

岩盤内天然ガス高圧貯蔵技術開発に関する実証試験 VERIFICATION TESTS OF LINED ROCK CAVERN FOR NATURAL GAS STORAGE

奥野 哲夫¹・小松原 徹²・栗原 雄二³・岩野 政浩⁴
Tetsuo OKUNO・Toru KOMATSUBARA・Yuji KURIHARA・Masahiro IWANO

Since 2004, we have been studying technologies for an underground natural gas storage system, a Lined Rock Cavern (LRC) gas storage system called ANGAS (Advanced Natural Gas Storage). In this paper, we introduce the project and discuss the results of verification tests of LRC based on the current work at the Kamioka mine in Japan. Important mechanical properties for the design, such as a modulus of deformation, a creep ratio and a residual strain ratio of the in situ rock mass, were evaluated from the results of borehole loading tests and rigid plate loading tests performed in a part of the access tunnel of the cavern. In addition, initial stress of the rock mass was measured.

Based on the geological data, the verification test cavern was designed and constructed. The test cavern is shaped like a cylindrical vessel with a hemispherical top and bottom. The maximum internal pressure for design is 20MPa. The verification tests were performed in order to confirm the validity of the LRC system for Japan. The tests include water pressure test (20MPa), airtight test (20MPa), cyclic and long-term test and 30MPa-water pressure test. The behavior of the test cavern was monitored during these tests using many measuring instruments, the resistibility for internal pressure and airtightness up to 20MPa were confirmed. In addition, the resistibility up to 30MPa was estimated during the 30MPa-water pressure test.

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、埋蔵量が豊富でかつ他の化石燃料と比較して二酸化炭素などの排出面で環境負荷が極めて少ないエネルギーであることや、石油依存度を低減しエネルギー供給源の多様化に資すること等から、重要なエネルギーと位置づけられ、「天然ガスの利用拡大」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、沿岸部大都市圏の需要増加だけではなく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⁾

以上の背景から、(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いる。本事業では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が行われている。本論文では、天然ガス貯蔵を目

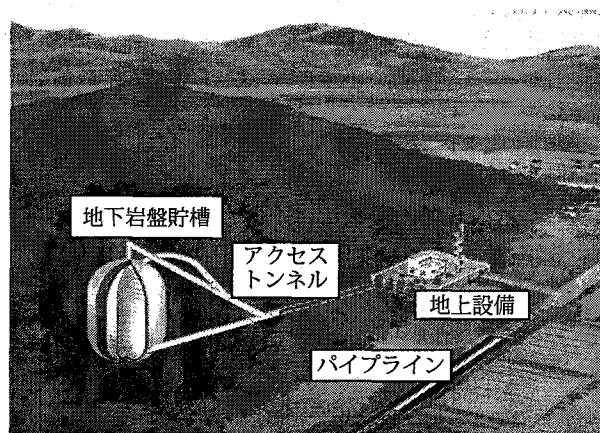
キーワード：地下空洞、鋼製ライニング式岩盤貯蔵、天然ガス高圧貯蔵、実証試験、耐圧試験、気密試験

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所 社会基盤技術センター 地下技術グループ グループ長

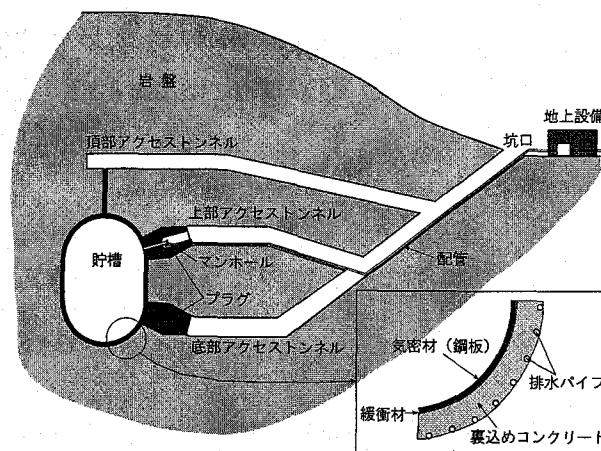
²正会員 社団法人日本ガス協会 技術開発部 天然ガス高圧貯蔵プロジェクトグループ マネージャー

³非会員 株式会社大林組 土木技術本部 原子力環境技術部 専任役

⁴フェロー会員 大成建設株式会社 土木本部 土木設計部 トンネル地下設計室 室長



(1) 商用機のイメージ



(2) 鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設の代表的構造

図-1 鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設のイメージと代表的構造

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）の概要と岐阜県神岡鉱山内に建設した小規模実証試験施設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を述べる。^{2)~7)}

2. 鋼製ライニング式岩盤貯蔵の概要¹⁾

(1) 基本コンセプト

図-1にはANGAS技術開発の対象とする商用機イメージと代表的な施設構造を示す。本施設の基本コンセプトは以下に示すものである。

- ① 耐圧性は周辺岩盤で支持する。（内圧は裏込めコンクリートを介して周辺岩盤に伝える。岩盤を耐圧部材とする。）
- ② 気密性は気密材（鋼材）で確保する。
- ③ 排水システムにより、施工時・内圧解放時には気密材に過剰な外水圧を作用させない。

(2) 技術開発目標と技術課題

我が国の地質条件および運用条件（日間変動の吸収を目的）を踏まえ、ANGAS技術開発では表-1に示すモデルケース（4ケース）の成立性を試設計により確認することを目的の一つとしている。商用機では最大の運用上限圧力20MPa、ガス受入・払出し回数10,000回（200回/年×50年耐用）を設計条件とする。本施設に関する技術調査等は平成12年度から実施されており¹⁾、以上の基本コンセプトを成立させるための技術課題として主に以下の項目が挙げられている。

