

液化石油ガス水封式岩盤貯蔵システムの概要について

Summary of a system of hydraulic contained underground cavern for liquefied petroleum gas storage

大竹 健司*・柴田 健志**・馬場 幸治郎***

Takeshi OTAKE, Kenji SHIBATA and Kojiro BABA

There are three kind of method in stockpiling of liquefied petroleum gas: above-ground refrigerated tank method, in-ground refrigerated tank method, hydraulic contained underground cavern method.

In hydraulic contained underground cavern method, we can hold the gas underground by the hydraulic pressure that is higher than the vapor pressure or the liquid pressure of the (liquefied) gas.

In Japan, there are no results of underground cavern. But in crude oil stockpile, three facilities that are designed with same idea had constructed and are under operation safely.

In this paper, we will explain about the theory and the feature of underground cavern and a design process of the hydraulic containment system of construction sites in Japan, Namikata in Ehime Prefecture and Kurashiki in Okayama Prefecture.

「key words」 liquefied petroleum gas, underground cavern, hydraulic containment system

1. はじめに

液化石油ガス（以下、「L Pガス」という。）の貯蔵は、常温高圧・低温常圧のいずれかの液化状態で行なわれ、貯槽の設置形態によって、地上式・地中式・地下式に分類される。

今回の国家備蓄基地の建設では、地上式低温常圧貯蔵方式と地下式常温高圧貯槽方式を採用しているが、前者については、我が国でも多数の建設実績を有している。一方、後者については、水封式岩盤貯槽方式を採用するが、この方式は、海外で70以上のL Pガス貯蔵基地、我が国でも3箇所の石油地下備蓄基地が安全に操業中であるものの、L Pガスとしては、我が国初の大規模な貯槽の建設となる。

建設に当たっては、岡山県倉敷市に同方式による小規模プラントを建設し、実証実験を経て、現在実基地の設計を行なっているところである。

本稿では、わが国初の水封式岩盤貯槽方式によるL Pガス備蓄基地建設となる波方・倉敷両基地における計画の概要、水封システムの原理と特徴、水封システムの要点、水封システムの構築プロセスについて述べる。

2. 基地計画概要

波方、倉敷両基地とも、地下に建設する貯蔵施設と地上に建設する貯蔵管理用の施設がある。表1に両基地の施設概要、図1、2に波方基地全体図、断面図、図3、4に倉敷基地全体図、断面図を示す。

「キーワード」 L Pガス、水封システム、岩盤貯槽

* 石油公団 備蓄業務部 調査役

** 日本液化石油ガス備蓄(株) 建設第二部 土木課 課長

*** 日本液化石油ガス備蓄(株) 建設第二部 土木課

表 1 波方基地、倉敷基地基本計画概要

基 地 名	波 方 基 地	倉 敷 基 地
位 置	愛媛県波方町宮崎地区	岡山県倉敷市水島地区
LP ガスの種類、容量	プロパン：30 万トン、ブタン：15 万トン	プロパン：4 0 万トン
貯 槽 寸 法	断面：幅 26m、高さ 30m 長さ：485m×2 列(プロパン) 430m×1 列(ブタン)	断面：幅 18m、高さ 22m 長さ：640m×4 列
貯 槽 位 置 (いずれも貯槽天端レベル)	標高 -150m (プロパン) 標高 -90m (ブタン)	標高 -160m
完 成 予 定 時 期	平成 2 0 年 1 2 月	平成 2 1 年 7 月

