

# DME 地下低温貯蔵システムの成立性に関する検討

米山 一幸 宮下 国一郎 石塚 峰夫 八田 敏行  
(技術研究所) (技術研究所) (土木事業本部) (技術研究所)

## Feasibility of an Underground Refrigerated Dimethyl Ether Storage System

by Kazuyuki Yoneyama, Kuniichiro Miyashita, Mineo Ishizuka and Toshiyuki Hatta

### Abstract

This paper proposes an underground refrigerated storage system for dimethyl ether (DME). The authors conducted analytical studies of heat conduction and thermal stress around the proposed underground storage cavern. The studies show that the stability and air tightness of the storage cavern can be maintained under the expected operating conditions. Moreover, a conceptual design and financial study of a model storage system indicates that the system is more economical than conventional aboveground tanks.

### 概要

ジメチルエーテル (DME) の地下低温貯蔵システムについて、地下貯槽周辺岩盤を対象とした熱伝導解析、熱応力解析により貯槽周辺の温度変化、貯槽空洞の安定性などについて検討を行い、設定した条件において貯槽の気密性、安定性が良好に保持されることを確認した。また、1つのモデルケースを想定して貯蔵システムの概念設計および経済性評価を行った結果、本システムが従来の地上式貯蔵よりも経済的に有利となる可能性が示された。

### § 1. はじめに

我が国のエネルギー情勢は、原油価格の記録的な高騰、中国・インドの急速な産業発展によるアジア地域のエネルギー需要の増加などを背景に、供給源の多様化によるエネルギーセキュリティ向上が急務となっている。このような状況の中、ジメチルエーテル (DME) は次世代のエネルギーとして近年特に注目を集めており、普及促進に向けた取り組みが進められている。

表-1に、DMEの主な物性を示す。DMEは常温常圧下では気体であり、常圧下における沸点は約 $-25^{\circ}\text{C}$ である。DMEの利用においては、冷却により液化ガスの状態で運搬・貯蔵することが計画されている。同種の液化ガスとしてはLNG、プロパンガスが既に広く普及しているが、DMEはこれらの燃料と比較して沸点が高いため、液化が比較的容易であり、運搬・貯蔵におけるハンドリングの面でも有利と考えられている。

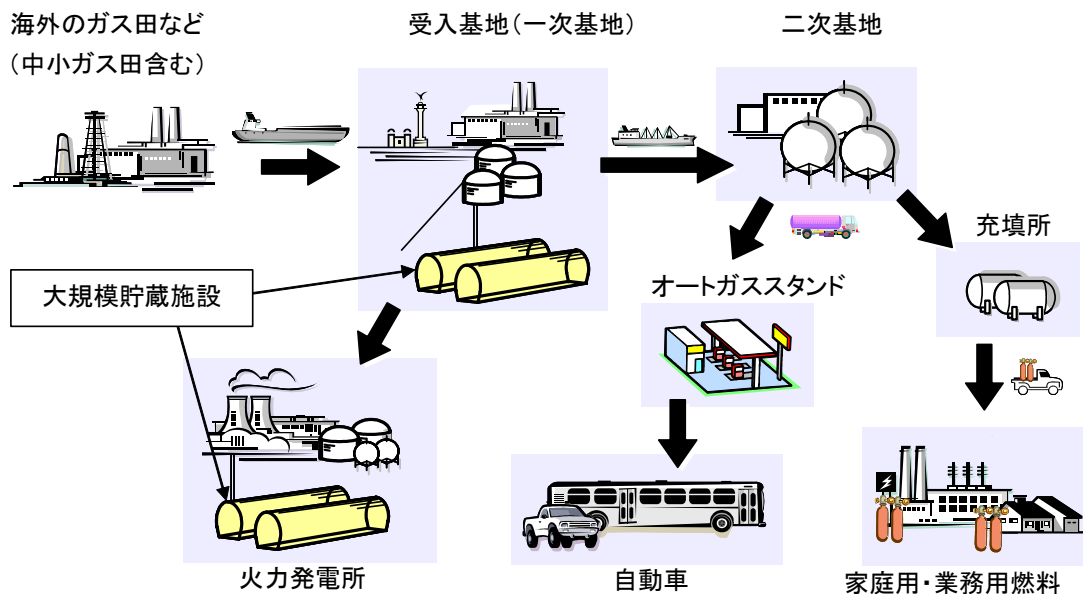
図-1に、DMEの将来の利用のイメージを示す。DMEは天然ガス、石炭、バイオマスなどさまざまなソースから製造が可能であり、その用途も発電、自動車燃料 (ディーゼルエンジン)、家庭・業務用燃料など多岐にわたる。流通ネットワークにおける貯蔵インフラとしては、当面は既存のLPG施設を転用する方法が検討されているが、将来のDMEの広範な普及を考えた

場合、より大規模の新規貯蔵施設の必要性が高まっていくことが予想される。特に、輸入受入基地や発電所などの大消費地における大容量貯蔵の計画においては、建設にともなう地表部の変更が少なく、景観性・安全性の面でも優れた地下貯蔵方式が有利となることが考えられる。

本検討では、今後実現が期待されるDMEの広範な供給ネットワークにおける貯蔵インフラとして、地下の岩盤空洞を利用したDME地下低温貯蔵システムを提案し、施設の基本概念を整理するとともに、地下貯槽周辺岩盤を対象とした熱伝導解析・熱応力解析を実施し、技術面での成立可能性について検討を行う。さらに、施設の経済性に関する基礎的な検討として、発

表-1 DMEの主な物性

化学式	$\text{CH}_3\text{OCH}_3$
沸点	$-25.0^{\circ}\text{C}$
液密度	$0.67\text{ g/cm}^3 (20^{\circ}\text{C})$
ガス比重 (対空気比)	1.59
爆発限界	3.4~17.0%
セタン価	55~60
低位発熱量	$59,441\text{ kJ/Nm}^3$



