

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

手塚 康成^{1*}・征矢 雅宏²・黒瀬 浩公³・岡崎 百合子^{4(元)}・前島 俊雄⁴

¹鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木工務部（〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目5-11）

²清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部（〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1）

³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）

⁴（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）

*E-mail: tezuka-yasunari@kajima.com

水封式LPG岩盤貯槽の気密試験においては、貯槽内を昇圧し圧力維持状態に保つ過程で、貯槽内気体の圧縮による温度上昇や湧水の排水による気相容積の変化、加圧気体の溶解に伴い貯槽内圧力や温度が変化するため、これらを適正に補正して評価する必要がある。したがって、各計測項目に対する計器配置や計測精度が、気密性の評価に多大な影響を及ぼす。筆者らは、波方基地での模擬岩盤空洞試験の知見と熱流体解析をもとに計器の配置と要求精度を設定した。計器の選定からフィールドでの設置に至るまで、原位置での精度実現のための机上検討や事前確認試験を重ね、設置に対する基準化と精度管理法を確立した上で計器を設置した結果、全ての計器において要求精度を満足する結果が得られた。

Key Words : LPG underground storage, air tightness test, precision control for measurement

1. はじめに

水封式LPG岩盤貯槽の気密試験は、岩盤貯槽の気密性能を確認する目的で、貯槽内の空気を所定の圧力まで昇圧させ、昇圧停止後の貯槽内温度変化、湧水の排水による気相容積変化などで補正した貯槽内圧力変化が±0.5kPa以内であり、且つ安定していることで合格となる¹⁾。このため、本試験における計測器の配置や測定精度は、貯槽の気密性を評価する上で最も重要な要素となる。

特に倉敷基地は、貯槽空洞レイアウトが複雑で、且つ湧水量が場所によってバラツキがあるため、圧力変化に伴う温度変化が、貯槽内で一様に発生するかが一つの課題となった。

そこで、波方地点でのチャンバー試験の知見²⁾を踏ま

えて、貯槽内圧力計と温度計の仕様並びに配置を検討した結果、原位置での測定精度向上のためには、実験室レベルの計測器を原位置に設置する必要性が生じたため、原位置で実験室と同等の分解精度を再現するための、設置の基準化と精度管理手法を確立したので以下に述べる。

2. 計測器の仕様と配置

波方基地でのチャンバー試験結果を踏まえた、貯槽気密試験の評価項目に対する計測器と要求精度を表-1に示す。同表の黄緑色のハッチング箇所がフィールドでの実測項目となり、水色は計算項目となる。

これらの計測精度で、実際に気密性を評価した場合の

表-1 倉敷基地 貯槽気密試験時の計測項目と要求計測精度

項目		パラメータ	実測/計算	計測精度	備 考	海外事例
P:圧力項	貯槽内圧力	圧力検出管口元圧	実測値	±53Pa		±53Pa
	大気圧	測地大気圧	実測値	±20Pa		±20Pa
	貯槽内水蒸気分圧	(貯槽内代表温度)	理論値	(±0.1℃)	貯槽内温度安定時の湿度を100%として算定	理論値
	配管堅坑内気柱重量圧	堅坑内水温度		±0.15℃	堅坑内水温の安定値から空気密度を算定	理論値
		(圧力検出管口元圧)		(±53Pa)		
		(測地大気圧)	(±20Pa)			
V:体積項	底水排水槽内水位変動	底水排水槽内水位	実測値	±0.65cm	高精度断面測定を別途実施し、1cm単位の断面積を算出(±0.65cmで±0.4m3程度)	±1m3
	排水中の溶存気体量	(底水排水槽内断面積)	(別途測定)	(固定値)		
		底水排水槽水温	理論値	±0.15℃	飽和度を100%として排水水温と排水量から排出量を算定	理論値
		排水量		±1.0%RD		
T:温度項	貯槽内代表温度	貯槽内温度(多点計測)	実測値	±0.01℃	代表温度は各計測値を加重平均 そのため計測精度は±0.01℃ (ただし、平均値の評価精度は±0.1℃)	±0.1℃

