

LNG低温岩盤貯蔵技術の実用化検討 - 次世代の岩盤貯蔵プロジェクト創出に向けて -

白鳥 英二^{1*}・西本 吉伸²・米山 一幸³・谷利 信明⁴・小原 伸高⁵・村岡 良樹⁶

¹一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目18-19)

²電源開発株式会社 土木建築部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

³清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

⁴鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8384 東京都港区赤坂6-5-11)

⁵大成建設株式会社 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1 新宿センタービル)

⁶千代田化工建設株式会社 (〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい4-6-2)

*E-mail: shiratori@ena.or.jp

天然ガスは今後も国内で需要の増加が見込まれる一次エネルギーである。しかし、国内使用量の9割以上を海外からの輸入に頼らざるを得ないのが現状であるのに加え、世界の天然ガス需要は新興国を中心に増加し続けており、日本国内での安定した天然ガス供給力の強化が望まれる状況にある。本報告では、天然ガスの供給力強化の方法の一つとして、岩盤空洞を用いた天然ガスの大規模貯蔵技術の適用性についての検討を行った成果のうち、貯槽の基本構造、貯槽の形状のバリエーション、及び実用化に向けた諸課題を整理した結果を報告する。

Key Words : LNG, refrigerated storage, membrane type, heater, drainage pipe, lined rock cavern

1. はじめに

今日、天然ガスの国内需要は増加しており、供給途絶に備えた貯蔵量の増加、価格安定のための在庫量確保、パイプラインネットワーク整備、等の対策により、天然ガスの国内在庫量を増加させることは重要である。

天然ガスは液化したLNGとしてタンカーで日本に輸送し、国内受入れ基地において地上タンクまたは地中タンクにより、低温液化状態で貯蔵されるのが一般的である。しかしながら、大規模な自然災害や環境影響の低減等を考慮すると、地下空間を利用した貯蔵技術も有効な方式であると考えられる。筆者らはLNG低温岩盤貯蔵技術の実用化についての検討を行ってきており、本報告はその検討結果を取りまとめたものである。

現状においてLNG低温貯蔵技術を適用したプラントは国内外に存在せず、研究段階にある技術である。この技術の要点は以下のとおりである。

- ・天然ガスを液化状態に保つためには貯蔵物をマイナス162℃以下に保持する必要があること、効率的な保冷構造を構築する必要があること。
- ・極めて低い温度の貯蔵物を貯めることにより、貯槽

構造や周辺岩盤の温度応力が発生するため、温度応力の影響を極力低減できるような構造とすること。

- ・周辺岩盤に地下水が存在する場合には、凍結の影響が生じる可能性があるため、その評価及び対策を考慮すること。

低温岩盤貯蔵技術については、図-1に示すように国内外においていくつかの検討事例があり、凍結岩盤貯蔵方式、不飽和形成ライニング方式、ヒーター付ライニング方式などが提案されている。

凍結岩盤貯蔵方式¹⁾は、吹付けコンクリートで仕上げられた岩盤空洞に直接LNGを貯蔵する技術であり、国外では液化プロパン等のやや沸点の高い液化石油ガス貯蔵に適用されている事例があり、構造的にもシンプルな方式である。しかしLNGの場合はさらに沸点が低いため、周辺岩盤が収縮して新たに亀裂が生じ、気密性の保持が難しくなるという課題がある。

不飽和形成ライニング方式²⁾は、コンクリートライニングにメンブレンを内張りした貯槽にLNGを貯蔵するものであるが、周辺地下水が凍結することによる凍上圧による影響を排除するために、空洞周辺の地下水を強制的

