

波方基地 プロパン貯槽気密試験結果と 圧力変動量への影響因子の分析結果について

前島 俊雄¹・岡崎 百合子¹ (元) ・大久保 秀一¹・板垣 賢^{2*}・黒瀬 浩公³

¹独立行政法人石油天然ガス・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2-10-1)

²大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

³東電設計株式会社 土木本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12)

*E-mail: itgkn-00@pub.taisei.co.jp

岩盤貯槽における気密試験では、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。ここで、 ΔP は貯槽内温度や貯槽内気相体積の影響による変化を生じることから、これらの影響を補正したうえで評価を行う必要がある。

本稿では、 ΔP の評価に影響を与える各種の影響因子を挙げ、そのうち最も大きな影響因子である貯槽内温度計測について、波方基地プロパン貯槽における温度計測の仕様、貯槽内における温度計の配置、および気密試験時の計測結果と分析結果を述べ、波方基地プロパン貯槽の気密試験データと気密性評価結果について報告する。

Key Words : LPG underground storage, rock cavern, air-tightness test

1. 気密試験概要

LPGの国家備蓄を目的とする波方国家石油ガス備蓄基地は、水封式地下岩盤貯蔵方式を採用しており、海水面下150mの深度に位置するプロパン貯槽（貯槽内気相容積約642,000 m^3 ）とブタン/プロパン兼用貯槽（貯槽内気相容積約287,000 m^3 ）からなる（図-1）。貯槽の運転圧は0.78MPaG、設計圧は0.97MPaGと高圧であり、気密性の確保が重要となる。これらの岩盤貯槽において、LPGの貯蔵に先立ってタンクとしての貯蔵性能を確認するために、貯槽気密試験を実施した。

気密試験は、圧縮空気を用いて貯槽内を所定の圧力（設計圧0.97MPaG以上）まで加圧し、加圧停止後、試験期間（連続72時間）における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試験である。

波方基地における気密試験条件を表-1に示す。

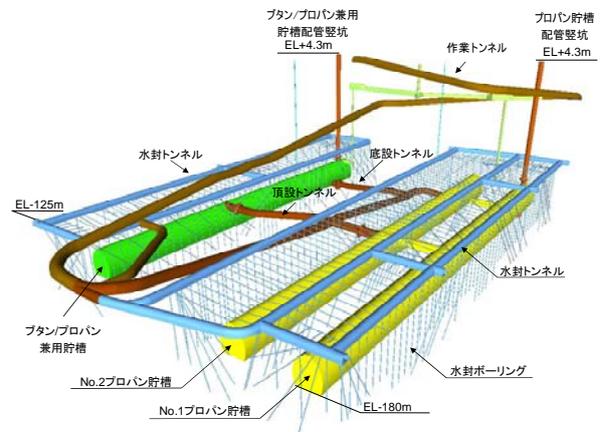


図-1 波方基地鳥瞰図

表-1 気密試験条件

項目	条件	
試験気体	空気	
試験圧力	設計圧力(0.97MPaG)以上	
水位	地下水位観測孔水位	限界地下水位(EL-15m)以上
	配管堅坑水位	限界地下水位(EL-15m)を保持
	給水堅坑水位	
	水封水供給配管水位	
気密試験期間	72時間	
気密試験開始前温度	±0.1℃/日以内	
昇圧速度	2kPa/hr(0.05MPa/日)以下	
減圧速度	1kPa/hr(0.025MPa/日)以下	

2. 気密性評価方法

(1) 気密性評価指標

気密試験は貯槽内の圧力変動量 ΔP を評価指標として合否の判定を行うが、ここで貯槽内圧力は、貯槽内温度の変化や貯槽気相体積の変化など、圧縮空気の漏洩以外の影響による変化を生じるため、岩盤貯槽の気密性評価においては、これらの影響を補正する必要がある。

