

天然ガス高圧貯蔵技術開発における 小規模岩盤貯槽を用いた実証試験

奥野 哲夫^{1*}・小松原 徹²・若林 成樹¹・新美 勝之³・栗原 雄二⁴・岩野 政浩⁵

¹清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17）

²社団法人 日本ガス協会 技術開発部（〒105-0001 東京都港区虎ノ門一丁目15-12）

³清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

⁴株式会社 大林組 土木技術本部（〒108-8502 東京都港区港南二丁目15-2）

⁵大成建設株式会社 土木本部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25-1）

*E-mail: okuno@shimz.co.jp

（社）日本ガス協会では、平成16年度より経済産業省の補助を受け「次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発事業」（ANGAS: Advanced Natural Gas Storage）を実施しており、天然ガスの需要変動等に対応するため、最大20MPaの貯蔵圧力の鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設の実用化を目指して技術開発を行っている。本論文では、設計技術の検証等のために行われた小規模実証試験施設（設計圧力：20MPa、幾何容積：約240m³）を用いた試験結果について述べる。実証試験として、耐圧試験(20MPa)、気密試験(20MPa)、繰返し・長期載荷試験(20MPa)、30MPa耐圧性能試験の4つの試験を行った。本論文では、類似施設として国内ではじめて20MPaの高圧での耐圧性・気密性を確認した結果を示し、岩盤貯槽の挙動について論じる。

Key Words : *underground cavern, lined rock cavern, natural gas storage, verification test, water pressure test, airtight test*

1. はじめに

天然ガスは、埋蔵量の豊富さ、環境負荷の低さ、エネルギー供給源の多様化等の観点から重要なエネルギーと位置づけられ、その利用拡大が強く求められている。我が国において天然ガスの利用拡大を推進するためには、内陸部への需要拡大も考慮した広域的なパイプラインネットワークの整備・拡大ならびに日間・季節間の需要変動を吸収してパイプラインの利用効率を上げるための、大規模なガス貯蔵施設の必要性が指摘されている。既に広域的な天然ガスパイプラインネットワークが発達している欧米では、天然の地質構造を利用した大規模ガス貯蔵施設が実現しているが、同様の地質構造が殆ど存在しない我が国においては、人工的な施設である「鋼製ライニング式天然ガス岩盤貯蔵施設」の設置が有効と考えられている。¹⁾ 図-1にこの施設の代表的構造を例示する。

このような背景から、（社）日本ガス協会では2004年度から4年間の計画で「次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発事業」を国の補助（補助率1/2）を受けながら実施しており、小規模の鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設を用いた実証試験等により実用化への技術開発を行っている。

本論文では、天然ガス貯蔵を目的とした鋼製ライニング式岩盤貯蔵技術開発（以下、「ANGAS (Advanced Natural Gas Storage)技術開発」と称する）において、岐阜県神岡鉱山内に建設した小規模実証試験施設^{2),3)}を用いて実施した実証試験内容を示し、貯槽の耐圧性や気密性について確認した結果⁴⁾⁻⁷⁾を述べ、特に岩盤貯槽の変形挙動について詳細に論ずる。

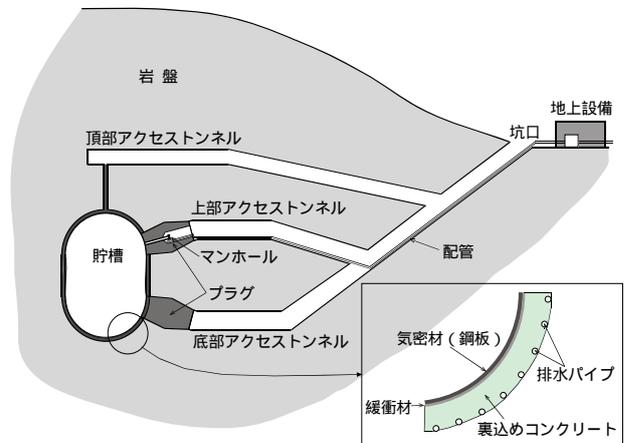


図-1 鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設の代表的構造
(商用機の場合)

