

LNG岩盤貯蔵システムに
関する調査研究
報告書

平成6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5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岩盤地下貯蔵の技術的可能性に関する検討を行いました。なお、平成5年度においては、空洞の力学的安定性に関する検討結果および平成4年度の調査研究内容などを踏まえてタンク形式の基本条件を設定し、LNG貯蔵施設の試設計を行いました。さらには、今後の検討課題の抽出と実証実験計画の立案も併せて行いました。

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、調査研究を実施しました。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。

この事業に御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6年3月

財団法人 エンジニアリング振興協会
会 長 斎 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
〃	山 富 二 郎	東京大学 工学部資源開発工学科 助教授
〃	高 島 賢 二	通商産業省 資源エネルギー庁 公益事業部 発電課 技術班長
〃	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
〃	三 谷 喬 晨	大阪ガス(株) 技術部 副部長
〃	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
〃	菊 地 慎 二	日本国土開発(株) エンジニアリング本部 技術開発部 副部長
〃	西 田 昌 利	三井鉱山エンジニアリング(株) 大深度地下開発部 部長

委 員	宮 坂 潤	三菱重工業(株) 横浜製作所 鉄構技術部 L N G担当課長
〃	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	堀 尾 容 康	通商産業省 環境立地局 産業施設課 課長補佐
〃	尾 崎 孝 良	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 係長

「L N G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 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
”	西 嶋 國 昭	大成建設(株) エネルギー部 エネルギー施設計画室 室長
”	赤 井 弘 央	大成建設(株) エネルギー部 エネルギー施設計画室 副課長
”	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 係長

「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 エネルギー施設計画室 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	森 清 就	(株)熊谷組 エンジニアリング部 技術第1課長
〃	林 憲 正	(株)熊谷組 エンジニアリング部 技術第1課 係長
〃	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) 技術開発センター 土木生産技術開発部
〃	梅 寺 誠	住友金属鉱山(株) 資源事業部 技術部
〃	Ajai Sulekh	大成建設(株) 土木設計第一部 第二設計室
〃	赤 井 弘 央	大成建設(株) エネルギー部 エネルギー施設計画室 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
〃	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
〃	菊 地 慎 二	日本国土開発(株) エンジニアリング本部 技術開発部 副部長
〃	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 係長

「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 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 LNG担当課長
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 係長

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正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、技術課題などについて幅広く調査研究を行い、長期的な視野に立った開発構想が必要となる。このような状況のもとで、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などが問われるようになってきた。また一方、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も提案されてきている。このように、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などの液化燃料の貯蔵についても、土地の有効利用、安全性、景観保全などの観点から、岩盤内への貯蔵が注目を集めるようになってきた。石油の岩盤内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の岩盤内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の地下貯蔵に関しては地中タンクが約20年前から実用段階にあり、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を岩盤空洞内に貯蔵するシステムについての調査研究を行った。その結果、十分に実現化の可能性があることが分かったが、2年間という限られた期間では実現に向けての課題を全てを解決するには至らなかったと思う。そのために、実現化に向けては今後もさらに調査研究を推し進めていく必要がある。

最後に、本調査研究を進めるに当たっては、分科会、各作業部会の活動などを通じて、多方面にわたる多くの人々の協力を頂いた。また、国内調査においても関係各位に実に丁寧な対応をして頂いた。本報告書をまとめるに当たり、心から感謝の意を表するとともに、今後ともさらなる御協力をお願いする次第である。

平成6年3月

LNG岩盤貯蔵システムに関する調査研究
分科会会長 山口 梅太郎

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	LNG貯蔵タンクの概要	9
2.2	国内における事例調査	10
2.3	海外における事例調査	17
2.4	関連法規の調査	29
第3章	LNG岩盤貯蔵システムの概要	47
3.1	LNG岩盤貯蔵タンク	47
3.2	岩盤貯蔵タンクの型式検討	49
3.3	基本形式の選定	51
第4章	LNG岩盤貯蔵タンクの立地に関する検討	53
4.1	岩盤分布状況	53
4.2	社会的ニーズ	68
4.3	立地・計画条件	70
第5章	LNG岩盤貯蔵施設の基本システム設計	71
5.1	検討条件	71
5.2	基本システムの概要	72
5.3	LNG岩盤貯蔵システムの基本条件	73
5.4	貯蔵規模	73
5.5	貯蔵条件	74
5.6	BOG圧縮機の運転条件	75
第6章	岩盤空洞の検討	77
6.1	解析プログラムの調査	77
6.2	熱伝導解析	81
6.3	熱応力解析	107

第7章	保冷材・メンブレンの検討	137
7.1	保冷材の検討	137
7.2	メンブレンの検討	146
第8章	LNG岩盤貯蔵施設の試設計	163
8.1	基本設計条件	163
8.2	施設計画	178
8.3	施工計画	197
8.4	建設費および工期	205
第9章	今後の課題と実証実験の提案	207
9.1	今後の課題	207
9.2	実証実験の提案	208
第10章	まとめ	215

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R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P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、さらに除塵、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)	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。

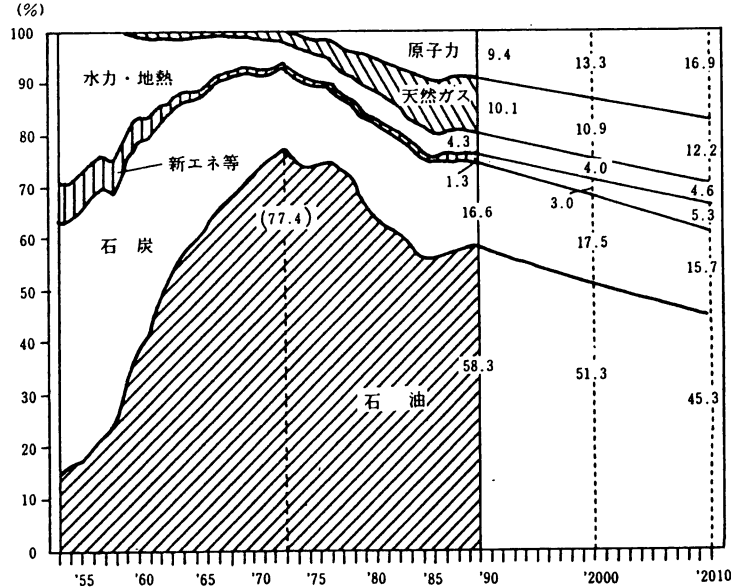
3) セキュリティー

- ・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	1988 (実績)	2000 (見通し)	2010 (見通し)	備 考
需 要			3,280	4,600	5,700	1990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	
	LNG	既契約分	3,120	4,300	5,000	契約延長見込み分を含む
		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/㎡) (百万㎡)
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、1992 年 5 月に「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、クリーン燃料への指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ものとみられる。

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 LNG貯蔵タンクの概要

天然ガスは常圧（1気圧）で -162°C 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、内圧が少ないために大規模なタンクの設置が容易で、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貯蔵タンクはタンク本体と設置地盤の位置関係により、地上タンク、地中タンク、半地中タンク、地下タンクの4つに大別される（図2.1参照）。これら各々のタンクの特徴を以下に示し、次に、国内外の低温液化ガス貯蔵タンクの建設実績を調査した結果を示す。

(1) LNG地上タンク

LNG地上タンクはタンク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。構造特性としてはタンク本体が内槽・外槽の二重殻から構成され、内槽は -162°C の極低温に耐えられ、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・地震荷重などに耐えられる構造になっており、内槽と外槽との間には保冷材が充填されている。この地上タンクは現在、世界で最も数多く建設されており、代表的なタンク方式として金属二重殻円筒タンクやPC二重殻円筒タンクなどがあげられる。

(2) LNG地中タンク

LNG地中タンクはタンク本体の側壁部、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である。このタンクは地上タンクと比べて周囲の景観を損なうことが少なく、また万一のタンク破損時にも液が地上に流出しないという特徴を持っている。構造的な特徴として躯体（側壁・底盤）が鉄筋コンクリートで造られ、周囲からの土圧・水圧など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、主としてタンク上方の気密を確保する役目を果たす。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保冷材が用いられている。さらに、タンク周辺の地盤の凍結防止のためにタンク側壁部・底盤部にヒーティング設備を設けることが一般的になっている。なお、この形式のタンクは地中に設置されるために、タンク容量、構造仕様、施工方法などが設置場所の地盤条件によって大きく左右される。

(3) LNG半地中タンク

LNG半地中タンクはタンク本体が地上部分・地中部分の両方に位置するタイプで、地上タンクと地中タンクの間隔的タンクである。構造的な特性は地中タンクと

ほぼ同じで、一般的に躯体（側壁・底盤）は鉄筋コンクリートで造られ、土圧・水圧など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、主としてタンク上方の気密性を確保する役目を果たす。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保冷材が用いられている。また、タンク周辺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がある。この形式のタンクは一部が地中に設置されているため、タンク容量、構造仕様、施工方法などが設置場所の地盤条件によって影響を受ける。なお、現在までに国内では半地中タンクが施工された実績はない。

(4) LNG地下タンク

LNG地下タンクはタンク本体が完全に埋没するタイプである。このタンクは地中タンクと比べてさらに景観上有利で、また万一のタンクの破損などにも液が地上に流出せず、地上の有効利用が図れるという特徴を持つ。構造的な特徴としては、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保冷材が用いられる。この地下タンクは地下に設置されるために、タンク容量、構造仕様、施工方法、建設コストなどが設置場所の地盤条件によって大きく影響を受ける。なお、現在までに国内では地下タンクが施工された実績はない。

2.2 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日本では、海岸線を中心に16ヶ所のLNG受入基地が存在している。図 2.2に国内のLNG受入基地の設置状況を示す。

国内に設置されたLNG貯蔵タンクは地上タンクと地中タンクの2種類であるが、これらのタンクについてその概要を示す。

(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。

1) 構造的特徴

内槽、外槽の二重殻からなり、その間にパーライトなどの保冷材を入れ、周辺地盤からの熱の流入を抑さえる構造になっている。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構造のものと2種類に大別される。

地上式金属二重殻タンクは長期間にわたる建設実績があり、10,000kl以上の地上タンクはほとんどがこの形式である。最近では、タンク本体の構造体にプレストレスコンクリートを採用したPCタンクも建設されるようになってきた。

	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				

図 2.1 LNG貯蔵タンクの比較



図 2.2 国内の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)

基礎形式には高床式と直接式があり、高床式基礎は凍上防止のために通気保冷層を確保する方式、直接式基礎は凍上防止のために底部にヒーターを設置する方式である。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

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

3) 用 途

地上タンクの用途は輸入基地大規模貯蔵用タンクが多く、タンク容量は60,000～80,000klが一般的であるが、最近は100,000～140,000klと大容量化している。

次に金属二重殻地上タンクの構造概略図を図 2.3に示す。また、表 2.1に国内の主要なLNG地上タンクの一覧表を示す。

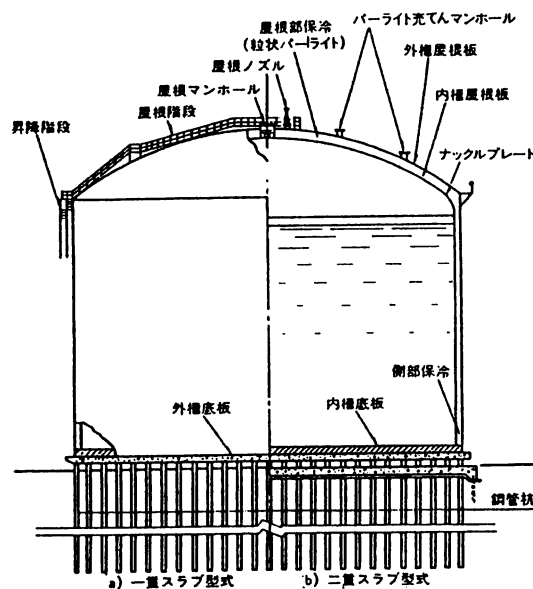


図 2.3 金属二重殻地上タンクの構造概略
(出典：日本LNG会議「LNG便覧」1981年)

表 2.1 国内の主要なLNG地上タンク一覧表

(1994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		
日本海エール・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基地に数多く建設され、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で、側壁の大部分を地盤面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方式で、地盤を掘削してコンクリート製の側壁と底盤を設け、その内側に保冷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) タンクは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) 地下水対策が必要となることが多い。

LNG地中タンクの代表例として、メンブレン式LNG地中タンクの構造概略を図 2.4に示す。また、表 2.2に国内の主要なLNG地中タンクの一覧表を示す。

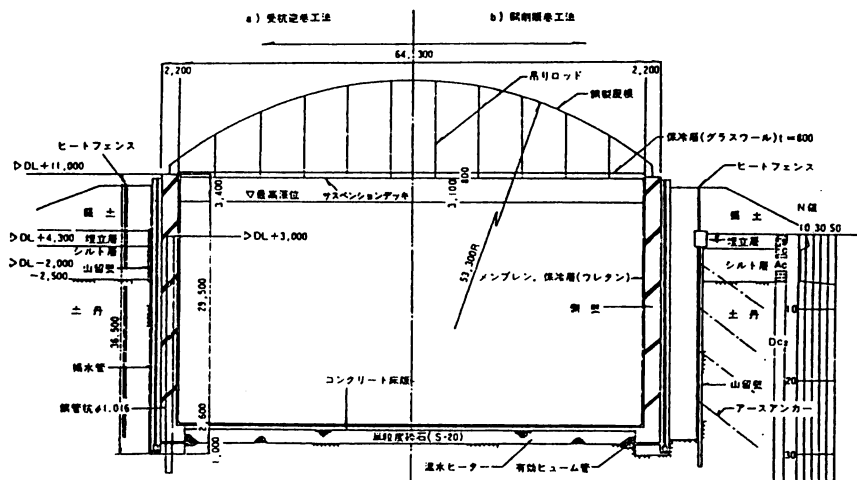


図 2.4 メンブレン式LNG地中タンク

（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

(1994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 (建設中) (建設中)	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
		東京ガス	85,000×2	50.0×43.5	揚水式
		東京ガス	200,000×2	68.0×55.1	揚水式
		東京ガス	60,000×9	60.0×21.3	強度版式
袖ヶ浦基地	1973	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
		東京電力	60,000×3	64.0×18.7	強度版式
		東京電力	90,000×6	57.4×35.0	強度版式
袖ヶ浦隣接基地	1984	東京電力	60,000×9	50.0×30.7	強度版式
東扇島LNGセンタ	(建設中)	東京ガス	200,000×1	72.0×49.2	強度版式
扇島基地	1985	東京電力	90,000×4	64.0×28.2	強度版式
富津基地		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		
清水基地	(建設中)	静岡ガス	80,000×1	58.0×33.4	強度版式
タンク容量小計(kl)			80,000		
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)			4,510,000		

2.3 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年代に建設された低温液化ガス貯蔵タンク、実証プラントにむけて現在原位置試験が行われている研究施設、廃坑を利用した天然ガス貯蔵施設、深部水封式天然ガス貯蔵施設および常温加圧式天然ガス貯蔵施設についての概要を述べる。

(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 ϕ 、深さ50m、容量48,000 m^3 の円筒状堅型LNG地中タンクが建設された。このタンクの断面図を図2.5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る。

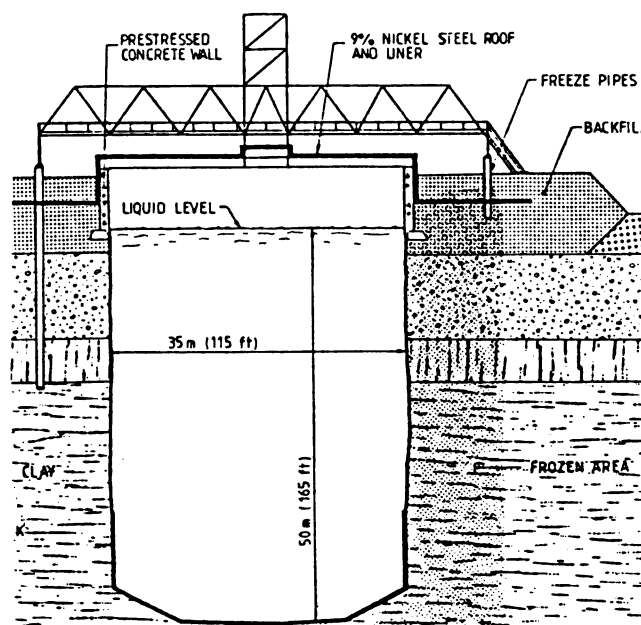


図 2.5 断面図 (Carlstadt)
(出典: Storage of Gases in Rock Caverns)

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35 m, 深さ50mの円筒状堅型LNG地中タンクを建設。無支保。ボイルオフのため, 短期間で運転中止。	赤色片岩 シルト岩 砂 岩
	Lasseeter & Witherspoon(1974) ⁶⁾	Hopkinton, Massachussetts. 1967年直径40m, 深さ50mの円筒状堅型LNG地中タンクを建設。無支保。ボイルオフのため, 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700 mm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, Canvery 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。ボイルオフのため, 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 m ³ 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20m ³ 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m ³ のエチレン地下タンク。ボイルオフ, ガス漏れのため, 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m ³ 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, 高压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年に直径約1.4 m, 高さ約2 m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3 m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, 3×3.5×9 m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℃, 5 MPa)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, 直径3 m, 長さ30mの試験空洞に, 数ヶ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, 応力などの測定を行った。	粘 土

2) Sonatrach, Algeria⁵⁾

1965年に直径37mφ、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覆工型LNG地中タンクである(図2.6)。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、無覆工の状態で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2.7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℃)による注入はその凝固点が高いためうまく

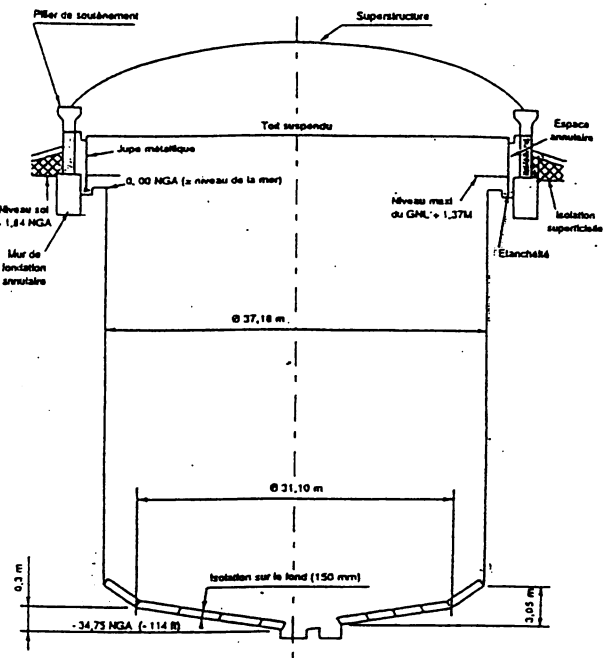


図 2.6 断面図 (Sonatrach)

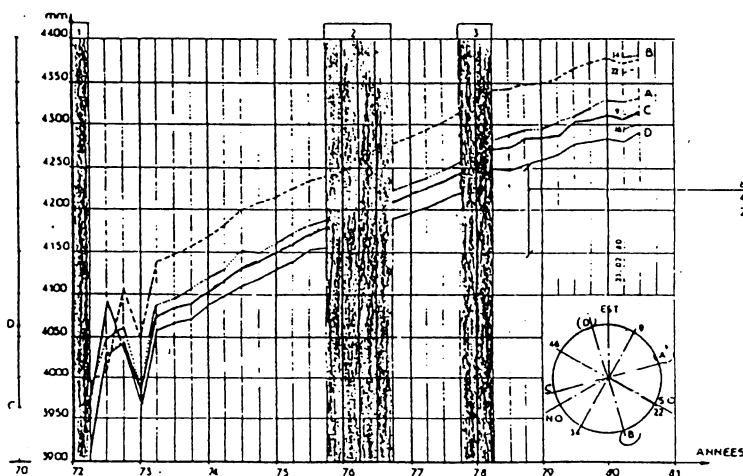


図 2.7 周辺地盤の凍上量 (Sonatrach)

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の長さに及んでいるものの、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 ϕ 、深さ52m、容量69,000m³の円筒状堅型LNG地中タンクが2基建設された(図2.8)。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、無覆工の状態でLNGが貯蔵された。運転は18ヶ月間続けられたが、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。

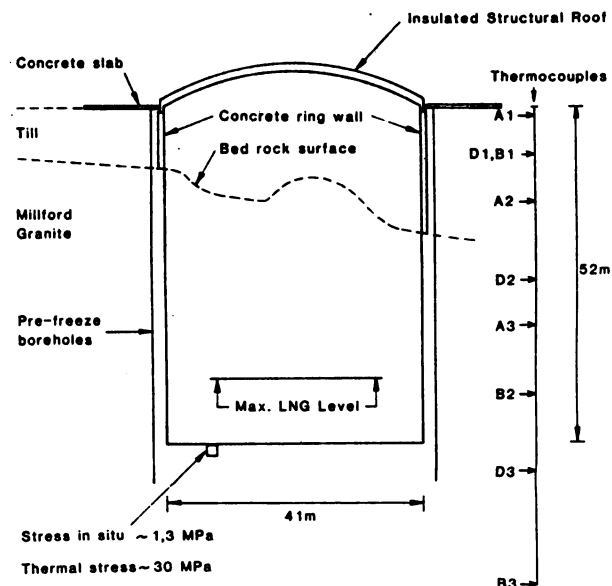


図 2.8 断面図 (Hopkinton)

(出典: Dept. of Civil Eng.,

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覆工のエチレン貯蔵地下タンクが建設され、 -100°C で運転された(図2.9)。

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。エチレンを少量貯蔵タンクに蓄えたが、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わ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。この貯蔵タンク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。

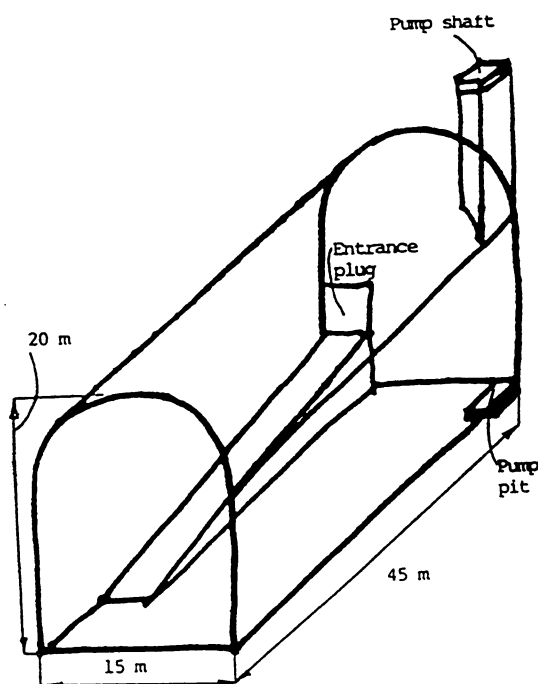


図 2.9 エチレン貯蔵タンク

(Stenungsung)

(出典: Rock Store '77)

5) Canvey Island, U.K⁸⁾

1967年～1969年にかけて直径40mφ、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2.10に示す。周辺地盤からの熱流入量が当初の予想よりもはるかに大きく、大量のボイルオフガスが発生した。また凍結に伴い、地表面が凍上した。

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。

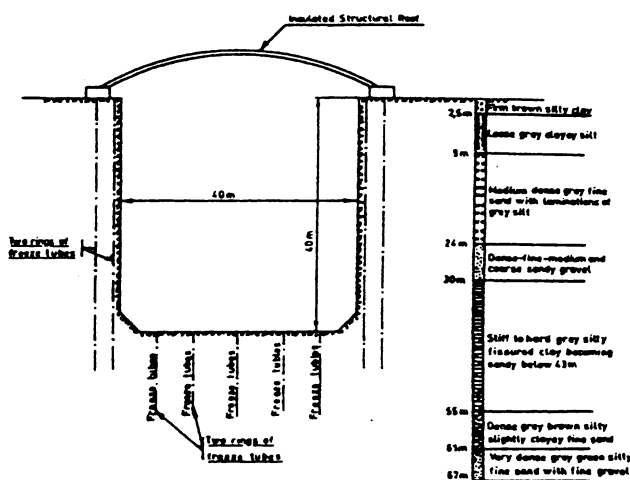


図 2.10 断面図 (Canvey Island)

(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、ロシア、デンマークなどから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の二つの実験空洞を設け、低温貯蔵システムならびに高圧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 2.11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。

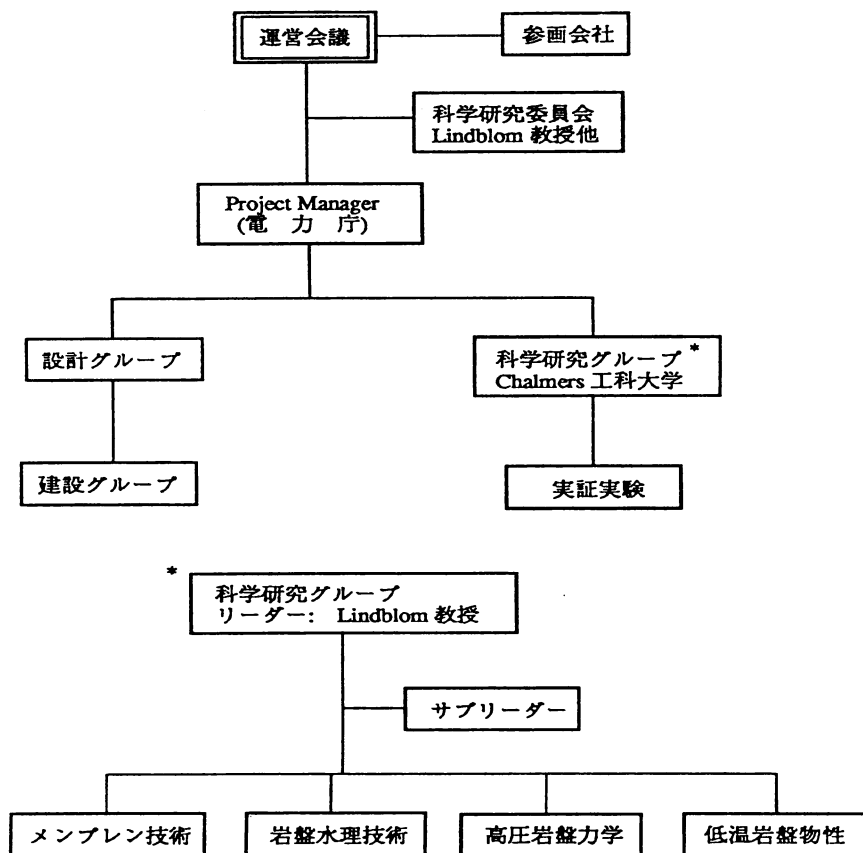


図 2.11 Røda Sten実施組織

1) 実験施設の概要

図 2.12、図 2.13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」に分

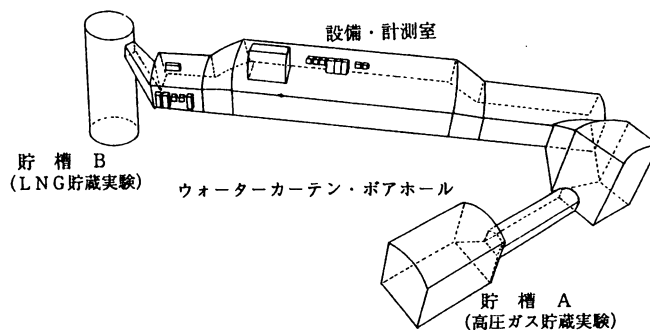


図 2.12 Røda Sten 試験施設の概要図

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 2.14 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覆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。

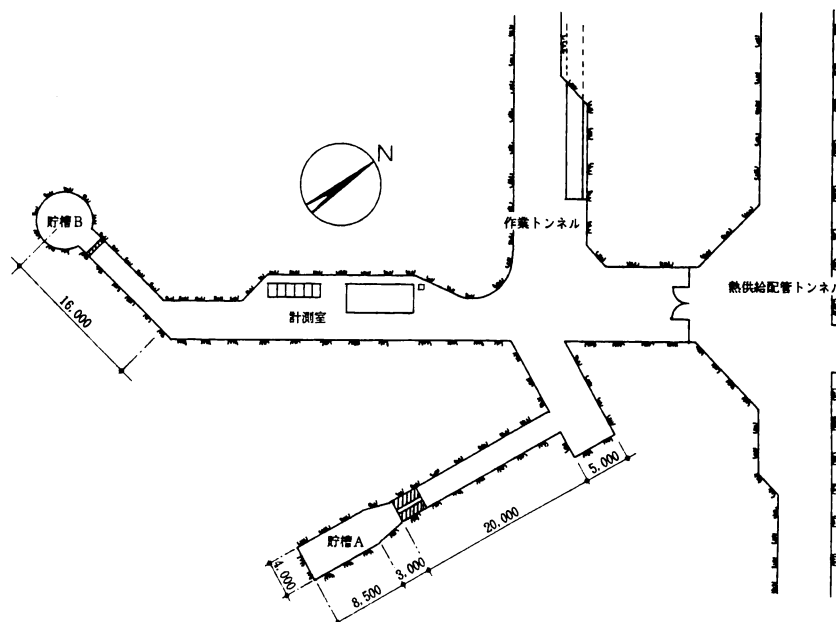


図 2.13 Röda Sten試験施設の平面図

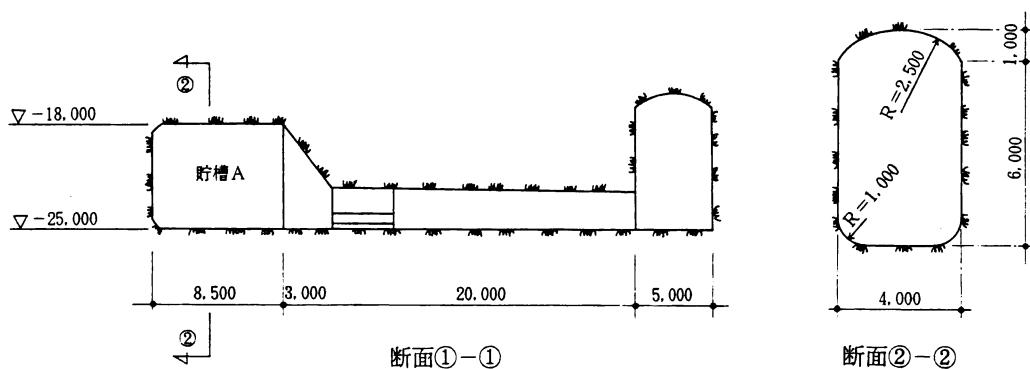


図 2.14 貯槽 A の断面図

3) 貯槽 B

貯槽 B は、直径 7 m ϕ 、高さ 12.5m の円筒形貯槽である（図 2.15）。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 2.16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 において出力40kW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、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。

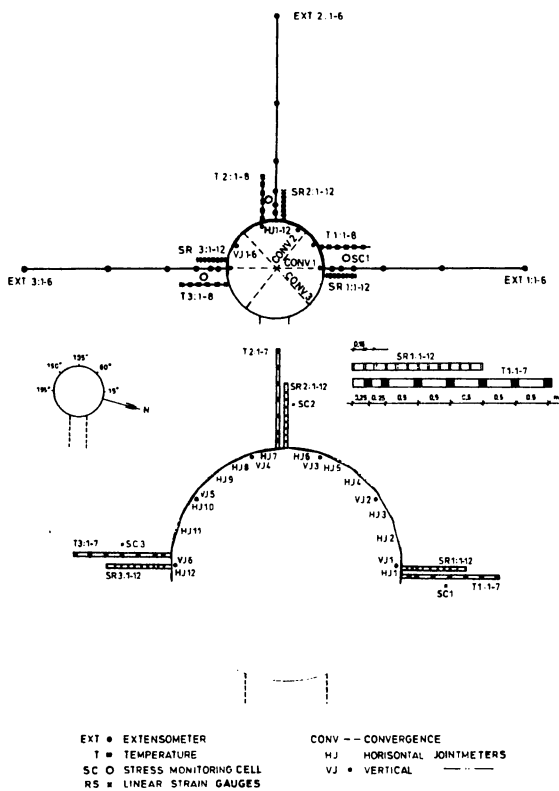


図 2.16 貯蔵 B における計器配置図

(出典: PhD thesis, CTH 1992)

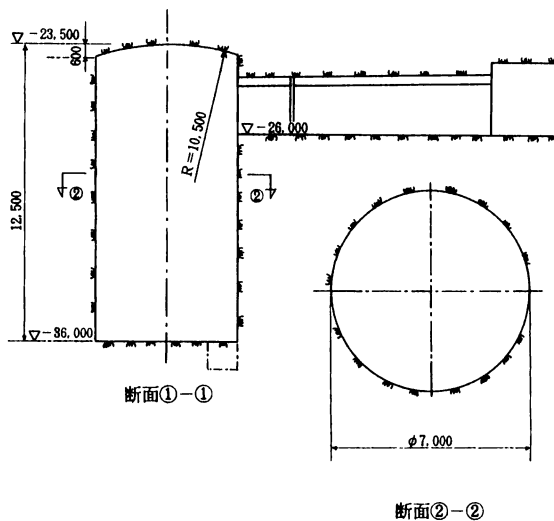


図 2.15 貯槽 B の断面図

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 2.17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0.5mにおける変位を図 2.18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る。

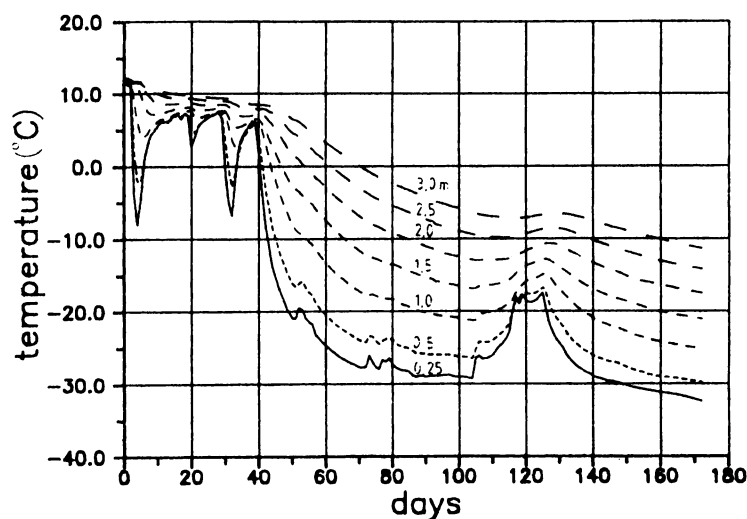


図 2.17 壁面からの深度別温度経時変化

(出典: PhD thesis, CTH 1992)

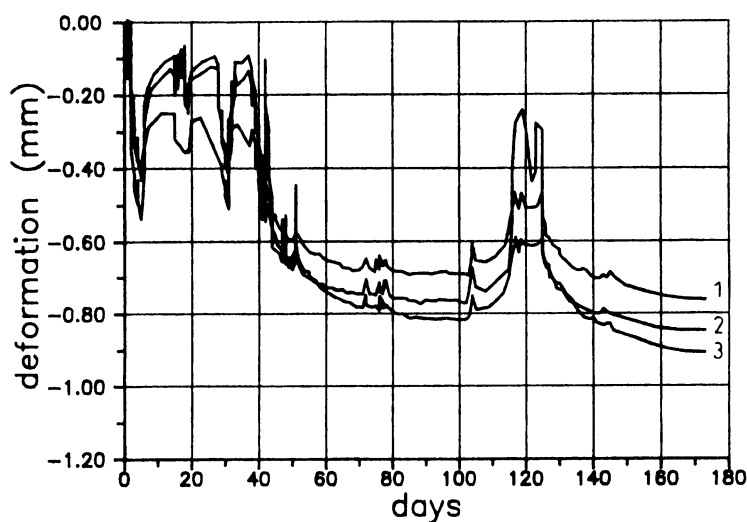


図 2.18 半径方向変位経時変化

(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複数個の長さ 150mm 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た +12°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。

(3) 廃坑を利用した天然ガス貯蔵施設

地下空間を利用した天然ガス貯蔵は、1916年米国のZ O A Rで実用化が始まった。現在では世界各国542ヶ所に約2400億 m^3 の天然ガスが貯蔵されており、年間2兆 m^3 の消費量に対して、40～45日分を供給できる。主な貯槽は枯渇した石油や天然ガス槽（423ヶ所）で、また帯水層（82ヶ所）、岩塩ドーム（33ヶ所）、廃坑（4ヶ所）なども利用されている。ここでは、廃坑を利用した天然ガス貯蔵施設を紹介する。

1) Leyden, U. S. A.

Leyden褐炭鉱山は、デンバーの北西22kmに位置している。この鉱山は1903年から1950年まで操業されていた。図2.19に示すように、地下210～300m、東側の当初の坑道と西側の新坑道の2本の廃坑で構成されている。褐炭層の厚さは2.4～3.0mである。

約600万トンの褐炭が採掘され、420万 m^3 の空間が残されている。

また、210mの静水頭によって、約1.8MPaの安全貯蔵圧力が生じる。

この圧力下では、総貯蔵量は天然ガス74M m^3 である。

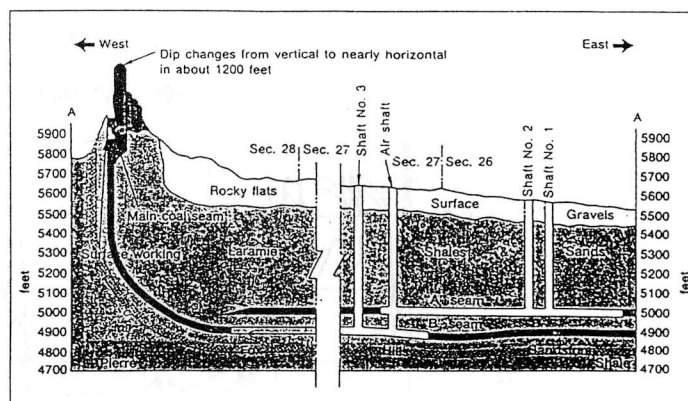


図 2.19 断面図 (Leyden)

(出典: Neste oy report)

2) Anderlues and Péronnes, Belgium

AnderluesとPéronnes鉱山は、ブリュッセルの南南西約50km、地下120～1,000mに位置する。天然ガスの貯蔵に際して、石炭の採掘に利用された立坑や坑道をコンクリートプラグで遮蔽するのが最大の課題であった。Anderlues鉱山は1975年から、また、Péronnes鉱山は1982年から供用されている。総貯蔵量は天然ガス180M m^3 である。

3) Brugggraf-Berndsdorf, Germany

Brugggraf-Berndsdorfカリ鉱山は地下約490mに位置する。天然ガス貯蔵に際して、立坑の遮蔽が問題となった。1986年より供用されている。総貯蔵量は3.6MPaのガス圧で、3.4M m^3 である。

(4) 深部水封式天然ガス貯蔵施設

地下深部における天然ガス貯蔵例はいくつか見られる。廃坑や帯水層が地表面近くにはないが、ガス需要が多い場合に用いられる。

1) Příbram, Czech

Příbram貯蔵層は、プラハから約70km地下950m花崗閃緑岩内に位置する。断面積13m²のトンネルが平行に掘削されつつあり、62万m³の貯蔵量を持つことになる。最大ガス圧は9.5MPaの予定である。

2) New York, U. S. A.

New Yorkでは、今後20年間のガス需要を満たすため、ケネディー空港そばに図2.20に示す高さ22m、幅12mの4本のトンネルを地下750mに建設計画中である。

設計段階は終了して、建設に踏み切ろうとしている。総貯蔵量は20Mm³である。

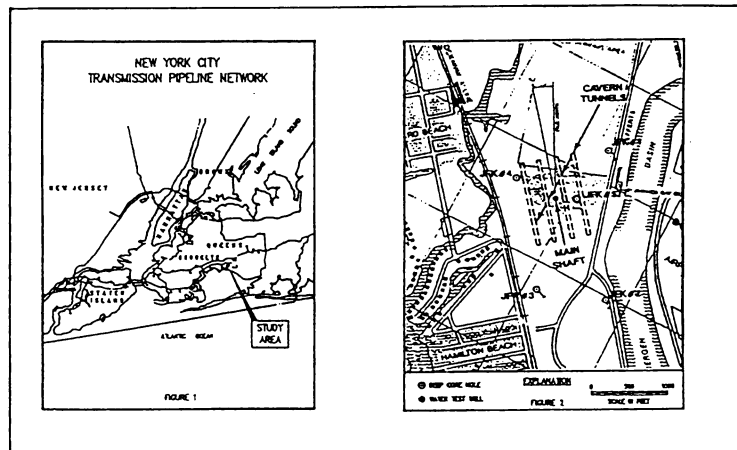


図 2.20 施設位置図及び空洞配置図 (New York)

(出典:Neste oy report)

3) Dannemora, Sweden

1980年代後半、ストックホルムの北約100kmのDannemoraに、天然ガスネットワーク拡張目的で、地下1,000m、高さ30m、幅23mの空洞を4本掘削した(図2.21)。総貯蔵量は300Mm³である。

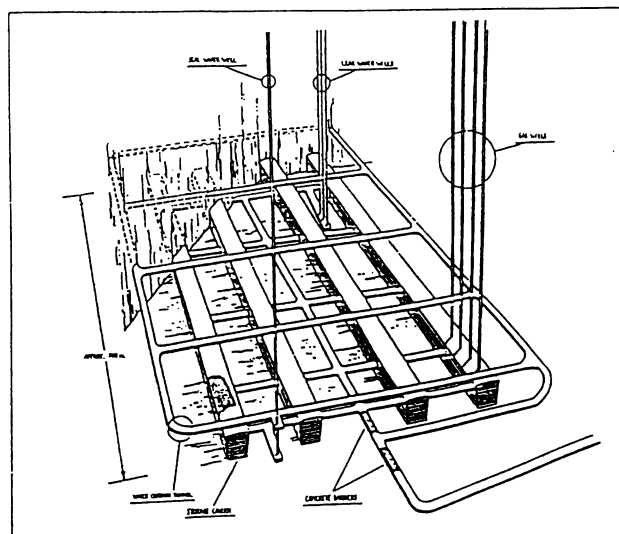


図 2.21 天然ガス貯蔵施設 (Dannemora)

(出典:Neste oy report)

4) Hirvehaara, Finland

ヘルシンキの北約60kmのMänstäläに、図 2.22に示す総貯蔵量100Mm³の貯蔵施設を地下870mに建設計画中である。空洞の高さは32m、幅は20.5mである。

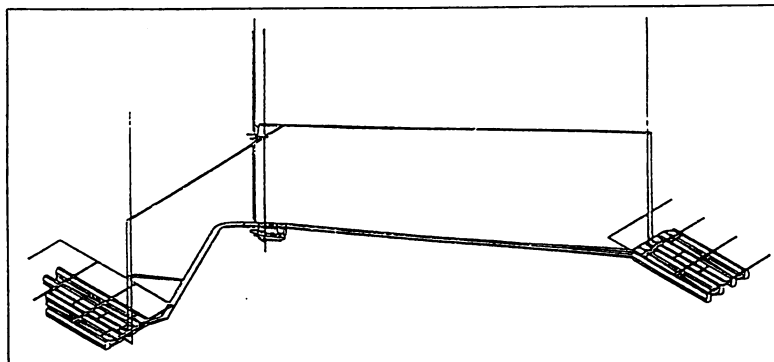


図 2.22 天然ガス貯槽施設 (Hirvehaara)

(出典: Neste oy report)

(5) 常温加圧式天然ガス貯蔵施設

スウェーデンでは、常温加圧式の天然ガス貯蔵施設の建設が計画されている。建設に先だって、原位置試験が行われたり、貯蔵施設の計画立案がなされている。

1) Grändesberg, Sweden

近い将来に直径35~40m φ、高さ70~80mの岩盤内常温加圧式天然ガス貯蔵施設を建設するのに先だって、花崗岩岩盤内に図 2.23に示す直径4.4m φ、高さ9 mの試験空洞を掘削して、3種類のライニング、メンブレンシステムの耐圧試験を行った。コンクリートライニングの内巻き材料として、スチールメンブレン、プラスチック、炭素鋼を考慮した。

前者2材料については、折り曲げ部、溶接部の問題や耐化学的腐食性の問題で気密性が保たれないと判断された。炭素鋼については水圧および空気圧による繰り返し試験を行い、19.5MPaまで保証できることを確認した。将来、空洞内の温度を下げることで、さらに貯蔵能率を高める可能性が示唆されている。

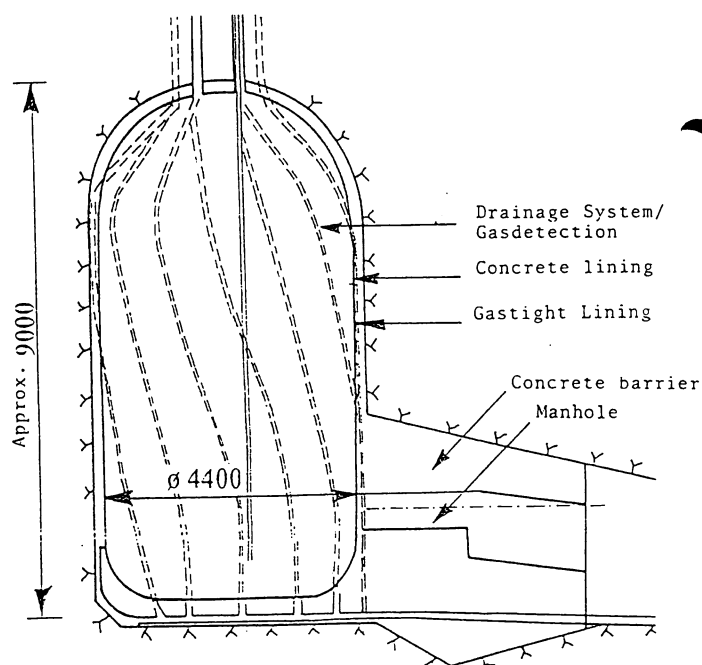


図 2.23 断面図 (Grändesberg)

(出典: Neste oy report)

2) Halland, Sweden

スウェーデン西海岸Hallandに、図 2.24に示す直径36～41m φ、高さ55m～85mの縦型円筒形貯蔵システムを建設計画中である。総貯蔵量40Mm³以上を目指している。

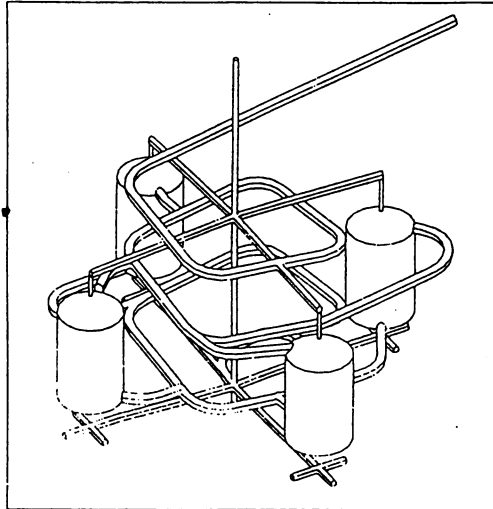


図 2.24 天然ガス貯蔵施設 (Halland)

(出典 : Neste oy report)

2.4 関係法規の調査

国内でLNG基地を建設する場合、その立地条件、業種、取扱物質、公害防止等の観点から、一般に以下の法規が適用される。

① 立地条件で適用されるもの

石油コンビナート等災害防止法、港湾法、その他

② 業種で適用されるもの

高圧ガス取締法、電気事業法、ガス事業法、その他

③ 取扱物質

高圧ガス取締法、消防法、労働安全衛生法、その他

④ 公害防止関連

水質汚濁防止法、大気汚染防止法、騒音規制法、その他

⑤ その他（各設備、機器類に適用）

高圧ガス取締法、電気事業法、ガス事業法、労働安全衛生法、消防法等

しかしながら、現状では上記の法規は現存するLNG地上タンクおよびLNG地中タンク（通常地下タンクと呼んでいるが、岩盤貯蔵タンクと区別する意味で地中タンクと呼ぶ）を対象としてその配置構造等を規定しているだけで、今回検討対象としているLNG岩盤貯蔵タンクの特異点については、別途岩盤地下特性を考慮した規定が構築されるものと思われる。この岩盤貯蔵タンクの特異点については、先行しているLPG岩盤貯蔵タンクおよび石油岩盤貯蔵タンクの適用法規が参考となる。

従って、ここでは地上タンクおよび地下タンクの適用法規および岩盤貯蔵タンクとし

て先行しているLPG岩盤貯蔵タンクおよび石油岩盤貯蔵タンクの適用法規の中から、LNG岩盤貯蔵タンクの配置、構造などを決める上で参考となると思われる法規を調査し、LNG岩盤貯蔵タンクの特性からの考慮点を記述するものとする。

(1) LNGタンクの配置、構造を規定する法規

LNGタンクの配置、構造を規定する法規としては、高圧ガス取締法、石油コンビナート等災害防止法などがある。高圧ガス取締法、石油コンビナート等災害防止法の概要は下記の通りである。ただし、基地の事業者がガス会社の場合にはガス事業法が、また電力会社の場合には電気事業法が高圧ガス取締法に代わって適用されるが、内容は高圧ガス取締法に準じている。

表 2.4 高圧ガス取締法、石油コンビナート等災害防止法の概要

	高圧ガス取締法*	石油コンビナート等災害防止法
概 要	高圧ガス設備に関する保安についての規定 設備の位置、構造および製造方法の技術上の基準	対象施設の配置、面積、特定通路、屋外給水栓および非常通報設備等の基準
配 置	タンク間距離、防液堤、保安距離等の規定	特定通路、防災設備の配置等の規定
保安距離	設備と保安物件との距離、設備と敷地境界の距離、設備間距離等規定	設備と防災設備との距離等規定
技術基準	使用材質、設備構造の基準、安全基準（安全弁など）等の技術基準規定	保有すべき防災設備の数量、能力等規定

*一般高圧ガス保安規則、コンビナート等保安規則および省令補完基準を含む

LNGタンクの配置、保安距離、技術基準を規定している高圧ガス取締法、電気事業法およびガス事業法は、対象タンクが地上タンクおよび地中タンクであり、岩盤地下タンクについて規定しているものはない。

地上タンクおよび地中タンクについては指針としてそれぞれ次の指針がある。

表 2.5 地上タンクおよび地中タンクの指針

	該 当 指 針	内 容
地 上 タ ン ク	LNG地上式貯槽指針 （資公部第427号通達 昭和56年12月15日）	LNG地上式貯槽の計画、建設、維持管理、の技術指針および保安対策指針
地 中 タ ン ク （地下タンク）	LNG地下式貯槽指針 （資公部第427号通達 昭和56年12月15日）	LNG地下式貯槽の計画、建設、維持管理、の技術指針および保安対策指針

(2) L N G岩盤貯蔵タンクの関連法規

先に述べたように、高圧ガス取締法などは対象タンクが地上タンク、地中タンクであり、岩盤貯蔵タンクを規定しているものは現状ではない。

従って、ここでは高圧ガス取締法関連法規および関連指針と岩盤貯蔵タンクとして先行している石油およびL P G岩盤貯蔵タンクの関連法規などの中からL N G岩盤貯蔵タンクの配置、構造を検討する上で参考となると考えられる法規を調査し、L N G岩盤貯蔵タンクの特性からの考慮点を記述する。

なお、今回計画しているL N G岩盤貯蔵タンクがその液密・気密構造をメンブレンに依存しているのに対し、先行する石油およびL P G岩盤貯蔵タンクはその液密・気密構造が密封式であり、本質的に異なるものである。

1) L N G岩盤貯蔵タンクの配置に関する法規

① タンクと保安物件、敷地境界との距離

現在、地上タンクおよび地中タンクと保安物件、敷地境界との距離は高圧ガス取締法により規定されている。同法の中ではタンク外面（地中タンクの場合はタンク屋根の胴板）を起点とし、起点から保安物件、敷地境界まで貯蔵能力（貯蔵能力の平方根）に応じた距離をとるよう規定されている。

なお、事業内容が電気事業の場合は電気事業法が、ガス事業の場合はガス事業法が高圧ガス取締法に代わって適用されるが、内容は高圧ガス取締法に準じている。

一方、岩盤貯蔵タンクと保安物件との距離については、L N G岩盤貯蔵タンクについて規定しているものはなく、同じ高圧ガスであるL P Gの岩盤貯蔵（ただし低温ではなく、高圧貯蔵）について、“小規模実験プラント基準（昭和63年2月、高圧ガス保安協会）”があるだけである。この小規模基準では起点を岩盤貯蔵タンク本体ではなく、本体と地上とをつなぐ配管立坑坑口内壁面としている。また、距離については小規模実験プラントの適用法規がコンビ則でなく液石則であることから、液石則に準じた保安距離を規定している。

従って、L N G岩盤貯蔵タンクでも、その岩盤特性から起点はタンク本体ではなく、配管立坑坑口とするのが妥当と考えられる。また、距離は岩盤貯蔵タンクの特性からその貯蔵能力に応じて規定するのではなく、貯蔵能力によらない別の方法によって規定するのが妥当と考えられる。

なお、L P G小規模実験プラントに引き続いて行う予定のL P G岩盤貯蔵（高圧貯蔵）の大規模基地については、現在高圧ガス保安協会一般基準を策定するべく作業中であり、平成6年度末には大規模タンクに適用する基準が策定される予定である。

② タンク相互間の距離

現在、地上タンクまたは地中タンク相互間の距離は高圧ガス取締法により規定されており、タンク外面から規定の距離をとるよう規定されている。

一方、岩盤貯蔵タンク相互間の距離については、L N G岩盤貯蔵タンクにつ

いて規定しているものではなく、石油の岩盤貯蔵（常温貯蔵）に関する基準“屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準（消防危第39号、昭和62年5月）”ではタンクの幾何寸法から決まる距離に岩盤の緩み域を考慮した距離を確保するように規定している。

また、同じ高圧ガスのLPGの岩盤貯蔵（ただし低温ではなく、高圧貯蔵）については、前述の小規模実験プラント基準があるが、実験プラントは単設空洞であるためタンク間距離は規定していない。LPG岩盤貯蔵（高圧貯蔵）の大規模基地については、先に述べたように現在高圧ガス保安技術協会一般基準を策定するべく作業中である。

③ タンクの設置深度

石油およびLPGの岩盤貯蔵タンクでは、タンクの設置深度がそれぞれ前述の岩盤貯蔵タンクに係わる屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準、小規模実験プラント基準で規定されているが、これはいずれも水封構造を確保するための深さを規定しているものであり、LNG岩盤貯蔵タンクの場合には別途凍結ゾーンの影響などを考慮して設置深度を決める必要がある。

2) LNG岩盤貯蔵タンクの構造に関する法規

LNG岩盤貯蔵タンクの構造は、荷重を受け持つ岩盤部と液密・気密を受けもつメンブレンからなる。この内、岩盤部の構造は先に述べた岩盤貯蔵タンクに係わる屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準、小規模実験プラント基準が参考となる。

一方、液密・気密構造に関しては、同基準よりLNG地下式貯槽指針のほうが今回検討しているLNG岩盤貯蔵タンクとその構造上の類似点が多く、参考となる点が多い。

3) その他

その他、LNG岩盤貯蔵タンクの設置に関し、既得権との調整が必要となる可能性があり、調整が必要なものとして鉱業法などがあげられる。

L N G 地下式貯槽指針

昭和 56 年 12 月

2. レイアウト

2.1 一般	9
2.2 離隔距離	9
2.2.1 特定事業所の離隔距離	9
2.2.2 特定事業所以外の事業所の離隔距離	11
2.3 設備間距離	11
2.3.1 LNG地下式貯槽相互間の距離	11
2.3.2 LNG地下式貯槽と他の設備との距離	11
2.4 保安用通路及び保安用道路	12

2.1 一般

LNG地下式貯槽のレイアウトにあたって、貯槽は事業所の境界線及び他の設備との間に保安上必要な距離を確保すること。^{*(1)}

〔解説〕

*(1) LNG地下式貯槽は低圧の液化ガス用貯槽で、かつ貯槽内のLNGの最高液面が盛土の天端面（盛土がない場合には周囲の地盤面）以下にあるため液の漏えいに対し本質的に安全なものである。

LNG地下式貯槽は機能的なプロセス上のレイアウトに加え、地形及び地盤等の自然条件を考慮したレイアウトが必要である。

2.2 離隔距離

2.2.1 特定事業所の離隔距離

LNG地下式貯槽とその貯槽を設置する特定事業所の境界線との間の離隔距離は次の(1)及び(2)を満足すること。^{*(1)}

(1) LNG地下式貯槽は、その外面から事業所の境界線まで、50m又は(2.1)式より算出した距離のいずれか大なるもの以上の距離を有すること。^{*(2)}

$$L = 0.24 \sqrt{K \cdot W} \quad (2.1)$$

ここに、L：距離(m)

K：液化ガスの種類に応じて表2.1に掲げる値

W：貯蔵能力(トン単位とする。)の値の平方根の値

〔備考〕貯槽内に二以上の液化ガスがある場合においては、それぞれの液化ガスの質量(トン)の合計量の平方根の数値にそれぞれの液化ガスの質量の合計量に対する割合を乗じて得た数値に、それぞれの液化ガスに係るKを乗じて得た数値の合計によりLを算出すること。^{*(3)}

ただし、敷地境界線に連接して海、河川、湖沼又は次の(a)～(e)の土地がある場合は、これらの対岸又は外縁を事業所の境界線とすることができる。

- (a) 水路及び工業用水道事業法(昭和33年法律第84号)第二条第三項に規定する工業用水道
- (b) 道路及び鉄道
- (c) 都市計画法(昭和43年法律第100号)第八条第一項第一号に規定する工業専用地域又は工業専用地域となることが確実な地域内の土地
- (d) 製造業(物品の修理加工業を含む。)、電気供給業、ガス供給業及び倉庫業に係る敷地のうち現にそれらの事業活動の用に供されているもの
- (e) LNG地下式貯槽を設置するものが所有し、若しくは地上権、賃借権その他土地の使用を目的とする権利を設定している土地

表 2.1 K の 値

ガスの種類	K
メタン CH_4	143×10^3
エタン C_2H_6	272×10^3
プロパン C_3H_8	178×10^3
ブタン C_4H_{10}	128×10^3
ペンタン C_5H_{12}	65×10^3

(2) LNG地下式貯槽は、保安上事業所の敷地境界線に対し必要な距離を有すること。^{*(4)}

〔 解 説 〕

* (1) 「特定事業所」とはガス事業法告示（昭和53年4月15日通商産業省告示第158号）第3条第3項に規定する製造所と同等以上のものをいう。

* (2) 「貯槽の外表面」とは、ガスを保持する屋根の胴板の外表面をいう。

* (3) 数種の液化ガスからなるLNGに対し、各液化ガスの質量（トン）及びKの値をそれぞれ W_i 、 K_i とおけば、このLNGの $K \cdot W$ の値は次式で表わせる。

$$\begin{aligned}
 K \cdot W &= \frac{\sum W_i K_i}{\sum W_i} \cdot \sqrt{\sum W_i} \\
 &= \frac{\sum W_i K_i}{\sqrt{\sum W_i}} \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

一例として貯蔵容量100000klのLNG地下式貯槽においてブルネイ産LNGを貯蔵した場合のLの値を算出した結果を示す。

解表 2.1 ブルネイ産LNGの組成例

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	N_2
89.83	5.89	2.92	1.30	0.04	0.02

（モル％）

（2.2）式により $K \cdot W$ を求め、（2.1）式に代入しLの値を求めると

$$L = 0.24 \sqrt[3]{K \cdot W} = 0.24 \sqrt[3]{3.39 \times 10^7} = 77.6 \text{ m} \quad (2.3)$$

となる。

* (4) LNG地下式貯槽に係る建設及びメンテナンス用空地の確保も含めて考慮し、その内面から事業所の敷地境界線まで、貯槽の内径の1/2以上の距離とすることが望ましい。ただし、20mを下廻らないこと。

なお「貯槽の内面」とは、接液部メンブレンの内面をいい、「貯槽の内径」とは、接液部メンブレンの内径をいう。

2.2.2 特定事業所以外の事業所の離隔距離

特定事業所以外の事業所に設置するLNG地下式貯槽は、事業所の境界線まで保安上必要な距離を有すること。^{*(1)}

〔解説〕

* (1) 離隔距離は原則として次の(a)及び(b)を満足するものとする。

(a) LNG地下式貯槽は、将来事業所のすぐ脇まで何らかの保安物件が建設される可能性を考え、貯槽の外側から事業所の敷地境界線まで、病院又は学校等の第一種保安物件までの距離30mに等しい値以上の距離を有するものとする。ただし、その敷地境界線に海、河川、湖沼又は2.2.1(a)～(e)の土地が接続し、それらの地域がその敷地境界線から10m以上にわたり存在している場合には、その距離を20m以上とすることができる。

(b) LNG地下式貯槽は、その内面から事業所の敷地境界線まで、貯槽の内径の $\frac{1}{2}$ 以上の距離を有するものとする。

2.3 設備間距離

2.3.1 LNG地下式貯槽相互間の距離

LNG地下式貯槽は、保安上他のLNG地下式貯槽に対し必要な距離を有すること。^{*(1)}

〔解説〕

* (1) LNG地下式貯槽に係る建設及びメンテナンス用空地の確保も含めて考慮し、その内面から他のLNG地下式貯槽の内面まで、大なる貯槽内径の $\frac{1}{2}$ 以上の距離とすることが望ましい。

2.3.2 LNG地下式貯槽と他の設備との距離

LNG地下式貯槽は、保安上他の設備（その貯槽に付属する設備、配管、導管及び2.3.1に定めるものを除く。）に対し必要な距離を有すること。^{*(1)}

〔解説〕

* (1) 貯槽の内面から他の設備に対し、15m又はその貯槽の内径の $\frac{1}{2}$ のいずれか大なる距離以上を有することが望ましい。ただし、特定事業所の場合、貯槽の外側から他の異なる保安区画内のガス又は液化ガスを通ずる設備までの距離は30mを下廻らないこと。

なお、ガス事業法省令（昭和53年4月15日通商産業省令第20号）第48条では貯槽相互間の距離を、貯槽は、その外側から他の貯槽に対し貯槽の最大直径の $\frac{1}{2}$ （低圧地下式貯槽は $\frac{1}{4}$ ）以上の距離を有しなければならないと規定している。

また、消防法政令（昭和51年6月15日政令第153号）第11条の屋外貯蔵タンクが隣接して設置

されている場合、同条によると屋外貯蔵タンクの周囲には、その最大直径の1倍以上の空地の保有が必要となる（指定数量の4000倍を超える場合）。

〔備考〕〔1〕保安区画は、その面積が20000 m^2 （貯槽の面積は算定しない。）以下、かつ液化ガス又は使用状態においてなりうる最高の圧力が10kgf/ cm^2 以上のガスを通ずる設備のK・Wの値の合計が 6.0×10^8 以下であり、幅員5m以上の通路又は事業所の境界線に囲まれているものとする。

2.4 保安用通路及び保安用道路

- (1) LNG地下式貯槽の周囲には、点検・検査等が容易に行えるように保安用通路を設けること。^{*(1)}
- (2) LNG地下式貯槽の運転、保守及び防消火活動が容易に行えるように、貯槽又は貯槽群の周囲の近接した位置に保安用道路を設けること。^{*(2)} この場合いずれの貯槽においても保安用道路に直接面するようにすること。

〔解説〕

* (1) 保安用通路の幅員は3m以上とすることが望ましい。

* (2) 保安用道路の幅員は解表2.2の値以上とすることが望ましい。また、保安用道路により囲まれた貯槽又は貯槽群のK・Wの値の合計は 6.0×10^8 以下であり、かつ、その道路に囲まれた面積の合計は原則として90000 m^2 を超えないものとする。なお、貯槽に附属する設備は、その貯槽の周囲の保安用道路の内側に設置することができる。

解表2.2 保安用道路の幅員

保安用道路に囲まれた面積	保安用道路の幅員
10000 m^2 未満	6 m
10000 m^2 以上20000 m^2 未満	8 m
20000 m^2 以上40000 m^2 未満	10 m
40000 m^2 以上	12 m

