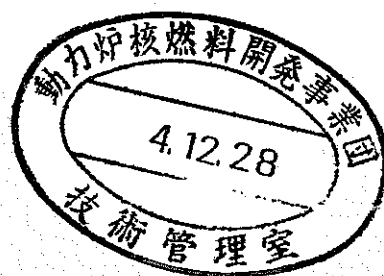


# 地層処分場の熱的安定性の検討



1992年9月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1992

# 地層処分場の熱的安定性の検討

—— ニアフィールド、ファーフィールドの熱解析 ——

報告者 五月女 敦\*  
藤田 朝雄\*  
原 啓二\*  
納多 勝\*\*

## 要 旨

高レベル放射性廃棄体からの放熱によるニアフィールドの温度分布およびその経時変化を解析評価し、処分場の熱的安定性のなかで問題となる緩衝材の熱変質の観点から廃棄体の埋設密度の検討を行うために、ニアフィールドの3次元有限要素法による熱解析を実施した。

さらに、ファーフィールドの温度分布および経時変化を解析評価するために、ニアフィールドの熱解析で得られた結果をもとに、処分場の規模を設定し、等価な熱源を与えたファーフィールドの軸対象有限要素法による熱解析を実施した。

廃棄体の発熱条件としては、ガラス固化後の冷却のための中間貯蔵期間を30年と設定し、緩衝材の熱物性については、廃棄体の発熱により乾燥することを考慮して伝熱条件のよりきびしい値を設定して検討した。また、岩盤の熱物性については、実測されている結晶質岩と堆積岩の平均的な値を用いた。

ニアフィールドおよびファーフィールドの熱解析により得られた主な結果は以下の通りである。

- ①ニアフィールド各部の温度は、廃棄体埋設直後から上昇し、10～50年後で最大となり10,000年後にはほぼ初期地温まで低下する。
- ②人工バリア材および周辺岩盤の温度は、廃棄体の埋設密度を調整することにより十分に低い温度に制御することができる。
- ③緩衝材の熱変質に対する許容温度を諸外国の例も参考にして約100℃とした場合、廃棄体の埋設密度は約80～100 m<sup>3</sup>に一本となる。
- ④処分場周辺岩盤の温度は50年後に最大約75℃程度まで上昇するが、地表面の温度はほとんど変化しないことから廃棄体の発熱による地上への影響は無視できると考えられる。

---

\* 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

\*\* 本社 環境技術開発推進本部 処分研究グループ

# 目 次

1. はじめに .....	1
2. ニアフィールドの熱解析 .....	1
2.1 解析手法 .....	2
2.2 解析条件 .....	4
2.3 解析ケース .....	27
2.4 解析結果 .....	29
2.5 まとめと今後の課題 .....	53
3. ファーフィールドの熱解析 .....	54
3.1 解析手法 .....	55
3.2 解析条件 .....	55
3.3 解析ケース .....	61
3.4 解析結果 .....	61
3.5 まとめと今後の課題 .....	81
4. 謝 辞 .....	81
5. 参考文献 .....	82

## 1. はじめに

地層処分場の設計検討においては、地下に埋設する廃棄体が核種の崩壊による熱を発生することから人工バリア材や周辺岩盤の熱的安定性の評価が重要となる。

廃棄体処分後の初期段階においては、廃棄体からの放熱、緩衝材への地下水の浸潤、膨潤圧力の発生、周辺岩盤の変形等が作用しつつ、ニアフィールドの温度、水理、応力環境等が変化する。ニアフィールドの温度を詳細に評価するためには、それらの連成解析が必要である。また、地層処分場の発熱により広域に渡って地盤の変形や熱対流の発生が考えられることから、ファーフィールドの温度変化を詳細に評価するためには、ニアフィールドと同様に連成解析を必要とする。

熱—水—応力連成挙動に関しては、ストリパ・プロジェクトのバッファマス試験(Pusch and Borgesson, 1985)を始め、いくつかの実規模試験(Kjartanson and Gray, 1984 ; Sato et al., 1991)が進められている。これらの試験と並行して連成モデル、コードの開発も進められているが(Radhakrishna and Lau, 1989 ; Ohnishi et al., 1989; Tsang, 1990), まだ開発途上にある。

本報告では、連成解析は今後の課題として、人工バリアや岩盤の熱物性を検討用に設定し、緩衝材や岩盤の熱伝導率を一定としたニアフィールドおよびファーフィールドの熱解析を行い、地層処分場の熱的安定性を概略評価した。

## 2. ニアフィールドの熱解析

ガラス固化体の発熱による人工バリアおよび周辺岩盤への熱的影響の観点から廃棄体の埋設密度を検討するため、廃棄体の定置間隔、処分深度(500m, 1,000m)をパラメータとして2種類の定置方式について人工バリアおよび周辺岩盤の3次元有限要素法による非定常熱解析を実施した。

ここで、緩衝材の熱変質については、後述するように100℃以下の条件ではほとんど問題とならないことから、ここでは緩衝材の熱変質に対する許容温度を諸外国の例(Nagra, 1985)も参考にして約100℃とし、緩衝材の熱変質を避けるという考え方に基づいて、緩衝材の最高温度が100℃以下となるような廃棄体の埋設密度を検討した。

## 2.1 解析手法

熱・水・応力連成モデルの中で、熱と水の流れの連成は、定常流の場合には一般的に下式で記述される。

$$R \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - C \rho \mathbf{V} \cdot \nabla T \quad (2.1)$$

$$\mathbf{V} = - \frac{\kappa}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \quad (2.2)$$

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)] \quad (2.3)$$

- R : 土中水と土の平均熱容量
- $\lambda$  : 土中水と土の平均熱伝導率
- $\rho$  : 土中水の密度
- C : 土中水の比熱
- $\mathbf{V}$  : 土中水の流速ベクトル (ダルシー平均流速)
- T : 温度 ( $T_0$ 基準温度)
- P : 圧力
- $\kappa$  : 浸透係数
- $\mu$  : 土中水の粘性係数
- $\mathbf{g}$  : 重力ベクトル
- $\beta$  : 土中水の体積膨張係数

エネルギー保存式 (2.1) の右辺第1項は熱伝導による熱移動を表わし、第2項は水の流れによる熱移動を表わす。

地下水の流速が小さい条件下（例えば流速  $10^{-10}$  m/s 程度，（動水勾配0.01，透水係数  $10^{-8}$  m/s）では水の流れによる熱移動の寄与は熱伝導（例えば結晶質岩系岩盤で  $\lambda = 2.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；表2.2-14参照）に比べて無視できる程に小さい。

一方，土中水の流速式（2.2）の右辺第一項は圧力勾配による水の流れ，第2項は熱による土中水の密度変化によって生ずる対流（ブシネスク近似）を表わすが，水の体積膨張係数  $\beta$  は  $4 \times 10^{-4} / \text{K}$  程度と小さいため，自然対流の地下水流速への寄与は小さい。したがって，ニアフィールドの温度分布及びその経時変化の評価においては，緩衝材や周辺岩盤の熱伝導率が支配的なパラメータとなる。緩衝材や岩盤の熱伝導率は，若干の温度依存性を有し，また，含水比や応力変化に伴う亀裂の開閉等に依存するが，これらの非線形性や連成効果を考慮した詳細な解析評価は今後の課題として，緩衝材や周辺岩盤の熱伝導率を一定とした概略の熱解析評価を行うこととした。

解析は，熱伝導の基礎式をもとにした有限要素法の汎用コードを使用した。

## 2.2 解析条件

### 2.2.1 解析対象とする人工バリア

人工バリアは、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材から構成される。日本の地層処分の対象となるガラス固化体には、動燃事業団東海事業所において現在運転準備を進めているガラス固化技術開発施設（TVF）および日本原燃㈱が青森県上北郡六ヶ所村に建設を計画しているガラス固化施設から発生するもののほかに、海外再処理計画にもとづき仏国COGEMA社および英国BNFL社から返還されるものがある。これらを参考に表2.2-1に示す標準的なガラス固化体の仕様を解析用に設定した。

オーバーパックおよび緩衝材の形状寸法は、廃棄体定置方式等によって大きく異なることから、現段階においてはいちがいに決められないが、オーバーパックについては、炭素鋼製試作例（本田ほか、1992）を、緩衝材については、低透水性、高膨潤性、高吸着性を有する圧縮ベントナイトを基本として、表2.2-1に示す仕様を解析用に設定し、図2.2-1に示す坑道横置方式と処分孔縦置方式の2種類の廃棄体定置方式について解析検討することとした。

### 2.2.2 廃棄体の埋設密度

図2.2-2に示すように廃棄体1本あたりの専有面積を埋設密度の指標として定義する。専有面積は、空洞の安定性を考慮した処分坑道の離間距離15mと廃棄体の定置間隔の積により与えられる。

### 2.2.3 解析モデル

解析モデルは、処分深度1,000mのケースにおいては、坑道横置方式と処分孔縦置方式の2種類、処分深度500mのケースにおいては、坑道横置方式の1種類について、それぞれ埋設密度の異なる3ケースずつ計9ケースのFEMモデルを作成した。さらに、処分深度1,000m/坑道横置方式のケースについては、オーバーパックと緩衝材の間、緩衝材と岩盤の間に1cmのギャップを設けるモデルを作成しギャップの影響を解析することとした。

図2.2-3に処分深度1,000m/坑道横置方式、図2.2-4に処分深度1,000m/処分孔縦置方式、図2.2-5に処分深度500m/坑道横置方式の解析モデルを示す。x方向については廃棄体中心から坑道間中心(7.5m)まで、y方向については廃棄体中心から廃棄体間中心(パラメータ)までをモデル化した。また、z方向(鉛直方向)については処分深度1,000mで



は地表面からGL-1200mまで、処分深度500mではGL-700m までをモデル化した。

#### 2.2.4 初期条件

地温は、地球内部から地表面に向かう地殻熱流の影響により、深度とともに上昇する。地表面は太陽エネルギーの入射により暖められるが、その影響範囲は日変化で約1m、年変化でも約20mであることを考慮すれば、恒温層以深では短期間にはほとんど変化せず、その場所特有の地温分布が存在する。表2.2-2は、世界各地の地温勾配および地殻熱対流を示している（坪井，1969）。火山等の特殊地域を除けば1~7°C/100m 程度の地温勾配となっていることが分かる。また、図2.2-6は我が国の各地域の地温分布（山本，1983）を、図2.2-7は石狩、新潟平野における地温分布（地下水ハンドブック編集委員会，1979）を示している。地域により、また同地域でも場所により地温勾配が異なることが分かる。

解析の初期条件については、地上の平均気温が15°C程度であることから解析モデル上面（地表面）の温度を15°Cとし、深度方向に我が国の一般的な値であるとあるといわれている3°C/100mの温度勾配を考慮して解析対象領域内の初期温度を設定した。

#### 2.2.5 境界条件

境界条件については、側面は隣接する廃棄体の発熱影響を考慮して断熱境界、地表面及び底面は熱伝達境界とした。

地表面（上面）の境界条件は、気温、日射、放熱、降雨、降雪、蒸発または風等により変動するが、一般的には熱伝達境界で評価し、熱伝達率としては $10\sim 20\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ （日本瓦斯協会，1981）が用いられていることから、その平均値をとって $17\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ （ $15\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）とした（地上の気温は15°C一定）。

底面の熱伝達率については、処分深度1,000mのモデルの場合ではGL-2000m（75°C一定）まで、処分深度500mのモデルの場合ではGL-1500m（60°C一定）までの熱伝導率から換算した $3.6\times 10^{-3}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ を与えた。

## 2.2.6 熱物性値

材料の熱物性としては熱伝導率と体積熱容量（比熱×密度）がある。ここでは、熱解析を行うための岩盤および人工バリアの熱物性値を設定する。

### (1)岩盤

各種岩石の熱伝導率の実測値を表2.2-3～2.2-7に示す。これらの測定結果の単位をそろえ、結晶質岩系と堆積岩系とに分類して整理したものを表2.2-8、2.2-9にまとめる。両岩種とも値にバラツキがあり同一種類の岩石であっても産地によって異なった値を示すことが分かる。これは、鉱物、含水比、間隙比、密度等の違いによるものと考えられる。

日本の結晶質岩系岩石の熱伝導率は、 $1.2\sim 4.6\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.0\sim 4.0\text{kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ) の範囲にほぼ分布しているが、堆積岩系岩石では $1.2\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.0\text{kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ) 以下のものもある。

岩石の比熱の測定値を表2.2-10、2.2-11および表2.2-4、2.2-5、2.2-7に示す。これらを結晶質岩系と堆積岩系に分けて整理したものを表2.2-12、2.2-13に示す。比熱は、熱伝導率と同様に両岩種ともばらつきがあり、同一種類の岩石であっても産地によって異なった値を示しているが、ほぼ $0.84\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.2\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ) の前後に分布している。

解析用の熱物性値としては、以上の実測されている平均的な値を用いることとし、表2.2-14に示す値を設定した。

### (2)ガラス固化体

ガラス固化体の熱物性値については、仏国のガラス固化体であるCOGBMA仕様 (Nagra, 1985)を参考に表2.2-14に示す値を設定した。

### (3)オーバーパック

炭素鋼オーバーパックの熱物性値に関しては、伝熱工学資料（改訂第2版）に基づき温度 $20\text{°C}$ 条件での熱伝導率 $53\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $46\text{kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )、比熱 $0.46\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.11\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )の値を、密度については $7830\text{kg}/\text{m}^3$ の値を用いた。（表2.2-14）。

### (4)緩衝材

緩衝材については、山形県月布産のクニゲルV1を用いた圧縮ベントナイトの熱物性値を用いた。室温における圧縮ベントナイトの熱伝導率と含水比の関係を図2.2-8に、比熱と

含水比の関係を図2.2-9に示す。

圧縮ベントナイトの乾燥密度を $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ とし、初期含水比10%に対して、ガラス固化体の発熱による乾燥を考慮して表2.2-14に示す乾燥状態（含水比6%）と飽和状態（含水比19%）の2種類の伝熱条件を設定した。

なお、含水比6%は、緩衝材大型試験（Sato et al., 1991）における加熱側の緩衝材の含水比が最大で約4%減少したことをもとに設定した最も伝熱条件のきびしい値である。

#### (5)各バリア材間のギャップ

各バリア材間のギャップの熱物性については、表2.2-15に示すように伝熱条件の悪い空気の熱物性値（日本機械学会, 1966）を用いたケースAと緩衝材大型試験の熱解析の熱物性値を用いたケースBの2種類の条件を設定した。

なお、ケースBの値は、緩衝材大型試験（Sato et al., 1991）の温度分布の実測値とその熱解析がほぼ一致するギャップの熱物性値である。緩衝材大型試験設備は、オーバーパックと緩衝材の間は3cmほどの隙間があり、緩衝材と岩盤（コンクリートにより模擬）の間はベントナイトの粉末により充填されている。

### 2.2.7 ガラス固化体の発熱特性

ガラス固化体の発熱特性は、表2.2-1に示すような条件で、燃焼計算コード ORIGEN2

（Croff, 1980）を用いて計算して設定した。その結果を図2.2-10に示す。ここでは中間貯蔵期間を30年とし、30年後（約670w）からの発熱特性を用いて熱解析を行った。

### 2.2.8 人工バリアおよび周辺岩盤の許容温度

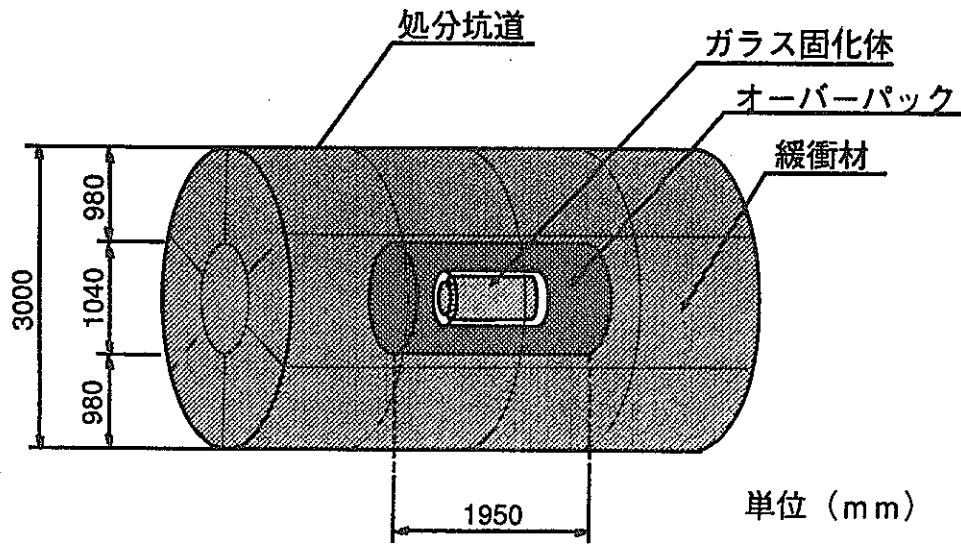
緩衝材としてのベントナイトの主成分であるスメクタイトという鉱物は、天然の続成作用、熱水作用によってイライト化することが知られている。スメクタイトがイライト化すると緩衝材に必要な低透水性、膨潤性、核種吸着性といった重要な性能が低下することが考えられる。

ベントナイトは、天然の事例調査（Kamei et al., 1991）や室内実験（柴田・亀井, 1992）によると $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下であれば長期にわたって安定性が保たれること、諸外国も緩衝材の長期安定性に対する許容温度を約 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ （Nagra, 1985）としていることから、ここでは緩衝材の許容温度を $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ とすることとした。

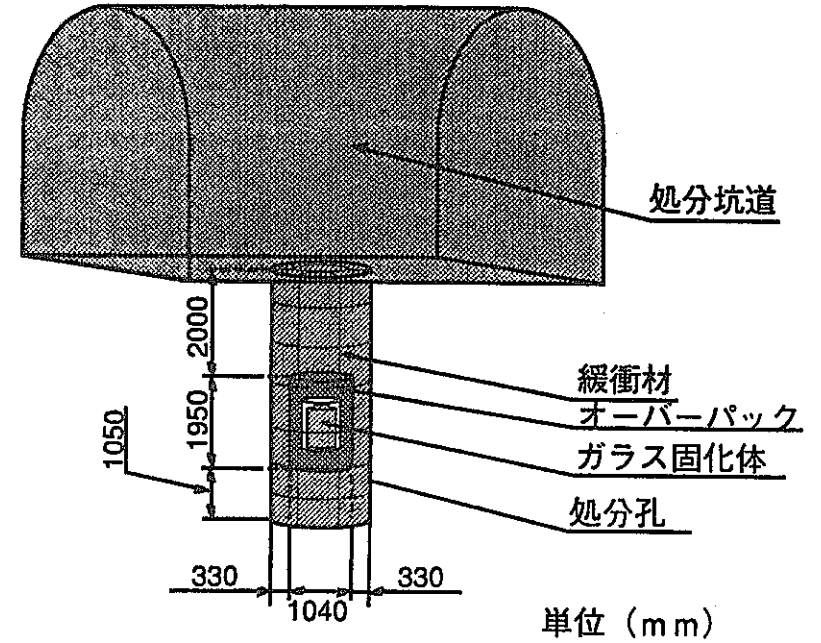
緩衝材の許容温度100℃に対して、固化ガラスの相転移温度は約500℃、岩石の熱変質温度は約150～300℃（IAEA, 1983）であることから、廃棄体の埋設密度は、緩衝材の許容温度によって決められる。

表2.2-1 検討用の仕様例

ガラス固化体	処分量	40,000 [本]
	燃焼条件	燃焼度 : 33,000 [MWd/t] 比出力 : 30 [MW/t] 燃焼サイクル : (275 日燃焼+90日崩壊) × 4 U-235 濃縮度 : 3.5 [%]
	再処理条件	原子炉からの取出し後, 3年冷却した後に再処理
		元素の除去率
	固化条件	高レベル放射性廃液として1年貯蔵した後にガラス固化
	処分条件 (中間貯蔵期間)	ガラス固化後30年間貯蔵した後に埋設
	発熱量	670 [W/本] (埋設時点)
	寸法等	ホウケイ酸ガラス重量 : 405 [kg/本] 直径 : 430 [mm] 長さ : 1,340 [mm]
オーバーパック	材料	炭素鋼
	外径	1,040 [mm]
	長さ	1,950 [mm]
	内厚	300 [mm]
緩衝材	材料	Na型ベントナイト
	寸法等	厚さ : 330 または 980 [mm] 乾燥密度 : 1.8 [g/cm <sup>3</sup> ] 初期含水比 : 10 [%] 空隙率 : 0.33 [-]
	組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Na-モンモリロナイト 50~55%</li> <li>・ 石英 30~35%</li> <li>・ 長石 5~10%</li> <li>・ 方解石 1~3%</li> <li>・ 沸石 (アナルサイト) 1~2%以下</li> <li>・ ドロマイト 1~2%以下</li> <li>・ 黄鉄鉱 1~2%以下</li> <li>・ 雲母 (黒雲母) 1~2%以下</li> </ul>



(a) 坑道横置方式



(b) 処分孔縦置方式

図2.2-1 廃棄体の定置方式

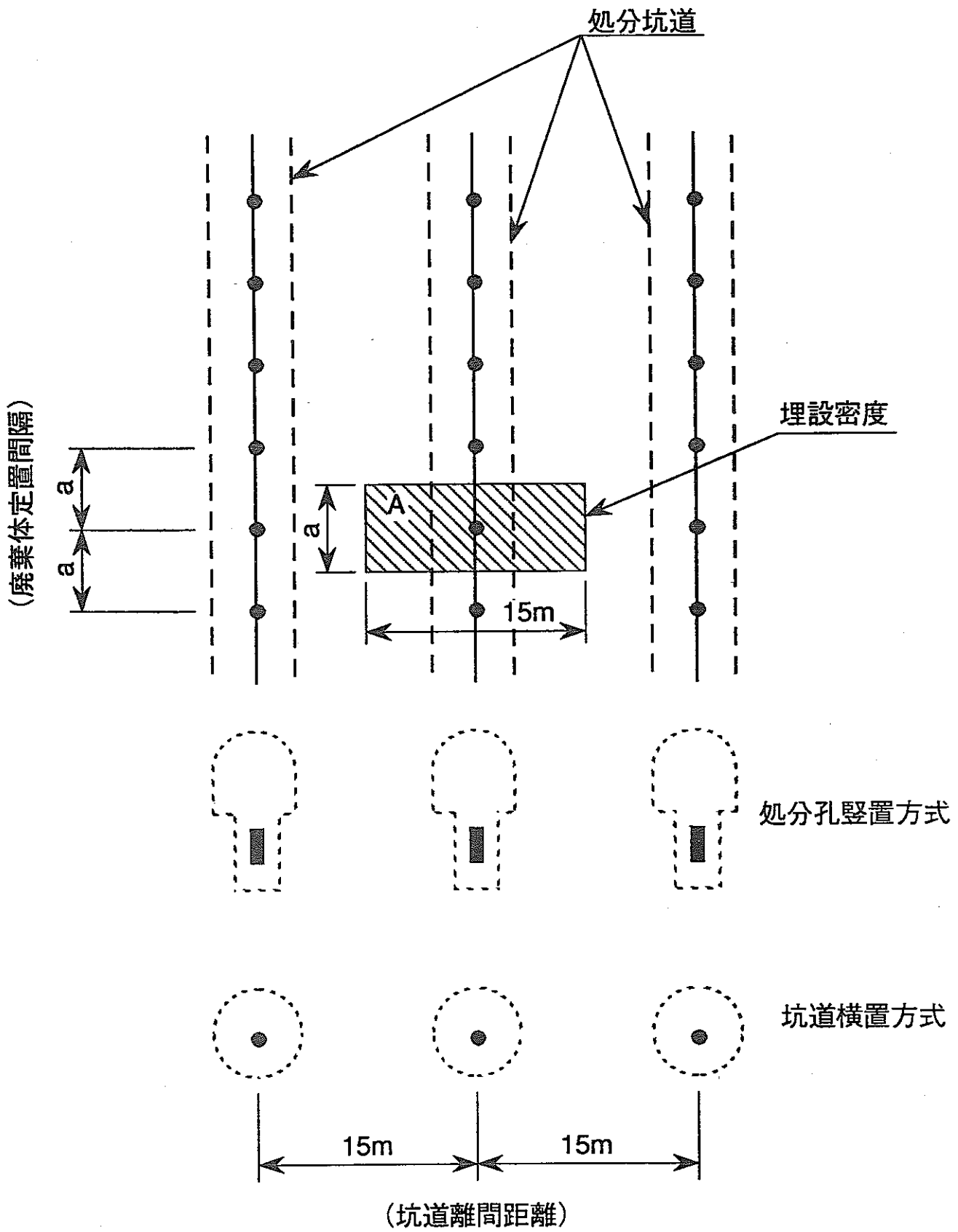


図2.2-2 廃棄体1本あたりの埋設密度

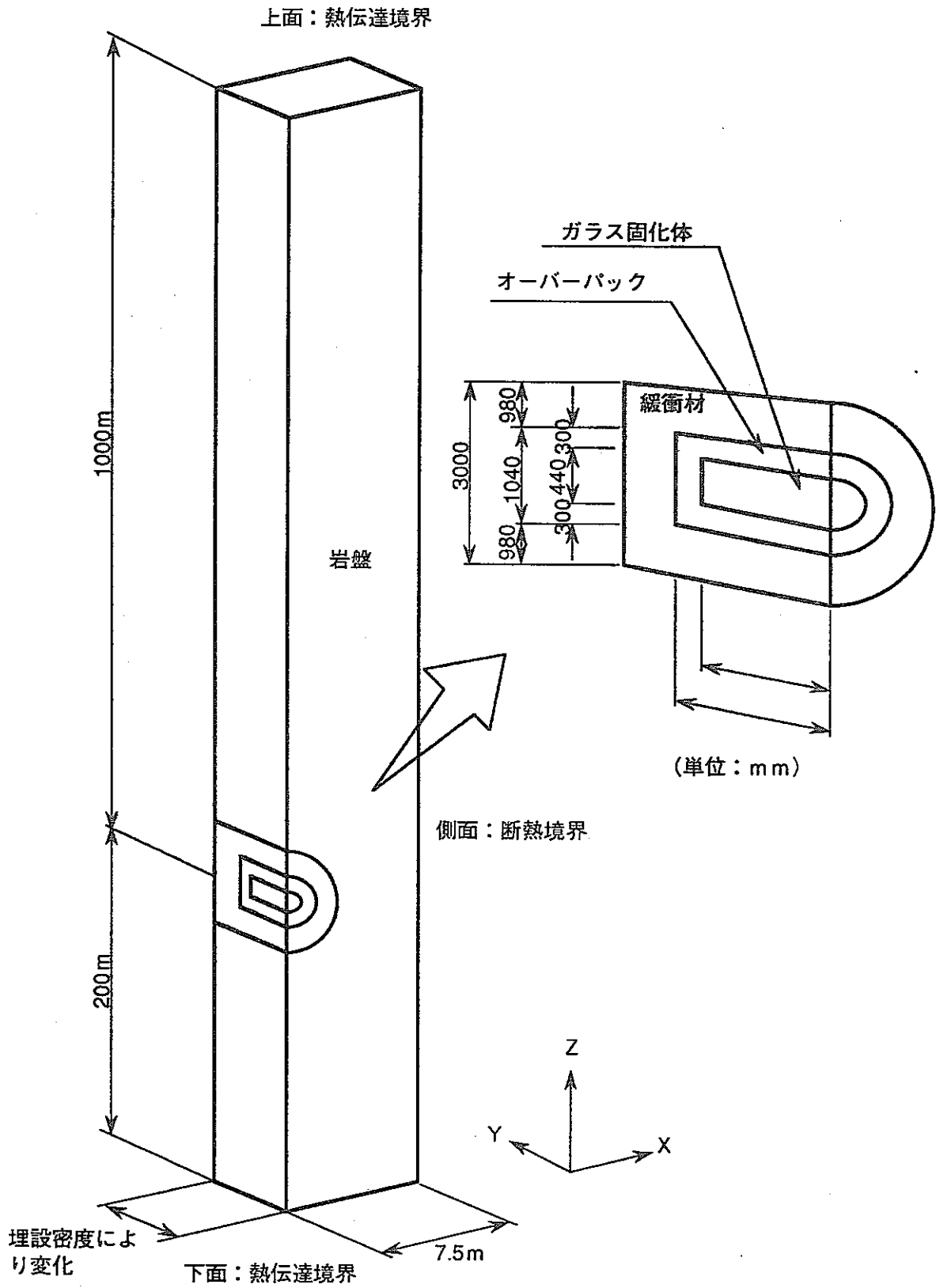


図2.2-3 解析モデル図（処分深度1,000m, 坑道横置方式）



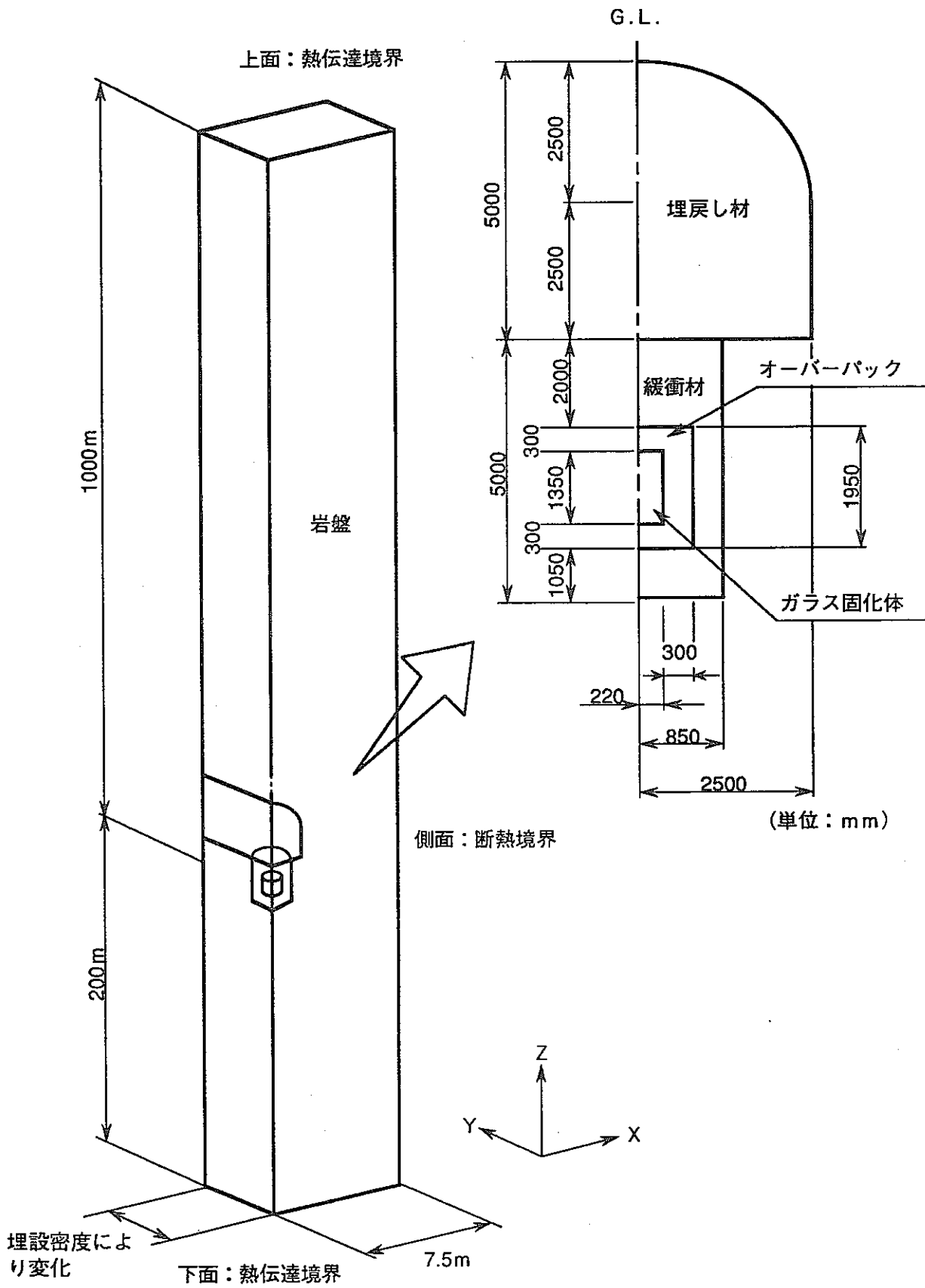


図2.2-4 解析モデル図 (処分深度1,000m, 処分孔縦置方式)