2. 実証試験の概要 ^{2) - 5), 8), 9)}

(1) 実証試験の目的と計画

ANGAS技術開発で実施する各実証試験の目的と内容を表 - 1に示す。実証試験全体としては、各部の変形挙動を計測し、設計解析との比較を行い開発した設計技術^{3), 5), 8), 9)}の確認を行うことが目的の一つである。実証試験は、耐圧試験、気密試験、繰返し・長期荷重試験、30MPa耐圧性能試験の4種類からなる。気密試験のみ空気圧荷重とし、他はすべて水圧荷重とした。各試験の荷重パターンは図 - 2に示すものである。

(2) 実証試験サイトの岩盤特性

実証試験は、神岡鉱山の茂住坑道内の堆積岩（手取層：砂岩と頁岩の互層）中で実施した。実証試験サイトの岩盤は電中研式岩盤分類においてC_H級～C_M級を主体とする岩盤である。その岩盤特性は、各種の岩石試験や原位置岩盤試験（孔内荷重試験、平板荷重試験等）により調査し、設計に用いる物性値を設定した。孔内荷重試験結果を表 - 2に、設計に用いた各種岩盤物性値を表 - 3に示す。また初期地圧等は参考文献^{2), 4)}を参照されたい。

表 - 1 実証試験の目的と内容

試験名	試験目的	荷重内容
耐圧試験	設計圧力まで加圧し、構造体(岩盤、貯槽、プラグ、マンホール)の耐圧性能、水密性能を確認	水加圧 20MPa (加圧期間: 7日間)
気密試験	設計圧力まで加圧し、構造体の気密性能を確認	空気加圧 20MPa (加圧期間: 31日間)
繰返し・長期荷重試験	実機の運用を想定した荷重・除荷、長期荷重を行い、構造体の挙動を把握し、健全性を確認して設計の検証用データを取得する	水加圧 繰返し 5~20MPa 長期荷重 20MPa (加圧期間: 10日間)
30MPa耐圧性能試験	構造体の30MPaまでの耐圧性能を把握するために、加圧装置最大圧まで加圧して挙動を計測し、設計の検証用データを取得する	水加圧 最大 30MPa (加圧期間: 0.5日間)

(3) 小規模実証試験施設

以上の実証試験の荷重パターンならびに岩盤特性を基に小規模実証試験施設を設計した。その設計の詳細は、参考文献^{3), 5), 9)}を参照されたい。設計・建設した小規模実証試験貯槽を図 - 3（貯槽長さ10.5m、貯槽直径6m、幾何容積240m³）に示す。実証試験貯槽は図 - 1の商用機と異なりカプセル状の貯槽を横置きとした。これは小規模な貯槽であることから貯槽の上下位置における初期地圧の違いなどは無視できると考えられることや、プラグの影響を貯槽の一方の半球部周辺のみ留めることなどを目的に設定した。建設時の小規模実証試験施設を写真 - 1~5に示す。

