

模擬岩盤空洞を用いた気密試験

前島 俊雄¹・下茂 道人^{2*}・宇野 晴彦³・青木 謙治⁴

¹(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構（〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番）

²大成建設株式会社技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

³東電設計株式会社土木本部（〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3）

⁴京都大学大学院工学研究科（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂）

*E-mail: michito.shimo@sakura.aisei.co.jp

わが国のLPG岩盤内備蓄では、水封方式による地下空洞内備蓄方式が採用されている。水封方式では、空洞への地下水の流入により貯蔵されたガスの漏洩を阻止する方式であり、岩盤の気密性評価が非常に重要である。著者らは、現在建設中の波方LPG地下貯槽基地の調査坑道を用いて、岩盤空洞の気密性を確認するための原位置試験を実施した。本論文では、試験で得られた測定データをもとに、気密性の評価精度と計測機器性能との関係や気密試験時の周辺岩盤内の地下水挙動などについて得られた知見をまとめる。

Key Words : LPG underground storage, gas tightness, in-situ test, test drift, instrumentation, ground water

1. はじめに

わが国のLPG岩盤内備蓄では、水封方式による地下空洞内備蓄方式が採用されている。水封方式では、空洞への地下水の流入により貯蔵されたガスの漏洩を阻止する方式であり、岩盤の気密性評価が非常に重要である。

これまで、現位置における空洞の気密性に関する試験は、圧縮空気貯蔵（CAES）¹⁾やLPG地下備蓄²⁾に関連して実施されているものの、気密性の評価に与える種々の変動要因（温度、圧力、容積など）の影響や計測機器精度が気密性の評価結果の信頼性に与える影響との関係については、必ずしも十分な知見が得られているとはいえない。今回、現在、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が愛媛県波方町に建設中の波方LPG地下備蓄基地において、事前調査のために掘削された試験坑道を用いた気密試験を実施した。

試験では、気室内を段階的に昇圧させながら気密性の確認を行う試験（昇圧試験）、目標圧で送気を停止した後の空洞内の温度、圧力などの測定値から気密性を評価する試験（安定試験）、さらに、気室圧力を上昇させ気密性の限界を確認する試験（気密性限界確認試験）を実施した。

本論文では、温度、圧力、容積などの変動を考慮した補正圧力変動量（ ΔP ）の気密性の評価指標としての適用性および測定機器精度が ΔP に与える影響を検討する。さらに、気密性限界前後の周辺地下水挙動について考察する。

2. 試験概要

試験は、建設地点の地質確認のために貯槽建設に先立って掘削された調査坑道を用いた。調査坑は、地表から斜坑で掘削した後、水封トンネルレベル（EL-125m）で水平となりプロパン貯槽の第2水封トンネルの一部となっているが、その先端部の約100m区間は、水封トンネル施工後も残存している。調査坑の断面は、幅3m高さ3.4mの馬蹄形で、ロックボルトおよび吹き付けコンクリートの支保がなされており、グラウチングなどの止水対策は施工されていない。

図-1に試験坑道、プラグおよびボーリングレイアウトを示す。また、図-2に、平面図および側面図を示す。

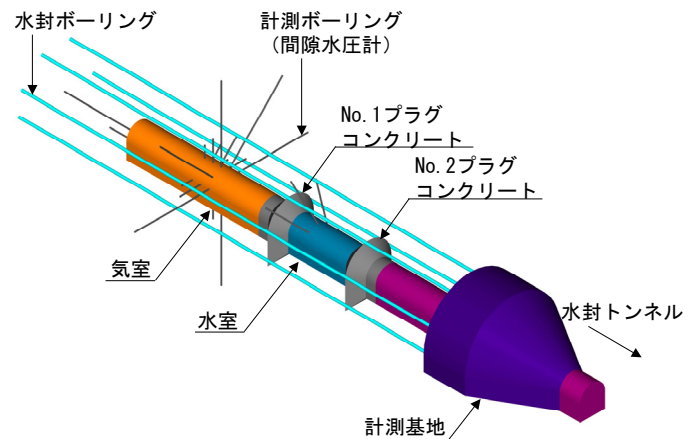


図-1 模擬空洞気密試験のレイアウト

坑内壁面観察により、2 箇所のプラグ位置と気室（気密試験坑道）および水室の位置を選定した。気室を隔離するプラグ（No.1 プラグ）は、湧水が少なく良好な岩盤が分布する箇所を選定した。調査横坑の先端 16m を気室とし、順に、気室を隔離するための No.1 コンクリートプラグ（厚さ 3.6m）、水室（延長 7m）、No.2 コンクリートプラグ（厚さ 3.6m）、坑道区間（延長 10 m）を経て、水封ボーリング試錐座と計測室設置のための拡幅部を設けた。気室の妻壁から拡幅部妻壁までの長さは、40.2m である。

