

メンブレン方式の新 LNG 低温岩盤貯槽の成立性に対する解析検討 ANALYTICAL STUDY FOR FEASIBILITY OF NEW MEMBRANE-TYPE UNDERGROUND REFRIGERATED LNG STORAGE

百田 博宣¹・米山 一幸²・風間 広志³

Hironobu MOMOTA・Kazuyuki YONEYAMA・Hiroshi KAZAMA

While the technology of above- and underground LNG tank was established in Japan, the research and development for refrigerated LNG storage in lined rock cavern had begun in other countries, and the pilot test of membrane-type refrigerated LNG storage was implemented at Daejeon, Korea. In this pilot test, unsaturated zone was formed around the storage cavern to decrease groundwater pressure and to relax thermal stress under low temperature, however, it considers there are some problems in technological reliability and economy.

In this paper, we propose new membrane-type refrigerated LNG storage with drainage pipes in shotcrete and heating pipes in reinforced concrete. Numerical analysis of heat conduction, thermal stress and groundwater flow was carried out in order to estimate the effect of water pressure decrease and thermal stress relaxation, and evaluate the validity of proposed system. We also estimate thermal inflow, boil-off ratio (BOR) and storage efficiency, and indicate the feasibility of the system.

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

1. はじめに

石油の時代と称された 20 世紀と同様, 21 世紀も石油はエネルギーの中核を担っていくと考えられるが, 環境負荷低減の観点やエネルギーセキュリティの観点から, NG(天然ガス)の供給増加や DME (ジメチルエーテル)・GTL(ガス・ツー・リキッド)などの新燃料の導入によるエネルギーソースの多様化が国レベルの施策として進められている (DME: NG・石炭・バイオマス・廃棄物など幅広い原料から製造される低温液体燃料, GTL: NG 等を原料に作られる軽油・灯油などの液体燃料). 特に, NG はクリーンエネルギーで埋蔵量も極めて多く, 石油のように資源の偏在が顕著ではないことに加え, 新燃料の原料にも利用されることから, 主要なエネルギーとして需要・供給とも増大していくと予想されている.

現在, 天然ガスの主な用途は火力発電用燃料と都市ガス原料であり, LNG (液化天然ガス) として LNG 船で輸入されるため, 受入れ基地に LNG 低温貯蔵施設 (地上式タンクや半地下式の地下タンク) が設置されている. しかし, 地上タンク・地下タンクの容量は実績ベースで最大 20 万 KL 程度であり, 今後の LNG の増大を想定した場合, 緊急時対応やサプライチェーンの効率的運用などの観点から, 供給インフラとしての貯蔵施設の大型化が重要であるが, 地上タンク・地下タンクの大幅な大型化には技術的課題がある. これに対し, 我が国においても, 久慈・菊間・串木野に建設された大容量の水封式石油岩盤貯槽の事例があり, LNG 低温貯蔵施設でも岩盤空洞を利用した大型化も想定される. また, 岩盤貯蔵は, 地震や台風等の自然災害やテロなどの人的災害, および爆発や事故に対する安全性が高く, 景観保全や土地の有効利用などの特長を有することから, 大容量の LNG 低温貯蔵施設の岩盤立地も有望な技術の一つとなることが期待される.

キーワード: LNG, 低温岩盤貯槽, メンブレン方式, ヒーター, 排水パイプ

¹ フェロー会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 上席研究員

² 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員

³ フェロー会員 清水建設(株) 技術研究所 上席研究員

低温岩盤貯蔵については、LPG（液化石油ガス、大気圧での沸点 -42°C ）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・気密性を確保する凍結方式貯蔵である。これに対し、更に貯蔵温度の低いLNG（大気圧での沸点 -162°C ）については、過去に欧米を中心に凍結方式貯蔵が試みられたが、熱応力によるクラックの発生やBOG（ボイルオフガス）の増大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、最近では貯槽部材として、空洞内に内側からメンブレン、保冷材、鉄筋コンクリート（RC）造の覆工コンクリート（以下、RC躯体と称す）を設置したメンブレン方式が検討され、韓国のDaejeonでパイロット試験が実施されている²⁾。このメンブレン方式のLNG低温岩盤貯槽の概念図を図-1に示す³⁾（図では保冷材・RC躯体は省略）。本貯蔵方式では、メンブレンによる液密性・気密性の確保、保冷材の断熱性能による岩盤の温度低下量の緩和を行うと共に、排水トンネル・排水ボーリングによる排水システムに特徴がある。すなわち、建設時・LNG貯蔵初期に排水システムを稼働して空洞周辺に不飽和帯を形成するため、貯槽部材の建設・設置時や貯蔵初期にRC躯体に作用する外水圧を除去すると共に、水の凍結膨張による構造部材への悪影響を排除できるとの考え方である。また、貯蔵開始後、貯槽部材から不飽和状態の岩盤中を凍結前線が進行するが、排水を止めることにより再度浸透を開始した地下水の凍結リングが形成され、貯槽の二次バリアとして機能するとしている（一次バリア：メンブレン）。しかし、この方式でも、周辺岩盤に掘削応力に温度応力が加わり構造安定性が低下すること、排水システムによる確実な不飽和帯の形成に懸念があること、および排水システムの設置がコスト高につながることなど、技術的・経済的な課題があるものと考えられる。

このため本研究では、貯槽部材（メンブレン・保冷材・RC躯体）のRC躯体中に凍結防止用ブライン配管（ヒーター）、吹付けコンクリート内に外水圧除去用の排水パイプを設置した新LNG低温岩盤貯槽を提案する。また、保冷材厚さ、温水等のブライン温度、配管ピッチをパラメータとした熱伝導解析を行って、流入出熱量やBOR（ボイルオフレイト：一日当たりのボイルオフガス量を貯蔵容量で除した数値）およびブライン温度低下量等を求めて貯蔵性能を評価する。さらに、熱伝導解析結果を用いた熱応力解析および排水パイプ間隔をパラメータとした地下水解析を行って、熱応力緩和や外水圧除去効果を検討し、提案する新LNG低温岩盤貯槽の成立性を示す。

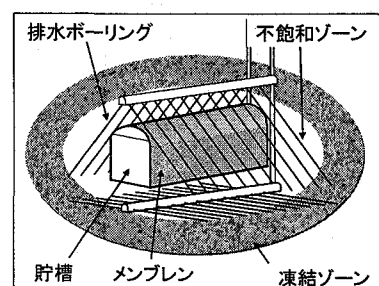


図-1 既存のメンブレン方式のLNG低温岩盤貯槽

2. 新LNG低温岩盤貯槽の提案

提案する新たなLNG低温岩盤貯槽の概念図を図-2に示す。石油岩盤タンク規模の大容量の貯槽を想定して、 C_H 級（電研式分類）上限相当の岩盤に、外径20mの円形空洞を掘削するものとする。空洞掘削後の力学安定性は一次吹付コンクリート（一次吹付Cと表示）とロックボルト等の支保部材で確保する。一次吹付Cの表面には、断面内と軸方向の排水パイプ等を設置し、二次吹付コンクリート（二次吹付Cと表示）を施工する。鉄筋コンクリート躯体（RC躯体と表示）中には温水等のブラインを循環させる凍結防止用配管（ヒーター）を設置し、RC躯体の内側に保冷材とメンブレンを設置して貯槽を形成する。図-2中には各部材の想定厚さを記しており、この場合、貯槽は直径18mになる。

