

# 倉敷国家石油ガス備蓄基地 LPG 岩盤貯槽建設工事 プロパン 40 万 t を貯蔵する水封式岩盤貯槽

征 矢 雅 宏

本工事は、液化石油ガス（LPG：Liquefied Petroleum Gas）を備蓄するための大規模な貯槽を岩盤内に建設する工事である。貯蔵方式は地下岩盤貯蔵方式であり、地下水および人工的に加圧給水する水封水によって LPG を常温高压で貯槽内に封じ込めることを目的とする。このため、施工途上から安定した地下水圧の確保と湧水量の抑制が求められた。工事においては、貯槽周辺岩盤に水封ボーリング孔を配置して水封水を供給すると共に、貯槽の周囲にグラウトによる低透水の改良帯を構築した。その結果、建設後に行った気密試験では漏洩に起因する圧力変動は認められず、気密性が確保されていることを示した。

キーワード：水封式岩盤貯槽、LPG、大規模地下空洞、NATM、水封ボーリング、グラウト、高水圧、気密試験

## 1. はじめに

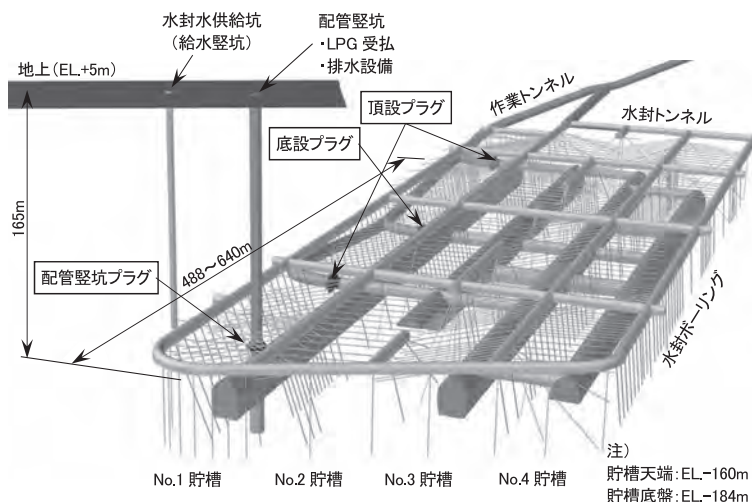
倉敷国家石油ガス備蓄基地は、地下岩盤貯蔵方式によって石油ガス（LPG）を貯蔵する国家備蓄基地である（図—1）。国家備蓄 150 万 t（国内輸入量の約 40 日分）の一環として、基地全体で 40 万 t のプロパンを貯蔵するトンネル形式の水封式岩盤貯槽（断面積  $374 \text{ m}^2$  の空洞 4 条、総延長  $640 + 488 + 584 + 502 = 2,214 \text{ m}$ 、総体積約  $85 \text{ 万 m}^3$ 、貯槽の断面形状は図—2 参照）を平成 14 年 7 月から平成 25 年 3 月にかけて建設している。

倉敷基地の他に、石川県七尾、長崎県福島、茨城県神栖に、それぞれ貯蔵量 25 万 t、20 万 t、20 万 t の

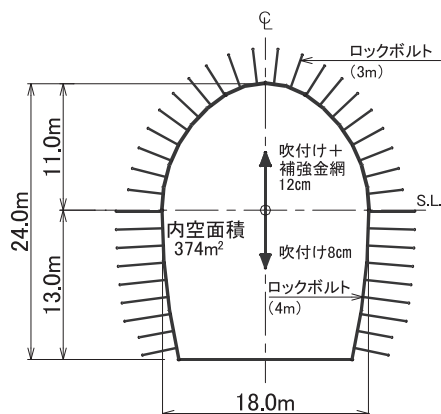
地上タンク方式の備蓄基地があり（図—3）<sup>1)</sup>、平成 17 年から操業されている。また愛媛県波方に、倉敷基地同様、地下岩盤貯蔵方式の貯蔵量 45 万 t の基地があり、倉敷基地と共に平成 25 年 3 月に竣工した。

水封式 LPG 岩盤貯槽では、その原理上、LPG の内圧より高い地下水圧となる深度の岩盤内に貯槽を設けて周囲の地下水および人工的に加圧給水する水封水の圧力によって常温高压の LPG を貯槽に封じ込めることを目指す。この方式は、鉄筋コンクリートやスチールなどのライニングを行わず、水圧によって気密性能を確保するものである。操業時の貯蔵内圧は、常温（ $22^\circ\text{C}$ ）のプロパンの場合、約  $800 \text{ kPa}$  となる<sup>1)</sup>。

