

倉敷基地 LPG岩盤貯槽の気密試験方法 と試験結果の評価について

前島 俊雄¹・岡崎 百合子^{1(元)}・金戸 辰彦¹・森 孝之²・征矢 雅宏³・黒瀬 浩公^{4*}

¹ (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油ガス備蓄部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目10-1)

²鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給三丁目19-1)

³清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間総括部（〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1）

⁴東電設計株式会社 土木本部 地下環境技術部（〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12）

*E-mail: kurose@tepsco.co.jp

気密試験は圧縮空気により貯槽内圧力を設計圧力まで加圧し、一定期間の気密性を確認する試験である。岩盤貯槽の気密性は、貯槽に注入した空気の物質量が変化しないことと定義し、理想気体の状態方程式から圧力変動量 (ΔP) を気密性の判定指標とした。貯槽圧力は、気体圧縮による温度変化と湧水の排水による体積変化の影響を受けるため、圧力測定に加え、貯槽内の温度と底水排水槽の水位変化を計測し、補正するとともに、貯槽内湧水に溶解した空気が排出されることによる物質量的変化を補正する必要がある。

本論文では、これらの気密性判定式の定式化、気密試験の計測・実施方法を説明し、倉敷基地の気密試験結果について計測データとその評価結果について報告する。

Key Words : *LPG underground storage, air-tightness test, correction pressure*

1. はじめに

倉敷国家石油ガス備蓄基地では、水封式地下岩盤貯蔵方式を採用している(図-1)。倉敷基地には、4条の岩盤貯槽(高さ24m、幅18m、長さ500m~640m)が海水面下160mの深度に設置されており(図-2)、その総容量は848,232³である。貯槽の設計圧は0.95MPaG、最大運転圧は0.85MPaGであり、設計圧以上の0.95MPaGで気密試験を実施した。

倉敷基地の気密試験では、圧縮空気により貯槽を加圧した後に、72時間の圧力変動を計測し、貯槽の気密性を確認した。本稿では、気密試験の気密性判定指標を、貯槽内の物質収支と理想気体の状態方程式から圧力変動量として定式化するとともに、試験の計測・実施方法ならびに試験結果を報告する。

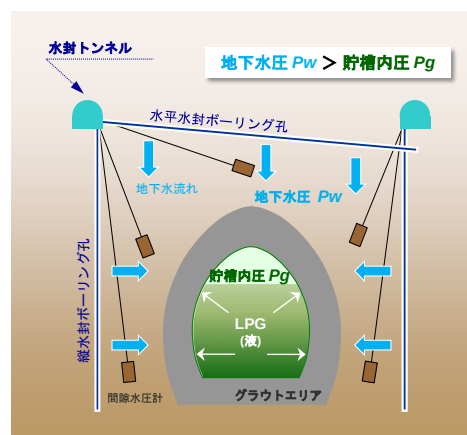


図-1 水封式地下岩盤貯槽の概念図

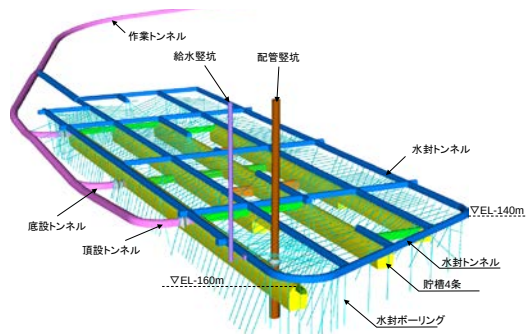


図-2 倉敷基地鳥瞰図

2. 氣密性判定指標

(1) 気密性判定式

気密試験では、貯槽内を所定の圧力まで加圧し、貯槽外に繋がる全てのバルブを閉止するが、貯槽内空気は貯槽に流入する湧水に溶解し、底水排水ポンプにより貯槽

外へ排出される(図-3)。このため、気密試験期間(t 時間)の貯槽内空気物質収支は、貯槽内湧水に溶解した空気の物質量を考慮し、次式で表される。

$$n_0 - n_t - n_d = 0 \quad (1)$$

ここで、 n_0 ：気密試験開始時の貯槽内空気の物質量、
 n_t ：気密試験中任意時間 t の貯槽内空気の物質量、
 n_d ：気密試験開始から任意の時間 t までに貯槽内湧水へ溶解する貯槽内空気の物質量である。

