

JAERI-M

83-040

地層処分による岩盤への熱的および
力学的影響

—調査および試算—

1983年3月

下岡 謙司・宇都宮 透*・川澄 倭*・海藏寺 忍*
村岡 進・田代 晋吾・荒木 邦夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

地層処分による岩盤への熱的および力学的影響

- 調査および試算 -

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

下岡 謙司・宇都宮 透・川澄 健*

海蔵寺 忍・村岡 進・田代 晋吾*

荒木 邦夫

(1983年1月31日受理)

高レベル放射性廃棄物処分場の建設、運転および処分後の熱が周辺岩盤に及ぼす岩盤力学的影響を解明するために、いくつかの処分条件を想定し数値解析を行った。

その結果、1) 坑道換気により熱の影響を少なくできることから、処分場閉鎖時期の選定が重要であること、2) 処分による熱の影響は、掘削による地圧への影響と比較すると小さいこと、3) 掘削による影響は初期応力の状態に大きく左右されることがわかった。

また岩石物性の温度依存性について調査した。

* 三井建設株式会社

Thermal and mechanical effects of the high level radioactive waste
on the rock mass for a repository

Kenji SHIMOOKA, Toru UTSUNOMIYA^{*}, Osamu KAWASUMI^{*},
Shinobu KAIZOJI^{*}, Susumu MURAOKA, Shingo TASHIRO
and Kunio ARAKI

Division of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1983)

Effects of decay heat from high-level wastes and those of construction and operation of a repository on the mechanical properties of surrounding rock mass were analyzed by numerical assessments for some concepts of repository.

The results showed that;

- 1) The closing time of a repository was very important, because the thermal effect could be reduced by it.
- 2) Thermal effect of disposal was less than that of excavation.
- 3) The effect of excavation depended largely upon the initial stress of a rock mass.

Moreover, temperature dependency of the characteristics of rocks was studied.

Keywords:

Decay Heat, High-level Waste, Repository, Thermal Effect, Excavation, Stress, Radioactive Waste Disposal, Underground Disposal.

* MITSUI CONSTRUCTION Co. Ltd.

目 次

1. 緒言	1
2. 処分場の概念と具備すべき機能	1
2.1 処分場の概念	1
2.2 処分場の機能	2
3. 岩石物性の温度依存性に関する調査	5
3.1 熱的性質	5
3.2 力学的性質	7
3.3 考察	9
4. 処分孔および処分トンネル周辺の温度分布の試算	22
4.1 廃棄物処分場の設計概念	22
4.2 計算コードと計算ケース	23
4.3 計算結果	24
4.4 考察	25
5. 処分トンネル周辺の岩盤内応力の試算	37
5.1 計算に用いた岩盤特性	37
5.2 計算コード	37
5.3 計算ケース	38
5.4 計算結果	39
5.5 円形トンネルモデルによる試算	40
5.6 考察	41
6. 地層処分安全性研究に関連した今後の開発項目	50
6.1 岩盤物性とその温度依存性	50
6.2 岩盤の温度分布	50
6.3 岩盤応力および破壊	50
6.4 山はねおよびその対策	51
7. 結言	52
謝辞	52
参考文献	53

CONTENTS

1.	Introduction	1
2.	Concept of a repository and its function	1
2.1	Concept of a repository	1
2.2	Function of a repository	2
3.	Temperature dependence of rock property	5
3.1	Thermal property	5
3.2	Mechanical property	7
3.3	Consideration	9
4.	Calculation of thermal distribution around the boreholes and tunnels in a repository	22
4.1	Designing concept of a repository	22
4.2	Calculation code and calculated cases	23
4.3	Calculated results	24
4.4	Consideration	25
5.	Calculation of stress in the rock mass around the repository tunnel	37
5.1	Rock characteristics used in calculation	37
5.2	Calculation code	37
5.3	Calculated cases	38
5.4	Calculated results	39
5.5	Calculation of circular tunnel	40
5.6	Consideration.....	41
6.	Subjects concerning the geological disposal	50
6.1	Property of the rock mass and its dependency on temperature	50
6.2	Temperature distribution in a rock mass	50
6.3	Stress and faulting of a rock mass	50
6.4	Rock burst and counterplan for it	51
7.	Conclusion	52
	Acknowledgement	52
	References	53

1. 緒 言

使用済み核燃料の再処理によって発生する、高レベル放射性廃棄物の処分問題は、核燃料サイクルの確立を計画している我が国にとって重要な課題の一つである。

昭和55年12月、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会が策定した我が国の開発スケジュールでは、深地層処分を目標とし、可能性のある地層の調査、有効な地層の調査、模擬固化体の現地試験、実物固化体の現地試験、処分と進め、それぞれの段階における技術に対応した安全評価を実施しながら、21世紀初頭の実現を目指している。

日本原子力研究所では安全評価研究を分担し、現在進めている第1段階の可能性のある地層の調査に対応して、安全評価手法の開発と関連データの蓄積を行っている。地層処分における安全性は、固化体を中心とした人工バリアと地層による自然バリアによって確保されることになり、それを評価するにはそれぞれのバリアの閉じ込め機能を調べ、バリアを通じて移行する廃棄物の環境移行経路を明らかにする必要があり、圧力、温度、放射線、時間等、種々の要因による影響を考慮して、総合的な評価が必要である。

本研究では、それらの評価の基礎となる処分場の構造強度への、廃棄物の発熱の影響及び地下岩盤の盤圧の影響についてモデル解析を行い、処分場の閉じ込め機能を評価するための基本的情報としたものである。

2章に現在考えられている処分場の概念と処分場が具備すべき機能をまとめ、3章には安全評価の基礎となる岩石物性の温度依存性について調査した結果を示した。処分場をモデル化し、廃棄物による発熱に起因する処分場周辺の温度上昇を計算して4章にまとめ、さらにその温度上昇を考慮した岩盤応力を計算して5章にまとめた。6章にはこれらの研究を進める段階で摘出した関連課題をまとめて、今後の研究の一助とした。

なお、本研究は日本原子力研究所と三井建設株式会社との56年度における共同研究として実施したものである。

2. 処分場の概念と具備すべき機能

2.1 処分場の概念

使用済み核燃料の再処理工程で発生する高レベル放射性廃液は、高い放射能と発熱によって特徴づけられる。その取扱いについて、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会の答申に、次のように述べられている。

再処理施設から発生する高レベル放射性廃液には、放射性物質として核分裂生成物、アクチノイド元素(Am , Cm 等)、ウラン、プルトニウムの抽出回収残渣、混入物として、硝酸、アルカリ塩、腐食生成物、(Fe , Cr 等)が含まれている。これらの種類や量は、燃料の種類、燃焼度、

1. 緒 言

使用済み核燃料の再処理によって発生する、高レベル放射性廃棄物の処分問題は、核燃料サイクルの確立を計画している我が国にとって重要な課題の一つである。

昭和55年12月、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会が策定した我が国の開発スケジュールでは、深地層処分を目標とし、可能性のある地層の調査、有効な地層の調査、模擬固化体の現地試験、実物固化体の現地試験、処分と進め、それぞれの段階における技術に対応した安全評価を実施しながら、21世紀初頭の実現を目指している。

日本原子力研究所では安全評価研究を分担し、現在進めている第1段階の可能性のある地層の調査に対応して、安全評価手法の開発と関連データの蓄積を行っている。地層処分における安全性は、固化体を中心とした人工バリアと地層による自然バリアによって確保されることになり、それを評価するにはそれぞれのバリアの閉じ込め機能を調べ、バリアを通じて移行する廃棄物の環境移行経路を明らかにする必要があり、圧力、温度、放射線、時間等、種々の要因による影響を考慮して、総合的な評価が必要である。

本研究では、それらの評価の基礎となる処分場の構造強度への、廃棄物の発熱の影響及び地下岩盤の盤圧の影響についてモデル解析を行い、処分場の閉じ込め機能を評価するための基本的情報としたものである。

2章に現在考えられている処分場の概念と処分場が具備すべき機能をまとめ、3章には安全評価の基礎となる岩石物性の温度依存性について調査した結果を示した。処分場をモデル化し、廃棄物による発熱に起因する処分場周辺の温度上昇を計算して4章にまとめ、さらにその温度上昇を考慮した岩盤応力を計算して5章にまとめた。6章にはこれらの研究を進める段階で摘出した関連課題をまとめて、今後の研究の一助とした。

なお、本研究は日本原子力研究所と三井建設株式会社との56年度における共同研究として実施したものである。

2. 処分場の概念と具備すべき機能

2.1 処分場の概念

使用済み核燃料の再処理工程で発生する高レベル放射性廃液は、高い放射能と発熱によって特徴づけられる。その取扱いについて、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会の答申に、次のように述べられている。

再処理施設から発生する高レベル放射性廃液には、放射性物質として核分裂生成物、アクチノイド元素(Am , Cm 等)、ウラン、プルトニウムの抽出回収残渣、混入物として、硝酸、アルカリ塩、腐食生成物、(Fe , Cr 等)が含まれている。これらの種類や量は、燃料の種類、燃焼度、

冷却期間等によって多少異なるが、量的には少ないものの、きわめて高い放射能を有し、かつ長半減期の放射性物質を含むので、それらによる環境の汚染と公衆の放射線被曝を長期間防止する見地から、放射能が減衰し、環境への影響が十分軽減されるまで、生活圏から隔離する必要がある。

現在、高レベル放射性廃棄物の処理、処分の方法としては、核種の移動を防げるためガラス固化体とし、貯蔵、冷却を行い発熱量の減少を待って、深い地層中への処分を行うことが検討されている。

この地層処分では、ガラス固化体、キャニスター、処分ピット、埋戻し材等の処分場における人工的な廃棄物の閉じ込め機構、即ち、人工バリアと処分場周辺の安定な地層による閉じ込め機構、即ち、自然バリアの両方によって、廃棄物を長期間安全に隔離する。

処分場は、立坑、横坑等を組み合わせることにより、地表面下500~1000mの深さに建設されることが考えられている。

Fig. 2.1にその概念図を示すが、今後さらに検討が進むにつれて、具体的仕様が決められて行くことになる。

2.2 処分場の機能

処分場の主要機能は、前節にあげた地層処分の目的からも明白なように廃棄物を生活圏から隔離する機能である。細部にわたる機能は主要機能が充分はたされるように決定されねばならない。

処分場をその置かれている状況、時期により分けると建設期、運転期および閉鎖放置期に分けることができる。建設期と運転期についてはその期間がオーバーラップするとも考えられる。それぞれの期間について要求される細部機能評価項目をあげると以下の通りである。

(A) 建設、運転期

- 固化体を安全に取扱えること。
 - ; 固化体安全取扱機能
- 就業者に対して安全であること。
 - ; 作業者安全衛生
- 地圧、熱に対して処分場が健全であること。
 - ; 処分場の構造強度
- 地震など自然現象に対して安全であること。
 - ; 処分場の構造強度
- 放射性廃棄物による環境汚染を生じないこと。
 - ; 閉じ込め機能
- 上記機能の稼動を監視でき、異常時に対応できること。
 - ; 監視機能及び事故対処機能

(B) 閉鎖放置期

- 生活圏に移行するおそれのある放射性核種の濃度が許容値以下であること。

; 閉じ込め機能

- 採掘など将来の人間の侵入に対して安全であること。

; 侵入防止性

- 火山など地殻変動によるリスクが許容値以下であること。

; 周辺地層安定性

そのうち、今回の研究では、処分場がこれらの機能を備えるに際して最も基本となる構造強度について、地圧及び熱の観点から処分場の安全性を検討した。

処分場は上記機能をはたすべく設計、建設そして運転されねばならないと考えられている。

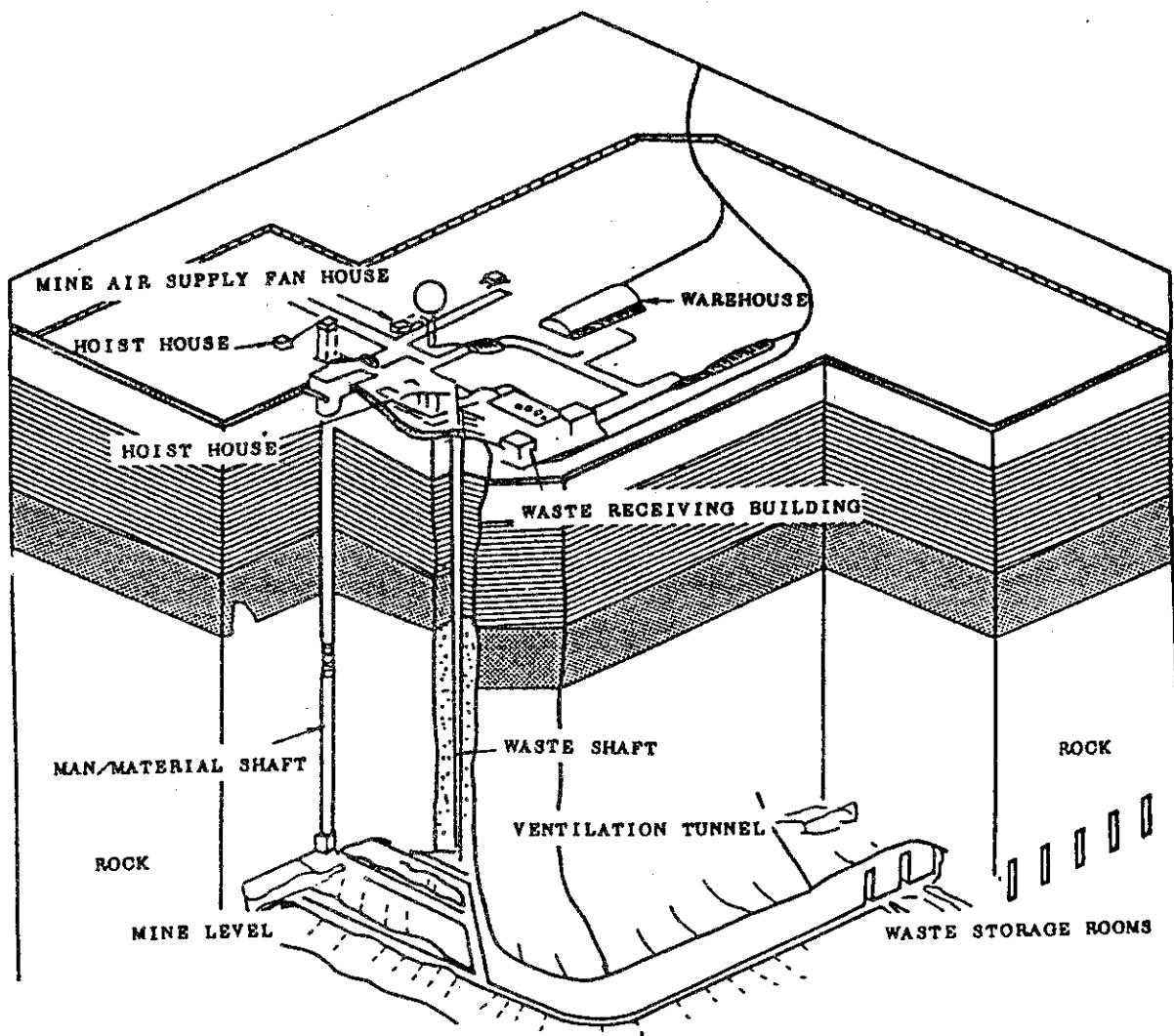


Fig.2.1 Conceptual design of a repository

"Workshop Material for State Seview of USNRC, Site Suitability
Criteria for High-level Radioactive Waste Repositories" (1978)

3. 岩石物性の温度依存性に関する調査

3.1 热的性質

岩石の高温下での物性研究は、火炎ジェット、レーザーなどによる熱削孔技術の開発、ならびに地熱利用を目的とする高温岩体の熱破碎技術の開発に関連して行われて来た。^{1)~3), 8)~17)}

また、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の開発とその安全性評価のために、岩石諸物性の温度依存性が検討されている。^{4)~7)}

本調査は、高レベル放射性廃棄物地層処分場の設計とその安全評価に必要な岩石の熱的性質と力学的性質の温度依存性を図表にまとめたものである。

熱伝導率、比熱、線膨張率を室温での各物性値に対する高温下での各物性値の比率として示した。室温での物性値が与えられていない場合は、0～100°Cの範囲の物性値を基準とした。図中のコメントは産地、特徴などである。また、数字は試験結果を引用した文献の番号である。

(A) 热伝導率

Fig. 3.1 は、各種岩石の熱伝導率の温度依存性を示している。花崗岩を始めとする深成岩では、200°C附近まで熱伝導率はほぼ直線的に低下しており、室温での値に比較して10～30%減少している。Dmitriyev らのまとめによると200°C以上では大部分の深成岩について熱伝導率の低下の割合がゆるやかになっているが、島田らの報告では稻田の花崗岩は200°C以下と同じ割合で値が低下している。火山岩では熱伝導率の変化は小さく、変化なし、もしくは200°Cで10%以下の減少を示している程度である。¹⁵⁾ 堆積岩は深成岩と同様の傾向を示している。²⁵⁾

深成岩と火山岩との間に見られる熱伝導率の温度依存性の差異は、その形成時の冷却条件による結晶度の違いとして説明されている。^{13) 25)} すなわち、結晶質の鉱物は温度の上昇に伴って熱伝導率が小さくなり、ガラス質の鉱物は温度の上昇により熱伝導率が大きくなることから、結晶度の違いにより熱伝導率の温度依存性が異なってくる。深成岩では結晶が発達しており結晶度が高く、火山岩では結晶度が低い。

収集した室温での熱伝導率の平均値を、Table 3.1 に示す。

火山岩の熱伝導率は他の岩種に比較して小さくなっている。全岩種を通して標準偏差が大きいが、これはサンプル数が少ないと、深成岩、火山岩、堆積岩といつてもその範囲は広く試験体間の差異が大きいためと思われる。

(B) 比 热

Fig. 3.2 に岩石の比熱の温度依存性を示した。比熱はすべての岩種において、温度上昇に伴い増加している。図中※つきで示した値は、定積比熱が18°Cから450°Cの範囲で与えられていたものである。その間の平均線膨張率を 15×10^{-6} (°C⁻¹) とすると体積変化は2%以下であるので、この定積比熱で与えられた値を体積変化については無視してデータを整理した。

岩石比熱は鉱物組成の関数であり、次式により計算できる。²⁵⁾

$$C = \sum C_i \cdot x_i \quad (1)$$

ここで C_i : 岩石を構成している各鉱物の比熱
 x_i : 岩石の全重量に対する当該鉱物の重量分率

温度依存性についても各温度で鉱物の比熱がわかっていれば、(1)式が適用可能である。大半の鉱物は温度が上昇すると比熱も増加することがわかっており、したがってほとんどの岩石の比熱は温度上昇に伴い増加する。このことはFig. 3. 2に示した結果と一致している。

Table 3. 2に、室温での比熱を示した。定積比熱で与えられていたものは除外したためサンプル数が非常に少なかった。石英、斜長石を始めとする造岩鉱物の大部分の比熱が700~1000 J/kg・°Cと比較的狭い範囲に入り岩石による差は少ない。

(C) 線膨張率

線膨張率の温度依存性をFig. 3. 3に示した。室温から200°Cの範囲で3倍以上になる岩石からせいぜい1.1~1.5倍にとどまる岩石まである。

花崗岩は線膨張率の温度依存性が大きい岩種の1つであり、500°C以上で更に急激に線膨張率が増加し、570~650°Cでピーク値を示すか、または、破壊すると報告されている。これは花崗岩に多く含まれている石英が、常圧下では573°Cで低温型石英(α -quartz)から高温型石英(β -quartz)に転移するためで⁵⁾、570~580°Cの間で約0.76%体積が膨張する。²⁵⁾この体積変化による鉱物粒子間の大きなせん断変形から微小なクラックが生じ、間隙が増大もしくは破壊するものと考えられる。

安山岩についても250°C付近に線膨張率のピークが見られ、昇温速度が速い場合には破壊に至ることが報告されている。¹⁵⁾

体積膨張率 α_v と線膨張率の間には等方性物質において次式の関係がある。

$$\alpha_v = 3 \cdot \alpha \quad (2)$$

ガラス質の鉱物は等方性であるので(2)式が適用可能であるが、結晶質のものは結晶軸に対する方向により線膨張率が異なっていることが多い。しかし、岩石を巨視的に見ると種々の鉱物が含まれており、結晶の方向も結晶片岩、片麻岩などの広域変成岩を除くとそれぞれ任意であり、線膨張について等方性であるといえる。岩石の線膨張率の測定に際しては、結晶軸についての任意性を保てる供試体寸法が必要である。特に鉱物粒径が1~3 cmにも及ぶ粗粒岩や、堆積岩でも疊岩などでは注意を要する。

岩石の体積膨張率は、結晶粒界にせん断変形によるクラックが発生しない温度範囲において、⁶⁾造岩鉱物の体積膨張率から次式で求められる。

$$\alpha_v = \frac{\sum \alpha_i \cdot E_i \cdot V_i}{\sum E_i \cdot V_i} \quad (3)$$

ここで α_i : 岩石を構成している各鉱物の体積膨張率
 E_i : 当該鉱物の静弾性係数
 V_i : 当該鉱物の体積分率

各種鉱物の体積膨張率は文献25)に詳しく記載されているが、大部分が温度の上昇に伴い体積膨張率が増加しており、岩石の体積膨張率も同じく温度上昇により増加するといえる。

Table 3.3 に室温での線膨張率を整理して示す。

3.2 力学的性質

岩石の力学的性質を大別すると強度特性と変形特性に分けることができる。また、各特性は荷重速度いいえれば応力、ひずみ速度の大小によって静的性質と、動的性質に分けられる。

本調査では静的性質の温度依存性について述べることとし、強度特性では一軸圧縮強度 σ_c 、引張強度 σ_t 、内部まさつ角 ϕ 、せん断強度 C について、変形特性では静弾性係数 E 、ポアソン比 ν について、また強度、変形特性と相関性が高く岩石や岩盤の区分にも利用される弾性波速度 V_p について調査結果を示す。各図、表に記載した数値の取扱いは前節と同様であるが、ポアソン比については比率表示とせず各温度での値を示す。

(A) 一軸圧縮強度

Fig. 3.4 は一軸圧縮強度の温度依存性を示したものであるが、花崗岩と閃緑岩は温度上昇による強度低下が顕著である。また石灰岩と一部の玄武岩も低下する。

このような岩種による一軸圧縮強度の温度依存性の相違について、次のいくつかの理由があげられている。
1) 2) 8) 9) 15) 25)