図—1 DME の将来の流通のイメージ

電利用を想定したモデルケースについて、概念設計および概略の経済性検討を行う。

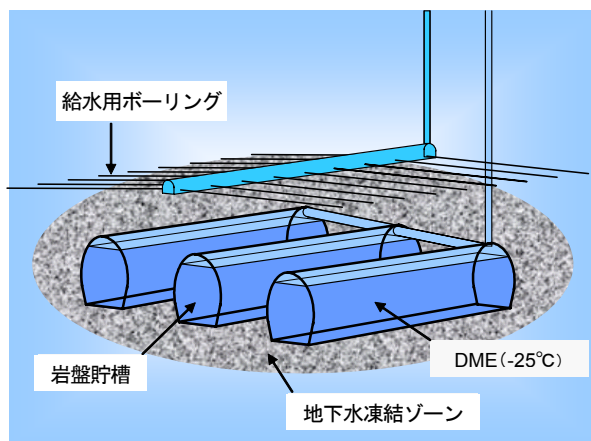
## § 2. DME 地下低温貯蔵システムの基本概念

図—2 に、本報告で提案する DME 地下低温貯蔵システムの概念図を示す。地下の岩盤中に掘削した空洞を貯槽とし、内部に低温液化状態の DME (温度  $-25^{\circ}\text{C}$ ) を貯蔵する。地下貯槽の気密性は、貯槽周辺の地下水が低温下で凍結し、漏洩経路となる岩盤のき裂を閉塞することにより確保される。貯槽壁面に気密材などの設置は不要であり、吹付けコンクリート等の簡易な支保のみとすることができることから、経済的に貯槽を建設することが可能と考えられる。

地下貯槽の上部には給水用のボーリング孔を配置し、施工中・稼動時に岩盤へ水を供給することにより、地下水位が低下し貯槽近傍の岩盤が不飽和になることを防止する。また、稼動時にボーリング内に常温の水を循環させることにより、地表付近の温度低下を抑制し、植生などに悪影響が生じることを防ぐことができる。

この他に、付帯設備として DME の受入れ/払出し設備、流入熱により発生する気化ガス (BOG) により貯槽内圧が上昇すること防ぐための BOG 処理設備などが必要となる。

このような地下の岩盤空洞を利用した低温貯蔵施設としては、北欧の LPG 貯蔵への適用が数例あるが、国内では実績がなく、国内の地質状況に適合した設計方法などの検討が課題と考えられる。



図—2 DME 地下低温貯蔵システムの概念図

## § 3. 貯槽周辺の温度変化・熱応力の予測解析

DME 低温貯蔵システムの技術的な成立可能性を検討することを目的に、地下貯槽周辺岩盤を対象とした熱伝導解析、熱応力解析を実施し、貯槽周辺の岩盤温度の変化、地下水凍結ゾーンの形成範囲、岩盤内の応力分布などを予測する。

### 3.1 解析手法

検討には 2 次元有限要素法による非定常熱伝導・熱応力解析を用いる。

解析のフローを図—3 に示す。解析の手順は、まず初期温度状態 (地温勾配に基づく温度分布) において自重解析により初期地圧分布を求め、さらに貯槽部を空洞に置き換えた掘削解析により貯槽掘削後の応力分布

を計算する。次に、貯槽空洞壁面部にプレクーリング時、および、運転時の温度条件を設定して非定常の熱伝導解析を実施し、各時刻における岩盤内の温度分布を計算する。さらに、求められた温度を各要素に与え、発生する熱応力を計算する。

解析においては、岩盤の熱特性、力学特性の温度依存性を考慮し、低温下における岩石物性に関する文献調査結果より解析条件を設定する。

### 3.2 解析モデル

解析モデルの形状、および、熱伝導解析・熱応力解析における境界条件を図-4に示す。解析モデルの設定において考慮した条件を以下に示す。

- ・地下貯槽は貯蔵容量 5 万トンの 2 連のトンネル型空洞と仮定する。解析領域は、トンネル横断方向の 2 次元鉛直断面とし、解析モデルの対称性を考慮して対称軸を境界とする 1/2 の範囲を対象とする。
- ・貯槽空洞の断面形状は、岡山県倉敷市に現在建設中の LPG 岩盤貯槽と同じ断面とする。
- ・地表部の地形は平坦とし、地下貯槽の設置深度は貯槽天端位置で GL-50m と仮定する。
- ・DME 貯蔵温度は-27℃（沸点-25℃より 2℃低い値）とし、施設の建設完了からプレクーリングを経て貯蔵を開始するまでの貯槽内の温度変化を図-5のように想定して、貯槽壁面部の境界温度を設定する。
- ・貯槽空洞天端より 20m 上方に給水用ボーリングを水平に配置し、プレクーリング時・貯蔵運転時に孔内に温度 15℃の水を循環することを想定して、モデル内の該当位置の節点温度を 15℃に固定する。なお、本検討では 2 次元断面を解析対象とするため、ボーリングの貯槽延長方向の設置間隔による影響は考慮していない。

### 3.3 岩盤物性

#### 3.3.1 熱伝導率、比熱

岩盤の熱伝導率、比熱については、対象岩盤として花崗岩、安山岩を想定し、既往の文献などにおける測定値を参考に値を設定する。表-2には、文献調査より得られた常温における花崗岩、安山岩の熱伝導率、比熱の平均値を示す。また、図-6には熱伝導率・比熱の温度依存性を計測した文献データを基に、これらを表-2の常温平均値で正規化した値と温度の関係を示す。図より、熱伝導率は花崗岩、安山岩とも測定値にばらつきが見られるが、全体的には低温になるほど増加する傾向があること、また、比熱は低温になるほど減少する傾向があることが示されている。なお、花崗岩の比熱の図で 0℃付近の測定値に局所的な変化が見られるが、間隙水の潜熱による影響と考えられる。