圧縮空気の物質量は理想気体の状態方程式より次式で表される。

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \quad (2)$$

ここで、 P ：貯槽内圧力(貯槽深度の乾燥空気絶対圧力)、
 V ：貯槽気相容積、 T ：貯槽内温度、 R ：気体定数である。

貯槽内湧水に溶解する空気の物質量は、式(2)と同様に理想気体の状態方程式より、次式で表される。

$$n_d = \frac{P_t \cdot (S_a \cdot Q_t)}{R \cdot T_t} \quad (3)$$

ここで、 S_a ：空気溶解率、 Q_t ：気密試験開始から任意の時間 t までの積算排水量である。

式(1)に式(2)、(3)を代入し貯槽内圧力で整理すると、

$$n_0 - n_t - n_d = \frac{P_0 \cdot V_0}{R \cdot T_0} - \frac{P_t \cdot V_t}{R \cdot T_t} - \frac{P_t \cdot (S_a \cdot Q_t)}{R \cdot T_t} = 0$$

$$P_0 - P_t \cdot \left(\frac{T_0}{T_t} \cdot \frac{V_t}{V_0} + \frac{T_0}{T_t} \cdot \frac{(S_a \cdot Q_t)}{V_0} \right) = 0 \quad (4)$$

となる。ここで、 P_0, T_0, V_0 ：気密試験開始時の貯槽内圧力、温度および気相容積、 P_t, T_t, V_t ：気密試験中任意時間 t の貯槽内圧力、温度、気相容積である。

貯槽内の気相容積(V_t)は、気密試験中任意時間 t の底水排水槽の水位変動量(Δh_t)と断面積(A)を用い、

$$V_t = V_0 + A \cdot \Delta h_t \quad (5)$$

と表せ、式(5)を式(4)に代入して整理すると、

$$\Delta P = P_0 - P_t \cdot \frac{T_0}{T_t} - P_t \cdot \frac{T_0}{T_t} \cdot \frac{(A \cdot \Delta h_t)}{V_0} - P_t \cdot \frac{T_0}{T_t} \cdot \frac{(S_a \cdot Q_t)}{V_0} = 0 \quad (6)$$

となり、式(6)の左辺第2項は貯槽内圧力の温度補正項、第3項は容積補正項、第4項は溶解空気量の補正項である。

したがって、貯槽の気密性は、貯槽内圧力の温度補正および容積補正と貯槽内湧水への溶解空気量補正で算出される貯槽内圧変動量を指標とし、試験中の内圧が変動しないことで判定される。