なお、これらの計画は、設計の結果によって変更もあり得る。

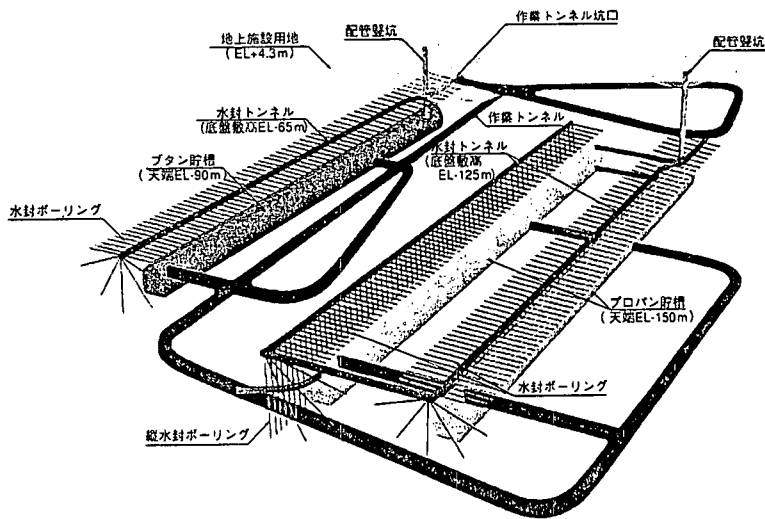


図 1 波方基地全体図

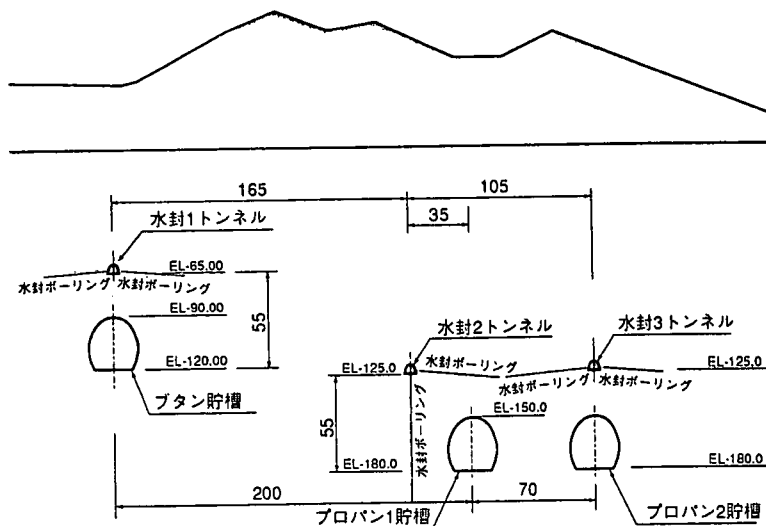


図 2 波方基地断面図

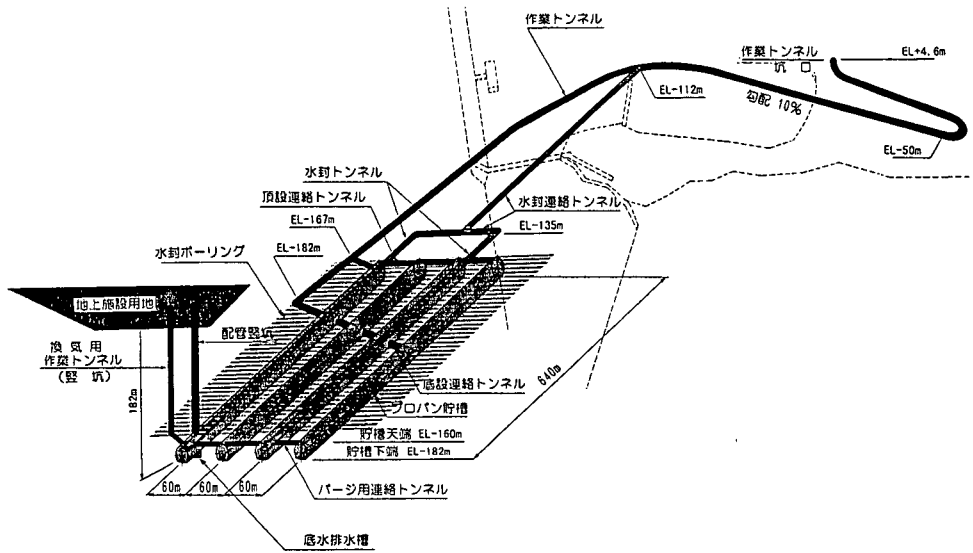


図3 倉敷基地全体図

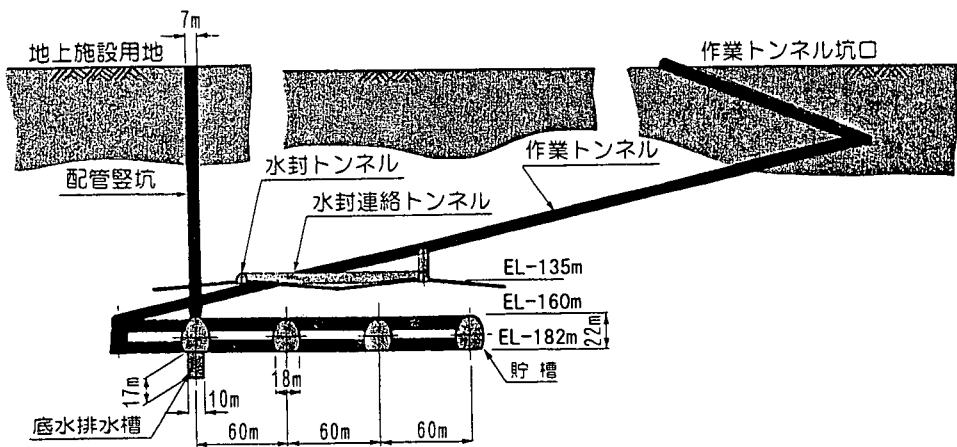


図4 倉敷基地断面図

波方基地は、15万トン of プタン貯槽及び30万トン of プロパン貯槽を建設し、倉敷基地は、40万トン of プロパン貯槽を建設する計画である。いずれの基地も、地下の貯槽上部には、地下水圧の安定化を図るために水封トンネルと水封ボーリング孔を設置し、人工的に水を供給するシステムとしている。

また、地上施設ヤードは、埋立てを行い造成し、各種貯蔵管理設備を設置する。

3. 水封システムの原理と特徴

水封式岩盤貯槽方式における水封とは、貯蔵液による液圧、ガス圧よりも大きい地下水圧を貯槽の周囲に作用させることにより液密、気密構造を形成する機能であり、地下水の供給方式の違いにより、

- ①自然水封方式
- ②人工水封方式

の2通りの方法がある。自然水封方式とは、岩盤内の自然地下水を貯槽内に流入させることによりLPガスを封じ込めるシステムである。一方、人工水封方式とは、貯槽周囲に設置された水封トンネル等の水封水供給設

