

5 金属管の腐食防止措置

岩盤備蓄保安検査基準案には以下のように記載されている。

6.11 金属管の腐食防止措置

腐食防止措置として電気防食を採用した場合の検査は、目視検査、非破壊検査及び電位測定とし、6.11.1、6.11.2 及び 6.11.3 による。

6.11.1 目視検査

- a) 腐食防止措置に係る設備の外観（取り付け位置を含む）に腐食、損傷、変形及びその他の異常¹⁾がないことを1年に1回目視により確認する。
- b) 金属管の気液界面近傍における外観に腐食、損傷、変形及びその他の異常がないことを1年に1回目視により確認する。
- c) 配管竪坑内金属管の水没部における外観に腐食、損傷、変形及びその他の異常がないことを10年²⁾以内に1回目視³⁾により確認する。ただし、b)の目視検査で異常があったときも、その都度確認する。

注¹⁾ 目視で検査可能な部分に限定して実施する。

注²⁾ 10年以内に1回の検査周期（時期）については附属書Bによる。

注³⁾ 水中ビデオカメラ等により目視で検査可能な部分に限定して実施する。

6.11.2 非破壊検査

金属管の腐食による減肉及び欠陥を適切な非破壊検査方法で10年以内に1回検査する。ただし、6.11.1、b)の目視検査で異常があったときも、その都度行う。

6.11.3 電位測定

電位を1年に1回測定し、確認する。

5.1 概要

金属管（金属管サポート架構を含む）の腐食防止措置としては、材料に耐腐食性に優れているステンレス鋼を使用するとともに電気防食が採用されている。また、工事期間中の腐食防止を目的として、金属管の表面には2000 μ mのコーティングが施されている。

(1) 金属管の材質

金属管の材質を次に示す。

- | | |
|-------------|--------------|
| ① 金属管 | SUS 316 L |
| ② 金属管溶接材料 | インコネル 625（注） |
| ③ 金属管サポート架構 | SUS 316 A |

注：倉敷基地では金属管周継ぎ手溶接に採用し、波方基地では周溶接継ぎ手及び金属管縦シームの被覆溶接として採用。

(2) SUS316 系ステンレス鋼の耐食性

配管竪坑内において考えられるステンレス鋼の腐食は、応力腐食割れ（SCC）、孔食、隙間

腐食及び微生物腐食であり、塩化物イオン濃度及び温度が高く pH が低い環境ほど発生しやすい。また、微生物が介在すると隙間腐食の発生を促進することがある。波方基地及び倉敷基地とも配管竪坑は原則として補給水には工業用水等の淡水を用い、水温は 20℃前後で安定した環境である。このような環境での SUS316 系ステンレス鋼の耐食性を以下に示す。

① 耐応力腐食割れ(SCC)

SUS316 系ステンレス鋼は、30℃以下の温度では塩化物イオン濃度に関係なく応力腐食割れは発生しない。

② 耐孔食

SUS304 ステンレス鋼で pH=2、7、12 のいずれの環境でも 25℃以下の温度では約 100ppm の塩化物イオン濃度まで孔食は発生せず、より耐食性に優れる SUS316 系は孔食を発生しない。

③ 耐隙間腐食

SUS316 ステンレス鋼は 40℃以下の温度では塩化物イオン濃度 1000ppm 近傍まで、100ppm 以下では温度によらず隙間腐食は発生しない。

④ 耐微生物腐食

塩化物イオン濃度 45mg/l、温度 25℃以下において、SUS316L ステンレス鋼で微生物腐食（隙間腐食）が発生した例はない。

(3) コーティング仕様

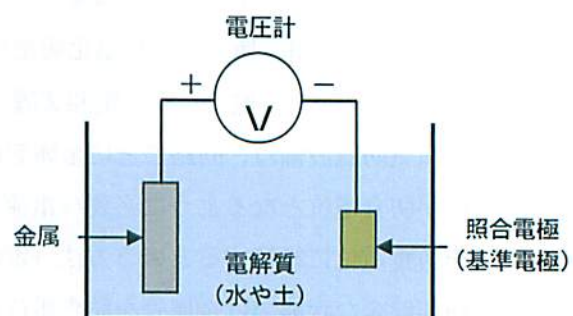
金属管の表面に施されているコーティングの仕様を以下に示す。

- | | |
|------------|--------|
| ① コーティング形式 | 超厚膜型被覆 |
| ② 被覆の材質 | エポキシ樹脂 |
| ③ 塗布膜厚 | 2000μm |

(4) 電気防食設備

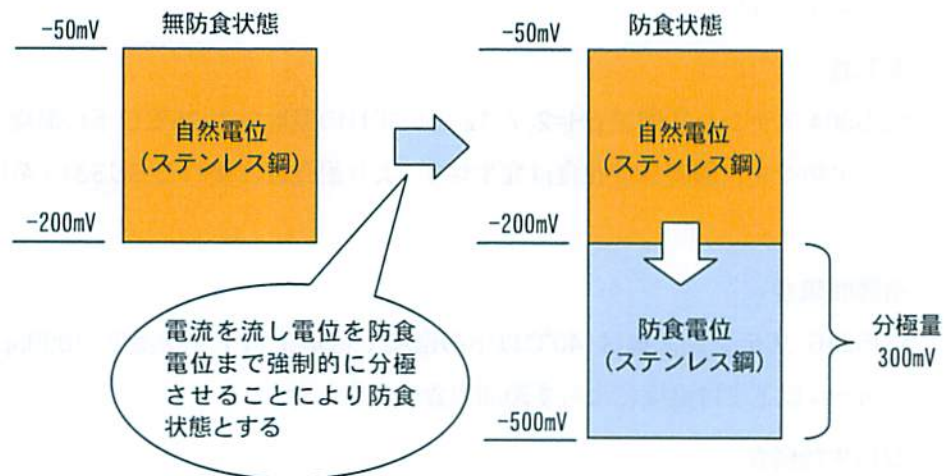
① 電気防食の原理

金属は、電解質中でその金属特有の電位を示す。下図に示すように、電解質溶液中に金属と基準電極（以下、照合電極）を入れ、金属と照合電極の間に電圧計を入れると電圧が測定される。この電圧のことを金属の電位（または自然電位）といい、金属の種類に応じた特有の値を示す。自然電位は、金属の種類のほか、表面状態や環境側の因子（pH や塩類濃度など）等により異なるが、炭素鋼では -600mV~-700mV (vs SCE)、一般的



なステンレス鋼では $-50\text{mV} \sim -200\text{mV}$ (vs SCE) 程である。

金属表面の電位は、金属の表面に電流を流入させることで卑(マイナス方向)に変化する。この電位変化を分極といい、自然電位から卑に $200\text{mV} \sim 300\text{mV}$ 程度分極させると腐食反応は停止する。このときの電位が、その金属の防食電位となる。電気防食は、金属に電流を流すことで自然電位を強制的に防食電位まで持っていき、その電位を維持して防食を達成させるものである。ステンレス鋼の電気防食の概念を図で表せば下図のようになる。



② 設備概要

電気防食の方法には、外部電源方式と流電陽極(犠牲陽極)方式があるが、配管竪坑の金属管には、図 5-1 に示す外部電源方式の電気防食設備が採用されている。電気防食設備の概要を以下に示す。

a. 全般

- 1) 電気防食方式 : 外部電源方式
- 2) 制御方式 : 定電位自動制御

b. 設計条件

- 1) 防食電位 : 0.2V 卑側にシフトまたは $-500\text{mV vs. SCE} \sim -1050\text{mV vs. SCE}$
- 2) 防食電流密度 : 0.1A/m^2

c. 設備概要

- 1) 通電電極 : 線状電極
- 2) 照合電極 : 飽和塩化銀電極
- 3) その他 : 直流電源装置、電極保護管

電気防食設備は、回路ごとに金属管の電位を測定する照合電極を設置し、照合電極の電位が防食電位となるように必要な電流を線状電極から金属管に流すことで、金属管の電位を防食電位に維持するという方法(定電位制御)で運転される。したがって、金属管の被覆が健全な状態では金属管を防食電位に維持するのに必要な電流は少なく、被覆が劣化するに従い必要電流が増加することになる。