(2) 貯槽内圧力の算出

貯槽は海水面下160mに設置されており、貯槽内には地上部で計測される圧力に加え、貯槽設置深度までの気

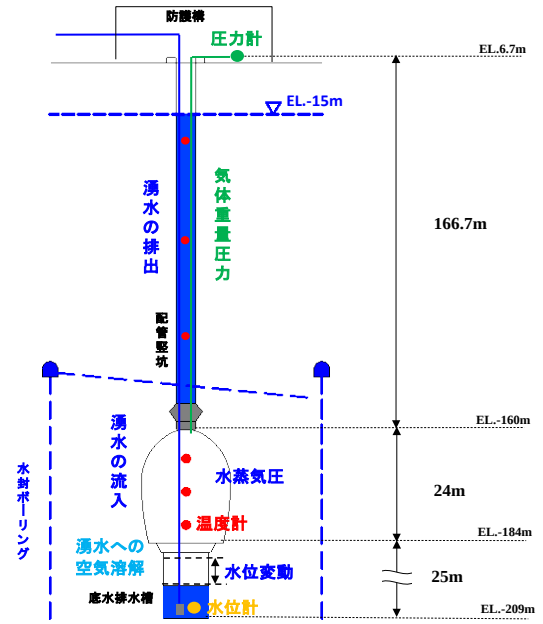


図-3 地下岩盤貯槽の気密試験概要

体重量圧が作用し、貯槽内に流入する湧水により水蒸気圧が作用するため(図-3)、貯槽内圧力は次式で表される。

$$P_t = P_{st} + P_{Lt} - P_{wt} \quad (7)$$

ここで、 $P_t, P_{st}, P_{Lt}, P_{wt}$ ：気密試験中任意時間 t の貯槽内圧力、地上部の圧力計計測値、気体重量圧、貯槽内の水蒸気分圧である。

気体重量圧は、次式で算出する。

$$P_{Lt} = \frac{\rho_t \times g \times h}{p_0} \times \left(P_{st} + \rho_t \times \frac{P_{st} \times g \times h}{p_0 \times 2} \right) \quad (8)$$

ここで、 ρ_t ：気密試験中任意時間 t の標準大気圧における空気密度、 g ：重力加速度、 h ：堅坑上面と貯槽空洞天井までの高低差、 p_0 ：標準大気圧である。

貯槽内の水蒸気圧は、注入する空気内の総水蒸気量から算出される貯槽内の水蒸気圧が、貯槽内温度における飽和水蒸気圧以上である場合、飽和水蒸気圧に等しいため、*Tetens* の式により次式で算出する。

$$P_{wt} = 1 \times 10^2 \times 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \cdot (T_t - 273.15)}{T_t - 273.15 + 237.3}} \quad (9)$$

なお、堅坑内の空気密度は、配管内の空気の温度が堅坑内水封水温と等しいものとし、配管堅坑内水温の計測結果に基づき算定する。

(3) 貯槽内温度の算出

貯槽内の温度は、貯槽気相部に配置した温度計の計測値から得られるが、80万 m^3 以上の貯槽内では、空間的なばらつきを含むため、温度計配置および平均温度算出方法について、3次元熱流体解析などを用いた検討を行

った¹²⁾。検討結果に基づき、貯槽内温度は、全ての温度計に同様の重みを与えて次式により算出する。

$$T_t = \frac{\sum T_i}{n} \quad (10)$$

ここで、 T_t ：気密試験中任意時間 t の平均温度、 n ：温度計の数である。

(4) 貯槽内気相体積の算出

貯槽内の気相容積は、貯槽掘削完了後に測定精度10mmの3次元レーザースキャナにより50mm間隔で貯槽形状を測定し、測定した貯槽容積から作成したタンクテーブル（標高と貯槽内容積との関係）と底水排水槽の水位計測値から算出する。

(5) 貯槽内湧水への空気溶解量

貯槽内湧水への空気溶解率は、水床の温度および貯槽内圧力により変化するため、ヘンリーの法則により貯槽内圧力上昇に伴う溶解率を算出する。

$$S_a = q_t \cdot \frac{P_t - P_0}{P_0} \cdot \frac{P_0}{P_t} \cdot \frac{T_t}{273.15} \quad (11)$$

ここで、 q_t ：水1m³への空气の飽和溶解度である。

また、貯槽内湧水量は、底水排水流量計および注水流量計の計測値と底水排水槽の水容積の変化から算出する。

$$Q = (D_t - D_0) + (v_t - v_0) - (F_t - F_0) \quad (12)$$

ここで、 D_t, v_t, F_t ：気密試験中任意時間 t の排水量測定値、底水排水槽水量、注水量測定値、 D_0, v_0, F_0 ：気密試験開始時の排水量測定値、底水排水槽水量、注水量測定値である。

3. 気密性判定基準

第2章(1)で示したとおり、岩盤貯槽の気密性は、試験期間中に貯槽内圧が変動しないことで判定される。貯槽内圧力変動量は、圧力、温度、体積変化の測定結果を基に補正することから、圧力変動量には測定の不確かさ（信頼性の範囲）があり、次式により、計測の合成不確かさが算出される。

