

液体燃料の低温岩盤貯蔵の成立性に 関する解析検討 ANALYTICAL STUDY FOR STABILITY OF UNDERGROUND REFRIGERATED STORAGE FOR LIQUEFIED GAS

米山 一幸¹・百田 博宣²・若林 成樹³・岡田 滋⁴

Kazuyuki YONEYAMA・Hironobu MOMOTA・Naruki WAKABAYASHI・Shigeru OKADA

The refrigerated storage in underground rock cavern is one of the feasible solutions to store large amount of liquefied gas (LNG, LPG, DME etc.) economically and safely. Some studies about the application of refrigerated storage to the Japanese rock condition are reported, however, proposed conditions are different from one another, and it is difficult to compare the criteria required for design of underground storages.

In this paper, heat conduction analysis and thermal stress analysis concerning refrigerated storage in lined/unlined rock cavern are conducted in the range from -25°C to -162°C storage temperature and from -40m to -80m cavern depth, and the criteria of temperature and depth are estimated. As the result of thermal stress analysis on unlined rock cavern, the cavern wall is damaged by tensile stress when storage temperature is less than -60°C or -80°C , and this indicate that LPG (-42°C) and DME (-25°C) can be stored in unlined cavern, while LNG (-162°C) can not. This result is consistent with all the past trials of LNG storage in unlined cavern at shallow depth have failed. Furthermore, as the result of thermal stress analysis on LNG storage in lined rock cavern, it is shown that the tensile stress around the cavern wall is relaxed and boil-off ratio of LNG is decreased when insulated, therefore the refrigerated storage of LNG in lined rock cavern may be feasible.

Key Words : *refrigerated storage, liquefied gas, unlined rock cavern, lined rock cavern, stability, boil-off*

1. はじめに

現在、エネルギーソースの多様化によるセキュリティ向上や環境負荷低減の面から、天然ガスの供給増加やDME（ジメチルエーテル）などの新燃料の導入が国の政策として進められている。これらの燃料の将来の広範な普及を想定した場合、緊急時対応やサプライチェーンの効率的運用などの点で、供給インフラとしての大規模貯蔵施設の整備が重要となる。ガス体燃料の貯蔵方法としては、常温下で高圧ガスや高圧液化して貯蔵する方法と、低温で液化した状態で貯蔵する方法があるが、天然ガスは現在ほとんどがLNGとして輸入されており、DMEも低温液化ガスとしての流通が検討されていることから、エネルギー効率面で有利な低温貯蔵方式が有力と考えられる。液化ガスの低温貯蔵については、LNGの地上タンクや地中タンクが実用化されており、主要な貯蔵施設として今後も建設が進められることが予想される。一方で、近年海外において地下の岩盤空洞を利用した低温貯蔵技術が注目されており、施設の経済性、安全性や環境性能の点で、今後

キーワード：低温貯蔵、液化燃料、凍結方式、メンブレン方式、安定性、ボイルオフ

¹ 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 副主任研究員

² フェロー会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 グループ長

³ 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員

⁴ フェロー会員 工修 清水建設(株) 土木技術本部 主査

我が国においても有望な技術の一つとなることが期待される。

低温岩盤貯蔵については、LPG（大気圧での沸点-42℃）の貯蔵施設が北欧などに建設されている¹⁾。これらの施設では、LPGは無覆工の岩盤空洞に直接貯蔵されており、周辺岩盤中の地下水が凍結して漏洩経路となる亀裂が閉塞されることにより、空洞の液密性・気密性が保たれる。一方、より貯蔵温度の低いLNG（大気圧での沸点-162℃）については、過去に欧米を中心に無覆工空洞への貯蔵が試みられたが、熱応力によるクラックの発生などによってほとんどが失敗に終わっている²⁾。このため、最近では覆工空洞内に保冷材とメンブレンを設置した構造が検討され、韓国のDaejeonでパイロット試験が実施されている²⁾。ここでは、無覆工空洞を利用する方式を「凍結方式」（図-1）、保冷材・メンブレンを設置する方式を「メンブレン方式」と呼ぶことにする。（図-2）

低温岩盤貯蔵の計画では、空洞周辺岩盤中に発生する熱応力を予測し、空洞の安定性、液密性・気密性を検討する必要がある。低温岩盤貯蔵における熱応力の検討については、国内ではLPGを対象に凍結方式による貯蔵が日塚ら³⁾、石塚ら⁴⁾により検討されている。また、LNGについては凍結方式、メンブレン方式の貯蔵が（財）エンジニアリング振興協会により検討されており、最近ではDME（大気圧での沸点-25℃）の凍結方式貯蔵の可能性も検討されている⁵⁾。しかし、検討例はまだ少なく基礎的データとしては不足しており、また、それぞれが異なる条件での検討であるため、相互の比較が難しい状況にある。

このため本研究では、低温岩盤貯蔵の成立性に対する基礎的知見を得ることを目的に、貯蔵温度、空洞設置深度、および、力学特性の温度依存性をパラメータとした凍結方式での熱伝導解析と熱応力解析を行い、空洞の安定性やボイルオフ率等を評価して凍結方式の適用範囲に対する基礎的データを示す。さらに、凍結方式の適用が困難なLNGを対象に²⁾、メンブレン方式で用いられる保冷材厚さをパラメータとした熱伝導解析と熱応力解析を行い、凍結方式との安定性やボイルオフ率等の差異を明らかにして、メンブレン方式の成立性の評価を行う。

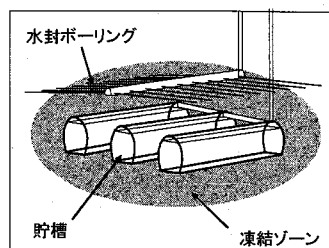


図-1 凍結方式低温岩盤貯蔵

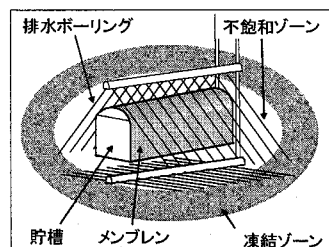


図-2 メンブレン方式低温岩盤貯蔵

2. 解析手法および検討対象モデルの設定

(1) 解析手法

解析手法には二次元有限要素法による非定常熱伝導解析、熱応力解析手法を用い、以下の手順で行う。なお、自重解析・掘削解析・熱応力解析において、応力・ひずみは引張方向を正とする。