貯槽内圧力に影響を与える因子を補正するための計測項目について、気密試験における計測概要を図-2に示す。

貯槽内圧力の算定に関わる計測として、地上部の配管堅坑口で測定する配管堅坑口圧力計測を実施している。また、貯槽内圧力の温度補正に関わる計測として貯槽内温度計測を、貯槽内圧力の体積補正に関わる計測として底水排水槽水位計測を実施している。その他、空気が溶解した貯槽湧水を貯槽外へ排水することによる補正に関わる計測として、排水流量および溶存空気量計測を実施している。

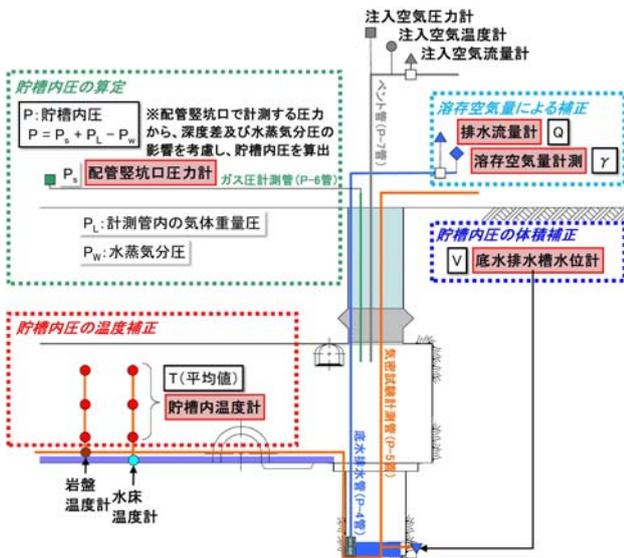


図-2 気密試験計測概要

以下に圧力変動量 ΔP の算出方法を示す。

$$\Delta P = P_i - P_t' - \Delta P_t'' \quad \text{式(1)}$$

P_i : 気密試験開始時貯槽内圧力 (配管堅坑口での圧力計測値から深度および水蒸気分圧を考慮した貯槽深度乾燥空気圧力として算出) (Pa)

P_t' : t 時間後の貯槽内圧力 (温度、気相体積の変化による影響補正) (Pa)

$\Delta P_t''$: t 時間後までに貯槽内湧水へ溶解して排出される空気量による影響補正 (Pa)

$$P_t' = P_i \cdot \frac{T_i \cdot V_t}{T_t \cdot V_i} \quad \text{式(2)}$$

P_t : t 時間後の貯槽内圧 (Pa)

T_i : 気密試験開始時の貯槽内代表絶対温度 (K)

T_t : t 時間後の貯槽内代表絶対温度 (K)

V_i : 気密試験開始時の貯槽気相体積 (m^3)

V_t : t 時間後の貯槽気相体積 (m^3)

$$\Delta P_t'' = P_i \cdot \frac{T_i}{T_t} \cdot \frac{\{\gamma \cdot (Q \cdot t)\}}{V_i} \quad \text{式(3)}$$

γ : 気体溶解度

Q : 湧水量

(2) 気密性判定基準

気密試験の判定指標である圧力変動量 ΔP は、圧縮空気の漏洩が無ければ補正後の値は0となるのが理想である。しかし実際は、補正を行うための各計測には不確かさが含まれるため、その結果に基づいて算出される ΔP はそれらの計測不確かさを含むこととなる。

そこで気密試験では、式(1)に関わる計測項目についての不確かさから式(4)により合成不確かさを算出し、これを気密性判定基準として用いている。

$$\varepsilon(\Delta P) = P_i \sqrt{\left(\frac{\varepsilon P}{P_i}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon T}{T_i}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon V}{V_i}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon \gamma}{\gamma}\right)^2} \quad \text{式(4)}$$