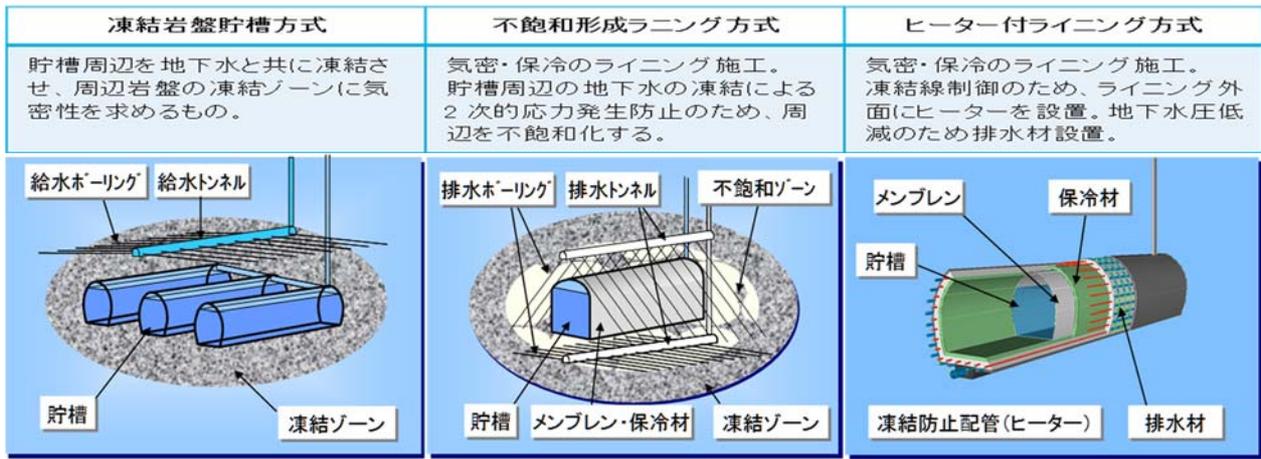


図-1 国内外で提案されている低温岩盤貯蔵方式の例

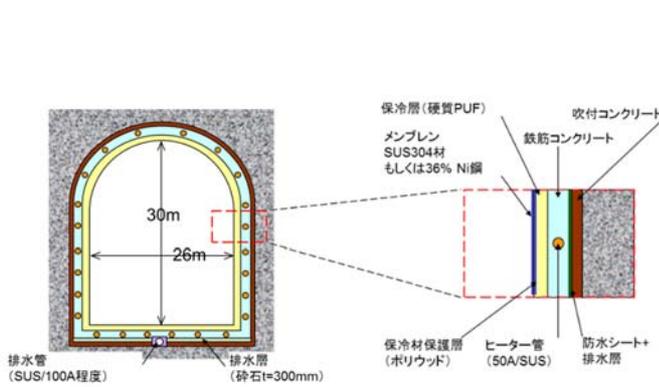


図-2 ライニング構造の概要

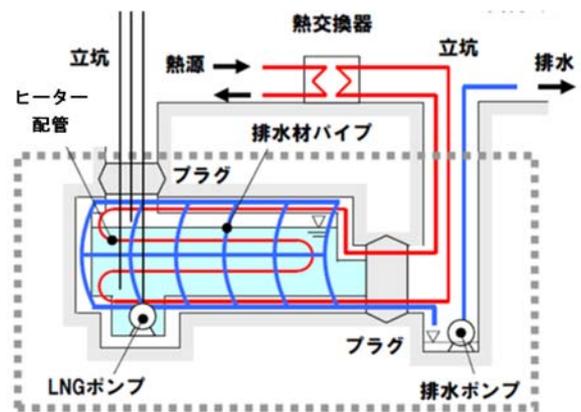


図-3 ライニングヒーター構造の概要

に排水し不飽和域を形成させる設備を付加した構造である。岩盤内の不飽和域形成の制御や、凍結影響の定量的評価が難しいことから、確実性の点で課題がある技術である。

以上の2方式に対し、ヒーター付ライニング方式³⁴⁾は、不飽和形成ライニング方式の不確実性を解消するために、コンクリートライニング内にブラインヒーターも設置し、凍結範囲をライニング内に留める構造としたものである。3方式の中では技術的には最も確実な方式と考えられるが、ライニング構造が複雑であり経済性の点では劣る方式と考えられる。