- ①自重解析：空洞掘削前のモデルで弾性解析を行い、岩盤の地圧分布を計算する。
- ②掘削解析：自重解析の結果を初期値として空洞部を応力開放し、空洞掘削後の応力分布を計算する。
- ③熱伝導解析：空洞掘削後のモデルを用い、貯蔵運転時の空洞内温度を想定した温度境界条件を空洞壁面に設定して熱伝導解析を行い、運転開始後の各時刻における岩盤温度分布を計算する。なお、空洞内の温度は、初期の15℃から90日間のプレクーリング期間で目標とする貯蔵温度まで冷却し、以後は一定の貯蔵温度を保つと仮定する。解析の対象期間は、プレクーリング開始から50年後までとする。
- ④熱応力解析：熱伝導解析で計算された各時刻の岩盤温度分布を基に、掘削解析で得られた初期応力分布に温度低下により発生する熱応力を考慮した弾塑性解析を行い、冷却後の岩盤の応力、ひずみ分布、破壊領域などを計算する。岩盤の破壊基準は、図-3に示すMohr-Coulombの降伏条件を用いる。破壊後の岩盤の挙動については、石塚ら⁴⁾の検討を参考に、せん断破壊後は完全塑性体として挙動し、引張破壊後はno-tension材料として挙動して引張応力に抵抗しないと仮定する。

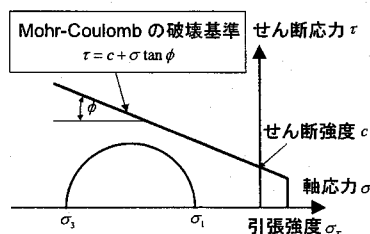


図-3 Mohr-Coulombの破壊基準

(2) 検討対象の液化燃料と空洞設置条件

検討対象とする液化燃料はLNG, LPG, DMEとし、貯蔵温度はそれぞれの気圧下での沸点である-162℃、-42℃、-25℃とする。また、凍結方式の適用温度範囲を検討するために、貯蔵温度-60℃、-80℃、-100℃についても解析を行う。

次に、空洞設置条件を検討する。海外の低温岩盤貯蔵施設の実施事例、検討事例では、貯槽空洞の高さは20～30m、空洞の幅は15～20m程度の規模のものが多く^{1), 2)}、これは国内の水封方式による石油備蓄基地の貯槽規模にはほぼ匹敵する。本検討では、国内で施工実績のある串木野石油地下備蓄基地の貯槽断面(高さ22m、幅18m)と同形状の断面をもつ単設のトンネル型空洞を貯槽とする。また、これらの大断面の地下空洞は、国内外とも岩盤が良好な地域に建設されることが一般的であることから、検討対象岩盤は電中研式岩盤分類でC_H級に相当する岩盤を想定する。貯槽空洞の設置深度は、海外の事例などから40mを最小とし、これより深い深度について事前に掘削解析を行った結果、掘削完了時に空洞周辺に破壊領域が発生しなかった深度80mまでを対象とする。

なお、実サイトでは岩盤物性(間隙率、力学特性など)は岩相、深度、風化度などにより変化するが、本検討は低温岩盤貯蔵の成立性に関する基礎検討であることを踏まえ、解析では岩盤物性を一様と仮定する。

(3) 岩盤物性

検討対象岩盤はC_H級の硬岩とし、国内に広く分布する花崗岩を想定する。解析において設定した岩盤物性を表-1に示す。岩盤の熱伝導率、比熱は、土木学会による低温下での各種岩石の熱特性の調査結果⁶⁾を参考に花崗岩の平均的な値とする。岩盤の力学特性については、C_H級岩盤の中でも特に良好な地域をサイトに選定することを想定し、C_H級の力学特性の最大値とする。また、弾性係数、せん断強度、引張強度は一般に低温になるほど増加する傾向があるが^{3), 4), 7)}、本検討では石塚ら⁴⁾による温度依存性を参考とする。ただし、石塚ら⁴⁾の検討では-40℃以下の温度依存性が示されていないため、この範囲については石塚ら⁴⁾のデータを線形に外挿するとともに、松永ら⁷⁾の研究を参考に、強度は-70℃、弾性係数は-100℃で一定に収束すると仮定して、図-4に示す温度依存性を設定する。また、線膨張係数は地下水の凍結膨張による影響がある場合とない場合の両方を考慮し、石塚ら⁴⁾の検討を参考に図-4のように設定する。これらの条件については、以下の3モデルを設定し、結果の比較を行う。

- ・モデル1：力学特性の温度依存あり
／凍結膨張あり
- ・モデル2：力学特性の温度依存なし
／凍結膨張あり
- ・モデル3：力学特性の温度依存あり
／凍結膨張なし

地表部の気温は関東地方の平年の平均気温の15℃とし、初期の地温勾配は国内の平均的な値である0.03℃/mとする。また、地表面における熱伝達係数は、LNG地下式貯槽指針⁸⁾を参考に11.63W/m²Kとする。

表-1 解析条件

項目	設定値
空洞天端深度	GL.-40m, -50m, -60m, -80m
大気温度	15℃
貯蔵温度	25℃, -42℃, -60℃, -80℃, -100℃, -162℃ ブローリング 90日間: 15℃から貯蔵温度に線形低下
熱伝導率	2.89 W/mK (温度依存性なし)
比熱	750 J/kgK (温度依存性なし)
地表熱伝達係数	11.63 W/m ² ・K (温度依存性なし)
初期岩盤温度	15.0+0.03×深度(m) ℃
密度	2,600 kg/m ³ (温度依存性なし)
弾性係数	常温時: 6.0 GPa, 温度依存性: 図-4
ポアソン比	0.25 (温度依存性なし)
せん断強度	常温時: 4.0 MPa, 温度依存性: 図-4
内部摩擦角	55° (温度依存性なし)
引張強度	常温時: 0.4 MPa, 温度依存性: 図-4
線膨張係数	温度依存性: 図-4
側圧係数	1.0