花崗岩、石灰岩などの結晶質の岩石では、鉱物物性の異方性により鉱物粒子間の界面にひずみが蓄積し、みだれ、はく離、きれつが生じる。

花崗岩に特に多く含まれる石英は 573°C で転移に伴う大きな体積膨張が生じるため花崗岩など石英分に富む岩石の一軸圧縮強度はこの温度前後で急激に失われる。

石灰石では、主成分である Ca CO_3 が 800°C 付近で分解し、 CO_2 を放出することにより強度が失われる。



温度上昇により一軸圧縮強度があまり変化しないか増加する岩石については、焼成により粒子の結合が強くなること、構成鉱物の熱膨張により空隙が減少しち密になることが考えられる。

以上は加熱した状態で一軸圧縮した際の現象であるが、所定温度まで加熱した後に徐冷した場合は、加熱時に発生した粒子界面のみだれや、焼成の影響が残留するため強度へ与える影響も残るが、ある程度回復作用があると報告されている。²⁾

Table 3.4 にて室温での一軸圧縮強度を示す。その範囲は 49 ~ 300 MPa と広く分布している。

(B) 引張強度

引張強度の温度依存性を Fig. 3.5 に示す。花崗岩や他の深成岩では一軸圧縮強度同様温度上昇により強度が減少する。火山岩および砂岩では温度上昇により一軸圧縮強度が増加するものが多いが、引張強度は室温から 600°C の範囲で顕著な変化はない。これは引張による破壊が岩石に含まれる微少なきれつに沿って起こるため、焼成による強度増加が全体としての強度に寄与しないためと思われる。

室温での引張強度を Table 3.5 に示す。

(C) 内部まさつ角とせん断強度

内部まさつ角の温度依存性を求めるには、高温下で三軸試験または直接せん断試験を行う必要があり、実験を行う上で非常な困難がある。今回の調査で得られたデータは Friedman²¹⁾ らの報告値のみである。

Fig. 3.6～Fig. 3.8は、花崗閃緑岩と安山岩についての試験結果を示したものである。Fig. 3.6はモールの応力円と破壊包絡線を示している。岩石の破壊包絡線には放物線仮定も広く行われているが、ここでは直線仮定とした。Fig. 3.7はせん断強度の温度依存性を示しているが、深成岩である花崗閃緑岩のせん断強度は温度上昇により失われているのに対して、火山岩である安山岩では変化が見られない。このことは一軸圧縮強度の温度依存性とよく一致する。Fig. 3.8に示した内部まさつ角については、温度による顕著な変化は見られなかった。

(D) 静弾性係数

岩石の静弾性係数の温度依存性をFig. 3.9に示した。今回調査した範囲では、安山岩を除く全岩種が温度の上昇により静弾性係数が一様に常温の値から減少している。特に花崗岩においてその変化が大きい。^{8) 10)} 安山岩については600°Cまでの範囲で増大する傾向を示している。

岩石の静弾性係数の温度による変化は、次の2点により影響される。²⁵⁾

造岩鉱物自身の静弾性係数の変化

鉱物粒子の界面における応力のしかんの影響

鉱物の静弾性係数は、20°Cの値と500°Cの値とを比較すると石英では52%，微斜長石で34%にそれぞれ高温になると減少している。応力のしかんは粒子界面の微小なきれつの発生によると考えられる。

Table 3.6は室温での静弾性係数であるが、14～108 GPaと広く分布している。

(E) ポアソン比

ポアソン比の温度による変化をFig. 3.10に示した。室温では0.2～0.3であるが、温度の上昇により減少している。Table 3.7に室温でのポアソン比を示す。

ポアソン比は応力レベルによっても影響を受ける。すなわち破壊応力状態に近づくとポアソン比は大きくなり0.5に近づく。火山岩である安山岩の場合、高い応力レベルにおいて温度が上昇してもポアソン比は低いレベルにとどまるが、深成岩であるはんれい岩では高温においてポアソン比の増加が大きいとの報告がある。⁸⁾

(F) 弾性波速度

弾性波速度は岩石の基本的特性値として利用される。これは弾性速度と一軸圧縮強度や静弾性係数など強度、変形特性とが相関性を持っているためである。すなわち、岩石が硬く良質になるほど弾性波の伝播速度は速くなる。

Fig. 3.11は弾性波速度の温度依存性を示しているが、深成岩では温度の上昇によりほぼ線形に弾性波速度が減少している。火山岩では弾性波速度の増減は明瞭ではないが、深成岩に比較してその変化の絶対値は小さい。堆積岩では変化の量は小さいが、温度上昇に伴い弾性波速度は線形に減少している。

弾性波速度と一軸圧縮強度、静弾性係数のそれぞれの温度依存性についても相関性がある。温度上昇により弾性波速度が減少する深成岩では一軸圧縮強度、静弾性係数とも減少を示す。

温度による弾性波速度の変化が深成岩ほど大きくない火山岩、堆積岩では一軸圧縮強度、静弾性係数の変化は小さい。

室温での弾性波速度をTable 3.8に示した。

3.3 考 察

岩石の熱的、力学的性質の温度依存性を前節までに示したが、比熱、線膨張率は大方の岩種で温度上昇によりその物性値が増加する。それに対して熱伝導率、一軸圧縮強度、引張強度、静弾性係数、弾性波速度は岩種によりその温度依存性に差異が見られる。火成岩のうち深成岩はそれら物性値が温度の上昇により減少している。同じ火成岩である火山岩の温度上昇による物性値変化は、減少していくても少ないか逆に増加している場合もある。堆積岩では個々の物性値、岩種によりその温度依存性は種々の傾向を示す。ポアソン比、せん断強度、内部まさつ角については既往の研究が少なかったが、ポアソン比は温度上昇により減少する傾向が見られた。

比熱、線膨張率については、大方の造岩鉱物が温度上昇によりその物性値が増加することが知られており、このことからそれら造岩鉱物の集合体である岩石の比熱及び線膨張率が温度上昇により増加することが説明できる。

熱伝導率、一軸圧縮強度、引張強度、静弾性係数、弾性波速度の温度依存性に見られる深成岩と火山岩の間での差異は、結晶度など生成条件に起因する構造の相異により説明される。火山岩では冷却が急激に進んだため、ガラス質の鉱物と結晶面が発達した自形の結晶質鉱物よりもなるのに対して、深成岩では結晶面の輪郭が発達していない他形もしくは半自形の結晶質鉱物となる。このことから以下のことがいえる。

結晶質の鉱物は温度上昇により熱伝導率、強度、静弾性波速度が減少するため、結晶度が高い深成岩では、それら物性値が温度上昇により減少する。また結晶面の輪郭が入り組んでいるため、熱膨張により結晶界面にきれつを生じやすく、強度、変形特性値の低下を招く。

ガラス質の鉱物は比較的低い温度範囲では、熱伝導率、弾性波速度が温度上昇により増加する。また火山岩の強度、変形特性値の温度上昇による増加は、熱膨張により空隙が減少し、ち密になるためと考えられる。

堆積岩については、その生成時の状況から碎屑性、有機性、化学性、火山性に分けられ、また、鉱物組織、粒度の相異などがあり、その熱的、力学的性質およびそれらの温度依存性は個々の岩種について研究していく必要がある。

今回調査した既往研究では、実験条件を整える目的で空げき中の自由水を除去した供試体を用いているが、岩石の熱的、力学的性質に水分が与える影響は大きい。岩盤を加熱した場合、初め湿潤であった岩石が乾燥してゆき、水分の減少または水分の移動による熱移動が生じ、室内の岩石試験で求められた各物性の温度依存性とは異なることがあることが考えられる。また岩盤に遍在しているきれつの影響を考慮する必要がある。

Table 3.1 Thermal conductivity λ at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	5	4	3	3	15
mean (W/m°C)	2.92	2.88	1.62	3.08	2.68
Standard dev.	0.55	0.85	0.56	1.47	0.95

Table 3.2 Specific heat C at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	2	—	1	1	4
mean (J/kg °C)	868	—	966	991	923
Standard dev.	97	—	—	—	85

Table 3.3 Coefficient of linear expansion α at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	6	3	5	4	18
mean (°C ⁻¹) $\times 10^{-6}$	7.4	4.7	4.7	8.7	6.5
Standard dev.	0.8	0.3	2.3	3.7	2.6

Table 3.4 Compressive strength σ_c at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	5	1	5	3	14
mean (MPa)	167	151	150	105	147
Standard dev.	36	—	93	76	67

Table 3.5 Tensile strength σ_t at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	1	3		1	6
mean (MPa)	6.9	2.0	6.5	4.3	5.5
Standard dev.	—	—	2.0	—	2.3

Table 3.6 Young's modulus E at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	8	5	5	3	21
mean (GPa)	57	92	53	41	62
Standard dev.	15	30	43	1	31

Table 3.7 Poisson ratio ν at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	6	1	3	—	10
mean	0.19	0.29	0.22	—	0.21
Standard dev.	0.03	—	0.03	—	0.04

Table 3.8 P-wave velocity Vp at room temperature.

Rock type	Granite	Pultonic	Volcanic	Sedimentary	All
Sample size	4	4	—	2	10
mean (m/sec)	4900	5390	—	4110	4940
Standard dev.	740	980	—	80	860

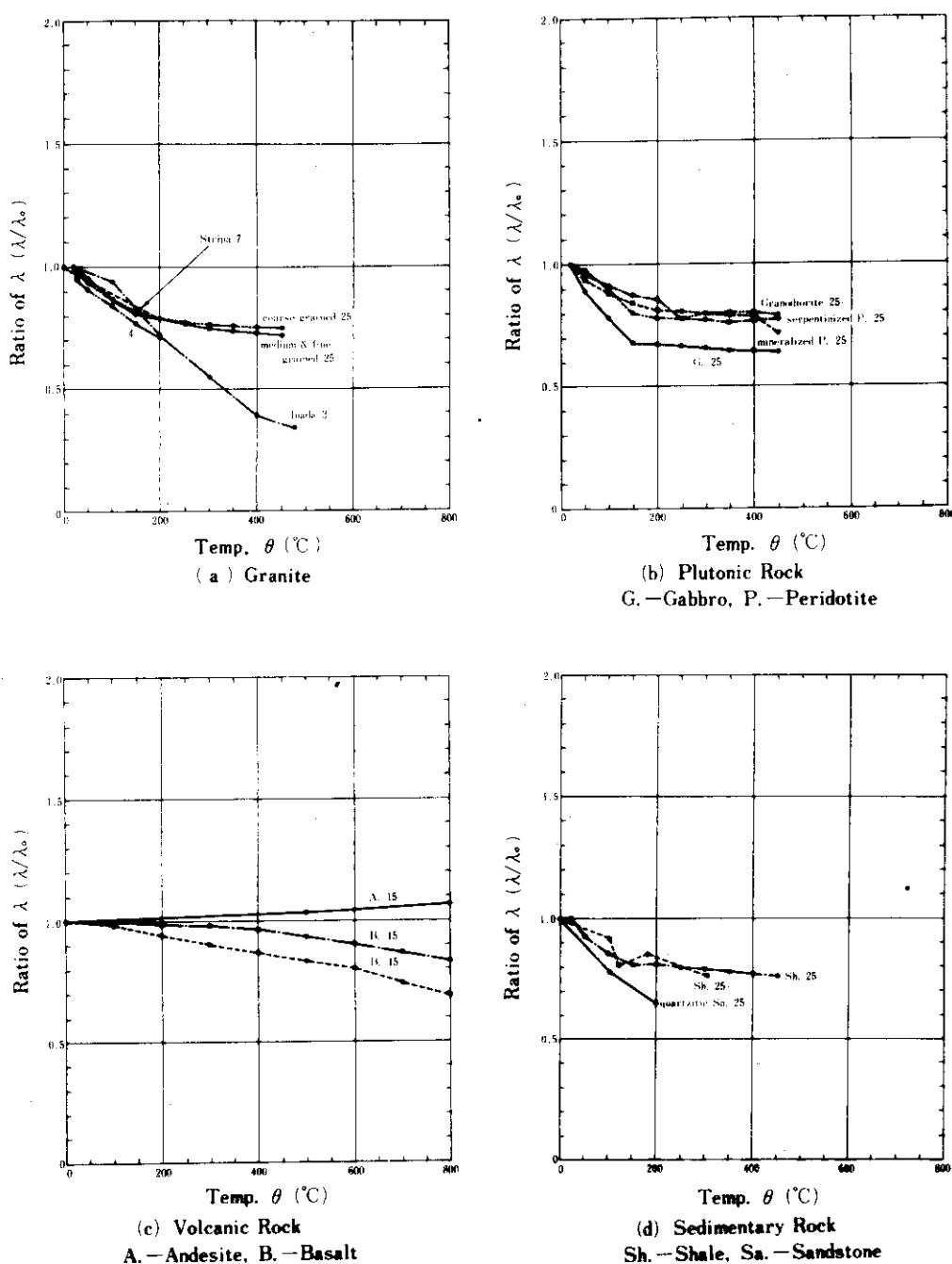
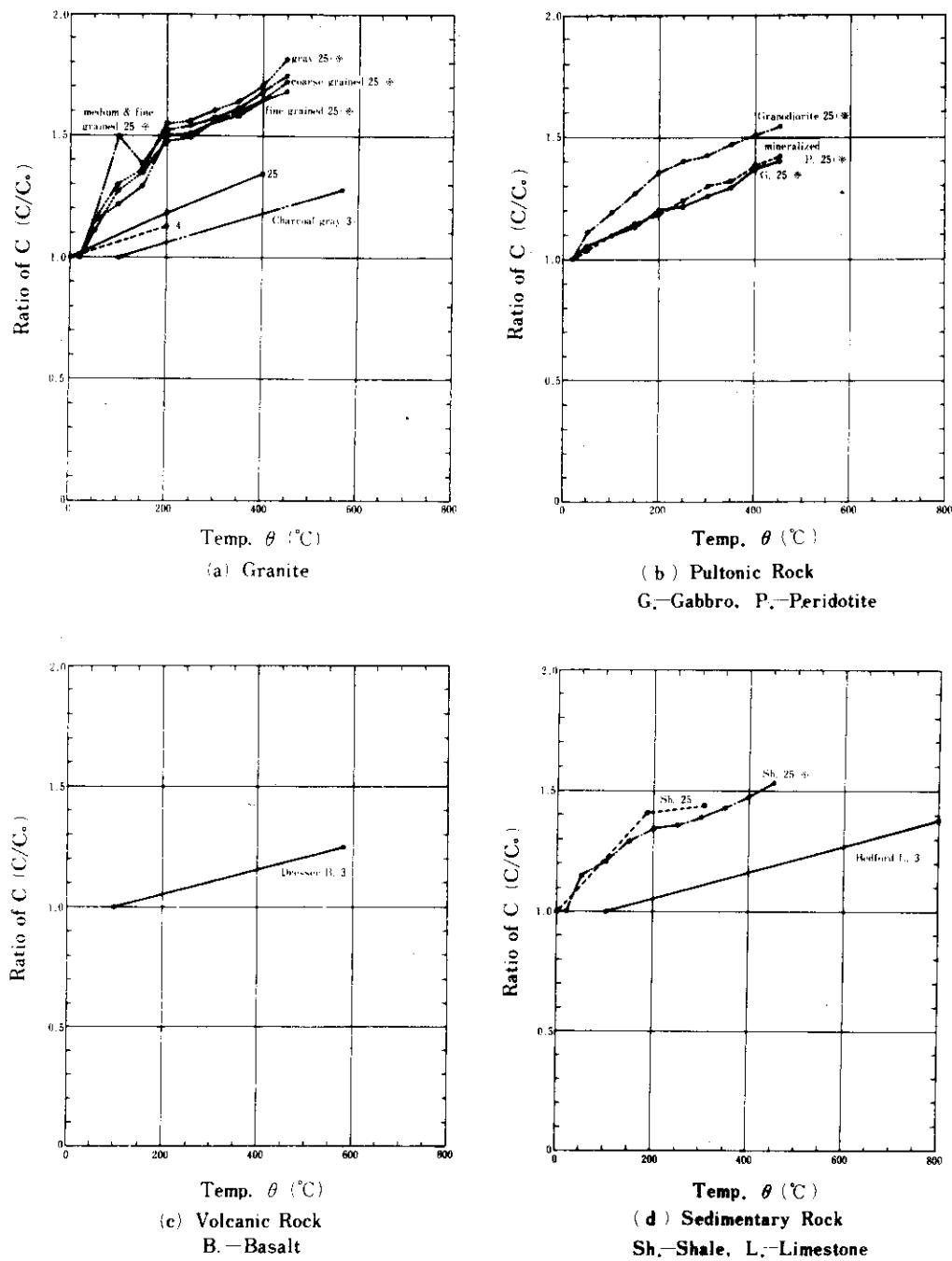
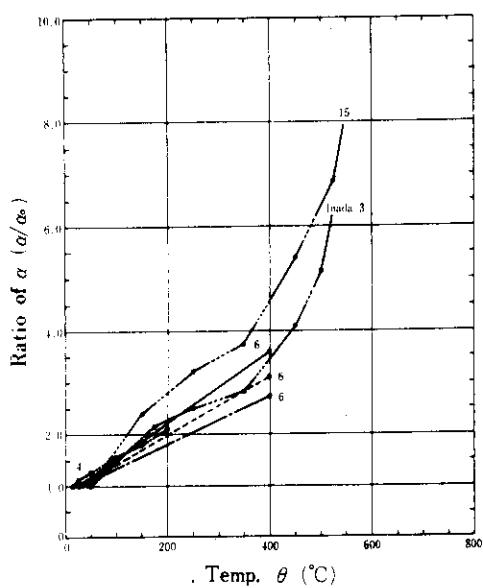
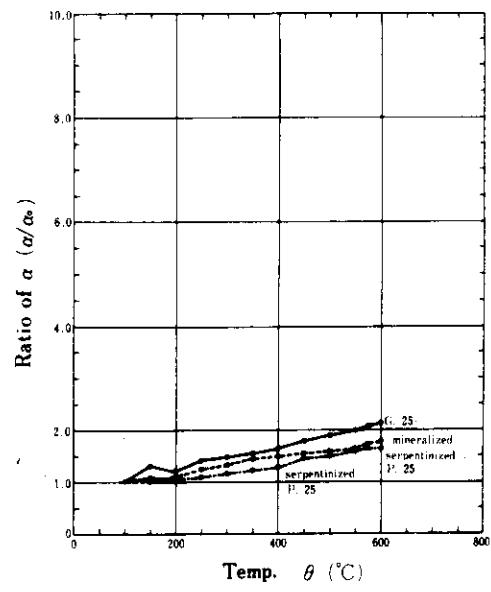
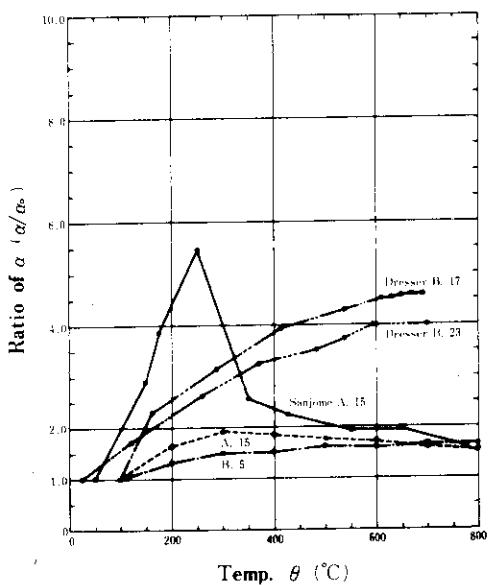
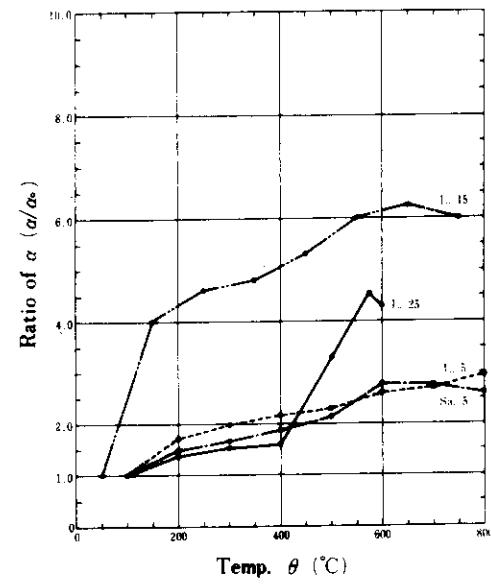


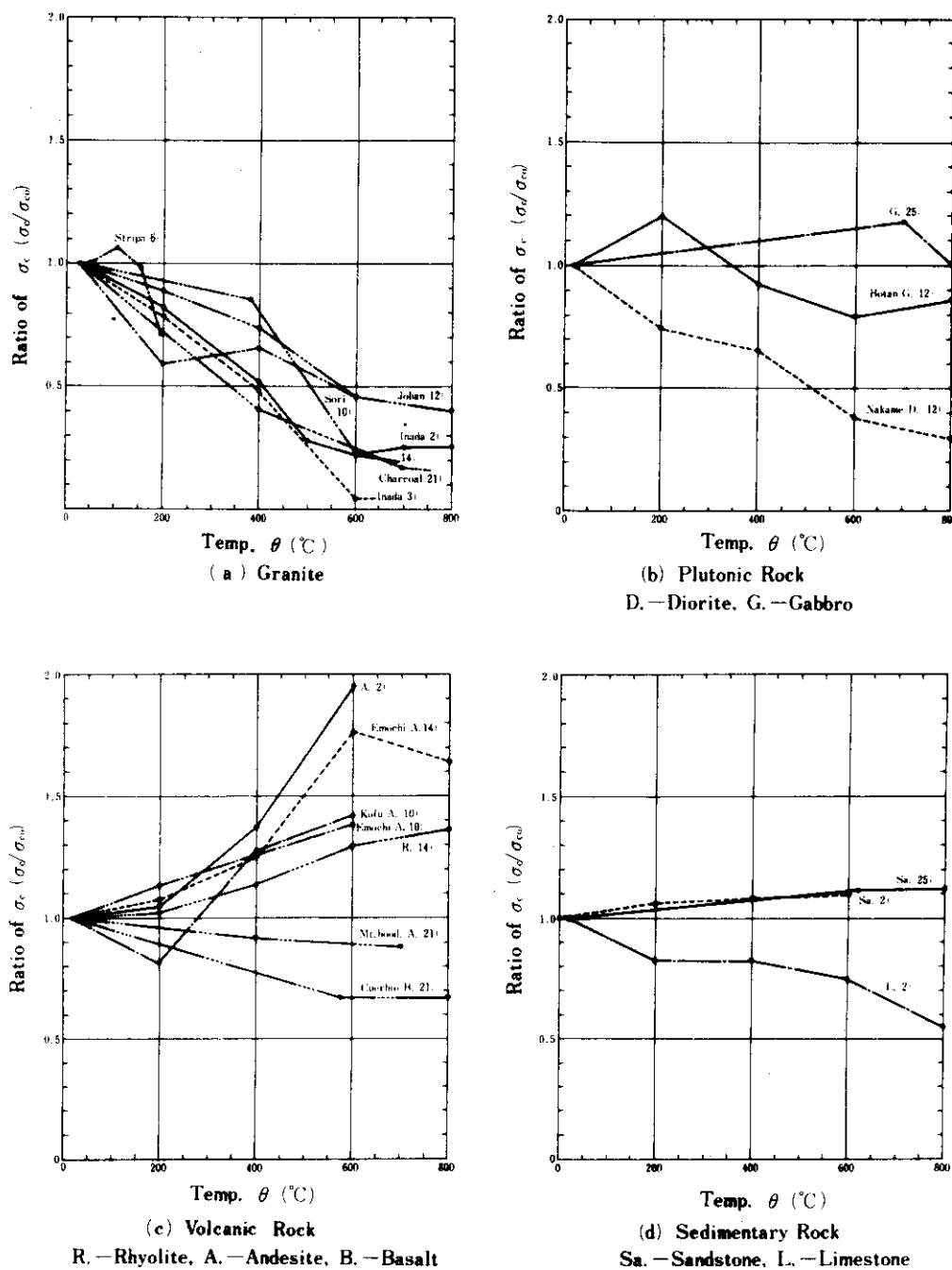
Fig. 3.1 Graph of dependence of Thermal conductivity λ on temperature.