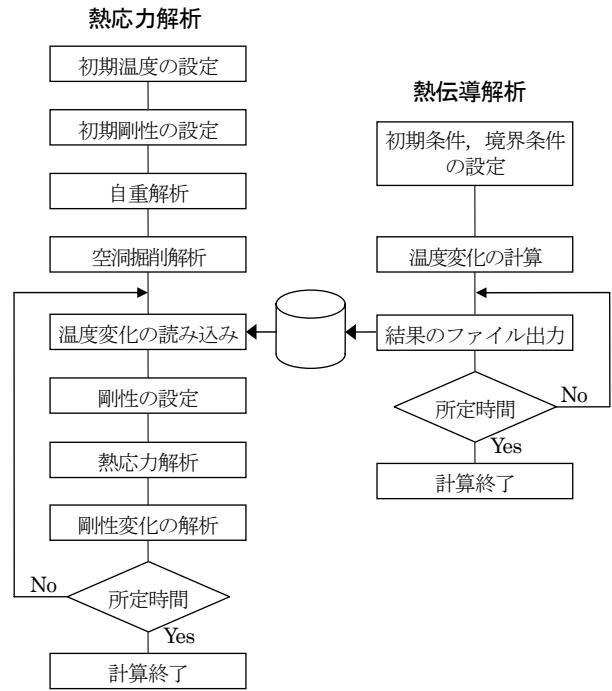


図-3 解析フロー

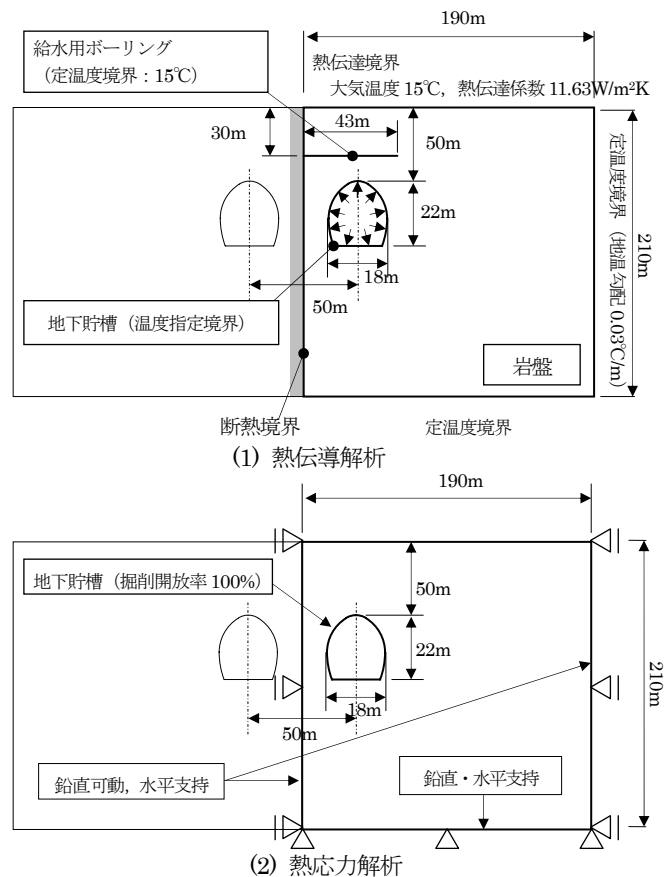


図-4 解析モデル、境界条件

表-2 常温における花崗岩・安山岩の熱特性 (平均値)

	花崗岩	安山岩
熱伝導率	2.89 W/mK	1.75 W/mK
比熱	0.75 kJ/kgK	0.75 kJ/kgK

解析においては、岩盤の熱伝導率が貯槽周辺の温度分布などに及ぼす影響を把握するため、図-6 (1), (2) に太線で示した3種類の条件（花崗岩の平均値・最大値、安山岩の平均値）を設定する。また、比熱については花崗岩と安山岩の平均値が等しく、測定値のばらつきが比較的小さいことから、図-6に示す同一の条件を用いることとする。

### 3.3.2 力学特性

岩盤の力学特性は、電中研式岩盤分類のC<sub>H</sub>級およびC<sub>M</sub>級岩盤を想定し、各岩級の力学特性の平均値より常温時の設定値を表-3に示すように定める。また、弾性係数、引張強度、せん断強度の温度依存性については、石塚ら<sup>2)</sup>により報告されている花崗岩試料の温度と物性の関係に基づき、常温時の値に対する比を図-7のように仮定し、各岩級の常温時の値に乗ずることにより設定する。

### 3.3.3 線膨張係数（凍結膨張ひずみ）

C<sub>H</sub>級岩盤の線膨張係数は、石塚ら<sup>2)</sup>の実験に基づき、図-8のように設定する。ここで、-10℃から0℃の間の線膨張係数が小さくなるのは、間隙水の凍結膨張に伴い、温度低下によって岩盤のみかけの体積が膨張す