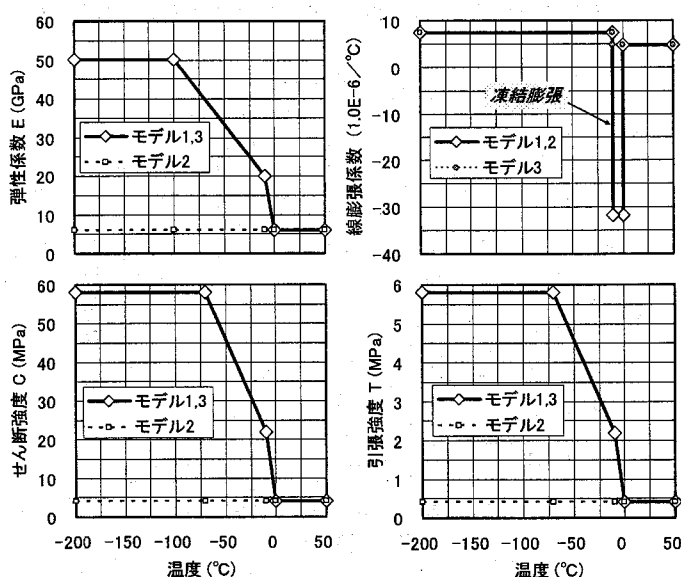


図-4 岩盤の力学特性などの温度依存性

3. 凍結方式の成立性に対する解析検討

凍結方式の低温岩盤貯蔵について、貯蔵温度、空洞設置深度、力学特性の温度依存性を解析パラメータとして熱伝導解析・熱応力解析によるパラメータスタディを実施し、成立条件について基礎的検討を行う。

(1) 解析モデル、解析ケース

解析モデルの概念図を図-5に示す。表-1に示す解析条件に基づき、空洞設置深度 GL-40m、-50m、-60m、-80m のそれぞれについて、貯蔵温度を-25℃ (DME)、-42℃ (LPG)、-60℃、-80℃、-100℃、-162℃ (LNG) の6条件に設定し、以上の全ての深度・温度条件について力学特性の温度依存性あり(モデル1)、温度依存性なし(モデル2)の両方の条件で熱伝導・熱応力解析を実施する。地下水の凍結膨張による効果については、設置深度 GL -50m、貯蔵温度-162℃のケースで凍結膨張を考慮しない条件(モデル3)で計算を行い、モデル1、2の結果と比較する。解析ケース数は全49ケースとなる。

(2) 熱伝導解析結果

空洞周辺の温度分布変化の計算結果の一例(空洞深度-50m、貯蔵温度-42℃)を図-6に、空洞設置深度、貯蔵温度と凍結深さの関係を図-7に示す。全貯蔵温度において、プレクーリング完了時である90日後の凍結深さが2~5m程度になっており、液密性・気密性の面では十分な厚さの凍結領域が形成されていると考えられる。

図-7より、空洞深度による凍結深さの差は、運転開始から90日後、5年後ではほとんど見られず、また、空洞上部方向とスプリングライン方向の凍結深さがほぼ等しく、凍結領域は同心円状に広がるのがわかる。一方、50年後の凍結深さは、スプリングライン方向では空洞深度による差があまりな

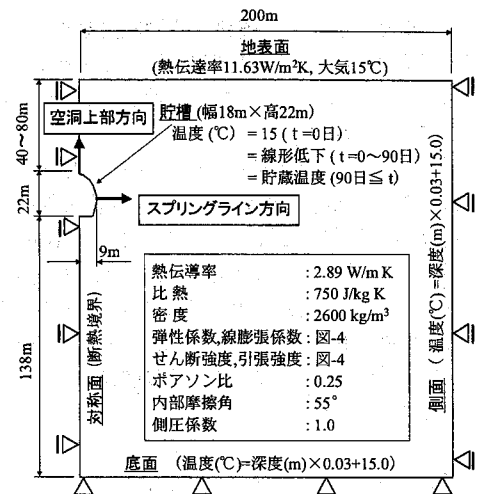


図-5 解析モデル

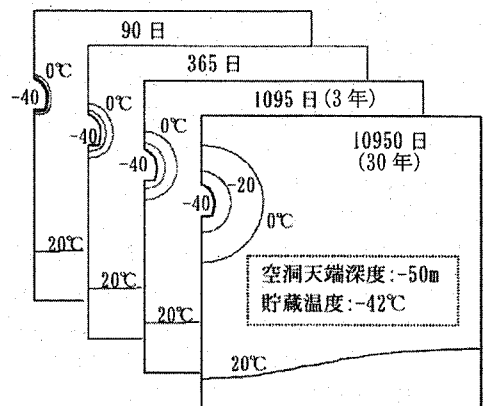


図-6 温度分布の経時変化の一例

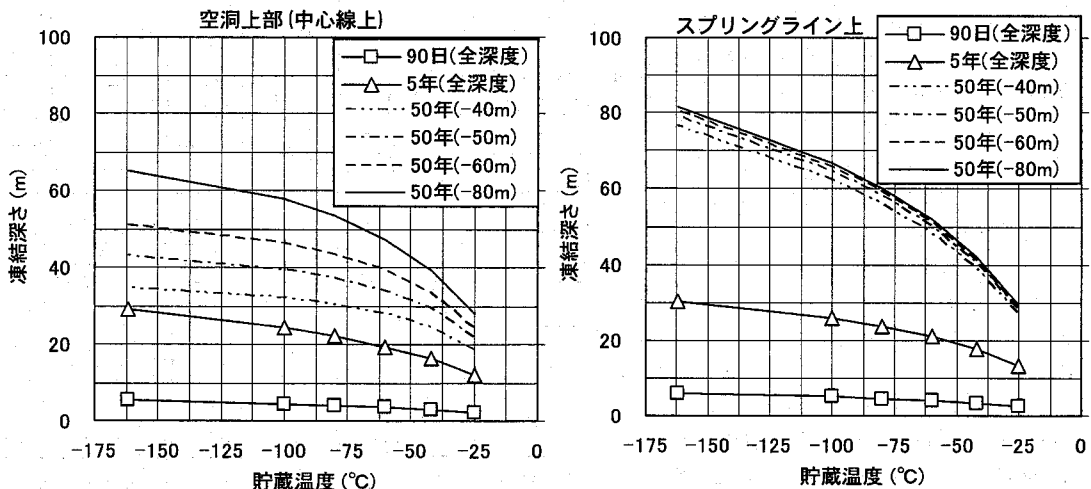


図-7 空洞設置深度、貯蔵温度と凍結深さ (0℃線までの距離) の関係

いが、空洞上部方向では深度が浅いほど小さくなる傾向を示しており、地表面からの熱流入により、凍結領域は時間の経過と共に同心円から偏平な形状に変化していくことがわかる。

地表面温度は、最も低下の大きい深度-40m、貯蔵温度-162℃の場合で運転開始 50 年後に 14.64℃となり、初期の 15℃より 0.36℃低下する。地表面温度低下による既存構造物や周辺環境への影響は別途検討する必要があるが、低下量が比較的小さいことから、大きな影響を及ぼす可能性は小さいと考えられる。

