

ニアフィールドの熱解析

～第2次取りまとめにおける処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定～

(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

ニアフィールドの熱解析

～第2次取りまとめにおける処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定～

報告者 谷口 航*, 岩佐健吾**

要 旨

地層処分施設の地下施設においては、人工バリアを設置する空間が求められ、なおかつ設置された人工バリアおよび周辺岩盤が種々の条件を満たすことが求められる。

その条件の一つは、ガラス固化体の発熱および地温による熱的影響であり、人工バリアおよび周辺岩盤の性能が損なわれないよう各々の制限温度を越えないことが求められる。したがって、各々の制限温度を越えないように、人工バリアおよび地下施設を設計する必要があり、地下施設の設計の一つに処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定がある。

ここでは、第2次取りまとめでの条件下で、上記熱的影響の観点から必要な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを解析により検討した。また、処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定するための熱的影響以外の条件を洗い出し、それら条件および熱的安定性も含めた合理的な設定方法を検討し値の設定を試みた。

次いで、設定された処分坑道離間距離および廃棄体ピッチにおいて、ニアフィールドの温度経時変化について考察するとともに人工バリアの施工上生じる隙間がニアフィールドの温度に及ぼす影響を把握した。

また、熱的観点から、つまりニアフィールドの制限温度の観点から、処分施設が成立するための処分深度の範囲についても考察を行った。

得られた成果は以下のとおりである。

- ・ 処分坑道横置き方式においては、廃棄体ピッチを人工バリアとして必要な寸法から決まる最小値にし、熱的安定性の観点から必要な処分坑道離間距離を設定するのが合理的である。
- ・ ガラス固化体の固化後の貯蔵期間 50 年における処分孔縦置き方式では、空洞の力学的安定性の観点から必要な最小処分坑道離間距離および廃棄体ピッチでも制限温度は満足する。
- ・ 人工バリアの温度は、概ね処分後数十年までで最高に達し、その後徐々に下がる。また、約 1000 年後には、人工バリアの温度分布差はなくなり、10000 年後には初期の地温に戻る。
- ・ 人工バリアの施工上生じる隙間が、ニアフィールドの温度に及ぼす影響は小さい。
- ・ 制限温度を下回ることが難しい熱的観点からの処分深度の範囲について一例を示した。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター

** 東京事務所 2000 年レポートチーム

処分研究部 処分バリア性能研究 Gr.

統合化 Gr.

Thermal analysis in the near field for geological disposal of high-level radioactive waste

- Establishment of the disposal tunnel spacing and waste package pitch on the 2nd progress report for the geological disposal of HLW in Japan -

Wataru Taniguchi*, Kengo Iwasa**

ABSTRACT

For the underground facility of the geological disposal of high-level radioactive waste (HLW), the space is needed to set the engineered barrier, and the set engineered barrier and rock-mass of near field are needed to satisfy some conditions or constraints for their performance.

One of the conditions above mentioned is thermal condition arising from heat outputs of vitrified waste and initial temperature at the disposal depth. Hence, it is needed that the temperature of the engineered barrier and rock mass is less degree than the constraint temperature of each other.

Therefore, the design of engineered barrier and underground facility is conducted so that the temperature of the engineered barrier and rock mass is less degree than the constraint temperature of each other. One of these design is establishment of the disposal tunnel spacing and waste package pitch.

In this report, thermal analysis is conducted to establish the disposal tunnel spacing and waste package pitch to satisfy the constraint temperature in the near field. Also, other conditions or constraints for establishment of the disposal tunnel spacing and waste package pitch are investigated. Then, design of the disposal tunnel spacing and waste package pitch, considering these conditions or constraints, is conducted.

For the near field configuration using the results of the design above mentioned, the temperature with time dependency is studied by analysis, and then the temperature variation due to the gaps, that will occur within the engineered barrier and between the engineered barrier and rock mass in setting engineered barrier in the disposal tunnel or pit, is studied.

At last, the disposal depth variation is studied to satisfy the temperature constraint in the near field.