排水パイプはRC躯体施工時および保冷材・メンブレンの建込み時の外水圧除去を行う。またLNG貯蔵開始後、ヒーターには 10° 程度の温水等のブラインを循環させることにより、凍結域を保冷材内に封じ込めてRC躯体・吹付Cおよび岩盤内の温度を 0°C 以上に維持する。

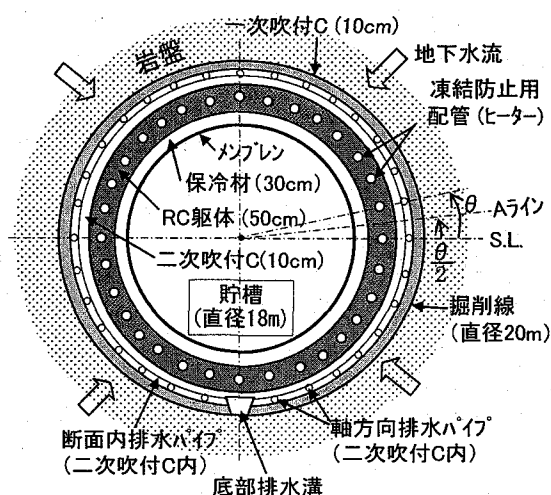


図-2 ヒーター・排水パイプをもつメンブレン方式のLNG低温岩盤貯槽

このため、RC 躯体・吹付 C および岩盤内の温度応力の発生を大幅に削減すると共に、貯蔵時も排水パイプによる外水圧除去が行える。

本提案方式は、図-1 のような大規模な排水システムが不要で、RC 躯体も LNG 地下タンクと比べて大幅に薄くできると共に、岩盤部に発生する熱応力極めて小さいと予想されるため、大断面空洞の建設が容易である。また、岩盤内・地表の温度低下の影響を除去できるため、設置深度を浅くできるなど、本提案方式は経済性に優れたものと考えている。以下、次章より、提案方式のヒーター設置効果や排水パイプの設置効果および流入出熱量や BOR などの貯蔵性能に対する解析検討を行い、新 LNG 低温岩盤貯槽の成立性を示す。

3. 貯蔵性能・ヒーター設置効果の解析検討

(1) 熱伝導解析条件

流入出熱量や BOR などの貯槽性能、およびヒーター設置効果の検討のため、保冷材厚さ、ブライン循環温度およびヒーター間隔をパラメータとした二次元有限要素法熱伝導解析を行う。

保冷材厚さが 30cm の場合の貯槽構造は図-2 であり、対称性利用した半断面の解析モデルを図-3 に示す。貯槽中心の深度は 60m とし、地温勾配は国内の平均的な値である $0.03^{\circ}\text{C}/\text{m}$ としている。図には境界条件も示しているが、地表部の気温は関東地方の平均気温 15°C とし、地表熱伝達係数は LNG 地下式貯槽⁴⁾を参考に、 $11.63\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ とする。また、岩盤内の初期条件は地表温度と地温勾配を考慮した温度とし、側面と底面は温度固定境界、対称面は断熱境界とする。貯槽ではメンブレンは考慮せず保冷材表面で境界条件を与えるが、保冷材設置後 $t=0$ 日は 15°C 、 $0\sim 1$ 日はクールダウン期間で $t=1$ 日後に -162°C 、 $t\geq 1$ 日後は LNG 貯蔵期間中を通じて -162°C で一定とする。熱伝導解析では、 $t=0$ 日に定常解析を行い、その結果を初期条件として 50 年間の非定常解析を行う。

岩盤の熱伝導率、比熱、密度は図-3 中に記しているが、土木学会による熱特性の調査結果⁴⁾を参考に、花崗岩の平均的な値を用いている。なお、一般的に地下水の凍結時の潜熱が熱伝導解析結果に影響するが、対象とする C_{II} 級上限相当岩盤の空隙率は 1% 程度と考えられることから、全ての熱伝導解析ケースで潜熱の影響は無視している。また、保冷材はポリウレタンフォーム、RC 躯体と一次・二次吹付コンクリート等は標準的なものを想定し、LNG 地下式貯槽指針⁵⁾を参考に、これらの熱特性を表-1 に示す。

なお、解析パラメーターは以下の通りとする。図-2 の貯槽構造において、空洞掘削外径 20m、RC 躯体と一次・二次吹付コンクリートの厚さは固定するため、貯槽内径は $a=20\text{cm}$ 、 40cm の場合は、18.2m、17.8m となる。

- ・保冷材厚さ a : 20cm、30cm (標準)、40cm
- ・ブライン温度 b : 5°C 、 10°C (標準)、 15°C
- ・ヒーター設置位置: RC 躯体の厚さ中央 (貯槽中心から 9.55m)。間隔 θ : 5.625° 、 11.25° (標準)、 22.5°

(2) 熱伝導解析結果と考察

まずヒーター設置効果を概観するため、保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ 、ブライン温度 $b=15^{\circ}\text{C}$ 、ヒーター間隔 $\theta=11.25^{\circ}$ の条件と、保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ でブライン循環なしの条件について、図-2 におけるヒーターを通る SL ライン上の代表時点における温度分布を図-4 に示す。図では前者は「循環」、後者を「循環なし」と表示し、LNG 貯蔵開始後の経過日数を凡例に示している。「循環なし」の場合は、保冷材部より外側の温度低下が大きく、

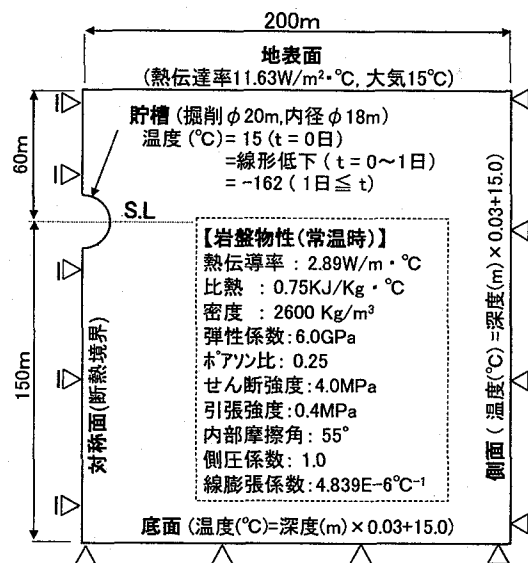


図-3 熱伝導・熱応力解析モデル
(貯槽内径は保冷材 30cm の場合)