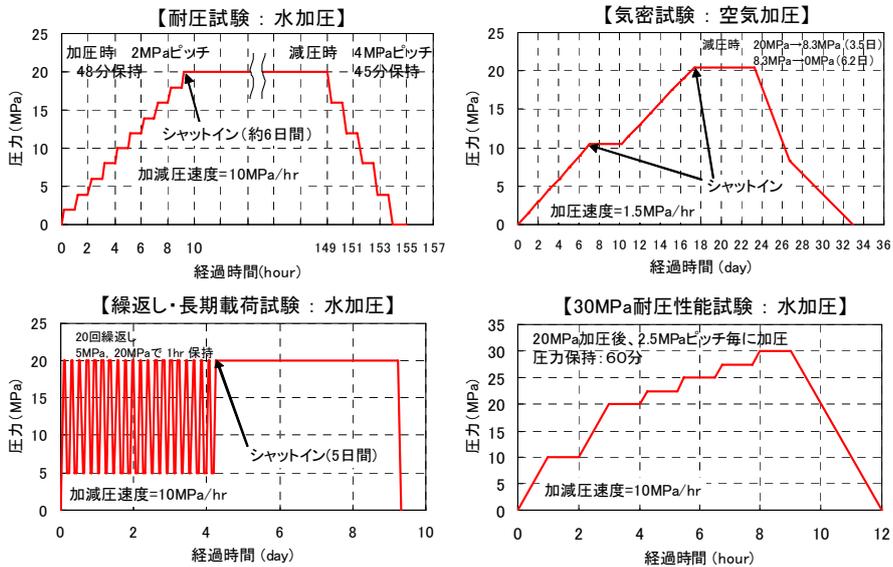


図 - 2 実証試験の荷重パターン

表 2 孔内荷重試験の結果

岩種・岩級	実施箇所	変形係数D (Gpa)	弾性係数E (Gpa)	残留変位率
砂岩: CH 級	A 地点	15.24	23.44	0.457
	B 地点	13.33	19.36	0.681
	平均	14.28	21.4	0.569
砂岩: CM 級	C 地点	8.20	11.43	0.536
	D 地点	10.38	13.76	0.500
	平均	9.29	12.59	0.518
頁岩: CH 級	E 地点	9.59	14.91	0.643
	F 地点	4.39	6.19	0.352

表 - 3 設計に用いた各種岩盤物性

	単位重量 γ kN/m ³	厚さ H m	内部摩擦角 φ 度	粘着力 c MPa	変形係数		ポアソン比 ν _r	クリープ率 ε _{cr}	残留変位率
					初期荷重時 E _{r0} GPa	運用時* E _r GPa			
健全部	26.5	-	50	2.5	10.0	8.47	0.3	0.180	0.234
ゆるみ域		-	45	1.9	4.0	3.38	0.4		
残留域		-	50	0.75	-	-	-		
風化部	20.0	50	-	-	-	-	-	-	-

* E_r = E_{r0} / (1 + ε_{cr})

なお、自然岩盤の耐圧性等を確認する目的から実証試験位置はC_H級～C_M級を主体とする岩盤を選定し、岩盤空洞は掘削直後に吹付けコンクリートとロックボルトによる支保を施工した。また、本施設は高压ガス保安法に基づく検査を受検し合格した。

3. 実証試験結果と耐圧性・気密性等の検討^{6)~8)}

実証試験は、表 - 1および図 - 2に示すように、耐圧試験、気密試験、繰返し・長期载荷試験、30MPa耐圧性能試験の順に行った。実証試験中の各部の変形挙動等は、図 - 4に示す計測機器の配置で計測した。ただし、この図には主要な計測機器のみ示している。以下に各試験の結果を順に述べる。

(1) 耐圧試験結果

耐圧試験では水圧により段階的に20MPaまで载荷し、変位計測結果から20MPaのシャットイン状態で内空変位と岩盤変位が収束することを以て耐圧性を確認した。図 - 5は耐圧試験時の岩盤変位計の計測結果と予測値（設計解析の値）を比較して示している。20MPa载荷時に貯槽下部は予測値より計測値が大きな値を示すが、そ

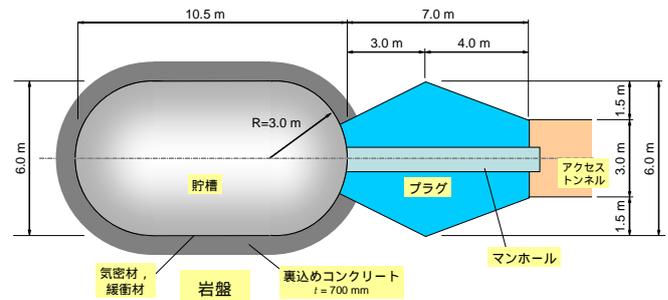


図 - 3 小規模実証試験岩盤貯槽

他の位置では計測値は予測値より小さな変位である。また、図 - 6には耐圧試験時の内空変位の計測結果と予測値（設計解析の値）を示している。内空変位において上下方向の変位が予測値の2倍弱の大きさとなっており、これは貯槽下部の岩盤変位が大きな値を示した影響を受けており、左右方向や長軸方向は予測値より若干小さな変位となった。以上の岩盤変位と内空変位は共に時間経過と共に収束傾向を示し、安定した挙動が確認された。

図 - 7は貯槽周辺の岩盤表面に設置した光ファイバの各側線方向のひずみの計測結果であり、耐圧試験と後述する気密試験の20MPa载荷時のひずみを比較したものである。耐圧試験および気密試験において、光ファイバのひずみ計測値も岩盤変位と内空変位に整合した計測値を