したがって、気密性の判定基準は、測定値を基に補正した貯槽内圧力変動量が計測の合成不確かさ以内で、低下傾向がないこととした。

$$\varepsilon \Delta P = P_t \sqrt{\left(\frac{\varepsilon P_t}{P_t}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon P_0}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon T_t}{T_t}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon T_0}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon V_t}{V_t}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon V_0}{V_0}\right)^2} \quad (13)$$

ここで、 $\varepsilon P_t, \varepsilon T_t, \varepsilon V_t$ ：測定時 t の貯槽圧力、温度、気相容積の計測不確かさ、 $\varepsilon P_0, \varepsilon T_0, \varepsilon V_0$ ：試験開始時の貯槽圧力、温度、気相容積の計測不確かさである。

計測の不確かさは、計測器の精度や海外の気密試験実績から、 $\varepsilon P_0, \varepsilon P_t = \pm 50 \text{ Pa}$ 、 $\varepsilon T_0, \varepsilon T_t = \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\varepsilon V_0, \varepsilon V_t = \pm 0.4 \text{ m}^3$ とし、合成不確かさは0.5kPaとなり、海外の岩盤貯槽の判定基準と同等の基準とした。

$$\Delta P < \pm 0.5 \text{ kPa} \quad (14)$$

4. 気密試験の実施

(1) 気密試験工程

気密試験に先立ち、2012年5月1日からは、貯槽内を試験圧力まで加圧し、試験は2012年6月8日から6月11日に実施した。加圧開始から試験完了までの期間は以下の3段階に大別される(図-4)。

貯槽加圧段階：配管堅坑の金属配管から圧縮空気を送気して、貯槽を大気圧から試験圧力まで加圧する段階。

貯槽加圧は、次段階の貯槽安定化・気密試験段階における貯槽内圧力および温度の挙動を把握・予測するため、計3回（配管堅坑頂部圧力230kPaG、700kPaG、900kPaG）の静定期間を設けた。

貯槽安定化段階（均一化段階）：貯槽加圧段階終了後、貯槽内圧力が安定状態とみなせるまで貯槽を静置する段階。

貯槽気密試験段階：気密試験として72時間の貯槽圧力および変化量を計測し、気密性を評価する段階。

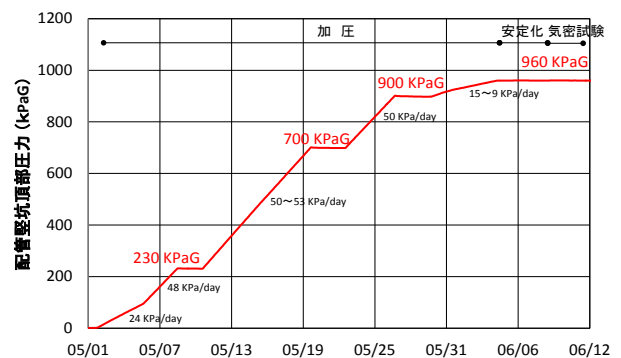


図-4 試験工程

(2) 気密試験条件

気密試験条件を表-1に示す。貯槽を試験圧力まで加圧するため、地上に設置した仮設のコンプレッサーにより圧縮空気を送気した。試験圧力は設計圧以上の0.95MPaGである。

また、気密試験期間中の人工水封水圧は、水封機能上最も厳しい条件となるよう、水封機能維持に必要な管理上の最低水位EL.-15m（限界地下水位）とした。

試験期間は72時間であり、貯槽内の気相部に設置した

すべての温度計の温度変化率が0.1℃/日以内に安定するのを確認して、気密試験を開始した。

表-1 気密試験条件

項目		条件
試験気体		圧縮空気
試験圧力		設計圧力 (0.95MPaG) 以上
水封水圧	地下水位 観測孔水位	限界地下水位 (EL.-15m) 以上
	人工水封水圧	限界地下水位 (EL.-15m)