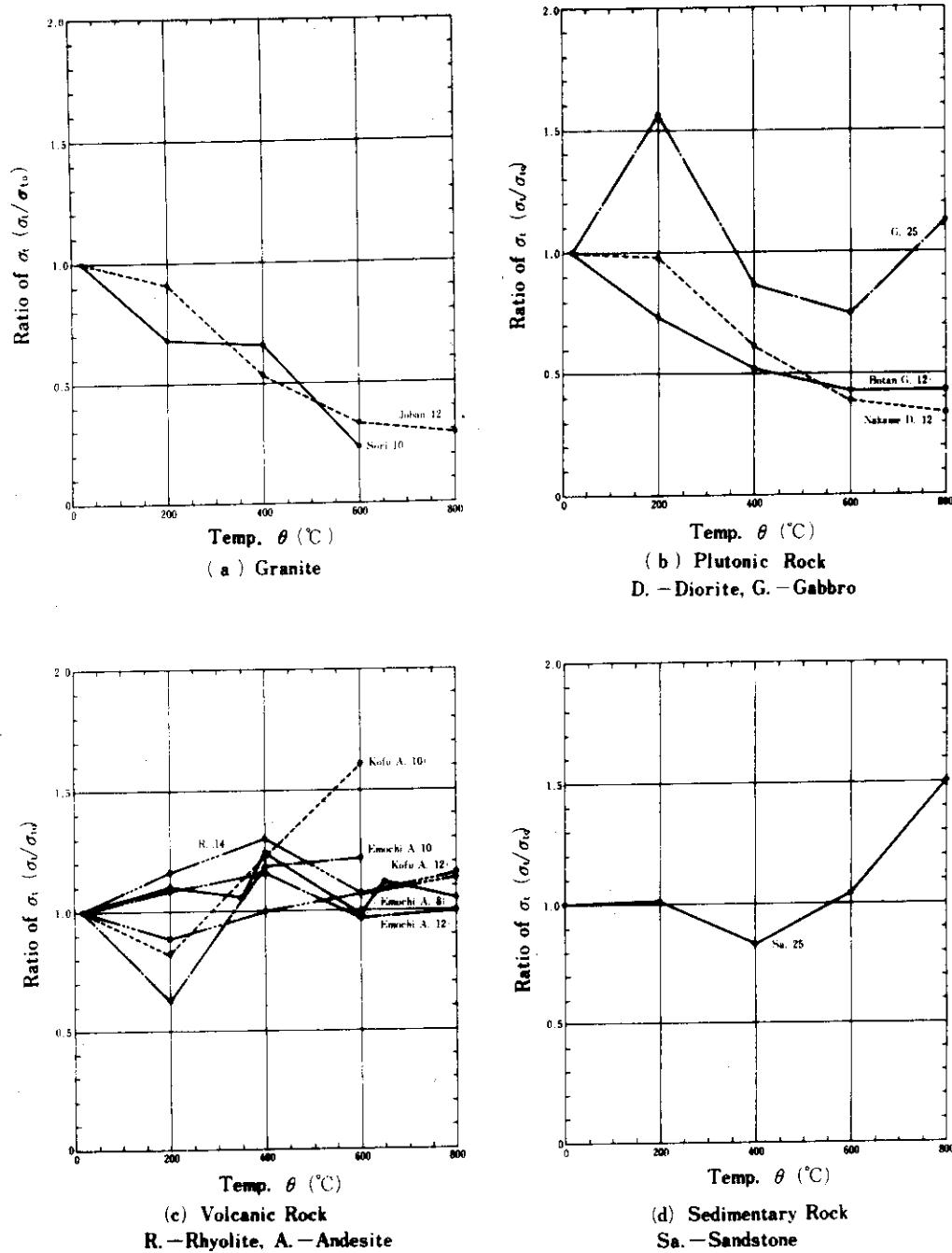
Fig. 3.2. Graph of dependence of Specific heat C on temperature.



(a) Granite

(b) Plutonic Rock
G.—Gabbro, P.—Peridotite(c) Volcanic Rock
A.—Andesite, B.—Basalt(d) Sedimentary Rock
Sa.—Sandstone, L.—LimestoneFig. 3.3 Graph of dependence of Coefficient of linear expansion α on temperature.

Fig. 3.4 Graph of dependence of Compressive strength σ_c on temperature.

Fig. 3.5 Graph of dependence of Tensile strength σ_t on temperature.

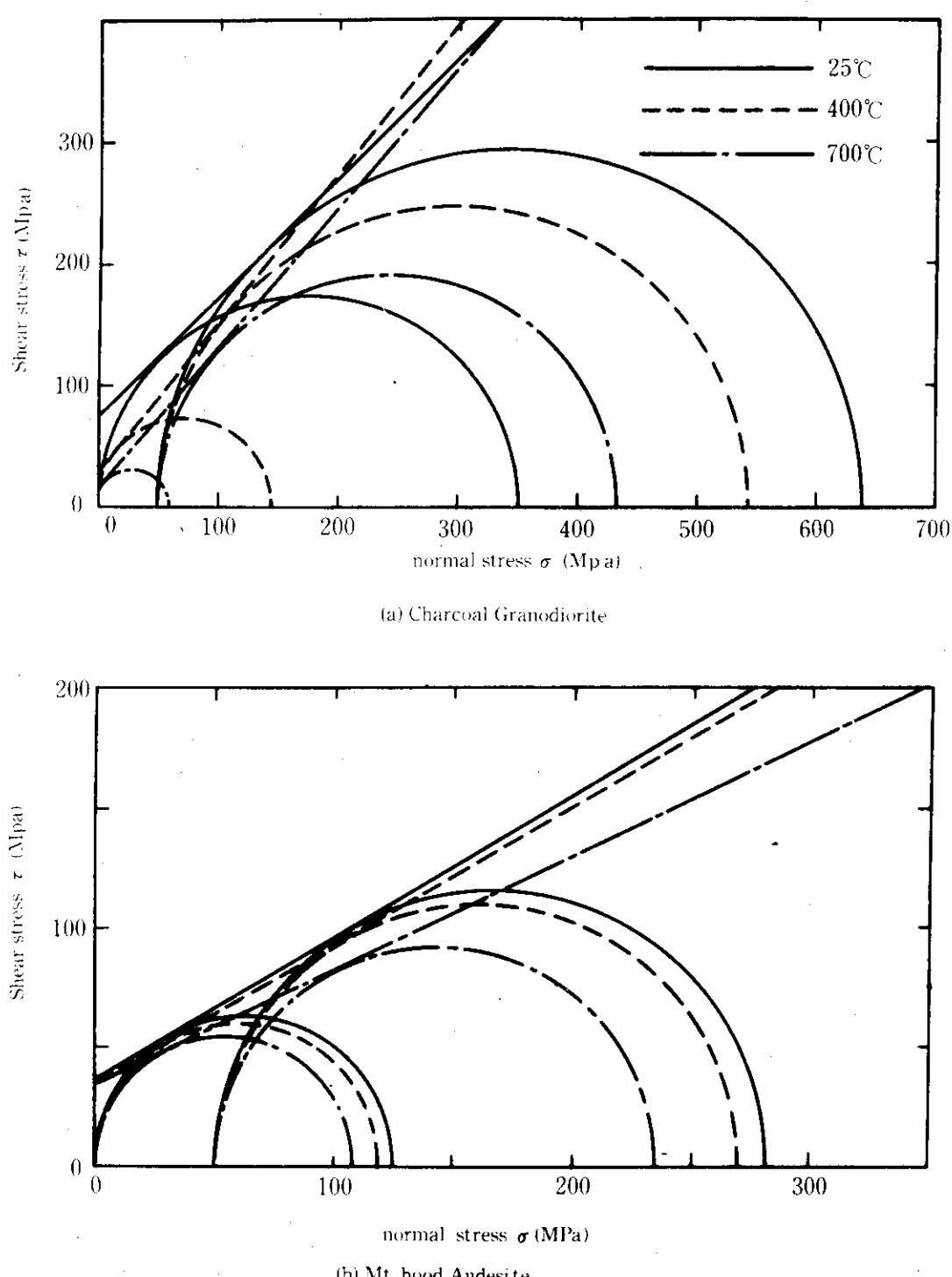
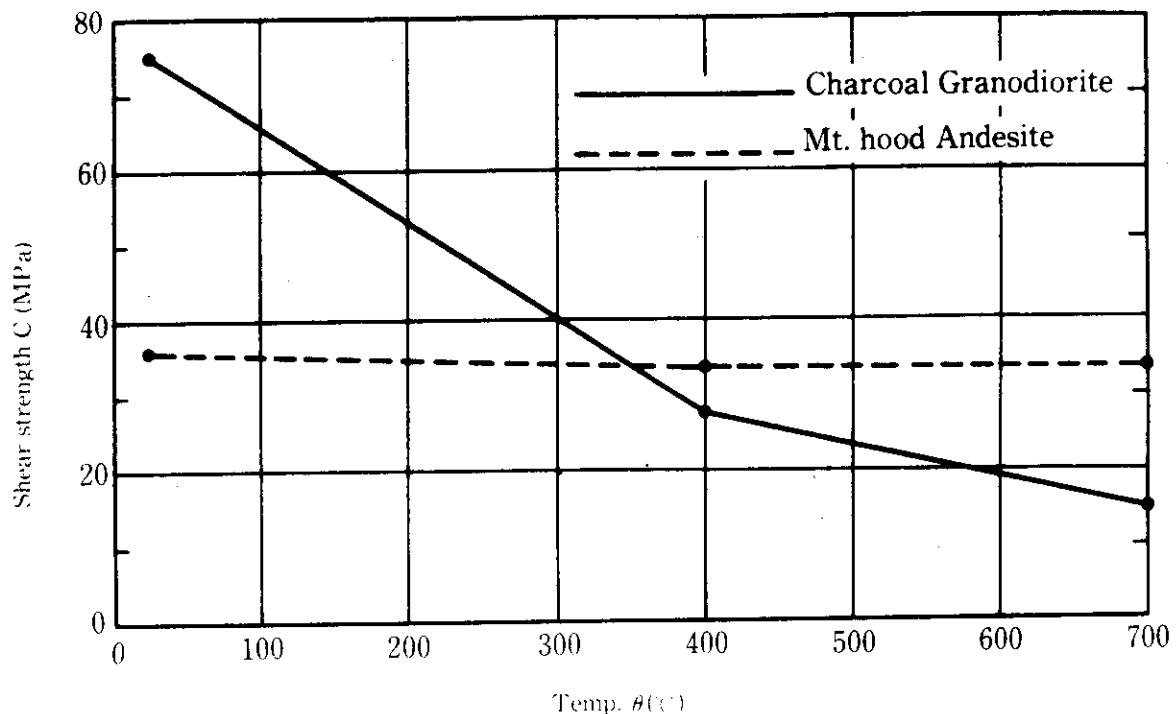
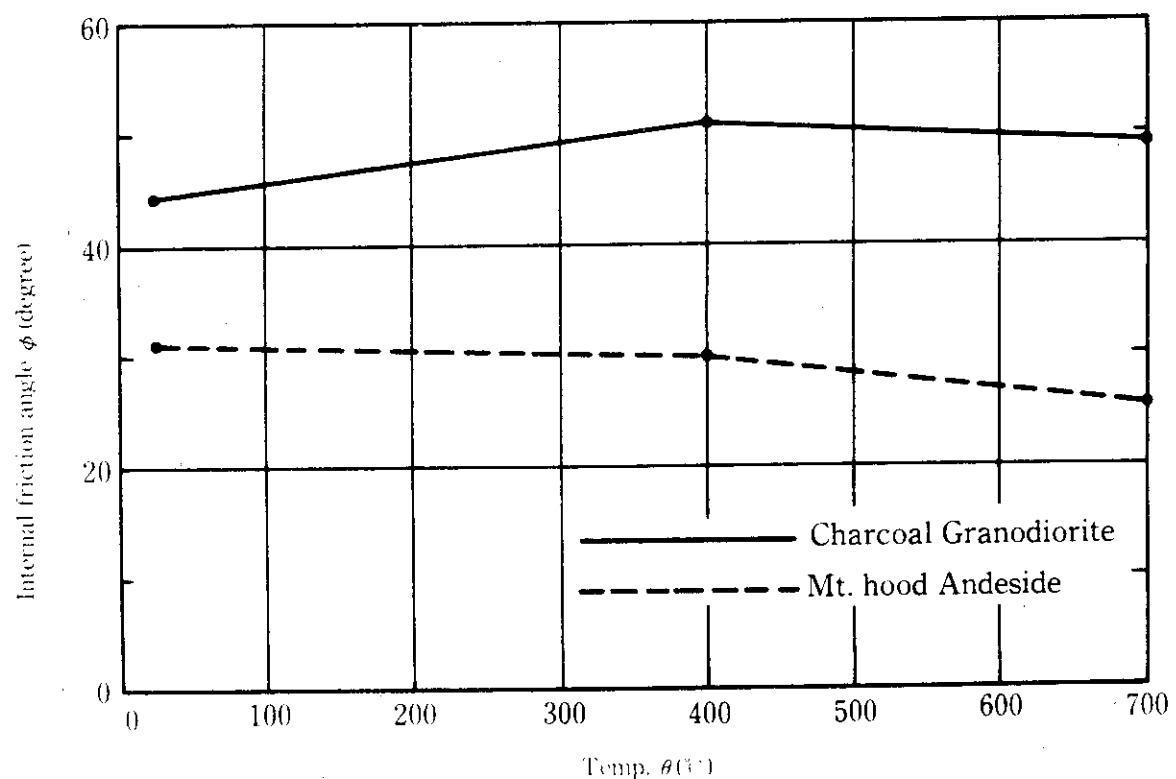


Fig. 3.6 Mohr envelopes at various temperatures.

Fig. 3.7 Graph of dependence of Shear strength C on temperature.Fig. 3.8 Graph of dependence of Internal friction angle ϕ on temperature.

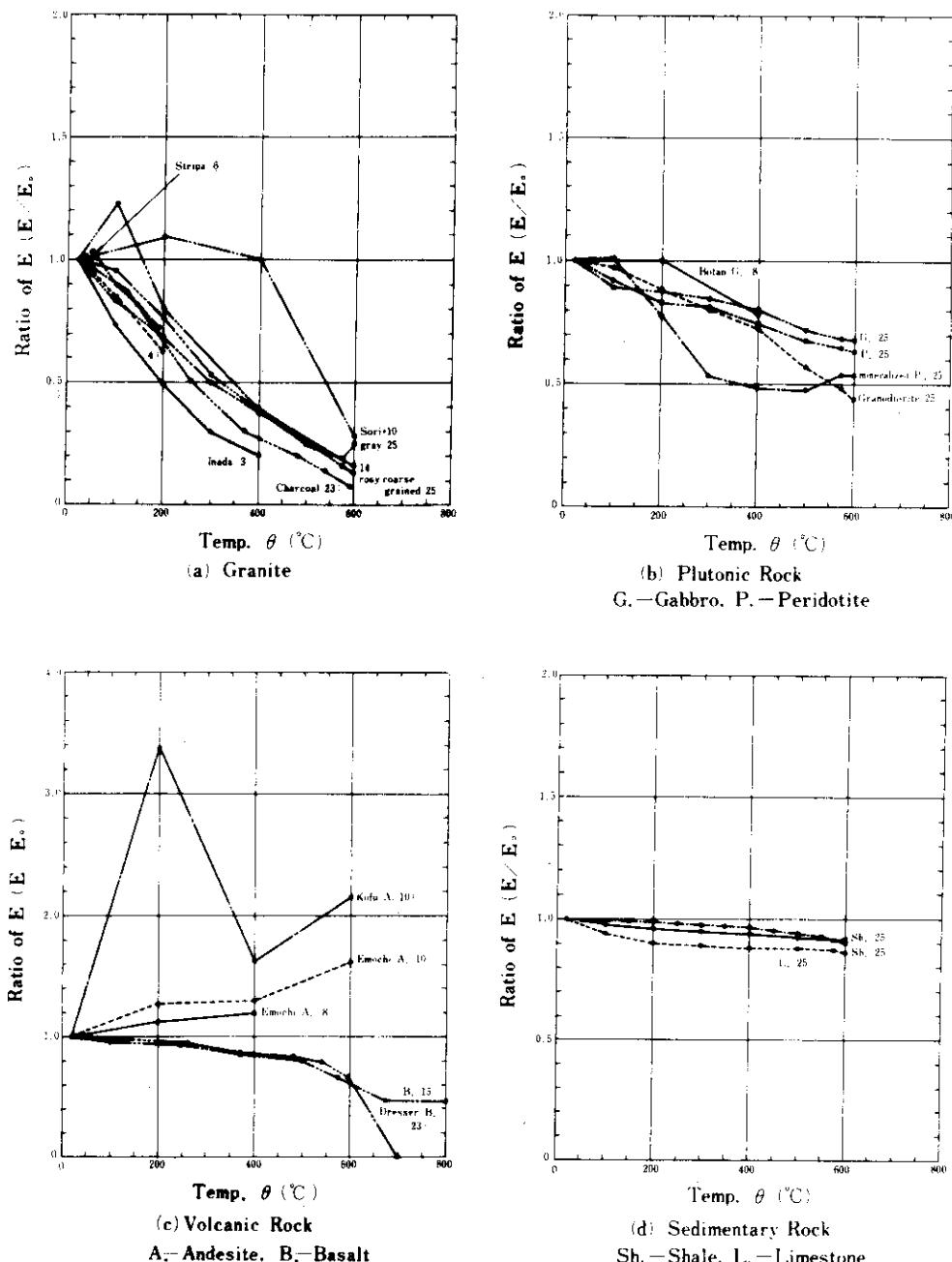
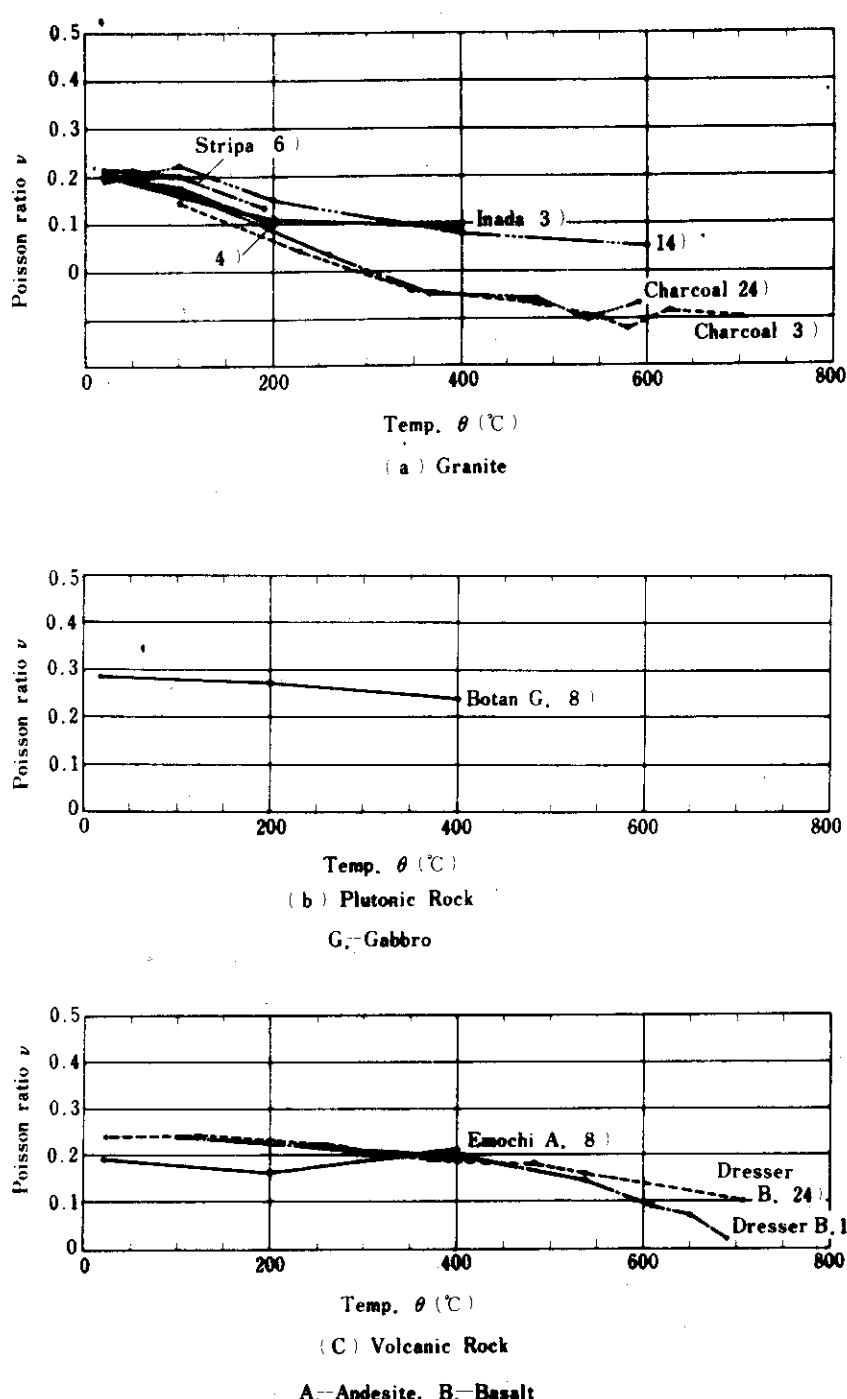
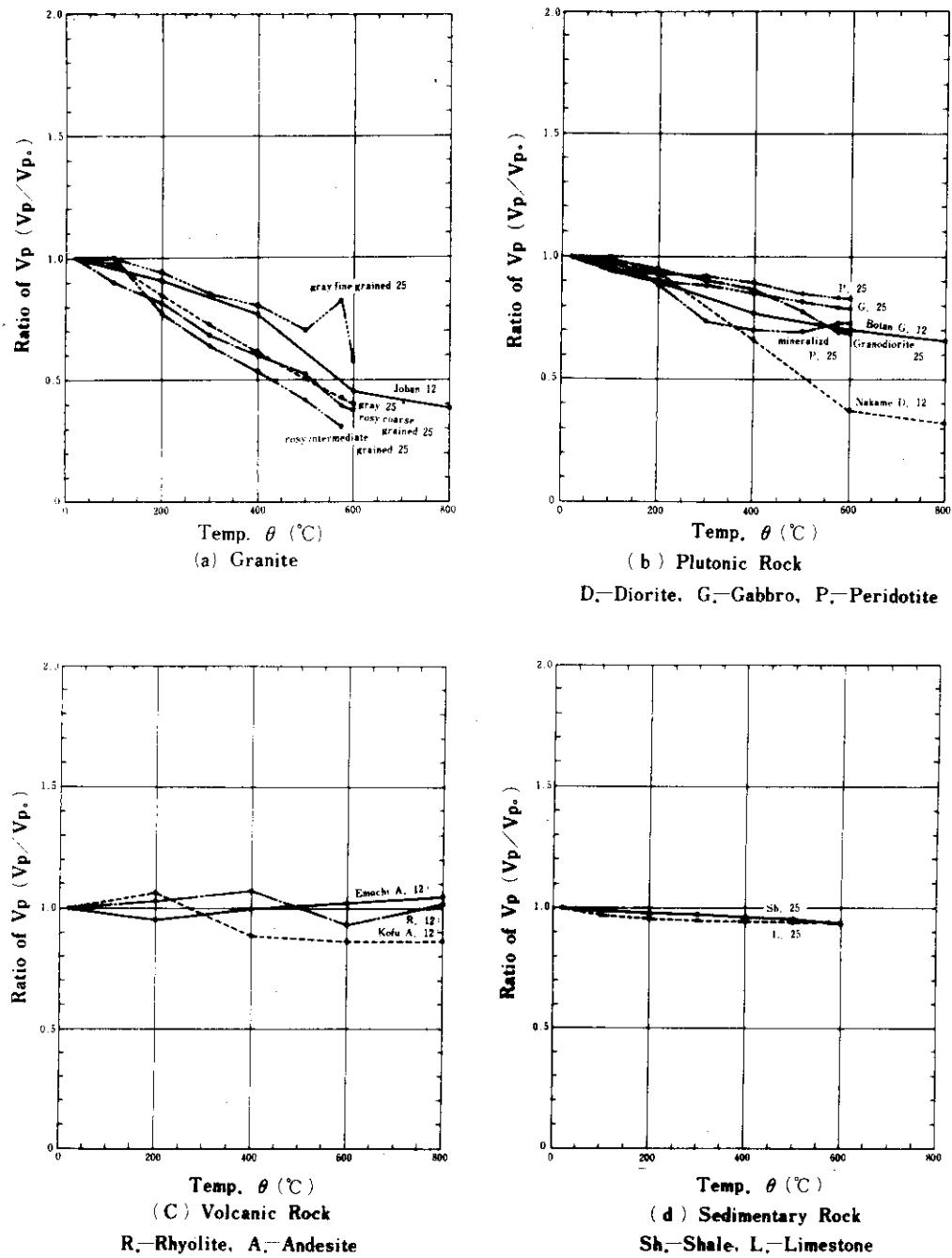