小規模実験プラント基準

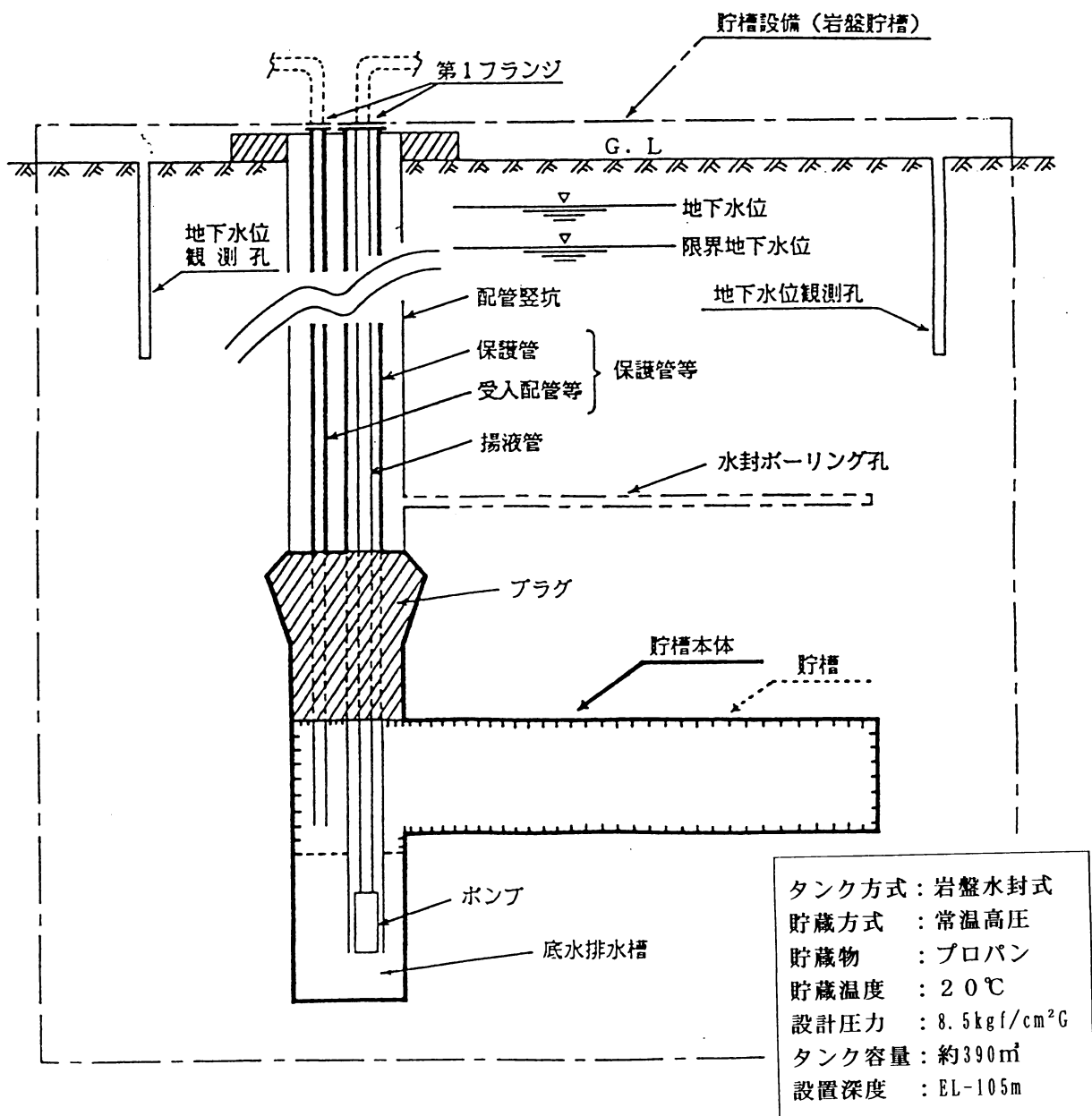
（液化石油ガス保安規則関係）

１．総則

昭和63年 2 月 高压ガス保安協会

1.1 適用範囲

この基準は、岡山県倉敷市において、石油公団が行う小規模実験プラントによる実験に使用される岩盤貯槽（貯槽本体、配管縦坑、水封ボーリング孔及び地下水位観測孔等から構成される貯槽設備であって、下図に示すもの）における液化石油ガスの製造に関する保安について、高压ガス取締法（昭和26年法律第204号。以下「法」という。）に基づき規定する。



(2) 貯槽は、安定した地下水が存在し、かつ、貯槽本体に悪影響を与える断層等のない良好な岩盤内に設置すること。

(3) 貯槽設備は、その配管竖坑坑口内壁面から第一種保安物件に対し30メートル以上、第二種保安物件に対し20メートル以上の距離を有すること。

(4) 貯槽設備は、配管竖坑坑口内壁面から他の可燃性ガス又は酸素の貯槽（高压ガス取締法でいう貯槽をいう。以下この号において同じ。）に対し、1メートル又は当該配管竖坑坑口及び他の可燃性ガス又は酸素の貯槽の最大直径の和の四分の一のいずれか大なるものに等しい距離以上の距離を有すること。

(5) 貯槽最上部の深さは、貯槽の液密及び気密を確保できる深さであること。

(6) 貯槽上部及び周辺の地下水位は、限界地下水位以上であり、かつ、安定したものであること。

(7) 高压ガス設備に使用される材料は、特定設備検査規則（昭和51年通商産業省令第4号。以下「特定則」という。）第9条に規定する材料及び別に定める基準（小規模実験プラント基準（特定設備検査規則関係）。以下「岩盤貯槽検査基準」という。）に規定する材料以外の材料は、使用しないこと。

(8) 高压ガス設備は、液石則第9条第11号に規定する耐压試験に合格するものであること。ただし、貯槽本体であって、岩盤貯槽検査基準に適合するものについては、この限りでない。

(9) 高压ガス設備は、液石則第9条第11の2号に規定する気密試験に合格するものであること。ただし、貯槽本体については、岩盤貯槽検査基準で行う気密試験に合格するものであること。

2 通達

2・1 危険物の規制に関する政令の一部を改正する政令等の施行について 昭和62年4月20日 消防危第33号（第1章2・1参照）

2・2 岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準等について

昭和62年5月19日 消防危第39号
岩手県総務部長
愛媛県地方振興部長あて消防庁危険物規制課長
鹿児島県総務部長

危険物の規制に関する政令の一部を改正する政令（昭和62年政令第86号）が昭和62年3月31日に、危険物の規制に関する規則の一部を改正する省令（昭和62年自治省令第16号）が昭和62年4月20日にそれぞれ公布され、ともに昭和62年5月1日から施行されることとなった。

今回の危険物の規制に関する政令（昭和34年政令第306号。以下「令」という。）及び危険物の規制に関する規則（昭和34年総理府令第55号。以下「規則」という。）の改正は、貴県に国家石油備蓄基地として計画されている岩盤内石油貯蔵施設に関し、岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所として、その位置、構造及び設備の技術上の基準、完成検査前検査、保安検査等を新たに規定したものであるが、これらの事項について下記のとおりその運用基準を定めたので、岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の規制については、この基準により運用されるようお願いする。

なお、貴管下関係市町村に対してもこの旨示達され、よろしく御指導願いたい。

別記 2

岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の位置，構造及び設備の技術上の基準に関する運用基準

第 1 用語の意義

本運用基準において用いる用語の意義は，令及び規則において使用する用語の例によるほか，次に定めるところによること。（図 1 参照）

1 豎 坑

危険物配管，底水排水配管，計装ケーブル等を収納するため，岩盤タンクから上方に設け，豎坑上部室に接続する坑

2 豎坑上部室

油中ポンプ，底水排水ポンプ，計装設備等の維持管理のため，豎坑の上部に設ける室

3 ドライポンプ室

岩盤タンク内の危険物等を移送するポンプ設備を設置するため，地盤面下に設ける室

4 サービストンネル

地盤面下の室と地盤面上を結び，危険物配管，換気ダクト，不燃性ガス配管，計装ケーブル等を収納し，又は車両及び人の通行の用に供するトンネル

5 水封トンネル及び水封ボーリング孔

人工水封方式の場合に，水封に必要な水を岩盤タンクの岩盤内に供給するトンネル及びボーリング孔

6 坑 道

地盤面下の空間のうち、岩盤タンクの空間を除いた部分

7 底水排水槽

岩盤タンク内に湧出した地下水を排水するためのポンプ等を設置する岩盤タンク底部の槽

8 限界地下水位

岩盤タンクの内壁から岩盤タンクの最大幅の5倍の水平距離を有する範囲において、岩盤タンクからの漏油又は漏気を防止するために保たなければならない最低の地下水位

第2 地下工作物からの距離の確保（規則第22条の3第3項第1号関係）

1 他の工作物等からの離隔距離

岩盤タンクの位置は、2によるほか、次に掲げる工作物等から岩盤タンクの内壁面までの間に、次に掲げる距離以上の距離を保つこと。

- (1) 水道法（昭和32年法律第177号）第3条第8項に規定する水道施設のうち、危険物の流入のおそれのあるものにあつては、300m以上とすること。
- (2) 地下トンネルその他の地下工作物にあつては、2(2)に規定する距離以上とすること。

2 岩盤タンクの空間相互間の距離及び岩盤タンクと他の岩盤タンク又は坑道との距離

岩盤タンクの空間相互間の距離及び岩盤タンクと他の岩盤タンク又は坑道との距離は次によること。

- (1) 岩盤タンク連絡トンネルにより連結されている岩盤タンクの空間相互間の距離は、次に定める値L以上を確保すること。（図2参照）

$$L = \frac{B_1 + H_1 + B_2 + H_2}{4} + R_1 + R_2$$

L ; 確保すべき距離（当該岩盤タンクの空間の内壁面から隣接する空間の内壁面までの距離）

B₁ ; 当該空間の内壁面の最大幅

H₁ ; 当該空間の内壁面の最大高さ

B₂ ; 隣接する空間の内壁面の最大幅

H₂ ; 隣接する空間の内壁面の最大高さ

R₁ ; 当該空間を構成する岩盤のゆるみ域の幅

R₂ ; 隣接する空間を構成する岩盤のゆるみ域の幅

上記の値を算定するにあたっては、次の事項に留意すること。

ア 岩盤タンクの長さ、幅及び高さは、内りのりとするものであること。

イ ゆるみ域の幅は、内壁面からの幅とし、鋼製支保工、吹付コンクリート又は覆工の厚さを含むものであること。

ウ ゆるみ域の幅は、空間の形状寸法、空間相互間の距離、岩盤のせん断強度、初期変形係数、初期ポアソン比等を考慮して数値計算により求めること。

(2) 岩盤タンク相互間の距離及び岩盤タンクと坑道との距離は、(1)に規定する距離L又は隣接する岩盤タンク又は坑道へ貯蔵する危険物が混入しない距離のうちいずれか大なる値以上を確保することとし、上下方向の距離も同様とすること。なお、次の事項に留意すること。

ア この距離は、空間の形状寸法、岩盤の透水性、空間の内圧、地下水圧等を考慮して数値計算により求めること。

イ 隣接する岩盤タンク又は坑道への混入を防止するため鉛直方向の水封設備を設置する場合は、その効果を見込むことができるものであること。

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 compressed 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.
- 14) Särkkä, P. 1993. Natural storage in mined caverns. Report ver2, IGU Committee A pp.1-17
- 15) NESTE oy 1990. Experimental Facility for the storage of natural gas in lined rock caverns. Executive report. pp.1-12

第3章 LNG岩盤貯蔵システムの概要

第3章 LNG岩盤貯蔵システムの概要

3.1 LNG岩盤貯蔵タンク

(1) 岩盤貯蔵タンクの概要

LNG岩盤貯蔵タンクは近年、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、LNGを貯える新しいタイプの貯蔵タンクである。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、岩盤貯蔵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岩盤貯蔵タンクは貯蔵する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などにより保たれることになる。LNG岩盤貯蔵タンクの概要を図3.1に示す。

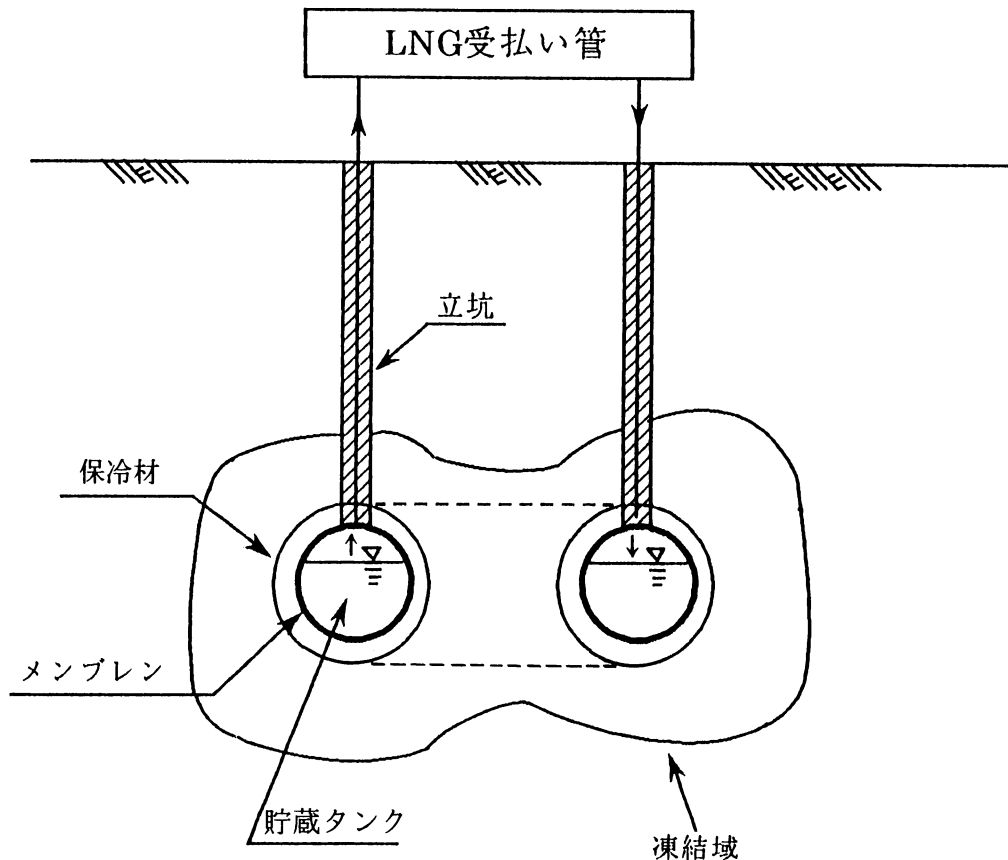


図 3.1 LNG岩盤貯蔵タンクの概要

(2) 岩盤貯蔵タンクの特徴

- ・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、岩盤貯蔵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BOGを岩盤貯蔵タンク内に貯蔵し、昼間の電力需要ピーク時にこのBOGを発電に供するような運転方法がとれる。このLNG岩盤貯蔵タンクの受入基地概略フロー図を図 3.2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。
- ・地震など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、岩盤がバリア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。

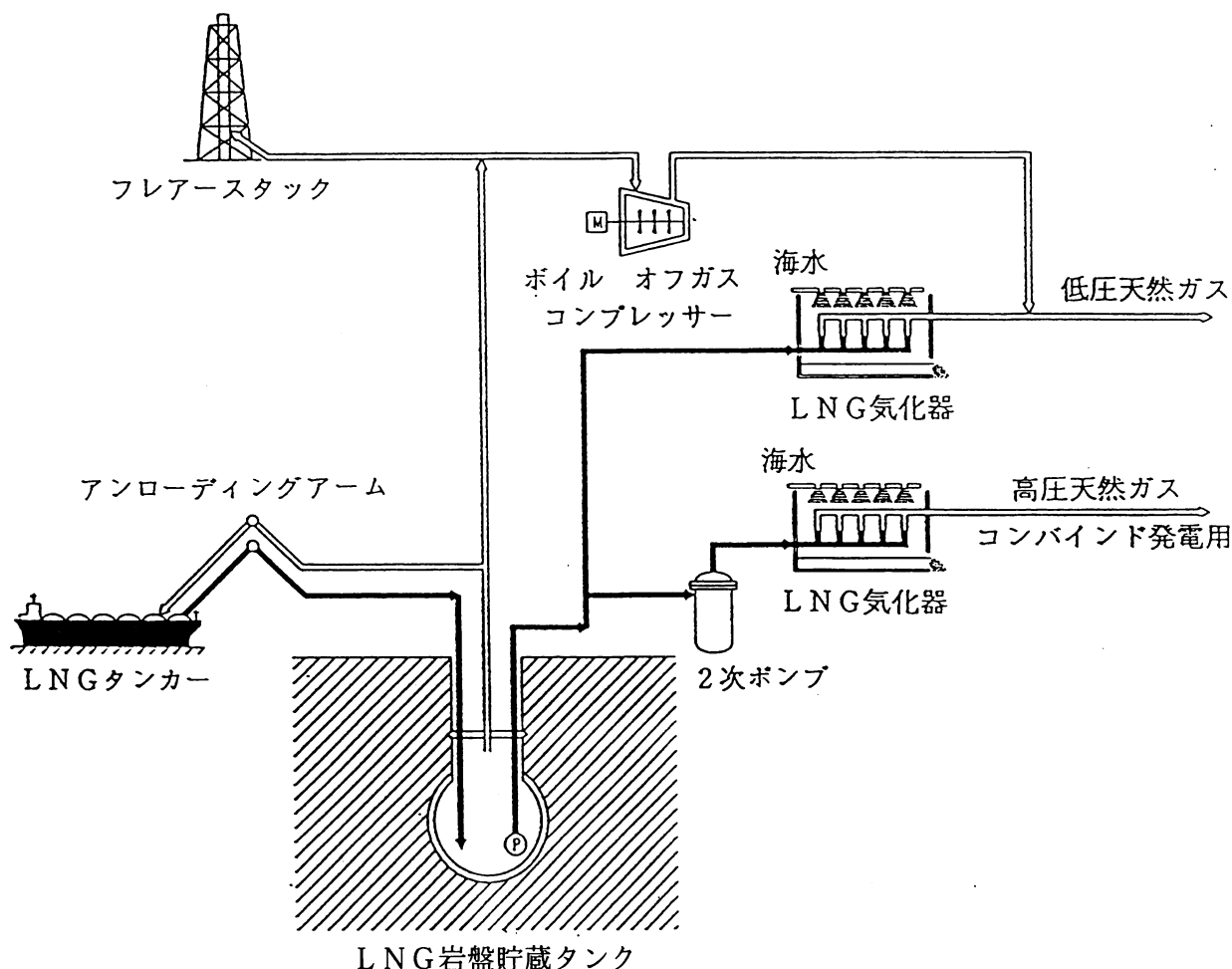


図 3.2 LNG岩盤貯蔵タンクの受入基地概略フロー

3.2 岩盤貯蔵タンクの型式検討

(1) 貯蔵方式による分類

貯蔵方式による岩盤貯蔵タンクの分類一覧を表 3.1に示す。

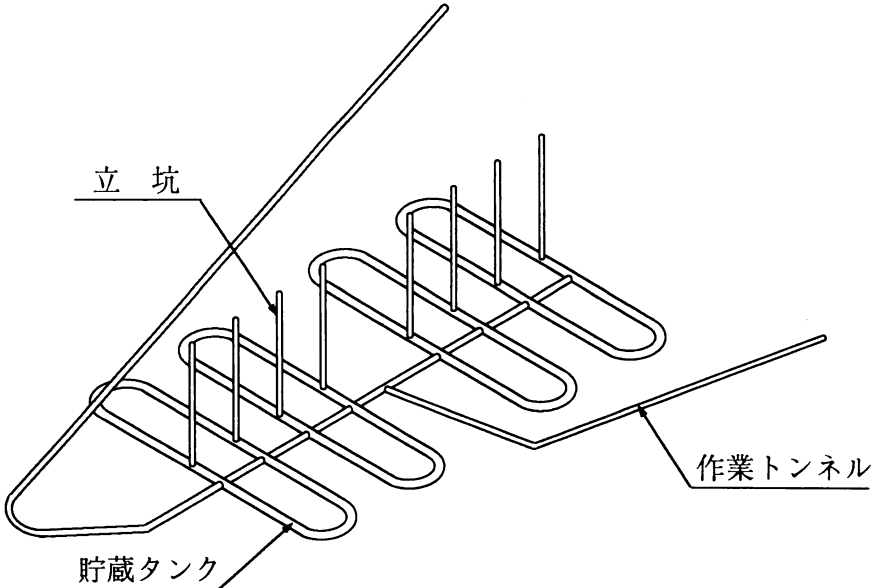
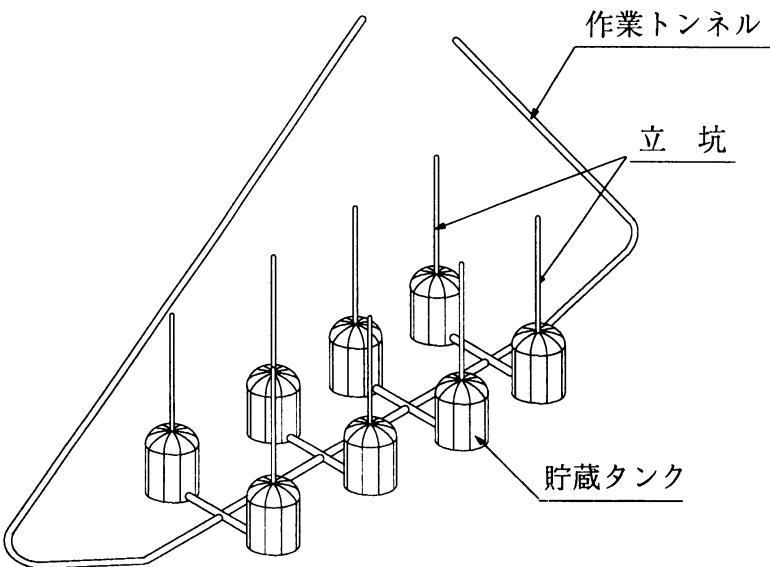
表 3.1 貯蔵方式によるLNG岩盤貯蔵タンク一覧

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保冷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ティ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の地中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、保冷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貯蔵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岩盤貯蔵タンク一覧

岩盤トンネル方式	
岩盤堅型タンク方式	

3.3 基本形式の選定

LNG岩盤貯蔵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) 保冷構造：メンブレンの外側に保冷材を敷設

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保冷材を敷設する。

(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は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。

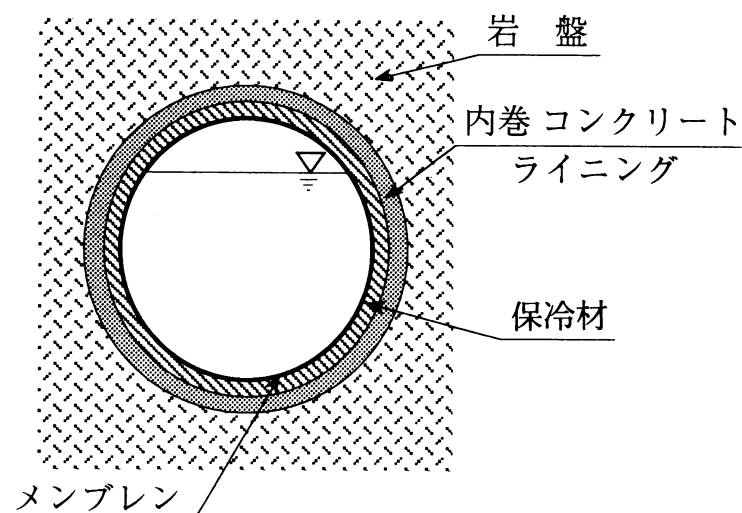


図 3.3 LNG岩盤貯蔵タンクの基本形状

第4章 LNG岩盤貯蔵タンクの立地に関する検討

第4章 LNG岩盤貯蔵タンクの立地に関する検討

4.1 岩盤分布状況

(1) LNG岩盤貯蔵タンクの立地のための地盤条件

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、国内で消費する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、岩盤貯蔵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

岩盤貯蔵タンク周辺の凍結・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、岩盤貯蔵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

岩盤貯蔵タンクは、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20mφ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、いくつかの岩盤貯蔵タンクによって、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貯蔵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岩盤貯蔵タンクの最も特徴的な点は、 -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、今後の研究を待つところが多い。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。岩盤貯蔵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

岩盤貯蔵タンク周辺の地下水の状況は、岩盤貯蔵タンクの気密性および空洞周辺の岩盤応力に関係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

日本には、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、既に石油岩盤貯蔵タンクの例などもあるように、岩盤貯蔵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、国内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 国内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	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 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 禰岩	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禰岩 (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線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岩盤貯蔵タンクも花崗岩の中に設けている。日本には、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・飛騨山地・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碎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、日本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岩盤貯蔵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、亀裂などを生じている。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、日本でも、地下発電所のような大規模な地下空洞が数種の堆積岩に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・火山碎屑岩）

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10～100kgf/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_v 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。

日本では、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。

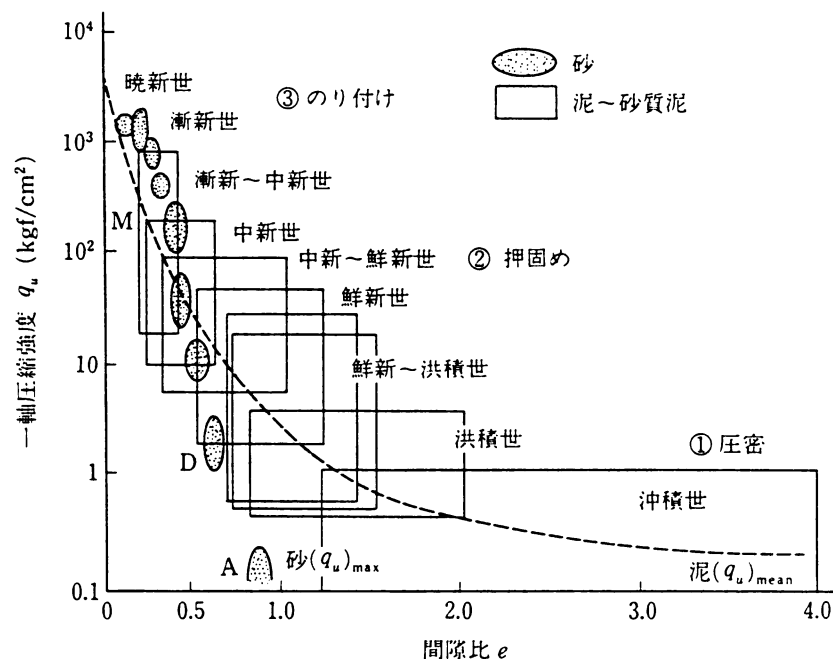


図 4.1 岩化に伴う日本の新生代堆積物の物理的性質の変化

（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。

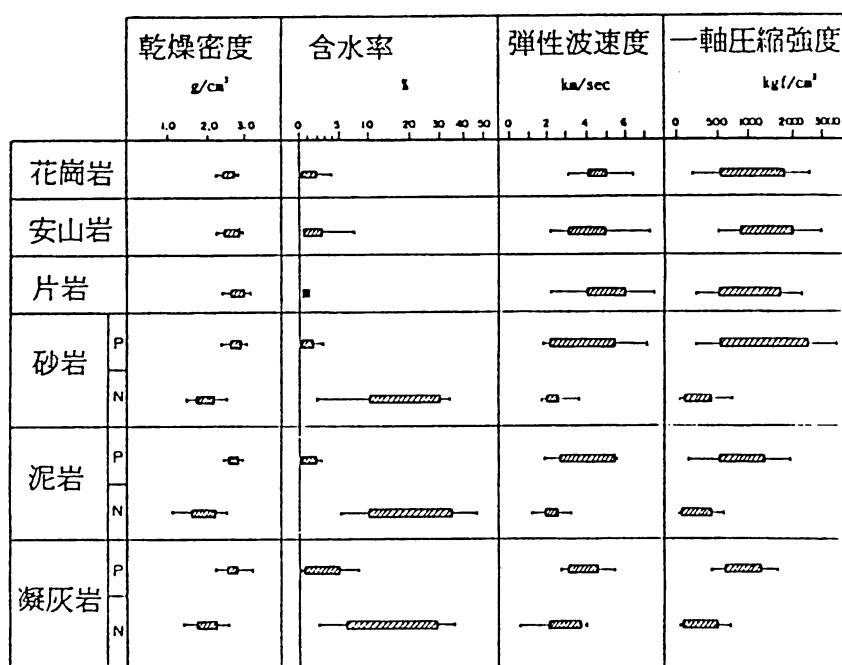
結晶片岩は、原岩から再結晶によって生じた変成鉱物が一定方向に配列するため、顕著な片状（片理）を呈する。岩石としては、孔隙率も小さく緻密であり、片理面に直交する応力に対しては他の硬岩と同程度の大きな強度をもつ。しかし、片理面に沿って著しく剝離し易く、異方性が強いことが特徴であり、工学的には要注意の岩石である。

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、国内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) 全国の沿岸の岩盤分布

全国の沿岸を対象にした岩盤の分布域を図 4.3に示す。本研究では、岩盤として第四紀更新世（洪積世）前期を含み、これより古い年代の堆積岩、変成岩、および第四紀を除く全ての年代の火成岩類を取り上げた。従って、図示した範囲の岩盤は軟岩領域から硬岩領域まで広い範囲にわたって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岩盤貯蔵タンクの建設対象になりうる可能性を有することを示している。なお、本図は、地質調査所発行の日本地質図（1/100万、1992年）の地質分布を参考にして作成した。

次に各地方沿岸の岩盤分布状況を概観する。

- ・北海道沿岸の岩盤は、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がある。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少なく、局部的に新生代新第三紀の堆積岩があるにすぎない。

- ・関東地方、東海地方の沿岸については後述するが、関東平野での岩盤は地下に埋没している。房総半島、三浦半島はいずれも新生代第三紀～第四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である。

- ・紀伊半島沿岸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、新世代第三紀の堆積岩、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。

- ・中部地方、近畿地方についても後述するが、平野での岩盤は地下に埋没している。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、その南の大隅半島には花崗岩類が分布している。



図 4.3 全国の沿岸の岩盤分布

(5) 3 大都市圏の岩盤分布

東京圏、名古屋圏、大阪圏について、岩盤分布状況をやや広くかつ詳細に調査し、図 4.4、図 4.6、図 4.8に示した。なお、堆積岩については、各都市圏で第三紀末期か第四紀初期にかけてのほぼ同じ地質年代に生成した次の地層群を含み、これらより古い地層を岩盤として取りあげた。

東京圏 …………… 上総層群
 名古屋圏 …………… 東海層群
 大阪圏 …………… 大阪層群下部

また、岩盤の分布域は、地表における分布を基本として図示しているので、地下100m程度までの範囲を対象にすると、岩盤の分布は周囲にさらに広がることになる。

1) 東京周辺の地盤

関東平野では、東西・南北それぞれ100km以上に及んで低地ないし台地が広がり、平野の周囲を古い地質年代の基盤岩からなる山地が取り巻いている。東京周辺に分布する主な地層の層序を表 4.2に、また、都心部を横切る東西方向の地質断面を図 4.5に示す。

表 4.2 東京周辺の主要地質層序

地 質 時 代			地 層
新 生 代	第 四 紀	完新世（洪積世）	沖積層
		更新世（洪積世）	段丘堆積物 下総（相模原・東京）層群
	新第三紀	鮮新世	上総層群
		中新世	三浦層群 葉山（保田）層群
	古第三紀		嶺岡層群
中 古 世 代	先第三紀		中生層・古生層 花崗岩類 変成岩類

関東平野北東方の筑波山地・北西方の足尾山地・西方の関東山地には中生代および古生代の堆積岩・変成岩が分布しており、また、東方の銚子付近にも小規模ながら中生代の堆積岩が露出している。さらに、筑波山地には稲田石として知られる花崗岩類も分布している。これらの基盤岩は本質的にはいずれも硬岩に属する。基盤岩の分布は、周囲の山地から平野の地下に埋没し、都心部では－3,000mを越す深部に分布する。

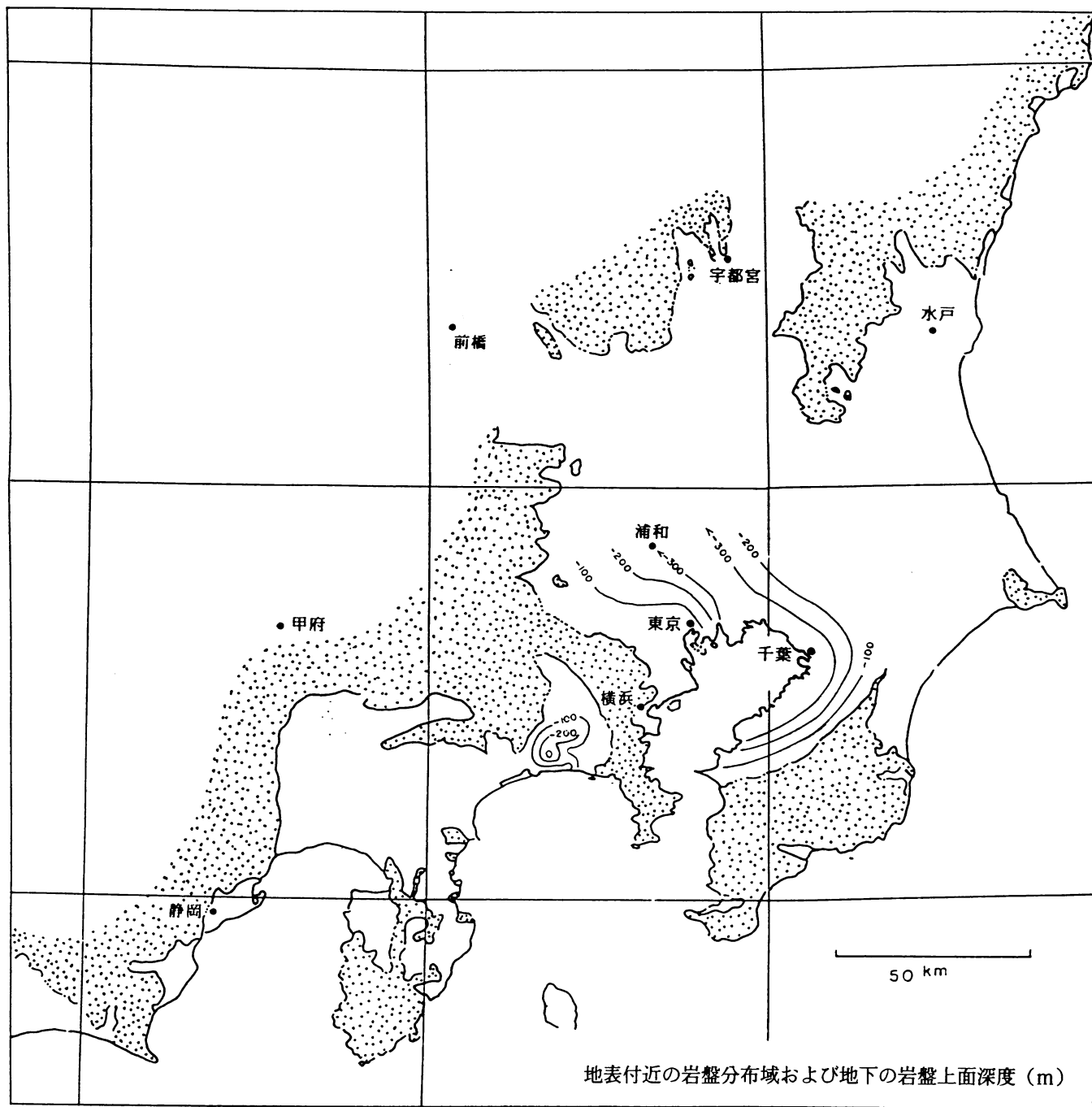


図 4.4 東京周辺の岩盤分布

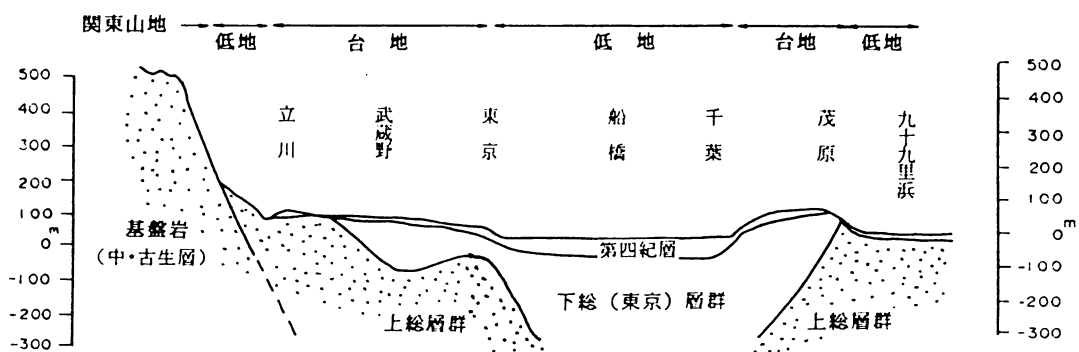


図 4.5 東京周辺の地質断面

西方の丹沢山地は、第三紀の火砕岩類を主としており、全体としては軟岩に相当するが、岩質の変化が大きい。また、この山地の中央部には花崗岩に近い性質の石英閃緑岩が貫入している。

三浦半島および房総半島の南部には第三紀の葉山（保田）層群・三浦層群などが分布しており、さらに、これらの地層群の相当層は関東山地および丹沢山地の東縁にも露出している。これら第三紀層は、砂岩・泥岩および礫岩・凝灰岩などの堆積岩類からなり、良く固結した軟岩である。第三紀層は関東平野の地下にも広がっているが、その上面は千葉付近で最も深く－1,200mの深部である。

三浦半島北部から多摩丘陵にかけては三浦層群の上位になる第四紀更新世前期の上総層群が分布しており、また、房総半島中央部の丘陵地帯にも同じ地層群が分布している。この上総層群は泥岩・砂岩を主とする堆積岩層であり、固結の程度はやや低い軟岩に属する。多摩丘陵の上総層群は北東方向に傾斜し、一方、房総丘陵では北西方向に傾斜しており、東京湾奥付近で最も深くなり、－500m～－600mに達している。なお、多摩丘陵東南部にあたる下末吉台地および武蔵野台地の南縁（多摩川沿い）では、台地上には新期の堆積物が分布しているが、台地崖下には上総層群が露出している。また、多摩丘陵の西に位置する相模平野の地下にも上総層群が分布しており、ここでは相模川河口付近での－300mを中心に盆状に広がっている。台地および低地には上総層群より新しい地層が広く分布するが、これらの地層はほとんど未固結の土質地盤である。

図 4.4は、地表付近における岩盤分布域を示しているが、これに平地部の地下における岩盤（上総層群上面の深度）の分布状況を合わせて記入した。都心部周辺でも－100m程度までを対象に検討すると岩盤の分布周囲はかなり広がることを示している。

2) 名古屋周辺の地盤

濃尾平野・伊勢湾・三河湾を取り巻いている美濃三河高原・美濃（両白）山地・養老山地・鈴鹿山脈・布引山地・志摩半島・渥美半島には、名古屋周辺の基盤をなす古い地質年代の地層が分布している。これらの山地の内側になる東濃地域・東部（尾張）丘陵・知多半島・伊勢湾西岸部の丘陵地帯には、堆積岩からなる東海層群が分布する。また、濃尾平野および岡崎平野には、さらに新しい洪積層および沖積層が広く分布している。表 4.3は名古屋周辺に分布する主な地層の層序を示す。図 4.6は名古屋周辺における東海層群およびこれより古い年代の地層からなる岩盤の分布を示し、図 4.7は東西方向の地質断面である。

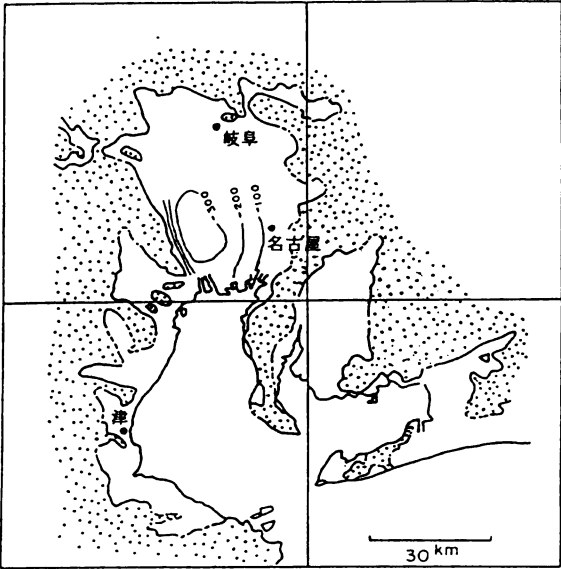
表 4.3 名古屋周辺の主要地質層序

地 質 時 代			地 層
新 生 代	第 四 紀	完新世（洪積世）	沖積層
		更新世（洪積世）	段丘堆積物
			見当山層
	新第三紀	鮮新世	東海（瀬戸）層群
		中新世	瑞浪層群
中 古 世 代	先第三紀		中生層・古生層 花崗岩類 変成岩類

基盤岩は、中生代・古生代の堆積岩・変成岩および花崗岩類からなる硬岩である。濃尾平野での基盤面は、東から西に傾いており、名古屋市街地で地下－500 m程度になり、木曽川河口付近では－1,500～－2,000mにもなって、養老山地とは大きなギャップをもって断層で接している。

東海層群は、鮮新世～更新世前期の堆積岩類で、礫質・砂質・泥質の層が数m以内の厚さをもって互層することが多く、固結の程度はや低いが軟岩である。東海層群も基盤と同様に西に傾斜しており、また、西方で次第に厚さを増している。東海層群の地下における分布は、名古屋市街地付近では－100m程度であり、木曽川河口に近い長島付近では－350m程度になっている。

知多半島と三河高原の間に位置する岡崎平野では、台地上には段丘堆積物が分布し、東海層群は海岸付近で地下－100m位の深度になる。



地表付近の岩盤分布域および地下の岩盤上面深度(m)

図 4.6 名古屋周辺の岩盤分布

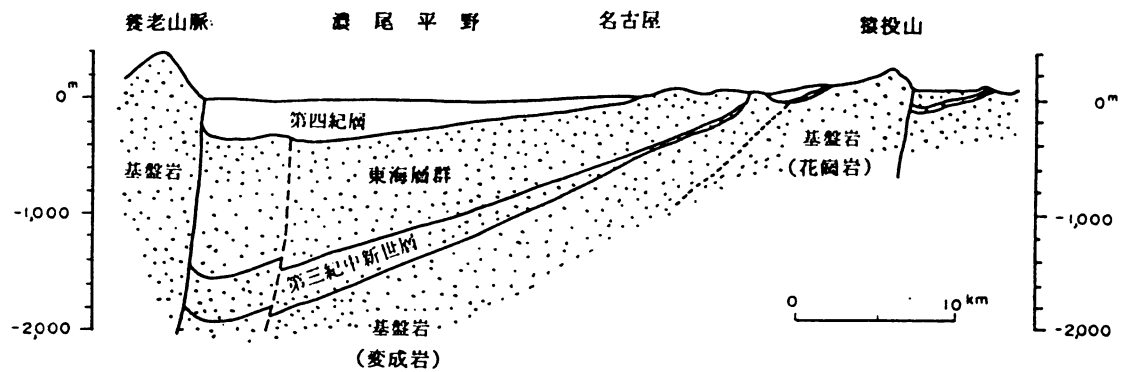


図 4.7 名古屋周辺の地質断面

3) 大阪周辺の地盤

大阪周辺に分布する主な地層の層序を表 4.4に示す。大阪周辺は、先第三紀の基盤岩が大阪湾および大阪平野を取り囲んで分布し、その内側の千里・枚方・泉南・泉北などの丘陵には大阪層群が、さらに内側の段丘および低地には洪積層および沖積層がそれぞれ分布している。また丘陵の一部には大阪層群の下位になる神戸層群が分布し、その地質年代は中新世ないし漸新世である。

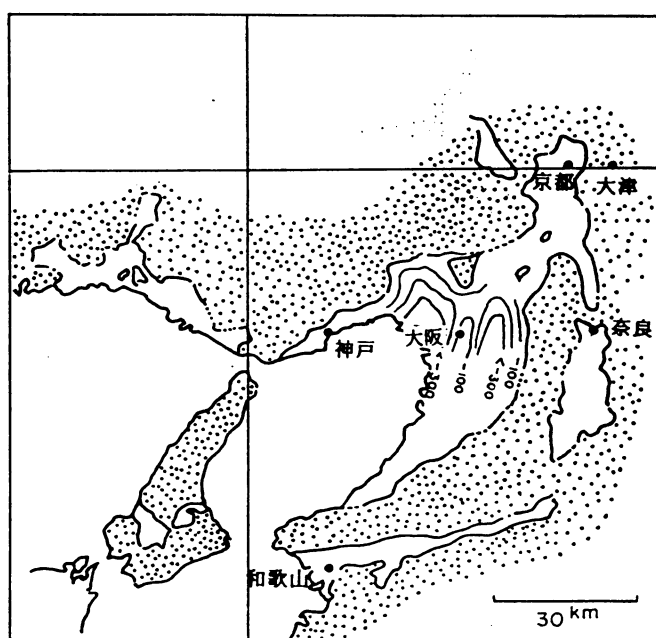
表 4.4 大阪周辺の主要地質層序

地 質 時 代			地 層
新 生 代	第 四 紀	完新世（洪積世）	沖積層
		更新世（洪積世）	段丘堆積物
			大阪層群上部層
	新第三紀	鮮新世	大阪層群下部層 大阪層群最下部層
		中新世～漸新世	神戸層群
中 古 世 代	先第三紀		丹波層群 和泉層群 花崗岩類 変成岩類

基盤岩は丹波層群・和泉層群などの堆積岩類および花崗岩類からなり、ほとんど硬岩に属する。これより新しい神戸層群は泥岩や砂岩からなる軟岩であるが、良く固結している。大阪層群は粘土質堆積物と砂礫質堆積物の互層からなる厚い地層であり、賦存深度に比例して強度が増加しており、その上部層は土質地盤であるが、下部層は軟岩に属する。図 4.8は地表付近における岩盤、すなわち大阪層群下部層、神戸層群および基盤岩の分布を示している。また、図 4.9は大阪平

野（広義）の代表的な地質断面を表している。

広義の大阪平野は大坂城のある台地から南に延びる上町台地を境として、東の河内盆地と西の大阪盆地（狭義）とに分けられる。上町台地では、基盤およびこれを覆う地層の高まりがあり、地下約50mから大阪層群下部層（軟岩）になり、神戸層群に続いて地下約660mで花崗岩に達する。しかし、台地の両側では土質地盤が深くまで続いており、大阪層群下部層は西の河内平野の中央付近でもまた東の新淀川河口付近でも地下約-400m以深に分布しており、神戸層および花崗岩は-700mあるいは-900m以深になっている。



地表付近の岩盤分布域および地下の岩盤上面深度(m)

図 4.8 大阪周辺の岩盤分布

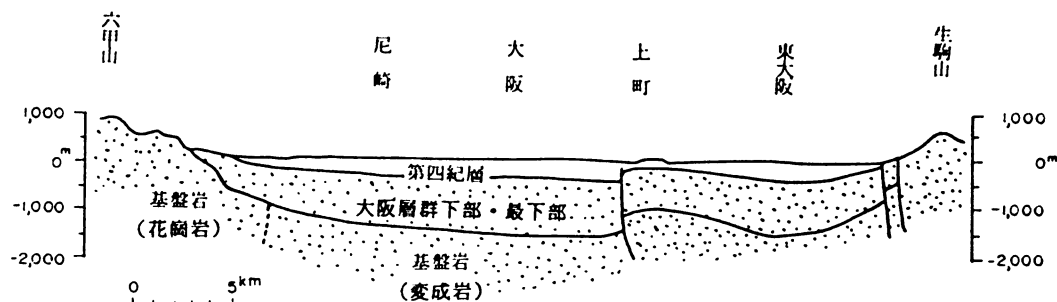


図 4.9 大阪周辺の地質断面

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 2.2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、例えば電力の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いう観点から、土地の有効利用が図れ、かつ安全性、環境保全性および経済性に優れる岩盤貯蔵が注目を集めるようになってきた。

この内、石油岩盤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岩盤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貯蔵および実験中のLPG岩盤貯蔵の概要を表 4.5に示す。

表 4.5 石油及びLPG岩盤貯蔵施設の概要

区分	施設名	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 油 (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月工事完了予定 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	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	工事は完了 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岩盤貯蔵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、地震など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

LNG岩盤貯蔵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LNG岩盤貯蔵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岩盤貯蔵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

LNG岩盤貯蔵タンクについては、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

LNG岩盤貯蔵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

LNG岩盤貯蔵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。

第5章 LNG岩盤貯蔵施設の基本システム設計

第5章 LNG岩盤貯蔵施設の基本システム設計

5.1 検討条件

ここではLNG岩盤貯蔵タンクの基本システム設計を実施する。この岩盤貯蔵タンクは環境保全、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。

天然ガスは -162°C まで冷却すると液体(LNG)となり、気体の時と比較すると、体積が約600分の1に減少するため、タンカー輸送および大規模なLNG貯蔵が容易となる。

既に日本で実用化されている石油岩盤貯蔵タンクおよび実証試験中のLPG岩盤貯蔵タンクがLNG岩盤貯蔵タンクと異なるのは、石油およびLPGの場合は常温で液体貯蔵するが、LNGの場合は -162°C の極低温で液体貯蔵することである。その主な相違点は表5.1の通りである。

表 5.1 各種岩盤貯蔵タンクの仕様比較

タンク型式	温度・圧力・相	液 密 性	備 考
石油岩盤貯蔵タンク	常温・常圧・液体	水封式	
LPG岩盤貯蔵タンク	常温・高圧・液体	水封式	日本でも実験中
LNG岩盤貯蔵タンク	常温・ -162°C ・液体	凍結岩盤・ メンブレン	スウェーデンで実験中

LNG岩盤貯蔵システムの検討を進めるに当たり、LNG岩盤貯蔵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の使用方法・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貯蔵タンクの断面寸法、長さ、保冷仕様といった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検討を行うに当たり、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、次に岩盤貯蔵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岩盤貯蔵施設の基本システム設計を行った。

LNG岩盤貯蔵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受入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、貯蔵システムなどが変わることもある。

しかし、LNG岩盤貯蔵に適合する大規模なLNG受入基地は、発電用もしくは発電

用および都市ガス用と一体で共同運用しているケースが多く、これらのケースでは、タンク仕様および貯蔵システムなどは大差がない。

ここでは一例としてLNG火力発電所の場合を取り上げ、LNG岩盤貯蔵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岩盤貯蔵タンクを含む受入から払出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125,000m³ 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岩盤貯蔵タンクに受入貯蔵する。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岩盤貯蔵タンク内の一部のBOGをタンカーへ送り出す。

LNG岩盤貯蔵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・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岩盤貯蔵タンクの貯蔵圧力は高圧と低圧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圧での運用を行うものとし、現在の地中タンクの保冷材およびメンブレンなどの延長技術で対応していくものとする。

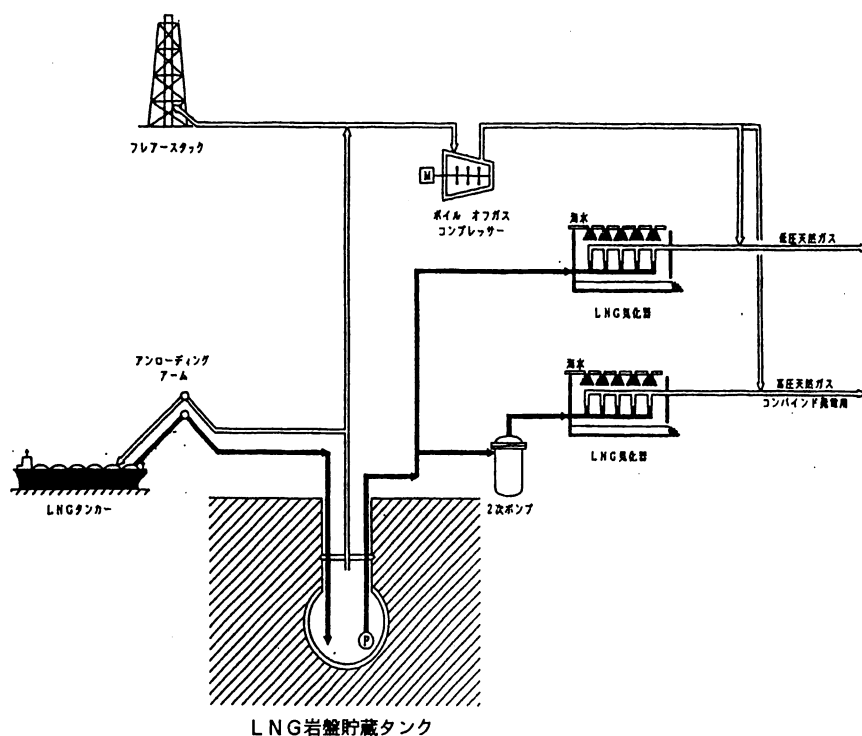


図 5.1 LNG岩盤貯蔵タンクの受入基地概略フロー

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る、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
- 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) 貯蔵タンク構造

- 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：空洞土被り100m（空洞周辺の冷熱影響を考慮）
- ③ 保冷、液密対策：メンブレンと保冷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 保冷材の物性：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
（保冷材厚み20cmにて冷却経過30日後）

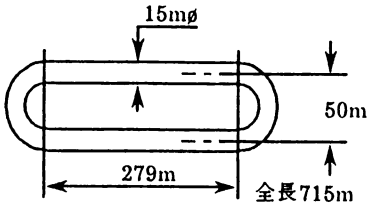
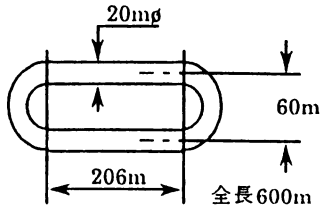
5.4 貯蔵規模

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360,000 kl となる。

(1) 貯蔵タンク寸法および基数

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 ϕ あるいは20m ϕ の円形断面に設定した。

表 5.2 検討貯蔵タンクケース

ケース 諸元	15m φ 貯蔵タンクケース	20m φ 貯蔵タンクケース
貯蔵タンク形状		
基 数	3 基	2 基
貯蔵容量	120,000kl／基	180,000kl／基

(2) 貯蔵タンク基数について

- ① 貯蔵タンク基数はメンテナンスを考慮して最低2基とする。
- ② 貯蔵タンク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とお経済性(基数の少ない方が有利)とを勘案し、直径15m φのケースは3基、直径20m φ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しれないが、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は岩盤貯蔵タンク内に圧力約3,500mmAq、温度約 -162°C 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 5.3 貯蔵条件比較表

タンク形式 項 目		岩盤貯蔵タンク		地上二重殻あるいは 豎型地中タンク		
(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) 貯蔵タンク内圧力は、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。夜間貯蔵タンク内に蓄圧された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、物性の温度依存性、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 A B Q U S : 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 A D I N A : 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。
ADINA-T
ADINA-F
- ③ D I A N A : 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 H I G H - T E M P : 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 N A S T R A N : 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 S I G N A S : 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 U D E C : 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	○	×	×	○	○
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

×：解析機能をもっていない

△：完全ではないが

？：調査では不明

機能としてもっている

※1) : 一部のバージョンで可能

6.2 熱伝導解析

(1) 解析条件

1) 概 要

本説では、LNGの貯蔵に伴う空洞周辺岩盤の温度変化を空洞壁面に保冷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、LNGのボイルオフガス（BOG）量、保冷材の必要厚、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FEM解析	ADINA-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 ϕ
		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℃
	対称軸保冷境界	—————	—————
	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
	保冷材（PUF） （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	保冷材厚	0 cm
	解析ケース 2	保冷材厚	20cm

2) 対象岩盤

LNG岩盤貯蔵タンクの対象岩盤としては、LNGの受払、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。

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

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。

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

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
- N : 内部内挿関数
- N_s : 表面内挿関数
- q^B : 体積熱流入
- 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。

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

従って、(式 6.8) より次式が成り立つ。

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

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。

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

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

$$\underline{K}_{t+\Delta t} = \left[\int_V \left(\left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial x} \right)^T \cdot k_x \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial x} + \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \right)^T \cdot k_y \cdot \frac{\partial \underline{N}}{\partial y} \right) dV \right] \quad (\text{式6.13})$$

$$\underline{F}_V^{t+\Delta t} = \left[\int_V \underline{N} \cdot q^3 dV \right] \quad (\text{式6.14})$$

$$\underline{F}_S^{t+\Delta t} = \left[\int_S \underline{N}_s \cdot q^s dS \right] \quad (\text{式6.15})$$

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。

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

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

使用する解析プログラムは、熱伝導解析結果を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、F E M解析プログラムのA D I N Aシリーズを用いることにした。熱伝導解析はA D I N A - T、熱応力解析はA D I N Aである。

A D I N A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 (A D I N A - 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 (A D I N A)	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) ×	×	—	—	$\sigma_t, \sigma_c,$ ε_c など	○ σ_t 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_1, E_1) or (σ_1, ε_1) ～ σ_7, ε_7)		—
	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_1, E_1) ○		—
	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_1, E_1) ○		—
	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、参考文献^{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 保冷材

P U F 保冷材の熱物性値は、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

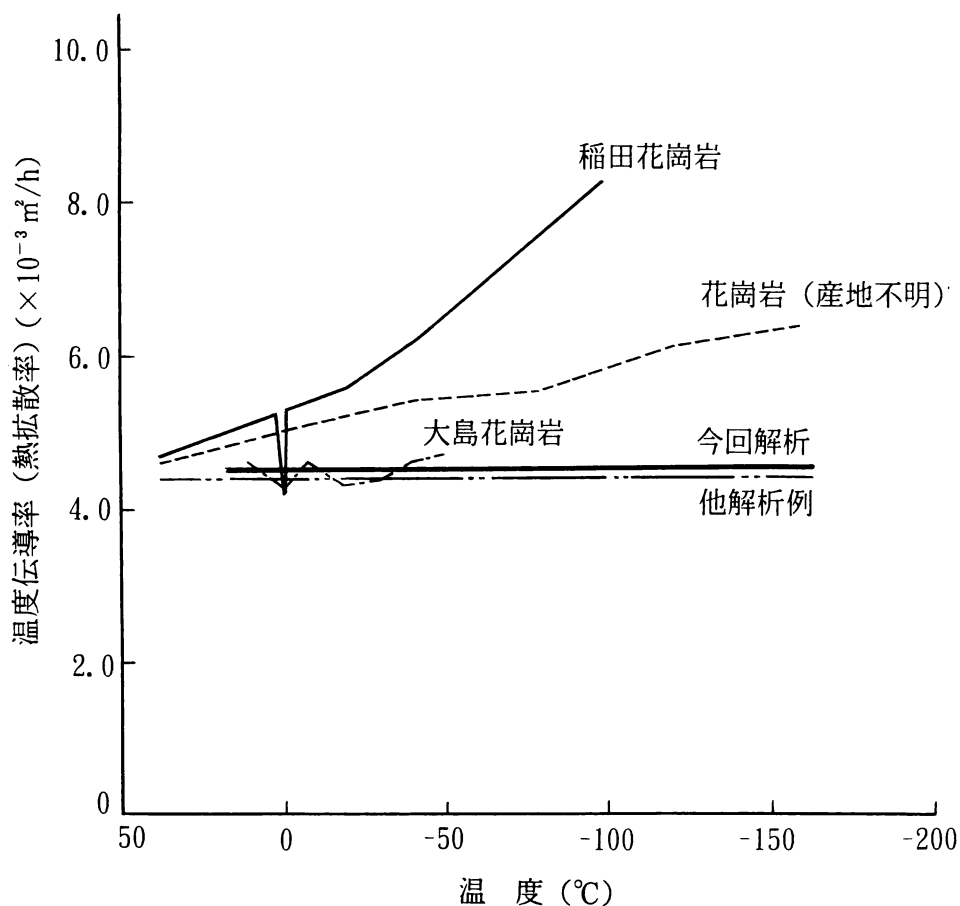


図 6.1 花崗岩の温度伝導率（大島花崗岩以外は計算値）

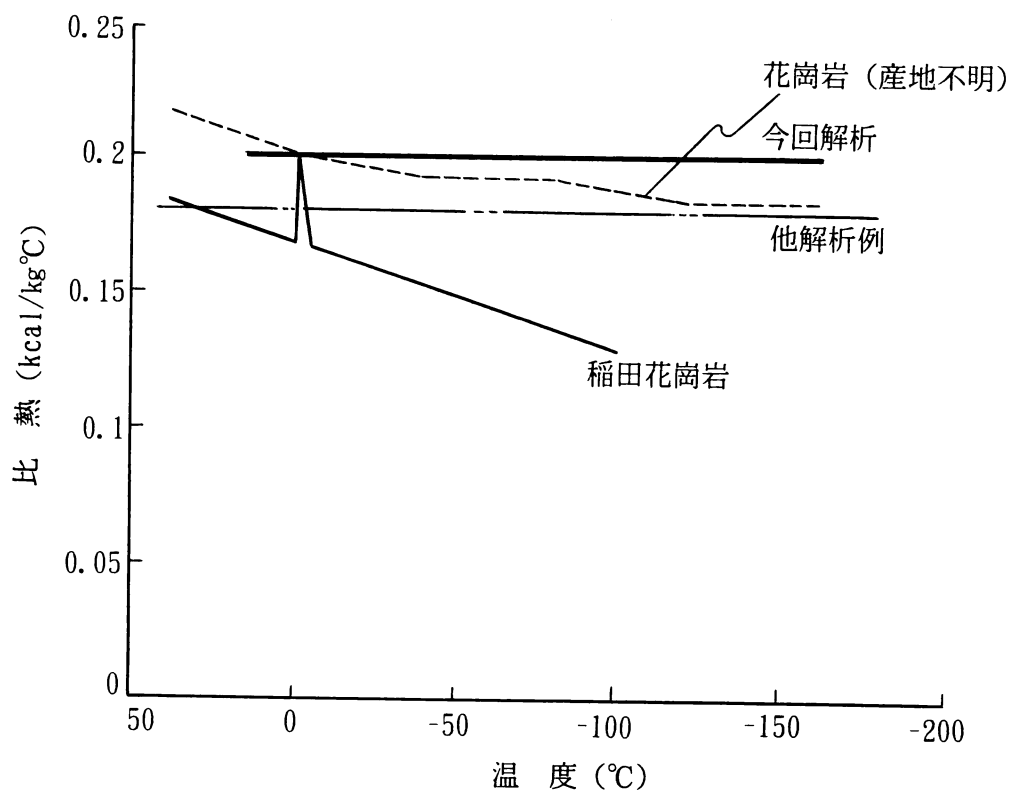


図 6.2 花崗岩の比熱

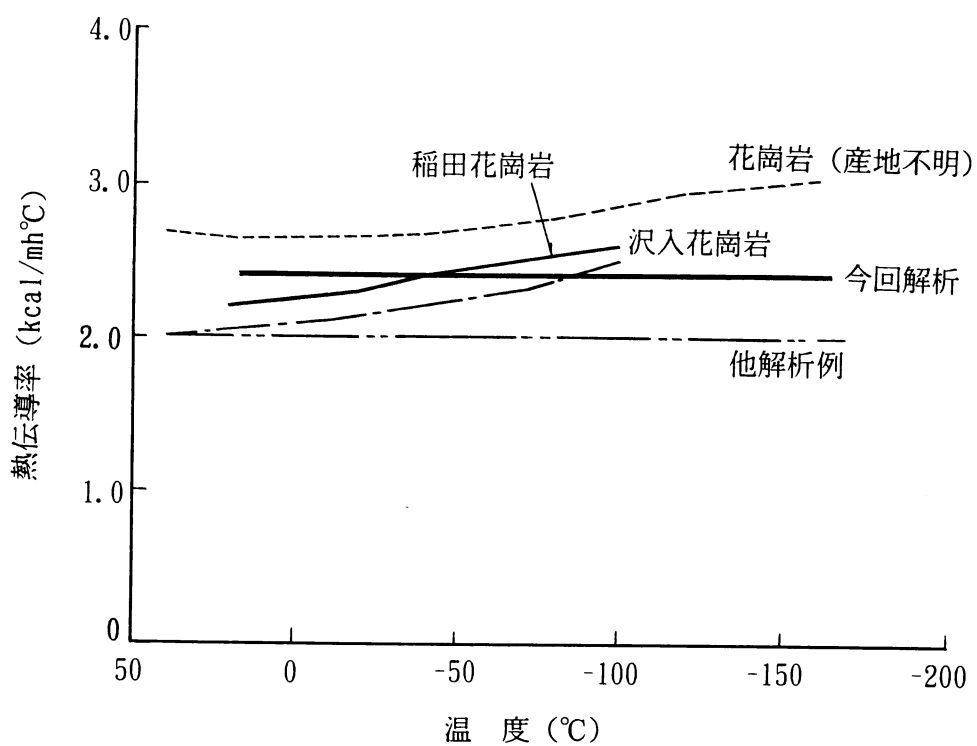


図 6.3 花崗岩の熱伝導率

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方式とする。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 ϕ とする。

② 解析範囲

解析範囲は、冷熱の影響範囲および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

対称軸境界は保冷境界、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 $10\text{kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$

④ 初期温度

岩盤、保冷材、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、空洞内壁に保冷材を設置した場合と保冷材を設置しない場合の以下の2ケースとする。

