

ENAA GEC 1992-P6

LNG岩盤貯蔵システムに
関する調査研究
報告書

平成5年3月

財団法人 エンジニアリング振興協会
地下開発利用研究センター

この調査研究は、日本自転車振興会から
競輪収益の一部である機械工業振興資金
の補助を受けて実施したものである。

序

本報告書は、財団法人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平成4年度「地下空間利用システム策定事業」の一つとして、「LNG岩盤貯蔵システム」について調査研究を行った研究成果をとりまとめたものであります。

近年、土地の有効利用、安全性、環境保全などの観点から、液化燃料の岩盤内貯蔵が注目を集めておりますが、本調査研究ではLNGを岩盤の地下空洞内に貯蔵するための基本システムについて検討を加え、将来の実現化に向けての検討を行いました。平成4年度においては、まず貯蔵方法や運転条件といった貯蔵システムの基本条件を設定し、次に岩盤地下タンクの概略構造仕様を決め、これを貯蔵システムにフィードバックするという手順でLNG貯蔵施設の基本システム設計を行いました。

本テーマについては平成4年度から2年間の調査期間にわたり学識経験者、関係官庁の方々および関連事業の専門家からなる分科会（分科会会長：山口梅太郎東京大学名誉教授）を編成し、調査研究を実施していく予定です。なお、本調査研究のとりまとめにあたっては大成建設株式会社が中心となって行いました。

この事業にご協力をいただいた関係各位に対して心から謝意を表するとともに、本報告書の成果が各方面で有効に活用されることを切望する次第であります。

平成5年3月

財団法人 エンジニアリング振興協会
会 長 齋 藤 英 四 郎

「LNG岩盤貯蔵システムに関する調査研究」分科会

委 員 名 簿

分科会長	山口梅太郎	東京大学 名誉教授
委 員	稲田善紀	愛媛大学 工学部土木海洋工学科 教授
〃	上原陽一	横浜国立大学 工学部物質工学科安全工学 教授
〃	小島圭二	東京大学 工学部資源開発工学科 教授
〃	小林英男	東京工業大学 工学部機械物理工学科 教授
〃	平嶋健一	山梨大学 工学部土木環境工学科 教授
〃	荒井行雄	通商産業省 資源エネルギー庁公益事業部 発電課 課長
〃	薦田康久	通商産業省 資源エネルギー庁公益事業部 ガス保安課 課長
〃	能勢吉弘	石川島播磨重工業(株) プラント事業部 第1機器設計部 課長
〃	石倉則義	大阪ガス(株) 技術部 部長補佐
〃	吉原健雄	川崎重工業(株) 鉄構事業部LNGプロジェクト部 主幹
〃	松本正毅	関西電力(株) 建設部 土木課長
〃	森清就	(株)熊谷組 エンジニアリング部 技術第一課長
〃	石井英二	サンコーコンサルタント(株) エネルギー調査部 部長
〃	中島隆	清水建設(株) 土木本部設計第二部 副部長
〃	永嶋興治	住友金属鉱山(株) 資源事業部技術部 地下利用技術グループリーダー
〃	北村黎夫	大成建設(株) エンジニアリング本部 エネルギー部長
〃	神崎靖	竹中土木(株) 技術開発本部 副本部長
〃	後藤貞雄	東京ガス(株) 生産技術部 専門技術部長
〃	角江俊明	東京電力(株) 建設部土木調査課 課長
〃	開発澄夫	東北電力(株) 土木部土木建設課 課長
〃	大谷通	戸田建設(株) 土木技術開発室プラントエンジニアリング 担当プロジェクトマネージャー
〃	森本美佐男	日揮(株) 第1事業本部プロジェクト第4部 次長
〃	小倉貞夫	日本鋼管(株) エネルギーエンジニアリング本部 貯蔵基地システム技術部 主幹
〃	佐藤實	三井鉱山エンジニアリング(株) 大深度地下開発部 部長
〃	宮坂潤	三菱重工業(株) 横浜製作所鉄構技術部 プラント設計課長

委 員	宮 川 彰 彦	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 研究理事
オブザーバ	廣 田 正 典	通商産業省 立地公害局産業施設課 課長補佐
〃	堀 尾 容 康	通商産業省 立地公害局産業施設課 課長補佐
〃	川 上 景 一	通商産業省 機械情報産業局産業機械課 課長補佐
幹 事	大 西 徹	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 主任研究員
事 務 局	真 下 秀 明	大成建設(株) 技術開発部地下空間開発室 主任

「LNG岩盤貯蔵システムに関する調査研究」分科会

全体作業部会委員名簿

部会長	大川 孝	大成建設(株) 技術開発部 地下空間開発室長
副部会長	森本美佐男	日揮(株) 第1事業本部プロジェクト第4部 次長
委員	能勢吉弘	石川島播磨重工業(株) プラント事業部 第1機器設計部 課長
〃	中島 隆	清水建設(株) 土木本部設計第二部 副部長
〃	赤井弘央	大成建設(株) エネルギー部 エネルギープロジェクト室 副課長
〃	西嶋國昭	大成建設(株) エネルギー部 エネルギープロジェクト室長
〃	渡部 紘	日揮(株) 第1事業本部プロジェクト第4部 担当マネージャー
幹事	大西 徹	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 主任研究員
事務局	真下秀明	大成建設(株) 技術開発部地下空間開発室 主任

「LNG岩盤貯蔵システムに関する調査研究」分科会

第1作業部会委員名簿

部会長	西嶋國昭	大成建設(株) エネルギー部 エネルギープロジェクト室長
副部会長	川崎廣貴	清水建設(株) 土木本部技術第一部 課長
委員	林 憲正	(株)熊谷組 エンジニアリング部技術第1課 係長
〃	森 清就	(株)熊谷組 エンジニアリング部 技術第1課長
〃	石井英二	サンコーコンサルタント(株) エネルギー調査部 部長
〃	熊坂博夫	清水建設(株) 技術開発本部地下・地盤開発部
〃	秋山清悟	住友金属鉱山(株) 資源事業部技術部 課長
〃	Ajai Sulekh	大成建設(株) 土木設計部解析技術第2室
〃	赤井弘央	大成建設(株) エネルギー部 エネルギープロジェクト室 副課長
〃	小川豊和	大成建設(株) 技術研究所岩盤チーム 係長
〃	細田泰宏	大成建設(株) 技術開発部地下空間開発室
〃	上田貴夫	(株)竹中土木 技術開発本部 専門課長 (兼 竹中技術研究所 主任研究員)
〃	甲村雄一	(株)竹中土木 竹中技術研究所 研究員
〃	大谷 通	戸田建設(株) 土木技術開発室プラントエンジニアリング 担当プロジェクトマネージャー
〃	西牧 均	戸田建設(株) 土木技術開発室開発企画課 主任
〃	飯森 裕	日揮(株) 第2事業本部プロジェクト第5部 課長
〃	柿田 毅	三井鉱山エンジニアリング(株) 国内事業部 大深度地下開発部 主任技師
幹事	大西 徹	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 主任研究員
事務局	真下秀明	大成建設(株) 技術開発部地下空間開発室 主任

「LNG岩盤貯蔵システムに関する調査研究」分科会

第2作業部会委員名簿

部会長	渡辺 紘	日揮(株) 第1事業本部プロジェクト第4部 担当マネージャー
副部会長	能勢 吉弘	石川島播磨重工業(株) プラント事業部 第1機器設計部 課長
委員	吉原 健雄	川崎重工業(株) 鉄構事業部LNGプロジェクト部 主幹
”	塩入 貢	大成建設(株) 技術開発部地下空間開発室 副課長
”	小倉 貞夫	日本鋼管(株) エネルギーエンジニアリング本部 貯蔵基地システム技術部 主幹
”	宮坂 潤	三菱重工業(株) 横浜製作所 鉄構技術部 プラント設計課長
幹事	大西 徹	(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 主任研究員
事務局	真下 秀明	大成建設(株) 技術開発部地下空間開発室 主任

はじめに

近年、ニューフロンティアとして地下空間が注目されてきているが、その背景として都市におけるインフラ整備、緑地空間の確保、景観の保全といった都市内整備事業の行き詰まりがあげられる。地下空間の高度な開発利用とそれに必要な研究開発を適性かつ効果的に推進していくためには、地下開発利用のニーズ、社会環境、技術課題等を幅広く調査研究し、地下空間の開発と利用について長期的な視野にたった開発構想が必要となる。このような背景のもとで、国や民間ベースで地下空間の利用に関する調査研究が積極的に行われ、地下を利用した様々な施設・構造物・利用システムが提案されてきている。

昨今、周辺への社会環境問題が重視され、新設構造物の地上における景観が周辺の住民に及ぼす心理的影響や周辺環境との調和等が問われる時代になってきた。また、地震や火災に対する万全な安全対策が要求され、安全性をより確実なものにするために地下を利用することが提案されてきている。このような地下空間の利用は時代のニーズから判断して、避けては通れないものになりつつある。

石油、LPG、LNG等の液化燃料の貯蔵についても、土地の有効利用、安全性、環境保全などの観点から、岩盤内の貯蔵が注目を集めるようになってきた。石油の貯蔵に関しては実証プラントによりシステムの安全性が確認され、現在、国内で実用プラントが建設中である。また、LPGの貯蔵に関しては現在、試験プラントが建設中で、貯蔵施設の安全性が確認されようとしている。さらに、LNGの貯蔵に関しては地中タンクが約20年前から実用の段階にあり、東京湾周辺を中心に約50基が建設されてきた。

このような状況下において、LNGを地下の岩盤空洞内に貯蔵するシステムの調査研究を行い、将来の実現化に向けての検討を行う。

目 次

第1章	LNGの現状と将来	1
1.1	LNGと天然ガスの概要	1
1.2	需給見通し	5
1.3	LNGと天然ガスに関する動向	7
第2章	国内外における低温液化ガス貯蔵タンクの調査	9
2.1	国内における事例調査	9
2.2	海外における事例調査	14
第3章	LNG貯蔵システムの概要	25
3.1	LNG貯蔵の概要	25
3.2	LNG岩盤地下タンク	28
3.3	岩盤地下タンクの型式検討	30
3.4	基本形式の選定	32
第4章	LNG岩盤地下タンクの立地に関する検討	33
4.1	岩盤分布状況	33
4.2	社会的ニーズ	43
4.3	立地・計画条件	45
第5章	LNG貯蔵施設の基本システム設計	47
5.1	検討条件	47
5.2	基本システムの概要	47
5.3	LNG岩盤貯蔵システムの基本条件	48
5.4	貯蔵規模	50
5.5	貯蔵条件	50
5.6	BOG圧縮機の運転条件	51
第6章	岩盤空洞の検討	53
6.1	解析プログラムの調査	53
6.2	熱伝導解析	57
第7章	タンク設備の検討	85
7.1	断熱材の検討	85
7.2	メンブレンの検討	92
第8章	まとめ	109

第1章 LNGの現状と将来

第1章 LNGの現状と将来

1.1 LNGと天然ガスの概要

(1) LNGと天然ガス

LNGとはLiquefied Natural Gas(液化天然ガス)の略語で、メタンを主成分とする天然ガスを冷却した無色透明な液体である。

天然ガスは、地下に天然に埋蔵されており、地表条件では気体状をなす物質である。通常は、メタンを主成分とする低級のパラフィン系炭化水素(C_nH_{2n+2})からなる可燃性天然ガスをさす。

天然ガスは地質学的な状態によって、次のように分類されている。

1) 油田系ガス(または、石油系天然ガス)

天然ガスとして世界的な産業の対象となっているのが、油田系ガスである。油田において原油とともに産出するものと、油田地帯の含油地質系統中に遊離型鉱床をなし石油を伴わずに産出するもの(構造的天然ガス)がある。

油田系ガスはさらに次のように分けられている。

・随伴ガス(または、油井ガス)

油層から生産される原油中に溶存していて、地表で分離されるガス。

・非随伴ガス(または、ガス井ガス)

原油とは別に産出されるガス。そのうちで、地下の条件では全体がガス相であるが、地表の物理条件ではコンデンセートと呼ぶ液相を析出するものもある。

2) 水溶性天然ガス

原油または石炭の鉱床を有しない地質系統中で、主として地層中に溶解状態で存在する。

3) 炭田ガス

炭田地帯で炭層または炭層付近の地層から産出する。

(2) 天然ガスの埋蔵量

世界の天然ガスの確認埋蔵量は、1991年現在で約124兆 m^3 と確認されている。また、世界の天然ガスの生産量は、1990年に2.14兆 m^3 となっている。これより、天然ガスの可採年数(R/P)は約58年となる。同様に、石油の可採年数を見ると約44年である。このように可採年数でみると、天然ガスのほうが石油より長いと言える。また、さらに新しいガス田も次々と発見されている。

次に、地域別確認埋蔵量をみると、埋蔵量の66%が中東に偏っている石油に比べて、天然ガスはやや広く分布していると言える。しかし、確認埋蔵量が上位10ヶ国で全体の79%を占めるなど、天然ガスについても地域的偏在が見られる。

表 1.1 天然ガスの確認埋蔵量の地域構成（1991年現在）

（単位：億 m^3 ）

地 域	埋 蔵 量
旧ソ連・東欧	500,177
中 東	373,533
アフリカ	87,850
アジア・オセアニア	84,475
北 米	75,349
南 米	67,510
西 欧	50,559
日 本	275
合 計	1,239,728

（出典：Oil and Gas Journal/International Petroleum Encyclopedia）

表 1.2 地域別確認埋蔵量構成比と可採年数（1991年現在）

（単位：％）

地 域	天 然 ガ ス 可採年数約58年	石 油 可採年数約44年
中 東	30.1	66.1
アジア・大洋州	6.8	4.4
ヨーロッパ	4.1	1.5
アフリカ	7.1	6.0
北 米	6.1	4.2
中南米	5.4	12.0
旧ソ連・東欧	40.4	5.8

（出典：BP統計1992）

(3) LNGと天然ガスの成分

天然ガスの主成分はパラフィン系炭化水素であり、メタン (CH_4) が最も多い。また、さらにCの数多いエタン、プロパン、ブタン、ペンタン、……などを含むガスも多い。ペンタン以上は常温常圧では液相として析出し、これらを含むガスを湿性ガス、メタンが多く液相を含まないガスを乾性ガスと分類している。

また、天然ガスの不純物としては、窒素、炭酸ガス、硫化水素を含むことがある。さらに、アルゴン、ヘリウム、キセノンなどの希ガスをごく微量に含む場合もある。

LNGはメタンが主成分である天然ガスを液化したものであり、さらに徐塵、脱硫などの前処理を行っているため、極めてクリーンなエネルギーとなっている。したがって、LNGを気化した天然ガスを燃料として使った場合、硫黄酸化物 (SO_x)

や煤塵を発生させることはない。また、燃焼時に発生する窒素酸化物（NO_x）も他の燃料に比べて少量であり、炭酸ガス（CO₂）の排出量も他の化石燃料に比べて優位にある。

表 1.3 輸入LNGおよび国内天然ガスの組成特性

（単位：％）

組成	産地 アラスカ	ブルネイ	マレーシア	オーストラリア	インドネシア (バダック)	インドネシア (アルソ)	日 本
メタン	99.8	89.9	92.0	88.6	90.8	89.2	88.2
その他炭化水素	0.1	10.1	7.9	11.4	9.2	10.8	9.3
窒 素	0.2	—	0.1	—	—	—	1.0
その他	—	—	—	—	—	—	1.5

（出典：日本ガス協会、日本は見附ガス田の場合（新潟県：県産天然ガスと石油の現況））

表 1.4 SO_x・CO₂ 排出量比較

化石燃料種別	SO _x 排出量	CO ₂ 排出量
天然ガス	0	57
石 油	68	83
石 炭	100	100

注：単位発熱量あたりの排出量を石炭を100とした場合

（出典：IEA, Natural Gas Prospects to 2010, 1986）

(4) LNGの利用

天然ガスは、－162℃まで冷却すると液体になり、ガス体のときに比べて約600分の1の体積になるという性質がある。近年、この性質を利用できるような低温技術が進歩し、天然ガスの輸送面で画期的な変化が生じた。その結果、パイプラインでは輸送できない地域においても、専用タンカーにより大量の天然ガスをLNGとして輸送し、利用できるようになった。

欧米では、1950年代以降、パイプライン網の普及により天然ガスの利用が拡大した。その後、1965年頃に低温液化技術の開発によるLNGの大量輸送が可能となり、天然ガスの供給量がさらに増加した。

日本では、1969年からLNGの輸入を始め、1991年には年間約3,800万tに達している。これは、世界のLNG貿易量年間約5,000万tの約7割にあたり、日本は世界最大のLNG輸入国となっている。また、日本の石油の輸入がその67％を政情不安定な中近東地域に依存しているのに対して、日本のLNGは主として環太平洋および東南アジア地域から輸入されている。このように、LNGは日本のエネルギー・セキュリティを高めるうえでも、有望なエネルギーの一つとなってい

る。

ただし、天然ガスをLNGとして導入するには、他のエネルギーと異なった特殊性がある。それは、ガス田の開発から始まり、産出地における液化基地、海上輸送のためのLNGタンカー、受入基地、輸送導管まで一環したプロジェクトとして進めることによって初めてLNGを利用できるという点である。そのため、LNGは供給量と需要量が特定され、弾力的な需給調整のきかないものとなっている。

表 1.5 日本のLNG輸入（1991年）

（単位：万t）

輸入相手国	輸 入 量
インドネシア	1,787
マレーシア	702
ブルネイ	528
オーストラリア	409
アブダビ	266
アラスカ	101
合 計	3,793

（出典：通関統計）

(5) LNGの特長

LNGの特長をまとめると、次のとおりとなる。

1) 効率

- ・製造・供給設備の効率化や省エネルギー化が容易である。
- ・発熱量が高く、同時に総合熱効率が高い。

2) 環境問題

- ・SO_x や煤塵を発生させないクリーンなエネルギーである。
- ・NO_x やCO₂ の発生量が比較的少ない。

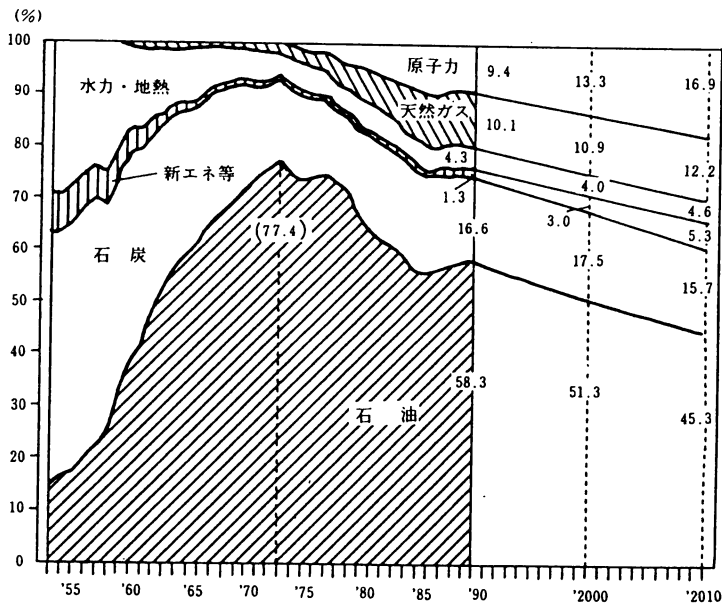
3) セキュリティー

- ・世界に広く分布している（政治的に安定している太平洋諸国が9割）。
- ・確認埋蔵量が膨大である。
- ・長期契約のため、供給制限の不安が少ない。

1.2 需給見通し

(1) 長期エネルギー需給見通しにおけるLNG

日本の一次エネルギー供給構成の推移（図 1.1）をみると、天然ガスの比率が近年増加傾向にあることがわかる。



注）2000年度及び2010年度の数値については、石油代替エネルギー供給目標（平成2年10月30日閣議決定）の基礎となったエネルギー需給の見通しによる。

図 1.1 日本の一次エネルギー供給成績の推移

通産省資源エネルギー庁がまとめた日本のLNG需要見通しおよび手当状況（現況）によると、「長期エネルギー需給見通し（1990年6月）」による天然ガス需要に対する供給のうち、LNGについては2000年度4,300万t、2010年度5,400万tとなっている。このうち、ほとんど全てが契約済（契約延長見込み分を含む）であり、2010年度のうちの400万tについては未定であった。

表 1.6 日本のLNGと天然ガスの需要見通しおよび手当状況（現況）

（単位：LNG換算万t）

需 給		年 度	1 9 8 8 (実績)	2 0 0 0 (見通し)	2 0 1 0 (見通し)	備 考
需 要			3,280	4,600	5,700	1 9 9 0年6月長期エネルギー需給見通し
供 給	国産天然ガス		160	300	300	
	L N G	既契約分	3,120	4,300	5,000	契約延長見込分を含む
		未 定	—	0	400	
		計	3,120	4,300	5,400	
	合 計		3,280	4,600	5,700	

（出典：資源エネルギー庁）

(2) 電力におけるLNG

中央電力協議会がまとめた「平成4年度（1992年度）電力長期計画」によると、LNGの所要燃料は表1.7の通りである。

表 1.7 平成4年度（1992年度）電力長期計画におけるLNG所要燃料

年 度	LNG (所要燃料) (万t)	(参 考)	
		総発電電力量に占める LNG発電電力量構成比 (%)	総発電電力量 (億kWh)
1991年度（推定実績）	2,930	23	7,622
1996年度	3,280	23	8,731
2001年度	3,490	23	9,763

（出典：中央電力協議会）

これを見ると、1969年に東京電力が初めてLNGを導入して以来22年間で、日本における発電用LNGが2,930万tに達し、これまでの増加ペースは単純な年平均で毎年133万tの伸びであったことになる。一方、今後の発電用LNGは10年間に560万tの増加と計画され、これまでのハイペースな伸びと比べると、今後の伸びは鈍化してきていると言える。これは、電力のエネルギー源のベストミックスを考えた場合、LNGの構成比に自ずから限界があることを示すものである。

(3) 都市ガスにおけるLNG

通産省資源エネルギー庁がまとめた「平成3年度（1991年度）一般ガス需給計画」によると、一般ガス原料消費量のうち、LNGについては表1.8の通りとなっている。

表 1.8 平成3年度（1991年度）一般ガス需給計画におけるLNG

年 度	LNG (原料消費量) (万 t)	(参 考)	
		都市ガス供給量に占める 天然ガス系の割合 (%)	ガス販売量 (10千kcal/m ³) (百万m ³)
1991年度（推定実績）	884	76.5	16,753
1992年度	925	76.1	17,563
1993年度	993	77.2	18,536
1994年度	1,061	78.4	19,425
1995年度	1,119	79.0	20,282
1996年度	1,169	79.3	21,090

（出典：資源エネルギー庁）

1.3 LNGと天然ガスに関する動向

(1) 長期エネルギー政策におけるLNGと天然ガス

LNGと天然ガスについては、1990年6月に通産大臣の諮問機関である『総合エネルギー調査会』が、最近のエネルギー情勢の変化や地球環境問題を踏まえて作成した今後のエネルギー政策に関する中間報告『地球規模のエネルギー新潮流への挑戦』において、「天然ガスは供給安定性が相対的に高く、CO₂排出においては化石エネルギー資源の中で優位にある」とした上で、「導入推進が適当である」と結論づけている。そして、『長期エネルギー需給見通し』においては、「天然ガスの全一次エネルギーに対する比率を1988年度の9.6%から2010年には12.0%に拡大する見通し」としている。

このような基本方針を踏まえて、1991年6月に設置された『ガス基本問題検討小委員会』において、「天然ガスは日本における基幹エネルギーの一つである」と初めて位置づけられ、「一層本格的な導入の時期が来ている」との中間とりまとめが、1992年5月に行われた。

(2) LNGと天然ガスを取り巻く状況

現在、世界は米ソによる冷戦構造の崩壊を契機として、新しい政治的、経済的秩序の構築を目指している。また、国際エネルギー市場も新秩序を模索する移行期にあると考えられる。さらに、世界的に環境問題に対する関心が高まるなかで、クリーン燃料への志向も一段と強まっている。このような状況の下で、LNGと天然ガ

スについては特に大きな期待が寄せられつつある。今後、各国においてLNGと天然ガスの需要が拡大し、一次エネルギーの中で相対的にLNGと天然ガスの重要性が増すとみられる。

日本においては最近、LNGと天然ガスを基幹エネルギーの一つとして普及させるため、パイプライン建設計画の動きが高まっている。一つは、都市ガス業界による東阪パイプライン構想（約600km）であり、もう一つは、電力、ガス、商社などが参加している広域天然ガスパイプライン研究会による東阪ラインを含む北海道から九州までの国土縦貫天然ガスパイプライン構想（全長3,000km超）である。また、これらの計画とは別に、仙台・新潟間にはLNG利用のためのパイプライン（約250km）が、1996年3月の完成を目指して既に着工されている。

参考文献（第1章）

- 1) 財団法人天然ガス導入促進センター：天然ガス，1992年10月

第2章 国内外における低温液化ガス貯蔵タンクの調査

第2章 国内外における低温液化ガス貯蔵タンクの調査

2.1 国内における事例調査

LNG供給量の大部分を海外に依存している我が国では、海岸線を中心に15箇所のLNG受入基地が存在している。図 2.1に我が国のLNG受け入れ基地の設置状況を示す。

ここに設けられたLNGの貯蔵タンクは地上タンクと地中タンクに分けられるが、これらのタンクについて概要を示す。

(1) LNG地上タンク

国内において実績の多い地上タンクは低温常圧貯蔵型平底円筒式二重殻タンクであるが、その代表的な特徴を以下に示す。

1) 構造的特徴

内槽、外槽の二重殻よりなり、その間にパーライトなどの断熱材を入れ、タンク内への入熱量が小さくなるよう作られている。この平底円筒式タンクは使用される材料によって内槽、外槽共に金属構造のものと、外槽がPC構造であるものとの2種類の型式に大別される。

地上式金属二重殻タンクは長い建設実績があり、10,000kl以上の地上タンクはほとんどがこの型式である。最近では、タンク本体の構造体にプレストレストコンクリートを適用するPCタンクも建設されるようになってきた。

基礎型式は高床式基礎と直接基礎がある。高床式基礎は、凍上防止のために通気断熱層を確保しており、直接式基礎は凍上防止のため、底部ヒーターが必要となる。

国内における屋根型式は地震時のスロッシング現象を考慮して、二重屋根型式を採用している。

2) 材料的特徴

内外槽材料として鋼材、コンクリートが用いられる。金属材料を使用する場合、内槽は低温に強い材料で構成するが、外槽は普通鋼で構成される。

3) 用途・目的

輸入基地貯蔵用で大規模貯蔵が多く、タンク容量は60,000～80,000klが一般的であるが、最近では100,000～140,000klと大容量化している。

金属二重殻地上タンクの構造概略を図 2.2に示す。また、表 2.1に国内の主要なLNG地上タンクの一覧を示す。

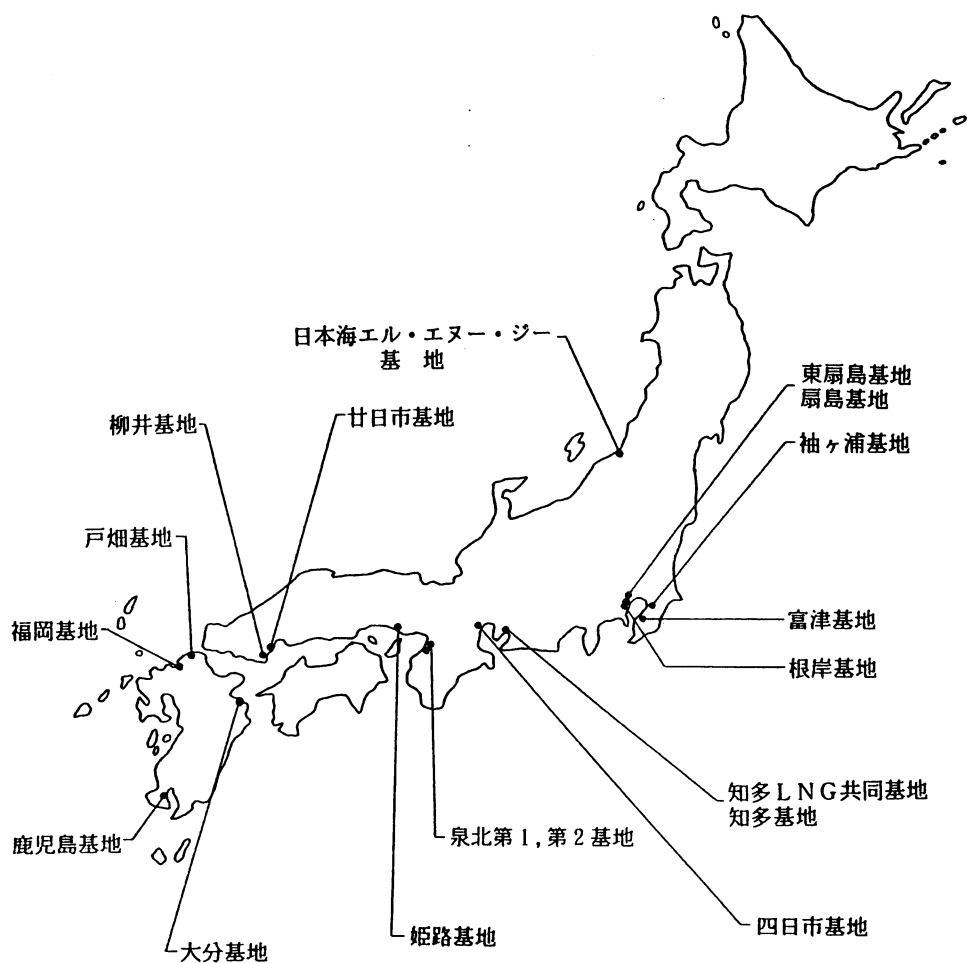


図 2.1 我が国のLNG受入基地の設置状況

(出典：天然ガス鉱業会，天然ガス資料年報，平成3年度版を一部加筆)

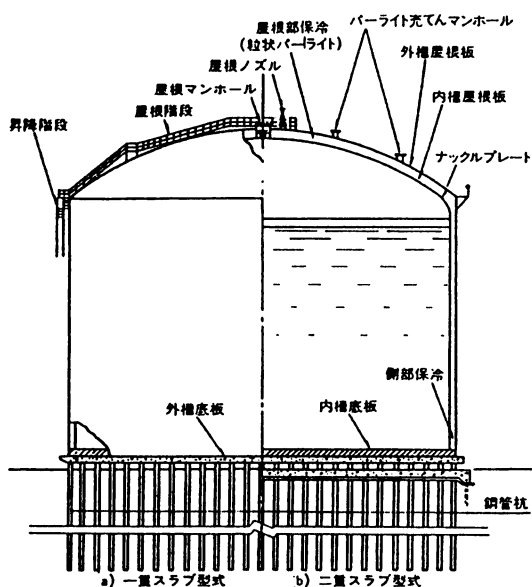


図 2.2 金属二重殻地上タンクの構造概略

(出典：日本LNG会議「LNG便覧」1981年)

表 2.1 国内の主要なLNG地上タンク一覧表

(1993年3月現在)

基 地 名	操業開始年	所有会社	タンク容量(kl) ×基数	寸法(m) (内径×液深)	タンク形式
根岸基地	1969	東京ガス	45,000×3	44.6×28.8	金属二重殻
		東京ガス	35,000×2	39.3×28.8	金属二重殻
根岸基地	1974	東京電力	25,000×1	36.0×24.3	金属二重殻
袖ヶ浦基地	1973	東京ガス	45,000×2	44.6×28.8	金属二重殻
		東京ガス	60,000×1	51.5×28.8	金属二重殻
袖ヶ浦基地	1974	東京電力	45,000×2	44.6×28.8	金属二重殻
		東京電力	60,000×4	51.5×28.8	金属二重殻
タンク容量小計(kl)			710,000		
日本海エル・エヌ・ジー 基地	1984	日本海LNG	80,000×4	59.5×29.9	金属二重殻
		日本海LNG	100,000×2	66.5×29.9	金属二重殻
タンク容量小計(kl)			520,000		
知多LNG共同基地	1977	中部電力	75,000×4	57.6×28.8	金属二重殻
知多基地	1983	知多LNG	80,000×6	59.5×28.8	金属二重殻
四日市基地	1987	中部電力	80,000×4	59.5×28.8	金属二重殻
	1991	東邦ガス	80,000×1	59.5×28.8	金属二重殻
タンク容量小計(kl)			1,180,000		
泉北第1基地	1972	大阪ガス	45,000×3	44.6×28.8	金属二重殻
泉北第2基地	1977	大阪ガス	75,000×15	57.6×28.8	金属二重殻
	(建設中)	大阪ガス	140,000×2	79.0×28.6	P C
姫路LNG基地	1979	関西電力	80,000×6	59.5×28.8	金属二重殻
		関西電力	40,000×1	42.1×28.8	金属二重殻
姫路基地	1988	大阪ガス	80,000×7	59.5×28.8	金属二重殻
タンク容量小計(kl)			2,620,000		
柳井基地	1990	中国電力	80,000×4	59.5×28.8	金属二重殻
廿日市基地	(建設中)	広島ガス	85,000×1	53.7×37.6	ピットイン
タンク容量小計(kl)			405,000		
戸畑基地	1977	北九州LNG	60,000×8	51.5×28.8	金属二重殻
大分基地	1990	九州電力	80,000×4	59.5×28.8	金属二重殻
鹿児島基地	(建設中)	日本ガス	36,000×1	40.0×28.8	P C
タンク容量小計(kl)			836,000		
タンク容量合計(kl)			6,271,000		

(2) LNG地中タンク

LNG地中タンクは東京湾周辺のLNG基地に数多く設置され、今までに約50基の建設実績を持つ。この貯蔵型式は低温常圧式で、側壁の大部分を現地盤以下に設置するものである。このLNG地中タンクの代表的な特徴を以下に示す。

- 1) 国内で建設されている地中タンクはメンブレン式で、地盤を掘削してコンクリート製の側壁と底版を設け、その内側に断熱材とメンブレンを張り付けて、液密性・気密性を保持しようとするものである。
- 2) タンクの現地盤面以上の部分が少ないため、地震加速度の増幅度が小さく、耐震性に優れている。
- 3) 地下に深く掘り下げることにより、大容量化が可能となる。
- 4) 大量の掘削土が発生するため、その処分地が必要となる。
- 5) 地下水対策が必要になることが多い。

地下タンクの代表例として、メンブレン式地中タンクの構造概略を図 2.3に示す。また、表 2.2に国内の主要なLNG地中タンク一覧表を示す。

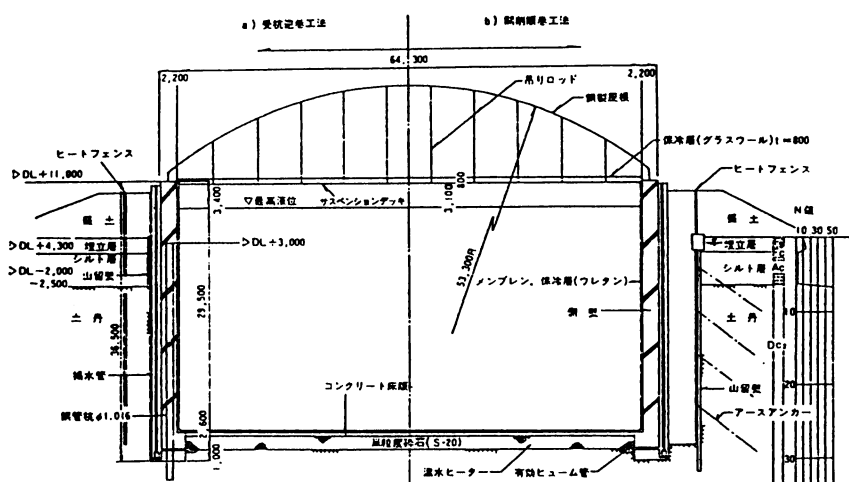


図 2.3 メンブレン式LNG地中タンク

(出典：日本LNG会議「LNG便覧」1981年)

表 2.2 国内の主要なLNG地中タンク一覧表

(1993年3月現在)

基地名	操業開始年	所有会社	タンク容量(kl) ×基数	寸法(m) (内径×液深)	タンク構造形式
根岸基地	1969	東京ガス	10,000×1	30.0×14.2	揚水式
		東京ガス	60,000×1	50.0×30.6	揚水式
		東京ガス	95,000×4	64.0×29.6	揚水式
	(建設中)	東京ガス	85,000×2	50.0×43.5	揚水式
	(建設中)	東京ガス	200,000×2	68.0×55.1	揚水式
袖ヶ浦基地	1973	東京ガス	60,000×9	60.0×21.3	強度版式
		東京ガス	62,000×1	64.0×19.3	強度版式
		東京ガス	58,000×1	64.0×18.1	強度版式
		東京ガス	130,000×4	64.0×40.5	強度版式
		東京ガス	140,000×2	64.0×43.7	強度版式
袖ヶ浦基地	1979	東京電力	60,000×3	64.0×18.7	強度版式
袖ヶ浦隣接基地	1984	東京電力	90,000×6	57.4×35.0	強度版式
東扇島LNGセンタ	1984	東京電力	60,000×9	50.0×30.7	強度版式
扇島基地	(建設中)	東京ガス	200,000×1	72.0×49.2	強度版式
富津基地	1985	東京電力	90,000×4	64.0×28.2	強度版式
		東京電力	125,000×2	72.5×30.5	強度版式
タンク容量小計(kl)			4,150,000		
泉北工場	1972	大阪ガス	45,000×1	54.0×19.7	揚水式
タンク容量小計(kl)			45,000		
福岡基地	(建設中)	西部ガス	35,000×1	46.0×20.0	強度版式
タンク容量小計(kl)			35,000		
タンク容量合計(kl)			4,430,000		

2.2 海外における事例調査

低温液化ガス貯蔵タンク建設は、1960年代を契機に世界各国で始まった。例えばスウェーデンのStenungsundでは、LPGやプロピレンなど、 -40°C までの低温液化ガス地下貯蔵に関し、すでに20年以上もの実績がある。また、地下を利用したLNG (-162°C) などの極低温液化ガスの貯蔵施設も、1960年代にいくつか建設された。現在までの主な地中・地下タンク施設の実績を表2.3にまとめたが、本報告書では、1960年代に建設されたプラント、および実証プラントにむけて現在原位置試験が行われている施設についてその概要を述べるものとする。

(1) 1960年代に建設された低温液化ガス貯蔵タンク

1) Carlstadt, New Jersey, U. S. A⁴⁾

1965年に直径35m、深さ50m、容量48,000 m^3 の円筒状縦型LNG地中タンクが建設された。このタンクの断面図を図2.4に示す。タンクの下部35mは赤色片岩に、その上部はシルトおよび砂岩に囲まれ、ここに無支保の状態でLNGが貯蔵された。しかしながら、LNGのボイルオフが当初の予想よりも多く、運転は短期間で中止された。原因として、温度応力により岩盤表面にクラックが発生し、貯蔵中の液体との接触面積が増加し、その結果として熱流入量が増加したためと考えられている。