Fig. 3.9 Graph of dependence of Young's modulus E on temperature.

Fig. 3.10 Graph of dependence of Poisson ratio ν on temperature.

Fig. 3.11 Graph of dependence of P-wave velocity V_p on temperature.

4. 処分孔および処分トンネル周辺の温度分布の試算

4.1 廃棄物処分場の設計概念

高レベル廃棄物はガラス固化体として処分されるが、核分裂生成物の崩壊により発熱する。燃焼強度 35 MW / MT (MT ; メトリックトン) で燃焼度 33 GWD / MT (WD ; ワットデイ) の使用済み燃料を燃焼停止後 180 日に再処理し、以下の諸元で固化体としたときの固化体 1 本当りの発熱量について日本原子力研究所のコード D-CHAIN で計算した。その結果を Fig. 4.1 に示した。

- 直径 ; 0.43 m
- 長さ ; 1.33 m
- 核分裂生成物の重量分率 ; 13.8 %

固化体は時間とともにその発熱量が減少する。今回の計算では再処理後 30 年に地層処分することとし、その後 100 年間の温度分布を求めたが、固化体を Fig. 4.1 に示す時間依存性を持つ発熱源として取扱った。再処理後 30 年で発熱量は固化体 1 本当り 1.34 KW である。

上記固化体の物性値は以下とした。

- 熱伝導率 ; 1.0 W / m°C
- 比熱 ; 920 J / kg °C
- 密度 ; 2700 kg / m³

高レベル廃棄物処分場のレイアウトについては、スウェーデン核燃料安全性プロジェクト (KBS) のレポート²⁸⁾ にある貯蔵トンネル、貯蔵孔を参考として Fig. 4.2 の形状、配置とした。処分場の深さは 1000 m とし、トンネルは幅 3.5 m、高さ 3.5 m 断面積約 11 m² の馬で形断面を持つとした。KBS レポートでは貯蔵孔間隔は 4 m であるが、今回の計算では処分孔間隔を 6 m とした。このときの平均発熱密度を計算すると、トンネル内の各処分孔には固化体 1 本ずつが処分されるとし、トンネル間隔を 25 m と仮定しているので、固化体 1 本の発熱が寄与する平面の面積は $6 \text{m} \times 25 \text{m} = 150 \text{m}^2$ となり、その面積で発熱量 1.34 KW を除した平均発熱密度は処分時で $8.93 \text{W} / \text{m}^2$ となる。

処分場周辺の岩盤の物性値は以下の値とした。

- 熱伝導率 ; 3.50 W / m°C, 1.75 W / m°C の 2 ケース
- 比熱 ; 800 J / kg °C
- 密度 ; 2600 kg / m³

3.50, 1.75 W / m°C の値は、岩石の熱伝導率としてそれぞれ上限、下限に近い値である。

地下深部の地温は深度が増すにつれ、上昇することが知られている。地温 t_x と深度 x の関係は次式で表わされる²⁹⁾。

$$t_x = t_0 + K \cdot x \quad (5)$$

ここで t_0 ; 不易層の地温

K ; 地下増温率

(5)式で不易層とは地温の年較差が 0.1 °C 以下となるところをさし、その温度は年平均気温とほぼ等しいとされている。日本本州では高地を除いて年平均気温は 10 ~ 17 °C で、関東以西では 15°C 前後の地方が多い³⁰⁾。地下増温率は 0.03 ~ 0.05 °C / m 程度である²⁹⁾。今回の計算では不易層の地温を 15°C、地下増温率を 0.03°C / m そして処分場の深度を 1000m として、(5)式により $t_x = 45$ °C を求め、岩盤初期温度とした。

以上の処分場の一般的概念に基づき、計算目的に応じさらに近似モデル、パラメータを設定して計算を行った。

4.2 計算コードと計算ケース

非定常熱伝導温度場の温度分布を汎用構造解析コード NASTRAN で求めた。

NASTRAN は有限要素法によるコードで、温度解析では次の一般式を処理する³¹⁾。

$$[K] \{ u \} + [B] \{ \dot{u} \} = \{ P \} + \{ N \} \quad (6)$$

ここで $\{ u \}$; 節点温度ベクトル

$\{ P \}$; 热流量ベクトル

$\{ N \}$; 非線形熱量ベクトル

$[K]$; 热伝導係数マトリックス

$[B]$; 热容量係数マトリックス

処分トンネル、周辺全体の温度分布、及び応力計算のため、処分トンネル、固化体を含む横断面を 2 次元平面座標系の温度場とするケースと、固化体近傍の温度分布計算のための固化体の中心を対称軸とし、半径方向への熱流のみを考慮する円柱座標系の 1 次元軸対称温度場とするケースで行った。

(A) 2 次元平面温度場；発熱源は 1 本の固化体の発熱量が 0.40 m × 1.30 m の矩形断面を持ち、長さ 6 m の直方体に均一に分散しているとして取扱った。Fig. 4.3 に計算領域を示したが境界 A B, C D は 45°C の温度拘束境界とし、境界 B C, D A は隣の処分トンネル、固化体から同一の熱流が来るという対称条件より断熱境界とした。Fig. 4.3 で影をつけた発熱源を示す要素は、岩盤と同一の熱的物性値とし、Fig. 4.1 に示す発熱量を 10 年毎の関数表として与え線形補間した。

2 次元平面温度場で行った計算は 3 ケースで、計算ケース毎の条件を以下に示す。

- Case - 1 ; 処分後埋戻した後の状態を想定して熱伝導率 3.50 W/m°C で、Fig. 4.3 で境界 E F G に包まれる処分トンネルを表わす領域には、岩盤と同一の熱的物性値を持つ材料が埋め戻されていると想定した。
- Case - 2 ; 処分後の監視状態を想定し換気がなされるものとして、熱伝導率 3.50 W/m°C で、境界 E F G は熱伝達境界とし、一般的のトンネル設計に使われている熱伝達率 5.81 W/m² °C を採用し処分トンネル内の流体温度は 25 °C とした。
- Case - 3 ; 热伝導性の悪い岩盤を想定して、熱伝導率 1.75 W/m°C で、その他は Case - 1 と同様とした。

(B) 1次元軸対称場

固化体およびその近傍の岩盤温度を求めるため、無限岩盤中に無限の長さを持つ円柱状の発熱源を想定し、半径方向の熱流のみを考慮する軸対称1次元温度場での熱伝導計算を行った。発熱源は半径0.2mとし、長さ1m当たりの発熱量は処分時で1.03Wとした。その他の固化体の熱的物性値は前節に示した値を用いた。

岩盤の熱伝導率を変化させ以下の2ケースの計算を行った。

- Case - 4 ; 热伝導率 3.50 W/m°C
- Case - 5 ; 热伝導率 1.75 W/m°C

4.3 計算結果

(A) 2次元平面温度場

Fig. 4.4は固化体中心高さの水平方向の温度分布である。ただしこの計算では板状発熱体が埋設されたと仮定されているので、固化体埋設位置の温度はあくまで仮定計算結果の参考値である。Case - 1とCase - 2を比較すると、トンネルが埋め戻されているかいないか、換言すれば換気されているかいないかが、岩盤温度に大きな影響を与えていていることがわかる。Case - 2は換気されていることを想定した計算ケースであるが、1年間以後を考える限り時間と共に温度が下る。すなわち早い時間で平衡に達し放射能の減衰と共に冷却する。Case - 1で10mの距離の場所でみると、処分後約40年で最高になり約80°Cに達する。その後全体的に温度が下がる。Case - 1とCase - 3では岩盤の熱伝導率を変化させたが、熱伝導の低いCase - 3では10mの距離で約90°Cとなる。

処分トンネル中心の垂直方向の温度分布をFig. 4.5に示した。Case - 2で換気されているトンネルから冷却されていく状況がわかる。トンネル内が埋め戻されたと想定しているCase - 1とCase - 3ではトンネルの下端と上端で処分から5年後にそれぞれ6°C, 11°Cの温度差が生じ、その後温度勾配はゆるやかになっていく。Case - 3では垂直方向の最大温度勾配が処分後1年で生じ、 28 °C/m である。

Fig. 4.6には処分トンネル中心線上の廃棄物上方の各点の時間に対する温度変化を示した。各点の位置はFig. 4.3に示した。Case - 1, 3で固化体から遠い点ほど温度のピークが表われる時間が遅れていき、約57m離れた点350では処分後100年経過した時点でも温度上昇が続いている。

Fig. 4.7, 4.8, 4.9は各計算ケースの処分後5, 10, 20, 40, 60, 100年の時点の等温線図である。Case - 2で岩盤が固化体から加熱されると同時に処分トンネルから放熱し冷却されていく状況がわかる。Case - 1, 3では処分後しばらく固化体から拡がって行く等温線が、その後固化体の発熱量の減少の影響により固化体側に狭まってくる。

(C) 1次元軸対称場

Fig. 4.10は軸対称1次元温度場の半径方向の温度分布を示したものである。距離軸について対数表示をとっている。固化体近傍の温度勾配は、距離を対数で表示するとはほぼ直線となり、処分後5年間、勾配はほぼ一定で温度上昇を続けるが、10年後にはその勾配はゆるやかになる。

時間に対する温度変化は Fig. 4.11 に示した。固化体中心の温度を示す図中 0 m の点は Case - 4 で 4 年後に 309 °C, Case - 5 で 5 年後に 469 °C のピークに達し、その後ゆっくりと低下する。

4.4 考 察

熱伝導計算を 5 ケース行なった結果を要約して述べると以下である。

- 処分トンネル内の換気の影響は大きく、処分トンネルが固化体処分後いつの時点でも埋め戻され閉鎖されるかで岩盤の温度分布は大きく変化する。
- 岩盤の熱伝導率は固化体の温度に大きな影響を与える。しかし固化体からの距離が大きくなるに従い、そのピーク温度に与える影響は小さくなる。
- 固化体の中心温度は、今回の計算に用いた条件下で岩盤の熱伝導率を小さく仮定したケースで約 470 °C である。
- 固化体のごく近傍温度は熱伝導率が小さいと処分後数年間で 400 °C 近くまで上昇する。熱伝導率が大きい場合でも 200 °C 前後まで上昇する。
- 固化体中心から約 4 m 離れた処分トンネルの底面のレベルでは温度上昇は大きくても約 50 °C である。
- 3 章で述べたように岩盤の熱的性質は温度依存性を持っている。熱伝導率は 50 °C の温度上昇でその変化が、岩種によっては約 10% ある。将来の設計にあたっては温度上昇を加味した物性値を用いるような配慮が必要であろう。
- 固化体の温度およびごく近傍の岩盤温度は固化体自身の安定性、また固化体の処分孔からの再取り出しが必要となったときの作業性に大きな影響を与える。その部分のより詳細な解析を行うには、400 °C 程度までの岩盤物性値を求めておく必要がある。

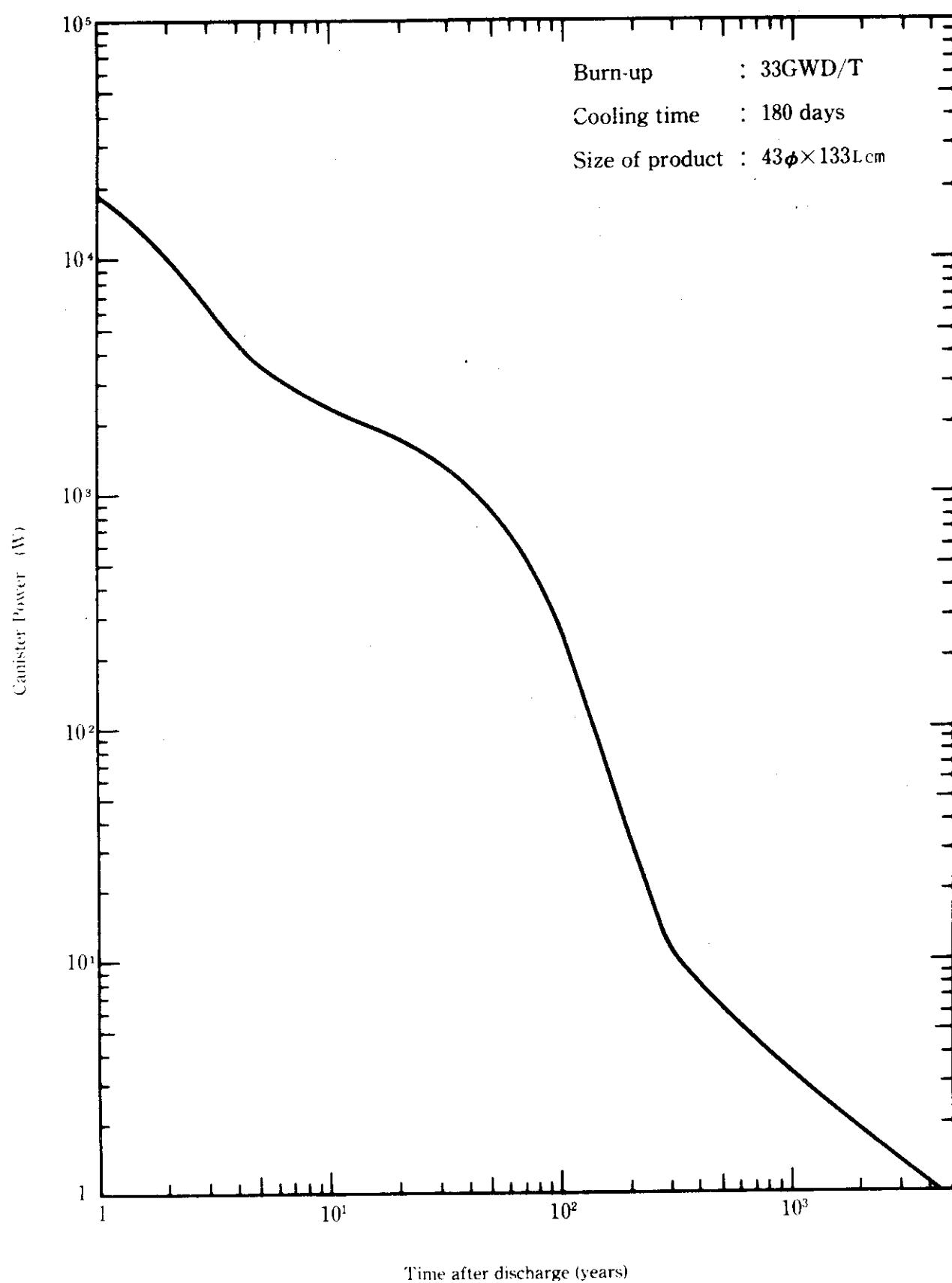


Fig.4.1 The heat generation rate of a waste canister.

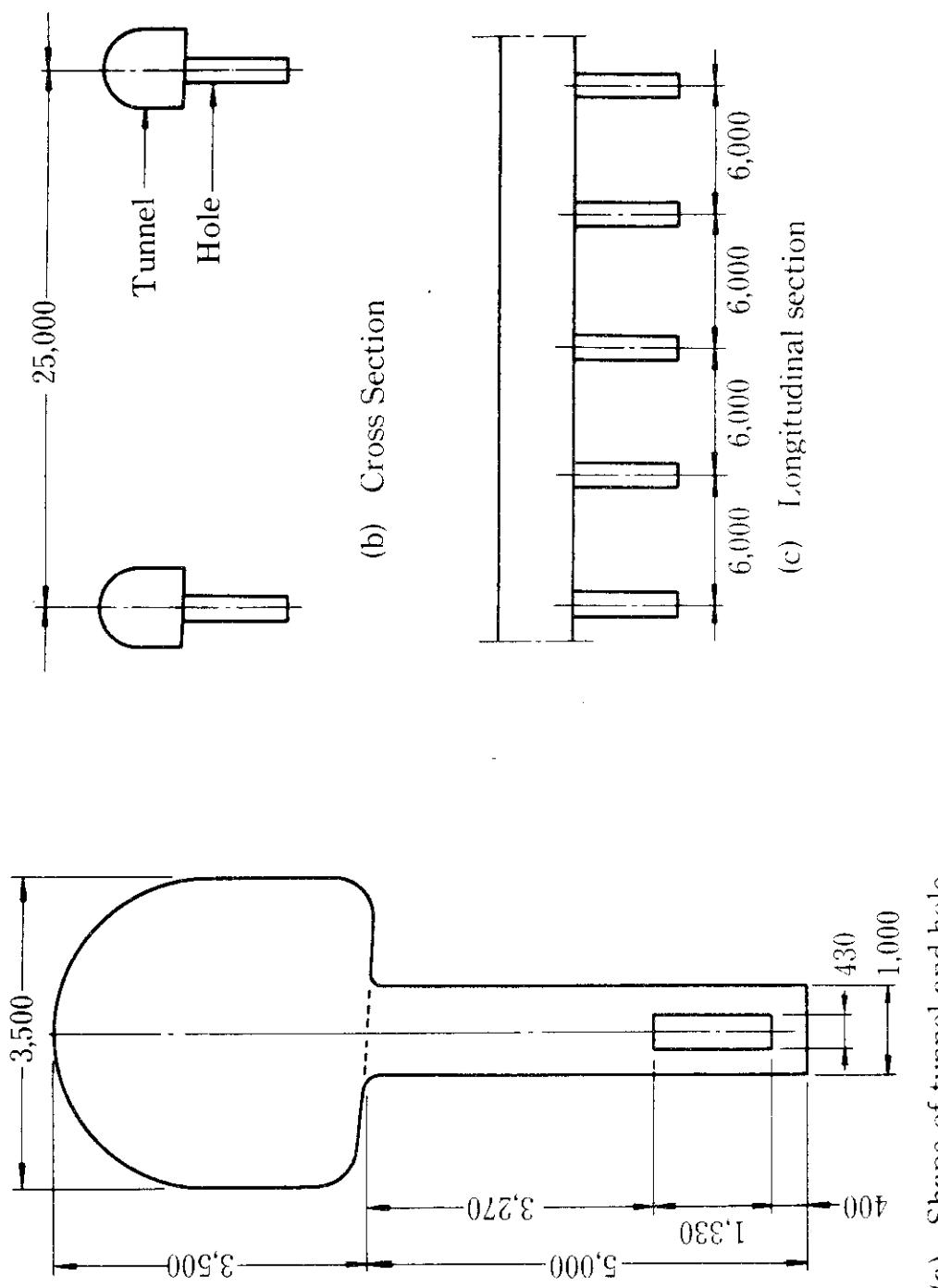


Fig.4.2 Layout of tunnel and hole in repository.