上面：熱伝達境界

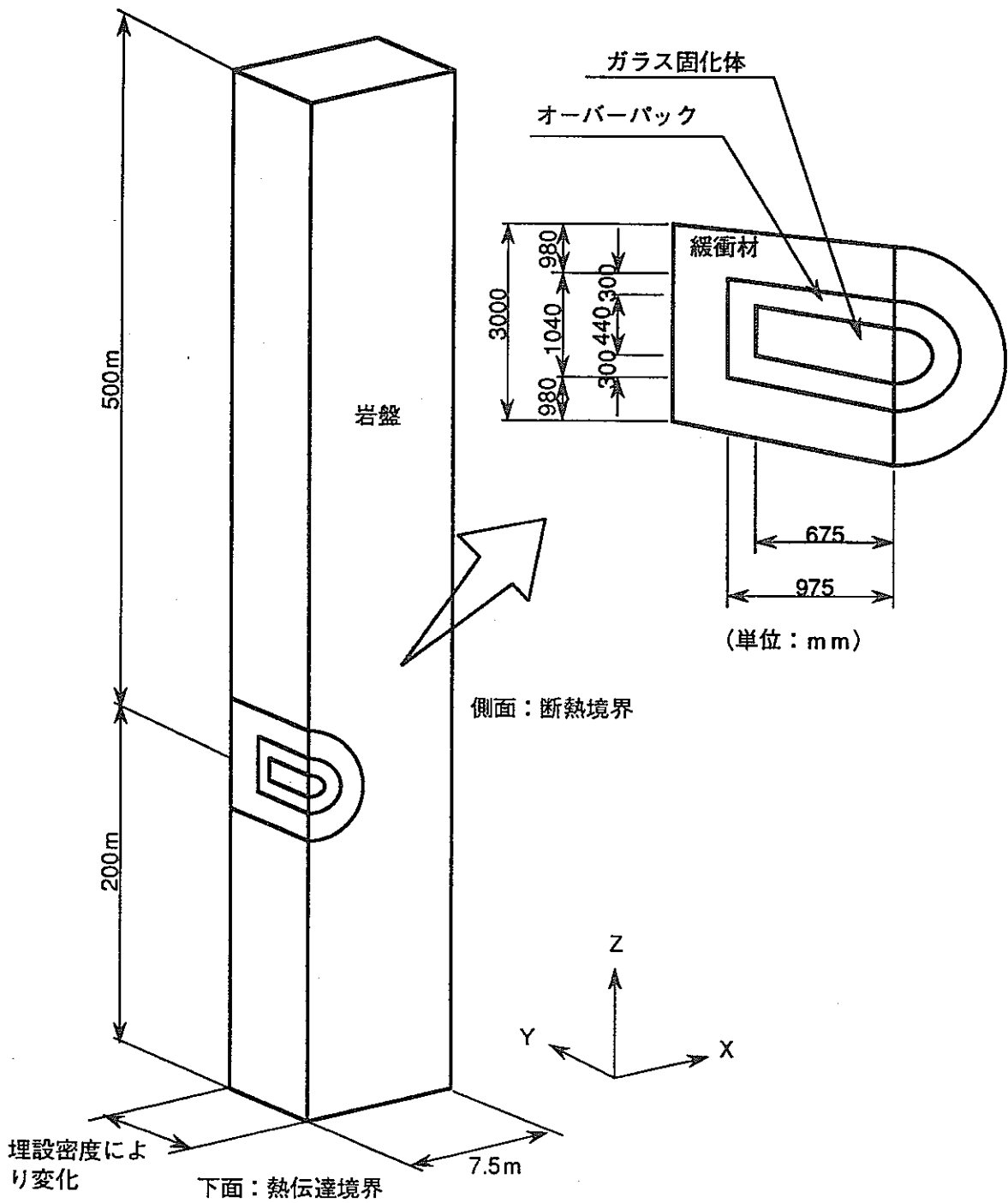


図2.2-5 解析モデル図 (処分深度500m, 坑道横置方式)

表2.2-2 世界各地の地温勾配および地殻熱流量 (坪井, 1969)

地名	地殻熱流量 ( $10^{-6}$ cal/cm <sup>2</sup> sec)	地温勾配 (°C/100m)	測定者
Canada			
Ontario, Quebec	0.69—1.32	0.9 —1.6	Misener et al. (1931)
Resolute Bay	2.9	3.95	Misener (1955)
U. S. A.			
Texas, New Mexico	1.1 —2.0	0.77—3.4	Herrin & Clark (1956) Birch & Clark (1945) Richardson & Wells (1931)
California	0.66—1.3	0.86	Benfield (1947) Clark (1957)
Michigan	0.9	1.3	Birch (1954)
Colorado	1.6 —1.9	2.0 —2.4	Birch (1950)
Georgia	1.4	1.7 —2.2	Birch (1947)
Kansas	1.4 —1.7	2.8	Birch (1947)
Great Britain	0.68—2.24	1.7 —6.5	Benfield (1939) Bullard & Niblett (1951) Anderson (1939) Chadwick (1956)
Hungary	2.0 —3.04	4.0 —7.0	Boldizsar (1956), (1959)
Iran	0.53—1.22	0.9 —2.0	Coster (1947)
South Africa	0.75—1.52	0.70—2.23	Bullard (1939)
Alps	1.4 —2.2	1.3 —3.6	Koenigsberger & Muhlberg (1911) Koenigsberger (1942) Clark & Niblett (1956)
Tasmania	2.04—2.54		Beck & Beck (1953)
日本			
葦子隧道	2.06	2.7	上田他 (1955)
草津白根火山	10.8	24.2	・ ( ・ )
日立鉱山	0.63—0.90	0.94—1.21	宝来 (1959)
八幡油田	2.01	4.8	宝来・上田 (1959)
院内油田	1.49	4.8	上田・宝来 (1960)
東京大学構内	0.74	2.2	・
茨城県鹿島	0.76	1.5 —2.6	・
茨城県勝田	0.91	2.9 —3.1	・
太平洋	0.14—8.09	4.0 —7.0	Revelle & Maxwell (1952) Herzen (1959)
北大西洋	0.58—1.42	2.5 —5.5	Bullard (1954) Bullard et al. (1957)
Mid-Atlantic Ridge	6.0		Bullard (1957)

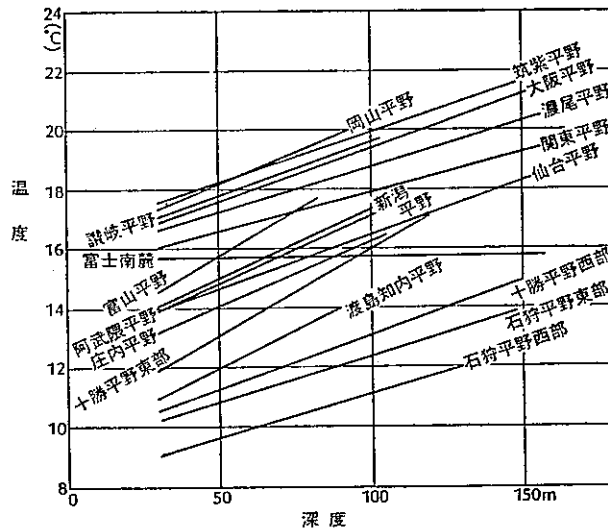
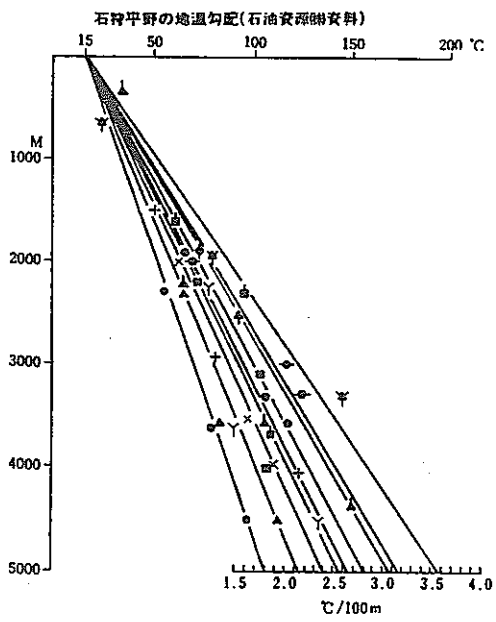
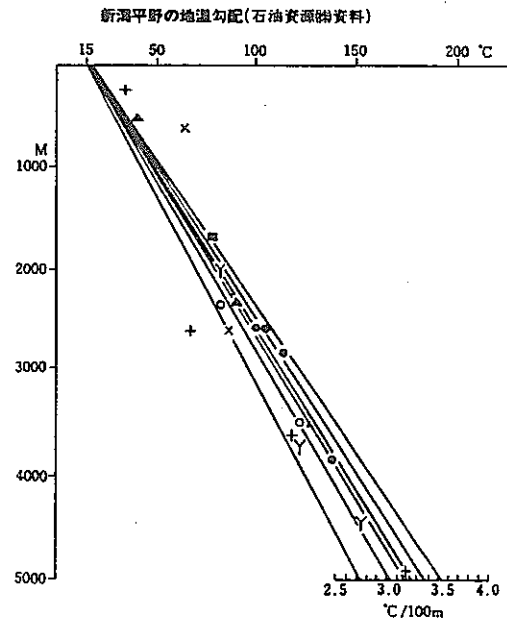


図2.2-6 深層地下水の温度と深さの関係 (山本, 1983)



(a)石狩平野の地温勾配



(b)新潟平野の地温勾配

図2.2-7 我が国の地温勾配例 (地下水ハンドブック編集委員会, 1979)

表2.2-3 岩石の熱伝導率 (土質工学会編, 1979)

(試験数5以上の平均値, 20°C前後における値, Clark, Jr.による)

岩石の種類, 産地	試験数	熱伝導率 10 <sup>-3</sup> (cal/cm·sec·°C)	
		平均値	範囲
花崗岩類, コロラド州アダムストーンネル	59	7.89	6.7~8.6
花崗岩, スイス, レッチベルクトンネル	12	7.77	6.2~9.0
花崗閃緑岩, ネバダ州スチームボート	5	6.64	6.2~6.9
〃 カリフォルニア州グラスパレー	14	7.61	7.0~8.3
石英斑岩, 南アフリカ, ジャコパポア	5	8.0(25°C)	7.6~8.6
閃長岩類, オンタリオ州カーランドレーク	37	7.66	6.3~9.5
変質硫紋岩, 〃 ティミンズ	6	8.23	7.4~8.8
斑禿岩, 〃 サドベリー	5	6.42	5.5~7.3
蛇紋岩化橄欖岩, ケベック州テドフォード	5	6.34	5.7~7.0
集塊岩, 南アフリカ, トランスバール	5	7.4	7.1~8.0
粗粒玄武岩, 南アフリカ, ケステルボア	9	4.8(35°C)	4.0~5.5
熔岩, 南アフリカ, ジャコパポア	9	7.4(25°C)	6.3~8.6
〃 南アフリカ, トランスバール	15	7.2	6.4~8.0
〃 (ちみつ), ミシガン州ガラムット	27	5.01	4.1~6.6
〃 (二次鉱物を含む) 〃	10	6.4	5.5~9.0
玢岩, 輝緑岩, カリフォルニア州グラスパレー	21	7.14	6.2~8.2
石英閃緑岩, 片麻岩, コロラド州アダムストーンネル	17	7.75	6.6~8.5
注入片麻岩, 片岩, 〃 〃	41	7.74	4.0~11.0
片麻岩, スイス, サンゴタルドトンネル	15	6.68	5.1~8.0
片麻岩, 片理に直角, スイス, シンプロントンネル	22	6.34	4.6~7.7
〃 平行, 〃 〃	8	8.90	6.0~11.4
片岩, 片理に直角 〃 〃	8	5.74	4.1~6.8
〃 平行, 〃 〃	7	7.50	6.8~8.9
片麻岩, パーモント州チェスター, 片理に直角	9	6.24	4.9~8.7
〃 〃 〃 平行	9	8.33	6.1~10.4
角閃岩, 南ダコタ州ホームステークマイソ	6	6.92	6.1~9.1
石灰岩雲母千枚岩, 〃 片理に直角	7	7.98	6.5~9.0
〃 〃 〃 平行	9	11.83	9.5~14.0
珪岩 〃	6	16.05	14.2~17.6
珪岩, 南フリカ, ウィットウォーターランド	17	14.3	8.7~19.2
〃 〃	21	14.5(25°C)	10.4~18.9
〃 〃 ルーデプールト	7	10.1	7.4~12.7
ドロマイトおよび石筈, スイス, レッチベルクトンネル	7	11.93	8.9~13.9
石灰岩, カナダトロント	6	6.12	4.7~7.1
ドロマイト, 南アフリカトランスバール HB15	8	13.2	標準偏差=1.0
ドロマイト, 〃 ゲルハルトミネブロンボア	7	11.0(25°C)	9.6~12.0
砂岩, 〃 ケステルボア	7	4.7(35°C)	3.5~7.7
砂岩, 南アフリカケステルボア	6	5.7(35°C)	4.7~6.4
石灰岩, イラン, マスジゲスライマン	21	5.2	標準偏差=.9
頁岩質石灰岩, レゾルートベイ, N.W.T.	5	7.3	6.6~8.0
泥灰岩, 頁岩 etc, イラン, マスジゲスライマン	5	4.9	標準偏差=.3
頁岩, カリフォルニア州, ベリー No.1#1 000~5 290 ft	14	3.55	2.8~4.2
5 290~8 780 ft	17	4.20	3.2~5.6
礫岩, ミシガン州カルメット	31	4.98	2.2~7.9
砂岩 〃 〃	8	6.78	5.1~10.2
二疊紀泥灰岩, イギリス, ヨークシャ	5	5.22	4.2~6.6
石炭紀砂岩, 〃 ノッティンガムシャ	6	6.62	6.0~7.7
〃 頁岩, イギリス	11	3.26	3.0~4.3
グリット砂岩, 〃ノッティンガムシャ	8	8.85	7.7~11.0
三疊紀泥灰岩, 〃 ヨークシャ	5	3.52	2.2~5.3

表2.2-4 岩および小石の膨張係数, 比熱, 熱伝導率 (Sydney P. Clark, 1966)

Cailleux (C), Duriez (D), Pascal (P) による

岩	比重	膨張係数 ( $10^{-5}$ )	比熱 (cal/g°C)	熱伝導係数 (C.G.S. $10^{-5}$ )	備考
安山岩	2.2~2.9	0.70		300~700	C
スレト	2.7~2.9	0.90	0.170	370~670	C, D
乾いた粘土	2.2			60~300	C
湿った粘土	2.2		0.360	200~500	C
玄武岩	2.8~3.2	0.54	0.150~0.213	300~700	C, P, D
非常に硬い石灰岩	2.6~2.8		0.210~0.240	810	C, P
硬質石灰岩	2.4~2.6	0.89		500	C
中硬質石灰岩	2.2~2.4			400	C, D
軟質石灰岩	1.7~2.2	0.50	0.160		C
非常に軟らかい石灰岩	1.2~1.8		0.150	200	C
礫岩	2.0~2.7			500	C
白亜	1.2~2.2			200~220	C, D
白雲岩	2.2~2.9		0.174	970	C
片麻岩	2.5~2.7		0.176~0.195~ 0.24	400~820	C, P
花崗岩	2.5~2.8	0.75~0.80	0.132~0.199	290~970	C, P
硬質砂岩	2.1~2.9		0.222	1100	C
中硬質砂岩	2.0~2.1	1.00	0.180	600	C, D
軟質砂岩	1.6~2.0		0.174	240	C
石膏	2.2~2.3	1.40	0.245	310	C, D
高陵石			0.220		P
溶岩	2.73		0.215	200	P, D
一口			0.540	30~550	C
大理石	2.6~2.8	0.54~0.70	0.190~0.210	120~890	C, P, D
泥灰岩				220~520	C
硅石 (Meulière)	0.9~2.4		0.198		P
雲母片岩	2.4~3.2				
斑岩	2.7~2.9			550~840	C, D
硅岩 (Quartzite)	2.3~2.7	1.10	0.167~0.225	700~1920	C, D
細砂	2.6~2.7		0.230	13~60~390	C, D
片岩	1.5~2.0		0.185	140~660	C
蛇紋岩	2.5~2.8		0.208	140	C
硅石 (Silex)	2.6~2.7		0.202	240	P, D
石灰華	1.4~2.4				
凝灰岩	1.8			170~385	C

表2.2-5 熱特性値例 (チュブルウノフ, 1968)

	単位体積重量 $\gamma$ , トン/m <sup>3</sup>	熱容量 $c$ , kcal/kg·°C	熱伝導率 $\lambda$ , kcal/m·hr ·°C	温度伝導率 $\alpha \cdot 10^4$ , m <sup>2</sup> /hr
無煙炭	1.44	0.23	0.28	8.64
水	1.00	1.0	0.5	5
砂利, 乾燥砂	1.4	0.2	0.29	10
花崗岩	2.72	0.2	2.7~3.5	31.82
粘土 [凍結したもの, 凍結してないもの]	2.00	0.29	1.15	20
石灰岩	2.48	0.22	0.9~1.1	16.03
石英 (砂岩)	2.63	0.2	1.1~1.5	28.5
氷	0.92	0.5	2	43
銅	7.2~7.8	—	40~45	—
含水砂利 [凍結したもの]	2.2	0.20	1.4	32
〃 [凍結してないもの]	2.1	0.26	1.8	42
頁岩	2.43	0.24	0.8	13.74
岩塩	2.2	0.22	5.0	103
火成岩	2.7	0.20	2.5	46
石炭	1.35	0.25	0.24	7.18

表2.2-6 日本産岩石の熱伝導率 (Horai, 1964)

(単位:  $10^{-3}$  cal/cm·sec·°C)

岩	石	熱伝導率	岩	石	熱伝導率
花崗岩	片麻岩	6-9	片麻岩	頁岩	3-10
花崗岩	閃緑岩	6-7	片麻岩	頁岩	4-9
安山岩	粗面岩	3-8	砂岩	頁岩	2-11
石英岩	板状安山岩	6-8	頁岩	頁岩	3-11
泥岩	状安山岩	6-7	頁岩	頁岩	5-8
粒状輝石岩	安山岩	4-8	頁岩	頁岩	3-9
輝石岩	輝石岩	5-6			

表2.2-7 岩盤物性値例 (新・北野, 1987)

	Stripa 花崗岩	Climax 石英モンゾナイト	Conasauga 頁岩	Eleana 泥質岩	単位
弾性係数	51.3	61.4~69.7			GPa
ポアソン比	0.23	0.21~0.22			—
密度	2.6	2.6~2.66	2.6~2.7	2.7~2.9	g/cm <sup>3</sup>
間隙率		0.7~1.1	0.1~4	6.8~12	(%)
一軸圧縮強度		210			MPa
熱伝導率	3.2	3.0	1.1~2.2	2.0~2.6	w/m°C
線膨張係数	$11.1 \times 10^{-6}$		$7.5 \sim 14 \times 10^{-6}$	8.6~12.5	1/°C
比熱	837		800~1,000	900~1,000	J/kg°C

表2.2-8 結晶質岩系岩石の熱伝導率

岩石の種類, 産地	熱伝導率 (Kcal/m·hr·°C)				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
(火成岩)					
花崗岩類, コロラド州アダムストーンネル			←○→		
花崗岩, スイス, レッチベルクトンネル			←○→		
花崗閃緑岩, ネバダ州スチームボート			←○→		
" カリフォルニア州グラスパレー			←○→		
石英斑岩, 南アフリカ, ジャコボボア			←○→		
閃長岩類, オンタリオ州カークランドレーク			←○→		
変質硫紋岩, " ティミンズ			←○→		
斑岩, " サドベリー			←○→		
粗粒玄武岩, 南アフリカ, ケステルボア		←○→			
玢岩, 輝緑岩, カリフォルニア州グラスパレー			←○→		
花こう岩, 日本			←○→		
花こう閃緑岩, 日本			←○→		
安山岩, 日本	←○→				
石英粗面岩, 日本			←○→		
斑紋岩, 日本			←○→		
柱状安山岩, 日本	←○→				
輝緑岩, 日本			←○→		
安山岩	←○→				
玄武岩	←○→				
花崗岩	←○→				
斑岩			←○→		
花崗岩			←○→		
火成岩			○		
花崗岩, Stripa			○		
石英モンゾナイト, Climax			○		
平均的な火成岩			○		
(変成岩)					
石英閃緑岩, 片麻岩, コロラド州アダムストーンネル			←○→		
注入片麻岩, 片岩, " "	←○→				
片麻岩, スイス, サンゴタルドトンネル			←○→		
片麻岩, 片理に直角, スイス, シンプロントンネル	←○→				
" 平行, " "			←○→		
片岩, 片理に直角, " "	←○→				
" 平行, " "			←○→		
片麻岩, バーモント州チェスター, 片理に直角	←○→				
" " " 平行			←○→		
角閃岩, 南ダコタ州ホームステークマイン			←○→		
石灰岩雲母千枚岩, " 片理に直角			←○→		
" " 平行				←○→	
片岩, 日本	←○→				
片麻岩, 日本	←○→				
スレート	←○→				
片麻岩	←○→				
雲母片岩			←○→		
片岩	←○→				



表2.2-9 堆積岩系岩石の熱伝導率

岩石の種類, 産地	熱伝導率 (Kcal/m·hr·°C)				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
珪岩, 南ダコタ州ホームステークマイン					←
珪岩, 南フリカ, ウィットウォーターランド			←		○
"				←	○
" " ルーデブルト			←	○	→
ドロマイトおよび石筈, スイス, レッチベルクトンネル			←	○	→
石灰岩, カナダトロント		←	○	→	
ドロマイト, 南アフリカトランスバル HB15					○
ドロマイト, " ゲルハルトミネブロンボア				←	○
砂岩, " ケステルボア	←	○	→		
砂岩, 南アフリカケステルボア		←	○	→	
石灰岩, イラン, マスジデスライマン		○			
頁岩質石灰岩, レゾルートベイ, N.W.T.			←	○	→
泥灰岩, 頁岩 etc, イラン, マスジデスライマン		○			
頁岩, カリフォルニア州, ベリー No. 1#1 000~5 290 ft	←	○	→		
5 290~8 760 ft	←	○	→		
礫岩, ミシガン州カルメット	←	○	→		
砂岩 " "		←	○	→	
二疊紀泥灰岩, イギリス, ヨークシャ		←	○	→	
石炭紀砂岩, " ノッティンガムシャ		←	○	→	
" 頁岩, イギリス	←	○	→		
グリット砂岩, " ノッティンガムシャ			←	○	→
三疊紀泥灰岩, " ヨークシャ	←	○	→		
砂岩, 日本	←	○	→		
頁岩, 日本	←	○	→		
石灰岩, 日本		←	○	→	
凝灰岩, 日本	←	○	→		
非常に硬い石灰岩			○		
硬質石灰岩		○			
礫岩		○			
白雲岩				○	
硬質砂岩				○	
泥灰岩	←	○	→		
凝灰岩	←	○	→		
石灰岩	←	○	→		
砂岩		←	○	→	
頁岩	○				
岩塩					○
頁岩, Conasauga	←	○	→		
泥質岩, Eleasa		←	○	→	

表2.2-10 各材料の20℃における比熱 (芝, 1947)

(Henning: Wärmetechnische Richtwerte による)

(cal/g°C)

物質	c <sub>20</sub>	物質	c <sub>20</sub>	物質	c <sub>20</sub>	物質	c <sub>20</sub>
アスファルト	0.22	硝子(フリント)	0.115	樹脂 (硬)	0.44	パラフィン	0.5
アスベスト	0.19	〃 (verre dur)	0.187	〃 (コロフォニウム)	0.29	封緘 (白)	0.25
雲母	0.20	軽石	0.24	スレート	0.18	ベークライト	0.33
エポナイト	0.34	珪藻土	0.20	石灰砂岩	0.20	螢石	0.21
花崗岩	0.18	玄武岩	0.19	石炭	0.30	木材	0.5-0.7
硝子(普通)	0.184	鏡滓	0.20	セメント	0.166	木炭	0.18
〃 (エナ16Ⅲ)	0.186	ゴム	0.27-0.48	セラチン	0.51	木綿	0.31
〃 (エナ59Ⅲ)	0.189	コルク	0.4-0.5	耐火粘土	0.20	煉瓦	0.20
〃 (鏡用)	0.183	コンクリート	0.21	粘土	0.21	燧石(黄)	0.7
〃 (クラウン)	0.159	磁器	0.19	灰	0.19		
硝子(バイレックス)	0.185	砂岩	0.17	白雲石(フロマイト)	0.21		

表2.2-11 種々の物質の比熱 (国立天文台編, 1990)

(J/g・°K)

物質	比熱					
	-196℃	-100℃	0℃	100℃	300℃	500℃
<b>合金</b>						
黄銅 (真鍮)	0.20	0.34	0.387	0.390	0.448	—
コンスタンタン	0.175	—	約0.40	0.42	0.45	—
ステンレス鋼 18Cr/8Ni	—	—	—	0.519	0.555	0.611
18Cr/12Ni	0.197	0.401	0.47	—	—	—
24Cr/20Ni	0.195	0.393	0.463	—	—	—
炭素鋼	—	—	—	0.48	0.57	0.70
はんだ	0.142	0.167	0.177	—	—	—
洋銀	—	—	—	0.398 (0-100℃の平均値)		
<b>固体</b>						
石綿	—	—	—	約0.84 (20-100℃)		
エポナイト	—	—	—	1.38 (20-100℃)		
塩化カリウム	0.44	0.63	0.68	—	—	—
塩化ナトリウム	0.48	0.77	0.84	—	—	—
紙	—	—	—	1.17-1.34 (0-100℃)		
花こう岩	—	—	—	0.80-0.84 (20-100℃)		
ガラス (クラウン)	—	—	—	約0.67 (10-50℃)		
(フリント)	—	—	—	約0.5 (10-50℃)		
(バイレックス)	—	—	—	0.70	0.85	1.1
玄武岩	—	—	—	約0.84-1.0 (20-100℃)		
氷	0.69	1.38	2.10	—	—	—
ゴム	—	—	—	1.1-2.0 (20-100℃)		
コンクリート	—	—	—	約0.84 (室温)		
磁器	—	—	—	約0.75 (0-200℃), 約1.07 (10-1000℃)		
水晶	0.19	0.47	0.73	0.86	1.06	1.2
砂	—	—	—	約0.8		
石英ガラス	—	—	—	0.70	0.83	1.02
大理石	—	—	—	約0.9		
パラフィンろう	—	—	—	約2.9		
ホタル石	—	—	—	0.88 (30℃)		
ポリエチレン	0.54	1.04	約1.8	—	—	—
ポリスチレン	—	—	—	1.34 (20℃)		
ポリメタクリル酸メチル	—	—	—	1.47 (20℃)		
木材	—	—	—	約1.25 (20℃)		

表2.2-12 結晶質岩系岩石の比熱

岩石の種類, 産地	比熱 (Kcal/kg°C)		
	0.15	0.20	0.25
(火成岩)			
玄武岩			
花崗岩			
花こう岩 (20°C~100°C)			
玄武岩 (20°C~100°C)			
花崗岩			
火成岩			
花崗岩, Stripa			
花崗岩			
玄武岩			
平均的な火成岩			
(変成岩)			
スレート			
片麻岩			
片岩			
大理石			
大理石			
スレート			

表2.2-13 堆積岩系岩石の比熱

岩石の種類, 産地	比熱 (Kcal/kg°C)		
	0.15	0.20	0.25
非常に硬い石灰岩			
白雲岩			
硬質砂岩			
矽石 (Heulandite)			
矽岩 (Quartzite)			
石灰岩			
砂岩			
頁岩			
岩塩			
頁岩, Conasauga			
泥質岩, Eleana			
砂岩			
石灰砂岩			
白雲石 (ドロマイト)			

表2.2-14 人工バリアおよび岩盤の熱的物性値

		熱伝導率 ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	比 熱 ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	単位体積重量 ( $kg \cdot m^{-3}$ )
ガラス固化体		1.2	0.96	2,800
オーバーバック		53.0	0.46	7,800
緩衝材	乾燥状態	0.9	0.6	1,900
	飽和状態	1.7	1.0	2,100
結晶質岩系岩盤		2.9	0.84	2,700
堆積岩系岩盤		2.3	0.84	2,300

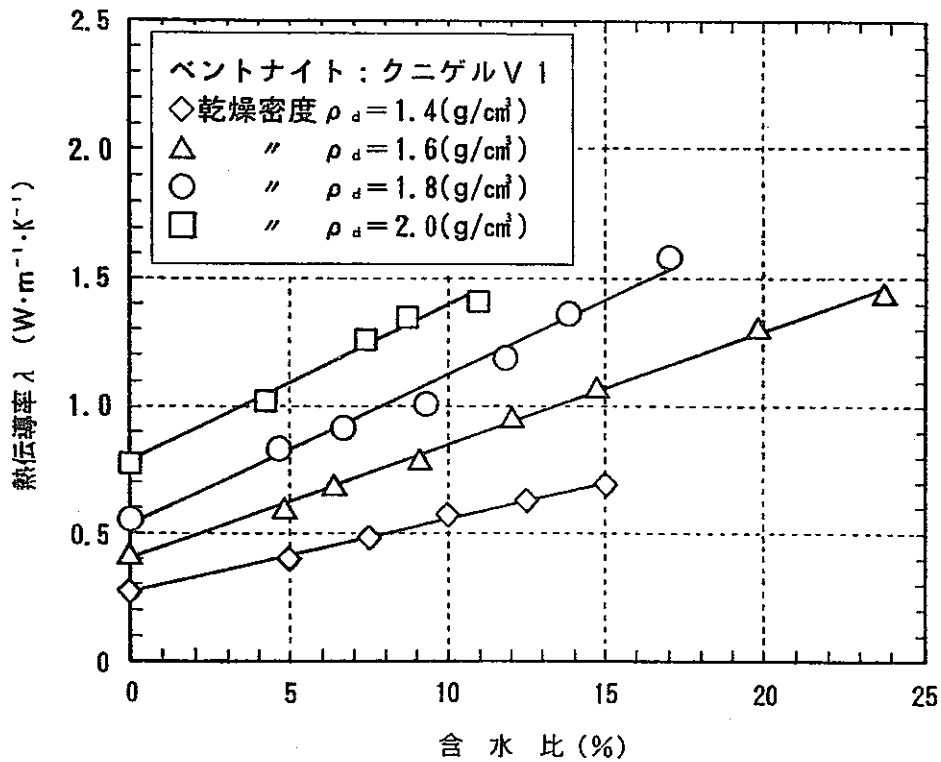


図2.2-8 圧縮ベントナイトの熱伝導率と含水比の関係  
(鈴木ほか, 1992)

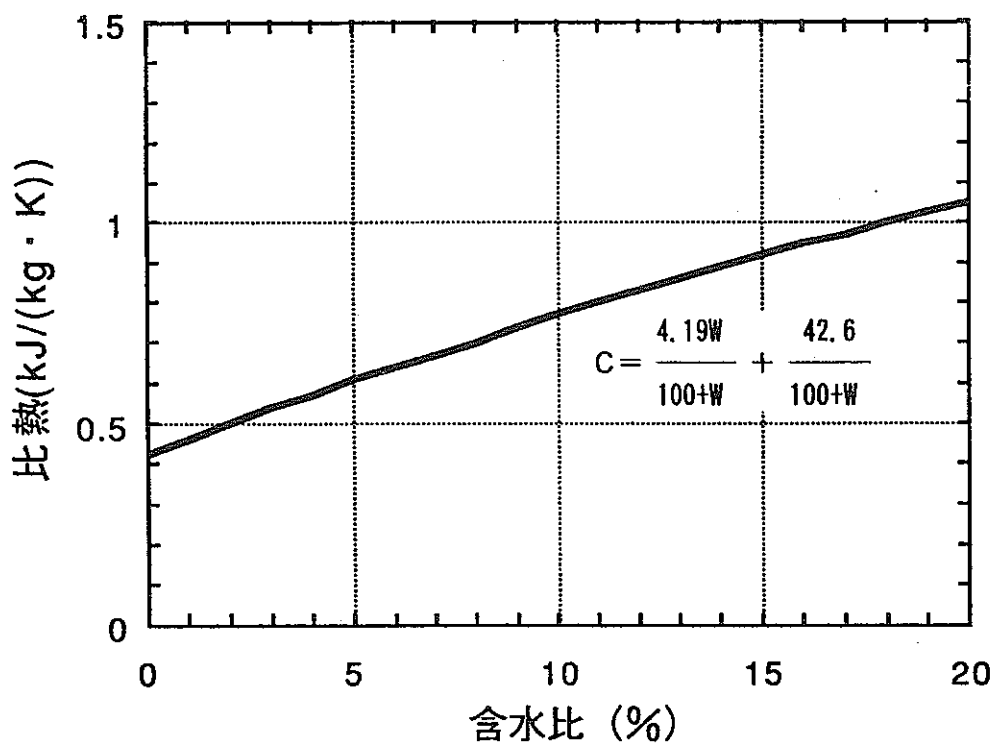


図2.2-9 圧縮ベントナイトの比熱と含水比の関係  
(藤田ほか, 1992)

表2.2-15 ギャップの熱物性値

		熱伝導率 ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	比熱 ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	単位体積重量 ( $kg \cdot m^{-3}$ )
物性A	オーバーパック, 緩衝材間	0.0316	1.0	0.916
	緩衝材, 岩盤間	0.0287	1.0	1.026
物性B	オーバーパック, 緩衝材間	0.071	1.0	0.916
	緩衝材, 岩盤間	0.569	0.92	1,300