各計測不確実性が持つ影響度は図-1に示すとおりであり、貯槽内温度の評価精度を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ とした場合の影響が全体の約70%を占め、次いで貯槽内圧力が約10%となっている。すなわち、温度と圧力をより正確に測定することが、気密試験において最も重要となることが分かった。特に貯槽内温度の影響が突出しており、また気密性の評価時は貯槽内代表温度(加重平均温度)とするため、温度計の計測精度は $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ として、平均値の確度を高め、挙動分析の精度向上を図ることとした。

一方、倉敷基地は4貯槽が複雑に連結され1ユニットになっていることもあり、計測精度の他に、貯槽内温度計の適正配置も重要となる。そこで、チャンバー試験時の温度分布の再現性を元に解析入力値を同定し、貯槽気密試験時の三次元熱流体解析を実施して、縦横断方向で適切な配置を検討した。

解析結果を図-2に示す。加圧に伴う温度上昇が安定した加圧完了2日後の温度分布は、縦横断方向とも一様な正の成層状態を成しており、この結果はチャンバー試験で得られた実測値と傾向が一致している。

各計測不確実性が持つ P への影響度

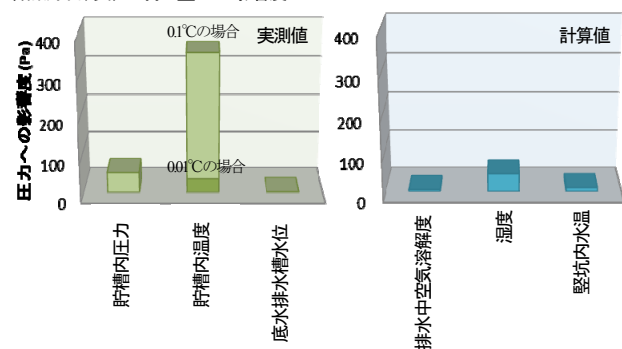


図-1 気密性評価への各計測不確実性の影響度

そこで、得られた結果を元に、まず各貯槽の断面内に設置する温度計の個数をパラメータとして、それらから分担面積を考慮して計算した平均温度と、解析上の全節点の平均温度の差が、全ての貯槽で最小となる個数を検討した結果(図-3)、断面内は3個あれば良いという結論が得られた。

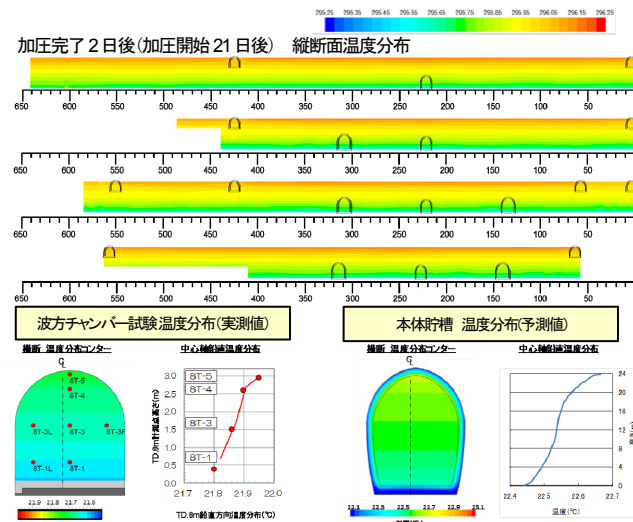


図-2 気密試験時の3次元熱流体解析結果(安定後)