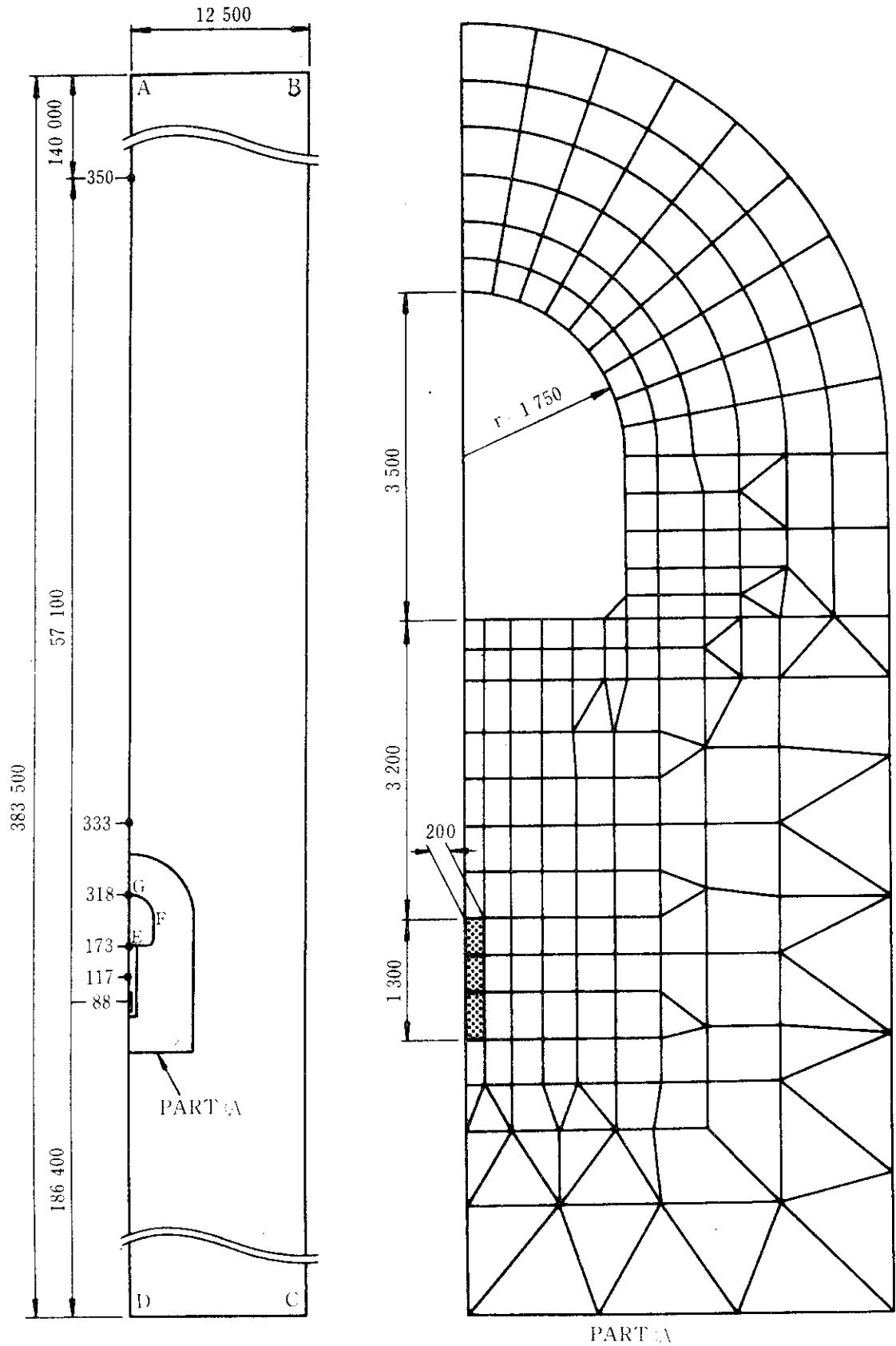


Fig.4.3 Area of calculation of heat conduction.

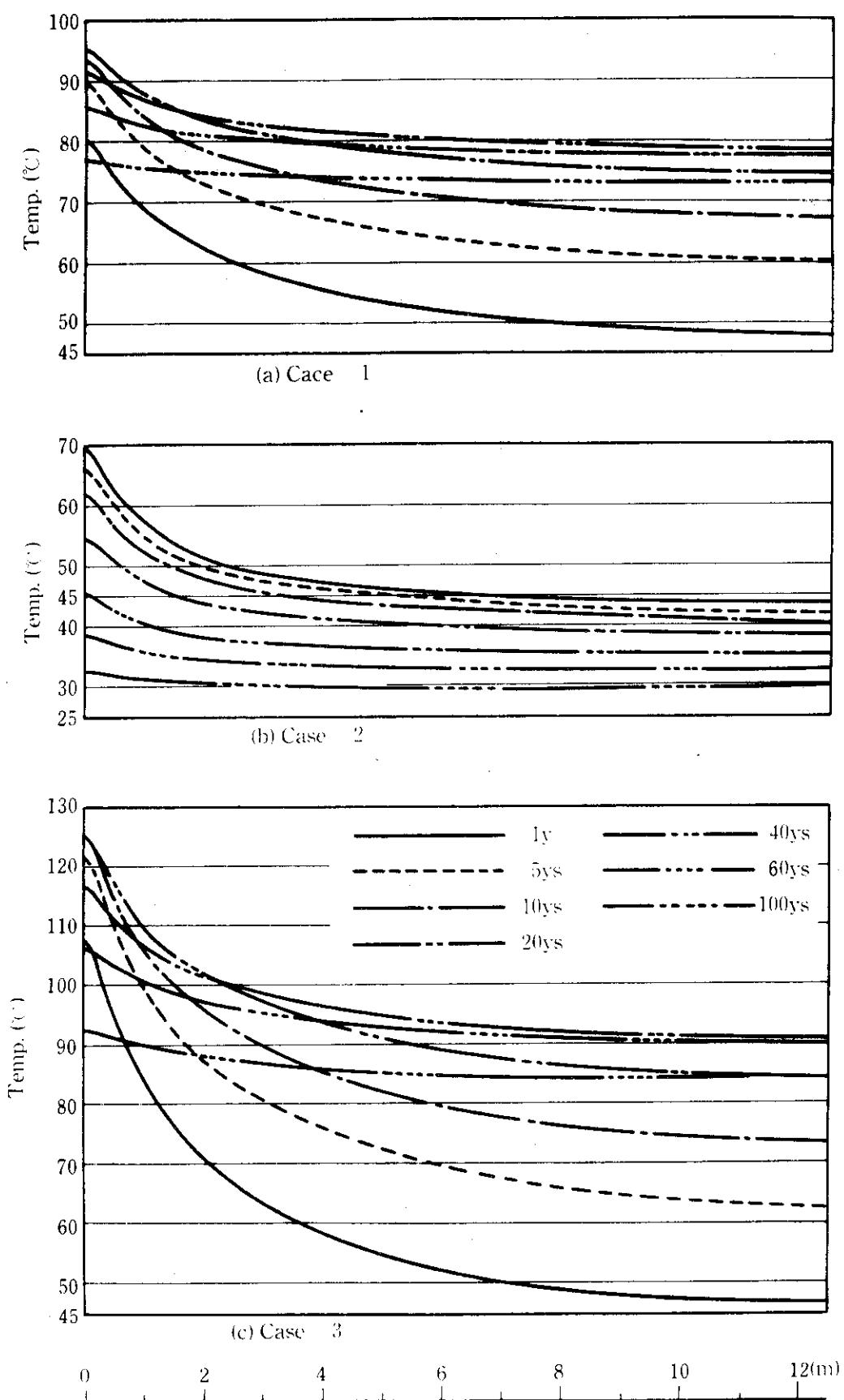


Fig.4.4 Horizontal profile of temperature along mid-plane of the waste at various times after deposition.

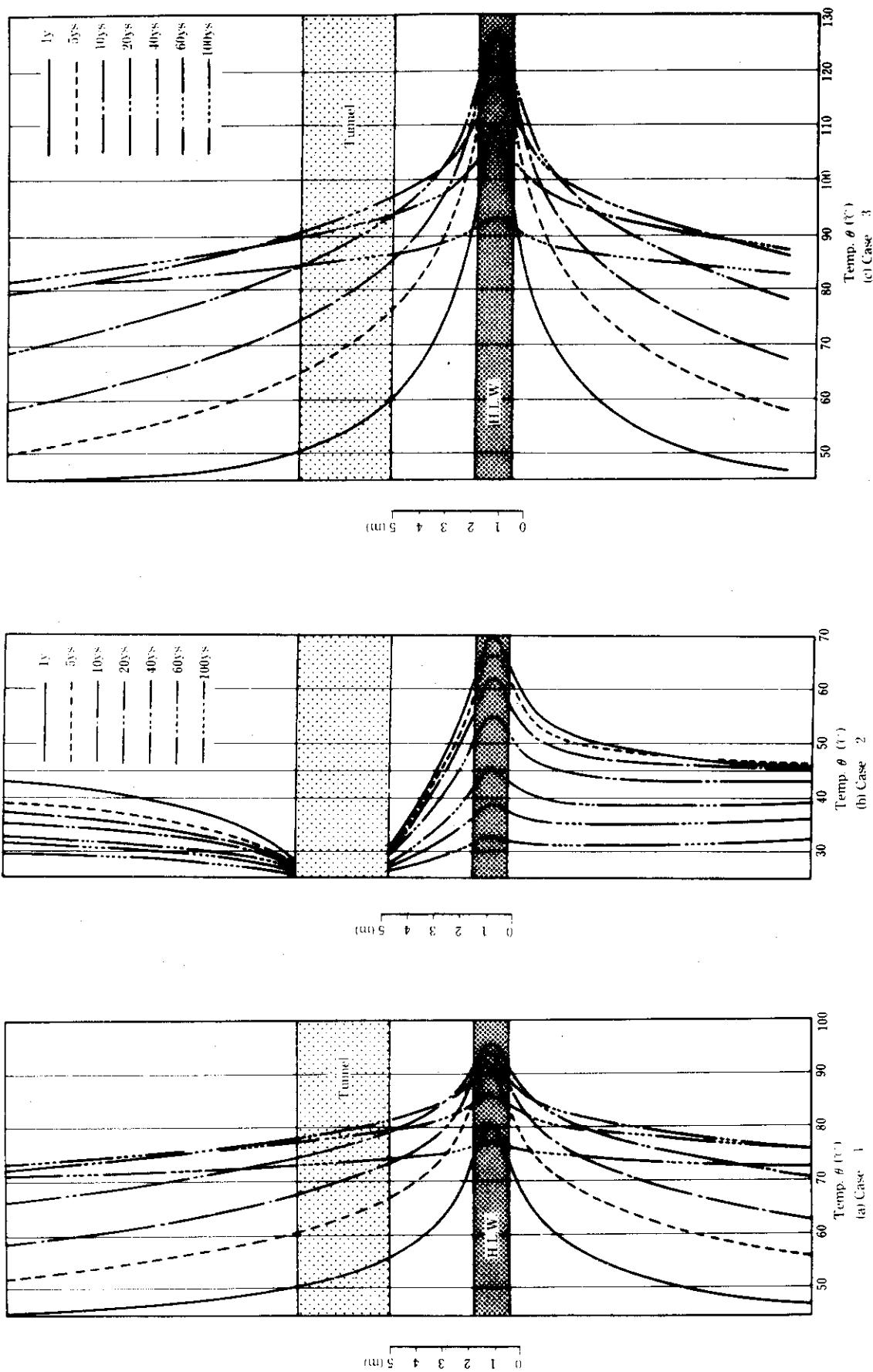


Fig.4.5 Vertical profile of temperature along the centerline of the tunnel at various times after deposition.
 (a) Case 1
 (b) Case 2
 (c) Case 3

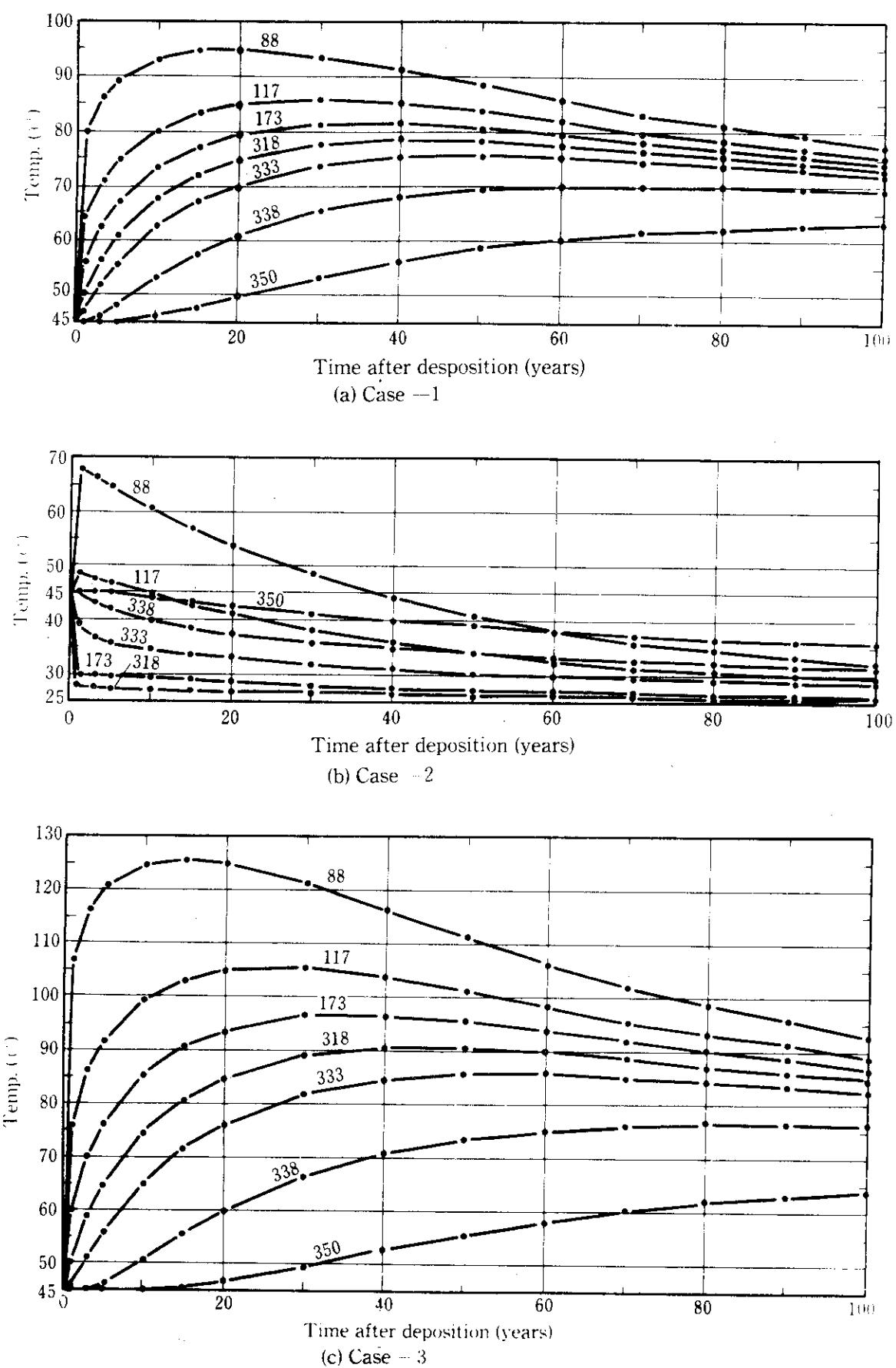


Fig.4.6 Temperature as a function of time at several points on the centerline of the tunnel.

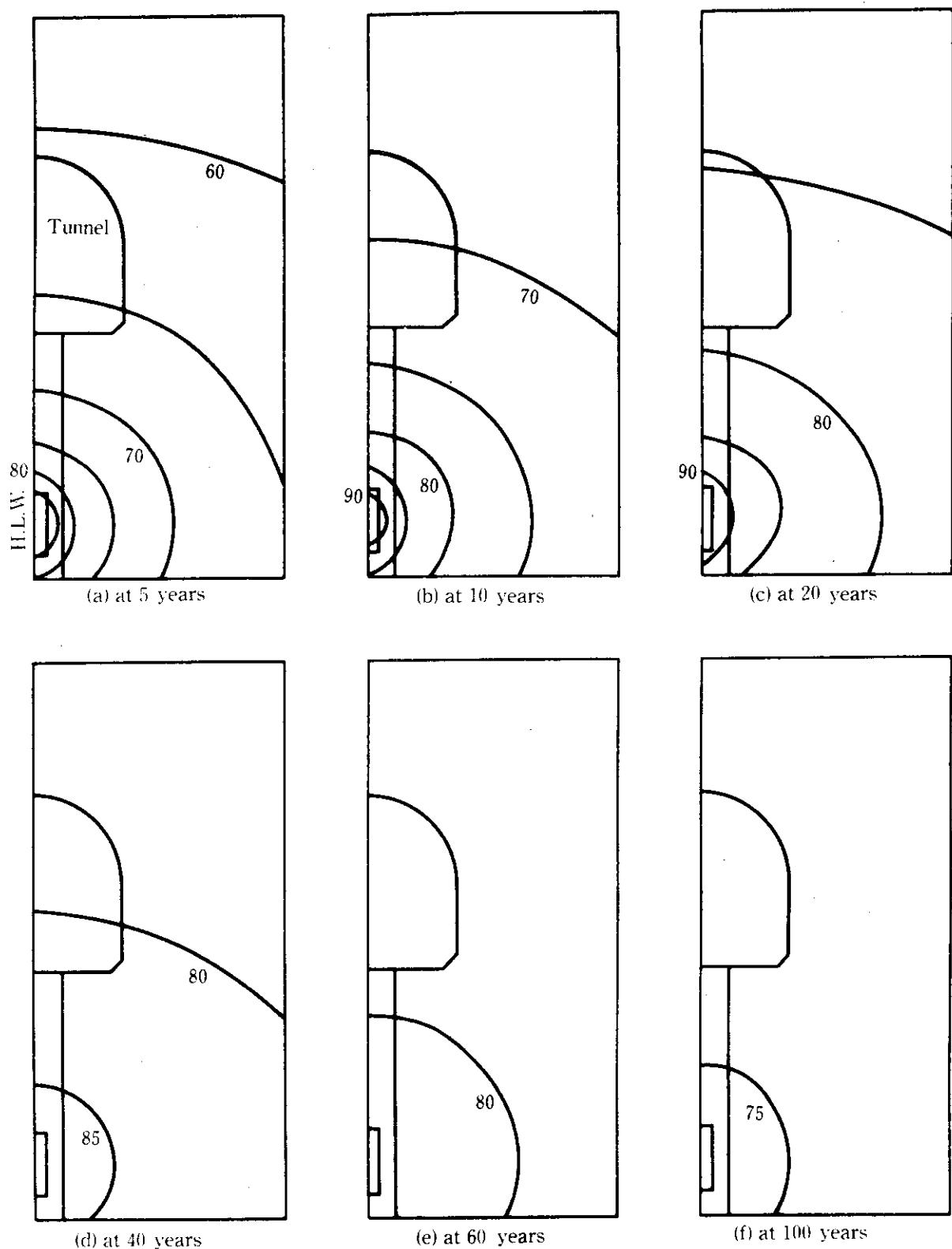


Fig.4.7 Isotherms of temperature (°C) at various times after desposition. (Case 1)

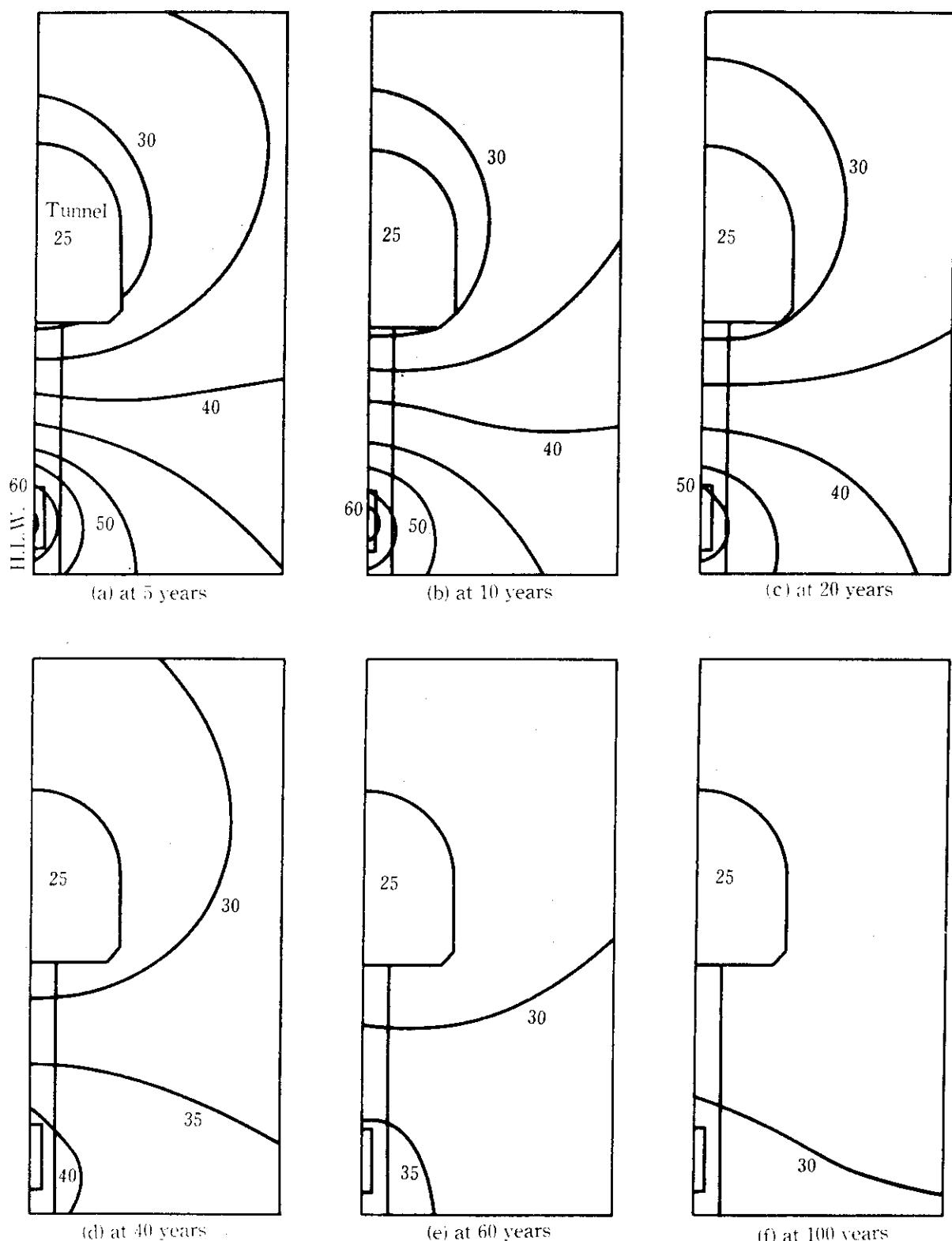


Fig.4.8 Isotherms of temperature (°C) at various times after deposition. (Case 2)

