

鉾山保安推進協議会  
保安管理マスター制度運営委員会 監修

# 鉾山保安テキスト 鉾場

鉾場技術保安管理士技術試験  
(令和7年改訂版)

天然ガス鉾業会 編

## まえがき

わが国の鉱山の保安水準を向上させることを目的に、平成 25 年度に「保安管理マスター制度」が発足し、作業監督者または作業管理者に準ずる者を目指す方々を対象とした保安管理士試験が開始されました。本試験は、鉱山保安に関連する技術分野の「技術試験」および「鉱山保安法令に関する講習」ならびに「鉱山保安法令に関する試験」から成り立っております。

技術分野としては、坑外保安および坑内保安などを対象とした「露天採掘」に関する技術試験と石油・天然ガス鉱山の保安を対象とした「鉱場」に関する技術試験がありますが、「露天採掘」に関する技術試験は平成 25 年度から先行して実施され、「鉱場」に関する技術試験は平成 26 年度から実施されます。合格者に対してはそれぞれ、「露天採掘技術保安管理士」、「鉱場技術保安管理士」の称号が与えられます。

鉱山保安テキスト『鉱場』は、昭和 54 年に初版を、平成 14 年には改訂版が発行されましたが、今般の試験制度の発足に合わせて、近年におけるさらなる技術の進歩や関係法令の改正などに対応した全面的な見直しを実施しました。

今回、別記の編集委員の方々のご協力をいただき、「保安管理マスター制度」の「鉱場技術保安管理士試験」の受験者の参考書として、また、保安技術教育の教本としてご利用いただけるように、最近の関係法令および最新の技術開発・研究成果などを取り入れて内容を改訂いたしました。

終わりに、業務ご多忙のかたわら、本書の執筆・編集にご尽力いただいた編集委員ならびに執筆者各位に厚く御礼申し上げます。

平成 26 年 3 月

※この「まえがき」は平成 26 年版発行時に掲載されていたものですが、保安管理マスター制度発足の経緯や主たる目的等が記載されているため、令和 7 年改訂版でもそのまま残すことにしました。

## 編集委員（平成26年版作成時）

委員	川田 浩介	旭硝子株式会社
委員	久保埜 陽	伊勢化学工業株式会社
委員	篠田 彰	関東天然瓦斯開発株式会社
委員	松村 隆雄	合同資源産業株式会社
委員	玉川 孝之	国際石油開発帝石株式会社
委員	奈良 正篤	〃 〃
委員	藤田 正和	〃 〃
委員	石山 義明	JX 日鉱日石開発株式会社
委員	新粥 岳彦	JX 日鉱日石開発株式会社
委員	島田 正啓	石油資源開発株式会社
委員	戸田 幹雄	〃 〃
委員	澤口 均	株式会社東邦アーステック
委員	後藤 直人	日本海洋掘削株式会社
委員	吉田 肇	日本海洋掘削株式会社
委員	池田 賢治	日宝化学株式会社
委員	内田 英一	日本天然ガス株式会社
委員	松本 高和	三井化学株式会社
委員	兼子 高志	三菱ガス化学株式会社
事務局	君島 護男	鉱業労働災害防止協会
〃	山下 芳久	〃 〃
〃	渡辺 道明	天然ガス鉱業会
〃	石原 一身	〃 〃
〃	佐々木 直人	〃 〃

※令和7年改訂版は天然ガス鉱業会事務局で編集しました。改訂箇所については本テキストの最終ページを参照して下さい。

# 目 次

<b>I</b>	<b>基礎知識</b>	<b>1</b>
1	数 学	1
1.1	代 数	1
1.2	三角関数	1
1.3	平面三角形	1
1.4	図形の面積、体積および表面積	2
1.4.1	図形の面積 (A)	2
1.4.2	立方体の体積 (V)、表面積 (S)	2
2	単 位	2
2.1	単 位	2
2.2	国際単位系 (SI 単位)	3
3	力 学	7
3.1	運 動	7
3.1.1	速度 ( $v$ ) および加速度 ( $\alpha$ )	7
3.1.2	運動の 3 法則 (ニュートンの法則)	7
3.2	重 力	7
3.3	仕 事	7
3.4	動 力	7
3.5	エネルギー	8
3.6	摩 擦	8
4	熱および熱力学	9
4.1	温 度	9
4.2	熱量および比熱	9
4.3	潜 熱	9
4.4	熱の移動	10
4.5	熱膨張	10
5	水力学	11
5.1	水の単位体積の重量	11
5.2	圧 力	11
5.3	圧力の伝達	11
5.4	浮 力	12
5.5	臨界レイノルズ数	12
5.6	液体の全水頭 (ベルヌーイの定理)	12
6	材料力学	12
6.1	応力と歪	12
6.2	応力-歪線図	13
6.3	荷重の種類と許容応力	13

<b>II</b>	<b>掘削</b>	<b>15</b>
1	掘削	15
1.1	掘削計画	15
1.1.1	工程表	15
1.1.2	ケーシング計画	15
1.1.3	泥水計画	17
1.1.4	仕上げ計画	17
1.2	掘削方法	18
1.2.1	ロータリー方式	18
1.2.2	トップドライブ方式	19
1.2.3	ダウンホールモーター方式	20
1.3	ビット	20
1.3.1	ビットの分類	20
1.3.2	ビットの構造と特徴	22
1.3.3	ビットの選択	26
1.3.4	掘削パラメーター	27
1.4	掘削泥水	28
1.4.1	泥水の機能	28
1.4.2	良好な泥水の条件	28
1.4.3	泥水の重要な特性	29
1.4.4	主要泥水調整剤	31
1.4.5	泥水の種類と特性	33
1.5	傾斜掘り	37
1.5.1	傾斜掘りの目的	37
1.5.2	傾斜掘りの種類	39
1.5.3	傾斜掘り方法および使用器具	41
1.5.4	坑跡コントロールのための編成	44
1.6	チューブラググズおよびドリルストリング	45
1.6.1	チューブラググズ	45
1.6.2	ドリルステム（ドリルストリング）	51
1.6.3	坑内ツール	54
1.7	セメンチング	56
1.7.1	プライマリーセメンチング	56
1.7.2	セメントの特性および添加剤	57
1.7.3	セメンチングの装置および作業	61
1.7.4	リークオフテストおよびセメントボンド検層	68
1.7.5	スクイズセメンチング	68
1.7.6	プラグバックセメンチング	69
1.8	掘削上の障害と対策	69
1.8.1	地層の崩壊	69

1.8.2	抑留（スタック）	70
1.8.3	逸泥	71
1.8.4	噴出（キック）	72
1.9	噴出防止	72
1.9.1	噴出の原因	72
1.9.2	噴出の察知と初期の対策	72
1.9.3	抑圧作業	73
1.9.4	噴出防止用機器	74
1.10	坑井仕上げ	77
1.10.1	仕上げ計画	77
1.10.2	坑井仕上げ方法の種類	78
1.10.3	穿孔器（Perforator）	80
1.10.4	仕上げ機器	80
1.10.5	坑井刺激法（Well Stimulation）	82
1.10.6	仕上げ流体	83
1.10.7	改修作業	84
1.11	物理検層	84
1.11.1	検層で対象とする地層の物理的諸性質	84
1.11.2	検層機器	84
1.11.3	検層種目	85
1.11.4	火薬作業	87
1.12	マッドロギング	89
1.12.1	マッドロギングの目的	89
1.12.2	測定方法	89
1.12.3	マッドロギングユニット	91
1.13	廃坑作業（「鉱業権者が講ずべき措置事例 第 22 章土地の掘削」参照）	92
1.14	試油・試ガス作業	92
2	掘削装置	95
2.1	デリック（やぐらないしはマストとも言う）	95
2.1.1	デリック	95
2.1.2	サブストラクチャー	98
2.2	ドローワークス	99
2.2.1	ドローワークス	99
2.2.2	効率と馬力計算	101
2.2.3	計器類	103
2.3	泥水ポンプ	104
2.3.1	泥水ポンプ	104
2.3.2	ポンプ効率と馬力計算	106
2.3.3	調泥ポンプ	107
2.3.4	泥水ライン	107

2.3.5	泥水処理装置	108
2.4	動力	109
2.4.1	動力伝達方式	109
2.4.2	動力	110
2.5	吊り具	111
2.5.1	クラウンブロック	111
2.5.2	トラベリングブロックおよびフック	111
2.5.3	エレベーターリンク	112
2.5.4	エレベーター	112
2.5.5	スイベル	114
2.5.6	トップドライブ	114
2.6	デリック下機器	115
2.6.1	ロータリーテーブル	115
2.6.2	ケリードライブ	116
2.6.3	スリップ	116
2.6.4	トンク	118
2.7	ロープ類	120
2.7.1	ワイヤーロープの用途と構造	120
2.7.2	ワイヤーロープの取扱い方	121
2.7.3	ドリリングラインの安全率	122
2.7.4	ワイヤーロープ端末の止め方と効率	124
2.7.5	潤滑油の効果	124
2.7.6	ワイヤーロープの特性	124
2.7.7	ワイヤーロープの強度	124
2.7.8	ドラムのワイヤーロープ巻取り量の式	125
2.8	掘削装置の管理・保守	125
2.8.1	点検および整備の種類	125
2.8.2	点検箇所	125
<b>III</b>	<b>生産</b>	<b>129</b>
<b>1</b>	<b>採収</b>	<b>129</b>
1.1	一次採収	129
1.1.1	自噴採収	129
1.1.2	ガスリフト採収	131
1.1.3	ポンプによる生産	135
1.1.4	天然ガスの採収	140
1.2	二・三次採収法	160
1.2.1	ガス圧入法	161
1.2.2	水攻法	162

1.2.3	三次採取法	164
2	集油および集ガス	172
2.1	原油・天然ガスの分離	172
2.1.1	セパレーター分離	172
2.1.2	多段分離法	178
2.1.3	付属機器	178
2.2	原油の処理	179
2.2.1	エマルジョンの処理	179
2.2.2	パラフィン処理	184
2.3	天然ガスの処理	185
2.3.1	ガスハイドレート	185
2.3.2	脱湿処理	187
2.3.3	脱酸性ガス処理	197
2.3.4	その他の成分分離	202
2.4	排水処理	204
3	計量	207
3.1	流量計による計量	207
3.1.1	差圧式による方法	207
3.1.2	容積式による方法	212
3.1.3	渦式による方法	213
3.2	タンク計量	214
3.2.1	圧力による液位測定	216
3.2.2	浮子による液位測定	217
3.3	その他の計量方法	218
3.3.1	せき式流量計	218
3.3.2	タービン流量計	218
3.3.3	超音波流量計	219
4	輸送	220
4.1	タンクローリー輸送	220
4.1.1	タンクローリー輸送	220
4.1.2	出荷・受入施設	222
4.2	パイプライン輸送	222
4.2.1	パイプラインの立案施工	222
4.2.2	パイプラインの設計	223
4.2.3	パイプラインの防食	227
4.2.4	パイプラインの敷設	232
5	貯蔵	237
5.1	原油の貯蔵	237
5.1.1	原油タンク	237
5.1.2	タンク内作業	246

5.1.3	消火設備	246
6	試験作業	248
6.1	原油試験	248
6.2	ガス分析	250
6.3	坑水分析	252
7	スリックライン作業	256
7.1	地上設備	256
7.2	計測作業	258
7.3	坑内サービス	264
8	毒物および劇物	267
8.1	毒物および劇物	267
8.2	酸化、燃焼および爆発	267
8.3	酸、アルカリおよび中和反応	267
8.4	貯蔵および取扱い	268
8.5	処 理	268
8.6	救急処置	268
8.7	PRTR/SDS 制度	269
9	遠隔監視・制御	270
9.1	遠隔監視・制御システムの基本	270
9.2	観測情報の種類と項目	271
9.3	情報伝送の構成	271
9.4	情報の検出端	272
9.5	受信端	274
9.6	制御	275
9.7	計装例	277
9.8	SCADA システム	280
<b>IV</b>	<b>水溶性天然ガス</b>	<b>283</b>
1	開発	283
1.1	水溶性天然ガスの特徴	283
1.2	水溶性天然ガスの開発	284
1.2.1	ガス産出能力	284
1.2.2	ガス産出挙動	285
1.2.3	開発方式	286
2	掘削	289
2.1	掘削	289
2.1.1	ビット類	289
2.1.2	掘削泥水	289
2.1.3	掘削上の障害	289
2.1.4	ドリルストリング	290

2.1.5	ワイヤーライン類	290
2.1.6	噴出防止	290
2.1.7	傾斜掘り	291
2.1.8	セメンチング	292
2.1.9	検層	293
2.2	掘削装置	293
2.2.1	掘削装置の一般的特徴	293
2.2.2	デリック（やぐらないしはマストとも言う）	294
2.2.3	ドローワークス	294
2.2.4	泥水ポンプ	294
2.2.5	吊り具類とやぐら下機器類	294
2.2.6	標準的な掘削装置	294
2.3	廃坑	294
3	坑井仕上げ	296
3.1	南関東ガス田	296
3.1.1	ガスリフト方式による仕上げ	296
3.1.2	水中電動ポンプ（ESP）方式による仕上げ	297
3.1.3	仕上げの特徴	297
3.2	新潟ガス田	298
3.2.1	ガスリフト方式による仕上げ	298
3.2.2	水中電動ポンプ（ESP）方式による仕上げ	299
3.2.3	仕上げの特徴	299
4	生産	300
4.1	採取	300
4.1.1	自噴採取	301
4.1.2	ガスリフト採取	301
4.1.3	ポンプ採取	303
4.2	集ガス	304
4.2.1	ガスとかん水の分離	304
4.2.2	脱湿	305
4.3	計量	305
4.3.1	ガスの計量	306
4.3.2	かん水の計量	306
4.4	輸送	306
4.4.1	パイプラインによる輸送	306
4.4.2	圧縮ガスによる輸送	307
4.5	貯蔵	309
4.6	試験作業	308
4.7	遠隔監視・制御	308
4.8	坑廃水処理	309

4.8.1	送水ポンプ	310
4.8.2	坑水処理	310
4.8.3	還元圧入	311
<b>V</b>	<b>海洋掘削</b>	<b>312</b>
1	海洋掘削の概要	312
1.1	搭載装置および機器	312
1.2	乗船人員構成	312
1.3	海洋掘削装置	314
1.3.1	着底式掘削装置（ボトムサポーター型）	315
1.3.2	浮遊式掘削装置（フローター型）	317
1.4	気象・海象観測	318
1.5	船体動揺	318
1.6	スラスタ（Thruster）	319
2	移動式海洋掘削装置	320
2.1	移動式海洋掘削装置の種類と特質	320
2.1.1	甲板昇降型掘削装置（ジャッキアップ型）	320
2.1.2	潜水型掘削装置（サブマージブル型）	321
2.1.3	半潜水型掘削装置（セミサブマージブル型）	321
2.1.4	船型掘削装置（ドリルシップ型）	322
2.1.5	テンダーバージ型掘削装置	322
2.2	掘削装置の曳航	323
2.2.1	曳航計画	323
2.3	掘削装置の設置と離脱	327
2.3.1	ロケーション位置における海洋掘削装置の方向の決定	327
2.3.2	掘削装置の進入方法	327
2.3.3	ジャッキアップ型掘削装置の進入方法	331
2.4	掘削装置の維持と保守	331
2.4.1	腐食	331
2.4.2	防食	333
3	掘削用装置および機器	335
3.1	概要	335
3.2	サブシーシステム	335
3.2.1	サブシーウェルヘッド	335
3.2.2	ブローアウトプリベンター（BOP）およびLMRP	336
3.2.3	ライザーパイプ	337
3.2.4	ストロークジョイント（テレスコピックジョイント）	338
3.2.5	ライザーテンショナー	338
3.2.6	ガイドラインテンショナー	339
3.2.7	サブシー-BOP コントロールシステム	339

3.3	ヒーブコンペンセーター	340
3.4	ポジションインジケータ、ライザーアングルインジケータ	341
3.5	水中テレビジョンシステム	342
3.6	ROV (Remotely Operated Vehicle)	342
<b>4</b>	<b>海洋掘削の保安</b>	<b>344</b>
4.1	保守管理	344
4.2	保安設備	345
<b>5</b>	<b>輸送手段</b>	<b>350</b>
5.1	ヘリコプター	350
5.2	ワークボート	352
<b>VI</b>	<b>海洋生産</b>	<b>353</b>
<b>1</b>	<b>海洋生産構造物</b>	<b>353</b>
1.1	海洋生産構造物	353
1.1.1	固定式及び着底式生産システム	353
1.1.2	浮遊式生産システム	359
1.2	海洋生産構造物の設計	361
1.2.1	自然環境	361
1.2.2	設計法と設計基準	363
<b>2</b>	<b>海洋生産システム</b>	<b>365</b>
2.1	採油と採ガス	366
2.1.1	坑内装置	366
2.1.2	坑口装置	366
2.1.3	採油装置と採ガス装置	368
2.2	保安システム	369
2.2.1	サブサーフェスセーフティバルブ (SSSV)	369
2.2.2	サーフェスセーフティバルブ (SSV)	369
2.2.3	防災設備	370
2.3	海底パイプライン	371
2.3.1	海底パイプラインの特徴	371
2.3.2	ルートを選定	371
2.3.3	海底パイプラインの設計	372
2.3.4	海底パイプラインの敷設	373
	<b>〔改訂履歴〕</b>	<b>377</b>

## I 基礎知識

## 1 数学

## 1.1 代数

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2, \quad (a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

$$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b), \quad a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2)$$

一次方程式

$ax + b = 0$  の場合

$$x = -\frac{b}{a}$$

二次方程式

$ax^2 + bx + c = 0$  の場合

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2ac}$$

## 1.2 三角関数

直角三角形 ABC で  $\angle ABC = \theta$  とすれば (図 1.1) 以下の公式が成立する。

$$\sin \theta = \frac{b}{c}, \quad \cos \theta = \frac{a}{c}, \quad \tan \theta = \frac{b}{a}$$

$$\csc \theta = \frac{c}{b}, \quad \sec \theta = \frac{c}{a}, \quad \cot \theta = \frac{a}{b}$$

$c^2 = a^2 + b^2 \dots\dots$  ピタゴラスの定理

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1, \quad \tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$1 + \tan^2 \theta = \frac{1}{\cos^2 \theta}, \quad 1 + \cot^2 \theta = \frac{1}{\sin^2 \theta}$$

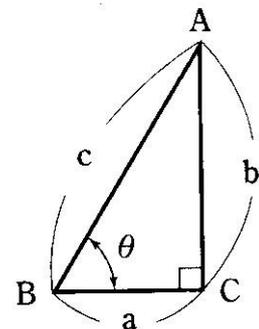


図1.1

## 1.3 平面三角形

三角形の各辺長さを  $a, b, c$  とし、その対角を  $\alpha, \beta, \gamma$ 、

$a + b + c = 2S$  とすると (図 1.2)、

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ,$$

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma},$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

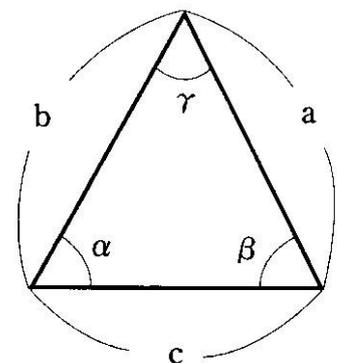


図1.2

三角形の面積

$$\frac{1}{2} bc \sin \alpha = \sqrt{S(S-a)(S-b)(S-c)}$$

## 1.4 図形の面積、体積および表面積

日常よく使用される平面図形の面積と立体の面積および表面積を図 1.3 および図 1.4 に示す。

## 1.4.1 図形の面積 (A)

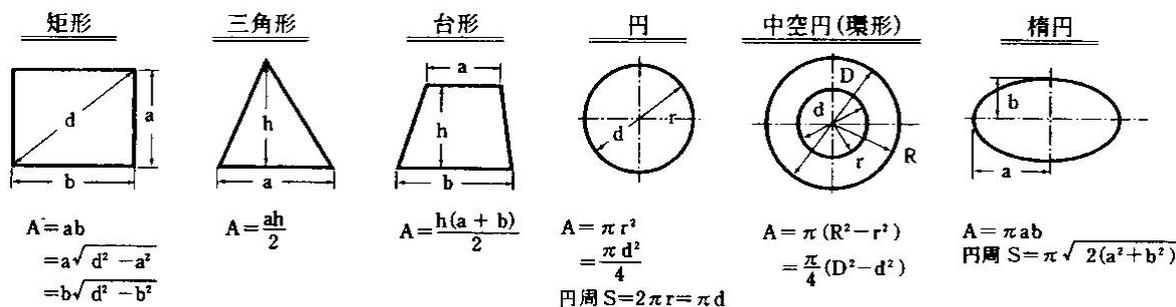


図1.3

## 1.4.2 立方体の体積 (V)、表面積 (S)

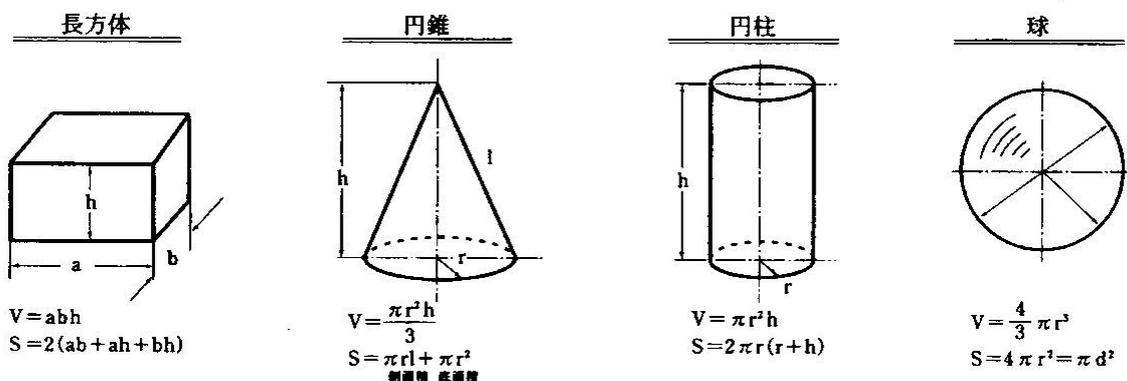


図1.4

## 2 単位

## 2.1 単位

単位とは種々の量とその関係を数値で表すために、幾つかの基本となる一定量を約束で決めている。それらが基本単位で、質量の単位「キログラム」は、国際キログラム原器の質量に等しい。

基本単位系としては、MKS系・CGS系のメートル系やヤード・ポンド系などがあるが、単位の普遍性を目指すために国際単位系 (SI 単位) を各国が採用している。わが国でも、計量法の改正により、圧力・熱量等の計量単位を SI 単位へ移行することとなり、平成 11 年以後、鉱山保安法関係省令に係わる次の単位系の整備が実施された。

力の単位: 「重量キログラム」 → 「N (ニュートン)」

圧力単位: 「kgf/cm<sup>2</sup> (重量キログラム平方センチメートル)」 → 「Pa (パスカル)」

熱量単位: 「cal (カロリー)」 → 「J (ジュール)」

## 2.2 国際単位系 (SI 単位)

SI 単位は、表 1.1 の基本単位 (7 個) と補助単位 (2 個) より組み立てられる。その主な組立単位および併用単位を表 1.2 に示す。また重力単位系との換算率表を表 1.3 に示す。

表 1.1 SI 基本単位および補助単位

	量	単位の名称	単位記号
基本単位	長 さ	メートル	m
	質 量	キログラム	kg
	時 間	秒	s
	電 流	アンペア	A
	熱力学温度	ケルビン	K
	物 質 量	モ ル	mol
	光 度	カンデラ	cd
補助単位	平面角	ラジアン	rad
	立体角	ステラジアン	sr

表1.2 従来単位／S I 単位換算表

換算単位名称	換算率	換算値例		
		旧JIS換算値方式	概算値	超概算値
1. ニュートンと重量キログラム	1 kgf = 9.80665 N 1 N = 1/9.80665 kgf	100 ⇒ 980.66 1000 ⇒ 101.97	100 ⇒ 980 1000 ⇒ 102	100 ⇒ 1000 1000 ⇒ 100
2. ニュートンメートルと重量キログラムメートル	1 kgf・m = 9.80665 N・m 1 N・m = 1/9.80665 kgf・m	100 ⇒ 980.66 1000 ⇒ 101.97	100 ⇒ 980 1000 ⇒ 102	100 ⇒ 1000 1000 ⇒ 100
3. メガパスカルと重量キログラム毎平方センチメートル	1 kgf/cm <sup>2</sup> = 0.0980665 MPa 1 MPa = 1/0.0980665 kgf/cm <sup>2</sup>	10 ⇒ 0.9807 10 ⇒ 101.97	10 ⇒ 0.98 10 ⇒ 102	10 ⇒ 1.0 10 ⇒ 100
4. メガパスカルと重量キログラム毎平方ミリメートル	1 kgf/mm <sup>2</sup> = 9.80665 MPa 1 MPa = 1/9.80665 kgf/mm <sup>2</sup>	1000 ⇒ 9807 9000 ⇒ 917.7	1000 ⇒ 9800 9000 ⇒ 918	1000 ⇒ 10000 9000 ⇒ 900
5. メガパスカルと気圧	1 atm = 0.101325 MPa 1 MPa = 1/0.101325 atm	10 ⇒ 1.013 1.0 ⇒ 9.869	10 ⇒ 1.01 1.0 ⇒ 9.9	10 ⇒ 1.0 1.0 ⇒ 10
6. キロパスカルと気圧	1 atm = 101.325 kPa 1 kPa = 1/101.325 atm	1.0 ⇒ 101.3 1000 ⇒ 9.869	1.0 ⇒ 101 1000 ⇒ 9.9	1.0 ⇒ 100 1000 ⇒ 10
7. キロパスカルと水柱ミリメートル	1 mmH <sub>2</sub> O = 0.00980665 kPa 1 kPa = 1/0.00980665 mmH <sub>2</sub> O	100 ⇒ 0.9807 10 ⇒ 1019.7	100 ⇒ 0.98 10 ⇒ 1020	100 ⇒ 1.0 10 ⇒ 1000
8. キロパスカルと水銀柱ミリメートル	1 mmHg = 0.133322 kPa 1 kPa = 1/0.133322 mmHg	760 ⇒ 101.32 10 ⇒ 75.006	760 ⇒ 101 10 ⇒ 75.0	760 ⇒ 100 10 ⇒ 75
9. ジュールとカロリー	1 cal = 4.18605 J 1 J = 1/4.18605 cal	1000 ⇒ 4186 1000 ⇒ 238.9	1000 ⇒ 4200 1000 ⇒ 240	1000 ⇒ 4200 1000 ⇒ 240
10. ワット毎メートル毎ケルビンとキロカロリー毎時毎メートル毎度	1 kcal/(h・m・°C) = 4186.05/3600 W/(m・K)	100 ⇒ 116.3	100 ⇒ 116	100 ⇒ 117
(熱伝導率)	1 W/(m・K) = 3600/4186.05 kcal/(h・m・°C)	100 ⇒ 86.00	100 ⇒ 86	100 ⇒ 86
11. ワット毎平方メートル毎ケルビンとキロカロリー毎時毎平方メートル毎度	1 kcal/(h・m <sup>2</sup> ・°C) = 4186.05/3600 W/(m <sup>2</sup> ・K)	1000 ⇒ 1163	1000 ⇒ 1160	1000 ⇒ 1170
(熱伝導係数)	1 W/(m <sup>2</sup> ・K) = 3600/4186.05 kcal/(h・m <sup>2</sup> ・°C)	1000 ⇒ 860.0	1000 ⇒ 860	1000 ⇒ 860
12. キロジュール毎キログラム毎ケルビンとカロリー毎グラム毎度	1 cal/(g・°C) = 4.18605 kJ/(kg・K)	10.0 ⇒ 41.860	10.0 ⇒ 42.0	10.0 ⇒ 42
(比熱及び質量エントロピー)	1 kJ/(kg・K) = 1/4.18605 cal/(g・°C)	10.0 ⇒ 2.3889	10.0 ⇒ 2.40	10.0 ⇒ 2.4
13. メガジュールとキロワット時	1 kW・h = 3.6 MJ 1 MJ = 1/3.6 kW・h	1000 ⇒ 3600 1000 ⇒ 277.8	1000 ⇒ 3600 1000 ⇒ 278	1000 ⇒ 3600 1000 ⇒ 280
14. パスカル秒とセンチポアズ	1 cP = 1 × 10 <sup>-3</sup> Pa・s	1000 ⇒ 1	同左	同左
15. 平方メートル毎秒とセンチストークス	cSt = 1 × 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	1 × 10 <sup>6</sup> ⇒ 1	同左	同左

〔注〕旧JISはJIS Z 8438-8449 で1993年5月1日付で廃止されているが、その換算値方式を使用した。

表1.3 S I 単位および併用単位

物理量	単位の名称	単位記号	備 考	
平 面 角	ラジアン	rad	$1^\circ(\text{度}) = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$ , $1'(\text{分}) = \frac{1^\circ}{60}$ , $1''(\text{秒}) = \frac{1'}{60}$ $1\text{l}(\text{リットル}) = 10^{-3}\text{m}^3$ $1\text{min}(\text{分}) = 60\text{s}$ $1\text{h}(\text{時}) = 60 \text{ min}$ $1\text{d}(\text{日}) = 24 \text{ h}$	
立 体 角	ステラジアン	sr		
長 さ	メートル	m		
面 積	平方メートル	$\text{m}^2$		
体 積	立方メートル	$\text{m}^3$		
時 間	秒	s		
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	重力の加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$	
速 度	メートル毎秒	m/s		
加 速 度	メートル毎秒毎秒	$\text{m/s}^2$		
周 波 数	ヘルツ	Hz	$1\text{Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ $\text{min}^{-1}(\text{回毎分})$	
回 転 数	回 毎 秒	$\text{s}^{-1}$		
質 量	キログラム	kg	$1 \text{ t} = 10^3\text{kg}$  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$ $1 \text{ Pa} = 1\text{N/m}^2$ $1 \text{ Bar}(\text{バール}) = 10^5\text{Pa}$  $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}$ $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$	
密 度	キログラム毎立方メートル	$\text{kg/m}^3$		
運 動 量	キログラムメートル毎秒	$\text{kg}\cdot\text{m/s}$		
力	ニュートン	N		
力のモーメント	ニュートンメートル	$\text{N}\cdot\text{m}$		
圧 力	パスカル	Pa		
応 力	パスカル又はニュートン毎平方メートル	Pa $\text{N/m}^2$		
粘 度	パスカル秒	$\text{Pa}\cdot\text{s}$		
粘 着 係 数	平方メートル毎秒	$\text{m}^2/\text{s}$		
エ ネ ル ギ ー	ジュール	J		
仕 事 率	ワ ッ ト	W		
熱 力 学 温 度	ケルビン	K		$t(^\circ\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$ セルシウス温度間隔は $^\circ\text{C}$ でもよい
セルシウス温度	セルシウス度	$^\circ\text{C}$		
温 度 間 隔	ケルビン	K		
熱 量	ジュール	J		
比 熱	ジュール毎キログラム毎ケルビン	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$		
電 流	アンペア	A		

表1.4 S I 単位換算率表

(太線で囲んである単位がSI 単位である。)

力	N	dyn	kgf	粘 度	Pa·s	cP	P
	1	$1 \times 10^5$	$1.01972 \times 10^{-1}$		1	$1 \times 10^3$	$1 \times 10$
	$1 \times 10^{-5}$	1	$1.01972 \times 10^{-6}$		$1 \times 10^{-3}$	1	$1 \times 10^{-2}$
	9.806 65	$9.80665 \times 10^5$	1	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^2$	1	

注 1 P = 1 dyn·s/cm<sup>2</sup> = 1 g/cm·s.

1 Pa·s = 1 N·s/m<sup>2</sup>, 1 cP = 1 mPa·s

圧 力	Pa	Bar	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmH <sub>2</sub> O	mmHg 又は Torr	A/m	Oe
	1	$1 \times 10^{-5}$	$1.01972 \times 10^{-5}$	$9.86923 \times 10^{-6}$	$1.01972 \times 10^{-1}$	$7.50062 \times 10^{-3}$	1	$1.257 \times 10^{-2}$
	$1 \times 10^5$	1	1.019 72	$9.86923 \times 10^{-1}$	$1.01972 \times 10^4$	$7.50062 \times 10^2$	79.58	1
	$9.80665 \times 10^4$	$9.80665 \times 10^{-1}$	1	$9.67841 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^4$	$7.35559 \times 10^2$		
	$1.01325 \times 10^5$	1.013 25	1.01325	1	$1.03323 \times 10^4$	$7.60000 \times 10^2$	T	G
	9.806 65	$9.80665 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$9.67841 \times 10^{-5}$	1	$7.35559 \times 10^{-2}$	1	$1 \times 10^4$
	$1.33322 \times 10^2$	$1.33322 \times 10^{-2}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-2}$	$1.35951 \times 10^2$	1	$1 \times 10^{-4}$	1

注 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>

応 力	Pa	MPa又はN/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
	1	$1 \times 10^{-6}$	$1.01972 \times 10^{-7}$	$1.01972 \times 10^{-5}$
	$1 \times 10^6$	1	$1.01972 \times 10^{-1}$	$1.01972 \times 10$
	$9.80665 \times 10^6$	9.806 65	1	$1 \times 10^2$
	$9.80665 \times 10^4$	$9.80665 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	1

動 粘 度	m <sup>2</sup> /s	cSt	St
	1	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^4$
	$1 \times 10^{-6}$	1	$1 \times 10^{-2}$
	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^2$	1

注 1 St = 1 cm<sup>2</sup>/s

仕事・ エネルギー・ 熱量	J	kW·h	kgf·m	kcal
	1	$2.77778 \times 10^{-7}$	$1.01972 \times 10^{-1}$	$2.28889 \times 10^{-4}$
	$3.600 \times 10^6$	1	$3.67098 \times 10^5$	$8.6000 \times 10^2$
	9.806 65	$2.72407 \times 10^{-6}$	1	$2.34270 \times 10^{-3}$
	$4.18605 \times 10^3$	$1.16279 \times 10^{-3}$	$4.26858 \times 10^2$	1

注 1 J = 1 W·s, 1 W·h = 3,600 W·s  
1 cal = 4.186 05 J (計量法による)

仕事率(工率・ 動力)熱量	kW	kgf·m/s	PS	kcal/h
	1	$1.01972 \times 10^2$	1.359 62	$8.6000 \times 10^2$
	$9.80665 \times 10^{-3}$	1	$1.33333 \times 10^{-2}$	8.433 71
	$7.355 \times 10^{-1}$	7.5 × 10	1	$6.32529 \times 10^2$
	$1.16279 \times 10^{-3}$	$1.18572 \times 10^{-1}$	$1.58095 \times 10^{-3}$	1

注 1 W = 1 J/s, PS : 仏馬力  
1 PS = 0.735 5 kW (計量法施行法による)  
1 cal = 4.186 05 J (計量法による)

熱伝導率	w/(m·k)	kcal/(h·m·°C)
	1	$8.6000 \times 10^{-1}$
	1.162 79	1

注 1 cal = 4.186 05 J (計量法による)

熱伝達係数	w/(m <sup>2</sup> ·k)	kcal/(h·m <sup>2</sup> ·°C)
	1	$8.6000 \times 10^{-1}$
	1.162 79	1

注 1 cal = 4.186 05 J (計量法による)

比熱	J/(kg·K)	kcal/(kg·°C) cal/(g·°C)
	1	$2.38889 \times 10^{-4}$
	$4.18605 \times 10^3$	1

注 1 cal = 4.186 05 J (計量法による)

## 3 力学

### 3.1 運動

#### 3.1.1 速度(v)および加速度(α)

運動の速さの度合いを速度という。また、単位時間に起こる速度の変化を加速度という。即ち、時間  $t$ [s]の間に距離  $l$ [m]を動いたとすると、その間の速度（または平均速度） $v$ [m/s]は次のようになる

$$v = \frac{l}{t} \text{ [m/s]}$$

時間  $t$ [s]の間に速度が  $v_1$ （初速度）から  $v_2$ （終速度）[m/s]に変わったとすると、その間の加速度（または平均加速度） $\alpha$  [m/s<sup>2</sup>]は次のようになる。

$$\alpha = \frac{v_1 - v_2}{t} \text{ [m/s}^2\text{]}$$

#### 3.1.2 運動の3法則（ニュートンの法則）

##### i) 運動の第1法則（慣性の法則）

全ての物体は、他より力の作用を受けなければ、運動の状態を変えない。即ち、静止している物体は静止をつづけ、運動している物体は等速度で直線運動を続ける。このように、物体は静止の場合も含めて、その速度を保とうとする性質をもつ。この性質を物体の慣性という。

##### ii) 運動の第2法則（運動の法則）

物体に力がはたらくと、力の方向に加速度が生ずる。加速度の大きさは、力の大きさに比例し物体の質量に反比例する。

$$\text{加速度} = \text{力} \div \text{質量}、 \text{力} = \text{質量} \times \text{加速度}$$

##### iii) 運動の第3法則（作用・反作用の法則）

物体に力の作用があれば必ず、①同じ作用線上で、②大きさが等しく、③方向が反対の力が作用する。

### 3.2 重力

地球上の全ての物体は地球から引かれており、その鉛直下向きの力のことを重力、その大きさを重さ(重量)という。今物体の質量を  $m$ 、重力の加速度を  $g$ 、重力の大きさを  $W$  とすると

$$W = m \cdot g$$

である。重量の加速度は場所により多少異なるが、わが国では標準として  $9.8 \text{ m/s}^2$ をとる。

### 3.3 仕事

ある物体に力  $F$  が作用して距離  $L$  だけ動かしたとき、その力のした仕事  $W$  は、 $W = FL$  となる。

### 3.4 動力

仕事の時間に対する割合を動力(工率)という。力  $F$  が質量  $m$  の物体を時間  $t$  の間に距離  $l$  だけ速度  $v$  で動かすとすると、下記式が成り立つ。

$$P = F \times \frac{l}{t} = F \cdot v$$

### 3.5 エネルギー

仕事をする能力をエネルギーという。仕事とエネルギーは同次元である。

#### i) 位置のエネルギー

高いところにある物体は、落下または降下によって仕事をするができる。したがって、ここではエネルギーをもっているわけで、これを位置のエネルギーという。高さ  $h$  のところにある重量  $G$  の質量  $m$  の物体の位置エネルギー ( $U$ ) は、以下の式で示される。

$$U = Gh = mgh \quad (g \text{ は重力の加速度、} G \text{ は物体の重量})$$

#### ii) 運動のエネルギー

質量  $m$  なる物体が速度  $v$  で運動している時の運動エネルギー ( $T$ ) は以下の式で示される。

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

#### iii) エネルギー保存の法則

物体の有しているエネルギーの総和は一定であり、消滅することはない。例えば、物体が自由落下するとき、高さが下がって位置のエネルギーが減るが、それは落下速度による運動エネルギーに変わり、その合計量には変化がない。

### 3.6 摩擦

摩擦には滑り摩擦ところがり摩擦がある。

#### i) 滑り摩擦

平面上を垂直力 ( $N$ ) で押しつけられた物体をその面に沿って動かすためには、物体と平面間に発生する摩擦抵抗 ( $F_s$ ) に等しい力  $F$  を接触面に沿って加えねばならない。この場合  $F_s/N$  を摩擦係数 ( $\mu$ ) という。

$$\mu = F_s/N = \tan\alpha$$

ただし、 $R$  は摩擦力 ( $F_s$ ) と垂直力 ( $N$ ) の合力、 $\lambda$  は合力 ( $R$ ) と垂直力 ( $N$ ) との角度で摩擦角である。摩擦係数は摩擦面の種類、組合せ、表面粗さ、潤滑剤の有無、種類、量、温度その他で変化する。また、静止しているときの静摩擦係数と動いている時の動摩擦係数があり静摩擦係数は動摩擦係数より大きい。

#### ii) ころがり摩擦

車輪のごとく、コロが平らな水平面上をすべることなく、ころがる様な場合、ころがり面に発生する摩擦抵抗である。一般に、前述の滑り摩擦抵抗より、このころがり摩擦抵抗は少ない。ころがり摩擦においても、静摩擦と動摩擦があり、摩擦係数は静摩擦が動摩擦より大きい。

## 4 熱および熱力学

### 4.1 温度

一般に使用される温度の単位には、摂氏温度[°C]、華氏温度[T]および絶対温度 (T) がある。即ち摂氏は標準気圧下で、純粋の水の氷点と沸点間を 100 等分して、その単位を[°C]とする。即ち氷点が 0 °C で沸点が 100 °Cである。

華氏温度 ( $t_F$ ) は摂氏温度 ( $t$ ) に対して次の関係にある。

$$t_F = \frac{9}{5}t + 32 \quad \text{または} \quad t = \frac{5}{9}(t_F - 32)$$

絶対温度 (T) は摂氏温度 (t) に対して

$$T \text{ (単位は K)} = t + 273$$

### 4.2 熱量および比熱

SI 単位系では、熱量はジュール (J) で表される。仕事量を表すワット・秒 (Ws) またはニュートン・メートル (N・m) との間には次の関係がある。

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

わが国でも SI 単位系が導入されるまで工業上用いられている熱量の単位は、キロカロリー[kcal]であった。水 1 kg を温度 1 °C だけ高めるのに要する熱量を 1 カロリー[cal]といい、ジュール [J] との関係を示す。

$$1 \text{ kcal} = 4.186 \times 10^3 \text{ J}$$

物体の温度を 1 °C (または 1 K) 上げるのに要する熱量を、その物体の熱容量[J/K]という。したがって、熱容量 C[J/K]の物体の温度を、 $\Delta T$ [K]だけ上昇させるのに必要な熱量 Q[J]は、

$$Q = C \Delta T$$

となる。また、物質の単位質量あたりの熱容量すなわち、1 g の温度を 1 °C (または 1 K) だけ上げるのに要する熱量[J]を、その物質の比熱という。したがって比熱の単位は [J/g・K] である。比熱が大きい物質は熱の含有可能量が大きく、温まりにくく、冷めにくい。物体の熱容量は、その質量に比熱を掛けたものになる。

したがって、比熱  $c$ [J/g・K]、質量  $m$ [g]の物体の温度を  $\Delta T$ [K]だけ上昇させるのに必要な熱量 Q[J]は、

$$Q = mc \Delta T$$

となる。

### 4.3 潜熱

物質に熱を与え、あるいは奪っても、物質の温度は変化せず状態だけが変わる場合がある。このような場合の熱を潜熱という。その代表的なものは、

#### i) 融解熱と凝固熱

水と氷のごとく、固体が液体に変わるとき吸収する熱を融解熱、液体が固体になるとき放出する熱を凝固熱という。水と氷の間では融解熱、凝固熱とも同じで 333.5 kJ/kg である。

## ii) 気化熱と凝結熱

水と水蒸気のごとく、液体が気体化するとき吸収する熱を気化熱、気体が液体化するとき放出する熱を凝固熱という。この熱量は物質により決まり、水と水蒸気との間の状態変化で（100℃において）は、2,256.9 kJ/kg である。

## 4.4 熱の移動

熱は物質の内部で、また物質相互間で、温度の高いところから低いところへ移動し、均一になって移動が止む。この移動の種類には次の4種類がある。

## i) 熱伝導

一つの物体の中でおこる熱の移動を熱伝導という。

## ii) 熱伝達

接触している物質間の熱の移動を熱伝達という。熱交換器は熱伝達を使用したものである。

## iii) 対流

流体(液体、気体)が暖められあるいは冷やされると、その部分は上昇し、あるいは下降して流体の中に流れがおこる。これによって熱が移動する現象を対流という。

## iv) 放射(ふく射)

熱は、何ら媒介物がなくても高温部から低温部へ伝わる。太陽の熱が地球に届くのはその例でこれを放射という。

## 4.5 熱膨張

固体・気体・液体とも一般に、温度が上がれば膨張し、下がれば収縮する。

## i) 固体

温度が上がると、長さ方向および体積が膨張する。

## (1) 線膨張

元の長さ  $l_0$  が温度  $t$ ℃ 上がって、 $l$  の長さになったとき

$$l = l_0(1 + \alpha t)$$

ただし  $\alpha$  を線膨張係数という。

## (2) 体膨張

元の体積  $V_0$  が、温度  $t$ ℃ 上がって、 $V$  の体積になったとき

$$V = V_0(1 + \beta t)$$

ただし  $\beta$  を体膨張係数という。同一物質、同一温度の状態では体膨張係数は線膨張係数の3倍である。

## ii) 液体

温度が上がると体積は膨張する。

## (1) 体膨張

元の体積  $V_0$  が、温度  $t$ ℃ 上がって、 $V$  の体積になったとき

$$V = V_0(1 + \beta t)$$

ただし  $\beta$  を液体の体膨張係数という。

## iii) 気体

温度が上がると体積が膨張するが、この場合圧力が大いに関係してくる。いま圧力を一定とし元の体積  $V_0$  が、温度  $t$  °C 上がって、体積が  $V$  となったとき

$$V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right)$$

即ち、 $1/273 \approx 0.0036$  が気体の膨張係数に相当する。

## iv) 気体の圧力、容積、温度との関係

ある量の気体を容積一定の容器に入れ、膨張を制限して加熱すると、温度上昇につれて圧力が上昇する。この場合、熱の形で与えられたエネルギーは、圧力の形で気体の内部に保持される。そして、膨張の制限が除かれたとき、気体はこの内部エネルギーにより外に向かって仕事をすることができる。

このように気体の容積と温度の圧力との間には一定の関係があり、圧力を  $P$  [Pa] 絶対温度  $K$  を  $T$ 、質量を  $M$  [kg]、体積を  $V$  [m<sup>3</sup>]、比容積(単位質量の気体が 0 °C・1 気圧のもとで占める容積)を  $v$  [m<sup>3</sup>/kg] とすると以下の法則が成り立つ。

- (1) ボイルの法則…温度が一定のとき、圧力は体積に逆比例する。

$$P \cdot V = \text{一定}$$

- (2) シャルルの法則…体積が一定のとき、圧力は温度に比例する。

$$V/T = \text{一定}$$

- (3) ボイル・シャルルの法則…圧力は体積に逆比例し、温度に比例する。

$$P \cdot v = PT \quad \text{または} \quad P \cdot V = MRT$$

$R$  [kJ/kg・K] は比例定数であり、気体の種類によってきまる値でガス定数という。

## 5 水力学

## 5.1 水の単位体積の重量

水の重量は温度および純水度によって異なるが、一般に取り扱われる清水は摂氏 4 度 1 気圧のとき、その密度が最大であり、1 cm<sup>3</sup> の質量が 1 g である。すなわち 1 m<sup>3</sup> の質量は 1,000 kg である。

## 5.2 圧力

## i) 単位

単位面積あたりの力をいう。圧力の単位は通常 [Pa] (パスカル) または [N/m<sup>2</sup>] で表される。

## ii) 絶対圧力とゲージ圧力

圧力計は大気圧との差を示すように作られているが、このように大気圧を基準とした圧力の大きさをゲージ圧力といい、これに対し絶対圧力を基準とした圧力の大きさを絶対圧力という。

$$\text{絶対圧力} = \text{ゲージ圧力} + \text{大気圧}$$

## 5.3 圧力の伝達

密閉した容器内に静止している液体の一部に加えた圧力は、液体の全体に等しく伝わり、あらゆる面に垂直に作用する。これを「パスカルの原理」という。この原理を応用したのが水圧機である。

また、この原理により水圧の大きさはその高さのみによることがいえ、同様に液体の密度が一定

であれば、その圧力も高さのみによるといえる。

### 【例題】

面積  $S[m^2]$  の面にかかる水（液柱）の重さ（重力）から水圧  $p[Pa]$  を求めてみる。

水柱の体積は、底面積  $S \times$  高さ  $h$  なので、 $Sh [m^3]$

水柱の質量は、密度  $\rho \times$  体積  $Sh$  なので、 $\rho Sh [kg]$

水柱の重力は、質量  $\rho Sh \times$  重力の加速度  $g$  なので、 $\rho g Sh [N]$

したがって、水圧  $p$  は、重力  $\rho g Sh \div$  断面積  $S = \rho gh [Pa]$

さらに、水面の上に大気圧  $p_0 [Pa]$  がかかっている場合、水圧は  $p = p_0 + \rho gh$  となる。

## 5.4 浮力

液体中の物体は、その物体が排除した体積の液体重量と同じ力を鉛直線上向きに受ける。この力を浮力という。浮力の作用点を浮力の中心といい、これは物体が排除した液体の重心に等しい。

## 5.5 臨界レイノルズ数

内径一定の管内を液体が流れるとき、流速が小さいうちは管軸に平行に層流で流れるが、流速を次第に増すと、ある速度で乱流となる。この流れの状態が変わる速度を臨界速度（ $V_c$ ）という。このときの管径（ $d$ ）、液体の運動粘性係数（ $\nu$ ）とには次の関係がある。

$$V_c = \text{Rec} \cdot \frac{\nu}{d}$$

上式の  $\text{Rec}$  を臨界レイノルズ数という。

## 5.6 液体の全水頭（ベルヌーイの定理）

液体の定常流においてはエネルギー保存則が成り立ち、液体のもつ水頭には圧力による水頭（圧力水頭）、速度による水頭（速度水頭）、位置による水頭（高さ）があるが、これ等の総和（全水頭）は常に一定である。これを「ベルヌーイの定理」という。この原理を応用したのが差圧式流量計である。

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z = H \quad (\text{定数})$$

ただし  $P$ : 圧力、 $\gamma$ : 液体の単位体積重量、 $g$ : 重力の加速度、 $v$ : 流速、 $Z$ : 基準面からその点までの高さ。

# 6 材料力学

## 6.1 応力と歪

全ての材料は、外部からの力を受けると変形し、この変形に抵抗して内部に力を生ずる。これを内力といい、この面上での単位面積あたりの内力を応力という。またこの内力の発生に伴って生ずる外形的变化を歪という。応力の次元は、 $N/m^2$  である。

### i) 引張および圧縮の場合

断面積（ $A$ ）一定で、長さ  $L$  なる棒を軸方向に外力  $W$  で引張または圧縮した場合、棒内部に発生する応力を  $\delta$ 、軸方向の微小歪を  $\lambda$ 、歪率を  $\epsilon$  とすると、次の関係式が成り立つ。

$$\delta = \frac{W}{A}, \quad \epsilon = \frac{\lambda}{\ell}, \quad E = \frac{\delta}{\epsilon} = W \cdot \frac{\ell}{A\lambda}$$

上式の  $E$  をヤング率といい、小さな応力範囲では材質により一定である。即ち、応力と歪は比例する（フックの法則）。

また棒が軸方向の荷重を受けるとその方向に伸びると共に、横方向に縮みが発生する。この横方向歪と縦方向歪の比は微小応力範囲では一定であり、この比をポアソン比といい、通常  $1/m$  で表す。鋼では  $1/3 \sim 1/4$  である。

### ii) せん断(剪断)の場合

図 1.5 のごとく、上下面の面積 ( $A$ ) に外力  $W$  が作用したときのせん断応力を  $\tau$ 、せん断歪量を  $\lambda s$ 、せん断歪率を  $\gamma$ 、外力の作用間隙を  $L$ 、せん断歪角を  $\theta$  (単位はラジアン) とすると、下記の式が成り立つ。

$$\tau = WA, \quad \gamma = \lambda s l = \tan \theta \doteq \theta, \quad G = \tau \gamma$$

この  $G$  を横弾性係数といい、微小応力の範囲では材質により一定である。

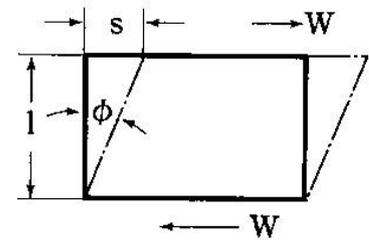


図1.5

## 6.2 応力-歪線図

外力を受けると変形するが、外力を除けば元の形にもどる性質を弾性といい、そのような物体を弾性体という。固体はすべて、ある限度の応力範囲では弾性体と見なすことができる。一般的な軟鋼の応力-歪線図を図 1.6 に示し、その主要な技術用語を記述する。

### i) 比例限度

材料に荷重をかけたとき、ある荷重までは応力と歪が正比例する。これをフックの法則といい、この限度の応力を比例限度といい、図中 A 点の応力。

### ii) 弾性限度

比例限度を超えて荷重をかけると、応力の増大に比べて歪の増大がやや大きくなる。しかし、ある限度までは、荷重をのぞいたとき歪が完全に消える。この限度の応力を弾性限度という。図中 B 点の応力。

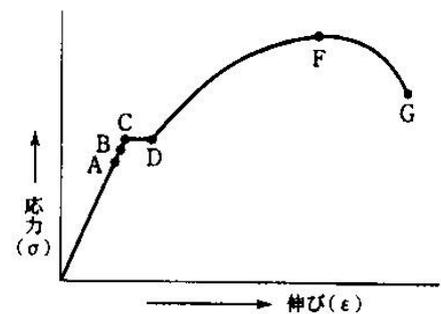


図1.6

### iii) 降伏点

比例限度以上の大きな応力をかけると、応力の増加がないのに歪だけが連続的に増加する。このような状況の生ずる応力をいう。図中 C~D 間。

### iv) 耐力

規定された永久歪を起こすときの応力で、普通 0.2 % の永久歪の点をいう。iii) の降伏点の出ない合金鋼や非鉄金属のような材料の降伏点として使用される。

### v) 極限強さ (抗張力)

降伏点以上に応力が増し、試験片が切断するまでに現れる最大応力をいう。図 1.6 の F 点。

## 6.3 荷重の種類と許容応力

### i) 荷重の種類

荷重は、その加える性質により、静荷重および動荷重（繰返荷重、衝撃荷重）に分類される。また

これらの荷重はその内容により引張荷重、圧縮荷重、せん断荷重、曲げ荷重や振り荷重がある。実際には、以上の荷重が組合わされて作用するのが普通である。

#### ii) 許容応力

許容応力は、実際の使用に際して安全であると考えられる最大応力をいい、一般の設計において使用する材料の安全応力である。これは、荷重の性質と内容および材料の材質に基づいて、その都度適宜決定される。

## II 掘削

### 1 掘削

掘削とは、石油・天然ガスおよび地熱の探鉱・生産あるいは地質調査等の目的で、地表より目的の深度までビットによる圧砕あるいは切削作用によって、地殻に比較的小さい径の孔（坑井）を掘ることをいう。

#### 1.1 掘削計画

掘削作業を実施するには、まず掘削計画を立てることから始まる。予想地質構造、近接井の掘削実績および工学技術に基づいて掘削工程、掘削手順および掘削装置等が計画される。この掘削計画には坑井の廃坑方法や安全対策も含まれている。

##### 1.1.1 工程表

掘削計画の中でも工程表は、坑井掘削の概要がひと目でわかり、事務所でも坑井元でも頻繁に使用されるものである。その例を図2.1.1に示す。縦軸に掘削深度、横軸に作業日数をとった簡単なものであるが、一枚の図に坑井掘削に関わる主要な項目（予想層序、ケーシング計画および泥水計画等）が示されている。近接井の掘削実績、物理検層およびセメンチング計画等を基に作成された工程表は、掘削作業中もその中に作業実績を書き加え、作業の進捗等を検討するために頻繁に用いられる。

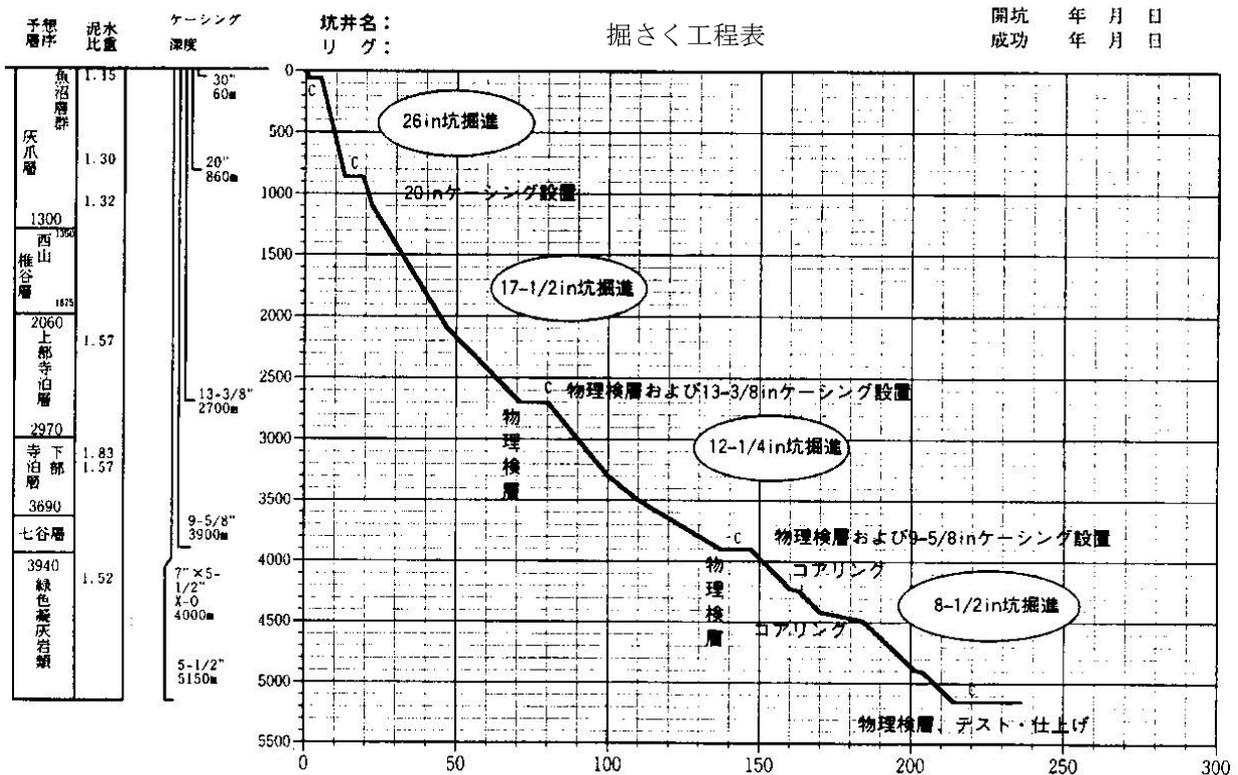


図2.1.1 掘さく工程表

#### 1.1.2 ケーシング計画

坑井を掘り進めるには掘削した坑井の変形、崩壊あるいは地層保護等のため、図 2.1.2 に示すように、ある程度掘削した段階でケーシングと呼ぶ鋼管を設置し掘り進めていく。掘削作業を効率的、安全に行い、掘削費用を最小限にするために、ケーシング計画は掘削計画のなかでも重要な位置をしめる。

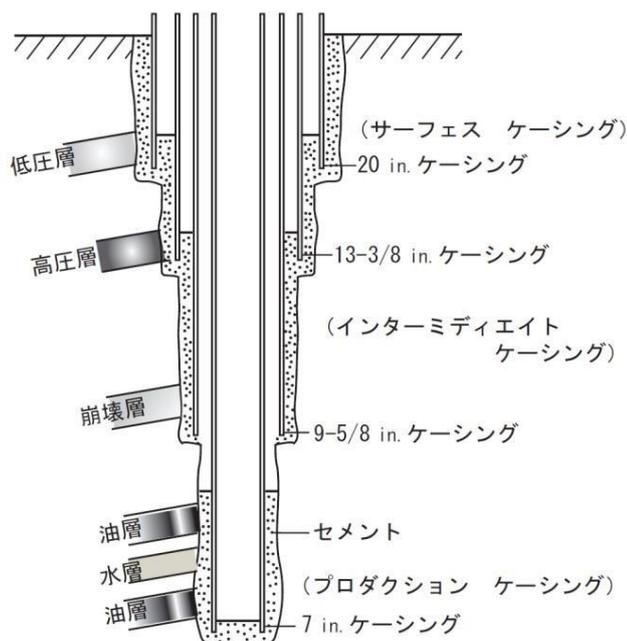


図 2.1.2 ケーシング設置概念図

表 2.1.1 ケーシング計画の例

ラベル1 *1 (in)	ラベル2 *2 (ppf)	公称外径 *3 mm	呼び質量 *4 kg/m	APIグレード	継手名称 *5	設置深度 m	質量総量 t	泥水比重 SG	泥水中重量 tf
20	94.00	508.00	139.89	J55	BIG OMEGA	50	7.0	1.20	5.93
13-3/8	54.50	339.72	81.10	N80 TypeQ	butt	800	64.9	1.30	54.13
9-5/8	43.50	244.48	64.74	L80 Type1	VamTop	1,800	116.5	1.30	97.16
7	32.00	177.80	47.62	C90	3SB	3,500	166.7	1.50	134.86

\*1 インチ単位の旧 API 呼び径。現行規格 (Spec 5CT) では“label”と記述し規格利用者の便宜としている。

\*2 lbs/ft 単位の旧 API 呼び重量。

\*3 現行規格の“outside diameter”。

\*4 “Nominal linear mass, T&C” API カップリング継手を含めた単位長さ当たりの質量。

\*5 BIG OMEGA: V&M 社がライセンス提供している大径ケーシング用継手。

butt: API パットレスコネクション。

VamTop: V&M 社がライセンス提供しているプレミアムコネクション。

3SB: テナリス NKK がライセンス提供しているプレミアムコネクション。

ケーシング計画 (表 2.1.1 参照) は、その地域の状況に応じ掘削深度、ケーシングの径、その機械強度を検討して計画を立てるが、地質条件に関しては以下の項目が重要な要素となる。これらの地質条件に対応してケーシング設置深度等を決める必要もある。

### (1) 地層の強度

地層の強度とは岩石の圧縮強度に依存し、一般的には小さな圧力で破壊される地層を強度の弱い地層という。この強度の弱い地層は、掘削に大きく影響を与えわずかな圧力で破壊されるため坑井の崩壊を引き起こしやすい。

### (2) 地層流体の圧力

地層流体の圧力は深度にほぼ比例して高くなる。しかし、地域によっては異常圧力層 (高圧層および低圧層) があり、逸泥や噴出といった掘削上の障害を引き起こしやすい。

### (3) 地層の崩壊性

地層の化学的および機械的特性により崩壊を起こす層がある。崩壊性の大きい地層に遭遇した場合、工程の遅延につながる。掘進中は泥水の特性を調整することにより対処するが、その地層を掘削し終れば、すみやかにこの区間をケーシングで覆うことを考える必要がある。

ケーシングの使用目的から以下のように分類される。

(1) サーフエスケーシング

地表付近の崩壊および逸泥を防止し、坑口装置を設置するためのもので、比較的大きな径のケーシングである。

噴出に対する内圧とケーシングヘッドにかかる荷重に耐える強度をもたねばならない。ケーシング設置深度は、次の区間の掘削深度で予想される最高泥水比重に対して、ブレイクダウンしない強度をもった地層を選定する。

(2) インターミディエイトケーシング

サーフェスケーシング設置後、プロダクションケーシングを設置するまでの区間での掘削障害を防止するため設置するケーシングである。「中間ケーシング」あるいは「プロテクティブケーシング (protective casing)」と呼ぶ場合も多い。

このケーシングは、強度も十分あり噴出防止装置は、より高圧のものが使用される。このケーシングの設置深度によって、目的深度に達せられるかどうか左右されることが多い。ライナーハンガーによって設置されることもある。

(3) プロダクションケーシング

坑井を仕上げるために設置するもので、坑井の最終設置ケーシングである。初めから仕上げる事が予想される場合は、地表からケーシングを降下する。状況に応じてライナーハンガーで降下し、セメンチングした後、同じサイズのケーシングを継ぎ足す（タイバック）場合もある。

### 1.1.3 泥水計画

泥水とは掘削、仕上げおよび改修作業をおこなうために使用する循環流体の一般名称である。泥水は坑井掘削に必要なものである。計画にあたっては近接井の実績および予想地質状況に基づきそれぞれのケーシング区間に対し適合する泥水系を選定し、その区間で予想される泥水比重を決定する。(図 2.1.1 参照)

### 1.1.4 仕上げ計画

生産を行うため坑井を仕上げることを想定し、仕上げ計画を立てる。仕上げ計画には、生産を最適化する仕上げ方法のみならず、予想される生産期間を通して坑井の健全性を保てるよう、仕上げ流体、プロダクションケーシング、プロダクションチュービングの選定等も含まれる。これには関係各部署と連携をとり計画を立てることが重要である。

主な仕上げ方法を以下に示す。(図 2.1.3 参照)

i) 穿孔仕上げ

プロダクションケーシングを降下しセメンチング後、穿孔を行い仕上げるものである。

ii) アンカー仕上げ

プロダクションケーシング先端にアンカーパイプを付け、その上部をセメンチングし仕上げるものである。

iii) ライナーハンガー仕上げ

プロダクションケーシングを地表まで設置せず生産層直上に設置し仕上げるものである。セメンチング後、地表までケーシングを継ぎ足す（タイバック）こともある。

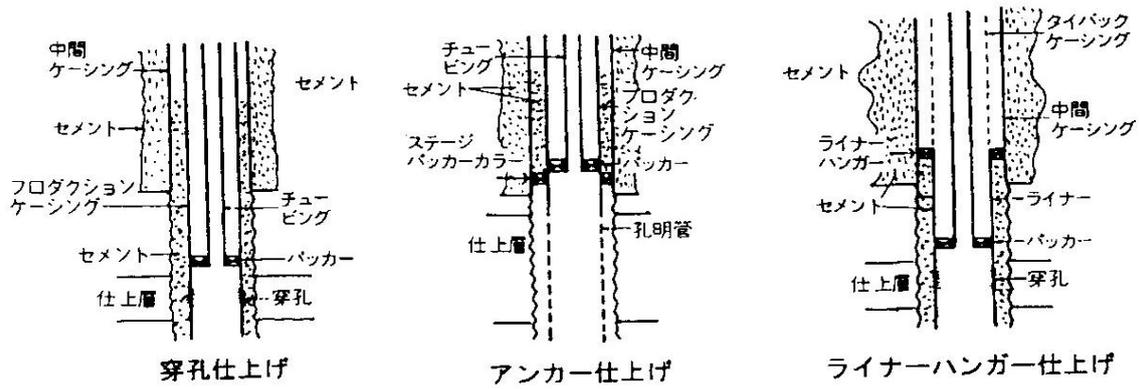


図2.1.3 仕上げ概念図

1.2 掘削方法

掘削はビットにより岩石を砕いて掘り進むが、その方法は主に衝撃式と回転式に分けられる。石油・天然ガスの坑井ではほとんど回転式が用いられている。回転式には以下の方法がある。

1.2.1 ロータリー方式

ドリルストリング全体を回転させることによりビットを回転させ掘削するものだが、通常ロータリー方式と呼ばれるものは、図 2.1.4 に示すようにデリック下（ドリルフロア）にあるロータリーテーブルにより回転力が与えられ、これを四角あるいは六角のケリーに伝達し、ドリルストリングを回転させるものをさす。ドリルストリングを回転させるために、ケリー上部にスイベルが取り付けられ、ケリー以下が回転してもスイベルの外側部分は回転しない仕組みになっている。この方式はケリーの長さ分を掘削する毎にドリルパイプ（掘管）を継ぎ足し掘り進むものである。

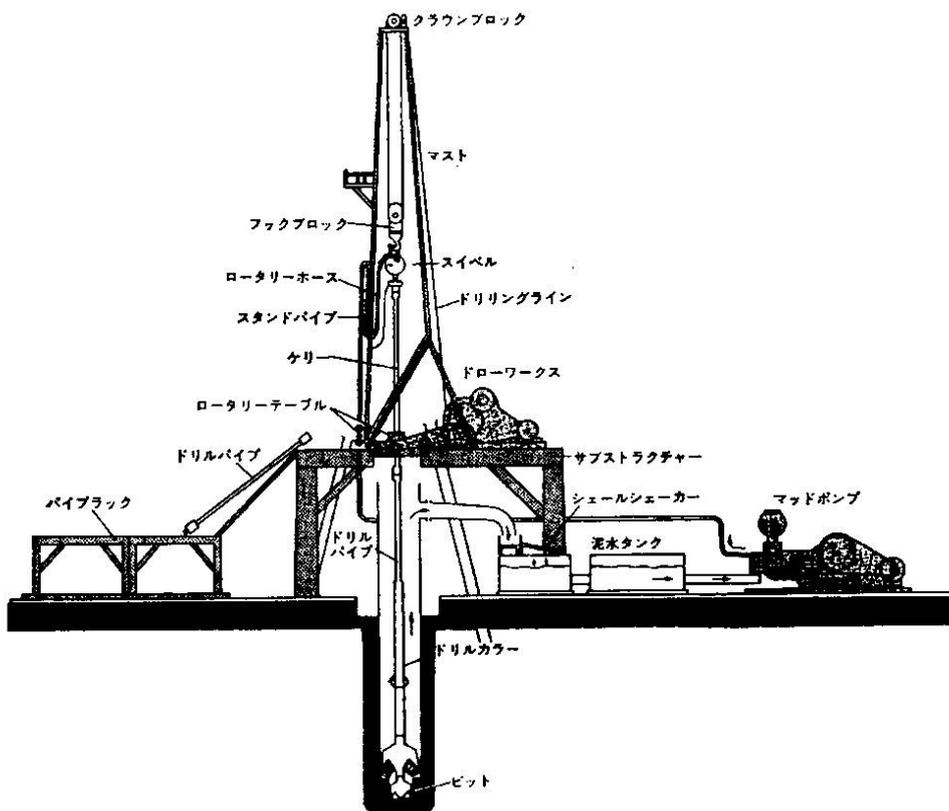


図 2.1.4 ロータリー掘削装置

1.2.2 トップドライブ方式

ドリルストリング全体を回転させることはロータリー方式と同様であるが、回転力を与える方法が異なるため別に分類される。トップドライブ方式は図 2.1.5 に示すように、ロータリー方式のトラベリングブロックとスイベルがモーターと一体になったものである。駆動方式には電動モーター駆動と油圧モーター駆動の二種類がある。ドリルストリング頭部に接続されて、ケリーを用いず直接ドリルストリングを回転させるところにロータリー方式との違いがある。この方式を用いるとドリルパイプ（掘管）を一本ずつ継ぎ足すことなく 1 スタンド（通常はドリルパイプ（掘管）3 本分）毎に掘削することが可能となり、掘削時間を短縮させることができる。また、揚降管作業中でドリルストリング頭部がどの位置にあっても、ポンプする必要が生じた時に直ちにトップドライブを接続してポンプ開始することができる。更にバックリーミング作業が容易に行える。このように、坑内状況の変化に対応しやすいという非常に優れた利点があるので、最近はこの方法が多く取られるようになり、掘削方式の主流となりつつある。

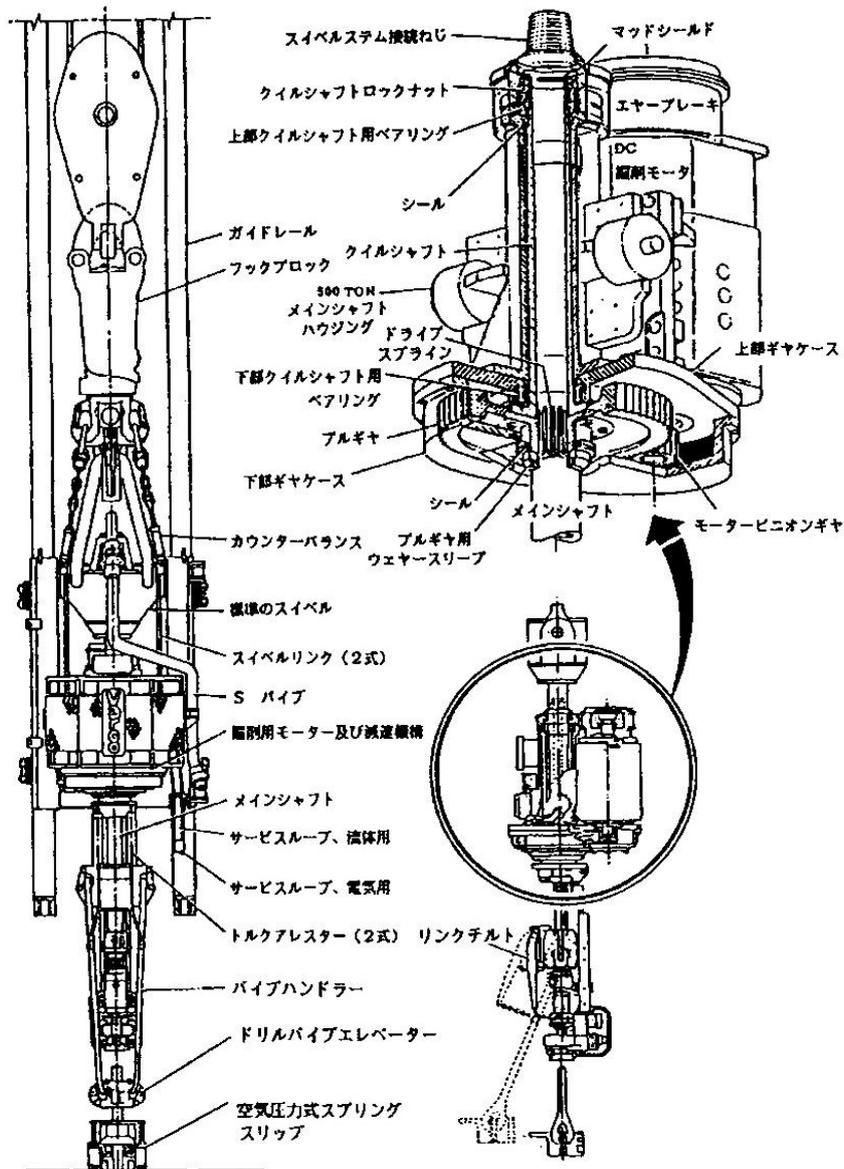


図 2.1.5 トップドライブ装置

### 1.2.3 ダウンホールモーター方式

ビット直上にダウンホールモーターを取り付け、泥水の流れによって得られる駆動力によりビットを回転させ掘削するもので、ドリルストリングを回転させなくても掘削が可能である。ダウンホールモーターにはタービン型と容積型がある。この方式は、傾斜掘りや水平掘りで傾斜を出すため、あるいは方位を修正するためによく使用されるが、掘進率を向上させるために使用されることもある。

タービン型は図2.1.6中左図に示すようにモーター内にローターとステーターが交互に何段にも組み合わされたものである。泥水の流れにより主軸についたローターの羽根が回転しビットを回転させる。非常に高い回転が得られる。

容積型はモイノ型とも呼ばれる。図2.1.6中右図に示すように、モーター内外周部のスパイラル状で中空の断面が楕円になったラバー製のステーターと、中心部のスパイラル状で断面が円になった鉄製のローターの組み合わせからなり、この間に泥水が流れるとローターが回転しビットを回転させる。容積型のモーターにはローターとステーターの形状の比率により多段式のものもある。(図2.1.7参照)この比率が大きいくほど低回転で高トルクを出すことができ、ビットベアリングに負荷を掛けず、また高いビット荷重を掛けることができる。

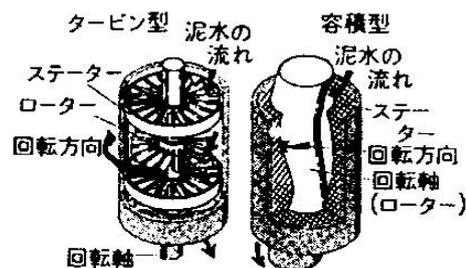


図2.1.6 ダウンホールモータの機構

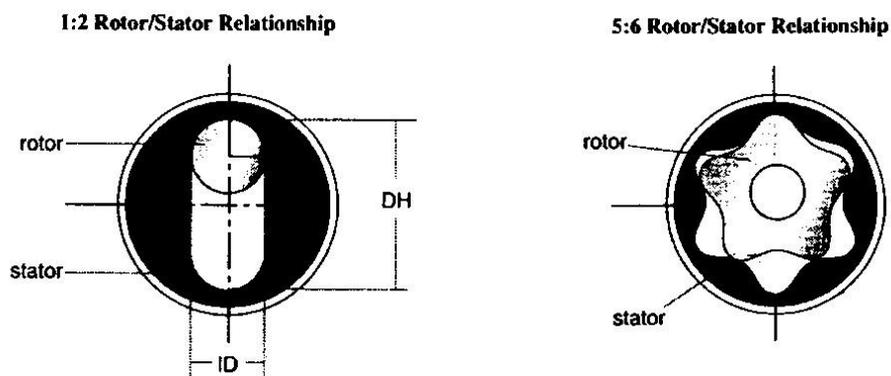


図2.1.7 容積型モータの形状

## 1.3 ビット

掘削を行うには、ビットにより岩石を砕く（圧砕）作用、あるいは削る（切削）作用により掘進していく。掘削作業には莫大な費用がかかるため、掘進率を向上させ、低コストで目的深度まで掘削することが求められる。従って、それぞれ異なる地質に最も適合したビットを選択することは極めて重要なことである。

### 1.3.1 ビットの分類

ビットは以下のように分類できる。(図2.1.8参照)

- ① ドリリングビット
- ② コアリングビット
- ③ ホールオープナー

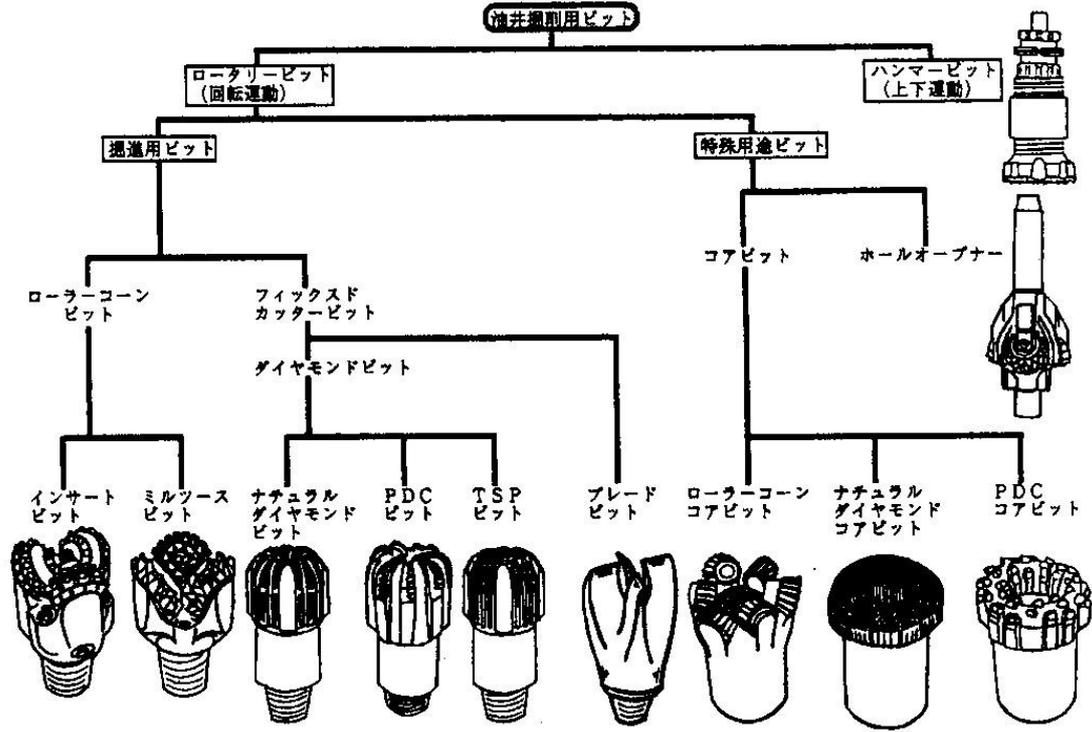


図2.1.8 ビットの種類

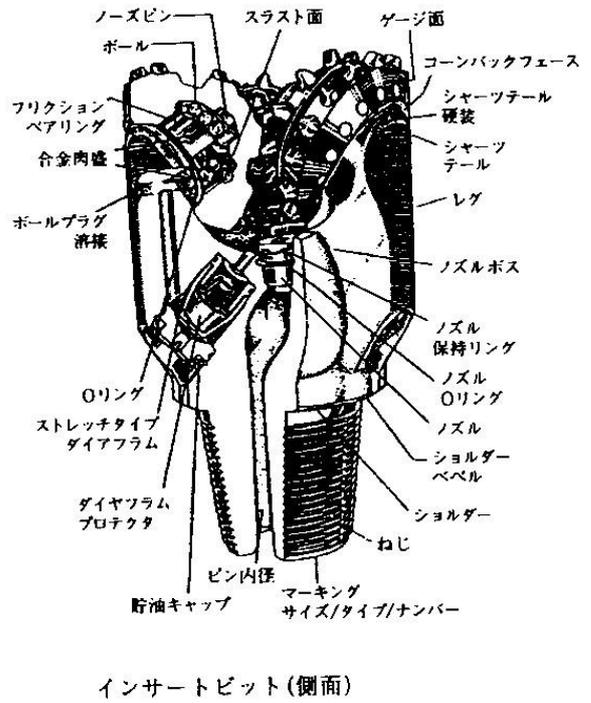
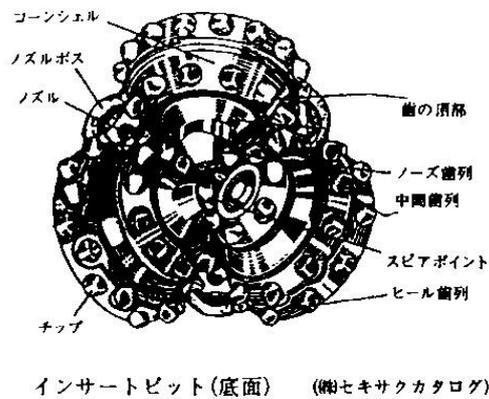
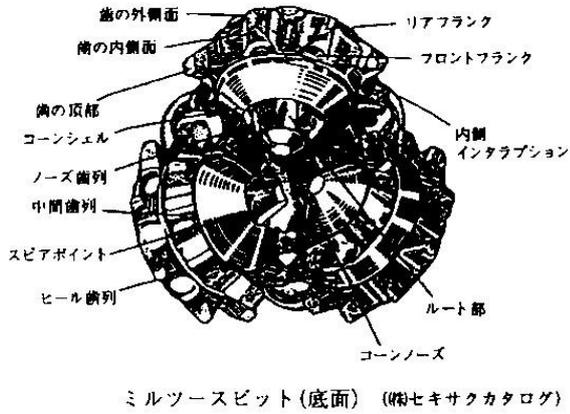


図2.1.9 ローラーコーンビット

1.3.2 ビットの構造と特徴

i) ドリリングビット

ドリリングビットは大別してローラーコーンビットとソリッドビット（フィックスドカッタービット）に分類される。

(1) ローラーコーンビット（図 2.1.9 参照）

ローラーコーンビットは、カッターのタイプによって、ミルツースビットと（タングステンカーバイド）インサートビットの2種類に分けられる。ミルツースビットのカッターは、ビットコーン製作時にコーン上に切り出されて作られる。歯先表面は、タングステンカーバイドで硬装されるが、適用岩石は中硬岩程度までであり、一般には硬岩掘削には適さない。インサートビットのカッターは、タングステンカーバイドのインサートがコーンに植え込まれたものである。この種のビットは、ほとんど圧砕作用によって掘削を行うので、硬岩にまで適用可能である。カッターを岩石に食い込ませるためには、大きな荷重が必要である。そのため、その大荷重に耐えられるように、ベアリングに多くの工夫がこらされている。ベアリングには、ローラーベアリングとフリクションベアリングの2種類がある。そして、ベアリング部にグリースが充填・密封されているか否かで、シールドベアリング（図 2.1.10 参照）とノンシールドベアリング（図 2.1.11 参照）に分けられる。ノンシールドベアリングは、ベアリング部が掘削泥水にさらされているので、通常その寿命は十数時間程度である。一方シールドベアリングは、グリース潤滑（図 2.1.12 参照）によってビット寿命は長い。シールドフリクションベアリング（図 2.1.13 参照）であれば、100 時間以上の寿命も可能である。

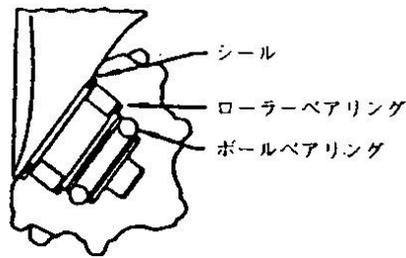


図2.1.10 シールドベアリング

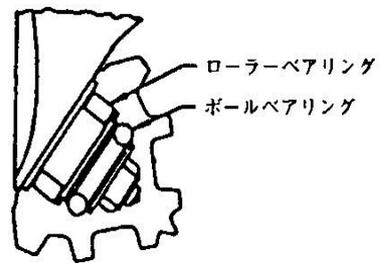


図2.1.11 ノンシールドベアリング

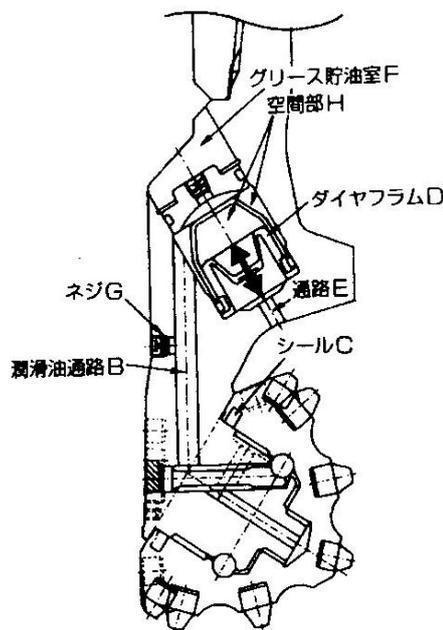


図2.1.12 グリース潤滑機構

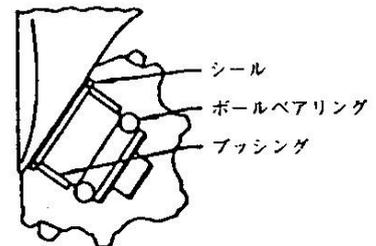


図2.1.13 シールドフリクションベアリング

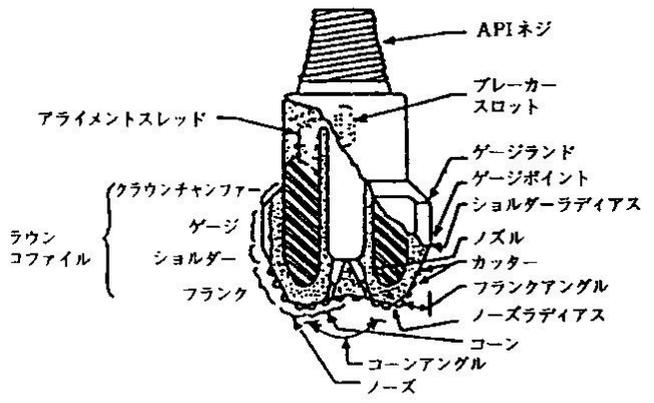
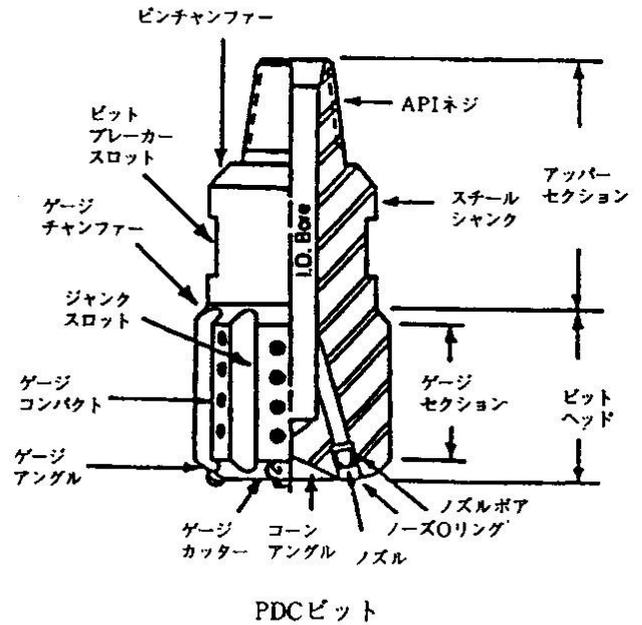
(2) ソリッドビット (図 2.1.14 参照)

ソリッドビットは、カッター部がボディと一体になっており、ベアリング機構を持たない。したがって、ローラーコンビットにしばしば起こるような、ベアリング寿命がビット寿命を支配するということがない。石油開発の初期から存在したタイプのビットでフィックスドカッタービット、またはドラッグビットとも呼ばれる。その掘削メカニズムは、すべて切削作用によるものであり、その寿命と切削性能は、主にカッターの性能にかかっている。古くはブレードビットなどが使用されたが、現在の主流は PDC ビットやダイヤモンドビットになっている。使用されているカッターの材質により、天然単結晶ダイヤモンドを使用したナチュラルダイヤモンドビット、非常に微細な天然ダイヤモンドをマトリクスボディの中に埋めたインプレグネーテッドダイヤモンドビット、多結晶人工ダイヤモンド (PCD: Polycrystalline Diamond) の薄層を使用した PDC (Polycrystalline Diamond Compact) ビット、高温安定多結晶人工ダイヤモンドを使用した TSP (Thermally Stable Polycrystalline) ビットなどである。これらのカッターを組み合わせる取り付けた混成ビットもある。

ナチュラルダイヤモンドビットは中硬質岩に対して、ある程度の掘進率を維持しながら長寿命を達成するビットとして位置付けられ、使用されている。しかし、天然ダイヤモンドの形および大きさには制約があり、それらの取り付け方法も限られているため、掘進率を飛躍的に高めたりあるいは軟らかい地層から非常に硬い地層までへの適用といった発展および応用は不可能とされている。そのため、形および大きさの選択が自由な人工ダイヤモンドが注目され、その油井掘削用ビットへの適用の研究開発が進んだ結果、PDC ビットおよび TSP ビットが実用化されてきた。

PDC ビットは、直径 1~5 cm、厚さ 0.5 mm の人工ダイヤモンドの薄層にタングステンカーバイドのバックプレートに接着したもの (PDC カッター) を多数取り付けたソリッドビットである。PDC カッターの優れたセルフシャープニング特性によって、軟らかい地層に対して PDC ビットは飛躍的な高掘進率を達成する。その一方で、カッターが薄層であるために硬い岩石に対して著しく寿命が短いこと、カッターの特性によってインパクトや摩擦熱に対して極端に弱いことが欠点である。(図 2.1.15 参照)

TSP ビットは、熱に起因する PCD の弱点を改良した新しいタイプの人工ダイヤモンドカッタービットである。PCD には、ダイヤモンドの結晶構造間の結合材としてコバルトとニッケルが使用されている。それらの熱膨張率とダイヤモンドの熱膨張率が異なるため、摩擦熱による PCD の温度上昇に伴い、



ナチュラルダイヤモンドビット  
図 2.1.14 ソリッドビット

PCDの内部応力が增大するため、PDCカッターの強度が低下してしまう。TSPダイヤモンドは、これらの結合材を可能な限り除去するか、またはダイヤモンドと熱膨張率の差がないシリコンを結合材として使用した人工ダイヤモンドである。

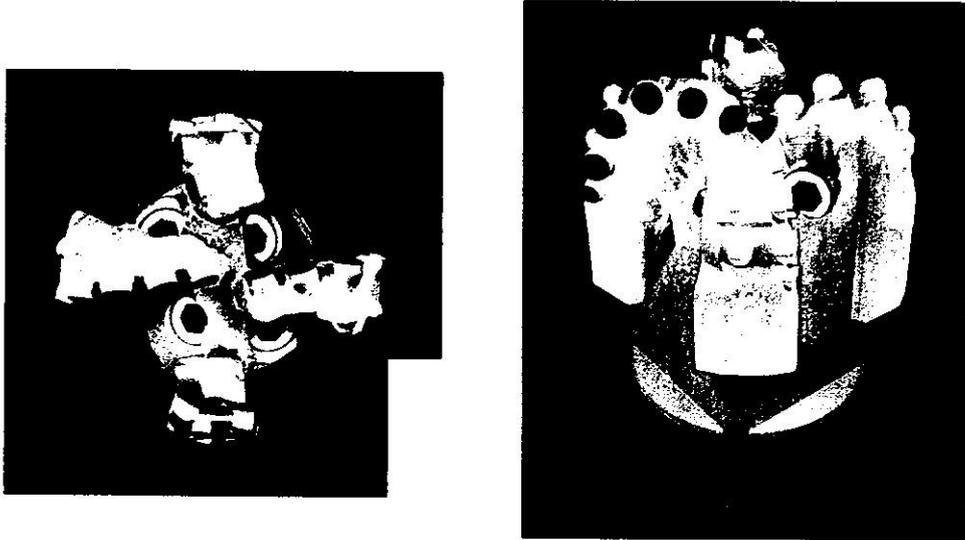


図2.1.15 PDCビット

#### ii) コアリングビット (図 2.1.16 参照)

コアリングは地層の岩石をそのまま採取して、その層の地質状況および物理的特性などを調査するために行なわれる。そのとき掘進に使用されるのがこのビットである。試掘井においては、ドリリングブレイクやショーイングのあった個所において、また開発井においては貯留層内などでコア掘りを実施されるが、岩石の浸透率、孔隙率、飽和率などを分析し埋蔵量の計算、採油管理等の資料を得る。また、地層中に存在する有孔虫による地層の対比なども行われる。ちなみにコア回収方法には、コンベンショナルコアリング方式とワイヤーラインコアリング方式がある。また、コアリングビットとしてはダイヤモンドタイプと PDC タイプが代表的である。

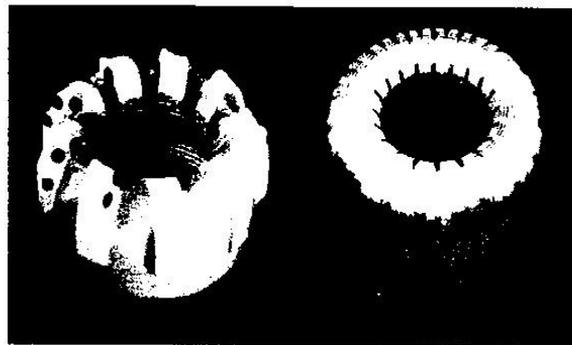


図2.1.16 コアリングビット

#### iii) ホールオープナー (図 2.1.17 参照)

坑径の大きい掘削の場合や、一段掘りでは無理のあるとき、あるいは試掘の際、パイロット的に小径のビットで掘ることがある。このような場合、小さなパイロットビットで掘削した後に、大きな径に拡掘するときホールオープナーが使用される。ホールオープナーは主にスリーポイントタイプが使用されている。



図2.1.17 ホールオープナー

以下の表に、ホールオープナーとローラーコーンビットによる掘削の主な相違点を示す。

表2.1.2 ホールオープナーとローラーコーンビットによる掘削の主な相違点

	ホールオープナー	ローラーコーンビット
耐荷重	荷重はボディ部に溶接したブラケットで受ける。耐荷重は静的荷重においてはビットと同程度であるが動荷重については小さい。ローラーコーンビットのリコメンド荷重の30%程度で使用する。	ボディ自身3つ組溶接である。かつねじ切りによりビットサブにネジ込まれるので、耐荷重、耐回転トルクがホールオープナーに比べ5~6倍強い。
耐回転トルク	掘削では回転トルクが大幅にかつ衝撃的に変化する。1つのボディームに過大な衝撃荷重が加わらぬよう、ローラーコーンビットのリコメンド回転数の1/2~1/3で使用する。	同上
最弱部	カッターを収容する部分	該当部なし
ベアリングの摩耗	坑径のわりにカッターが小さいのでベアリング寿命は同径のビット掘削時に比べ短い。ボディーム、シャーツテル部の摩耗によってベアリング摩耗が加速される。	元穴の回りを均等に掘削していく時、荷重が均等にかからずベアリングが短時間で痛んでしまう場合がある(特に小さなビット8-1/2in.以下)

掘削時のホールオープナーとトリコーンビットの選択基準を以下の表に示す。

表2.1.3 ホールオープナーとトリコーンビットの選択基準

	ホールオープナー	トリコーンビット
元穴を逸脱せず掘削したい（傾斜井）	○	
地層が崩壊性で穴曲りしやすい	○	
地層が比較的軟質	○	
硬質地層		○
短時間で掘削したい		○
元穴の径と掘削径の比が小さい （例：10・5/8in と 12・1/4in 12・1/4in と 14・3/4in）		○
硬質層のようにトルク値の変動の大きい地層		○
掘削中ビットが「はねる」ような地層		○

### 1.3.3 ビットの選択

近接井のデータ、および当該坑井の予想地質をもとに、種々ある中から、1つのビットを選ぶ時にまず考えなければならないことは、その地層に適した掘削性（Drillability）と寿命（Life）をもつビットを選択することである。この他に、使用目的あるいは形態（ドリリング、コアリング、掘削、リーミング、水平掘りなど）と温度条件等も考慮する必要がある。

#### i) ビットの掘削性

ビットの掘削性にもっとも影響をおよぼすのはカッター部の大きさである。加えてローラーコーンビットの場合は、ビットオフセットの大きさが掘削性に影響する。地層が軟らかい程、大きなカッター部やオフセットを採用することが可能で、より高い掘進率が得られる。地層が硬くなるにつれてカッター部やオフセットを小さくすることでより大きなビット荷重に耐えられるようにできるが、その掘削性は減少する。また、ソリッドビットを高速回転のダウンホールモーターと組み合わせた掘削も頻繁に行われており、飛躍的な掘進率向上を達成した例も多い。

掘削する地質によって、高ビット荷重が適する場合と、高ビット回転が適する場合とがある。それに対応して様々なタイプのビットが選択可能である。

#### ii) ビット寿命

ビットの寿命は具体的には、カッター部の寿命とベアリング部の寿命の複合であり、掘削する地質に対応して両方の寿命がバランスするようにビットタイプを選択することが理想的である。地質の軟硬、研磨性、温度などの多くの要素がビット寿命に影響する。地層に研磨性がある場合にはカッターの摩耗が早まり、寿命が短くなる。また地層温度が高いほど、ベアリングシールの熱劣化が著しく、ビット寿命が短くなる。カッターやシールの材料を吟味することにより寿命をのばすことが可能であるが、それだけ高価格になる。

#### iii) 岩石の硬軟（表 2.1.4 参照）

ビット選択の中でもっとも重要なファクターは岩石の硬軟である。それは岩石の成分粒子そのもの

表 2.1.4 岩石強度の区分 \*

	クリステンセン		セキサク		土木研究所	
	kgf/cm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
超軟	<280	27<	<400	<39	<400	<39
軟	280~560	27~55	<400	<39	<400	<39
中軟			400~800	39~78	400~800	39~78
中軟	560~1,400	55~137	700~1,000	69~	800~	78~
硬	1,120~2,240	110~220	1,000~1,500	69~98	~1,800	~177
超硬	>2,240	>220	>1,500	>98	>1,800	>177

\* 鉱山保安テキスト・鉱場（平成14年版）から、SI単位数値を付加した。

の硬さと粒子間の固着の緊密さによる。その目安として一般的に一軸圧縮強度が使われているが、岩石の硬軟は明確に定義されていない。また関連機関によってその区分は異なっている。

#### iv) ビット選択の目安

実際の掘削では、地層の予想に基づいてビットを選択し、そのビットの最適な掘削パラメータをさがし、使用後の損傷状況などそこで得られた情報をもとに次のビットの選択を行うというのが通常の手順となる。一般的な岩石の硬軟によるビットタイプの選択の目安は、以下に示される通りである。

- 超硬：インプレグネーテッドダイヤモンドビット
- 硬：インサートビット、ナチュラルダイヤモンドビット
- 中：ミルツースビット、インサートビット、PDC ビット
- 軟：ミルツースビット、PDC ビット、ブレードビット

### 1.3.4 掘削パラメーター

#### i) ビット荷重

掘削する地質の硬軟により選択するビットの歯先の形状が変わる。それには、岩石を剥ぎ取る作用のものから押しつぶす作用までのタイプがある。ビット径 1 インチ当り 3,000~10,000 lbf (13.34~44.48 kN) の荷重を掛けて使用できるようになっており、このビット荷重はドリルカラーを使用してその重量を掛ける。ドリルパイプ（掘管）はバックリング等の障害が生ずるので、ドリルパイプ（掘管）によってビット荷重を掛けないようにする。一般的にドリルカラーの重量はビット荷重の 40 % 増しぐらいが基準とされている。ビット荷重により生ずるパイプ座屈時の中立点（ニュートラルポイント）が常にドリルカラー部の中にあるように使用するカラーの長さを調整する。

#### 【例題】

8-1/2 in. (215.9 mm) ビットを使用したいが、適正ビット荷重はどれくらいか。

このビットのメーカーリコメンドは 3,000~5,000 lbf/in. が適切とされている。

よってビット荷重は

$$(3,000 \sim 5,000 \text{ lbf}) \times 8.5 = 25,500 \sim 42,500 \text{ lbf} = 11.6 \sim 19.3 \text{ tf} \quad (113.4 \sim 189.0 \text{ kN})$$

が推奨される。

ドリルカラーは 6-1/2 in. (165.1 mm, 単位質量 135.5 kg/m) の 9 m 物を使用すると、

$$135.5 \times 9 \div 1,220 \text{ kg/本} \quad \text{となり、}$$

いま、泥水比重を 1.30 SG (Specific Gravity) とすると浮力係数は 0.834 となる。

よって泥水中での見掛け質量は  $1,220 \times 0.834 \div 1,020 \text{ kg/本}$

ここで 15 tf の荷重を掛けるとするならば

$$15,000 \div 1,020 \div 15 \text{ 本}$$

推奨されるドリルカラーの重量が、荷重の 40 % 増しだとすると

$$15 \times 1.4 \div 21 \text{ 本} \quad \text{が必要となる。}$$

#### ii) ビット回転数

掘進率は理論的には回転数に比例する。但し軟岩はかなりの回転までこのことが言えるが硬岩はすぐ限界に達する。その後はいくら回転を上げても変わらない。

適切なビット回転数は地質、坑径およびビットにより異なるが、主にローラーコーンビットの場合の一般的な目安を以下に示す。

軟質層	60 ~ 250 rpm
中硬質層	60 ~ 120 rpm
硬質層	60 ~ 100 rpm

### iii) ビットノズル速度

掘り屑が坑底に停滞し、ビットにより再破碎されるのを防止するため、掘り屑はできるだけ早くビットより排除しなければならない。軟岩の場合はビットノズル部の泥水噴出速度が大きくなると掘進率が大きくなるのが一般的である。

ビットノズルサイズを選択するための目安として、ビットノズルスピードは最低 220 ft/sec (67 m/sec) が必要で、300 ft/sec (91 m/sec) 以上が最適とされている。

## 1.4 掘削泥水

石油・天然ガスおよび地熱井などの掘削において、泥水を使用する目的は、掘り屑（カッティングス）を地表まで運搬し、地層の崩壊を抑え坑内を安定に保ち、地下に存在する石油、ガス、水および地熱蒸気などの噴出を防ぎ、掘削が安全かつ迅速に行なわれるのを助けて、掘削目的である種々の調査および石油、ガスおよび地熱蒸気などの採取が完全にできるようにするため使用するものである。泥水は、人体にたとえると血液のような役割を担い、坑井掘削にとって非常に重要な役目をするものである。泥水特性の良否が坑井掘削の成否を左右する場合が多い。

### 1.4.1 泥水の機能

泥水的主要な機能は以下のとおりである。

- ① 坑底やビット付近から掘り屑を除去して、ビットカッター部を清浄にするとともに、掘り屑を地表まで運搬する。
- ② ビット、ドリルカラーおよびドリルパイプ（掘管）類を冷却し、かつ潤滑にする。
- ③ 薄くて浸透性の小さい泥壁を作って、坑壁が崩れるのを防ぐ。
- ④ 地層圧力や地下に存在する油、ガス、水および地熱蒸気などが噴出しないよう抑制する。

### 1.4.2 良好な泥水の条件

良好な泥水が持つべき条件は以下のとおりである。

- ① 泥水比重が坑内圧力とバランスした適正值であること。
- ② 粘性、イールドバリュー、ゲルストレングス等の流動特性が適正であること。
- ③ 循環を一時的に停止したときに掘り屑やバライトが沈澱しないように保持し、また地表においては掘り屑、砂分、粘土分および含有ガスをよく分離すること。
- ④ 脱水量が少なく、泥壁が薄くて丈夫であること。
- ⑤ 低比重ソリッド分が少なく適量であること。
- ⑥ 地層の崩壊、泥化抑制能力が優れていること。
- ⑦ 張り付きができてにくいこと。
- ⑧ 潤滑性が優れていること。
- ⑨ 塩水、セメントその他電解質による影響を受けにくいこと。
- ⑩ 温度、圧力によって泥水特性に変化が少なく安定性が大きいこと。
- ⑪ 物理検層結果の解析に悪影響を与えないこと。
- ⑫ 油、ガス層および地熱蒸気層に対する障害を最小限にすること。

⑬ バクテリア（腐敗）に対する免疫性があること。

⑭ 作泥費、調泥費ができるだけ安いこと

しかし、一つの泥水系で上記条件を完全に満足させるようなオールマイティの泥水はない。したがって、実際の坑井に対してそれぞれの必要とする条件に最も適応した特性をもつ泥水を選定し使用しなければならない。

### 1.4.3 泥水の重要な特性

良好な安定した泥水特性を維持するためには、全体で 20 項目に近いチェックポイントがあり、それぞれに重要な意味をもっている。ここでは最も基本的な特性について述べる。

#### i) 泥水比重

泥水比重とは厳密には 4 °C の水を基準とした泥水との質量比であるけれども、室温状態の泥水密度 [g/cm<sup>3</sup>] と同様に用いられている。泥水比重は、一般にはマッドバランスで測定しているものの、一部ガンマ線を利用した自動比重計も使用されている場合もある。

泥水は、掘削中地下に存在する油その他の圧力流体の噴出や地層の崩壊を防止する重要な役目をもっており、これらの役目は泥水比重（泥水柱圧力）によって行なわれることが多い。泥水比重は泥水諸特性のうち大切な特性である。地層圧力は地域によって大きな差があるため、泥水比重は常にその坑井のもつ地層圧力とバランスした適正值を維持することが大切である。泥水比重が高すぎて泥水柱圧力と地層圧力との差が大きくなればなるほど、①掘進率が低下する、②差圧抑留され易くなる、③逸泥を起こし易くなるなどの障害が起こる。このため泥水比重はできる限り低くすることが望ましい。しかし、泥水柱圧が地層圧力よりも低すぎると噴出や崩壊を起こすため、比重は常に適正值を維持するように絶えずチェックしなくてはならない。

#### ii) 流動特性

ファンネル粘性、イールドバリュー、ゲルストレングス等で表せられる泥水の流動特性は、掘削時における ①掘り屑の運搬能力、②ポンプ中の流動抵抗、③掘り屑やバライトの保持能力、④揚管時のスワッピングによる圧力低下、⑤張り付き、⑥掘進速度などに大きな影響を与える重要な性質である。これらの各々の定義および特性を簡単に説明することはむずかしいが、泥水はニュートン流体と異なり、外力に対して特殊な粘性特性を示し、また静止によって膠化（ゲル化）する非ニュートン流体（可塑流体）である。その値は泥水中に含まれるコロイド粘土類、分散解膠（かいこう）剤などの種々の状態と複雑な界面電気現象によって左右される性質をもっている。

泥水の流動特性は、その坑井の泥水比重、地層の特性、掘削条件（坑径、深度、ポンプ容量等）によって、それぞれの状態に最も適応するように調節しなければならないが、正常な掘削状態下においては一般的に低く維持することが必要とされる。

坑井元で測定される泥水の流動特性としては、ファンネル粘性（FV、秒）、見かけ粘性（AV、cP）、プラスチック粘性（PV、cP）およびイールドバリュー（YV、lb/100ft<sup>2</sup>）<sup>\*1</sup> が挙げられる。ファンネル粘性は漏斗型のファンネル粘度計で測定し、他の粘性およびゲルストレングス（GS、lb/100ft<sup>2</sup>）はすべて回転粘度計である VG メーターで測定する。

#### iii) 脱水特性

坑井内にある泥水は、砂層のような浸透性地層に対しては、地層面が一種の濾過器となって、泥水柱圧力と地層圧力との差圧によって、泥水中の水分が濾過されて地層中に失われ（脱水）、地層面に泥水中の粘土分を主体としたコロイド分が泥壁として形成される特性をもっている。この性質を脱水特性という。脱水特性は、地層の崩壊や坑内障害の防止あるいは油層、ガス層の保護に対して重要な役

割を果たすものである。脱水特性の良否は泥壁の厚さ[mm]と脱水量[cm<sup>3</sup>]で判定する。脱水量が少なく、泥壁が薄くて丈夫な泥水ほど良好な泥水である。この測定は、普通は API 規格によるフィルタープレス（常温 690 kPa (100 psi) 加圧 30 分テスト）により行われる。深掘井や高温度坑井では、高温高圧フィルタープレス（150 °C (300 °F)、3,450 kPa (500 psi)、30 分）を併用して、より厳密なチェックを行なうことが必要である。

#### iv) アルカリ度

泥水中の粘土粒子の分散や調泥剤の機能を十分に発揮させ、安定な泥水を維持するためには、泥水中に一定量の OH イオンが含まれている必要がある。一般に水中の OH イオンの含有量は pH メーターにより水素イオン濃度 (pH) を測定することにより知ることができる。しかし、泥水中には、OH イオンの他、地層から泥水中に炭酸根が混入したり、有機系調泥剤の分解（劣化）によって生じる炭酸根、同じく調泥剤の分解によって生じる有機イオン類等のアルカリ成分が含まれている。泥水の流動特性を著しく悪化させる炭酸根の量や、泥水の劣化度の指標としての有機イオン類の量を知ることにも極めて重要となる。

泥水のアルカリ度の測定は、pH 値とともに、泥水および濾水に指示薬を加えて酸で滴定し、その滴定量から泥水のアルカリ成分の含有量を知る方法が用いられる。濾水に指示薬としてフェノールフタレイン (pH8.3 で変色) を使用した時の値をアルカリ度 Pf、同じくメチルオレンジ (pH4.3 で変色) を使用した時の値をアルカリ度 Mf と呼ぶ。また、泥水に指示薬としてフェノールフタレインを使用した時の値をアルカリ度 Pm と呼ぶ。

#### v) 潤滑性

抑留を防止し、坑井内を安定に維持するためには泥水の潤滑性が非常に重要である。特に水平坑井を含む傾斜坑井の掘削においては、良好な潤滑性をもった泥水を使用することが必要である。泥水の潤滑剤としては、軽油、A1 重油の油類および非イオンあるいは陰イオン系配合型界面活性剤が用いられる。また、水平坑井や高傾斜坑井掘削等にはポリプロピレングリコール誘導体が高機能潤滑剤として用いられている。

泥水の潤滑性は、ルーブリシティーテスターを用いて測定される泥水の摩擦係数や抑留係数計測試験による泥水の抑留係数により評価される。

#### vi) ソリッドコンテンツ

ソリッドコンテンツとは、泥水中に含まれているベントナイトを主体とした粘土分、シルト分、砂分、頁岩微粒子、バライトその他添加調整剤などの固形分の合計量であって、泥水性質を良好に維持する上において重要な要素である。最近では、掘進率を向上させるためおよび流動特性をよくするために、ソリッド分の少ないローソリッドマッドが盛んに使用される傾向にある。ソリッド分を粒径の大きさによって区別した場合、①200 メッシュ (74 ミクロン) より大きいものを砂分、②2 ミクロンから 74 ミクロンまでのものをシルト、③2 ミクロンより小さいものを粘土分という。これらの合計量は一般的に小型レトルトの油水分測定器により測定される。泥水中のソリッドコンテンツを調節するには、①水および新規泥水による希釈、②機械的処理法、③化学的処理法の 3 つがある。現在最も一般的に行なわれている方法は、水および新規泥水による希釈と機械的処理法である。機械的処理法としては、20~30 メッシュより大きいものはマッドスクリーン、200 メッシュより大きいものはデサンダー、200 メッシュ以下のものはデシルターおよびセントリフュージが使用されている。

1.4.4 主要泥水調整剤 (表 2.1.5 参照)

i) 加重剤

泥水比重を上げるための加重剤としては、一般的にバライトが用いられる。バライトとは、重晶石の微粉末で、主成分は硫酸バリウム (BaSO<sub>4</sub>) である。バライトは比重が大きい (4.20~4.30 SG) 上に、鋼管類に対する摩耗性が小さく、かつ安定性が大きいために現在世界各国で泥水比重をあげるために一般的に使用されており、泥水調整剤のうちで最も使用量が多く、かつ重要なものである。現在泥水用として使用されているバライトは、API 規格に合格したバライトで、規格には比重、不純物含有量、粒度などが規制されている。

表2.1.5 主要調泥剤の例 (国内)

分類	品名	主成分	使用目的 (機能)
加重剤	テルパー	硫酸バリウム (バライト)	泥水比重増加剤
無機コロイド剤	クニゲル V1 テルゲル サーモゲル ハイパーゲル	Na-ベントナイト Na-ベントナイト セピオライト 合成スメクタイト	清水ベース一般泥水用基本剤 (増粘、泥壁形成性他) 清水、海水、KCL ベース泥水用基本剤 (〃) 高温地熱用泥水基本剤 (〃) 超高温地熱用増粘剤
分散剤	テルナイト B テルナイト BH SSMA リグネート リグネート K BM ナイト テルフロー リグナス 10 G-500S	フミン酸ソーダ フミン酸、カルボン酸誘導体の複合物 スルホスチレン無水マレイン酸共重合体 フミン酸、リグニンスルホン誘導体の複合物 フミン酸、リグニンスルホン誘導体の複合物 フミン酸誘導体 ポリアクリル酸塩 酸リグニンスルホン酸、アクリル酸共重合体誘導体 フミン酸、アクリル酸共重合体誘導体	一般清水ベントナイト泥水の分散、脱水減少、安定剤 高温地熱用 3日 泥水の主成分 (分散、脱水減少、安定剤) 高温度用分散、安定剤 リグネート泥水の主成分 (分散、安定、脱水減少、泥化抑制剤) KCl、リグネート泥水の主成分 (分散、安定、脱水減少剤) リグネート泥水の耐熱安定、脱水減少剤 一般ボーリング用泥水の分散剤、地熱用泥水の高温度分散剤 クロムフリー分散剤 超高温度用分散、脱水減少、安定剤
有機コロイド剤	テルポリマー-DX テルセローズ テルポリマー-H/L ホスタドрил NCD ポリマー テルコート イーゾードリル パワービス	デンプン誘導体 Na-カルボキシメチルセルロース (CMC) ポリアニオンックセルロース系ポリマー ビニルスルホン酸、ビニルアミド共重合体 ゼンサンガム (バイオポリマー) PHPA ポリマー 高分子量 PHPA ポリマー MMH ポリマー	耐塩性脱水減少剤、泥岩の保護安定剤 (主に塩水ポリマー泥水) 脱水減少剤、増粘剤 耐塩性脱水減少剤、増粘剤、泥岩の保護安定剤 高温度用脱水減少剤、安定剤 高耐塩性増粘剤、流動特性 (η <sub>sp</sub> /c) 改善剤 皮膜形成ポリマー、頁岩安定剤 皮膜形成ポリマー、頁岩安定剤 特殊増粘剤 (主にミリング液体)
坑壁強化剤	アステックス S	スルホン化アスファルト誘導体	坑壁保護強化剤、高温度脱水調整剤
界面活性剤	テル DD スピーダーP スピーダーX EZ スポット テルクリーン クリンリユープ	特殊非イオン、アニオン系配合型活性剤 特殊非イオン、アニオン系配合型活性剤 特殊非イオン、アニオン系配合型活性剤 乳化剤、潤滑剤、ゲル化剤、その他 特殊非イオン系配合型活性剤 ポリプロピレングリコール誘導体	坑内洗浄剤、張り付き防止剤 極圧性潤滑剤、抑腐防止剤、スポットオイル添加剤 浸透潤滑剤、スポットオイル専用添加剤 高比重スポットオイル用添加剤 水溶性潤滑剤、非揮発系の抑腐防止剤 潤滑剤、張り付き防止剤、泥壁改良剤、脱水減少剤
消泡剤	デフォーマー No 15 デフォーマー 30C	高級アルコール配合物 シリコン系エマルジョン	多用途型協効消泡剤 塩水用消泡剤
逸泥防止剤	テルストップ テルシール テルプラグ テルマイカ TN ファイバー	綿実しぼり滓 矽石粉砕物 くすみ炭粉砕物 雲母繊維断物 ロックウール	逸泥防止剤、泥水に混合して使用 逸泥防止剤、泥水に混合して使用 逸泥防止剤、泥水に混合して使用 逸泥防止剤、泥水に混合して使用 逸泥防止剤、泥水に混合して使用
泥水用一般薬品	苛性ソーダ 苛性カリ 消石灰 重曹 ソーダ灰 塩化カリウム		泥水の pH 調整剤 KCL 泥水の pH 調整剤 泥水の pH、アルカリ度調整剤 セメント汚染処理剤 泥水中のセメント、海水中的 Ca イオンの不活性剤 KCL 泥水のカルウム源、泥化抑制剤

ii) 増粘剤

泥水の増粘剤としては、無機コロイド剤であるベントナイト、セピオライト、合成スメクタイトのような粘土類および有機コロイド剤であるポリマー増粘剤が使用される。

粘土類の内、ベントナイトとは非常に微細な粘土で、主要鉱物は Si-Al-Si の 3 層構造をした不定形板状のモンモリロナイトであって、その特長は、①清水中に入れると水を吸収し著しく膨潤する、②大きな粘性、可塑性および水中で複雑な界面化学現象を起こすことである。泥水の基本成分としてベントナイトを使用する目的は、泥水に対して粘性、イールドバリュー、ゲルストレングス、チキソトロピック性、泥壁形成性およびバライトや掘り屑の保持能力を与えるためである。また、繊維状構造 (鉢状粒子) をしたマグネシウムを含む珪酸塩であるセピオライトや 200 °C を超える超高温井用に開発された合成スメクタイトが高温下での熱安定性に優れているため、地熱掘削や超高温井掘削に使用されている。

ポリマー増粘剤としては、ゼンサンガム、高粘度カルボキシメチルセルロース、ポリアニオンック

セルロース、アクリル系ポリマーおよびヒドロキシエチルセルロースなどが挙げられる。ポリマーが水に溶解すると、水和ポリマー分子は相互に衝突、反発運動を行い、相互の絡み合いが起こる。これによってポリマー水溶液は粘性を示す。ポリマー分子が長いほど水和ポリマー相互の作用が大きくなるので粘性は大きくなる。攪拌など、外部から剪断力を加えた時、その剪断力が小さい場合には絡み合いが強いために大きな粘性を示すが、剪断が大きい場合には、絡み合いが弱くなり、その結果、粘性が小さくなる。このような流体はシアニング流体と呼ばれる。最も増粘性に優れ、しかもシアニング性をもったものはザンサンガムである。

### iii) 分散解膠（かいこう）剤

泥水コロイドの主成分であるベントナイトを主体とした粘土粒子がお互いに弱い集団として結合したり、粒子間の牽引力によってお互いに結合したり、それらが集合あるいは凝集すると、粘性、イールドバリューおよびゲルストレングスが上昇する。また、粒子間の牽引力が中和されて、各粒子や粒子の集合体が分散ないし解膠（かいこう）すると、粘性、イールドバリューおよびゲルストレングスは下がる。分散解膠剤とは、粘土粒子間の牽引力を減少させて、粘性、イールドバリュー、ゲルストレングスを下げる機能をもっている物質である。このような機能をもっている物質として数多くの無機物が知られているが、現在最も安定で効果が優れており、一般に使用されている分散解膠剤は、リグニン系物質（リグニンスルホン酸の誘導体）、フミン酸物質（フミン酸の誘導体）およびアクリル系ポリマーである。また、高温用度の分散解膠剤としては、スルホスチレン無水マレイン酸共重合体やフミン酸アクリル酸共重合体誘導体等が挙げられる。

### iv) 脱水調製剤

塩水、セメント、石灰および石膏のような電解質が泥水中に入ると泥水の脱水特性は著しく悪化し、脱水量は多く、泥壁は厚くなる。そうすると、地層の崩壊その他いろいろな障害が起こるため、有機親水コロイド剤（ポリマー類）である脱水調製剤を加えて泥壁形成性を良好にすることが必要である。脱水調製剤としては、①デンプン系、②CMC系、③合成系のものがあるが、CMC系のものが広く使用されている。現在の泥水用 CMC は、温度に対する安定性が大きくかつ汚染に強く、泥壁改良性が優れているように研究製造されたものである。現在では、更に進んで、粘土粒子に対する被膜性および膨潤抑制能力の優れたポリアニオンセルロースが開発され、温度の非常に高い坑井や飽和塩類泥水（塩水泥水、KCl 泥水）、非分散系泥水の主成分として使用されている。また、超高温井には、210～220℃においても安定なビニルアミドとビニルスルホン酸のコポリマーが盛んに使用されている。

### v) 頁岩安定剤

#### (1) アスファルト誘導体

特殊アスファルトをスルホン化して得られるスルホン化アスファルトを主成分としたものが、頁岩層のうちで崩壊を起こし易いマイクロフィッシャーの多い頁岩層をプラグするとともに保護皮膜を作ることによって崩壊防止機能が優れている。また、アスファルト誘導体は高温下における脱水減少力、泥壁強化力が優れているため、掘削井に広く使用されている。

#### (2) アクリル系ポリマー

頁岩表面に吸着して粘稠（ねんちょう）なゼリー状の皮膜を作って、孔隙やフィッシャーをプラグしたりシールして水が頁岩中に浸入するのを遅らせるポリマーは頁岩層保護に非常に効果的である。現在最も頁岩安定化機能が優れているポリマーはアクリル系ポリマーである。その中でも、1000～1200万程度の分子量を持つアクリルアミドとアクリル酸ソーダといったコポリマーが、効果的である。

### vi) 界面活性剤

界面活性剤とは、それが含まれている液体、固体、気体の界面（表面）に吸着して、界面（表面）の性質を著しく変化することができる有機化合物である。

界面活性剤は、水溶液で界面活性を示す部分の性質によって ①陰イオン（アニオン）活性剤、②陽イオン（カチオン）活性剤、③非イオン（ノニオン）活性剤 および ④両性活性剤の4種類に分類されている。分子構造からみると、界面活性剤はすべて共通に極性基（親水性部分）と非極性基の2部分から成りたっており、そして極性基と非極性基の適当なバランスによって界面張力を低下して、種々の物質に対して浸透、湿潤、洗浄、乳化、吸着、起泡、消泡および可溶化などの作用を示すものである。

現在泥水用として使用されている界面活性剤は、①潤滑剤、抑留防止用、②潤滑剤、浸透剤、スポット用。③湿潤潤滑剤、張り付き防止用の3種類で、いずれもアニオン、ノニオンの配合型界面活性剤である。

このほかに、特殊潤滑剤として水溶性潤滑剤があるが、これは環境汚染問題から油-エマルジョンマッドを使用できない海洋掘削などで、油に代わる特殊潤滑剤として使用されている。また、水平坑井や高傾斜坑井の掘削において、特に高潤滑性が求められる場合には、ある種のポリプロピレングリコール誘導体が水溶性潤滑剤とともに用いられる。

#### vii) 逸泥防止剤

逸泥防止剤とは、逸泥層を閉塞するために使用する物質で、古くからいろいろなものを使用しているが決定的なものはない。現在知られている逸泥防止剤は大別すると、①繊維状のもの、②粒状のもの ③フレーク状のもの、④その他であるが、どの防止剤が最も効果的であるかは実際に使用して見なければ判りにくい。一般にはいろいろな形状のものを数種類混合して使用する方法が行なわれている。

表2.1.6 泥水の種類と成分の例

種類	主要成分
ベントナイト泥水	水、ベントナイト、分散解こう剤、CMC、油、潤滑剤、バライト
ソルト系泥水	水、ベントナイト、苛性ソーダ、リグニンスルホン酸誘導体、フミン酸ソーダ デンプン誘導体、ポリアニオニックセルロース、ザンサンガム、ソーダ灰 食塩、油、潤滑剤、バライト
リグニンスルホネート泥水 (例：リグネート泥水)	水、クニゲルVI、リグネート、苛性ソーダ、CMC、テルポリマー、油 アステックスS、潤滑剤、バライト
KCLポリマー泥水	水、テルゲル、塩化カリウム、テルポリマーDX、テルポリマーH/L XCDポリマー、アステックスS、潤滑剤、バライト
KCLリグニンスルホネート泥水 (例：KCLリグネート泥水)	水、テルゲル、塩化カリウム、リグネートK、苛性カリ、テルポリマーH/L XCDポリマー、アステックスS、油、潤滑剤、バライト
NaCl-KCl/ポリマー/PPG泥水	水、テルゲル、塩化カリウム、塩化ナトリウム、テルポリマーDX テルポリマーH/L、ザンビス、クリーンリユープ、苛性ソーダ、バライト
ハイパーゲル/G-500S泥水	水、テルゲル、ハイパーゲル、苛性ソーダ、ホスタドリル、G-500S アステックスS、クリーンリユープ、油、バライト
地熱用泥水 (例：BH泥水)	水、クニゲルGT、テルナイトBH、テルフロー、潤滑剤

#### 1.4.5 泥水の種類と特性

掘削泥水は表2.1.6で示すように今までに数多くの種類が開発されている。泥水は掘削を安全かつ迅速に行なうために使用するものであるから、その選択にあたっては、それぞれの坑井地質条件、坑内状態およびその他の諸条件を総合的に判断して、適切かつ経済的な泥水を選ぶ必要がある。

泥水は大別すると①水をベースとした泥水（水系泥水）、②油をベースとした泥水（油系泥水）、および ③空気、ガスなどの気体を使用する泥水（空気泥水）の3種類に分けられる。現在一般的に使用されている泥水は、水系泥水である。油系泥水は、水系泥水の数倍以上の高コストとなり、特殊な設備を必要とするけれども、特に頁岩の水和・膨潤抑制に優れ、我が国でも良好な成績を収めている。

空気泥水は、掘削する地層圧力より低い泥水柱圧力で掘削を行うアンダーバランス掘削を行う時に用いられる。

以下に主要な泥水系についての概要を述べる。

### i) 水系泥水

#### (1) ベントナイト泥水

ベントナイト泥水とは、清水に対して適量のベントナイトを加えてよく分散させた懸濁液で、必要によりフミン酸ソーダのような分散解膠剤、CMC、潤滑性を与える界面活性剤およびバライトなどを加えた泥水の総称（クレー上問題点の少ない坑井に広く使用されているが、①崩壊防止機能が小さい。②塩水、セメントのような電解質に弱い。③比重をあまり上げられない（大体 1.50 SG 程度）。④温度に対して不安定等適用に限界がある。

#### (2) カルシウム系泥水

カルシウム系泥水とは、カルシウム塩を予め泥水中に加えて粘土粒子を Ca-粘土に変換することによって、粘性およびゲルストレングスを低くするとともに、泥水中に含有されている過剰の Ca イオンによって、地層中から出てくる粘土類の膨潤分散を抑制する泥水である。使用する Ca イオン源により、石灰泥水、石こう泥水、および塩化カルシウム泥水に細分される。カルシウム系泥水は、頁岩の泥化抑制効果が優れている点などベントナイト泥水で得られない特徴を有しているものの、わが国のように Na モンモリロナイト粘土を豊富に含有している頁岩層に対しては、①張り付き等の坑内障害が大きく、崩壊防止に対しても必ずしも満足な結果を与えない。②費用が比較的高い。③電気抵抗値が小さい。④調泥が比較的難しい。⑤アルカリ性が強いいため危険性が高い、などの欠点がある。

#### (3) ソルト系泥水（塩水泥水）

ソルト系泥水とは、一般的には、清水の代わりに塩素イオン濃度 Cl<sup>-</sup>濃度)が 10,000 mg/l 以上の水を使用した泥水の総称であって、海水泥水、塩水泥水および飽和塩水泥水などがある。これらの泥水は、①海洋掘削などで清水の入手が困難か、入手できても運搬、貯蔵その他に費用がかかり、いつでも容易に入手できる海水を使用した方が経済的である場合（海水泥水）。②砂漠または海岸地域で清水がなく、塩分濃度の高い水しか得られない場合（塩水泥水）。③粘質頁岩層の水和、膨潤を抑制するために塩分濃度を 3 % 以上にしたい場合（塩水泥水）。④岩塩層を掘進する場合（飽和塩水泥水）などに使用される。

#### (4) リグノスルホネート泥水

リグノスルホネート泥水は、清水または海水をベースとしたベントナイト泥水に、「リグネート」と呼ばれる分散剤すなわち、リグニンスルホン酸とフミン酸誘導体を加え、pH 値を 9.5~10.5 に調泥した泥水の総称である。このタイプの泥水は、わが国ではリグネート泥水（Lignate mud）と呼ばれている。特長は、①頁岩類の保護皮膜機能が比較的優れている。②流動性や比重のコントロールが容易である。③温度に対する安定性がかなり大きい。④塩水、セメントその他の汚染に対する抵抗力が大きい。⑤泥壁形成性が優れている。⑥作泥、調泥維持が比較的容易などの特徴を持つ。掘進しながらベントナイト泥水から徐々にリグノスルホネート泥水に切り替えることが可能である。そのさい重要なことは、割水と機械によるソリッド分除去を充分に行うと共に良質のベントナイトを添加し泥水特性を良好にしてから、リグネートを添加することである。掘削中のソリッド分が多いまま不用意にリグネートを添加すると、ゲルストレングスや粘性が下降すると同時にイールドバリューも急激に下がり泥水の流動特性等がむしろ悪化する。

#### (5) KCl ポリマー泥水

KCl ポリマー泥水は、粘土類の水和および膨潤を抑制する K イオン源として KCl を使用するととも

に、増粘性やシアシニング性、頁岩や掘り屑の被膜性および脱水特性の優れているザンサンガム、ポリアニオニックセルロース、デンプン誘導体およびアクリル系ポリマーのようなポリマーを使用した非分散系インヒビテッド泥水である。KCl ポリマー泥水は、粘土類の水和、膨潤を抑制機能の優れているKイオンと頁岩の被膜機能の優れているポリマー類を併用することによって、崩壊などの坑内障害を起こし易い頁岩層掘削に対して、現在の水系泥水のうちでは最も優れたインヒビテッド泥水の一つである。しかしながら、著しい崩壊を起こし易いイライト質の破碎性頁岩層に対しては、KCl ポリマー泥水でも解決が困難な場合がある。この場合には泥水比重をあげるとともに、マイクロフィッシャーを閉塞して裸坑壁を保護強化する機能を持つアスファルト誘導体等を併用することが必要になる。また、KCl ポリマー泥水を良好に維持するためには、十分なソリッドコントロールのできることが前提条件であり、また高比重の場合には泥水特性の調整が困難となるため、実際の使用にあたっては、坑井地質条件とともにソリッドの機械的処理についても十分に考慮する必要がある。

#### (6) KCl リグノスルホネート泥水

KCl ポリマー泥水はシアシニング性の大きい優れた非分散系インヒビテッド泥水であるが、最大の欠点は比重が高い場合、あるいは急激に比重を上げたい場合に流動性の維持およびコントロールが非常に困難となることである。このような場合に対処するため、分散剤兼安定剤として KCl 泥水用のリグニンスルホン酸とフミン酸誘導体を使用したものが KCl リグノスルホネート泥水である。この場合には分散系インヒビテッド泥水となり、YV/PV 比は小さく、シアシニング性は失われるが、高比重下における維持コントロールを含めた泥水の安定性は大きい。国内では、高比重を必要とし、かつ頁岩の安定や張り付き等の問題を抱える坑井に対して広く使用されている。

#### (7) NaCl-KCl/ポリマー/PPG 泥水

近年、国内でも水深が 800 m を超える大水深地域での海洋掘削が行われるようになってきた。海外では、水深が 3,000 m にもおよぶ地域での掘削も報告されている。大水深下での掘削における固有の問題としては、低温で、かつガスおよび水が存在する環境下においてガスハイドレートが生成することにある。このガスハイドレートの生成を抑制するために使用されるのが、NaCl-KCl/ポリマー/PPG 泥水である。NaCl-KCl/ポリマー/PPG 泥水は、高濃度の NaCl および KCl を使用したポリマー泥水にポリプロピレングリコール誘導体を併用した泥水であり、ガスハイドレートの生成分解平衡曲線を低温側にシフトさせることによりガスハイドレートの生成を抑制するとともに、低温環境下における安定性、および坑壁の安定性に優れた泥水である。

#### (8) ハイパーゲル/G500S 泥水

5,000 m を超える大深度掘削の場合、掘削する地域によっては坑底温度が 200 °C 以上となる坑井が多々ある。この場合、既存の泥水システムでは、温度による劣化が激しく、ゲル化、脱水特性の悪化およびバライトの沈澱を生じ、著しく泥水の機能が損なわれ、安全な掘削に支障をきたす。このため 250 °C まで安定な水系泥水として開発された超高温泥水システムがハイパーゲル/G500S 泥水である。ハイパーゲル/G500S 泥水は、耐熱温度約 370 °C の合成スメクタイト（増粘剤）と耐熱温度約 250 °C のフミン酸/アクリル酸共重合誘導体（泥水安定剤）を中心とし、これに他の高温用脱水調整剤や潤滑剤を併用したシステムであり、坑底温度が 200 °C を超える国内の深掘井において使用された。

#### (9) 地熱用泥水

地熱開発井においては、深度は浅くとも温度が著しく高くなる。地熱開発井に使用される泥水の最も大きな特徴は、石油、ガス開発井のように高比重泥水や頁岩の抑制効果に優れた泥水は殆どの場合必要でないが、温度が著しく高いために、高温に安定な泥水および調泥剤が要求されることである。

一般的に、地熱開発井用の泥水としては BH 泥水が用いられる。BH 泥水は、①基本コロイド剤としてのベントナイト。②高温安定剤、脱水減少剤、軟弱地層安定剤としてのフミン酸およびカルボン酸誘導体の複合物。③高温分散剤であるポリアクリル酸塩などから構成される泥水である。近年では、より高温となる地熱開発坑井に対応するべく、高温分散剤、高温安定剤、脱水減少剤としてフミン酸/アクリル酸共重合体誘導体が開発され、G500S 泥水として、地熱開発坑井の中でも特に高温となる坑井に使用されている。

## ii) 油系泥水

### (1) オイルベース泥水

オイルベース泥水は、油の中に乳化剤、有機粘土類、塩類、水およびその他多くの調整剤を加えて、泥水としての必要な特性を与えた油中水滴型（油が連続相）の泥水であって、一般的に使用されている水系泥水とは根本的に異なる泥水である。オイルベース泥水には①油 95～98 %、水 2～5 %の真のオイルベース泥水、②油 65～85 %、水 15～35 %のインバーテッドオイル泥水があるが、経済性、粘性調整、塩分濃度の調整および取扱い等の点からインバーテッドオイル泥水が主に使用されている。適切に調整されたオイルベース泥水は、①頁岩の水和を防ぐ機能が著しく大きいので、障害を起こし易い頁岩の掘削に適している。②濾液は全て油であり水分を含まないため、水系泥水によって生産障害を起こし易い生産層の掘削に適している。③高温に対する安定性が非常に大きく、高温地層の掘削に適している。④潤滑性が優れているので抑留の防止に効果的である。などの特徴を有している。しかしながら、掘り屑の洗浄、廃棄、飛散泥水の処理、余剰泥水の処理および多量の油の貯蔵の問題など環境および安全面からみた取扱い上の制約が多い。

### (2) シンセティックベース泥水

オイルベース泥水では、ベースとなる油として軽油もしくはミネラルオイルが使用されているが、これらには毒性をもつ芳香族が含まれている。そのため、使用にあたっては多くの制限がある。そこで、有害な芳香族を有さない合成油等をベースとして開発された泥水が、シンセティックベース泥水である。また、シンセティックベース泥水は生分解するという特徴も有している。使用されているベースの種類としては、エステル、エーテル、ポリアルファオレフィンおよび異性体アルファオレイン等が挙げられる。オイルベース泥水と同等な特徴を有し、かつ毒性が少なく生分解もするシンセティックベース泥水であるが、オイルベース泥水と比較しても著しく高価である。

## iii) 空気泥水

### (1) 空気混合泥水

生産障害の低減、生産性の向上、逸泥の低減あるいは掘進率の向上を目的として、掘削する地層圧力よりも低い泥水柱圧力にし、坑内の見かけ比重（泥水柱圧力）を下げる手法（アンダーバランス掘削）として空気や窒素などの気体を混合した泥水が用いられる場合がある。この気体を混入した泥水を空気混合泥水という。通常、気体と泥水の比率は、必要とされる坑底圧力によって決定されるが、一般的は 10:1～35:1 程度の範囲で使用されることが多い。理想的な空気混合泥水には、地上に達するまでは泥水と気体が均一に混合して分離しないこと、しかし地上に達した後、サクシオンタンクから泥水ポンプに吸い込まれる前には完全に分離することが求められる。このため、空気混合泥水に用いる泥水としては、シアニング性に優れた泥水が有効である。

### (2) フォーム泥水

連続相である水の中に分散相として窒素や空気などの気体が存在し、シェービングクリーム状の安定した泡にさせた泥水がフォーム泥水である。フォーム泥水は、気体（窒素、空気）、水、ポリマー、

および界面活性剤（発泡剤）を主成分としている。フォーム泥水は、坑内洗浄能力に優れており（掘削屑運搬能力が大きい）、砂岩、砂利または礫などの未固結な地層や大坑径においても有効とされている。しかしながら、フォーム泥水は、地表にかわってもフォームが消泡されづらく、このため再循環することができず、フローラインから泥溜に廃棄する必要がある。また炭化水素や多価金属イオンにより界面活性剤の機能が低下するなどの点により、発泡剤や消泡剤などの消耗が大きくなるという欠点も持つ。これら欠点を解決すべく、最近ではフォームのリサイクルシステムも開発され、また炭化水素や多価金属イオンに対する耐性の高い界面活性剤も開発されつつある。

## 1.5 傾斜掘り

様々な理由により目的層直上の位置に坑井設置のための敷地が確保できないため、他の地点から方位・傾斜をコントロールしながら坑井を掘削するものである。最近では、機器の発達によりこの技術を応用して水平掘り、大偏距掘りやマルチラテラル坑掘削が行われるようになっている。

### 1.5.1 傾斜掘りの目的

傾斜掘り、水平掘り、大偏距掘り、マルチラテラル坑掘削はそれぞれ以下に示す目的により行われる。

#### i) 傾斜掘り（図 2.1.18 参照）

- (1) 目的層が山、海、湖、市街地あるいは建造物等の下にあつて、直上で掘削することが不可能の場合。
- (2) 油田、ガス田を開発する場合に、一つの基地あるいは海洋プラットフォームから傾斜掘りした方が経済的な場合。
- (3) 掘削中、ドリルストリングや坑内ツール等の遺留により掘削続行が不可能となりサイドトラックを行う場合。
- (4) 掘進中に坑跡が目的となる地点から逸脱したためこれを矯正する場合。
- (5) 坑井が暴噴を起こし、この坑井を抑圧するために離れた地点から救助井を掘削する場合。

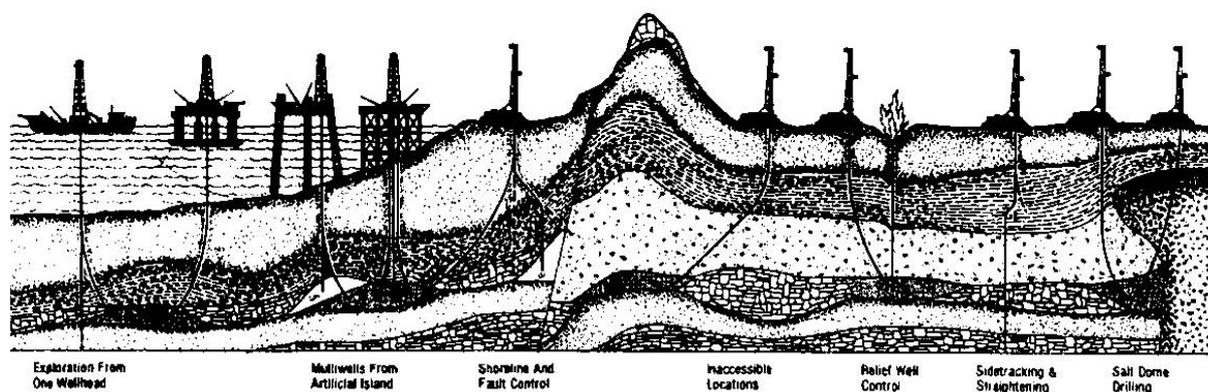


図2.1.18 傾斜掘りの目的

ii) 水平掘り (図 2.1.19 参照)

- (1) ガスあるいは水のコーニング問題を軽減させる場合。
- (2) 排油面積を大きく取り生産性を向上させる場合。
- (3) 垂直井のフラクチャーの存在する生産層を開発する場合。
- (4) 層厚が薄く、浸透性の悪い生産層を開発する場合。
- (5) EOR による掃攻範囲を大きくする場合。

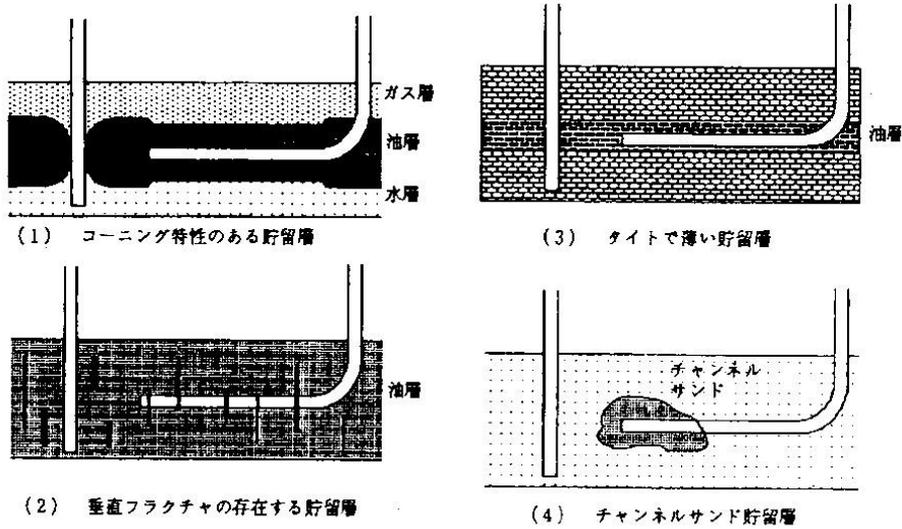


図2.1.19 水平掘りの目的

iii) 大偏距掘り (ERD-Extended Reach Drilling) (図 2.1.20 参照)

- (1) 遠方の海洋等で目的層直上に基地が作れない制限がある場合。
- (2) 単独で開発するには経済性がないため既存の基地を利用して遠方の油・ガス田を開発する場合。

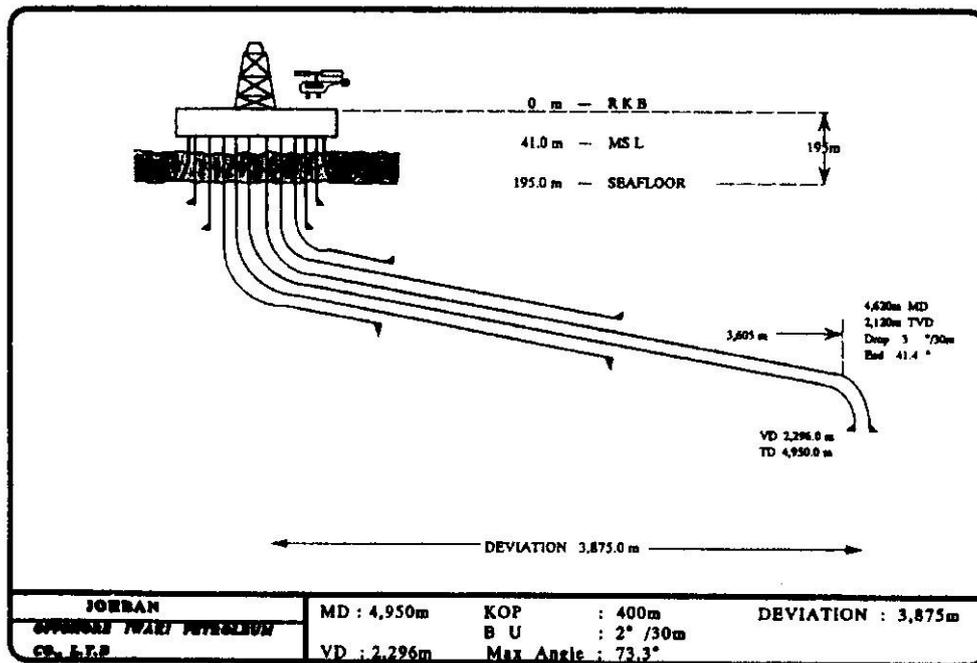


図2.1.20 大偏距掘り概念図

## iv) マルチラテラル坑掘削 (図 2.1.21 参照)

一本の主坑井の途中から1本または複数本の枝坑井を掘削し、複数の油層に同時にアクセスして生産性の向上を図ることを目的とする。

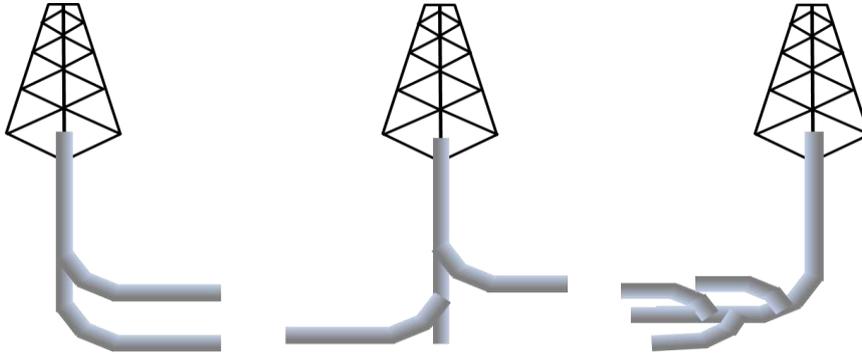


図 2.1.21 マルチラテラル坑井概念図

## 1.5.2 傾斜掘りの種類

傾斜掘り、水平掘り、大偏距掘りの分類あるいは定義を以下に示す。

## i) 傾斜掘り (図 2.1.22 参照)

坑跡の形態から以下の種類に分類される。

- (1) ある深度から傾斜を出し、予定傾斜になったあとはその傾斜を維持し掘削するもの (ビルド・アンド・ホールド)。
- (2) ある深度から傾斜を出し、予定傾斜に達してから坑井傾斜を維持しながら掘削し、その後傾斜を落として掘削するもの (ビルド・アンド・ドロップあるいはS字)。
- (3) ある深度から傾斜を出しそのまま傾斜を出し続けるもの (ビルド・アンド・ビルド)。

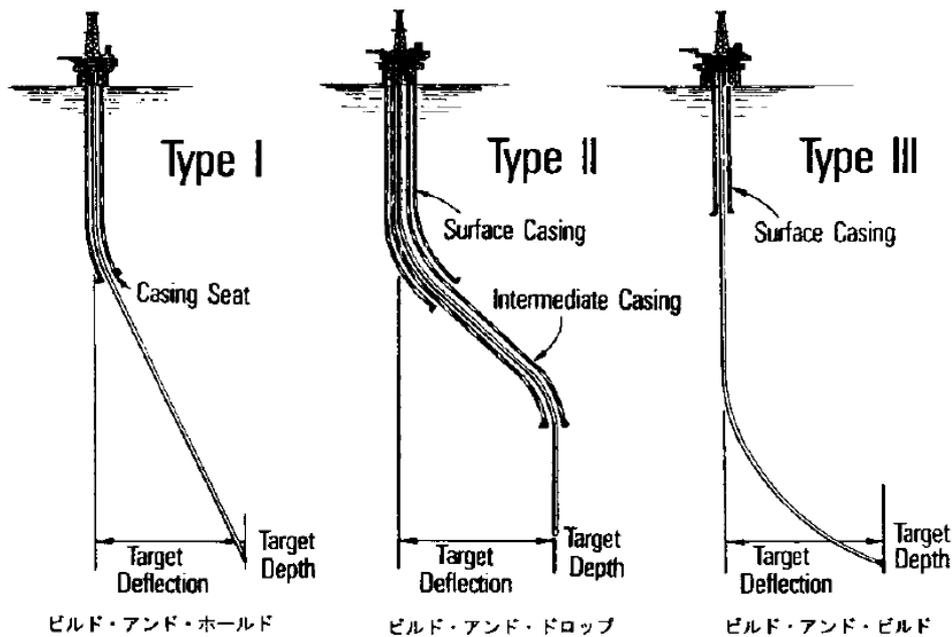


図 2.1.22 傾斜掘りのタイプ

## ii) 水平掘り (図 2.1.22a 参照)

生産層に沿って坑井を掘削するもので、一般に生産層内を  $85^\circ$  以上の傾斜角で掘削される坑井をさす。増角率の大きさによりおよそ以下の3種類に大別される。

- (1) ショートラディアス法: 坑井の曲率半径が短く ( $R: 0.3 \sim 35 \text{ m}$ )、急激な増角率 ( $50^\circ / 30 \text{ m}$  以上) で坑井を曲げるもの。この場合、特殊な坑内機器を用いる。坑跡コントロールが難しく水平坑区間の掘進長さは短い。
- (2) ミディウムラディアス法: 坑井の曲率半径が比較的長く ( $R: 35 \sim 300 \text{ m}$ )、中程度の増角率 ( $7 \sim 50^\circ / 30 \text{ m}$ ) で坑井を曲げるもの。通常の掘削編成で掘削可能であり、多くの坑井がこの方法で行われている。坑跡コントロールも精度よく行える。
- (3) ロングラディアス法: 坑井の曲率半径が長く ( $R: 300 \text{ m}$  以上)、坑井をゆるやかな増角率 ( $7^\circ / 30 \text{ m}$  以下) で曲げるもの。最も方位傾斜コントロールがしやすく、掘削上の障害も少ない方法だが、水平に達するまでに長い偏距をとらなくてはならない。

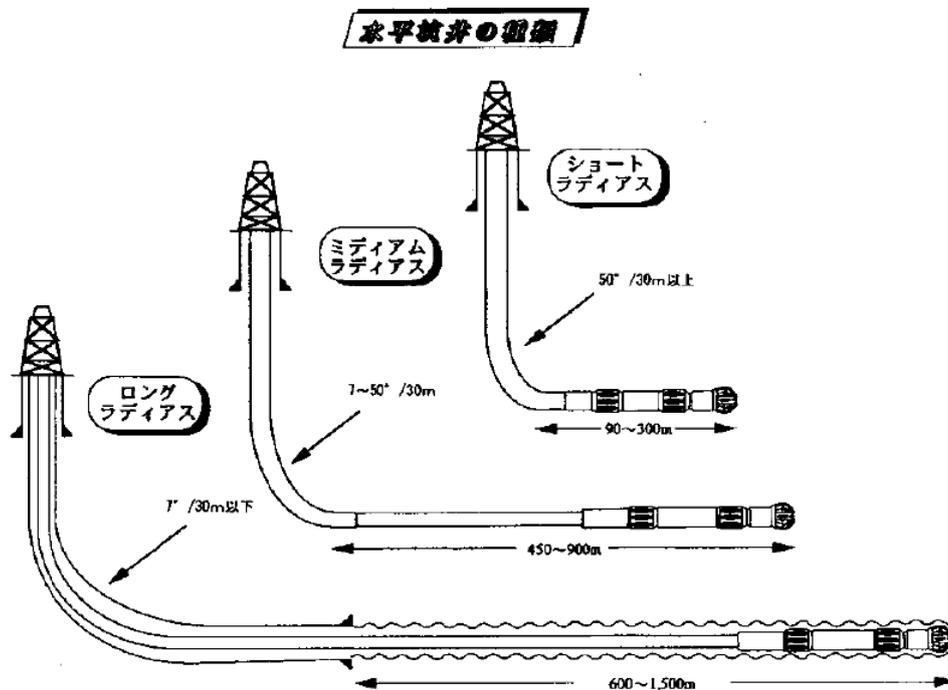


図 2.1.22a 水平掘りの種類

## iii) 大偏距掘り (図 2.1.20 参照)

水平坑井よりはるかに遠方まで掘削する技術である。この坑井の特徴は、目的構造まで長い区間高傾斜を維持して掘削するところにある。一般に水平偏距と垂直深度の比が2以上の坑井と定義されている。

## iv) マルチラテラル坑掘削

主坑井から枝坑井への分岐部をジャンクションとよびその構造はケーシングやセメンチングの有無などの複雑さによって1~6の6つのレベルに分類される。

1.5.3 傾斜掘り方法および使用器具

坑井をキックオフさせるための主要な方式および坑井の方位、傾斜測定器具について述べる。

i) キックオフの方式

(1) バジャービット方式 (図 2.1.23 参照)

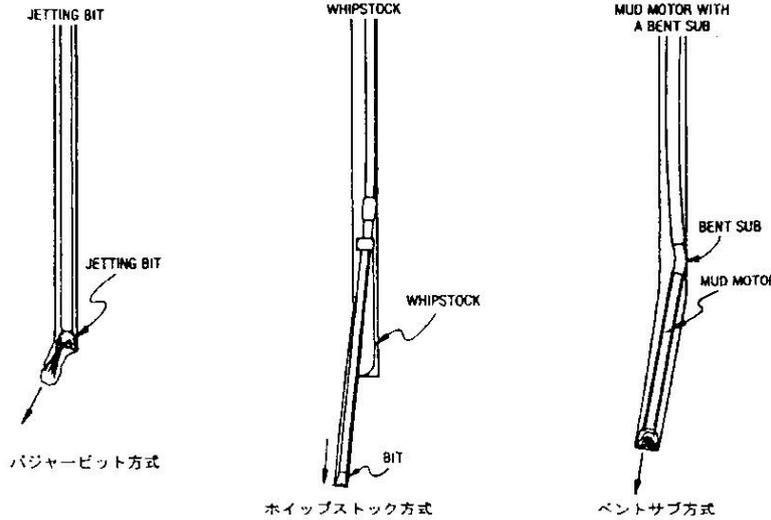


図2.1.23 キックオフの方式 1

ビットノズルのうち1個だけ大きな径のものを使用し、大きな径のノズルの方向に坑底指向してビットを回転させずジェット噴流によりドリルストリングを上下させながらキックオフさせる方式。軟質層で用いられる。

(2) ホイップストック方式 (図 2.1.23 参照)

ドリルパイプ (掘管) 下端にホイップストックを接続して降下し目的方位に坑底指向をしてホイップストックを設置する。その後ホイップストックの曲がりに沿ってビットによりキックオフさせる方式。ホイップストックはキックオフさせるだけの機能なので、キックオフ直後は傾斜角が維持されているかどうか方位、傾斜測定を頻繁に行う必要がある。

(3) ベントサブ方式 (図 2.1.23 参照)

ダウンホールモーターの直上に曲がりの付いたサブ (ベントサブ) を設置する。この編成でドリルストリングを回転させずダウンホールモーターを掘進し、ベントの方向にキックオフさせる方法。

(4) ステアラブルモーター方式 (図 2.1.24 参照)

傾斜掘り専用開発されたもので、本体に角度を調節できる曲がり付いた容積型ダウンホールモーターを使用しキックオフさせる方式。キックオフさせる原理はベントサブ方式と同じであるがより円滑なコントロールができることと、モーターの曲がり角の程度によるが、ドリルストリングを回転させ掘進することもでき、編成替えをせず継続して掘削することも可能なため掘削効率をあげることができる。また、このモーターは、キックオフだけに使用

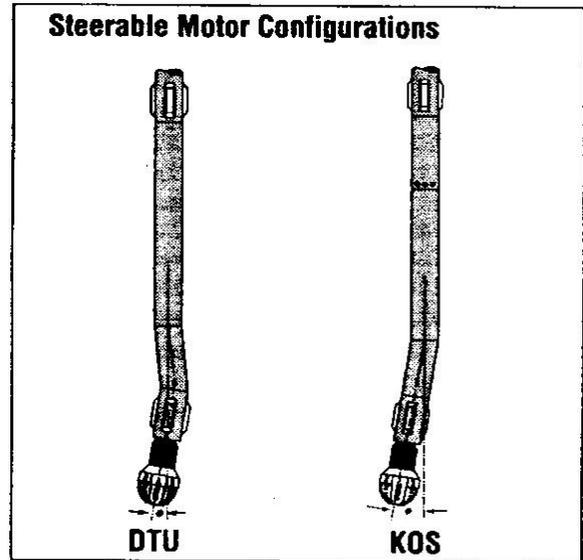


図2.1.24 キックオフの方式 2

するものでなく、通常は、MWD、LWD と併用し、坑跡、地層データをリアルタイムで測定しながら掘進することができる。このため掘削中の地層に変化が起きた場合など、必要な時はいつでも方位傾斜をコントロールすることができるので、近年傾斜掘ではこの方法が一般的になっている。

#### (5) RSS (ロータリー・ステアラブル・システム)

ステアラブルモーター方式では、スライドモードで方位傾斜調整を行い、ロータリーモードで沿角掘進を行う。ロータリー・ステアラブル・システムは、モーターを使用せず常時ストリングを回転させながら方位傾斜調整を行えるシステムである。利点として、よりスムーズな坑跡コントロールが可能、よりビットに近い位置で各種の検層 (MWD・LWD) が実施可能、常にストリングの回転があるためカッピングの除去効率が良い等が挙げられる。メカニズムとしては、坑壁にパッドをプレスして方位傾斜調整を行うプッシュ・ザ・ビット (push-the-bit) 型と、ストリング軸に対してビット角度を変更して方位傾斜調整を行うポイント・ザ・ビット (point-the-bit) 型があるが、両方のメカニズムを採用したものも開発されている。

#### ii) 測定器具

坑井の方位傾斜測定器具は磁石を使用しているため、測定器具は非磁性のドリルカラー、サブ内に設置し測定する。

#### (1) イーストマン (図 2.1.25 および図 2.1.26 参照)

イーストマン社 (現 BHI 社) 製の測定器で、この名で通称されている。この方法は、測定のたび地表から測定器を降下させて測定するシングルショット方式と、ドリルパイプ (掘管) を揚管しながら何箇所も測定することができるマルチショット方式がある。

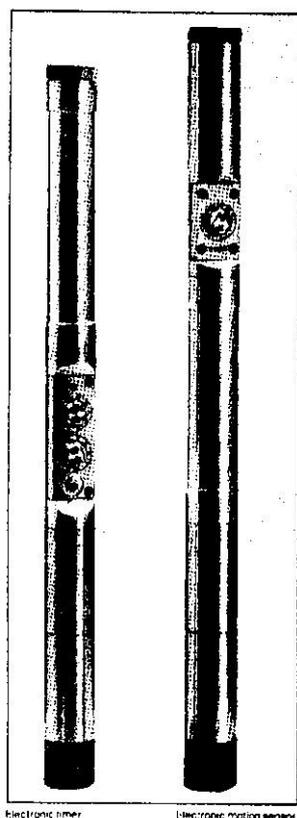


図2.1.25 傾斜測定器

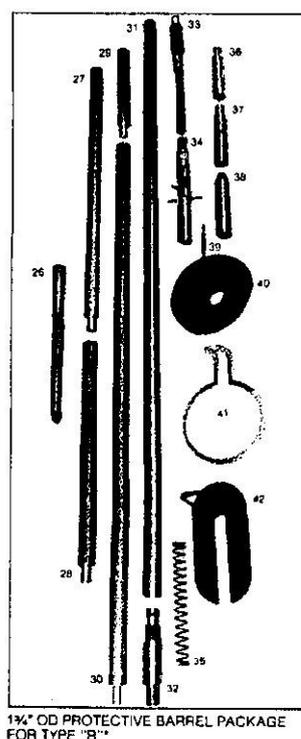


図2.1.26 傾斜測定ツール

傾斜掘りの掘進中は、シングルショット方式による測定結果から坑跡コントロールを行い、マルチショット方式による測定は停掘後の坑跡確認のために行われることが多い。いずれも測定後は測定器を回収し、測定器内で写し出されたフィルムを目視で計測する。またイーストマン測定は垂直井において坑跡確定のため使用されることも多い。

### (2) ワイヤーラインステアリングツール (図 2.1.27 参照)

ダウンホールモーターの直上に地表からワイヤーラインを接続した測定器を設置して測定する。ある程度掘進したのち、掘進を止め測定作業に入る。測定にはワイヤーラインの操作があるため測定時間が掛かる。測定結果はワイヤーラインから電気信号で送られ、測定ハウスおよびデリック下に方位傾斜が表示される。なお、ドリルストリングを回転させない場合のダウンホールモーター掘進中はツールフェイスの向きが常時表示される。

ドリルストリング内にワイヤーラインを降下したまま掘削作業を行うので、特殊サブを使用したり、スイベルを改造するなど作業は複雑になる。

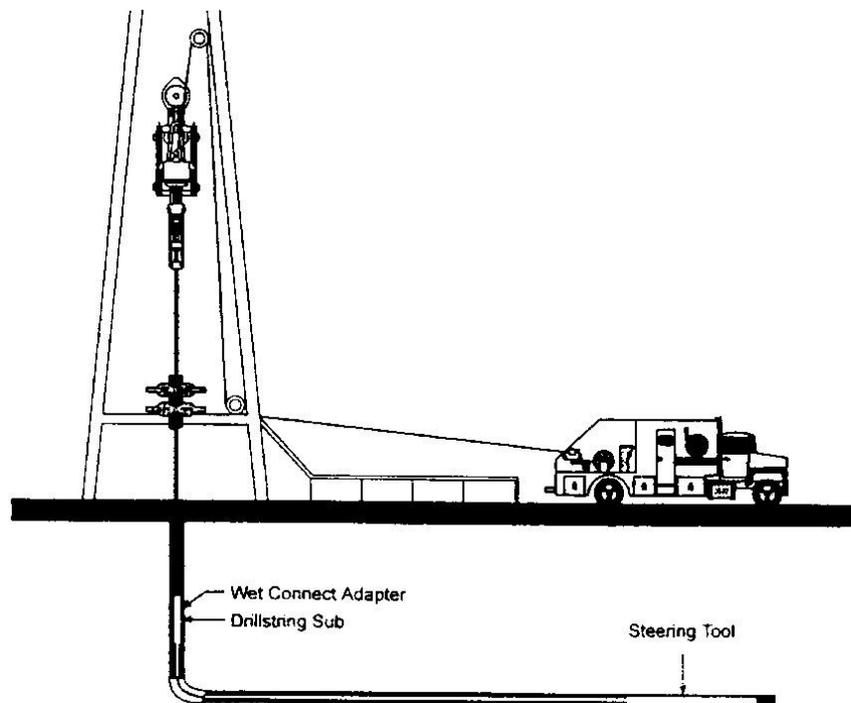


図2.1.27 ワイヤーラインステアリングツール

### (3) MWD (Measurement While Drilling)

ダウンホールモーターの直上に測定器と測定結果伝送装置を設置して測定する。ワイヤーラインステアリングツールとの違いは、測定結果の伝送方法にある。(図 2.1.28 参照) この場合ワイヤーラインは使用しない。測定結果は泥水の圧力変動により伝えられ、地表のセンサーにより受信されて測定ハウスおよびデリック下にツールフェイス、あるいは方位傾斜が表示される。