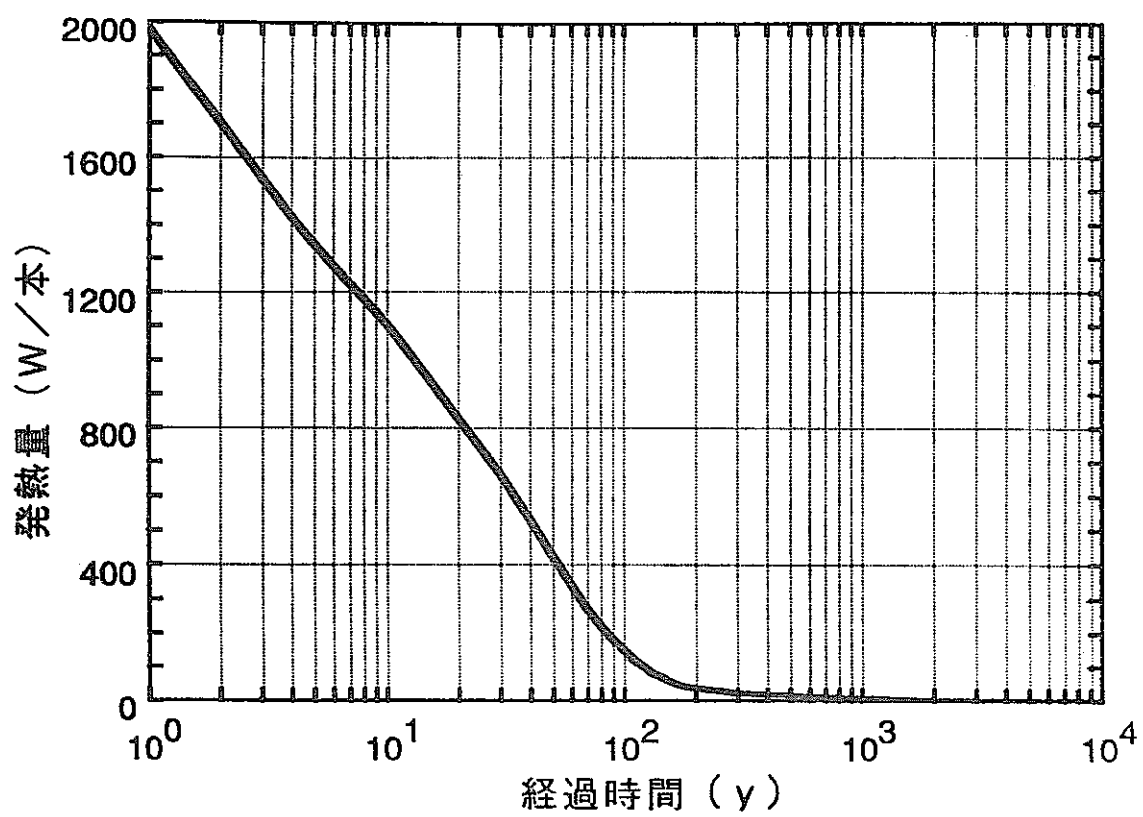


図2. 2-10 ガラス固化体の発熱量の経時変化

### 2.3 解析ケース

ニアフィールドの熱解析は、表2.3-1に示すように処分深度、廃棄体の定置方式、埋設密度、ギャップの有無をパラメータにした合計12ケースを実施した。

解析ケース1～3は、堆積岩系岩盤、坑道横置方式、処分深度500mの条件で、埋設密度をパラメータとした。解析ケース4～6は、結晶質岩系岩盤、坑道横置方式、処分深度1,000mの条件で、解析ケース10～12は、結晶質岩系岩盤、処分孔縦置方式、処分深度1,000mの条件で、それぞれ埋設密度をパラメータとした。以上の解析では、緩衝材の熱物性値については乾燥状態の値（表2.2-14）を用い、バリア材間のギャップを無視した理想系で行った。

解析ケース7は、オーバーパックと緩衝材、緩衝材と岩盤の境界に1cmのギャップを設け、その熱物性値として表2.2-15の物性Aを用いており、その他は解析ケース5と同一条件とした。

解析ケース8は、ギャップの熱物性値として表2.2-15の物性Bを用い、その他は解析ケース7と同一条件とした。

解析ケース9は緩衝材が飽和状態のときの熱物性値（表2.2-14）を用いており、その他は解析ケース5と同一条件とした。

表2.3-1 ニアフィールドの熱解析ケース

解析 ケース	岩盤分類	処分深度 (m)	廃棄体定置方式	廃棄体の埋設 密度 (m <sup>3</sup> )	緩衝材の 物性	ギャップの有無
1	堆積岩系岩盤	500	坑道横置方式	40	乾燥状態	なし
2	〃	〃	〃	100	〃	〃
3	〃	〃	〃	160	〃	〃
4	結晶質岩系岩盤	1,000	〃	40	〃	〃
5	〃	〃	〃	100	〃	〃
6	〃	〃	〃	160	〃	〃
7	〃	〃	〃	100	〃	あり (物性A)
8	〃	〃	〃	〃	〃	あり (物性B)
9	〃	〃	〃	〃	飽和状態	なし
10	〃	1,000	処分孔竖置方式	70	乾燥状態	〃
11	〃	〃	〃	100	〃	〃
12	〃	〃	〃	130	〃	〃



## 2.4 解析結果

### (1)人工バリアおよび周辺岩盤の温度変化

解析ケース1～12のニアフィールドの各部の温度の経時変化を図2.4-1～2.4.12に示す。いずれもニアフィールドの各部の温度は、廃棄体埋設直後から上昇し、10～50年程度で最大となり、その後低下し、10,000年後にはほぼ初期地度まで低下している。

図2.4-13は、緩衝材が乾燥状態（解析ケース5）と飽和状態（解析ケース9）の場合の温度の経時変化を比較したものである。緩衝材が乾燥状態では、熱伝導率が低く、熱がこもりやすくなることから温度は高くなるが、実際の温度上昇は、緩衝材浸潤状態を考慮すると両者の間の値を示すことになる。

図2.4-14にオーバーパックと緩衝材および緩衝材と岩盤の間に1cmのギャップがありそのギャップに物性Aを用いた場合（解析ケース7）、図2.4-15にギャップの熱物性に物性Bを用いた場合（解析ケース8）、図2.4-16にギャップがない場合（解析ケース5）のニアフィールドの温度分布を示す。また、図2.4-17に解析ケース7と解析ケース5、図2.4-18に解析ケース8と解析ケース5とのニアフィールド各部の温度の経時変化を比較したものを示す。ギャップがある場合は熱を伝導しにくくすることから、ガラス固化体および緩衝材の温度は、ギャップのない場合に比べて上昇する。しかしながら、ギャップに条件のきびしい物性Aを用いた場合でも、ガラス固化体中心の温度は最大で30℃近く上昇するが、熱的安定性上問題となる緩衝材の温度は最大で5℃程度の上昇に止まっており、温度差の生じる期間も比較的短くなっている。

図2.4-19は、結晶質岩系岩盤、深度1,000mの条件で定置方式の違いによる温度の経時変化を比較したものである。緩衝材の薄い処分孔縦置方式（解析ケース11）は坑道横置方式（解析ケース5）に比べ放熱しやすく温度は低くなっている。

# ケース 1

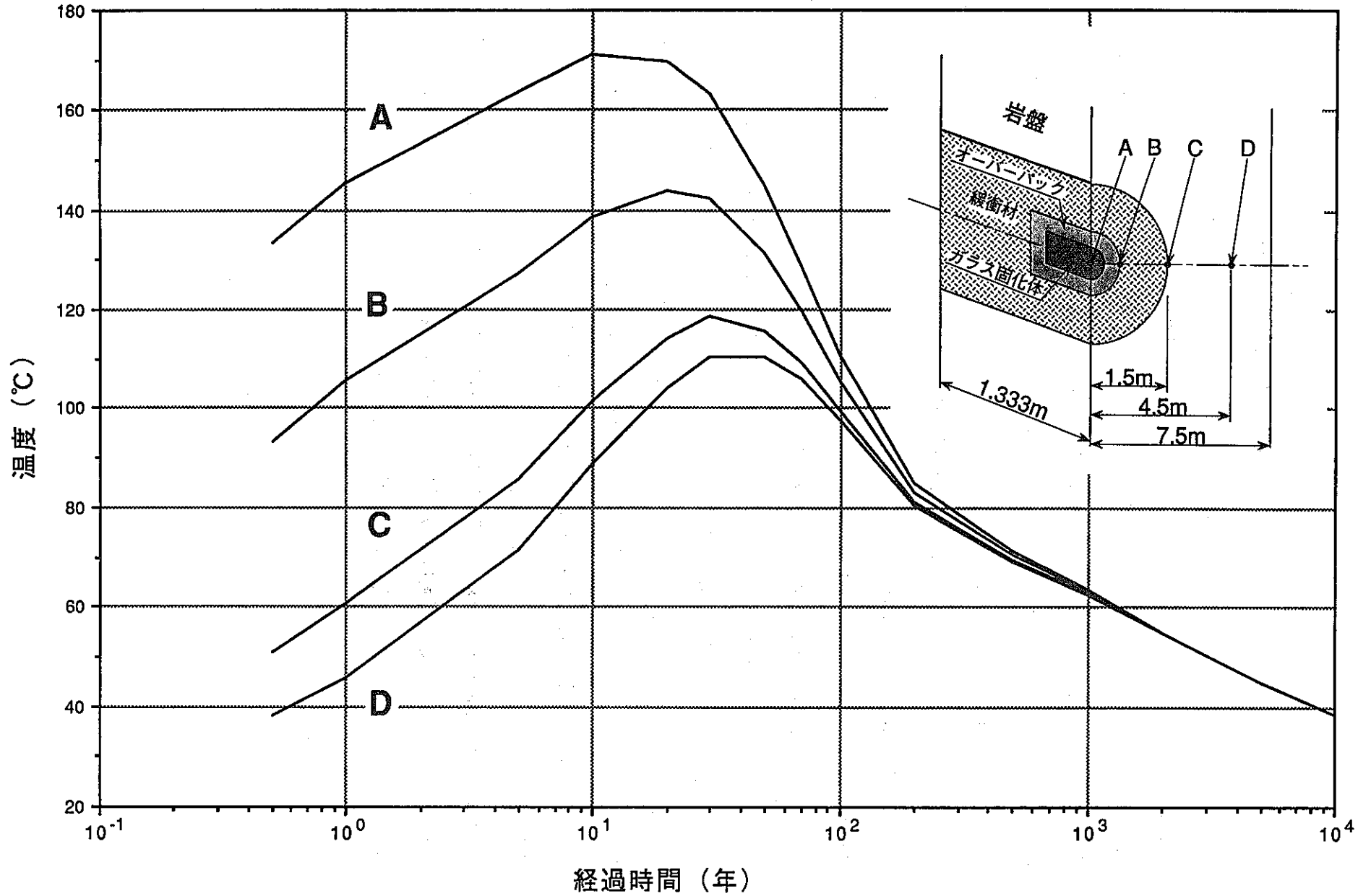


図2.4-1 ニアフィールドの温度変化 (堆積岩系岩盤, 処分深度500m, 坑道横置方式, 埋設密度40 m<sup>2</sup>)

# ケース 2

-31-

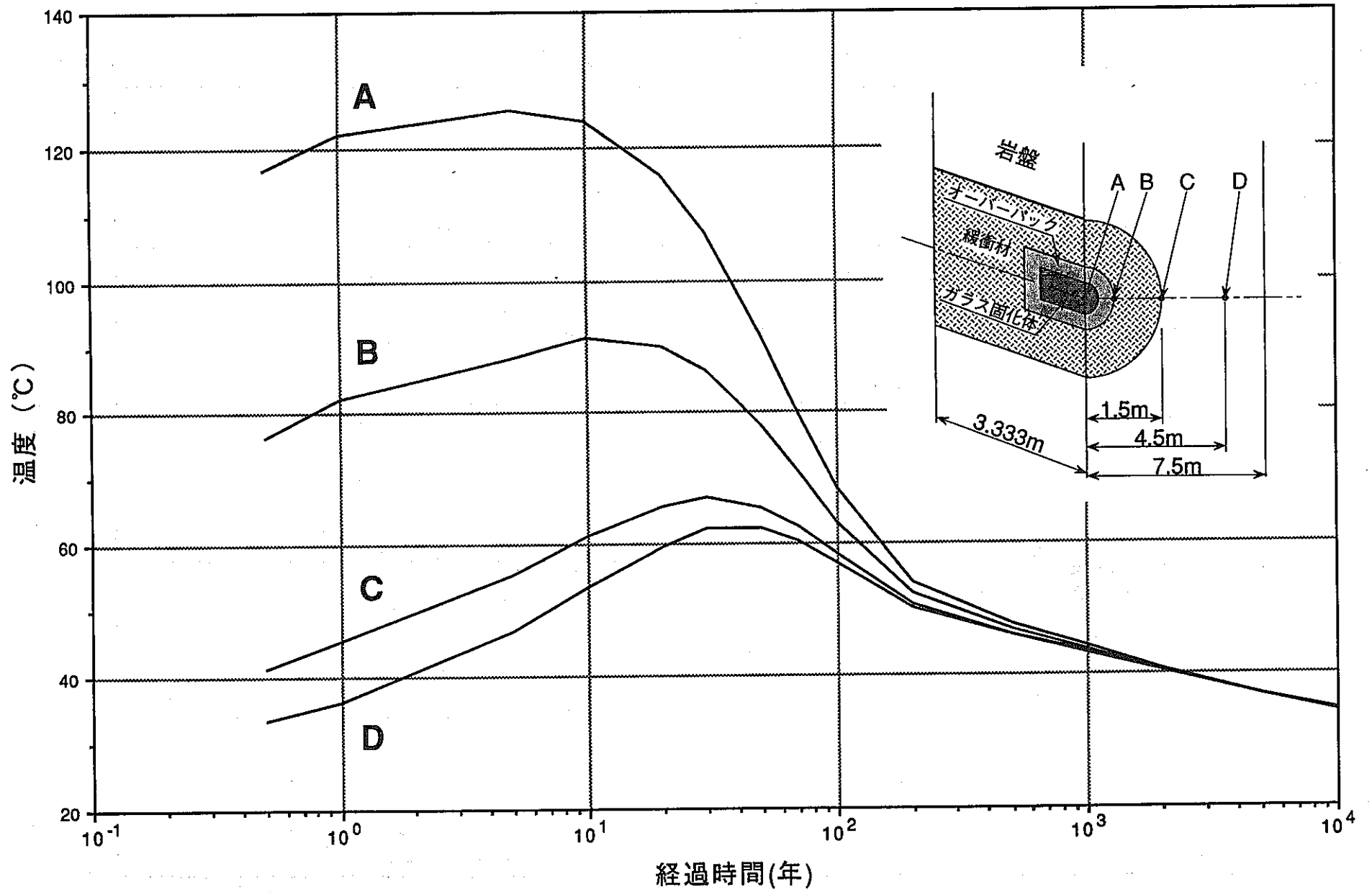


図2.4-2 ニアフィールドの温度変化 (堆積岩系岩盤, 処分深度500m, 坑道横置方式, 埋設密度 100m<sup>2</sup>)

### ケース 3

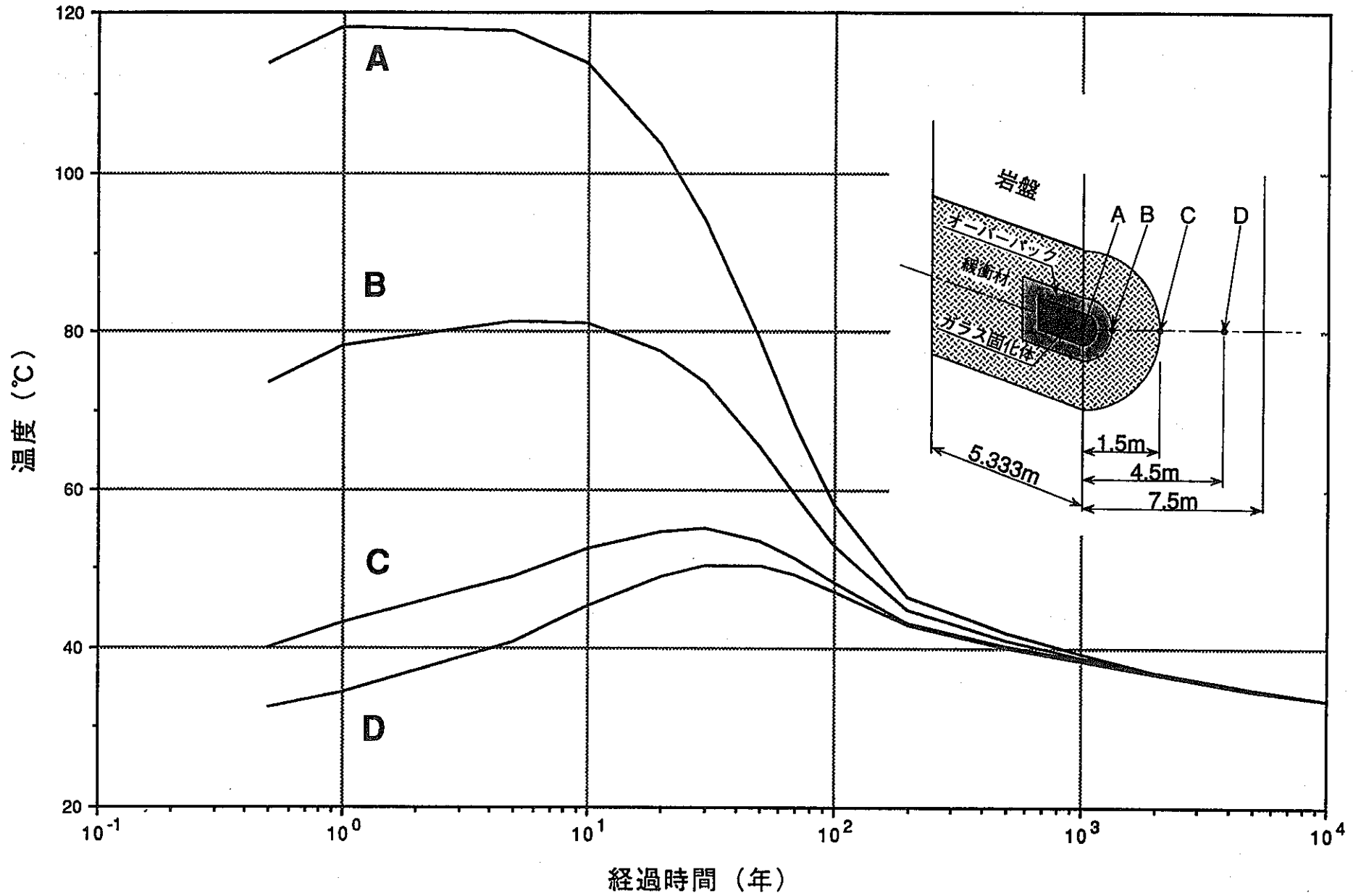


図2.4-3 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度500m, 坑道横置方式, 埋設密度 160mf)

# ケース 4

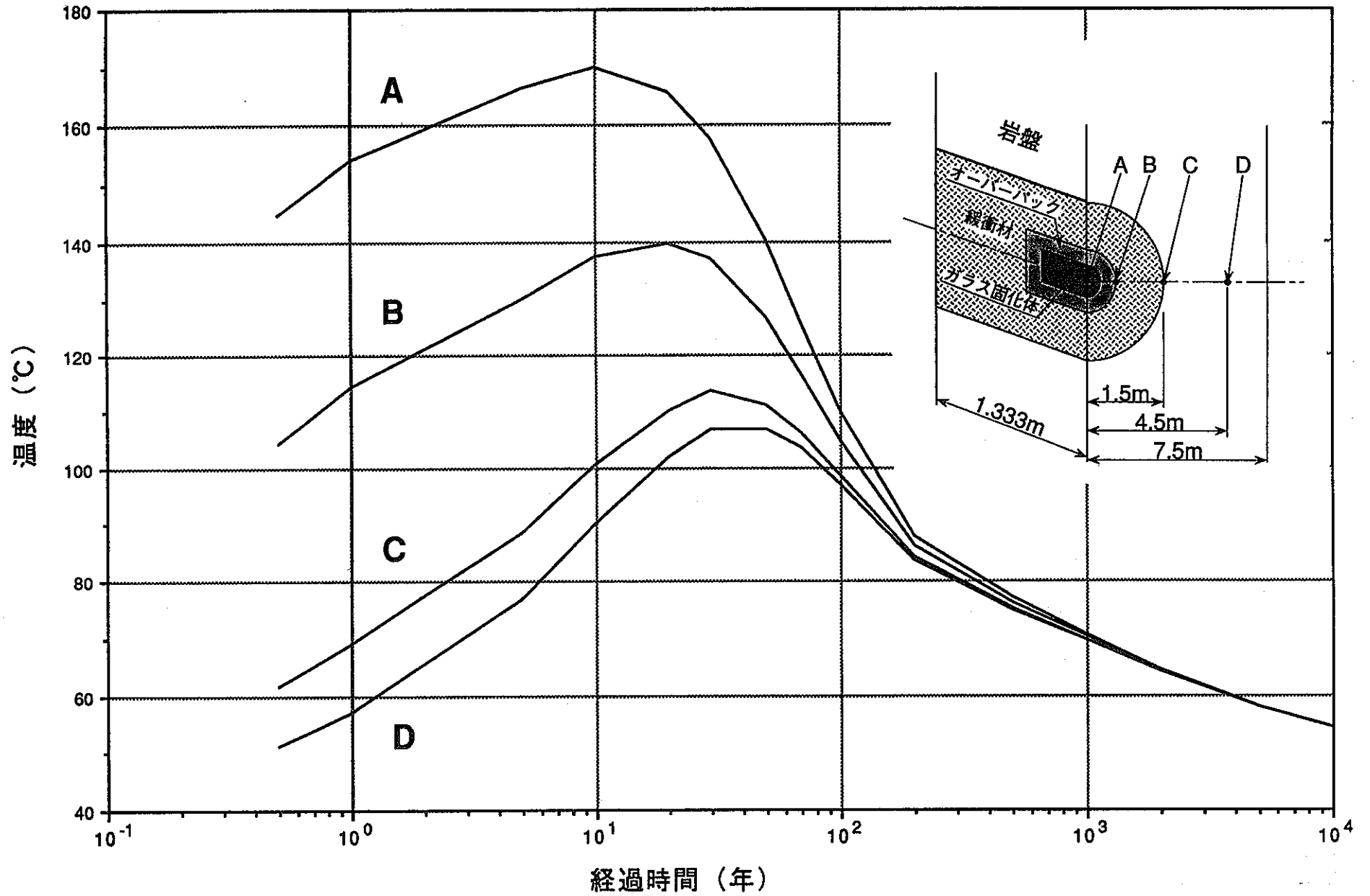


図2.4-4 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度40 m<sup>3</sup>)

# ケース5

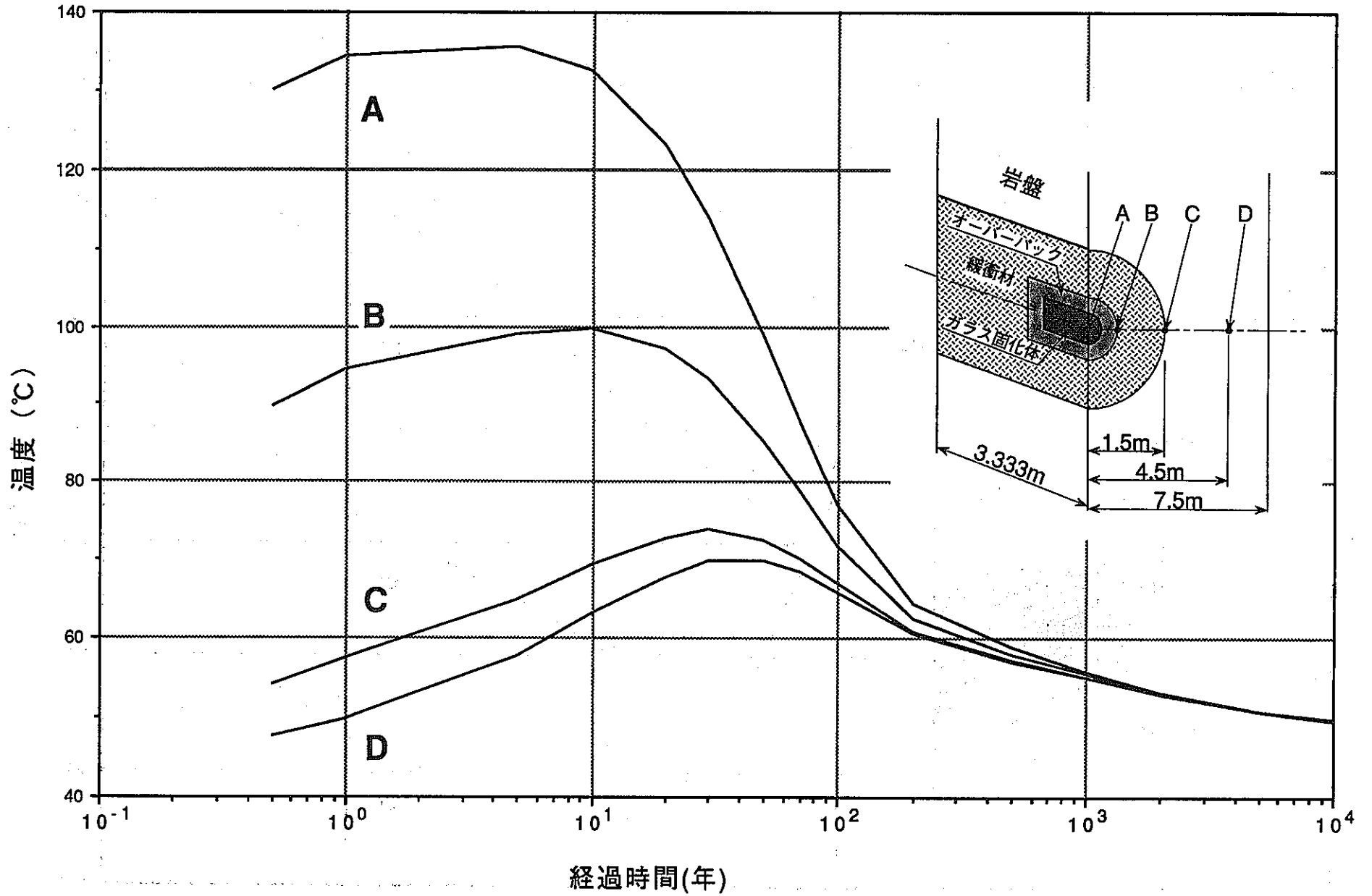


図2.4-5 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 100m<sup>2</sup>)

# ケース 6

-35-

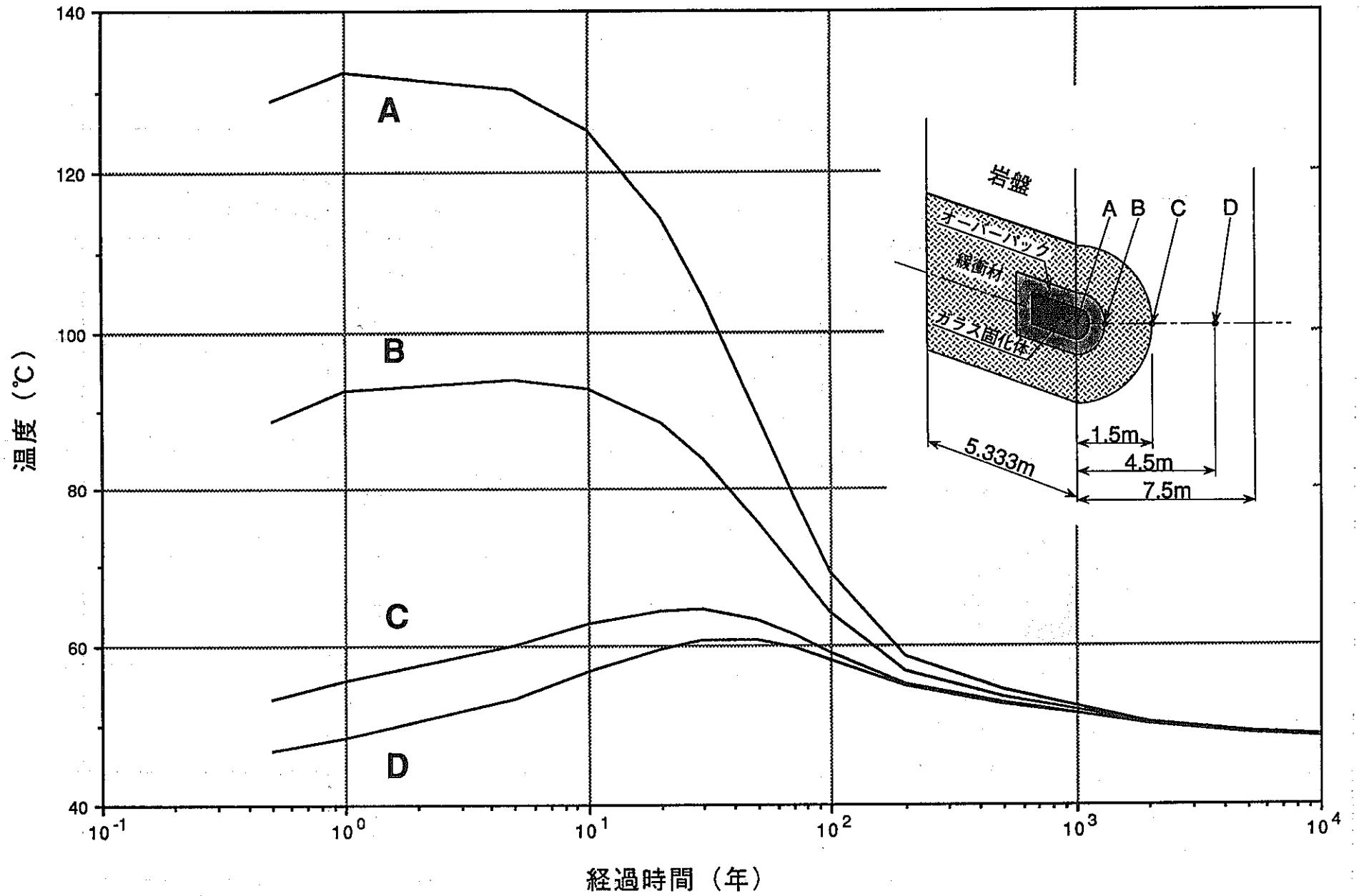


図2.4-6 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 160m<sup>2</sup>)

# ケース7

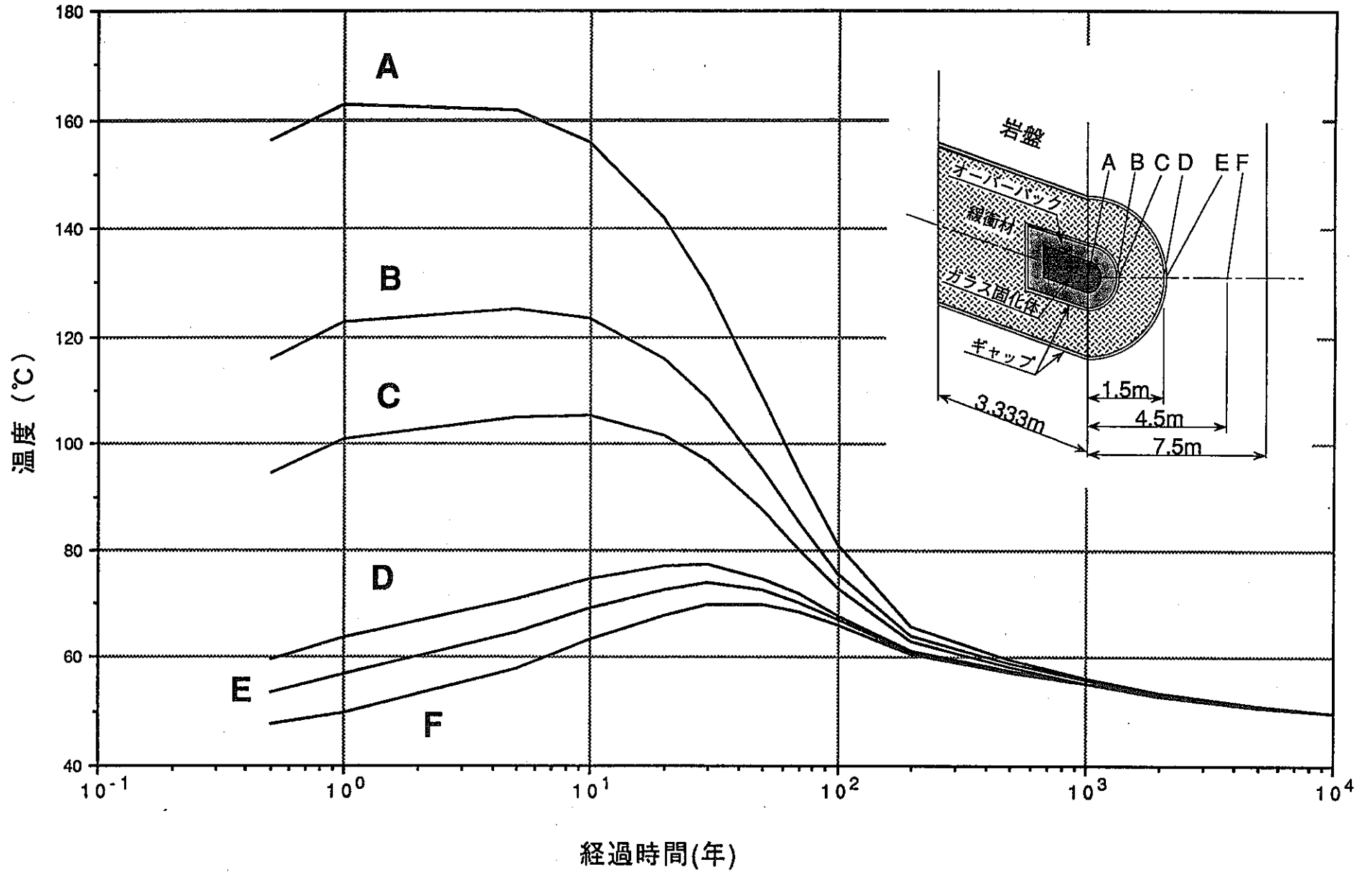


図2.4-7 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 100m<sup>2</sup>)