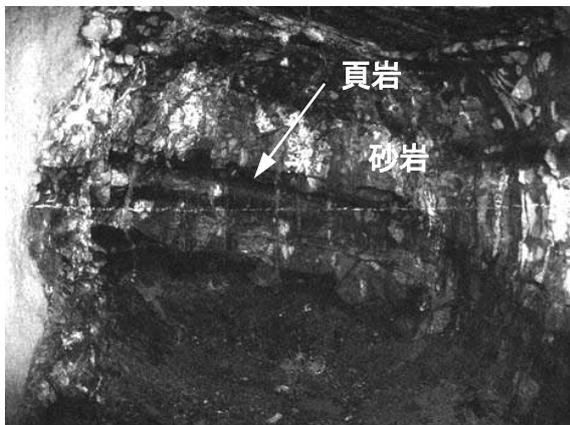


写真 - 1 アクセストンネルの掘削（切羽）



写真 - 2 岩盤掘削後の貯槽空洞内部（貯槽奥側からプラグ方向を撮影）

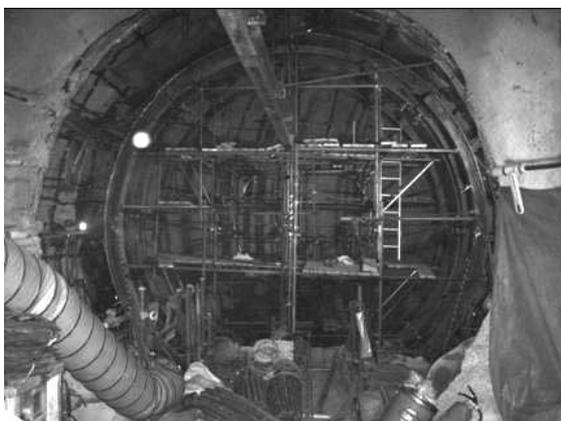


写真 - 3 気密材の組立て状況（プラグ部から貯槽内部を撮影）

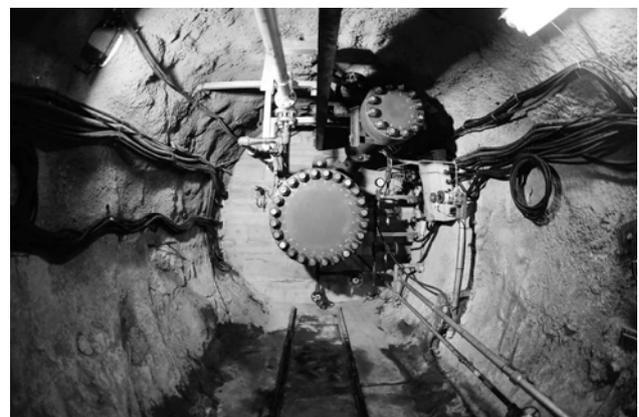


写真 - 4 建設後のプラグ（マンホール）部（アクセストンネルからプラグ部を撮影）

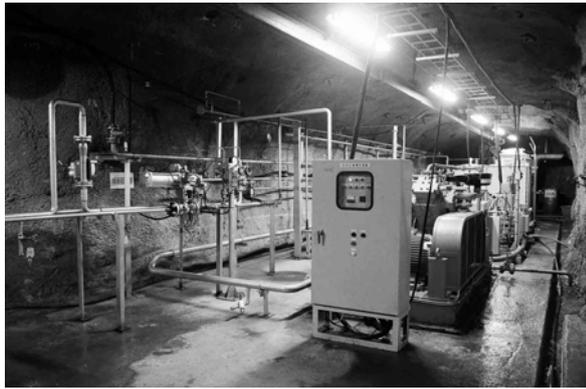


写真 - 5 加压装置 (水加压装置と空気加压装置)

示し、貯槽下部の岩盤ひずみが大きく生じている。この原因は、貯槽底盤部に頁岩層が厚さ約1.5m程度存在しているためと考えられる。すなわち、頁岩は砂岩よりも変形係数が小さくかつ底盤部は他の領域よりも頁岩が厚いため、その影響を大きく受けたものと考えられる。

図 - 8は、耐圧試験時において貯槽内の気密材に設置した光ファイバによる各側線方向のひずみの計測結果である。20MPa载荷時に約2000 μ ~ 8000 μ 程度のひずみが生じ、気密材は全域で塑性域に達している。また、気密材においても貯槽下部の岩盤変形の影響を受け、特に貯槽下半が大きなひずみを示していることがわかる。