(3) 気密試験時の計測

倉敷基地の岩盤貯槽は、世界最大級の規模であり、気密試験時には、高精度の試験データを取得・分析し、厳密に気密性を評価する必要がある。

このため、気密試験に用いる計測器は、表-2に示す高精度のものを採用した。特に、温度は試験結果への影響が大きいことから、±0.01℃の精度を有する計測器を採用し、工場製作から現地の設置に至る過程で様々な試験を繰り返し、計器精度を確認した²⁾。

表-2 気密試験に用いた計測器一覧

	圧力計	温度計	水位計
計測原理	水晶振動式	白金測温抵抗体式	水晶式
計器精度	Repeatability : ±0.016kPa	不確かさ : ±0.01℃	Repeatability : ±0.0065m

a) 貯槽内圧力の計測

貯槽内圧力は、貯槽内圧変動量を算出する上で、必要不可欠なデータであり、式(7)に示すとおり防護構内に設置した圧力計の計測値を基に算出される。このため、圧力計の計測値に対して、防護構内の環境変化（温度変化、湿度変化、防護構内設備の運転に伴う振動）が影響を及ぼさないよう、対策を講じた上で計測を行った²⁾。また、計測箇所が1点に限られており、欠測が発生した場合には、圧力変動量の算出が不可能になるため、2台の圧力計により計測を行った。

b) 貯槽内温度の計測

貯槽内温度は、第2章(3)で述べた通り、温度計配置および平均温度算出方法の検討結果に基づき、気相部に配置した計64個の温度計により計測を行った。また、貯槽内温度は、水床や周辺岩盤への熱移動により変化するため¹⁾、水床・底水排水槽の水温、岩盤内温度を計17個の温度計により計測した(図-5)。

c) 水位の計測

底水排水槽には、LPGと底水排水の界面を計測するために、超音波液面計が設置されているが、計測器がLPGに液没した状態での計測を前提としているため、貯槽内気相容積の算出に必要な底水排水槽水位は、底盤から

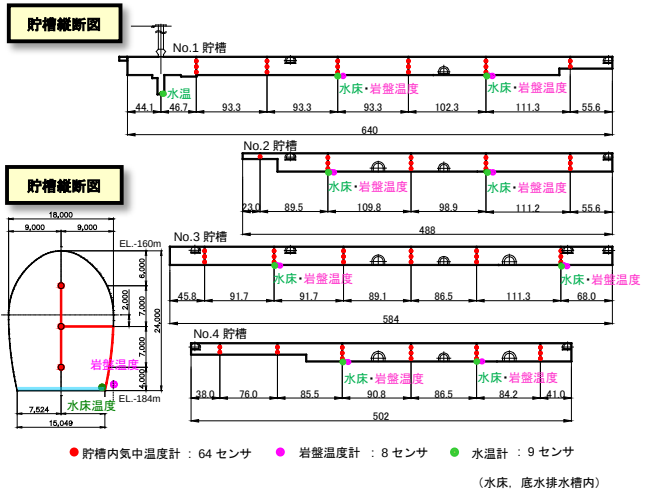


図-5 貯槽内温度計配置

1m上に設置した水位計により計測を行った。

d) 貯槽内湧水への空気溶解量の計測

貯槽内湧水への空気溶解量の算出には、空気の飽和溶解度が必要になるため、地上部で底水排水のサンプリング・空気溶解量の分析を実施し、21.5℃における理論値 (0.018Nm³/m³) の妥当性を確認した。