*Tokai Works, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Waste Isolation Research Division,

Barrier Performance Group

**Tokyo Office, Geological Isolation Research Project, Integration and Reporting Group

目 次

1.	はじめに	1
2.	処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定	3
2-1	設定に際しての前提条件	3
2-2	設定の考え方	8
2-3	人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法	12
2-4	建設・操業技術からくる制限	13
2-5	空洞の力学的安定性からくる制限	14
2-6	ニアフィールドの温度からくる制限	14
2-7	総合的判断	18
2-8	まとめ	22
3.	ニアフィールドの熱解析	25
3-1	概要	25
3-2	解析手法	25
3-3	解析条件	27
3-4	解析結果	41
4.	熱的観点から設定される処分深度の範囲	113
4-1	考え方	113
4-2	検討ケース	114
4-3	考察	115
5.	まとめ	120
 謝辞		
 参考文献		

1. はじめに

地層処分研究開発第2次取りまとめでは、人工バリアと処分施設の設計、制作・施工、建設などに関し、安全性を実現するための信頼性の高い人工バリア並びに処分施設についての設計要件を提示するとともに、これらが現実的な工学技術によつて合理的な構築ができることを示すことが求められている。核燃料サイクル開発機構では、この要求に対して、人工バリアや処分施設の設計の考え方や要件を示し、これらに基づき実際に試設計を行い、さらに試設計された仕様に対し種々の検討を行うことにより、応えることとしている。

本報は、上記のうち処分施設の設計の考え方および試設計に資するものであり、地下施設の設計のうち処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定に関して、その考え方を示すとともに、試設計を行ったものである。

地層処分場の地下施設の設計においては、人工バリアを設置する空間が求められ、なおかつ建設・操業・閉鎖の作業性について充分考慮するとともに、人工バリアおよび周辺岩盤に対しても有意な影響を与えないように配慮しておくことが要件である。

人工バリアおよび周辺岩盤に対して有意な影響を与えるものとして、温度が考えられており、制限温度を下回ることが求められている。本報では、第2次取りまとめで設定した条件下で、人工バリアおよび周辺岩盤、つまりニアフィールドの温度に着目し、解析による検討を行い、制限温度を下回る処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを検討した。

また、処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定に際し必要な温度制限以外の条件を検討するとともに、温度制限を含めて設定の考え方を示し、これら条件を満たす処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定を行った。

地層処分システムの安全評価やオーバーパックの腐食評価において、緩衝材内の水理挙動および温度環境は重要であり、水理挙動はニアフィールドの温度経時変化および温度分布と深く関係する。例えば、緩衝材の透水係数は温度とともに変化することが報告されている（松本ほか、1997）。また、人工バリア内の緩衝材が周辺岩盤から供給される地下水により飽和していく仮定での水分移動には、緩衝材内の温度分布（温度勾配）も影響を与える（千々松・谷口、1999）。したがって、設定された処分坑道離間距離および廃棄体ピッチにおいて、ニアフィールドの温度経時変化および温度分布についての考察を行った。

人工バリアの施工では、オーバーパックと緩衝材、緩衝材と岩盤の間に隙間が生

じると考えられる（千々松ほか, 1999）。また、ガラス固化体が格納されるオーバーパックの内寸は、その作業性を考慮して、ガラス固化体の外寸に比べて若干大きくしている（本間ほか, 1999a）。これら隙間は、場合によっては、ニアフィールドの温度に影響を与える可能性がある。したがって、これら隙間がニアフィールドの温度に及ぼす影響について検討した。

最後に、熱的観点から、つまりニアフィールドの温度制限の観点から、処分施設が成立するための処分深度の範囲についても一例を挙げ考察を行った。

2. 処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定

2-1 設定に際しての前提条件

わが国における地層処分概念は、諸外国と同様、多重バリアの概念に基づき、人工バリアを地下数百メートル以深に定置することとしており（動力炉・核燃料開発事業団，1992a），その検討ではわが国の地質環境の特徴を踏まえたものである必要がある。

現段階では、わが国の幅広い地質環境を考慮した概念の検討を行っており、この観点から地質環境の幅に対して性能に余裕を持たせた人工バリアを考えている。図2-1にわが国の地層処分の概念を示す。ここで「性能に余裕を持たせる」ことの意味は、幅広い地質環境条件を考慮した性能の他に、天然バリアが持つ不確実性（間隙構造や鉱物学的分布に関する空間的不均質性等）への対応が含まれており、その程度は人工バリアの設計や地層処分システムの性能評価において、現実的な範囲で保守性を考慮することによって設定されるものである。したがって、現段階の合理的な設計手順として、まず人工バリアの設計を行い、次いで、設計された人工バリアに対し種々の条件を満たすような地下施設を設計することが望ましい。ここでは、第2次取りまとめへの反映を目的に、杉野らによって例示された人工バリア仕様（杉野ほか，1999）に対して処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定することとした。杉野らによって例示された人工バリア仕様（杉野ほか，1999）を図2-2に示す。