ケース1：空洞表面に保冷材を施工せず、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）

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

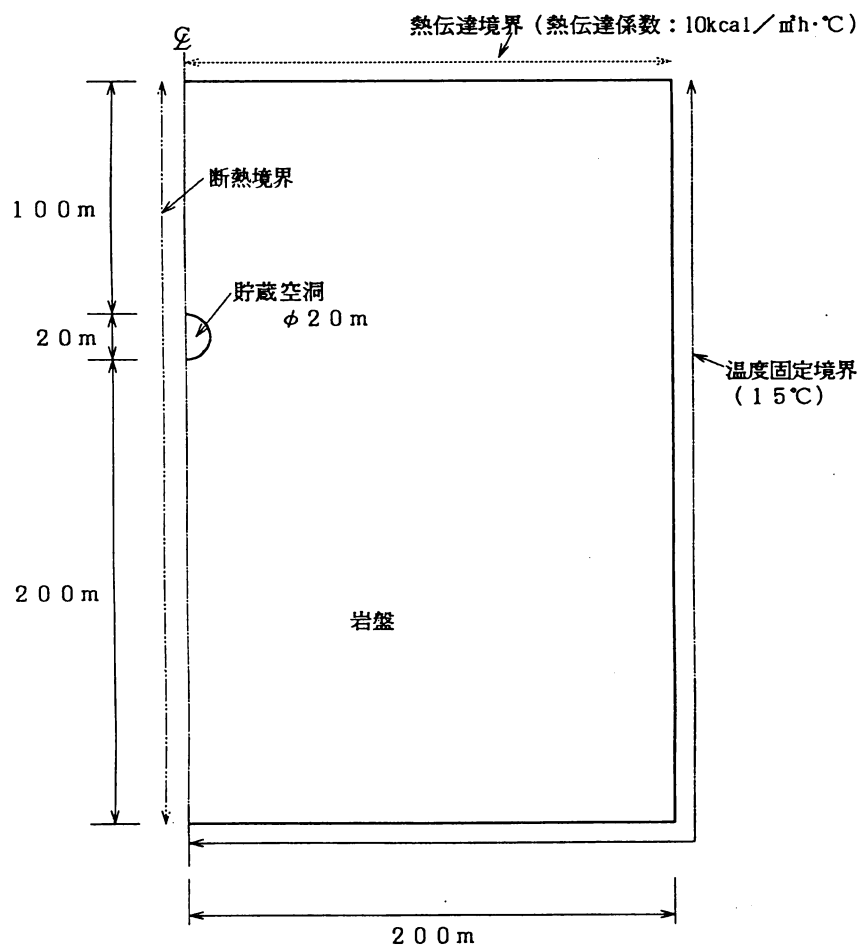


図 6.4 解析モデル

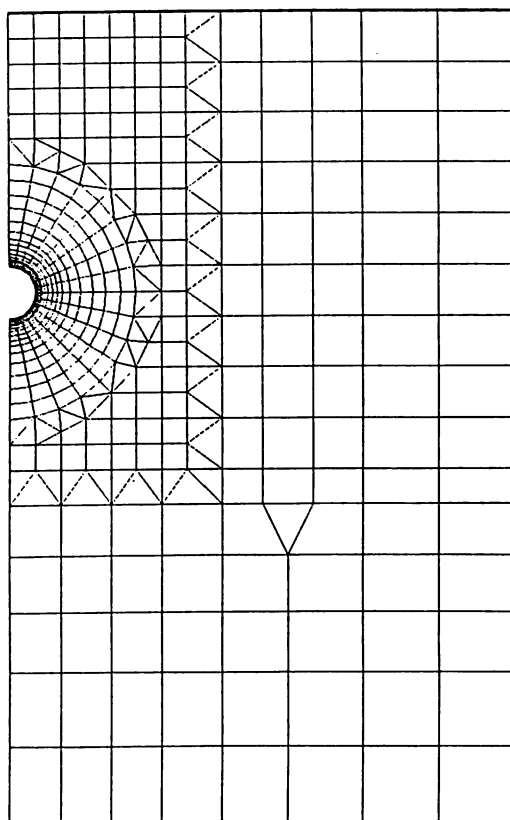


図 6.5 メッシュ分割図

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17ステップについて行った。

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

ケース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。同様にケース2における解析結果を図 6.8および図 6.9に示す。保冷材の効果が得られているため、ケース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、保冷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（17ステップ）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、ケース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、ケース2については保冷材の効果が得られているため、ケース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に各ケースの熱流束の経時変化を示した。ケース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 $20\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ 程度の値に収束してきている。一方、ケース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 $16\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ 、貯蔵50年後で約 $10\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ である。このことからケース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、ケースにおいては保冷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。

- 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を行う。
- 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。

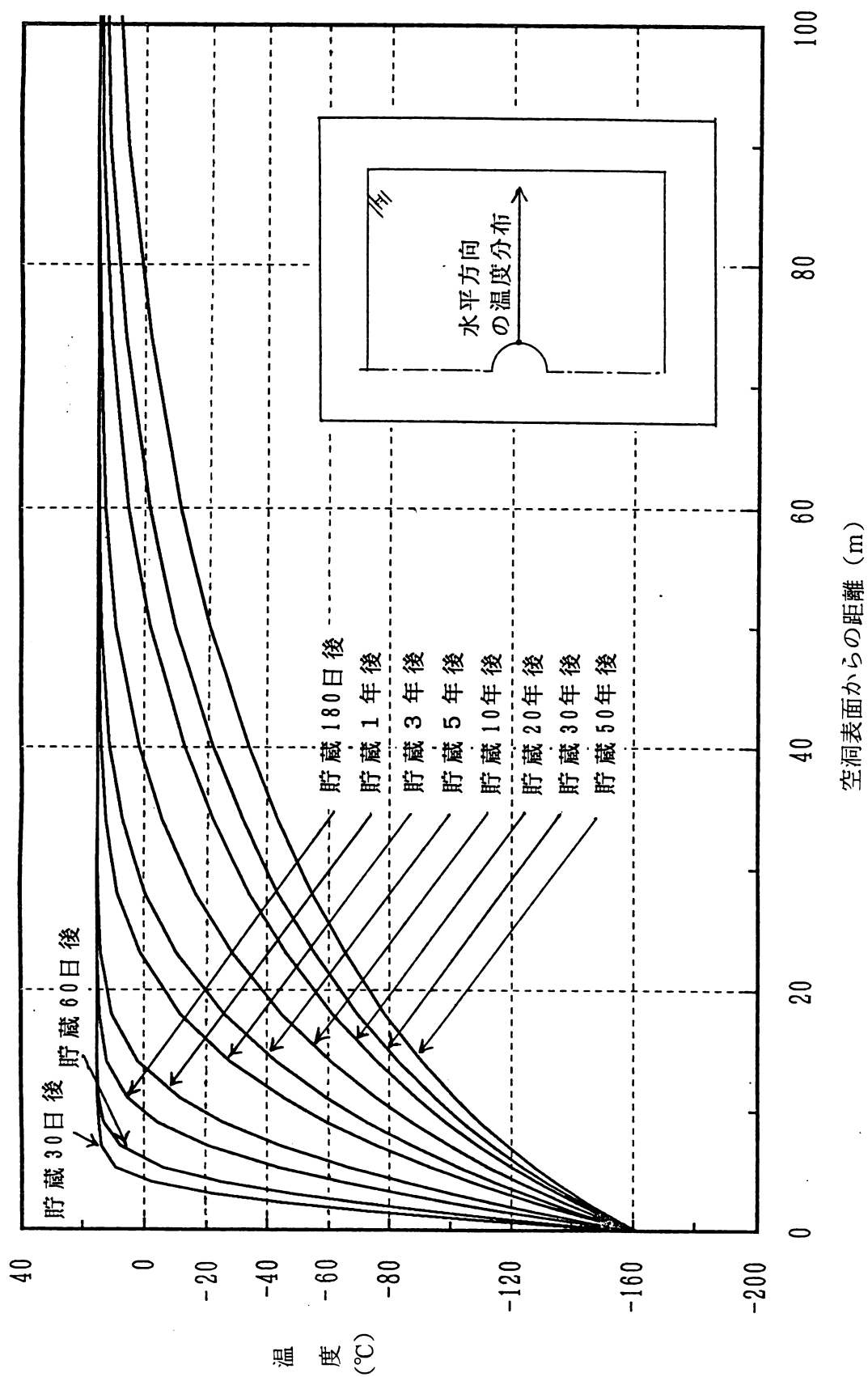


図 6.6 空洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (ケース1：水平方向)

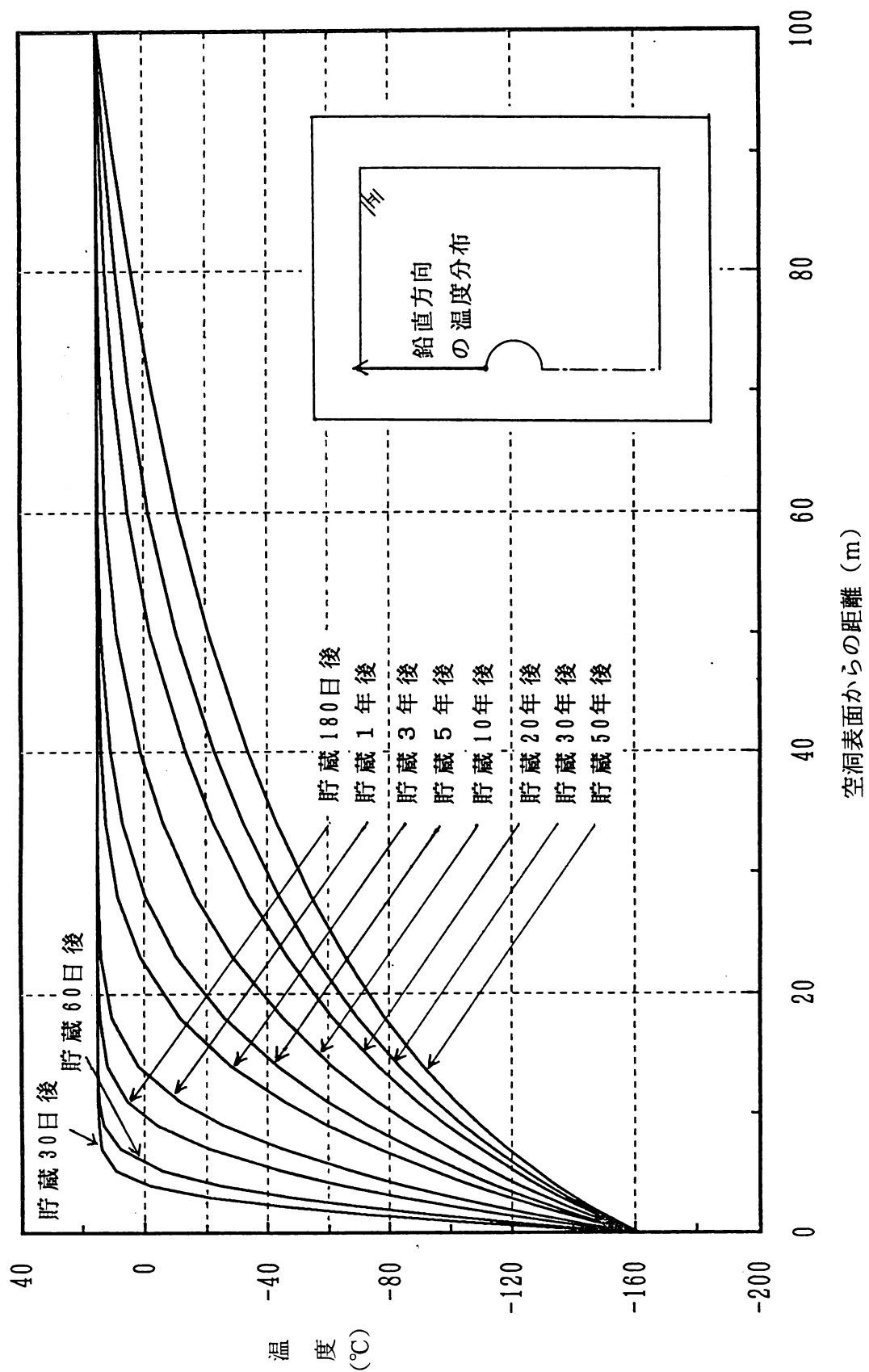


図 6.7 空洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (ケース 1 : 鉛直方向)

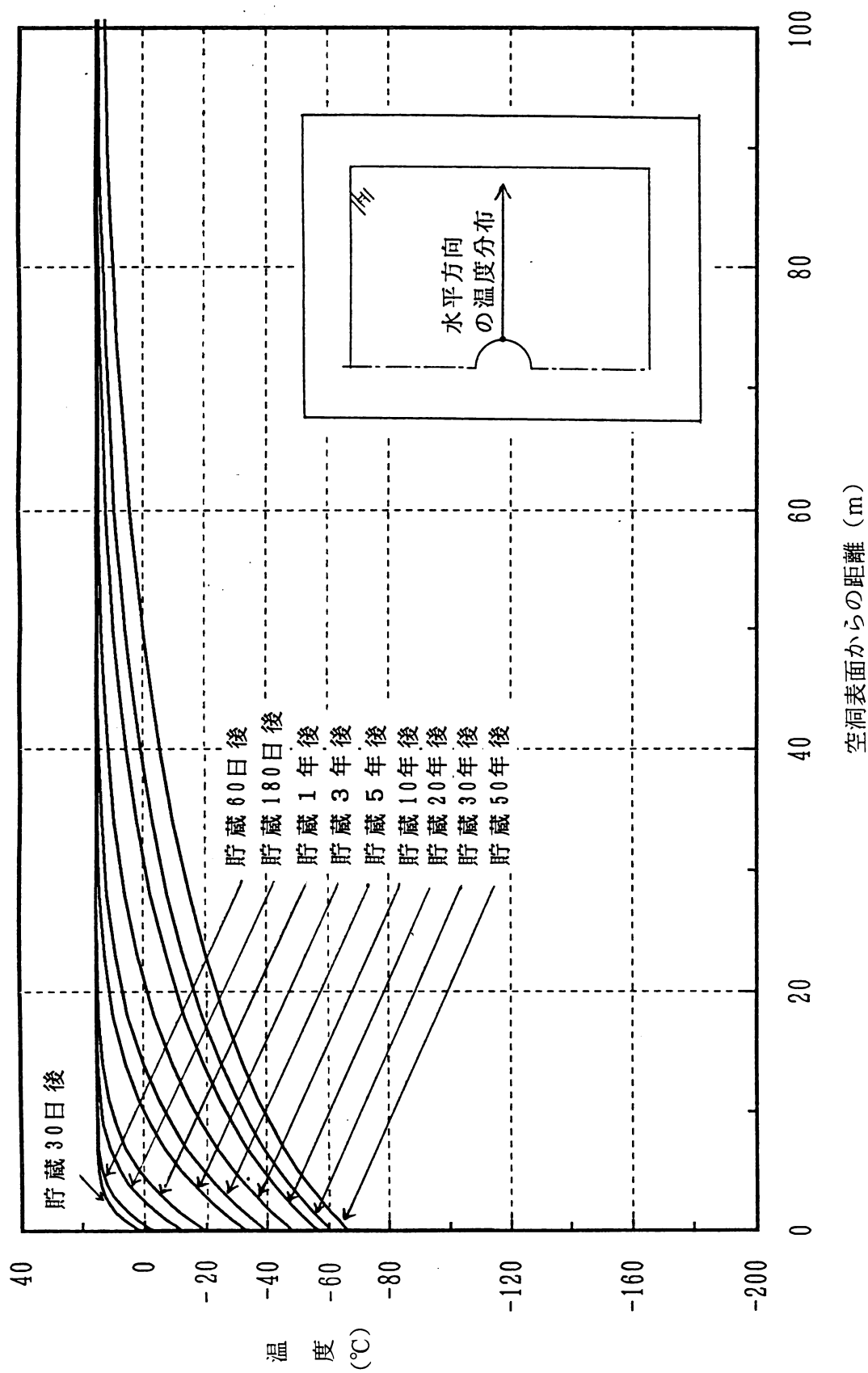


図 6.8 空洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (ケース 2 : 水平方向)

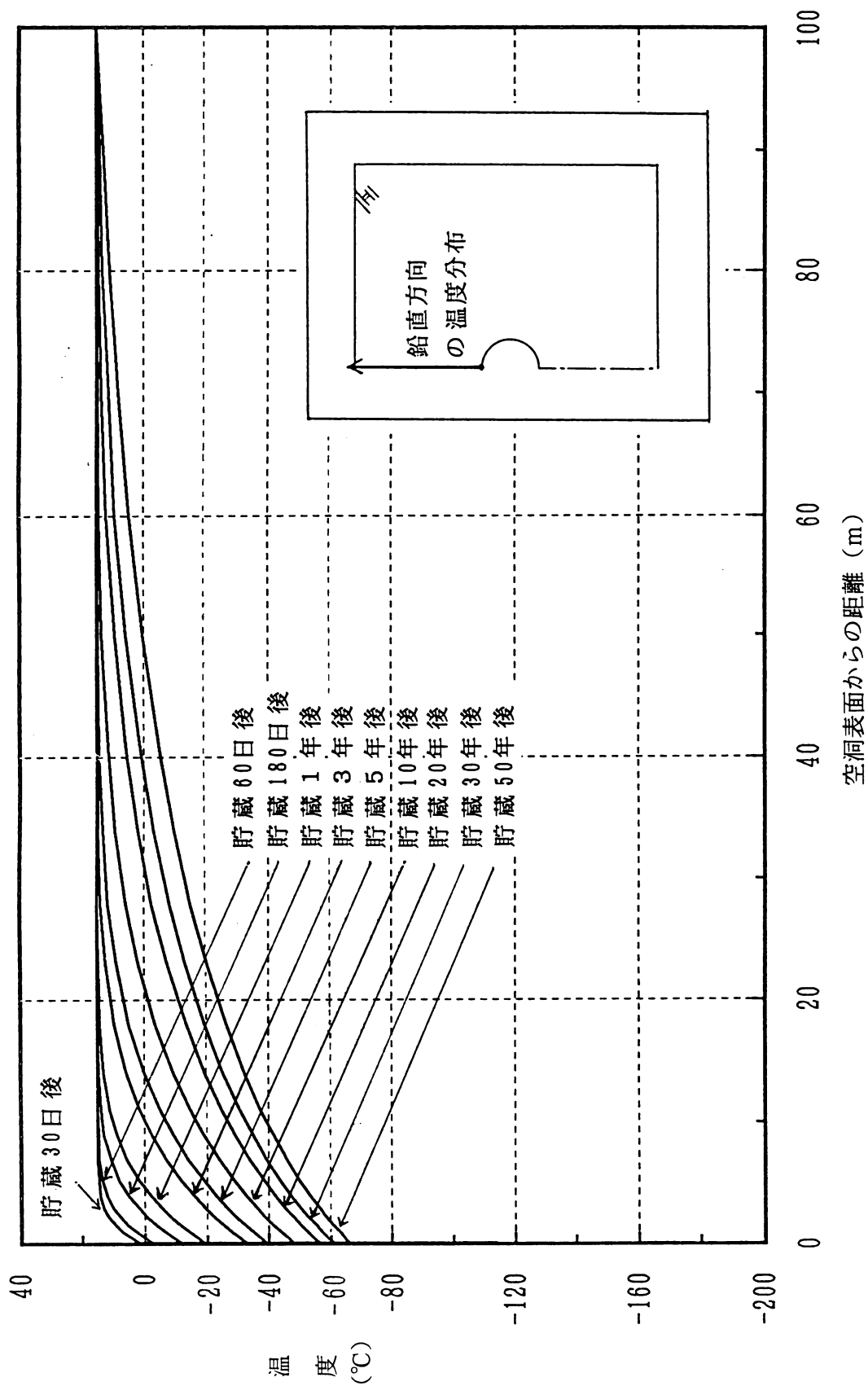
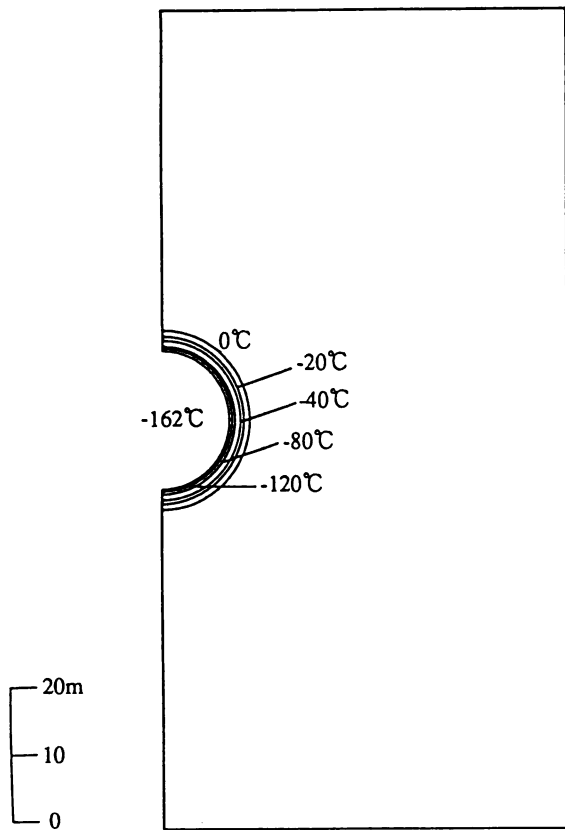
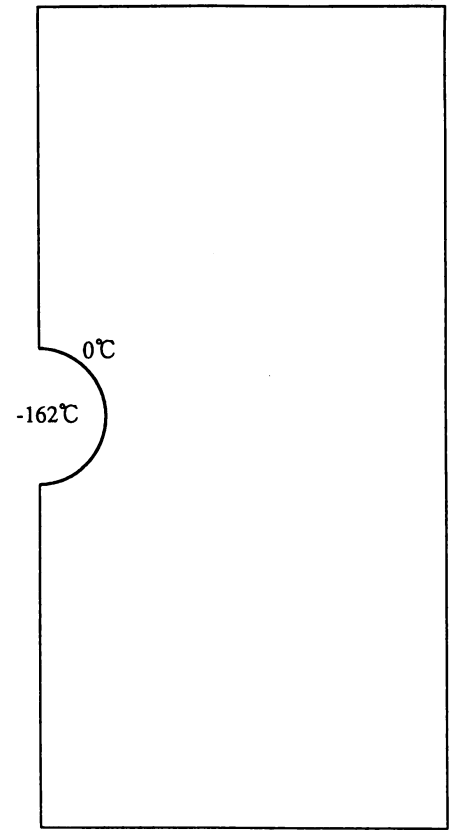


図 6.9 空洞周辺岩盤の温度分析の経時変化 (ケース 2 : 鉛直方向)

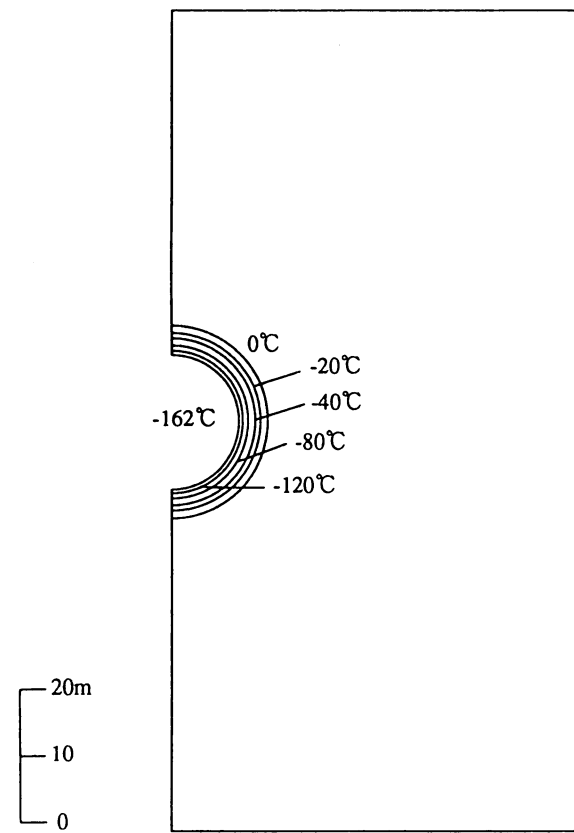


(a) ケース 1 (保冷材なし)

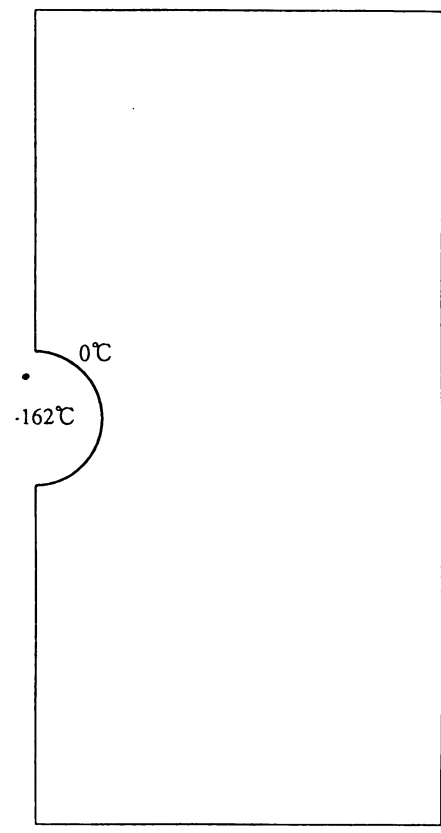


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.10 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵15日後)



(a) ケース 1 (保冷材なし)



(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.11 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵30日後)

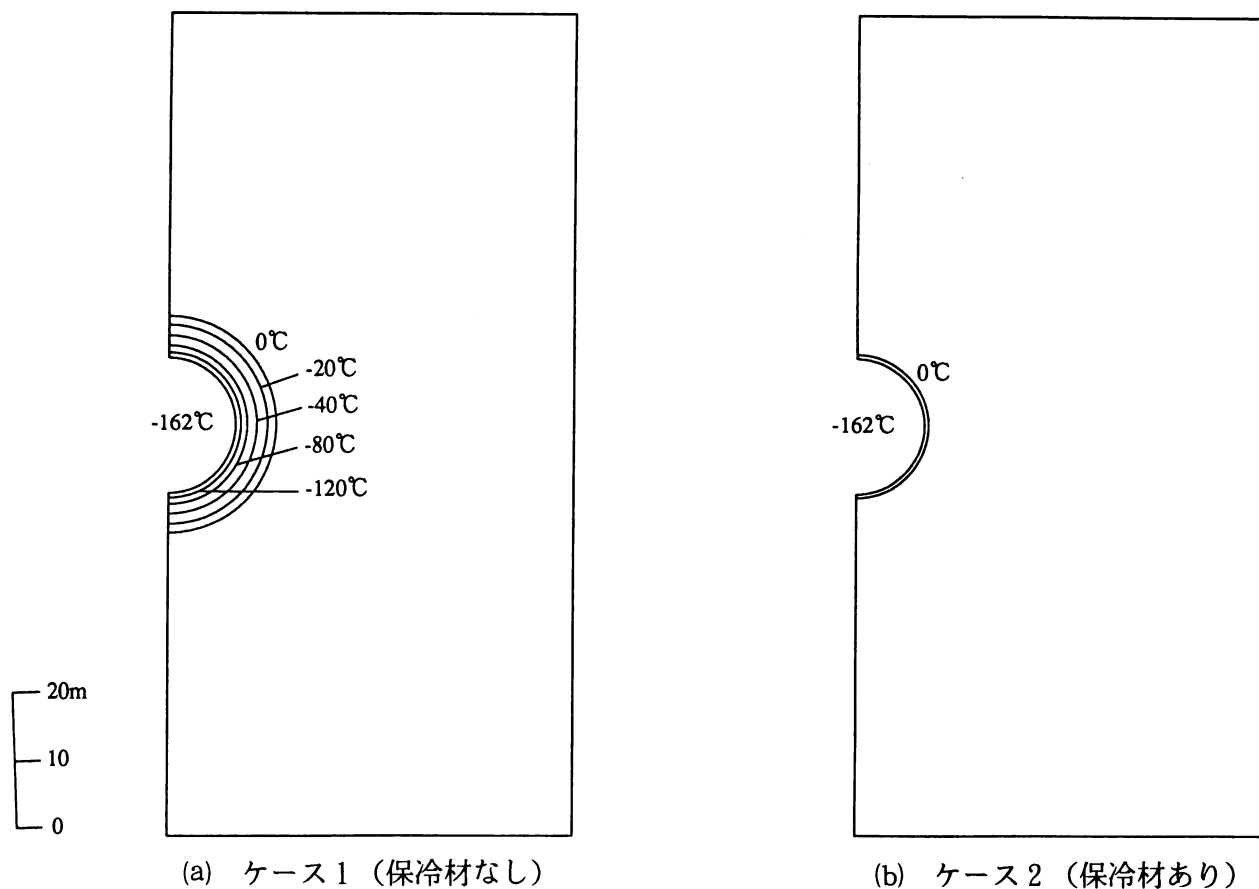


図 6.12 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵60日後)

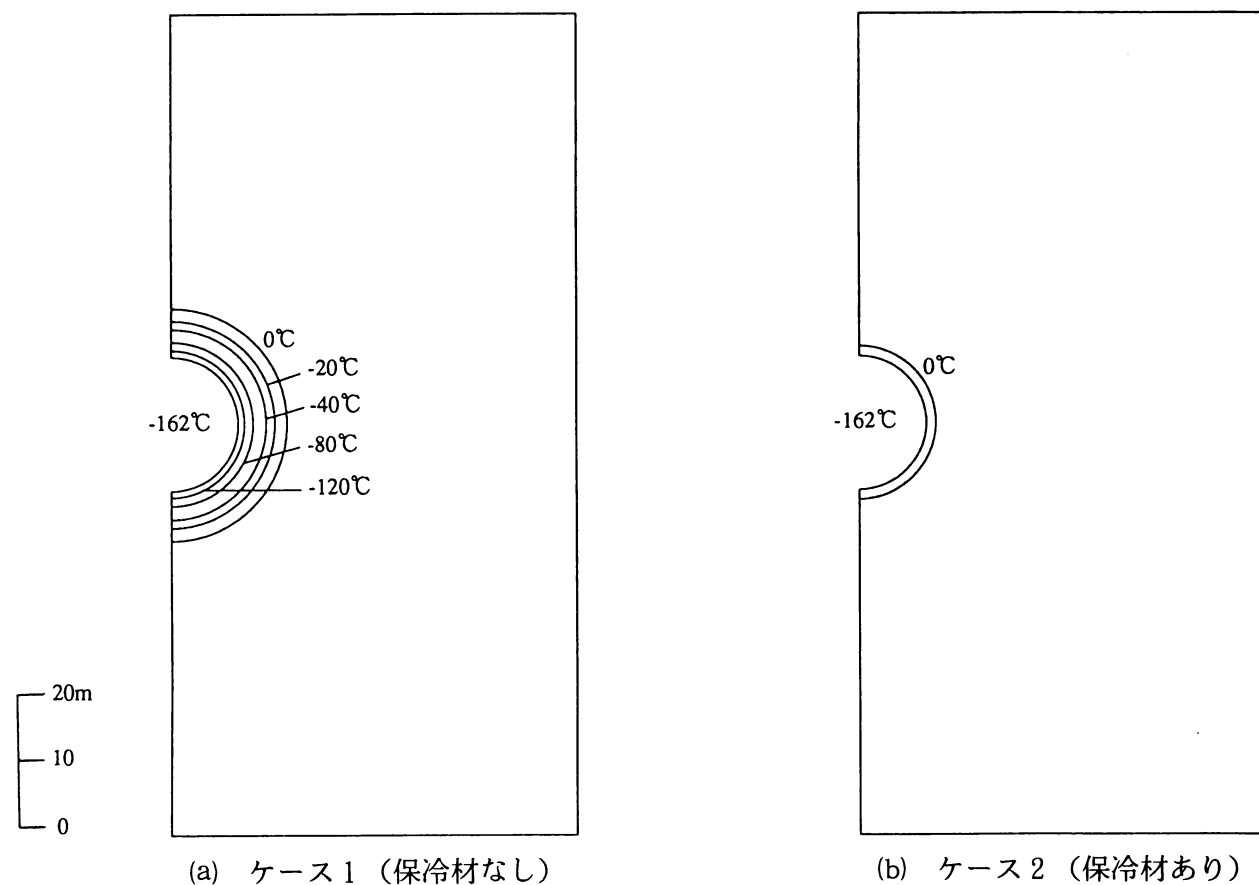


図 6.13 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵90日後)

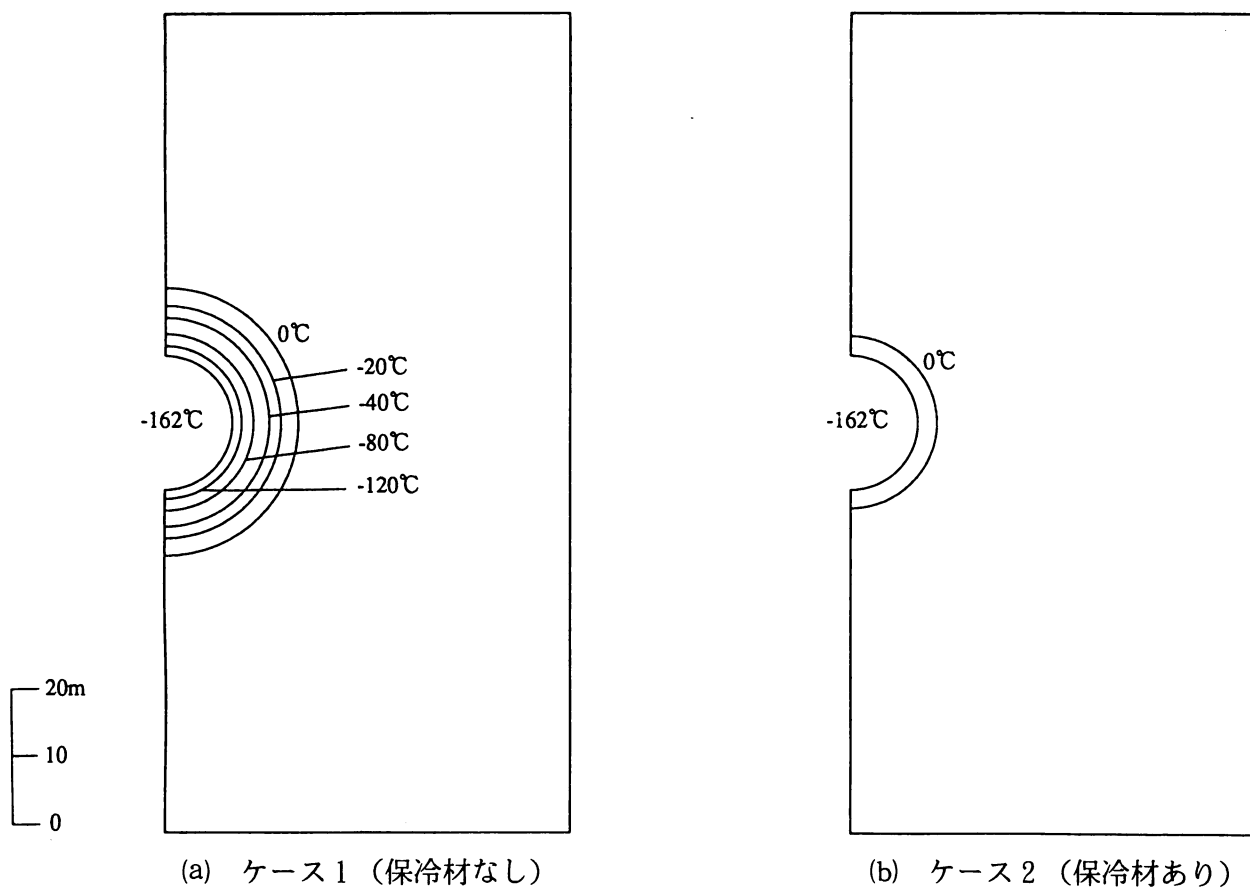


図 6.14 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵180日後）

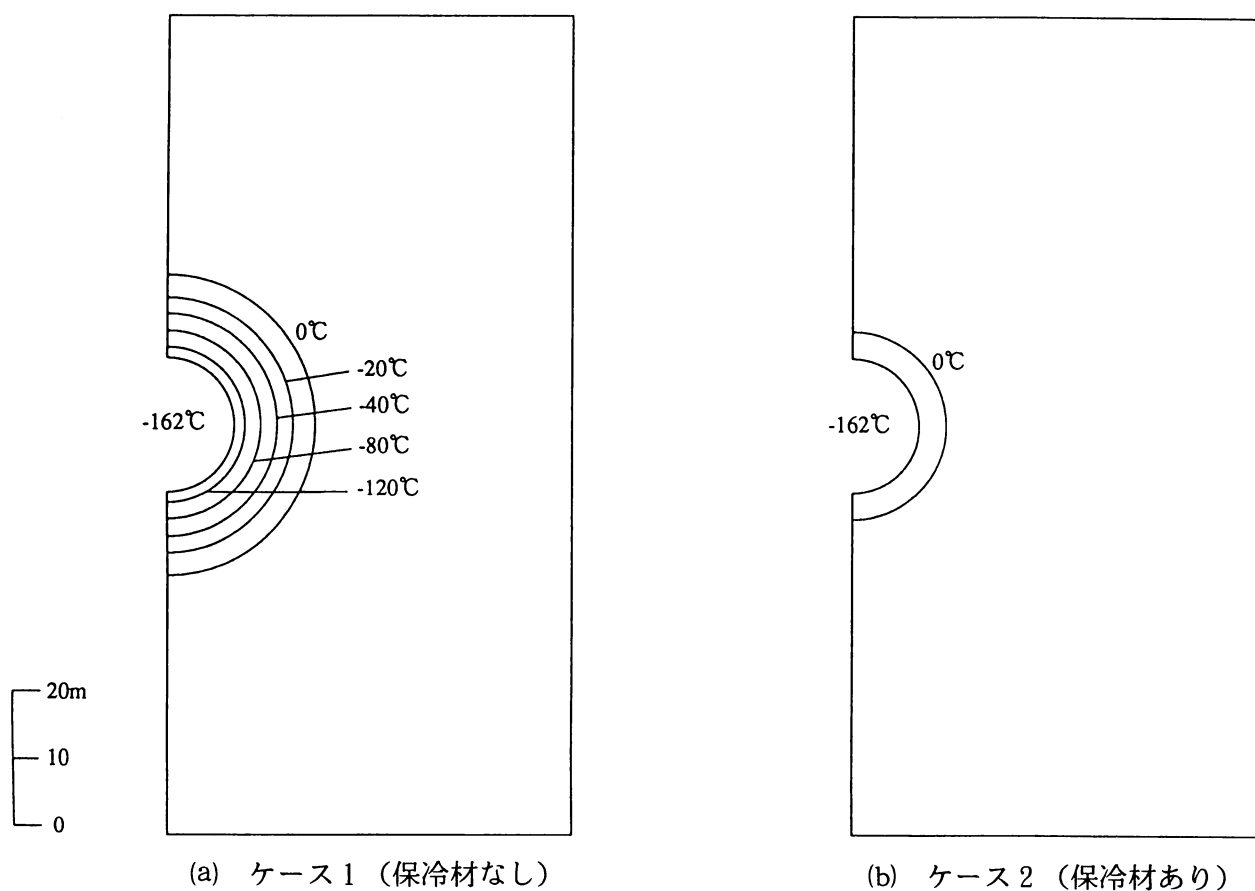
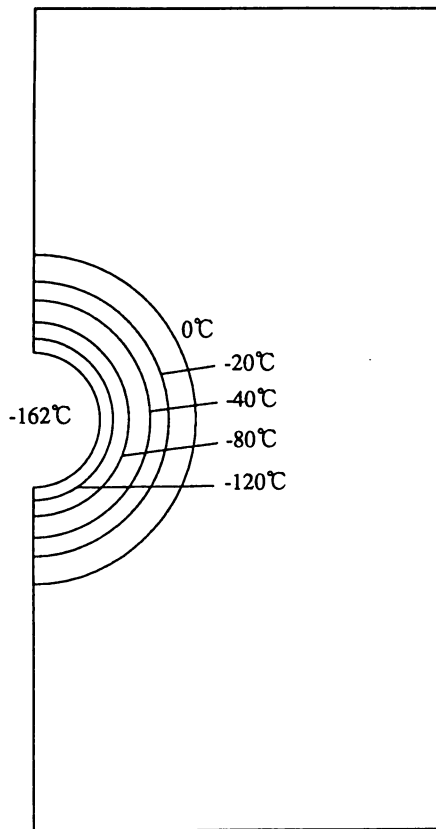
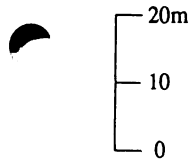
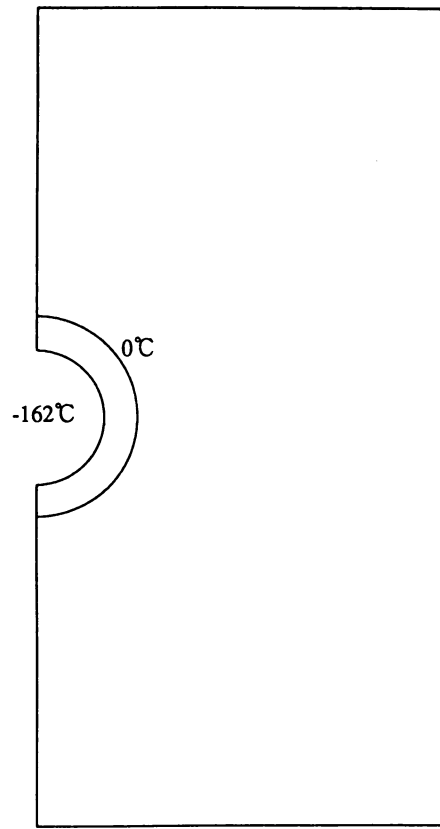


図 6.15 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵270日後）

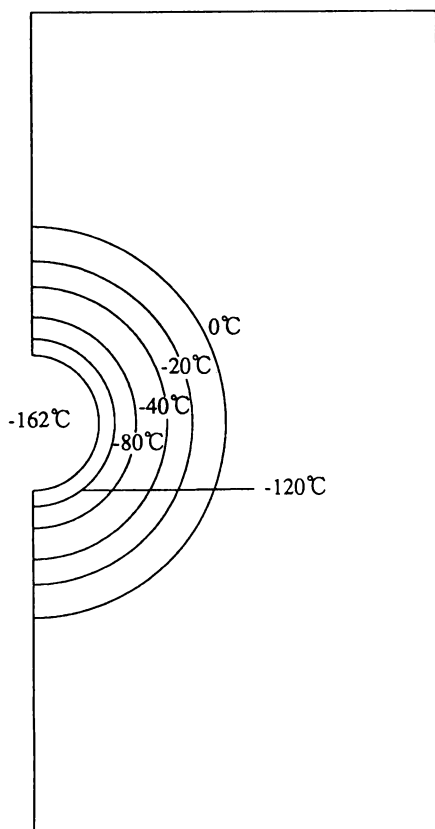


(a) ケース 1 (保冷材なし)

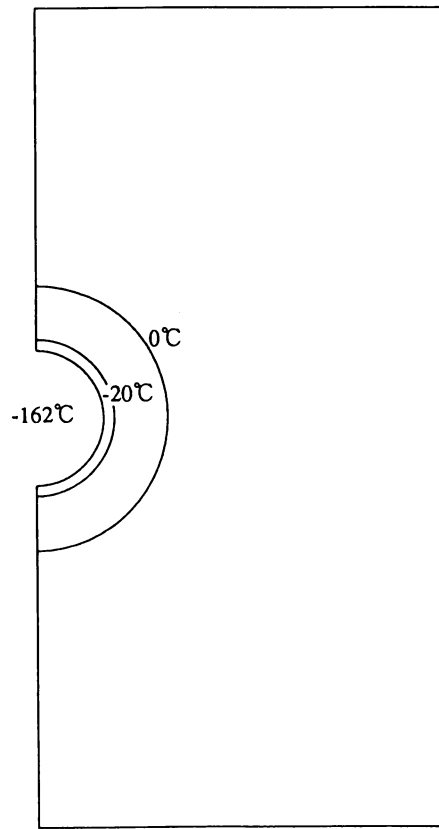


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.16 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵 1 年後）

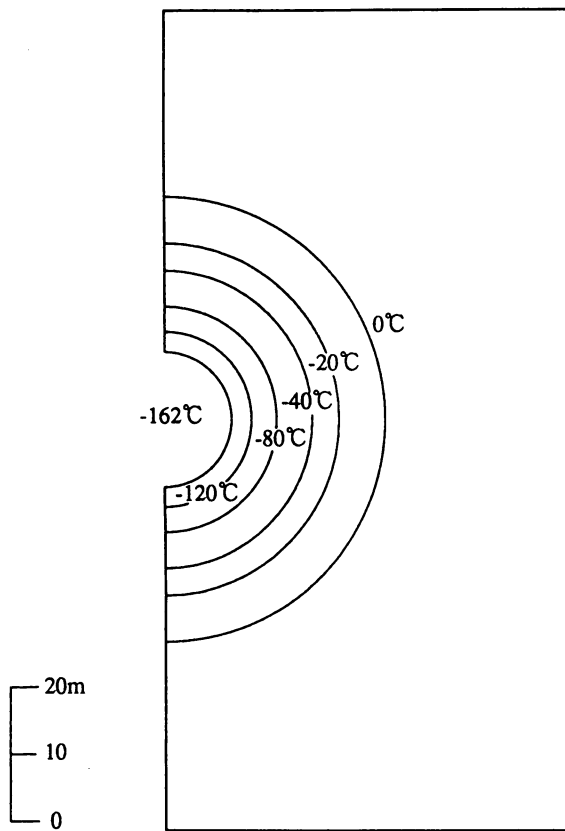


(a) ケース 1 (保冷材なし)

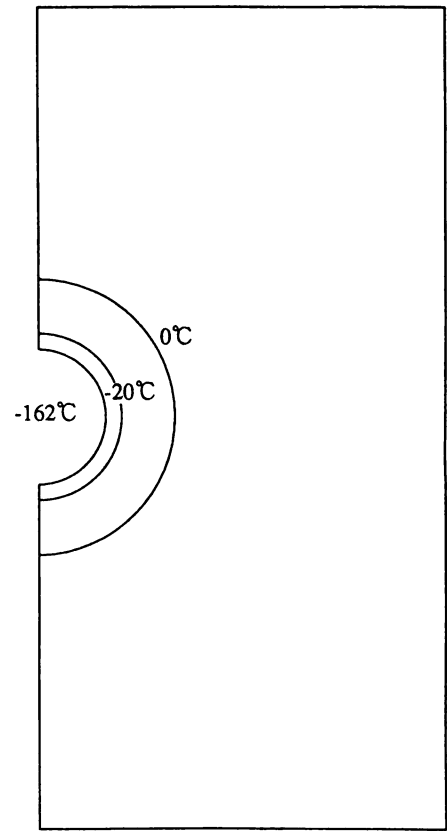


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.17 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵 2 年後）

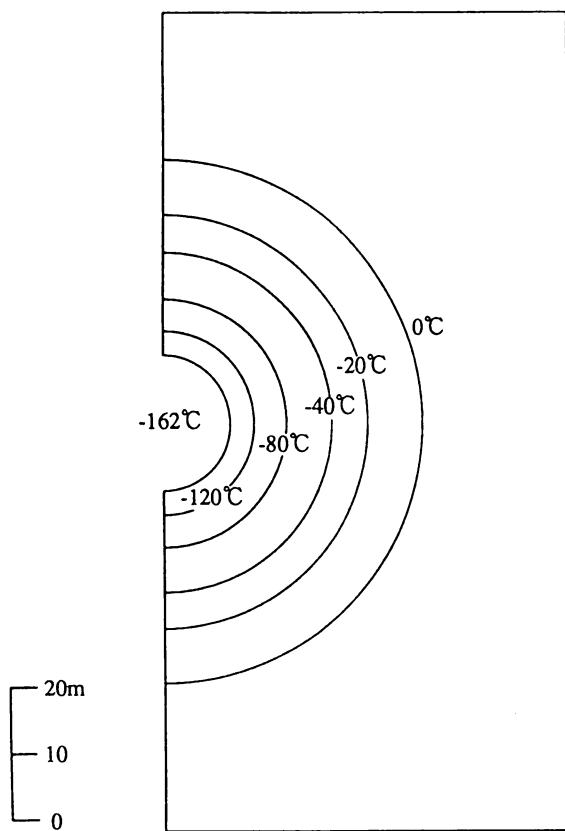


(a) ケース 1 (保冷材なし)

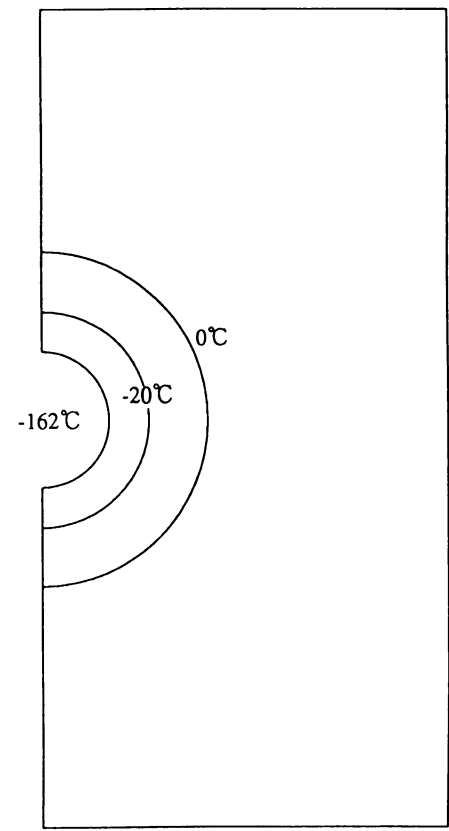


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.18 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵 3 年後)



(a) ケース 1 (保冷材なし)



(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.19 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵 5 年後)

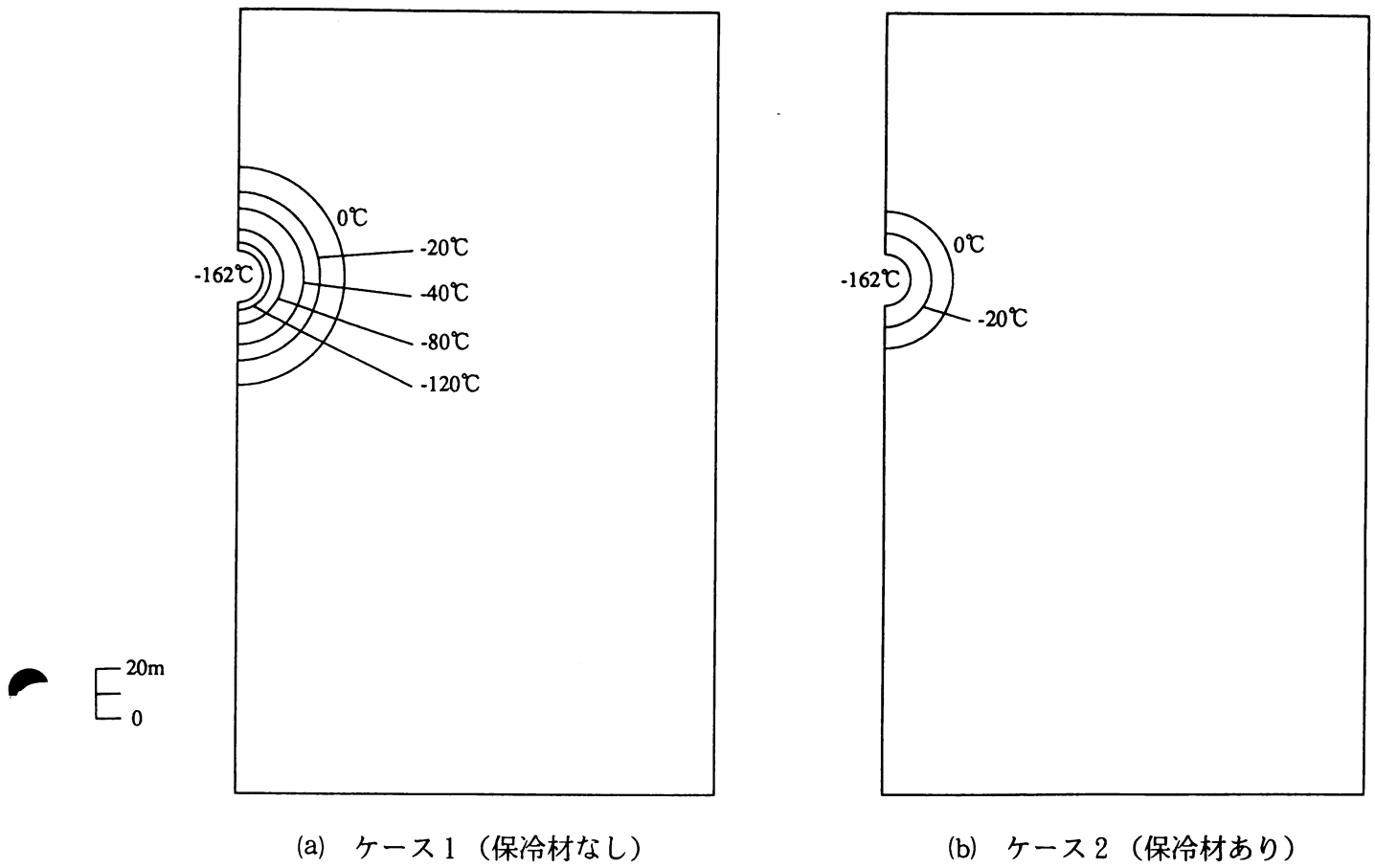


図 6.20 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵7.5年後）

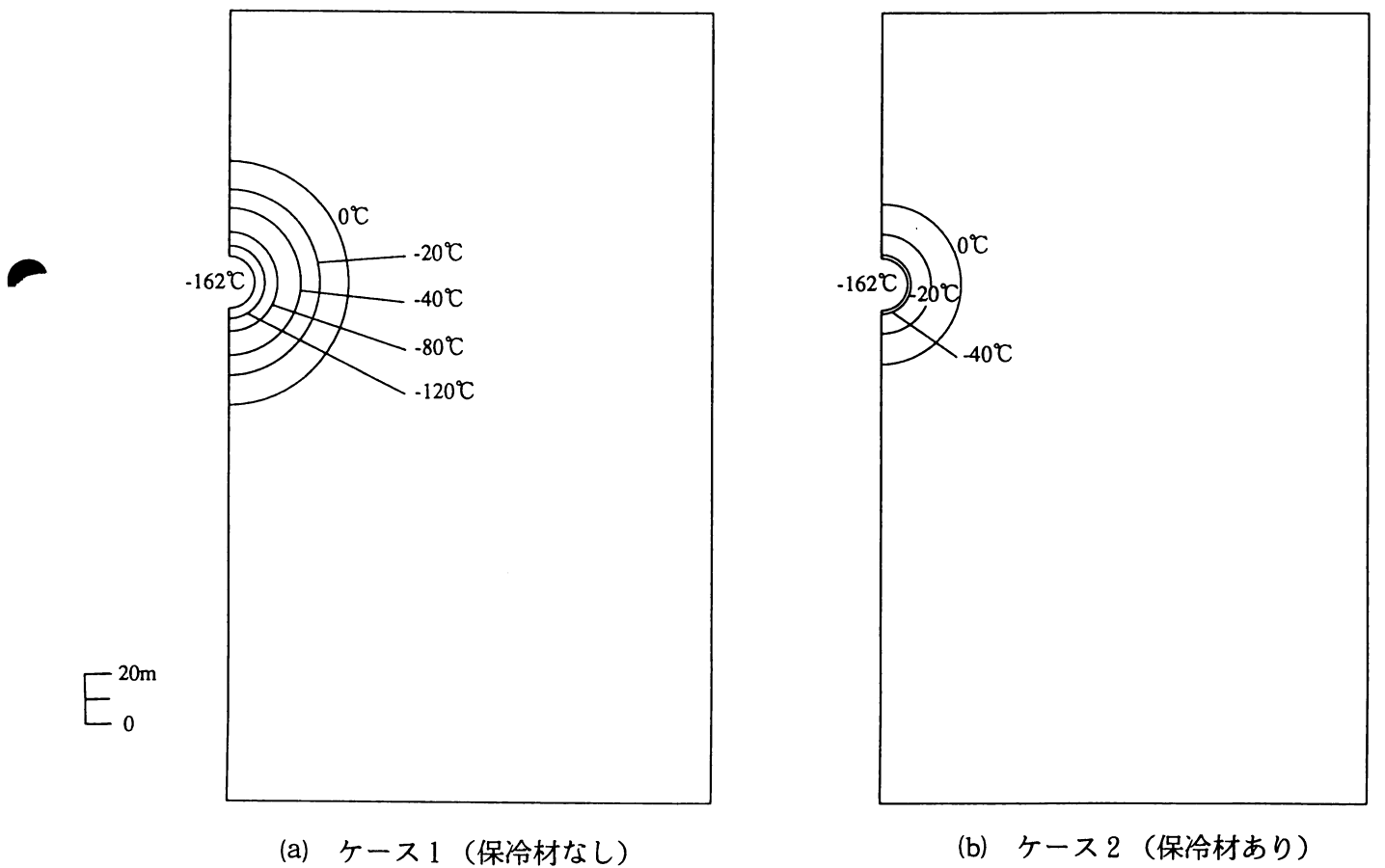
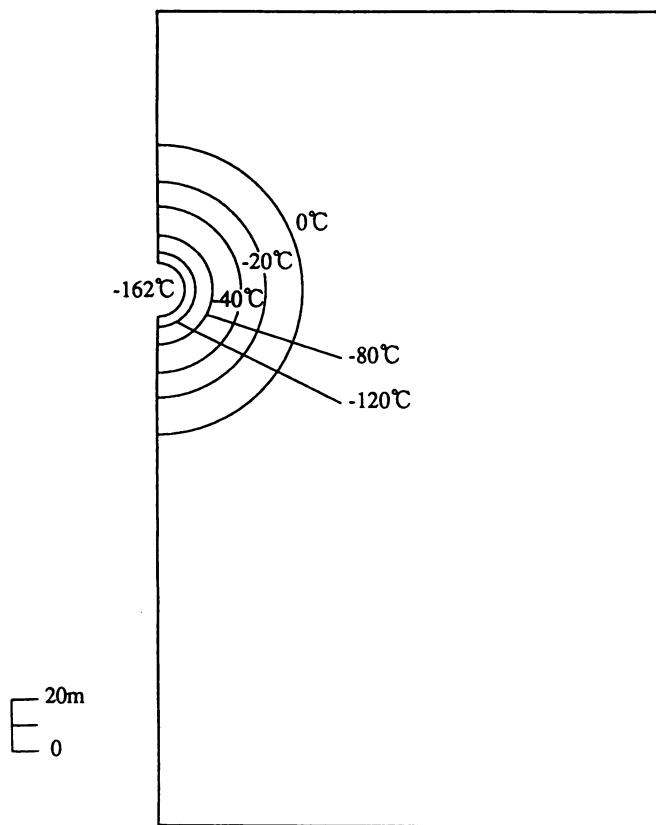
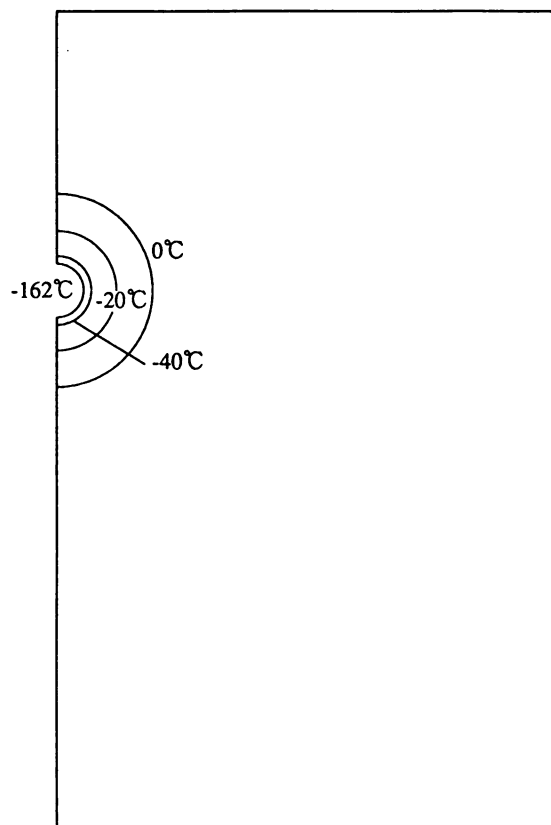


図 6.21 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵10年後）

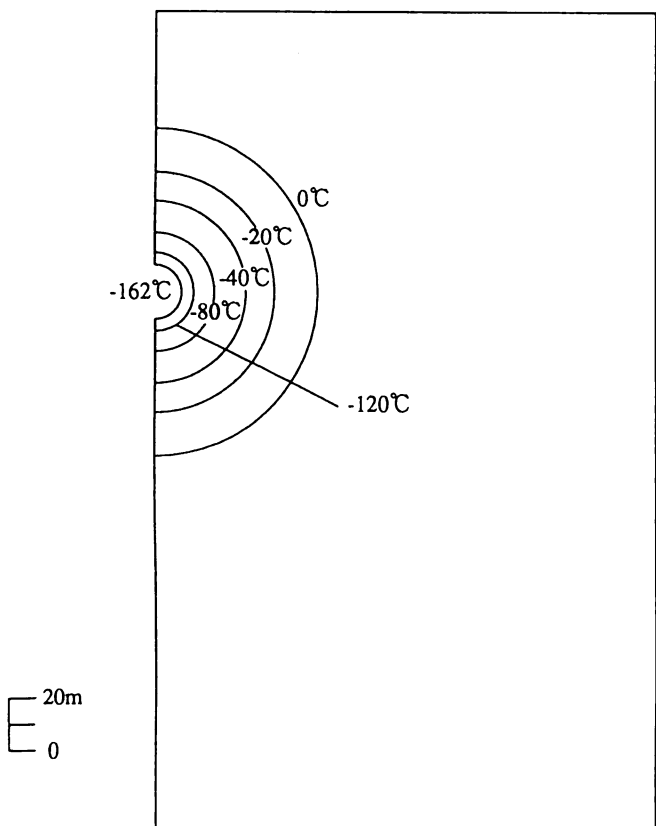


(a) ケース 1 (保冷材なし)

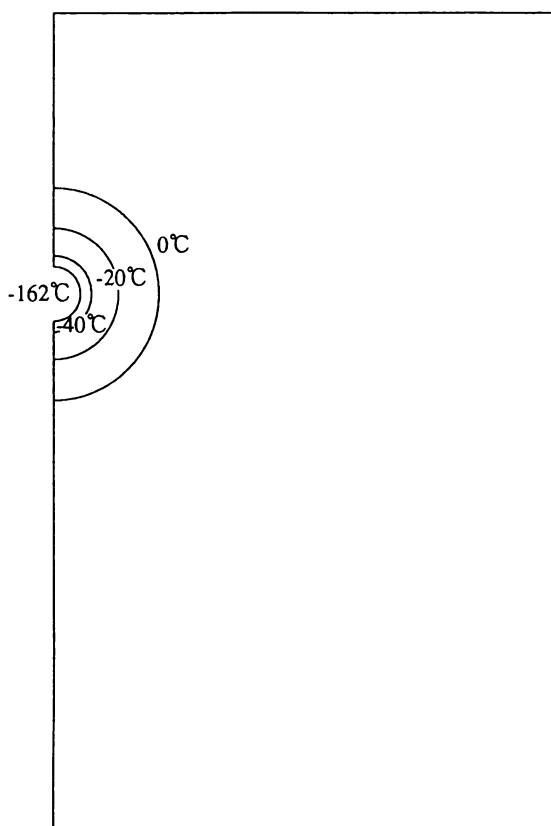


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.22 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵15年後)

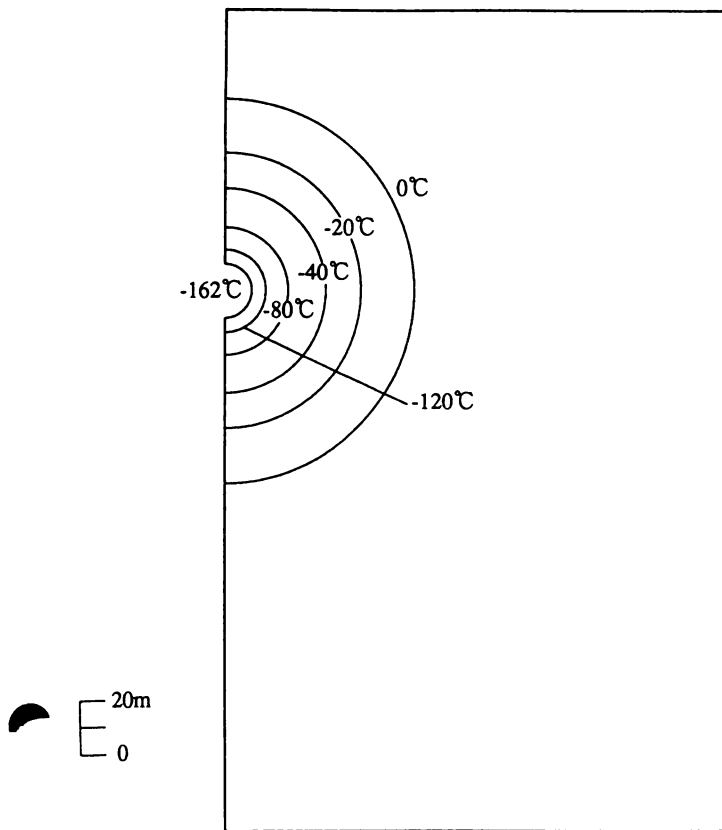


(a) ケース 1 (保冷材なし)

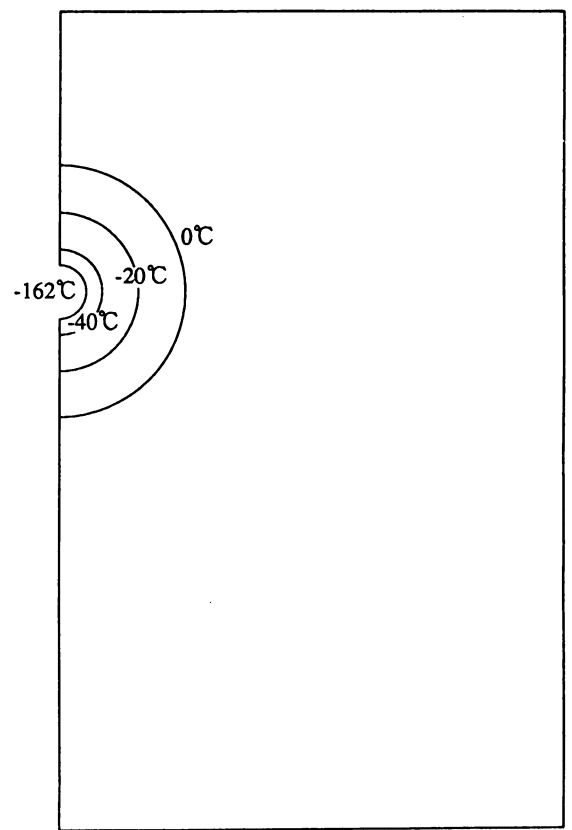


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.23 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵20年後)