(2) 気密試験結果

気密試験時の岩盤挙動は図 - 7に示したように概ね耐圧試験と同様の挙動を示し、貯槽底盤のひずみが5000 ~ 6000 μ と大きく生じていることがわかる。

気密試験では、図 - 9に示すように空気圧により20MPaまで载荷し、シャットイン状態で内圧(P)、温度(T)、貯槽変位(容積:V)を計測した。図 - 9より加压中は貯槽内の温度が上昇し、シャットイン中など加压を止めた状

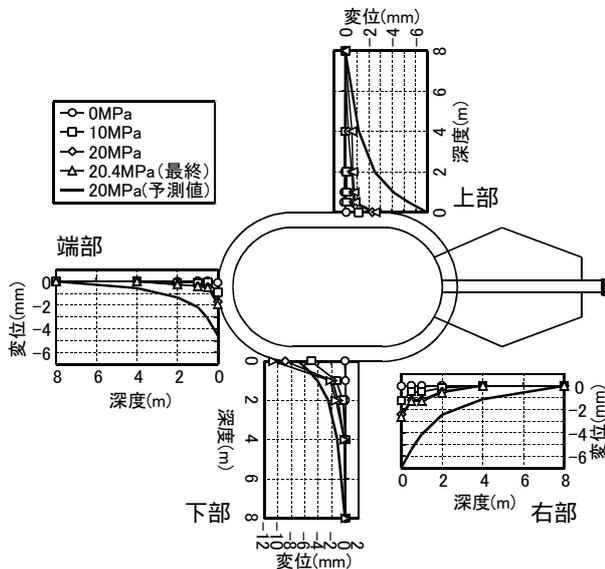


図 - 5 岩盤変位計の変位 (耐圧試験時)

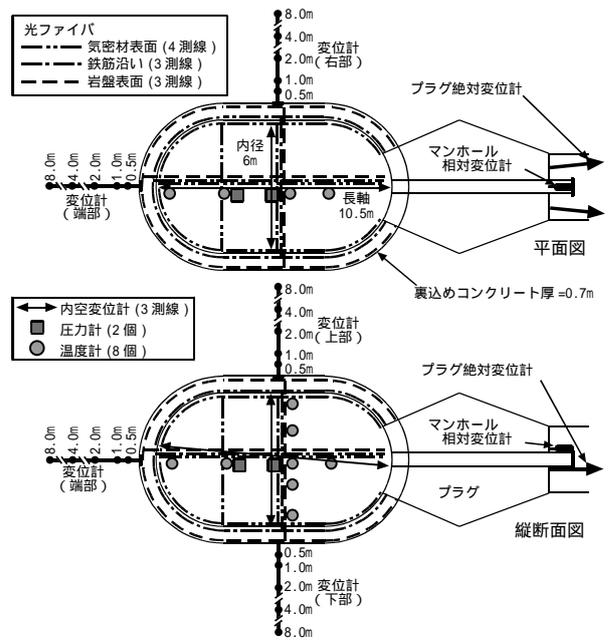


図 - 4 主要な計測器配置

態では貯槽周辺への熱の流出により温度低下を示していることがわかる。これらの計測値 (P, V, T) から貯槽内の空気質量を算出した。なお、貯槽容積の変化は内空変位の計測値から求めた。

本論文中には貯槽内の温度分布を示していないが、図 - 4に示す上下方向の温度計測位置に依存し、上部が高く、下部が低い値を示した。特に、加压・減圧期間中の温度差は相対的に大きくなる。シャットイン直後の計測温度差の最大値は3程度で、シャットイン期間中の温度は徐々に低下し温度差も小さくなる。気体の状態方程式により空気質量を評価するためには、貯槽内の代表温度を評価する必要がある。この方法として、図 - 4の8点の温度計測結果の単純平均を用いた。

図 - 10には約20MPaでのシャットイン期間中の空気質量を示している。これは貯槽内の圧力と温度から理想気体を仮定して算定した値である。図より、加压による貯槽容積の増加を補正して算定した空気質量は、シャットイン中も加压前の貯槽容積（幾何容積：240m³）のまま一定と仮定して算定した空気質量よりは大きな値を示すものの、共に見かけ上は空気質量の低下傾向を示す。