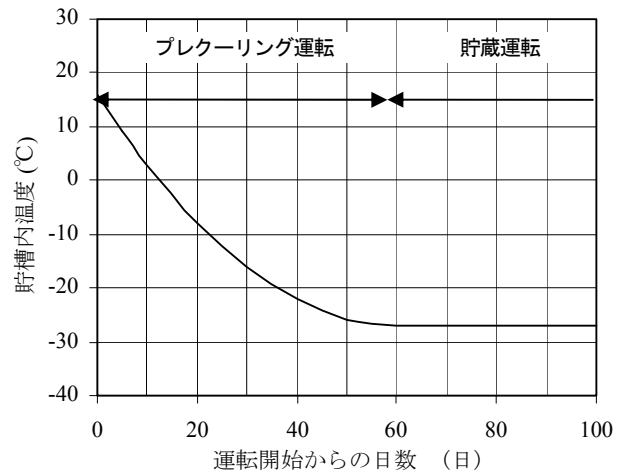
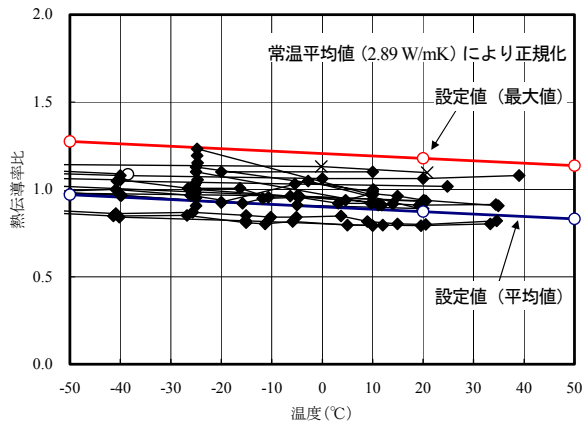


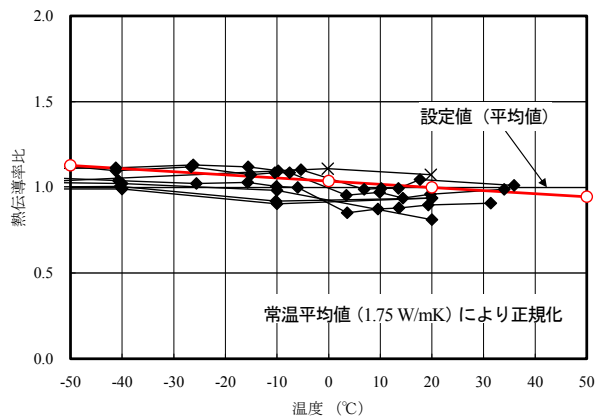
図-5 地下貯槽内の温度変化

表-3 常温における岩盤の力学特性

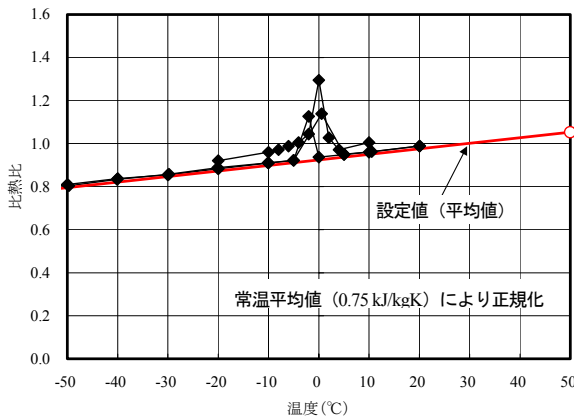
	C <sub>H</sub> 級岩盤	C <sub>M</sub> 級岩盤
単位体積重量	26.0 kN/m <sup>3</sup>	24.5 kN/m <sup>3</sup>
弾性係数	6.0 GPa	2.75 GPa
引張強度	300 kN/m <sup>2</sup>	150 kN/m <sup>2</sup>
せん断強度	3000 kN/m <sup>2</sup>	1500 kN/m <sup>2</sup>
内部摩擦角	45°	35°



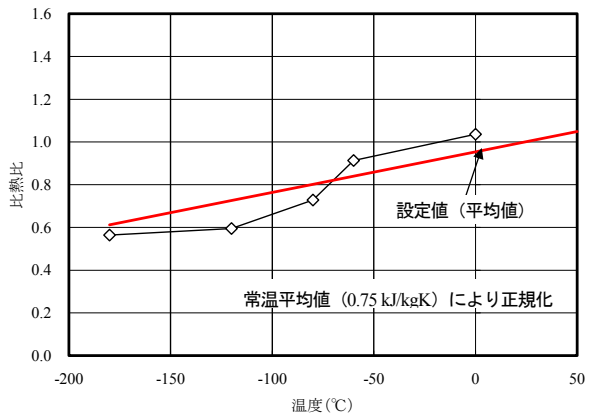
(1) 熱伝導率 (花崗岩)



(2) 熱伝導率 (安山岩)

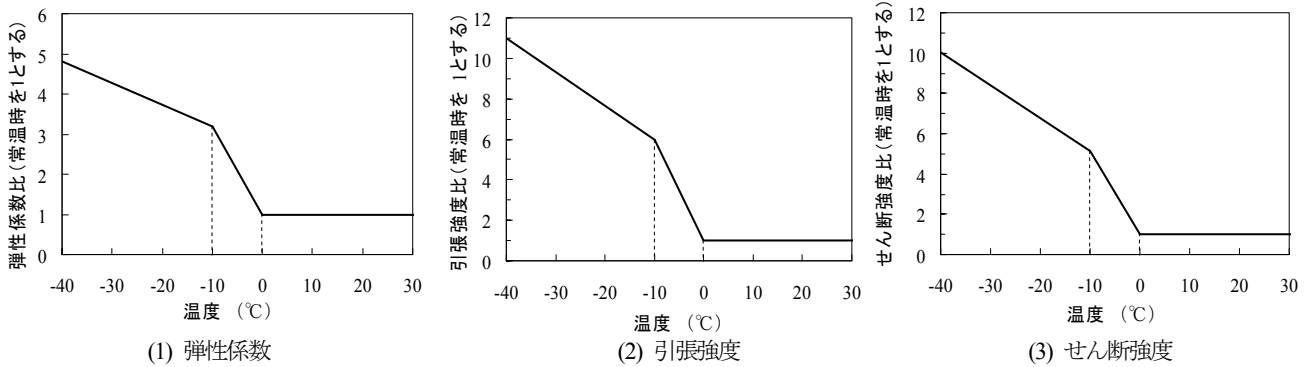


(3) 比熱 (花崗岩)