εP : 貯槽内圧力の計測不確かさ

εT : 貯槽内温度の計測不確かさ

εV : 貯槽気相体積の計測不確かさ

各項目の計測不確かさは、 $\varepsilon P = \pm 53 \text{Pa}$ 、 $\varepsilon T = \pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $\varepsilon V = \pm 0.3 \text{m}^3$ であり、これらを式(4)に代入すると、合成不確かさは $\varepsilon(\Delta P) = 0.5 \text{kPa}$ となる。

以上より、気密試験における気密性判定基準は式(5)のとおりとなる。

$$\Delta P < \pm 0.5 \text{kPa} \quad \text{式(5)}$$

3. 気密試験における貯槽内温度計測

(1) 貯槽内圧力の補正に対する各計測の影響度

気密試験においては、式(1)~式(3)に示す補正を行い圧力変動量 ΔP を評価する。ここで、それぞれの項目単独の補正量を試算すると、以下のとおりとなる。

貯槽内温度の変化による補正量は気密試験72時間の温度変化を 0.3°C ($0.1^\circ\text{C}/\text{日}$) と仮定すると約 1.1kPa となる。

貯槽気相体積の変化量は、底水排水槽水位の最大変動幅から 469m^3 となり、これによる圧力補正量は約 0.7kPa となる。

溶存空気による72時間の補正量は、湧水量 $27 \text{m}^3/\text{hr}$ 、飽和溶解を仮定すると、式(3)より約 0.06kPa となる。

(2) 貯槽内温度計の仕様

前述のように貯槽内温度計測が貯槽内圧力に最も大きな補正量を与える因子となることから、気密試験においては温度計測精度の確保が重要となる。そこで貯槽内温度計の計器精度は、JIS C 1604-1997クラスAの許容差である $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ （測定温度 0°C ）よりも厳しい $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 以内を確保するものとした。

このため、温度計の校正は、水の三重点、ガリウム点、インジウム点の3点の定義定點を使用した2次式を採用し、品質向上を図った。また、温度計製造工場からの出荷前検査、現地搬入後の着荷検査、貯槽内ケーブル敷設後の敷設後検査など、各段階検査において $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ よりも厳しい管理値を設けた品質管理を行うことにより、貯槽内設置後の最終検査において計器精度 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ を確保した。

波方基地プロパン貯槽の気密試験に用いた貯槽内温度計の仕様を表-2に示す。

(3) 貯槽内温度計の配置

気密試験における貯槽内温度計測は、貯槽内圧力の温度補正に用いる貯槽内代表絶対温度を算出することが目的である。そのため、貯槽内に設置する温度計の個数、設置箇所が重要となる。波方基地プロパン貯槽は図-3に示すように2条の貯槽とそれらをつなぐ連絡トンネルからなり、また気密試験時の圧縮空気はNo.1プロパン貯槽端部に位置する配管堅坑内のベント管から送気されるため、設計圧力への昇圧過程においては貯槽内に複雑な気流が生じ、それに伴い貯槽内の空気温度分布も複雑になることが予想された。

そこで貯槽内温度計の配置にあたっては、事前に貯槽および周辺岩盤をモデル化した3次元モデルによる気流解析を行い、気密試験時における貯槽内空気温度分布を予測したうえで、場所による温度のばらつきを把握でき、適切な代表温度を算出できるように設置個数および設置