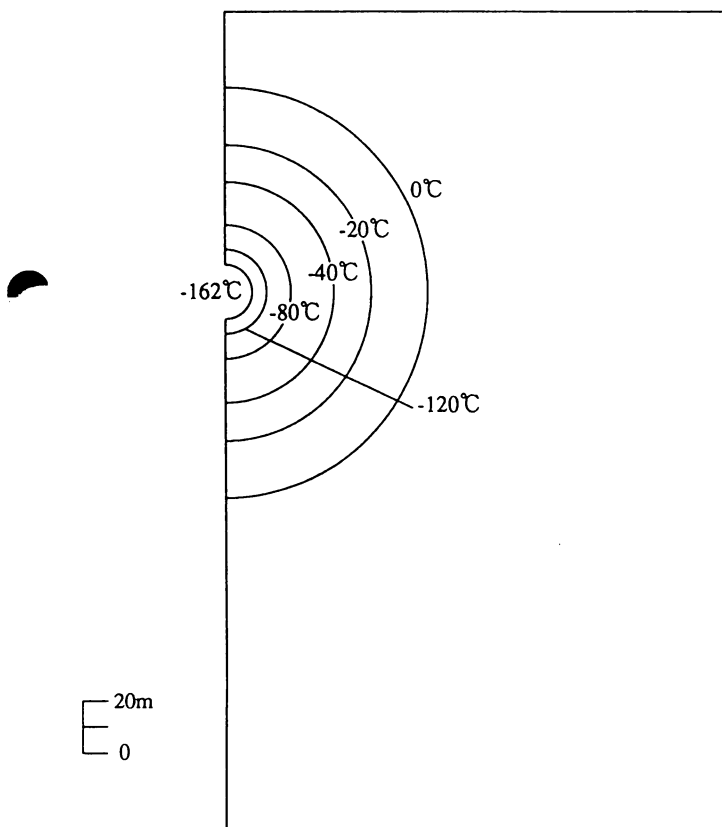


(a) ケース 1 (保冷材なし)

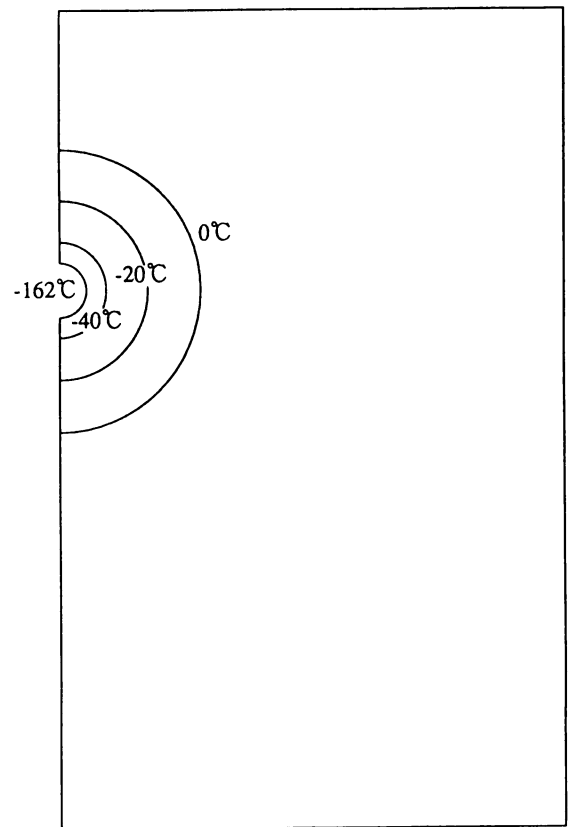


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.24 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵30年後)



(a) ケース 1 (保冷材なし)



(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.25 空洞周辺の岩盤の温度分布 (貯蔵40年後)

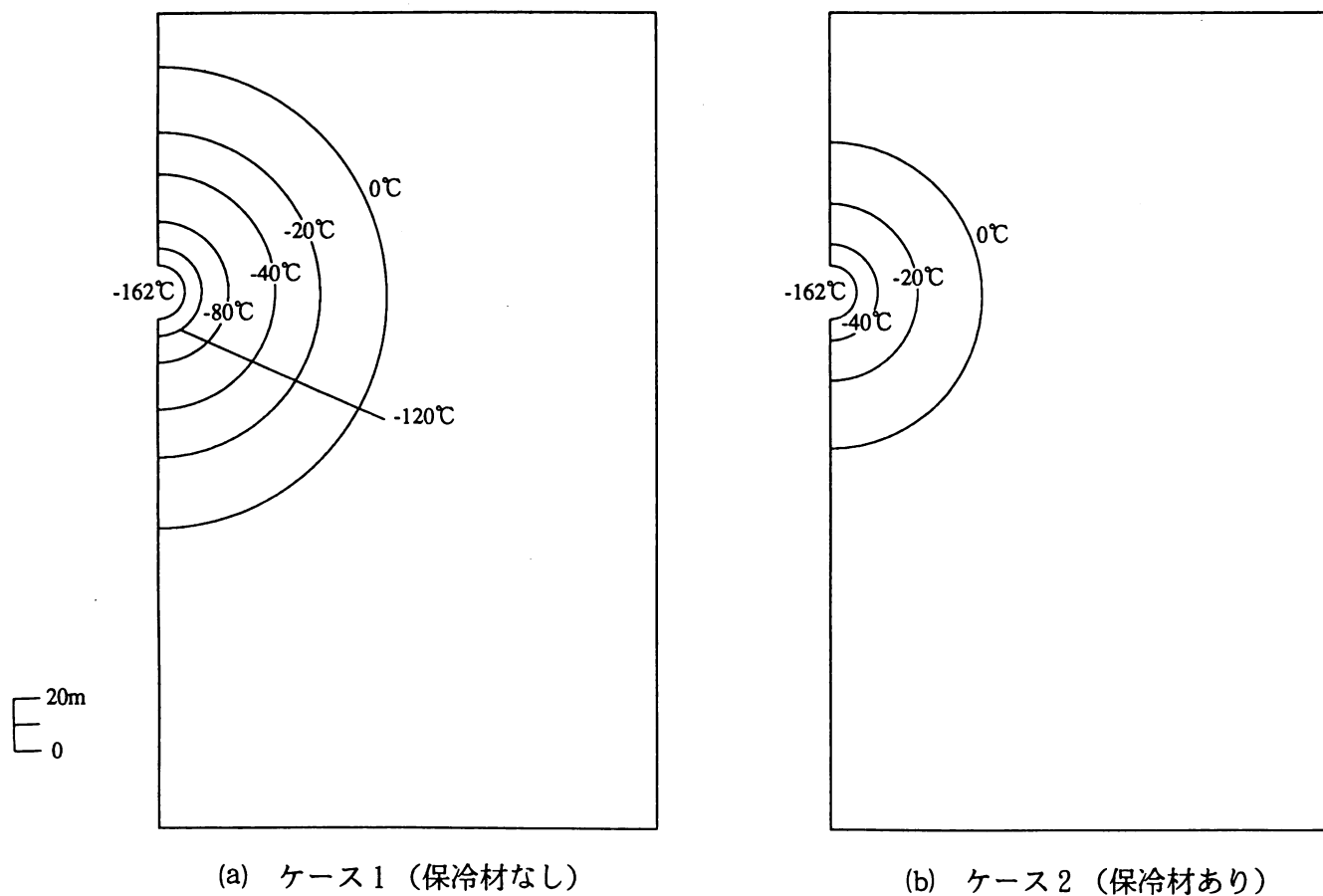


図 6.26 空洞周辺の岩盤の温度分布（貯蔵50年後）

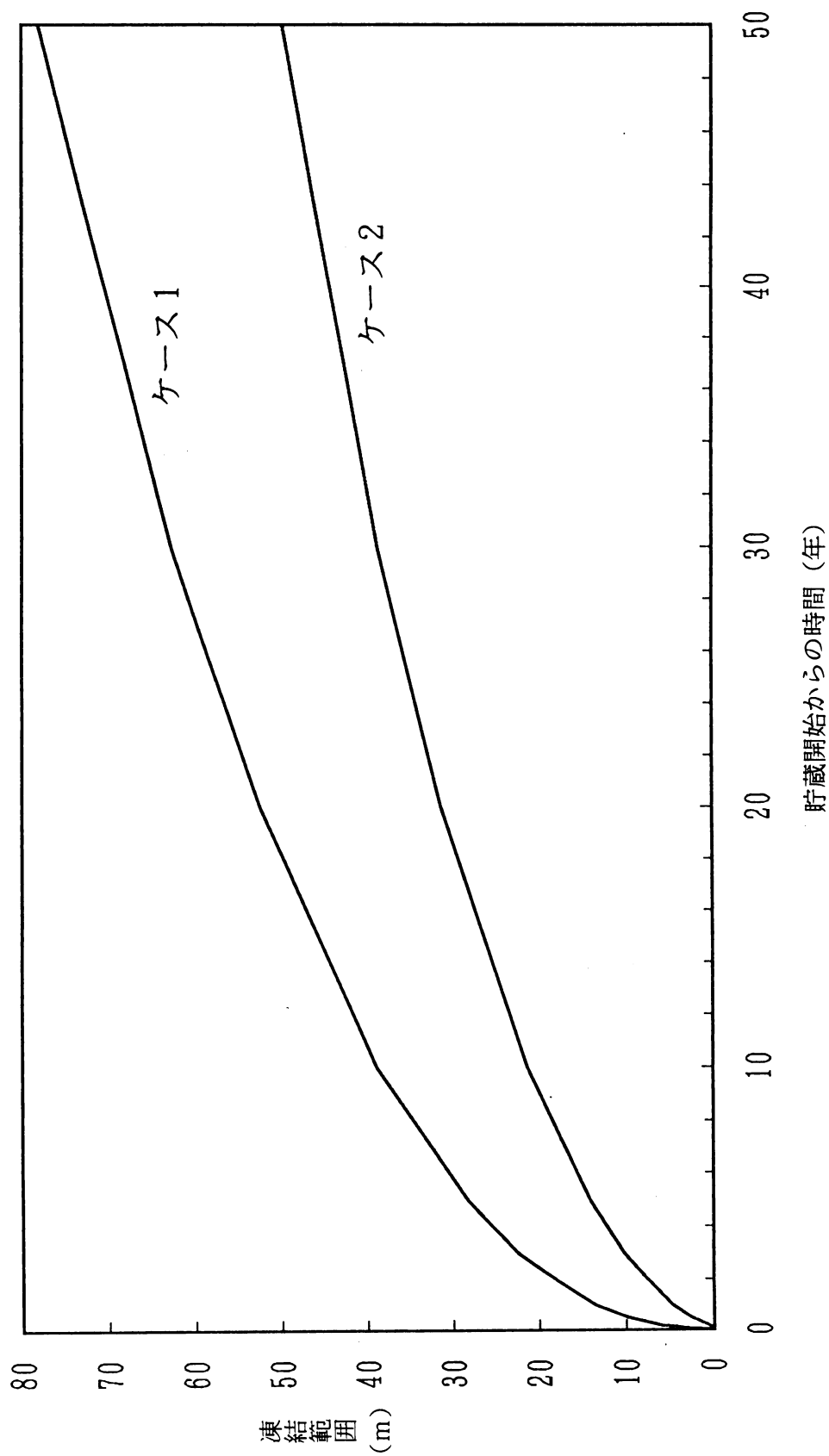


図 6.27 空洞周辺の岩盤の凍結範囲の経時変化

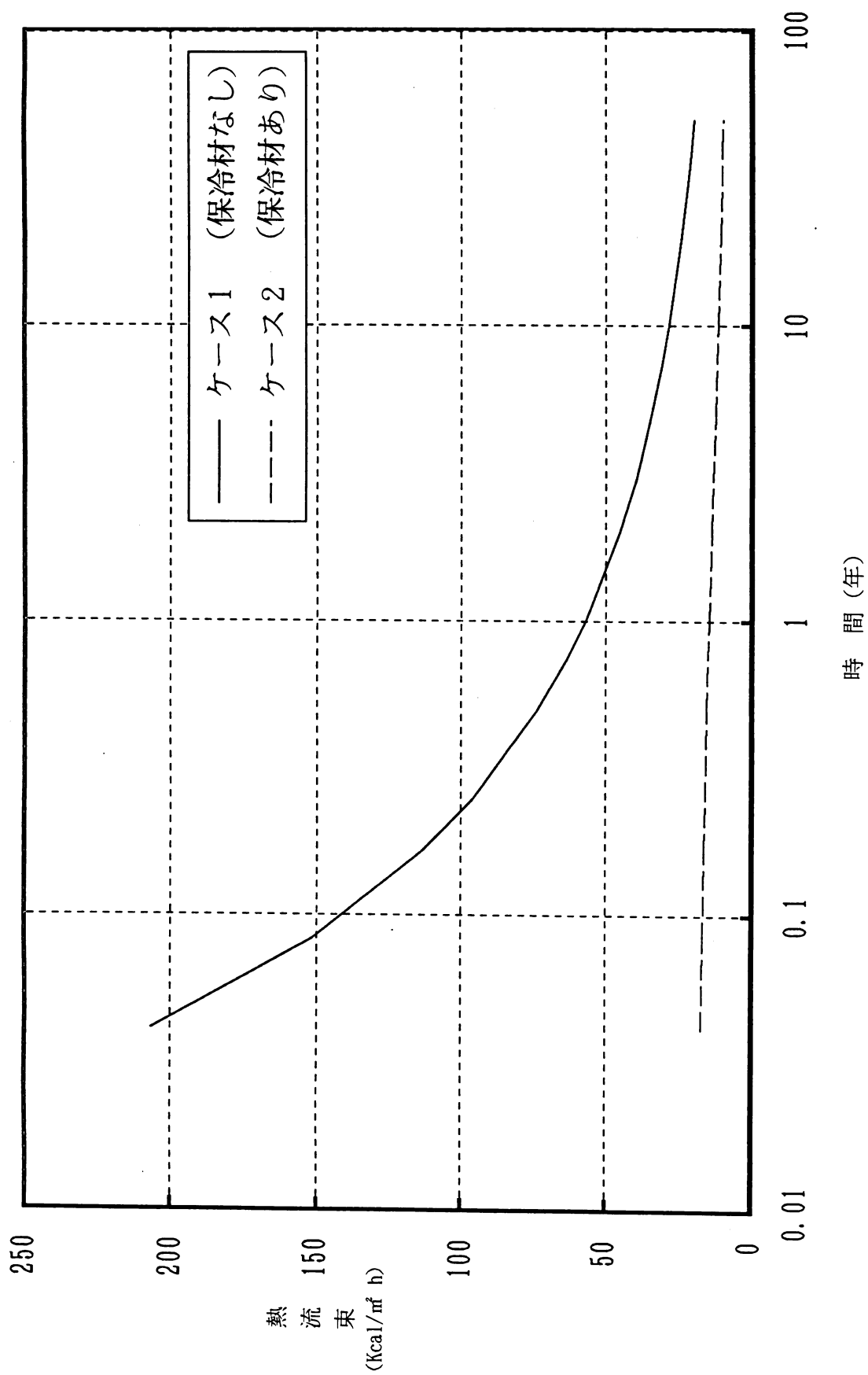


図 6.28 熱流束の経時変化

6.3 熱応力解析

(1) 解析条件

1) 概要

岩盤内に空洞を掘削し、これをLNG岩盤貯蔵タンクとして利用する場合、空洞周辺の岩盤は熱応力を受けることが予想される。ここでは空洞周辺岩盤の応力状態の経時変化を解析によって求めた。解析プログラムにはADINAを使用し、先の熱伝導解析によって得られた温度分布を用いて解析を行った。

2) 解析方法

① 弾性解析

解析に当っては2次元平面ひずみ問題として取り扱うこととし、以下のよう
な仮定を設けた。

- ・岩盤は均質であり、等方弾性体とする。
- ・岩盤は新鮮であり、潜在的な亀裂は含まないものとする。

解析の手順としては、

- i) 空洞の存在しない状態（空洞部分も要素分割し、空洞内にも岩盤が存在する状態）において自重（岩盤の密度を 2.65 g/cm^3 とした）による応力状態および変形状態を解析する。
- ii) i) の状態を初期条件とし、空洞部分の要素を削除して空洞周辺岩盤の緩みを考慮した解析を行う。
- iii) ii) の状態を初期条件とし、所要時刻における温度分布を用いて熱応力解析を行う。また、岩盤物性の温度依存性を考慮することとした。

② 弾塑性解析

弾塑性解析における今回の岩盤材料としては、ADINAにおいて使用できる材料モデルの中のコンクリート材料モデルを使用して解析を行うこととした。

コンクリート材料モデルでは次式を用いることにより、非線形の応力-ひずみ関係を考慮することができる。

$$E = \frac{E_0 [1 - B (\varepsilon / \varepsilon_c)^2 - 2C (\varepsilon / \varepsilon_c)^3]}{[1 + A (\varepsilon / \varepsilon_c) + B (\varepsilon / \varepsilon_c)^2 + C (\varepsilon / \varepsilon_c)^3]^2}$$

ここに、

$$A = \left[\frac{E_0}{E_u} + (p^3 - 2p^2) \frac{E_0}{E_s} - (2p^3 - 3p^2 + 1) \right] / [(p^2 - 2p + 1)p]$$

$$B = [(2E_0 / E_s - 3) - 2A]$$

$$C = [(2 - E_0 / E_s) + A]$$

$$P = \varepsilon_u / \varepsilon_c$$

$$E_s = \sigma_c / \varepsilon_c$$

$$E_u = \sigma_u / \varepsilon_u$$

E : 接線弾性係数

ε : ひずみ

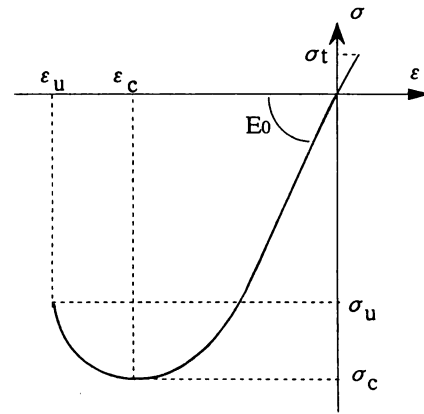
E_0 : ひずみ0における接線弾性係数

σ_c : 一軸圧縮強度

σ_u : 一軸降伏強度

ε_c : σ_c におけるひずみ

ε_u : σ_u におけるひずみ



引張側の弾性係数については、ひずみが0における接線弾性係数を用いる。

また、ポアソン比については応力状態に関係なく一定の値を用いる。

今回の解析では、岩盤の熱収縮により引張応力が発生することが予想される。この場合、引張側については各要素の最大主応力が一軸引張強度を越えた場合、最大主応力方向と垂直な方向に破壊面が生じるものとしている。圧縮側については三軸応力状態を考慮した破壊判定を行う。ただし、本解析で生じる圧縮応力は、後述する通り、値が小さく破壊に到ることはなかったため、圧縮側の破壊判定の詳細についてはここでは省略する。

本解析で使用した花崗岩の応力-ひずみ曲線を図 6.27に示す。これより、今回の場合は一軸引張強度を越えて亀裂を生じた後もその要素内には一軸引張応力値を保持するものとして解析を行った。

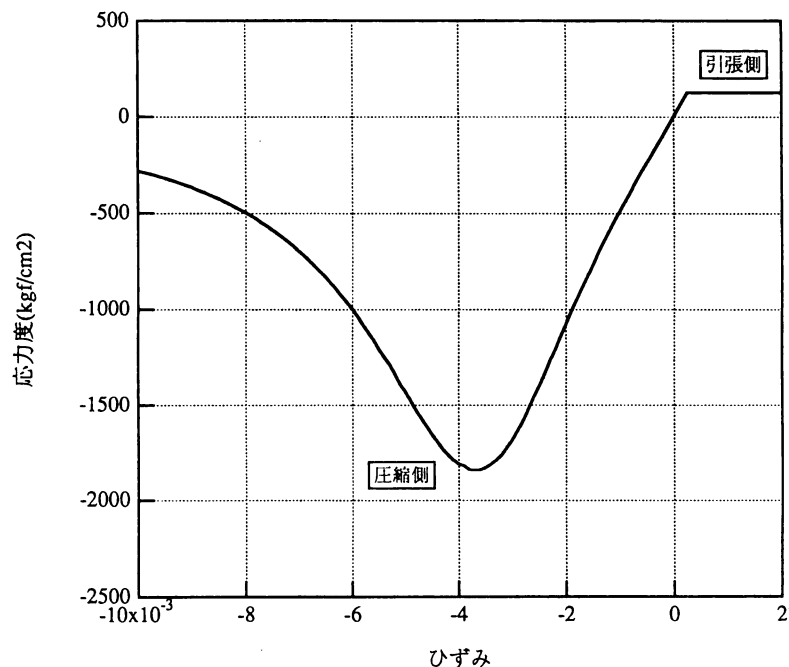


図 6.29 コンクリート材料モデルの応力-ひずみ関係

3) 解析物性値

解析に用いる岩盤の物性値は文献調査により決定した。応力解析を行うには、圧縮強度、引張強度をはじめとして多種の物性値が必要となる。今回は大島花崗岩の岩石物性値を使用することとした（表 6.7）。なお表 6.7に示した物性値は、ブロックサンプリングされた岩石から作成された供試体の室内一軸圧縮試験および圧縮引張試験により求められた物性値である。そのため、これらの値は潜在的な亀裂を含む原位置岩盤の値とは異なるものと予想されるが、ここでは岩盤が亀裂を含まないと仮定していること、また、原位置においてこれらの物性値を低温下において求めた例がないことなどの理由により、表 6.7の物性値をそのまま岩盤の物性値として使用することとした。

4) 解析モデル

① 空洞形状

熱伝導解析を行ったものと同じとし、直径20m φの円形空洞とする。

② 解析範囲

図 6.30に示すように水平方向200m、垂直方向320mとする。

③ 境界条件

境界条件は以下のとおりである。

対 象 軸：水平方向の変位を固定

モデル側面：水平方向の変位を固定

モデル底面：垂直方向の変位を固定

④ 初期温度

深度方向には変化せず、モデル内はすべて15℃で一定温度とする。

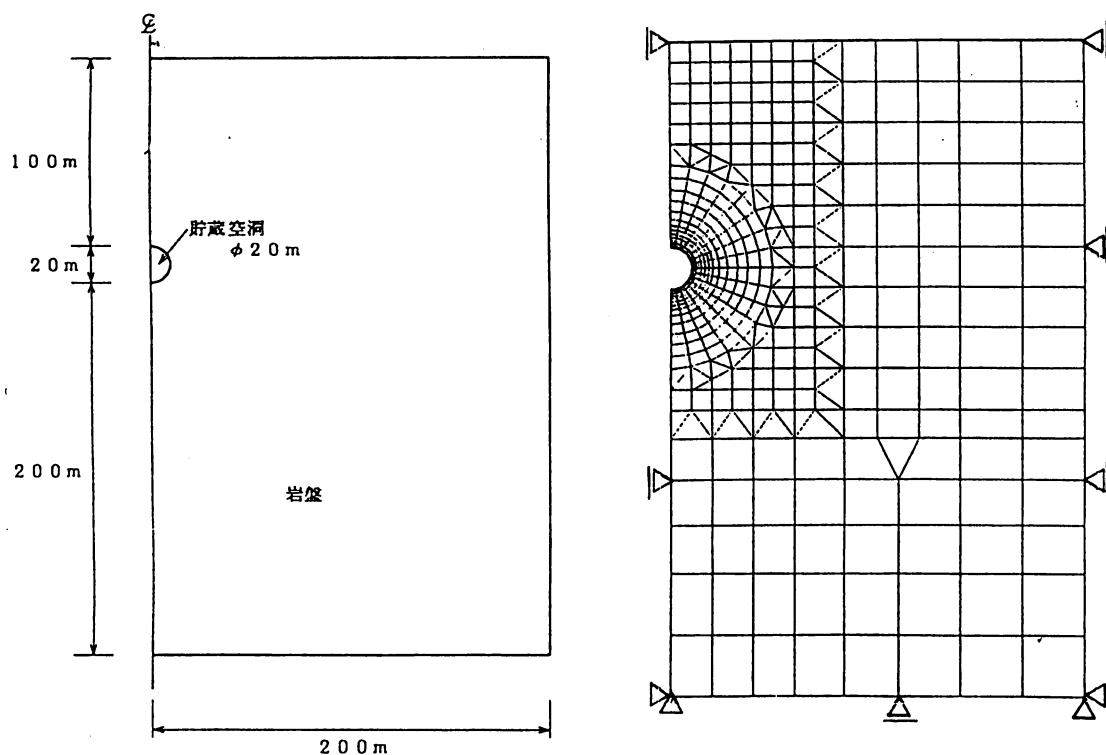


図 6.30 解析モデル

表 6.7 解析に用いた岩盤の物性値

温 度	割線線膨張係数 $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$	ヤング率 $\text{kgf}/\text{cm}^2 \times 10^6$	ポアソン比	圧縮強度 kgf/cm^2	引張強度 kgf/cm^2
15	0	0.494	0.25	-1670	79
0	15.0	0.495	0.25	-1674	87
- 20	14.3	0.496	0.25	-1700	108
- 40	13.4	0.497	0.25	-1760	119
- 60	12.5	0.498	0.24	-1839	126
- 80	11.7	0.499	0.24	-1919	131
-100	10.8	0.500	0.23	-1998	134
-120	9.8	0.501	0.23	-2077	138
-140	9.1	0.501	0.23	-2157	141
-160	8.2	0.502	0.22	-2236	144

(出典：稲田善紀著、地下の空間利用、森北出版、1989より作成)

5) 解析メッシュ

熱伝導解析で使用したものをそのまま使用する。なお、節点数は715、要素数は752である。

6) 解析ケース

解析は以下の2ケースについて行うものとする。

ケース1 空洞表面に保冷材を施工せず、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。

ケース2 空洞表面に20mの保冷材（ポリウレタンフォーム）を施した場合。仕上がり内径は20mφとし、貯蔵容量はケース1と同じとする。

なお、ケース2について熱応力解析を行う場合、保冷材のヤング率は岩盤に比べて十分小さいと考えられるため、保冷材部分の要素は存在しないものと仮定し、直径20.4mφの空洞として岩盤部分のみを解析することとした。また、2ケースいずれもコンクリートライニングはないものとして解析を行った。

7) 解析期間および解析ステップ

結果の出力は以下の6点について行った。

- ・自重のみ作用している状態
- ・空洞掘削後の状態
- ・貯蔵1年後
- ・貯蔵5年後
- ・貯蔵10年後
- ・貯蔵50年後

弾塑性解析において、解析時間間隔は解析結果に影響を及ぼす要因である。ここではケース1では30日間隔、ケース2で1年間隔とした。

(2) 解析結果

1) 弾性解析

① 自重解析および掘削解析

ケース1における解析結果を図6.31および図6.32に示す。図6.31に空洞掘削前の変形状態を、図6.31に空洞掘削後の変形状態を示す。また、図6.32に空洞掘削前の、図6.32に掘削後の最大・最小主応力方向線図を示す。これより、空洞を掘削することによって周辺岩盤は影響を受けていることが分かる。図6.33に空洞周辺岩盤の応力の変化を示す。これより掘削の影響を受ける範囲としては、水平方向では空洞直径分程度、垂直方向では空洞直径の2倍分程度となることが分かる。

② 熱応力解析

空洞周辺岩盤の変形状態を図6.34～図6.37に、最大最小主応力方向線図

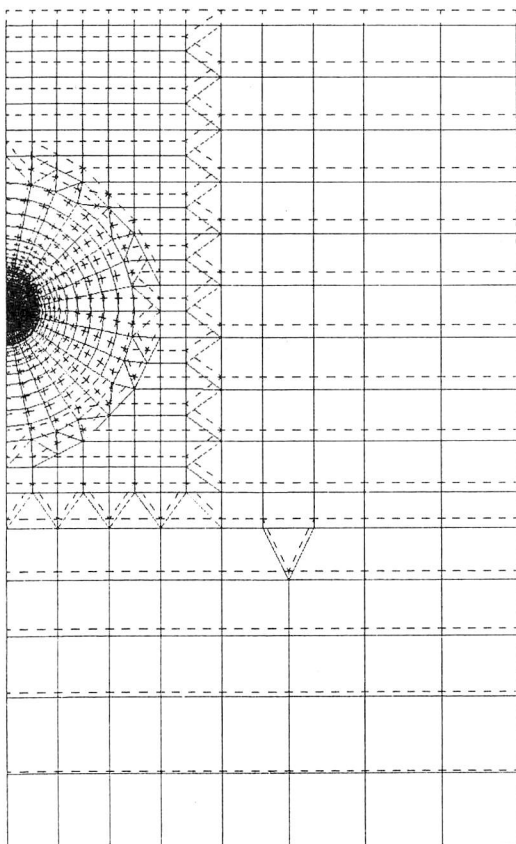
を図 6.38～図 6.41に示す。また、図 6.42に空洞の水平方向における最大主応力の分布を示す。空洞周辺の岩盤には非常に大きな引張応力（常温における岩盤の引張強度：79kgf/cm²）が発生し、時間が経過するほど熱応力の影響範囲は大きくなっていくことが分かる。これらの結果をもとに空洞の水平方向における引張応力による亀裂発生領域の進展状況を求めたものが図 6.20である。

なお、亀裂発生の判定はMohrの破壊包絡線説によるものとした。貯蔵50年後においてケース1では約175m、ケース2では約67mまで亀裂が生じていることが分かる。

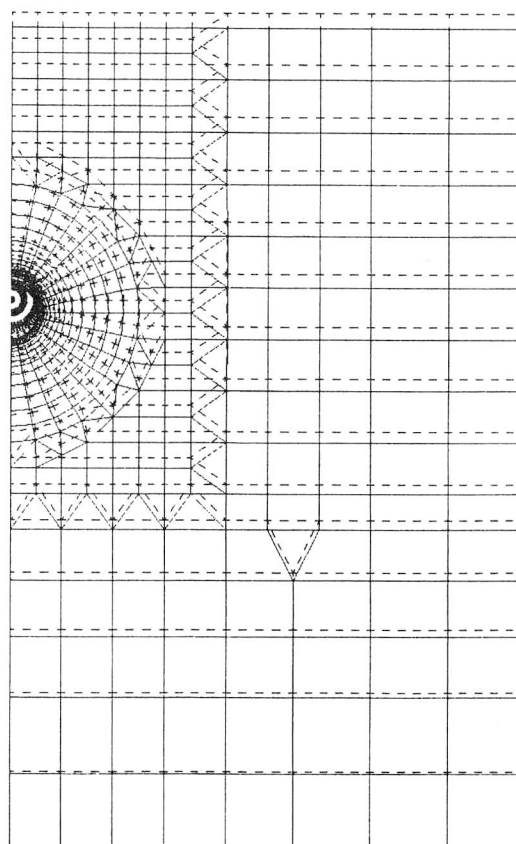
しかし、実際の岩盤においては、亀裂が生じることで熱応力が解放されるといったことが時間の経過とともに繰り返されながら進行していくものと考えられ、今回行った解析ではこのような現象を考慮していないため、得られた亀裂発生領域は実際のものより過大に評価されているものと予想される。

ORIGINAL DEFORMED XVMIN -0.001992
 14.40 0.05733 XVMAX 200.0
 YVMIN -5.759
 YVMAX 320.0

ORIGINAL DEFORMED XVMIN -0.02614
 14.40 0.05754 XVMAX 200.0
 YVMIN -5.759
 YVMAX 320.0

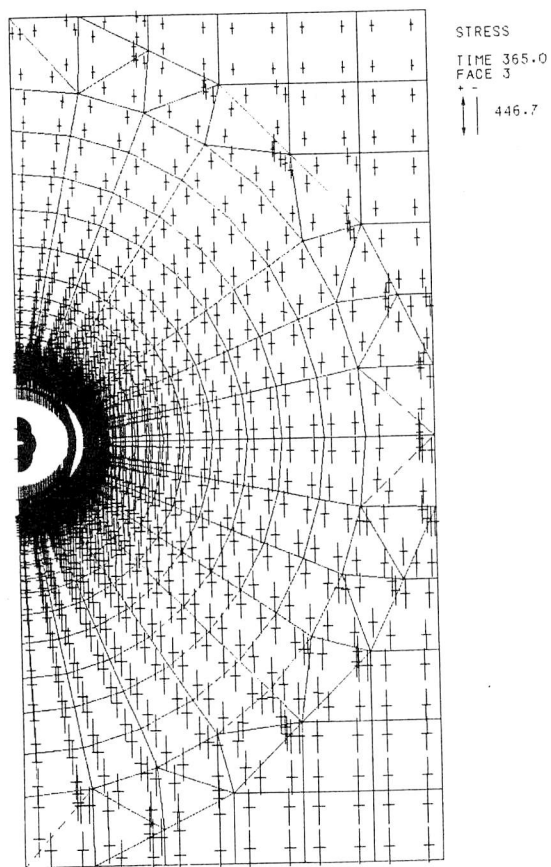


(a) 空洞掘削前

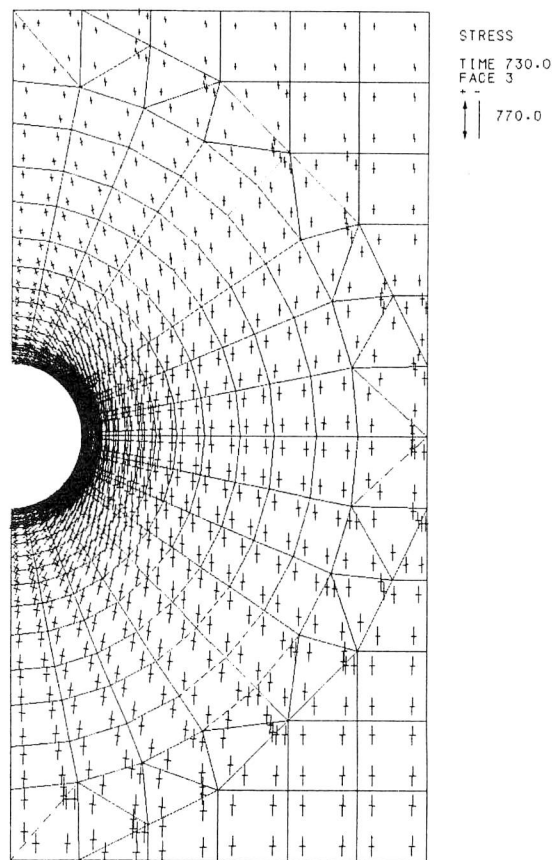


(b) 空洞掘削後

図 6.31 空洞周辺岩盤の変形状態

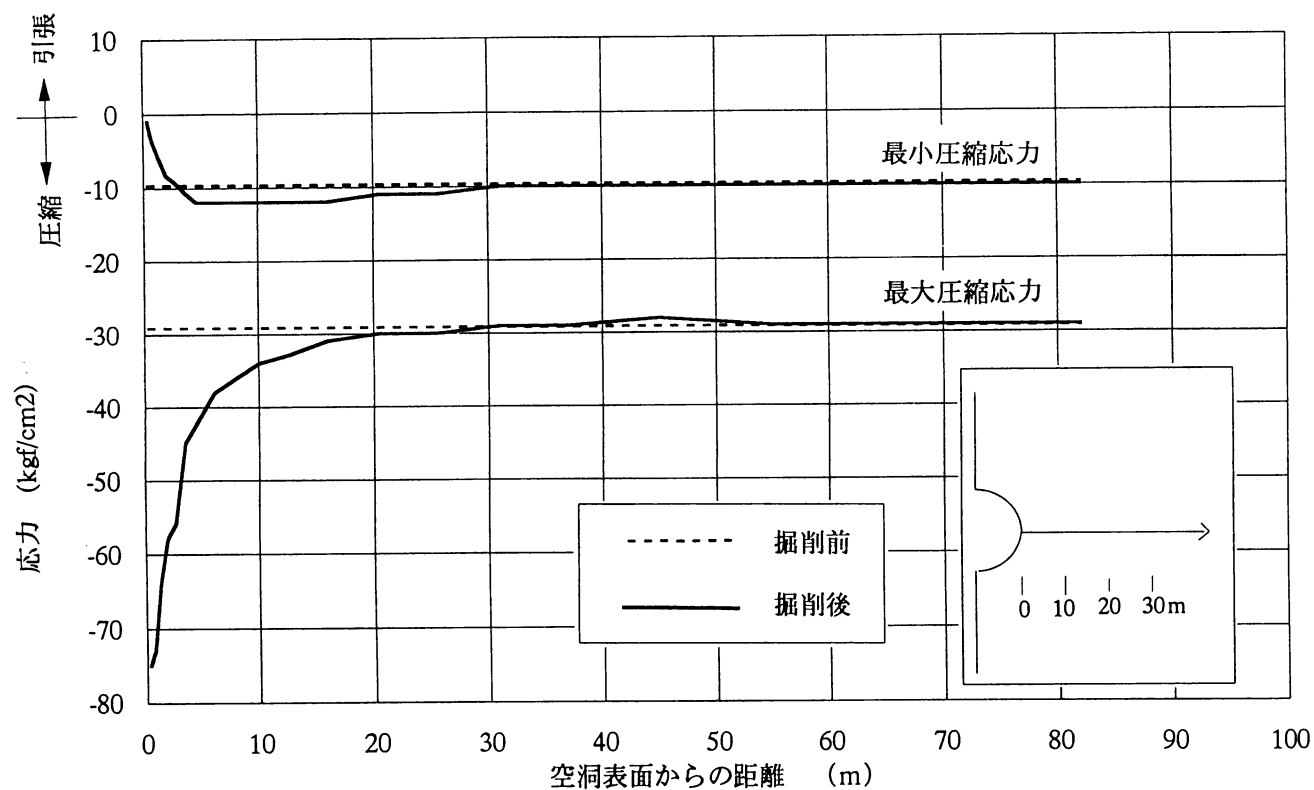


(a) 空洞掘削前

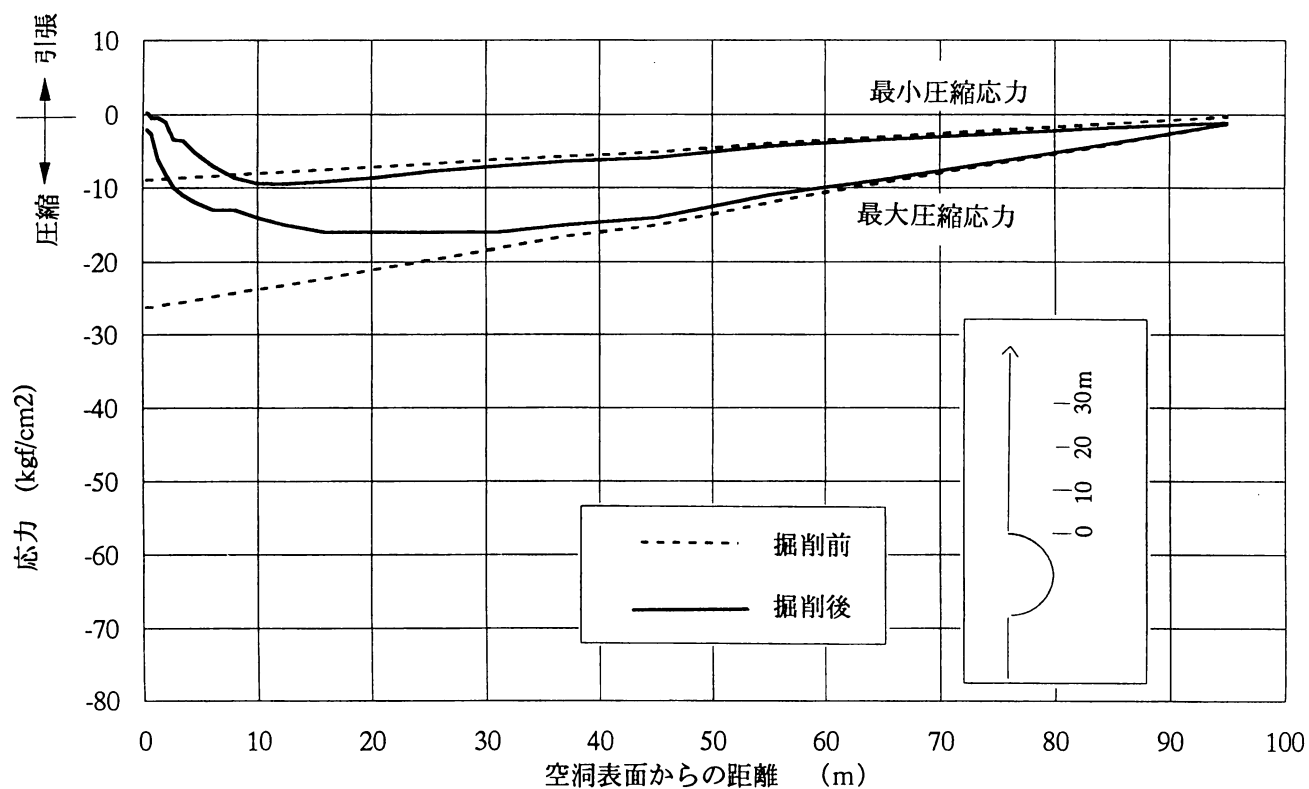


(b) 空洞掘削後

図 6.32 空洞周辺岩盤の応力状態 (空洞周辺拡大図)



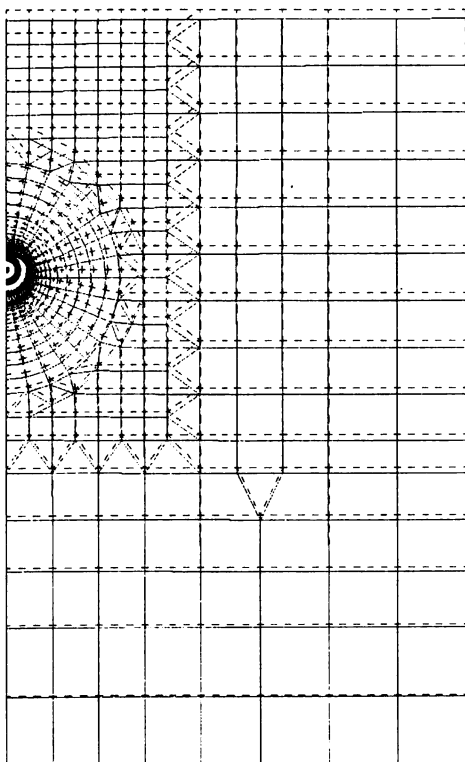
(a) 水平方向の応力変化



(b) 垂直方向の応力の変化

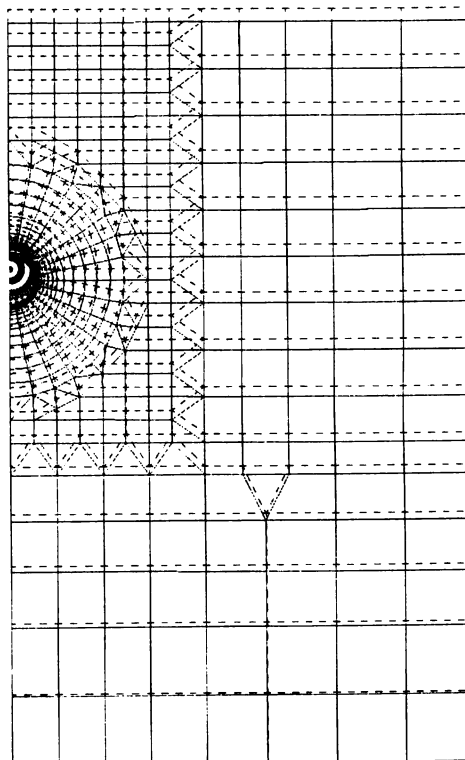
図 6.33 空洞掘削による空洞周辺岩盤の応力変化

ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN	-1.798
		XVMAX	200.0
14.38	0.09301	YVMIN	-5.752
		YVMAX	320.0



(a) ケース 1 (保冷材なし)

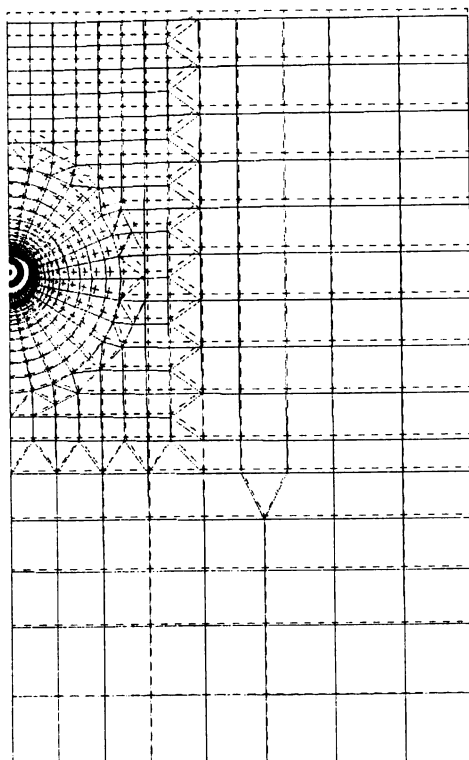
ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN	-0.4273
		XVMAX	200.0
14.40	0.05966	YVMIN	-5.759
		YVMAX	320.0



(b) ケース 2 (保冷材あり)

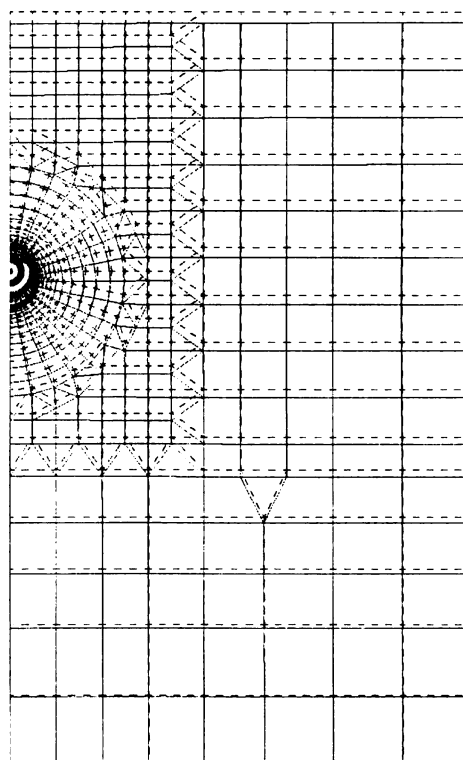
図 6.34 空洞周辺岩盤の変形状態 (貯蔵 1 年後)

ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN	-2.129
		XVMAX	200.0
14.38	0.1316	YVMIN	-5.752
		YVMAX	320.0



(a) ケース 1 (保冷材なし)

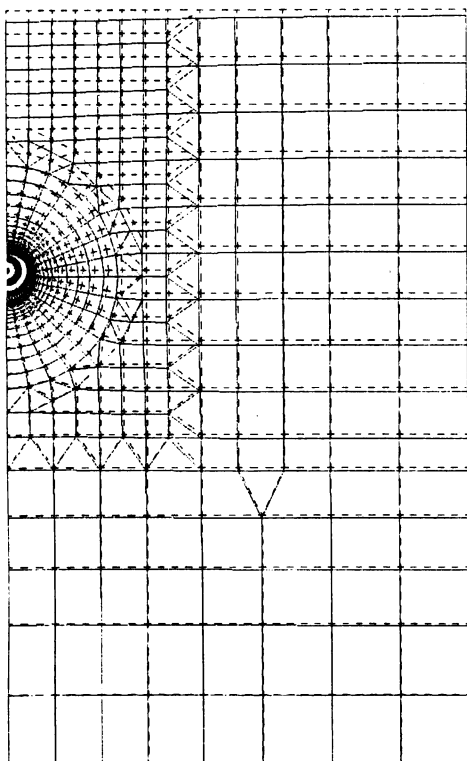
ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN	-1.137
		XVMAX	200.0
14.40	0.07491	YVMIN	-5.759
		YVMAX	320.0



(b) ケース 2 (保冷材あり)

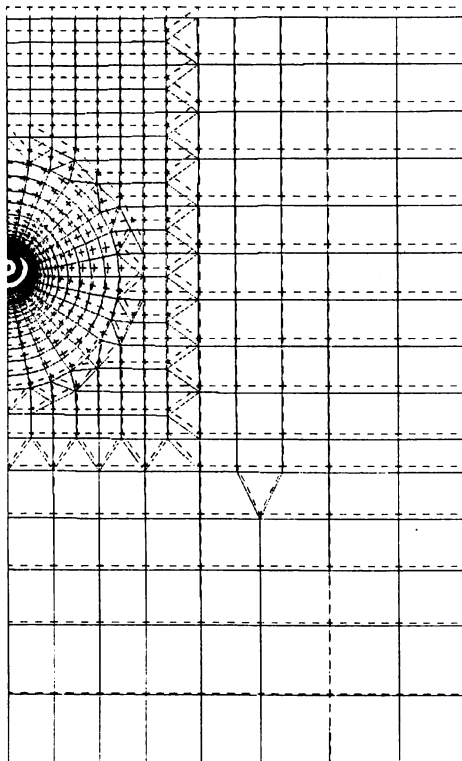
図 6.35 空洞周辺岩盤の変形状態 (貯蔵 5 年後)

ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN -2.113
L=14.38	0.1613	XVMAX 200.1
		YVMIN -5.752
		YVMAX 320.0



(a) ケース 1 (保冷材なし)

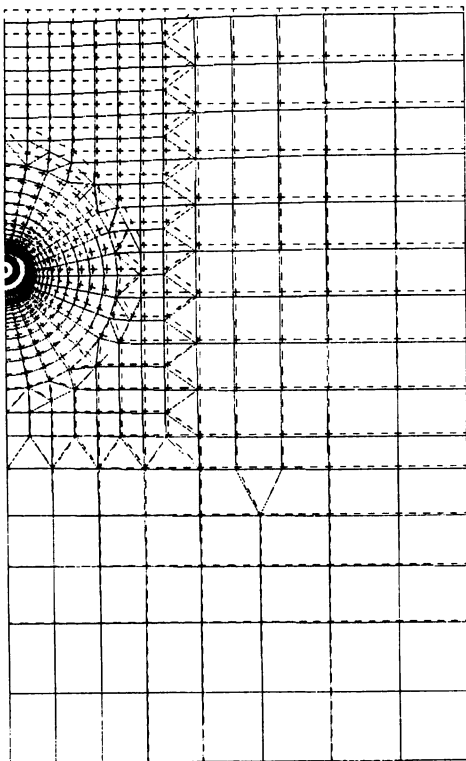
ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN -1.449
L=14.40	0.08778	XVMAX 200.0
		YVMIN -5.759
		YVMAX 320.0



(b) ケース 2 (保冷材あり)

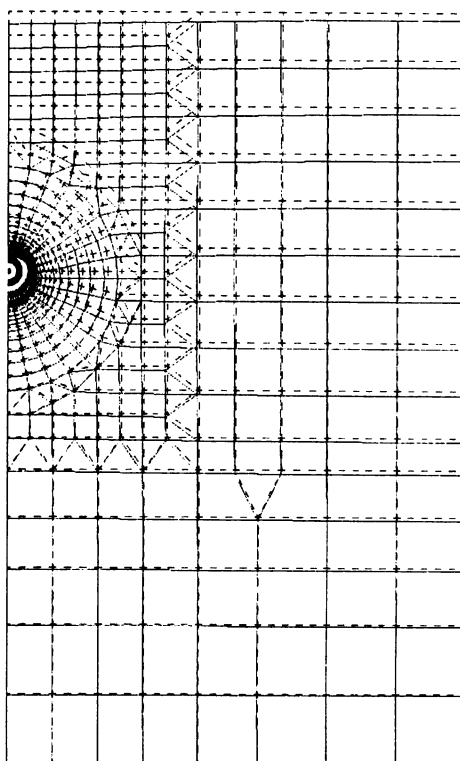
図 6.36 空洞周辺岩盤の変形状態 (貯蔵10年後)

ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN -1.599
L=14.29	0.3107	XVMAX 200.2
		YVMIN -5.716
		YVMAX 320.0



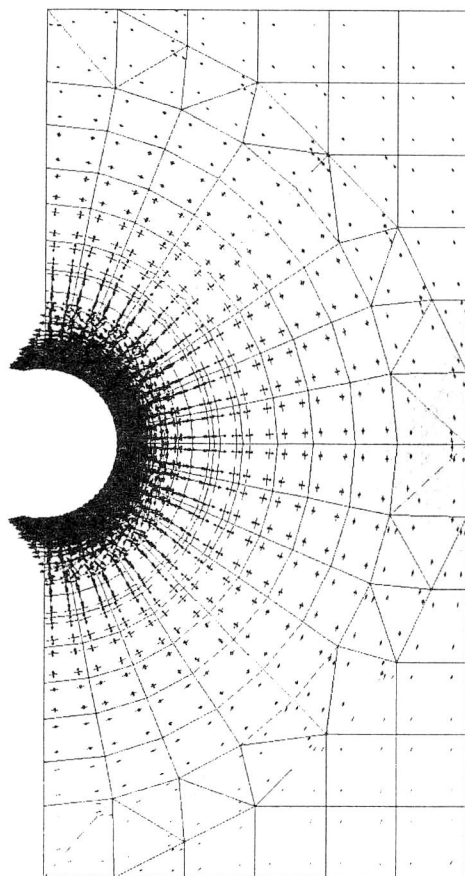
(a) ケース 1 (保冷材なし)

ORIGINAL	DEFORMED	XVMIN -1.585
L=14.42	0.1524	XVMAX 200.1
		YVMIN -5.765
		YVMAX 320.0

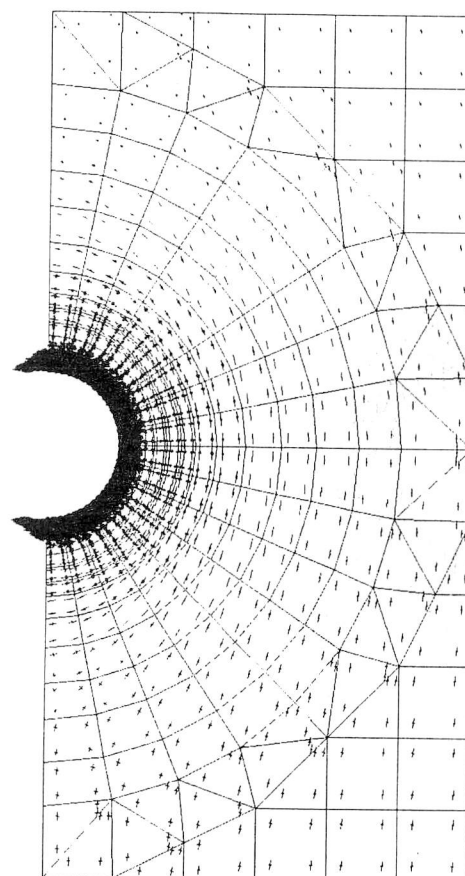


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.37 空洞周辺岩盤の変形状態 (貯蔵50年後)

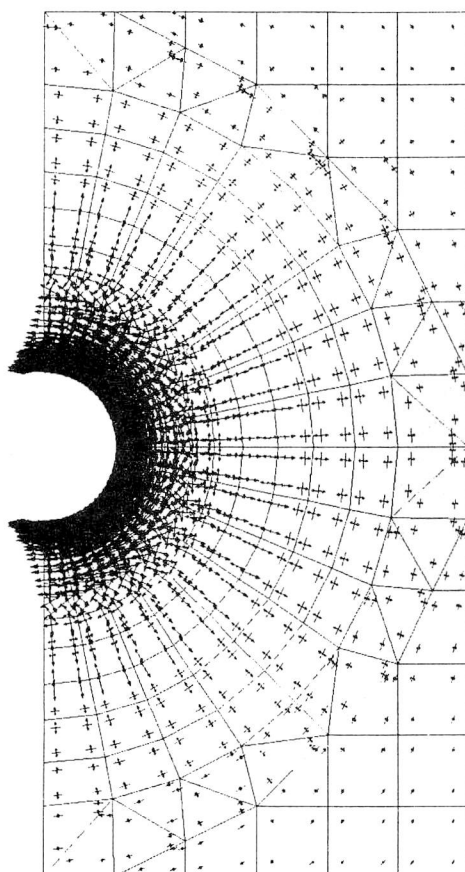


(a) ケース 1 (保冷材なし)

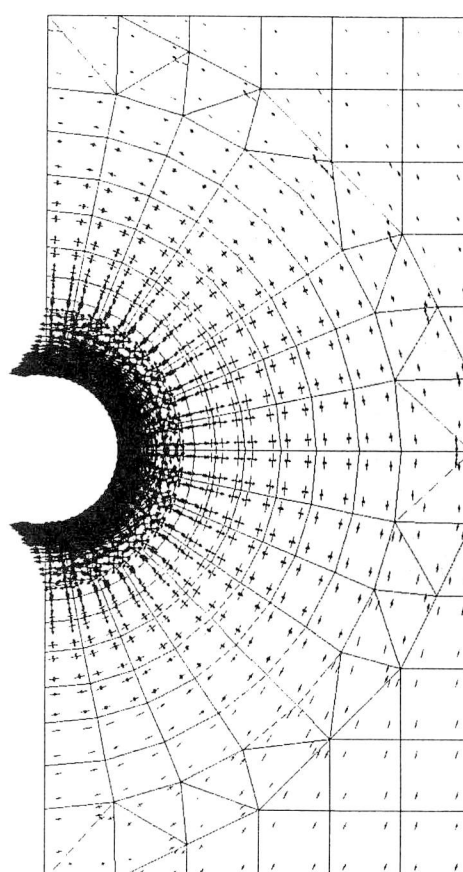


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.38 空洞周辺岩盤の応力状態 (貯蔵 1 年後)

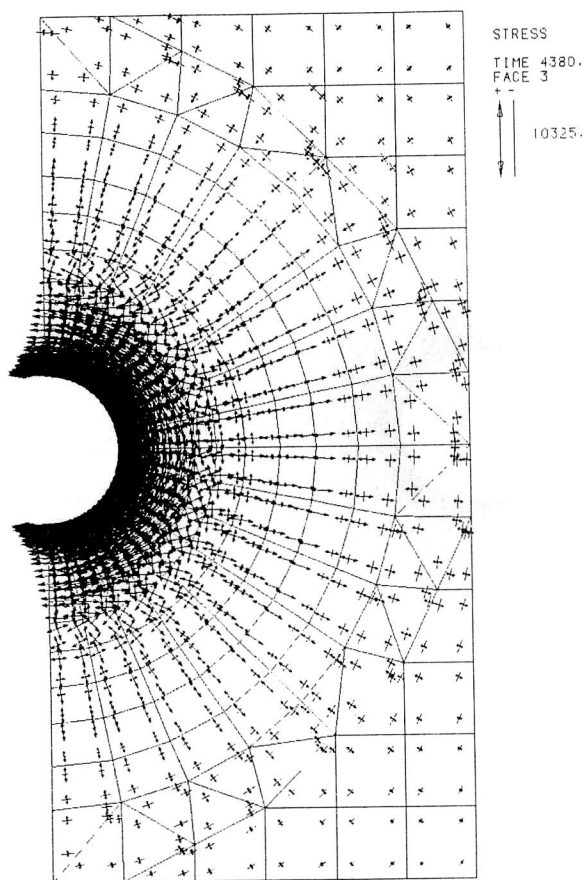


(a) ケース 1 (保冷材なし)

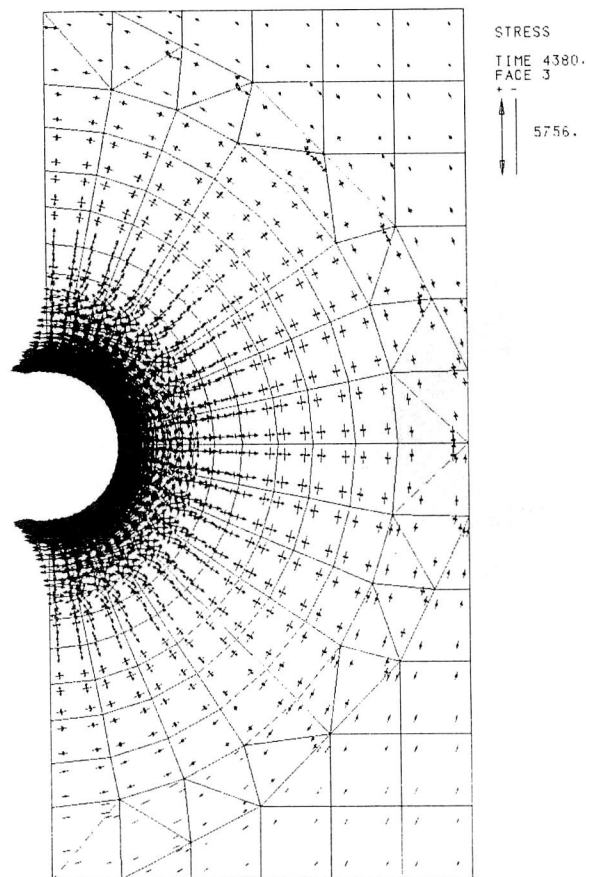


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.39 空洞周辺岩盤の応力状態 (貯蔵 5 年後)

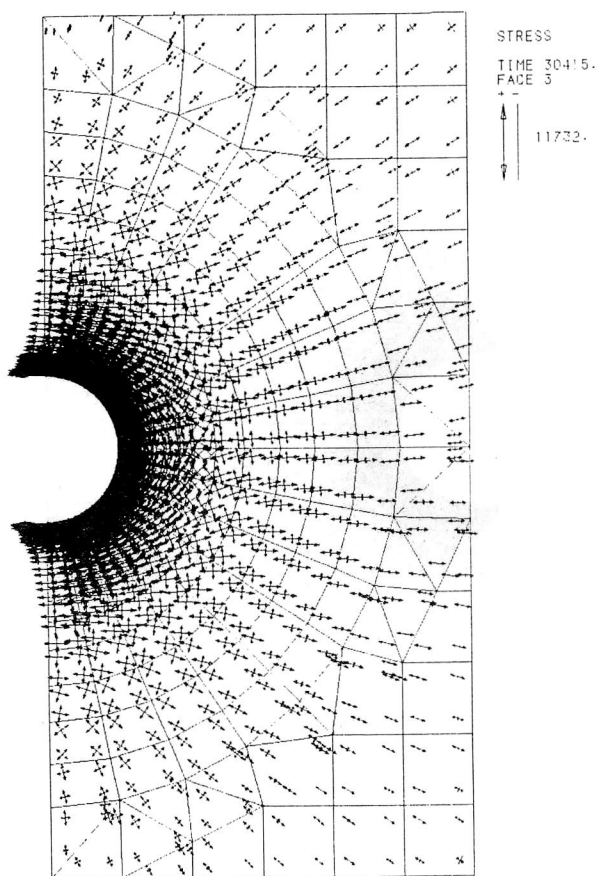


(a) ケース 1 (保冷材なし)

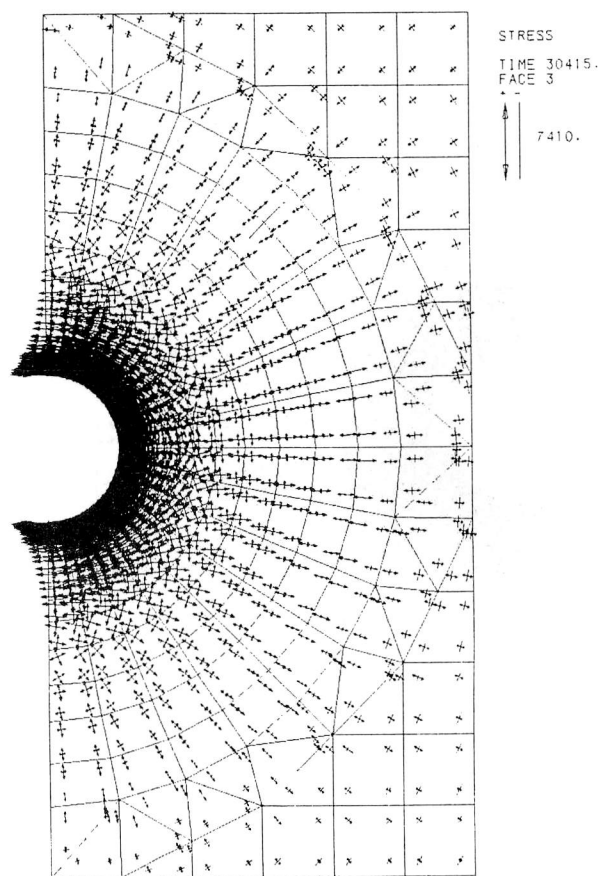


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.40 空洞周辺岩盤の応力状態 (貯蔵10年後)

