

波方ボタン/プロパン兼用貯槽の気密試験結果 と圧力変動量の補正法について

前島俊雄¹・岡崎百合子²・大久保秀一¹・田中達也^{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元(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)

³(株)大林組 原子力本部 (〒108-8052 東京都港区港南 2-15-2)

⁴東電設計(株) 土木本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12)

*E-mail: tanaka.tatsuya@obayashi.co.jp

岩盤貯槽における気密試験では、圧縮空気を用いて貯槽内圧を設計圧力まで加圧した後、一定期間貯槽内の圧力変動量 (ΔP) を計測し、貯槽内空気の物質量が変化しないことを確認する。 ΔP は、貯槽内空気の温度・湧水の排水による体積、加圧空気の湧水への溶解により変動する。したがって、気密試験期間内の ΔP を気体の状態方程式等を用いて補正して気密性を評価する必要がある。

本稿では、波方基地ボタン/プロパン兼用貯槽の気密試験の試験データとその評価結果を報告するとともに、底水排水ポンプの運転による体積変化の補正方法などについて報告する。

Key Words : LPG mined storage cavern, gas tightness test, correction pressure

1. はじめに

(1) 波方ボタン/プロパン兼用貯槽の概要

エネルギーの国家備蓄計画の一環として建設された波方国家石油ガス備蓄基地は、岩盤内部（貯槽天盤深度 EL-150m）に建設した3列の貯槽（高さ30m、幅26m、長さ430m）に45万tの液化石油ガス（LPG）を常温高压で地下水圧により封じ込めて貯蔵する、世界最大規模の水封式地下岩盤貯槽である¹⁾。波方ボタン/プロパン兼用貯槽は、このうち北西端の1列の貯槽で容量15万tを占める（図-1）。気密試験では、貯槽内を貯槽設計圧（970kPaG）以上に加圧し、貯槽の気密性を確認した。

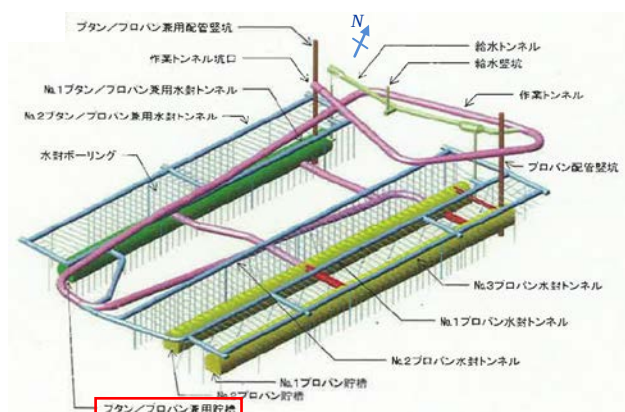


図-1 波方基地鳥瞰図

(2) 波方ボタン/プロパン兼用貯槽の特徴

波方ボタン/プロパン兼用貯槽の南東側に並列する2列の波方プロパン貯槽は容量30万t（貯槽空洞容積60万 m^3 ）であり、また、岡山県倉敷市において同時期に建設された倉敷プロパン貯槽は容量40万t（貯槽空洞容積80万 m^3 ）である²⁾。容量15万t（貯槽空洞容積28万 m^3 ）の波方ボタン/プロパン貯槽はこれら貯槽の中で容量が最も小さい。ボイル・シャルルの法則に基づけば、気密条件で貯槽内の水位変化等に起因する貯槽内空気体積の変化が生じた場合、貯槽空洞容積の最も小さい波方ボタン/プロパン兼用貯槽において、貯槽内温度に与える影響が最大になると考えられる。

さらに、波方ボタン/プロパン兼用貯槽における貯槽の湧水量は極めて少なく、大気圧解放条件で約10 m^3/h である。気密試験時には、さらなる湧水量低下が予想される。湧水量が貯槽内底水排水槽に設置したポンプの最小の定格揚水量を下回ることから、気密試験時に貯槽内水位を一定に保つ定常運転ができず、水位の変化を伴う間欠運転を行う必要がある。