表-1 貯槽部材の熱特性

項目	保冷材	RC躯体, 吹付C
熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	0.0267	2.326
比熱 ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	1046.5	837.2
密度 (kg/m^3)	50.0	2400.0
弾性係数 (GPa)		25.0
ポアソン比		0.2
粘着力 (MPa)		4.0
内部摩擦角 ($^{\circ}$)		55.0
引張強度 (MPa)		0.4
線膨張係数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)		$1.0\text{E}-5$

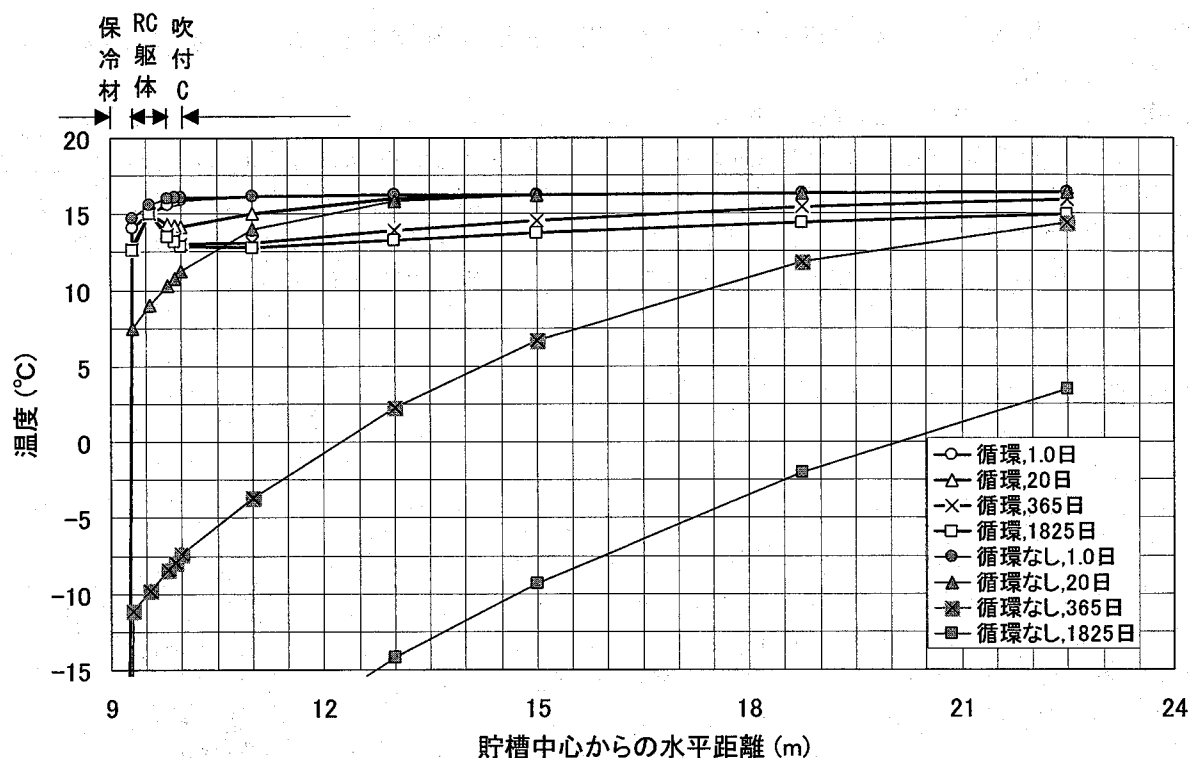


図-4 ブライン循環の有無と SL ライン上の温度分布の関係 ($a=30\text{cm}$, $b=15^\circ\text{C}$, $\theta=11.25^\circ$)

20 日から 365 日の間に保冷材部より外側は 0°C 以下となって、その後も温度が低下していく。これに対し「循環」の場合は、20 日以降はヒーター位置 (9.55m) から RC 躯体・吹付コンクリート部で温度低下域が認められるが、温度低下量は小さく、保冷材より外側は凍結しないことが認められ、ヒーター設置の効果を概略把握できる。

次に、パラメータ a, b, θ の影響を詳細に検討する。解析結果として、ブライン温度 $b=10^\circ\text{C}$ 、ヒーター間隔 $\theta=11.25^\circ$ の条件下で、保冷材厚さ a をパラメータとした 50 年間の熱伝導解析結果を図-5、保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ 、ヒーター間隔 $\theta=11.25^\circ$ の条件下で、ブライン温度 b をパラメータとした解析結果を図-6、保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ 、ブライン温度 $b=10^\circ\text{C}$ の条件下で、ヒーター間隔 θ をパラメータとした解析結果を図-7 に示す。図-5～図-7 では、凡例に示すように、ブライン循環のない条件も「循環なし」と記して、解析結果をプロットしている。また、図-5～図-7 とも、解析結果は貯蔵開始後の経過日を横軸にして、貯槽全周の貯槽流入熱量（流入を正值）、BOR、ブライン流出熱量（流入を正值）、図-2 のヒーター間隔の中央の A ライン上の保冷材・RC 躯体接触部の温度の経時変化をまとめている。BOR は、式(1)で求めるが⁵⁾、貯槽への全流入熱量がすべて LNG を気化させるものとし、一日当たりのボイルオフガス量を貯蔵容量に対する割合で示したものである。式(1)から貯槽流入熱量と BOR は比例関係であるが、貯槽流入熱量はブライン流出熱量との量的関係や熱収支の把握の観点、BOR は貯蔵性能の評価指標という観点からグラフ化している。

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

ここに、BOR: 1 日当りボイルオフ率 (%), Q_t : 貯槽全周の流入熱量 (W/m), A : 貯槽断面積 (m^2), r : 貯液率 (0.97 と仮定), ρ : LNG の密度 (425kg/m^3), h_v : LNG の蒸発熱 (509.91J/kg)。

図-5～7 の結果を概観すると、「循環なし」の場合は、貯蔵開始～クールダウン終了の $t=1$ 日まで流入熱量と BOR は増加し、接触部の温度は貯蔵開始から時間の経過と共に、低下する傾向をもつ。これに対し、「ブライン循環」の場合は、 $t=1$ 日まで流入熱量と BOR は増加後、僅かに減少してほぼ一定値を示し、接触部の温度とブライン流出熱量は貯蔵開始から低下していくが、時間の経過と共に一定値に収束する傾向を示す。

次に「ブライン循環」の解析結果に注目すると、図-5 より、保冷材厚さ a は、流入出熱量・BOR に大きく影響し、 $a=20, 30, 40\text{cm}$ で $BOR=0.19, 0.14, 0.10\%$ と貯蔵性能に強く係わるが、接触部の温度に与える影響は比較的小さいことが認められる。また図-6, 7 より、循環温度 b とヒーター間隔 θ は、流入出熱量・BOR に対