- ① 岩盤貯槽の設計技術開発
 - ・気密構造の設計技術開発
 - ・高性能プラグの設計技術開発
- ② 技術基準への対応等
- ③ 省エネルギー型運用システムの検討

表-1 商用機の試設計条件（モデルケース）

モデルケース	運用下限～ 上限圧力 (MPa)	単基 幾何容積 (万 m ³)	岩盤の 変形係数 (GN/m ³)	ガス受入・ 払出しの回数 (回)
1	5～20	2.0	12	10,000
2	2～7	1.0	8	10,000
3	5～12	0.5	8	10,000
4	5～12	2.0	8	10,000

制限条件：気密材板厚 20mm 以下

(3) 技術開発の詳細内容

上記の「① 岩盤貯槽の設計技術開発」は、その検討手法から、室内模型試験等を用いた「要素研究」と実際の岩盤貯槽を用いた「実証試験」に大別される。本論文では、主に実証試験による検討について述べる。

a) 気密構造の設計技術

気密構造の設計技術は、図-1(2)に示すように「気密材（鋼材）」、「緩衝材」、「裏込めコンクリー

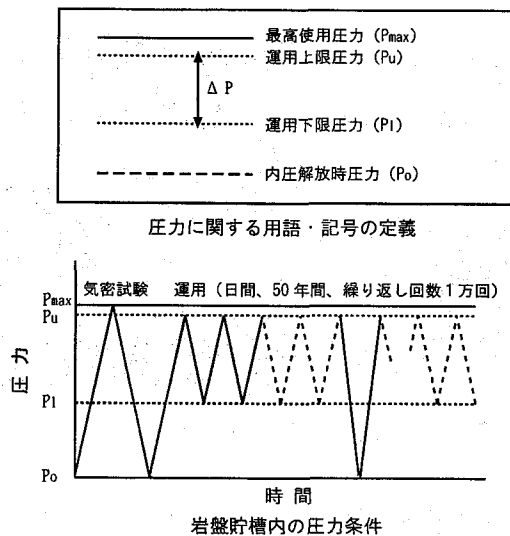


図-2 貯蔵圧力の定義と载荷パターンの例

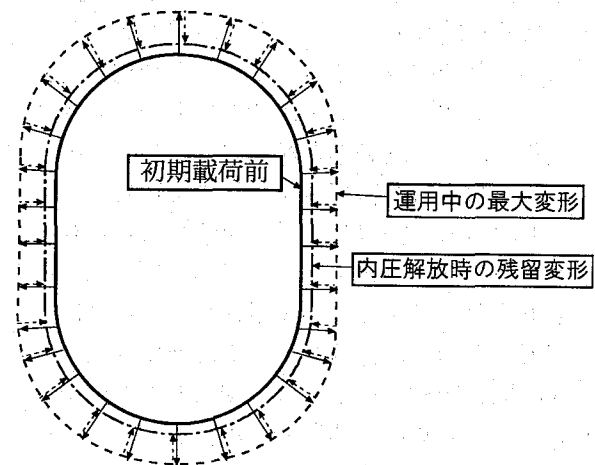
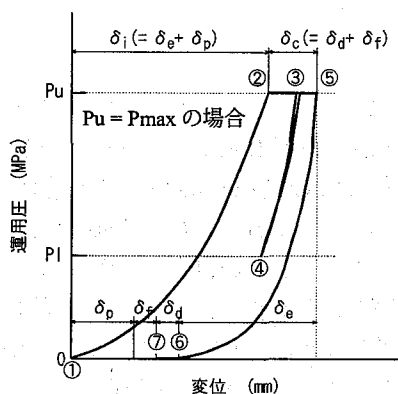


図-3 貯蔵空洞の変形挙動の概念図



- (1) 初期変位 (①→②) : $\delta_i = \delta_e + \delta_p$
 弾性変位 (⑤→⑥) : δ_e
 塑性・締固め変位 : δ_p
 (2) クリープ変位 (②→⑤) : $\delta_c = \delta_d + \delta_f$
 回復性クリープ (⑥→⑦) : δ_d
 (遅れ弾性変位)
 非回復性クリープ : δ_f
 (流動)

クリープ率 (クリープ変位/初期変位) : δ_c / δ_i
 残留変位率 (残留変位/全変位) : $(\delta_p + \delta_f) / (\delta_i + \delta_c)$

残留変位 : 塑性・締固め変位 + 非回復性クリープ
 全変位 : 初期変位 + クリープ変位

図-4 岩盤変位 (半径方向) の概念図

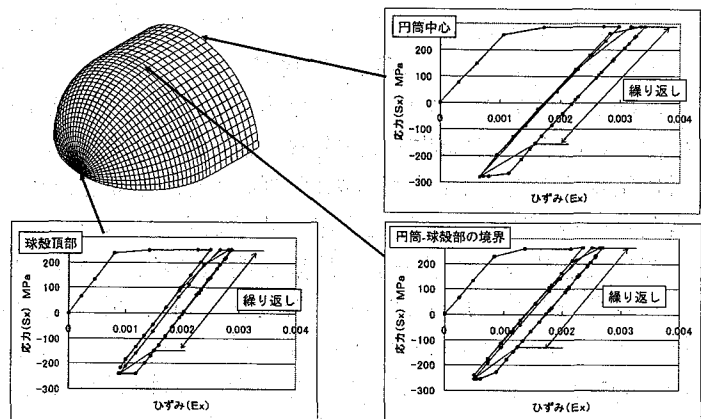


図-5 内圧変動に伴う気密材の代表位置での応力-ひずみ曲線の例 (引張側が正)