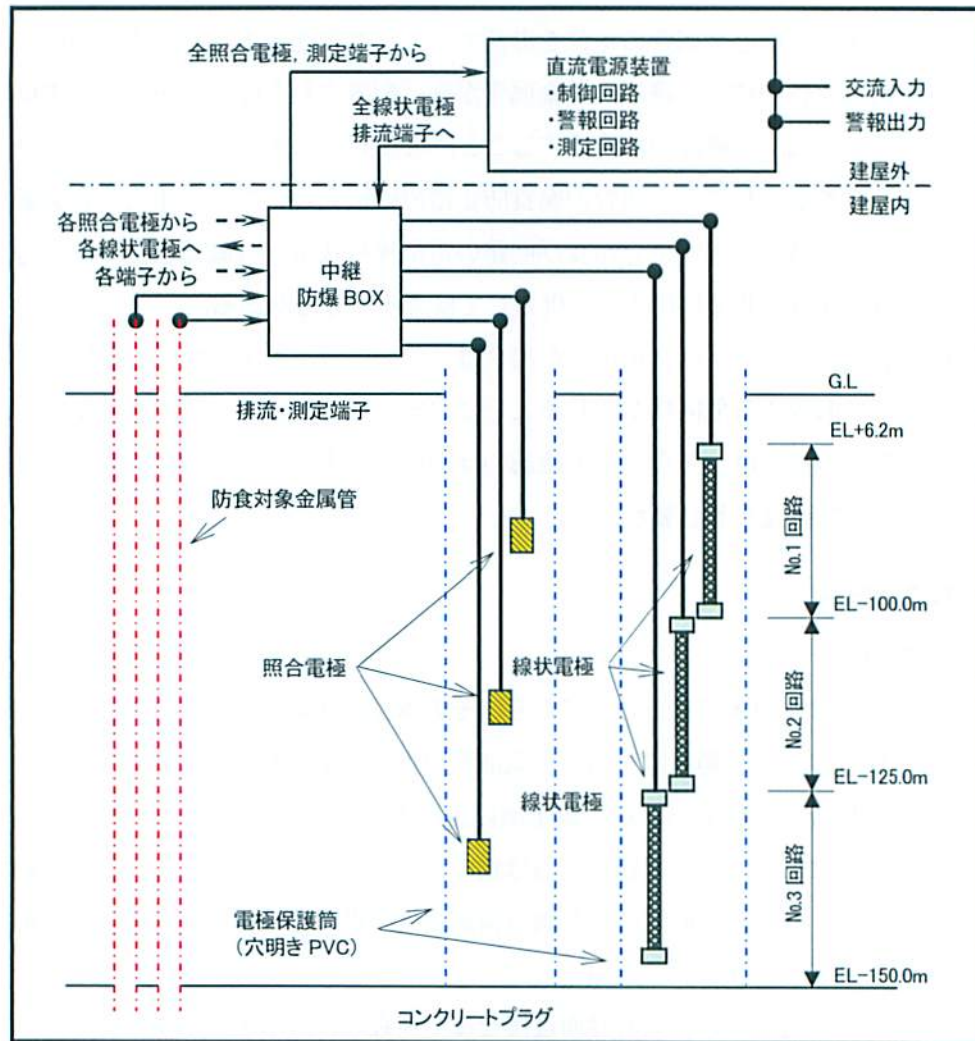


図 5-1 外部電源方式設備概要図

5.2 検査

(1) 検査の目的

腐食の検査は、初期の段階で腐食を発見し腐食によるトラブルを未然に防止することを目的に実施され、腐食の兆候や有無の確認には目視検査が有効な方法であるが、配管竖坑においては金属管の目視可能な範囲は限られる。金属管及び金属管サポート架構は材料として SUS316L を使用し、コーティング及び電気防食を行っている。金属管及び金属管サポート架構の最も腐食しやすい部位は界面部であり、水没部の腐食の可能性は界面部より小さい。このため、6.11.1 b) の気液界面近傍（界面の 1m 程度下部及び上部気相部を含む）の目視検査を重点的に行うこととし、6.11.1 c) の水没部の目視検査は目視可能な範囲で良いこととした。

一方、金属管の腐食防止措置として採用されている電気防食は、強制的に金属の電位を防食電位に維持して腐食を抑制するもので、理論的に確立された防食方法である。水中や土中における金属の腐食は電気化学現象であり、電気防食下で防食電位が維持されていることは、

防食が達成されていることを示すものである。防食電位は、前述の「電気防食の原理」に示すように照合電極と金属管の電位を計測することで可能であるが、1つの照合電極で計測できる範囲は比較的狭く、縦に長く金属管が密に配置された配管竪坑で防食電位が維持されていることを全域かつ継続的に確認することは現実的には困難である。

これらを考慮すれば、金属管の腐食防止措置の検査としては、電気防食装置の健全性、防食電位（検査時点での電位分布及び回路の電位維持状況）の確認とともに、範囲は限られるものの目視検査、非破壊検査等を併用して検査する必要がある。

配管竪坑の金属管が腐食損傷した場合は、その位置にもよるが、岩盤貯槽内の液化石油ガスが外部に漏洩する危険性が生じることになる。したがって、この意味からも、金属管の腐食防止措置の検査は、防食電位の確認のほかに、有害な腐食が現れないことを、目視検査や非破壊検査で確認する必要がある。

(2) 検査の方法

① 目視検査

配管竪坑は水封水で満たされており、その水深は150m以上になる。したがって、直接の目視検査が可能な範囲は水封水の気液界面近傍に限られる。比較的浅い箇所は潜水夫による目視検査が可能であるが、数十m以深は水中カメラ等の機器を導入しての検査となる。この場合においても、配管竪坑内は狭く、潜水夫や水中ビデオカメラの移動可能な範囲は限られる。一方、一般的に、金属の腐食は気液界面近傍のように環境が変化する箇所に発生し易いことが知られている。

これらを考慮すれば、気液界面近傍を毎年検査し、潜水夫や水中ビデオカメラによる水中部の検査は、電気防食と国内外の実績を考慮して10年以内に1回実施する。ただし、毎年の気液界面近傍の検査で何らかの腐食の兆候が見られた場合にも水中部の検査を行う。

② 防食電位の確認

防食電位は、照合電極を用いて測定が可能である。照合電極で電位を測定できる距離には限りがあるが、配管竪坑内に照合電極を吊り降ろしながら一定間隔で電位を測定することで、深さ方向の防食電位分布の測定が可能である。また、回路ごとに設けられた照合電極の電位は、その回路を代表する電位としてDCSに記録を蓄積することが可能であり、代表値ではあるが継続的な防食電位の維持記録の確認が可能である。

なお、明石らのステンレス鋼の自然海水中の腐食電位経時変化に関する報告（防食技術,32,(1983)239）には、自然海水中でステンレス鋼が腐食電位に貴化するまでには 10^6 秒（10日）以上の期間があることが示されており、これによれば、点検等による装置の短期的な停止は、防食電位の継続維持にはほとんど影響しないものと思われる。

③ 非破壊検査

非破壊検査には、放射線、磁力、超音波等を利用した検査があるが、金属管の腐食検査に

は、金属管の内側から行う超音波探傷検査が有効である。この超音波探傷検査に関しては、
「オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験方法 (NDIS 2424:2004 平成 16
年 2 月 25 日制定 社団法人日本非破壊検査協会)」を参考として、倉敷基地にて初期肉厚
測定を兼ねて試験的に実施し、その有効性が確認されている。

なお、金属管内部からの非破壊検査を行うには、内管設備の抜き出し等の作業が必要であ
り、実施するには多大な労力と費用を必要とする。防食電位の確認、可能な範囲の目視検
査が定期的に行われることから、水中部の目視検査と同様に、10 年以内に 1 回実施する。
ただし、毎年の気液界面近傍の検査で何らかの腐食の兆候が見られた場合にも非破壊検査
を行う。