箇所を決定した。

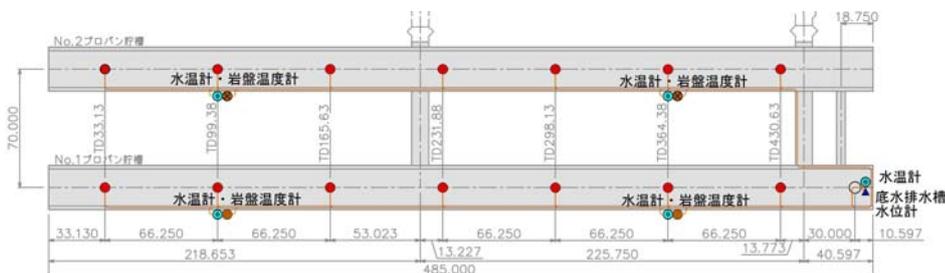
決定した貯槽内温度計配置を図-3に、貯槽内温度計設置状況を写真-1に示す。

表-2 貯槽内温度計仕様

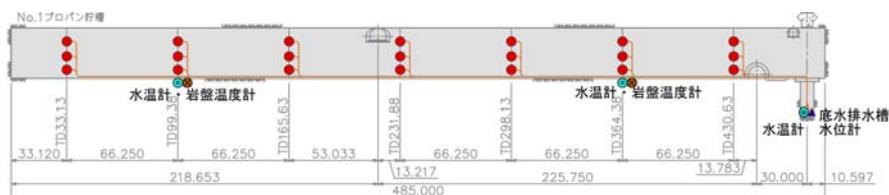
適用規格	JIS C 1604-1997
抵抗体素子	白金巻線型（セラミックボディ）
0°C における公称抵抗値	100 Ω
R100/R0 値	1.3851
導線形式	4 導線式
品質	計器精度： $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 以内
校正法	3 定點を用いて JIS 校正に基づく 2 次式により補正係数算出
防水性	2.0MPa 以上（全数試験により確認）
本体材質	SUS316L



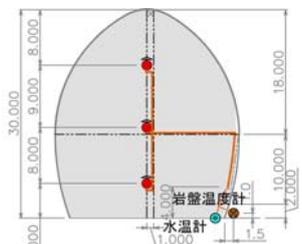
写真-1 貯槽内温度計設置状況



計測機器配置平面図



計測機器配置縦断面図 (No.1プロパン貯槽)



計測機器配置横断面図

凡例

- 貯槽内温度計 (42個)
- 岩盤温度計 (4個)
- 水温度計 (5個)
- ▲ 底水排水槽水位計 (1個)

図-3 気密試験貯槽内計測機器配置図

4. 気密試験手順

波方基地プロパン貯槽における貯槽加圧前から気密試験終了後までの貯槽内圧（配管堅坑口圧力計による計測値）と貯槽内温度（温度計42個の計測値および算術平均値）の経時変化グラフを図-4に示す。

貯槽内圧力が大気圧状態からの加圧初期段階では、圧縮空気の送気に用いる配管径から定まる流速制限により加圧速度を0.025MPa/日とした。これは衝撃波を発生させない条件（マッハ数0.8以下）として定めた速度である。貯槽内圧力が0.07MPaGに達して以降は、先行して気密試験を実施したブタン/プロパン兼用貯槽の実績に基づき加圧速度を0.053MPa/日とした¹⁾。貯槽内圧力が0.92MPaGに達して以降は、コンプレッサー能力の関係から加圧速度を0.019MPa/日とした。

また、気密試験は設計圧力0.97MPaG以上で行うが、加圧途中において貯槽気密性の段階確認を行うことを目的として、貯槽内圧力が0.28MPaGおよび0.7MPaGに達した時点で加圧を一旦停止し、数日間の静置期間を設け、