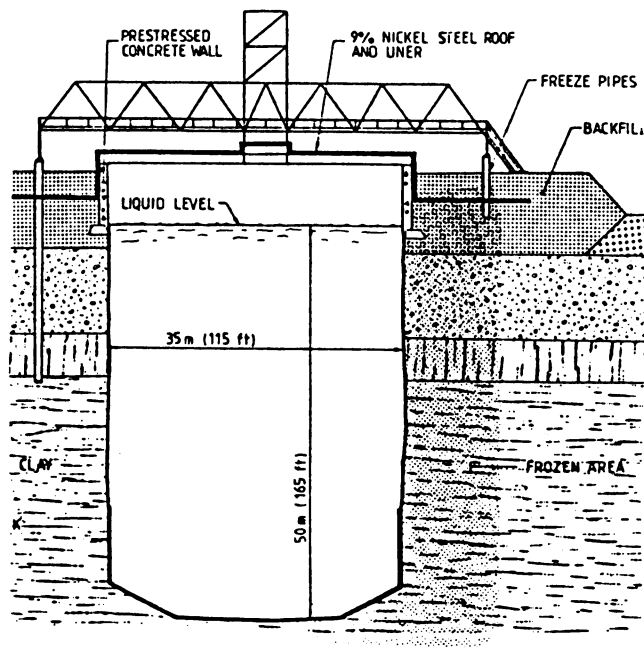


図 2.4 断 面 図 (Carlstadt)

(出典: Storage of Gases in Rock Caverns)

表 2.3 海外における事例

国 名	文 献	概 要	岩 種
アメリカ	Lindblom (1989) ⁴⁾	Carlstadt, New Jersey. 1960年半ばに直径35m深さ50mの円筒状堅型LNG地中タンク建設。無支保。ボイルオフの為、短期間で運転中止。	赤色片岩 シルト岩 砂岩
	Lasseter & Witherspoon (1974) ⁶⁾	Hopkinton, Massachusetts. 1967年直径40m深さ50mの円筒状堅型LNG地中タンク建設。無支保。ボイルオフの為、18ヶ月で運転中止。	花崗岩 氷河堆積土
アルジェリア	Dahlöf (1992) ⁵⁾	現在LNG地中タンクとして供用されている世界唯一の無覆工型岩盤タンク。1965年から現在まで約700mmの地盤の凍上が計測されている。また1979年に生じたタンク底部の亀裂は、ナフサを用いた注入でふさいだ。	砂岩 マール
イギリス	Dahlström (1992) ⁸⁾	1960年代後半に、Canvey Islandで無支保、5万kLのLNG地中タンクを4基建造。凍土中にクラック発生。ボイルオフの為、15年程度で使用中止、砂で埋め戻し。	シルト 砂利 粘土
スウェーデン	Christenson (1983) ¹⁰⁾	CryoCavernと呼ばれる、表面を特殊な断熱材で被覆した8立方メートルの試験空洞内に、液体窒素(-196℃)を一ヶ月貯蔵。試験後断熱材には漏れや亀裂は見られなかった。	花崗岩 片麻岩
		CryoCavernの2回目の実験は20立方メートルの貯槽で、一年以上液体窒素を貯蔵、安全性が検討された。	
	Jacobsson (1977) ⁷⁾	Stenungusund、無支保。1.2万立方メートルのエチレン地下タンク。ボイルオフ、ガス漏れの為後にプロピレン貯蔵タンクとして利用。	片麻状 花崗岩
		Stenungusund、無支保。6万および8万立方メートルのLPG地下タンク。順調に運転中。	
	Lindblom & Söder (1992) ⁹⁾	ヨテボリ市付近にある既往の地域暖房用トンネルを用いて、地下72mの位置に、高圧ガス貯蔵実験用の貯槽Aと、LNG貯蔵実験用の貯槽Bの2つのプラントが設置されている。貯槽Bでは、1992年現在、-60℃までの低温実験が終了し、温度、内空変位、地中変位などが測定された。今後-196℃までの極低温下での試験を行う予定である。	片麻状 花崗岩
ドイツ	Dreyer (1977) ¹¹⁾	1974年に、径約1.4m、高さ約2mの空洞を掘削し、液体窒素の貯蔵を試みた。液体窒素の流し込みの途中で岩盤に亀裂発生。亀裂は3m以上進んでいることが確認された。	岩塩
フィンランド	Särkkä (1989) ¹²⁾	深度45m、3x3.5x9mの大きさのコンクリート層とファイバー補強したプラスチック材スプレー層の複合支保を持つ低温加圧型の試験空洞。低温加圧下(-80℃, 5MPa)での試験を繰り返したが、ライニングの一部が破損。現在、解析により検討中。	ミグマタイト
ベルギー	Boulanger & Luyten (1982) ¹³⁾	深度23m、径3m、長さ30mの試験空洞に、数カ月間液体窒素を貯蔵。液漏れもなく空洞周辺での温度、変位、応力などの計測を行った。	粘土

2) Sonatrach, Algeria⁵⁾

1965年に直径37m、深さ36m、容量38,000m³の円筒状型LNG地中タンクが建設された。現在採用されている世界唯一の無履工型LNG地中タンクである(図2.5)。タンク上部5mは亀裂、砂、貝殻を含む砂岩と粘土に、その下部は粘土や珪岩を介在する泥灰岩(マール)に囲まれている。タンク建設に先駆けてブラインパイプが円状に打設され、-30℃まで周辺地盤を冷却、凍結させたあと内部地盤の掘削が開始された。掘削後タンク底部に耐水性を増すため、フォームグラスが設置され、無履工の状態でLNGが貯蔵された。

タンク建設後、熱電対による周辺地盤の温度がモニターされているが、プラント使用開始から14年後

の1979年には凍結線が壁面より約37m側方に及んでいる。また、地盤凍結に伴う凍上量も多く、図2.6に示すように年間約25mm、1981年までに700mmに達している。コンクリート杭や凍結パイプはその機能を何とか保ってはいるものの、問題は深刻になりつつある。1979年には周辺地盤にクラックが発生し、LNGガスは地上まで漏出した。メチルアルコール(-80℃)による注入はその

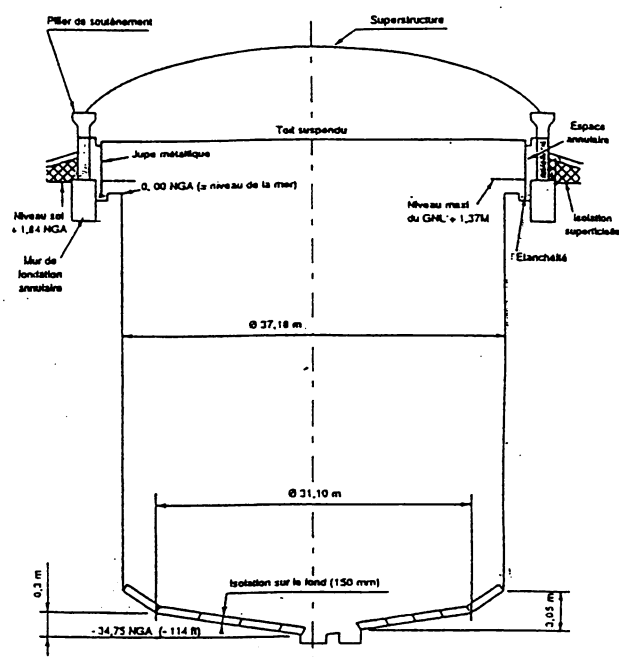


図 2.5 断面図 (Sonatrach)

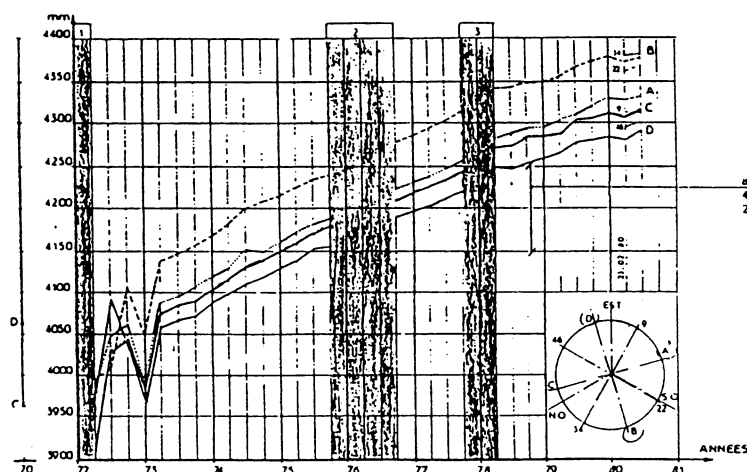


図 2.6 周辺地盤の凍上量 (Sonatrach)

凝固点が高いためうまく行かず、ナフサ(-10℃)でクラックの補修が行われた。1985年に実施された光ファイバーによる検証では、クラックは海面下12mに位置し、その幅は約10~15mm、約12mの長さにおよんでいるものの、亀裂自体には連続性がないと報告されている。

3) Hopkinton, Massachusetts, U. S. A⁶⁾

1967年に直径41m、深さ52m、容量69,000m³の円筒状型LNG地中タンクが2基建設された(図2.7)。タンク周辺の岩盤は花崗岩および氷河堆積土で構成され、無履工の状態でLNGが貯蔵された。運転は18ヶ月の間続けられたが、LNGのボイルオフ量が計算値を上回った状態が続き、不経済という理由で運転は中止された。ボイルオフ量が増加した原因として、岩盤表面にクラックが発生し、貯蔵中の液体の接触面積が増加したためと考えられる。

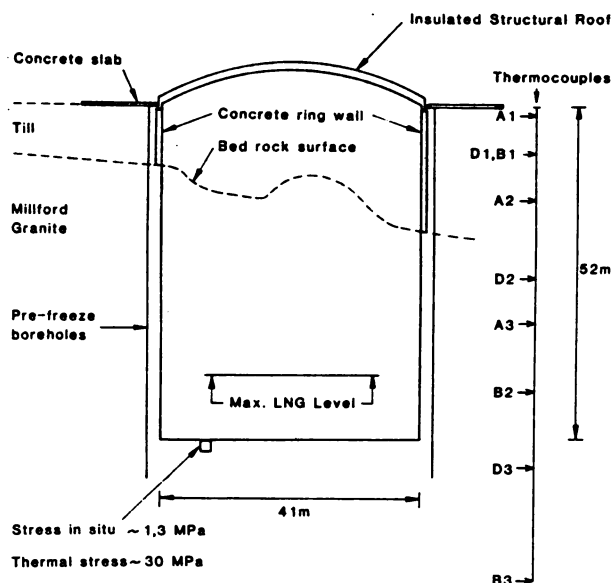


図 2.7 断面図 (Hopkinton)

(出典: Dept. of Civil Engg.

Publication 74-1, UCB)

4) Stenungsung, Sweden⁷⁾

1967年、片麻岩質花崗岩からなる地盤内に無履工のエチレン貯蔵地下タンクが建設され、-100℃で運転された(図2.8)。貯槽容量は12,000m³、空洞の大きさは長さ45m、幅15m、高さ20mで、空洞の土被り厚は12~15mである。エチレンを少量貯槽に蓄えたが、ボイルオフが予想よりも大きく内圧が高くなった。さらに空洞真上の地盤からクラックを伝ってガス漏れが検出された。テレビを用いた空洞内調査では、岩盤上に長さ4m、幅15~25mmにも達する大きなクラックが観察され、ここから大量のボイルオフが生じていることが確認された。この貯槽ではエチレンの貯蔵を中止し、後にプロピレン貯蔵タンクとして利用されることになり、その後順調に運転されている。

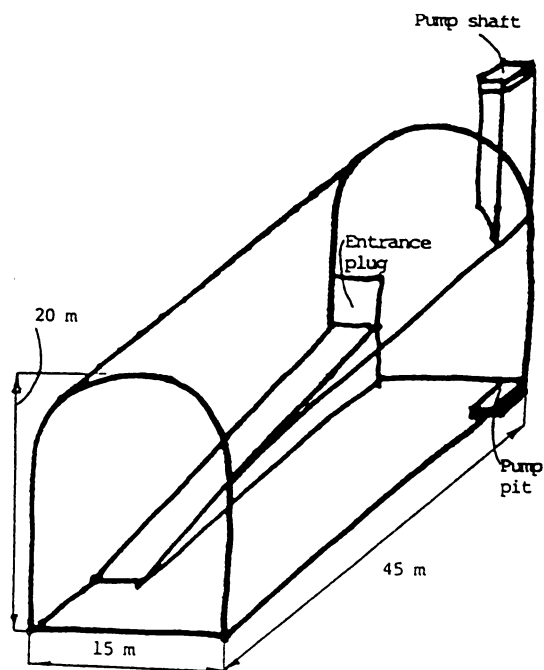


図 2.8 エチレン貯蔵タンク

(Stenungsung)

(出典: Rock Store '77)

5) Canvey Island, U.K⁸⁾

1967年～1969年にかけて直径40m、深さ40m、容量49,000m³の円筒状縦型LNG地中タンクが4基沖積粘土内に建設された。このタンクの断面図を図2.9に示す。周辺地盤からの熱流入量が当初の予想よりはるかに大きく、大量のボイルオフ発生をみた。また凍結に伴い地表面の凍上も生じた。近接する地上タンク施設の杭基礎への影響が懸念されたので、タンク周辺に一連のボーリング孔を掘り、温水を流すことでヒートバリアーを形成した。1982年現在でこの応急処置には効果が合ったと報告されているが、プラント使用開始より約15年後（1984年）に使用を停止し、その後砂で埋め戻された。

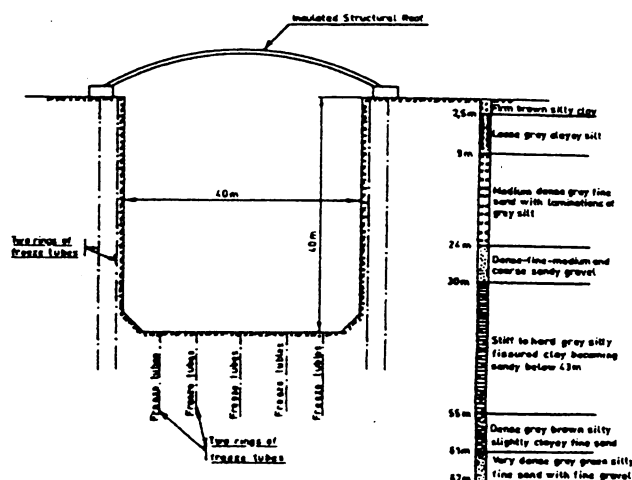


図 2.9 断 面 図 (Canvey Island)

(出典：Int. Gas Research Conference)

(2) Röda Sten 岩盤研究施設⁹⁾

スウェーデンでは、原子力発電所の運転中止の決定などに伴い、エネルギー源としての天然ガス導入が進められている。この天然ガスは、北海、ソ連、デンマークなどよりパイプラインで供給される。このため、スウェーデン国内のパイプラインの整備とともに、天然ガスの貯蔵施設の建設が必要となっている。現在まで天然ガスを貯蔵するために最も有効な貯蔵方式を選定するための研究が行われてきたが、その方式の一つとして、岩盤の掘削空洞を利用して低温の液化天然ガスあるいは天然ガスを貯蔵するため二つの実験空洞を設け、低温貯蔵システムならびに高压貯蔵システム確立のための漏気試験、水封試験、冷却試験などの実証試験が行われている。

このプロジェクトには以下の官公庁が参加している。

電力庁	Swedish State Power Board
電力会社	Sydskraft, EIG Gothenburg Energy Authority
ガス会社	Swede Gas, MNG, Brooklyn Union Gas
石油会社	Neste, Shell International Petroleum
建設会社	NCC
建設コンサルタント	SBUF

プロジェクトの実施組織を図 2.10に示す。ここでは、岩盤内の高圧ガス貯蔵の原理・実用システム（例えば圧縮空気エネルギー貯蔵システム）と岩盤内における LNG 貯蔵の原理・実用システムの研究を主目的としている。プロジェクト終了後、岩盤試験場はChalmers工科大学岩盤研究グループの永久施設となる。

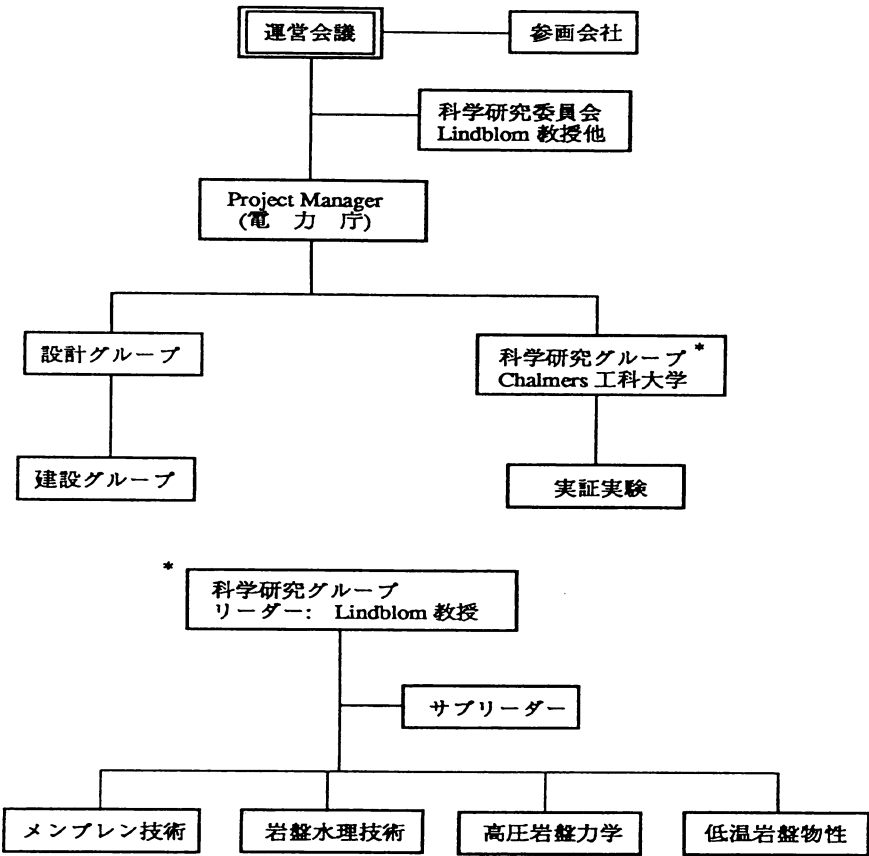


図 2.10 Røda Sten実施組織

1) 実験施設の概要

図 2.11、図 2.12にに示すように、高圧ガス貯蔵用の貯槽 A と低温実験用の貯槽 B は、ヨテボリ付近にある既往の地域暖房用トンネルを用いて地下70mの位置に建設された。岩盤試験施設は非常に堅く風化を受けていない片麻岩質花崗岩内に位置する。Rock Mass Ratingによる岩盤分類では、RMR 値が62～79 で「goodrook」に分類され、またRockMass Quality Systemによる岩盤分類では、Q 値が40～50で「very good 」に

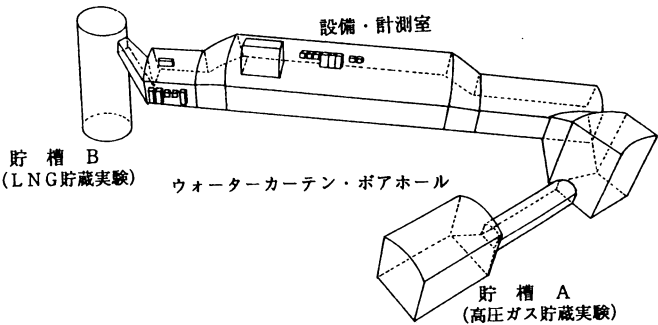


図 2.11 Røda Sten 試験施設の概要図

分類される。一軸圧縮強度は 100～120MPa 、ヤング率は56～63GPa、ピーク強度摩擦角 41° である。オーバーコアリング法により計測された岩盤内の最大、中間、最小初期地圧はそれぞれ7.2、3.4、2.0MPaで、最小初期地圧（鉛直方向）は土被りから計算される値とほぼ等しい。試験空洞は自由水面下35mに位置し、ボアホールにおける水圧0.2～0.3MPaである。

2) 貯槽 A

貯槽 A は図 2.13 に示す幅 4 m、高さ 7 m、奥行き 11.5 m の馬蹄形貯槽で、最終的には 8 MPa (約 80 気圧) までの圧縮空気による貯蔵実験を行う。初期段階では、水封ボーリングによる無履工の低圧圧縮空気貯蔵を行い、次の段階でポリマーメンブレンなど各種ライニングを用いて高圧貯蔵特性を調べる。

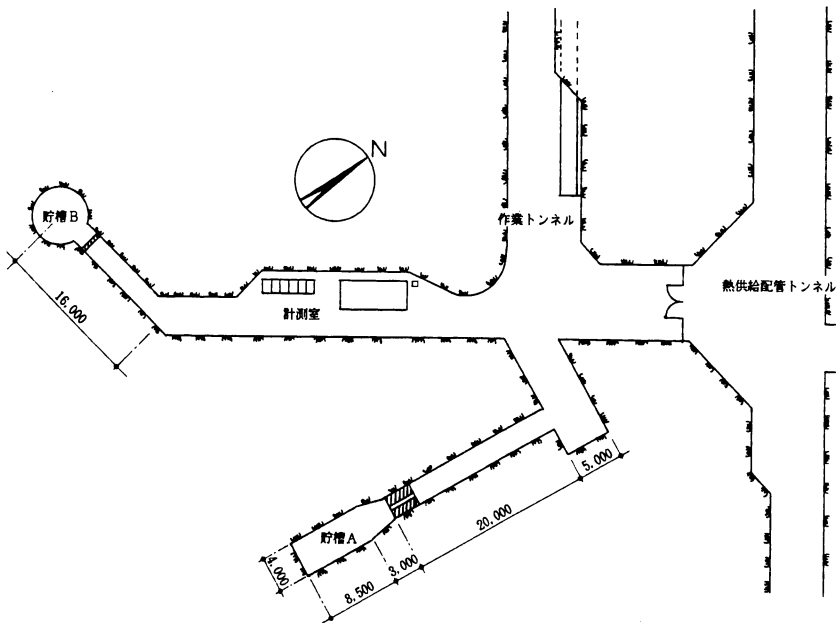


図 2.12 Röda Sten試験施設の平面図

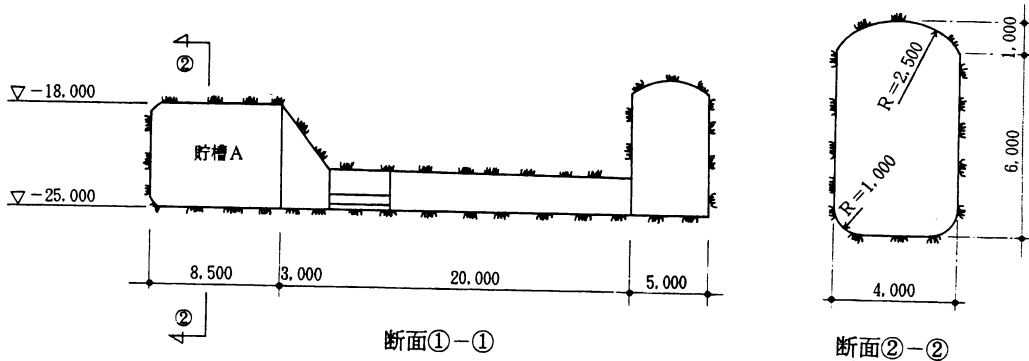


図 3.13 貯槽 A の断面図

3) 貯槽 B

貯槽 B は図 2.14 のごとく、直径 7 m、高さ 12.5 m の円筒形貯槽である。第 1 ステージ（既に終了）では -50°C までの低温下における実験、第 2 ステージでは -196°C までの極低温下における実験を行う。空洞へ流れ込んだ水は集水ピットで集められ、ガスの成分、トレーサーの種類が分析される。

現在までに、空洞の冷却に伴う周辺岩盤の温度、変位、応力の経時変化が計測されている。計測断面と、計器配置を図 2.15 に示す。

用いられた冷却システムはコンプレッサー、2 つの冷却コイル、媒体冷却機からなり、空洞温度 -40°C においては出力 40 kW の仕様である。当初の計画では 45 日間の冷却で壁面温度が -45°C まで冷却される予定であったが、しかしながら、コンプレッサーの故障で、冷却過程が何度か寸断し、冷却期間は 5 ヶ月に延長された。このとき空洞壁面での最低温度は -40°C が記録された。

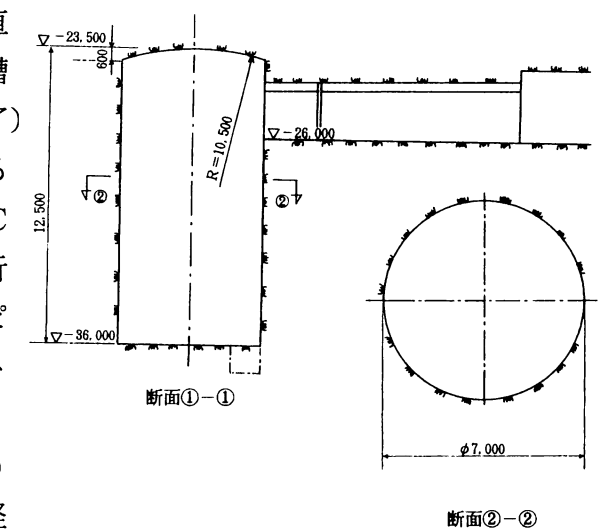


図 2.14 貯槽 B の断面図

空洞の中央部付近水平断面内における岩盤の温度計測結果を図 2.16 に示した。温度は空洞壁面から深度 0.25、0.5、1.5、2、2.5、および 3 m の位置で計測された。経時変化を見ると初期の 40 日間、50 日付近、70～75 日、10～20 日における冷却機の不調が明らかである。

中央部水平断面内において温度荷重による岩盤の半径方向変位が地中変位計、内空変位計、ひずみゲージを用いて計測された。地中変位計 Ext. 1 によって記録された、深度 2.0、1.0、および 0.5 m における変位を図 2.17 に示す。60～100 日においては空洞内の温度は一定に保たれ、この図における各々の計測点においても岩盤温度はほぼ一定であった。しかしながら、この範囲よりも外側の岩盤内において半径方向の変位は増加し続けた。これは岩盤の応力緩和の影響であり、冷却とともに徐々に周辺へと広がっていく。

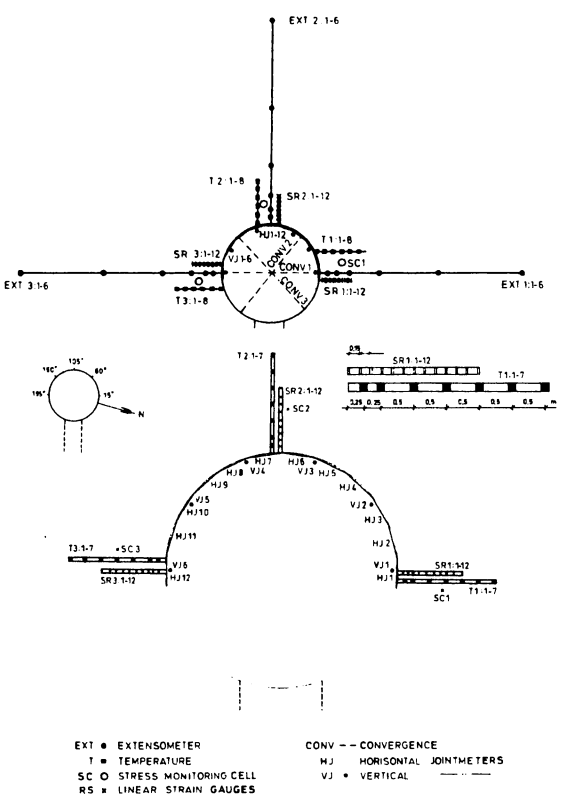


図 2.15 貯槽 B における計器配置図

(出典：PhD thesis, CTH 1992)

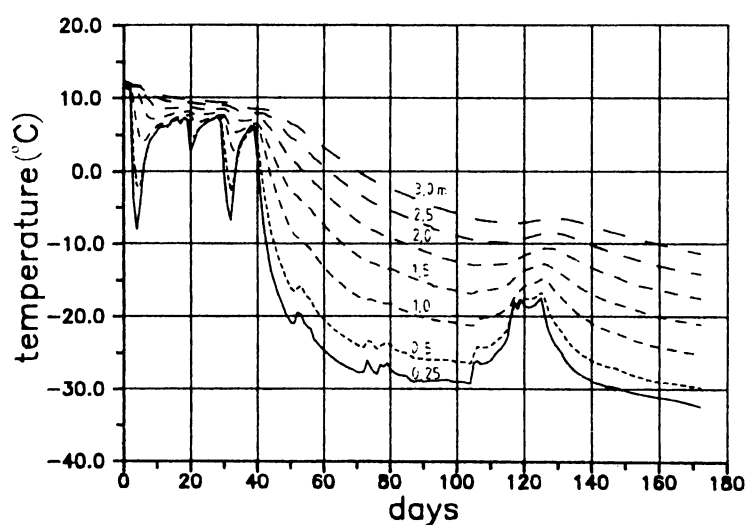


図 2.16 壁面からの深度別温度経時変化

(出典 : PhD thesis, CTH 1992)

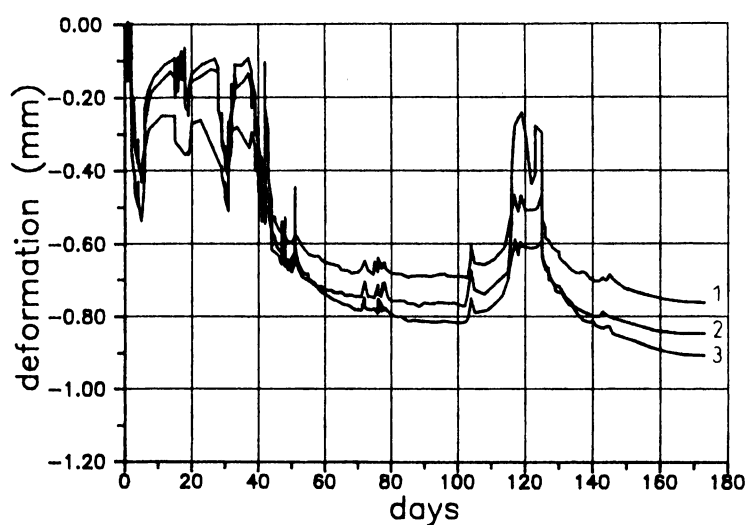


図 2.17 半径方向変位経時変化

(壁面からの深度 1 : 2.0m、2 : 1.0m、3 : 0.5m)

(出典 : PhD thesis, CTH 1992)

温度荷重による局所的な半径方向変位は、壁面から 2 m 以内の岩盤中に設置された長さ 150mm の複数個のひずみゲージで測定された。壁面近傍における半径方向の応力は小さいために、計測された収縮は主に岩盤の冷却に伴う収縮に起因するものである。個々の観測結果から逆算される $+12^{\circ}\text{C}$ から -35°C までの岩盤の平均線膨張率は、 $9 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ となった。これまでの計測結果を総合すると、温度荷重による岩盤の応答は熱収縮と応力変化の影響を受けて、非常に複雑な挙動を示している。岩盤自体の不均一性や水分の凍結がこの挙動をさらに複雑にしていることがうかがえる。

参考文献（第2章）

- 1) 地下空間開発利用の現況調査（マスタープラン専門委員会報告書その1）、(財)エンジニアリング振興協会地下開発利用研究センター、平成2年7月
- 2) 天然ガス鉱業会、天然ガス資料年報、平成3年度版
- 3) LNG-6 記念出版集「LNGのすべて」、LNG便覧、日本LNG会議、1981年
- 4) Lindblom, U. E. 1989. The development of hydrocarbon storage in hard rock caverns. Storage of Gases in Rock Caverns, edited by Nilsen & Olsen, Balkema, Rotterdam, pp.15-30.
- 5) Dahlöf, P. 1992. Travel report, Sonatrach, Algeria, Feasibility study Röda Sten, phase II, cavern B. NCC Teknik.
- 6) Lasseter, T. J. and Witherspoon, P. A. 1974. Underground storage of liquefied natural gas in cavities created by nuclear explosives. Dept. of Civil Engg. Publication 74-1, Univ. of California, Berkeley.
- 7) Jacobsson, U. 1977. Storage for liquefied gases in unlined refrigerated rock caverns. Rock Store '77. pp.449-458.
- 8) Dalström, L.-O. 1992. Rock mechanical consequences of refrigeration - a study based on a pilot scale rock cavern. Ph.D. thesis. Dept. of Geotechnical Engg., Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- 9) Lindblom, U. E. and Söder, C.-O. 1992. Pilot test of compresses air containment in a rock cavern. Int. Gas Research Conference.
- 10) Christenson, K. 1983. Towards underground LNG-storage, the CryoCavern storage system. CIAE, pp.122-129.
- 11) Dreyer, W. E. 1977. Cold and cryogenic storage of petroleum products. Rock Store '77, pp.467-479.
- 12) Särkkä, P. S. 1989. The U-test cavern for gas storage at extremely low temperatures, Storage of Gases in Rock Caverns, edited by Nilsen & Olsen, Balkema, Rotterdam, pp.245-250.
- 13) Boulanger, A. and Luyten, W. 1982. Underground storage of liquefied gas at low temperature. Gas Tech '82, Session 6, Paper 11.