図-8 には、空洞設置深度-50m の場合の各貯蔵温度における空洞全周からの時間当りの流入熱量を示す。また、式(1)を用いて-25℃、-42℃、-162℃の流入熱量から計算した DME、LPG、LNG 貯蔵における 1 日当りのボイルオフ率の経時変化を図-9 に示す⁸⁾。

$$R = \frac{Q \times 86400}{A r \rho h_v} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 R : 1 日当りボイルオフ率 (%/日)、 Q : 空洞全周の流入熱量 (W/m)、 A : 空洞断面積 (329.26 m^2)、 r : 貯液率 (0.97 と仮定)、 ρ : 液化燃料の密度 (kg/m^3 、表-2 参照)、 h_v : 液化燃料の蒸発熱 (J/kg 、表-2 参照)

図-8 より、運転開始後、貯蔵温度が低下するとともに流入熱量は増加し、プレクーリングが完了する 90 日後付近で最大となる。最大時の流入熱量は貯蔵温度が最も低い-162℃で約 12kW/m、-25℃で約 3 kW/m となる。90 日以後は流入熱量は時間の経過とともに減少し、50 年後には 0.5~1.7kW/m 程度の範囲に収束する。また図-9 より、ボイルオフ率も流入熱量と同様、プレクーリング時に上昇して最大値を示し、その後の貯蔵運転時は低下していくことがわかる。また、LNG のボイルオフ率は比較的大きいが、LNG、DME は低い値となる。

(3) 熱応力解析結果

熱伝導解析より求めた岩盤温度分布を基に、各解析ケースについてプレクーリング開始から 1, 10, 30, 60, 90, 180, 365, 1095, 1825, 3650, 10950, 18250 日後の各時刻で熱応力解析を実施した。

まず、破壊の発生状況の典型例として、空洞深度-50m、貯蔵温度-42℃と-162℃の条件を対象に、モ

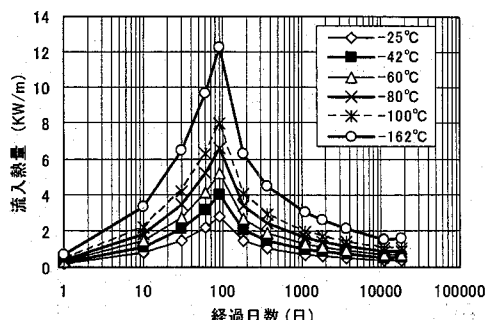


図-8 空洞全周の流入熱量 (空洞深度-50m)

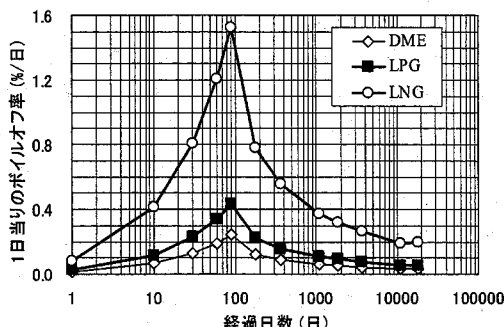


図-9 各燃料のボイルオフ率 (空洞深度-50m)

表-2 各液化燃料の密度と蒸発熱

液化燃料	密度 ρ (kg/m^3)	蒸発熱 h_v (J/kg)
DME	668.0	466.90
LPG	580.0	425.68
LNG	425.0	509.91

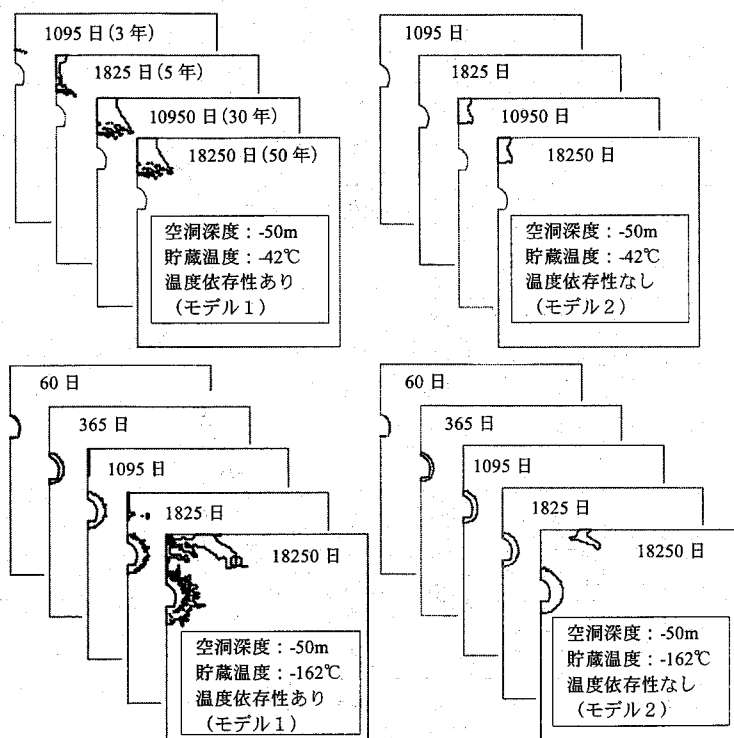


図-10 破壊領域の拡大状況 (空洞深度-50m、貯蔵温度-42℃、-162℃)

デル1, 2の破壊領域の拡大状況を図-10に示す。図より, 貯蔵温度-42℃のモデル1の場合は, 破壊領域は3年後に空洞上部に発生し, その後破壊領域は拡大するが, 空洞近傍には破壊は発生しないことがわかる。これに対し, 貯蔵温度-162℃のモデル1では, 60日後から空洞壁面に破壊が発生してその領域が拡大しており, 破壊の発生パターンが貯蔵温度-42℃の場合と大きく異なることが認められた。また, 温度依存性のないモデル2の結果はモデル1に比べて, 貯蔵温度-42℃では破壊の発生が遅く破壊領域の拡大も小さいこと, -162℃では破壊領域の拡大が小さいことが認められた。

次に, 表-3には全ケースの破壊領域発生時刻を一覧表で示す。表-3より, 大局的には貯蔵温度が低い条件, 空洞深度が小さい条件, および温度依存性ありの条件(モデル1)において破壊が発生しやすい傾向が把握できる。また, 貯蔵温度が低い場合は空洞壁面の破壊が先行するが, 貯蔵温度が高い場合は空洞壁面の破壊が発生せず, 空洞上部に破壊領域が発生することがわかる。なお, 空洞深度-40mのモデル1の空洞上部については, 貯蔵温度が-80℃より低い場合には破壊の発生が遅くなっているが, 空洞壁面で早期に破壊が発生したことが原因と考えられる。