6 金属管の漏えい遮断措置

岩盤備蓄保安検査基準案には以下のように記載されている。

6.12 金属管の漏えい遮断措置

金属管の破損により液化石油ガスが漏えいしたときに安全に、かつ、速やかに遮断するための措置としてのフェールセーフバルブに係る検査は目視検査、漏れ検査及び作動検査とし、6.12.1、6.12.2 及び 6.12.3 による。

6.12.1 目視検査

フェールセーフバルブの地上部設備の外観¹⁾に異常がないことを1年に1回目視により確認する。

注¹⁾ 外観には地上部の油圧発生設備等の取付位置、構造を含み、目視で検査可能な部分に限定して実施する。

6.12.2 作動検査

作動検査は、作動域全域について遠隔操作にて正常に作動することを1年に1回確認する。ただし、漏れ検査を行わない年の検査においては、フェールセーフバルブの作動油圧の圧力を低下させた後に、金属管上部を開放し金属管上部の圧力が低下することを確認することにより作動検査の代替とすることができる。

6.12.3 漏れ検査

漏れ検査は、保安上支障のない漏れ量以下であることを5年以内に1回確認する。

6.1 概要

岩盤貯槽の建設申請では、漏えい遮断措置として水シールによるものとして認可を受けている。水シールとは金属管内に水を注入することにより貯槽内と地上部とを遮断するものである。

その後、水シールより遮断時間の短いフェールセーフバルブを設置するという設計変更を行っている。

配管竪坑プラグを貫通して直接岩盤貯槽に接続している金属管の周囲は水封水で満たされており、金属管が損傷した場合は速やかに補修を行うことは困難である。損傷は小さくても、長期間になれば大量の液化石油ガス漏えいに繋がる恐れがある。したがって、配管竪坑の金属管に対しては、耐震構造、腐食防止措置に加えて漏えい遮断措置を講じておく必要がある。

(1) フェールセーフバルブ

金属管の漏えい遮断措置としてフェールセーフバルブを設置し、配管竪坑プラグ又はその下部の位置で遮断する方法が採用されている。フェールセーフバルブは油圧を駆動源とした遮断弁で、海外の液化石油ガス岩盤貯槽で多くの実績がある。

フェールセーフバルブには二型式あり、金属管が底水排水槽に達している液化石油ガス受入管、液化石油ガス払出用金属管、液面・界面計用金属管及び液面・界面警報計用金属管に

金属管の遮断弁の設置位置及び水シールの状況を図 6-1 に、ウェッソ式フェールセーフバルブの概要を図 6-2 に、ハリバートン式フェールセーフバルブの概要を図 6-3 に示す。また、参考として、フェールセーフバルブを設置している海外の岩盤貯槽の例を表 6-1 に示す。



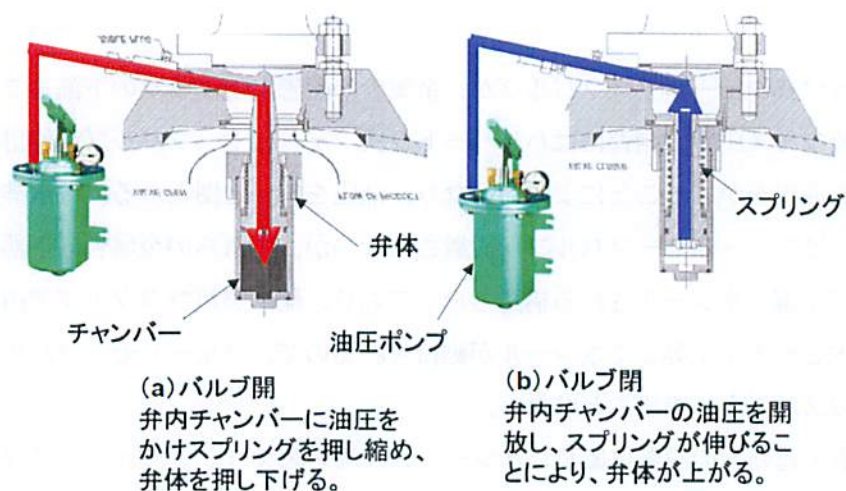


図 6-2 ウェット式フェールセーフバルブの概要

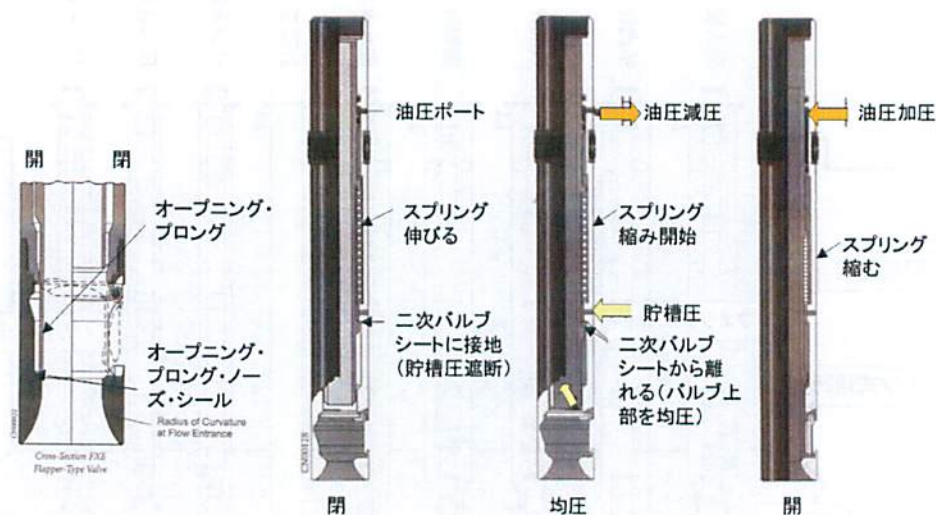


図 6-3 ハリバートン式フェールセーフバルブの概要

表 6-1 海外のフェールセーフバルブ設置岩盤貯槽の例

国	所有者	基地	貯槽	完成年
フランス	GEOGAS-LAVERA	LAVERA	プロパン/ブタン	1971/1984
	GEOVEXIN	GARGENVILLE	プロパン	1977
	PRIMAGAZ	LAVERA	プロパン	1997
オーストラリア	ELGAS	SYDNEY	プロパン	2000
ポルトガル	SIGAS	SINES	プロパン	2001
中国	CALTEX-SOE	SHANTOU	プロパン/ブタン	1999
	BP-NINGBO HUADONG LPG	NINGBO	プロパン/ブタン	2002
韓国	E1 CORP.	YOSU	プロパン/ブタン	1983
	SK-GAS	ULSAN	プロパン/ブタン	1988
	KNOC	PYONGTAEK	プロパン/ブタン	1989
	KNOC	PYONGTAEK	プロパン	1996
	SK-GAS	PYONGTAEK	プロパン	1999
	E1 CORP.	INCHON	プロパン/ブタン	2000

注：韓国の基地では、液面計を除く金属管にフェールセーフバルブを設置

(2) 金属管とのシール（シェブロンシール）

フェールセーフバルブはメインテナンスのために、抜き出しが可能な構造となっている。ウェッソ式フェールセーフバルブのメインテナンス時は、底水排水槽の水位を金属管下部以上に上げたのち、金属管内を脱圧して底水を金属管内に導入することで水シールが達成され、金属管の上部を開放することができる。

このように、ウェッソ式フェールセーフバルブは、メインテナンスで抜き出せるように、金属管と V パッキン(シェブロンシール)でシールされたインナーシェル内に収納して設置されている。ハリバートン式フェールセーフバルブについても、部品構成等は異なるものの、基本的な構造は同じである。