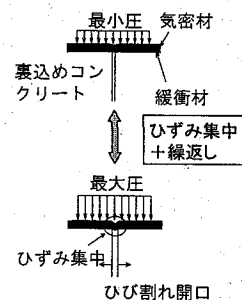


図-6 裏込めコンクリートのひび割れ特性

ト」からなる複合構造が、支障なく機能して気密性を確保する必要がある。特に、次に示すように気密材は内圧载荷時に塑性域まで変形を許し、緩衝材、裏込めコンクリートと密着させ、その後一体として挙動するよう設計することが重要である。

まず、図-2に商用機の貯蔵内圧力の定義と载荷パターンの例を示す。運用開始前には気密試験等を実施し、その後運用上限圧力と運用下限圧力の範囲で、ガス受入・払出を繰り返す。貯蔵空洞の変形挙動の概念を図-3に示す。耐圧部材である岩盤変位は、一般に図-4に示すものであり、このような岩盤変位は気密構造の変位拘束条件となり、気密材の挙動に支配的な影響を与える。

図-5には貯蔵内圧の変動とそれに伴う岩盤変位を拘束条件とした気密材の変形挙動の一例を示す。この図は、後に示す小規模実証試験貯槽に対して実施した解析結果であるが、貯槽各部の気密材のひずみは、

内圧载荷に伴い塑性域まで達する。その後、除荷・载荷を繰り返した際にひずみ進展が生じていないことが確認できる。また、気密材は塑性域まで変形することで除荷時の岩盤変位の回復（戻り）により圧縮応力が生じている。この状況では、気密材が緩衝材を介して裏込めコンクリートや岩盤と密着した挙動を示す。しかし、過大な圧縮応力が発生すると気密材に座屈（面外変形）が生じることが危惧される。これに対して仮に気密材が弾性域のみで変形する場合は、除荷時に気密材のひずみは初期状態まで回復するものの、岩盤には残留変位が生じるため、気密材と裏込めコンクリートの間などで隙間が生じる。このような状態では、気密材と裏込めコンクリートの間に肌別れが生じ、気密材の支持が得られず不安定になり、また気密材とマンホールの接合部（溶接部）ではひずみ集中が発生することになる。このため前述のように気密材には適度の塑性変形を許し、除荷時の圧縮応力で座屈を生じさせないことが理想となる。以上の気密構造（気密材、緩衝材、裏込めコンクリート）の挙動に基づき、実証試験での主要な検討課題を以下に示す。

- ・裏込めコンクリートのひび割れ特性

貯槽の裏込めコンクリートには内圧载荷時に引張りひずみが生じ、これによるひび割れが生じる。緩衝材は、このひび割れ部での気密材の疲労破壊に対する応力集中の緩和等を目的にしている。ひび割れが1箇所集中すると、1本当たりの開口幅が大きくなるため、できるだけひび割れを細かく多数分散させ、1本当たりのひび割れ開口幅を小さくすることが、気密材にとっては有利となる。このひび割れ分散を目的として、裏込めコンクリートに鉄筋を設置する。これは鉄筋の付着力によりひび割れを分散するもので、ひび割れを分散した結果として「最大ひび割れ間隔」を評価し、これから1本当たりの「最大開口幅」を評価する。この「最大開口幅」に対して、図-6のようにひび割れ部のひずみ集中と内圧増減によるひび割れの開閉繰り返しに関して、気密材が疲労破壊しないことを設計において評価する。後述の実証試験では、以上の設計に関して特に裏込めコンクリートのひび割れ分散の状況等を確認することも目的の一つとしている。

- ・岩盤の変形特性を考慮した安全裕度

前述のように载荷時に気密材のひずみが塑性域まで達すると除荷時に座屈発生が危惧されるため、設計において座屈が発生しないことを確認する必要がある。塑性域に達したのち、除荷時に仮に岩盤の変位が初期状態まで回復することを仮定すると、気密材も強制的に初期状態付近まで戻されるため圧縮応力はさらに大きくなる。この状態で座屈が生じないことが確認できれば、実際の岩盤では残留変位が生じることから、初期状態まで変位が回復する場合よりも圧縮応力は緩和されるので、座屈に対する余裕が見込まれる。設計において除荷時に残留変位が初期状態まで回復しても座屈が発生しないことを安全裕度と呼び、これを確認・評価する。

b) 高性能プラグの設計技術

高圧貯蔵の技術の一つとして重要なプラグに関する主要な検討課題を以下に示す。

- ・アーチ構造タイプのプラグ設計技術

従来のプラグの設計では、プラグの抵抗力は岩盤とのせん断力に基づく設計である。しかし、高圧貯蔵に対して十分なせん断力を確保するためにはプラグの長さは極端に長くなる。このため新たにアーチ作用に基づく抵抗力を確保する合理的でコンパクトなプラグを設計する。

- ・構造不連続部の気密構造の構造形式と設計技術

図-7にプラグと裏込めコンクリートの間の構造不連続部とこの部分の構造形式の一例を示す。この部分は不連続な変位に対しても気密材による気密性を確保するよう設計する必要がある。図では緩衝材を増厚することで気密材への影響を低減し、背面鋼材により不連続部への緩衝材の圧入を防止する構造を示している。

- ・緩衝材増圧形式による構造不連続部の合理的な設計
- ・緩衝材厚さなどの基本形状決定

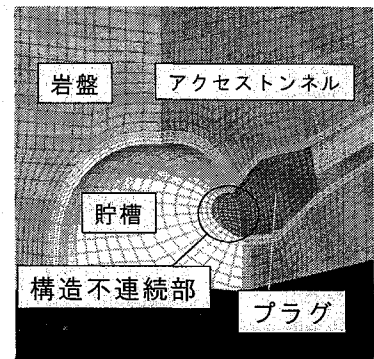
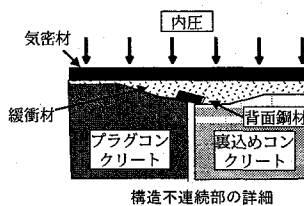