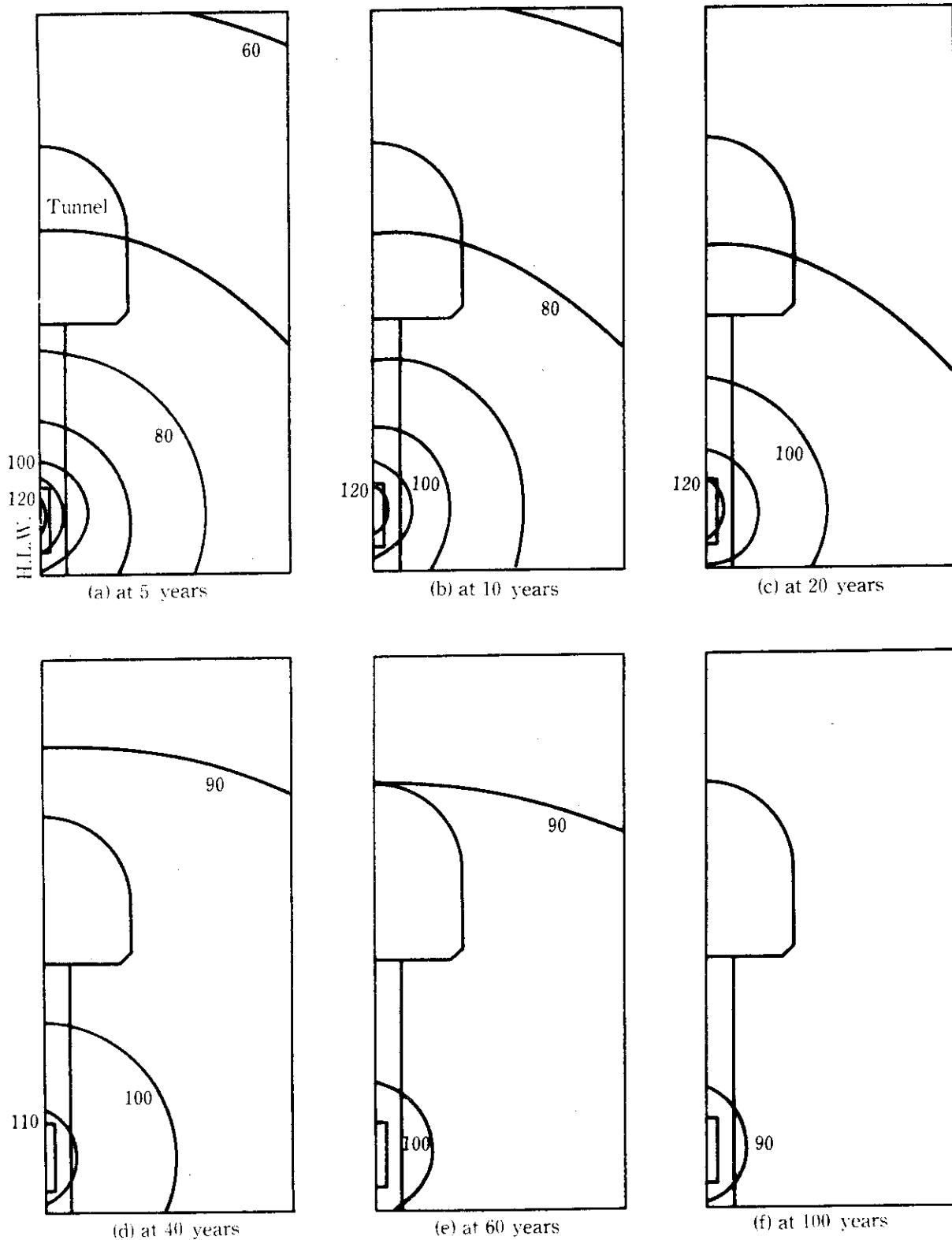


Fig.4.9 Isotherms of temperature (°C) at various times after deposition. (Case 3)

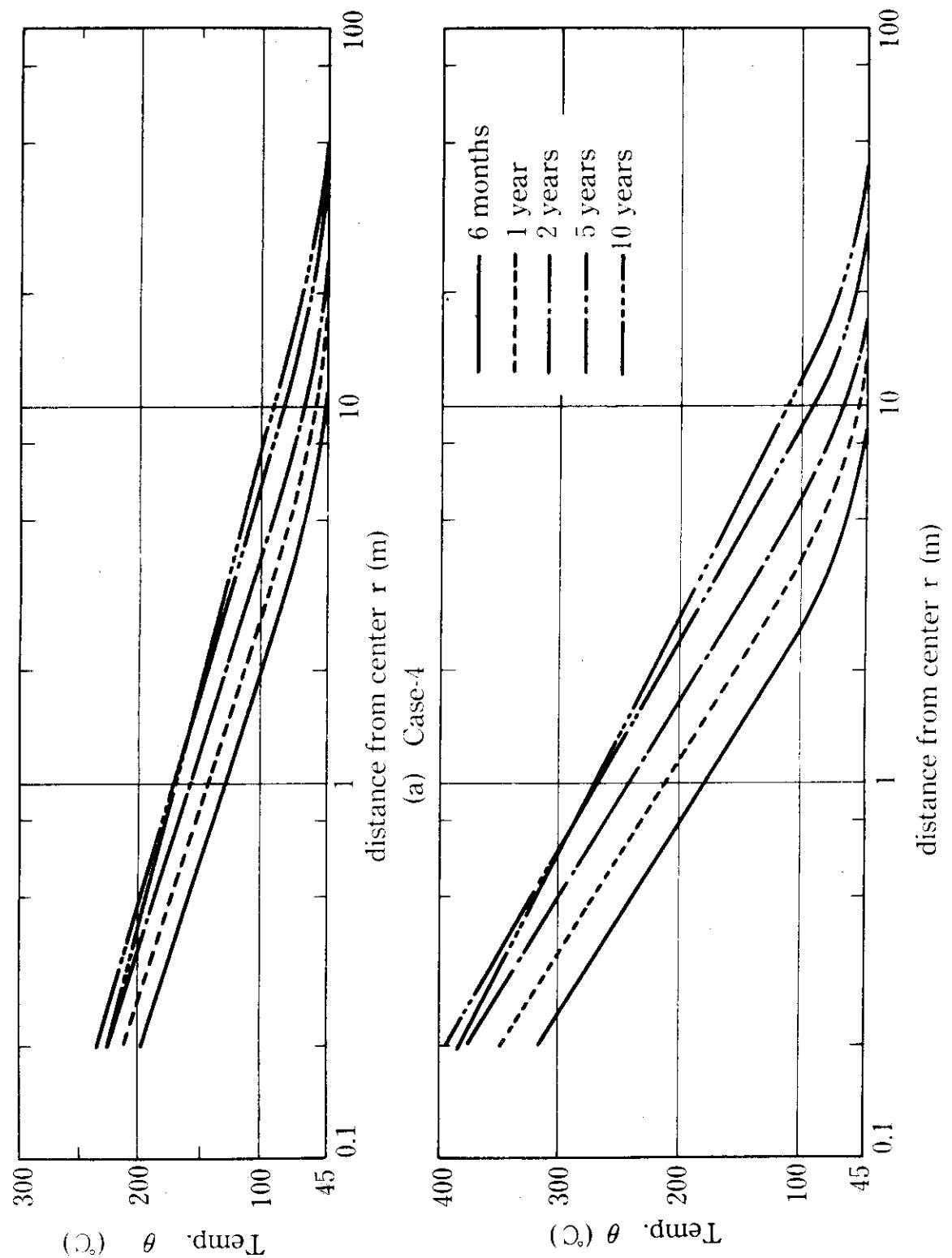


Fig.4.10 Radial profile of temperature at various times after deposition.

(b) Case 5

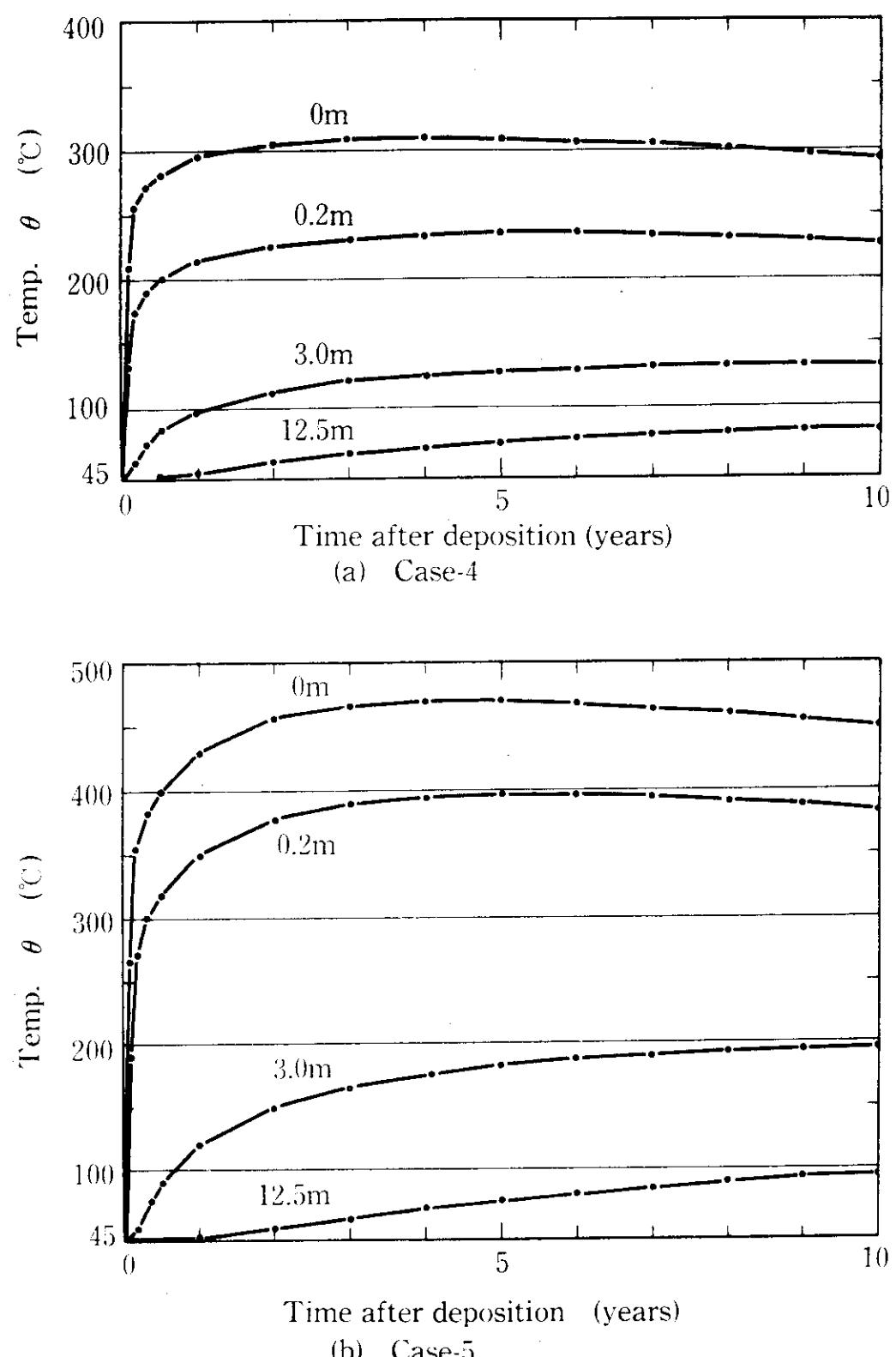


Fig.4.11 Temperature as a function of time at several points.

5. 処分トンネル周辺の岩盤内応力の試算

5.1 計算に用いた岩盤特性

3章で岩石コアによる力学的性質について述べた。室温下での力学的物性値については、Table 3.4 から Table 3.8 に示したが、岩石コアによる試験結果は強さ、硬さとも岩盤のそれに較べて大きいとされている。³²⁾ これは岩盤が各種のきれつや欠陥を有し不均質であるのに対して、室内の試験に用いられる岩石コアはきれつなどの少ない均質で良効な部分が使用されるためである。岩盤の強度、変形特性を直接求める方法として岩盤試験があるが、設備が大掛かりであり実施されないことが多い。そこで岩盤の強度、変形特性を推定する方法として岩盤を種々の指標により分類し、分類された岩盤区分にある幅を持った物性値をあてはめ利用することが行われている。指標としては成因、生成年代などの岩質、産出状態の観察などの他にきれつの存在量をあらわす R Q D 値、岩盤の弾性波速度値など数量化された岩盤の状態が用いられている。対象となる構造物などにより種々の岩盤分類が提案利用されているが、Table 5.1 に、わが国でダムなどの設計によく用いられている分類と強度定数の関係を示した。³³⁾

今回の応力計算では Table 5.1 の分類 B の岩盤を想定し、以下の物性値とした。

- 内部まさつ角 ; $\phi = 45^\circ$
- せん断強度 ; $C = 1.96 \text{ MPa}$
- 静弾性係数 ; $E = 14.7 \text{ GPa}$
- ポアソン比 ; $\nu = 0.22$
- 線膨張率 ; $\alpha = 7.1 + 0.0645 \theta (\text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 10^{-6})$
 θ は温度

3章でも述べたように岩盤の力学的特性、熱特性は温度により変化するが、ここでは変形、強度特性は一定とし、線膨張率に関してのみ温度依存性を考慮した。

破壊条件について岩石と岩盤の破壊条件が明確に区別しうる段階まで研究が進展していないのが現状である。岩石の破壊条件については、破壊理論に基き種々の取扱いが提唱されているが、今回は便宜的に破壊包絡線を直線で近似した Fig. 5.1 の Mohr - Coulomb の理論に従うものとした。破壊包絡線は次式で表現される。

$$\tau = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad (7)$$

ここで τ ; せん断応力
 σ ; 垂直応力

5.2 計算コード

2次元平面ひずみ状態の材料非線形問題として取扱い有限要素法により定式化し、処分場周辺の応力を解析した。一般に岩盤材料の変形特性は応力（あるいはひずみ）に依存し、応力 -

ひずみ関係は Fig. 5.2 の実線で示したごとく曲線となる。軟岩などの比較的延性の強い材料では、外力により永久ひずみを生じその応力-ひずみ関係は連続的にその勾配が変化する。それに対して処分場の建設が想定されている地下深部の新鮮で硬い岩盤はせい性材料に近いと考えられる。せい性材料は外力により永久ひずみをあまり生じないうちに破壊する。即ちその応力-ひずみ関係は破壊に至るまではほぼ直線である。

今回使用したコードでは、岩盤の応力とひずみの関係をせい性材料に近いとして Fig. 5.2 の破線で示す Bilinear モデルとして取扱い、破壊した要素が(7)式を満たすように応力を再配分する Stress - Transfer Method を使用した。この方法では破壊した各要素について、破壊限界を越えた応力 $\{\Delta\sigma_f\}^e$ を(8)式より等価節点力 $\{F\}_{\Delta\sigma_f}^e$ に換算し、剛性マトリックスを変化させることなく構造全体に関して解いて周辺要素に再配分する。

$$\{F\}_{\Delta\sigma_f}^e = - \int [B]^T \{\Delta\sigma_f\}^e d(vol) \quad (8)$$

ここで $[B]$ はひずみ-未定係数マトリックス、Tは転置を示す。

この過程を、各要素の応力が破壊包絡線内に納まるまで繰返す。

温度変化による岩盤応力の検討は、解析期間を適当なステップに分割してステップ毎の各要素の熱ひずみ $\{\Delta\xi_0\}^e$ を(9)式により等価節点力 $\{F\}_{\Delta\xi_0}^e$ に換算し、構造全体に関して解いた。

$$\{F\}_{\Delta\xi_0}^e = \int [B]^T [D] \{\Delta\xi_0\}^e d(vol) \quad (9)$$

ここで $[D]$ は応力-ひずみマトリックス

線膨張率は各ステップの各要素毎に平均温度を求め、その温度での値を使用した。

各ステップでの応力は、前ステップの応力にそのステップの温度応力を順次加算することにより求め、破壊した要素があるときは上記の方法で応力の再配分を行った。

5.3 計算ケース

(A) 掘削地圧

岩盤には掘削以前に初期地圧が作用している。岩盤内に空洞を掘削するとじょう乱を受けた岩盤の応力状態が変化し、掘削地圧が発生する。

岩盤の初期地圧は自重、地殻変動および地形の影響を受けており、その主応力の方向は任意である。しかし、問題の単純化のために主応力方向の内1つは垂直であるとし、残る2つの主応力方向は水平面内にあり直交しているとした。

垂直方向の主応力 σ_v は一般に深度 Z の関数として表わされる。

$$\sigma_v = a + b \cdot Z \quad (10)$$

ここで a, b は係数

Jamison³⁴⁾ らは実測または直上の自重より計算で求めた垂直応力と深度の関係に対して(10)式を適用し、高い相関性を持つことを示した。また、対象とする地点の近傍に存在し、初期地圧に影響を与えている断層構造別に(10)式を適用して正断層、衝上断層および走行移動断層それ

それについて係数を求めているが、断層の構造による大きな差異は見られないとしている。

Jamisonの報告値を平均して求めた係数は、 $a = 1.0 \text{ MPa}$, $b = 0.0245 \text{ MPa/m}$ である。この係数と処分場の深度 1000 mを(10)式に代入、 $\sigma_v = 25.5 \text{ MPa}$ が得られた。

水平方向の応力の平均 σ_h av. と垂直応力 σ_v との比 $K (= \sigma_h \text{ av.} / \sigma_v)$ は断層構造により大きな影響を受ける。Hoek³⁵⁾らは実測結果を整理して(11)式を経験式として求めた。

$$\frac{100}{Z} + 0.3 \leq K \leq \frac{1500}{Z} + 0.5 \quad (11)$$

いま深度 1000 mを代入すると、 $0.4 \leq K \leq 2.0$ が得られる。そこで垂直応力を一定とし、 $K = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の 4 ケースで計算した。

Fig. 4.3 で示した領域に初期地圧状態を与え、処分トンネルが掘削されたとして掘削地圧を求めた。境界条件は AB, CD 共に垂直及び水平方向の変位を拘束した。境界 BC, DA は隣の処分トンネルの影響を考慮し対称性があるとし、水平方向の変位を拘束した。

キャニスタ挿入孔については完全に埋め戻されるとし均一岩盤とみなした。

(B) 热応力

処分場周辺の岩盤は固化体の発熱により加熱され、熱応力を発生する。熱負荷としては、4 章で計算を行なった Case-1, 2, 3 の結果に基き、以下の 4 ケースとした。

- Case-1 ; 4 章 Case-1 による熱ひずみを与えた。時間に対する計算ステップは 0 ~ 5 年, 5 ~ 20 年, 20 ~ 40 年, 40 ~ 100 年の 4 ステップとした。
- Case-2 ; 4 章 Case-2 による熱ひずみを与えた。時間に対する計算ステップは 0 ~ 1 年, 1 ~ 5 年, 5 ~ 20 年, 20 ~ 100 年の 4 ステップとした。
- Case-3 ; 4 章 Case-3 による熱ひずみを与えた。ステップは Case-1 と同じ。
- Case-4 ; 4 章 Case-3 の 2 倍の発熱源による熱ひずみを与えた。ステップは、Case-1 と同じ。

処分前の地圧状態としては、前節の $\sigma_h / \sigma_v = 1.0$ の計算ケースの地圧状態をとった。解析領域、境界条件は前節の計算ケースと同様である。Case-1, 3, 4 ではトンネルは埋め戻されているとしたが、その剛性は考慮していない。

5.4 計算結果

(A) 掘削地圧

初期地圧の垂直応力と水平応力の比を変化させた 4 ケースについて掘削後の応力状態を Fig. 5.3 に示した。影を付けた部分が応力再配分の繰返しの結果、その応力が破壊包絡線に接した状態の領域である。数字付きで示した線は応力状態の破壊包絡線に対する接近度が同じ点を結んだ線である。

$\sigma_h / \sigma_v = 0.5$ のケースでは側面に破壊領域が発達し、その最大深さは 0.86 m であった。トンネル上部では破壊領域は発生していない。トンネル底面では側面に近いところで応力集中が

起り一部破壊している。全体としては水平方向に破壊領域が発達しているといえる。垂直、水平方向の応力比が 1.0 のケースでは、ほぼ全方向に破壊領域が発達しておりその外形は円形に近いが、トンネル底面の中央部に破壊包絡線に対する接近度が低いところがある。応力比が 1.5, 2.0 と大きくなるに従い、トンネル上下部の垂直方向に破壊領域が発達するが、水平方向の破壊領域は減少する。応力比 2.0 の場合、破壊領域の最大深さはトンネル底面の中央部に生じ、1.79 m であった。全ケースを通じて側面と底面が交わる隅角部で応力状態の変化が複雑になっている。

(B) 热応力

Fig. 5.5 から Fig. 5.8 は初期地圧の状態が $\sigma_h / \sigma_v = 1.0$ の岩盤中に処分トンネルを開削し固化体を処分後、図に示した年数が経過した時点の温度条件で応力を計算した結果である。破壊領域についてはそれ以前の計算ステップで破壊した領域にも影をついている。

Case - 1 の各時点での応力状態を示す Fig. 5.5 では、時間とともにトンネル上下部で新たな破壊領域が発生しトンネルを一周する連続した領域となっている。処分後 40 年以降新らしい破壊領域は発生せず、その外形は円形に近い。処分トンネルからの換気を想定した Case - 2 では岩盤は冷却されており、計算を行った全期間を通して新らしい破壊領域の発生はごく一部でしか見られない。トンネル底面中央部で応力状態の破壊包絡線に対する接近度が処分前よりも低下している。Fig. 5.7 に Case - 3 の計算結果を示したが、その応力状態は Case - 1 と近いものである。Case - 3 の 2 倍の固化体発熱を想定した Case - 4 の計算結果は Fig. 5.8 に示した。Case - 1, 3 に較べてトンネル底面で、より大きな破壊領域が発生しており、その最大深さは 1.71 m となっている。