図 2.1.29 に MWD ツールズの例を示す。ドリルストリングを回転させない場合、ダウンホールモーター掘進中はツールフェイスの向きが常時表示される。方位傾斜はある程度掘進したのち、掘進を止め測定作業に入る。この方式は地表装置も数箇所センサーを取り付けるだけで作業性が良い。測定時間が短くてすみ、抑留等坑内障害の可能性を少なくできる利点がある。ただし逸泥層を掘削する場合、信号がうまく伝わらないことがあるので注意を要する。

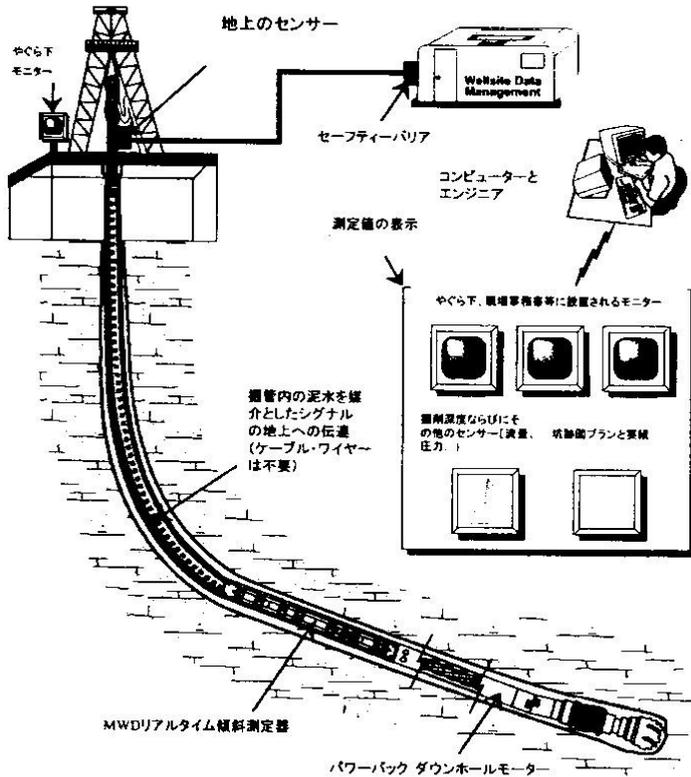


図2.1.28 MWD概念図

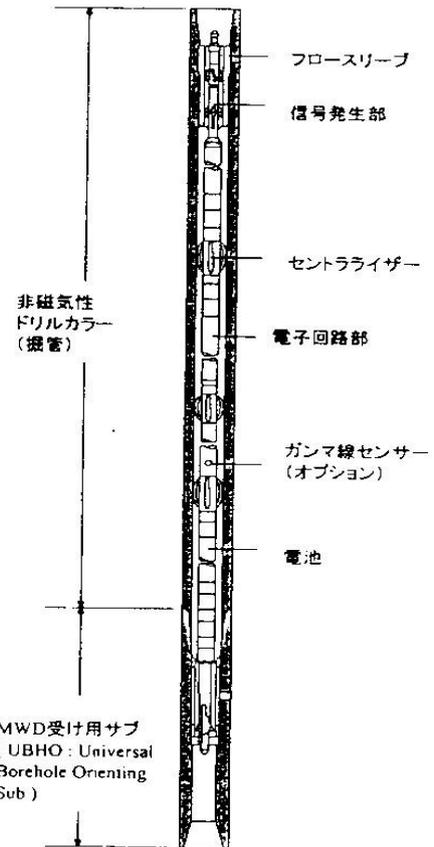


図2.1.29 MWDツール

#### 1.5.4 坑跡コントロールのための編成

キックオフ掘進により目的の方位に向かい、ある程度傾斜角が得られたら、ダウンホールモーターを使用するキックオフ編成から通常の増角編成に切り替えコントロールドリリングに入ることもある。キックオフ編成のまま増角から沿角掘進へと進んでいく場合もあるが、ダウンホールモーター等の傾斜掘り機器を使用しなくとも、掘進編成中のスタビライザーの位置や径を調整することにより傾斜コントロールが可能となる。坑跡コントロールのための最も基本的な増角、沿角、減角編成は以下の通りである。これらの編成は最大傾斜角など個々の条件により細かに調整される。

##### i) 増角編成

ビット+スタビライザー+ドリルカラー (18~27 m) +スタビライザー+必要ドリルカラー

##### ii) 沿角編成

ビット+スタビライザー+ドリルカラー (6~9 m) +スタビライザー+必要ドリルカラー

##### iii) 減角編成

ビット+ドリルカラー (9~18 m) +スタビライザー+必要ドリルカラー

いずれも掘削編成中、可能な限りビットの近くに非磁性カラーを使用し、適時方位傾斜測定を行なう。方位が目的より外れたときは再度矯正し、計画された方位傾斜に戻す。

ここでいうコントロールドリリングとはビット荷重、テーブル回転、掘削編成を調整し、目的の位置に掘り進むことをいう。

## 1.6 チューブラグズおよびドリルストリング

### 1.6.1 チューブラグズ

チューブラグズとは油井、ガス井の掘削および坑井仕上げに必要な坑内に降下挿入するパイプ類をいう。その主たるものはケーシング、チュービングおよびドリルパイプ（掘管）である。OCTG（Oil Country Tubular Goods）とも呼ばれている。

製造の便宜上ケーシングは 20 in. (508 mm) から 4-1/2 in. (114.3 mm) まで、チュービングは 4-1/2 in. (114.3 mm) から 1.05 in. (26.7 mm) という寸法による分類が行われている。一方、石油・ガス生産者等は、たとえば 9-5/8 in. (244.4 mm) チュービングという事例がある如く、寸法による分類は行っていない。チュービングは流体の導通管（flow conduit）、ケーシングは圧力容器（pressure vessel）として機能による分類が行われている。

製造上のケーシングおよびチュービングのグレード（耐力名称）等は表 2.1.7 による。なお、21 in. (533.4 mm) 以上のケーシングはラインパイプないしは JIS 一般溶接構造用材の規格が使われる。

表 2.1.7 ケーシング・チュービングのグレードと強度等

グループ	グレード_タイプ	耐力 ksi (MPa)		引張強さ ksi (MPa) 最小値	硬度 HRC 最大値	熱処理等*
		最小値	最大値			
1	H40	40 (276)	80 (552)	60 (414)		
	J55	55 (379)	80 (552)	75 (517)		
	K55	55 (379)	80 (552)	95 (655)		
	N80-1	80 (552)	110 (758)	100 (689)		
	N80-Q	80 (552)	110 (758)	100 (689)		QT
	R95	95 (655)	110 (758)	105 (724)		QT
2	M65	65 (448)	85 (586)	85 (586)	22	
	L80-1	80 (552)	95 (655)	95 (655)	23	QT
	L80-9Cr	80 (552)	95 (655)	95 (655)	23	QT
	L80-13Cr	80 (552)	95 (655)	95 (655)	23	QT
	C90	90 (621)	105 (724)	100 (689)	25.4	QT
	T95	95 (655)	110 (758)	105 (724)	25.4	QT
	C110	110 (758)	120 (828)	115 (793)	30	QT
3	P110	110 (758)	140 (965)	125 (862)		
4	Q125	125 (862)	150 (1034)	135 (931)		

\* QT：焼入焼戻し

#### i) ケーシング

##### (1) ケーシングの分類

坑井掘削の際、坑壁の崩壊、地層のせり出し、出水、高圧ガス噴出、逸泥等種々のトラブルがよく発生するので、これらを防止して作業が順調に行われるよう坑井にセットする目的と、防噴装置の取付け、坑井仕上げ（採取用）として使用される。これらはその使用目的から次のように分類される。（図 2.1.2 参照）

##### 1) コンダクターケーシング

陸上では主に敷地造成時地表部に設置されるケーシングで、目的は坑井の口元の崩壊を防ぐこと（地表近くは軟らかいため崩れやすい）と、坑井内に送入される泥水が地上までリターンして循環を可能にするための導管として使うことである。コンダクターパイプあるいはストラクチャルケーシングとも呼ばれている。また打込みでセットする場合ドライブパイプと呼んでいる。

##### 2) サーフェスケーシング

サーフェスケーシングは地下水層を保護し、坑井浅部における崩壊層、逸泥層等を遮蔽する目的でセットされる。サーフェスケーシングをセット後、坑口に防噴装置が取付けられる。

### 3) インターミディエイトケーシング

サーフェスケージングセット後、掘り止め予定深度までの中間において、崩壊層、高圧出水層、高圧ガス層等に遭遇したり、裸坑部が長過ぎて以深の掘進が困難になると予想される場合に用いるケーシングである。プロテクティブケーシングとも呼ばれている。

### 4) プロダクションケーシング

坑井仕上げ、即ち原油や天然ガスを採取するため使用されるもので、坑井にセットされる最終ケーシングである。

## (2) ケーシングの製造法

ケーシングは一般に継目なし（シームレス）または電気溶接法（通称 電縫管【でんぼうかん】：ERW）により製作される。

また、低耐力材質のものは圧延のままであるが、高耐力材質のものは圧延後熱処理を施し強度を上げてある。

## (3) ケーシングの寸法と重量

現行呼称外径（in.）であったものが mm 単位、呼称重量（lbs/ft）であったものが質量 kg/m 単位に置換わっている。使用者の便宜を考えて径（in.）と重量（lbs/ft）に各々「ラベル1」と「ラベル2」という項目が与えられた（表 2.1.1 参照）。ISO/API ケーシングのラベル 2 ないし単位質量(Nominal Liner Mass kg/m)は呼称(Nominal)ではあるものの規定の公差の範囲内であり実際の継手（カップリング、ねじ、チュービングにあつてはアプセットおよびインテグラル形状）を含んだ重量（ないし質量）を反映している。

1 本当りの長さには約 6 m (R-1、R:レンジ)、約 9 m (R-2)、約 12 m (R-3) の 3 種類がある。レンジの選択は輸送やリグの条件により異なる。

## (4) ケーシングの継手

パイプの両端に接続用ねじが切られている。このねじはテーパー付きねじであり、カップリングで接続される（T&C: threaded and coupled）。製造上の ISO/API 規格は以下の丸山ねじとバットレスのみとなって今日に至っている。熱の変化あるいは熱や圧力による軸力変動に充分耐えられる特殊継手が、各製造者から供給され、プレミアムコネクションと呼ばれている。

### 1) 丸山ねじ

ねじ山の角度が 60° の丸山ねじで、ねじ長さにより長ねじと短ねじの 2 種類がある。ねじ山数はいずれも 8 山/in. (8 山/25.4 mm) で、小径のパイプには長ねじが多く、外径が大きくなるにつれて短ねじの割合が多くなっている。どちらも耐圧力においては変わらないが、引張強度は長ねじの方が高い。

### 2) バットレス（ねじ）

形状は鋸刃状で、3° と 10° のねじ角度を有する。ねじの長さは丸山長ねじより更に長く、引張強度が高い。バットレスのねじ山数はすべて 5 山/in. (5 山/25.4 mm) である。

丸山ねじあるいはバットレスに代表される ISO/API 継手は一般に高温のガス井には推奨されていないものの、気密性能は 2,500 psi (17 MPa) という値もほぼ受入れられてきた。またプレミアムコネクションと違って、市場で入手しやすく（したがってアクセサリ類も入手しやすく）、高価でもなく、さらにハンドリングも比較的容易という長所がある。ただし次の点に留意する必要がある。

- 耐漏洩性についてはスレッドコンパウンド（ねじグリス）に大きく依存している。したがって熱・経年劣化を含めた同コンパウンドの品質性能と坑井条件を照らし合せ検討する必要がある。
- 締付けが完了すると特にバットレスではボックス側に大きな円周応力が発生する。このことがカ

ップリングの内圧性能を低下させる場合がある。また泥水の劣化など周辺環境によって、高強度鋼ではSSC (sulfide stress cracking) または遅れ破壊を引起す。

- スペシャルクリアランスのカップリングを選んだ場合、耐漏洩性を含めて内圧性能が低下する。

### 3) プレミアムコネクション

高温高圧井、高傾斜あるいは水平坑井の開発、シェールオイルあるいはガスタイト (gas tight) な地域への水圧破碎の適用、これらの頻度が増すにつれ継手への要求仕様が多様かつ高度になってきた。このことが強い動機となり、ここ半世紀の間プレミアムコネクションの開発が続けられ、今もなおそれが続いている。これら継手の特色は以下のとおり。

- アニュラスのクリアランス (余地) を大きく取るためのエクスターナルフラッシュ (もしくは管体外径より少し大き目の継手)
- インターナルフラッシュかつスムーズボア (smooth bore)
- もしくは管体内径より少し小さ目 (内アプセット) でもスムーズボアであること
- カジリ (cross-thread) を抑え、素早い締付けを意図としたねじ形状
- 気密性を向上させる (複数の) メタルツーメタルシール
- ねじり強さを向上させる複数のショルダー
- 軸圧縮耐荷重性能が大きいこと

多くのプレミアムコネクションは上記の特色すべてを備えているわけではない。ユーザーは坑井条件にあわせて以上の幾つかの特色を併せ持った継手を選択する。プレミアムコネクションの性能限界を知るには、有限要素法等の机上計算が有用とはいえ、唯一実機試験をもって性能曲線 (test load envelope) の確証が得られるとされている。一般的な試験項目は温度圧力等の分類が行われたISO 13679 (API 5C5) にて規定されている。それらの典型的な試験要項は以下のとおり ;

- 焼付け傾向 (galling tendencies) を確かめるための締め・戻し (make-and-break) 試験
- 気密性能 (内圧のみ) と水密性能
- 最大の圧力と引張荷重
- 最大の圧力と圧縮荷重
- 最大の圧力と曲げ応力
- 熱サイクル
- アニュラス部から受ける外圧の耐漏洩性
- 最小と最大の締付けトルク
- 継手が破断するまで荷重を与えること

以上の性能試験の結果をまとめたものが多くの製造者から性能データシート (connection geometry and performance property data sheet) として供給されている。これらデータシートは継手が持ちこたえうる様々な組合せ荷重を製造者が規定した文書である。提示されている性能値は、ISO 13679 (API 5C5) で指定された試験手順の結果である場合、ユーザーはそれらの性能値に確証を得ることができる。

### (5) ケーシングの適用

ケーシングを選定する場合は、使用坑井の坑径、深度、坑内状況、使用泥水および採取層流体やその他の地層の流体性質、圧力、量、あるいは坑井仕上げ方法等を良く検討し、これらに適合する寸法、グレードそして継手の組合せより安価なものを選定する。特にこの検討においては、ケーシングの強度を十分考慮することが必要である。その検討項目の主たるものは、

- ① 管体ならびに継手の引張りと圧縮強度
- ② 管体ならびに継手の耐圧力、シール性

### ③ 管体ならびに継手の圧潰強度

等である。また材質選定上、硫化水素や炭酸ガス等の温度を含めた腐食環境の検討も大切である。

#### (6) ケーシングの取扱い

ケーシングは一般に長く、かつ肉薄で、両端に精密ねじが付されているので、保管時、輸送時、操作時の外傷、変形等を防止するため規定の取扱書を遵守する必要がある。保管時、輸送時にはねじ保護のため、ねじグリースとねじプロテクターを必ず付すること、また保管時の積み方にも防食に対する配慮が必要である。P-110等のハイグレード材質のものは脆性破断し易い性質を持っているので、トンダ、スリップその他によるシャープな外傷が深くなるようなハンドリングツール類あるいはサービスクラスの選定が必要となる。また継手はここで全荷重を支え、かつ高圧に耐えねばならないので、規定の取扱書を遵守する。特に規定されたトルクで確実に締付けなければならない。使用ねじグリースも規定のものを正しく使用することが必要である。

#### ii) チュービング

坑井の掘削により油層またはガス層が発見され、生産能力テストの結果、採取井とする決定がされると、プロダクションケーシング内にプロダクションパッカーを付したパイプをセットし、原油や天然ガスを採取する。このパイプが典型的なチュービングである。グレード、製造法はケーシングの規格に準ずる。

##### (1) チュービングの継手

###### 1) アプセット無しチュービングねじ (NUE:Non Upset End)

テーパ付き、山の角度  $60^\circ$  の丸山ねじである。カップリング接続で、ねじ山数はパイプ径により 10 山/in. (パイプ系:1.050~3-1/2 in. (26.7~88.9 mm)) と 8 山/in. (パイプ系:4~4-1/2 in. (101.6~114.3 mm)) の 2 通りある。

###### 2) アプセット付きチュービングねじ (EUE:External Upset End)

管端がアプセット加工されたチュービングのアプセット部分に切られたねじで、テーパ付き、山の角度  $60^\circ$  の丸山ねじである。アプセット無しチュービングねじに比べると、カップリング外径が大きくなる。またねじについては、10 山/in. (10 山/25.4 mm) と 8 山/in. (8 山/25.4 mm) の 2 通りあるが、パイプ外径 2-3/8 in. (60.3 mm) 以上は 8 山/in. と一回り大きいので、ねじの引張強度は NUE よりも強い。

###### 3) インテグラルジョイントチュービングねじ (IJ: Integral Joint)

管体外径が 1.315~2.063 in. (33.4~52.4 mm) の小径チュービングに使用されているねじである。テーパ付き、山の角度  $60^\circ$  の丸山ねじである。接続部の外径はアプセット無しチュービングのカップリング外径よりも小さく、ねじ山数はすべて 10 山/in. である。ねじの引張強度はアプセット無しチュービングねじとアプセット付きチュービングねじの中間的な強さである。

###### 4) プレミアムチュービングコネクション

ケーシングのプレミアムコネクションと同様である。

##### (2) チュービングの適用

チュービングの選定に当たっては、坑井の深度、予定生産レート、圧力、生産流体の成分、仕上げ方法等の検討結果により、パイプ寸法、材質、継手等を決定する。この場合、管体の一般的な強度検討に加えて、継手部のシール性検討や腐食環境を考慮した材質選定を行うことが必要である。この段階で選定されるチュービング径は引続き行われるケーシング設計の基礎となる。

(3) チュービングの取扱い

ケーシングの取扱いと同様である。

iii) ドリルパイプ（掘管）

ドリルパイプ（掘管）は坑井を掘進する場合、掘進動力をビットに伝達する目的とパイプ内部を通して掘削泥水を高圧で循環させる目的に使用される。この目的のため、ドリルパイプ（掘管）には強力な引張り、捩れ、曲がりおよび内圧力が連続的に作用するので十分な強さが要求される。接続は上部がケリーないしトップドライブの IBOP、下部はヘビーウェイトドリルパイプそしてドリルカラーが普通である。

(1) ドリルパイプ（掘管）の形状による分類

ドリルパイプ（掘管）はその管体両端に継手が圧接されており、これをツールジョイントと呼んでいる。その上端がボックスねじ、下端がピンねじである。ドリルパイプ（掘管）は管体のアップセット形状およびツールジョイントの形式により次のように分類される。アップセット形状からの分類では、内アップセット（IU）、外アップセット（EU）、内外アップセット（IEU）の3種類がある。またツールジョイントの分類には、エレベーター受け部の形式による分け方とねじ形状による分け方がある。ねじ形状はシール部として、ドリルカラーと同様、胴付を持つため一般にロータリーショルダーコネクション（rotary shouldered (thread) connection）と呼ばれている。

(2) ドリルパイプ（掘管）のグレードと強度

ドリルパイプ（掘管）の材質種類とその強度は API Spec 5DP（ISO 11961）および DS-1 から下表のように規定されている。

API 5DP 規格のツールジョイントを使用する場合、その規格最小耐力は 120 ksi であって、どのグレードでも継手の形状、外径と内径が同じであれば E-75 グレードであれば、S-135 であれ同じねじり強さとなり、したがって締付けトルクも同様の取扱いとなる。

**表2.1.8 掘管のグレードと引張試験値** (API Spec 5DP および DS-1から)

グレード	耐力 ksi(MPa)		引張強さ ksi(MPa)		熱処理*	備考
	最小	最大	最小	最大		
E-75	75 (517)	105 (724)	100 (689)		N,NT,QT	
X-95	95 (655)	125 (862)	105 (724)		QT	
G-105	105 (724)	135 (931)	115 (793)		QT	
S-135	135 (931)	165(1,138)	145(1,000)		QT	
Z-140	140 (965)	160(1,103)	150(1,034)		QT	NON-API
V-150	150(1,034)	165(1,138)	160(1,103)		QT	NON-API
TJ**	120 (827)	165(1,138)	140 (965)		QT	

\* N: normalized; NT: normalized and tempered; QT: quenched and tempered

\*\* Tool Joint

(3) ドリルパイプ（掘管）の製造法

管体はケーシング・チュービングと同様の工程で製造される。ツールジョイントは鍛造、熱処理、機械加工して製作される。管体とツールジョイントは通常は圧接（Weld-On）され後熱処理の後、ピート切削・検査・出荷となる。

(4) ドリルパイプ（掘管）の寸法と重量

管体の外径（ラベル1）は 2-3/8～6-5/8 in. (60.3～168.3 mm) で、長さは約 6 m (R-1)、約 9 m

(R2)、約 12 m (R-3) の三種類があり、陸上掘削では主として 9 m ものが使用されている。ドリルパイプ (掘管) の呼称重量 (lbs/ft, ラベル 2) はツールジョイントを含めた実際の重量とは異なったまま今日に至っている。したがってケーシング・チュービングとは違いドリルパイプ (掘管) の呼称重量 (ラベル 2) は計算に使用することはできない。実際の重量は管体の内外径、アプセットを含めたツールジョイント形状に応じて細かく異なる。しかしながら、ある程度実情を反映した概算質量 (approx.mass, kg/m) が API 5DP に表記されており、この値が荷重等の概算に有用となっている。

#### (5) ツールジョイント

ツールジョイントはパイプの一端にピン、他端にボックスが配されているが、このボックスのエレベーター受け部 (ショルダー) の形式によりスクエアショルダのものと、18° テーパーショルダの二種類がある。18° テーパーショルダのものは降管時の抵抗が少なく、かつ防噴対策時に管動し易い利点があるので一般に良く使われている。またツールジョイント・ボックス外周には耐摩耗用としてハードフェーシングを施工したものが一般に使用される。

ツールジョイントねじ形状からの分類ではナンバースタイル (NC: numbered connection)、インターナルフラッシュスタイル (IF)、フルホールスタイル (FH)、エクストラホールスタイル (XH) の 4 種類がある。これらはいずれも胴付部を持つロータリーショルダーコネクションで、相互にある程度の互換性がある (表 2-1-9 参照)。

表 2.1.9 ロータリーショルダコネクションと互換性

種別	呼称	同等もしくは互換性有り
Internal flush (IF)	2-3/8IF	NC26, 2-7/8SH
	2-7/8IF	NC31, 3-1/2SH
	3-1/2IF	NC38, 4-1/2SH
	4IF	NC46, 4-1/2XH
	4-1/2IF	NC50, 5XH, 5-1/2DSL
Full hole (FH)	4FH	NC40, 4-1/2DSL
Extra hole (XH) (EH)	2-7/8XH	3-1/2DSL
	3-1/2XH	4SH, 4-1/2EF
	4-1/2XH	NC46, 4IF
	5XH	NC50, 4-1/2IF, 5-1/2DSL
Slimhole (SH)	2-7/8SH	NC26, 2-3/8IF
	3-1/2SH	NC31, 2-7/8IF
	4SH	3-1/2XH, 4-1/2EF
	4-1/2SH	NC38, 3-1/2IF
Double streamline (DSL)	3-1/2DSL	2-7/8XH
	4-1/2DSL	NC40, 4FH
	5-1/2DSL	NC50, 4-1/2IF, 5XH
Numbered connections (NC)	NC26	2-3/8IF, 2-7/8SH
	NC31	2-7/8IF, 3-1/2SH
	NC38	3-1/2IF, 4-1/2SH
	NC40	4FH, 4-1/2DSL
	NC46	4IF, 4-1/2XH
	NC50	4-1/2IF, 5XH, 5-1/2DSL
External flush (EF)	4-1/2EF	3-1/2XH, 4SH

**【例題】**

サービスコントラクター（請負業者）が井戸元で「4-1/2 XH（エクストラホール）」の接続が欲しいと言って来た。さて坑井を担当している貴方はどんなサブ（スチールブッシング）を用意するか？

答え：4 IF（NC46）と接続できるサブを用意する。

また、胴付部を増やし、ねじり強さを大きくしたダブルショルダーツールジョイントが各社で開発され、大偏距坑井等でも使用されている。

ダブルショルダーツールジョイントの長所は以下の通り。

- 高トルク性能
- スムーズなボア
- 気密性の向上

**(6) ドリルパイプ（掘管）の適用**

坑井の深度、坑径、ケーシングプログラム、掘削装置、掘削方式等により使用するドリルパイプ（掘管）の寸法、重量、材質、ツールジョイント等を選定する。

**(7) ドリルパイプ（掘管）の保守および取扱い**

掘削時、ドリルパイプ（掘管）の使い方で、大切なことは常に引張状態で作業をすることである。圧縮状態ではバックリングが生じ、曲りまたは破断する可能性が多いので圧縮状態で使用しないことが原則である。最近では水平掘りのように、ドリルパイプ（掘管）を圧縮状態で使用する例外的な使い方、掘削方法もあるが、基本的にはドリルパイプ（掘管）は常時引張状態で使用され、その他に振り、曲げ等の外力が作用する。管内外傷、摩耗ならびに内面腐食等の把握に努め、いつも規定性能を満足する状態にしておく。ツールジョイントでは外径摩耗、ねじの変形、ねじのクラック、ショルダー部の不良等いろいろ問題になる項目が発生するので、不良個所を修正して規定の能力が発揮出来るようにして置くことが必要である。また掘進中回転する場合は、ツールジョイント外周がケーシング内面を傷付ける恐れがあるので、適当な数のケーシングプロテクターを使用するか、あるいは最初からツールジョイントを低摩擦のハードバンディング仕様とする。取扱いおよび保守については、DS-1, NS-2 あるいは API RP7G-2（ISO 10407-2）にしたがって定期的実施することが推奨されている。

**1.6.2 ドリルシステム（ドリルストリング）**

坑井をビットで掘進する場合、一般的にはロータリー掘削において掘削動力をビットに伝達する中間の機器、即ちケリー、ドリルパイプ（掘管）、ヘビーウェイトドリルパイプそしてドリルカラー（略してカラーとも言う）等をドリルシステムという。

**i) ケリー**

ケリーの上端はスイベルに、下端はドリルパイプ（掘管）に接続されドリルシステムの全荷重を支え、内部に泥水を通すと共に、掘進に必要な回転力を下部のドリルパイプ（掘管）に伝達する作用をなしている。

**(1) 形状および寸法**

ケリーはその断面形状が四角と、六角の2種類がある。通常は上端からアッパーケリーバルブ、スイベルサブを介してスイベルに接続され、その間の継手は左山ねじとなっている。下端からケリーセーバーサブおよび／あるいはロアケリーバルブを介してドリルパイプ（掘管）に接続される。ケリーの

断面寸法、長さ、継手等は ISO 10424-1(API Spec 7-1)に規定されている。全長は四角、六角とも約 12 m のものが標準で、指定品としては 16.2 m のものもある。前者は 9 m ドリルパイプ（掘管）用、後者は 12 m のものに使用される。ケリーの公称寸法は四角ケリーでは四角断面の対面距離寸法で、2-1/4 in. (57.2 mm)、3 in.(76.2 mm)、3-1/2 in.(88.9 mm)、4-1/4 in.(108.0 mm)、5-1/4 in. (133.4 mm) のものがあり、六角ケリーでは断面六角の平行対面距離寸法で、3 in.(76.2 mm)、3-1/2 in. (88.9 mm)、4-1/4 in.(108.0 mm)、5-1/4 in.(133.4 mm)、6 in.(152.4 mm) のものがある。

## ii) ドリルカラー

ビットに回転を与えると同時に荷重を与える役目がドリルカラーである。

### (1) ドリルカラーの形式種類

ドリルカラーの形式は管体形状より分類して次の種類がある。

#### 1) ストレート型

最も一般的に使用されるもので外径は均一になっており、ドリルカラーの昇降管操作はリフティングプラグ等を使用する。

#### 2) リセス型

ドリルカラー外周上部にエレベーター掛けおよびスリップ受け構（リセス）があるもので、操作時吊り管等が不要である。

#### 3) スパイラル型

ドリルカラー外周に大きなピッチのスパイラル溝が全長に亘り付してあるものである。これは掘削時における差圧抑留防止に有効である。

### (2) ドリルカラーの寸法、重量および継手

ドリルカラーの単位重量は表 2.1.10 に示すように、パイプの外径と内径により定まる。外径は 2-7/8 ~12 in.(73.0~304.8 mm)で、長さは約 9 m のものが主体である。継手はロータリーショルダーコネクションが使用されるが、主としてナンバースタイル(NC)、レギュラースタイル (REG)、インターナルフラッシュスタイル (IF)、フルホールスタイル (FH) が使われる。

### (3) ドリルカラーの材質と強度

ドリルカラー外径 3-1/8 in.(79.4 mm)から 6-7/8 in.(174.6 mm)の規格最小耐力は、110 ksi (758 MPa)、7 in.(177.8 mm)から 11 in.(279.4 mm)については 100 ksi (689 MPa)と指定されている。ニッケル基合金やベリリウム銅のような ISO/API 非磁性管については規格最小耐力が同様の値となる（表 2.1.11）。通常使用されるクロムモリブデン鋼のカラーは、ブリネル硬度 285 以上になるよう全長熱処理されている。ドリルカラーはビットに荷重を与える役割もあり、肉厚の管である。このことが肉薄のケーシング等と比べて、均質な焼入れ性を維持することが困難となり、ドリルパイプ（掘管）のツールジョイントと同様、規格最小耐力の頭打ちがある理由となっている。また、これら規格最小耐力から継手のねじり強さを求めることができる。そして推奨締付けトルクは一般的にねじり強さの約 60 %となっている。

ドリルカラーの継手には特別なアプセットが付いているわけでもないことから了解できるように、ドリルシステムで最も弱い箇所となっている。この対策のひとつとして応力集中を減少させるためピン部に図 2.1.30 のようにストレスリリーフグループを、またボックス部にボアバックをねじの切りじまい部に付するのが一般的である。

表 2.1.10 ドリルカラーの寸法と単位重量 (kgf/m)

Size		Size inside diameter (in. & mm)														
outside diameter		1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	2.8125	2.88	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00
(in.)	(mm)	25.40	31.75	38.10	44.45	50.80	57.15	63.50	69.85	71.44	73.03	76.20	82.55	88.90	95.25	101.60
2.875	73.0	28.9	26.7	23.9												
3.000	76.2	31.8	29.6	26.8												
3.125	79.4	34.9	32.6	29.9												
3.250	82.6	38.0	35.8	33.1												
3.500	88.9	44.7	42.5	39.8												
3.750	95.3	52.0	49.7	47.0	43.8											
4.000	101.6	59.7	57.4	54.7	51.5	47.7	43.5									
4.125	104.8	63.7	61.5	58.7	55.5	51.8	47.5									
4.250	108.0	67.9	65.6	62.9	59.7	55.9	51.7									
4.500	114.3	76.6	74.3	71.6	68.4	64.6	60.4									
4.750	120.7	85.8	83.5	80.8	77.6	73.8	69.6	64.9								
5.000	127.0			90.5	87.3	83.5	79.3	74.6	69.4							
5.250	133.4			100.7	97.5	93.7	89.5	84.8	79.6	78.2	76.8	73.8				
5.500	139.7			111.4	108.1	104.4	100.2	95.5	90.2	88.9	87.4	84.5				
5.750	146.1			122.6	119.3	115.6	111.4	106.7	101.4	100.0	98.6	95.7	89.5			
6.000	152.4			134.2	131.0	127.3	123.1	118.3	113.1	111.7	110.3	107.4	101.2	94.5	87.3	
6.250	158.8			146.4	143.2	139.5	135.2	130.5	125.3	123.9	122.5	119.6	113.4	106.7	99.4	
6.375	161.9			152.7	149.5	145.7	141.5	136.8	131.6	130.2	128.8	125.9	119.6	112.9	105.7	
6.500	165.1			159.1	155.9	152.1	147.9	143.2	138.0	136.6	135.2	132.3	126.0	119.3	112.1	
6.625	168.3			165.6	162.4	158.7	154.4	149.7	144.5	143.1	141.7	138.8	132.6	125.9	118.6	
6.750	171.5			172.3	169.1	165.3	161.1	156.4	151.2	149.8	148.4	145.4	139.2	132.5	125.3	117.6
7.000	177.8			186.0	182.7	179.0	174.8	170.0	164.8	163.4	162.0	159.1	152.9	146.2	139.0	131.3
7.250	184.2			200.1	196.9	193.2	188.9	184.2	179.0	177.6	176.2	173.3	167.1	160.3	153.1	145.4
7.500	190.5			214.8	211.6	207.8	203.6	198.9	193.7	192.3	190.9	187.9	181.7	175.0	167.8	160.1
7.750	196.9			230.0	226.7	223.0	218.8	214.0	208.8	207.4	205.0	203.1	196.9	190.2	183.0	175.3
8.000	203.2			245.6	242.4	238.7	234.4	229.7	224.5	223.1	221.7	218.8	212.6	205.8	198.6	190.9
8.250	209.6			261.8	258.5	254.8	250.6	245.9	240.6	239.3	237.9	234.9	228.7	222.0	214.8	207.1
8.500	215.9			278.4	275.2	271.5	267.2	262.5	257.3	255.9	254.5	251.6	245.4	238.7	231.4	223.7
8.750	222.3			295.6	292.4	288.6	284.4	279.7	274.5	273.1	271.7	268.7	262.5	255.8	248.6	240.9
9.000	228.6				310.0	306.3	302.1	297.3	292.1	290.7	289.3	286.4	280.2	273.5	266.3	258.5
9.250	235.0				328.2	324.4	320.2	315.5	310.3	308.9	307.5	304.5	298.3	291.6	284.4	276.7
9.500	241.3				346.8	343.1	338.8	334.1	328.9	327.5	326.1	323.2	317.0	310.3	303.0	295.3
9.750	247.7				365.9	362.2	358.0	353.3	348.0	346.7	345.2	342.3	336.1	329.4	322.2	314.5
10.000	254.0					381.9	377.6	372.9	367.7	366.3	364.9	362.0	355.8	349.0	341.8	334.1
10.500	266.7					422.6	418.4	413.7	408.5	407.1	405.7	402.7	396.5	389.8	382.6	374.9
10.750	273.1					443.8	439.5	434.8	429.6	428.2	426.8	423.9	417.7	410.9	403.7	396.0
11.000	279.4							456.4	451.2	449.8	448.4	445.5	439.3	432.6	425.4	417.7
11.250	285.5							478.6	473.3	472.0	470.5	467.6	461.4	454.7	447.5	439.8
12.000	304.8								547.9	542.7	541.3	539.9	537.0	530.8	524.1	516.8
14.000	355.6									749.5	748.2	746.7	743.8	737.6	730.9	723.7
																716.0

表 2.1.11 ドリルカラーの機械特性

材質	寸法範囲 in.	耐力 ksi (MPa)	引張強さ ksi (MPa)	硬度 HBW
		最小値	最小値	最小値
クロムモリブデン 低合金鋼	3-1/8~6-7/8	110 (758)	140 (965)	285
	7~11	100 (689)	135 (931)	285
ステンレス鋼	3-1/8~6-7/8	110 (758)	120 (828)	-
	7~11	100 (689)	110 (758)	-
ベリリウム銅	3-1/8~6-7/8	110 (758)	140 (965)	-
	7~11	100 (689)	135 (931)	-

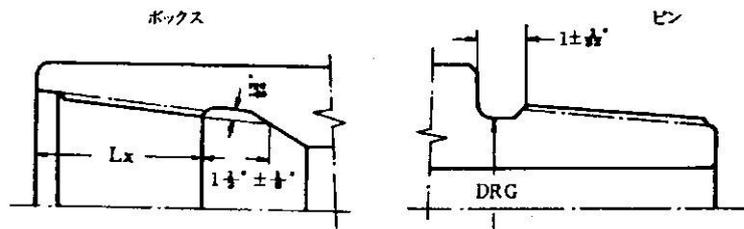


図 2.1.30 ドリルカラーのストレスリリーフグループ

#### (4) ドリルカラーの適用

使用坑井の坑径、ビットの種類、ドリルパイプ（掘管）の種類、垂直井か傾斜井か、ケーシングの設置状況等によりカラーの寸法、形式、継手、本数等を検討して使用する。継手の疲労破断をできるだけ回避するためには、ピンとボックスの剛性比がバランスのとれたものでなければならない。加えて接続部の直線性（内径と外径の一致）を維持することが大切である。

#### (5) ドリルカラーの保守取扱い

ドリルカラーはその作業目的から苛酷な外力、特にバックリング荷重が繰り返して衝撃的に作用するので各部の探傷、摩耗、変形、特に最弱箇所の継手部の探傷、ねじ形、ショルダー部等の検査をドリルパイプ（掘管）同様 DS-1 等にしながら定期的に実施することが推奨されている。そして使用時特に大切なことは継手の締付けトルクである。この値が不適當であれば疲労損傷を加速させてしまう。

#### iii) ノンマグネティックカラー（非磁性カラー）

主として傾斜掘り時、ビット直上またはドリルカラー間に指定された本数を挿入する。通常使用される低合金ドリルカラーはそれ自体強い磁性体のため、地磁気の方位測定を阻害するので、非磁性のカラーが使用される。寸法、継手等の規格は、通常の高合金ドリルカラー同様 API Spec 7-1 (ISO 10424-1) が適用されている。長さは 18 ft (5.5 m)、25 ft (7.6 m)、30 ft (9.1 m) のものが主として使われる。これら挿入する非磁性カラーの組合せ（長さ）は、掘削地域の磁極強度と伏角（磁極の傾斜角）および掘削坑傾斜の磁北ないし磁南からの相対方位によって決められている。

#### iv) その他

ドリルストリングでケリー、ドリルパイプ（掘管）、ドリルカラーについて記したが、これ以外に、ヘビーウェイトドリルパイプが使用されている。これはドリルパイプ（掘管）とドリルカラーの間に相当数挿入して使用されるもので、垂直井においてはドリルカラーからドリルパイプ（掘管）への剛性変化の緩衝機能を持つ。特に傾斜掘りではドリルカラーの代わりに多用され成果を上げている。管体は外径がドリルパイプ（掘管）と同じであるが内径が小さく管肉が厚い。管体上下にはツールジョイントが圧接されており、全長は約 9 m (R-2) が主体である。ツールジョイントはドリルカラーと同じ外径およびロータリーショルダーコネクションを持つ。

またその他にサブ類（スチールブッシング）が使用される。異なる継手のドリルカラー、スタビライザーその他の坑内ツールを接続するためのものである。

以上のヘビーウェイトドリルパイプやサブ類の通常規格もドリルカラー同様 API Spec 7-1 (ISO 10424) の適用を受けている。また検査保守については他のドリルシステム同様 DS-1 等の適用が推奨されている。

### 1.6.3 坑内ツール

坑井を一定の径でよりきれいに掘るために欠くことのできないツールや、トラブル時に威力を発揮するツールがある。以下に代表的なものを紹介する。

#### i) スタビライザー（図 2.1.31 参照）

ドリルカラーの間に適宜挿入されるもので、ビット径と同じか少し径落ちの放射状ブレードを持ち、ボトムホールアセンブリー（坑内編成）を坑井中心部に保持し、ビット回転の軸を固定して坑井掘進の方向を安定させる役割をする。また差圧抑留防止を目的として使用する場合もある。

## ii) リーマー (図 2.1.32 参照)

ビットとドリルカラーの間に取付けられ、ドッグレグやキーシート等の坑井形状を矯正したり、ドリルカラーを坑井中心部に保持してビットの安定をはかり、坑井の曲りを防止するものである。スタビライザーと多少類似した形状で、ブレード部分にビット径と同じか少し径落ちのローラーカッターを持つ。カッターのタイプはビットと同様にツースタイプとインサートタイプがある。

## iii) ジャー (図 2.1.33 参照)

坑井内でドリルストリングが滞留された時、ツール中のマンドレルを急激に伸ばしたり、縮めたりして上下方向に衝撃を与えドリルシステムを自由にするためのツールであり、油圧式とメカニカル式の 2 つのタイプがある。通常は掘進時にボトムホールアセンブリー (掘進編成) の中に組み込んで使用する。

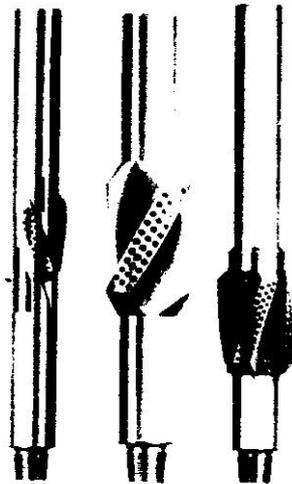


図 2.1.31 スタビライザー



図 2.1.32 リーマー



図 2.1.33 ジャールス

## iv) フィッシングツール (図 2.1.34 参照)

坑井の中は見えない世界であり、順調に掘進できれば幸いであるが、時にはドリルストリングを坑内に遺留する場合がある。その場合には、遺留形状、坑内状況を考え最も適したツールを降下して回収することが必要となる。以下に数種類のフィッシングツールを示す。

- ① オーバーショット
- ② ダイカラー
- ③ スピア
- ④ テーパータップ
- ⑤ 呼び継ぎ管

#### v) ケーシングスクレーパー (図 2.1.35 参照)

ケーシングスクレーパーはビットとドリルカラーの間に使用されるもので、ケーシング内径とほぼ同じ外径の多数の歯（下向き）がついたツールである。掘削された坑井のテストや仕上げあるいは廃坑作業に先立ち坑内に降下し、ケーシング内面からセメントや泥水固着物等の異物を除去するために使用され、仕上げパッカーや廃坑時のブリッジプラグのセットを確実なものにできる。

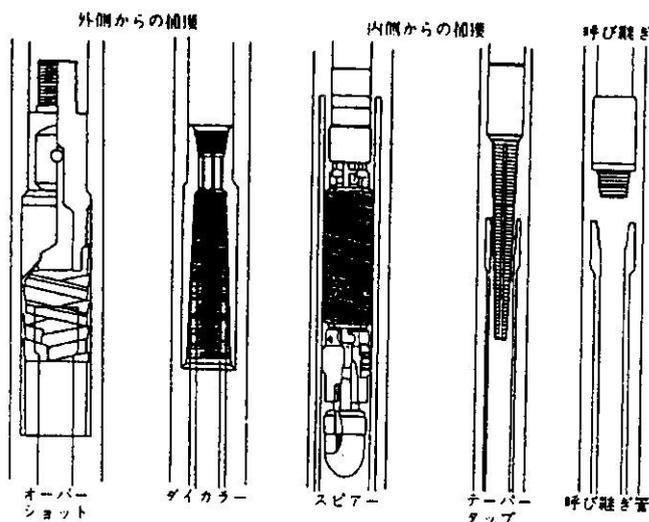


図2.1.34 フィッシングツール



図2.1.35 ケーシングスクレーパー

## 1.7 セメンチング

### 1.7.1 プライマリーセメンチング (図 2.1.36 参照)

掘削した坑井にケーシングを降下し、最初にセメントスラリーを送入し、ケーシング外周を固める作業を一般にプライマリーセメンチングという。通常は坑底から地表までフルケーシングを降下し、セメンチングヘッドを取り付けて行うが、裸坑部を隠すのに必要なだけの長さのケーシング（ライナー）をドリルパイプ（掘管）により降下して行うこともある。

プライマリーセメンチングの主要目的は、

- ① 各地層の流体を遮断する。
- ② ケーシングを支える。
- ③ 地表近くの清水層（地下水層）を保護する。
- ④ ケーシングに加えられる内圧や引張り、圧縮等の負荷に対してケーシング耐力を補強する。
- ⑤ 油やガスを採取する仕上げ層区間において、ケーシングセメンチング部の導通による早期の水生産を防ぐ。

等である。

プライマリーセメンチングには以下に示すように、設置するケーシング（図 2.1.2 参照）の役割によりそれぞれのセメンチング目的がある。

### i) サーフেসケーシング

地表近くの清水層（地下水層）を保護し、坑井浅部の未固結地層の崩壊を防止する。またウェルヘッドおよび噴出防止装置を取り付けるため、噴出圧力に耐える内圧強度とケーシングヘッドにかかる荷重に耐える強度をもたねばならない。セメンチングは地表までセメントを上昇させる。

### ii) インターミディエイトケーシング

掘削深度が深くてサーフェスケージングの後一つの坑径だけで予定深度まで掘削することが困難な場合や、掘削区間は短くても、地層圧力や崩壊性などの地層の特性が著しく異なる地層が連続する場合に設置するケーシングである。セメンチングは 2 段セメンチングで行なわれることが多い。

アニュラーガス対策、あるいは特性の異なる地層を相互に干渉しないように遮断する必要がある場合には 3 段セメンチングを行うこともある。当該ケーシングはプロテクティブケーシングとも呼ばれている。

### iii) プロダクションケーシング

採取井の仕上げに使用されるケーシングであるため生産中に圧潰しないように十分な強度が必要である。また仕上げ層を他の地層から完全に遮断することが最重要で、更に仕上げ層中でも将来アニュラス部の導通による早期の水生産等が発生しないようにセメントの種類および添加剤の選択を的確に行い良好なセメントを充填する必要がある。

## 1.7.2 セメントの特性および添加剤

セメントは水を加え混合することにより水和反応を起こし速やかに、凝結・固化するものである。

### i) セメントの化学組成

セメントは石灰石・粘土・酸化鉄を焼成・粉砕した灰白色の粉末で、水で練ると速やかに凝結・固化するものである。また広義には硬化性を示す無機材料を指す。一般にセメントという場合にはポルトランドセメントをいう。ポルトランドセメントは、JIS では石灰質原料および粘土質原料を適当な割合で十分に混ぜ、その一部が熔融するまで焼成して得たクリンカーに、適量の石膏を加えて粉砕し、粉末にしたものと定義されている。シリカ、ライム、アルミナおよび鉄から生成される。

このセメントは次に示す 4 つの重要なセメント鉱物により構成される。

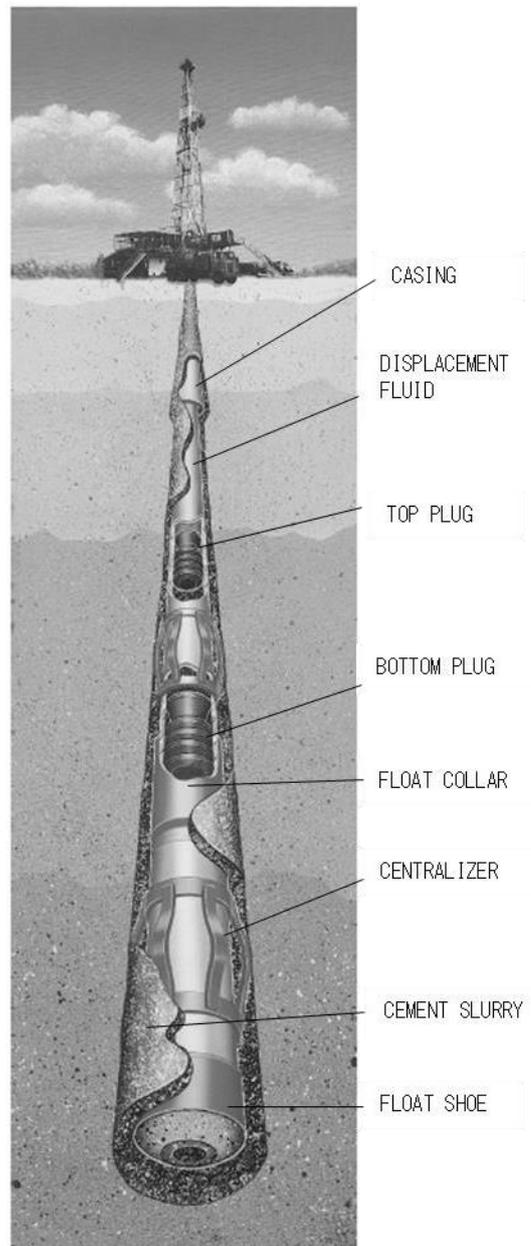


図 2.1.36 セメンチング概念図  
(出典：Halliburton)

(1) 珪酸三カルシウム ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、略記号 C3S)

セメント中に最も多量に存在する成分で、水和反応が比較的早く、早期強度の発現に寄与する。これはシックニングタイムを調節する成分である。

(2) 珪酸二カルシウム ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、略記号 C2S)

水和反応が遅く、長期にわたって強度に寄与する。

(3) アルミン酸三カルシウム ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、略記号 C3A)

水と混合すると急速に水和反応が始まり、水和熱が高くなる。シックニングタイムに影響を与える。

(4) 鉄アルミン酸四カルシウム ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、略記号 C4AF)

水和反応は早い、水和熱が低い。セメントの特性にはほとんど影響を与えない。

## ii) 油井用セメント

油井用セメントは使用目的により何種類ものタイプに分けられるが、普通セメントというポルトランドセメントをさす。ポルトランドセメントの用途は、土木建築などにおける構築物用であり、温度や圧力の影響をほとんど受けない。これに対して油井用セメントは、種々のセメント添加剤を加えて比重、粘性、脱水量、シックニングタイムおよび圧縮強度のような重要特性を、それぞれの坑井条件に適応するように調整して坑内にポンプで送り込む。API では坑井の深度および温度によって使用に適するセメントを分類している。これを表 2.1.12 に示す。

## iii) セメントスラリーの物理的特性

坑井内におけるセメントスラリーの特性は、坑井の温度および圧力に著しく左右される。したがってその坑井に適するセメント組成を計画する際には、そのシックニングタイム、圧縮強度および脱水量に特に重点をおいて、その坑井条件下で室内実験を行ってからセメントスラリー特性を決定する。

以下にセメントスラリーの重要な特性を示す。

## (1) シックニングタイム

シックニングタイムとは送入されたセメントスラリーが、その坑内温度、圧力のもとでポンプ送入可能な流動特性を維持している時間をいう。シックニングタイムは、計画されたセメンチング作業時間に基づいて決められるが、ある程度作業時間の余裕をみて通常およそ 2 時間 30 分から 4 時間がとられる。セメントスラリーの送入中や混合中にやむを得ず、ポンプを中断するか、あるいはセメントスラリーを排出するような場合を考慮して、計画作業時間に対しおよそ 30 分から 1 時間を加算して最終的なシックニングタイムを決めるのが一般的である。

## (2) 圧縮強度

送入されたセメントスラリーはセメンチング作業が終了した後、セメント硬化待機時間（通常 6～24 時間）の間に硬化して、次の掘削作業を続けるのに十分な強度を発現しなければならない。掘削作業を再開するのに必要な最小セメント圧縮強度は API 規格により 500 psi (35 kgf/cm<sup>2</sup>) と規定されているが、より高い強度になることが望ましい。

圧縮強度の発現は、温度および圧力により著しく影響される。特に温度は圧縮強度に強く影響する。温度が高くなるにしたがって強度は高くなるが、温度が 110 °C 以上になると強度の劣化が起こる。このため坑内温度が高い場合は、シリカ等を適当にセメントに混合して、熱劣化による強度低下対策を施した高温用セメントを使用する必要がある。

## (3) 脱水量

脱水とは、送入したセメントスラリーが水和反応により硬化する前に、セメントスラリーから水分の一部が分離することをいう。一般に脱水量が大きいとセメント体積の収縮率が大きく、チャンネリ

ングが発生し易い。このため必要度に応じて添加剤を用い、脱水量を調整することはスラリー計画を立てる上で重要である。

表 2.1.12 油井用セメントの物理的性質

ISO 10426-1:2009(E)

4.1.3 Physical and performance requirements

Well cement shall conform to the respective physical and performance requirements specified in Table 2 and in Clauses 6 through 10.

Table 2 — Summary of physical and performance requirements

Well cement class				A	B	C	D	G	H
Mix water, % mass fraction of cement (Table 5)				46	46	56	38	44	38
Fineness tests (alternative methods) (Clause 6)									
Turbidimeter (specific surface, minimum, m <sup>2</sup> /kg)				150	160	220	NR <sup>a</sup>	NR	NR
Air permeability (specific surface, minimum, m <sup>2</sup> /kg)				280	280	400	NR	NR	NR
Free-fluid content, maximum, percent (Clause 8)				NR	NR	NR	NR	5,9	5,9
Compressive strength test (8 h curing time)	Schedule number (Table 6)	Final curing temperature °C (°F)	Curing pressure MPa (psi)	Minimum compressive strength MPa (psi)					
(Clause 9)	NA <sup>b</sup>	38 (100)	atm.	1,7 (250)	1,4 (200)	2,1 (300)	NR	2,1 (300)	2,1 (300)
(Clause 9)	NA	60 (140)	atm.	NR	NR	NR	NR	10,3 (1 500)	10,3 (1 500)
(Clause 9)	6S	110 (230)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	3,4 (500)	NR	NR
Compressive strength test (24 h curing time)	Schedule number (Table 6)	Final curing temperature °C (°F)	Curing pressure MPa (psi)	Minimum compressive strength MPa (psi)					
(Clause 9)	NA	38 (100)	atm.	12,4 (1 800)	10,3 (1 500)	13,8 (2 000)	NR	NR	NR
(Clause 9)	4S	77 (170)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	6,9 (1 000)	NR	NR
(Clause 9)	6S	110 (230)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	13,8 (2 000)	NR	NR
Thickening-time test	Specification test schedule number (Tables 9 through 11)	Maximum consistency (15 min to 30 min stirring period) B <sub>c</sub> <sup>c</sup>	Thickening time (minimum/maximum) min						
(Clause 10)	4	30	90 <sup>d</sup>	90 <sup>d</sup>	90 <sup>d</sup>	90 <sup>d</sup>	NR	NR	
(Clause 10)	5	30	NR	NR	NR	NR	90 <sup>d</sup>	90 <sup>d</sup>	
(Clause 10)	5	30	NR	NR	NR	NR	120 <sup>e</sup>	120 <sup>e</sup>	
(Clause 10)	6	30	NR	NR	NR	100 <sup>d</sup>	NR	NR	
<sup>a</sup> NR indicates "no requirement". <sup>b</sup> NA indicates "not applicable". <sup>c</sup> Bearden units of consistency, B <sub>c</sub> , obtained on a pressurized consistometer as defined in Clause 10 and calibrated in accordance with the same clause. <sup>d</sup> Minimum thickening time. <sup>e</sup> Maximum thickening time.									

iv) セメント添加剤

セメント添加剤は、セメンチングにおいて、その坑井条件に適合したセメントスラリー特性になるように、スラリーの物理的および化学的特性を調整するために使用する。セメント添加剤の主なる用

途として以下のことが挙げられる。

- ① スラリー比重の調整。
- ② セメント強度の増加。
- ③ セメント硬化時間の調整。
- ④ 脱水量を下げる。
- ⑤ 粘性を下げる。
- ⑥ セメントに伸縮性を持たせる。
- ⑦ 耐久性を強くする。
- ⑧ 逸泥防止のためのブリッジを作る。
- ⑨ セメントの費用を節減する。

などが挙げられる。現在知られている添加剤には表 2. 1. 13 に示すようなものがある。

表2. 1. 13 セメント添加剤の種類

	目 的	成 分
セメント速硬剤	硬化待ち時間の短縮 早期強度の増加	①塩化カルシウム ②塩化ナトリウム（食塩） ③珪酸ソーダ（水ガラス） ④石膏セメント
セメント遅硬剤	シックニングタイムを長くする 凝結を速くする	①リグニンスルホン酸カルシウム ②リグニン ③CMHEC（カルボキシメチルヒドロキシエチルセルロース） ④飽和食塩水
低比重添加剤	セメントスラリーの比重を低くする セメントスラリーのイールドを多くする セメント費用を安くする	①ベントナイト ②中空フライアッシュ ③ギルソナイト ④パーライト ⑤珪藻土 ⑥ケイ酸ナトリウム ⑦アモルファスシリカ
高比重添加剤	セメントスラリーの比重を上げ坑内圧力を抑える	①イルミナイト ②バライト ③砂（40～60メッシュ） ④ヘマタイト
脱水減少剤	水に鋭敏な地層を保護する 早期のデハイドレーションを防ぐ スクイズの成功率を高める	①CMHEC ②ラテックス ③アクリロタイプの共同重合体 ④有機重合体
逸泥防止剤	循環を回復し、フィルアップを良好にする	①ギルソナイト ②粒状のクルミの殻 ③セロファンフレーキ ④パーライト ⑤ファイバー片 ⑥ベントナイト ⑦ベントナイトディーゼルオイル
特殊セメント		①石膏セメント ②樹脂セメント ③ディーゼルオイルセメント ④ポゾランセメント（高温用）
特殊添加剤		①シリカフラワー（高温用）

### 1.7.3 セメンチングの装置および作業

#### i) セメンチング装置

##### (1) セメントバルクブレンド装置

粉末状の添加剤をセメントに混合する装置であり、ベントナイト、バライト、スフェアライト等を均一に混入するのに使用する。空気圧利用方式が便利である。

##### (2) セメントストレージタンク (図 2.1.37 参照)

バルク車、あるいは袋詰めセメントをあらかじめ開封して坑井元に貯えておくための装置である。タンク一基あたり数 100 袋から 1,000 袋以上の大型のものまで作られている。タンクには防湿スライド式、加圧空気式、スクリーコンベア式等がある。セメント粉末の放出には重力落下式、空気圧強制放出方式がある。

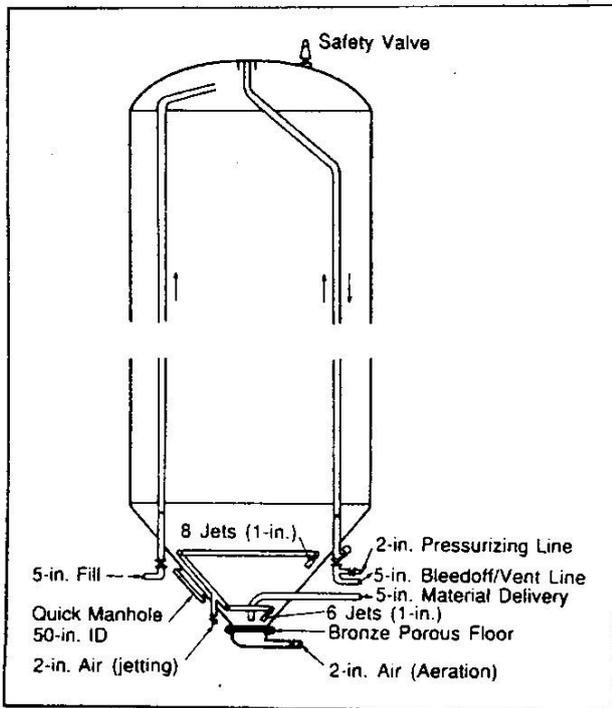


図2.1.37 セメントストレージタンク

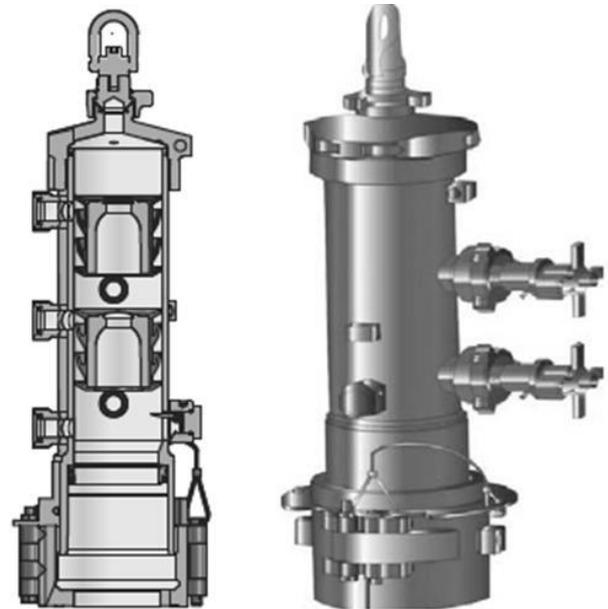


図2.1.38 セメンチングヘッド  
(出典: Halliburton)

##### (3) セメンチングヘッド (図 2.1.38 参照)

プラグコンテナ式が一般に使用されていて、セメンチングプラグ 1 個または 2 個を収納しておくことができる。内部にプラグをあらかじめセットしておくことにより、セメントスラリーとプラグの間に空気が侵入する機会をなくすので、混入された気泡によるセメント硬化中の障害が起こらない。セメントスラリーを均一に管外に上昇させるために、ケーシングを回転させる場合は、セメンチングヘッドスイベルを接続して使用する。

##### (4) セメントジェットミキサー

セメンチングポンプで図 2.1.39 に示されているようにセメントの溶解水を噴射させると、セメントの粉末を一緒に吸込み、先端のバッフル部で水と混合されて均一なセメントスラリーが作られる。セメントの混合速さはおよそ毎分 50 袋まで可能である。セメントスラリーの比重調節はジェットノズルの大きさを変えたり、バイパスバルブを調節したりして行なう。バッフル内のセメントスラリーの比重測定は、自動計測あるいは作業員によって行なわれる。

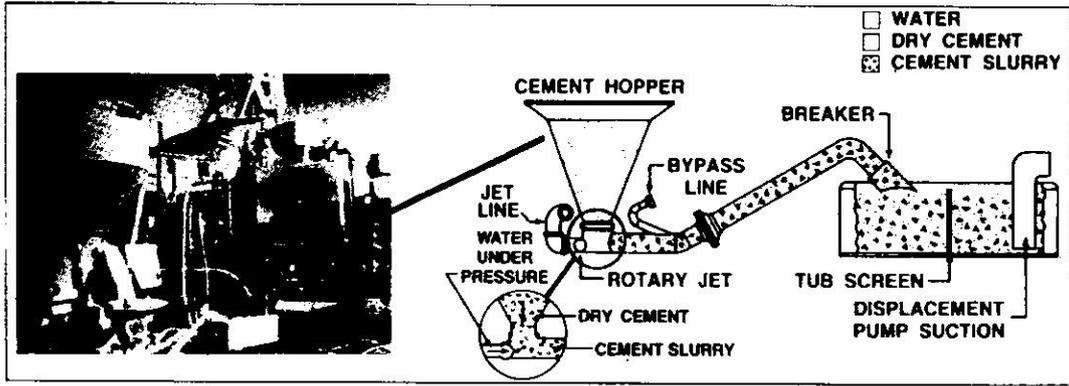
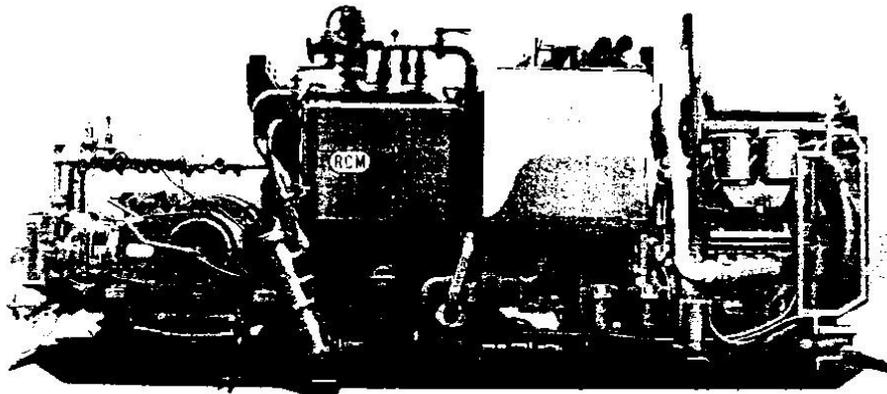


図2.1.39 セメントジェットミキサー

(5) セメンチングポンプ (図 2.1.40 参照)

セメンチングポンプはセメントスラリーを作液し坑内に送り込むポンプである。通常1人のオペレーターによりミキサーとポンプの両方を操作する。セメントスクイズ、ハイドロフラクチャリング等にも使用を兼ねているので高圧のポンプである。最近ではセメントの混合をより良くするためジェットミキサーを使用せず、セメンチングポンプに付随したタンクで攪拌しながら循環し、一括してセメントスラリーを混合した上で送入する方式（リサーキュレーティング・ミキシング・システム）が一般的である。セメントスラリー送入後の後押しは、掘削ポンプで行なう場合が多い。これは吐出容量を多くして、セメントスラリーの管外上昇速度を早くし、セメンチング効果を良くするためである。このためセメンチングヘッドにはセメンチングポンプと泥水ポンプからのそれぞれのラインが接続されている。またセメンチングポンプは、セメンチング中のポンプトラブルに備えて、1台は予備とし2台準備しておくのが普通である。



SKD4/SKE4 Twin HT-400 Modular Compact Cementing Skid with Self-contained Centrifugal Pumps and Recirculating Mixing System

図2.1.40 セメンチングポンプ

(6) ケーシングアクセサリー

1) フロートシューおよびフロートカラー (図 2.1.41 参照)

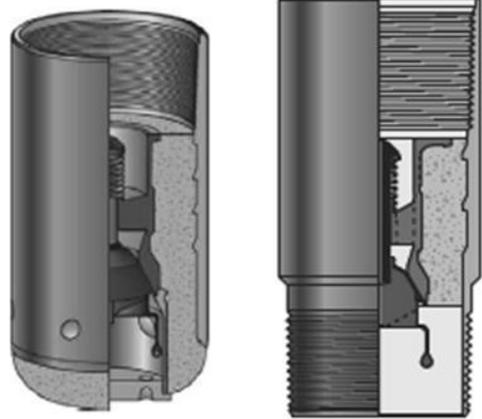
シューにはガイドシューとフロートシュー、オートマチックフィルアップシューがある。これらはケーシングの最先端にねじ込むか、溶接して取り付けられる。フロートシューはガイドシューとフロートを組み合わせたものである。フロートとはバックバルブでありケーシングに浮力をつけさせ、また坑内の泥水の逆流を防ぐ働きをもつ。オートマチックフィルアップシューはケーシングの

内・外の圧力差により泥水が管内に侵入する構造になっている。

フロートカラーはフロートシューの予備のバックバルブとしての役割を持ち、また 2 栓式セメンチングの場合はセメント後押し用のセメンチングプラグをここに止めて後押ししすぎを防ぎ、シュー付近のセメンチングを確実にする。フロートカラーは普通シューから 1 本あるいは 2 本上のケーシングに取り付けられる。

シューから管内セメントトップの 2~3 ジョイント上までは、ケーシング設置後のセメント浚い中や掘進中のねじ戻りを防止するため、特殊接着剤にて固定する。

オートマチックフィルアップ機構を持たないフロートカラーおよびフロートシューを使用した場合は坑内にケーシングを降下中、ケーシング内に泥水が流れ込まないので、圧潰防止のため適宜地表よりケーシング管内に泥水を補給する作業が必要である。



フロートシュー

フロートカラー

図2.1.41 フロートシューおよびフロートカラー (出典: Halliburton)

2) セメンチングプラグ (図 2.1.42 参照)

2 栓式セメンチングでは、第 1 栓 (ボトムプラグ)、第 2 栓 (トッププラグ) を使用し、両プラグの間にセメントスラリーをはさんで坑内に送入する。第 1 栓はフロートカラーに到着すると、プラグにあるダイヤフラムに孔があき、セメントは坑内に送入される。

第 2 栓は後押しの泥水で送入され両プラグ間にあるセメントスラリーを坑内に押し出し、最終的に第 1 栓に到達しポンプ圧力が上昇した時にセメンチングが終了したことになる。プラグはゴムとアルミニウム鋳物等で構成されており、ビットで容易に切削することができる。



Type 5W Top Plug

Designed to reduce channeling of displacement fluid through the cement, also to provide a shut-off on the float collar or guide shoe.



Type 5W Bottom Plug

Wipes the pipe clean and tends to keep the drilling fluid and cement separated.

3) ステージセメンター (図 2.1.43 参照)

2 段 (場合によっては 3 段) セメンチングを行うために使用するケーシングアクセサリーで、所定の深度に位置するようにケーシングと共に取り付け降下される。ステージセメンターのセメンチングポートは、1 段目のセメンチングを終了した後にオープニングプラグを使用して加圧するか、あるいは内圧力を掛けるだけでポートを塞いでいるスリーブが下方にスライドして開放され、循環そしてセメンチングが可能になる。セメントスラリー送入後はクロージングプラグによりセメント後押しを行い、プラグがセメンターに到達後は、このプラグによってもう一つのスリーブをスライドさせることにより再度ポートが塞がれて 2 段目のセメンチングが終了となる。

図2.1.42 セメンチングプラグ

4) セントライザーおよびスクラッチャー

セントライザーおよびスクラッチャーは併用して使用されることがある。

セントライザー（図 2.1.44 参照）の目的はケーシングと坑壁を接触させずケーシングを坑径の中心におき、地層とケーシングの間に確実にセメントスラリーを充填させ、チャンネリングを防止することにある。セントライザーは通常ケーシングカップリングに取り付ける。良く芯を出すために多数のセントライザーを使用したい場合や、カップリング個所を外してセントライザーを取り付けたい場合は、ストップカラーをケーシング管体に取り付け、任意の深度にセントライザーを付すこともできる。

スクラッチャー（図 2.1.45 参照）は泥壁をひっかけ落とし、地層とセメントをしっかりと接触させるために用いられる。ケーシングを回転させながらひっかく方式とケーシングの上下動によりひっかく方式がある。スクラッチャーを使用した場合は坑内状況が許す限り、ケーシングの回転あるいは上下動の操作をセメントスラリーが管外にほとんど送り出されるまで継続するのが望ましい。

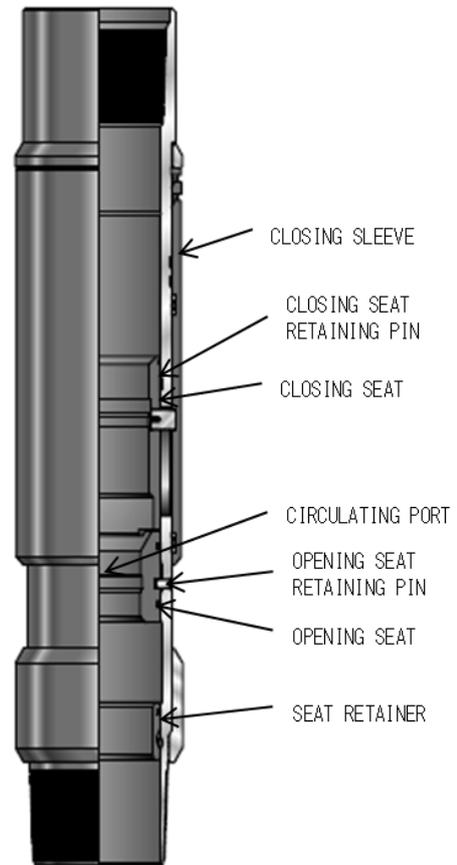


図2.1.43 ステージセメンター  
(出典：Halliburton)

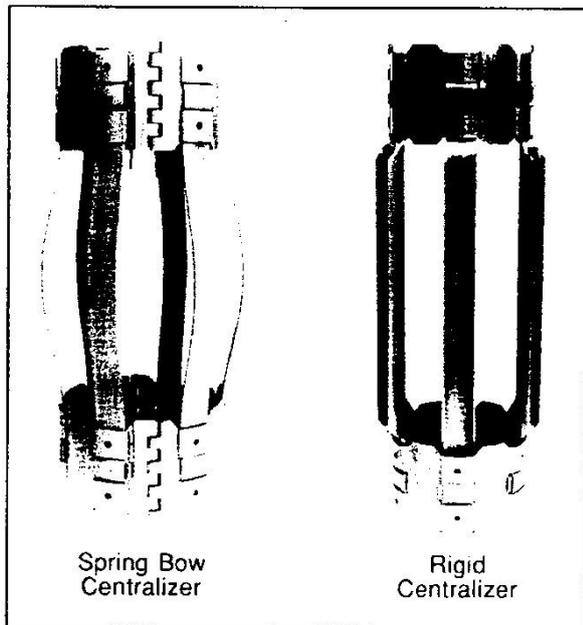


図2.1.44 セントライザー

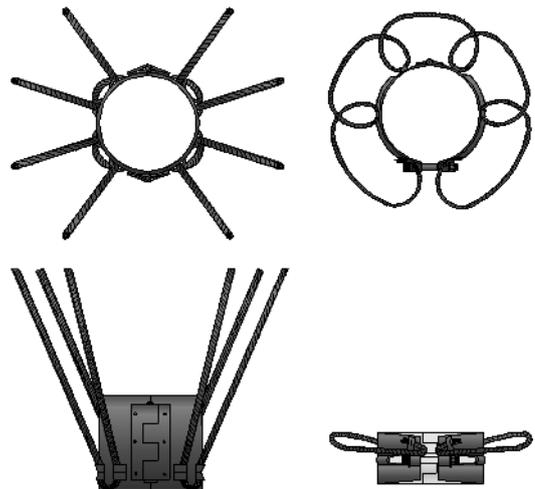


図2.1.45 スクラッチャー  
(出典：Halliburton)

ii) セメンチング作業

プライマリーセメンチングにおいては、ケーシングアニュラスへセメントスラリーを注入するのに、ケーシング内に直接ポンプする通常の方式と、ドリルパイプ（掘管）やチュービングをケーシング内に降下して、フロートカラーやシューにラッチしてポンプする方式（インナーstring方式）がある。またドリルパイプ（掘管）によりライナーを降下してセメンチングを行うライナーセメンチング方式もある。これは上記の二つの方法を組み合わせた方法といえる。

サーフェスケーシングのセメンチングの場合でセメンチング終了後、セメント上昇高さが不足している時には、救済作業として地表からケーシングアニュラスに細いパイプを降げて、アニュラス部にセメントスラリーを充填し、坑口付近をセメントで閉塞し補強することができる（通常トップジョブ（グラウチング）と呼ぶ）。

(1) ケーシング内へ直接ポンプする方式

セメンチングヘッドおよびセメンチングプラグを使用して行う方式である。

一般的な2ステージセメンチングの方式を図 2.1.46 に示す。この図はファーストセメンチング作業において第1栓がフロートカラーに到達し、引続いてセメントスラリーを第2栓を使用して泥水で後押ししている状態を示している。第2栓がフロートカラーに到着すると、ポンプ圧力は急上昇し、この時点でポンプを停止させる。あらかじめプラグ到達の後押し量を計算しておき、到達量付近ではポンプレートを落とす。プラグが到達してポンプ停止したら、ある程度圧力を保持した後、坑口圧力を開放する。この時フロートバルブが効いて、管外に上昇したセメントスラリーが管内に逆流して来ないことを確認しセメンチングは終了する。セメンチング後、セメント硬化待機をする。

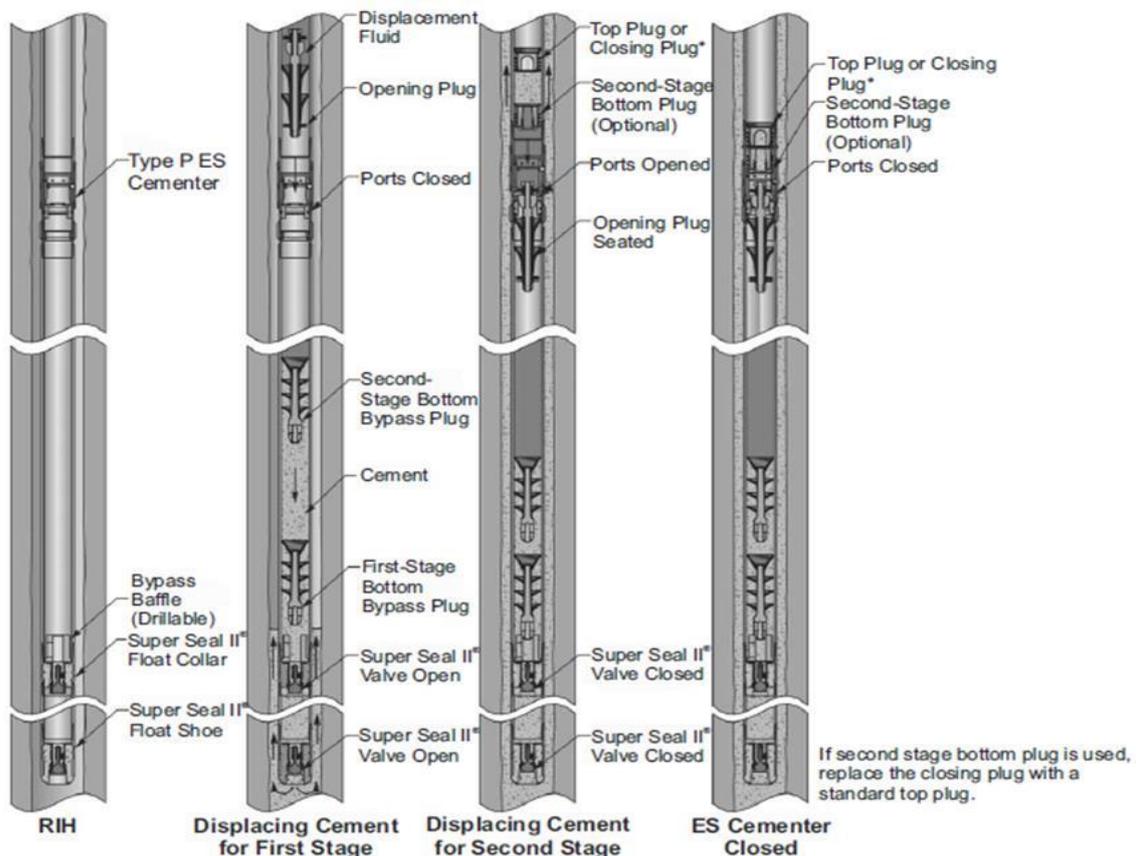


図2.1.46 2ステージセメンチング  
(出典：Halliburton)

(2) ドリルパイプ（掘管）またはチュービングによる方式（インナーstring方式）

この方法は図 2.1.47 に示すように、シーリングアダプターをドリルパイプ（掘管）等の先端に付けて降下し、これをフロートカラーあるいはフロートシューに差し込みパッキングを効かせ、ドリルパイプ（掘管）内にセメントスラリーを送入しセメンチングする方法である。このセメンチング方法は大型ケーシング（主として 20 in. (508.0 mm) 以上）に使用され、通常のケーシング内へ直接ポンプする方式であれば坑内から地表に排出されてしまうセメント量が無駄にならないという利点がある。ケーシング降下後、ドリルパイプ（掘管）をケーシング内に降下する作業時間が加わるが、このセメンチング法は深度の比較的浅い大型ケーシングに使用されるので、その作業時間は短く、シックニングタイムの面からみてもあまり問題とならない。

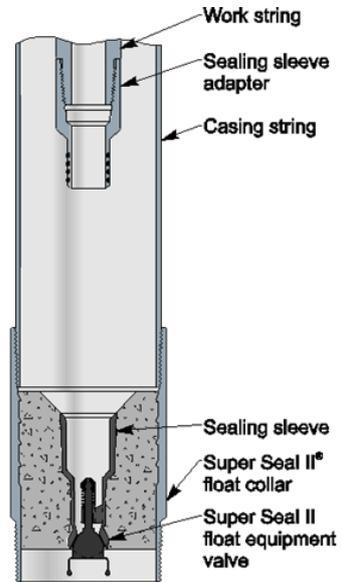


図2.1.47 インナーstringセメンチング (出典：Halliburton)

(3) ライナーセメンチング方式

図 2.1.48 に示すように、ライナーを設置するためのセメンチングをライナーセメンチングという。ライナーはドリルパイプ（掘管）により降下され、この状態でセメンチングを行うので、プライマリーセメンチングの中でも特別なセメンチングに分類される。

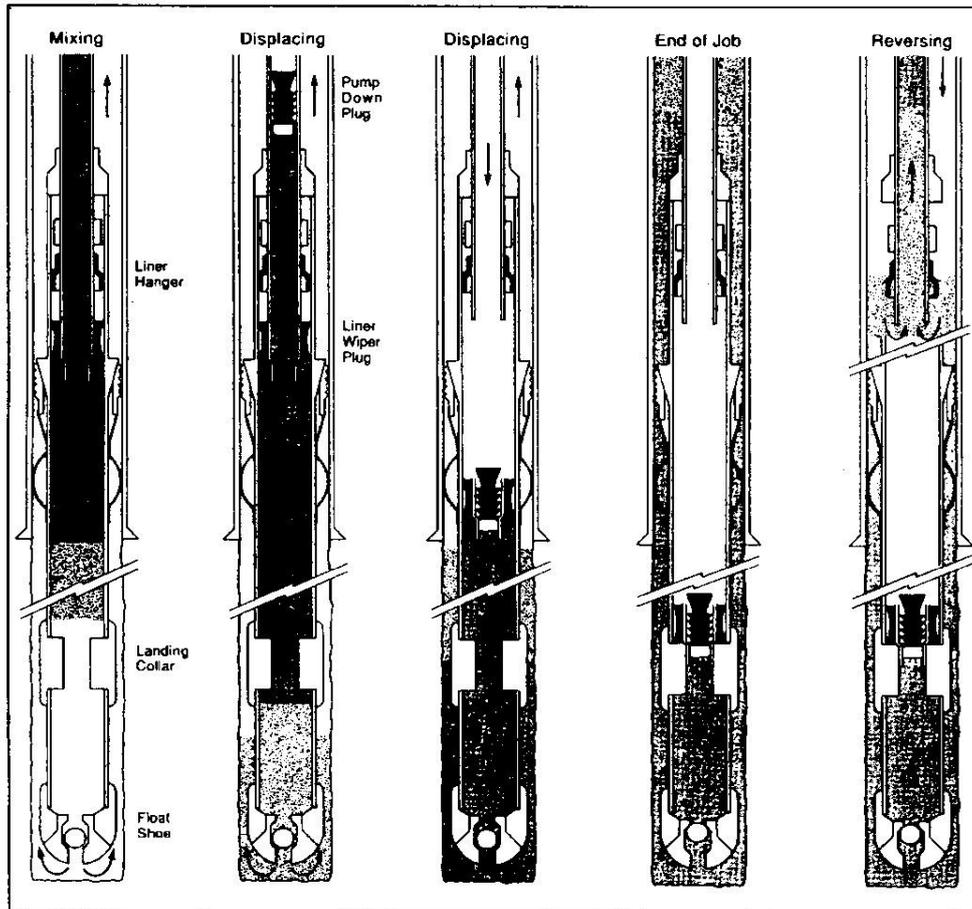


図2.1.48 ライナーセメンチング

通常のライナーセメンチングは、ライナーを降下するために使用されるドリルパイプ（掘管）先端のセッティングツールにワイパープラグが取り付けられた状態で、ライナーが降下される。設置深度に達したら、デリック下のドリルパイプ（掘管）頭部にセメンチングマニホールドを取り付け、セメンチングを行う。あらかじめセメンチングマニホールド内にはポンプダウンプラグを取り付けておき、セメント送入後、ポンプダウンプラグを投下し後押しを行う。このポンプダウンプラグが、ワイパープラグに到達するとポンプダウンプラグとワイパープラグは一体となってセメントを押し行き、これがランディングカラーに到達してセメンチング作業が終了する。

尚、セメンチング終了後は直ちにライナーからドリルパイプ（掘管）をリリースし、逆循環あるいは正循環によりドリルパイプ（掘管）を洗浄する必要がある。

ライナーセメンチングは、1 段セメンチングを行うのが一般的であるが、2 段セメンチングを行うことも可能である。

### iii) セメンチング作業で検討すべき事項

(1) 満足なセメンチング結果を得るには以下のことに留意する必要がある。

- 1) 坑内がきれいであること。
- 2) 坑径に対してケーシングの芯が出ていること。
- 3) 坑内泥水の粘性が低いこと。
- 4) セメントスラリーの比重が目安として泥水より 0.20 SG 程度以上重いこと。
- 5) 坑内泥水をセメントで置換するときの流動パターンがターバレントフローになるようにアンユラー上昇速度が十分速いこと。

等が挙げられる。

(2) セメントスラリーを坑内に送る前に、先行液を十分量送って泥壁を洗い落とし、セメントが泥水分で汚染される割合を減らす。先行液としては清水が使用されることもあるが、泥壁がよく洗浄できるように特別に配合された液体が一般に使用される。

(3) セメンチングプラグは普通第 1 栓（ボトムプラグ）、第 2 栓（トッププラグ）が使用される。第 1 栓を使用しない場合、ケーシングの内壁に泥水の薄い膜が残る可能性が高く、トッププラグ（第 2 栓）によりその泥水分が収集蓄積されることになる。例えば 5-1/2 in. (139.7 mm) ケーシング内壁に 1/64 in. (0.016 mm) 厚さの泥水膜があつてこれを 1,000 m 分集めると約ケーシング 1 本分の体積となる。したがって、ケーシング深度が深い場合フロートカラー付近にはセメントスラリーがないことになり、良好なセメンチングはできない。このため第 1 栓を使用することは重要である。

(4) セメントスラリーと泥水との置換効率を考える場合、セントライザーを適宜使用しケーシングの芯を出すことが最重要である。それと共にセメントスラリーのアンユラー上昇速度が重要である。上昇速度を上げセメントスラリーやスパーサーをターバレントフローにできれば、坑内のポケットにあるジェル化した泥水なども攪拌され置換効率は最適化される。ただし、アンユラスの間隙によってはポンプ圧力の制約等により、そこまで上昇速度を上げることが出来ずラミネーションとなってしまふ。一般に、ラミネーションであっても可能な限り上昇速度を上げることにより、置換効率も良くなるといわれている。また、泥水とセメントスラリーとの間に送る先行液として泥壁洗浄液とスパーサーを使用して、置換効率を高めるとともに、泥水分によるセメントスラリーの汚染を防ぐ方法も用いられる。

(5) セメントスラリーがアンユラス部を上昇する際の坑底圧力上昇により逸泥を起こしたり、セメン

ト硬化時にガスフローが発生することがあるので作業中およびセメント硬化待機時の坑井監視を的確に行う必要がある。

- (6) セメント送入中は、適宜セメントスラリーのサンプルを採取し、セメント硬化待機中の硬化状況を調べる。

#### 1.7.4 リークオフテストおよびセメントボンド検層

##### i) リークオフテスト

ケーシングを設置し、次の掘削に入る前に通常 2~3 m を新たに掘削した後、地層に圧力を掛けてケーシングシュー付近のセメントの効きと地層の耐圧力を調べるものである。これは、次の掘削において、キックコントロールの必要が生じた時に、ケーシングシュー付近がどれだけの圧力まで耐えられるかをあらかじめ把握しておくことであり、キック対策上極めて重要なことである。

##### ii) セメントボンド検層

CBL (Cement Bond Log) /VDL (Variable Density Log) は、音波検層と同様の装置を使用して測定される。音波がケーシングを走行するときの音波の振幅(減衰度)と坑壁からの音波反射時間を測定し、ケーシングおよび坑壁とセメントの膠着状況を調査するものである。

最近では、Ultra Sonic ツールを使用し、周方向のセメントの状態も評価できるようになった。また、この Ultra Sonic ツールは低比重セメントの評価にも対応している。

#### 1.7.5 スクイズセメンチング

スクイズセメンチングは、坑内に一定量のセメントを送り人為的に圧力を掛けセメントスラリーを地層内のポーラス部分に圧入することを言う。スクイズセメンチングは以下のような場合に実施される。

- ① 不完全なプライマリーセメンチング箇所を補修する。
- ② 仕上げ層の上下層からガスあるいは水が浸入するのを遮蔽する。
- ③ 別の層を採取するために、既に採取した生産層を廃止する。
- ④ 採取により水位が上昇し、水が多量に生産されてきた時この水層を遮蔽する。
- ⑤ ケーシングの磨耗あるいは腐食によってケーシングに孔明きが生じた場合これを補修する。

スクイズセメンチングの方法は以下に示す 2 つに分類される。

##### i) ブレーデンヘッド法

ドリルパイプ(掘管)あるいはチュービングを使用してセメント圧入区間にセメントスラリーをスポットし、安全な位置まで揚管した後ブローアウト BOP を閉めて加圧圧入するもの。

##### ii) スクイズパッカー法

スクイズ対象層直上にスクイズパッカーを設置しスクイズセメンチングを行う方法で、より確実にスクイズ対象層にセメントスラリーを圧入できる利点がある。この方法には以下に示す 2 種類がある。

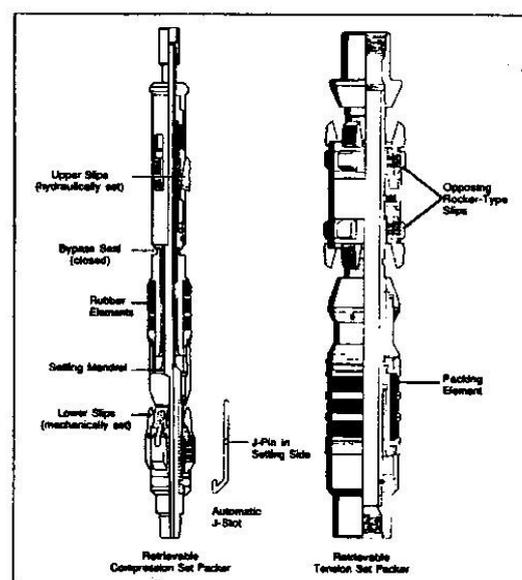


図2.1.49 リトリvableパッカー

## (1) リトリバブルパッカーを使用する方法 (図 2.1.49 参照)

ドリルパイプ (掘管) (あるいはチュービング) 下端に作業後回収可能なスクイズパッカーを接続して、スクイズ対象層直上に降下セットし、セメントスラリーを圧入する方法である。この方法ではスクイズ作業で十分な圧力を掛けた後、パッカーを腰切り、逆循により管内を洗浄する。

## (2) ノンリトリバブルパッカー (セメントリテーナー) を使用する方法 (図 2.1.50 参照)

この方法は、ワイヤーラインかドリルパイプ (掘管) (あるいはチュービング) によりバックバルブ付きのノンリトリバブルパッカーをスクイズ対象層直上にセットし、セメントスラリーを圧入する方法である。(1)の方法と異なる点は、スクイズ作業終了後、ストリングだけを抜き上げ (スティングアウト)、バックバルブによりセメントスラリー圧入圧力を保持させることができるところにある。セメントスラリー圧入後ストリングを抜き上げた後は、逆循によって管内を洗浄する。

この方法はより理想的なコミュニケーションスクイズセメンチングを行うのに適している。パッカーは坑内に放置されるが、材質はドリラブルなもので、後で浚うことができる。

パッカーを使用するいずれの方法も、スクイズ中に圧入圧力がケーシング周囲に達することによりケーシングが圧潰する可能性があるため、圧入圧力の上限を設ける必要がある。またセメントスラリー圧入の方法にはヘジテーションスクイズと呼び、シックニングタイムを長めに調節したセメントスラリーを使用してあらかじめ設定した上限圧力の範囲内で、圧入を繰り返し徐々に保持圧力を上昇させて行く方法も行われる。

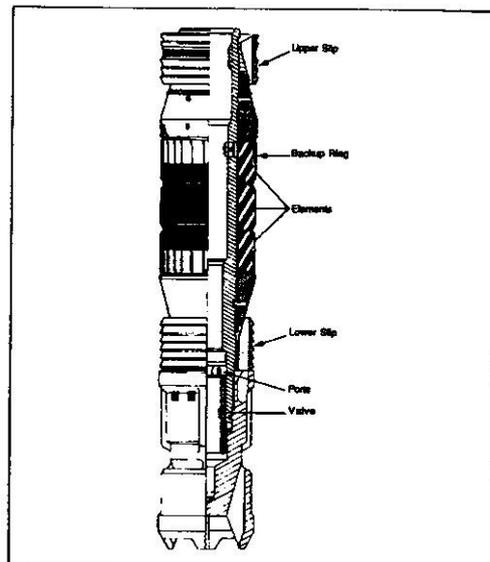


図2.1.50 ノンリトリバブルパッカー

### 1.7.6 プラグバックセメンチング

セメント埋め立てとも呼ばれるが、坑井内にセメントを放置することを言う。この適用例は以下の場合が挙げられる。

- ① 坑井の完全廃坑。
- ② ゾーンアイソレーションを行うための部分廃坑。
- ③ サイドトラックを行うためのセメント台座作りと深部の廃坑。
- ④ 逸泥対策。

一般的にはドリルパイプ (掘管) あるいはチュービングを使用してセメントスラリーを送入するが、少量のセメントを放置する場合には、ダンプベラーを使用してワイヤーラインによりセメントスラリーを放置する方法もある。

## 1.8 掘削上の障害と対策

### 1.8.1 地層の崩壊

崩壊とは、掘削した地層が坑井内に崩れてくる現象で、種々の障害のうち最も困難な問題である。崩壊が起こると①ドリルパイプ (掘管) が抑留される、②逸泥が起こる危険がある、③この回復のために多くの時間と費用がかかる、④予定外のケーシングを入れざるを得ない、⑤甚だしい場合は掘進

ができずその坑井を放棄せざるを得なくなる等いろいろな障害が起こる。崩壊の原因は、地質および地下応力条件、使用泥水の性質、掘削技術等の複雑な要素によると考えられているが、現在まだ完全には解明されてはいない。しかし、崩壊する地層のうち一番障害の大きいのは頁岩である。また崩壊防止の第一の手段は、使用する泥水組成を改善することによって行なわれており、泥水組成と頁岩の安定性とが密接な関係にあることを示している。

崩壊防止の基本的な対策は次のようになる。

- ① 頁岩の安定化機能の優れた泥水を使用する。
- ② 泥水比重は地層圧力とバランスした適正值を維持する。
- ③ 泥壁形成性、粘性その他流動性の優れた泥水を使用する。
- ④ 泥水に湿潤潤滑剤や油を加えて、ドリルカラー、ドリルパイプ（掘管）等のドリルストリングおよび泥壁面を潤滑しておく。
- ⑤ ポンプ速度を遅くして、泥水流動による坑壁の侵食を起こさないようにする。また掘屑を完全に揚げながら掘進する。
- ⑥ 掘進中のドリルストリングの挙動による機械的な衝撃力を小さく抑える。
- ⑦ 揚降管速度を遅くして、地層に対して異常圧力や機械的な衝撃力を与えない。
- ⑧ 崩壊層をできるだけ早く掘り抜いて、早くケーシングセットする。
- ⑨ 傾斜井や水平井の場合、坑壁安定性の検討を行う上で近隣井からのデータによる応力評価も考慮し、掘削方位を決める。

### 1.8.2 抑留（スタック）

抑留とは、坑井内に下げたストリングの一部が何らかの原因により動かなくなる現象である。坑井事故のうちで最も費用のかかるものである。場合によっては大部分のドリルストリングを坑井内に残したままでその坑井を放棄せざるを得ないこともある。抑留の原因としては、①地層の崩壊によるもの、②掘り屑の途中滞留または張り付きによるもの、③地層の膨潤、せり出しによるもの、④キーシートまたはドッグレグのように坑内形状によるもの、⑤差圧によるものなどがある。このうち最も多く起こる抑留は差圧抑留である。キーシートまたはドッグレグのような、いわゆるせり込み型抑留以外のものは十分な泥水対策を講ずることによって、ある程度未然に防止することが可能である。噴出、逸泥を起こさないように泥水管理を完全にするとともに、掘削作業中ドリルストリングの重量、トルクあるいはポンプ圧力の変化等による坑内の異常徴候を早期に発見して、それぞれの状況に対応した適切な対策を速やかに講ずることが必要である。

差圧抑留は、泥水柱圧力と地層圧力との差圧が大きく厚い泥壁ができている浸透性地層壁面にドリルストリングが押しつけられることによって起こるもので、抑留されている力は、数式的に次の式で表わされる。

$$F = (P_m - P_f) \times A \times f$$

F：離脱に要する力 [kgf]

P<sub>m</sub>：泥水柱による圧力 [kgf/cm<sup>2</sup>]

P<sub>f</sub>：地層圧力 [kgf/cm<sup>2</sup>]

A：抑留部分の面積 [cm<sup>2</sup>]

f：ツールズと泥壁間の摩擦係数

差圧抑留の予防対策としては、

- ① 管動、ショートトリップを励行してなるべくドリルストリングを静止させることを避ける。
- ② スタビライザーを使用して泥壁面とドリルカラー等の接触面積を小さくする。
- ③ 泥水比重を適正にして差圧を小さくする。

- ④ 泥壁が薄くて丈夫な性質にし、坑壁面とドリルストリングの接触面積を小さくする。
- ⑤ 潤滑性のよい泥水にして摩擦係数を小さくする。
- ⑥ スパイラルドリルカラーを使用し、ドリルカラーと泥壁面との接触面積を少なくする。

が挙げられる。

抑留された場合は、状況に応じ直ちにドリルストリングの強引、ジャーの作動といった抑留離脱対策を講じなければならない。差圧に原因すると判断される場合は勿論だが、その他の原因による場合でも、ポンプ循環ができる場合には抑留対策用ピルを抑留箇所スポットするのが有効である。抑留対策用ピルとしては、以前は軽油等の油を用いたピルを使用していたが、最近では消防関係手続きや環境面を考慮し、潤滑剤や界面活性剤を用いたピルを使用することが多くなってきた。抑留対策用ピルのスポット実施は、早ければ早いほどその効果が大きい。差圧抑留の場合は、時間が経てば経つほど泥壁は厚くなり、抑留面積が大きくなって離脱が困難となり成功率が悪くなる。抑留対策用ピルのスポットは、抑留したドリルストリングの周囲に潤滑剤や界面活性剤を浸すことにより差圧や摩擦係数を小さくしてドリルストリングを離脱させる方法で、差圧抑留では特に成功率の高い方法である。

### 1.8.3 逸泥

逸泥とは、ポンプ循環している泥水が、地層の低圧層や割れ目などに浸入し正常な循環ができなくなる現象をいう。逸泥は非常に費用がかかり、作業的にもかなりの労力を要する問題である。古くからいろいろな逸泥防止対策が行なわれているが、現在までのところ絶対的な解決策というものはない。逸泥の原因を大別すると地層固有の原因によるものおよび人為的な原因によるものの2つがある。

逸泥層のタイプとしては浸透性のもの、断層や割れ目のあるもの、空洞地層などがある。また、人為的な原因には急速な降管に伴う高圧力の負荷によって人工的な亀裂が発生することがある。

逸泥の状態、その程度を大別すると①少量逸泥するが循環できる（小逸泥）、②少量循環するが大部分逸泥する（中逸泥）、③完全に循環されない（大逸泥）の3つに別けられる。このうち最も危険なのは大逸泥の場合と、高比重で掘進中に急激に逸泥が起こった場合であり、このような場合には噴出、崩壊、抑留のような坑内障害を併発することが多い。逸泥を予防する基本は、地層に対して異常に大きな圧力を与えないことである。そのためには適正なケーシングプログラムを立て、適正比重の維持、低粘性、低イールドバリュウ、低ゲルストレングスの維持、降管速度に細心の注意をはらうことであるが、いったん逸泥が起こったら逸泥層の正確な位置、逸泥の原因、その程度などをできるだけ早く判断して、適切な対策を講じなければならない。しかし、逸泥はいろいろな作業条件下で起こるものであり、その複雑さから実際には逸泥層の位置、原因を正確に知ることは困難なことが多い。したがって適切な対策といっても絶対的な方法というものはないが、一般的な基本対策としては、

- ① ポンプを止めて一定時間坑井内を休ませる。
- ② 泥水比重を下げる。
- ③ 逸泥防止剤を泥水全体に加える。
- ④ 逸泥防止剤を多量に加えた泥水（LCM マッド）を坑井内に放置する。
- ⑤ セメントフラッシュあるいはスクイズを行う。

などが挙げられる。逸泥が少ない場合には①～③の方法で、中あるいは大逸泥の場合は④～⑤の方法を行う。これらの方法を何回も反復実施してようやく解決できる場合もある。

また、減退した生産層を掘削する場合など、通常的安全に掘削するための泥水比重を使用していたのでは逸泥を起こしてしまうケースもある。Rotating Control Device とチョークを用い密閉した循環システムを形成することにより、付替え時など循環を止めて背圧がなくなった状態でもアニュラスに加圧が出来るため、地層圧とほぼ同じの泥水比重を使用しても安全に掘削が出来るようになる。これ

は、MPD (Managed Pressure Drilling) の一つの手法である。

#### 1.8.4 噴出（キック）

噴出とは地下に存在する油、ガス、水などの流体圧力が泥水柱圧に勝り、これらの地層流体が坑井内に浸入する現象をいう。噴出の原因としては、①揚管時に適切なる補泥を怠った場合の泥水柱圧減少、②揚管時のスワッピングアクションによる圧力低下、③逸泥して水頭が低下した場合の泥水柱圧減少、④掘進中、突然不測の高圧層に遭遇した場合などである。噴出を地表で抑圧することができなくなった状況を暴噴（ブローアウト）と呼び、この状況になると人員、掘削機器および環境に多大な被害をおよぼすので、常日頃から噴出防止対策および抑圧のための訓練を行わなくてはならない。

噴出は一般には掘進中突然起こるよりも、むしろ揚管中または揚管直後に起こることが多い。この原因の多くは適切なる補泥を怠ったことおよびスワッピングアクションによって泥水柱圧が低下したことなどによる。したがって、噴出はドリラーの注意によって大部分は初期のうちに予防することができるものである。

掘削中、特に高浸透性砂岩のような高圧層に掘り込んだ場合、第一に大切なことは、噴出の徴候を早期に発見して手早く適切な対策を講ずることである。噴出の徴候は、①ピットレベルの増加、②ポンプ圧力の低下、③荷重の低下、④掘進率の増加（ドリリングブレイク）、⑤泥水比重の低下、⑥ガスショーイングの変化などが挙げられるので、常日頃これらの変化に対し細心の注意を払い、噴出の早期発見に努めることが重要である。これらの徴候のうちいずれかが起こった場合には噴出の危険信号を示すものであり、直ちに掘進およびポンプを止め坑内状況を監視し、明らかに地層流体が坑内に浸入して来ていると判断された場合には、直ちに防噴装置を密閉して管内圧力、ケーシング圧力およびピット増加量を確認・記録し、引続き地層圧力とバランスする適正比重を決定し、所定の抑圧作業に入る。

噴出に対しては、噴出および抑圧時に冷静かつ適切な対策を講ずるため、定期的にこれらに対する教育・訓練を行うとともに、防噴装置は常時点検整備しておくことが非常に重要である。

### 1.9 噴出防止

抑圧できなくなるほどの噴出は、安全作業の喪失、環境の破壊、経済的損失等につながるため、平常より十分に防止対策を立てておくべきである。もし噴出が起きたときはすぐさま防噴装置を閉め、冷静に状況を把握し、抑圧手順を決め円滑に作業を進める。また、噴出を未然に防ぐ作業は非効率、不経済と思われ易いが、一度起きた場合に経済的、時間的なロスが極めて大きいことを認識し、日頃から安全性の高い作業を行う。

#### 1.9.1 噴出の原因

- ① 揚管中に適切な補泥を怠った場合。
- ② 揚管中のスワッピングアクションにより泥柱圧力が低下した場合。
- ③ 逸泥して泥水ヘッドが低下した場合。
- ④ 掘進中突然不測の高圧層に遭遇した場合。
- ⑤ 傾斜掘りで隣接の採取井に掘り込んだ場合。
- ⑥ ドリルシステムテストおよび（仮）廃坑中に噴出防止のための正しい処置を行わなかった場合。

#### 1.9.2 噴出の察知と初期の対策

噴出は初期の微量噴出を早期に発見し、ただちに適切な処置を行えば、大惨事になる前にほとんど

未然に防ぐことができる。いったん噴出が起これしまうと抑圧作業は困難を極め、その他の坑内問題を併発することが多い。

#### i) 掘進中の場合

急激な掘進率の増加（ビット荷重の低下）、ポンプ圧力の低下、泥水比重の低下、ガス・ウォーターカット状況の発生、塩分の増加、ピットレベルの増加等の現象が現われる。

#### ii) 揚管の場合

全揚管前にショートトリップを実施し、揚管の途中溢泥テストを行う。揚管スピードはスワッピングアクションを起こさせない速さで実施する。補泥量が計算通りになっているかを常にチェックし、もし溢泥してくるならインサイド BOP を接続し、BOP を閉める。

#### iii) 逸泥による場合

逸泥すれば液面が下り、泥水柱圧が低下する。このとき地層圧より低下すれば噴出が起こることがある。逸泥が起こった場合は、ただちに掘進およびポンプを止め、坑内状況を監視する。逸泥量が多ければ補泥し、引き続き坑内状況を監視する。

#### iv) 仕上げ作業中の場合

既に仕上げ対象層が坑内に露出しているのでケーシング降下、管内セメント浚い、ガンパー作業、チュービング降下等の作業中に坑内の圧力バランスが崩れると噴出が起こる場合もある。

### 1.9.3 抑圧作業

#### i) 日常の噴出防止対策（諸準備・訓練）

- (1) ブローアウトプリベンター（BOP）の機能テスト。
- (2) チョークマニホールドの点検。
- (3) 新ビット降下時および泥水比重変更時、等に一定のスローポンプ回転で泥水循環し、その深度と圧力を記録する（スローポンプテスト）。
- (4) 掘進に入る前に各タンクのピットレベルをマークしておく。
- (5) 掘進中のドリルパイプ（掘管）内容量、アニュラス容量、坑内循環容量、ビット位置迄の所要ポンプカウント数および一循のポンプカウント数等を計算しておく。
- (6) 掘進中はピットドリルを定期的実施する。
- (7) 揚降管中はインサイド BOP ドリルを定期的実施する。

#### ii) 掘進中に地上でわかる徴候

- (1) ピット内の泥水量の増加。
- (2) フローラインの流速の増加。
- (3) ポンプスピードの増加。
- (4) ポンプ圧力の減少。
- (5) ガスカット、ウォーターカットマッドの上昇。
- (6) 掘進率の急激な上昇。

#### iii) 一般的な抑圧作業手順（ウェイトアンドウェイト法）

- (1) ドリルストリングを必要な高さまで引揚げ、ポンプを止める。
- (2) ブローアウトプリベンター（BOP）を閉め坑井をシャットインする。
- (3) 密閉スタンドパイプ圧力、ケーシング圧力、ピットの増加量等を計測する。

- (4) 諸々の点検、抑圧泥水比重を計算、作液、抑圧ポンプ計画を作成して、循環手順の態勢が整ったら制限循環を始める。
- (5) 循環しつつ坑内を抑圧比重泥水に入れ替える。
- (6) 抑圧が完了し坑内のバランスがとれたら、制限循環を解除する。

#### iv) 揚管中の抑圧作業

- (1) 溢泥の徴候が発見されれば、インサイド BOP を接続し、ブローアウトプリベンター (BOP) を閉める。
- (2) 可能なら坑底までストリップングを試みる。
- (3) 制限循環を行なって坑内を抑圧比重泥水に入れ替える。

### 1.9.4 噴出防止用機器

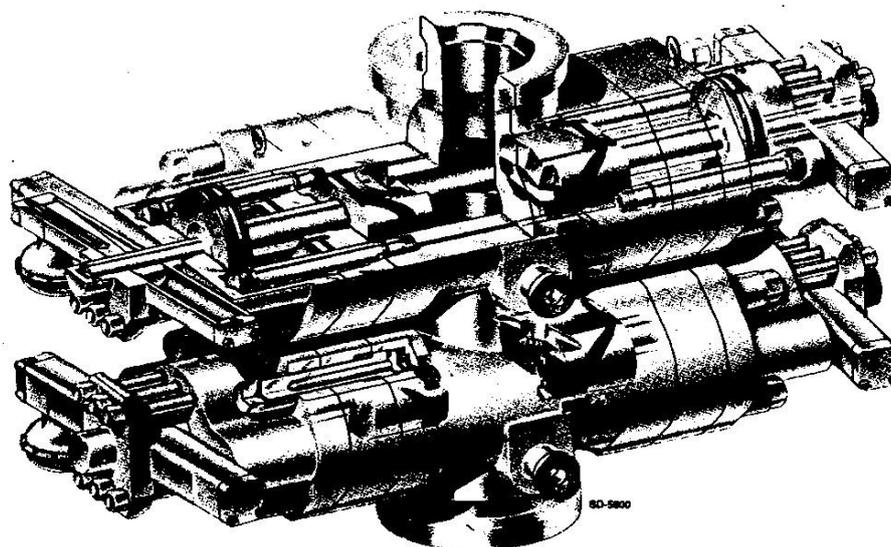
#### i) ブローアウトプリベンター (BOP)

掘削中や揚降管中などに地層よりガス、油、水等が坑内に浸入したときに、これを閉めて地上への噴出を防止する装置である。

これには種々のタイプがあるが、以下に陸上で使用されている代表的なものを記す。

##### (1) ラム型 BOP (図 2.1.51 参照)

2 個のラムを油圧によって水平に移動させパイプの外径を密閉したり (パイプラム)、全密閉する (ブラインドラム) もので、作動液圧により迅速かつ容易に開閉できる。密閉能力に関する信頼性が高い。パイプラムは基本的には使用パイプの外径によりラムを取替える必要があるが、一定範囲内で異なる外径に対応できる特殊なものもある。



16-3/4" Double U Ram Blowout Preventer

図2.1.51 カメロン型BOP

##### (2) アニュラー型 BOP (図 2.1.52 参照)

環状のラバー製シーリングエレメントを作動液圧により上方に移動収縮させる機構で、全密閉から最大許容内径までの全ての径のパイプを密閉できる。また、ワイヤーやケリー等真円でないものまで密閉可能である。密閉圧力を減圧することによって密閉したままパイプを静かに動かすことも可能で

ある（ストリップング）。

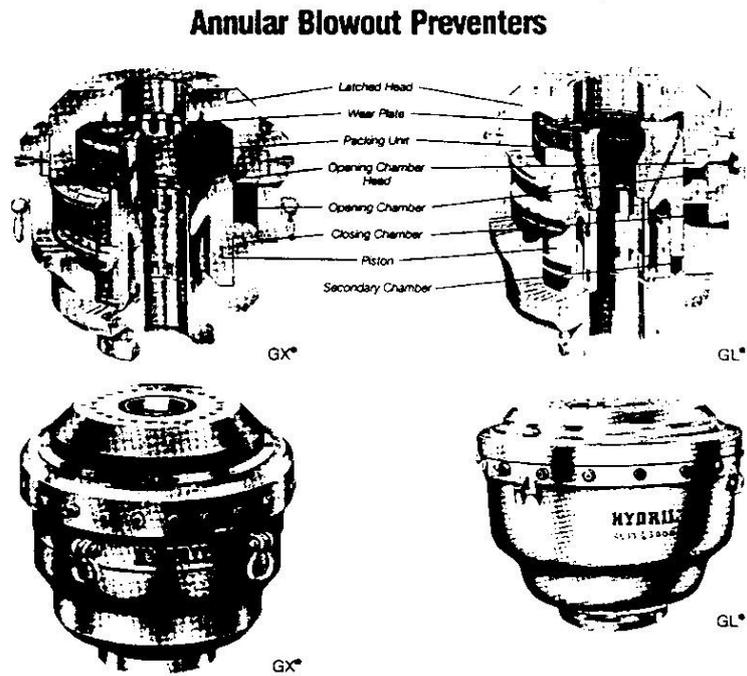


図2.1.52 ハイドリル型BOP

ii) フロートバルブ（図2.1.53 参照）

バックバルブで普通はビット直上の管内に使用される。ドリルストリング内部よりのキック発生時の噴出や泥水の逆流によるビットノズルの目詰りを防止できる。小さな孔開きの圧力が読めるタイプのものが多く使用されている。付替時もアンバランスにより泥水がパイプ内部から逆流することがない。

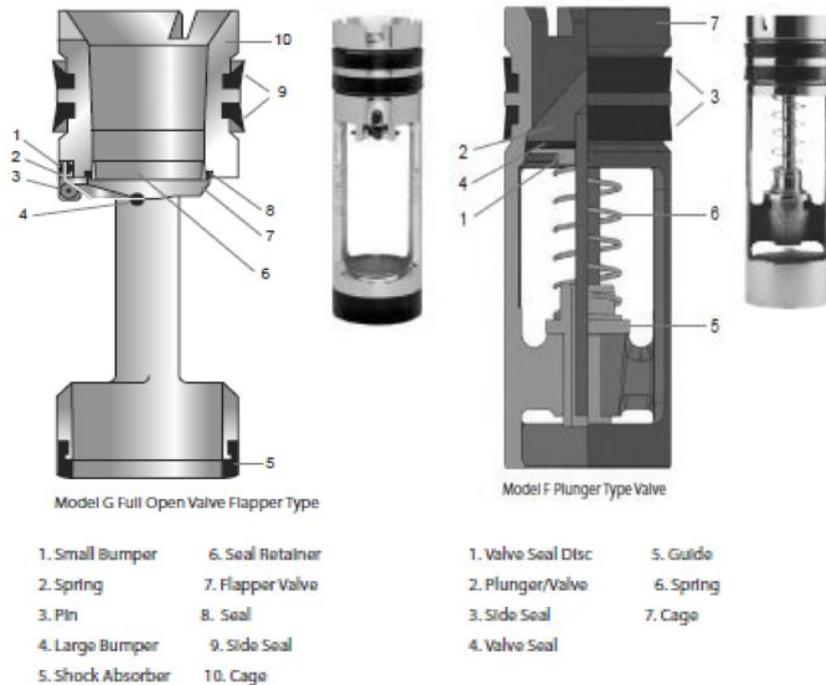


図2.1.53 フロートバルブ  
(出典：Forum Energy Technologies)

## iii) ケリーコック (図 2.1.54 参照) およびトップドライブ IBOP

ケリーコックはケリーの上下に取り付けられる。掘削中、噴出されたときフロートバルブを使用していないか、使用していてもリークしたときにこのコックを閉めてドリルストリング内部からの圧力を密閉する装置である。

トップドライブ使用の場合は、ケリーコックと同様の機能を持った IBOP がパイプハンドラー内に組み込まれている。

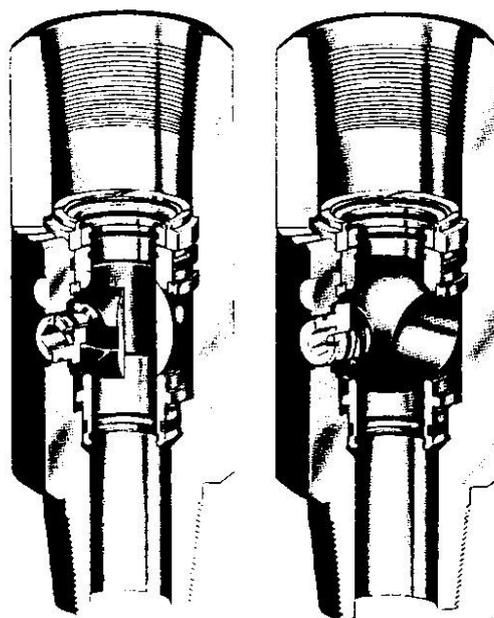


図2.1.54 ケリーコック

## iv) インサイド BOP

揚降管中にキックされた際にドリルストリングに接続してドリルストリング内を遮断するもので、この上にドリルパイプ (掘管) を接続して坑内に降下することもできる。機能は、一種のバックバルブであり、下からの噴出は止めるが、上からのポンプ循環は可能である。

## v) クロージングユニット (アキュムレーターユニット)

(図 2.1.55 参照)

ブローアウトプリベンター (BOP) の開閉に使用する作動液を常時高圧に蓄圧しておき、緊急時、リグの動力が停止しても BOP 開閉に応ずる装置である。作動液タンク、蓄圧ポンプ (電動モーター駆動とエアモーター駆動)、蓄圧部 (アキュムレーター)、コントロール部 (圧力調整レギュレータ、圧力計、切替バルブ) 等より構成されている。ダイアフラムにより作動液と隔離された不燃性の窒素ガスがボンベ内で高圧に圧縮蓄圧され、開閉操作と同時に高圧で作動液が移動する機構である。

常に一定の圧力を保持するために油圧が一定圧力以下になると自動的にポンプが運転して指定の圧力まで昇圧するようになっている。この開閉操作はユニット元で手動操作できる他、ドリルフロアや休憩室付近等で遠隔操作ができるようになっている。各 BOP の作動液室容量の大小により使用液体量が変わるのでそれらに応じた操作能力のユニットが使用される。作動液は軽質の作動油または防食剤を混入した清水が使用され、必要量の 1.5 倍程度貯蔵できる容量のユニットが使用される。

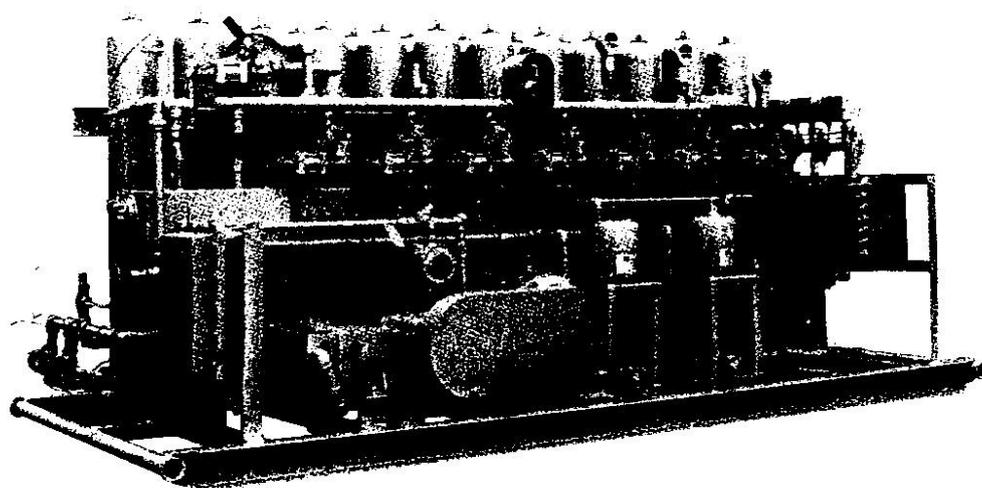


図2.1.55 クロージングユニット

## vi) チョークマニホールド (図 2.1.56 参照)

チョークマニホールドは地層中から坑内への噴出が発生した時に、BOP を閉め坑内に圧力が掛かったままの状態を制限循環をするための装置である。チョークマニホールドは入口側の左右 2 ヶ所に各々アジャスタブルチョークが装備されており、片方が手動チョーク、もう一方がエアによるリモートコントロール作動チョークというのが一般的である。チョークの開き具合を調整しながら制限循環により、ガスや油の混入により比重の低下した泥水を抑圧比重泥水に入れ替えを行う。抑圧比重泥水の送水量（ポンプカウント数）に合わせてスタンドパイプ圧力、ケーシング圧力をコントロールする。

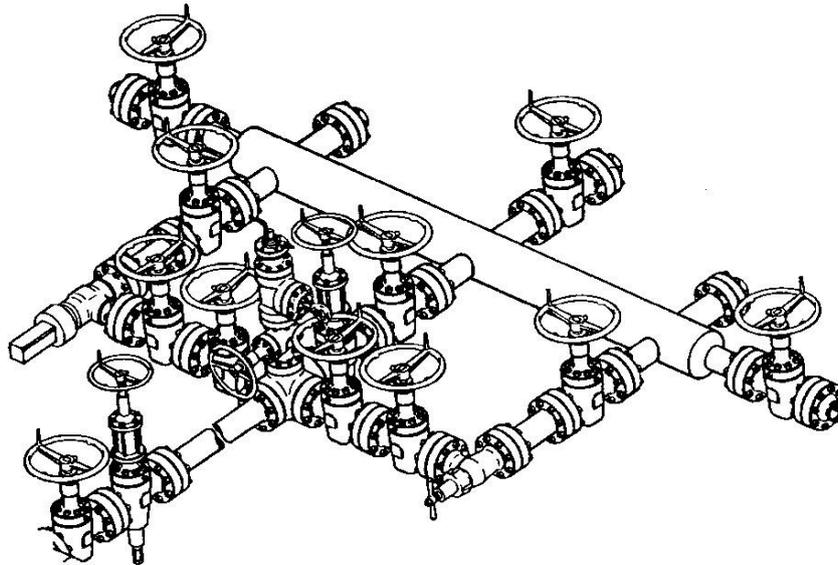


図 2.1.56 チョークマニフォルド

## 1.10 坑井仕上げ

## 1.10.1 仕上げ計画

坑井を目的深度まで掘削すると、それまでに得られたカッティングス、コア、マッドロギング、物理検層、DST 等からの情報が総合的に検討され、その坑井を廃坑するか仕上げ作業を実施するかが判断される。坑井仕上げ作業には、特別な資機材を準備する必要があるため、当該構造に試探掘井が既に数坑掘削されていて、あらかじめ仕上げ計画が策定されていることが多い。しかし、試掘井で仕上げ作業が行われる場合もあり、準備が整っていない場合、一時的に坑井を休止井として仮廃坑し、後に仕上げ作業のみが行われることもある。

仕上げ計画の策定では、油ガス層の大きさや、構造、岩質、圧力、生産物等を考慮して、仕上げ層の選定、仕上げ方法の選定、仕上げ機器の選定、坑井刺激の実施、仕上げ流体の種類と比重、といったことがそれぞれ十分検討される。

油ガス田全体を評価するために必要な資料を収集するために、試掘井に引き続き、数坑の探掘井が掘削される。油ガス田評価に影響を与える要素には、

- ① 可採埋蔵量
- ② 油ガス層の生産能力
- ③ 開発コストおよび生産中の操業コスト
- ④ 販売市場価格
- ⑤ 鉱区の契約条件、適応法規
- ⑥ 生産施設の資産評価

等があり、更に油ガス田開発上大きく影響する点として

- ① 油ガス田の地理的条件、海気象条件
- ② 油ガス層の深度
- ③ 生産流体の種類と性状
- ④ 坑井掘削間隔
- ⑤ 油ガス層にいたる途中の坑内地質状況
- ⑥ 油ガス層の生産特性
- ⑦ 環境対策

等がある。したがって試掘段階のときから油ガス田評価に必要な情報を効果的に収集し、適切な油ガス田評価や開発計画の策定に役立てることが大切である。

### 1.10.2 坑井仕上げ方法の種類

#### i) 油ガス層との導通からの分類

##### (1) 裸坑仕上げ

仕上げ層にケーシングやアンカーパイプを挿入せず、裸坑のまま仕上げる方法である。セメンチングによる仕上げ層に対してのダメージが無く、最大限の流路が得られる等の利点はあるものの、他の層とのセパレーションが必要無い、生産中の地層の崩壊の心配が無い等の特別なケースに採用が限定される。安定した石灰岩層を水平掘りする場合等に適している。

##### (2) パーフォレーション仕上げ

ケーシングを降下し、セメンチング後に、仕上げ層部にパーフォレーションを行って仕上げる方法である。他の油ガス層や水層から分離して、目的層を選択的に仕上げる事が出来る。一般に仕上げケーシングを油ガス層部まで降下してセメンチングする。この際セメントスラリーは油ガス層部を完全にかくし、必要により上部ケーシングシュー付近まで上昇させる。仕上げ層は掘止深度付近にあるとは限らないので、仕上げ層が坑底から相当離れた所にある場合は、他の層との遮断をするためセメントで埋立をしてからケーシングが降下される。

##### (3) アンカー仕上げ

仕上げ層部にアンカーパイプを降下して仕上げる方法である。仕上げ層部分で砂や頁岩等が崩壊したり、押し出してくる場合、これを防止するため、油ガス層部分にスリットライナー、丸孔ライナー、または特殊設計のスクリーンライナーが使用される。

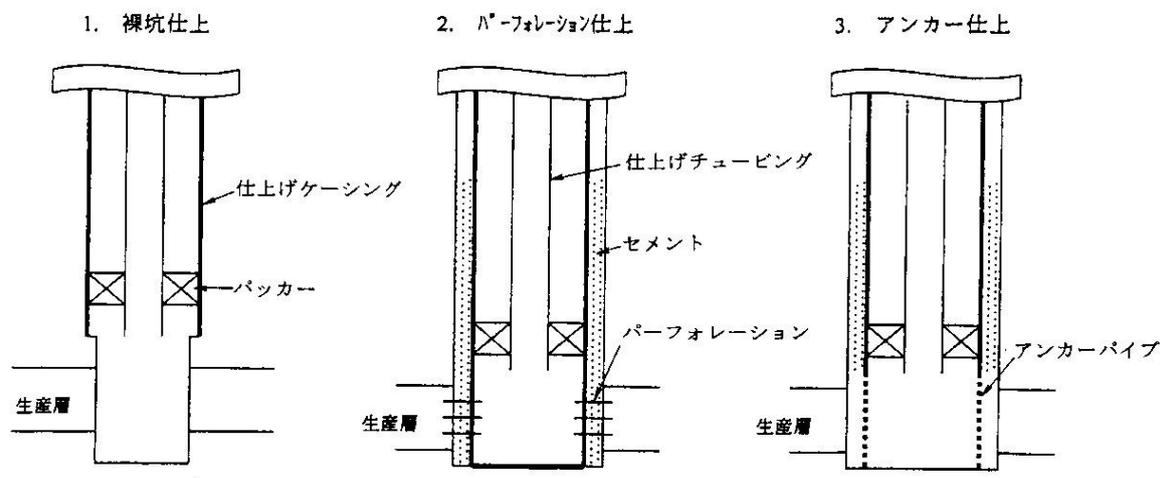


図2.1.57 油ガス層との導通からの分類

## ii) ケーシングの形状からの分類

## (1) フルストリング仕上げ

仕上げケーシングをワンストリングで降下する仕上げ方法である。全体がブランクパイプの場合と一部アンカーパイプが使用される場合がある。先端にアンカーパイプを接続して降下する場合、アンカーパイプから上についてはケーシングの外側をセメンチングし、仕上げ層を上部と分離することになり、セメント放出孔位置が大切である。即ち、油ガス層部から少なくとも数 m 上部からセメントを放出し、採油ガス井として稼働中ししっかりしたセメント層が保持され、他の水層等から油ガス層を完全に保護しなければならない。このため放出孔付近の岩質はしっかりした頁岩や砂質頁岩が選択される。セメントスラリーで油ガス層を汚染しないようにセメンチング器具を工夫して使用する必要がある。しかし、セメンチングテストが不完全になり易いこと、また坑内循環をライナー先端から十分行なえないので、油ガス層部分に埋没、崩壊物をためやすい欠点もある。

## (2) ライナー仕上げ

ライナーはセッティングツールでドリルパイプ（掘管）に接続し降下され、すでに設置してあるケーシングにスリップで吊り下げられるか、坑底に着底させることによって固定される。ライナーとケーシングの間隙はセメントまたはパッキングでシールされる。ライナーとしては、ブランクパイプが使われセメンチング後にパーフォレーションを実施する場合とアンカーパイプが使われる場合がある。

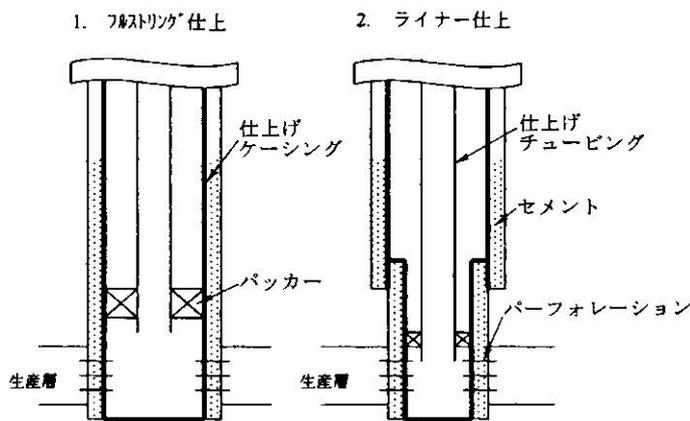


図2.1.58 ケーシングの形状からの分類

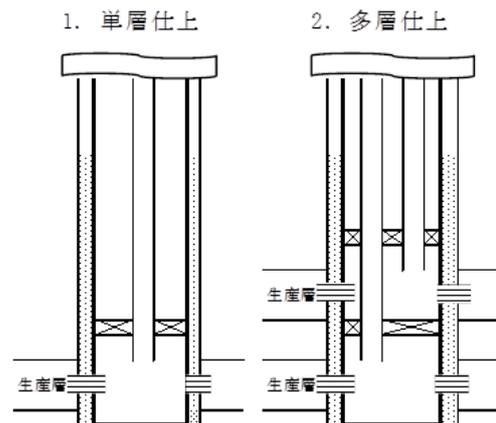


図2.1.59 仕上ストリングの形状による分類

## iii) 仕上げストリングの形状による分類

## (1) 単層仕上げ

坑井の仕上げに際し、生産層を 1 層のみに限定して仕上げる方法である。

## (2) 多層同時仕上げ

1 本の坑井で、2 層または 3 層と採取可能な油ガス層が発見された場合、まず 1 層を仕上げ、その層の生産を終了してから、改修作業により次の層の生産のための仕上げを行うといった方法もあるが、多層を同時に仕上げて、複数の層から同時に生産が可能な状態にすることがある。多層同時仕上げでは、各層の間はプロダクションパッカーで遮断され、各層個別のチュービングをセットするか、または 1 本のチュービングで内・外から 2 層を同時に採取したり、ワイヤーラインツールで開閉可能なスライディングサイドドアを使用し選択的に採取する。パッカー型式は固定式、リトリーブブル式および両型式の組み合わせ方式がある。

多層同時仕上げの場合、チュービングのサイズの他にストリング数についても生産性・経済性を考

慮に入れて検討され、その結果によってはケーシングサイズの選定にも影響を及ぼす。クリスマスツリーもチュービング本数・油ガス層圧力に適合したものを使用しなければならない。

### 1.10.3 穿孔器 (Perforator)

仕上げ作業やセメントスクイズ作業のために、ケーシングとその外側のセメントを貫通する孔を開ける時に穿孔器が使用される。火薬により弾丸を発射させるタイプのものもあるが、現在は、主として火薬によりジェットを発生させるジェットパーフォレーターが使用されている。

#### i) ジェットパーフォレーター (Jet Perforator) (1.11.4 火薬作業参照)

主な機構として「電気雷管」、「導爆線」、「爆薬」を組合せたものであり、爆薬は圧搾成型（シェーブトチャージ）されている。爆薬面はV字型をしていて、これを着火すると爆発力は内面に集中して合成され、その力が高温、高圧力の「ジェット」を形成し、目標物体に衝突し深い穿孔を生ずる。

#### ii) ジェットパーフォレーターの特徴

- ① 貫通中に地層に与えるクラックが少ない。
- ② 坑内温度の高い場合にも使用できる。
- ③ 硬い地層の場合、弾丸型より貫通力大である。

チュービング内を通して降下できる小径のスルーチュービングパーフォレーターや、検層ケーブルでなくチュービングの先端にパーフォレーターを接続して降下してパーフォレーションを行なうチュービングコンベイドパーフォレーション (TCP: Tubing Conveyed Perforation) といったものもある。TCP の利点としては、重量を気にせず長い区間のパーフォレーションを一度に行うことが出来ること、高傾斜にも容易に降下出来ること、アンダーバランスパーフォレーションも容易に出来ることなどが挙げられる。

通常パーフォレーションは、坑内の掘削泥水または仕上げ流体の泥柱圧が地層圧よりも高い状態（オーバーバランス）で行うが、坑内の泥柱圧を地層圧よりも低い状態（アンダーバランス）にして行うことがある。このような方法をアンダーバランスパーフォレーションといい、パーフォレーション直後に圧力差による坑内へのフローが生じ、パーフォレーション孔およびその周辺貯留層のダメージの除去が可能である。

### 1.10.4 仕上げ機器

坑井からの油およびガス採取のため次のような坑内機器および坑口装置が使用される。

#### i) 坑内機器

##### (1) プロダクションパッカー (Production Packer)

チュービングの外周と仕上げケーシングの間隙を密閉して、油層の圧力を効果的に利用して安全に油やガスを採取できるようにする目的で使用されるパッカーの総称である。このパッカーにはリトリバブル型とパーマネント型がある。

##### 1) リトリバブル型

何らかの理由により将来パッカーを回収する必要がある場合に使用される。チュービングと共に降下され、回収する時にはパッカーに引張力を与えることでスリップが外れそのまま引揚げる事ができる機構となっている。仕上げ油ガス層の圧力が高い場合には、パッカー下向きの負荷が不足になり、パッカーが上に持ち上げられ、リークすることがある。このようなことを防止するために、坑内の自噴圧力でパッカー上部のボタンスリップが効いて、上にもちあげられるのを防ぐ機構をもったパッカーもある。

パッキングは高温、高圧力下でも機能する耐油性のエラストマーが使用され、使用圧力・温度・坑内流体等に合わせて材質が選定される。

## 2) パーマネント型

このパッカーは検層ケーブルやチュービングでセットされる。検層ケーブルを利用する場合セット時間が短縮できる。このパッカーは回収するための機構が無いので、何らかの理由で回収が必要な場合には、ミリングツールで削り取らねばならない。次のような場合に使用される。

- ① パッカーに大きい差圧のかかることが予想される場合。
- ② パッカーを坑内に残しチュービングだけ揚管したい場合。
- ③ 坑底温度が高い場合。
- ④ ブリッジプラグとしても使用したい場合。

## 3) パッカーの設置方式

パッカーの設置方式には、メカニカルセット、ハイドロリックセット、ワイヤーラインセットの3種類がある。

### ① メカニカルセット

パッカーはチュービングに固定され降下され、地上でチュービングを回転させたり、上下動させたりを行うことで設置する。下側にスリップその上にパッキングがある。パッカーをセットする深度まで降下して右へ廻わして、パッカー機構のJスロットを外し、マンドレルのストロークを押し下げて、パッキングに荷重をかけて拡大させ、パッカーをセットする。セット深度が深い場合チュービング自体の伸びが大きいので、マンドレルの長さを長くして地表で操作が確実にこなえるように作られている。高傾斜井や大深度井では地表の動きをパッカーに伝えることが難しくなる。

### ② ハイドロリックセット

チュービングに固定され降下され、チュービング内に圧力を掛けることにより設置する。地表での操作が容易で、深度や坑井傾斜の制限が無く、広く使用されている。しかし、圧力を掛けるために一時的なプラグをチュービング内に設置する必要があり、また、パッカー自体の構造が複雑である。

### ③ ワイヤーラインセット

パッカーを検層ケーブルにて降下し設置する。チュービング下端に接続したシールアセンブリをパッカーに挿入することによって、パッカーとアニュラスのシールを形成する。

## (2) チュービングセーフティーバルブ

チュービングセーフティーバルブは、通常時は地表からハイドロリックラインで加圧することにより、バルブを開いた状態に保持している。地表生産装置に何か事故があつて減圧した場合、バルブはスプリング機構によって自動的に閉まり、坑内の油やガスを遮断して、地表の汚染や火災を防止して坑内油ガス層を保護する。海洋掘削仕上げ井には重要な機器であり、サブサーフェスセーフティーバルブとして海底面下に設置される。

## (3) ランディングニップル

ランディングニップルは、各種のワイヤーラインツールを設置できるように、特殊の寸法に内面を加工してある。ロッキングマンドレルに組み合わせたストームチョーク、プラグ、坑底圧測定器などを降下しセットして使用する生産制御機器である。これらの機器は、特殊坑口装置を取付けることによって生産中にも設置・回収が可能である。

生産制御機器がセットされていると下流側に乱流が発生しチュービングを侵食する危険性があるた

めに、フローカップリングと呼ばれる肉厚のパイプを組み合わせて使用される。

#### (4) スライディングサイドドア

スライディングサイドドアは、外側のケースに循環できる孔があいていて、相対する内面にスリーブがセットしてあり、通常時はチュービング内外が遮断されている。孔を開放して循環したい場合ワイヤーラインでツールスを降下して内面スリーブをスライドすることによって、内外を導通させる。スライディングサイドドアはパッカー上やパッカーとパッカーの間に取付けて、坑内抑圧の循環ポートや生産のための流路として使用される。

#### ii) クリスマスツリー (Christmas Tree)

坑内からチュービングで誘導された油やガスは地表に到達しても、なお高い圧力を保有しているので、生産管理および保安上、生産圧力・流量を制御する機能が必要である。そのためクリスマスツリーが坑口に取り付けられる。クリスマスツリーはチュービング寸法と同径のバルブを組み合わせたものであり、フローラインは両側に取付ける場合と、片側のみの場合がある。両側に取付ける場合は片方をソリッドチョーク、もう一方はアジャスタブルチョークを取付ける例が多い。片側のみに取付ける場合は一般に油井ではソリッドチョーク、ガス井ではアジャスタブルチョークを使用する。マスターバルブに予備をつけたり、トップバルブ（またはスワブバルブ）を取り付けることもある。バルブの材質や、機構に対しては、寒冷地の場合、地熱井の場合、生産物に硫化物が混入している場合等は、それぞれ考慮して対策をたてなければならない。バルブの接続方式は API フランジ、クランプ方式、ソリッドブロック式等がある。クランプ式はボルト 2 本で接続できるので、組立時間を節約でき、フランジ面に常に一定の力で取付けることができる。ソリッドブロック型は大型のバルブボディ内にバルブがいくつも組込んであり、全体を小型に造ることができる。また各バルブの接続ボルトの数が少ないので、長時間の使用でも錆や、腐食により損傷される部分が少ないが、バルブが故障で取替の際は坑口作業が大がかりなものとなる。

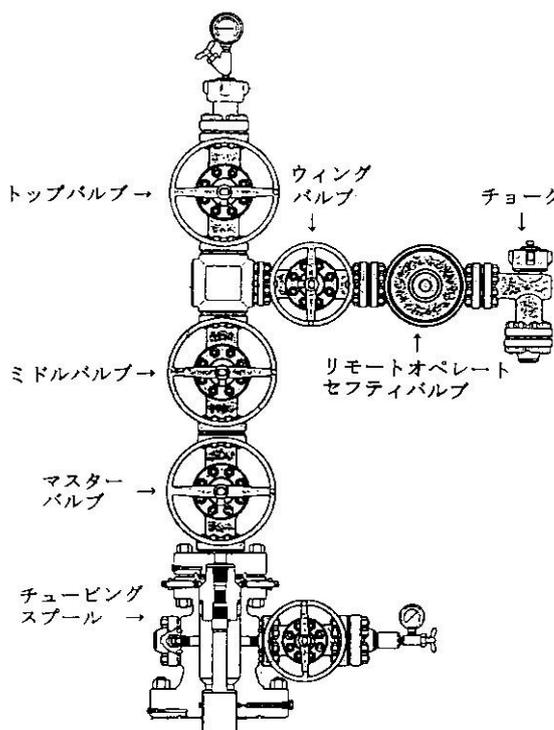


図2.1.60

#### クリスマスツリー (CAMERON社)

### 1.10.5 坑井刺激法 (Well Stimulation)

油ガス井のスティミュレーションは本来、採油ガス井に応用されたが、現在は新掘井の仕上げ作業にも行なわれるようになった。この技術には、酸処理作業、ハイドロフラックチャリング等が含まれている。

#### i) 酸処理

地層が低浸透性で生産性が悪い場合に、油ガス層の孔隙を埋めている固形分を酸で溶かしたり、カーボネート層のクラックを酸で溶かして流路を拡大する等の方法で、生産性の向上を図る手法が酸処理である。この処理作業はケーシングやチュービングを腐食させるのでインヒビターの添加が必要であり、また、酸液が油層内に流入し易いようにするための界面活性剤等の添加剤が用いられる。しかしこれら薬剤は劇薬であり、人体に大きな損傷を与えるため取扱いには十分注意し、熟練者による取扱い・機器の操作が必要である。

使用される酸のうち主なものは次の三種類である。

(1) 15 % 濃度の塩酸

この酸 1,000 gal (3,785 ℓ) で石灰岩 1,840 lbs (835 kg) を溶解するといわれる。

(2) 酢酸または蟻酸 10 % 液

この酸の化学反応速さは塩酸の約半分で 1,000 gal (3,785 ℓ) で石灰岩 740~970 lbs (336~440 kg) を溶かすといわれる。

(3) 弗化水素酸

塩酸と併用される。mudacid とよばれ、4.2 % の弗化水素酸は 7,001 lbs (3,176 kg) の粘土 (clay) を溶かすといわれる。

これらは使用上の目安であり、実際作業に当り油ガス層岩石についてサンプルテストを実施してから決定する。

### ii) 水圧破碎処理 (Hydraulic Fracturing)

この方法も油ガス層の浸透性が悪くて生産量が多く得られない場合、高圧力で多量の液体を層に送り込んで地層を破碎し、油、ガスの流路を拡大して生産量を増やす方法である。液体の種類としては水、塩水、酸等が使用され、地域によってはポリマーの添加で高粘性流体に調整することもある。液体に砂、樹脂でコーティングされた砂、セラミック、ボーキサイト等が混入され破碎層に送り込まれ、圧入終了後も広がった割目が閉じるのを防ぐための支持材となる。これら混入物の使用量は液体 1 gal (3.785 ℓ) に対しておよそ 5 lbs~20 lbs (2 kg~9 kg) を使用し、粒子の大きさはおよそ 20~40 mesh である。地層が非常に硬い場合、割目の復元力で混入物が砕かれるので、混入物の種類、粒子の大きさや強度はコストも考慮しながら地層によって選択しなければならない。

一般に破碎には相当多量の液体と高い圧力を必要とするため、チュービングを使用しないでケーシングを使用したフラクチャリングをすることもある。生産性を上げるために 1 坑井で多段のフラクチャリングが実施されるようになってきており、地域によっては水平区間を 2,000~3,000 m 掘削し 20 段以上のフラクチャリングを実施するケースも見られる。

### 1.10.6 仕上げ流体

仕上げ層に対してのダメージを軽減すること、および生産期間中の坑内の安全性を確保する目的で、仕上げ作業時に掘進中の泥水から仕上げ流体に入れ替えが行われることがある。仕上げ流体の主な目的は、フォーメーションダメージを防止することである。したがって、流体比重を地層圧のコントロールに必要な最低限にし、ソリッド分を含まないものが理想的である。また、パッカー上のチュービングのアニュラス部が、パッカー流体と呼ばれる長期間の安定性と腐食に特に考慮した流体に入れ替えられることがある。流体の種類としては、水系泥水、油系泥水、ケミカルフルイドの 3 種類がある。

仕上げ流体の備えるべき性質としては以下のような項目がある。

- ① 生産層に対してダメージを与えない。
- ② 生産流体との適合性がある。
- ③ 長期間に渡って坑内で安定している。(温度に対して安定、沈殿を起こさない等)
- ④ 金属に対する腐食性が小さい。
- ⑤ 取り扱いが安全かつ容易である。
- ⑥ 環境に対しての汚染が問題ない。
- ⑦ 経済的である。

### 1.10.7 改修作業

生産期間中に坑内機器や生産層のトラブルおよび仕上げ層の変更等のために、坑内作業が必要となることがある。ワイヤーラインを使って行われるような簡易な作業でなく、コイルドチュービングやリグを動員する比較的大掛かりな作業を改修作業と呼ぶ。

#### i) 坑内機器の機械的なトラブル

チュービングやケーシングの腐食等による機械的損傷、ポンプやガスリフトバルブ等坑内機器の故障、ワイヤーラインツールの遺留等がある。

#### ii) 生産層のトラブル

出砂によるパーフォレーション孔や坑内の閉塞、フォーメーションダメージの除去、採取目的以外の流体の産出等がある。

#### iii) 仕上げ層の変更

生産中の油ガス層からの生産が減退した場合、自噴による生産から人工採油仕上げへの変更や、その層を廃層して他の仕上げ層を仕上げ直す等がある。

## 1.11 物理検層

各種検層ツールを坑井内に降下して、地層の物理的諸性質（密度/孔隙率/比抵抗/弾性波速度等）を知ろうとするものである。

### 1.11.1 検層で対象とする地層の物理的諸性質

#### i) 孔隙率

岩石の単位体積中に占める孔隙の割合を百分率で表現するもので、油ガス層の評価では、孔隙中でも互いに連結している有効孔隙率が特に重要である。

#### ii) 比抵抗

元来岩石の構成物質は電気的には不良導体であるが、地層の孔隙中には導電性の物質が存在するため、地層の比抵抗は一般的に数オームメートル以下から数千オームメートルの範囲内にある。

#### iii) 浸透率

地層中より産出する気体、流体の量を左右するものに浸透率がある。浸透率は地層の孔隙中を流体がどの程度流れ得るかを表わすものである。

#### iv) 水分飽和率

地層の孔隙中に含まれる地層水の量を総流体量に対しての百分率で表わすもので、油ガス層の場合、水と炭化水素の含有成分比に相当する。水分飽和率を  $S_w$ 、地層の比抵抗を  $R_t$ 、地層水の比抵抗を  $R_w$ 、地層係数を  $F$  とすると、次の式で表される。

$$S_w = \sqrt{F \times R_w / R_t}$$

### 1.11.2 検層機器

#### i) ワイヤーライン検層装置

検層装置には自走可能なトラックタイプと海洋の坑井でも使用可能なユニットタイプがある。検層装置にはケーブルドラム、ウインチシステム、データ取得の為にコンピューター等が搭載されている。検層ツールは滑車に通したケーブルの先端に接続され、ケーブルを繰り出す事で自重によって坑内に降下し、ウインチ操作によってブレーキ操作やケーブルの巻上げを行う。また、ケーブルは検層ター

ルを坑内に下げると共に、ツールへの電力供給やデータ転送の役割もある。

ケーブルの繰り出し部と検層ツールの最上部にはそれぞれテンションメーターが装着されており、ワイヤーに掛かる引張力を常時モニタリングすることで、坑内状況を把握し安全に作業を行うことができる。ただし、検層ツール最上部のテンションメーターは種目によって装着できない場合がある。

#### ii) Logging While Drilling (LWD)

ワイヤーを使用して行う検層作業を **Wireline Logging** と呼ぶのに対し、ドリルストリングに各種計測器が備え付けられ、掘削作業と同時に検層作業を **Logging While Drilling (LWD)** と呼ぶ。LWDでの検層種目に関しても測定原理等は基本的には **Wireline Logging** の検層ツールと同じである。LWDのメリットは、検層ツールの自重では降下不能な高傾斜井や水平井においてもデータを取得することができ、掘削直後にデータを取得が可能なので、坑内状況が良い状態でデータを取得することができる。デメリットとしては、**Wireline Logging** に比べ、ノイズが入りやすく、データの解像度が幾分劣ることと、コストが高い点が挙げられる。

### 1.11.3 検層種目

#### i) 比抵抗検層

##### (1) インダクション検層

コイルに交流電流を流す事で周囲の地層に磁場と渦電流を発生させる。発生した渦電流の大きさは地層の導電率と比例する。導電率は地層比抵抗に変換される。単位は  $\text{ohm} \cdot \text{m}$  である。ツールには複数のコイルが配置されており、探査深度の異なる比抵抗を測定する事ができる。インダクション検層は坑内为非導電性の流体（オイルベースマッドやシンセティックベースマッド等）であっても測定が可能である。

##### (2) ラテロ検層

複数の電極から発生させた電流を導電性のある泥水を通して地層に流し、地層の比抵抗測定値を得る。単位はインダクション検層と同様に  $\text{ohm} \cdot \text{m}$  である。ツールには複数の受信機と発信機が配置されており、探査深度の異なる比抵抗を測定する事ができる。インダクション検層とは測定原理が異なり、ラテロ検層では坑内流体が非導電性の場合には測定できない。

##### (3) マイクロ比抵抗検層

アームを張り出し坑壁にパッドを圧着させることで、坑壁近傍の地層比抵抗を測定する。測定原理はラテロ検層と同様である。アーム式のため坑径データも同時に測定する事ができる。

#### ii) 孔隙率検層

##### (1) 音波検層

発信器から発信された音波を、一定区間離れた受信器にて記録し、その波形を解析する事で地層中を伝播する音波の走行時間を計測する。この時間は岩石の硬さ、孔隙率、フラクチャーの分布等によって変化する。一般には、P波速度から孔隙率が推定されるが、P波に加えてS波やストーンレイ波のデータも使うことにより、ポアソン比、ヤング率などの物性解析やフラクチャーの評価も行われている。

##### (2) 密度検層

ツール中に装填された放射線源から発せられたガンマ線を地層に照射し、検出器で計測されるガンマ線量から地層密度を算出している。放射線源には  $^{137}\text{Cs}$  を使用しており、このガンマ線が地層中でコンプトン散乱を起こす性質を利用して、岩石の見掛け密度を連続的に測定する。この測定結果から

孔隙率も求めることができる。

### (3) 中性子検層

ツール内に装填された放射線源から中性子を地層に照射し、検出器で計測される中性子の量から孔隙率を算出している。放射線源にはアメリシウム-ベリリウム 241 ( $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ ) を使用している。中性子は同じ質量の水素原子と衝突したときに、そのエネルギーを完全に失う性質がある。この性質を利用して岩石の孔隙率を算出している。ガス層では水素原子数が少ないため、孔隙率を過小評価してしまうことがある。

### (4) 核磁気共鳴検層

核磁気共鳴現象を利用した検層であり、地層の水素原子に磁場を掛ける事で発生する電磁波の強さや、減衰するまでの時間を想定することで孔隙率を求めている。ガス層では水素原子数が少ないために、孔隙率を過小評価してしまうことがある。また、孔隙サイズの分布から浸透率を計算することができる。

## iii) その他の検層

### (1) 自然電位検層

自然電位には拡散電位と膜電位がある。膜電位とは泥質岩と浸透性のある地層との境界で泥質岩が陽イオン膜として働く結果生じる電位であり、拡散電位とは地層水と掘削泥水の濾過水との境界でのイオン拡散率の違いによって生じる電位である。自然電位は電気化学的に発生する電位と流動的に発生する電位を総じて測定されるが、主な電位の発生源は拡散電位である。

電位は浸透性の高い地層では大きくなるが、頁岩のような浸透性の小さい岩相ではほぼ一定の値を示す。SP 値は浸透性の目安となるが、地層水や坑内流体の塩分濃度に依存し、両者の塩分濃度に差が無い場合には一定の値を示す。頁岩での値と浸透性のある地層での値との電位差を SP (mV) とする。

### (2) ガンマ線検層

地層中に含まれる放射性物質が放つ自然ガンマ線を測定している。測定するガンマ線は  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  などで、 $^{40}\text{K}$  は粘土鉱物中に多く存在する。鉱物の種類によってガンマ線量に違いが出るため、岩質の判定ができる。測定値は GR と表記され、単位は API Unit が使用されている。

### (3) ディップメーターおよび坑壁イメージ検層

地層傾斜の測定、堆積環境の推定、フラクチャーや断層の検知などを目的として測定される検層である。複数のアームに取り付けられたパッドに多数の電極を備え、比抵抗値をイメージにして出力するタイプとデュアルラテロ検層の電極を分割して表示するタイプ、超音波を発する回転子を備えたツールを使用し音波速度の違いをイメージとして出力するタイプなどがある。それぞれ加速度計や磁力計を用いた方位傾斜ツールを併用する事によって、地層およびフラクチャーの方位や傾斜などの解析が可能であると同時に、坑井の方位傾斜データを得る事もできる。

### (4) 地層圧測定および地層流体サンプリング

坑壁にツールを密着させ、地層圧および浸透率の取得、地層流体のサンプリングをそれぞれ複数回行うことができる。これによって貯留層圧や生産性の評価を行うとともに、貯留層内の圧力勾配を求めることにより、流体の種類（ガス、油、水）や、それらの境界面の推定に役立てられる。

### (5) サイドウォールコアサンプリング

かつては火薬を使用し、爆破の力で採取器を地層に打ち込む方式でコアサンプルが取られていたが、近年は火薬を使用せずに、小坑径のビットを使用し、機械的にコアサンプルを取得するのが一般的で

ある。ビットには硬質用と軟質用の2種類があり、採取する地層の硬さにより選択する。採取したサンプルは各種分析に使用される。

#### (6) ケーシングカラーロケータ

測定器は2個の永久磁石を相反する極性に配置し、その中間にコイルを置き、中央部での磁束密度を高めるようにしてある。鋼管内を通る測定器が、ケーシングのカップリング部を通過すると鋼鉄肉厚の変化による磁気抵抗に変化を生じ、コイルの誘起電位が高まる。この起電力の変化を連続記録してカップリング位置を確認し、パーフォレーションによる穿孔位置の確認や調整などに利用される。

#### (7) セメントボンドログ

音波検層の原理を応用し、セメント評価を行う検層で、発信機から発した音波エネルギーは3 ft と5 ft 離れた受信機にそれぞれ記録される。3 ft 離れた受信機では、ケーシングとセメントの密着度を知ることができ、最初の振幅を記録する。5 ft 離れた受信機では地層とセメントの密着度を知ることができ、全ての振幅を記録する。それぞれセメントとの密着度が高ければ、音波エネルギーが大きく減衰するので、小さな音波エネルギーが受信機に到達する。逆に密着度が低ければ、減衰が小さいので、大きな音波エネルギーが受信機に到達する。

この他に、超音波を使用してセメント評価を行う検層ツールもある。360度回転する送受信機から発した超音波は、泥水、ケーシング、セメントの境界で反射を繰り返す、最終的には送受信機に戻る。音波と同様に、セメントの密着度が良好な場合にエネルギーが減衰する。また、水やガスなど、それぞれの物質によって音波減衰特性が異なるので、超音波を使用する事でケーシング背後に存在する物質の分布状況を知ることができる。

#### (8) キャリパー検層

アームを坑壁に押し付けることによって、坑径を測定する。アームの数が1本、4本、6本等がある。取得されたデータは、他の検層データの坑径補正、ケーシングセメンチング時のセメント量の算出、ケーシングの健全性評価に利用される。

#### (9) プロダクション検層

フローメーターを用いた流量測定や坑内温度圧力を連続的に測定するもので、流体の産出箇所の特定期間や産出状況等を把握するために実施される。

#### (10) VSP (Vertical seismic profiling)

地表震源で生成した弾性波を一定間隔の深度レベルの坑内受振器で受振し解析を行う手法。

地表震源を坑口付近に設置するゼロオフセット VSP は、以下の目的のために実施される。

- 初動走時による時間～深度関数の推定。
- VSP 合成地震記録の作成。反射法地震探査記録と坑井地質との正確な対比を行う。

### 1.11.4 火薬作業

油ガス井における火薬作業はその目的、方法が様々である。坑井で使用される火薬類は主に電気雷管、導爆線、油井用火工品である。

#### i) 鋼管の穿孔と切断作業

##### (1) パーフォレーション

火薬によりジェットを発生させ、鋼管を穿孔する作業であり、パーフォレーターは Body タイプと Strip タイプに区別される。Body タイプは、キャリアと呼ばれる金属板に火薬類を装填し、パイプ内

に格納したものを使用して、鋼管の穿孔作業を行う。防水性、耐圧性に優れ、大深度、高圧環境下での作業も可能。**Strip** タイプはキャリアに火薬類を装填し、鋼管の穿孔作業を行うが、パーフォレーター径が小径なのでチュービングを通過させる必要がある場合や、小坑径の坑井で使用される。ただし**Strip** タイプの場合、発射時のデブリが坑内に残留するほか、衝撃でキャリアが変形するデメリットがある。それぞれ穿孔径や穿孔長、穿孔密度が違う様々なタイプがあるので、ケーシングサイズや対象とする地層の特性に合ったものを選択することができる。

#### (2) チュービングジェットカッター/ケーシングジェットカッター

火薬によりジェットを発生させ、鋼管を切断する。円錐台形の火薬 2 個を向かい合わせに配置し、360 度方向に収束したジェットを発射させる。鋼管の種類・型式によって、カッターの型式が選択される。

#### (3) ケミカルカッター

火薬の燃焼圧によって放出されたケミカルによって鋼管を切断するツール。ジェットカッターに比べ、切り口がきれいであり、切断後の呼継作業を容易に行うことができる。

### ii) その他の火薬作業

#### (1) バックオフツール

抑留鋼管を回収するに、抑留位置より浅い深度で鋼管接続捻子部にかかる外力をフリーにし、更に同一箇所にもトルクを掛けた上で、使用鋼管種類、深度などに応じた爆薬を爆発させ、その衝撃で鋼管の接合部の捻子を戻すものである。

#### (2) セバーリングツール

坑内に抑留された抑留鋼管を火薬により破壊し、回収する。バックオフ作業では抑留鋼管を回収することが難しい場合に用いられることが多い。

#### (3) ブリッジプラグ

坑井の産出テスト、仕上げや廃坑において、坑内の一部を遮断、埋立するときに使用される。装置はセッティングツール部とブリッジプラグ本体よりなっていて、坑井内設置深度で火薬の燃焼圧によって、プラグ本体を膨張させ設置する。プラグは鋼管種類・型式に合わせて選択される。一般的にケーシングカラーロケーターを使用し、深度の確認と調整を行ってから設置する。

### iii) 火薬類の取扱い

火薬類消費については、事前に坑井所在地の都道府県より「火薬類譲受許可」を受ける必要があり、火薬類の取扱作業においては、鉱山保安法令を厳守し必要な措置を講じて着手する必要がある。火薬類の取扱いについて講ずべき措置は、鉱山保安法施行規則に以下の項目について規定しており、その内容について「鉱業権者が講ずべき措置事例」により補完されている。

- ① 火薬類の受渡し
- ② 火薬類の存置
- ③ 存置する火薬類の量
- ④ 受渡し、返還および消費した火薬類の記録
- ⑤ 暴発、紛失および盗難の防止
- ⑥ 発破作業時の異常爆発の防止ならびに発破作業員および周辺への危害の防止
- ⑦ 発破作業終了後の不発等危険の有無の検査、および、火薬類による危害の防止
- ⑧ 不発の際の火薬類の回収、および、火薬類による危害の防止

## 1.12 マッドロギング

### 1.12.1 マッドロギングの目的

地下を掘進中の坑井で地上に設置された一連の測定装置を使用して、掘削循環泥水が地上に運んでくる地層の掘り屑および泥水中に含まれるガス量を連続的に測定記録する検層方法の一種である。炭化水素は、ガスクロマトグラフによってC1～C5に定量分析され、その成分比から油、ガス、水層の判別評価が行なわれる。マッドロギングは、炭化水素の分析のほか、岩石中の油徴の検知、岩相区分、掘進率、ポンプストローク、泥水比重等に関する坑井諸情報を掘削深度に対応して速やかに検知処理できる利点を有するところから油ガス層評価の上で物理検層とともに石油鉱業に欠かせない存在となっている。地層評価の情報以外にも、掘削作業に関連したパラメーターも取得され、それらを監視することや分析に利用することで、掘削作業の安全性や効率の向上にも役立っている。

### 1.12.2 測定方法

#### i) ガス検知装置

##### (1) 連続ガス測定

掘進時の地層流体中のガスおよび岩石中に含まれていたガスがビットによる岩石の破碎により泥水中に流出したマッドガスを、地上にて連続的にモニタリング（トータルガス濃度）する作業である。トータルガスは連続脱ガス装置・ガス検知器などの検出効率および、地層の浸透率、孔隙率、掘進率、坑径、地層圧など諸条件に影響される。検出器の感度補正は、調整器による流量調節と標準ガスの注入による感度補正で行なわれる。採取サンプル中に含まれる炭化水素量は脱ガス装置、吸引用真空ポンプの効率により異なるのでトータルガス濃度については蒸留真空迫出器などを使用しての完全追出ガスのガスクロマトグラフによる定量分析値で補正される。測定では連続脱ガス装置より供給される脱ガスと空気との混合気体がガス検知器に連続的に引き込まれる。検出方式には①ホットワイヤー方式、②熱伝導度差方式、③赤外線吸収方式などがある。ホットワイヤー方式では、可燃性ガスの濃度が一定値以上になると酸素不足による不完全燃焼のため検出不能となる。熱伝導度差方式では、炭化水素濃度 100 % までの検出が可能であるが試料の温度、湿度、炭酸ガスなどに対する前処理が必要で応答時間の長いのが一つの欠点である。赤外線吸収方式はメタン、エタン、プロパンなどガスの種類によって感度が著しく異なるためトータルガスの検出精度は低い。

##### (2) ガスクロマトグラフ

分析試料に適応した充填物の詰まった分離管（カラム）内を気体試料あるいは気化した液体または固体試料をキャリアーガスによってガス状で移動させて各成分に分離し、検出器を用いて定量化する装置である。マッドロギングに用いられているガスクロマトグラフは主として軽質飽和炭化水素を分離定量化するように作られている。ジオサービス社製を例にとるとカラムはシリカゲルとスクアランを組み合わせ、前者を主としてメタン、ときには水素、窒素を、後者データーン以上の飽和炭化水素を固定するようになっている。

分析される試料には循環泥水で地上に運ばれてきたマッドガスおよび掘屑（カッティングス）中のガスがある。連続的に分析するときには、プログラムが組込まれていて C1～C4 まで分析試料の移動速度に応じて 2.5 分～5.5 分までサイクル変換が選択される。ただし C5 以上は手動に切替え測定される。

キャリアーガスは空気を使用し、カラム温度は 40 °C、検出器はホットワイヤーが用いられている。最近では高感度検出器（水素炎イオン化ディテクター）を加えたものも取入れ始めている。このときのキャリアーガスはヘリウム、水素、窒素が使用される。

マッドガスの分析は連続して、カッティングガス分析は必要に応じて行なわれる。カッティングガスはカッティングの一定量に水を加えミキサーで泥水化、脱ガスしたものをホットワイヤーガスディテクターで分析計量する。油ガス層のカッティングガスでも、多くの場合、泥水中に流出後の残存ガスを計ることになるのでその評価は難しい。泥岩中のガスは、その質量についての深度分布を調査することで石油根源岩評価に利用される。

### (3) 連続脱ガス装置（デガッサー）

デガッサーは循環泥水流路にセット、泥水を連続攪拌して、泥水中に含まれるガスを脱ガスさせるものである。この追出ガスと空気との混合気体はガスホースを通じてガス検知器およびガスクロマトグラフに連続的に供給される。装置は泥水連続攪拌用の水平回転棒を備える防爆型モーターのシャフトを内包するガストラップと攪拌泥水流量を調整するレベルタンクおよびガスホースその他の付属品で構成される。