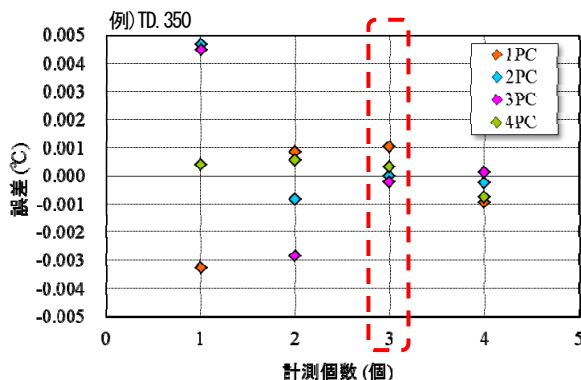


図-3 解析結果に基づく断面内計器配置の検討結果

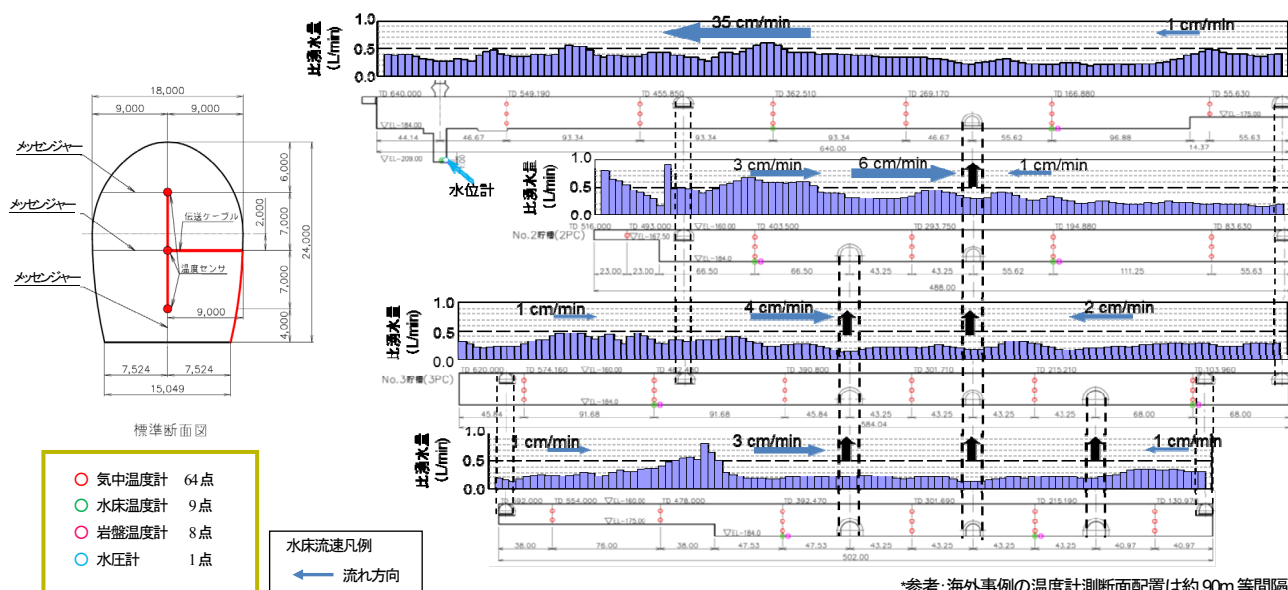


図-4 貯槽湧水量の分布に基づく貯槽内温度計の配置検討結果

縦断方向の断面配置については、海外の実績(約90m等間隔)を基本に、図-4に示すように、連結トンネルでの温度擾乱を避けるため離隔を40m程度確保し、かつ水床水温の影響を加味して、湧水量が多い区間(水床水の流速が変わる区間)毎に計測断面を配置した。

3. 計器の選定と設置基準化試験結果

(1) 貯槽内圧計測圧力計

使用した高精度圧力計は、FLUKE社のRPM4-A1.4Mである。工業用圧力計の校正に使用されているものと同様の精度(試験圧1.0MPaに対して $\pm 53\text{Pa}$)を有しており、通常は室内の一定温度状態で使用するものである。今回、外気と変らない温度変化が生ずる防護構内で使用するに当たっては、高精度圧力計の温度・湿度・振動に対して以下の品質管理を実施した。

a) 圧力計の品質管理

高精度圧力計の温度・湿度対策については、インキュベータ内に圧力計を設置することにより温度を 20°C 程度に保持し、湿度30%以下に抑制した。

振動対策については、圧力計下部に振動マットを設置し、圧力計の収納箱を防護構コンクリート床版にボルトで固定した。試験中は圧力計を格納したインキュベータ内に振動計を設置し、随時、振動と圧力変化の関係を監視した。圧力計は、製造者構成結果および国内認定検査機関での標準器による製品性能試験を実施した後、現地にて2台の高精度圧力計での器差(20Pa)確認および高精度大気圧計との器差(8Pa)確認を実施し、精度チェックを行った(写真-1)。