# ケース 8

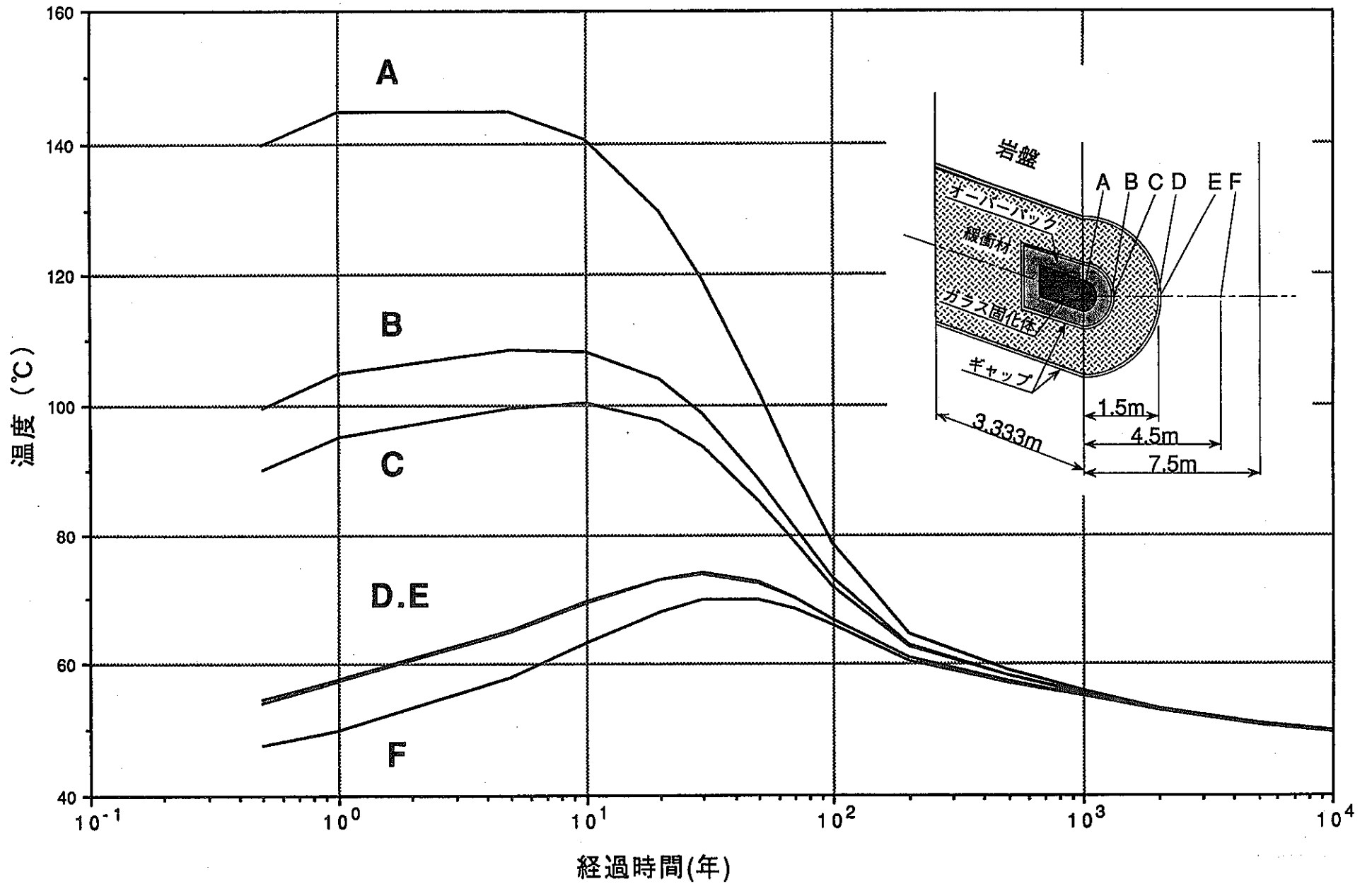


図2.4-8 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 100m<sup>2</sup>)

# ケース 9

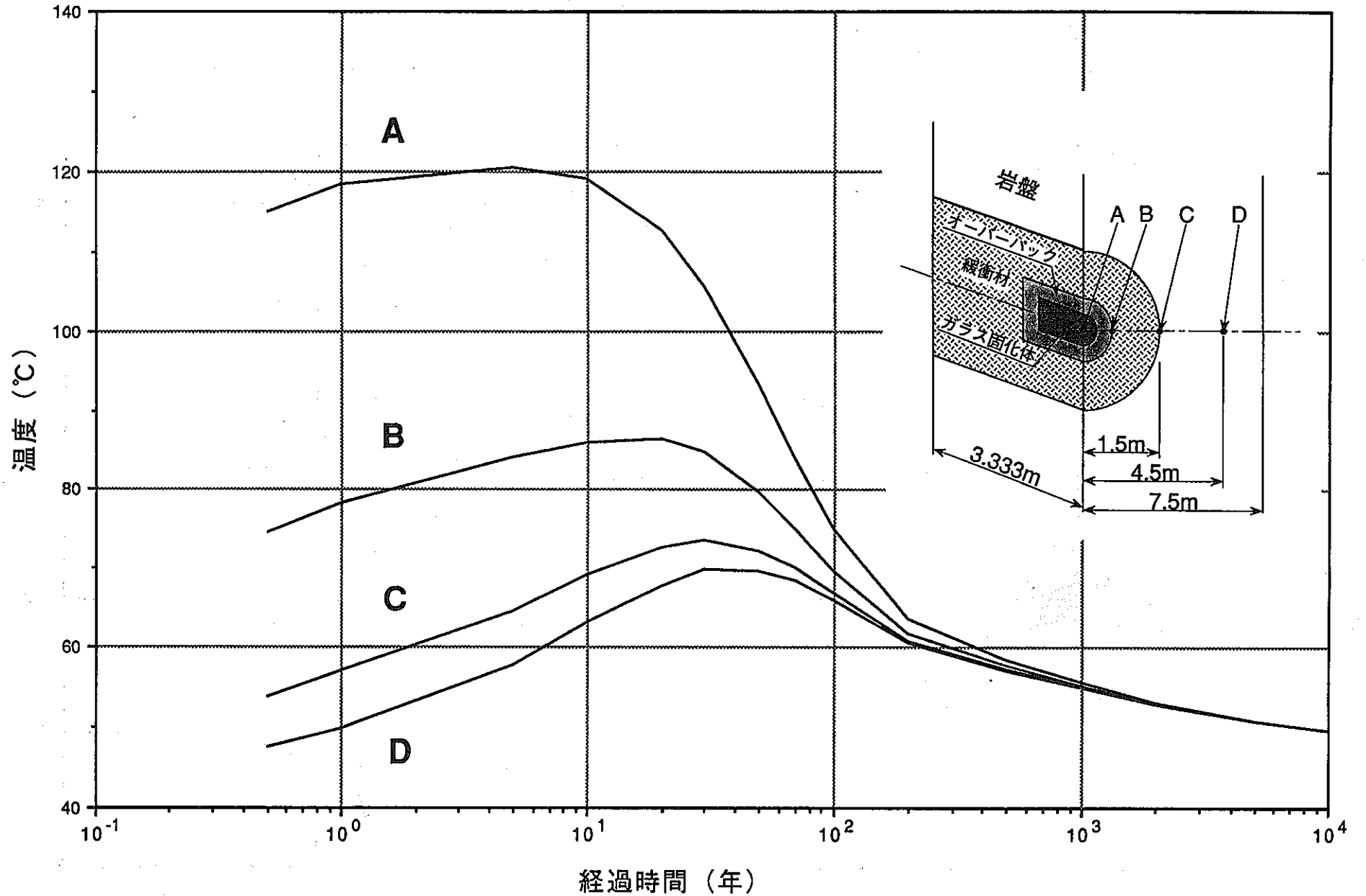


図2.4-9 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 100mf)

# ケース10

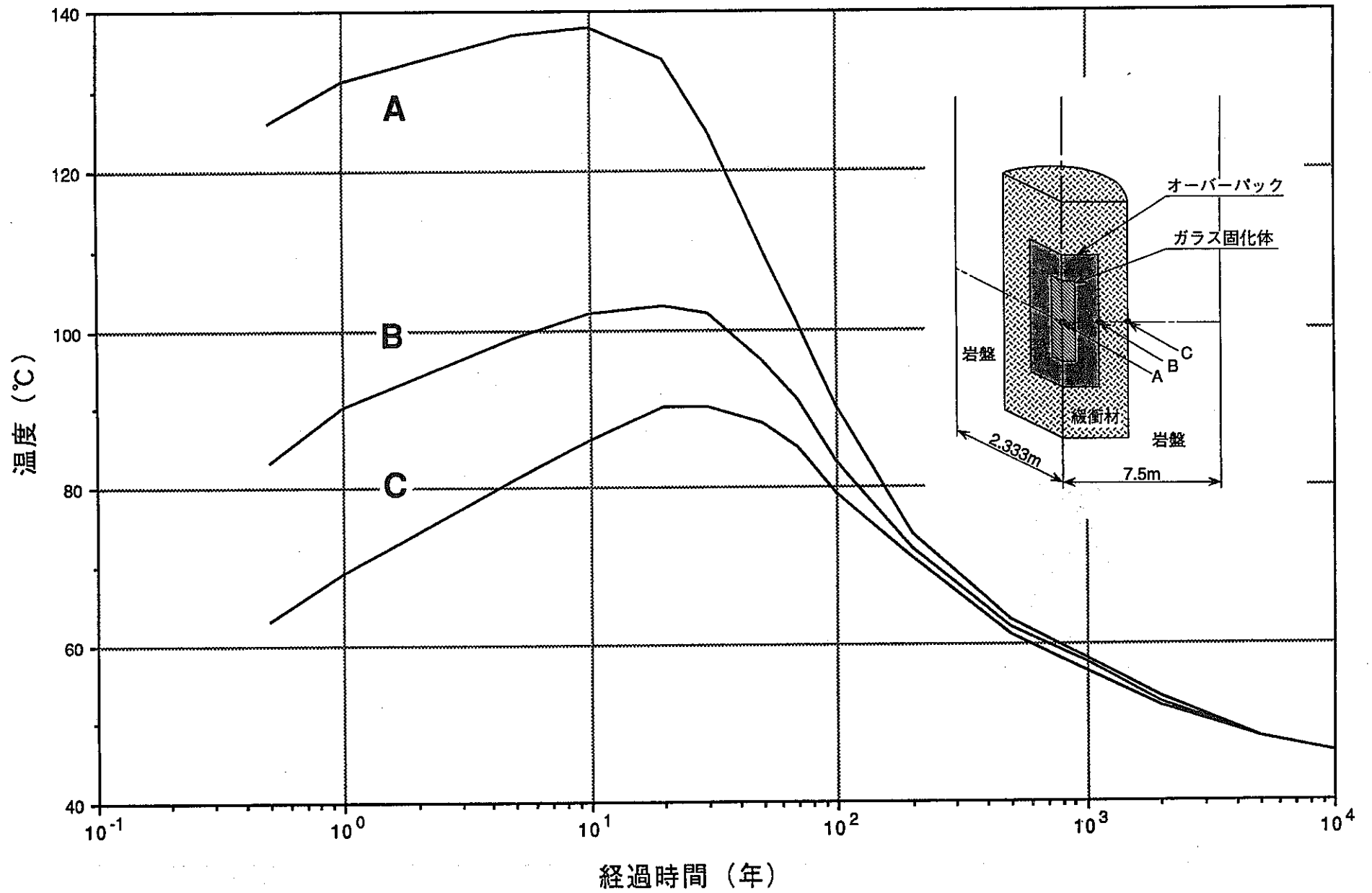


図2.4-10 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 処分孔縦置方式, 埋設密度70m<sup>3</sup>)

# ケース11

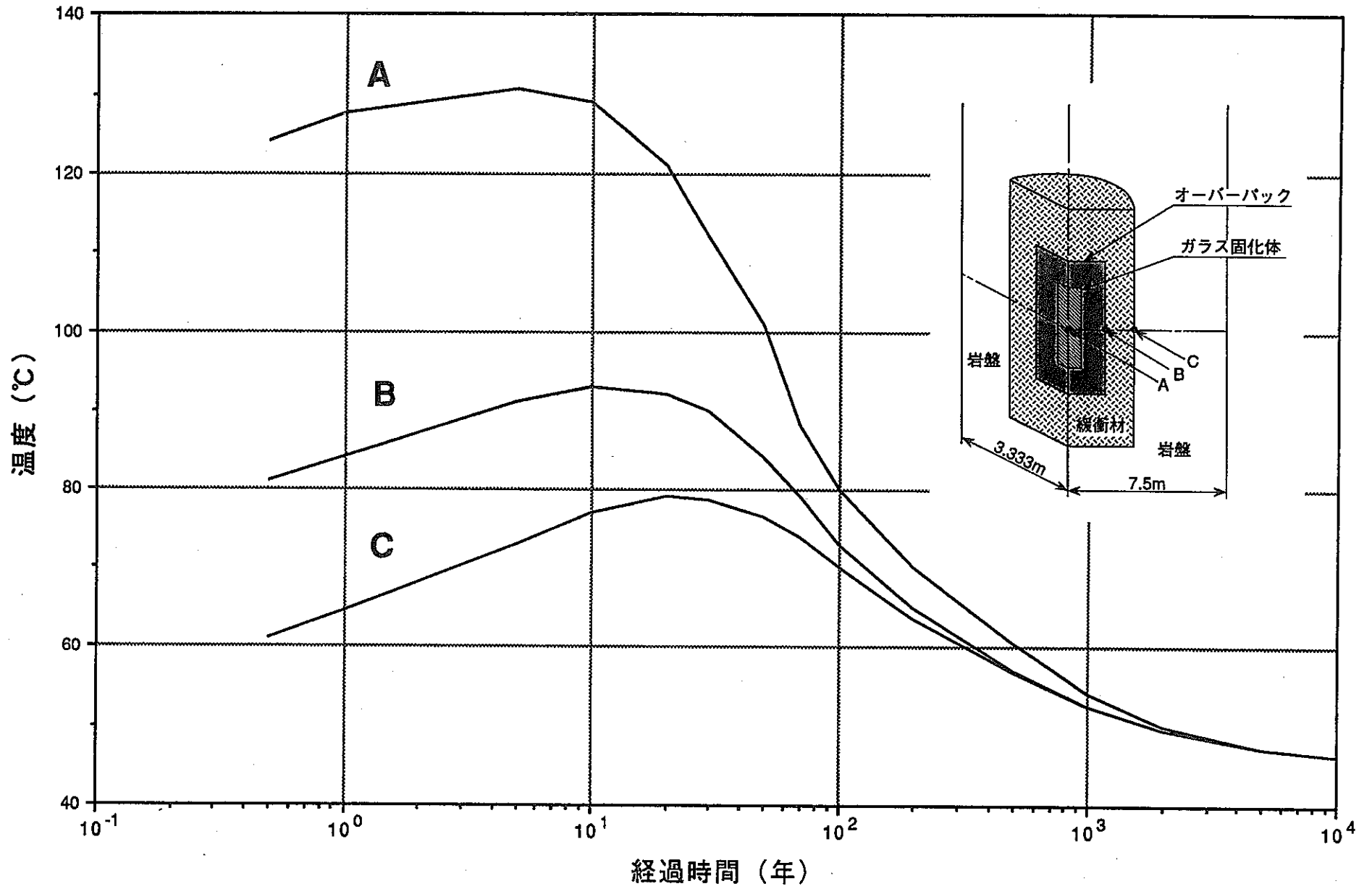


図2.4-11 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 処分孔縦置方式, 埋設密度 100mf)

# ケース12

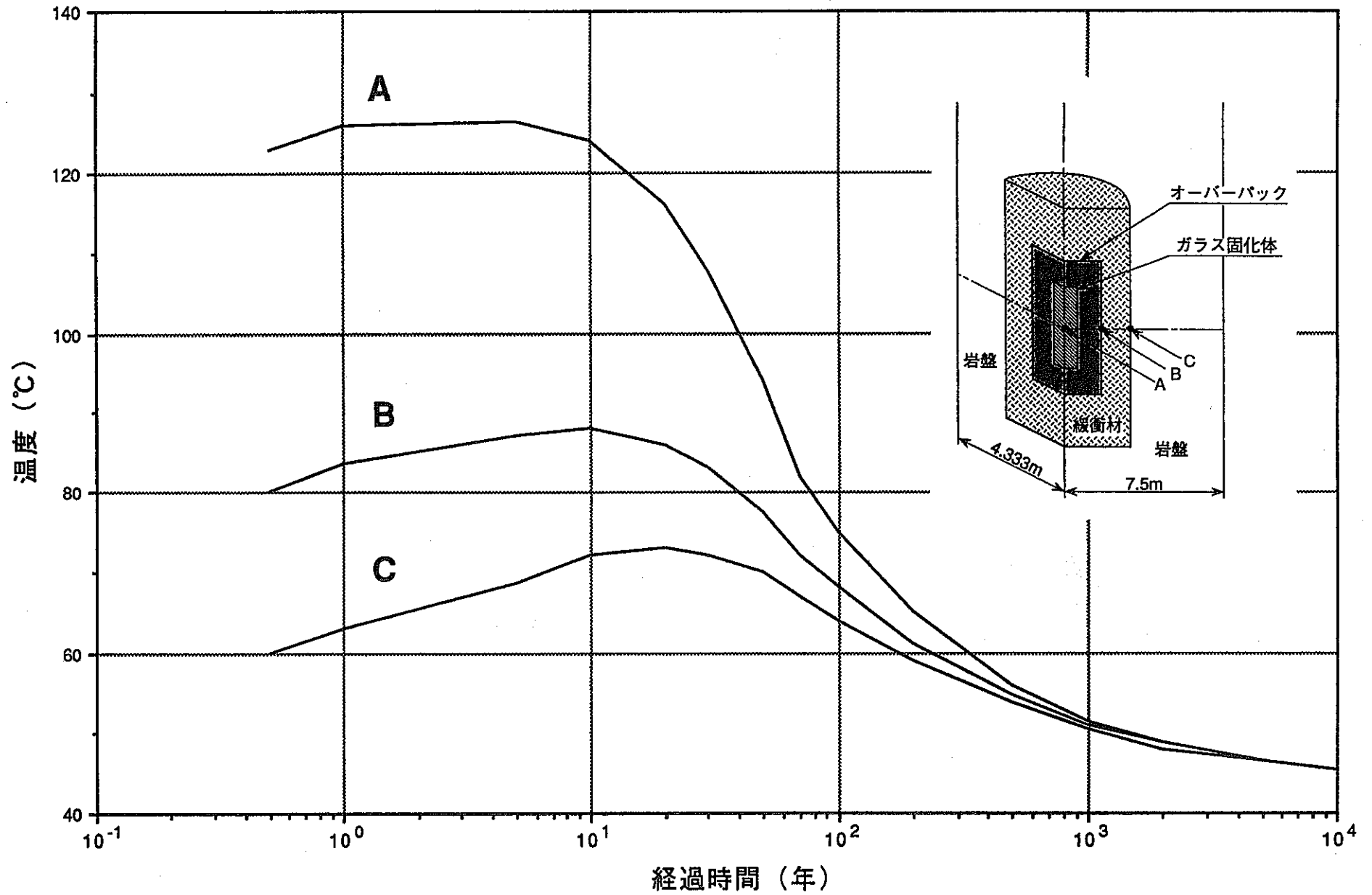


図2.4-12 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 処分孔縦置方式, 埋設密度 130m<sup>3</sup>)

ケース5とケース9

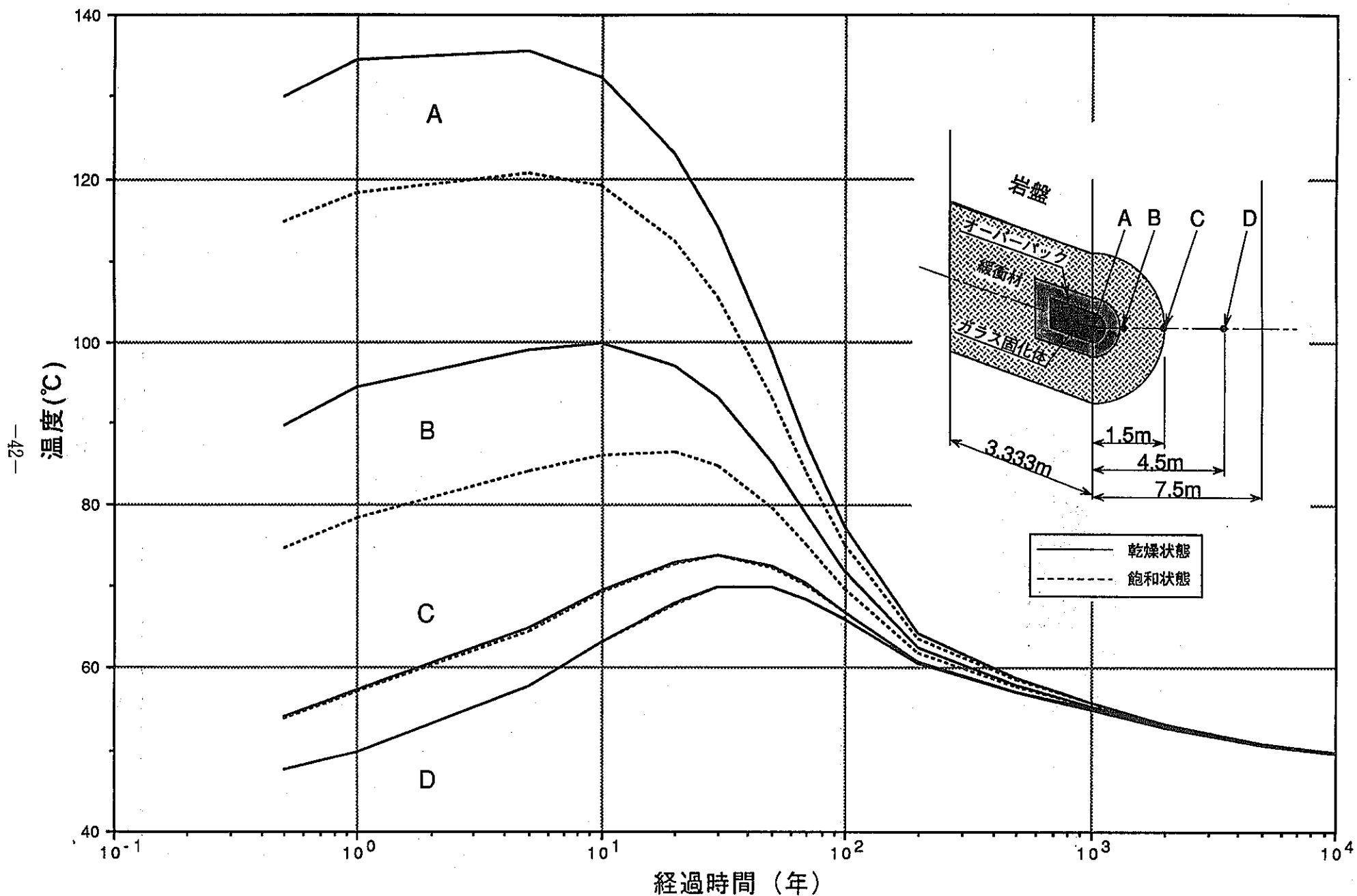


図2.4-13 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 100m<sup>2</sup>)