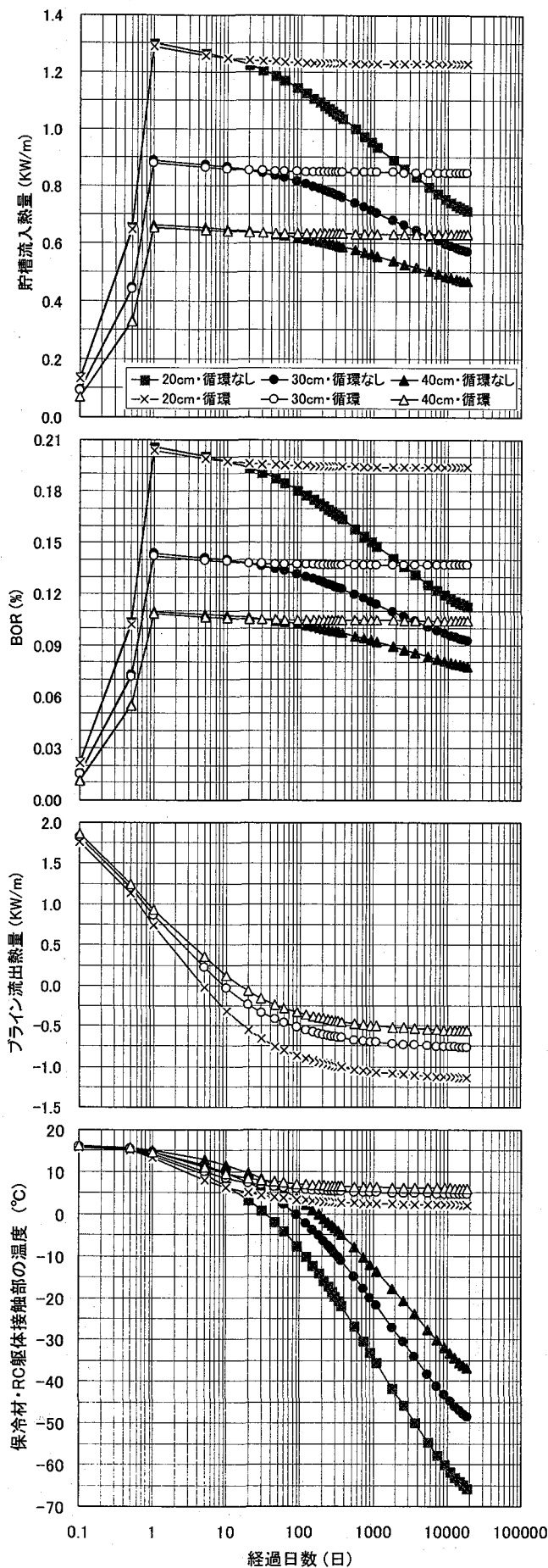


図-5 保冷材厚さ a をパラメータとした解析結果
(ブライン温度 $b=10^{\circ}\text{C}$, ヒーター間隔 $\theta=11.25^{\circ}$)

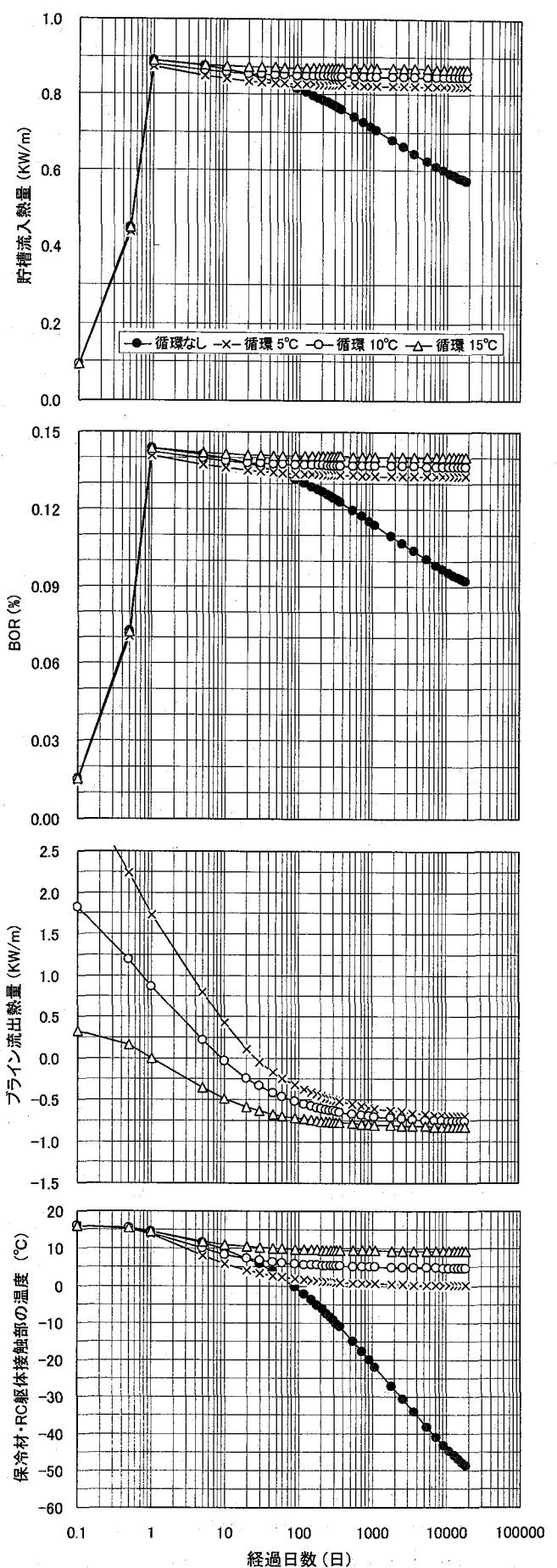


図-6 ブライン温度 b をパラメータとした解析結果
(保冷材厚さ $a=30\text{cm}$, ヒーター間隔 $\theta=11.25^{\circ}$)

する影響は比較的小さいが、接触部の温度に与える影響は比較的大きいことが認められる。

以上でブライン循環とパラメータ a, b, θ の影響を論じてきたが、解析結果の貯蔵性能を BOR で評価する。BOR が小さいほど貯蔵性能は良好であるが、流入熱量がある限り零以上の値となる。LNG 地下タンク等の BOR の公表値は見当たらないが、図-1 の既存のメンブレン方式の LNG 低温岩盤貯槽では 30 年後の BOR が 0.1%未満となるよう設計すると記されており²⁾、メンブレン LNG 船では BOR は通常 0.15%程度と記されている⁹⁾。このため、BOR の閾値を 0.15%と 0.10%と設定すると、循環温度 $b \geq 10^\circ\text{C}$ 、ヒーター間隔 $\theta \leq 11.25^\circ\text{C}$ の条件下では、 $\text{BOR} \leq 0.15\%$ は保冷材厚さ $a \geq 30\text{cm}$ 、 $\text{BOR} \leq 0.10\%$ は $a \geq 40\text{cm}$ で確保できることが認められる。また $a \geq 30\text{cm}$ の条件で、循環温度 $b \geq 10^\circ\text{C}$ 、ヒーター間隔 $\theta \leq 11.25^\circ\text{C}$ にすると、凍結域を保冷材内に封じ込めることができて排水パイプの凍結もないため、RC 躯体～岩盤部に発生する温度応力や RC 躯体に作用する外水圧を大幅に削減できることが期待できる。