以上のような破壊の発生機構を検討するため, 空洞深度-50m, 貯蔵温度-42℃と-162℃のケースについて, 空洞天端直上部の各深度における岩盤の温度, 変位, 応力度(鉛直方向応力 σ_y , 最大主応力 σ_1 : 引張方向正)を図-11と図-12に示す。

貯蔵温度-42℃の図-11に着目すると, 空洞上部は

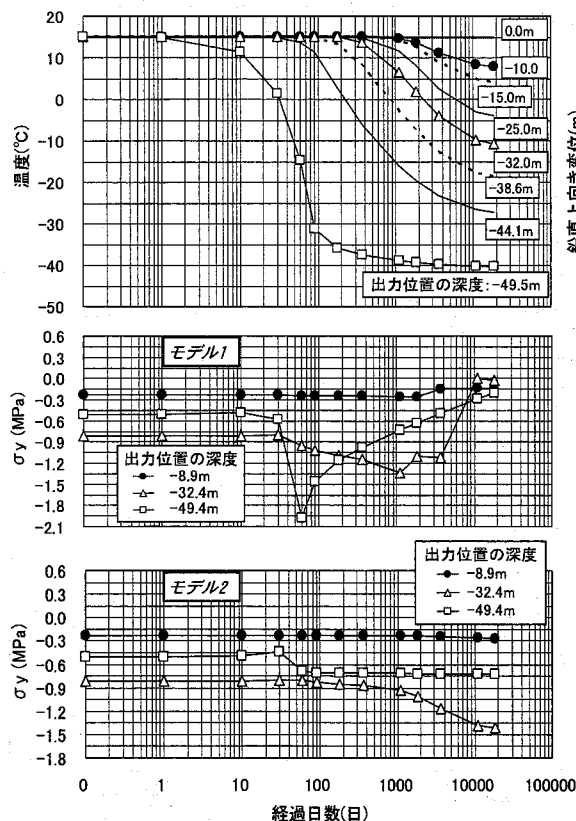


表-3 破壊領域の発生時期(単位: 日)

(1)力学特性の温度依存性あり(モデル1)

空洞天端 深度(m)	貯蔵温度(°C)					
	-25	-42	-60	-80	-100	-162
上部						
-40	1095	365	365	1095	1095	1095
-50	1825	1095	1095	1095	1095	1095
-60	10950	3650	1825	1825	1825	1825
-80	なし	10950	10950	3650	3650	3650
壁面						
-40	なし	なし	1095	90	90	60
-50	なし	なし	3650	90	90	60
-60	なし	なし	10950	90	90	60
-80	なし	なし	なし	90	90	60

(2)力学特性の温度依存性なし(モデル2)

空洞天端 深度(m)	貯蔵温度(°C)					
	-25	-42	-60	-80	-100	-162
上部						
-40	なし	3650	3650	3650	3650	なし
-50	なし	10950	10950	10950	10950	なし
-60	なし	18250	10950	10950	10950	なし
-80	なし	なし	なし	18250	18250	なし
壁面						
-40	なし	なし	なし	90	90	60
-50	なし	なし	なし	なし	90	60
-60	なし	なし	なし	なし	90	60
-80	なし	なし	なし	なし	30	60

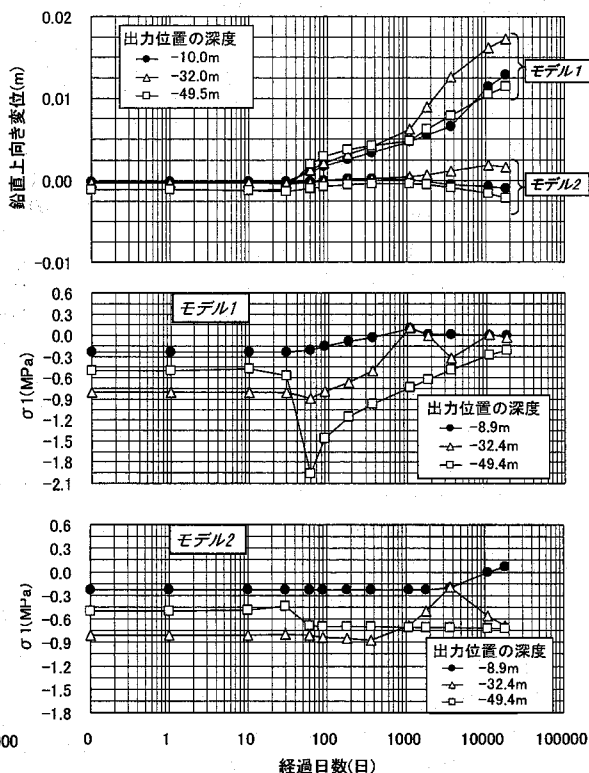


図-11 空洞天端直上部の各深度における岩盤の温度, 変位, 応力度の変化(空洞深度-50m, 貯蔵温度-42℃)