建設後に行った気密試験では、最大  $960 \text{ kPa}$  の試験



図—1 倉敷基地の地下施設の鳥瞰図（図面提供：JOGMEC）



図—2 貯槽断面図 (I型、岩盤が比較的良好の場合)



図—3 国家石油ガス備蓄基地 (文献1) を基に作成

内圧に対して漏洩に起因する圧力変動は認められず、気密性が確保されていることを示した。地下岩盤貯蔵方式の実用プラントにおいて最大 960 kPa の内圧下で気密性を確保した例は国内にない。不均質な貯槽周辺の岩盤において地下水圧を貯蔵内圧よりも確実に高く保持し、上記の高圧下において貯槽の気密性を確保することが、プロジェクト成立のための最重要課題であった。本報告では、プロジェクトの技術的特徴を記述しながら工事の概要を総括的に紹介する。

## 2. 倉敷基地全体の実施体制

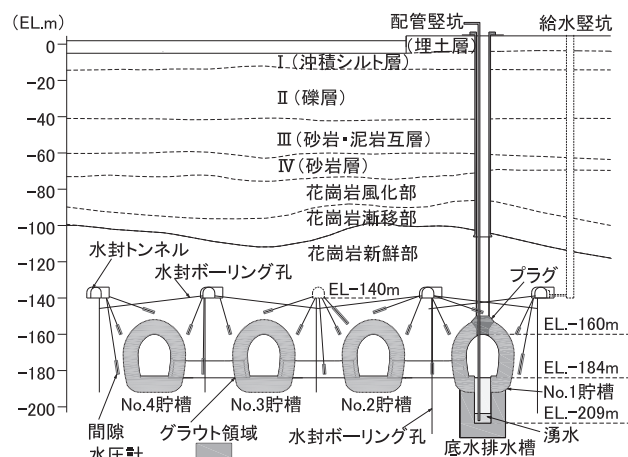
図—4 に、倉敷基地全体の工事発注後の実施体制を示す<sup>2)</sup>。事業者である(独)石油天然ガス・金属鉱物資

源機構 (略称: JOGMEC) の下、土木工事および設備工事に関して同図に示す実施体制が組まれた (筆者は、この内の貯槽Ⅱ工事に携わった)。

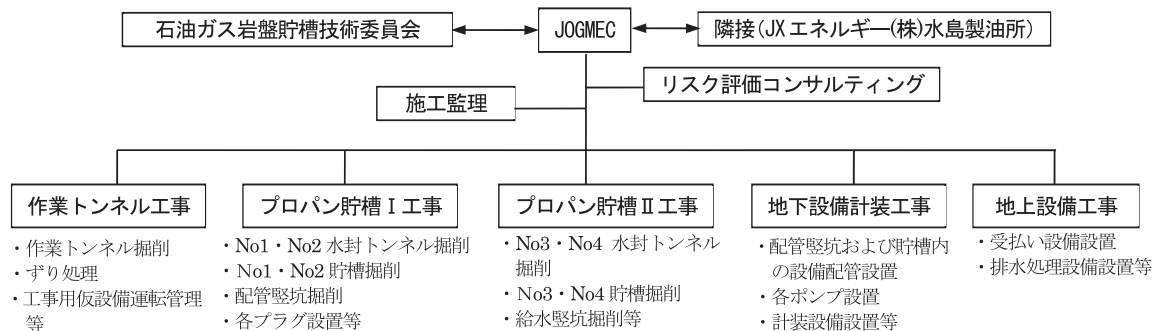
## 3. 地質概要

岡山県を含む瀬戸内海一帯は、日本の地質帯区分において西南日本内帯に位置し、基盤岩として領家変成帯に属する中生代白亜紀～新生代古第三紀の花崗岩類および火山岩類 (当基地周辺では流紋岩) が広く分布している。