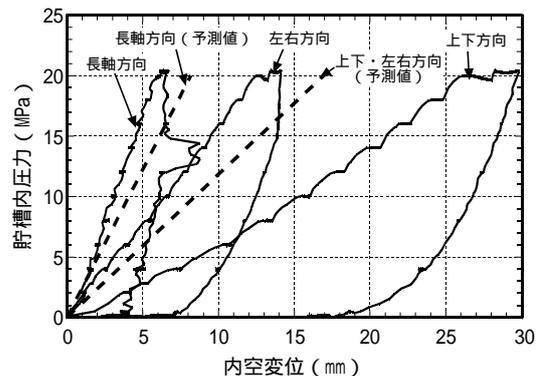


図 - 6 内空変位の計測値 (耐圧試験時)

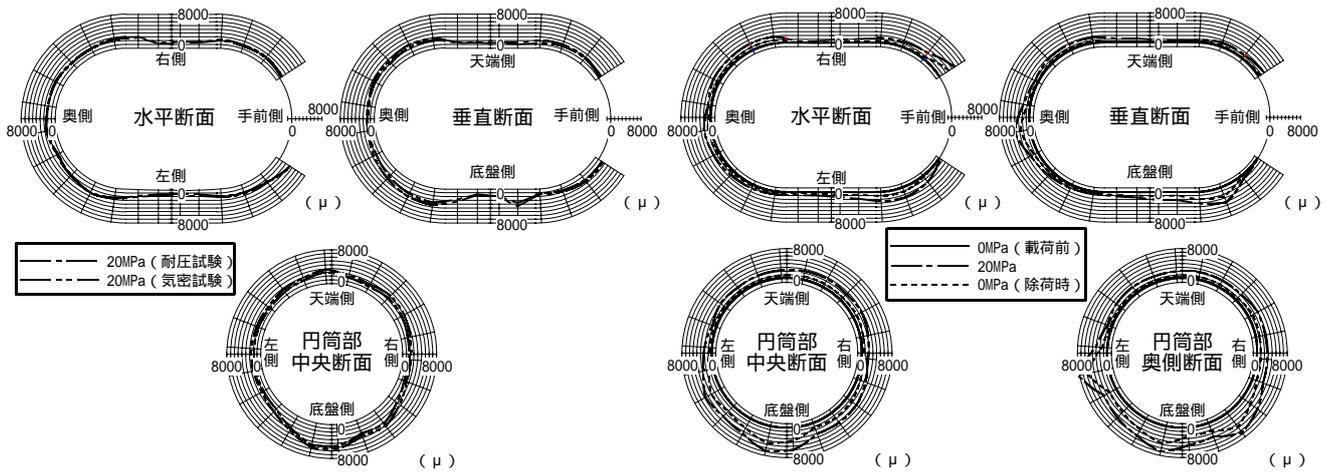


図-7 岩盤壁面のひずみ分布 (光ファイバによる計測)

そこで今回の気密試験の評価では、特に高压であることを考慮して、理想気体の状態方程式に換えて実在気体の方程式を用いて確認を行った。この理由は、理想気体の状態方程式では、a)分子の大きさを無視する、b)分子間力の影響を無視する、との仮定に基づいているが、これらの仮定は、特に高压では実際の挙動と差異が生じる点にある。実在気体（非理想気体）を想定し、かつ貯槽容積の変化も考慮した空気質量を図-11に示す。図-11では空気組成を窒素：79%、酸素：21%と仮定してDaltonの法則から各分圧を求め、成分毎にLee and Kesler¹⁰⁾に基づき各温度・圧力毎に圧縮係数Zを算定し、温度・圧力による非線形性を考慮して空気質量を評価した。この図より、シャットイン後3日目以降は空気質量の算定値はほぼ一定値を示していることがわかる。

以上より、実在気体の方程式を用いることで精度よく気密性を確認でき、実証試験施設の気密性が確認された。また、高压気体の気密性を評価する手法として、実在気体（非理想気体）を想定した評価方法の方が気密性をより良く評価できるものと考えられる。