ここに示したように、フェールセーフバルブによる金属管の漏えい遮断措置は、シェブロンシールを含むシステムとして遮断機能を発揮するものである。

ウェッソ式フェールセーフバルブ周りのシールシステムの概要を図 6-4 に示す。

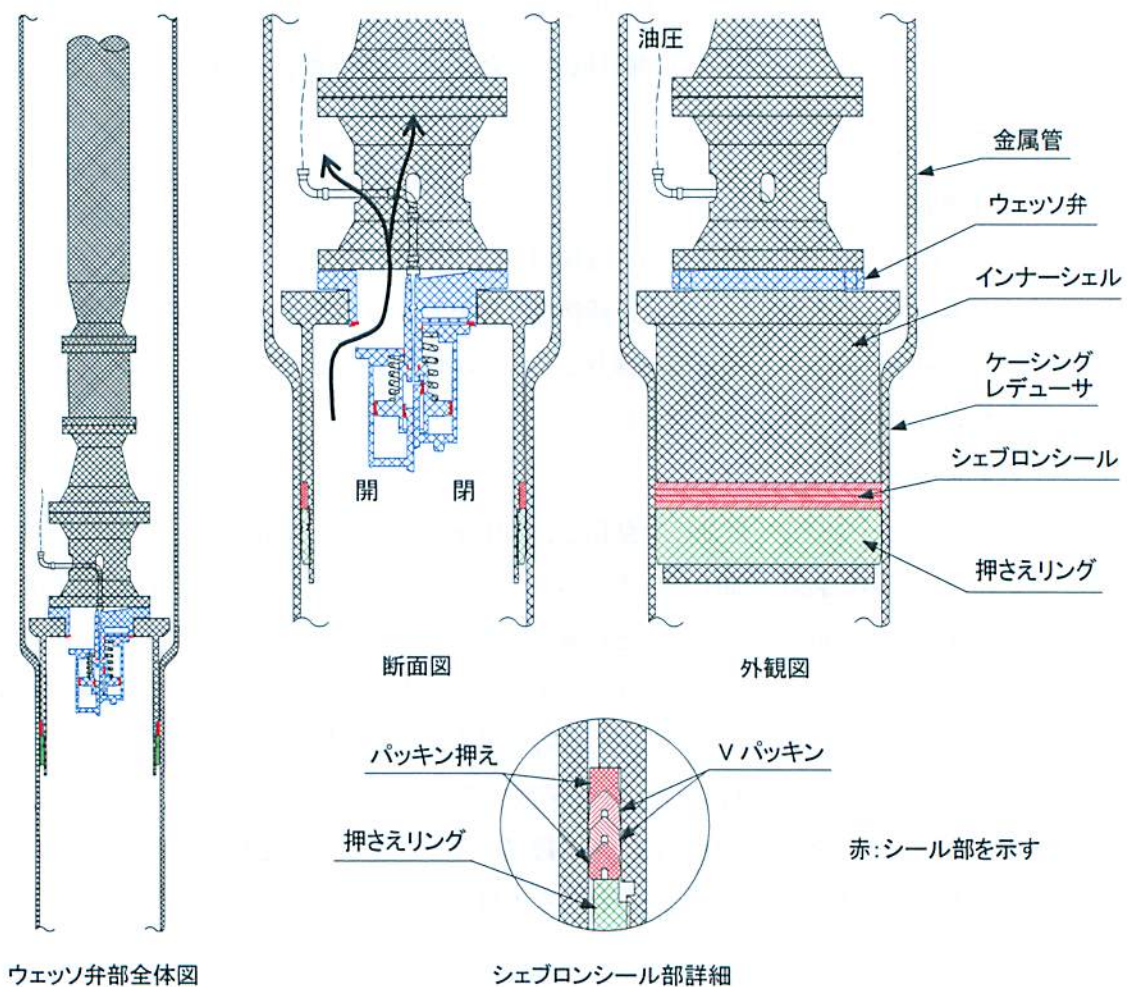


図 6-4 ウェッソ式フェールセーフバルブ周りのシールシステムの概要

6.2 検査

金属管の漏えい遮断措置の検査は、フェールセーフバルブ単体を対象としたものではなく、駆動装置、シェブロンシール等を含めたシステムの検査と位置付ける必要がある。

(1) 検査の目的

金属管の漏えい遮断措置は、金属管の破損により液化石油ガスが漏えいしたときに安全に、かつ、速やかに遮断するための措置であるので、現に、有効に遮断できるかどうかを確認することを目的として行う必要がある。したがって、外観等の目視確認、作動確認の他に漏れ量の確認が必要となる。

設計変更によるフェールセーフバルブについての完成検査は、気密試験後に保安検査で行う漏れ検査と同様に漏れ量の確認を行うことで県の了解を得ている。

漏れ検査ではフェールセーフバルブの遮断性能として保安上支障のない漏れ量以下であることを確認することとし、漏れ量の許容値については、API (American Petroleum Institute) の油井やガス井に使用するバルブの許容漏れ量を規定した規格 (API 14B (ISO 10417) の Annex E) である『低圧の場合に漏れ量の許容値は $0.43\text{m}^3/\text{min}$ 』を採用する。

(2) 検査の方法

① 目視検査

金属管の漏えい遮断措置に関わる設備のうち、直接遮断動作する箇所 (フェールセーフバルブ本体等) は金属管内にあり、通常では目視検査ができない。目視検査の対象は地上部にある駆動装置等の目視可能な部分とし、金属管内のフェールセーフバルブ本体等は、作動検査で対応する。

② 作動検査

フェールセーフバルブは油圧で動作し、油圧を加えることで開き、抜くことで閉まる。したがって、駆動装置の油圧を抜き、フェールセーフバルブ上部の金属管を大気圧に開放して金属管内圧が低下していくことを確認する。

ここで、払出ポンプ下部にあるウェッソ式フェールセーフバルブは液化石油ガスの液中にあるので、正常に動作してもその上部の金属管内には液化石油ガス液が残留する (図 6-1 参照)。この状態で金属管を大気圧に開放するため、フェールセーフバルブシステムが正常に機能しても金属管の圧力の低下は緩慢になることが予想される。作動検査は、金属管の圧力が低下することが確認できればその目的が達成される。

③ 漏れ検査

漏れ量の確認は、前記の作動確認に示した方法で金属管の圧力低下の確認後、再度金属管を大気圧から密閉して圧力の上昇速度を測定し、測定結果から漏れ量を計算することで確認が可能である。

漏れ量の確認は、フェールセーフバルブシステムの上部に残留液化石油ガスがない状態で実施する必要がある。検査の前に管内の液化石油ガス液を窒素等で貯槽内に排除し、さらに多少残る液化石油ガス液の気化が終了するまでの放置期間をとったのちに検査を行う必要がある。

漏れ量の許容値については、国内法規等に類似の規定はないが、API (American Petroleum Institute) に、油井やガス井に使用するバルブの許容漏えい量を規定した規格(API 14B (ISO 10417) の Annex E) がある。この規格は、ハリバートン式フェールセーフバルブを対象としたものである。

ハリバートン式フェールセーフバルブの現場取付後の漏れ量の判定基準(許容値)については、ガス井に使用するバルブとして API 14B (ISO 10417) の Annex E に規定があり、『低圧の場合に漏れ量の許容値は $0.43\text{m}^3/\text{min}$ 』としており、検査における実漏えい量は、次式により算出することとしている。

$$q=9.68 \times p \times V/t$$

q : 検査における実漏れ量 [m^3/min]

p : 検査におけるフェールセーフバルブ上部の管内圧上昇値 [MPa]

V : フェールセーフバルブ上部の管内容積 [m^3]

t : 検査における計測時間 [min]

一方、ウェッソ式フェールセーフバルブ本体の判定基準については、API 及び ISO に規定がなく、メーカーの社内基準では『漏えいなし』と規定している。しかしながら、漏れ検査は、フェールセーフバルブ本体のみではなく、シェブロンシール、ケーブル貫通部を含めた漏えい遮断部全体の漏れ量を検査するものであるのでハリバートン式フェールセーフバルブと同様の漏れ量が許容されと考えられる。