図-7 構造不連続部の構造形式の例

3. 小規模実証試験施設^{2)~5)}

実証試験を行うため、小規模実証試験施設を設計・建設し、耐圧試験や気密試験等を行い、この間の各部の挙動等を計測・確認した。そのスケジュールを表-2に示し、以下にその内容を述べる。なお、本施設は高圧ガス保安法に基づく検査を受検し合格した。

(1) 岩盤特性と設計概要

実証試験施設は図-8に示す神岡鉱山の堆積岩（手取り層：砂岩と頁岩の互層）中に建設した。商用機は都市近郊での建設が想定されるため、実証試験サイトも都市近郊に比較的多く存在する地質として堆積岩を選定した。

実証試験施設周辺の岩盤は電中研式岩盤分類においてCH級～CM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により調査し、設計に用いる物性値を設定した。その一例として孔内載荷試験結果を表-3に示す。岩盤の変形係数は、砂岩と頁岩の互層を考慮して、各岩種の変形係数と含有率に基づく積層モデルを想定し、積層モデル全体の縦・横方向の変形係数を算出し岩盤としての変形係数の異方性を評価した。その結果、顕著な異方性は評価されなかったため、岩盤の変形係数は等方性を設定した。これ以外に平板載荷試験の結果等も参考に設計に用いる値として表-4に示す各値を設定した。

小規模実証試験施設において岩盤貯槽は、図-9に示す配置（貯槽長さ10.5m、貯槽直径6m、幾何容積240m³）とし、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よ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に限ることなどを目的にして設定した。

貯槽建設位置の初期地圧を計測した結果、初期地圧は異方性が顕著であり、水平方向の地圧が卓越することから最大主応力方向に貯槽軸方向がほぼ一致するように配置した。設計ではこの初期地圧の異方性を考慮し、表-5に示す値を設計に用いた。

貯槽およびプラグは回転対称体であることから、設計解析に用いるFEMモデルは軸対称モデルとした。設計は前述の気密構造の設計技術で述べた点を考慮するため、まず掘削時ならびに貯蔵圧力作用時の貯蔵空洞安定性解析により貯蔵安定性を確認し、実証試験時の貯蔵空洞の各部の変位等を評価した。この評価には、モール・クーロンの破壊規準に対する応力の近接度から岩盤の局所安全率分布を評価し、空洞周辺岩盤のゆるみ域を考慮した解析を実施した。この結果、ひずみ分布としては円筒部の裏込めコンクリート表面の周方向ひずみが最大となり、20MPa載荷時に0.32%と評価された。この貯蔵圧力の増減による貯蔵空洞（裏込めコンクリート表面）の変位分布を、貯蔵圧力作用時の気密材（緩衝材も考慮）の外周面変位拘束条件として与え、気密材の変形挙動解析を実施した。以上の設計解析により、気密材は塑性域まで変位が達しても除荷時に座屈しないことを評価した。この解析による気密材の応力-ひずみ曲線が先の図-5である。なお、貯蔵圧力作用時の荷重条件となる載荷パターンは、後述の実証試験の耐圧試験、気密試験、繰返し・長期載荷試験の載荷パターンを用いており、設計圧力20MPa、繰返し回数20回である。この結果、本貯槽では裏込めコンクリートの厚さ0.7m、気密材の材質（鋼材）はSM400を用い、構造不連続部周辺を

表-2 実証試験のスケジュール

項目	16年度	17年度	18年度	19年度
試験準備 設計				
高圧ガス保安法申請				
試験用小規模貯槽構築				
実証試験				
耐圧試験				
気密試験				
繰返し・長期載荷試験				
30MPa耐圧性能試験				
試験結果評価・まとめ				

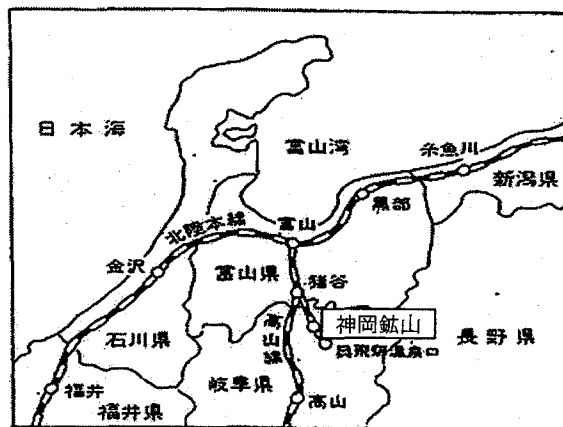


図-8 岐阜県飛騨市神岡町 神岡鉱山

表-3 孔内載荷試験の結果

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	14.23	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	0.513
頁岩・CH級	E地点	9.53	14.91	0.643
	F地点	4.39	6.19	0.252