セット位置は、シェールシェーカーの振動の影響をできるだけ受けない泥水の地上への放出口に近いところが望ましい。泥水流量の調整は排水バルブとタンクレベルの可動部分の上下動によって行なわれる。

### (4) 真空蒸溜脱ガス装置（V.M.S. : Vacuum Mud Still）

デガッサーで、検知器に供給される追出ガス量は、デガッサーの効率により泥水中に含まれるガス量の100%を維持することはできない。このことはガス検知器およびガスクロマトグラフで測定されるマッドガス濃度値を不正確なものとし、油ガス層評価に影響する。V.M.S.は採取泥水中に含まれるガスの全量分析を行なうものであるが、分析所要時間が長いため1日の測定回数は限られたものとなる。この採取泥水と同一条件下にあった循環泥水中のデガッサーによる追出ガス測定記録とV.M.S.使用による測定値を比較することでデガッサー効率を知り、ガス検知器およびガスクロマトグラフによる連続ガス分析記録値を補正評価することができる。V.M.S.は250 ccの採取泥水をフラスコに導入し、これを加熱、フラスコ中の磁気攪拌器で泥水を攪拌、ガスの全量追い出しを行なう。フラスコ、ガス採取チューブなど一連のガス導入路はあらかじめ真空ポンプにより器内を真空にしておく。採取ガスは注射器で注出、ガスクロマトグラフで定量分析される。

#### ii) 掘削深度、ビット位置、掘進率の測定

掘進率は掘削技術者にとって、ビットの摩耗度や地質に対する使用ビット、テーブル回転数、ビット荷重の適・不適の目安となり、地質の変化を知る上にも重要で、その遅速は掘削コストに大きな影響を与える。ドローワークスのドラムシャフトに取り付けられたセンサーにより、フック位置の変化をモニターすることによって、任意の深度間隔の掘進率を算出している。また、フック位置をモニターすることによって、ビット位置や深度の情報が得られる。

#### iii) 泥水比重の連続測定

適正な泥水比重は、地層を掘進中に生ずる掘屑・崩壊ざくなどを地上に運び、地下の油・ガス・水などの地層流体圧力とのバランスを保って坑内への流出を防止し、また、地層崩壊を抑制する上で重要である。この泥水比重の変化を連続的に記録するのが泥水比重計である。

泥水タンク内に設置された、2つの圧力センサー間の差圧から、連続的に泥水比重が求められる。

#### iv) 頁岩密度測定

頁岩密度は異常高圧層の予知を目的に測定される。異常高圧層とは、堆積時に地層が圧密を受けたときに頁岩層部分が水を排出できず多くの水を含んだ地層のことで、頁岩層自体が岩石荷重を支え得

ないため、その間隙水の圧力が静水圧より異常に超えたものである。測定は天秤によるか、アルキメデスの原理を利用した水溶液とのバランス法によって行なわれる。使用する頁岩は純粋で泥水に浸されていない角ばったもの数片を選定し、試料表面をろ紙でふき、乾燥しないうちに手早く測定する。異常高圧層は高孔隙率、低密度なので密度測定値が正常地層圧の勾配より落ち込むようなときには、その存在に注意を要する。

#### v) ピットレベル計

掘削中に遭遇する低圧層の逸泥、高圧の油ガス層や高圧の水層による溢泥は掘削作業を困難にし、時には坑壁崩壊やキックなど掘削中断を惹き起す。この逸泥および溢泥を初期に知り、迅速な対策を講ずるためには泥水ピットのレベル変化に留意することが必要となる。ピットレベル計としては、ピットタンク中のフロートの上下動を利用したものが過去には主流であったが、現在は超音波を利用したものが広く使われている。これは、タンク内の液体表面に超音波を照射し、帰ってくるまでの時間を計測することによって、液面の位置をモニターする。計測は泥水タンク毎に行われ、指定されたタンクの合計について、設定以上の変化が生じると警報を発するようアラームの設定が可能である。

#### vi) 蛍光反応測定

カッティングス、あるいは泥水中の油徴を紫外線検油器を使用して測定する測定は紫外線に対する原油の光化学反応を肉眼で観察するもので試料表面の黄色斑点の濃淡、広がり度合を 3~5 段階に分け判定する。時には岩石試料中の重質油分をクロロホルム、四塩化炭素、アセトンなどに浸漬して浮き出させた上で、その反応を調査する手法も取られるが、これらは有害物質なので使用の際には十分換気に留意することが必要である。

#### vii) 連続硫化水素濃度測定

硫化水素は人体に極めて有害な物質で、空気中の濃度が 10 ppm を超えると危険なため、遭遇のおそれがある坑井で使用される。センサーとして、半導体や電気化学電池を使用したものが使われている。横導管周り、シェールシェーカー周り等、数箇所測定器を取り付け、泥水によって運ばれてきた硫化水素を確実に迅速に検知できるようにする必要がある。

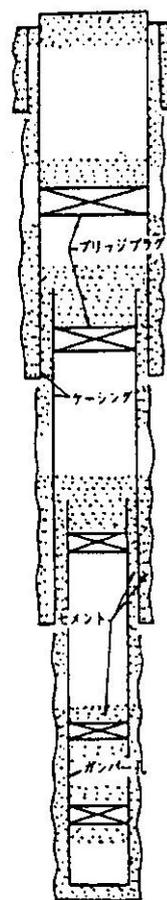
### 1.12.3 マッドロギングユニット

上に述べたような測定作業およびそれらデータの解析作業は、マッドロギングサービス会社に外注される場合が多い。サービス会社からは、測定器、コンピューター、出力装置等が、エンジニアとパッケージで提供される。ユニットでは、坑井掘削および地層情報に関する諸情報を時々刻々記録するとともに、データベース化し保存する。これら情報は、ユニット内はもちろん、ドリラーコンソール、カンパニーオフィス等に配置されたモニターにて監視することが可能であり、必要に応じてアラームをセットするということもできる。また、コンピューターの処理能力の向上により、表示項目の変更や過去のデータの表示といったことが、モニター毎に可能である。検層解析、炭化水素組成による油層評価などのプログラムも用意していて油層評価を坑井元において迅速に処理できるようになっている。また、掘削技術者用の異常高圧層の予知等の諸計算を行なうコンピュータプログラムも用意されている。

### 1.13 廃坑作業（「鉱業権者が講ずべき措置事例 第 22 章土地の掘削」参照）

掘削終了後種々の検層での調査の結果、仕上げ層がないことが確認された場合、または試油・試ガスを実施したが産出量が少なく採算性がない場合、その坑井は廃坑される。後日になって坑井から水および油ガス等が地上に洩れ、農作物に被害を与えたり、埋立個所が陥没したりする鉱害問題を起さぬよう万全の作業をすることが大切である。この作業にも坑井の状況によりいろいろな方法があるが一例を示す。

- (1) 地層と遮断するためテスト層を閉塞する。
- (2) ケーシング尻にブリッジプラグかりテーナをセットし、プラグ上にセメントをスポットしたり、リテーナ下にセメントを圧入する。
- (3) ケーシングを切断して回収する。
  - 1) セメントを充填してある部分のケーシングまたは坑壁の崩れによりスタックされた個所のケーシングは回収不能であるので検層により回収可能深度を調査する。
  - 2) 回収可能深度で爆薬かカッターにてケーシングを切断回収する。
  - 3) ケーシングの切断個所をセメントで閉塞する。
  - 4) 更にケーシングが二重に残っている場合、径の小さい方のケーシング内にブリッジプラグをセットしプラグ上にセメントをスポットする。
  - 5) 坑口にセメントをスポットし、鉄板溶接にてキャップする。



### 1.14 試油・試ガス作業

図 2.1.61 廃坑作業後の坑内図

試油・試ガスには試掘井の掘進中、掘進を一時中断し、ドリルパイプ（掘管）を使って裸坑のまま行なう裸坑 DST（ドリルステムテスト）と、ケーシングをセットしてからケーシング内でドリルパイプ（掘管）を使って行なう管内 DST、およびクリスマスツリーを設置して完全に仕上げられた坑井における試油・試ガスがある。

いずれの場合も得られるデータの精度に差はあるが、生産量と油ガス層圧力の時間的変化の関係を得ることに変わりはない。DST は 1920 年代から種々の方式により実施されているが、現在でも最も直接的な油ガス層の調査・評価手段である。前述のように DST には裸坑で行なう場合とケーシング内で行われる場合があるが、原理的には同じである。裸坑 DST を例にとると、各装置の編成は上部から、仮自噴装置、ドリルパイプ、テスター、ウォールパッカー、スリット管（アンカーパイプ）、捨て管の順であり、捨て管の下端が坑底についた状態で荷重をかけると、パッカーがセットされて坑内の泥柱圧はパッカー上下間にて遮断される（図 2.1.62 参照）。あらかじめドリルパイプ内は窒素および水（クッションウォーター）に入れ替えておくので、テスターのバルブを開くと地層内の流体はドリルパイプ（掘管）内へ流入する。テスト編成に取り付けた圧力ゲージから得られたデータを解析することにより、自噴圧力、密閉圧力、浸透率、掘削泥水の浸入に起因する油ガス層障害などについても定量的な情報が得られる。ケーストホール DST では一般に、バルブの開閉時などでドリルパイプの上下動に影響を受けない外圧加圧式のテスターが使用される（図 2.1.63 参照）。外圧を加圧することによりテスターのバルブは開となり、脱圧により閉となり、フローとシャットインを何度でも繰り返すことが出来る。

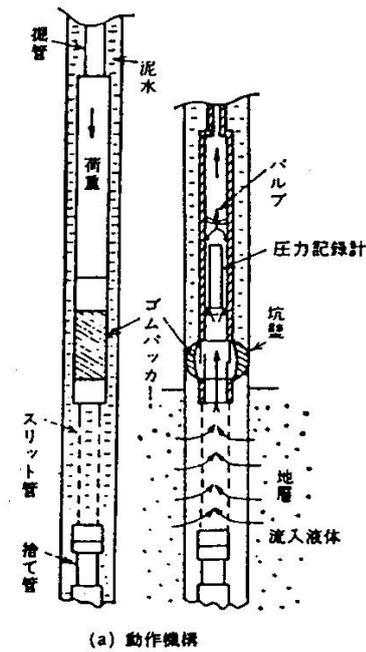


図2.1.62 掘削テストの機構

図2.1.63 外圧加圧式テスター  
(出典: Halliburton)

裸坑テストの場合には長時間にわたりドリルパイプを坑内に停止させておかねばならないので深い井戸や高傾斜井では抑留される危険が多いことなどが問題である。DST は一時的仮仕上げの状態で行なうもので、比較的短時間で油ガス層の物理・化学的性状や商業性を調査する作業であるが、通常の試油・試ガスはパーフォレーション、またはアンカー仕上げにより、プロダクションパッカーをセット、クリスマスツリーを取り付けて仕上げられた坑井に対して行なわれ、その作業手順は一般に次のように行なわれる。

#### (1) 排泥

チュービング内の泥水、パッカー下のケーシング内の泥水および油ガス層内に浸透していた掘削泥水が油ガスと共に自噴してくる。この泥水を十分に排出しておかないと試油・試ガスによって得られるデータの誤差の原因となったり、生産開始までに長時間油ガス層に泥水を浸すことになり地層障害が懸念される。

#### (2) 坑井密閉

排泥を十分行なった後、油ガス層の圧力が本来の圧力に回復するまで十分な時間密閉する。

#### (3) 密閉坑底圧力測定

#### (4) 生産レートを3~4段階に変化させ、油、ガス、水の生産量、および流動坑底圧力を測定

#### (5) 坑井密閉

#### (6) 密閉坑底圧力上昇測定

産出時間にもよるが、一般には、密閉してから24~72時間前後の坑底圧力を測定して試油・試ガス終了となる。なお、試油・試ガス中に必要に応じワイヤーライン/スリックラインによる坑底試料の採取、および地上に産出した油、水、ガスの試料を採取したり、テスト編成に試料採取のツールを組んでいる場合には揚管時に試料採取する。

以上の試料により大要、次の事項が解明される。

- ① 坑井の適正初日産量
- ② 坑井仕上げの良否
- ③ 層内流体の固有性質

試油・試ガス中の一般的な地上での処理の流れを以下に示す。

自噴を開始した直後は多量の泥水を排出するので、油とガスとに分離するセパレーターに入れる前、泥水だけを取り除くための泥切りセパレーターおよびマッドトラップを通し、泥水率が下がるとセパレーターに入るように切り替える。セパレーターで分離した油は計量した後、タンクローリー等で運搬されたり、場合によっては特殊なバーナーで焼却される。ガスはパイプラインがない場合には放散塔で焼却される。

#### <参考文献>

- ISO 11960 : Petroleum and natural gas industries —Steel pipes for use as casing or tubing for wells, 2011 (API Spec 5CT)
- 株式会社テルナイト：泥水技術マニュアル、平成元年
- ISO 10414-1 : Petroleum and natural gas industries — Field testing of drilling fluids Part 1: Water-based fluids ,2008 (API RP RP 13B-1)
- 最近の我が国の石油開発：第2章 さく井技術の進歩；石油技術協会, 1993
- API Spec 5CT: Specification for Casing and Tubing(includes Errata 1 dated September 2012) 9th Edition, July 2011
- Teodoriu, Catalin: Selection Criteria for Tubular Connection used for Shale and Tight Gas Applications, SPE 153110, 2012
- Scheider, Warren P. : Casing and Tubing Connection Stresses, JPT, August 1982
- ISO 15156-2 (NACE MR0175) : Petroleum and natural gas industries, Materials for use in H<sub>2</sub>S-containing environments in oil and gasproduction, Part 2:Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons, 2nd edition, 2009
- Lewis and Miller: Advanced Drilling and Well Technology(chapter 2) - Casing Design, SPE, 2009.
- Badicioiu, Marius and Teodoriu, Catalin: Sealing Capacity of API Connections - Theoretical and Experimental Results, SPE 106849, 2007.
- ISO 13679(API RP 5C5) : Petroleum and natural gas industries - Procedures for testing casing and tubing connections, 1st edition, 2002
- API Spec 5DP (ISO 11961:2008) Specification for Drill Pipe, 1st Edition, August 2009
- API RP 7G : Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits, 16th Edition, August 1998, Reaffirmed October 2010
- API RP 7G-2 (ISO 10407-2:2008) : Recommended Practice for Drill Stem Element Inspection (includes Errata 1 dated October 2009) 1st Edition, August 2009
- T.H.Hill : Standard DS-1, Drill Stem Design and Inspection,3rd edition. Jan. 2004
- NS-2: North Sea Drillstring Standard, Nov. 1999
- API Spec 7-1 (ISO 10424-1:2004) : Specification for Rotary Drill Stem Elements, 1st Edition, February 2006, Reaffirmed December 2012
- API Spec 7-2 (ISO 10424-2:2007) : Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connections, 1st Edition, June 2008
- IADC Drilling Manual Section P; Hole Deviation, 10th edition, 1982

- Directional Drilling and Deviation Control Technology, Editions Technip, 1990

<常用単位と SI 単位の併記方法は ISO 11960 ならびに ISO 10414-1 の記述法に準拠した>

## 2 掘削装置

地下に埋蔵されている石油および可燃性天然ガスを採取する目的で、坑井を掘削し、採取井を完成するに要する機械設備全般を掘削装置（ないしは掘削リグ）という。

一言で掘削装置といっても、過去発展途上において使用された上総掘り、綱掘りなどといった方式は現在ほとんど使用されていないため、ここでは現在最も一般的に使用されているロータリー式掘削装置について、その概要を述べる。なお広義に解釈すれば、当然坑内機器やストリング類等も掘削装置の一部と考えられるけれども、ここで述べるものは地上機械設備のうち、防噴装置、坑口装置および泥水調整装置を除く、主な機械装置にとどめる。

ロータリー式掘削装置はエアードリリング、ダウンホールモータードリリングなどにも発展利用されており、以下に示す機械装置も最近の資源有限論から急激な脚光を浴びるに至り、その利用範囲の拡大と相まって、特にめざましい進歩がある。以下の機械装置を使用するにあたり、目的坑井に適合する規模、容量、機能および個々の相互調和を有する装置で作業するとき、掘削技術とともに、安全で、合理的で、かつ経済的な掘削作業が可能となろう。

### 2.1 デリック（やぐらないしはマストとも言う）

デリックおよびサブストラクチャーは石油鉱業のシンボルとすべき大型形鋼で一体をなしたユニット構造物であり、掘削作業能率に影響を及ぼす重要度の高い装置である。

#### 2.1.1 デリック

デリックまたは掘削やぐらと称するもので、坑井の直上に設置され、滑車類（クラウンブロック、トラベリングブロック他）そしてドローワークス（巻揚装置）により、坑井内に降下するストリング類（ドリルストリングおよびケーシング・チュービングストリング）の懸垂重量を支えると同時に、ドリルストリング（ドリルカラー類とドリルパイプ他）の揚降を可能とする鉄塔である。

##### i) デリックの種類

###### (1) 組立式標準デリック（スタンダードデリックとも言う）

防食処理を施した形鋼製部材を使用し、サブストラクチャー上面から順次組立てて完成するもので、サブストラクチャーの平面四隅がデリックの脚位置となる正方内面を有する極く一般的なデリックである。トッププラットフォームから上に、クラウンブロックを引き上げるジンポールを有し、これらを含め、デリック建設後の掘削準備作業が多い。特徴としてはデリック建てに要する敷地面積が少なく、掘削作業床面積が広く、かつ製作費や輸送費が安いなどの利点がある反面、デリック建て倒しに特殊技能と時間を要し、経費高となることから、海洋プラットフォームやジャッキアップバージには良く使用されるが、陸上掘削装置には頻繁な移動を伴うため、現在の使用頻度は低い。

###### (2) カンチレバーマスト

デリックを輸送可能な範囲内で分割したブロックに製作し、これをサブストラクチャーの高さで横組みにし、A マストとスリングラインを介して、ドローワークスで一気に建て倒しする。またハイフ

ローアサブストラクチャーの場合、横組みの高所作業を伴うので、地上で組み、そのまま建てるか、あるいはレールによりサブストラクチャー上面に引き上げて建てる方式が採用されている。デリック横組み中に、ロータリーホース等デリックに附属する機器一切を取付けて建てるので、デリック建て後の掘削準備作業が少ない。デリック部材は溶接性が良く、強度の高い抗張力鋼が使用されている。特徴としては一般に高所作業が少なく、デリック組みや建て倒し作業が容易で迅速である利点に反し、デリック組み敷地を広く要し、デリック脚間隔が狭いので、掘削作業床の制限があり、かつ製作費が高額になるなどの欠点があるものの、最近多く使用されている。

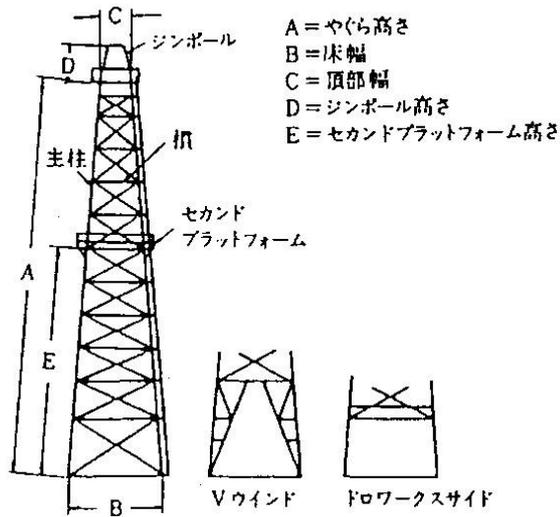


図2.2.1 組み立て式標準やぐら

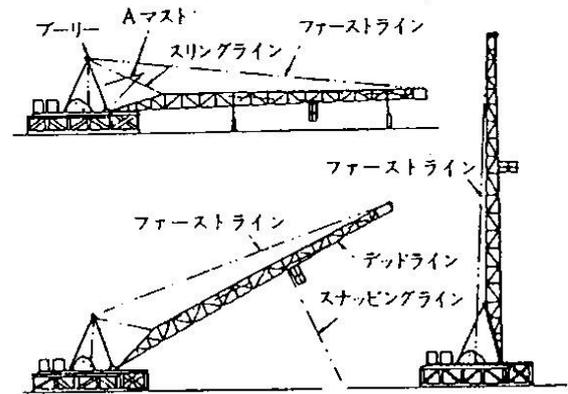


図2.2.2 カンチレバーやぐら

### (3) テレスコープデリック

比較的浅い深度の坑井掘削および坑井改修作業に使用されるデリックで、カンチレバーのような形鋼溶接ブロック構造のものやパイプ製主柱のものがある。機構は油圧または専用ワイヤーロープを使用して、一旦デリックを建ててから更にセカンドプラットフォーム上部を引き伸ばす方式が一般的である。これらはドロワークスとその動力をユニット化したトレーラーマウント型式のものが多いが、一方カンチレバーマスト同様に建て倒しするものもある。特徴はカンチレバーマストと同じであるが、デリック組み敷地はそれより小さい。

### (4) ダイナミックデリック

最大静荷重の他に動荷重に耐えるように設計されているデリックで、特に海洋掘削船の半潜水式バージおよび船型バージのように、作業時に船のローリング、ピッチング、ヒービング等の船揺れのあるところに使用される。これには前述の組立式とカンチレバー式の2種類がありいずれも強力で、デリック自重も大きい。

## ii) 寸法および容量

デリックの型式、掘削深度およびドリルパイプ仕様などにより一様ではないが、テレスコープを除く掘削デリックでは、高さが24～58 mで、自重を含む耐荷重容量が100～600 tで、かつラッキング容量（セカンドプラットフォームのドリルパイプ建て掛けm数）が1,000 m～9,000 m位である。テレスコープデリックはコンパクトなもので、その目的によって多種多様であるが、一般的に利用されるデリックは地上からの高さが14～34 mで、そのフックロード容量（デリックの自重を含まない最大静荷重）が14～186 t程度の範囲である。また最近この種のもので、海洋改修井共用として大容量のものが

あり、高さ 29～42 m、フックロード容量 150～340 t 位まで開発されている。

### iii) 強度

デリックの強度はそれにかかる懸垂最大静荷重に、かつ風圧や海洋の動荷重に対して十分耐えなければならない。これらは掘削深度、掘削条件および地域条件によって、その設計条件を設定するが、その設定条件に対して技術基準省令の技術指針（内規）にもとづいて設計製作される場合、最大静荷重に対し 2.7 以上で、風速 30 m/sec 以上となる。なお API Spec 4F の中で海洋に用いられている基準では、ドリルパイプをラッキングしたりする稼働条件で、21.6 m/sec の設計最小風速となっている。この風速はデリック部位により変化し、あらかじめ決められた高さ係数  $\beta$  (elevation factor) を掛ける。たとえば、あるデリックの部位が海拔 48.8 m (MSL) の場合、 $\beta$  は 1.18 なのでその部位については少なくとも 25.5 m/sec の設計風速となる。時化などに備えた状態での設計最小風速は 47.8 m/sec の基準となっていて、デリックの高さ 48.8 m 部位に適用する設計風速は 56.4 m/sec 以上としなければならない。

### iv) デリックの附属品

#### (1) セカンドプラットフォームおよびフィンガーボード

デリックの約中間にありドリルパイプの揚降作業時に、デリックマンがドリルパイプスタンドやドリルカラーをエレベーターに掛けたり、外したりする場所である。この場所をモンキーボード (monkeyboard) とも呼んでいる。サブストラクチャー上面からの高さは使用ドリルパイプの長さにより異なるが、レンジ 2 (9 m) の場合で、例えば 3 本継ぎスタンドが 25.6～26.2 m で、2 本継ぎスタンドが 16.7～17.7 m の範囲で調整可能となっている。

#### (2) トッププラットフォーム (あるいはウォーターテーブル)

デリックの頂部でクラウンブロック周囲の足場である。それゆえこの足場をクラウンウォークアラウンド (crown walk around) とも呼んでいる。

#### (3) チュービングサポートフレーム (あるいはチュービングベリャーボード)

チュービング作業時、スタンドチュービングの建て掛けによる曲りを防止するもので、レンジ 2 (9 m) ドリルパイプ 3 本継ぎセカンドプラットフォームの場合、サブストラクチャー上面から約 13.5 m の高さに取り付ける。周囲に足場と手摺がついている。

#### (4) ケーシングスタビングプラットフォーム (あるいはケーシングスタビングボード)

ケーシングを降下するとき、ケーシングねじ込み前の芯出しおよびエレベーターかけを行なう足場で、2～4 m 程度の高さ調節が可能である。

#### (5) ジンポール

組立式デリックに必要なもので、クラウンブロックの取付け、取外しなどに使用される。高さはトッププラットフォーム上、更に 2.5～5.0 m の空間を保持すべく製作される。

#### (6) デリック起し用 A マスト

カンチレバーマストの建て倒しに使用する装置である。

#### (7) デリックブーム

特にカンチレバーマストで、掘削作業中に軽い器材を吊り上げるためにホイストブームで、デリックのトップセクションの主柱に取付け、半径約 6 m の旋回範囲で、約 2 t 吊り上げられる。

#### (8) ラダー

作業員のデリック昇降梯子で、デリックの頂部まで一直線に取付けたものと、適当に休めるように

考慮したものがある。昇降時の安全策としては種々のものがあるが、ラダーケージが一般的である。

### 2.1.2 サブストラクチャー

坑井上の整地した地表に通常板パネルまたは皿板を敷き、その上に設置される鉄骨構造物で、デリック、ドローワークス、同動力、デリック機器、吊り具、ドリルパイプ、ドリルカラー、ケーシング等の重量物の支持台であり、かつ掘削作業床となるものである。

#### i) サブストラクチャーの形成

##### (1) ブロック積み重ね型サブストラクチャー

サブストラクチャーの上面は作業床となり、坑芯周囲の床下は坑口装置および防噴装置が位置する重要な空間である。そのため、左右のデリック脚部にブロックを重ねて、両側のブロックを継ぎ材で一体化する構造である。サブストラクチャーはデリックサブストラクチャーとエンジンサブストラクチャーより構成されるが、この二つが明白に分離されているものは組立式デリックを伴う場合で、カンチレバーマストの場合は長手方向の各ブロックの継手を各々重ね段毎に互わしているため、明白でない。各ブロックは輸送制限内寸法で、形鋼溶接構造のロング型ブロックであり、ブロック間および継ぎ材との接合はすべて作業容易なピン打ち込み方式を採用している。作業床および機械搭載面となる上面は均一面を有するものと、デリックとエンジン用床の異なる2段あるいは更に、ドローワークス床を異にした3段式とがある。特徴は移動性に富み、組み立て解体時間が短く、ブロック個々の重量が大きいので耐震性が高いことであり、設置に大型クレーン車が必要となる。

##### (2) ブロック組立型サブストラクチャー

ブロックを横に積み上げる前項の方式と異なり、上部と下部の平面溶接ブロックに柱部材または柱ブロックをピン打ち込み方式などにより組み立てる方式で、ディーゼルエレクトリック方式またはキャットウォークのみを搭載するハイフロアーに多く使用される。

##### (3) 組み立て式サブストラクチャー

デリックその他の受荷重部の下に、それぞれ支持台を入れ、それをボルトで継ぎ合わせて組み立てる方式で、現在はほとんど使用されない。

#### ii) サブストラクチャーの高さ

ケーシングプログラム、坑口装置、防噴装置、その他作業上の関係等から決定する。一般には3.2～5.2 m程度であるけれども、掘削深度の増加に伴う防噴装置の増強などから6.7～9.0 mのハイフロアーサブストラクチャーも使用される。

#### iii) 強度

ドリルパイプやケーシングの全重量を支えるロータリーマシンの下のテーブルサポートフレーム、ドリルパイプをセットバックするエリア、デリックの主柱を支えるエリアは特に重荷重部として、十分な強度を必要とする。その他のドローワークス下、ディーゼルエンジン下およびデッドラインアンカー取付け部についても、その荷重に耐え、更に掘削時に強力な動荷重が加わるため、振動をも考慮して設計製作されている。また地盤との関係もあり接地面積を多くし、荷重分布の均一化をはかるべく、大型形鋼を配するなど考慮している。

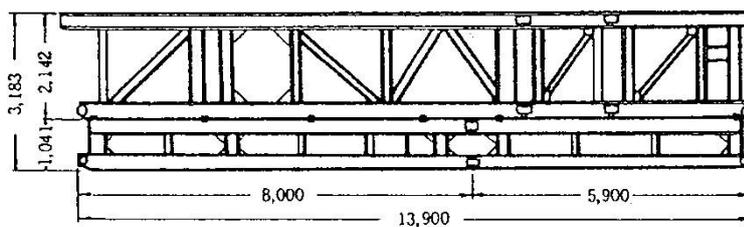


図2.2.3 サブストラクチャー側面図（フラットフロア式）

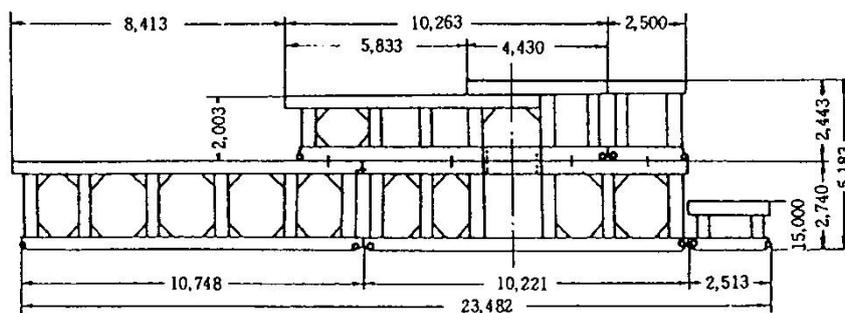


図2.2.4 サブストラクチャー側面図（三段フロア式）

## 2.2 ドローワークス

ドローワークスは衝撃など過酷な荷重条件に耐える大型巻揚装置で、エンジンまたは電動機から動力を得て、ストリング類を昇降する。ドリルパイプに回転を伝えるロータリーテーブルの駆動に使用する場合も多い。

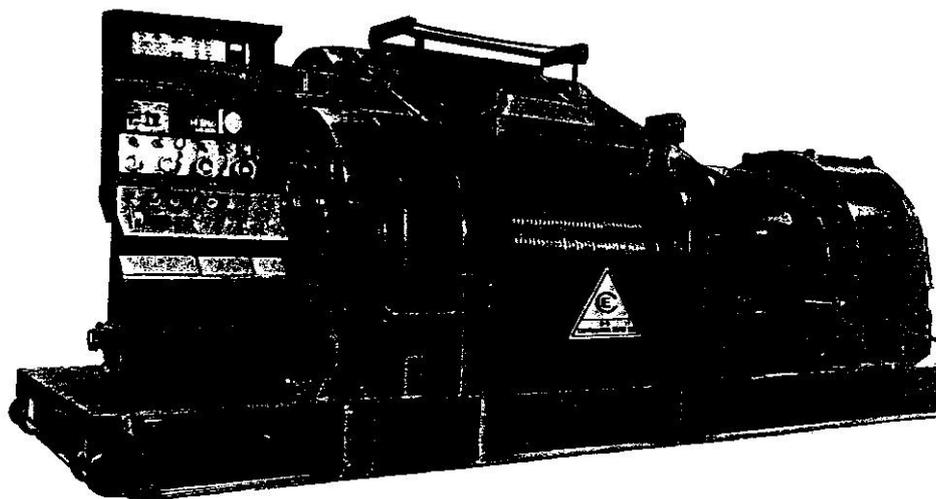


図 2.2.5 ドローワークス

### 2.2.1 ドローワークス

#### i) 種類および構成

エンジンからチェーン駆動によるメカニカルドローワークスと電動機からチェーン駆動によるエレクトリックドローワークスがある。

##### (1) メカニカルドローワークス

主な構成はトランスミッション部とドラム部からなり、トランスミッション部には入力軸のドライ

ブシャフトとジャックシャフトが組み込まれており、チェーンとスプロケットによって動力伝達と変速が行なわれる。ドラム部にはドラムシャフトとキャットシャフトが組み込まれ、ミッション部のジャックシャフトからチェーン駆動されている。ドラムシャフトにはワイヤーロープの巻き取りドラムがあり、そのリールの両側面に懸垂荷重を支えるブレーキホイールとブレーキバンドがある。キャットシャフトは両側にキャットヘッドが取付けられており、ドリルパイプ等のジョイントの締め戻しやキャットラインによるデリック下作業に使用される。これらの装置が強靱な構造の鋼製スキッドベース上のフレーム構造内に組み込まれており、その外面は雨水の浸入を防ぎ、かつ外力からの損傷を防ぐべく丈夫なケースで覆われている。

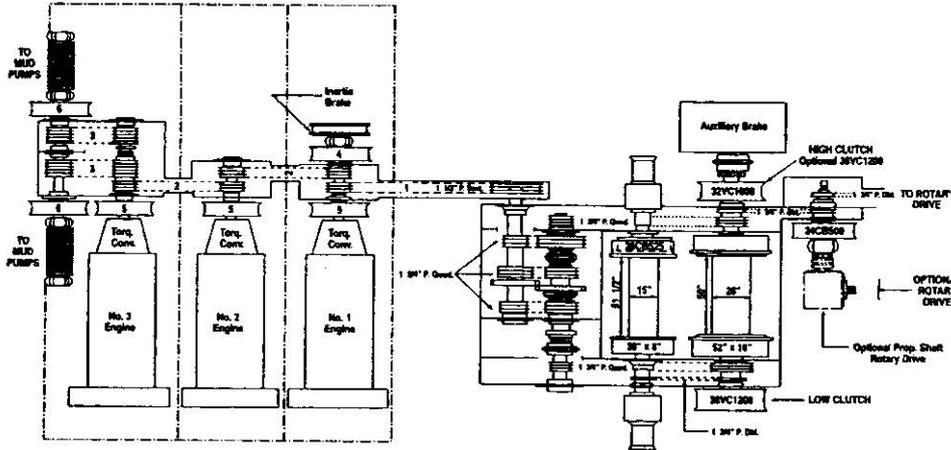


図 2.2.6 ドローワークス (メカニカル)

(2) エレクトリックドローワークス

上述のメカニカルドローワークスと異なる点は、その動力がエンジンと違って、一定のトルクに保持したまま速度変化ができるために、ミッション部分すなわち、ジャックシャフトがなく、比較的コンパクトである。その他はメカニカルドローワークスと同じである。

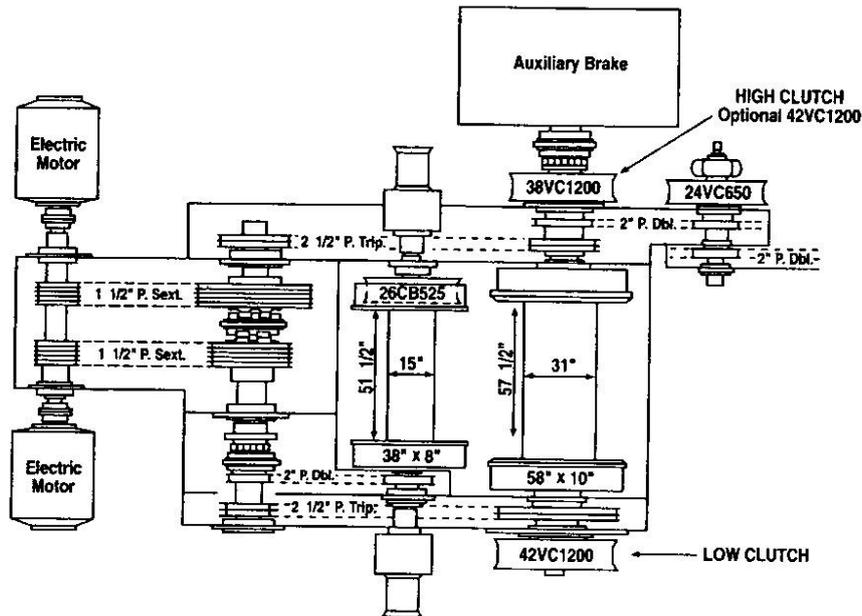


図 2.2.7 ドローワークス (エレクトリック)

## ii) 付属設備

### (1) コントロールパネル

ドラム部のドリラステップのブレーキハンドルの位置で、左手で操作可能な位置に設置され、ドロワークスの全操作、動力制御および泥水ポンプの作動など遠隔操作を司る集中操作盤であり、エアークラッチやダイアフラムへの空気を給供する空気制御弁群とミッション部の速度選定を行う接続棒レバー群で構成されている。

### (2) 補助ブレーキ

ドラム軸にクラッチ（オーバーランニング式またはジョークラッチ）を介して直結され、またはドラム軸からチェーン駆動されるもので、主ブレーキの補助として使用される。これには電磁ブレーキ（エルマゴ）と水圧ブレーキとがあり、いずれもドロワークスの入力馬力と同程度の容量である。

### (3) コアリングリール

ドロワークスのキャットシャフトにワイヤードラムを設け、ドラムとバンドブレーキにより構成され、コアリングその他の作業に使用されてきたが、現在は坑芯傾斜方位測定やスワビングなどが主な目的である。附属されないドロワークスもあり、その場合は専用動力付の独立ユニットを使用する。

### (4) ロータリーカウンター

ドラム部のロータリーサイドに設けられ、ロータリーテーブルの駆動用に使用されるカウンターであり、特に大型装置ではエアークラッチの他に、ロータリーテーブルの惰性回転を止めるイナーシャブレーキが付いている。

### (5) その他

ドラムブレーキホイール冷却装置、給油装置、エアー操作関係制御装置などがある。最近の保安および自動化の装置として、過巻防止装置と自動掘進装置があり、前者はドラムのワイヤードラムの巻き段が一定位置になると自動的にクラッチが切れ、ブレーキを働かせる方式で、過巻きによるトラベリングブロックとクラウンブロックとの激突を防止する。後者は一定のビット荷重になるように自動的にブレーキをコントロールし、掘進する装置である。

## iii) 強度および容量

ドロワークスはその使用内容の多岐と強大な入力馬力に耐えるべく各部が強靱に作られ、かつ輸送を考慮して軽量に製作されている。このため軸材をはじめ各部は最良品を使用し、製作には技術の粋を結集してある。特にドラムクラッチは高性能なフリクションクラッチを備え、多少の無理な作業が可能になっている。

ドロワークスの入力馬力は、その性能に応じて 100 馬力から 3,000 馬力 (74.6~2,237.1 kW) 位までであるが、この馬力基準は一般に最大掘削深度で 1 馬力当り約 3 m である。ドラムに使用する巻揚用ロープすなわちドリリングラインの公称径も種々あり、その能力に応じ 3-3/8 in. (85.7 mm) から 1-3/4 in. (44.4 mm) くらいで使用されている。コアリングリール用ワイヤードラムは 9/16 in. (14.3 mm) で、リール容量は 3,000 m から 6,000 m 程度である。

## 2.2.2 効率と馬力計算

### i) コンパウンド装置とドロワークスの機械効率

動力数台をコンパウンドしてドロワークスを駆動する場合の機械効率は、チェーン駆動装置と耐

摩擦性ベアリングを伴う軸から構成されるコンパウンドとドロークスの軸 1 本を経過する毎に 98 % で、1 条のチェーンを経過する毎に 98 % となるとして、1 台毎の動力伝達経路の軸数(a)とチェーン条数(B)を数えて、1 台の機械効率  $(0.98)^{a+B}$  を求め、全台数の和を台数で除した値を平均機械効率とする。これは一般的な考え方で、軸 1 本毎に 98 % とするのはベアリング一対の効率で、実際にはベアリングの摩耗状態やその他の附属品によっても異なるが、目安にできる。

ここで、参考のために、図 2.2.8 のごとく一般的なメカニカルドライブのドロークスおよびコンパウンド装置について、その計算数値を次に示す。

ドロークス効率  $\eta_D$  ドラム出力効率 0.90

ロータリー入力効率 0.85

コンパウンド効率  $\eta_C$

1 台コンパウンド効率 0.96

2 台コンパウンド効率 0.94

3 台コンパウンド効率 0.92

ライブ

4 台コンパウンド効率 0.90

したがって、エンジンの軸馬力の総和を P とすれば、ドロークスドラムの出力馬力  $HP_D$  は

$$HP_D = P \times \eta_D \times \eta_C \quad \text{である。}$$

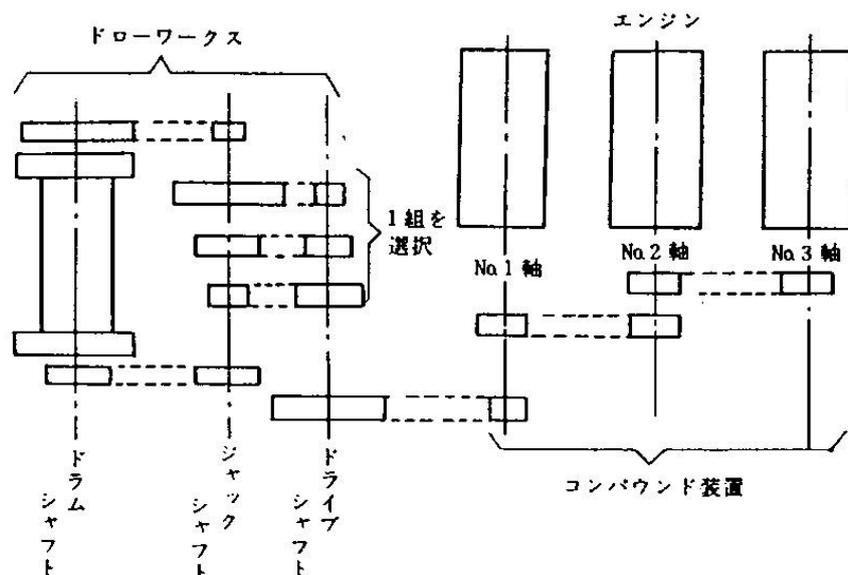


図 2.2.8 ドロークス駆動系統

## ii) 滑車組合せ装置の効率

クラウンブロックとトラベリングブロックの滑車組合せ装置の効率は経験的要素が多く、一般にはシーブのベアリング効率とドリリングラインの曲げや振動などによる効率から求めるが、API 規格に次の数値を使用すべく、推奨されている。

6 本綱の滑車組合せ装置効率  $\eta_s = 0.874$

8 本綱の滑車組合せ装置効率  $\eta_s = 0.841$

10 本綱の滑車組合せ装置効率  $\eta_s = 0.810$

12 本綱の滑車組合せ装置効率  $\eta_s = 0.770$

## iii) 馬力計算式

ドローワークスの馬力計算式として次の式が使用される。

## (1) 回転馬力

$$HP_R = \frac{2\pi T N}{60 \times 75} = \frac{T N}{716.2}$$

ここで  $HP_R$  = 回転馬力, hp

$T$  = トルク, kgf・m

$N$  = 回転数, rpm

## (2) フック馬力

$$HP_H = \frac{W_h \times V}{4,500}$$

ここで  $HP_H$  = フック馬力, hp  $W_h$  = フック荷重, kgf

$V$  = フック速度, m/min

## (3) ファーストラインの張力

$$T_F = \frac{W_h}{N \times \eta_s}$$

ここで  $T_F$  = ファーストライン張力, kgf

$W_h$  = フック荷重, kgf

$N$  = トラベリングブロックの綱数

$\eta_s$  = トラベリングブロックの綱数による滑車効率

## 2.2.3 計器類

掘進作業や揚降管作業時に、坑内状況を把握しつつドローワークスを操作しなければならない。そのためドローワークスのブレーキハンドルの直前に、ウェイトインジケーター等の計器を格納し、集中監視できるゲージボックスが取り付けられている。その中に組み込まれている主なものを述べる。

## i) ウェイトインジケーター

圧力発生装置付のアンカー部と計器部とからなり、ワイヤーロープ径 5/8～1-5/8 in. (15.9～41.3 mm) で、綱数6～14本のものがあり、デッドラインの引張り容量は13.6～54.5 tで、それぞれ目盛板を取替えることで、6～12本、8～14本綱の範囲で使用できる。デッドラインの張力を圧力に変換して重量表示する方式である。

## ii) ロータリートルクメーター

掘進時に、ドリルパイプにかかる回転トルクを表示するもので、ロータリーチェーンにかかる張力からとるものと、ロータリーテーブルにかかる左右のねじり力からとるものと2種類あり、前者は圧力表示のため換算表が必要であり、後者は圧力発生器の取り付け位置を一定とするので、トルク表示であられる。

## iii) トングトルクメーター

ドリルパイプやケーシング、チュービング類のジョイント締付けトルクを確かめるため、トングのパワーラインに挿入して使用するもので、207～16,560 kgf・m (2.0～162.4 kN・m) の範囲で表示される。

## iv) ロータリースピードメーター

ロータリーカウンターの回転により発生する電力によりロータリーテーブルの回転数を検出表示する。

## v) その他

泥水関係で、遠隔圧力計、ポンプスピードメーター、ポンプカウンター、ピットレベルメーター、フローレートメーターなどがあり、またトンマイルメーター、ドリリングレコーダーなどもあり、掘削管理に利用される。

## 2.3 泥水ポンプ

坑内循環泥水は泥水ポンプにより圧力エネルギーが与えられ、デリベリライン、スイベル、ケリー、ドリルパイプ内を経て、ビットのノズルから管外に噴射し、ドリルストリング外周と坑壁との間隙を通過して、地上に返還する。その目的は掘屑の運搬・除去やビット冷却のみならず、圧力の一部をビットの消費馬力として与え、掘進率の向上をはかるとともに、坑井維持管理に重要な役割を果たす。

## 2.3.1 泥水ポンプ

## i) 動力装置

泥水ポンプを駆動する動力装置にはドローワークス動力のコンパウンド装置よりポンプクラッチを経てチェーン駆動されるテールポンプ方式と、独立した専用動力装置を設けて駆動する独立方式の2つがある。前者は動力利用効率が良く、一般に大型掘削装置に、後者は作業上の便利度が高く、中型以下の掘削装置に多く使用される。

## ii) 種類と構成

掘削泥水を坑内に圧送する泥水ポンプは横置式複筒往復動型と横置式3筒単動型ピストンポンプの2種類がある。前者はデュプレックス、後者はトリプレックスポンプと呼ばれ、ともに大馬力・高吐出圧力、高繰出量の大容量ポンプで、必要に応じてピストン径を変更できる泥水ポンプである。ポンプの構成は変速部とライナー（シリンダー）受圧部からなり、これらは同一スキッドベース上に一体に組み立てられ、運搬に便利である。変速部は入力回転を減速し、回転を水平の往復運動に変え、受圧部はピストン、ライナー、バルブ等で、泥水圧力を発生させる部分である。

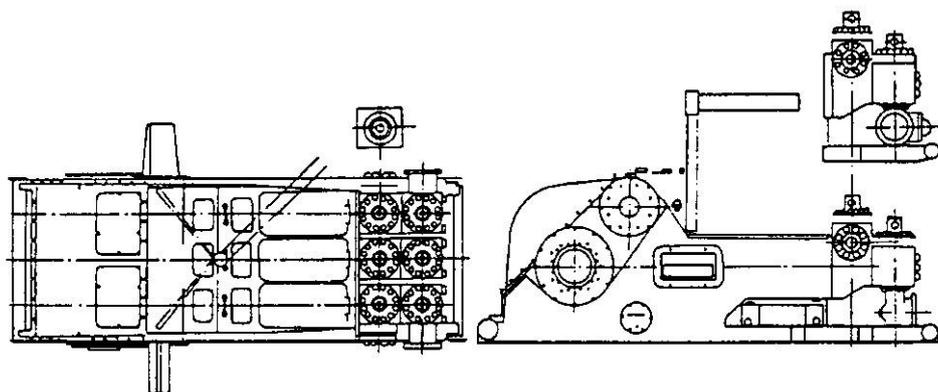


図2.2.9 トリプレックスポンプ

## iii) 付属装置

## (1) 安全弁

安全な圧力以上にポンプの吐出圧力が上昇した場合にその圧力を逃がすための安全弁であり、ポンプの吐出マニホールドにバルブを介さずに直接取付けなければならない。スプリング式のリセットリリース弁とシャープピン式の安全弁があるが、前者は圧力を選定できるようになっており、あらかじめポンプの最高使用圧力に調整しておけば、設定圧力で開放するため、現在使用される大部分がこの機種である。

## (2) ストレーナー

坑井内に異物が送られることを防止する目的で、デリベリマニホールドに格納されている孔明パイプ製ストレーナーである。

## (3) パルセーションダンパー

デリベリ用とサクシジョン用の2種があり、前者はデリベリマニホールド真上に設置され、後者はポンプ直前のサクシジョンラインに設置される。いずれもピストンによる脈動を緩和するもので、窒素ガスを封入し、脈動を吸収させる。

## (4) スーパーチャージングポンプ

ピストンの速度が速く、サクシジョン効率の悪いトリプレックスポンプのサクシジョン効率を高くするために使用するもので、セントリヒューガル（渦巻型）ポンプを利用し、サクシジョン側に強制供給するものである。これはピニオンシャフトからベルト駆動する方式と独立方式とがある。

## (5) その他

耐振型圧力計およびポンプスピードメーター、ポンプカウンターなどのセンサーが取り付けられる。

## iv) ポンプの入力馬力とその性能

中型以下の掘削装置ではポンプ1台か、あるいは2台を備えるが、その1台は規模の小さいものを選ぶが、大型掘削装置では2台とも同規模のポンプを備えるのが一般的である。入力馬力は300馬力位から2,000馬力(223.7~1,491.4 kW)程度のものであるが、その選定は、掘削装置の規模にもよるが、一般的にドローワークスの入力馬力の75~110%程度である。ポンプの最高吐出圧力および繰出量はポンプ型式、入力馬力、使用ピストン径やピストンストローク数によって異なるが、70~400 kgf/cm<sup>2</sup> (6.86~39.2 MPa)、2~3.5 kl/min程度が使用される。ピストンストロークと定格ストローク数はデュープレックスで14~16 in. (356~406 mm)、65 spm程度で、ピストン径は5~7-1/2 in. (127~191 mm)位であるが、トリプレックスでは7-3/4~12 in. (197~305 mm)、120~170 spm程度で、ピストン径は3-1/2~7-1/4 in. (89~184 mm)程度である。

トリプレックスポンプのデュープレックスポンプに対する利点は、

- ① 一入力馬力の場合小型である。
- ② 筒数が多く、ストロークも小さいため、吐出圧力の脈動が小さい。
- ③ 単動のためピストンロッドやロッドパッキングの消耗がない。
- ④ 構造上、ピストン、ライナー等の消耗品の取替え作業が容易である。

欠点としては、

- ① 同じ繰出量を得るのにピストン速度が大きくなるため、効率を上げるためのサクシジョン用スーパーチャージポンプが必要である。
- ② 同様に、ピストン、ライナー、バルブ等の消耗品の消耗が早い。
- ③ ピストンの冷却および潤滑のための装置が必要である。

## v) 強度

ピストンポンプは往復運動のために、回転ポンプと比較して、その脈動等による衝撃荷重が大きく、軸やギア関係には良質材料が使用され、特に、それらを支えるフレームは強靱で、かつ剛性に富むよう配慮されている。また受圧部のピストン、ライナー、バルブ、パッキング等は微細なソリッド（砂など）を含む泥水を高圧下で吐出するため、各部の摩耗が多いので、特殊な材質を使用して、丈夫に製作されている。

## 2.3.2 ポンプ効率と馬力計算

## i) ポンプ効率

ポンプ効率には機械効率と繰出量の容積効率の2つがある。機械効率はピニオンシャフトとメインシャフト間の歯車伝達機構の効率、クランク機構の摺動効率および軸関係のベアリング効率の相乗で、デュプレックスで0.85、トリプレックスで0.90の機械効率であるとされる。容積効率は圧力、泥水の性状および配管システムにより不定である。ただ、一般的には0.90前後を使用する。チャージングポンプ付のトリプレックスポンプは比較的高い。

## ii) ポンプ駆動装置の機械効率

ポンプ駆動装置の効率は2.2.2項と同じ方法による。2台の独立コンパウンド装置について機械効率は0.90、同様に1台動力の場合は0.92である。

## iii) ポンプの繰出量と水馬力

ポンプの繰出量は次の式で計算する。

$$Q = \frac{\pi}{4 \times 1,000} [D^2 + (D^2 - d^2)] L N S = 7.854 \times 10^{-4} [D^2 + (D^2 - d^2)] L N S$$

ここで  $Q$  = 繰出量, l/min

$D$  = ライナーの内径, cm

$d$  = ピストンロッドの外径 (ただしデュプレックスのみ), cm

$L$  = ストロークの長さ, cm

$N$  = ライナーの数 (デュプレックスは2、トリプレックスは3)

$S$  = 1分毎のストローク数, spm

上式において、トリプレックスの場合は  $(D^2 - d^2)$  の項が不要となる。

ポンプの水馬力は次式で計算する。

$$HP_P = \frac{Q \times P}{450}$$

ここで  $HP_P$  = 水馬力, hp

$Q$  = 繰出量, l/min

$P$  = 吐出圧力, kgf/cm<sup>2</sup>

水馬力は動力の入力馬力とポンプ効率に制限されている。また下式により必要な入力馬力を求めることもできる。

$$HP_P = \eta_P \times \eta_V \times HP_B$$

ここで  $\eta_P$  = 機械効率

$\eta_V$  = 容積効率

$HP_B$  = 入力馬力, hp

## iv) 計算例

ライナー径6 in. (158.8 mm)、ストローク長さ10 in. (254.0 mm) のトリプレックスポンプが吐出圧力200 kgf/cm<sup>2</sup> (19.6 MPa)、140 spmで運転している。このときの繰出量およびポンプの入力馬力を求めよ。ただし、容積効率90%と機械効率を90%とする。

〔解〕 ポンプの繰出量  $Q$  は、

$$Q = 7.854 \times 10^{-4} \times 15.88^2 \times 25.4 \times 3 \times 140 = \underline{2,113 \text{ l/min}}$$

ポンプに必要な入力馬力  $HP_B$ は

$$\begin{aligned} HP_B &= HP_P / (\eta_P \times \eta_V) = Q \times P / (450 \times \eta_P \times \eta_V) \\ &= 2,113 \times 200 / (450 \times 0.9 \times 0.9) = \underline{1,159 \text{ hp}} \end{aligned}$$

### 2.3.3 調泥ポンプ

地上での泥水タンク間と泥水調整装置への泥水移送、更には坑内への補泥用として使用する。これには泥水ポンプのうち、スタンバイポンプ1式を利用する方法と、これとは無関係に動力付の専用ポンプを使用する方法がある。比較的小型の掘削装置には前者が、また大型掘削装置には後者が多く使用される。動力付の専用ポンプの大部分はボリュート式の渦巻ポンプ、いわゆるセントリヒューガルポンプである。ポンプの入力馬力は100馬力(74.6 kW)程度で、最大吐出圧力7 kgf/cm<sup>2</sup>(0.69 MPa)、繰出量は4~6 kl/minであり、ポンプサイズは6×8(デリベリ径 in.×サクシジョン径 in.) (152.4 mm×203.2 mm) または5×6 (127×152.4 mm) が多く、回転数は1,100~1,800 rpm程度である。インペラー、ケーシング材質は耐摩耗材料を使用している。

### 2.3.4 泥水ライン

泥水ポンプからケリーまでの泥水吐出ラインならびに付帯ラインとポンプサクシジョンライン関係である。

#### i) 吐出ライン関係

ポンプの吐出ライン、すなわちデリベリラインは高圧、大容量の泥水が流れるので、パイプ本体、金具、バルブ類は耐高圧のものが使用される。特に、陸上掘削装置については組立、分解、輸送を容易にするため、ユニオン継手を主体とし、パイプと金具類の接続は脈動を考慮した溶接継手が多い。エルボ、分岐管関係も内部抵抗を減ずる目的で、曲率半径の大きな特殊品を使用する。バルブは泥水専用のゲートタイプのマッドバルブを使用し、ユニオンは強靱で、かつ締め戻しの容易なウイング式で、ともに材質は鍛造または鋳鋼品である。使用サイズは主線が4~5 in. (102~127 mm)、補助線が2~3 in. (50.8~76.2 mm) で、最高使用圧力は140~527 kgf/cm<sup>2</sup> (13.7~51.7 MPa) である。

#### ii) サクシジョンラインと調泥ポンプのデリベリライン

これらは低圧であるが、大容量で、一般に5~10 in. (127~254 mm) 径を使用し、耐圧は10 kgf/cm<sup>2</sup> (0.98 MPa) 程度である。バルブは操作が早くて容易なバタフライバルブを使用し、取付けを容易にするため、ユニオンまたはスリーブジョイントを使用する。

#### iii) ロータリーホースとバイブレーションホース

ロータリーホースはスイベルとスタンドパイプ(デリックに沿って立ち上っている)間に取り付けられ、バイブレーションホースは泥水ポンプ出口とデリベリライン間などの脈動による振動の生じやすい個所に取り付けられる。これらのホースはともに鋼線入りのバンドレスホースで、可塑性に富み、耐圧に強いラバーホースである。接続は両端とも一般にラインパイプねじである。ロータリーホースのサイズは 2、2-1/2、3、3-1/2、4、5、6 in. (50.8、63.5、76.2、88.9、101.6、127.0、152.4 mm) 内径で、耐圧(試験圧力)が210~1,582 kgf/cm<sup>2</sup> (20.6~155.2 MPa) 間の4種類である。バイブレーションホースのサイズは3、3-1/2 in. (76.2~88.9 mm) 内径で、耐圧(試験圧力)が525 kgf/cm<sup>2</sup> (51.5 MPa) と 700 kgf/cm<sup>2</sup> (68.6 MPa) の2種類がある。

### 2.3.5 泥水処理装置

#### i) シェールシェーカー

シェールシェーカーとは、坑内から返ってきた泥水をメッシュスクリーンで振動により泥水と掘屑に分離する装置をいう（図 2.2.12）。ソリッドコントロールの中でシェールシェーカーが最初の役割を担うが、それが掘削工程の増減（＝リグコストの増減）、坑内状況の良し悪しにも影響することより、地下から揚がってきた最初の段階で微細な掘屑をもあらかた除去することが重要となる。例えば、シェールシェーカーを3台、泥水が均一にフローするようにデバイダーなどを設置し、細かなメッシュサイズのスクリーンで極力ソリッド分を除去することがその第一歩となる。

#### ii) マッドクリーナー

マッドクリーナーとは、サイクロンの原理（図 2.2.10）を応用したもので、遠心力で泥水とソリッドを分離し、さらに分離されたソリッドをメッシュスクリーンにかけてソリッドに付着した泥水を循環系統に回収する装置をいう（図 2.2.13）。

この装置の設置場所については会社の考え方にも違いがあるが、例えばシェールシェーカー3台の隣にマッドクリーナーを1台設置し、シェーカータンクから最初のサクシオンタンクに入った泥水を再度ヒューガルポンプで吸い、シェールシェーカーで除去しきれなかったソリッド分を除去するような使用方法などがある。

#### iii) セントリフュージ

セントリフュージとは、サイクロンよりも更に大きな遠心力によって、泥水と微細なソリッドを分離する装置をいう（図 2.2.11, 2.2.14）。

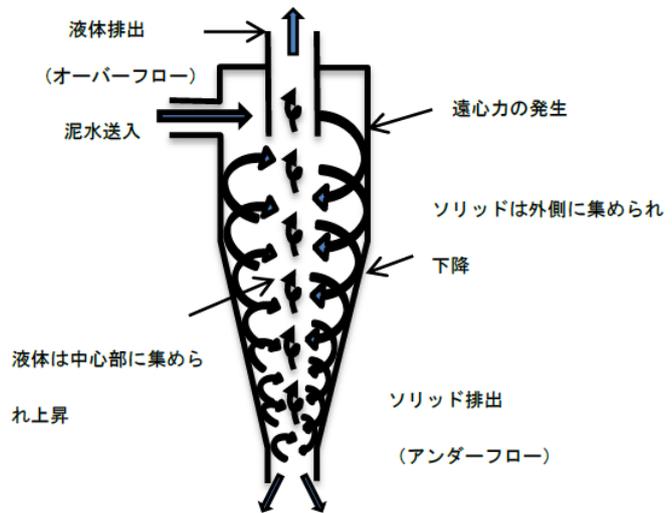


図 2.2.10 マッドクリーナーサイクロン図  
(JAPEX 製図)

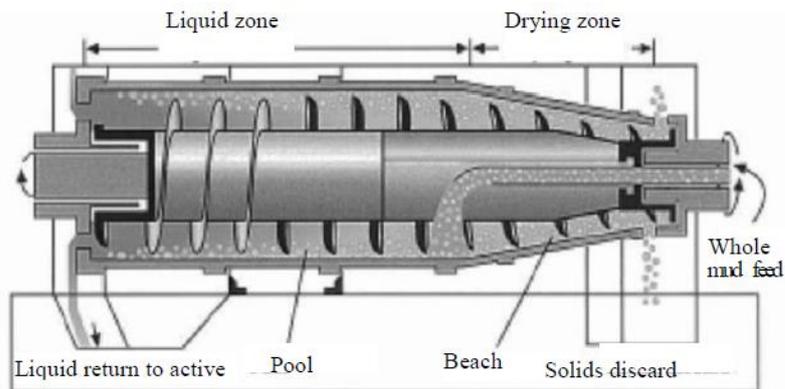


図 2.2.11 セントリフュージの原理  
(MI SWACO Environmental Solutions Catalog Version 4)

シェールシェーカーで掘屑と分離した泥水はシェーカータンクに溜り、オーバーフローした泥水がサクシオンタンクに入る。そこからヒューガルポンプで泥水を吸いセントリフュージにかけ、シェールシェーカー、マッドクリーナーで除去しきれなかったソリッド分を除去する。このように泥水は坑

内に送るための主力ポンプの吸い口があるサクシオンタンクに到達するまでに、できるだけ作泥した状態に近い泥水（不純物が除去された泥水）に調泥して坑内に再び送ることが重要となる。

#### iv) アクティブマッドタンク

シェーカータンク、サクシオンタンクなどがあり、通常 18-50 kl 容積程度の角槽のオープンタンクで、溶接鋼板製である。陸上掘削装置では可搬スキッドベースになっており、各タンク接続用配管を備えている。

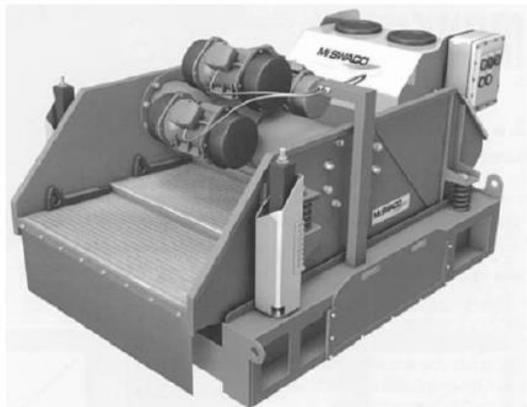


図 2.2.12 シェールシェーカー  
(MI SWACO Environmental Solutions  
Catalog Version 4)

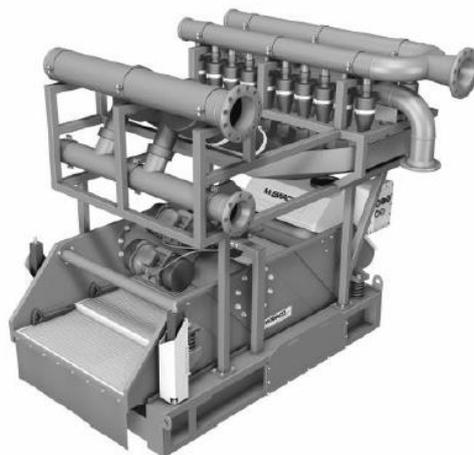


図 2.2.13 マッドクリーナー  
(Electrical file supplied by MI SWACO)



図 2.2.14 セントリフュージ  
(Electrical file supplied by MI SWACO)

## 2.4 動力

主としてドローワークスや泥水ポンプの動力源として使用するもので、ディーゼルエンジンと電動モーターがある。

### 2.4.1 動力伝達方式

#### i) メカニカルドライブ方式

ディーゼルエンジン数台をチェーンで連結し、その合力を直接ドローワークスや泥水ポンプに動力として投入する方式で、一般には 1~4 台コンパウンド装置が使用される。コンパウンド装置は各エンジンの出力軸をスプロケットとチェーンで接続し、エンジン毎にエアークラッチとハイドロリックカップリングまたはトルクコンバーターを配し、エンジン選定および負荷衝撃に対する緩和をはかるとともに、テールポンプおよびドローワークスの動力区分の組合せが可能な接続クラッチを備えている。この方式は動力の回転をそのまま利用できるため、設備費用を含め経済的であるが、反面大型掘削装置ではエンジンおよびコンパウンド装置が大型化し、輸送や取付けの困難性が生ずる。一方台数

増加も機械効率の低下とエンジン同調の点で限度がある。

### ii) ディーゼルエレクトリック方式

ディーゼルエンジンまたはガスタービンを使用して、発電機を回転し、その発生電力(直流または交流)で、ドローワークスおよび泥水ポンプに取付けられている直流モーターを回転させて駆動する方式である。この場合、直流発電機を使用し、直流モーターを回す制御をワードレオナード方式といい、交流発電機を使用し、直流モーターを回す制御をサイリスターレオナード方式といい、両者が使用される。これらは一般に大型掘削装置に利用されるが、ドローワークスや泥水ポンプの駆動制御(速度とトルク)が容易で、かつ範囲が広く、エンジンを含む発電装置の隔離が可能で、集中管理ができ、更にはエンジンの騒音防止対策が容易であるなどの利点がある。

### iii) 一般電気方式

交流電源を用い交流モーター(巻線型)を使用し、抵抗による速度制御をする方式やインバーターを介して速度制御する方式がある。

## 2.4.2 動力

### i) 動力の規模

掘削装置にはドローワークスや泥水ポンプを同一の動力群から駆動する方式と、それぞれ独立した動力を有する方式がある。また泥水管理や附属巻揚装置などの動力もあり、その所要全動力は、掘削深度、装置形式、その他により異なるが、小型掘削装置で数百馬力、大型掘削装置で数千馬力になる。その目安はテールポンプ方式で掘削深度 1 m 当り約 0.5 馬力 (0.4 kW)、2 台ポンプのうち 1 台独立ポンプ方式を取る掘削装置で 1 m 当り約 0.7 馬力 (0.5 kW) である。

### ii) エンジン

過去にはガソリンエンジンやガスエンジンも使用されていたが、現在はほとんどがディーゼルエンジンである。

#### (1) メカニカルドライブ用エンジン

主として4サイクル型もしくはV型の排気タービンスーパーチャージ付エンジンであり、エンジンサブストラクチャー上に搭載され、運搬されるため、耐震性よび剛性を維持するため強靱な台板上に設置される。エンジン単体の連続定格出力は 700~1,000 馬力 (522~745.7 kW) で、回転数は 900 rpm あるいは 1,000 rpm 程度である。ガバナーは圧縮空気による遠隔操作可能なバリアブルスピードタイプが採用され、400~900 または 1,000 rpm 間の速度選定ができる。特にドローワークス動力は低速時の高トルクが必要であり、エンジンの追従性の高いものが選ばれる。

#### (2) ディーゼルエレクトリック用エンジン

海洋掘削バージはエンジンの運搬がないので比較的自由であり、数千馬力のものまで利用できるが陸上では 1,300 馬力 (969.4 kW) 程度に単体馬力が限定される。回転数は一般に 60 Hz であるため、900 rpm または 1,200 rpm であり、ガバナーはコンスタントスピードの電気ガバナーが使用される。

調泥ポンプ、コアリングリールなどの動力としては約 100 馬力 (74.6 kW) 程度の出力であり、回転数は 1,100~1,800 rpm のディーゼル機関で、一般には車輛用エンジンが利用される。

### iii) 電動モーター

#### (1) ディーゼルエレクトリック用電動モーター

負荷設備に適した出力の直流電動モーターが使用され、速度制御が容易である。形式は分巻、直巻、複巻が使用される。

## (2) 一般電気方式用電動モーター

交流電動モーターが使用され、速度制御が可能で、起動電力を緩和できる巻線型またはかご型が使用される。

## (3) 附属設備用電動モーター

交流電動モーターで、かご型のものが使用される。

## 2.5 吊り具

掘削装置の吊り具類はケーシング、チュービング、ドリルパイプ、ドリルカラー等のストリング類を揚降する滑車装置および、それらの吊り下げ器具をいう。

## 2.5.1 クラウンブロック

デリックの頂部に設置する鋼製ベース付の滑車群で、ドロワークスドラムよりのドリリングラインを多本綱にして懸吊力を増加する目的で使用される。一般に使用滑車数は4~8車、滑車径は24~60 in. (609.6~1,524 mm) 程度、使用ワイヤーロープ径 $3/4$ ~ $1-5/8$  in. (19.1~41.3 mm)、綱数は6~14本、容量100~600 tくらいである。

滑車は鋳鋼製および鍛造板鋼製とあるが、API規格にもとづく各滑車溝は耐摩耗性を考慮した表面硬化処理が施されている。また付帯滑車を除き、滑車径は一樣の大きさであるが、特にカンチレバーマストの場合、ファーストシーブとワーキングシーブグループに分かれており、互換性がなく、その稼動頻度からファーストシーブを一段大きなシーブ径にしたものもある。

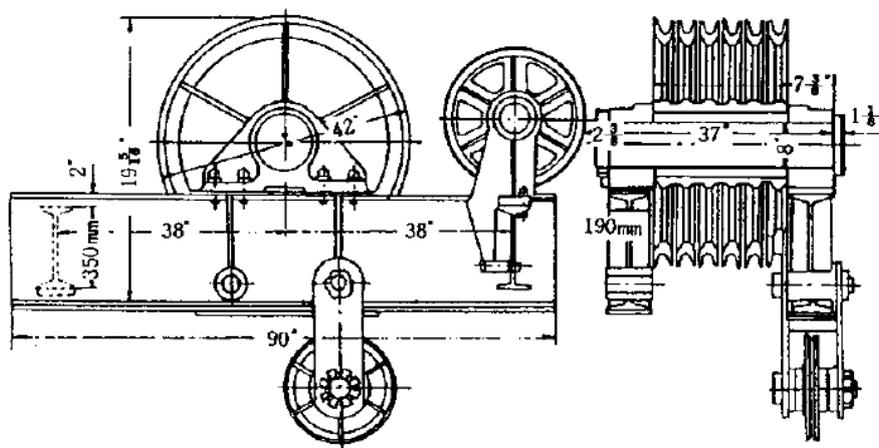


図 2.2.15 クラウンブロック

## 2.5.2 トラベリングブロックおよびフック

## i) トラベリングブロック

クラウンブロックからのドリリングラインを経て、デリック内部を上下する滑車群で、一本軸に滑車が数個取付けられ、下部はフックに接合されている。滑車数は3~7車、滑車径は20~60 in. (508~1,524 mm)、使用ワイヤーロープ径は $3/4$ ~ $1-5/8$  in. (19.1~41.3 mm)、綱数6~14本、容量は100~1,000 tである。滑車の材料はクラウンブロックと同じであるが、災害防止のため、シーブ全体を丈夫な鋼板カバーで被覆されている。

## ii) フック

トラベリングブロックの下部に接続される重量物懸吊装置である。エレベーターリンクやスイベル

等のベールがかけられるようになっており、容量は 100~1,000 t くらいである。フックにはショックダンパー装置、自動ポジショナー、フック外れ止め装置がついている。

### iii) フックブロック

トラベリングブロックとフックとが一体となったもので、その全長はトラベリングブロックとフックを組み合わせた長さより短く、デリック内部の有効稼動範囲が長く、特にカンチレバーマストにおいては有効であることから、現在最も多く使用されている。また揚降管作業時間が節約できるデュアルスピードフックブロックがあり、トラベリングブロックのシーブ群を二つに分割し、ドリルパイプを内側に抱き込んだ状態でもフックブロックを降下できるようにしている。

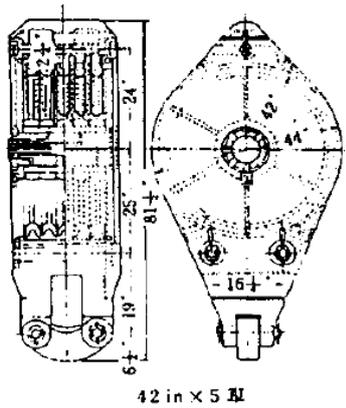


図 2.2.16 トラベリングブロック

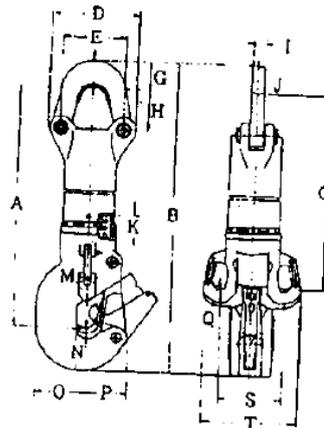


図 2.2.17 フック

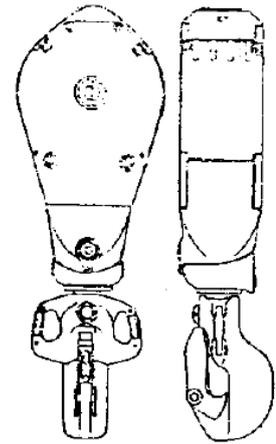


図 2.2.18 フックブロック

### 2.5.3 エレベーターリンク

エレベーターとフックを連続する上下アイ付のリンクで、一体鍛造型、溶接型などの製造法のものがあるが、掘削装置に使用するリンクは最高の引張り強さを有する高合金鋼で、一体鍛造ものを使用する。

サイズは径が 1-3/4 in. (44.5 mm) 長さ 144 in. (3,657.6 mm) の範囲で、容量 150~750 ショートトン (1,334~6,672 kN) くらいである。現在、ドリルストリング用として使用されるものは 2-3/4×108 in. (69.9×2,743.2 mm) 容量 350 ショートトン (3,114 kN)、3-1/2×132 in. (88.9×3,352.8 mm) 容量 500 ショートトン (4,448 kN) が多い。特に上下アイ形状は API 規格による。

### 2.5.4 エレベーター

フックにエレベーターリンクを介して取付けられ、ドリルパイプ、ドリルカラー、ケーシング、チュービング等の揚降に使用する。その使用目的から形式、容量、サイズ等種々ある。

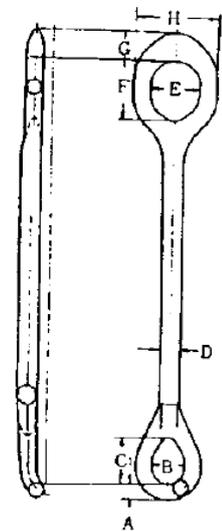


図 2.2.19 エレベーターリンク

#### i) センターラッチエレベーター

主としてドリルパイプ、チュービングに使用されるもので、左右対称をなし、中央の一方が開口で、他方がリンク形状を有するものである。ドリルパイプやチュービングのボックスジョイントのエレベーターショルダーを吊り上げるもので、その形状によりスクエアタイプと 18° テーパータイプがある。ドリルパイプ用のエレベーターはパイプ径が 2-3/8~5-1/2 in. (60.3×139.7 mm)、容量が 100~350 ショートトン (890~3,114 kN) くらいであり、チュービングエレベーターはパイプ径が 1.050~4-

1/2 in. (26.7~114.3 mm)、容量が 35~100 ショートトン(311~890 kN)程度である。このタイプでドリルカラー用のものもあり、更にチュービング用として内側にスリップを配したセンターラッチスリップエレベーターも使用されている。

### ii) サイドドアエレベーター

主としてケーシング、ドリルカラー用で、一般的に軽荷重用が多い。円周上の正面 40 %が開閉ドアになっているもので、パイプサイズは 2-3/8~20 in. (60.3~508 mm) くらいであり、容量は 60~250 ショートトン(526~2,224 kN)程度である。センターラッチエレベーターと同じくスクエアタイプと 18° テーパータイプがある。

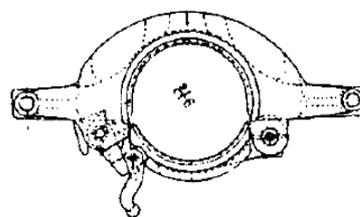
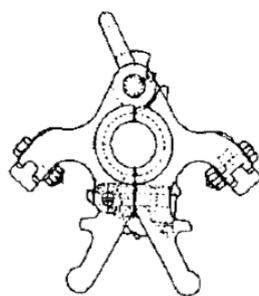
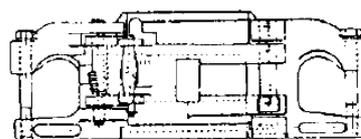
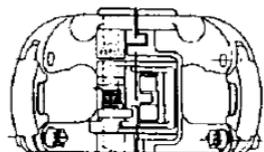


図 2.2.20 センターラッチエレベーター

図 2.2.21 サイドドアエレベーター

### iii) スリップエレベーター

ケーシング、チュービング用に使用され、一般には重荷重用である。前述のエレベーターがパイプのジョイントまたはカップリングの段付き部あるいはテーパー部で支えるのに対して、スリップエレベーターは管体にスリップを効かせて支える形式である。普通はスリップスパイダーと併用するチュービング用はパイプサイズが 1.6~2-7/8 in. (40.6~73.0 mm) で、容量が 20~75 ショートトン(177~667 kN)程度であり、ケーシング用はパイプサイズが 2-3/8~30 in. (60.3~762 mm) で、容量が 175~750 ショートトン(1,557~6,672 kN)くらいである。容量およびサイズの小さいものに手動操作のものがあるが、その大部分はエアまたは油圧作動である。

### iv) その他

シングルジョイントエレベーターおよびドリルカラーハンドリングシステムがある。前者はチュービングやケーシングの 1 本降下作業時に 1 本をデリック内に吊り込むために使用するもので、パイプサイズは 2-3/8~24 1/2 in.



図 2.2.22 ケーシングエレベータースパイダー (Blohm+Voss Oil Tools カタログより)  
"Blohm+Voss is a trademark of Blohm + Voss Shipyards."

(60.3～622.3 mm) でいずれも1本の重量を吊れる容量で、極く軽便なものである。機構および受荷重面はセンターラッチエレベーターと同じである。後者はドリルパイプのエレベーターを取替えずにドリルカラーを吊り上げるためのシステムであり、リフトアダプター、リンクおよびカラーエレベーターの組み合わせで、リフトアダプターをドリルパイプのエレベーターにかければ、即座にカラーを吊り上げられる。

### 2.5.5 スイベル

#### i) スイベル

掘進時に、フックに懸吊され下部はケリーに接続されてドリルストリング全重量を支え、かつ掘削泥水をロータリーホースから受け入れ、回転中のケリーに送り込む作用をさせる装置であって、懸吊ベールとスラストベアリングならびに泥水の回転シール機構から構成される。スイベルの下部接続ねじは一般に API ロータリーショルダーコネクションであり、ロータリーホースとの接続ねじは API の通常 LP ねじ付のユニオンである。特に、ベール部寸法は API 規格による。最高使用圧力は 140～350 kgf/cm<sup>2</sup> (13.7～34.3 MPa) くらいである。

#### ii) パワースイベル

パワースイベルは油圧によりドリルストリングを回転させるもので、最大回転数が 200～250 rpm、最大トルクは 2,000～3,500 kgf・m (19.6～34.3 kN・m) という仕様のももある。

#### iii) ケリースピンナー

ケリースピンナーはスイベルの直下に取付けられ、付け替え作業時にケリー本体を空気圧により回転させ、ねじの締め戻しに使用される。このツールはケリー本体を回転させるだけで、ねじの適正締め付けトルク等のような大きなトルクは得られない。

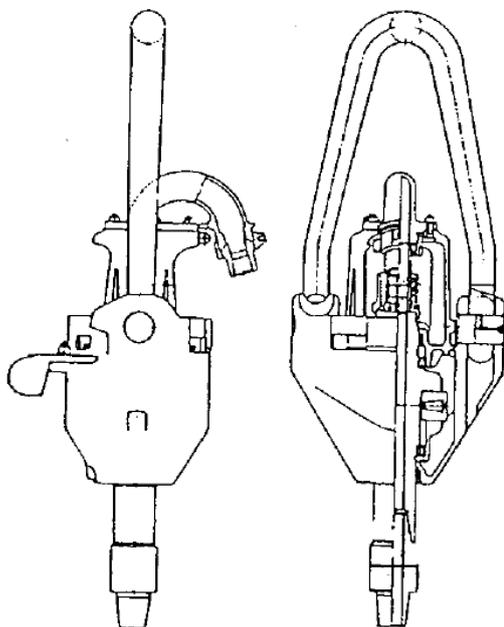


図 2.2.23 スイベル

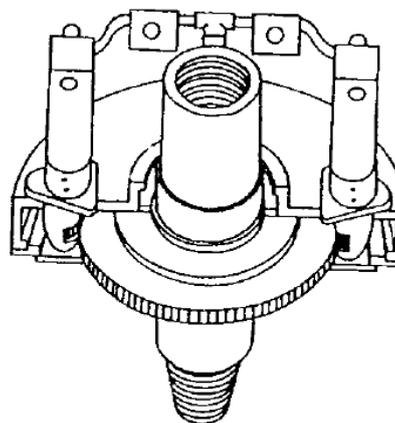


図 2.2.24 ケリースピンナー

### 2.5.6 トップドライブ (図 2.1.5 参照)

トップドライブシステムの特徴はドリルパイプを3本継ぎのスタンドのまま使用して掘削出来るところにあり、従来のロータリーテーブルの回転伝達機構に代わり、スイベルの下に取り付けたモーターで直接ドリルパイプに回転を伝達する。そしてドリルストリングの揚降管作業、ドリルストリングの

正転、逆転、泥水の循環、ケーシングの降下作業および抑留鉄管の採揚作業等を、効率よく実施できる。

## 2.6 デリック下機器

デリック下（ドリルフロア：作業床）に設置され、掘進およびドリルストリングの揚降に必要な諸設備である。

### 2.6.1 ロータリーテーブル

ロータリーテーブルはドローワークスのロータリーカウンターからチェーン駆動され、これを水平のテーブル回転力に変換し、ドリルストリングとビットを回転させる。ドリルストリングをケリーから切り離れたときに、スリップとマスターブッシング（スプリットブッシング）を介してドリルストリングの全重量を保持する。また、ケーシングやチュービングの降下時にもスリップおよびブッシングやスパイダーを介して、この全荷重を支える役目をする。主機構はピニオン軸とヘリカルベベルギアならびにスラストベアリングである。

ロータリーテーブルの大きさはマスターブッシングを除いたテーブル自体の開口径（テーブルオープニング）、静荷重容量などで表示するが、開口部径は12～49-1/2 in. (304.8～1,257.3 mm) まであり、静荷重容量は135～1,000 t程度である。最高使用回転数は300 rpm くらいである。

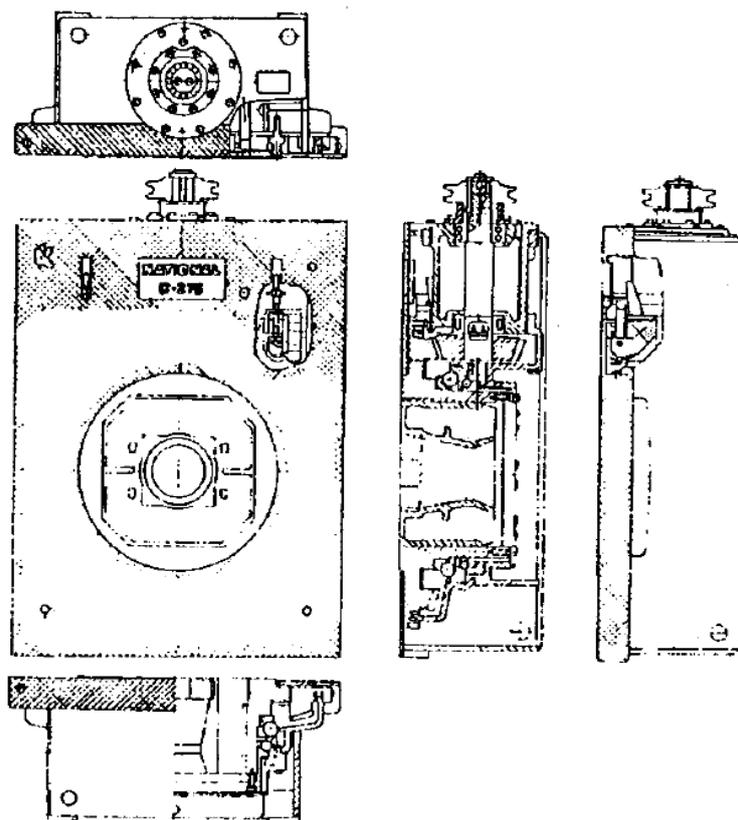


図 2.2.25 ロータリーテーブル

開口部は円形であるが、その上部にマスターブッシングを固定するための角形またはノックがある。マスターブッシングはドリルパイプ等の保持のスリップを支えるだけでなく、掘進時はロータリーの回転をケリードライブに伝える役目もする。そのため、ケリードライブがマスタードライブ内に嵌まり込む機構になっている。これにはロータリーテーブルとの接合の方式として角の嵌合を持つスクエアドライブ方式と4本のピンがマスターブッシング上面の穴に嵌まり込むピンドライブ方式とがあ

る。後者は嵌合の安定度が高く、さらに、スリップの支持面が多いという利点があり、掘削バージや深掘り掘削装置に用いられる。

強度的には前述の荷重容量に対して、ベアリングやギアの強度は当然のことであるが特にそれらを支えるフレームは剛性に富む強靱なもので、安定性の高い設計である。各部の接合部の寸法はすべてAPI規格にもとづいて製作される。

大型掘削装置では専用動力と変速装置を有するロータリーテーブルを使用することもできる。

### 2.6.2 ケリードライブ

ロータリーテーブルのマスターブッシング内に嵌合し、ケリーを平滑に上下させ、かつロータリーテーブルの水平回転力をケリーに伝える働きをする。ドライブ機構として、ロータリーテーブルの項で述べたスクエアドライブとピンドライブがある。また、ケリーの種類に4角と6角ケリーがあり、それに適合する2種のケリードライブがある。ローラーは耐摩耗材で、4角ケリー用が各フラットに接するローラーを有し、6角ケリー用はフラット用ローラー2個とコーナー用ローラー2個の計4個でケリーを支えている。

さらに2ローラータイプと1ローラータイプとがあり、それぞれ拘束性や耐摩耗性の点など特徴があるが、一般に1ローラータイプは大径ローラーが荷重に強く、摩耗に対する寿命が長いために利用度が多い。4角ケリー用は2-1/2~6 in. (63.5~152.4 mm)、6角ケリー用は3~6 in. (76.2~152.4 mm)のケリーサイズに適合するものがある。

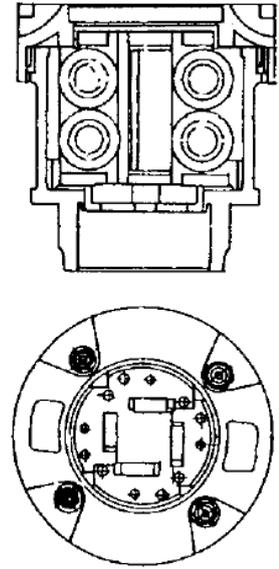


図 2.2.26 ケリードライブ

### 2.6.3 スリップ

ドリルパイプ、ドリルカラー、ケーシング、チュービング等をロータリーテーブルのマスターブッシング内またはロータリーテーブル上に設置されたスパイダー内で支える機器で、次のような種類がある。

#### i) ロータリースリップ

主としてドリルパイプを支えるもので、ロータリーテーブルのマスターブッシング内面テーパ部に効かせて使用するものであり、3つのセグメントからなっており、特にインサートは細かく浅いエッジが多数配列され、ドリルパイプに損傷を与えずに、かつ確実に支持すべく設計製作されている。使用パイプ径は2-3/8~6-5/8 in. (60.3~168.3 mm)くらいで、その荷重量によって、ショート、ロング、エキストラロング型がある。

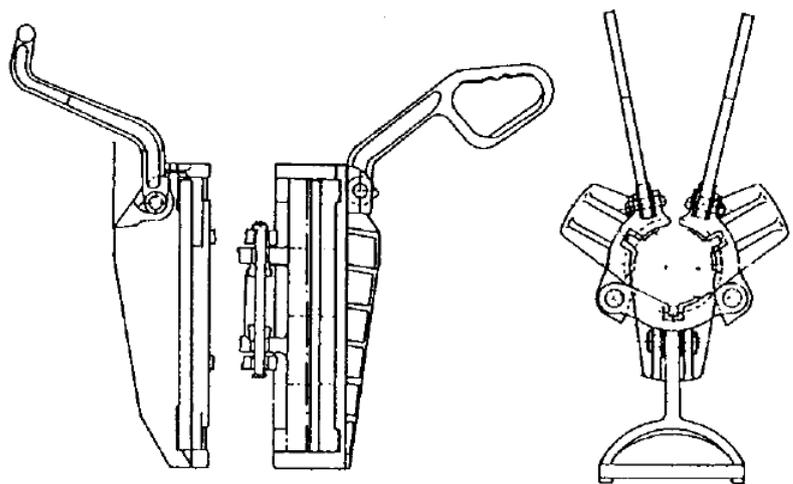


図 2.2.27 ロータリースリップ

#### ii) ドリルカラーリップ

ドリルカラーを支えるもので、ロータリースリップと同じ方法で使用する。細いスリップセグメント数個により構成され、使用パイプ径は3~14 in. (76.2~355.6 mm)位であるが、スリップの種類は荷重により3種類程度に分かれ、5~16個のセグメントで支える。各スリップの使用パイプ径の範囲

内での調整はセグメントの数の加減で行なう。比較的軽荷重のため、セグメント全長に対し、テーパ一部およびインサート部は下方から約 60 %程度である。

### iii) ケーシングスリップスパイダー

掘削が目的深度まで終了するとケーシング降下作業になる。ケーシング降下作業には専用のケーシング用スリップを使用する。ケーシングの外径にもよるが、マスターブッシングを入れたまま、ロータリーテーブル上にケーシングスリップスパイダーを置いて行う場合と、マスターブッシングを抜いてロータリーテーブルの中に入れて行う場合がある。前者はスリップスパイダーボディの高さが1mくらいになるので、その周りに足場を組まなければ作業が容易ではない。後者に使用されるスパイダーは一般にフラッシュマウンテッドスパイダーと呼ばれ、掘削作業時の揚降管作業と同じレベルで作業ができるので、保安上からもこちらが推奨される。ケーシングの外径に合わせてスリップセグメントを交換すれば、20~2-3/8 in. (508~60.3 mm) への適用などが可能となる。

浅い深度のケーシング降下作業などには、ケーシングスリップスパイダーを使用せず、ハンドセットのケーシングスリップを使用することもある。

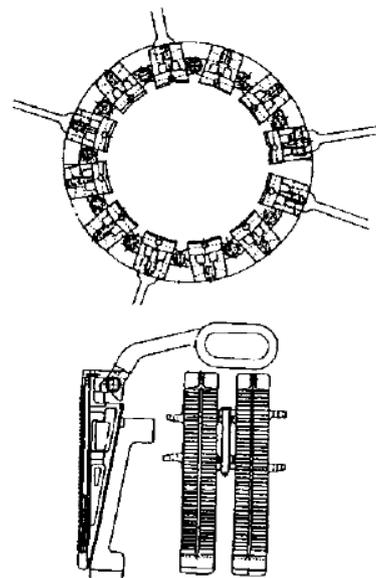


図 2.2.28 ケーシングスリップ

### iv) チュービングスリップスパイダー

チュービング用として、極く軽便な機構で、ロータリーテーブル上に設置し、手または足操作でチュービングを支えるものである。サイズはパイプ径 1.6~4-1/2 in. (40.6~114.3 mm) である。

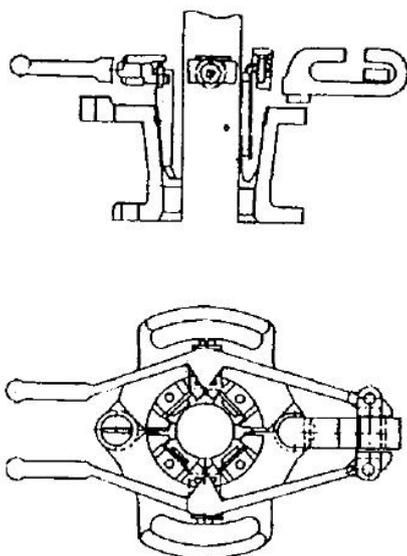


図 2.2.29 チュービングスリップスパイダー



図 2.2.30 ケーシングスリップ  
FMS 375 (NOV カタログより)

### v) パワースリップ

ドリルパイプ、ケーシング、チュービングのねじ締め戻しの時に使用するもので、空気圧、油圧、作業員の体重でスリップを入れてパイプ類の重量を支えるものがパワースリップと呼ばれている。

## vi) セフティークランプ

ストレートドリルカラーやフラッシュジョイントパイプ等を坑内に揚降する場合のように、スリップだけでは坑内に逸走の恐れがあるとき、スリップの上部に取付けて使用する安全装置である。

使用パイプ径は 2-7/8～27-1/8 in. (73.0～689.0 mm) くらいまで使用できるが、この範囲で 5 種類のボディーサイズに分かれ、各ボディーの使用範囲内のパイプ径への適合はグリッピングダイ付のキャリア数の加減で調整し、目的パイプの外径にバンドがけしてメークアップスクリューを締め付けて使用する。

## 2.6.4 トング

ドリルパイプ、ドリルカラー、ケーシング、チュービング等のジョイントやカップリングねじの締め戻しに使用するもので、次の種類がある。

## i) ロータリーおよびケーシングトング

ドリルパイプ、ドリルカラー、ケーシングに使用し、左右一組をジョイント上下にかけ、レバーエンドのパワーラインをドローワークスのメークアップまたはブレイクアウトキャットヘッドにより巻き込み、締め戻しする。使用パイプ径は 2-3/8～30 in. (60.3～762 mm) で、容量は 2,208～12,400 kgf・m (21.7～121.6 kN・m) くらいでその用途に応じ、容量別に各種あり、それぞれのパイプ径への適合は 4 個のヒンジピンの位置調整やラグジョーの交換で行なう。パイプハンギング機構は 4 個のヒンジピンで、3 または 4 枚のダイが一般的であるが、大径ケーシング用として、ヒンジピンの数を増やし、一層パイプに密着すべく設計した特殊なものもある。また、大径ドリルカラーの締め戻し等の大容量の引張力が必要な場合に、キャットヘッドの代わりに使用する油圧シリンダーの専用パワー装置も使用できる。

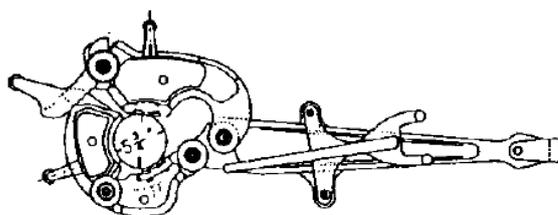


図 2.2.31 ロータリートング

## ii) チュービングトング

チュービングに使用する軽便なもので、スナポン型やケルコ型のように人力で締め戻しするものと、ロータリートング同様の小型のものがある。

## iii) パワートング

これまでのトングはドローワークスの動力を利用して操作するが、これは独自の油圧発生装置を有し、その油圧を利用したり、あるいはリグエアーを利用して、ねじの締め戻しを行なうものである。

## (1) スピニングレンチ

通常ドリルパイプ等の降管作業時にスピニングチェーンを使用してねじ締めを行なうが、それを一層安全に早く遂行するもので、パイプの幹に接する 4 個のローラーのうち 2 個をエアーモーターで回転させ、スピンをかけてねじ込む機構のものである。ロータリートング同様に高さを自由に調節できるように吊り下げて使用する。使用パイプ径は 3-1/2～5-1/2 in.

(88.9～139.7 mm)、最大トルク容量は 138 kgf・m (1.4 kN・m) (5 in. (127 mm) ドリルパイプのとき) である。また、専用油圧発生装置を有し、ドリルカラーにも使用可能なもので、使用パイプ径 2-

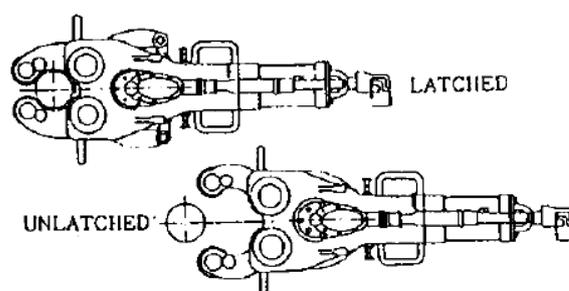


図 2.2.32 スピニングレンチ

7/8 in. (73.0 mm)、最大トルク 276 kgf・m (2.7 kN・m) のものもある。

### (2) ドリルパイプパワートング

ドリルパイプ等のツールジョイントを締め付けるために使用するもので、油圧モーターでトルクをかける方式と、油圧シリンダーで締め付ける方式とがある。前者はスピニングレンチの働きもするが、トルクは比較的小さい。後者はロータリートングだけの働きであるが、トルクは大きい。いずれも油圧発生装置が必要である。前者にはパイプ径が 4-1/4~7-1/4 in. (108.0~184.2 mm)、容量が 759~5,520 kgf・m (7.4~54.1 kN・m)、後者にはパイプ径が 4~8 in. (101.6~203.2 mm)、容量がメークアップのとき 8,280 kgf・m (81.2 kN・m)、ブレイクアウトのとき 9,936 kgf・m (97.4 kN・m) のものがある。

### (3) バックアップサポーターツール

ドリルパイプをマウスホールで追降するとき、マウスホール内のパイプが回転しないように固定する装置で、ケリーをマウスホール位置まで引き寄せる装置も付属されている。ケリースピンナーと一対で使用されるもので、パワータイトはできない。

### (4) ケーシングパワートング

ケーシングに使用し、油圧モーターを使用して、締め込みおよび締め付けを行なうもので、使用パイプ径は 4-1/2~20 in. (114.3~508 mm) で、容量は 520~3,700 kgf・m (5.1~36.3 kN・m) 程度である。

### (5) チュービングパワートング

チュービングの締め付けに使用し、油圧または空気圧で作動する。使用パイプ径は 1.050~5-1/2 in. (26.7~139.7 mm) で、165~920 kgf・m (1.6~9.0 kN・m) である。

## iv) アイアンラフネック

ドリルストリング（ドリルカラー、ドリルパイプなど）ねじの規定トルクへの締め付け、締め戻しはロータリートングで行っているが、近代化されたリグには通称アイアンラフネックというロボットのような機械が導入されているところも多くある。これは独自の油圧ユニットを有し、ロータリートングとスピニングレンチの働きを兼ね備えていて安全で且つ作業が容易になり、時間の短縮にも大いに寄与している。

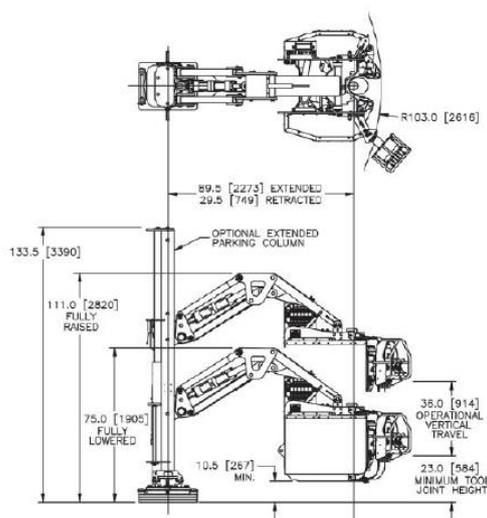


図 2.2.33 アイアンラフネック



(NOV カタログより)

## 2.7 ロープ類

### 2.7.1 ワイヤロープの用途と構造 (図 2.2.34 参照)

石油・天然ガス井の掘削においてワイヤロープは様々な用途に使用されている。デリック下（ドリルフロア）におけるドロワークスのドリリングライン、サンドライン、巻ラインやエアーホイストのラインのように巻揚機械の吊りワイヤーとして使用される他、ドロワークスのメークアップライン、ブレイクアウトラインやバックワイヤーのようにトングワイヤーとして、更に種々のツールを吊る時の首ワイヤーとして、というように実に多くの目的に利用される。

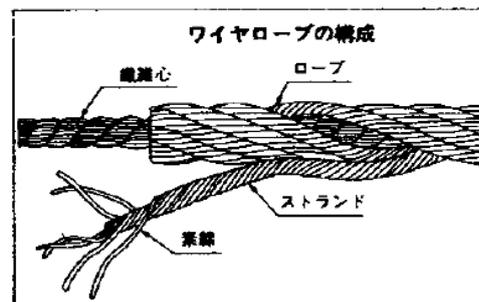


図 2.2.34 ワイヤロープの構造

掘削リグにおける上記のような多くの用途の中でも決定的に重要なのはドロワークスのドリリングラインとしての用途である。ドリリングラインとして使用されるワイヤロープには以下の性能が求められる。

- ① ワイヤロープの抗張力が十分大きいこと。
- ② ワイヤロープはクラウンブロック、トラベリングブロックの限定された直径のシーブの上で激しい繰返し屈曲を受け、同時に摩擦も大きいので屈曲に対して強くかつ摩耗の少ないものであること。
- ③ 頻繁にドロワークスドラムに巻きついたり延ばしたりするので、よりが戻ったりキンクを生じたりしないこと。

一般に、ワイヤロープは JIS G 3501 に規定された素線によってストランドを作りさらにストランドが数本より合わされて作られる。よりの方向の違いから以下のように分類される。

- ① ワイヤロープのよりとストランドのよりが反対のもの……………普通より
- ② ワイヤロープのよりとストランドのよりが同じ方向のもの……………ラングより

また、JIS G 3525 では、

- ① 普通 Z より
- ② 普通 S より
- ③ ラング Z より
- ④ ラング S より

の 4 種を規定してある。(図 2.2.35 参照)

ワイヤロープのより方には多くの種類があるが、油・ガス井の掘削では普通 Z よりが一般的で、19 本線 6 本よりで鋼心入りのものが多く使用されている。これは 19 本の素線で 6 本のストランドを作り、6 本のストランドの中心に鋼心を入れてよったものである。以下、繊維心と鋼心について説明する。



図 2.2.35 ワイヤロープのより方とより方向

#### i) 繊維心 (Fiber Core、FC と略称する)

繊維心は①ストランドを支えてワイヤロープの形を保つと同時に、②ワイヤロープグリースを保持して、使用中にワイヤロープの内部から潤滑と防錆に必要なグリースを補給するという2つの重要な働きをする。従来は天然繊維が多く用いられていたが、最近では合成繊維も使用されるようになってきた。繊維心の特長としては、鋼心に比べて

- ① ワイヤロープの柔軟性が大きい。
- ② ワイヤロープに加わる衝撃や振動を吸収する。

- ③ ワイヤロープグリースを含みやすい（特に天然繊維の場合）。
- ④ ワイヤロープの質量が小さい。

などがある。なお、合成繊維は天然繊維に比べて耐食性に優れている。

#### ii) 鋼心 (Steel Core)

鋼心としては、ストランド心 (IWSC) とロープ心とがあり、ロープ心には IWRC と CFRC とがある。

- (1) IWSC (Independent Wire Strand Core) はワイヤーストランドを心にしたもので、側ストランドと同構成のものは共心とも呼ばれている。
- (2) IWRC (Independent Wire Rope Core) は、独立した 1 つのワイヤロープを心に行している。通常は 7×7 の構成のものが使用される、用途によっては 6×7 や 6×19 などが用いられることもある。
- (3) CFRC (Center Fit Wire Rope Core) は、ワイヤロープの側ストランド内側の谷間に心ロープの外層ストランドをはめ込んだ形状をしており、この心ロープは外層ロープと 1 工程でより合わされる。

なお、心ロープには 7×7、19+8×7 などが使用される。

IWSC と CFRC とは特殊用途に僅かに使用されているに過ぎず、IWRC が鋼心入りワイヤロープのうちでは柔軟性がよいので、最も多く使用されている。

鋼心の特長としては、繊維心に比べて次の点が挙げられる。

- ① ワイヤロープの強度が大きい。
- ② 横圧に対する抵抗性があり、ワイヤロープがつぶれにくい。
- ③ ワイヤロープの伸びが少なく、ロープ径の減少も少ない。
- ④ ワイヤロープの耐熱性が優れている。

油・ガス井の掘削用としては、繊維心は首ワイヤにのみ使用される。ドリリングラインをはじめ、大きな引張荷重のかかるその他のワイヤロープについてはすべて鋼心で IWRC のものが使用されている。

#### 2.7.2 ワイヤロープの取扱い方

ワイヤロープは、取扱いの良否によって、その寿命が著しく左右される。したがって、運搬、保管には細心の注意が必要である。

##### i) 荷降しおよび運搬上の注意

- (1) 貨車、自動車などの高い所から地面に落すことは絶対に禁物で、必ず歩み板を渡して静かに転がして降すか、クレーン、ホイストなどで吊り降す。高い所から落下させると木杵が破損したり、コイル巻きロープがはなはだしく荷くずれを起したりして解梱不能となる。
- (2) 木杵に巻かれているワイヤロープを転がすときは、必ずテコを木杵の縁に当て決してワイヤロープが巻かれている部分に当てない。ワイヤロープにテコを当てて転がすと、その部分につぶれが生じ、早期廃棄の原因となる。
- (3) 石ころや金属塊・鋼材などのようなデコボコな上を転がさない。固形物によってワイヤロープは各所につぶれを生じ早期廃棄の原因となる。

##### ii) 保管上の注意

- (1) ワイヤロープを長時間に亘って保管するときは、乾燥した倉庫内または屋上などの風通しのよい所に置く。直接日光の当る所やボイラーの熱源の近くなどにさらして置くとワイヤロープグ

リースが乾燥し防錆力が弱くなる。

- (2) ワイヤロープはコンクリートの床や地面にじかに置かず、必ず枕木を敷いてその上に載せる。じかに置くと湿気のため錆びたり、はなはだしいときは腐食する。
- (3) ワイヤロープを止むを得ず戸外に保管するときは、地上から15～30 cm離れるように枕木などを敷き、雨覆いをかけ、地上は常に清掃して草などをはやさないようにする。ワイヤロープの大敵は腐食であり、湿気や雨水の浸入からワイヤロープを保護すること。なお、ワイヤロープの上にワイヤロープグリースを十分塗布することによってある程度腐食を防止することができる。
- (4) 使用したワイヤロープを取りはずして保管するときは、表面に付着している泥、砂、砂利などをよく取除き、ワイヤブラシで素線やストランドの間の残滓（古いグリースと塵埃の混じったもの）を、きれいに取ってからワイヤロープグリースを塗布する。残滓を落とすとき、洗油を使うと取除き易いが、洗油が繊維心にしみ込んだり、素線の間に残るとかえって腐食を起す原因となる。
- (5) ドリリングラインの巻替えや使用後の巻取り作業では、ドローワークスドラムと運搬・保管用の鉄枠ドラムとの間に適当な緊張を維持し、よりのもどりやキンクを起こさないように注意する。

### iii) キンク (Kink) (図 2. 2. 36 参照)

キンクが起る原因は以下のことが上げられる。

- (1) ワイヤロープの解き方が悪い場合。
- (2) ワイヤロープがしごかれて、撚りのピッチが変化した場合。
- (3) ワイヤロープの解き方は正しくても、ワイヤロープを地面に環状に置いてこれを横引きして架設したり、機械に巻き付けた場合。
- (4) ドローワークス操作によりトラベリングブロックを降下中やホイスト、クレーン等による荷降し作業中にワイヤロープを出し過ぎてたるませた場合。

### 2. 7. 3 ドリリングラインの安全率

ドリリングラインの安全率が、ファーストラインに掛かる荷重の最大値に対して 3 以上であることが原則である。しかしながら、ケーシング降下時や抑留管の強引作業において、特に安全のための措置を講じたときは、この限りでない。以下にドリリングラインの安全率計算例を示す。

計算に使う記号の意味；

$W_0$ ：ドリリングラインを含む吊具および坑内ストリング類の最大静荷重[kN]

$w_1$ ：ドリリングラインを含む吊具の質量[t]

$w_2$ ：坑内ストリング類の質量（空中重量と同じ値）[t]

$\alpha$ ：坑内流体の浮力係数

$$\alpha = 1 - X/Y$$

ここで  $X$  = 坑内流体の比重

$Y$  = 坑内ストリング類の比重、鋼の場合 7.85

$g$ ：重力加速度を考慮した係数 9.8 [kN/t]

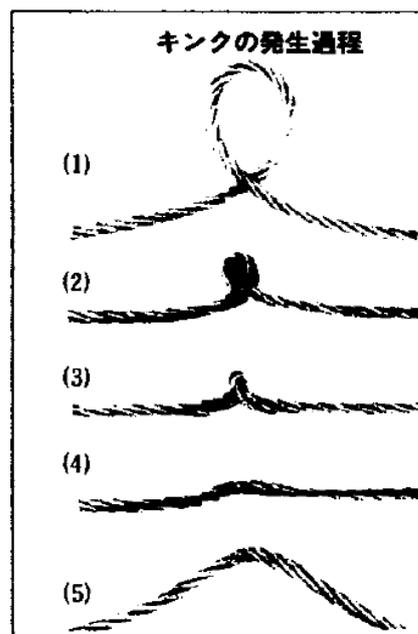


図 2. 2. 36 キンクの発生過程

$\eta$  : シーブの効率

$\varepsilon$  : シーブの摩擦係数 \* API RP 9B による

ローラーベアリングシーブの場合  $\varepsilon = 1.04$  \*

プレーンベアリングシーブの場合  $\varepsilon = 1.09$  \*

$n$  : ドリリングラインの本数

$W$  : ファーストラインにかかる最大荷重 [kN]

$S_F$  : ドリリングラインの安全率

$S_r$  : ドリリングライン製造者が示す保証破断荷重 [kN]

$A$  : ドリリングラインの屈曲効率、一律 0.96 とする \*\*

\*\* 鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針(内規)

i) ドリリングラインを含む吊具および坑内ストリング類の最大静荷重  $W_0$  (kN)を求める

$$W_0 = (w_1 + w_2 \times \alpha) \times g \quad (\text{式 i})$$

ii) シーブの効率  $\eta$  を求める

$$\eta = \frac{1}{n} \times \frac{\varepsilon^n - 1}{\varepsilon^s(\varepsilon - 1)} \quad (\text{式 ii})$$

iii) ファーストラインにかかる最大荷重  $W$  [kN]を求める

$$W = W_0 \times \frac{1}{n \times \eta} \quad (\text{式 iii})$$

iv) ドリリングラインの安全率  $S_F$  を求める

$$S_F = \frac{S_r}{W} \times A \quad (\text{式 iv})$$

#### 【例題 i】

デッドラインからファーストラインまでのドリリングラインの重量が3トン、フックブロックの重量が7.3トンそしてトップドライブ重量が20トンとする。さらにドリルストリング（ドリルパイプとドリルカラー他）の空中重量が180トンで、坑内泥水比重が1.15（浮力係数0.854）であった場合の荷重を求める。

$$\text{式 i から } W_0 = (3 + 7.3 + 20 + 180 \times 0.854) \times 9.8 = 1,803 \text{ [kN]}$$

#### 【例題 ii】

フックブロックが12本綱であった。シーブの効率を求める。ただしフック・クラウンブロック共ローラーベアリングシーブの仕様とする。

$$\text{式 ii から } \eta = \frac{1}{12} \times \frac{1.04^{12} - 1}{1.04^{12}(1.04 - 1)} = 0.782$$

#### 【例題 iii】

ファーストラインに掛かる荷重を求める。

$$\text{式 iii から } W = 1,803 \times \frac{1}{12 \times 0.782} = 192 \text{ (kN)}$$

#### 【例題 iv】

ファーストラインに掛かる荷重に対する安全率を求める。ドリリングラインとして使用している38mmシール型6xS(19)IWRCワイヤーロープの保証破断荷重は1,009.4[kN]であった。

$$\text{式 iv から } S_F = \frac{1,009.4}{192} \times 0.96 = 5.04 \text{ (したがって安全率は3より大きい)}$$

### 2.7.4 ワイヤロープ端末の止め方と効率

ワイヤロープ端末の止め方には図 2.2.37 に示すような方法がある。

取付方法	略 図	効率 %	備 考
ソケット止め		100	合金又は亜鉛鍍込み法
グリップ止め		80~85	増し締めが必要。 加工不適当なものの効率は50%以下
くさび止め		65~70	加工不適当なものの効率は50%以下
アイスブライス		75~95	15mmφ以下の効率 95% 16mm~26mmφの効率 85% 28mm~38mmφの効率 80% 39mmφ以上の効率 75%
シングルロック		100	共心入り又はロープ心入りに限る。
トヨロック		95	アルミ素管をプレス加工する。

図 2.2.37 ワイヤロープ端末の止め方

### 2.7.5 潤滑油の効果

ワイヤロープの鋼心には特別の油がしみ込ませてある。また、ワイヤロープの外表面には「コンポジションオイル」が塗ってある。これによりワイヤロープは柔軟性を持つとともに腐食防止対策されているが、長期の使用でオイルが乾燥してしまう。これを防ぐためにあらたにオイルの補給を行う必要がある。これによりワイヤロープの寿命が2~3倍保たれる。

### 2.7.6 ワイヤロープの特性

ワイヤロープは部品ともいべき素線を数多く組み合わせた複雑な構造を持ち、その選択使用に当たっては、ロープの特長（長所・短所）を知ることが大切である。以下にその長・短所を示す。

- |  |  |
|--|--|
| <p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 引張強度が高い</li> <li>(2) 柔軟性に富む</li> <li>(3) 長いものが得られる</li> <li>(4) 耐衝撃性に優れている</li> </ul> | <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 伸びが比較的大きい</li> <li>(2) 一般的に自転性がある</li> <li>(3) 形くずれを起こす傾向がある</li> </ul> |
|--|--|

上記短所の(1)にはプレテンション加工、(2)に対しては非自転性ロープを採用するなどの対応策がとられている。

### 2.7.7 ワイヤロープの強度

素線の引張強度からワイヤロープの破断荷重を概算するには次の式を使用することができる。

$$P = F_t \times \frac{i \pi d^2}{4}$$

ここで P : ワイヤロープの破断荷重, kN

- $i$  : 素線の総本数  
 $d$  : 素線の公称径, mm  
 $F_t$  : 公称引張強さ, kN/mm<sup>2</sup>

### 2.7.8 ドラムのワイヤーロープ巻取り量の式 (図 2.2.38 参照)

$$M = (A + B) \times A \times C \times \frac{\pi}{d^2}$$

- ここで  $M$  : ワイヤーロープ巻取り量, m  
 $A$  : フランジの深さ, cm  
 $B$  : バーレルの径, cm  
 $C$  : バーレルの長さ, cm  
 $d$  : 素線の公称径, mm

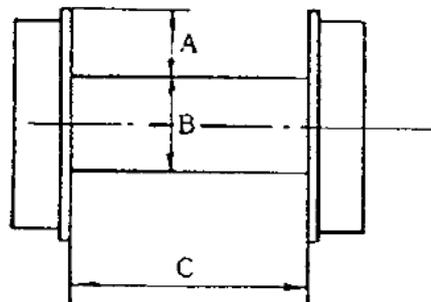


図 2.2.38 ドラムのワイヤーロープ巻取り量

## 2.8 掘削装置の管理・保守

掘削装置は種々の機械の集合体とし、その目的を予定通り完遂するためには、日常、その機械の状態を十分把握するとともに、最善の状態に維持し続けることが肝要である。

### 2.8.1 点検および整備の種類

掘削装置を故障なく維持管理するためには日常の点検および補修が重要であり、その点検方法および呼称などについても種々あるが、一般的に次の区分がある。

毎日点検(毎作業時)・・・作業の合間の巡視または作業開始前に実施。

毎週点検・・・・・・・・・・週1回定めた日などに実施。

毎月点検(開坑前)・・・・・・・・作業開始前または作業を中断して実施。

定期整備・・・・・・・・・・年1回または稼動時間による整備工場に搬入して実施。

上記の区分のうち、点検は坑井現場において実施する。また定期整備の中には、点検整備、小整備、中整備、大整備などが考えられる。

### 2.8.2 点検箇所

次に各主要機械別に点検項目を列記するが、これは一例であって、実際には種々変更があろう。また詳細については製造者の指示によることが望ましい。

#### i) デリックおよびサブストラクチャー

- (1) 各部材の曲りや変形およびワイヤー等による摩耗
- (2) ボルトのゆるみやピンの抜出。
- (3) 作業床面のレベル。
- (4) 坑井芯とデリック芯ずれの計測。

#### ii) ドローワークスおよびコンパウンド関係

- (1) ブレーキ関係
  - 1) ブレーキライニングの摩耗。
  - 2) ブレーキホイールの摩耗。
  - 3) ブレーキリング接合部の摩耗と作用角度の調整。
- (2) チェーンおよびスプロケット
  - 1) チェーンの伸び、ローラーやサンドバーのヘアークラック、および極端な打痕の有無。

2) スプロケットの歯型の極端な摩耗。

(3) ベアリング

1) 外観破損、回転異状音、異状回転抵抗、表面変色の有無。

2) ベアリング遊隙の限界値内か。

3) ベアリング温度の異状の有無。

(4) 給油

1) 各軸ベアリングの給油が安全か。

2) チェーンへの潤滑が十分な量か。

3) チェーンケースの油洩れの有無。

(5) 各軸の外観による曲り、傷、振れ、嵌合部のガタ、滑り等の有無。

(6) エアー関係

1) 回路の漏洩テストを実施し、リーク量が基準値内か。

2) エアークラッチ、クイックリリースバルブ等の異状。

(7) ドラム冷却水系統の洩れの有無。

iii) 泥水ポンプ

(1) 消耗部品

1) ピストンロッドの径摩耗が基準値内か。

2) バルブおよびバルブシートの当り面の打痕が著しくないか。

3) ライナー内径が摩耗限界内であるか。

4) 各パッキングに変形、欠け、破損はないか。

(2) クロスヘッドとクロスヘッドガイドの遊隙が許容値内か。

(3) クロスヘッドとエクステンションロッドおよびエクステンションロッドとピストンロッド間の接続ねじの異状。

(4) ピストンロッドの芯振れが平行度許容値内か。

(5) 受圧部の流体通路部の摩耗の有無。

(6) 各カバーのスタッドボルトのねじ変形および摩耗。

(7) ベアリングおよび軸関係の異状（ドローワークスと同じ）。

(8) エキセントリックギア、ピニオンギアの歯面について、当り面は限度以上であるか。また、ピッチングやスクラッチングが多くないか。

(9) 給油関係

1) 各ベアリングへの給油は十分か。

2) ギアおよびクロスヘッド摺動面への給油は十分か。

3) ギアポンプの異状およびパイピングの洩油。

4) 油質が規定以上に劣化していないか。

iv) エンジン

(1) 平常負荷運転状況で、冷却水温度、油圧を確認する。

- (2) クランクケース内のオイルレベルの確認と補給。
- (3) オイルフィルターの交換、ストレーナーの清掃およびオイル汚れの有無。
- (4) 冷却水レベルの確認と補給。
- (5) ターボチャージャーフィルタの清掃。
- (6) 燃料フィルターの清掃やエレメントの交換。
- (7) 燃料、水、潤滑油配管系統の漏洩の有無。
- (8) エンジン外面の清掃。
- (9) 水ポンプのシールの点検。
- (10) ファンベルトのゆるみ。
- (11) ターボチャージャーの異状音。
- (12) ヘッドボルトおよび基礎ボルトのゆるみ。
- (13) ガバナーの作動状態の異状。
- (14) 保安装置の作動の確認。
- (15) ラジエーターの水洩れの有無、スケールの付着の有無。

#### v) 吊り貝

- (1) フックおよびエレベーター
  - 1) ベールのアイおよび吊りフック部の径が摩耗限度内か、クラックはないか。
  - 2) フックのスプリングのヘアークラックの有無およびパーマネントセット量が基準内か。
  - 3) フックベアリングに異状はないか（ドローワークスと同じ）。
- (2) スイベル
  - 1) ウォッシュパイプの径は摩耗限度内か（ドローワークスと同じ）。
  - 2) ベアリングに異状はないか。
  - 3) ベアリング潤滑油量は十分かまた汚れていないか。
  - 4) ベールの吊り部の径は摩耗限度内か。
  - 5) ベールと本体との接続ピンの摩耗が限度内か。
  - 6) 下部オイルシールの油洩れの有無。
- (3) クラウンブロックおよびトラベリングブロック
  - 1) プーリー溝の摩耗が限度内か。
  - 2) ベアリングの異状。
  - 3) 基礎ボルトと軸固定ボルトおよびケースボルトの緩み。
  - 4) スラストワッシャーの摩耗。
  - 5) グリースは各滑車に十分か。

#### vi) デリック下機器

- (1) ロータリーテーブル
  - 1) リングギアとピニオンギアのかみ合いは正規のバックラッシュを有するか。
  - 2) 潤滑油の量は十分か、また汚れていないか。

- 3) 各軸ベアリングおよびメインベアリングの異状ならびに規定の遊隙内か。
  - 4) マスターブッシングのテーパー部の異状摩耗とクラック。
  - 5) 運転時の異状音と異状発熱。
- (2) スリップおよびトング
- 1) ボディーにクラック、異状摩耗および変形はないか。
  - 2) インサートおよびダイの割れ、脱落の危険。
  - 3) 潤滑が十分で、良く作動するか。

<参考文献>

- A Primer of Oilwell Drilling, 7th ed. ; PETEX, 2008
- A Dictionary for the Oil and Gas Industry, 1st ed. ;PETEX, 2005
- API Spec 8C : Drilling and Production Hoisting Equipment (PSL 1 and PSL 2) 5th Edition, April 2012
- API RP 9B : Application, Care, and Use of Wire Rope for Oil Field Service 13th Edition, October 2011
- 鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針（内規）、第 15 章掘削装置（第 17 条関係）、(20121115 商局第 4 号) 平成 24 年 11 月
- JIS G 3525:2006 ワイヤロープ
- API Spec 4F : Drilling and Well Servicing Structures, 3rd Edition, Jan

### III 生 産

#### 1 採 収

##### 1.1 一 次 採 収

##### 1.1.1 自 噴 採 収

###### i) 自 噴 井

開発初期の油・ガス層の圧力は、通常、海面からの深さに相当する静水圧の 1.2 倍前後あり、生産を開始した当初は人工的な力を加えなくても油・ガスは地上に噴出してくる。これを採取するのが自噴採取であり、自噴採取の坑井を自噴井という。

自噴井の坑口装置は一般にクリスマスツリーと呼ばれている。(図 3.1.1)

坑口装置には坑井開閉用のバルブ、圧力計およびフローチョーク(ビーンともいう)、取替え用のチョークニップルが取り付けられている。坑井開閉用のバルブは定期的にグリースを注入、点検し、坑井の緊急密閉のとき支障のないようにしておかなければならない。

圧力計は坑井の自噴状況の判断に役立つものであるから、定期的に標準圧力試験器で検定をしなければならない。坑口圧力の変化により、一般的に次のような坑井状況を知ることができる。

###### (1) 坑口圧力が徐々に上昇する場合

###### 1) ガス油比の上昇

この場合、圧力の上昇とともに、チョーク下流はガスの自由膨張によって、冷却され結露してくる。

###### 2) パラフィンおよび異物によるチョークの閉塞

異物によるチョーク詰まりのときは、チョーク下流の温度が下がると同時に、生産量が減少する。

###### (2) 坑口圧力が徐々に低下する場合

###### 1) 出水、出砂等による坑内障害

出水、出砂等により坑内が閉塞状態となり、坑口圧力が低下し生産量も減少する。

###### 2) 坑井の自然減退

自噴採取を継続によっても坑底圧力の低下に伴い、坑口圧力が低下し生産量が減少する(自然減退)。一旦坑井を密閉し坑底圧力の上昇を図るか、もしくは人工採取を検討する。

###### ii) 試油・試ガス

掘削された坑井が成功すると試油・試ガスが実施される。試油・試ガスとは産出能力調査である。坑口装置設置後、十分な時間をかけて泥切りを実施する。その後一般的には、三段階にチョークサイズを変えて自噴させ、各チョークサイズに対する安定した状態での油、ガス、水の産出量の計量、および坑底圧測定器により、自噴坑底圧力( $P_f$ )の測定、坑井を密閉した後の坑底圧力上昇曲線、密閉坑底圧力( $P_s$ )の測定等を行う。更に坑底試料採取器により、密閉圧力下における坑底試料を採取して

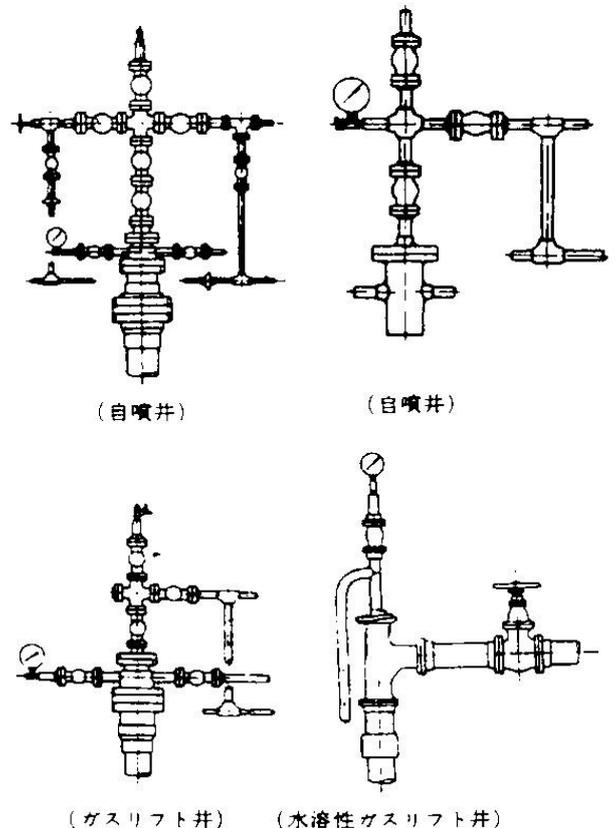


図3.1.1 クリスマスツリー

終了する。以上の資料により、概ね次の事項が解明される。

- ① 坑井の適正初日産量
- ② 坑井の仕上げの良否
- ③ 油・ガス層内流体の固有性質

なお、一般に可燃性天然ガスを大気放散する場合には保安上、次の事項に留意しなければならない。

- イ) 火気を取り扱う場所または発火性のものを堆積した場所、およびその付近以外の通風のよい大気中に導くこと。
- ロ) 大気中に放出した際、発火する温度以上の可燃性ガスは、それ以下の温度に冷却するか、または発火しても安全な場所に導くこと。
- ハ) 放出を行う可燃性ガスの放出管は、それぞれをボンドによってアースし、静電気を除去すること。
- ニ) 放出ガスは危険（人畜など）または損害（山林畑作など）を他に及ぼすおそれのない場所に導くこと。
- ホ) ガスと液体の混合物からなる放出ガスは、適当な設備によりガスと液体を分離し、ガスのみを放出するようにすること。
- ヘ) 放出管の内径は放出ガスによる過大な圧力損失なしに流出できる十分な大きさとし、かつ、放出管は振動、反力による事故のないように処置すること。

### iii) 産油・ガス（産出）調整

できるだけ自噴期間をのばし、かつ自噴採取によりできるだけ多量の油・ガスを採取できるように、自噴初期から適切な自噴状態を保ち、油・ガス層内にあるエネルギーを浪費することがないように、常に監視し産出調整を行う。

油・ガス層の産出調整といっても結局は個々の坑井の調整を行うことになるから、具体的にその調整方針が重要である。実際に個々の坑井に対し、絶えず注意すべき事項としては次のものが挙げられる。

#### (1) 坑底圧力

密閉坑底圧力よりどれくらい低い圧力で自噴しているかを表すのに、ドローダウン (%) が用いられる。

$$\text{ドローダウン}[\%] = \frac{P_s - P_f}{P_s} \times 100$$

ドローダウンが小さいほど、密閉坑底圧力と自噴坑底圧力との圧力差は小さい。このような場合、油・ガス層に対する背圧が大きいので、ガス油比の増大、ガスのチャンネリング、端水、底水の異常接近、油・ガス層岩の崩壊等がある程度防止できる。

#### (2) ガス油比

溶解ガス押し型油・ガス層では、ドローダウンを小さくして油・ガス層に背圧をかけておいても、ガス油比は比較的早期に上昇してくる。このような場合、局部的にガス油比が上昇した坑井は一時密閉されるのが普通である。ただし一般に、溶解ガス油比の 3~5 倍の生産ガス油比になるまでは連続生産される。坑井によっては密閉と生産を繰り返すことによって、比較的長期にわたって低ガス油比で生産できる例もある。また、このように密閉、開放を繰り返しても、ガス油比の低くならない坑井もある。このような坑井は、チョークのサイズを絞って生産レートを低くすることで、ガス油比が下がり、その後の上昇も緩慢なものもある。

ガス油比の調整も、やはり個々の坑井についていろいろと産出試験を実施して、最もその油田に適した生産方法をみつけなければならない。

水押し型油・ガス層のガス油比は、生産期間中はほぼ一定であるが、油・ガス層圧力の低下に伴い末期は徐々に下がる。

キャップガス押し型油・ガス層では一般に、キャップガスの生産を極力抑えて油・ガスの採取を行うことが産出層管理の観点から適切であり、そのような生産期間中のガス油比はほぼ一定である。しかし、キャップガスの生産が始まると、ガス油比は急上昇する。

### (3) 出水

水押し型油・ガス層においては、生産の進行による油・ガス層圧力の低下に伴い、端水や底水が油・ガス層部分に浸入してくる。これらの地層水は、いずれは生産井に到達して坑井からの出水を招き、産出水量の増加および水油（ガス）比の上昇が進むと、坑口圧力が低下して自噴不調となる。

出水を伴う坑井の生産挙動およびこれら坑井の生産方法としては、以下の二つに大別できる。一つは比較的生産レートの低い坑井において、ドローダウンを小さくして出水を抑制しておく、一部の水は油・ガスとともに自噴してくるが、一部の水はチュービング内に滞留してくる。このため坑口圧力が低下して自噴不調となる。この場合は一時的にチョークのサイズを大きくして自噴を誘導させると、多量の水が油・ガスとともに自噴し坑口圧力が上昇する。このとき適当な時期にもとのチョークサイズに戻すと、もと通りの自噴状態に回復する。これを水払い（フローバック）と呼び、水払いが必要となる周期は坑井によって異なっている。

もう一つは比較的生産レートの高い坑井において、ある程度チョークのサイズを大きくして相当量の水を油・ガスとともに自噴させる方式である。この方式は砂の産出を伴うときは、砂を沈殿させないで水とともに排出させるので有効である。このような坑井ではチョークサイズを小さくすると自噴停止することがある。また、砂の産出を伴っているときは、チュービング内に柵を作り自噴不能になる場合が多い。また、一般に出水を伴うとエマルジョン化するため、薬品添加、加熱処理が必要となってくる。

出水が認められたとき、どのような方法が一番良いかは、個々の坑井についていろいろと操作を行って決める必要がある。

#### 1.1.2 ガスリフト採取

ガスリフト採取の機構は、圧縮ガスの膨張エネルギーを利用して液体を汲み上げるものであり、その目的は人口採取法と呼ばれるものに共通したところがあるが、油・ガス層圧力が低下した状態においても適正な産出レートを保持するとともに、油・ガス層の放棄圧力を低くして油・ガスの

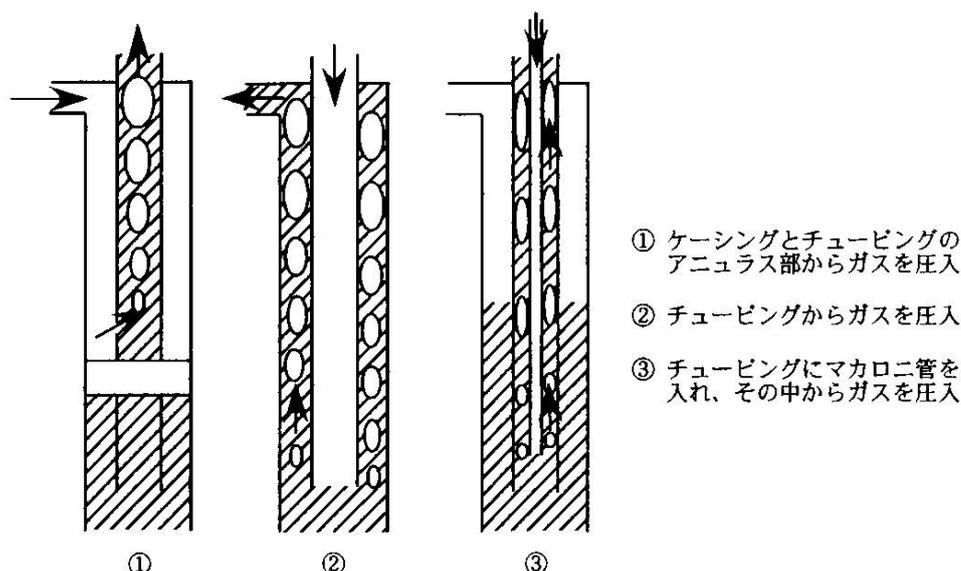


図3.1.2 ガスリフトにおけるガス圧入箇所

回収率を高めることにある。

ガスリフトには種々の方法があり、ガスの圧入個所だけから分類しても図 3.1.2 の 3 種に大別される。さらに、連続的にガスを圧入する連続リフト法と間欠的リフト法があり、坑井の産出能力によって選択される。ただし、いずれの方法も、ガスの膨張エネルギーを利用して液体を汲み上げるという機構そのものは同一であり、ここではアニュラスからガスを圧入する方法による間欠ガスリフトに絞って説明する。

#### i) 地上設備

圧入ガスとしては、コンプレッサーによる圧縮天然ガス、もしくは高圧ガス井からの産出ガスを使用し、通常これらのガスは大気放散せず、図 3.1.3 に示すようなシステムにより販売、もしくは再圧入に利用する。このようなシステムをクローズドシステムと呼ぶ。なお、ガスリフトの稼働坑井はコンプレッサーの能力に応じ、何坑でもこのシステムに組み込める。言い換えれば、ガスリフトが必要な坑井数から所要ガス量を予測し、それに見合うガス容量のコンプレッサーを選定するのが順序である。

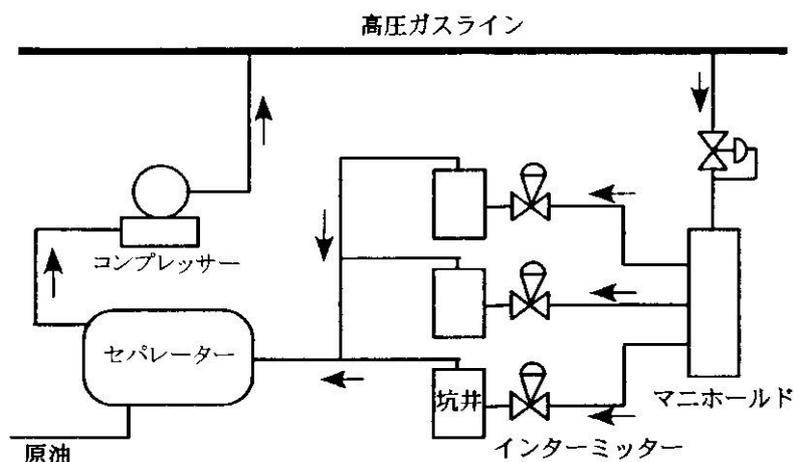


図3.1.3 ガスリフト地上設備系統図

#### ii) 坑井設備

ガスリフト坑井内に装置する主な設備は次のようなものであり、概念図を図 3.1.4 に示す。

##### (1) ガスリフトバルブ

アニュラス部からチュービングへのガスの通路の開閉を制御するバルブであり、圧力によって開閉作動する機構になっている。その機構は多種多様のものが開発考案されているが、代表的なものであるベローズ型バルブについて後述する。

##### (2) マンドレル

チュービングと直接接続できるようになっており、これにガスリフトバルブをセットする。

##### (3) スタンディングバルブ

チュービングの下部に取り付ける逆流防止弁であり、ガスリフトバルブ作動時にリフトガスの圧力が油・ガス層にかかるのを防ぐ。

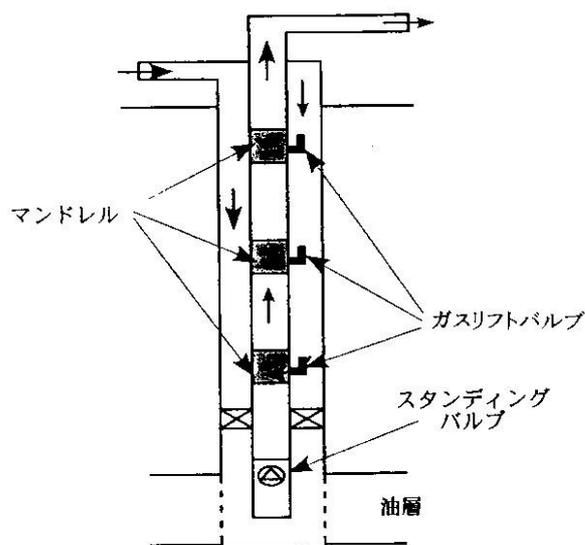


図3.1.4 ガスリフト坑井内概念図

## iii) ガスリフトバルブの機構

数あるガスリフトバルブの内、ここではベローズ型ガスリフトバルブの機構について述べる。図 3.1.5 にベローズ型バルブの略図を示す。

(1) バルブの開放圧力;  $P_o$ 

バルブが開く瞬間の力の釣り合いは、バルブを閉じようとする力 ( $F_c$ ) とバルブを開こうとする力 ( $F_o$ ) が等しい。

$$F_c = P_b A_b + St(A_b - A_v) \dots\dots\dots ①$$

$$F_o = P_o(A_b - A_v) + P_t A_v \dots\dots\dots ②$$

$P_b$ : ベローズ内の窒素の圧力 [kgf/cm<sup>2</sup>]

$P_t$ : チュービング内圧 [kgf/cm<sup>2</sup>]

$St$ : スプリングの有効張力 [kgf/cm<sup>2</sup>]

$A_b$ : ベローズの有効面積 [cm<sup>2</sup>]

$A_v$ : バルブポートの面積 [cm<sup>2</sup>]

$F_o = F_c$  なる関係から

$$P_o = \frac{P_b}{1 - A_v / A_b} + St - P_t \left[ \frac{A_v / A_b}{1 - A_v / A_b} \right] \dots\dots\dots ③$$

(スプリングのない型のバルブでは  $St$  の項は不要)

(2) バルブの遮断圧力;  $P_c$ 

バルブが閉じる瞬間の  $F_c$ 、 $F_o$  は次のようになる。

$$F_c = P_b A_b + St(A_b - A_v)$$

$$F_o = P_b A_b$$

したがって

$$P_c = P_b + St(1 - A_v / A_b) \dots\dots\dots ④$$

(3) スプレッド;  $\Delta P$ 

バルブの開放圧力と遮断圧力の差をスプレッドと呼ぶ。これは③式と④式から次式で算出できる。

$$\Delta P = \left[ \frac{A_v / A_b}{1 - A_v / A_b} \right] \left[ P_b + St \left( 1 - \frac{A_v}{A_b} \right) - P_t \right] \dots\dots\dots ⑤$$

したがって、③式に基づいてベローズ内の窒素圧力を調整することにより、バルブの開放圧力を自由に選ぶことができる。そのときの遮断圧力とスプレッドは④式、⑤式からそれぞれ求めることができ、アニュラスの容積から坑井内温度に対する補正計算を行って、ガスリフトバルブ作動 1 回当たりの所要ガス量を推算できる。

## (4) バルブのスペーシング

チュービングに取り付けるバルブの深度をスペーシングと呼び、次のように算出する。

## 1) 1 番上のバルブ (1st バルブ)

$$D1 = (P_{v1} - P_{sp}) / G_s$$

$D1$ : 1st バルブの深度 [m]

$P_{v1}$ : バルブ深度におけるケーシング圧力 [kPa (または kgf/cm<sup>2</sup>)]

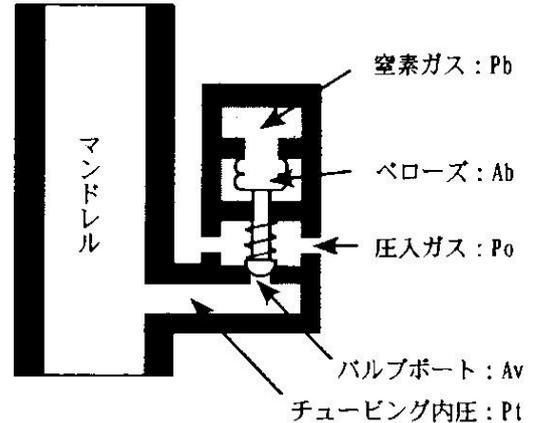


図 3.1.5 ベローズ型ガスリフトバルブ略図

$G_s$  : チュービング内液体の静圧力勾配 [kPa/m (または kgf/cm<sup>2</sup>/m) ]

$P_{sp}$  : 坑口背圧 [kPa (または kgf/cm<sup>2</sup>) ]

2) 1st バルブと 2nd バルブの間隔

$$D_2 = (P_{v2} - G_f D_1 - P_{sp}) / G_s$$

$D_2$  : 1st バルブと 2nd バルブの間隔 [m]

$P_{v2}$  : 2nd バルブのケーシング圧力、通常は 1st バルブの遮断圧力を用いる。[kPa (または kgf/cm<sup>2</sup>) ]

$G_f$  : ガス体と液体の場合、二相流の圧力勾配。間欠ガスリフトの場合、1.0~1.2 kPa/m

(0.010~0.012 kgf/cm<sup>2</sup>/m) を用いるのが普通である。

3) 3 番目以下のバルブ

同様の方法でバルブの間隔を求め、これを加算して深度を決定する。

4) オペレーティングバルブ (1 番下のバルブ)

通常作動するのは 1 番下のバルブだけなので、これをオペレーティングバルブと呼ぶ。これに対して、これより上のバルブはガスリフト開始時や再開時のアンローディングのときにだけ作動するので、アンローディングバルブと呼ぶ。

オペレーティングバルブの深度は油・ガス層の圧力および産出能力、予定生産量から決定する。

(5) 効率

ガスリフトの効率の指標となるものに、ガス液比 (G/L) なる係数がしばしば用いられ、これは単位時間当たりの圧入ガス量 (m<sup>3</sup>) を汲み揚げ液体量 (kl) で除した商をもって表す。この比率が小さければ、少量のリフトガスで多量の液体を汲み上げていること、即ちガスリフトの効率が高いことを意味する。

この効率に影響を与える要因としては、次のような事項がある。

- ① オペレーティングバルブの深度
- ② オペレーティングバルブの径およびスプレッド
- ③ チュービング径
- ④ ガスの圧力
- ⑤ 産出液体の粘性
- ⑥ 産出ガス液比
- ⑦ 坑口背圧
- ⑧ サブマージェンス

(6) プランジャーリフト (フリーピストン)

間欠リフト井のチュービング中にピストンを挿入し、ガスリフト作動毎に自動的に管内を上下させる方法をプランジャーリフトと呼ぶ。この方法には次のような利点がある。

- ① 液体のスリッページを小さくし、ガスリフト効率を高める。
- ② チュービング内でのエマルジョンの生成を緩和する。
- ③ パラフィントラブルを起こしやすい坑井でも未然に防ぐことができる。

(7) ガスリフトの長所・短所

1) 長所

- ① 汲み揚げ能力が比較的大きく、高い産出ガス液比でもトラブルの心配がない。

- ② 坑井内に機械的に動く部分が殆どなく、砂やパラフィンによる故障の心配がない。
- ③ 傾斜の強い坑井にも適用できる。

## 2) 短所

- ① コンプレッサー等の設備費が相当高い。
- ② 水を伴う坑井では強固なエマルジョンを作りやすい。
- ③ 効率を高く保つことが困難であり、厳密に管理しないと運転費が高くなる場合がある。

### 1.1.3 ポンプによる生産

自噴能力の低下、または自噴停止した坑井に適用される生産方法に、前節に述べたガスリフトの他、ポンプがある。ポンプによる生産には次の三つの方法がある。

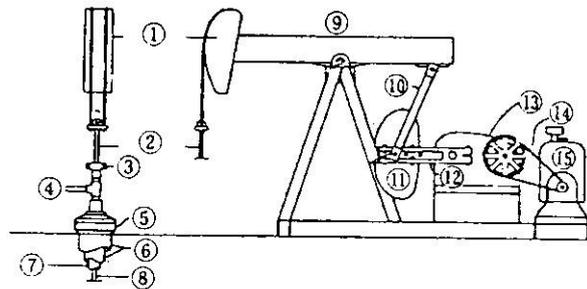
#### i) サッカーロッドポンピング

坑内に設置したポンプのプランジャーにサッカーロッドにより上下運動を与えることにより、坑内の原油を地上に汲み揚げる方法である。ポンプの駆動方式により、複数の坑井を一つの動力で駆動するポンピングパワー方式と、1坑または2坑を一つの動力で駆動するポンピングユニット方式ないし連結ユニット方式に分けられる。ポンピングパワー方式は、比較的浅い坑井が密集する地域に適用され、国内では山間部の古い油田で現在でも稼働している例がある。

ポンピングユニット方式の装置の概略は次の通りである。

#### (1) 地上装置

地上に設置されるポンピングユニットには、図3.1.6に示すクランクバランス型の他に、エアバランス型、ビームバランス型があり、また長いストロークを必要とする場合には水圧式ポンピングユニットが使用される。クランクバランス型ポンピングユニットの型式は、ポンプの設置深度、汲揚量等によって、適切な出力の装置が選択されるが、機構としては電動機や内燃機関の回転をクランクに伝え、更にビームを動かして上下動に変えて生産する装置である。



①ホースヘッド、②ポリッシュロッド、③スタッフィングボックス、④フローライン、⑤ケーシングヘッド、⑥ケーシング、⑦チュービング、⑧サッカーロッド、⑨ウォーキングビーム、⑩ビットマン、⑪カウンターウェイト、⑫クランク、⑬減速機、⑭V-ベルト、⑮原動機

図3.1.6 地上ポンピングユニット略図

#### (2) 坑内設備

##### 1) 坑口装置

チュービングを吊り下げ、またフローラインを接続し、さらにチュービングとケーシング間(外圧)から出るガスを採取する口がある。

##### 2) ロッド

ポンプにつながるサッカーロッドを上下することにより、ロッド先端のプランジャーが上下し

油を汲み込み、押し上げて、チュービングから地上に汲み出す仕組みである。

なお、ロッドには、ポリッシュドロッド、サッカーロッド、バルブロッドがある。

### 3) ポンプ

バーレル、プランジャー、トラベリングバルブ、スタンディングバルブの4部分からなり(図3.1.7)、多種多様であるが、それぞれ特徴を有するから、坑井の状況により選定される。ポンプはチュービングポンプとロッドポンプの2種類に大別され、チュービングポンプではバーレルはチュービングに接続して降下し、プランジャーはサッカーロッドの下端に接続して降下され、バーレル内に挿入する。

ロッドポンプは別名インサートポンプとも呼ばれ、ポンプ全体がサッカーロッドに接続されて、チュービング内の決められた深度に設置される。ロッドポンプでは、ポンプ交換のためにチュービングを揚管する必要がなく、ポンプ交換は容易であるが、同径チュービングでのチュービングポンプに比較してプランジャーの有効断面が小さく、小容量の汲揚量となる。

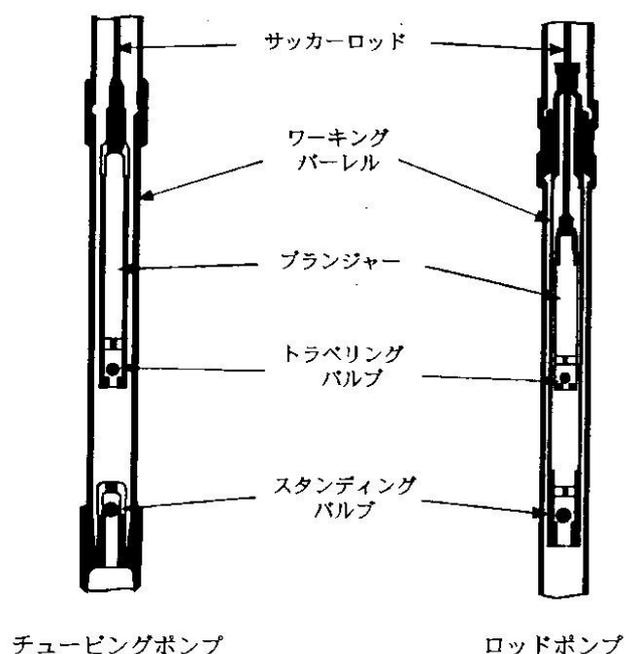


図3.1.7 チュービングポンプとロッドポンプ

### 4) ガスアンカー

ガスのある坑井では、ガスがポンプ内に入ったときは単に圧縮膨張を繰り返し、産出作用に障害を与えるので、これを防ぐためポンプの下端に接続される。

### (3) 運転

クランクバランス型ポンピングユニットの運転に当たっては、ポンプの上昇ストロークと下降ストロークとで負荷が均一となるよう、カウンターバランスを調整することが重要である。同ユニットでは、クランクピン孔および減速機ギアの選択により、ポンプのストロークおよび回転数の変更が可能である。

ポンプ位置は液面の高さ、油・ガス層位置、坑井の産出能力と実際の産出レート等により決定されるから、当初の条件に変化のあった場合は、ポンプ位置を上げ、または下げて、それにより効率よく生産する。

### (4) 故障復旧

坑内においてポンプ他に故障を生じて運転不能または産出量減少等の種々トラブルが発生することがあり、これを復旧して順調な運転状態を保持することが必要となってくる。この故障（対応）には概ね次のようなものがある。

① プランジャーライナーの磨耗腐食	ポンプ取替
② バルブの磨耗、腐食	バルブシート取替
③ プランジャー抑留運転不能	チュービング揚管
④ ガスロックング	運転の取り直し
⑤ ロッドの磨耗、切断	不良取替
⑥ チュービング孔あき、ネジ脱落	不良取替
⑦ 坑内に砂などが沈殿することによる埋設	浚揚

### ii) 水中電動ポンプ (ESP)

ロッドの上下運動によるポンプ採取は、坑井深度が非常に深くなってポンプ位置が深い場合には、ロッドの伸びや抗張力等の問題で生産が制限されたり、或いは不可能となったりするケースがある。また、坑井が高傾斜になった場合や非常に多量の油や水を汲み揚げなければならない場合にも、ロッドの上下運動による生産方法は適さない。このような場合には、水中電動ポンプが適している。

これはチュービング下端にモーター直結の多段タービンポンプを取り付け、チュービングにケーブルを沿わせて坑井内（ケーシング内）の所定の位置まで挿入し、ポンプ運転して揚液する方式である。（図 3.1.8）

米国メーカーの製品では、4-1/2 in. (114.3 mm) のケーシングに用いる外径 3-3/8 in. (85.7 mm) から 13-5/8 in. (346.1 mm) のケーシングに用いる 11-1/4 in. (285.8 mm) までの各種サイズのポンプがあり、ポンプ位置を 15,000 ft (4,500 m) まで下げて揚液できるものもある。

### iii) ハイドロリックポンピング

ハイドロリックポンプは高圧の液体を動力油として使い、坑底のエンジンを動かしポンプのピストンを作動させるものである。したがって高傾斜や大深度の坑井にも適する。また、図 3.1.9 に示すように中央に動力設備を設け、複数の坑井より生産することもできる。

#### (1) 坑内設備 (図 3.1.10)

##### 1) エンジン

エンジンはシリンダーとピストンの部分からなる。エンジンは復動であり、ピストンの両端からそのアニユラス部に動力油が流れ、それがエンジンバルブで調節される。

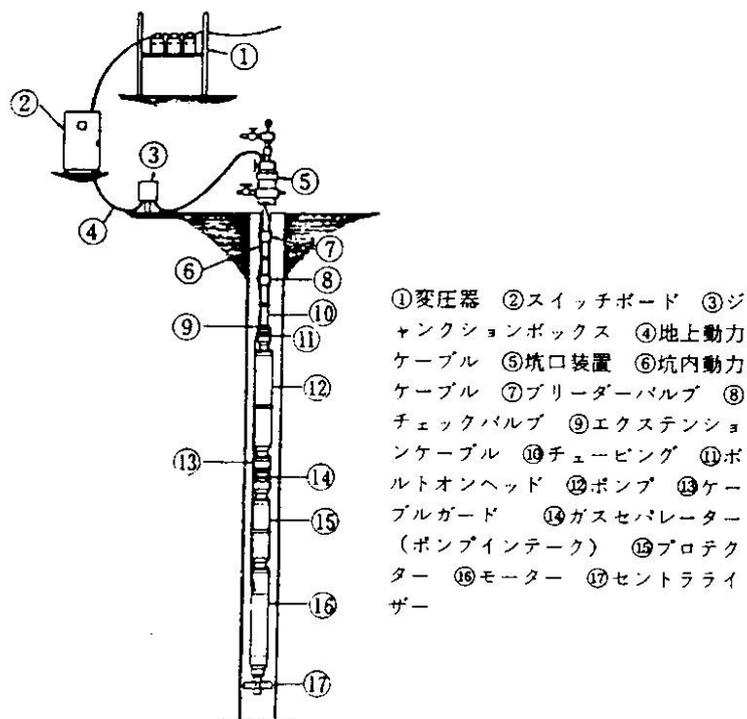


図3.1.8 水中電動ポンプ採油設備

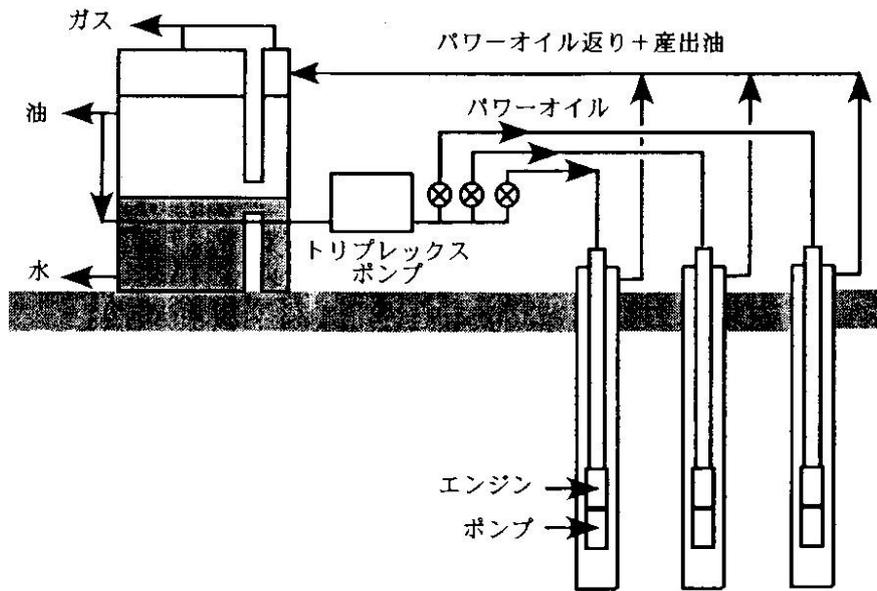


図3.1.9 ハイドロリックポンピング地上設備系統図

2) エンジンバルブ

ピストンがそのストロークの終わりに近付いたとき、エンジンのシリンダーの端に流体を戻す機能と、加速度と速度の調節を行う機能がある。

3) ポンプ

エンジンピストンの上下運動がエンジンピストンと直結したポンプピストンに伝達され、産出油および動力油が地上に運ばれる。

ポンプの種類は、動力油を送り込みそれを地上に回収する方式により、次の二つのシステムに分類される。

イ) クローズドシステム

動力油と産出油とを混合させない方式をクローズドシステムと称する。同システムでは、動力油を圧入するためのパワーチュービング、産出油のみを汲み揚げるプロダクションチュービング、動力油の戻り線に用いられるエキゾーストチュービングの3本のチュービングを同時に降下させる。動力油と産出油とが混合しないため、回収した動力油はそのまま循環させて使用できる利点があるが、坑内に降下するパイプが多く複雑となる。

ロ) オープンシステム

使い終わった動力油と産出油とが一緒に地上に運ばれるもので、坑内降下パイプが少なくしてシステムが単純であり、比較的大容量のポンプを降下させることができる等の利点があるが、地上に運ばれた油を処理しなければならない。

これらのポンプはまた、ポンプを坑井内に降下する方法によって、チュービングに接続して降下するフィクスタイプと、チュービング内に投入し動力油の循環によって降下・上昇させるフリータイプの二つのタイプに分類される。これらは油井の特性に合わせて、最も効率的・経済的

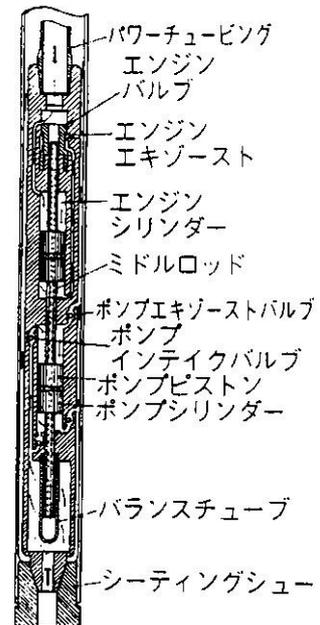


図3.1.10

ハイドロリックポンピングユニット

なシステムを選択する必要がある。基本的な四つのシステムを図 3.1.11 に示す。

① フィックスケーシングタイプ (オープンシステム)

ポンプは動力油用のパワーチュービングに接続して降下され、下方にケーシングパッカーが取り付けられる。動力油の返りと産出油は、パワーチュービングとケーシングとの間のアニュラス部から地上に運ばれる。

② フリーケーシングタイプ (オープンシステム)

このシステムでは、パワーチュービングに取り外しのできるスタンディングバルブ、ケーシングパッカーが接続される。ポンプはパワーチュービング内に投入され、図 3.1.12 に示すように動力油の循環によって設置と回収ができる。フィックスケーシングタイプと同様に、動力油の返りと産出油はアニュラス部から地上に運ばれる。

③ フリーパラレルタイプ (オープンシステム)

パワーチュービングと平行して小径のプロダクションチュービングを降下させ、フリータイプのポンプをパワーチュービング内に設置する。動力油の返りと産出油は混合してプロダクションチュービングより回収される。

④ フリーパラレルタイプ (クローズドシステム)

このシステムでは、3 本のチュービングが平行に降下される。このタイプに使用するフリーポンプでは、油圧により坑底に降下されると、ポンプのエンジンポート部と下端部のシール機能が働き、動力油と産出油とが混合しないようになっている。

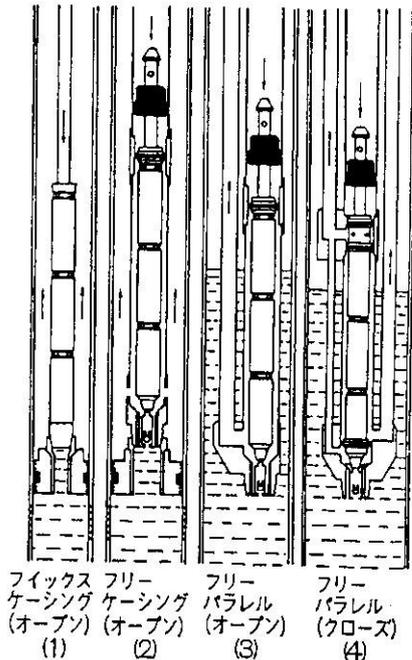


図3.1.11 ハイドロリックポンプシステム

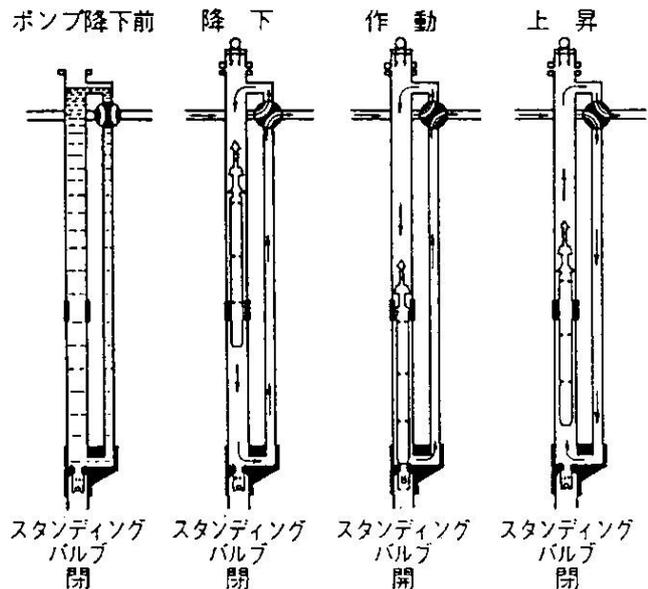


図3.1.12 フリータイプポンプの揚降操作

(2) 地上設備

1) 坑口装置

イ) フィックスタイプ

坑口装置は、圧入する動力油と産出油とが混じらないように、パワーチュービングにパッキングでスリップを施してある単純なチュービングヘッドからなる。

ロ) フリータイプ

ポンプキャッチャー、ポンプをコントロールする4ウェイバルブ、作動圧やポンプの汲み揚げ圧を示す圧力計、その他の部品を備えた耐圧のあるチュービングヘッドが必要である。

## 2) 動力油ポンプ

使用する動力油の容量と圧力によりその装置が決まることになるが、必要な作動圧はポンプの水頭、坑底ユニットのポンプに対するエンジンの面積比、装置の摩擦損失等により決まる。しかし深度や坑井の状況が異なることにより、作動圧も、また容量も、坑井により異なることが多いので、トリプレックスポンプが最もよく用いられる。また、装置が割合に安価である長所もある。

## 3) 動力油の処理

動力油として一般には坑井からの原油を用いるので、潤滑的性質の油とするために水、砂、塩分、鉄分等、ポンプを腐食あるいは磨耗する不純物を除かねばならない。この場合、クローズドシステムの場合は最初に不純物の除去を行えばよいが、オープンシステムの場合は循環する毎に処理が必要となってくる。そこでその処理装置として、フィルター、ヒーター、ウォッシュタンクを通して油に浮遊するパラフィン、エマルジョン、水、その他浮遊物を除去している。このほかに電気脱水機、電気沈殿セパレーター、遠心クリーナー等もある。

## 4) 動力油の配管

これは主幹線コントロールヘッダ、個々の坑井配管からなり、中央基地にマニホールドを組み、流量調整バルブ、抑圧バルブ、フローメーター、インターミッターを備え、ポンプの吐出量を各坑井へ流量調整して圧入する。