(3) 繰返し・長期载荷試験結果

引き続き実施した繰返し・長期载荷試験時の内空変

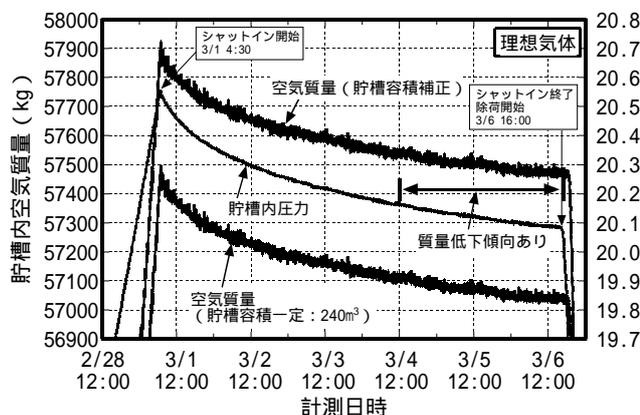


図-10 貯槽内の空気質量 (理想気体を仮定)

図-8 気密材のひずみ分布 (光ファイバによる計測：耐圧試験)

位の計測結果を図-12に示す。この図には、4種類の全試験の内空変位を全て示している。

この図より、繰返し・長期载荷試験において、それ以前の耐圧試験、気密試験時の内空変位より若干大きな変位を示すものの、除荷時の変形係数（除荷時の勾配）は全試験を通してほぼ同様であることがわかる。また、20回の繰返し・長期载荷時に内空変位にはクリープ的挙動はみられるものの収束傾向を示し、ひずみ進展等は認められなかった。

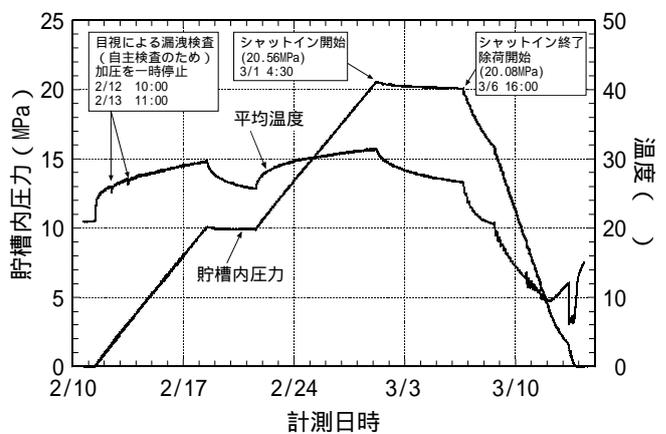


図-9 気密試験時の圧力と温度

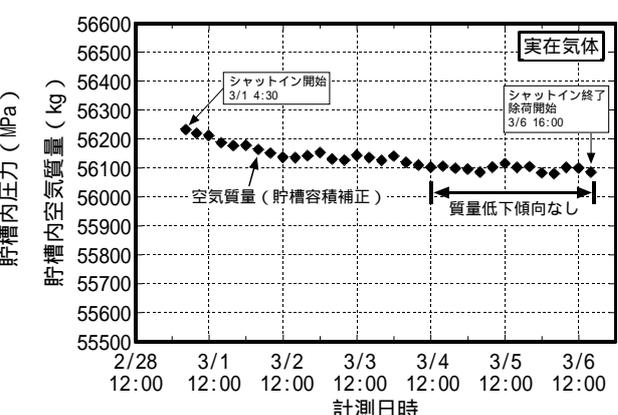


図-11 貯槽内の空気質量 (実在気体を仮定)

(4) 30MPa耐圧性能試験結果

30MPa耐圧性能試験時の内空変位を同様に図 - 12に示す。設計圧20MPaの実証試験貯槽に30MPaの貯槽内圧を水压で載荷した結果、20MPaまでの貯槽内圧力と内空変位の関係をほぼ延長するよう変位が生じた。30MPa载荷中にクリープ的挙動等はみられるものの時間と共に収束傾向を示し、貯槽からの漏水は認められず、30MPaまでの高圧での耐圧性が確認された。

4. おわりに

本実証試験では、類似の貯蔵施設として国内ではじめて20MPaの高圧での耐圧性・気密性が確認できた。平成19年度には貯槽の解体調査も実施して、裏込めコンクリートのひび割れ分散特性等も詳細に検討し、本施設の設計技術を確認する予定である。また、これらの知見等に基づき商用機の試設計を行い成立性を確認する予定である。さらにコスト試算を行い、競合施設との比較を通して経済性の評価も行い、総合評価を行う予定である。