計測値の確認と気密性の評価を実施した後、次ステップの加圧に臨んだ。

最高圧力到達時の加圧停止は2012年11月17日16時であり、その後貯槽内温度の安定化を待ち、2012年11月26日16時から72時間の気密試験を開始した。

5. 貯槽内温度計測結果

(1) 貯槽加圧時の挙動

図-4に示すように、加圧直後または加圧速度上昇直後は貯槽内温度は急激に上昇するが、その後は上昇勾配が徐々に緩やかとなり、勾配は一定に近づく傾向を示す。

逆に、加圧停止直後または加圧速度低下直後は貯槽内温度は急激に低下し、その後時間の経過とともに収束する傾向を示している。

貯槽内温度の変動幅（平均温度との差）は、図-5に示すように貯槽内圧力の上昇とともに小さくなり、また加圧停止期間は一一定となる傾向を示している。

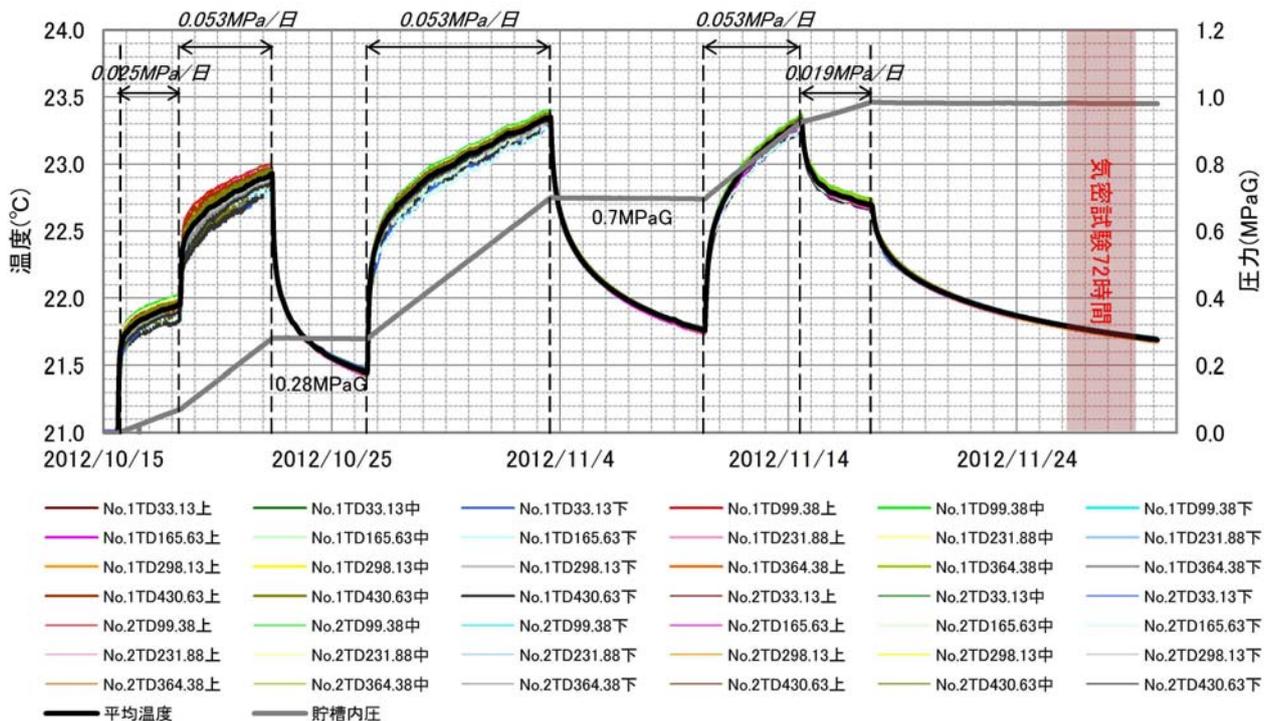


図-4 貯槽内圧・貯槽内温度経時変化図

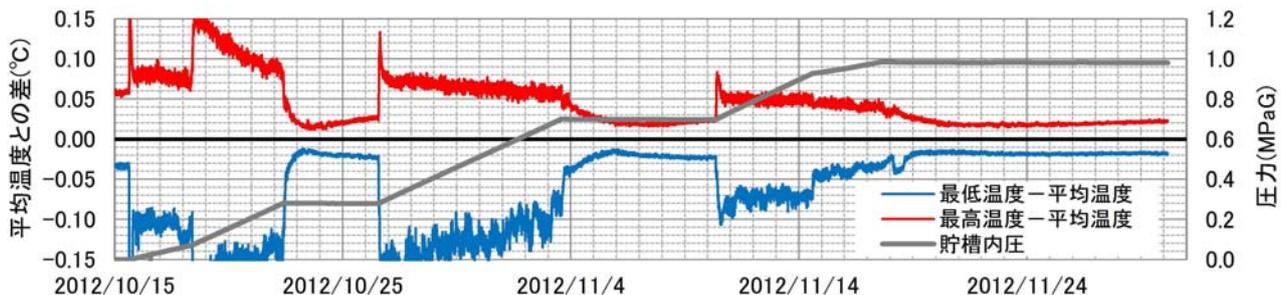


図-5 貯槽内温度の変動幅経時変化図

(2) 気密試験時における貯槽内温度の分析

気密試験におけるΔP評価のうえで、理想的な貯槽内温度の条件としては以下の二つが挙げられる。

- ① 貯槽内に場所による温度分布がなく、各温度計計測値が等しく貯槽内代表温度が一意的に決定される。