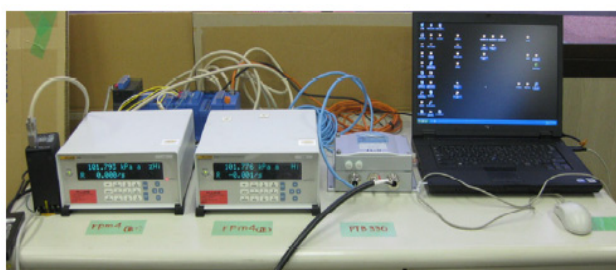


写真-1 高精度圧力計の器差確認状況

b) 導圧管の品質管理

貯槽圧力計測は、図-5に示す導圧管(8/6mm $\times$ 12m継手なし)により貯槽内と計器を連結させ実施した。結露発生を抑制するため断熱加工を施したが、仮に導圧管内に結露が発生した場合には、圧力計に水滴が流れ込まないよう導圧管に1/10以上の勾配を設けた。なお、気密試験中は、加圧直後に排水バルブの開閉により結露水の発生の有無を確認したが、結露は認められなかった。

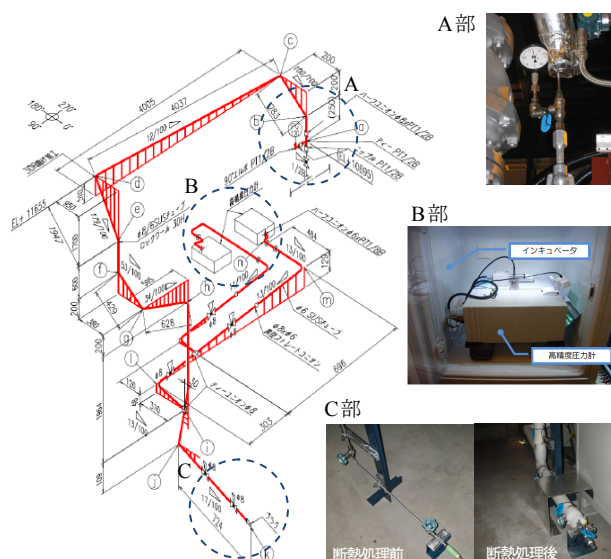


図-5 導圧管の配管図と敷設状況

(2) 貯槽内温度計

貯槽内温度計の要求精度は $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ であり、この計測精度を有する計測器は、圧力計と同様に試験室等で基準器として使われているものに限られる。

計測原理は、海外で実績のある白金抵抗体Pt100を採用するものとしたが、JIS 1級品でも精度は $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ であるため、 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ の精度を実現するためには、計測器の構造から見直す必要があった。

そこで、表-2に示すような事前試験を実施し、要求精度を満足する計測器の構造と仕様を図-6のように定めた。この温度計の特徴を端的に列挙すると、

- ・エレメントをシース形としコイルの拘束を弛緩
- ・リード線のジョイントレス化とドレンワイヤーによる耐ノイズ対策

であるが、コイルの温度による伸縮の追随性を高めるため拘束を緩めた分、JIS 1級品よりも振動や衝撃に弱い構造となり、さらにリード線もジョイントレス化したことによって、計測位置から地上までの敷設長が平均で1,100m、最長は1,500mと長く、敷設作業による伝送路抵抗値の変化も無視できないため、工場での精度をフィールドで再現するためには、工場へ設置後の精度保証方法と設置基準を、事前に確立しておく必要があった。

表-2 貯槽温度計選定の評価試験項目と結果

試験項目	事前試験・評価内容	評価結果
受感部の構造	自己加熱影響度 耐振動・耐衝撃性	受感部はシース形とする
シール部の構造	耐水圧性 (絶縁低下)	収縮チューブによるシール構造とする
指示計	基準温度の再現性 長期安定性	指示計はMicroK200を採用
伝送ケーブル	耐ノイズ性 (静電容量)	4線式リード線+ドレンワイヤーとする

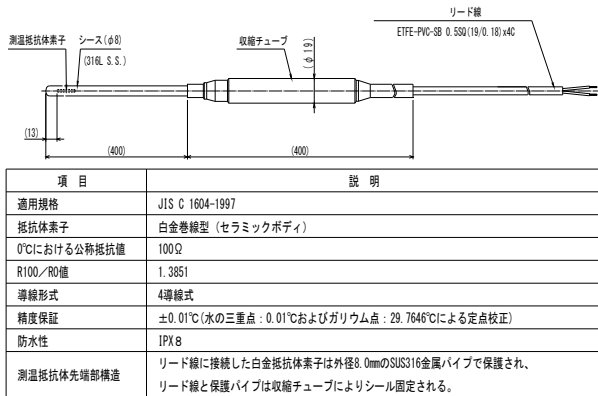


図-6 貯槽温度計の構造と仕様

a) 温度指示値の精度保証

温度計の精度保証は、工場での較正時と現場での敷設完了時では別個の方法が必要となるため、図-7に示したように、工場出荷時に現場での管理値を定め、施工プロセスの節目に必ず検査を行うこととした。