備を介して人工的に水を供給するシステムであり、波方・倉敷両基地ともこの人工水封方式を採用することとしている。水封システムの概念図を図5に示す。

人工水封システムは、水封トンネルとトンネルから一定間隔に設置する水封ボーリング孔で構成されており、これらは、貯槽の液密、気密構造を確保するのに必要な水压を保持したウォーターカーテンを形成させる役割を持つ。ウォーターカーテンは水封ボーリングの方向により

①水平ウォーターカーテン

②鉛直ウォーターカーテン

に分けられる。水平ウォーターカーテンは主として貯槽全体に水封水を供給するために設けられるものであり、鉛直ウォーターカーテンは貯槽間相互の圧力差によって生ずるLPガスの移流あるいは異種ガス間の混合を防ぐために設けられるものである。

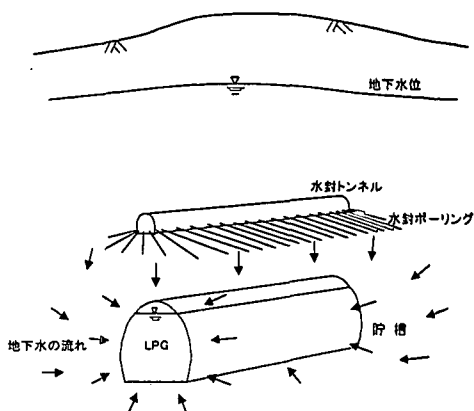


図5 水封システム概念図

4. LPガス貯蔵における水封システムの要点

水封機能を安定化させるためには以下の点について留意しなければならない。

(1) 地下水位の確保

水封システムの原理上、LPガスの漏洩を防止するためには、貯槽の上方及び周囲において限界地下水位以上の地下水位が確保されていなければならない。ここで、限界地下水位とは、貯槽内のLPガスの漏洩を防止するため、貯槽の上方及び周囲に保たなければならない最低の水位であり、限界地下水位と貯槽内壁の最上部はある一定の距離Hwが確保されていなければならない。ここで、このHwは以下のとおり表わされる。

$$Hw \geq 100 \times P$$

ここで、Hw：距離 (m)

P：貯槽圧力 (MPa・G)