謝辞：本技術開発内容は、東京瓦斯（株）、大阪瓦斯（株）、帝国石油（株）、東邦瓦斯（株）、西部瓦斯（株）、北海道瓦斯（株）ならびに天然ガス高圧貯蔵技術開発共同企業体（代表者：清水建設（株）、（株）大林組、大成建設（株）、（株）IHI、三井造船（株）、三菱重工業（株））の関係各位にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 澤 一男, 石塚 与志雄：都市ガス岩盤貯蔵の実用可能性の調査研究, トンネルと地下, 第 35 巻, 4 号, pp.31-39, 2004.
- 2) OKUNO, T., et al. : Experimental Lined Rock Cavern for Natural Gas Storage in Japan, *ISRM International Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Rock Mechanics in Underground Construction*, CD-ROM, Singapore, 8-10, November 2006.

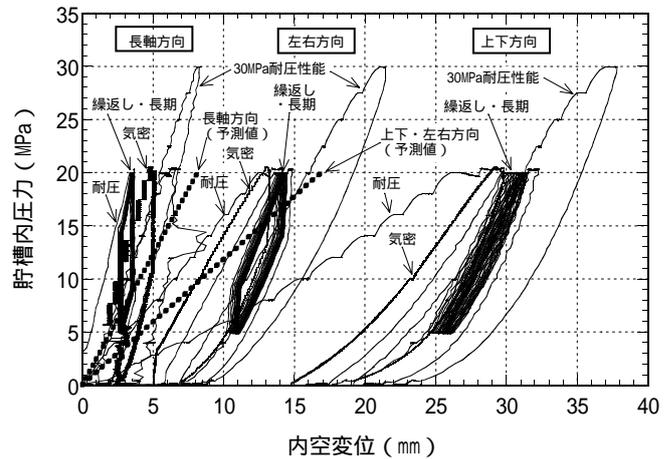


図 - 12 実証試験中の内空変位の計測値と予測値

- 3) NIIMI, K., et al. : Design Analysis of Experimental Lined Rock Cavern for Natural Gas Storage in Japan, *ISRM International Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Rock Mechanics in Underground Construction*, CD-ROM, Singapore, 8-10, November 2006.
- 4) 小松原 徹 ほか：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験計画と実証試験サイトの岩盤特性, 土木学会第 62 回年次学術講演会, -420, 2007.
- 5) 新美 勝之 ほか：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験施設の設計, 土木学会第 62 回年次学術講演会, -421, 2007.
- 6) 若林 成樹 ほか：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験結果(耐圧試験結果), 土木学会第 62 回年次学術講演会, -422, 2007.
- 7) 奥野 哲夫 ほか：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験結果(気密試験結果), 土木学会第 62 回年次学術講演会, -423, 2007.
- 8) 奥野 哲夫 ほか：岩盤内天然ガス高圧貯蔵技術開発に関する実証試験, 第 13 回地下空間シンポジウム 論文・報告集, 土木学会地下空間研究委員会, 投稿中, 2008.
- 9) 新美 勝之 ほか：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験施設の岩盤特性と設計, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会 岩盤力学委員会, 投稿中, 2008.
- 10) Lee, B. I. and M. G. Kesler : A Generalized Thermodynamic Correlation Based on Three-Parameter Corresponding States, *AIChE Journal*, Vol.21, No.3, pp.510-527, 1975.

VERIFICATION TESTS OF LINED ROCK CAVERN FOR NATURAL GAS STORAGE

Tetsuo OKUNO, Toru KOMATSUBARA, Naruki WAKABAYASHI,
Katsuyuki NIIMI, Yuji KURIHARA and Masahiro IWANO

In this paper, we introduce a Lined Rock Cavern (LRC) gas storage system called ANGAS (Advanced Natural GAs Storage) and discuss the results of the verification tests of LRC performed at the Kamioka mine. Based on the geological data, the verification test cavern was designed and constructed. The maximum internal pressure for design is 20MPa. The verification tests include water pressure test (20MPa), airtight test (20MPa), cyclic and long-term test and 30MPa-water pressure test. The resistibility for internal pressure and airtightness up to 20MPa were confirmed based on the monitored behavior of the test cavern. In addition, the resistibility up to 30MPa was confirmed during the 30MPa-water pressure test.