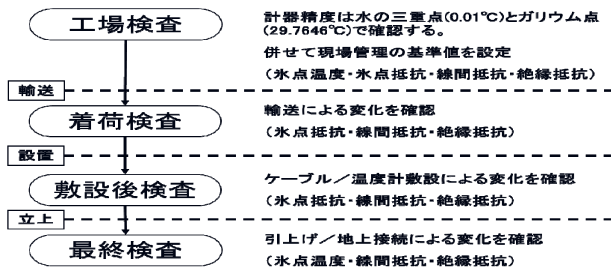


図-7 精度保証のための検査プロセス

まず工場での較正は、今回の测温範囲が $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 程度の範囲内であるため、1990 年国際温度目盛（ITS-90）の中から、水の三重点(0.01℃)とガリウム点(29.7646℃)を使って、温度計1台ずつ実敷設ケーブルも取り付けた状態で定点較正を実施した。その較正結果を用いて、現地へ導入するデータロガーで氷点温度(0.00℃)とその時の氷点抵抗値を測定し、併せて各ケーブルの線間抵抗値・絶縁抵抗値も測定して、それぞれを現場検査における再現性の基準値とした。

なお、全体の合成不確かさは、

$$\sigma = \sqrt{(T_{sns})^2 + (T_{sys})^2 + (T_{cbl})^2} = 0.0033^\circ\text{C} \quad (1)$$

ここに、 T_{sns} :温度センサの誤差要因 0.00280℃
(較正精度と安定性と自己加熱の再現性の合成誤差)

T_{sys} :測定ロガーの誤差要因 0.00112℃
(温度表示精度と安定性とノイズ影響の合成誤差)

T_{cbl} :リード線での誤差要因 0.00140℃
(静電容量の影響と絶縁劣化の合成誤差)

となり、信頼度は $2\sigma = \pm 0.0066^\circ\text{C} < \pm 0.01^\circ\text{C}$ と、要求精度内に収まった。

次に現場検査は、現場への輸送後(着荷検査)・貯槽内

設置後(敷設後検査)・計測システム構築後(最終検査)の3回実施することとし、各段階における検査項目と管理値を表-3のように定めて、施工途中での異常の早期発見と最終的な精度を確保するものとした。特に、現場での氷点検査については、工場に現地で入手可能な氷と精製水を持ち込み、その再現性について事前に確認した。

表-3 現場検査項目と管理値

検査項目	評価内容	管理値	
氷点温度	工場検査基準値との差 (氷点抵抗値から換算)	着荷検査時	±3mK
		敷設後検査時	±6mK
		最終検査時	±9mK
		長期変動余裕	±1mK
線間抵抗	工場検査基準値との差	±30Ω 以内	
絶縁抵抗	都度の実測値	100MΩ 以上	