当基地周辺の代表的な地質断面図および地質層序を図—5および表—1に示す。干拓・埋立地の下部では、EL. -70 m 程度を境に新第三紀鮮新世～第四紀完新世の堆積層と中生代白亜紀の花崗岩が不整合に接している。上位の堆積層は、上から埋土層、Ⅰ層 (沖積層)、Ⅱ層 (礫層)、Ⅲ層 (泥岩・砂岩層)、Ⅳ層 (砂岩層) に区分される。その下の花崗岩は、風化の程度から、風化部、漸移部、新鮮部に区分され、新鮮部は概ね EL. -120 m 以深に分布する<sup>3)</sup>。新鮮部の平均透水係数は、約  $3.5 \times 10^{-6}$  cm/s であるが、花崗岩の表層は風化が進んでおり、堆積層から花崗岩風化部までの透水性は、相対的に高い。



図—5 倉敷基地の地質断面図 (文献7) の同図に加筆



図—4 倉敷基地の建設工実施体制 (文献2) を基に作成

表-1 倉敷基地の地質層序<sup>3)</sup>

| 時代  |                   | 地層名        |                                                            | 地質状況                                                                    |
|-----|-------------------|------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 新生代 | 完新世<br>第四紀<br>更新世 | 未固結<br>堆積物 | 埋土                                                         | 砂・礫を主体とする                                                               |
|     |                   |            | 沖積層                                                        | I層<br>埋立前の海岸・海底面堆積物<br>軟弱なシルトを主体とし、砂層を挟在する                              |
|     |                   |            | 礫層                                                         | II層<br>未固結～半固結状の円～亜円礫<br>礫種は流紋岩類、花崗岩、チャートなど<br>層厚は25～30m                |
|     |                   | 泥岩・砂岩層     | III層<br>半固結～軟岩状<br>東部の陸側を除いて、ほぼ調査地全域に分布<br>特徴的な火山灰を挟む      |                                                                         |
|     | 新第三紀<br>鮮新世       | 砂岩層        | IV層<br>半固結～軟岩状の砂岩～細礫岩<br>西部から南部に分布する<br>III層との境界付近に、火山灰を挟む |                                                                         |
| 中生代 | 白亜紀               | 花崗岩類       | 風化部                                                        | いわゆるマサ状の強風化岩から、軟質化の著しい風化岩                                               |
|     |                   |            | 漸移部                                                        | 風化花崗岩と新鮮岩の中間部で、<br>軟質部と硬質部が混在、または中間的な硬さの部分                              |
|     |                   |            | 新鮮部                                                        | 砂優白色粗粒黒雲母-角閃石花崗岩で調査地の基盤<br>新鮮岩基盤をなす。アブライト、石英閃長岩、黒色<br>斑状岩、ヒン岩等の貫入岩が見られる |

EL. -160 ～ -184 m の深度に配置された貯槽の周辺岩盤は、花崗岩新鮮部の被りが概ね 40 m と薄い  
ため、割れ目が発達しており、風化部からの水みちとなり得る透水性の高い割れ目も存在した。水封トンネル  
および岩盤貯槽においては、グラウトによる湧水抑制  
対策（後述）を実施したが、その際にはこれらの空洞  
の設置深度相当の水圧が作用することに加え、透水性  
の高い割れ目が存在することを考慮する必要があった。

#### 4. プロジェクトの技術的特徴

水封式地下岩盤貯槽が気密・液密性を確保するた  
めに貯槽掘削に先立って、貯槽を取り囲むように水平お  
よび縦の水封ボーリング孔を配置して水封水を加圧給  
水すると共に、貯槽周囲にグラウトによる低透水の改  
良体を構築し、掘削に伴う周辺岩盤の地下水压低下を  
抑制した。また、貯槽の周辺岩盤に間隙水压計を配置  
し、グラウト改良区間を掘削した後の地下水压が所定

の水圧以上の値であるかどうか常に確認できるように  
した(図-5)。以下に、当プロジェクトの特徴を記す。

##### (1) 水封カーテンの構築

水封水が供給された水封ボーリング孔群を水封カー  
テンと称す。水平と縦のボーリング孔からなる水封  
カーテンは、原則として岩盤の卓越割れ目に交差する  
方向に 10 m 間隔に設置した。ただし、貯槽掘削の際  
に、地下水压の計測と、シャットイン試験<sup>4)</sup>（水封ボー  
リング孔単孔への給水を停止し、停止後の水压低下量  
を測定する試験）を貯槽掘削前、アーチ掘削後および  
ベンチ掘削後のステップ毎に実施し、それらの結果に  
応じて、適宜、水封ボーリングを追加した(図-6)。  
すなわち、水封カーテン内外の水压計測結果とステッ  
プ毎のシャットイン試験結果から水压場の適正さを確  
認すると共に必要な対策を講じ、貯槽の気密・液密性  
確保に努めた。なお、水压場の適正さは、掘削時の調  
査結果を反映した水理地質モデルによる 3 次元地下水  
解析を実施し、計測結果と解析結果を比較することに  
よって判断した<sup>5)</sup>。