第3章 LNG貯蔵システムの概要

第3章 LNG貯蔵システムの概要

3.1 LNG貯蔵の概要

天然ガスは -162°C まで冷却すると液体になり、気体の時と比較すると体積が約600分の1に減少する。このためLNGの低温貯蔵は天然ガスを高圧下で貯蔵する場合と比較して、高密度に貯蔵することが可能である。さらに、LNGの低温貯蔵は天然ガスの高圧貯蔵と比較して、内圧が少ないため大規模な貯槽の設置が容易で、天然ガスをLNGとして貯えるLNG貯蔵が近年、主流をなしている。

LNG貯蔵タンクは貯槽本体と設置地盤の位置関係により、地上タンク、半地中タンク、地中タンク、地下タンクの4つに大別されている。特に、東京湾周辺では地中タンクが主流で、今までに50基近くが建設されてきた。これら各々のタンクの特徴を示すと以下のとおりである。

(1) 地上タンク

地上タンクは貯槽本体が完全に地上に位置するタンクであるが、地盤の凍結を防ぐために高床式にしたものとヒーターを入れて直接地盤上に設置したものに分けられる。構造特性としては貯槽本体が内槽・外槽の二重殻より構成され、内槽は -162°C のLNG温度に耐えられ、かつ液圧・ガス圧に耐えられる構造となっている。また、外槽は自重・風荷重・地震荷重等に耐えられる構造になっており、内槽と外槽の間には断熱材が充填されている。この地上タンクは現在世界でも最も数多く建設されており、代表的な貯槽方式として金属二重殻円筒貯槽やPC二重殻円筒貯槽等があげられる。

(2) 地中タンク

地中タンクは貯槽本体の側壁部、底盤部が地中に位置し、屋根の部分だけが地上に飛び出したタイプの貯槽である。このタンクは地上タンクと比べ周囲の景観を損なうことが少なく、また万一の貯槽の破損時にも液が地上に流出しないという特徴を持つ。構造的な特性として躯体（側壁・底盤）が鉄筋コンクリートで造られ、周辺からの土圧・水圧等の荷重を支える構造となっている。屋根は側壁上部に設けられ、主として貯槽上方の気密を確保する。また、躯体コンクリートの内側には液密性・気密性を確保するための金属製のメンブレンが用いられ、さらに躯体コンクリートとメンブレンの間には周辺地盤からの熱の流入を抑えるために断熱材が用いられている。また、地盤の凍結防止のために貯槽側壁部・底盤部にヒーティング設備を設けるのが一般的になっている。なお、この形式の貯槽は地中に設置されるために、貯槽容量、構造仕様、施工方法等が設置場所の地盤条件によって大きく左右される。

(3) 半地中タンク

半地中タンクは貯槽本体が地上部分・地中部分にまたがって位置するタイプの貯槽で、地上タンクと地中タンクの中間的な貯槽である。構造的な特性は地中タンクとほぼ同じで、躯体（側壁・底盤）が一般的には鉄筋コンクリートで造られ、土圧・水圧等の荷重を支える構造部材となっており、屋根が側壁上部に設けられ、主として貯槽上方の気密を確保する。躯体コンクリートの内側には液密性・気密性を確保するために金属製のメンブレンが用いられ、さらに躯体コンクリートとメンブレンの間には周辺地盤からの熱の流入を抑えるために断熱材が敷設されている。また、地盤の凍結防止のために地表面下の側壁部および底盤部にヒーティング設備が必要となる場合もある。この形式の貯槽は一部が地中に設置されるために、貯蔵容量、構造仕様、施工方法等が設置場所の地盤条件によって影響を受ける。なお、現在までに国内でこの半地中タンクが施工された実績はない。

(4) 地下タンク

地下タンクは貯槽本体が完全に埋没するタイプの貯槽である。このタンクは地中タンクに比べさらに景観上有利で、また万一の貯槽の破損等にも液が地上に流出せず、さらには地上の有効利用が図れるという特徴を持つ。構造的な特性として、空洞周辺の岩盤や地盤自体を貯槽として利用するタイプのタンクで、空洞内部は液密性・気密性を確保するために金属製のメンブレンが用いられ、さらに岩盤・地盤とメンブレンの間には周辺からの熱の流入を抑えるために断熱材が敷設される。この地下タンクは貯槽が地下に設置されるために、貯槽の規模、構造仕様、施工方法、建設コスト等が設置場所の地盤条件により大きく影響を受ける。なお、現在までにこの地下方式の貯蔵タンクは国内において施工されていない。

表 3.1 貯蔵タンクの比較

	地上方式	地中方式	半地中方式	地下方式
タンク配置図				
タンク構造図				

3.2 LNG岩盤地下タンク

(1) 岩盤地下タンクの概要

LNG岩盤地下タンクは近年、重視されている安全性、環境保全、土地の有効利用などの観点を考慮し、タンク本体を地下深部の岩盤空洞内に設けてLNGを貯える新しいタイプの貯槽である。このタンクは岩盤の支持力を利用して発生したBOGの圧力貯蔵ができることから、出力調整が容易で、夜間に発生したBOGを昼間のピーク時の発電に利用するといった省エネ化にも有効である。また、岩盤タンクは海岸沿いの丘陵地にも立地可能であることから、今まで立地を見ない地域への貯蔵基地建設の可能性を秘めている。

LNG岩盤地下タンクは貯蔵するLNGが常圧（1気圧）のもとで -162°C という極低温の液体であるため、空洞周辺岩盤に凍結領域を自由に形成させて空洞内にLNGを貯蔵する岩盤凍結方式のものと、ヒーティング設備により周辺岩盤の温度を管理する温度コントロール方式のものに大きく分類される。これら貯蔵タンクの液密性は凍結岩盤、コンクリートライニング、スチール性メンブレン等により保たれることになる。

LNG岩盤地下タンクの概要を図 3.3に示す。

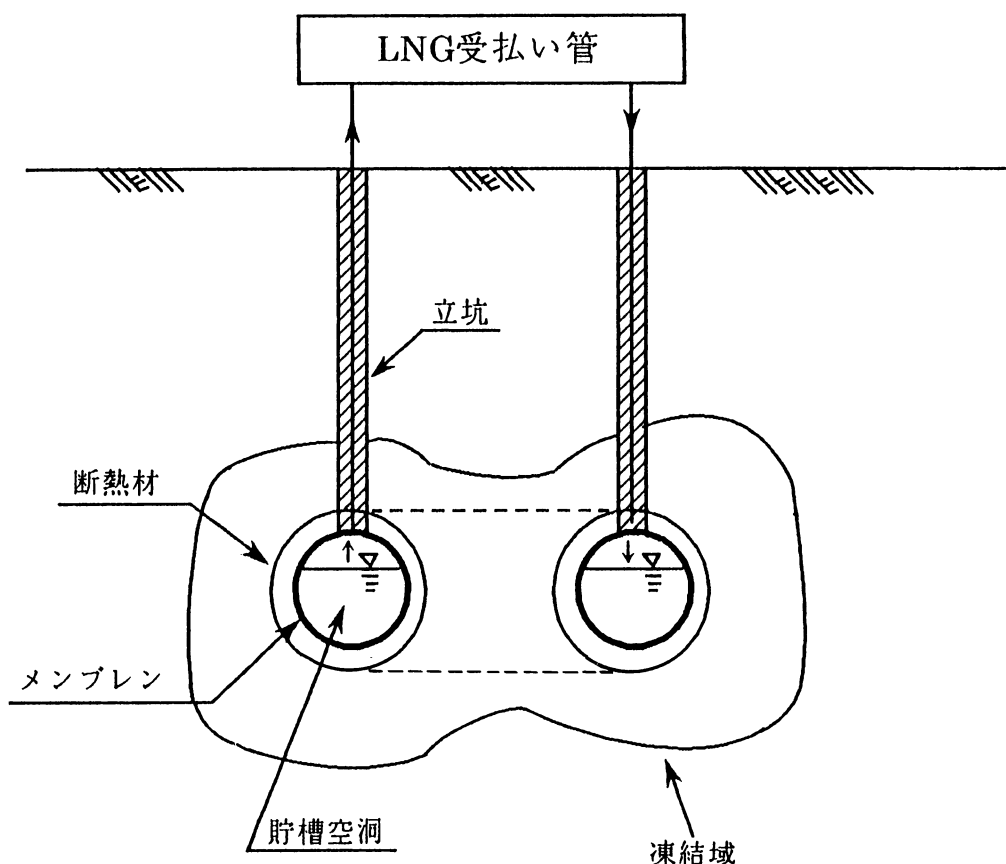


図 3.3 LNG岩盤地下タンクの概要

(2) 岩盤地下タンクの特徴

- ・貯蔵施設周辺への景観の保全に有利である。
- ・地上金属二重殻タンクや地中タンクと異なり、岩盤タンクは岩盤の支持力を利用した圧力（低温加圧）貯蔵が可能である。このため夜間に発生するB O Gを岩盤タンク内に貯蔵し、昼間の電力需要ピーク時にこのB O Gを発電に供するような運転方法がとれる。このL N G岩盤地下タンクの受入基地概略フロー図を図 3.4に示した。
- ・海岸沿いの平野部の少ない地域においても貯蔵施設の設置が可能で、今まで発電所の建設を見ない海岸沿いの丘陵地においても発電所建設が可能である。
- ・地震等の自然災害の影響を受けにくい。
- ・貯蔵施設の事故に対しては、岩盤がバリヤーとなるため周辺への影響が小さい。
- ・比較的良好な岩盤が設置対象となるため、立地場所選定のための制約を受ける。

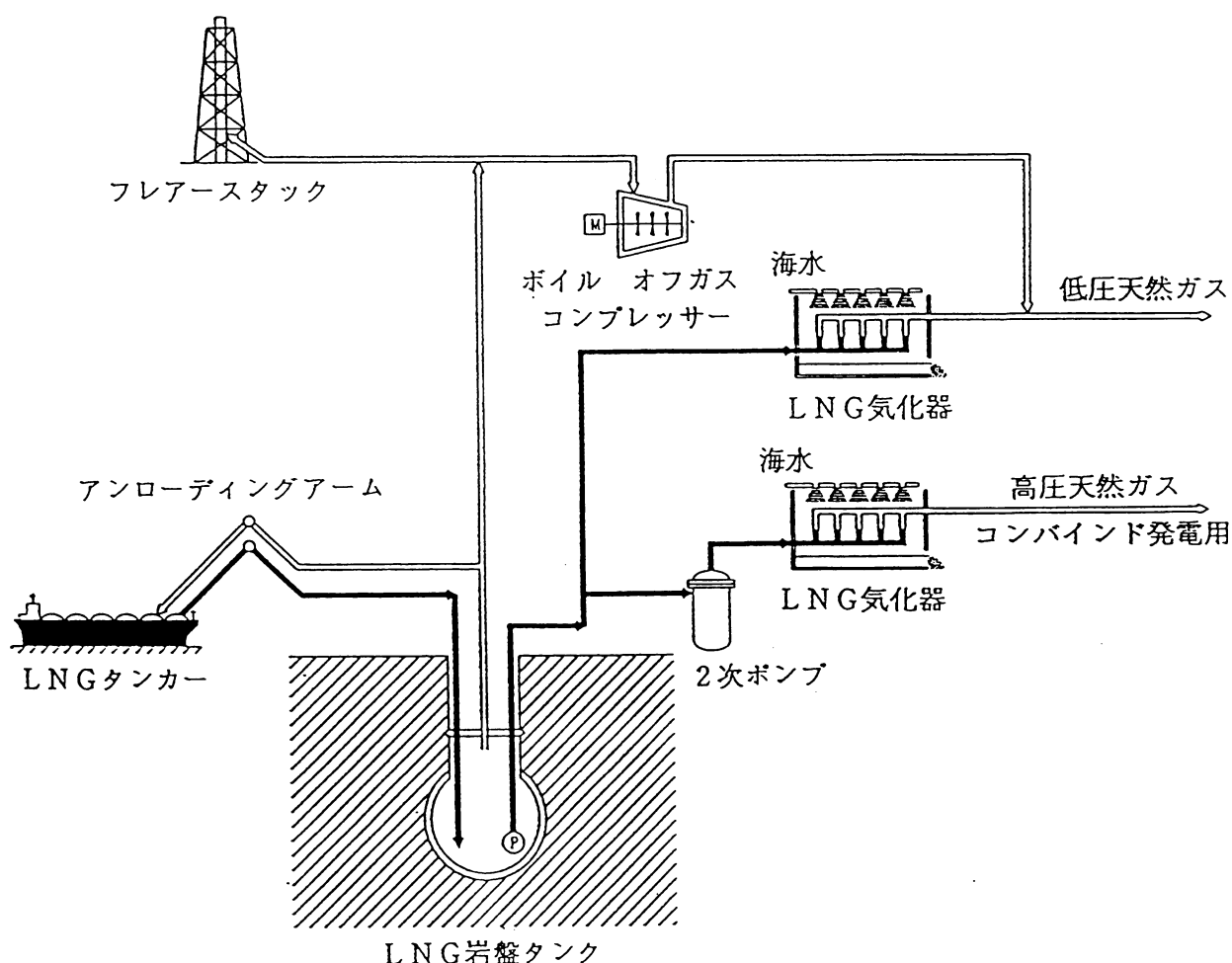


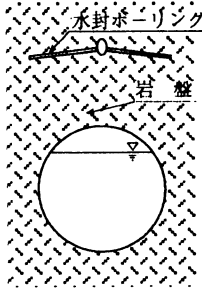
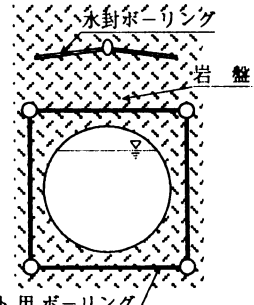
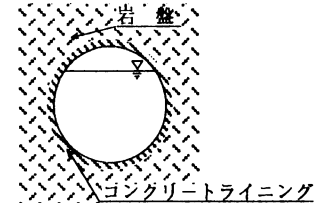
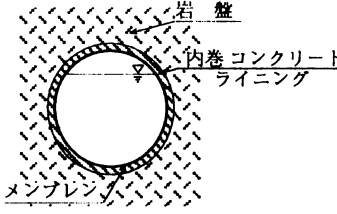
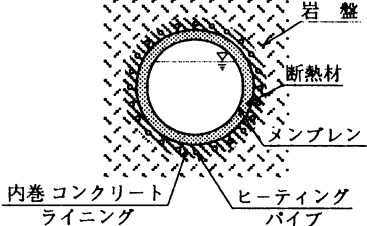
図 3.4 岩盤地下タンクの受入基地概略フロー

3.3 岩盤地下タンクの型式検討

(1) 貯蔵方式による分類

貯蔵方式による岩盤タンクの分類一覧を表 3.1に示す。

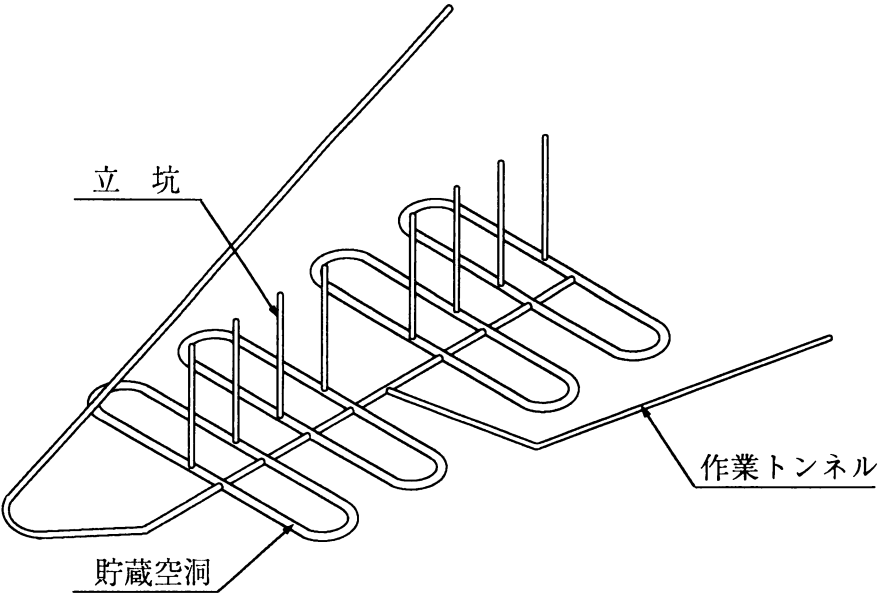
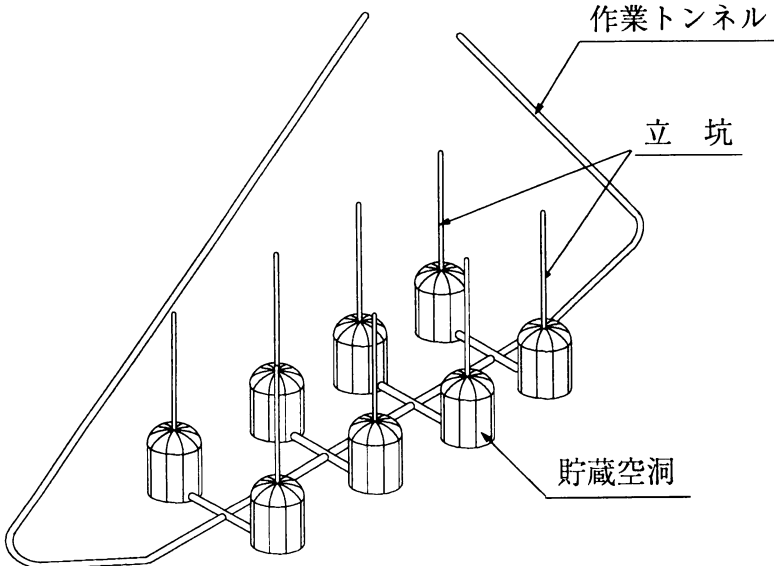
表 3.1 貯蔵方式によるLNG貯蔵システム一覧

① 地下水水封方式	岩盤内に空洞を設けその内部に低温のLNGを貯蔵する場合、岩盤自体が冷却され、その温度応力により空洞周辺の岩盤内にクラックが発生する。地下水水封方式は地下水がクラック内に流れ込むのを利用してクラック内を氷で充填し、空洞の液密性を保って、LNGの流出を防ぐシステムである。	
② グラウト水封方式	空洞周辺にボーリング孔を配置し、凍結温度の低いグラウト材をその中に充填する。温度応力によるクラックがボーリング孔に達するとグラウト材がクラックに流れ込み、そのクラックを充填することにより空洞の液密性・気密性を確保するシステムである。	
③ ライニング方式	空洞内をコンクリートあるいは断熱材で内巻ライニングし、これを容器としてLNGを貯蔵するシステムである。内巻ライニングは液密性を確保するため、貫通クラックの発生しない材料あるいは構造にする必要がある。	
④ メンブレン方式	空洞内に内巻コンクリートライニングとスチール製メンブレンあるいはそれに変わるメンブレン材を設け、その内側にLNGを貯蔵するシステムである。本方式における液密性はメンブレンの容器により保たれる。	
⑤ 温度コントロール方式	現在、LNGの地下タンクで用いられている方式であり、貯蔵タンク内のヒーティングシステムを設け、空洞周辺の岩盤にクラックが発生しないよう周辺岩盤をヒーティングし、温度をコントロールする方式である。液密性はメンブレン、断熱材あるいはライニングにより保たれ、岩盤クラックの影響も避けることができる。	

(2) 空洞型式による分類

空洞形状による岩盤タンクの分類一覧を表 3.2に示す。

表 3.2 空洞形状によるLNG貯蔵システム一覧

岩盤トンネル方式	 立坑 作業トンネル 貯蔵空洞
岩盤縦型タンク方式	 作業トンネル 立坑 貯蔵空洞

3.4 基本形式の選定

LNG岩盤地下タンクの貯蔵システムを検討するにあたり、以下のような基本貯蔵形式を設定した。

(1) 液密構造：空洞内部にメンブレンを敷設

LNG貯蔵による周辺岩盤の冷却に伴い周辺岩盤に引張応力が発生し、一部の岩盤領域においてはクラックが発生する。そのため、タンク内部のLNGが岩盤内にこれらのクラックを介して漏洩する可能性がある。そこで今回、これらタンク内部の液密性を確保し、漏洩に対する安全性を増すためにメンブレンを設置する。

(2) 断熱構造：メンブレンの外側に断熱材を敷設

貯蔵するLNGの温度は -162°C と極低温であるため、周辺岩盤からタンク内部への熱流入によりBOGが発生する。このBOGの発生量は、周辺岩盤の冷却に伴い低下するが、この発生量の時間経過に伴う変化を少なくし、岩盤の絶対温度の低下量を減らすために断熱材を敷設する。

(3) ヒーティングシステム：岩盤凍結方式

(タンク周辺にヒーティングパイプは設けない)

タンク周辺岩盤を凍結させる貯蔵システムとし、現状のLNG地中タンクで採用されているヒーティングシステムの簡略化をはかる。

(4) 空洞形状：円形の岩盤トンネル方式

貯蔵タンク周辺の岩盤には温度低下に伴う引張応力が発生するが、力学的安定性の立場から断面寸法の小さい岩盤トンネル方式の方が岩盤堅型タンク方式に比べ有利である。また、応力集中を抑えるのに円形断面が最適であり、応力の発生原因を明確化するためにも本研究では円形の岩盤トンネル方式について検討するものとする。

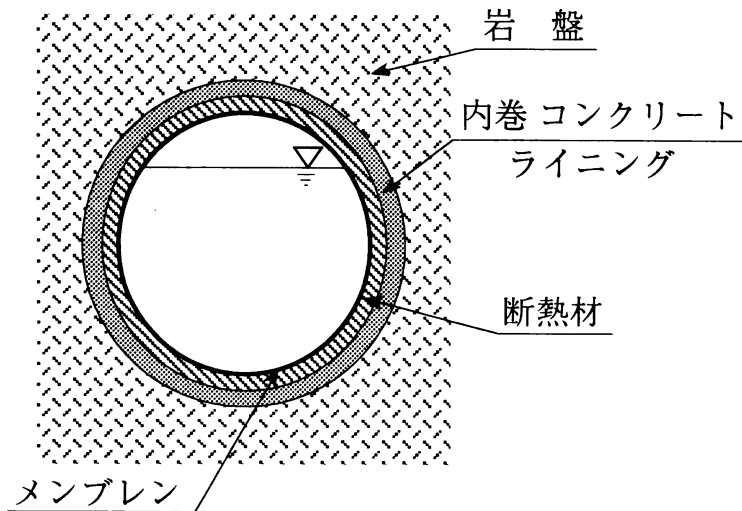


図 3.5 LNG岩盤タンクの基本形状

第4章 LNG岩盤地下タンクの立地に関する検討

第4章 LNG岩盤地下タンクの立地に関する検討

4.1 岩盤分布状況

(1) LNG岩盤地下タンクのための地盤条件

1) 地理・地形条件

① 建設位置

建設地の立地条件については別途詳細に検討するが、我が国で消費するLNGは、すべて海外から専用船で輸送されており、荷揚げのあとLNGの状態では長距離の陸上輸送をすることは得策ではない。そのため、LNGの貯蔵基地は海岸近くに設置する必要がある。

② 周辺地形

貯蔵基地周辺の地形は、建設工事の経済性に影響するが、岩盤地下タンクにとって本質的な制約条件にはならない。

③ 設置深度

岩盤タンク周辺の凍結・冷熱領域および漏液・漏気などの周辺環境に対する影響、地下空洞としての安全性などを考慮すると、適当な深度に設置する必要がある。本研究のモデルでは、空洞土被りとして100mを仮定している。

2) 地質・岩盤条件

① 基本条件

地盤および地下水などについての必要条件是、岩盤タンク設計の考え方によっても異なるが、基本的にはタンクを安全かつ経済的に建設・維持可能なことである。

② 対象地盤

岩盤地下タンクは、経済性を考慮すると、比較的大きな地下空洞であることが必要である。本研究では、空洞内径20mを仮定した。このような大断面空洞の構築に土砂地盤を対象にすることは、建設コストの上でも不適当であり、少なくとも軟岩以上の強度を有する岩盤を対象にする必要がある。

③ 岩盤の規模

LNG基地としては、いくつかの岩盤タンクによって、経済的な貯蔵容量を確保する必要がある。従って、対象とする岩盤は、ある程度の広がりをもっていることが要求される。

④ 岩盤の均質性

岩石・岩盤は、一定水準以上の工学的性質を有し、変化の少ないことが岩盤タンクの建設および維持の上で望ましい。

⑤ 地質構造

地質構造によっては、地下空洞に偏圧を及ぼすなどの原因となることがあるので、特別な地質構造の中には位置しないほうが良い。

⑥ 岩盤の熱特性

LNG岩盤タンクとして最も特徴的なことは、 -162°C の低温物質を貯蔵することである。低温域における岩石の熱物性および強度・変形特性などについては別途検討するが、まだ十分なデータがなく、今後の研究に待つところが多い。特に、岩盤としての低温域における挙動に関してはデータが少ない。

岩石の低温域における挙動は、岩石の孔隙率・含水率および岩石の骨格構造の強さなどによって影響を受け、特に、孔隙率の大きい岩石では、その含水状態によって挙動が大きく異なる。岩盤地下タンクにどのような物性および熱特性の岩石・岩盤が最適であるかは、タンクの設計思想、例えば、空洞周囲の岩盤を水封式のように水飽和状態とするか、または乾燥状態とするかといった問題、さらには支保・ライニングの問題などとも関係することであり、一概に岩盤の適否を決めることは難しい。例えば、稲田教授（愛媛大学）らの研究によれば、花崗岩のように均質・緻密で、高い強度を有する岩盤においては、地下空洞の構築が容易であるが、低温域では、熱収縮のため空洞周辺の広範囲に放射状の亀裂を生じる。また、逆に、新生代の凝灰岩のように孔隙率が大きく、鉱物粒子間の結合力が弱い岩盤では、空洞の周辺に亀裂を生じるが、氷結時の膨張により、空洞表面付近には逆に安定領域が発生するといわれている。

⑦ 地下水状況

岩盤タンク周辺の地下水の状況は、岩盤タンクの気密性および空洞周囲の岩盤応力に関する問題であると同時に環境上の問題ともなる。前述のようにタンク設計に対する考え方と合わせて充分検討しなければならない。

(2) 岩石の分類と特徴

我が国には、各地質年代の種々な岩石が分布している。また、地質構造は比較的複雑で、安定した地質状態が広がっていることは少ない。しかし、地下空間利用のスケールで見ると、既に石油備蓄地下タンクの例などもあるように、岩盤地下タンクの建設対象になる岩盤の分布は少なくはない。

表 4.1は、我が国に分布する主な岩石について、その種類と地質年代を考慮して分類し、それらの地表に分布する比率とその性質を要約したものである。

表 4.1 我が国に分布する岩石の特徴と分布比率

岩石分類		地質年代		代表的な岩石		硬軟別	分布(%)	岩石・岩盤の特徴	
堆 積 岩		新 生 代	第 四 紀	粘土・砂・礫		土 砂	19.3	平野・段丘を構成	
			新第三紀	泥岩・砂岩・礫岩 火山砕屑岩		軟 岩	19.3	泥岩は均質、孔隙率小 厚層のことあり 砂岩・礫岩は孔隙率大 層状構造、各種岩石の互層あり 鮮新世（最上位）の岩石、特に砂 岩は未固結のこと多し	
			古第三紀	泥岩・砂岩・礫岩・ 凝灰岩		中硬岩		細粒岩は均質、孔隙率小 粗粒岩は不均質のことあり、孔隙 率大 層状構造	
		中 生 代		泥岩・粘板岩・砂岩 ・礫岩・チャート・ 石灰岩		中硬岩 ～硬岩	8.0		
		古 生 代		同 上		硬 岩	11.6	緻密、層状構造	
火 成 岩	火 山 岩	新 生 代	第 四 紀	安山岩・玄武岩・流 紋岩		硬 岩	8.8	岩石は均質なるも火山砕屑物と共 存のこと多し	
			新第三紀	同 上		硬 岩	13.1	微晶質、均質、緻密 溶岩・岩脈・貫入岩体をなし、規 模は小から大	
			古第三紀	同 上		硬 岩	4.1		
		中～古生代		同 上		硬 岩			
	深 成 岩	新～古生代		花崗岩・閃緑岩・斑 礫岩		硬 岩	11.6	完晶質、均質、緻密 岩体大	
変 成 岩		中～古生代		千枚岩 結晶片岩・片麻岩		硬 岩	4.1	片理発達、異方性大、岩体大	
				ホルンフェルス・ 大理石				均質、緻密、岩体小	

注1) 硬軟の別は、新鮮な岩石についての工学的区分を表す。
注2) 分布の比率は、各岩石の地表に分布する割合(%)を示す(理科年表 1989)。

(3) 主な岩石・岩盤の性質

1) 地質的・工学的特徴

① 深成岩（花崗岩・閃緑岩）

比較的大きく結晶した鉱物で構成され、粒状構造を呈する。花崗岩（御影石）は、無色鉱物（石英・長石）を主とし、有色鉱物（雲母・角閃石）が少ないため全体として白色を呈する。閃緑岩は花崗岩に類似し、同類の岩石として扱われるが、花崗岩に比べ有色鉱物がやや多く、長石と角閃石を主としており、やや黒色を帯びる。なお、さらに有色鉱物の多いものが斑礫岩（黒御影）であるが、その分布は小さい。

大部分の花崗岩類は等方性であり、新鮮な岩石は、孔隙率が小さく、圧縮強度

が大きい硬岩である。しかし、岩石の生成時およびその後の地殻変動による亀裂（節理）が発達している場合があり、岩盤としての性質に大きく影響する。また、主要構成鉱物である石英と長石の膨張係数の違いおよび石英には微細な割れ目が多いことと他の構成鉱物にへき開が発達することから、花崗岩類は風化を受け易く、亀裂に沿ってかなり深部まで砂状（まさ）に風化していることがあるので注意を要する。

花崗岩類は、均質・塊状で、大きな岩体をなすことが多く、大規模な地下空間開発における有力な対象岩盤であり、菊間および久慈の石油備蓄地下タンクも花崗岩の中に設けている。我が国には、いろいろな地質時代に貫入した花崗岩類が多く、例えば、北上山地・阿武隈山地・飛驒山地・木曽山脈・紀伊半島北部・中国瀬戸内地方・九州北部など広範囲に分布している。

② 火山岩（流紋岩・安山岩・玄武岩）

これらの火山岩は、一般に、ガラス質または微細な結晶からなる石基の中に、比較的大きく結晶した鉱物を含む斑状組織を示す。構成鉱物は、石英・長石・雲母・角閃石・輝石等であり、流紋岩・安山岩・玄武岩の順に有色鉱物が多くなり、白色から黒色へと変化する。また、有色鉱物が多いほどマグマの粘性が大きく、溶岩となって広く流れる。

火山岩は、孔隙率はやや大きいのが、新鮮な岩石では圧縮強度も大きく硬岩に属する。しかし、これらの岩石は、地表または地下浅所で冷却固結してできたものであるため、岩盤としての評価には特に次のような点に注意を要する。

- ・冷却時の収縮によって、柱状または板状に亀裂（節理）が発達し、強い異方性および大きな透水性を示すことがある。
- ・溶岩として形成された場合には、個々の岩層の厚さは小さく、岩層間に脆弱な火山砕屑岩類を挟む場合が多い。また、溶岩の固化の過程で、角礫岩状に破碎した岩石になっていることがある。
- ・新しい地質年代に形成された火山岩類は、継続する火山作用のために変質（粘土化）している場合がある。

火山岩はこのような問題もあるが、我が国には広く分布しており、均質・塊状の安山岩の中に設けられた串木野の石油備蓄地下タンクの例に見るように、変質していない大きな岩体は大規模な地下空間開発の対象として検討に値する。

③ 古生代および中生代の堆積岩

（泥岩・頁岩・粘板岩・砂岩・礫岩・チャート・石灰岩）

堆積岩は、基本的には構成粒子の粒度によって分類する。泥岩・頁岩・粘板岩は、いずれも粘土・シルト相当の細粒土から固化した岩石であるが、泥岩は無層理・塊状であり、頁岩は堆積または続成の過程で生じた剝離性があり、粘板岩はさらに続成作用が進み硬化と剝離性が増したものである。また、チャートは、主として珪質の化学的沈殿岩として形成され、緻密・硬質であり、層状または塊状

をなす。石灰岩は、生物起源の石灰質有機岩として形成され、均質・硬質である。

堆積岩は、細粒岩ほど孔隙率が小さく粗粒岩ほど大きい。また、生成した地質年代が古いほど硬く圧縮強度が大きくなるのが一般的である。

古生代および中生代の堆積岩は、長い地質時代を通しての続成作用によって、岩石としては緻密・硬質になっているが、一方ではこの間に、地殻の応力を受けて様々な地質構造を造るとともに、節理、亀裂等を生じている。特に、細粒岩は粗粒岩に比較し塑性変形し易いため、著しく破碎していることがある。

岩盤としての評価は、地質構造および亀裂の発達状況によって支配されるが、我が国でも、地下発電所のような大規模な地下空洞が数種の堆積岩わたって建設されている例もある。石灰岩は均質・堅硬であるが、地下水の溶食によってできた地下空洞が存在することがあり、その探査が難しく注意を要する。

④ 新生代の堆積岩（泥岩・頁岩・砂岩・礫岩・火山砕屑岩）

岩石の構成は、本質的には古生代および中生代の堆積岩と同じであるが、新しい地質年代に生成しているため、固化（岩化）の程度が低いことが特徴である。

新生代は、古い年代から古第三紀・新第三紀・第四紀に分けられるが、それぞれの年代の堆積岩の工学的性質にはかなりの差がある。古第三紀の堆積岩は、中生代の岩石と大差なく大部分は硬岩に近い性質であり、特に、砂岩は泥岩よりも一般に硬質である。しかし、その分布は北海道・常磐・九州の炭田地域が主になっている。新第三紀の堆積岩については後述するが、大部分が軟岩に属する。第四紀の堆積物は、最下部（更新世＝洪積世）で半固結の状態にある泥質岩でも一軸圧縮強度は10数kgf/cm²程度で、大部分は未固結の状態であり、大規模な地下空間開発の対象として扱うことは難しい。

新第三紀堆積岩の大部分は、続成作用によって硬岩に移行する過程にあるいわゆる軟岩（堆積軟岩）に属する。一般に、砂質岩は固結程度が弱く容易に土粒子状に分離することがあるが、泥質岩はほぼ固結しており、一軸圧縮強度は10-100 kgf/cm²程度あるいは200kgf/cm²程度を示す。

軟岩の岩盤は比較的亀裂が少なく、その物理的な性質は岩石片の性質と大差ない状態を示し、この点では硬岩とは異なっている。また、軟岩は弾性体として扱うことはできるが、長期的にはクリープ変形を伴うこと、含水状態によって物性が大きく変化することなども特徴である。軟岩の透水性に関しては、泥岩は難透水性であり、亀裂状態が問題となるが、砂岩は孔隙率・透水係数が大きく、一般に帯水層となっている。

図 4.1は、小島教授（東京大学）による堆積過程での土～軟岩～硬岩の物性値の変化を示す。横軸は圧密の程度を間隙比 e で、縦軸は固結の程度を一軸圧縮強度 q_u 表している。間隙比および一軸圧縮強度の変化は連続的であるが、砂と粘土では両者の関係に差が表われている。

我が国では、新第三紀層の分布は広く、北海道東部および西部・東北地方中西部・長野北部・北陸～山陰沿岸などのほか、3大都市平野部の周辺および地下に

も及んでいる。

三大都市部を除いた新第三紀層の分布域は、火山碎屑岩類（凝灰岩・凝灰角礫岩等）の分布域でもある。火山碎屑岩類は、一軸圧縮強度が 100kgf/cm^2 を示す硬質のものもあるが、中には極端に軟質なものもあり、また、熱水変質を受け脆弱化していることもしばしばあるなど、性状の変化が大きいので一様に扱うことはできない。

大都市周辺には、塊状で安定した厚い新第三紀層の泥質岩が発達する地域もあり、地下利用の場として検討する必要があるが、大規模な地下空洞の建設例は少なく、本研究でも今後の課題とした。

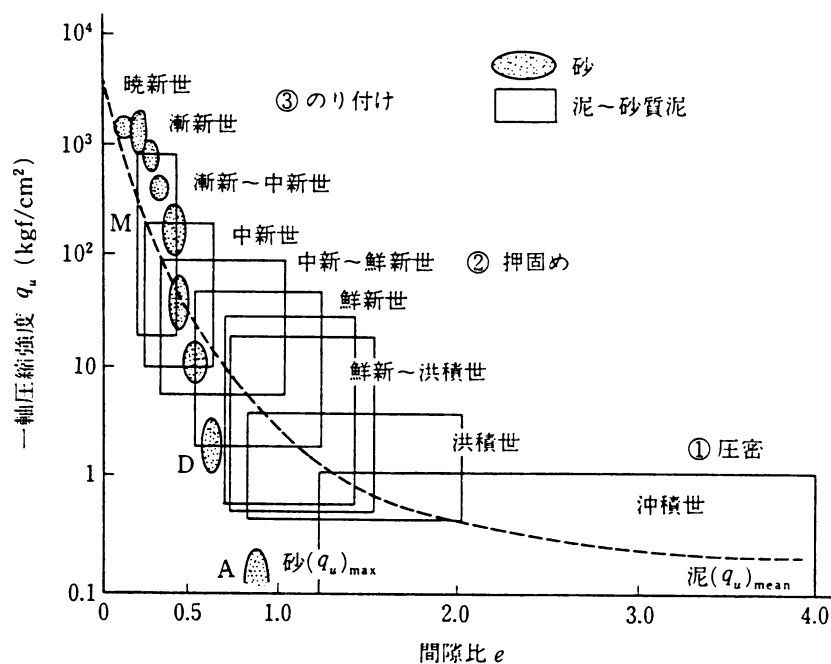


図 4.1 岩化に伴う日本の新生代堆積物の物理的性質の変化

（出典：軟岩評価－調査・設計・施工への適用－，土木学会，小島，1992）

⑤ 変成岩（結晶片岩・片麻岩等）

変成岩には、マグマの貫入によって原岩が熱変質したホルンフェルス類と造山運動による熱と圧力を受けて変質した結晶片岩・片麻岩類とがある。

ホルンフェルスは、岩石としては細粒緻密であるが、その分布域は比較的小さい。なお、大理石は、石灰岩がホルンフェルスと同じように熱変質してできたものである。

結晶片岩は、原岩から再結晶によって生じた変成鉱物が一定方向に配列するため、顕著な片状（片理）を呈する。岩石としては、孔隙率も小さく緻密であり、片理面に直交する応力に対しては他の硬岩と同程度の大きな強度をもつ。しかし、片理面に沿って著しく剝離し易く、異方性が強いことが特徴であり、工学的には

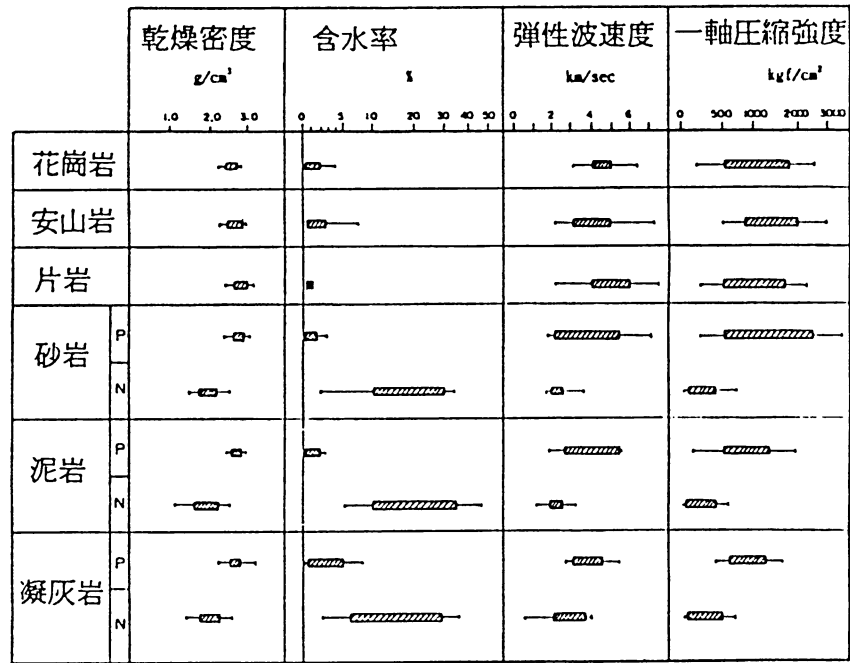
要注意の岩石である。

片麻岩は、結晶片岩よりも変成度が高く、無色鉱物と有色鉱物とで縞状を呈する。しかし、石英および長石が多いため、異方性は結晶片岩ほど強くはなく、中には花崗岩に近い性質のものまである。

結晶片岩・片麻岩類の分布は、地質構造線と密接に関係しており、西日本を内帯と外帯に分けて延びる中央構造線の南側に結晶片岩が、北側に片麻岩が帯状に分布しているのはその代表的な例である。この他、結晶片岩は九州北部、または片麻岩は飛騨地方にまとまった分布がある。

2) 岩石の物理的性質

図 4.2は、我が国に分布する主要な岩石の物理的性質をまとめたものであり、その概要を把握することができる。



P：先新第三紀 N：新第三紀及び更新世（第四紀）
(compiled and simplified from Kasuya's manuscript, etc.)
Engineering Geology of Dams in Japan, 日本応用地質学会, 1992

図 4.2 代表的な岩石の物理的性質

(4) 我が国沿岸の岩盤分布

図 4.3は、日本地質アトラス（1／100万、工業技術院地質調査所、1982年）を基にして、全国の沿岸を対象に、第四紀完新世・更新世の堆積層・火山岩類および第三紀最上位の鮮新世の火山岩類を除いた、岩盤の分布状況を表わしている。図に示した岩盤は、軟岩領域から硬岩領域までの広い範囲を含んでおり一様に扱うことはできないが、岩盤状況に適合した方法をとることによって、LNG岩盤タンクの建設対象とすることができる可能性を有している。

次に各地方沿岸の岩盤分布状況を概観する。北海道沿岸には岩盤の分布は多くない。岩石は、襟裳岬付近の中生代～古生代の堆積岩を除いて、新生代新第三紀の堆積岩が多いが、釧路付近では古第三紀の堆積岩となる。また、渡島半島の沿岸は新生代の火山岩類からなる。

東北地方では、三陸海岸から牡鹿半島にかけて岩盤の分布が良く、中生代～古生代の堆積岩および花崗岩類からなる。また、常磐海岸も岩盤が比較的良く分布するが、すべて新生代の堆積岩である。津軽海峡に面した地域は新生代の火山岩類の岩盤が多いが、日本海沿岸になると岩盤の分布がなく、局部的に新生代新第三紀の堆積岩があるにすぎない。

関東・東海沿岸では岩盤の分布は多くはない。房総半島・三浦半島はいずれも新生代第三紀の堆積岩からなる軟岩である。しかし、伊豆半島では新生代の火山岩類となる。

紀伊半島沿岸には岩盤の分布が良く、それらは中生代～新生代古第三紀の堆積岩からなる中硬岩である。また、熊の灘の一部には花崗岩類が分布している。

北陸地方では、能登半島に岩盤の分布が良く、新生代第三紀の堆積岩・火山岩類から構成される。若狭湾付近には、中生代～古生代の堆積岩、花崗岩、新生代の火山岩類など多種の岩盤が分布する。中国地方の日本海沿岸には断続的に新生代の堆積岩・火山岩類が分布している。