※1mK=0.001℃

b) 設置フローと設置基準

計器設置フローを図-8に、貯槽内ケーブル敷設ルート俯瞰図を図-9に示す。

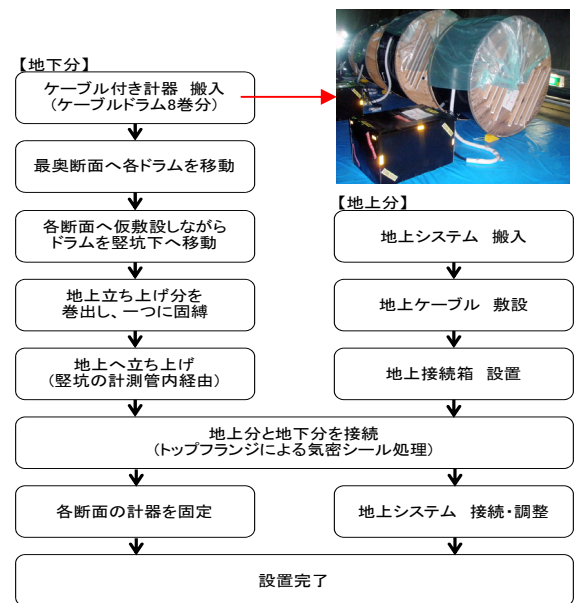


図-8 貯槽内温度計の設置フロー

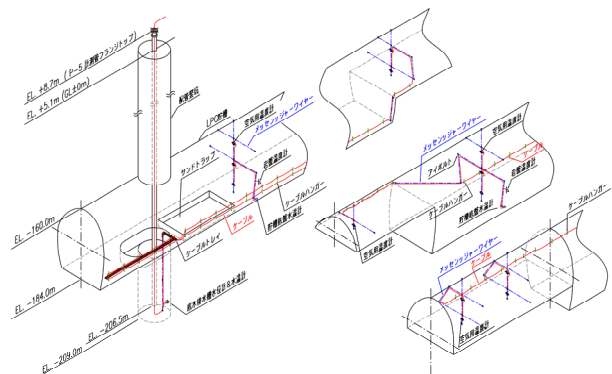
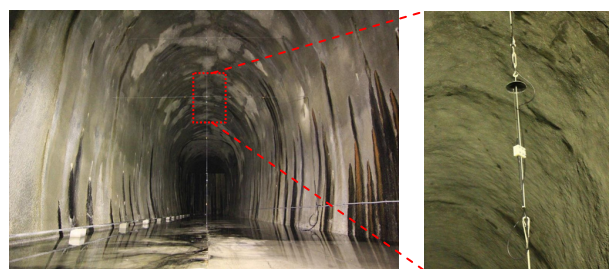


図-9 貯槽内温度計ケーブル敷設ルート俯瞰図

計器の特性とケーブル敷設ルートのアップダウン等を考慮し、表-4に示すように、事前に各種評価試験を実施して、精度保証に必要な設置基準を定め、これに従い設置工事を管理した。

表-4 貯槽内温度計の設置基準

設置基準項目	事前試験・評価内容	結果
振動・衝撃に対する基準	模擬搬入・設置試験 (防振構造の確認)	防振保護管を使用し最終試験まで取付 エアサス付ユニックでの搬入・設置
敷設作業に対する基準	ケーブル耐張力 (自重による抵抗変化量)	フリー吊下げ高さは15m以下とする 配線は手配りを基本とする
ケーブル固定に対する基準	机上検計 (信号ケーブルの基準)	固定時許容曲げ半径6D以内 受感部とメッセンとの離隔20mm以上
耐ノイズに対する基準	机上検計 (誘導電流)	地上配線で防護構~J/B~横断部手前 までは金属シース防護管に収納



設置状況

同 拡大



氷点検査状況

氷点槽

4. 計器設置実績

(1) 貯槽内圧計測圧力計

現場設置後の2台の高精度圧力計の器差は室内と同様20Pa程度であり、基準値 $\pm 31\text{Pa}$ に対して余裕をもって設置が完了した。器差の測定結果を図-10に示す。

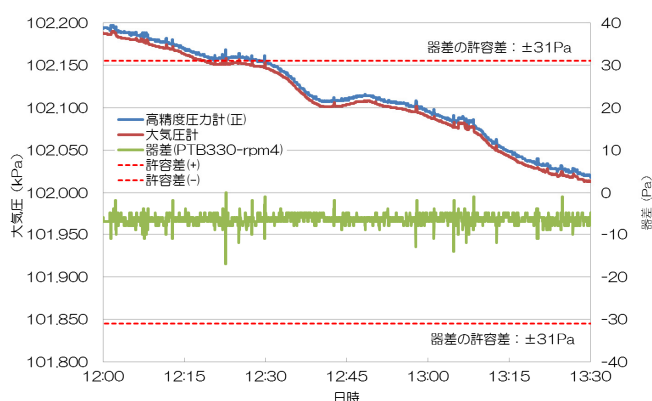


図-10 高精度圧力計の器差確認結果

(2) 貯槽内温度計

設置状況を写真-2に、また設置完了時の氷点検査結果を図-11に、線間抵抗の測定結果を図-12に示す。

最終の氷点検査結果(工場検査値との差)は、全体平均で $+0.4\text{mK}$ ($+0.0004^\circ\text{C}$)となり、(1)式の工場検査時の合成不確かさを加味しても、設置後の全体の不確かさは $+3.7\text{mK}$ ($+0.0037^\circ\text{C}$)となるため、設置基準通りに設置・管理したことによって、目標精度 $\pm 10\text{mK}$ ($\pm 0.01^\circ\text{C}$)に対して十分な余裕を持って測定精度が確保できた。