本報では、これら波方ボタン/プロパン兼用貯槽固有の特徴が貯槽内温度へ与える影響を考慮した気密試験の計画、および気密性の評価と結果について示す。

2. 気密試験概要

(1) 気密試験の目的

気密試験は、岩盤貯槽に液化石油ガスを貯蔵するために必要な気密性を確認するための試験である。気密試験では、貯槽内を試験圧力（最高圧力）まで加圧し、加圧状態を保持したまま貯槽内温度の安定を確認した後、72時間の試験を行い、堅坑の水面で漏洩と判断される気泡が認められないこと、貯槽圧力を計測し漏洩によると判断される異常が認められないことを検査する。

(2) 気密試験の段階と評価概要

気密試験は、①貯槽加圧段階、②貯槽安定化段階（均一化段階）、③貯槽気密試験段階からなる。

貯槽加圧段階では、貯槽に圧縮空気を送気し、貯槽を大気圧より段階的に加圧する。貯槽安定化段階は、貯槽加圧段階終了後、貯槽内温度を安定状態にする段階である。貯槽気密試験段階は、気密試験期間（72時間）の貯槽内圧力の変化量（ ΔP ）を記録・評価する段階である。

なお、波方ブタン/プロパン兼用貯槽は、南東側に並列するプロパン貯槽と個別に気密試験を実施したことから、気密試験時には、プロパン貯槽を大気圧状態とした。また、気密試験時の水理的な境界条件は、水封機能上最も厳しい条件を想定し、配管堅坑及び水封水供給坑、水封水供給配管の水位を水封管理上の最低水位EL-15m（限界地下水位）とした。

気密試験期間（72時間）の貯槽内圧力の変化量（ ΔP ）は、ボイル・シャルルの法則に基づき、貯槽内圧力（坑口ゲージ圧）指示値から、貯槽内温度、空気体積変化等の影響を補正するとともに、貯槽内の湧水に溶解して排出される空気の影響を補正した圧力で評価する。

(3) 気密試験時計測

気密試験時の計測は、リアルタイムモニタリングシステムを構築し実施した。図-2に計測器配置の概要を示す。

貯槽気相部には18個の計測精度0.01℃の温度計を設置した（図-3）^{3,4)}。また、2個の岩盤温度計を空洞壁面から1mの岩盤内に設置し、3個の水床温度計を貯槽の水床部に設置した。貯槽圧力は、貯槽内部において直接計測できないため、坑口において圧力計側管上部の圧力を精度 $\pm 53\text{Pa}$ の高精度圧力計で計測した⁴⁾。貯槽の空気体積を算出するため、貯槽への湧水を集積する底水排水槽（直径約8m）内の底盤から1m上の深度に精度 $\pm 6.5\text{mm}$ の水位計を設置した⁴⁾。

その他、気密試験中には、主要な水理挙動パラメータである水封水圧（水封水供給配管水位、水封水供給坑水位）、作業トンネル水位、配管堅坑水位、水封水供給量、

貯槽湧水量、間隙水圧などを測定した⁵⁾。

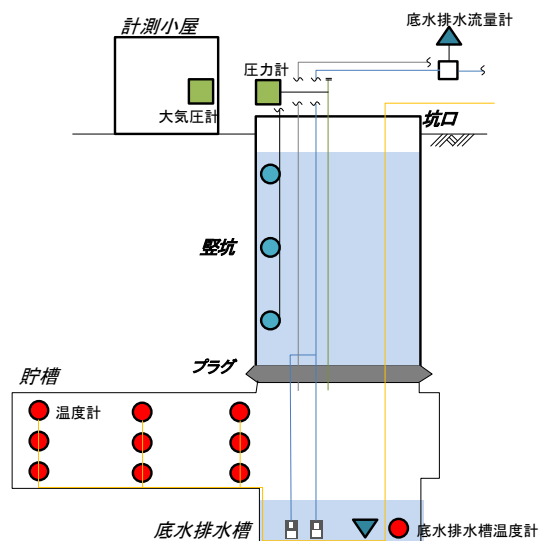


図-2 気密試験時の計測器配置(縦断面図)