処分場の地下施設は、地上と地下を結ぶアクセス坑道、廃棄体を定置するための処分坑道、処分坑道を取り囲む主要坑道、主要坑道間を結ぶ連絡坑道、および処分坑道とそれを取り囲む主要坑道からなる区画、つまり処分パネルからなる（動力炉・核燃料開発事業団，1992a）。地下施設の概念を図2-3に、地下施設の建設および人工バリアを設置・施工することを考慮し、黒木らにより設計された地下水平坑道の断面仕様（黒木ほか，1999）を図2-4に示す。なお、本検討での人工バリアの定置方式に関しては、代表例である処分坑道横置き方式および処分孔豎置き方式（動力炉・核燃料開発事業団，1992a）を対象とした。

人工バリア、各種坑道の断面仕様、処分坑道離間距離・廃棄体ピッチの設計においては、地質環境条件が必要となるが、サイトが未定の現段階では、これを特定するのは不可能である。ここでは、谷口らにより地層処分場の設計のためにわが国地質環境を幅広く考慮し検討・設定された地質環境特性（谷口ほか，1999a）から、

硬岩系岩盤および後述する深度において現実的な支保を施工することが可能な軟岩系岩盤（黒木ほか, 1999）の2種の地質環境特性を用いることとした。

処分深度に関しては、地層処分の長期安全性、地質環境の長期安定性、対象となる岩盤の広がり、地下水の地球化学特性や地下水流动特性等の地質環境の特性、建設技術や調査技術の適用範囲、空洞安定性や熱的影響の検討などの設計の面から把握される深度の影響、さらに経済性等を勘案して設定される。ここでは、一例として、硬岩系岩盤で1000m、軟岩系岩盤で500mとした。

ガラス固化体の埋設時の発熱量はニアフィールドの温度分布を規定する大きな因子である。本検討では、後述の3「ニアフィールドの熱解析」で示すように、石原らによって設定されたガラス固化体仕様（石原ほか, 1999）に対し、固化後の貯蔵期間を50年、および30年としたもの（以下、各々を中間貯蔵期間50年、中間貯蔵期間30年とよぶ）を対象とした。

処分場に埋設されるガラス固化体の本数については、総合エネルギー調査会原子力部会中間報告において検討がなされ、「処分単価を算出する前提としては、4万本とすることが適当と考えられる。」としている（総合エネルギー調査会原子力部会, 1999）。したがって、本検討では、埋設するガラス固化体を4万本と想定した。