なお、中間検査においても管理目標値を外れる計器は無かったため、1台も交換や欠測は生じていない。また、線間抵抗値の変化は $+0.44\Omega$ と微小で、絶縁抵抗値はすべての検査において全計器が $100\text{M}\Omega$ 以上であった。

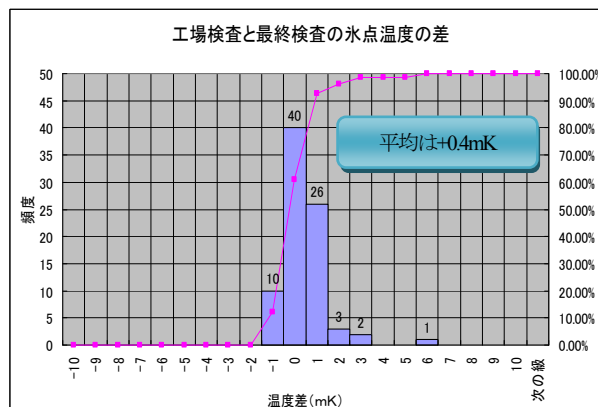


図-11 最終検査結果(氷点検査)

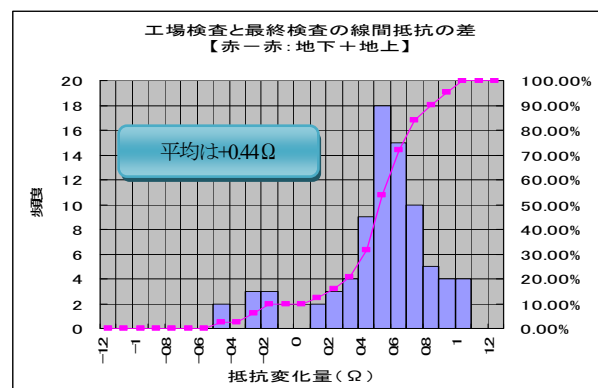


図-12 最終検査結果(線間抵抗値)

5. 気密試験時の測定結果

気密試験時の貯槽内圧力・温度の実測結果を図-13に示す。気密試験期間中の貯槽内圧力変化量は $\Delta P = -286\text{Pa}$ 、温度変化量は $\Delta T = -0.08^\circ\text{C}$ であり、各変化量に占める計測精度の割合は、圧力計が $\pm 53\text{Pa} \div 286\text{Pa} = \pm 18.5\%$ 、温度計が $\pm 0.01^\circ\text{C} \div 0.08^\circ\text{C} = \pm 12.5\%$ となった。

この測定値を用いて貯槽の気密性を評価した結果¹⁾、補正後の圧力は $\Delta P=2\text{Pa}$ となり、気密性判定基準値 $\pm 500\text{Pa}$ に対して十分に満足する結果となった。

なお、図-14に気密試験期間中の貯槽内温度計64台の日変化速度のヒストグラムを、また表-5に指示値をスミルノフ・グラブス法で検定した結果を示すが、日変化速度の標準偏差は最大でも $\sigma=0.0038^\circ\text{C}/\text{day}$ と非常に小さく、また指示値の検定結果も、有意水準0.05に対する有意点3.051に対して検定統計量は2.0前後となっており、外れ値は無く、全計器が安定して有意な値を示していた。

6. おわりに

国内初のフルスケールでの貯槽気密試験に際して、計測項目に対する事前の評価・検討と確認試験を重ね、フィールドにおいて要求精度を実現した結果、十分な確度で貯槽の気密性が評価できた。

今後の同種試験の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 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, 2014.(投稿中)
- 2) 前島俊雄, 下茂道人, 宇野晴彦, 青木謙治: 模擬岩盤空洞を用いた気密試験, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.238-243, 2010.