周辺岩盤内の水圧を保持するために、坑道壁面から 3.0m 離れた位置に、6 本の水封ボーリング（ ϕ 76mm $\times$ 長さ 50.2m）を坑道を取り囲むように配置した（図-3）。また、試験時の周辺岩盤の水圧分布を把握する目的で、気室周辺に水圧計測ボーリング（ ϕ 78mm）を配置した。気室中央付近に 1 m 間隔に 3 つの計測断面（A, B, C 断面）を設け、各断面で 6 方向にボーリングを削孔し（図-3）、孔底 30cm をパッカーで隔離し測定区間とした。A, B, C 断面のボーリング長は、それぞれ 9.0m, 2.5m, 1.3m である。気室妻部にも、長さ 9.0m, 2.5m, 1.3m の水圧計測ボーリングを削孔した。このほか、No.1 プラグの上方に、水圧観測孔 3 本を削孔し、パッカーで隔離された中央部と孔底部に水圧センサーを設置した。

計測ボーリングのうち、B-2, B-3, B-4 および C-2, C-3, C-4 の各孔と No.1 プラグ上方の P 孔には、AE センサーを各水圧測定区間の孔壁に固定し設置した。

計測に用いた計測機器の一覧を、表-1 に示す（プラグコンクリート内の計測機器を除く）。気室内の圧力は、高耐圧性ナイロンチューブで気室まで導管し、計測室で測定した。気室内の容積は、3 次元レーザースキャナーにより、測定精度 1.5mm, 10mm 間隔で形状測定を行い（図-5）、165.78m³（EL-125.0m 以上の空洞容積）を得た。排水ピット内水位測定には、磁歪式水位計（フロートタイプ）を用いた。

気室内の温度分布は、主計測断面（TD 8m, TD は No.1 プラグコンクリートの気室妻面を 0 とする）に 9 点, TD 1m, TD 15m に 4 点ずつ, TD 2m, TD 14m に 1 点ずつ, 計 19 点の温度計で測定した（図-4）。このほか、水温 3 点, 岩盤温度 1 点の測定を行った。温度測定には、精度 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$, 分解能 0.001°C のサーミスタプローブを用い、各プローブには、輻射熱防止用のカバーを取り付けた。

プラグコンクリートには、人孔、ケーブル配管、給排水・給排気配管を設けた。

計測基地内には、送排気設備（コンプレッサー、レギュレータなど）、給排水設備および計測室を設置した。計測内には、各計測機器の値をリアルタイムに表示・保存する計測システムを設置した。