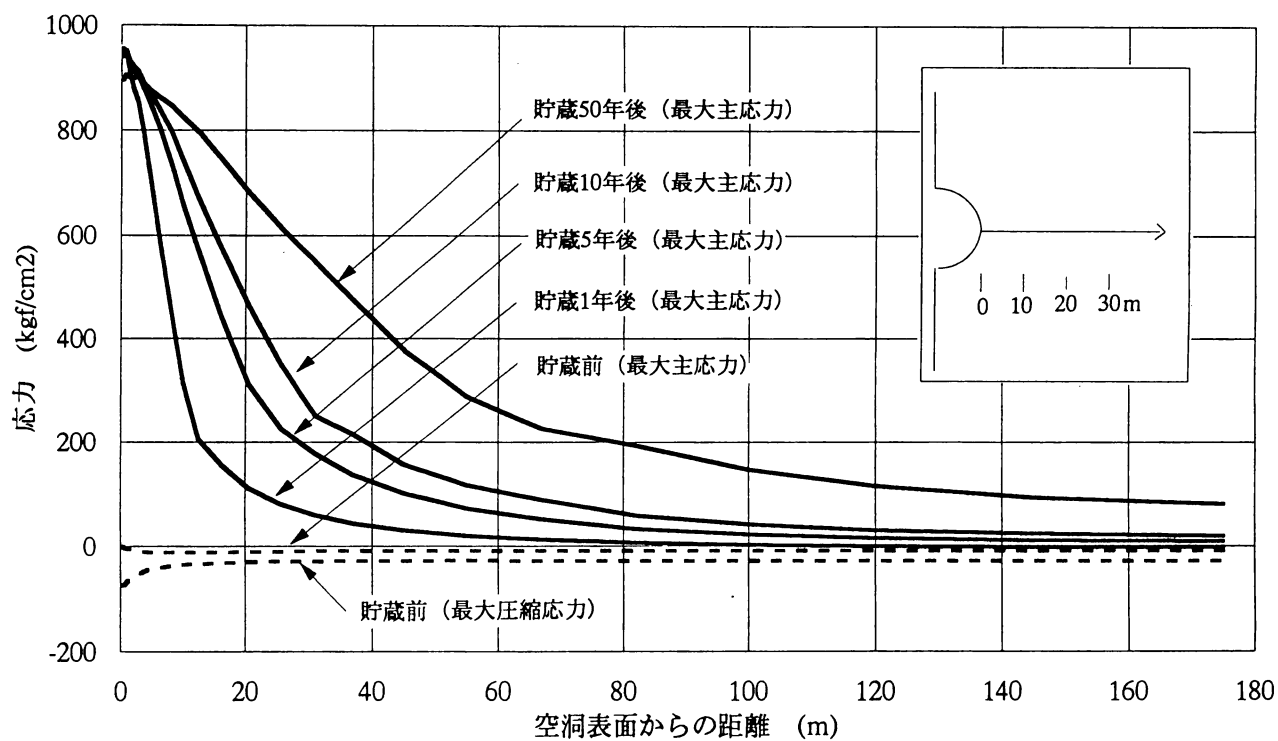


(a) ケース 1 (保冷材なし)

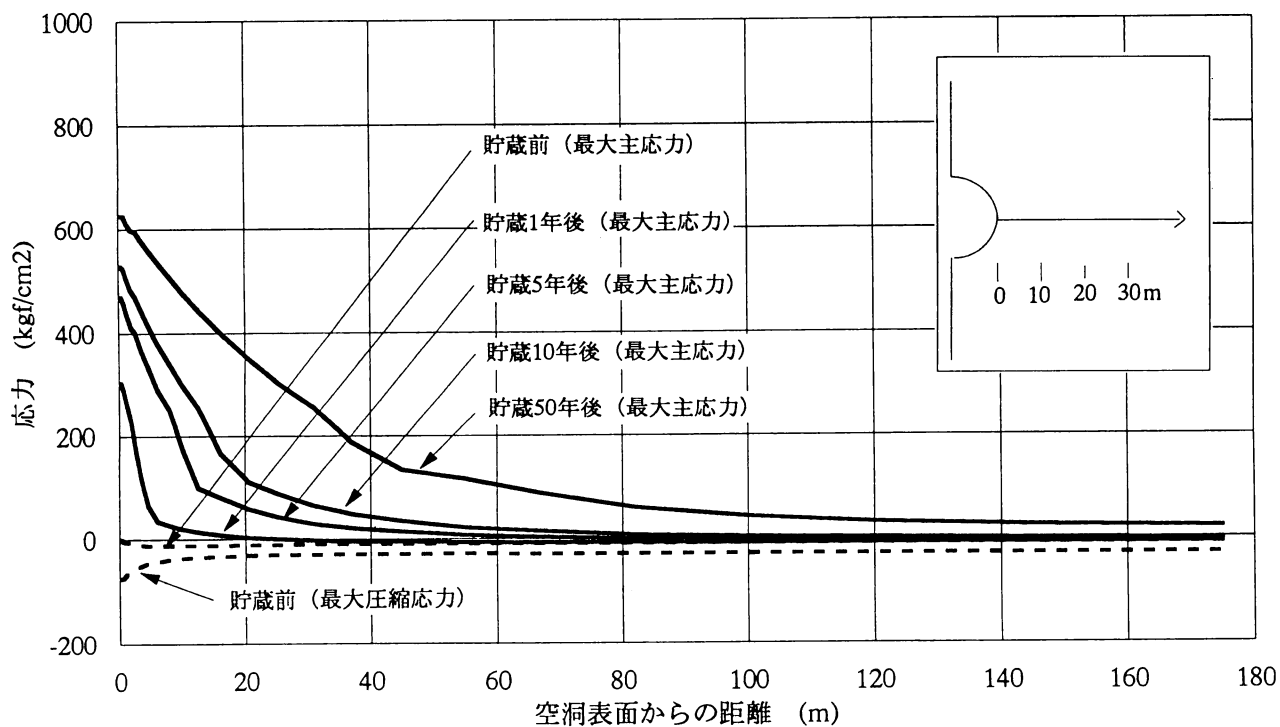


(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.41 空洞周辺岩盤の応力状態 (貯蔵50年後)



(a) ケース 1 (保冷材なし)



(b) ケース 2 (保冷材あり)

図 6.42 空洞周辺岩盤の最大主応力の分布

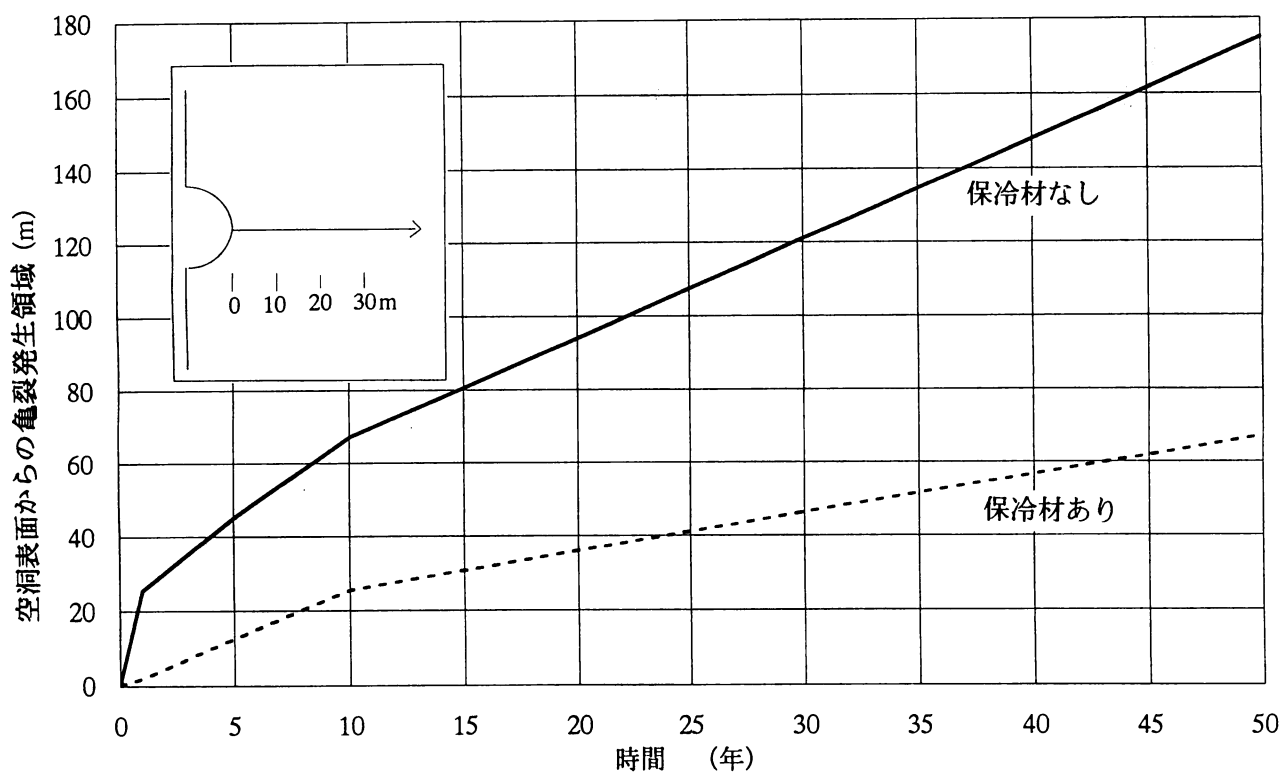


図 6.43 空洞周辺岩盤における亀裂発生領域の経時変化

2) 弾塑性解析

① 解析に用いる物性値

岩盤の物性値は温度とともに変化するが、ここで使用するモデルでは物性値の温度依存性を考慮できない。そこで、予備解析により物性値の違いによる解析結果への影響を考察した。空洞周辺岩盤の温度分布は、条件の厳しい保冷材なしの場合を用い、使用する物性値は以下の4種類とした。

ケース a 線膨張係数は -60°C の値を使用し、その他の物性値は 0°C のものを使用する。

ケース b すべての物性値に -60°C の値を使用する。

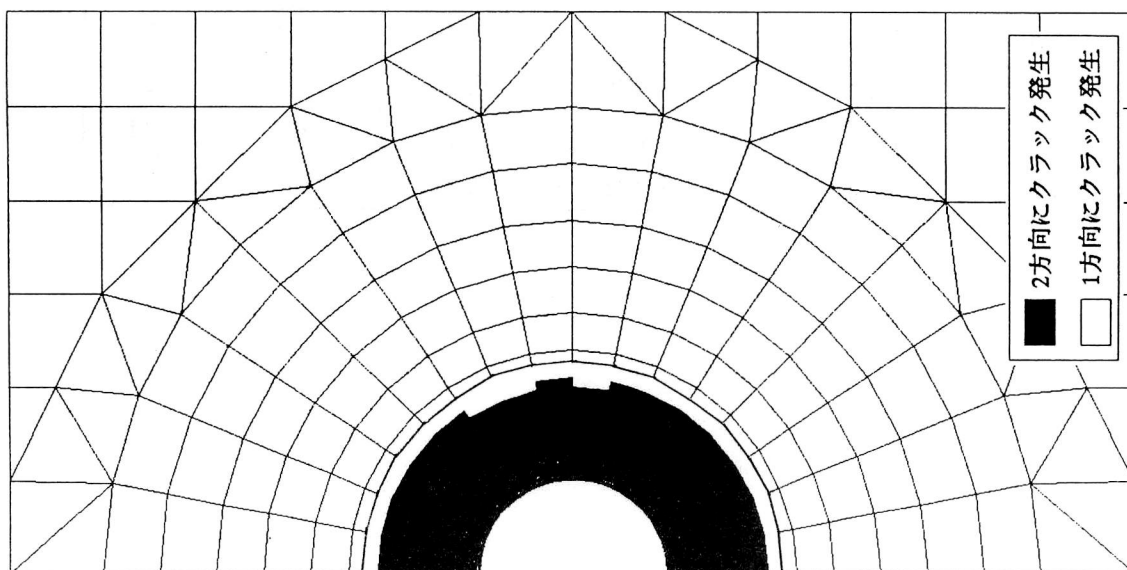
ケース c 線膨張係数は -60°C の値を使用し、その他の物性値は -160°C のものを使用する。

ケース d すべての物性値に -160°C の値を使用する。

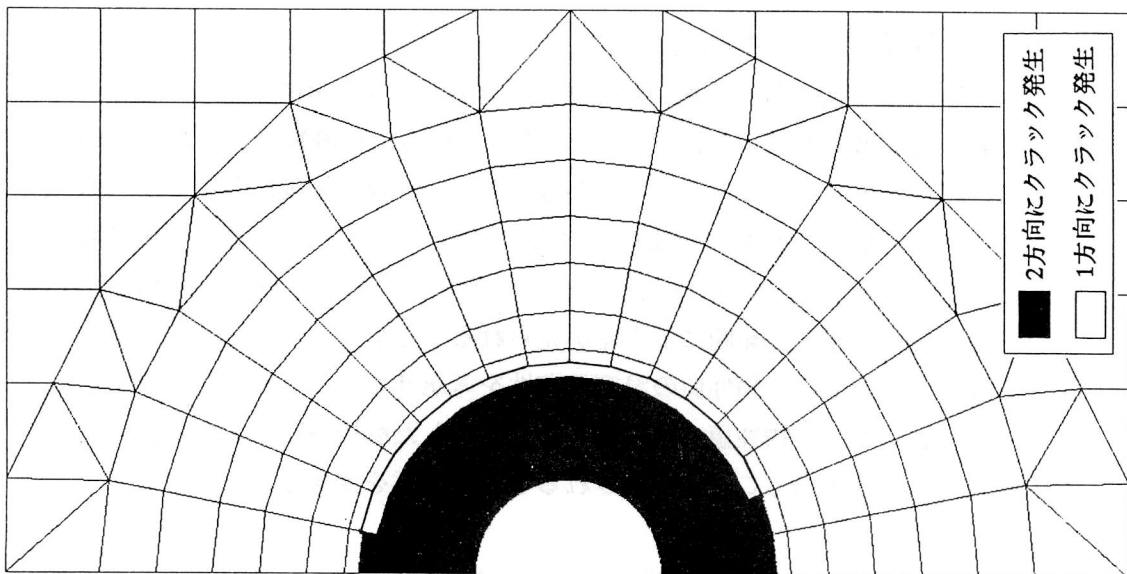
表 6.8に解析に用いた物性値を示す。ケース a～ケース c の物性値を使用した場合の貯蔵1年後における亀裂発生領域を比較したものが図 6.21、貯蔵10年後において比較したものが図 6.22である。これらより亀裂発生領域の範囲にはほとんど差が見られないことが分かる。次に、貯蔵1年後においてケース b とケース d を使用した場合を比較したものが図 6.23、また貯蔵10年後において比較したものが図 6.24である。これよりケース b とケース d を使用した場合には亀裂発生領域の範囲に多少差が見られることが分かる。従って以下に述べる解析については、物性値の温度依存性を考慮せずケース b の物性を用いて行うこととしたが、物性値の温度依存性を考慮した解析を行う場合に比べて多少解析結果に差が出ることが予想されることに注意を要する。

表 6.8 解析に用いた物性値

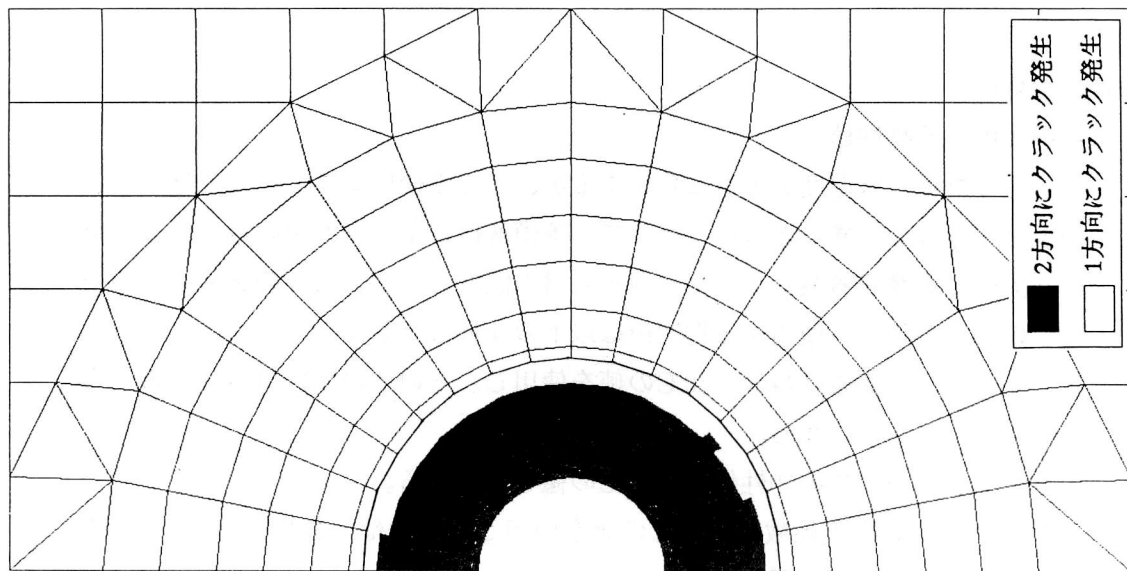
	割線線膨張係数 $1/^{\circ}\text{C} \times 10^{-6}$	ヤング率 $\text{kgf}/\text{cm}^2 \times 10^6$	ポアソン比	圧縮強度 kgf/cm^2	引張強度 kgf/cm^2
ケース a	12.5	0.495	0.25	-1674	87
ケース b	12.5	0.498	0.24	-1839	126
ケース c	12.5	0.502	0.22	-2236	144
ケース d	8.2	0.502	0.22	-2236	144



(a) ケース a

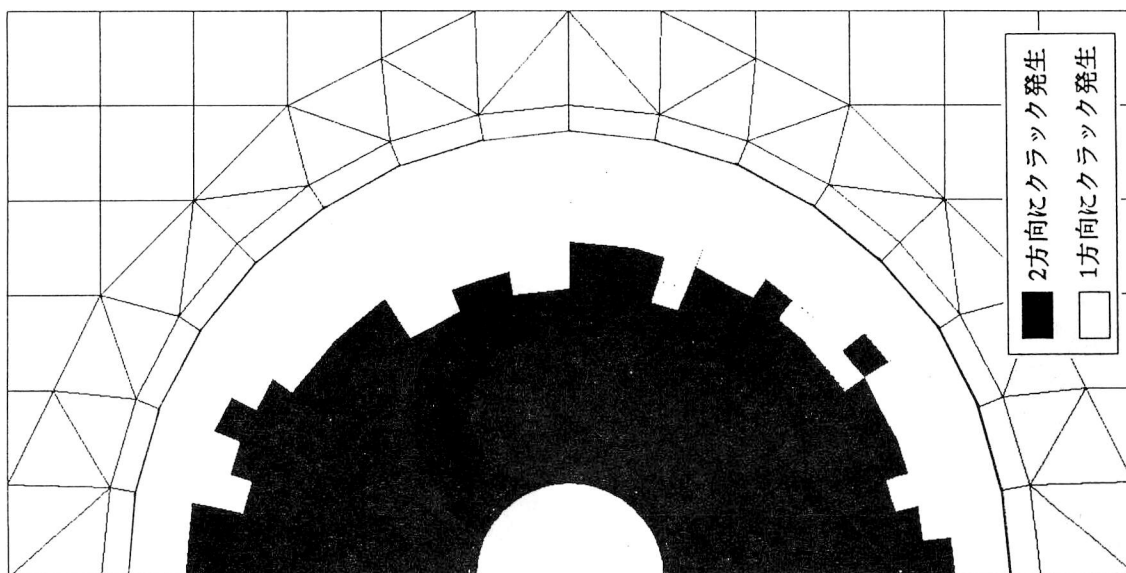


(b) ケース b

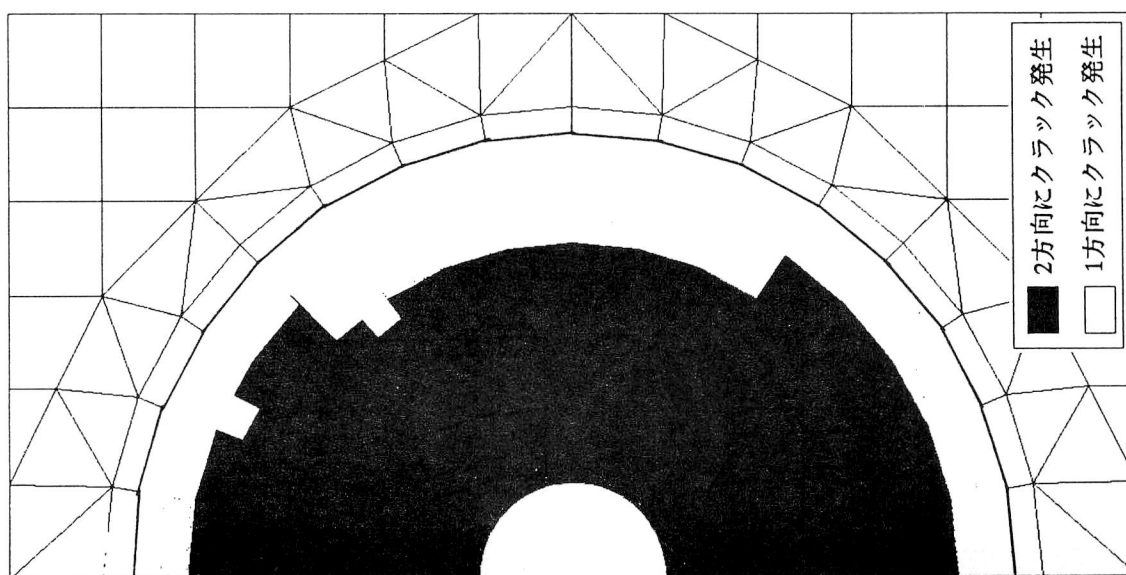


(c) ケース c

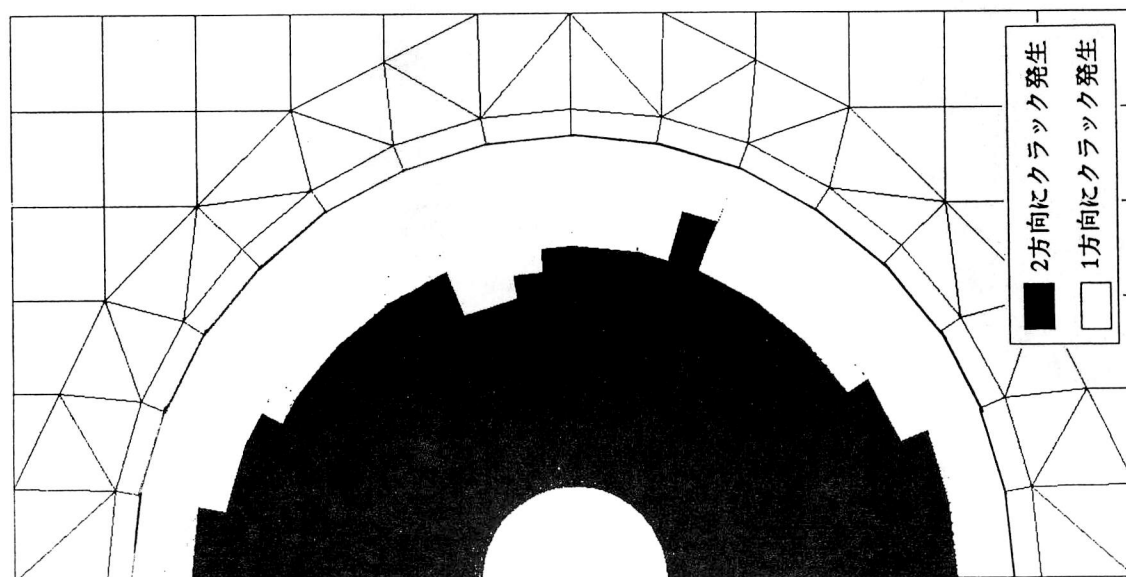
図 6.44 物性値の違いが解析結果に与える影響 (貯蔵1年後)



(c) ケース c

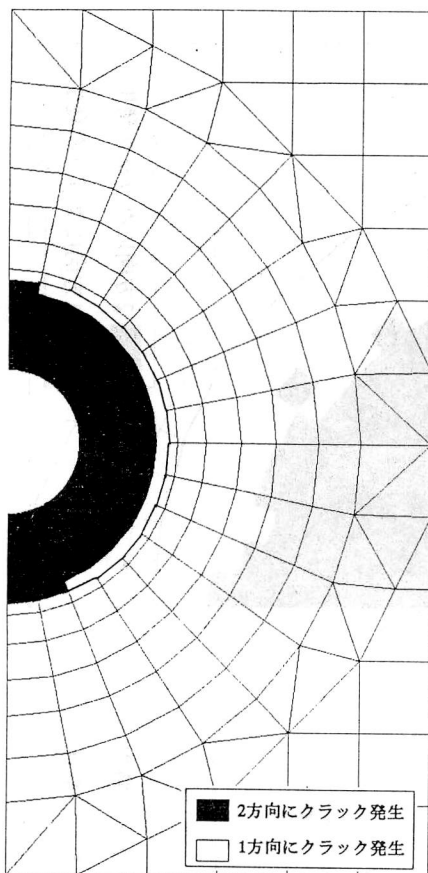


(b) ケース b

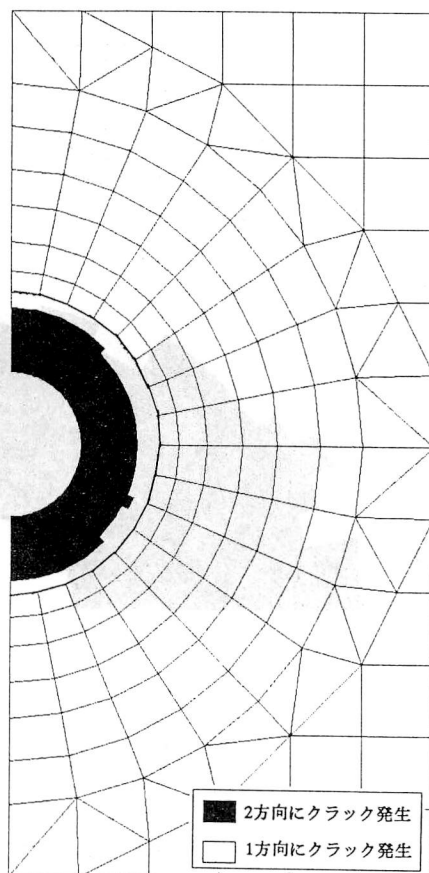


(a) ケース a

図 6.45 物性値の違いが解析結果に与える影響 (貯蔵10年後)

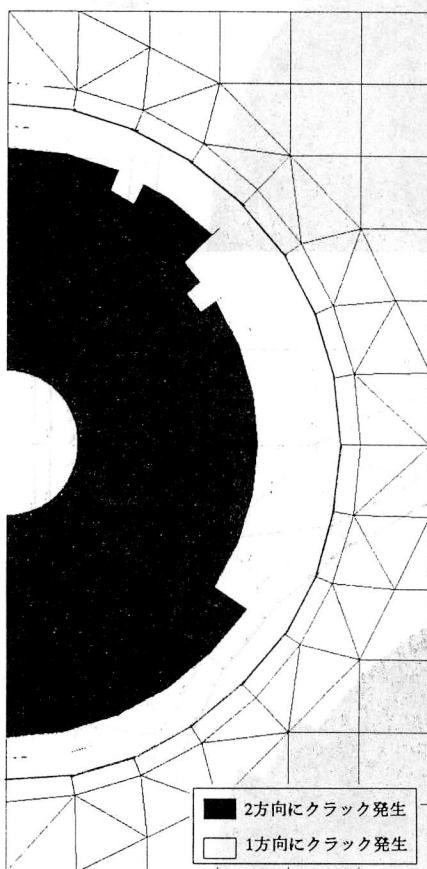


(a) ケース a

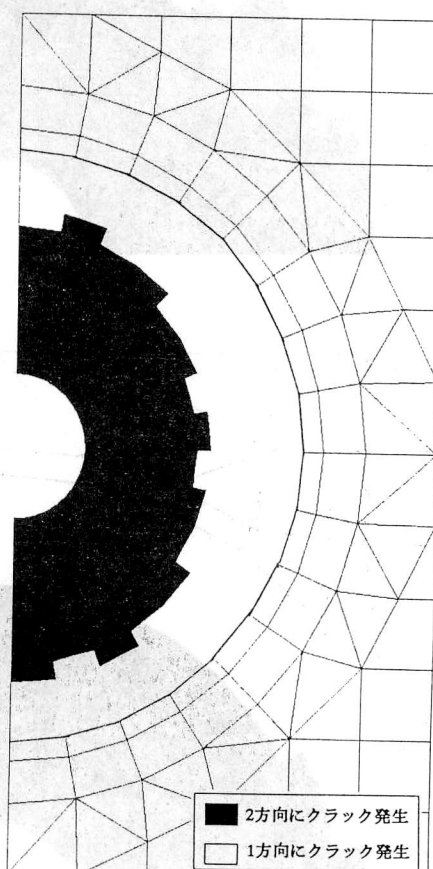


(b) ケース b

図 6.46 物性値の違いが解析結果に与える影響（貯蔵1年後）



(a) ケース 1



(b) ケース 2

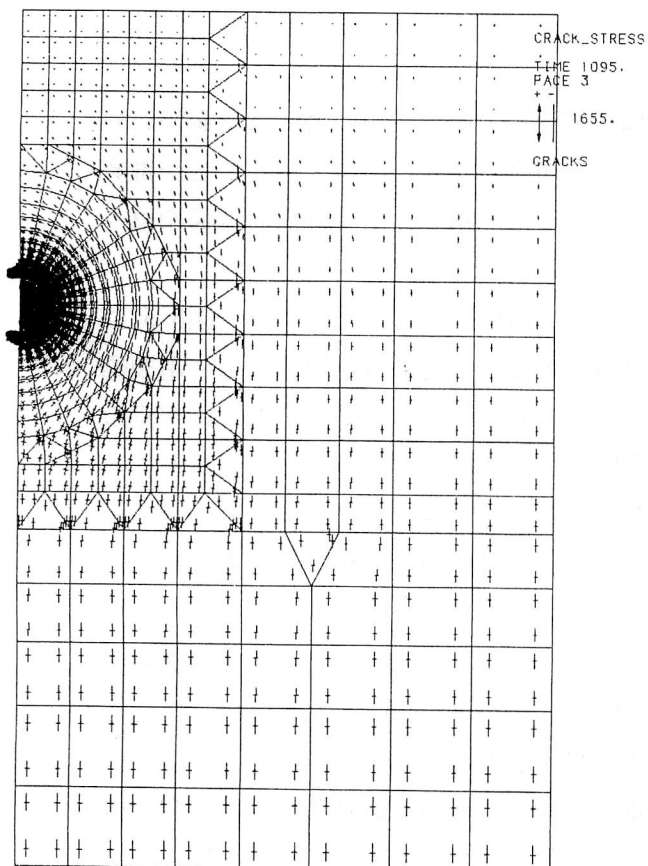
図 6.47 物性値の違いが解析結果に与える影響（貯蔵10年後）

② 解析結果

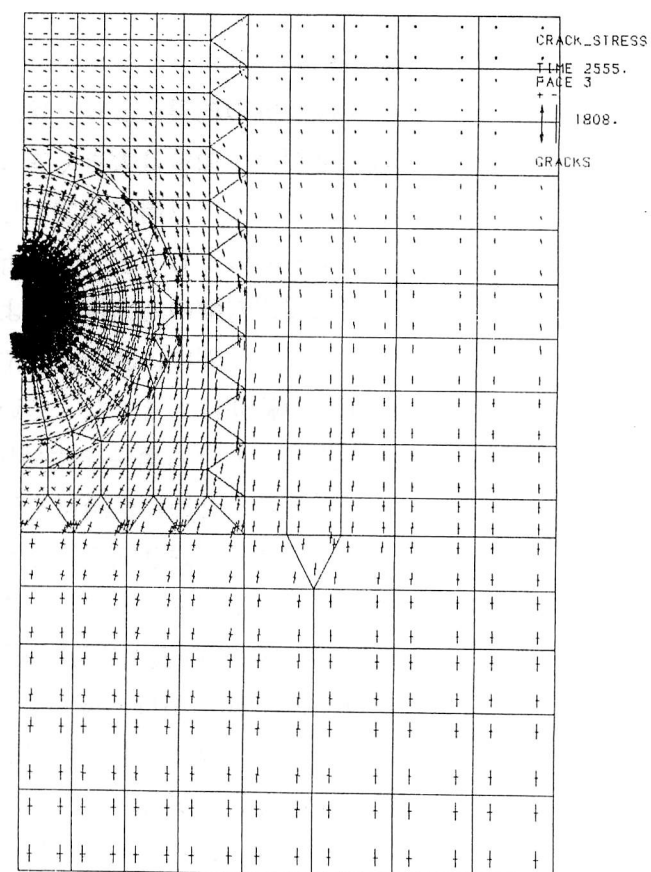
弾性解析の結果により、保冷材を使用する場合としない場合では空洞周辺岩盤の亀裂発生領域は大きく異なるため、保冷材の効果が期待できることが推察された。ここでは周辺環境に与える影響などを考慮し、空洞表面には保冷材を使用するものとして以下の解析を行った。

空洞周辺岩盤の応力状態および亀裂発生領域の経時変化を図6.48～図6.51に示す。なお、図中に凍結線の位置を破線で示した。時間の経過とともに亀裂発生領域の範囲は大きくなっていくことが分かる。これらの結果をもとに空洞の水平方向における亀裂発生領域の進展状況を求めたものが図 6.52である。ここでは参考のために保冷材を使用しない場合（ケース1）についても併せて示した。これより貯蔵50年後においてケース1では約75m、ケース2では約45mまで亀裂が生じることが分かる。

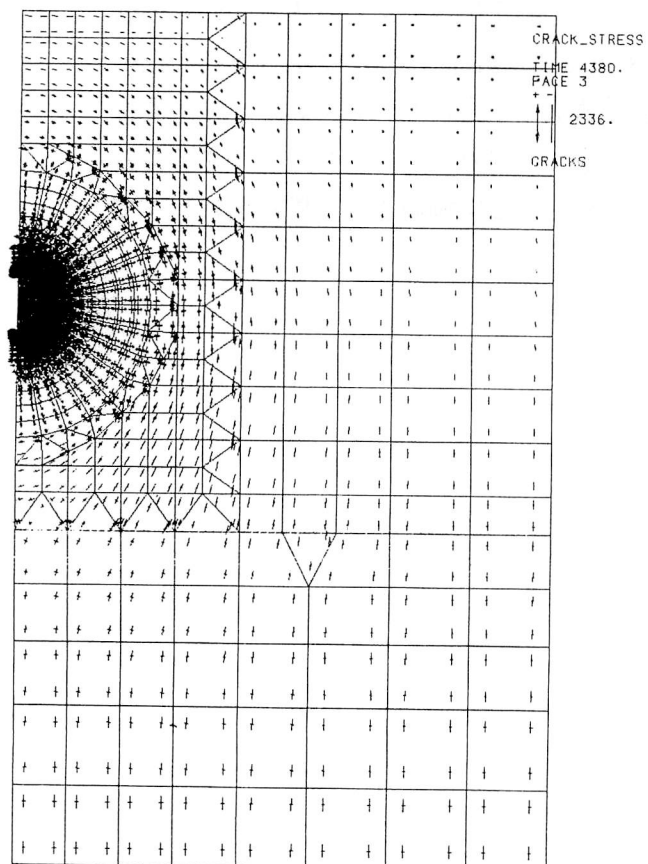
図 6.53に空洞表面岩盤の変形状態を示した。また、空洞上部、空洞側部および空洞下部における変位の経時変化を図 6.54～図 6.57に示した。これらより時間の経過とともに空洞は変形するが、水平方向と垂直方向では変形の状態が異なることが分かる。つまり、水平方向には時間の経過とともに空洞は単純に広がっている。しかしながら、垂直方向では空洞の中心が下方に移動し、それに伴い空洞上部が下方に移動することで結果としてわずかではあるが空洞直径は収縮していることが分かる。これは、固定境界である下方に向かって岩盤が熱収縮するためと考えられる。図 6.58に地表面における垂直方向変位の経時変化を示す。時間の経過とともに地表面は下方に変位しており、その変位は空洞の真上でもっとも大きくなり、空洞から離れるにしたがって小さくなっていることが分かる。また、貯蔵50年後における空洞の周長は貯蔵前に比べて約3cm程度拡がることが分かる。



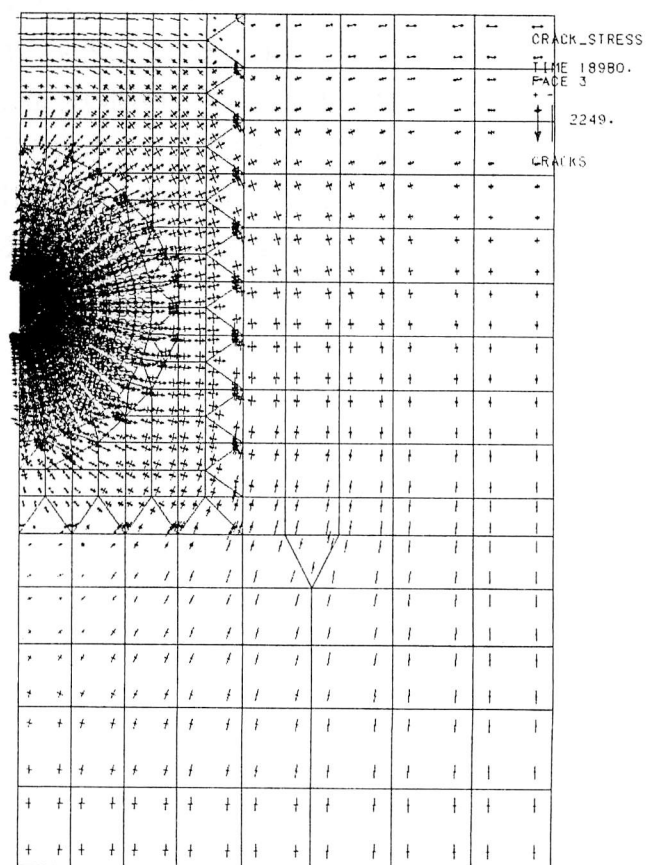
(a) 貯蔵1年後



(b) 貯蔵5年後

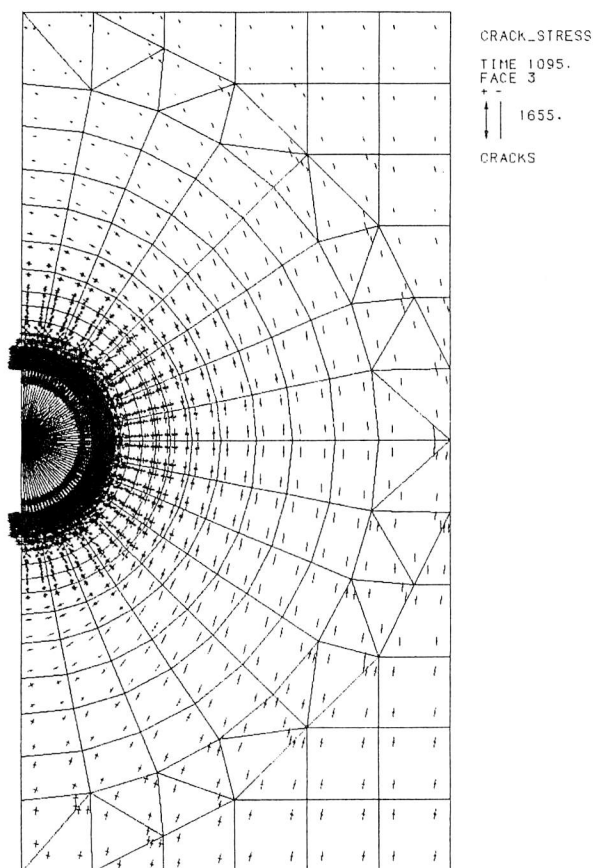


(c) 貯蔵10年後

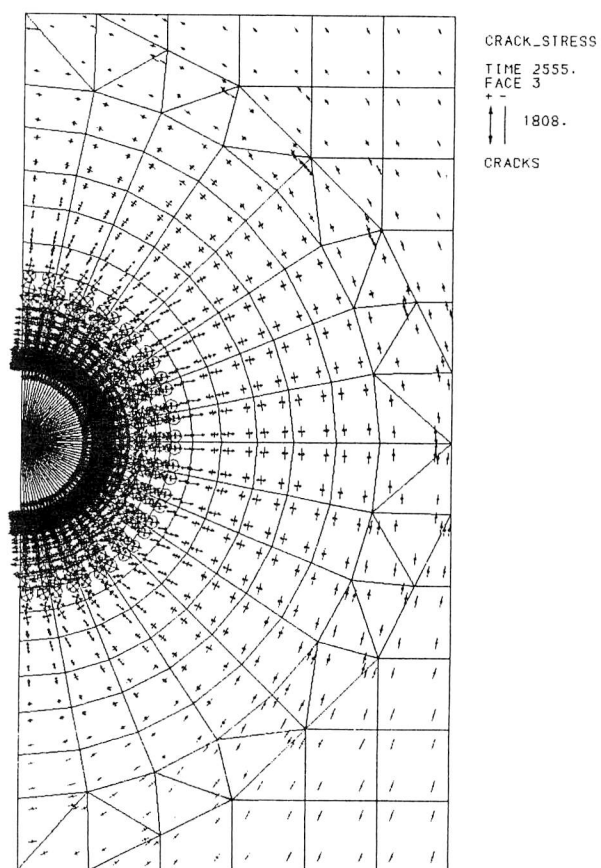


(d) 貯蔵50年後

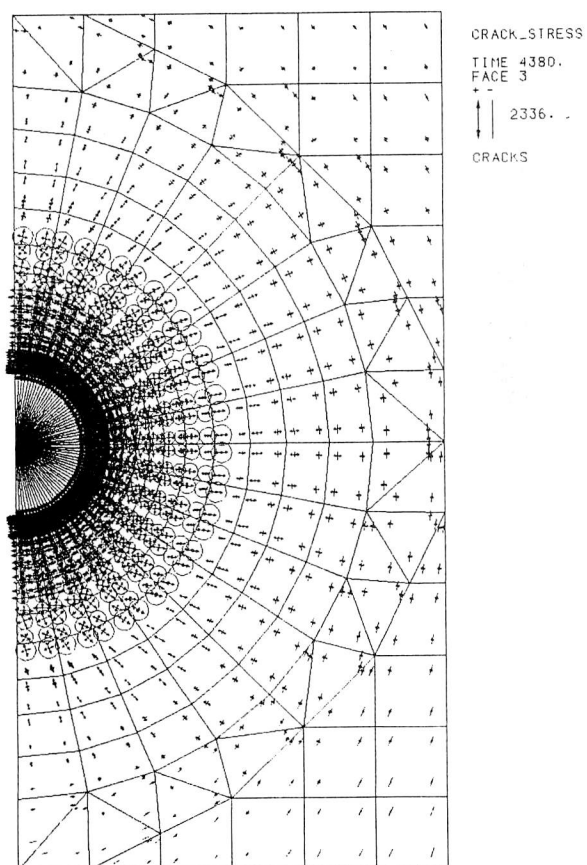
図 6.48 空洞周辺岩盤の応力状態



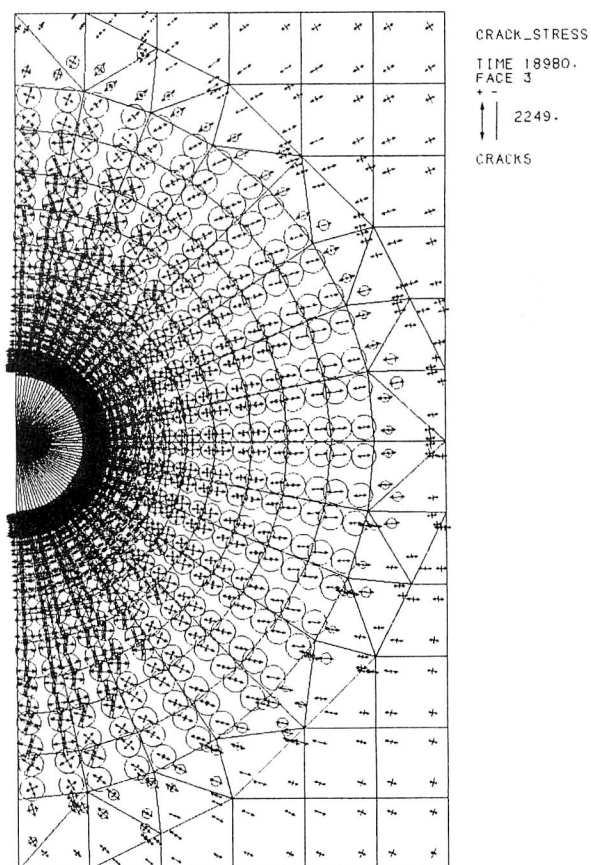
(a) 貯蔵1年後



(b) 貯蔵5年後

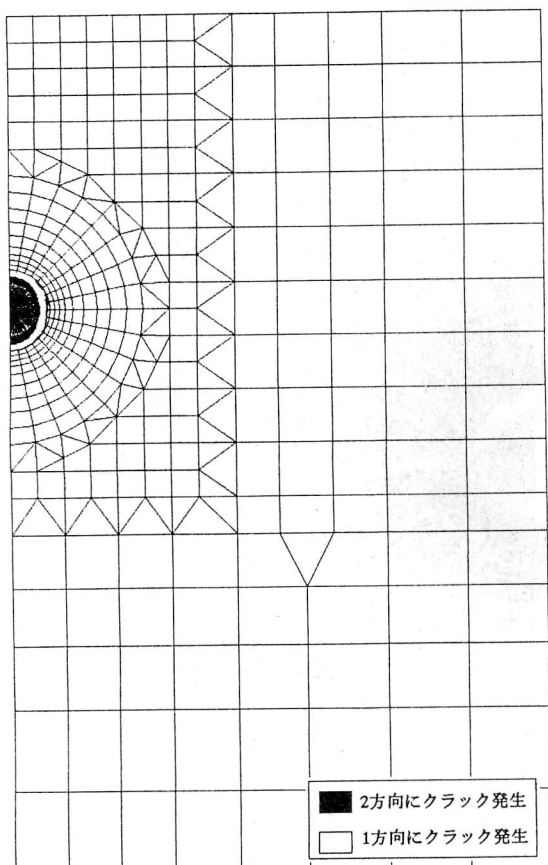


(c) 貯蔵10年後

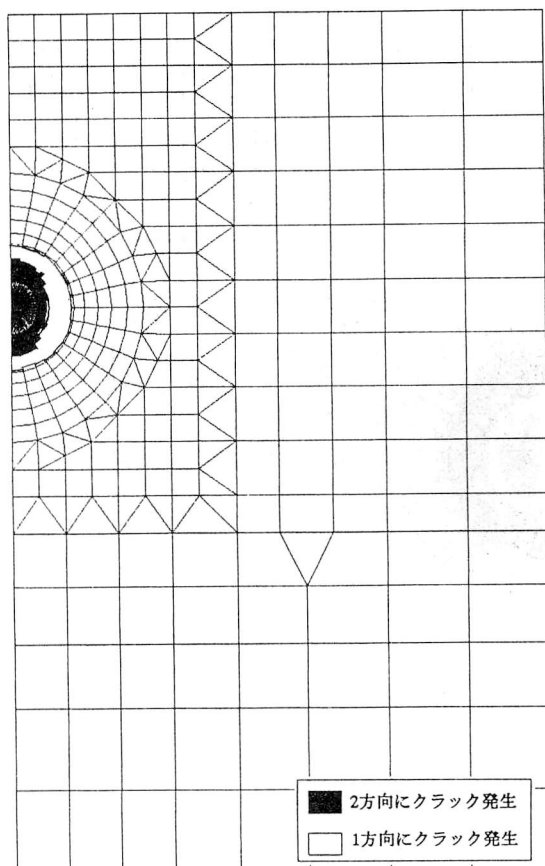


(d) 貯蔵50年後

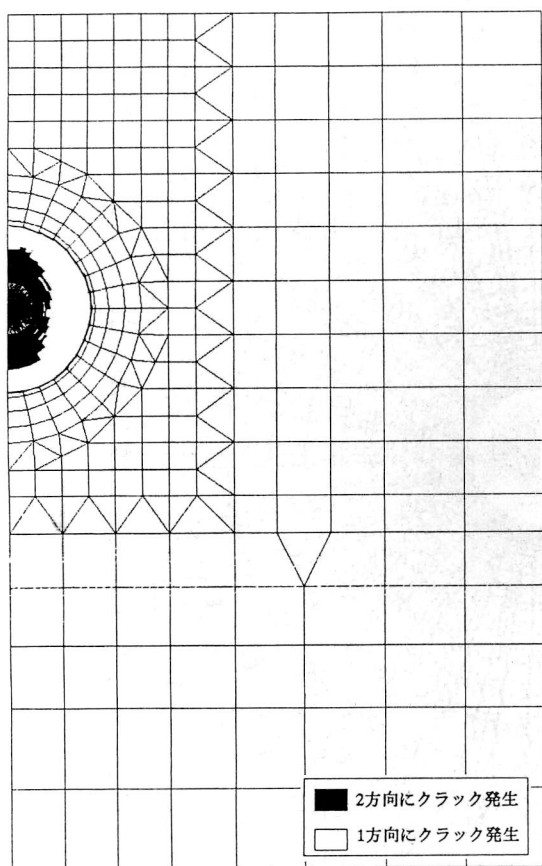
図 6.49 空洞周辺岩盤の応力状態 (空洞周辺拡大図)



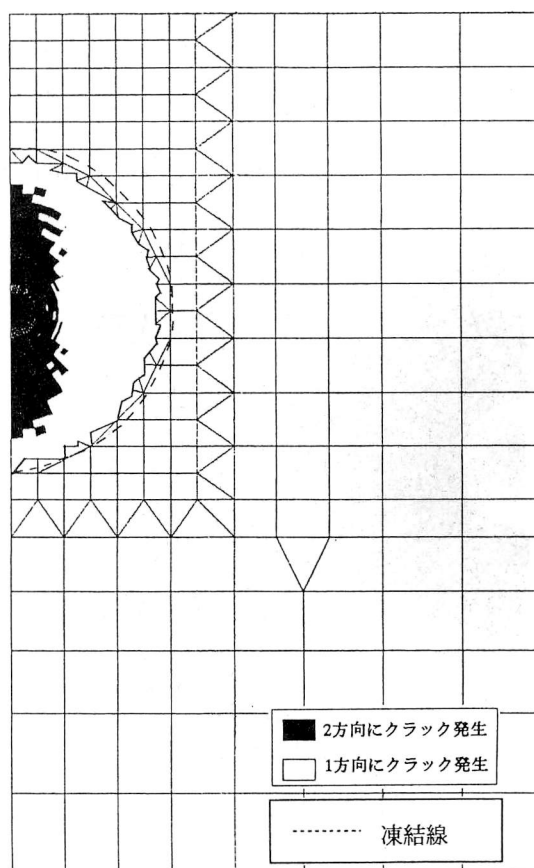
(a) 貯蔵1年後



(b) 貯蔵5年後

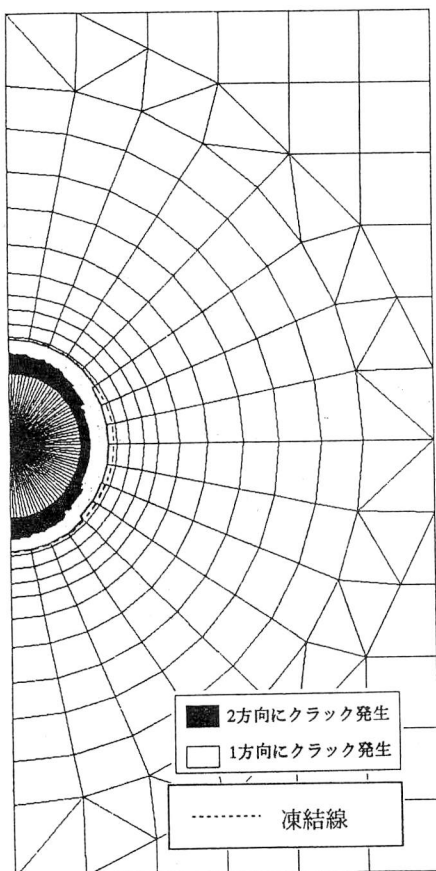


(c) 貯蔵10年後

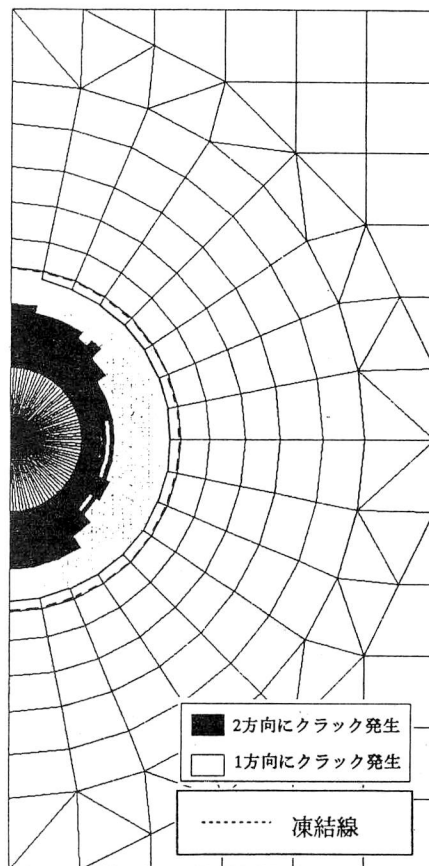


(d) 貯蔵50年後

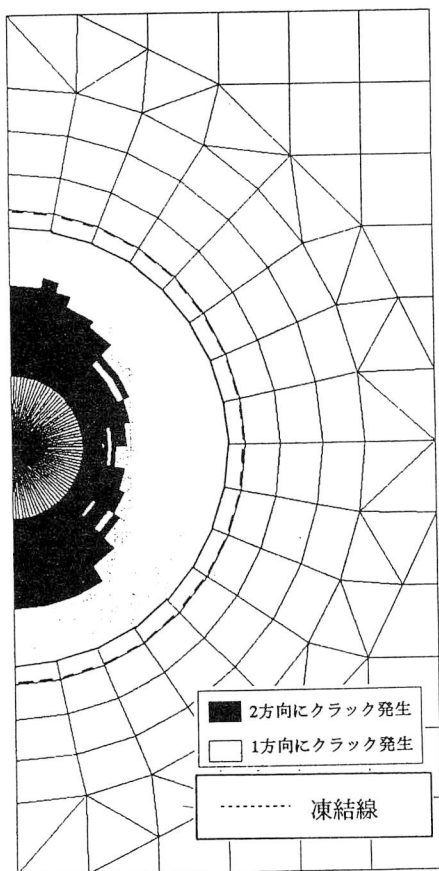
図 6.50 空洞周辺岩盤の亀裂発生領域



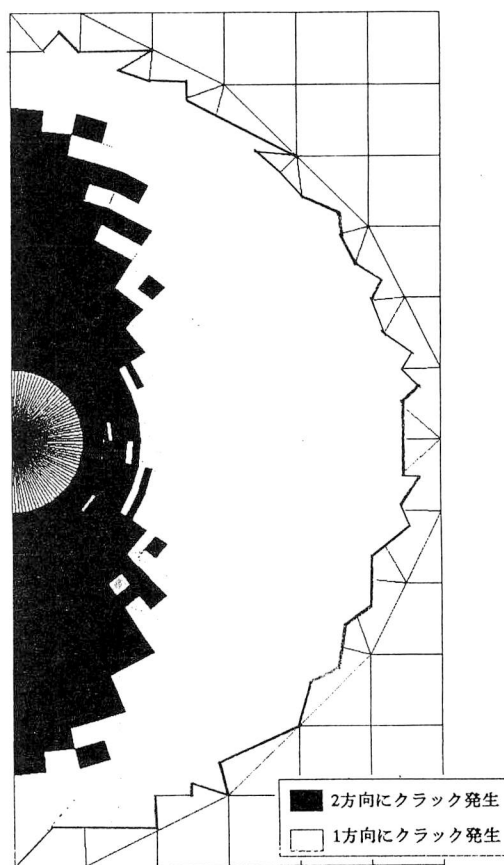
(a) 貯蔵1年後



(b) 貯蔵5年後



(c) 貯蔵10年後



(d) 貯蔵50年後

図 6.51 空洞周辺岩盤の亀裂発生領域（空洞周辺拡大図）

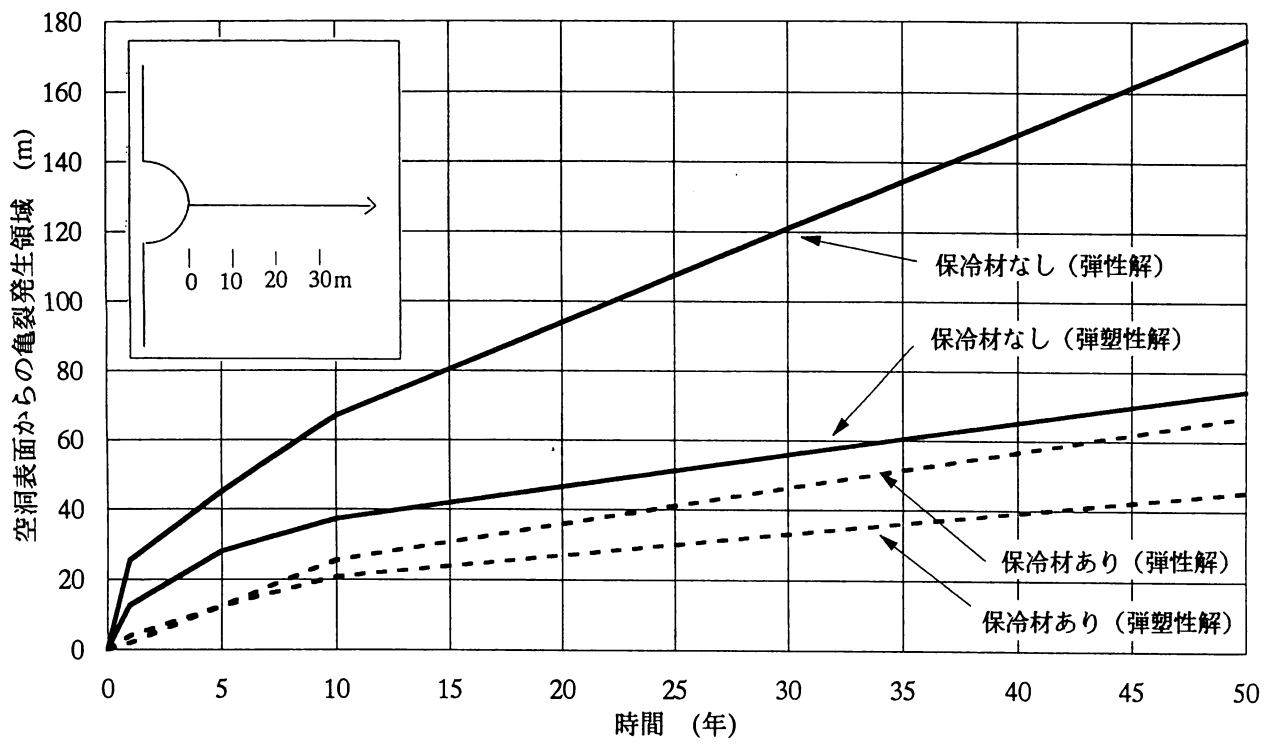
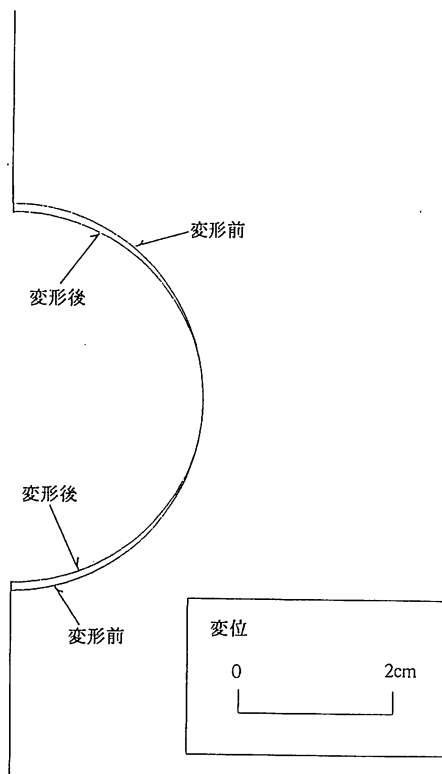
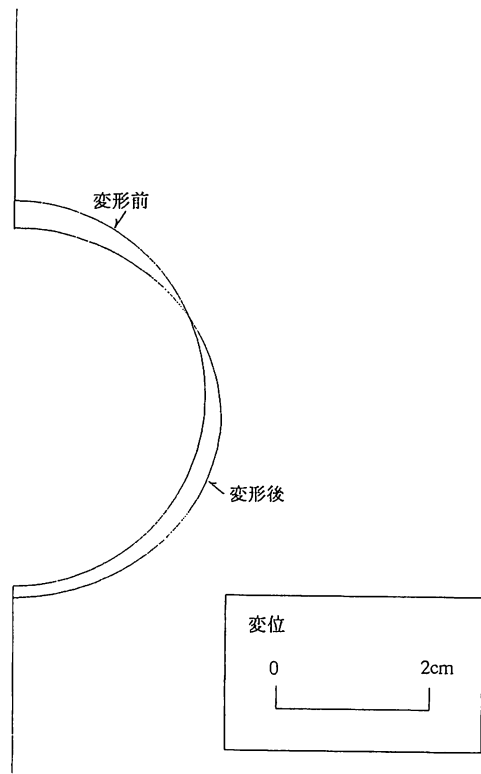