この API 14B (ISO 10417) の Annex E に規定している『漏れ量の許容値は $0.43\text{m}^3/\text{min}$ 』が保安上支障のない漏れ量か否かを判断するため、 $0.43\text{m}^3/\text{min}$ の漏れが発生した時の防護構換気ダクト出口の液化石油ガス濃度を算出してみると、

- ・防護構内床面積 : 139.24m^2 ($11.8\text{m} \times 11.8\text{m}$)
- ・通気(換気)能力 : 床面積 1m^2 につき $0.5\text{m}^3/\text{min}$ (コンビ則例示基準 3 4)
- ・通気(換気)量 : $69.62\text{m}^3/\text{min}$

から $0.62\text{vol}\%$ となり、液化石油ガスの爆発下限濃度(プロパンの場合 $2\text{vol}\%$ 、ブタンの場合 $1.5\text{vol}\%$) を大きく下回っており、API 14B (ISO 10417) の Annex E に規定している『漏れ量の許容値は $0.43\text{m}^3/\text{min}$ 』は保安上支障のない漏れ量であると判断できる。

これらのことから、金属管の漏えい遮断措置としてフェールセーフバルブを採用した場合の機能検査における判定基準は、『漏れ量が $0.43\text{m}^3/\text{min}$ 以下であること。』とする。

7 金属管地上部分の破損防止措置

岩盤備蓄保安検査基準案には以下のように記載されている。

6.13 金属管地上部分の破損防止措置

金属管地上部分の破損を防止するための措置に係る検査は目視検査とし、設備¹⁾の外観²⁾に破損、変形、劣化損傷等の異常がないことを1年に1回目視により確認する。

注¹⁾ 破損を防止するための措置に係る設備には、防護構、つり荷の落下防止器具（常設の器具がある場合）、車両止めがある。

注²⁾ 外観には取付位置、構造を含み、目視で検査可能な部分に限定して実施する。

7.1 概要

金属管地上部分の破損防止措置は、破損した場合に液化石油ガスが漏えいする可能性のある配管及び液化石油ガスが漏えいしたときに安全に速やかに遮断するための設備を外的要因による破損から防護することを目的としている。

これらを踏まえ、配管竪坑上部の金属管、金属管から地震防災遮断弁までの接続配管及び金属管上部に設置される計器本体を包含する範囲を対象として、金属管地上部分の破損防止措置を講じている。

金属管の地上部分が外的要因により破損する場合としては、メンテナンス作業時におけるクレーン作業での吊り荷の落下等の上部要因と、クレーン車等の工事車両の接触等の側面要因を考え、これらの要因に対し、以下に示す措置を施すこととしている。

(1) 防護構

防護構本体は鉄筋コンクリート（RC）造で、上部に鋼製屋根が設置される。防護構本体は配管竪坑と一体となっている防護構基礎の上に設置されており、本体及び屋根を含めて、高圧ガス保安法耐震告示に示す耐震構造物となっている。

防護構に関わる設計荷重としては、長期荷重として防護構自重（鋼製屋根荷重含む）＋配管荷重＋上載荷重を、短期荷重として長期荷重＋衝撃荷重を見込んでいる。なお、衝撃荷重は、配管竪坑周りでのメンテナンス作業時に落下する可能性のあるもののうち最大重量物である払出ポンプ本体重量の200%を静的集中荷重として見込むことで代替し、耐震設計がなされている。

(2) 車両止め（ガードレール）

車両止めとしては、防護柵の設置基準・同解説（（社）日本道路協会）の区間区分C（衝突速度30km/h未満）相当のガードレールを設置することとしている。

(3) 吊り荷の落下防止対策

サブマージドポンプの吊り治具のリフティングラグは2個とし、吊りワイヤーは複数個使

用して落下防止の対策を施す。

7.2 検査

(1) 検査の目的

金属管地上部分の破損防止措置のための設備には、機械的な可動部を有するものはない。
構造物等に有害な腐食、損傷、変形及びその他の異常がないことを確認する必要がある。

(2) 検査の方法

構造物等に有害な腐食、損傷、変形及びその他の異常の有無を目視にて確認する。

8 水封機能を維持するための措置

岩盤備蓄保安検査基準案には以下のように記載されている。

7 水封機能を維持するための措置

水封機能を維持するための措置に係る検査は目視検査、作動検査とし、7.1 及び7.2 による。水封機能の検査は、7.3 による。

7.1 目視検査

水封機能を維持するための措置に係る設備の外観²⁾に腐食、損傷、変形及びその他の異常がないことを1年に1回目視により確認する。

7.2 作動検査

水封水供給ポンプ及び底水排水ポンプの起動、停止機能について、1年に1回作動させ、確実に作動することを確認する。

7.3 水封機能の検査

水封機能が維持されていることを下記項目について1年に1回確認する。

- a) 地下水位が限界地下水位以上であること。
- b) 湧水量が設計湧水量以下であること。
- c) 間隙水圧が管理値以上であること。

8.1 概要

(1) 保安検査基準の考え方

高圧ガス保安法では、自主保安を前提としているために、日常管理の内容を保安検査に追加することは、規制強化に繋がる恐れがあるとの考え方から、保安検査では保安検査時に確認できる事項のみを対象として検査することとした。しかしながら、水封機能は岩盤貯槽の健全性を確保する上で最も重要なものであるので、定期自主検査指針は、以下の考え方により作成している。

(2) 水封機能の概念

水封式岩盤貯槽は、岩盤貯槽周辺の地下水圧を貯槽内圧以上に高く保持することで、岩盤貯槽内の液化石油ガスを封じ込めることで気密性を保持している。水封方式には、自然水封方式と人工水封方式があり、通常は、液化石油ガスのように蒸気圧が大気圧より高いものを貯蔵する場合は、人工水封方式を採用することが多く、波方基地、倉敷基地でも人工水封方式を採用している。人工水封方式は、人工水封設備(水封トンネル及び水封ボーリング)を設け、水封水を供給することで貯槽周辺での必要な地下水圧(間隙水圧により評価)を保持し、水封機能の維持を図るものである。

この水封機能が維持されていることの確認は岩盤貯槽の管理において最も重要な項目の一

つで、貯槽空洞の安定性、耐圧性能、気密性能についても、水封機能の維持を確認することにより評価される。人工水封方式における水封機能の概念を図 8-1 に示す。

岩盤貯槽の水封機能の状態は、岩盤貯槽周辺の間隙水圧により把握できる。間隙水圧は岩盤全体の水収支に影響され、地震や人為的な揚水、土地造成等の要因を除けば、岩盤の水収支は、水封水供給量、岩盤貯槽への湧水量及び自然涵養量に支配される。自然涵養量は、降水量、表面流出量、蒸発散量、潮位等に支配される。岩盤貯槽周辺の水収支の概念を図 8-2 に示す。 図 8-2 に示されている限界地下水位、地下水位、間隙水圧、自然涵養量について以下に記述する。