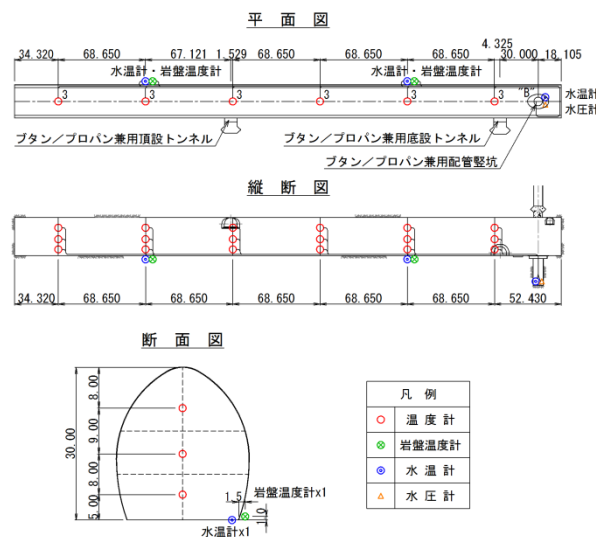


図-3 貯槽内温度計配置図

(4) 気密試験判定基準

貯槽安定化段階で確認する貯槽内温度の基準は、貯槽気相部に設置したすべての計器の温度変化率が0.1℃/日以下となることである。また、気密試験期間（72時間）の貯槽内圧力の基準は、貯槽内圧力（坑口ゲージ圧）が気密試験設計圧（970kPaG）を上回るとともに、貯槽内圧力の変化量（ ΔP ）が $\pm 0.5\text{kPa}$ 以内で、且つ、貯槽内圧力に低下傾向が認められないことである。

3. 貯槽加圧段階の結果と評価

(1) 貯槽加圧段階データの評価の目的

波方ブタン/プロパン貯槽貯槽の湧水量は、大気圧解

放条件で約 $10\text{m}^3/\text{h}$ である。また、貯槽内圧力を試験設計圧まで加圧した場合には、湧水量が約 $5\text{m}^3/\text{h}$ にまで低下することが予想された。この値は、貯槽内底水排水槽ポンプの定格揚水量の下限を下回ることから、気密試験期間（72時間）に貯槽内水位を一定に保つ常運転ができず、底水排水槽水位の変化を伴う間欠運転が必要とされた。そのため、貯槽加圧段階に取得した計測データより、底水排水槽ポンプ運転による影響を考慮した、貯槽安定化段階および貯槽気密試験段階の貯槽内温度挙動を推定し、以下に示す試験条件について検討した。

- ① 貯槽安定化段階に貯槽内温度安定化（全計器の温度変化率が $0.1^\circ\text{C}/\text{日}$ 以下）に必要となる時間。これに基づき、貯槽加圧段階の最高圧力を設定する。
- ② 気密試験中（72時間）の底水排水槽ポンプの運転に伴う貯槽内温度への影響の程度。これに基づき、気密試験中の底水排水ポンプの運転モードを設定する。

(2) 貯槽内圧力・温度挙動

貯槽加圧段階は2012年9月1日に開始し、最高圧力まで貯槽内圧を220kPaG、700kPaG、900kPaGの3段階の加圧した。図-4に貯槽加圧段階の経時変化（貯槽内圧、貯槽内温度、底水排水槽水位）を示す。