なお今回の解析では、ブライン温度は一定の条件で解析したが、実際にはブライン温度は循環中に低下する。ここでは、図-6 の $a=30\text{cm}$ 、 $\theta=11.25^\circ\text{C}$ 、 $b=10, 15^\circ\text{C}$ の解析結果に対して、ブラインの循環中の温度低下量を把握するため、ブラインを温水、貯槽長さを 500m と仮定し、ヒーターの一往復 ($L=1000\text{m}$) の温度低下量を式(2)で計算する。

$$\Delta c = \frac{qt}{w \times A_p} \times \frac{L}{V} \quad (2)$$

ここに、 Δc : ブラインの温度低下量 ($^\circ\text{C}$)、 qt : 単位長さ・1 本あたりのヒーター平均流出熱量 (kW/m)、 w : ブライン熱容量 ($4,186.1\text{kJ/m}^3\text{C}$)、 A_p : ヒーター断面積 (65A として、 0.003621m^2)、 V : 循環流速 (2m/s と仮定)

図-6 の $a=30\text{cm}$ 、 $\theta=11.25^\circ\text{C}$ 、 $b=10, 15^\circ\text{C}$ の解析結果に対する一往復間 $L=1000\text{m}$ の温度低下量 Δc の計算結果は、 $b=10^\circ\text{C}$ の場合は 0.79°C 、 $b=15^\circ\text{C}$ の場合は 0.86°C であった。ブライン供給と戻りの温度差を 5°C ($b=10^\circ\text{C}$ では供給 12.5°C 、戻り 7.5°C) と設定すれば、ヒーターの全配管 32 本 (16 往復) を 6 往復 $\times 2 + 5$ 往復の 3 系統でカバーできることになり、設備仕様や運用面で実用的な範囲と考えられる。

(3) 熱応力解析条件

これまで行ってきた熱伝導解析ケースのうち、標準的な保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ 、ブライン温度 $b=10^\circ\text{C}$ 、ヒーター間隔 $\theta=11.25^\circ\text{C}$ の条件を対象に、二次元有限要素法による熱応力解析を行って、貯槽の力学的安定性を検討する。この場合、掘削応力や RC 躯体等の打設による

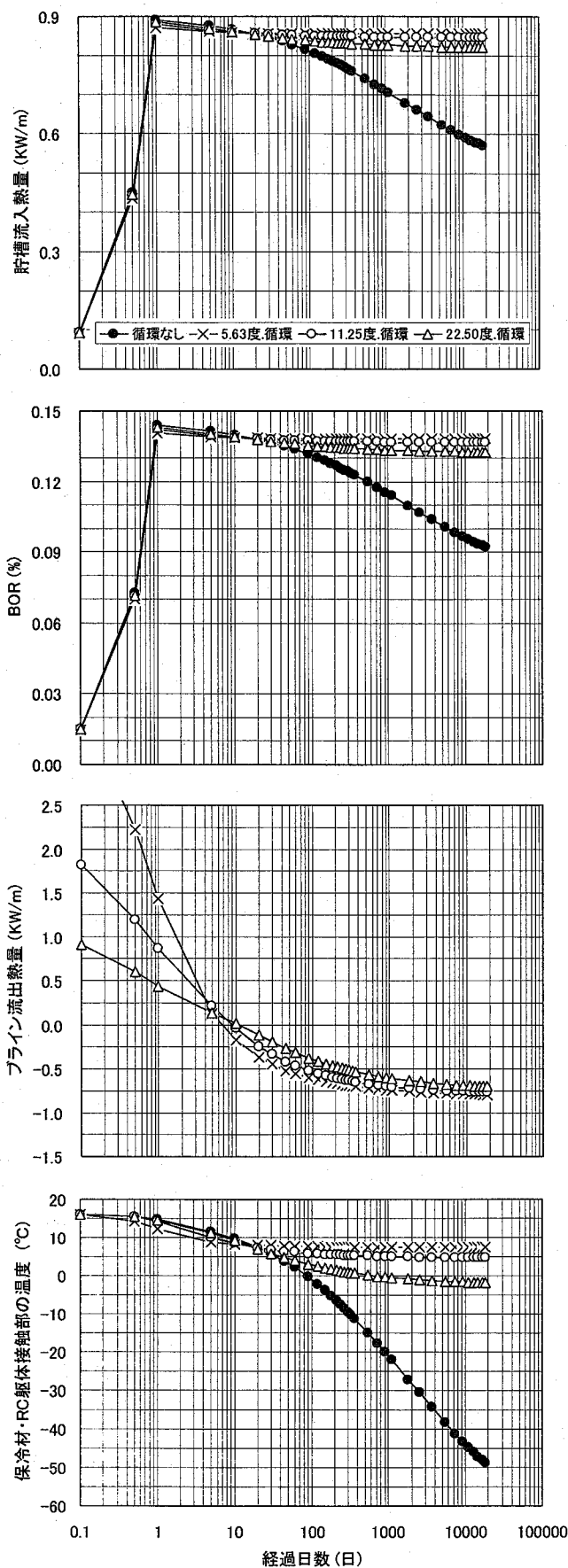


図-7 ヒーター間隔 θ をパラメータとした解析結果 (保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ 、ブライン温度 $b=10^\circ\text{C}$)

応力と熱応力の重ね合わせが必要なため、以下の手順で解析を行う。なお、自重解析～熱応力解析において、岩盤の力学特性は図-3、貯槽部材の力学特性は表-1 に示しており、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：空洞部を応力開放し、空洞掘削後の応力分布を計算する。
- ③RC 躯体・吹付コンクリート打設時の解析：メンブレン・保冷材は構造部材としないため、貯槽部材として、RC 躯体・吹付コンクリート打設時の応力を計算する。
- ④熱伝導解析：前項の熱伝導解析と同様に、図-3 の解析モデルを用い、初期定常解析を実施後、クールダウン期間($t=0\sim1$ 日)、貯蔵期間($t=1\sim18,250$ 日)の 50 年間の非定常熱伝導解析を行う。なお、保冷材の熱特性は式(3)を用いて熱伝達係数 h ($\text{W/m}^2\text{C}$)に置換え、RC 躯体内面を熱伝達境界とするモデル化を行う。

$$v = k \frac{\Delta T}{a} = h \Delta T \quad \therefore h = \frac{k}{a} \quad (3)$$

ここに、 k ：保冷材の熱伝導率($\text{W/m}^2\text{C}$)、 v ：保冷材における熱流速(m/s)、 ΔT ：保冷材両面の温度差($^{\circ}\text{C}$)。

保冷材の熱伝達係数 h は、表-1 より $k=0.0267\text{W/m}^2\text{C}$ 、 $a=0.3\text{m}$ を用いて、 $h=0.089\text{W/m}^2\text{C}$ と求められる。また、貯槽内の温度条件は、初期定常解析では 15°C 、非定常解析では $t=0\sim1$ 日に $15^{\circ}\text{C}\sim-162^{\circ}\text{C}$ 、 $t\geq 1$ 日は -162°C であり、RC 躯体内面を熱伝達境界として解析する。