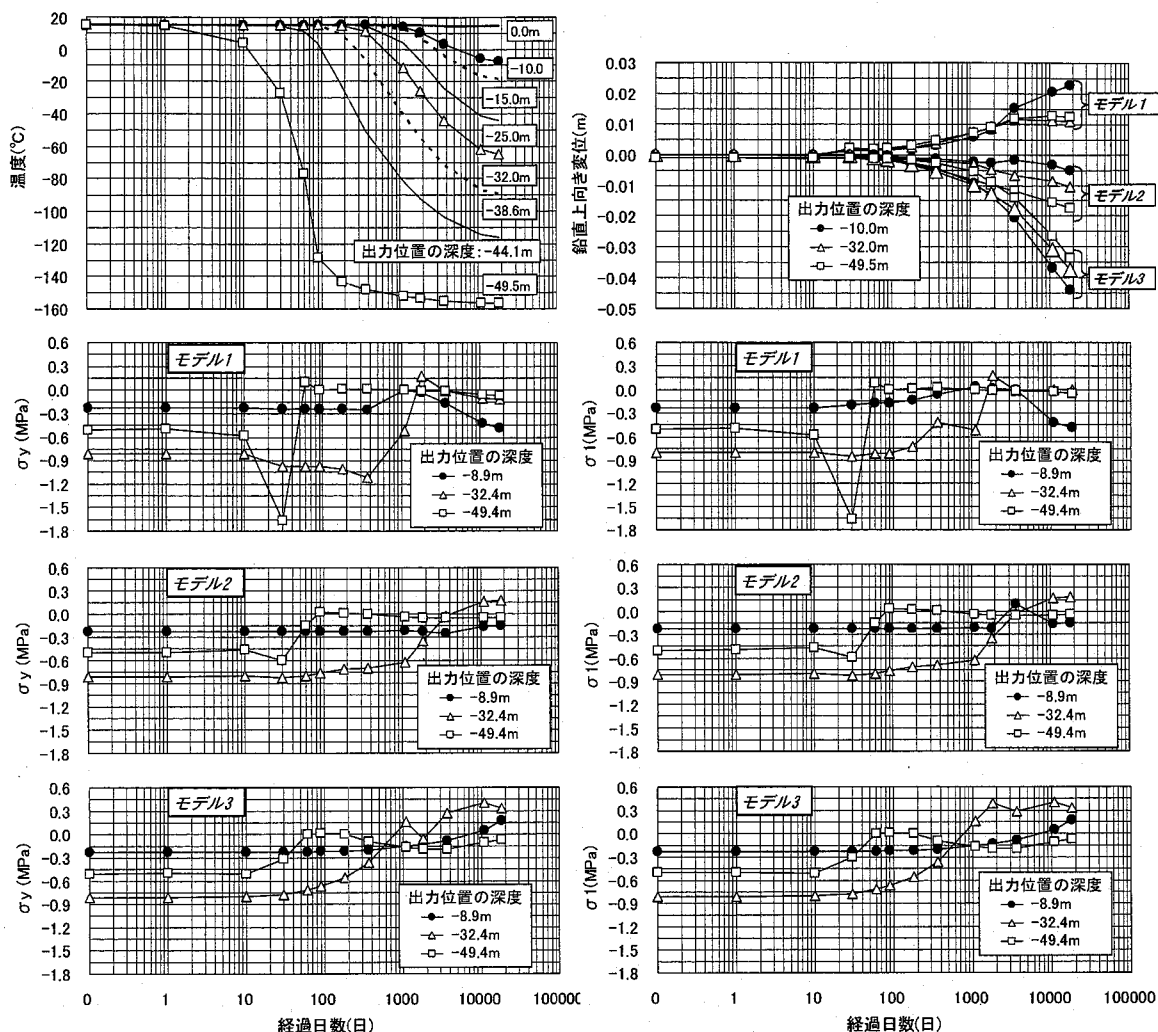


図-12 空洞天端直上部の各深度における岩盤の温度，変位，応力度の変化（空洞深度-50m，貯蔵温度-162℃）

モデル1では浮き上がり傾向，モデル2はほぼ変化なしであることがわかる。これは，各地点とも周囲の拘束によって，0℃～10℃の温度範囲の地点は凍結膨張量が抑制され，他の地点は低温収縮量が抑制されるが，発生する応力度の関係から，モデル1はモデル2に比して膨張抑制量が小さくなることに関係している。次に，空洞壁面近傍の深度-49.4m 地点の応力度に注目すると，凍結膨張が生じる 30～50 日後にモデル1では凍結膨張量の抑制により圧縮応力が大きくなり，その後は低温収縮量の抑制により引張応力側に移行するが，引張強度までは達しない。これに対し，深度-32.4m の地点は凍結膨張区間の近接に伴って引張応力度が増大し，モデル1では1095日，モデル2では10950日に引張破壊をすることが σ_1 の経時変化より理解できる。

次に貯蔵温度-162℃の図-12に着目すると，空洞上部はモデル1では浮き上がり，モデル2ではやや沈下，モデル3では沈下傾向であり，前述したように凍結膨張特性と温度依存性による変位への影響が再確認できる。また，空洞壁面近傍の深度-49.4m の地点の応力度を見ると，凍結膨張が生じる 10～20 日頃にモデル1では凍結膨張量の抑制によって圧縮応力が増大し，その後は低温収縮量の抑制によって引張応力側に移行して90日頃に引張破壊が生じたことが認められ，空洞壁面で60日後に破壊が生じたことと合致する。モデル2，3の応力度の変化はそれほど明確ではないが，深度-49.4m 地点は90日から180日頃に引張破壊が生じたようである。これに対し，深度-32.4m の地点は凍結膨張区間の近接に伴って引張応力度が増大し，モデル1では1095日後に引張破壊が生じるが，モデル2，3では引張破壊に達していないようである。

なお，温度分布は図-7で述べたように初期は同心円状に拡がるため空洞上部の σ_1 は鉛直方向であるが，

時間の経過と共に偏平な形状に移行するため、鉛直方向との合致性が低下することも図-11と図-12の σ_y と σ_1 の関係から理解される。

(4) 凍結方式の成立性

LNGの凍結方式貯蔵の過去の試みはほとんどが失敗に終わっているが、その多くは空洞壁面部に熱応力によるクラックが発生してLNGが漏出し、クラック中で岩盤と熱交換することにより、ボイルオフが急増したことが原因と報告されている²⁾。このことから、壁面近傍で破壊が生じないことが凍結方式が成立するための必要条件と考えられる。一方、空洞から離れた位置の岩盤中で発生する破壊については、貯槽空洞の安定性には直接影響せず、また、破壊発生箇所と空洞の間に十分な厚さの凍結領域が確保されていれば、地下水の凍結により空洞の液密性・気密性も保持される。したがって、前項の解析で空洞上部に発生する破壊領域については、地表の構造物などへの影響を除けば、凍結方式の成立性に直接は関与しないと考えられる。

熱応力解析の結果(表-3)によると、本検討で設定した条件では、空洞近傍で破壊が発生しない貯蔵温度の下限は-60~-80℃程度となり、これより低温では凍結方式の成立が難しくなることが予想される。海外の検討でも凍結方式の限界温度を-80℃程度としており²⁾、本結果とほぼ一致している。また、貯蔵温度が高いLPG、DMEは、図-9に示されるようにボイルオフ率も比較的低い。このことから、低温岩盤貯蔵の適用が予想される液化燃料のうち、沸点-42℃のLPG、-25℃のDMEについては凍結方式による貯蔵が十分可能である。これに対し、沸点-162℃のLNGでは空洞周辺に熱応力による空洞壁面部の破壊が予想され、実際のボイルオフ率は図-9の結果よりさらに大きくなると考えられることから、保冷材の設置などにより岩盤の温度低下を緩和する方策が不可欠である。