# ケース7

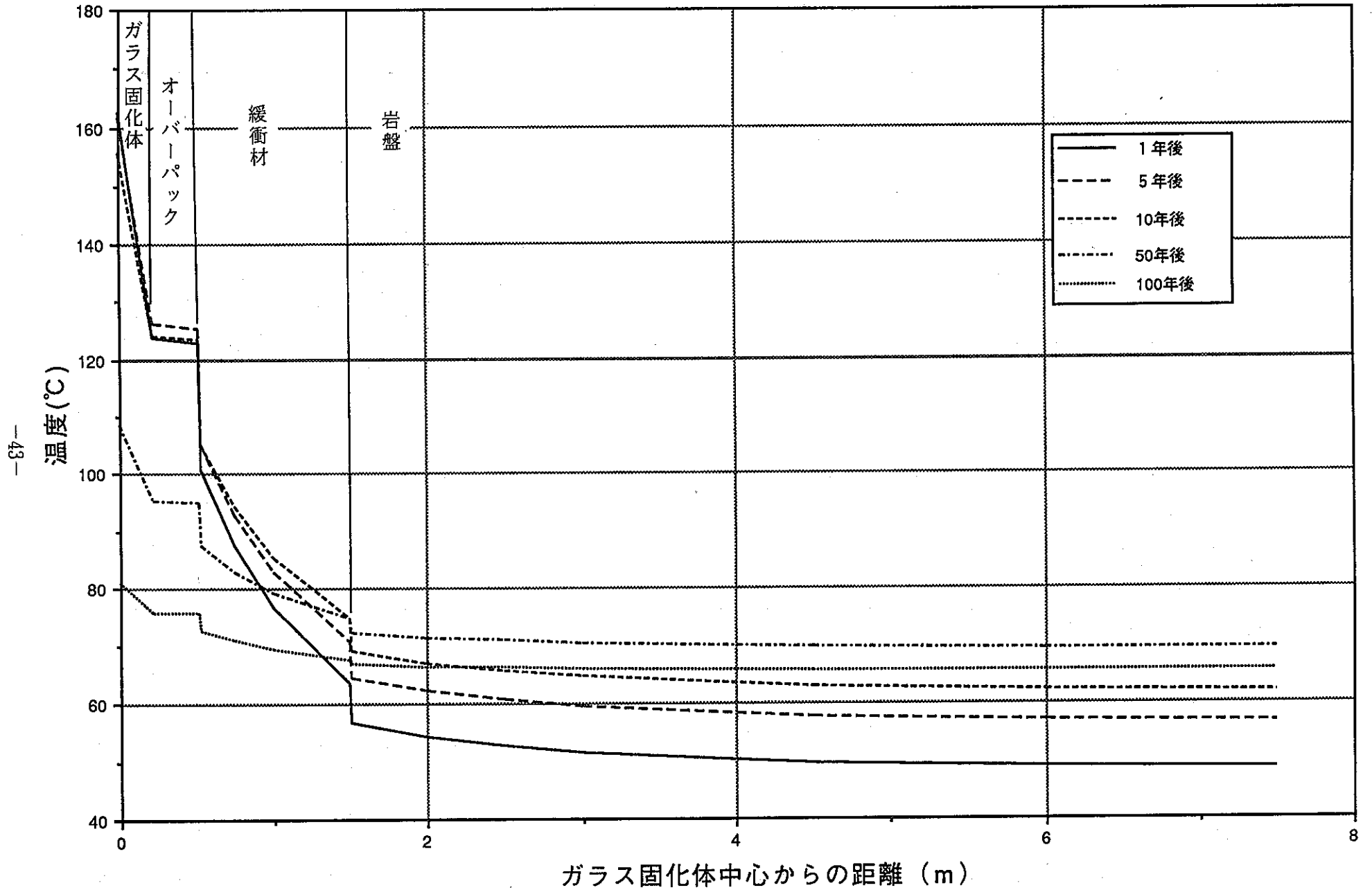


図2.4-14 ギャップに物性Aを用いた場合のニアフィールドの温度分布

# ケース 8

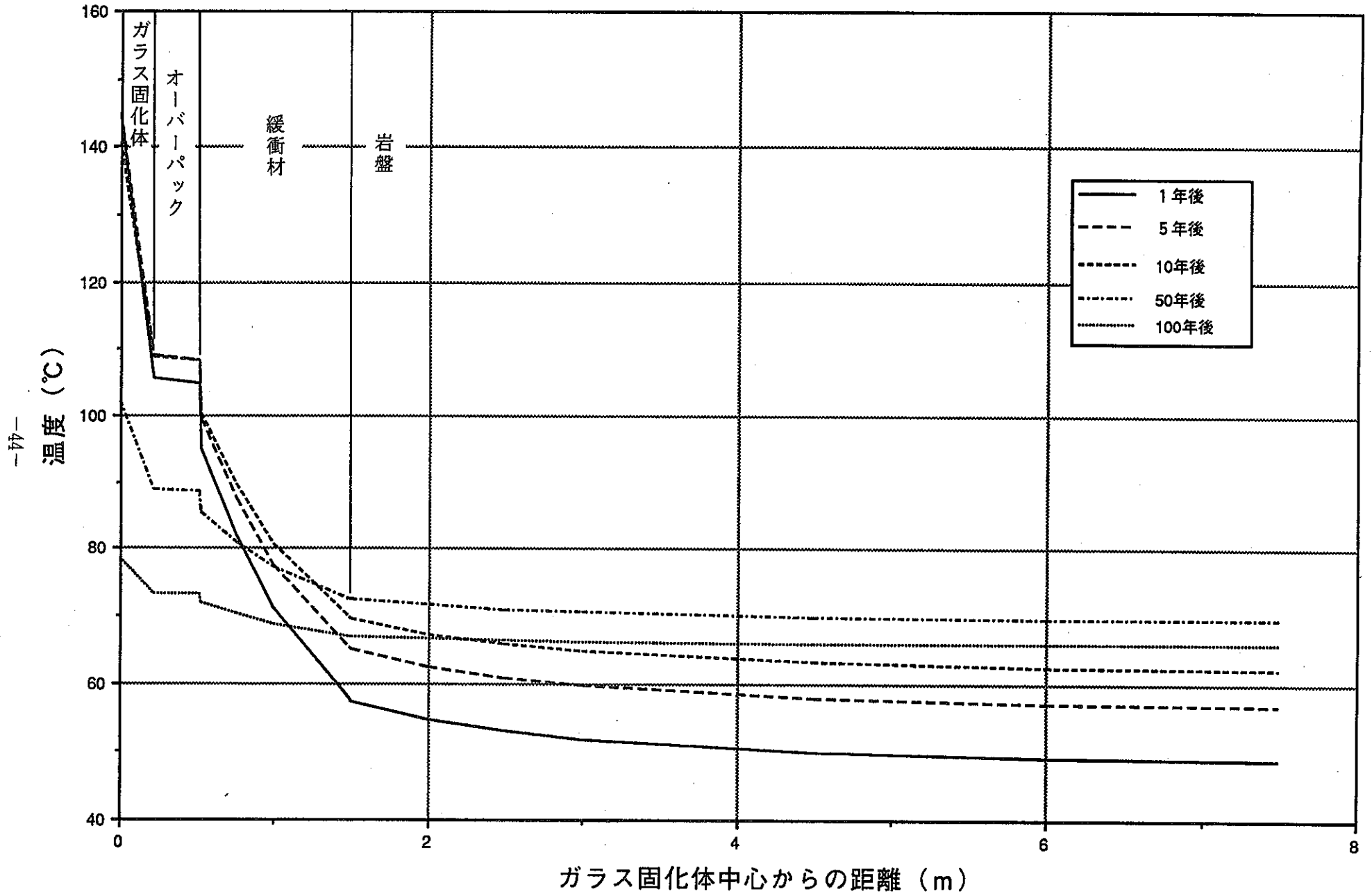


図2.4-15 ギャップに物性Bを用いた場合のニアフィールドの温度分布



# ケース 5

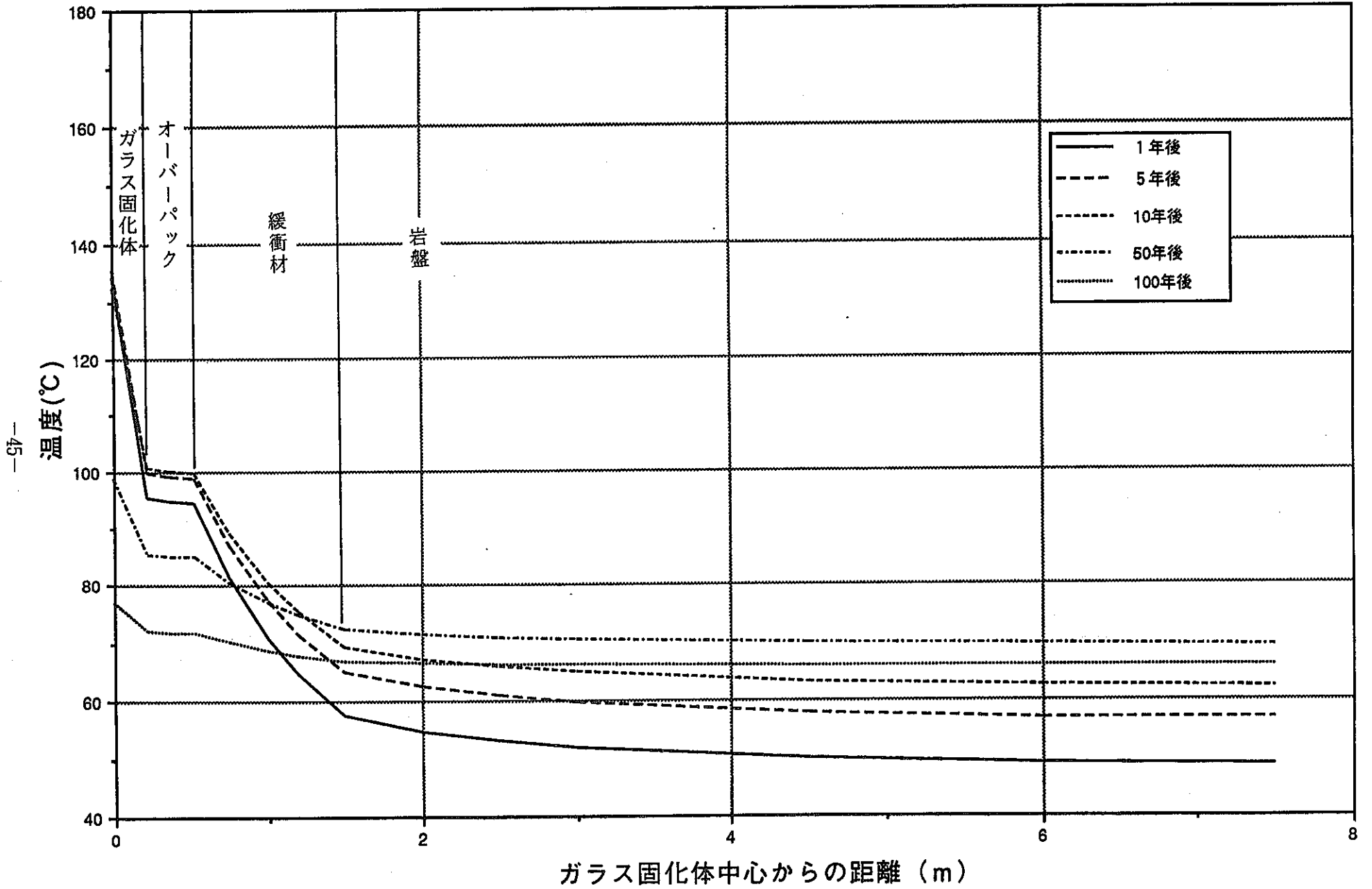


図2.4-16 ギャップを設けない場合のニアフィールドの温度分布

ケース5とケース7

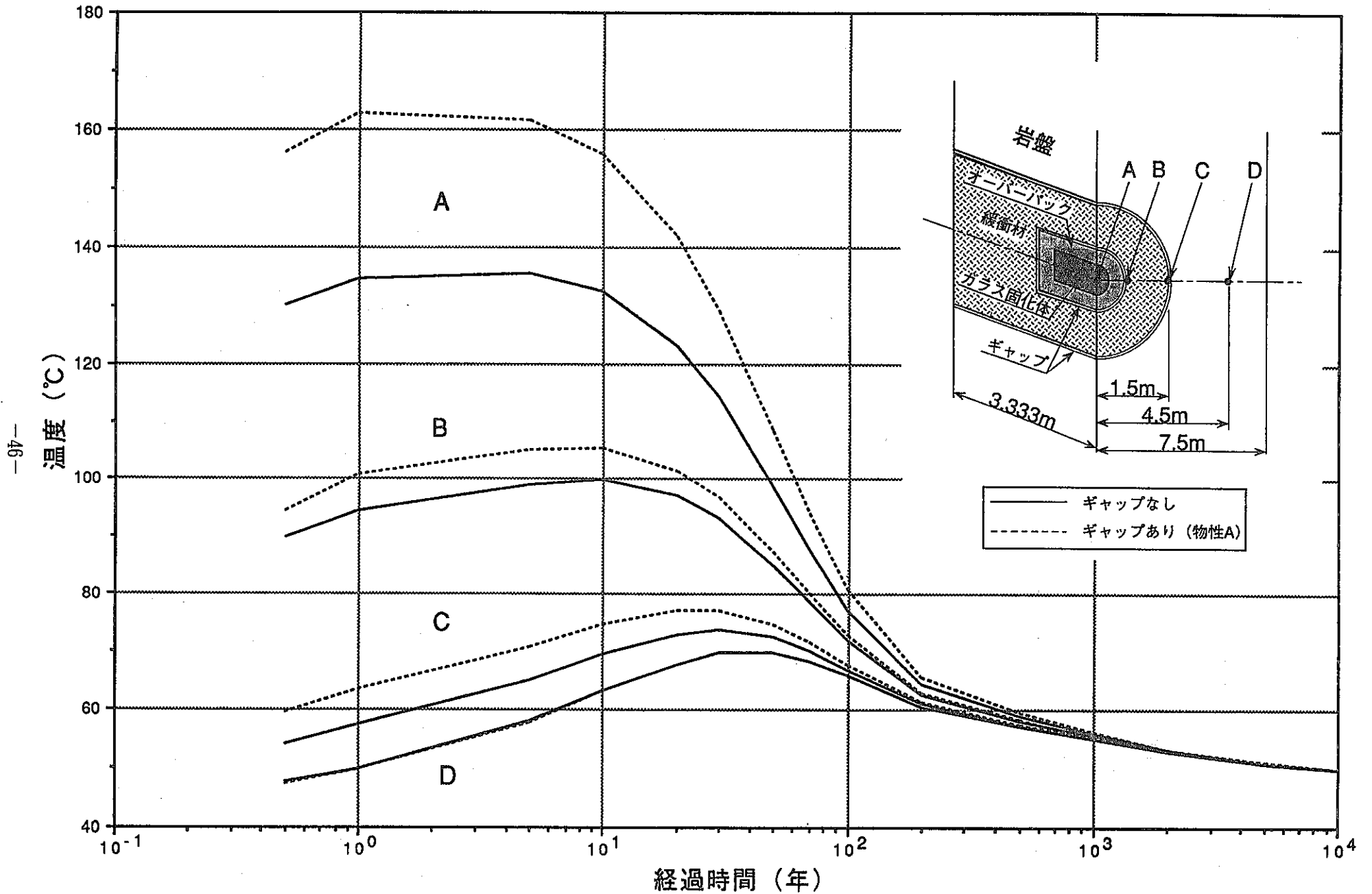


図2.4-17 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 100mf)

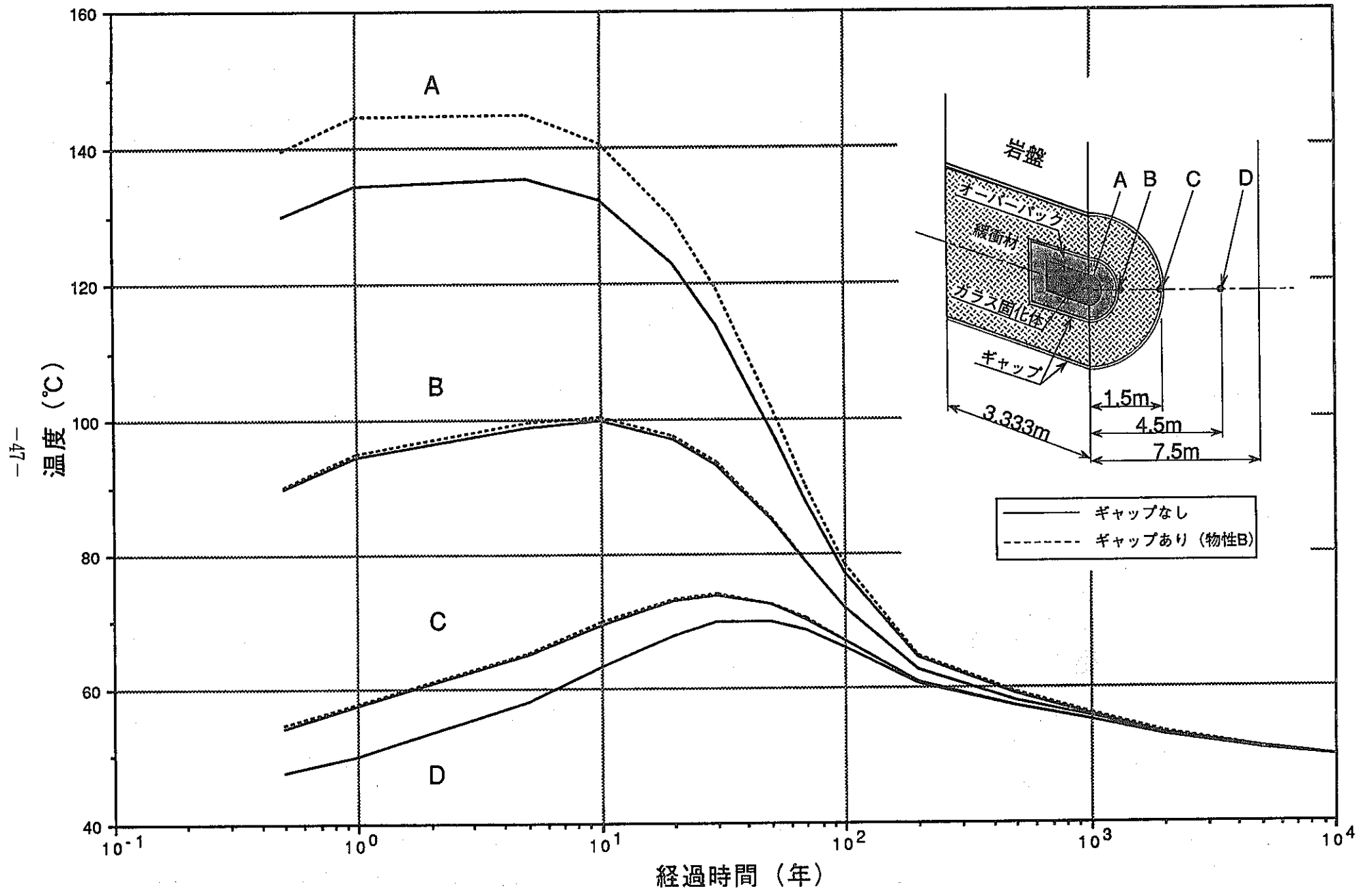


図2.4-18 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式, 埋設密度 100 m<sup>3</sup>)

ケース5とケース11

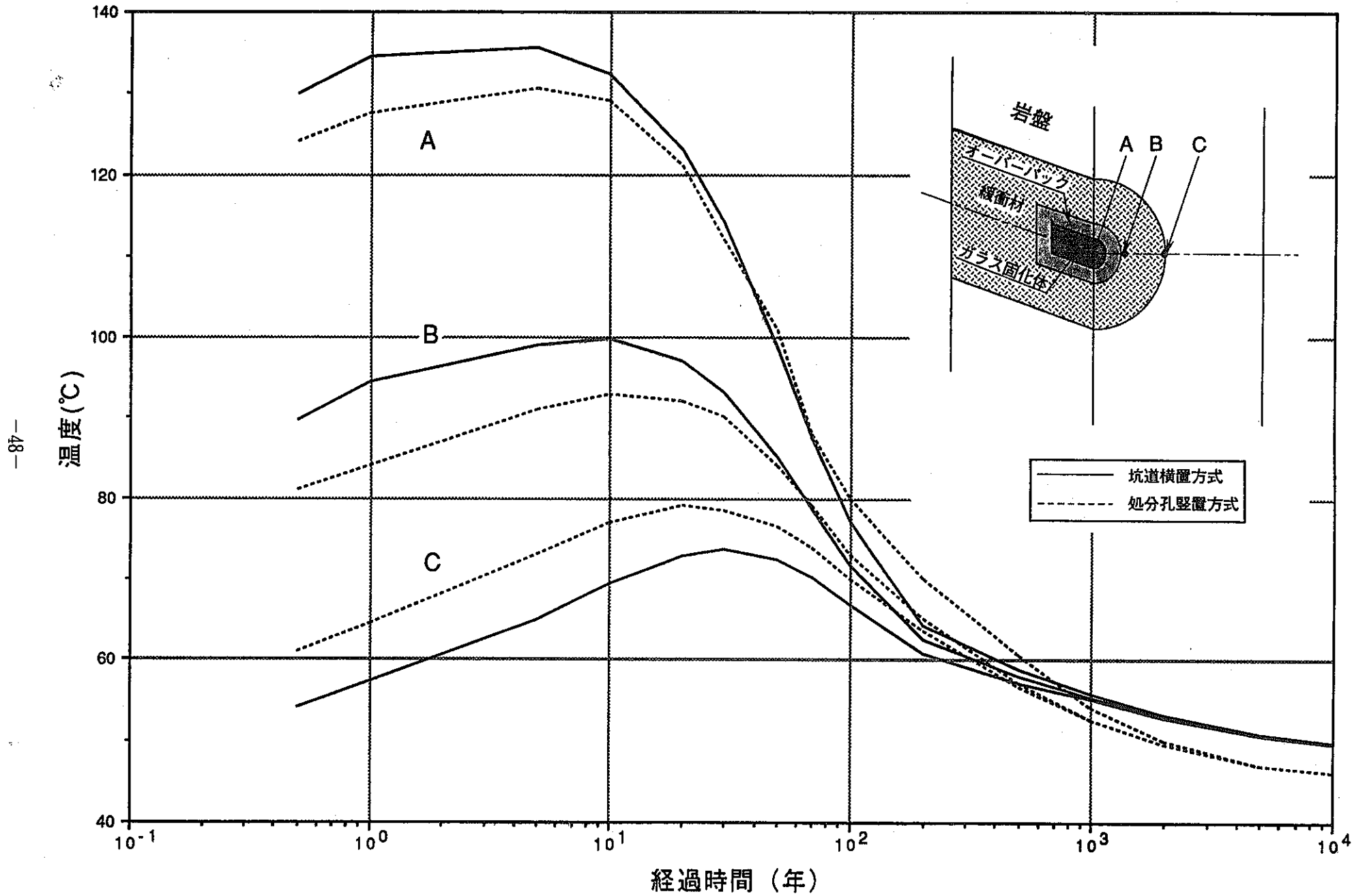


図2.4-19 ニアフィールドの温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 埋設密度 100ml)

## (2)緩衝材の最大温度と廃棄体埋設密度の関係

図2.4-20～2.4-22に廃棄体埋設密度とガラス固化体および緩衝材の内側、外側の最大温度との関係を示す。ニアフィールドの温度上昇は、廃棄体の埋設密度により変化する。

ここで緩衝材の熱物性については、より厳しい条件を与える乾燥状態（含水比6%）の値を用いた。結晶質岩系岩盤で深度1,000mの場合、緩衝材の最高温度を100℃以下とするためには坑道横置方式では廃棄体1本当たり約100m<sup>3</sup>、処分孔縦置方式では1本当たり約80m<sup>3</sup>となり、また、堆積岩系岩盤で深度500mの坑道横置方式の場合は廃棄体1本当たり80m<sup>3</sup>程度となることが分かる。この埋設密度を用いて、地下施設全体の規模を想定すると、中間貯蔵期間30年経た40,000本の廃棄体を埋設するとして深度1,000mの結晶質岩系岩盤の場合、坑道横置方式で約4.0km<sup>3</sup>、処分孔縦置方式で約3.2km<sup>3</sup>の広さとなる。

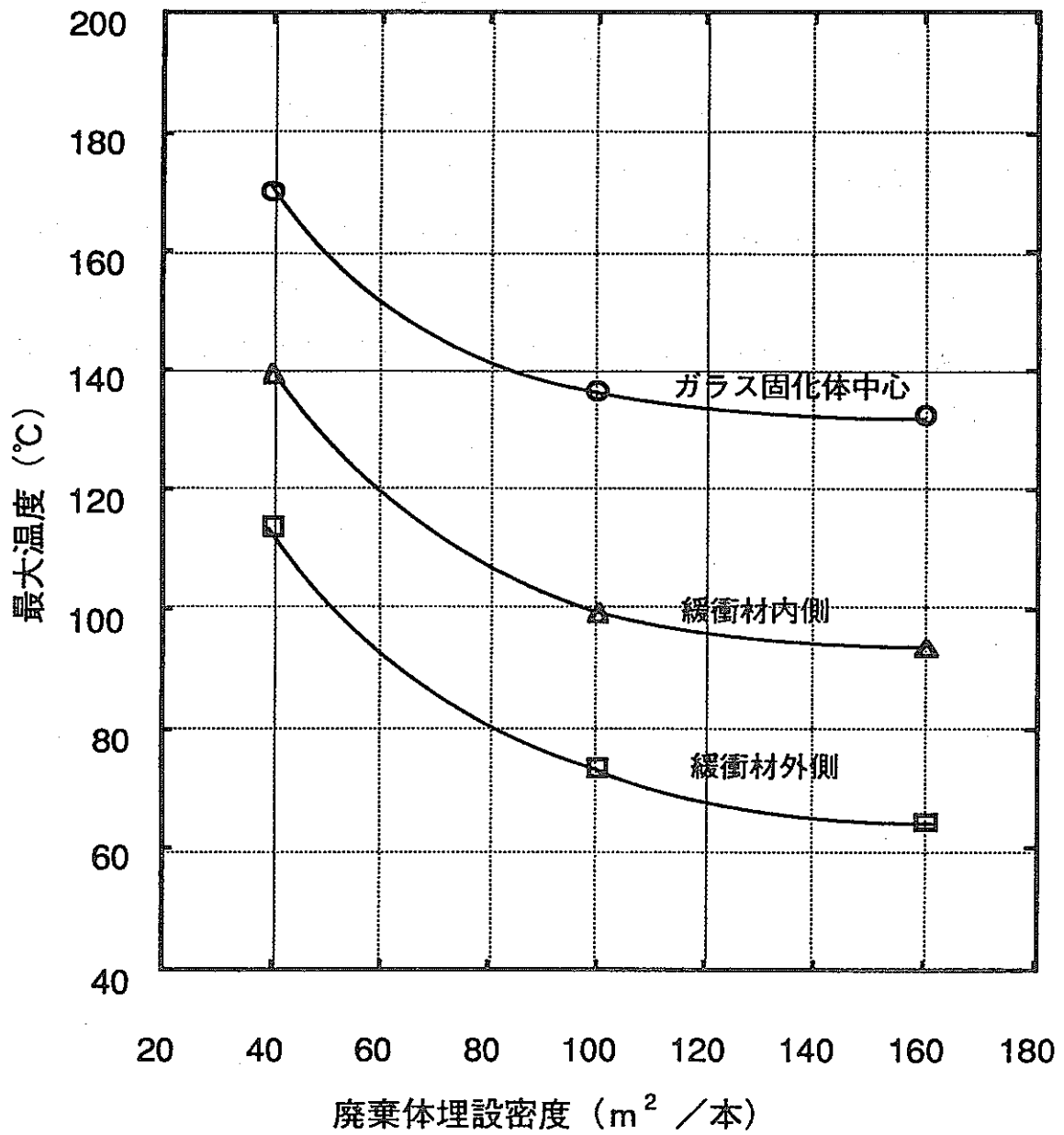


図2.4-20 廃棄体1本あたりの埋設密度と最大温度との関係  
(結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 坑道横置方式)

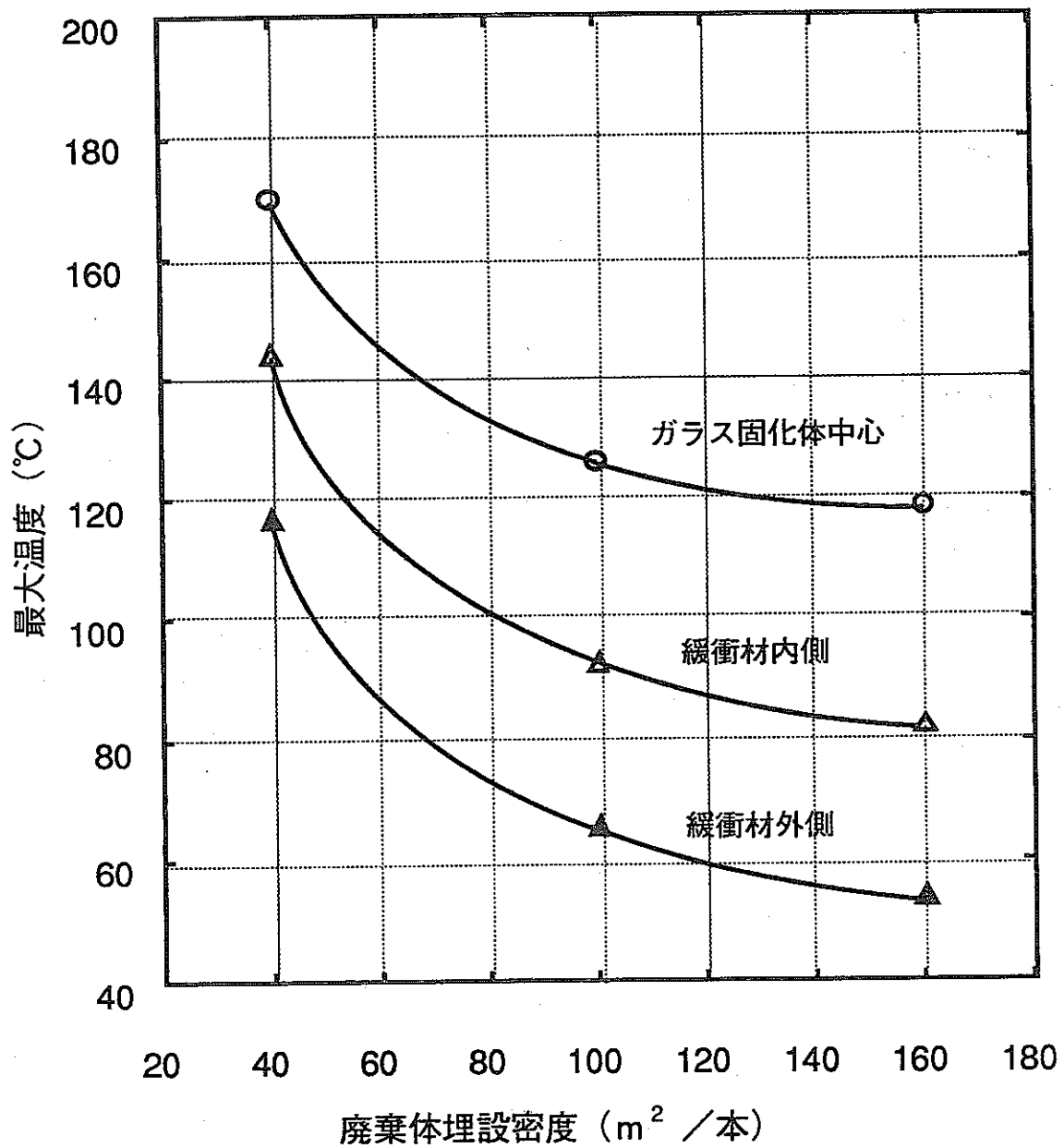


図2.4-21 廃棄体1本あたりの埋設密度と最大温度との関係  
(結晶質岩系岩盤, 処分深度500m, 坑道横置方式)

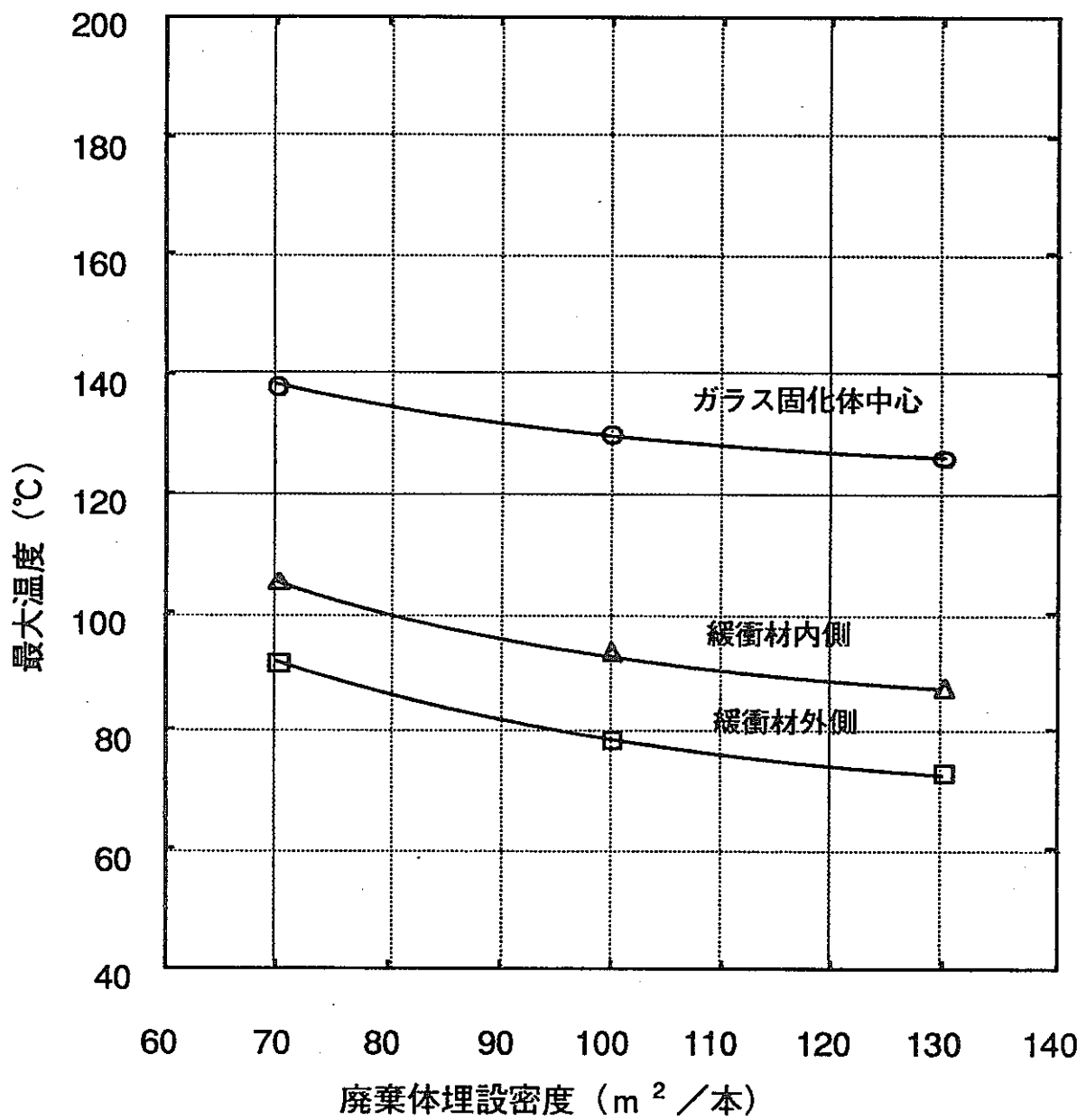


図2.4-22 廃棄体1本あたりの埋設密度と最大温度との関係  
 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m, 処分孔縦置方式)



## 2.5 まとめと今後の課題

ニアフィールドの温度上昇は、廃棄体の発熱特性（中間貯蔵期間）、人工バリアの仕様、廃棄体の埋設密度の他、人工バリア周辺の岩盤の熱物性等に依存するため一義的に規定されるものではない。しかし、基本的には人工バリア材および周辺岩盤への熱的影響を考慮して、廃棄体の埋設密度を調整することにより制御することができる。

ここでは、緩衝材の許容温度を100℃とし、人工バリアおよび緩衝材の熱物性値を一定とした概略の熱解析を行なった。その結果、廃棄体1本あたりの埋設密度は約80～100 m<sup>3</sup>となったが、緩衝材の許容温度および熱物性値に保守的な値を用いていることから、今後の詳細な解析や試験によって埋設密度をもっと小さくすることは可能であると考えられる。

ニアフィールドの温度変化を詳細に評価し、設計仕様へ反映していくためには、熱-水-応力の連成解析、人工バリアや周辺岩盤の熱物性値の温度依存性を考慮した解析が課題となる。

また、今回、バリア材間にギャップを設け一定の熱物性値を与えた概略的な解析を行い、バリア材間のギャップは結果に大きな影響を与えないことを確認しているが、詳細な検討を行うためには、人工バリアの施工条件等も十分考慮した解析を行う必要がある。

### 3. ファーフィールドの熱解析

廃棄体の発熱によるファーフィールドへの熱的影響を把握する目的で、2章で行ったニアフィールドの解析結果をもとに、処分場の規模を設定し、等価な熱源を与えたファーフィールドの熱解析を実施した。

ここで、処分場は、ニアフィールドの場合と同様に深度1,000m, 500mの2種類とした。処分場の形状は、中間貯蔵期間30年のガラス固化体を処分することを想定し、埋設密度を深度1,000mでは1本あたり100㎡、深度500mのモデルでは1本あたり80㎡として、4万本のガラス固化体を等価な円盤発熱体として解析した。

### 3.1 解析手法

ファーフィールドの温度を詳細に評価するためには、熱-水-応力の連成解析が必要であるがニアフィールドの熱解析と同様に、ここでは人工バリアおよび岩盤の熱物性値を一定とした概略の熱解析評価を行うこととした。

### 3.2 解析条件

#### 3.2.1 解析モデル

解析モデルとしては、図3.2-1、図3.2-2に示すような処分深度1,000mと500mの2種類の処分場の2次元軸対象FEMモデルを作成した。第2章ニアフィールドの熱解析によると廃棄体1本当たりの埋設密度は、緩衝材の温度を100℃以下にするためには坑道横置方式の場合、処分深度1,000mで100㎡、処分深度500mで80㎡の面積が必要となる結果が得られている。この結果をもとに、廃棄体4万本を処分する処分場を想定し、処分深度1,000mでは、半径1,125m、処分深度500mでは、半径1,009mで厚さ3mの円盤によりモデル化した。

解析領域は、処分深度1,000mのモデルでは、r方向に4,125m、Z方向に4000m、処分深度500mのモデルでは、r方向に4,009m、Z方向に3,500mとした。

#### 3.2.2 初期条件及び境界条件

初期条件については、地表面の温度を15℃とし、深度方向に3℃/100mの温度勾配を考慮して解析対象領域内の初期温度を設定した。

境界条件については、側面は断熱境界、地表面は熱伝達境界、下面は等温境界とした。地表面の熱伝導率は、ニアフィールドの熱解析と同様に $17\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ （地表面の大気温度は15℃一定）とし、下面は、処分深度1,000mのモデルで135℃一定、処分深度500mのモデルで120℃一定とした。

#### 3.2.3 熱物性値

岩盤の熱物性値は、前章のニアフィールドの熱解析と同じ値（表2.2-14）を使用し、処分場内の熱物性値は、緩衝材の乾燥状態の値を用いた。

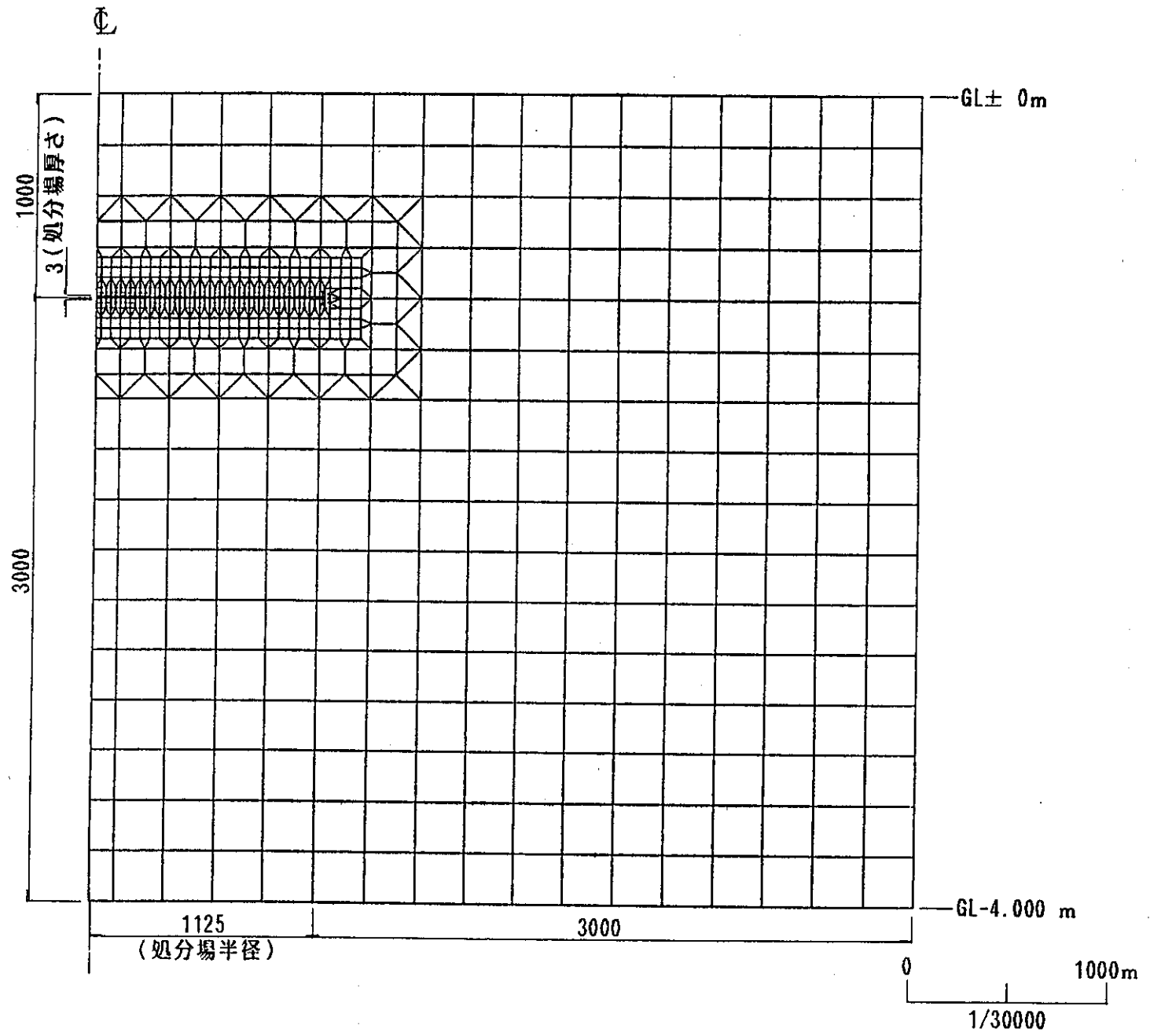


図3.2-1(a) ファーフィールドの解析モデル全体図 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