- ② 貯槽内温度に時間的な変化がなく、したがってΔPに対する温度変化による補正が不要となる。

これらの理想条件に対し、場所的・時間的に変化する計測値を用いた現実的な評価手段を以下に挙げる。

- ① 各温度計の計測値のばらつきが小さく正規分布に近ければ、平均値を最確値(=貯槽内代表温度)として温度変化によるΔPの補正に用いる。
- ② 時間的な温度変化によるΔPの補正誤差を小さくするために温度変化量がある程度小さくなった段階で評価を行う。

ここで、波方基地プロパン貯槽の気密試験時における貯槽内温度計測値の度数分布を図-6に、貯槽内温度分布を図-7に示す。度数分布は平均値を中央値としてほぼ左右対称であり、平均値との差も最大0.02℃程度と、貯槽

内における場所によるばらつきは小さい。また図-8には温度変化量(右軸は平均温度)を示すが、試験開始時には全温度計が気密試験条件の±0.1℃/日よりも小さい±0.03℃/日程度の値となっている。

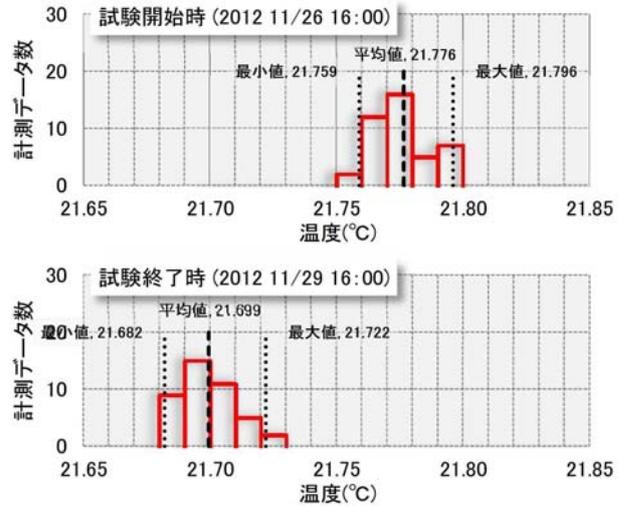


図-6 貯槽内温度計測値の度数分布

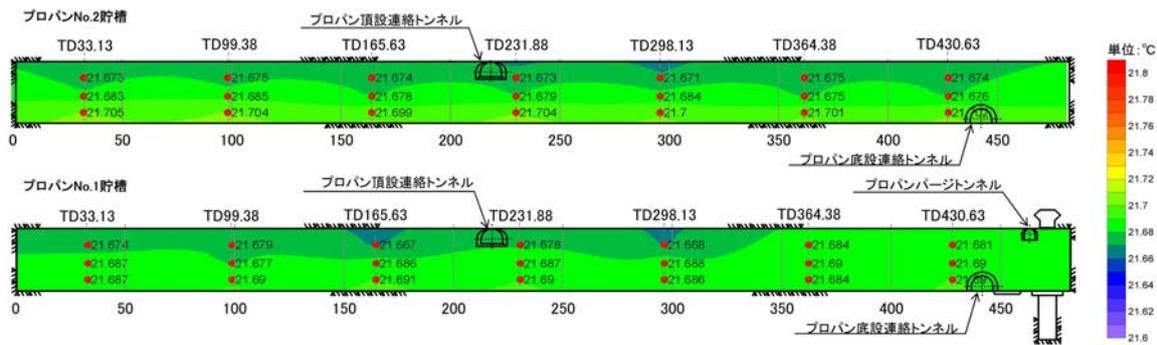


図-7 貯槽内温度分布図 (2012年11月30日7:00)