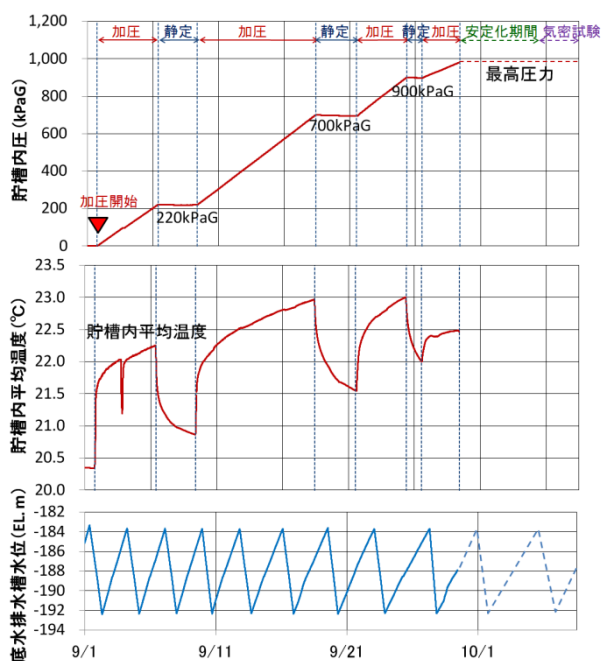


図-4 貯槽内圧力・温度・水位の経時変化

(3) 貯槽内温度挙動と底水排水槽ポンプ運転の影響評価

貯槽内圧を900kPaGまで加圧し、加圧を停止した状態（静定という）の貯槽内の全計器の温度と標準偏差の変化を図-5に示す。

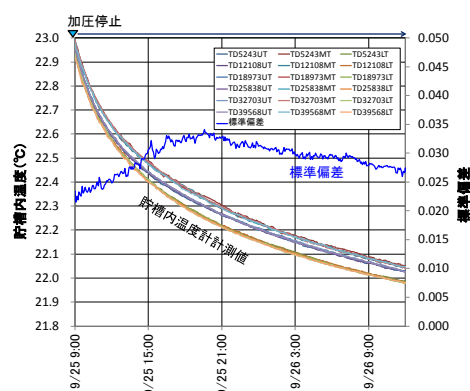


図-5 静定時の貯槽内温度変化（900kPaG静定時）

図-4の計測データより、貯槽内の気中温度は、貯槽の加圧を開始すると、断熱圧縮により急上昇し、その後、温度の上昇勾配は小さくなることを確認できる。また、貯槽の加圧を停止すると、熱量の供給がなくなることから、貯槽内の温度が急激に低下し、貯槽周辺（岩盤や水床）媒体や温度境界との温度差が小さくなるに従い、温度の低下勾配は小さくなる。また、気中温度のばらつき（気中温度の最高温度と最低温度との差）は加圧停止後11時間程度まで大きくなるが、その後徐々に小さくなり、貯槽内の空間的な温度分布が均質に向かうことが確認された（図-5）。貯槽内の温度変化挙動は、大局的には、加圧による断熱圧縮で発生する熱量と、貯槽周辺の境界（岩盤および床水）へ逸散する熱量との熱収支で決定されると考えられる³⁾。

底水排水ポンプの運転が貯槽内温度へ及ぼす影響についても計測データより確認された。図-6は貯槽内圧を900kPaGから最高圧に加圧中の貯槽内温度平均温度と底水排水槽水位を整理したものである。図より、底水排水ポンプの運転に伴う貯槽内空気体積の変化が、貯槽内平均温度に影響を及ぼすことが確認できる。底水排水ポンプの運転に伴う貯槽内温度の影響の程度は、貯槽内圧が高まるにつれ大きくなることも確認された。

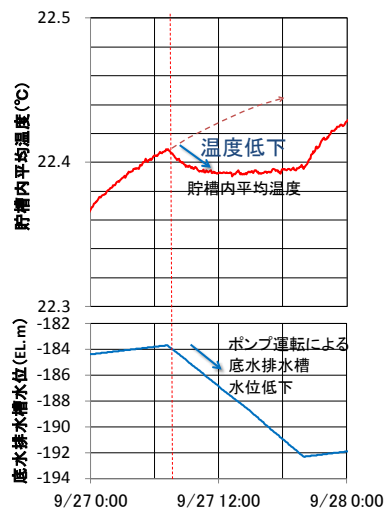


図-6 貯槽加圧段階の経時変化(図-4の一部拡大)