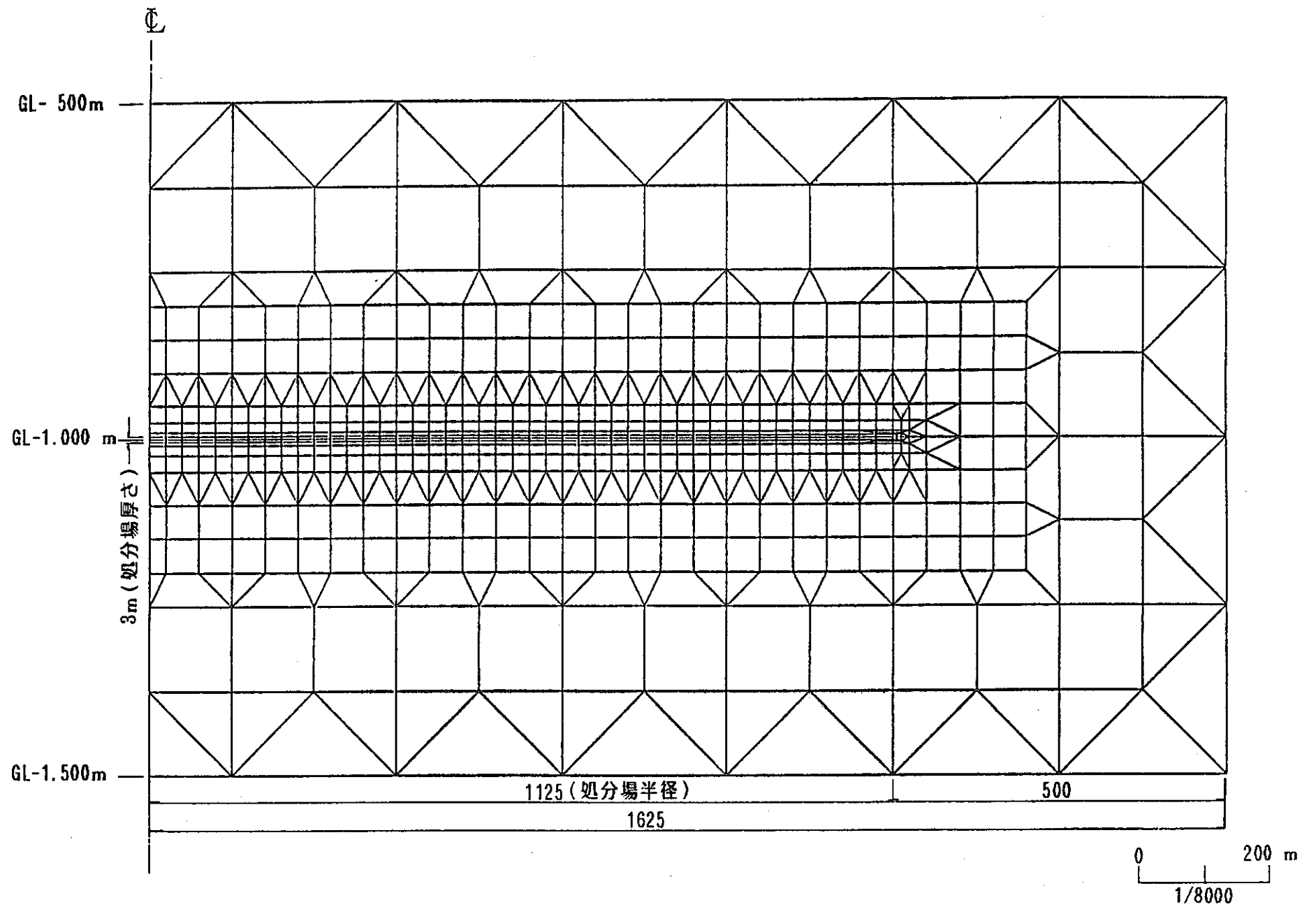


図3.2-1(b) ファーフィールドの解析モデルの処分場周辺拡大図

(結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

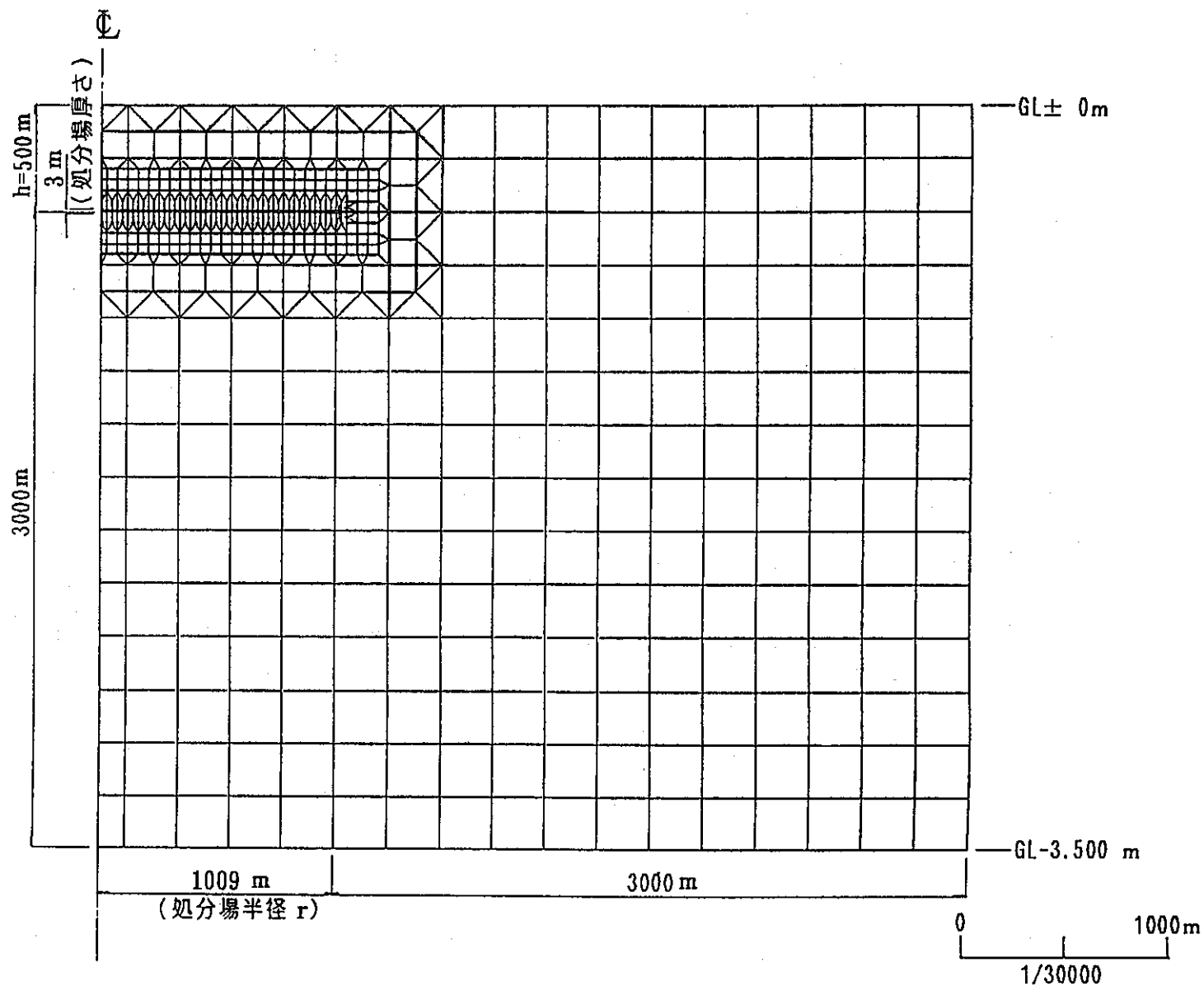


図3.2-2(a) ファーフィールドの解析モデル全体図 (堆積岩系岩盤, 処分深度 500m)

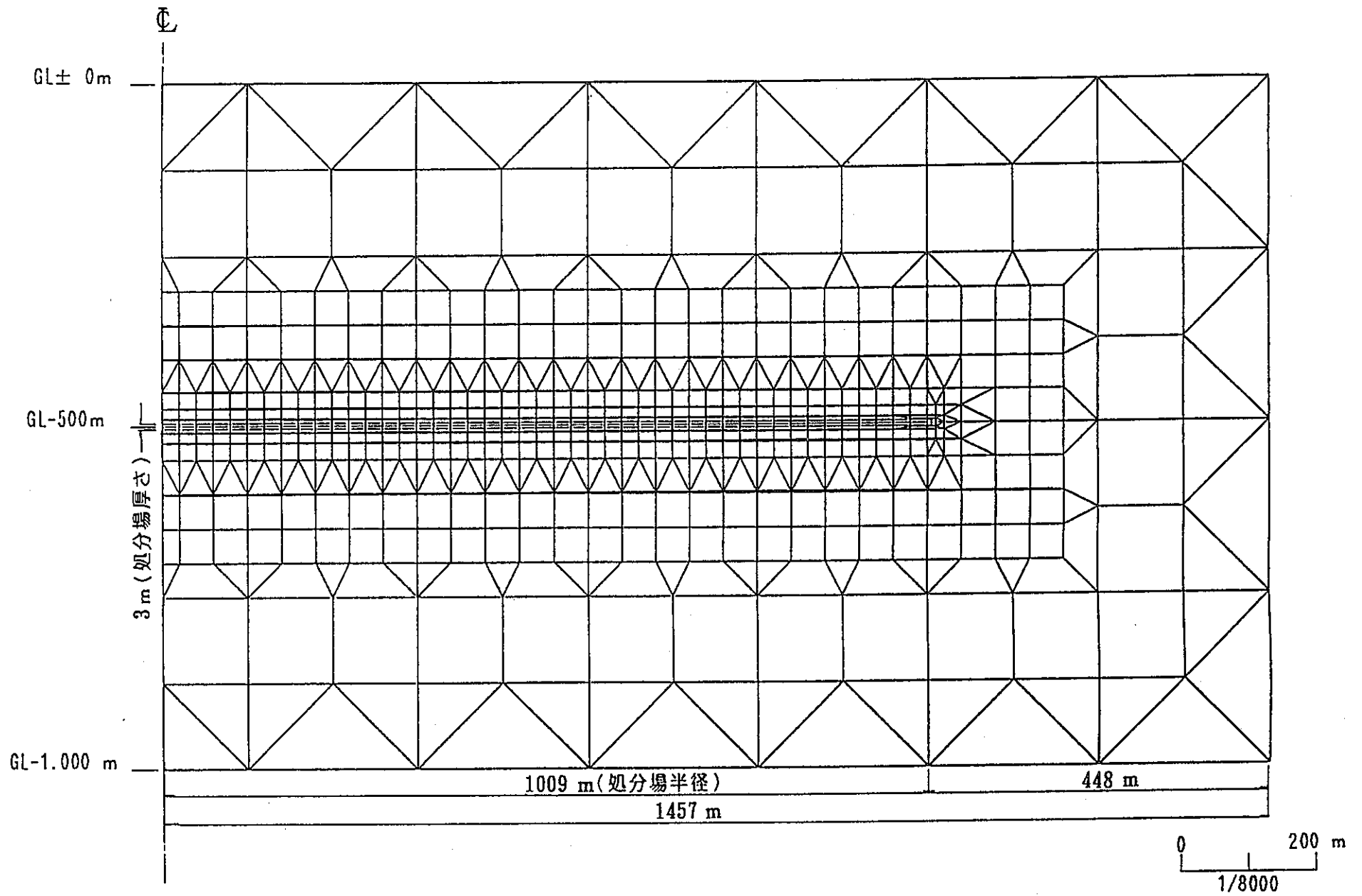


図3.2-2(b) ファーフィールドの解析モデルの処分場周辺拡大図

(堆積岩系岩盤, 処分深度 500m)

#### 3.2.4 処分場の発熱特性

ガラス固化体の一本当たりの発熱特性は、ニアフィールドの熱解析に用いた特性（図2.2-10）を使用し、中間貯蔵期間30年を経た4万本分のガラス固化体の発熱が3.2.1項で設定した処分場の円盤モデル領域より発生することとした。



### 3.3 解析ケース

ファーフィールドの熱解析は、表3.3-1に示すように結晶質岩系岩盤／処分深度1,000m、堆積岩系岩盤／処分深度500mの2ケースについて実施した。

表3.3-1 ファーフィールドの解析ケース

解析ケース	岩盤分類	処分深度 (m)	廃棄体の埋設密度 (m <sup>3</sup> )
1	堆積岩系岩盤	500	80
2	結晶質岩系岩盤	1,000	100

### 3.4 解析結果

#### (1)結晶質岩系岩盤、処分深度1,000mの解析結果

図3.4-1に処分場（発熱源）内の温度の経時変化を、図3.4-2に処分場周辺の温度の経時変化を示す。処分場内の温度が最大になるのは、処分場の中心で40年後、処分場端部で37年後であり、それぞれの最高温度は、75℃、59℃である。

処分場中心の上部100mの位置の温度（深度900m）は、270年後に最大で53℃となり、初期地温から約10℃上昇する。また、処分場中心の上部500mの位置（深度500m）の温度は、3000年後に最大3℃上昇するが、地表面の温度は、初期温度15℃から変化しない。

モデル全体および処分場周辺の温度分布を図3.4-3(a)～(d)に示す。伝熱は、初期には円盤状発熱源を中心としてほぼ楕円状に広がっていく。1℃以上の温度上昇がみられる100年後で処分場周辺の200m程度の領域となっており、それ以外の領域は初期温度分布とほとんど変わらない。そして10,000年後の温度分布は、初期状態とほぼ同じ形状を示している。

次に深さ方向の温度分布の経時変化を調べるために処分場中心及びその中心からそれぞれ、1,125m（処分場端部）、1,625m離れた地点鉛直方向の温度分布の経時変化を図3.4-4～3.4-6に示す。1℃以上の温度上昇がみられる範囲は処分場中心軸上で、ほぼ1年後で20m、50年後で120m、100年後で180m、1,000～10,000年後で500mである。また、処分場より水平方向に500m離れると発熱の影響はないという結果となっている。

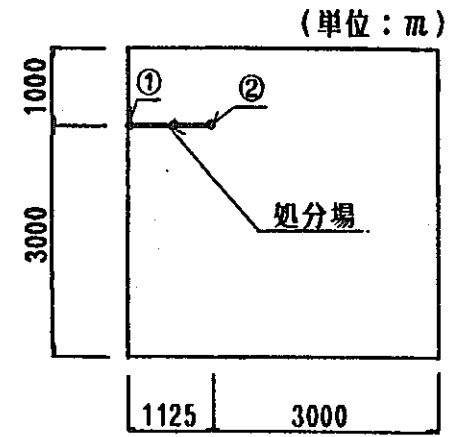
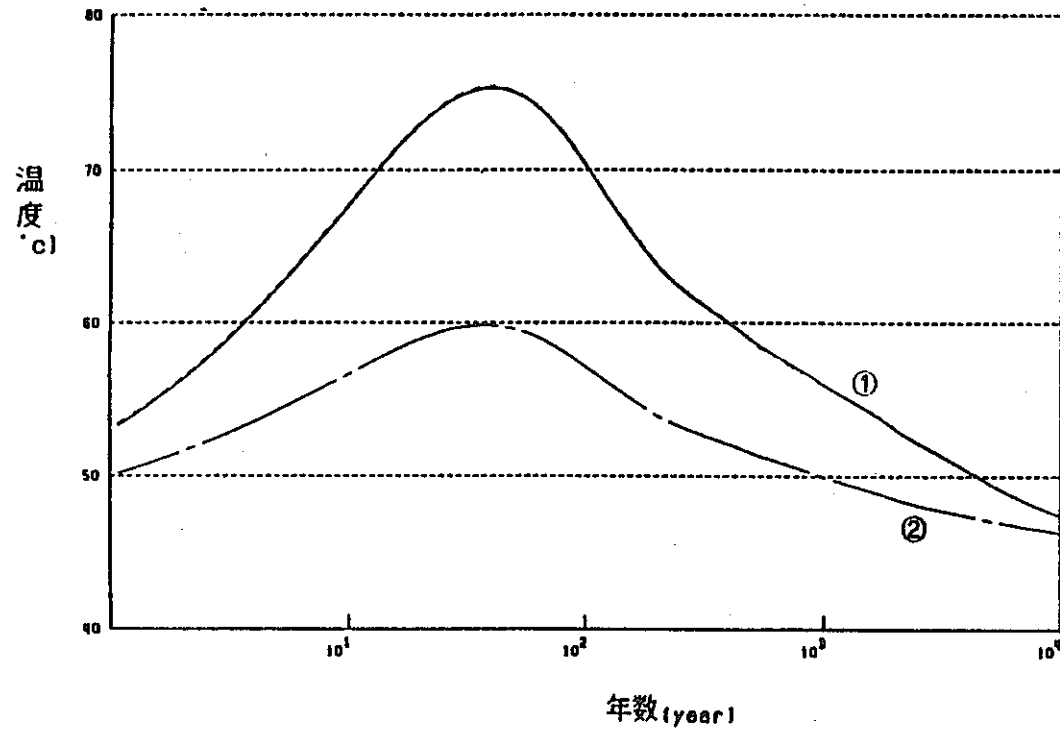


図3.4-1 処分場の温度経時変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

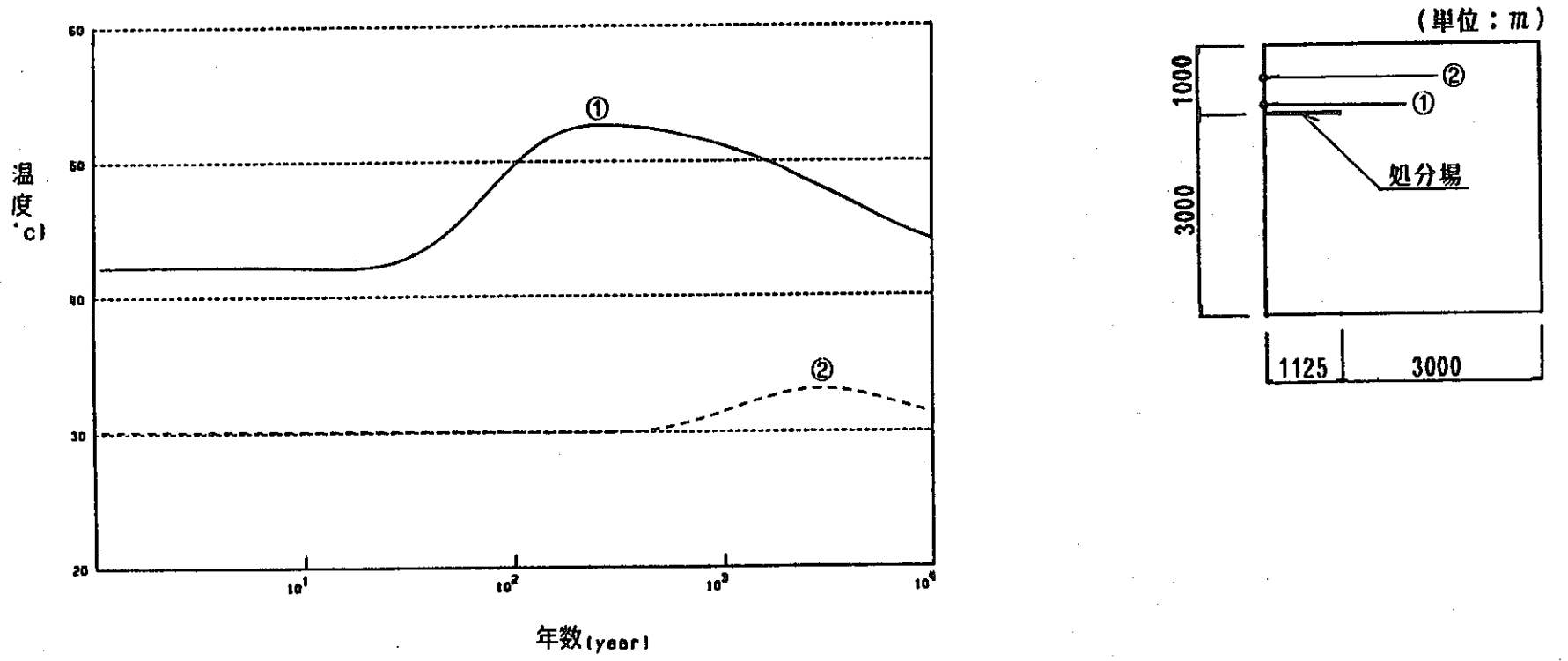
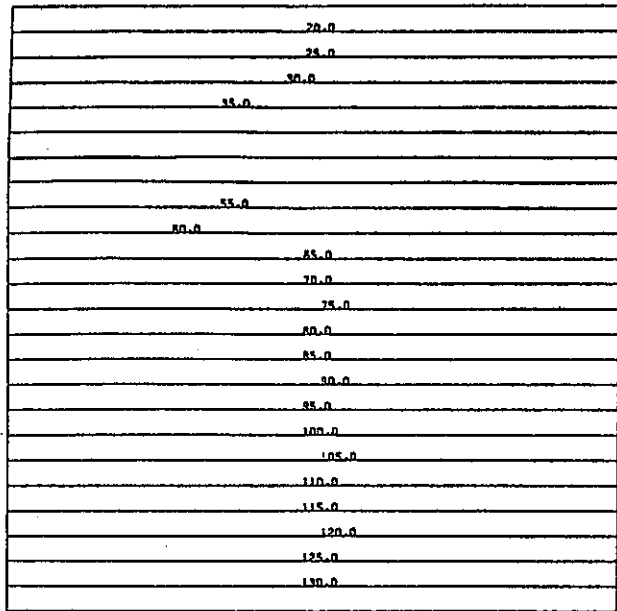
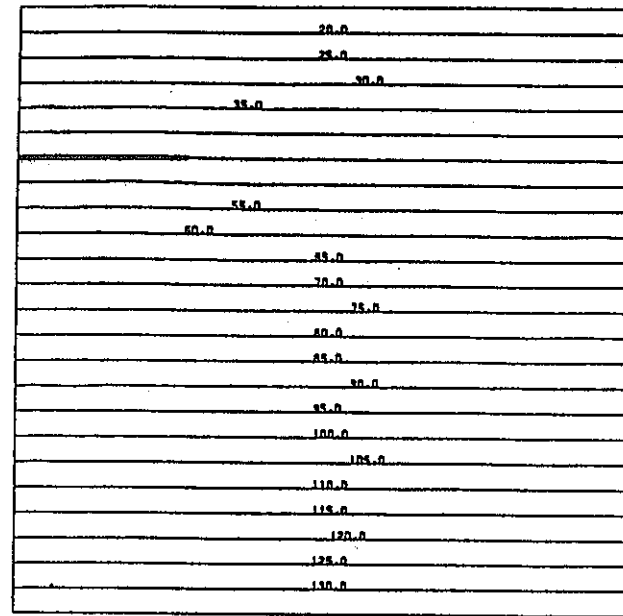


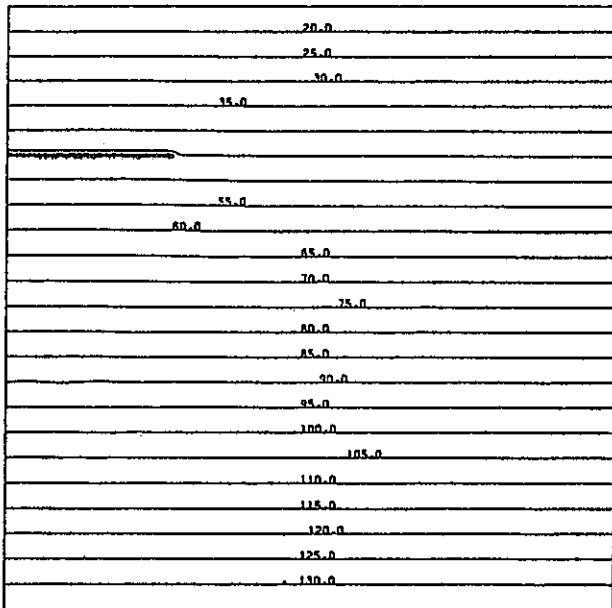
図3.4-2 処分場周辺の温度経時変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)



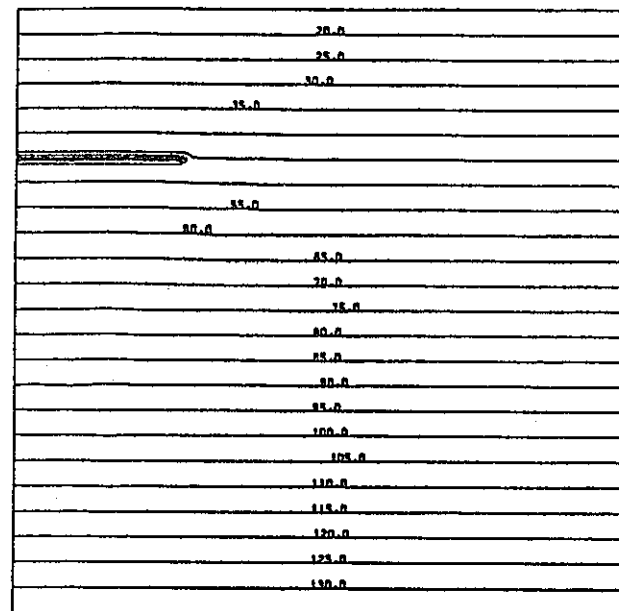
初期状態



1年後



5年後



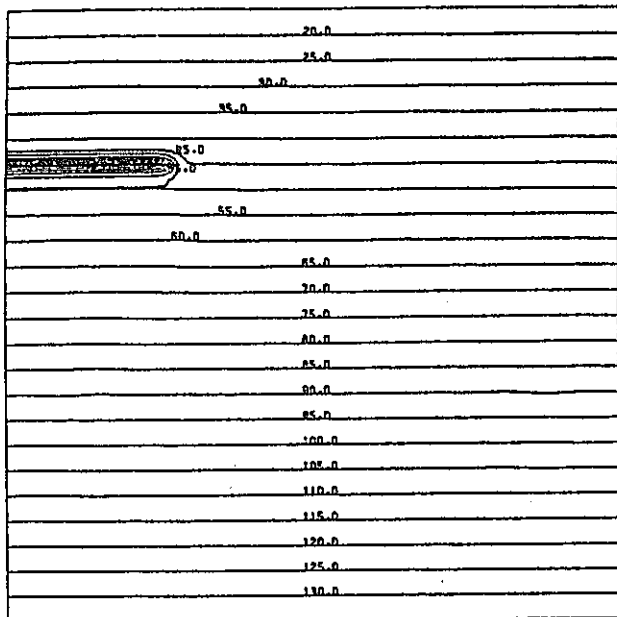
10年後

(単位: °C)

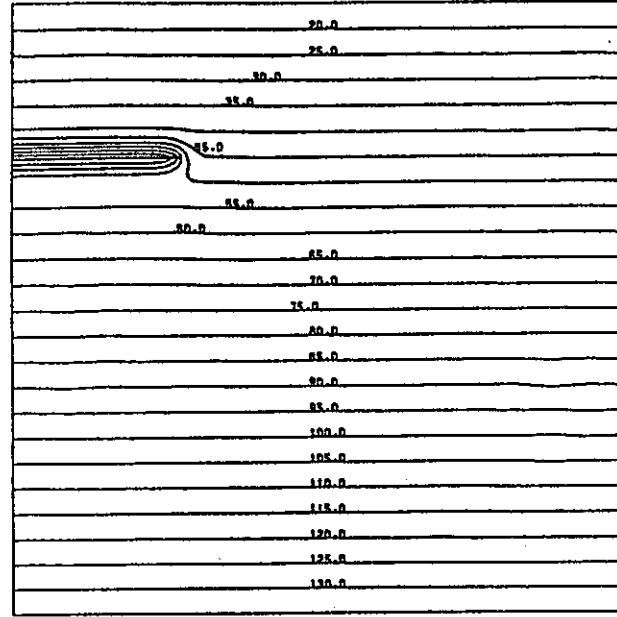
0 1000m  
S=1/50000

図3.4-3(a) 温度分布の全体図 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

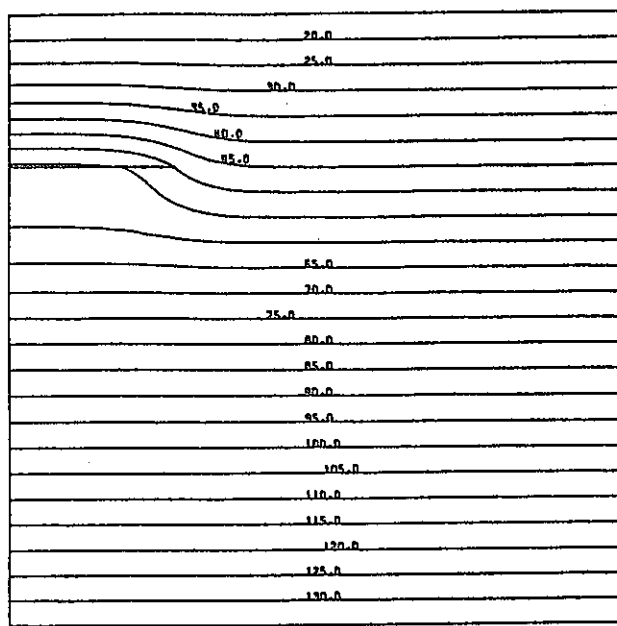
(単位: °C)



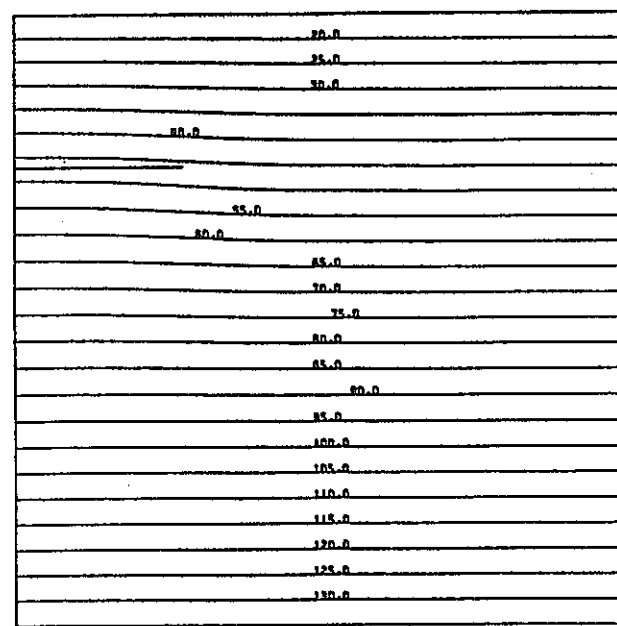
50年後



100年後



1000年後



10000年後

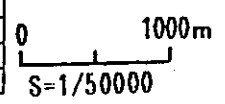
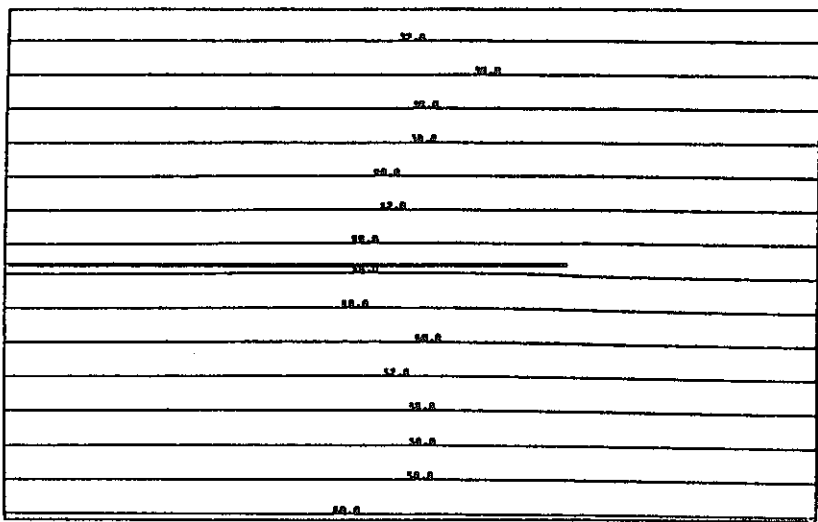
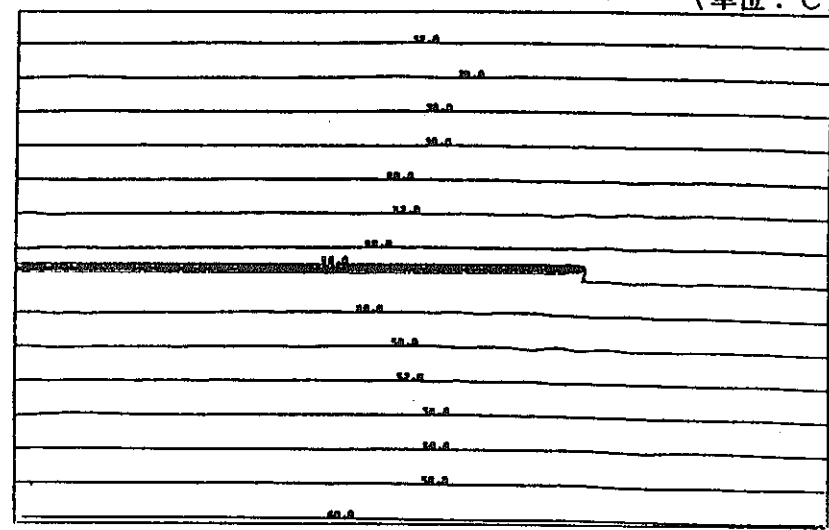