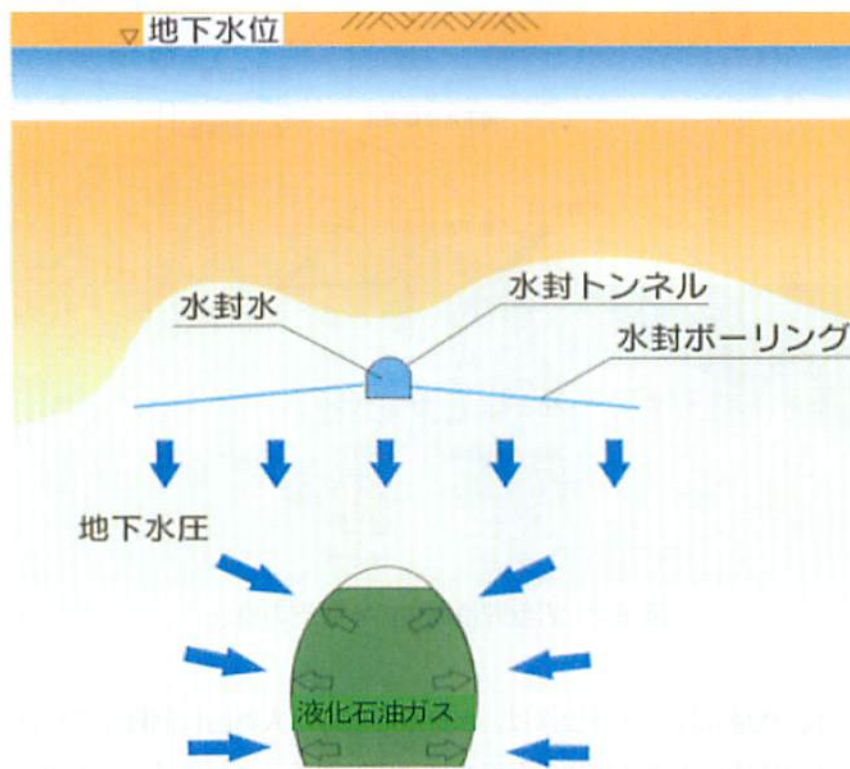


図 8-1 人工水封方式における水封機能の概念図

① 限界地下水位

岩盤貯槽周辺の間隙水圧を貯槽内圧以上に高く保持するために、一定以上の地下水位を維持する必要がある、これ以下に下げてはならない水位として限界地下水位がある。

波方基地の限界地下水位は岩盤貯槽天端から 135m 上の EL-15.0m に、倉敷基地の限界地下水位は 145m 上の EL-15.0m に設定されている。

② 地下水位と間隙水圧

一般に、ある深さの地点の間隙水圧はその上部の地下水位に支配されるが、岩盤は一様ではなく、地下水圧はいわゆる水みち等を通して作用するため、当該地点の真上の地下水位

が真下の間隙水圧にそのまま反映されるわけではない。水封機能の維持に必要なのは岩盤貯槽周辺の間隙水圧であることから、地下水位と間隙水圧の双方の管理が重要である。

③ 自然涵養量

人工水封方式では、人工水封設備（水封トンネル及び水封ボーリング）に水封水を供給することで、岩盤貯槽周辺の地下水位の安定化を図るが、地下水の水源の大半は降雨の自然浸透等による自然涵養である。人工水封設備へ供給する水量は、この自然涵養の量と岩盤貯槽への湧水量とのバランスから決まってくる。

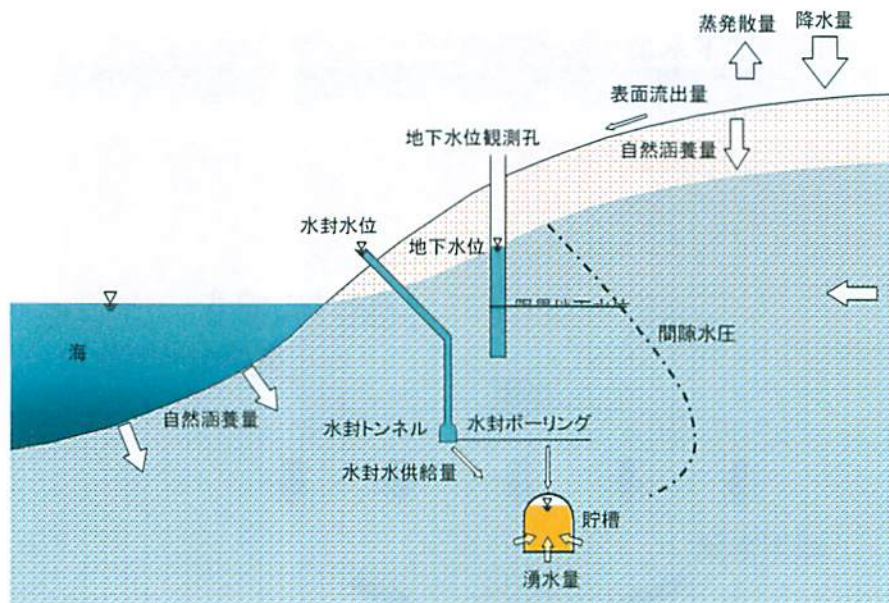
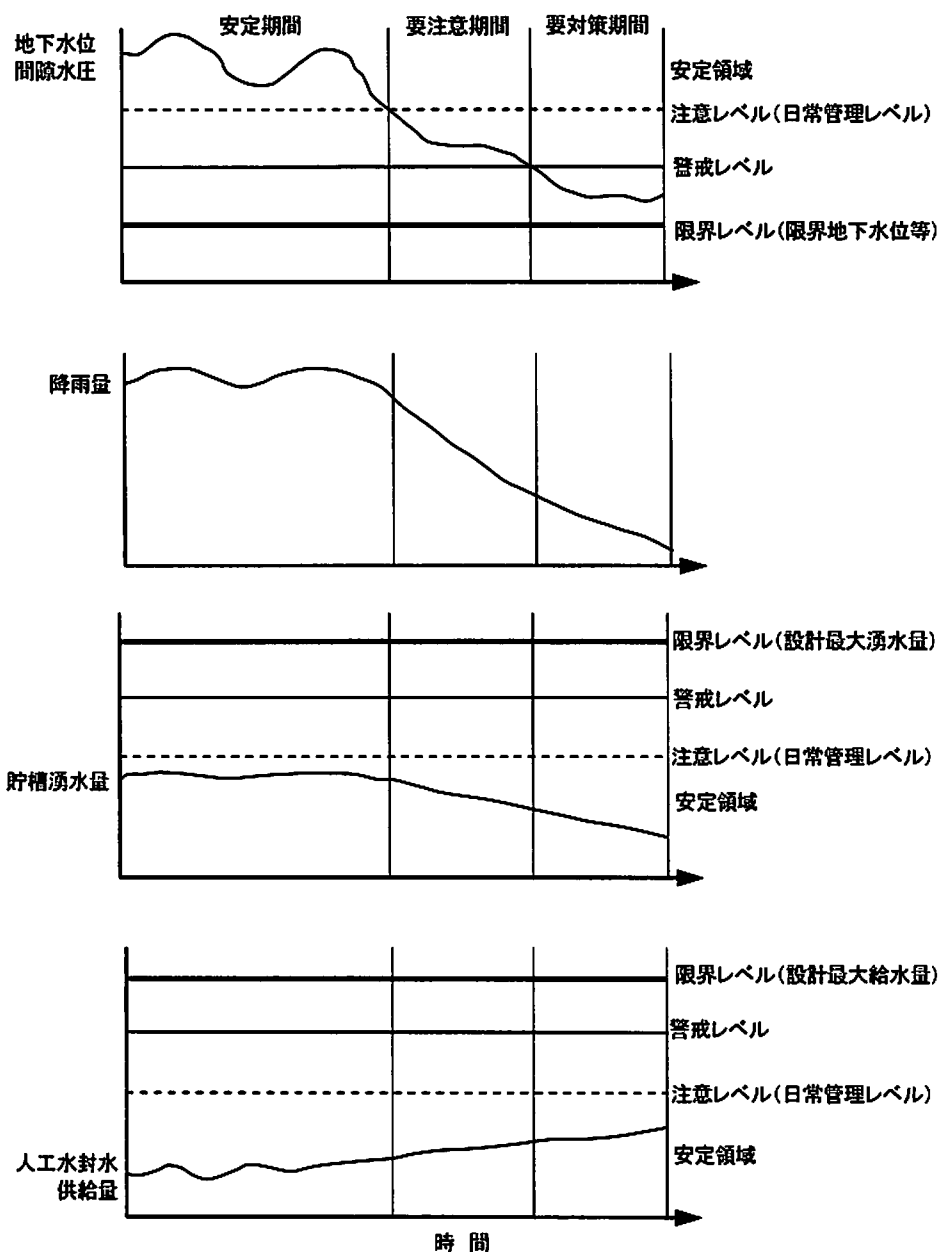