(4) 比熱 (安山岩)

図-6 花崗岩、安山岩の熱特性と温度の関係



図一七 弾性係数、引張強度、せん断強度と温度の関係（常温時の値に対する比）

ることによる。C<sub>M</sub> 級岩盤の線膨張係数については、C<sub>H</sub> 級岩盤との間隙率の差を考慮し、岩盤の間隙率と凍結膨張ひずみの関係に関する文献データ<sup>3)</sup>を参考に、図一八のように設定する。

### 3.4 解析ケース

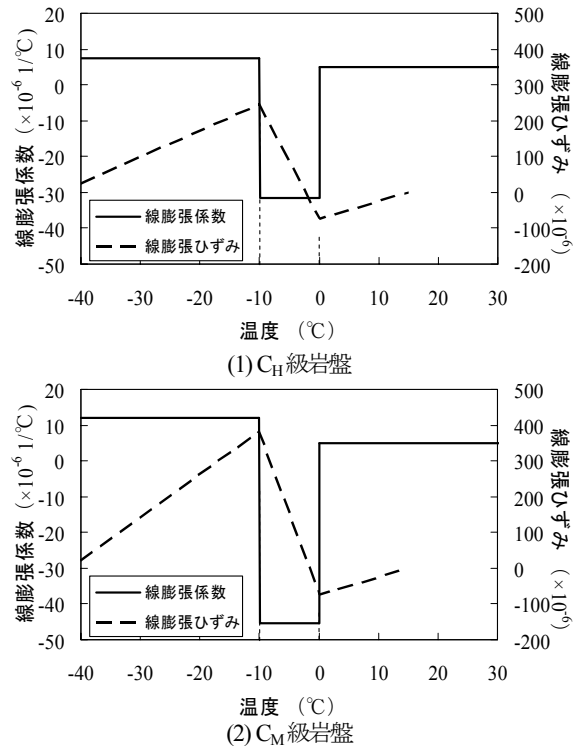
検討において設定した解析ケースを表一四に示す。ケース1～3はC<sub>H</sub>級岩盤を想定し、3.3.1項で設定した3種類の熱伝導率を解析条件として、岩盤の熱伝導率による影響を検討する。ケース4は、熱伝導率は花崗岩の平均値とし、C<sub>M</sub>級岩盤の力学特性を解析条件として岩級による影響を検討する。

### 3.5 解析結果

#### 3.5.1 貯槽周囲の温度分布

図一九に、ケース1～3の運転開始1年後および30年後の貯槽周囲の岩盤温度分布を示す。図中の赤線は地下水凍結ゾーンの範囲を示す。施設の運転に伴い貯槽周辺の岩盤温度が低下し、地下水凍結ゾーンが形成される。凍結ゾーンは時間の経過とともに拡大し、岩盤の熱伝導率を高く設定したケースの方が拡大する速度が大きくなる。運転開始から30年後の解析結果では、貯槽の側壁から水平に約25～30m、底盤から鉛直下方に約30～40mの範囲が凍結ゾーンとなっている。一方、貯槽上方の凍結ゾーンは壁面から約10mの範囲であり、給水用ボーリングの効果により貯槽上部の温度低下、凍結ゾーンの形成が抑制されていることがわかる。

図一十、図一十一に、ケース1における貯槽側壁方向の岩盤温度分布、および、地表面の温度分布の各経時変化を示す。貯槽周辺の岩盤温度は、運転開始直後には比較的早く低下するが、時間の経過とともに温度低下が緩やかになる。運転開始から50年後の初期温度からの温度低下は、貯槽側壁から50mの位置で約9°C、100mで約2°Cとなる。施設付近に地下構造物があり、温度低下による悪影響が予想される場合には、上記の温度変化を考慮し、適切な離隔距離を確保する必要があるものと考えられる。一方、貯槽上部の地表面の温



図一八 線膨張係数、線膨張ひずみと温度の関係

表一四 解析ケース

ケース	熱伝導率	力学特性
ケース1	2.8～2.4 W/m・K (花崗岩の平均値)	C <sub>H</sub> 級岩盤を想定 単位体積重量 : 26.0 kN/m <sup>3</sup> 弾性係数 : 6.0 GPa せん断強度 : 3000 kN/m <sup>2</sup> 引張強度 : 300 kN/m <sup>2</sup> 内部摩擦角 : 45°
ケース2	3.9～3.4 W/m・K (花崗岩の最大値)	
ケース3	2.0～1.7 W/m・K (安山岩の平均値)	
ケース4	2.8～2.4 W/m・K (花崗岩の平均値)	C <sub>M</sub> 級岩盤を想定 単位体積重量 : 24.5 kN/m <sup>3</sup> 弾性係数 : 2.75 GPa せん断強度 : 1500 kN/m <sup>2</sup> 引張強度 : 150 kN/m <sup>2</sup> 内部摩擦角 : 35°

度は、運転開始から50年の全期間を通じて初期温度からほとんど変化せず、温度低下による地表の植生や生態系への影響はほとんどないと考えられる。

### 3.5.2 貯槽周囲の破壊領域

図-12に、各ケースの運転開始から1年後、3年後および30年後の貯槽周囲の破壊領域(図中の×印)を示す。図中の青線は地下水凍結ゾーンの範囲を示す。運転開始から1年後の結果では、熱伝導率を大きく設定したケース2で貯槽上方に一部破壊が生じているが、その他のケースでは破壊の発生は見られない。一方、運転開始から3年後の結果では全てのケースで破壊が生じており、さらに30年後の結果では破壊領域が拡大していることがわかる。