瀬戸内海沿岸および多くの島々には花崗岩類の岩盤が広く分布している。四国の外周、紀伊水道・土佐湾・豊後水道に面しては、中生代～新生代古第三紀の堆積岩が良く発達し、安定した中硬岩帯となっている。また、佐田岬半島は、方向性の著しい変成岩の岩盤からなる。

九州地方では、玄界灘に面しては花崗岩類も分布するが、五島列島にかけては新生代の堆積岩となり、西彼杵半島では変成岩である。八代海沿岸および天草諸島には、中生代～新生代古第三紀の堆積岩が分布し、豊後水道沿岸に続いている。志布志湾付近は新生代の堆積岩であるが、その南の大隅半島では花崗岩類が分布している。

(5) 関東地方海岸域の岩盤分布

図 4.4は、関東地方の海岸地域を主な対象に、図 4.3の岩盤分布と同様の基準で、軟岩～硬岩の岩盤が分布する範囲を示している。。しかし、関東平野のように海岸から沖積世ないし洪積世の平地が広がっている地方については、岩盤が地表付近に分布する周辺山地までを対象に表現した。詳細な検討は次年度に行うこととする。



図 4.3 我が国沿岸の岩盤分布

第四紀完新世・更新世の堆積層及び第三紀鮮新世の火山岩類を除き、軟岩～硬岩の岩盤が地表付近に分布がすると推定される地域を示す。

主として、海岸地域を対象にしたが、沖積平野等については、岩盤が地表付近に分布するまで、陸域に入り込んでいる。

参考資料：日本地質アトラス（1/100万、地質調査所1982年）



図 4.4 関東地方の海岸域を主対象にした岩盤分布

4.2 社会的ニーズ

(1) 立地点へのニーズ

電力会社のLNG消費量は現在輸入量の79%を占め、規模が大きく、将来の電力需要の拡大も予想されることから、今後大規模な新規LNG基地の建設が進むものと想定される。また、ガス会社では大手3社が輸入量の16%を占めており、ガス需要の伸び率も高いことから、電力同様今後大規模な新規LNGの基地の建設が予想される。

このようにLNG基地の新設のニーズはあるものの、東京、大阪、中京地区などの大都市圏周辺は、図 2.1の既設LNG受入基地の設置状況に示すように立地難の状況である。大都市圏周辺以外では、たとえば電力のLNG基地の立地に関しては、電力供給面から、特に関東地区では関東西部が、関西地区では紀伊半島、和歌山方面および若狭湾周辺へ立地が望まれている。

(2) 岩盤貯蔵タンクへのニーズ

近年、周辺への社会環境問題が重視され、新設構造物の地上における景観が周辺住民に及ぼす心理的影響や周辺環境との調和などが問われる時代になってきている。また、地震や火災に対する万全な安全対策が要求され、安全性をより確実なものにすることが要求されつつある。これらの解決策として地下を利用することが提案され、地中タンク（堅型地下タンク）などが建設されているが、近年はより大深度の地下を積極的に利用する方向に進みつつある。

この例として石油およびLPGの貯蔵では、従来の地中タンクに加えて、大深度の地下を積極的に利用すると言う観点から、土地の有効利用がはかれ、かつ安全性、環境保全性および経済性に優れる岩盤地下貯蔵が注目を集めるようになってきた。この内、石油の岩盤地下貯蔵に関しては菊間実証プラントによりシステムの安全性が確認され、現在久慈、菊間、串木野の3ヶ所で合計500万klの実用プラントが建設中で、本年3月に一部完成、オイルインされている。

また、LPGの岩盤地下貯蔵に関しては既に試験プラントが建設され、現在実験中である。実験は来年3月に完了予定で、引き続き実用プラントが計画、建設される予定である。

LNGの貯蔵に関しては、地中タンクが約20年前から実用化され、東京湾周辺を中心に約50基が建設されてきたが、石油およびLPGと同様今後は岩盤地下貯蔵へのニーズが高まるものと思われる。

なお、現在建設中の石油岩盤地下貯蔵および実験中のLPG岩盤地下貯蔵の概要を表 4.2に示す。

表 4.2 石油及びLPG岩盤内地下貯蔵の概要

区分	基地名	所在地	方式	容量	貯蔵圧力 (kg/cm ² G)	貯蔵温度 (°C)	岩質	設置深度 (単位：m)	寸法 (単位：m)	備考
石油	原油地下備蓄 久慈基地	岩手県 久慈市	横穴水封式	175万kl (35万kl×1) (70万kl×2)	-0.1～0.4	13	花崗岩	-20 (海面より) -100 以深 (地表より)	幅 18 高さ 22 延長 1100～2200 (1ユニット当り)	工事は完了 H 5. 10月オイルイン予定
	原油地下備蓄 菊間基地	愛媛県 菊間町	横穴水封式	150万kl 注) (59万kl×1) (75万kl×1)	-0.1～0.4	18	花崗岩	-35 (海面より) -65～-100 (地表より)	幅 20.5 高さ 30 延長 1000～1300 (1ユニット当り)	H 5. 10月工事了予定 H 6. 4月オイルイン予定
	原油地下備蓄 串木野基地	鹿児島県 串木野市	横穴水封式	175万kl (35万kl×1) (76万kl×2)	-0.1～0.4	22	安山岩	-20 (海面より) -100 以深 (地表より)	幅 18 高さ 11 延長 1000～1300 (1ユニット当り)	工事は完了 H 5. 1月一部オイルイン 済
	LPG地下備蓄 実証プラント	岡山県 倉敷市	横穴水封式	390m ³	8.5 (設計圧力)	19	花崗岩	-105 (海面より) -110 以深 (地表より)	幅 3.5 高さ 3.5 長さ 33.5	工事了 H 4. 11月より実験開始 H 6. 3月実験完了予定

注1) 菊間基地は地上タンク (3.4万kl×4) と実証プラントを転用した地下タンク (2.5万kl×1) を含む。

4.3 立地・計画条件

(1) 自然条件

LNG地下タンクを計画するに当たっては、対象地域の地形、地質、気象、海象、地震等の自然条件を調査検討し、計画する必要がある。

1) 地 形

タンクはすべて地下にあるため、地上用地は付帯設備だけでよい。従って、地形にあまり左右されず、急峻な山地でも可能な場合がある。

2) 地 質

タンクそのものが岩盤であるため、地質条件が建設コストに大きな影響を与える。タンク断面を大きくでき、タンクの補強をできるだけ少なくできる方が経済的である（4.1 岩盤の分布状況参照）。

3) 気象、海象

地下タンクの設計についてはあまり影響がない。

4) 地 震

地震の影響は地下タンクでは小さいが、地震多発地帯や密集した活断層地帯は避ける方が望ましい。

(2) 社会的条件

LNG地下タンクを計画するに当たっては、対象地域の自然条件の他に、既存権益保安、環境保全などの社会的条件を調査、検討し、計画する必要がある。

1) 既存権益

地下タンクについては、計画用地内の鉱業権について、その実態と権益の削減は可能か否かを調査する必要がある。

2) 保 安

他施設との保安距離については、保安物件との距離が規定以上とれるように配置計画時に計画する必要がある。

3) 環境保全

地下タンクは周囲環境との調和をはかり易いが、大気、水質汚染、騒音、振動、土壌汚染等に関し、定められている規制値をクリアできるように計画する必要がある。

4) 掘削土砂、掘削ずりの利用方法

地下タンク建設に伴う掘削土砂および掘削ずりの利用方法を調査、検討する必要がある。

参考文献（第4章）

- 1) 稲田善紀、藤原斉郁、門田俊一、姚義久：
低温物質の岩盤内貯蔵時に岩質の差異が挙動に及ぼす影響
第25回岩盤力学に関するシンポジウム、231～235頁、1993年2月
土木学会岩盤力学委員会
- 2) 東京天文台編纂：理科年表、1989年、丸善
- 3) 小島圭二：軟岩－評価調査・設計・施工への適用、1992年、土木学会
- 4) 地質調査所：日本地質アトラス、1982年
- 5) 日本応用地質学会：Engineering Geology of Dams in Japan
Engineering Geology, Special Issue, 1992年

第5章 LNG貯蔵施設の基本システム設計

第5章 LNG貯蔵施設の基本システム設計

5.1 検討条件

ここではLNG貯蔵用の貯槽としてLNG岩盤地下タンクを取り上げ基本システム設計を実施する。この岩盤地下タンクは環境保全、土地の有効利用などの観点から有利であるとともに、岩盤の支持力を利用した圧力貯蔵により、夜間のBOGを昼間のピーク時の発電に利用するといった省エネ化にも有効である。また、このタンクは海岸沿いの丘陵地にも立地可能であり、今まで立地を見ない地域への貯蔵基地建設の可能性を持っている。

LNG岩盤貯蔵システムの調査を進めるにあたり、LNG岩盤地下タンクの安全性評価、ならびにLNG貯蔵のためのシステム確立が重要な研究テーマとなる。この時、LNGの使用法・使用形態といった貯蔵施設建設の目的が、貯蔵容量、貯蔵圧力、入熱量、受け払い方法といった貯蔵方法や運転条件に影響するとともに、これらの貯蔵方法や運転条件などの施設の基本システムは岩盤地下タンクの断面寸法、長さ、断熱仕様といった地下タンク本体の構造仕様と互いに密接な関係にある。そこで、LNG岩盤貯蔵システムの研究を行うにあたり、まず貯蔵方法や運転条件といった貯蔵システムの基本条件を設定し、次に岩盤地下タンクの概略構造仕様を決め、これを貯蔵システムにフィードバックするという手順でLNG貯蔵施設の基本システム設計を行った。

LNG岩盤地下タンクの利用目的として、LNG火力発電所における発電燃料の貯蔵用、都市ガス供給のための貯蔵用、LNG受け入れの際の貯蔵用などといった用途が考えられる。貯蔵施設はその用途に応じて、設置場所、貯蔵容量、タンク仕様、貯蔵システム等が変わることから、ここでは一例としてLNG火力発電所の場合を取り上げLNG岩盤タンクの基本システム設計を行った。

5.2 基本システムの概要

LNG岩盤地下タンクを含む受入れから払出しに至るまでの貯蔵施設の概略フローを図5.1に示す。液化基地から貯蔵施設へのLNGの輸送は125,000 m^3 LNGタンカーで行うものとし、タンカーのLNGはアンローディングアームを通してLNG岩盤地下タンクに受入れ貯蔵する。この時、LNG荷卸しはタンカーのカーゴポンプにより行い、タンカー保護のためLNG岩盤タンク内の一部のBOGをタンカーへ送り出す。

LNG岩盤地下タンクに貯蔵されたLNGは消費必要量に応じ、LNGポンプで払出し・昇圧し、LNG気化器で気化・昇温（常温まで）した後、コンバインド発電用燃料または都市ガス（都市ガスにも利用した場合）として送出する。LNG受け入れ時およびLNG貯蔵時に発生するBOGはBOGガスコンプレッサーで昇圧し、気化ガスに混入される。

また、LNG岩盤地下タンクの貯蔵圧力は高压と低压のものが考えられるが、ここでは夜間のBOG発生による昇圧量が通常約1,000mmAq、受入れ時で約2,000mmAqと少ないことから低压での運用を行うものとし、現在の地中タンクの断熱材およびメンブレン

等の延長技術で対応していくものとする。

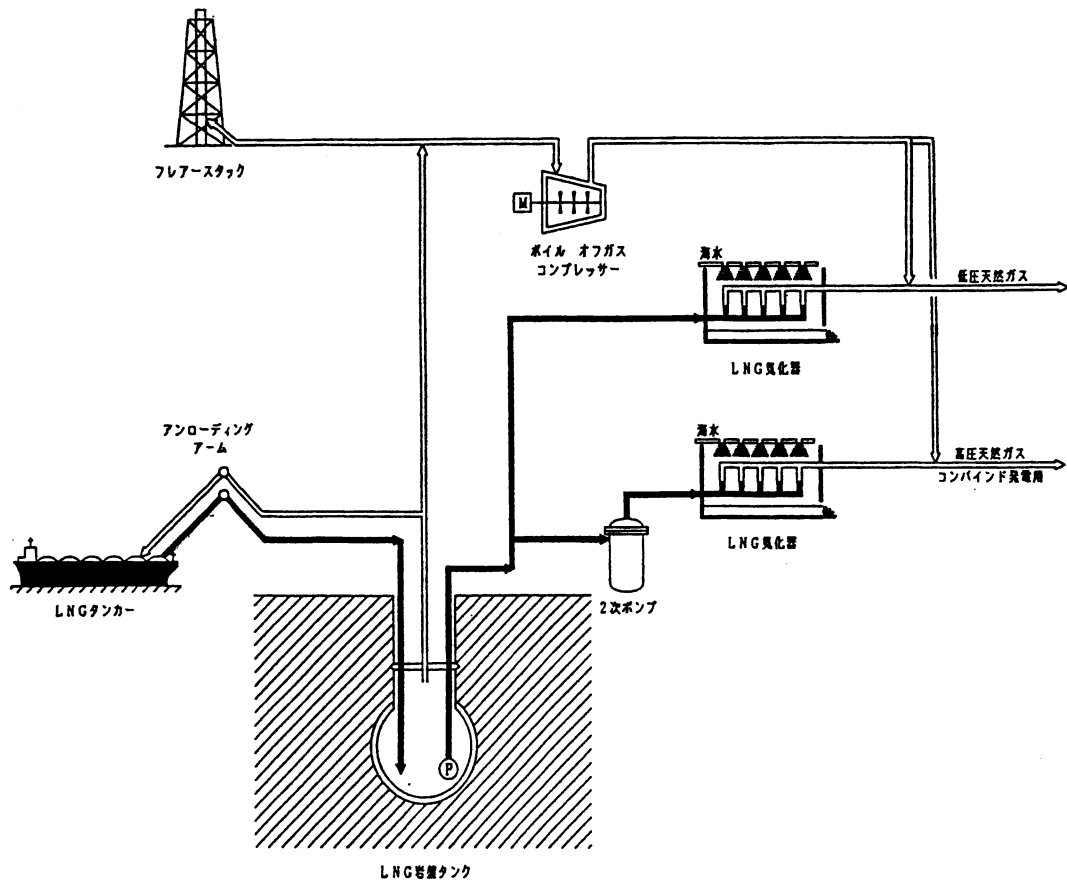


図 5.1 LNG岩盤地下タンクの受入基地概略フロー

5.3 LNG岩盤貯蔵システムの基本条件

本研究を実施するに当たって貯蔵規模や運転圧力の諸条件を設定する必要があり、LNG岩盤貯蔵システムの規模に適合するモデルとしては規模が大きく、利用率や効率がモデル化し易い発電用の貯蔵設備を研究対象とし、その条件を下記に示す。

(1) 発電所モデル

- ① 発電形態：コンバインドサイクル発電方式とする。
- ② 発電所規模：200万kW（LNG燃料9発電所の平均値）
（火力、原子力発電設備便覧、S61年改訂版による）
- ③ 発電利用率：56.9%
平成3年度：LNG火力データ（ガス年鑑91年度版による）
- ④ 発電効率：48%（コンバインドサイクル発電効率）
- ⑤ 発電所内消費率：5%（実績データによる）

(2) LNG組成および貯蔵条件

- ① LNG組成：インドネシア（アルン）産（組成はLNG便覧による）
（比重0.467、温度 -162°C ）
- ② 貯蔵総量：年間使用LNG量の10%（文献、石油、H3年9月号による）
- ③ 有効貯液率：95%
- ④ LNG船の大きさ：125,000 m^3

(3) 貯槽構造

- ① 空洞形状：円形トンネル形状（熱応力に対する安全性を考慮）
- ② 設置深度：空洞土被100m（空洞周辺の冷熱影響を考慮）
- ③ 断熱、液密対策：メンブレンと断熱材を用いた岩盤凍結方式
（岩盤凍結範囲をコントロールするヒーターは設けない）
- ④ 断熱材の物性：熱伝導率 0.02kcal/mh $^{\circ}\text{C}$
：比熱 0.25kcal/kg $^{\circ}\text{C}$
：平均密度 60kg/ m^3
：入熱量 16.4kcal/ m^2h
（断熱材厚み20cmにて冷却経過30日後）

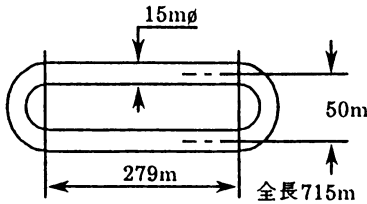
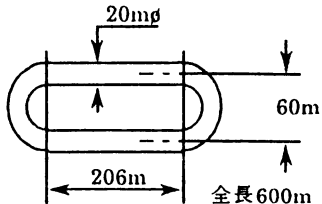
5.4 貯蔵規模

前述の200万kWのコンバインド発電所をモデルとして、システムの基本条件の貯蔵総量と有効貯液率から貯蔵規模を算出すると、LNG貯蔵総量は360,000klとなる。

(1) 貯槽寸法および基数

トンネル空洞内径は経済性および施工性を考慮し、直径15mあるいは20mの円形断面に設定した。

表 5.1 検討貯槽ケース

ケース 諸元	15m φ 貯槽ケース	20m φ 貯槽ケース
貯槽形状		
基 数	3 基	2 基
貯蔵容量	120,000kl／基	180,000kl／基

(2) 貯槽基数について

- ① 貯槽基数はメンテナンスを考慮して最低2基とする。
- ② 貯槽の基数は総容量を割り切れる1基当たりの容量（10～20万kl）と、用地、施工性を考慮したトンネル長さで経済性（基数の少ない方が有利）とを勘案し、直径15mのケースは3基、直径20mケースは2基とした。

- (3) 対象岩盤の種類として硬岩と軟岩を考えている。軟岩の場合はこの径をもう少し小さくする必要があるかも知れないが、取りあえず一つのケースとしてこの径をモデルケースとする。

5.5 貯蔵条件

LNGは岩盤タンク内に圧力約3,500mmAq、温度約－162℃の液状で貯蔵する。LNG受入時やLNG貯蔵時の入熱により発生するBOGは次項に示す方法で処理するものとする。

表 5.2 貯蔵条件比較表

タンク形式			岩盤地下タンク		地上二重殻あるいは 豎型地中タンク	
項 目						
(1)	運転温度		−162℃～−159℃		−162℃	
(2)	運転圧力		常 時： 3,500mmAq 最大時： 5,600mmAq		約800mmAq (最近2,000mmAqのものもあり)	
(3)	B O G 発 生 量	経過時間	15m φ ケース	20m φ ケース	地上二重殻タンク	豎型地中タンク
		30 日 後	0.2％／日	0.10％／日	約0.07％／日	約0.10％／日
		1 年 後	0.17％／日	0.09％／日		
		10 年 後	0.14％／日	0.07％／日	経年変化少なく、建設後概ね一定	

5.6 B O G圧縮機の運転条件

- (1) 貯槽内圧力は、昼間はB O G圧縮機を運転し、約3,500mmAqに保持するので、L N G受入時でも貯槽内のB O Gを自在で送出することが可能である。よってリターンガスブローが無くてもL N Gは受入れることができる。
- (2) 夜間（夜11:00～朝7:00）は発電所側の需要および運転員の負担を考慮し、B O G圧縮機は停止する。この間L N Gの入荷が無い場合の圧力は3,500mmAqから4,400mmAqに約900mmAq上昇する。
夜間貯槽内に蓄圧されたB O Gは昼間時にB O G圧縮機を運転して払出しすることする。

第6章 岩盤空洞の検討

第6章 岩盤空洞の検討

6.1 解析プログラムの調査

LNG岩盤貯蔵システムの研究では極低温のLNGを岩盤内に貯蔵するため、貯蔵時の温度分布、空洞周辺岩盤の安定性の評価が必要となる。この時、物性の温度既存性、掘削に伴う要素の除去、熱伝導解析結果と応力解析との連結、初期応力の評価、引張力をによるクラックの発生といった現象を解析にて捕えていく必要がある。このため、熱伝導解析、安定解析に関するプログラムの調査を行い、その機能について調べた。

(1) 調査対象プログラム

熱伝導解析、応力解析を行うということで下記の7プログラムが調査対象となった。

- ① ABAQUS : HIBBIT, Karlsson & Sorensen Inc. が1978年から開発しているコードで、応力変形解析、熱伝導解析、浸透流解析、応力変形～浸透流連成解析、応力変形～熱伝導連成解析ができる。
- ② ADINA
(ADINA-T)
(ADINA-F) : ADINA(Automatic Dynamic Increment Nonlinear Analysis)はMITのProf. Barthe がSAP IVをもとにしてADINA R&D Inc. が開発したコードで、応力変形解析 (ADINA)、熱伝導解析、浸透流解析 (ADINA-T)および動的解析 (ADINA), 熱流動解析 (ADINA-F)ができる。
- ③ DIANA : DIANA(Displacement Method Analyzer) はヨーロッパのオランダのTNO-Building & Construction Research Inc. が1972年から開発を行っている解析コードで、応力変形解析、熱伝導解析、浸透流解析、応力～熱伝導連成解析、応力～浸透流連成解析ができる。
- ④ HIGH-TEMP : コンクリート構造物用に開発された解析コードで、応力変形解析、熱伝導解析、応力～熱伝導連成解析ができる。
- ⑤ NASTRAN : NASTRAN(NASA Structural Analysis Program)は、NASAが開発した構造解析用コードであり、現在、MSC社(The MacNeal-Schwendler Corp.) が1970年よりNASAから永久使用権を取得して発売している。現在は、応力変形解析、熱伝導解析、動的解析ができる。
- ⑥ SIGNAS : 東洋情報システムがマルチクライアント方式で開発した地盤解析用コードで、応力変形解析、熱伝導解析、浸透流解析、応力変形～浸透流連成解析、動的解析ができる。
- ⑦ UDEC : UDEC(Universal Distinct Element Code) はMinnesota Univ. のProf. Cundallが開発した個別要素法による解析コードで、現在、ITASCA Consulting Group Inc. が商業用に

提供している。岩盤を不連続性による岩盤ブロックとしてモデル化して解く方法で、安定・変形解析、熱伝導解析、浸透流解析、応力変形～熱伝導連成解析、応力変形～浸透流解析を行うことができる。

(2) 解析機能の調査

調査対象となった解析プログラムの機能を次の観点で調査を行った。また、この時の熱伝導解析、応力解析の機能調査結果をそれぞれ表 6.1、表 6.2に示す。

1) 熱伝導解析

- 解析手法（有限要素法、差分法，…）
 - ・有限要素法
 - ・差分法
- 解析モデル（2次元、軸対称、3次元解析）
 - ・2次元問題
 - ・軸対称問題
 - ・3次元問題
- 定常・非定常解析
- 物性のモデル化
 - ・熱伝導率の温度依存性
 - ・比熱の温度依存性
- 潜熱の取り扱い
- 出力項目
 - ・温度分析
 - ・熱流束
 - ・その他

2) 応力解析

- 初期応力の入力
- 掘削解析
- 要素の付加（支保、断熱材など）
- 物性のモデル化
 - ・変形特性の温度依存性
 - ・強度特性の温度依存性
- No-tension解析
- 亀裂を考慮した解析
- 温度応力
- 出力項目
 - ・主応力図
 - ・降伏、破壊領域図

表 6.1 熱伝導解析機能について

		ABAQUS	ADINA-T	DIANA	HIGH-TEMP	NASTRAN	SIGNAS	UDEC
解 析 手 法		FEM	FEM	FEM	FEM	FEM	FEM	DEM
解 析 モ デ ル	2 次 元	○	○	○	○	○	○	○
	軸 対 称	○	○	○	○	○	?	×
	3 次 元	○	○	○	○	○	×	×
定 常 解 析		○	○	○	○	○	△	○
非 定 常 解 析		○	○	○	○	○	△	○
物 性	熱 伝 導 率 の 温 度 依 存 性	○	○	○	○	×	△	×
	比 熱 の 温 度 依 存 性	○	○	○	○	×	△	×
潜 熱 の 取 り 扱 い		○	○	?	○	×	×	×
出 力	温 度 分 析	○	○	○	○	○	△	○
	熱 流 束	○	○	○	×	○	×	?

○：解析機能をもっている

△：完全ではないが

機能としてもっている

×：解析機能をもっていない

？：調査では不明

表 6.2 応力解析の機能について

		ABAQUS	ADINA-T	DIANA	HIGH-TEMP	NASTRAN	SIGNAS	UDEC
解析手法		FEM	FEM	FEM	FEM	FEM	FEM	DEM
解析モデル	2次元	○	○	○	○	○	○	○
	軸対称	○	○	○	○	○	?	×
	3次元	○	○	○	○	○	×	×
初期応力の設定		○	○	○	○	○	○	○
掘削解析		○	△ ^{注1)}	○	×	×	○	○
要素の付加		○	○	○	○	×	○	○
物性	変形特性の温度依存性	○	○	○	△	×	△	×
	強度特性の温度依存性	○	○	○	△	×	×	×
no-tension解析		△	○	○	○	△	○	○
亀裂を考慮した解析		×	○	○	○	×	×	○
温度応力		○	○	○	○	○	△	○
出力	主応力図	○	○	○	○	○	△	○
	降伏、破壊領域	○	○	○	○	○	○	○

○：解析機能をもっている

△：完全ではないが機能としてもっている

注1)：一部のバージョンで可能

×

？：調査では不明

6.2 熱伝導解析

(1) 解析条件

1) 概 要

本説では、L N Gの貯蔵に伴う空洞周辺岩盤の温度変化を空洞壁面に断熱材を設置した場合としない場合について熱伝導解析を行い、冷熱の影響範囲、空洞への熱流入量を定量的に把握し、空洞設置深度、L N Gのボイルオフガス（B O G）量、断熱材の必要厚、空洞安定性などの検討に用いる基礎データを求める。そのためここでは、熱伝導解析に必要な岩盤（岩石）の熱物性、解析モデル、解析方法および解析目的に適合した解析プログラムについて既往資料調査などを実施し、解析条件、解析プログラムを設定した。表 6.3に解析条件の一覧表を示す。

表 6.3 熱伝導解析条件一覧表

項 目	解 析 条 件	解析定数項目など	定 数 値 な ど
解析手法	非定常熱伝導解析	2次元F E M解析	A D I N A－T
対象岩盤	中硬岩	花崗岩	大島花崗岩
空洞条件	円形トンネル式	直 径	20m
		土破り	100m
解析範囲	対称解析領域	水平方向	200m
		鉛直方向	320m
境界条件	空洞壁面温度境界	固定温度	－162℃
	上面熱伝達境界	熱伝達率	10kcal/m ² h℃
	対称軸断熱境界	—————	—————
	側・底面温度境界	固定温度	15℃
初期条件	初期温度	全て同一	15℃
熱物性値	岩盤（岩石） （温度依存性無）	比 熱	0.2kcal/kg℃
		熱伝導率	2.4kcal/mh℃
		密 度	2.65tf/m ³
	断熱材（P U F） （温度依存性無）	比 熱	0.02kal/kg℃
		熱伝導率	0.25kal/mh℃
		密 度	60kgf/m ³
解析期間			50年
解析ケース	解析ケース1	断熱材厚	0 cm
	解析ケース2	断熱材厚	20cm

2) 対象岩盤

L N G岩盤貯蔵タンクの対象岩盤としては、L N Gの受払い、経済的な貯蔵容量、空洞安定性などから沿岸部に分布するものが適している。ここでは、原油の

岩盤内貯蔵で実績があり、岩石としての熱的特性の資料が整っている花崗岩類とする。

3) 解析方法

① 解析手法

解析手法は、岩盤の熱的特性が温度依存性を有する場合が多いこと、温度分布などを経時的に求める必要があることから材料物性の温度依存性を考慮する非定常熱伝導解析法を用いた。

② 解析理論

2次元非定常熱伝導FEM解析の理論は、以下の通りである。

連続体の2次元熱伝導解析に対する汎関数は(式 6.1)で与えられる。

$$\pi = \int_V \left[\frac{1}{2} \rho c \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 + \frac{1}{2} \left[k_x \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] \right] dV - \int_V \theta \cdot q^p dV - \int_S \theta^s \cdot q^s dS \quad (\text{式 6.1})$$

上記の汎関数の停留条件は(式 6.2)で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta \pi &= \int_V \left[\rho c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \delta \theta + \delta \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \cdot k_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \delta \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \cdot k_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] dV - \int_V \delta \theta \cdot q^p dV - \int_S \delta \theta^s \cdot q^s dS \\ &= \int_V \left[\rho c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \delta \theta + \partial \left(\frac{\delta \theta}{\partial x} \right) \cdot k_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \partial \left(\frac{\delta \theta}{\partial y} \right) \cdot k_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] dV - \int_V \delta \theta \cdot q^p dV - \int_S \delta \theta^s \cdot q^s dS \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{式 6.2})$$

従って、(式 6.1)、および(式 6.2)より(式 6.3)の関係が成り立つ。この式が熱伝導解析における有限要素解析に用いる基本方程式である。

$$\begin{aligned} \int_V \left[\rho c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \delta \theta + \partial \left(\frac{\delta \theta}{\partial x} \right) \cdot k_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \partial \left(\frac{\delta \theta}{\partial y} \right) \cdot k_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] dV \\ = \int_V \delta \theta \cdot q^p dV - \int_S \delta \theta^s \cdot q^s dS \end{aligned} \quad (\text{式 6.3})$$

ここで任意の連続体を有限個の要素に離散化すると、以下の関係が成り立つ。

$$\theta = \underline{N} \cdot \hat{\theta} \quad (\text{式 6.4})$$

$$\theta^s = \underline{N}_s \cdot \delta \hat{\theta}_s \quad (\text{式 6.5})$$

$$\delta \theta = \underline{N} \cdot \delta \hat{\theta} \quad (\text{式 6.6})$$

$$\delta \theta^s = \underline{N}_s \cdot \delta \hat{\theta}_s \quad (\text{式 6.7})$$

ただし、各々の記号は以下の通りである。

- θ : 内部温度
- $\hat{\theta}$: 内部節点温度ベクトル
- θ_s : 表面温度
- $\hat{\theta}_s$: 表面節点温度ベクトル
- ρ : 単位体積重量
- c : 比 熱
- k_x, k_y : 熱伝導率
- $\underline{N}$: 内部内挿関数
- $\underline{N}_s$: 表面内挿関数
- $\underline{q}^B$: 体積熱流入
- $\underline{q}^S$: 表面熱流入

(式 6.4) ～ (式 6.7) の関係式を (式 6.3) の基本方程式に代入すると次式が成立する。

$$\begin{aligned}
 &= \int_V \left[\rho c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \delta \theta + \partial \left(\frac{\delta \theta}{\partial x} \right) \cdot k_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \partial \left(\frac{\delta \theta}{\partial y} \right) \cdot k_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] dV \\
 &= \int_V \left[\rho c \underline{N} \cdot \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial t} \left(\underline{N} \cdot \delta \hat{\theta} \right)^T + \delta \hat{\theta}^T \cdot \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial x} \right)^T \cdot k_x \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial x} \cdot \hat{\theta} + \delta \hat{\theta}^T \cdot \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \right)^T \cdot k_y \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \cdot \hat{\theta} \right] dV \\
 &= \delta \hat{\theta}^T \int_V \left[\rho c \underline{N} \cdot \underline{N}^T \cdot \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial t} + \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial x} \right)^T \cdot k_x \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial x} \cdot \hat{\theta} + \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \right)^T \cdot k_y \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \cdot \hat{\theta} \right] dV \\
 &= \delta \hat{\theta}^T \left[\int_V \underline{N} \cdot \underline{q}^B dV + \int_S \underline{N}_s \cdot \underline{q}^S ds \right] \tag{式 6.8}
 \end{aligned}$$

従って、(式 6.8) より次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 &\int_V \left[\rho c \underline{N} \cdot \underline{N}^T \cdot \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial t} + \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial x} \right)^T \cdot k_x \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial x} \cdot \hat{\theta} + \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \right)^T \cdot k_y \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \cdot \hat{\theta} \right] dV \\
 &= \int_V \underline{N} \cdot \underline{q}^B dV + \int_S \underline{N}_s \cdot \underline{q}^S d \tag{式 6.9}
 \end{aligned}$$

ところで、(式 6.9) は領域に関しては離散化が行われ、時間に関してはまだ離散化が行われていない。そこで、クランク・ニコルソンの差分式を用いて時間に関する離散化を行う。節点温度ベクトルの時間微分は (式 6.10) で与えられる。

$$\left| \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial t} \right|_{t+\Delta t} = \frac{\hat{\theta}_{t+\Delta t} - \hat{\theta}_t}{\Delta t} \tag{式6.10}$$

これより (式 6.11) ～ (式 6.15) の関係式が成り立つ。

$$\underline{M}_{t+\Delta t} \cdot \frac{\hat{\theta}_{t+\Delta t} - \hat{\theta}_t}{\Delta t} + \underline{K}_{t+\Delta t} \cdot \hat{\theta}_{t+\Delta t} = \underline{F}_V^{t+\Delta t} + \underline{F}_S^{t+\Delta t} \tag{式6.11}$$

$$\underline{M}_{t+\Delta t} = \left[\int_V (\rho c \cdot \underline{N} \underline{N}^T) dV \right] \tag{式6.12}$$

$$\underline{K}_{t+\Delta t} = \left[\int_V \left(\left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial \underline{x}} \right)^T \cdot \underline{k}_x \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial \underline{x}} + \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial \underline{x}} \right)^T \cdot \underline{k}_y \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial \underline{y}} \right) dV \right] \tag{式6.13}$$

$$\underline{F}_V^{t+\Delta t} = \left[\int_V \underline{N} \cdot q^B dV \right] \tag{式6.14}$$

$$\underline{F}_S^{t+\Delta t} = \left[\int_S \underline{N}_s \cdot q^S dS \right] \tag{式6.15}$$

これより、(式 6.3) で示された熱伝導解析の基本方程式は以下のように表される。

$$\left(\frac{\underline{M}_{t+\Delta t}}{\Delta t} + \underline{K}_{t+\Delta t} \right) \hat{\theta}_{t+\Delta t} = \underline{F}_V^{t+\Delta t} + \underline{F}_S^{t+\Delta t} + \frac{\underline{M}_{t+\Delta t}}{\Delta t} \hat{\theta}_t \tag{式6.16}$$

この方程式を解くことで、 $t+\Delta t$ 時における節点温度ベクトル $\hat{\theta}_{t+\Delta t}$ が得られ領域内の温度 $\theta_{t+\Delta t}$ が算定される。

③ 解析プログラム

今回使用する解析プログラムは、熱伝導解析結果を次年度に行う空洞安定性検討のための熱応力解析に直接利用できるとともに、熱応力解析においても材料物性の温度依存性、岩盤の引張破壊を考慮できるプログラムということで、FEM解析プログラムのADINAシリーズを用いることにした。熱伝導解析はADINA-T、熱応力解析はADINAである。

ADINAシリーズの機能は表 6.4、表 6.5の通りである。

表 6.4 解析プログラムの機能

解 析 種 類	可否	プログラム機能
(1) 熱伝導解析 (ADINA-T)	可	・定常・非定常解析 ・熱伝導率の温度依存性 ・比熱の温度依存性 ・潜熱 ・熱流束出力
	不可	・温度拡散率の入力
(2) 熱応力解析 (ADINA)	可	・初期応力設定 ・力学定数の温度依存性 (表 6.5参照) ・破壊判定 (クラック取扱い) (表 6.5参照)
	不可	・掘削解析

表 6.5 ADINA熱応力解析機能

要素	非線形 材料モデル	温 度 依 存 性				破壊判定	クラック の取扱い
		弾性係 数 E	ポアソ ン比 ν	線膨張 係数 α	破壊強 度		
2 次 元 ・ 3 次 元 要 素	1.等方性線型弾性	×	×	—	—	—	—
	2.直交異方性 線型弾性	×	×	—	—	—	—
	3.等方性熱－弾性	○	○	○	—	—	—
	4.曲線記述モデル	(体積ひずみ－荷重付加・除去弾性係数など) ×				—	○ 引張 中断・破壊
	5.コンクリート 材料モデル	(G_0) ×	×	—	—	$\sigma_c, \sigma_e,$ ε_c など	○ σ_c 中 張中断強度
	7.弾性－塑性、ド ラッカー－プラガ ー－キャップモデ ル	×	×	—	(σ_y, E_s) or $(\sigma_1, \varepsilon_1$ $\sim \sigma_1, \varepsilon_1)$		—
	8.弾性－塑性、フ ォン・ミーゼス降 伏条件、等方性硬 化	×	×	—			—
	9.弾性－塑性、フ ォン・ミーゼス降 伏条件、運動学的 硬化	×	×	—			—
	10.熱－弾性－塑 性およびクリープ、 フォン・ミーゼス 降伏条件、等方性 硬化	○	○	○	(σ_y, E_s) ○		—
	11.熱－弾性－塑 性およびクリープ、 フォン・ミーゼス 降伏条件、運動学 的硬化	○	○	○	(σ_y, E_s) ○		—
	12. ユーザー定義						

4) 解析物性値

① 花崗岩の熱物性値

花崗岩の熱物性値について既存文献を調査した結果、解析対象花崗岩として熱伝導解析用物性値だけでなく熱応力解析に必要な物性値も整っている大島花崗岩を選定した。ここで大島花崗岩の場合、温度伝導率（熱拡散率）で与えら

れているため、密度と他の花崗岩データより推定した比熱により熱伝導率を求めて入力データとしている。また、温度伝導率は明瞭な温度依存性を示していないため、比熱および熱伝導率を一定とする。

大島花崗岩の熱伝導解析用定数は下記の通りである。

- 温度伝導率…… $4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$
- 密 度……… $2.65 \text{ tf}/\text{m}^3$
- 比 熱……… $0.2 \text{ kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$
- 熱伝導率……… $2.4 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$

図 6.1, 6.2, 6.3に、既存文献^{1)・2)・3)・4)・5)}より求めた各種花崗岩の温度伝導率、比熱、熱伝導率と本解析に用いた各物性値を示す。

② 断熱材

P U F 断熱材の熱物性値は、第 7 章の 1 節より下記の通りである。

- 熱伝導率……… $0.02 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$
- 比 熱……… $0.25 \text{ kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$
- 密 度……… $60 \text{ kgf}/\text{m}^3$
- 厚 さ……… 20 cm