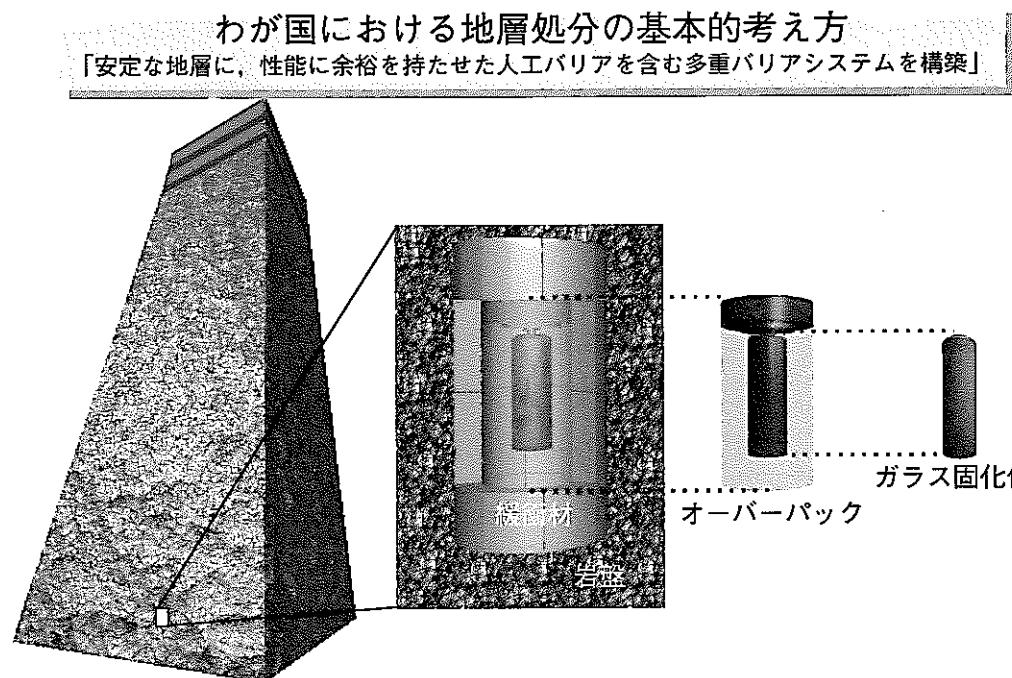
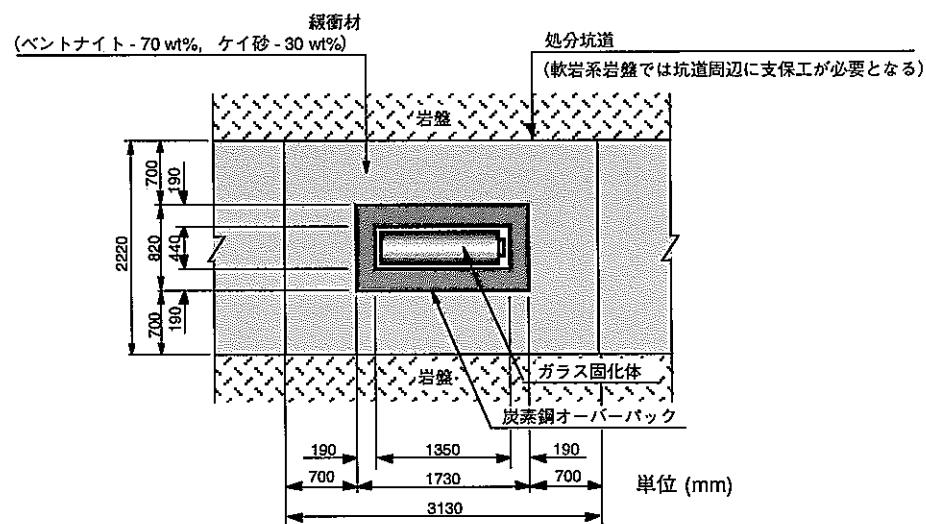
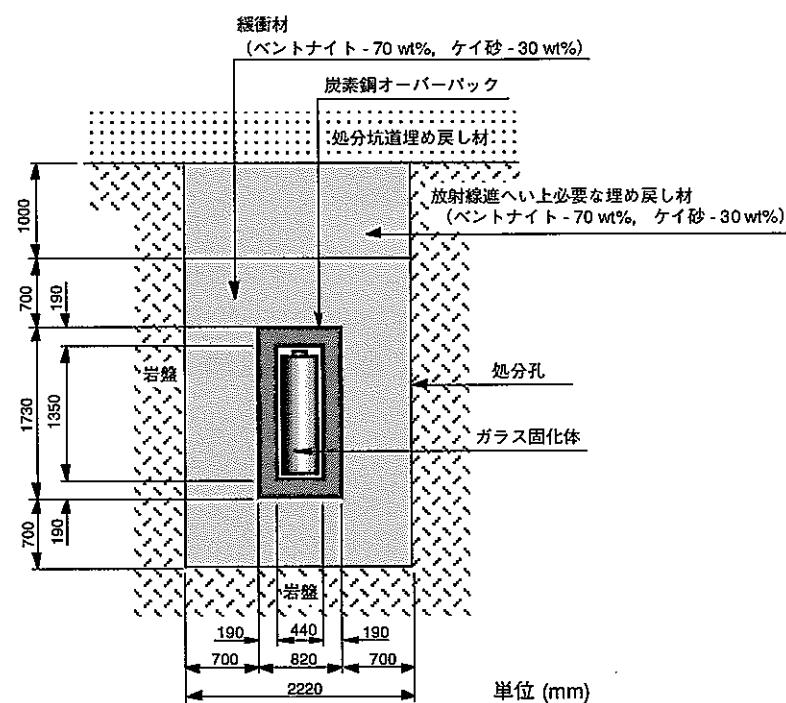