操業時においては、限界地下水位以上に水位が維持されることが設計上の前提であり、確実に地下水が供給され、地下水位が安定することが重要である。

(2) 貯槽周辺の地下水压の確保

前述の(1)で示した限界地下水位の確保は、水封機能上の必要条件ではあるが十分条件ではない。水封機能として直接的に重要なものは地下水压であり、貯槽周辺に高透水層が存在する場合には局部的に地下水压が低下し、貯槽に向かう動水勾配を与える地下水压が確保されない可能性がある。この局所的な地下水压の低下は、貯槽の掘削に伴う貯槽周辺の不飽和域の発生によるものと考えられており、その発生を未然に防止もしくは軽減するとともに、発生した場合にはそれを後々残さないための適切な処置が重要である。

貯槽掘削に伴う不飽和域の形態は、図6に示すとおり、以下のように分類できる。

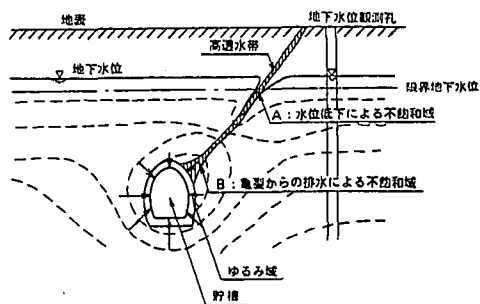


図6 貯槽周辺地下水压分布(高透水帯部)

A：貯槽への湧水量が地表面からの地下水供給量を上回るため地下水位の確保ができないゾーン。

水みちとなる高透水帯周辺で水位低下量、水位低下速度が大きい。

B：貯槽掘削により壁面に交差する高透水帯からの湧水量が上部からの地下水の流入量を上回る場合に、貯槽壁面から岩盤内部に向かって形成されるゾーン。

開口性の高透水亀裂に沿って生じやすい。

一般に A のゾーンは広域的な不飽和域、B のゾーンは局所的な不飽和域を形成するが、B のゾーンでも排水が継続すると貯槽上部に広範囲な不飽和域を形成する可能性がある。

L P ガス貯蔵の場合、貯蔵物の物性の違いにより貯蔵圧力が高くなることから、常圧貯蔵である石油備蓄と比較し、より大きい水封圧を得るため貯槽の設置位置が深くなる。従って、計画に当たり以下の特性を考慮する必要がある。

- ・貯槽設置位置が深いため、貯槽掘削時に大きな地下水压に伴う大量の湧水が発生する可能性が予想され、湧水発生に伴う地下水位の低下・貯槽周辺の不飽和化に留意する必要がある。
- ・貯槽周辺に高透水帯がある場合には地下水压低下による低ポテンシャル域が生じ、不飽和域が発生する可能性がある。

よって、L P ガス貯蔵における水封システムの構築にあたっては、貯槽周辺の不飽和域の発生をできるだけ抑え、貯槽周辺の必要地下水压を確保することに留意する必要がある。

5. 水封システムの構築プロセス

5.1 概要

水封システムの設計は、事前調査による各種基礎データに基づいて行われるが、貯槽設置予定範囲が均質な岩盤として分布していることは一般的には考えにくく、断層破碎帯、割れ目等が不規則に分布しているのが通常である。一方、ボーリング調査等を主体とした事前調査により把握できる情報には限界があり、事前設計段階では、このような不均質性、不規則性等を考慮したある程度の余裕を見込んだものとせざるを得ないのが現状である。従って、施工時には、掘削により得られる諸情報を設計に反映させつつ、事前調査では得られなかった諸状況、諸現象に対しの確実な対応、対策を講じて水封機能を確実なものとしていくことが重要となってくる。

すなわち、水封システムの確実な構築には、各施工段階を通じて綿密な情報化施工を行い、水封機能を常に保証していく必要があるとともに、最終段階に向けてこの保証の精度をより高めていくというプロセスを作っていくことが重要なポイントとなってくる。建設過程におけるこのような水封システムの構築プロセスの具体的な全体イメージを図 7 に示す。

同図は、建設の各施工段階における水封機能上の主要検討項目について、①調査・計測、②解析、③設計、④評価・対策、⑤点検・検査の各プロセスにおける対応の要点を示したものであり、各施工段階でこの①～⑤の検討プロセスのサイクルを回しながら確実な水封機能を構築していく流れを概念的に示している。