破壊領域は、主に貯槽上方の凍結ゾーンの境界付近と、地表面近くの領域を中心に発生している。ケース1~3の結果を比較すると、岩盤の熱伝導率が高いケースほど破壊の範囲が大きい。また、 $C_H$ 級岩盤を想定したケース1では凍結ゾーン境界部の破壊が顕著であるのに対し、 $C_M$ 級岩盤としたケース4では凍結ゾーン近傍の破壊領域は比較的小さい。

図-13には、ケース1における貯槽天端直上方向の水平方向の応力分布(引張方向を正とする)を示す。貯槽壁面部において圧縮応力が最大となり、壁面からの距離が大きくなるほど圧縮応力は減少する。運転開始から10年後以降では、貯槽壁面から約10m付近から地表面までの区間で応力がほぼ0となっており、図-12の破壊領域と一致することから、この領域で引張応力による岩盤の破壊が生じていることがわかる。一方、貯槽壁面近傍では運転開始から50年後までの全期間を通じて圧縮応力が作用しており、引張破壊は生じないことが示されている。

以上の解析結果より、地下低温貯蔵システムの運転に伴い、運転開始から1~3年後に凍結ゾーン近傍で岩盤の破壊が生じる可能性があることが示されている。しかし、これらの破壊領域は十分な厚さを持った凍結ゾーンの境界付近から外側で発生しているものであり、貯槽近傍の領域では破壊は生じていない。したがって、設定した条件においては、運転開始から50年後までの全期間を通じて貯槽周囲の凍結ゾーンは良好に保持され、貯槽の安定性、気密性・液密性などの機能は健全に保たれることがわかる。

また、 $C_M$ 級岩盤を想定したケース4で凍結ゾーン近傍の破壊範囲が小さくなることについては、 $C_H$ 級岩盤に比べて弾性係数が小さいため熱応力や凍結膨張により岩盤に発生する応力が小さくなり、破壊条件に達しなかったためと考えられる。このことから、比較的強度が小さな岩盤においても貯槽の気密性、安定性が良好に確保される可能性があることがわかり、中硬岩、軟岩等の地質条件の地域にも、本システムが適用することが示された。

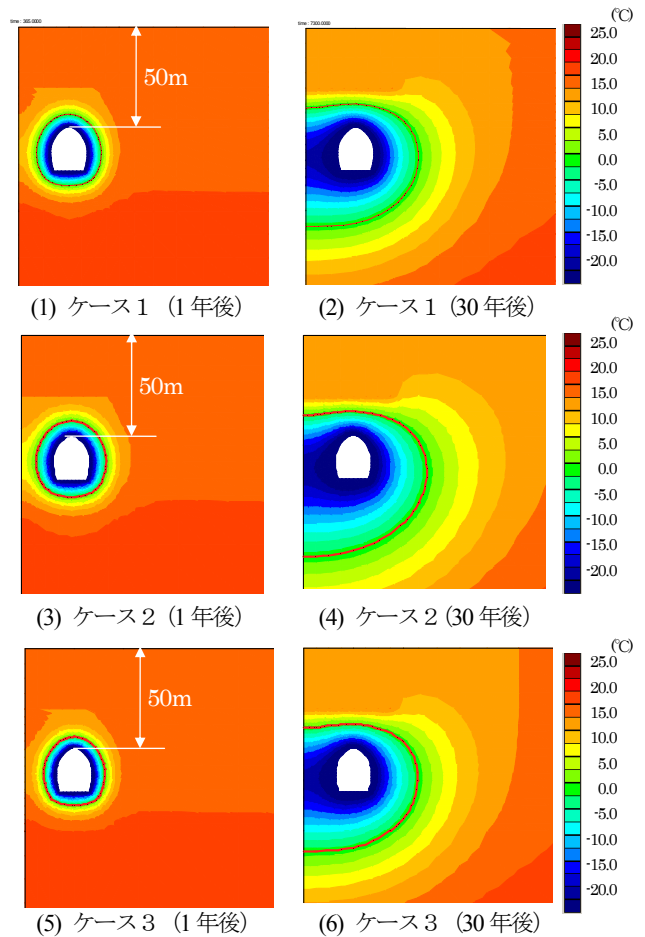


図-9 貯槽周辺の岩盤温度分布  
(運転開始から1年後および30年後)

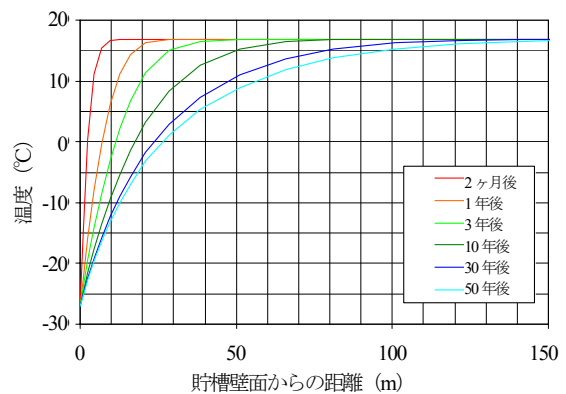


図-10 貯槽側壁方向の岩盤温度分布(ケース1)

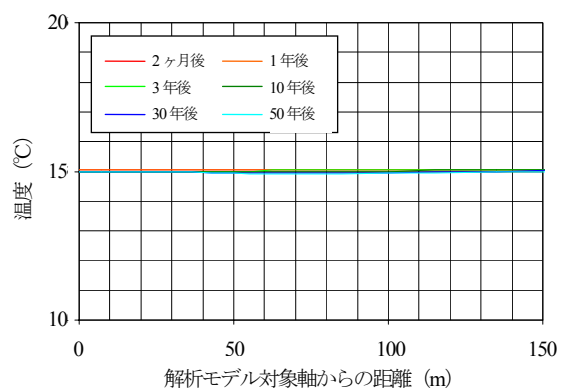


図-11 地表面の岩盤温度分布(ケース1)