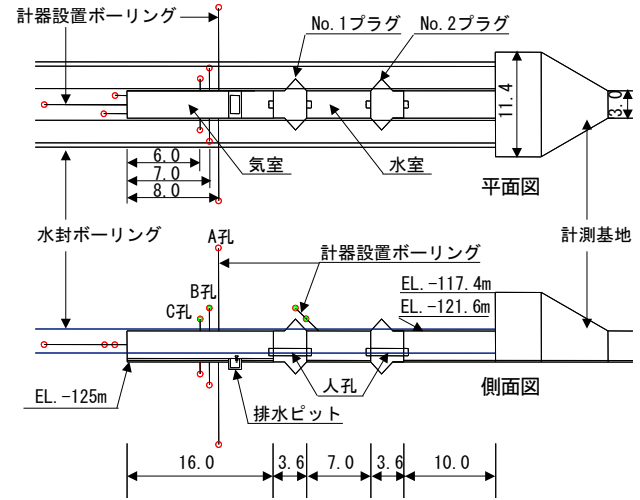


図-2 模擬空洞気密試験の概要

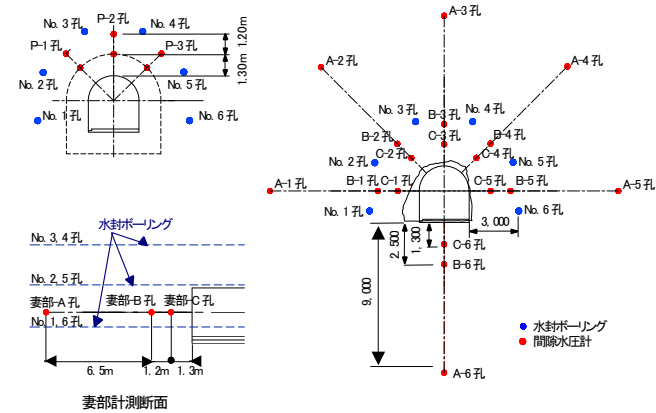


図-3 計測ボーリング

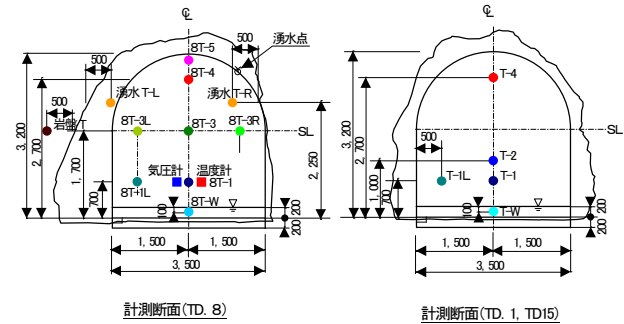


図-4 気室内の温度計配置

表-1 計測機器一覧

設置箇所	計器名	仕様			数量	計測方式
		測定範囲	精度	分解能		
計測ボーリング	間隙水圧計	0~2.0MPa	$\pm 0.1\%$ ($\pm 2\text{KPa}$)	0.01% (0.2kPa)	27	拡散型半導体
	AEセンサー	5~200kHz	60db		12	圧電素子
	温度計	-80~200 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$	0.001 $^{\circ}\text{C}$	23	サーミスタ
	湿度計	0~100%RH	$\pm 1.8\%$ RH	0.05%FS	1	静電容量式
	水位計	0~1000mm	$\pm 0.01\%$ ($\pm 0.1\text{mm}$)	0.01% (0.1mm)	1	磁歪式
気室内	大気圧計	50~1300hPa	$\pm 60\text{Pa}$	10Pa	1	シリコンダイアフラム
	圧力計 (気室)	0~1.38MPa	$\pm 110\text{Pa}$ ($\pm 0.008\%$)	1.38Pa	1	水晶発振式
	温度計 (送気温度)	-80~200 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$	0.001 $^{\circ}\text{C}$	1	サーミスタ
	流量計 (送気流量)	0~1500L/分	75L/分	5L/分	1	
	圧力計 (送気圧力)	0~2.0MPa	$\pm 0.1\%$ ($\pm 2\text{KPa}$)	0.01% (0.2kPa)	1	拡散型半導体
	流量計 (排水量)	0.5~10L/分	0.15L/分	30cc/分	1	タービン流量計
	流量計 (排水量)	0.1~2.5L/分	0.0375L/分	0.05cc/分	1	
	圧力計 (水室水圧)	0~1.5MPa	$\pm 0.2\%$	0.02%	1	ひずみゲージタイプ
	流量計 (水封Bor)	—	—	1L	6	水道メータ (積算型)
	圧力計 (水封Bor)	0~2.0MPa	$\pm 0.5\%$	0.05%	6	ひずみゲージタイプ
計測基地	溶存ガス発泡量	0~2L	0.02L	0.02L	1	メスシリンダー
	溶存ガス圧計	$\pm 750\text{mmHg}$	1mmHg	1mmHg	1	膜浸透圧型

3. 試験坑道周辺の地質

波方地点は、愛媛県高縄半島先端部から西方に延びる東西約 3km 南北 0.8km の岬に位置し、中生代白亜紀の花崗岩、花崗閃緑岩が分布している。試験地点にも、貯槽本体で確認できる波方花崗岩が分布している。図-6 に地質図を示す。試験地点の北西約 40m には、粘土を夾在し変質帯を伴う F-1 破碎帯が分布する。地下水観測の結果から、貯槽掘削や水封ボーリング稼動の影響が、F-1 破碎帯の南側すなわち試験地点に及んでおらず、同破碎帯は貯槽部と試験箇所を隔てる遮水帯として機能していると考えられる。卓越する割れ目は、おもに NS～N20W 走向（坑道横断方向）で南傾斜のものと N30E～N70SE 走向（坑道縦断方向）で北傾斜のものがある。このうち、気室と水室にまたがって分布する割れ目①'（N32E58SE）は、これを境に割れ目構造が異なる地質境界となっている。水封ボーリングや計測ボーリングなどで求めたルジオン値の対数平均は 0.08Lu で、波方基地の設計ルジオン値 0.1Lu にほぼ匹敵する。気室内部の壁面は全体に湿っており、割れ目①'が出現する南側スプリングラインに沿って、滴水が見られた。