### 1.1.4 天然ガスの採収

天然ガスの採収作業に携わる場合には、天然ガスの性質をよく理解する必要のあることはもちろん、天然ガスの採収装置、とりわけ天然ガスを産出する坑井についての十分な知識を持つことが必要である。

天然ガスの採収にかかわる問題は、単に地層内および採収管内の流動に関するものだけではなく、地層内あるいは採収管内において物理化学的な状態変化を伴うことがあり、ここからいろいろな問題が生ずることになる。

ここでは「天然ガス」について改めて一応の定義を下し、その分類を行い、採収技術的観点からの基礎的性質を記した上で、採収技術の概要について説明する。

#### i) 天然ガスの種類と産状

天然ガスとは、広くは天然に産する全てのガスをいい、炭酸ガス、亜硫酸ガス、硫化水素、水素、窒素等があるが、石油鉱業あるいはさらに広く産業界において「天然ガス」というときは、メタンその他の炭化水素を主とする「可燃性天然ガス」を指す。これをまた単に「ガス」と呼ぶ場合もある。

#### (1) 天然ガスの一般的な分類（産出する場所による分類）

##### 1) 油田ガス

油田において原油の生産に伴って産出するガスを指すが、これは更に層内での賦存形態によって「溶存ガス」と「キャップガス」に区分される。

##### 2) 構造的ガス田ガス

油層と同一系統の地層がガス層となっているガス田から産出されるガスをいい、場合により構造的ガスと略称する。

##### 3) 水溶性ガス田

ガスガスが地層水中に溶存して賦存するガス田から産出されるガスをいい、場合により水溶性

ガスと略称する。

4) 炭田ガス

石炭層の付近または石炭に伴って発生するガスをいい、組成的には殆どメタンからなる。石炭層内部に存在するものは炭層メタンまたはコールベッドメタン（CBM）と呼ばれる。

5) 沼沢ガス

沼・沢等の湿地に発生するガスをいう。

6) タイトサンドガス

浸透率が1 md（ミリダルシー）より低い砂岩に含まれるガス。

7) シェールガス

硬い頁岩（シェール）層の微小亀裂（フラクチャー）に含まれるガスや吸着ガス。組成的には殆どメタンから成る。

8) メタンハイドレート

低温・高圧化の地層中で氷を形成する水分子の籠状構造内部に、分子レベルで存在する天然ガス。天然ガスハイドレートとも言う。

本書では4)～8)の詳細については割愛する。

(2) 賦存形態による分類

1) 油溶性ガス

層内において原油に溶解して存在するガス。

2) 遊離形ガス

層内において遊離して存在するガス。

厳密には前項の分類の「油田ガス」のうち、キャップガスは賦存形態による分類では遊離形ガスに属することになるが、統計的には油田において産出するガスは全て油溶性としている場合が多い。なお、石炭起源のものとみなされるものであっても、炭層の上部の地層中に貯留しているガスを坑井によって採取している例を「遊離形鉱床」として扱うこともある。

3) 水溶性ガス

前項の(1)の3)に同じ。

4) 吸着ガス

石炭や頁岩内部に存在し、生産に伴う減圧によって遊離するガス。

(3) 存在状態による分類

以上の他に、炭化水素の貯留層を熱力学的な相挙動との関連に従い、次のように分類することが行われている。

1) ガス層

層内圧力と温度が、層内炭化水素系の状態図（図3.1.13）のAの範囲にあるもの。層内炭化水素系は初期から層内の圧力と温度のもとで気体として存在し、層内圧力が低下しても気体のままである。

2) ガスコンデンセート層

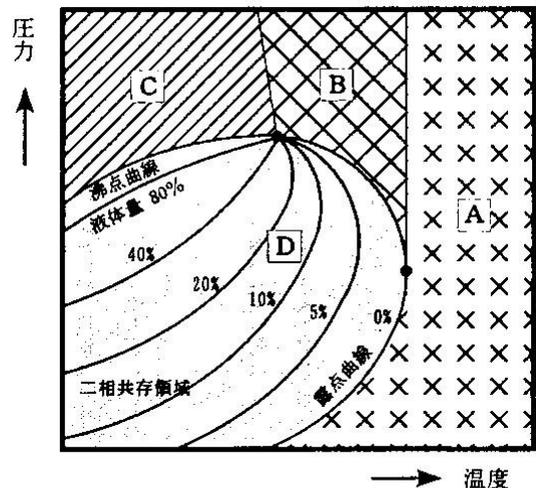


図3.1.13 層内炭化水素系の状態模式図

層内圧力と温度が図 3.1.13 の B の範囲にあるもの。層内炭化水素系は初期には層内の圧力、温度のもとで気体として存在するが、圧力が低下すると液体（コンデンセート）が凝縮（逆行液化）する。

### 3) 油層

層内圧力と温度が図 3.1.13 の C および D の範囲にあるもの。C の場合、層内圧力は層内炭化水素系の沸点圧力以上で層内炭化水素系は液体（原油）として存在し、層内圧力が沸点以下に下がればガスが放出される。D の場合には液体とガスが共存する。すなわちガスキャップが存在する。

ここで重要なのは、この分類は層内炭化水素系の相挙動との関連で、層内の圧力および温度の条件に基づいて行われることである。すなわち、層内炭化水素系の組成が同一であっても層内の条件により、ある場合はガス層であり、ある場合には油層として分類される。

一方、重炭化水素を多く含む系では臨界温度が高いので油層を形成し、重炭化水素の少ない系はクリコンデンサームが低いのでガス層を形成することが多い。

なお、コンデンセートと一般に呼ばれる軽質（比重 0.8017 以上 0.830 未満）ないし特軽質（0.8017 未満）の原油は、必ずしも上記(3)の 2)のガスコンデンセート層から産出されるものに限らないことに注意しておく必要がある。(3)の 1)のガス層の層内流体も、地上の温度、圧力の条件のもとでは、いわゆるコンデンセートを生ずるものもあり、さらに(3)の 3)の油層から産出するものであっても、場合によりコンデンセートとして扱われることがある。

## (4) 性状による分類

### 1) 湿性ガス（ウェットガス）

プロパン、ブタン、ペンタン等の液化しやすい重炭化水素類を多量に含んだガス。

### 2) 乾性ガス（ドライガス）

液化しやすい成分を殆ど含まないガス。メタンが大部分で若干のエタン、プロパン等を含むことがある。

この分類は、これまでの分類のように産状や地下の賦存形態に直接関係がなく、ガソリンプラント等の処理の前で「ウェット」、「ドライ」と呼び分けることもある。

なお、飽和量の水蒸気を含むものを「ウェットガス」、脱湿して水蒸気のある限度以下に除去したものを「ドライガス」と呼ぶこともある。

### 3) サワーガスとスウィートガス

天然ガス中に不純物として炭酸ガス、硫化水素等の酸性ガスを多量に含むガスを、一般にサワーガスと称する。これに対し、このような酸性ガスを殆ど含まない天然ガスや、酸性ガス除去処理を施した後のガスをスウィートガスと称する。

## ii) 天然ガスの採取技術に重要なガスの基礎的性質

天然ガスとは、地表条件で気状をなすものをいうのであって、地上において加圧状態のもとでは液体であっても、大気圧下で気体となるものは天然ガスとみなされる。すなわち、天然ガスは地下のガス層内では i)の(3)で記したように気体であったり液体であったりするが、そのような地下での存在状態とは関係なく、i)で定義したように、地上に産出し、液体を分離、除去して初めて、天然ガスとして識別されることになるわけである。

だから、天然ガスの性状を比較するときには、分離のプロセスと条件を抜きにしては無意味である。

上に記したこととは別に、ある条件のもとで気体であるという意味で「ガス」ということがよくあるので、用語の用法についてはっきりした認識を持つ必要がある。

## (1) 組成

天然ガスはメタンを主成分とする低級のパラフィン系炭化水素 ( $C_nH_{2n+2}$ ) と若干の不純物との混合物である。不純物として一般的なものは炭酸ガスおよび窒素で、ときにはこれが半ば以上を占め可燃性ガスとして商品にならないガスもある。また、硫化水素を多く含む場合もあり、炭化水素ガスとしての商品価値を著しく低めるばかりか、腐食性の強いことから採取技術的にもいろいろな対策を必要とするものもある。その他には微量の酸素、水素、ヘリウム、アルゴン等が含まれることがあり、まれにヘリウムが工業的に採取される例も外国では知られている。

一般に、混合物の化学的、物理的性質は組成によって変化する。ガスの混合物の性質はまだ完全に究明されていないといわれているが、組成が知れば、他の諸性状を実用上には十分な精度で求めることができる。しかし、学術的な問題を除き、実用上の問題ではいちいち組成を取り上げずに、組成の目安となるガスの比重等の簡単な性質から、他の諸性状をおしはかることが普通に行われている。

## (2) 爆発限界

「可燃性天然ガス」の名が示す通り、ガスは着火源（炎、火花、静電気放電、過熱物体など）の存在により容易に燃焼する。ガスには燃焼を起こす濃度の最低値（下限）および最高値（上限）があり、一般に1気圧、常温において空気との混合気中の可燃性ガスの容量% (vol%) で示す。この濃度範囲を燃焼範囲といい、連鎖的な燃焼により爆発を起こす危険があることから爆発範囲とも呼ばれる。

燃焼範囲はガスの組成によって異なり、メタン 5.0~15.0 %、エタン 3.0~12.4 %、プロパン 2.1~9.5 %、ブタン 1.8~8.4 %である。混合ガスである天然ガスの場合、一般的には主成分であるメタンの値を用いる。

燃焼範囲の下限値を爆発下限界 (LEL ; Lower Explosive Limit) といい、この値を超えると可燃性ガス検知器は警報を発する。なお、ほとんどの可燃性ガス検知器は vol%表示の他、爆発下限界を 100 %とした%LEL 表示 (メタンの場合、50 %LEL で 2.5 vol%) を採用しており、測定の際はどちらの値で表示されているか注意が必要である。

## (3) ガスの圧力、温度と体積との関係

気体は遮るものがなければいくらかでも広がり、もしこれを遮ると、ある圧力を示す。そしてその圧力よりも大きな圧力を加えると、圧縮することができる。このように気体は形や体積がたやすく変わる。また、気体は圧力を同一に保っても、温度の変化により大きく膨張、収縮する。これらの関係を示す式が気体の状態方程式である。

これらのことからわかるように、気体の状態または性質は、ある物理量によって表される。この中で直接測定できる量としては温度、圧力、体積、質量がある。このうち体積および質量は物質系の量に関係する因子であるので示量因子と呼び、そうでない因子、例えば温度、圧力等を示強因子という。

## 1) ボイル・シャルルの気体の法則

気体は温度が一定であれば、一定の質量の気体が占める体積は圧力に反比例する。すなわち、一定量の気体の圧力を  $P_1$ 、体積を  $V_1$  とし、圧力を変化させて  $P_2$  としたときの体積を  $V_2$  とすれば、常に、

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{あるいは} \quad P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

の関係式が成り立つ。これをボイルの気体弾性の法則という。

気体はまた、圧力が一定であれば、一定の質量の気体が占める体積は絶対温度に比例する。すなわち、絶対温度  $T_1$  のとき体積  $V_1$  を占める気体が、絶対温度  $T_2$  で体積  $V_2$  を占めるならば、

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{あるいは} \quad V_1/T_1 = V_2/T_2 \quad \dots\dots\dots ②$$

これをシャルルの気体膨張の法則という。

ボイルの法則とシャルルの法則とを合わせたものが、ボイル・シャルルの法則といわれるもので、式①と②とを合わせて次のように表される。

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} \quad \dots\dots\dots ③$$

これを言葉でいえば、「一定の質量の気体が占める体積は圧力に反比例し、絶対温度に比例する」ということができる。

式③は次のように書き直すことができる。

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \dots\dots\dots ④$$

すなわち、ある気体の一定量をとれば、その状態がどんなに変わっても  $PV/T$  の値が一定である。この値を  $R$  とおけば、

$$PV = RT \quad \dots\dots\dots ⑤$$

ここで、気体の一定量として1モルをとれば、1モルのガスは全て標準状態（0℃、1気圧）で22.4ℓの体積を占めるので、式⑤において  $P$  を1気圧、 $V$  を22.4ℓとすると、0℃は273.1 Kであるから、

$$1 \times 22.4 = 273.1 \times R$$

したがって、

$$R = 0.08 \text{ ℓ} \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K} \text{ または、} 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad (1.013 \times 10^5 \times 2.24 \times 10^{-3} / 273.1)$$

となる。この  $R$  の値はガスの種類に関係のない定数で、ガス定数と呼ばれる。 $R$  の値は、圧力および体積の単位の取り方によって種々の値をとる。

ところで、 $V$  を1モルの気体の占める体積とすると式⑤となるが、 $n$ モルについては  $V$  をその体積とすれば式は一般化されて、

$$PV = nRT \quad \dots\dots\dots ⑥$$

となる。式⑥が理想気体、あるいは完全ガスの状態方程式として知られているものである。

## 2) 実在の気体と理想気体

上に記したボイル・シャルルの法則は、実在の気体に対しては大体あてはまるが、厳密には多少の偏りがある。そこで、厳密にこの法則の成り立つ架空のガスを考えて、それを理想気体あるいは完全ガスと名付ける。

式⑥は、実在のガスについては必ずしも正確にあてはまるものではないが、適当な圧力、温度の範囲では、概ね適用することができる。また、このような条件でなくても、特に厳密さを必要としない場合には、式⑥によっておおよその傾向を知ることができる。

## 3) 圧力の単位

圧力の単位にはパスカル (Pa)、気圧 (atm)、 $\text{kgf/cm}^2$ 、 $\text{lb/in}^2$  などがある。国際単位系 (SI) への移行に伴いパスカル単位の使用が一般的であるが、石油・天然ガス業界では慣習的に  $\text{kgf/cm}^2$  や  $\text{lb/in}^2$  (psi) 等での表示・計算等も多用されており、換算の必要が生じることがある。

1パスカルとは1平方メートルあたりに1ニュートンの力が作用する圧力を表し、

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 (\text{kg} \cdot \text{m/s}^2) / \text{m}^2$$

一方、1  $\text{kgf/cm}^2$  (KSC) は、1平方センチあたりに1 kgの物体が地球の重力加速度（約

9.807m/s<sup>2</sup>) により受ける力が作用する状態であるから、

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgf/cm}^2 &= 1 \times 9.807 \text{ (kg} \cdot \text{m/s}^2) / \text{cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ (kg} \cdot \text{m/s}^2) / \text{m}^2 \\ &= 9.807 \times 10^4 \text{ Pa (98.07 kPa もしくは 0.09807 MPa)} \end{aligned}$$

また逆に、

$$\begin{aligned} 1 \text{ kPa} &= 1/98.07 \text{ kgf/cm}^2 = 0.0102 \text{ kgf/cm}^2 \\ &\text{(もしくは、1 MPa=10.20 kgf/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

米英系ではポンド/平方インチ[lb/in<sup>2</sup>、psi]が採用されているが、これは毎平方インチに働く力をポンドで示したものであり、

$$1 \text{ psi} = 6.895 \text{ kPa} = 0.0703 \text{ kgf/cm}^2$$

ところで、圧力を示す場合、絶対圧力とゲージ圧力とがある。ゲージ圧力とは物体が常に受けて平衡を保っている大気圧をゼロとみなすものであるが、絶対圧力はゲージ圧力にさらに大気圧を加えたものである。すなわち、絶対圧力=ゲージ圧力+大気圧であり、大気圧 (1 atm) を上記の圧力単位でそれぞれ表すと、

$$1 \text{ atm} = 101.3 \text{ kPa} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 14.70 \text{ psi}$$

KSC (psi) 単位でのゲージ圧力を KSCG (psig)、絶対圧力を KSCA (psia) と書くことがある。

#### (4) ガスの密度と比重

ガスの密度とは、通常は標準状態のガス 1 ℓ または 1 m<sup>3</sup> の重量をいう。たとえば空気の密度は 1.293 g/ℓ あるいは kg/m<sup>3</sup> である。

ガスの比重は普通、同一条件の空気の密度に対するそのガスの密度の比をもって表す。たとえば空気を 1 としたとき、メタンは 0.554、プロパンは 1.550 である。すなわちメタンは空気より軽く、プロパンは空気より重い。

理想気体の法則が適用される範囲にあるガスでは、比重はそのガスの分子量と空気の平均分子量との比となるので、次の計算式を利用することができる。

$$\text{ガスの比重} = \text{ガスの分子量} / \text{空気の平均分子量} = M / 28.966$$

混合ガスの場合には組成のモル分率を用いて比重を計算することができ、これを逆に用いれば、比重を測定することによって平均分子量を計算することができる。

天然ガスでは炭酸ガス、硫化水素などの不純物を除いた比重はおおよその組成を示し、メタン以外の炭化水素ガスの含有量の目安となる。すなわち、乾性ガスはメタンの比重に近い比重を持ち、湿性ガスの比重はそれよりも重くなる。逆に比重の重いガスほどウェットであって、液化しやすい成分を多量に含む。

#### (5) 実在ガスの状態方程式

##### 1) 実在ガスの状態方程式

理想気体の場合には圧力、体積、温度の関係は式⑥により示されるが、実在ガスの場合は皆、多少この式から偏りを示す。特に圧力が高くなると、この偏りが無視できないようになる。

天然ガス採取の場合には、この偏りを圧縮係数で示し、式⑥を次のように修正して使用している。

$$PV = ZnRT \dots\dots\dots\text{⑦}$$

ガスの圧縮係数  $Z$  は、ガスの種類はもちろん、圧力、温度によっても変化する。メタンのような純粋ガスのあるものについては、圧力、温度と圧縮係数との関係が知られているが、天然ガスのような混合物の場合にも組成あるいは比重が知れば、擬対臨界温度および擬対臨界圧力を用

いて圧縮係数を求めることができる。

実在ガスの状態方程式は実用式としては上式⑦であるが、その他にも理論的なもの、実験的なものが多数求められている。代表的なものとしてファンデルワールス (Van der waals) の式と呼ばれるものが有名である。

2) 臨界温度と臨界圧力

実在ガスは冷却して圧縮すると液化するが、ある温度を超えるとどんなに大きな圧力を加えても液化しなくなる。この温度を臨界温度 (Tc) といい、臨界温度で気体を液化するために必要な圧力を臨界圧力 (Pc) という。臨界温度と臨界圧力を越えた状態にある物質は液体とも気体とも異なる特殊な状態をとり、この状態にある物質を超臨界流体という。

混合ガスは組成により臨界点が異なるので、以下の式を用いて擬臨界温度 (pTc) と擬臨界圧力 (pPc) を求める。

$$pTc = \sum y_i T_{ci}$$

$$pPc = \sum y_i P_{ci}$$

yi : 各成分のモル分率

Tci : 各成分の臨界温度

Pci : 各成分の臨界圧力

ガスの温度や圧力は比重に対してある程度規則的に変化するため、完全な分析結果が得られない場合は比重から擬臨界温度と擬臨界圧力を図 3. 1. 13a より推測できる。

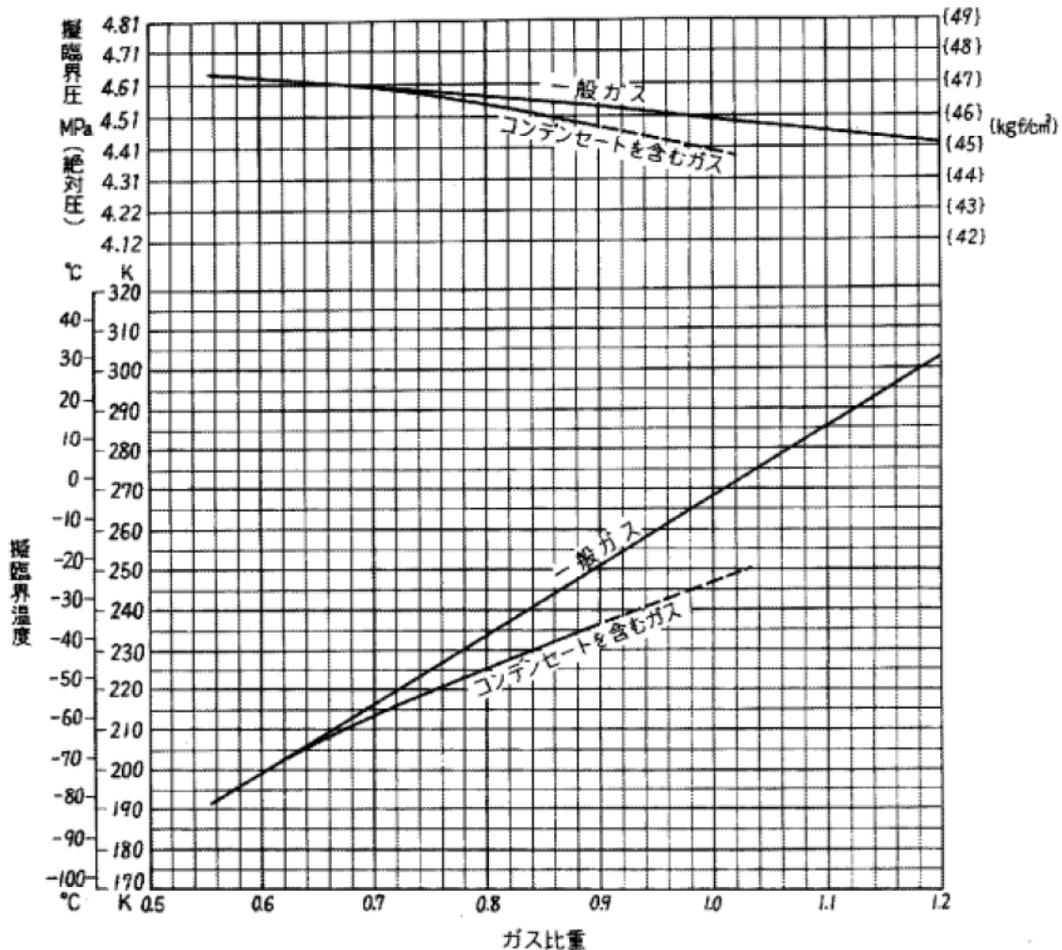


図 3. 1. 13a ガス比重と擬臨界温度、擬臨界圧力の関係  
(by Petroleum Reservoir Engineering, Physical Properties; Amyx et al, 1960)

## 3) 圧縮係数

圧縮係数は、ガスの種類、温度、圧力によって異なるが、擬対臨界温度 ( $p_{Tr}$ ) と擬対臨界圧力 ( $p_{Pr}$ ) の関数としてガスの種類に無関係に表すことができ、図 3.1.13b より求めることができる。

擬対臨界とは擬臨界状態からどの程度離れた状態にあるかを表すものであり、以下の式により求める。

$$p_{Tr} = T/p_{Tc}$$

$$p_{Pr} = P/p_{Pc}$$

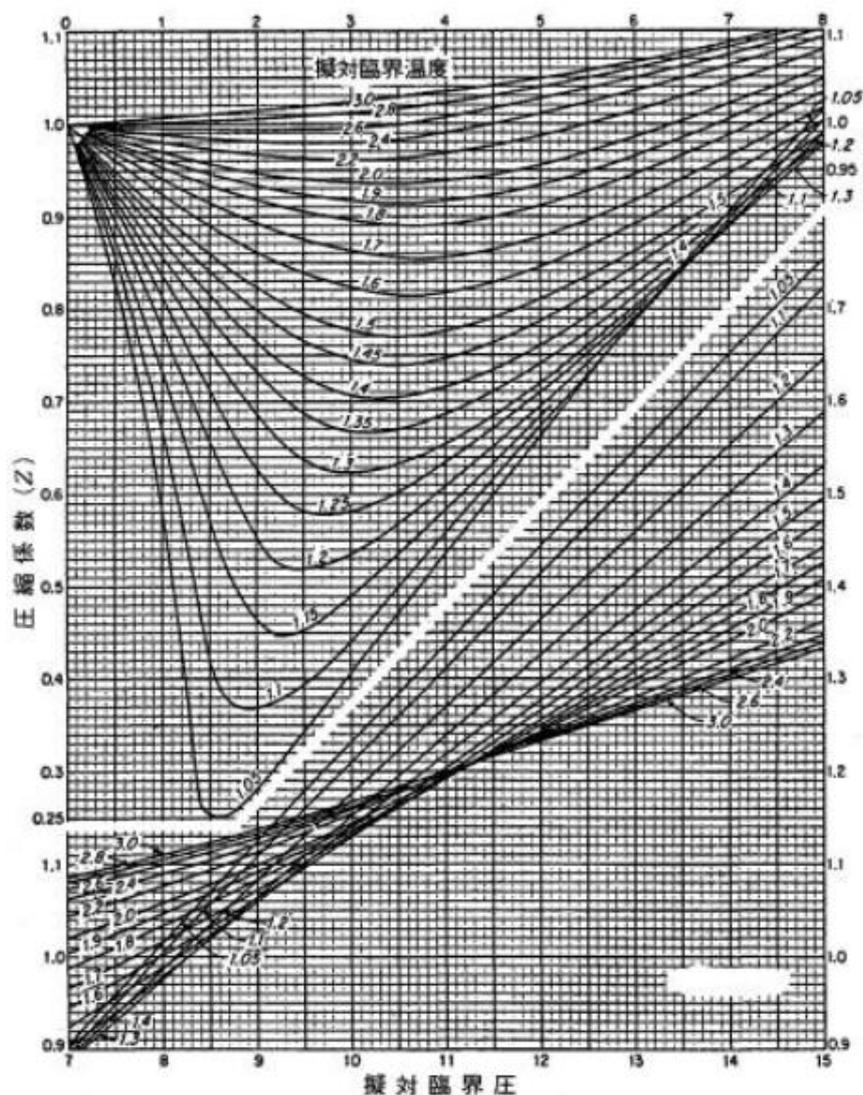


図 3.1.13b 擬対臨界温度、擬対臨界圧力と圧縮係数の関係  
(by Handbook of Natural Gas Engineering; Katz et al, 1969)

## (6) 原油・天然ガス系の相挙動

## 1) 多成分系の P-V-T 関係

二成分系について、圧力 (P)、体積 (V)、温度 (T) の関係を図示すると図 3.1.14 のようになる。気相および液相の領域では、等温線 AB、CD は単一成分系のものと似ているが、二相共存の領域内では単一成分系のものとは異なり、露点と沸点との間で圧力が上昇する。これは二相共存の領域を通るときに液相、気相の両者の組成ならびに相対量が連続的に変化するため、一般に沸点圧力が露点圧力よりも高くなる。したがって、臨界点も単一成分のものとは違って、二相共存の最高の温度、圧力ではなくなり、臨界圧力以上の圧力でも気体が存在し、また、臨界温度以上の

温度でも液体が存在するようになる。

[沸点と露点]

蒸発は液体の分子が表面から空間に逃げていく現象であるが、液体を熱する、あるいは圧力を下げると、液体の表面からだけではなく、内部からも盛んに気化していくようになる。この現象が沸騰であり、このときの温度を沸点という。つまり沸騰は、温度を高めることによって液体内部の蒸気の圧力が液体に作用している外界の圧力に等しくなったときに起こる現象である。したがって、ある温度の液体があった場合に、ただ単に外圧を減らしていきだけで沸騰が起こるようになり、逆に外圧を増やせば沸騰は止む。

上記のことは単一成分についてのことであって、「沸点」の定義としては一般的なものである。多成分系の場合には、油層工学では下記のように、もっと広い意味で「沸点」という用語を用いる。

液相の圧力を温度一定の元で減少させていくと、気化が起こりガス泡が生じる。この状態に対応する状態図上の点を泡点（起泡点）というが、公式には「泡点」の代わりに「沸点」ということにしている。沸点では大量の液相と極微量の気相（気泡）とが共存して平衡状態にある。

沸点における圧力を沸点圧力という。沸点圧力はまた、飽和圧力ともいう。一方、気体を温度一定の元で圧縮していくと、普通液化が起こり、液滴が結露する。この点を露点（結露点）といい、その圧力を露点圧力という。露点の状態では大量の気相が液相（液滴）と共存して平衡状態にある。

沸点と露点は上で述べたように、温度を一定にして圧力を変化させた場合に限らず、圧力を一定にして温度を変化させた場合、あるいは温度と圧力の両方を一緒に変化させた場合についても、先の定義を拡張してあてはめることができる。

気相、液相における多成分系の相の挙動は、二成分系のものとは非常に良く似ている。PVT 線図における等温線も二成分系のものとはよく似ているが、露点における屈曲が不明瞭である。

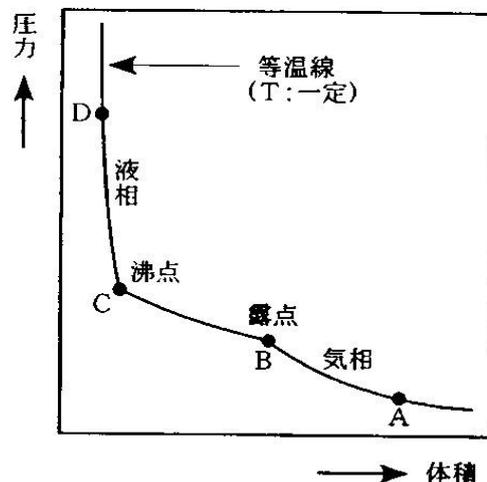


図3.1.14 二成分系のP-V-T関係図

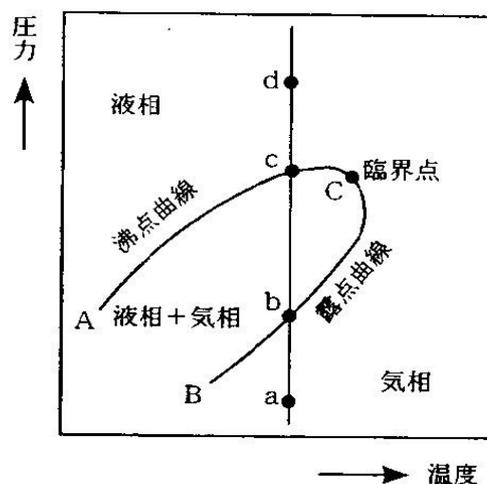


図3.1.15 二成分系の状態図

2) 多成分系の状態図

二成分系の状態図は単一成分系のものとは大分様子が変わって、蒸発曲線（沸点曲線）と凝縮曲線（露点曲線）が離れ、図 3.1.15 に示すようなものになる。両曲線は臨界点 C において会合し、ACB 内は 2 相共存の領域となる。

図 3.1.14 の等温線 ABCD を図 3.1.15 で描けば abcd となる。

先に説明したように、二成分系では沸点圧力が露点圧力よりも高いので、両曲線が分離することになるのである。

一方、多成分系の状態図は二成分系のものとは性格は同じであるが、上記の二つの曲線がずっと

離れ、全体的に膨らんでいる。図 3.1.16 の M 点の温度、すなわち最高温度をクリコンデンサーム、N 点の圧力、すなわち最高圧力をクリコンデンパーと呼ぶ。なお、臨界点と上記2点との関係は図 3.1.16 の点 C の位置に限らず、系の組成により点 C1 あるいは C2 のようになることがある。

3) 逆行液化 (レトログレード)

二成分以上の多成分系の場合に、臨界点の付近で起こる現象である。これを図 3.1.17 により説明する。

いま、A の状態にあるガスを温度一定に保ちながら減圧していくと、露点曲線上の B 点の状態において液滴が結露する。更に圧力を低めていくと液化が進み、E 点に達するまでは系の液相の割合が増大していく。逆に E 点の状態にある系を加圧していくと、液相の割合が減少し、最後には全てガス状となる。このような現象は、通常見られる加圧すれば液化し、減圧すれば蒸発が生じるという現象とは全く逆の現象であるので、逆行液化および逆行気化という。

今度は E 点の状態から減圧を進めていくと、通常の行程と同じく液相の割合が減少していき、露点曲線上の D 点において気化は終わり、露点圧力以下の圧力で全てガスとなる。

逆行液化の現象は等温過程の場合に限られたものではなく、圧力を一定に保ち温度を変化させた場合、および温度、圧力の両方を変化させた場合にも生ずる。このような現象は透視窓のついた圧力容器を用いた試験によって観察することができる。

4) 多成分系の蒸気圧

液体は、その液体と関係のない気体（例えば空気）の中へも蒸発する。この場合、その液体から出た蒸気の分圧が、真空のときの蒸気圧に等しくなるまで蒸発し、もしその液体の蒸気分圧が蒸気圧よりも大きくなれば、やはり液化が起こる。

このように他の気体が共存する場合でも、それらの気体間に化学反応が起こらなければ、それが単独にあったときの蒸気圧と等しくなる。つまり、他の気体あるいは蒸気の影響を受けない。これまでに記したことから、次のようなことが言える。

液化ガスが一部液化された状態で他のガスと共存しているとすると、気相中の液化ガスの蒸気分圧が、そのときの液化ガスの平衡の蒸気圧となっている。気相を圧縮したとき、気相中の液化ガスの蒸気圧は一定温度で定まっているから、圧縮を増すとともに気相中に含まれる液化ガス蒸気の含有量は減少することになる。すなわち、気相中の液化ガス蒸気が液化する。また、冷却すれば液化ガスの蒸気圧も下がるので、気相中に含まれる液化ガス蒸気の含有量は減少する。

以上のように、蒸気と液化の問題は、要するに蒸気圧のことが最も重要であるといえる。

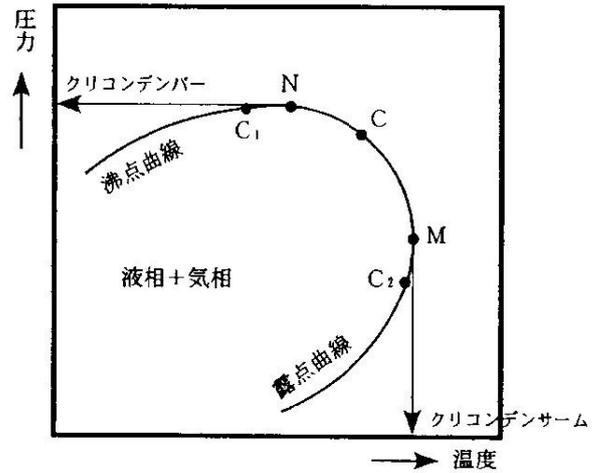


図3.1.16 多成分系の状態図

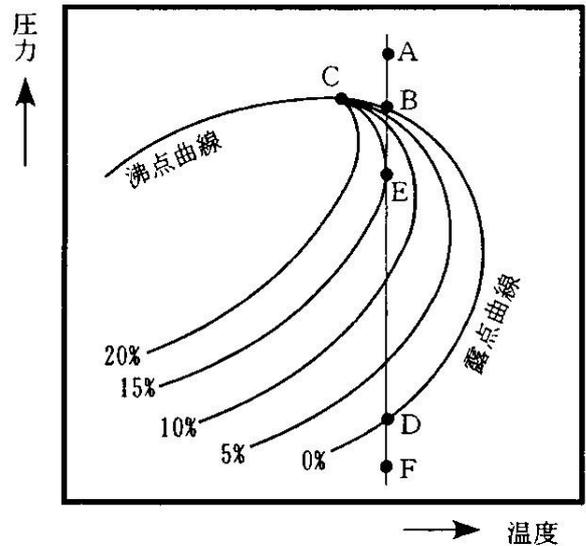


図3.1.17 レトログレード現象

## [ラウールの法則と理想溶液]

いろいろな物質が混合しているような「混合液においては、各成分の呈する蒸気圧はその成分が単独に存在するときの蒸気圧と、液体中のそのモル分率との積に等しい」としてよい場合がある。これをラウール (Raoult) の法則という。

ところが、ラウールの法則が正確にあてはまるような溶液は実在しない。そこで、この法則が正確にあてはまるとした仮想の溶液を考えて、これを理想溶液と呼ぶ。

## 5) 気液平衡係数

多成分系の二相共存領域にある気相、液相のそれぞれの量的関係、ならびにこれらの組成を求めるには普通、気液平衡係数を用いて計算することができる。平衡係数は次の式により定義される。

$$\text{着目成分の平衡係数}(K_i) = \frac{\text{その成分の気相中のモル分率 } (Y_i)}{\text{その成分の液相中のモル分率 } (X_i)} \dots\dots\dots\textcircled{8}$$

ラウールの法則が適用できる場合には、着目成分の気相中の分圧  $P_i$  は、

$$P_i = X_i \cdot P_{vi} \dots\dots\dots\textcircled{9}$$

(ただし  $P_{vi}$  はその成分が同一温度のもと純粋状態で存在するときを示す蒸気圧) で表される。

一方、ドルトンの分圧の法則により、

$$P_i = Y_i \cdot P \dots\dots\dots\textcircled{10}$$

(ただし  $P$  は全圧) であるから、

$$K_i = Y_i / X_i = P_{vi} / P \dots\dots\dots\textcircled{11}$$

によって平衡係数を考えることができる。

圧力が高い領域では、式⑪により求まる平衡係数と実際のデータとの間ではかなりの偏りがある。

## (7) ガスの減圧による温度降下

高圧状態のガスを、熱の出入りがないようにして自由に膨張させる (減圧する) と、ガスの温度が降下する。この現象をジュール・トムソン効果と呼んでいる。

減圧弁を通してガスを減圧することは、外部から温めない限り、断熱自由膨張させていることに相当するので、ジュール・トムソン効果による温度降下が生じる。天然ガスの減圧による温度降下の関係を示すと図 3.1.18 のようになる。減圧、冷却によって液体が凝縮するが、このとき液化の潜熱が放出されるので、温度降下は液化量によって異なることになる。これに対し、実用上は下表に示すような補正が行われている。

## (8) 天然ガスの水和物 (ハイドレート)

ハイドレートについては、2.3「天然ガスの処理」の項で詳述しているので省略する。

## (9) 原油・天然ガスの比熱

1 g の物質の温度を 1 °C だけ上昇させるのに要する熱量をその物質の比熱という。この場合に温度の上昇を定圧のもとで行ったものを定圧比熱 ( $C_p$ )、定容のものを定容比熱 ( $C_v$ ) という。

液体では、その定圧比熱と定容比熱との差は一般に小さいが、ガスの場合には両者の差は著しい。理想気体ではこれら両者の間には次の関係がある。

単位質量について

$$C_p = C_v + R / M \dots\dots\dots\textcircled{12}$$

$$C_p, C_v : \text{J/g} \cdot \text{K}$$

$$M : \text{モル質量} [\text{g/mol}]$$

$$R : \text{ガス定数} [8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}]$$

単位 mol 数について

$$C_p = C_v + R \dots\dots\dots(12)$$

$C_p$ 、 $C_v$  : J/mol · K

R : ガス定数 [8.31 J/mol · K]

液体量による補正值

減圧後に生じる液体量 (bbls/MMCF)	図3. 1. 18から求まる $\Delta P$ から差し引く値 (F)
0	-10
10	- 5
20	0
30	5
40	10
50	15

注) MMCF=百万 ft<sup>3</sup>

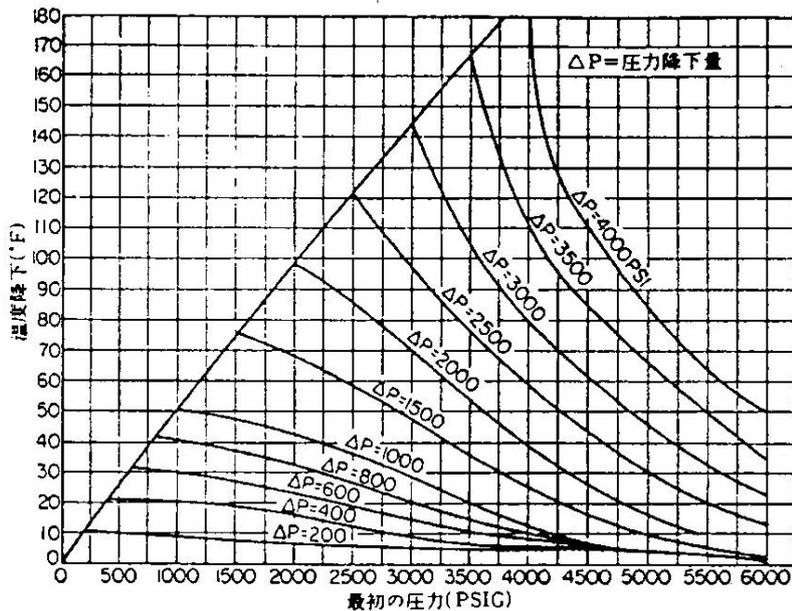


図3. 1. 18 天然ガスの膨張による温度降下

(10) 原油・天然ガスの粘性

粘性とは流体が運動するとき、その内部に生ずる摩擦抵抗を表すものである。粘性係数(粘度)の絶対単位はポアズ(P)であるが、実用上はその 100 分の 1 のセンチポアズ(cP)を用いることが多い。

1) 原油の粘性

原油の粘性は組成によって大きく変わり、重質のものほど粘性が大である。また粘性は温度の影響を受け、温度が上昇すると粘性が低下する。中質の原油の粘性は常温ではおおよそ 2~10 cP 程度である。圧力による影響としては、高压になるほど粘性は増加の傾向を示すが、その程度はわずかである。

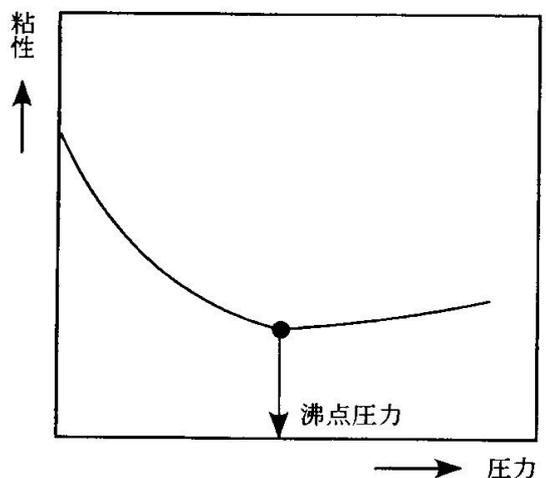


図3. 1. 19 油層内原油の粘性と圧力の関係

ところが、油層内でガスと共存しているときには、圧力が高いほどガスを多く溶解することになるので、粘性が低下する。油層内原油についてこの関係を例示すると、図 3.1.19 の通りである。

## 2) 天然ガスの粘性

実在ガスの粘性はその分子量と関係があり、一般に分子量が大きいほど粘性が小さい。したがって各種のガスの混合物である天然ガスの粘性は、その組成によって異なったものとなる。また、粘性は温度による影響を大きく受ける。

天然ガスの粘性を求めるには、実用的には組成のかわりに比重を目安にすることが行われる。大気圧下における天然ガスの比重—温度—粘性の関係図の例を図 3.1.20 に示す。ガスの粘性はまた、圧力の高い範囲では圧力の影響を大きく受ける。高圧状態のガスの粘性は、図 3.1.20 から得られるものを、圧力による補正を施して求めることができる。補正図を図 3.1.21 に示す。

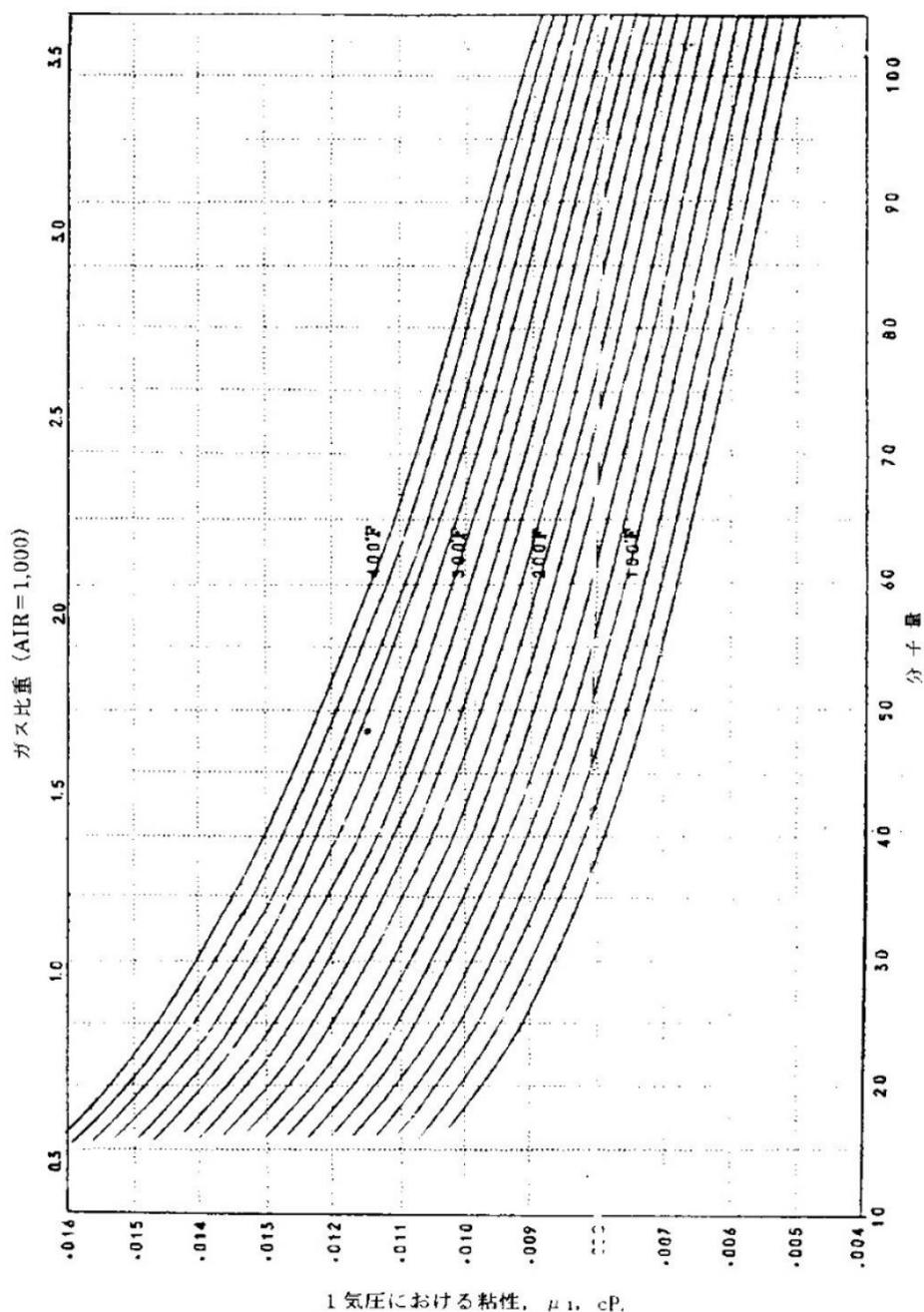


図3.1.20 天然ガス比重—温度—粘性の関係

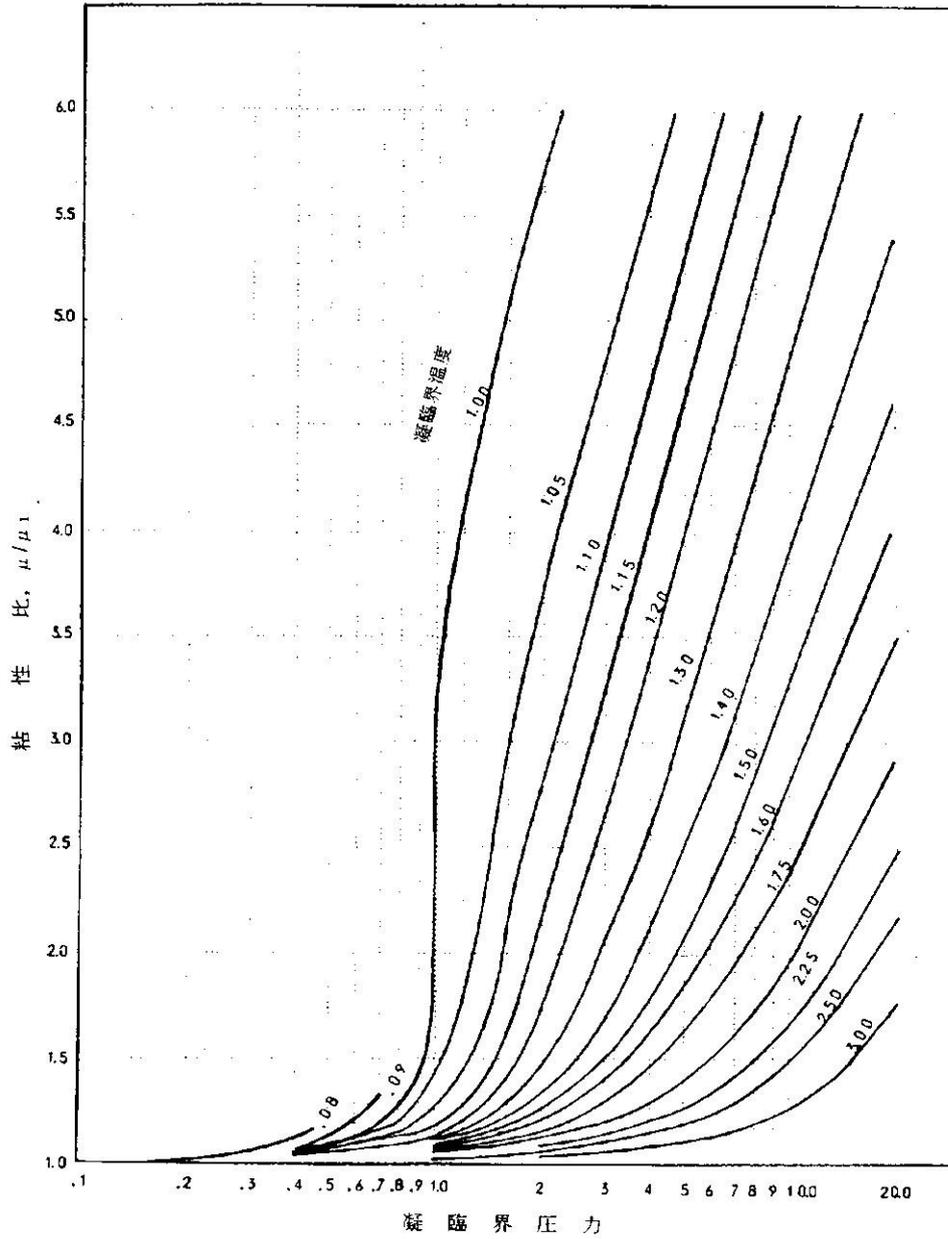


図3.1.21 高压状態の天然ガスの粘性を求める補正図

iii) ガス採取技術

本項では、構造型ガスあるいは広義のガスの採取に限って説明する。以下「ガス層」というときには、特にことわらない限り「ガスコンデンセート層」を含めることにする。

構造型ガスは一般に産出圧力が、後に説明するように、相当の高压であることが多く、これに対する考慮が技術的にも、また実作業面においても、ガス採取上の一つの眼目となっている。

油井ガスの採取については、主としてGORの調整に関心が払われる程度であり、原油の採取に付随するものとして扱われることが多く、内容的にも原油の採取技術を主とするか、それに準ずるものであるので、本項では特に説明を加えない。

なお、坑井仕上げについては掘削編、ガスと原油の分離その他の処理については、本生産編2集油および集ガスを参照のこと。

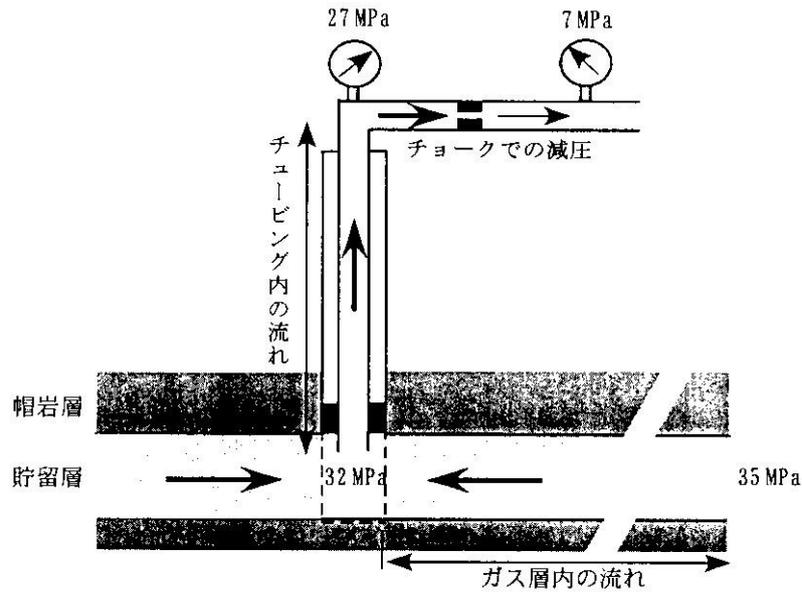


図3.1.22 天然ガスの産出工程

(1) 産出工程

天然ガスの産出の工程は基本的には次の3つに分けられる (図3.1.22 参照)。

- ① ガス層内での流動
- ② 採取管内 (主にチュービン) での流動
- ③ チョークによる減圧

1) ガス層内でのガスの流れ (ダルシーの式)

ガス層内でのガスの流れの様相に影響する因子は様々である。実際のガス層について、層内をガスがどのように流れるかということは、直接に観察することが不可能であって、各種の観測資料をもとに、油層工学の理論に基づき推量する以外に方法がないのであるが、これにより実態をどの程度把握できるかは一概に言うことができない。

そこで、図3.1.23に示すような単純な形状をしたガス層を想定し、極めて理想化した状態における流れを考えれば次の式が成り立つ。

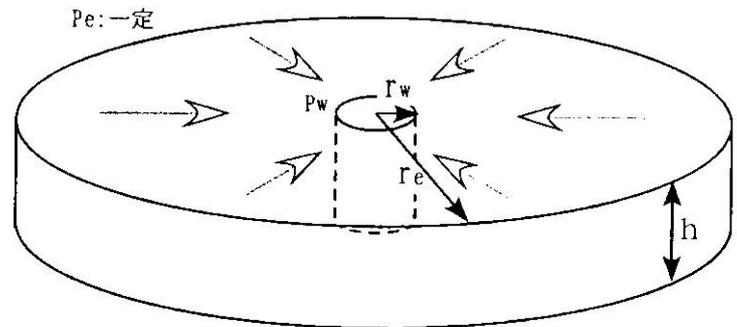


図3.1.23 ダルシーの公式におけるガス層模型

$$Q = 3.2Kh(Pe^2 - Pw^2) / TZ\mu \log(re/rw) \dots\dots\dots ⑬$$

ここで、

Q : 産出ガス量、基準状態 (15.6 °C、1 気圧、水蒸気で飽和された状態) における量、m<sup>3</sup>/day

K : ガス層貯留岩のガスに対する有効浸透率、md

h : 有効層厚、m

Pe : re の位置の圧力、kgf/cm<sup>2</sup>

Pw : 産出時の坑壁面 (rw の位置) の圧力、kgf/cm<sup>2</sup>

T : ガス層温度、K

Z : ガス層温度および平均圧力におけるガスの圧縮係数

$\mu$  : ガス層温度および平均圧力におけるガスの粘性、cP

re : ガス層の半径、m

rw : 坑井半径、m

式⑬がガス層の場合のダルシーの式と呼ばれるものである。Pe<sup>2</sup> - Pw<sup>2</sup>をガス流ドローダウンと呼ぶことがある。なお、実際上はPeの代わりに密閉坑底圧力を用いることもある。

式⑬から、ガスの産出量はガス層の厚さと浸透率ならびにガス層に与えるドローダウンに比例し、ガスの粘性に反比例することがわかる。すなわち、ガス井の産出能力が大きいということは、ガス層の浸透率が大きいか、ガス層が厚いか、あるいはそれらの相乗効果によるものである。

式⑬を導くに際しては、半径 re の位置における圧力が時間に関係なく一定に保たれると仮定しているが、このことは実際には成り立たない。また、re は排ガス半径と呼ばれることがあるが、その名が意味していると思われがちな、坑井からある距離以上離れたところのガスが決して坑井に向かって流れてこないというような境界を指すものではない。

実際にガスを産出するに当たっては、ドローダウンをあまり大きくすることができない。大きなドローダウンを付けると、坑井およびガス層に対して次のような害がある。

- ① ガス層が砂あるいは凝結の程度のゆるい砂岩からできているときには、坑壁面が崩れて砂が坑井内に押し出してくる。
- ② 老朽した坑井では、水止め（セメント、遮水）が破れたり、ケーシングの圧潰が生じる。
- ③ ガス層の上下に近接して水層がある場合、ガス層と水層とを連通させてしまう。あるいはコーニング現象等により水をよび込む。
- ④ 坑井周辺のガス層内に逆行液化による液体が蓄積し、ガスに対する有効浸透率を低下させる。

## 2) ガス柱の圧力勾配

ガスが採取管内の相当な部分を占めているような状態にあるとき、これを柱にみたてて「ガス柱」ということがある。同様に「油柱」、「液柱」等のいい方をする。液柱はその各部において圧力を呈する。圧力は単位面積に作用する力であるから、液柱が各部で呈する圧力は、その位置より上にある液柱の重量を液柱の断面積で除したものに、液柱の上端にかかる圧力を加えたものとなる。

単位深度差当たりの圧力差を液柱の圧力勾配、ある2点間の圧力差を深度差で除したものを平均圧力勾配という。特に流体が静止しているときのものを静止圧力勾配という。

ガス柱については、圧力が低いときにはガスの重量を無視することができるが、高圧になるとこれを無視することができなくなるので、圧力勾配を考えなければならなくなる。

ガス柱のおおよその静止圧力勾配は、ポイル・シャルルの法則を利用して次式により求めることができる。

$$\Delta P = 1.293 \times 10^{-3} \times 273 / 1.033 \times G \cdot P / T \quad \cdots \cdots \text{⑭}$$

ここで、

$\Delta P$  : 圧力勾配、[kgf/cm<sup>2</sup>/10 m]

G : ガスの比重

P : 圧力、[kgf/cm<sup>2</sup>]

T : 温度、[K]

ガス柱の正確な静止圧力勾配を計算で求めるには、ガスの圧縮係数を考慮しなければならないので、計算は複雑となる。

採取管内をガスが流れているとき、すなわち産出(自噴)しているときの圧力勾配を流動圧力勾配あるいは自噴圧力勾配という。流動圧力勾配では摩擦による圧力損失が加わるので、静止圧力勾配よりも大きくなる。

式⑭からわかる通り、ガス柱の静止圧力勾配は圧力およびガスの比重にほぼ比例し、温度に反比例する。圧力が  $100 \text{ kgf/cm}^2$  ( $9.8 \text{ MPa}$ ) 程度のとき、圧力勾配は  $0.1 \text{ kgf/cm}^2/10 \text{ m}$  ( $9.8 \text{ kPa}/10 \text{ m}$ ) 程度となる。

このように、ガス柱の圧力勾配は液柱の圧力勾配と大きな差があるので、採取管内の圧力勾配を測定することによって、管内に液体があるかどうか、どの程度の割合を占めるか、底部に蓄積している場合には液柱の位置を知ることができる。

また、ガス柱の重量はわずかなものであるために、ガス層圧力に近い圧力を坑口においても示し、ガス井は一般に産出圧力が高くなるのであるが、産出圧力が通常より低いことは、液体の影響、あるいは坑井障害、ガス層障害によるものと考えられるわけである。

ガスと液体とが採取管内を同時に流れるときの二相流動の挙動は複雑なものである。流動条件によってはガスのみが流れて液体が置き去りにされ、底部に液体が蓄積するようになることがある。このような状態を俗に液柱をかつぐという。液柱をかつがせることは、エネルギーの消費効率が低下するだけでなく、ガス層に対して種々の悪影響があるので、坑内状況を的確に察知して、できるだけそのような状態になることを避けるようにしなければならない。また、液柱をかつぐ傾向にある坑井では、ときどきガスの産出量を増し、流速を上げて坑内底部に蓄積した液体を地上に排出させる。すなわち液柱を刈る必要がある。

コンデンセート井の場合には、層内ガスが採取管内を流れるうちに、圧力が低下すると逆行液化が生じるので、事情は一層複雑となる。

### 3) チョークによる減圧

ガス井は既に記したように産出圧力が高いので、パイプラインでの送ガスに適当な圧力あるいは処理施設に適応した圧力まで減圧する必要がある。また、ガス層に与えるドロダウンを適当に保つために、バックプレッシャー(背圧)をかけなければならない。

このような目的のために、通常、地上にてチョークを用いる。チョークはまた、産出量の調整の役目を果たす。

天然ガスは水蒸気で飽和された状態で産出されるので、温度が低下するとハイドレートが生成される恐れがある。ガスを減圧すれば温度降下が生ずるので、ガス井の産出制限にはこのために特別の装置が必要となる。

制限用チョークは通常、加熱装置(インダイレクトヒーター)に取り付けられるが、重炭化水素が多い場合、液体の分離に低温分離装置を用いるときには、低温セパレーターの入口に取り付けられる。

また、特殊な方法として、チョークを坑内の深部(坑底付近)に取り付けることがある。これは、地下の深部はかなりの高温であるので、その熱を有効に利用して産出ガスの減圧を行うものである。

チョークを通過できるガスの流量は、チョークの流出口の断面積と、上流と下流の圧力差におおむね比例する。このことは、下流圧力  $P_o$  と上流圧力  $P_i$  との比がある値以上のときにはあてはまるが、この比がある値以下になるとあてはまらなくなる。その状態を限界流動(クリティカルフ

ロー) という。限界流動の状態では、チョークを通過する流量は、上下流の圧力差の大きさに関係なく一定となる。

限界流動に達する  $P_o/P_i$  の値は、天然ガスの場合おおよそ 0.55 程度である。液体を伴う場合には、この値はかなり異なったものとなる。

さて前述の如くチョークを開いていくと、限界流動に達するまでは、チョークを通過できるガス量は増大するが、ガス層から坑井に供給される量がこれに伴わないと産出状況が不安定になる。即ち、チョークを開くとガス層にかかる背圧が小さくなるので、ドローダウンが増し、ガス層から坑井に流れ込むガス量が増加するが、ガス層の産出能力が低いと、この増加量がチョークを通過するガスの増加量に追い付かなくなることから生ずる現象がある。この挙動は液体を伴う場合にはずっと複雑になる。

一般にはチョークを開くと、産出圧力（自噴内圧）が低下するが、反対に自噴内圧が上昇することがある。これは先に述べたように、液柱が刈られて元の圧力に戻るための場合もあるが、別の現象によっても生じる。液体の量が多いときは、管内流速を増すと、二相流動挙動が摩擦損失を減少させるように変化して、自噴内圧が上昇する。このような特性の坑井では、チョークを絞り過ぎると、坑口圧力が低下して自噴が停止することがある。

ガス層が圧力、浸透性の異なる何枚かの層から構成されているときには、事情はさらに複雑になる。以上のように、チョークの大きさと産出量、および産出圧力の見掛け上の関係は単純には示すことができない場合があるので、坑井管理に当たっては個々の坑井ごとに綿密な観察を行い、特性を十分に把握しなければならない。

## (2) 坑井管理

坑井管理とは、坑井の生産性を維持し、稼働効率を高め、稼働期間の延長を図ることである。ガス井では、産出圧力が高いことによる坑井障害に格別の留意が必要である。既に記したように、圧力が高いとハイドレートを作りやすいので、適度の温度を保っておかないと採取管内でハイドレートが生成する。

ガスの流量が大きく、流速が大きいときには、採取管内を流れる間にガス流から失われる熱量は少なく済むが、流速が遅いと地上での産出温度は周囲温度近くまで低下する。そのような恐れのある場合には、産出量をあまり制限することはできない。産出性の悪いガス井の場合には保温さらには坑内加温等の処置が必要となることがある。

ガス井では、一般に油井と比べて管内流速が大きいので、固形物あるいは液体を伴う場合には管その他に腐食による損傷を及ぼすことがある。高圧ガス井では、チューブリングのネジ部からガスの漏洩が生ずる例が多い。

チューブリング、あるいはパッカーに漏洩が生ずると外圧が上昇する。外圧は通常産出温度により変動する。すなわち産出量を増し、産出温度が上昇すれば外圧は上昇し、坑井を密閉すれば温度降下に伴い外圧は低下する。このような平常の挙動から著しくかけ離れた挙動をするときには、チューブリングあるいはパッカーの漏洩が疑われる。

チョークは特に浸食を受けやすい。浸食したチョークは表示寸法と実寸法がかけ離れてしまうため、点検を欠かすことができない。

坑井管理においては、産出物の量をチョークの大きさとの関連において正しく把握することが重要である。とりわけ、水の産出量は、水そのものに商品価値が無いために、とくくなおざりにされがちになるが、坑井管理上は水の産出挙動の実態を的確に把握する必要がある。

先に記したように、ガス井の産出挙動に及ぼす水の影響は、様々な効果が組み合わさって複雑であ

り、経験的にもチョークを絞ることによって水の産出が抑制される場合と、チョークを開くことによってかえって安定した状態が得られる場合、チョークの大小が水の産出挙動に何も影響しない場合等、様々であることが知られている。それゆえチョークを開き過ぎて水を呼び込んだり、水が付いているのを見過ごして不用意にチョークを絞り過ぎて液柱をかつがせ水没させたりすることのないよう、産出状況の不断の監視が必要である。

#### iv) ガス井の産出能力

ガス井の能力という言い方はあいまいなものであって、考え方によりいろいろな判定の基準を設けることができる。例えば産出量が同じであっても、産出圧力の高い方を能力が高いとする見方もできる。

しかしながら、これまでのところ、産出量を中心として能力を評価する方法が大勢を占めている。

ところで、ガス井の産出量はチョークの大きさ、即ち、さかのぼればガス層に対するドロダウンの大きさによって変化するので、能力の評価においてはこのことを考慮に入れなくてはならない。

古くは大気に開放した状態で産出、すなわちオープンフローをさせて、そのときの産出量をもってガス井の能力とすることが行われた。この産出量をオープンフローキャパシティ (OFC) あるいはオープンフローポテンシャルという。

しかし、このような方法は、ガス層および坑井に悪影響を及ぼすばかりでなく、産出したガスの始末に危険を伴い、ガス量の計量も十分な精度で行うことが困難なものであった。その上、産出量が多量の場合には、採取管内の摩擦の影響が大きくなるため、採取管の径や延長により能力が異なって評価されることになるというようなものであった。

その後、このような欠点を取り除いた絶対オープンフローキャパシティ (AOFC) という考えが取り入れられるようになった。

現在、AOFC とは、坑壁面すなわちガス層が坑孔に露出する面のところの圧力 (近似的にはガス層中央深度の坑底圧力) を絶対圧力 0 (ゼロ) と仮定したときに、ガス層から坑内に供給されるであろうガス量と定義されている。このように AOFC とは、理論的に考えられるものであり、能力の表し方として絶対的な意味を持つものであるが、実測不能のものである。

AOFC を評価するには、一般にバックプレッシャーテスト (背圧試験) が採用されている。バックプレッシャーテストにも種々の方法があるが、本来は次のような経験的事実を出発点として発達したものである。

ガス層に与える背圧を種々に変化させ、産出量 (Q) とこれに対応するガス流ドロダウン ( $P_e^2 - P_w^2$ ) とを両対数グラフにプロットすると直線が得られる。この直線をバックプレッシャーカーブ (背圧曲線) といい、この関係を数式で表したものを、バックプレッシャー方程式といい、次式で与えられる。

$$Q = C(P_e^2 - P_w^2)^n \dots\dots\dots \textcircled{15}$$

Q: 産出ガス量、[m<sup>3</sup>/d]

P<sub>e</sub>: ガス層圧力 (密閉坑底圧力)、[kgf/cm<sup>2</sup> または kPa、psi] (絶対圧)

P<sub>w</sub>: 自噴坑底圧力、[kgf/cm<sup>2</sup> または kPa、psi] (絶対圧)

C: パフォーマンス係数

n: バックプレッシャーカーブの指数

AOFC は、P<sub>w</sub> = 0 として式⑮から求めるか、あるいはバックプレッシャーカーブから求める。バックプレッシャーカーブの例を図 3.1.24 に示す。バックプレッシャーカーブを描くには、坑底圧力を知る必要があるが、坑底圧力の実測が困難である場合には、坑口圧力から坑底圧力を推算して用いるこ

とができる。このテスト法の発達の初期には、そのような方法が多く行われ、坑底圧力の推算方法がいろいろと発表されている。また、より簡便に坑口圧力を代用して AOFC を求めることも行われる。坑口バックプレッシャーカーブの式は次式で表される。

$$Q = C(P_c^2 - P_h^2)^n \dots\dots\dots(16)$$

$P_c$ : 密閉坑口圧力、kgf/cm<sup>2</sup>または kPa、psi (ゲージ圧)

$P_h$ : 自噴時の坑口圧力、kgf/cm<sup>2</sup>または kPa、psi (ゲージ圧)

圧力が適当な範囲の場合 (150 kgf/cm<sup>2</sup>程度以下)、坑口 AOFC は坑底 AOFC と一致する。

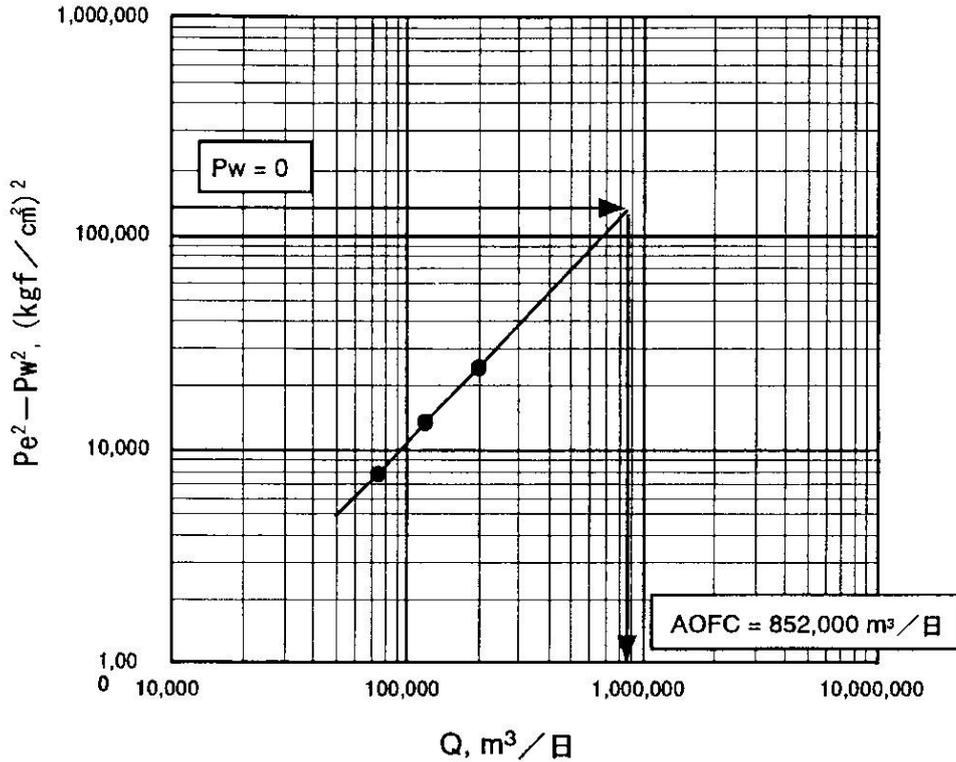


図3.1.24 バックプレッシャーカーブ (背圧曲線) の例

ところで、AOFC は概念的にはある決まった一つの値となるはずであるが、これをバックプレッシャーテストによって求めようとするときには、特にガス層の産出性が悪かったり、ガス層の構成が複雑であったり、液体の影響が著しかったりするときには、採用するテスト方法によって異なる結果を得る。産出挙動が特別に異常であるときには、AOFC が求まらない場合もある。このようなときには、テストのやり方が悪かったのか、坑底圧力の測定に誤差があったのか、それともガス層の特性からそうなったのかについて検討しなければならない。液体を伴う場合、産ガス量と産油量の関係 (GOR)、あるいは産水量の関係 (GWR) を細かく正確に計算することが重要である。

v) 旧上級保安技術職員試験出題例 (ガス採取関係)

【例題】

延長 1 km、内径 100 mm のパイプラインの気密テストを行うため、窒素を用いて 60 kgf/cm<sup>2</sup> (ゲージ圧) まで加圧した。加圧終了直後のパイプライン内の窒素の平均温度は 25 °C であったが、24 時間後には 15 °C まで低下した。リークがない場合のパイプラインの圧力を求めよ。ただし、窒素は理想気体として取扱い、1 気圧は 1.03 kgf/cm<sup>2</sup> とする。

## 【解説】

ボイル・シャルルの法則： $PV/T = \text{一定}$ 、を適用して、

$$(60+1.03) \times V / (25+273.15) = (P+1.03) \times V / (15+273.15)$$

$$P = 57.95 \text{ kgf/cm}^2$$

式中 V:パイプラインの内容積

P:24時間後の圧力

答え 58 kgf/cm<sup>2</sup>

## 【例題】

温度 20 °C、ゲージ圧力 30 kgf/cm<sup>2</sup>で容器に入っている天然ガスの圧縮係数 Z を求めると 0.95 であった。等温圧縮して容器内の天然ガス容積を 40 %まで減じたところ、圧力は 70 kgf/cm<sup>2</sup>まで上昇した。圧縮後の容器内天然ガスの圧縮係数を求めよ。ただし、大気圧を 1.033 kgf/cm<sup>2</sup>とし、小数点以下 2 桁まで求めよ。

## 【解説】

実存気体の法則： $PV = ZnRT$  を圧縮の前後にそれぞれ適用して、

$$(30+1.033) \times V = 0.95 \times nRT, \quad (70+1.033) \times 0.4 \times V = ZnRT$$

式中 P:ガス絶対圧力

V:ガス容積

Z:ガス圧縮係数

n:ガスのモル数

R:ガス定数

T:ガス絶対温度

$$Z = ((70+1.033) \times 0.4 \times V) / ((30+1.033) \times V / 0.95) = 0.870$$

答え 0.87

## 【例題】

標準状態 (0 °C、1 気圧) 下で 56 l の容積を占めるガスの重さを測ったところ 45 g であった。このガスの比重 (空気比重 = 1.0) を小数点以下 3 桁まで求めよ。ただし、標準状態におけるガス 1 g・mol (グラムモル) の容積は 22.4 l、空気の分子量は 29.0 とする。

## 【解説】

$$\text{ガスのグラムモル数} = 56.0 / 22.4 = 2.50 \text{ g} \cdot \text{mol}$$

$$\text{ガス 1 g} \cdot \text{mol の重量} = 45.0 / 2.50 = 18.0 \text{ g}$$

$$\text{ガス比重} = 18.0 / 29.0 = 0.621$$

答え 0.621

## 1.2 二・三次採取法

二次採取法とは、原油生産に伴う天然ガス、もしくは水を油層内に圧入して油層圧力を高く保ち、油層に排油エネルギーを補足することにより原油の回収率および回収レートを高めることを目的とする採取方法をいう。このような採取方法は、油田の生産開始当初から適用される場合も多く、上述の一次採取との間で時間的な差異があることを意味するものではない。油層圧力ひいては原油生産レート維持のためのガス圧入あるいは水圧入は、油田開発計画の策定段階から考慮されるべきもので

あり、あくまで「二次的な排油エネルギー」を利用する採取方法のことをいう。(図 3.1.25)

一方、三次採取法とは、一般に増進石油回収法 (EOR-Enhanced Oil Recovery) とも称され、上述の一次的・二次的な排油エネルギーでは採取困難な原油をも回収することを目的としている。このため、油層内に熱、溶剤、ケミカル類を圧入し、原油を物理的・化学的に変化させることで油層に「三次的」な排油エネルギーを与え、これにより原油を回収しようとする採取方法である。

以下ではガス圧入法、水攻法、および代表的な三次採取法の概要について記す。

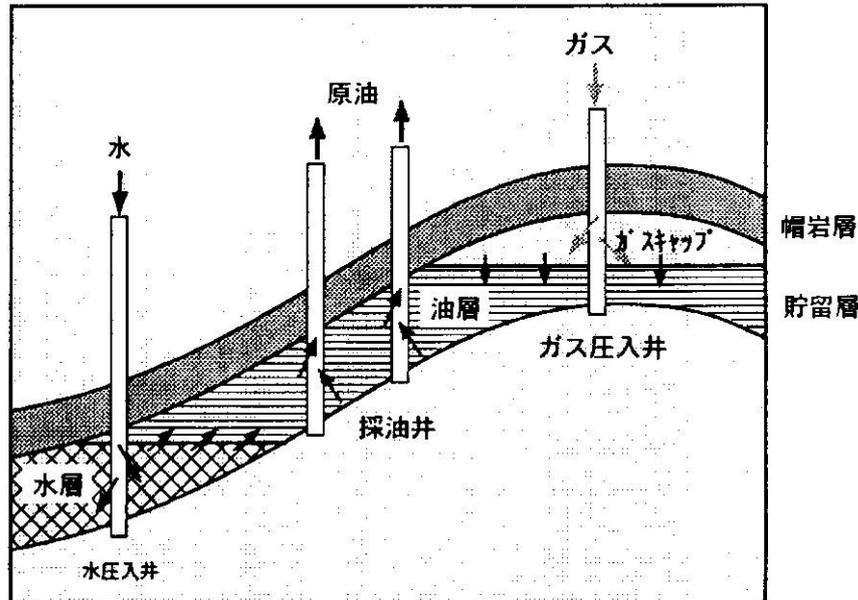


図3.1.25 ガス圧入法と水圧入法

### 1.2.1 ガス圧入法

ガス圧入法とは油層圧を所定の圧力に保ち、あるいは油層の有する排油エネルギーを補足するために、産出するガスの一部を油層へ再圧入することである。油層に対して全面的または部分的に行われるガス圧入は、油層の産油特性を改善し、かつ原油、ガスの回収率を向上させる。

ガス圧入を行うことによって油層より回収される原油の増加量は、個々の油層の性状、すなわち、油層岩の性質、油層圧、油層温度、排油機構、油層の形態、砂の連続性などに影響される。

基本的にはガス圧入による炭化水素の回収率の向上は、圧入ガスの排油ならびに蒸発作用によるものである。また、ある場合には、油層圧が保持されなかった場合に、その油層に発生し得る多くの損失を防止することもある。例えば、油層圧保持のために行われるガス圧入は、揮発性の収縮率の大きい原油を含むと考えられる油層、多量の逆行液化ガスを含むガスキャップ押し型の油層にとっては、特に重大な意義を持っている。更に油層圧保持のためのガス圧入法は、しばしば水押し型油層や油層ダウンディップにおける水圧入を行う場合における油のガスキャップへの移動を防止するためにも応用される。

更に油層に対してガス圧入法を行うことにより、油層からの油の回収期間が短縮されるため、特に経済的意義を持っている。また、油層内における油の粘性を低下させ、採油井近傍のガス飽和率を低下させる傾向を有するために、個々の坑井の産油量を維持し、かつ一般に油層の産出期間を通じて採油井は計画された産油量を維持することが可能である。

#### i) ガス圧入の形

いわゆるガス圧入法および圧力維持法と呼ばれているものは、一般に油層内の比較的油の多い部分

に圧入する場合と、ガスの多い部分に圧入する場合とによって、異なった二つのタイプに分けられる。いずれの形で圧入する場合でも、油の移動に関する物理的な原理は同様であるが、実際面で油層へ応用する場合に多くの相異が考えられる。

### ii) 分散ガス圧入法

油層内圧入法、あるいはパターン圧入法が用いられ、一般に油層中の産油部分に対して均一にガスを分布させるように圧入するので、圧入井は幾何学的に配列される。実際の圧入井と採油井の配置に当たっては、一般の通常配置法、例えば5点法、7点法などが採用され、油層の形状や特性に応じて変形したものがとられる。圧入井の配置については、一般に油層の形質（構造、砂の連続性、浸透率、孔隙率の変化など、）現在坑井の数、および坑井相互の位置関係を勘案して行う。

このような圧入方法は、高低の少ない地質構造で、しかも比較的均一で浸透率の小さい油層に対して適している。また、この方法は、圧入井の密度が高いために急速に油層圧を上昇させ、産油量が増加する。このために油層からの油の回収に必要な時間を短縮することができる。

しかし、これを実施するに当たっては、次のことを念頭に置かなければならない。

- (1) 重力押し型の油層にあつては、油の回収率の向上はあまり期待できない。
- (2) 面積掃攻効率は、一般に次に述べるところの外部ガス圧入法におけるそれよりも劣る。
- (3) ガスの粘性が小さいことに起因するガスのフィンガリングは、一般に油の回収に対する効果を低下させる傾向があるが、これは外部ガス圧入法におけるよりも多い。
- (4) 圧入井の密度が高いために、必然的に圧入に要する装置が大きくなり、コスト高の原因となる。

### iii) 外部ガス圧入法

外部ガス圧入法は構造の頂部、またはガスキャップに対する圧入で、圧入井としては構造の高いところ、すなわち一次的あるいは二次的ガスキャップにある坑井が利用される。一般にこの圧入法は、油層部分が構造上の高低を有し、また浸透率の平均値および個々のそれが高い場合に利用される。

圧入井は圧入したガスが油層内によく行き渡り、かつ油の重力排油を最大限に利用するに有利な位置に選定される。また、圧入井の数については油層の特性、特に各々の圧入井の圧入能力によって決まり、また圧入ガスが油層内の要所に充分に行き渡るために必要な坑井数を選定すべきである。

外部圧入法は一般に油の重力排油効果を充分に利用できるために、分散型ガス圧入法に比して優れた圧入法であると考えられている。さらにこの方法は、同規模の分散型ガス圧入法に比してより大きな範囲の油を押し出すことができ、効率も良い。

## 1.2.2 水攻法

水攻法は二次回収法の一法として、一次回収の結果生ずる油層内の排油エネルギーの減退を補充するため、外部より水を圧入し、油層内に二次的な排油エネルギーを補給し、出油を増す方法である。

### i) 水攻法対象油層の選定に関する要素

- (1) 油層の厚さ:あまり厚いと液体の流動の制御を困難にする。
- (2) 油層の浸透率:低いと流体の流動を妨げる。
- (3) 浸透率の均一度:悪いとバイパスの可能性があるため、流動の制御が困難となる。
- (4) 孔隙率:埋蔵量の基準となるものであるから高いほど良い。
- (5) 油の粘度:油の粘性が高くなると、水との易動度比が悪化し、掃攻効率が低下する。
- (6) 油層深度:あまり浅いと高い圧入圧に耐えられず、あまり深いと圧入圧が高くなり、圧入費が高くなる。
- (7) 掘削費:掘削費が高いと、経済性の観点から増油が大きくなければならない。

## ii) 水攻法の実施について検討すべき事項

### (1) 圧入圧と圧入レート

水攻法の圧入圧と圧入レートはその成否に対する重要な要因である。一般に最大圧入圧は砂層の深度に対し 1 psi/ft とされており、ある臨界圧以上になると油層内にフラクチャーが発生し、その結果として圧入井から採油井への水のブレークスルーが早まる等の影響がある。

圧入レートは枯渇油層が圧入水で満たされるまでの期間は、フラクチャーを発生させない範囲で、できるだけ高い圧力で水を圧入し、できるだけ早く油を回収するためには 10 bbl/d/ft 程度、ゆっくりした速度で圧入し、採油寿命を長くするためには 1~2 bbl/d/ft が望ましいとされている。また満たされた後は 0.5~1 bbl/d/ft とするのが良いとされている。

### (2) 水攻形と坑井間隔

油層の地質学的問題、物理的性質、圧入レートなどに関係するが、坑井間隔には多分に経済的要素もからんでくる。

適正な坑井間隔を決定する際、考えるべき主な要因は、

- ① 全回収量
- ② 水攻法の終了に要する時間
- ③ 開発ならびに作業原価

である。圧入井の配置には周縁圧入形と多点圧入形とがある。この圧入形式の適用条件としては、傾斜の急な油層、幅の狭い油層では前者が用いられる。後者のうちでは5点法が最も多く用いられる。

圧入水による油の移動の状態を知ることは大変重要なことであり、これは水攻法の評価に役立つ。この模様を知るために、かつては電気モデルが使用されていたが、現在では数値モデルによるシミュレーションが利用されている。

### (3) 水攻法における坑井試験

圧入指数曲線と圧力降下曲線をとることにより、種々の圧入状態を知ることができる。

### (4) セレクティブ・プラグギング

自然のフラクチャー、プレッシャーパーティングによって生じたフラクチャーなど、浸透率の高い部分にのみ圧入水が入ってゆくことは、水攻効率の極端な低下をきたす。これらの高浸透率の部分を確認し、セレクティブ・プラグギングを実施する必要がある。

確認方法としては放射線物質、染料をトレーサーとして使用するか、スピナーを用いて測定する方法がある。セレクティブ・プラグギング剤としては、エマルジョン、有機物質の粉末などが用いられる。

## iii) 圧入水に関する問題

### (1) 供給水量と水源

水攻法に必要な水の合計量は、孔隙容積の 1.5~1.7 倍が必要とされている。水源は淡水と塩水に分けられる。淡水の水源としては池、沼、湖、河川などの地表水があるが、これらの水は質と量の信頼性に乏しく、化学処理に費用がかかる。河川の近くに井戸を掘って、沖積層から採水したり、300 m 位の地下水源より採水することもある。

塩水の水源としては海水、塩水層、油層水などが考えられる。海岸で採水する場合、水量が多く、費用が安い点が長所であるが、腐食対策等には格別の対策が必要である。油層水を用いる場合は特に費用が安い。

### (2) 水の処理

圧入水の適格条件としては、油層水と反応しないこと、油層に対する充填・閉塞作用、腐食性がないこと等である。

溶解ガス：種類と量とが問題になる。硫化水素や二酸化炭素は腐食の原因となるので、エアレーションにより除去する。

懸濁物質：プラッキングの原因となるのでろ過と沈殿で除去する。

硫酸アルミ：水中のアルカリ化合物と反応してゲル状沈殿物を作る。

水酸化第一鉄：空気と接すると不溶解性質を生ずる。

硫酸第一鉄：硫酸塩還元バクテリアと作用して、不溶解性化合物が沈殿しスケールを形成する。

炭酸塩・硫酸塩：スケールを形成する。この防止策としてはリン酸ナトリウムや他のリン酸の錯塩の使用がある。

鉄：空気と接し酸化して $\text{Fe}(\text{OH})_3$ となり、沈殿してプラッキングをおこす。特にアルカリ溶液内で酸化される。圧入水中に溶解されている鉄分は1 ppm以下でなければならない。

微生物：油層内でのプラッキングの主原因の一つである。微生物には硫酸塩還元バクテリア、鉄バクテリアなどがある。藻類は硫酸銅や塩素のような無機化合物、ホルムアルデヒド、アミンのような有機化合物で容易に除去しうる。硫酸塩還元バクテリアは硫酸塩イオンを硫化水素にし、鉄や鋼製装置に腐食をおこす。このバクテリアはエアレーションによって破壊されず、最も有効なバクテリア殺菌剤としてカオチン化合物とホルムアルデヒドの結合したものがよい。またフェノール誘導体も有効である。

### (3) 水の処理設備

圧入プラントの設計に当たっては材料費、プラントの維持費など問題になる点がある。特に考慮すべき点としては処理される水の特性、処理された水の性質、プラントの能力、プラントの位置の選定、プラントの型式である。

型式は密閉方式、半密閉方式があり、この方式の採用には水質が大きな要素となる。

ろ過装置には、ろ材別に分類すると砂を用いたサンドフィルター、炭化ケイ素、アルミナを用いたエレメントタイプフィルターがあり、加圧の有無によって重力式と加圧式に別れる。

### (4) その他

圧入水の塩分が多いと腐食の問題がおこる。対策としてはコーティング、耐食合金の使用などが考えられる。コーティングにはセメントコーティングがあるが、スケールがたまり易い欠点がある。対策材としてのプラスチックパイプは材料強度の難点があるが、最近では強度が相当改良されている。

## 1.2.3 三次採取法

### i) 化学攻法

化学攻法とは、水攻法における圧入水にポリマー類・界面活性剤等のケミカルを添加して、水攻法を上回る原油回収率を達成しようとする方法である。そのメカニズムとしては大別して、圧入水の粘性を高めて原油との易動度比を改善させる方法（ポリマー攻法）と、原油と水の界面張力を低下させる方法（界面活性剤攻法、アルカリ攻法）とに二分されるが、油層への適用に当たってはこれらを適切に組み合わせて用いられることが多い。（図 3.1.26）

#### (1) ポリマー攻法

原油の掃攻効率を高める方法の一つは、水（掃攻する流体）の易動度を原油（掃攻される流体）の易動度より小さくすることである。ここで易動度とは、その流体の有効浸透率を粘性係数で割った数値であり、油と水の易動度をそれぞれ  $M_o$ 、 $M_w$  とすると、両者の比  $M_w/M_o$  は、

$$Mw/Mo = (Kw/\mu_w)/(Ko/\mu_o) = (Kw/Ko) \times (\mu_o/\mu_w)$$

ただし、 $K_w$ :水有効浸透率

$K_o$ :油有効浸透率

$\mu_w$ :水の粘性

$\mu_o$ :油の粘性

で表される。ポリマー攻法は  $\mu_w$  の値を大きくして上記の易動度比を低下させるものであり、この比を 1 以下とすることにより水のチャネリング等を発生し難くし、原油の垂直および面積掃攻効率の向上を図る方法である。

ポリマーとは一般に重合体のことであるが、通常はポリサッカロイド（バイオポリマー）もしくはポリアクリルアミドが使用され、水に溶解させる濃度によって易動度の調整が行われる。ポリマー溶液は水に比べて粘性が高く圧入特性が劣るために、比較的浅い低浸透率層への適用では十分な圧入レートが得られないことが問題となる。また、油の粘性があまり高すぎると、易動度そのものが過小となるため、経済性等の面から適用は困難となる。

ポリマー攻法の特徴は、前述のように掃攻効率が改善されることであるが、特に油層が薄い層の集まりである場合や、浸透率の不均質性が大きい油層などでは、掃攻効率の改善に伴い顕著な効果が見られる場合がある。

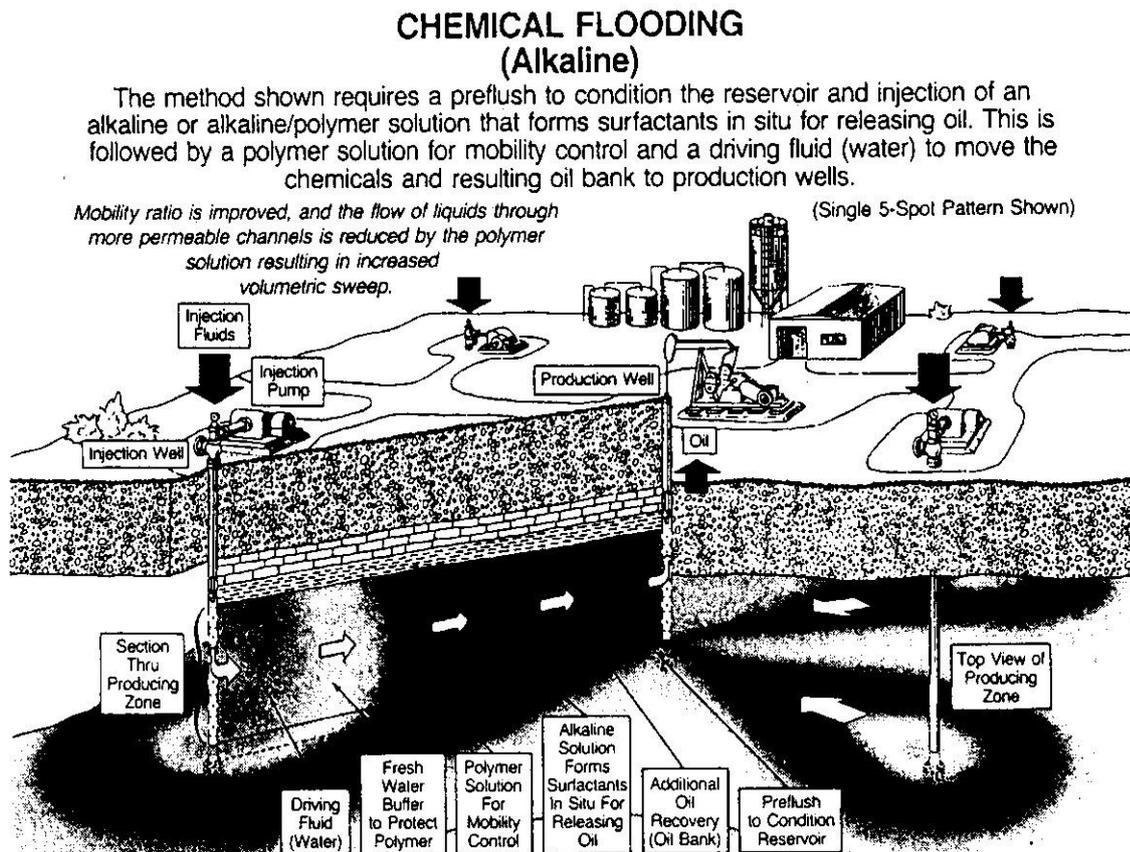


図3.1.26 化学攻法（アルカリ攻法）

## (2) 界面活性剤攻法

原油と水との界面張力を低下させる方法としては、ミセル溶液などの界面活性剤を含む溶液を圧入井より圧入する方法と、アルカリ溶液を圧入することにより原油中の有機酸類と反応させて油層内で界面活性化物質を生成させる方法がある。前者は後者に比較して、原油の特性による制約を受けにく

く、広範な特性の油田において適用が可能であるという利点があるが、ミセル溶液のコストが相対的に高いことが欠点である。

ミセル溶液とは、界面活性剤、アルコール系助剤、塩類を含む水と油の混合溶液（マイクロエマルジョン）である。また、同マイクロエマルジョンの粒径は通常のエマルジョンのそれ（ $10^{-4}$  mm 程度）に比較して 1/10～1/100 程度であり、通常のエマルジョンが比較的不安定であるのに対し、ミセル溶液は均質であり、熱力学的にも安定である。

ミセル溶液圧入の手順としては、最初に油層内塩分濃度および pH 調整を目的として低塩分濃度の水を圧入し、続いてミセル溶液をスラグ状にて圧入する。さらに易動度比調節のためにポリマー溶液を圧入し、最後に通常の水で後押しを行う。

ミセル溶液による方法の特徴は、ミセル溶液の粘性を調節して、油層中の原油と水を最も効果的に掃攻できる易動度を持った溶液を作ることが可能なことである。この調節は水に溶解する塩とアルコールの種類および量によって行われる。採取率はミセル溶液の量によるが、孔隙容積の 5 %程度でこの溶液が通過した部分は 100 %に近い回収率が得られる。

## ii) ミシブル攻法

油層中には原油・水・ガスが共存し、これら流体間および流体と貯留岩との間には界面張力が作用している。ガス圧入法におけるガスによる油の掃攻、あるいは水攻法における水による油の掃攻のいずれの場合においても、油層中の原油はこの界面張力および毛細管圧力の作用により、理想的な掃攻状態においても、残油飽和率の形で油層内に残り残されることになる。

「ミシブル」とは、理想的にはある流体が別の流体とどのような比率においても完全に混合し合う状態をいい、例えば水と低級アルコール、軽質原油と重質原油等の組み合わせがそのような例である。ミシブル攻法とは、原油と「ミシブル」な流体を油層中に圧入し、ガス圧入法や水攻法における上記界面張力の作用を消失させ、理論的には油層中の原油を 100 %回収することを目的とするものである。

しかしながら、ミシブル攻法においても実際には様々な油層の条件によって、100 %の原油回収は不可能である。例えば油層が互層になっている場合や、圧入井から圧入するガスが油層全体に均質に行きわたらない、油層が不均質である、といった種々の条件が回収率を低める作用をする。

ミシブル攻法で使用される圧入流体としては、乾性もしくは湿性の炭化水素ガス、および炭酸ガス等が一般的である。メタンを主成分とする乾性ガスの場合には、原油とミシブルな状態とするために高い圧入圧力が必要であり、また、原油もメタンを溶解しやすい比較的軽質の原油であることが必要となる。

一方、LPG 成分などを多量に含む湿性ガスを使用する場合には、乾性ガスに比べ原油とのミシビリティの形成は容易であるが、商品価値の高い LPG を使用するため、適用に当たっては経済性に対する十分な考慮が必要となる。このため、LPG の使用を節約する手法として、湿性ガスをスラグ状にして一定量圧入し、その後に乾性ガスを圧入するミシブルスラグ法などが適用される場合がある。

圧入流体として炭酸ガスを利用する炭酸ガス攻法は、適切な条件下では炭酸ガスと原油がミシブルな状態を形成し、この場合、ミシブル攻法の一つと見なすことができる。エネルギーとしては価値のない炭酸ガスを利用することから、炭化水素ガスを利用する方法に比較して経済性の点で魅力があるが、対象とする油田の周辺に適切な炭酸ガスの供給源が必要となる。

炭酸ガスの供給源としては、天然の炭酸ガス層を供給源とする場合が主であるが、近年は産業活動に伴う炭酸ガスの大気中への排出削減が地球環境問題の中心的課題となっており、このため、各種工場・プラントや発電所等の大規模発生源における排出ガス中の炭酸ガスを分離・回収し、これを利用して炭酸ガス攻法に活用する運用が、米国・カナダ等で開始されている。

炭酸ガス攻法では、炭酸ガスが油層内で原油と接触・溶解すると同時に、原油中の多くの成分が炭酸ガス中に気化する。これにより、油層内では次のような原油採取に非常に好都合な現象が生じる。

- ① 原油の膨張:原油の飽和率が上昇し、原油が流動しやすくなる。
- ② 原油の粘性低下と炭酸ガス粘度上昇:易動度比の改善に役立つ。
- ③ 原油の密度低下と炭酸ガス密度の上昇:原油と炭酸ガスとの重力分離を少なくする。
- ④ 原油の界面張力の低下・ミシビリティの形成

また、炭酸ガス攻法の場合に限らず、油層中にガス体等の易動度の大きな流体を圧入する場合には、掃攻効率を高く維持する目的で、水と交互に圧入する WAG (Water Alternating Gas) 法が適用される場合がある。(図 3.1.27)

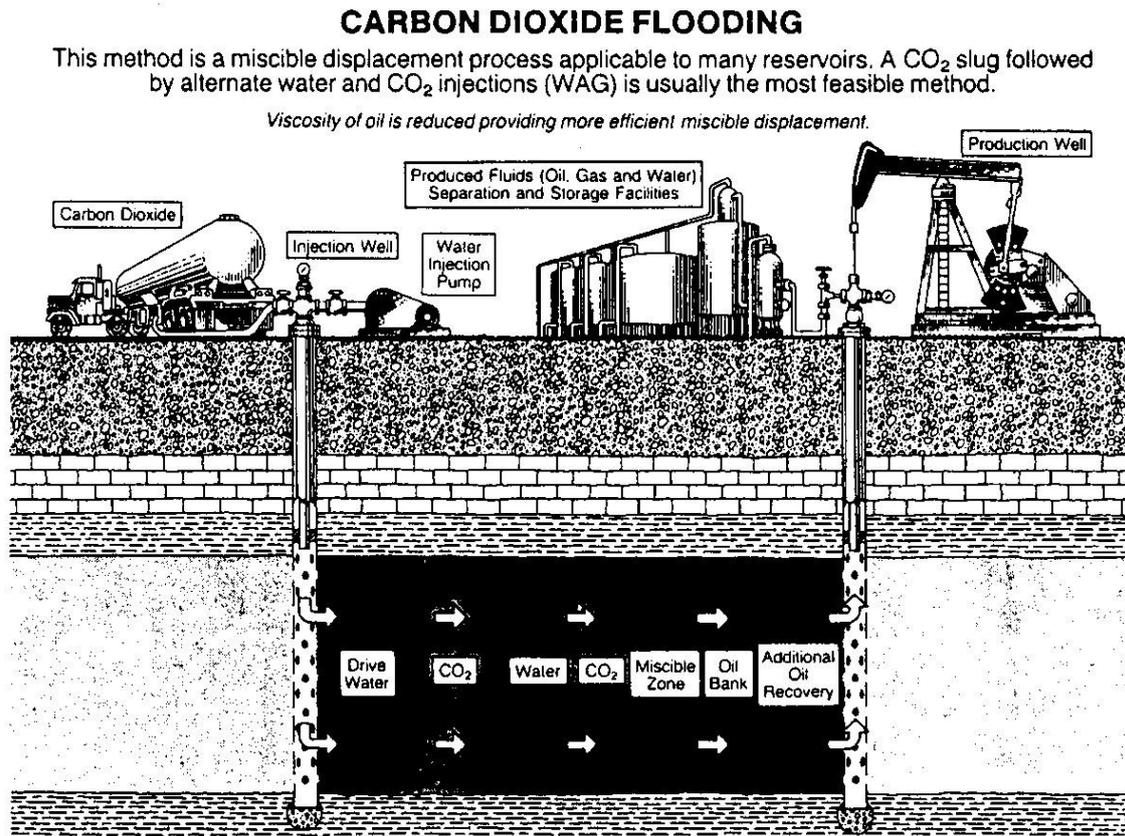


図3.1.27 炭酸ガスミシブル攻法 (WAG 法)

### iii) 熱攻法

熱攻法による原油回収の機構には様々な要因があるが、基本的には原油に熱を加えてその粘性を低下させ、流動しやすい状態にして回収しようとする方法である。このため、特に高比重・高粘性の原油回収に適している。原油に熱を加える方法としては、熱水を圧入する方法 (熱水攻法)、水蒸気を圧入する方法 (水蒸気圧入法)、および油層内で原油の一部を燃焼させる方法 (火攻法) などがある。以下では水蒸気圧入法と火攻法について、その概要を記す。

#### (1) 水蒸気圧入法

飽和あるいは過熱水蒸気を油層内に圧入することにより、原油に熱を加える方法である。熱水や水蒸気は熱伝達能力が相対的に高く、特に水蒸気は凝縮する際に凝縮熱を発生するため熱伝達媒体として優れている。

水蒸気圧入の形態としては、単独の坑井において水蒸気圧入と原油生産を定期的に繰り返す水蒸気

刺激法（スチーム・ソーク法あるいはハフアンドパフ法）と、水攻法と同様に圧入井と生産井を配置する水蒸気フラッド法（あるいは水蒸気ドライブ法）とに大別される。また、両者をあわせて広義に水蒸気攻法と称する場合と、後者の水蒸気ドライブ法に限定して狭義に水蒸気攻法と称し、水蒸気刺激法と区別して用いる場合がある。

### 1) 水蒸気刺激法

この方法では、対象とする坑井にて短期間（数日～数週間）で水蒸気を圧入し、その後、水蒸気の熱を坑井周辺の油層に伝達させるため、一定の期間（数日～数週間）坑井を密閉する。水蒸気によって加熱されて粘性が低下した坑井周辺の原油は、水蒸気が凝縮して生じた熱水とともに、再生産時に同一坑井より生産される。

この方法の利点としては、圧入専用の坑井が不要であり、また生産期間（数週～数ヶ月間）に比較して圧入・密閉期間が短期間であるため、実質的には全ての坑井を常時、原油生産に寄与させることが可能であることが挙げられる。逆に欠点としては、坑井周辺への適用に限定されるため、油田全体としての原油回収率を高くするためには、高い坑井密度が必要となる。

### 2) 水蒸気フラッド法（図 3.1.28）

水攻法などと同様に、水蒸気の圧入井と原油生産井とを別々に配置し、熱による原油の粘性低下に加え、熱水による原油の掃攻効果、水蒸気による原油の蒸留効果等によって原油回収を増進させる方法である。水蒸気による原油掃攻の機構は複雑であり、まず、圧入された水蒸気は油層内で冷却され、掃攻前線で凝縮水の壁を作る。この熱水の壁はフロントの前進に伴い次第に油層温度まで冷却される。

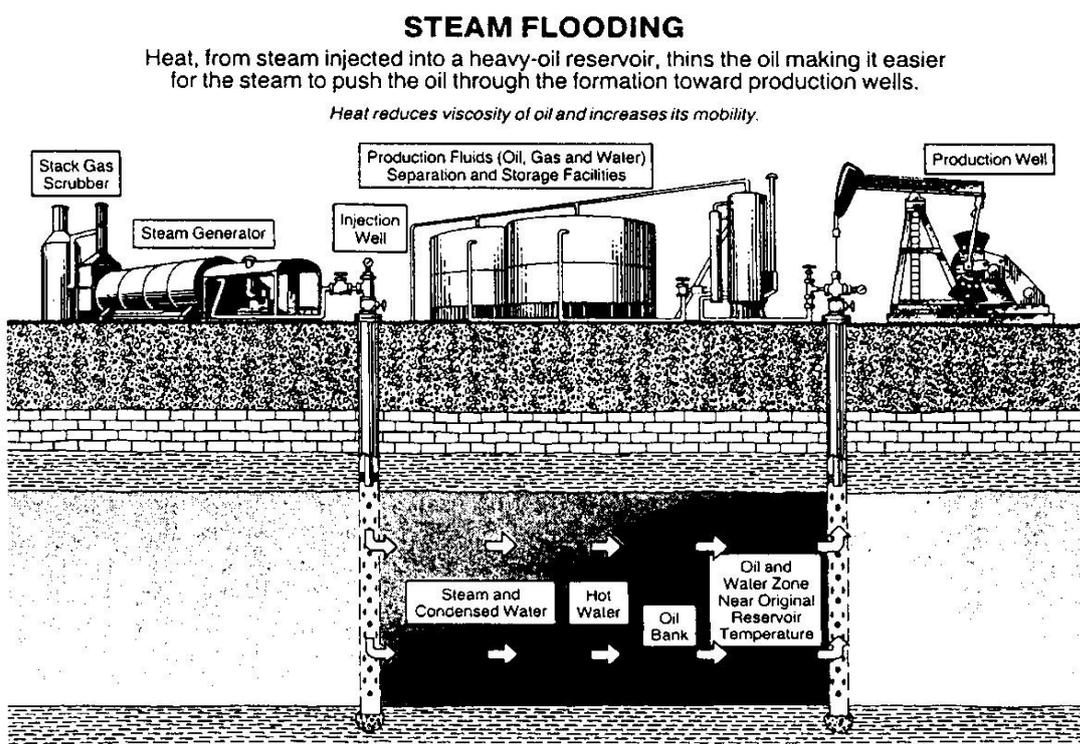


図3.1.28 水蒸気フラッド法

一方、水蒸気により加熱された原油は一部気化するが、フロント付近では再び凝縮してコンデンセートとなる。これら熱水およびコンデンセートは原油を掃攻しつつ前進するが、これらによって掃攻されずに取り残された原油は、あとから来る水蒸気により加熱され気化する。この気化した油と水蒸気は冷却されて再び凝縮し、熱水とコンデンセートになり、それにより掃攻が継続・進行し

ていく。したがって、最初は油層温度の水による掃攻、続いて熱水および熱コンデンセートによる掃攻、最後に水蒸気による掃攻と続く。

水蒸気フラッド法においても、油層の不均質性や高浸透性部分の存在等により、水蒸気がチャンネルを形成するが、このようなチャンネルは前進に伴い容易に冷却されて熱水に変わるため、ガス圧入法の場合と比較して相対的にフロントの形状は安定したものとなる。

カナダのオイルサンド層に存在するビチューメンは、貯留層内の温度では水より重く、流動性を持たないほど粘性が高いため、この超重質油の回収方法として SAGD 法 (Steam Assisted Gravity Drainage 法) が開発された。

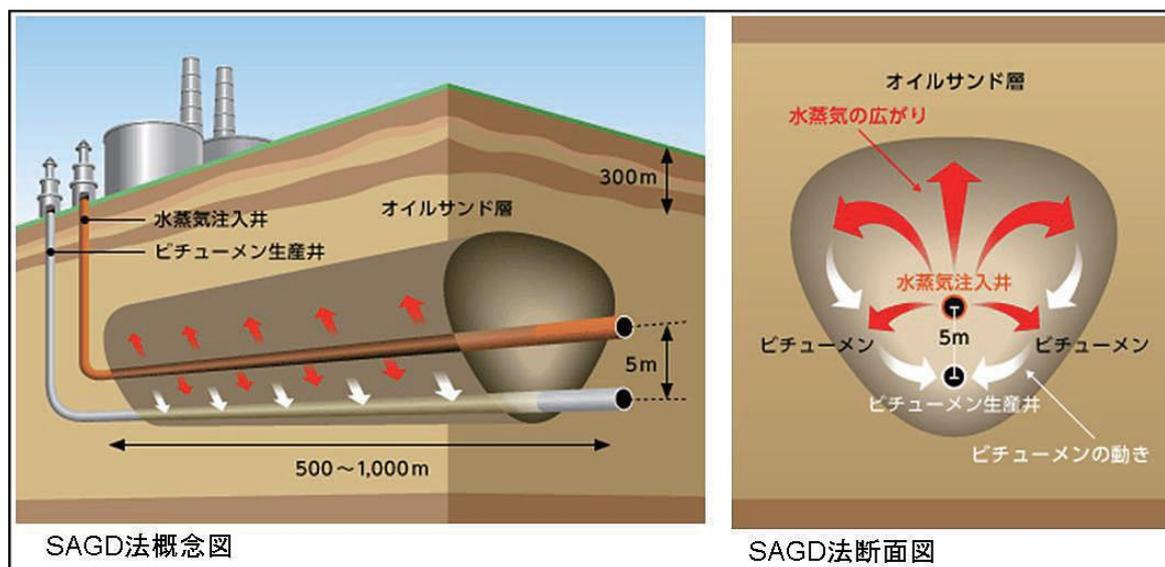


図 3.1.28-2 SAGD 法 出所：石油資源開発株式会社

この方法は水蒸気フラッド法の応用で、深度の異なる 2 本の並行した水平井をオイルサンド層に掘削し、片方の井戸から連続的に高温蒸気を圧入しながら、もう片方の井戸から連続的にビチューメンと凝縮水を生産するという回収方法である。図 3.1.28a 右の断面図に示したように、縦に配列された 2 本の水平井のうち、上部の水平井より圧入された高温蒸気は、貯留層内でスチームチャンバー (高温蒸気ので満たされたエリア) を形成、スチームチャンバーとビチューメンの界面において、ビチューメンに蒸発潜熱を与えて凝縮する。この凝縮水と加熱されて流動性を得たビチューメンは周辺の高温蒸気 (気相) よりも重いため、貯留層内を流下していき、最終的には下部の水平井を通じて生産される。一方で加熱されたビチューメンが流下した後のボイドスペースは高温蒸気で満たされ (つまり生産が進むにつれてスチームチャンバーが拡大する)、その高温蒸気によって更に外側のビチューメンが加熱されるというプロセスが連続的に進行するのが SAGD 法の特徴である。

## (2) 火攻法

油層内で原油の一部を燃焼させ、その結果生ずる熱によって原油を加熱し、原油の粘性を低下させて回収しようとする方法である。火攻法は上述の水蒸気攻法とともに、比較的多く用いられてきた熱攻法の一つであるが、原油の回収機構としては二・三次回収法の中で最も複雑とされている。即ち、油層内での原油燃焼とその熱による原油の粘性低下に加え、油層内で発生する水蒸気による水蒸気攻法と同様のメカニズム、原油の蒸留と再凝縮するコンデンセートによるミシブル置換の機構、更には燃焼排ガスに含まれる炭酸ガスによる炭酸ガス攻法と同様のメカニズムなど、火攻法では他の二・三次回収法で機能する主要なメカニズムが総合的に作用する。このため、火攻法の総合的な評価・解析

は非常に複雑なものとなる。

火攻法にも油層や原油の特性に応じて改良された数多くの種類があるが、基本的には以下の三つの方法に集約される。

### 1) 乾式火攻法 (図 3.1.29)

着火井の坑底に強力な電熱器、バーナーなどを降下して、空気を圧入しながら油層を熱すると、最初は坑井に近い部分の油層内に含まれる原油の中の軽質分と、原油と一緒に存在する水が気化され、また、原油の一部は熱分解され、最後に残った重質分が熱によって着火する。更に空気によって酸素が供給されると重質分の酸化が進行し、すなわち燃焼が継続され、それ以降は空気だけを送ってれば、燃焼が続いて熱が補給されることになる。

油層内の原油は、水が気化して生じた水蒸気によって一部は蒸留されて円筒状に外側へ移動する。また、一部は熱によって気化し、あるいは熱によって分解されてより軽質の炭化水素に変化する。これらはガス体または軽質油となって外側に移動し、それ以前に水蒸気蒸留で外側に移動しそこで再び凝縮した油に吸収されてその油の比重を下げ粘性を下げる働きをする。当然、この吸収によって熱も加わることになる。

重質分の燃焼によって生じた炭酸ガス、水蒸気、および酸素を消費されて残った空気中の窒素は、熱をさらに外側へ運ぶ働きをする。このように軽質分の水蒸気による蒸留、中質分の熱分解、残渣重質分の酸化（燃焼）の繰り返しによって燃焼前線が進んで行き、これに伴い原油は次第に前へ送られて採油井から回収されるようになる。

## IN-SITU COMBUSTION

Heat is used to thin the oil and permit it to flow more easily toward production wells. In a fireflood, the formation is ignited, and by continued injection of air, a fire front is advanced through the reservoir.

*Mobility of oil is increased by reduced viscosity caused by heat and solution of combustion gases.*

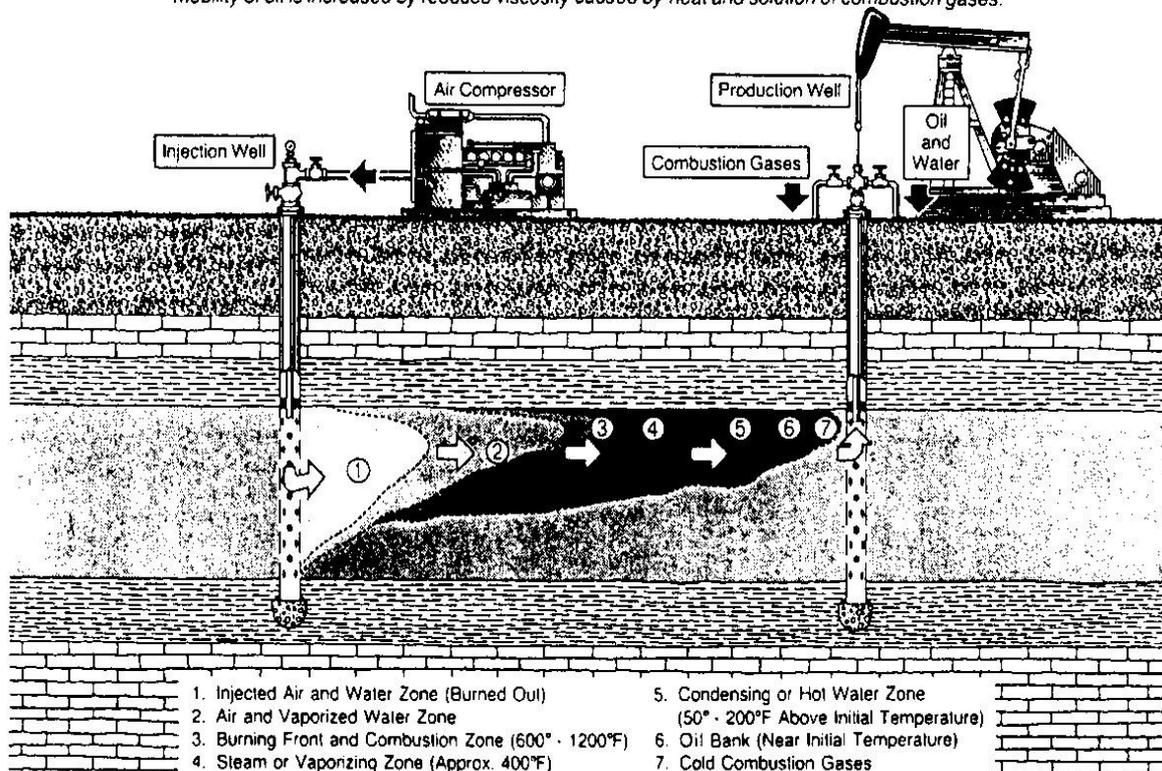


図3.1.29 火攻法

## 2) 湿式火攻法

上記の乾式火攻法では、燃焼前線の通過した後の油層は燃焼によって加熱されたまま残され、その熱の一部は圧入空気によって前方に運ばれるものの、空気の熱容量が小さいために熱の利用効率が低い。これを改善するために、空気と同時に、あるいは空気と交互に水を圧入し、この水に油層中の残留熱を吸収させ、水蒸気もしくは熱水として前方に移動させる方法を湿式火攻法と称する。

湿式火攻法では、熱の利用効率が著しく改善されることに加えて、空気と水の圧入比率を調整することによって燃焼温度が必要以上に上昇する過熱燃焼を抑制し、必要空気量を減少させることができるメリットがある。しかしながら、原油の流動性は乾式火攻法に比較して低下するため、この方法を適用する際の原油に対する粘度の選定基準は、乾式火攻法に比較して厳しいものとなる。

## 3) 後退式火攻法

着火井とは別に空気圧入井を設ける方式で、この場合、燃焼前線の進む方向と油の移動する方向とが逆になる。したがって着火井が採油井になる。油層内で燃焼するのは中間留分であり、重質分はコークスとして油層内に残る。また、空気の流れる方向と燃える方向が逆なので、熱によってガス化した軽質分および水蒸気が熱を燃える方向と逆の方向に運ぶために、燃焼前線の進行速度の調整が難しい。ただ、採油井に集まる油は燃焼によって十分に温度が上昇した部分を通過してくるために、非常に軽質となり流動性が高い。

結局、重質分はコークスとして油層内に残り、中間留分は燃料となり、採油井に集まるのは軽質油だけとなる。したがって前進式の火攻法に比べ効率は悪いが、産出してきた原油は軽質であるということになる。

## 2 集油および集ガス

### 2.1 原油・天然ガスの分離

一般に油層より産出する原油は天然ガスを伴っており、またガス層より産出する天然ガスも原油、あるいは液体分を伴っている。さらには水、泥、砂等が含まれている場合もある。このように異種、異相の物を含んでいると商品価値が少なくなり、貯蔵、輸送等実際の取り扱い面においても種々問題を生ずるため、貯蔵以前の段階でこれらを分離する必要がある。

この目的のために使用される設備をオイルアンドガスセパレーターといい、単にセパレーターと称することもある。セパレーターは、使用場所、目的の相違によってはノックアウト、スクラバー、フラッシュチャンバー、エクспанションベッセル、フィーダー、ダストスクラバーとも称せられる。このセパレーター内での原油とガスの分離現象の把握には、原油に対するガスの溶解度、一段分離と多段分離、気相および液相の平衡等に関する知識が必要である。

#### 2.1.1 セパレーター分離

##### i) セパレーターの機能

###### (1) 液体中のガスの除去

多くの原油は油層圧力、油層温度において天然ガスで飽和されており、一定量の原油から分離するガス量は圧力および温度の関数である。

セパレーターの流体処理能力は①原油の物理的、化学的性質、②セパレーター圧力、温度、③流体の通過量、④セパレーターの大きさ、形態等により決まる。セパレーターの内径、液体通過量および液面の高さにより、原油がセパレーター内に滞留する時間が異なってくる。この時間をリテンションタイムといい、この時間の長短によりセパレーターの分離効果は決まってくる。一般には、リテンションタイムは1~3分程度であるが、泡立ち性原油の場合には5分以上を必要とする。

###### (2) ガス中の液体分の除去

ガス中に含まれる液体分の分離は、流体が地層を通り坑井内へ流入する時から始まり、チュービング、フローライン、採取施設へと進むに従い、圧力降下、温度降下によって促進され、セパレーターに入って最終的に分離される。しかしセパレーター出口近くにおいてもガス中になお多少の液状成分が含まれているのが普通で、セパレーター出口においてこれを取り除く装置をミストエクストラクターという。

###### (3) ミストエクストラクター

坑井流体から分離したガスには、多くの霧状になった液体分が含まれている。これらの霧状液体はガスパイプライン内で液滴となり、輸送能力の低下、販売先でのトラブル等を起こすので除去しなければならない。霧状の液体分は、セパレーターでのガス流速を十分遅くし、また十分な時間を与えれば、その比重差により分離が行われるが、実際問題として、このような流速と時間を与えるのは困難であるためミストエクストラクター（デミスター）を用いて除去する。

ミストエクストラクターには、種々の形のものがあるが、いずれも根本的には次の原理の応用にほかならない。

①衝突 ②流れの方向の転換 ③速度の変化 ④遠心力 ⑤コアレスニングパック ⑥フィルター

##### ① 衝突

霧状液体を含むガスが邪魔板に衝突すると、霧状液体は板に付着し液滴となって滴下する。

##### ② 流れの方向の転換

流れの方向を急に変化させると、霧状液体はガス粒子に比較して粒子が大きく慣性が大きいため、

それまでの進行方向を維持しようとする。その結果、分離が促進される。

③ 速度の変化

流速が減少すると慣性の大きい霧状液体はガスから分かれて遠方に飛び去り分離される。

④ 遠心力

霧状液体を伴ったガスが円運動を行うと、粒子の大きい霧状液体分は円筒内を内壁の方に飛散しガスと分離する。

⑤ コアレッシングパック

パックにパールサドル、ラシヒリング、ワイヤメッシュ等を用いてその中を流体が通過すると、前述の衝突、方向の転換、速度の変化、遠心力が共に起こり効果的に分離される。

⑥ フィルター

多孔性の物質をフィルターとして使用すると、霧状液体分をガスから効果的に分離する。フィルターの使用は衝突、方向の転換、速度の変化の応用である。

図 3.2.1 にベーン型、図 3.2.2 に遠心力型、図 3.2.3 にコアレッシング型のみストエクストラクターをそれぞれ示す。

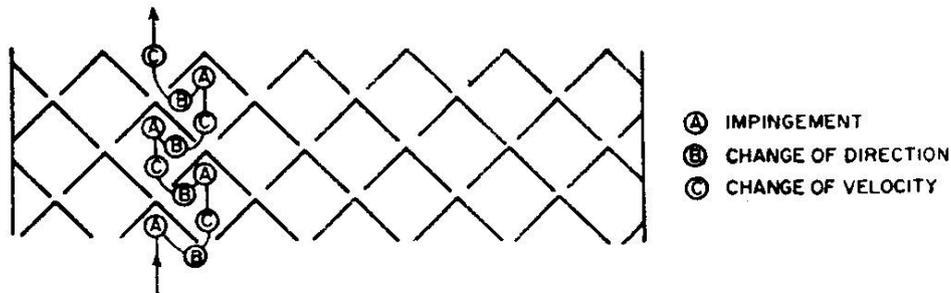


図3.2.1 ベーン型みストエクストラクター

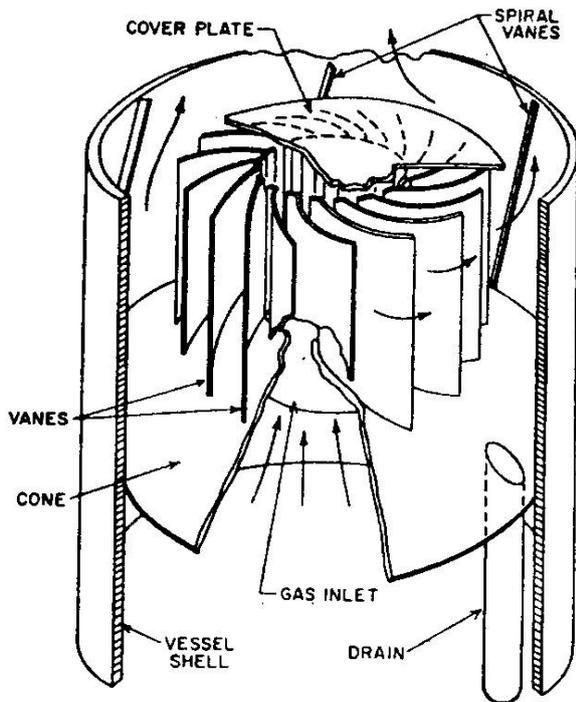


図3.2.2 遠心力型みストエクストラクター

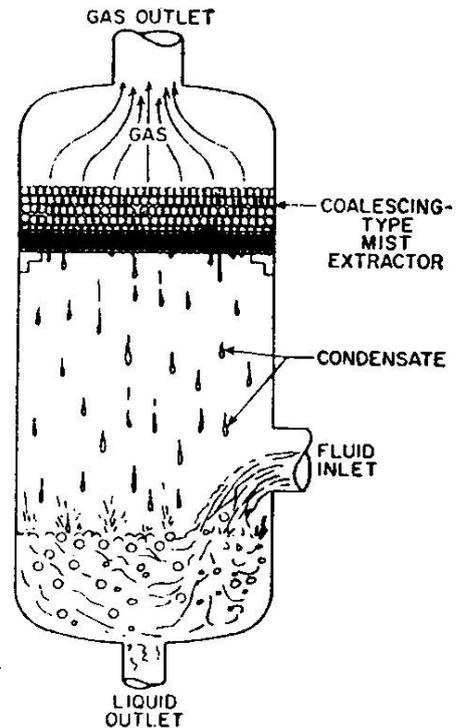


図3.2.3 コアレッシング型みストエクストラクター

ミストエクストラクターを通過する際の圧力降下はなるべく小さい方がよい。一般的にフィルタータイプの物は圧力降下が最小で、コアレスタイプのは最大である。その他のものはこれらの中間に位置する。

ii) セパレーターの形態

セパレーターには気液分離の 2 相用、油・ガス・水を分離する 3 相用があり、形態的には横型、縦型、球型がある。機構的にはほとんど同じであるが、処理能力設置条件等によりいずれの型を使用するか決められる。代表例として縦型 2 相用と横型 3 相用を図 3.2.4、図 3.2.5 に示す。

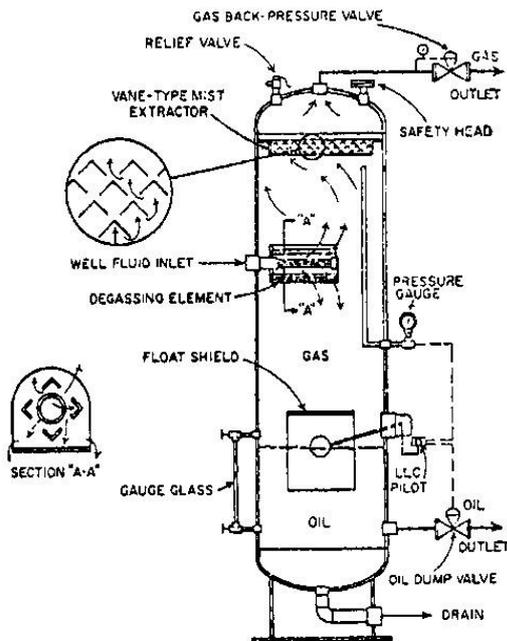


図3.2.4 縦型セパレーター

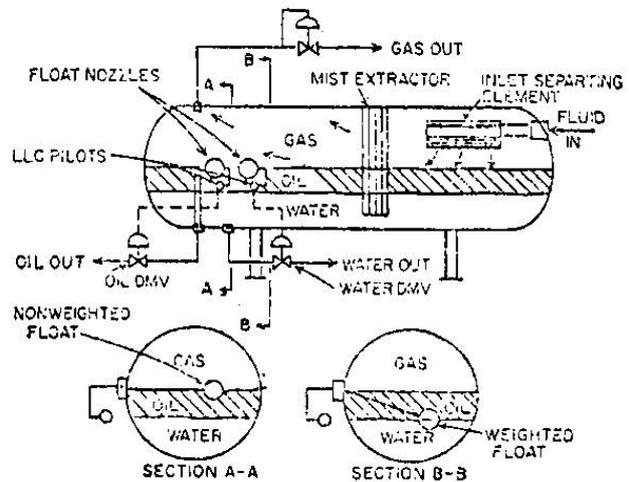


図3.2.5 横型セパレーター

2 相用セパレーターは流体をガスと液体とに分離するもので、まず流体はエレメントに衝突し、大まかにガスと液体に分離される。大部分の液体は下部に落ち、一方ガスは上部へ流れミストエクストラクターを通過する。ガスはセパレーター頂部より、液体は同底部より排出される。

3 相用セパレーターは流体をガスと油と水に分離するもので、ガスはセパレーター頂部、油は同中間部、水は同底部よりそれぞれ排出される。ガス-油の表面にフロートを浮かべ、油の液面をコントロールし、かつ油-水の界面にもフロートを浮かべ、水の液面をコントロールしている。即ち、油と水の分離はそれぞれの比重差により行っている。

セパレーターの圧力の保持、液面の安定はそれぞれガス圧力調節弁（図 3.2.6 に例）、液面制御機構により保たれる。

iii) セパレーターの処理能力

(1) 横型セパレーターの処理能力

横型セパレーターの処理能力は、その有効断面の大きさに比例する。即ち、セパレーターの直径および液面の高さが与えられた条件

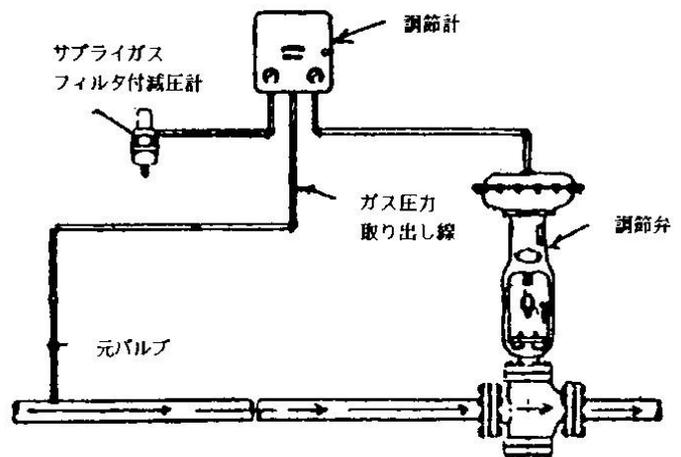
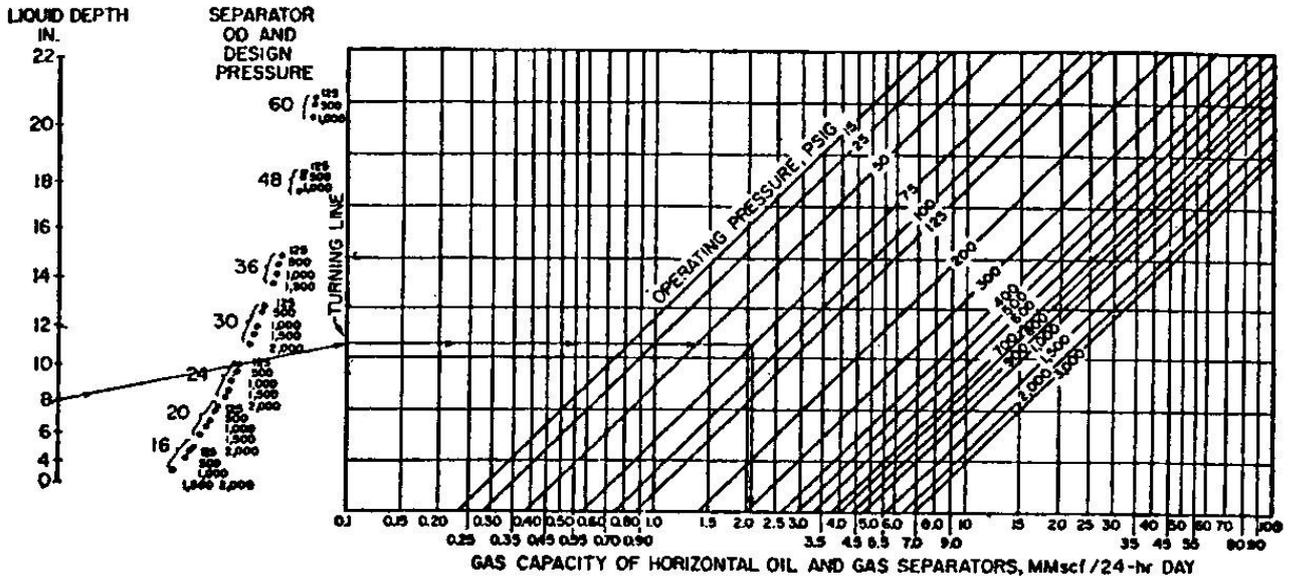


図3.2.6 圧力調節弁

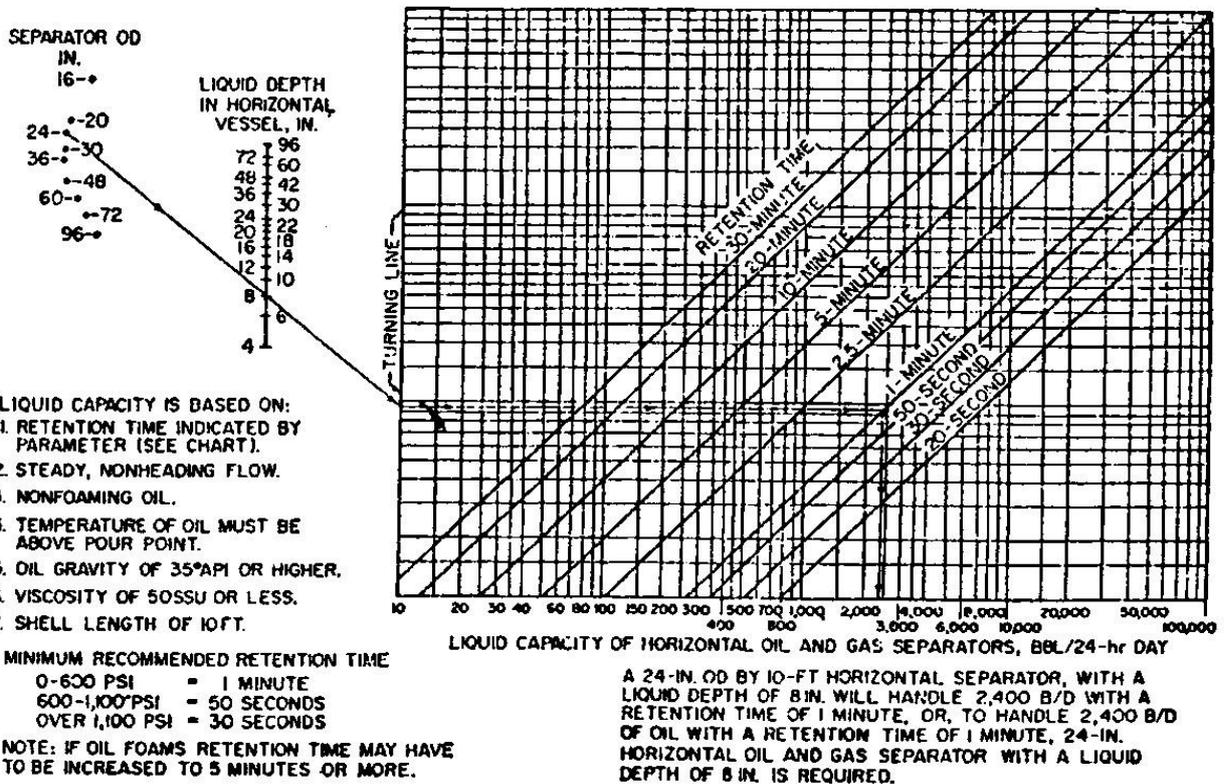
に対するガス処理能力を決定する要素となる。したがって長さを変えてもガス処理能力はそれほど大きく変化しない。



NOTE: THIS CURVE SHOULD NOT BE USED FOR LIQUID DEPTHS GREATER THAN ONE-HALF THE DIAMETER OF THE SEPARATOR VESSEL.

- GAS CAPACITY IS BASED ON:
1. VOLUMES MEASURED AT 60°F AND 14.7 PSIA.
  2. FLOW RATES ARE STEADY AND NONHEADING.
  3. OIL IS NONFOAMING.
  4. SHELL LENGTH IS 10 FEET.
  5. TEMPERATURE IS ABOVE HYDRATE TEMPERATURE.
  6. GAS IS 0.65 SPECIFIC GRAVITY.
  7. LIQUID CARRY-OVER WILL BE LESS THAN 1.0 GAL/MMscf.
- A 24-IN. BY 10-FT BY 125-PSI HORIZONTAL OIL AND GAS SEPARATOR, OPERATING AT 75 PSI WILL HANDLE 2.1 MMscf/D. THE PROBLEM CAN BE REVERSED IF THE DAILY VOLUME AND WORKING PRESSURE ARE KNOWN.

図3.2.7 横型セパレーターのガス処理能力



- LIQUID CAPACITY IS BASED ON:
1. RETENTION TIME INDICATED BY PARAMETER (SEE CHART).
  2. STEADY, NONHEADING FLOW.
  3. NONFOAMING OIL.
  4. TEMPERATURE OF OIL MUST BE ABOVE POUR POINT.
  5. OIL GRAVITY OF 35°API OR HIGHER.
  6. VISCOSITY OF 50SSU OR LESS.
  7. SHELL LENGTH OF 10FT.

MINIMUM RECOMMENDED RETENTION TIME  
 0-600 PSI = 1 MINUTE  
 600-1,100 PSI = 50 SECONDS  
 OVER 1,100 PSI = 30 SECONDS

NOTE: IF OIL FOAMS RETENTION TIME MAY HAVE TO BE INCREASED TO 5 MINUTES OR MORE.

A 24-IN. OD BY 10-FT HORIZONTAL SEPARATOR, WITH A LIQUID DEPTH OF 8 IN. WILL HANDLE 2,400 B/D WITH A RETENTION TIME OF 1 MINUTE, OR, TO HANDLE 2,400 B/D OF OIL WITH A RETENTION TIME OF 1 MINUTE, 24-IN. HORIZONTAL OIL AND GAS SEPARATOR WITH A LIQUID DEPTH OF 8 IN. IS REQUIRED.

図3.2.8 横型セパレーターの液体処理能力

また、液体の処理能力はセパレーター内液部分の容積に比例し、直径、長さ、液面の高さによって決まる。図 3.2.7 に横型セパレーターのガス処理能力、図 3.2.8 に横型セパレーターの液体処理能力を示す。

なお、図 3.2.7 は液面設定高さがセパレーター内径の半分以下の場合にのみ用いられ、ガス処理能力は下記条件下におけるものである。

- ① 処理能力は 60°F (15.6 °C)、14.7 psia (0.10 MPa、1 atm) における値である。
- ② 流れは安定しており脈流がないものとする。
- ③ 油は泡立ち性を有しないものとする。
- ④ セパレーターの長さは 10 ft (3 m) とする。
- ⑤ ガス温度はハイドレート点以上とする。
- ⑥ ガス比重を 0.65 とする。

また、図 3.2.7 の使用例 (矢印線) は液位 8 in.、セパレーター外径 24 in.長さ 10 ft 設計圧力 125 psig、セパレーター運転圧力 75 psig におけるガス処理能力が 2.1 MMscf/D (59,000 m<sup>3</sup>/D) であることを示している。図 3.2.8 の液体処理能力は下記の条件におけるものである。

- ① 液体滞留時間の目安は次の通りである。

セパレーター運転圧力	所要最小滞留時間
0~600 psi (0~4.14 MPa)	1 min
600~1,100 psi (4.14~7.58 MPa)	50 sec
1,100 psi (7.58 MPa) 以上	30 sec

- ② 流れは安定しており脈流がないものとする。
- ③ 油は泡立ち性を有しないものとする。
- ④ 油の温度は流動点以上とする。
- ⑤ 油比重は 35° API 以上とする。
- ⑥ 油の粘度は 50 SSU 以下とする。
- ⑦ セパレーターの長さは 10 ft (3 m) とする。

また、図 3.2.8 の使用例 (矢印線) はセパレーター条件が図 3.2.7 の場合と同じでさらに滞留時間を 1 分とした場合に液体処理能力が 2,400 bbl/d であることを示している。

図 3.2.7、図 3.2.8 共、所要処理能力からセパレーター仕様を定める場合、即ち前述使用例の矢印を逆にたどるときにも用いられる。

## (2) 縦型セパレーターの処理能力

縦型セパレーターのガス処理能力はセパレーターの断面積に比例し、その長さ高さにはほとんど関係しない。即ち、長さが 50 % 増加してもガス処理能力は 5 % 程度しか増加せず、また、50 % 減少しても 3 % 程度しか減少しない。液体の処理能力は直径および液面の高さにより決定される。図 3.2.9 にガス、図 3.2.10 に液体の処理能力を示す。両図の使用条件は前述の横型セパレーターの場合と同じであるが、液体の処理能力 (図 3.2.10) については、液面高さがセパレーター径の 1~3 倍以下という条件が付加される。

図 3.2.9 の使用例矢印線は、セパレーターの外径 20 in.、長さ 10 ft、設計圧力 1,000 psig、セパレーター運転圧力 700 psig におけるガス処理能力は 8.2 MMscf/d であることを示し、図 3.2.10 のそれは、外径 30 in.、長さ 10 ft、設計圧力 1,000 psi 液位 30 in.、滞留時間 1 分とした場合の油処理能力

は 2,700 bbl/d であることを示している。

これらの場合も横型の項で述べたと同じく処理能力から逆にセパレーター設計条件をたどることが可能である。

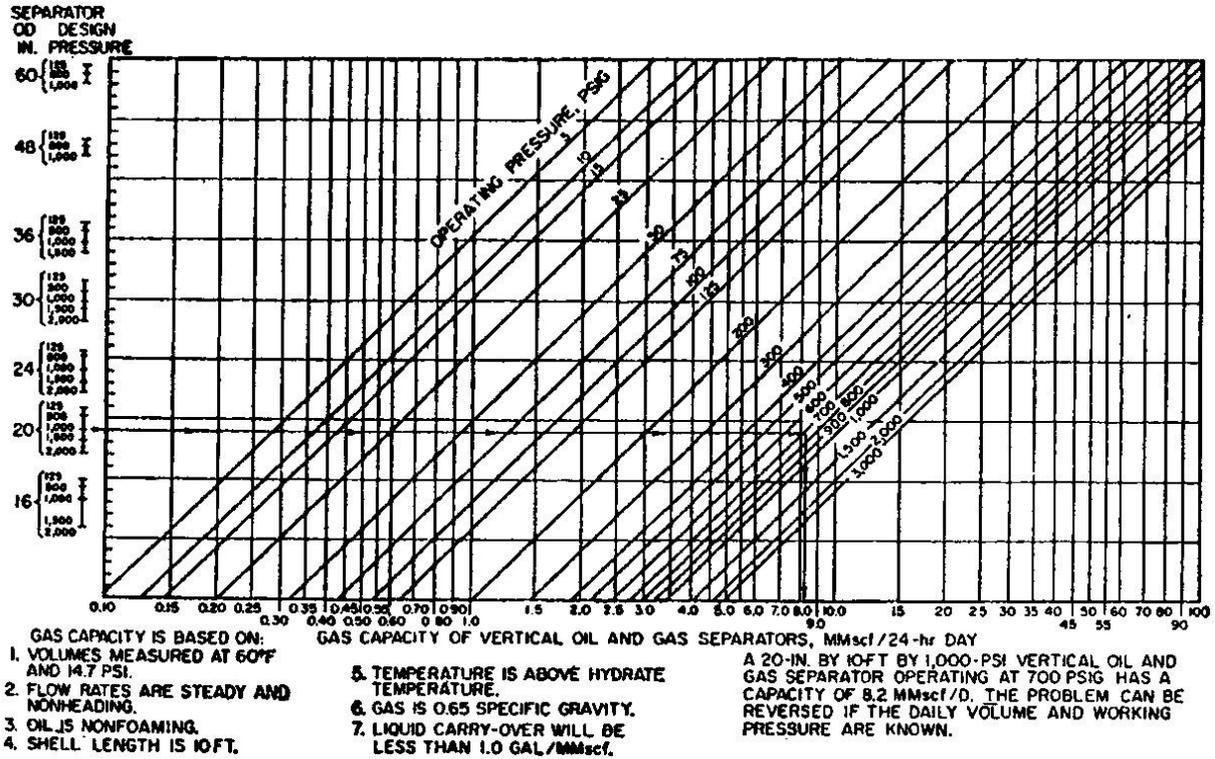


図3.2.9 縦型セパレーターのガス処理能力

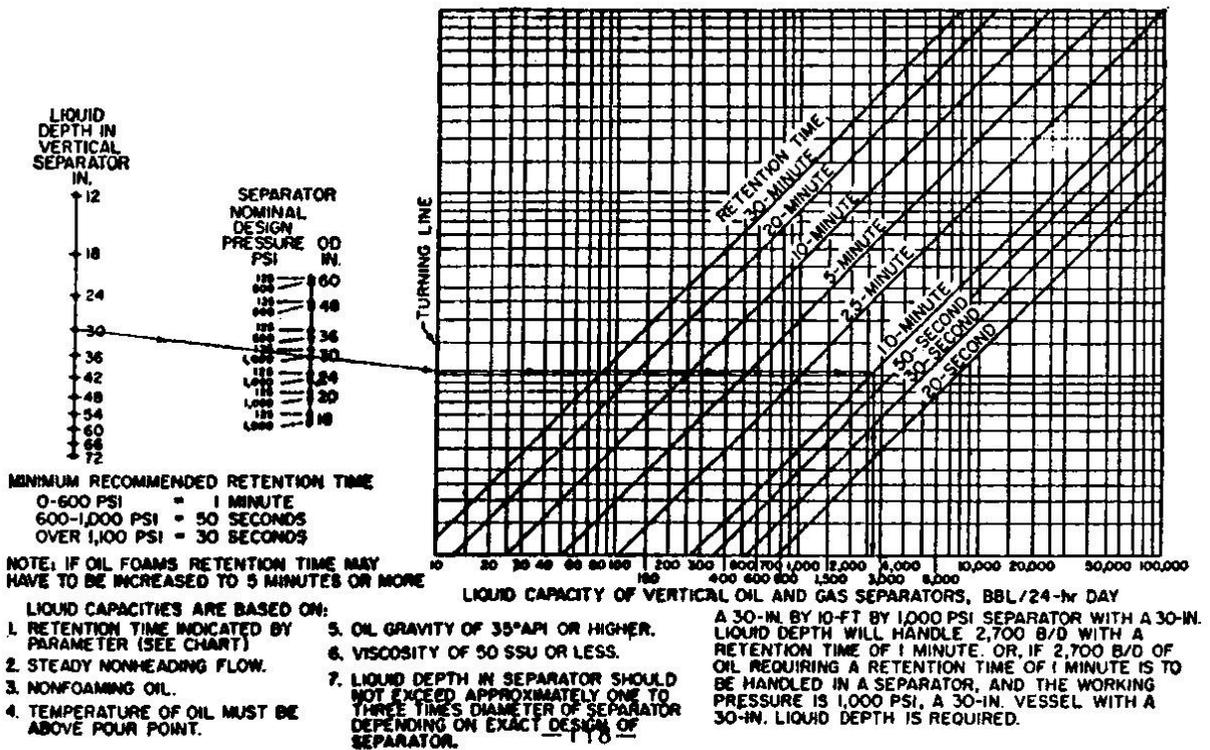


図3.2.10 縦型セパレーターの液体処理能力

### 2.1.2 多段分離法

多段分離はセパレーターを直列につなぎ、各段の操作圧力を順に減少させることによって行なわれる。一般的な多段分離を図 3.2.11 に示す。

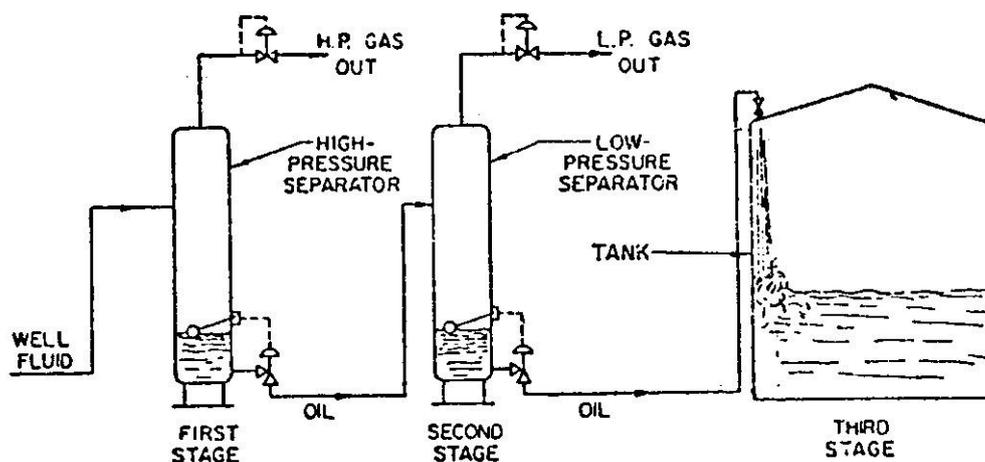


図3.2.11 三段分離の一例

多段分離の目的は液体あるいはガスの回収量を最大にし、液体とガスを安定化することにあるが、段数の決定、設定圧力の選択に際しては、気液の平衡計算を行う他にガス販売契約の条件、ガスおよび油の価格、経済性を考慮しなければならない。

### 2.1.3 付属機器

セパレーターに取り付けられる必要機器には次のようなものがある。

#### i) 圧力調節弁

セパレーターの内圧を一定に保つためにセパレーターの下流に取り付けられる。弁作動の動力源には電気式と空気式があるが、一般的に空気式を採用している。調節計と調節弁より成り、調節計ではセパレーター内圧を感知し、内圧と設定しようとする圧力の偏差に応じた信号圧を調節弁に送り、調節弁はそれに応じて作動し、セパレーター内圧を設定圧に保持する。図 3.2.6 に一般的な圧力調節弁を示した。

#### ii) 液面調節弁

セパレーターの液面を一定にするために取り付けられるもので、これも調節計と調節弁より成る。大別して電気式と空気式とに分かれるが、電気式はセパレーター内に電極を挿入し、気相と液相の静電容量の差を利用して調節弁の電源を通断して弁を作動させるものである。

空気式はフロートを使用し、フロートの位置の変化を空気信号圧に変えて調節弁に送り、弁を作動させるものである。

#### iii) 安全装置

圧力調節弁または液面調節弁等の故障防止や、セパレーター自体とその周辺施設の危険防止のために安全装置が付けられている。圧力に対する安全装置には、安全弁およびラプチャーディスクがある。安全弁は普通スプリング式のものが広く用いられ、セパレーターの常用圧力の 1.1 倍にセットされる。ラプチャーディスクは金属の薄板でできており、普通圧力がセパレーター設計圧力の 1.25 倍から 1.5 倍になると、薄板が破れるように作られている。

場合により安全弁とラプチャーディスクの 2 重の安全措置が講じられる。このほか、セパレーター内

の圧力が異常に高くなったり、あるいは低くなったりした場合、それぞれセパレーター入口、出口のバルブが自動的に閉まるように設計されているものもある。

#### iv) その他

以上の他にセパレーターには液面計、温度計、圧力計が必要である。

## 2.2 原油の処理

### 2.2.1 エマルジョンの処理

#### i) エマルジョンとは

原油の生産に伴い、しばしばエマルジョンが原油と共に随伴してくる。ここでいうエマルジョンとは油の粒子と水の粒子が強く結合したもので、水と油の量に応じて0%~100%の間で水と油の両方の性質を持つものである。このエマルジョンを何らかの方法で油と水の結合を切り離し、油分は回収し、水は油分を取り除いて排水できるようにしなければならない。

エマルジョン（乳濁液）は1つの液体中に他の液体が分散して作られるコロイド分散系である。例として、少量のオリーブ油を水の中に加えて強く振り混ぜると、オリーブ油は水の中に細かく分散してエマルジョンとなるが、しばらくするとオリーブ油は水から分離して上層に浮かんでしまう。つまりエマルジョンは安定しないのである。しかし、あらかじめ水の中に少量のセッケンを加えておいて同様の処理を行うと安定したエマルジョンが得られる。このように一般に安定なエマルジョンを作るためには分散を促進し、かつ安定化するような物質が必要で、このような物質を「乳化剤（エマルジファイヤ）」という。

一般に分散系が作られるためには、分散相を分散媒の界面の増大に伴う自由エネルギーの増加に偿うだけの仕事が必要とされるが、その仕事は界面張力が小さいほど少なくて済む。そこで乳化剤の役目は液-液間の界面張力を低下させるものであるといえる。乳化剤はその分子内に性質の異なる原子団を持ち、その性質の差によって界面において方向配位をとって吸着層を作り、かつそこに電気2重層を形成するものと考えられている。

水と油によるエマルジョンには水中油滴型と油中水滴型があり、それぞれのエマルジョンの状態を図3.2.12に示す。

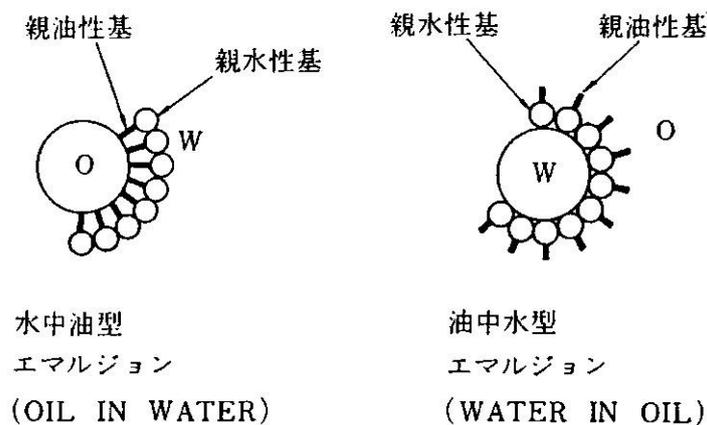


図3.2.12 エマルジョンの状態図

水中油滴型の場合には、エマルジョンは油粒子の周りに親油性の炭化水素と親水性の基を持つ乳化剤が取り囲み、親油性基が油の相の側に、親水性基が水の相の側に向くように配位してならば、界面

に単分子層をつくる。このように単分子層で被われた油の粒子間には電荷による反発が作用して相互の合体を防いでいる。

油中水滴型の場合には、水中油滴型の場合と全く逆に作用する。

実際の油田におけるエマルジョンの型は油中水滴型が圧倒的に多い。

## ii) エマルジョンの性質

エマルジョンについての重要な物理的性質は、液滴径、表面張力、水の含有率、密度、油の粘度である。

### (1) 液滴径

液滴の大きさはエマルジョンの処理に関し、次の理由により重要である。第一に小さな液滴は沈降するのに、より時間を必要とするからである。今、2つの液滴を考えて1つの液滴が他の液滴の径の1/2とすると、小さな液滴の重さは大きな液滴の重さの1/8であるが、表面積は1/4である。このことは小さな液滴の下向きの重力は大きな液滴の1/8であるが、下向きの力に対する摩擦抵抗は1/4であることを示している。したがって、同じ条件では、大きな液滴よりも小さな液滴の方が沈降するのにより長い時間を必要とする。

第二には、小さな液滴の方が大きな液滴よりも表面張力が強く、他の液滴と衝突してもこわれにくく、凝集もしにくいということである。

### (2) 表面張力

エマルジョンの中に異種の物質が存在すると液滴の表面張力を増加させる。また、前述のごとく小さな液滴の方がこわれにくい。このように液滴の表面張力は液滴の大きさおよび組成に関係する。化学作用や熱によって液滴の表面を破壊したり、または弱くしたりすると、液滴同士が衝突した場合に凝縮してより大きな液滴となって下に沈降する。

### (3) 水の含有率

原油と共に産出する水の含有率は処理上にも大きな影響を与える。水の含有率が多いと液滴径は大になり、液滴同士が接触する可能性が高くなり、結果的に沈降が早く行なわれることになる。

### (4) 密度

油と水の密度の差も沈降時間に関係し、比重差が大きいほど分離しやすい。

### (5) 油の粘度

粘度が高いと沈降は遅く、粘度が低いと沈降は早く行なわれる。

## iii) エマルジョンの処理

エマルジョンの処理の方法には薬品注入、水の分離、加熱、ろ過、静置、電氣的処理、遠心分離がある。

### (1) 薬品

エマルジョン破壊剤として使用される薬品は界面活性剤である。界面活性剤は水と油の境界面に吸着されて液体の表面張力を著しく弱め、水と油の結合を切り離す。薬品の注入場所は薬品に十分な反応時間を与え、かつ混合させるために処理装置から十分離れた上流箇所、例えば坑井元等がよい。

### (2) 水の分離

エマルジョンを処理する前に、水は十分に分離すべきである。これによってエマルジョンを加熱する場合に不必要な熱を与えるのを防ぎ、処理コストを下げることになる。

## (3) 加熱

エマルジョンの加熱による処理は古くから行われており、最も基本的な方法である。エマルジョンに対する加熱の効果には3つある。

- ① エマルジョンに作用して表面張力を弱くし、液滴同士を凝集させる。
- ② 油の粘度を減じて水の液滴が沈降するのを容易にする。
- ③ 温度上昇により分子活動が盛んになり液滴同士の衝突回数が増える。

## (4) ろ過

加熱によるのみでは、全てのエマルジョンに対して十分な効果をあたえることができない場合もあり、フィルターを併用することもある。エクセルシヤ (Excelsior=木毛) は最も安価かつ効果的なフィルターで古くから使われている。

## (5) 静置

静置することにより、油と水はそれぞれの比重差によってストークスの法則にしたがって分離する。しかし分離するためには十分な時間が必要である。

## (6) 電氣的処理

電界の中に位置する液滴は相互に衝突して表面の安定膜が破壊される。この衝突と結合は液滴内部の両極間に働く引力によってなされる。油の中の水の液滴に作用する電界の影響を図 3. 2. 13 に示す。

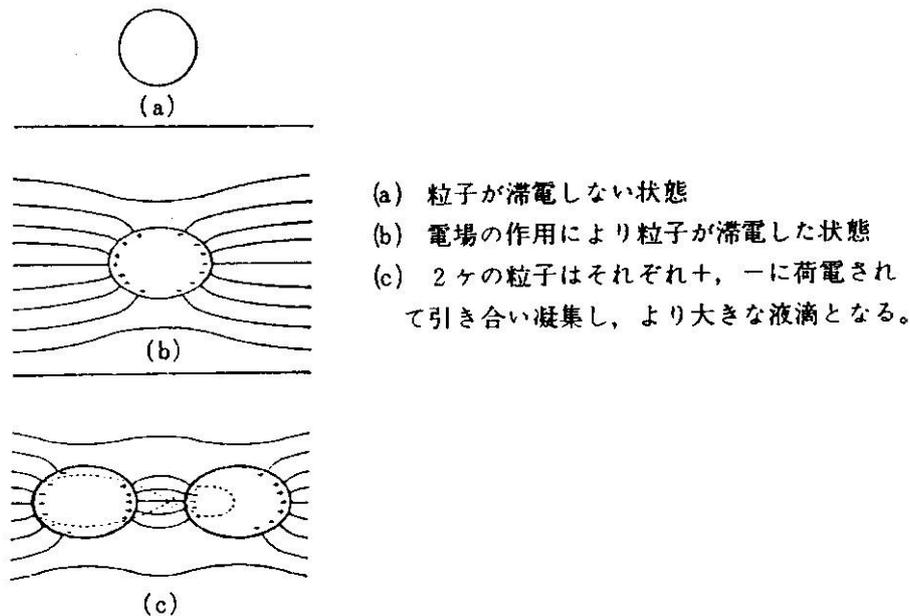


図3. 2. 13 液滴に作用する電界の影響

エマルジョンが高電圧を負った二つの電極の間を流れると、エマルジョン粒子は帯電し、水滴同士が凝集し大きな水滴となって分離する。使用電圧の一例を示すと一次側 440 V、高压側は 16,500 V、この場合のリテンションタイムは約 20 分である。使用電力量は原油の電気伝導度によるが、軽質油の場合は大体 1,000 bbl 毎に 0.5 kW、重質油の場合は大体 1,000 bbl 毎に 1.5 kWである。

## (7) 遠心分離

これはエマルジョンを高速回転させて遠心力を与え、比重差によって油と水を分離するものである。

## iv) エマルジョン処理装置

エマルジョン処理装置としては、ウォッシュタンク、ヒータートリーター、電気処理装置等が一般的である。処理装置の目的は前項の「エマルジョンの処理」において述べた個々の作用により、原油から水、砂、その他の不純物を除去するものである。通常、原油はセパレーターからエマルジョン処理装置に入り、ここで前述の方法の単独あるいは組み合わせによって原油は処理される。

## (1) ウォッシュタンク (Wash Tank)

ウォッシュタンクの一例を図 3.2.14 に示す。原油はまずタンク上部の低圧セパレーター部分に入り、ガスは分離して上部に流れ、原油は低圧セパレーター下部に流れ、スプレッダで一様にタンク内部に分散される。タンク内部に分散されたエマルジョンはスチームラジエーターにより加熱されて油と水に分離しやすくなる。そして油は上部に、水およびスラッジは下部に溜り、水のレベルはレベルコントローラーによって常に一定に保たれ、上部に溜った油はオイルスキマにより排出される。

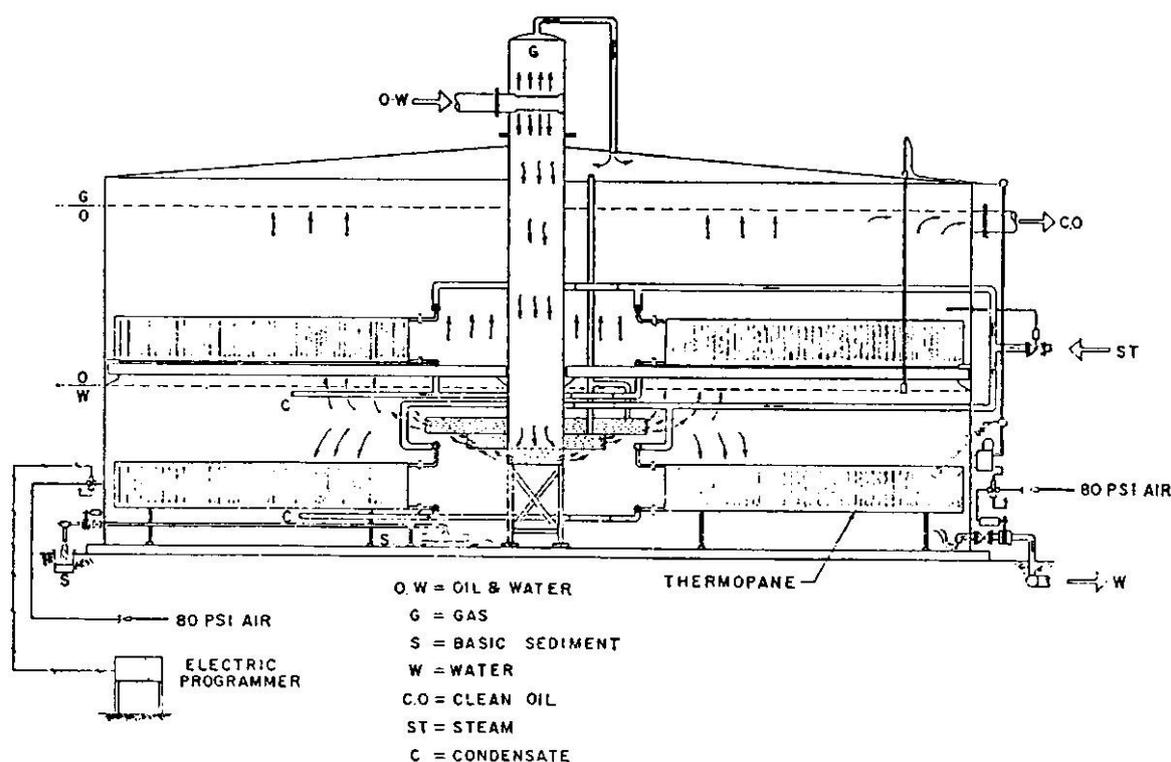


図3.2.14 ウォッシュタンクの一例

## (2) ヒータートリーター (Heater treater)

ヒータートリーターには縦型と横型があり、また直火式と間接加熱式がある。ヒータートリーターの一例を図 3.2.15、3.2.16 に示す。直火式はベッセルまたはパイプの中のエマルジョンをバーナーで加熱する方法である。間接加熱式は水、塩水または熱媒油の中にエマルジョンを流すチューブを通し、水、塩水または熱媒油を加熱することによってエマルジョンを加熱する方法である。