表-4 設計に用いた各種岩盤物性値

	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 載荷時 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	—	—	—	—	—	—	—

$$* E_r = E_{r0} / (1 + \varepsilon_{cr})$$

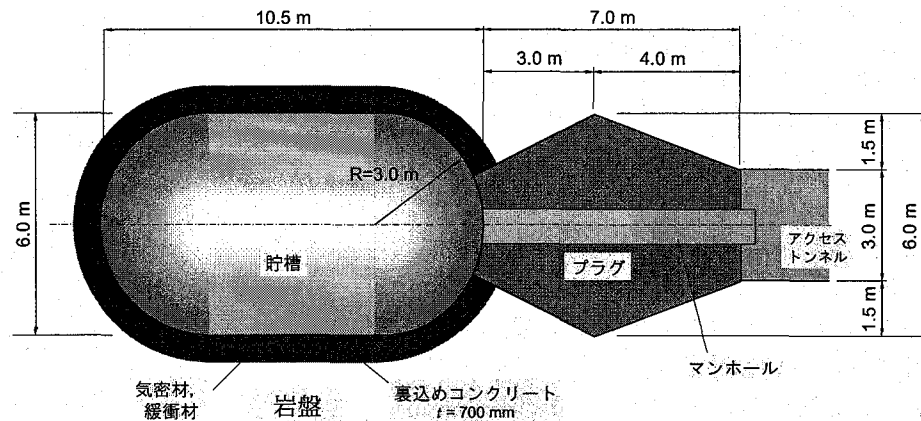


図-9 小規模実証試験貯槽

除く一般部は気密材板厚6mm，緩衝材厚さ4mmを標準として設計した。

アーチ構造タイプのプラグは，図-9に示すようにプラグの最大拡幅部の幅が6mを有し，その位置よりアクセストンネル側の岩盤との接合面が受圧部となり，アーチ作用が生ずる構造である．設計解析では，プラグの安定性として終局限界状態（断面破壊と剛体安定）と疲労限界状態に対して安全性を照査し，貯蔵圧力作用時のプラグおよび周辺岩盤の挙動をFEM解析により把握した．その結果，設計圧力20MPa載荷時の構造不連続部の相対変位（裏込めコンクリートとプラグの相対変位）は，開口変位5.37mm，せん断変位1.70mmと評価され，この変位挙動に基づ

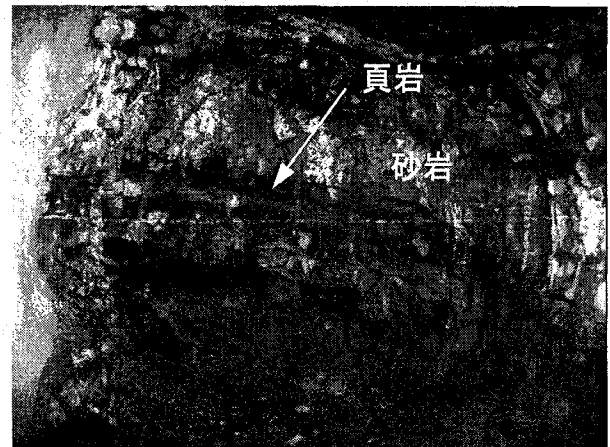


写真-1 アクセストンネルの掘削（切羽）

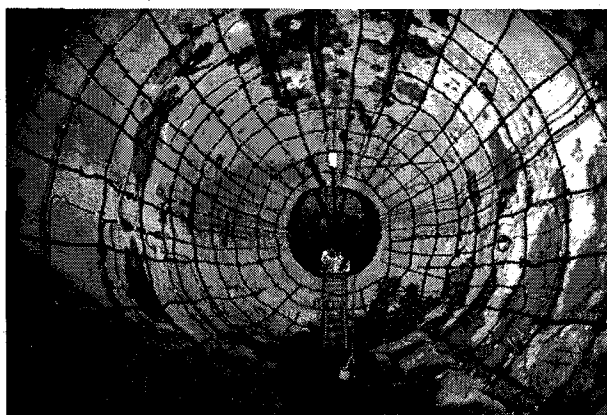


写真-2 岩盤掘削後の貯槽空洞内部（貯槽奥側からプラグ方向を撮影）



写真-3 岩盤掘削後の貯槽空洞内部（プラグ部から貯槽内部を撮影）

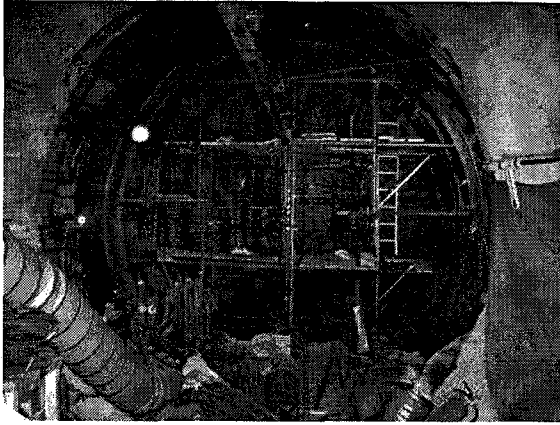


写真-4 気密材の組立て状況（プラグ部から貯槽内部を撮影）

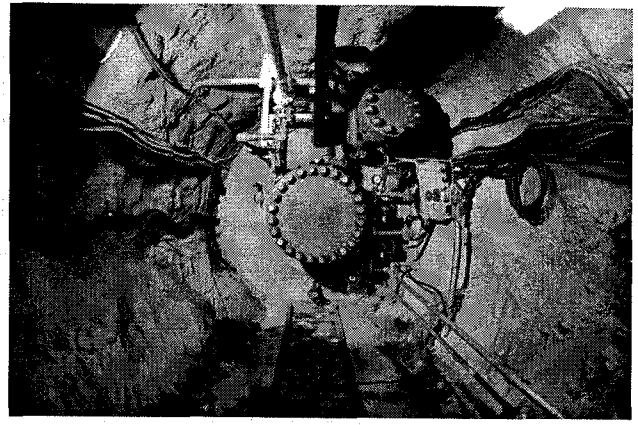


写真-5 建設後のプラグ（マンホール）部（アクセストンネルからプラグ部を撮影）

き構造不連続部の緩衝材厚さ等を設計した。

(2) 実証試験貯槽の建設状況

建設中および建設後の小規模実証試験の状況を写真-1～6に示す。写真-1はアクセストンネル掘削中の切羽写真であり、砂岩の中に黒色に見える部分が頁岩である。写真-2、3は、岩盤貯槽の掘削後の状況であり、壁面は吹付けコンクリートが施工され、格子状の黒線は排水パイプと計測機器の計測ケーブルである。これらは気密材、裏込めコンクリート、プラグ等の施工前の状況である。