4. 試験手順

試験手順を図-7 に示す。①水封ボーリングの削孔・給水開始、計測ボーリングの削孔、②計測機器設置の後、③プラグコンクリートを No.1（気室側）、No.2（水室側）の順で施工した後、④プラグの耐圧性確認の目的で、水室内に最大 1.8MPa の加圧注水を行った。その後、予備試験として、⑤気室注水試験を実施した。この試験は、気室内の昇圧を水圧で行うもので、気密試験時の周辺水圧応答の予測や気密試験時の昇圧速度の検討を目的として実施した。水封水圧を 1.2MPa に保ち、気室を水没した後、気室排水量を制御することにより、気室内水圧を 0.4MPa～0.9MPa まで昇圧させた。気室注水試験完了後、水室および気室内を排水し、⑥気室内に計器（温度計、湿度計、水位計、圧力測定配管）を設置した後、プラグの人孔を閉鎖し、水室を再び水没させ、水圧を 1.2MPa に保った。周辺水圧および気室内温度の安定を確認後、⑦本試験を行った。本試験は、気室内圧を 0.01MPa づつ段階的に 0.7MPa まで上昇させた後（昇圧試験）、送気を停止し、気密性を確認する気密試験（安定試験）と、その後、送気を再開し、0.9MPa まで徐々に気室内の圧力を上昇させた（気密性限界確認試験）。その後、気室圧力および水封圧力を低下させた。