また、これを作業トンネルの掘削から貯槽掘削に至る全ての掘削に伴う諸情報の蓄積とその対応によって、より確実なものとしていく必要があるということを示している。

水封機能は、操業時における安定した水収支、安定した地下水位、必要水压・動水勾配を確保することを前提として保証されるものであり、全掘削期間を通じて、同図に示した検討・対応プロセスによってこれを確認・構築していく必要がある。

なお、②の解析は、岩盤状況、計測状況等により必要に応じて節目々で実施し、③の設計に反映させていくことを示している。また、⑤の点検・検査は、①～④のサイクルを回した結果を第 3 者的な立場から定期的にチェック、確認していくことを示しており、これは水封機能の保証プロセスの要として位置づけられるものである。

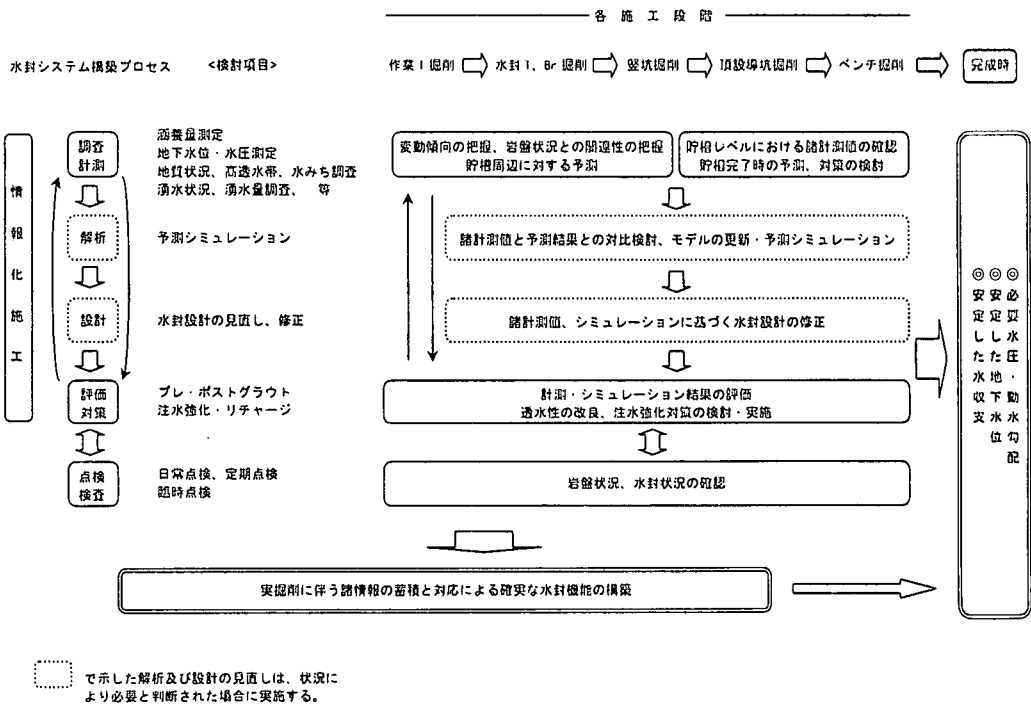


図7 水封システム構築プロセス全体概要図

5.2 事前調査設計段階における合理的配置に対する考え方

①地下水位の確保、②貯槽周辺の地下水圧の確保に対して設計段階で考慮する要因としては、貯槽配置等による人工的な条件からは以下のものが挙げられる。

- ・ 貯槽設置深さ
- ・ 貯槽離間距離
- ・ 水封トンネル配置（貯槽との間隔、レイアウト、断面寸法等）
- ・ 水封ボーリング配置（設置範囲、間隔、ボーリング径等）

また、自然条件からは、以下のものが挙げられる。

- ・ 高透水帯の存在
- ・ 地層等の地質構造上の影響要因

これらを考慮して人工水封設備が設計されることになるが、設計においては、既知境界条件の下で十分広い領域を考慮した岩盤水理モデルを用いた有限要素法などの浸透流解析により検討される。水封ボーリングの長さ、間隔等の諸元については、均質な岩盤を仮定した簡易設計法により検討される。