4. 貯槽安定化段階・気密試験中の温度変化予測

(1) 貯槽内温度変化の予測方法

貯槽加圧後、貯槽圧力を一定に維持した時の貯槽温度は、大局的には、加圧により上昇した初期の貯槽温度と、貯槽周辺の境界（岩盤および床水）へ逸散する熱量で決定される。これはニュートンの冷却の法則⁹で表現できる。

$$-\frac{dQ}{dt} = k(T_{\text{wall}} - T_{\text{air}}) \quad (1)$$

Q：熱量(W)

k：熱の伝達のしやすさを表す係数

T_{wall} ：貯槽壁面温度(K)

T_{air} ：貯槽平均温度(K)

式(1)から以下の一般式が得られる。

$$T_{\text{air}} = A(T_{\text{wall}} - T_{\text{air}}) \ln(kt) + B \quad (2)$$

A, B：計算上の係数

さらに、底水排水槽ポンプの間欠運転に伴う貯槽温度の変動に関する項を追加した。

$$T_{\text{air}} = A(T_{\text{wall}} - T_{\text{air}}) \ln(kt) + \text{sgn}(C) \cdot \ln(kt) + D \quad (3)$$

式(3)の定数、A, B, C, D, kについては、気密試験の加圧段階における、220kPaG, 700kPaG, 900kPaGの圧力一定期間の実測値から求めた。

(2) 貯槽安定化段階の温度変化予測

貯槽安定化段階は、気密試験の開始に向けて貯槽内の全計器の温度変化率が $\pm 0.1^\circ\text{C}/\text{日}$ 以内となるまで貯槽を静定する段階である。前述のとおり、底水排水ポンプの運転が貯槽内温度挙動に影響を及ぼす。そこで底水排水ポンプの運転モードを、モード①：EL-183.6～-192.3m間とモード②：EL-183.6～-187.6m間の二つに設定し、貯槽安定化段階および貯槽気密試験段階の温度挙動を予測した(図-7)。

貯槽安定化段階および貯槽気密段階の貯槽内温度変化の予測結果を図-8に示す。図は底水排水ポンプの運転モード①を条件とした予測結果である。温度の安定化は、貯槽気相部の全ての温度計を対象とすることから、貯槽加圧段階で確認された貯槽温度の平均とばらつき（平均と分散）について考慮し、予測値を整理している。

予測結果より、貯槽安定化段階にも、底水排水槽ポンプの運転が貯槽内温度に影響を及ぼすことが確認できる。また、貯槽内温度の安定化に要する時間の予測結果は2日と14時間程度となった。

貯槽加圧段階の終了時に設定する最高圧は、貯槽内温度の安定化に要する時間を参照し、同期間の①貯槽内温度低下、②底水排水槽水位変化、③ゲージ圧に対する大気圧変化、④貯槽湧水への空気溶存等を考慮することで設定(0.981MPaG)した(評価式は5章に後述)。