5.5 円形トンネルモデルによる試算

Kastner³⁶⁾は、無限固体中に設けられた円形孔周辺の破壊領域の大きさについて破壊包絡線を直線として次式を与えている。馬てい形トンネルと比較するためこの式を使って試算した。

$$\cos^2 2\varphi + \frac{2}{\omega} \left[\frac{1 + \lambda_0}{4(1 - \lambda_0)} - (1 - 2\alpha^2 + 3\alpha^4) - \frac{(1 + \lambda_0 + \frac{2x}{rh}) \sin^2 \phi}{2(1 - \lambda_0)} \right] \cos 2\varphi \\ - \frac{1}{\omega} \left[\frac{(1 + \lambda_0)\alpha^2}{4(1 - \lambda_0)^2} + \frac{(1 + 2\alpha^2 - 3\alpha^4)^2}{4\alpha^2} - \frac{(1 + \lambda_0 + \frac{2x}{rh})^2 \sin^2 \phi}{4\alpha^2(1 - \lambda_0)^2} \right] = 0 \quad (12)$$

ここで φ ; 垂直軸からかたった角度

λ_0 ; σ_h / σ_v

α ; a / r a はトンネル半径, r は破壊領域境界までの距離

r ; 岩盤の単位体積重量

h ; 土かぶり高さ

x ; 破壊包絡線の σ 軸切片 $x = c / \tan \phi$

ω は補助変数で $\omega = \alpha^2 \sin^2 \phi + 2 - 3 \alpha^2$

C, ϕ はそれぞれ岩盤のせん断強度, 内部まさつ角

(12) 式を α について解くことにより r が求められる。トンネルの半径を処分トンネルと同断面積を持つ円の半径 1.86 m とし 4.1 節, 5.1 節で示した岩盤物性値を用いて計算した結果を Fig. 5.4 に示した。図中, 実線で境界を示し影を付けた部分が破壊領域である。 $\sigma_h / \sigma_v = 0.5$ では水平方向に破壊領域が発達し, その最大深さは 0.57 m であった。応力比が 1.0 のケースでは破壊領域の外形は真円となり, その深さは 0.28 m となった。水平方向の応力が大きくなるに従い, 垂直方向の破壊領域が発達し $\sigma_h / \sigma_v = 2.0$ で最大深さは 0.61 m であった。

また, Fig. 5.4 において破線でその境界を示した領域は, $C = 2.45 \text{ MP}_a$, $\phi = 50^\circ$ の条件での破壊領域である。この物性値は Table 5.1 で示した分類の A に相当する岩盤を想定している。

5.6 考 察

初期地圧の垂直, 水平方向の応力比が掘削地圧の状態に大きな影響を与えることは, 円形トンネルについて, Kastner の式などにより広く言われてきたが,³⁶⁾ 今回処分トンネルの断面形として想定した馬てい形トンネルにおいても非常に大きな影響を与えることが確認された。また, 馬てい形トンネルでは円形トンネルに較べてその応力状態が複雑であり, 特に側面と底面が交わる隅角部での変化が複雑であることがわかった。以下計算結果にもとづき考察を述べる。

- 今回想定した岩盤分類 B 相当の岩盤では, 掘削による破壊領域は最高で 1.79 m 程度であった。岩盤はその深度が増すとより強く硬くなると考えられるが, 地下深部の資料は少なく今後データ収集を行っていく必要がある。
- 破壊した領域は岩石相互のかみ合せにより残留強度を有している。そのため破壊した領域がすぐに崩落するというのではない。しかしその破壊が進行していく過程でひずみ量が増加し, また自重をささえられなくなり崩落すると考えられる。
- 崩落に至らない領域においてもその物性の変化は大きく, たとえばきれつの発生により透水性は大きくなると考えられる。
- 地下岩盤内の工事においては, 破壊領域が生じることが極めて一般的であり, 破壊領域については補強を施すのが普通である。現在トンネルの構築では, 支保工の設置, コンクリートによる覆工, ロックボルトの打設, ショット・クリートの打設などが適宜組合されて行われている。
- 掘削された岩盤の破壊形態として, 山はねがある。山はねは岩盤の急激な破壊により解放されるひずみエネルギーが運動エネルギーに変わり, 岩石が飛散する現象である。詳しくは, 次章に現在考えられている対策を合わせて述べる。

初期地圧の応力比, トンネル断面形状は, トンネルの安定に非常に大きな影響を及ぼす。初期地圧の方向, 大きさを正確にはかり, その状態に適した断面形状を選定していく必要がある。

断面形状の選定にあたっては、建設時の施工性、運転時の作業性を合わせ考える必要があろう。

廃棄物の崩壊熱の影響については以下のことが言える。

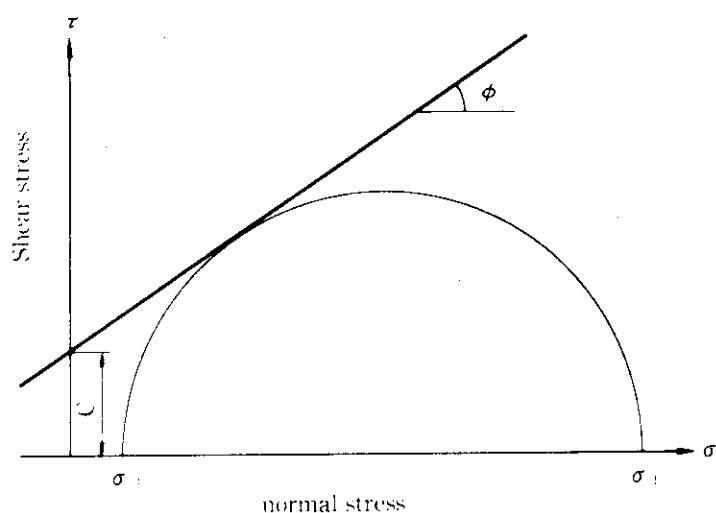
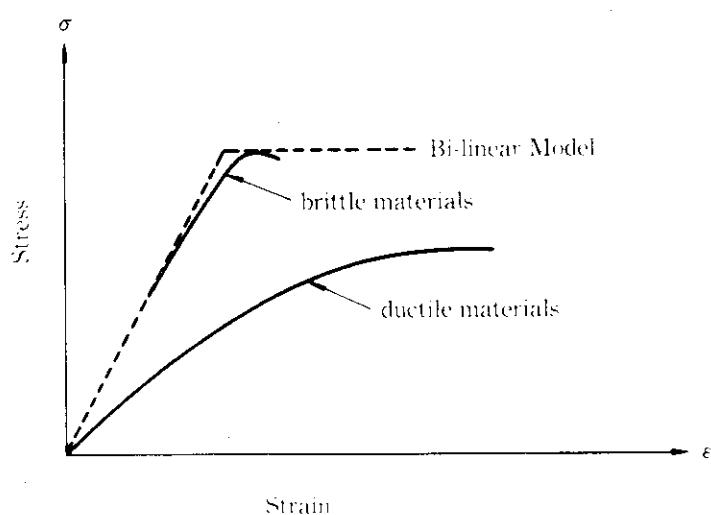
- 処分トンネルが換気されている場合は、トンネル周辺の破壊領域は掘削直後の状態に停まる。
- 処分トンネルが閉鎖され換気されていない場合、トンネル上下部に若干破壊領域が拡大する。
- これは固化体の発熱に起因する温度勾配がトンネル付近では垂直方向に大きいためと考えられる。

今回想定した固化体の発熱量 1.34 Kw / 本で、ひき起される破壊領域は大きなものではない。しかし 2 倍の 2.68 kw / 本を想定すると破壊領域は拡大される。単位孔当りの挿入本数が増した場合にも注意する必要がある。

- 今回の計算では岩盤物性は温度により変化しないとしたが、処分トンネル付近の岩盤は条件によっては約 50°C 程度温度上昇する。3 章に述べたところによると、岩種によっては数パーセント強度が減少する。これは若干の破壊領域の拡大につながると思われる。
- 固化体を挿入する処分孔周辺の応力変化については今回検討を行わなかったが、検討を行うには物性の温度変化による影響を考慮に入れる必要があろう。

Table 5.1 Relation of bedrock classification and strength. (after Miki²⁾)

Classification	Grade of Hardness	Internal Friction Angle ϕ (°)	Shear Strength C(MPa)
A	Very Hard	50	1.96 ~ 2.96
B	Hard	45	1.47 ~ 2.45
CH	A little Hard	40	0.98 ~ 1.96
CM	A little Soft	40	0 ~ 1.47
CL	Soft	35	0 ~ 1.47
D	Partly Soil condition	30	0 ~ 0.98

**Fig.5.1** Failure criteria of Mohr-Coulomb.**Fig.5.2** Relation of Stress vs Strain.

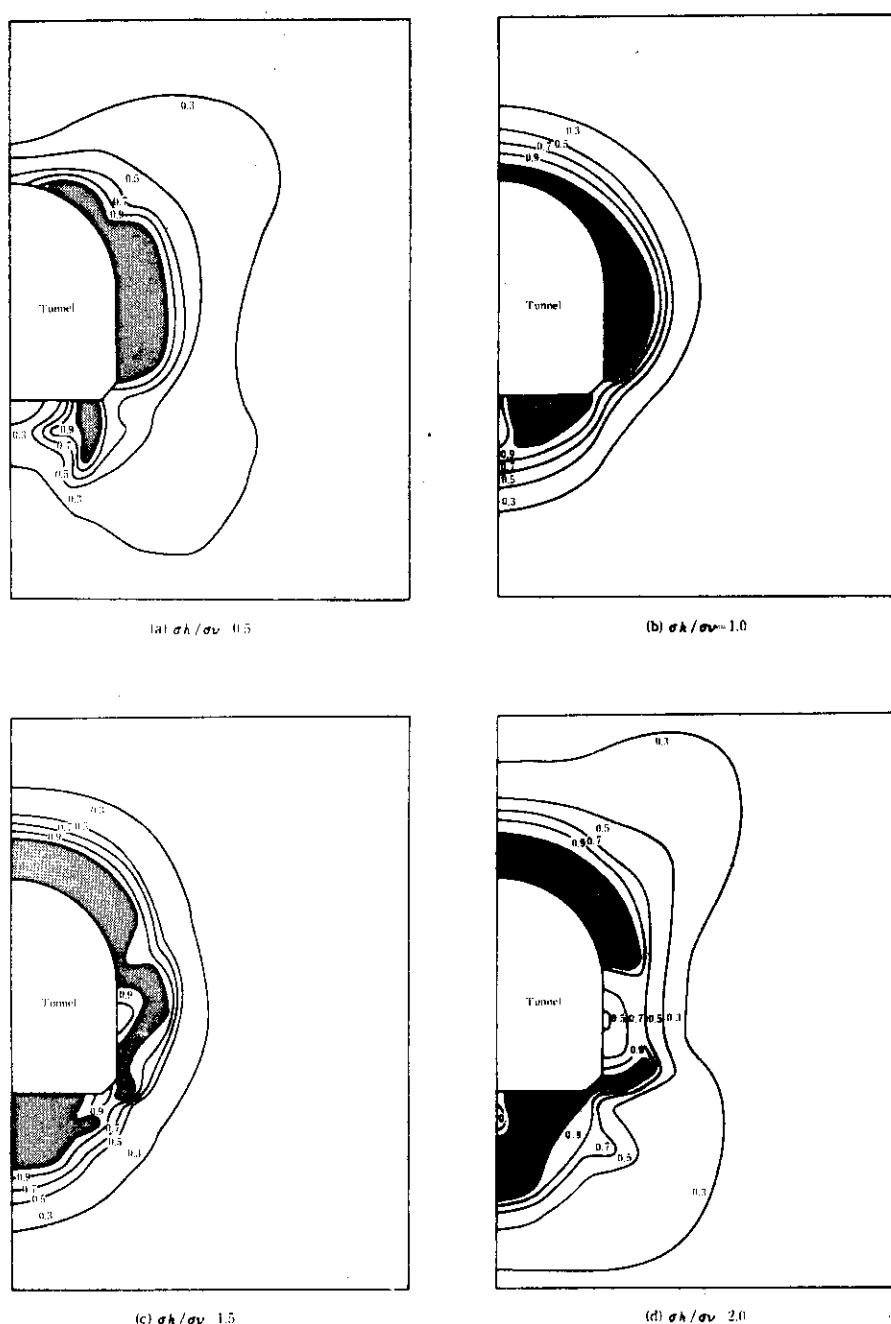


Fig. 5.3 The region of strength failure due to the excavation with various ratios of horizontal stress to vertical stress.

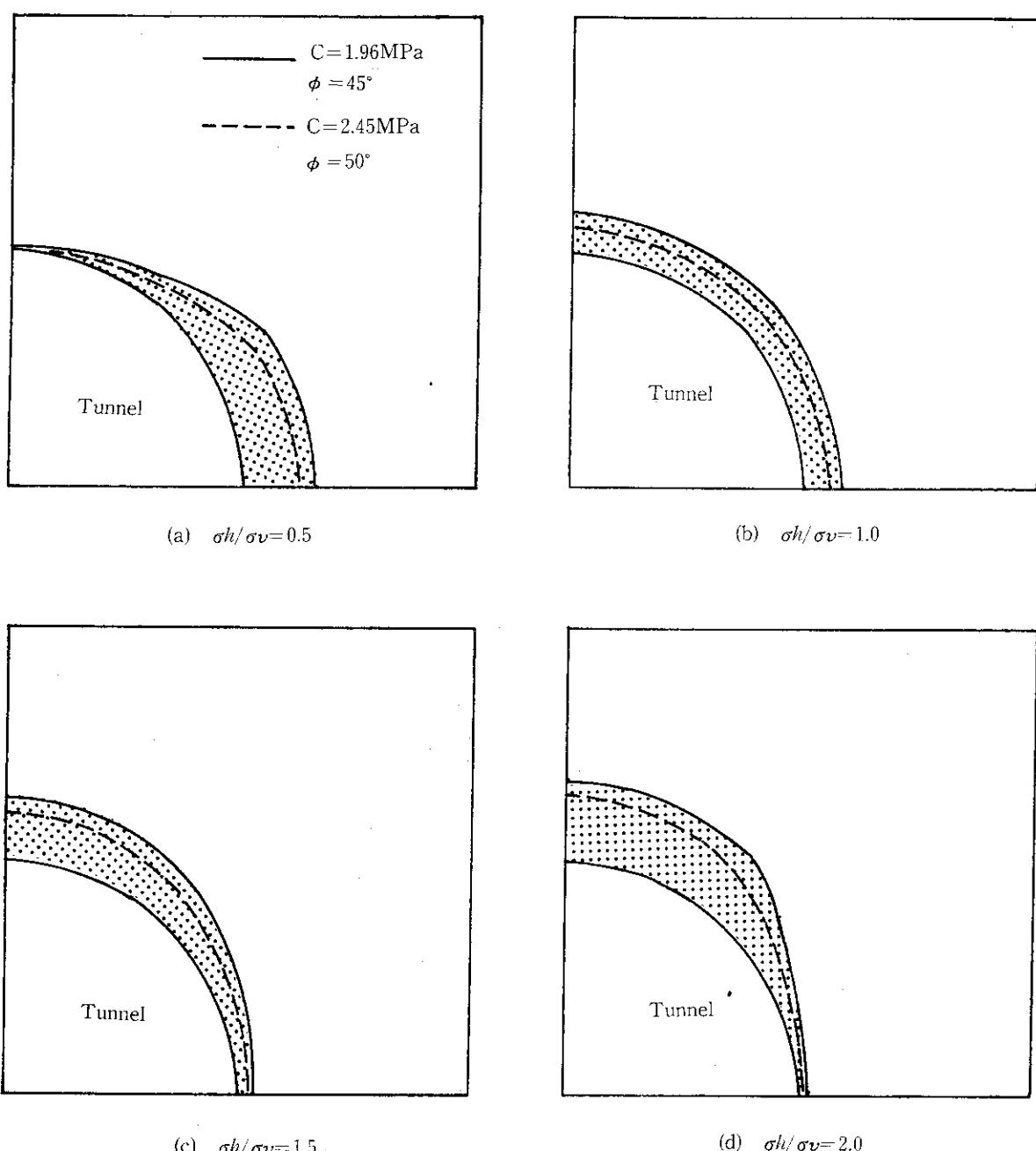
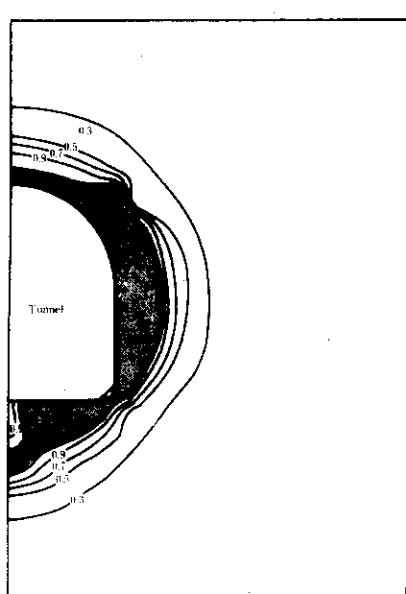


Fig.5.4 The region of strength failure near the circular hole with various ratios of horizontal stress to vertical stress.



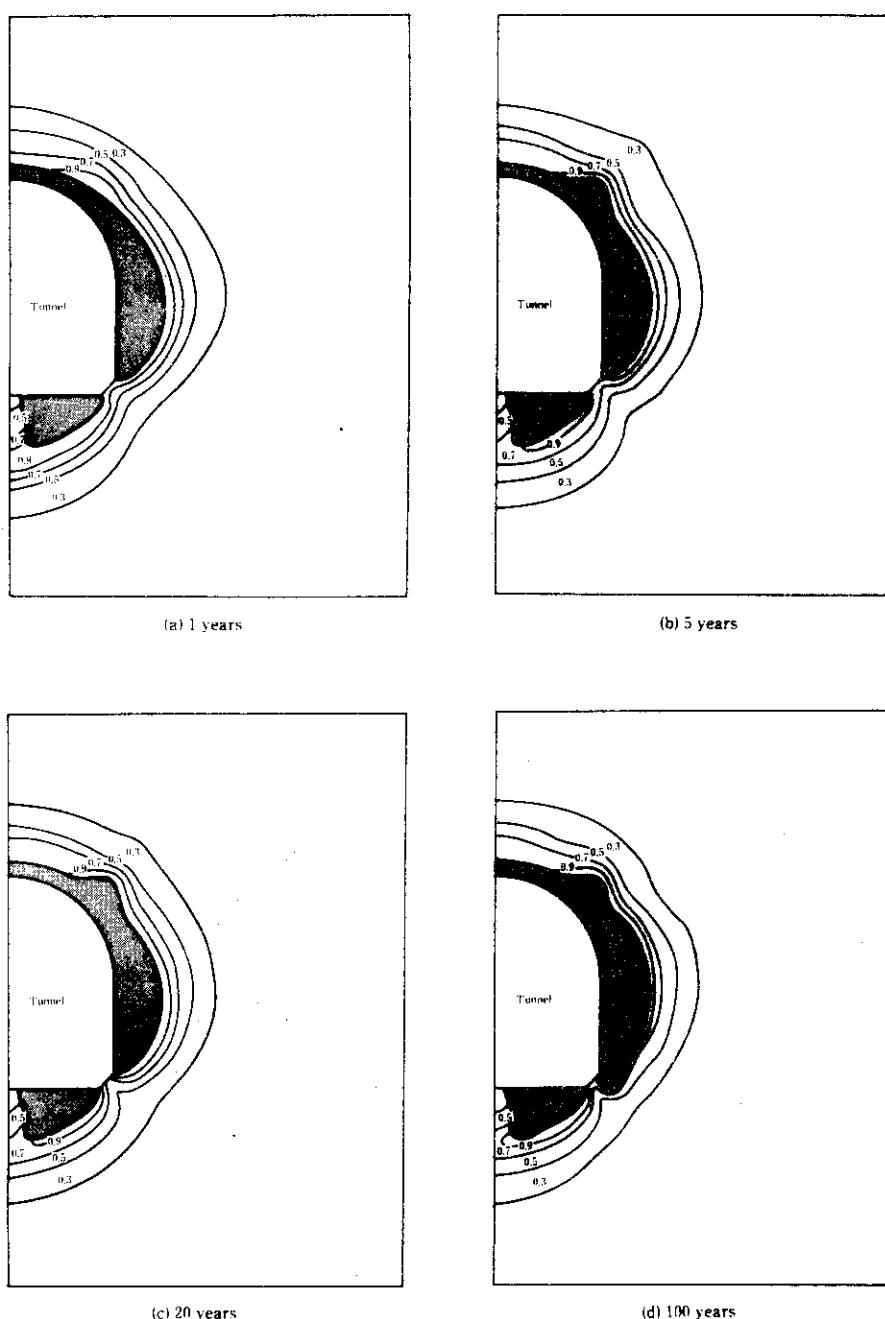
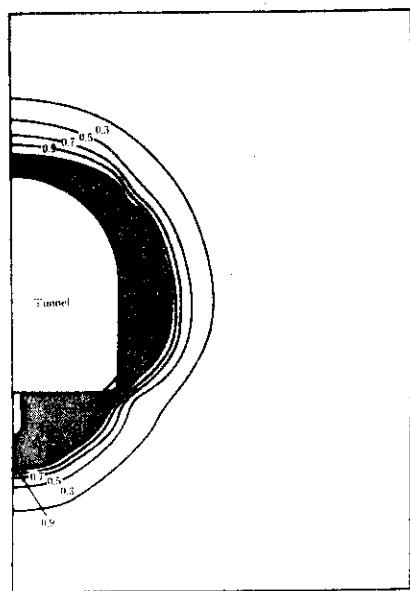
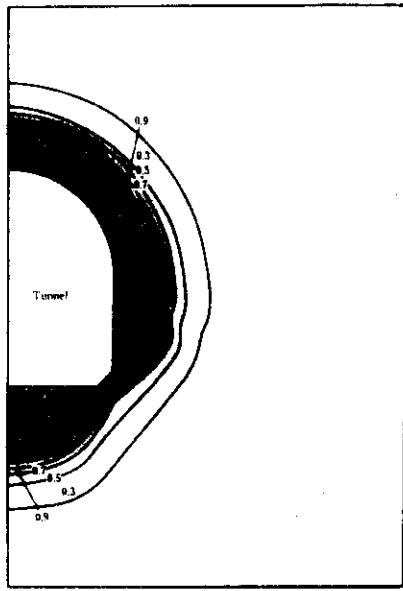