貯槽掘削完了後には、貯槽内が大気圧状態のまま  
で水封トンネルを水没させ（水没時の水封トンネル内水  
圧 1.225 MPa、水封ボーリング孔内水圧 1.35 MPa、作  
業トンネル・給水堅坑・配管堅坑の水没水位 EL.-  
15 m の状態で）水封昇圧試験を実施し、貯槽周りの  
水压場が所定の圧力を保持していることを確認した。  
その後、気密試験を実施して、気密試験時の地下水挙  
動の実測データと 3 次元地下水解析の結果から水封  
カーテンの仕上がり状況を確認した<sup>5)</sup>。

水封水は、地上設備で工業用水を膜ろ過処理したも  
のである<sup>6)</sup>。貯槽掘削中は、これを送水管によって水  
封ボーリング孔に供給していた。貯槽掘削完了後（水

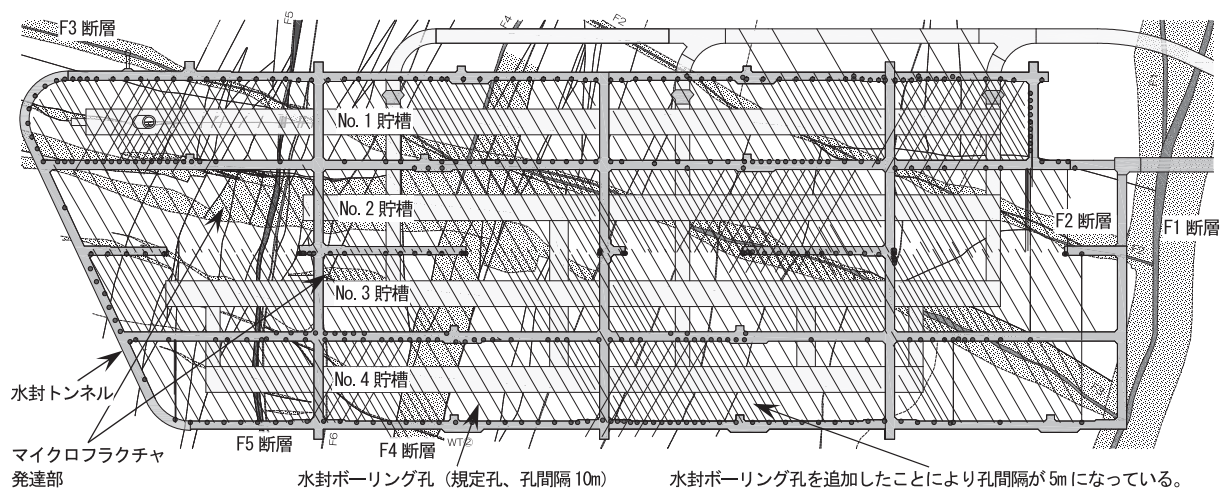


図-6 水封ボーリング孔の最終配置平面図（文献 5）の同図に加筆）



封トンネルを水没させる前)には、リターン管を設けて地上に水封水を戻す循環式給水システムに改め、水封ボーリング孔の目詰り防止対策を講じた。

## (2) グラウトによる湧水抑制

貯槽掘削によって過大な湧水を生じると、周辺岩盤の地下水圧低下を招くため、上記の水封カーテン構築のみならず、貯槽周囲にグラウトによる低透水の改良体を構築するようにした。これは、空洞周りに周辺岩盤よりも相対的に低透水の改良体を構築すると、改良体外側の水圧が上昇するためである。また、グラウトは貯槽湧水量を設計湧水量 ( $312 \text{ m}^3/\text{h}$ ) 以下に収めるためにも必要であった。このように、周辺地下水圧の低下抑制と貯槽湧水量抑制を目的として貯槽の全周にわたるグラウトを実施した。