- ⑤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入力して熱ひずみ・熱応力を算出する擬似連成解析であり、①～③で得られた応力分布に熱応力解析結果を加算する。なお、RC 躯体・吹付コンクリートおよび岩盤は 0°C 以上に維持されることから弾性解析とし、岩盤の破壊基準は、図-8 に示す Mohr-Coulomb の降伏条件を用いる。

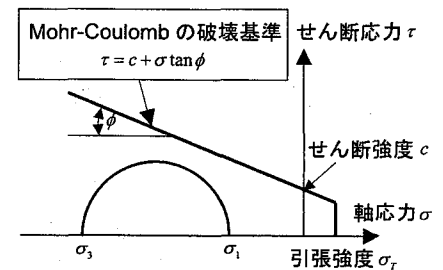


図-8 Mohr-Coulomb の破壊基準

(4) 熱応力解析結果と考察

前項(3)のように、熱応力解析に用いる熱伝導解析結果は保冷材を熱伝達係数でモデル化するため、まず、境界条件のモデル化の影響を検討する。図-2 の A ライン上の保冷材・RC 躯体接触部の温度の経時変化を図-9 に示す。保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ 、ブライン温度 $b=10^{\circ}\text{C}$ 、ヒーター間隔 $\theta=11.25^{\circ}$ の条件で、保冷材を熱伝達係数でモデル化したものが「循環・熱伝達」、保冷材を考慮したものが「循環・熱伝導」であり、参考までにブライン循環がない条件も図-9 に示す。ブライン循環の有無に拘らず、保冷材の熱伝達係数によるモデル化の影響は極めて小さく、以下の熱応力解析には「循環・熱伝達」の熱伝導解析結果を用いた。

熱応力解析結果としては、貯槽中心から 9.3m の位置を「RC 内側」、貯槽中心から 9.8m の位置を「RC 外側」と称することとし、ヒーターを通る SL ライン上とヒーター間の中央を通る A ライン上の「RC 内側」と「RC 外側」の最大主応力 σ_1 の経時変化を図-10 に示す。経過日数の増大に伴って引張応力が増加し、1000 日頃をピークに低下する傾向をもつこと、引張応力度は RC 内側が外側より高いこと、ヒーターを通る SL ライン上の引張応力度が高いことがわかる。このため、代表 3 時点の SL ライン上の応力分布として、 σ_1 と鉛直方向応力 σ_y を図-11 に示す。図-10, 11 によれば、RC 躯体・吹付コンクリート・岩盤は凍結しないため、岩盤部は圧縮応力場になるが、RC 躯体・吹付コンクリートには最大主応力 σ_1 が y 軸方向に引張応力として発生する。これは、RC 躯体等の線膨張係数が岩盤のその 2 倍程度で温度低下量も RC 躯体等の方が大きいいため、RC 躯体等は低温収縮しようとするが、岩盤に拘束されて収縮量が制限されるため引張応力が発生する。その上、RC 躯体等の弾性係数が岩盤部の 4 倍程度であることも、引張応力を大きくする要因になっていると考えられる。

しかし、ヒーターの設置によって RC 躯体等の温度低下量は大幅に低下しているため、発生する引張応力度も大幅に削減されており、鉄筋で十分対応可能な範囲と考えられる。また図-11 より、岩盤部の熱応力が極めて小さい値であるため、貯槽の力学安定性を掘削応力で評価でき、ヒーターを設置した場合は、設置しない場合に比べて貯槽の力学的安定性が向上する。