e) 計測システム

計測データは、試験結果を厳密かつ迅速に評価するため、配管堅坑近傍に設置した仮計測室に集約し、リアルタイムでモニタリング可能な計測システムとした。

5. 試験結果

(1) 貯槽加圧段階

貯槽の加圧は、2012年5月1日17時17分より開始し、2012年6月4日7時に予定圧力960 k PaGに達して終了した。

貯槽内の気相温度は、貯槽の加圧開始に伴い、断熱圧縮で発生する熱量により急上昇するが、貯槽内の温度変化は、加圧により発生する熱量と、貯槽周辺の境界（岩盤および水床）へ逸散する熱量との熱収支で決定されるため、時間経過とともに温度の上昇勾配は徐々に小さくなるものと想定された。これとは逆に、貯槽の加圧を停止した場合には、加圧による熱量の供給がなくなり、貯槽内の温度が急激に低下するが、貯槽周辺の境界との温度差が小さくなるのに伴い、温度低下勾配が緩やかなるものと想定されたことから、熱流体理論に基づき、貯槽内温度挙動の予測解析を行った上で、貯槽内の加圧を進めた¹⁾。

貯槽加圧時におけるコンプレッサからの送気流量は、貯槽内の圧力変化速度に応じて設定し、設定値に対し±50Nm³/hrで管理するとともに、貯槽内の水蒸気圧が貯槽内温度における飽和水蒸気圧となるよう、温度 17℃±2℃、湿度90%以上で送気した。図-6に加圧開始から気

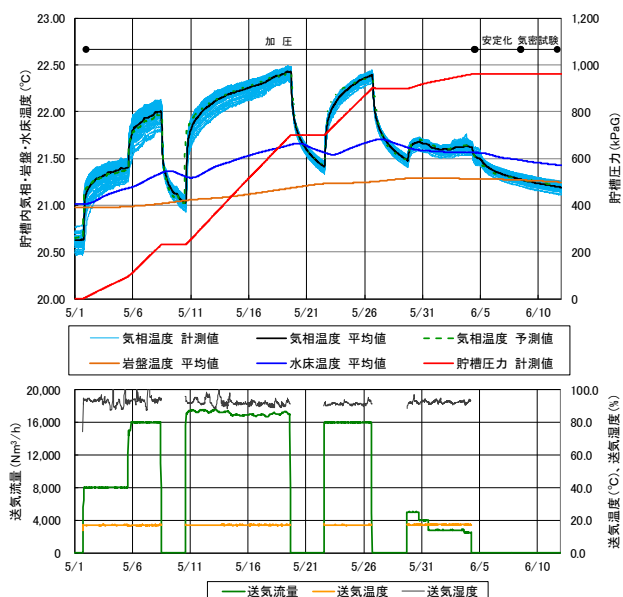


図-6 加圧開始から気密試験完了までの貯槽内温度と予測値

密試験完了までの期間における気相温度の予測解析値と計測値，送気流量，送気温度を示す。

貯槽加圧段階での気相温度の上昇量は，事前予測解析と同様に，送気流量，すなわち貯槽加圧速度に依存しており，特に最終の加圧段階では，貯槽内温度の安定化時間を短縮するよう，貯槽圧力上昇速度を15～9kPa/日とそれまでの加圧段階と比較して低下させ，徐々に送気流量を減じた。これにより，加圧中の温度上昇および加圧停止後の温度低下量を抑制することが可能となった。

また，貯槽の加圧に伴い，気相温度のばらつき（気相温度の最高温度と最低温度との差）は徐々に小さくなり，安定化段階では0.14℃であり貯槽内の空間的な温度分布がほぼ均質となった。

上記の気相温度上昇に伴い，水床温度も上昇しており，岩盤温度は時間遅れが認められるものの，加圧期間中は上昇し続け，貯槽加圧停止後の安定化期間3日目には低下傾向に転じ，気相温度，水床温度および岩盤温度の温度差が徐々に小さくなっている。

(2) 最終圧力の予測と設定

貯槽内圧力は，試験期間を通して試験圧力以上である必要があるが，貯槽加圧に伴い上昇した貯槽内温度の低下による影響が大きく，理論解析により温度低下量を推定した(図-6)¹⁾。これらを考慮して貯槽加圧の最高圧力を960kPaGとした。