以上の特長を踏まえ、本報告においては、技術的な成立性が高い方式を選定し、ヒーター付ライニング方式を対象に検討を行った。

2. 基本構造

ヒーター付ライニング方式は、図-2に示すような「メンブレン+断熱材(保冷材)+覆工コンクリート」の構造

により、貯槽気密性を確保する構造である。ヒーターには、約10~15°Cのブラインを循環させる。これにより、凍結範囲をヒーターの内側に限定してコンクリート・岩盤の熱応力を緩和するとともに、貯槽付近の地下水の排水機能を維持して、貯槽外部の水圧をほぼゼロに低減する。貯槽形状は既往の石油備蓄岩盤タンクやLPG備蓄岩盤貯槽と同様の馬蹄型断面とし、鉄筋コンクリートのライニング中にヒーター管を、ライニング外面には地下水排出用の排水層を設置する。メンブレンは地中タンクで実績のあるコルゲーシオン付メンブレン(SUS304)、またはインバー材(36%Ni鋼)の適用を想定した。常温から低温まで大きな温度変化に対応するために、地中タンク方式ではコルゲーシオン付メンブレンが利用されるが、低温岩盤貯蔵方式ではさらに大きな液圧が作用する可能性があり、コルゲーシオンの液圧に対する耐力が不足する懸念がある。熱膨張係数の小さなインバー材を利用できれば、コルゲーシオン無しのメンブレンを使うことができ液圧へのメンブレンの耐圧性を維持しやすくなる。