写真-4は気密材の組立て状況を示す。気密材の組立て・溶接の後、裏込めコンクリートを打設し、プラグおよびマンホールの施工を行った。以上の実証試験貯槽全体が完成した後のプラグ部を写真-5に、また貯槽内圧の载荷に使用した加圧装置を写真-6に示す。

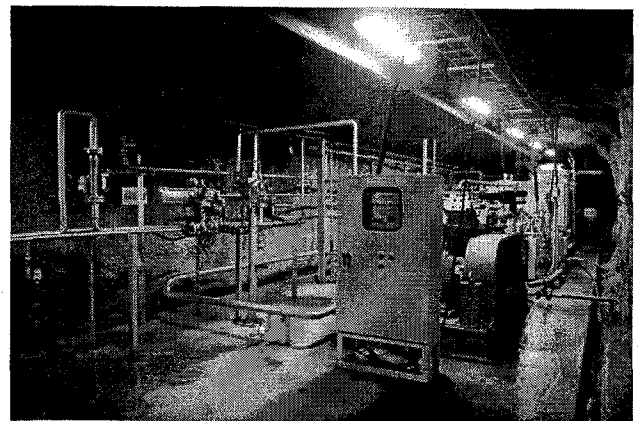


写真-6 加圧装置（水加圧装置とコンプレッサ）

表-6 実証試験の内容

試験名	試験目的	载荷内容
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）
繰り返し・長期载荷試験	実機の運用を想定した载荷・除荷、長期载荷を行い、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 繰り返し 5～20MPa 長期载荷 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）

4. 実証試験と結果検討^{4), 6), 7)}

(1) 試験計画と計測機器

前述の表-2のスケジュールのとおり、小規模実証試験施設の建設を平成18年度に完了し、表-6に示す実証試験を実施した。貯蔵内圧は、気密試験のみ空気圧を载荷し、耐圧試験、繰返し・長期载荷試験、30MPa耐圧性能試験は全て水圧を载荷した。各試験の载荷パターンは図-10に示すものであり、20MPaの設計圧力に対して、各部の挙動を計測しながら、耐圧性と気密性を確認した。30MPa耐圧性能試験は、設計圧力20MPaの貯槽に対して30MPa载荷時の挙動を計測・検討するものである。実証試験中の各部の変形挙動等は、図-11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。

(2) 貯槽の耐圧性と気密性の確認

耐圧試験では水圧により段階的に20MPaまで载荷し、後述する変位計測結果から20MPaのシャットイン状態で内空変位と岩盤変位が収束したことを持って耐圧性を確認した。

気密試験では、図-12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-12より加圧中は貯槽内の温度が上昇し、シャットイン中など加圧を

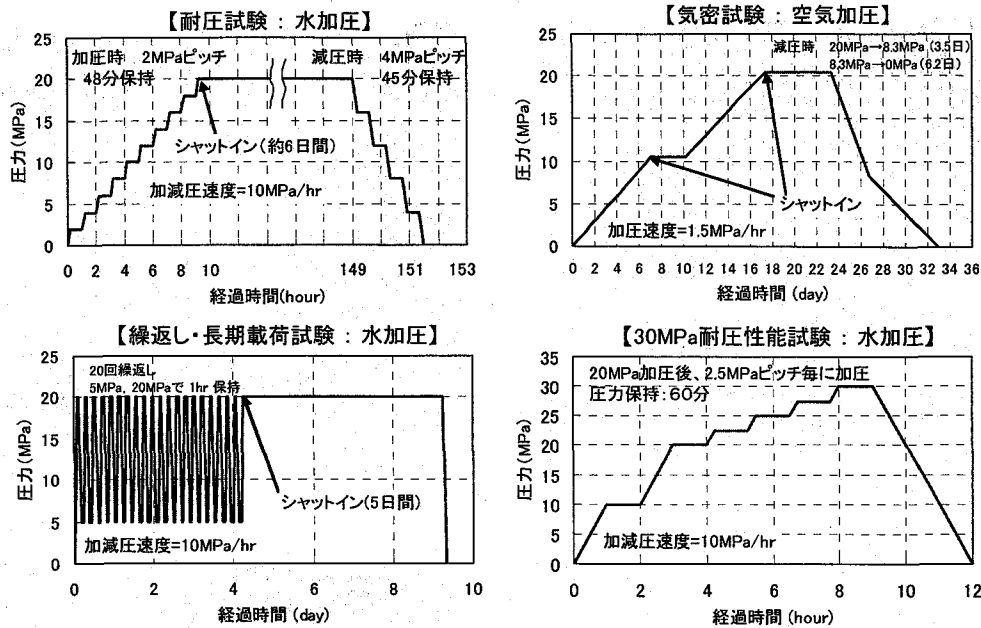


図-10 実証試験の载荷パターン

止めた状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、貯槽容積の変化は図-11の内空変位の計測値から求めた。

ここには貯槽内の温度分布を図示していないが、図-11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、加圧・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-11の8点の温度計測結果の単純平均を用いた。

図-13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、加圧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圧前の貯槽容積 (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。

そこで今回の気密試験の評価では、特に高圧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、①分子の大きさを無視する、②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、特に高圧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-14に示す。図-