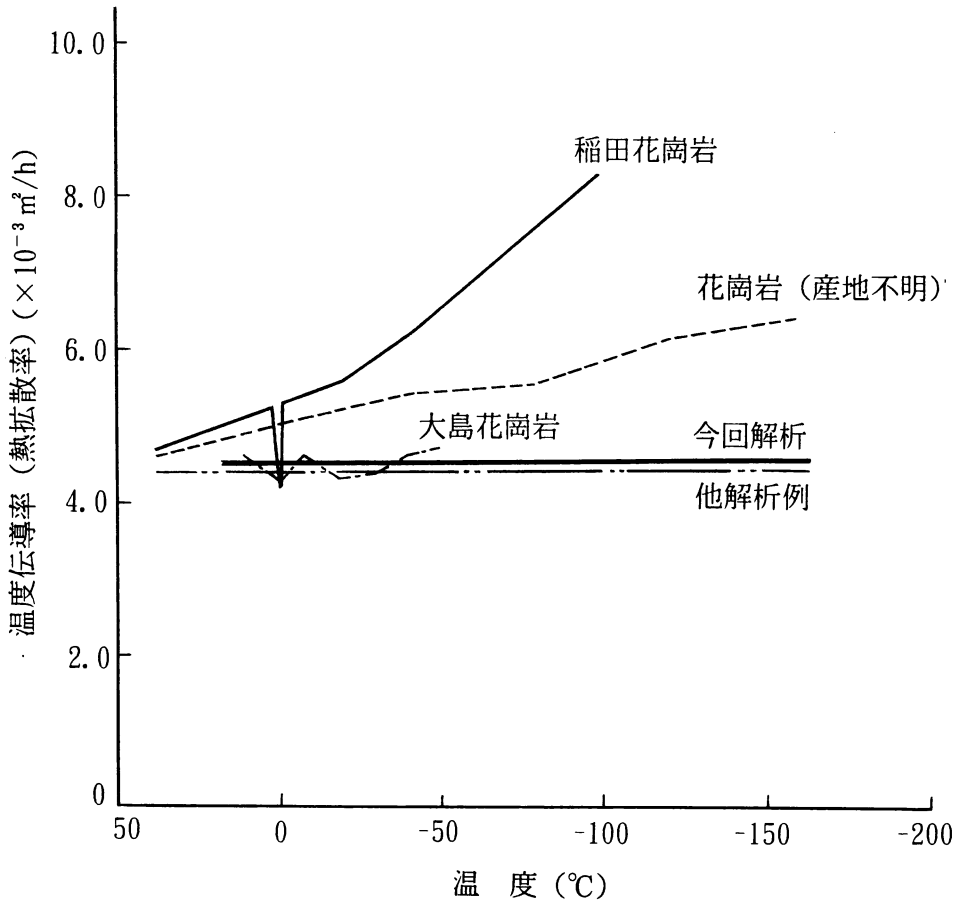


図 6.1 花崗岩の温度伝導率 (大島花崗岩以外は計算値)

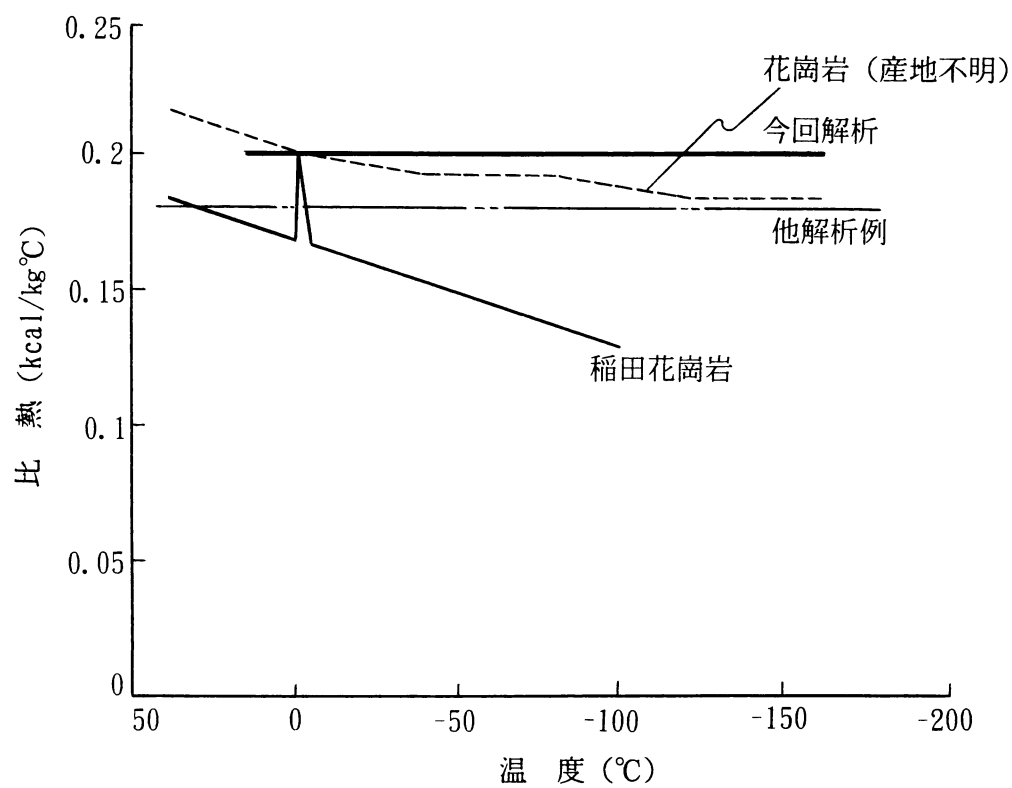


図 6.2 花崗岩の比熱

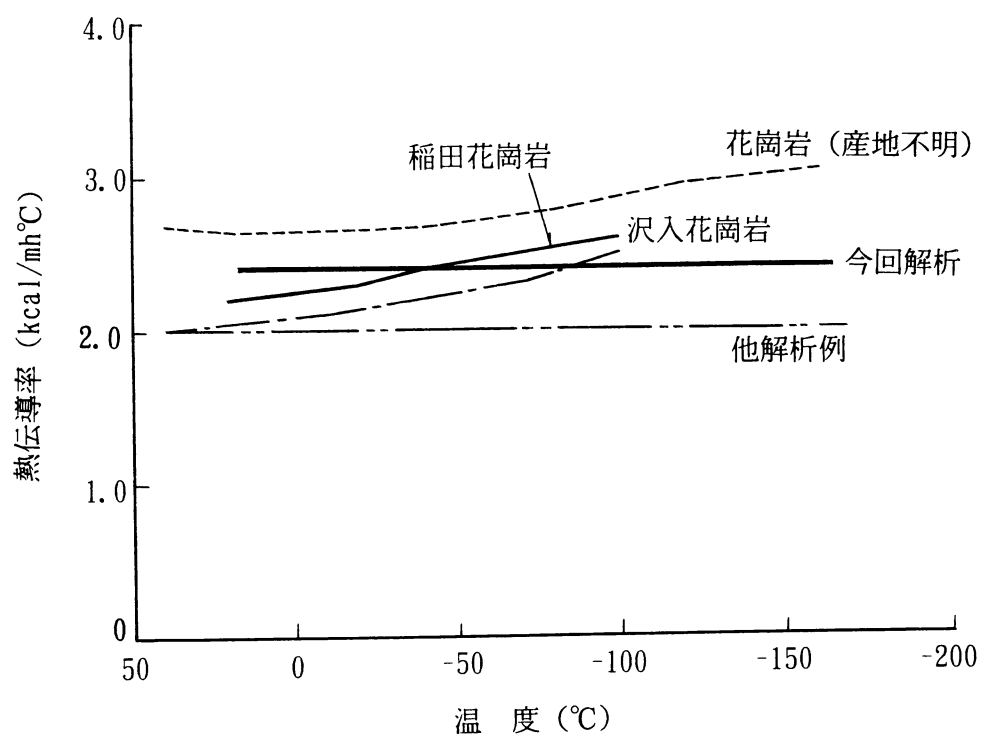


図 6.3 花崗岩の熱伝導率

5) 解析モデル

① 空洞形状

貯蔵空洞の形状は、熱応力に対する空洞の安定性を考慮して円形トンネル式とする。空洞の深度は、冷熱影響範囲の既存検討資料、経済性および施工性から100m、また空洞直径は同様に20mとする。

② 解析範囲

解析範囲は、既往検討資料より冷熱の影響範囲および次年度解析予定の熱応力解析を念頭に置き、図 6.4に示すとおり貯蔵空洞の対称性を考慮して右側領域の水平方向200m、鉛直方向320mの領域とする。

③ 境界条件

対称軸境界は断熱境界、空洞壁面、解析モデルの側面および底面は温度固定境界、上面（地表面）は熱伝達境界とする。

境界条件は、下記の通りである。

- ・空洞壁面は、LNGの液温 -162°C
- ・側底面は、岩盤の初期温度 15°C
- ・上面は、地表面であることから熱伝達係数は、一般的な $10\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$

④ 初期温度

岩盤、断熱材、大気とも 15°C

6) 解析メッシュ

解析に用いたメッシュ分割図を図 6.5に示す。温度勾配が大きい空洞表面付近では要素を細く分割し、表面から離れるに従って要素を大きく分割した。なお、節点数は715、要素数は752である。

7) 解析ケース

解析ケースは、空洞内壁に断熱材を設置した場合と断熱材を設置しない場合の以下の2ケースとする。

Case 1：空洞表面に断熱材を施工せず、素掘りあるいはコンクリートライニングを施工した状態で貯蔵する場合。（コンクリートと岩盤の熱物性値は同じと仮定する）

Case 2：空洞表面に20cmの断熱材（ポリウレタンフォーム）を施した場合。仕上がり内径は20mとし、貯蔵容量はCase 1と同じとする。

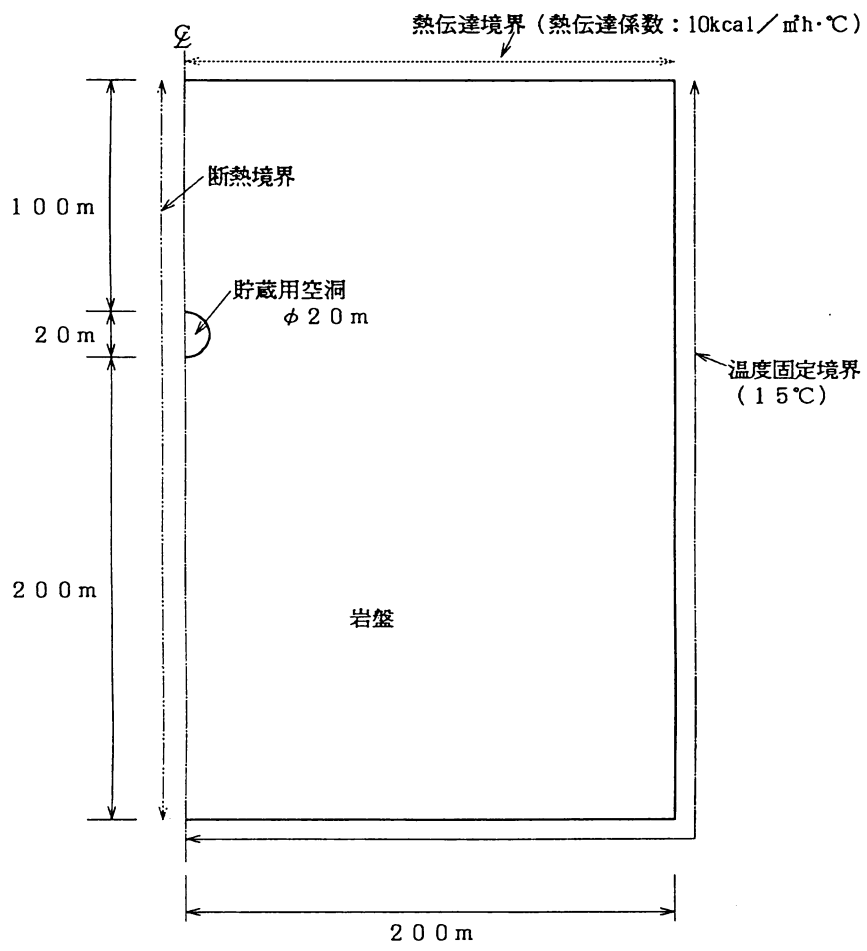


図 6.4 解析モデル

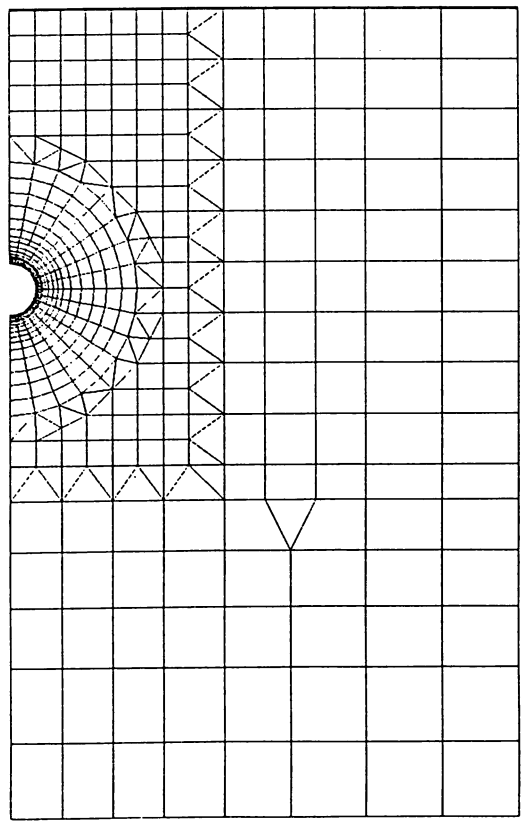


図 6.5 メッシュ分割図

8) 解析期間および解析ステップ

解析期間はLNG岩盤内貯蔵施設の運転期間と想定される50年間とする。なお、結果の出力は以下の17stepについて行った。

1 step	貯蔵	15日後 (0.5ヶ月後)	10step	貯蔵	5年後
2 step	貯蔵	30日後 (1ヶ月後)	11step	貯蔵	7.5年後
3 step	貯蔵	60日後 (2ヶ月後)	12step	貯蔵	10年後
4 step	貯蔵	90日後 (3ヶ月後)	13step	貯蔵	15年後
5 step	貯蔵	180日後 (6ヶ月後)	14step	貯蔵	20年後
6 step	貯蔵	270日後 (9ヶ月後)	15step	貯蔵	30年後
7 step	貯蔵	1年後	16step	貯蔵	40年後
8 step	貯蔵	2年後	17step	貯蔵	50年後
9 step	貯蔵	3年後			

非定常の計算を行う場合の分割時間間隔および分割ステップ数を表 6.6に示した。初期の温度勾配が急なところは時間間隔を短くとり、時間が経過するにしたがって間隔を長くした。

表 6.6 分割時間間隔

時 刻	分割時間間隔 (日)	ステップ分割数
貯蔵開始 ～貯蔵 1 日後	0.02	50
貯蔵 1 日後 ～貯蔵15日後	0.05	280
貯蔵15日後 ～貯蔵30日後	0.1	150
貯蔵30日後 ～貯蔵60日後	0.2	150
貯蔵60日後 ～貯蔵 180日後	0.25	480
貯蔵 180日後～貯蔵 1 年後	0.5	370
貯蔵 1 年後 ～貯蔵 2 年後	1.0	365
貯蔵 2 年後 ～貯蔵 3 年後	2.0	183
貯蔵 3 年後 ～貯蔵 5 年後	3.0	243
貯蔵 5 年後 ～貯蔵10年後	5.0	365
貯蔵10年後 ～貯蔵20年後	10.0	365
貯蔵20年後 ～貯蔵50年後	25.0	438
合 計		3,439

(2) 解析結果

Case 1 における解析結果を図 6.6 および図 6.7 に示す。いずれも横軸は空洞表面からの距離を、縦軸には温度を示した。空洞中心から水平方向の地点における温度分布の経時変化を図 6.6 に示す。初期の時間には急激な温度勾配を示しているが、時間の経過とともに温度勾配は緩やかになることがわかる。図 6.7 には空洞中心から鉛直方向（地表面の方向）の温度分布の経時変化を示した。水平方向の温度分布と比較して、ほとんど同じ温度分布を示しているが、時間の経過に伴わずかではあるが熱伝導の遅れがみられる。これは地表面を熱伝達境界としており、時間の経過とともにわずかであるが地表の影響が表れたものと考えられる。同様に Case 2 における解析結果を図 6.8 および図 6.9 に示す。断熱材の効果が得られているため、Case 1 に比べて温度の影響範囲は小さくなっていることがわかる。また、断熱材の内部で大きな温度勾配を示すため、貯蔵 50 年後においても岩盤の温度は約 -65°C までにしか下がらないことがわかる。また温度の影響範囲が小さいため、地表面の影響をほとんど受けず、水平方向と鉛直方向の温度分布はほとんど同様であることがわかる。なお、全出力時刻（17step）における等温線図を図 6.10～図 6.26 に示した。

図 6.27 に凍結範囲の経時変化を示す。ここでは空洞中心から水平方向における凍結範囲を示した。時間の経過とともに空洞周辺岩盤の凍結領域は広がっていき、Case 1 では貯蔵 1 年後で約 14m、貯蔵 10 年後で約 39m、貯蔵 50 年後では約 78m の範囲が凍結することがわかる。また、Case 2 については断熱材の効果が得られているため、Case 1 に比べて凍結範囲は小さくあり、貯蔵 1 年後で約 5m、貯蔵 10 年後で約 20m、貯蔵 50 年後では約 50m の範囲が凍結することがわかる。

図 6.28 に各 Case の熱流束の経時変化を示した。Case 1 においては初期の時間には熱流束の値は大きな値を示しているが、時間の経過とともに減少し、貯蔵 50 年後においては $20\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 程度の値に収束してきている。一方、Case 2 においては初期の時間から値は小さく貯蔵 30 日後で約 $16\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 、貯蔵 50 年後で約 $10\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ である。このことから Case 1 の場合は初期の段階で大量のボイルオフガスの発生が予想される。また、Case 2 においては断熱材の効果が得られており、ボイルオフガスの発生量が大きく減少することが予想される。

(3) 今後の課題

今回の解析は 2 つのケースについて行ったが、今後さらに現実的な解析を行うためには次のようなことを考慮する必要があると考えられる。

- ① 空洞表面に施工するコンクリートの物性も考慮した解析。
- ② 今回は岩盤物性は等方性であると仮定したが、実際には節理などの影響を受け異方性を示すことが予想されるため、これを考慮した解析を行う。
- ③ 水分を多く含む場合、岩盤の物性は凍結時に大きく変化することが予想される。このため物性値の温度依存性を考慮した解析を行う。

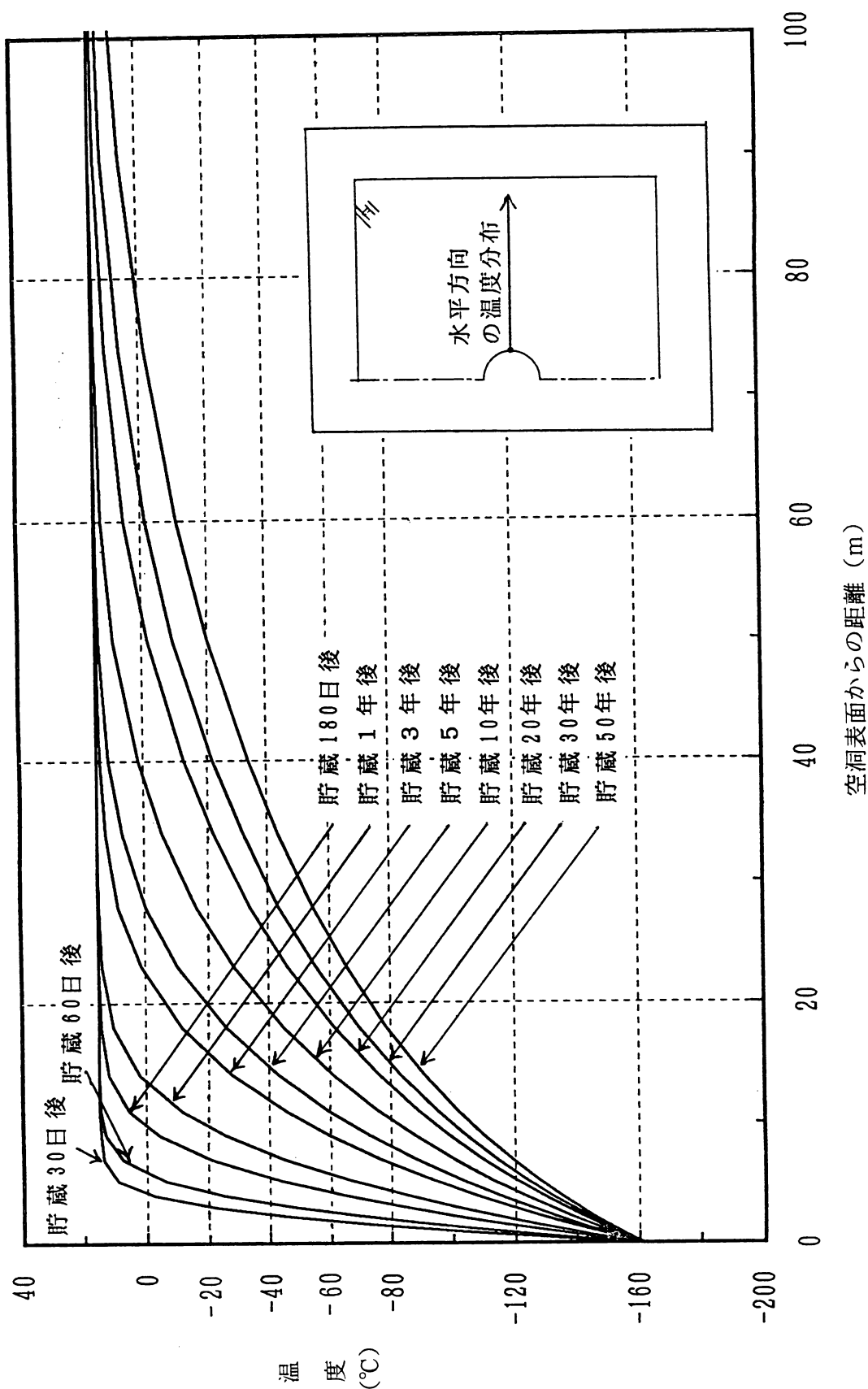


図 6.6 洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (Case 1 水平方向)

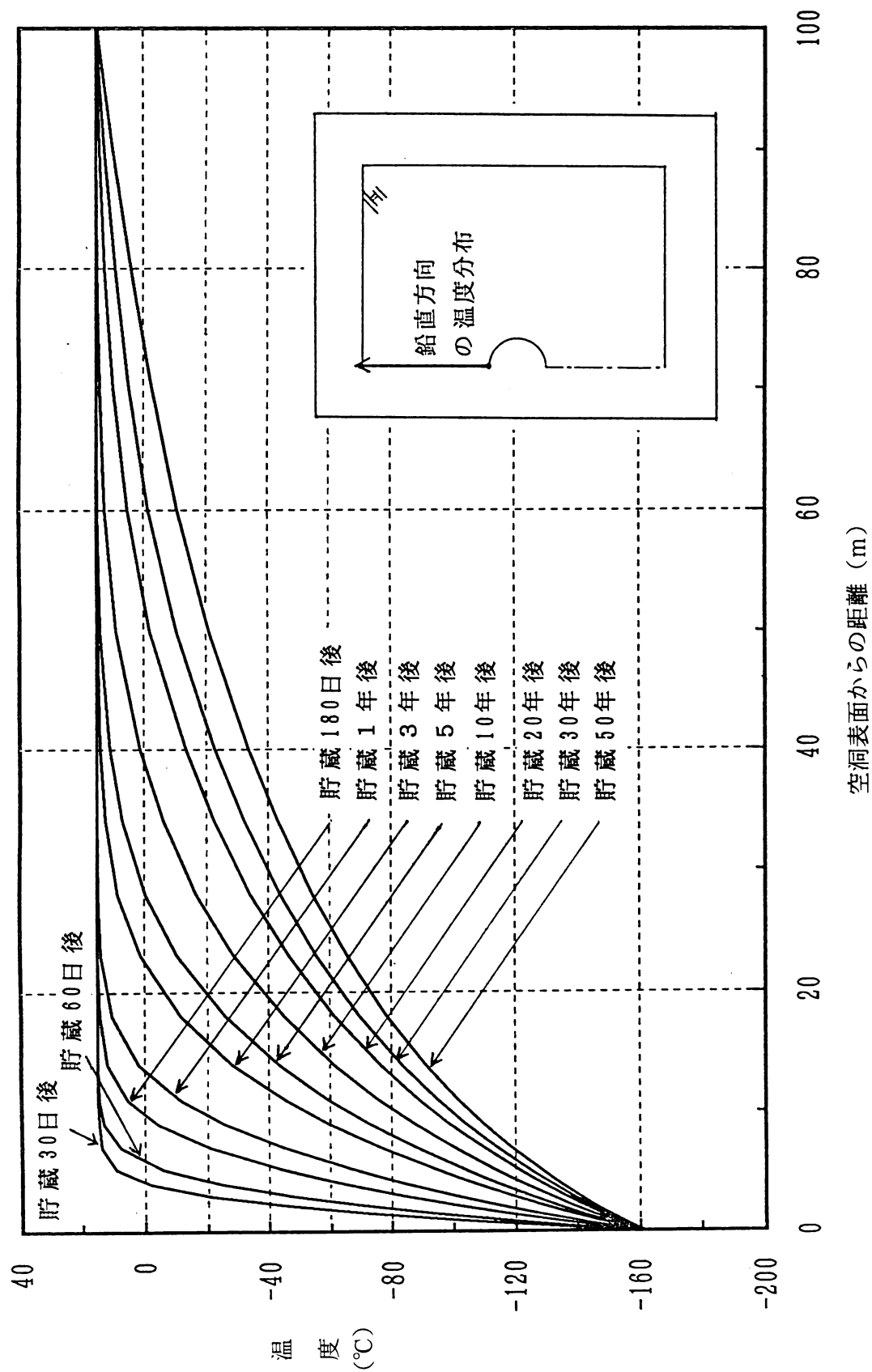


図 6.7 空洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (Case 1 : 鉛直方向)

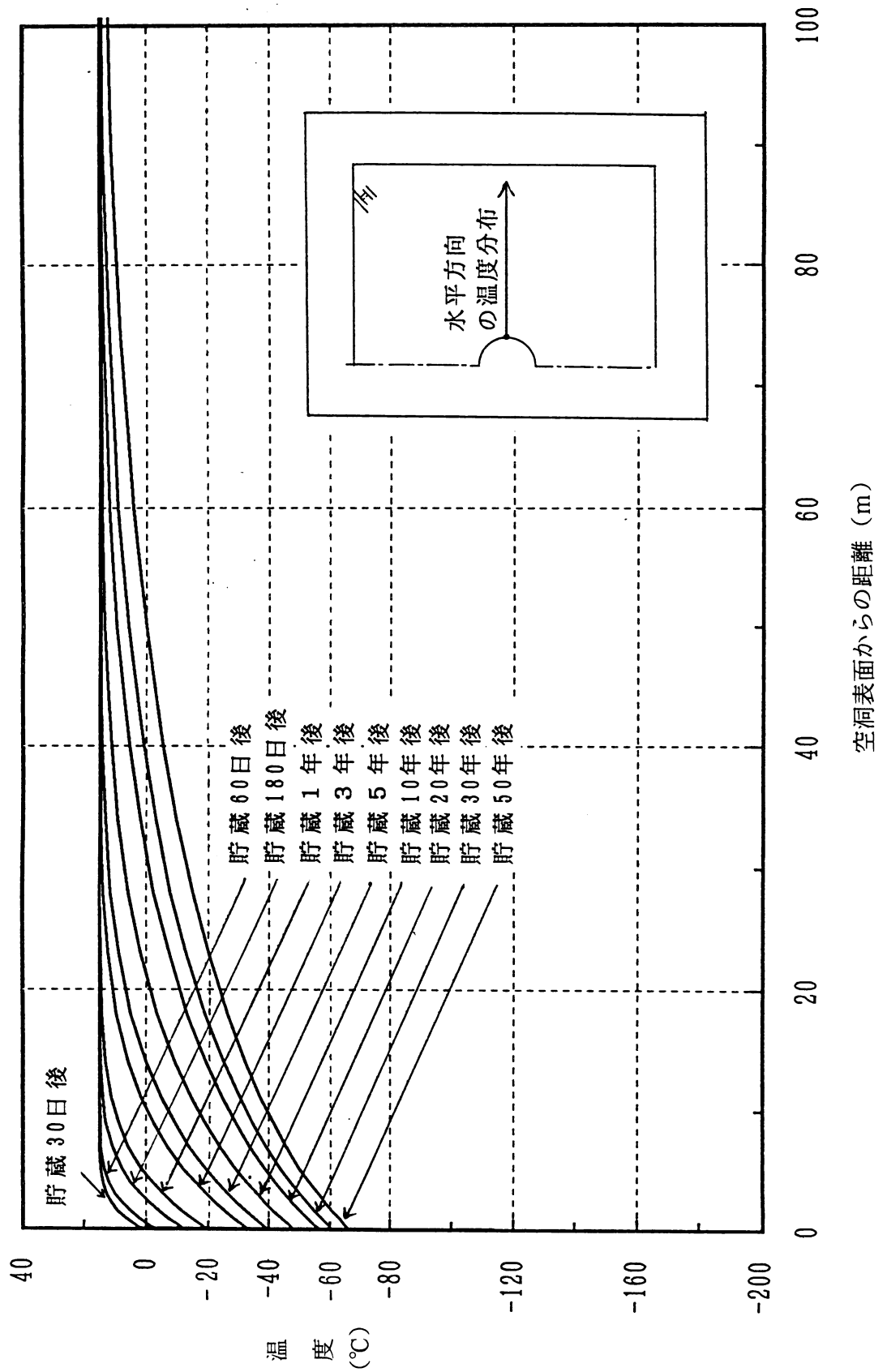


図 6.8 空洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (Case 2 水平方向)

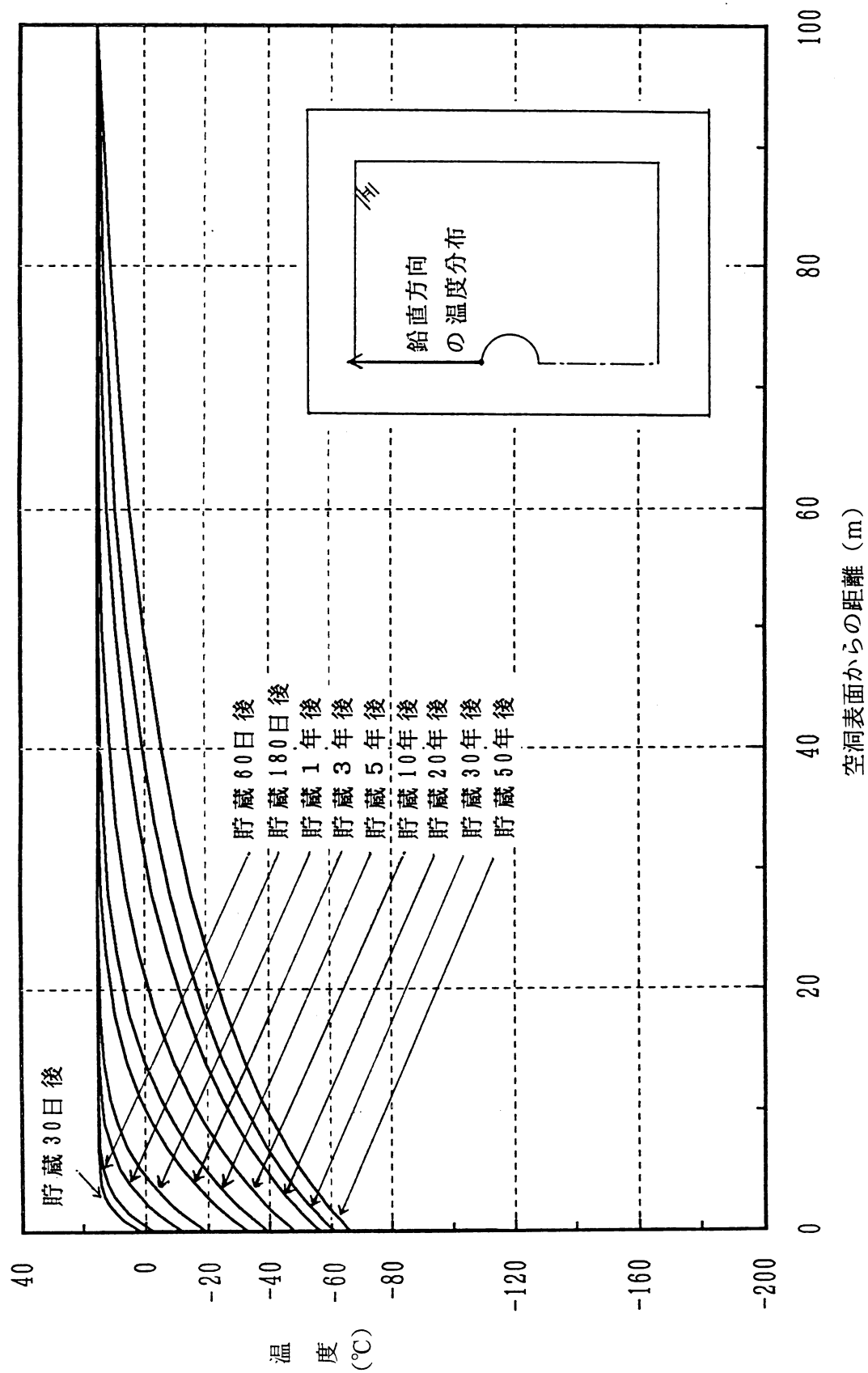


図 6.9 空洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (Case 2 : 鉛直方向)

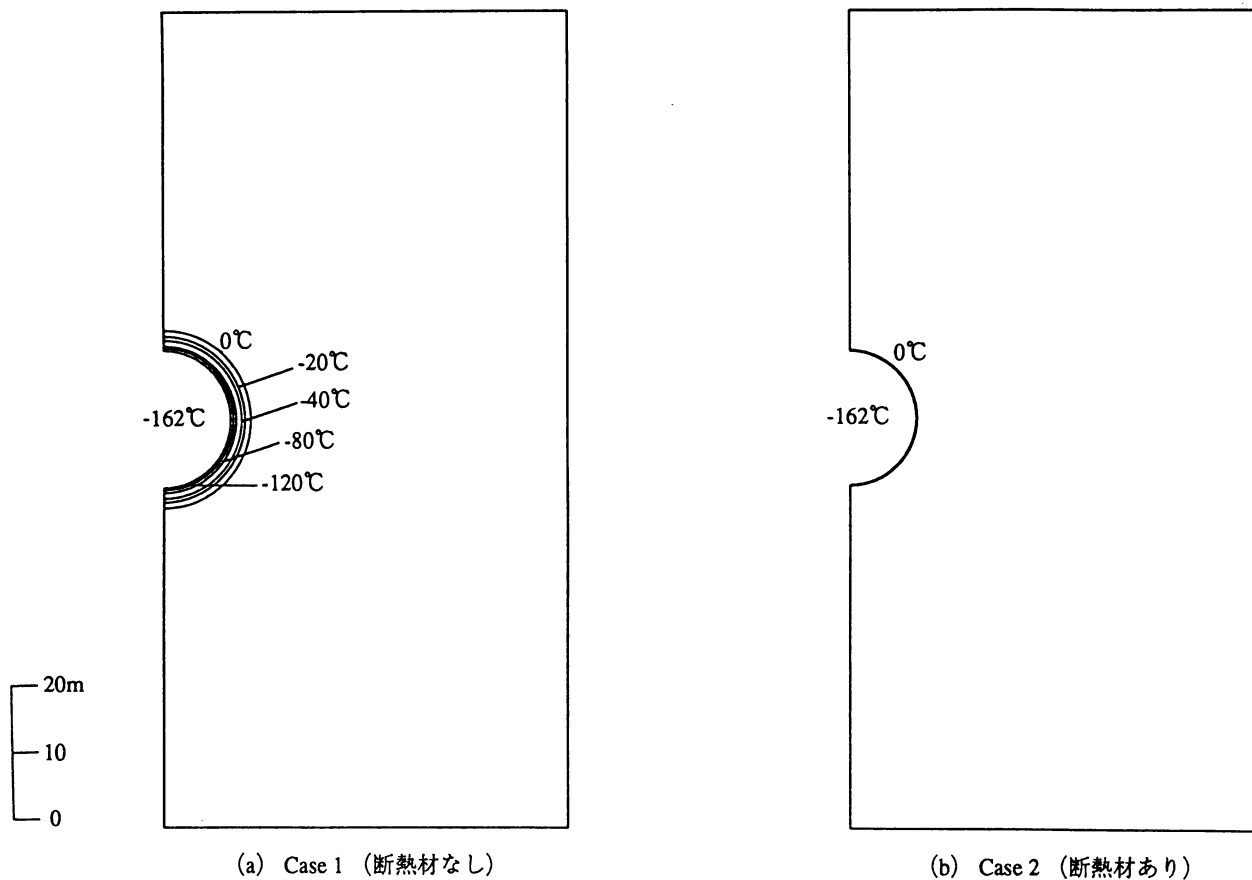


図 6.10 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵15日後）

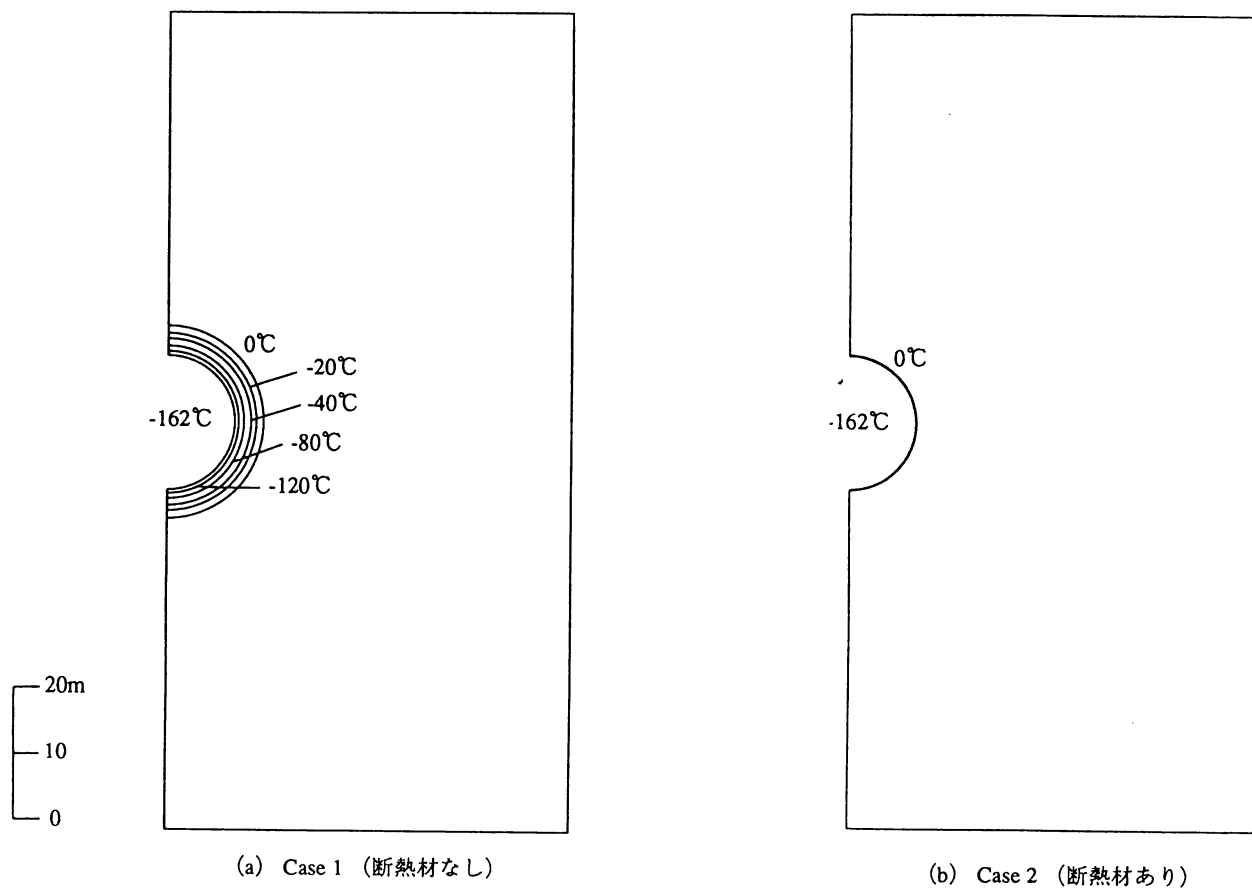
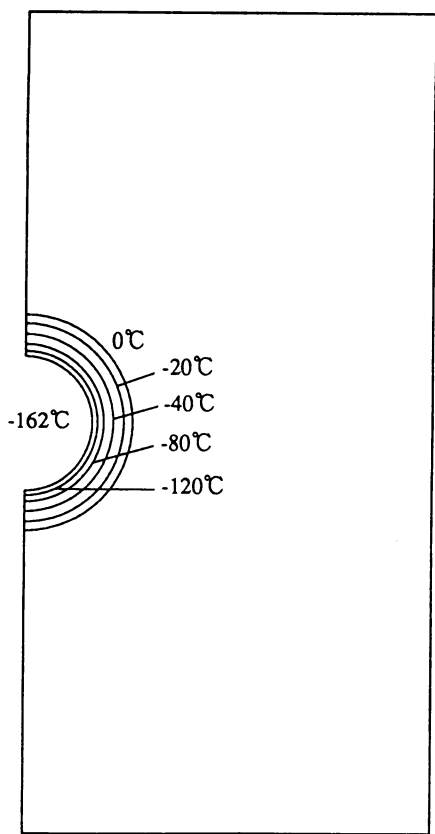
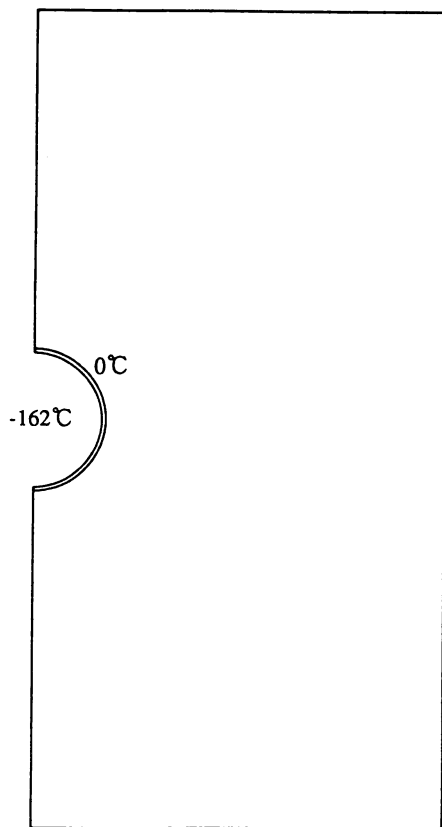