(3) 貯槽安定化段階

貯槽安定化段階は，最高圧力までの加圧完了後，貯槽内の気相温度が安定状態とみなせるまで貯槽を静置する段階であり，貯槽内気相部に設置した計64個の温度計の温度変化率が0.1℃/日以内となったことを確認した。

なお，貯槽内の全ての温度計の温度変化率が0.1℃/日となったのは，加圧停止後49時間後であった(図-7)。

6. 気密性評価結果

気密試験は，2012年6月8日11時から2012年6月11日11時の72時間にわたり実施した。安定化段階から気密試験完了までの貯槽圧力，貯槽温度，貯槽水位を図-7に示す。

気密試験開始時の貯槽内圧(圧力計計測値)と貯槽内温度の平均値は，1060.653kPa(abs)，21.28℃であり，気密試験完了時には1060.367kPa(abs)，21.20℃であった。

圧力計の計測値を基に算出した貯槽内絶対乾燥空気

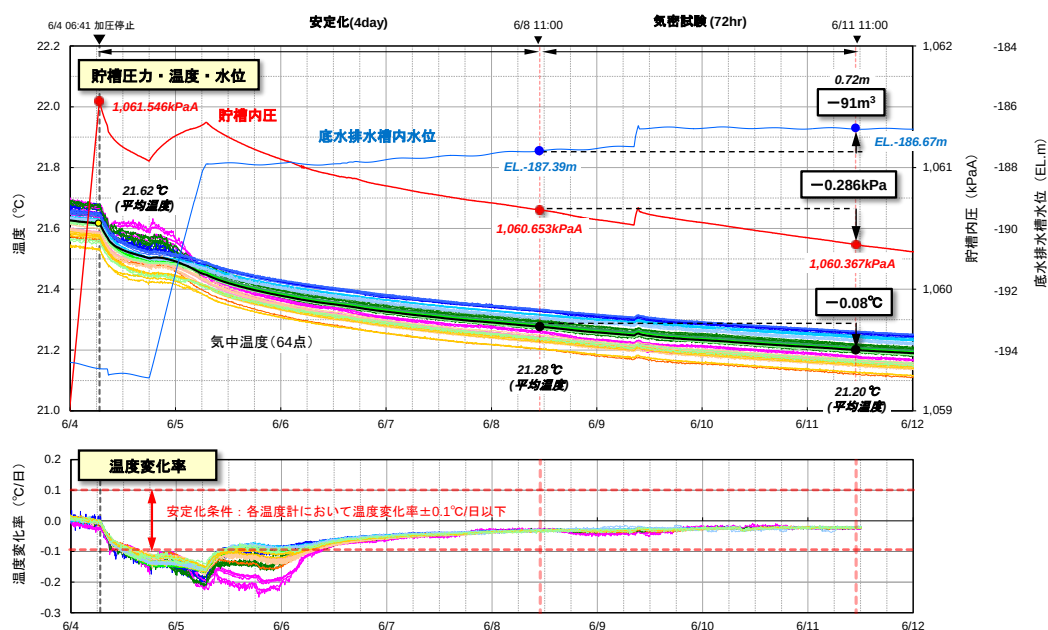


図-7 安定化から気密試験までの貯槽圧力・温度・水位の変化

圧は、試験開始時に 1,078.738kPa・abs であり、試験終了時には 0.291kPa 低い 1,078.447kPa・abs であった。この低下量のうち、水位変動、温度変化、排水した湧水への空気溶解の影響は 0.289kPa と見積もられ、これを考慮した補正圧力は 1,078.736kPa・abs となった（図-8）。

気密試験中の補正圧力の変動量は、-0.016～+0.033 kPa の範囲で試験終了時-0.002kPa と気密性判定基準±0.5kPa を十分に満足するとともに、低下傾向も認められない。

7. 結論

水封式地下岩盤貯槽の気密性判定指標は、貯槽内空気の物質収支と理想気体の状態方程式より、圧力変動量として定式化されるが、国内では、同指標を実規模の水封式地下岩盤貯槽に適用した事例は無い。