## (3) 電気処理装置 (Electrical treater)

図 3.2.17 に電気式のエマルジョントリーターの一例を示す。エマルジョントリーターに入ったエマルジョンはディストリビューターで均一に分散され、加熱されて粘度を減じられる。そして高圧

交流電界におかれた粒子は荷電されて活動が盛んになり、粒子同士の結合を促進し、そして重力により沈降分離する。

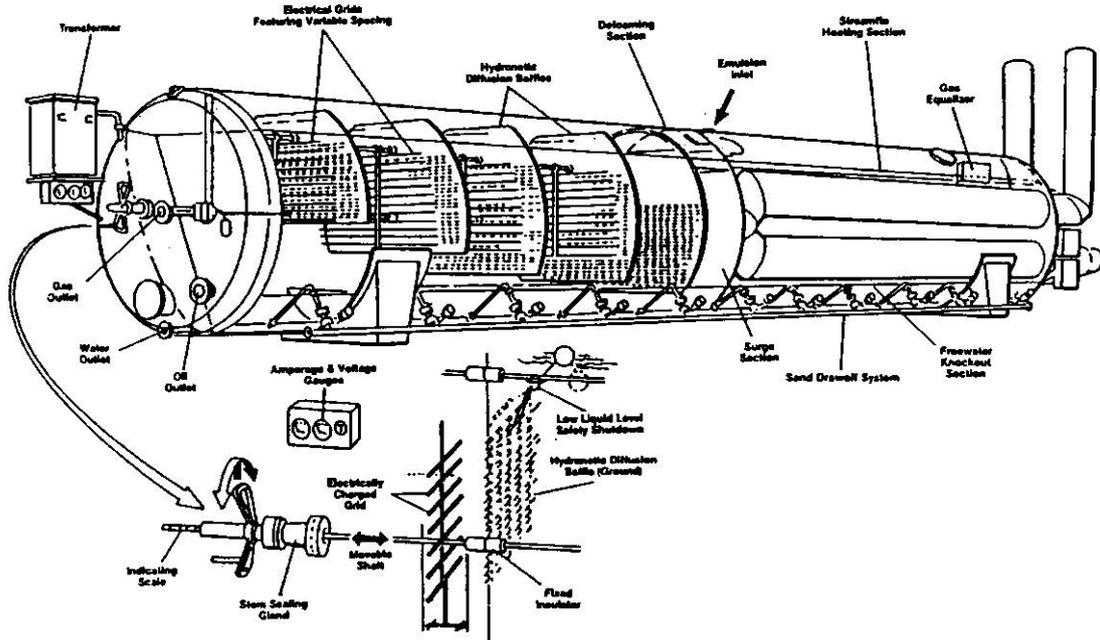


図3.2.15 横型ヒータートリーターの内部

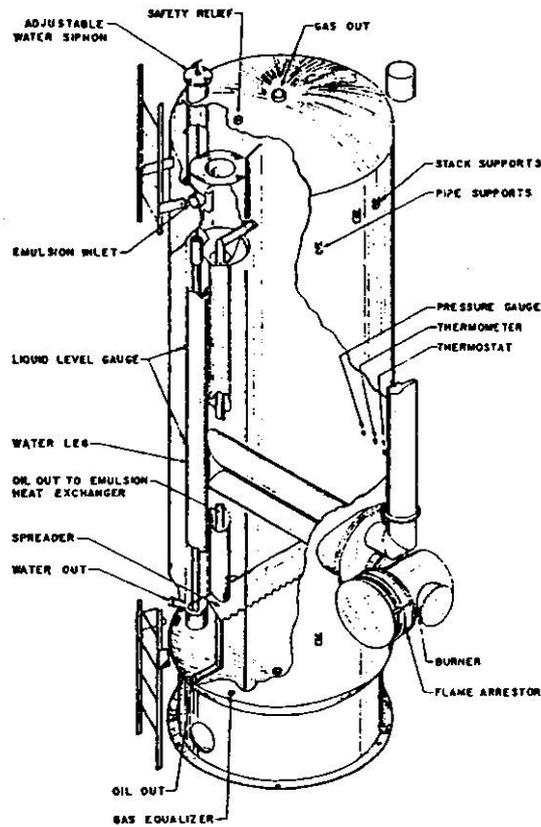


図3.2.16 縦型ヒータートリーター

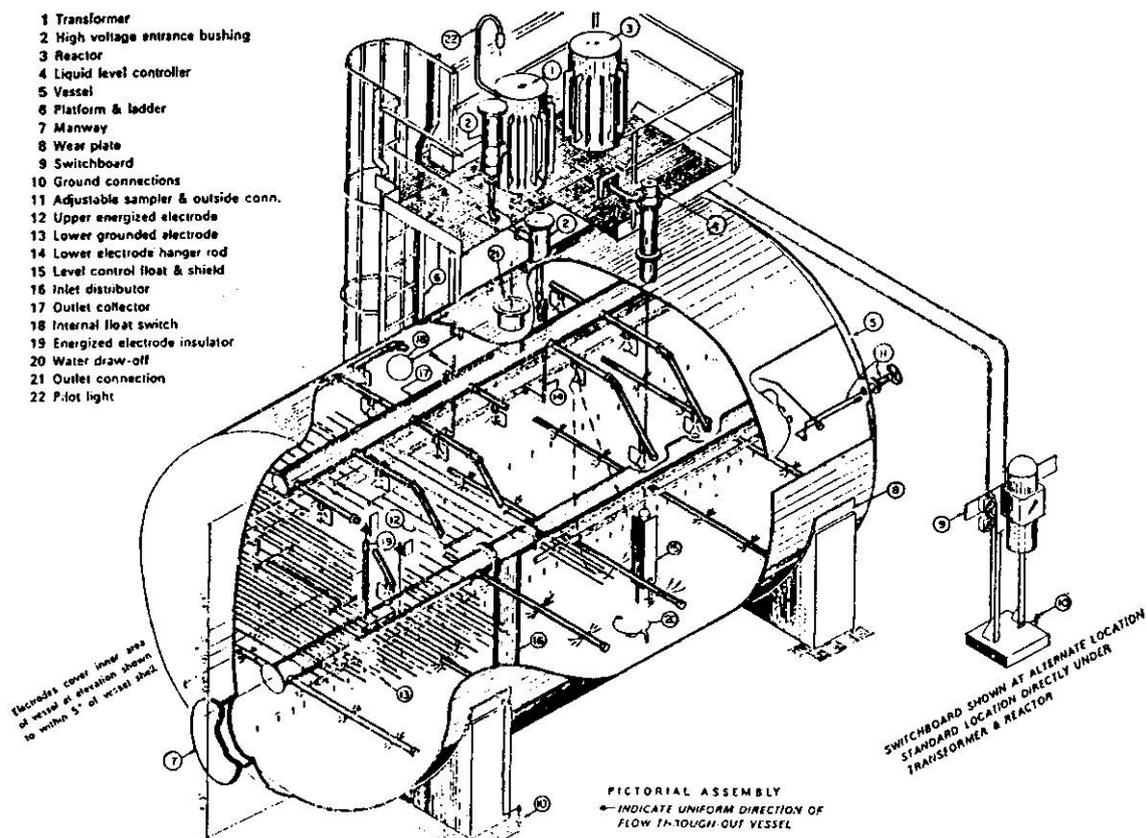


図3.2.17 電気式エマルジョントリーターの一例

### 2.2.2 パラフィン処理

原油にはパラフィン分を含有する場合がある。パラフィン分を含有する場合は温度が低下するとパラフィン分が析出し、チュービング内の閉塞、パイプラインの輸送能力の低下、その他セパレーターやタンク内に溜ると機能に支障を生じさせる。

パイプライン内においてパラフィンが析出した場合はパイプライン内をピグクリーニングして除去する。

パイプラインを加熱するとパイプラインの粘度が減じて流動しやすくなり、またパラフィンの一部は原油に溶解する。パイプラインを加熱する場合は外側からスチームを吹き付けるかあるいは電気ヒーターを巻き付けて行う。また、内部から加熱する場合は、熱湯あるいは熱油をパイプライン内に流して行う。

ピグによるクリーニングは、パイプライン内にピグを挿入し、坑井圧力、ガス圧あるいは原油をポンプで圧送することによって前進させピグ前面のパラフィンを機械的に除去するものである。

図3.2.18にピグクリーニングの概略図を示す。

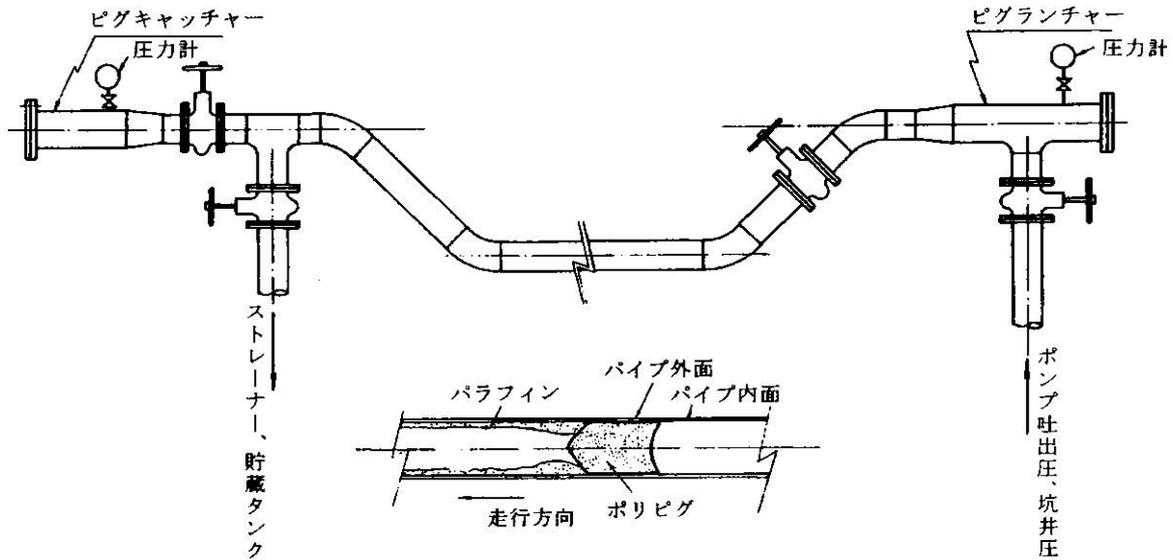


図3.2.18 ピグクリーニング概略図

## 2.3 天然ガスの処理

### 2.3.1 ガスハイドレート

#### i) 概念とその組成

地中より産出する天然ガスは、地層水を産出しなくても、その温度および圧力に見合った水蒸気で飽和している。地上に産出されるとガスの温度が下がり、水蒸気の一部が凝縮して遊離水となり、セパレーターやロックアウトドラムで除去されるが、天然ガス中にはなお水蒸気が飽和している。このまま天然ガスが採取装置やパイプラインへ送られると温度が下がり、水蒸気の凝縮水と天然ガスが共存してガスハイドレート（固体状物質）を生成する。ガスハイドレートが生成されると、ガスの流れを妨げ、極端な場合には完全にラインを閉塞して送ガスを不可能にする。この現象は、圧力が高くなるに従い一層促進されるため、長距離でしかも高圧のパイプライン輸送に当たっては、特にハイドレートの防止が必要となる。

ガスハイドレートについては 1810 年ハンフリー・デイビー (Humphry Davy) の塩素ガスハイドレートの発見が最初で、次いで 1888 年にはフランスでメタンガスのハイドレートが発見されたが、アメリカで実際にパイプラインにおける障害の原因としてとらえられたのは、1934 年ハマーシュミット (Hammerschmidt) によってであったといわれている。

ガスハイドレートの組成および結晶構造については、以下の通り分類されているが、一部不明瞭な点が残っている。

- (1) I 型ハイドレート ( $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等)
  - 2 個の 12 面体と 6 個の 14 面体から成る立方晶
- (2) II 型ハイドレート ( $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  等)
  - 16 個の 12 面体と 8 個の 16 面体から成る立方晶
- (3) H 型ハイドレート
  - 前述の多面体を組み合わせた 6 方晶

## ii) 生成条件と対策

ガスハイドレートは、天然ガスからの凝縮水とガスが共存して、ある圧力・温度で結合されて生成される。ガスハイドレート生成の温度と圧力の関係は、図 3.2.19 に示したように、圧力が高くなると温度も高くなる。また、天然ガスに含まれる水分量は圧力と温度により変化し、その含水量は図 3.2.20 から求められる。ガスの圧力が高くなると含水量が少なくなり、同じ圧力でも温度が下がると少なくなる。ガスハイドレートは、比重と圧力を示す実線の交点から温度が下がれば発生する。更に、下記の条件が起こるとハイドレートの生成が促進される。

- ① ガス流速が早いこと
- ② ガスの圧力変動が激しいこと
- ③ 激しい乱流（攪拌流）を伴うこと
- ④ ハイドレート生成時に核となる砂等の異物が存在すること

以上の条件によってガスハイドレートが生成されることになるが、逆に実際の操業において、これらの諸条件が起こらないようにすることが、ハイドレートによる障害を未然に防止するための対策となる。

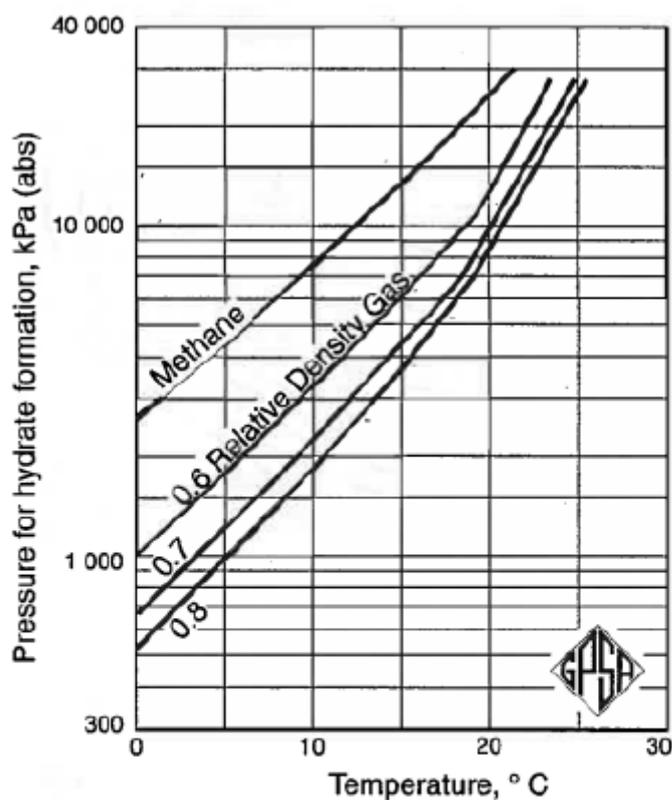


図 3.2.19 ハイドレート生成に関する圧力-温度曲線

出典: Engineering Data Book SI version Volume II Sections 20  
Gas Processors Suppliers Association

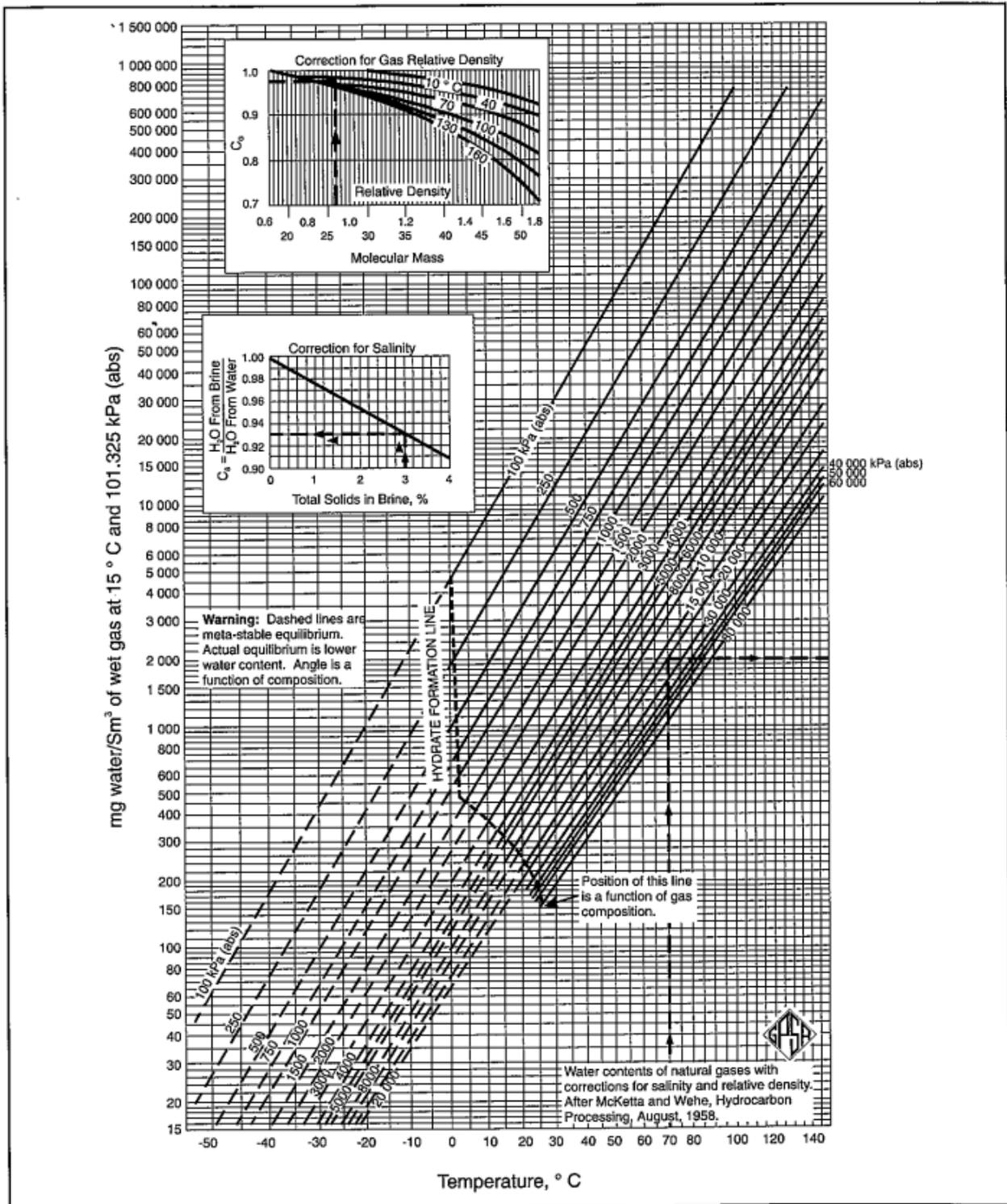


図3.2.20 各圧力、温度における天然ガス中の含水量

### 2.3.2 脱湿処理

#### i) 脱湿処理の目的

天然ガス中に含まれている水分は、ハイドレートによる障害防止のため、後述する種々のプロセスやパイプライン輸送に先立ち、あらかじめ除去しなければならない。

上記を含めて水分除去の必要な理由は次の通りである。

- ① ハイドレートによる障害防止
- ② ガスからの遊離水によるパイプライン圧力損失の増大防止
- ③ ガス中に酸性ガス（ $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{S}$  等）と遊離水が共存する場合の鉄材腐食の防止
- ④ ガス販売契約上からの制約

上記したもののうち、④については、アメリカでのガスパイプラインに関わるガスの輸送および販売契約において、通常、ガス中の水分は 7 lb/MMscf ( $0.1 \text{ g/m}^3$ ) 以下とされていることからくる制約条項である。

以上の目的のために、水分除去を行う一連の操作を「脱湿処理」といい、次にこれについて説明する。

## ii) 脱湿処理の方法

大別すると次のように分けることができる。

### (1) 吸収法

液体の脱湿剤により水分を吸収除去する方法。

脱湿剤名：エチレングリコール（モノエチレングリコール、ジエチレングリコール、およびトリエチレングリコール、の 3 種類がある）、塩化カルシウム（固体）

### (2) 吸着法

固体の脱湿剤により水分を吸着除去する方法。

脱湿剤名：活性炭、活性アルミナ、シリカゲル等。

### (3) 低温分離法

#### 1) 自己冷却方式

ガスの断熱膨張による冷却効果（ジュールトムソン効果）を利用する方式で、特に処理装置の出入口において圧力差を大きくとれる場合に適しており、これには次の 2 通りの方法がある。

#### イ) ハイドレート防止剤を用いない方法

運転温度がハイドレート生成温度以上の場合に用いられるもので、試ガス装置などの限られた用途に使用される方法である。

#### ロ) ハイドレート防止剤を用いる方法

運転温度がハイドレート生成温度以下の場合に用いられる方法で、防止剤には通常エチレングリコールが使用される。

#### 2) 冷凍冷却方式

ガス圧力が十分でなく上記方式を利用できない場合は、冷媒を用いる冷凍冷却によりガスの脱湿を行う方式があるが、これには次の 2 通りの方式がある。

#### イ) 吸収冷凍方式

#### ロ) 圧縮冷凍方式

## iii) 装置の説明

### (1) 吸収法の利用

#### 1) グリコールデハイドレーター

この方法で用いられるエチレングリコールは、脱湿処理用として最も広く用いられている液状の脱湿剤で、分子構造の違いから、モノエチレングリコール（MEG）、ジエチレングリコール（DEG）およびトリエチレングリコール（TEG）の 3 種類がある。これらはいずれも水と共存して、その露点を数～数十℃の範囲で降下させる性質があるが、現在 TEG が圧倒的に多く使用されている。そ

表3.2.1 エチレングリコールの性状

	モノ・エチレングリコール MEG	ジ・エチレングリコール DEG	トリ・エチレングリコール TEG
分子式	$\text{HO C}_2\text{H}_4\text{OH}$	$\text{HO (C}_2\text{H}_4\text{O)}_2\text{H}$	$\text{HO (C}_2\text{H}_4\text{O)}_3\text{H}$
分子量	62.07	106.12	150.17
沸点@760mm Hg・°C	197.22	244.78	287.39
凝固点 °C	-13.0	-8.0	-7.22
臨界条件			
圧力 $\text{kg/cm}^2\text{a}$	78.4	47.6	33.7
温度 °C	372.0	408.0	442.2
密度 $\text{g/cm}^3$ @20°C	1.1120	1.1156	1.1216
比重 20°C/20°C	1.1155	1.1184	1.1254
比熱@15.6°C・kcal/kg・°C	0.552	0.535	0.492
熱伝導率 kcal/hr・m・°C	0.247	0.214	0.207
蒸発潜熱 kcal/kg@760mm Hg	191	129	99
粘度 cP@20°C	20.9	35.7	47.9
屈折率 Nd@20°C	1.4316	1.4472	1.4559
発火点 °C	116	143	166

の理由は、表3.2.1に示すとおり TEG の沸点が他のグリコールよりも高く、水の沸点との差がより大きくなるためである。これによりグリコールの蒸留に際して蒸発損失が少なくなる事に加え、グリコールを高純度で再生することが可能となり、大きな露点降下が得られる事となる。図3.2.21では TEG 濃度と露点降下の関係性を示す。当該図からわかるように TEG 濃度が数% 変化するだけで処理ガス後の露点が数十°C 変わってしまう。そのため、グリコール濃度を定期的に測定し、その濃度管理を行うことが製品ガスの品質管理上、重要となる。

図3.2.22にグリコールデハイドレーターのフロー例を、図3.2.22に設備構成例を示す。装置の構成は、吸収塔（コンタクター）、リボイラー（リジェネレーター）、スチルコラム、サージタンク、およびグリコールポンプより成るが、フラッシュタンクを設置する場合もある。

脱湿前のウェットな天然ガスは、吸収塔底部へ入り、天然ガスは底部から塔頂へ、グリコールは塔頂から底部へ

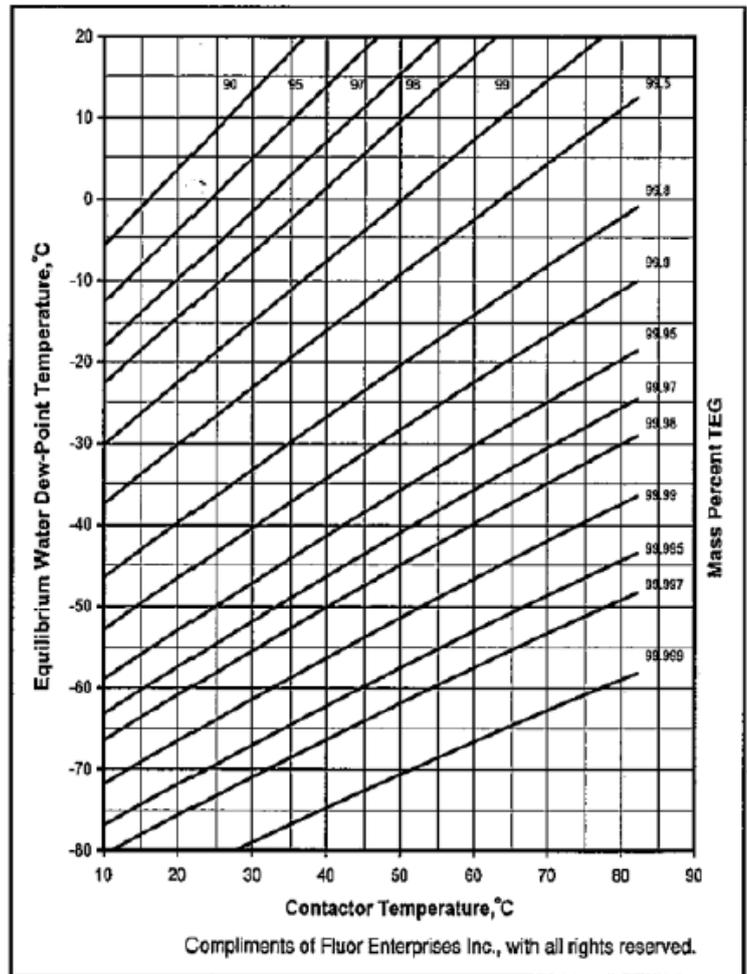


図3.2.21 TEG 濃度と露点との関係

出典:Engineering Data Book SI version Volume II Sections 20  
Gas Processors Suppliers Association

と流れ、天然ガスとグリコールが向流接触し、グリコールは天然ガス中の水分を吸収することで天然ガスが脱湿される。脱湿された天然ガスは吸収塔塔頂から出て次のプロセス或いはパイプラインへ送られる。吸収塔にて水蒸気を吸収したグリコールは、吸収塔底部から排出され、熱交換器、フラッシュタンクを通過して、リボイラーに入る。グリコールをリボイラーで加熱することで、グリコール中の水を蒸発させグリコール濃度を回復させる。リボイラーの運転温度（再生温度）は、処理するガスの脱湿程度およびグリコール濃度を勘案して 180℃～190℃の範囲に設定される。

グリコールの循環量は処理ガス量、水分および脱湿の程度から決められる。また、運転に伴ってドライガス中へのミスト同伴やリボイラーからの損失により、グリコールを補給する必要がある。リボイラーでグリコール濃度を回復したグリコールは、一旦サージタンクに貯えられた後、ポンプで吸収塔へ送られ再循環利用される。

TEG の場合、循環量は脱湿される水 1 kg 当たり 17～42 ℓ の範囲内で処理ガス量、水分および脱湿の程度を決められるが、通常、25 ℓ 位で十分であるとされている (3.0 gal/lb@H<sub>2</sub>O)。

運転に伴うグリコールの損失はドライガス中へのミスト同伴やリボイラーからの損失が考えられるが、最も大きな損失原因は、吸収塔やリボイラーの液面調節装置の不具合によるオーバーフローである。

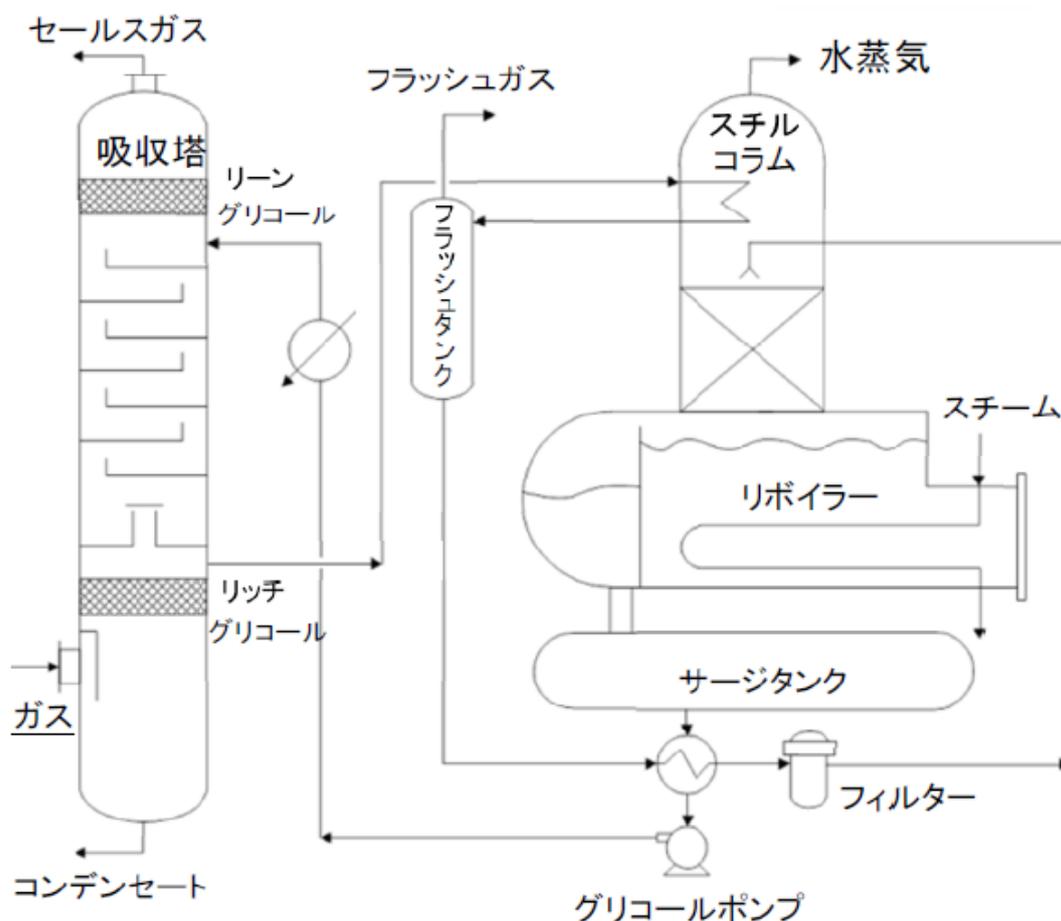


図 3. 2. 22 グリコールデハイドレーター フロー図

吸収塔には充填式とトレイ式の二つがあるが、図 3. 2. 23 にトレイ式の一例を示す。通常、トレイの気液接触効率は 25～35 %の間にあるので、トレイは数段より成りグリコールによるガスの脱湿が十分に行われるように配慮されている（図の例では 4 段）。

この装置は、比較的構成が簡単であり、脱湿剤であるグリコールが安価で取り扱い易く、運転管

理が容易である。また、広範な処理量(数万 $\text{m}^3/\text{日}$ ~数百万 $\text{m}^3/\text{日}$ )の装置の製作が可能のため、最も広く用いられている方法である。

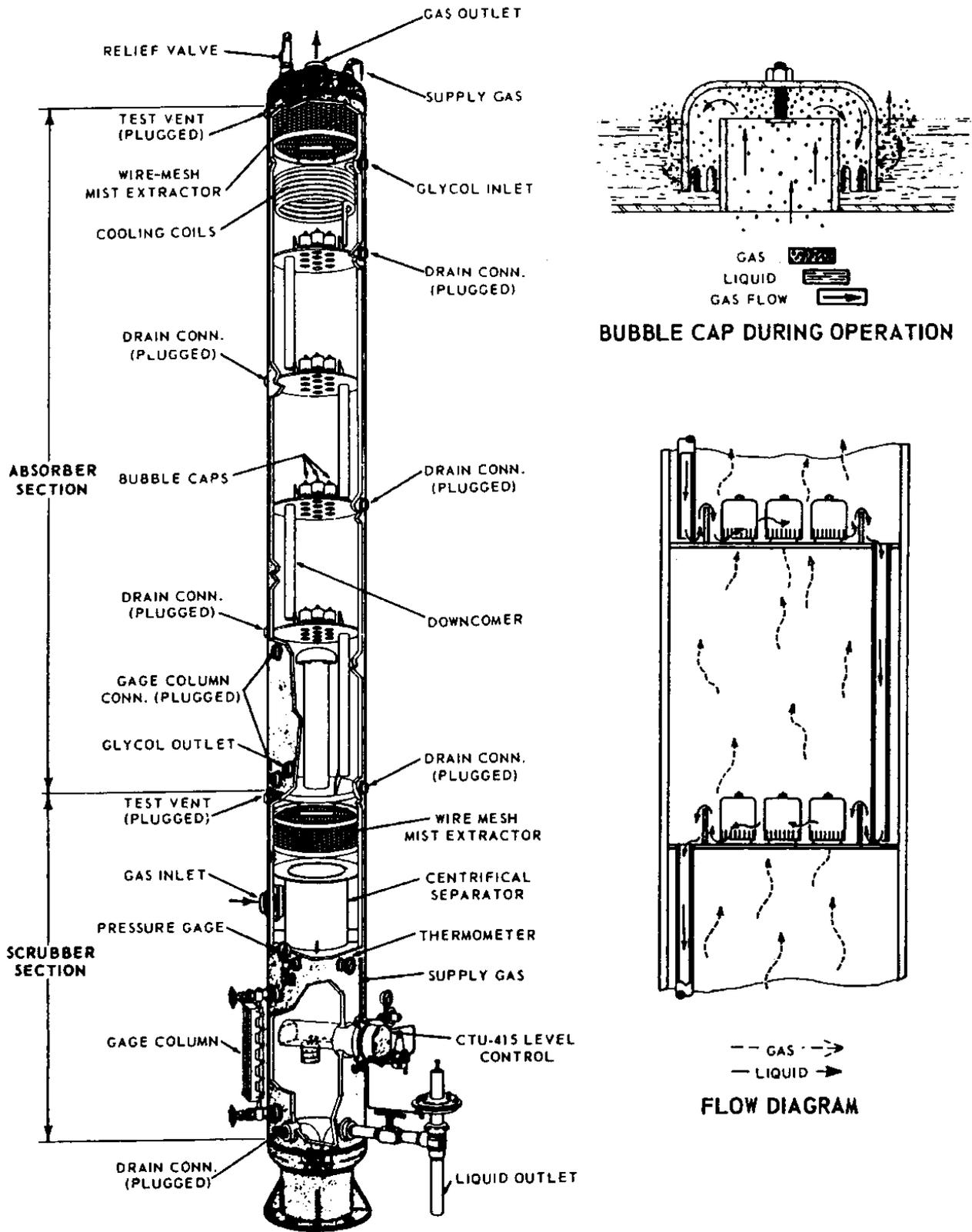


図3.2.23 吸収塔の構造

## 2) 塩化カルシウムデハイドレーター

固体塩化カルシウム ( $\text{CaCl}_2$ ) の吸水性を利用する方法で、用途はグリコールデハイドレーターの場合に比べて非常に限られており、比較的ドライなガスの脱湿のみに使用される。これは固体塩化カルシウムの表面が油で汚染されると、水と塩化カルシウムとの接触が妨げられることにより脱湿効果が著しく減少するからである。装置は単に吸収塔だけであり、構造は吸収塔上部が塩化カルシウム充填部、中間部がバブルキャップ (泡鐘)、底部がセパレーターよりなっている。

坑井からのガスは、塔底から入り塔上部の固体塩化カルシウムと接触するが、ガス中の水分の吸収により液体となって下のバブルキャップに流下する。そこで更にガスと向流接触してガス中の水分を吸収除去してから底部セパレーターに流下し自動排出される。

## (2) 吸着法の利用

吸着剤として使用するドライデシカント (乾燥脱湿剤) は、ガスの組成および処理目的により種々のものが用いられているが、主なものに活性炭、活性アルミナ、シリカゲルおよびモレキュラーシーブがある。この内、水分脱湿用としては活性アルミナおよびシリカゲルが一般的である。

吸着法の特色は、吸収法よりガス中の水分をより多く取り除くことが可能で、 $0.016 \text{ g/m}^3$ 以下とする (露点:  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 相当) ことも容易である。図 3.2.24 にフローダイアグラムの一例を示す。

ウェットガスは、まずインレットスクラバーで同伴する遊離液体分が除去されてから吸着塔に入り、中の吸着剤で脱湿されドライガスとなる。ドライガスは塔を出てセールスガスとしてパイプラインへ送られる。塔内の吸着剤は、次第に水分により飽和されるため、飽和点に達する前に塔を切り替えて、吸着剤を加熱ガスあるいはスチームで再生する必要がある。このため、ガスを連続して処理するには少なくとも2本の塔が必要であり、実際の運転ではこの切り替えは、あらかじめ定められたスケジュールにより、自動的に行われるようになっている。再生に加熱ガスを用いる場合には、図 3.2.24 の例のようにウェットガスを用いる方式とドライガス (セールスガス) を用いる方式の2通りがある。

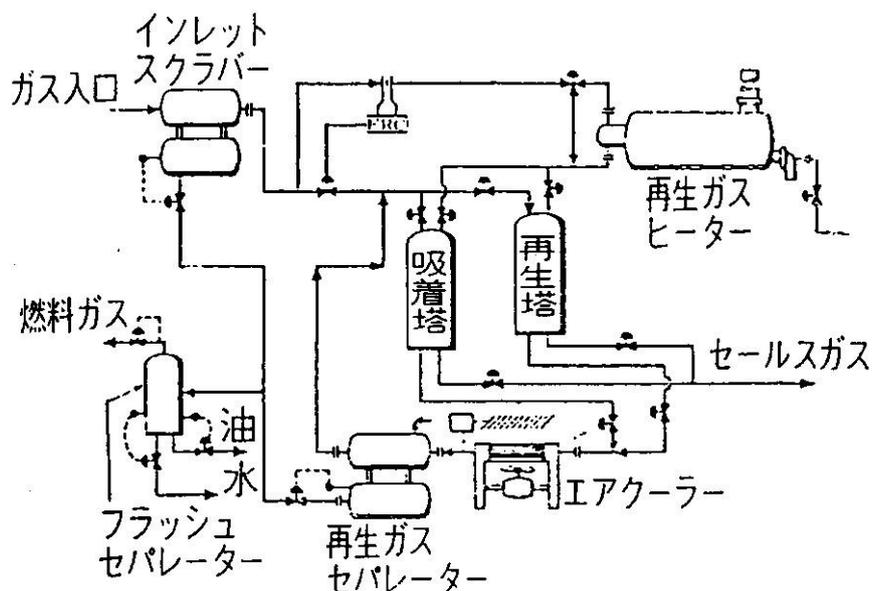


図3.2.24 ドライデシカントデハイドレーター

上記のごとく、吸着から再生・冷却を経て再び吸着に至るまでの過程をサイクルといい、サイクルおよび処理量等の違いにより2塔式、3塔式または4塔式のものもある。

運転条件としては、脱湿は常温、再生は吸着剤の種類により様でないが大体  $200 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 位の温度で行われる。運転圧力は、 $2 \sim 20 \text{ MPa}$ 位までを対象として数万～百数十万  $\text{m}^3/\text{日}$ の処理能力のものが実

用化されている。吸着剤は、運転に伴い次第に脱湿能力が低下してくるため 1~3 年ごとにメーカー等に送って完全な活性化を行う必要がある。

この方法は、水分の脱湿のみの目的で用いられることは少なく、天然ガソリンや LPG を同時に回収除去する場合に多く用いられる。

### (3) 低温分離法の利用

#### 1) 自己冷却方式

この方式は、装置の出入り口で十分な圧力差がとれる場合によく用いられるもので、特に高压ガス井の坑井元での処理に広く活用されている。これによる圧力降下と温度降下の関係を図 3.2.25 に示す。図から装置の入口出口の圧力差より ( $\Delta p$ : 圧力降下量)、温度降下の程度を容易に知ることができる。

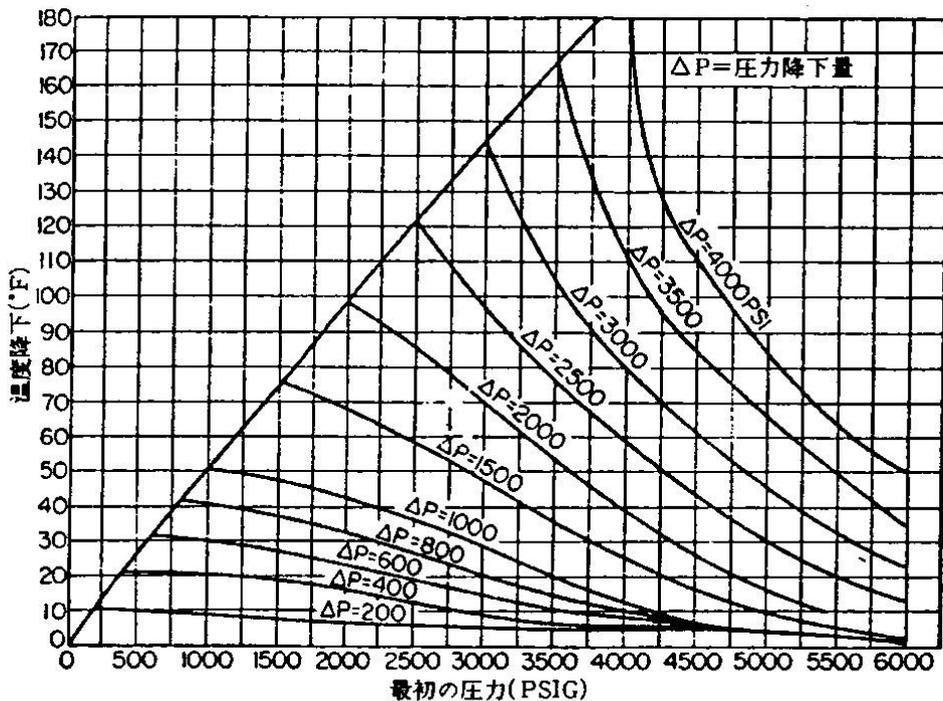


図3.2.25 圧力降下と温度降下の関係

#### イ) ハイドレート防止剤を用いない方法 (低温分離装置)

図 3.2.26 にフローダイアグラムの代表例を示す。

坑井からの液体(40~50 °C)は、低温セパレーター (Low Temperature Separator : LTS) 下部のコイルを通り、熱交換によって冷却され高压ノックアウトに達する。そこで遊離液体が除去された後、チョークを通過して LTS に入り、送ガス圧力まで断熱膨張して低温になり、ガス中から液体が凝縮分離され、ガスが脱湿される。脱湿後のガスは、熱交換器で多少加温され販売線に送られる。ノックアウトの温度は、温度調節計と 3 方弁により一定に保たれる。この装置は販売ガス圧力を 5 MPa とすれば、坑井液体の装置入口圧力が 15 MPa 以上にならなければ、販売ガスの水分は 0.1 g/m<sup>3</sup>以下にならない。このためには LTS の温度は-5 °C 以下でなければならない。運転に当たっては、LTS 入口の液体温度をできるだけハイドレート生成温度に近づけて、LTS 温度を可能な限り下げることが必要である。

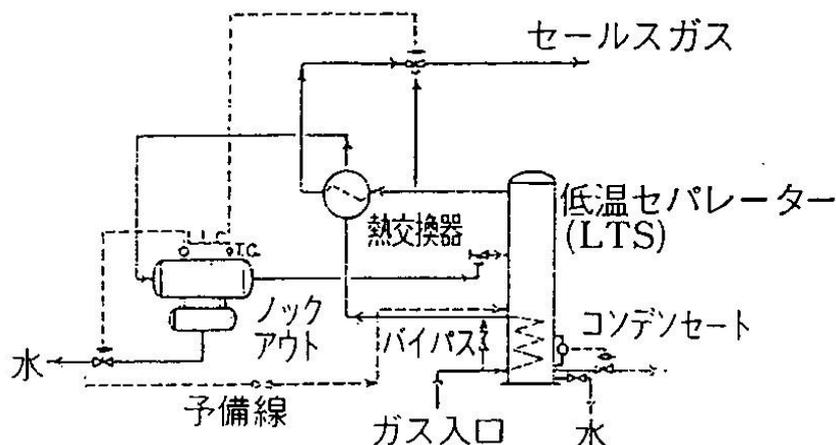


図3.2.26 低温分離装置（グリコール注入なし）

ロ) ハイドレート防止剤を用いる方法（グリコール注入式低温分離装置）

断熱膨張時に得られる低温下でのハイドレート生成防止のために、グリコール（DEG）注入を行う低温分離法である。このグリコールの作用によって装置出口ガスの露点は、低温セパレーター（LTS）の運転温度より数°C位低くすることができるが、グリコール注入および分離再生のための設備費が10～20%余分に必要である。これのフローダイアグラムを図3.2.27に示す。

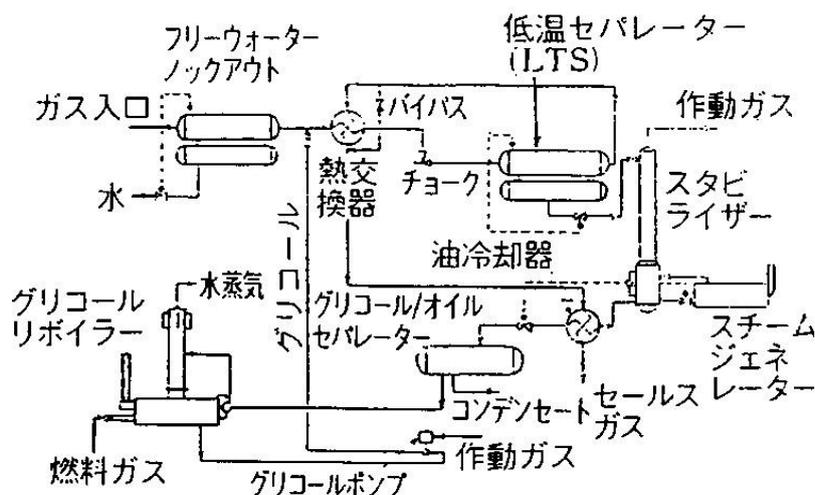


図3.2.27 グリコール注入式低温分離装置

坑井流体は最初にフリーウォーターノックアウトで同伴する液体（油・水）を分離される。次に熱交換器に入り、LTSからの低温ガスにより予冷される。最後にチョークを通過してLTSへ入る。LTSの圧力は送ガス圧力となっているため、ここで断熱膨張によって低温となりガス中より水分および一部の炭化水素（プロパン、ブタン、ペンタン）が凝縮分離される。このようにして脱湿されたガスは熱交換器を経てセールスガスとして送出される。この熱交換の際に坑井からの液体がハイドレート生成温度以下となるため、生成防止の目的で熱交換器の上流にグリコールが注入される。グリコールはLTSの凝縮液体と共にスタビライザーに入り、加熱されて軽質分（作動ガス）を分離した後にグリコール/オイルセパレーターへ送られる。ここで油分（コンデンセート）が分離され、グリコール水溶液だけがグリコールリボイラーに送られ再生循環される。

グリコールの氷点降下度は、MEGが最大で次いでDEG、TEGの順に小さくなっている。液化炭

化水素への溶解度も同様であり、この順序で油中への溶解損失が少なくなる。ここで使用されるグリコールは DEG が最も多いが、これは上述の特性の他、価格が比較的安く再生が容易なためである。リボイラー温度は約 120 °C に設定され、DEG の濃度が最も氷点降下度の大きい 50~80 wt% となるように運転される。循環量は、15 万 m<sup>3</sup>/日装置の場合約 57 l/時、消費量はガス量 1000 m<sup>3</sup> 当り 0.01 l 以下である。

2) 冷凍冷却方式

低温を得るために冷媒の蒸発潜熱による冷凍冷却効果を利用する方式で、吸収式と圧縮式の 2 通りがある。ここでは最も一般的なアンモニアを冷媒とする方式について説明する。

イ) アンモニア吸収冷凍方式

フローダイアグラムを図 3.2.28 に示す。これはアンモニアを冷媒としてアンモニアの蒸発潜熱を利用して冷却効果を用いる方式である。この装置は前述の LTS に低温源としての冷凍装置が付属したものと考えることができる。

冷凍装置は、スチルコラム、リボイラー、アンモニア溶液熱交換器、アブソーバー、コンデンサーおよびチラー等よりなっている。

坑井からの流体は熱交換器で予冷された後チラーに入り、冷却凝縮した液体分はコールドセパレーターで除去され、ガスが脱湿される。ここで分離されたガスおよび液体は坑井流体を熱交換器で予冷し、液体はスタビライザーで軽質分を分離してから貯油タンクに送られる。ガスは更に貯油タンクに入る油を冷却してから、セールスガスとしてパイプラインに送られる。

コンデンサーに貯えられる液体アンモニアはチラーのアンモニア用液面調節計の作動により自動的にチラーに送られ気化する。坑井流体はアンモニアが気化するに必要な蒸発熱を奪われて冷却される。チラーを出たアンモニア蒸気はアブソーバーに入り、スチルコラム底部からのアンモニア低濃度溶液に吸収されてからスチルコラムに送られ、リボイラーで加熱気化される。コラム頂部より出るアンモニア蒸気はコンデンサーで水冷され液体アンモニアとなって再びチラーへ送られる。チ

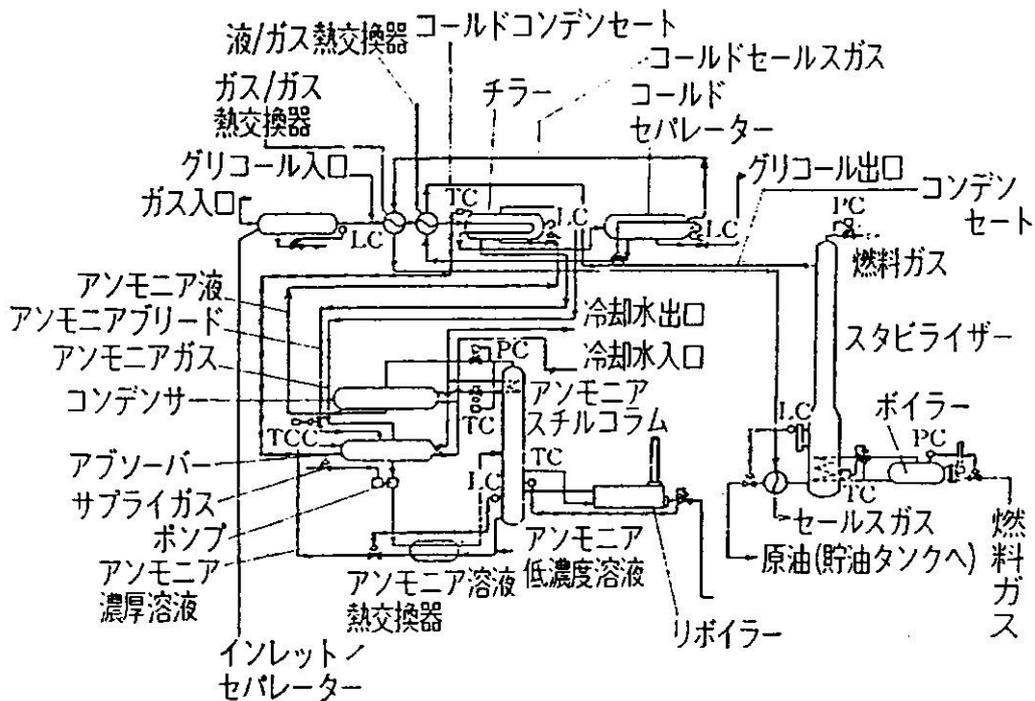


図3.2.28 アンモニア吸収冷凍方式低温分離装置

ラー温度の調節は液体アンモニアの循環量の増減によって行われ、量を増すほど低温となる。実際の調節はチラーに取り付けられた温度調節計によりアブソーバーからスチルコラムへのアンモニア溶液の増減（ポンプ吐出量の調整等）によって行われる。これによって-25℃くらいまでの低温分離が可能である。

ロ) アンモニア圧縮冷凍方式

フローダイアグラムを図 3.2.29 に示す。この方式はチラーからの冷媒蒸気を機械的に圧縮して凝縮液化するためにコンプレッサーを用いる方法である。冷媒には通常アンモニアおよびプロパンが用いられるが、フロン、ブタン等も使用されている。アンモニアは気化熱がプロパンの約 3.2 倍であるため、同じ冷凍能力でアンモニアの循環量がプロパンの 1/3 ですみ、それだけコンプレッサー容量を小型にすることができる。一方、凝縮液化に際しては、上記の気化熱相当分が凝縮熱として放出されるので、これの冷却除去が必要である。アンモニアの場合には水による冷却が必要のため冷却水設置を要するが、プロパンの場合は空冷式とすることができる。フロンには数種のものがあり、運転条件に合わせた選択が可能であるが高価なことが難点である。

上記の方式はいずれも-30℃以下の温度とすることが可能であるが、実用的には-25℃位が最低運転温度とされている。ブタンは-15℃位までの冷却に用いられる。

吸収冷凍、圧縮冷凍いずれの方式も、低温部でのハイドレート防止の目的で上流側にグリコール (MEG) またはメタノールの注入を行う必要がある。MEG 注入の場合は前述の通りであるが、メタノールの場合は回収再生が不可能であるため、以下のハマーシュミット (Hammerschmidt) の式によって決められる量を連続的に注入する必要がある。

$$d = 2335W / (100M - MW)$$

ここで d : メタノール注入によるハイドレートポイントの降下度[°F]

M : メタノールの分子量

W : 液相部分のメタノール濃度[wt%]

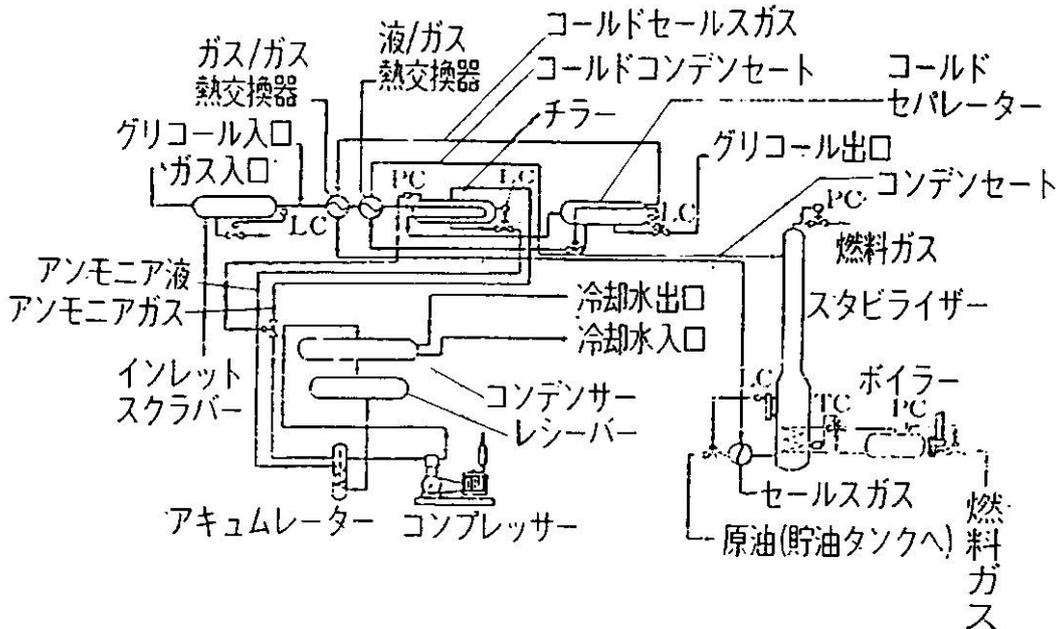


図3.2.29 アンモニア圧縮冷凍方式低温分離装置

### 2.3.3 脱酸性ガス処理

#### i) 脱酸性ガス処理の目的

天然ガス中には水分のほかに、硫化水素（ $\text{H}_2\text{S}$ ）、炭酸ガス（ $\text{CO}_2$ ）等の酸性ガスが含まれている場合がある。これらのガスは水と共存して採取処理装置やパイプライン等を腐食させたり、ユーザー側で使用する際に以下に示すような種々な障害を発生させるのでパイプラインで送るに前に酸性ガスを除去する必要がある。

- ① 硫化水素の毒性（硫化水素の濃度対危険度は図 A 参照）
- ② 燃焼時における炉内腐食
- ③ 燃焼排ガス中への亜硫酸ガス放出による大気汚染
- ④ 硫化水素、炭酸ガスによる触媒劣化
- ⑤ 炭酸ガスによる熱量低下

以上の障害を防止するために、酸性ガスの除去を行う一連の操作を脱酸処理（スィートニング）という。

濃度(ppm)	作用又は毒性
0.025	鋭敏な人は特有の臭気を感知できる
0.3	誰でも臭気を感知できる
3~5	不快に感じる中程度の強さの臭気
10	眼の粘膜が刺激される下限。
20~30	耐えられるが臭気の慣れで、それ以上の濃度に、その強さを感じなくなる。 肺を刺激する最低限界
100	2~15分で臭覚が鈍る。1時間で眼、気道の刺激 8~48時間の連続ばく露で死亡することあり。
170~300	気道粘膜の灼熱的な痛み。 1時間以内のばく露ならば、重篤な症状に至らない限界
700	短時間、過度の呼吸運動が現れた後、直ちに呼吸麻痺、窒息死
1000	昏倒、呼吸麻痺、窒息死

図 3.2.29a 硫化水素の濃度対危険度（出典：理研計器株式会社 HP）

米国において、ガスの需給関係会社間で一応の基準とされているセールスガス中の酸性ガス濃度は  $\text{CO}_2$  : 3 vol%以下、 $\text{H}_2\text{S}$  : 4 ppm 以下である。

#### ii) 脱酸性ガス処理の方法

脱酸性ガスの処理方法を大別すると次のようになる。

##### (1) 化学反応法

酸性ガスと溶剤との化学反応を利用して除去する方法

##### (2) 物理吸収法

酸性ガスと溶剤との物理吸収を利用して除去する方法

## (3) 物理化学吸収法

物理吸収および化学吸収併合型

## (4) 乾式固定床吸着法

酸性ガスと吸着剤との吸着作用を利用して除去する方法で、これは物理吸着型と化学吸着型がある。

## (5) 膜分離プロセス

酸性ガスと炭化水素透過速度の違いを利用して除去する方法

## iii) 処理方法の説明

## (1) 化学反応法の利用

アルカノールアミン法は天然ガスの脱酸処理において、今日まで最も広く用いられている方法で、酸性ガスとアルカノールアミン類との化学反応を利用し、種類によって色々と使い分けられている。

エタノールアミンは、原料ガス中の酸性ガス濃度いかにかわらず処理ガス中の酸性ガスの残留濃度を数 ppm 以下にすることができる。これには三種類（モノ：MEA、ジ：DEA、トリ：TEA）あるが、大部分に MEA が用いられており次いで DEA、TEA の順となっている。これらは同族のアミン類であるため性状も類似点が多いが、酸性ガスとの反応性、劣化または損耗の程度については MEA、DEA、TEA の順に小さくなる。特に MEA は原料ガス中に硫化カルボニル、二硫化炭素またはメルカプタンがある場合には、これらと反応して再生不能な化合物となるため、劣化損耗が最も大きい。このような原料ガスは天然ガスより精油所オフガス等に多いが、この処理には MEA よりも耐性のある DEA が用いられる。TEA は反応性が低いために近年用いられることが少なくなっている。

ジグリコールアミン（DGA）を用いる方法は、MEA および DEA に対抗するものとして、Flour Corp. (USA) によって開発されたもので、別名フロアエコノアミンプロセスといわれている。装置は基本的には MEA 法のものと同じでよく、MEA を DGA に替えてもほとんど支障なく運転できたという事例も報告されている。MEA 法との最も大きな相違点は、吸収溶液濃度であり、MEA 法が 15～30 wt% 水溶液である一方、DGA 法は 60 wt% 水溶液を用いる点である。これは DGA が MEA と比較して酸性ガスに対して極めて安定なため、その分だけ溶液濃度を高くすることができるため、溶液循環量を少なくできることが利点となっている。

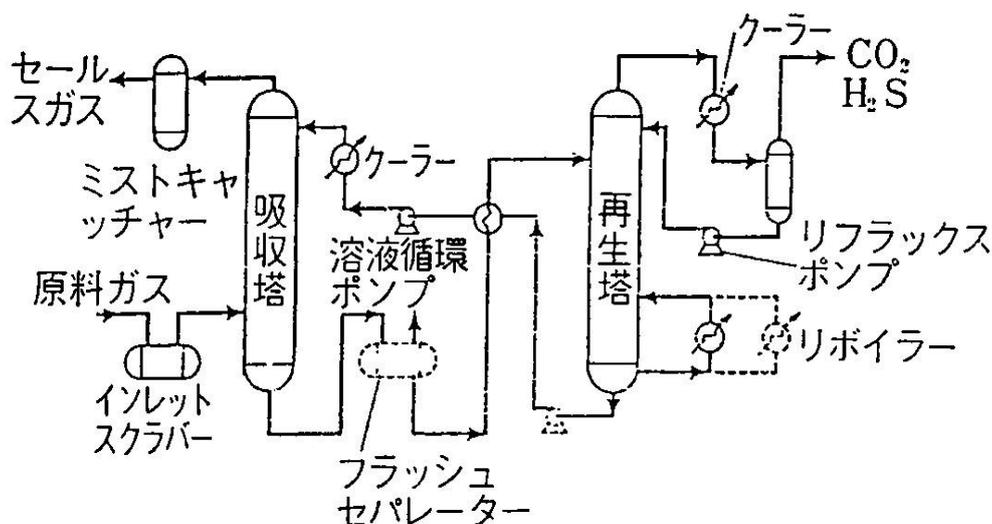


図3.2.30 化学反応による脱酸性ガス処理装置

ホットカーボネイト法は、炭酸カリウムの加熱溶液 ( $K_2CO_3$  20~40 wt%水溶液) によって酸性ガスを化学反応により吸収除去する方法である。用途としては、比較的高濃度の炭酸ガスを含むガスの処理に適している。硫化水素の他、硫化カルボニル (COS) や二硫化炭素 ( $CS_2$ ) の除去も可能であるが、これらの硫黄系酸性ガスは、炭酸ガスが多少でも存在しないとこの方法による吸収除去は不可能である。

実用化は、1930年代前半に米国鉱山局によりなされたが、熱炭酸カリウム溶液だけでは反応効率が低いため、販売ガス中の硫化水素の残留ガス濃度を基準値の 4 ppm 以下にすることが不可能なことで、装置鋼材に対する激しい腐食性故に、ほとんど採用されることがなかった。しかし、その後これらの欠点を改善すべく種々の反応促進剤や防食剤を添加する方法が考案され、添加剤の種類ごとに固有のプロセスが開発されてそれぞれに特許が認められている。代表的なプロセスとしてはカタカーブ、ペンフィールドおよびギアマルコーベトロコーク等がある。

図 3. 2. 30 に化学反応式のフローダイアグラムを示す。

### (2) 物理吸収法の利用

溶剤の酸性ガスに対する選択的な物理吸収作用を利用する方法で、化学反応の伴わない方法である。一般に一定体積の溶剤に吸収されるガスの量は、温度が低くガスの分圧 (濃度) が高い程多いため、吸収除去の程度は、溶剤と原料ガスとの接触温度が低く、圧力が高い程効果があがる。用いられる吸収剤の種類によって独自のプロセスが開発されているが、ほとんどの吸収剤が揮発性であり、天然ガス中の重質成分であるプロパン、ブタン等の炭化水素を溶解しやすい性質を有している。このため処理ガスの熱量低下や溶剤の蒸発損失を伴うことがこの方法の短所である。しかし長所として、常温での処理が可能で、溶剤再生は減圧のみで良く加熱もほとんど必要としないため運転費が極めて安くすむという利点がある。したがってこれらの処理方法の検討に当たっては、処理ガスの熱量低下と運転費軽減との比較の他、更に再生塔塔頂ガスからの重質炭化水素分の分離回収および有効利用に要する設備費等についての比較検討を行う必要がある。代表的なプロセスとしてはセレキゾル、カタソール、およびフロアソルベント法がある。以上により炭酸ガスは 1.5~0.1 vol%以下、硫化水素は 16~1 ppm 以下とすることができる。図 3. 2. 31 に物理吸収法のフローダイアグラムを示す。

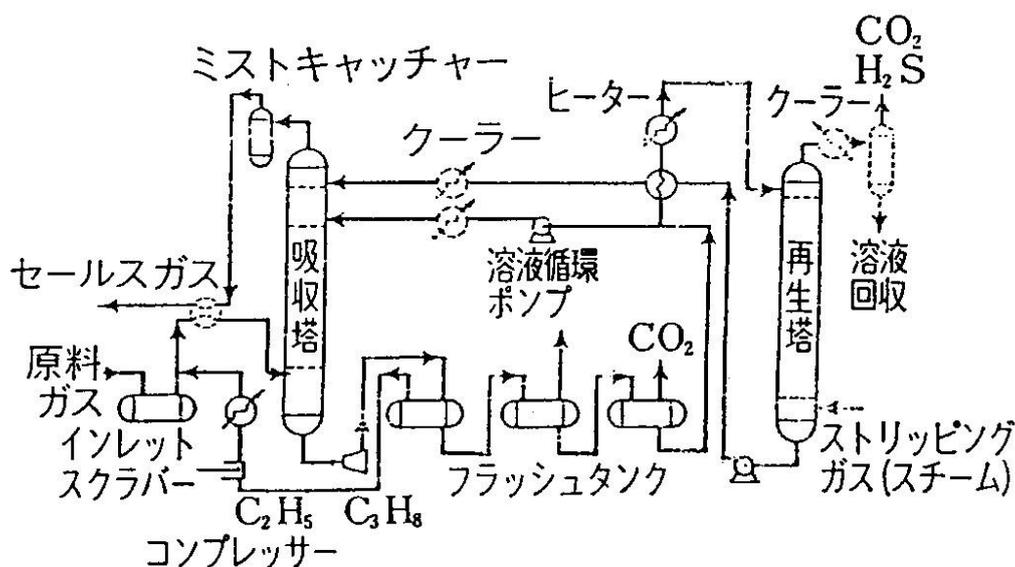


図3. 2. 31 物理吸収による脱酸性ガス処理装置

### (3) 物理化学吸収法の利用

吸収剤として物理吸収剤と化学吸収剤の混合溶液を用いる方法で、既に関連されている実績のある

プロセスには、サルフィノール法や BASF 社の a-MDEA 法がある。この方法の特長は、原料ガス中の酸性ガス濃度が 1~2 vol% から 90 vol% 以上ある場合でも、溶液循環量と再生熱がアミン方式より少ないために経済的な運転が可能であることである。この利点は原料ガス圧力が高くなる程大きくなるが、一方原料ガス中の重質炭化水素分が物理吸収剤に溶解除去されるため処理ガス熱量が低下するという短所がある。

炭酸ガスは数十 ppm 以下、硫化水素は 4 ppm 以下とすることが可能である。

装置は化学反応による脱酸性ガス処理装置 (図 3.2.31) とほぼ同様なものが用いられる。

#### (4) 乾式固定床吸着法の利用

乾燥した多孔質の固体 (吸着剤) で酸性ガスを選択的に吸着除去する方法で、化学反応を伴う化学吸着型と物理現象としての物理吸着型の 2 通りの方法がある。前者の一例がアイアンスポンジ (木クズ等に酸化第二鉄:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  を加えたもの) 法であり、後者の一例がモレキュラーシーブ法である。いずれの方法も、原料ガス中の酸性ガス濃度の上限は数 vol% までであって、それ以上の濃度の場合には、液体の吸収剤による方法が適している。

アイアンスポンジ法は硫黄系酸性ガスをアイアンスポンジ上の酸化第二鉄との化学反応により硫化第二鉄 ( $\text{Fe}_2\text{S}_3$ ) として除去する方法である。再生は加熱空気の吹き込みによって行われる。しかし、炭酸ガスと酸化第二鉄とは反応しないため、炭酸ガスの除去は不可能であるが、硫黄系酸性ガスの除去に関しては、モレキュラーシーブ法よりはるかに多く実績を有している。

モレキュラーシーブ法は、吸着除去あるいは回収したい成分の分子の大きさに相当する孔隙の吸着剤を用いて、分子 (モレキュラー) をふるい (シーブ) でふるい分けるように、目的とする成分を強い選択性で吸着分離する方法である。これは物理吸収を利用するものの中で最も進んでいると考えられる方法で、炭酸ガス、硫化水素共 4 ppm 以下とすることも容易である。モレキュラーシーブを 2 種類以上組み合わせることにより、脱酸脱湿処理を同時に行うことも可能である。

再生は加熱ガスの吹き込みによって行われる。この方法は、設備費および運転費が比較的高いため脱酸処理のみの目的で用いられることはまれである。厳寒地において、脱酸の他、脱湿もかなりの程度まで行う必要があつて、更に LPG 等の回収も合わせて行う場合に使用される。

モレキュラーシーブによる脱酸性ガス処理プロセスを図 3.2.32 に示した。

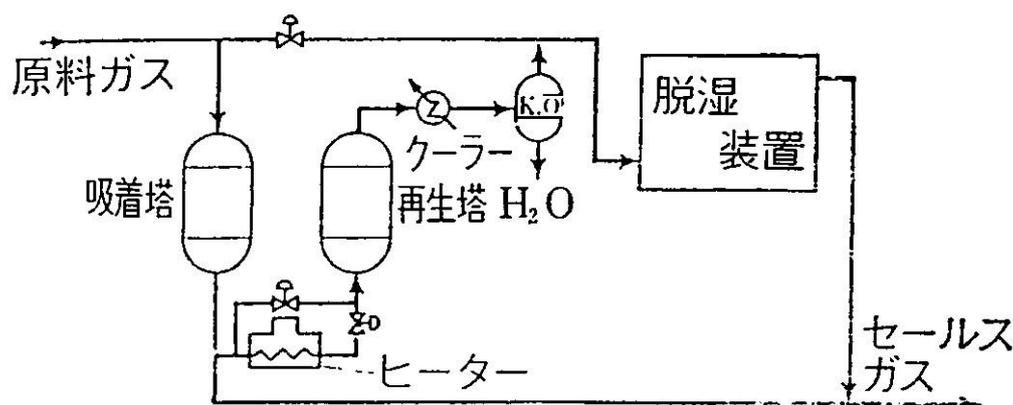


図3.2.32 モレキュラーシーブによる脱酸性ガス処理装置

#### (5) 膜分離プロセス

膜による気体分離に関する研究は、1970 年代から本格的に開始され、1980 年代初めに、Monsanto 社により PRISM セパレーターと呼ばれる水素分離膜が実用化されて以来、酸素分離、 $\text{CO}_2$  分離、水

蒸気分離、ヘリウム分離などの分野で実用化が進んできている。

膜はその製造元によっても異なるが、大体30~500ミクロン程度の直径の毛細管を持つ様々なタイプのポリマーから出来ている。その分離の原理は、以下に示すような、それぞれの成分が膜を通過する速度の違いを利用している。

速い： $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{He}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$

中間： $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$

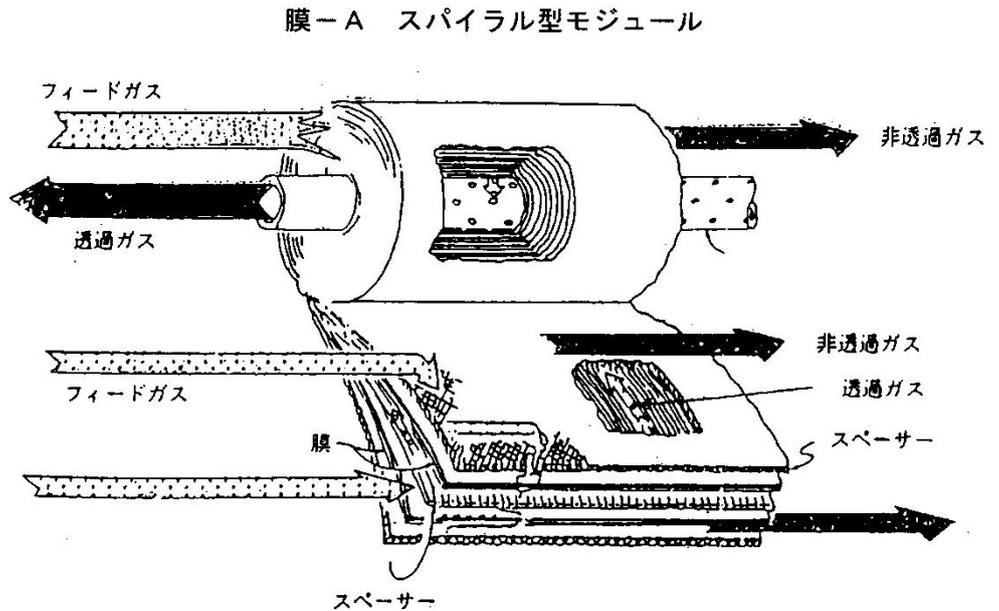
遅い： $\text{Ar}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CH}_4$

したがって、水素とメタンなどのように、膜を通過する速度の違いが大きい組み合わせ程、膜による分離が行いやすい。これら  $\text{CO}_2$  分離に使用される膜は、各社共にその材料や構造に工夫を施している。膜の材料としては、酢酸セルロース、ポリスルホン、ポリイミドなどが用いられている。

スパイラル型は、膜と布、プラスチックの支持体を重ね合わせて、円柱状に巻かれた形状をしている。製膜が容易で耐圧性に優れているものの、凝縮液による閉塞を招き易いとも言われている。

中空糸型は、細い中空糸を何万本も束ね、圧力容器に収めた形状を持つ。単位容積当たりの膜表面積が大きく装置の小型化ができるが、透過側の圧力損失が大きいとの欠点を持つ。

スパイラル型、中空糸型それぞれの構造を図3.2.33に示す。



**膜-B 中空糸型モジュール**

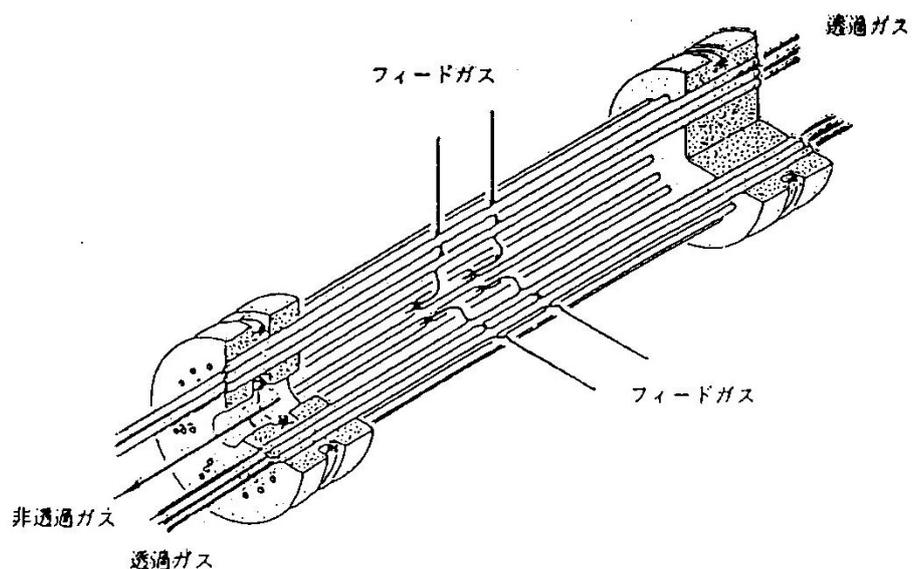


図3.2.33 スパイラル型モジュール，中空糸型モジュール

## 2.3.4 その他の成分分離

脱湿処理によりガス中の水分が除去される際、 $C_3H_8$ （プロパン）、 $C_4H_{10}$ （ブタン）といった更に重質な成分も、吸収剤、吸着剤あるいは冷却効果によって一部除去される。これらの重質成分は、吸収剤および吸着剤の再生時に分離されるが、これを低温下で回収し、LPG（Liquefied Petroleum Gas）あるいは天然ガソリン（粗製揮発油）として販売することにより、利益を上げることができる。

このように、脱湿から LPG および天然ガソリンの回収までを一貫して行う施設を NGPP（Natural Gas Processing Plant）といい、基本的には、脱湿処理と蒸留装置が結合しているものである。図 3.2.34 にその一例を示す。

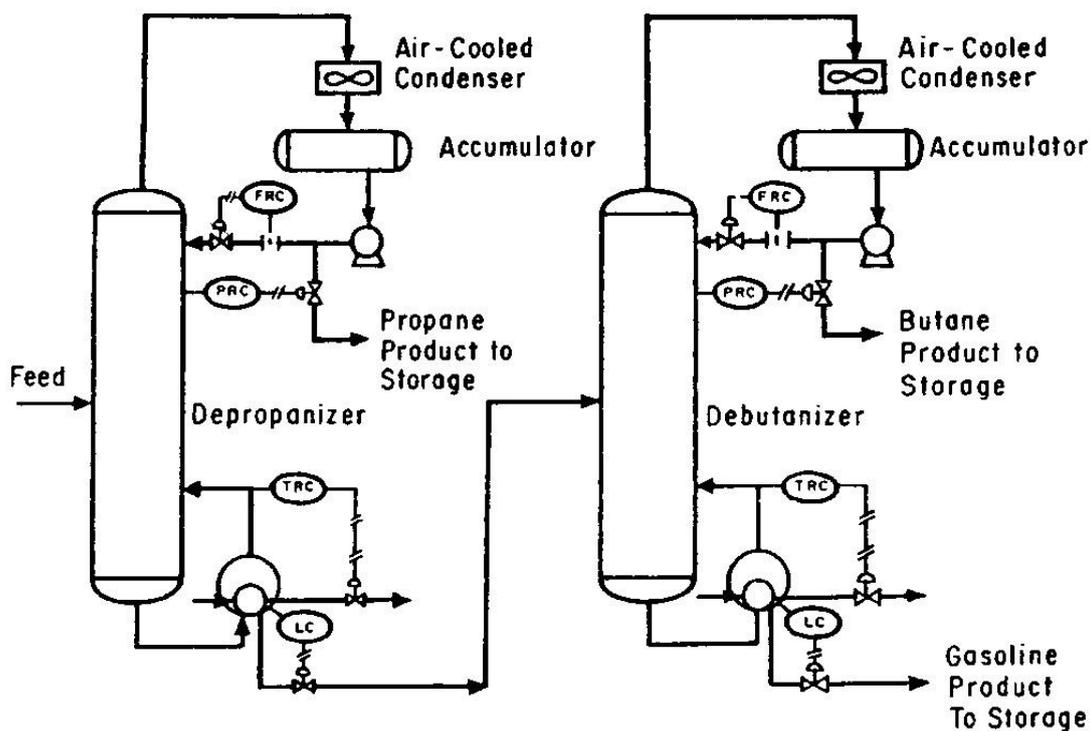


図3.2.34 LPG回収装置の一例

蒸気圧が調整され、スタビライザー底部から出た液体は、図 3.2.34 のフィードとして、最初に脱プロパン塔（Depropanizer：段数 30～40 段）に供給され蒸留される。そして塔頂部からはプロパンを主成分としたガスが分離し、冷却液化を経てストレージタンクへ送られる。一方、底部からの液体は、更にブタン分を回収するため、脱ブタン塔（Debutanizer：段数 30～40 段）へ送られる。

そして塔頂部からは、ブタンを主成分としたガスが、底部からはいわゆる天然ガソリンが分離回収され、それぞれのストレージタンクへ送られて出荷まで貯えられる。

得られた LPG は、製品規格に合致するように操作運転あるいは混合されて出荷される。天然ガソリンについても同様で、調整の指針として温度  $100^{\circ}F$  ( $37.8^{\circ}C$ ) の蒸気圧（RVP：Reid Vapor Pressure：JIS K 2258）が用いられている。

表 3.2.2 に  $C_1$ ～ $C_{10}$  までの炭化水素の性状を、図 3.2.35 には、炭化水素の蒸気圧を示す。

表3.2.2 炭化水素の物理的性質

Hydrocarbon	Symbol	Liquid Specific Gravity @60 F	Gas Specific Gravity	Boiling Point@ 14.7psia F	Vapor Pressure @100 F psia	Critical Temp. F	Critical Pressure Psia
Methane	C <sub>1</sub>	0.30	0.55	-259	5,000	-117	668
Ethane	C <sub>2</sub>	0.36	1.04	-127	800	90	708
Propane	C <sub>3</sub>	0.51	1.52	-44	190	206	616
Iso-butane	i C <sub>4</sub>	0.56	2.01	11	72	275	529
Normal Butane	n C <sub>4</sub>	0.58	2.01	31	52	306	551
Isopentane	i C <sub>5</sub>	0.62	2.49	82	20	369	490
Normal Pentane	n C <sub>5</sub>	0.63	2.49	97	16	386	489
Hexane	C <sub>6</sub>	0.66	2.97	156	5.0	454	437
Heptane	C <sub>7</sub>	0.69	3.46	209	1.6	513	397
Octane	C <sub>8</sub>	0.71	3.94	258	5.0	564	361
Nonane	C <sub>9</sub>	0.72	4.43	303	0.2	611	332
Decane	C <sub>10</sub>	0.73	4.91	345	0.1	652	304

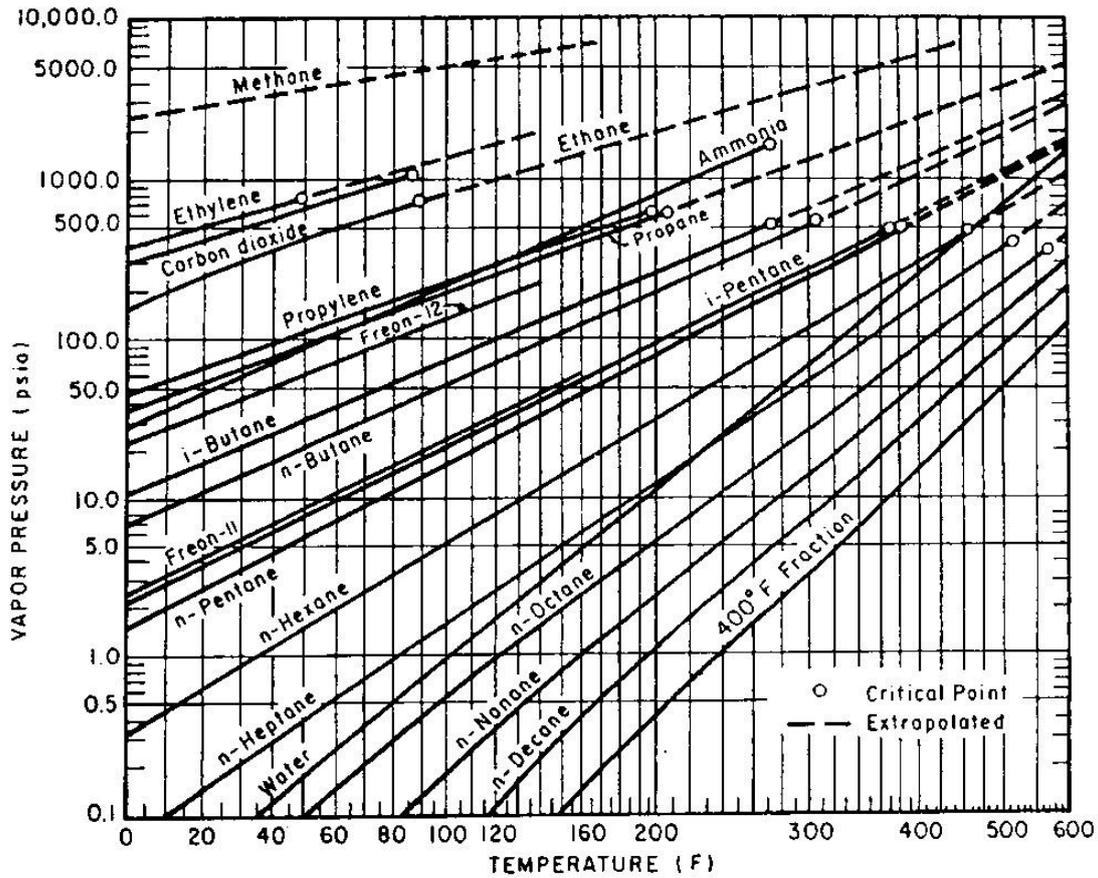


図3.2.35 炭化水素の蒸気圧

## 2.4 排水処理

### i) 排水の種類

油ガス田の生産活動に伴い排出される排水は、一般に油ガス田の衰退による含水率の上昇、水攻法や化学攻法の適用に伴い、量の増加および水質の変化が起こる。油ガス田排水は、無油排水系と含油排水系とに大別できるが処理量の多いこと、処理方法の難しさから、特に下記種類の含油排水系の処理が重要である。

#### (1) 含油水

フリーウォーターノックアウト、各種セパレーター、静置タンク、廃水ピットおよびエマルジョン処理設備から排出される含油水。

#### (2) 雑含油水

貯油槽清掃、ポンプおよび流量計等の点検補修時、および配管系の改造、補修工事に伴う雑含油水。

#### (3) 雑油雨水

坑井元、防油堤内敷地および各種生産設備からの漏油を伴う雨水。

### ii) 含油排水の処理上の問題点

含油排水は通常遊離性油、水中油滴型エマルジョン状態の油滴、各種無機塩類および泥砂等の固形粒子を含有しているため、廃棄する際には鉱害を起さないよう処理しなければならない。

#### (1) 処理上問題となる特性

含油排水の大部分は油ガス田水でありその性状は地域、産出層によって異なっている。一般的にもpH5.3~7.4程度、無機塩類（主として塩化ナトリウム）濃度は数×10<sup>-4</sup>~数%と広範囲にわたっており、また産出量、含油量、エマルジョンの性質および量、泥砂の含有量等が異なるため、その地域の法的規制措置を含め、実情に応じた処理方法をとらなければならない。

#### (2) 設備管理上の問題

排水中に含まれる各種無機塩類によるスケールの発生、硫酸還元バクテリアの硫酸塩還元時の硫化水素の発生に伴う腐食対策が必要である。

### iii) 排出基準

我が国における油ガス田排水の公共水域への排出基準は、鉱山保安法および水質汚濁防止法に基づく省令および府令に定められている。また国で定めた基準の他、地方条例または特定地域の実情に応じて地方自治体の規制または指導がある。油ガス田排水に関連の深い排出基準を表3.2.3に示す。

表 3.2.3 排出基準

適用を受ける排水の基準	排水基準を定める省令（昭和46年総理府令及び附則） 排出量 50 m <sup>3</sup> /日以上	A地区の条例 排出量に関わらず適用
pH	海域 5.0~9.0 海域以外 5.8~8.6	海域 5.0~9.0 海域以外 5.8~8.6
ノルマルヘキサン抽出物質含油量（鉱油類含有量）	5 mg/l	5 mg/l
浮遊物質（SS）	200 mg/l（日間平均 150）	日間平均 70 mg/l
化学的酸素要求量（COD）	160 mg/l（日間平均 120）	日間平均 30 mg/l
生物化学的酸素要求量（BOD）	160 mg/l（日間平均 120）	日間平均 30 mg/l

## iv) 排水処理プロセス

通常油ガス田排水は廃水ピットに集められる。廃水ピットの容量は、油分や懸濁粒子が浮上または沈降するに十分な滞留時間をとれる大きさでなければならない。一般に分離効果を高めるため、ピットを 2~3 室に区切り順次サイフォン管で連結し、多段分離を行っている。しかし、この処理操作では、排水を公共水域に排出するに必要な法的許容値までは処理することは難しい。このため処理した排水は、浸透性が良くかつ利水層を汚染しない地層に地下圧入するか、別に水処理装置を設けて排出基準に適合した水質として放流するか、適当な水質に処理して水攻法圧入水として利用する等の必要がある。

排水処理プロセスにおける基本的な単位操作には、沈降もしくは浮上分離、凝集、ろ過、吸着、スラッジ分の脱水および廃棄等がある。処理プロセスの選定には処理対象排水の性状、目標水質、規模、運転維持管理の難易度および経済性等を考慮し、上記方法を組みあわせることが必要である。

## (1) 沈降分離

沈降分離は排水中に浮遊する粒子の密度が水より大きい場合に行なわれる分離操作であり、水より小さい場合が浮上分離である。

単一粒子が重力の作用で沈降する場合、初期速度は重力により加速されるが、速度の 2 乗に比例する抵抗力が重力とは逆方向に作用するため、粒子に作用する重力と抵抗力はある時点からは等しくなりそれ以降は一定速度で沈降する。排水処理で扱う粒子の沈降速度は一般に次のストークスの式で表される。

$$v = g (\rho_s - \rho_l) \frac{D^2}{18\mu}$$

ここで  $v$  : 沈降速度 [m/s]

$g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$\rho_s, \rho_l$  : 粒子および排水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$D$  : 粒子径 [m]

$\mu$  : 排水の粘度 [kg/m・s または Pa・s]

実際の排水処理では粒子群として取り扱わなければならない、しかも各々の粒子は大きさ、形状、密度が異なるため実用上は沈降度分布を直接測定するのがよい。

## (2) 浮上分離

浮上分離の代表例として油水分離がある。

## 1) API オイルセパレーター

浮上分離装置の代表的なものである。含油水は長方形の水槽に導入され、層流で流れている間に水中の遊離性油滴が浮上分離する原理を応用した型式である。本装置では油滴径が 150  $\mu\text{m}$  までの分離を目的としている。

## 2) PPI (Parallel Plate Interceptor) オイルセパレーター

本装置はシェル社で開発された傾斜板式のオイルセパレーターで、傾斜板間隔 100 mm、傾斜角 45 度の平板が槽内に設置されている。油滴径 60  $\mu\text{m}$  までの分離ができるとされている。

## 3) CPI (Corrugated Plate Interceptor) オイルセパレーター

本装置もシェル社で開発されたもので、PPI 式と同じく傾斜板式であるが、波状の傾斜板を用いてあるほか板間隔を 20~40 mm としてあるため、単位面積当りの分離面積が大きく、油滴径 60  $\mu\text{m}$  までの分離ができるとされている。

### (3) 凝集分離

含油水中に浮遊する粒子径が小さくなるに従い、重力による分離だけでは時間がかかりすぎるため、薬品を注入して粒子を凝集させ粗大粒子（フロック）として、分離処理する方法である。粒子径が 10  $\mu\text{m}$  ~1  $\mu\text{m}$  程度の液は、固形粒子が浮遊している場合懸濁液、液体粒子が浮遊している場合乳濁液といわれるが、粒子径が更に小さくなるとコロイド溶液となり、更に 1  $\text{nm}$  を超えると溶液となる。凝集の対象となるのは、1  $\mu\text{m}$ ~1  $\text{nm}$  のコロイド粒子が主である。コロイド粒子はブラウン運動と粒子表面が一般に負電荷を持ち互いに反発しあうことで安定な分散状態にあり、沈降も浮上もしない。この分散系の中に反対の電荷を持つ薬品を添加することで、粒子表面の電荷を中和すると、粒子間のファンデルワールス力が支配的となり、粒子が凝集する。この目的で使用される薬品が凝集剤で、無機凝集剤と有機凝集剤とに分けられる。含油水の処理では、一般に塩基性塩化アルミニウム（PAC）、硫酸アルミニウム（硫酸バンド）等の無機凝集剤が用いられている他、各種有機凝集剤も用いられている。

#### 1) 凝集沈殿法

凝集沈殿法は水処理において重要な分離方法であり、原排水と適正な凝集剤の混合、粗大粒子の成長、および分離の三要素からなる。

#### 2) 加圧浮上分離法

浮遊粒子に気泡を付着させ比重を軽くし、強制的に浮上分離する方法である。エマルジョンの分離等には凝集剤を添加し粗大粒子として分離している。凝集沈殿法と比較して、(ア)浮上速度は沈降速度より数倍速い、(イ)汚泥の含有率が低い、等長所があるが、(a)所要動力が大きい、(b)運転管理が難しい、(c)処理水の濁度がやや高い等の欠点がある。

### (4) ろ過分離

上記で述べた処理で除去できなかった残留浮遊物を、ろ材層を通して分離する方法である。各種ろ過装置があるが、ろ過抵抗や速度を大きくとれる圧力式急速濾過装置が多く用いられている。ろ材としてはアンストラサイト（上層）と細砂（下層）が用いられている。本装置で浮遊固形分は 5 ppm 以下に落すことができるが、凝集性のないコロイド粒子にはほとんど効果がない。微量油分を含む有機物の除去には活性炭吸着法が有効で、処理原水の水質変動に安定で、良好な水質が得られる。

### 3 計量

天然ガスの計量では、流量計にて通過状態あるいは体積を測定し、圧力・温度などの状態変化を同時に測定し各補正を加えて求める。これらの測定には、機械式センサーあるいは電子式センサーなど多くの種類が用いられ、次のような測定方法がある。

- ① 差圧式（オリフィス板等）による方法
- ② 容積式による方法
- ③ 渦式による方法

原油および水でも天然ガス同様に計量はできるものの、これらは流量計で計量する以外にタンクなどの容器に貯蔵して、液位の増減量を次の方法で測定し計量することが一般的に用いられる。

- ① 圧力による液位測定
- ② 浮子による液位測定

その他の計量として、せき・タービン・超音波など流体別・用途別に各種の流量計が存在しており、運転条件・目的・コストなどにより適正な計量方法が選定される。

#### 3.1 流量計による計量

流量計の測定では、気体・液体どちらの計量にも使われるものが多いが、JIS M 8010 天然ガス計量方法には次の表のように分類されている。

表3.3.1 計量方法の種類

計量方法	計量方法の原理	備考
オリフィス流量計による方法	オリフィスをガスの流れている管路内に取り付けた場合に、オリフィスの上流側と下流側との間に生じる差圧は、管路内の流量と一義的な関係があるので、差圧を測定して流量を求める。	管路の直径50～1,000mmの円形管路内を流れるガスの流量を、オリフィスを用いて測定する方法について規定する。 オリフィスは、次のとおりである。 (1) コーナータップオリフィス (2) $D \cdot \frac{D}{2}$ タップオリフィス (3) フランジタップオリフィス
容積流量計による方法	一定容積の袋又は回転子室にガスを満たし運動子の作動とともに流出口の方へ送り出し、その回数を指示機構に伝えて、通過するガスの流量を求める。	測定するガスの流量範囲は、容積流量計の検定又は校正試験で定められた計量可能な範囲に適合しなければならない。 容積流量計は、次のとおりである。 (1) 実測乾式ガスメーター (膜式ガスメーター、回転子式ガスメーター) (2) 実測湿式ガスメーター
渦流量計による方法	管路に柱状の渦発生体を取り付けて、カルマン渦を発生させ、その渦の発生数を測定してガスの流量を求める。	算出の適用範囲は、流量特性において直線性の定義された流量範囲でなければならない。この範囲は、流量又はレイノルズ数によって表される。

更に JIS Z 8762-1～-4 には円形管路の絞り機構による流量測定方法が、JIS Z 8766 には渦流量計による流量測定方法が記載され、それぞれの規格を満足しなければならない。

##### 3.1.1 差圧式による方法

配管の途中にオリフィス板・ノズル・ベンチュリ管を取付けて、その前後の圧力差の平方根が流量に比例する原理を利用したもので、流量はベルヌーイの定理および連続の式により求められる。

$$Q = \alpha F \sqrt{2 \frac{g}{\gamma} (p_1 - p_2)}$$

- Q : 流量[m<sup>3</sup>/s]  
 α : 流量係数  
 F : 最小断面積[m<sup>2</sup>]  
 g : 重力の加速度[m/s<sup>2</sup>]  
 γ : 流体の比重量[N/m<sup>3</sup>]  
 (p<sub>1</sub>-p<sub>2</sub>) : 差圧[Pa]

オリフィスで気体を測定する場合は、導圧管内および配管内に液体が存在しないように注意する必要がある。逆に液体を測定する場合は、気泡のたまりがないように配管および導圧管や取出し口に注意する必要がある。

オリフィス流量計の構成は次のとおりである。

- ① オリフィス板（絞り機構）
- ② 直管部（計量に必要な上下流の同一口径配管）
- ③ 導圧管（オリフィス板上下流の圧力取出し用配管）
- ④ 測定器（圧力計・差圧計・温度計）および積算器

#### i) オリフィス板

図 3.3.1 にオリフィス板の形状を示す。オリフィス板はノズルやベンチュリ管に比べて圧力損失が大きく、他の絞り機構に比べて流量係数が小さい点が欠点といえるかも知れない。しかし、形状が簡単で製作が容易であるために広く用いられている。

オリフィス板を用いたときの圧力取出し口の位置、つまり差圧の取出し方式にはいろいろの方式があり、以下のとおりである。

##### (1) フランジタップ

上流側の圧力取出し口はオリフィス板の上流側の面から、下流側の圧力取出し口はオリフィス板の下流側の面から、それぞれ 25.4 mm のところに設ける。図 3.3.1 に取付け例を示す。

##### (2) コーナータップ

オリフィス板の直前、直後から圧力を取出す方式である。

##### (3) (D・D/2)タップ

上流側の圧力取出し口は、オリフィス板の上流側の面から 1D (D = 管内径)、下流側の圧力取出し口は 0.5D のところに設ける。

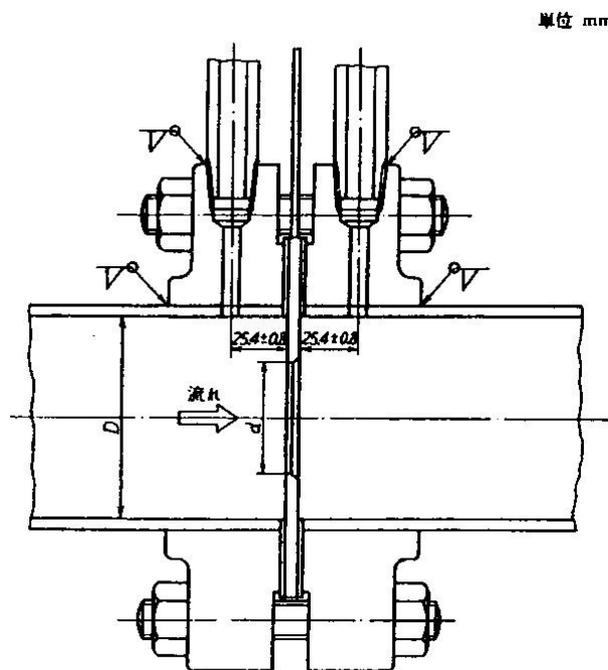


図3.3.1 フランジタップ取付の一例

#### ii) 直管部

直管部はオリフィス板の上流側および下流側共に円管で十分な長さの直管の部分が必要とする。これらは管路の状況により必要直管の長さが規定されている。規定の直管が配管の都合でとれない場合は上流側に整流バーンを用いても良いとされている。これの製作取付け位置についても細部にわたり

規定されている。

### iii) 導圧管

導圧管については凝縮物によって圧力伝達に支障を生じないように配管すること。この場合 1/10 以上の傾斜をもたせ導圧管の最低部にドレン抜き取りを付けると良い。また、周囲の温度影響を受けないように配管することが望ましい。

### iv) 測定器

オリフィス計量で測定する項目は、オリフィス板前後の圧力（差圧）・静圧・温度である。これらはそれぞれの測定用の機器を使い計測されるが、機械式の差圧計や自記式の温度計、もしくは電子式の差圧、圧力、温度伝送器が使用される。

機械式であるダイヤフラム式差圧計の原理はダイヤフラムによって隔てられた二室の一方を高圧側、他方を低圧側に導き、両者の差圧によるダイヤフラムの変位で指針を駆動する方式の差圧計である。差圧は直接機械的変位に変換される。指針駆動源の変位が十分大きくなるように多数のダイヤフラムを縦続接続した独特のエレメントを用い、この変位を指針に導く駆動機構は極めて摩擦の少ない構造に作られている。

差圧を変位する機構は図 3.3.2 の通りである。

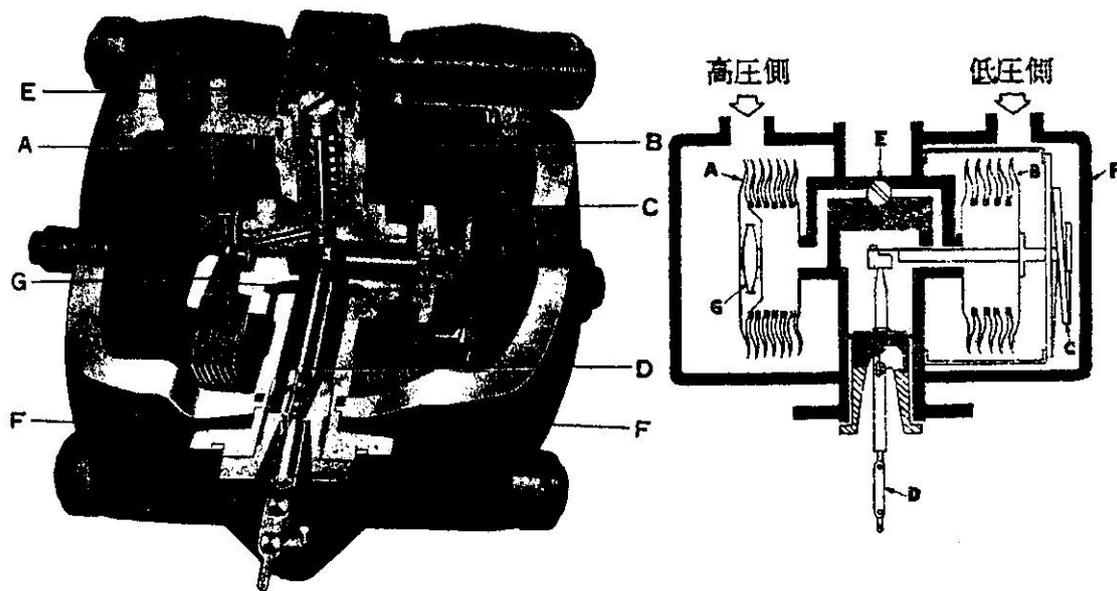


図3.3.2

この図で、

- A：高圧側ダイヤフラム
- B：低圧側ダイヤフラム
- C：レンジスプリング
- D：指針駆動軸
- E：制動率調整ねじ
- F：本体カバー
- G：温度補償装置

である。

自記式の測定器では、変位をペンの動きに伝えて、記録紙に差圧、静圧、温度が記録される。記録紙は時間の経過と共に回転し、一周 24 時間で表示される。

電子式の差圧・圧力伝送器では圧力検出素子を用いて、温度伝送器では測温抵抗体を用いて、測定された差圧、圧力、温度のデータが電気信号 (4-20 mA DC) に変換され、計装パネルに伝送した後、演算器やプロセス制御コンピューターで自動的に演算され流量が求められる。

現在では、電子式伝送器による計量が主流となっているが、作業停電や電子機器の点検修理作業時は、機械式差圧計と自記式温度計をバックアップとして並列に設置することで計量を継続できる。また、計装システムが整備されていない坑井掘削直後のテスト生産における計量でも、機械式差圧計や自記式温度計が使われる。

#### v) ガスの性質

ガスを計量する場合、以下のようなガスの性質が計量値に影響を及ぼす。

- (1) 比重
- (2) 粘度
- (3) 圧縮係数
- (4) 湿度

これらに対する補正について以下に述べる。

##### (1) 比重

ガスの比重 (湿分も含む) はガス成分の分析値および湿度の値を用いて計算するか、比重計により実測する。

##### (2) 粘度

ガスの粘度は実測によるか、図 3.3.3 の数値を用いて流動温度、標準圧力における粘度を求める。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i x_i \sqrt{M_i}}{\sum_{i=1}^n x_i \sqrt{M_i}}$$

ここに、

$\eta$  : 流動温度、標準圧力におけるガスの粘度 [cP]

$\eta_i$  : 流動温度、標準圧力におけるガス成分 i の粘度 [cP]

$x_i$  : ガスの成分 i のモル分率

$M_i$  : ガスの成分 i の分子量

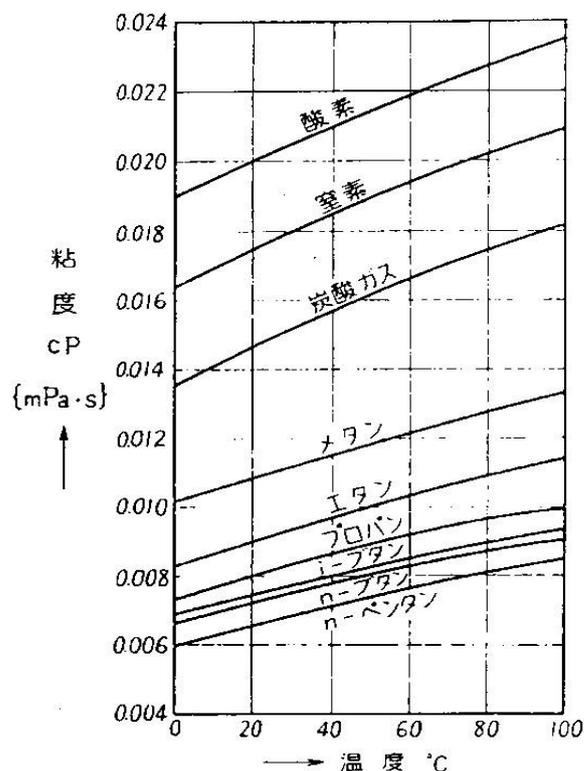


図3.3.3 標準圧力におけるガスの粘度  $\eta$

このようにして求めた粘度は、更に図 3.3.4 を用いて圧力による補正をして、流動状態における粘度となる。

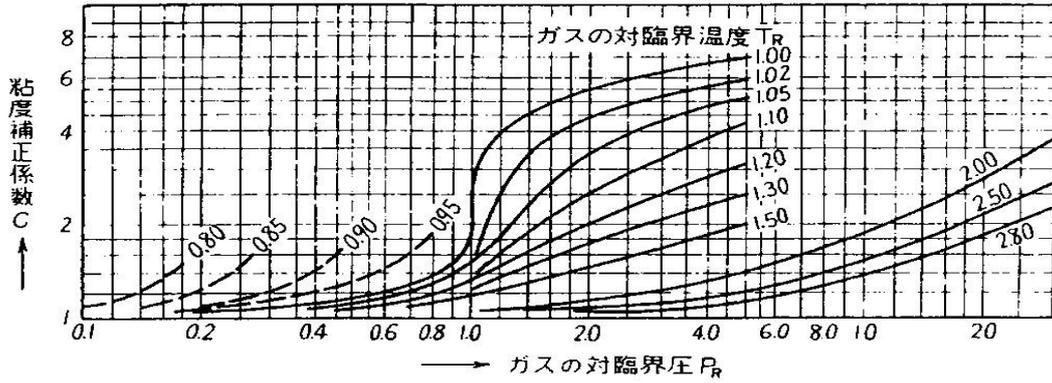


図3.3.4 ガスの粘度の圧力による補正係数 C

(3) 圧縮係数

天然ガスの圧縮係数はガスの成分、流動温度、流動圧力により求められる。この値については JIS M 8010 天然ガス計量方法の表に記載されているのでここでは省略する。

(4) 湿度

ガスの湿度はあらかじめ較正された湿度計により測定する。

vi) 流量計算式

標準状態における体積流量は次の式より求める。

$$q_{vN} = \frac{31.082 d^2 C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon Z_N F_{wv} \sqrt{\frac{p_1 \Delta p}{N_N Z_1 T_1}}$$

ここに、  
 $q_{vN}$  : 標準状態における体積流量 [m<sup>3</sup>/h (Normal)]

$C_d$  : オリフィス流量計の流出係数

$\beta$  : オリフィス直径比

$\varepsilon$  : オリフィス流量計の膨張補正係数

$d$  : 計量中におけるオリフィス孔径 (m)

$\Delta p$  : 差圧 (Pa)

$F_{wv}$  : 湿度補正係数

$Z_N$  : 標準状態におけるガスの圧縮係数

$T_1$  : オリフィス流量計を流れるガスの温度 (K)

$p_1$  : オリフィス流量計の上流側圧力取出断面におけるガスの圧力 (Pa)

$Z_1$  : 上流側圧力取出断面におけるガスの圧縮係数

$\rho_1$  : オリフィス流量計の上流側圧力取出断面におけるガスの密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$N_N$  : 標準状態におけるガスのモル質量 (kg/mol)

上記係数の詳細については、JIS M 8010 を参照のこと。

### 3.1.2 容積式による方法

容積式流量計は一定の容積の計量室を持つ流量計であり、代表的な容積式流量計であるオーバル式やルーツ式の場合、計量室の容積分の流体が流れることで回転子が回転し、その回転数から流量を求められ、比較的精度の高い流量測定に適している。

原理としては、図 3.3.5 のとおり流体の圧力  $P$  が加わったとき、流入口と流出口の圧力差は回転子 A・B いずれにも加わるが、回転子 B には回転軸に対称に圧力が加わるため回転トルクが発生しないが、回転子 A には回転子に非対称な圧力が加わり、矢印の向きにトルクを生じその結果回転子が回転し斜線部分に閉じ込められた定容量の流体が流出口に押し出され、次に回転子 B に圧力差に基づく回転トルクが働き同じ動作を繰り返す。したがって、回転子の回転のたびに定容積の流体が流出口に現れるので、回転子の回転数を測定すれば流量を求めることができる。

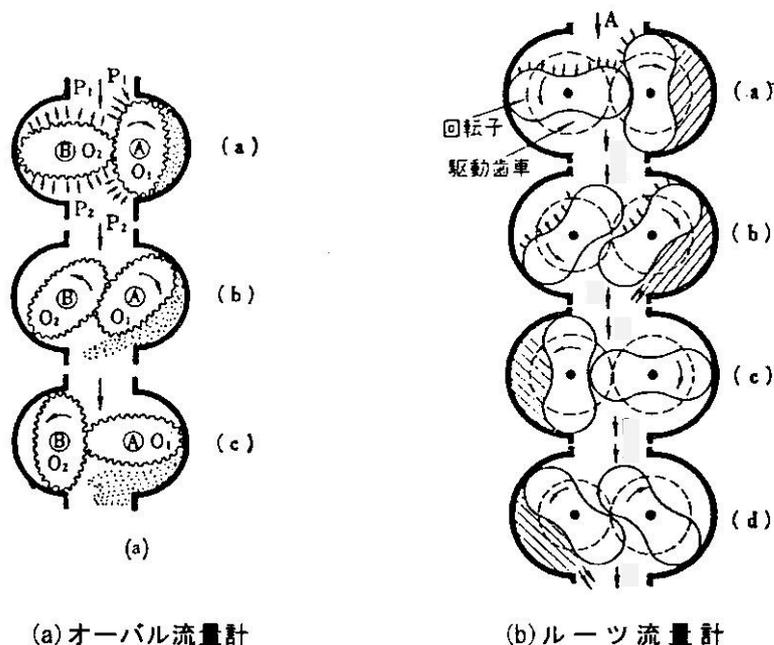


図3.3.5 容積流量計動作原理図

オーバル流量計・ルーツ流量計とも、回転子が回転する原理からその隙間に固形物が付着すると回転が妨げられることから、流量計の入口にはフィルターを設置し固形物を除去することが大切である。また、機器の点検取外しにおいても流量を流すことができるように、配管にはバイパスが設置されこれらがユニットとして利用されている。

### 3.1.3 渦式による方法

渦流量計は、流れに垂直に円柱や角柱をおくと、その後部に渦を生じ、渦列は2列に交互に発生する現象が流速によって異なることを利用したものである。

渦流量計は、気体・液体・スチームの単独測定が可能であるが、ふたつ以上の流体が交ざった混相流の測定はできず、固形物（砂・小石など）を含む流体は渦発生体への付着や損傷を与えるため避けなければならない。

#### i) 測定原理

渦発生体の幅 ( $d$ )、流速 ( $U$ ) および渦周波数 ( $f$ ) で定義される無次元のストローハル数 ( $St$ ) は、次の式で示される。

$$St = \frac{fd}{U}$$

渦周波数は流速に比例し、渦発生体の幅に反比例するが、ストローハル数はその比例定数として定義されるものである。

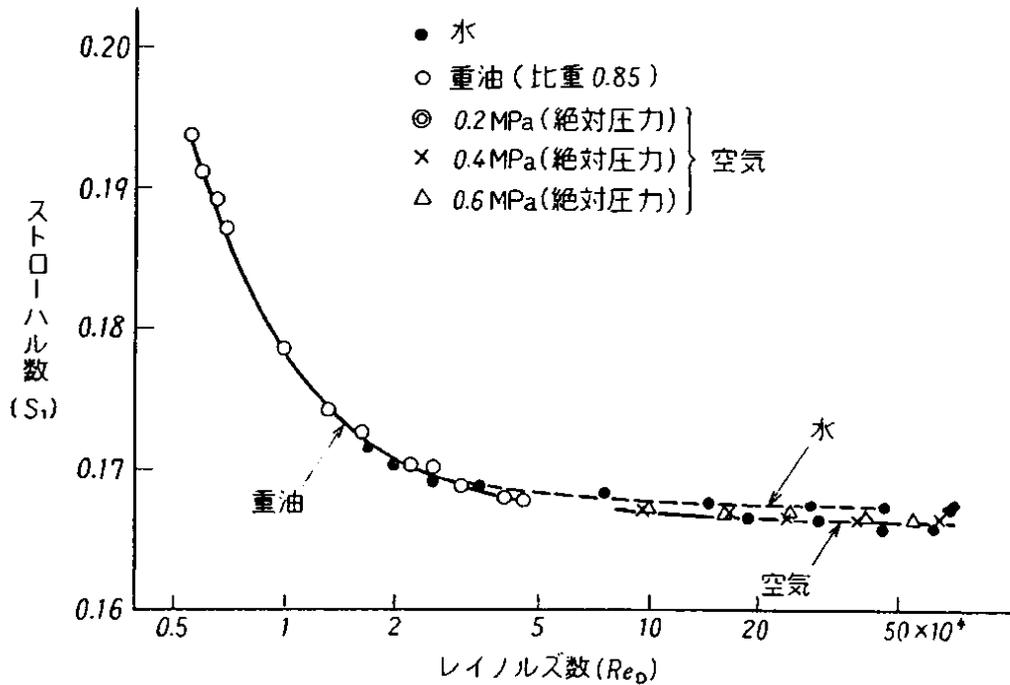


図3.3.6 渦流量計のストローハル数とレイノルズ数の関係の一例

ストローハル数はレイノルズ数の関数であるが、あるレイノルズ数範囲ではほぼ一定値とみなすことができる。ストローハル数がほぼ一定値であるとき、上の式から、流速は渦周波数にほぼ比例する。したがって、この範囲では渦周波数を測定することによって、流速から、最終的には渦発生体に取り付けられている円管内の流量を求めることができる。以上が渦流量計の基本的な原理であるが、渦流量計の特性を考えると、円管内でより広い流量範囲において、できるだけ一定のストローハル数になる渦発生体を選定することが重要になる。図3.3.6は、市販の渦流量計のストローハル数とレイノルズ数の関係の測定例で、ストローハル数は、流体の組成や圧力が異なっても広いレイノルズ数範囲 ( $2 \times 10^4$  以上) でほぼ一定値であることが示されている。

## ii) 渦流量計の特徴

渦流量計による流量測定方法の特徴は、次のとおりである。

- ① 流体の通過体積流量に比例した周波数出力が得られる
- ② カルマン渦による流体の振動現象を利用しており、基本的に機械的可動部を必要としていない（渦検出部に可動部を使用するものはある）
- ③ 流量測定範囲が広い
- ④ 気体（蒸気を含む）、液体いずれも同じメーター係数で測定できる
- ⑤ 流体の組成、密度、湿度、圧力などにほとんど影響されずに体積流量が測定できる

周波数出力の流量計は、積算が容易で容積流量計やタービン流量計の例のように取引用に都合がよい。その中でも渦流量計は、基本的に可動部をもっていないので特性の経時変化がほとんどなく、また、保守が容易であるという利点がある。

また、絞り流量計と比べて圧力損失が少なく、流体圧力、温度、組成などの影響を受けずに流体の通過体積に比例した出力が得られ、レンジアビリティが広いなどの特徴を持っている。

### 3.2 タンク計量

原油の計量については、流量計による計量方法も可能であるが、タンク内に静置させて測定する方法が通常行われる。これは通過量を測定する流量計とは異なり石油の貯蔵量を把握する意味で利用される。タンクで計量する場合は、その液体の性状を試験することが重要でこれに関する JIS 規格は次のとおりである。

- ① JIS K 2249-1～-4 原油および石油製品 - 密度の求め方
- ② JIS K 2251 原油および石油製品 - 試料採取方法
- ③ JIS K 2601 原油試験方法
- ④ JIS B 7410 石油類試験用ガラス製温度計

これらの試験方法は、タンク計量を行う場合のみではなく流量計の計量においても、その性状を知る上で重要な試験方法といえる。

#### i) 原油比重試験方法

原油の比重測定は JIS K 2249 原油および石油製品 - 密度の求め方で定める方法によって行われ、振動法、ガラス製比重浮秤法またはピクノメーター法がある。

比重浮秤法で比重を測定する場合は必ず温度も測定しなければならない。これは比重の基準が 4 °C の蒸留水の質量に対する、それと同一体積の 15 °C の試料の質量の比だからである。他の温度で測定した比重は換算表を用いて 15 °C に換算しなければならない。そしてこのような比重を 15 °C/4 °C 比重と表示する。

また測定に使用する試料は、試験を行う原油を代表するもので、かつ正しい採取方法に従わねばならない。これらは JIS K 2251 の原油および石油製品 - 試料採取方法に定められている。

比重浮秤は軟質ガラス製で、計量法による検定を受けたものでなければならない。JIS K 2249 に則った石油用標準密度計は 10 種類の目盛範囲の浮秤で、0.6～1.1 の比重を持つ試料を測定できる。

温度計は JIS B 7410 の石油類試験用ガラス製温度計に規定する温度計の番号 42 のものを用いる。試料の容器（試験用シリンダー）は比重計の最大部径より 25 mm 大きく高さは比重計をシリンダーに入れた場合、比重計の下端よりも 25 mm 以上保持するものを用いる。

測定方法としては、

- ① 試料をシリンダーに移す場合は内壁に沿って気泡の入らないように静かに移す。
- ② 清浄な浮秤を静かに約 2 目盛だけ液中に沈めてから手を離す。
- ③ 比重計がシリンダーに触れずに静止したら細部目盛の半分まで読む。
- ④ 温度は比重測定の直前直後を測定する。

この場合、温度計で試料を静かにかき混ぜた後温度計を全没（水銀柱の上端まで浸没）させて温度を 0.1 °C まで読む。もし比重測定の前後で温度差が 0.5 °C をこえた場合は試料の温度を安定させてから温度および比重を再測定する。

このようにして得た数値は JIS K 2249-4 原油および石油製品 - 密度の求め方 - 第 4 部：密度・質量・容量換算表を用いて 15 °C/4 °C における比重ならびに容量に換算して報告される。

また、比重によって原油の油質を分類する場合は、

特軽質原油	比重	0.8017 未満
軽質原油	〃	0.8300 未満
中質原油	〃	0.9040 未満
重質原油	〃	0.9660 未満
特重質原油	〃	0.9660 以上

と分けられるのが一般的で、売買価格を決める際などに良く使われる指標であり、同じ産地でもそれぞれの油質によって販売価格が異なることもある。

ii) 原油泥水分試験方法

原油中の泥水分を定量する場合、一般に遠心分離法ともいわれ JIS K 2601 原油試験方法により規定されている試験方法を適用する。

泥水分とは沈殿物と析出水との総量であって真の水分のみではない。

試料の採取方法が適正であり、試料が試験を行おうとする原油を代表するものでなければならないのは、比重の試験方法の場合と同じである。

試験に使われる装置には以下のものがある。

- ① 遠心分離用目盛試験管：図 3.3.7 に示すような形状寸法のガラス製 I 型試験管で十分焼きナマシをしたものを用い目盛線は明確に下方から刻み、その口はコルク栓で密閉できるものである。目盛間隔および許容差は表 3.3.2 の通りである。
- ② 遠心分離器：試料を満たした遠心分離用目盛試験管をセットし、管端の相対遠心力が 600 となるように回転数を調節し得るもので、遠心力に十分耐える構造になっている。
- ③ 水槽：遠心分離用目盛試験管を 100 ml 目盛まで垂直に浸すことができるもので、かつ温度を  $49 \pm 3$  °C および  $60 \pm 3$  °C に保つことができるものである。

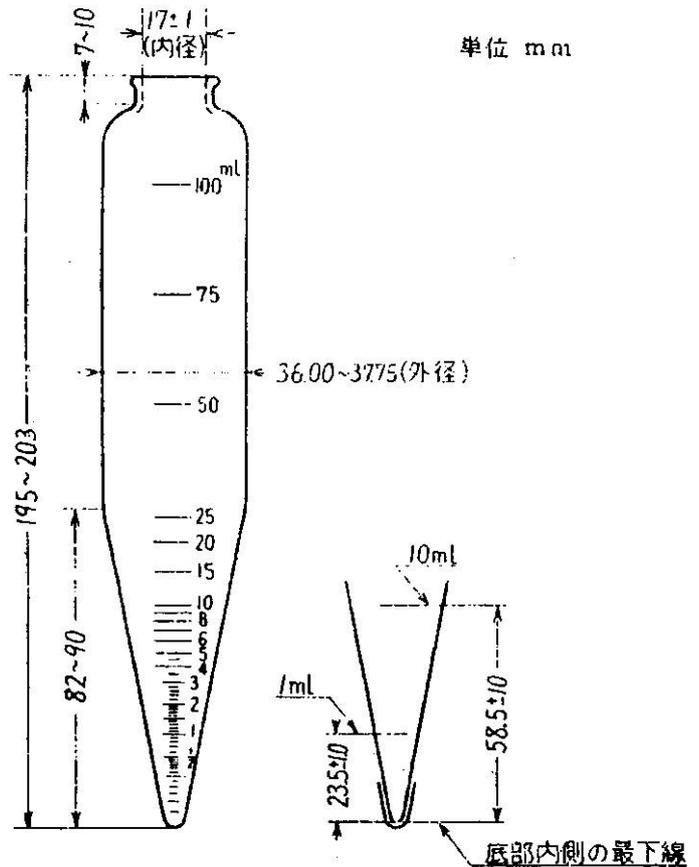


図3.3.7 遠心分離用 I 型目盛試験管

表3.3.2 遠心分離用I型試験管の容量範囲による許容差

容量範囲 (ml)	目盛間隔 (ml)	許容差 (ml)
0.0~0.1	0.05	±0.02
0.1~0.3	0.05	±0.03
0.3~0.5	0.05	±0.05
0.5~1.0	0.10	±0.05
1.0~2.0	0.10	±0.10
2.0~3.0	0.20	±0.10
3.0~5.0	0.5	±0.20
5.0~10.0	1.0	±0.50
10.0~25.0	5.0	±1.00
25.0~50.0	25.0	±1.00

この他に試薬として、JIS K 8680 トルエン（試薬）に規定されるトルエン、または JIS K 2435-2 ベンゼン・トルエン・キシレン - 第2部：トルエンに規定される純トルエン1号もしくは純トルエン2号に、 $49 \pm 3$  °C乃至  $60 \pm 3$  °Cにおいて水を飽和させた水飽和トルエン（JIS K 2601 原油試験方法 付属書1）と泥水分の測定結果に影響ない量の解乳化剤を使用する。

測定方法としては、

- ① 水飽和トルエンを 50 ml 正確にとり、解乳化剤を滴下し、これに原油試料 50 ml を加え正確に 100 ml とする。この試験試料を同一条件で 2 本作る。ついで栓で封をして完全に試料が混合するまで手で振り  $60 \pm 3$  °C に保った水槽に 100 ml 目盛まで浸し 15 分間以上保持する。（ワックス状のものが多原油のときはワックス状のものが認められなくなる温度で行う。また、あらかじめワックス状のものが認められないことがわかっている場合には、温度を  $49 \pm 3$  °C としてもよい。）
- ② 2 本の遠心分離用目盛試験管を水槽から取り出し再度手で振って試料と水飽和トルエンを混合する。これを向かい合わせに遠心分離器中の試験管保持具に納め 10 分間回転させる。遠心分離器の回転が止まったら、直ちに目盛試験管底部の水分と沈殿物の体積の合量を読み取るが、読み取りは、
  - 0.1 ml 以下の場合には 0.025 ml
  - 0.1~1.0 ml の場合には 0.05 ml
  - 1.0~2.0 ml の場合には 0.10 ml

まで行う。遠心分離と、水分と沈殿物の体積の読み取りは、2 回続けて同じ結果になるまで繰り返す。なお、遠心分離操作全体を通じて、試料の温度は基準値（60 °C、49 °C等） $\pm 3$  °C を保っていなければならない。

2 本の目盛試験管の最終読み取り量の和を容量%とする。また、60 °C 以外で試験を行った場合には、その温度を明記する。

### 3.2.1 圧力による液位測定

通常開放したタンクの底面にかかる圧力は、液面の高さに比例するので、液体の比重がわかれば、そのときの圧力の大きさから液面の高さを知ることができ、これを圧力液面計と呼び圧力伝送器で測定する。

$$\text{底面の圧力 (p)} = \text{液面の高さ (h)} \times \text{液体の比重 (\rho)}$$

一方、密閉されたタンクでは、底面の圧力は液柱圧力だけではなく液の表面にうける圧力（液体の蒸気圧など）に影響されるので、これを補正する必要がある。よって、この場合は差圧伝送器を用い

て、タンク上部にかかる圧力との差圧を測定することにより、純粋な液柱圧力が求められる。

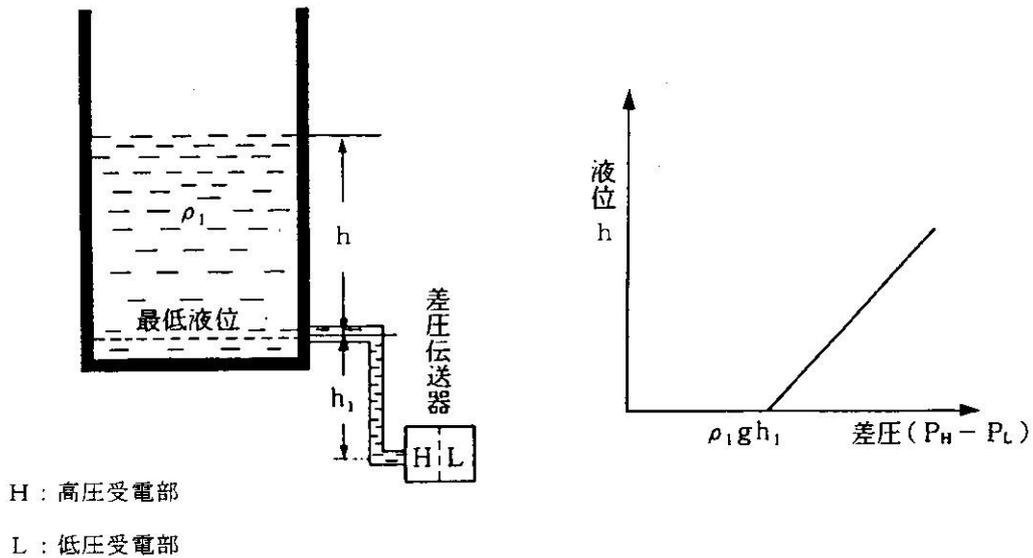


図3.3.8 開放タンクの液位測定

開放形タンクの液位を差圧伝送器で測る場合には、図 3.3.8 に示すように差圧伝送器の低圧側は大気開放にしておき、タンク内の液を、導圧管を通して差圧伝送器の高圧側に導く。差圧伝送器の高圧側圧力と低圧側圧力の差圧は次式で表される。

$$P_H - P_L = \rho_1 g (h + h_1)$$

- ここで  $P_H$  : 差圧伝送器の高圧側圧力 [Pa]
- $P_L$  : 差圧伝送器の低圧側圧力 (大気圧) [Pa]
- $\rho_1$  : 液の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $g$  : 重力加速度 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
- $h$  : 最低液位から液面までの鉛直距離 [m]
- $h_1$  : 差圧伝送器の受圧素子の位置から最低液面までの鉛直距離 [m]

上の式から液位と差圧は直線関係になることがわかる。

### 3.2.2 浮子による液位測定

圧力による液位の測定では、液体の比重変化により測定値に誤差が発生してくる。そのため液体の比重が一定でない場合は、浮子 (フロート) による実液面測定が有効である。

全体の構造は、図 3.3.9 のようにフロートをテープにより接続し、タンク上部のガイドエルボ・パイプを通しタンク側面の液面指示機構部に接続している。

指示機構部には、テープを巻き取るため一定回転力を発生する機構があり、テープのたるみを防いで測定誤差が生じないようにしている。また、フロートも液面の波の影響による横移動などのズレを受けないようにガイドワイヤーにて位置が固定されている。

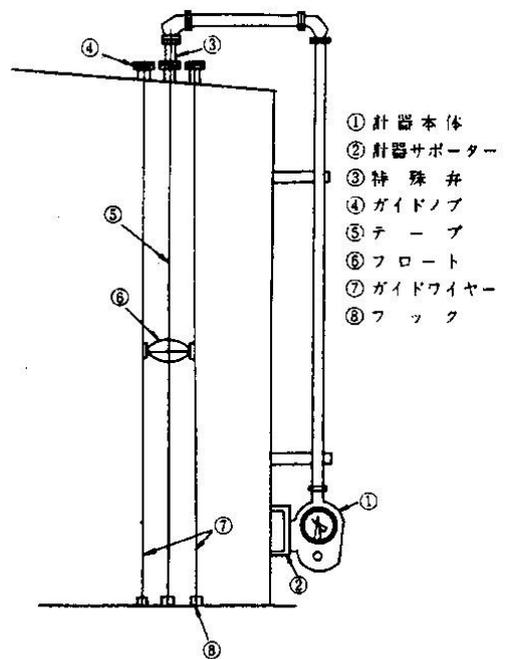


図3.3.9 浮子式液面計

### 3.3 その他の計量方法

油ガス田で取り扱われる流体は、気体・液体および蒸気と多種類であり、その測定条件においても、高温高圧・低温の液化ガス・高粘度液体など範囲が広い。更に流量の大小も設備規模により様々で、このような条件下で流量を測定するために、いろいろな測定原理の流量計が開発され、それぞれの特徴を生かして広く用いられている。

#### 3.3.1 せき式流量計

本書で述べている流量計は、ほとんどが管路内を充満して液体が流れているものである。

せき式流量計はこれに対し、上部が開放された水路の流量を測るため考案された物である。

せき式流量計の実験は長い歴史をもっており、多数の流量公式が発表されているが、精度の高いものが少なかった。

現在、日本で使用されているせき式流量計のせきの構造と流量公式を定めている JIS B 8302 ポンプ吐出し量測定方法では、それらの中から精度の点でもっとも優れていると認められるものが採用されている。

算式の誤差は JIS の適用範囲内において、

直角三角せき……±1.4%

四角せき……±1.5%

全幅せき……±1.7%

となっている。

#### 3.3.2 タービン流量計

タービン流量計は、図 3.3.10 に示すように管中を流体が流れると翼車が回転し、翼車の回転数と流速が比例するので、管の断面積が一定であるから断面積と流速の積である流量を、翼車の回転数を測ることで知ることができる流量計である。

$$N = K_1 v$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$N = \frac{QK_1}{A}$$

ここに N : 翼車の回転数 [rpm]

v : 流体の流速 [m/s]

K<sub>1</sub> : 比例定数 [rpm/m/s]

Q : 流量 [m<sup>3</sup>/s]

A : 管の断面積 [m<sup>2</sup>]

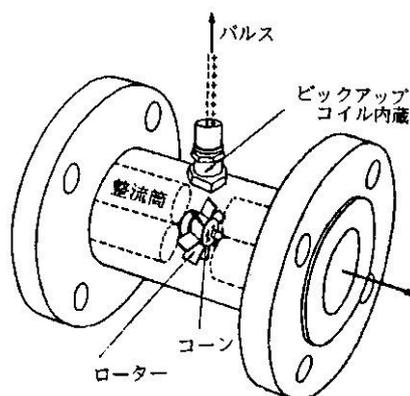


図3.3.10 タービン流量計の断面

図 3.3.10、図 3.3.11 の検出部にはピックアップコイルと永久磁石が内蔵されていて回転翼がピックアップコイルの近くを通り過ぎるたびに、コイルを貫通している磁束密度が変化して一つのパルス電圧をコイルに発生させるので、単位時間のパルスの数を計数すれば流量を、またパルスの数を積算すれば積算流量を測定することができる。

この流量計の特徴は下記のとおりである。

- ① 流体抵抗の少ない低粘度液に適している。
- ② 精度は一般に定格値の±0.5%

- ③ 測定流量範囲も広く最大流量の 1/10~1/30 におよぶ。口径は 15 mm から 350 mm。
  - ④ 構造が簡単で軽量である。
  - ⑤ 出力信号は流量に比例したデジタル電気信号である。
  - ⑥ 上流側には直管部およびストレーナーを取り付ける必要がある
- なお最大流量のときの圧力降下は 41~55 kPa 程度である。

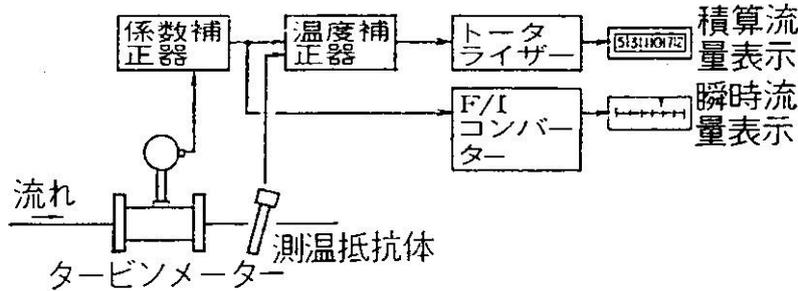


図3.3.11 タービン流量計の構造例

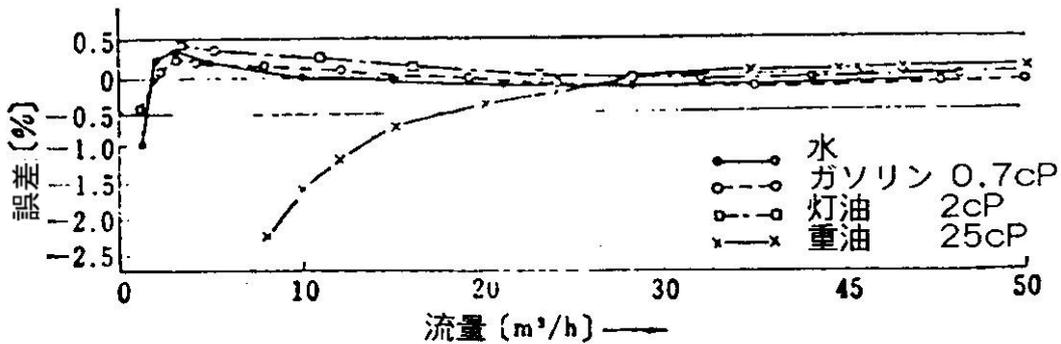


図3.3.12 流体の種類による誤差の例

### 3.3.3 超音波流量計

超音波は良好な指向性をもつので、各種物体中を容易に透過する。したがって流体中に超音波を放射し、流速が音速に与える変化から流量を測定することができる。現在、超音波流量計として広く実用化されているものに、伝搬速度差法とドップラー法の2つがある。(図 3.3.13)

#### i) 伝搬速度差法

この方法は斜めに対向して設置された検出器間の超音波の到達時間差から、流体の流速を求める測定法で、伝搬速度差法の中でも伝搬時間差法、伝搬時間逆数差法、シングア라운드法などがある。その中でよく使われているのが伝搬時間逆数差法(周波数差法)であり、工業用超音波流量計の主流をなしている。

#### ii) ドップラー法

この方法はドップラー効果を利用したもので流体中の混合物より反射してもどってくる反射波と送信波の周波数差から

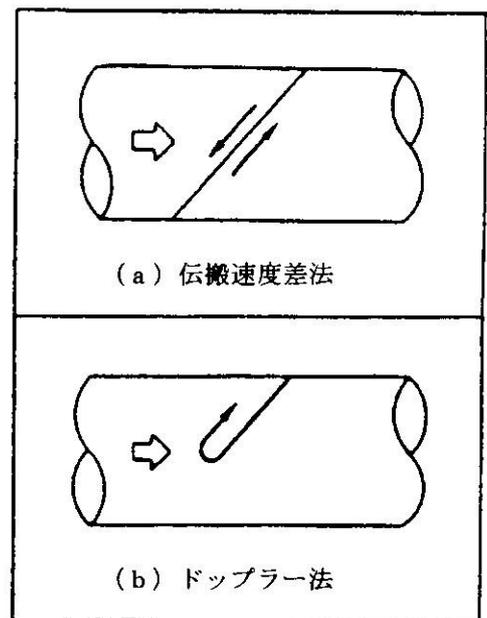


図3.3.13

混入物の移動速度、すなわち流体の流速を測定するものである。伝搬速度差法に比較し、反射物のないきれいな水の測定は難しく、音波の透過が悪く、伝搬速度差法では測定が困難な下水、排水流量の測定に利用されている。

超音波流量計の特徴は、管の外側からでも流速の測定が可能である点にある。その結果、超音波流量計は他の流量計に対して、

- ① 既設の配管に特別の加工なしに送水を中断することなく検出器を取り付けて、流量が測定できる。
- ② 検出部は接液しないため腐食、水漏れなどに起因するトラブルがなく、メンテナンスフリーである。
- ③ 圧力損失がない。
- ④ 口径が大きい場合に、他の流量計に比べ価格面で有利である。

といった利点がある。

また、超音波が透過し、あるいは反射する液体であれば、粘度、電気伝導度などの影響を受けずに測定が可能である。

なお、超音波流量計は線流速を測定するため、電磁流量計と比べると偏流や旋回流の影響を受けやすい。そのため上流側 10~20D (D は管路直径)、下流側 5D 程度の直管長を必要とする。各種のバルブなどの下流に設置するときには、さらに長い直管長を必要とする。

## 4 輸送

### 4.1 タンクローリー輸送

#### 4.1.1 タンクローリー輸送

タンクローリーは原油を道路輸送するための自動車で、石油の陸上輸送における代表的なものである。タンクローリー輸送は他の方法に比べて初期の設備投資は少なくすむが、輸送量、輸送費用、管理面（冬期間の運行）では不利な点も多い。しかし、油田の規模、地理的条件を勘案した場合、最も有利な方法ともなり得る。

タンクローリーの構造、大きさは消防法その他により規制されており、タンク容量は最大 30 kl とし、かつその内部は 4 kl 以下ごとのタンクに完全に仕切られたものでなければならない。したがって、例えば 20 kl 車は普通 4 kl のタンクと 2 kl のタンクを組み合わせると 6 つ以上のタンクに分かれた構造になっている。

タンクローリーの構造を図 3.4.1 に示すが、詳細は消防法「危険物の規制に関する政令（以下、政令）」第 15 条「移動タンク貯蔵所の基準」などを参照されたい。構造的な基準を以下に示す。

- ① タンク容量は上述のように、タンクローリー 1 台あたり 30 kl 以下とし、4 kl 以下ごとに 3.2 mm 以上の鋼板またはこれと同等以上の機械的性質を有する材料で完全に間仕切りを設けること。
- ② 各間仕切り内に動揺防止策として防波板を設けること。
- ③ 間仕切り部分ごとに安全装置を設けること。
- ④ タンク下部に排出口を設ける場合には底バルブを設置し、非常の場合に直ちに閉鎖可能とすること。
- ⑤ 配管の先端にはバルブなどをつけること。

- ⑥ 可燃性液体で静電気による災害発生の予測される危険物のタンクには接地導線をつけ、計量棒により計量するものには、計量時の静電気による災害を防止するための装置を設けること。
- ⑦ 給油ホースには取り扱うタンクの注入口と完全に結合できる金具を備え、その材質は真ちゅうなど摩擦により火花を発生しにくい材料を選定すること。

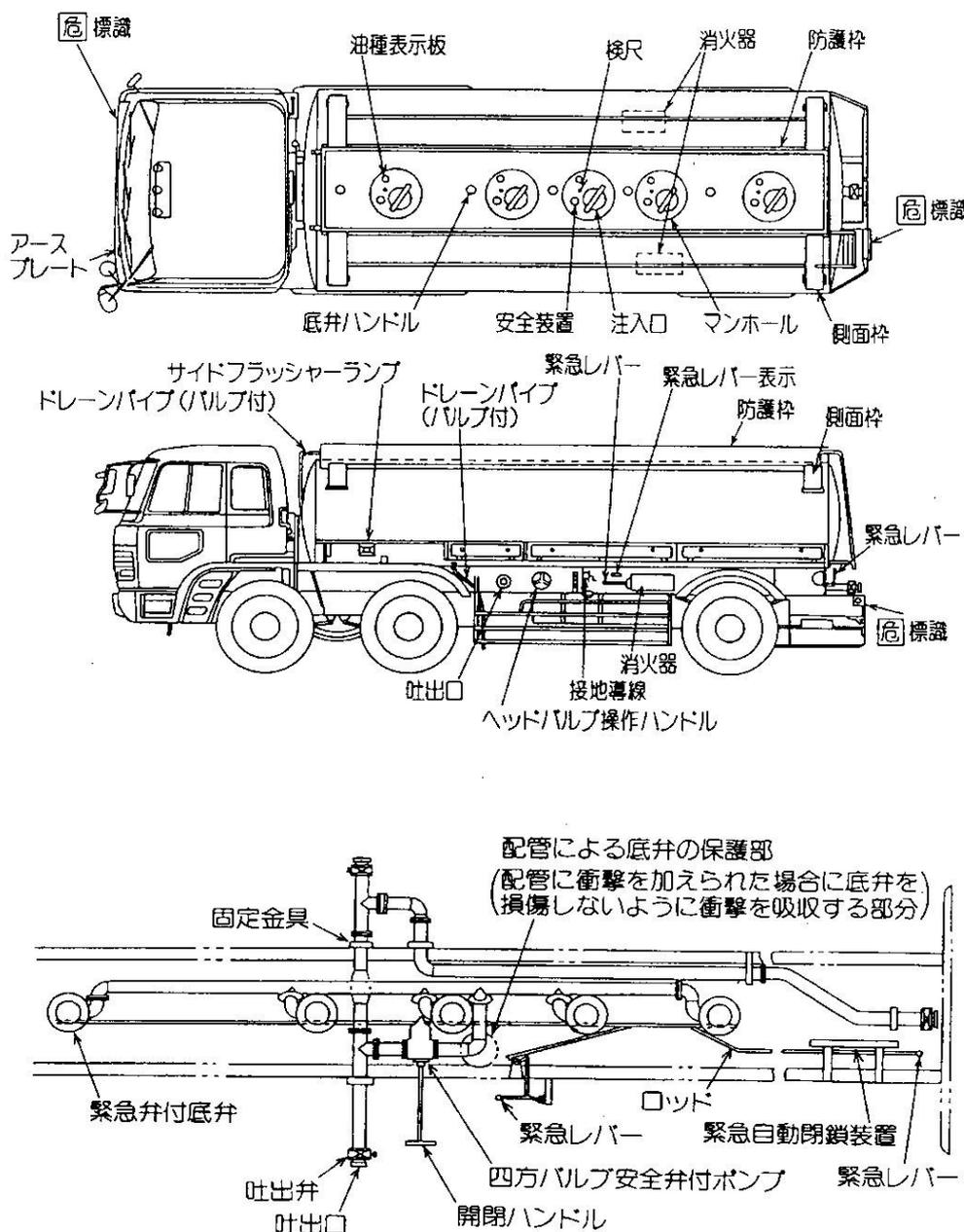


図3.4.1 タンクローリーの構造

タンクローリーは車両によって運搬される「移動タンク貯蔵所」であることから、タンクローリーの車両部、容器部に対しての点検・整備は通常の定期的なものだけでなく、日常的な管理も重要である。

一方、軌条を使用するタンク車は、現在も石油製品の内地向け長距離輸送の主要な輸送方法として用いられているが、原油輸送に関しては、国産原油をタンク車で受け入れて処理してきた日本海側の製油所が精製会社による集約化で閉鎖され、近年ではほとんど使われることはなくなった。ここではタンク車についての記述は割愛する。

#### 4.1.2 出荷・受入施設

タンクローリーへの出荷は、油ガス田の貯油施設近くに設けた積込スタンドから行う。積込スタンドにタンクローリーが到着すると車輪止めを行い、車体にアース線を接続し静電気による事故が起らないようにする。続いてタンクのハッチを開け、ポンプによりタンクローリーへの積み込みを開始する。各タンクが満液になると順次切り替えて行く。道路運送車両法、車両制限令上の重量制限から、重質油になると全タンクの容量一杯まで積み込めない場合もある。なお、積み込みにあたっては、タンク上部から積み込む方式と底部から積み込む方式がある。

逆に、タンクローリーからの受入では、荷卸スタンドの定位置にタンクローリーをとめ、出荷時と同様に車輪止めと静電気対策用のアースを接続して、底部の払い出しバルブを通してポンプもしくは重力で荷卸を行う。

出荷施設（一般取扱所）の概要図を図 3.4.2 に示す。政令 19 条の規定により、政令 9 条 1 項に定められた保安距離、保安空地を確保することが要求される。

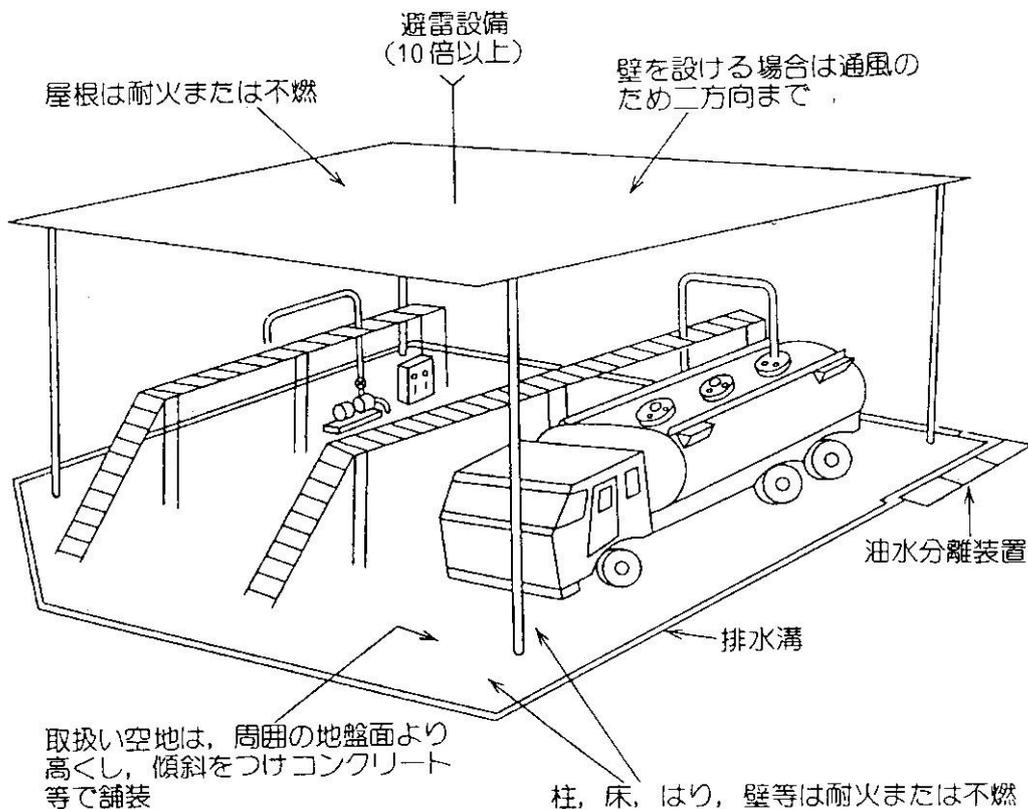


図3.4.2 出荷施設の概要

#### 4.2 パイプライン輸送

原油と天然ガスではその性質が全く異なるが、パイプラインによって流体を送るという点では類似する点が多いので、ここでは両方をまとめて説明する。パイプライン輸送の基本的事項につき、立案施工、設計、防食および敷設に分けて以下に述べる。

##### 4.2.1 パイプラインの立案施工

パイプラインの立案施工に関する一連の手順を以下に列記する。なお、油ガス田からの生産計画や需要者への供給計画は既知であるとの前提に立つものとする。

- ① 敷設の目的
- ② 路線計画
- ③ パイプの径および使用圧力の決定
- ④ パイプの仕様の決定（材質、肉厚、塗装など）
- ⑤ 路線調査
- ⑥ 工事仕様の決定
- ⑦ 通行権の獲得（官庁申請、地元折衝など）
- ⑧ 所要資材のリストアップ
- ⑨ 総工事費の積算
- ⑩ 工事請負契約
- ⑪ 敷設工事（掘削、配管、溶接、塗履装、埋戻しなど）
- ⑫ 完成検査（耐圧および気密試験など）
- ⑬ エアパージ
- ⑭ 使用開始

#### 4.2.2 パイプラインの設計

##### i) 原油パイプラインの設計

原油パイプライン設計においては、パイプ径の決定が最も重要である。径を小さくした場合、パイプライン設備費は小さくなるが、パイプ内の圧力損失が大きくなり、ポンプも吐出圧力の大きいものが必要となり、運転費は大きくなる。径を大きくすれば、その逆に設備費は大きいが、運転費は小さくなる。いくつかの径についての設備費と運転費を産出し、その和が最小になる点を見出して最適な径は決定される。

パイプ径の決定には、対象流体の流量に対する摩擦損失とパイプ径との関係が明らかでなければならない。ここでは流体の流れの理論的説明は省略し、圧力損失を計算する Darcy-Weisbach の式を掲げその計算例を示す。

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{8f\rho Q^2}{\pi^2 D^5} \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

ここで  $\Delta P/\Delta L$  : 圧力損失 [Pa/m]

f : 摩擦係数

$\rho$  : 原油の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

Q : 流量 [m<sup>3</sup>/sec]

D : パイプの内径 [m]

摩擦係数 f は、油の粘度やパイプ内面の粗度、また層流か乱流かによって計算方法がことなるが、ここでは詳細に言及しない。

##### 【例題】

送圧 1,500 kPa で 1 時間当たり 36 kl の原油を、パイプ内径 104.5 mm、パイプ延長 9.4 km のパイプラインで輸送するときの着圧を計算する。摩擦係数は 0.02 とする。

このとき①式において、以下の数値を代入すると、

$$\rho = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$Q = 36 \text{ kl/hr} = 0.01 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$D = 0.1045 \text{ m}$$

$$\Delta P / \Delta L = 104.2 \text{ Pa/m} = 104.2 \text{ kPa/km}$$

よって、 $1500 - (104.2) \times (9.4) = 521 \text{ kPa}$  が着圧と求められる。

### ii) 天然ガスパイプラインの流量計算

パイプライン内を流れる天然ガスの流量と圧力損失の関係を計算するために、いくつかの式が使用されているが、広く用いられている Weymouth の式について説明する。

$$Q = 0.0199d^{8/3} \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{GL}} \dots \dots \textcircled{2}$$

ここに Q : ガス流量 [m<sup>3</sup>/Day]

p<sub>1</sub> : 送圧(絶対圧力) [kPa(abs)]

p<sub>2</sub> : 着圧(絶対圧力) [kPa(abs)]

d : パイプ内径 [mm]

L : パイプ延長 [m]

G : ガス比重 (空気=1)

なお、この式には次の仮定が含まれている。

- ① パイプライン中を流れるガスにはコンプレッサーなどで機械的エネルギーを与えていない。
- ② 流れは定常流である。
- ③ パイプライン内のガス温度は一定である。
- ④ 流動するガスの圧縮係数は一定である。
- ⑤ 運動エネルギーは無視する。
- ⑥ パイプラインは水平である。

### 【例題】

パイプ内径 153.2 mm、延長 61.1 km、送圧 5,000 kPaA、着圧 1,667 kPaA のとき、ガス流量を求める。②式に数値を代入すると、Q=329,228 m<sup>3</sup>/Day、約 33 万 m<sup>3</sup>/Day がガス流量となる。

Weymouth の式は 12 in.以下のパイプラインで圧力 500 psig (約 3.4 MPa) 以下の場合に広く用いられる。一般に圧縮係数 Z = 1 として計算を行なうが、Z の実際の値を使用すれば圧力が 500 psig 以上の場合でも実際とよく一致するといわれている。その他 12 in.以上の大きな径で高圧の場合には、Panhandle の式が適するといわれている。

また、径の違ったパイプを直列につないだときの能力、ループラインの能力、パイプラインの高低差の能力への影響、比重の変化、曲りパイプに対する考慮などについての詳細は石油鉱業便覧などを参照されたい。二相流(油・ガスの混送)の流量計算についても専門技術書を参照されたい。以上、輸送能力について慣用式のみについて列記したが、流体の流れを取扱う理論から出発して様々な計算式が紹介されており、いずれの式からもどれが一番良いという判断は下せない。しかし、使用した計算式によって計算値の多少のバラツキが出るにしても、この計算値をもとにして後述するようにパイプの規格品の中から使用パイプを選択しなければならない。実際に設計者はこのパイプ選択の段階でかなりの余裕をみているので、計算式自体の選択は実用上さして問題とならない。

### iii) パイプラインの肉厚計算

パイプの径が決定されたら、次に使用されるパイプの肉厚を決定しなければならない。肉厚の決定については過去の実績が最も大きな要素となっているが、第一の目安は使用圧力によって定められる。

また、埋設パイプの場合には、埋戻し後の土圧による静荷重および地表上の活荷重などの外圧が作用するので、内・外圧それぞれによって要求される肉厚を計算して大きな数値を肉厚とする。加えて、パイプライン敷設後の腐食についても考慮した上で、肉厚は決定される。

#### (1) 内圧に対する肉厚計算式

高圧パイプの強度計算は一般に「ガス事業法」に関連する一般高圧ガス保安規則関係例示基準によって行なわれている（「ガス工作物技術基準の解釈例」参照）。

$$t = \frac{pD}{2\sigma_a\eta + 0.8p} + C$$

ここに  $t$  : パイプの肉厚 [mm]  
 $p$  : 最高使用圧力 [MPa]  
 $D$  : パイプの外径 [mm]  
 $\sigma_a$  : パイプ材料の許容引張応力 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\eta$  : 継手効率  
 $C$  : 腐れ代の厚さ [mm]

腐れ代  $C$  については、パイプ内流体に腐食成分がないか、または腐食を防止し得る限度にまでこれを除去し、かつパイプ内にその圧力および温度において水分の凝結を生じないような脱湿を行なった場合には  $C = 0$  mm でよい。その他の場合には、 $C = 1$  mm 以上とされている。

また、上式には、安全率 4.0 が考慮されている。これは労働安全衛生法に基づく圧力容器構造規格（厚生労働省告示 196 号第 3 条）から導入されている。

#### (2) 外圧より要求される肉厚

埋設されるパイプラインの外圧に対して必要な肉厚は、内圧に対するものと同様、「ガス工作物技術基準の解釈例」にある次の式より算出する。

$$t = \sqrt{\frac{2.5(K_f W_f + K_t W_t)}{\sigma_a}} D + C$$

$t$  : パイプの最小肉厚 [mm]  
 $W_f = 0.001\gamma h$

ここで  $h$  : 埋設深度 [m]、 $\gamma$  : 単位体積当たりの上載重量 = 2 g [kN/m<sup>3</sup>] とする。

$K_f$ 、 $K_t$  : 係数、鋼管の場合  $K_f = 0.198$ 、 $K_t = 0.114$

$\sigma_a$  : パイプ材料の引張強さ [N/mm<sup>2</sup>]

$C$  : 腐れ代の厚さであり 1 以上とする [mm]。

但し、耐食性材料を使用している場合もしくは電気防食等の防食対策が十分に施されている場合はゼロとすることができる。

$D$  : パイプの外径 [mm]

$W_t$  : 路面荷重による土圧 [MPa]

(埋設深度との関係は別図 3.4.3 から求めた値に 0.098 を乗じた値)

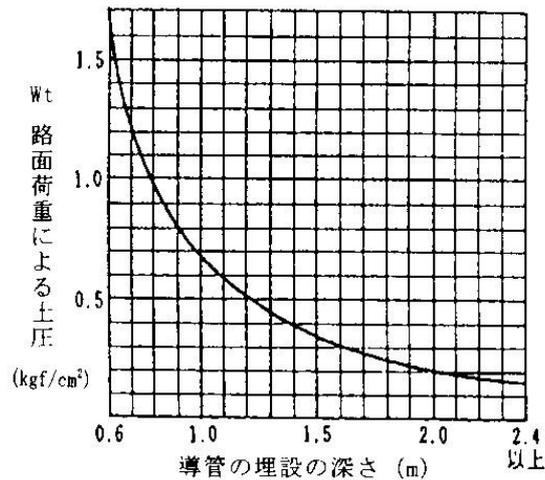


図3.4.3 埋設深度と土圧の関係

### (3) パイプ種の選定

内・外圧に耐え得る所要の肉厚を計算し、パイプ径および肉厚が決まったら、それを満足するパイプ種を鋼管の規格品の中から選択する。

日本国内では、鋼管は、JIS 規格により分類、規格が定められ製造されており、通常、油ガス田で使用する鋼管として

JIS G 3452 配管用炭素鋼鋼管 SGP (Steel Gas Pipe)

JIS G 3454 圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG (Steel Tube Piping General)

JIS G 3455 高圧配管用炭素鋼鋼管 STS (Steel Tube Special)

などがある。

また、アメリカではパイプライン用の鋼管規格として、API (American Petroleum Institute アメリカ石油協会によって制定されている規格) 5Lがあり、5LXがSTPG規格に相当する。

この中で、油ガス田で最も多く使用されているSGPおよびSTPGについて以下に説明する。

#### 1) 配管用炭素鋼鋼管 (SGP)

通称ガス管の名で一般に親しまれている規格品で、6A (1/8 in.) から500A (20 in.) までの標準寸法が決めてられており、比較的低い圧力の用途に使用される。適用範囲としては、圧力は水圧試験圧力 2.5 MPa であるが、JIS B 8265 圧力容器の構造一般事項では、SGP 管の使用は設計圧力で 1.0 MPa までとされている。一方同じく JIS B 8265 によると、温度は、設計圧力が 0.2 MPa 未満の場合には -15 °C から 350 °C まで使えるが、通常は 0 °C から 100 °C が使用範囲とされている。

#### 2) 圧力配管用炭素鋼鋼管 (STPG)

圧力配管用炭素鋼鋼管は、通常は配管用炭素鋼鋼管以上の圧力で使用されるが、その標準肉厚寸法はスケジュール (Sch) 方式によって決められている。STPG の鋼種として STPG370、STPG410 の 2 種類が一般に使用され、この中に更に肉厚系列として各外径に対し Sch10、20、30、40、60、80 の標準寸法が定められており、水圧試験圧力は Sch10 の 2.0 MPa から Sch80 の 12 MPa と、スケジュールの数字が大きくなると試験圧力も高くなる。また、汎用品ではないが Sch160 もあるので、その用途をよく考慮して、鋼種と肉厚寸法を決める。

STPG 管の適用範囲としては通常圧力 10 MPa 以下で、温度は低温脆性およびクリープの心配のない -15 °C から 350 °C 程度に用いる配管用として規定されている。

### 3) JIS の標準寸法とスケジュール (Sch) 方式

JIS の配管関係の寸法標準化において、外径は鋼管寸法により、肉厚は ASA (米国規格協会) スケジュール番号の厚さの mm 換算値とすることを原則とした。ASA と JIS では外径が異なるが、ASA と同じ肉厚を採用してもスケジュール方式に矛盾がないことが計算で確かめられたのでこれによることにした。次式の P/S で、P はパイプ内圧力 (kgf/cm<sup>2</sup>) であり、S は使用温度における材料の許容応力 (引渡り強さの 1/4、kgf/cm<sup>2</sup>) であるので、JIS の場合はスケジュール番号を次のように定めた。

$$\text{Sch 番号} = \frac{P}{S} \times 10$$

ここで材料の引張強さは、鋼種表示された STPG38 (現規格の STPG370) の場合は 38 kgf/cm<sup>2</sup> (3.7 MPa)、STPG42 (現規格の STPG410) の場合は 42 kgf/cm<sup>2</sup> (4.1 MPa) である。

スケジュール方式による JIS 標準寸法の使い方について大体の目安を得ればよいときには、次の式のようになる。

#### 【例題】

圧力 70 kgf/cm<sup>2</sup> (7 MPa) の水を常温付近で流す配管で STPG370 (旧規格の STPG38) を使う場合どのような寸法のパイプを使えばよいか。

$$\frac{70}{38/4} \times 10 = 73.7$$

すなわち Sch80 を使えばどの外径の場合でも満足出来る。

以上のような式は大体の目安をつける場合であって、実際の設計に当ってはさらに適用される規則などの計算式によって算出する必要がある。

なお近年では、都市ガス会社はポリエチレン等、鋼管以外のパイプを積極的にパイプラインに用いている。油ガス田においても、水溶性ガス生産施設など低圧の配管に対してポリエチレンパイプ、FRP パイプなどが採用されている事例が見られる。