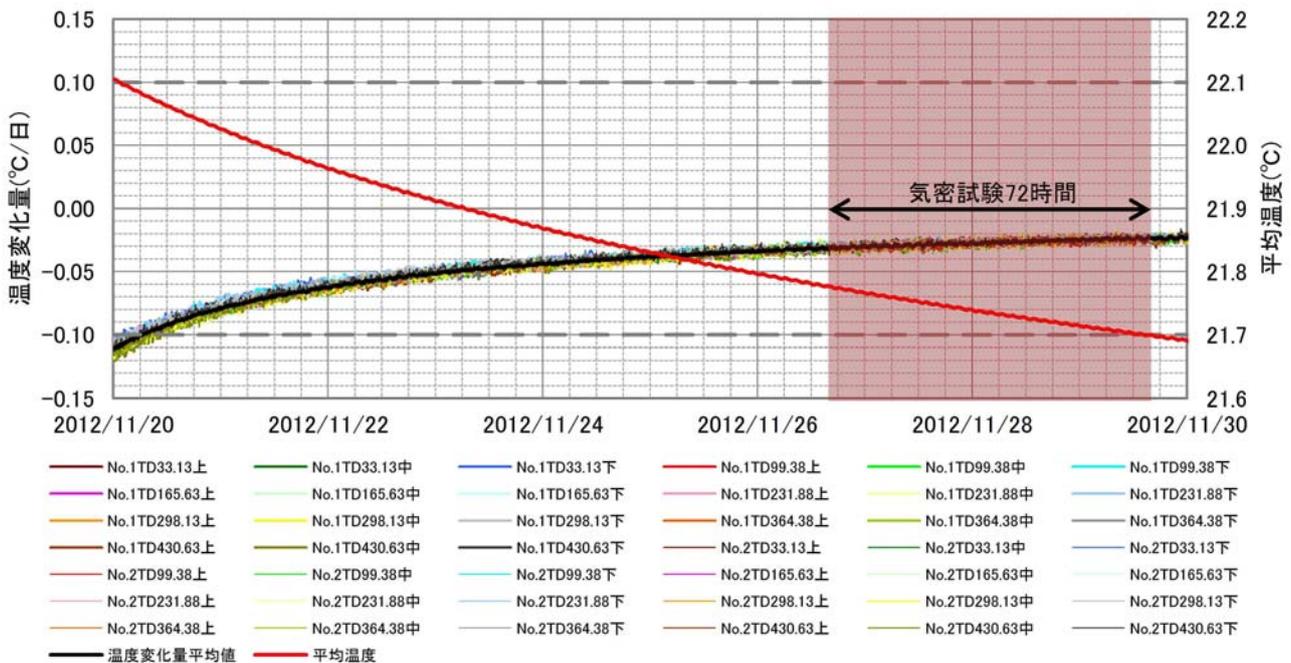


図-8 貯槽内温度変化量経時変化図

以上の温度計測結果より、貯槽内温度のばらつきおよび温度変化量は十分に小さく、得られた貯槽内温度（平均値）を用いて圧力変動量の補正を行うことにより、 ΔP の適切な評価が可能である。

6. 気密性評価結果

波方基地プロパン貯槽における気密試験結果として、 ΔP の算出結果を図-9に示す。

気密試験時の貯槽深度乾燥空気圧力は、開始時1,099.699kPa、終了時1,099.339kPaであり、72時間における変動量は0.360kPaとなった。貯槽の気密性評価指標である補正圧力変動量 ΔP は、試験終了時点で0.022kPaとなり、低下傾向も認められない。したがって気密性判定基準である $\pm 0.5\text{kPa}$ よりも十分小さく、貯槽の気密性を確認することができたと判断される。