倉敷基地の岩盤貯槽の気密試験に際し、同指標を適用した結果、補正圧力の変動量は、気密性判定基準に比べて十分に小さく、また低下傾向も認められないことから倉敷基地岩盤貯槽の高い気密性が確認された。

また、貯槽の加圧を段階的に進めることにより、加圧または減圧過程における貯槽内圧力および温度挙動を正確に把握することが出来たため、加圧設備や排水設備の運転管理を適切に行うことが出来た。

参考文献

- 1) 高木賢二, 征矢雅宏, 黒瀬浩公, 岡崎百合子, 前島俊雄: 倉敷基地 LPG 岩盤貯槽の気密試験昇圧に伴う貯槽内圧・温度の予測解析と実測値の評価, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2013. (投稿中)
- 2) 手塚康成, 征矢雅宏, 黒瀬浩公, 金戸辰彦, 岡崎百合子, 前島俊雄: 倉敷基地 LPG 岩盤貯槽の気密試験における高精度計測器の精度管理について, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2013. (投稿中)

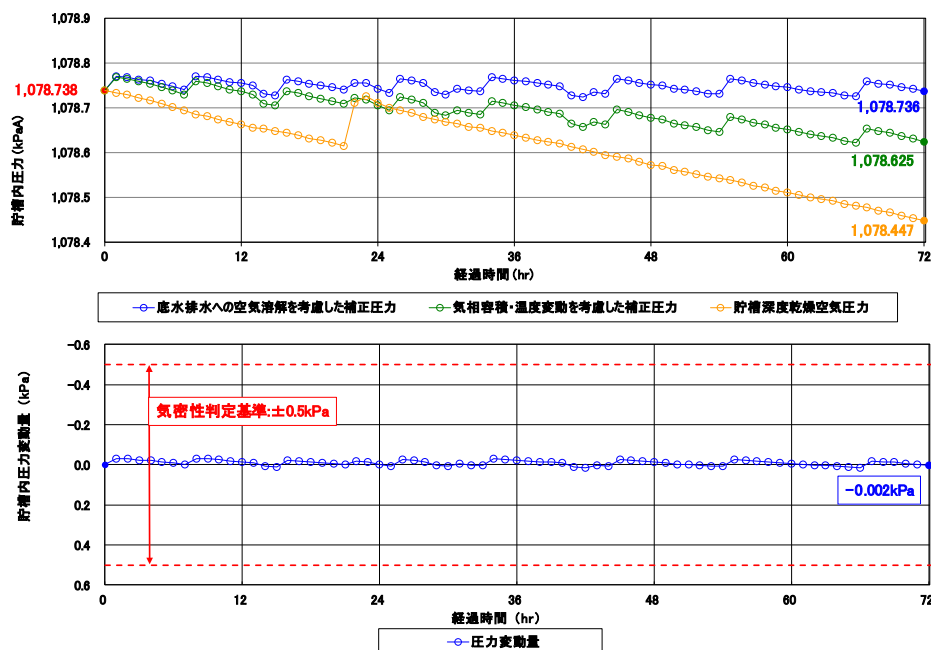


図-8 気密試験期間中の補正圧力と気密性評価結果

EVALUATION AND METHODOLOGY OF AIR TIGHTNESS TEST IN THE KURASHIKI LPG UNDERGROUND STORAGE CAVERN

Toshio MAEJIMA, Yuriko OKAZAKI, Tatsuhiko KANETO, Takayuki MORI, Masahiro SOYA and Hiroki KUROSE

Air-tightness test was conducted at the Kurashiki LPG underground rock cavern. If the cavern is gas tight, the mass balance of air into the cavern during the test must be equal to zero. By considering the perfect gas equation, the mass of air is linked with the cavern pressure. But the cavern pressure changes must be caused by the temperature variation with compression, level changes in the pit and dissolution into the seepage water. So, the variation of pressure during the test must be corrected from the result of measurement. This paper describes the gas-tightness criterion based on the mass balance and perfect gas equation and reports the methodology and evaluation result of the test.