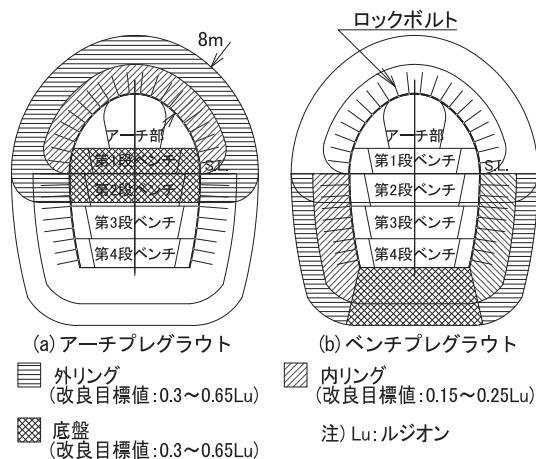
グラウトは、貯槽のアーチ部およびベンチ部を多段掘削する前に、発破およびロックボルト打設の影響を考慮して貯槽の周囲 8 m の範囲を事前に改良するプレグラウト方式を主とした<sup>7)</sup>。この範囲内の改良目標値は、貯槽掘削時から操業後の水封機能確保を考慮して、 $0.15 \sim 0.65$  ルジオン ( $1 \text{ ルジオン} \div 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ) に設定した(図—7)。これは、ダム工事のカーテングラウトで通常採用されている目標値の約 1/10 程度に相当する。

改良範囲内を内リング・外リングという 2 リングに分けた(図—7～8)のは、外側を先に改良することによって、貯槽壁面近傍の内側の改良効率を向上させることを図ったためである。

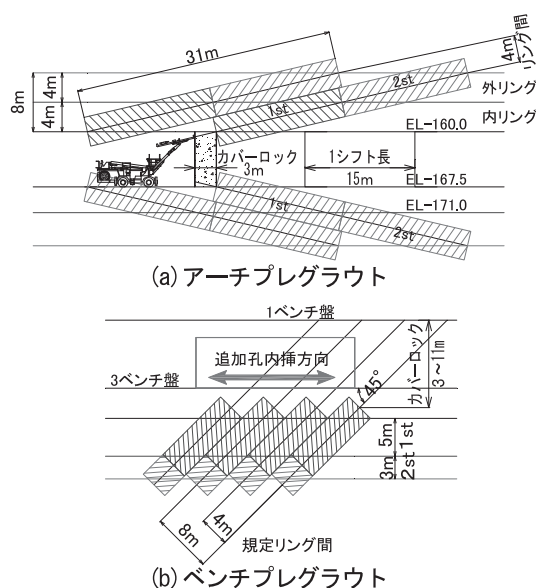
プレグラウト方式としたのは、対象岩盤に対して比較的高い注入圧力を加えることができるためである。実際に注入範囲を掘削した後は、掘削区間の湧水量および周辺岩盤の地下水圧を計測すると共に、その結果に地質情報を加えてデータを分析・評価し、対策が必要な場合、湧水箇所の壁面から周辺岩盤に対してポストグラウトを実施した。また、これらのグラウト結果を次ステップの施工方法や改良目標値に反映させた。

特に断層交差部や非常に微細な割れ目から成るマイクロフラクチャ発達部においては、改良効率を高めるためにグラウト孔の配置に当って割れ目の方向性を考慮した。注入材料には基本的に超微粒子セメントを用いたが、セメントグラウトによる透水性改良効率が極めて低い一部のマイクロフラクチャ発達部においては、コロイダルシルカを注入主材とした溶液型グラウトを用いた<sup>7), 8)</sup>。

以上のグラウト施工の結果、掘削完了後の水封昇圧



図—7 プレグラウトの改良範囲と目標値<sup>7)</sup>



図—8 プレグラウト孔配置側面図<sup>7)</sup>

試験においても周辺岩盤の地下水圧が所定の値以上、また貯槽湧水量が設計湧水量以下であることを確認することができた。

## (3) 地下水圧の管理

水封式地下岩盤貯槽の施工に当っては、掘削の途上から周辺に所定の地下水圧を確保する必要があるため、貯槽周辺に網羅的に計 174 点の計測点を設けて地下水圧を監視すると共に、地下水圧と密接に関係する貯槽湧水量を計測した<sup>5)</sup>。施工中は、これらの計測データと調査によって得られたデータを分析・評価しながら工事を進め、3次元地下水解析によって定めた所定の圧力に抵触する可能性のある場合には、水封ボーリング孔の追加(前述)等の対策を講じた。