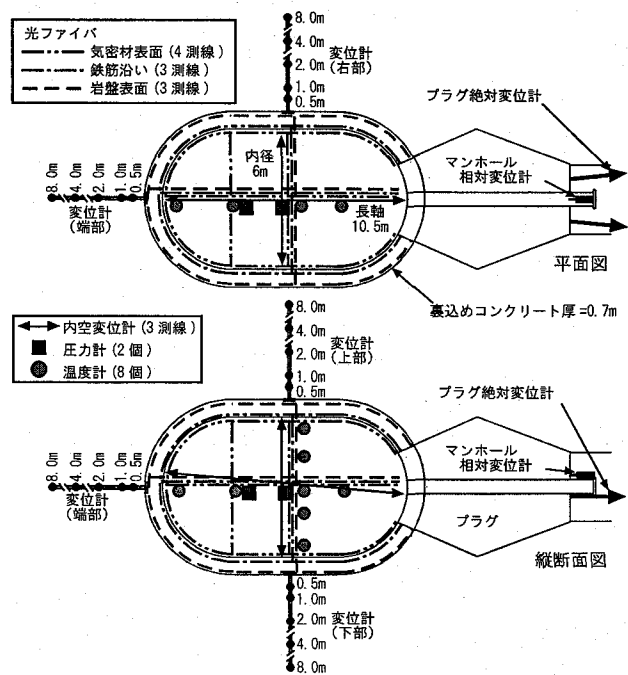


図-11 主要な計測器配置

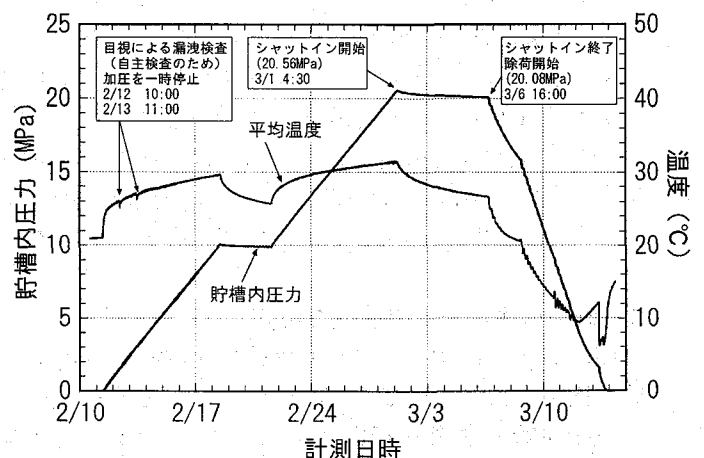


図-12 気密試験時の圧力と温度

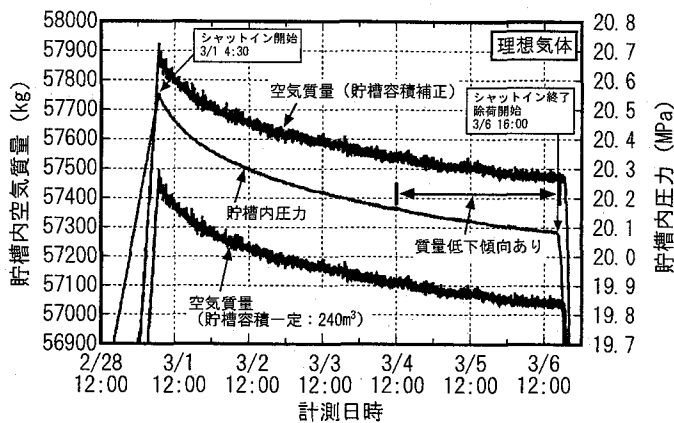


図-13 貯槽内の空気質量（理想気体を仮定）

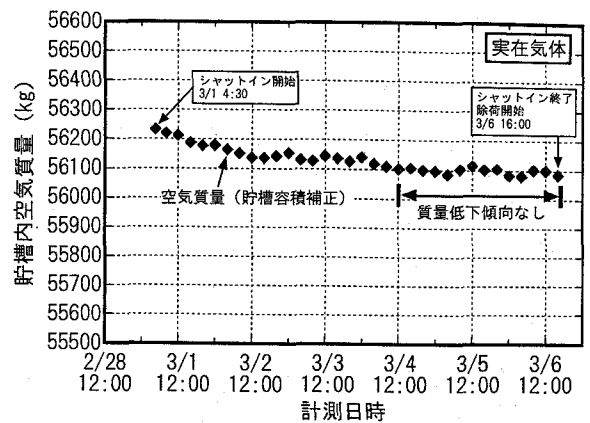


図-14 貯槽内の空気質量（実在気体を仮定）

14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 Kesler⁸⁾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．

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，高圧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) 試験中の貯槽変位

実証試験時の岩盤挙動を計測した結果を図-15に示す．図-15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載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，その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-16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，これは岩盤変位の貯槽下部が大きな値を示した影響を受けており，他の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ている．

図-17は貯槽周辺の岩盤壁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，耐圧試験と気密試験の20MPa載荷時のひずみを比較したものである．この図からも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．また，同じ20MPa載荷時に同程度のひずみを生じているが，耐圧試験よりもその後引続いて実施した気密試験の方がわずかながら大きなひずみを示している．

以上のように貯槽下部の岩盤変位が大きく生じた原因は，貯槽底盤部に頁岩層が厚さ約1.5m程度存在しており，試験サイトの頁岩は砂岩よりも変形係数が小さいことから，他の領域よりも厚い頁岩層の変形の影響を大きく受けたものと考えられる．

図-18は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載荷時に約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．気密材においても貯槽下部の岩盤変形の影響等を受け，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．