図 6.11 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵30日後）

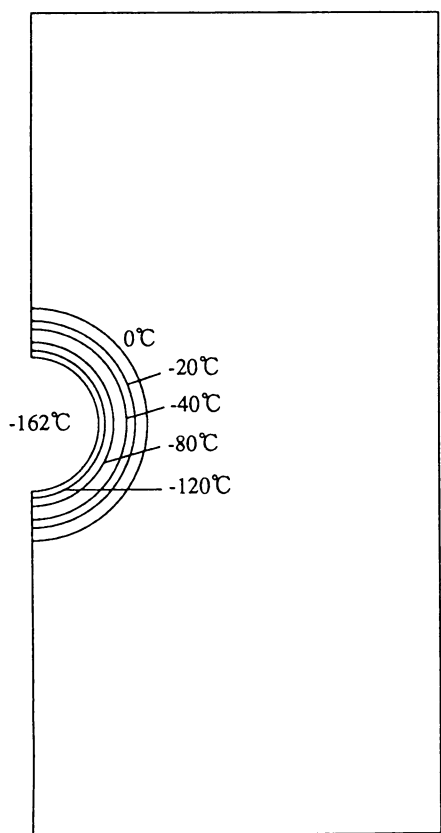


(a) Case 1 (断熱材なし)

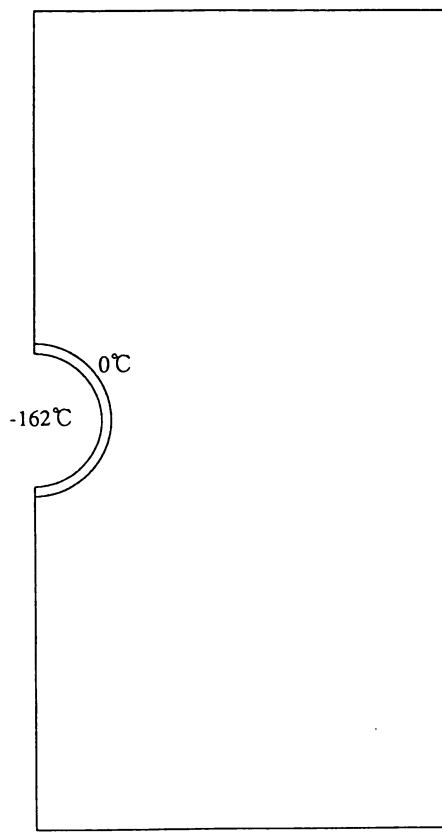


(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.12 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵60日後）



(a) Case 1 (断熱材なし)



(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.13 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵90日後）

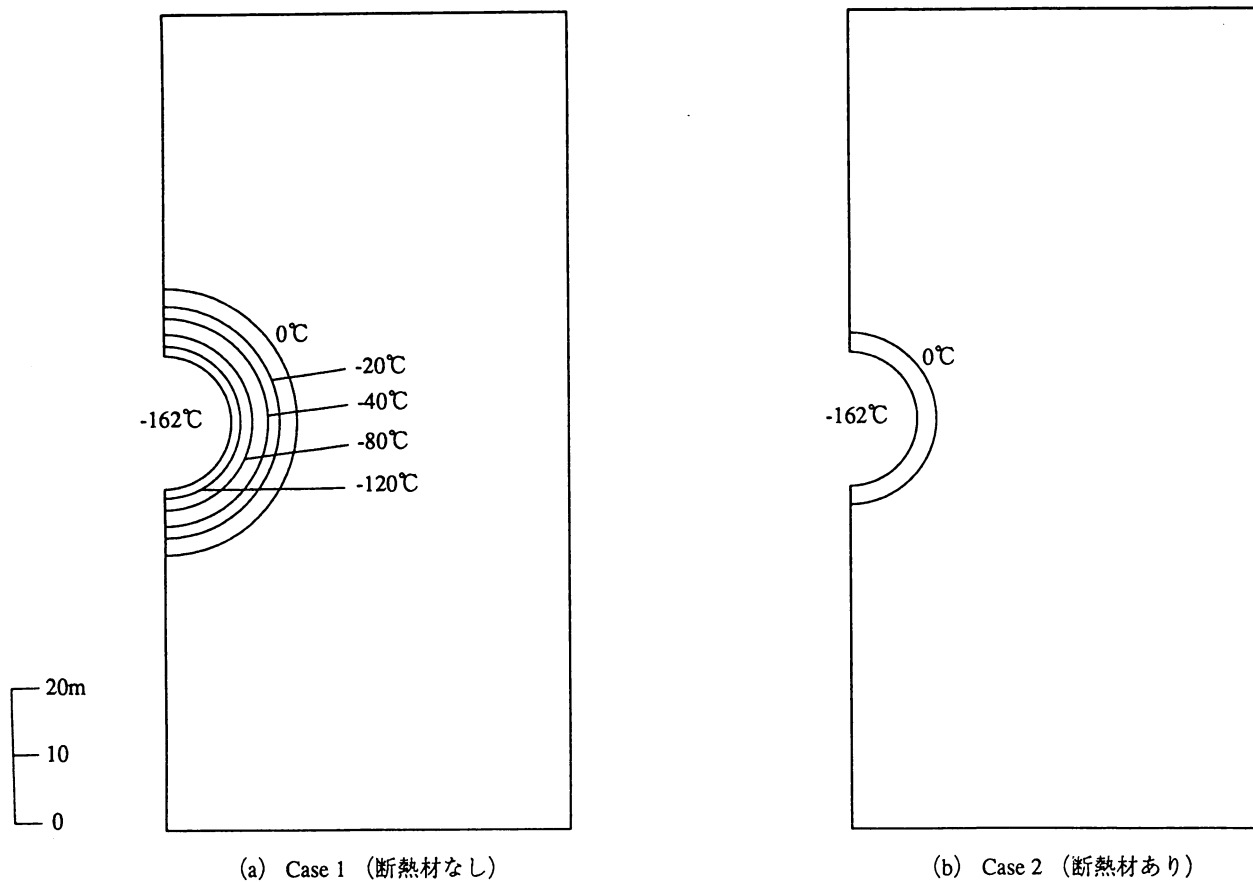


図 6.14 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵180日後）

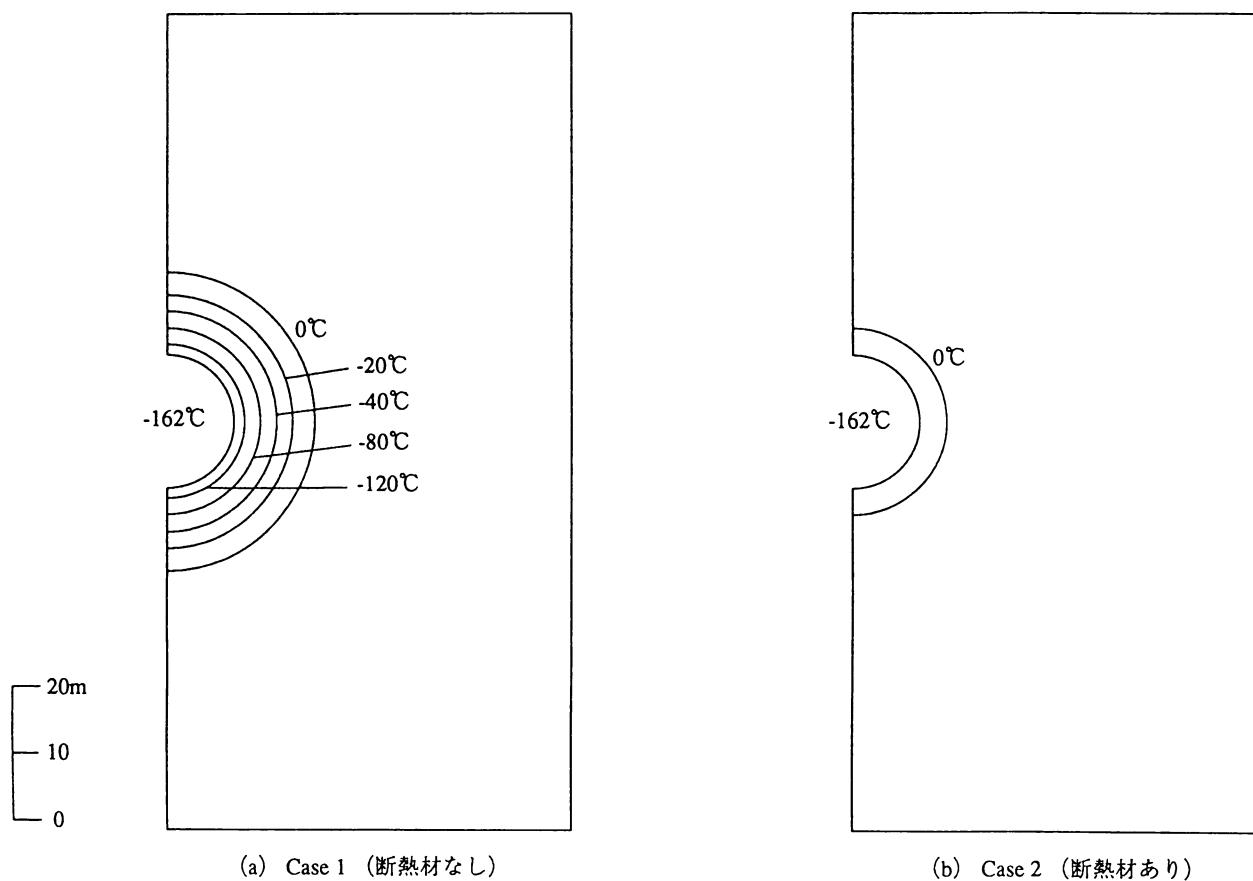
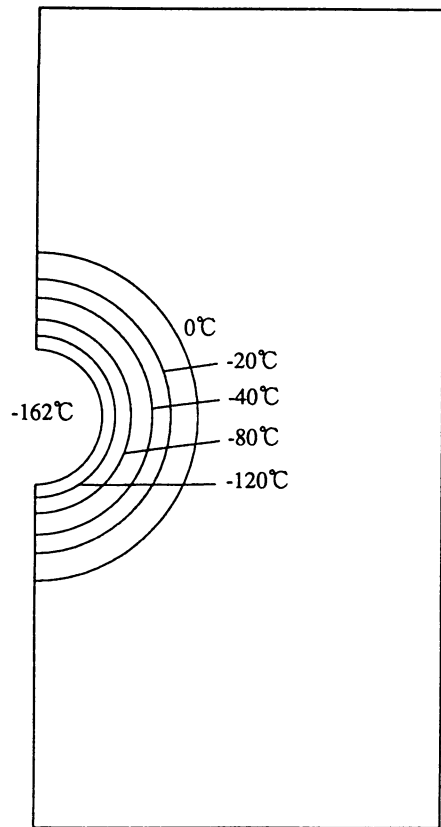
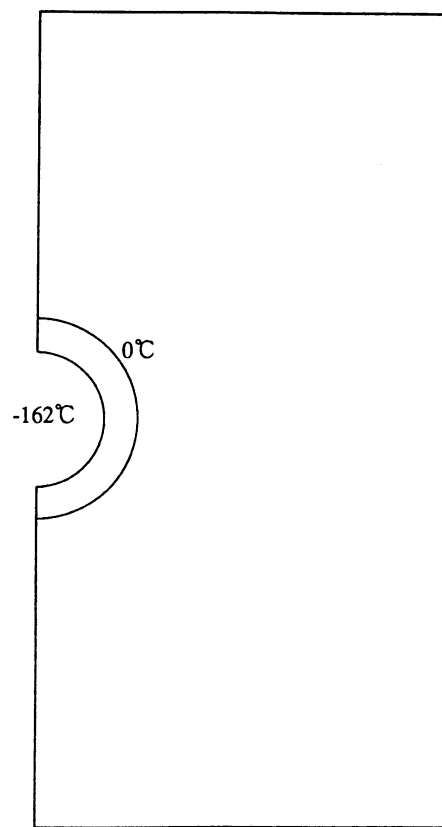


図 6.15 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵270日後）

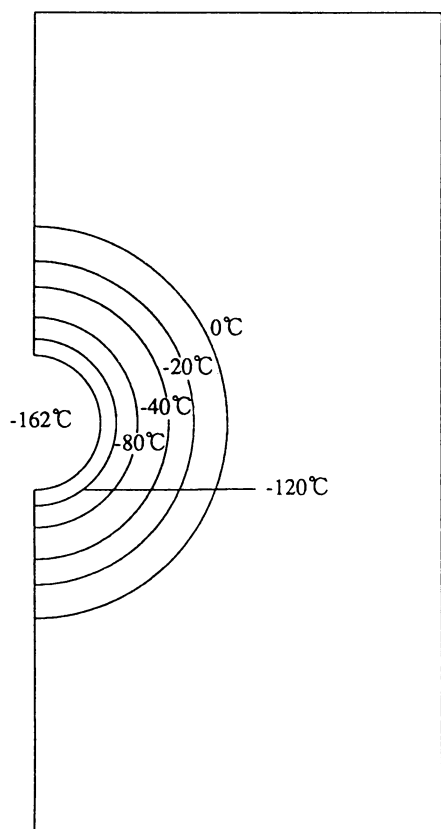


(a) Case 1 (断熱材なし)

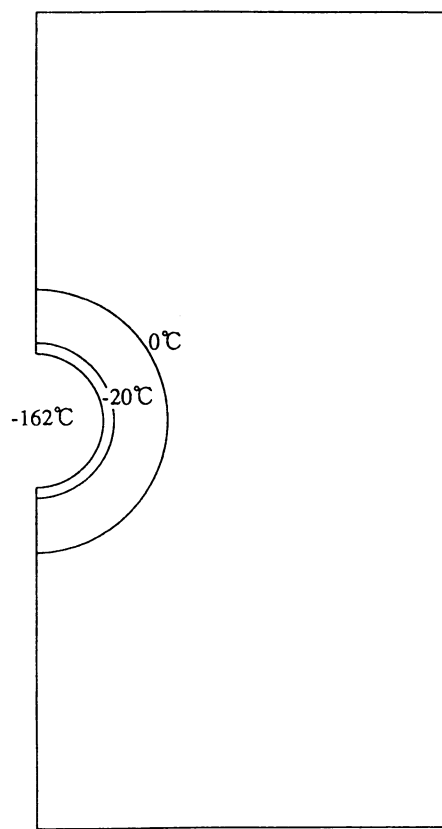


(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.16 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵 1 年後）



(a) Case 1 (断熱材なし)



(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.17 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵 2 年後）

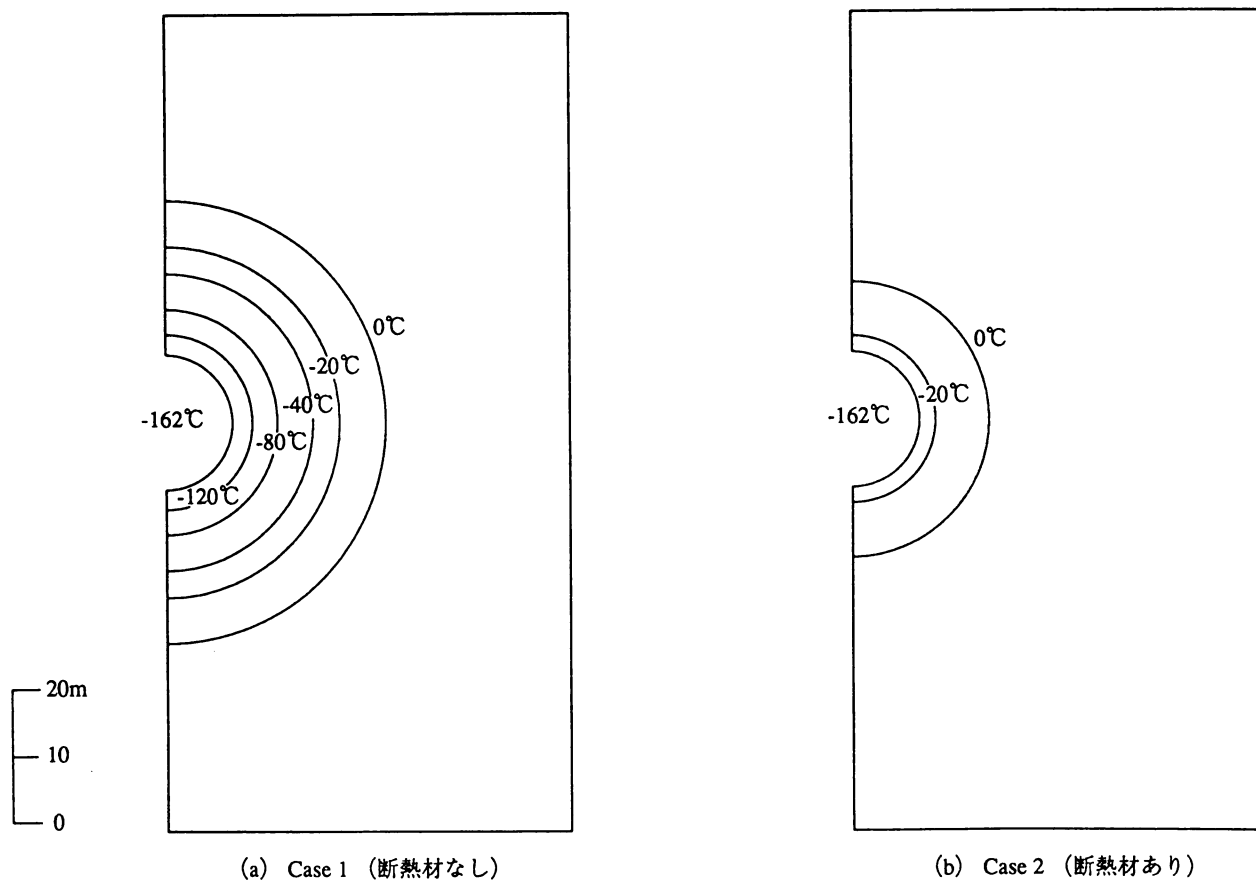


図 6.18 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵 3 年後）

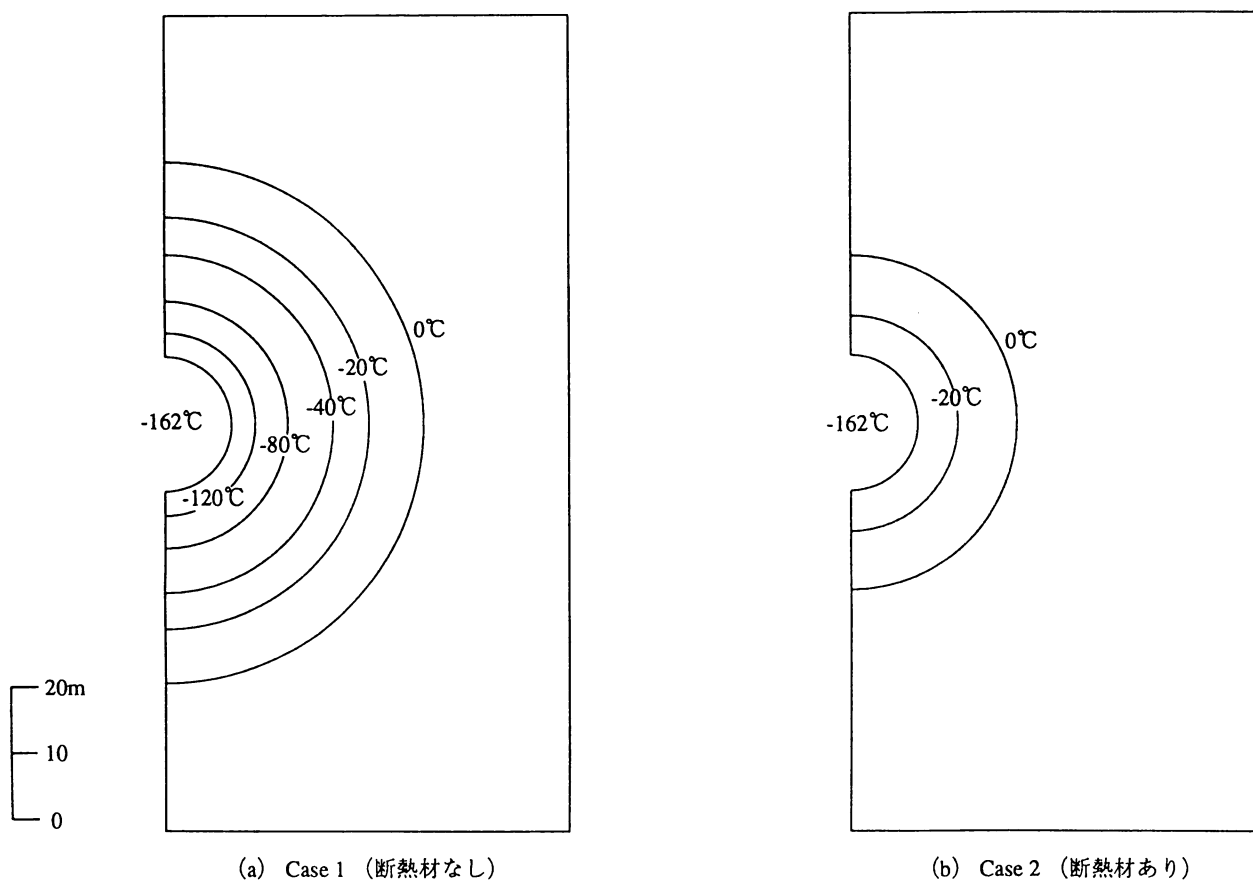
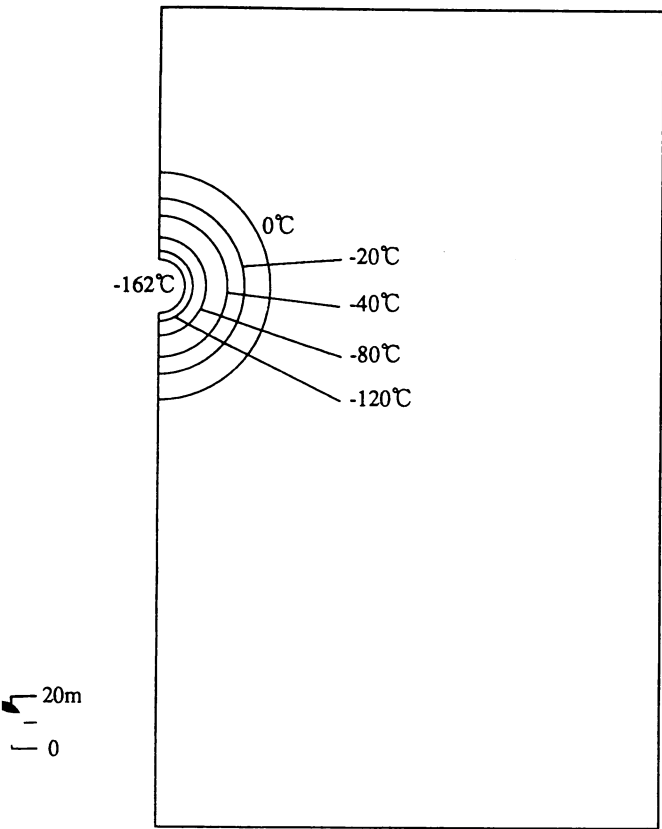
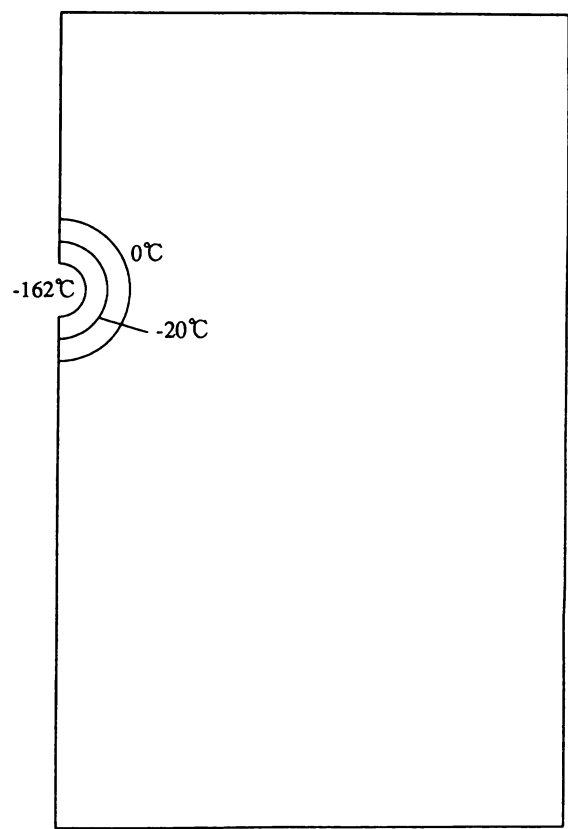


図 6.19 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵 5 年後）

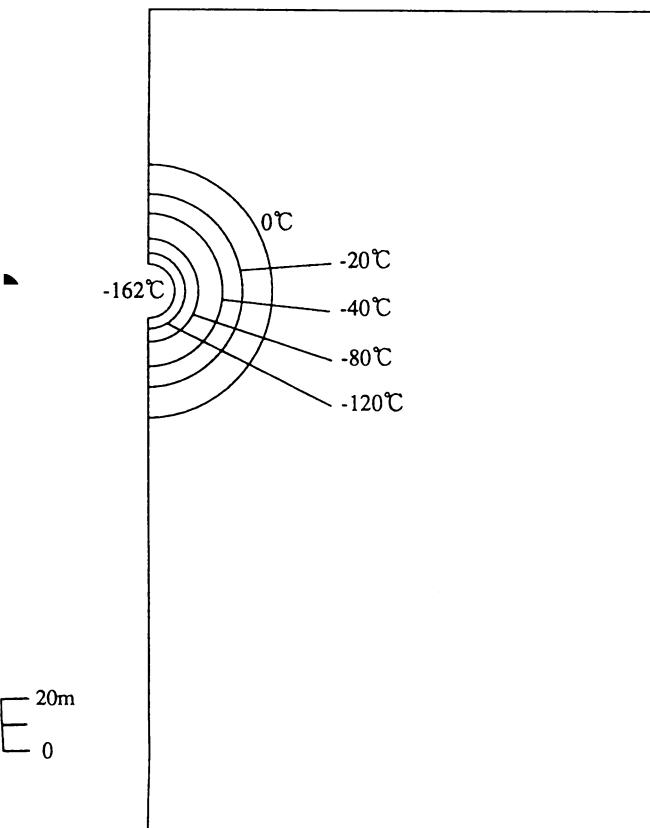


(a) Case 1 (断熱材なし)

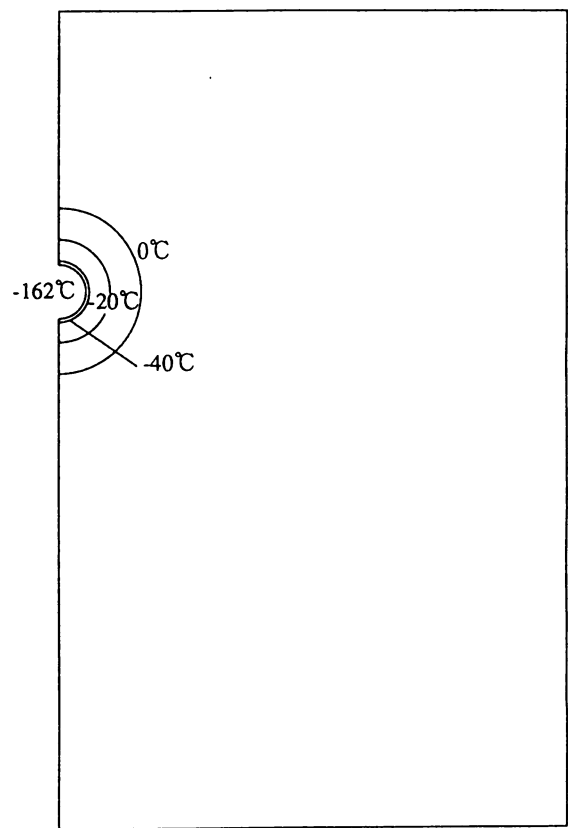


(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.20 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵7.5年後）



(a) Case 1 (断熱材なし)



(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.21 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵10年後）

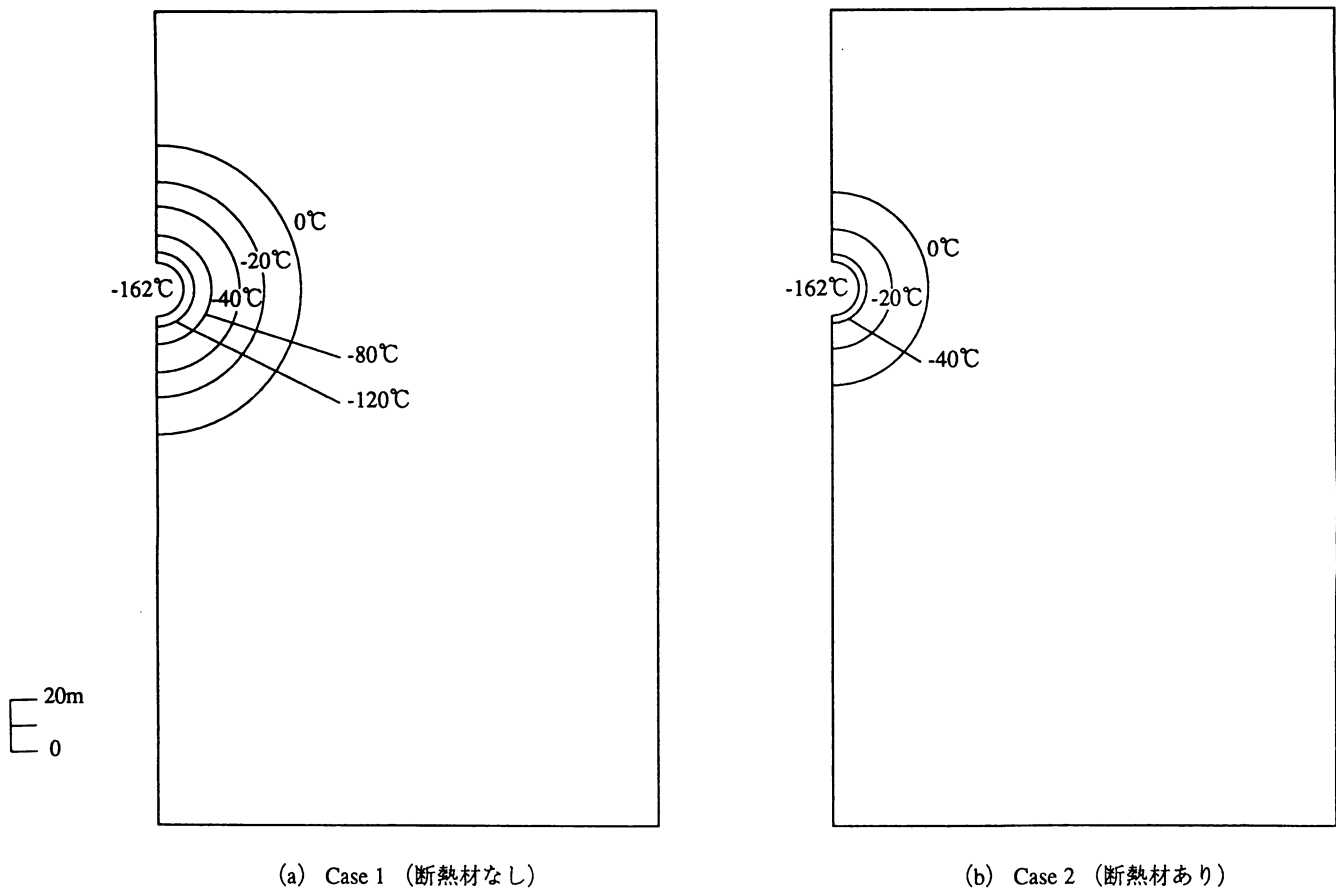


図 6.22 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵15年後）

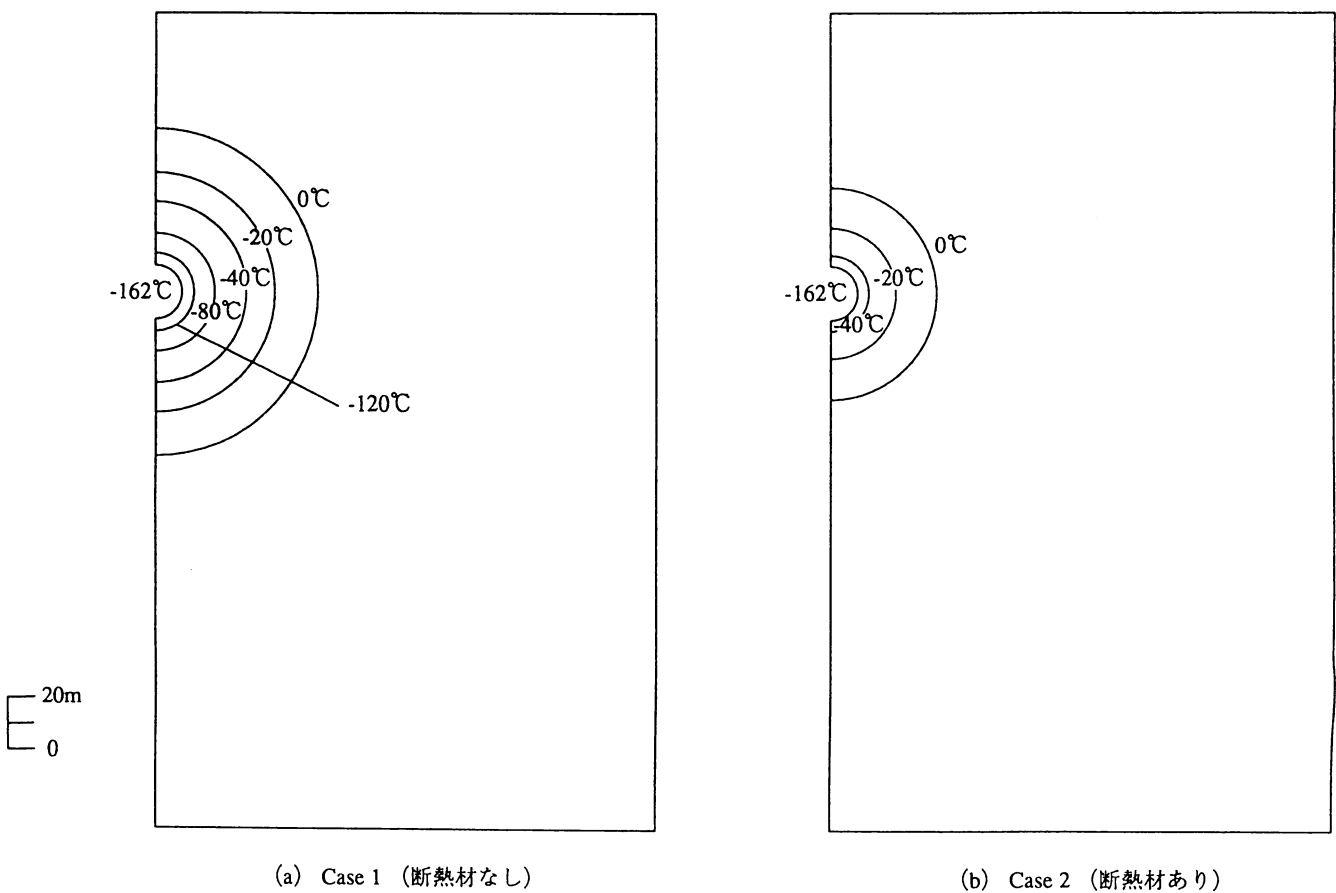
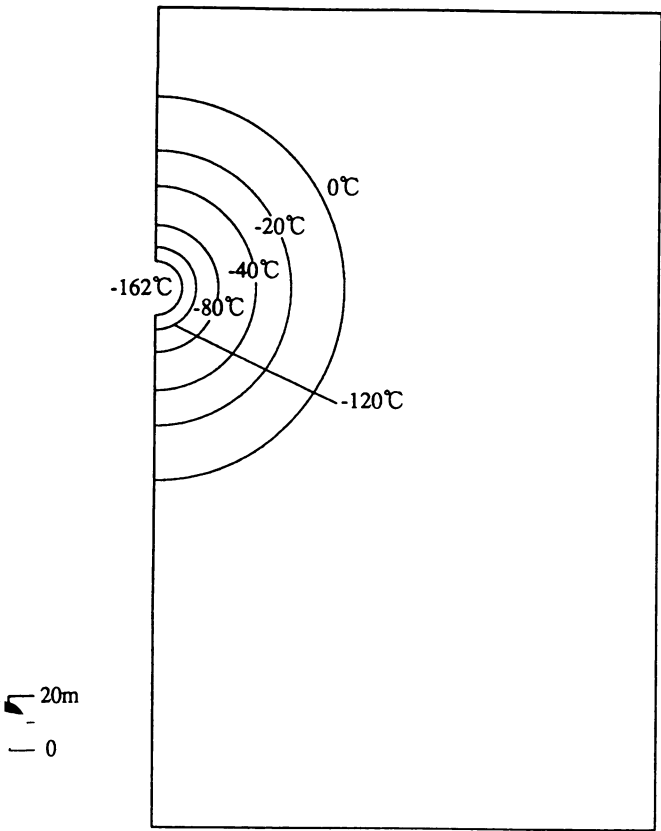
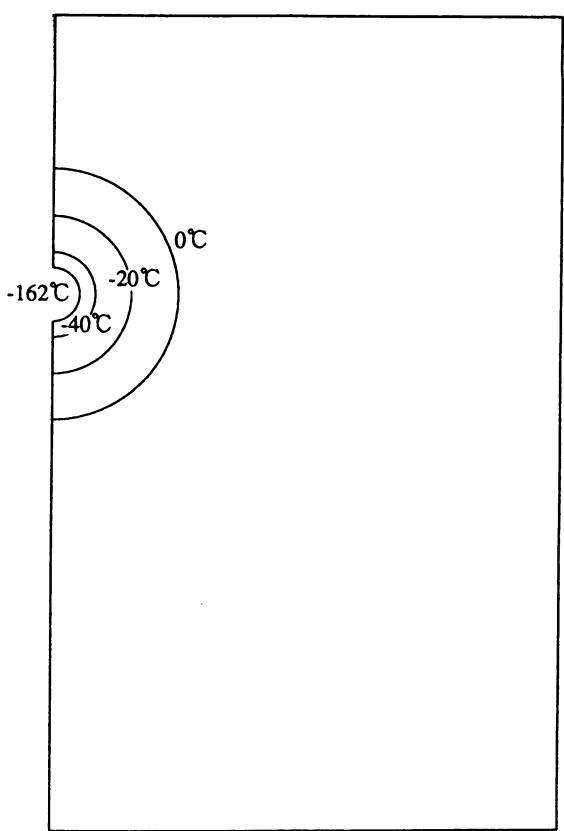