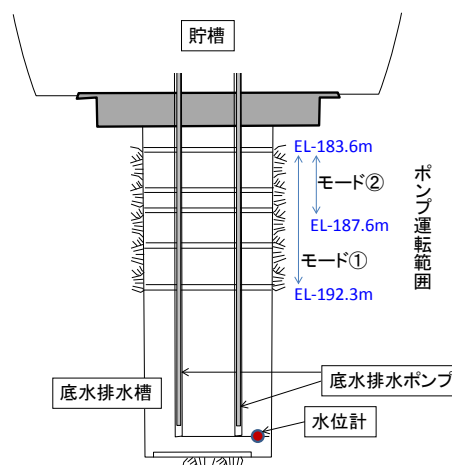


図-7 底水排水槽とポンプ運転の範囲

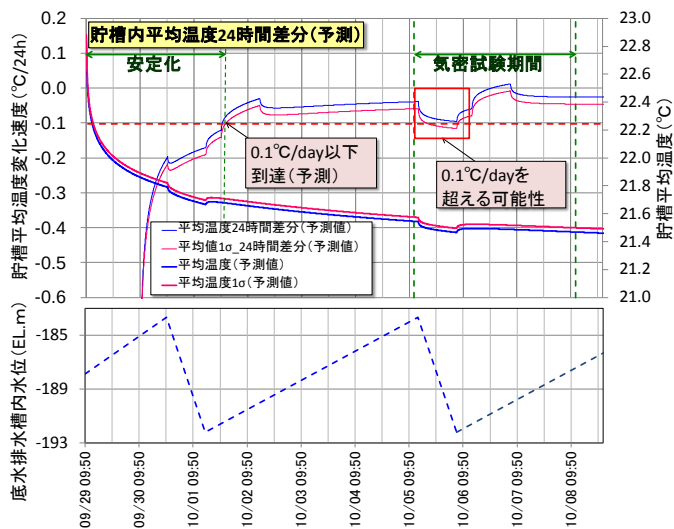


図-8 安定化・気密試験時の貯槽内温度経時変化
(ポンプ運転モード①予測)

(3) 気密試験中の底水排水ポンプ運転と温度変化予測

図-8に示す貯槽気密試験段階の貯槽内温度変化の予測結果より、貯槽安定化段階において貯槽内温度が一度安定化($0.1^\circ\text{C}/\text{日}$ 以下)に到達したにもかかわらず、気密試験期間(72時間)の底水排水ポンプの運転(運転モード①)に伴い、貯槽内温度の変化率が再び $0.1^\circ\text{C}/\text{日}$ 以上となる懸念が確認された。

一方、運転モード②の予測結果(後述図-9)では、貯槽内空気体積の変化量が小さいことから、気密試験中の底水排水ポンプ運転の影響が低減され、安定化の基準を下回ることが確認された。

そこで、気密試験期間(72時間)の底水排水ポンプの運転モードをモード②：EL-183.6～-187.6m間に変更し、気密試験を実施することを決定した。

5. 気密試験結果

(1) 貯槽内温度・圧力変化

貯槽安定化段階の確認の後、気密試験は2012年10月5日12時00分から2012年10月8日12時00分までの72時間にわたり実施した。

図-9に貯槽安定化段階および貯槽気密試験段階の貯槽温度の測定結果を底水排水水位とともに示す。貯槽最終加圧終了時から、貯槽内温度の安定化に要する時間は、2日と17時間50分であり、予測値とほぼ一致した。また、気密試験期間（72時間）の底水排水ポンプの運転モードを、モード②とした結果、同期間の温度変化率が $0.1^{\circ}\text{C}/\text{日}$ を上回ることにはなかった。

貯槽気密段階の貯槽内温度変化の予測は、実測結果をよく再現しており、予測手法および底水排水ポンプ運転モードの計画が妥当であることが確認できた。

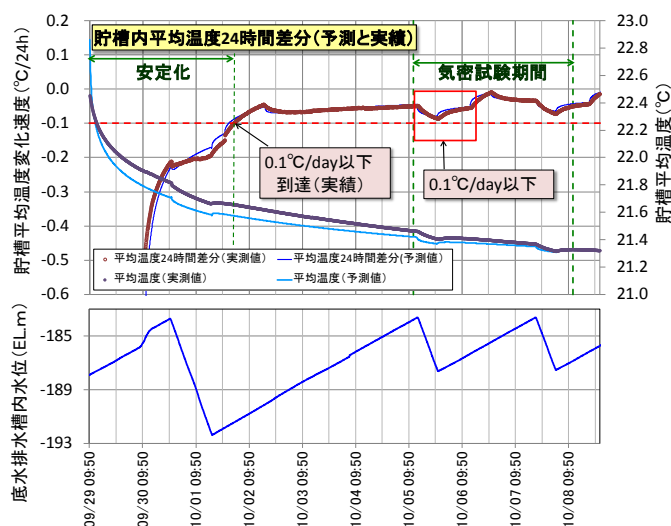


図-9 安定化・気密試験時の貯槽温度経時変化
(ポンプ運転モード②予測と実績)