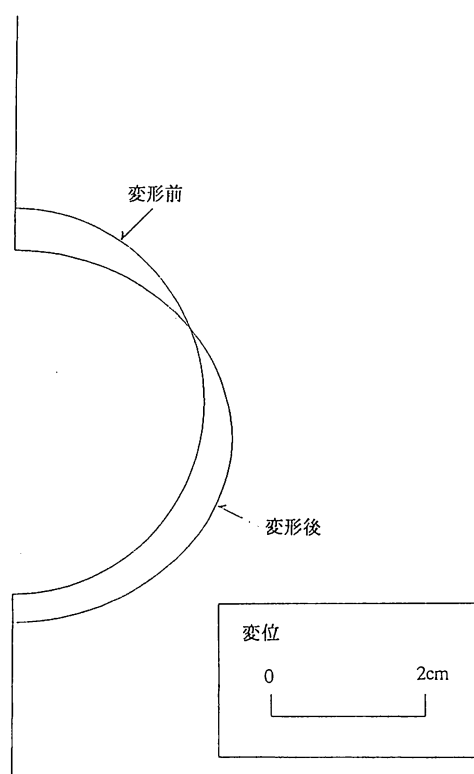
図 6.52 空洞周辺岩盤の亀裂発生領域の経時変化



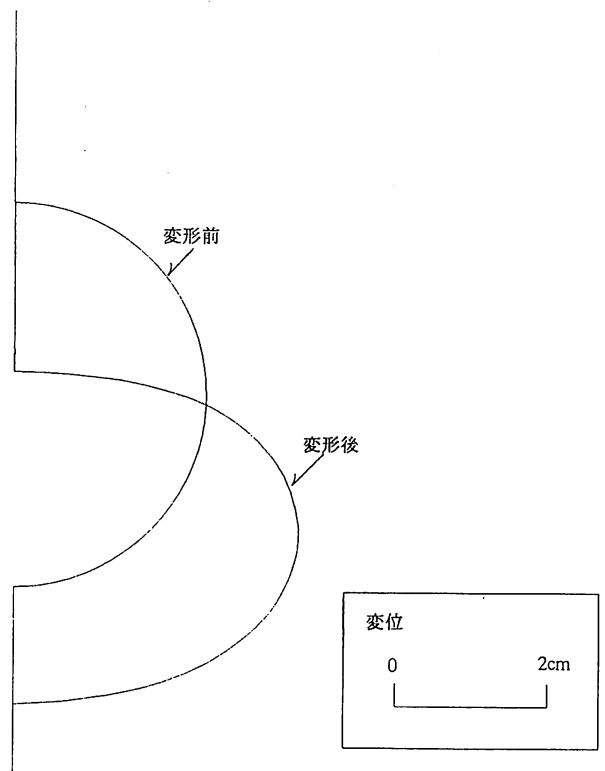
(a) 掘削後



(b) 貯蔵5年後



(c) 貯蔵10年後



(d) 貯蔵50年後

図 6.53 空洞周辺岩盤の変形状態

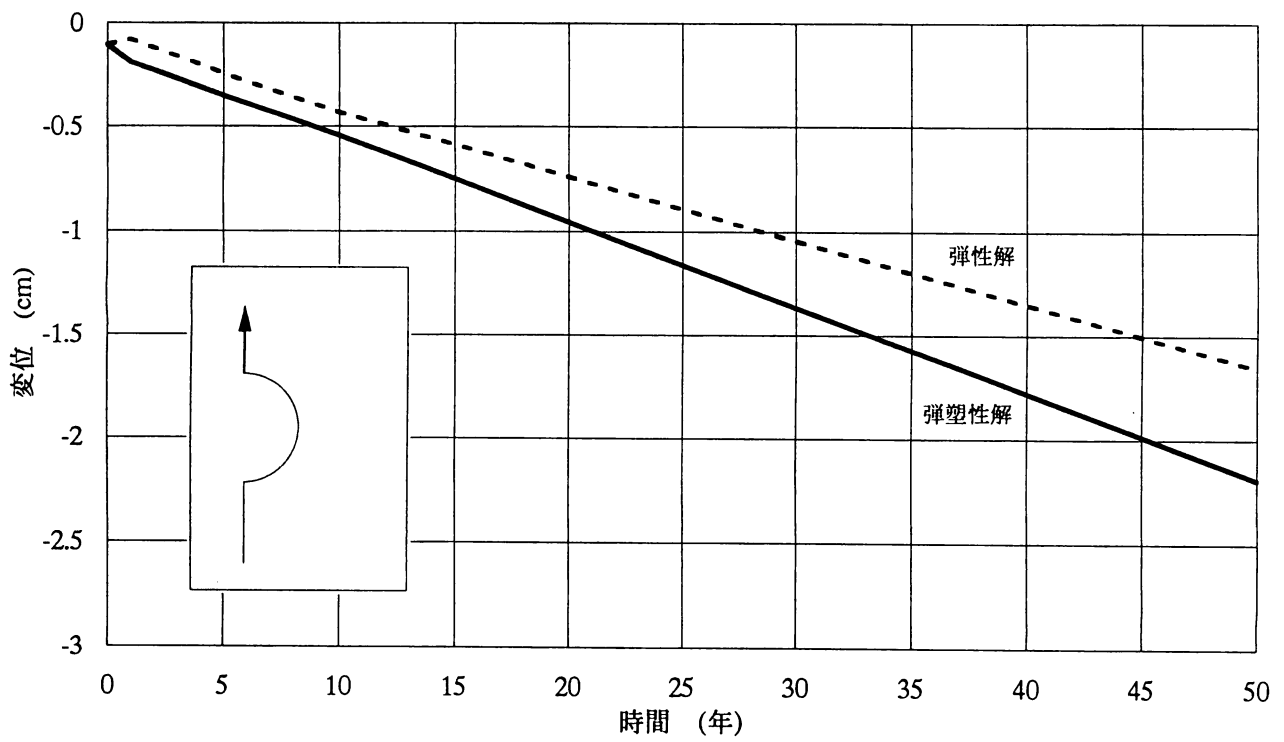


図 6.54 空洞周辺岩盤の変形量の経時変化（空洞上部）

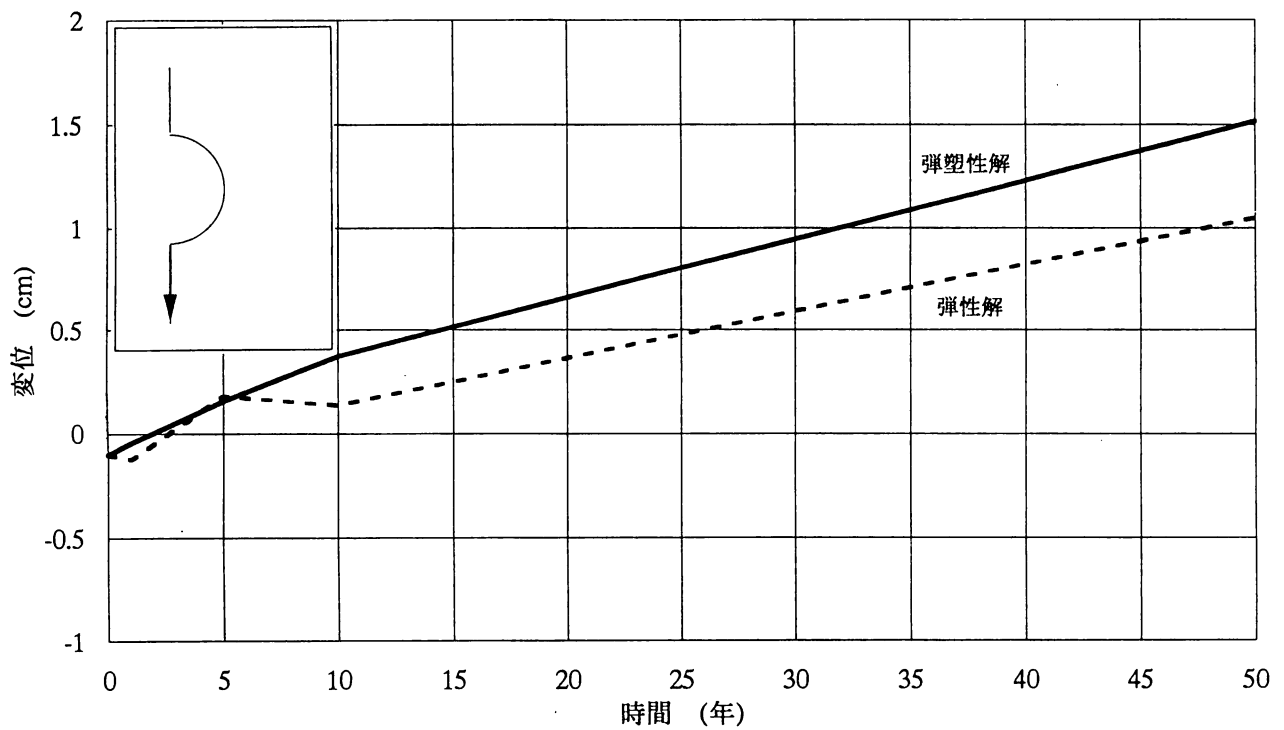


図 6.55 空洞周辺岩盤の変形量の経時変化（空洞下部）

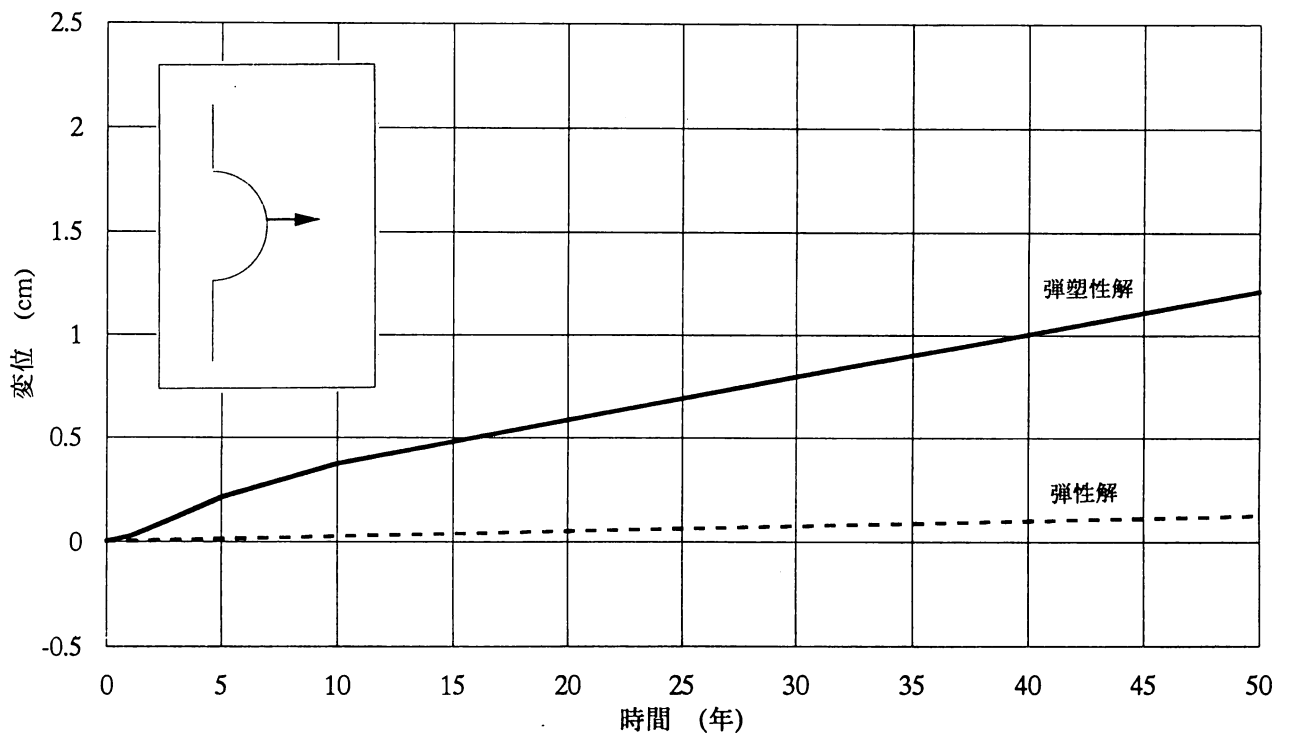


図 6.56 空洞周辺岩盤の変形量の経時変化（空洞側部、水平方向）

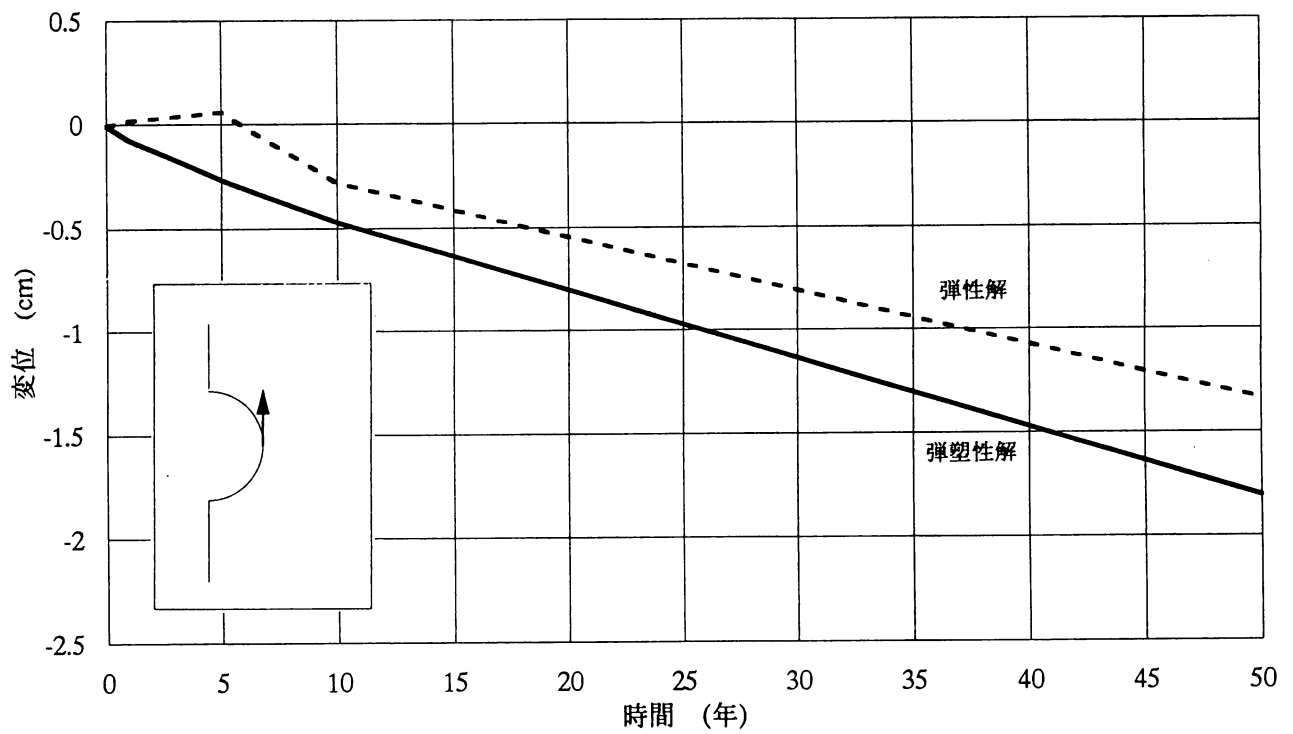


図 6.57 空洞周辺岩盤の変形量の経時変化（空洞側部、垂直方向）

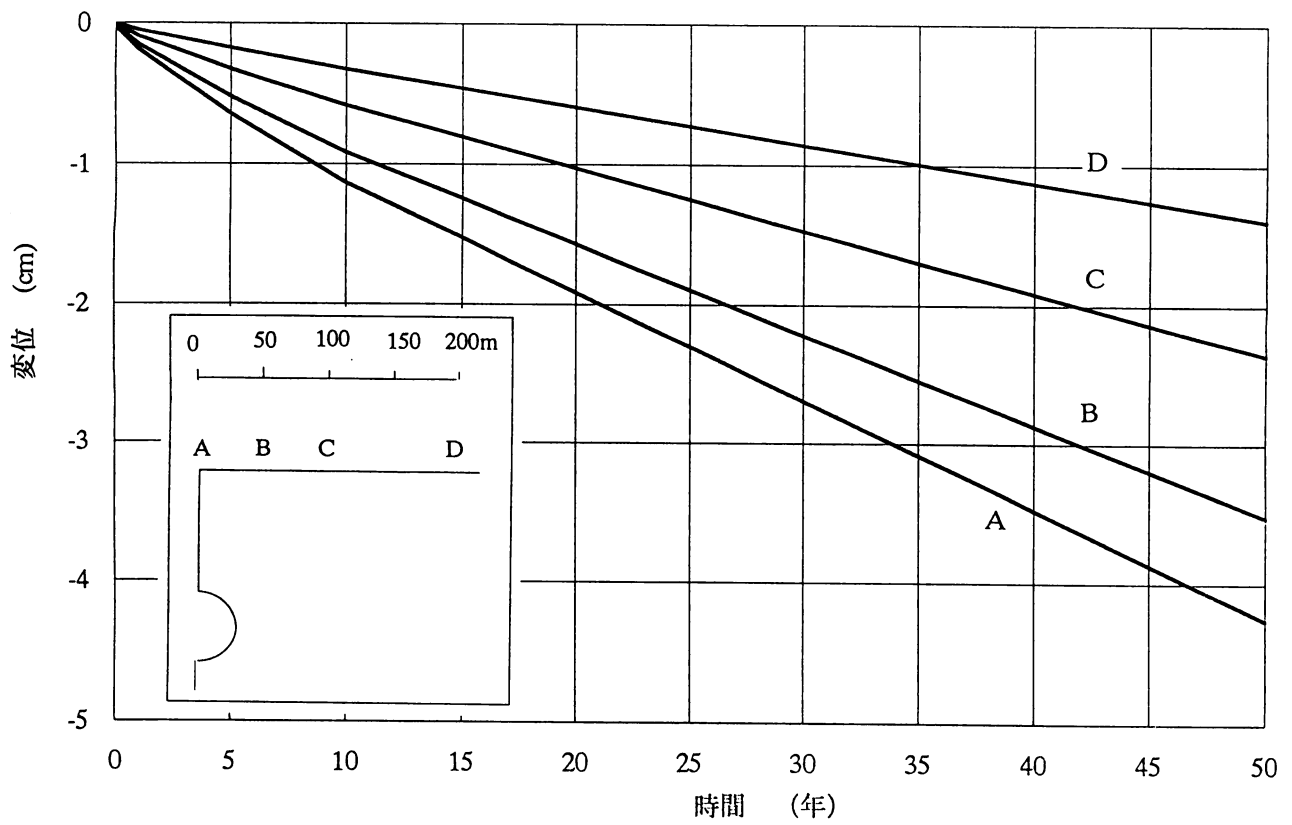


図 6.58 地表面における変形量の経時変化

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、1980
- 4) 日景秀治・添田弘基・西牧 均・関根一郎、「LPG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 保冷材・メンブレンの検討

第7章 保冷材・メンブレンの検討

7.1 保冷材の検討

(1) 既存の保冷材の調査

LNGタンクに用いられている保冷材を中心に、既存の保冷材について調査した。各種保冷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。図中の $\diagup$ は発泡方向に対し平行方向、 $\perp$ 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

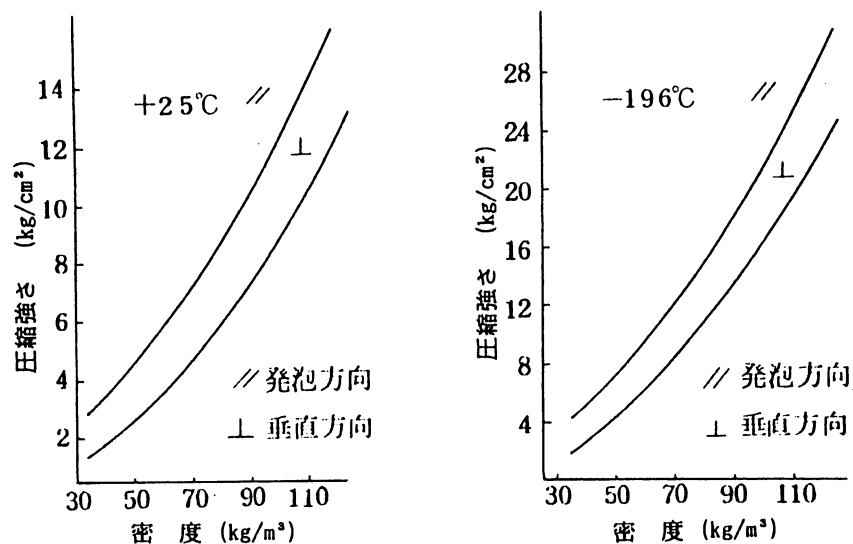


図 7.1 従来品の密度と圧縮強さの関係（出典：LNG地下式貯槽指針）

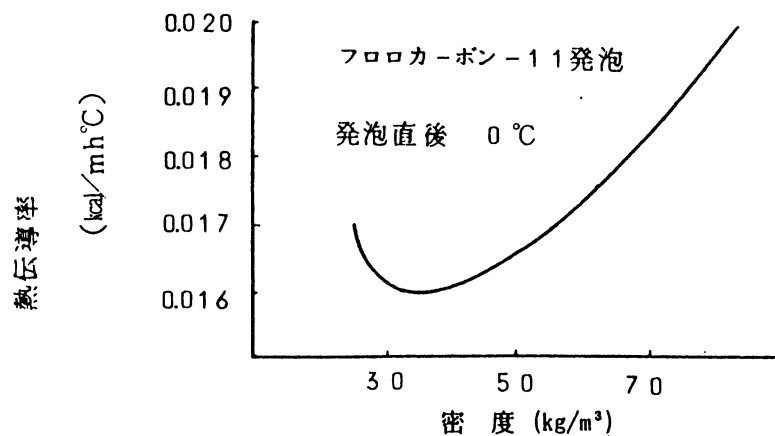


図 7.2 従来品の密度と熱伝導率の関係（出典：LNG地下式貯槽指針）

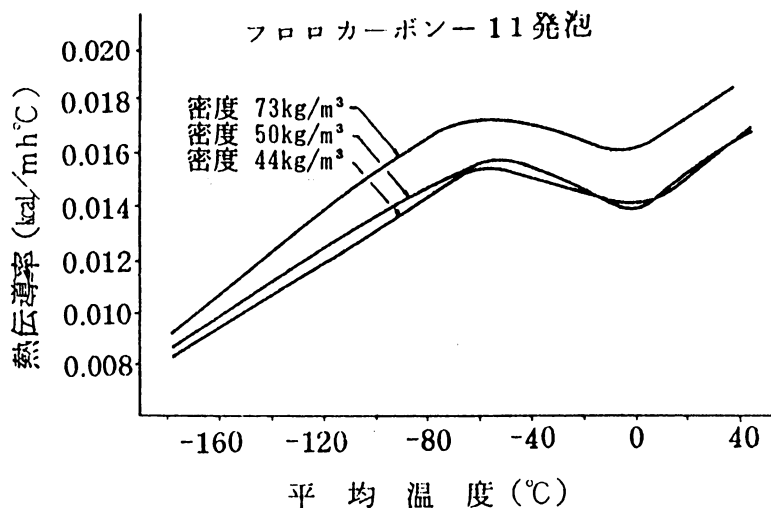


図 7.3 従来品の温度と熱伝導率との関係（出典：LNG地下式貯槽指針）

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。

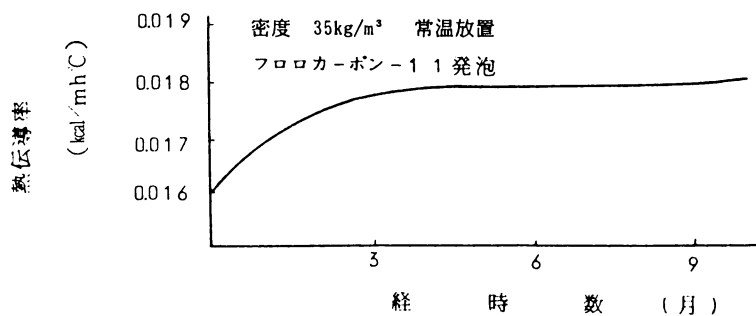


図 7.4 従来品の熱伝導率の経年劣化（出典：LNG地下式貯槽指針）

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、保冷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、他の保冷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保冷材である。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℃と他の保冷材に比べて低い。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、最も一般的な保冷材と言える。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。この保冷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保冷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。

このような保冷材に対し、メンブレン方式のLNG岩盤貯蔵システムにおける保冷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
 貯槽タンク内直径 : 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

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

保冷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保冷材は、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保冷材としては、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

名 称	種 類	密 度 (kg/m ³)	熱 伝 導 率 (kcal/mhr℃) (常温にて)	圧 縮 強 (kg/cm ²)
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
粒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%
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%
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

2.1 保冷材の調査

さ	縦弾性係数 (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 (メンブレン)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 (メンブレン)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
注	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	
注	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、保冷厚さが大	

(2) 保冷材の設計条件の整理

メンブレン方式のLNG岩盤貯蔵タンクにおける保冷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 B O G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十分な強度を有すること。

3) 構造設計

- ① B O G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所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。

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岩盤貯蔵タンクの内装材の方式を検討するため、既存の低温材料についての調査を行い、その特性について概略を述べるとともに、LNG岩盤貯蔵タンクに適した内装材の条件についても検討し、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) 極低温貯蔵タンク内装材の調査

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の貯蔵タンクでは収縮量は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、配管取り合い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、貯蔵タンク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

極低温貯蔵タンク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いるため、耐圧部材かメンブレン部材かを考えて既存のLNG貯蔵タンクは建設されている。

次に極低温貯蔵タンク材料として実績のあ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、液体酸素などの貯蔵タンク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ない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、メン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。メン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°C ）までの低温容器材として使用されてきた。この材料は INCO 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が良好であること、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。

国内で建設されている LNG 地中タンクのメンブレン構造の内槽材には、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 船の内槽にメンブレン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ンブレンは 36 % ニッケル鋼の 0.5 ~ 1.5 mm の薄板で、耐力 $28\text{kg}/\text{mm}^2$ 、引張強さ $47\text{kg}/\text{mm}^2$ 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岩盤貯蔵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、錆が発生し易く、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岩盤貯蔵タンク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蔵タンクの内槽材として開発された貯蔵タンクの液密性、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、貯蔵タンク躯体、岩盤等)に伝えられて保持されるため、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 -162°C 間の温度差による熱応力荷重、貯蔵タンク稼働時のタンク内液の変動による液圧変動荷重、液層からガス層への変動による温度変化による熱応力荷重、構造体の変位または運動による機械荷重、貯蔵タンク内機器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で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。

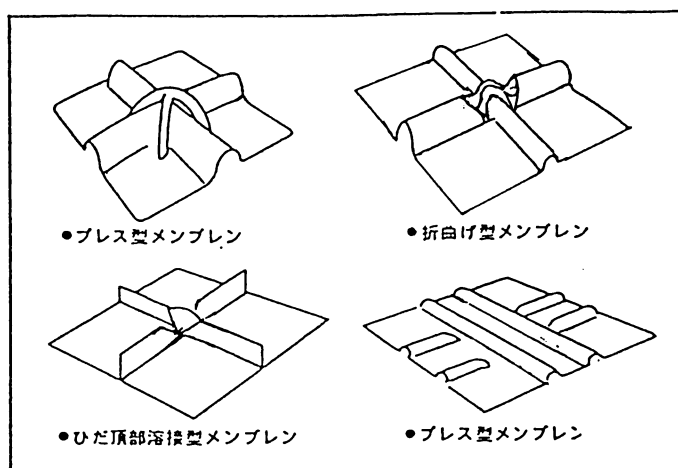


図 7.5 各種メンブレンの基本モジュール

（出典：LNG便覧）

(2) 既存のメンブレンの調査

低温液化ガス貯蔵のシール材として金属（ステンレス鋼、36%Ni鋼）¹⁰ 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、貯蔵タンクに用いられて久しい。日本で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蔵タンク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貯蔵タンクなど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

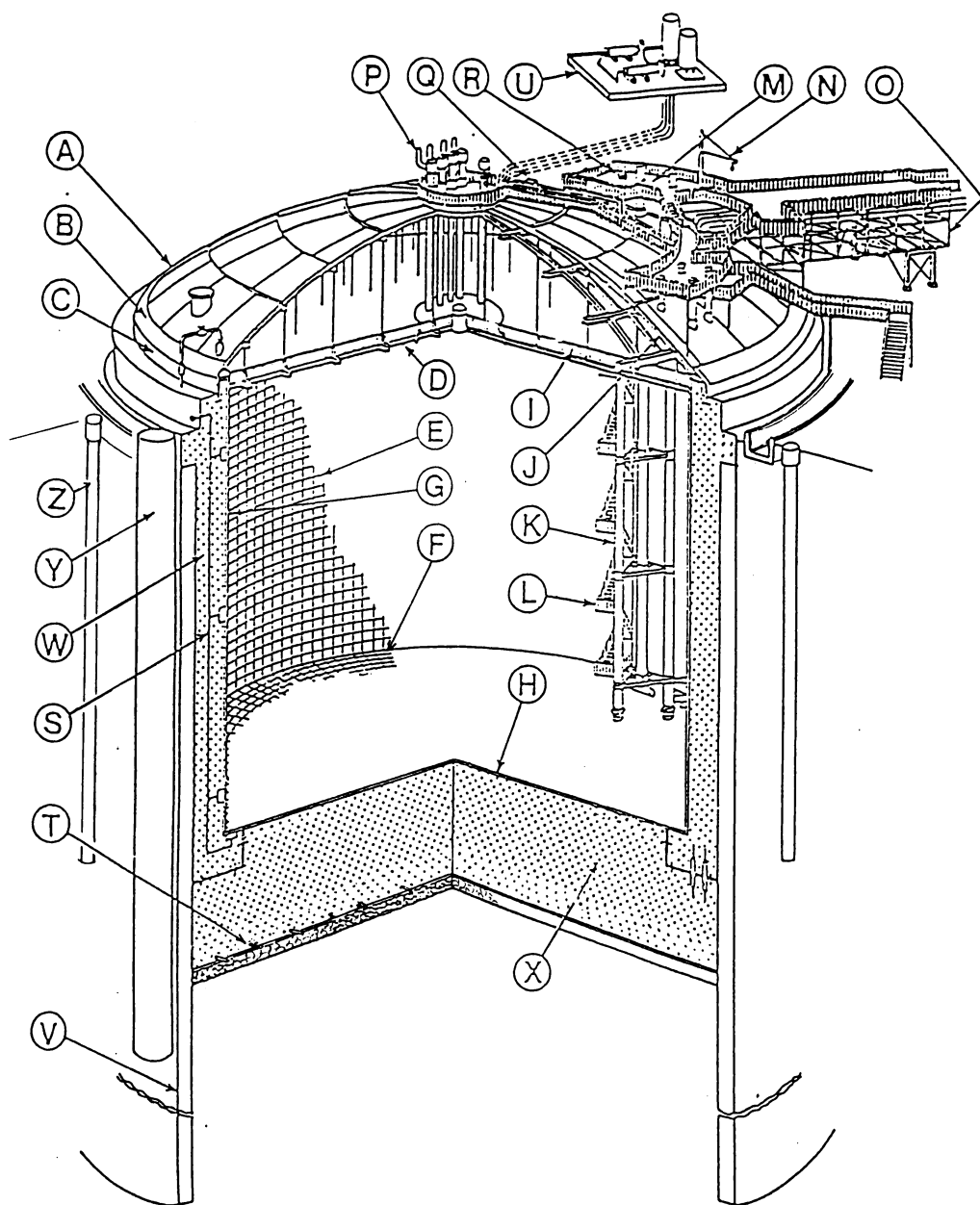
ここではLNG貯蔵タンクに実績のあるメンブレン方式について比較する。メンブレン形式は平行収縮式（実績としては2方式あり）と旋回收縮式（実績としては2方式あり）に分けられる。各方式とも熱収縮を吸収するコルゲーションの形状およびその配置方法に特徴があり、またメンブレンを固定する方法にもメンブレン形式により異なった形式が用いられている。これらの各メンブレン方式の特徴点について比較する。これらの比較表を表 7.4(1)～(3)に示す。

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日当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

メッシュ型		平行収縮式メッシュ		旋回収縮式メッシュ	
比較検討	メッシュ	A方式	B方式	A方式	B方式
	比較検討	平行収縮式メッシュ		旋回収縮式メッシュ	
1. 温度変化に対する変位吸収方法		平行収縮式メッシュは、コルゲーションを縦横に配置し、その交差点部二方向の熱収縮が吸収できるようにしています。 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。		旋回収縮式メッシュ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。実験がコルゲーションの位置もとの位置を示し、破壊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挙動が完了します。	
2. メッシュ材料		SUS304 2mm		SUS304 2mm	
	3. コルゲーション形状				

表 7.4 (2) メンブレン構造の各方式比較表

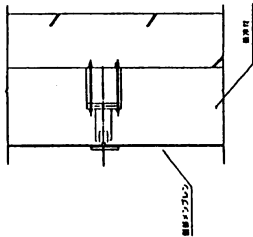
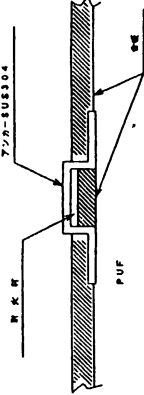
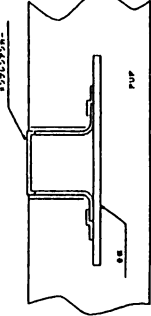
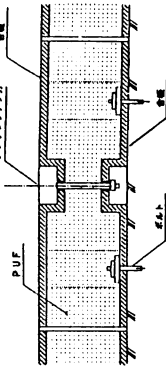
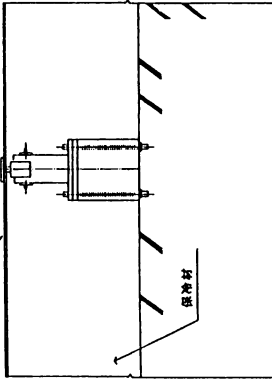
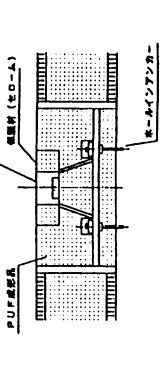
比較検討	平行収縮式メンブレン		旋回収縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
4. アンカー構造	 側部メンブレンアンカー	 メンブレンアンカーは保冷材の上面合板に取付 側部・底部メンブレンアンカー	 メンブレンアンカーは保冷材埋込みの合板に取付 メンブレンアンカーは側部のみ	 側部
5. ノブ・リッド・ガ	 底部メンブレンアンカー	 メンブレンアンカーは保冷材の上面合板に取付 側部・底部メンブレンアンカー	 メンブレンアンカーは保冷材埋込みの合板に取付 メンブレンアンカーは側部のみ	 底部

表 7.4 (3) メンブレン構造の各方式比較表

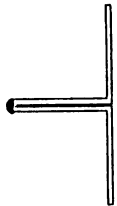
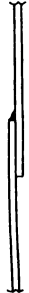
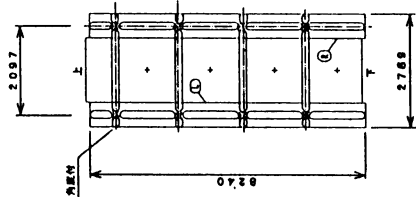
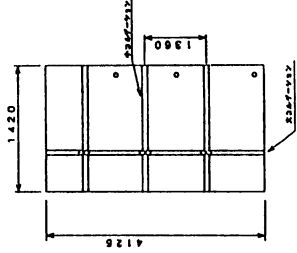
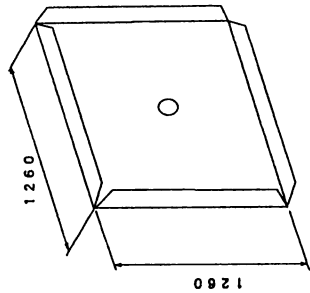
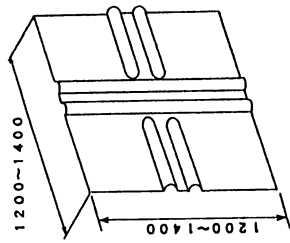
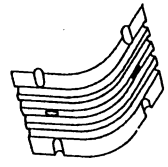
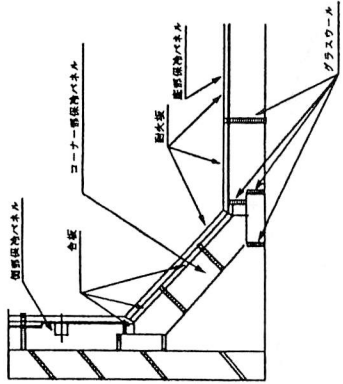
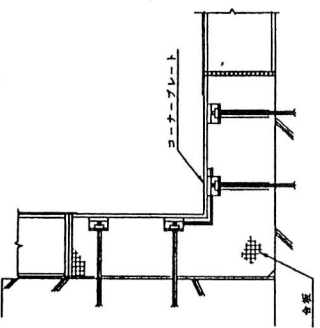
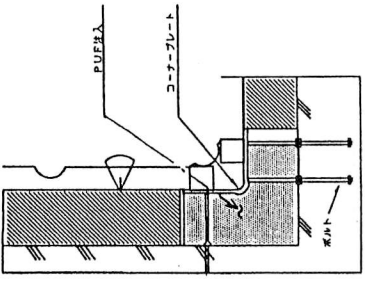
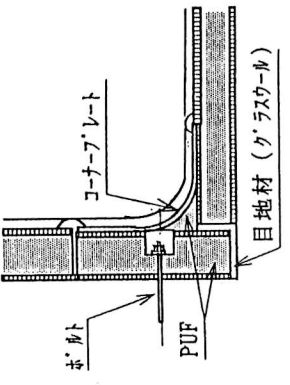
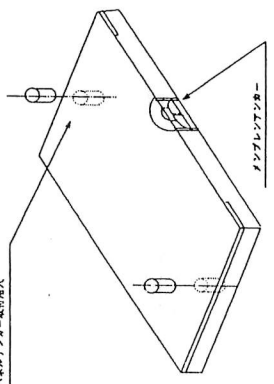
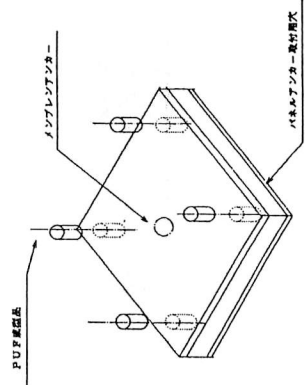
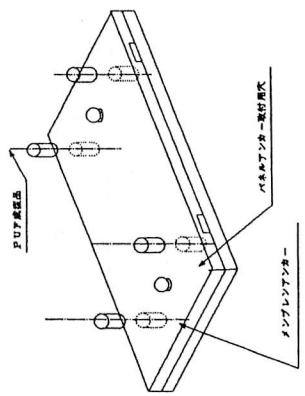
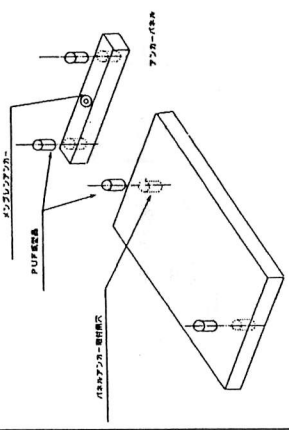
カブリ型式 比較検討	平行収縮式メンブレン		旋回收縮式メンブレン	
	A方式	B方式	A方式	B方式
6. 溶接方法	 片側全厚すみ肉重ね溶接	 片側全厚すみ肉重ね溶接	 片側全厚すみ肉重ね溶接  へり溶接	 片側全厚すみ肉重ね溶接
7. 溶接部検査	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト	液体浸透探傷試験 アンモニア・リークテスト
8. その他 代表的カブリ パッチ		 側部一般部パネル	 側壁一般部パネル	 一般部  コーナーパネル

表 7.5 (1) 保冷構造の各方式比較表

カブリ型式 トナー	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
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	平行収縮式メンプレン		巡回収縮式メンプレン	
	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				

(3) メンブレンの設計条件の整理

LNG岩盤貯蔵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ようになる。

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、貯蔵タンク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。

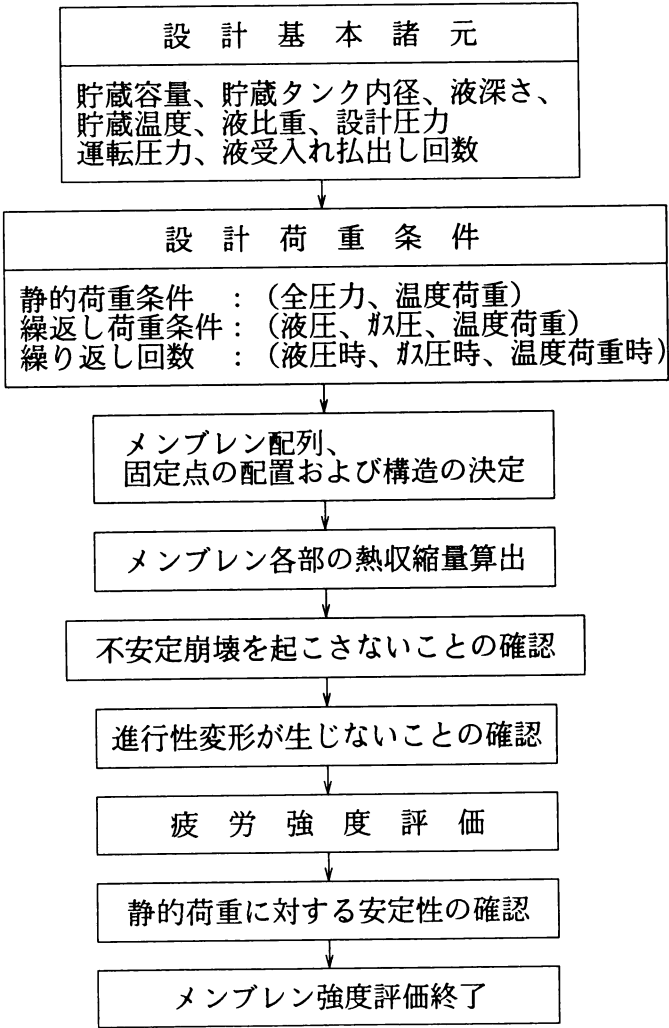
表 7.7 繰り返し荷重の種類、変動幅および繰り返し回数

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	$\Delta \varepsilon_1$	n_1 回	設計寿命および貯蔵タンク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	$\Delta \varepsilon_2$	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	$\Delta \varepsilon_3$	n_3 回 ^{注)}	
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	$\Delta \varepsilon_4$	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（㈱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（㈱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 LNG岩盤貯蔵施設の試設計

第 8 章 LNG 岩盤貯蔵施設の試設計

8.1 基本設計条件

(1) タンク型式の設定手順

1) 地盤諸条件

① 想定岩盤

岩盤は良質な硬岩と想定し、今回は花崗岩（C_H 級）とした。

2) 岩盤貯蔵システム全体条件

① 空洞土被り：100m

タンク周辺の凍結・冷熱領域や漏液・漏気などの周辺環境に対する影響および地下空洞としての安全性などを考慮し、今回は土被りを100mとした。

② 岩盤貯蔵タンク構成：作業用トンネル・立坑・貯蔵タンク

土木・設備工事の円滑化・設備配置の最適化という見地から、今回のタンク構造の構成要素を作業用トンネル・立坑・貯蔵タンクとした。

③ 作業用トンネル本数：1本・作業用トンネル断面積：45m²

貯蔵タンク本体のずり出しルートとして作業用トンネルを設けるが、ダンプトラックの対面通行が可能な断面形状・断面積を選定した。

④ 立坑本数：4本・立坑径：6mφ

最適なLNG受払システムの設備配置を考えた場合、受入・払出設備を別々の立坑に設置するのが妥当であり、また工事中の必要換気容量および換気方法からも立坑を各貯蔵タンク毎に2本ずつ設けた。立坑径に関しても適正な設備配置が可能な6mφとした。

3) 貯蔵タンク諸条件

① 貯蔵タンク型式：円形トンネル方式

貯蔵タンク型式については、周辺岩盤が冷却することにより引張応力が発生するが、その場合の力学的安定性を考えた場合、断面寸法の小さいトンネル方式が最も適している。また、応力集中を抑えるためには断面形状としては円形が最も適していることから、今回は貯蔵タンク形式を円形トンネル方式とした。

② 総貯蔵量：36万kl

今回は200万kWのコンバインド発電所をモデルとしており、貯蔵タンクの貯蔵総量を年間使用LNG量の10%、有効貯液率を95%と設定し、その結果総貯蔵量を36万klと設定した。

③ タンク基数：2基

タンク基数についてはメンテナンスと用地・施工性を考慮したトンネル長さや経済性（タンク基数の少ない方が有利）などから、タンク基数を2基とした。

④ 貯蔵タンク径：20m ϕ

建設費全体に占める保冷材・メンブレン建設費は非常に大きく、そのために同容量に対する貯蔵タンクの表面積、つまり貯蔵タンク径をできる限り大きくする必要がある。今回の場合は想定岩盤の力学的安定性から考えて、貯蔵タンク径を20m ϕ とした。

⑤ 断面構造：鉄筋コンクリート・保冷材・メンブレン

・覆工コンクリートとしての鉄筋コンクリートの使用

今回の場合には、LNG貯蔵時にコンクリートへの応力集中を避け、またひびわれを分散させるためにも鉄筋コンクリートを使用した。

・保冷材の敷設

LNG貯蔵時に周辺岩盤から貯蔵タンク内部への熱流入によってBOGが発生する。このBOG発生量は周辺岩盤の冷却に伴い低下するが、ランニングコストの低減を図るために時間経過に伴うBOG発生量の変化を少なくし、また、岩盤の冷却影響範囲を低減するために保冷材を敷設した。

・メンブレンの敷設

周辺岩盤の冷却に伴って岩盤に引張応力が発生し、一部の岩盤領域にはクラックが発生する。これにより、タンク内部のLNGがこれらのクラックを介して岩盤内部に漏洩する可能性があるために貯蔵タンク内部の液密性を確保するためにメンブレンを敷設した。

⑥ 岩盤状態：岩盤凍結方式（ヒーティングシステムは設けない）

今回の場合はコストの低減を図るために、周辺岩盤にはヒーターなどは設けず、自然冷却させる。

以上の結果から、今回の設定岩盤貯蔵タンク型式を図 8.1に示す。

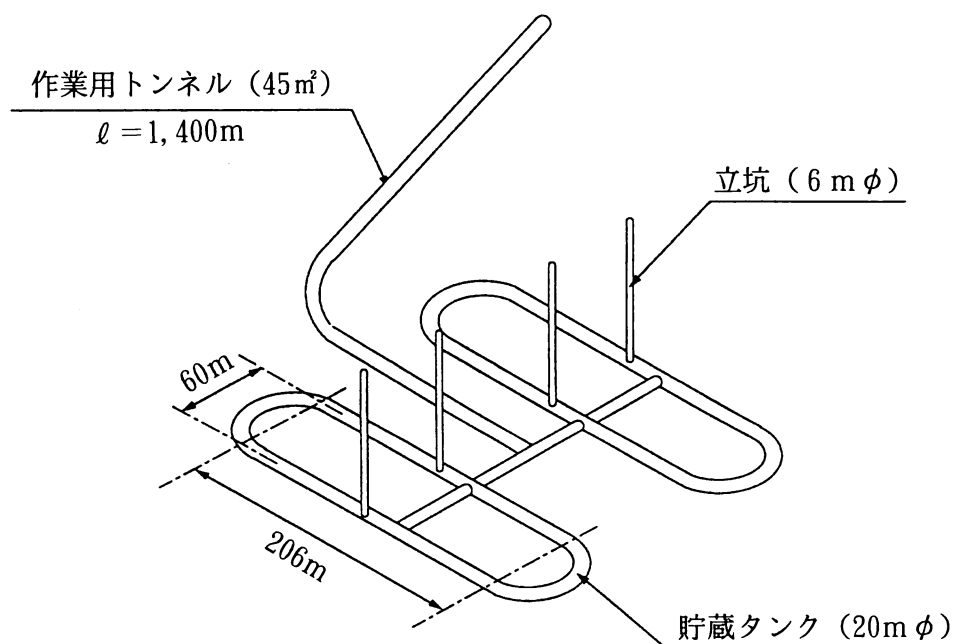


図 8.1 設定岩盤貯蔵タンク形式

(2) 受入・払出設備に関する基本的な考え方

1) 検討の前提条件

- ① 1 貯蔵タンクがメンテナンス時でも、受入・払出を同時に行える設備とする。
- ② L N G 払出ポンプは $350 \text{ m}^3/\text{H} \times 250 \text{ m}$ L N G 2 台とし、各貯蔵タンクに上記 L N G 払出ポンプと同様の保冷循環ポンプ 1 台を設置する。
- ③ L N G 地中タンクでは、一般的に、下記の配管・設備類が 1 貯蔵タンクに設置される。

・液受入れ管	26 ^B × 2 本
・ポンプバレル管	3 本
・ポンプミニマムフロー管	各 L N G ポンプ 1 本
・ミキシング管	一 式
・クールダウン管	一 式
・B O G 出口管	22 ^B × 1 本
・高圧ポンプ液・ガス戻り管	各 1 本
・圧力安全弁管	2 本
・真空安全弁管	1 本
・液面計ノズル	2 本
・温度計ノズル	4 本
・圧力計ノズル	4 本
・予備ノズル	2 本
・タンク内部昇降設備	2 セット
・マンホール	2 ケ

以上のタンク内設備を効果的に配置する必要があり、特に岩盤貯蔵タンクの場合には、地上の露出部分が限られていることもあって、極力集合させることを検討する。

2) 立坑利用方式と作業用トンネル利用方式との比較検討

L N G 岩盤貯蔵タンクの受入・払出設備に関する立坑利用方式と作業用トンネル利用方式とを比較検討する。

① 配管方法のケース

ケース 1：立坑利用方式

立坑利用方式とは、立坑に配管（受入・払出設備）を設置する方式で、石油岩盤貯蔵タンクや実証実験中の L P G 岩盤貯蔵タンクなどで採用実績がある。

立坑は、掘削工事中に主として作業者の移動用エレベータースペースとして使用されるものであり、地下タンクへの最短通路として存在する。これを配管立坑として利用する場合は、受入管・払出管などを全て鉛直として、地上部から吊り下げる構造とする。

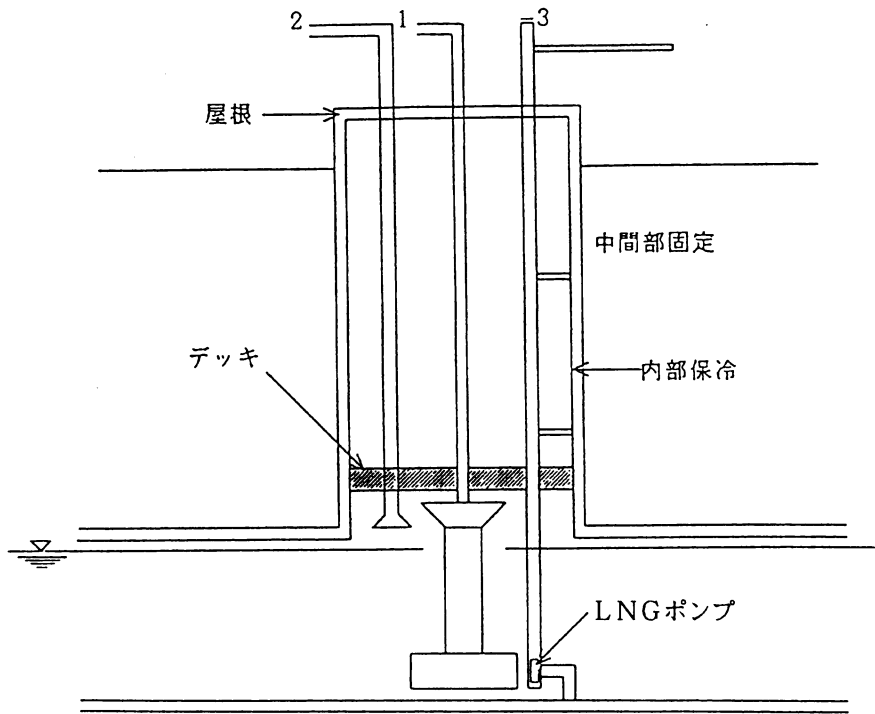


図 8.2 立坑利用方式の概念図

ケース 2：作業用トンネル利用方式

作業用トンネル利用方式とは、作業用トンネル内に配管（受入・払出設備）を設置する方式で、この方式は、LNG基地で洞道内に配管を設置した実績が類似例としてある。

作業用トンネルは、工事中に掘削土の排出用としてトラックの通路にもなるため、比較的広いスペースで堅固な通路として存在する。

この方式の場合は、配管のみならずLNGポンプ・計装設備・操作弁などの設備関係をも地下に設置することができる。

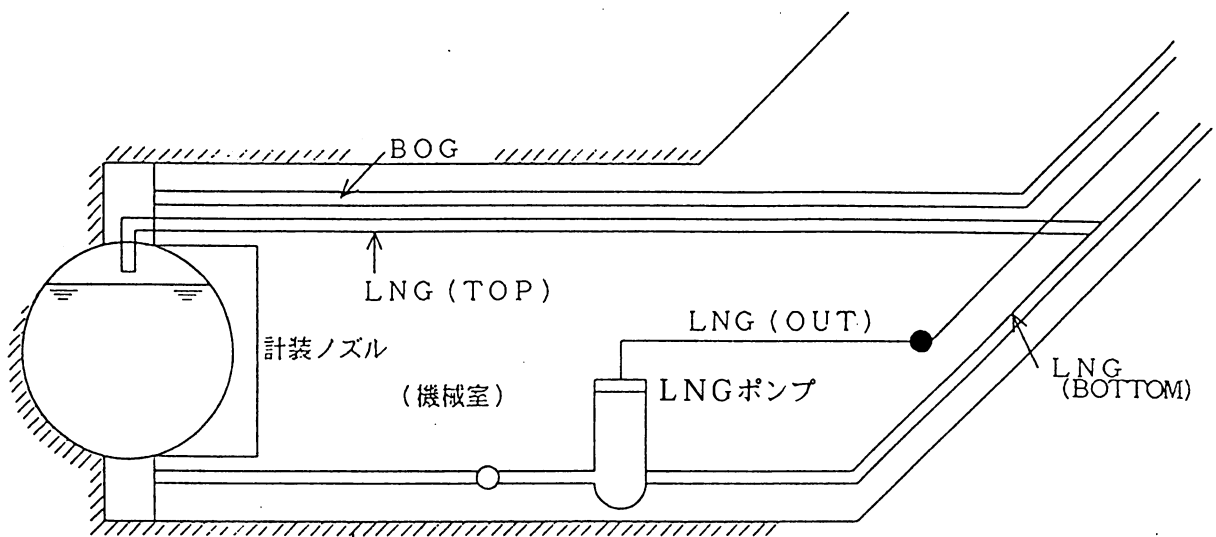


図 8.3 作業用トンネル利用方式の概念図

② 立坑利用方式と作業用トンネル利用方式の比較

表 8.1 立坑利用方式と作業用トンネル利用方式

項 目	立 坑 利 用 方 式	作 業 用 ト ン ネ ル 利 用 方 式
概 念 図		
実 績	石油岩盤貯蔵タンク、実証実験中のLPG岩盤貯蔵タンクにて実績	LNG基地の洞道にて実績（但しメンテナンスの少ない配管系統のみ）
構 造	- 立坑内に鉛直配管を設置 - 立坑内面はライナープレートにて気密保持 - 立坑上端部に地上屋根、下端部にデッキ（デッキ上保冷付）を設置 - 立坑内はメタンガス雰囲気	- 作業用トンネル内に配管を設置 - 作業用トンネル内面は基本的にライナー不要 - 作業用トンネル内に機械室を設け、設備関係を地下に設置 - 作業用トンネル内は不活性ガス（窒素ガス）雰囲気
受入・払出設備	- 受入漏斗管（リード管）方式 - サブマージド・モータ型の貯槽内設置型ポンプをポンプバレル内にセット	- 底部直接受入方式 - サブマージド・モータ型の貯蔵タンク内設置型ポンプをタンク外部にセット
利 点	- 地上でのメンテナンス LNGポンプ・計装設備・操作弁などの保守点検が地上で可能 - 地中の配管長が最短 - 既存のLNG地中タンク技術適用可能 * 配管熱変位吸収機構（上端部吊下げ＋中間振止めサポート） * ポンプバレル構造 * 計装機器の計画	- 立地上のメリット 設備関係を地下に設置するため、岩盤選定上の制約を受けず、地上の有効活用も可能 - 作業用トンネル内の設備点検 特殊作業服の使用により、稼働中の設備点検が可能
課 題	- 液受入配管の検討 高低差約120 mでの自由落下方式の受入時確認が必要 - 配管スペース 立坑内は狭隘部となり、施工・点検時に困難 更なる信頼性向上と検査ロボットの開発などにより、安全性・信頼性の改善をはかることが必要 - 長尺配管構造の耐震検討 地震時の安全性確認が必要	- ガス漏洩対策 作業用トンネル内は蒸発性の高いLNGを取扱う閉空間であり、ガス漏洩対策が必要 - メンテナンス時の安全性 LNGポンプ・計装設備・操作弁などメンテナンスを要する設備の点検時に安全対策が必要 本来この種の設備を設置することは好ましくない - 配管スペース 配管熱変位吸収機構がループ方式となり、幅広いスペースが必要 - 機械室内の稼働時温度低下防止策 加温又は換気が必要

③ 結 論

以上の概略検討から、本岩盤貯蔵タンクの基本検討において、メンテナンス時の安全性などを考慮すると、立坑利用方式が作業トンネル利用方式より有利と考えられ、今後の詳細検討では立坑利用方式を採用する。

3) 立坑1本案と2本案の比較検討

① 立坑1本に1タンク全てのノズルを設ける場合

LNG岩盤貯蔵タンクの場合、既存のLNG地中タンクと比較して、貯蔵タンクの断面積および立坑の断面積が共に小さいので、立坑1本の場合には、受入用、払出用および計測用の配管・機器類が接近して設置されるため、同一貯蔵タンクで受入・払出を同時に行う場合には、次のような点に関して強度上、運転上の課題の検討が必要となる。

・ポンプバレルの振動対策とポンプへの気泡巻き込みの防止対策

LNGポンプの吸い込み口近辺に液受入管の出口があり、受入時にポンプバレルに受入LNGが当たるので、ポンプバレルの振動に対する対策を要する。また受入時において、液受入管内に巻き込まれた気泡がポンプへ吸い込まれないような対策を要する。

・液面計の振動防止と計測精度の確保

液面計には、受入時に吹出したLNGにより起こされる液面動揺およびLNGの流れにより計測上、強度上の問題が考えられる。LNG地中タンクでは液面計は液受入管の位置よりかなり離している。

・その他の課題

詳細検討時に、配管長、熱収縮の吸収、配管スペース、配管貫通方法（側壁貫通の検討）などについて、現在の立坑内径の検討を行う必要がある。

本ケースについて、図 8.4に立坑を1本とした場合のタンク廻り配管概念図を、図 8.5に立坑を1本とした場合のタンク廻り配管概略配置図を示す。

② 立坑2本に1タンクのノズルを分ける場合

同一貯蔵タンクで受入・払出を同時に行う場合、受入LNGによる液面動揺および液中の物体への流体力を避けるため、距離を離して設けた2本の立坑（受入立坑、払出立坑）へ配管・計装機器を配置することにより、①に示すような問題は生じない。

本ケースについて、図 8.6に立坑を2本とした場合のタンク廻り配管概念図を、図 8.7、8.8、8.9に立坑を2本とした場合のタンク廻り配管配置図を示す。なお、このケースでは、立坑の内径を6mφとしている。

③ 共通の課題

液受入管に関しては、既設のLNG地中タンクの実績では地上部配管からタンク内出口までの高低差は約60mである。本ケースの場合には約120mと2倍以上となるため、既存の方式のようにタンク入口からの自由落下に関しては検討（試験などによる）が必要である。

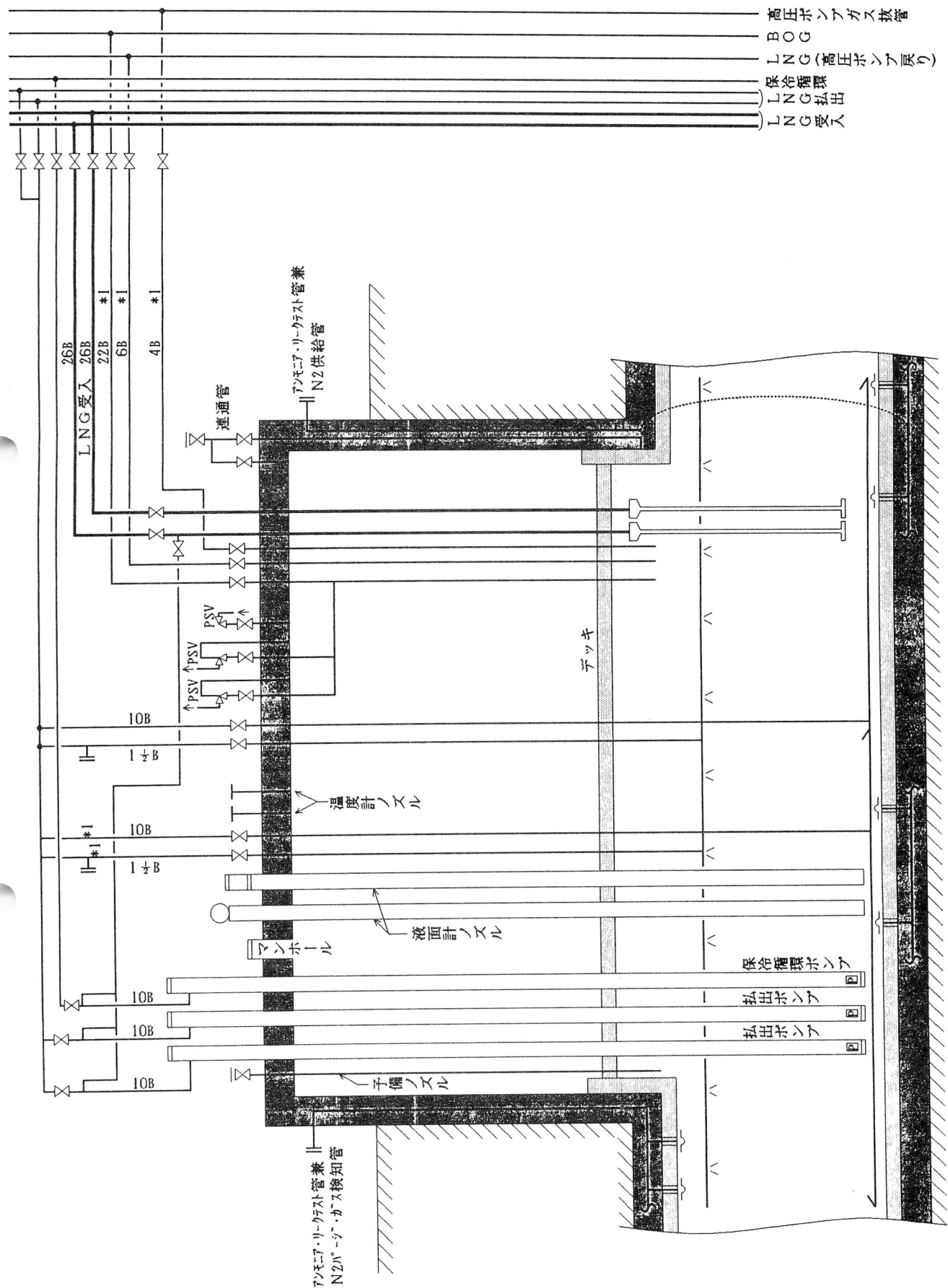


図 8.4 タンク廻り配管概念図 (立坑 1 本のケース)

($\times$: バルブを示す。但しバルブ種類は未定)

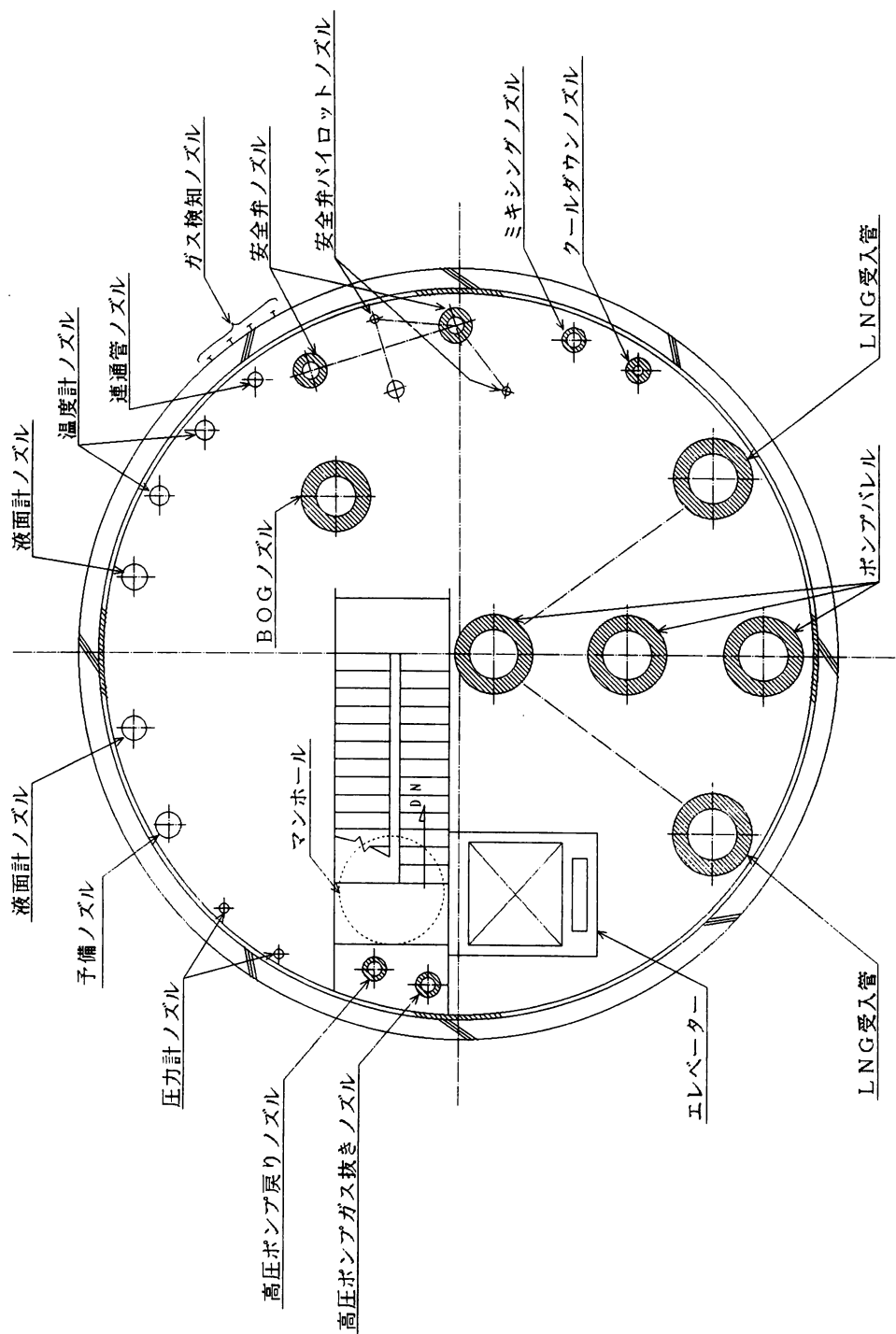
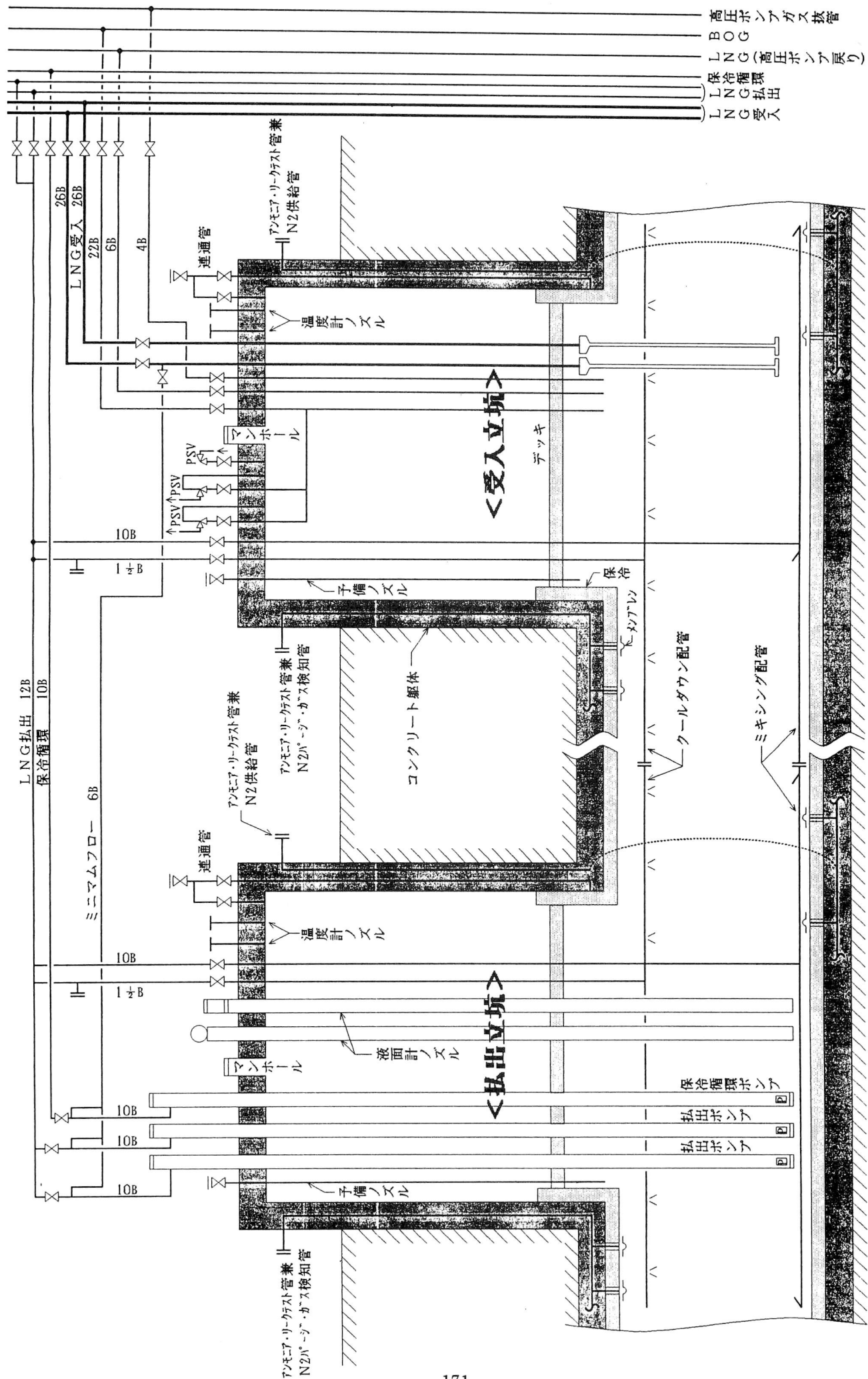
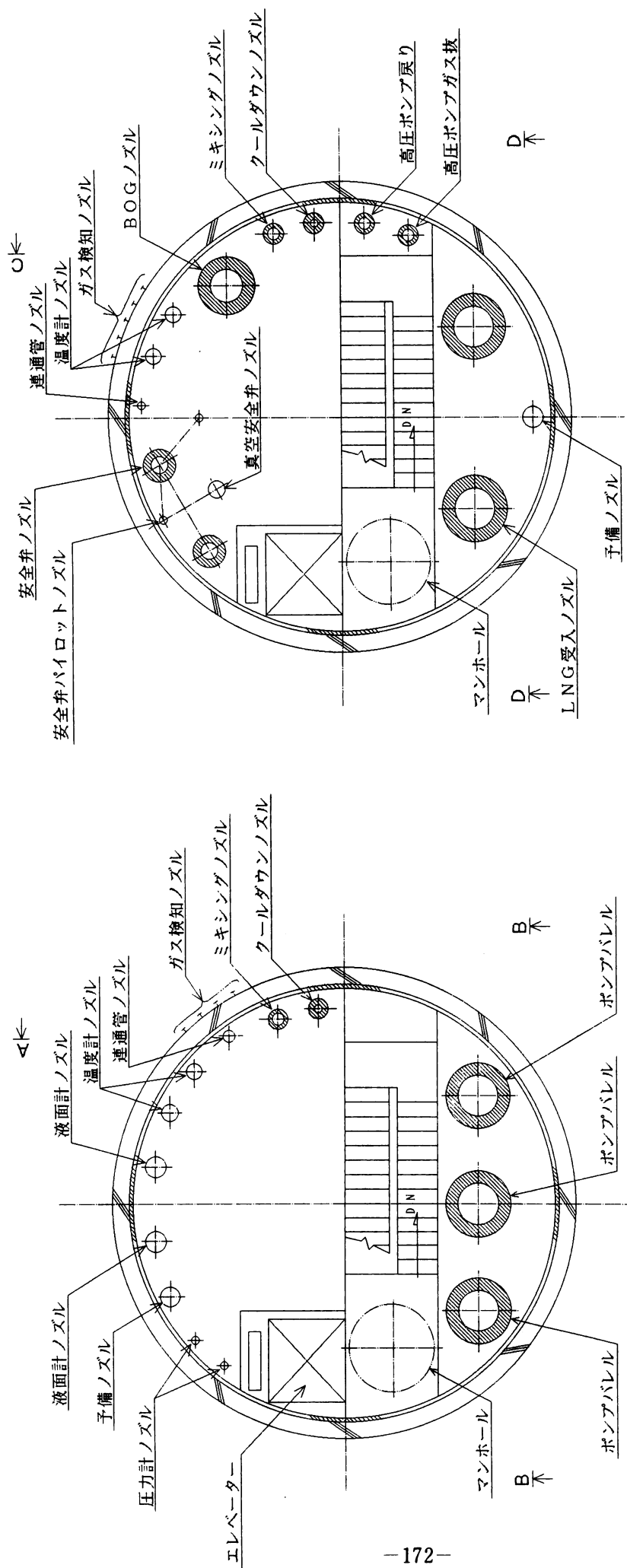