地下水解析を行うに当っては、複数の施工段階における地下水挙動(水圧分布、湧水量)を再現できる水理地質構造モデルを構築する必要がある。岩盤の透水

性の評価が解析の精度を左右するため、調査データから不均質な岩盤に対してばらつきのある透水係数の空間分布を作成し、また、断層などの比較的大きな水みちに対しては透水係数の連続性を確保したモデル化を図った<sup>5)</sup>。

気密試験の前には、水封昇圧試験までの地下水挙動を分析して水理地質モデルを修正し、気密試験時の地下水圧分布を予測した。また、解析によって得られた貯槽壁面上の動水勾配が、以下に示す貯槽の気密・液密条件を満足することを確認した。

- a. 気密条件：貯槽天端（気相部）での鉛直方向動水勾配（ $I_v$ ）が、次の条件を満たすこと。 $I_v \geq 0.5$
- b. 液密条件：貯槽壁面（液相部）での法線方向動水勾配（ $I_n$ ）が、次の条件を満たすこと。 $I_n \geq 0$

なお、操業後のLPG受入完了時には、貯槽体積の97%が液相、3%が気相となる予定である。

#### (4) 水封水圧下における貯槽掘削

周辺岩盤に所定の水圧場を保持すると共に岩盤貯槽の湧水量を抑制するために、水封水圧が作用している状態で、貯槽の周囲を前述のようにグラウト改良しながら、NATMによる貯槽の多段掘削を実施した（写真—1～2）。



写真—1 貯槽アーチ部の掘削状況



写真—2 貯槽掘削完了後の状況（No.3 貯槽）

所定の水圧場を保持したまま掘削を続けるため、万が一、高透水の水みちに対するグラウトが十分でなかった場合、吹付けコンクリート背面にクラックを発生させるような高い水圧が直接作用しないとも限らない。この点に注意して断層交差部やマイクロフラクチャ発達部においては、貯槽空洞の力学的安定性の観点から解析を行い<sup>9)、10)</sup>、水封水圧が最大に上昇した場合に備えて高耐力ロックボルトと鋼繊維補強吹付けコンクリートを施工する対策を施した<sup>9)</sup>。これらの領域では、内空変位・天端沈下計測だけでなく、ロックボルト軸力・吹付けコンクリート応力等の計測を併せて実施した。

貯槽アーチ部では、切羽前方にプレグラウトを施した後に、基本的に15 m区間を掘削する（図—8（a））というサイクルを繰り返した。また、ベンチ部ではプレグラウトを実施した後にベンチカットを行った。グラウトを実施しながらの貯槽掘削であったため、常に工程遅延要素が付きまとったが、グラウトと掘削の併行作業が可能な場合には、それが成立つようにし、工程確保に努めた<sup>11)</sup>。

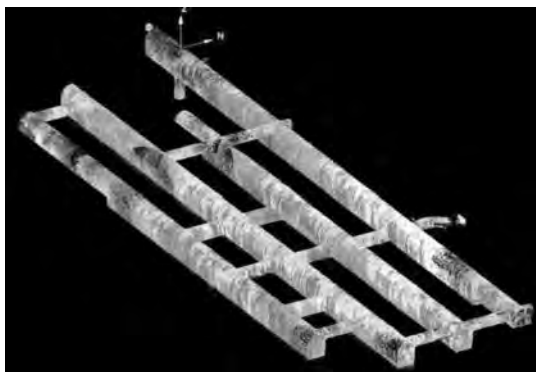
貯槽掘削完了後は、貯槽内が大気圧状態のままで水封昇圧試験を実施し、外水圧が最大となった場合にも貯槽空洞が力学的に安定していることを確認した。

#### (5) 気密性の立証

貯槽につながる作業トンネル・配管堅坑と貯槽との間にプラグコンクリートを施工し、それらのトンネルおよび堅坑を水没させた後に、貯槽の気密性を確認する気密試験を実施した。気密試験は、貯槽内に加圧空気を送気して設計圧以上の圧力（960 kPa）にまで高め、送気バルブを閉じた後に一定時間（72時間）放置し、その間の漏洩に起因する圧力低下がないことを確認するものであった。