4. メンブレン方式の成立性に対する解析検討

前章の検討において凍結方式の適用が困難とされたLNGを対象に、メンブレン方式による貯蔵を想定して保冷材厚さをパラメータとした熱伝導解析、熱応力解析を行い、成立性を検討する。

(1) 解析モデル、解析ケース

現在、韓国で検討されているメンブレン式低温岩盤貯蔵では、空洞内に覆工コンクリートを施工した後、覆工壁面にポリウレタンフォーム製の保冷材と、鋼製のメンブレンを設置した構造となっている²⁾。本検討では、保冷材による保温効果のみをモデル化し、岩盤の温度変化や熱応力の発生に与える影響を評価する。

解析ケースについては、空洞深度は-50mとし、力学特性の温度依存性についてはモデル1、2の両方を対象とする。保冷材の熱伝導率 k は、LNG地下式貯槽指針⁸⁾を参考に0.026743W/mK(23cal/m・hr・K)と設定し、保冷材厚さ t をパラメータとして10cm、30cm、50cmの各ケースについて計算を行う。なお、空洞壁面は下式で計算される熱伝達係数 h を用いた熱伝達境界として仮想的にモデル化する(v :保冷材における熱流速、 ΔT :保冷材両面の温度差)。

$$v = k \frac{\Delta T}{t} = h \Delta T \quad \therefore h = \frac{k}{t} \quad (2)$$

(2) 熱伝導・熱応力解析結果

空洞上部の深度 H における岩盤温度の経時変化を図-13に示す。また、図-14、図-15には、各ケースの空洞全周からの時間当りの流入熱量と、(1)式より計算したLNGの1日当りのボイルオフ率を示す。保冷材を設置しない場合($t=0$ cm)に比べ、保冷材

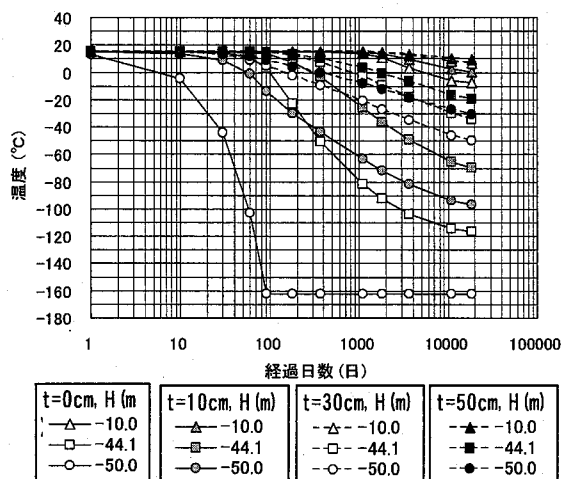


図-13 保冷材厚さ t と空洞直上部の岩盤温度変化の関係
(空洞深度-50m、貯蔵温度-162℃)

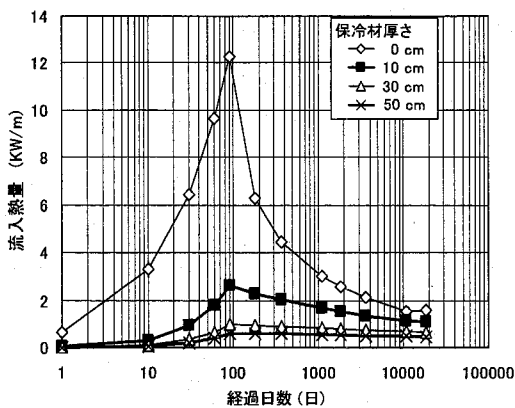


図-14 保冷材厚さと貯槽全周の流入熱量の関係
(空洞深度-50m、貯蔵温度-162℃)

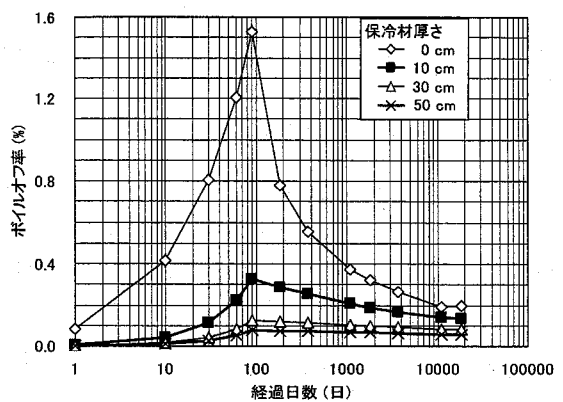


図-15 保冷材厚さとボイルオフ率の関係
(空洞深度-50m、貯蔵温度-162℃)

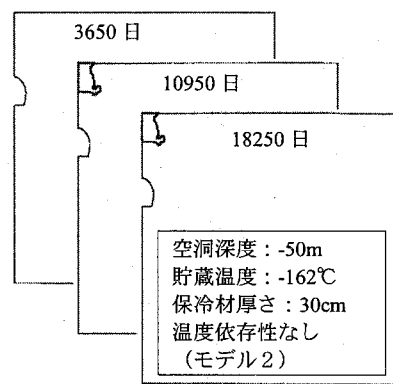
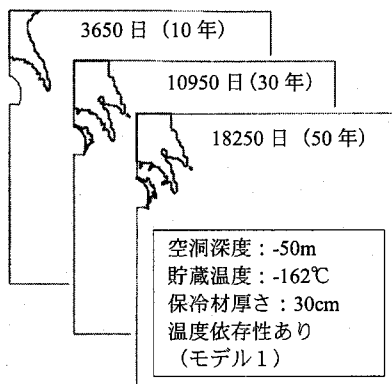


図-16 破壊領域の拡大状況 (空洞深度-50m、貯蔵温度-162℃、保冷材厚さ30cm)

を設置したケースでは岩盤の温度低下が緩和されており、保冷材が厚いほどその効果は大きい。50年後の保冷材背面 (H=-50m) の温度は、保冷材厚さが10cmの場合で-100℃、30cmで-50℃、50cmで-30℃程度となる。また、空洞への流入熱も大幅に減少し、ボイルオフ率も大きく低下する。保冷材厚さ10cmの場合のボイルオフ率は保冷材なしの場合の1/4程度、厚さ30cm、50cmの場合は1/10以下となる。