## 4.2.3 パイプラインの防食

### i) パイプラインの腐食

パイプラインの腐食については、内面腐食と外面腐食とが考えられる。油ガス田の生産施設で処理された原油および天然ガスには腐食成分がほとんどなく、ガスも脱湿されているので、内面腐食は考慮するほどのものではない。しかしながら、坑井元から生産施設までの集油、集ガスラインにおいては、貯留層から産出される随伴水と、ガス中に含まれる二酸化炭素、硫化水素などの影響で、パイプライン内面が酸性環境になることで内面腐食が発生する。一方、地下埋設されたパイプラインの土壤に接する表面に生ずる外面腐食には、電気化学的作用による自然腐食および漏洩電流による腐食 (電食) などがある。

#### (1) 内面腐食

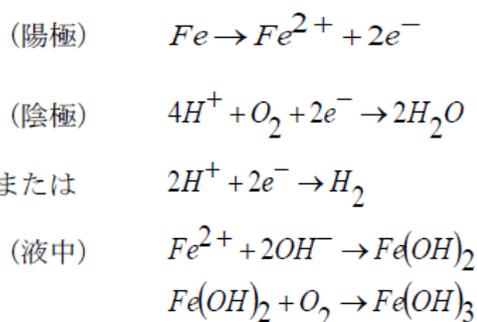
油ガス田の生産が進むと、坑井から随伴水が生産される可能性が高い。また、水溶性ガス田では、セパレーターで分離した時点でガス中には水蒸気が飽和しており、水分が集ガスライン内で凝縮することは避けられない。加えて、ガス中の二酸化炭素や硫化水素といった酸性ガスが溶けることで随伴

水、凝縮水の pH が低下し、パイプラインの腐食を進行させる。

## (2) 外面自然腐食

地中における自然腐食はパイプラインに接する土壌の性質に左右されるものであり、水はけが良好で水分を含まない土壌中では、鉄の腐食は液体の水が作用するときに限られるので緩慢であるが、常に水を含む土壌中の鉄の腐食はかなり速い。液体の水を含みにくく、しかも空気を通しにくい土壌中では大気中におけるよりも腐食は緩慢であるので、とくに手数のかかる高価な防食塗覆装を施す必要はない。液中あるいは土中の金属表面には種々の原因によって電位を異にする部分が存在するが、その結果無数の局部的短絡電池が形成され、陽極部に相当する金属表面が腐食する。このような腐食電池を形成する種々の原因は多種多様であるが、内部因子としては金属の組成、組織、表面状態、内部圧力、温度差など金属自体のあらゆる不均一性が考えられる。次に外部因子として考えられるものは、金属表面と接する溶液、あるいは土壌の部分的に組成を異にする場合のほか、イオン濃度、溶存酸素量、温度、流速などに差異をもつときに生ずる局部電池である。

この電気化学作用による鉄の腐食発生機構は、次のように示される。



## (3) 電食

電食は陽極、陰極の形成が金属体や土壌などの不均一性によるのではなく、外部から流入する直流電流によって生ずる。

都市における埋設パイプラインの電食の原因は、大部分が直流式電気鉄道の漏洩電流によるものである。架空単線式の直流式電気鉄道では軌条を電車運行時の電流の帰路として利用するので、軌条を流れる電流の一部はある場所で地中に漏洩し、付近に埋設パイプラインがある場合はこれを経て電流の漏洩点、すなわち変電所へ帰る。このための電気鉄道の軌条に接近して埋設されている地下埋設パイプラインは、電車の運転中に軌条から地中に漏洩した電流の帰路になり、埋設パイプラインから地中へ電流が流出する部分が陽極となって電食を起こす。したがって、金属表面を電氣的に土壌と完全に絶縁しない限り、埋設パイプラインの電食は発生する。

その他埋設パイプラインの外面腐食にはバクテリア、特に硫酸塩還元バクテリアの作用による腐食がある。

### ii) パイプラインの防食方法

#### (1) インヒビター注入法

内面腐食防止のためには、脱湿や酸性ガスの除去等で腐食環境を作らないことも重要であるが、生産設備まで坑井元から原油やガスを運ぶ集油、集ガスラインの場合には、防食用薬剤（インヒビター）を注入することで腐食を抑制できる。インヒビターは、流体の成分によって使われる種類が異なるため、通常はラボテストを行い、適切なインヒビターを選定する。

#### (2) 塗覆装防食法

埋設パイプライン（鋼管）が長い年月の使用に耐え得るために要求される防食材料の主な特性は、耐水性、密着性、化学安定性、機械的強度、電気抵抗において優れていなければならない。これらの特性に適合するものとして、かつての瀝青質系材料に代わって、ポリエチレンやエポキシ樹脂などのプラスチックを被覆したプラスチックライニングパイプが近年では多用されている。塗覆装は、ホリデーディテクターと呼ばれる検査機で、ピンホールや膜の薄い箇所などがいないかが確認される。

瀝青質系塗覆装はプラスチック系塗覆装と比較すると、機械的強度や化学的安定性（耐食性）が劣る。普通の土壌では一般にアスファルトジュート巻き（1重巻き）、過酷な腐食を受けやすい土壌や湿地帯にはコールタールエナメルグラスクロス巻き（1重巻き）を採用することがある。また、プラスチックライニングパイプを採用した場合でも、パイプを接合した溶接部については塗覆装がなされていないため、溶接後にポリエチレン系フィルムに自己融着タイプの粘着剤が塗られた防食テープを巻きつけるといった処理が施されている。

海底、河底に埋設する場合でもプラスチックライニングパイプが使用されており、さらにこの上にモルタルライニングを行ない、コンクリートサドルで海底、または河底に固定する場合もある。

パイプラインが大気中に露出する場合は、その環境目的に応じて外面防食方法を選択する。露出パイプラインの外面防食の目的は主に大気腐食防止であり、埋設パイプラインとはおのずと方法が異なる。性能上の条件として、海岸地帯では耐塩害性、その他では対候性、耐水性、耐磨耗性、さらに密着性などが要求される。ガスパイプライン橋、橋梁添架などの外面防食には、さび止め塗装の上に合成樹脂系塗装を重ねたり、ジンクリッチプライマーの上に塩化ゴム系塗装を行ったりする方法が一般に採用されている。

### (3) 電気防食法

塗覆装が完全であっても埋設時の損傷やピンホールを絶無にすることは困難であり、年月の経過とともにその絶縁抵抗は低下し、不測の損傷がある場合にはその部分に局所的な腐食を生ずることがある。よって、電気鉄道の漏洩電流による地下埋設パイプライン腐食に対しては、電気防食によってこれを補い完全に防食する方法が採用されている。

なお、電気防食を十分効果的に実施するためには、防食する部分を他の部分から電氣的に分離する必要がある。例えばパイプラインの場合には、絶縁フランジを使用して防食するパイプライン本線と支線を絶縁する。

#### 1) 原理

電解質溶液と接する金属表面では、金属と液との界面の電位差が箇所によっては著しい不均一性を生じており、これが電気化学作用による金属の腐食機構となる。このような電位の不均衡は金属表面における各種の不均質性と溶液側における不均質性によって惹起されている。このように高電位の部分（陰極）と低電位の部分（陽極）が短絡して局部電池を形成する結果、金属体内部では陰極から陽極へ電流が流れ、また液中では陽極表面の金属が陽イオンとなって溶出し陽極から陰極へ向かって電流が流れる。この電流にともなって陽極が腐食する。図 3.4.4 は腐食の状態を示す。

電気防食法は、この陽極より電解溶液に流出する腐食電池と逆の方向に外部より電流を加え、腐食電流を消滅させ腐食を防止する方法である。

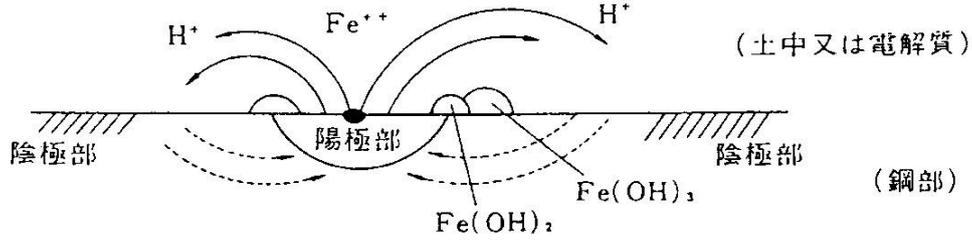


図3.4.4 局部電池の形成と金属腐食

2) 流電陽極方式 (低電位金属接続法)

この方法は図 3.4.5 に示すように、防食すべき地下埋設パイプラインにそれより低電位の金属、すなわち亜鉛、アルミニウム、マグネシウムなどをその埋設パイプラインと接続し、この両者間に起る電池作用により発生する電流を防食電流として使用する方法である。この場合低電位の金属 (流電陽極と呼ぶ) からは、電流とともに金属イオンが溶出して時間とともに消耗することになる。つまりこれら陽極となる金属が犠牲となって腐食していくのである。

流電陽極方式は電食発生領域が比較的狭く、漏洩電流または電位差が小さい場合有効であり、施設も簡単で経済的である。

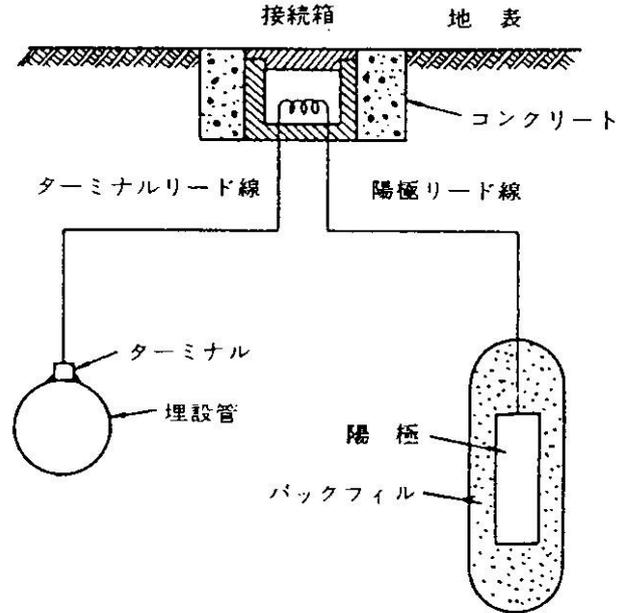


図3.4.5 流電陽極方式

3) 外部電源方式 (強制排流法)

この方法は図 3.4.6 に示すように土壤中に電極を設置し、この電極を外部の直流電流のプラス端子に、地下埋設パイプをマイナス端子に接続し、電極から埋設パイプに向い土壌を通して防食電流を流入させて電食を防止する方法である。

外部電源方法における陽極としては鉄、炭素、人造黒鉛、磁性酸化鉄など種々あるが、敷設の状況によって適当なものを選定する必要がある。流電陽極方式と外部電源方式の比較を下表に示す。

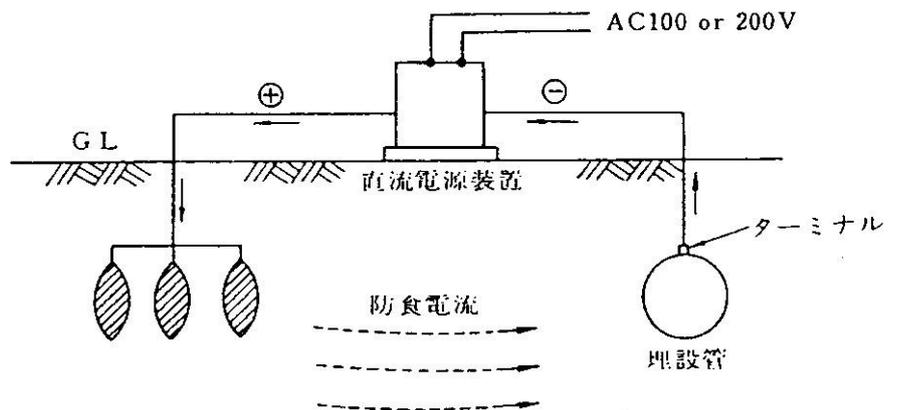


図3.4.6 外部電源方式

表3.4.1 外部電源方式と流電陽極方式の比較

	外部電源方式	流電陽極方式
電 源	電源の得やすい場所	電源の得がたい場所
規 模	大規模施設に有利	小規模施設に有利
腐食規模	腐食が激しく大電流が必要な場所	比較的小電流で足りる場所
比 抵 抗	土壌中の比抵抗の高い場所	比抵抗の比較的低い場所
設 備 費	設備費がやや高い	設備費は安い
維 持 費	維持費が非常に安い	電極の消耗が大きいので維持費がやや高い
管 理	設備の管理が必要	管理の必要はない

4) 排流方式

排流方式とは、地下埋設パイプの腐食が軌条に対して正電位となる場所で甚だしいことから、埋設パイプの一部を負極である変電所、負給電線、あるいは軌条に抵抗の低い導線で接続して、埋設パイプを流れる電流が大地に流出するのを防ぎ、この電流を一括して直接電源または軌条に帰流させる方法である。この方法は設備費も比較的低廉で防食効果があるので、電食に対しては一般的に用いられている方法であるが、埋設パイプと電気鉄道との相互関係および他の埋設体との関係など、敷設に当って多くの注意が必要である。軌条または負給電線に排流する場合に、負荷の変動、変電所の運転状態の変化などで埋設体の排流点が負電位となり、逆に流れることが普通である。また変電所の負極母線に排流する場合も同様のことが起こる。したがってこのような場合には逆流を阻止し、正方向の電流のみを通す装置が必要である。この一方的に排流する装置を選択排流器といい、この装置を使用する方法を選択排流法という。

また排流場所に正電流が逆流する回路構成が生ずる心配のない場合は、地下埋設パイプと変電所の負極母線を単に導線で接続すればよい。この方法を直接排流法といい施設費は最も安い。

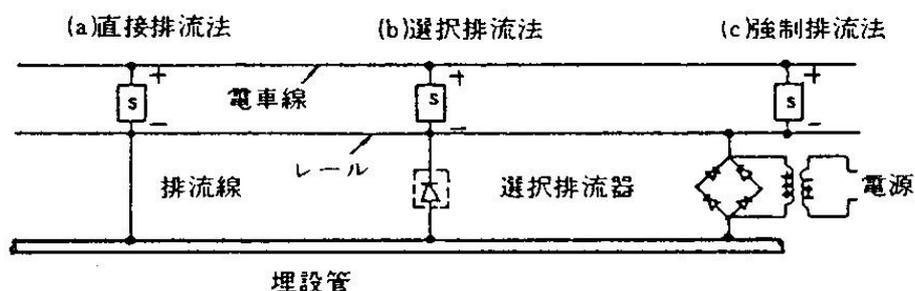


図3.4.7 排流方式

【例題】

送油・ガスパイプラインの電気防食法として、一般に流電陽極法と外部電源法が採用されている。各々についてその特徴を比較した右の表を解答例にならい完成せよ。

	流電陽極法	外部電源法
電 源	不要	必要
規 模	小さい場合に有利	大きい場合に有利
腐食環境		
比 抵 抗		
設 備 費		
維 持 費		
管 理		

## 【例題】

次に文中の〔 〕の中に適当な言葉を入れよ。

地下埋設されたパイプラインの腐食のうち、自然腐食は金属体や土壌の不均質性のため金属表面に形成される〔 ① 〕によって発生し、〔 ② 〕に相当する金属体表面が腐食する。一方、電食は外部の〔 ③ 〕がパイプ内に流入することで発生し、この電流が地中に〔 ④ 〕する金属表面が腐食する。鉄の腐食表面における腐食発生機構は、次の電気化学式として説明される。



## 4.2.4 パイプラインの敷設

## i) 工事施工前の準備

## (1) 事前調査

工事着手前に設計図書に基づき、各種の調査を実施する。

- 1) 既設埋設パイプ・埋設物および障害物（架空線、地上構造物など）の調査
- 2) 現地路線、環境の調査

## (2) 本工事の準備

パイプ(鋼管)の埋設工事に当たり、事前調査などを参考にして、以下のものを準備しておく。

- 1) 設計図書に基づく付近の地理、地形の把握および施工方法の検討
- 2) 設計図書に基づく試掘箇所計画
- 3) 設計図書に基づく埋設工事材料（直パイプ、異径パイプ、特殊材料など）の数量、種類、場所などの設定
- 4) 埋設パイプ材料、重機、骨材（砂、碎石、仮復旧材など）、山留め材、仮設事務所などの用地の確保
- 5) 人員、機械、資機材、副資材などの準備
- 6) 不測の事態に対応する病院などの確認
- 7) 施工計画書の作成
- 8) 関係官公庁への各種許可申請および届出
- 9) 地元 PR

## ii) 工事施工

通常の施工手順を以下に述べる。

## (1) 試掘調査

路線条件によるが、10～50 m 間隔で試掘を行う。これにより、既設舗装厚さ、土質、湧水状況、既設埋設物の位置、離隔、溶接場所（会所）を確認する。また、特殊工事を行う場所については別途計画書を作成し、入念に調査を行う。試掘調査の結果が設計図書と矛盾するときは、設計者などと変更する必要があるかどうかを協議する。

## (2) カッター・舗装壊し工

試掘調査結果や設計図書などの資材により、カッター、舗装壊しの機械を選定する。カッターは舗装厚さに合ったブレードを使用し、施工計画書に合わせた方法で舗装を切断する。切断方法は半切り、全切り、柵目切り、切削などの方法がある。舗装壊し工は、ブレイカー掘削機などで行うが、国道・主要地方道において、舗装が厚い場合はニブラ、アイオン（ジャンボブレイカー）、タックルなどの重機を使用する。

また、既設舗装材のアスファルトコンクリート、コンクリートは産業廃棄物であり、処理方法に諸

手続きが必要であるため、現場踏査の段階で産業廃棄物運搬業者、中間処理場、採集処理場を調査する。

### (3) 掘削工

地山掘削作業主任者を定め、その指示により人力および掘削機にて掘削する。ガスパイプ供給施設や他の埋設物の近傍では、原則として人力で掘削する。その場合には埋設物所有者の立会いを求め、保安措置の指示にしたがって施工する。また、掘削機の使用は刃先誘導者を配置し、掘削機オペレーターと合図方法の打ち合わせを行うこと。

### (4) 土止め支保工

土止め支保工作業主任者を定め、その指示により現場の実情に合った堅固な土止め支保工を施工する。支保工の材料は施工に十分な使用量を準備する。図 3.4.8 参照

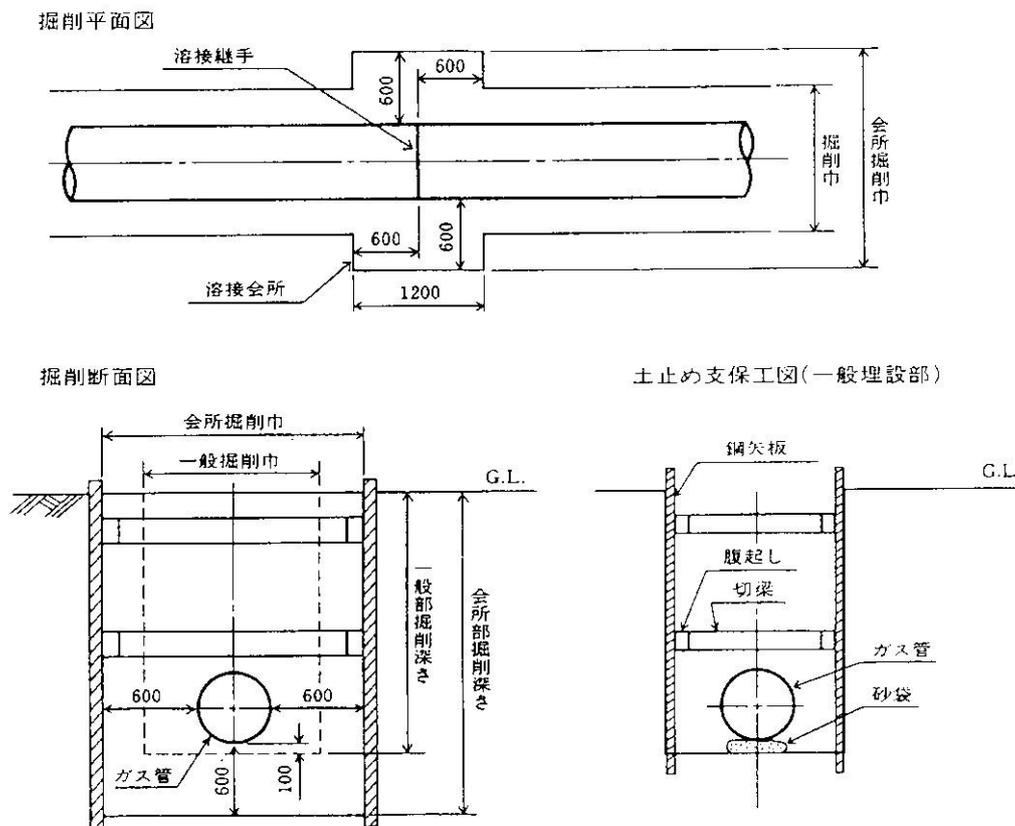


図3.4.8 土止め支保工の一例

### (5) パイプ床処理

パイプ吊降ろしの前に掘削床の石またはコンクリート塊などを除去し、良質の砂を入れた土のう袋を3m以下に1箇所割合で平にし、パイプ床を作る。軟弱地盤で砂置換をした箇所においても砂袋を敷く。

### (6) 水替工

工事区域内に湧水、滞水などがある場合は、現場状況にあった施設、方法により排水を行う。一般的には水中ポンプと沈砂槽を準備し、掘削溝より汲み上げた水は直接、道路・排水施設などに流さず、ろ過施設(沈砂槽)を設けて、水だけを排水施設や河川に放流する。

(7) 小運搬・吊降ろし

直パイプまたは地上でプレハブしたパイプ体をトラックとクレーン車、または小型クレーン付きトラックなどで掘削溝の近くまで運搬する。付近までトラックが入ることが出来ない場合は、台車と人力により運搬する。運搬時はトラック、台車、パイプ台などの金属部や木部にパイプ体が直接当たらないように、ゴム板などの緩衝材を入れ、パイプ体と塗覆装を保護し、損傷を防止する。

(8) 溶接工事

1) 接合方法

ネジ継手、フランジ継手および溶接継手などが広く行われてきたが、現在では、安全性の高い溶接継手が主流となっている。溶接方法はアーク溶接（電気溶接）が一般的である。アーク溶接の中でも一般配管では突合せ溶接継手が多用されている。V型継手はパイプ厚  $t$  が 2.0~20 mm に用いられ、開先角度  $d = 60\sim 70^\circ$ 、ルート間隔  $g = 1\sim 4$  mm、ルート面  $f = 0\sim 2.6$  mm が普通である。

図 3.4.9、3.4.10 参照。

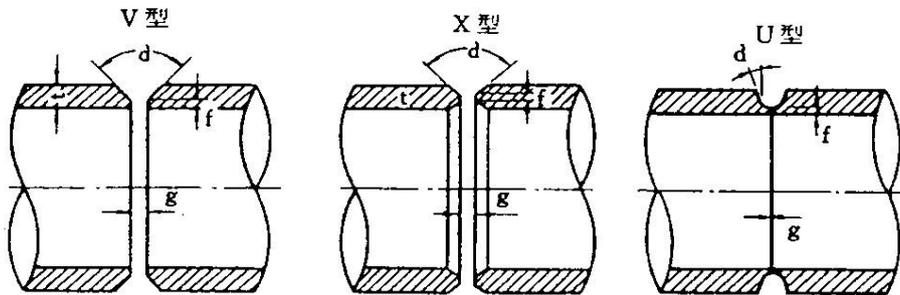
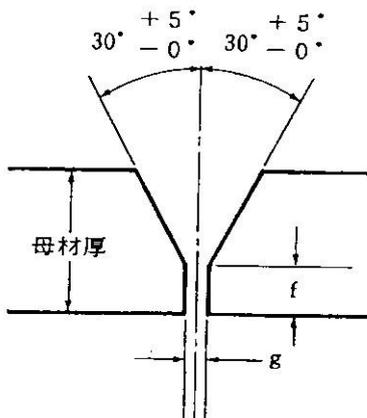


図3.4.9 突合せ溶接継手



口径 (mm)	(mm) g	(mm) f
50以下	1.7±0.7	0 ~ 1.6
80 ~ 150	2.0±1.0	0.2~1.8
200~ 350	2.0±1.0	0.7~2.3
400~ 1,050	2.5 <sup>+1.5</sup> <sub>-1.0</sub>	1.0~2.6

図3.4.10 V型継手の開先

2) 現場溶接作業

現場での溶接は、地上溶接と地下溶接に分けられる。埋設パイプ路に沿って配列されたパイプ（鋼管）は、直接部では可能な限り数本ずつ地上で溶接する。また、地下障害物などの部分は、その種類・大きさによっては、あらかじめ伏越し、切り回しのプレハブ溶接をしておき、施工能率を上げて工程の短縮を図る。

溶接芯出し作業は溶接の前に鉄工が行う。開先加工、清掃、開先検査などを行い、アウトークランプで芯出しを行う。クランプは、突合せ溶接の開先部の目違い、ギャップ調整を行い、真円の矯正をするために使用する。本溶接を行う前に、アングルグラインダーやワイヤーブラシなどでクランプ溶接の刺繍点の整形・清掃を行った後、開先部分の再検査を行って、クランプ溶接に割れ、ブ

ローホールなどの溶接欠陥がないことを確認する。欠陥が発見されたときは、この部分の溶着金属を完全に除去した後に本溶接を施工しなければならない。本溶接作業中に最も重要なことは、第一層目溶接の完全な溶け込みであり、第一層目に欠陥が生じた場合はその上層に他層を溶接しても強度上の欠陥となり、継手強度を保持し得ないので、細心の注意を要する。

地下溶接作業は地上溶接と比べて条件が悪く、掘削溝の中で溶接姿勢にかなりの制限を受けるので、会所掘削寸法を確保することにより、溶接継手の品質を良いものにする必要がある。地下溶接は現場施工の要となる作業なので、条件の悪い場所でも溶接士が安全でかつ安心して施工できる環境が求められ、特に夜間作業の場合は工事帯の中、掘削溝、会所部分などは十分な光量の照明が必要である。

### 3) 溶接部検査

溶接作業終了後、溶接ビードの外観目視検査を行い、特にアンダーカット、余盛、スパッターを確認し、放射線透過試験を行う等、非破壊検査によって溶接部の健全性を確認する。また、耐圧試験、気密試験によりパイプからの漏えいがないかを確認する。

試験方法等については後述する。

### 4) 現地塗覆装作業

溶接部の非破壊検査合格後に現地塗覆装を実施する。この塗覆装はもともと防食が施されている部分と同等の防食性能が得られる熱収縮チューブや自己融着型防食テープなどを使用して行う。

## (9) 埋戻し・仮復旧工

検査および塗覆装作業終了後、速やかに埋戻し作業を行う。埋戻し材は良質の砂を使用し、パイプ回り 30 cm 以内は石・コンクリート塊が混入しないようにし、パイプの沈下および道路の陥没を防止するためにも、パイプの下にも砂が十分回るように突き入れ、ランマーなどの転圧機で十分に締め固める。この際には塗覆装を傷めないように注意することが大切である。砂埋戻しの場合は、水締めを行うのが最も好ましい場合もあるが、砂の最適含水比に注意する。

路盤・表層材については、道路管理者の指示や設計図書により、規定の骨材を使用する。路盤は碎石や粒調碎石を使用するので、使用材料を間違えないように留意する。路盤は転圧機で十分に転圧する。転圧完了後に加熱合材または常温合材などの仮復旧表層材を 5~10 cm の厚さに敷き均し、転圧して仮復旧を完了する。

## iii) 検査工事

### (1) 非破壊試験

常用圧力 0.98 MPa 以上、外径 100~2,000 mm、肉厚 6~40 mm のパイプラインに関しては、溶接部の非破壊試験方法が JIS Z 3050 もしくは同 JIS に記載された関連 JIS に規定されており、原則として外観試験および放射線透過試験を行う。また特に強度が必要な箇所では外観試験、放射線透過試験および外面からの超音波探傷試験を行い、更に外面から磁粉探傷試験または浸透探傷試験を行う。

試験の合否判定基準は JIS Z 3050 附属書に記載されている。

#### 1) 外観試験

目視により、余盛の形状、アンダーカットの大きさおよび分布状況、試験部およびその付近の割れ、アークストライクの跡、オーバラップ、ピット、ジグ跡、ビート形状ならびにスラグおよびスパッターの付着の有無について確認する。

## 2) 放射線透過試験

X線による放射線透過試験は、JIS Z 3050 もしくは JIS Z 3104「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」にしたがって行う。検査箇所は最高使用圧力に応じて抜き取り数が決まるが、100 %全数検査することもある。X線撮影の結果は同JISの記録要領に基づき記録し、フィルムは数年間保管されるのが通常である。

## 3) 超音波探傷検査

高圧幹線に使用される高張力などのハイグレードのパイプ溶接部の欠陥検査には、超音波探傷検査も実施される。試験方法は JIS Z 3050 もしくは JIS Z 3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」にしたがって実施される。

## 4) 磁粉探傷検査

原理は省略するが、検査の可否は JIS G 0565「鉄鋼材料の磁粉探傷試験方法および磁粉模様の分類」にある磁粉模様の等級分類により判定する。各種法令の判定基準の多くは、割れは許容されないが線状磁粉模様および円形状磁粉模様は試験箇所により長さ 4 mm もしくは 8 mm までは合格としている。

## 5) 浸透探傷検査

溶接構造物の開先面、初層、最終層溶接部、治具跡などの表面欠陥の検出には一般的に溶剤除去性染色浸透探傷試験（カラーチェック）が実施されている。明るい場所であれば室内外、昼夜を問わず行うことができ、特別な電源も要しない簡易な試験方法である。判定にあたり、割れによる浸透指示模様は不合格とし、線状浸透指示模様、円形状浸透指示模様は試験箇所により長さ 4 mm もしくは 8 mm までは合格としている。

## (2) パイプライン内清掃作業

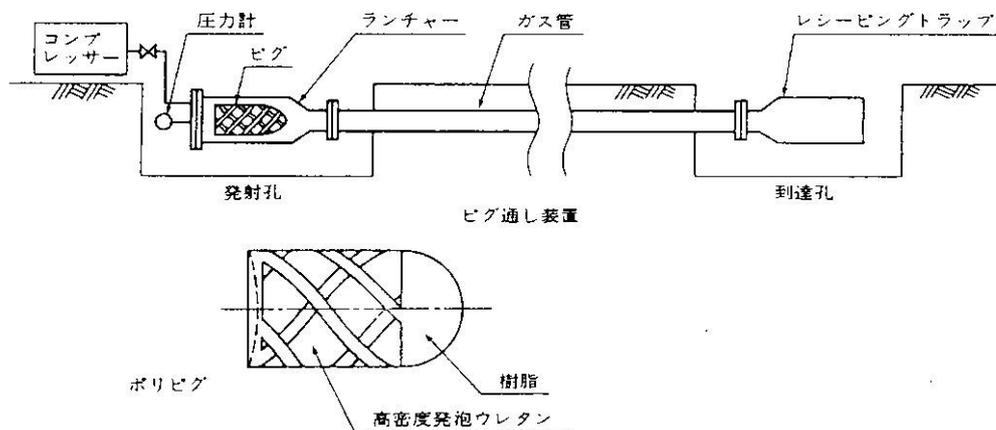


図3.4.11

パイプライン内には溶接工事のスラグ、ほこり、水その他の異物が残留していることがあるので、流体輸送に支障の出ることがないように、事前にパイプライン内をピグ清掃する。発進坑にピグランチャーを、他方にレーザーを取り付け、ピグランチャーにポリピグを挿入して、コンプレッサーの圧力でポリピグを到達坑に圧送する。一般的に 200～1,000 m 毎に施工することが多い。

## (3) 耐圧気密試験

完成検査として耐圧試験と気密試験を行う。検査の記録は自記圧力計と自記温度計で記録する。

### 1) 耐圧試験

耐圧試験はパイプラインが強度的に内圧に耐えることを確認するための試験であり、漏洩のみでなく、著しい変形や台・サポートなどの異常も検査の対象とする。但し、パイプの溶接部に対して JIS Z 3104 に則った放射性透過試験を行い合格（等級分類が 1 類、2 類または 3 類）している場合、耐圧試験は必要ない。

中低圧パイプラインでは空気や不活性ガスを使用し、高圧パイプラインでは水圧試験を行うことが普通であるが、場合によっては不活性ガスの使用も認められる。

### 2) 気密試験

気密試験は、パイプライン使用圧力で漏えいが生じないことを確認するための試験であり、一般的に最高使用圧力の 1.1 倍以上の圧力をかけ、漏えいがないか調べる。但し、パイプ溶接部の全数に対して放射性透過試験を行い合格している場合は、使用する圧力をかけて漏えいがなければ良い。試験時間はパイプラインの容積が大きくなると長くなるが、最長でも 24 時間漏えいがない場合は合格となる。

パイプライン端のプラグ、平板、バルブおよび露出部の継手は、規定の発砲液で漏洩の有無を検査する。

## 5 貯 蔵

### 5.1 原油の貯蔵

#### 5.1.1 原油タンク

原油貯蔵の方法として用いられているのはほとんどタンクによる貯蔵法である。現在石油産業において使用されているタンク類は、原油用、ガソリン用、LPG 用などそれぞれに応じて球型タンク、円型タンク、伸縮屋根型タンク、膜型タンク、円錐屋根型タンク、浮屋根型タンクなどが用いられている。また、わが国における石油備蓄基地には、地上タンク、地中タンク、洋上タンク、地下岩盤タンクという多様な備蓄タンクが採用されている。これらの中から建設費が安価で、貯蔵中の蒸発損失が少なく、安全性の高いタンクが選定される。

現在、原油貯蔵タンクとして広く使用されているのは、円錐屋根型タンク（コーンルーフタンク）と浮屋根型タンク（フローティングルーフタンク）が多い。また、タンクはその用途により静置用タンク、貯蔵用タンク、操作用タンクと計量用タンクに分けられる。

以上のタンクはほとんど固定式のものであるが、とくに容量を小さくし、スキッドベース付で移動可能としたものもあるが、これは試油（ガス）や仮採取施設のときなどに使われる。

#### i) 円錐屋根型タンク（図 3.5.1）

原油貯蔵タンクとして最も構造が簡単で安価に建設できるので一般的に広く利用されている。

円錐屋根型タンクの操作圧力は水柱 60~70 mm であって、タンク内に存在する原油揮発ガスと空気との混合気体の圧力がタンクの操作圧力より高くなると、混合気体は開放弁より大気中へ排出されて原油の揮発成分の損失となる。これは昼夜の気温の変化によって毎日起るもので呼吸損という。また、タンクに内容液を張り込む時に流入した内容液と原理的には等量の蒸発した蒸気と空気が放出されることによる損失を受入損失という。反対に、内容液を払出すことによりベーパー空間が増し、これに内容液の蒸発が追従しきれずに外部から空気が入り込むことで圧力の平衡が保たれるが、その増加分の蒸発分圧までの蒸発が起り、結果として蒸発損失が発生する。これを払出損失という。

日本では一般に呼吸損失は年間で全量の 3.5 %、受入損失と払出損失は 0.2 % くらいである。この量は軽視できない量であり、タンク内で発生する揮発ガスと空気との混合ガスの爆発しやすさとともに、円錐屋根タンクの最大の欠点となっている。この欠点を改善したものが、次に述べる浮屋根型タンクである。

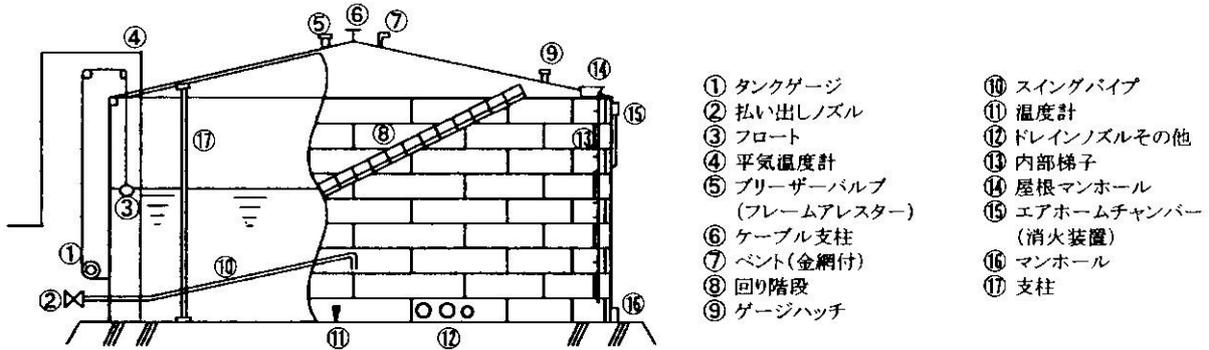


図3.5.1 円錐屋根型タンク

ii) 浮屋根型タンク (図 3.5.2)

浮屋根型タンクは貯蔵原油上に浮んでいて自由に上下する鋼製の浮屋根があって、浮屋根のへりとタンクの内壁との間はシールメカニズムにしてあり、ここから原油が蒸発しないようになっている。原油面に屋根が密着しているから、空気や揮発性ガスが存在する空げきがほとんどなく蒸気損失が大幅に減少し、発火、爆発の危険がきわめて少ない。呼吸損失は円錐屋根タンクの 1/5~1/3 で、受入損失もほとんど無視できる程度まで低減するが、払出損失は浮屋根が下降するときに、側板に付着した内容液が大気中に露出し蒸発することで生じる。これは濡れ損失とも言われる。円錐屋根タンクにくらべて構造が複雑なため、修理維持に手間がかかるし、屋根の排水や大雪の荷重に対する注意や寒冷時におけるシールメカニズムの点検など注意が必要である。浮屋根型タンクには、その屋根の型式によって皿型、ポンツーン型、タンブルデッキ型などに分けられる。

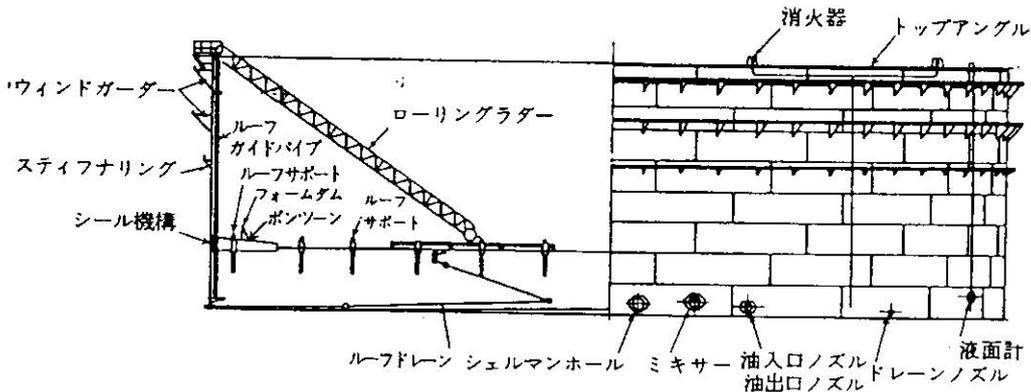


図3.5.2 浮屋根型タンク

iii) タンクの設計と建設

タンクの設計と建設に当たっては「JIS B 8501 鋼製石油貯槽の構造 (全溶接製)」を基準にしているのでこの規格を参照されたい。JIS 規格の決定に当たっては「API std12c 溶接製貯油タンク」を参考しているので、不明の場合は API 規格を参照すること。また、タンクの付属品やタンクの建設については「危険物の規制に関する政令 (以下、政令) および規則 (以下、規則)」（消防法) と (鉱山保安法) に定められ規制されているので、これらの規制にしたがって設計、製作、検査および保安管理をおこ

なわなければならない。現場向けの解説書としては「図解、危険物施設早わかり」（全国加除法出版 KK 刊）などを参照されたい。以上の関係法規に従い、屋内タンク、屋外タンク、地下タンク等規格規制に基づいて設計建設する。特に屋外タンクについて保安上の規制事項について以下に述べる。

#### iv) 保安上の規制事項

##### (1) 保安距離

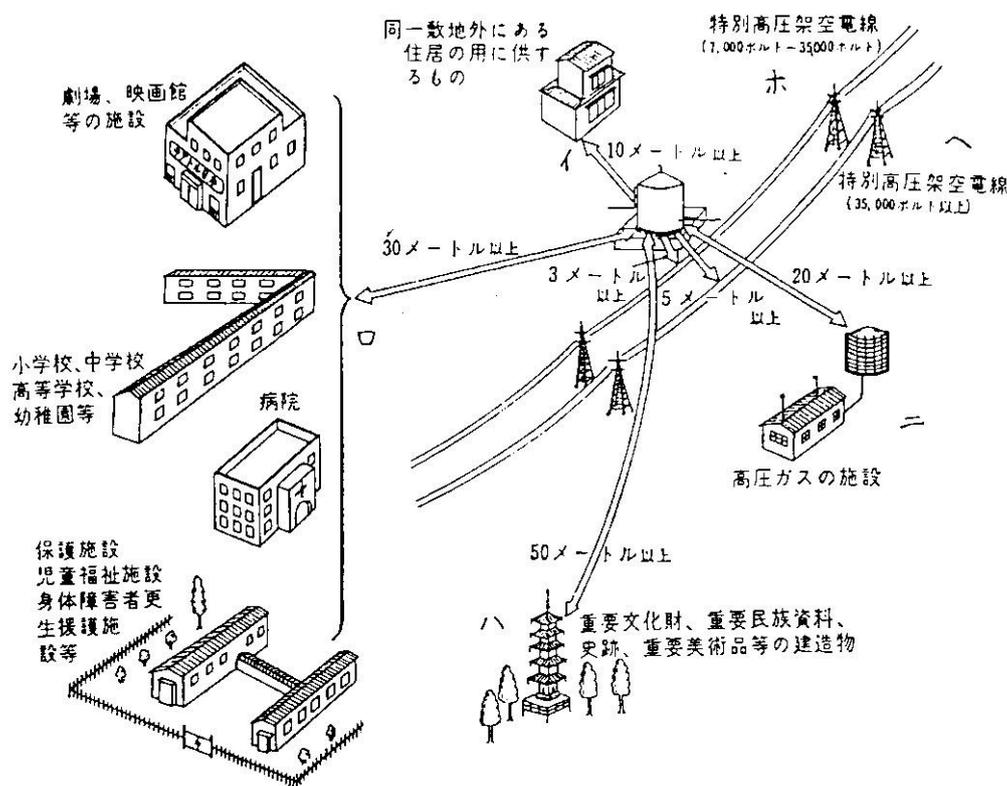


図3.5.3 保安距離

政令第9条1項（製造所の基準）のイからへに掲げられている、建築物などから製造所までの保安距離の規定は、屋外タンク貯蔵所の保安距離についても準用される。保安距離は、イからへまでに掲げる建築物などからタンク外側までの間の距離であって、図3.5.3に示すとおりである。イについては屋外タンク貯蔵所と同一敷地内にあるものは除外される。ロの施設については人の存在する施設そのものに対する距離であって、付属施設に対しては距離をとる必要はないと考えられる。距離を保たなければならない建築物または工作物などと屋外タンク貯蔵所との間に他の建築物または工作物が存在する場合があっても防災上および避難上の観点からそれぞれの距離を保有しなければならない。保安距離については、不燃材料で作られる防火上有効な塀を設けることなどの措置を講ぜられる場合、市町村長などの認定によりこれを短縮することができるが、これは敷地の状況などから見てやむを得ない場合に限る。

##### (2) 保有空地

タンクの周囲には、政令第11条2項の表の区別に応じ、それぞれ保有空地を保有しなければならない。

ここで原油は危険物第4類の第1石油類に属し、指定数量は200ℓである。空地は延焼防止上の必要性とともに、消防活動上必要な空地を意味しているものであり、延焼の媒介となったり、消防活動に

支障となるような工作物はすべてこの空地内にあることは許されない。保有空地はタンクと一体をなすものであり「屋外タンク貯蔵所」として、必ず保有しなければならない義務的な空地のことであり、この点が保安距離と異なるところである。防油堤はタンクの設備であり、これを保有空地外におくために広げることは、漏洩の際の流出面積を拡大し隣接建設物などへ影響を与えることとなるなど、好ましくない問題が起るので、規則 22 条 2 項 1 号（防油堤）に定める容量以上であれば空地内に設けてもよいものと考えられる。

また、屋外タンク貯蔵所の保有空地の特例として、規則第 15 条 1 項より保有空地を短縮することができる。すなわち、取扱う 2 基以上の屋外タンク貯蔵所を同一の敷地内に隣接して設置する場合は、引火点の範囲により各々表 3.5.1 の 1/3 あるいは 2/3 に短縮できる。ただし、空地幅は 3 m 未満とすることはできない。保有空地の短縮例（ただし引火点が 200 °C 以上の場合）を図 3.5.4 に示す。

表3.5.1 保有空地

危険物の貯蔵最大数量	空地の幅
指定数量の 500 倍以下	3m 以上
指定数量の 500 倍を超え 1,000倍以下	5m 以上
指定数量の1,000倍を超え2,000倍以下	9m 以上
指定数量の2,000倍を超え3,000倍以下	12m 以上
指定数量の3,000倍を超え4,000倍以下	15m 以上
指定数量の4,000倍を超える	当該タンクの水平断面の最大直径または高さの数値のうち大なるものに等しい距離以上。ただし 15m 未満であってはならない。

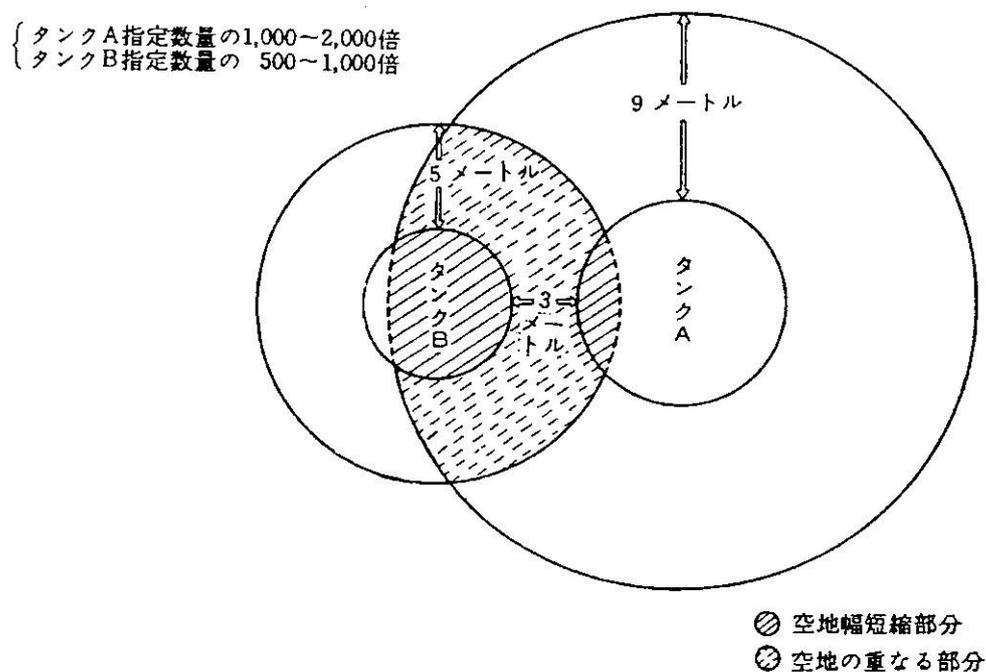


図3.5.4 保有空地の短縮例

## (3) 防油堤

政令第 11 条により第 4 類危険物の屋外貯蔵タンクの周囲には、危険物が漏れた場合にその流出を防止するための規則（第 22 条防油堤）に定める防油堤を設けなければならない。すなわち、防油堤の容量はタンク容量の 110 % 以上で、同一敷地内において隣接して設置された 2 基以上のタンクを同一防油堤でかこむ場合も、当該タンクのうち、その容量が最大であるタンク容量の 110 % 以上なければならない。また、防油堤の高さは、0.5 m 以上としなければならない。防油堤は鉄筋コンクリートまたは土で造り、かつその中に収納された油が防油堤外に流出しない構造であることが要求される。防油堤には、その内部の滞水（雨水など）を外部に排出するための水抜口を設けるとともに、これを開閉する弁などを防油堤の外部に設けなければならない。（収容能力の減少の防止）。

## (4) 通気管（ブリーザーバルブ、フレイムアレスターなど）（図 3.5.5）

政令第 11 条 8 項により、屋外貯蔵タンク（圧力タンク以外）には、規則第 20 条（通気管）で定める通気管を設けなければならない。通気管は無弁通気管、または大気弁付通気管とし、その構造は次のようなものである。

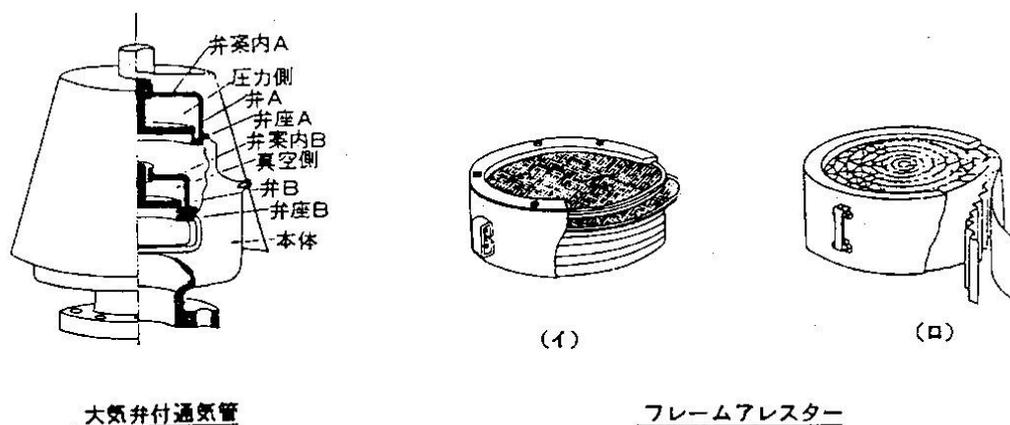


図 3.5.5

## 1) 無弁通気管

- ① 直径は 30 mm 以上であること。
- ② 先端は水平より下に 45 度以上曲げ、雨水の侵入を防ぐ構造とすること。
- ③ 細目の銅網などによる引火防止装置を設けること。

## 2) 大気弁付通気管

- ① 水柱圧力 500 mm 以下の圧力差で作動出来るものであること。
- ② 上記③と同じ銅網などによる引火防止装置を設けること。

通気装置は、危険物の出入れ、または日照などによる内圧の変化に対し、これを常圧に保つための呼吸作用をなすものである。通気管の銅網は 40 メッシュが基準とされている。

低引火点の危険物を貯蔵するタンクには、安全上大気弁付通気管が適当である。大気弁付通気管は、タンクの内部の温度変化に伴う呼吸作用を一定圧力下に抑制し、通常時におけるタンク内の蒸発を少なくしようとするもので、その作動圧は 500 mm 水柱以下と規定されている。大気弁は図 3.5.5 に示すとおり、通常圧力側と真空側の 2 室に区分されタンク内圧力が上昇すると、弁 A と弁座 A が離れ大気圧に通ずるようになっている。タンク内圧力が負になると、弁 A と弁座 A が密着し真空が出来るので、弁本体脇の開口部から大気圧により弁 B を押し上げ弁座 B と離し、これから大気がタンク内に進

入する構造になっている。大気弁は、その下部に図 3.5.5 に示すフレイムアレスター（引火防止器）が用いられる。

タンクが大きくなった場合、通気管は通気能力上適当な径および数を設けるべきである。

(5) 液量指示装置（液位指示計）

政令第 11 条 9 項により、液体の危険物の屋外貯蔵タンクには、危険物の量を自動的に指示する装置を設ける。

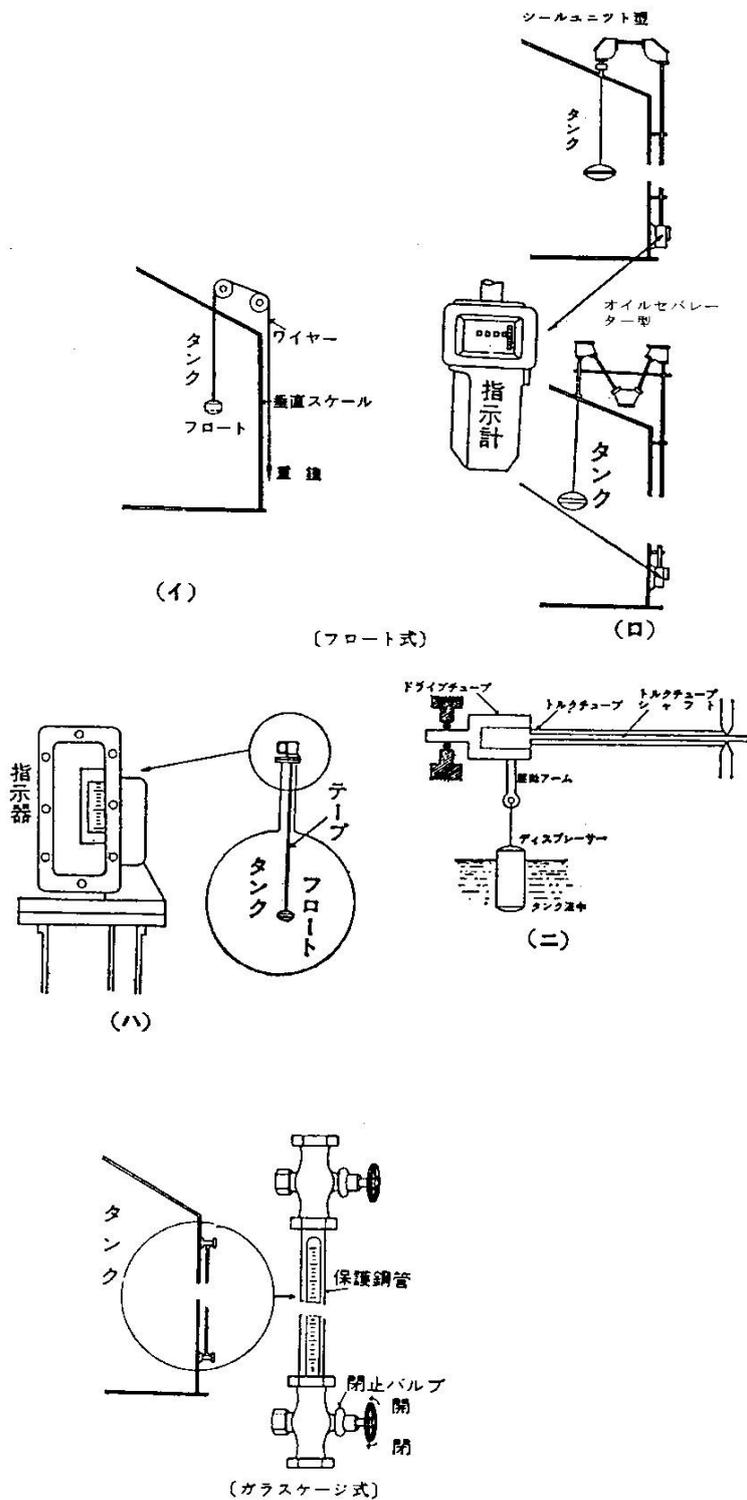


図 3.5.6 各種液量指示計

指示装置を大別するとタンクの側壁などに直接指示するものと、自動制御室などに遠隔指示するものがある。また、これらはフロート式、ガラスゲージ式、圧力式、マイクロ波式およびラジオアイソトープ式に分類される。フロート式はフロートと重錘をワイヤーによりバランスをとり、タンク側壁に設けられた垂直スケール、または指示計により液位を測定するもので、現在一般的にこの方法が最も多く使われている。図 3.5.6 液量指示装置参照のこと。

#### (6) 避雷設備 (アース)

政令第 11 条 14 項により、指定数量の 10 倍以上の危険物を貯蔵する屋外タンク貯蔵所には有効な避雷設備を設けなければならない。有効な避雷設備とは JIS A 4201 に合致するものとされている。なお、アースの接地抵抗は  $10 \Omega$  以下でなければならない。タンクと接地導線の接続方法は図 3.5.7 を参照のこと。

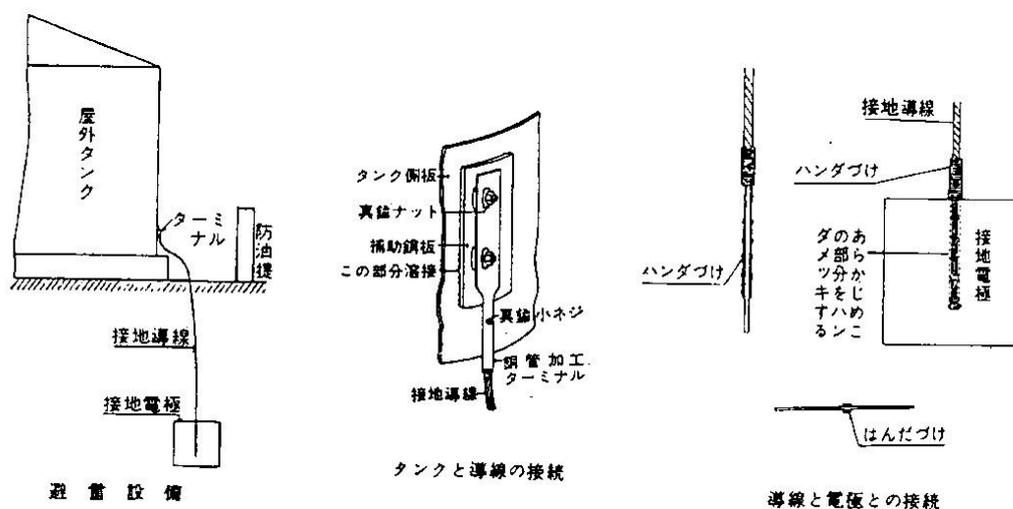


図3.5.7 アースの接続方法

#### (7) 注入口

政令第 11 条 10 項および規則第 18 条 2 項参照のこと。屋外貯蔵タンクの注入口は、タンクと一体の付属設備であって、注入口がタンクからいかに離れていても付属設備であるので、上記政令によらなければならない。

#### (8) 水抜管

政令第 11 条 1 項の 11 の 2 により、屋外貯蔵タンクの水抜管はタンクの側板に設ける。

ただし、規則第 21 条の 4 (水抜管) により、タンクと水抜管との結合部分が地震などにより損傷を受けるおそれのないように、水抜管の周囲に十分な空間がある場合は底板に設置することができる。

#### (9) 配管

政令 11 条 12 項により、屋外貯蔵タンクの配管は火災などによる熱によって容易に変形する恐れのないものであることが要求される。

#### (10) 配管の緩衝装置 (フレキシブルチューブなど)

政令 11 条 12 項の 2 により、液体の危険物を移送するための屋外貯蔵タンクの配管は、地震などにより当該配管とタンクの結合部分に損傷を与えないように設置する。衝撃があっても管とタンクの結合部分に損傷がなければ、元バルブを閉めることによって危険物の流出を防ぐことができる。損傷を与えないような設置方法として、ループ方式と伸縮継手方式などがあるが、ループ方式ではベントの取

付けなどにより広い場所が必要となるため、伸縮継手方式（フレキシブルチューブ）が多く使われている。これはステンレス鋼のベローズの外部に帯条の編組が施してあり、内圧による推力および異常な引っ張りなどにも耐えられる構造となっている。しかし、耐圧や引っ張り強度などは他の方法より弱いので、最高圧力 10 kgf/cm<sup>2</sup> で使用される例が多い。図 3.5.8 参照。

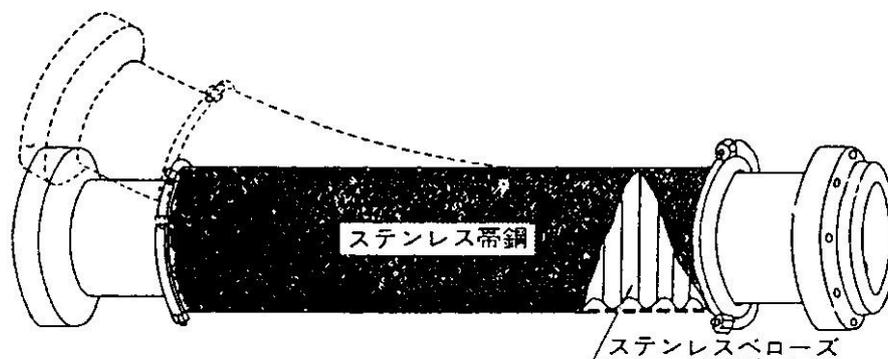


図3.5.8 フレキシブルチューブ

#### (11) 弁

政令 11 条 11 項により、屋外貯蔵タンクの弁は鋳鋼またはこれと同等以上の機械的性質を有する材料で製作され、かつ危険物が漏れないものであることが求められる。

鋳鉄の場合は亀裂などが入りやすく、また火災により溶融しやすいので鋳鋼を用いるように規定されている。この場合、配管に設ける弁とは規定されていないのデータタンクに最も近い部分に設ける弁を鋳鋼製とすることにより、破損などによる危険物の流出を防止する。注入管（張込み線）のように注入口がタンクのトップにある場合は、事実上弁の破損により危険物が流出することはないのデータタンクに最も近い弁ではある特例適用の余地（鋳鋼弁でなくともよい）があり得る。鋳鋼弁の肌はなめらかな鋼色を呈し、新品の場合は鋳鉄弁と明確に見分けられる。なお、鋳鋼に準ずるマレーブル（黒心可鍛鋳鉄）製バルブも使用される。

#### (12) ポンプ設備とその保有空地

屋外貯蔵タンクのポンプ設備すなわちポンプおよびこれに付属する電動機をいい、ポンプおよび電動機のための建築物、その他の工作物を設ける場合には、政令 11 条 10 項の 2 に定められているので参照されたい。図 3.5.9 参照。

#### (13) 検査

##### 1) 水張検査

政令第 11 条 4 項により、圧力タンクを除くタンクにあつては水張試験を行わなければならない。水張試験はタンクに満水した状態で実施する。この場合ハンマーによる軽打は全面的に実施する必要はなく、水頭圧を受ける底部（底部または下部側板）、または不良溶接箇所を選んで部分的に実施すれば十分である。漏水は噴出する場合も稀にあるが、滲み出る程度なので、この発見には細心の注意を要する。

##### 2) 底板試験

水張試験の際、底板の点検が不可能なタンク（円錐型縦置の大型タンク）については、底板完成時においてバキューム試験を実施するのがよい。

これはテストボックスをあらかじめ石鹼液を塗布した溶接部分にあて、真空ポンプにより負圧を

つくと、漏洩部分があった場合は、その部分の石鹼液が泡立つことによってこれを発見する方法である。真空度は概ね水銀柱 400 mm で実施するのが普通で、気密試験器の枠の底部には気密を保つため軟質ラバーが取付けられている。図 3.5.10 底板検査参照。

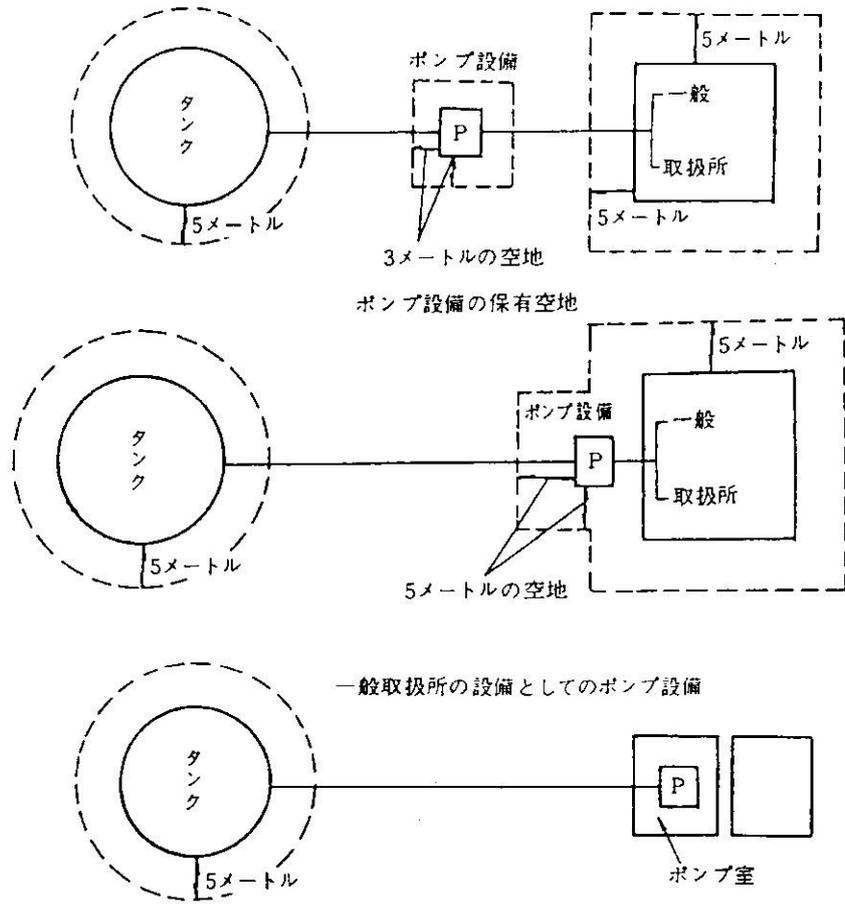


図3.5.9 ポンプ設備の保有空地

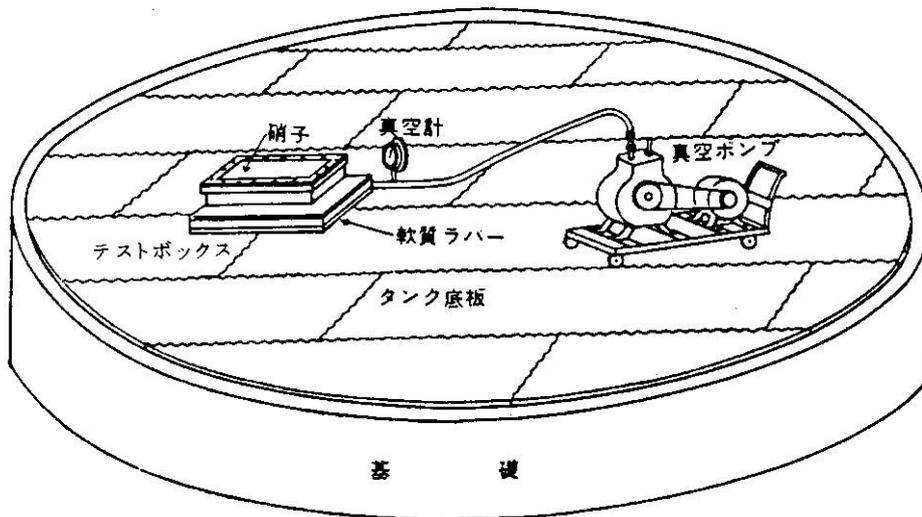


図3.5.10 底板検査

#### (14) 錆止め塗装

政令第 11 条 7 項により、タンクは最低の厚みを保持するため錆止め塗装が必要である。塗装は下塗装用として光明丹塗装が用いられ、上塗剤としては熱の吸収排除の目的も兼ねてアルミニウム塗料を用い、蒸発をできるだけ抑制するのが経済上からも火災予防上からも効果的である。また、タンク底板と基礎部分との間は水などにより底板が腐食するおそれがあるので、通常コールタール、アスファルトなどを底板に塗布、または基礎上に散布して腐食を防いでいる。

#### (15) その他

その他タンク付属物には、マンホール（50 kl 以上）、予備引出しパイプなどを設けなければならない。標識および掲示板については、政令第 11 条 3 項および規則第 17 条（標識）、第 18 条（掲示板）の項を参照されたい。

### 5.1.2 タンク内作業

危険物タンクの修理、または清掃作業はかなりの危険を伴う作業なので十分な注意を要する。その要点を以下に述べる。

- ① 必ず当該危険物に対する知識経験の豊富な監督者の指揮の下に行なうこと。
- ② タンク内の残留危険物は、外部からの手段で除去すること。人がタンク内に入って作業することは原則的にはならない。
- ③ 次いデータンクの配管、弁、継手などを取外し、ブラインド板を入れる。
- ④ 掃除は内容物の種類により、水、熱湯、水蒸気を適当に選定する。油性のものにはソーダ液、ソープレスソー液などが有効である。可燃性ガス中に水蒸気を高速で噴出させると、静電気を発生するので十分アースする必要がある。
- ⑤ タンク内部のガスをガス検知器で試験し、完全にガスがないことを確認し、作業員の立入り、または溶接を開始する。
- ⑥ タンク内では作業員の接地抵抗が低くなり感電しやすいから、ゴムシートその他の電気保護用具を用いること。

#### 【例題】

石油タンクを清掃するときどんな注意がいるか。

- ① 内部の有害ガスを完全に除去し、危険のないことを確かめる。
- ② 配管等にブラインド板を入れる。
- ③ 内部でやむを得ず作業する場合、腰網を使用し、見張り人を置く。

### 5.1.3 消火設備

#### i) 火災および消火について

火（燃焼）の現象は化学的立場から「光と熱の発生をともなう酸化反応である」と定義されており、一般的に燃焼の条件としては、燃料、空気、熱の三要素が共存した場合にのみ燃焼が起りうるものであるから、これらのいずれか一つを除くことにより火は消える。

すなわち、消火の原則は次のごとくである。

- ① 空気を遮断する方法
- ② 燃料をなくする方法
- ③ 熱を取る方法

このことはただちに危険予知の手段、防火消火の方法に利用される。

また、火災の種類を区分すると基本的に次の3種類に大別される。

(1) A級火災（一般可燃物）

消火には冷却が主で、消火液としては水または水溶液が用いられる。手動ポンプ、重曹酸、泡沫式などがこれに属する。

(2) B級火災（引火物物質火災）

消火には空気遮断が主で、消火液は化学消火液を用いる。泡沫、揮発性不燃液－四塩化炭素など、炭酸ガス、消火粉末－ドライケミカルなどがこれに属する。

(3) C級火災（電気施設火災）

消火液としては電気伝導性のものは用いられない。有機性消火液が用いられる。

ii) 消火施設

消火施設は、対象となる危険物の種類、規模、予想される火災の状態に基づき有効性と経済性を考慮して、最も適応した種類の設備を選定しなければならない。

生産関係では上記すべての火災が予想されるが、ここでは原油の貯蔵に関連する B 級火災について述べる。

採取施設のうち原油および可燃性ガスを取扱う施設を対象とする消火設備は次の種類である。

消火設備の区別		通称
第3種	固定泡消火設備	エアフォーム消火装置
第4種	消火粉末を放射する大型消火器	ドライケミカル消火器
第5種	消火粉末を放射する小型消火器	ドライケミカル消火器

消防法では、政令第 20 条（消火設備の基準）および規則第 33 条、34 条、35 条により、屋外タンク貯蔵所を次のように分類し、消火設備の基準を定めている。

- ① 著しく消火困難なもの（危険物の液表面積が 40 m<sup>2</sup>以上のもの、または高さが 6 m 以上のもの）第 3 種（固定式の泡消火設備）、第 5 種
- ② 消火困難なもの（①以外）、第 4 種および第 5 種
- ③ その他のもの、第 5 種

消火器および消火設備は、その能力単位（規則第 31 条消火設備の能力単位）の数値が、その危険物の所要単位（規則第 30 条所要単位の計算方法で危険物は指定数量の 10 倍を 1 所要単位とする）の数値に達するように設ける。

危険物第 4 類を消火対象とする固定消火設備としては、空気泡消火設備を採用する。かつて固定装置として粉末消火設備を採用したことがあったが、保安全管理のし易さと安定性で前者が優れているので、現在では空気泡に統一されている。固定消火装置は直接屋外タンクに接続されており、補助設備として泡消火栓が設けられ（多くの場合泡原液はタンク 1 基分と消火栓分若干量）、また泡消火栓は水消火栓としても利用できる。

可搬式消火器としては、危険物第 4 類に適する消火器のうちから、使いやすさと消火能力などを勘案して重炭酸ソーダ（NaHCO<sub>3</sub>）を主剤とする粉末を放射する消火器（俗にドライケミカル消火器とよばれている）を採用していたが、近年は第 1 リン酸アンモニウムを主剤とするもの（俗に ABC 消火器とよばれる）が主に使用されている。その他に重炭酸カリウムを主剤とするもの（俗に PAK 消火器とよば

れる)がある。化学泡を放散する小型消火器は、油火災に対する能力単位が小さいので適当ではない。固定消火装置は毎年1回、次の項目について定期検査を実施する。定期検査から次の定期検査までの間、月1回以上起動テストを行なうことが望ましい。

- ① 空気泡原液性能検査、損保規則により精密検査
- ② 原液貯蔵槽の点検
- ③ 発泡器、泡ヘッド、泡ノズルの分解手入れ、放水試験
- ④ 弁類、配管の破損、腐食漏洩の点検
- ⑤ ポンプ試運転、注油、呼水装置の点検
- ⑥ 混合装置の分解手入れ、水吸引テスト
- ⑦ 消火栓、格納箱点検
- ⑧ ホースの数量、破損、接続金具、格納方法の点検

消火粉末は吸湿性が大きいので水気を嫌う。そのため、とかく消火器を消火対象物から遠く離れた建物内などに置かれることがある。しかし、消火器は保守面が面倒であっても必ず覆布格納箱を用い、消火対象物から適当な位置に置くべきであって、少なくとも6ヶ月に1回程度は点検して常に使用出来るようにしておかなければならない。点検項目は次の通りである。

- ① ボンベ圧力の確認(秤量による)
- ② 消火粉末の品質(湿気によって固結していないか)
- ③ 容器、ホース、ノズルなどの損傷の確認
- ④ 配置状況、格納箱、覆布の点検

## 6 試験作業

試験作業を大別すると、原油試験、ガス分析、坑水分析、その他がある。その意義、および試験分析方法の概要を以下に述べる。

### 6.1 原油試験

原油試験は JIS K 2601「原油試験方法」に基づいて以下の方法で行う。同規格では試験方法の種類として、17項目を規定しているが、このうちいくつかの概要を述べる。

#### i) 試料採取

JIS K 2601「原油試験方法」には規定されていないが、JIS K 2251「原油および石油製品—試料採取方法」で規定されており、本法によって行う。

試料採取にあたって、試験の対象となるものの平均状態を代表する試料を採取することが目的である。

#### ii) 密度

JIS K 2249-1~4「原油および石油製品—密度の求め方」によって行う。密度は、試料の単位体積あたりの質量であるが、温度により変化するので普通15℃における数値が使われ、密度(15℃)と表し、その単位は g/cm<sup>3</sup>である。

試験方法は、JIS K 2601「原油試験方法」ではI形浮ひょう法または振動式法を規定しているが、JIS K 2249では、JIS K 2249-1で振動法、JIS K 2249-2で浮ひょう法、JIS K 2249-3でピクノメータ

一法を規定しており、JIS K 2249-4では密度・質量・容量換算表を定めている。

15℃以外の温度で測定した測定密度を、15℃の密度に換算する場合は、JIS K 2249-4に規定する別冊付表I表1A(原油の温度に対する密度換算表)から求める。

従来使われていた比重15/4℃は、15℃におけるある体積の質量と、それと等体積の4℃における水の質量の比で、密度(15℃)と以下の関係にある。

$$\text{密度}(15\text{℃}) = \text{比重}15/4\text{℃} \times 0.99997$$

### iii) 蒸気圧

JIS K 2258-1「原油および石油製品—蒸気圧の求め方—第1部：リード法」によって行い、37.8℃における絶対圧[kPa] (kgf/cm<sup>2</sup>) で表す。

試験の原理は以下のとおり。蒸気圧ポンベの試料室にあらかじめ0~1℃に冷却しておいた試料を満たし、37.8℃の空気室に試料室を接続した後、これを37.8±0.1℃の恒温槽中に浸して、圧力が平衡に達した時の圧力計の読みを検査用水銀マンオメータの圧力の読みによって補正し、補正した値を蒸気圧とする。

### iv) 動粘度

JIS K 2283「原油および石油製品—動粘度試験方法および粘度指数算出方法」によって行う。動粘度は粘度をその液体の同一状態(温度、圧力)における密度で除した商で、液体が重力の作用で流動するときの抵抗の大小を表し、単位は[mm<sup>2</sup>/s] (cSt) である。通常、30℃、50℃または75℃における動粘度を測定する。

従来センチストークス[cSt]が使用されていたが、1 mm<sup>2</sup>/s = 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s = 1 cSt であるため、単位の表示が変わっても数値は変わらない。

動粘度の測定にはガラス製毛管式粘度計が使われ、一定容量の液体が粘度計の毛管内を、自然落下するのに要した時間から動粘度を求める方法である。

粘度計にはウベローデ粘度計、キャノン—フェンスケ粘度計、キャノン—フェンスケ不透明液用粘度計などがある。

### v) 流動点

JIS K 2269「原油および石油製品の流動点ならびに石油製品曇り点試験方法」によって行う。流動点は、試料を45℃に加熱した後、試料をかき混ぜないで規定の方法で冷却したとき、試料が流動する最低温度をいい、0℃を基点とし2.5℃の整数倍で表す。

### vi) 残留炭素分

JIS K 2270-1~2「原油および石油製品—残留炭素分の求め方」によって行う。残留炭素は、試料を蒸発および熱分解させたときに生成するコークス状炭化残留物で、単位は[質量%]で表す。

残留炭素分の試験方法にはコンラドソン法(JIS K 2270-1)とマイクロ法(JIS K 2270-2)がある。

### vii) 硫黄分

JIS K 2541-1~7「原油および石油製品—硫黄分試験方法」によって行う。単位は[質量%または質量ppm]で表す。

試験方法は、JIS K 2601「原油試験方法」では燃焼管式(空気法)または放射線式(励起法)を規定しているが、JIS K 2541ではこの他に酸水素炎燃焼式ジメチルスルホナゾⅢ滴定法(JIS K 2541-1)など、全7種類と参考法1種類を規定している。

#### viii) 発熱量

JIS K 2279「原油および石油製品—発熱量試験方法および計算による推定方法」によって行う。単位は[J/g] (cal/g) または 15 °Cにおける[J/cm<sup>3</sup>] (cal/cm<sup>3</sup>) で表す。

試験の原理は、酸素を圧入した一定容量のボンベ中で試料を燃焼させ、燃焼前後の温度計の読みから発熱量を求め、その値に対してあらかじめ求めておいた熱当量の補正を行って総発熱量を算出する。

#### ix) 引火点

JIS K 2265-1~4「引火点の求め方」によって行う。引火点は、規定条件で試料を加熱して、小さな炎を油面に近づけたとき、油蒸気と空気の混合気体が、せん光を発して瞬間的に燃焼する最低の試料温度のことで、単位は[°C]で表す。

試験方法は、JIS K 2601「原油試験方法」では、室温で流動する試料の場合は、タグ密閉式またはペンキーマルテンス密閉式を、また、室温で流動しない試料の場合は、迅速平衡式を規定している。

#### x) 水でい分

JIS K 2601「原油試験方法」の中の「14. 水でい分試験方法」によって行う。試験の概要は、遠心分離用の試験管に試料とトルエンを等量採り、完全に混合してから遠心分離器で 60 °Cで 10 分間の遠心分離操作を行い、試験管底部に沈積した水でい層の量から、水でい分を算出する。単位は[容量%]で表す。

#### xi) 蒸留試験

JIS K 2601「原油試験方法」の中の「17. 原油常圧法蒸留試験方法」によって行う。蒸留試験は原油の分留性状および軽留出分（ガソリン、灯油、軽油）の得率を推定するために行う。

試験の概要は、試料 300 mlを精留管付き 500 mlの蒸留フラスコに採り、毎分 4~5 mlの留出速度で蒸留を行い、留出油量 5 %ごとにその温度を記録する。温度計示度が 270 °Cになるまで蒸留を続け、この留出量（容量%）を求める。

#### xii) その他試験

JIS K 2601「原油試験方法」では他に、窒素分、灰分、水分、塩分、ワックス分、硫化水素分も規定されている。また、JIS には規定されていないが、水銀、アスファルテン、曇り点などを分析する場合もある。

#### xiii) 原油エマルジョン

エマルジョンとは乳状液のことで、普通の状態では混じらない原油と塩水が、特殊な環境のもので混合され、いわゆる原油エマルジョンができる。油中水滴型と水中油滴型があり、前者の場合が多い。エマルジョンの対策には種々あるが、主として加熱によるか、または薬品添加により分解することが多い。

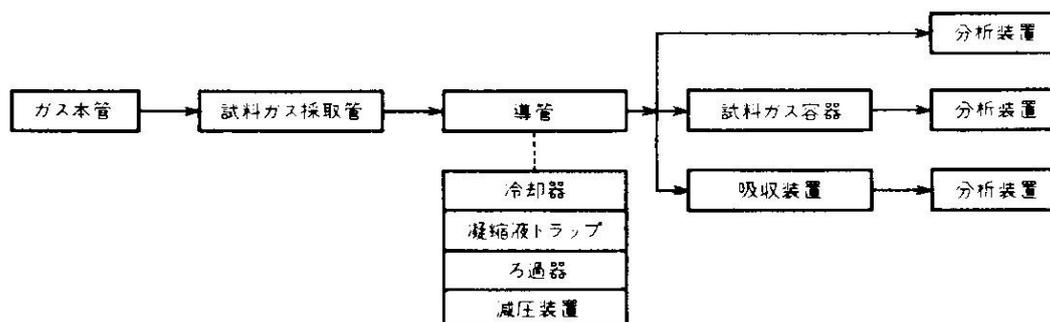
## 6.2 ガス分析

ガス分析は JIS K 2301「燃料ガスおよび天然ガス—分析・試験方法」に基づいて以下の方法で行う。同規格では分析・試験方法の種類として、5 項目を規定しているが、この概要を以下に述べる。

#### i) 試料採取

試料ガスは、分析または試験しようとするガスを代表したものでなければならない。

試料ガスの採取装置は、適用される分析または試験方法によって、下図に示すように構成し、その際の試料ガスの状態に応じて処理する。



採取方法は、一般成分分析用、特殊成分分析用、発熱量測定用、比重測定用に分けられ、分析または試験する項目に応じて試料ガスを直接採取するか、または試料ガスを吸収装置もしくは試料ガス容器に導いて採取する。

### ii) 一般成分の分析

一般成分の分析にはガスクロマトグラフ法が使われる。

分析方法の概要は次のとおり。熱伝導度検出器または水素炎イオン化検出器を備えたガスクロマトグラフを用い、試料ガスの全成分を数種のカラムによって分離し、記録されたクロマトグラムそれぞれのピークの面積を、同一条件下で得られた混合標準ガスまたは純ガスのピーク面積と比較し、補正係数による補正を行って各成分を定量する。

### iii) 特殊成分の分析

#### (1) 硫化水素

よう素滴定法、メチレンブルー吸光光度法、酢酸鉛試験紙法および炎光光度検出器付ガスクロマトグラフ法がある。

よう素滴定法は、試料ガスを吸収液に通して、硫化水素を硫化亜鉛とした後、沈殿をろ別し、よう素溶液と塩酸で分解してチオ硫酸ナトリウム溶液で逆滴定する。この方法は、試料ガス 150 l を採取した場合、硫化水素濃度が  $0.01 \text{ g/m}^3$  以上のガスの分析ができる。

メチレンブルー吸光光度法は、試料ガスを吸収液に通して硫化水素を吸収し、塩酸ジメチル-P-フェニレンジアミンと塩化第二鉄を加え、生成するメチレンブルーの吸光度を測定する。この方法は、試料ガス 5 l を採取した場合、硫化水素濃度が  $0.001 \sim 0.03 \text{ g/m}^3$  のガスの分析ができる。

酢酸鉛試験紙法は、酢酸鉛溶液に浸したろ紙に試料ガスを接触させ、ろ紙の変色の有無を調べる。この方法は、硫化水素が試料ガス中に数  $\text{mg/m}^3$  含まれていれば変色する。

炎光光度検出器付ガスクロマトグラフ法は、分離カラムとして充填カラムまたはキャピラリーカラムを用い、また、検出器として炎光光度検出器を用いて分析する。採取した試料ガスをガスクロマトグラフに導入し、得られたクロマトグラムから硫化水素を定量する。試料ガス 100  $\mu\text{l}$  を導入した場合、定量範囲は  $0.0003 \text{ g/m}^3 \sim 0.076 \text{ g/m}^3$  である。

#### (2) 水分

吸収ひょう量法と露点法がある。

吸収ひょう量法は、試料ガスを過塩素酸マグネシウムで充填した吸尿管に通して水分を吸収し、その質量増加を測定する。この方法は、試料ガス 100 l を採取した場合、水分濃度が  $1.0 \text{ g/m}^3$  以上のガスの分析ができる。

露点法は、圧力計、温度計および水蒸気が凝縮する鏡面をもつ露点計内に試料ガスを通過させて、徐々に冷却しながらその露点温度を読み取り、標準状態における試料ガス中の水分を求める。この方法は、主として高圧天然ガスの水分の定量に適用する。

#### iv) 発熱量

ユニカース式流水形ガス熱量計によって測定するか、または ii) 一般成分の分析によって得られた成分組成から計算によって求める。

ユニカース式流水形ガス熱量計法の概要は、試料ガスを空気と共に完全に燃焼させ、燃焼廃ガスを最初のガス温度まで冷却して生成水蒸気を凝縮させ、発生した熱の総量を熱量計に流れる水に吸収させる。一定の試料ガス量に対応する流量およびその流水の入口と出口の温度差から、総発熱量を求める。この方法は総発熱量約 8,400~62,800 kJ/m<sup>3</sup> (約 2,000~15,000 cal/m<sup>3</sup>) の試料ガスに適用する。

計算によって求める方法は、ii) 一般成分の分析によって得られた成分組成と、それぞれの成分の発熱量を用いて、計算によって試料ガスの発熱量を求める。

#### v) 比重

ブンゼン-シリング法 (流出法) または比重瓶法によって測定するか、ii) 一般成分の分析によって得られた成分組成から計算によって求める。

ブンゼン-シリング法 (流出法) の概要は、ブンゼン-シリング式比重計によって試料ガスを細孔から流出させ、同様の操作で空気も流出させて、それぞれの流出時間の比からガスの比重を算出する。

比重瓶法の概要は、質量既知の同一の比重瓶に、試料ガスおよび乾燥空気をそれぞれ充填し、温度および圧力を調整した後、秤量して比重を算出する。

### 6.3 坑水分析

坑井から産出する水の性状を知っておくことは、油田・ガス田の推移や地層を知る上からも重要なことである。

坑水分析は主として、JIS K 0101「工業用水試験方法」および JIS K 0102「工場排水試験方法」に基づいて以下の方法で行う。

#### i) 試料採取

坑水はしばしば掘削泥水や、浅層からの浸透水など二次的な汚染によって、真の値を見誤ることがある。更に、分析の目的が石油、ガスの探鉱開発、生産、あるいは鉱害等いずれにあるかを考えて、試料採取および分析項目を選ぶべきである。

試料の採取、試料容器、採水器および採取操作は、JIS K 0094「工業用水・工場排水の試料採取方法」を参考にして、分析の目的に適した方法を選ぶ。

#### ii) 外観

採水直後の試料を無色のビーカーに採り、試料全体の色の種類と程度、上澄み液の色の種類と程度、浮上物質・懸濁物などの色の種類と量の程度、泡立ちや臭気など特異な状態等について、肉眼で観察する。

#### iii) pH

pH は水溶液中の水素イオン濃度の尺度であり、水素イオン濃度 (モル濃度、[H<sup>+</sup>]) の逆数の常用対数で表される。pH7 のとき中性で、これより数値が大きいときはアルカリ性、小さいときは酸性である。

測定にはガラス電極 pH メーターが用いられる。測定は試料採取直後あるいは早急に行わなければならない。

#### iv) 電気伝導度

電気伝導率測定方法は JIS K 0102「工場排水試験方法」-13. 電気伝導率に規定された方法で行う。

電気伝導率は、溶液がもつ電気抵抗率 ( $\Omega \cdot m$ ) の逆数に相当し、S/m (従来単位の  $\mu S/cm$  は SI 単位では 0.1 mS/m に相当する) の単位で表し、電気伝導率計を用いて測定する。

水の試験では、25 °C の値を用い S/m および S の千分の一を単位とし、それぞれ mS/m および mS で表す。

この試験は試料採取後直ちに行なう。直ちに行なえない場合には、試料容器に満杯として密栓し、0 ~10 °C の暗所に保存し、できるだけ早く試験する。

電気伝導度計は検出部と指示部からなるもので、検出部は白金電極に白金黒めつきを行なった電極を組み込んだセルからなる。セルは水中に保存する。

指示部は、ホイートストーンブリッジ回路などを組み入れた温度補償回路を組み入れたものを用いる。JIS K 0102「工場排水試験方法」には、校正用溶液として塩化カリウム (KCl) 溶液が規定されている。

#### v) 懸濁物質および蒸発残留物

水中に懸濁している物質および水を蒸発したときの残留物質を次のように区分して試験する。

- ① 懸濁物質：試料をろ過したとき、ろ過材上に残留する物質。
- ② 全蒸発残留物：試料を蒸発乾固したときに残留する物質。
- ③ 溶解性蒸発残留物：懸濁物質をろ過したろ液を蒸発乾固したときに残留する物質。
- ④ 強熱残留物：懸濁物質、全蒸発残留物および溶解性蒸発残留物のそれぞれを、600 ± 25 °C で 30 分間強熱したときの残留物で、それぞれの強熱残留物として示す。
- ⑤ 強熱減量：④の測定時における減少量で、それぞれの強熱減量として示す。

#### vi) 塩化物イオン

塩化物イオンの定量には、チオシアン酸水銀 (II) 吸光光度法、硝酸水銀 (II) 滴定法、硝酸銀滴定法、イオン電極法およびイオンクロマトグラフ法が用いられる。

高濃度の塩化物イオンを含む坑水では、通常、硝酸銀滴定法が用いられる。

硝酸銀滴定法の概要は、試料の pH を 7 に調節し、ウラニン (フルオレセインナトリウム) 溶液を指示薬として、硝酸銀溶液で滴定して塩化物イオンを定量する。

#### vii) ヨウ化物イオン

ヨウ化物イオンの定量には、ヨウ素抽出吸光光度法またはヨウ素滴定法が用いられる。

ヨウ素抽出吸光光度法の概要は、ヨウ化物イオンを硫酸酸性で亜硝酸イオンと反応させ、遊離したヨウ素をクロロホルムで抽出し、その吸光度を測定してヨウ化物イオンを定量する。

ヨウ素滴定法の概要は、ヨウ化物イオンを pH1.3 ~ 2.0 で次亜塩素酸で酸化し、ヨウ素酸イオンとする。過剰の次亜塩素酸を pH3 ~ 7 においてギ酸ナトリウムで分解した後、ヨウ化カリウムを加え、遊離するヨウ素をチオ硫酸ナトリウム溶液で滴定してヨウ化物イオンを定量する。

#### viii) 臭化物イオン

臭化物イオンの定量には、ヨウ素滴定法またはイオンクロマトグラフ法が用いられる。

ヨウ素滴定法の概要は、臭化物イオンを pH6.5 ~ 8.0 において次亜塩素酸で酸化し、ヨウ素酸イオンとする。過剰の次亜塩素酸を pH3 ~ 7 においてギ酸ナトリウムで分解した後、ヨウ化カリウムを加え、遊離するヨウ素をチオ硫酸ナトリウム溶液で滴定して臭化物イオンを定量する。試料にヨウ化物イオ

ンが共存する場合は、ヨウ化物イオンと臭化物イオンの合計量が定量されるので、別にヨウ化物イオンを定量して差し引く。

イオンクロマトグラフ法は試料中の臭化物イオンをイオンクロマトグラフ法によって定量する。

#### ix) 硫酸イオン

硫酸イオンの定量には、クロム酸バリウム-ジフェニルカルバジド吸光光度法、クロム酸バリウム吸光光度法、重量法またはイオンクロマトグラフ法が用いられる。坑水では一般に、重量法またはイオンクロマトグラフ法が用いられる。

重量法の概要は、硫化イオンを硫酸バリウムとして沈殿させ、その質量をはかって定量する。

イオンクロマトグラフ法の概要は、試料中の硫酸イオンをイオンクロマトグラフ法で定量する。

#### x) アンモニウムイオン

アンモニウムイオンの定量には、インドフェノール青吸光光度法、中和滴定法、イオン電極法またはイオンクロマトグラフ法が用いられる。坑水では一般に、インドフェノール青吸光光度法、中和滴定法またはイオンクロマトグラフ法が用いられる。

これらいずれの方法も、共存成分による妨害があるため、分析に先だって試料を凝集沈殿処理または蒸留処理して、妨害物質から分離する必要がある。ただし、イオンクロマトグラフ法を適用する場合は、以上の前処理を行わず、試料採取後ただちに分析する。

インドフェノール青吸光光度法の概要は、アンモニウムイオンが次亜塩素酸イオンの共存のもとで、フェノールと反応して生じるインドフェノール青の吸光度を測定してアンモニウムイオンを定量する。中和滴定法の概要は、前処理（蒸留）を行って留出したアンモニアを、一定量の硫酸中に吸収させた溶液について、水酸化ナトリウム溶液で、残った硫酸を滴定してアンモニウムイオンを定量する。

イオンクロマトグラフ法の概要は、試料中のアンモニウムイオンをイオンクロマトグラフ法で定量する。

#### xi) ナトリウム

ナトリウムの定量には、フレイム光度法、フレイム原子吸光法、イオン電極法またはイオンクロマトグラフ法が用いられる。坑水では一般に、フレイム光度法またはフレイム原子吸光法が用いられる。フレイム光度法の概要は、試料を都市ガス-空気フレイムや水素-酸素フレイムなどの中に噴霧し、このとき生じる波長 589.0 nm の輝線の強さを測定してナトリウムを定量する。

フレイム原子吸光法の概要は、試料をアセチレン-空気フレイム中に噴霧し、ナトリウムによる原子吸光を波長 589.0 nm で測定してナトリウムを定量する。坑水では一般に高濃度であるため、希釈する必要がある。

#### xii) カリウム

カリウムの定量には、フレイム光度法、フレイム原子吸光法またはイオンクロマトグラフ法が用いられる。坑水では一般に、フレイム光度法またはフレイム原子吸光法が用いられる。

フレイム光度法の概要は、試料を都市ガス-空気フレイムや水素-酸素フレイムなどの中に噴霧し、このとき生じる波長 766.5 nm または 769.9 nm の輝線の強さを測定してカリウムを定量する。

フレイム原子吸光法の概要は、試料をアセチレン-空気フレイム中に噴霧し、カリウムによる原子吸光を波長 766.5 nm で測定してカリウムを定量する。坑水では一般に高濃度であるため、希釈する必要がある。

### xiii) カルシウム

カルシウムの定量には、キレート滴定法、フレイム原子吸光法または ICP 発光分光分析法が用いられる。

キレート滴定法の概要は、試料を pH12 以上とし、シアン化カリウム、塩酸ヒドロキシルアミン溶液で共存重金属イオンをマスクングし、HSNN 指示薬を加え、EDTA 標準溶液で滴定してカルシウムを定量する。

フレイム原子吸光法の概要は、塩酸を加えて微酸性とした試料に、干渉抑制剤としてランタン溶液を添加し、これをアセチレン-空気フレイム中に噴霧し、カルシウムによる原子吸光を波長 422.7 nm で測定してカルシウムを定量する。

ICP 発光分光分析法の概要は、試料を試料導入部を通して誘導結合プラズマ中に噴霧し、カルシウムによる発光を波長 393.367 nm で測定してカルシウムを定量する。

### xiv) マグネシウム

マグネシウムの定量には、キレート滴定法、フレイム原子吸光法または ICP 発光分光分析法が用いられる。

キレート滴定法の概要は、試料に緩衝液を加えて pH10 に調節し、シアン化カリウム、塩酸ヒドロキシルアミン溶液で共存重金属イオンをマスクングし、エリオクロムブラック T 指示薬を加え、EDTA 標準溶液で滴定し、カルシウムとマグネシウムの含量に対する滴定量を求め、カルシウムに対する滴定量を差し引き、マグネシウムを定量する。

フレイム原子吸光法の概要は、塩酸を加えて微酸性とした試料に、干渉抑制剤としてランタン溶液を添加し、これをアセチレン-空気フレイム中に噴霧し、マグネシウムによる原子吸光を波長 285.2 nm で測定してマグネシウムを定量する。

ICP 発光分光分析法の概要は、試料を試料導入部を通して誘導結合プラズマ中に噴霧し、マグネシウムによる発光を波長 279.553 nm で測定してマグネシウムを定量する。

### xv) 鉄

鉄の定量には、フェナントロリン吸光光度法、フレイム原子吸光法または ICP 発光分光分析法が用いられる。

フェナントロリン吸光光度法の概要は、微酸性溶液中で塩化ヒドロキシルアンモニウムと 1、10-フェナントロリンを加えた後、酢酸アンモニウムを加えて pH を 4~5 に調節し、生成するだいたい赤の鉄(II)錯体の吸光度を測定して鉄を定量する。

フレイム原子吸光法の概要は、試料を前処理した後、硝酸または塩酸酸性とし、これをアセチレン-空気フレイムの中に噴霧し、鉄による原子吸光を波長 248.3 nm で測定して鉄を定量する。

ICP 発光分光分析法の概要は、試料を前処理した後、試料導入部を通して誘導結合プラズマ中に噴霧し、鉄による発光を波長 238.204 nm で測定して鉄を定量する。

## 7 スリックライン作業

ピアノ線と一般に称される丸型鋼線を使用して、作業ツールを坑内に降下することにより行なわれる作業の総称をスリックライン作業と呼び、導電性ケーブルを使用するワイヤーライン作業とは区別する。

ピアノ線の有する強度を活用して、埋没調査や坑底圧測定ばかりでなく、チュービング内にセットした各種機器を脱着したり、スライディングサイドドア（SSD）を開閉することが可能となり、1930年代以降は各種の装置が急速に開発された。油・ガス層や坑井の管理のみならず、坑井仕上げを検討する場合も重要な作業と位置付けられるようになった。

### 7.1 地上設備

スリックライン作業で使用される設備は図3.7.1に示すように、坑口装置（クリスマスツリー）に取り付けるリュウブリケーター部とスリックラインを巻き取るウインチ部の地上設備および坑内での作業に使用されるスリックラインとその先端に接続される坑内作業ツールから構成される。ここでは先に地上設備とスリックラインについて説明し、坑内作業ツールについてはそれぞれの作業説明の箇所で言及する。

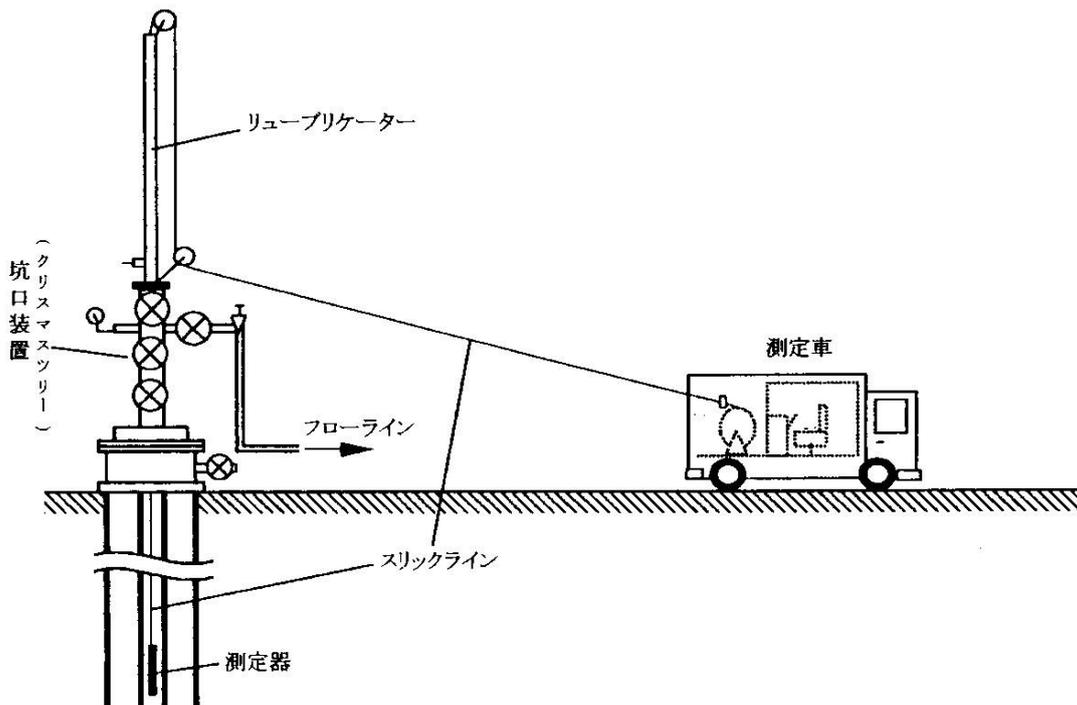


図3.7.1 スリックライン作業概要図

#### i) ウインチ部

スリックラインを巻き取る装置全体をいう。小さなものは机1個程度のものから、大きなものはトラックに数台の巻き取りリールを備えたものまでである。駆動動力源はエンジン直結タイプ、あるいはディーゼルエンジンと油圧ポンプを組み合わせた独立のパワーユニットを有する油圧モーターで作動させる。ウインチ部には深度測定用のメジャリングデバイスが付属しており、プーリーの回転数によってスリックラインの長さを計測できるようになっている。

#### ii) リュウブリケーター部（図3.7.2参照）

クリスマスツリーのトップ（スワブ）バルブの上に接続し、坑内に降下する作業ツールを圧力下

でも収納できるパイプをリューブリケーターと呼ぶ。作業ツールの長さに応じて何本かを継ぎ足せるようにユニオン接続となっており、石油・天然ガス井においては 3 本程度で使用されることが多い（1 本は 8～10 ft（約 2.4～3.0 m））。

リューブリケーターとクリスマスツリーの間にはワイヤーライン BOP が設置されており、スリックラインを切断することなくリューブリケーターとクリスマスツリー間の圧力を遮断できる。

- ① スタフィンボックス
- ② リューブリケーター（アッパーセクション）
- ③ クイックユニオン
- ④ ロープブロック
- ⑤ ジンポール
- ⑥ リューブリケーター（ミドルセクション）
- ⑦ リューブリケーター（ローワーセクション）
- ⑧ 払いバルブ
- ⑨ ワイヤーライン BOP（防噴装置）
- ⑩ プーリー
- ⑪ スウェッジ（坑口接続部）
- ⑫ ウェイトインジケーター
- ⑬ トップ（スワブ）バルブ

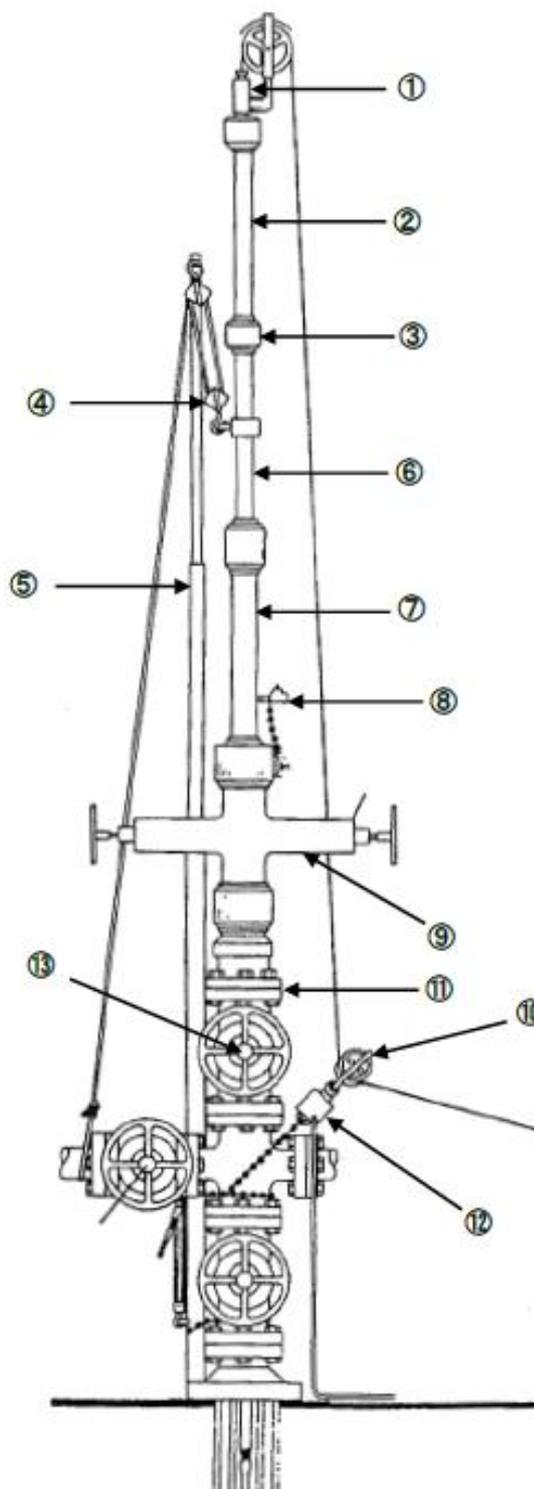


図 3.7.2 リューブリケーター部

ワーキングプレッシャーは、21 MPa (3,000 psi)、35 MPa (5,000 psi)、69 MPa (10,000 psi) などの他に、水溶性天然ガス井では4 MPa (570 psi) といった様に坑井の圧力に適した耐圧のものを使用する。

坑口装置は密閉坑口圧力の2倍に相当する圧力にて耐圧試験を行い、また坑口装置の下流に接続するリューブリケーターはワーキングプレッシャー或いは密閉坑口圧力以上の耐圧試験を行ったものを使用する。

図3.7.2にはジンポールが示されているが、最近では作業の安全性と効率を高めるために、クレーンを代用することが多い。

### iii) スリックライン

ここでいうスリックラインはピアノ線に限定する。スリックラインはウインチ部にあるドラムに巻かれており、そのドラム径の大きさはスリックラインの長さ、太さ、曲げ応力に基づいて決定される。スリックラインの材質は坑井内の流体の環境 ( $H_2S$ 、 $CO_2$  などの濃度、坑内温度および水質等) に応じて選定される。深度や荷重によって線径が選定され、測定用には線径が 0.072 in. (1.83 mm)、0.082 in. (2.08 mm)、0.092 in. (2.34 mm)、0.108 in. (2.74 mm) のものが使用されている。スワッピングなど荷重の大きな作業には、0.125 in. (3.18 mm) のピアノ線が使用されることもある。尚、作業中の荷重はウェイトインジケーターで測定する。

## 7.2 計測作業

### i) 坑底圧測定

#### (1) 坑底圧測定の目的とその概要

油・ガス層から油・ガスを合理的に採取して、それを管理するために坑底圧測定を行い、その測定結果を種々の技術計算の基礎に用いる。主なものを以下に示す。

- ① 油・ガス層の埋蔵量の計算
- ② 油・ガス井の産出能力計算
- ③ 坑井障害の有無の判定
- ④ 浸透率の計算
- ⑤ 坑井間の干渉に関する試験
- ⑥ 液面深度と圧力勾配 (液体密度) の判定測定は坑井仕上げ直後の他に、定期的にも行なわれる。また坑井異常時にも必要に応じて行なわれる。

#### (2) 坑底圧測定器

坑底圧測定器の原理は、圧力の変化をブルドン管へ、そのスプリングの伸びを機械的に変換するものである。わが国では通称アメラダ型 (ブルドン管式) とメモリーゲージ式 (電気式) の2種類が使用されてきたが、近年メモリーゲージ式が主流となりアメラダ型は殆ど使用されていない。アメラダ型の坑底圧測定器は直径1-1/4 in. (32 mm)、長さ67-1/2 in. (1,764.5 mm) で、その構造を図3.7.3に示す。

アメラダ型の長所は耐温性に優れ、頑丈で壊れにくく、高温井や地熱井などで使用されている反面、精度の面ではメモリーゲージ式と比較すると劣る。

メモリーゲージ式の坑底圧測定器の圧力センサーとして、静電容量型、クウォーツ型、サファイア型があり、いずれも発信周波数を圧力に変換する。アメラダ型よりも精度に優れるため、微小な圧力変化の測定に適する。メモリーゲージ式の圧力センサーの耐熱は最高で177 °C (350 °F) であるが、魔法瓶で保護することで315 °C (600 °F) 4時間や350 °C (662 °F) 4時間と耐熱性を上げている。

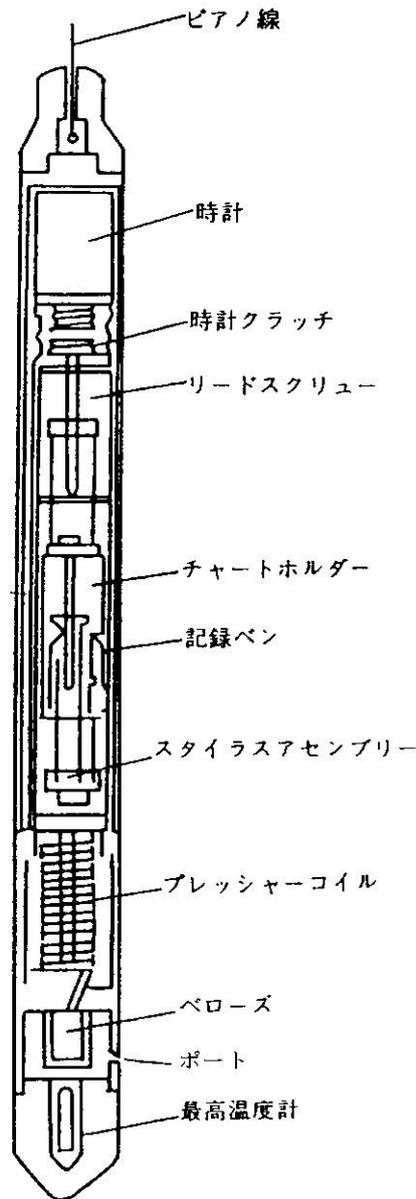


図3.7.3 坑底圧測定器の構造

## (3) 測定作業における保安上の注意

- 1) 測定作業中は、止むを得ない場合の他、デリック下ならびにピアノ線付近で他の作業はしてはならない。
- 2) 測定作業時は原則としてウインチを坑井元より 8 m 以上離して設置する。
- 3) 測定中の坑井元バルブの開閉は、作業監督者（鉱山労働者）が測定責任者の依頼によって行なう。クリスマスツリーのメインバルブとしてハイローバルブを組み込んであるときは、測定前にサプライガスを払い、手動開の状態にしておく。
- 4) リューブリケーター内の圧力を払うときは、風向き、火気に注意し安全を確認してから実施すること。また、鉱害防止の観点から、払い用のホースを接続してドラム缶などに払う。ドラム缶には静電気除去のためにアースを取ること。
- 5) 測定時の標識
  - イ) ピアノ線付近に「測定中」の標識を立てる。

ロ) 測定器を坑底に放置するときはピアノ線に標布を下げる。

ハ) バルブの開閉状態を明記した標識をつける。

ニ) バルブに無断開閉を禁ずる旨の標識をつける。

6) 測定中に異常を生じた場合は、ただちに応急処置を講ずるとともに、ただちに作業監督者に連絡しその指示を受けること。

#### (4) 測定結果のまとめ

メモリーゲージ式において、測定器内のメモリーから圧力・温度データをコンピューターに取り出し、技術計算の基礎資料とする。

### ii) 坑内温度測定

油層、ガス層の温度は、坑底圧と同様に埋蔵量などに関する技術計算をする場合、きわめて重要なファクターである。また、坑内の温度勾配は流体の産出箇所の判定に役立つ。

#### (1) 測定器

メモリーゲージ式の坑底圧測定器を使用することで、圧力と温度および坑内流量を同時に測定することができる。

#### (2) 測定方法

油層、ガス層、水層の静的な温度測定を行なう場合は、少なくとも 24 時間は坑井を密閉し、測定器を降下する前に坑内状況を静止安定状態にした後に、測定器を対象層の目的深度まで降下する。出水層と出油、ガス層、あるいは遮水状態を調査する場合は、坑底から測定器を引上げつつ各深度の温度を測定した後に、同様な方法で自噴中の各深度の温度を測定し、各深度における温度差を比較する。この場合、熱膨張する金属の温度は各深度における温度に達するまでに数分の時間を要するので、各深度で 10 分くらい静止してから引上げる必要がある。

### iii) 坑内流量測定

坑井内の流量を測定し、産出層および圧入層の深度、流量を明らかにするために、スピナーが用いられる。坑井内の流量を測定することにより、圧入井においては目的層にどの程度圧入されているか、また生産井が多層仕上げの場合あるいは薄互層の場合、各層からそれぞれいくらの産出量があるか知ることができる。(図 3.7.4 参照) その他にメモリーゲージ式の測定器を使用することで、圧力、温度と同時に坑内流量を測定することが出来る。

#### (1) 測定器

スリックラインで使用されるスピナーは、回転体部、レコーダー部および時計部から構成され、流速に応じて回転するインペラーの回転数が測定チャートに記される。流量の大小はチャートに記される単位時間当たりのキズの数で表される。

#### (2) 測定方法

最深の測定深度にて測定器を静止させ、その深度での回転数をチャー



図3.7.4 スピナー外観図

トに記録させる。次に測定器を上方に引き上げ、2 番目の測定深度にて測定する。最後にチュービング内で測定する。チュービング内では産出（圧入）量の 100 %が測定され、仕上げ区間より下部では 0 %となる。各深度で記録された回転数と、100 %流量での回転数との比からそれぞれの流量を算出する。

またシュルンベルジュ社のワイヤーラインサービスでは、チュービング尻を通過後ケーシングのガンパー部の任意部分に、パッカーをセットしたり外したりできるフローメーター（パッカーフローメーター）も使用しており、接近して仕上げられた各層の小さい産出割合もかなり正確に測定される。また同社では、比重測定装置（グラディオマノメーター）、温度測定装置（高感度サーモメーター）も同時に併用し（坑底圧も測定）し、坑底における流体の区別（油、ガス、水）の判定もしている。

#### iv) 坑井内液面（静水位・動水位）測定

##### (1) エコーメーターによる液面測定

エコーメーターによる液面の測定方法は、坑井内に空気銃を空砲発射し、音波が液面に反射して戻ってくる時間から音速を測定して、液面を算出する方法である。その特長としては、採油ポンプを止めたりチュービングやロッドを揚げたりする必要もなく、また採油状態の液面変動を測定することができる。測定装置の概略を図 3.7.5 に示す。測定方法は次の通りである。

測定前に調整用音さを用いて、チャート送りモーターのスピードを調整する。坑内に空砲発射すると、音波はマイクロフォンの白金線を流れる電流を変化させ、坑口の音波が記録される。音波は次の第 1 リフレクター、第 2 リフレクターと順々に反射し、液面に達し戻ってくる。音波は共鳴管に感応し、マイクロフォンの白金線を流れる電流を変化させる。電流の変化は増幅器により増幅され、音速は記録装置の検流計ペンの振れとなり自動記録される。しかし、坑内にはガスがあり坑内気体の密度が一定せず、また温度差により音速が一定しないので、50 m～100 m ごとにリフレクターをチュービングに取付け、音速が各リフレクターに反射し戻ってくる音速を測定し、坑井内の平均速度を求めて、最後のリフレクターから液面までの深度を計算し液面を算出する。

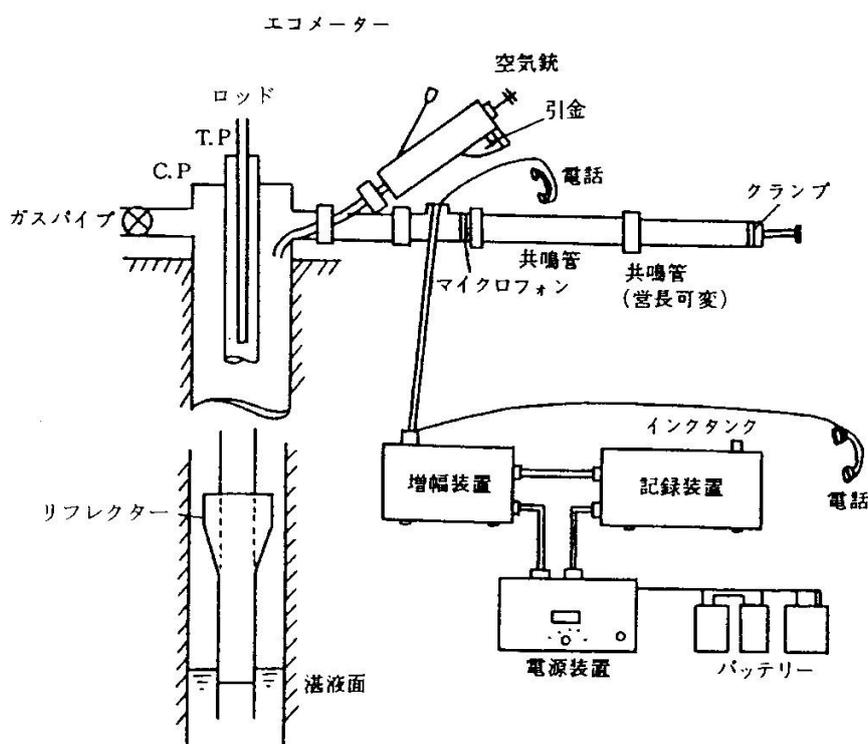


図3.7.5 エコーメーターによる港液面測定

## (2) 電気式液面測定

水溶性ガス井の液面は一般に水位が浅いため、簡単な測定方法で判定が可能である。測定器はドラム、ビニールコード、電極、サーキットテスターからなっている。

このドラムには電極として径 12 mm、長さ約 17 cm の塩ビパイプに鉛を充填し、一端をビニールコードに接続する。ビニールコードには電極の先端から測深目盛りを付しておき、コードはドラムに巻かれている。電極が水面に接触したとき、サーキットテスターは電氣的回路を作り水位を確認することができる。

## v) 坑底試料採取

油・ガス層内に存在する油やガスの炭化水素類の存在態様やその特性を正しく把握し、温度や圧力の変化に対する挙動を良く理解しておくことが、油・ガス層評価ならびに開発・生産計画策定、処理施設設計の基礎となる。また水溶性天然ガス井においては、仕上げであるストレーナーが長く、上記の他にガス水比 (GWR) や水質 (Cl、I、他) を各深度にて採取し、この後の操業や開発計画に役立てている。ここでは、スリックライン作業にて坑底すなわち原位置での試料を採取する方法について述べる。

坑底試料に対して通称 PVT テストと呼ばれる試験が行われる。フラッシュテスト、ディファレンシャルテスト、セパレーターテスト、粘度測定などが行われるが、本稿での説明は省略する。

### (1) 坑底試料採取器

採取器には一般的に水銀型と水銀フリー型とがある。試料を採取器から抜き出す際に、前者は水銀が使用され、後者は水銀を使用しなくても済むような工夫がなされている。水銀の人体への影響が問題となって以来、水銀フリー型が主流となっている。

### (2) 採取方法

水銀フリー型による試料採取の概要を図 3.7.6 に示す。採取目的深度に到達するまでの降下時間を推定し、これに若干の余裕を持たせた時間を採取器内の時計 (CLOCK) にセットする。目的深度に達した後、採取器が作動するまで静置する (FIG.A)。セットした時間に達すると、トリガーデバイス (TRIGGER DEVICE) が外れ、スプールバルブ (SPOOL VALVE) が開き、坑底の圧力によりトラベリングピストン (TRAVELLING PISTON) が上方に押され、エアチャンバー (AIR CHAMBER) 内にプライムフルイド (PRIME FLUID、普通は精製油) が流れ込むと同時にサンプルチャンバー (SAMPLE CHAMBER) 内に坑底試料が流れ込む (FIG.B)。トラベリングピストンがサンプルチャンバー内の上端に達すると、アンチプリマチュアークロージングデバイス (ANTIPREMATURE CLOSING DEVICE) を押し、ロウアーピストンアッセンブリー (LOWER PISTON ASSEMBLY) を押し上げ、ピストンロックピン (PISTON-LOCK PIN) がロックされて、圧力が保持されたまま坑底試料がサンプルチャンバー内に封入される (FIG.C)。

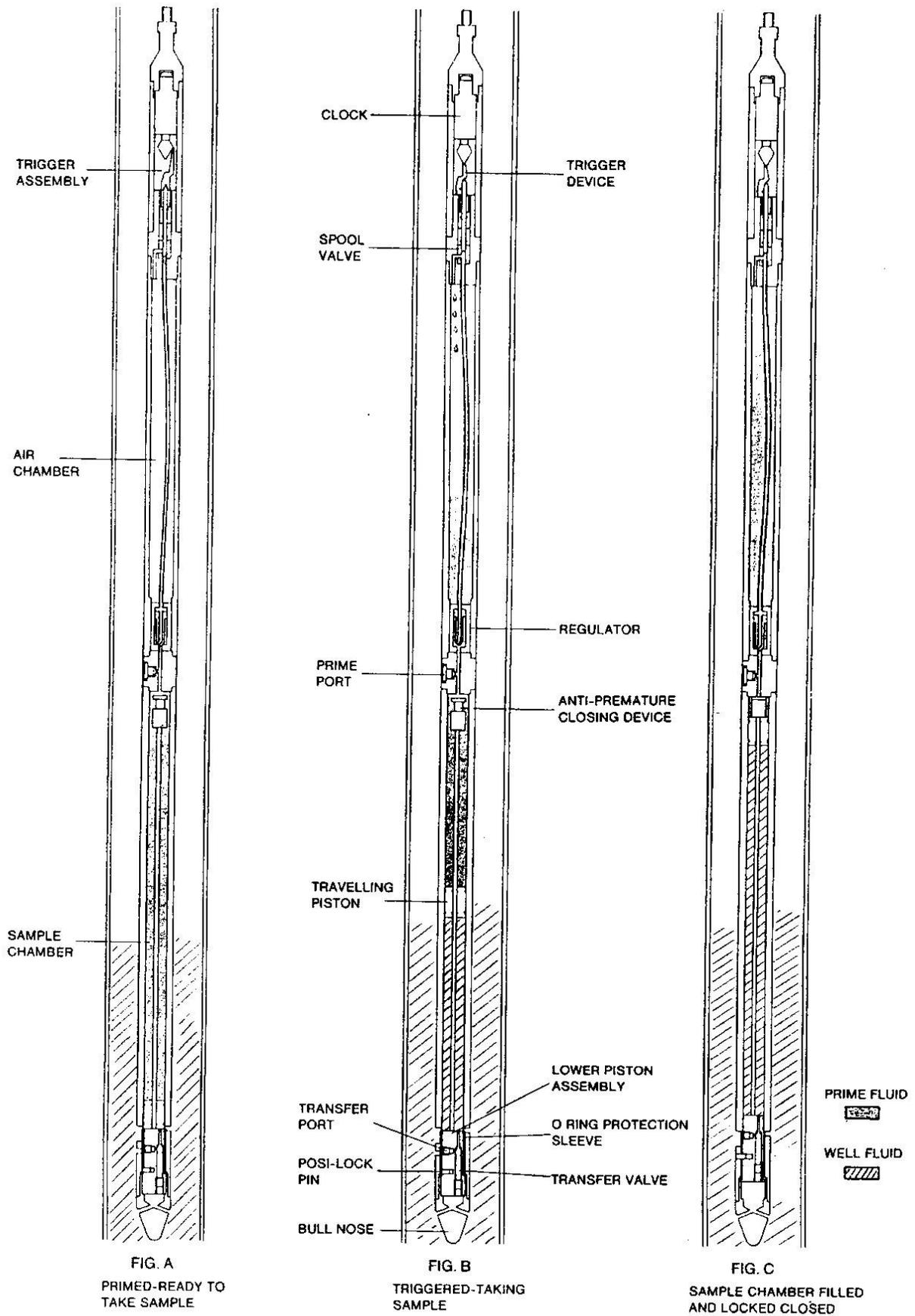


図3.7.6 坑底試料採取（水銀フリー型サンプラー）

### 7.3 坑内サービス

#### i) 管内除去・採揚（フィッシング）作業

チュービング内にパラフィンの付着や、ハイドレートの生成もしくは砂の沈積が生じた場合、生産の障害となり、まったく生産が不能になってしまうこともある。

このようなトラブルに対処するのが坑内サービスであり、特にパラフィンの場合にはチュービング内壁に徐々に付着していくことから、生産中の坑井内に定期的にスリックラインでスクレーパーを通して、パラフィンを除去してやるのが効果的である。

ハイドレートや砂の除去は図 3.7.7 に示すように、ベラーを使って行うことができる。しかし、除去区間が長い場合や閉塞物が堅固な場合は多大な時間を要することから、このような場合はコイルドチュービングを採用する方が効果的である。逆に、時間的な余裕があり、かつ対象区間が短い場合はスリックラインサービスが使われる。

ベラーは坑内状況を把握するための試料採取に欠かせない作業ツールでもある。その他の坑内サービスには、チュービング内の液体分を汲み上げて自噴誘導するスワッピング作業、チュービング内に遺留したツールなどのフィッシング作業などがある。水溶性天然ガスにおいては、外吹込み（リフトガス）という生産方式を取っており、坑井内の埋没調査、遺留したツールなどのフィッシング作業を行っている。

図 3.7.8 に各種作業で使用される坑内編成（BHA）の一例を示す。ソケット+ステム+ジャー+ナックルジョイントの編成の先に、対象作業によって様々な作業用ツールが接続される。

#### ii) 坑内設備操作作業

多層仕上げ井でスライディングサイドドア（SSD）が設置されている場合、採取層の変更はスリックラインによるプラグセットや SSD の開閉により行われる。また、坑井仕上げの際のパッカーセットを、スリックラインにより加圧ポートを開けて行うこともある。さらには、チュービングの加圧テストの際には、チュービング先端

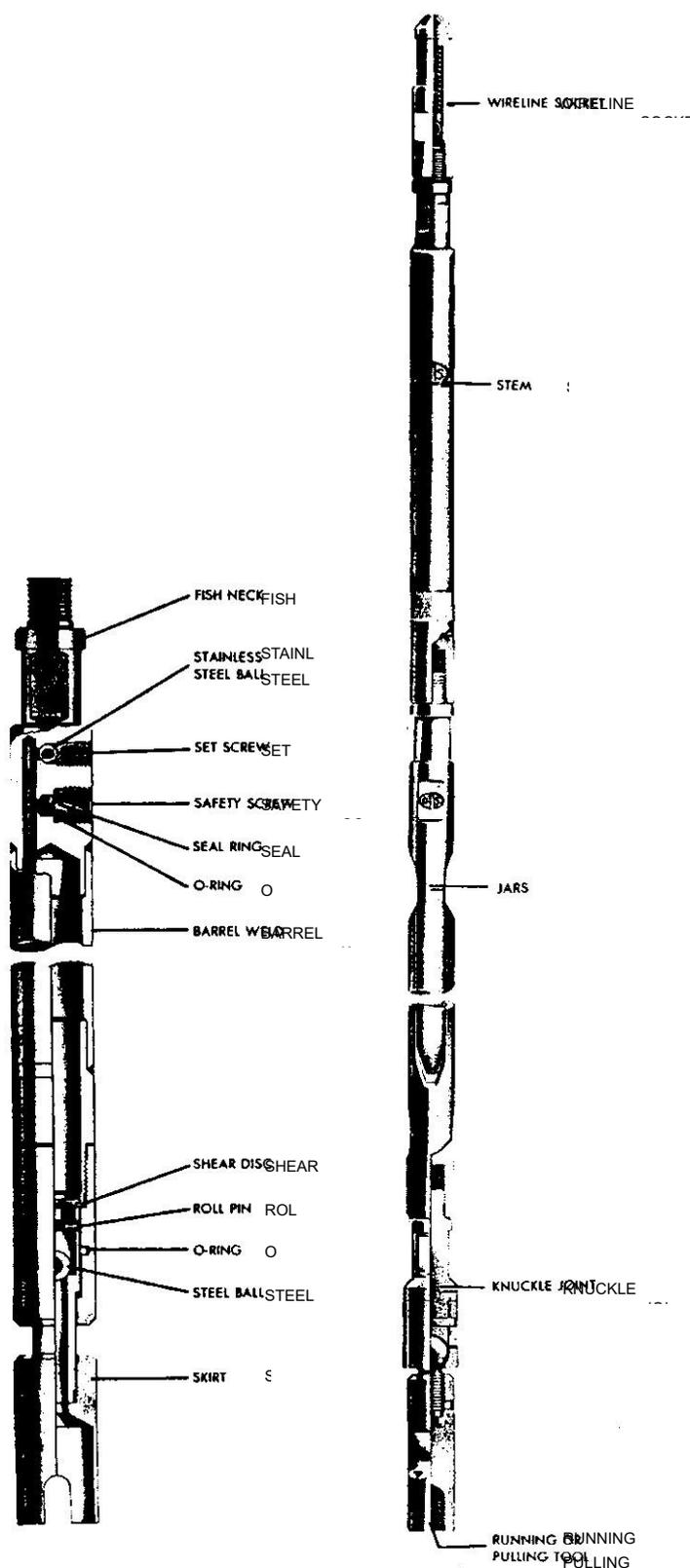


図3.7.7 ベラー

図3.7.8 代表的な坑内編成



(3) ランニングツール他

ロッキングマンドレルのセットなど、坑内ツールスを坑内に降下する機器をランニングツール、セットされたツールスはずして引き上げてくる機器をプリングツールス、SSD などのポートを開閉する機器をポジショニングツールと呼んでいる。一般的に使用されるツールスの一例を図 3.7.10 に示す。

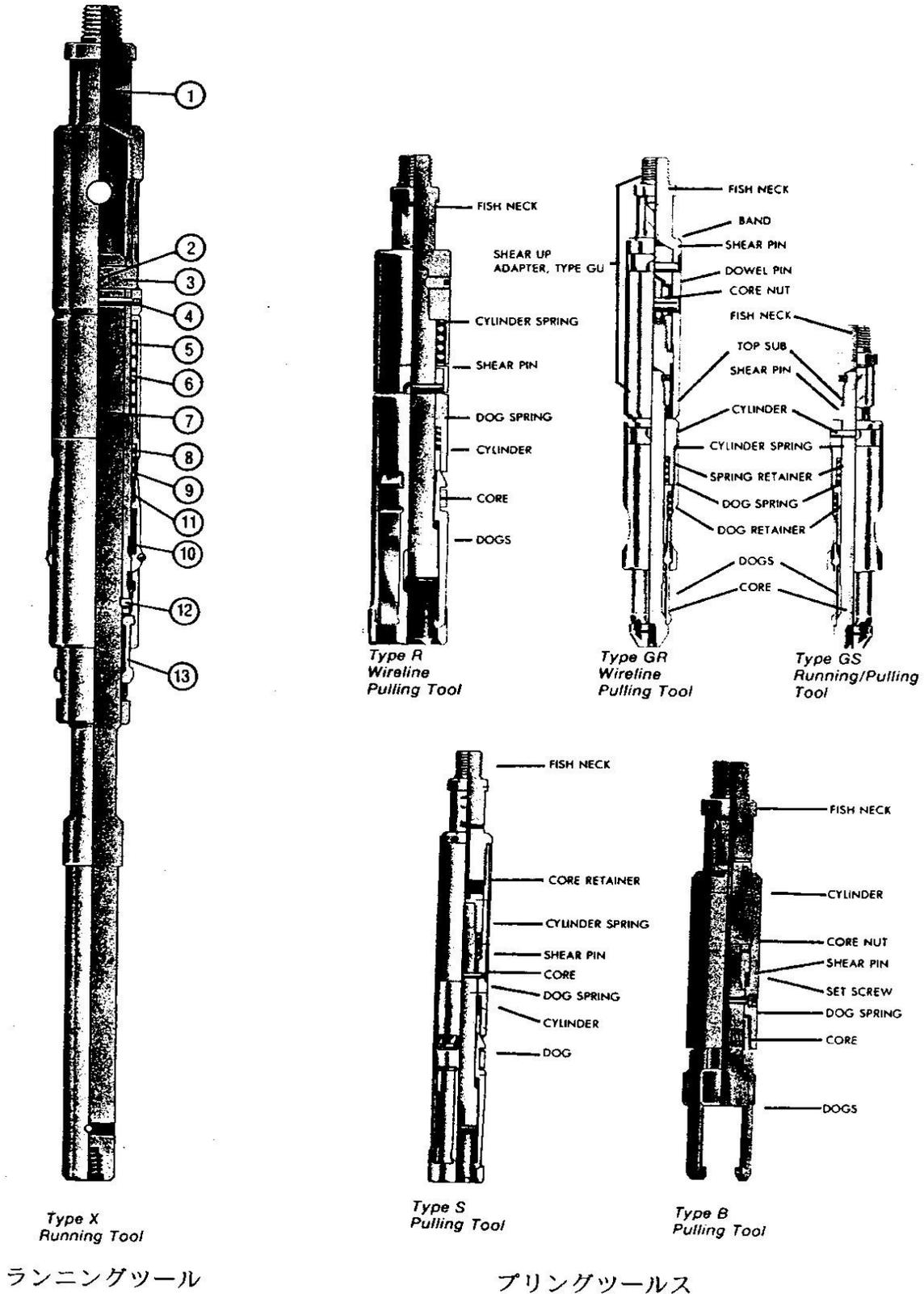


図3.7.10 各種ツールス

## 8 毒物および劇物

### 8.1 毒物および劇物

毒物および劇物といわれるものは、ガス、ミスト、ヒューム、粉塵などの形で吸入されたり、皮膚に付着したり、または誤って飲み込んだ場合に、比較的少量で人体に危害を与えるおそれのあるもの、ということができる。さらに毒物と劇物の区別については LD50 値（半数致死量：体重 1 kg 当り何 g 投与すれば、50 % の動物が致死するかの量）または LC50 値（半数致死濃度：水生動物やガス・粉塵の吸入による投与の場合の濃度）を基準にし、これに中毒発現状態（発現率の大小、症状の程度）、慢性中毒の程度を勘案したものであるということができる。毒物とされる毒性の程度は経口投与の場合で LD50 値が大体 50 mg/kg 以下、劇物の場合は大体 300 mg/kg 以下であることが基準とされている。しかし、本文で毒物、劇物とよぶものは、このような化学常識に立脚して法律によって定められたもの、すなわち、「毒物および劇物取締法」により定義づけられたものをいう。

毒物および劇物とは別に、毒薬と劇薬がある。毒薬および劇薬は人または動物の病気を治療、軽減、予防するために用いられるものであり、薬事法により規定されている。また関連するものに医薬部外品があるが、これは主として吐き気等の不快感や口臭の防止、ねずみ、蚊、蠅等の駆除等を目的とするもので、人体に対する作用が緩和なものと規定されている（薬事法）。医薬品および医薬部外品は薬事法の規制を受け、「毒物および劇物取締法」の適用を除外されている。したがって、「毒物」および「劇物」とは医薬品および医薬部外品以外のもので、毒性を有するものの総称であり、体内に取り入れられた場合に少量で機能に障害を与える性質を有するものをいい、毒性の程度により毒物と劇物に区別されるという一般常識に準拠して法で定めたもの、ということができる。

### 8.2 酸化、燃焼および爆発

過酸化水素、過マンガン酸カリウムなど、酸素を放出し易いものを酸化剤という。木材、布、油脂、アルコール類、水素、イオウなどは酸化され易く、酸化剤と接触または混合すると酸化され、燃焼または爆発の恐れがある。また、塩素、臭素などは酸素を含まない物質であるが、強い酸化作用をもつので、可燃物に対しては他の酸化剤同様の作用をもつ。

酸化物または可燃性物質の貯蔵、取扱いに当っては、火災、爆発を防止するため、酸化剤と可燃性物質を隔離するのが原則である。

硫化水素、水素などは空気と混合すると、一定濃度範囲の混合気は爆発するおそれがあるので、通気を良好に確保するほか、火気、熱源、電気設備、酸化剤から隔離して貯蔵または取扱う。

二硫化炭素、アルコール類は蒸気圧が大きく、常温常圧でガスを発生し引火性があるので上と同様の注意が必要である。

酸類はそれ自体可燃物ではないが、金属と反応して水素ガスを発生する恐れがあり、水素は可燃性および爆発性を有するので、酸類の貯蔵取扱いはこの点を留意して行なう。

### 8.3 酸、アルカリおよび中和反応

塩酸、硫酸、硝酸などは酸と呼ばれ、一般に水に溶け、酸味を呈し、また種々の金属を浸して水素ガスを発生するなど、いわゆる酸性を示す。

アンモニア、水酸化ナトリウムなどはアルカリと呼ばれる。酸およびアルカリは一般に人体組織に対して強い腐食性を有する。酸とアルカリが反応すると、中和して水および塩類を生成する。中和は、一般に発熱反応であり、極端な場合には爆発する。酸またはアルカリの貯蔵ならびに取扱いに当っては、反応を避けるため、それぞれアルカリまたは酸から隔離しなければならない。酸化、中和以外にも、一般に毒物および劇物は他の毒物、劇物および一般化学物質と反応して、熱または有害物を発生

する恐れがあるので、物理、科学的性質をよく理解するとともに、不用意な扱いをしてはならない。

#### 8.4 貯蔵および取扱い

##### i) 貯蔵に当たっての留意点

- (1) 乾燥した冷暗所に貯蔵する。
- (2) 風雨を避けて貯蔵する。
- (3) 転倒、転落および他の物体による衝撃を防止する措置を講ずる。
- (4) 可燃性のものは酸化剤、熱源、火気から隔離し、電気設備は防爆型とする。
- (5) 酸化剤と可燃物、酸とアルカリなど反応し易いものは隔離して貯蔵する。
- (6) ガスを発生する恐れのあるものは、換気を十分に行なう。
- (7) 気化し易いもの、空気中で変質し易いもの、吸湿性または潮解性のあるものは密封する。
- (8) 気化し易いものをドラム缶などの容器に収納する場合には、容器の一部に空間を残して充満しておく。

##### ii) 取扱いに当たっての留意点

- (1) 毒物または劇物が直接皮膚に触れるのを避ける。
- (2) 取扱い物質、取扱い方法に応じた保護具を着用する。
- (3) 毒物または劇物に浸されない材質の用具を用いる。
- (4) 容器を落したり、こわしたりしないように注意する。
- (5) こぼしたり飛散させたりしないように注意する。
- (6) ガス、ミストの発生する恐れがある場合には、通気のよい所で扱うか、または換気を行なう。
- (7) 職場環境気中の有害物の濃度を許容濃度以下に保つ。
- (8) 可燃性物質を取扱う場合には、酸化剤、熱源、火気および電気設備から離れた所で取扱う。
- (9) 酸化剤を扱う場合には、有機物、水素等の可燃物から離れた所で取扱う。
- (10) 酸またはアルカリを扱う場合には、それぞれアルカリ、酸との接触がおこらないように注意する。一般に反応し易い物質同志の接触がおこらないように注意する。
- (11) 取扱い後は手や顔をよく洗い、場合によっては入浴する。
- (12) 万一に備えて、洗眼設備およびシャワー設備を設置する。

#### 8.5 処理

次のいずれかにしたがって処理するが、いずれの場合にも係員の指示した方法による。

- (1) 回収して再使用、他に転用または業者に引取らせる。
- (2) 中和、加水分解、酸化、還元、希釈その他の方法により毒物および劇物のいずれにも該当しない物とする。
- (3) 毒物および劇物等の有害物質が廃水中に含まれる場合には、廃水を上の各項の方法により直接処理するのか、または沈殿法等により有害物質を回収した後、回収物（沈殿等）を上の各項の方法によって処理する。処理後の廃水を公共用水域に排出する場合には、有害物の濃度（場合によっては総量）を排出基準以下にする。

#### 8.6 救急処置

毒物または劇物により人体に危害が生ずるか、あるいはその恐れのある場合には、できる限り早く医師の手当、診察を受ける。医師の手当を受けるまでの応急処置については毒物または劇物の種類に応じるが、次の一般原則に従う。

- (1) 皮膚に付着した場合には、汚染した着衣を脱がせ、患部を十分に水洗いする。酸またはアルカリが付着した場合には、直接中和をはかってはならない。
- (2) 目に入った場合には流水で十分洗眼する。
- (3) 誤って飲み込んだ場合には、
  - 1) 直接のどの奥を刺激するか、食塩水を飲ませて吐かせる。ただし胃腸の損傷がはなはだしい恐れのある場合には、無理に吐かせてはならない。無理に吐かせると胃腸の損傷が進行する。
  - 2) 牛乳、卵白等を飲ませる。
  - 3) 活性炭、酸化マグネシウム等の吸着剤を飲ませる。
  - 4) 酸またはアルカリを飲み込んだ場合には中和剤を飲ませる。
  - 5) ただし、意識不明の者には、口から何も与えてはならない。
- (4) ガス中毒の場合には、ただちに新鮮な空気の所に運び出す。
- (5) 意識不明の場合には、亜硝酸アミルなどの興奮剤を嗅がせる。ただし嗅がせすぎないように注意する。
- (6) 呼吸が停止している場合には、講習受講者によって人工呼吸を行なう。

### 8.7 PRTR/SDS 制度

有害性が疑われる化学物質の環境への排出量・移動量を把握・管理することにより、環境中の化学物質のリスクを低減することを目的として、1999年に「特定化学物質の環境への排出量の把握等および管理の改善の促進に関する法律」(PRTR法、化管法、化学物質排出把握管理促進法)が法制化され、2001年4月から実施されている。本法律はPRTR(Pollutant Release and Transfer Register)制度およびSDS(Safety Data Sheet)制度をふたつの柱とする。PRTR制度では、事業者が対象化学物質を排出・移動した際にはその量を把握し国に届け出る義務があり、国は届出データや推計に基づき排出量・移動量を推計し公表する。これに対しSDS制度では、事業者が対象化学物質を他の事業者に譲渡・提供する際にはその情報を提供する義務がある。尚、SDSは、国内では2011年までは一般的にMSDS(Material Safety Data Sheet:化学物質等安全データシート)と呼ばれていたが、国際整合の観点から、GHS(The Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals:化学品の分類および表示に関する世界調和システム)で定義されているSDSに統一された。SDSはJIS Z 7253:2012で標準化されている。毒物および劇物取締法で指定されている毒物や劇物、労働安全衛生法で指定された通知対象物、PRTR法の指定化学物質を指定の割合以上含有する製品を事業者間で譲渡・提供する場合にはSDSの提供が義務化されている。

## 9 遠隔監視・制御

生産現場においては、装置運転の自動化あるいは施設の無人化が、様々な意味での合理化の一つの方向として、古くから研究され広く採用されている。取り扱う対象が油、ガスおよび水などの流体であり、その流送に係るバルブ類の開閉、ポンプの起動・停止などの比較的単純な操作が主なものであるから、監視(観測)・制御システムを取り入れることによって合理化が図られることが多い。

監視制御は油・ガス田内のある単独の装置に対してのみ導入されるわけではない。広域に散在する油・ガス田また需要家とも連結され、更にはこれらを結ぶ長大なパイプライン網の運用・保全・防災のためには、監視制御システムが威力を発揮する。これら監視制御システムとしてテレコントロール・テレメータリング或いは SCADA システム(後述)が採用されている。

機能の点からテレコントロールとテレメータリングを概説すると、遠隔の機械・装置・施設の稼働状態を示す情報量を、中央の監視所に伝送して、その内容を指示計、記録計、表示ランプ、ディスプレイなどに再現し、また、遠隔の機械・装置・施設の稼働を自由に変更したり、停止したり、再開する操作・制御を行うための装置である。

石油・天然ガスの鉱場において行なわれている遠隔監視および制御の信号源としては空気圧式、油圧式および電気式(電子式)があるが、本文では電気式を中心に述べる。

### 9.1 遠隔監視・制御システムの基本

システムの典型的な例を図 3.9.1 に示す。これは大別して計測監視系としてのテレメータリング系と、制御系としてのテレコントロール系に区別される。被計測監視制御機器と、判断機構としての人間またはコンピューターを介して一つの閉じたループを構成している。

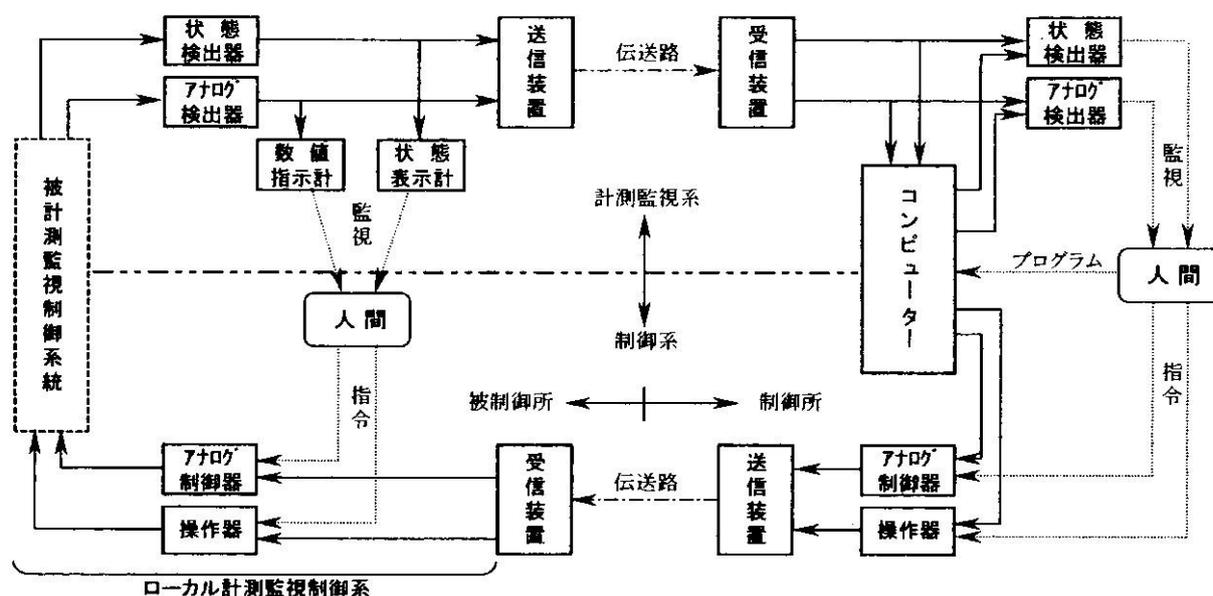


図3.9.1 典型的システム

この中で各系統の送信装置、受信装置を一緒にして狭義のテレコン・テレメーター装置と呼んでいる。“テレコン・テレメーター装置”と一般に呼ばれているのは、“遠隔計測監視制御装置”の総称で、元来は“計測”、“監視”、“制御”という別次元の情報を取扱うため、各々別々の機器で構成されていた。

図 3.9.1 において、テレメーターの送信部は被計測監視情報を「アナログ検出器」や「状態検出器」を通して電気信号に変換し、送信装置内の送信変換器でデジタル符号の直流パルスに変換する。この信

号を、変調器を介して回線に都合の良い交流信号に直して送出する。受信部では信号を復調器、受信変換器を通して元の信号に再現し、用途にしたがって人間が直視したり判断できるよう、「状態表示器」としてランプ指示したり、メーター、記録計などのアナログ指示とディスプレイまたはプリンターなどによるデジタル指示に別れる。

また、これら計測、監視情報から得られた現状の把握および分析結果から、緊急性を要すると判断された制御指令は、ただちに逆方向の制御系ラインにのってテレメーターと同一方法で伝送され、端末の被制御機器をコントロールすることになる。この制御結果は再度テレメーターを通して受信されるから、常時、計測監視と制御が完全に一体化され、連動化した情報伝送システムが組まれることになる。

## 9.2 観測情報の種類と項目

一般に情報の種類は、計測、積算、監視に分類され、項目としては次のようなものがある。

- ① 計測：圧力、温度、瞬間流量、液位、開度（位置）、その他
- ② 積算：流量、その他
- ③ 監視：液面、運転/停止状態、開/閉状態、その他

## 9.3 情報伝送の構成

現場の検出端からの情報を係員が常駐する中央基地まで伝送するには、大きく区分すると有線直送方式と有線または無線による多項目伝送方式がある。以下にその概要を記す。

### i) 有線直送方式

現場と中央基地を多芯ケーブルで結び、現場に設置してある各検出端（伝送器）の信号を中央基地に伝送し、表示または指示させる。この方式は項目数が比較的少なく近距離の場合に多く用いられる。

### ii) 多項目伝送方式

伝送器、指示計類（ループ）が多くなり距離が長くなると、有線直送方式ではケーブル布設の工事が割高になるので、一般には下記の伝送方式が使われる。

- (1) 周波数分割方式（一般にアナログテレメーターという）
- (2) 時分割方式（一般にサイクリックデジタルテレメーターという）

また、情報の収集方式は下記の方式がある。

#### (1) 呼出伝送方式

ある一定間隔の時間毎に中央基地（親局）より現場（子局）を呼出し、その都度情報を収集する。主として無線回線が多い。

#### (2) 常時伝送方式

子局より親局に向け常時情報を伝送する。主として有線回線が多い。

表 3.9.1 にアナログテレメーターとデジタルテレメーターの特徴を示す。

表3.9.1 テレメーター方式の比較

	アナログ方式	デジタル方式
運用上の特徴	・アナログ量の物理的变化に対して連続記録が可能。 ・指示計・記録計などへの信号出力は簡単であるが、デジタル表示装置に信号出力するためには変換器が必要。 ・装置構成が単純で、比較的保守も容易。	・デジタル表示が簡単にでき、データの読み取りが迅速、かつ読み取り誤差を生じない。 ・データ数が多量であっても付加装置を接続するだけで簡単に伝送できる。 ・将来の拡張性に対してスムーズに対応でき、コンピューターとの結合も容易。
情報の信頼性	伝送上のデータの誤り訂正は不可能である。	伝送データにパリティビットなどを付加して伝送している関係上、容易に誤り検定ができ、情報の信頼性は非常に高い。
精度	±1~2%	高精度(±0.5%以内)
応答速度	直結伝送のためほとんど遅れはない。	時分割伝送方式のためサイクリック時間分だけ遅れを生じる。
伝送路条件	伝送回路の“断”に対する処理は、“回線断”の警報程度で、データの保持は困難。	回線の“断”に対してはデータの記憶能力を有しているため、回線断が長期に及ばない限り、現状維持が可能である。
経済性	子局数に関係なく、1子局当たりのデータ量が少ない場合(1~3量)に有利。	子局数に関係なく、1子局当たりのデータ量が多い場合(3量以上)に有利。

### iii) 伝送路の種類

圧力や流量などの計測データや、各種機器の動作状況などの監視データを遠方に伝送するための伝送路には、大別して有線路と無線路の2つの伝送路がある。更に有線路は自営専用線とNTT専用線の2つに分けて考えることができる。

無線路は一般に伝送する距離が長い場合、あるいは山間部などのような有線路布設が困難な場合に利用される。伝送路として無線路を計画する場合には、電波監理局よりの電波割当ての問題、電波伝播上の無線回路の検討を加える必要がある。近年では衛星回線が広く開放されることとなり、無線路のひとつとして採用されている。

自営専用線を伝送路として選ぶ場合には、自営線の布設、回線特性、布設後の保守管理の問題を解決する必要がある。NTT専用線(電話線をデータ伝送専用として借用した場合の呼称)の場合には、月々の電話線借用料は支出しなくてはならないが、伝送路の保守管理は全てNTT側で行ない、回線特性なども十分考慮してある。

以上のように、それぞれ一長一短があるが、一般的には大規模システム(特に伝送距離が長い場合)においては衛星回線を含めた無線路、中小規模システムにはNTT専用線利用が有利といわれている。

## 9.4 情報の検出端

一般に計測信号は機械的な変量を電気的な変量に変換するために、検出端には伝送器(発信器)を使用する。監視信号は各種のスイッチを使用する型式が多く、モーター類は開閉器の二次側のリレーにより取り出す場合が多い。また、積算信号は検出端よりパルス信号を出力するものと、計測信号(アナログ信号)を積算器で変換する場合がある。

### i) 計測信号の種類

伝送器からの出力信号はDC4~20 mAまたは1~5 Vに統一されている。

### ii) 情報の検出例

#### (1) 圧力伝送器

センサー部は抵抗（またはコンデンサー）の平衡ブリッジになっており、ブリッジの1辺または2辺に圧力に比例した電気信号として出力される。（図3.9.2参照）

尚、差圧、液位などの伝送器もこれを利用したものが多い。

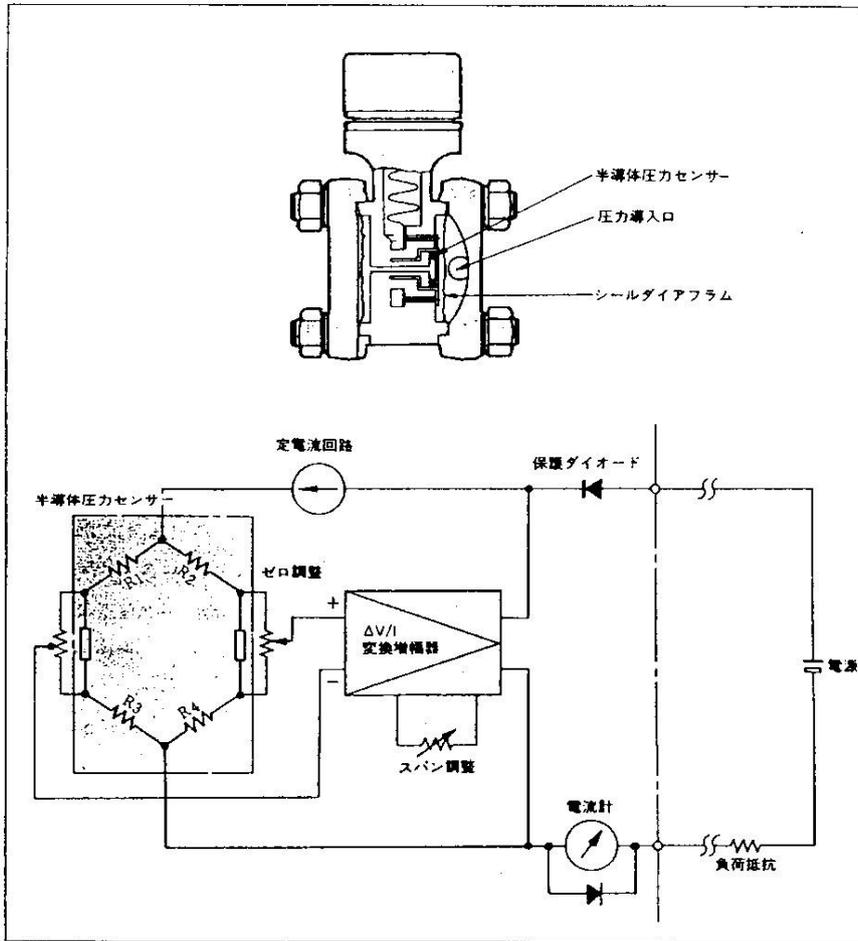


図3.9.2 圧力伝送器

(2) 気体または液体流量計（タービンメーター）

気体または液体によりローターが回転し、ピックアップコイルにあるマグネットの磁界がタービンブレードによって遮られ、コイルに誘導電圧が生じる。この電圧をプリアンプで増幅・整形して流量に比例したパルス出力が得られる。パルス信号はそのまま積算カウンターを動作できないので、受信部で係数補正を行うのが普通である。尚、使用上の注意として、適当なフィルターをメーター上流に設置し、異物の流入を防止する他、十分な直管部またはストレートナーを設置することが必要である。また、液体計量には気体の混入、気体計量には液体の混入があると精度が非常に悪くなるので十分な分離が必要である。（図3.9.3参照）

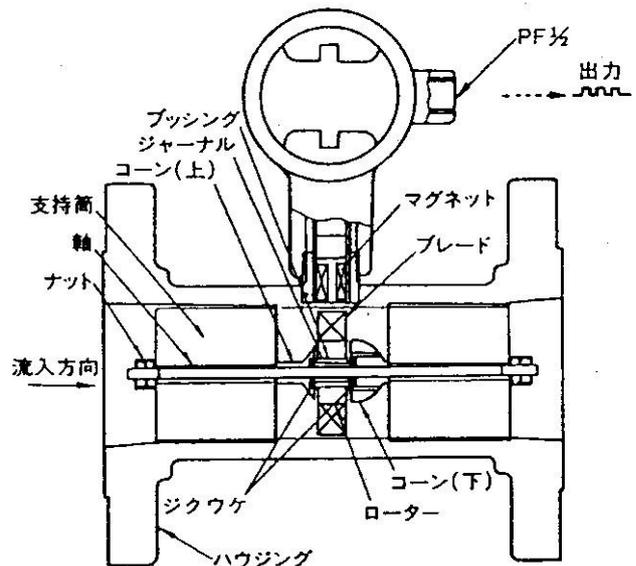


図3.9.3 液体流量計

(3) 液面スイッチ

ステム内にリードスイッチを内蔵しており、フロートにマグネットが取り付けられている。

フロートがリードスイッチと同位置に達すると、磁力によりリードスイッチの接点が入る。上限 (H)、下限 (L)、上上限 (HH)、下下限 (LL) 用などの信号が得られる。ベッセル内部、ピットの液面などの監視、警報および制御に使用される。(図 3.9.4 参照)

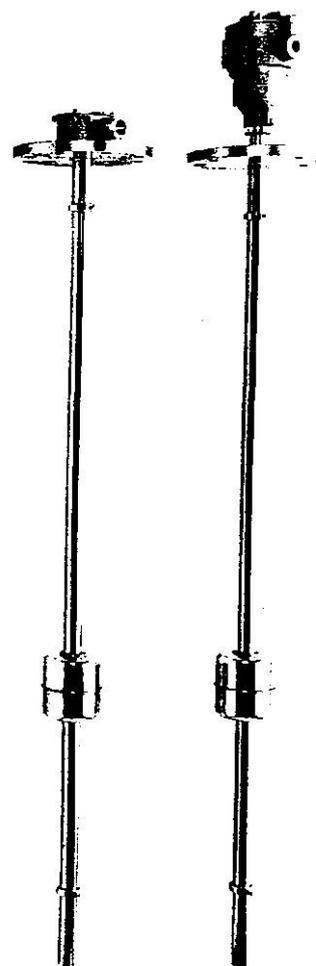


図3.9.4 液面スイッチ

9.5 受信端

一般に受信端は中央基地 (コントロールセンター) にあり、パネル盤および操作卓などにより構成されている場合が多い。

受信端の表示の方法としては次のようなものがある。

(1) 計測

- ① アナログ：指示計、記録計
- ② デジタル：数表示、印字 (プリンター)
- ③ その他：ディスプレイ

(2) 積算：数表示、印字 (プリンター)

(3) 監視：ランプ、ブザー

また、差圧による流量 (ガス体) の計測には電氣的に計算 (演算) を行なわなければならないので、圧力・温度補正演算器、開平演算器および比重・圧縮補正演算器を使用する。一例を図 3.9.5 に示す。

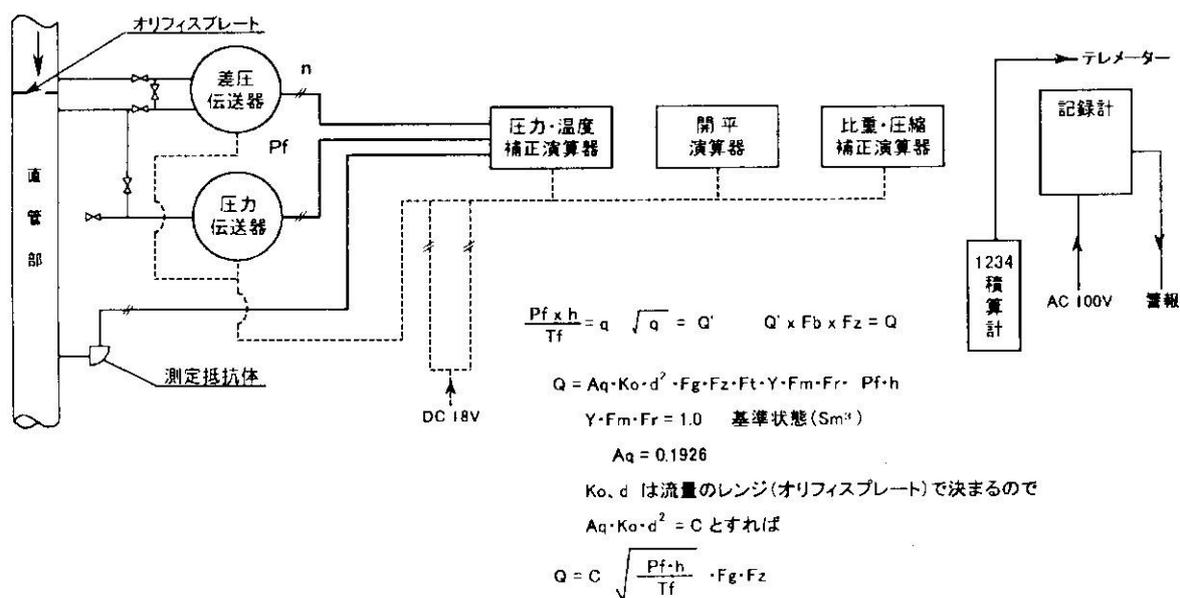


図3.9.5 ガス流量演算

## 9.6 制御

## i) 制御の種類

制御には手動制御と自動制御があり、自動制御にはさらに下記のような制御方式がある。

- ① フィードバック制御
- ② プログラム制御
- ③ シーケンス制御
- ④ コンピューター制御
- ⑤ 数値制御

## ii) 制御対象項目

制御を行なう要素は圧力、温度、流量、液位、その他であり、制御を行なう機器としてはバルブの開閉制御、ポンプの運転/停止制御がほとんどである。以下にバルブの開閉制御について述べる。