また、図-10に温度変化、体積変化、溶存気体量のそれぞれの圧力補正量を示す。試験期間中の温度変化による圧力補正量は試験終了時点で0.298kPaと各種圧力変動要因の補正量の中で最も大きく、次いで溶存気体量による補正量が0.040kPaであり、貯槽気相体積の変化による補正量は試験終了時点では0kPaと最も小さくなった。

7. まとめ

波方基地プロパン貯槽の気密試験においては、判定指標である補正圧力変動量 ΔP に及ぼす影響が最も大きい貯槽内温度計測について、目標とする計器精度を設定し、各工程における段階的な品質管理によりその精度を確保した。また、3次元モデルを用いた事前の予測解析により貯槽内の配置を決定した。

その結果、気密試験において高精度な温度計測が実施可能となり、貯槽内の温度分布のばらつきや時間的

な温度変化量から、計測値に基づく ΔP の補正についてその妥当性を確認した。このような計測結果に基づき温度変化に対する補正を行い気密性を評価した結果、 ΔP 変動幅は十分に小さく、低下傾向も認められず、波方基地プロパン貯槽の高い気密性を確認することができた。

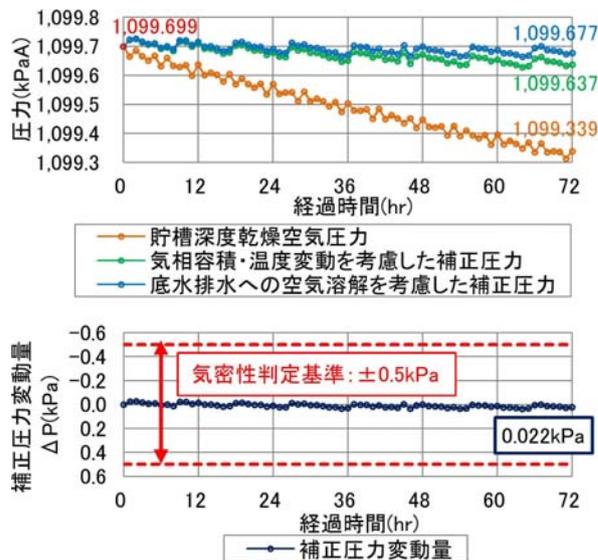


図-9 気密性評価結果

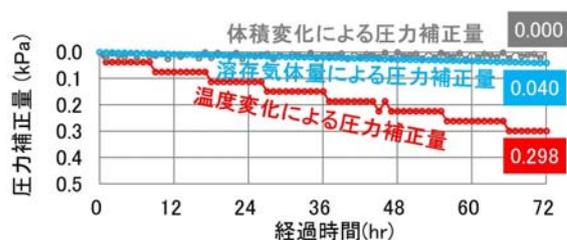


図-10 ΔP 影響因子毎の圧力補正量

参考文献

- 1) 前島俊雄, 岡崎百合子, 大久保秀一, 田中達也, 黒瀬浩公: 波方ブタン/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, 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2013.

RESULT OF AIR-TIGHTNESS TEST AT NAMIKATA PROPANE STORAGE CAVERNS AND ANALYSIS OF FACTORS OF PRESSURE CHANGE IN ROCK CAVERNS

Toshio MAEJIMA, Yuriko OKAZAKI, Shuichi OKUBO, Ken ITAGAKI
and Hiroki KUROSE

Cavern pressure was measured during its air-tightness test to ensure its storage performance. For evaluation of air tightness of rock cavern, it is necessary to take account of the influence of temperature change, air volume change in the caverns from the measured value of pressure change.

This paper describes various factors of pressure change in the rock cavern during its air-tightness test and degree of influence of various factors, and reports the result of air-tightness test at NAMIKATA PROPANE STORAGE CAVERNS.