浸透流解析においては、貯槽及び人工水封設備という人工的な条件と、高透水帯の分布や地層構成などの自然条件の両者が考慮される。断層破砕帯などの高透水帯は、ボーリング調査、屈折法及び反射法弾性波探査や比抵抗探査などにより把握されるが、予測された高透水帯については、できる限りその地下水理特性を事前に把握しておくことが必要である。これらにより推定された高透水帯については、貯槽の配置計画においてできるだけ避けるものとするが、配置上避けられない場合や事前の調査では確認されなかった高透水帯については、次に述べる施工段階において、その地質状況、湧水状況について十分な調整・検討を行うとともに、必要に応じて対策工あるいは水封設備の見直し等を検討していくことになる。

5.3 施工段階における修正・追加に関するプロセス

施工段階では、日常の地質や湧水等の観察・計測及び地下水位や間隙水圧等の水理モニタリング等とともに、事前に推定できなかった水封機能に影響を与える高透水帯の把握に留意し、高透水帯の位置、連続性、方向性及び水理特性の把握に努め、確実な水封機能を確保できるよう必要に応じて対策工を検討していく必要がある。

また、この段階で得られた水理及び地質情報は、当初想定した工事完了時点における最終的な岩盤水理モデルに逐次反映させ、このモデルの構築により、完成時段階から操業段階での様々な事象を解釈していくことになる。更に、完成時段階においては、気密試験によって安全性が確保されていることを確認する必要がある。

① 原位置の亀裂状況

高透水帯は、断層破砕帯や亀裂集中帯、またはいくつかの透水性の大きな亀裂により形成される。作業トンネル、水封トンネル及び貯槽施工中の切羽観察等によって、このような高透水帯の方向、厚さ、連続性等の地質構造特性を把握し、貯槽空洞周辺における地質構造の予測により、グラウト等の対処法を事前に検討しておく必要がある。

② 地下水位、間隙水圧、湧水量の変化

作業トンネル、水封トンネル及び貯槽施工中の地下水位や間隙水圧等の計測管理によって、計測値と予測値との比較を行いながら、原因究明を行うとともにグラウト等の対処法を検討する必要がある。

湧水量は、作業トンネル、水封トンネル及び貯槽掘削それぞれの過程において計測管理される。地下水位等と同様、事前調査段階で設定された岩盤水理モデルが適切であるかどうかは各施工段階での湧水量と予測値との整合性から判断される。

③ 水封水供給量の変化

貯槽の掘削に際して、掘削に伴う貯槽空洞周辺の不飽和域の発生をできる限り抑制し、必要な地下水位を確保するために、水封ボーリングあるいは水封トンネルから水封水が供給される。事前調査段階で設定された水封機能が満足されているかどうかを確認するためには、各施工段階での給水量予測との整合性を水理モニタリングや水封ボーリング孔を利用した透水試験等から検討し、変化の要因を明確にすることが必要である。水封水供給量が大きく増加した場合には、空洞の掘削状況と対比検討するとともに、その原因が高透水帯等の水みちによるものであった場合には、原因となる水みちを特定し、グラウト等の対策を検討する必要がある。逆に大きな減少が認められた場合には、水封ボーリング孔の日詰まりによる可能性が考えられ、その原因の究明と共にボーリング孔の洗浄や追加等の対策を講じることを検討する必要がある。

6. おわりに

水封式岩盤貯槽の建設にあたっては、事前の調査とともに施工中の地質・水理状況等の把握に努め、現場状況の変化に応じた設計見直し・施工へのフィードバックを行なう、いわゆる、情報化施工によって初めて安全な水封システムを構築することができるものである。また、操業時の維持管理のために、これらのデータの蓄積による岩盤水理モデルを構築することも必要である。

このような認識のもとに、海外や石油地下備蓄基地の事例を参考にしつつ、我が国初の水封式岩盤貯槽の完成に向けて取り組んでいく所存である。

7. 参考文献

- 1) 石油公団・(財)エンジニアリング振興協会・(財)エルピーガス振興センター共同企業体：水封システムの要点―液化石油ガス地下岩盤貯槽方式の事前調査から操業までの重要ポイント―平成9年3月
- 2) 石油公団・(財)エンジニアリング振興協会：水封式地下岩盤貯槽における施工管理の基本的事項に関する検討業務報告書 平成12年3月
- 3) 高圧ガス保安協会：平成12年度 地下岩盤貯槽の技術詳細検討業務報告書 平成13年3月