図-8 に計画時の試験工程（日数は概略）を示す。

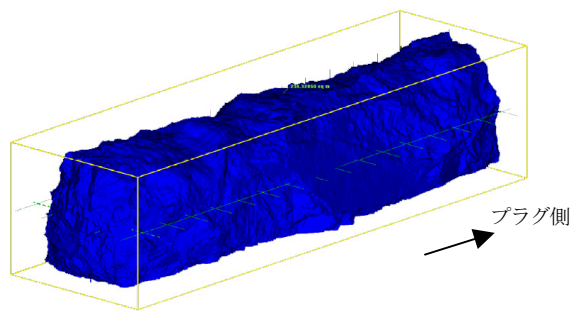


図-5 3D スキャナーによる気室形状計測結果

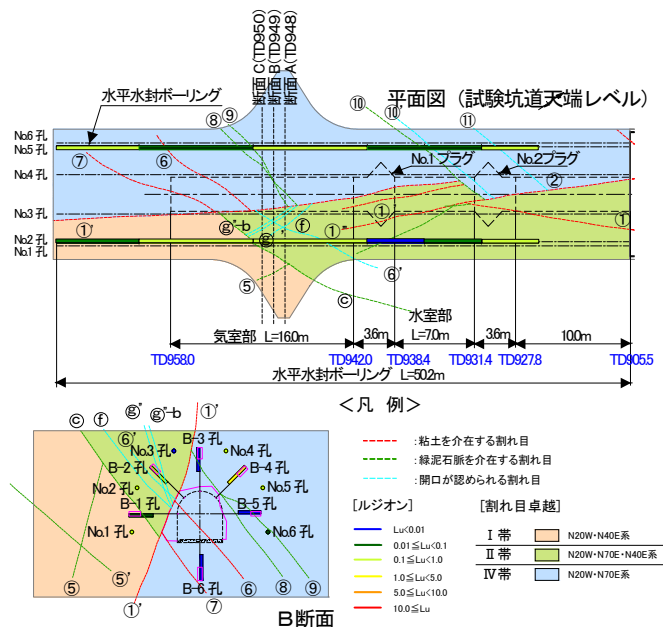


図-6 試験坑道周辺の地質

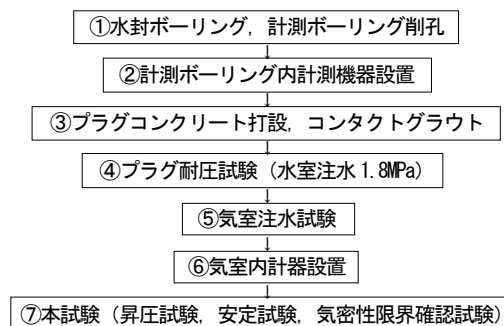


図-7 試験のフロー

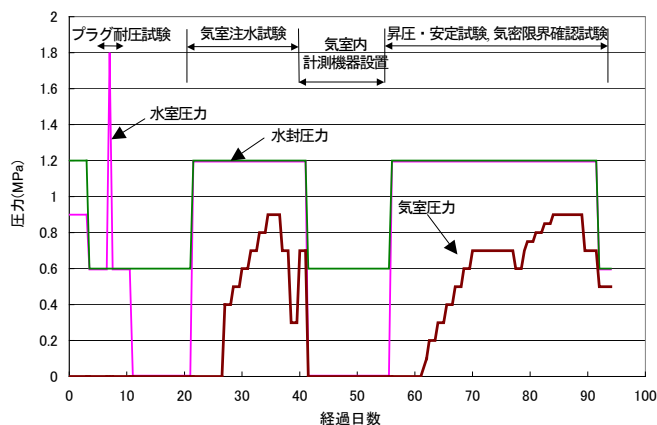


図-8 試験計画工程（プラグ耐圧試験以降）

5. 試験結果

(1) 間隙水圧

図-9 に、気室周辺に設置した計測ボーリングのうち、B 孔の間隙水圧の経時変化を示す。また、気密試験時（昇圧試験、安定試験、機密性限界確認試験）のデータを図-10 に示す。図-11 に、気室注水と送気（気密試験）による間隙水圧分布の比較を、1 側線（A-1, B-1, C-1）と 2 側線（A-2, B-2, C-2）について示す。

水封ボーリングより外側の水圧を把握する目的で設置した A 孔（ $L=9.0\text{m}$ ）では、水封水圧の変動に対する応答の速さが孔ごとに異なるものの、安定水圧（水封水圧 1.2MPa ）は全水頭換算で $\text{EL-42m} \sim \text{EL-50m}$ （試験坑道天端レベルの水圧で $0.71\text{MPa} \sim 0.79\text{MPa}$ ）の範囲にあり大きな差は見られなかった。また、気室圧力の変化に対する A 孔水圧の変化はわずかであった（図-11 中に A-1 孔、A-2 孔の例を示す）。B 孔（ $L=2.5\text{m}$ ）は、気室圧力への応答が顕著で、応答速度（図-10）、安定水頭（図-11 中の距離 2.5m の水頭）とも孔ごとに差異が見られた。なかでも、B-2 孔の水頭が最も低く、B-5, B-4, B-6, B-3, B-1 の順で大きくなっており、応答の速さは、水圧の低い孔ほど速い（応答の速い B-4 を除く）傾向が見られた。

気室壁面に最も近い C 孔（ $L=1.3\text{m}$ 、図-3 参照）は、C-1, C-妻部を除き、気室内圧に非常に近い値を示した。この原因としては、試験坑道では、貯槽工事で実施したような空洞周辺を対象としたグラウチングを行わなかったため、割れ目などを通じて気室と試験坑道が水理学的に連結したことによるものと考えられる。

(2) 気室内温度

気密試験時における気室内の温度変化（主計測断面）を図-12 に示す。気密試験（昇圧試験）の昇圧速度は、気室注水試験で、気室と B 孔の間で水頭との逆転が生じないことが確認された 0.01MPa/hr を基本とした。

気室温度は、気室の昇圧に伴い上昇し、送気を停止すると低下した。本試験の前に 0.01MPa/hr （図-12 の▼）と 0.02MPa/hr （図-12 の▲）の 2 種類で速度で気室を昇圧したところ、両者には温度上昇量にほぼ 2 倍の差が見られた。一方、 0.01MPa/hr で昇圧した本試験（昇圧試験）では、各圧力段階の気室内の温度上昇量は、いずれも約 0.5°C であったことから（図-12）、温度上昇量は気室圧力ではなく、昇圧速度に依存することが分かった。圧力低下に伴う温度低下量も同様であった。坑道内温度は、場所によって 0.2°C ほどの差が見られ、上部ほど温度が高く、下部ほど低い傾向が見られた（図-12）。水封供給水温度の季節変化により試験途中から岩盤温度が低下し、それに伴い気室内温度も低下傾向を示した。