## (1) 電動弁

電動弁は電動機とバルブの組合せによりできており、駆動電源として三相交流、遠隔操作用電源として直流 24 V が使用される。

また、全開、全閉および過大トルク時は自動的に停止する機能を持つ安全装置が付加されることが多い。構造の一例を図 3.9.6 に示す。

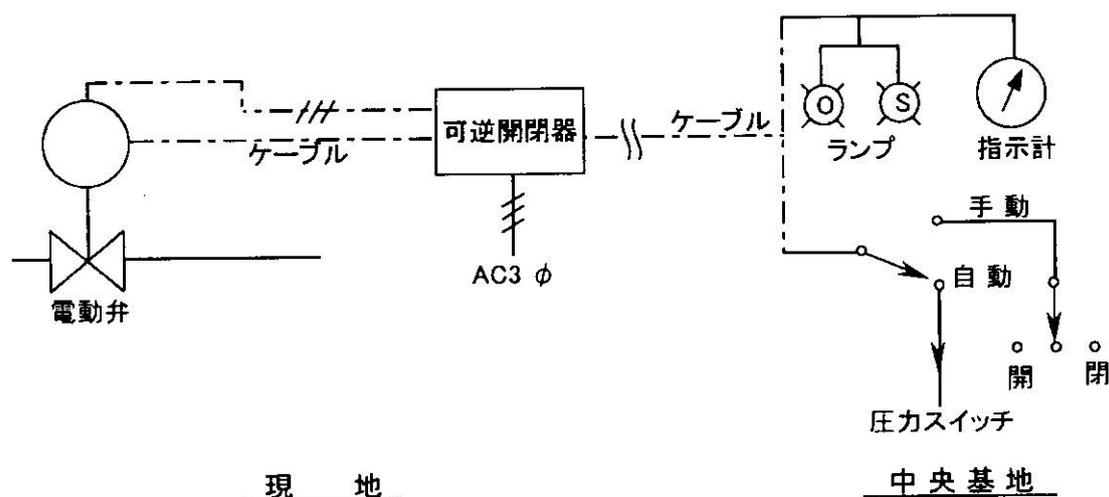


図3.9.6 電動弁制御

## (2) ハイローバルブ

駆動ガスのON-OFFを小型の三方電磁弁を使用し制御するもので、構成の一例を図3.9.7に示す。

ハイローバルブに駆動ガスが流れた状態でバルブが開となるとすれば、電磁弁に通電した時に①にガスが流れ加圧状態になり、ハイローバルブは開となる。また、電磁弁に通電していない場合は②に動作し圧力が抜け、ハイローバルブは閉となる。なお、三方電磁弁の動作は通電開型を使用するのが普通である。

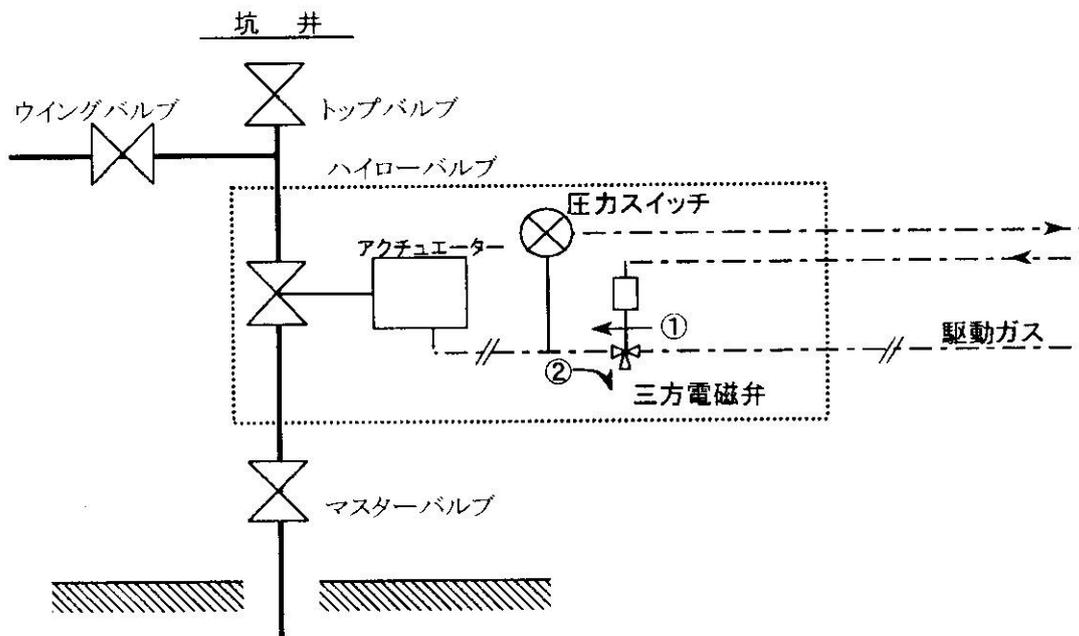


図3.9.7 ハイローバルブ

(3) アジャスタブルチョーク

アジャスタブルチョークの制御は特別の場合を除き自動制御を行わず、中央基地にてガス流量および開度計を見ながら、手で遠隔制御を行なうのが普通である。また、アジャスタブルチョークの制御はその坑井のアジャスタブルチョーク目盛最高・最低の位置で自動的に停止するようにリミットスイッチがセットしてある。構成例を図3.9.8に示す。

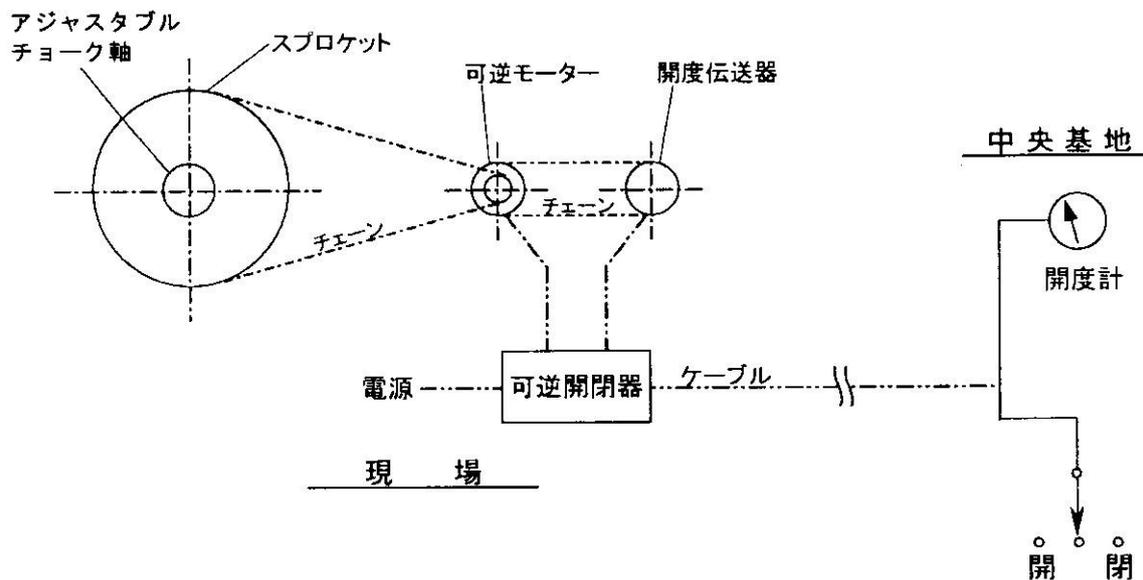


図3.9.8 アジャスタブルチョーク開閉制御

(4) コントロールバルブ

圧力、流量等の制御を行なうためコントロールバルブを使用するが多い。コントロールバルブ、電気信号、調節計を使用したフィードバック制御の構成例を図3.9.9に示す。

なお、停電時を考慮し無停電電源を設置するのが望ましい。

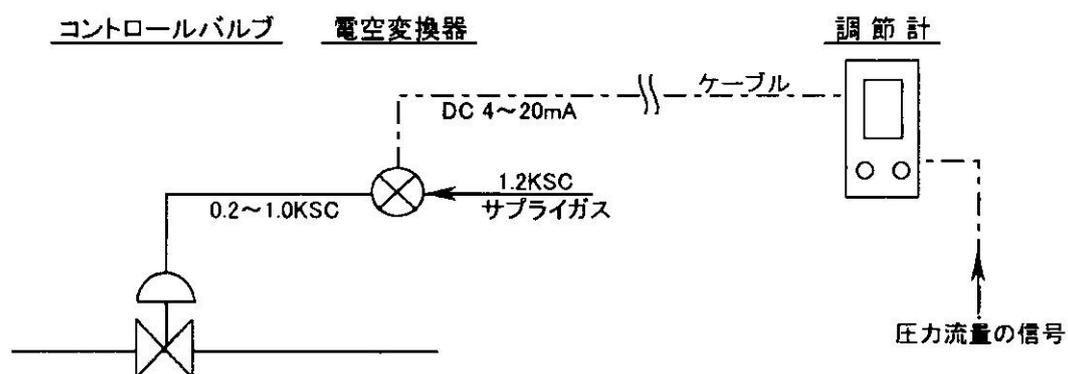


図3.9.9 コントロールバルブ

### 9.7 計装例

- (1) 現場基地の規模が大きい場合の一例を図3.9.10に示す。
- (2) 送油設備の監視制御系統の一例を図3.9.11に示す。

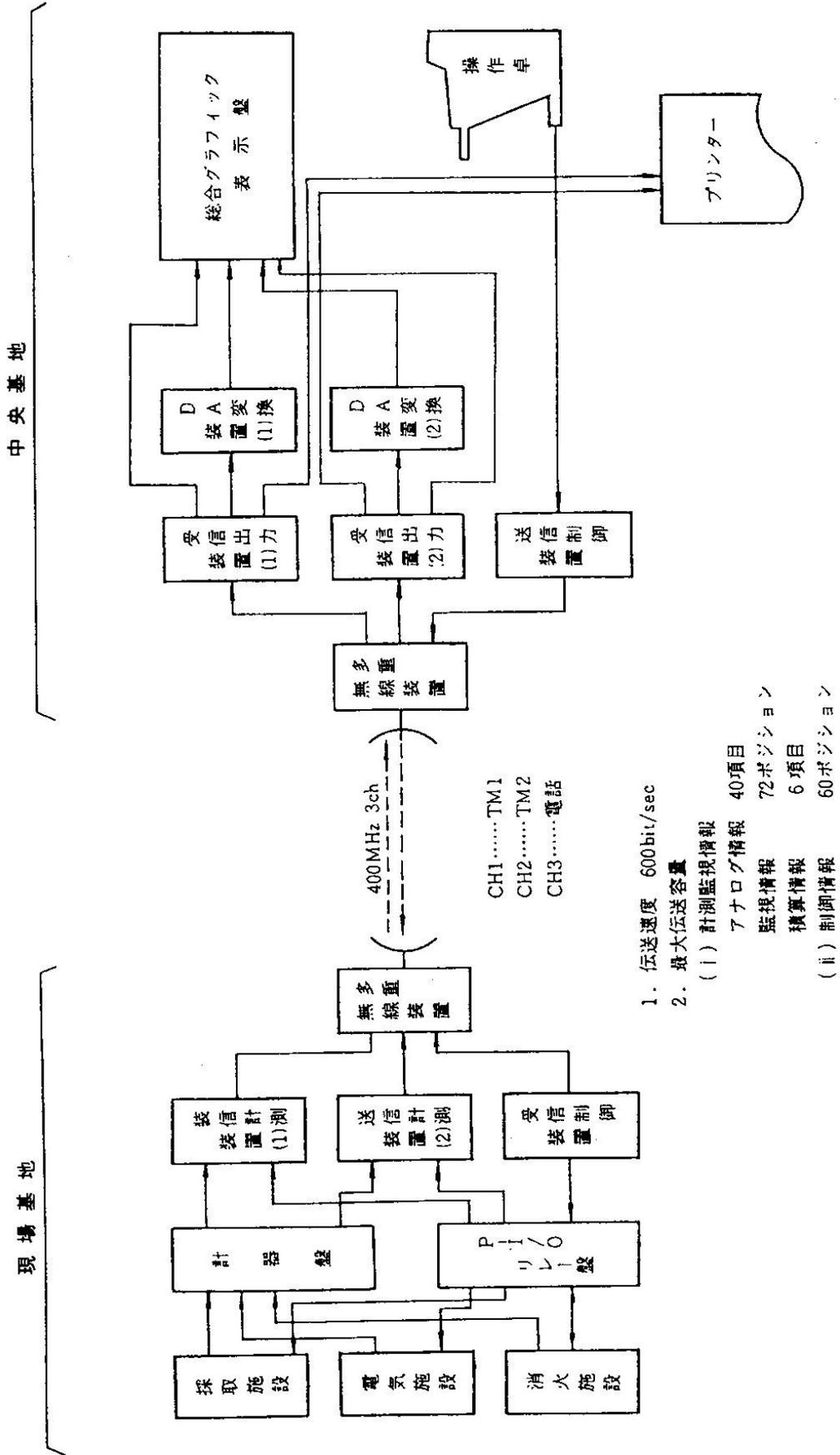


図3.9.10 遠隔制御系統

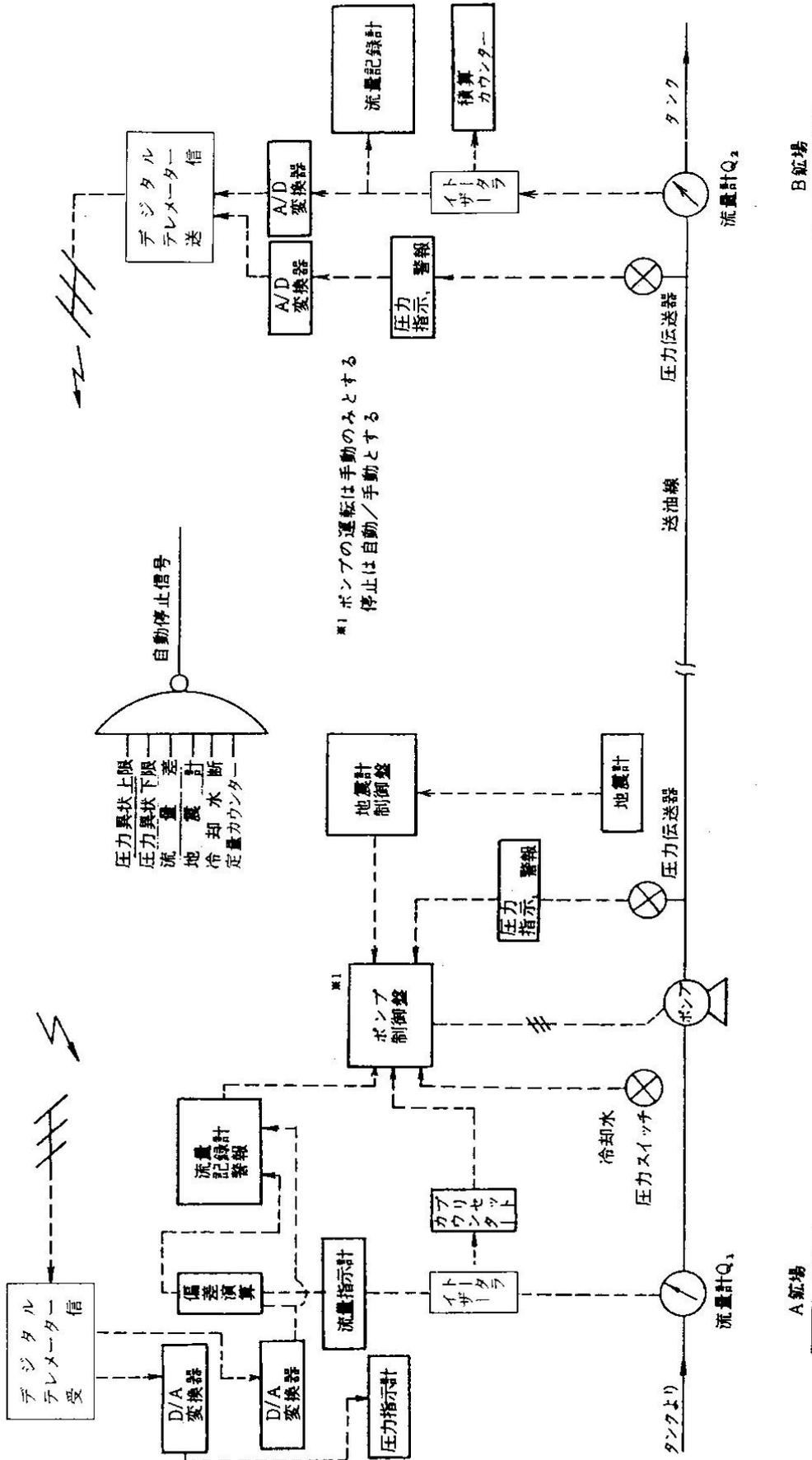


図3.9.11 送油設備の遠隔監視制御例

## 9.8 SCADA システム

### i) SCADA とは

SCADA とは、監視制御とデータ収集を意味する Supervisory Control And Data Acquisition の略称で、産業制御システムの一つである。

コンピューターによるシステム監視とプロセス制御を行ない、以下に示すような工業プロセス、インフラストラクチャー、設備など非常に広範囲の分野に適用されており、社会のあらゆるインフラに欠かせないものとなっている。

- (1) 生産、製造、組み立て、精製、精錬、発電、石油・天然ガス生産などを含む工業プロセス
- (2) 上下水道、排水等の水処理、石油・天然ガスパイプライン、送電網、送ガス網、鉄道、大規模通信システムなどのインフラ
- (3) 空港、駅、デパート、ホテル等のビルディング、船舶などの設備に於ける空調、防火、アクセス、エネルギー消費など

### ii) システムの構成

SCADA システムは、一般的に次のようなサブシステムから構成される。

#### (1) ユーザーインタフェース:

対象プロセスのデータをオペレーターに提示し、オペレーターがプロセスを監視し制御できるようにする機構。

#### (2) 監視制御（コンピューター）システム:

プロセス上のデータを収集し、プロセスに対して命令を送る。

#### (3) 遠方監視制御装置（RTU, Remote Terminal Unit）またはプログラマブルロジックコントローラ（PLC）:

プロセス内に設置されたセンサーと接続し、センサーの信号をデジタルデータに変換、そのデジタルデータを監視制御システムに送ると同時にプロセスを制御する装置。

#### (4) 通信基盤:

監視制御システムと遠方監視制御装置（RTU）または PLC を接続する。

### iii) SCADA の特徴

SCADA は、地理的に遠隔あるいは広域に散在する設備群を中央から集中的に状態監視し、制御や操作することを目的としたシステムである。

対象プロセスはその役割に応じて散在する設備群や多くの機器から構成されるが、中央の監視制御システムと遠隔地に設置される多数の遠方監視制御装置（RTU）または PLC を通信基盤で接続することにより、そのすべての状況を中央で掌握し、設備群全体を中央から運用することが可能となる。

SCADA システムに於ける制御のほとんどは遠隔地設置の遠方監視制御装置（RTU）または PLC が自動的に行ない、中央の制御機能は実時間制御でなく監督的な介入や優先的なものに限られる特性がある。

### iv) 通信基盤

中央の監視制御システムと遠隔地設置の複数の遠方監視制御装置（RTU）または PLC を結ぶ通信基盤として、NTT が提供する VPN サービスを利用することが可能である。

この VPN サービスは「広域イーサネット」と「IP-VPN (Internet Protocol-Virtual Private Network)」の 2 種類のサービスに分類され、多拠点ネットワークへの適正とカスタマイズの自由度に主な違いがあるが、バックボーン（網）・アクセス回線ともにネットワーク構成には大きな差異は無い。

広域イーサネットは、多拠点ネットワークにおける設定が煩雑で、カスタマイズの自由度は高い。一方、IP-VPNは、多拠点ネットワークにおける設定が簡単で、カスタマイズの自由度は低い。ネットワーク機器も含め設定や運用を NTT が実施しすべてを任せられるので、SCADA システムの通信基盤として IP-VPN を利用するケースが非常に多い。

なお、中央の監視制御システムと遠隔地設置の遠方監視制御装置 (RTU) または PLC 間の伝送制御手順は、TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) が使われている。

#### v) SCADA システムの適用例

天然ガスパイプラインに SCADA システムを適用した一例を図 3.9.12 に示す。



## IV 水溶性天然ガス

### 1 開 発

#### 1.1 水溶性天然ガスの特徴

水溶性天然ガスとは、生物起源のメタンガスが、比較的浅い所の堆積層である帯水層中に静水圧の下で溶解しているものである。ガスの溶解した水を坑井を通じて地表に汲み上げると、減圧のためガスが分離し、ガスは容易に採取される。このような帯水層をガス層と呼んでいる。我が国では早くから水溶性天然ガス鉱床の存在が知られており、昭和初期には逸早く千葉県下で開発企業が設立され水溶性天然ガスの採取が行われるなど、商業的採取の歴史も古い。現在生産が行われている水溶性天然ガス田は、千葉県九十九里平野を中心とした南関東ガス田、新潟ガス田、宮崎県佐土原ガス田、秋田県象潟ガス田などである。なかでも南関東ガス田は、膨大な可採埋蔵量を有し、現在でも継続的に開発が行われており、ガス生産量は水溶性天然ガスの90%近くを占める主力ガス田となっている。

水溶性天然ガスはガス層の水（かん水）に溶解して存在しているため、かん水を揚水することによってガスを採取する。ガスのかん水に対する溶解度は、ガス層の圧力、温度、塩分濃度などで決まるが、ガス層の圧力にほぼ比例して溶解度が大きくなる。深度2,000 mの静水圧下では、かん水1 kl中に2 m<sup>3</sup>程度のガスが溶解している。地上に取り出したときのガスとかん水の容積比（m<sup>3</sup>/kl）をガス水比という。

我が国の水溶性天然ガス田のほとんどが、ガスのかん水への理論溶解度に応じたガス水比を示している。これに対し、南関東ガス田九十九里地域南部では、比較的浅いガス層を仕上げた坑井で特殊なガス産出挙動を示すものが多くある。すなわち、生産初期からガス水比がすでに理論溶解度を上回っており、生産が進むに連れて更にガス水比が上昇し、ガス量の増加によって自噴採取が可能となるまでになる。このようなガス産出挙動を示す坑井が千葉県茂原市周辺に集中していたことから、これを茂原型ガス産出挙動、鉱床を茂原型鉱床と呼び、ガス水比が低く理論溶解度程度の一定値で推移するものを通常型ガス産出挙動（通常型鉱床）と呼んで区別している。茂原型鉱床の坑井では、ガス水比が50 m<sup>3</sup>/klを超える例も報告されている。

茂原型鉱床から揚水されるかん水の化学組成例を表4.1.1に示す。水溶性天然ガスかん水中には、一般に高濃度のヨウ素が含まれているため、天然ガスを分離採取した後、かん水からヨウ素が採取されている。現在、我が国で生産されるヨウ素は、全量が水溶性天然ガスかん水を原料として製造されている。日本は世界ヨウ素生産量の40%前後を生産しており、チリ国と拮抗する世界の2大ヨウ素生産国の一つである。ヨウ素の生産は南関東ガス田、新潟ガス田及び佐土原ガス田で行われており、その中で、南関東ガス田で生産されるヨウ素は、国内生産量の約80%近くに達している。

水溶性天然ガスの採取は、かん水の揚水に伴ってガス層圧が低下する過程においてガス層及びその周辺地層の収縮を引き起こし、その地域の地表面の低下すなわち地盤沈下現象を発生させる危険性を常に内包している。そのため、水溶性天然ガスの採取においては、地盤沈下の防止が最も重要な技術課題の一つである。また、地盤沈下の防止を図りながら合理的な開発を推進するための各種の行政措置もとられている。ガス田の地質的条件によって地盤沈下特性に違いがあり、地盤沈下防止対策がそれぞれ異なることから、ガス田ごとにその特性に応じた開発方式によって水溶性天然ガス採取が行われている。

以上が水溶性天然ガスの特徴の大要であるが、そのほか構造的天然ガスなどと比べた場合に見られる一般的な特徴を列記すれば、次のようになる。

- (1) 水溶性天然ガスはメタン純度が高く、僅かに二酸化炭素や窒素が含まれているが、一酸化炭素や硫化水素などの有害な成分は含まれていない。

- (2) 水溶性ガス井では、自噴採取できる坑井もあるが、一般的にはガス層の圧力が低いため、ガスリフトまたは水中ポンプ方式で採取され、そのための設備と動力を必要とする。
- (3) 地上でかん水から分離されたガスの圧力は大気圧に近い低圧であるので、集ガスや輸送など以降のガス処理にはブロワーやコンプレッサーなどの輸送昇圧設備とそのための動力が必要である。
- (4) 水溶性天然ガスの採取には大量のかん水を揚水しなければならない。揚水したかん水の処理のために送水管や排水管など大規模な施設が必要となる。かん水には高い濃度の塩分が含まれているので、地上に排出する場合には最終的に海域まで排出する施設が必要である。
- (5) かん水は坑水または廃水として海域に排出されるが、かん水は油分・重金属類・有害有機物等を含んでいない化石海水であり、外洋海域へ排水するにあたっては排水処理の必要はなくそのまま直接排水できる。ただし、かん水には窒素成分としてアンモニウムイオンを含有しているため、閉鎖性海域など富栄養化の問題が発生する可能性のある水域に排出する場合は、窒素成分を低減させるための処理が必要となる。
- (6) 一坑井当りのガスの生産規模は構造的天然ガスに比べて格段に小さいため、必要ガス量を確保するためには相当数の坑井の開発が必要である。
- (7) 構造的天然ガスに比較して探鉱リスクがほとんどなく、生産開始後は比較的長期間にわたって生産能力は安定している。

表4.1.1 かん水の化学組成表

(単位 : mg/l)

項目	かん水	海水
PH	7.9	8.2
HCO <sub>3</sub>	1,000	105
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-	5.9
Cl <sup>-</sup>	18,000~19,500	18,230
Br <sup>-</sup>	120	56.2
I <sup>-</sup>	110~130	0.05
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	120	1.5
Ca <sup>2+</sup>	190	372
Mg <sup>2+</sup>	500	1,160
K <sup>+</sup>	300	356
Na <sup>+</sup>	10,000	9,350
HBO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	10	21.9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	2,450
TOTAL-Fe	2~5	0.2

## 1.2 水溶性天然ガスの開発

水溶性天然ガス鉱床はそのほとんどが被圧地下水をもった帯水層であり、天然ガスを採取することは、とりもなおさず地下水を汲み上げることに他ならない。そのため、水溶性天然ガスの開発や生産技術の分野では、ガス層中における液体の流れを帯水層における被圧地下水の流れとみなして、水理学的概念で取り扱われる部分が多い。

### 1.2.1 ガス産出能力

ガス層におけるガス水比が飽和状態もしくは不飽和状態である場合には、地層中を均質な非圧縮性流体が流れるものとして、ガス層より坑井に向かって水平放射状に流入する水量は、定常流において

はダルシーの法則により次式で表される。

$$Q = \frac{2\pi KH \cdot \Delta P}{\mu \cdot \ln(r_e / r_w)}$$

ここで  $Q$  : 坑井内にガス層より流入する水量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$K$  : ガス層の浸透率 [ $\text{m}^2$ ]

$H$  : ガス層の有効層厚 [ $\text{m}$ ]

$\Delta p$  : 産出時における坑底圧降下 [ $\text{Pa}$ ]

$$\Delta p = p_s - p_f$$

$p_s$  : 静止坑底圧 [ $\text{Pa}$ ]

$p_f$  : 流動坑底圧 [ $\text{Pa}$ ]

$\mu$  : ガス層内における水の粘度 [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]

$r_e$  : 産出時における圧力影響半径 [ $\text{m}$ ]

$r_w$  : 坑井半径 [ $\text{m}$ ]

この式から、ガス坑井の産出水量はガス層の浸透率と有効層厚ならびに有効差圧 ( $\Delta p$ ) に比例することが分かる。

単位圧力降下に対する単位時間当りの産出水量は、ガス層の産水能力を示す指数として産出指数 (Productivity Index : PI) と呼ばれる。すなわち、

$$\begin{aligned} PI &= Q / \Delta P \\ &= \frac{2\pi KH}{\mu \cdot \ln(r_e / r_w)} \end{aligned}$$

PI はガス層の浸透率と有効層厚の積に比例する。水溶性天然ガス鉱床のガス産出能力は、産出指数 PI とガス水比の積で評価される。

### 1.2.2 ガス産出挙動

#### i) 通常型

ガス井からの産出水量に対してガス層に外部から同量の補給 (かん養) があり、定常状態にあるものとするれば、ガス層内の圧力分布は時間に依らず一定である。しかし、実際の坑井では、時間とともにガス層圧力が低下する非定常流動であることが多く、産出水量も時間とともに低下し続けることが一般的である。その場合でもガス水比はほとんど変化しないので、産出ガス量は産出水量に比例する。わが国では、水溶性天然ガス田のほとんどがこのような産出経過を示すことから、これを通常型ガス産出挙動と称している。

通常型に見られるガス層圧力と産出量の経年変化を図 4.1.1 に示す。

#### ii) 茂原型

上記の通常型に対し、図 4.1.2 に示すような茂原型ガス産出挙動と呼ばれる特殊な産出経過を示す坑井がある。すなわち、採取開始後に産出水量は通常型と同じように減少するが、ガス水比が上昇して産出ガス量は、ある期間逆に増加し、最大値に達した後漸減に向かうという特徴を持つ産出経過である。茂原型ガス産出挙動は、南関東ガス田九十九里地域南部の比較的浅い鉱床を仕上げた坑井に見られる。ガス水比が上昇するメカニズムは、茂原型鉱床のもつ特性に起因しているものとして、次のように考えられる。

ガス層内ではガスが過飽和の状態であり、遊離ガスが存在している。

- ① ガス層の砂層は層厚 1 m 以下と比較的薄く、薄い泥層と互層をなしている。砂層の浸透率は平均して 100 md 以下と通常型に比べて低い。
- ② そのため、揚水に伴いガス坑井近傍での圧力低下が大きく、ガス層内でガスが分離する。また、薄い泥層であるため泥層中のガスも砂層に移動する。
- ③ ガス層深度が 400~1,000 m と比較的浅いため、深いガス層に比べて圧力変化率が大きくなる。分離したガスは比容積が比較的大きくなり、ガスと水との相対浸透率の関係からガスが移動しやすくなり、産出ガス水比は層内原始ガス水比よりも大きくなる。

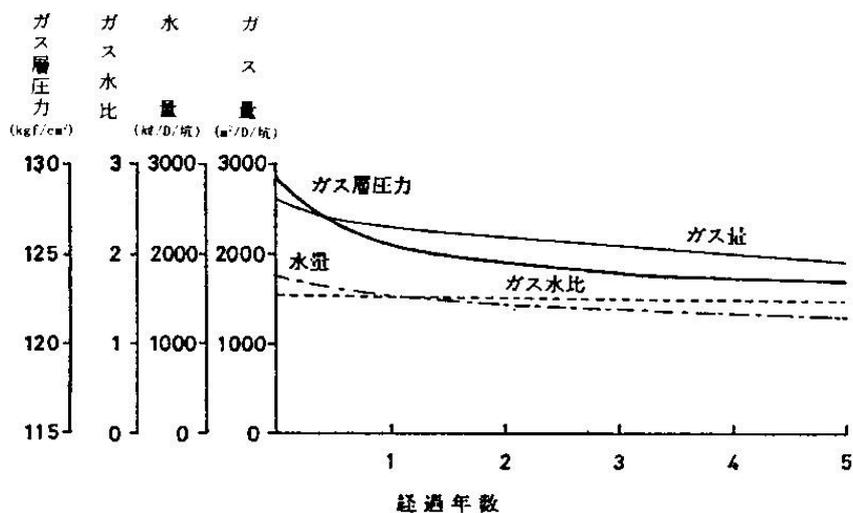


図4.1.1 通常型産出挙動

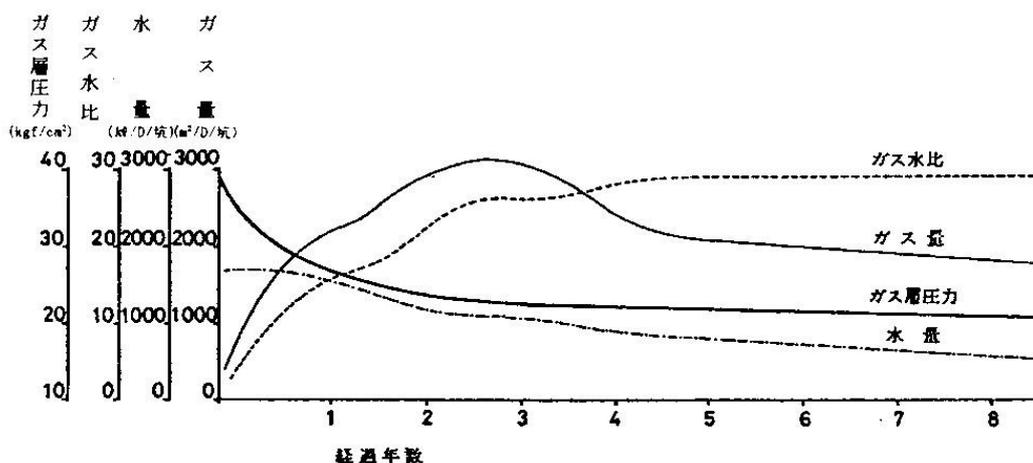


図4.1.2 茂原型産出挙動

### 1.2.3 開発方式

水溶性天然ガスの採取は、ガス層の圧力低下に伴って地盤沈下現象を引き起こす危険性があるので、適切な地盤沈下防止対策を講じながら開発しなければならない。鉱床の地質的特性の違いによって地盤沈下特性には大きな差異があるので、基本的な開発方式はガス田ごとに異なっている。

また、同じガス田であっても、ガス層のガス産出能力やガス産出挙動など鉱床の産出能力に差異があり、それぞれの特性に応じた経済的開発を行わなければならないため、鉱床ごとに坑井仕上げ方法や採取井間の間隔の設定などに違いがある。

以下に、代表的な水溶性天然ガス田である新潟ガス田と南関東ガス田において、最近行われている開発方式を記す。

#### i) 新潟ガス田における開発方式

新潟ガス田ではガス層上下の泥岩層は圧密降伏応力が小さく、体積圧縮係数が大きく、僅かの水圧降下でも地盤沈下を生じやすいと考えられている。そのため、新規の開発は、各ガス層について汲み上げた水量と同量の水を同一ガス層に還元圧入して水の収支バランスをとる層別バランス方式が採られ、付随水を地上に排出しない全量地下還元方式によって開発が行われている。

この場合、採取井の揚水量は還元圧入量に制約されることになるので、対象となるガス層は浸透率が高く広範囲にわたって連続分布する厚い砂礫層であるなど、層別バランス方式を採用するに十分な条件を備えたものでなければならない。

4層のガス層を採取の対象としたときの層別バランス方式を図4.1.3に示す。

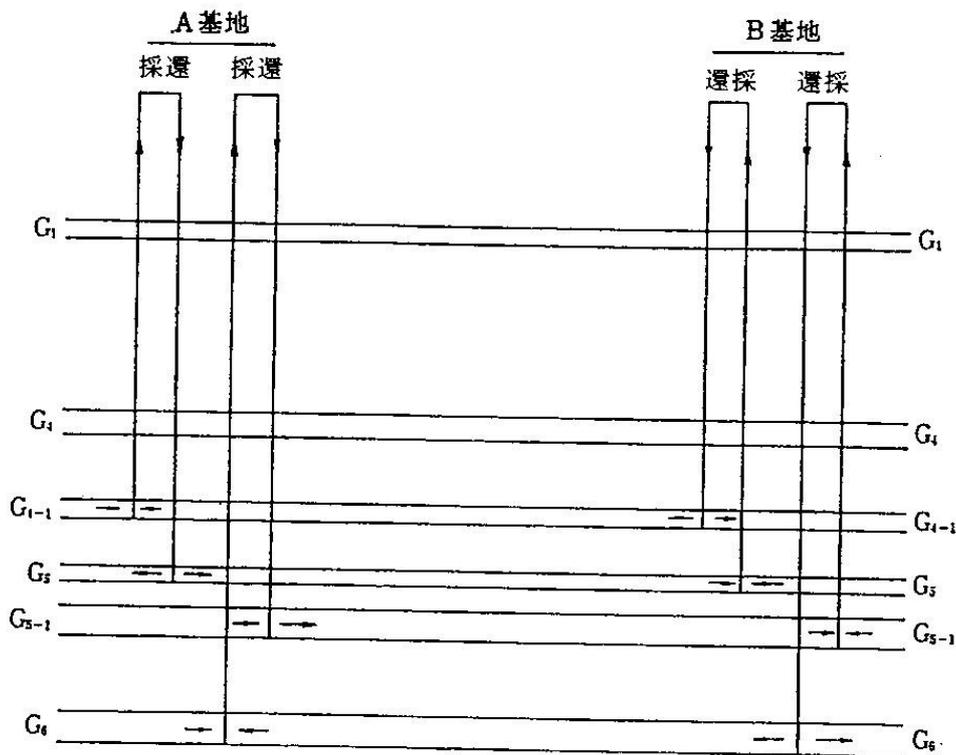


図4.1.3 層別バランス方式

この場合、1地点に2層から採取し他の2層に還元圧入するために計4坑井が設けられて一つの採取基地をなし、これから適当な離隔距離をとった他の基地に、採取層、還元層を逆にした4坑井が設けられ、この2基地8坑井が1対となって4層全量還元方式のガス採取の単位となる。

実際の開発においては、偶数となる多数の基地を展開して経済規模の集団開発を行うことになる。このとき、同一ガス層における採取井と還元井の間隔の決定が最も重要な問題となるが、次の点を考慮しながら決定される。

- ① 地盤沈下に対する影響を配慮して、ガス層の本来の原始水位をできるだけ変化させないため、採取井と還元井は双方の圧力伝播圏に配置する。
- ② 長期的な企業採算性を考慮し、ガスが溶存していない還元水が採取井に到達して採取を停止するまでの間に、十分な累計生産量が得られるように坑井間隔をとる。

- ③ ガス層特性を把握して、ガス層内のガスをできるだけ取り残さないよう効率よく採取できるように展開する。

#### ii) 南関東ガス田における開発方式

南関東ガス田のガス層は、砂層と泥岩層の互層からなり、砂層、泥岩層ともに単層の厚さは数m以下であり、しかも砂層における砂の粒径が小さく浸透率が低いため、単層ごとに仕上げたのでは経済的な産出量は全く期待できない。そのため、幾つかのガス層グループに長孔明管を当て一括して仕上げる多層同時仕上げによって採取されている。しかし、南関東ガス田のガス層の圧密降伏応力は新潟ガス田の圧密降伏応力に比べて大きく、そのため、地盤沈下は新潟ガス田よりも比較的緩やかである。

このような地質特性を考慮して、南関東ガス田では地盤沈下防止対策として地上排水限度量方式が採用されており、この方式に基づいて水溶性天然ガスの開発ならびに採取が行われている。

地上排水限度量方式とは、南関東ガス田における開発対象地域を、地形および地質、圧密降伏応力などの地層特性並びにガス産出経過特性などを考慮してⅠ～Ⅷの8区域に分類し、それぞれの区域ごとに単位面積当りのかん水の地上排水限度量を設定した方式である。ここで言う、地上排水量とはかん水揚水量から還元圧入量を差し引いたものであり、実質的に地上に排水されるかん水の量である。

新規開発を行う場合、開発坑井の数は1 開発地域について最大10 坑井程度である。坑井展開では通常型坑井と茂原型坑井で坑井間隔は異なり、通常型はおおむね1,000 m、茂原型はおおむね500 mの間隔が取られる。坑井展開図を基に、通常型、茂原型それぞれ所定の方式によって開発地域の開発面積を算定する。当該開発地域におけるかん水の地上排水量は、その開発地域が属する区域の単位面積当りの地上排水限度量に当該開発地域の開発面積を乗じて算出した地上排水量が最大限度量となる。すなわち、新規開発地域の天然ガス採取は、開発地域の坑井を合わせたかん水の地上排水量がこの最大限度量の値を超えないようにして採取しなければならない。

また、新規開発のほかに、補充井開発として既開発地域内やその周辺地域において1～3 坑井規模で開発する場合もあるが、この補充井開発は既開発地域の天然ガス産出量の減退分を補うことを目的とした開発であるので、原則的には既開発地域において既に定められている地上排水量の最大限度量の値は変更しないことになっている。

南関東ガス田においては、地質特性の違いによって、新潟ガス田のような全量還元方式による天然ガスの採取は技術的、経済的に非常に困難であるため、上述のような地上排水限度量方式が採用されている。そのなかで、かん水の還元圧入は地盤沈下の抑制に効果を有しているため、天然ガス採取企業は還元率を高めることによってできるだけかん水の地上排水量を低く抑える操業努力を行っている。また、水溶性天然ガスの継続的な開発が可能となるよう、天然ガス採取企業は地盤沈下防止のための技術知見の集積にも多大な努力を払っている。

## 2 掘削

水溶性ガス井の深度は 2,000 m を超えるものもあるが、一般的にはそれ以下で比較的浅い。また、ガス層圧力は深度相応の静水圧に近く、異常高圧層や異常低圧層は存在せず、地質は概して軟質である。これらの点で、水溶性ガス井の掘削は、石油や構造的ガス井の掘削に比べて容易である。そのため、水溶性ガス井で使われる掘削装置や機器類は、石油や構造的ガス井の掘削に比べて一般に簡易で小型のものが使用されている。

しかし、掘削作業の目的は、掘進率を向上させ、低コストで安全にガス層を掘り抜くことであり、この点は石油や構造的ガス井のそれと全く同様である。したがって、掘削方法や掘削作業などの基本的な技術は、石油や構造的ガス井の掘削の場合と変わらない。

水溶性ガス井の掘削について、以下に概要を記すが、詳細についてはⅡ掘削を参照されたい。

### 2.1 掘削

#### 2.1.1 ビット類

地層が軟質であるため、ドリリングビットには軟質層で高い掘進率を発揮するブレードタイプのビットが多く使用されるが、ローラータイプビットも同じように用いられる。

坑径の大きい掘削の場合は、初めに小径ビットで掘削し、次にホールオープナーを用いて拡張することが多い。ホールオープナーはスリーポイントタイプが主に使用される。

地層コアを採取するコアリングには、もっぱらダイヤモンドコアビットが使用される。固結度が弱い軟質砂層に対しても採取率が良い。

そのほかの機器類も必要によって、石油や構造的ガス井の場合と同じ目的で使用される。

#### 2.1.2 掘削泥水

異常高圧層や異常底圧層はなく、また坑内温度も高くはないことから、使用される泥水はほとんどベントナイト泥水である。脱水調整剤として CMC が用いられることが多く、そのほかの調泥剤として分散解こう剤なども必要により用いられている。

ガス層の圧力はほぼ深度に対応する静水圧に等しいので、もっぱら低比重泥水が使用されている。通常、比重 1.2 以下程度に管理されることが多い。

#### 2.1.3 掘削上の障害

##### i) 逸泥

既に開発が行われている地域内やその周辺で掘削する場合には、生産によってガス層圧力が低下しているため、そのガス層部分で逸泥が起き易い。このような場所で掘削するときは、あらかじめ逸泥が想定される深度を把握しておき、その部分では特に適正泥水比重を保つなど泥水管理を十分に行うとともに、掘管の降下や泥水ポンプの作動を緩やかにするなどして、できるだけ逸泥を起こさないよう細心の注意を払って掘進することが大事である。

逸泥が発生した場合には、泥水に逸泥防止剤を混入してできるだけ早く逸泥を防止する。

逸泥防止剤を用いても逸泥が止まらない場合には、逸泥部分にセメントを放置する逸泥対策などが行われることもある。

##### ii) 地層の崩壊

崩壊は上部に厚い砂層がある場合に起きやすく、また逸泥に伴って発生するケースが多い。逸泥によって坑内泥水の水位が下がり、それまで泥水柱圧により抑えられていた上部の砂層の地層圧がまさり、地層水とともに砂が坑内に押し出されてくるからである。そのため、崩壊を防止するには逸泥を防止

することが第一であるが、あらかじめ崩壊層があると分かっている場合には、そのところまでコンダクターパイプを挿入することも行われる。

### iii) 抑留

掘管の抑留は地層の崩壊による場合と差圧抑留による場合が多い。崩壊による場合は、崩壊によって落下した砂が坑壁と掘管の間に挟まるため、この場合は先ず崩壊を防止することが大事である。

差圧抑留の場合は、泥壁が厚くなり、坑径が小さくなって掘管が泥壁に吸着し、差圧によって押し付けられて起こるものである。この場合は泥水管理を十分に行い、なるべく薄い泥壁を作るようにすることが重要である。

### 2.1.4 ドリルストリング

外径寸法 3-1/2 in. や 4-1/2 in. の掘管が良く使われる。長さは主に 9 m のものが使用されている。このほか深度 1,000 m 前後の浅い坑井では、2-7/8 in. や 4-1/2 in. の 6 m または 9 m のチュービングパイプを使用して掘削することが多い。

ビットに荷重を与えるためドリルカラーが用いられるが、地層が軟質であるので特に大きなビット荷重は必要としない。

### 2.1.5 ワイヤーライン類

鉱山保安法施行規則（鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令第 17 条、技術指針第 15 章 6 (1) から、ドローワークスの巻揚用ロープの安全率は、ファーストラインに掛かる荷重の最大値に対して、3 以上にしなければならないので、これを満たす保証破断荷重をもっているワイヤーラインが使用される。ドローワークスの巻揚用ロープには、普通 Z 撚りワイヤーラインが多く使われている。

### 2.1.6 噴出防止

#### i) 噴出

水溶性ガス井では、通常型坑井の掘削の場合には噴出の恐れは少ないが、ガス水比の高い茂原型坑井の場合には掘削中に坑内水位の低下が原因となって噴出が生じる恐れがある。噴出は災害や鉱害の発生など、大きな影響を及ぼす危険性が非常に高い。また、噴出が生じた場合、坑内状況が悪化して坑内トラブルが多発し、掘削作業の継続が極めて困難となって断念せざるを得ないこともあり、大きな経済的損失は免れない。したがって、十分な噴出防止対策を講じておくことが必要である。

#### ii) 噴出防止装置

鉱山保安法施行規則（鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令第 17 条、技術指針第 15 章 8 (8) により、水溶性ガス井に使用する噴出防止装置は、表 4.2.1 に掲げる圧力以上の最高使用圧力を有するものでなければ使用してはならないことが定められている。

表 4.2.1 噴出防止装置の最高使用圧力

掘さくする水溶性ガス層の深度	圧力
垂直深度 1,000 m 未満のもの	目的層の垂直深度のメートル数に 0.0039 を乗じた数値のメガパスカル
垂直深度 1,000 m 以上のもの	3.923 MPa

水溶性ガス井の掘削で広く使用されている噴出防止装置を図 4.2.1 に示す。

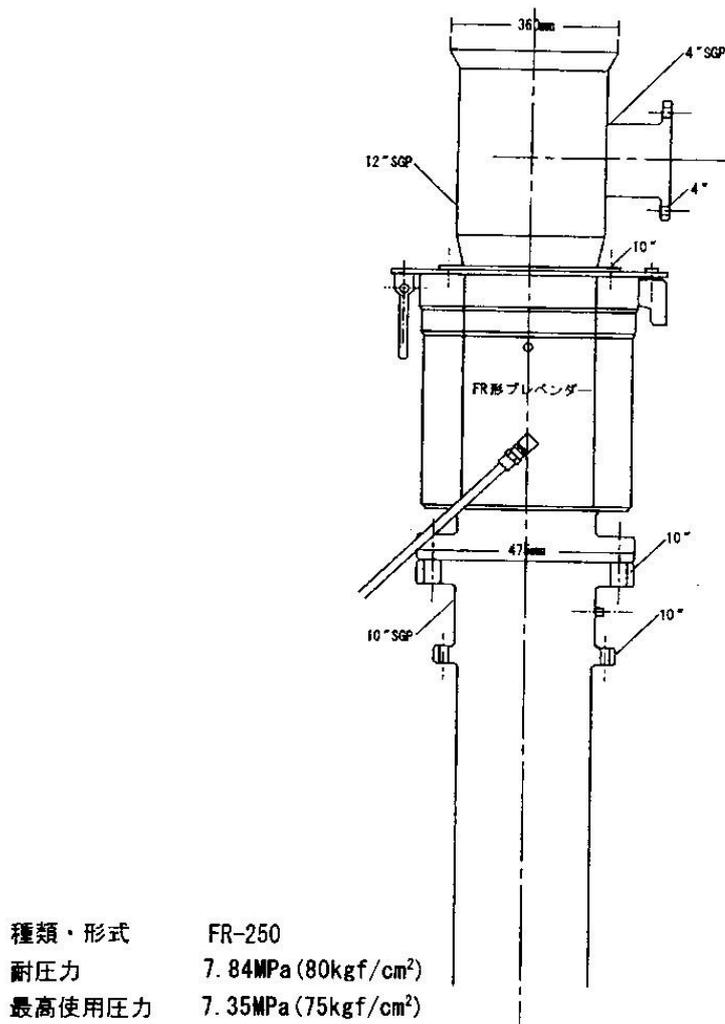


図4.2.1 噴出防止装置

### iii) 噴出防止上の注意点

ガス水比の高い水溶性ガス井では、噴出は逸泥が生じたとき、揚管時に適切な補泥を怠ったときなど泥水頭が低下したことによって起こる場合がある。しかし、泥水管理を十分に行うことによって逸泥を防止し、掘削手が十分注意を払って作業を行えば噴出の発生はほとんど防止することができる。したがって、常に掘削手に十分な技術教育、保安教育を実施しておくことが噴出防止に最も必要な措置である。

### 2.1.7 傾斜掘り

一般的に水溶性ガス井では垂直井が掘削され、傾斜掘りの坑井は極めて少ない。南関東ガス田では、地盤沈下防止のため坑井の間隔が定められているが、地表条件などのため目的位置の直上から掘削できない場合には、傾斜井が掘削されることがある。

以下に、南関東ガス田で行われている傾斜掘りについて概要を記す。なお、傾斜掘りの詳細についてはⅡ掘削編 1.5 傾斜掘りを参照されたい。

#### i) 傾斜偏距具

いろいろな器具があるが、ダウンホールモーターとベントサブを用いた方式が一般的である。

## ii) 測定器

測定器をその都度降ろし測定するシングルショット方式と、掘削時にリアルタイムで傾斜、方位等の測定ができる MWD (Measurement While Drilling) を用いる方法がある。必要とされる精度や費用によって使い分けられる。

## iii) 掘削方法

キックオフポイントまではロータリー方式で掘削し、キックオフポイントからはダウンホールモーターを利用して傾斜掘りを行う。ダウンホールモーターの動力源は泥水圧であるため、通常使用しているポンプ能力よりも大きな出力の泥水ポンプが必要である。傾斜測定を行いながら掘削し予定の傾斜に達するとロータリー方式に戻して掘削する場合と、ロータリー方式とダウンホールモーターを併用しながら掘削する場合がある。

## 2.1.8 セメンチング

### i) 使用されるセメントの種類

水溶性ガス井では、コンダクターパイプのセメンチングや、ケーシングの遮水にセメンチングが行われる。水溶性ガス井のセメンチングの場合には、油井用セメントではなく土木建築などで使われている普通ポルトランドセメントが使用されるのがほとんどである。必要によって、セメント遊離水調整剤などの添加剤が使われることもある。

### ii) セメンチングの方法

坑径の大きいコンダクターパイプのセメンチングには、インナーストリングセメンチング方式が採用されている。

これには次のような利点がある。

- ① ケーシング内にセメントを残さない。
- ② セメントの後押しの計量が正しく行われる。
- ③ 管内のセメント浚いの時間が節約される。

ケーシングの遮水セメンチングは、水層からガス層に水が入ることを防止するために行われる。塩化ビニル管仕上げの坑井では、遮水セメンチングのほとんどは外セメント打管方式で行われている。これは、ケーシング挿入時にケーシングの外側に、必要な数のセメント打管を添わせて降下し、このセメント打管を通して所定の深度にセメントスラリーを送り込む方法である。

遮水セメンチングは孔明管の上端部より上の位置から口元まで行われる。セメントが孔明管部にたれ込むのを防止するため、セメンチングの最下部の位置にセメント受けのメタルバスケット等が取り付けられる。

セメンチングの方法は、通常2段階方式が採られることが多い。最初に孔明管の直上部位置で少量のセメンチングを行う。これは、孔明管部へのセメントのたれ込みによる生産性障害の発生を避けることと、十分な遮水効果をもつセメンチングを期すためである。適正なセメントスラリー比重に調整され、慎重なセメンチングが行われる。

そのセメントが硬化した後、その上部から口元までのフルホールセメンチングを行う。深度が深くなった場合には、1回で大量のセメンチングを行うことは困難なので、数回に分けて行われることが多い。この場合には、必要回数分のセメント打管を所定深度に設定して挿入しておくことになる。

油井用鋼管を使用した坑井の場合には、セメント放出孔による通常の間遮水セメンチングが行われることが多い。

## 2.1.9 検層

### i) 物理検層

坑井の掘削時には、ガス層の諸特性を調査するための物理検層が行われる。一般的に実施されている検層は次のようなものである。

#### (1) 電気検層

掘削中に所定の深度で電気検層を行う。掘削泥水を媒体として、通常、自然電位と比抵抗曲線を連続的に測定する。比抵抗の測定は 2 極法で行われ、ショートとロングの 2 つの比抵抗が測定される。これらによって、地層の対比、ガス層の有効層厚の測定、孔隙性や浸透性の判断、地層水の塩分濃度の推定などを行う。これらは、仕上げガス層、セメンチング位置などを決定するための資料として利用される。

#### (2) ガンマ線検層

地層に含まれる放射性物質から放出される自然ガンマ線を連続的に測定する。地層対比などに利用される。測定ツールは電気検層ツールとコンビネーションされ、同時に測定される。

#### (3) その他

セメンチングに要するセメントスラリーの量を計算するために、キャリパー検層は一般的に行われている。また、実施される頻度は石油や構造型ガス井に比べて少ないが、特定の坑井において、地質評価やガス層評価の目的に応じて孔隙率検層などの各種物理検層も適宜行われている。

### ii) 泥水検層

ガス層評価の確認を目的として泥水検層が行われることがあるが、通常の坑井掘削では一般的に行われていない。検層は主にマッドガスの測定が行われ、ガス層評価の資料に利用されている。

### iii) その他の検層

#### (1) カッティングス調査

掘削中にカッティングスを採取し、化石調査を行う場合もある。これによって、地質時代の推定、地層の対比並びに堆積環境の推定などが行われる。

#### (2) コア調査

コアリングによって地層コアを採取する場合もある。コアからは、化石調査及び土質力学的試験のための試料が採取される。

## 2.2 掘削装置

### 2.2.1 掘削装置の一般的特徴

坑井の掘削にはロータリー式掘削装置が使用されている。掘削方法は基本的には石油や構造型ガスのそれと共通しているが、水溶性ガス井は比較的深度が浅いため、石油や構造型ガス井の掘削に用いられるような大型の掘削装置は使用されず、一般に、広い用地面積を要しないで、かつ組立、解体及び運搬が容易な小型で利便性の高い掘削装置が使用されている。

特に水溶性ガス井の場合には、住宅地域に近接した農作地などに掘削されることも多いため、騒音や振動などの環境問題に十分配慮した機械装置を備えた掘削装置であることも欠かせない。更に、できるだけ安価な費用で掘削するため、安全かつ効率良く、短期間に掘削できる機能を有する掘削装置であることが必要である。そのため、坑井の掘削深度や仕上げ方法に応じて、それに適合した機械装置を選定して組み合わせ、掘削装置として使用する場合が多い。水溶性ガス井で使用される掘削装置

において、一般的に用いられている主な機械装置の概要は次のとおりである。

### 2.2.2 デリック（やぐらないしはマストとも言う）

一般に、正方4脚の組立式標準やぐらが使用されている。形鋼製部材を使用し、サブストラクチャー上面から順次組立てて完成する。特徴としては、やぐら建てに要する敷地面積が少なく、製作費や輸送費が安い反面、やぐらの建て倒しには多くの高所作業を伴う特殊技能と時間を要し、経費高となる。坑井の掘削深度や仕上げ方法、使用するドリルストリングに応じて、高さ18～38 mのやぐらが使用されている。

### 2.2.3 ドローワークス

商用電力を買電し、電動機からベルトによって駆動されるドローワークスが主に使用されている。掘削深度などに応じて22～190 kW程度の電動機が用いられる。

### 2.2.4 泥水ポンプ

商用電力を買電し、ポンプ専用に備えられた電動機からベルト駆動による泥水ポンプが使用されている。掘削坑井の仕様に応じて、必要な吐出圧力、吐出量を有する泥水ポンプが使用される。22 kW～150 kW程度の電動機を備えた横置式複筒往復動型の泥水ポンプが使われ、これらが単独に或いは2台並列に使用されている。

### 2.2.5 吊り具類とやぐら下機器類

用途や機能は石油や構造化ガスで用いられているものと同じであり、使用するドリルストリングやケーシングの径に適合するサイズの機器類が用いられている。

### 2.2.6 標準的な掘削装置

南関東ガス田において、掘削する坑井の深度に応じて使用されている代表的な掘削装置の例を表4.2.2に示す。

表4.2.2 標準的な掘さく装置

	1,000m級	1,500m級	2,000m級
掘管	2 $\frac{7}{8}$ in外アプセットT.P	3 $\frac{1}{2}$ in外アプセットT.P	4 $\frac{1}{2}$ in外アプセットD.P
やぐら	18m	27m	38m
ドローワークス	3 $\frac{5}{8}$ inトラムシャフト4段変速	4 $\frac{3}{4}$ inトラムシャフト4段変速	6 $\frac{1}{4}$ inユニット
同上動力	22 kW	110 kW	190 kW
泥水ポンプ	4 $\frac{1}{2}$ in×10in	6 $\frac{1}{2}$ in×10in	17 $\frac{1}{4}$ in×14 in 1～2台
同上動力	22 kW	150 kW	150 kW・110 kW
クラウンブロック	17 $\frac{3}{4}$ in×5車	28 in×4車	35 in×5車
トラベリングブロック	15 $\frac{3}{4}$ in×4車	28 in×3車	35 in×4車
ロータリーテーブル	10 $\frac{1}{4}$ in	14 in	20 $\frac{1}{2}$ in
巻揚用ワイヤーライン	20 mm	25 mm	28 mm

## 2.3 廃坑

生産量が著しく減衰した場合、あるいは坑井が損傷し修復が困難な場合は、その坑井を廃坑する。坑井を廃坑する場合には、廃坑した後におけるゆう水やガスの噴出等による鉱害の防止について、遺漏のないよう措置しなければならない。

鉱山保安法施行規則第 25 条（土地の掘削）、鉱業権者が講ずべき措置事例 第 22 章 土地の掘削において、坑井を廃止する場合には密閉その他の措置を講じ、措置内容を鉱山保安監督部長に報告することが義務付けられている。これらの規定を受け、「坑井の廃止に関する措置事例」が定められているので、坑井の廃坑は、これに基づいた方法で行われている。

水溶性ガス井は、石油や構造型ガス井とは坑内状況、坑井仕上げの方法等で次の点で異なっている。

- ① ガス層の圧力がガス層深度に相当する静水圧以下であり、また、異常高压層等は特に存在しない。
- ② 産出ガスの成分はほとんどメタンであり、硫化水素などの酸性ガスは含まれていない。
- ③ 坑内温度が比較的低い。
- ④ せん孔部が長く、数百 m に及ぶものもある。
- ⑤ 付随水はかん水であり塩分濃度が高いので、鋼管ケーシングを使用している場合はケーシングが腐食して強度が劣化している恐れがある。

このため、石油・構造型天然ガス井に係る措置事例の他に、水溶性天然ガス井に係る措置事例が別個に定められている。

水溶性ガス井で行われている廃坑方法の例を図 4.2.2 に示す。坑井は、せん孔部の最上部及びその上端から 30 m 以上の範囲にわたる部分にセメントプラグを設置し、並びに坑井の最上部は地表付近に長さ 30 m 以上のセメントプラグを設置することによって密閉される。そのほかの坑井内空隙部分には砂を充填する。セメントプラグには普通ポルトランドセメントを使用するのが一般的である。

せん孔部上部のセメントプラグの密閉状態については、次の 2 つの方法により試験を行って、密閉状態の異常の有無を確認して、鉱害の発生のないよう万全な廃坑を期している。

- ① ワイヤライン等によりセメントプラグの頭部位置を確認し、セメントプラグの長さが確保されていることを確認する。
- ② 1 MPa 以上のポンプ圧力を 15 分以上加え、圧力低下が 10 % を超えないことを確認する。但し、状況によっては坑内に水張りを行い溢逸泥、気泡等の有無を目視で検査し確認すれば良い。

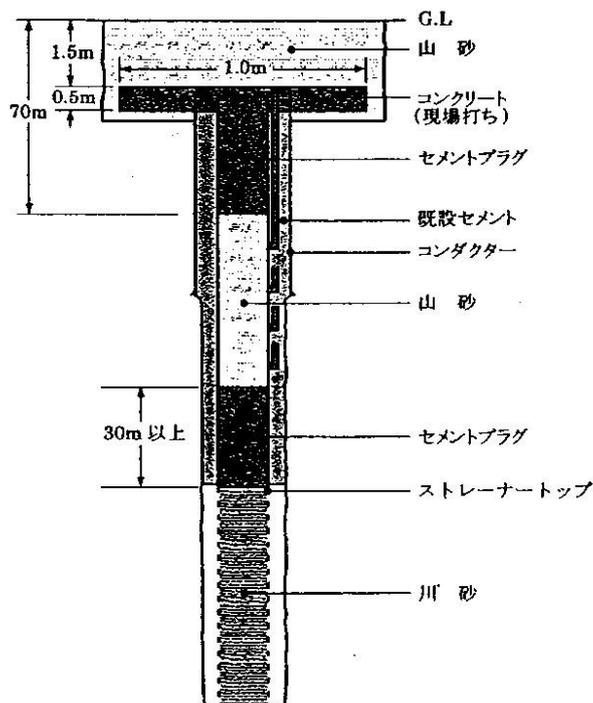


図 4.2.2 水溶性ガス井の廃坑方法

### 3 坑井仕上げ

水溶性天然ガスは、揚水したかん水からガスを分離して採取するものであり、これはどの水溶性天然ガス鉱床においても同じである。かん水の揚水には、ガスリフト方式または水中電動ポンプ（ESP）方式が採用されていることも共通している。しかし、鉱床によってガス層の諸特性や開発方式などに違いがあり、また、生産に影響する障害が発生しないようそれぞれに適切な防止策を講じながら、効率良く経済的に採取しなければならないため、具体的な坑井仕上げ方法や使用されている資機材は鉱床によって異なっている。

以下に、代表的な水溶性天然ガス田である南関東ガス田と新潟ガス田において、一般的に行われている坑井仕上げ方法の例を記す。

#### 3.1 南関東ガス田

##### 3.1.1 ガスリフト方式による仕上げ

水溶性天然ガス採取に用いられているガスリフト方式には、(a)外吹込管方式、(b)ケーシングフロー方式および(c)チュービングフロー方式の3種類がある。それぞれの方式の詳細は4.1.2 ガスリフト仕上げに改めて記す。

南関東ガス田において、現在最も普及しているガスリフト方式は外吹込管方式である。外吹込管式ガスリフト方式の一般的な坑井仕上げの例を図4.3.1に示す。

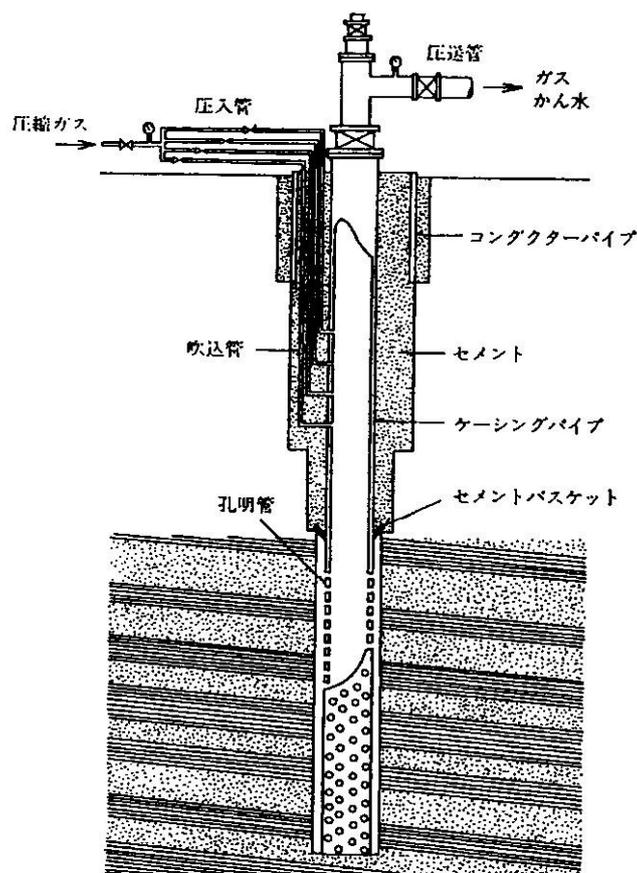


図4.3.1 外吹込管式ガスリフト方式

茂原型坑井では3~4 in. ケーシング仕上げ、通常型坑井では茂原型坑井よりも揚水量を大きくするため5~6 in. ケーシング仕上げが一般的である。ガスリフト坑井では、ケーシングに坑井用塩化ビニ

ル管（PVC管）が使用されている。

また、坑井用塩化ビニル管では強度不足が懸念されるような深い坑井の場合、最近では強化プラスチック管（FRP管）の使用も行われ始めている。

### 3.1.2 水中電動ポンプ（ESP）方式による仕上げ

水中電動ポンプ（ESP）方式による一般的な坑井仕上げの例を図4.3.2に示す。

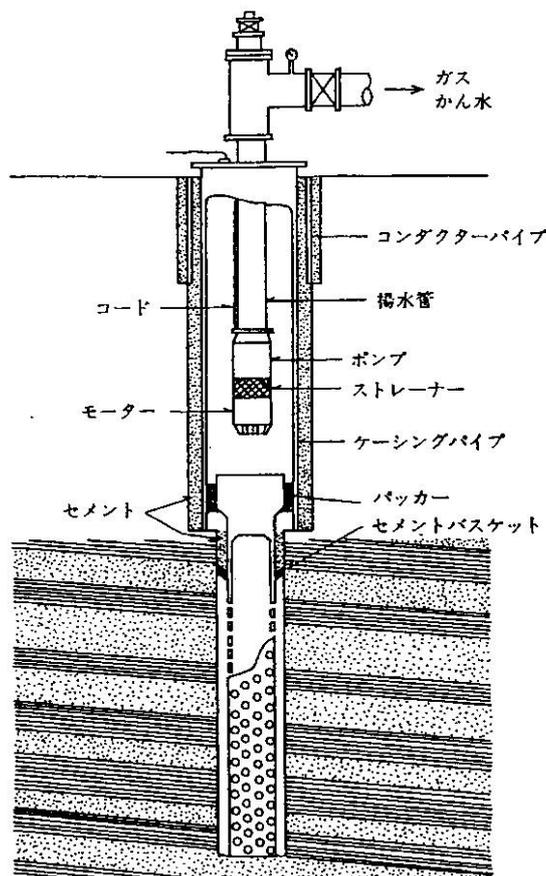


図4.3.2 水中モーターポンプ方式

ポンプ設置深度までは、使用するポンプの外径に応じて大坑径のケーシングを設置する。所定の遮水セメンチングを行った後、下部を追掘し孔明管を挿入する。上部ケーシングとの間隙はパッカーやセメンチングによって遮断する。

ポンプの揚水能力に応じて、13-3/8×7 in. ケーシング仕上げ、あるいは11-3/4 ×5-1/2 in. ケーシング仕上げが標準的である。水中電動ポンプ（ESP）方式ではケーシングに坑井用塩化ビニル管は使用されず、油井用鋼管やFRP管が使用されている。

水中電動ポンプ（ESP）方式は通常型坑井に限られた採集方式であったが、近年ではガスセパレータの性能も向上し、通常型坑井に限らずガス水比 10 m<sup>3</sup>/kl 程度の茂原型坑井にも導入されるようになった。

### 3.1.3 仕上げの特徴

#### i) 長孔明管の使用

南関東ガス田のガス層は薄い層厚の砂泥互層が多く、また浸透率が小さい。そのため、経済的に十分な生産量を得るためには有効層厚を大きくする必要がある。しかし、砂層の部分にのみ孔明管を配

置するのは技術上困難である。このため、数百 m にも及ぶ連続した長孔明管を用いて、幾つかのガス層グループを一括して仕上げる多層同時仕上げが行われている。

孔明管はケーシングパイプにあらかじめ孔明け加工して製作する。各径の管に対して、孔径 5 mm の丸孔とし、ピッチ 25 mm の千鳥配列にし、総孔面積は管表面積の 3 %程度としている。

#### ii) 坑井用塩化ビニル管 (PVC 管) の使用

ガスリフト方式による仕上げでは、ケーシングおよび吹込管にはほとんど全て坑井用塩化ビニル管が使われている。坑井用塩化ビニル管は、硬質塩化ビニル管の持つ特性を活かし、さらに坑井用に使用するためにいろいろ工夫が凝らされており、次のような特徴をもっている。

- ① 多くの腐食性薬品に対して優れた抵抗性を示し、塩分の多いかん水に対しても電気化学的腐食は全く生じないなど、耐食性に優れている。
- ② 耐磨耗性は鋼管より優れている。
- ③ 鋼管などに比べて強度は劣るが、これを補うため JIS K 6741「硬質塩化ビニル管」、JIS K 6742「水道用硬質塩化ビニル管」よりも厚肉とすることによって必要強度を具備している。坑井用塩化ビニル管規格 (メーカー規格) ができている。
- ④ プラスチック管のなかで最も加工性が良い。ただし、切欠効果によって破壊強度が低下するのでネジ型は丸山ネジにする。坑井用塩化ビニル管ネジ規格ができている。
- ⑤ 温度上昇によって強度は低下するので、60 °C以下で使用する。
- ⑥ 鋼管などに比べて安価である。耐食性による坑井寿命の延長を考えれば、経済性は高い。

#### iii) 外吹込管ガスリフト方式

ガスリフト方式は、外吹込管式が多く採用されている。この方式は、ケーシング挿入時にガス吹込管をケーシングに添わせて挿入する。外吹込管式の場合には、あらかじめ生産に伴う水位低下に対応するガスの吹込深度を段階的に想定しておき、深度ごとに1本の吹込管をセットしておく。各段の間隔は 40 ~70 m にとり、3~5 段の吹込管がセットされるのが一般的である。吹込深度の変更は、各段の吹込管ごとに地上井戸元に設置されている開閉バルブの操作によって行われる。

外吹込管式の場合には、水位低下に伴うガス吹込深度の変更が、地上に設置されたバルブの操作で容易に行われ、坑井作業を必要としないこと、ガスリフトを起動させるときに、浅い深度の吹込管からリフトし、坑内水位の低下に合わせて深いものへと順次切替えながら所定深度の設定ができるので、起動のためのみの高い圧力装置を必要としないことなどの長所をもっている。

#### iv) スクリーン

南関東ガス田ではガス層に細砂が多いため、揚水したかん水中に砂が含まれることが多い。これによって、坑井底の埋没、水中電動ポンプ (ESP) の磨耗、送水管の能力低下などの障害が発生することがある。そのほか沈砂槽内の砂の処理などに相当の費用を要することになるので、孔明管部にスクリーンを巻くことにより出砂防止が図られ、かなりの効果をあげている。

スクリーンはかん水による腐食を考慮してステンレス製が用いられ、内側に 80 メッシュ、外側に保護用として素線の太い 30 メッシュを巻いた 2 重巻きとして使用されるのが一般的である。

### 3.2 新潟ガス田

#### 3.2.1 ガスリフト方式による仕上げ

新潟ガス田のガス層は産出能力が大きく、2,000~4,000 kl/d の揚水を標準としており、7~9-5/8 in. ケーシングが採用されるが、なかでも 8-5/8 in. ケーシングを使用するのが一般的である。ケーシングには油井用鋼管が使用されている。

### 3.2.2 水中電動ポンプ（ESP）方式による仕上げ

水中電動ポンプ（ESP）の設置深度（通常 200～300 m）までは、大坑径のケーシングを設置する。所定の遮水セメンチングを行った後、下部を追掘して孔明管を挿入する。

13-3/8×7～9-5/8 in. ケーシング仕上げが標準である。ケーシングには油井用鋼管が使用されている。

### 3.2.3 仕上げの特徴

#### i) 孔明管

新潟ガス田では、ガス層は厚い砂礫層であるので、孔明管を目的ガス層にあたる部分にのみ配置する単層仕上げが行われている。孔明管の孔は通常丸孔で、孔径はガス層の粒度に応じて 8～12 mm の範囲で選択され、総孔面積は管表面積の 3～8 %程度としている。

#### ii) ケーシングパイプの防食

ガス層が崩落し易い砂礫層であることと、坑径が大きいことから、ケーシングパイプは圧潰に耐え得る油井用鋼管が使用されている。塩分を含んだかん水のため、ケーシングパイプの電気化学的腐食の進行がかなり激しく、裸管では数年のうちに腐食により破坑が生じ、うわ水の浸入や出砂による坑井底埋没等の障害の原因となる。そのため、内側にセメントライニングを施したケーシングパイプが使用されている。

セメントライニングの施工方法は、パイプを回転させながらセメントモルタルを内部に噴射し、遠心力を利用してライニングするもので、ライニングの厚さは通常 6 mm 程度である。なお、ライニング施工のできないカップリングソケットのネジ部分については、可塑性エポキシ樹脂をあらかじめ塗布しておく。これらの腐食対策により、坑井寿命をきわめて長くすることが可能となっている。

## 4 生産

日本の主な水溶性天然ガスの生産の特徴はガスとかん水を圧送管（フローライン）を經由して基地において分離し、ガス及びかん水ともに生産物となることである。

また、その基地の規模は、坑井あたりの産出量があまり多くないため、数本から 10 本程度の坑井を一つの基地に集約している事が多い。1 本あたりの生産量が多い地域においては、1~2 本（主に通常型）を単位にしている場合もある。図 4.4.1 に一般的な水溶性天然ガスの生産の流れを示す。

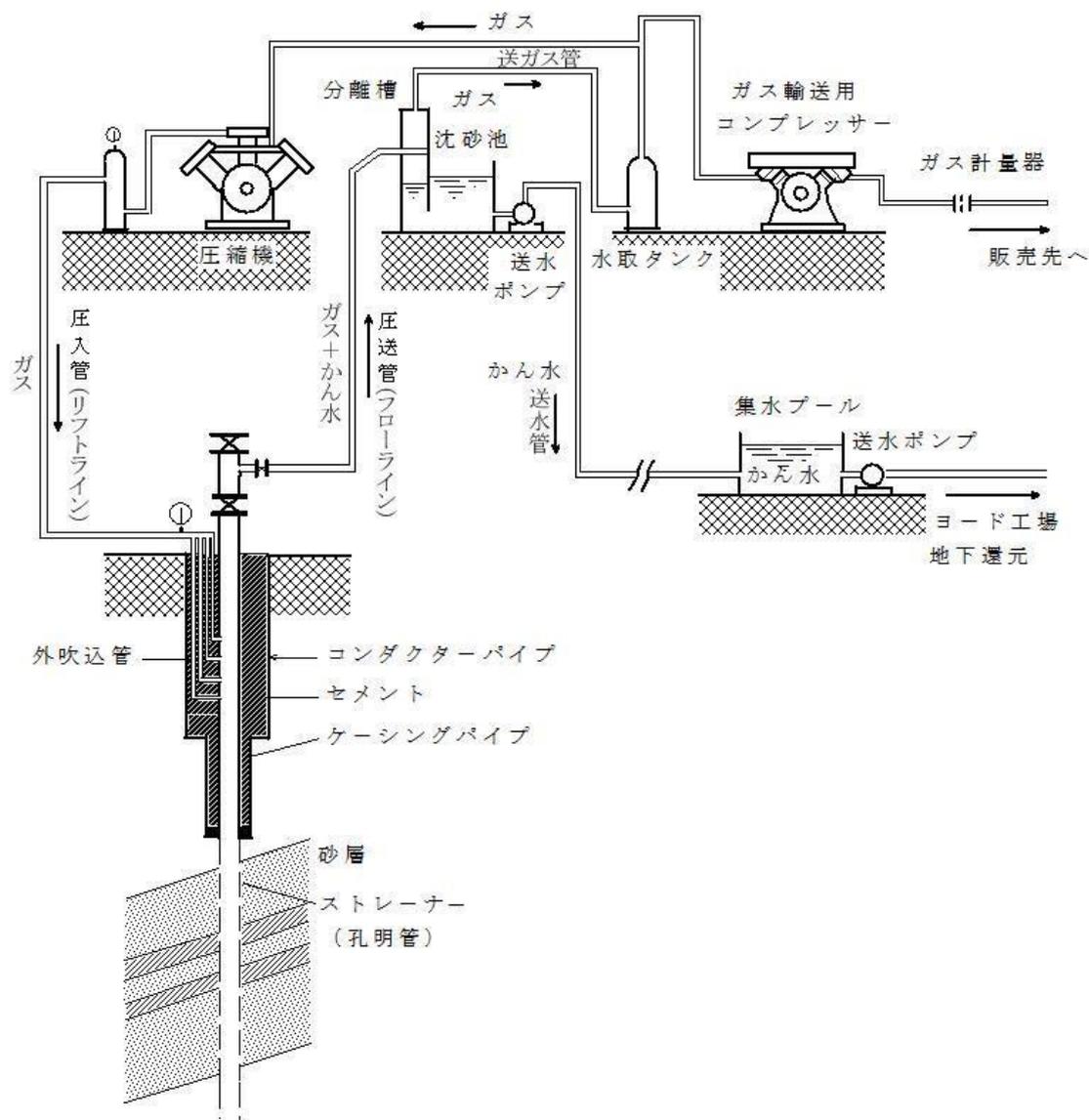


図 4.4.1 採取系統図

### 4.1 採取

水溶性天然ガスの採取の方法には、

- ① 自噴採取
- ② ガスリフト採取
- ③ ポンプ採取

がある。それぞれの鉱床のガス水比や、生産量の大小により効率的な方法にて採取方法が選択される。

### 4.1.1 自噴採取

千葉県九十九里地域の茂原近辺では、開発当初から自噴状態で産出する坑井は少ないが、生産を継続していくとガス水比が上昇し自噴状態になる場合がある。このようなタイプを茂原型と呼んでいる。そのガス水比はほぼ8～数十  $\text{m}^3/\text{kl}$  程度である。

生産量の調節については、主要パイプを閉じ小径オープンホールを施したプレートバイパス管を利用する方法や坑口装置内にコントロールバルブを設置して流量を調整する方法等がある。

### 4.1.2 ガスリフト採取

自噴採取が出来ない坑井でガス水比が比較的高い ( $3 \text{ m}^3/\text{kl}$  以上) 地域ではガスリフトを採用しているところが多い。IV-3 坑井仕上げの項にて述べられているように水溶性天然ガス採取に用いられるガスリフト方式は3種類ある。

#### i) ガスリフト方式

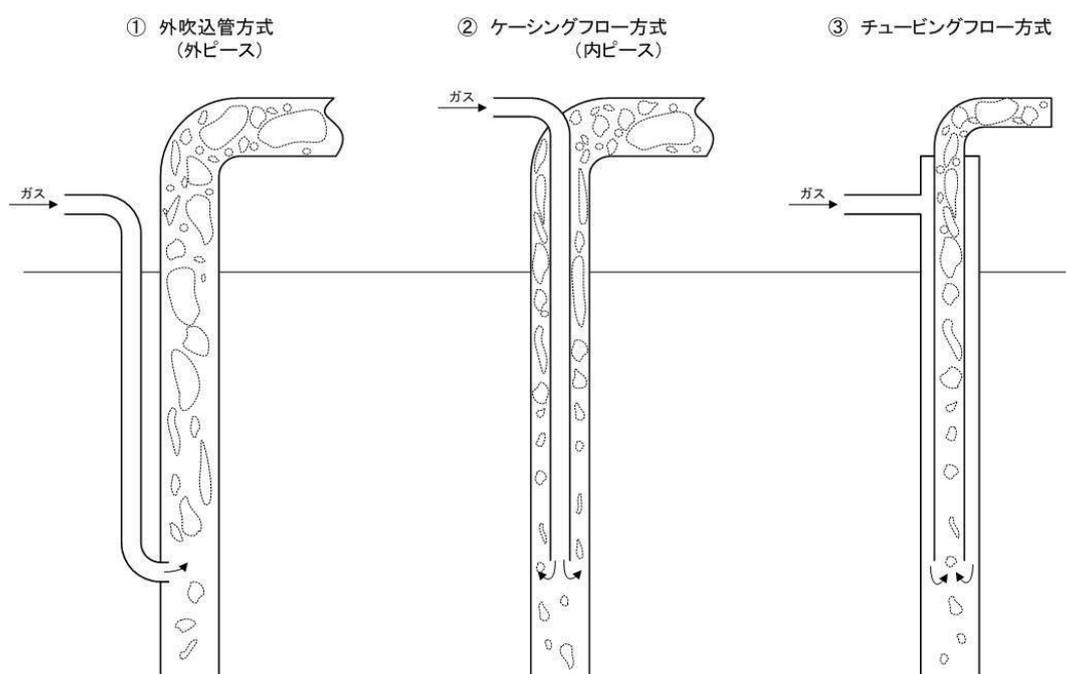


図 4.4.2 ガスリフト方式

#### ① 外吹込管方式

千葉県九十九里地域において現在最も普及している方式である。この方式はケーシングの外側にリフトパイプと称される小口径のパイプ 3～5 本を 30～70 m の間隔で挿入し、水位の変化にあわせどの位置でガスを吹き込ませるか地上に設置したバルブを使用して切り替える方式である。この方式の長所としては、水位の変化に対し容易に吹き込む位置を切り替えることが出来ることである。短所としては、小口径のパイプを使用するため圧力損失が大きい事、また、異物により詰まることがあること、1 段から 5 段と固定された位置で吹き込むため、極端な圧力の変化には対応できない事が挙げられる。

#### ② ケーシングフロー方式

中ピース方式とも呼ばれているが、ケーシング内に挿入したチュービングからガスを吹き込み採取する方式である。チュービングには鋼管、塩化ビニル管、ポリエチレン管、FRP 管が使用されている。この方式の長所としては水位の変化に対応してチュービングの長さが容易に変更できることが挙げら

れる。短所としては、チュービングが振動や腐食により破損、孔あき、脱落等の事故が発生する事が挙げられる。

### ③ チュービングフロー方式

この方式は、ケーシングとチュービングのアニユラス部からガスを注入してチュービングより採取する方式である。長所としてはケーシングフロー方式に比べチュービングの事故が少ないこと等が挙げられる。開発当初はこの方法が多く採用されていたが現在ではあまり使用されていない。

## ii) ガスリフト装置

ガスリフトを行うときに坑井に吹き込むガスは水溶性天然ガスの場合、新潟の一部地域を除くと、圧縮機を用いて昇圧している。圧縮機1台で1坑井用のガスを昇圧する単独方式と、1台の大型圧縮機で数坑井分のガスを昇圧する集合方式があるが、現在は前者の方式が多数を占める。使用する圧縮機の能力は、ガス層圧、生産量、坑井の坑径、坑井までの距離等で決められるが、単独方式の場合11～37 kWの圧縮機が使用される。圧縮機の種類としては、主に往復動式圧縮機が用いられているが、騒音・振動の少ないスクリー式圧縮機も用いられるようになってきている。

単独方式の長所は、

- ① 井戸の運転及び停止の作業が容易である。
- ② 圧縮機の入れ替えが簡単である。
- ③ 圧縮機の定期修理の際休止するのは1坑井だけなので生産に及ぼす割合が小さい。

短所は、

- ① 台数が多くなるため日常の管理が煩雑になる。
- ② リフトガス量（風量）の調整が容易でない。

集合方式の長所は、

- ① 圧縮機の台数が少ないので日常の管理が容易である。
- ② 風量が、簡単に変更できるので適正風量で運転することが出来る。

短所は、

- ① 生産調整をする時に生産量に見合う電力の低減を図ることが難しい。
- ② 定期修理の時や故障の時は、一度に数本の坑井を休止することになるため生産量に著しい減少がある。

などが挙げられる。

## iii) 圧入管(リフトライン)の管理

圧縮機から坑井までの配管を圧入管（リフトライン）という。ガス圧入圧力は概ね0.5～1.5 MPa程度である。圧縮機には水冷式または空冷式のものを使用しているが、いずれも圧縮時にガスが高温になるのでそのまま送ガスすると、配管中で冷却され、水分が凝縮する。凝縮水は配管の内部腐食、配管の詰まり、外吹込管の詰まり等の原因となる。

ガス圧縮機で昇圧されたガスは坑井まで1～2 in.の圧入管を通じて送られる。圧入管の材質は主に鋼管である。リフトガス輸送に関して最も注意を払わねばならない事項は、ガス漏洩の問題である。ガス漏洩の主な原因は、圧入管の内部腐食、外部腐食である。内部腐食は圧縮時に高温になったガスが、外気温や地中温により温度が低下し過飽和になった水蒸気が凝縮水として凝縮するためになるため、腐食の原因となる。ガス中に二酸化炭素が多い場合には凝縮水が酸性になり、より腐食の危険が高くなる。凝縮水の発生を防ぐためにはガスの除湿を行うことが必要で、その方法としては、配管が

埋設される手前の地上でガスを冷却し水分を凝集する方法や薬剤で水分を吸収・吸着する方法等が実施されている。また、それ以外の腐食を防ぐために、①被覆管の使用②流電陽極方式による電気防食、異種金属間の絶縁等が行われている。

#### iv) ガス漏洩点検

圧入管の漏洩点検の項目をあげると

- ① 圧縮機の吐出側バルブと井戸元リフト切替バルブ間の圧力降下テストを実施する。
- ② 管路を目視で点検し、植生や土壌の変化に気をつける。
- ③ FID・レーザーメタン計等のガス検知器にて管路を点検する。
- ④ 圧入圧力、生産量に異常がないか確認する。
- ⑤ 管が地上にある場合は、バルブ・溶接部等を石鹼水等で点検する。

#### v) 坑井の管理

通常、日常の巡回において坑井への圧入圧力を基地にて確認しているが、遠隔監視システム（4.7）による圧力監視も多くなってきている。

坑井のタイプがガス水比の低い、生産量に大きな変動のない通常型の場合、圧入圧力（リフト圧力）に大きな変動はないが、ガス水比の比較的高い茂原型で自噴採取ではなくガスリフト採取の坑井の場合、その圧入圧力に大きな変動を伴う坑井がある。また坑井毎にもそれぞれの産出パターンがあり、その特徴をよく把握する必要がある。

例えば、通常時、圧入圧力がほぼ一定である坑井で通常より圧入圧力が低い場合、プレッシャータンク（レシーバータンク）、圧入管、圧送管に漏洩等の異常が発生している可能性があるほか坑内にて異常が発生し、生産量が減少している可能性もある。また逆に圧入圧力が高い場合は、圧縮機から分離器までのバルブに異常が発生している可能性、圧入管、圧送管に異物が発生して詰まっている可能性、ケーシング破損があり、採取層以外の層から産出の可能性、還元井からの還元水による影響の可能性等が考えられる。また茂原型の場合でも圧入圧力の平均的な値から上記のような事も推察できるほか、変動幅やその周期からも異常の有無を読みとることが出来る。

坑井の圧送圧力については、坑井元の圧力計にて読みとるため、毎日点検することは難しく強いてその変動を読みとるには圧入圧力の変化を調べることによりある程度は把握できる。圧送圧力の変動は主にガス及びかん水の生産量の変化に左右される。圧送圧力が上昇する他の事例としては、圧送管内でスケール等の固形物の発生、坑井からの砂分等による管の閉塞、遮断バルブ等の破損、分離器のスケールや砂分による詰まり等が挙げられる。圧送圧力が下降する他の事例としては、圧送管の破損あるいは摩耗等による漏洩による場合が挙げられる。

#### 4.1.3 ポンプ採取

ガス水比が低く、浸透率が比較的大きく小さなドローダウンで 1,000 kl/d 以上の揚水量が得られる地域では、水中ポンプによる採取を行っている坑井もある。

水中ポンプ方式の利点としては

- ① 揚水効率が優れている。
- ② 大量揚水が可能であること。
- ③ 水位低下に対処が可能なこと。
- ④ 起動が容易である。
- ⑤ 地上設備が小規模である。
- ⑥ 間欠状態がない。

- ⑦ 深い坑井、高傾斜坑井でも対応可能である。
- ⑧ 地上設備による騒音や振動の心配がない。

などが挙げられる。欠点としては

- ① 坑井の坑径が大きくなる。
- ② ポンプの点検が容易にできない。
- ③ 出砂によるポンプの摩耗がある。
- ④ 修理期間が長く、費用が高い。

などが挙げられる。

水中ポンプの運転状態は直接見ることはできないが、ポンプの摩耗による揚水量の減少、ポンプの故障の兆候、坑井異常等は、電流値の変化として現れる。したがって日常点検では電流値および揚水量・坑井圧力の変化等を管理することが重要となる。

## 4.2 集ガス

坑口装置から採取基地までは、主に 3~6 in. 径の圧送管が用いられる。材質は主に塩化ビニル管であるが、最近になってポリエチレン管やダクタイル鋳鉄管の使用も多くなっている。坑井から産出したガスとかん水は二相流で管内を流れる。二相流は单相流とは異なる挙動を示すので、効率的に基地まで送るには、その経路や管径等が重要な問題となってくる。一旦配管や基地が建設されるとその変更は難しいため、坑井開発及び基地建設計画の際は配管経路や管径等に充分注意を払う必要がある。また出砂が多い坑井の場合、配管の曲線部で摩耗が発生することがあり、管の曲がり部分の補強や材質の変更等を行うのが望ましい。

### 4.2.1 ガスとかん水の分離 (図 4.4.3)

圧送管にて基地まで運ばれたガスとかん水は、分離槽にて分離される。分離槽には、大きく分けて、坑井毎に分離する単独型と数本を同一の容器にて分離する集合型がある。

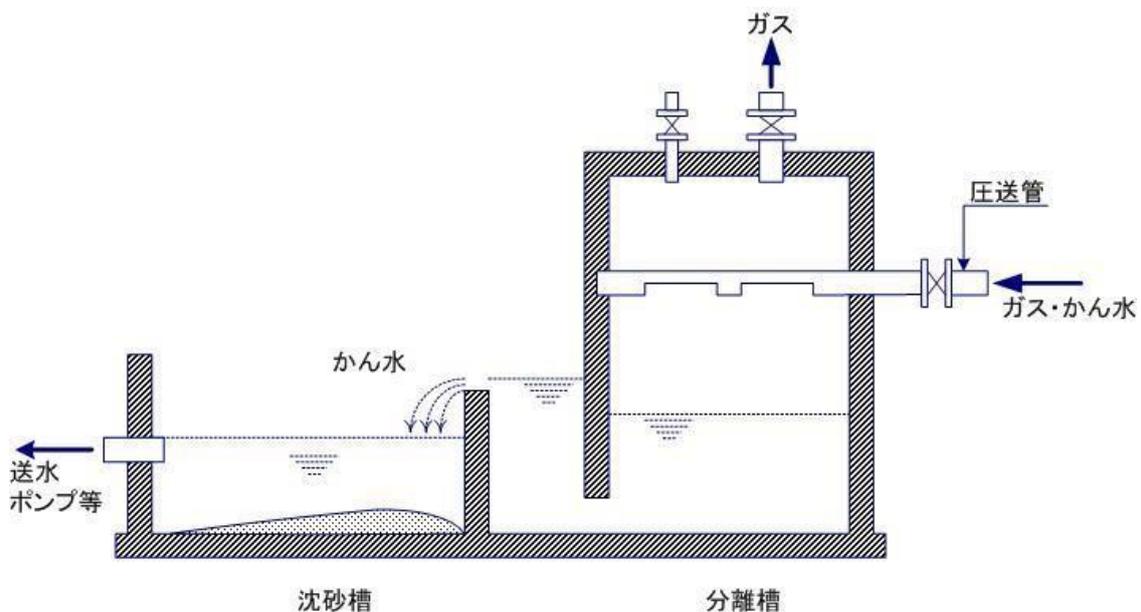


図 4.4.3 ガスとかん水の分離槽

単独分離槽の利点は、坑井毎の産出の状況が、かん水の色、温度、量により簡単に把握できることである。しかし、ガス量の多い坑井や猛噴（一時的に生産量が増大する）を起こす坑井ではガスの噴

出量が多く、水封圧力よりもガス圧力が勝り、分離槽のかん水出口よりガスが漏洩する可能性が高くなる。集合分離槽の利点は、ガス産出の多い坑井や猛噴を起こす坑井があっても容積が大きいためガスの漏洩が起こる可能性が低い事である。しかし坑井毎の産出状況を日常点検においては確認できにくいという欠点がある。

ガスとかん水の分離がうまくいかないと圧縮機にかん水が侵入し、機械の破損に及ぶ恐れがあるので特に注意が必要である。

長期間の使用で分離槽に亀裂等破損が生じた場合、気密性が損なわれ、ガス、かん水が漏洩する。また、かん水水質によっては、分離槽内が、砂、スケールで詰まる場合があるので、日常の巡回時にかん水の産出の状況を目視にて点検するほか、ガス検知器、石鹼水等による検査にて異常の有無を確認する。

#### 4.2.2 脱湿

分離槽にてかん水と分離されたガスは、脱湿用セパレーターにてガス中の水分を取り除く。この装置では、ガス中に浮遊するミスト状の水分除去を目的にしている。その種類には、中空のタンクとタンクの中にメッシュフィルターの入っている方式の二種類がある。前者はミスト状になっている水分を流速を落とすことで沈降させ、後者はフィルターを使用し流路を狭めて水粒子の成長を図る方式で、ガスから水分を除去する。

これらの方式では、そのガス温度における飽和水蒸気圧分の水分は除去できない。

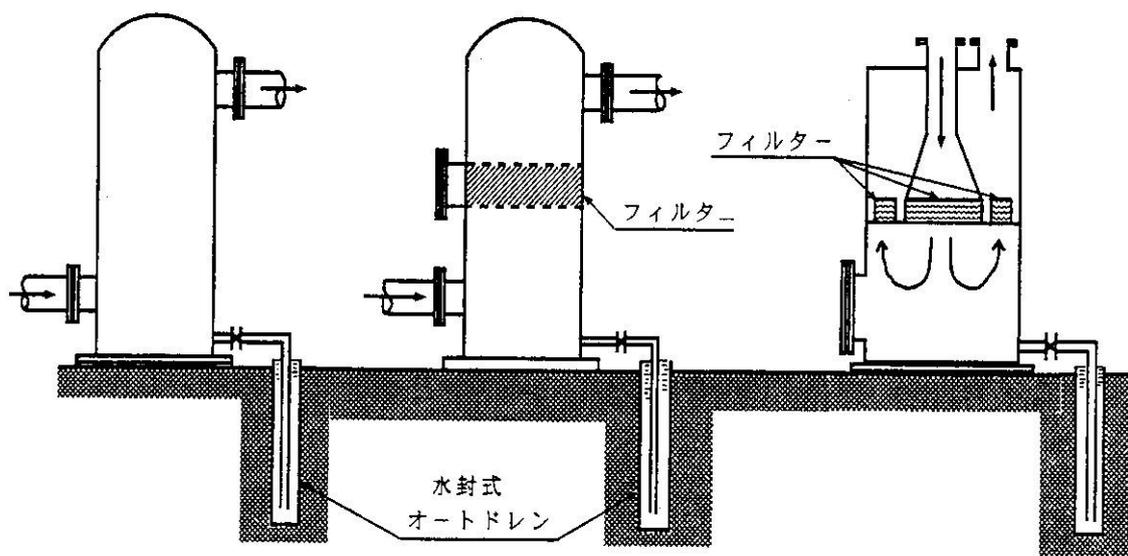


図4.4.4 各種脱湿用セパレーター

#### 4.3 計量

計量を常時行っている主なものは基地毎のガス量、かん水量と送ガス基地毎の送ガス量及び送水所毎の送水量である。また個別坑井のガス量及びかん水量も基地内に計量できる設備が設置されている。基地における計量は、坑井の状況を把握する重要な情報であるとともにパイプラインの漏洩等を発見する手段でもある。また、送ガス基地及び送水基地と供給先での計量比較により、この間のパイプラインの漏洩の有無を把握する重要な情報となる。

#### 4.3.1 ガスの計量

ガス量の計量方法として主に次の3つの方法を使用している。

- ① 差圧式流量計（オリフィス）
- ② 容積式流量計
- ③ 渦式流量計

多くの場合、差圧式を用い計量しているが、最近では渦式も増えている。また少量の場合は容積式を用いている。

それぞれの計量方法については、Ⅲ生産編3計量の項を参照されたい。

#### 4.3.2 かん水の計量

かん水の計量方法として主に次の3つの方法を使用している。

- ① 堰式流量計（三角堰、四角堰）
- ② 差圧式流量計（オリフィス）
- ③ 電磁流量計

堰式流量計のうち三角堰は生産量の少ない坑井あるいは生産量の少ない基地のかん水計量に用い、四角堰は生産量の多い坑井あるいは、基地のかん水計量に用いる。また管路内でオリフィス等の絞り機構による差圧を用いた計量も使用されることがある。電磁流量計は、最近多く使用されるようになった。生産量の大小に関わらず使用されている。

それぞれの計量方法については、Ⅲ生産編3計量の項を参照されたい。

#### 4.4 輸送

生産されたガスは、ほとんどがパイプラインを通して供給先や自社の送ガス基地、工場に送られる。一部のガスは高圧状態に圧縮し、ポンベにて供給先等に輸送される。かん水はほとんどが、送水パイプラインを通してヨウ素工場に運ばれる。かん水の一部は砂分やヨウ素分を取り除いた後還元井に還元されることもある。

ここでは、ガスの輸送について説明する。かん水の輸送については、坑水処理の項にて説明を行う。

##### 4.4.1 パイプラインによる輸送

水溶性天然ガスのパイプライン輸送には、ガスリフトのための圧入管（リフトライン）、坑井から基地までの圧送管（フローライン）、基地からのガス輸送のための送ガス管、基地からヨウ素工場までの送水管などがある。ここではガス輸送のためのパイプライン（送ガス管）について述べる。

水溶性天然ガスの場合、坑井元でのガス圧力が低く、また輸送距離も比較的短いためポリエチレン管や塩化ビニル管が使用されることが多い。

ガスのパイプライン輸送には大きく分けて次に挙げる経路がある。

- ① 基地から送ガス基地
- ② 送ガス基地から送ガス基地
- ③ 送ガス基地から需要先

経路ではなくその圧力の違いにより次のように区分される。

- ① 低圧（分離圧を利用するもの）
- ② 低圧（プロアを用いるもの）
- ③ 中圧（圧縮機を用いるもの）
- ④ 高圧（圧縮機を用いるもの）

使用されている管の材質は主に次の3種類がある。

- ① 塩化ビニル管（低圧送ガス管）
- ② ポリエチレン管（低圧送ガス管）
- ③ 各種鋼管（低圧～高圧送ガス管）

塩化ビニル管の長所は以下の通り。

- ① 価格が安い。
- ② 配管施工が簡単である。
- ③ 腐食の恐れが少ない。
- ④ 比較的軽い。

一方、短所は以下の通り。

- ① 管の強度はあまり大きくなく、特に外圧に対しては弱い。
- ② 撤去等で不要となったときの処理が難しい。

ポリエチレン管の長所は以下の通り。

- ① 価格が比較的安い。
- ② 配管施工が簡単である。
- ③ 衝撃に対して塩化ビニル管に比べて強い。
- ④ 軽い。
- ⑤ 腐食の恐れが少ない。

一方、短所は以下の通り。

- ① 管の強度は鋼管に比べ小さい。
- ② 接合部が塩化ビニル管に比べると容易でない。

鋼管の長所は以下の通り。

- ① 管の強度が大きい。
- ② 管の埋設位置が、探しやすい。

一方、短所は以下の通り。

- ① 価格が高い。
- ② 配管施工が容易ではない。
- ③ 内部外部腐食の恐れが大きい。
- ④ 重い。

#### 4.4.2 圧縮ガスによる輸送

需要家への天然ガスの供給はパイプラインによるものがほとんどであるが、パイプライン施設のない場合には、天然ガスを高圧に圧縮して圧縮天然ガス CNG（Compressed Natural Gas）とし、車両に固定された高圧ガス容器（ボンベ）に充填して輸送し、需要先に供給されている。

CNG による輸送は、パイプラインを利用できない個別の需要家や遠隔地の需要家にも供給することができるという長所があるが、輸送能力が非常に小さいため大口供給は困難であることや経費高になるなどの短所がある。

#### 4.5 貯蔵

水溶性天然ガス主成分はメタンガスであるが、液化には多大なエネルギーを必要とするため、気体

状態で圧縮をして体積を減じる方法を用いている。一般的な貯蔵としてガスホルダーに充填をすることが行われている。その目的としては事故等に備える保安ガスのため、需要の日間変動に対応するため、坑井の生産量の変動に対応するため等が挙げられる。主に用いられているホルダーの種類は、球形ホルダー、水封式ホルダーがある。

#### 4.6 試験作業

試験作業としては、坑井に関するものと坑井から産出するガス及びかん水に関するものが主な対象となる。また、大量のかん水を揚水するため地盤沈下の恐れがあり、そのために水準測量や岩石の力学試験等を実施している。

##### i) ガス分析

ガス成分分析には、一般的にはガスクロマトグラフが用いられる。水溶性天然ガスの主要成分としては、メタンが 97～99.5 %で、あとはわずかな二酸化炭素、窒素、炭化水素からなり、大きな変動はない。供給先に随時あるいは定期的にガス成分を報告するが、大きな変動等がないため、送ガス基地において酸素計やメタン濃度計にて空気の混入をチェックしている程度である。

##### ii) かん水分析

かん水に含まれるヨウ素を工場にて抽出しており、また坑井、基地により差異があることや坑井の状況を把握する有効な手段となるためヨウ素の分析等頻繁に実施している。主に分析される項目は、水温、pH、F<sup>-</sup>イオン、Cl<sup>-</sup>イオン、Ca<sup>2+</sup>イオン、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオン等がある。これらの分析値から、産出層の推定、ケーシングの破損、遮水の不具合、スケール付着の有無等がわかる。また、圧入水の生産井へのブレイクスルー判定にも利用される。

##### iii) 坑内計測

水溶性天然ガスにて一般的に行われている坑内計測は、坑底圧測定、温度検層、坑内サンプリング、フローメーター検層、電極及びエコーメーターによる測定などが行われている。その主目的及び各々の検層方法等については、「Ⅲ生産-7. スリックライン作業」を参照されたい。

水溶性天然ガスの場合、これまでも述べたようにガスと大量のかん水を汲み上げるため地盤沈下の恐れがある。そのため沈下の予測をするときに最も重要な情報として坑井の水位が問題となってくる。その計測として、坑底圧測定、電極による水位測定、エコーメーターによる水位測定等の計測が頻繁に行われる。また産出する地層を把握するために温度検層、フローメーター検層もしばしば行われる。

##### iv) 水準測量

県による公共測量のほか、企業による自主的な水準測量が行われている。

##### v) 岩石力学試験

地下の岩石をコアリングし、圧縮強度や圧密試験を実施しその力学的強度を測定し、地盤沈下予測のデータとして活用する。

#### 4.7 遠隔監視・制御

水溶性天然ガスの操業においては、基地が1つの単位として機能していることが多く、ほとんどの場合無人状態で稼動している。それらの基地、及び供給先、そしてその間を結ぶパイプライン輸送システムを常時監視し、安定操業を行うために遠隔監視制御システムが導入されている。その主な利点は以下のとおりである。

- ① トラブルの早期発見により災害を最小限に抑えることが出来る。
- ② 緊急時に機器を制御することにより、迅速に安全を確保できる。
- ③ 供給先の要望に即時対応できる。

監視業務としては以下がある。

- ① 圧縮機、送ガス機、送水ポンプ、付属施設等の稼働停止及び運転状況の監視
- ② ガス、かん水の生産量及び送ガス送水量の監視
- ③ 送水、送ガス圧力の監視
- ④ ガス濃度、ガス温度の監視
- ⑤ その他

また制御としては以下がある。

- ① 各種設備の稼働休止
- ② ガス量、かん水量の流量調整

これらの遠隔監視制御は、現場計器と監視室とを専用回線や、インターネット回線などで結びリアルタイムで行われている。

データが専用回線により監視室コンピューターに入力され、そのデータが表示されるとともに蓄積される。遠隔監視制御に要求される主なものとして以下などがある。

- ① プラント系統図による運転状況の監視
- ② データトレンドの表示
- ③ 警報の表示
- ④ 時報、日報の作成
- ⑤ 圧縮機、バルブ等の機械類の緊急停止
- ⑥ 送水・送ガス等の圧力、流量制御
- ⑦ 停電時のバックアップ機能
- ⑧ 各種イベントの印字機能

監視室にての監視業務について概略を示すと、基地からのデータの値が、設定されている警報設定外の値である場合、警報が鳴る等の状態になり、監視員により確認される。監視員は、他の情報等を考慮に入れ、最適な対処方法をとる。また蓄積されたデータからは、生産や販売のパターンが読みとれ、そのパターンを極端にはずれた場合、警報域には入らないが何かしらの異常発生シグナルの可能性があり、注意しなくてはならない。そのため、警報が出なくても定期的に各基地等の状況を点検し、異常の有無を確認する。

監視業務において注意すべき点は、①警報条件を最適なものにしておく。②トレンドを定期的に点検し異常の有無を確認する。であり、異常を確認した場合は、対応マニュアル等にしながら業務を遂行する。

#### 4.8 坑廃水処理

天然ガスを分離したかん水には、砂分等の SS（浮遊物質）分がいくらか含まれており、ヨウ素工場に送られる前に沈砂槽にて沈降除去される。一部かん水は地盤沈下防止対策の一環として還元されることもある。

沈砂槽は、ストークスの法則等を用い粒子沈降のための沈砂槽内の流速、滞留時間、深さ、産出水量等を考慮して設計される。また、基地のかん水量を正確に測定するために、波消し板（整流板）等が設置される。

送水方法は、自然流下とポンプ圧送の二通りである。自然流下は地形の高低差を利用して送水する

ため、基地に設備が必要なく動力も必要とせず非常に効率的である。しかし、高低差があまり大きくない場合、沈砂槽で除去できなかった砂分や酸化生成物が管内に沈積するため管路中に何カ所もマンホールを設置し、沈積物を除去できるようにする必要がある。ポンプ圧送の場合は基地内にポンプやその吸入レベルをコントロールするための設備が必要となり日常の維持管理が必要となるほか、電気代等の費用も発生する。また送水圧が高くなると送水管の破損の危険も発生してくる。送水管としては塩化ビニル管、ヒューム管、ダクタイト管、ポリエチレン管等が使用されている。

#### 4.8.1 送水ポンプ

ポンプは、大別すると「遠心ポンプ」「軸流ポンプ」「往復ポンプ」「回転ポンプ」などがあり、それぞれ特色を持っているが、かん水送水には一般に遠心ポンプ（うず巻きポンプ）が使用されている。

遠心ポンプは、軸に取り付けられて回転する羽根車とうず形室の中に固定された案内羽根がある。うず形室の中に水を入れて羽根車を回転させると、水は遠心力によって外に押し出され、圧力が高められてうず形室から吐出口へ送り出される。

一方、羽根車中心部の吸入口の圧力は低くなるため、吸入管から水が吸い込まれる。

遠心ポンプを運転するときは、ポンプ内を水で満たしてから始動しなければならない。すなわち呼び水を必要とする。

ポンプを選定するに当たっては、送水量・送水距離・高低差・管内圧力損失から、「ポンプ揚程」と「ポンプ吐出量」を決定する。また必要に応じ材質をステンレス等にもすることもある。

日常の管理として、以下などが挙げられる。

- ① ポンプ送水圧
- ② 吸入槽レベルのコントロール状況
- ③ パッキン等からの漏水の有無
- ④ ベアリング等からの異音の有無
- ⑤ 潤滑油の量

#### 4.8.2 坑水処理

工場にてヨウ素を採取したかん水は、地盤沈下防止対策として新潟地区では全量を還元圧入し、千葉地区やその他の地区では一部を還元圧入し、残りを主に海域に放流している。

公共水域にかん水を放流するに当たっては、鉱山保安法及び水質汚濁防止法に基づく排水基準を順守しなければならない。排水基準値は、Ⅲ生産 2.4 排水処理の項 表 3.2.3 を参照されたい。

#### 4.8.3 還元圧入

水溶性天然ガスにおいてはガス産出に伴い大量のかん水も汲み上げるため、地盤沈下の恐れがある。その沈下の詳細なメカニズムについては現在研究中であるが、汲み上げたかん水の一部を還元する方法が地盤沈下防止対策として最も有効であることが従来から認められている。還元するのは、汲み上げて何の処理もされていないかん水と工場あるいは基地においてヨウ素をとった脱ヨウ素かん水である。基地より坑井には自然流下あるいはポンプによる圧送にて送水される。還元井としては、還元を目的に仕上げられた坑井よりも、生産井を還元井に転用しているものが多くみられる。生産井を還元井に転用している場合最も問題となるのは、ブレイクスルーの問題である。特に茂原型鉱床の場合、ガス層の圧力が下がりガス水比の上昇があることが特徴であり、効率的な生産が出来るわけであるが、産出層と同じ地層に還元されるため、ガス層の圧力が上昇し茂原型の特徴であるガス水比に大きく影響し、ガス水比が低下しガスの産出量が著しく減少する。

また、脱ヨウ素かん水が生産井に達すると、ヨウ素濃度が著しく低下する。脱ヨウ素かん水はヨウ

素濃度が低いためトレーサーとして利用される場合がある。しかし、この還元水の流れを予測する事は非常に難しい。また、還元水中の砂分や酸化生成物には十分注意しなくてはならない。これらが坑井内に送り込まれると地層の目詰まりが起こり、還元能力の低下を引き起こし、リフトを使用して逆洗すなわち還元層からかん水を汲み上げる作業や、酸や洗浄剤等の薬品にて目詰まりを解消しなくてはならなくなる。

還元量は、水道用メーター、差圧式流量計（オリフィス）、電磁流量計等で計量される。

日常の管理として以下などが挙げられる。

- ① 還元量の変化に注意する。
- ② 還元圧力に注意する。
- ③ 還元水の砂等の固形物を除去する。
- ④ 生産井の圧力変動に注意する。
- ⑤ 周囲の生産井の水質の変化に注意する。

## V 海洋掘削

### 1 海洋掘削の概要

海洋掘削は陸上の掘削と相違し、風、波、潮流、特に台風、低気圧等の厳しい海象、気象条件を如何に克服し安全な作業を行なうかということが要件となる。

いい換えれば、陸上掘削と同様、安定した状態を海上において作り出すことが必要である。しかしこのための装置は広範多岐に亘り、しかも多額の費用を要する。したがって、掘削装置（掘削バージ）の選択には、掘削深度、稼働水深、気象、海象、海底土質、海底地形等を十分検討しなければならない。

海洋掘削装置は陸上掘削装置と比較し、掘削海域の気象海象条件を克服あるいは緩和する装置または機器が用いられる。これについては次の章に詳しく述べるので本章では海洋掘削の基本的な問題について述べる。

#### 1.1 搭載装置および機器

海洋掘削の装置および機器は陸上のものと比較して、特殊な例を除き大型大容量のものを搭載装備するのが一般的である。すなわち海洋掘削は気象、海象条件の悪化により調泥剤等掘削資材の供給ができず作業が中止することのないよう、大量の資機材が搭載できるものが要求され、掘削機器においても余裕のある機器で安全に作業を進めるという考えが深く浸透し、作業の自動化も積極的に図られている。

陸上と比べ海洋掘削の費用は数倍多いといわれ、作業の中断が掘削費用増大の原因となり、掘削装置の効率的かつ安全な稼働を行うためにも主要機器については豊富な予備品を備え万全を期している。

#### 1.2 乗船人員構成

海洋掘削の構成人員は陸上掘削に比較しその特殊性により多くなる。表 5.1.1 は海洋掘削の乗船人員構成表であるが、サービスカンパニーのサービス項目の中に含まれている気象、海象予測サービス、ダイビング（ROV）サービス、ワークボートサービス、ヘリコプターサービス等から海洋掘削の複雑な作業の一端が現れている。また表 5.1.2 はドリリングコントラクターの提供人員一覧表で大型掘削装置である半潜水型の一例である。

海洋掘削は原則的には 12 時間勤務、2 交代制である。掘削装置上には 2 組が乗船しており、残りの 2 組は陸上にて休養することになる。

従来の海洋掘削の勤務形態は掘削装置の責任者を除き 2 週間勤務し 1 週間休養をとる方法が一般的であったが、最近では国内の場合には 2 週間勤務、2 週間休暇の方法をとり、海外勤務の場合は 4 週間勤務、4 週間休暇の方法をとり、各自が世界のどこで稼働していても自国まで帰り休暇を取るのが一般的である。表 5.1.2 は後者の 4-4 の場合の人員表である。

表 5.1.1 海洋掘削装置の乗船人員構成表（半潜水型）

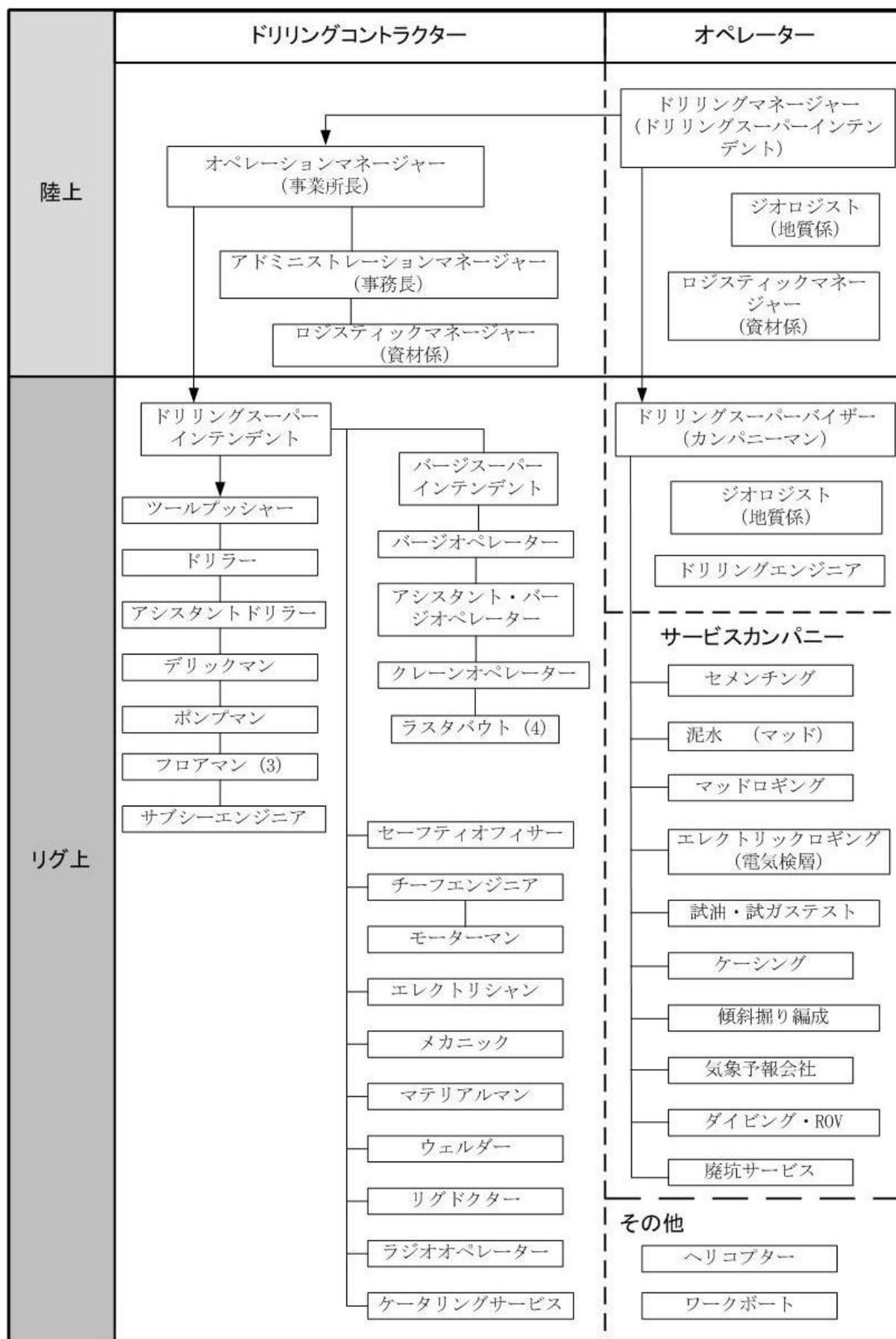


表5.1.2 ドリリングコントラクター提供人員一覧表（4週間:4週間の場合）

職名	提供人員	リグ乗船 人員	陸上にて 休暇人員	備考
ドリリングスーパーインテント	2	1	1	
バージスーパーインテント	2	1	1	
セーフティオフィサー	2	1	1	
ツールプッシャー	4	2	2	12時間交代
ドリラー	4	2	2	12時間交代
アシスタントドリラー	4	2	2	12時間交代
デリックマン	2	2	2	12時間交代
ポンプマン	4	2	2	12時間交代
フロアマン（3）	12	6	6	12時間交代
バージオペレーター	4	2	2	12時間交代
アシスタントバージオペレーター	4	2	2	12時間交代
チーフエンジニア	2	1	1	
エレクトリシャン	2	1	1	
メカニック	2	1	1	
サブシーエンジニア	2	1	1	
ウェルダー	2	1	1	
ラジオオペレーター	4	2	2	12時間交代
リグドクター	2	1	1	
マテリアルマン	2	1	1	
モーターマン	4	2	2	12時間交代
クレーンオペレーター	4	2	2	12時間交代
ラストバウト（4）	16	8	8	12時間交代
ケータリングサービス	30	15	15	12時間交代
計	112	56	56	

### 1.3 海洋掘削装置

海洋掘削装置の名称は掘削バージ（鉱山保安法・内規\*）、移動式海底資源掘削船（MODU）等多様であるが、本章では「海洋掘削装置」という総称を用いた。この海洋掘削装置を大別すると固定式掘削装置と移動式掘削装置に分けることができる。このうち石油開発の可能性を探索するために使用される掘削装置としては移動式掘削装置がその大半を占め、着定式掘削装置、浮遊式掘削装置等にさらに分類することができる。固定式掘削装置としては人工島、ケーソン型が挙げられるが、非常に特殊で

あり、数も限られているため本章では省略した。また、海洋石油生産用システムについても本章では触れていない。(第16章掘削バージ(第18条関係)参照\*)

### 1.3.1 着底式掘削装置(ボトムサポータイド型)

着定式掘削装置の範疇には甲板昇降型掘削装置(ジャッキアップ型)と潜水型掘削装置(サブマージブル型)が含まれるが、現在稼働しているこの形式の掘削装置は甲板昇降型掘削装置が大部分であるので、本節は以下に甲板昇降型掘削装置の概要を記す。

甲板昇降型掘削装置は、3本、4本あるいはそれ以上の脚で海底に着底し、船体およびその搭載重量を支持するため、その着底位置における海底土質の調査が必要である。その調査項目については少なくとも次のことを実施するよう保険会社に委託された専門の検査会社の検査員(保険サーベイヤー)より要求されている。

- ① 音響測深機による水深測定
- ② サイドスキャンソナーによる海底地形状況の調査
- ③ ブーマまたはスパーカーなどの地層探査機により海底地形状況の調査
- ④ 着底位置の潮流の強さ、流向および潮の干満の調査
- ⑤ 着底位置の海底下数十メートルまでの土質のサンプル採取と支持力の調査・解析
- ⑥ 寒冷地においては、結氷、流氷予測
- ⑦ シャローガスの有無

これらのデータに適合する甲板昇降型掘削装置が選択され使用される。保険会社はこれらのデータをもとに甲板昇降型掘削装置が安全に設置出来るかどうかの判定を行い保険の適用を承認することになる。

#### i) プリロードテスト

保険会社のサーベイヤーより着底の承認が出た場合でも、その着底後プリロードテストを実施することが義務付けられている。プリロードテストとは掘削に先立ち風・波・潮流の50年再現期待値を推定し、それに伴うレグにかかる荷重をあらかじめ算出しその値まで脚に荷重をかけ暴風時における甲板昇降型掘削装置の安全性を確認することをいう。

したがって、通常は実際の暴風時のレグにかかる荷重はプリロードのそれ以下となる。プリロードタンクは設計条件の荷重をレグにかけることができる容量を有しており、プリロードはプリロードタンクに徐々に水を張り込みながらレグの貫入量と海底土質とを勘案しながら逐次実施される。

しかし海底土質の軟弱な場合などで急激にレグが数メートルも貫入すること(パンチスルー)があり、万レグが急激に貫入した場合はハル底部が水面に一気に衝突し、掘削装置全体に大きな損傷を与える可能性がある。このパンチスルーに備え、プリロード実施中は水面とハル底部との間隔(エアギャップ)を最高でも1~1.5 mに保つ事が一般的である。

#### ii) レグ長と稼働水深

甲板昇降型掘削装置では、水深が大変重要な要素となる。即ちその稼働海域の海象、気象の影響を加味したエアギャップ、水深、レグの貫入量(ペネトレーション)等のいろいろな条件を考慮し、装備されているレグが十分な長さであることを確認する必要がある。

図5.1.1は甲板昇降型(ジャッキアップ型)掘削装置の最大稼働水深の相関関係を示したものである。

\*1 鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針(内規)、(20121115 商局第4号)平成24年11月

即ち最大稼働水深は次のようになる。

$$A = B - (C + D + E + F)$$

- A : 最大稼働水深
- B : レグ(脚)全長
- C : エアーギャップ
- D : ハル全高
- E : レグ、安全米数
- F : 最大貫入量

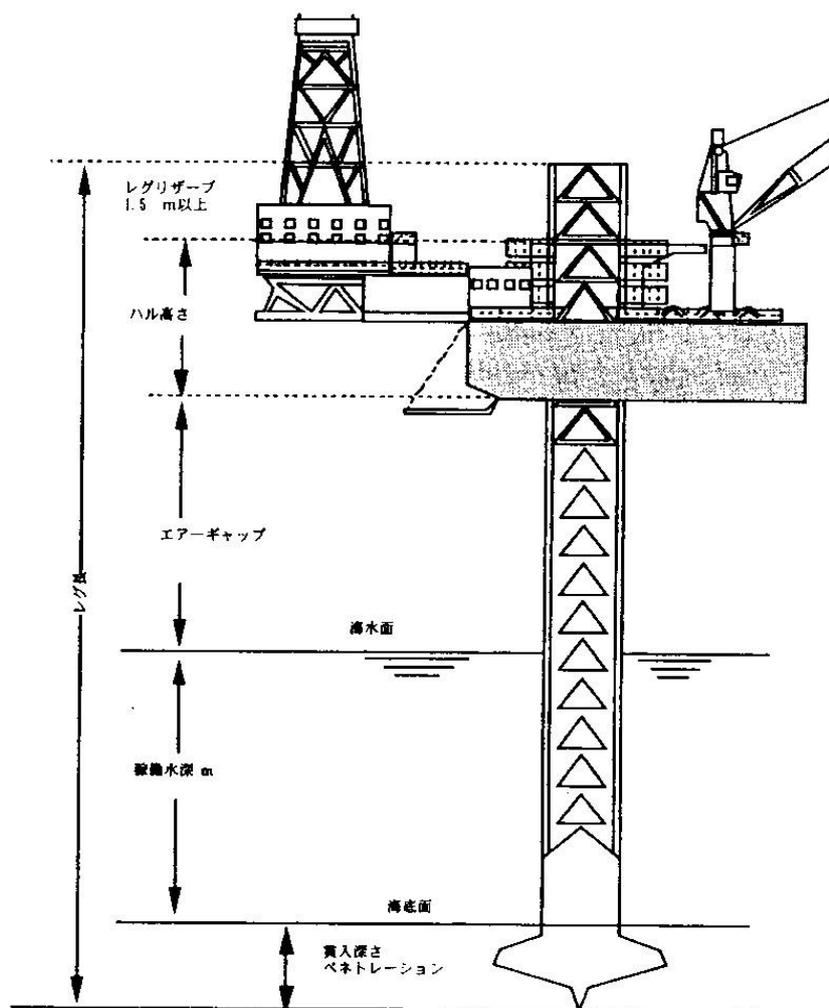


図5.1.1 甲板昇降型掘削装置の稼働水深関係図

### iii) エアーギャップ

エアーギャップは稼働海域の気象、海象条件を検討の結果保険サーベイ会社により指定される。その海域により大幅な違いがあるが基本は波が船底をたたかない十分な高さを保つということであり、次の要素により決定されるのが一般的である。

$$A = (B + C + D) \times 1.1$$

- A : エアーギャップ
- B : その海域の最大波高
- C : 潮高
- D : ストームサージ (暴風時の低気圧による海面上昇) 安全率 10 %

### 1.3.2 浮遊式掘削装置（フローター型）

浮遊式掘削装置の範疇には、半潜水型掘削装置（セミサブマージブル型）、船型掘削装置（ドリルシップ型）およびテンダーバージ型掘削装置が含まれ、その位置保持（係留）方法は大部分がアンカーによる方法（アンカー係留）を採用している。ただし、大水深対応の掘削装置ではスラスターと呼ばれるプロペラをコンピューターで制御して位置を保持する方法（ダイナミックポジショニングシステム）も多く用いられている。

アンカー係留の浮遊式掘削装置では着底式掘削装置と同様に掘削装置の設置位置の海底土質、気象、海象調査等の実施が保険会社のサーベイヤーにより要求される。一方、ダイナミックポジショニングの場合は、作業海域の気象海象条件がスラスターの能力と密接に関係しているため事前調査が重要となる。

#### i) プリテンション

掘削装置の作業海域における暴風、海底土質に対する安定性を確認するため、着底式掘削装置の場合はプリロードを行なうが、アンカー係留の浮遊式掘削装置の場合はこれと同じ目的でプリテンションを行なう。

プリテンションは、アンカーにより掘削装置を完全に設置するのに先立ち実施されるもので、掘削作業時のアンカーテンション、（これをワーキングテンションと呼ぶ）よりもはるかに大きな張力にてアンカーチェーン、あるいはアンカーワイヤーを引張りアンカーの把駐力を確認することをいう。

この際にかかるテンションを決定する基準はいくつかあるが、通常はAPIで規定される5年再現期待値あるいは10年再現期待値から算出し、その値に安全率を乗じて決定する。天気予報等でプリテンションの値以上の暴風が予想されるような場合には、すべてのアンカーテンションをゆるめ、全員掘削装置から退避し、暴風の通過を待つという緊急対策をとる。なおプリテンション実施中にアンカーがスリップした場合には、若干位置をずらして打ち直すを試みる。これも不調の場合は補助アンカー（ビギーバックアンカー）をそれぞれの主力アンカーに加え把駐力を確保する。

#### ii) ワーキングテンション

このプリテンションが終了すると通常の作業を行うに十分なワーキングテンションに設定され掘削作業に入る。通常、浮遊式掘削装置は掘削作業中は海底に作った坑口とライザーパイプで繋がれるため、ある一定の範囲内（水深の3～5%）に留まっている必要がある。作業中浮遊式掘削装置をその範囲内に係留しておくために必要な係留力をワーキングテンションと呼んでいる。言い換えれば掘削装置が水深の3%～5%オフセット（海底の坑口と掘削装置とのずれ）したときにアンカーテンションがチェーン（ワイヤー）の破断荷重の1/3に達するような初期張力のことである。台風や暴風等により、さらなる外力が掘削装置に働いた場合にはオフセット量は更に増大

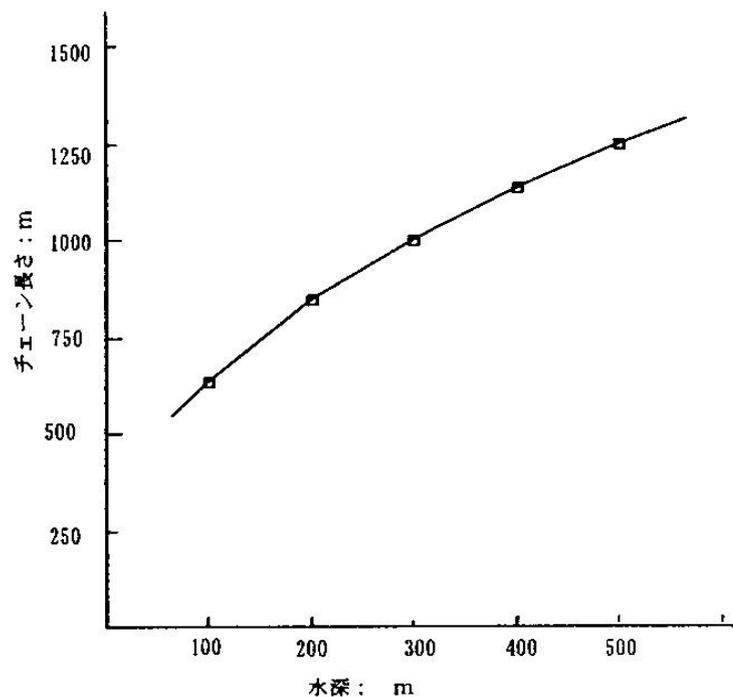


図5.1.2 水深におけるチェーン持ち上がり長さ

し、水深の約 10 %になるとチェーンのテンションは破断荷重の 1/2 に達する。

係留ラインの安全率は、船級協会等で規定されており、それらを遵守することが必要である。

### iii) 係留力と稼働水深

浮遊式掘削装置の場合、稼働する海底の気象、海象条件で安全に掘削装置を定点保持することに必要十分な係留設備を備えなければならない。アンカーが十分に効いていると仮定すれば、装備されているチェーン（ワイヤー）の強度と長さによって係留可能かどうかが決まる。即ち前述の定点保持条件を満足し、なおかつ暴風下でもチェーン（ワイヤー）に十分な長さがある、アンカーまでのチェーン（ワイヤー）全量が持ち上がらないことが最低限の条件である。水深が深くなると、掘削装置を 3～5 %の範囲内に収めるためにはより大きな張力が必要になる。そのためにはチェーンのサイズを大きくする必要がある。チェーンやワイヤーが水中で描く弧をカタナリー曲線と言うが、チェーンのサイズが大きくなると自重のためにチェーンの張力の水平分力が小さくなり、定点を保持するという役目を果たせなくなる。そのため、稼働水深が深くなるとチェーンとワイヤーによるコンビネーションシステムが使われる。即ち海底に接触する部分にはチェーンを用い、持ち上がり部分にはワイヤーを用いる混合システムである。近年、さらに深い海域では係留索を軽くするという目的で合成繊維ロープなどが使われている。

## 1.4 気象・海象観測

気象海象条件は海洋掘削を行う上で海洋掘削装置の作業限界と係る重要な要素であり、稼働中のみならず曳航および係留作業中においても常に観測を続けなければならない。

いかなる状況においても、観測された気象・海象条件が作業限界を超える場合は、作業を中止し緊急退避も考慮しなければならない。そのため海洋掘削作業では掘削装置上での気象・海象観測とともに、気象予報サービス会社等から定期的に情報を入手することが一般的である。

気象海象条件として考慮される事項は次のようなものがある。(VI 海洋生産編 1.2.1 自然環境参照)

- ① 気圧、風向、風速
- ② 波高、波長、波向
- ③ 潮流、海流、流向、流速
- ④ 海水温度、気温
- ⑤ 潮汐

尚、「技術基準省令の技術指針」によれば海洋掘削装置には以下の器具の設置が義務付けられ、また、毎作業時間に 1 回以上の観測と記録が規定されている。

- ① 気圧計
- ② 風向計
- ③ 風速計
- ④ 波高計
- ⑤ 流向計
- ⑥ 流速計

## 1.5 船体動揺

海洋における浮遊式掘削装置は常に外的要因である気象海象の影響を受けており、装置の作業限界と密接な関係を有している。その船体の動きは、6 つの動揺に区別されている。

- ① ローリング：横揺れ（船首尾線を軸にして横方向の回転運動）

- ② ピッチング：縦揺れ（船体中央線を軸にしての縦方向の回転運動）
- ③ ヨーイング：偏（かた）揺れ（船体中央垂直線を軸にしての左右方向の回転運動）
- ④ ヒービング：船体の上下動
- ⑤ スウェー：船体の左右動（横すべり）
- ⑥ サージ：船体の前後動（縦すべり）

これらの船体動揺の殆どは係留索やスラスタにて制御されるが、ヒービングは特に掘削作業に大きな影響を及ぼすため、ライザーテンショナーやヒービングコンペンセーターなど上下動の緩衝装置が必要不可欠である。

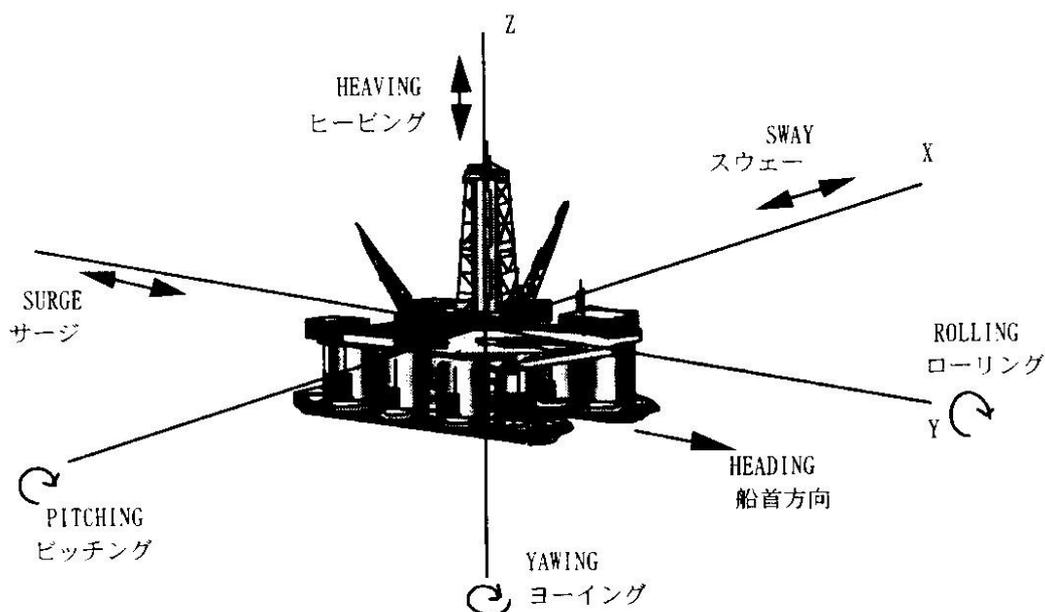


図5. 1. 3 船体動揺

### 1.6 スラスタ（Thruster）

スラスタとは船の推進器のことで、通常はプロペラと呼ばれている。プロペラが水中で回転すれば水の反力は軸から軸の長さ方向に伝わり、船体を前進せしめるもので、この軸方向の力をスラストと言うところからスラスタと言われる様になった。船尾部に備えられた航行用スラスタのほか、船首、船尾、船体中央などに船を任意の方向に動かすことの出来るアジマススラスタや、船を横方向に動かすためのサイドスラスタ（トンネルスラスタ）など用途や構造によって呼び名が付けられている。ダイナミックポジショニングシステムでは、これらのスラスタを数多く使用することによって船位を保持して、掘削作業を行っている。

## 2 移動式海洋掘削装置

### 2.1 移動式海洋掘削装置の種類と特質

海洋掘削装置はその発達の過程で一部変わった設計が試みられ特殊な形状の物がわずかながら建造されたこともあったが、現在までに経験上種類は自然に淘汰され、現状は1.3に記したとおり海洋石油の探鉱に使用される移動式海洋掘削装置は次に示す形式に大別できる。

表5.2.1 移動式海洋掘さく装置の種類

着底式	甲板昇降型掘削装置	ジャッキアップ型
	潜水型掘削装置	サブマージブル型
浮遊式	半潜水型掘削装置	セミサブマージブル型
	船型掘削装置	ドリルシップ型
	テンダーバージ型掘削装置	固定プラットフォームに付随

#### 2.1.1 甲板昇降型掘削装置（ジャッキアップ型）

甲板昇降型掘削装置は掘削地点の海面上到着後、脚（レグ）をジャックで降下させレグ下端を海底に着け、海底土質に支持させてから同じくジャッキング操作によって船体部分（ハル）を空中に上昇させ、その船体を波の影響を受けない安全な高さに保って掘削作業を行なうものである。掘削作業が終了し、次の掘削地点へ移動する時は、前記のジャッキアップと全く逆の操作をする。

甲板昇降型掘削装置の特質は以下のとおりである。

- ① 風波・潮流による船体の動揺、移動がないので安定した掘削作業が可能である。
- ② 水深により掘削可能海域が制限される。（現在のところおよそ 150 m 以下である）
- ③ 海底土質により下端の形状の適した掘削装置を使用しなければならない。海底土質が柔らかい場合はマット付かフーティング付を使用し、硬い場合はスパッドカン付等、下端が強固で突起のある形式が有効である。又海底に傾斜がある場合、あるいは凹凸のある場合には、マット付の形式は適さない。
- ④ 掘削地点へ掘削装置を設置する場合、または掘削地点から離脱する場合の作業可能な限界波高は他の半潜水型や船型に比して低い。

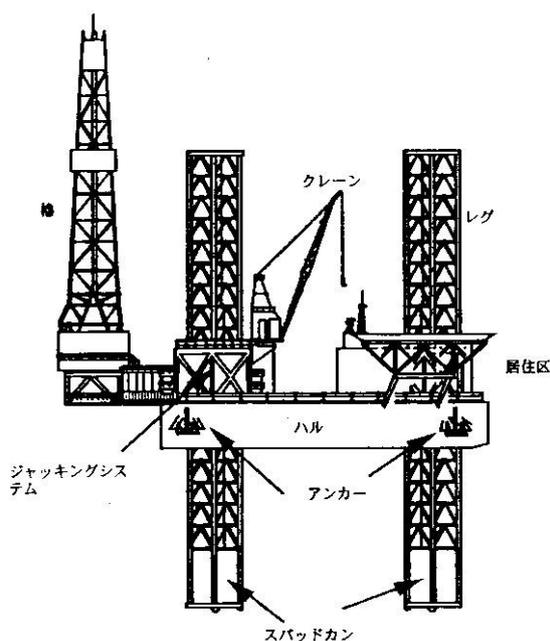


図5.2.1 甲板昇降型掘さく装置

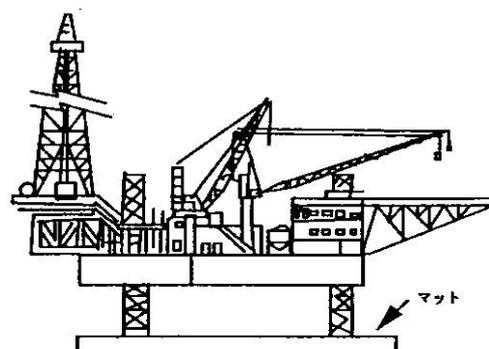


図5.2.2 マット付き甲板昇降型掘さく装置

- ⑤ 掘削作業中掘削装置上に搭載できる搭載重量（バリアブルロード）は、一般的に他の形式に比べ少ない。
- ⑥ 一般に船体の形状やレグの長さのため、曳航抵抗が大きい。又レグの強度によっては曳航時レグの上部を一部取り外さなければならないものもある。
- ⑦ レグの長さや強度によって稼働海域が限定されることがある。したがって設計条件に適合する海域を選定しなければならない。

### 2.1.2 潜水型掘削装置（サブマージブル型）

掘削地点海面に到着した後、下部のベースハル（ポンツーン）内のバラストタンクに海水を注入し、掘削装置全体を沈下させ、ベースハルを海底に着けて掘削作業を行なう掘削装置である。掘削作業が終了し、次の掘削地点へ移動するときは、前記の操作の逆で、先ずベースハル内のバラスト水をポンプ等によって排水し、ベースハルの浮力で浮き海上を移動する。掘削作業中の条件により海底への接地圧を調整する必要がある時はバラスト水の量によって行なう。

潜水型掘削装置の特質は以下のとおりである。

- ① 風波、潮流による動揺、移動がないので安定して掘削作業ができる。
- ② 水深によって掘削可能海域が制限される。（特殊な場合を除き掘削可能水深は大体 25 m 以下である。）
- ③ ベースハルのみで浮上するものは浮上時の喫水が少ないので、水深の浅い海域へも曳航し掘削することができる。
- ④ 海底土質の柔らかい泥質のような海域の使用に適するが、硬い海底土質の海域には適さない。
- ⑤ 曳航時の安定性が悪いので、海象条件の厳しい海域の長距離曳航は困難である。

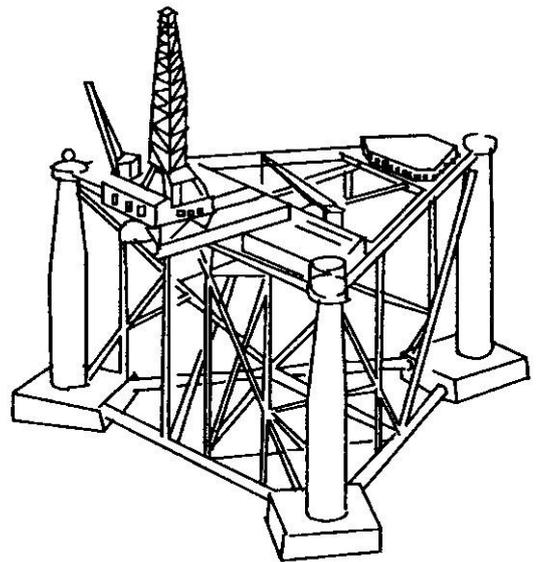


図5.2.3 潜水型掘削装置（着底式）

### 2.1.3 半潜水型掘削装置（セミサブマージブル型）

掘削地点上に到着した後、ローアールまたはリングポンツーン内のバラストタンクに海水を注入して船体を沈め、ローアールまたはリングポンツーンの上のコラムまたはケーソンの高さの中間位の喫水を維持し、半潜水状態で掘削作業を行なう移動式海洋掘削装置である。掘削作業中の位置保持は大部分が海底にアンカーを置き、チェーンまたはワイヤー等の係留索によって行なっているが、大水深では DPS（ダイナミックポジショニングシステム）といってコンピューター制御された複数のスラスターを使用して行うことになる。また係留索にスラスターを加えたスラスターアシストのものもある。半潜水型掘削装置の中には潜水型掘削装置のように水深の浅い海域では海底土質条件により着底して掘削作業ができる形式もある。

半潜水型掘削装置の特質は以下のとおりである。

- ① 大水深の海域でも稼働できる。（最大水深 3,000 m で稼働可能のものもある）
- ② 風波の中での安定性能が良いので船型に比べ横揺れが小さい。
- ③ ローアール型で推進機或いはスラスターを装備したタイプは移動性能が良い。
- ④ 半潜水式で掘削を行なうため、海底防噴装置等の海底用の機器を装備しなければならない。

- ⑤ アンカーの把駐力によって位置を保持する場合は、海底土質に影響される。
- ⑥ 他の形式に比べ船体の幅、高さが大きくなるため狭水道の通過が困難なことがある。

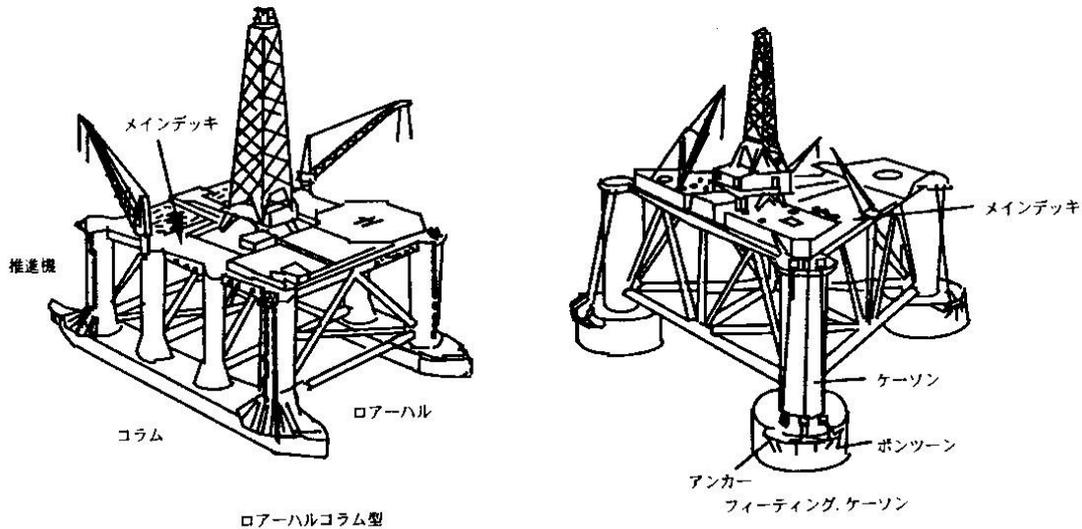


図5.2.4 半潜水型掘さく装置

#### 2.1.4 船型掘削装置（ドリルシップ型）

船型の船体部分に掘削機器を装備した移動式海洋掘削装置で、掘削地点に到着後海面に浮上したまま掘削を行なう。この時の掘削地点での位置保持は半潜水型と同様にアンカーとチェーンあるいはワイヤーによるもの、ダイナミックポジショニングシステムによるものがある。

#### 2.1.5 テンダーバージ型掘削装置

この形式は既に発見された油層の生産井を掘削するために使用される。小型の固定式プラットフォームに付随して掘削作業を行なう形式の掘削装置である。掘削デリック（やぐら）、ドローワークス、ロータリーテーブル等サブストラクチャー上に装備している機器（サブストラクチャーを含む）とシェールシェーカー、デシルター、デサンダー、デガッサー等を固定式プラットフォーム上に設置し、このテンダー型掘削装置にはその他の掘削関係機器、マッドポンプ、セメンチングポンプ、バルクタンク、調泥剤ストア、アクティブマッドタンク等のほか動力設備、居住設備、クレーン等のハンドリング設備、位置保持のための係留設備等が装備される。船体の形状は船型に近い舢舨状である。これも舟艇や一般船舶を改造したものと、新しく専用に設計建造されたものがある。掘削地点間の曳航の際は、固定式プラットフォーム上に設置されるドリリングデッキ上の機器を分解して掘削装置上に搭載して曳航する。掘削地点の固定プラットフォームの近くに到着後、アンカーによって係留、適切な位置に船位を保持し、クレーンによって固定プラットフォームの上に掘削機器を設置して作業を行なう。掘削作業中は固定プラットフォームに対し常に定められた位置を維持し、動力、パイプ、諸機械の供給をする。

テンダーバージ型掘削装置の特質は以下のとおりである。

- ① テンダーバージは船型をしており、固定プラットフォームに対し絶えず適切な位置を保持せねばならないため波浪の大きな海域には適さない。
- ② 固定プラットフォームの設置条件に制限されるため、余り深い水深には使用できない。一般に水深 100 m 以下である。

- ③ セルフコンティンド型のプラットフォームに比べて、テンダーバージに掘削関係機器の半分以上と他の設備があるため、固定プラットフォームの大きさを小さくできる。

注) バージ(Barge)とは

バージとは舢(はしけ)の総称で、小さい船または港湾で沖に停泊している大型船の貨物の積み取りや積み込みのために陸上との運搬に用いられる小型の船を言う。貨物を多く搭載出来る様に通常は四角い箱構造になっているものが多く、喫水が浅いため大洋には不向きである。テンダーバージは、もともとはバージに上記の掘削装置を備え、浅い沼や湖で用いられていたものが、次第に水深の深い構造のものに変わっていった歴史があり、潜水型や半潜水型の原型とも言える。

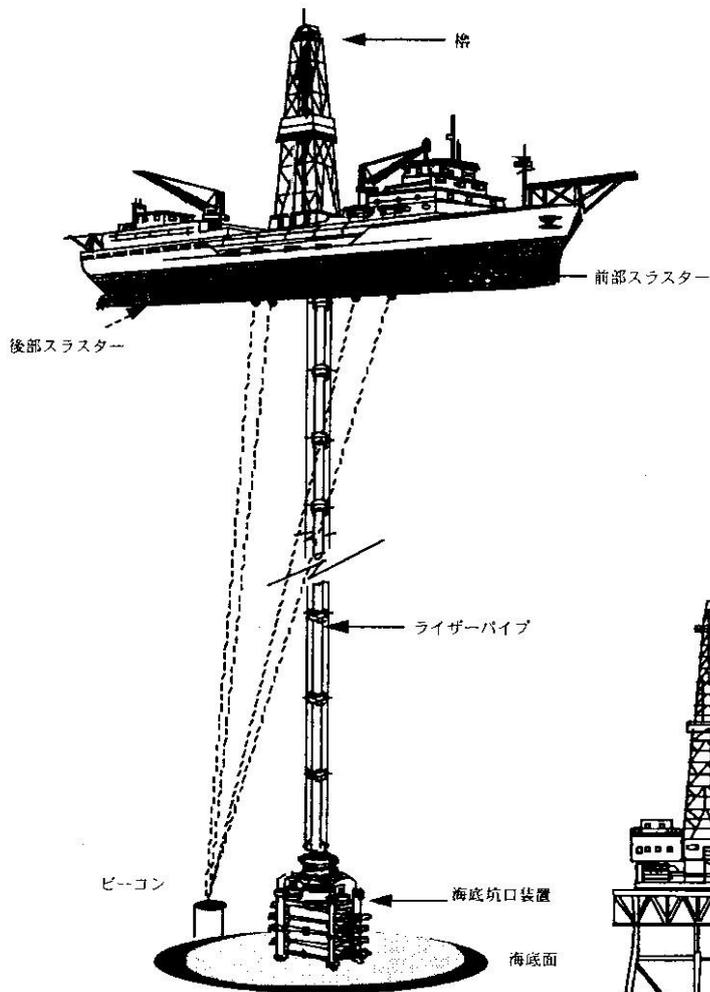


図5.2.5 船型掘さく装置

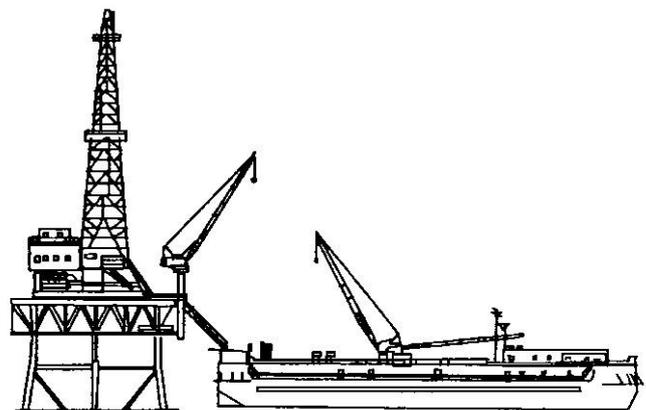


図5.2.6 テンダーバージ型掘削装置

## 2.2 掘削装置の曳航

### 2.2.1 曳航計画

掘削装置を曳航するに先立ち、事前に曳航計画書(曳航方法)を作成し、航行の安全に十分な対策を以下の要目について講じることが重要である。

#### i) 曳航航路の決定

曳船の船長と掘削装置の船長(マリンスーパーインテンドントまたはバージェンニア)は互いに

協議し、曳航期間の気象、海象条件を十分考慮し、安全な曳航航路を決定する。

## ii) 気象、海象データの収集

曳航コースにあたる気象、海象データを収集し、急激な気象、海象状況の変化にも十分対応できる対策を施す。原則として長期曳航に関しては出航予定日の少なくとも3日前、短期曳航については出航予定日の少なくとも2日前より情報を収集し、出航か否かの最終判断を行なう。なお気象データの収集の内容は下記要目を網羅する。

- ① 気圧配置図
- ② 波高、うねり、潮流
- ③ 風向、風速
- ④ 曳航期間中の上記の予想
- ⑤ 結氷、着氷、流氷予想（寒冷地にのみ実施）

## iii) 掘削装置の資機材の搭載計画および安定計算

曳航時に搭載する資機材は、所定の書式により計算し、掘削装置の搭載重量の許容範囲を越えないように留意する。かつ掘削装置にできるだけ平均に荷重が分布することに心掛けることが必要である。またそれぞれの掘削装置により異なるが、安全性の許容範囲を越える積載をしてはならない。

図5.2.7は船が傾いた時に起き上がろうとする復原力を表した図である。船の復原力は国際条約に定められている。すなわち、船の復原モーメントは風による船を転倒させようとする傾斜モーメントよりも大きくなければならない。図で示すと、復原モーメント曲線で囲まれた面積(A+B)は、風が船を倒そうとする傾斜モーメント曲線が作る面積(B+C)の1.3倍（セミサブマージブル型、ドリルシップ型）以上でなければならない。（ジャッキアップ型は1.4倍）。海水流入角とは、これ以上傾斜した場合復原力を得られない限界を指す。

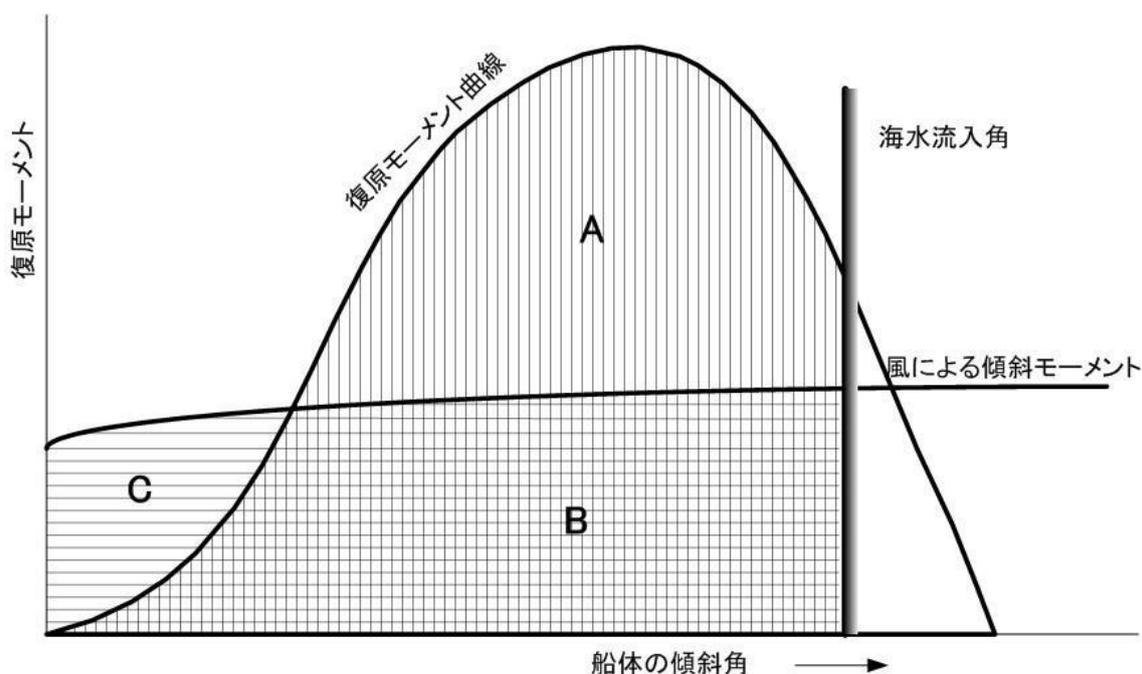


図5.2.7 復原力曲線

## iv) 曳航固縛

曳航時には荒天等による掘削装置の動揺のため、積載資機材が動くことがある。特にタンク内に搭

載する液体は、掘削装置の傾斜により液体移動のモーメントが加わるため、掘削装置の安定性を悪くする。したがってタンクの積載計画には十分注意すべきである。また、搭載物の固縛が完全でないため、作業員に衝突することなど、人身災害を誘発することもあるので重量物は溶接またはワイヤーロープやターンバックルで固縛し、高所から吊り下がっているものは、掘削装置の動揺、風の影響で振れないように十分固縛しなければならない。

#### v) 曳航および曳航方法

曳航の方法については、短期曳航、長期曳航等により異なるが、一般的に以下の方法が用いられる。

- ① タグボート（ワークボート）1 隻曳き
- ② タグボート（ワークボート）2 隻曳き
- ③ ドライトウベッセルに搭載する曳航（ドライトウ）
- ④ 自力航行（推進機による。）

##### (1) タグボート（ワークボート）1 隻曳き

既に述べたように、曳航作業は十分な情報の収集と安全対策を実施してからでなければ曳航を開始してはならない。したがって、掘削装置を曳航する場合には曳航中予想される気象、海象条件に対して十分な能力を有するタグボート（ワークボート）が必要である。一般に各々の掘削装置を曳航するタグボートの能力は保険サーベイヤーの勧告にしたがって決定され、その要目は、タグボートの馬力、牽引力（ボラードプル）、曳航索の長さ、外径、破断荷重、予備ワイヤー等が含まれる。一方、掘削装置は、曳航索接続の端末、曳航チェーン、接続用シャックル等の強度も指定される。又図 5.2.8 に示すペンダントワイヤーは衝撃荷重を緩和するためにナイロンホーサーを使用することもある。

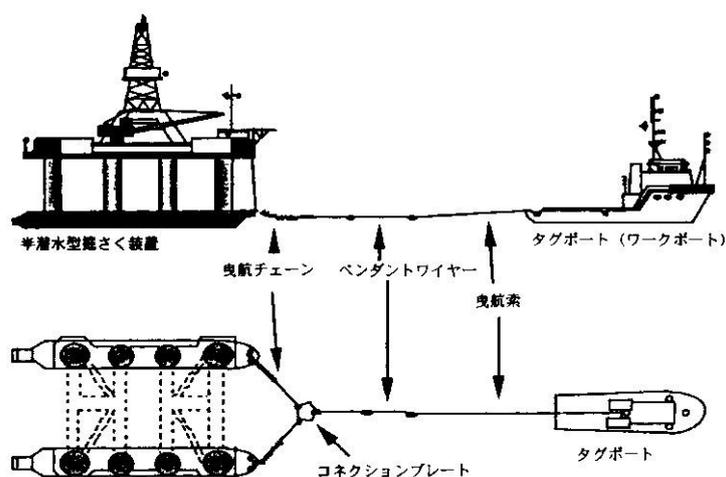


図5.2.8 曳航索及び曳航方法（タグボート1隻曳き）

##### (2) タグボート2隻曳き

海洋掘削作業に使用するワークボートは、掘削装置の大型化に伴い、大馬力、大容量のものが増えてきており、このワークボートをタグボートとして使用して曳航するケースが増えている。現在海洋掘削で使用されているワークボートはほとんど、曳航もできるように設計されており、曳航については1隻曳きでその能力および容量に不安がある場合は2隻曳き曳航となる。2隻曳き曳航も前節で述べたような、タグボートおよび掘削装置の能力についての指定を受けることとなる。

2隻曳き曳航の場合、両ボートの能力に大きな差があるような場合や、もし、どちらかのタグボートの故障、または曳航索、ペンダントワイヤーの切断などにより、1隻のボートのみの使用による曳航の

場合は、掘削装置の中心に力がかかっていない関係で真直ぐ曳航することは難しく、どうしても左右に振れ動き安全な曳航ができない。したがってそのような場合には、図5.2.9のように曳航ラインの中間からそれぞれの曳航索に接続する方法をとる。この方法によれば、たとえ1隻のボートが故障しても、コネクションプレートを紹介して掘削装置の中心を曳くことになるため、掘削装置の曳航に対するコントロールが容易となる。

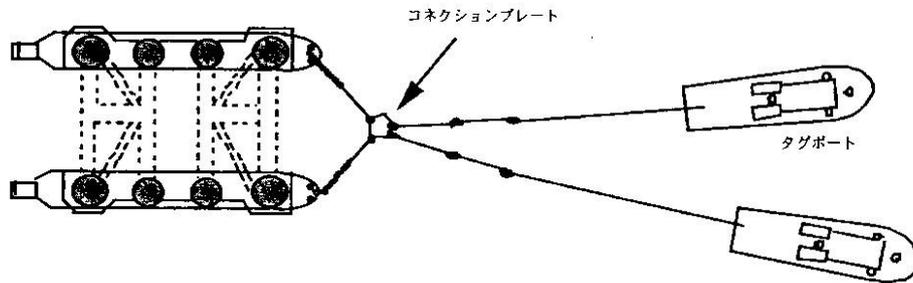


図5.2.9 タグボート2隻の力がアンバランスの場合の曳航方法

### (3) ドライトウ

曳航距離が非常に長い場合、次の掘削作業の開始時期が決まっている場合、曳航航路において暴風が予想される海域や季節の場合にはドライトウが選択される。図5.2.10のようにドライトウベッセルを半潜水状態で待機させておき、その上に掘削装置を移動させる。ドライトウベッセルが浮上することにより掘削装置が搭載される方式で、ドライトウと呼ばれている。ドライトウベッセルに掘削装置を完全に載せた航行となるため、速力や所要日数等はほとんど一般貨物船と変わらない。

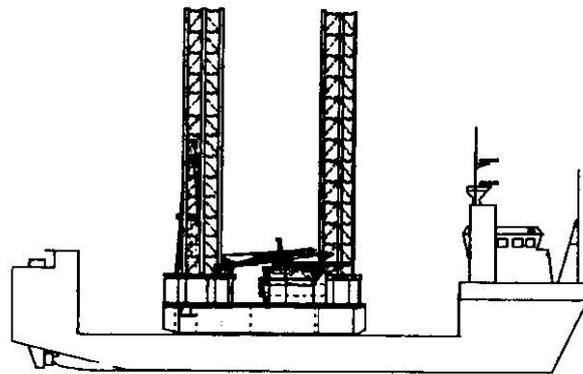


図5.2.10 ドライトウベッセルに搭載する曳航

### vi) 監督官庁への届出および緊急連絡方法

日本海域での曳航は曳航計画を作成し、海上保安庁（海上保安部）に提出し、掘削装置の航路筋に関し、安全確保の措置を講じてもらうべく依頼する。緊急時には海上保安庁に連絡し、その通信方法は、インマルサット、国際VHF、船舶SSB、船舶電話等により行い、もし必要ならばタグボートからも交信できる態勢を整えておく。

### vii) 曳航喫水

掘削装置はその気象、海象条件により曳航方法が違ってくる。例えば、セミサブマージブル型の長期曳航は、曳航抵抗を極力少なくするため、ローハル曳航を行う。曳航中に暴風に遭遇することが予想される場合には、掘削装置を半潜水状態まで喫水を下げて曳航する。また、甲板昇降型掘削装置

の場合は暴風に備えるため、レグを下降し、掘削装置の重心を下げて曳航することもできる。

半潜水状態またはレグダウンして曳航する場合は、水深に十分注意し、水深測定器で水深を測りながら曳航することが望ましい。

## 2.3 掘削措置の設置と離脱

### 2.3.1 ロケーション位置における海洋掘削装置の方向の決定

掘削装置の船首方向をどの角度で設置するかは、その後の掘削作業に重大な影響を及ぼすため、その方向決定については十分検討を行なう必要がある。その海域の稼働時期におけるデータを分析し、それに対処するにはどの方向が一番良いかを決定する。