ライニングのヒーティングシステムは、図-3に示す通り、海水などの外部熱源により熱交換器を介してブ

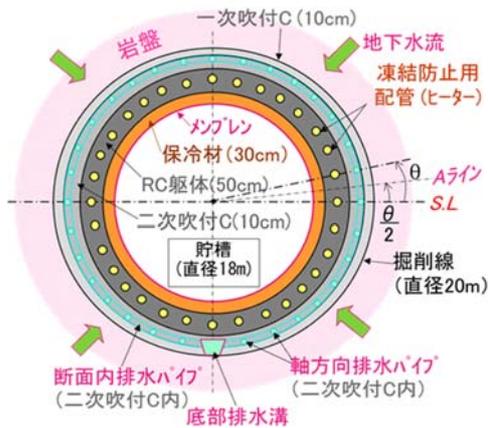


図-4 ヒーター付きライニング構造の温度応力解析の概念

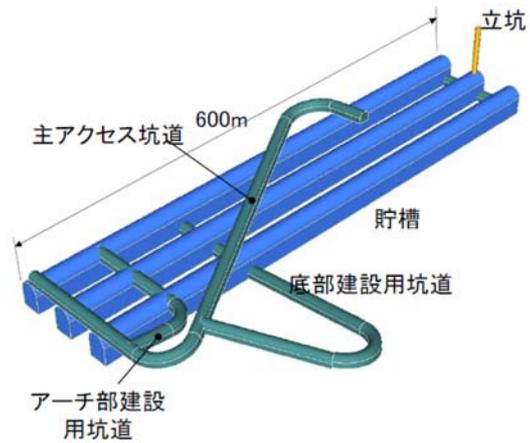


図-5 地下構造物の全体配置案

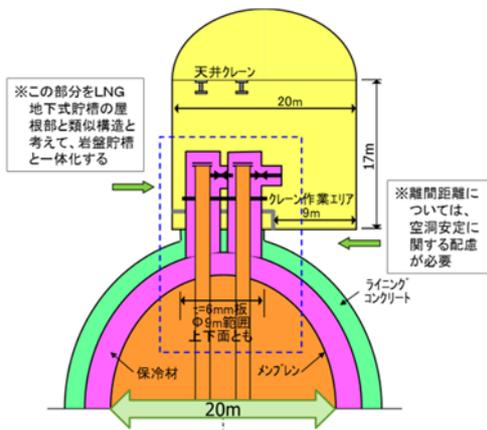


図-6 貯槽配管の貫通部概念

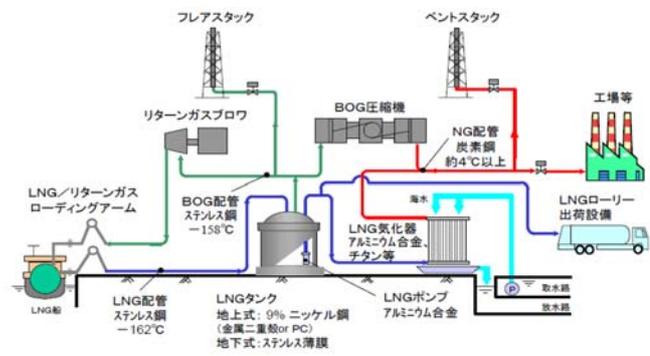


図-7 地上設備の基本構成

インを10~15℃程度に温め、ヒーター（凍結防止用配管）にブラインを循環して使用する方式とした。

本方式の特長は、ヒーターにより凍結線をライニング内部に留めることである。そのためライニング内の熱応力やヒーターによる入熱量の評価が重要になる。それらについて概略検討に用いたモデルを図-4に示す。これにより発生応力が許容される範囲にあり、ヒーターからの入熱量も既往の地中タンクとほぼ同程度となることを確認した。

3. ケーススタディ

(1) 地下構造物

LNG低温岩盤貯蔵の概略経済性評価を行うために、概念的な構造物配置検討を行った。

a) 全体配置

貯蔵規模は、地下利用のスケールメリットを確認するため大規模なものを前提とした。国内最大級の地中タンクは20~25万kLであるが、本報告では30万、60万、100

万kLの3ケースとした。

設置深度は地表から比較的良好な岩盤が分布する条件を仮定し土被りを60mとし、貯槽形状は既往実績を考慮し横型貯槽で高さ30mの空洞とした。

その他付属構造物としてアクセストンネル、貯槽のガス受払のためのサービス空洞等が必要となる。以上により図-5に示す構造物配置を想定した。地下貯槽が浅い深度にある場合には直上の地上まで堅坑で引出すことが考えられるが、地上から地下貯槽まではアクセストンネルを設置する想定であるため、そのアクセストンネルを利用したガス受払ラインを設ける方針とした。

b) 貯槽配管の貫通部

LNG貯槽からアクセストンネルまでの貫通配管部分の構造については、図-6に示すように既存の地中タンクと同様の鋼板屋根を天端に設け接続する方式とした。

貫通部上部ではポンプ、配管類の設置及びメンテナンスのために、クレーン作業エリアの確保が必要である。配管はメンテナンス作業空間を確保するため、高さ方向で離隔を確保する必要がある、やや大きな空間が必要になるものと考えた。

(2) 地上設備

LNG低温岩盤貯蔵基地においても、既往のLNG基地と同様な地上設備が必要であるとした。図-7に地上設備の基本構成を示す。主要設備は以下の通りである。

a) BOG再液化設備

低温LNGにおいては、常に外部からの入熱により沸騰が生じ気化ガス（BOG：boil off gas）が発生する。長期間にわたりLNGを貯蔵するためには、BOGを窒素冷媒とコンプレッサーを用い再液化させる必要がありBOG再液化設備が必要となる。

b) LNG気化器

低温LNGを気体で払い出すために気化器が必要になる。オープンラック式、サブマージドコンバッション方式の2系統を装備することが多い。

c) 受払設備

低温LNGの荷揚げや払い出しのための設備が必要になる。

(3) コスト検討

前節に述べた全体構成を考慮し、備蓄基地のように長期間にわたりLNGを貯蔵する設備構成に基づき工事費算定を行った。工事費は貯蔵容量に応じ、土木工事費、気密材保冷材工事費、設備工事費に分けて算定した。貯槽容量100万kLの場合の各工事要素の構成を図-8に示す。また貯槽容量100万kLの建設コストを100%としたときの工事費の割合を図-9に示す。