表-5 スミルノフ・グラブス法 検定結果

Case No.	Case1	Case2	Case3
検定イベント	気密試験開始時	気密試験終了時	最大ばらつき時
標本数 n	64	64	64
標本平均	21.276	21.200	21.250
不偏標準偏差 σ	0.0374	0.0393	0.0386
有意水準 α	0.05	0.05	0.05
標本の最大値 $X_{\max}$	21.335	21.263	21.311
標本の最小値 $X_{\min}$	21.202	21.121	21.175
検定対象(最大値or最小値)	min	min	min
有意点 τ 自由度 $n-2$ の t 分布の $100\alpha/n\%$ 点 $\tau = \frac{\sqrt{n(n-2)+nt^2}}{\sqrt{n(n-2)+nt^2}}$ (T_i と τ の大小関係)	3.051	3.051	3.051
検定統計量 T_i $T_i = \frac{ x_i - \bar{X} }{\sigma}$	1.981	2.010	1.954
判定	OK	OK	OK

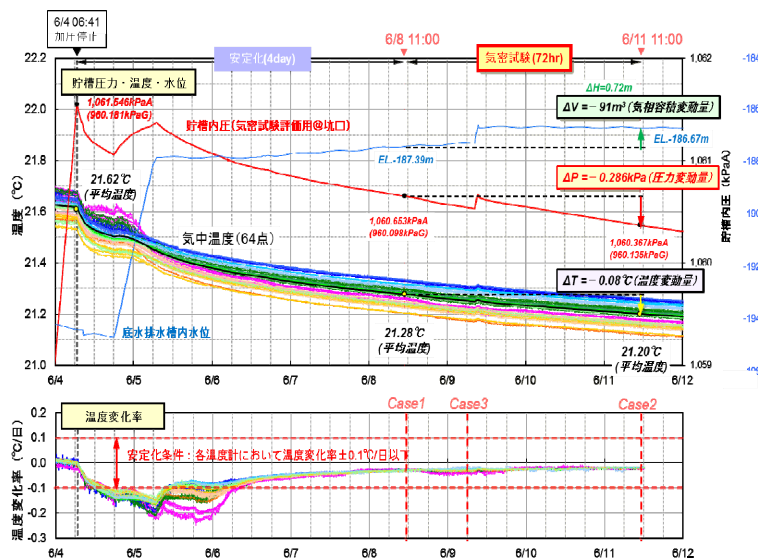


図-13 気密試験期間中の各計測項目の測定結果

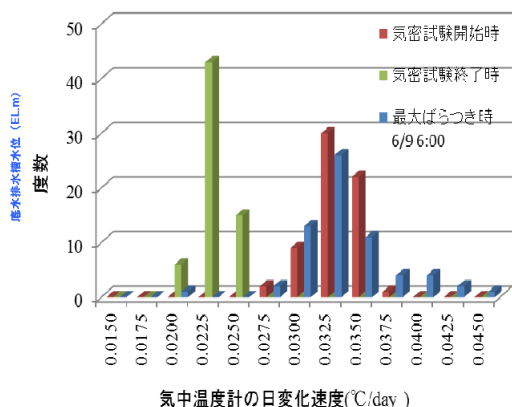


図-14 気中温度計日変化速度の分布

気密試験開始時	気密試験終了時	最大ばらつき時
平均 0.0316	平均 0.0218	平均 0.0321
標準偏差 0.0018	標準偏差 0.0013	標準偏差 0.0038
分散 3.22E-06	分散 1.72E-06	分散 1.47E-05

THE PRECISION CONTROL OF THE MEASURING INSTRUMENT IN THE AIR TIGHTNESS TEST OF KURASHIKI LPG UNDERGROUND STORAGE CAVERN

Yasunari TEZUKA, Masahiro SOYA, Hiroki KUROSE, Yuriko OKAZAKI
and Toshio MAEJIMA

In the air tightness test in the hydraulic containment LPG underground storage, a change of the quantity of air in the storage cavern is evaluated by a pressure change revised by temperature, gaseous phase capacity and dissolution of pressurization gas. Therefore, the precision for measurement and meter arrangement over each measurement item have large influence on airtight evaluation. As a result of installing a meter in the field after repeating the desk examination and the prior check test for precision control method for installation, the result with which it is satisfied of desired accuracy in all the meters was obtained.