図 6.23 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵20年後）

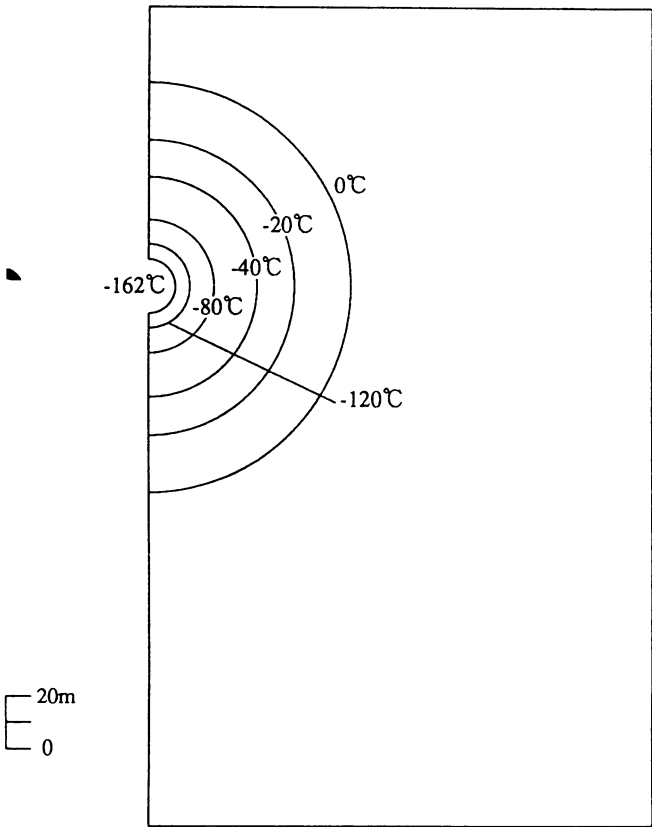


(a) Case 1 (断熱材なし)

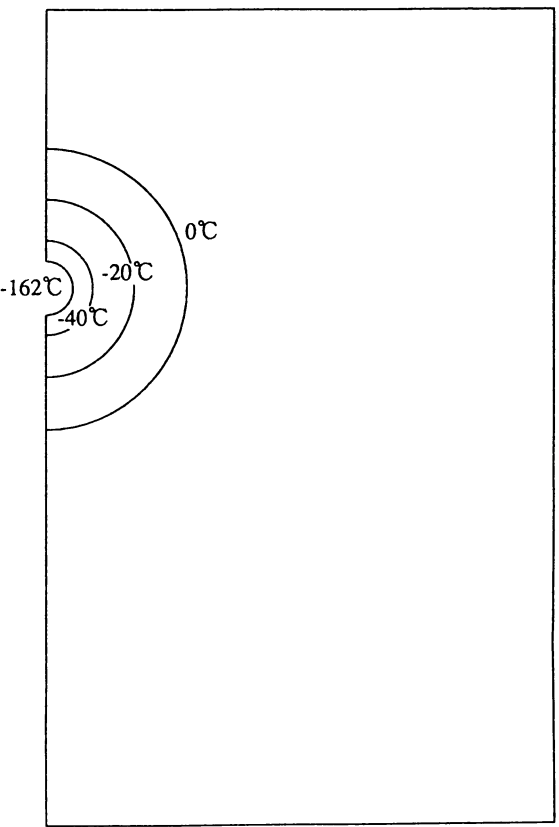


(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.24 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵30年後）



(a) Case 1 (断熱材なし)



(b) Case 2 (断熱材あり)

図 6.25 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵40年後）

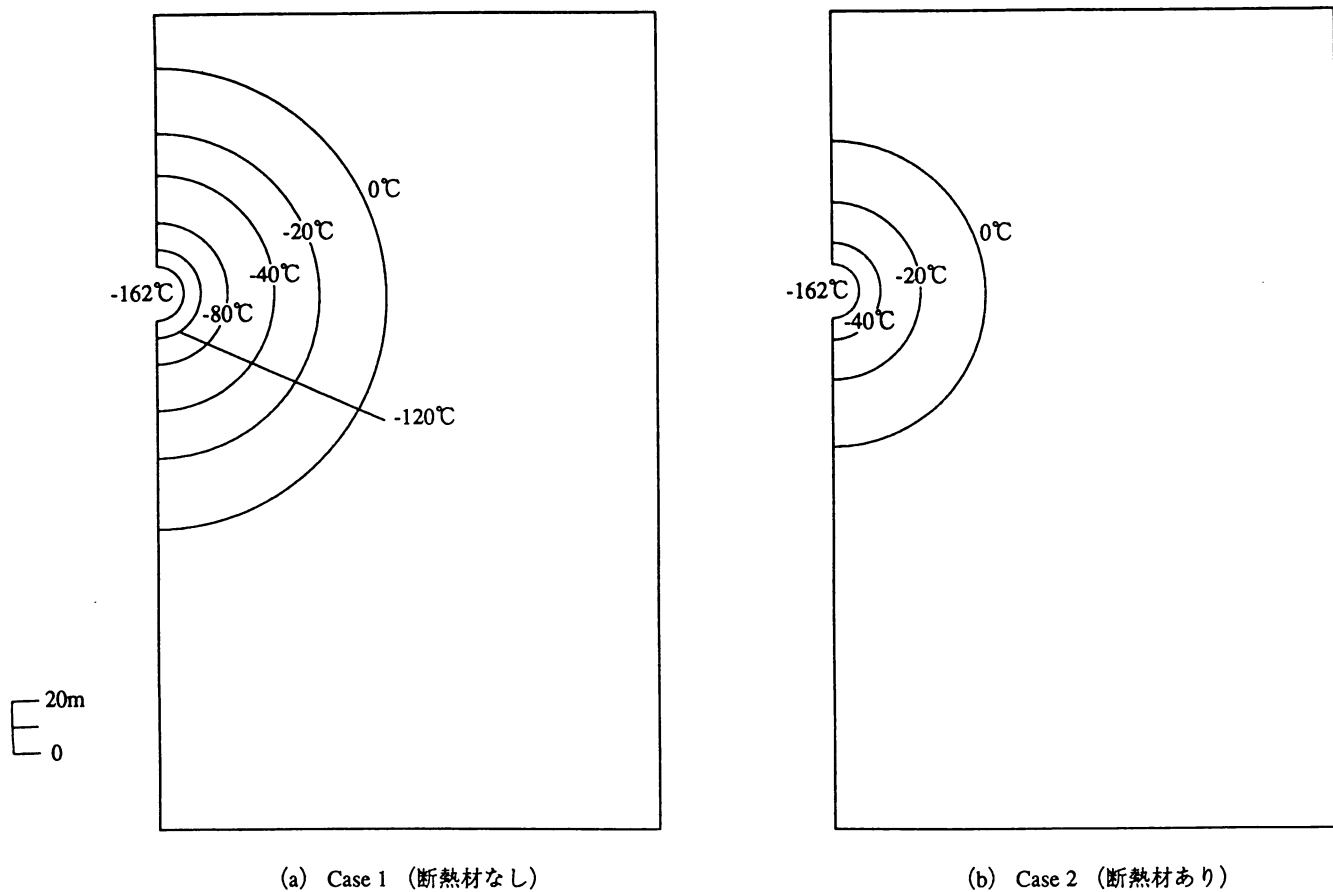


図 6.26 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵50年後）

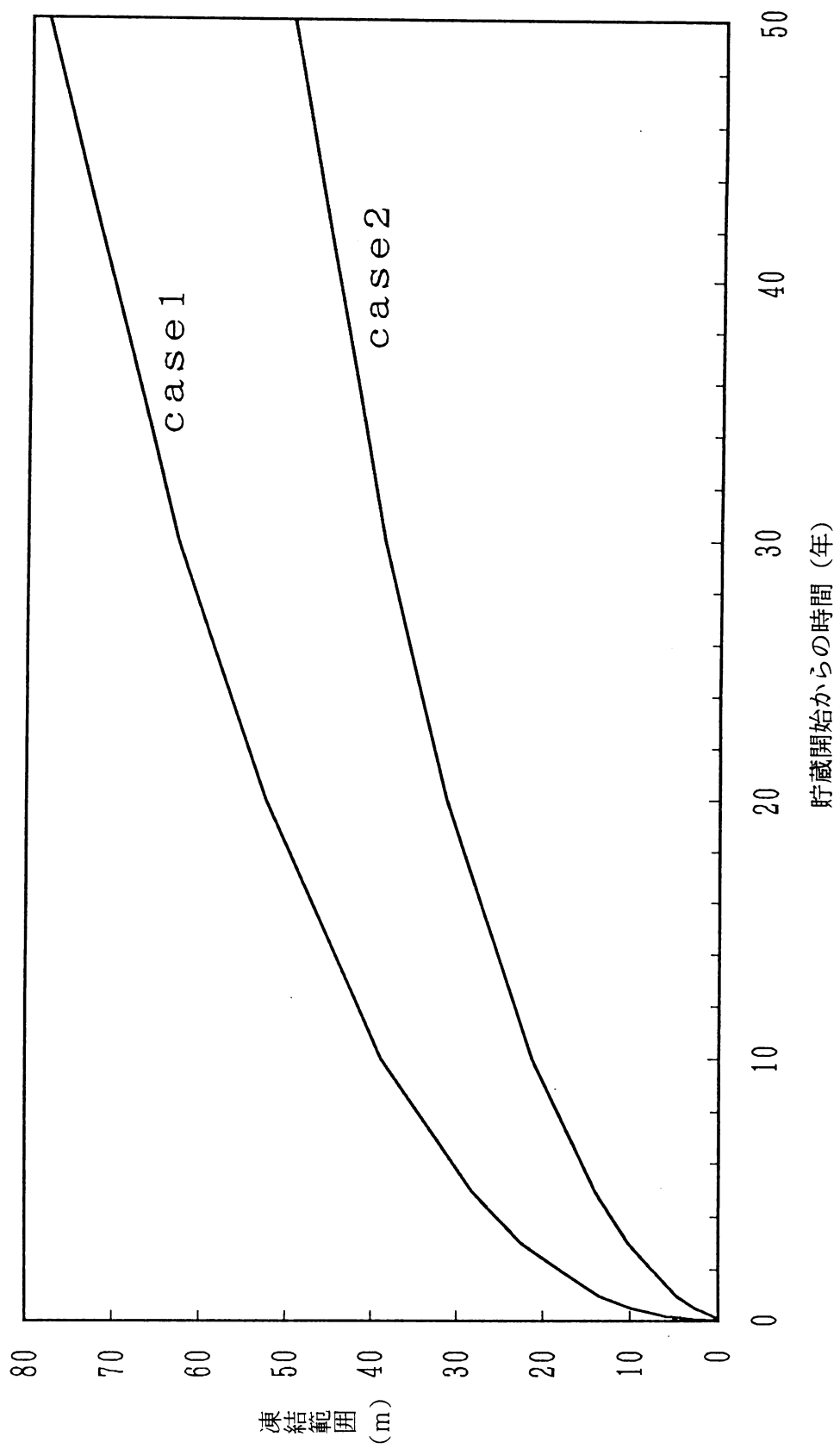


図 6.27 空洞周辺の岩盤の凍結範囲の経時変化

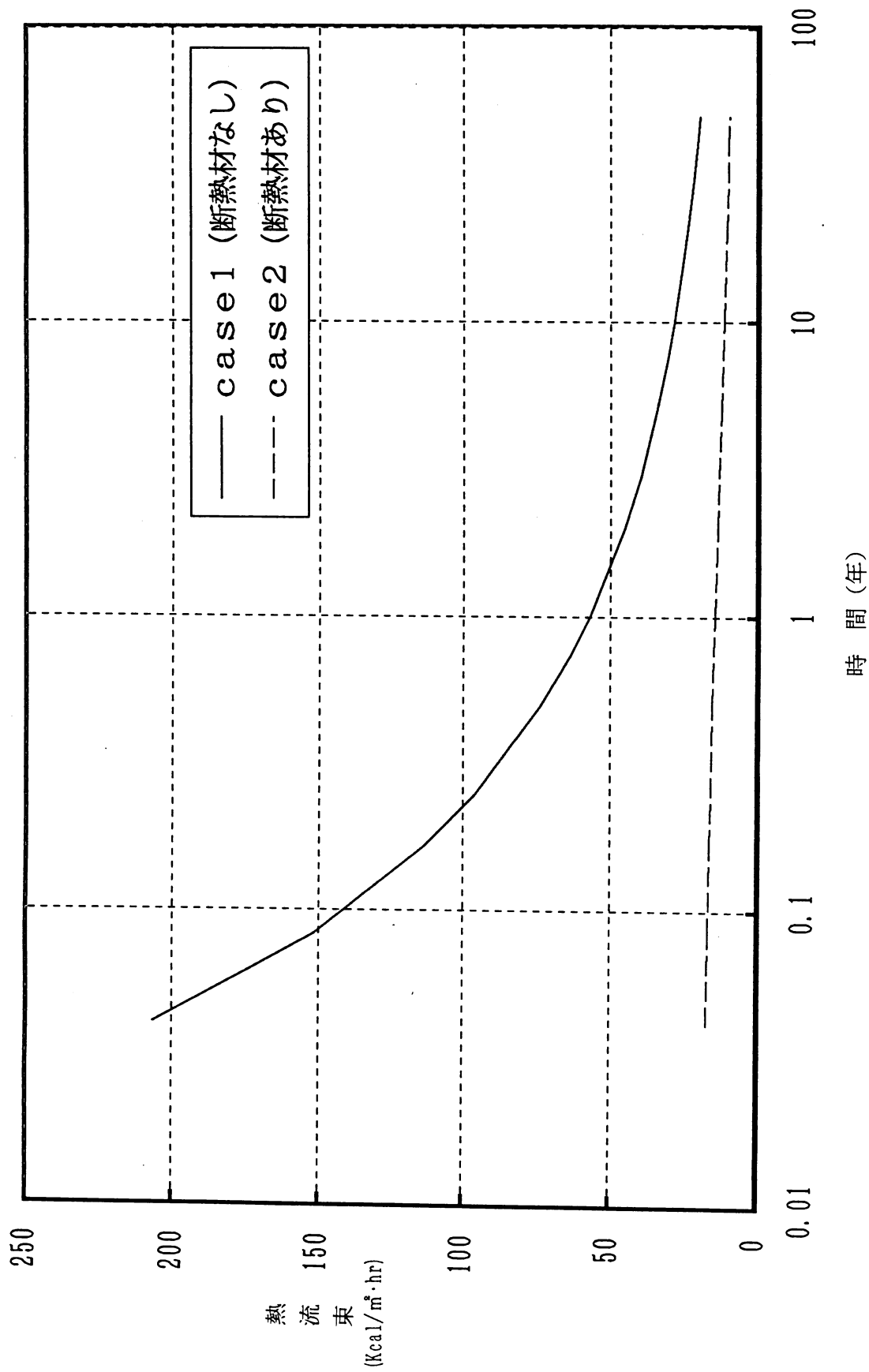


図 6.28 熱流束の経時変化

参考文献（第6章）

- 1) 稲田善紀・八木則男、「極低温下における岩石の熱物性値」、材料、第29巻、第327号、pp. 74～79、1980
- 2) 松永 烈・廚川道雄、「岩石の低温下における熱伝導率に関する研究」、採鉱と保安、Vol. 26、No. 9、pp. 448～455、1980
- 3) 木下直人・石塚与志雄・日比一喜、「岩石の低温特性と熱応力による破壊」、第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 181～185、1982
- 4) 日景秀治・添田弘基・西牧 均・関根一郎、「L P G地下岩盤内低温貯蔵槽に関する研究」、戸田建設研究報告、No.10、pp. 36～48、1983
- 5) 姚 義久・古賀重利・門田俊一、「低温時の岩の熱的特性及びその評価に関する研究」、フジタ技術研究所報、第27号、pp. 43～48、1991

第7章 タンク設備の検討

第7章 タンク設備の検討

7.1 断熱材の検討

(1) 既存の断熱材の調査

LNGタンクに用いられている断熱材を中心に、既存の断熱材について調査した。各種断熱材の特徴を以下に示すとともに、それらのまとめを表7.1に示す。

1) 硬質ウレタンフォーム

硬質ウレタンフォーム（PUF）は、ポリオール、ポリイソシアネートおよび発泡剤を主剤として、化学反応により独立気泡を形成させた発泡体で、空気より小さい熱伝導率を示すガス体を封入しているため、フォーム自体の熱伝導率は低く、密度も $30\sim 700\text{kg}/\text{m}^3$ の範囲で任意に製造可能である。

発泡剤には、従来CFC-11が使用されていたが、近年特定フロンによる地球の温暖化およびオゾン層の破壊が大きな社会問題となり、1989年のヘルシンキ宣言において、特定フロンなどの今世紀中の全廃が国際的に合意されたため、CFC-11に代わる発泡剤による硬質ウレタンフォームの開発がメーカー各社により急ピッチで進められている。一般に従来品（CFC-11）と代替フロン品を比較すると、常温における圧縮強度では一割程度、熱伝導率では数パーセント代替品の方が劣っているが、低温での圧縮強度は代替品が一割程度優れているといわれている。

ウレタンフォームは板、パイプカバー状の成形品として使用される場合と、現場にて任意の形状に注入あるいは吹付け法により発泡する場合とがある。

また、ウレタンフォームはライン発泡による大量生産が可能であるため、製作期間および価格面で優れており、メンブレン式LNGタンクの保冷材として使用されている。ウレタンフォームの成形品については、1972年にJISが制定されている（JIS A 9514「硬質ウレタンフォーム保温材」）。

ウレタンフォームの物性は、原料の選定により変化するが、一般に強度と熱伝導率は密度により左右され、密度との相関関係がある。

図7.1に従来品（CFC-11使用）の密度と圧縮強さとの関係を示す。図中//は発泡方向に対し平行方向、⊥は発泡方向に対し垂直方向を表す。本図で示されるように、ウレタンフォームは密度とともに強度が増加する。また、その強度は低温になるにつれて上昇するが、安全性を考慮し、大気温度での実測値に基づいて基準強度が定められている。

図7.2に従来品の密度と熱伝導率の関係を示す。硬質ウレタンフォームの熱伝導率は、密度が $30\sim 40\text{kg}/\text{m}^3$ の間に最小値がある。

図7.3に従来品の温度と熱伝導率の関係を示す。図に示されるように、硬質ウレタンフォームの熱伝導率は温度とともに変化し、 0°C 付近に極小点、 $-50\sim -60^{\circ}\text{C}$ 付近に極大点を有する曲線となる。これは、ウレタンフォームの独立気泡中

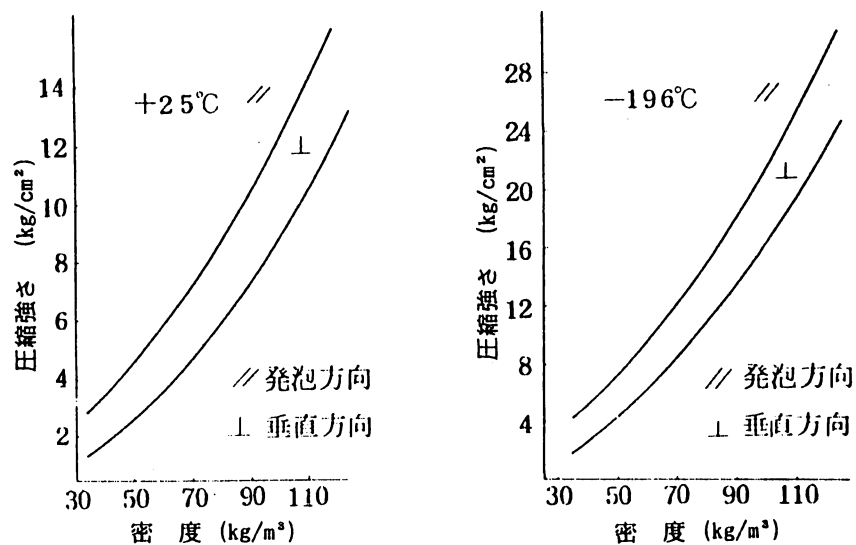


図 7.1 従来品の密度と圧縮強さの関係 (出典：LNG地下式貯槽指針)

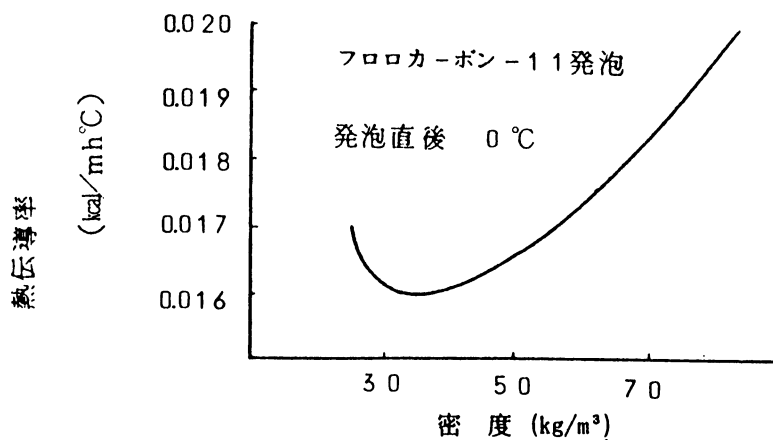


図 7.2 従来品の密度と熱伝導率の関係 (出典：LNG地下式貯槽指針)

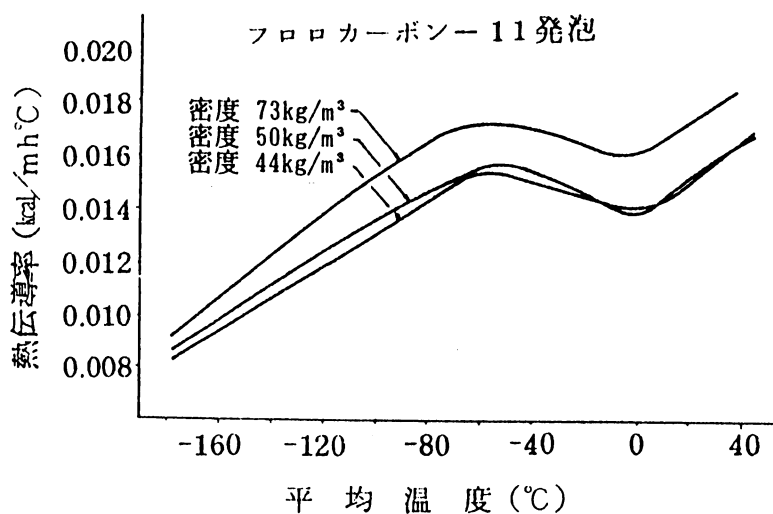


図 7.3 従来品の温度と熱伝導率との関係 (出典：LNG地下式貯槽指針)

に含まれるフロロカーボンの液化によるものである。

図 7.4に従来品の熱伝導率の経年劣化を示す。密度 35kg/m^3 のフォームでは、発泡初期の熱伝導率は $0.014\sim 0.016\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ であるが、表面を何も覆わず空气中に放置すると本図のように約3～6か月後に平衡に達し、 $0.018\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 程度となり、約20%前後大きくなる。

硬質ウレタンフォームの物性設計値は、以上述べてきた温度依存性や経年劣化を考慮して定められている。

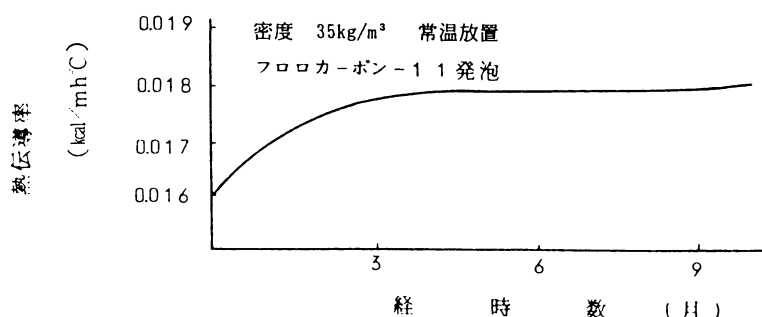


図 7.4 従来品の熱伝導率の経年劣化 (出典：LNG地下式貯槽指針)

2) ポリ塩化ビニルフォーム

ポリ塩化ビニルフォームは、塩ビ、イソシアネート、酸無水物を主原料とした独立気泡体であり、熱伝導率が低い。また、毛細管現象などによる吸水率が極めて低いため、断熱性能をはじめとする諸性能の劣化がほとんどない。

ポリ塩化ビニルフォームは、圧縮、曲げ、引張に対して強度的に優れており、他の断熱材に比較して密度当りの機械的強度が高い。また、製造工程においてフロンを使用しないため、環境保護の面でも優れている。ただし、硬質ウレタンフォームに比べて高価格となるため、国内のLNGタンクにおいて保冷材として使用された例はまだない。

3) あわガラス

ガラス微粉末にカーボンを混ぜ、高温窯内で発泡焼成して作られた無機質ガラス発泡体で炭酸ガスを主成分とした独立気泡よりなる。熱伝導率は常温で $0.04\sim 0.05\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ であり、吸水、吸湿率は非常に低い。また、耐圧強度が高いため、LNGタンクの底部保冷材として数多く使用されている。あわガラスは完全な不燃材であるため、LNG配管の保冷材としても多く使用されている。ASTMC552 “Specification for Cellular Glass Thermal Insulation”に規定されている。

4) フェノールフォーム

液状フェノール樹脂と酸性触媒を用いて硬化させた発泡体で、炎に接しても炭化するだけという点で高い防火性を特長とした断熱材である。機械的強度が弱く、吸水性が高い点で本システムに適用する保冷材としては問題がある。

5) ポリスチレンフォーム

ポリスチレンフォームは発泡剤を含ませた粒状のポリスチレンビーズを原料とした発泡体で、1958年にJIS A 9511として制定された。可燃性であるため、最高使用温度が70℃と他の断熱材に比べて低い。また、機械的強度が高くないため、本システムの保冷材としては適さない。

6) ロックウール

ロックウールは、安山岩、玄武岩などの原料鉱石を高熱で溶かし、遠心力や圧縮空気を吹くなどして繊維化したものである。ロックウールは非結晶質で均一なガラス質状態の人造鉱物繊維で、繊維径は3～10ミクロンである。ロックウールには繊維として吹付けなどにより使用される場合と成型品としてパイプやダクトの保温材として使用される場合とがある。JIS A 9504「ロックウール保温材」として規定されている。

7) グラスウール

ガラスを溶融し、これを吹付法、遠心力法、ロッド法、ポット法およびこれを組み合わせた方法などで繊維化したものである。グラスウールは繊維径が数ミクロン程度のものが生産され、性能は一段と向上している。これはサスペンデッドデッキ型タンクにおいては欠かすことのできないものである。またLNG二重殻タンクにおいてはその復元性を利用し、パーライト流下防止用クッション材としても使用されている。JIS A 9505「グラスウール保温材」に規定されている。

8) パーライト

真珠岩または黒曜石の火山岩を原料とし、粉碎後1,000～1,200℃程度に急激に加熱膨張させた中空球型の粒状のもので気密性の小気泡よりなるものである。非常に軽く、取り扱いが容易で、保冷槽に簡単に搬入でき、LNG二重殻タンクの側部・屋根部にN₂ガスとともに封入され、最も一般的な断熱材と言える。何よりも不燃材であり、安価であることが大きな特長である。パーライト粒の熱伝導率は0.02～0.04kcal/mh℃程度である。この断熱材は粉体であるために、内槽タンクの液の出入れ熱呼吸または地震による振動などによって圧密され、保冷効果が落ちることになるので、これらに対する対応策が必要となる。

9) パーライトコンクリートブロック

前記パーライト粒にセメント、水を混合し成形したものをパーライトブロックという。これらは耐圧強度の大きいことを利用してタンク低部断熱材として多く使用されている。また、セメントとコンクリートと混合して、現場打設を行い底部のリングコンクリート、レベル調整モルタルとしても多く使用されている。

このような断熱材に対し、メンブレン方式のLNG岩盤貯蔵システムにおける断熱材として必要な条件は、以下の通りである。

- ① 熱伝導率が小さい。
- ② 圧縮強度が高く、変形が小さい（常・低温、クリープ）。

- ③ 使用環境における性能の経年劣化が小さい。
- ④ 吸水性および吸湿性が低い。
- ⑤ 不燃性あるいは難燃性である。
- ⑥ 低コストである。

特に、圧縮強度は

液 比 重 : 0.467

貯槽内直径 : 20m

運 転 圧 力 : 5,600mmAq

という基本仕様に対し、次項の設計条件から以下のように算定される。

液頭圧は

$$2,000 \times 0.467 \times 10^{-3} = 0.94 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

断熱材に負荷される圧縮荷重は、液頭圧と運転圧力の和であり

$$0.94 + 0.56 = 1.5 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

従って、本システムに適用する断熱材は、安全率を3と見込むと、以下の圧縮強度を有する必要がある。

$$1.5 \times 3 = 4.5 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

このようなことから、本システムに適用する断熱材としては、LNG地中タンクにも用いられている硬質ウレタンフォームが有望である。

ただし、本材料は吸湿による性能の経年劣化もあり、施工期間中における岩盤からの地下水侵入に対して十分な対策が必要である。

表 7. 1 断

名 称	種 類	密 度 (kg／m ³)	熱 伝 導 率 (kcal/mhr℃) (常温にて)	圧 縮 強 さ (kg／cm ²)	縦 (
硬 質 ウレタンフォーム	J I S 1号	45以上	0.021以下	3.0以上	
	(代替フロン試作品)	70	0.018	6.2	
	(代替フロン試作品)	90	0.020	9.0	
ポリ塩化ビニルフォーム	――	40	0.024	4.6	
		55	0.023	8.0	
		75	0.026	12.0	
		100	0.030	19.0	
あ わ ガ ラ ス	――	平均 136	0.0439以下	5.51以上	
		平均 140	0.0456以下	6.53以上	
		平均 148	0.0460以下	7.55以上	
		平均 152	0.0465以下	8.57以上	
フェノールフォーム	――	33	0.035	0.52以上	
		49	0.033		
		72	0.036		
ポリスチレンフォーム	J I S A類 1号	30以上	0.031以下	1.6以上	
ロックウール	J I S 保温板 1号	100以下	0.038以下	――	
	――	200	――	圧縮率 30% 注	
グラスウール	J I S 保温板 2号	24～120	0.036～ 0.042以下	――	
	――	96	――	圧縮率 54% 注	
粒状パーライト	――	35～55	0.038以下	――	
パーライトコンクリート	――	1,200以下	0.16以下	30以上	

注1) L N G地下式貯槽指針に規定されている安全率
注2) 圧縮荷重1.5kg／cm²に対する圧縮量の初期厚さとの比

熱材の調査

弾性係数 kg/cm ²	比 熱 (kcal/kg℃)	使 用 例	課 題	備 考
—	0.25	・LNG 地中タンク保冷 ・LNG 船 (メブレン)保冷	・吸湿性あり ・代替フロン規制	・安全率：3 注 ・代替フロン試作品の物性値はメーカー実験値より
215				
315				
225	0.24	・LNG 船 (メブレン)保冷	・硬質ウレタンフォームに比べコスト高い (密度比)	・安全率：3 注 ・物性値はメーカーカタログ値より
350				
500				
800				
9,200	0.18	・LNG 地上タンク底部保冷 ・LNG パイプ保冷	・摩擦や衝撃に弱い	・安全率：4 注 ・物性値はメーカーカタログ値より
—	0.38	・LNG 船 (モス式) 保冷	・強度弱く軟らかい	・安全率：3 注
100	0.29	・冷凍パイプ保冷	・可燃性 ・圧縮強度小さい ・溶剤に解けやすい	・安全率：3 注 ・物性値はメーカーカタログ値より
5	0.2	・空調用ダクト保温 ・蒸気パイプ保温	・重い ・圧縮変形が大きい	
2	0.2	・LNG 地中タンク屋根 (吊りデッキ) 保冷 ・ダクト保温保冷	・吸水性あり ・対流により熱伝導率低下	
—	—	・LNG 地上タンク側部保冷	・強度がなく、支圧部材構造の選定	
—	—	・LNG 地上タンク底部保冷	・熱伝導率が1オーダー大きく、断熱厚さが大	

(2) 断熱材の設計条件の整理

メンブレン方式のLNG岩盤地下タンクにおける断熱材の基本的な設計条件を整理すると以下ようになる。

1) 要求事項

設計上要求される十分な保冷性能を有するほか、作用するガス圧、液圧に対して充分なる強度を有すること。

2) 基本的設計方針

- ① BOG量を満足できる保冷性能を有すること。
- ② 作用する荷重に対して充分な強度を有すること。

3) 構造設計

- ① BOG量を満足する厚さの硬質ポリウレタンフォーム成型品を使用する。
- ② 支圧部は、作用荷重を岩盤に直接伝達する構造とすること。したがって、保冷材を取り付ける面に凹凸がある場合には、その面を平坦に仕上げるか、またはレベル調整材を挿入するなどにより、支圧部に使用する保冷材に局部的な集中応力が発生しないような構造とすること。
- ③ 支圧部は、液圧変動および熱収縮などに伴うメンブレンの円滑な挙動を損なわないような構造とすること。従って、メンブレンと直接接触する支圧部表面は、なめらかで凹凸のない構造とし、メンブレンに有害な影響を及ぼさないように配慮すること。
- ④ 保冷材の目地は、熱的短絡路 (cold-path)が生じないように、目地材などを充填して、保冷材が低温にさらされて熱収縮しても、すき間が貫通しない構造とすること。
- ⑤ 保冷材は、施工時および運転時に保冷性能が劣化しないよう、施工時に防湿および防水対策を施すほか、岩盤からの地下水侵入などの保冷性能の劣化の要因となるものを極力排除した構造とすること。
- ⑥ クラックアレスター、接着剤およびマスチックなどの補助材料を用いる場合は、それらの使用温度に応じた特性が確認されたものであること。

4) 強度設計

支圧部には、作用荷重に対する強度を考慮し各々比重量が異なる（圧縮強度が異なる）保冷材を配置することから作用荷重に対する圧縮強度の評価を以下のように行うこと。

支圧部の強度

① 通常時

$$\frac{\text{圧縮強度}}{\text{作用荷重}} > 3.0 \quad \text{通常時の作用荷重としてはガス圧および液圧の和とする。}$$

② 地震時

$$\frac{\text{圧縮強度}}{\text{作用荷重}} > 2.0 \quad \text{地震時の作用荷重としてはガス圧、液圧および地震時に生じる液圧の増加分の和とする。}$$

7.2 メンブレンの検討

ここではLNG岩盤貯槽の内装材の方式を検討するため、既存の低温材料の調査を行い、その特性について概略を述べるとともに、LNG岩盤貯槽へ適した内装材の条件について検討し、現時点においてはメンブレン方式を推薦する理由について述べる。また、既存のLNG地中タンクに用いられているメンブレン方式について特徴的な点について比較を行った。