この結果から、大まかに土木工事とメンブレン保冷材工事費がそれぞれ25%程度、設備工事が50%程度を占めることがわかる。設備工事費については、LNGを長期貯蔵する前提で設備構成を設定しているため、操業条件を変えることにより設備工事費用は削減可能となる。

4. 縦型貯槽の可能性

前節までのケーススタディは横型貯槽を基本としたものであるが、新しい発想として縦型貯槽の適用の可能性について考察した。既往の大規模燃料貯蔵空洞は全て横型であり、大規模な縦型の空洞の事例は少なく、一部の物理実験場の事例がある程度である。

貯槽容量100万kLの場合の縦型貯槽のイメージを図-10に示す。

縦型にすることのメリットを列挙すると以下のとおりとなる。

- ・縦型のため円筒形状とするため、断面形状が円形となり貯槽の比表面積を小さくすることができる。このため、メンブレン、ライニング、及びヒーティングシ

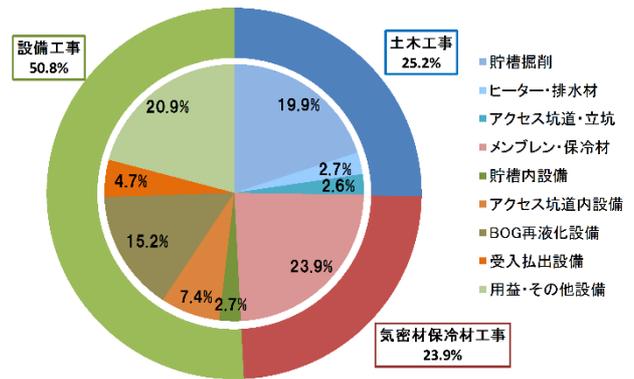


図-8 工事費試算結果

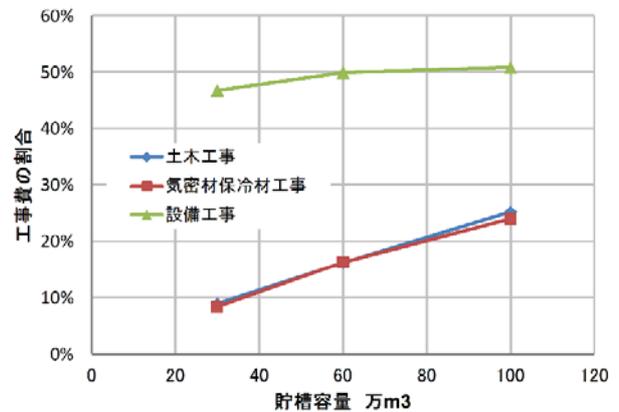


図-9 貯槽容量毎の工事費割合

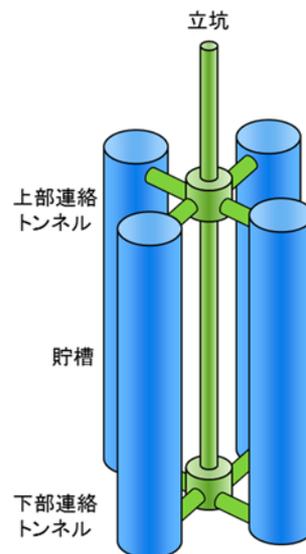


図-10 縦型貯槽の可能性

ステム等の表面積に依存する工種の施工数量を相対的に削減できることから、コストの削減効果を期待できる。

- ・横型では複数貯槽を設ける場合には同じレベルに平面

的に配置することとなるが、縦型貯槽では図-10に示すように貯槽同士を立体的に配置することができる。立体配置ができれば貯槽群としての入熱量を低減できる可能性があり、入熱量を小さくできる可能性があり、運転費用の削減効果を期待できる。

- 必要な用地面積（地上投影面積）が少なく、立地地点の選定において、相対的に狭い範囲を対象に選定を行うことができる。花崗岩帯のように地下深部から貫入し分布する岩体においては縦型配置の方が、配置しやすいと考えられる。
- 同様な視点で、用地範囲が狭ければ、周辺環境に対する影響範囲も相対的に狭くなると考えられる。（揚水による地下水への影響範囲等）