(2) 貯槽の絶対乾燥空気（カラム圧、水蒸気分圧）

貯槽内圧の計測は堅坑口で行うことから、気密性評価に必要な貯槽内圧は、計測値に貯槽位置までの堅坑気体重量圧を考慮して算出した。また、補正圧力の計算は、ボイル・シャルルの法則に従うため、水蒸気分圧の影響を除外した。貯槽内の絶対乾燥空気圧は、次式で求められる。

$$P_t = P_{st} + P_{Lt} + P_{wt} \quad (4)$$

P_t : t時間後の補正された貯槽内絶対乾燥空気圧(Pa abs)

P_{st} : t時間後の圧力測定値(Pa abs)

P_{Lt} : t時間後の堅坑配管内の気体重量圧(Pa)

P_{wt} : t時間後の貯槽内の水蒸気分圧(Pa)

(3) 水位変動と温度変化による圧力補正

貯槽気密試験段階には、貯槽内圧力は常に貯槽内温度変化による影響を受けるため、貯槽内の温度および貯槽内空気体積の変化による圧力変化の補正は、ボイル・シャルルの法則に基づき、次式で表される。

$$P'_t = P_t \times \frac{T_i}{T_t} \times \frac{V_t}{V_i} \quad (5)$$

P'_t : t時間後の貯槽内の温度および空気体積の変化を補正した貯槽内の圧力(Pa abs)

T_t : t時間後の貯槽内の平均温度(K)

T_i : 試験開始時の貯槽内の平均温度(K)

V_t : t時間後の貯槽内の空気体積(m^3)

V_i : 試験開始時の貯槽内の空気体積(m^3)

(4) 貯槽空気の湧水への溶解による圧力補正

貯槽内へ常時入ってくる湧水に貯槽内空気が溶解することにより、貯槽内圧力は影響を受ける。湧水は、地表において大気圧下で空気溶解飽和とし、貯槽内では貯槽内圧力下で空気溶解飽和とする。試験開始からt時間後までの総湧水量に対する溶解に起因する圧力変動量は、以下の式で表される。

$$\Delta P''_t = P_t \times \frac{\{\gamma \times (Q \times t)\}}{V_i} \times \frac{T_i}{T_t} \quad (6)$$

$\Delta P''_t$: t時間後の湧水への空気溶解に起因する圧力変動量(Pa)

γ : 空気の飽和溶解度（水 1m^3 に溶解可能な空気量）(m^3/m^3)

Q : 貯槽内への湧水量(m^3/h)

t : 試験開始から経過時間(h)

(5) 圧力変動量

気密性の評価は、補正した圧力変動量 (ΔP_t) により行う。

図-10に、貯槽内絶対乾燥空気圧、水位変動と温度変化および湧水への空気溶解を考慮した補正圧力変動量の算出結果を示す。

気密試験期間（72時間）の補正圧力変動量は $-0.048 \sim +0.024\text{kPa}$ の範囲であり、補正圧力の低下傾向は確認されない。また、気密試験終了時（72時間経過後）の補正圧力変動量は $+0.012\text{kPa}$ であり、気密性判定基準（ $\pm 0.5\text{kPa}$ 以内）に適合することが確認された。本試験結果から、貯槽内圧力の変動量は気密性判断基準の1/10以下となり、波方ブタン/プロパン貯槽が、高い気密性能を有することが確認された。