注) 図中の×は破壊領域、太線は地下水凍結ゾーンを示す

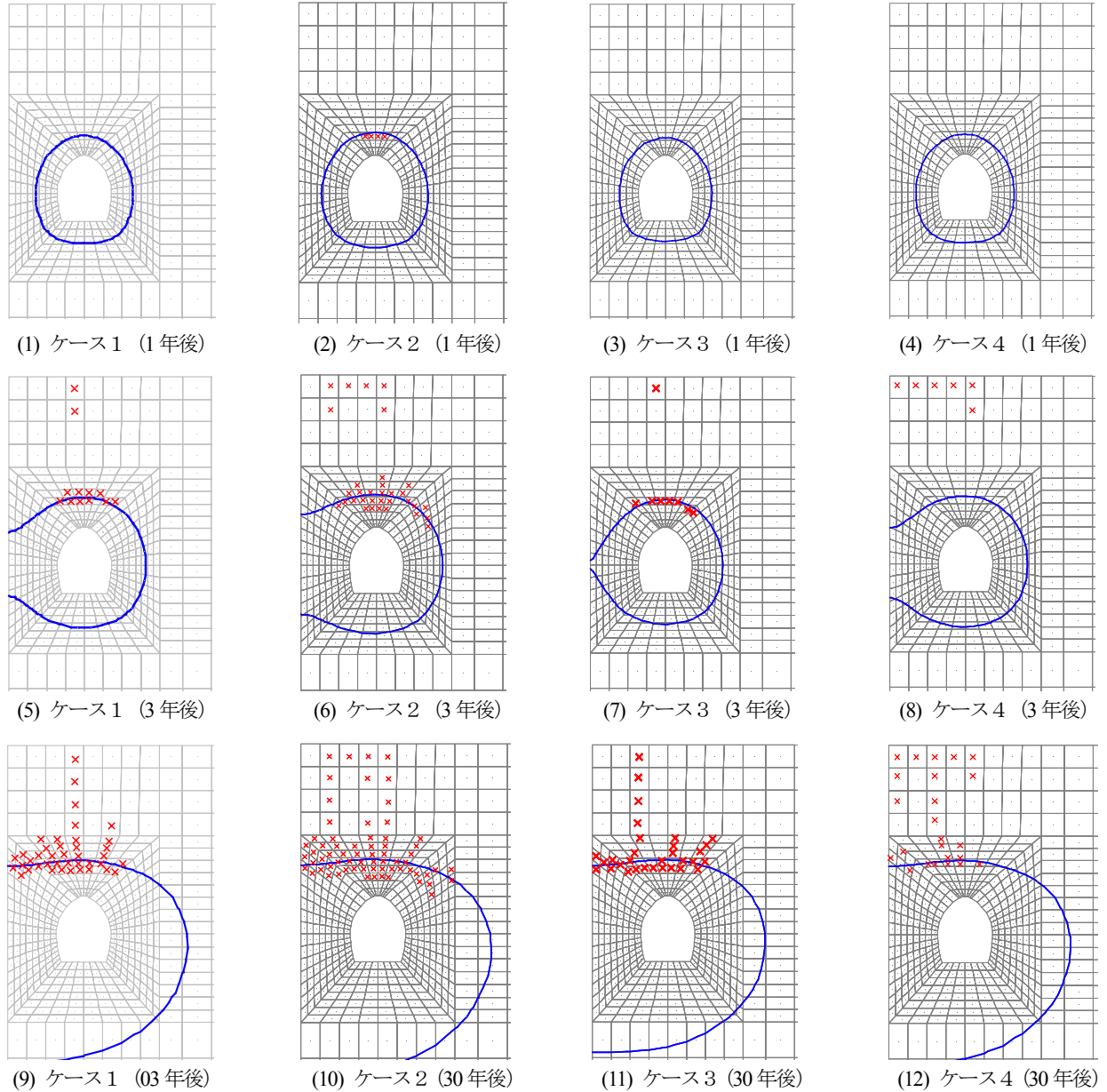


図-12 破壊領域の分布 (運転開始から1年後, 3年後および30年後)

#### § 4. モデルケースによる概念設計・経済性検討

本章では、DME 低温貯蔵システムについてモデルケースを想定し、概念設計および経済性の検討を行う。

##### 4.1 計画条件

検討においては、将来の DME の発電利用を想定し、計画条件を以下のように設定する。

発電出力	: 1,000,000 kW
年間 DME 使用料	: 1,000,000 t/年
貯槽年間回転数	: 10 回
DME 貯蔵容量	: 100,000 t
貯槽設置深度 (天端深度)	: GL.-60m

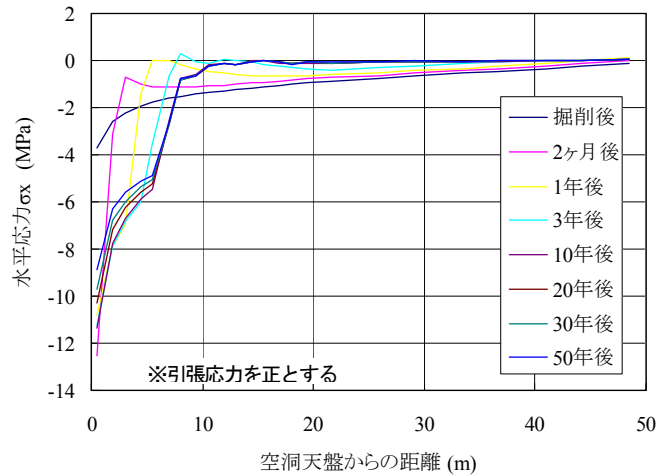


図-13 貯槽天端方向の水平方向応力分布 (ケース1)