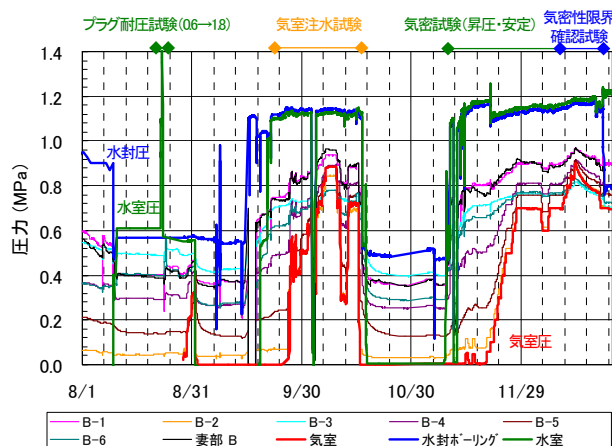


図-9 試験期間中の間隙水圧変化（B 孔の例）

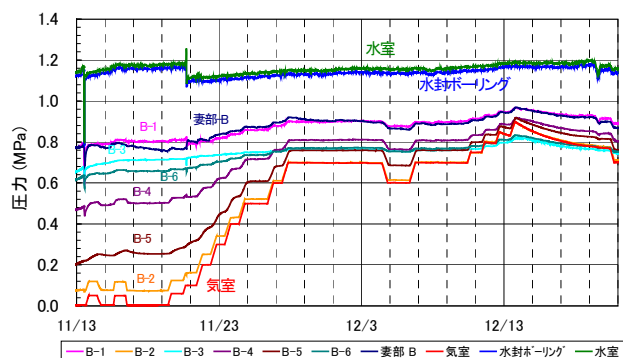


図-10 気密試験実施期間の間隙水圧（B 孔の例）

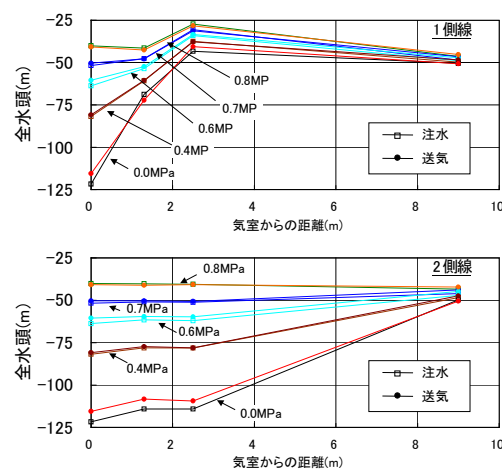


図-11 気室注水および送気試験時の水圧比較（1, 2 側線）

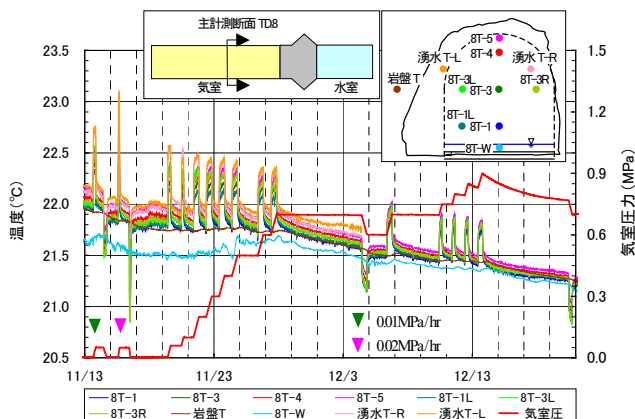


図-12 気密試験時の坑道内温度変化（主計測断面 TD8m）

6. 試験結果の評価

(1) 0.7MPa 安定試験時の気密性評価

気室への送気停止後、気密性が確保されていれば、気室圧力は一定に保たれる。しかし、実際には、気室圧力は、昇圧停止後の温度低下、湧水や排水による気室容積の変化、排水中への気体の溶解、蒸気圧の変化などによって変動する。よって、気密性の評価には、次式のような、これらの影響を補正した圧力変動量 ΔP を用いた。

$$\Delta P = (P_1 - P_{W1}) - (P_2 - P_{W2}) \cdot \frac{T_1}{T_2} - (P_2 - P_{W2}) \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{A \cdot \Delta h}{V_1} - (P_2 - P_{W2}) \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{Q}{V_1} \cdot S_a$$

ここに、サフィックス 1, 2 : 評価開始, 終了時刻, P : 圧力, T : 温度, V : 容積, P_W : 蒸気圧 (絶対圧), A : 排水ピット面積 ($\approx 2\text{m}^2$), Δh : ピット内水位変動量, Q : 排水量, S_a : 空気溶解度, である。

一方, ΔP は, 試験に用いた計測機器の精度により, 次式で求められる不確か性 $\varepsilon(\Delta P)$ を有している。

$$\varepsilon(\Delta P) = P_2 \sqrt{\left(\frac{\varepsilon P}{P_1}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon P}{P_2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon T}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon T}{T_2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon A h}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon A h}{V_2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon P_W}{P_1}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon P_W}{P_2}\right)^2 + \left(\frac{V_s}{V_2}\right)^2}$$