(1) 極低温貯槽内装材の調査

1) 一次バリアの基本方式

LNG、液体窒素、液体酸素などを貯蔵する極低温貯蔵容器用一次バリア（液密、気密性能を有する機能部材）としての基本方式は耐圧機能の有無により大別すると表 7.2に示すように分けられる。この両者の中間的な方式として低温液化ガス船においてセミメンブレン方式がまれには用いられたこともある。

表 7.2 一次バリアの比較

構 造 方 式	耐圧性	液密・ 気密性	低温時の 熱 収 縮	外槽との関係	備 考
構造強度部材 方 式	有 (厚板設計)	有	自由収縮 変位量大	・独立タンク ・外槽との 相対変位有り	地 上 タンクに 実 績
メンブレン 方 式	無 (薄板設計)	有	分散吸収 変位量小	・液圧・ガス圧 を外槽材へ 伝達	地 中 タンクに 実 績

この中で構造強度部材方式は、熱応力を低減するため低温時の熱収縮を自由収縮としており、例えば長さ 200mの貯槽では収縮量は35cmを越える変位量となる。従って外槽と内槽との相対変位量を考慮して構造設計することになり、配管取り付け部形状などに特殊な配慮を必要とする。一方、メンブレン方式は熱収縮をモジュール単位に分散して吸収する方式であり貯槽形状による影響は比較的受けない。メンブレン方式の熱変位の吸収方法については後述する。

2) 材料の検討

① 一次バリア材料の必要性能

極低温貯槽の内装材としての必要性能は以下の通りである。

- ・線膨張係数が小さいこと
- ・低温脆性を起こさないこと
- ・低温において十分な引張強さ・耐力および伸びを有すること
- ・十分な疲労強度を有すること
- ・溶接性および加工性に優れていること

しかしながらこれら全てを満たす材料は既存の低温用材料ではなくそれぞれが特徴を有しており、これらの特徴を考慮し、また耐圧部材かメムブレン部材かを考えて既存のLNG貯槽は建設されている。

次に極低温貯槽材料として実績の有る材料の特徴について述べる。

② 既存材料の特徴

LNG、液体窒素、液体酸素などの貯槽のような超低温において現在各国で使用されている材料として、9%ニッケル鋼、アルミニウム合金、ステンレス鋼および36%ニッケル鋼（インバー）があげられる。これら超低温材料は常温および超低温において良好な機械的性質を有する他に、低温において脆性破壊を起こさぬように十分な破壊靱性を有している。また、これらの材料は加工および溶接により溶接構造物となるため、加工性および溶接性においても優れている。これらの溶接材料についても、溶接欠陥が発生しにくく、溶接部の性能の良いものが使われている。

LNG貯蔵タンクの内槽材として、9%ニッケル鋼、アルミニウム合金、ステンレス鋼の3種類が一般に使用されている。使用材料の選定は、タンクの大きさ、材料の性質、加工性、溶接性、経済性などを考慮して検討されるが、現状では厚板タンクの場合9%ニッケル鋼とアルミニウム合金、メムブレンタンクの場合ステンレス鋼やインバーが使用されることが多い。メムブレン方式にステンレス鋼が用いられる理由は、加工時の伸び率が大きいこと、コルゲーションの加工性がよいこと、またインバーは熱伸縮・ヤング率が小さく発生熱応力が低レベルなためである。上記4種の材料の性質について表 7.3に示すと共に各材料について略記する。

表 7.3 極低温用内槽材料の比較

材 料	J I S 規格	組 成	引張強度 kg/mm ²	0.2%耐力 kg/mm ²	線膨張係数 1/°C	縦弾性係数 kg/mm ²	特 徴	備 考
冷間圧延 ステンレス鋼板	JIS G 4305 SUS 304	18Cr, 8Ni	53	21	14×10^{-6}	1.93×10^4	• 強度、伸び良好 • メンブレン実績多し • 溶接性良好	地中タンク
低温圧力容器用 ニッケル鋼板	JIS G 3127 SL9N520 SL9N590	9Ni	70	53 60	9.2×10^{-6}	1.95×10^4	• 強度大 • 最低板厚 6 mm	地上タンク
アルミニウム 合 金	JIS H 4000 A 5083P-0	4Mg	28	13	18.5×10^{-6}	0.7×10^4	• 軽量 • 強度低くキズ不安 • 溶接性他より難	地上タンク LNG船
インバー材	—	36Ni	47	28	1.5×10^{-6}		• 線膨張係数小 • コルゲーション不要 • 耐蝕性悪い	LNG船

a. 9 %ニッケル鋼

9 %ニッケル鋼は米国で開発された超低温用材料で、液体窒素温度（-196℃）までの低温容器材として使用されてきた。この材料はINCOS社、CB&I社およびUSスチール社のOperaton Cryogenicsと呼ばれる共同試験により、溶接部の応力除去焼なましが必要であることが確認された。その後、ASME Code 1308 にとりいれられ、大型タンク用として広く実用されるようになった。

わが国においても9 %ニッケル鋼は液体酸素や液体窒素等のタンクとして使用され、WES（日本溶接協会規格）の鋼種承認を得て製作されはじめ、その後LNGタンクの建設に使用されるようになった。現在はJISに制定されている（JIS G 3127）。

9 %ニッケル鋼の主な特長は一般の高張力鋼と似て加工性、溶接性がよく、かつ許容応力に対する価格が安い点である。

b. アルミニウム合金

アルミニウムおよびその合金は一般的に低温における靱性の遷移現象がないため、ほとんどのアルミニウム合金が低温材料として使用できる。アルミニウム合金は大型溶接構造用材料として、その加工性、溶接性が優れているほかに、常温および低温における機械的性質の良好であること、低温において十分な破壊靱性を有すること、応力腐食割れを発生しないことなどの長所があげられる。

また、アルミニウム合金は比重が鉄の1/3程度であり、許容応力に対する材料コストが9 %ニッケル鋼と同程度か少し高い程度である。しかしながら、アルミニウム合金はガス切断ができない、溶接に高度な技術・熟練性が必要、溶接歪が大きいといった要因から製作、据え付けコストが上昇するという可能性も秘めている。

c. ステンレス鋼

ステンレス鋼は自立式の液体窒素・液体酸素のタンク、あるいはその他の低温容器材料として使用されている。この場合、板厚20mm程度までのものが使用され、ステンレス鋼の種類としては一般的にSUS 304が用いられている。

SUS 304はガス切断が困難なため、プラズマ切断が行われている。加工性、溶接性は良好で、化学容器、高温容器、原子力容器として古くから大量に使用されている。低温における破壊靱性についても優れた材料である。

わが国で建設されているLNG地中タンクのメムブレ構造の内槽材には、SUS 304の1～3 mm板厚の薄板が使用されている。また諸外国で建設されているテクニガス式LNG船の内槽にはSUS 304Lの1～2 mm板厚の薄板が使用されている。

d. 不変鋼（インバー）

LNG船の内槽にメムブレ型式により不変鋼を使用している。ガストランスポードのLNG船が建造されている。LNG船の内槽に使用されているメムブレは36 %ニッケル鋼の0.5～1.5mmの薄板で、耐力28kg/mm²、引張り強さ47kg/

mm以上のものである。不変鋼の特徴である線膨張係数は鋼のその約1/10である。インバーの低温における機械的性質としては、耐力および引張り強さは低温になると著しく上昇し、伸びについても若干上昇する。

3) 一次バリアの選定

LNG岩盤地下タンクの一次バリアを考えた場合、構造形式としては耐圧部材方式とメンブレン方式が考えられる。前者の場合低温時の内槽の熱収縮により外槽との間の相対変位が大きく配管の設計などに特別の考慮を払う必要がある。メンブレン方式の場合は基本的にモジュール単位で熱収縮を吸収するのでこの問題は生じない。また、岩盤は耐圧強度を有しており内槽を耐圧部材とする必要はない。

次に施工面より考えた場合大深度地下空間における工事となるためメンブレン方式が有利であると考えられる。以上から考えてメンブレン方式が推奨される。

一方、メンブレン材料の選択においては4種類が考えられるがメンブレン材としてはステンレス鋼板を除き必要性能上難点がある。

- ・ニッケル鋼板は、低温強度に優れているものの、薄板の製造が難しく、疲労強度の確認が不足である。(JISでは最小板厚6mmである。)
- ・アルミニウム合金は、重量に対する強度に優れているものの、強度が低く線膨張係数も大きい。
- ・インバー材は、線膨張係数が小さくメンブレン材として優れているが、錆を発生し易く、水分の存在が懸念される場所では耐蝕性に問題がある。

従って、いずれもステンレス鋼板と同等以上の性質を有する材料ではないと判断される。すなわちステンレス(SUS 304)鋼板を用いたメンブレン方式がLNG岩盤貯槽の内槽材として推奨される。

次に材料とは異なるがメンブレン構造について記す。メンブレン構造は耐圧部材による貯槽の内槽材として開発された、貯槽の液密性、気密性を保持する機能部材である。

メンブレンに作用する圧力は保冷材を介して耐圧構造部材(船体構造部材、貯槽躯体、岩盤等)に伝えられ保持されるため、メンブレンは耐圧性を有していない。メンブレンに対する設計荷重としては液圧、ガス圧による圧力荷重、常温とLNGの貯蔵温度の-160℃間の温度差による熱応力荷重、貯槽稼働時の貯槽内液の変動による液圧変動、液層からガス層への変動による温度変化による熱応力、構造体の変位または運動による機械荷重、貯槽内機器の荷重などが考えられている。これらの設計荷重に対してメンブレン構造は不安定崩壊しないこと、進行性変形しないこと、疲労破壊しないことが確認される必要がある。地中タンクに関しては「LNG地下式貯槽指針」に従って設計される。

メンブレンは常温とLNG温度との温度変化による熱応力を避けるため適宜にコルゲーション(温度変化によるメンブレンの熱収縮または熱膨張を吸収するた

めに幾何学的凹凸形状が設けられた部分）を配置したり、線膨張係数の小さいインバーを用いることにより構成されている。熱応力の吸収方法としてはメンブレン全体が一体として熱応力を吸収する方法にて対応したメンブレンの建設実績もあるが現在ではメンブレンを小部分に分割しモジュール単位としこの単位にて熱応力を吸収する方式が多く建設されている。コルゲーションの形状は各社により異なりコルゲーションはプレス加工または折り曲げ加工により成形されている。また、板の端部をフランジ曲げ加工し、その頂部を溶接接合したコルゲーションもある。LNG地中タンクに実績のあるメンブレンの基本モジュールを図 7.5 に示す。

メンブレンの材質は、オーステナイト系ステンレス鋼SUS 304またはSUS 304L が用いられている。また上記したようにインバー（36%ニッケル鋼）を用いているメンブレンもLNG船に実績あるが地中タンクに用いられた例はない。

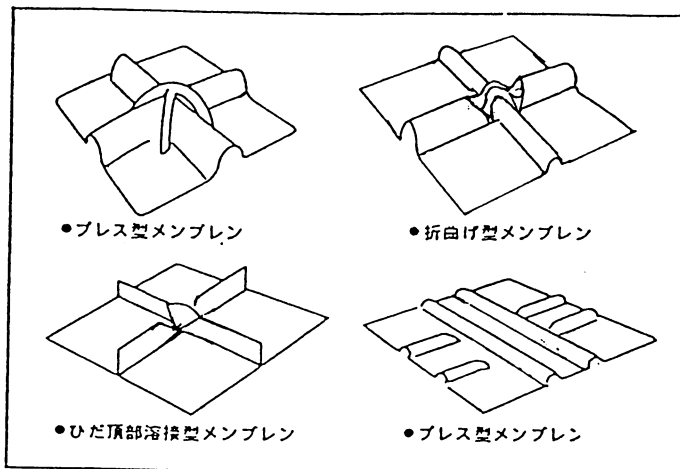


図 7.5 各種メンブレンの基本モジュール

（出典：LNG便覧）

(2) 既存のメンブレンの調査

低温液化ガス貯槽のシール材として金属（ステンレス鋼、36%Ni鋼）¹⁾ 薄膜によるメンブレン構造が開発され、低温液化ガスの輸送、貯蔵の貯槽に用いられて久しい。日本においてはLNGの地下貯蔵のため1970年最初のLNG地中タンクが完成して以来、すでに数十基建設され安全に運転されている。また通商産業省の委託調査事業として社団法人日本瓦斯協会に設置された液化天然ガス用貯槽保安調査委員会によりLNG地下式貯槽指針（本報告書では地下式貯槽を地中タンクと称する）が1978年作成されている。以下に、LNG地中タンクにおいて実績のあるメンブレン構造およびそれと一体となって貯槽の内槽を形成している保冷構造について比較する。LNG船、LPG貯槽等に適用したメンブレン方式もあるが、LNG地中タンクに限定して比較する。既存のLNG地中タンクの構造例を図 7.6 に示す。

1) メンブレン構造の比較

ここではLNG貯槽に実績のあるメンブレン方式について比較する。メンブレン形式は平行収縮式（実績としては2方式あり）と旋回収縮式（実績としては2方式あり）に分けられる。各方式とも熱収縮を吸収するコルゲーションの形状およびその配置方法に特徴がありまたメンブレンを固定する方法にもメンブレン形式により異なった形式が用いられているこれらの各メンブレン方式の特徴ある点について比較する。

これらの比較表を表 7. 4(1)～(3)に示す。

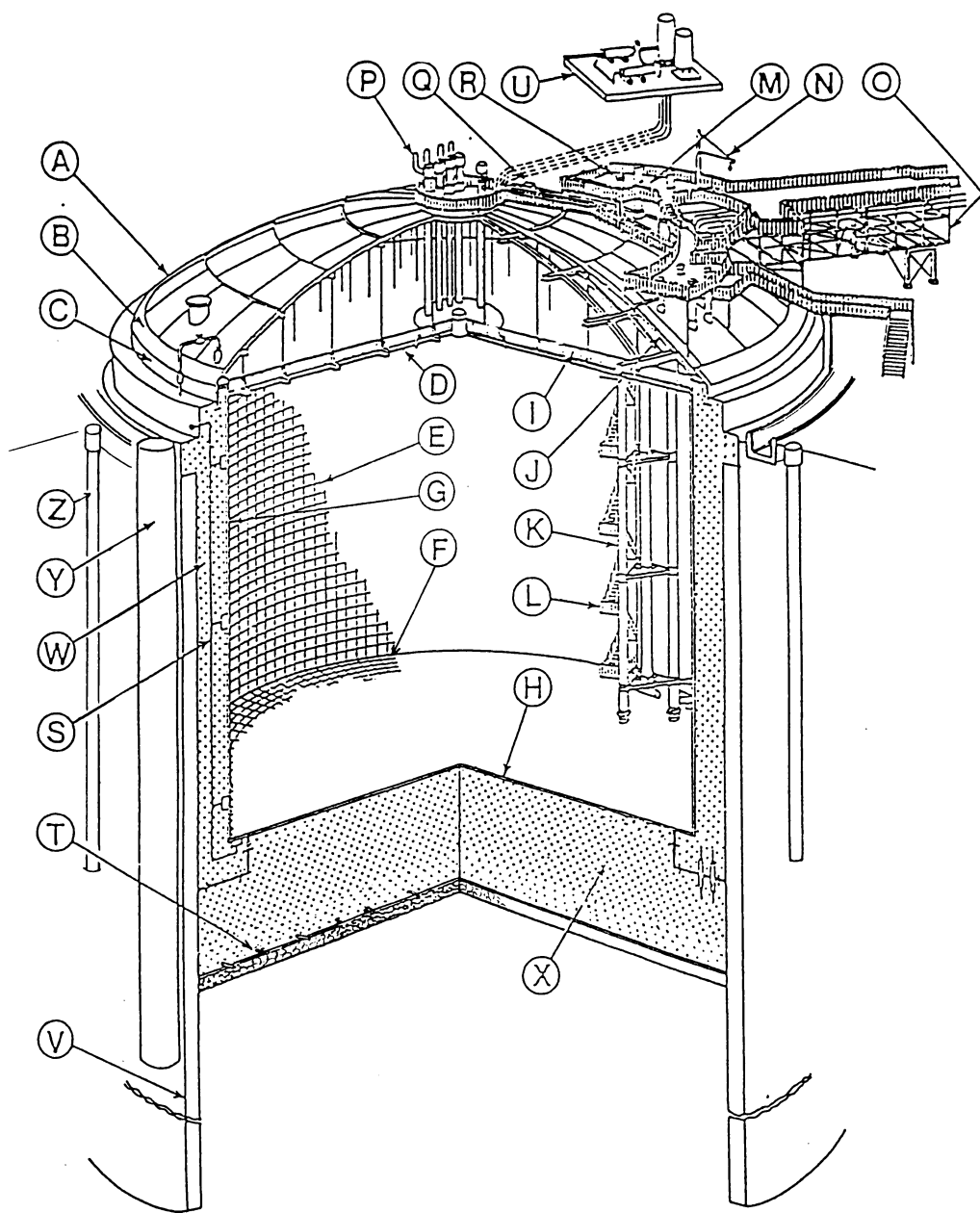
2) 保冷構造の比較

メンブレンは各タイプ毎にアンカー方式、コルゲーション方式が異なるためそれに応じて保冷材の構造が異なる。保冷材料は各タイプ共硬質ウレタンフォームを用いており、所要のボイルオフ率^注を満足するように厚みを変化して対応している。

比較表を表 7. 5(1)～(3)に示す。

注1) JIS G 4305-1991 SUS304またはSUS 304L、36%Ni鋼についてはJISには規定がされていない。

注2) タンクへの全入熱量がすべてLNGを気化させるものとし、1日あたりの気化量を貯蔵容量に対する割合で表す数値をいう。%/日で表すことが多い。



符号	名称	符号	名称
A	屋根	N	ポンプ吊り上げ装置
B	ナックルリング	O	サブラック架構
C	胴板	P	安全弁
D	吊りデッキ	Q	安全弁搬送装置
E	側部メンブレン	R	液面計
F	底部メンブレン	S	ガス検知管
G	側部保冷	T	底部ヒーター管
H	底部保冷	U	ヒーター地上設備
I	デッキ保冷	V	連続地中壁
J	屋根裏保冷	W	側壁
K	ポンプバレル架構	X	底板
L	内部梯子	Y	揚水ピット
M	ステージ	Z	側部ヒートフェンス

図 7.6 LNG地中タンク全体構造説明図

表 7.4 (1) メンブレン構造の各方式比較表

メグワ型式 メーカ 比較検討	平行収縮式メンブレン		旋回収縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
1. 温度変化に対する 変位吸収方法	平行収縮式 平行収縮式メグワはコルゲーションを縦横に配置し、その交差点二方向の熱収縮が吸収できるようになっています。 コルゲーションが上下または、左右に広がることにより熱収縮を吸収します。		旋回収縮式 旋回収縮式メグワは有限長さのコルゲーションを互いに交差することなく縦横に配置した構造です。その熱収縮吸収の原理を下図に示します。実線がコルゲーションの位置もとの位置を示し、破線が収縮後のコルゲーションの位置を示しています。コルゲーションの開きに伴い、平板部がわずかに旋回し熱収縮移動が完了します。	
2. メグワ材料	SUS304 2mm	SUS304 2mm	SUS304 2mm	SUS304 2mm
3. コルゲーション形状	大コルゲーション $r_1 = 12.7\text{mm}$ $r_2 = 99.0\text{mm}$ $r_3 = 14.3\text{mm}$ 小コルゲーション $r_1 = 12.7\text{mm}$ $r_2 = 58.1\text{mm}$ $r_3 = 12.7\text{mm}$	h=85mm	$r = 34.2\text{mm}$ $R = 34.2\text{mm}$	h=85mm

表 7.4 (2) メンブレン構造の各方式比較

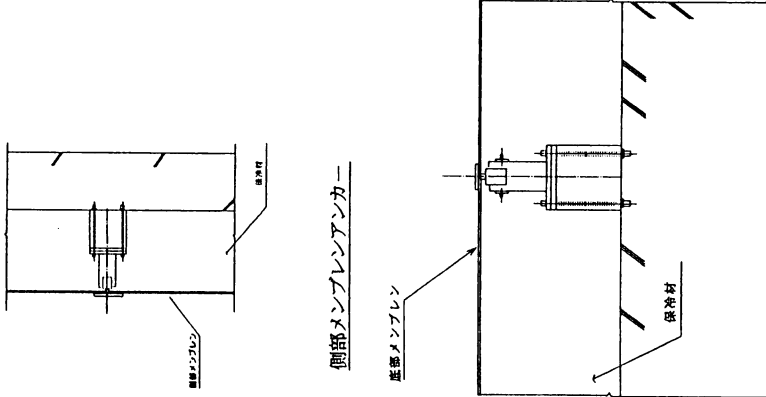
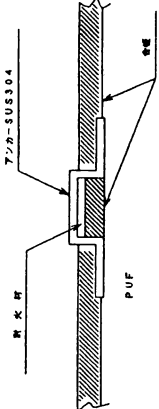
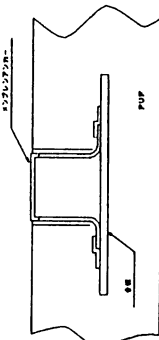
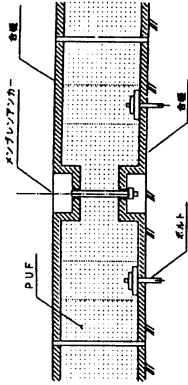
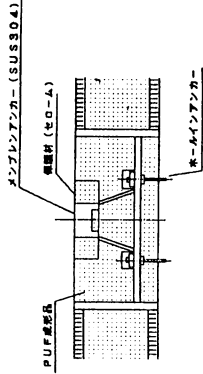
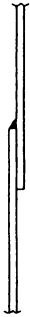
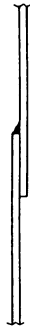
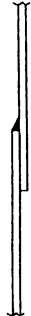
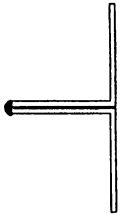
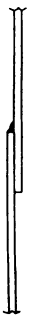
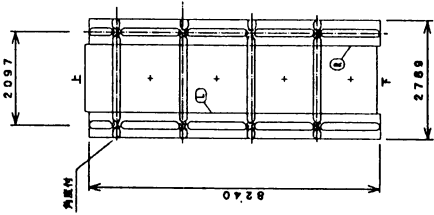
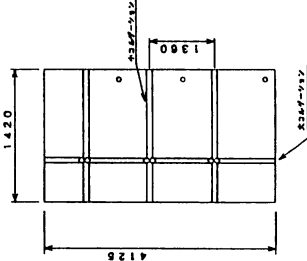
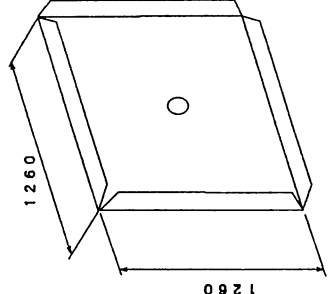
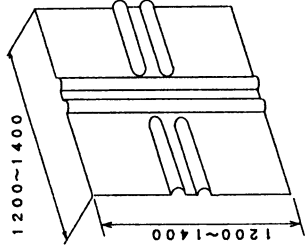
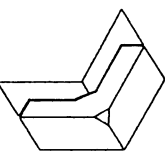
比較検討	平行収縮式メンブレン		旋回収縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
4. アンカー構造		 メンブレンアンカーは断熱材の上面合板に取付 側部・底層メンブレンアンカー	 メンブレンアンカーは断熱材埋込みの合板に取付 メンブレンアンカーは側部のみ	 側 部  底 部
5. マグリップ	可変 (設計条件タンク形状によりマグリップを変更する。)	可変 (設計条件タンク形状によりマグリップを変更する。)	可変 (設計条件タンク形状によりマグリップを変更する。)	可変 (設計条件タンク形状によりマグリップを変更する。)

表 7.4 (3) メンブレン構造の各方式比較表

比較検討 方法	平行収縮式メンブレン		旋回收縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
6. 溶接方法	 片側全厚すみ肉重ね溶接	 片側全厚すみ肉重ね溶接	 片側全厚すみ肉重ね溶接  へり溶接	 片側全厚すみ肉重ね溶接
7. 溶接部検査	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト
8. その他 代表的な バリエーション	 側部メンブレンパネルの例	 側部一般部パネル	 側壁一般部パネル	 一般部  コーナーパネル

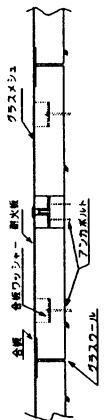
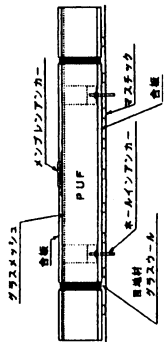
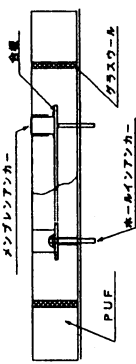
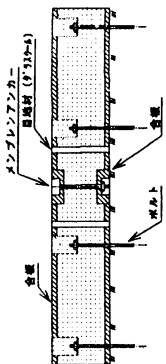
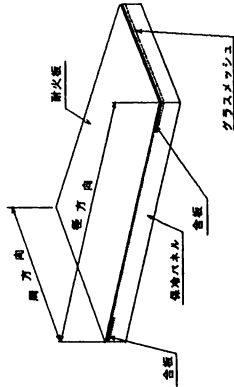
パネル型式 メーカ	平行収縮式メンブレン		旋回收縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
比較検討				
1. 保冷材の構造と 使用材料 (1) 一般部 (a) 側部保冷材				
(b) 底部保冷材		側壁と同一構成パネルを使用		

表 7.5 (2) 保冷構造の各方式比較表

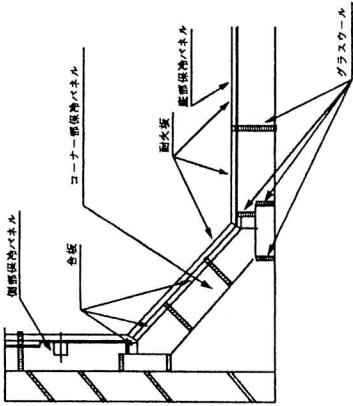
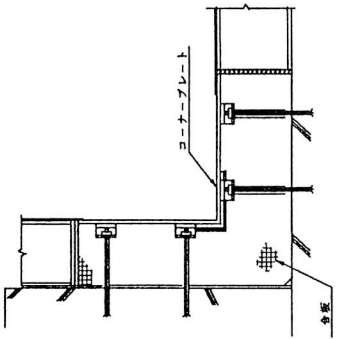
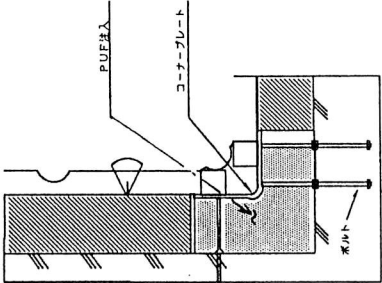
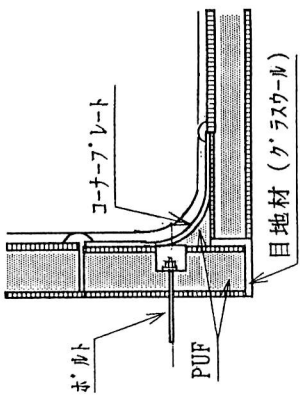
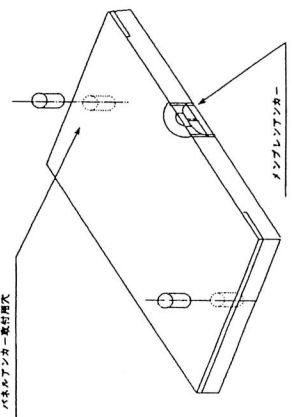
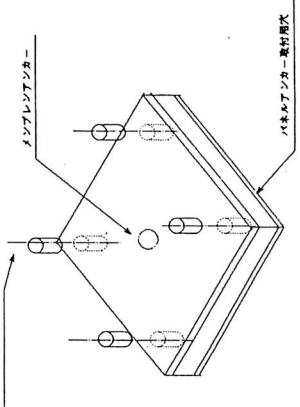
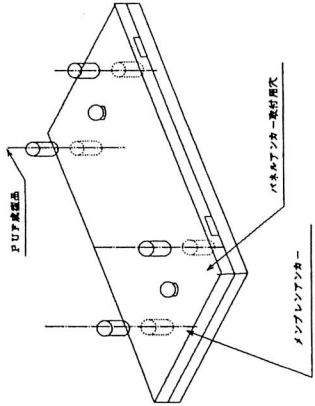
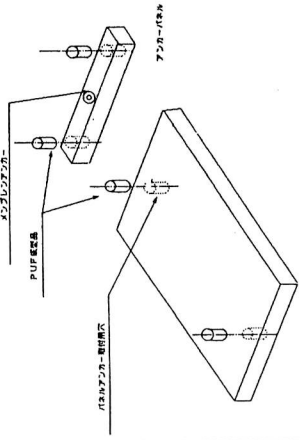
比較項目	平行収縮式メンブレン		巡回収縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
(2) コーナー部				
(3) その他 代表パネルの組織				

表 7.5 (3) 保冷構造の各方式比較表

比較項目	平行収縮式メンブレン		旋回收縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
2.メンブレンとの位置関係				

(3) メンブレンの設計条件の整理

LNG岩盤地下タンクにおけるメンブレンについてその基本的な設計条件を整理すると以下になる。

1) 要求事項

メンブレンはそれに作用するガス圧および液圧を保冷材を介して岩盤に伝える金属製薄膜であるため耐圧部としての機能は要求されないが、貯槽内液およびガスに対して液密性および気密性を有するよう設計すること。

2) 基本的設計方針

メンブレンは継手部も含み想定される荷重に対して安定した変形挙動を示し、また想定される繰り返し荷重に対して十分な疲労強度を有すること。

- ① 不安定崩壊を起こさないこと
- ② 進行性の変形が生じないこと
- ③ 十分な疲労強度を有すること
- ④ 静的荷重に対して全体として安定した形状を保つこと

3) 設計条件

メンブレンの設計には下記に示す静的荷重および繰り返し荷重を考慮すること。

① 静的荷重

静的荷重の種類およびその大きさは、表 7.6によること。

表 7.6 静的荷重の種類およびその大きさ

静的荷重の種類	静 的 荷 重 の 大 き さ
温 度 荷 重	190℃の温度差によって生じる荷重
全 圧 力	最高液位状態において各部に生じる液圧と最高使用圧力の和
機 械 的 荷 重	自重または懸垂装置等の外力により生じる荷重 (温度変化に起因する荷重は除く)

② 繰り返し荷重

繰り返し荷重の種類、変動幅および繰り返し回数は表 7.7によること。

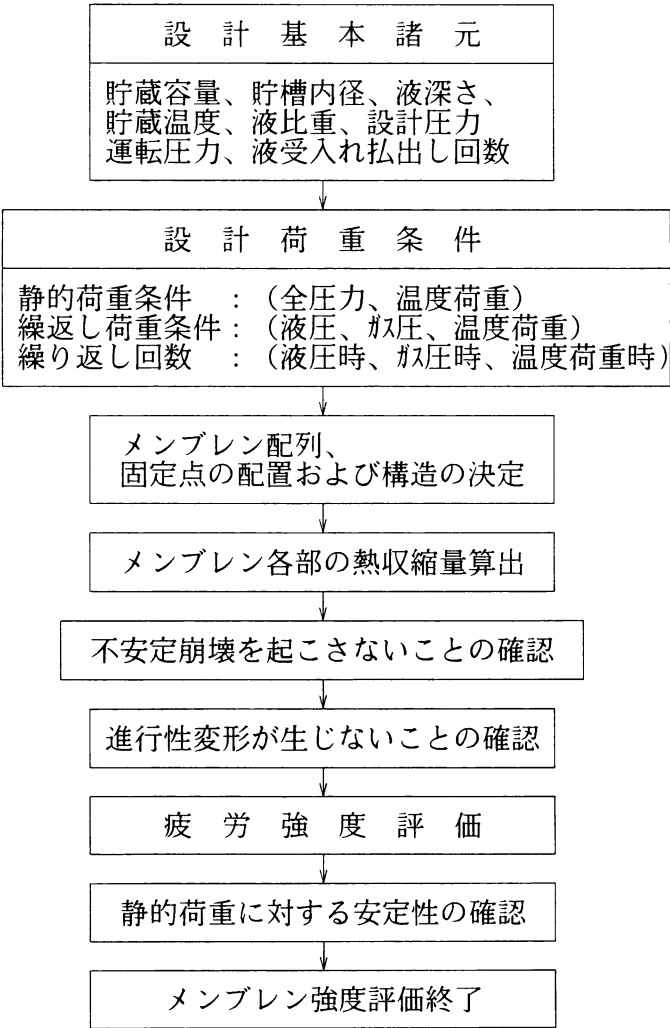
表 7.7 繰り返し荷重の種類、変動幅および繰り返し回数

繰り返し荷重の種類	変 動 幅	対応するひずみ範囲	繰り返し回数の記号	繰り返し回数
液 圧	最高液位状態において各部に生じる液圧	$\triangle \varepsilon_1$	n_1 回	設計寿命および貯槽の使用条件により適切に定めること
ガ ス 圧	最高使用圧力	$\triangle \varepsilon_2$	n_2 回	
温度荷重 ケース 1	−162℃と最低液位の時に定まるメンブレン温度との温度差によって生じる温度荷重幅	$\triangle \varepsilon_3$	n_3 回 ^{注1)}	
温度荷重 ケース 2	190℃の温度変化によって生じる温度荷重幅	$\triangle \varepsilon_4$	n_4 回	

注1) $n_1 = n_3$ とする。

(4) 構造ならびに強度設計

メンブレンの構造ならびに強度についての一般的な確認フローを以下に示す。



参考文献（第7章）

- 1) LNG便覧 日本LNG会議（社）日本ガス協会内）編
- 2) LNG地下式貯槽指針 液化天然ガス用貯槽保安調査委員会（社）日本ガス協会内）編
- 3) LNG基地建設総合資料 経営開発センター出版部編
- 4) LNG地下式貯槽メーカー技術資料
- 5) LNG地下式貯槽ユーザー技術資料

第8章 ま と め

第8章 ま と め

本年度は次年度への展開を前提として、LNG岩盤貯蔵タンクの実現へ向けての調査研究を行った。調査研究の実施については分科会、ならびに岩盤空洞を中心に検討を行う第1作業部会、タンク設備を中心に検討を行う第2作業部会、全体的なシステムの検討と第1作業部会、第2作業部会の研究の方向付けや橋渡しをする全体作業部会から構成されている。

第1作業部会ではLNGの現状と今後の動向に関する調査、既存の低温液化ガス貯蔵タンクの調査、LNG貯蔵システムの研究、LNG岩盤地下タンクの立地に関する検討、岩盤空洞の検討を実施した。LNGの現状と今後の動向に関する調査ではLNGと天然ガスの特徴についての調査を行い、今後の国内の需給見通しに関する動向を調べた。また、既存の低温液化ガス貯蔵タンクの調査では国内のLNGタンク建設の実績、ならびに海外における低温液化ガス岩盤貯蔵タンク設置の実績やLNG岩盤内貯蔵技術確立のための研究動向・研究実績を調査した。次いでLNG岩盤地下タンクの立地に関する検討を行い、国内におけるLNG岩盤貯蔵タンクに適した岩石の分布状況、LNG岩盤タンクの社会的ニーズ、岩盤タンク立地・計画のための条件を調査した。さらに、岩盤空洞の検討ではLNG貯蔵時における空洞周辺岩盤の時系列温度変化、空洞内への熱流入量を熱伝導FEM解析により算出し、空洞周辺への温度の影響やBOG発生量算出のための基礎的データを整理した。

第2作業部会ではLNG貯蔵施設の基本システム設計、タンク設備の検討を実施した。LNG貯蔵施設の基本システム設計ではLNG岩盤タンクをLNG火力発電所に利用する場合を取り上げ、貯蔵容量、貯蔵圧力、入熱量、受け払い方法といった貯蔵方法や運転条件を設定し、これをもとに設置深度、タンク仕様、貯蔵システム等の基本システム設計を行った。また、タンク設備の検討では断熱材ならびにメンブレンの調査を行い、LNG岩盤タンクに適した断熱材の選定ならびにメンブレン仕様を検討した。

全体作業部会ではLNG貯蔵システムの調査を行い、LNG岩盤地下タンク検討のための液密構造、断熱構造、ヒーティングシステム、空洞形状といった基本貯蔵形式を設定した。また、第1作業部会と第2作業部会の研究成果の取り纏めを行い、両部会の検討に必要な情報の提供、検討内容の方向付けを行った。

これら平成4年度における各作業部会の調査研究の結果、地下100m程度に直径15m～20mの円形状のトンネル空洞を設け、その中にLNGを貯蔵するLNG岩盤貯蔵タンクが有望であることがわかった。この岩盤地下タンクは環境保全、土地の有効利用などの観点から有利であるとともに、岩盤の支持力を利用した圧力貯蔵により、夜間に発生するBOGを昼間のピーク時の発電に利用するといった省エネ化にも有利であることが確認された。この貯蔵システムでは、液密性確保のためのメンブレン設置とBOG制御のための断熱材の敷設が安全性・経済性の向上のために重要な役割を果たすとともに、これらの適用は既存の地中タンクにおける現状技術の延長上で対処できることが明らかになった。

また、本年度はわが国の海岸線に沿った岩石の分布調査が行われ、海岸付近にLNG岩

盤タンク立地の可能な軟岩あるいは中硬岩以上の岩盤が分布することが確認された。さらに、海外におけるLNG岩盤タンクの実績調査や岩盤内低温貯蔵の研究動向の調査を行い、実現に向けての問題点を検討した。

平成5年度は、この成果に基づきさらに研究を推し進めるが、第1作業部会ではさらに空洞の力学的安定性に関する検討、岩盤タンクの概念設計、施工方法の検討、建設コストの検討等を実施し、岩盤空洞といった視点からLNG岩盤タンク建設の可能性を調査する。また、第2作業部会ではタンク設備を中心に調査を行うが、断熱材・メンブレンの安全性の検討、トンネル状空洞に適した断熱材・メンブレンの施工方法の調査、設備コストの算出等を実施し、タンク設備の面からLNG岩盤貯蔵タンクの実現性を探る。さらに、全体作業部会では第1作業部会と第2作業部会の研究成果を受けて、LNG岩盤タンクによるLNG受入基地システムの検討ならびに受入基地全体のレイアウトを作成するとともに、LNG岩盤タンクの経済性についての検討を加える。

この他に、岩盤タンク構造、断熱材・メンブレン等に関する課題の抽出を行い、LNG岩盤タンクの実現に向けて、今後実施すべき検討内容の整備、実証実験等の研究計画を立案する。