図 8.5 タンク廻り配管概略配置図
(立坑径を 8 m φとした立坑 1 本のケース)



(X) : バルブを示す。但しバルブ種類は未定)

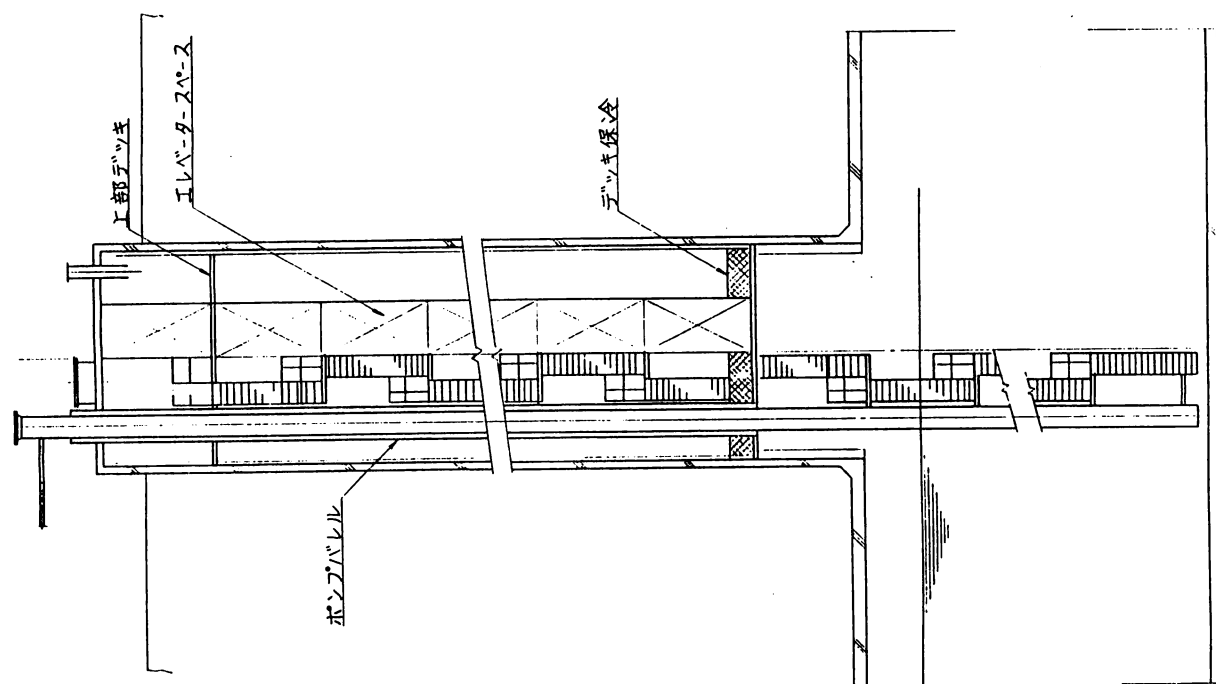
図 8.6 タンク廻り配管概念図 (立坑 2 本のケース)



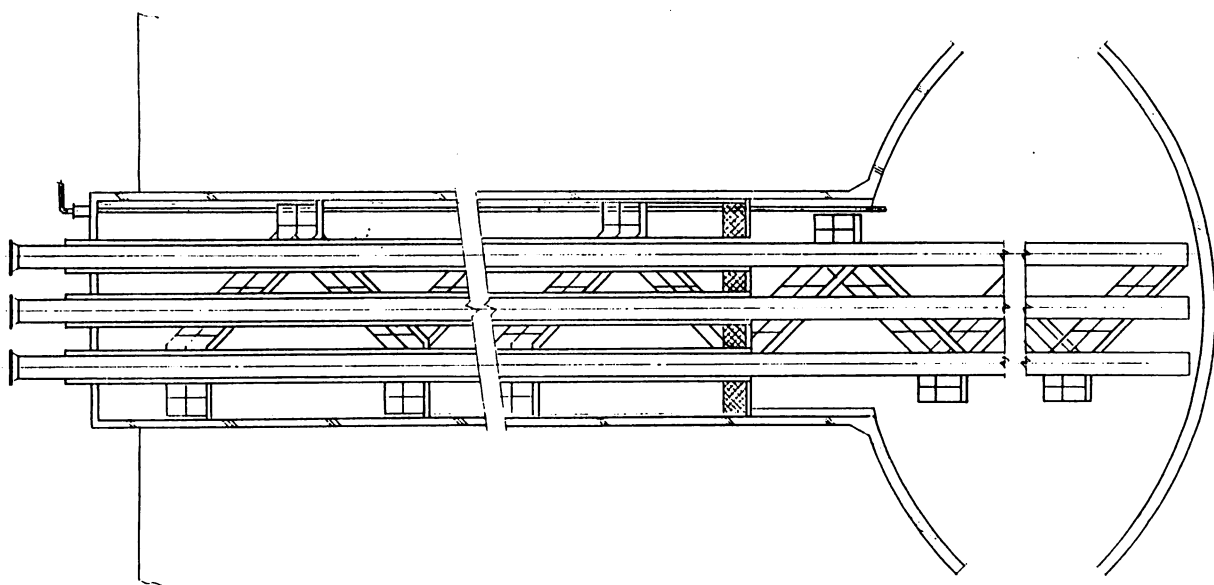
払出立坑

受入立坑

図 8.7 タンク廻り配管概略配置図
(立坑径を 6 m φ とした立坑 2 本のケース)

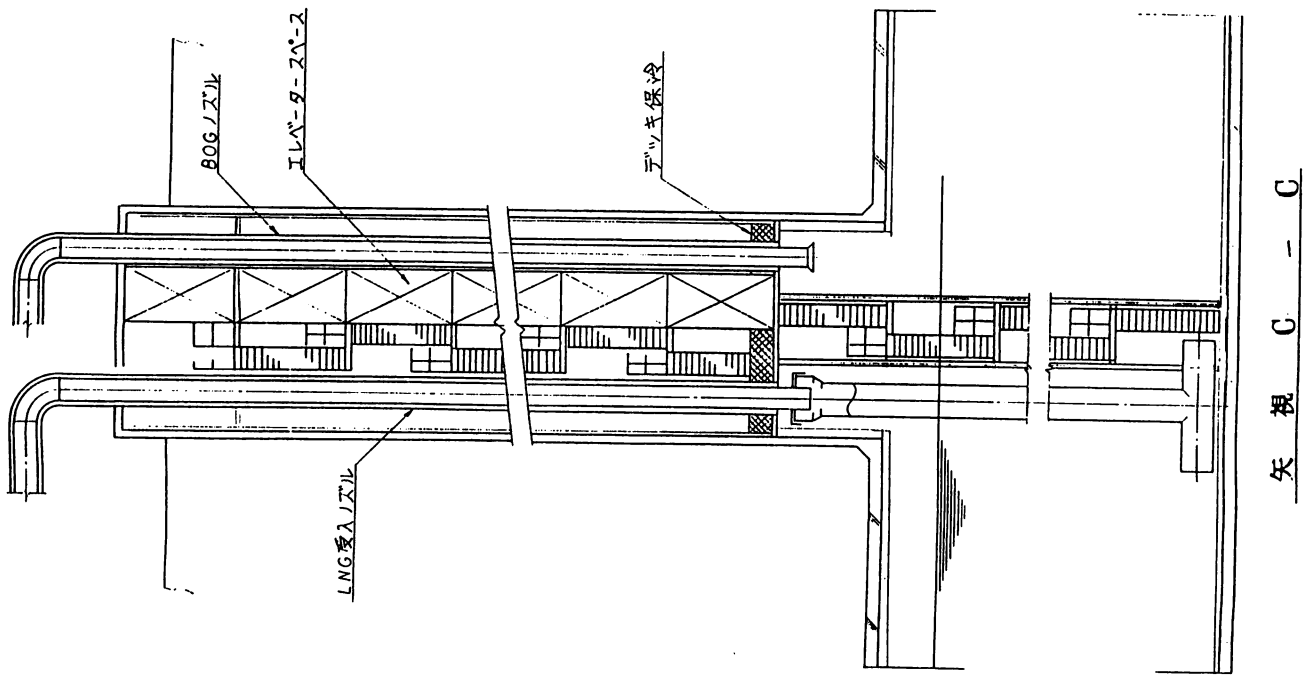


矢視 A - A

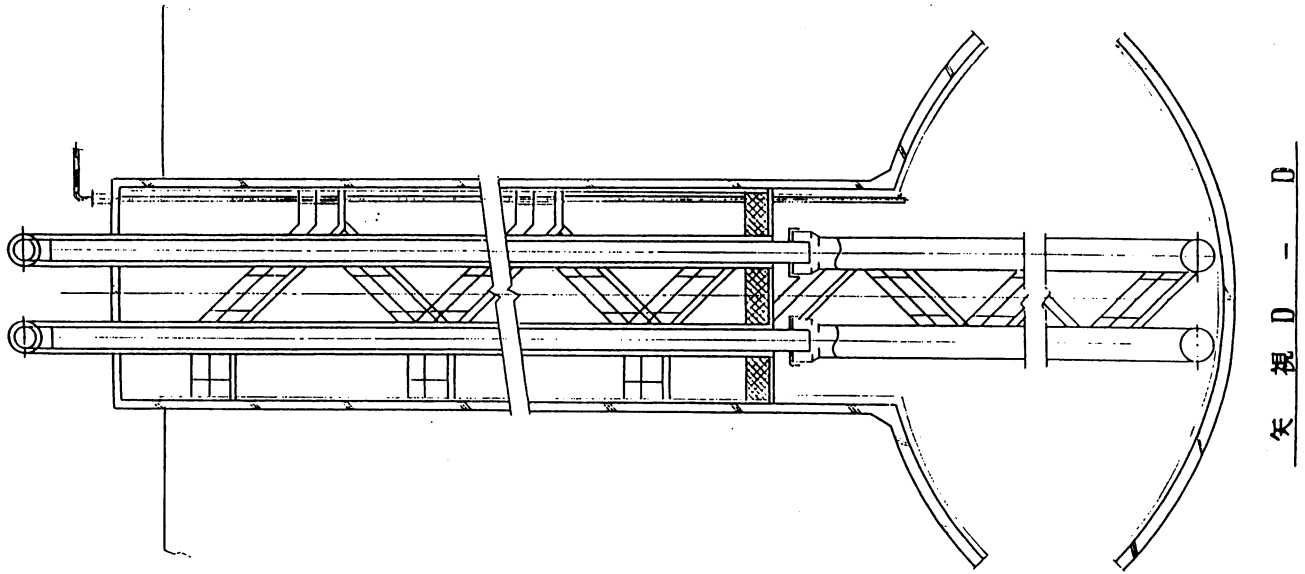


矢視 B - B

図 8.8 払出立坑断面図



矢 視 C - C



矢 視 D - D

図 8.9 受入立坑断面図

④ 結 論

検討結果として立坑の本数に関しては、工事中進入口の数が多いこと、また運転性、メンテナンス性を考えると立坑2本案が有利である。

4) 配管の取り付け方法の分類（立坑部）

① 立坑の分類

立坑と配管の関係については立坑の屋根の位置により次の分類になる。

a. ケース1：地上屋根、上部デッキ保冷、立坑内メンブレン・保冷材方式

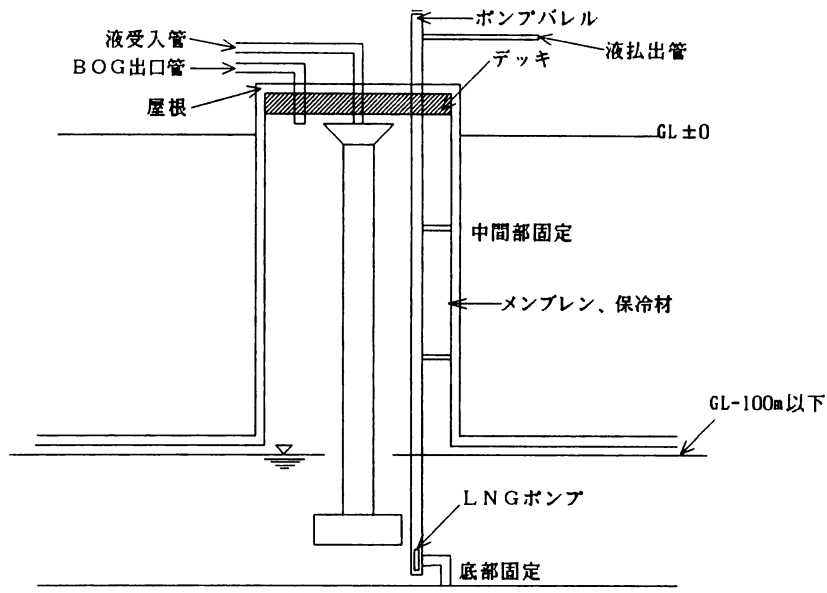


図 8.10 地上屋根、上部デッキ保冷、立坑内メンブレン、保冷材方式

b. ケース2：地上屋根、下部デッキ保冷、立坑内ライナープレート・内部保冷方式

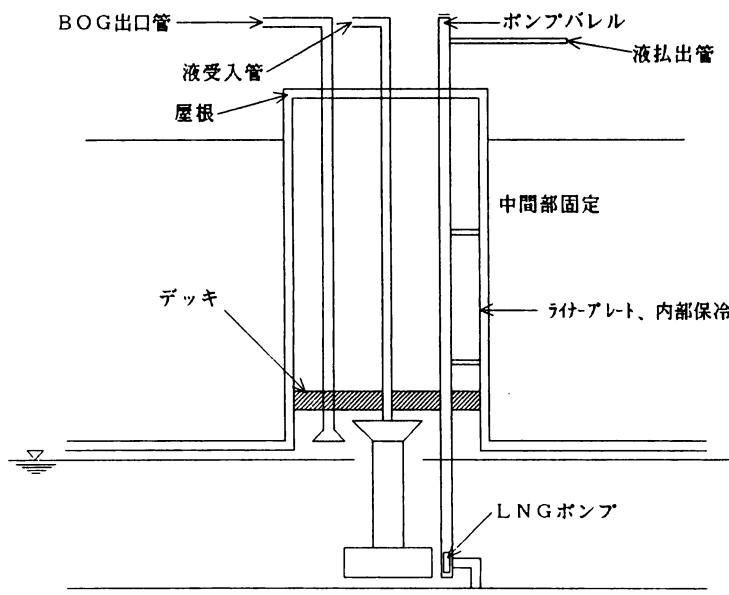


図 8.11 地上屋根、下部デッキ保冷、立坑内ライナープレート、内部保冷方式

c. ケース3：地中屋根、メンブレン・保冷材方式

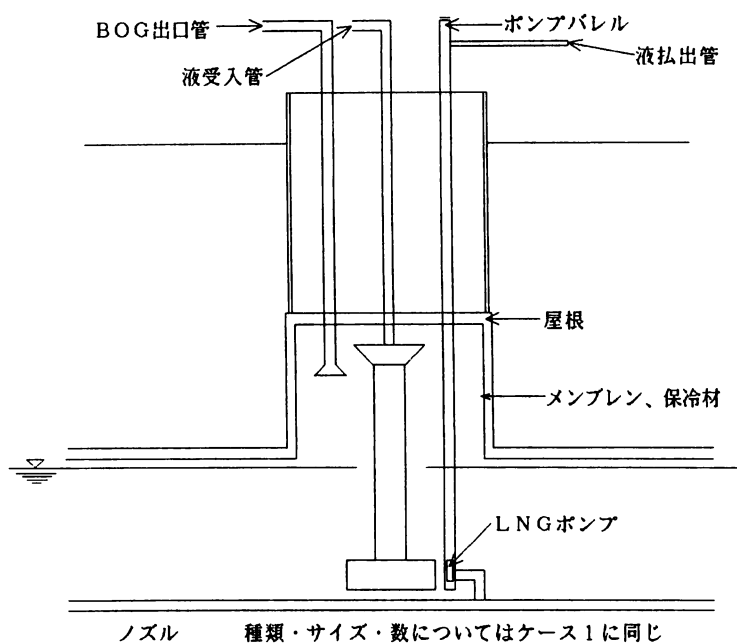


図 8.12 地中屋根、メンブレン、保冷材方式

② 比較検討

各ケースについて比較表を表 8.2に示す。

③ 結 論

ケース1とケース2を比較すると、ケース2の方がメンブレンおよび保冷材の施工範囲が少なく、コスト的に有利である。また、立坑の温度変化についてもケース2の方が少なく有利である。

以上のことよりケース2とケース3を比較すると、全て地上部でメンテナンスが行えるケース2が有利である。

以上より、各ケースを比較するとケース2が有利である。

表 8.2 各ケースの比較表

項 目	ケ ー ス 1	ケ ー ス 2	ケ ー ス 3
概 要 図			
配管固定	地上屋根部	地上屋根部	地中屋根部
屋根貫通部	二重管方式	二重管方式	二重管方式
立坑内温度変化 LNG受入時 圧縮機の運転	常温からLNG温度まで変化する 運転による内圧変化の影響、BOG温度の変化の影響を受ける	LNG受入による内圧変化の影響範囲は狭い 運転による内圧変化の影響を受ける	運転による影響は少ない。
立坑内の構造 シール及び保冷	デッキ下は、メンブレン及び保冷材を取り付ける デッキ上は、タンク部の保冷材厚さは、タンク部の1/3程度とする	デッキ下は、メンブレン及び保冷材を取り付ける デッキ上は、ライナープレート及び内部保冷を取り付ける デッキ上の保冷材厚さはタンク部の1/3程度とする	屋根上部については不要。 屋根下部は、タンク部と同じメンブレン及び保冷材を取り付ける。
配管の熱収縮対策	配管は上部より吊り下げたため立坑内での対策は不要	ケース1に同じ	立坑内屋根と地上部サポートの熱収縮対策が必要。
配管保冷	不要	地上部配管と同じ厚さ 耐候性は不要	地上部配管と同程度の厚さとする 耐候性を要す
安全弁放散	大気放散	大気放散	立坑内とすると低温ガスが滞留する
メンテナンス性	全て地上部	全て地上部	立坑内でのメンテナンスが多い

8.2 施設計画

(1) 岩盤貯蔵タンク

1) 立 坑

立坑は受入・払出設備計画および岩盤条件などを考慮して下記のように設定する。

- ① 設備計画より立坑内径は6 m ϕ とする。
- ② 岩盤は硬岩であり、支保は吹付けコンクリートとロックボルトおよび2次覆工コンクリートとする。
- ③ 立坑坑口部は表土、岩盤の風化を考えて5 mと設定する。
- ④ 立坑底部は、貯槽空洞との交差部となる。立坑径が6 m ϕ と比較的小口径であること、および岩盤が硬岩であることより補強区間を6 m ϕ と設定する。

中央立坑標準断面図

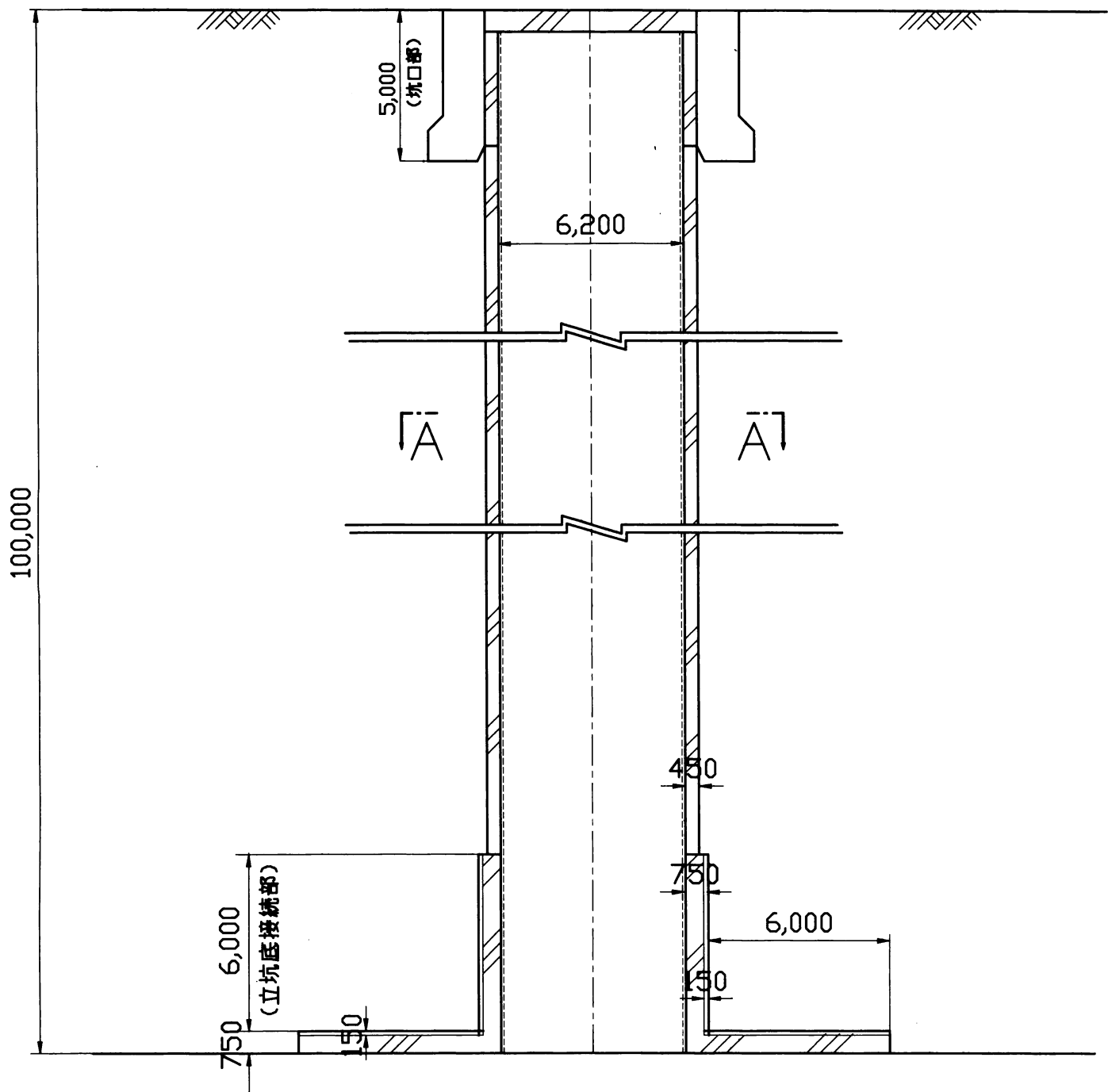
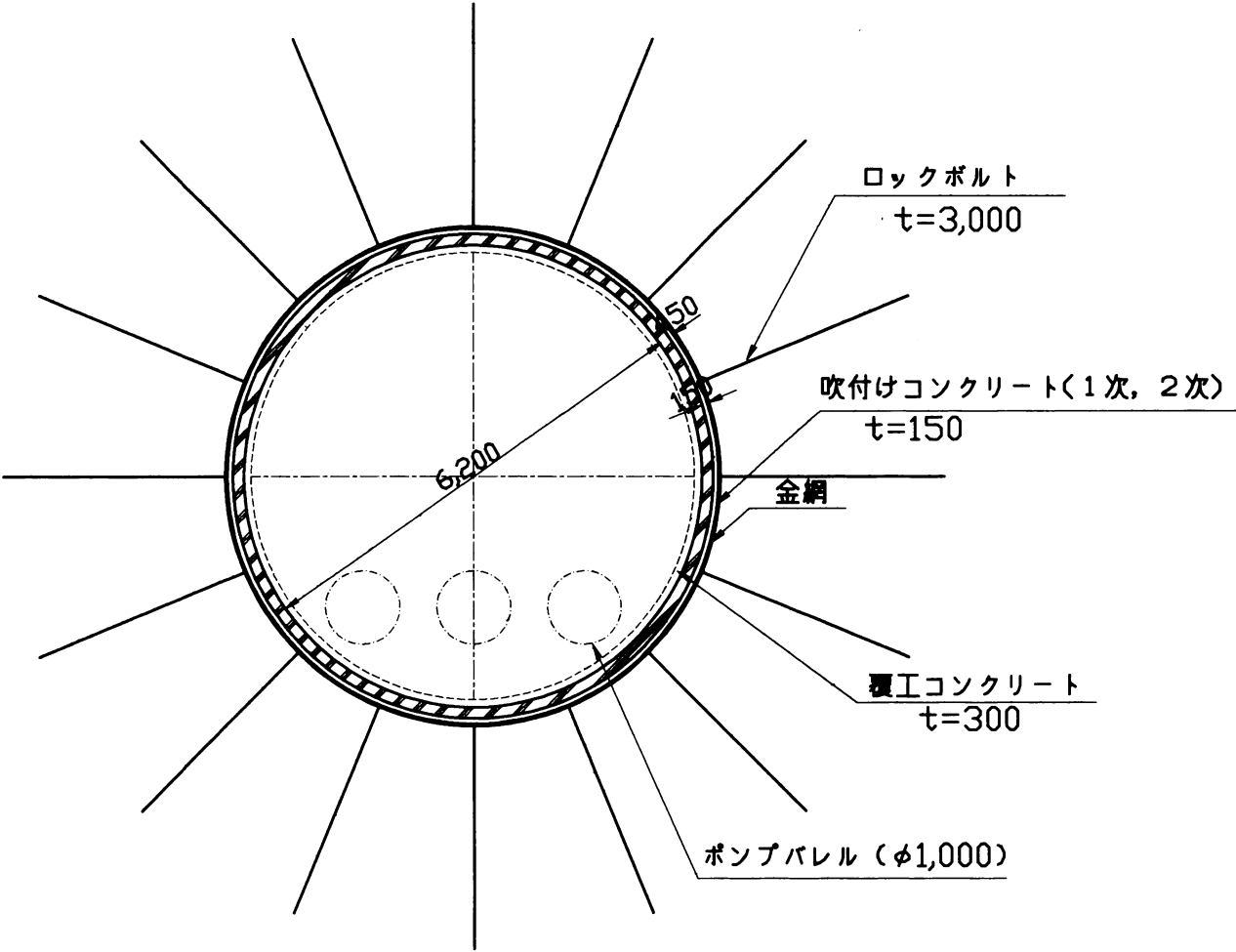


図 8.13 立坑断

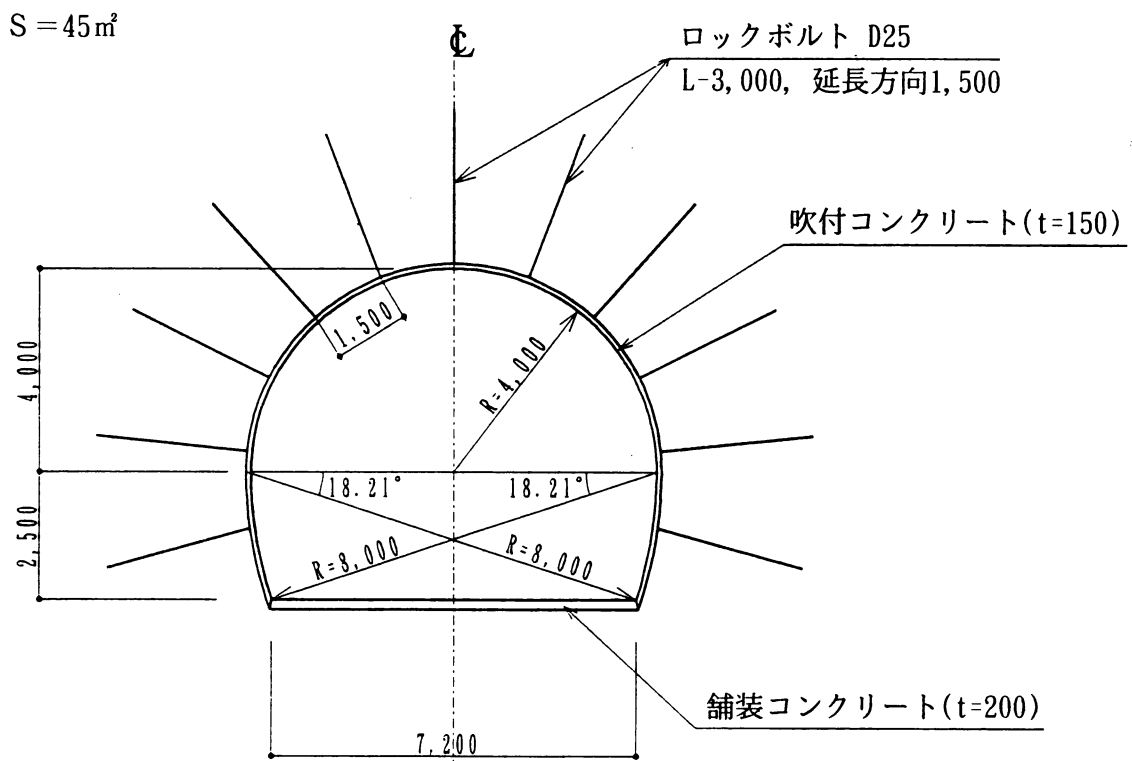
A - A断面



2) 作業トンネル

作業トンネルは積載重量20～25 tの大型ダンプが対面で通行できる断面とし、
図 8.14に示すように設定する。

岩盤は硬岩であり、この場合、岩石自体の強度は十分な場合が多く、その掘削における地山の安定性は、通常、岩盤の亀裂などの力学的不連続面の影響に支配される。このような地山状態では、ロックボルトによる補強を行い、トンネルの安定性を確保する必要がある。ロックボルトの補強効果により、空洞表面のキーブロックを保持し、岩塊の移動を抑制してグランドアーチの形成を促進させ、見かけ上の地山強度を増加させることができる。



作業トンネル断面 $S = 1/150$

図 8.14 作業トンネル断面図

3) 貯蔵タンク

貯蔵タンクはメンブレン内径を20m ϕ 、コンクリート内径を20.404m ϕ と設定し、その空洞断面を図 8.15に示す。貯蔵タンク構造は、覆工コンクリート、止水シート、鋼繊維吹付コンクリートから構成され、覆工コンクリートには温度応力によるひび割れ分散を図るため、鉄筋を配置する。

また、貯蔵タンクにおいても、作業トンネルと同様にロックボルトによる補強を行い、空洞の安定性を確保することとする。

4) 埋め戻し部

貯蔵に接続している作業トンネルの境界部は、貯蔵タンク施工終了後、無筋コンクリートで埋め戻しを行う。埋め戻し厚さは、トンネルの幅員と同等の 8 m とする。また、人の出入りを行うためのマンホールは設けない。ただし、貯蔵タンクの排水を行うための排水路は、作業トンネルの埋め戻し部下部に設置しておき、埋め戻し後も排水機能を維持するものとする。

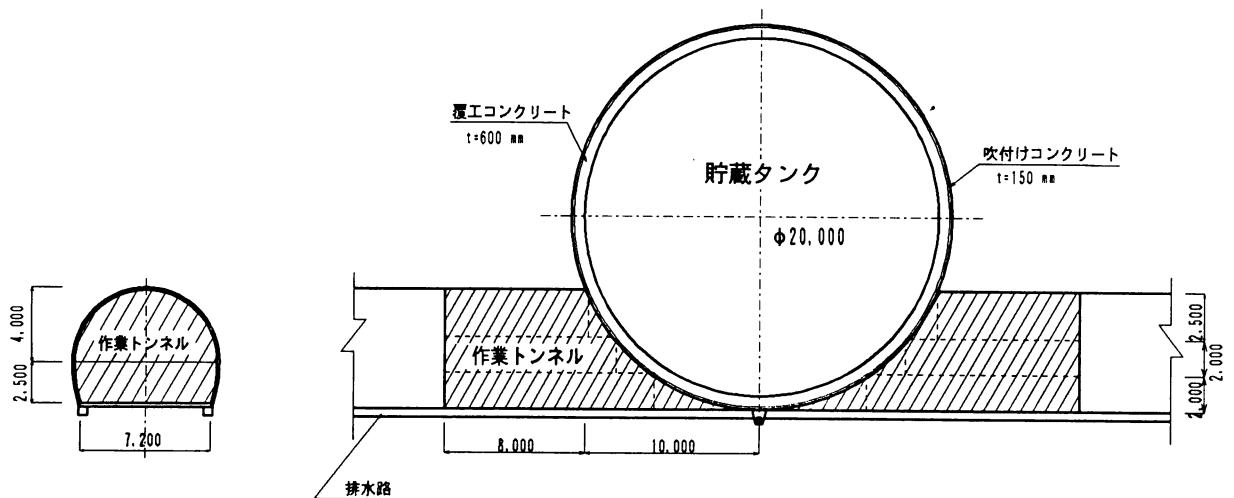
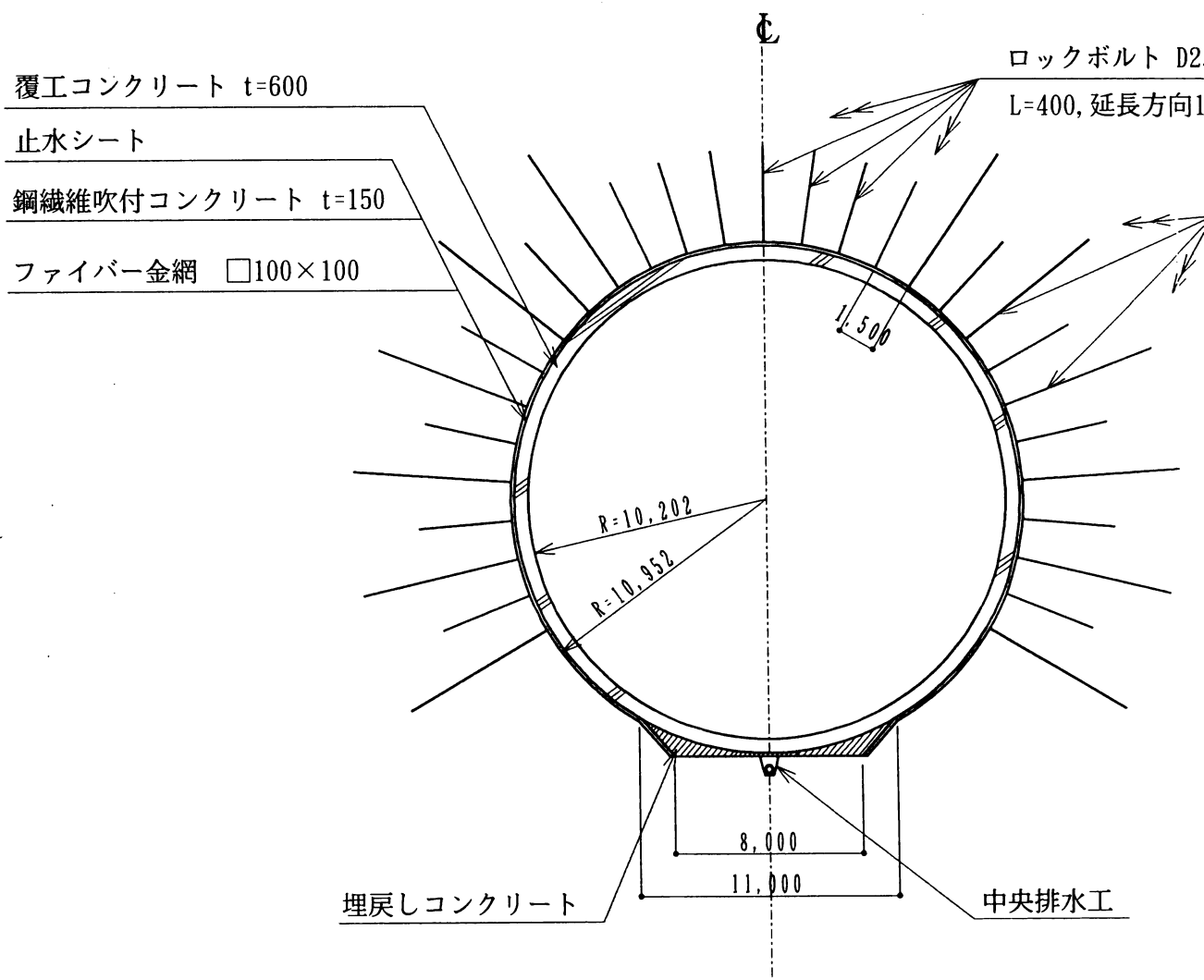


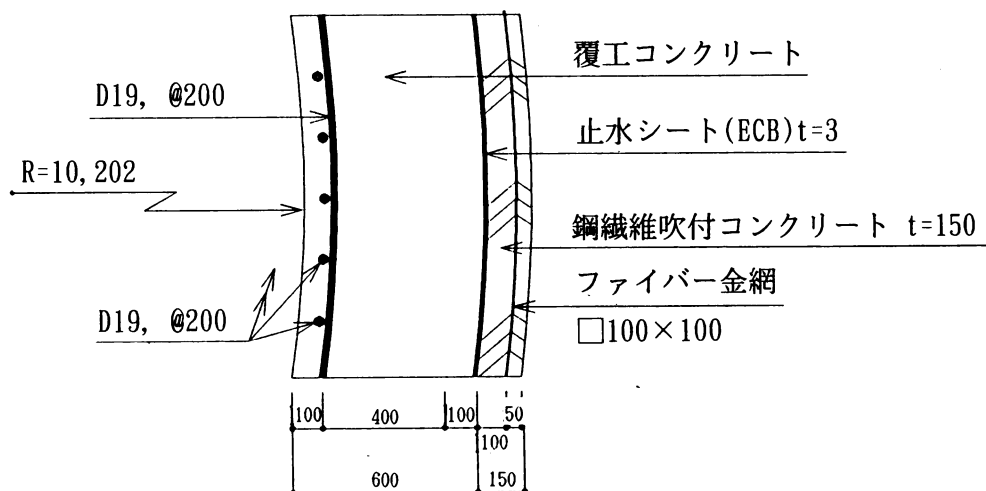
図 8.16 作業トンネル埋戻し部（ハッチ部）



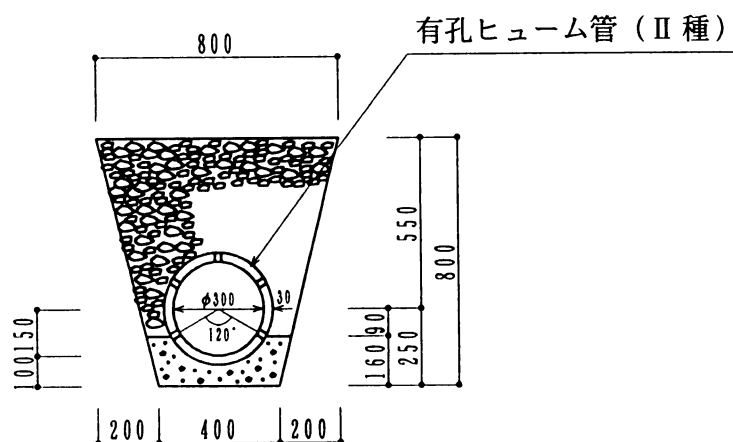
貯蔵タンク断面 $S = 1 / 300$

500

ロックボルト D25
L=7,000, 延長方向1,500



貯蔵タンク断面詳細 S = 1 / 25



中央排水工詳細 S = 1 / 25

貯蔵タンク断面図

5) 保冷材およびメンブレン

メンブレン型式には、平行収縮式と旋回収縮式の2形式がある。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。このように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も異なっているが、今回は平行収縮式メンブレンとした。

① 全 体

- ・貯蔵タンクは地盤面下100mのところに傾斜をつけずに水平に設置するものとしている。また有効貯液率は95%とし、最高液位は18.07mとしている。
- ・内巻コンクリートの内面は32角形の多角形としている。
- ・保冷材に対する水の影響を避けるため、岩盤と内巻コンクリートの間にはシール材として水膨張性ゴムを挿入している。

② 保 冷 材

- ・保冷材には硬質ポリウレタンフォームを採用している。また液圧のかかりかたによって密度を $40\text{kg}/\text{m}^3 \sim 70\text{kg}/\text{m}^3$ と使い分けている。
- ・保冷材の内側の面にはメンブレンの溶接熱から保冷材を保護するため、耐火板を設けている。
- ・保冷材のパネルの大きさは1パネル $990\text{mm} \times 1,959.8\text{mm} \times 200\text{mm}$ であり、1パネルにつき2ヶ所を保冷アンカーによって岩盤に固定している。
- ・保冷パネルどうしの目地部には、グラスウールを充填することで熱のコールドパスを防いでいる。

③ メンブレン

- ・メンブレンには厚さ2mmのSUS304を使用している。また、コルゲーションはあらかじめ工場にて成型されているものとする。
- ・コルゲーションのピッチは貯槽（円筒）の軸方向2mピッチとしている。
- ・メンブレン要素としては幅 $688.7\text{mm} \times$ 長さ $6,000\text{mm}$ 、および幅 $1,357.8\text{mm} \times$ 長さ $6,000\text{mm}$ のものを使用している。
- ・メンブレンは熱収縮中心を点アンカーと称するメンブレンアンカーによって岩盤に固定するものとしている。
- ・メンブレンの継ぎ手には重ね継ぎ手を採用し、溶接は片側全厚すみ肉重ね溶接としている。

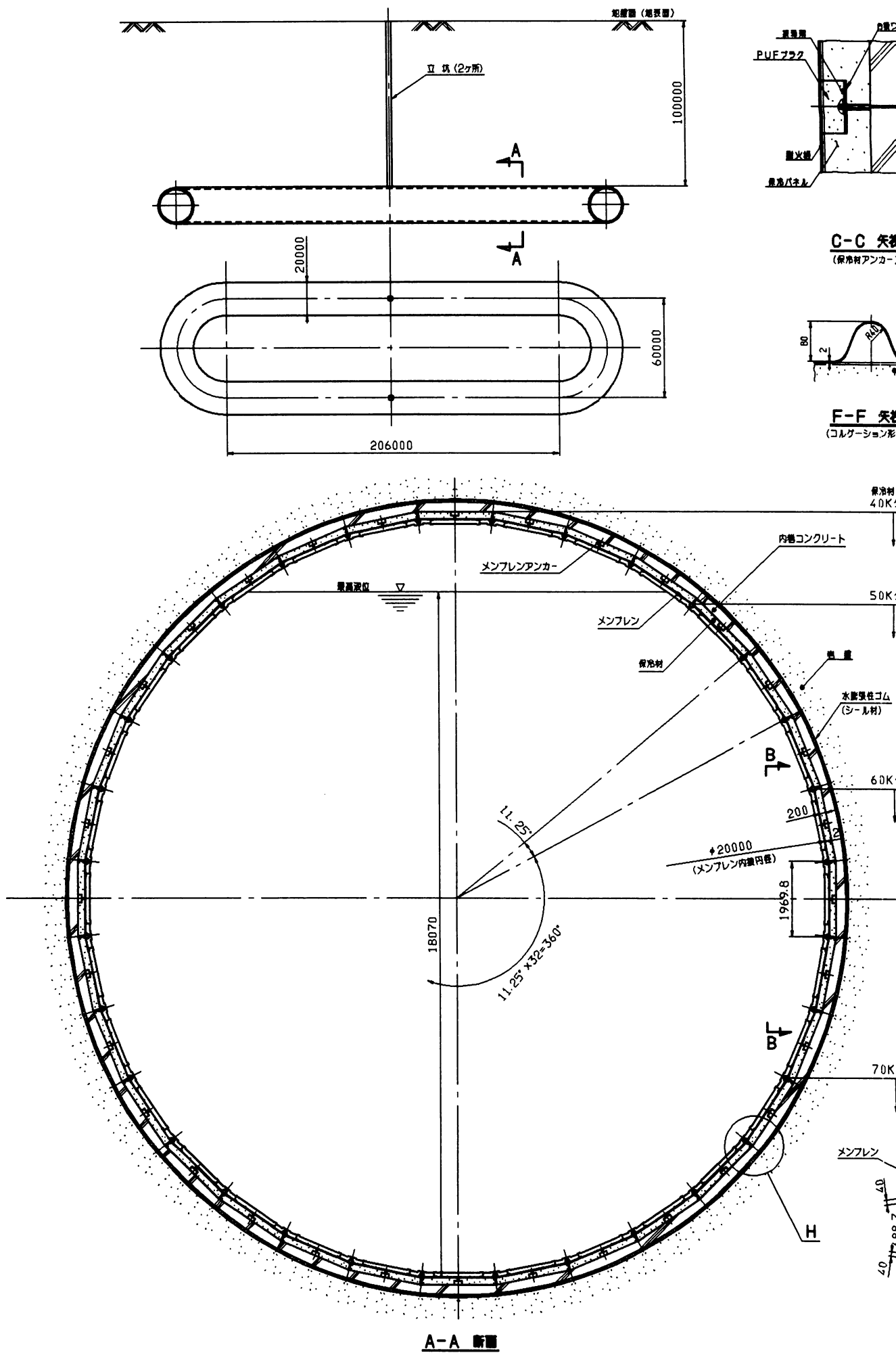
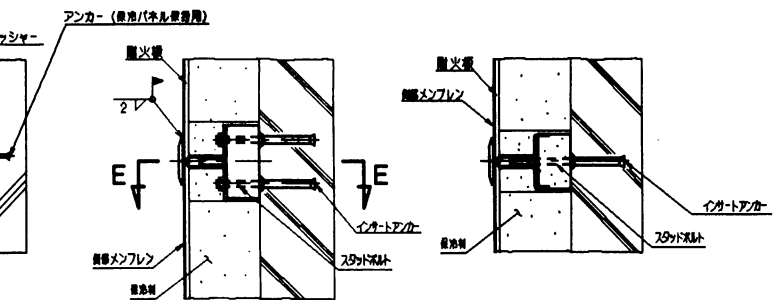
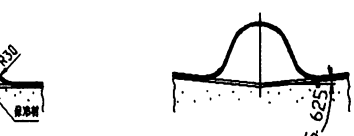


図 8.17 保

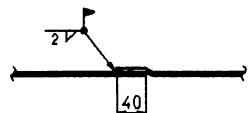


D-D 矢視
(メンブレンアンカー)

E-E 矢視
(メンブレンアンカー)



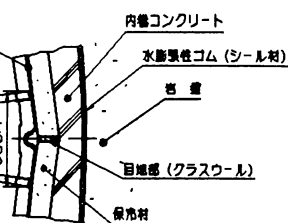
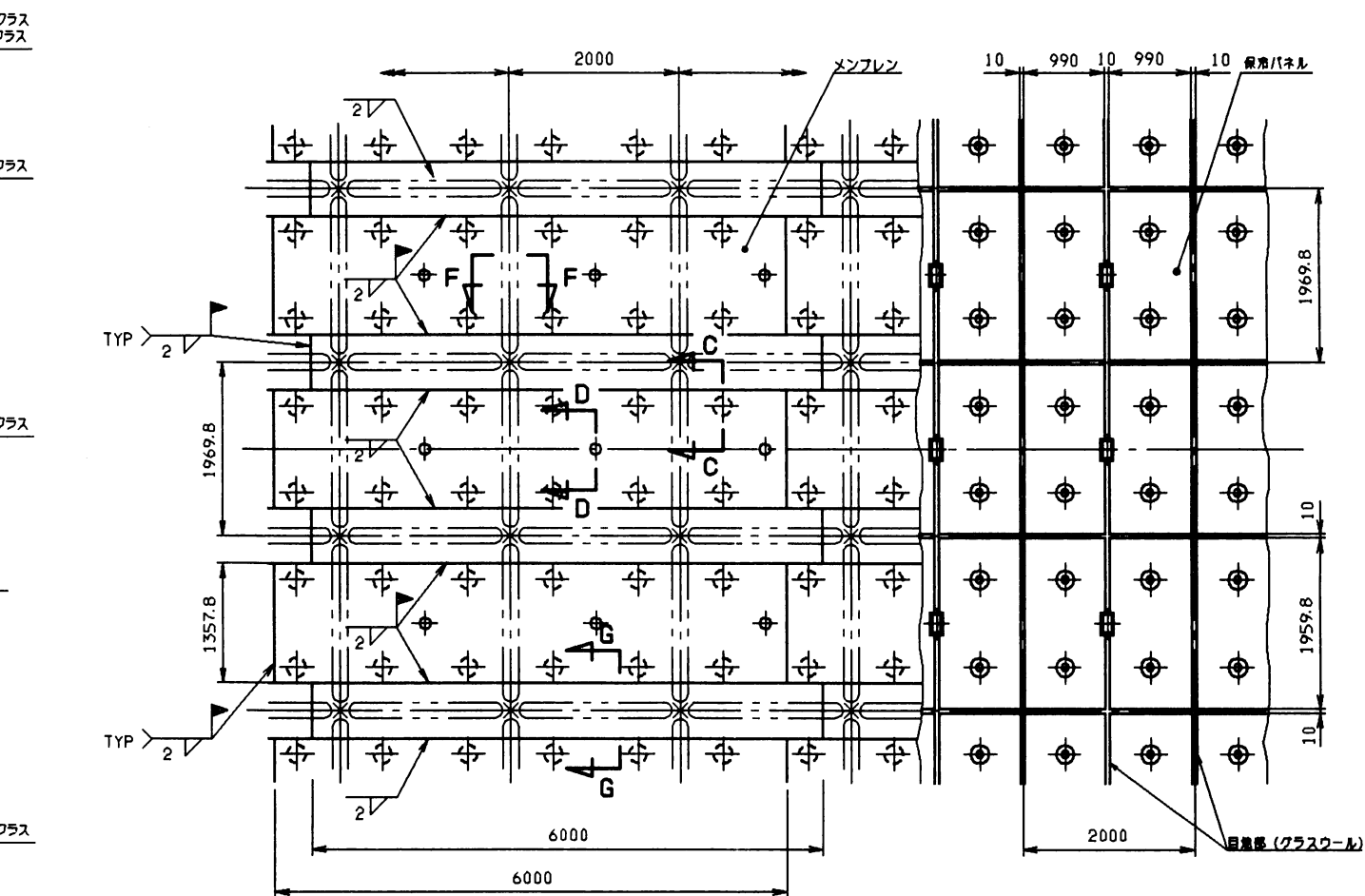
G-G 矢視
(コルゲーション形状)



メンブレン継手形状

主仕様

貯蔵容量	180.000KL
内容物	LNG
基数	2基
貯槽内径	φ20.000mm
貯液率	95%
常用圧力	0.35kgf/cm ² G
設計圧力	0.56kgf/cm ² G
設計温度	-162℃
設置深度	地盤面下100m
主要材料	メンブレン: SUS304 保冷材: 硬質ポリウレタンフォーム



B-B 矢視
(展開図)

H 詳細

(2) 受入・払出設備

1) 受入設備

LNG岩盤貯蔵タンクの計画に必要な設計条件のうち、受入設備に関する基本計画条件を抽出し、その考え方を整理する。

① 受入方法

荷役設備として、タンカーと地上設備との接続装置（アンローディング・アーム）を介して、船側のLNGポンプ（カーゴポンプ）により荷揚げする。

その際、陸側からは船側タンクの圧力バランス（液位低下による減圧防止）を図るため、BOGガスをローディング・アームを經由して返送する。

LNG岩盤貯蔵タンクの場合、陸側タンク内圧が3,500mmAqであり、自圧でBOGを戻すことができ、通常の受入基地で必要となるリターンガス・プロアは不要である。

② 受入流量

船側のカーゴポンプの総揚荷容量は、最大11,000 m^3/H であり、125,000 m^3 クラスの船で、前後の処理時間を除くと、約12時間で荷揚げを完了する。

受入れ貯蔵タンクの基数を2基同時受入とすると、タンク側の受入流量は、5,500 m^3/H となる。現在は、この流量条件が一般的である。

③ 液受入配管の形式

受入母管から分岐して貯蔵タンク頂部からタンク内に挿入した受入配管は、ガス層で一旦開口する。その後、液は受入ロート管内を流下して、タンク底部近傍で貯蔵タンク内に流出する。この形式は、既設の地中タンクで広く採用されているもので、ガス層での開口は、受入液中の気泡放出および他の戻り液集合管を狙いとしている。

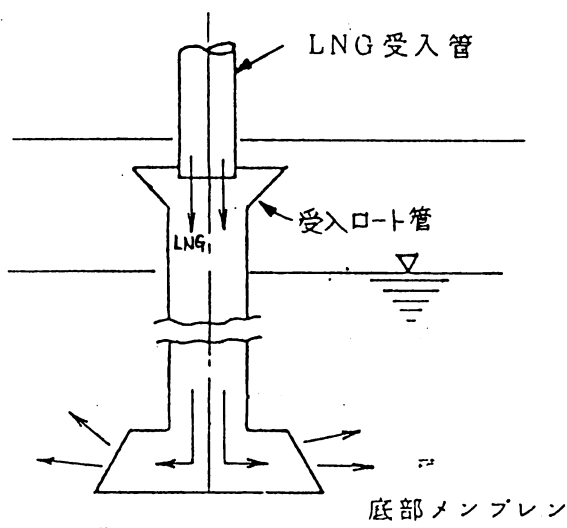


図 8.18 液受入配管方式

2) 払出設備

LNG岩盤貯蔵タンクの計画に必要な設計条件のうち、払出設備に関する基本計画条件を抽出し、その考え方を整理する。

① 発電燃料用払出

貯蔵タンクからの液払出には、発電燃料用・都市ガス燃料用・タンク間移送用・基地配管保冷循環用などがある。

本検討では、200万kWコンバインドサイクル発電用高圧天然ガス設備として

払出条件を設定する。発電用の場合、LNG船の受入頻度と同じとすると、2週間に1回程度(125,000kl)が一般的である。

② 払出方法

払出設備として、LNGポンプによる送出および自圧による送出が考えられるが、LNG岩盤貯蔵タンクでは前者とする。

液化ガスのポンプには、モータを内部に装備したタイプ(サブマージド・モータ型)として、貯蔵タンク内設置型ポンプおよび貯蔵タンク外設置型ポンプがある。

貯蔵タンクから払出されたLNGは、その後地上設備にて高圧LNG気化器へ送られるため、ポット型高圧ポンプ(貯蔵タンク外設置型ポンプ)にて更に昇圧される。前者をプライマリーポンプ、後者をセカンダリーポンプと呼ぶ。ここでは、プライマリーポンプについて検討を加える。一方、基地内の配管保冷維持に使用するための保冷循環ポンプも同様とする。また、液化ガスのポンプは、その運転上、取扱い流体が気化しやすいので、ミニマムフロー運転を可能とする設備を設ける。

③ 払出設備

タンクとしての払出流量は、燃料使用量によるが、200万kW発電所の最近の例では、 $660\text{ m}^3/\text{H}$ /タンク程度であり、ポンプ台数を2台とすると、1台あたり $330\text{ m}^3/\text{H}$ (160ton/H)程度となる。

④ LNGポンプ

LNGポンプは、地中タンクにて実績のある貯蔵タンク内設置型サブマージドポンプが適している。岩盤貯蔵タンクの設置深度は、空洞土被り100mであり、地上設備のセカンダリーポンプ能力等を現状と同等とすると、

容量×揚程= $330\text{ m}^3/\text{H} \times 250\text{ m LNG}$ を2台とする。

⑤ 払出配管

貯蔵タンク内設置型サブマージドポンプは、ポンプを装着するケーシング配管(以降ポンプバレルと称す)を必要とする。

ポンプバレル構造は、ポンプ外径より僅かに大きな内径(24B:600A程度)を有する直管で、最下部にフート弁(ポンプ自重で開閉する動力式弁)を内蔵しており、上部構造物から吊下げ支持されている。ポンプバレルは、100mを超える長尺配管となり、熱収縮で300mmを考慮すると同時に、耐震設計上、途中に振れ止めを有する構造とする。また、LNGポンプには、性能上最低必要液位(NPSHR)があり、通常2m程度残す必要がある。岩盤貯蔵タンクの場合、タンク内圧が運転時3,500mmAq(MAX 5,600mmAq)であり、必要背圧が確保されているので、液圧として残す必要は少ない。しかし、内圧の変動、液面の形状などを考慮すると、最低液レベルは約2mと考える。この時の岩盤貯蔵タンクにおける貯残量(デッドストック量)は、液位との関係から表8.3の通りとなる。

表 8.3 貯槽液位と貯残量との関係

貯槽液位	2 m	3 m	4 m	5 m
貯残量	5.2%	9.4%	14.2%	19.6%

この最低液レベルによる貯残量を更に削減する場合には、ポンプピット方式や傾斜タンク方式などの構造が考えられるが、岩盤貯蔵タンク自体に傾斜などをつけなくとも、既設のLNG地中タンクと同等の貯残量が得られることから、ここでは、この種の検討を除外する。

⑥ 付帯設備

LNGポンプは、運転時間に応じて定期点検を実施し、消耗部品を交換することが通例である。従って、ポンプをポンプバレルから引抜く装置が必要となる。

ポンプ吊揚げ装置は、現在ワイヤーによる巻き上げ方式が主流であり、ドラムに巻き取る形式を採用している。LNG岩盤貯蔵タンクの場合、100m以上のワイヤ長となることから、大口径が予想されるため、パイプロッド方式も考えられる。

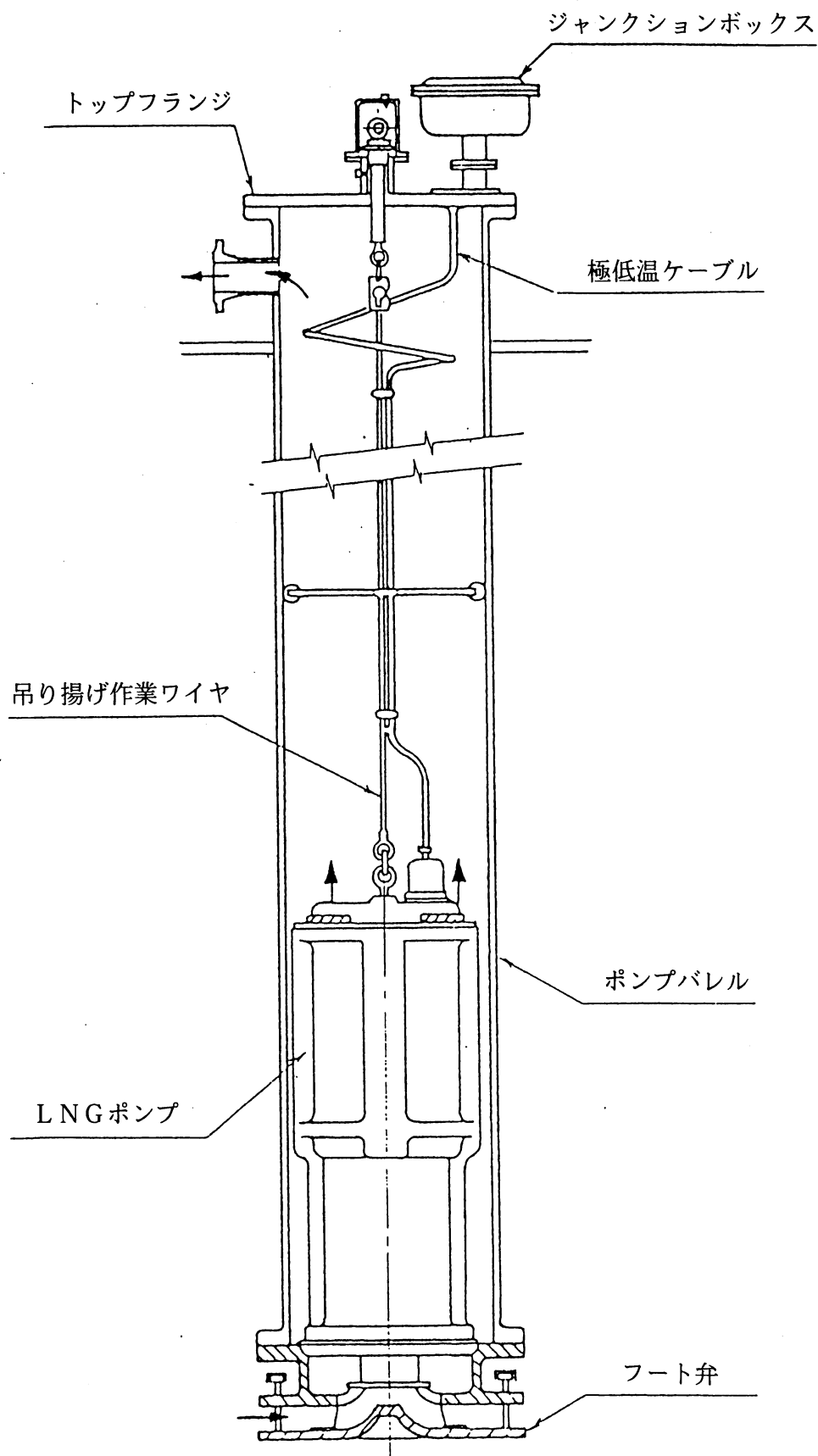


図 8.19 LNGポンプ据付状態図

(3) クールダウンおよびパージ方法

1) 基本的な考え方

1 基目の貯蔵タンクをクールダウンするための LNG は、LNG 船から供給することになるが、滞船時間を短縮するため事前に $L N_2$ によるプレクールを行い、LNG によるクールダウン時間を短縮するものとする。

また、2 基目以降の貯蔵タンクについては、既設貯蔵タンクの LNG が使用可能となるため、 $L N_2$ によるプレクールは行わないものとする。

尚、エアパージおよび N_2 パージは、密度差を利用するピストンフロー方式と、加圧・放出を繰り返すプレッシャースウィング方式があるが、本貯蔵タンクのパージにおいては、消費ガス量の少ないピストンフロー方式を採用するものとする。