ここで, ε は, それに続く物理量の計測値に含まれる不確か性 (精度) を示す。また, V_s は排水に含まれるガス量 (気室環境での体積) である。表-1 に示した機器の精度と試験条件 (試験圧力 0.8MPa (絶対圧), 温度 274K, 容積 165.78 m^3 , 評価時間 1440min, 湧水量 0.005 m^3/min , 空気溶解度 0.019 m^3/m^3 (20°C, 大気圧, 理科年表)) から, ΔP を求めると 176Pa となり, 精度の代わりに分解能を用いると 22Pa となる。

図-13 に, 気室内圧 0.7MPa 安定試験における測定結果を示す。排水ポンプの水位調整に伴う気室容積や温度変化 (0.02°C~0.04°C) が明瞭に捉えられている。送気停止から約 24 時間経過時を評価開始時刻とし, ΔP を計算した結果を図-14 に示す。補正後の圧力変動値 ΔP は, 計測機器の分解能から計算された不確か性の幅 22Pa にほぼ収まっており, 今回使用した機器により高い精度で気密性の評価が可能であることが示された。

(2) 気密性限界確認試験

0.7MPa における安定試験の後, 気室圧を 0.05MPa ずつ上昇させたところ, ΔP は 0.75MPa まで一定値を示したが, 0.8MPa 以上で明らかな低下傾向を示した (図-15)。これより, 気室圧が 0.75MPa~0.80MPa の間に気密性の限界があることが分かった。図-16 に, 0.75MPa から 0.80MPa の昇圧時の 2 側線 (A-2, B-2, C-2) 沿いの水圧変化を示す。気室昇圧開始後 B-2, C-2 孔の水圧は気室圧とほぼ平行に上昇するが, 気室圧が 0.758MPa 付近で B-2 孔の圧力上昇勾配に変化が見られ, 同時に B-2, C-2 孔内で AE を確認した。さらに, 気室圧を上げると, AE が一旦収まり 0.765MPa 以降で B-2 孔は再び気室圧と

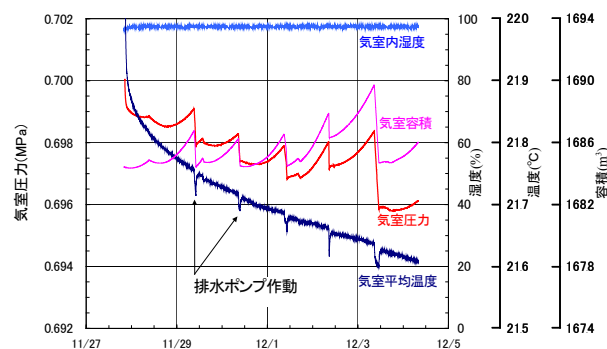


図-13 気室内測定結果 (気密試験 0.7MPa 安定時)



図-14 補正後圧力変動量 ΔP (気密試験 0.7MPa 安定時)

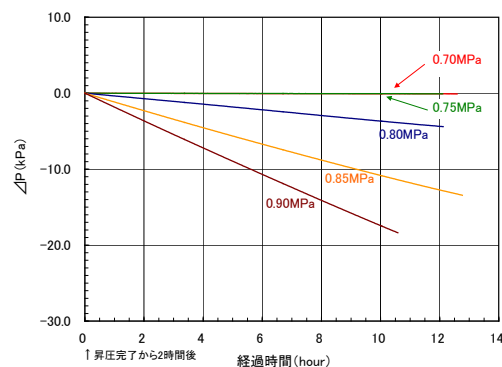


図-15 気室内圧ごとの ΔP の経時変化

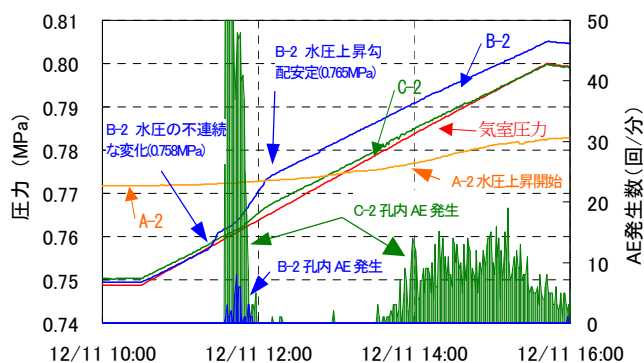


図-16 気密性限界確認試験時の水圧変化 (2 側線)