他方、大規模縦型の岩盤空洞の施工については、施工事例がほとんど無いため、施工技術面での不確実性が高く、合理的な立坑施工技術の開発が必要である。

また縦方向に長い空洞においては、貯槽内面の液圧が高くなり、メンブレンの耐圧性が課題となる。既往の地中タンクの最大深度は60m程度であるが、それ以上の深さを有する縦型空洞になると従来まで経験のない大きな液圧がメンブレンに作用することとなり、メンブレン材料や構造の技術開発が必要となる。

5. まとめ

一連の検討により、ヒーター付ライニング方式でのLNG低温岩盤貯蔵の構想をまとめた。できるだけ既往技術を組み合わせ、比較的確実に貯蔵可能な方式について検討を行ってきたが、実用化のためには経済性の点ではまだ課題が残る結果となった。現状における主要な技術課題を以下に列挙する。

- メンブレン保冷構造として、高い液圧に耐えかつ保温性能を兼ね備えた材料・構造の開発
- ライニングの力学安定性に関連し、温度応力や凍結の影響に耐えられる材料・構造の検討及び凍結範囲の考

え方

- 合理的なヒーター構造の検討
- 施工技術として大規模空洞におけるライニングや気密構造の施工技術、縦型空洞の合理的な施工法

プロジェクト創出に向けては、事業的視点から、長期貯蔵型設備とするか流通型にするかで、BOG処理コストが大幅に異なるため利用形態を明確にする必要がある。

低温岩盤貯蔵技術のメリットを生かすためには、岩盤空洞を利用する視点と利用形態の関係から、適切な自然条件及び社会環境条件を満足する立地サイトを選定適用することが必要である。

将来的に実用化のためには、関係法令や技術基準等の整備も重要となろう。

謝辞：

本報告は、一般財団法人エンジニアリング協会地下利用研究センターにおけるエネルギー地下貯蔵検討会において取組んできた内容である。委員各位の多大なる協力により取りまとめを行うことができたものであり、ここに途中退任したメンバーも含め委員各位にあらためて謝意を表す。

参考文献

- 1) 石塚 与志雄, 木下 直人：破壊力学を用いたLPG岩盤内貯蔵空洞の亀裂進展解析に関する研究，土木学会論文集，No.388/III-8，pp.171-178，1987.
- 2) S.S. Cha, G.O. Bae, K.K. Lee：Evaluation of drainage system around a lined pilot cavern for underground cryogenic LNG storage. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, pp. 360-372, 2008.
- 3) 米山 一幸, 百田 博宣, 若林 成樹 [他]：液体燃料の低温岩盤貯蔵の成立性に関する解析検討，地下空間シンポジウム論文・報告集 12, 9-18, 2007-01
- 4) 百田 博宣, 米山 一幸, 風間 広志：メンブレン方式の新LNG低温岩盤貯蔵の成立性に対する解析検討，地下空間シンポジウム論文・報告集 13, 53-62, 2008-01

PRACTICAL STUDY OF UNDERGROUND REFRIGERATED STORAGE OF LNG
WITH LINED ROCK CAVERNS
- TOWARDS CREATION OF A NEW STORAGE PROJECT IN ROCK CAVERNS
FOR THE NEXT GENERATION -

Eiji SHIRATORI, Yoshinobu NISHIMOTO, Kazuyuki YONEYAMA, Nobuaki
TANIKAGA, Nobutaka OHARA and Yoshiki MURAOKA

Natural gas is one of the most important primary energy for Japan, which demand is expected to keep increasing. To survive severe competition with emerging countries whose demands are also increasing, further enhancement of storage capacity to obtain import flexibility is desired in Japan,

Under the situation, we have investigated the applicability of large-scale refrigerated storage technology of LNG with underground lined rock caverns. We will report the basic structure of the reservoir, and variations of the shapes, and points to be solved to realize them.