図-16には、保冷材厚さを30cmとした場合の破壊領域の拡大状況を示す。保冷材を設置しない場合(図-10)と比較して空洞壁面周辺での破壊の発生が相対的に小さくなっており、保冷材の効果により壁面近傍の温度低下が緩和され、岩盤の低温収縮による引張破壊が抑制されていることがわかる。しかし、モデル1では、30年後以降に壁面近傍の一部で破壊が生じている。図-13の深度-50mの位置の50年後の温度が-50℃であることから、この壁面での破壊は、前章で示した「空洞壁面で破壊が生じない貯蔵温度の下限は-60~-80℃程度」という結論と対応しないと考えられる。

このため、図-17に保冷材厚さ30cmの場合の貯蔵上部の温度変化と、貯蔵温度-42℃で保冷材を設置しない場合の温度変化を比較した結果を示す。運転開始から10950日時における壁面近傍の深度-49.5m付近の温度は両ケースとも-40℃程度であり、あまり差異がないにも係らず、保冷材なしのケースでは壁面部の破壊は

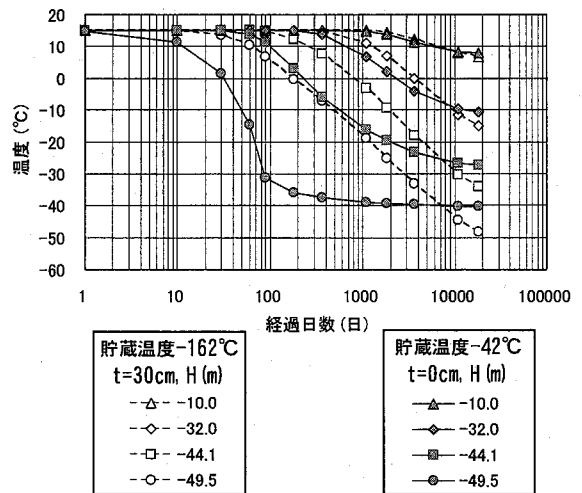


図-17 空洞直上部の岩盤温度変化
(空洞深度-50m、貯蔵温度-42℃、-162℃)

発生せず(図-10)、一方、保冷材を設置したケースでは図-16に示されるように壁面の一部で破壊が生じている。この違いは、図-17に見られるように保冷材を設置したケースでは運転開始から長期を経過しても温度低下が継続して進行しており、空洞近傍ほどその傾向が強いいため、長期間経過後も空洞壁面近傍で熱応力が増大していることが原因と考えられる。

(3) メンブレン方式の成立性

メンブレン方式の岩盤低温貯蔵は最近検討が着手された段階であり、設計の考え方などについては必ずしも確立されてはいない。韓国 Daejon での検討事例²⁾では、鋼製メンブレンで貯槽空洞の液密性・気密性を確保する構造となっている。したがってその成立のためには、①空洞壁面部の覆工、保冷材、メンブレンなどの健全性が保たれること、②岩盤からの入熱によるボイルオフ率が許容範囲以下となること、が要件になると考えられる。本検討においては、②については保冷材の設置により LPG 貯蔵と同程度までボイルオフ率を低減しうることが示された。①については、力学特性の温度依存性なし(モデル2)の場合は保冷材厚さ 30cm で成立すると考えられるが、モデル1の場合は保冷材の厚さを増すなどの対策が必要と考えられる。

5. おわりに

低温岩盤貯蔵の成立性に対する基礎的知見を得ることを目的に、凍結方式/メンブレン方式のそれぞれについて、貯蔵温度、空洞設置深度、力学特性の温度依存性、保冷材の厚さなどをパラメータとした熱伝導解析・熱応力解析を行い、成立条件などの検討を行った。得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- ・凍結方式の解析検討により、貯蔵温度が低く、空洞深度が小さく、岩盤力学特性の温度依存性を考慮した条件の方が破壊が発生しやすい傾向を示した。また、貯蔵温度が低い場合は空洞壁面の破壊が先行し、貯蔵温度が高い場合は空洞壁面の破壊が発生せず、空洞上部に破壊領域が発生する破壊パターンを見出せた。
- ・空洞壁面部に破壊が発生しないことを凍結方式の成立条件と考えると、本検討の設定条件における適用可能な下限温度は-60~-80℃程度となり、海外の検討事例とほぼ一致した。これにより、LPG(沸点-42℃)、DME(沸点-25℃)は凍結方式による貯蔵が可能であり、ボイルオフ率も小さいことを示すことができた。これに対し、LNG(沸点-162℃)への凍結方式の適用は安定性・ボイルオフ率の両面で困難と判断された。
- ・空洞壁面部に保冷材を設置した解析検討により、空洞壁面近傍の温度低下を緩和して壁面部の破壊発生を抑制すること、流入熱量やボイルオフ率を大幅に低減することなどの保冷材の効果を示すことができた。
- ・メンブレン方式の成立性については、温度依存性なしのモデル2では空洞の安定性・ボイルオフ率の両面から、保冷材厚さ 30cm で LNG 貯蔵の成立性を示せた。これに対し、温度依存性を考慮したモデル1では空洞壁面部に破壊が生じており、保冷材を 30cm 以上にするなどの対策が必要と考えられた。

以上の結果より、低温岩盤貯蔵の成立性の検討においては岩盤力学特性の温度依存性が重要となると考えられ、今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) Broms, L., Fredriksson, A., Glamheden, R. and Pilebro, H.: Conversion of an oil storage cavern to a refrigerated LPG storage facility, Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001, pp.659-664, 2001.
- 2) Amantini, E., Chanfreau, E. and Kim, H. Y.: Daejon pilot project: Lined cavern LNG storage, LNG Joournal March/April 2003, pp.25-27, 2003.
- 3) 日景秀治・添田弘基・西牧均・関根一郎: LPG 地下岩盤内低温貯槽に関する研究, 戸田建設技術開発センター研究報告, Vol.10, pp.36-48, 1983
- 4) 石塚与志雄・木下直人・奥野哲夫: LPG 岩盤内貯蔵空洞の熱応力に対する安定性の検討, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp.243-250, 1986.
- 5) 中川加明一郎 他: DME 地下低温貯蔵システムにおける貯槽空洞の安定性に関する検討, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, pp.849-850, 2005.
- 6) 土木学会: 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして-熱物性と解析-, 丸善, 2006.
- 7) 松永列, 厨川道雄, 木下直人: 岩石の低温における機械的性質, 日本工業会誌, Vol.97, No.1120, pp.431-436, 1981
- 8) 日本ガス協会: LNG 地下式貯槽指針, 2002.