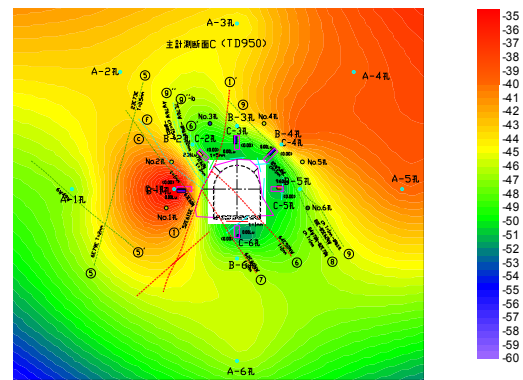
ほぼ平行に上昇する傾向を示した。その後、気室圧が A-2 孔の水圧を超える時点（約 0.773MPa）から、A-2 孔の水圧上昇が見られ、それと同時に C-2 孔内で継続的な AE が測定された。このとき、3 側線、4 側線に設置した AE センサーには変化が見られなかった。上記計測データは今後詳細な分析が必要であるが、現象的には、0.765MPa でガスフロントが B-2 孔に達し、0.773MPa 以降、2 側線方向に継続的な漏気が生じたと解釈される。

図-17 に、気室内圧 0.7MPa と 0.8MPa の間隙水圧測定結果から作成した全水頭コンターを示す。同図から、気密性が確認された 0.7MPa では、気室左上方の 2 側線方向に低水頭領域が形成されていることが分かる。2 側線方向には、図-6 に示したように、開口割れ目 (⑥)′、① など) が分布しており、これらが坑道とつながる水みちを形成していると考えられる。一方、気室内圧 0.8MPa では、2 側線方向の圧力も上昇しており、低水頭領域に沿って岩盤中に気体が進入したことが伺える。

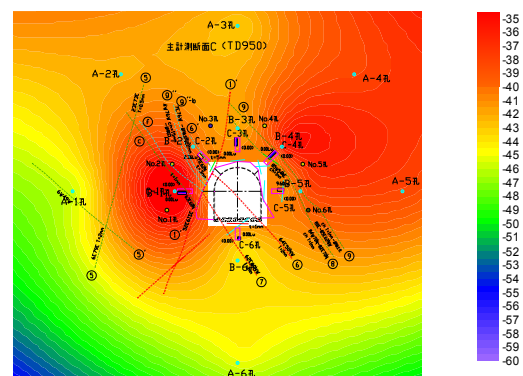
7. まとめ

- 1) LPG 貯槽空洞の気密性評価手法や計測機器の性能が気密性の評価精度に与える影響を把握する目的で、模擬空洞を用いた気密試験を実施した。
- 2) 気室圧力変化に伴う温度変化の測定に高精度・高分解能のセンサーを気室内に配置することにより、空洞の気密性を、圧力変動量 ΔP を用いて高精度に評価できることを示した。
- 3) 気密性限界圧力は、圧力変動量 ΔP 、空洞周辺の水圧や AE 測定により特定できることが示された。

今回の試験位置は、貯槽の水封エリア外でかつ深度も浅いため、気密限界などの結果をそのまま貯槽本体に適用できないが、今後、計測データを詳細に分析し、LPG 貯槽の気密性評価技術の向上を目指したい。



a. 気室圧 0.7MPa (ΔP 一定, 気密性確認)



b. 気室圧 0.8MPa (ΔP 低下, 気密性限界以上)

図-17 全水頭コンター (測定値より作成)

参考文献

- 1) 中川加明一郎, 志田原巧, 池川洋二郎, 末永弘, 宮本由紀: 水封式圧縮空気貯蔵の実証-横坑での気密試験-, 電力中央研究所報告, U02050, 2003.
- 2) 大竹健司, 皆川宗仁治: 周辺環境に配慮したLPガスの水封式地下岩盤貯槽方式-岡山県倉敷地点-, 石油・天然ガスレビュー, pp.56-72, 2001.

IN-SITU GAS-TIGHTNESS TEST USING A DRIFT SIMULATING A LPG STORAGE CAVERN

Toshio MAEJIMA, Michito SHIMO, Haruhiko UNO and Kenji AOKI

A small-scale gas tightness test has been conducted using an exploratory drift at Namikata underground LPG storage site. Instruments such as thermometer, pressure gauge and water level sensor were carefully selected considering the accuracy and the resolution to minimize the uncertainty associated with the corrected cavern pressure change, ΔP , under the storage pressure. Groundwater pressure and AE activities during the drift pressurization were also monitored using boreholes around the drift. Obtained results showed that the gas tightness of the test drift with the volume of 166m³ was evaluated within the uncertainty of 22Pa under the storage pressure of 0.7MPa.