図3.4-3(b) 温度分布の全体図 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

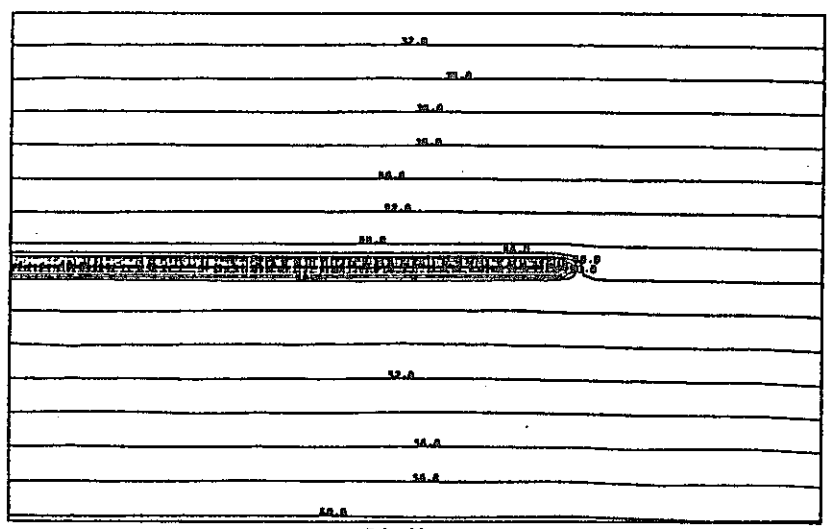
(単位: °C)



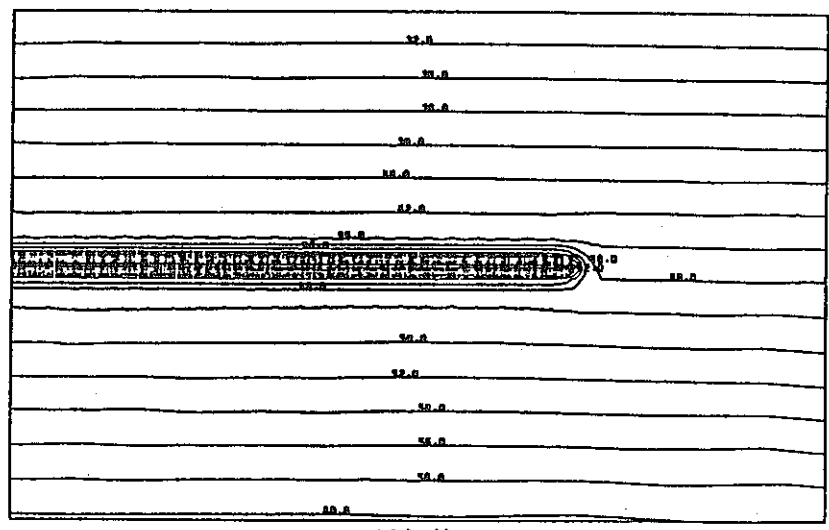
初期状態



1年後



5年後

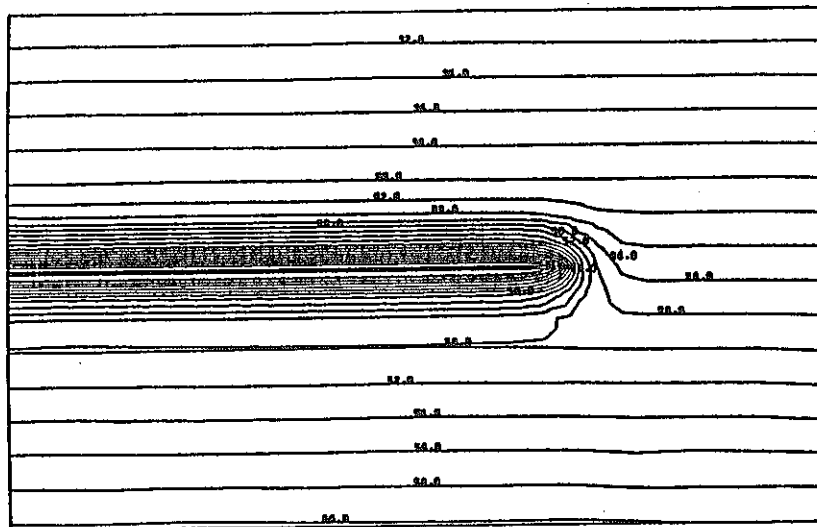


10年後

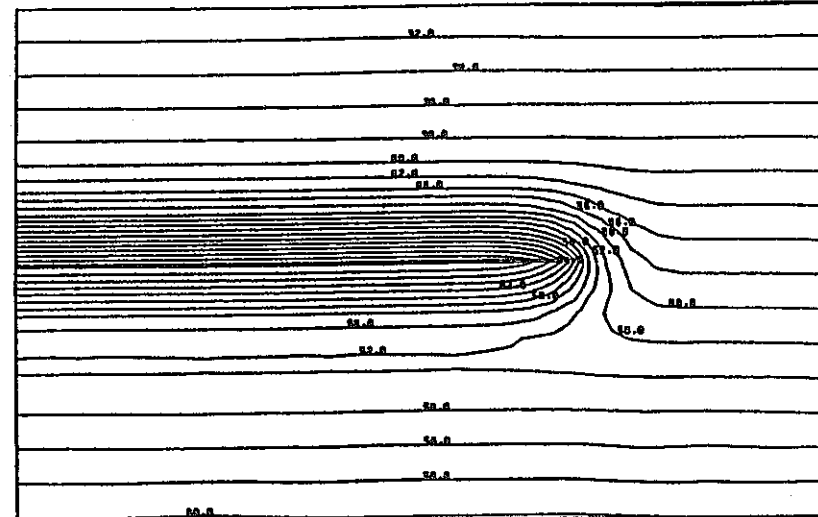
0 100m  
  
 S=1/15000

図3.4-3(c) 温度分布の処分場周辺拡大図 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

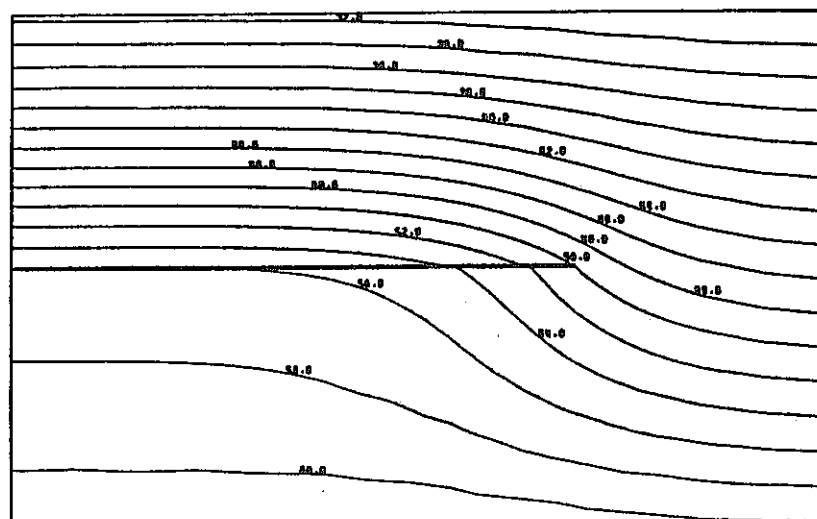
(単位: °C)



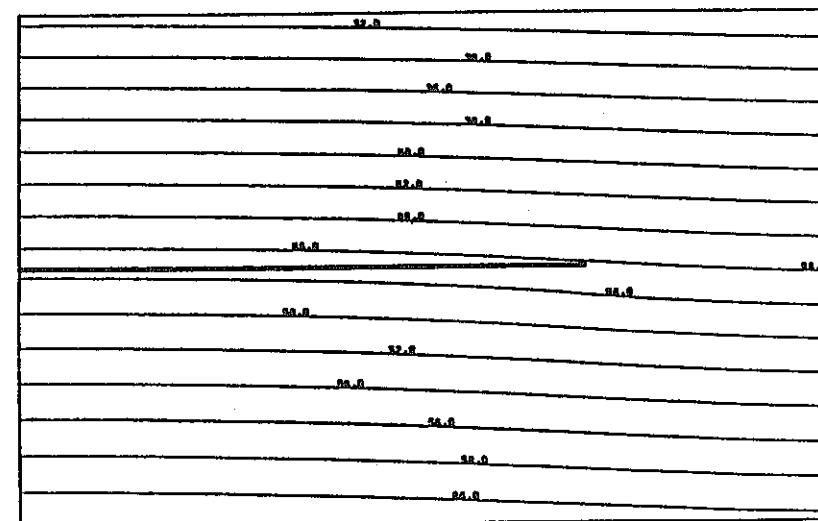
50年後



100年後



1000年後



10000年後

0 100m  
S=1/15000

図3.4-3(d) 温度分布の処分場周辺拡大図 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

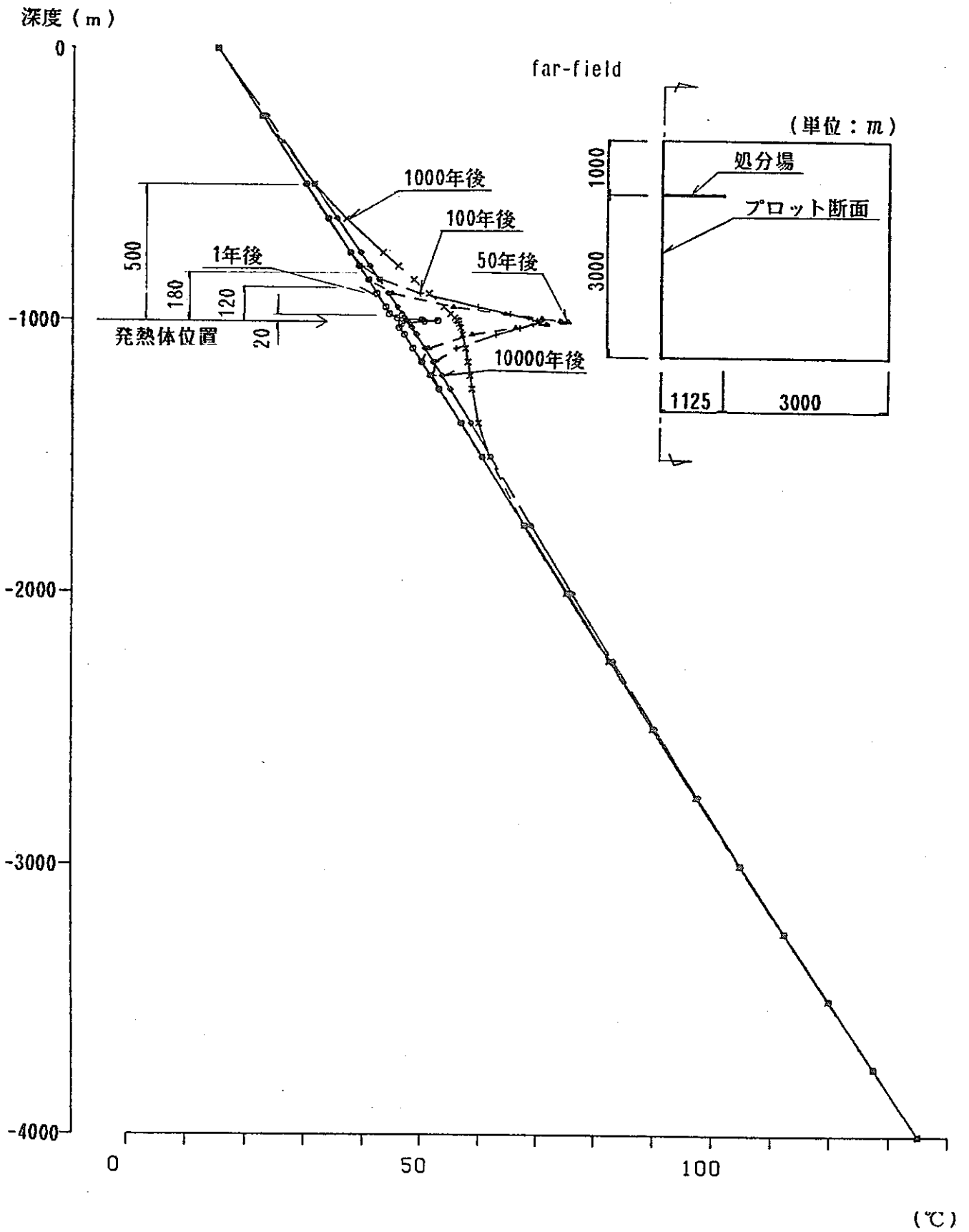


図3.4-4 中心軸の深さ方向の温度変化 (結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)



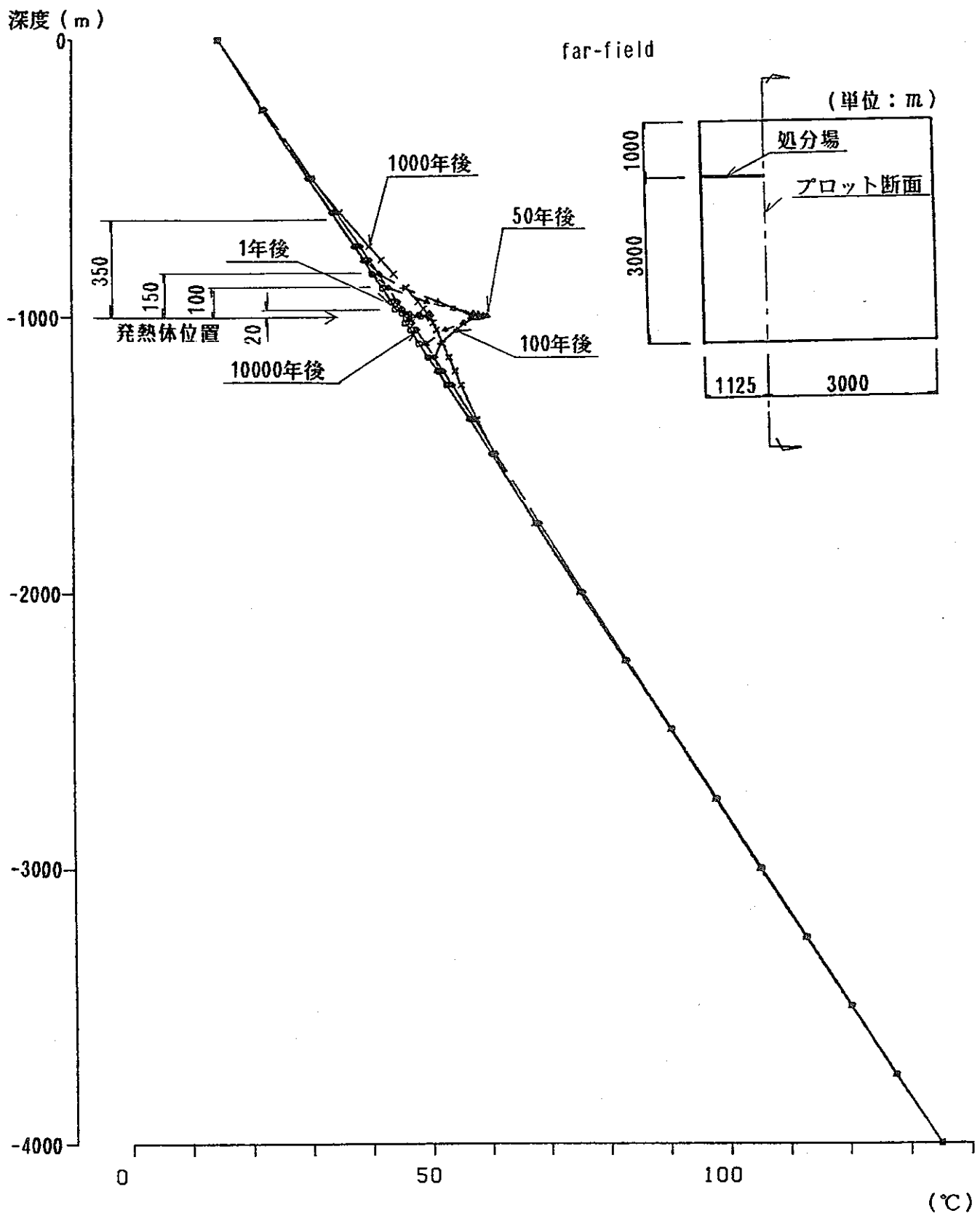


図3.4-5 中心から1,125m離れた地点の深さ方向の温度変化  
(結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

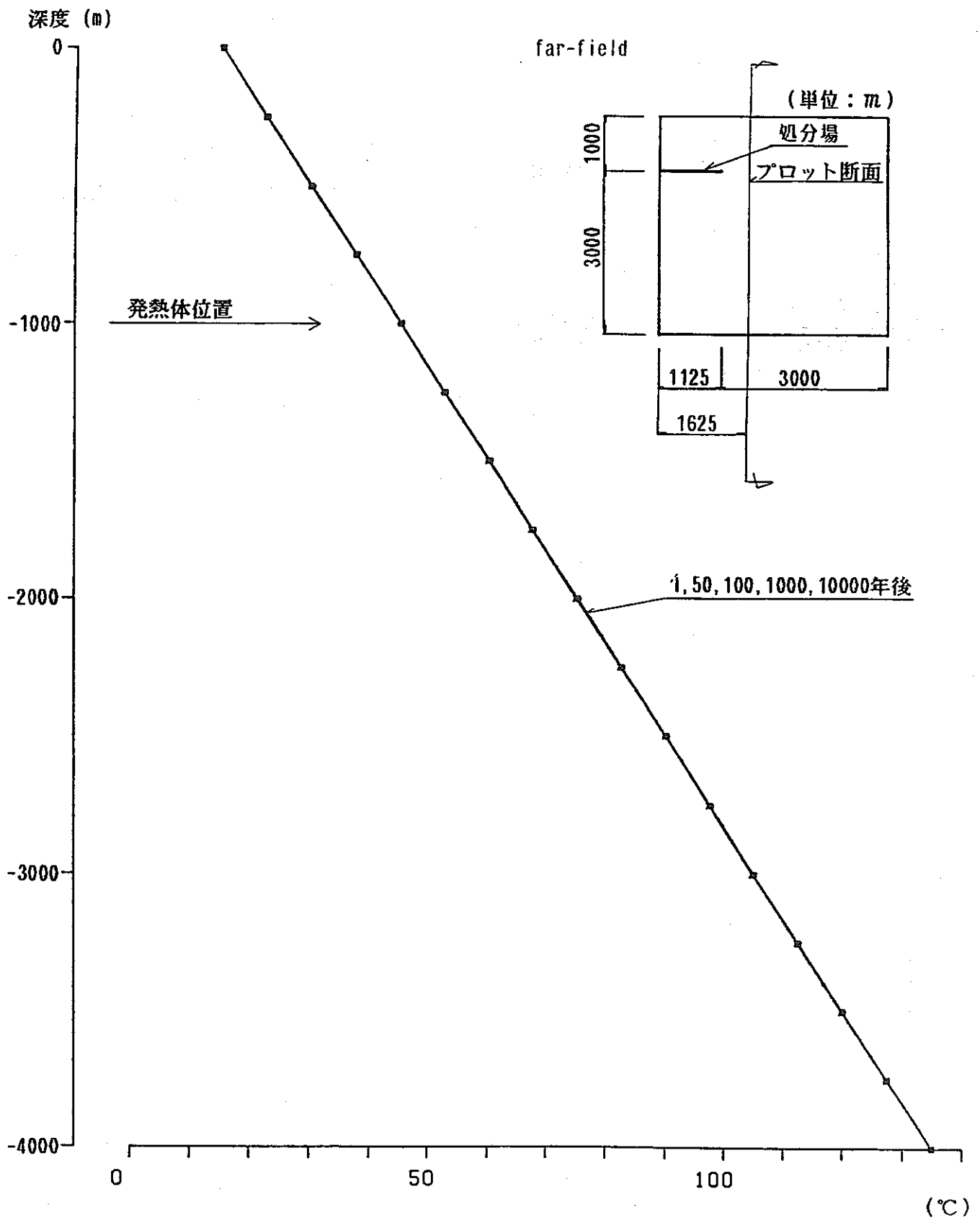


図3.4-6 中心から1,625m離れた地点の深さ方向の温度変化

(結晶質岩系岩盤, 処分深度1,000m)

## (2)堆積岩系岩盤，処分深度500mの解析結果

図3.4-7に処分場内の温度の経時変化を，図3.4-8に処分場周辺の温度の経時変化を示す。処分場内の温度が最大となるのは，処分場の中心で42年後，処分場端部で40年後であり，それぞれの最高温度は，78℃，54℃である。

処分場中心の上部100mの位置の温度（深度400m）は，250年後で最大44℃であり，初期状態から約15℃上昇しており，処分場中心の上部375mの位置（深度125m）の温度は，ほぼ1,000年後で最高32℃となり，約4℃の温度上昇を示している。また，地表面の温度は，結晶質岩系岩盤，深度1,000mの結果と同様に初期温度15℃から変化しない。

モデル全体および処分場周辺の温度分布を図3.4-9(a)～(d)に示す。発熱の影響範囲は，(1)と同様な結果となっている。

処分場中心及び中心からそれぞれ，1,009m（処分場端部），1,457m離れた地点の鉛直方向の温度変化を図3.4-10～3.4-12に示す。1℃以上の温度上昇がみられる範囲は処分場中心軸上で，1年後で20m，50年後で140m，100年後で200m，1,000年後で470mである。また，処分場から水平方向に約450m離れた場所では，温度変化がほとんどなく発熱の影響を受けないという結果になっている。

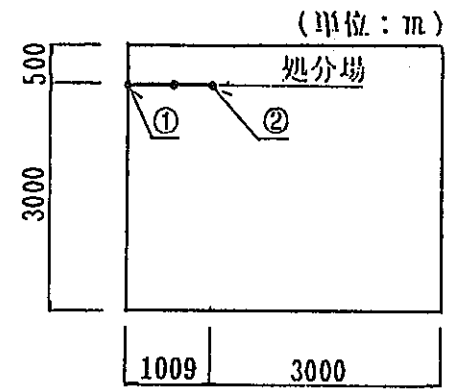
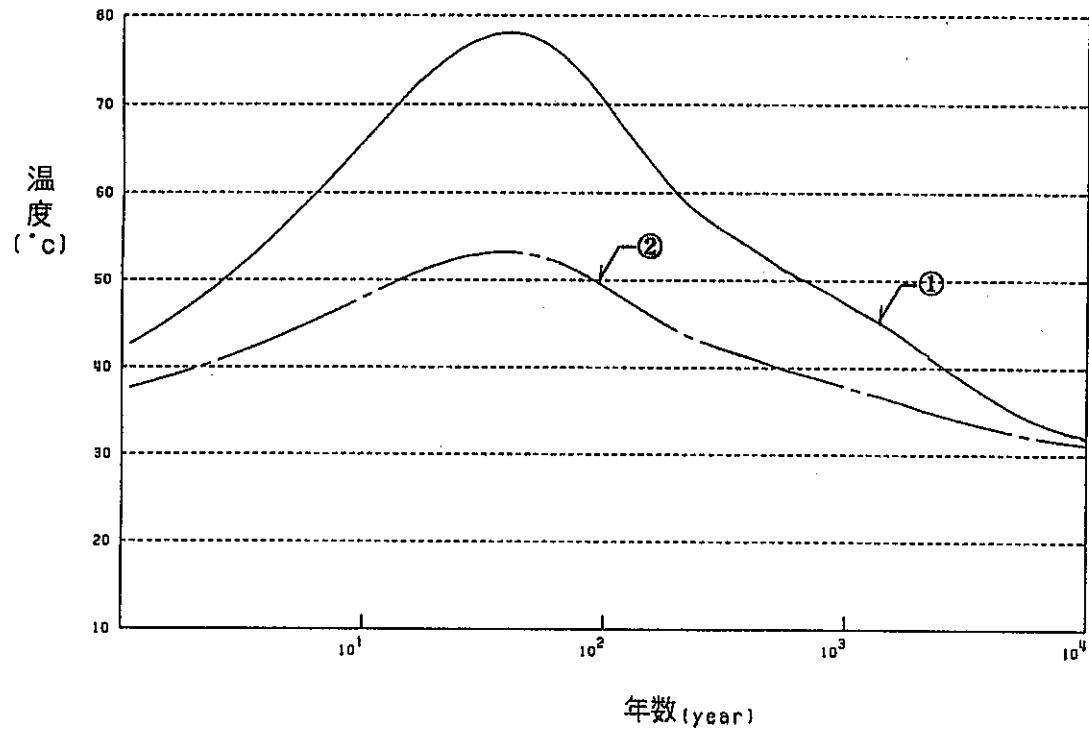


図3.4-7 処分場の温度経時変化 (堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

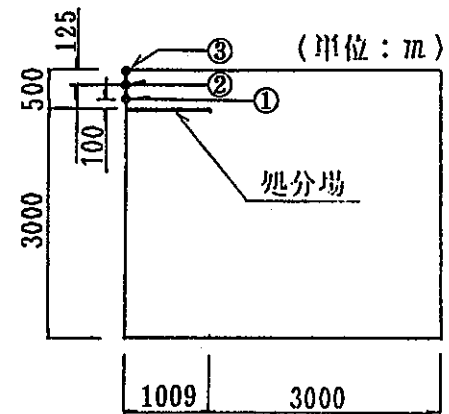
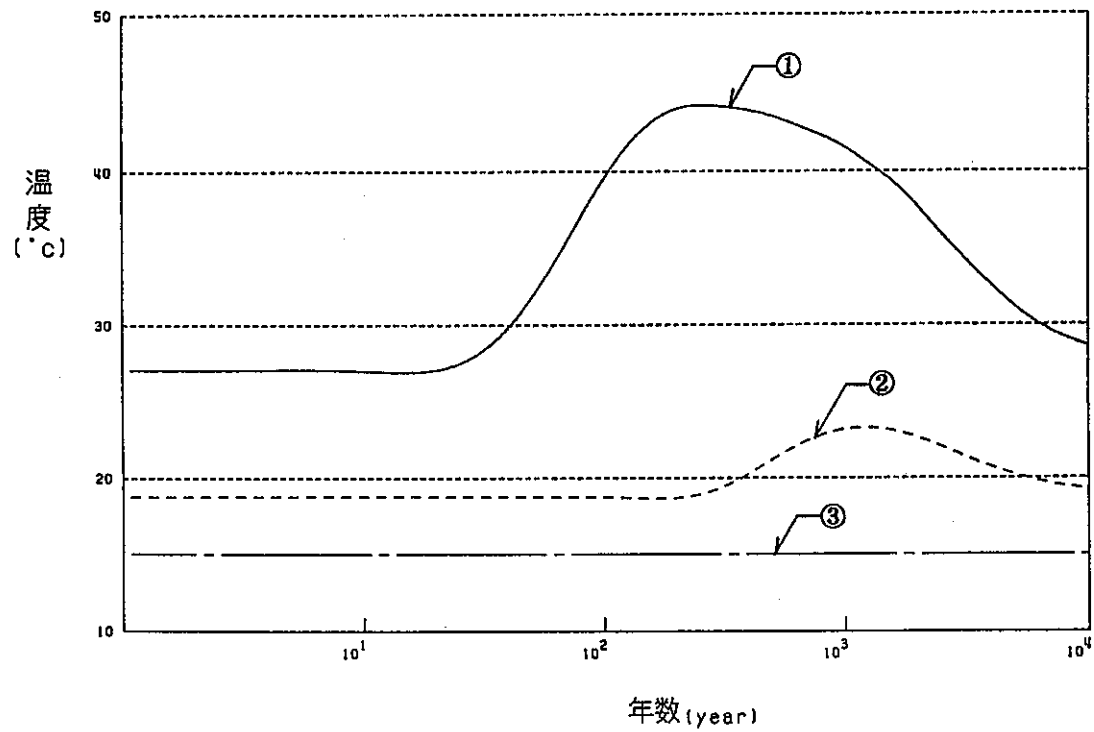
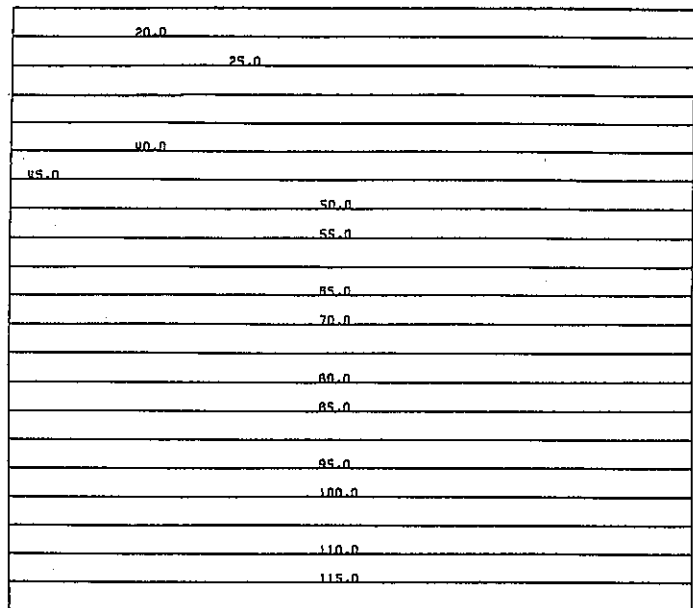
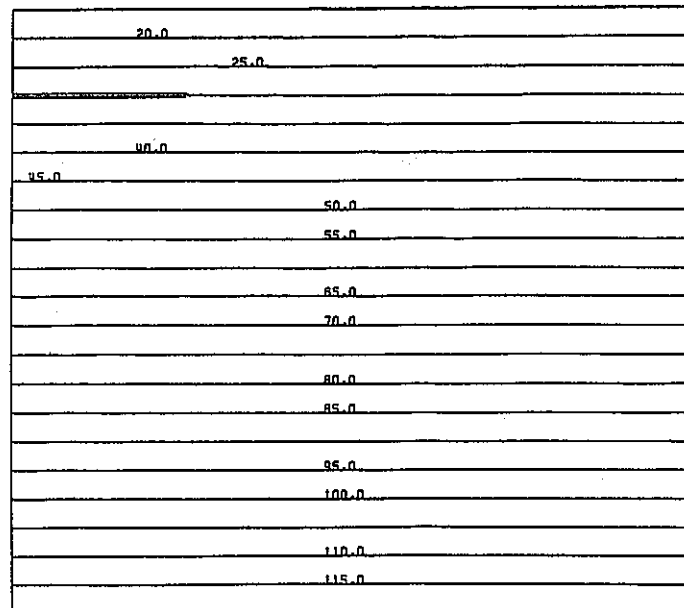


図3.4-8 処分場周辺の温度経時変化 (堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

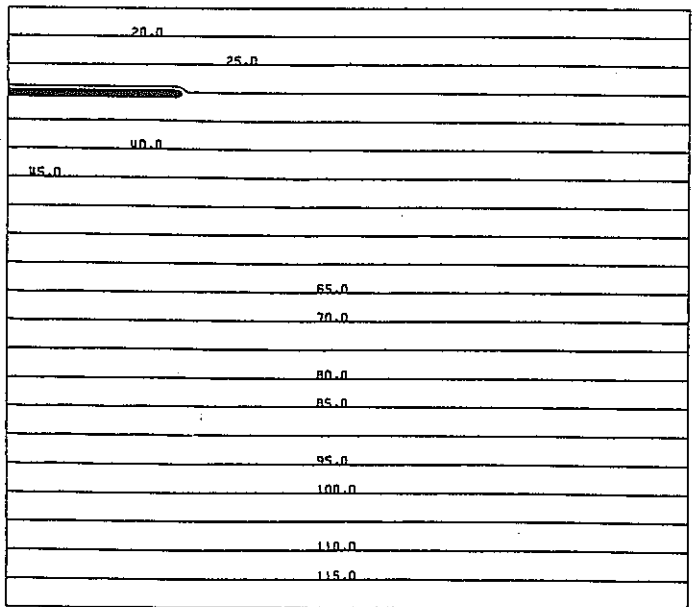
(単位: °C)