気密試験時には、貯槽内空気の温度が周辺岩盤への放熱によって、また質量が加圧空気の湧水への溶解によって変化すると共に貯槽の気相体積も湧水による底水排水槽内の水位変動（排水ポンプの間欠運転）によって変化するため、貯槽内空気の圧力は一定にはならない。したがって、これらの圧力変動要因を考慮し、気体の状態方程式やヘンリーの法則等を用いて圧力の計測結果を補正して評価する必要がある<sup>12)</sup>。補正計算においては、できるだけ正確な貯槽容積が必要であったため、水封昇圧試験以降から貯槽閉塞までの間に3Dレーザースキャナを用いて貯槽容積を計測した（図—9）。

試験に当っては、計器配置や計測精度が気密性の評



図—9 3D レーザースキャナによる貯槽形状取得結果

価に多大な影響を及ぼすことが予想されたため、計器の選定から現場での設置に至るまで、現場計測での精度実現のための机上検討や事前確認試験を重ねた<sup>13)</sup>。それらを踏まえて計器設置に関する基準を作成した上で計器を設置した結果、全ての計器の精度が要求精度を満足した状態で試験に臨むことができた。

気密試験においては、72時間経過後の温度変化等を考慮した補正圧力と試験開始時の貯槽内圧力との差が十分に小さいことから、漏洩に起因する圧力低下は認められず、高圧ガス保安協会によって合格と判定された。

## 5. おわりに

本工事では、貯槽掘削に先立って水封ボーリング孔を配置して水封システムを稼働させると共に、貯槽の周囲にグラウトを実施した。これによって、地下水压や湧水量を制御しながら掘削を進め、地下水挙動の管理に努めてきた。

また、貯槽掘削完了後に実施した水封昇圧試験においては、外水压最大時に貯槽の湧水量が設計値以下であることおよび貯槽空洞が安定であることを確認し、その後に実施した気密試験では、地下水压が貯槽の内圧よりも高く保持されており、貯槽空洞が気密性を確

保していることを確認した。本工事が今後の参考になれば幸いである。

J C M A

### 《参考文献》

- 1) 前島俊雄：我が国初のLPG地下岩盤貯槽の建設，土木技術，Vol.67，No.11，pp.103-108，2012.
- 2) ㈱石油天然ガス・金属鉱物資源機構：倉敷国家石油ガス備蓄基地工事記録誌，pp.3-3～3-5，2013.
- 3) 財団法人エンジニアリング振興協会・エルピーガス振興センター共同事業体：石油ガス国家備蓄基地基本計画調査報告書（倉敷計画地点），Vol.7/9，p.22，1999.
- 4) 下茂ほか：水封ボーリングを用いたLPG貯蔵空洞周辺の水封機能確認方法，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.55-60，2008.
- 5) 藤井ほか：倉敷基地LPG岩盤貯槽における水封カーテンの構築と気密試験時の地下水挙動評価について，第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.131-136，2014.
- 6) 手塚ほか：水封式LPG岩盤備蓄基地における水封水の水質管理—倉敷国家石油ガス備蓄基地（貯槽工事その6）—，土木学会第68回年次学術講演会概要集，VI-205，2013.
- 7) 小林ほか：倉敷基地LPG岩盤貯槽における高水压下のグラウト施工実績と改良効果の評価について，第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.125-130，2014.
- 8) 小林ほか：倉敷LPG貯槽建設工事における溶液型グラウトによる止水対策（その1）—溶液型グラウトのマイクロフラクチャへの注入計画と実績—，土木学会第68回年次学術講演会概要集，VI-194，2013.
- 9) 菊井ほか：倉敷基地水封式LPG岩盤貯槽における空洞掘削時の岩盤挙動と空洞安定性評価について，第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.137-142，2014.
- 10) 矢部ほか：高水压下における水封式LPG岩盤貯槽の空洞安定性検討—倉敷国家石油ガス備蓄基地—，土木学会第68回年次学術講演会概要集，VI-202，2013.
- 11) 池田ほか：水封式岩盤貯槽の掘削実績—倉敷国家石油ガス備蓄基地—，土木学会第68回年次学術講演会概要集，VI-200，2013.
- 12) 前島ほか：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集，土木学会，pp.44-49，2014.
- 13) 手塚ほか：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，第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.50-55，2014.

### 【筆者紹介】

征矢 雅宏（そや まさひろ）  
清水建設㈱  
土木技術本部 地下空間統括部  
担当部長