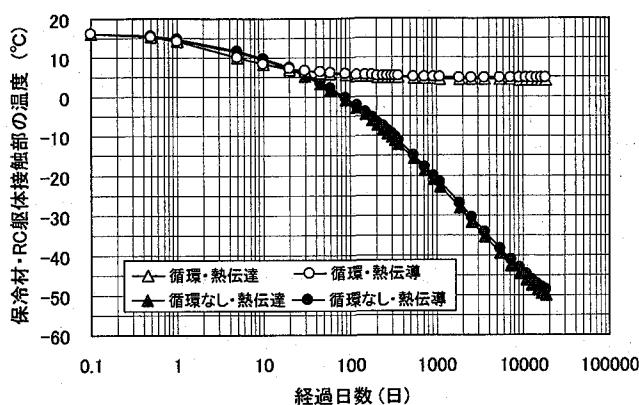


図-9 保冷材のモデル化と温度経時変化の関係

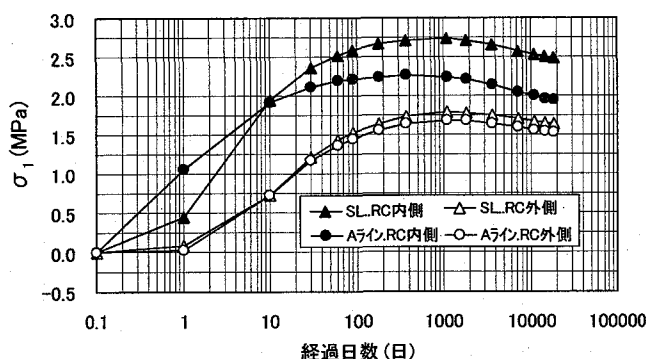


図-10 RC 躯体の最大主応力 σ_1 の経時変化

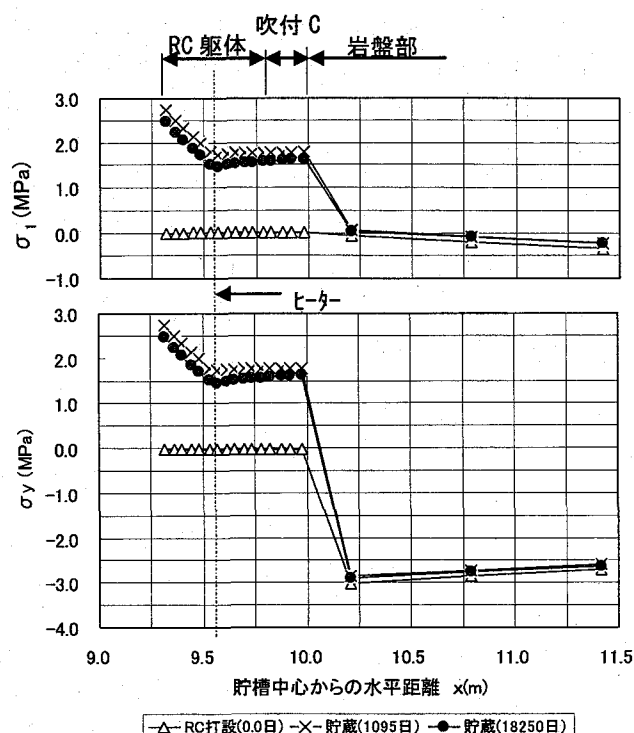


図-11 SL ライン上の最大主応力 σ_1 と y 軸方向の応力 σ_y の分布

4. 排水パイプ設置効果の解析検討

(1) 地下水解析条件

前章の熱伝導解析結果より、LNG 貯蔵時も排水パイプは凍結しないことが確認できたため、本章では地下水解析を行い、排水パイプの外水圧削減効果を定量的に把握する。

解析領域は図-3 と同様とし、貯槽構造は図-2 で保冷材厚さ $a=30\text{cm}$ の条件を対象とし、地下水解析モデルを図-12 に示す。境界条件としては、最大外水圧を作用させるため、地表面に地下水位を固定し、側面に静水圧を作用させる。底面と対称面は不透水境界の条件であり、貯槽はメンブレンを設置するため、不透水境界とする。排水パイプについては、図-2 の軸方向排水パイプのみを解析の対象とし、設置間隔は θ で、一次吹付コンクリート・二次吹付コンクリートの境界位置（貯槽中心から 9.9m ）に設置するものとする。 θ は 5.625° , 11.25° , 22.5° の 3 条件とし、排水パイプには大気圧を与える。透水性の条件は、図-12 中に記したが、吹付コンクリートの透水係数 K_f は $1.0 \times 10^{-6}\text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}$ の 2 条件を与える。解析は有限要素法による地下水解析とし、定常計算を行う。

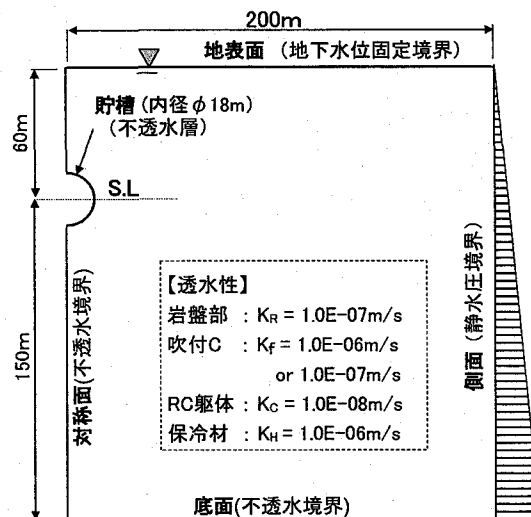


図-12 地下水解析モデル

(2) 地下水解析結果と考察

まず、排水パイプの間隔 θ に対する奥行き 1m 当たりの排水パイプの全排水量 Q と、一孔当たりの平均排水量 q を図-13 に示す。図のように、全排水量 Q は K_f が小さく、 θ が大きくなるほど低下するが、その低下割合は比較的小さいことが認められる。一方、一孔当たりの平均排水量 q については θ の増大でパイプ本数が減るため、 θ の増大ではほぼ比例関係で増大することがわかる。

次に、RC 躯体外周面（貯槽中心から $r=9.8\text{m}$ ）に作用する外水圧を貯槽中心に対する天頂角 α に関してプロットし、図-14 に示す。 $\alpha=0^\circ$ は貯槽中心上方で排水パイプがない場合の水圧(初期水圧) は 50.2m , $\alpha=90^\circ$

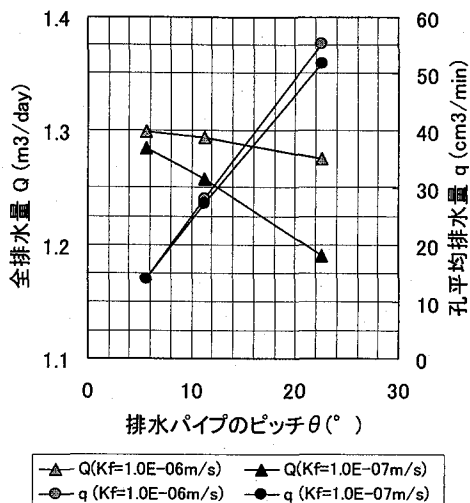


図-13 奥行き 1m 当たりの排水パイプ
全湧水量 Q と一孔当たりの平均
排水量 q の算出結果

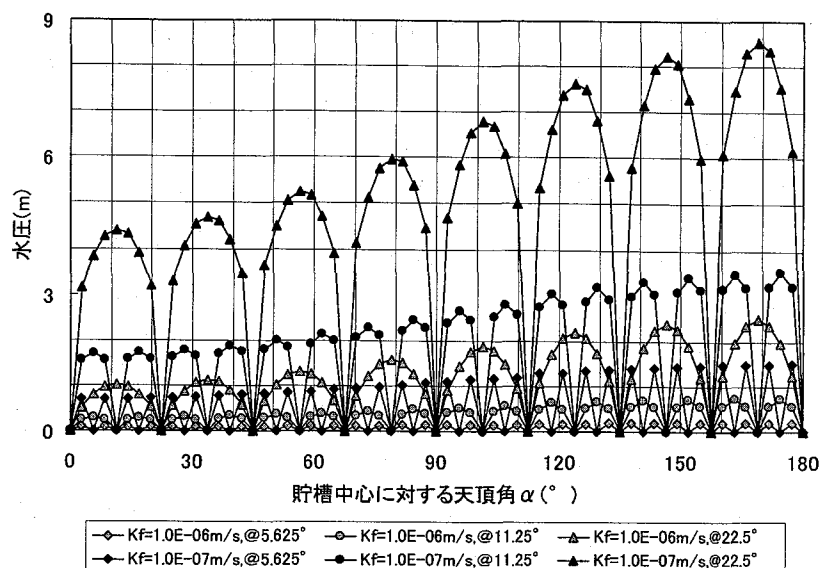


図-14 RC 躯体外周 ($r=9.8m$) に作用する外水圧の算出結果

は貯槽中心側方で初期水圧は $60.0m$ 、 $\alpha=180^\circ$ は貯槽中心下方で初期水圧は $69.8m$ であり、概観すれば、各条件とも排水パイプによる外水圧削減効果が認められる。特に、 K_f が小さく、 θ が小さいほど外水圧が小さくなり、 $K_f=1.0 \times 10^{-6}m/s$ 、 $\theta=5.625^\circ$ の条件ではほぼ無視できるレベルになることがわかる。 $\theta=5.625^\circ$ は今回の条件ではほぼ $0.96m$ のため、実用的な範囲と考えられ、排水パイプによる外水圧除去は可能といえる。したがって、前述の図-13 の結果から、全排水量 Q は θ を小さくしても増加割合が小さいことから、外水圧削減効果が大きい θ を小さくした排水パイプの設置が望ましいものと考えられる。