図 8-2 岩盤貯槽周辺の水収支の概念

これらの水封機能に関わる各要素は、水封水位以外は人為的に制御することが困難な項目であり、水封機能に異常が起きると直ちに対応を取ることができないものもある。このため、設備については、能力不足や障害に備えて予備の設備を備える必要がある。水圧の低下に対する現実的な対応としては、地上部からのグラウト強化や水封ボーリングの追加等が考えられる。このため、水封機能の状態を常に監視し将来の予測を行うことが不可欠となる。

水封機能を維持するための措置は、岩盤等の自然が対象であるため、設計結果は万全であると断言できない部分があるので十分なデータに基づいて浸透流解析や各種シミュレーション等を繰返し行い、検証していく必要がある。この観点からも、常に水封機能における各管理項目の将来予測を念頭に置くことは重要である。水封機能管理の概念を図 8-3 に示す。



安定領域

計測データが安定した状況にあり、特に問題がない範囲（安定期間に対応）

注意レベル

この値を超える場合には計測データを注意深く監視する必要があり、データを分析し、警戒レベルに入るかどうかの検討を行うことが求められる。（要注意期間に対応）

警戒レベル

この値を超える場合には、データの分析、評価及びその対策の必要性を検討するとともに、必要と判断された場合には、所要の対策を実施することが求められる。（要対策期間に対応）

限界レベル

法的に超えてはならないレベル

図 8-3 水封機能管理の概念

（大規模な漏水等で自然涵養量が減少したと考えた場合等に想定される変化状況例）

(3) 管理項目の変動要因

水封機能の管理はすなわち岩盤貯槽周辺の間隙水圧の管理である。間隙水圧に影響を与えるのは地下水位、水封水位、水封水供給量、湧水量及び自然涵養量であり、これらに関連する項目が水封機能に関わる管理項目となる。

水封機能に関わる現象は相互に関連があり、各管理項目も連動して変動する。主な変動要因と管理項目に表れる現象の関係を図 8-4 に、変動要因と管理項目に表れる現象を以下に示す。ただし、変動要因は複合的に生じることが多く、時間的な遅れもあり、管理項目に現れる現象は単純な増減ではないことに留意する必要がある。

① 岩盤の透水性

貯槽周辺の岩盤に亀裂の拡大、亀裂の進展、ゆるみ域の拡大等が生ずると岩盤の透水性が上昇し、湧水量は増加、地下水位・間隙水圧は低下する。水封水供給量は、地下水位・間隙水圧の低下を補完する形で増加する。

また、水封ボーリング孔及び水封トンネル周辺等の水封水供給側の目詰まりは、水封水供給量を減少させ、地下水位・間隙水圧が低下する。一方、湧水側（貯槽周辺）の目詰まりはグラウトと同様の効果となり、地下水位・間隙水圧を上昇させる。

② 自然涵養量

通常、自然涵養量が増加した場合は湧水量が増加し、地下水位・間隙水圧は上昇する。自然涵養量が減少した場合は湧水量が減少し、地下水位・間隙水圧は低下する。水封水供給量は、自然涵養量を補完する形で増減し、地下水位・間隙水圧の変動幅を小さくする。

自然涵養量は降雨等に依存（＝ 降水量 － 蒸発散量 － 表面流出量）しており、その影響は時間的な遅れがある。また、地表面の掘削、造成等の地形の変状により、変動（多くは減少）することがある。

③ 水封水位

地下水位が上昇すると間隙水圧が上昇して貯槽湧水量は増加し、低下すると間隙水圧も低下して貯槽湧水量は減少する。人工水封方式は、人工的に水封水を供給して間隙水圧を安定させるものである。

④ 貯槽内圧

貯槽内圧が上昇すると湧水量は減少し、低下すると湧水量は増加する。貯槽内圧は貯槽内温度(岩盤温度)と液化石油ガス組成により決まり、操業時の備蓄状態では変動しない。貯槽内圧が変動する可能性があるのは液化石油ガス受払時の貯槽上部空間容積が少なくなるときで、受入時の終盤では貯槽液位の上昇に伴い一時的に貯槽内圧が上昇し、一方、払出しの開始時には貯槽液位の低下に伴い一時的に貯槽内圧が低下することがある。

⑤ 地震時の挙動

地震時に、湧水量及び水封水供給量が変動する場合がある。要因として、地震動により亀

裂が開閉したり、亀裂内に付着堆積した水垢及び粘土鉱物・岩粉等の挟雑物が洗浄され、通水断面が拡大（縮小）することで岩盤の透水性が上昇（低下）することが考えられる。我が国の地下石油備蓄基地では、地震により湧水量及び水封水供給量が増加し、1年程度で地震前の量に回復している実例がある。また、地下水位・間隙水圧の変動は一様ではなく、上昇・低下の両方とも起こっている。地下水位・間隙水圧の変動は数 m 程度と比較的小さく、回復は1ヶ月以内のものがほとんどであり、湧水量及び水封水供給量の回復に比べて早いものが多い。

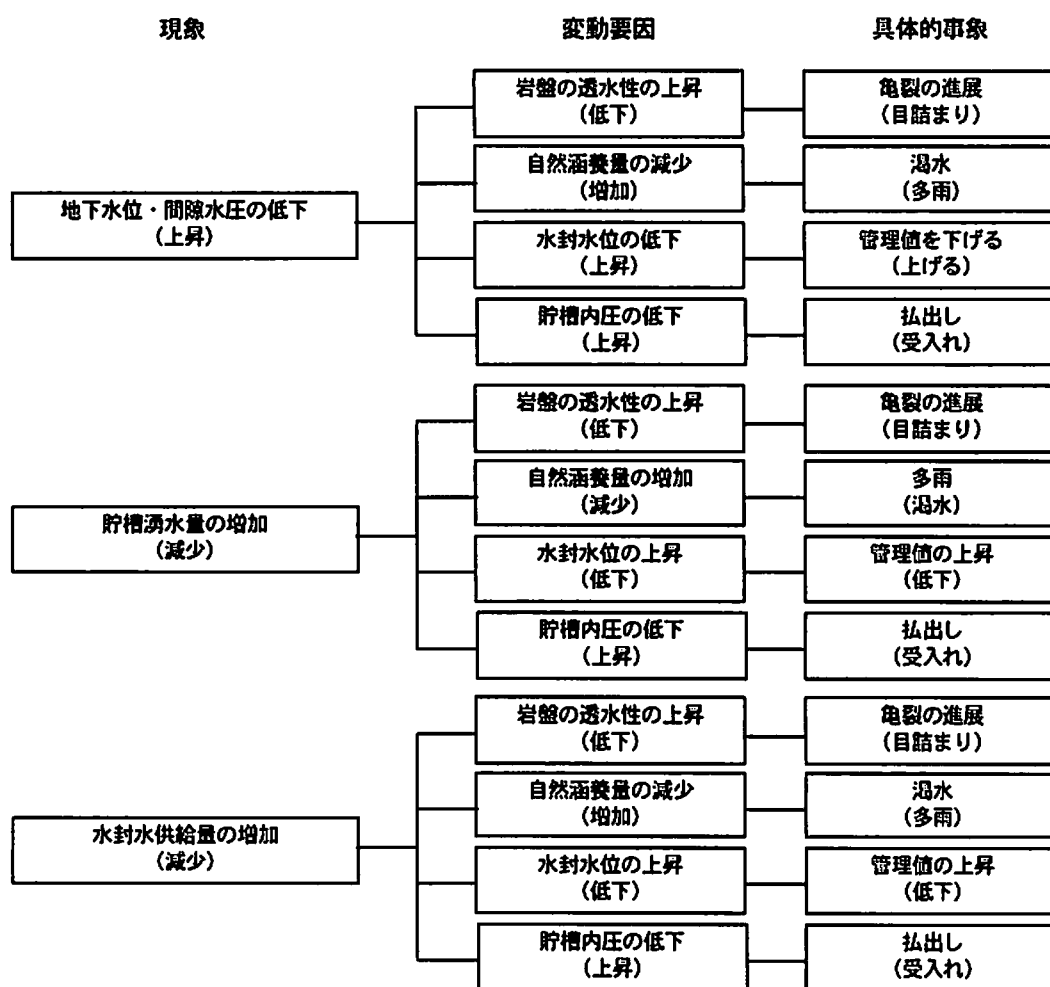


図 8-4 水封機能の管理項目と変動要因の関係
(一般的な現象、変動要因及び具体的事象例)