クールダウンおよびパージに使用するノズルの配置を図 8.20 に示す。

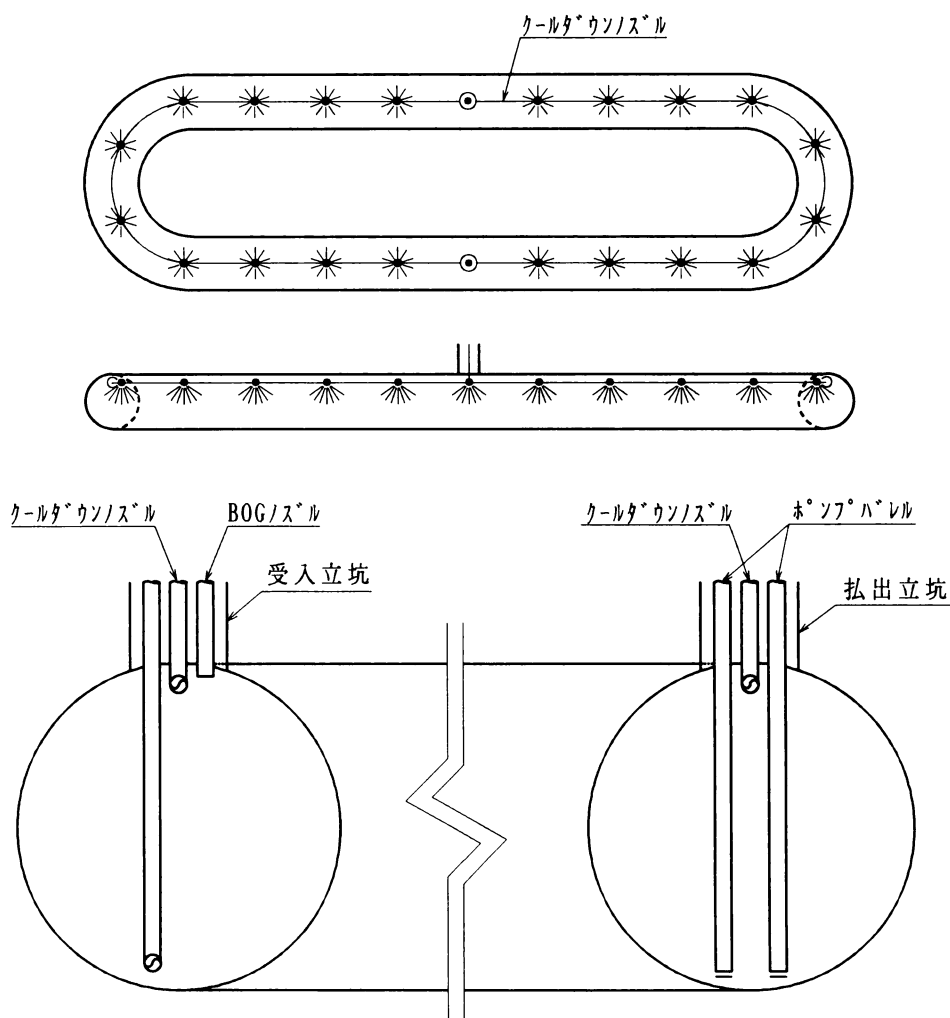


図 8.20 クールダウン・パージに使用するノズル配置図

2) 1基目貯蔵タンクのクールダウンおよびパージ

1基目貯蔵タンクは、以下の手順にてクールダウンを行うものとする。

① GN₂によるエアパージおよびドライニング

GN₂供給口 : BOGノズル(貯蔵タンク上部)

ガス排出口 : ポンプバレル(貯蔵タンク下部)

排出ガス処理 : 大気放散

完了条件 : 排出ガス中の酸素濃度6.0vol%以下

② LN₂によるプレクール

LN₂供給口 : クールダウンノズル

ガス排出口 : BOGノズル

排出ガス処理 : 大気放散(または、回収後再液化)

完了条件 : 貯蔵タンク内メムブレ温度-100℃以下

③ LNGによるクールダウン

LNG供給口 : クールダウンノズル

ガス排出口 : BOGノズル

排出ガス処理 : メタン濃度80%未満……フレアースタック
メタン濃度80%以上……BOG処理系で回収

完了条件 : 排出ガス中メタン濃度80%以上かつ
底部メムブレ温度-150℃以下

3) 2基目以降貯蔵タンクのクールダウンおよびパージ

2基目以降の貯蔵タンクは、以下の手順にてクールダウンを行うものとする。

① GN₂によるエアパージおよびドライニング

方法は、1基目目と同様

② NGによるN₂パージ

NG供給口 : BOGノズル

ガス排出口 : ポンプバレル

排出ガス処理 : フレアースタック

完了条件 : 排出ガス中メタン濃度50%以上

③ LNGによるクールダウン

LNG供給口 : クールダウンノズル

ガス排出口 : BOGノズル

排出ガス処理 : メタン濃度80%未満……フレアースタック
メタン濃度80%以上……BOG処理系で回収

完了条件 : 排出ガス中メタン濃度80%以上かつ
底部メムブレ温度-150℃以下

(4) 主要機器リスト

8.1の基本設計条件を踏え、図 8.18に示すような受入立坑・払出立坑を利用するLNG岩盤貯蔵タンクの付属機器・配管について記載する。

1) 岩盤貯蔵タンク

円形トンネル形状、保冷材・メンブレン内装式

180,000m³/タンク×2基(20mφ×206mL)

2) LNGプライマリーポンプ

サブマージドモータ型タンク内設置式

350m³/H×250mLNG×2台/タンク

3) LNG保冷循環ポンプ

350m³/H×250mLNG×2台/タンク

4) 主要配管(貯槽1基当り)

・液受入れ管	26 ^B × 2 本
・ポンプバレル管	24 ^B × 3 本
・ポンプミニマムフロー管	各LNGポンプ1本
・ミキシング管	10 ^B × 2 本
・クールダウン管	11/2 ^B × 2 本
・BOG出口管	22 ^B × 1 本
・高圧ポンプ戻り管・ガス戻り管	6 ^B
・高圧ポンプガス抜管	4 ^B
・圧力安全弁管	2 本
・真空安全弁管	1 本
・液面計ノズル	2 本
・温度計ノズル	4 本
・圧力計ノズル	4 本
・予備ノズル	2 本
・タンク内部昇降設備	2 セット
・マンホール	2 ケ

5) その他

・ガス漏えい検知警報設備	一 式
・火災検知警報設備	一 式
・消火設備	一 式
・N ₂ 設備	一 式

8.3 施工計画

(1) 岩盤貯蔵タンク

1) 立 坑

立坑の施工は、貯蔵タンクの施工に先立ち施工するため、現在一般的に行われているNATMで行う。なお、坑口付近に強風化帯あるいは沖積層・洪積層が存在する場合には、この部分に山留開削工法を採用する。

掘削は、地山がC_H 級の花崗岩であるため、発破工法によるショートステップ方式を採用する。この方式は、支保工の1打設長を短くとして、削孔・発破・ずり出し等の一連の掘削作業と、吹付コンクリート・ロックボルト打設等の支保工を交互に行っていくものである。発破掘削後、一次吹付コンクリートを行い、ロックボルト・金網を施工する。その後、二次吹付コンクリートを行う。立坑掘削終了後、二次覆工コンクリートを底部より施工する。

立坑施工手順を図 8.22に、施工概要図を図 8.23に示す。

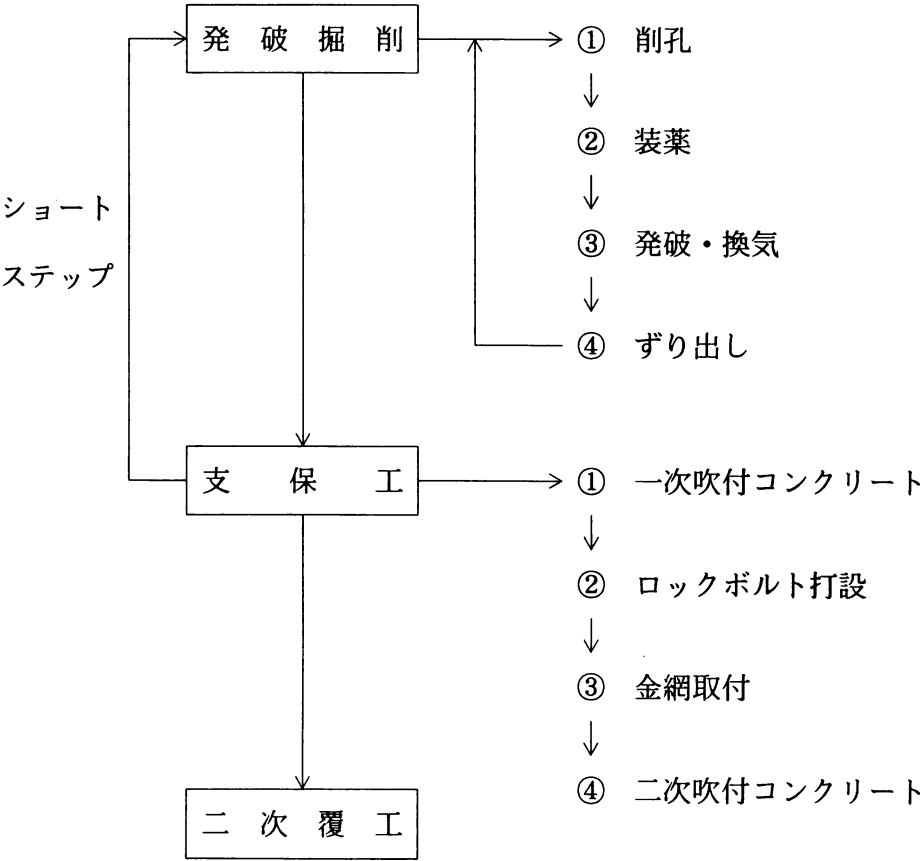


図 8.22 立坑の施工手順

- ① 削孔・発破 ② ずり出し ③ 一次吹付コンクリート ④ ロックボルト・金網 ⑤ 二次吹付コンクリート

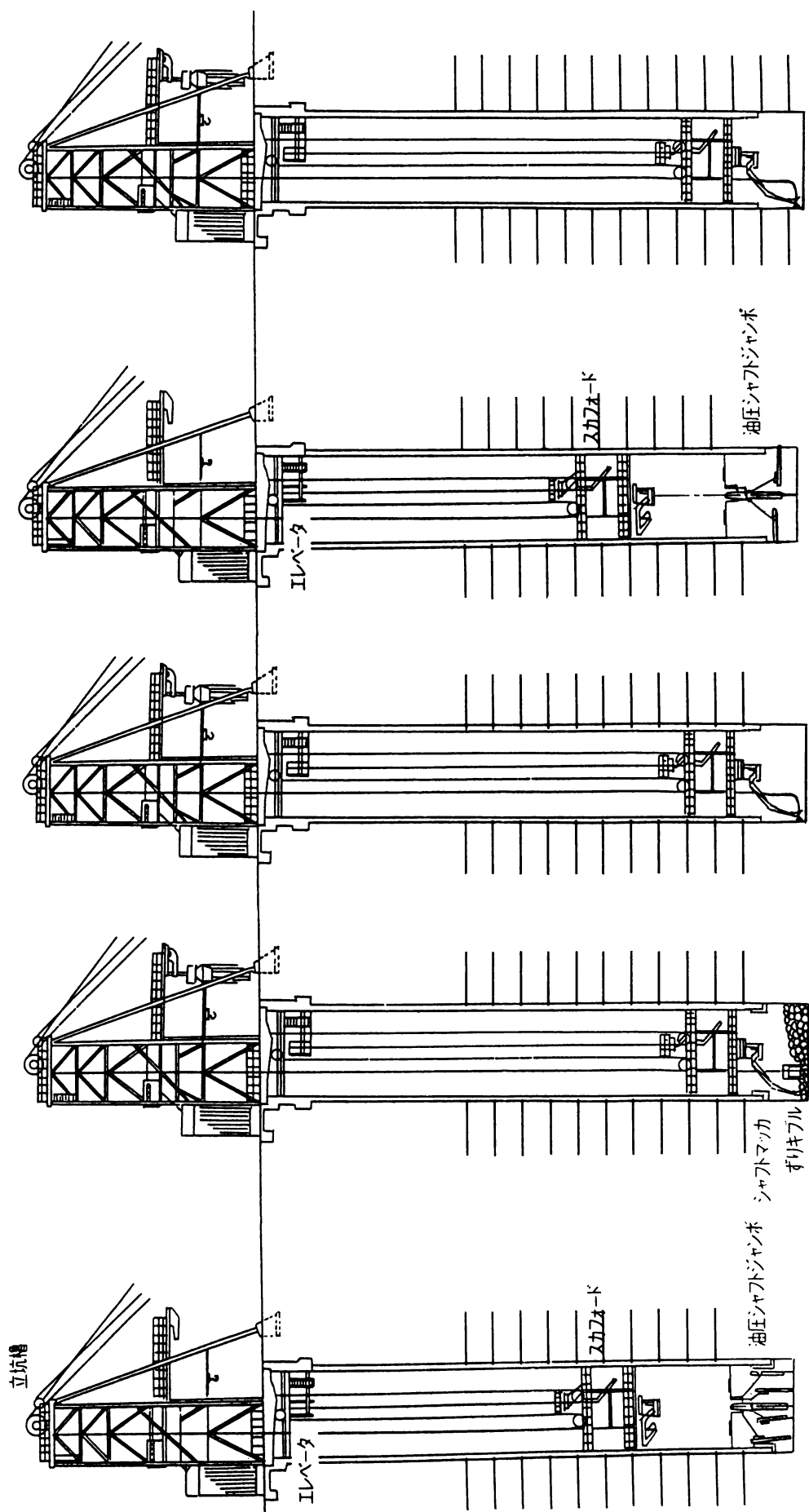


図 8.23 立坑施工概要図

2) 作業トンネル

作業トンネルの施工は、一般的なNATMで行う。作業サイクルは、削孔、装薬、発破、ずり出し、一次吹付コンクリート、ロックボルト、金網および二次吹付コンクリートの順で行う。なお、二次覆工コンクリートの施工は行わない。作業トンネルの施工手順は、立坑部と二次覆工を除き同様である。

施工概要を図 8.24に示す。

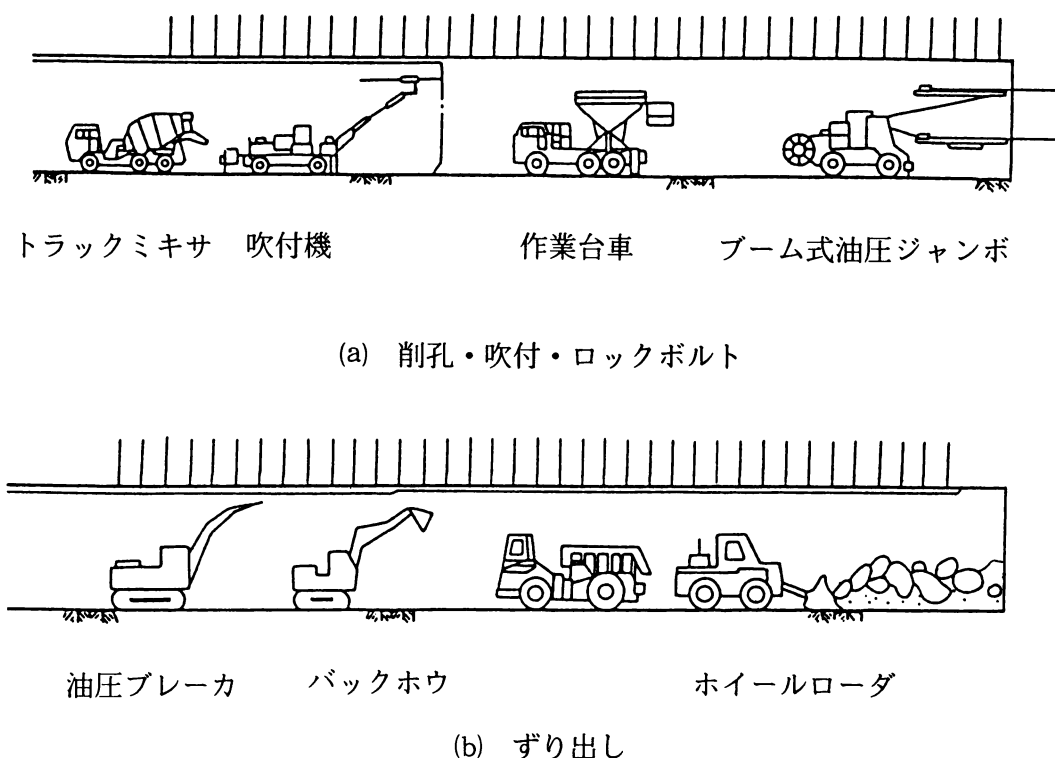


図 8.24 作業トンネル施工概要図

3) 貯蔵タンク

貯蔵タンクの掘削方法は、従来使われている3段ベンチ掘削工法を採用する。

施工手順としてまず、掘削と支保工施工（一次吹付コンクリートおよびロックボルト・金網二次吹付コンクリート施工）を交互に行っていく。掘削後のずりは作業トンネルを利用して坑外に搬出する。次に掘削・支保工完了後に不織布と防水シートおよび中央排水工を施工し、その直後で覆工コンクリート施工を行う。コンクリート覆工においても、従来用いられているスライドセントルによる打設方法を採用する。なお、止水工およびコンクリート覆工に関しては、貯蔵タンクの上部およびインバート部に分割して施工する。

以上の標準的な施工手順と施工概念図を図 8.25および図 8.26に、そして貯蔵タンク断面の加背割図を図 8.27に示す。

以上の土木工事が完全に終了してから保冷材・メンブレンの施工を開始する。

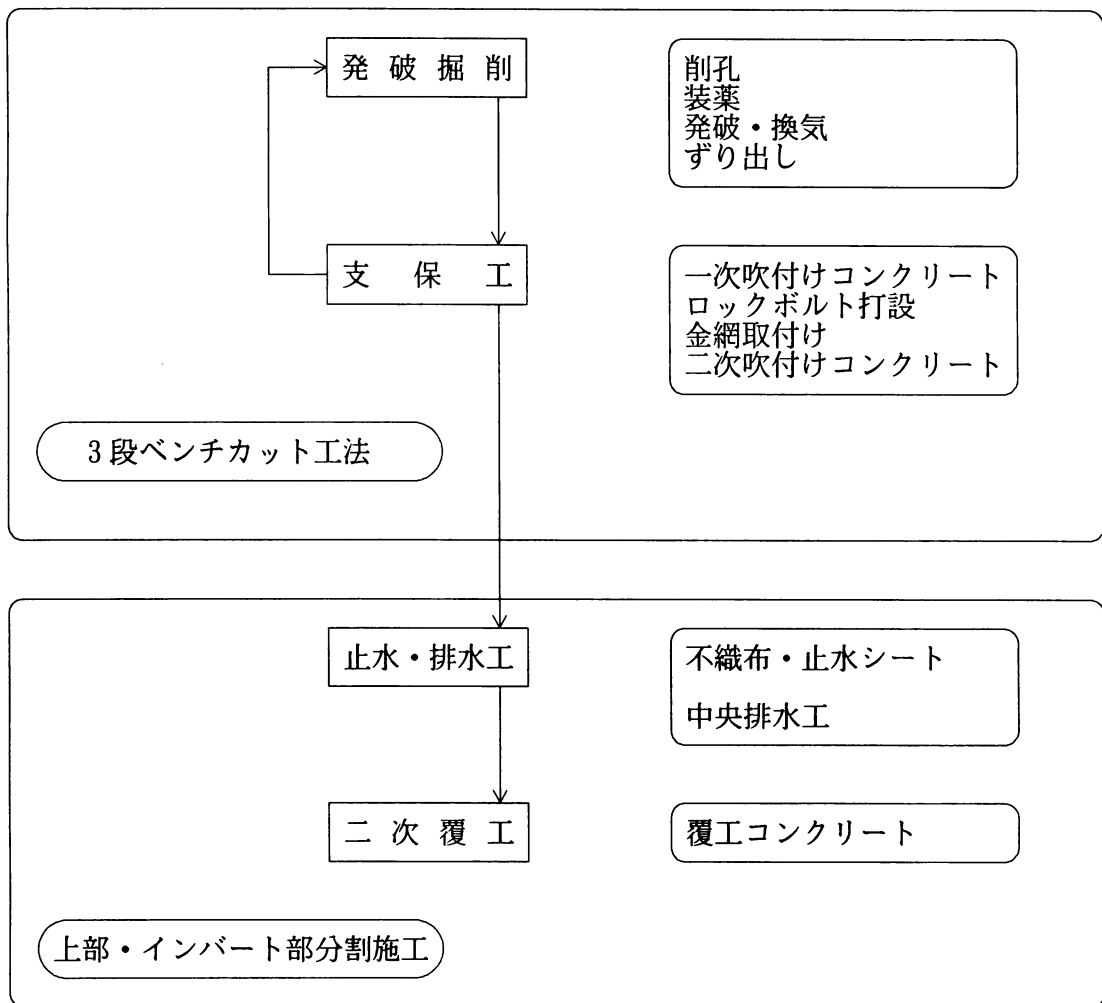


図 8.25 標準的な工法による施工手順

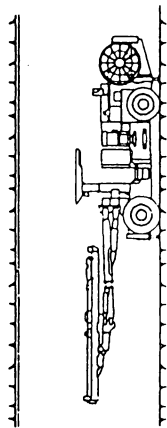
また工期の短縮化を図るために、コンクリートと保冷材を同時に施工する工法も併せて記述する。具体的には通常のECL工法の応用で、内型枠の外側に保冷材を締結して型枠を組み、その後コンクリートを打設するものである。この施工方法に関する縦断概念図および施工手順を図 8.28および図 8.29に示す。

なお、この工法には現状において以下に挙げる問題点が存在するために、採用に当っては、今後十分な技術検討を要する。

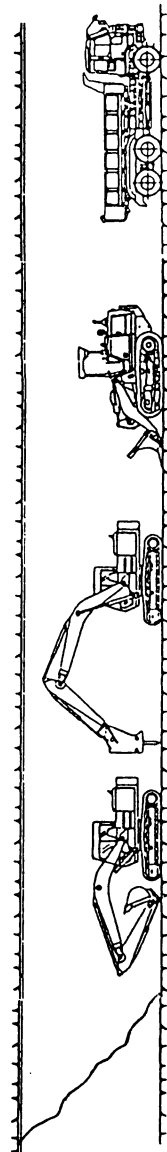
- 空洞径が20mφ以上もあり、コンクリート打設圧から保冷材には4.5～5.0kgf/cm²程度の圧縮応力が発生する。通常、保冷材の設計に当っては安全率を3倍程度見込むために最低でも圧縮強度が15kgf/cm²程度必要であるが、その場合には高密度のPUF（ポリウレタンフォーム）を使用することになり、この場合も伝導率は通常の保冷材と比較して約5倍程度（0.1kcal/mhr℃）になる。
- 保冷材に対する水処理対策が困難である。
- 貯蔵タンク曲線部における施工が困難である。

削孔

ザリ出し



油圧ジャンプ



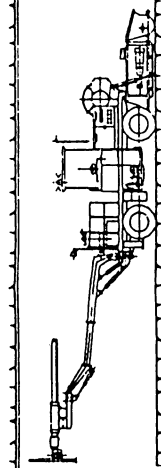
バックホー

アイオン

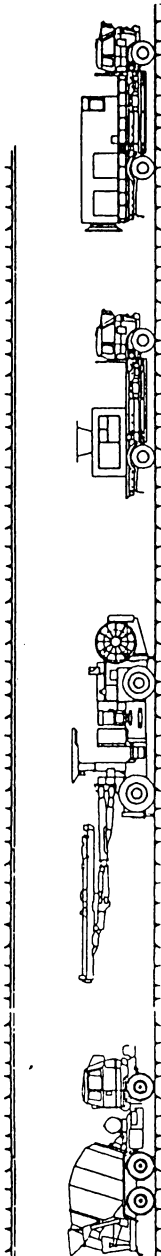
トラクターショベル

ダンプトラック

吹付けコンクリート・ロックボルト施工



一体型吹付機



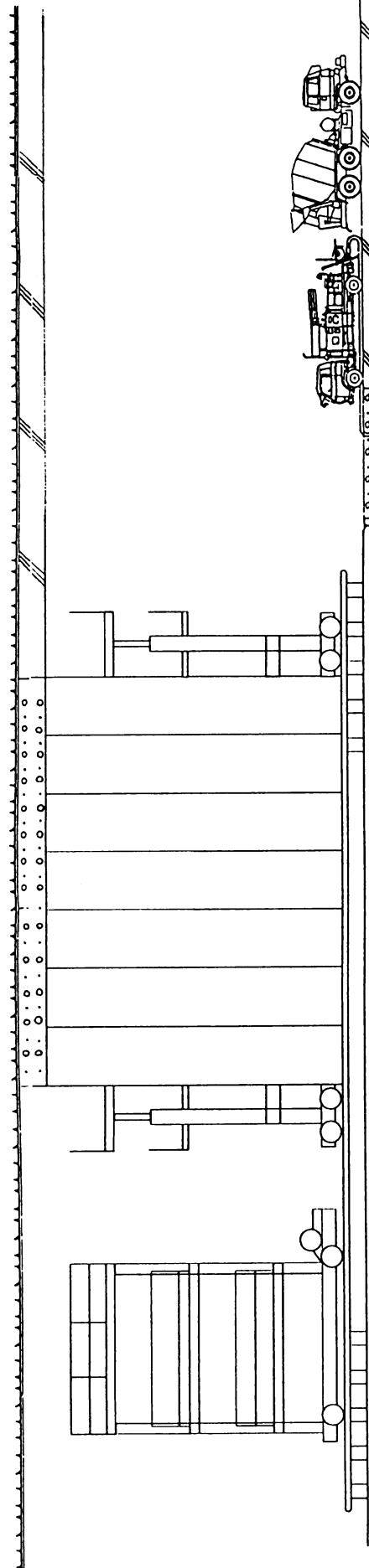
トラックミキサー

油圧ジャンプ

モルタルポンプ

集塵機

止水工・覆工コンクリート施工



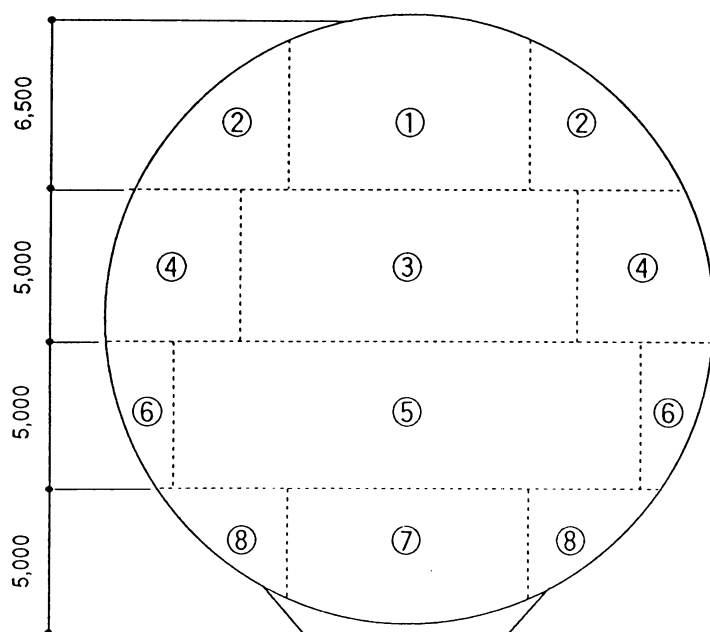
シート台車

覆工用スライディングスチールフォーム

コンクリートポンプ車

トラクミキサー

図 8.26 貯蔵タンク施工概要図



番号は施工順序を表す

図 8.27 貯蔵タンクの加背割図

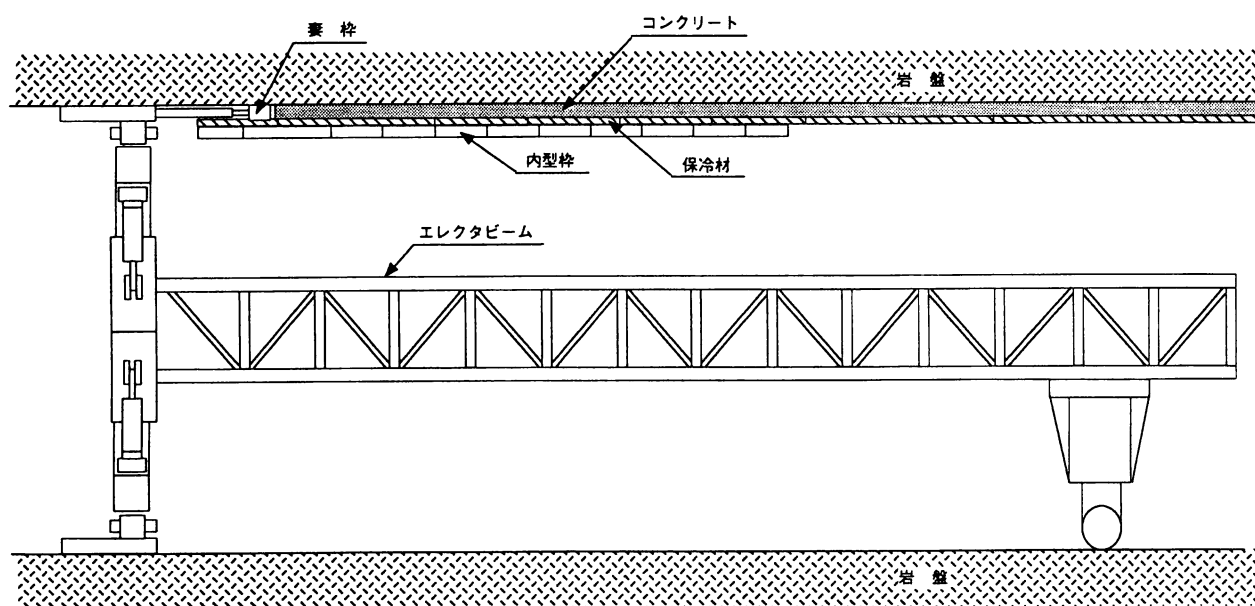


図 8.28 コンクリート・保冷材同時施工方法の縦断概念図

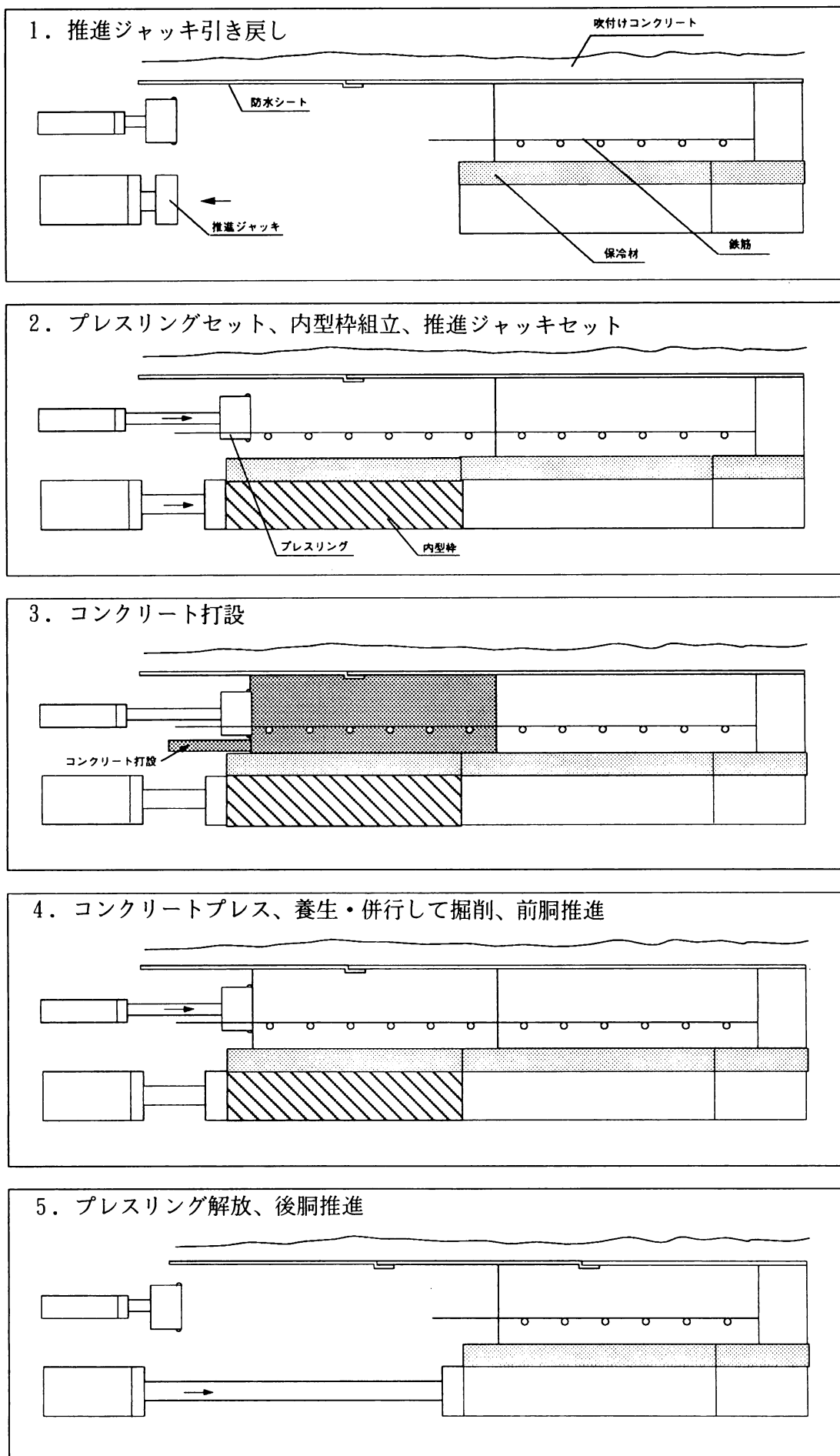


図 8.29 コンクリート・保冷材同時施工方法の施工順序

4) 埋め戻し部

貯蔵タンクと作業トンネルの境界部の埋め戻し作業は、保冷材およびメンブレンの施工が埋め戻し位置に到達する直前に行うものとする。

施工は、作業トンネル最奥部から作業トンネル出入口に向かって順次行う。コンクリートは、型枠を設置後3リフトに分けて打設する。トンネル側の型枠支保工はコンクリート内に設置し、支保工材は埋め殺しとする。また、天端ではグラウト注入を行い、岩盤との密着を図る。

5) 保冷材およびメンブレン

保冷材およびメンブレンの施工手順を図 8.30に示す。

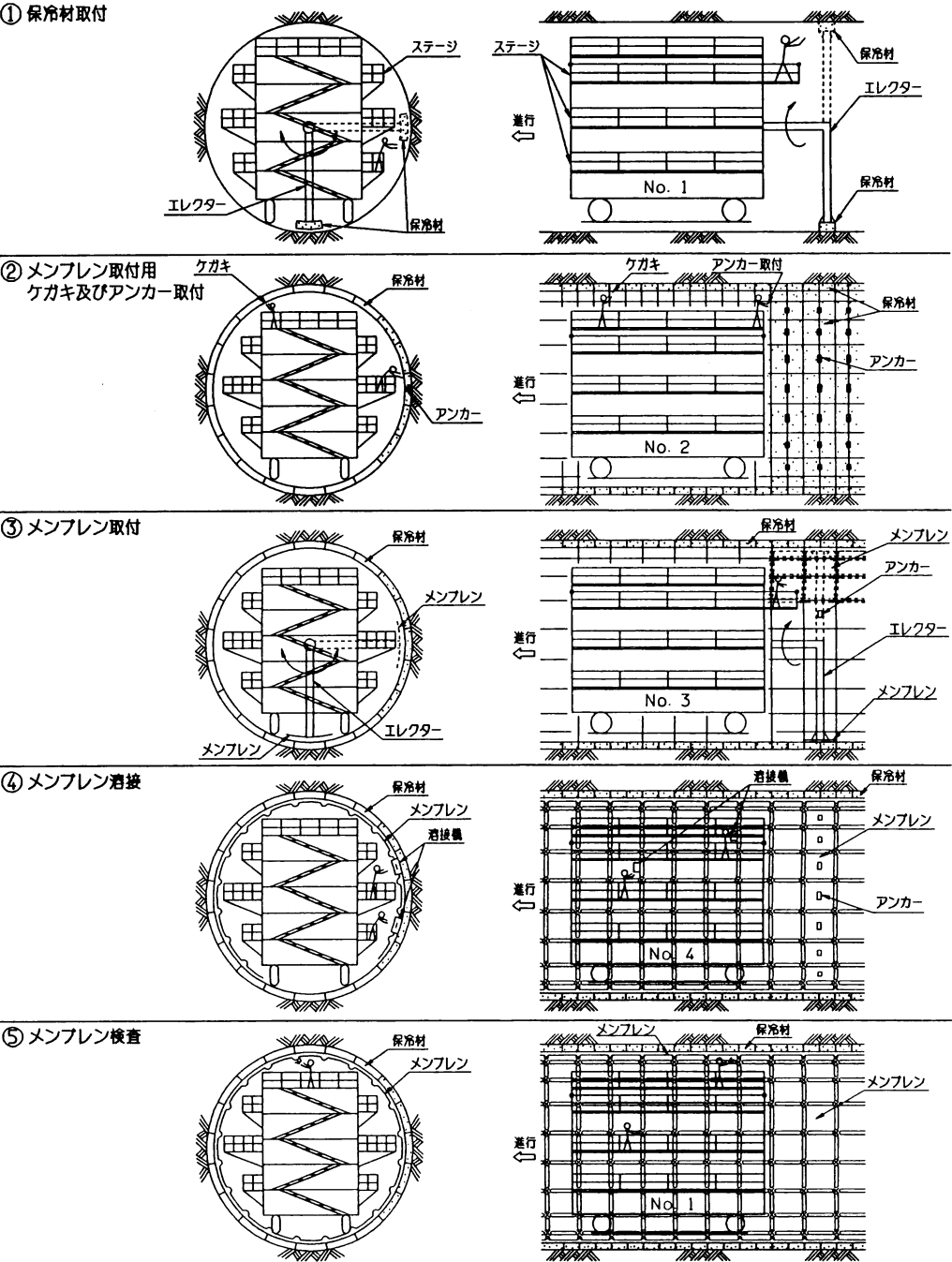


図 8.30 保冷材およびメンブレンの施工手順

8.4 建設費および工期

(1) 建設費

表 8.4にコンクリート・保冷材・メンブレンを別々に施工する標準的な工法の場合とコンクリート・保冷材を同時に施工する場合との建設費を示す。

表 8.4 LNG岩盤貯蔵タンクの建設費

項 目	仕 様	工事費	
		標準的な工法	コンクリート・ 保冷材同時施工
1. 土木工事			
(1) 貯蔵タンク	タンク直径 φ 20m×2基	80億円	160億円
(2) 作業トンネル		20億円	
(3) 立 坑	立坑直径 φ 6m×4本	10億円	
小 計		110億円	190億円
2. 機械設備工事			
(1) 配管関連	配管設備・ポンプ・ 計装設備 注)	40億円	
(2) メンブレン・保冷材関連		200億円	
小 計		240億円	
概算建設費		350億円	430億円
		10万円/kl	12万円/kl

注) 配管設備は8.2(4)主要機器リストのタンク付弁（タンク側）までである。

標準的な工法の場合、36万kl規模のタンク建設費は350億円程度であり、kl当りに換算すると約10万円である。またコンクリートと保冷材を同時に施工する場合でも建設費は、全体で430億円と標準的な工法よりは高くなるが、kl当りに換算すると約12.0万円である。

また、従来のLNG地上および地中タンクの建設費は貯蔵容量・立地条件によって大きく左右されるが、今回の岩盤貯蔵タンクのケーススタディーの容量では10～15万円/kl程度である。以上の結果から、岩盤貯蔵タンクは従来のLNG地上・地中タンクと同程度の建設費で建設が可能である。

(2) 工 期

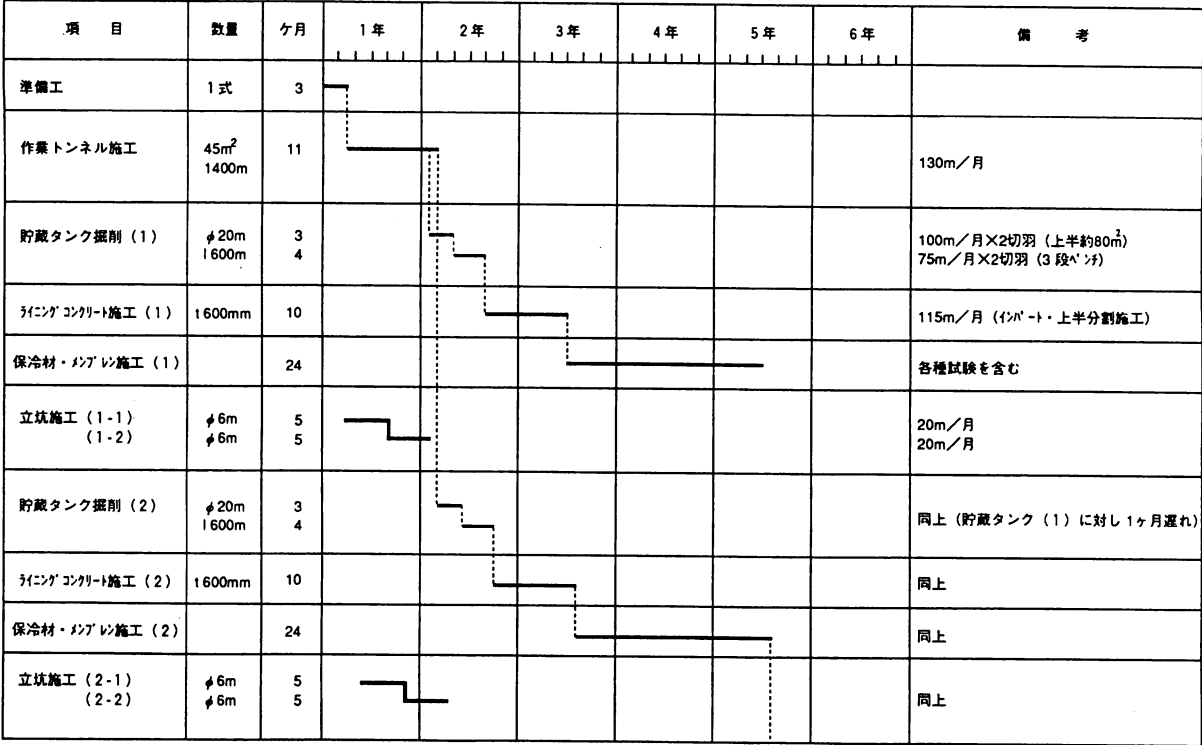
標準的な工法の工期を 8.4に、コンクリート・保冷材同時施工法の工期を表 8.5に示す。

標準的な工法の場合には、通算して55ヶ月を要する。また、コンクリートと保冷材を同時に施工する場合には、立坑・作業トンネル・貯蔵タンクの施工には標準的な工法と同じ施工方法を採用するために21ヶ月を要するが、コンクリート・保冷材

の同時施工10ヶ月・メンブレン施工18ヶ月で通算49ヶ月となり、標準的な工法に比べて6ヶ月程度工期が短縮できる。

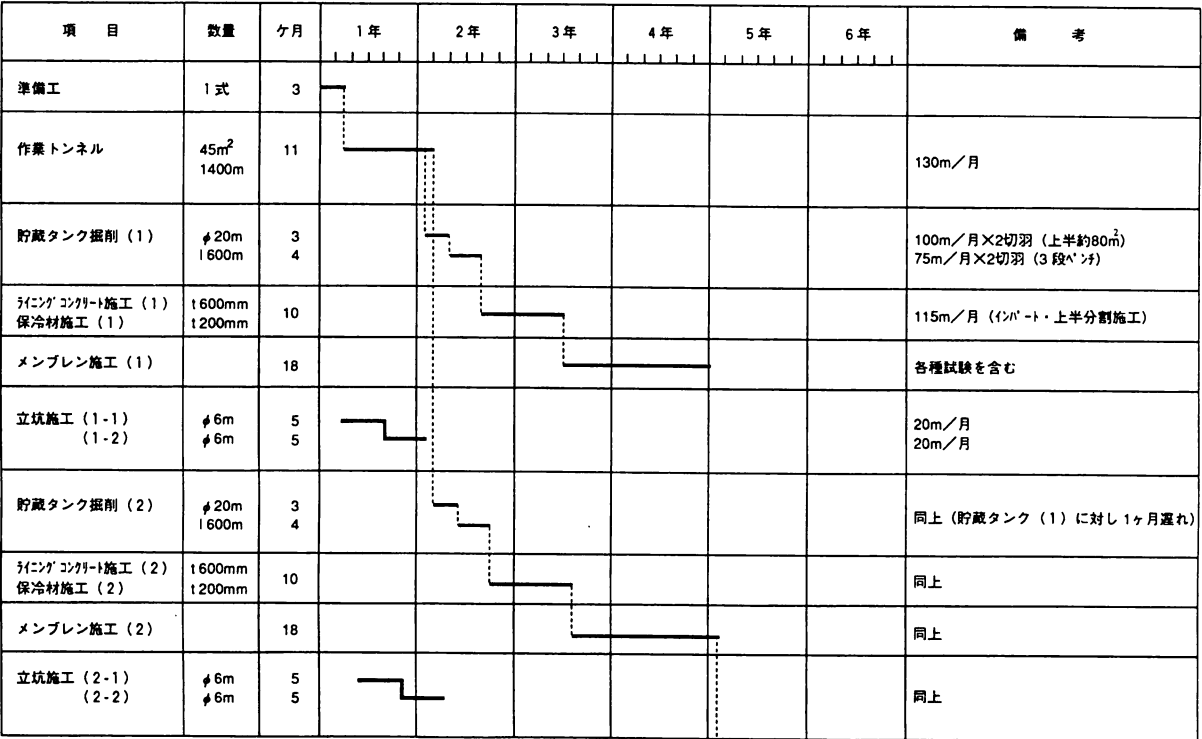
以上の結果から、工期についても岩盤貯蔵タンクは従来の地中タンクと同程度の期間で建設が可能である。

表 8.5 LNG岩盤貯蔵タンク概略工程図（標準的な工法）



通算55ヶ月

表 8.6 LNG岩盤貯蔵タンク概略工程図（コンクリート・保冷材同時施工）



通算49ヶ月

第9章 今後の課題と実証実験の提案

第9章 今後の課題と実証実験の提案

9.1 今後の課題

今までの調査研究の結果から、実現化に向けての今後の課題を抽出した。

(1) 岩盤特性に関する課題

1) 低温域における岩盤の物理的・力学的特性の把握

低温域における岩石の性質に関する研究例は多いが、岩盤に関してのデータはほとんど得られていないのが現状である。特に硬岩の場合には亀裂や地下水の存在によって岩盤とその構成要素である岩石との性質に大きな差があるのが普通である。そのため、今後は岩石はもちろん、岩盤についても低温域における各種の特性について研究を行う必要がある。

(2) 岩盤貯蔵タンクの安定性に関する課題

1) 低温下における岩盤貯蔵タンクの安定性に関する検討

今回の研究では、事前検討として熱伝導・熱応力解析を行い、タンク周辺岩盤の定性的な挙動についての検討を行った。今後は実際の岩盤を対象とした岩盤挙動についての調査・研究を行い、岩盤貯蔵タンクの安定性に関する検討を行う必要がある。

2) 対象岩盤に関する検討

今回の研究では、岩石の熱特性に関するデータが比較的多い花崗岩の岩盤を想定して、空洞の熱伝導・熱応力解析を行った。これらの結果をもとに硬岩を仮定して試設計を行った。しかし、LNG需要地などの周辺には、関東地方のように軟岩（堆積岩）が分布する地域もあることから、今後は軟岩立地の可能性についても研究することが望ましい。

3) 岩盤貯蔵タンクの耐震性に対する検討

今回は岩盤貯蔵タンクの耐震性に対する検討を行っていないが、今後は既存タンクの耐震性技術を参考に検討を行う必要がある。

(3) 岩盤貯蔵タンクの液密性・気密性に関する検討

1) メンブレン自体の液密性・気密性に関する検討

竪型地中タンクにおけるメンブレンの液密性・気密性は実証されているが、今後は円形トンネル方式の岩盤貯蔵タンクにおけるメンブレン自体の挙動に関しても検討を行う必要がある。

2) 貯蔵タンク全体構造の液密性・気密性に対する検討

低温下での岩盤挙動が覆工コンクリート・保冷材・メンブレンなどに影響を及ぼすが、これらのタンク全体構造の相互作用によるメンブレン構造の液密性・気

密性に対しての検討を行う必要がある。

(4) 岩盤貯蔵タンクの施工性に関する課題

- 1) 工事中における最適止水方法の検討
- 2) 保冷材の最適施工方法の検討
- 3) メンブレンの最適施工方法の検討
- 4) 覆工コンクリートの施工精度に関する検討

今回は保冷材・メンブレンが成型品であるため、覆工コンクリートの施工精度についての検討を行う必要がある。

5) 施工システムの検討

今回は既存の施工法をベースに検討を行っているが、今後は特に建設費の低減化、工期の短縮化が図れる施工システムについて検討する必要がある（例えばコンクリート・保冷材同時施工方法の検討など）。

(5) 運転管理上の課題

1) クールダウンに関する検討

貯蔵タンク内を均一冷却するためのLNG流量制御方法の検討を行う必要がある。

2) 受入配管に関する検討

地上部配管からタンク内出口までの高低差が通常の地中タンクの2倍以上となるために、LNGの受入方法（特に液の落下方法）についての検討を行う必要がある。

3) パージ方法に関する検討

効果的にパージを行うためのガス置換方法の検討を行う必要がある。

(6) 周辺環境に対する課題

- 1) タンク周辺の植生や地下水に対する影響の把握
- 2) 地上部への影響に対する検討

9.2 実証実験の提案

(1) 実験目的

LNG岩盤貯蔵タンクの実用化に先立ち、調査・研究を今後さらに推し進めていく必要がある。具体的には、LNG岩盤貯蔵タンクの安全性・経済性・環境保全などについての実証を行うことがLNG岩盤貯蔵タンクの実現に向けて必要であり、

そのためにもLNG岩盤貯蔵タンクの実証プラントを建設し、以下のような研究課題についての実証実験を行う必要がある。

- ・運転時における空洞周辺の岩盤の構造安定性
- ・運転時におけるライニングコンクリート、保冷材、メンブレンの構造安定性
- ・経済的な土木構造、保冷材・メンブレンの選定法、施工方法
- ・岩盤タンクの液密性・気密性
- ・岩盤からの入熱に配慮した温度・圧力管理、ミキシング、パージなど運転上の安全性
- ・植生や地下水への環境影響評価

そしてこれらの試験結果をふまえて、実現に向けての検討および経済的な貯蔵システムの開発を実施する。

(2) 実験施設

今回は、小規模プラント、実規模プラントの2つの実験施設を構築し、2つのステージに分けて実証実験を実施する。各ステージにおける実験の概要は、以下の通りである。

1) 事前検討

内 容：建設対象岩盤についての室内実験調査等

目 的：実証実験に先立ち、岩盤データの収集および実験方法の確立

主な実験項目：

- ・岩盤の力学的・熱的特性の調査
- ・保冷材の熱的特性の調査
- ・測定方法・測定技術の検討

2) 実証実験（ステージ1）

内 容：小規模プラントによる実証実験

規 模：3 m ϕ $\times$ L 30m（容量約200kl）

目 的：実規模プラントによる実証実験に先立ち、安全性確認のための予備的実験

主な実験項目：

- ・岩盤の力学的安定性の確認
- ・凍結岩盤の液密性の確認
- ・温度・圧力管理

3) 実証実験（ステージ2）

内 容：実規模プラントによる実証実験

規 模：10m ϕ $\times$ L 100m（容量約7,500kl）

目 的：実規模プラントによる、総合的な実用性の評価

主な実験項目：

- ・岩盤タンクの力学的安定性の確認

- ・メンブレン・保冷材の施工方法、施工性の検討
- ・ミキシング、パージ等の運転管理についての実証
- ・環境影響評価

実証実験のそれぞれのステージにおける実験施設概念図を図 9.1に示した。

(3) 実験内容

実証実験の事前検討および各実験ステージにおける実験項目の詳細内容について表9.1に示した。

(4) 実証工程

実証実験の工程を図 9.2に示した。

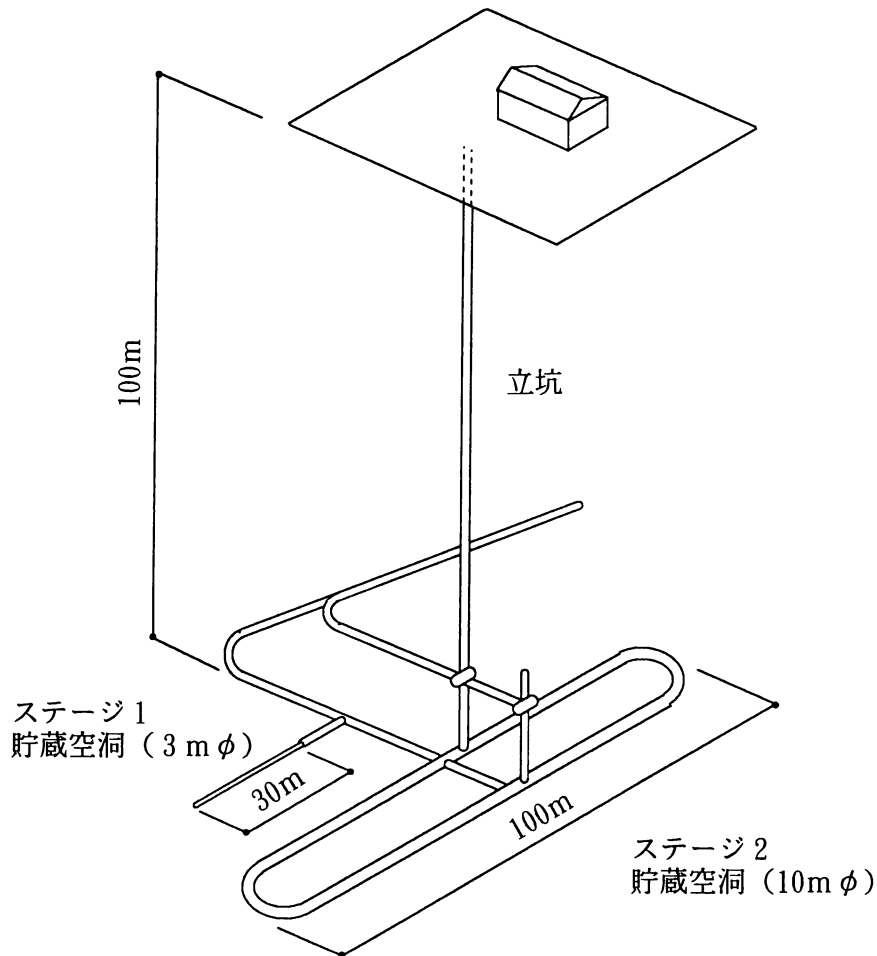


図 9.1 LNG岩盤貯蔵タンク実証実験施設イメージ図

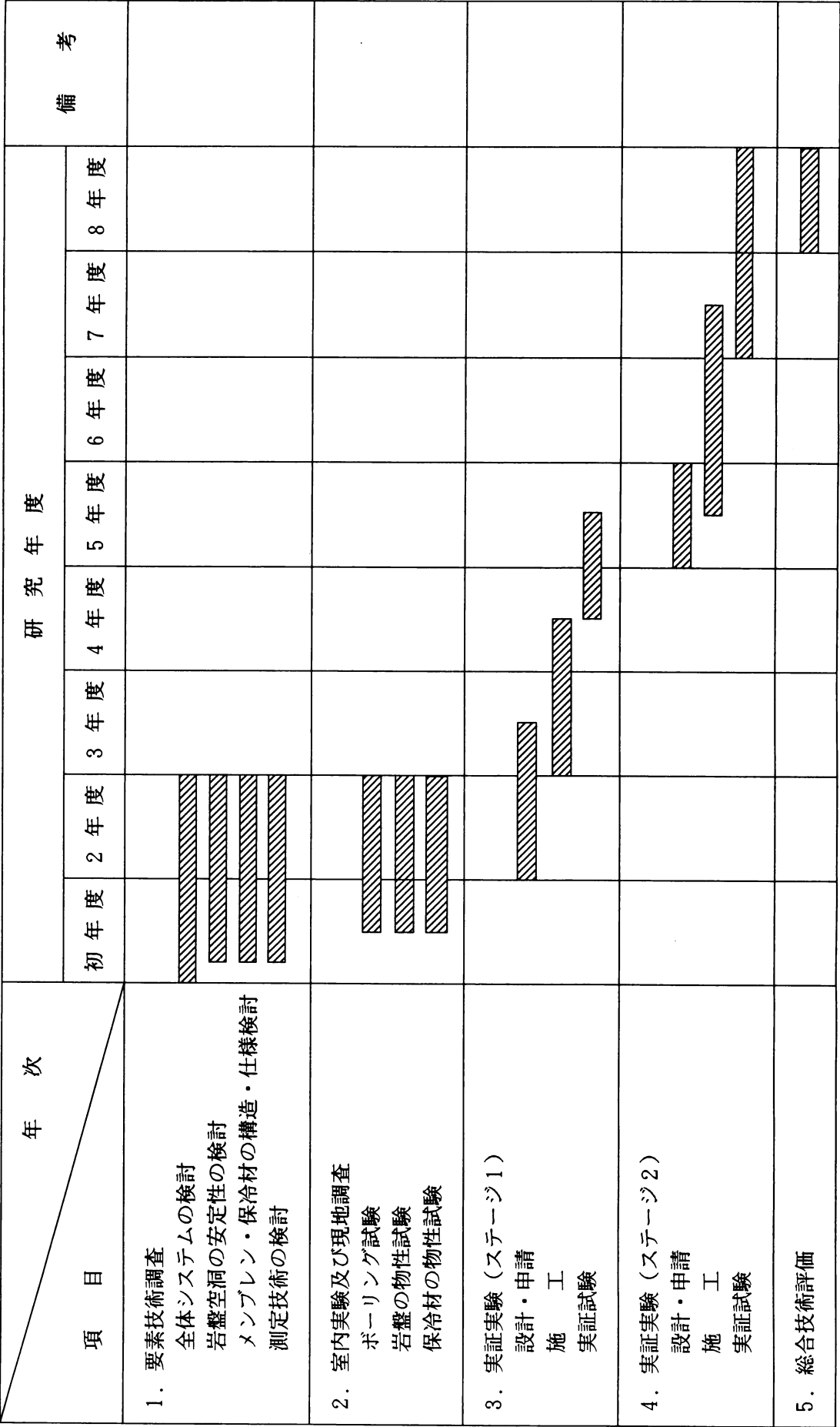
表 9.1 LNG岩盤貯蔵タンク実証実験検討項目

		検 討 項 目	検 討 細 目	調 査 項 目
事前検討	土木構造	岩盤の構造上の安定性	岩盤への影響	低温下における岩盤の力学的・熱的特性
			測定技術	建設地点周辺における地質構造
	メンブレン 保冷材	特になし		低温下における測定精度・測定方法
実証実験 ステージ1 (小規模)	土木構造	岩盤タンクの構造上の安定性	周辺岩盤への影響（熱伝導特性）	岩盤の温度分布（小規模）
			周辺岩盤への影響（熱応力特性）	岩盤の凍結領域（小規模）
		岩盤タンクの液密・気密性		岩盤の力学的安定性（小規模）
				岩盤挙動（小規模）
	メンブレン 保冷材	岩盤タンクの構造上の安定性	周辺岩盤への影響（液密・気密特性）	凍結岩盤の液密性（模擬リーク試験）
			保冷材への影響（熱応力特性）	保冷材の力学的安定性（小規模）
		岩盤タンクの施工性	保冷材の最適施工方法	保冷性能（小規模） 目地・アンカーの影響
				タンク内への熱流入（小規模）
	タンクシステム	操業上の実用性・安全性	温度・圧力変化に対するタンクシステムへの影響	保冷材の力学的安定性（小規模）
				タンク内部の温度・圧力（小規模）
				タンク内への熱流入（小規模）
		岩盤タンクの構造上の安定性	周辺岩盤への影響（熱伝導特性）	岩盤の温度分布（実規模）
				岩盤の凍結領域（実規模）
				岩盤の力学的安定性（実規模）

土木構造	岩盤タンクの施工性	周辺岩盤への影響（熱応力特性）	岩盤挙動（実規模）
			岩盤の力学的安定性（実規模）
			岩盤挙動（実規模）
			タンク内部の止水状況（実規模）
			ライニングコンクリートの施工性（実規模）
実証実験 ステージ2 （実規模）	岩盤タンクの構造上の安定性	岩盤タンクの液密・気密性	保冷材の力学的安定性（実規模）
			メンブレンの力学的安定性（実規模）
			メンブレンの液密性
			保冷性能（実規模） 目地・アンカーの影響
			タンク内への熱流入（実規模）
メンブレン 保冷材	岩盤タンクの施工性	温度・圧力変化に対するタンクシステムへの影響	保冷材の力学的安定性（実規模）
			メンブレンの液密性
			メンブレンの力学的安定性（実規模）
			タンク内部の温度・圧力（実規模）
			ミキシング
タンクシステム	操作上の実用性・安全性	周辺に対する環境への影響	クールダウン
			パージ
			地下水流への影響
			植生への影響

太字は重点項目を表わす

図 9.2 LNG岩盤貯蔵タンク実証実験研究スケジュール



第10章 ま と め

第10章 ま と め

今回の調査研究は、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岩盤貯蔵システムの研究、LNG岩盤貯蔵タンクの立地に関する検討、LNG岩盤貯蔵施設の基本システム設計、岩盤空洞の検討、保冷材・メンブレンの検討、LNG岩盤貯蔵の試設計、今後の課題の抽出、実証実験計画の立案の大きく分けて9項目から構成されている。なお、この調査研究の実施に当っては、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および両作業部会の研究の橋渡しをする全体作業部会の3つの部会を編成した。

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岩盤貯蔵システムの研究、LNG岩盤貯蔵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がなされ、今後の国内の需給見通しに関する調査がなされた。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および天然ガス貯蔵施設（廃坑利用・深部水封式方法）の貯蔵実績やLNG岩盤貯蔵技術確立のための研究動向・研究実績が調べられた。次いでLNG岩盤貯蔵タンクの立地に関する検討がなされ、国内におけるLNG岩盤貯蔵タンクに適した岩石の分布、LNG岩盤貯蔵タンクの社会的ニーズ、岩盤貯蔵タンクの立地・計画のための条件が調べられた。また、岩盤空洞の検討ではLNG貯蔵時における空洞周辺岩盤の経時列温度変化、空洞内への熱流入量を熱伝導解析（FEM解析）により算出し、空洞周辺への温度の影響やBOG発生量算出の基礎的データが求められた。さらには、空洞の力学的安定性を検討するために弾性ならびに弾塑性熱応力解析（FEM解析）を行い、タンク周辺部の変位量、応力値などを算出し、さらには破壊領域および亀裂進展長についても算定を行った。

第2作業部会ではLNG貯蔵施設の基本システム設計、保冷材・メンブレンの検討を実施した。LNG岩盤貯蔵施設の基本システム設計ではLNG岩盤貯蔵タンクを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、受払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、貯蔵システムなどの基本システム設計を行った。また、保冷材・メンブレンの検討では各種の保冷材ならびにメンブレンの調査を行い、LNG岩盤貯蔵タンクに適した保冷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岩盤貯蔵システムの調査を行い、LNG岩盤貯蔵タンクの検討のための液密構造、保冷構造、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。

なお、LNG岩盤貯蔵システムの試設計の検討、今後の課題の抽出、実証実験計画の立案については第1作業部会、第2作業部会、全体作業部会の合同で行った。

試設計の検討では、最初に岩盤貯蔵タンクの構成要素である立坑・作業用トンネル・貯蔵タンクの詳細検討を行った。具体的には、立坑に関しては立坑断面・立坑本数・立坑位置などを、作業用トンネルについてはトンネル断面・トンネル勾配などを、貯蔵タンクについてはタンク断面・タンク規模などを、その他として受入・払出に関する具体的方法や設備の最適レイアウトなどの検討を行った。次に、この設定仕様に沿った施工計画の検討を行い、さらにはLNG岩盤貯蔵タンクの建設費および工期の算定も行った。調査研究内容から、今後のLNG岩盤貯蔵タンクの実現化に向けての必要検討事項（岩盤特性・岩盤タンクの安定性・岩盤貯蔵タンクの液密、気密性・岩盤貯蔵タンクの施工性・通常管理・周辺環境）の抽出を行った。さらには実証実験についても検討を行った。

各作業部会の調査研究の結果、200万kWのコンバインド発電所をモデルとした場合には、貯蔵タンクの貯蔵量は36万klとなる。この場合、地下100m前後に直径20mφの円形状のトンネル空洞を設け、この中にLNGを貯蔵することとした。この場合の岩盤貯蔵タンク施設は2基の貯蔵タンク（1基：18万kl）、4本の立坑、1本の作業用トンネルとした。

各施設断面は主に吹付けコンクリートとロックボルトにより構成するが、貯蔵タンクについては防水シートの内側に液密性確保のためのメンブレンとBOG制御のための保冷材の両方を敷設する。施工方法としては立坑・作業用トンネルについては従来の山岳トンネル工法を行い、貯蔵タンクについては同様の土木工事終了後に保冷材・メンブレンの施工等を行う。なお、工期の短縮化を図るためにコンクリートと保冷材とを同時に施工する方法についても併記した。以上の各種設定条件を踏まえてLNG岩盤貯蔵タンクの建設費を算出すると10～12万円／klとなり、同容量の従来型のLNGタンクの建設費と比較すると同程度となる。また、工期についても標準的な工法の場合を採用した場合には、約55か月と従来の地中タンクと同程度の工期で建設が可能である。なお、コンクリート・保冷材の同時施工を採用した場合には標準的な工法の場合よりも約6か月程度工期が短縮可能となる。最後に、今までの調査結果を踏まえて、LNG岩盤貯蔵タンクの実現化に向けてさらに検討を有する項目を抽出し、これら課題解決の方策の1つとして、実証実験も行う必要があるため、各種計画検討（施設計画、実験項目計画、工程計画）を含めた実証実験の提案を行った。