- 半潜水型掘削装置の場合潮流と風速を比較して、より潮流の方が風速よりもローアールに与える影響が大と考えられる場合は、潮流に対して平行に設置する。
- 潮流が弱い場合には風向を考慮して設置するがこの場合は資機材のワークポートへの積み降しを考慮する。
- 居住区側を風上にして坑口からの可燃性ガス、有毒ガスが来ないように設置する。
- ヘリコプターデッキに向かい風で着陸できるように設置する。
- その他として、衛星通信アンテナ、エンジンからの排気ガスの飛散方向を加味する必要がある。

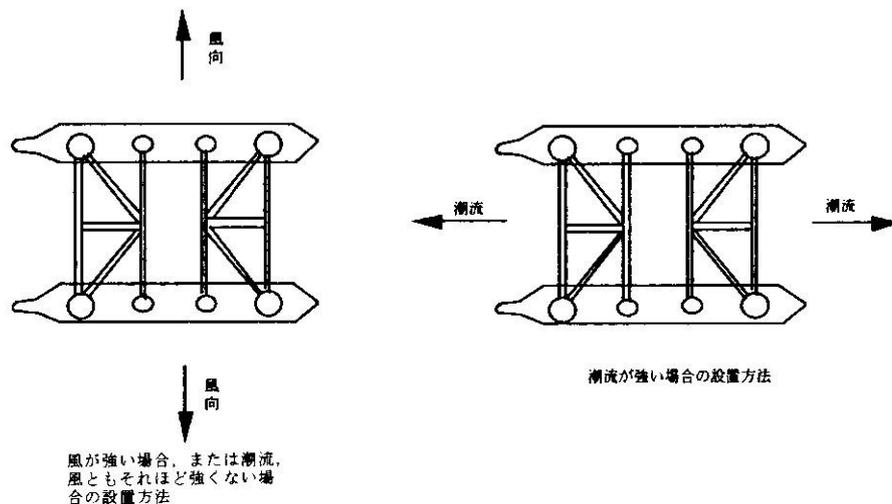


図5.2.11 潮流方向と掘さく装置の方向

### 2.3.2 掘削装置の進入方法

掘削装置の掘削予定地点への進入方法は、陸上局からの電波によるデッカ、衛星を利用した GDPS、音波によるトランスポンダやトランスデューサー、またこれらの機器の併用による位置決定を用い行われている。掘削装置の船長ならびに曳船の船長は上記の機器のモニターに映し出された自船の位置と掘削予定地点を見ながら坑井位置まで進入する。

#### i) セミサブマージブル型におけるアンカー設置作業

セミサブマージブル型のアンカー設置作業は、その他の浮遊式掘削装置とほぼ同様な方法で行なわれる。

- ① 掘削予定地点（ロケーション）に近づいたら、潮流、風向を考慮し進入方向をタグボートと打ち合わせの上決定する。

- ② ロケーションより、5～6 マイル\*<sup>2</sup>手前にて曳航索を 500 m 程度まで縮めながら進入コースを低速で航行する。
- ③ ファーストアンカーのペンダントワイヤーにブイを付け投下準備する。
- ④ ロケーションより 3 マイル程手前にて、ファーストアンカー用ブイを投下しながら航行を続け、ファーストアンカーの投入地点でアンカーを自力投錨する。アンカーが海底に着底したら掘削装置の前進に伴い、チェーン（ワイヤー）をブレーキで調節しつつスラックする。
- ⑤ 外力を考慮して次のアンカーを設置する。
- ⑥ アンカー設置手順を図 5.2.12 に示す。

表5.2.2 アンカーチェーンとアンカーワイヤーの水深に対する持ち上がり長さ

水深	3inチェーン	ワイヤー3in
80m	600m	700m
100m	650m	900m
150m	750m	1100m
200m	850m	1400m
300m	1000m	1600m
350m	1050m	1700m
450m	1200m	1850m
500m	1250m	2000m
700m	1400m	2400m
1000m		3000m

## ii) セミサブマージブル型におけるアンカー回収作業

- ① アンカーの回収作業は、アンカー設置の作業の逆の順序にて行ない、4 点のアンカーだけを残す。
- ② アンカーが 4 点だけになったら、潮流、風向等を考慮して曳航直前に回収する採集アンカーを決定し、ワークボートにより掘削装置から 400～500 m 付近に再設置する。これは、最終アンカーを自力で回収するため、アンカーが効き過ぎて自力回収をする場合の困難を排除するためである。
- ③ 図 5.2.13 の 5 段階データグボートに曳航索を接続する。
- ④ 最終アンカーは自力で回収する。

## iii) アンカーチェーンおよびアンカーワイヤーの繰り出し長さ

アンカーチェーン、アンカーワイヤーの繰り出し長さについては、水深により異なる。又チェーンとワイヤーによってもその長さは違ってくる。表 5.2.2 はチェーン、ワイヤーを使った一般例である。しかし繰り出し長さは表 5.2.2 以上の長さを要求され、また海底土質、海象条件によっても違ってくることを留意する必要がある。

\*<sup>2</sup> マイル：海マイルで 1.852km

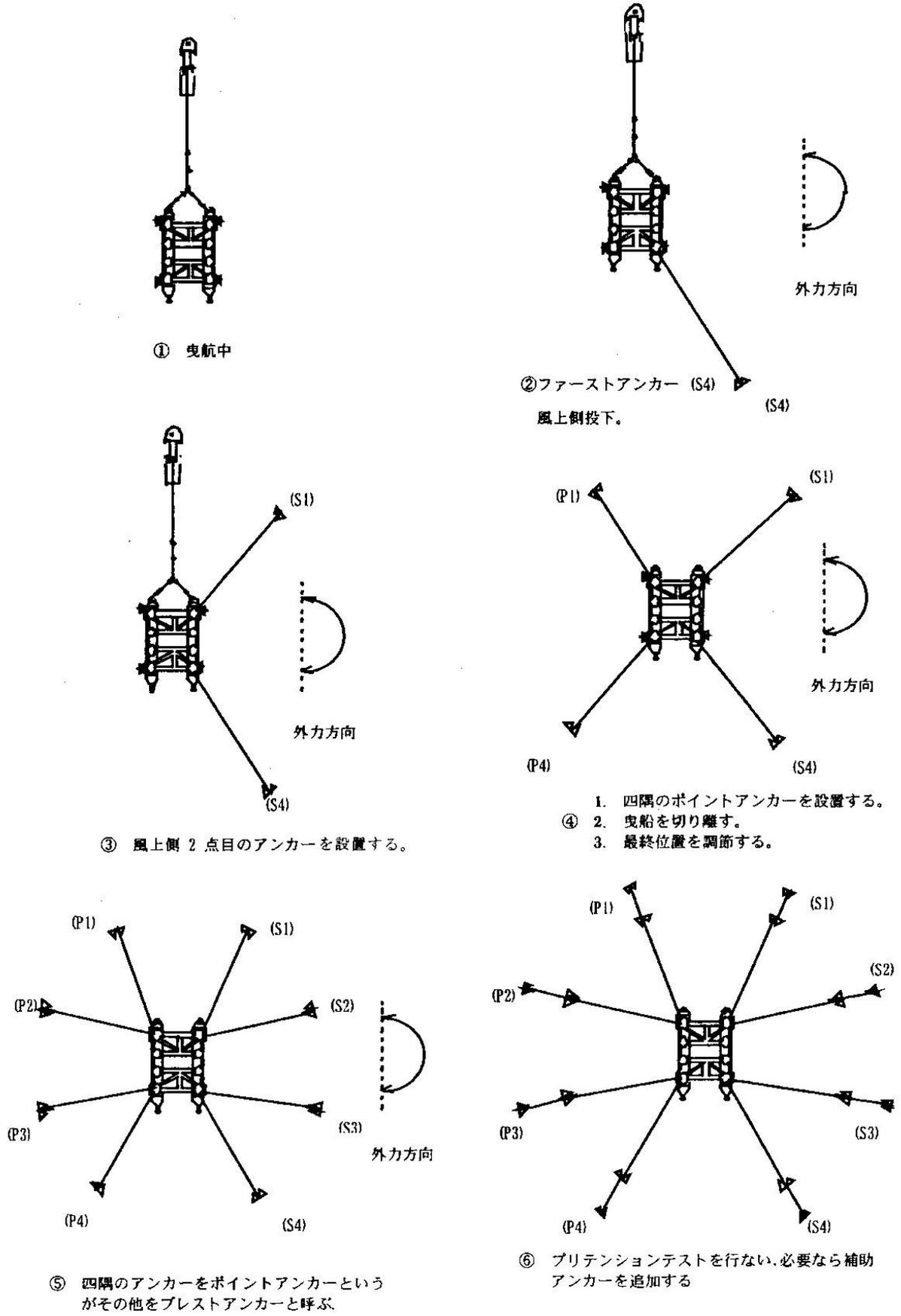


図5.2.12 セミサブマージブル型のアンカー設置作業手順

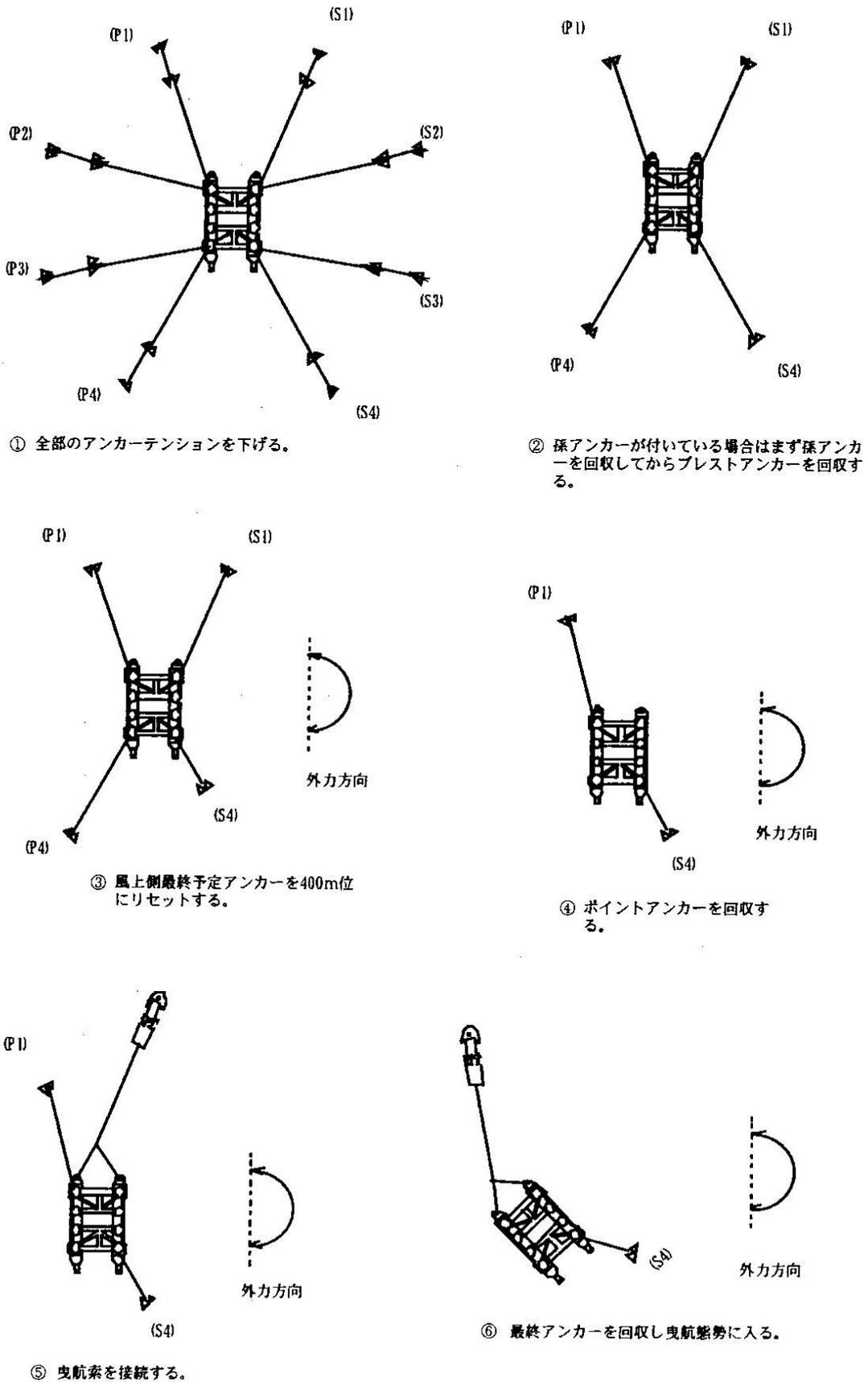


図5.2.13 アンカー回収作業手順

### 2.3.3 ジャッキアップ型掘削装置の進入方法

ジャッキアップ、ジャッキダウン作業は、波高が 1.5 m、または平均風速 10 m を超える場合は行なってはならない。

- ① セミサブマージブル型の進入時と同様、ロケーション位置より、5 マイル手前で低速で航行しながら進入コースに入る。この場合、タグボートが掘削装置をロケーションに正確に導けるように、曳航索はできるだけ短くする。(300~500 m)
- ② 上記①の時点になったら、タグボートおよび掘削装置は、事前調査した水深または海図により、測深器で確認しながら、進入コースに入る。
- ③ 水深を測定しながら、スパッドカンの先端より海底までの間隔を少なくとも 5 m 以上の余裕をとる。したがって航路上の水深に問題がなければ、曳航時の状態から順次レグを降下しながらロケーションに進入する。
- ④ ロケーション位置に、タグボートの船首が通過した時点で、スピードを低速とし、掘削装置の速度を 1 ノット\*<sup>3</sup>以下に落とす。補助タグボート等を使用して振れを修正し、掘削装置が固定できるようであればこの位置でレグダウンして着底する。
- ⑤ 掘削装置がロケーション位置に着底する場合に、補助タグボートを使用しない場合には、ジャッキアップの場合のマーカースイッチ通過時点でアンカーを自力投下する。
- ⑥ アンカーを投下したら、アンカーの効き具合を確認しながら徐々にアンカーワイヤーを繰り出しブレーキする。また海底にパイプライン等の障害物が無い場合にはレグを降下して海底に接触させながらブレーキとして併用する。
- ⑦ レグが着底し掘削装置の前進が止まったら、ハルをジャッキアップしてエアギャップを 1~1.5 m とる。
- ⑧ 残りのアンカーを設置する。この場合セミサブマージブル型と違って、海底に固定してあるため、アンカー設置の順序はどのアンカーからでも良い。
- ⑨ 曳航に使用したタグボートをアンカー設置に使用しない場合には十分余裕をとって緩め、予想に反して天候が急変した場合、掘削装置を直ちに安全な場所に移動できる態勢をとることが望ましい。
- ⑩ 所定のアンカー設置が終了したら、再度ハルダウンし浮遊状態とし（レグを海底から上げる）掘削装置をロケーションに移動する。
- ⑪ アンカー作業とレグの上げ下げで掘削装置をロケーションまで移動したら、アンカーで固定したままレグを降下し着底する。

## 2.4 掘削装置の維持と保守

海洋における掘削装置の維持は陸上の場合と基本的にはほぼ同様であるが、洋上という特殊性のためその範囲は多方面に亘る。ここでは特に陸上と違うと思われる保守・管理を取り上げることとする。

### 2.4.1 腐食

船体を長期に亘り良好な状態を保つことは、船体を腐食から守るということに他ならない。腐食をおこさせないためにペイント、犠牲陽極法等多様な方法があるが、以下に腐食の原理、これに対応する防食の方法を述べる。

金属が化学的、あるいは電気化学的に変質したり、あるいは溶液中に溶け込んだりすることを腐食

---

\*3 ノット：時当たり（海）マイルの速度 例：10 ノット＝時速 18.52 キロメートル

と称している。これらの腐食の形態として、純化学的腐食、電気化学的腐食、応力腐食、疲労腐食、バクテリア腐食等がある。船舶においては、電気化学的腐食によるものがほとんどであると考えられているので、この詳細を以下に記す。

表5.2.3 金属の標準電極電位

金属名	イオン	原子量	標準電極電位 (ボルト)
金	Au+	197.2	+1.50
白金	Pt+++	195.23	+0.86
パラジウム	Pd++	106.7	+0.82
銀	Ag+	107.88	+0.799
水銀	Hg++	200.61	+0.792
銅	Cu++	63.54	+0.345
ヒ素	As+++	74.91	+0.3
アンチモニー	Sb+++	121.76	+0.1
ビスマス	Bi+++	209.0	+0.1
水素	H+	1.003	+0
鉛	Pb++	207.21	-0.132
錫	Sn++	118.70	-0.146
ニッケル	Ni++	58.69	-0.248
コバルト	Co++	59.94	-0.278
カドミウム	Cd++	112.41	-0.397
鉄	Fe++	55.85	-0.426
クローム	Cr+++	52.01	-0.51
亜鉛	Zn++	65.38	-0.762
マンガン	Mn++	54.93	-1.000
アルミニウム	Al+++	26.97	-1.337
マグネシウム	Mg++	24.32	-1.55
ナトリウム	Na+	22.997	-2.723
カリウム	K+	39.10	-2.922

金属は表5.2.3に示すようなそれぞれ特有の電位を持っているので、これらの電位の異なる2つの金属を電解質溶液に浸し電氣的に結合すると、溶液中では電位の低い（すなわちイオン化傾向の大きい）金属は、腐食されることになる。一般的には、電解液の中で相対的に電位の低い金属をアノード、高い金属をカソードと呼ぶけれども、ここではそれぞれを陽極、陰極と呼ぶことにする。このような腐食電気回路は、異種金属間だけでなく以下のような組合せでもおこる。

- 異種金属 — 濃度を異にする同種溶液
- 異種金属 — 温度を異にする同種溶液
- 異種金属 — 溶解酸素量の異なる同種溶液
- 異種金属 — 異種溶液
- 同種溶液 — 同種金属の不純物の存在
- 同種溶液 — 同種金属の内部歪の存在
- 同種溶液 — 同種金属の不均一

このような組み合わせのもとに腐食が進行し、それにつれて陽極面上に腐食生成物（主に陽極金属の水酸化物）が沈積する。また陰極面上には水素や陽極金属が析出して被膜を生じて腐食が減少し最後には止まる傾向にあるものの、実際には溶液の攪拌、加熱、酸素等の作用により、常に活発化し腐食の進行が進む。したがって腐食が進行するためには水ないし海水のような電解質溶液および／あるいは酸素が必要となる。

鉄鋼の海水中的腐食率は、世界各地で行なわれた浸漬試験や構造物の実測値では0.1 mm/年が標準とされているものの、環境条件によって異なり、船舶においては下記の場所の腐食が著しい。

- 海水やビルジの溜まり易い場所
- 常時湿潤で、通風が十分でない場所
- 日常手入れの行き届かない場所
- 水線付近、バラストタンク等乾湿交互作用を受ける場所
- ボイラ室、厨房、蒸気管の付近等、温度の高い場所
- バッテリー室等、酸、アルカリの影響を受ける場所
- アンカー、アンカーチェーン、係留索、荷役索などのために塗膜が摩損する場所
- ビルジキール先端部等、流速が変わり渦を生じ易い場所
- 振動の激しい場所

#### 2.4.2 防食

船舶の腐食は先に述べたことによるのがほとんどであるから、防食の原則は、

- ① 水、酸素が金属面に到達しないようにすること
- ② 電気化学的に防食すべき金属が陰極になるようにすること
- ③ 防食すべき金属を不動態化すること

の3項目となる。以下にこの具体方法を示す。

##### i) 水、酸素と絶縁する方法

腐食しにくい金属によるメッキ等があるが、船舶においてはビルジパイプ、ワイヤーロープ、リングボルト等小物に使用されているのみであり、船体のような大型のものには施工されず、主にペイントによって船体（鋼材）は絶縁されている。

ペイントはその塗膜によって、鋼材の表面に水や酸素が到達するのを防いでいる。しかしながら、実際には塗膜の表面は微視的に見ると塗装時の泡やピンホールのような欠陥などで、完全には絶縁されていない。このような透過性は展色剤や顔料の選択や塗膜の厚さ、下地処理、乾燥過程等によって異なるため、透過性を少なくするよう努力する必要がある。一方、ペイントが透過性を示すのでこの性質を利用して亜鉛を混入し、塗膜が被塗装材の鋼に対して陽極となるようなペイントもある。

また鉄鋼の腐食生成物は水酸化物である場合が多く、その状態ではアルカリに溶けない。したがって鋼の表面をアルカリにし腐食の進行を止めるような塗料もある。

このようにペイントは多様な性質を有するものであるから、塗料の選定、塗装方法等に十分注意を払う必要がある。

##### ii) 電気防食

先の腐食原理に示したように、金属の表面に局部的に陰極と陽極が生じて、電気化学的に腐食するのが大半の船舶の腐食原因である。電気防食はこの金属の表面に発生した陽極よりさらに低い電位の極を設け、もとの金属の表面よりの腐食電流に打ち勝つだけの電流を流すことによって、この腐食電流を消滅させる方法である。この方法としては以下に示す2つの方法があり、これらの優劣は表 5.2.4 の通りである。

###### (1) 流電陽極方式

防食すべき金属より電位の低い金属、たとえば、鉄に対してはアルミニウム、マグネシウム、亜鉛等の陽極を電線などで繋ぎ、この両金属間で発生する電流を防食電流として利用する方式である。この場合低電位の金属（流電陽極）からは電流と共に金属イオンが溶出し時間と共に消耗してゆく。

###### (2) 外部電源方式

腐食液中または土壌中に電源を設置して、これを外部の直流電源のプラス端子に、また、被防食体

をマイナス端子にそれぞれ繋ぎ、電極から防食すべき金属面に向かって電解質を通して防食電流を流入させる方式である。設置すべき電極には鉛銀電極、磁性酸化鉄電極、珪素鉄電極、白金電極、炭素電極等種々あり、施設の状況によって適切なものを選定する必要がある。

表5.2.4 防食方式の優劣

項目	流電陽極法	外部電源法
(1) 電源	電源自給であるから取付ただけでよい	常時外部の電源を必要とする
(2) 電流範囲	調節範囲が狭い、そして表面積の大きさに影響される	広範囲に電流を調節し得る
(3) 調節	Znには電位をある程度自然に調節する作用があるがMgは少ない	自然的な調節は無いが人工的に自動制御装置が可能である
(4) 設備	簡単である	整流器、電流計、抵抗器、電極配線等を必要とし、装備、操作とも複雑であり、誤ると致命的になることがある
(5) 経費	設備費は少ないが発生電流に対する単価は高くなる	設備費は高いが発生電流単価は安い
(6) 使用液体	海水等比抵抗の低い液体では使用できるが清水には不適である	比抵抗の比較的高い液体でも使用しうる
(7) その他	たびたび取替える必要がある 重量が大きい 配線の場合はその抵抗が影響する	取替える必要は少ない 出力の割に小さい 導線抵抗の影響はない

### 3 掘削用装置および機器

#### 3.1 概要

浮遊式の海洋掘削装置（セミサブマージブル型、ドリルシップ型）では、陸上や着底式の海洋掘削装置（ジャッキアップ型）とは異なる設備が必要になる。浮遊式掘削装置は風、波、潮流などの影響を受け常に動揺しており、この動揺を吸収する必要がある。ここでは浮遊式掘削装置に使用する特殊装置および機器、特にサブシー噴出防止装置（ブローアウトプリベンター（BOP））システム、ライザーテンショナー、ドリルストリングモーションコンペンセーターなどについて簡単に説明する。

#### 3.2 サブシーシステム

坑口および防噴装置を水面上に設置できない浮遊式掘削装置においてはこれらを海底面に設置し、海面上の海洋掘削装置と接続できる海底坑口装置（サブシーシステム）を使用しなければならない。このサブシーシステムはウェルヘッド、サブシーBOP スタック、ローアマリンライザーパッケージ（LMRP： Lower Marine Riser Package）、ライザーパイプに大別される。代表的なサブシーシステムを図 5.3.1 に示す。

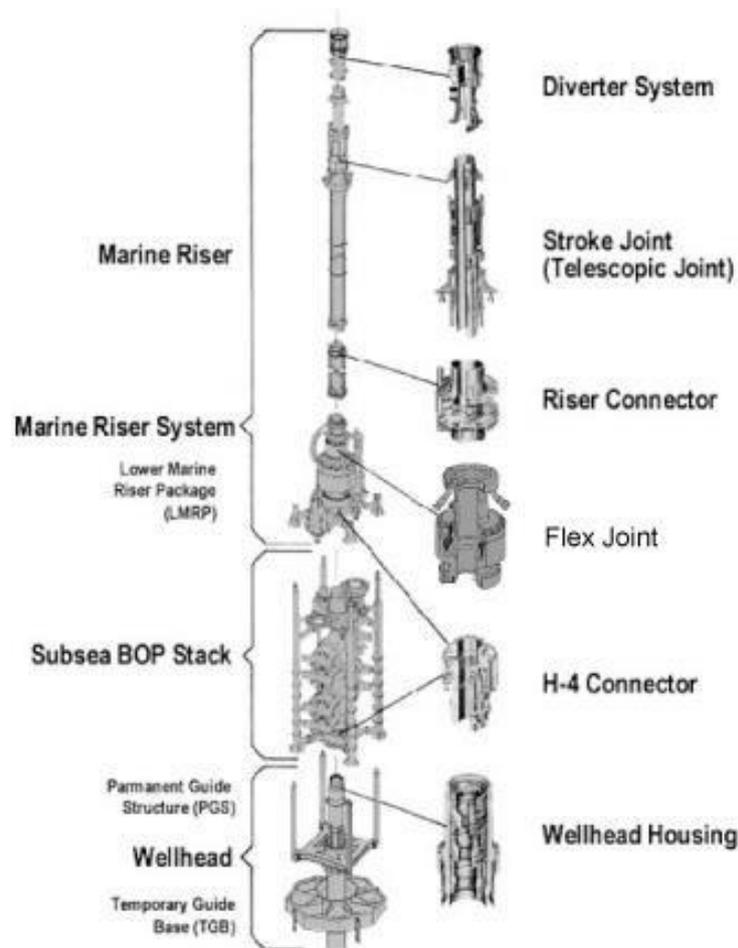


図 5.3.1 サブシーシステム（出典 ABB Vetco Gray）

##### 3.2.1 サブシーウェルヘッド

サブシーウェルヘッド、坑口装置は陸上のものと比較して極めて大きく、様々なサイズのケーシングを設置できるだけでなく、100 トン以上にもなる BOP を支える土台になるものである。ここでは、代

表的なサブシーウェルヘッドとして ABB Vetco Grey 社の SG ウェルヘッドシステムを例として示す。海底面上には最初にテンポラリーガイドベース (TGB : Temporary Guide Base) が設置され、ここから 36 in. (914.4 mm) 坑が掘削される。TGB には 4 本のガイドラインが取り付けられており、このガイドラインワイヤーに沿って、ドリルパイプが降下されることになる。

その後、パーマネントガイドストラクチャー (PGS : Permanent Guide Structure) に 30 in. (762.0 mm) ケーシングとウェルヘッドハウジングが取り付けられて降下される。この 30 in. (762.0 mm) のウェルヘッドハウジングには 20 in. (508.0 mm) ケーシングと共に、18-3/4 in. (476.3 mm) のウェルヘッドハウジングが据え付けられ、その上にサブシーBOP スタック、LMRP およびライザーパイプが設置される。これらが設置された後は、全てのケーシングがこのシステム内を通過して、18-3/4 in. (476.3 mm) のウェルヘッドハウジング内に吊り下げられることになる (図 5.3.2)。

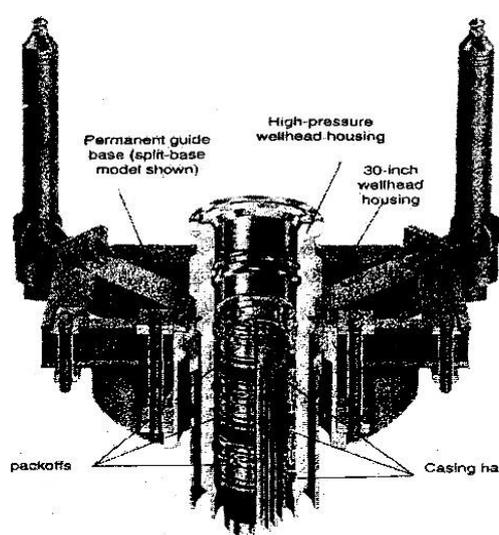


図 5.3.2 SG5 ウェルヘッドシステム (出典 ABB Vetco Gray)

### 3.2.2 ブローアウトプリベンター (BOP) および LMRP

浮遊式掘削装置の BOP は海底面上に設置される。この BOP は一般的にサブシーBOP スタックと呼ばれ、複数の BOP を組み合わせた装置となっている。総重量は 100 トン以上にもなる。図 5.3.3 は典型的なサブシーBOP スタックの構成例を示している。

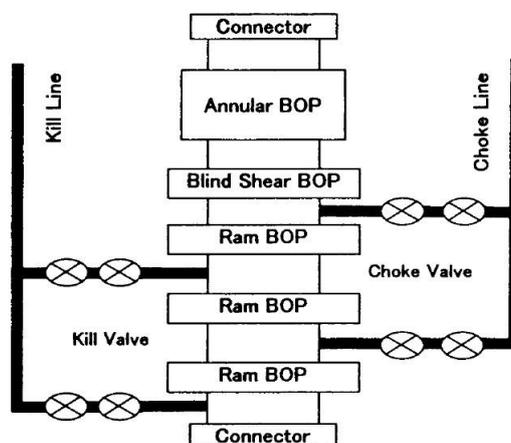


図5.3.3 サブシーBOP スタックの構成例

サブシーBOPの耐圧はアニューラー型BOPが5,000 psi (34.5 MPa) でラム型BOPが10,000 psi (69.0 MPa)、サイズは18-3/4 in. (476.3 mm) のものが一般的であるが、高温高圧坑井などでは、15,000 psi (103.4 MPa) のものが使われることもある。

サブシーBOPスタック本体は、1つのアニューラー型BOPと1つのシア（ブラインド）ラム型BOP、3つのパイラムBOP、チョークライン、キルラインのポートをそれぞれ有しているのがこれまで一般的であったが、大水深化に伴いシアラムを含めて5~6つのラム型BOPを装備するBOPスタックも増加している。また2012年に改訂されたAPIでは、2セットのシアラムを装備することを基本事項としている。このように海洋では、BOPスタックが海底に位置し陸上の場合に比べて簡単にBOPの修理やラムの交換ができないため、バックアップ用として複数のBOPを有する構成になっている。BOPの構成は場合によりドリルパイプ用のラムの他、ケーシング用、小径ドリルパイプ用のラムがあらかじめ取り付けられているものもある。

更にラム型BOPには、ラムロックが取り付けられており、クロージング圧力がなんらかの理由でなくなってもラム型BOPが開くことがないように安全機構を有している。

チョークライン、キルラインのポートはサブシーBOPスタックによってその位置や数は異なるが、最近ではそれぞれが2つのポートを持つものが一般的となっている。それぞれのポートにはサブシーゲートバルブがそれぞれバックアップ用を含めて2つずつ備え付けられている。

LMRPは、サブシーBOPスタックの上部に油圧式コネクターにより接続されるものであり、荒天候などで海洋掘削装置の動揺により作業の継続が出来ない場合、また緊急時にはBOPスタックに組み込まれたシアラムでドリルパイプを切断し、このコネクター部からLMRPより上部を切り離しロケーションから離脱できるようになっている。

LMRPは、アニューラー型BOP、フレックスジョイントおよびコネクターで構成されている。LMRPに取り付けられているアニューラー型BOPは、通常の坑井作業で最も使用されるものである。これは、LMRPの回収が比較的簡単に行え、アニューラー型BOPのバグ（シールエレメント）の損傷に対しても比較的簡単に交換が可能であることに起因している。一方、フレックスジョイントは海洋掘削装置の水平変位や潮流によるライザーパイプの引張応力・曲げモーメントを緩和する装置で、全方向に10度まで傾斜可能である。フレックスジョイントはボール型のものが使われていたが、現在はシングルフレックス型のものが一般的であり（図5.3.4）、常に動いても泥水の漏れがなく、引張力・曲げモーメントに対して十分な強度をもっていなければならない。

### 3.2.3 ライザーパイプ

ライザーパイプは海底坑口装置から海面上に浮遊している海洋掘削装置までを連結するためのパイプである。ライザーパイプは16 in. (406.4 mm) または21 in. (533.4 mm) 等の呼び外径(OD)が一般的で、種々な長さのものがある。ライザーパイプにはその両側にキル・チョークラインが取り付けられている。水深が増すと浮力材を適切な箇所に取り付ける。浮力材としては空気タンク、プラスチック球を埋め込んだシンタクティックフォーム等がある。ライザーパイプを用いて海底坑口装置

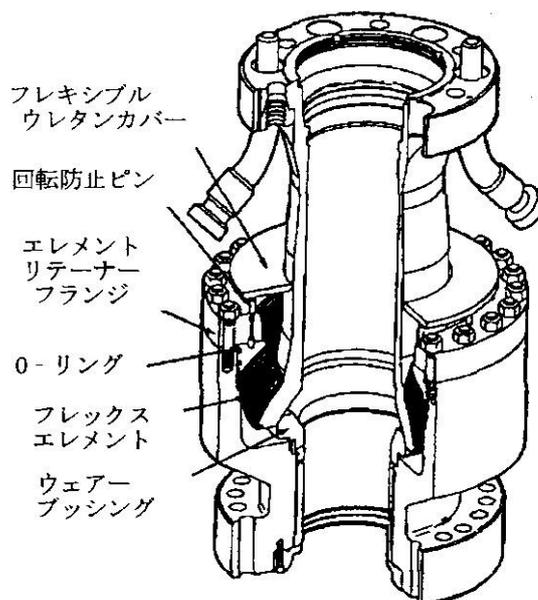


図5.3.4 フレックスジョイント

(出典 ABB Vetco Gray)

と海洋掘削装置間を連結することにより、掘削した地層のカッティングスを回収し、泥水による坑壁の安定性を保つことができる。

### 3.2.4 ストロークジョイント（テレスコピックジョイント）

ライザーパイプは海底に固定しているブローアウトプリベンター（BOP）に接続されているため、海面上で常に上下動している浮遊式掘削装置にそのまま固定することはできない。この補償装置となるパイプが、ストロークジョイントである。ストロークジョイントは二重管構造で、インナーバーレル、アウターバーレル、パッキン等から構成される（図 5.3.5）。インナーバーレルは、その頂部にベルニップル（ダイバーター）が接続され、ロータリーテーブル下に吊り下げられているため、浮遊式掘削装置と同じ動きをする。アウターバーレルの下部はライザーパイプに接続され、上部はライザーテンショナーによりある一定の力で吊られている。したがって掘削装置が上下動すれば、インナーバーレルがアウターバーレル内を上下し、掘削装置の上下動は吸収される。また、アウターバーレルには、キルライン、チョークラインの末端が付属している。

浮遊式掘削装置の上下動は大なり小なり常に生じているため、アウターバーレル内のストローク部からの泥水の漏れを防ぐパッキンが必要となる。このパッキンはアウターバーレル内にあり、海洋掘削装置上のコントロールパネルにより圧力が掛けられている。したがってパッキンはインナーバーレルによって磨耗を受けるが、圧力調整により、この磨耗が最小限になるようにし、またパッキンは、取替が容易にできるように設計されている。

### 3.2.5 ライザーテンショナー

ライザーテンショナーはフレックスジョイントから上のライザーパイプ重量を、ストロークジョイントのアウターバーレルに接続されたワイヤーにより、浮遊式掘削装置の上下動にかかわらず一定の張力で吊り上げ、ライザーパイプが限界以上に湾曲しないように維持する装置である。ライザーテンショナーの型式には種々のタイプがある。アキュムレーター内の高圧オイルには、蓄圧エアボトル内のエア（コントロールパネルにより圧力を設定する）により圧力が掛けられている（図 5.3.6）。ストロークジョイントに取り付けられているワイヤーが、バージの上昇により引張られ、張力が増加しようとするときアキュムレーター内のエア圧力は一定に保たれているので、シリンダー内のオイルはピストンにより押し出されてアキュムレーターに送られ、ワイヤーはテンショナーから出て行き、ワイヤーの張力は一定に保たれる。また、逆の場合にはピストンが伸びてワイヤーが巻き込まれる。蓄圧エアボトル内に、算定されたワイヤー張力に相当するエア圧力を掛けておけば、アキュムレーター内にも一定圧が掛かり、ワイヤーの張力

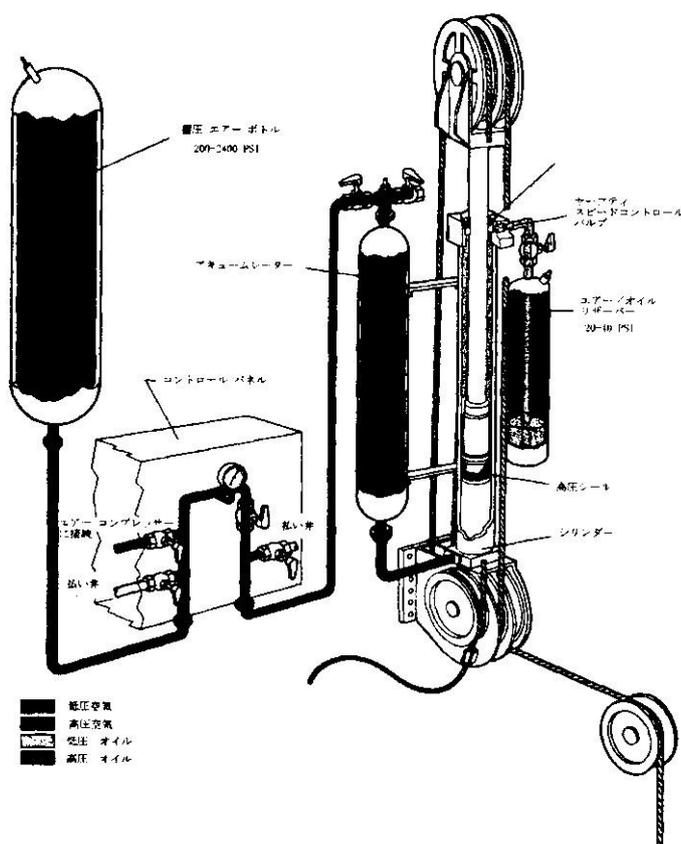


図5.3.6 ライザーテンショナーの仕組み  
(出典 Varco Shaffer)

変化に応じてピストンが上下し、ライザーパイプに一定の張力が常時与えられる。

一般にこのテンショナーは 15 m までの上下動に対処できる。ピストン位置にかかわらず圧力の差を少なくするために大容積の高圧ポンペを備えている。テンショナーの能力は普通 1 個当たり張力 8 万～25 万 lbs だが、大水深掘削用として 80 万 lbs まで利用可能である。ライザーパイプは海洋掘削装置の動揺や潮流の影響を受けて湾曲する。そのためフレックスジョイントの角度に大きな影響が出る。フレックスジョイントの角度はライザーの張力を増せば小さくなるが、テンショナーの能力や、パイプの強度などによって限界がある。掘削時や暴風時において安全に作業が行えるように、様々な外力条件(海洋掘削装置の変位、潮流の強さ、泥水比重、水深など)によって、ライザーの挙動解析を行い、作業限界基準を求めることが必要になっている。

### 3.2.6 ガイドラインテンショナー

ガイドラインは掘削作業開始時に海底坑口装置と海洋掘削装置を結ぶワイヤーとして用いられるもので、海底に最初に設置される TGB に接続されている。このガイドラインに張力を与えるものがガイドラインテンショナーであり、機構はライザーテンショナーとほぼ同じである。

水深 500 m 以上の大水深になると、ガイドラインレスのサブシーBOP システムが使われることが多い。

大水深掘削においては、通常のガイドラインを使用する方式ではガイドワイヤーが切断した場合に海中での復旧作業が潜水技術等の問題により非常に困難であるため、TGB に大きなファンネルを付け、場合により水中テレビカメラ、水中音波探知機(ソナー)を単独または併用したエントリーシステムが採用され、ガイドラインは使われない。

### 3.2.7 サブシーBOP コントロールシステム

海洋における BOP コントロール装置の特徴は、多くの BOP 装置を瞬時に開閉しなければならないこと、あらゆるトラブルに対するフェイルセーフの機構を有していなければならないことに代表される。海底面に BOP が設置されるため、陸上とは異なり、そのコントロールラインは水深に比例して長くなり、海洋掘削装置上で BOP 開閉を指示してから実際に BOP が開閉するまでの時間を如何に短くするか様々な工夫が成されている。

通常、BOP コントロールラインは 2 系統以上を有し、トラブルを回避するシステムになっている。BOP コントロールラインにはいくつかのタイプがあり、水深が 1,000 m 程度までであれば、ハイドロリックコントロールによるものが一般的である(図 5.3.7)。大水深になると、エレクトロハイドロリックマルチプレックスシステムが使われる。このシステムでは、海洋掘削装置上における BOP の開閉操作がケーブルを伝わって電気信号により海底面上に設置された BOP まで届けられる。その電気信号により BOP 上に備え付けられたコントロール装置が作動し、ハイドロリック液体が実際に BOP を開閉するようになっている。

ハイドロリックコントロールでは、次のように BOP が開閉する。BOP コントロールパネル上である BOP をクローズするボタンを操作すると、ソレノイドバルブによりエアシリンダーがアキュムレーターマニフォールド上の 4 ウェイバルブを動かす。4 ウェイバルブにより高圧のハイドロリック流体がパイロットラインを通過して BOP 上のサブシーポッドまで送られる。ポッドの中のハイドロリックバルブをこのパイロット圧力が動かすことにより、パワーラインからの圧力によって BOP を実際にクローズすることになる。一度に何度も BOP 開閉を行うと蓄圧された圧力の降下が激しくなり、適正な圧力による作動が妨げられるので、アキュムレーターボトルも数多くサブシーBOP スタック上に取り付けられている。

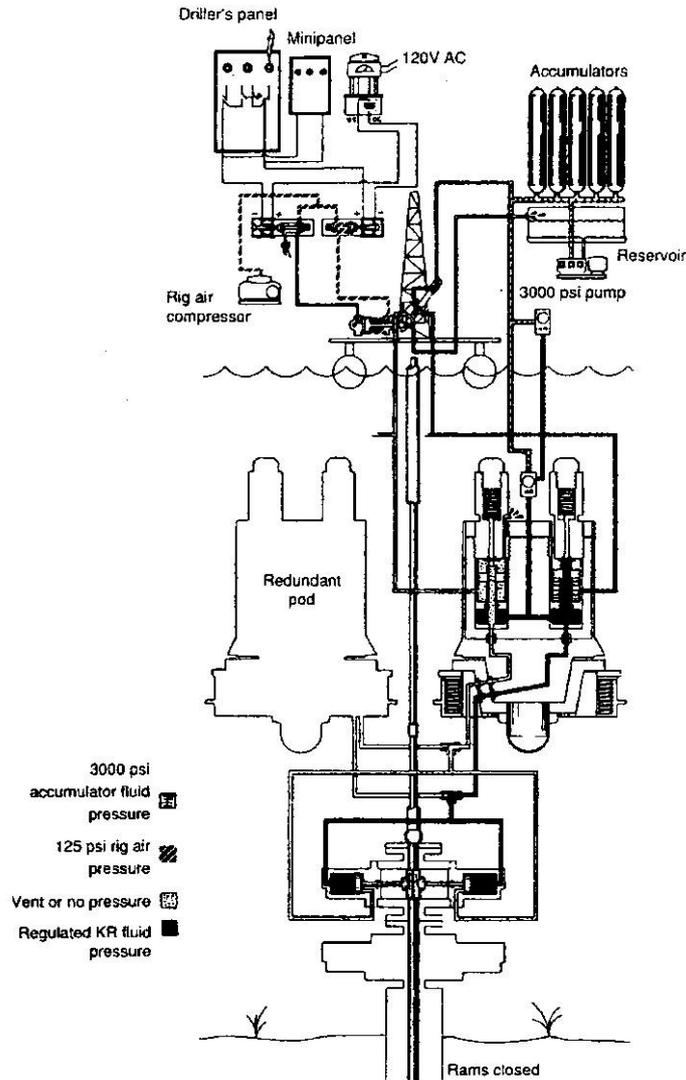


図5.3.7 サブシーBOP リモートコントロールシステム

この他にアコースティックバックアップコントロールシステムというものがある。これは、他のBOPコントロールシステムが機能しない場合に、最後の手段として使われるもので、海洋掘削装置より発信した音波によりBOPの開閉、ライザーコネクタおよびウェルヘッドコネクタのディスクコネクタを行うシステムである。音波はサブシーBOPスタックに据え付けられた hidroフォンで受信される。全てのBOPの開閉が可能なのではなく、3つのラムの開閉と先に述べたコネクタのディスクコネクタのみに制限されている。

### 3.3 ヒープコンペンセーター

浮遊式掘削装置による海洋掘削の場合、波浪などの影響を受けて海洋掘削装置が上下動(ヒープ)し、それに伴いドリルストリングも上下動するため、ビット荷重を一定にすることが困難となる。ヒープコンペンセーターはこのような外力による海洋掘削装置の上下動を吸収して一定の荷重をビットに与えるための装置である。

基本的に機構はライザーテンショナーと同じであるが、取り付ける位置や構造によって、大きく二つのタイプに分類される。ドリルストリングモーションコンペンセーター(図5.3.8)とクラウンマウントモーションコンペンセーター(図5.3.9)である。前者は、トラベリングブロックとフックの間に

備え付けられる。後者はクラウンブロック上に設置されるものである。

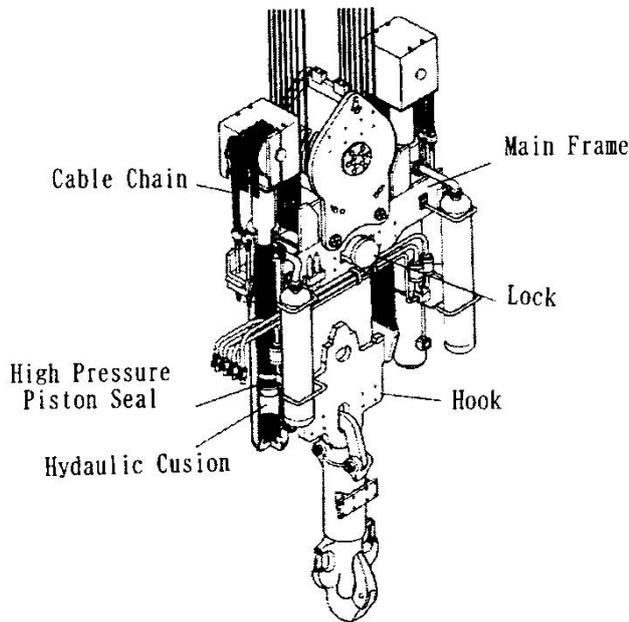


図5.3.8 ドリルストリングモーションコンペンセーター  
(出典 Varco Shaffer)

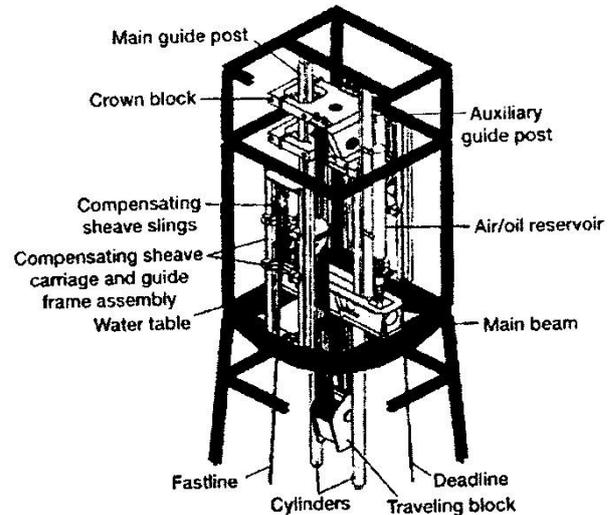


図5.3.9 クラウンマウントモーションコンペンセーター  
(出典 Varco Shaffer)

### 3.4 ポジションインジケータ、ライザーアングルインジケータ

浮遊式掘削装置は海上に浮いているので、これらによる掘削作業において重要となる問題は、いかにして陸上の掘削のように安定した状態を創りだすかということであり、掘削装置をその掘削期間中、一定の範囲内に保持しておくということを第一に考える必要がある。その際に必要となるのが、高い精度を持ったポジションインジケータである。これを用いて、海洋掘削装置の坑井中心と海底の坑井芯のずれを検知する。

このポジションインジケータには種々のタイプがあるが、最も一般的なものは、ビーコン方式によるもので、そのシステムは以下により構成されている。

- ① ビーコン
- ② ハイドロフォン
- ③ 信号処理装置
- ④ 補正装置
- ⑤ 表示装置

ビーコンは海底の定点となる場所に設置（普通 PGS に設置）され、超音波のパルス信号を発信する。この信号は掘削装置上のハイドロフォンで受信され、信号処理装置、補正装置を経て、表示装置に位置の方向と距離の変化が表示される。この表示にしたがって、係留ラインまたはスラスタにより位置を修正することが出来る。

しかし、浮遊式掘削装置による掘削では位置変化の測定だけでは不十分であり、ライザーパイプの傾斜（実際はフレックスジョイント直上のライザーパイプの傾斜）も測定する必要がある。この測定装置が、ライザーアングルインジケータで、これにより、フレックスジョイント直上のライザーパイプの傾斜および傾斜方向を知ることができる。

ライザーアングルインジケータのシステムはポジションインジケータと同様である。こうして

ライザーアングルを検知することができ、それにより位置を修正したり、ライザーテンションを変えたりして、ライザーアングルを修正する。この結果、ドリルパイプ、ライザーパイプ、フレックスジョイント、サブシーBOPスタック、などの破損、磨耗を最小にすることが可能になる。

### 3.5 水中テレビジョンシステム

浮遊式掘削装置の場合、坑口装置が海底にあり、簡単に監視することはできない。しかしながら、浮遊式掘削装置による掘削作業において坑口監視は非常に重要である。したがって水中テレビジョンシステムを常備し、海洋掘削装置と坑口装置との相互関連作業その他各種作業の円滑化を図っている。

水中テレビジョンシステムは、水中テレビカメラ（フレーム、ガイドライン用ガイド、水中ライト等が付属）、水中ケーブル、ケーブルウィンチ、カメラのコントロールおよびモニター用コンソールより構成されている。水中テレビカメラはフレームに固定され、TGB に接続されている 4 本のガイドラインのうちの 2 本あるいは水中テレビカメラガイド用に特別に TGB に接続されているガイドライン 2 本によりガイドされる。ガイドラインのないときは、フレームにシンカー（おもり）が取り付けられ、海中で流されないようにする。カメラに入った映像の信号はカメラのフレームを吊っている水中ケーブルを通してコンソールに付属しているモニターに入り受像される。映像状態はコンソールで調整され、水中テレビカメラの上下左右、焦点等もコンソールで調整される。

この水中テレビジョンシステムにより以下の確認、検査等ができ、作業を円滑に進めることができる。

- ① TGB の設置状態、傾斜等
- ② 浅層ガスの監視
- ③ 開坑後のドリルストリングのリエントリー
- ④ PGS の装置
- ⑤ ケーシング降下時の状況
- ⑥ BOP 設置状態、傾斜、コネクター、作動等
- ⑦ フレックスジョイントの傾斜
- ⑧ キル・チョークライン、BOP、BOP コントロールホース、ライザーパイプ等の漏洩、破損の検査
- ⑨ 海底への遺留物確認
- ⑩ その他各種海中設置装置の点検

これらの確認、点検はテレビの特性上対象物を総括的に促えることが困難であるため ROV (Remotely Operated Vehicle) が不可欠なものとなってきている。特に大水深掘削では上記の作業はテレビに代わり ROV が行っている。

### 3.6 ROV (Remotely Operated Vehicle)

ROV は、その技術的な進歩により、安全性および経済性の面から、80 年代より徐々にダイバーによる潜水作業・飽和潜水作業に替わり、現在海洋掘削で頻繁に使用されている。小型のアイボールタイプからワーククラスまで種々のタイプがあるが、海洋掘削ではマニピュレータを装備したワーククラスが多用されている。通常ダイバーが行う作業に加えて、長時間に渡る海底広範囲における遺留物の捜索および引き上げ作業や、ドリルストリングのリエントリーのアシスト等の作業を行える。また、API では、シアラムのクローズ、LMRP のアンラッチ等、クリティカルな BOP コントロール機能については、ROV が実施できるように要求している。

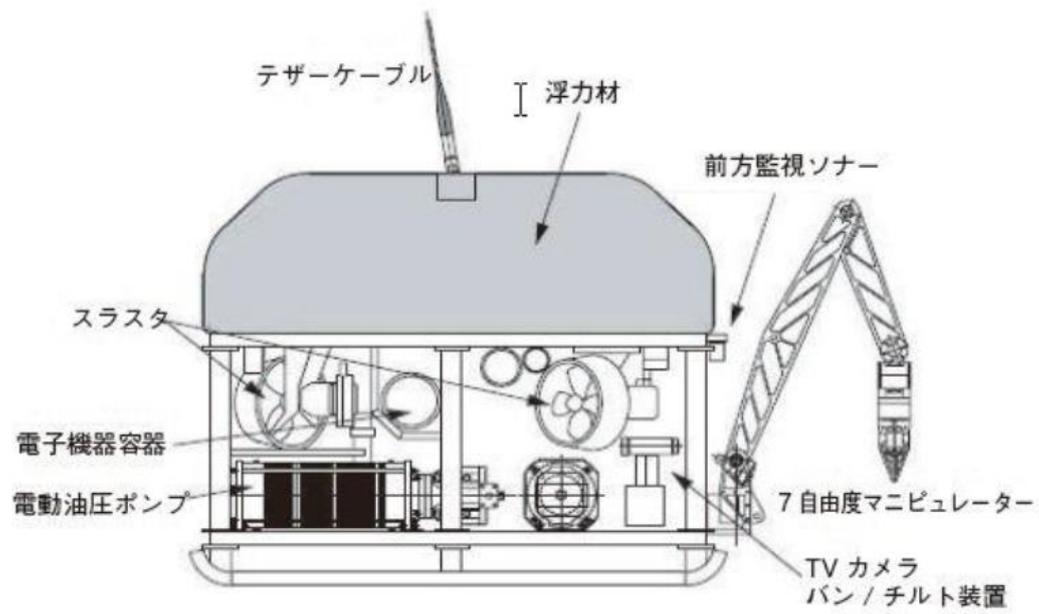


図 5.3.10 ワーククラス ROV (出典: 石油・天然ガスレビュー 2006.9 VOL. 40 No. 5、水深 2,000m を超えた生産井—油・ガス田開発の進歩、執筆者: 佐尾邦久)

## 4 海洋掘削の保安

### 4.1 保守管理

#### i) 通常時

海洋掘削装置は、船舶安全法に定められている定期的な法定検査を受検して船舶としての安全性を維持することが義務付けられている。また、日本国内で掘削作業を行うときには、新しく移動した地点で作業を開始する前に鉱山保安法に定める検査を受け、これに合格し、掘削作業を行う機械、器具等施設の安全性に関する承認を受けなければならない。更に作業期間を通して鉱山保安法施行規則に基づき保安管理者および各種作業監督者を任命し、定期的に施設を点検し、その結果を検査表に記録する。不良、不具合箇所を発見した場合は、直ちに修理、取り替えを行い、何時でも使用出来る状態を維持しなければならない。

また、海洋掘削装置が固定されている時には、非常事態に備えて、全搭乗員の救助に使用することができる救助船（スタンバイボート）を常に配置しておかなければならない。

#### ii) 緊急時

##### (1) 緊急時人員配置

海洋掘削装置には、火災、暴噴など乗員の退船を要する緊急事態が発生した場合に、誰がどのような役割を負って行動しなければならないかを定めた緊急時人員配置表が掲示されており、乗船者は必ずこれに従わなければならない。

##### 1) 火災

非常ベルおよび船内放送により火災場所が伝えられると予め編成された消火チーム（1～2 チーム）が出動し消火作業を行う。消火チーム以外の乗船者は直ちに救命胴衣を装着し所定の場所に集合する。予め定められた担当者によりスタンバイボートおよび陸上基地への連絡が行われる。

##### 2) 暴噴

非常ベルおよび船内放送により掘削または改修作業中の坑井から油またはガスの噴出があることが伝えられる。

居住区以外の火気の使用が禁止され、ガスの流入を防止するために各ドア、ハッチなどが閉められる。

掘削監督の指示のもと、掘削クルーは坑井からの噴出を抑制する作業を行う。他の乗船者は直ちに救命胴衣を装着し所定の場所に集合する。担当者によりスタンバイボートおよび陸上基地への連絡が行われる。

##### 3) 総員退船

非常ベルおよび放送により全員が救命艇で脱出避難しなければならないことが伝えられる。指揮者、電源・動力の停止に関わる者以外は直ちに救命胴衣を装着し救命艇前に集合する。

スタンバイボート、陸上基地へ連絡し、電源、動力が停止され全員救命艇に乗船、脱出する。

##### (2) 非常ベル、警報

火災、暴噴、退船など緊急事態が発生した場合、非常ベル、警報、船内放送などにより乗船者に伝えられる。

①火災	— — —	3 秒間吹鳴	1 秒停止を繰り返す
②暴噴	— — —	3 秒間吹鳴	1 秒停止を繰り返す
③総員退船	—————	連続吹鳴	
④解散	- - - - -	1 秒吹鳴	一秒停止を 3 回繰り返し 2 秒停止後繰り返す

図5.4.1 非常ベル例

### iii) 訓練

毎週または定期的に非常事態を想定しての訓練が繰り返し実施される。

#### (1) 消火訓練

あらゆる場所での火災を想定し、ベルが鳴り、船内放送で火災発生が告げられる。消火チームは直ちに消火ホースの準備をする。消火チーム以外の乗船者は救命胴衣を装着し所定の場所に集合、点呼が行われる。

火災場所での怪我人、行方不明者の有無が調査され、消火チームは放水訓練に入る。

#### (2) 退船訓練

ベルが鳴り、船内放送で退船が告げられる。乗船者は救命胴衣を装着し、救命艇前に集合、点呼が行われる。

全員集合したことを確認後、救命胴衣の装着状況の確認が行われる。通常は救命艇エンジンの始動、および無人で救命艇を途中まで降下させる訓練が実施される。また救命艇の固定装置を取りつけた状態での救命艇への乗り込み、座席ベルトの装着なども行われる。

#### (3) 溺者救助訓練

作業その他の理由で海中へ落下した者が出たことを想定し、人形などが投下される。

発見者は直ちに救命浮環などを投下すると共に他のクルーの協力を得て無線室などへ連絡する。

無線係はスタンバイポートへ連絡し、救助の要請をする。救助された者を引き上げられるようクレーン、人員バスケットが準備され、ドクターが待機する。

#### (4) 暴噴訓練

ベルが鳴り、放送されると居住区以外での火気の使用は禁止され、ドア、ハッチなどが閉められる。

指揮者および暴噴の抑制作業に携わるクルー以外の者は救命胴衣を装着し、決められた場所に集合、点呼が行われる。無線係はポートへ連絡し風上での待機を要請する。

暴噴の抑制が出来なくなったとの想定で退船訓練へ切り替わることもある。

## 4.2 保安設備

### i) 消火設備

海洋構造物または海洋掘削装置では、初期消火を怠ると逃げ場を失い大災害につながる可能性が非常に高い。

したがって消火設備は十分に考慮して配備する必要がある。海洋構造物または海洋掘削装置上の消火方法も他の施設同様、基本的には「燃える物・熱・酸素」の火災の3原則を火災場所から素早く除去または冷却するものである。使用機器、燃料・油脂類の保管量等により関連法の下にそれぞれの施設の

火災に適した消火設備の種類、数量が配備される。

(1) 消火装置泡消火装置

大型の泡消火装置が主にヘリコプターの離着陸時の事故に備えて設置されている。

大量の燃料火災事故に対し、消火ポンプを運転することにより、タンクに蓄えられた消化液と海水が混合、泡を発生、ノズルから噴出させ火災の冷却および空気を遮断する効果により消火する。

(2) 炭酸ガス消火装置

エンジンルーム、電気設備、ペイント、シンナー等引火性の強い油脂類保管場所の火災の際に火災区画を密閉し、外部からの遠隔操作によりポンペに充填されている炭酸ガスを火災区画に噴射し、区画内の冷却と酸素濃度を低下させ消火する。

(3) スプリンクラー

事務所、居室など居住区域に備え、火災の熱でバルブ先端部分が溶融すると自動的にノズルから水が噴霧され消火する。

(4) 消火ポンプ

通常火災の際、自動または手動操作で運転され、火災場所近くの消火栓を通して海水を供給する。

(5) 消火器

1) 泡消火器（通常火災）

- ① 消火器内下部に消火液、上部にはガスまたは空気の圧力が掛かっている。ピンを抜きレバーを握ると、ガスと液が混合され、ホース先から泡が噴出される。
- ② 消火器内下部に消火液、上部には炭酸ガスポンペを内蔵、消火器を逆さまにし、床にプランジャーを打ちつけると、シアピンが切れ、ガスと消火液が混合されて泡が噴出する。

2) 粉末消火器（通常火災、油火災、電気火災）

- ① 消火器内下部に粉末消火剤、上部には炭酸ガスポンペを内蔵し、ピンを抜きレバーを握るとガスにより消火剤が噴出される。
- ② 消火器内に粉末消火剤があり、外部に炭酸ガスのボンペが付いている。ボンペ元のピンを抜き、レバーを押すと、ガスが消火器内に入り、ホース先から消火剤が噴出される。

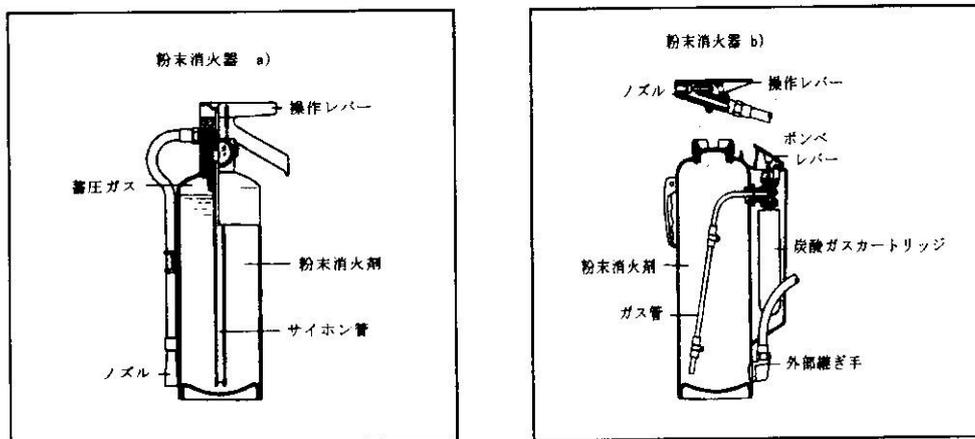


図5.4.2 粉末消火器

3) 炭酸ガス消火器（油火災、電気火災）

炭酸ガスが消火器内に着圧されている。消火器内部のピンを抜き、レバーを握ると、ホース先か

ら炭酸ガスが噴出する。

4) 窒素ガス操作型粉末消火器（ヘリポート、エンジンルームに配置）

車輪付きの大型消火器（重量 34～159 kg）で蓄圧された窒素ポンベのバルブを開けるとガスが消火器内に送られ、消火剤と混合し、ホース先から消火剤が噴出される。

(6) その他

1) 消火ホース

キャンバス、ナイロン、レーヨン、ビニル、合成繊維製などがあり 15 m 位の長さで十分に柔軟性があり、高圧に耐え、取り扱い易い物でなければならない。接続カップリングは砲金や真鍮の合金製で着脱が容易で錆び難いものを使用している。

2) ホースノズル

ストレートに噴出される物とノズル元のハンドル操作で噴霧状とストレートの併用できる物などがある。

3) ハンマー、斧

消火作業のため、火災場所を破壊する必要がある場合は斧またはハンマー等を使用する。

ii) 救命救難設備

(1) 救命艇（ライフボート）

海洋掘削装置上での火災、暴噴、その他緊急避難を要する場合に使用する。

技術基準省令の技術指針では全搭乗員の2倍以上に相当する数の人員を収容することができるライフボートまたは救命いかだを備える事が要求されている。救命艇内には法定備品として、水、食料、医薬品、緊急信号、トランシーバーなどを備えることが要求されている。

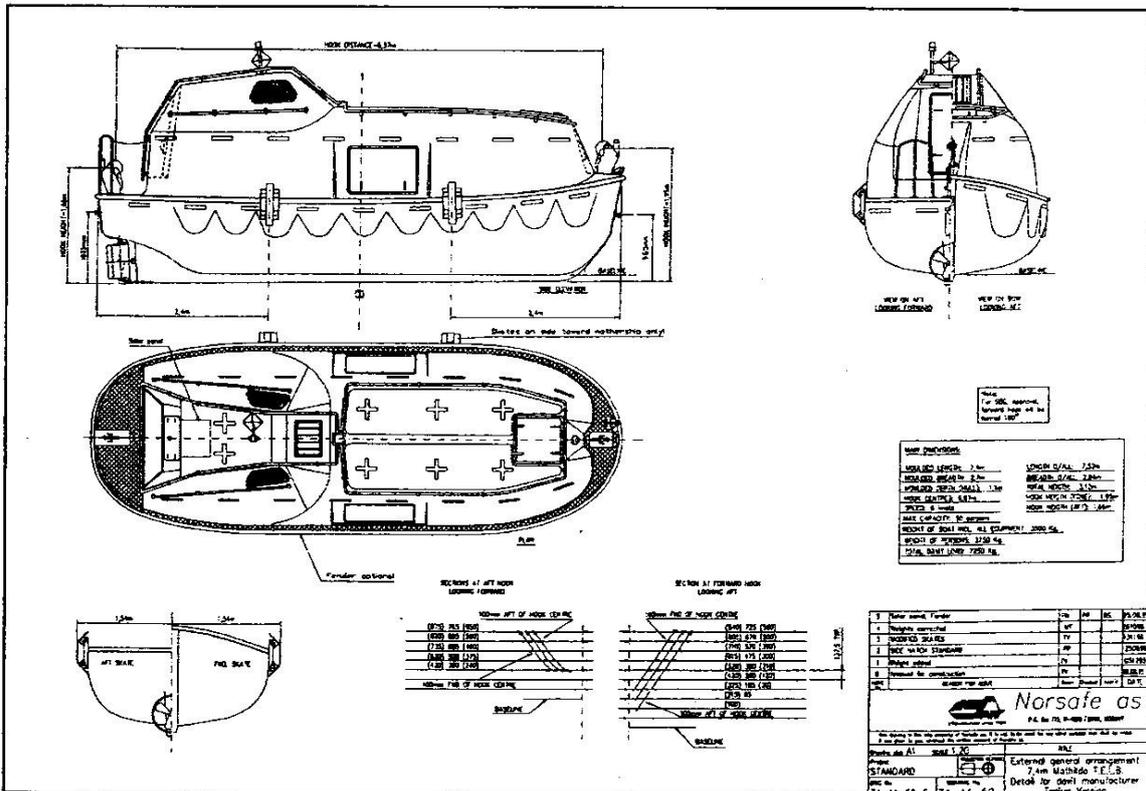


図5.4.3 ライフボート

## (2) 膨張式救命筏（ライフラフト）

手動による投下式のライフラフトは着水すると自動的に開放し、ウィンチ式のライフラフトは展張後ウィンチにより降下される。

## (3) その他の設備

## 1) 縄梯子

緊急時、ボートまたは海上へ避難する際に使用する。

## 2) 救命胴衣（ライフジャケット）

緊急時救命艇で非難する際に装着するベスト式等の浮力体である。ホイッスル、点灯灯がついている。最大乗船人員の 1.05 倍の数量を備え付けなければならない。

## 3) イマージョンスーツ

寒冷地または海水温度の低い地域での緊急避難する際着用する、オーバーオール式の救命衣服である。防水、浮力効果があり、ある程度の時間海上での浮遊、生存が可能である。

## 4) 救命浮環（ライフリング）

作業員の海上への落下事故などの際、緊急救助するために投下されるリング型、その他の浮力体である。

## 5) 救命索発射装置

救助船に先導ロープを渡すための発射装置で火薬または空気などによるものがある。

## 6) 担架（ストレッチャー）

怪我人を搬送するために使用される。



図5.4.4 イマージョンスーツ

## iii) 通信・信号設備

## (1) 通信設備

## 1) 海上での避難および安全の為の通信制度：GMDSS（Global Maritime Distress Safety System）

遭難通信、緊急通信および安全通信を自動化した通信技術を用い、全海域から直接陸上の捜索機関との間で交信が出来る。

## 2) 国際海事衛星：INMARSAT（International Maritime Satellite）

国際海事衛星インマルサットの種類は A、B、C、M があり、非難通信、緊急安全通信、電話、テレックス、ファクシミリなどに利用される。

## 3) VSAT（Very Small Apperture Terminal）システム

通信衛星を介する双方向通信システムのひとつであり、定額料金制の海上ブロードバンドが商品化され実用化されている。

## 4) 無線設備：International VHF

156～174 MHz の間の周波数帯における海上移動業務の局の送信周波数の通称。現在 25 KHz 間隔 57 チャンネルの周波数が定められている。安全業務通信、公衆通信、船舶相互間の通信が世界的に

出来る。

- 5) 双方向無線電話装置：Portable Two Way Radio  
救命艇に持ちこみ、救助船との相互交信に使用される。周波数は ch15、ch16、ch17 が使用される。
  - 6) トランシーバー  
可搬式で作業用のコミュニケーションに使用される。
  - 7) 海上安全情報受信装置：NAVTEX (Navigation Telex)  
海上での航行警報、気象警報、気象予報その他の緊急な安全情報を自動的に受信出来る受信機。
- (2) 信号装置
- 1) 遭難自動通報設備：EPIRB (Emergency Position Indicating Radio Beacon)  
船舶が遭難した場合に、その遭難自動通報設備の送信の地点を探知させるための信号発信器。
  - 2) 遭難信号
    - ① 火せん (Flare)  
船舶安全法により救命艇、ライフラフトに搭載が義務付けられている。筒の先端部分のマッチ状の部分を擦るとオレンジ色の煙が発生する。
    - ② ロケット (Rocket)  
船舶安全法により救命艇、ライフラフトに搭載が義務付けられている。ロケットを発射すると閃光が発生する。
    - ③ 落下傘付き信号 (Parachute Signal)  
船舶安全法により救命艇、ライフラフトに搭載が義務付けられている。発射すると落下傘が開き浮遊する。
    - ④ 発煙信号 (Smoke Signal)  
ライフリングに取りつけられていて、オレンジ色の煙が発生する。
    - ⑤ レーダートランスポンダー (Radar Transponder)  
マリンレーダーに使用されている周波数 (9,147~9,520 MHz) の電波を発射して、相手側のレーダーに位置を通報する装置。
  - 3) 霧笛：Fog Horn  
濃霧のため他の船舶と衝突の危険性のある時、空気音を発生させて航行する船舶に知らせる装置。
- iv) レーダー
- (1) 自動衝突予防援助装置：ARPA (Automatic Radar Plotting Aids)  
レーダーが他船など、障害物を捕らえると、自動的に操舵され衝突を回避することができる装置。

## 5 輸送手段

海洋掘削装置による坑井の掘削作業では周りが海に囲まれているという特殊な環境のため、人間の移動、物資の搬入、搬出をヘリコプターやサブライボートに頼らなければならない。これらの輸送手段は天候の影響を大きく受けると同時に、ひとたび事故が起きると人命に関わる大事故に繋がる可能性が強いため、信頼性の高い気象情報の取得に努め、適正な運行規則を設けて安全な運行を心がけなければならない。

### 5.1 ヘリコプター

ヘリコプターの運行は、航空法、および同関連規則に基づいて作成されたヘリコプター会社の運行基準にしたがって安全に運行されるものである。機長はヘリコプターの離着陸の決定、および乗客の安全に関する責任を負っている。

#### i) 飛行条件

##### (1) 視界

ヘリコプターの飛行作業は航空法に定める有視界気象状況（VMC）のもとで行うことを原則とする。空港および各基地の有視界飛行最低気象条件はそれぞれ異なるのでそれぞれの有視界飛行最低条件に従うことが必要である。

したがって、出発地点、飛行コース、海洋掘削装置付近の気象・海象情報を事前に十分調査し、パイロットに伝えておかなければならないが、掘削装置から報告される実際の天候状況の情報は重要な判断材料となる。

##### (2) 風速限界

ヘリコプターの飛行限界は運用する会社および機種により若干異なるが、ベル412クラスの機種であれば、「離着陸の横風運用限界は、陸上ヘリポート、空港または構造物上のヘリポートの如何にかかわらず最大風速 15 ノット (7.7 m/sec)。また、最大風速 45 ノット (23.1 m/sec) を超える場合は風向きに関係なく離着陸を行なわない。掘削装置上で風速 20 ノット (10.3 m/sec) 以上のときは、ヘリコプターのエンジンを停止させて待機してはならない。」というようなものが目安として考えられる。

##### (3) 夜間飛行

ヘリコプターの運行は、日の出から日没までの間に限り航空局承認を受けて実施される。しかし、例外として人命に重大な緊急救助のための夜間飛行を計画実施する場合がある。この場合は出発地および目的地の着陸地帯に所定の照明設備が設けてあり、有視界飛行のもとで視認できる気象状態でなければならない。

#### ii) 海洋掘削装置での発着

海洋掘削装置上でのヘリコプターの発着に際しては、訓練を受けた、指定された係員がヘリデッキ上に人あるいは障害物等が無く、安全であることを確認し、あらかじめパイロットに伝えるとともに、ヘリデッキ上では直接パイロットに合図を送る必要がある。また、ヘリコプターの火災事故に備え、防火服を装着した係員を消火器前に待機させる事も重要である。さらに掘削装置にはヘリデッキ付近の風向きがパイロットから視認できるようにウィンドソックを備え、海洋掘削装置上の作業に関してはクレーン作業を中止し、ブームがヘリコプターの進入、進行方向を妨げないこと等に注意を払わなければならない。

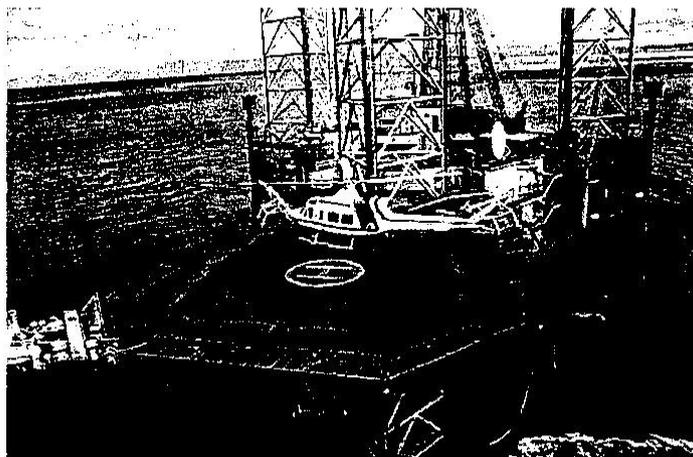


写真5.5.1 着陸中のヘリコプター

### iii) 搭乗心得

ヘリコプターの安全な運航には積み荷の重量管理が大切な要素となるため、搭乗者は体重および手荷物の重量を測り係員に報告し、搭乗者名簿に署名して搭乗を待つ。更に以下に列記したような事項を十分に理解している必要がある。

- ① 救命胴衣を正しく装着し、搭乗後はシートベルトを締めること。
- ② 帽子、ヘルメット等軽い物はしっかり身に付けるか、抱えて飛ばないようにすること。
- ③ 搭乗後、非常口、ライフラフトの格納場所を確認すること。
- ④ 飛行中はみだりにドアを開閉したり、物品を投下したりしないこと。
- ⑤ ヘリコプター周囲および飛行中は常に禁煙とすること。
- ⑥ ヘリコプターのテールローター付近には近寄らないこと。
- ⑦ 長い荷物を持ち込む場合は、水平にして腰の高さより下で持つこと。
- ⑧ 下記の物品は機内に持ちこまないこと。爆発物、火薬類、高圧ガス、腐食性液体、可燃性固体、毒物、放射性物質、銃砲刀剣類。
- ⑨ 緊急事態発生時の対処法。

### iv) ヘリコプターでの資材の運搬

パイロットは積載制限重量、バランスを考慮して資材の積み込みを指示し、機内に積みこんだ資材は必ず固縛する。また、機外に資材を積載、運搬する場合は、前後左右のバランスをとった積載方法でなければならない。

### v) 交信

ヘリコプターは出発地、目的地と何時でも無線交信が可能なのが義務付けられており、許可された専用周波数を使用しなければならない。また、海洋掘削装置にはロケーションに向かうヘリコプターにその位置を知らせるためのヘリビーコンを備えなければならない。

### vi) 緊急時の対応

緊急事態発生を機長より伝えられたら、全ての搭乗者は機長の指示に従うことが大前提となる。

海上への不時着を例にとれば、ローターの停止を待ってライフラフトを投下し、機外へ脱出する。海洋掘削で使われるヘリコプターには通常フローターが装備されているので海上に不時着しても直ぐに沈むようなことはない。機外へ脱出後は救命胴衣を膨らませ、全員の脱出を確認したら速やかにヘリコプターから離れる。

## 5.2 ワークボート

ヘリコプターが主として人間の輸送に使われるのに対してワークボートは物資の輸送に使われることが多い。

また、天候状況その他でヘリコプターが飛行できない場合はワークボートが人間の輸送手段として使われることもある。海洋掘削装置とワークボート間の人間または物資の受け渡しは海洋掘削装置に設置されたクレーンにより行われるが、双方とも海象条件の影響を大きく受けるので、クレーンの運用基準に従った安全作業を心がけなければならない。そのためには事前に双方の合図の方法、吊り上げ方法などを打ち合わせ国際 VHF やトランシーバーで緊密に連絡を取り合いながら息の合った協力作業体制をとることが不可欠である。

また、燃料や水、バライト・セメントなどは直接掘削装置とワークボートをホースで繋いで移送することになるため、ワークボートの係留方法、保留用ロープ、海象状況の変化、移送用ホースおよび結合部の状況などに十分注意して不具合な物はあらかじめ修理し作業を行わなければならない。

海洋掘削作業では、ワークボートを複数使用して物資や人間の輸送を行うが、通常そのうちの一隻は海洋掘削装置の側で待機し、スタンバイボートとして非常事態に備えることが一般的である。

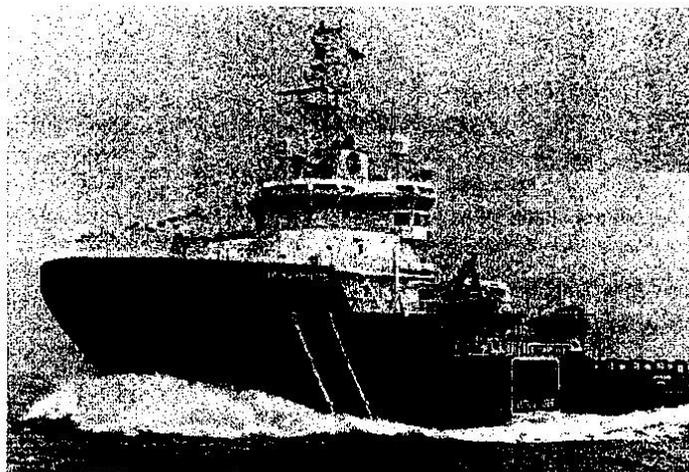


写真5.5.2 ワークボート

## VI 海洋生産

### 1 海洋生産構造物

#### 1.1 海洋生産構造物

我が国の海洋開発は、1888年に新潟県尼瀬海岸の浅瀬を埋め立て掘削を行なった（日本石油）のが始まりと言われ、最初の鋼鉄製プラットフォームは1960年に設置された土崎沖プラットフォーム（石油資源開発）である。その後、同年1960年に頸城人工島（帝国石油）、1974年に阿賀沖プラットフォーム（日本海洋石油資源開発）、1984年に磐城沖プラットフォーム（磐城沖石油開発）、同じく1984年に阿賀北プラットフォーム（出光石油開発）、1990年に岩船沖プラットフォーム（日本海洋石油資源開発）が設置され、石油天然ガスを生産して来た。

一方海外では、1890年代にカリフォルニア州サマーランドの浅瀬で木製栈橋を作り、デリック（やぐら）と最小限の装置を用いて石油生産を行なったのが海洋生産の始まりと言われている。その後、海洋生産構造物は木製から鋼鉄製（1947年米国ルイジアナ沖のカールマギィ社）に取って代わり、時代と共に世界各地の海域、湖沼等の地域環境に合わせた構造物が開発されて来た。そして近年、開発域は徐々に深海に向かい大水深用構造物も次々と開発されている。

一般に、石油天然ガスの生産を目的として海洋に建造された構造物をプラットフォーム（Platform）と呼んでいる。元来プラットフォームはジャケット式（鋼鉄製）を示していたが、テンションレグプラットフォーム（TLP：Tension Leg Platform）やFPSO（Floating Production, Storage and Offloading System：浮遊式生産貯油出荷システム）等の浮遊式生産システムが建造されるに至り、これらすべてを含めて幅広くプラットフォームと称するようになった。

構造物は波に対する特性から以下に分類される。

##### (1) 固定式及び着底式生産システム

- ジャケット式プラットフォーム（Steel Jackets Platform）
- コンプライアントタワー（Compliant Tower）
- 重力式プラットフォーム（Gravity Platform）
- 人工島（Artificial Island）

##### (2) 浮遊式生産システム

- TLP
- FPSO
- FPS（Floating Production System）
- SPAR及びDDCV（Deep Draft Caisson Vessel）

生産システムのプロットは図6.1.1の通りである。

#### 1.1.1 固定式及び着底式生産システム

固定式にはジャケット式プラットフォームとコンプライアントタワーがあり、着底式には重力式プラットフォームと人工島がある。鋼鉄製ジャケット式プラットフォームは世界で最も多く設置されており、その数は約1万基程度で、米国メキシコ湾だけでも4,000基余りが設置されている。（“Offshore Engineer, January 2010”によれば、稼働中の固定式プラットフォームは9,230基で、建設中が124基、計画が1,517基である）。重力式プラットフォームは北海の厳しい環境向けに開発されたもので、設置箇所もほとんどが北海となっている。また、人工島はカナダおよびサハリン等の浅い氷海域に設置され、地域特性を持っている。

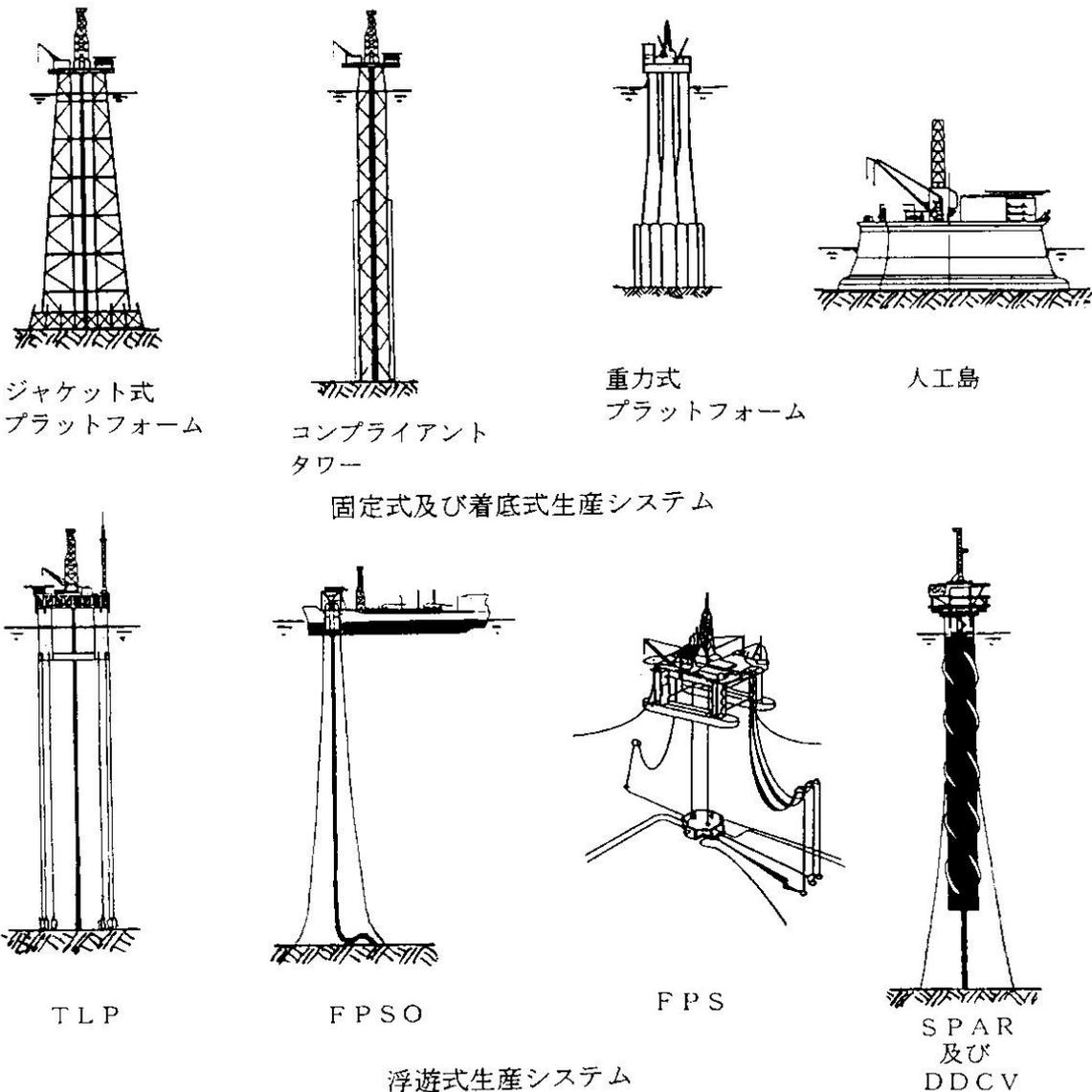


図6.1.1 生産システムの概念図

固定式および着底生産システムの特徴は次の通り。

- ① ジャケット式プラットフォームおよびコンプライアントタワーは、構造物を杭（パイル）で海底に固定し、貯油機能を持たず、上載設備は現場で搭載される。
- ② 重力式プラットフォームは、自重で固定され、貯油機能を持つ。上載設備を搭載した状態で設置場所に曳航することが多い。
- ③ 一般に、水深が増すほど建設コストの上昇は大きく、浮遊式に比べ適用水深は浅い。

建造上の制約から人工島の水深限界は数十 m、重力式プラットフォームは 300～400 m と言われている。また、ジャケット式は他方式との建設コストの競合から水深 400 m 程度が限界と言われ、コンプライアントタワーは水深約 700 m が競合限界となっている。

主な固定式および着底式生産システムの例を表 6.1.1 に示す（撤去済み含む）。

表6.1.1 固定式及び着底式生産システムの稼働例

プラットフォーム名システム	磐城沖ジャケット	岩船沖ジャケット	ブルウィンクルジャケット	ボールドベイトコンプライアントタワー	ホルダ重力式	モリクバック人工島(鋼製ケーソン)
海域 フィールド名 オペレーター	福島県楢葉町沖 磐城沖ガス田 磐城沖石油開発	新潟県中条町沖 岩船沖油ガス田 日本海洋石油 資源開発	米国メキシコ湾 G C 65 シェル	米国メキシコ湾 G B 260 アメラダヘス	北海 トロールイースト シェル (ノルウェー)	ロシア サハリン ブリトン アストフ サハリンエナジ イノベーション
設置年	1984	1990	1988	1998	1996	1997
水深 (m)	154	36	412	503	303	30
デッキ (長さm*幅m)	31*68	28*49				110*110
坑井数	10	20	60	20	40	32
処理量						
原油 (BPD)	—	8,800	200,000	50,000	—	90,000
ガス (MMscf/d)	75	21	306	150	3,175	70
パイプライン						
原油	—	12 in*22 km		16 in		12 in*2 km
ガス	12 in*41km			12 in		

注) BPD; Barrel Per Day; 1BPD=0.159kl/d  
MMscf/d; Million standard cubic feet per day; 1MMscf/d=28,830Sm<sup>3</sup>/d

i) ジャケット式プラットフォーム

ジャケット式プラットフォームは、形式と機能により以下に分けられる (図 6.1.2 参照)。

(1) ウェルプロテクタープラットフォーム

ウェルプロテクタープラットフォーム (Well Protector Platform) は、坑井の支持・保護を目的とする比較的簡単な構造となっており、坑井自身によるフリースタANDINGタイプ (Free-standing)、保護ケーソンタイプ (Caisson-supported) および 3~4 本のレグからなるトラス構造等のタイプがある。坑井改修は水深によりテンダーバージ、スワンプバージあるいはジャッキアップリグ等を用いて行ない、プラットフォームデッキはリグのムーンプールに収まる大きさとなる。デッキ上は坑口装置のみ設置することが多く、生産流体はフローラインを通じてプロダクションプラットフォームに送られる。

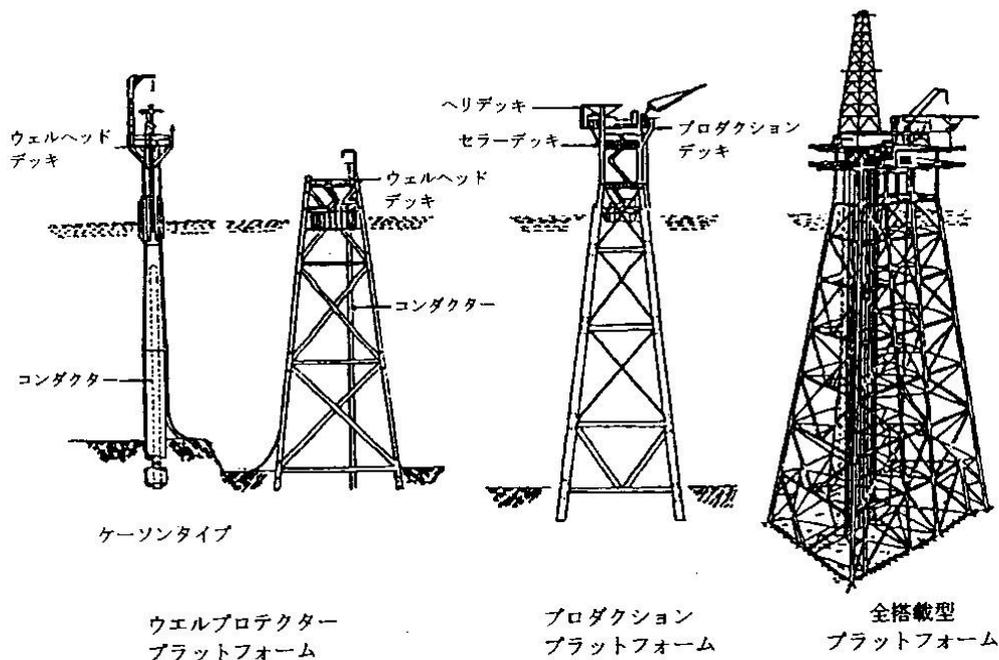


図6.1.2 ジャケット式プラットフォーム

## (2) プロダクションプラットフォーム

坑井および生産設備を搭載した中規模プラットフォームである。周辺のウェルプロテクタープラットフォームから生産流体を受け取り、処理後パイプラインを通じて陸上に輸送する。一般的にセラーデッキと生産デッキおよびヘリデッキからなる。

## (3) 全搭載型プラットフォーム

全搭載型プラットフォーム (Self-contained Drilling/Production Platform) は、生産坑井のほかプラットフォーム上に掘削設備、生産設備および居住設備などすべての必要な機能を備えたもので、図6.1.3の通り大規模構造である。

全搭載型プラットフォームは次の要素からなる。

## 1) ジャケット

ジャケット (Jacket) はレグ (Leg) とブレース (Brace) から構成され、波、風等の横荷重と上載設備の縦荷重を受け、パイル (Pile) を介して海底地盤に伝達支持する。プラットフォームの用途、気象海象、水深、建造ヤード等の条件により種々の構造形態がとられる。ジャケットのレグ数は4本、6本、8本等の種類があり、設置場所に運搬された後、クレーン船で吊り上げられ所定の位置に設置される。大型ジャケットの場合、クレーン能力によっては直接吊り上げて設置することが難しく、ランチングバージ (Launching Barge) を用いて現地に運搬し、進水浮遊させてクレーン船で所定の位置に設置する方式がとられる。その他、レグサイズを大きくすることによりフロートの役割を持たせ、ランチングバージを使用せずにヤードからそのまま浮上曳航により現場に運搬する方式もある。

## 2) パイル

ジャケットはパイル (Pile : 支持杭) により海底地盤に固定される。パイルは、プラットフォームの全重量を支えると共に、波、風、潮流等の外力による剪断力と転倒モーメントを受け支える強度が必要となる。パイルの種類には、ジャケットのレグを通して設置されるメインパイルと、レグ以外の部分でパイルガイドを通して設置されるスカートパイルの2種類がある。

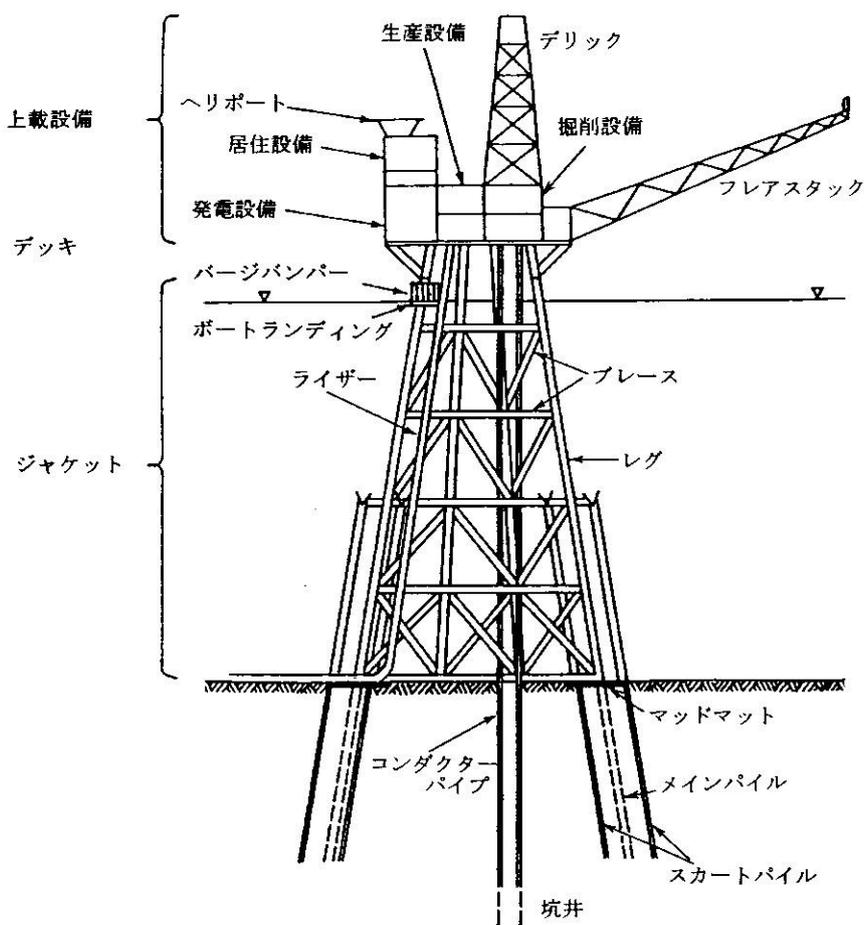


図6.1.3 全搭載型プラットフォーム

### 3) デッキ構造

デッキ構造 (Deck Structure) は、ジャケット上部に設置され、上載設備の搭載支持構造となる。なお、デッキ構造と上載設備を一体構造として製作し、搭載することが多い。

### 4) 上載設備

掘削設備、生産設備、居住設備、発電設備などを総称して上載設備 (Topside Facilities) という。上載設備は、一般に掘削、生産など機能別にモジュール (Module) と呼ばれるユニット毎に建造され、クレーン船によりデッキ構造上に搭載されることが多い。よって、各モジュールの大きさは、クレーン船の吊り上げ能力によるため、500 t 程度から 2 千～3 千 t 程度の範囲にまとめられることが多い。1980 年代後半には、約 1 万 t の吊り上げ能力を持つセミサブマージブルクレーン船が出現している。

### 5) その他

#### ① ヘリポート

居住設備を備えたプラットフォームは、ヘリポート (Heliport) を持つ。ヘリポートにはセーフティネット、消火設備、着陸灯など安全設備が装備される。

#### ② ボートランディングとバージバンパー

サプライボートからプラットフォームに荷物を搬入したり、人員の乗降を行なうために海面上の適当な位置にボートランディング (Boat Landing) が設置される。また、サプライボートが停泊中プラットフォームに衝突衝撃を与えないために、バージバンパー (Barge Bumper) が設置される。

#### ③ コンダクターパイプ

コンダクターパイプ (Conductor Pipe) は、海底面における坑井崩壊を防ぐ目的でジャケット設置後に海底面下数十 m 程度まで打ち込まれる。中間部をクランプでジャケットに固定し、掘削作業はコンダクターパイプを通して行なう。通常 26～36 in. 口径の鋼管を用いるが、パイプ数が多くなると波力、潮流による作用力が大きくなるため、十分なプラットフォーム外力計算が必要となる。

#### ④ ライザーパイプ

ライザーパイプ (Riser Pipe) は、海底パイプラインとプラットフォーム上の送油設備や生産設備を結ぶもので、ジャケット外側に沿って設けられる。

#### ⑤ マッドマット

ジャケットはクレーン船で設置された後、メインレグを通じてパイルが打ち込まれ、海底に固定される。しかしながら、海底地盤が軟弱な場合にはパイル打ち込み前にジャケットの重量や波、潮流等の外力を支持できないことがある。このような場合には四隅のジャケットレグにマッドマット (Mud Mat) を設け、地盤支持力を増加させる対策がとられる。

### ii) コンプライアントタワー

ジャケット式プラットフォームは、比較的水深の浅い所では波の卓越周期と比べ固有周期が短いため共振を起こさないが、水深が深くなるにつれ固有周期が波の卓越周期に近づき共振を起こすようになり、構造部材に疲労を生じ易くなる。このため、構造変形を大きくし、波の周期に比べ固有周期を 2～4 倍長くしたのがコンプライアントタワーである。コンプライアントタワーは、ジャケットと同じ鋼管立体構造をしており、パイルで海底に固定される。構造は、海底部を支点にして適度な曲げモーメ

ントが作用し、タワーが撓む細長い直方体となっており、上部にデッキと上載設備が設置される。現在、以下のタイプが考案され、設置されている。

(1) ガイドタワー (Guyed Tower)

海底面のパイルとガイワイヤー (張り綱) で外力に対抗。

(2) パイルドタワー (Piled Tower)

タワー中間部に固定されたパイルの軸力で、外力の転倒モーメントに対抗。

コンプライアントタワーの特長は以下の通り。

- ① ジャケット式に比較し、構造重量が小さい。
- ② 海上に坑口装置を設置。
- ③ 掘削装置の搭載が可能。
- ④ 水深 300~1,000 m に適用可能。
- ⑤ 貯油機能がない。
- ⑥ 再利用に適さない。

なお、水深が 500 m を超えるタワーの場合は、2~3 に分割して製作、輸送され、現地で接合の上、設置される。コンプライアントタワーの設置実績として、メキシコ湾のレナ (ガイドタワー)、ボードペイト (パイルドタワー)、ペトロニウス (パイルドタワー) 等がある。

iii) 重力式プラットフォーム

重力式プラットフォームは、北海の厳しい環境向けに開発された。このプラットフォームは自重により海底面に固定される。コンクリート製と鋼製があるが、ほとんどがコンクリート製で、約 40 基が北海、メキシコ湾、ブラジル沖等に設置されている。重力式プラットフォームの長所は、硬地盤に適し、安定性が高く、デッキおよび装置を据付けてから曳航するため現場作業が短いこと、また貯油機能を持ち、耐食性に優れている点 (コンクリート製) 等が挙げられる。短所としては、建造コストや廃山撤去コストが高く、水深限界が約 300~400 m であること等が挙げられる。

iv) 人工島

人工島は、ケーソンなど護岸構造物を設置し、内側を埋め立てて作られたプラットフォームで、近年氷海域向けとして開発された斬新な物がある。ケーソンは、ヤードで建造されたあと現地に曳航され、海水や土砂をバラストとして設置される。氷海域の人工島の特徴は、構造的に氷荷重の圧壊に強いこと、ケーソンの内側を土砂等で埋め立てた人工地盤であるため構造部材に低温脆性問題等が生じないこと、水深限界が約 20 m と浅いことなどが挙げられる。現在、氷海域ではカナダのボーフォート海、ロシアのサハリン等で数基設置されている。

v) 固定式および着底式構造物の保守点検

ジャケット式等の固定式構造物において以下の保守点検が定期的に行なわれる。

- ① 生物付着物の除去
- ② 塗装状態の検査と塗布
- ③ 鋼材肉厚測定
- ④ 溶接部の非破壊検査
- ⑤ 防食電位測定とアノードの追加設置
- ⑥ 洗掘状況の検査

生物付着物の除去は、点検箇所を見易くするだけでなく、部材に作用する流体外力を減らす目的もある。ジャケットなど鋼管構造物における格点部 (溶接箇所) は、疲労破壊を生じ易いため超音波探

傷や磁粉探傷を定期的に行なうことが多い。点検作業はスクーパー潜水で行なわれ、ROV（遠隔操作潜水艇：Remotely Operated Vehicle）を用いる場合もある。通常、定期検査は年1回行なわれ、精査のため4~5年毎に特別検査を行なう。

### 1.1.2 浮遊式生産システム

浮遊式生産システムは、基本的に浮遊船体（タンカーやセミサブマージブル等）を用いて、海底に設置された坑口装置から原油天然ガスを生産する方式である。このシステムにはFPSO、FPS およびTLP、SPAR（DDCV）等がある。また、原油の貯蔵と出荷のみ行なうシステムをFSO（Floating Storage and Offloading System）と呼び、貯油機能の無い他の生産システムと組み合わせて用いられる。前述の固定式および着底式生産システムは、生産処理した原油をパイプラインで出荷することが多いが、浮遊式生産システムは、洋上で一旦貯油した後シャトルタンカーで出荷することが多い。

（“2011年度版海洋資源開発プロジェクト調査”によると、2011年末時点世界の浮遊式生産システムは257基であり、160基のFPSOが稼動しており、TLPは22基、SPAR（DDCV）は18基となっている。）浮遊式生産システムの特徴は次の通り。

- ① 一般に、固定式および着底式生産システムと比べ、設備投資額が小さく、転用が可能である。
- ② FPSOは中古タンカー、FPSはセミサブマージブルリグを改造して利用することで、建造期間および設備コストを縮小できる。
- ③ 浮遊式生産システムは、上記の特徴を生かして小規模油田、大水深および既存施設の利用が難しい油田開発に採用されている。

#### i) FPSO

FPSOは、浮遊タンカーに生産、出荷設備を搭載した海洋生産システムである。この生産システムでは係留システムの選択が最も大切であり、近年一点係留システムが数多く採用されている。一点係留システムは、浮体の一点を拘束した場合に浮体が自然に外力（波、風、潮流の総和）の最も小さくなる方向に向く効果（Weather Vane）を利用したもので、浮遊タンカーをチェーンまたはワイヤーロープ、コラム等を用いて係留し、下端を海底に固定する。係留システムは、適度な復原力を持つように設計されているが、復原力を弱くすると変位が大きくなり浮体を許容範囲内に留めることは難しく、逆に強すぎると変位は小さくなるがブイやチェーン径が過大となる。FPSOの概念図を図6.1.4に示す。

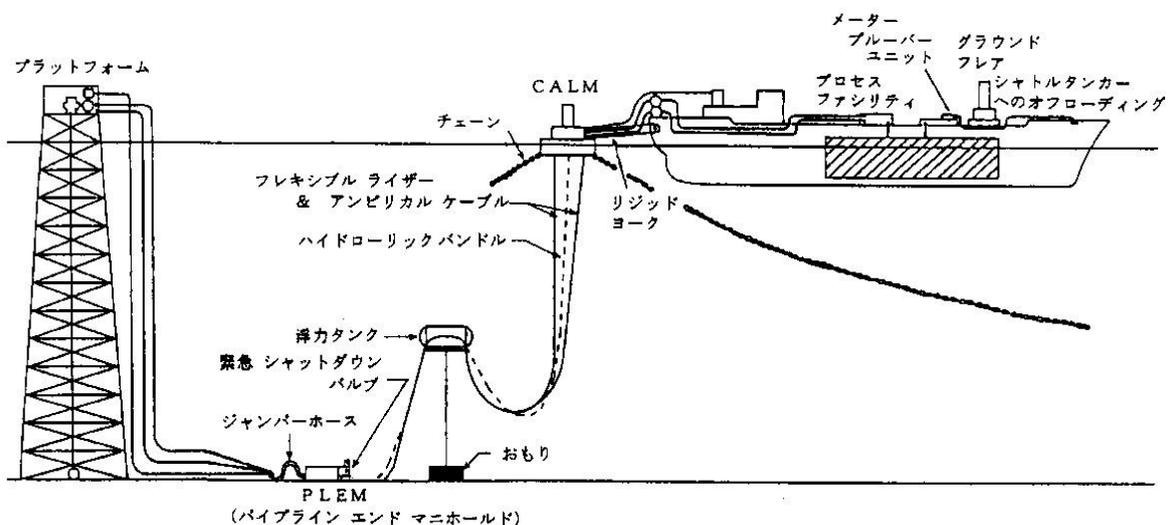


図6.1.4 FPSOの概念図

一点係留システムには以下の種類がある。

(1) カテナリー係留

ワイヤーロープやチェーンの重力により復原力を持たせる。タレット (Turret Mooring)、CALM (Catenary Anchor Leg Mooring) 等の方式がある。

(2) コラム係留

コラムの浮力により係留復原力を得る。アーティキュレイテッドコラム (Articulated Column)、SALS (Single Anchor Leg Storage)、タレットライザー (Turret Riser) 等の方式がある。

(3) タワー係留

ヨークの重力により復原力を持たせる。タワーソフトヨーク (Tower Soft Yoke) の方式がある。

浮遊式生産システムにおいて使用される係留装置は、一般に永久設置型であるが、台風等の気象海象の悪化や補修等のメンテナンスを考慮し、離脱可能な切離し型とすることも多い。また、浮遊タンカーは外力の方向に応じて方向を変えるため、係留上端は特殊回転機構 (スイベル) となっている。このスイベルには、フローラインや生産ライン用として hidroリックスイベル、海底坑口装置の電気・信号用ケーブル用として電気スイベル等がある。FPSO はタレット係留を採用するケースが多い。なお、生産された原油は処理、貯油された後、定期的にシャトルタンカーで払い出される。

ii) TLP

浮遊式構造物を複数本の鋼索または鋼管から製作されるテンドン (Tendon) を用いて鉛直下方に張引し、浮体の余剰浮力により常に張力を持たせたのが TLP である。上下方向の動揺が押えられ、水平面内の変位も小さく、生産ライザーに掛かる負担が小さい。浮体は半潜水型 (セミサブマージブル) で、デッキ、コラム、ポンツーンからなる。テンドンは海底基礎のテンプレートから立ち上がってコラムに固定され、ポンツーンはバラストタンクとして注排水を行ないテンドンの張力を調整する。これまで設置された TLP の内、Heidrun (コンクリート製:Norway) 以外は鋼鉄製である。

iii) FPS

FPS は、半潜水型浮体 (セミサブマージブル) に生産設備を搭載した構造物、係留システム、フレキシブルライザー、海底坑口装置、フローライン等から構成される。浮体構造物は、油田の枯渇まで長期に係留されることが多いため、補修等の必要性が無い様に健全性が要求される。また、海底坑口装置のフローラインや制御用アンビリカル (油圧、電力、信号用の複合ケーブル) は浮体に接続されるが、浮体は水平運動が大きいためフレキシブルなものが必要となる。なお、FPS は貯油機能を持たない。ブラジル沖において最も多く稼働しており、その他、北海、メキシコ湾、東南アジア、西アフリカ沖で稼働している。

iv) SPAR および DDCV

FPSO は貯油機能を持つが揺動が大きく厳海域にやや不向きであり、FPS は揺動性能が優れているが貯油機能を持たない。この FPSO と FPS の利点を合わせ持ったのが SPAR および DDCV である<sup>\*3</sup>。SPAR および DDCV のハルは巨大な二重円筒構造となっており、中心部のムーンプールからライザーシステムを扱うことができる。また、構造上軸対象のため、外力の方向や強さが変化してもほとんど回転しない。

<sup>\*3</sup> 但し、原油タンクとバラストタンクを共用することを禁ずる国際条約と FPSO の二重船殻 (またはダブルサイド) を規定する各国の法律が普及したことから、貯油能力を持つ SPAR および DDCV は現存しない。

SPAR および DDCV の特徴は、上下動が極めて小さいためリジッドライザーを使用して海上坑口装置が設置可能なことやワークオーバーシステム搭載が可能なが挙げられる。SPAR はマレーシアの1基を除いて全てメキシコ湾にて稼働している。

#### v) 浮遊構造物の保守点検

浮遊構造物の点検については、各国船級協会（ABS、DNV、BV、NK 等）により定められている。基本的に5年毎に構造および主要機器の定期検査を行ない、2年半毎に中間検査が行なわれる。

浮遊式生産プラットフォームの例を表6.1.2に示す。また、固定式および着底式生産システムを含めた各生産システムの機能比較を表6.1.3に示す。

表6.1.2 浮遊式生産システムの稼働例

プラットフォーム名 システム	ラム ポウエル TLP	マース TLP	PB-36 FPS	シールリーン FPSO	ジェニシス SPAR	フーバー/ダイアナ DDCV
海域	米国メキシコ湾	米国メキシコ湾	ブラジル カンボス	ブラジル カンボス	米国メキシコ湾	米国メキシコ湾
フィールド名	V K956	MC807	ロンカドール	ロンカドール	G C160/161	Alaminos Cyn25, 26 EB945, 946, 988, 989
オペレーター	シェル	シェル	ペトロプラス	ペトロプラス	シェブロン	エクソンモービル
設置年	1997	1996	1999	1999	1998	2000
水深 (m)	980	759	1,360	1,830	789	1463
デッキ (長さm*幅m)	75*75	75*75			53m*53m ハ* D37m*L215m	62m*62m ハ* D37m*L215m
坑井数	20	24	26		20	5
処理量						
原油 (BPD)	60,000	21,000	180,000	20,000	55,000	100,000
ガス (MMscfd)	200	25			72	325
パイプライン						
原油	12in*40km	18in	FSO PB-47			20in*240km
ガス	14in	14in	20in*176km			20in*137km
排水量 (トン)			268,000	79,600		
貯油量 (BBL)			1,800,000	306,000		

注) BPD; Barrel Per Day; 1BPD=0.159kl/d  
MMscf/d; Million standard cubic feet per day; 1MMscf/d=28,830Sm<sup>3</sup>/d

表6.1.3 生産システムの機能比較

システム	ジャケット	重力	コンダクター	TLP	FPSO	FPS	SPAR/DDCV
垂直揺動	なし	なし	なし	なし	大	小	極小
水平揺動	なし	なし	極小	小	大	大	大
坑口位置	海上	海上	海上	海上	海底	海底	海上
ライザー	コンダクター	コンダクター	コンダクター	リジッド	フレキシブル	フレキシブル	リジッド
掘削装置	設置	設置	設置	設置	なし	なし	設置
建設期間	長	長	長	長	短	短	長
再利用	可能	不可	不可	可能	可能	可能	可能

## 1.2 海洋生産構造物の設計

### 1.2.1 自然環境

一般に、海洋生産構造物は油ガス田の操業継続が採算上難しくなり停止に至るまで同じ場所で長期間稼働する必要がある。このため、気象海象等の自然環境が構造物の安全性や操業に与える影響は非常に大きい。

海洋構造物の設計に当っては、波浪、風、潮海流、潮位、地震、津波、海氷、着氷、海底土質などの自然環境条件に対する考慮が必要であり、これらの再現期間、非超過確率（安全係数）および構造物の耐用年数が設定される。耐用年数は構造物の使用期間のことであり、経済性、機能、強度等を勘

案して設定される。また、再現期間とは遭遇する自然条件を定めた仮想期間のことで、この再現期間 (R) と耐用年数 (N) の関係は、現象が発生しない確率 (非超過確率 (Q)) を組み入れると次式が成り立つ。

$$R = 1 / (1 - Q^{1/N})$$

よって、設定した値を少なくとも 1 回超える割合  $Q_1$  [%] は、

$$Q_1 = 100 - (1 - 1 / R)^N \times 100$$

となり、更に設定した値を少なくとも 2 回超える割合  $Q_2$  [%] および 3 回超える割合  $Q_3$  [%] は、

$$Q_2 = 100 - Q_1 - N(1 - 1 / R)^{N-1} / R \times 100$$

$$Q_3 = 100 - Q_1 - Q_2 - N \{ (N - 1) (1 / R)^2 (1 - 1 / R)^{N-2} \} \times 50$$

となる。

上式によれば、再現期間を 100 年とし耐用年数を 30 年とした場合は非超過確率が 0.74 となり、設けた値を少なくとも 1 回超える割合は 26 %、少なくとも 2 回超える割合は 3.6 %、更に少なくとも 3 回超える割合は 0.3 % となる。一般に、再現期間を 50 年または 100 年と設定することが多く、非超過確率は 0.7 前後に設定される。

#### i) 波浪

海洋構造物の設計に用いる波浪は、長期間に亘る観測値または風から推測した値を統計処理し、適正に波浪変形を考慮して設定される。波浪の分類には、規則波と不規則波に区別する場合と、水深により深海波と浅海波に区別する場合がある。主な波浪の諸元と定義は次の通りである。

- ① 有義波は、有義波高と有義波周期で表わされ、各々  $H_{1/3}$  [m]、 $T_{1/3}$  [sec] と記す。有義波とは、一連の不規則な波群の一波一波を波高の高い順に並べ、高い方から全体波数の 1/3 を平均したものであり、その平均値を有義波高、その一波一波に付随する波周期の平均値を有義波周期という。
- ② 最高波は、一連の波群の中で最高の波浪のことで、最大波高とその時の波周期で表され、各々  $H_{max}$  [m]、 $T_{max}$  [sec] と表わす。
- ③ 深海波は、水深が波長の 1/2 以上の海域における波浪で、有義波の諸元と同様に表わされる。波浪の推算法には、有義波法と波浪スペクトル法がある。有義波法とは、風速、吹送距離および吸送時間を与えて有義波を推算する方法で、SMB 法と Wilson 法がある。波浪スペクトル法は、波浪のスペクトルを利用して推算する方法で、PNJ 法と方位スペクトルを直接解く方法とがある。現在 PNJ 法はあまり使用されない。

#### ii) 風

海洋構造物を設計する際は次の風を考慮して風速と風向を設定する。

- ① 台風 (熱帯性低気圧または旋衡風)
- ② 季節風 (地衡風)
- ③ 低気圧と高気圧 (傾度風)

また、設計風を設定する手法は次の通りである。

- ① 日々の資料を用いて月間および年間の出現度数率表および風速の累積度数率図を作成する。
- ② 可能な限り長期間に亘る資料を用いて、月間および年間で最大の風速の分布図を作成する。
- ③ 再現期間に対する風速の再現期待値、平均年間で最大の風速、および各種累積度数率に対する風速を設定する。

④ 設計基本風速としては、高さ 10m における 10 分間平均風速を標準とする。

また、海洋構造物の種類によっては、平均風速以外に突風率を適正に考慮する必要がある。

一般に、風速の確率分布は Fisher-Tippett の I 型分布または Gumbel の分布あるいは 2 重指数分布等により求められる。構造の強度設計や係留設計を行なう際には、風の長周期の変動が重要な設計外力となる場合がある。このため、風速の変動性およびその変動による荷重の変動周期と海洋構造物の固有周期の関係を検討することが大切となる。

### iii) 海流および潮流

設計においては、風による吹送流、海流および潮流等の流れを適正に考慮する必要がある。流れを表わす諸元としては、流速 (m/sec)、流向 (度) およびその鉛直分布がある。吹送流とは、風が海面上を吹くとき、風と海面との間に摩擦力が働いて発生する流れのことを言う。

### iv) 地震

地震動または地震によって発生する津波により海洋構造物が重大な影響を受けることが想定される場合、適正な手法に基づいて地震の規模を設定し、海洋構造物の安全性等を検討する。地震の大小を表わす数値をマグニチュードといい、地震動の強弱を表わす数値を震度という。

### v) 着氷

海洋構造物が冬季帯（北緯 66 度 30 分以北の海域および南緯 60 度以南の海域、並びにベーリング海、バレンツ海およびオホーツク海等の冬期）または準冬季帯（冬季帯以外の海域において通常の海洋構造物へ着氷が起こると予測される海域）において、移動または稼働することが予測される場合、適正な手法に基づいて海洋構造物への着氷を考慮し、安全性等を検討する必要がある。

### vi) 海底土質

地震により海底土質が液状化を起こし、海洋構造物が被害を受け危険状態となることがある。よって、海底土質の液状化検討を行なうと共に、海底土質液状化による海洋構造物の安全性の検討が必要である。

## 1.2.2 設計法と設計基準

プラットフォームの設計は複雑である。ジャケット式プラットフォームの設計手順を以下に簡易的に示す。

- ① 構造物の形状、寸法、断面の仮定
- ② 荷重の算定
- ③ 構造解析
- ④ 材料の選定
- ⑤ 各部材断面の応力解析
- ⑥ 耐震設計
- ⑦ 波や各種振動による材料の疲労解析
- ⑧ 基礎の設計（杭の設計、杭の打ち込み性、地盤沈下など）
- ⑨ 付属品の設計
- ⑩ 施行方法の検討

プラットフォームを設計する場合は、まず作業条件を設定し、必要なデッキ寸法を決定する。次に、プラットフォームの形式や形状を仮定して波、風および潮流等の各種荷重を算定し、構造的に十分耐え得る材料や各部材の断面について検討する。その後、地震による荷重を考慮し、耐震設計を行なう。

また、波や風あるいは機器の振動による疲労解析を行ない、各部材を判定する。プラットフォームの形状が決まった段階で基礎の設計を行ない、付属品等を決定する。そして最後に、施行方法の検討を行なう。以上の手順および検討は実際には複雑に入り組んでおり、繰り返し計算や試行錯誤の積み重ねが非常に多く、プラットフォーム建造会社は独自でソフトウェアを開発し、作業に当たっている。

#### i) 設計法

海洋構造物の設計において長期間の気象海象データを如何に反映できるかが大切である。設計条件において最も支配的なものは波の条件である。以下に波浪を中心とする設計手法について概説する。

##### (1) 設計波法 (Design Wave Method)

長期の波浪統計から 50 年または 100 年の再現期間における最大波を求め、それと同じ波高と周期を持つ規則波に置き換え設計波とする方法である。この方法は、波長と比べ径の小さな部材から構成されるジャケット等の固定式構造物設計法として広く用いられる。

##### (2) 設計スペクトル法 (Design Spectrum Method)

長期の波浪統計から最大値 (有義値) を求め、それに対応する有義波高と波周期を持つ波スペクトル (設計スペクトル) および別に求めた周波数応答関数により構造物の応答スペクトル分散を求める。この応答スペクトル分散から最大期待値を測定する方法が設計スペクトル法である。この方法は上記の設計波法で表現し得ない不規則波の応答特性を考慮するため、海洋構造物の設計法として広く用いられている。

##### (3) 非線形時系列計算法 (Non-Linear Time History Simulation Method)

設計スペクトル法と同様に、最大値に対応する有義波高と波周期を持つ波スペクトルを設計スペクトルとし、この波スペクトルが得られる波の時系列を作って構造物に作用させ、時間領域での応答の極大値を推定する方法である。この方法は、波浪に対する応答だけでなく、定常風や変動風あるいは潮流の影響を含めて取り扱うことが可能で、非線形な係留系を持つ浮遊式海洋構造物に応用される。

##### (4) 長期確率応答法 (Long Term Probabilistic Response Method)

この方法は、線形重ね合わせ法を基礎とし長期の波浪統計を直接使用して行なうため、長期分布の形を仮定する必要がない。この方法によれば応答の累積発現確率が求められ、運転条件における稼働率や疲労強度の検討が可能となる。

#### ii) 設計基準

海洋構造物に関する設計基準は、以下の各国任意団体および船級協会等で定められている。

##### (1) API (American Petroleum Institute)

- API RP2A (Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms)
- API RP2P (Recommended Practice for The Analysis of Spread Mooring Systems for Floating Drilling Units)
- API RP2T (Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms)

##### (2) ABS (American Bureau of Shipping)

- Rules For Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units

##### (3) DNV (Det Norske Veritas) Classification A/S

- Rules For Classification of Mobile Offshore Units

- Rules For Classification of Fixed Offshore Installations

(4) 日本海事協会(NK)

- 鋼船規則 P 編、海洋構造物および作業船等

その他、BV (Bureau Veritas : フランス船級協会) 等がある。

## 2 海洋生産システム

海洋生産システムは、海洋の油ガス田から原油および天然ガスを生産するシステムを言い、以下の機能を備える必要がある。

- ① 高温高压な生産物をコントロールできること。
- ② 作業員の安全および公害や災害防止対策が万全であること。
- ③ 坑井の産出状況を適時把握できること。
- ④ 出荷仕様を満たす適切な処理がなされること。
- ⑤ 操業費が安価なこと。

機能的には陸上の生産システムと同じであるが、海洋にある点が異なる。また、陸上と異なり面積の限られたプラットフォームに設置され、生産坑井や陸上基地へのアクセスが容易でないことが多い。

坑井から生産物を集約し、合理的な管理方式を行なうシステムをギャザリングシステムと呼び、開発計画全体における重要な要素を占める。ジャケット式プラットフォームを用いた典型的なギャザリングシステムを以下に示す。

### i) 単独井分散方式

水深が比較的浅く、油ガス田の掘削深度も浅い場合は、しばしば単独井を分散して掘削するか、あるいは数坑にまとめて掘削し、各々のフローラインをフローステーションに集める方式がとられる。

これを単独井分散方式という。この方式は、成功した試掘井を生産井に切り替え、開発しながら生産を行なうことができるなど適応性が高い。しかしながら、プラットフォームが数多くなった場合フローラインが複雑となる。このため、プラットフォームやフローラインの建設費が安価で比較的水深の浅い場所を除いてあまり採用されない。

### ii) 集団井方式

水深が深くなるとプラットフォームの建設費が増し、必然的に一基のプラットフォームから多くの坑井を掘削することになる。この方式を集団井方式と呼び、一般的に一基のプラットフォームから十数坑以上を掘削する。現在、ほとんどがこの方式である。多くの坑井が一ヶ所に纏まっているため管理が容易である反面、最初から掘削坑井数を決める必要があり、将来を見据えた開発計画が大切となる。

### iii) フローステーション

単独井あるいは小数坑井による分散方式を採用した場合、これを集約するためにフローステーションが設けられる。フローステーションの役割は、坑井のフローラインを集約し、産出の把握(単独計量)を行なうことにある。各坑井から生産された原油および天然ガスは、チョークで流量調整された後、マニホールドのバルブ切替えにより単独計量あるいはギャザリングラインへ仕分けられる。多くの場合、ギャザリングラインの圧力損失を低減するためにフローステーションにおいてガスと液体が分離される。分離されたガスが高圧の場合は、メタノールやグリコール等のハイドレート防止剤を注入し、

デハイドレーターで脱湿処理等を行なう。

#### iv) ギャザリングステーション

ギャザリングステーションは、フローステーションから送られた原油および天然ガスを集約し、陸上基地に送り出す中央基地の役割を持っている。簡易処理された原油はパイプラインで陸上基地に輸送され、最終処理が行われる。原油は貯油された後、定期的にタンカーで出荷される。フローステーションで脱湿処理された生産ガスは、そのまま幹線ガスパイプラインに送り込まれる。低圧ガスはガスコンプレッサーを用いて昇圧されたあと幹線ガスパイプラインに送り込まれる。

## 2.1 採油と採ガス

### 2.1.1 坑内装置

海洋における坑井改修作業は陸上と異なり技術的、経済的制約が非常に大きい。このため坑井仕上げ計画では坑内機器の編成について十分な検討が必要である。坑内機器は、耐久性はもちろんのこと、砂、パラフィン等の各種障害に対しても適応性が要求される。

海洋油ガス田の場合、掘削費用は非常に高く、掘削坑井数をできるだけ最小限にするという命題のため、多層仕上げ、デュアル仕上げが一般的となっている。仕上げ層が2層以上の場合、スライディングサイドドアが採用され、生産における採取層の変更を容易としている。また、将来のガスリフト採取を考慮し、当初からガスリフトマンドレルやランディングニップル等を装備する事が多く、坑内編成が複雑となる。スムーズにワイヤーライン作業で坑内サービスを行なうためには、全ての坑内機器サイズを慎重に計画する事が大切となる。海底仕上げ坑井では一般坑内サービス作業（坑底圧力測定、ガスリフトバルブ類の設置や回収など）に特殊作業船が必要となるが、ポンプダウンシステムを採用してプラットフォームから直接作業を行なう場合もある。この場合は、仕上げ時に坑内にクロスオーバー（Hメンバー）を設置し、ポンプダウンツール（PDT）の流体循環を容易としている。なお、海洋生産坑井の特徴として、安全操業を確保するために海底面下にサブサーフェスセーフティバルブが取り付けられる。

### 2.1.2 坑口装置

海洋における坑口装置には、プラットフォーム上に設置される海上坑口装置と、海底面に設置される場合の2種類の海底坑口装置がある。

#### i) 海上坑口装置

海洋油ガス田で使用される坑口装置は、陸上のものと異なり、耐久性を考慮し鋼鉄塊をくりぬいてバルブゲートとステム部分を埋め込んだブロックタイプを用いることが多い。機能的には陸上のものと変わらない。

#### ii) 海底坑口装置

SPS（Subsea Production System：海底生産システム；海底において生産を行なうシステムで、海底仕上げ坑井、フローライン、海底マニホールド、海底生産処理設備などからなる）等を採用した海洋油ガス田において、海底に仕上げられた坑井に対し海底坑口装置が設置される。海底坑口装置は、大別してクリスマスツリーが水中に暴露しているウェット式と、圧力チャンバー等の耐圧殻を用いて大気圧空気環境下にあるドライ式に分けられる。典型的なウェット式およびドライ式海底坑口装置を図6.2.1に示す。

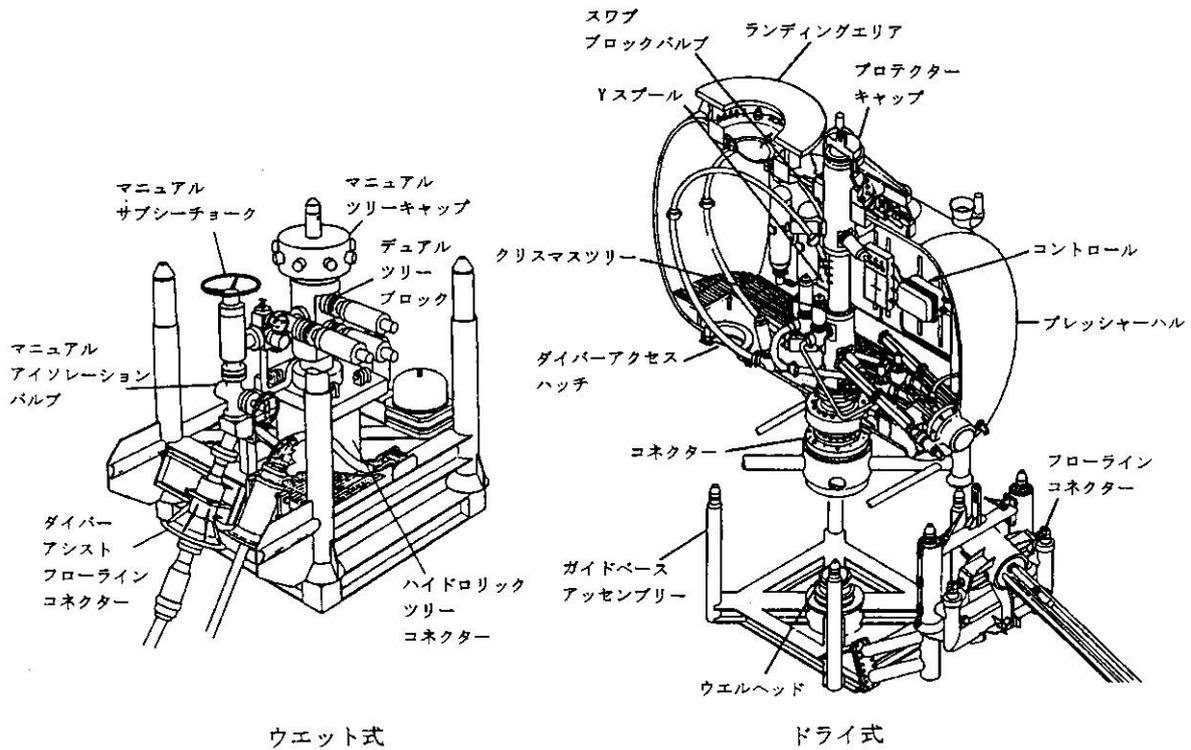


図6.2.1 海底坑口装置

海底坑口装置は、クリスマスツリー、ツリーキャップ、ウェルヘッドコントローラー等から構成され、バルブは油圧もしくは手動で操作される。また、テンプレート（ユニタイズやモジュラータイプ）を用いて一カ所から集約して掘削を行ない、複数の海底仕上げ坑井をグループ化する方式がある。海底坑口装置の主流はウエット式で、ダイバー（ダイバーによる作業は水深約 300 m が限界）や ROV によりメンテナンスが可能となっている。なお、坑井が点在し複数のフローラインを集約する必要がある場合は海底マニホールドが設置される。

海底坑口装置および海底マニホールドの制御は、プラットフォームから油圧および電気信号を用いて行なわれることが多い。制御方式には次の 5 方式がある。

- ① 直接液圧制御システム (Direct Hydraulic)
- ② パイロット液圧制御システム (Piloted Hydraulic)
- ③ シーケンス式液圧制御システム (Sequential Hydraulic)
- ④ 直接電気-液圧制御システム (Direct Electro-Hydraulic)
- ⑤ 多重電気-液圧制御システム (Multiplexed Electro-Hydraulic)

①の直接液圧制御システムは、プラットフォームからハイドロリックラインを通して直接高圧液体を海底坑口装置のアクチュエーターに送り込み、このアクチュエーターを介して坑口装置のバルブ等を開閉するシステムである。機構が簡単であり、距離が短い場合は設備費が安価となる。ただし、1 対 1 の制御方式のため制御数が制限され、距離が長い場合応答が遅いなどの短所がある。これに比べ、⑤の多重電気-液圧制御システムは、海底坑口装置上に制御モジュールを置き、プラットフォームから電気信号でモジュール上にあるアキュムレーターのソレノイドパイロットバルブを作動させ、アキュムレーターの高圧液体をアクチュエーターに送り込んでバルブ等を作動させるものである。長所としては、電気信号を使うため応答が速く長距離向きで、フレキシビリティがあり比較的単純なアンピリカルでよいことなどが挙げられる。短所としては、水中電気コネクターのトラブルが起き易く、機構

が複雑となることや高価なことが挙げられる。

採用される制御システムはそれぞれの油ガス田管理方針により異なる。一般にバックアップシステムを考慮し、2系統の制御システムを採用することが多い。

### 2.1.3 採油装置と採ガス装置

海洋の採油装置と採ガス装置はスペース的な制限を受けるため、出来るだけコンパクトで軽量、耐久性に富んだものが望まれる。基本的には陸上のものと同じだが、原油や天然ガスの性状、ガスリフト採取の有無、水攻法あるいはガス圧入法実施の有無、近接施設等を考慮して最適な装置が設置される。以下に主な採油装置と採ガス装置を述べる。

#### (1) セパレーター

陸上用とほとんど変わらないが、浮遊式生産システムでは内部にバッファープレートを入れ、船体動揺による分離効率低下を防止している。

#### (2) 原油処理装置

FPSO などの貯油出荷を行なう生産システムでは原油を出荷仕様（水分、蒸気圧：RVP など）に合わせるため、エマルジョン処理装置や蒸気圧低下装置が設置される。

#### (3) ガス処理装置

生産ガスは、販売ガスとしてデハイドレーターで水分を除去した後、パイプラインにより陸上に輸送される。燃焼処理する場合には、フレアスタックまたはグラウンドフレアを設置する。フレアスタックは、放射熱を考慮した安全な高さや距離が必要となる。グラウンドフレアは、放射熱問題は無いが高価である。なお、最近は地球環境を考慮して燃焼処理を行なうことがなくなってきた。

#### (4) 排水処理装置

セパレーターで分離された産出水は、重力式油水分離器または遠心式分離型であるハイドロサイクロン等を通して海洋に排出される。排出水の油分濃度は鉱山保安法施行規則で 10 ppm 未満（海洋施設）および 15 ppm 以下（掘削バージ）、MARPOL（海洋汚染防止条約）で 15 ppm と定められている。

#### (5) 水あるいはガス圧入用装置

基本的に陸上と同じ装置であり、水攻法の場合水攻用原水として海水が利用されることが多い。また、油層圧力維持または地下貯蔵としてガス圧入する場合は、レシプロケーティングコンプレッサーが設置される。コンプレッサーに因る振動の解析が必要となる。

#### (6) 制御システム

コントロールルームから遠隔操作により主要バルブの開閉操作および各装置、ラインの圧力・温度・流量の設定、調整、モニタリングが可能となる制御システムが計画される。一般に駆動部に空気圧式を採用するが、電気式あるいは油圧式を併用することもある。緊急遮断弁は、正常時のアクチュエーターが加圧され、バルブがオープン状態となっているが、緊急あるいは停電等のフェイル時に瞬時にアクチュエーター圧力が抜けて内部スプリング力によりクローズ状態となるフェイルセーフ機構となっている。

#### (7) その他

その他の装置には、消火設備、熱交換器・加熱器、ケミカル注入装置、ピグレシーバー、ランチャー、造水器、発電設備等がある。

近年、海洋開発が大水深に向かうにつれ、離岸距離が遠くなったことと水頭圧力（水深）が大きくなったことが生産処理上の問題となっている。このため、生産流体を海底において気液分離する海底セパレーター（Subsea Separator）や生産流体をそのままブーストアップする多相流ポンプ（Subsea Multiphase Pump）等の開発が行なわれている。

## 2.2 保安システム

海洋は陸上と比べ環境条件が厳しく、万一事故が発生しても直ちに応援に駆けつけることができるとは限らない。このため、海洋生産システムは陸上と比べ自動化が進められており、種々の事故に対し瞬時に対応できる体制が取られている。

### 2.2.1 サブサーフェスセーフティバルブ（SSSV）

海洋生産システムは、海底からプラットフォームまで高压流体が存在し、万一プラットフォームが何らかの理由により壊れたりまたは破壊されたりした場合、生産流体の漏洩により大事故や海洋汚染が発生する。このため、海洋においては生産坑井に対して海底下にサブサーフェスセーフティバルブを取り付けることが義務付けられている。

このセーフティバルブには2つのタイプがある。一つはプラットフォームから細長いパイプを海底下にバルブまで導き、常時圧力を掛けてバルブを開いておくタイプで、仮にプラットフォームや坑口が破壊された場合パイプが破れて圧力が抜け、バルブを閉じる機構となっている。もう一つは管内の流量が一定以上になった場合にバルブ内のオリフィス差圧により自動的に閉じるタイプである。後者の場合は少量の漏れで閉じにくい欠点がある。

### 2.2.2 サーフェスセーフティバルブ（SSV）

生産操作中にプラットフォームあるいはパイプライン等の施設に異常事態が発生した場合、坑口装置のウイングバルブまたは上部マスターバルブを自動的に瞬時に閉める。この自動閉止弁をサーフェスセーフティバルブと呼ぶ。バルブを閉じる条件には次のものがある。

- ① フローライン、パイプライン等に異常高圧または低圧が発生した場合
- ② セパレーター等の処理装置に異常高圧または低圧が発生した場合
- ③ 発電機などの主要装置が故障した場合
- ④ 火災発生
- ⑤ 陸上基地等の受入施設の故障

システムは、信号を伝達するケーブル、コントロールライン、警報装置および伝達信号で開閉するバルブ本体からなる。バルブ本体は空気圧、ガス圧、油圧等により開閉される。エアーコントロールラインは熱に弱いものが使用され、ライン上にヒューズプラグが取り付けられる。このラインやプラグが火災時に熱で溶けることによりライン圧力が抜け、バルブが自動的に閉じる機構となっている。

図 6.2.2 にサーフェスおよびサブサーフェスセーフティバルブシステムの例を示す。

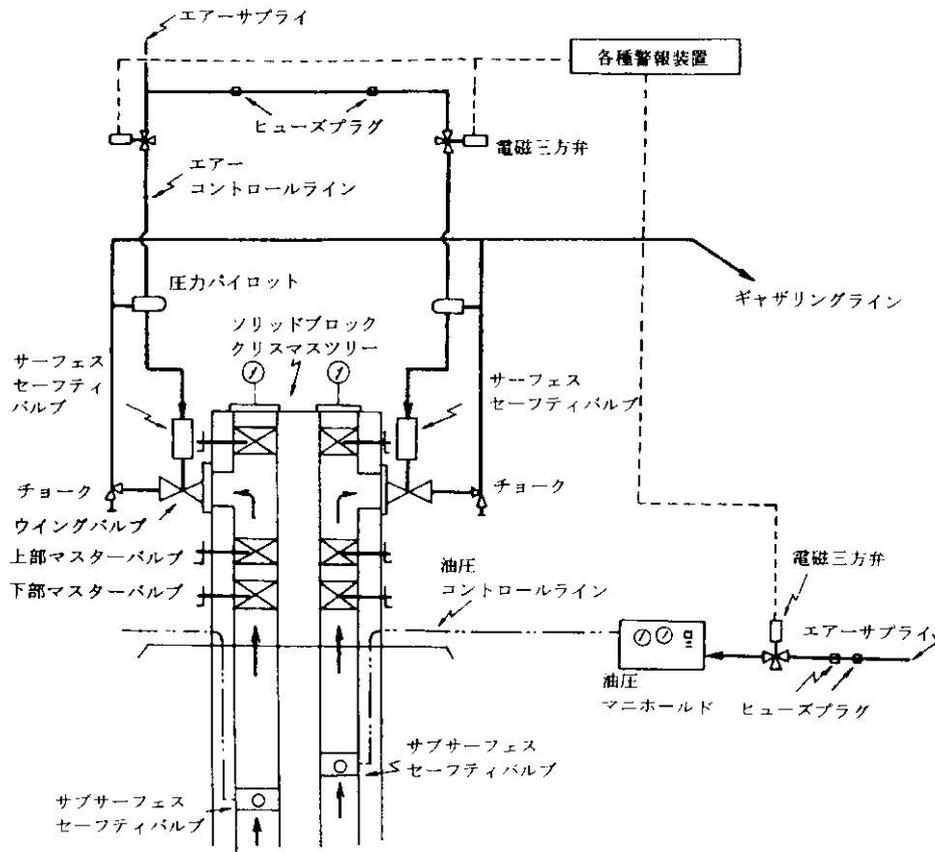


図6.2.2 サーフェス及びサブサーフェスセーフティバルブシステム

### 2.2.3 防災設備

防災設備として消火設備、救命設備および通信設備がある。

#### i) 消火設備

消火設備には消火栓設備（含スプリンクラー、水噴霧消火）、泡消火設備、不活性ガス消火設備、消火器および火災・ガス検知装置がある。消火配水管は常に加圧状態に保たれ、火災発生と同時に射水可能となっている。射水により配水管内圧力が低下した場合は自動的に消火ポンプが起動し、圧力が維持される。また、消火ポンプが電動式のため、停電時に稼動可能なディーゼルエンジン駆動の非常用消火ポンプ設置が義務付けられている。消火栓はプラットフォーム上に計画的に配置され、スプリンクラーは居住区内、噴霧装置は燃料タンクや圧力容器など輻射熱の遮断が必要とされる箇所に配置される。泡消火は、火災発生と同時に泡原液と海水を混合し、放水銃で噴射される。不活性ガス消火装置は、制御室やモーターコントロールルーム(MCC)など密閉可能な電気計装室に用いられ、消火ガス放出前に退去警報を発すると共に換気装置(HVAC)が自動停止する。

火災検知器には、紫外線、赤外線感知型(UV Detector, IR Detector)、熱感知型(Heat Detector)、煙感知型(Smoke Detector)などがあり、防火対象によって検知器が選択される。また、可燃性ガス検知器(Gas Detector)も適宜配置される。火災あるいはガス漏れが発生した場合、これを検知したシグナルが制御室にある火災・ガス検知制御盤に伝えられ、警報を発して自動的に消火体制に入る。緊急遮断ロジックにおいては火災発生が最重要項目であり、検知したら直ちにシステムのトータルシャットダウンに入る。シャットダウン状況およびアラームステイタスは、パネルないしはディスプレイに表示される。

## ii) 救命設備

救命設備には救命艇、救命筏<sup>いかだ</sup>、救助艇、救命胴衣、救命浮輪および救難信号類があり、その仕様と数量は法令や規則で規定される。救命艇は全閉型動力付で、プラットフォーム乗組員の 200 %収容となっている。また、救命筏は膨張式で、コンテナごと海面に投下すると自動的に展張する。

## iii) 通信設備

通信設備は、プラットフォームの船内通信と船外通信に分けられる。

### (1) 船内通信

船内電話、UHF 携帯無線、ページングおよび警報がある。船内電話、ページング等はプラットフォームに計画的に配置される。

### (2) 船外通信

陸上基地との通信用 HF-SSB 無線（データ送受信も含む）、作業船との通信用 VHF/FM 船舶無線および VHF/FM 携帯船舶無線、ヘリコプターとの通信用アビエーションラジオ等がある。

## 2.3 海底パイプライン

1950 年代に米国メキシコ湾湿地帯において海洋油田開発が本格化し、これと併せて輸送用の海底パイプライン敷設が盛んとなった。その後、急速な石油需要の増加に伴い海洋油田開発が活発化し、徐々に大水深や自然環境の厳しい場所においてパイプライン敷設が行われるようになって来た。現在パイプライン敷設が多い地域は、メキシコ湾、北海、ペルシャ湾、東南アジア、南アメリカ等である。

我が国最初の本格的な海底パイプラインは、1975 年に敷設された阿賀沖海底パイプライン（14 in.、約 11 km）で、その後 1983 年に磐城沖海底パイプライン（12 in.、約 41 km）、1984 年に阿賀沖北海底パイプライン（10 in.、約 17 km）、1990 年に岩船沖海底パイプライン（12 in.、約 22 km）等が敷設されている。

### 2.3.1 海底パイプラインの特徴

海底パイプラインは、陸上パイプラインと異なり海底面下に敷設され、敷設後の補修や点検等が容易ではない。また、何らかの原因によりパイプが損傷した場合は大規模な海洋汚染を引き起こす可能性もあり、パイプラインの敷設計画に際しては十分な安全面への配慮が必要となる。このため、法規等を準拠して設計を行なうことは勿論のこと、保安および環境保全を考慮し、慎重に敷設検討を行なう必要がある。

### 2.3.2 ルートの選定

#### i) 事前調査

##### (1) 海底データの収集

海底パイプラインの予定ルートに沿って水深測量と地質調査が行なわれる。水深測量により調査エリアの等高図を作成し、谷の傾向や峰の高低変化を認知する。地質データはサイドスキャンソナーやサイスミックプロファイリングにより取得する。

##### (2) 海底土質調査

予定パイプラインルートに沿ってコアサンプルを採り、海底土質の特性を調査する。一般にピストングラビティまたはバイブロ、ロータリー等の方式により 1 km 当り 1 コア採取する。

##### (3) 海洋データの収集

海洋データは海底パイプラインの設計のみならず敷設船の選定評価およびパイプラインの操業・保守に活用される。特に重要なデータは、波浪、海流、風、潮、海水の特徴などで、既存データも活用される。

## ii) ルート選定

海底パイプラインのルート選定に当たっては、最短距離を選ぶという大原則はあるが、海底地盤条件の悪い場所や障害物を避け、最も安全性の高いルートを選ぶことが大切となる。そのため、激しい低層流が存在する場所や地震活動の危険性のある地域も避けられる。

海底地盤障害としては、峡谷、火山、活断層、隆起、亀裂、地滑り、不安定土質等がある。また、選定に当たっては、将来に予定される事業計画、海上交通の実態、漁業権等の社会環境も考慮される。選定されたルートに対し以下の最終チェックを行なう。

- ① 敷設工事に必要な幅長分を含め、サーベイが行なわれたか。
- ② ルート上の海底地形および地球物理的調査評価にリスクを提起するものがないか。
- ③ 地震活動のある場所や断層箇所を適切に回避しているか。
- ④ 選択した敷設技術は確立されたものか、また、その評価は適正に行なわれたか。
- ⑤ プラットフォームとの接続では、膨張伸縮ループや将来のライン増設に対するエリアを考慮したか。
- ⑥ 既存構造物への干渉は最小限か。
- ⑦ 経済的に最も効果的なルートを選択したか。

上記チェック項目は互いに相反するものがあるが、最終的に容認できる範囲内においてパイプラインルートを選択することとなる。このため、敷設後、最終容認した項目について操業時に注目する事が大切である。

### 2.3.3 海底パイプラインの設計

#### i) 設計手順

海底パイプラインの一般的な設計手順を以下に示す。

- ① 適用規則および自然条件、社会環境に関するデータ収集
- ② 輸送条件からパイプライン径を検討
- ③ 敷設ルートの選定
- ④ 荷重計算、座屈解析および管種、管材の選定
- ⑤ 静水圧による伝播座屈とパイプラインの安定性の検討
- ⑥ パイプ溶接法の検討
- ⑦ 保温、過熱の検討
- ⑧ 防食設計
- ⑨ 敷設および埋設方法の検討
- ⑩ 漏洩検知、保守点検の検討
- ⑪ 経済性の検討

上記手段により安全性を持ち経済的なパイプラインが設計される。

海域の水深、海底土質、地形など自然条件から選ばれた敷設候補ルートを技術面、経済面の観点から検討し、最終敷設ルートを絞り込む。パイプ径、肉厚および管材料を液体の性質、輸送量、最高使用圧力、各種荷重および応力等から求める。システム検討においては加熱、冷却、保温等の温度コン

トロールやパイプ内外面の腐食対策の他、漏洩検知方法や異常圧力検知方法などの安全対策の検討も行なう。パイプライン防食はシステム検討の中で最も重要であり、海底パイプラインでは外面塗覆装と電気防食を施すのが一般的となっている。電気防食法には流電陽極法と外部電源法の2方式があるが、流電陽極法は犠牲陽極(アノード)の寿命が限られることや防食電位の管理面から外部電源法を採用することが多い。なお、敷設方法の選択によっては計画全体を左右することがあり、十分な検討が必要である。

## ii) 技術基準

わが国において石油類や天然ガスを輸送するパイプライン法令としては、石油パイプライン事業法(昭和47年法律第105号)の規定に基づく「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令」(昭和47年通商産業省、運輸省、建設省、自治省令第2号)および同告示(昭和48年通商産業省、運輸省、建設省、自治省)並びにガス事業法の「ガス工作物の技術上の基準を定める省令」および「ガス工作物の技術上の基準の細目を定める告示」、電気事業法の「電気設備に関する技術基準を定める省令」と「発電用火力設備に関する技術基準を定める告示」、「鉱山保安法施行規則(平成16年経済産業省令第96号)」、高圧ガス保安法(昭和26年法律第204号)等があり、それぞれ技術基準が定められている。

パイプラインの歴史が長い欧米諸国においては、以下の任意団体や政府機関の技術基準等がある。

### (1) ANSI (American National Standards Institute)

- ANSI Code B31.4 (Liquid Petroleum Transportation Piping Systems)
- ANSI/ASME Code B31.8 (Gas Transmission and Distribution Piping Systems)

### (2) U.S. Department of Transportation

- Code Title 49, Part 192 (Transportation of Natural and Other Gas by Pipeline)
- Title 49 Part 195 (Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline)

### (3) Det Norske Veritas

- DNV OS-F101 (Submarine Pipeline Systems, 2000)

### (4) British Standards Institution

- BS8010 (Code of Practice for Pipelines)

### (5) ISO (International Organization for Standardization)

- ISO 13623 (Pipeline Transportation Systems, 2000)

## 2.3.4 海底パイプラインの敷設

### i) 海底パイプラインの敷設方法

海底パイプラインの敷設方法は、パイプ溶接を陸上で行なうか、あるいは海上で行なうかにより大きく分けられ、海底曳航法、浮遊曳航法、敷設船法、巻取りパイプ法等がある。図6.2.3に各種パイプライン敷設方法の概念図を示す。

#### (1) 海底曳航法 (Bottom-Pull Method)

海底曳航法とは、陸上のヤードで溶接したパイプを、バージ上のウインチまたは曳船によって順次海底面に引き出す方法である。パイプの引き出し長さは、ウインチ能力とパイプ許容引張力に制限されるため、あまり長いパイプラインの敷設に適用されない。一般に、陸上施設と沖合い原油積み出し施設など短距離パイプラインの敷設に行われる。

## (2) 浮遊曳航法 (Tow-Out Method)

浮遊曳航法とは、海底曳航法と同様に陸上のヤードでパイプを溶接し、一定の長さ分をウインチで引き出してフロートを取り付け、海上に浮かべながら曳航し、沈設する方式である。長いパイプラインの場合は数本のラインに分けて曳航し、作業船上で溶接して敷設する。この方法では敷設距離に限界はないが、長いラインを海上に浮かべて曳航するため、気象海象条件により大きな影響を受ける。

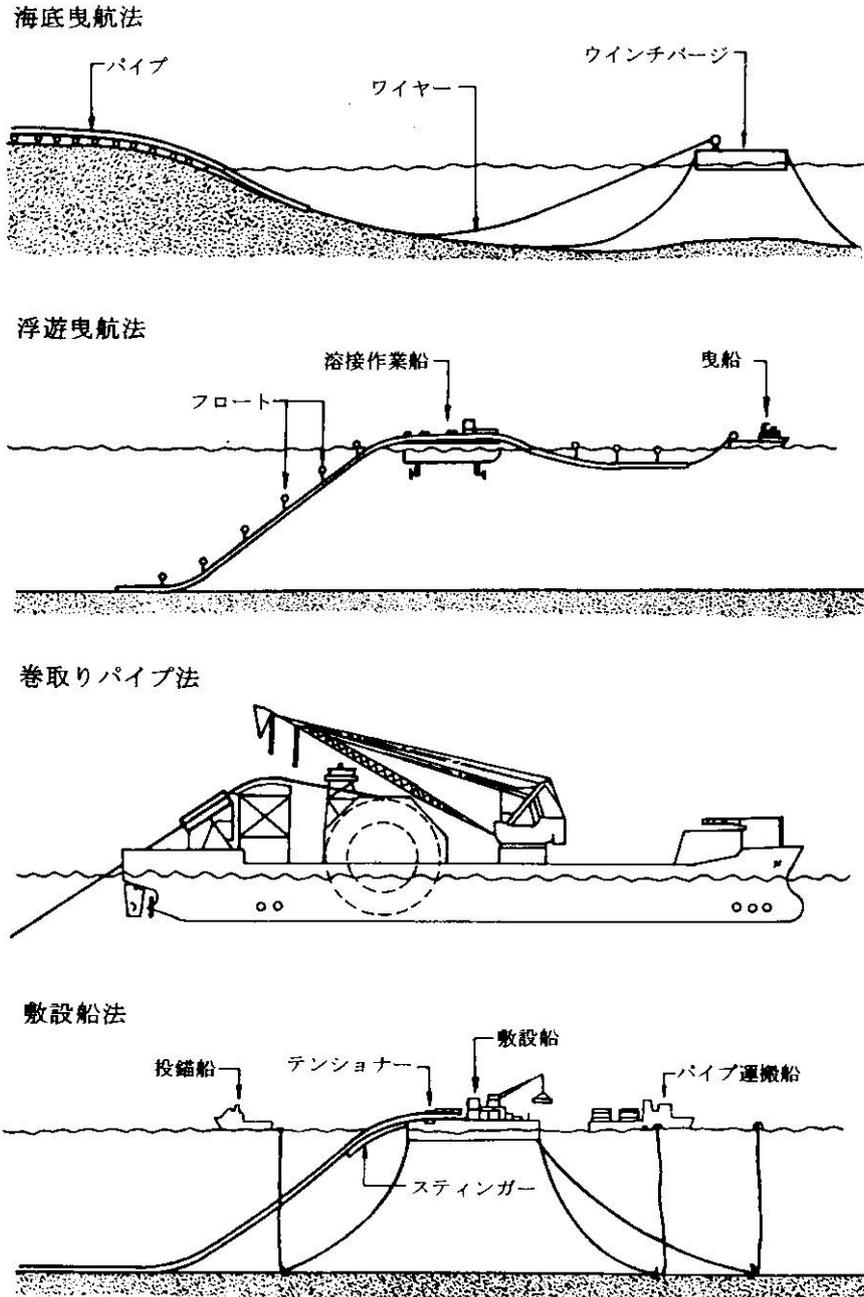


図6.2.3 海底パイプライン敷設方法

## (3) 敷設船法 (Lay Barge Method)

敷設船 Y 法とは、船上でパイプを次々に溶接して敷設する方法である。敷設船は、パイプライン敷設用として特別に設計された作業船で、波の影響を受けにくい大きな船である。大型クレーンを持ち、船上で溶接、検査、外装等の各作業が直線的に行われる。一連の作業が終わると、敷設船は前進し、

後方からパイプを張力装置（テンショナー）で一定の張力を掛けながらスティンガー上をすべらせ、海中に操り出す。この時のたわみ形状が S 字型となるため S-Lay 工法とも呼ばれる。パイプが海底に着くまで、異常な荷重が掛からないようにスティンガーの角度を調節したり、張力装置で張力を調節したりしながら順次前進してパイプを敷設する（図 6.2.4 参照）。敷設船法はパイプラインの敷設距離に限界がなく、陸上設備が必要ないことや付属作業船が小数で良い等の長所がある。現在、多くの海底パイプラインはこの方法により敷設されている。

大水深のパイプライン敷設においては、敷設時のパイプ応力を許容範囲内に押さえるため大きな張力が必要となる。これまで海底パイプラインの敷設水深限界は、テンショナーやスティンガーの能力から水深約 1,000 m と言われていたが、敷設船上にタワーを設け、ほぼ垂直に近い角度で敷設する方法が出現し、水深約 2,000 m まで可能となっている。この方法はパイプのたわみ形状から J-Lay 工法と呼ばれている。

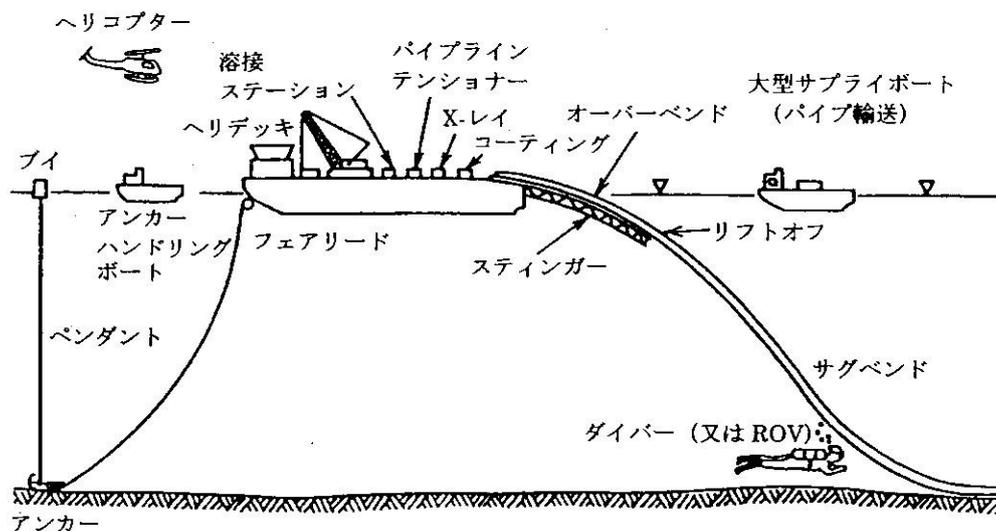


図6.2.4 敷設船オペレーションの概略

#### (4) 巻取りパイプ法 (Reel Vessel Method)

巻取りパイプ法とは、陸上で溶接したパイプを巨大なドラムに巻取り、それを現場で巻戻ししながら海底に敷設する方法である。この方法は、ラインをあらかじめテスト可能な事や、現場での敷設スピードが非常に速い等の長所がある。しかし、ドラムに巻き取るパイプ径と長さに限界があることや、コンクリートコーティングができないなどの短所がある。近年、浮遊式生産システム等のパイプライン敷設において、特殊フレキシブルパイプを用いた方法が採用されている。

#### ii) 海底パイプラインの埋設

海底パイプラインの埋設方法は、大別して先行掘削法 (Pre-Trenching) と水中掘削法 (Post-Trenching) がある。

先行掘削法は、ポンプ船やバケット船等の浚渫船を用いてあらかじめ敷設路線上を所定深さに掘り、その溝にパイプを敷設し、土砂等で埋め戻す方法である。埋め戻しは、溝の両側に積まれた浚渫土砂を用いるのが一般的であるが、投走錨に対する安全性や洗掘問題および地震時の液状化等を検討した上で埋め戻し材料が決められる。この埋設方法は、パイプを深埋する場合や水中掘削法の適用が難しい硬質な海底土質に対し行われる。しかしながら、水深が深くなるとパイプを正確に溝に設置することが難しくなるため、比較的水深の浅い場合に適用される。

水中掘削法は、パイプを海底に敷設した後にパイプ下側の土砂を高圧ジェット水で掘り削って埋設する方式、回転カッター等で掘削して敷設と同時に埋め戻す方式、および鋤（Plow）を引いて溝を掘る方式などがある。一般的にパイプライン埋設において水中掘削法を採用することが多い。

### iii) 海底パイプラインの保守管理と漏洩検知

#### (1) 保守管理

海底パイプラインの定期点検は安全操業を行なう上で重要である。定期点検において、ルート沿いに行なう目視検査、電気防食の機能検査、沈下測定や必要に応じたパイプライン洗掘調査、バルブ類の作動検査等が行われる。海底パイプラインの大事故は世界でもほとんどないが、パイプ内外面の腐食原因による漏洩や船舶等による外的損傷、あるいは関連施設のポンプ、バルブ、フランジ等に起因する小さな事故は多い。特異な例としては、北海においてコンクリートコーティング剥離により数百 m のパイプラインが浮上したケースがある。保守管理上、事故等の異常事態に備えた緊急対策マニュアルの整備とそれに従った日常の訓練が大切となる。また、海洋汚染防止器材の装備と適所配備が大切である。

#### (2) 漏洩検知

漏洩検知には、漏洩検知装置の設置、ラインパックテストおよび検査ピグ方式等がある。

##### ① 自動漏洩検知装置

パイプラインの入口と出口の流量差を測定することにより漏洩を検知する方法で、流量差が計器の誤差範囲以上となれば漏洩の可能性が大きい。ただし、この方法は定常流状態において有効とされ、非定常状態では漏洩の判断が難しい。また、大口径パイプラインでは微少な漏洩検知が難しい。

##### ② ラインパックテスト

ライン内の圧力変化を測定して漏洩を検知する方法である。パイプラインの圧力を一定に保持したまま運転を停止し、バルブを遮断して各遮断バルブ前後間の圧力変化により漏洩の有無を検知する。この方法は、かなり微少な漏洩を検知できる反面、周辺温度の影響を受け易い事や加圧中に漏洩箇所から漏出する等の欠点がある。

##### ③ 検査ピグ方式

パイプ内を、超音波プローブを搭載したピグや強磁性体を搭載した漏洩磁束検査ピグを走行させ、腐食状況や漏洩箇所を探知する方式である。これらインテリジェントピグを用いた方式は、近年パイプラインの健全性を評価するために幅広く世界中で行なわれている。

## 〔改訂履歴〕

(令和7年改訂版)

項目番号	修正前	修正後
II	掘さく	掘削 (テキスト中の表記を全て修正)
II 1.3.3	データー	データ (テキスト中の表記を全て修正)
II 1.6.1 i)	i)ケーシング	i)ケーシング の項目に「(1) ケーシングの分類」の見出しを追加
II 1.10.4 i) (1)	(1) プロダクションパッカー	(1) プロダクションパッカー の項目に「3)パッカーの設置方式」の見出しを追加
II 1.12.2 i)(2)	キャリアーガスはヘリウムが使用される	JISK2301(2022 追補)の変更内容を反映し、「キャリアーガスはヘリウム、水素、窒素が使用される」に修正
II 2.3.5 i)～ iii)	i)シェールシェーカー ii)マッドクリーナー iii)セントリフュージ	i)シェールシェーカー ii)マッドクリーナー iii)セントリフュージ の夫々に該当する図表番号を追記
II 2.8.2 iv)	iv)エンジン	iv)エンジンの項目番号 1)～15)を (1)～(15)に変更
III 1.1.3 iii)	iii)ハイドロリックポンピング	iii)ハイドロリックポンピング 3)ポンプロオープンシステムの項目番号 1)～4)を①～④に変更
III 3.1.1 vi)	vi)流量計算式 ガスの体積流量計算式 $q_v = A_q C_0 E d^2 \varepsilon F_G F_Z F_i F_M F_r \sqrt{p \Delta p}$	vi)流量計算式 ガスの体積流量計算式が JISM8010 (2020) で変更されたことから、下記計算式に変更 $q_{vN} = \frac{31.082 d^2 C_d \varepsilon Z_N F_{wv}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{p_1 \Delta p}{N_N Z_1 T_1}}$
III 3.1.3	3.1.4 渦式による方法	3.1.3 渦式による方法
III 9	「遠隔監視・制御」本文中の項目番号 i)～vii)	「遠隔監視・制御」本文中の項目番号を①～⑦に修正
III 9.8	「9.8 SCADA システム」本文中の項目番号(1)～(5)	「9.8 SCADA システム」本文中の項目番号を i)～v)に修正
IV 4.8.3	農度	濃度
V 4.2 i)	「i)消火設備」本文中の項目番号 1)～4)および(1)～(2)	「i)消火設備」本文中の項目番号を(1)～(6)に修正