5. おわりに

本報告では、ヒーターと排水パイプをもつ新たな LNG 低温岩盤貯槽を提案した。提案方式は、ヒーターの設置によって LNG 貯蔵時の凍結域を保冷材に封じ込め、RC 躯体や吹付コンクリートおよび岩盤を $0^\circ C$ 以上に保ち、凍結膨張や熱応力の大幅削減と排水パイプの機能維持を目的としている。また、排水パイプの設置によって、RC 躯体等の施工時および LNG 貯蔵時に RC 躯体等に作用する外水圧削減を行うものである。このため本報告では、この提案方式に対する熱伝導解析・熱応力解析および地下水解析を行い、ヒーターと排水パイプの機能・効果の確認および BOR 等を指標とした貯蔵性能を評価し、提案方式の成立性を検討した。得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- ・ヒーターを設置しない場合は、メンブレン・保冷材・RC 躯体・吹付コンクリートで構成する貯槽部材を設置した条件でも RC 躯体・吹付コンクリート・岩盤部の温度は時間の経過にしたがって大きく低下する。これに対し、ヒーターを設置した場合は、RC 躯体～岩盤部の温度低下は小さく、保冷材に凍結域を封じ込めることが認められた。その結果、LNG 貯蔵時も排水パイプの機能確保が可能なが示された。
- ・ブライン循環を行った場合、保冷材厚さ a は、BOR に大きく影響して貯蔵性能に強く係わるが、接触部の温度に与える影響は比較的小さいこと、循環温度 b とヒーター間隔 θ は、BOR に対する影響は比較的小さいが、温度に与える影響は比較的大きいことが定量的に把握できた。また、 $a \geq 30cm$ の条件で $b \geq 10^\circ C$ 、 $\theta \leq 11.25^\circ$ にすると、凍結域を保冷材内に封じ込めることができることが確認できた。
- ・貯蔵性能を BOR で評価すると、今回の計算の範囲内では、 $b \geq 10^\circ C$ 、 $\theta \leq 11.25^\circ$ の条件下で、 $BOR \leq 0.15\%$ を確保するには $a \geq 30cm$ 、 $BOR \leq 0.10\%$ を確保するには $a \geq 40cm$ でよいことが把握できた。
- ・自重解析、空洞掘削解析、RC 躯体設置時解析による応力算出後、 $a=30cm$ 、 $b=10^\circ C$ 、 $\theta=11.25^\circ$ の条件に対する熱応力を加算した結果、LNG 貯蔵日数の増大に伴って RC 躯体・吹付コンクリート中に引張応力が発生するが、鉄筋で十分対応可能な範囲と考えられた。また、ヒーターの設置によって RC 躯体等の温度低下量は大幅に小さくなっているため、引張応力度も大幅に削減されていること、岩盤部には熱応力がほとんど発生しないため、ヒーターなしの場合に比べて力学的安定性が大幅に向上することが推察された。

・吹付けコンクリート K_f と軸方向排水パイプの設置間隔 θ をパラメーターとした地下水解析の結果、排水パイプの外水圧削減効果を定量的に示すと共に、今回の計算の範囲では θ を 5.625° (@0.96m) 程度にすれば、RC 躯体に作用する外水圧をほぼ削除できることが確認できた。 θ を小さくして排水パイプ本数が増えた場合も排水パイプの全排水量はそれほど増加しないことから、外水圧削減効果が大きい θ を小さくした排水パイプの設置が有効と考えられた。

以上の評価結果より、提案方式の凍結膨張・熱応力削減効果、外水圧削減効果等を確認すると共に、BOR 等の貯蔵性能の確保に必要な条件を確認でき、提案方式の成立性を示すことができた。また、今回得られた結果より、提案方式は図-1 の大規模排水システムが不要なこと、岩盤部には熱応力がほとんど発生しないため大規模空洞の建設に有利なこと、地表部への温度低下の影響がないため貯槽深度を浅くできる可能性があるなど、経済性や環境面にも有利な貯蔵方式と考えられる。

いま、今回の提案した新 LNG 低温岩盤貯槽の全体システムの一部を図-15 に示す。本図は貯蔵物の受払いを頻繁に行う流通型貯蔵を念頭に置いたシステム例であるが、今後利用用途に応じた詳細仕様を今後検討する必要がある。また、貯槽部材の詳細仕様および施工法の検討が必要と考えられ、今後、具体化を目指した研究開発を行う予定である。

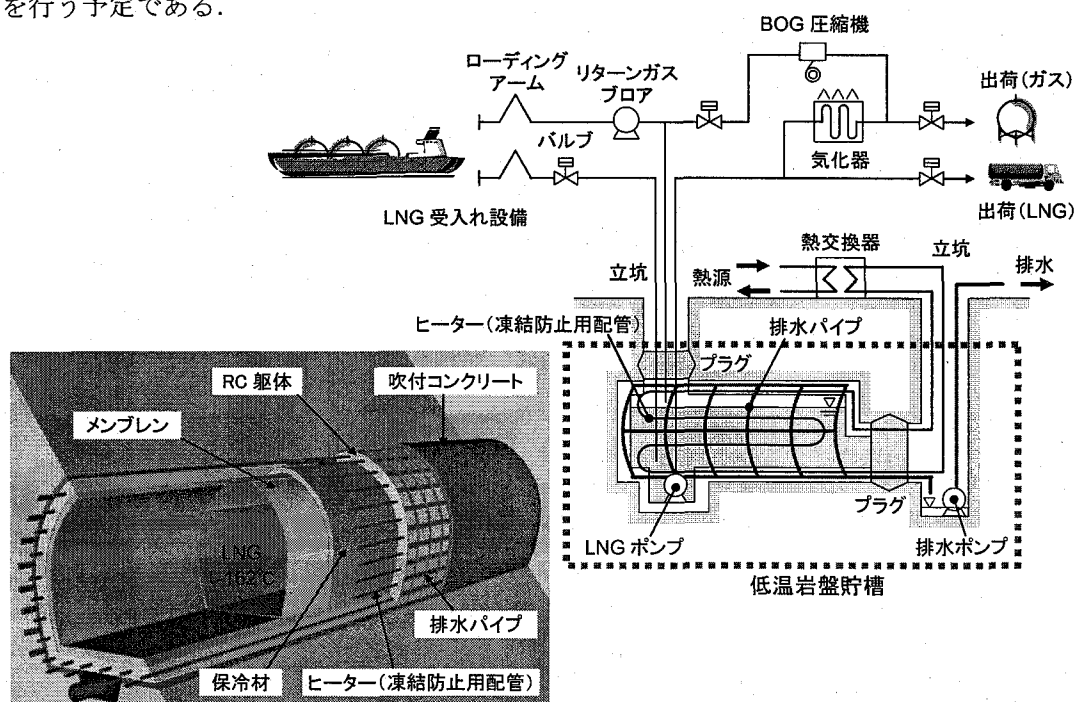


図-15 提案方式の LNG 低温岩盤貯槽と全体システムの一部

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) 米山一幸・百田博宣・若林成樹・岡田滋：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，Vol.12，pp.9-18, 2007.
- 4) 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.
- 5) 日本ガス協会：LNG 地下式貯槽指針，2002.
- 6) 難波直愛・玖久正憲・湯浅和昭・石丸純史郎：クリーンエネルギー輸送～LNG 船の昨日・今日・あした，三菱重工技報，Vol.40，No.1，pp.32-35, 2003.