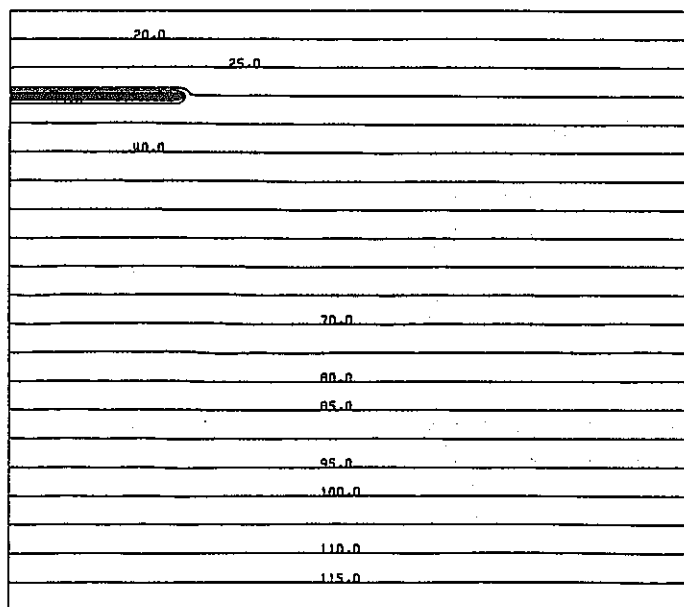
初期状態



1年後



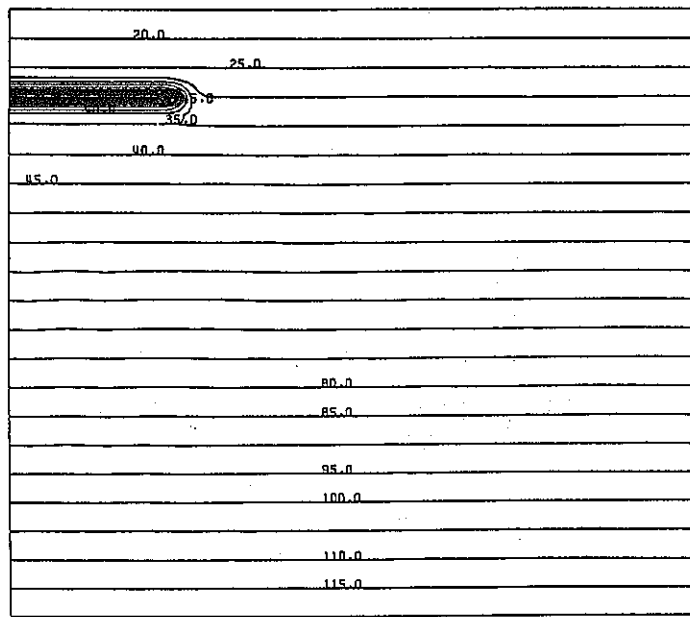
5年後



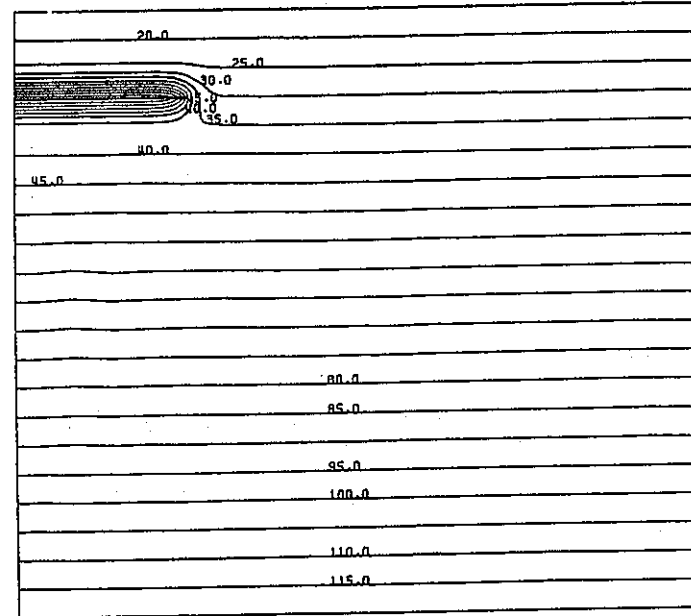
10年後

0 500m  
S=1/30000

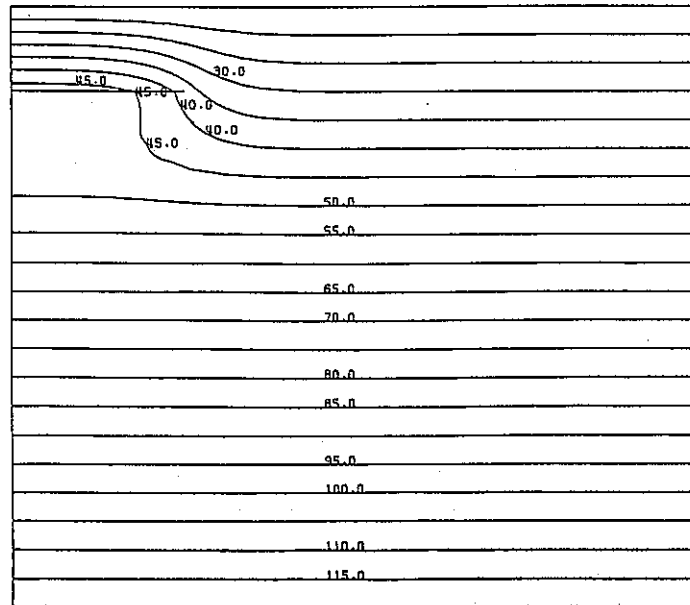
図3.4-9(a) 温度分布の全体図 (堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)



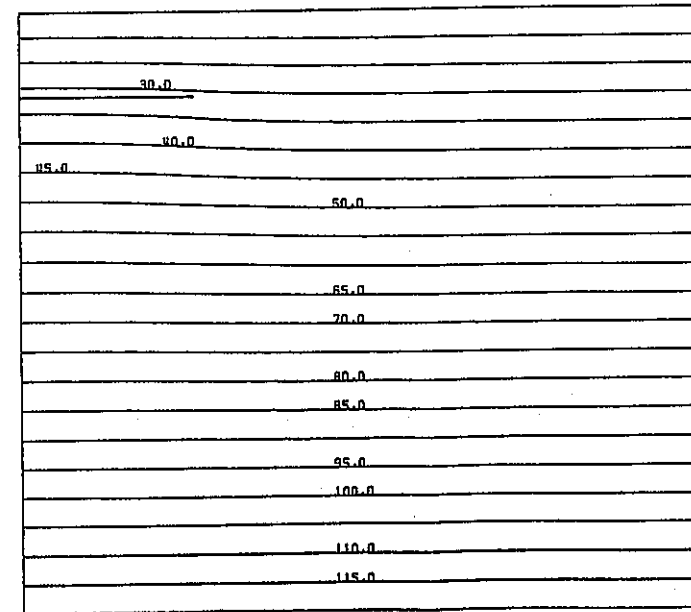
50年後



100年後



1000年後



10000年後

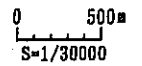
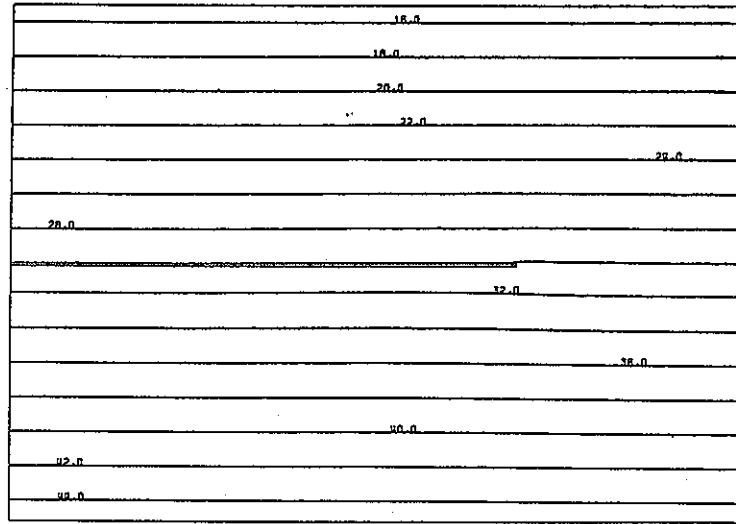
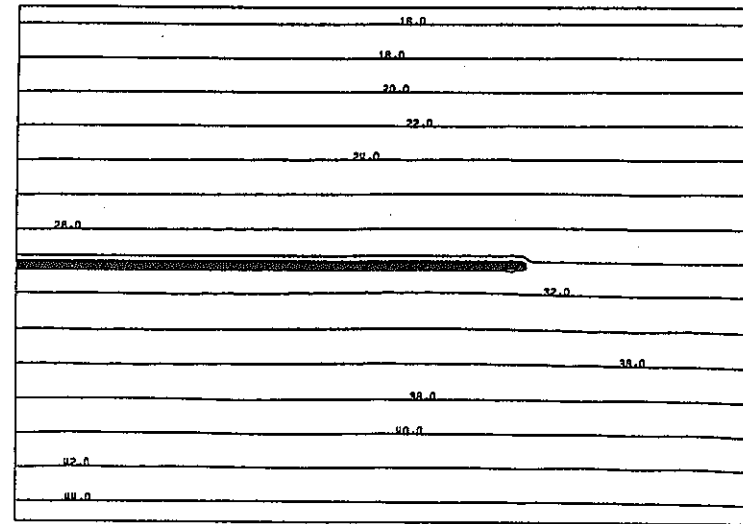


図3.4-9(b) 温度分布の全体図 (堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

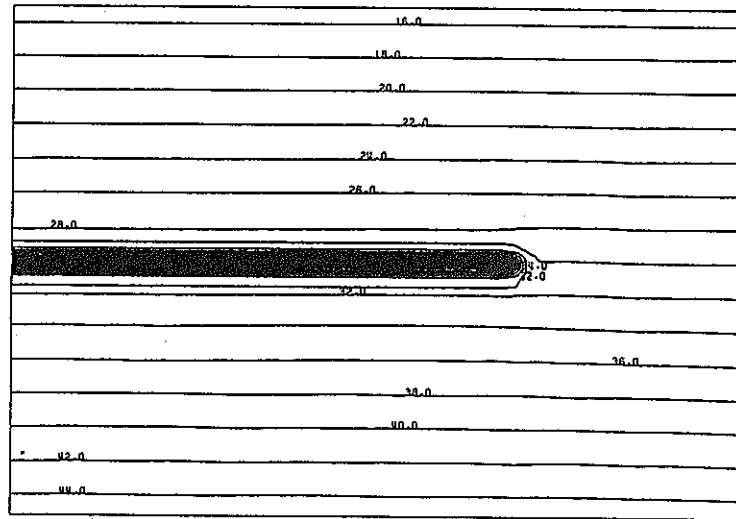
(単位: °C)



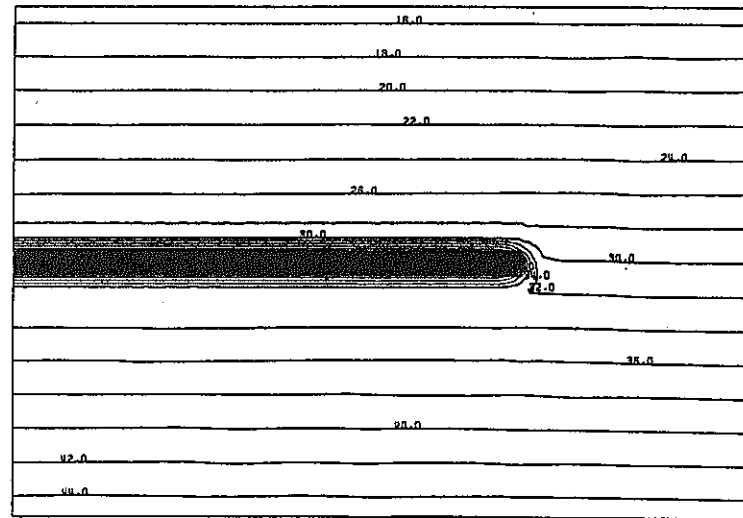
初期状態



1年後



5年後

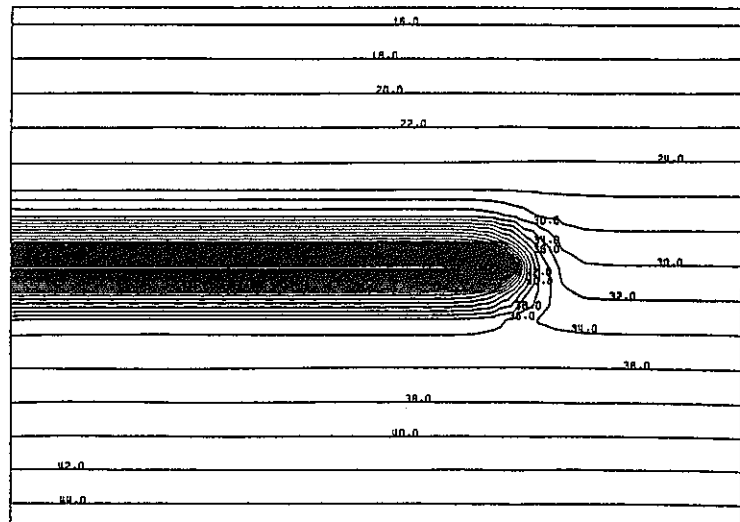


10年後

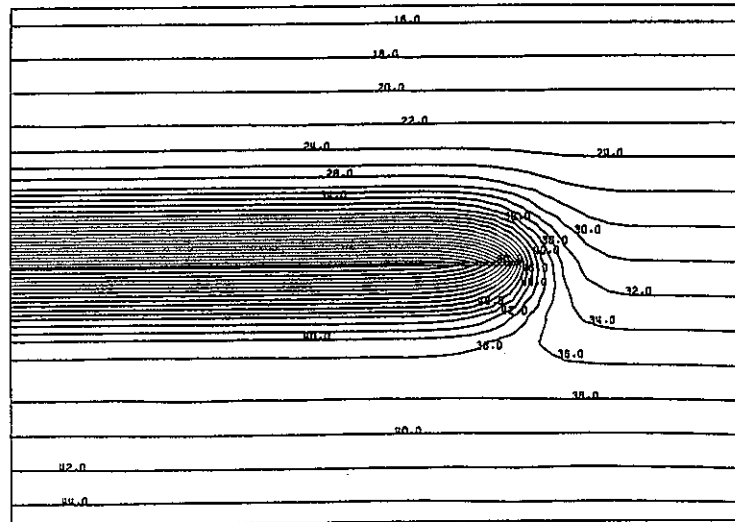
0 100 200m  
S=1/10000

図3.4-9(c) 温度分布の処分場周辺拡大図 (堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

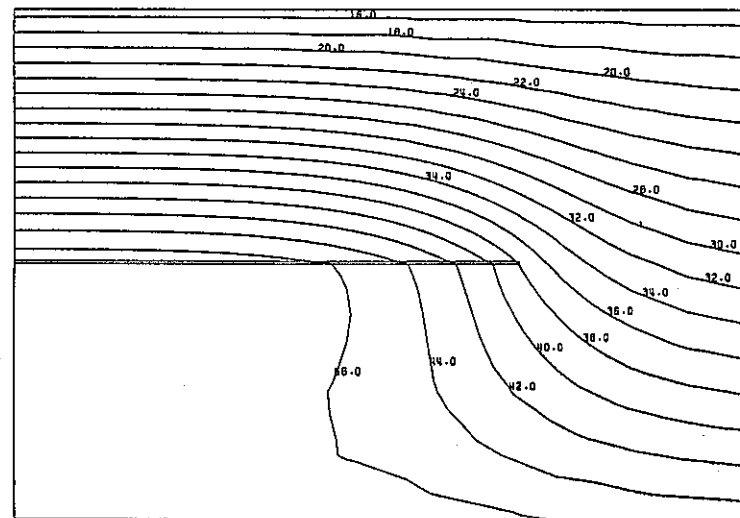




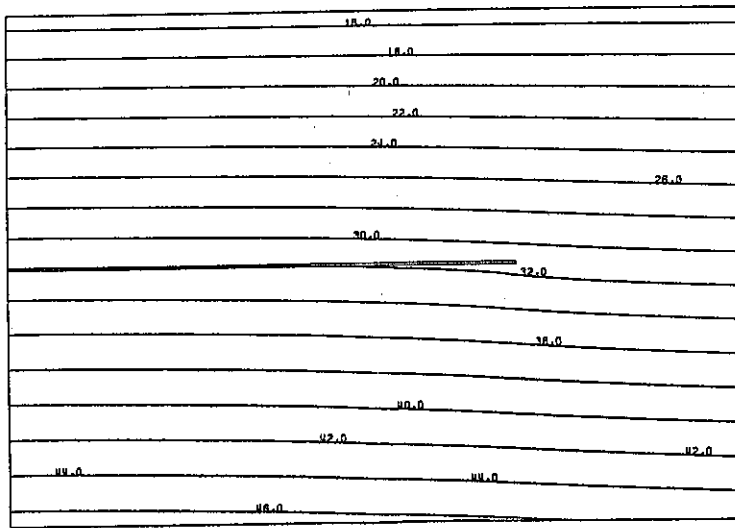
50年後



100年後



1000年後



10000年後

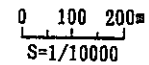


図3.4-9(d) 温度分布の処分場周辺拡大図 (堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

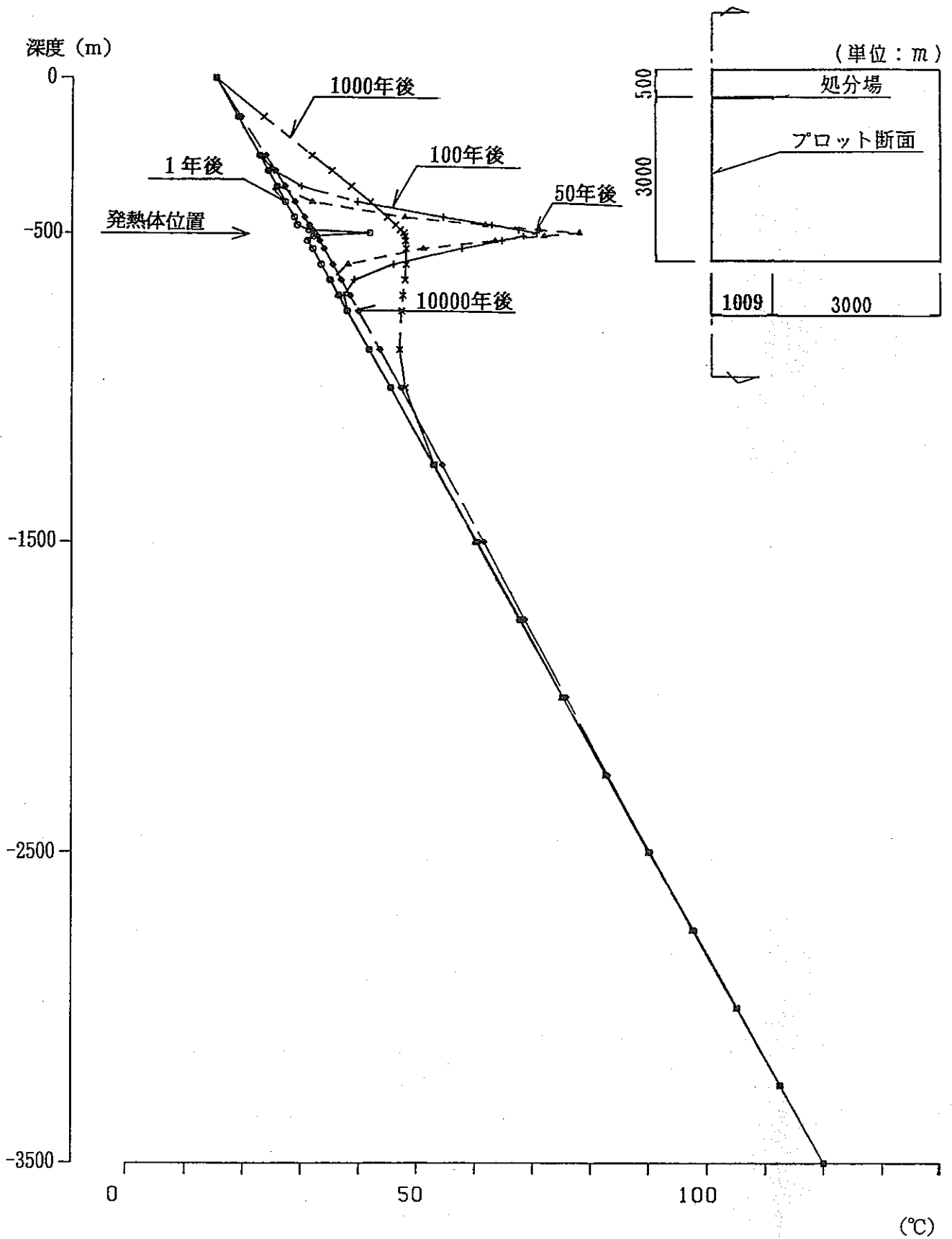


図3.4-10 中心軸の深さ方向の温度変化 (堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

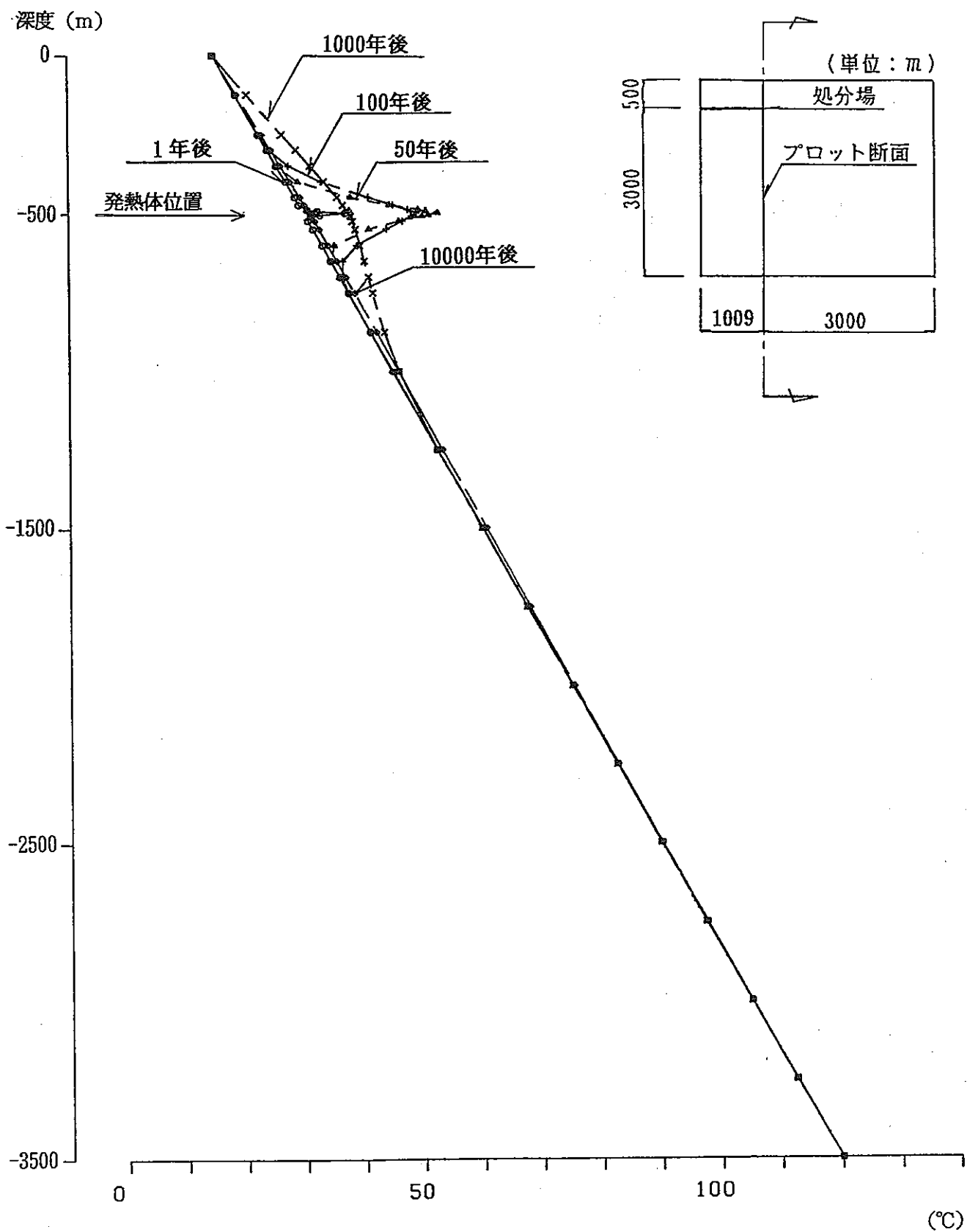


図3.4-11 中心から1,009m離れた地点の深さ方向の温度変化  
(堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

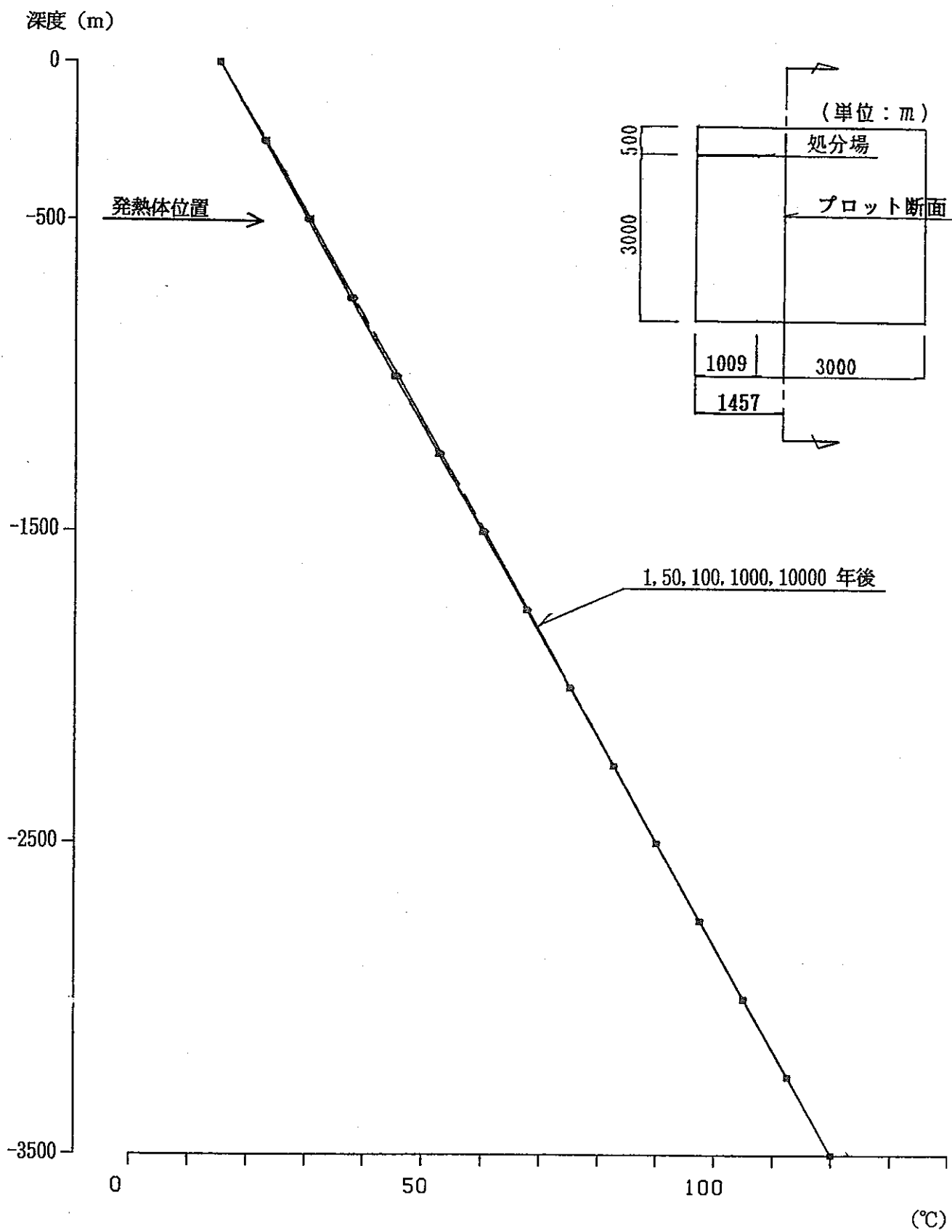


図3.4-12 中心から1,457m離れた地点の深さ方向の温度変化  
(堆積岩系系岩盤, 処分深度 500m)

### 3.5 まとめと今後の課題

ファーフィールドの温度上昇は、ニアフィールドと同様に、廃棄体の発熱特性、人工バリアおよび処分場地下施設の仕様、廃棄体埋設密度、岩盤の熱物性値等に依存する。

ここでは、岩盤物性として堆積岩系岩盤、結晶質岩系岩盤の平均的な熱物性を設定し、ガラス固化体の中間貯蔵期間を30年、廃棄体4万本の処分場を想定し、廃棄体1本あたりの埋設密度を80または100m<sup>2</sup>の条件で熱解析を行った。廃棄体の発熱により処分場の温度は、数10年後に初期地温より最大25～50℃程度上昇し、1,000年後には、5～15℃程度、10,000年後にはほぼ初期温度となる。1℃の温度上昇がみられる範囲は、50年後に処分場（発熱体）より100m程度、100年後に200m、1,000年後に最大500m程度となっている。また、今回の解析条件とした処分深度500～1,000mの範囲では地表面の温度は変化しないという結果が得られており、廃棄体の発熱による地上への温度影響は、気象条件による影響に比べて無視できるものと考えられる。

今後、ファーフィールドの温度変化を詳細に評価し、設計仕様へも反映していくためには、ニアフィールドと同様に熱-水-応力の連成解析、岩盤の熱物性の温度依存性やファーフィールドの地盤構造等を考慮した解析が課題である。

## 4. 謝辞

ニアフィールドの熱解析を行うにあたっては、大成建設株式会社、ファーフィールドの熱解析を行うにあたっては、鹿島建設株式会社にご協力頂いた。また、検査開発株式会社の酒井裕一氏には、計算、データ整理でご協力頂いた。ここに記し感謝の意を表したい。

## 5. 参考文献

- 1) Pusch, R. and Börgesson, L. (1985): Final Report of the Buffer Mass Test-vol.11 ; Test Results, SKB Technical Report 85-12.
- 2) Kjartanson, B. H. and Gray, M. N. (1984): Buffer/Container Experiment in the URL, 40th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, Oct.
- 3) Sato, S., Kobayashi, A., Hara, K., Ishikawa, H. and Sasaki, N. (1991) : Full Scale Test on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process in Engineered Barrier System, '91 Joint International Waste Management Conferance, ASME. Seoul, Korea, Oct.
- 4) Radhakrishna, H. S. and Lau, K. C. (1989): Modelling the In-situ Performance of Bentonite-Sandbuffer, MRS Scientific Basis for Nuclear Waste Management X III , Symp., Nov.
- 5) Ohnishi, Y., Shibata, H., and Kobayashi, A. (1987): Development of Finite Code for the Analysis of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Behaviors of a Saturated-Unsaturated Medium, Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, edited by Tsang, C. F., pp. 679-697.
- 6) Tsang, C. F. (1990): Coupled Behavior of Rock Joints, Rock Joint, 1990 Balkema, Rotterdam, ISBN.
- 7) Nagra (1985) : Project Gewähr 1985, NGB 85-09.
- 8) 本田明, 野田昌之, 鶴留浩二, 井上邦博, 石川博久, 佐々木憲明 (1992) : 炭素鋼オーバーパックの試作, PNC TN1410 92-059.
- 9) 坪井忠二編(1969) : 地球の構成 増補版, 地球の熱学 (上田・力武), 岩波書店.

- 10) 山本莊毅 (1983) : 地下水探査法, 地球出版, pp. 358.
- 11) 地下水ハンドブック編集委員会 (1979) : 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp. 119-129.
- 12) 日本瓦斯協会 (1981) : LNG地下式貯槽指針, 昭和56年12月.
- 13) 土質工学会編 (1979) : 岩の工学的性質と設計・施工への応用, 土質工学会.
- 14) Sydney P. Clark, Jr (1966) : Handbook of physical Constants, The Geological Society of America, Inc. Memoir 97.
- 15) J. タロブル, (1967) : 岩盤力学, 森北出版
- 16) ゲ・デ・チュウブルウノフ (1968) : 地盤改良法, 産業図書.
- 17) Horai, k. (1964) : Studies of the Thermal state of the Earth, The 13th paper ; Terrestrial Heat Flow in Japan, Bull, Earthg. Res. Inst, Vol. 42.
- 18) 新孝一, 北野晃一 (1987) : 低温下, 高温下での岩石・岩盤の特性調査, 電力中央研究所報告 U87010.
- 19) 芝亀吉 (1947) : 物理定数表, 岩波書店.
- 20) 国立天文台編 (1990) : 理科年表, 丸善, pp. 475.
- 21) 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬 (1992) : 緩衝材の特性試験 (I), PNC TN8410 92-057.

- 22) 藤田朝雄, 五月女敦, 原啓二, 納多勝: 緩衝材の熱物性試験, PNC TN1410 92-052
- 23) Nagra (1985) : Project Gewähr 1985, NGB 85-04
- 24) 日本機械学会 (1966) : 伝熱工学資料 改訂第2版, 日本機械学会, pp.262.
- 25) Croff, A. G. (1980): ORIGEN-2 A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-5621, Jul.
- 26) Kamei, G., Yusa, Y., Sasaki, K. and Sakuramoto, Y. (1991) : Natural Analogue Study on the Long-term Durability of Bentonite, Time-temperature Condition and Water Chemistry on the Illitization at the Murakami Deposit, Japan, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (in Press).
- 27) 柴田雅博, 亀井玄人 (1992) : ベントナイトの長期安定性評価, PNC TN8410 92-165.
- 28) IAEA (1983): Effects of Heat from High-level Waste on Performance of Deep Geological Repository Components, IAEA-TECDOC-319, Stockholm, Aug.