## 4.2 検討結果

計画条件に基づいて DME 低温貯蔵システムの概念設計を行った結果を図-14 に示す。地下貯槽部の平面寸法は 120m×170m 程度となり、作業トンネル、給水ボーリングなどの施設を併せても 200m×250m 程度(作業トンネル坑口のアプローチ部を除く)の範囲となる。図に示すように、地下貯槽は発電所建屋などの地表設備の地下に敷地内に収まるように建設が可能であり、用地の有効活用が図れると考えられる。なお、図-14 には参考として地上式タンク(低温二重殻タンク 50,000t×2基)を建設する場合のイメージ図も示す。地上式タンクでは、タンクおよび防液堤の建設用地が別途必要になることから、用地計画の面で地下貯槽が有利になると考えられる。

表-5 には、DME 低温貯蔵システム建設工事の概略工程表を示す。施設の建設工期は約 40 カ月、プレクーリングまでを含めた運転開始までの所要月数は約 46 カ月となる。

表-6 には、DME 低温貯蔵システムの地下貯槽部の概略建設費を地上タンク本体工事費と比較した結果を示す。本検討で設定した条件では、地下貯槽の建設費は地上タンクの約 7 割程度となり、経済性の面でも本システムが地上式貯槽よりも有利となる可能性が示されている。

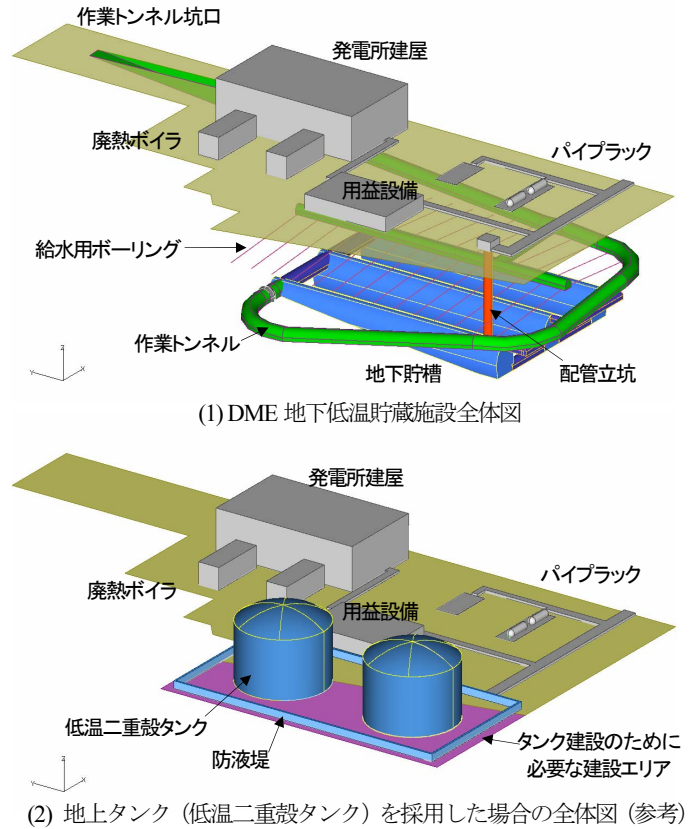


図-14 DME 地下低温貯蔵施設の概念計画

表-5 概略工程表

工種	1年度	2年度	3年度	4年度
作業トンネル工	■	■		
給水トンネル・ボーリング工		■		
貯槽掘削工			■	
配管立坑・換気立坑築造工		■	■	
配管工			■	■
地上設備工事			■	■
エアバージ、プレクーリング				■

表-6 地下低温貯槽と地上タンクの概略建設費比較

	地上タンクとの比 <sup>※</sup>
地下低温貯槽本体工事 ・坑口工(開削区間) ・作業トンネル掘削工 ・貯槽掘削工 ・受払配管立坑・換気立坑築造工 ・給水トンネル・ボーリング工 ・ずり処理工 ・調査・計測、止水対策工	0.72
地上タンク本体工事 ・基礎工事(杭基礎) ・二重殻タンク本体 ・防液堤 ・フリージングタンク	1.00

※) 地上タンク本体工事全体費用を1とした場合の比率

## § 5. おわりに

将来の DME 普及に向けた貯蔵インフラとして地下低温貯蔵システムを提案し、予測解析による成立可能性検討、モデルケースに対する概念設計・経済性検討を実施した。貯槽周辺岩盤を対象とした熱伝導・熱応力解析結果により岩盤温度変化、貯槽安定性について検討を行い、設定した条件において貯槽の気密性、安定性が良好に保持されることを確認した。また、貯蔵システムの概念設計および経済性検討の結果から、本システムが従来の地上式貯蔵よりも経済的に有利となる可能性が示された。

## 謝辞

本報告は(財)エンジニアリング振興協会が日本自転車振興会から機械工業振興資金の補助を受け、同協会地下開発利用研究センターの「社会開発プロジェクト等の計画策定および推進事業」として実施したものです。検討においてご支援を賜りました関係各位に深く感謝申し上げます。

## <参考文献>

- (財)エンジニアリング振興協会：“平成 15 年度 DME の低温貯蔵供給機械熱システムに関する調査報告書”，2004。
- 石塚ら：“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，No.370/III-5，pp.243～250，1986
- 木下ら：“各種条件下における岩石の力学挙動—軟岩”，材料，Vol.45，No.2，pp.242～248，1996。