(4) 水封機能を維持するための設備

水封機能は、岩盤貯槽周辺の間隙水圧を保持することにより維持される。水封トンネル及び水封ボーリングは、岩盤貯槽周辺の間隙水圧を維持する設備として設置されるものであり、水封水供給設備等はこれらに水封水を供給する付帯設備として設置される。

水封機能を維持するための措置に係わる設備には、水封水供給設備、底水排水設備及び運転監視設備がある。

① 水封水供給設備

水封水供給設備は、供給配管を通して水封水供給坑から水封トンネル及び水封ボーリングに、また地上配管を通して配管堅坑に水封水を供給するための設備である。水封水貯水槽、水封水供給ポンプ、水封水供給配管及びリターン配管等で構成される。

配管給水設備は、直接目視検査することが困難なため、記録による確認等で機能が維持されていることを確認する必要がある。配管給水設備の機能が健全であることは、下記に示す記録を確認することで可能である。

- a. 供給量に配管の損傷をうかがわせるような急激な変化がないこと
- b. リターン運転中の供給量とリターン量の差が大きく異ならないこと
- c. リターン運転時の水質に大きなバラツキがないこと
- d. リターン配管垂直部内に異常なスケールの付着がないこと

② 底水排水設備

底水排水ポンプは、岩盤貯槽内に湧出する湧水（底水）を排出するための設備で、底水排水ポンプ及び排水管で構成される。排出された底水は、液化石油ガスのガス分を脱気処理されたのち排水処理設備で処理され基地外部に放流される。

③ 運転監視設備

水封機能の維持状態は、水封機能に関わる管理項目の管理・計測データにより確認する。湧水量や水封水供給量を計測する流量計は、誤差が蓄積すれば正しい量が把握できなくなる。連続記録に異常がないことをポンプの稼働時間と比較する等の方法で確認し、精度に異常がないことを検査する必要がある。同様に、地下水位、間隙水圧、水封水位の連続記録を確認し、測定計器の機能が維持されていることを確認する。

運転監視設備を以下に示す。

- a. 地 下 水 位：地下水位観測孔に設置される水位計
- b. 間 隙 水 圧：間隙水圧観測孔に設置される間隙水圧計
- c. 湧 水 量：底水排水配管の流量計
- d. 水封水供給量：水封水供給配管の流量計、リターン配管の流量計
- e. 水 封 水 位：水封水供給坑の水位計及び配管堅坑の水位計
- f. 自然涵養量：雨量計、蒸発計、潮位計等（気象台データの利用も可）

8.2 検査

定期自主検査として操業管理上最も重要な水封機能全般について記述する。

水封機能を維持するための措置の検査は、岩盤貯槽周辺の間隙水圧が所定の圧力以上に保持されていることを確認することが目的である。岩盤貯槽周辺全域の間隙水圧を測定することは不可能である。このため、水封機能を維持するための措置の検査は、水封機能を維持するための設備の検査に加え、水封機能の検査が重要である。

(1) 検査の方法

水封機能を維持するための設備（水封水供給設備、底水排水設備及び運転監視設備）については、腐食、損傷、変形及びその他の異常の有無以外に、作動・機能性が確保されていることの検査を行う必要がある。

① 目視検査

目視可能な範囲で、設備に有害な腐食、損傷、変形及びその他の異常の有無を検査する。ただし、底水排水ポンプ、排水管、水位計・間隙水圧計等の金属管内やボーリング孔内に設置される設備は、直接検査することが困難であるので、次に示す作動検査または機能検査でその健全性を確認する。

② 作動検査

水封機能の重要性からは、底水排水ポンプ及び水封水供給ポンプは、所定の信号により正しく起動・停止が行われることを確認する必要がある。

③ 水封機能の検査

水封機能は岩盤貯槽周辺の水圧が貯槽内圧より所定圧力以上に保持され、貯蔵物が漏れないことである。この水圧を間隙水圧により評価する。しかしながら、間隙水圧計では岩盤の亀裂中の水圧の測定であり、岩盤貯槽周辺全域の水圧を測定することは不可能である。このため、水封機能の検査は、保安検査基準には具体的な記載はないが管理項目単独での判断ではなく、記録相互の関連性に異常がないことを確認する必要がある。

水封機能の管理項目のうち、目視で確認が可能なものは、水封水供給坑の坑口、配管竪坑及び配管給水槽（水封水貯水槽）の水位である。その他は、下記項目の連続記録及び記録相互の関連性に異常な事象がないことを確認することとなる。

- a. 地下水位が限界地下水位以上で有意な低下傾向がないことを確認する。
- b. 水封水供給坑、配管竪坑及び配管給水槽（水封水貯水槽）の水位が管理値以上であることを目視で確認し、異常がないことを確認する。
- c. 間隙水圧が管理値以上で安定していることを確認する。
- d. 湧水量が設計湧水量以下で急激な変化がないことを確認する。
- e. 水封水供給量が設計供給量以下で急激な変化がないことを確認する。

記録相互の関連性の評価方法としては以下の方法がある。

a. 経時変化図の作成による方法

水封機能の維持状態に変化が生ずれば、個々の計測データにも変化が生じる。したがって、水封機能の維持状態の検査においては、まず、地下水位、間隙水圧、湧水量、水封水供給量等の経時変化を検査し、異常と思われる変化や傾向がないことを確認することが有効である。

水封機能の評価に関わる計測データは相互に関連しており、単独の計測データでその変動を評価すると誤った解釈を生じる可能性がある。たとえば、地下水位は、降雨だけでなく、湧水量、水封水供給量を含めた全体の水収支により変動する。地下水位、間隙水圧、湧水量及び水封水供給量の計測データの特性を以下に示す。

1) 地下水位

地下水位は、地下水位観測孔の孔内水位として計測される。計測データは、観測孔周辺岩盤の水収支がバランスしたレベルを表しており、観測孔周辺の局所的な透水性により左右される。また、地下水位観測孔は容積が小さいため、降雨の影響を受けやすい。

2) 間隙水圧

岩盤は人工構造物と異なり、均質な材質ではない。水理的には、水みちと呼ばれる亀裂を通る流れが卓越して支配している。この亀裂の分布及びその水理特性は複雑で、間隙水圧は計測箇所による計測値の差が大きくなることが多い。また、間隙水圧も地下水位と同様に、降雨等の影響を受ける。ただし、深部の間隙水圧は、降雨（自然涵養量）による変動が比較的小さいと考えられる。

3) 湧水量及び水封水供給量

水封水供給量及び湧水量も降雨（自然涵養量）の影響を受ける。水封水供給量は、自然涵養量と逆相関を示し、降雨量を反映して比較的季节変動が大きい。この逆相関は、人工水封による供給が自然の供給を補完していることを表していると考えられる。

湧水量も季節変動を示すが、水封水供給量が自然涵養量を補完するため、変動率は水封水供給量に比較して小さいと考えられる。

b. 地下水位、間隙水圧の分布図の作成による方法

地下水位、間隙水圧の分布図を作成し、分布の傾向、変動傾向から地下水位、間隙水圧の異常を予測することができる。

c. 地下水流動解析による方法

異常と思われる変化や傾向がみられる場合は、変動要因の分析及び必要に応じて統計分析、地下水流動解析（浸透流解析）等を実施する必要がある。経時変化図、地下水位、間隙水圧分布及び地下水流動解析を合わせて評価することは、水封機能を管理する上でさらに有効である。海外及び国内の石油岩盤タンクにおいても、総合的な分析評価による判断・検査が行われている。