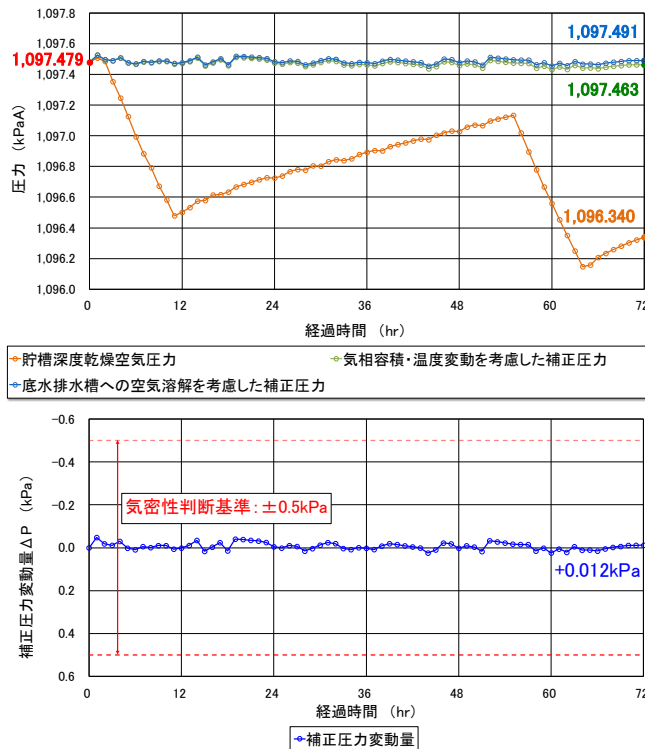


図-10 補正圧力変動量の算出結果

6. まとめ

波方ブタン/プロパン兼用貯槽の気密試験では、貯槽空洞容積が小さいこと、湧水量が極めて小さいことから、気密試験期間（72時間）のポンプ運転に伴う貯槽内空気体積の変化が、貯槽内温度挙動および貯槽の気密性評価に与える影響が懸念された。

そのため、気密試験に先立つ貯槽加圧段階において、ポンプ運転に伴う貯槽内温度への影響を評価し、貯槽安定化段階および貯槽気密試験段階の貯槽内温度挙動の予測を行うことで、気密試験期間（72時間）のポンプ運転モードを選定し、気密試験を実施した。気密試験時の貯槽内温度計測結果より、ポンプ運転に伴う貯槽内温度への影響は軽減され、高い精度で気密性評価が実施可能となり、気密試験判定基準に適合することを確認した。

参考文献

- 1) Miyazaki, H., Ichikawa, M., Nakajima, S., and Yamamoto, H., Hydraulic containment management applied to the world's largest LPG mined cavern in Japan, WTC2011 proceedings, 2011.
- 2) 前島俊雄, 岡崎百合子, 金戸辰彦, 森孝之, 征矢雅宏, 黒瀬浩公: 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, 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2013.
- 3) 諏訪好英, 土屋貴史, 田中達也, 戸谷成寿, 黒瀬浩公, 前島俊雄: 波方基地ブタン/プロパン兼用貯槽 気密試験時の熱挙動予測と計測データの分析方法について, 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2013.
- 4) 手塚康成, 征矢雅宏, 黒瀬浩公, 岡崎百合子, 金戸辰彦, 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.
- 5) 池谷貞右, 張傳聖, 鈴木健一郎, 宮崎裕光, 大久保秀一, 前島俊雄: 波方ブタン/プロパン兼用貯槽 岩盤貯槽における水封カーテンの構築と気密試験時の地下水挙動評価について, 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2013.
- 6) 庄司正弘: 伝熱工学, 東京大学出版会, 1995.

RESULTS OF AIRTIGHTNESS TEST AT NAMIKATA BUTANE/PROPANE STORAGE CAVERN AND ANALYSIS OF PRESSURE CHANGE IN ROCK CAVERN

Toshio MAEJIMA, Yuriko OKAZAKI, Shuichi OKUBO, Tatsuya TANAKA and Hiroki KUROSE

An airtightness test for Namikata butane/propane underground storage cavern (30m high, 26m wide, 430m long, storage capacity of 150,000 ton and cavern volume 286,287 m³) has been carried out. During the test, the pressure change has been monitored for 72 hours after compressed air, in excess of its design pressure (0.97MPa), was injected into the cavern. The pressure change, ΔP , in the rock cavern was then evaluated after correcting for factors such as temperature change, air volume changes and air dissolved into pumped water. This paper describes the planning, execution, interpretation and results of the airtightness test with the main focus on the effect of pumping operation.