このような気密材のひずみ発生後に，引続き20回の繰返し・長期載荷試験と30MPa耐圧性能試験を実施し，水压載荷時に貯槽から漏水はなく，各部の変位も時間経過と共に収束傾向を示し，耐圧性が確認された．

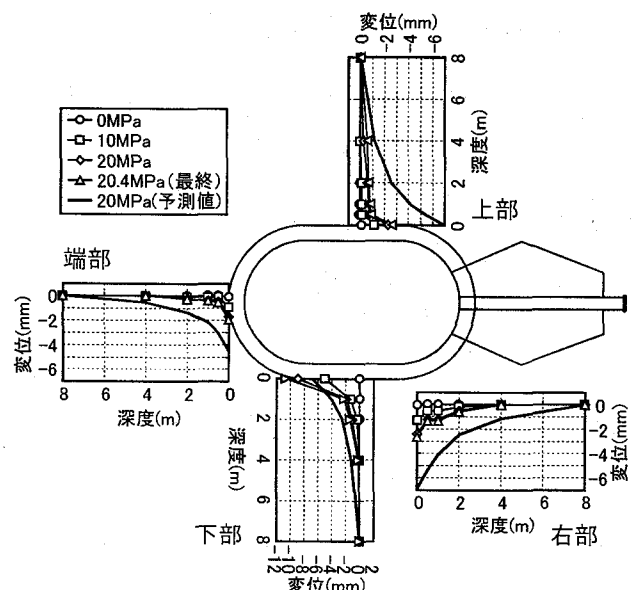


図-15 岩盤変位計の変位

5. 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の高压での耐圧性・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技術課題を詳細に検討し、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先の表-1に示した条件で商用機の試設計を行い成立性を確認する。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压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.
- 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 他：天然ガス高压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，Ⅲ-420，2007.9.
- 5) 新美 勝之 他：天然ガス高压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，Ⅲ-421，2007.9.
- 6) 若林 成樹 他：天然ガス高压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，Ⅲ-422，2007.9.
- 7) 奥野 哲夫 他：天然ガス高压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，Ⅲ-423，2007.9.
- 8) 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.

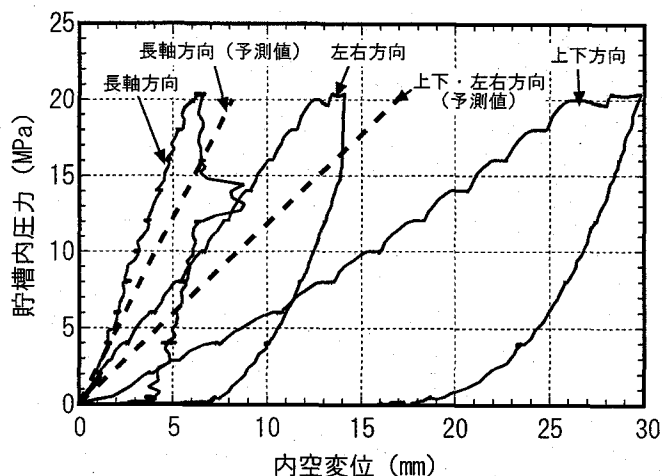


図-16 内空変位の計測値（耐圧試験時）

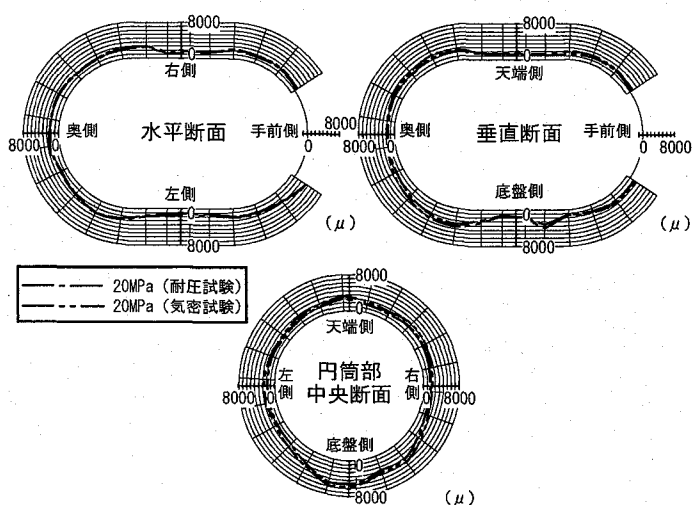


図-17 岩盤壁面のひずみ分布（光ファイバによる計測）

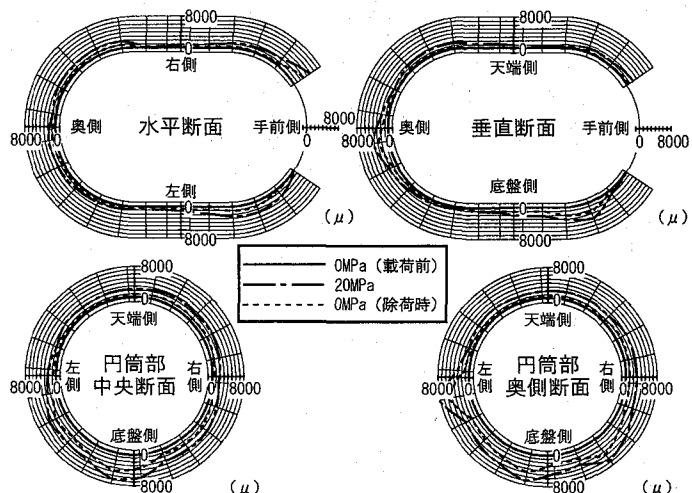


図-18 気密材のひずみ分布（光ファイバによる計測：耐圧試験）