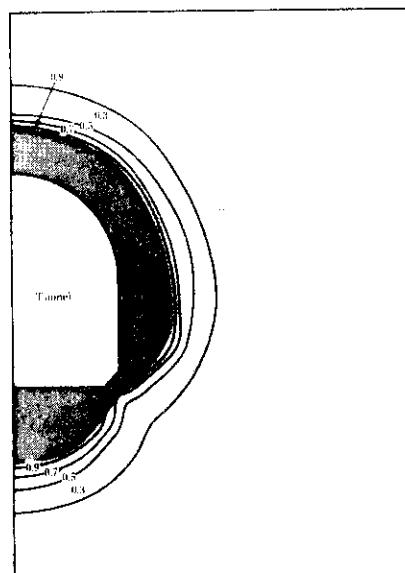
Fig.5.6 The region of strength failure at various times after deposition.
(Case-2)



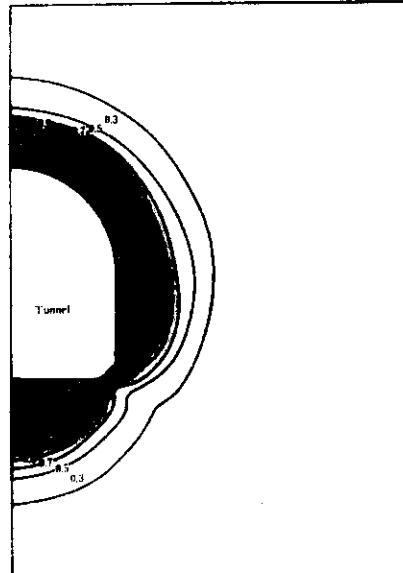
(a) 5 years



(b) 20 years



(c) 40 years



(d) 100 years

Fig.5.7 The region of strength failure at various times after deposition.
(Case-3)

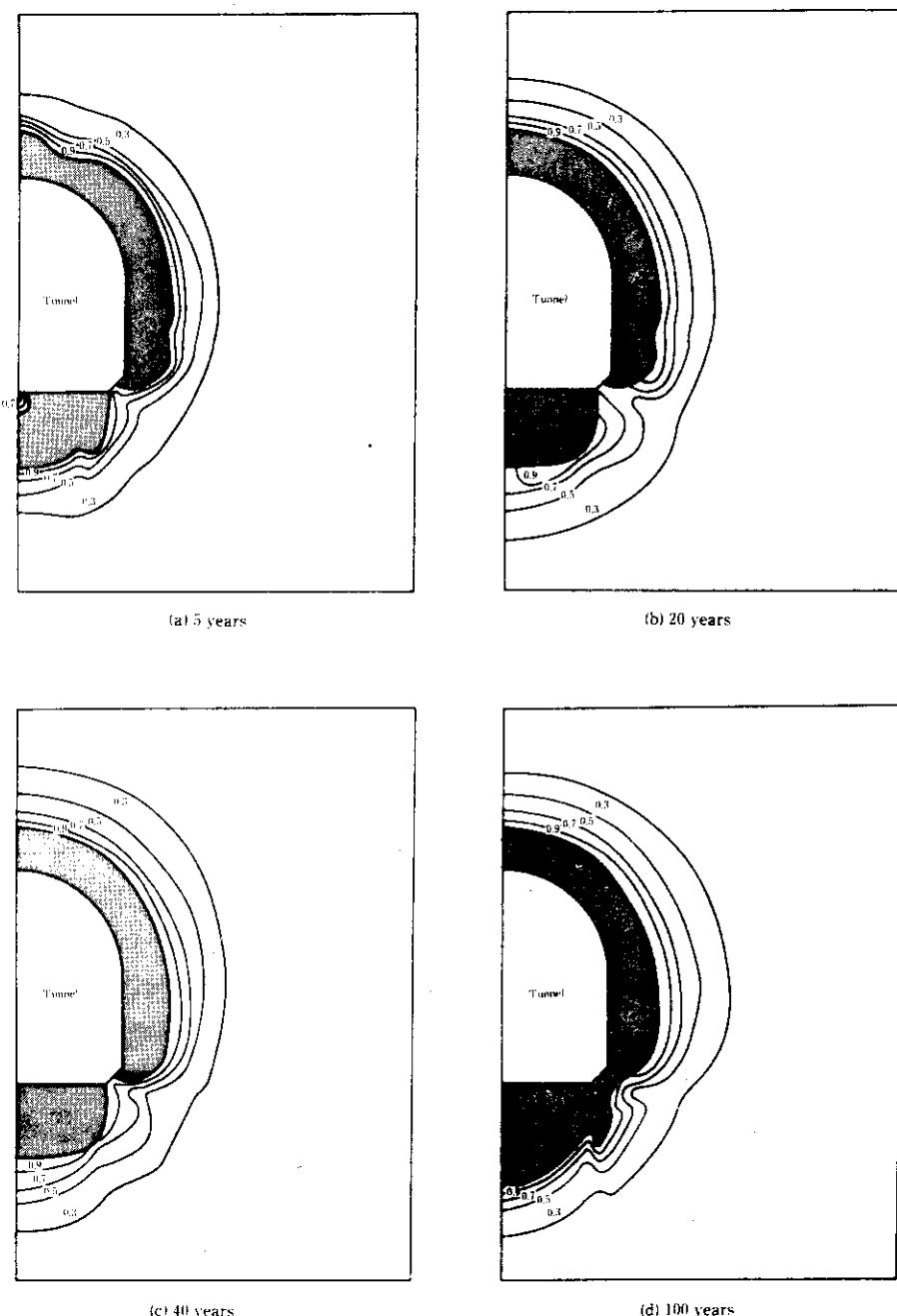


Fig. 5.8 The region of strength failure at various times after deposition.
(Case-4)

6. 地層処分安全性研究に関連した今後の開発項目

6.1 岩盤物性とその温度依存性

3章に岩石物性の温度依存性について整理して述べたが過去において十分な研究が行われたとは言えず、岩種によっては資料がほとんどないものもある。岩盤物性の温度依存性については、近年になって地層処分の技術開発、安全性評価の研究に伴い、一部岩種で着手されたのが現状である。地層処分において固化体、岩盤の温度上昇は避けがたく今後さらに研究を進めていく必要がある。対象となる温度範囲は、今回の温度計算による処分トンネル周辺の状態を検討するには100°C前後まで、固化体およびそのごく近傍の岩盤では400~500°Cまで考えておけば充分であろう。

今回は検討対象の中に入れなかったが、岩盤の透水性は処分場の機能評価を行う際非常に大きな要素である。当初掘削が行われていない状況での岩盤の透水性、また透水性に対する掘削の影響及び加熱の影響を室内、原位置において測定、評価する手法を開発する必要がある。

6.2 岩盤の温度分布

4章に処分場周辺の岩盤について温度分布の計算結果を示したが、トンネルの換気の有無は岩盤温度に非常に大きな影響を持つ。処分トンネル閉鎖の時期は運転時の安全性問題などを合わせて検討する必要があるが、岩盤温度の面からは遅い方が望ましい。

固化体の主材料として考えられているガラスについてはその軟化、失透温度から見てその温度を500°C程度以下に保つことが望ましい。今回の計算では、岩盤の熱伝導率を低く想定した場合半径方向のみの熱流を考える安全側の境界条件下で、固化体の中心温度が470°Cになるとという結果が得られた。

今後岩盤物性とその温度依存性の研究成果の上にたったより詳細な検討が望まれる。

6.3 岩盤応力および破壊

5章に示したが、処分場の深度を1,000mとすると掘削により、ある程度の破壊領域が発生することは避けがたいと思われる。破壊した領域についてもその強度が0になるのではなく残留強度を有しており、自重により発生する応力に抵抗している。この領域は現在トンネル開削で、その応力が弾性域を越え塑性域に入っているとして塑性領域と呼ばれ、また強度、剛性が低下しているとしてゆるみ領域とも呼ばれている領域に相当すると思われる。トンネル開削では、ゆるみ領域の崩落に対して抵抗する補強が行われるのが普通である。

補強は、以下があり単独または組合せて行われる。

- 鋼材などによる支保工

- コンクリートによる覆工
- ロック・ボルト工
- ショット・クリート工

現在これら補強の選定、実施数量については経済的に決定されている面が強い。補強の効果を応力解析の手法の中に取り入れて、その補強効果を定量的に評価していく必要がある。

熱応力については、処分トンネルに対して重大な影響を与えないことを今回の計算により確認した。開削時に行う補強を割り増すことにより、又今回の計算は岩盤分類Bに相当する岩盤を仮定して行ったが、実際の処分場はさらにしっかりとした岩盤が選定されるであろうからその後発生する熱応力を充分対応できると思われる。固化体近傍の岩盤については、物性の温度依存性を取り入れた解析手法の確立が必要であろう。

6.4 山はねおよびその対策

山はねは岩盤中に開削を行ったときその開削面で発生する急激な破壊現象をさし、破壊した岩石の飛散を伴う。山はねを発生状況により分けると以下のものがあげられる。

- ガスの突出を伴うもの；炭鉱活動でその事故例が多く見られるが、開削前は高い間げき圧により間げき水や岩石中に取り込まれていたガスが、開削が行われ間げき圧が低下することにより爆発的に膨張する。³⁷⁾
- 側壁の圧出；やはり炭鉱活動で炭壁の圧出として多く見られるが、硬い上下盤にはさまれた層を掘削するとき、掘り残された部分に応力集中が起こり、側壁部が急激に押し出していく。^{38) 39)}
- 硬岩の山はね；山岳トンネル、地下深所の鉱業活動でその発生が報告されている爆発的な岩石の飛散を伴う現象。^{40) 41)}

処分場を地下深部に構築する場合、3番目にあげた硬石の山はねが問題となる。山はねの発生と因果関係をもつと考えられている条件をあげると、

- 地下深部やしう曲などの影響により初期地圧が大きい岩盤中の開削に伴って起こる。
- きれつなどの弱点を含まないマッシブなかたくせい性な岩石で起こりやすい。^{40) 42)}
- 応力が岩石強度を越えた場合、掘削面の凹所で応力集中が起きやすい。

しかし岩石強度を越えたとして、破壊が遂次静かに起こらず急激な山はねを起こすかどうかについて定量的に判定できないのが現状である。

その発生機構が明確でない山はね現象を予知する目的で、岩盤の内部破壊による振動を監視する手法が研究されている。これは山はねの前兆と考えられる山鳴りの発生箇所、解放されるエネルギーの推移を観測して蓄積されているひずみエネルギーを知るものである。⁴³⁾

山はねの対策としては、応力の集中を避けるため壁面の凹凸をなくすことが考えられる、さらにいったん生じた応力集中を散らすことが考えられる。これは応力集中部で小規模な爆破を行い、応力をより広い領域で分担させることが行われている。また、応力集中部にボーリング切り込みを入れて応力を開放する方法などが経験的に行われている。

このように山はねについては未解明な部分が多く、今後の研究が必要である。

7. 結 言

今回の研究では、地下深部に建設が想定されている高レベル放射性廃棄物の地層処分について、その建設、運転により周辺岩盤に与える影響、すなわち掘削部周辺の応力分布、温度分布について解析を行った。また解析に用いる岩盤物性の基礎資料となる物性値について、その温度依存性を調査した。

地下深部の利用は、これまで鉱業活動を中心に行われてきており、今回の研究の中で行った既往研究の調査でも鉱業活動に関連したもののが多かった。爆破工、補強工など建設技術、また換気システム、保安システムなど鉱山に蓄積されてきた技術は、今後地層処分場の建設技術、運転システムを開発していく上で、その基礎になると思われる。

しかし、鉱業活動では採鉱が目的であり、抗道の確保はそのための手段と考えられる。すなわち抗道は採鉱が行われる期間、その機能をはたすべく維持される。それに対して、地層処分場では建設、運転期間を通してトンネルが安全に維持されるのはもちろん、処分場閉鎖後、周辺岩盤に開削が行われたことによる影響をできるだけ残さないようにしなければならない。特に岩盤の透水性は、処分場周辺の岩盤に期待されている自然バリアとしての機能が有効に動くかどうかに密接に関係しており、開削による影響を極力小さくしなければならないと言える。

今回の調査研究で明らかになった点は次の通りである。

- (1) 100~500°Cでの岩石物性データを収集したが、一部の岩石を除いては常温以上でのデータは殆んどなく、今後データを蓄積してゆく必要がある。
- (2) 汎用構造解析コード NASTRAN を用いた温度分布計算の結果、岩盤の熱伝導率を低く想定し、ガラス固化体の半径方向のみの熱流を考えた安全側の境界条件下で、固化体の中心温度が 470 °Cとの結果が得られ、処分時期設定のための知見が得られた。
- (3) 今回想定した馬てい形トンネルでは円形トンネルに比べ、特に側面と底面の交る隅角部での応力変化が複雑であることがわかった。又熱応力は大きな影響を及ぼさないことがわかった。
- (4) 岩盤の開削時に問題となる山はね対策については、岩盤表面の応力集中箇所を生じさせないための施工法の必要性があげられ、山はね現象自体には未解明な部分が多く今後一層開発研究を進めてゆく必要がある。

謝 辞

今回の研究の実施にあたり、環境安全研究部高レベル廃棄物処理処分研究室の方々から多くの御教示をいただいたことに感謝します。又本報告書をまとめるにあたって有益な御助言並びに御指導を頂きました高レベル廃棄物処理処分研究室長、中村治人博士に感謝致します。

7. 結 言

今回の研究では、地下深部に建設が想定されている高レベル放射性廃棄物の地層処分について、その建設、運転により周辺岩盤に与える影響、すなわち掘削部周辺の応力分布、温度分布について解析を行った。また解析に用いる岩盤物性の基礎資料となる物性値について、その温度依存性を調査した。

地下深部の利用は、これまで鉱業活動を中心に行われてきており、今回の研究の中で行った既往研究の調査でも鉱業活動に関連したもののが多かった。爆破工、補強工など建設技術、また換気システム、保安システムなど鉱山に蓄積されてきた技術は、今後地層処分場の建設技術、運転システムを開発していく上で、その基礎になると思われる。

しかし、鉱業活動では採鉱が目的であり、抗道の確保はそのための手段と考えられる。すなわち抗道は採鉱が行われる期間、その機能をはたすべく維持される。それに対して、地層処分場では建設、運転期間を通してトンネルが安全に維持されるのはもちろん、処分場閉鎖後、周辺岩盤に開削が行われたことによる影響をできるだけ残さないようにしなければならない。特に岩盤の透水性は、処分場周辺の岩盤に期待されている自然バリアとしての機能が有効に動くかどうかに密接に関係しており、開削による影響を極力小さくしなければならないと言える。

今回の調査研究で明らかになった点は次の通りである。

- (1) 100~500°Cでの岩石物性データを収集したが、一部の岩石を除いては常温以上でのデータは殆んどなく、今後データを蓄積してゆく必要がある。
- (2) 汎用構造解析コード NASTRAN を用いた温度分布計算の結果、岩盤の熱伝導率を低く想定し、ガラス固化体の半径方向のみの熱流を考えた安全側の境界条件下で、固化体の中心温度が 470 °Cとの結果が得られ、処分時期設定のための知見が得られた。
- (3) 今回想定した馬てい形トンネルでは円形トンネルに比べ、特に側面と底面の交る隅角部での応力変化が複雑であることがわかった。又熱応力は大きな影響を及ぼさないことがわかった。
- (4) 岩盤の開削時に問題となる山はね対策については、岩盤表面の応力集中箇所を生じさせないための施工法の必要性があげられ、山はね現象自体には未解明な部分が多く今後一層開発研究を進めてゆく必要がある。

謝 辞

今回の研究の実施にあたり、環境安全研究部高レベル廃棄物処理処分研究室の方々から多くの御教示をいただいたことに感謝します。又本報告書をまとめるにあたって有益な御助言並びに御指導を頂きました高レベル廃棄物処理処分研究室長、中村治人博士に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木；岩盤力学と計測，内田老鶴社（1973年）
- 2) 外尾；高温度における岩石の強度に関する研究（第1報），日本鉱業会誌，vol. 84, No. 964, (1968年)
- 3) 島田, 外尾；熱削孔シミュレーション，日本鉱業会誌，vol. 96, No. 1113, (1980年)
- 4) K. K. Tsui, A. Tsai and C. F. Lee "Near-field thermal transient and Thermomechanical stress analysis of a disposal vault in Crystalline hard rock" OECD/NEA Workshop on Near-field Phenomena in Geologic repositories for Radioactive Waste, Seattle, 1981
- 5) 下岡, 石崎他；高レベル廃棄物の処分岩体および処分地層としての岩石の物性, 日本原子力研究所 JAERI-M 9247, 1980
- 6) G. Swan "The mechanical properties of Stripa Granite" Swedish-American cooperative program on radioactive waste storage in mined caverns in Crystalline rock, Technical Project Report No. 3, LBL-7074, 1978
- 7) H. Carlsson "A pilot heater test in the Stripa Granite "Swedish-American cooperative program on radioactive waste storage in mined caverns in Crystalline rock, Technical Project Report No. 6, LBL- 7086, 1978
- 8) 緒方, 藤本, 高多；高温岩石の力学的特性の研究, 採鉱と保安, vol. 24, No. 1, 1978
- 9) 緒方, 高多；高温下における岩石の力学的特性, 日本鉱業会研究業績発表講演会要旨集, 1977
- 10) 三沢, 厨川；高温岩石のビット圧入破碎に関する研究, 日本鉱業会研究業績発表講演会要旨集, 1977
- 11) 厨川, 三沢；ビットによる高温岩石の破壊機構について, 日本鉱業会研究業績発表講演会要旨集, 1977
- 12) 緒方, 藤本, 高多；高温下における岩石の力学的特性（続報），日本鉱業会研究業績発表講演会要旨集, 1978
- 13) 幾世橋, 京, 石浜；線熱源法による高温岩石の熱伝導率測定, 日本鉱業会研究業績発表講演会要旨集, 1979
- 14) 村原, 橋本；CO₂レーザによる花崗石の熱破壊, 日本鉱業会研究業績発表講演会要旨集, 1978
- 15) 松永；岩石の熱的性質と高温岩体からの熱抽出(1), 採鉱と保安, vol. 23, No. 11, 1978
- 16) R. Miller, F. D. Wang, J. Dubow "Mechanical and thermal properties of oil shale at elevated temperatures" Oil Shale Symp. Proc. (USA), 11th, 1977
- 17) T. F. Lehnhoff, M. R. Patel, G. B. Clark "A thermal rock fragmentation model" Proc. Symp. Rock Mech. (USA), 15 th, 1975

- 18) 山口, 下谷; 岩石の熱的性質の測定, 日本鉱業会秋季大会分科会研究資料, 1972
- 19) E. J. Hanley, D. P. Dewitt and R. F. Roy "The thermal diffusivity of eight well-characterized rocks for the temperature range 300~1000°K" Engineering Geology (NLD), vol. 12, 1978
- 20) S. J. Bauer, B. Johnson "Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal Granites" U. S. Symp. Rock Mech. (USA), 20th, 1979
- 21) M. Friedman, J. Handin, N. G. Higgs and J. R. Lantz "Strength and ductility of four dry igneous rocks at low pressures and temperatures to partial melting" U. S. Symp. Rock Mech. (USA), 20th, 1979
- 22) 厨川; 岩石の熱破碎(その1), 採鉱と保安, vol. 17, No. 5, 1971
- 23) T. F. Lehnoff, J. D. Scheller "The influence of temperature dependent properties on thermal rock fragmentation" Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geotechn. Abstr. (GBR), vol. 12, No. 8, 1975
- 24) K. Thirumalai "Rock fragmentation by creating a thermal inclusion with dielectric heating" Bureau of Mines Report of Investigations, 1970
- 25) A. P. Dmitryev, L. S. Kuzyayev, Yu. I. Protasov and V. S. Yamshchikov Physical Properties of rocks at high temperatures" Nedra Press, Moscow, 1969 : Translated by National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1972
- 26) 緒方, 藤本; 岩石の高温三軸試験, 日本鉱業会研究業績発表講演会要旨集, 1979
- 27) J. Handin, N. Carter "Rheological properties of rocks at high temperatures" Proc. of International Congress on Rock Mech., vol. 3, 1979
- 28) KBS, "Handling of spent nuclear fuel and final storage of vitrified high-level reprocessing waste", 1978, 5 volumes, KBS Project, Stockholm
- 29) 渡辺編; 建築計画原論, 丸善(1973)
- 30) 東京天文台編; 理科年表, 丸善(1981)
- 31) Scientific and Technical Information office NASA; NASTRAN Theoretical Manual
- 32) 日本材料学会編; 岩石力学とその応用, 丸善(1966)
- 33) 三木; わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出版会(1978)
- 34) D. B. Jamison, N. G. W. Cook "An analysis of the Measured values for the state of stress in the Earth's crust" Swedish-American Cooperative Program on radioactive waste storage in mined caverns in Crystalline rock, Technical Project Report No. 7, LBL- 7071, 1978
- 35) E. Hoek, E. T. Brown "Underground Excavation Engineering" The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1977
- 36) H. Kastner "Statik des Tunnel and Stollenbaues" Germany: 金原訳; トンネ

ルの力学, 森北出版 (1974)

- 37) 近藤; ガス突出の諸現象から考察した「ガス突出の理論」と「実験による立証」, 日本鉱業会誌, vol. 94, No. 1085, 1978
- 38) 木村, 菅原, 岡村; 三池炭鉱の岩壁圧出の特色とその要因の考察, 炭層の山はねに関する研究(第1報), 日本鉱業会誌, vol. 96, No. 1114, 1980
- 39) 菅原; 西ドイツの炭鉱の山はね対策, 日本鉱業会誌, vol. 97, No. 1117, 1981
- 40) 土木学会編; 土木技術者のための岩盤力学, 土木学会 (1975)
- 41) 天野; 南アフリカ共和国における鉱山技術の研究状況, 日本鉱業会誌, vol. 87, No. 998, 1971
- 42) A. П. БОБРЯКОВ, В. Н. КРАМАРЕНКО, А. Ф. РЕВУЖЕНКО, Е. Н. ШЕМЯКИН
"О СТРЕЛЯНИИ ГОРНЫХ ПОРОД" Fiz Tekh Probl Razrab Polezn Iskop (SUN), 1980
- 43) 磯部, 佐藤, 森, 後藤; 山はねの計測と問題点, 全国地下資源関係学協会合同秋季大会分科研究会資料, (1979)