図2-1 わが国の地層処分の概念



処分坑道横置き方式の仕様（硬岩系岩盤／軟岩系岩盤）



処分孔縦置き方式の仕様（硬岩系岩盤／軟岩系岩盤）

図 2-2 第2次取りまとめでの人工バリア仕様（杉野ほか, 1999）

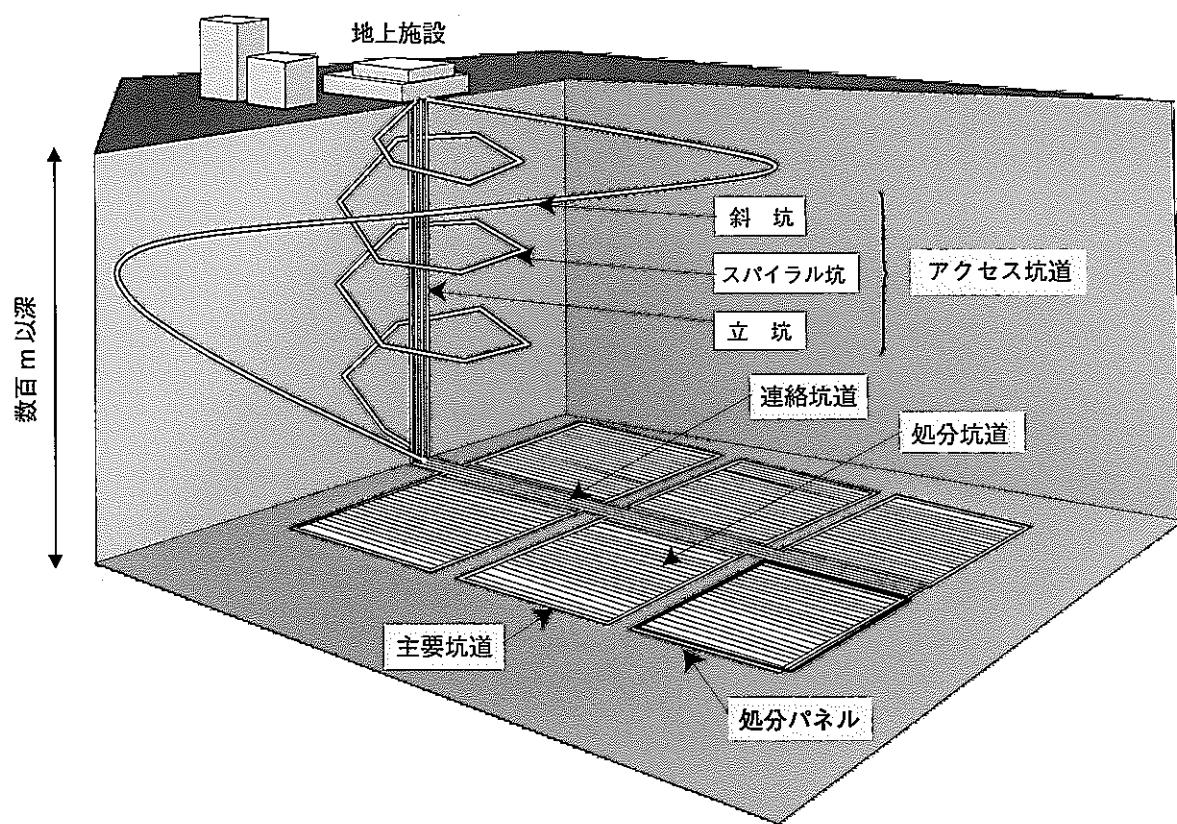
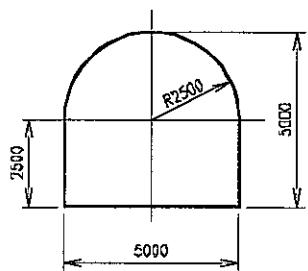
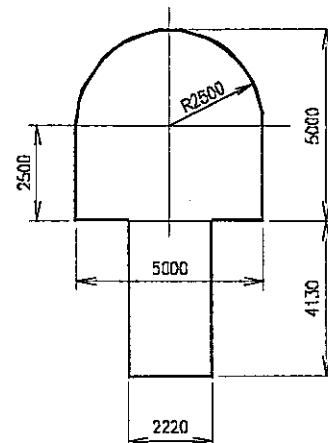
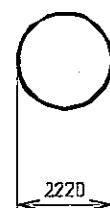


図 2-3 地下施設の概念

主要・連絡坑道



処分坑道
処分坑道横置き方式　処分孔堅置き方式

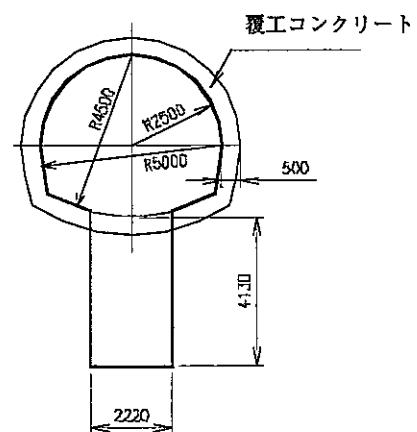
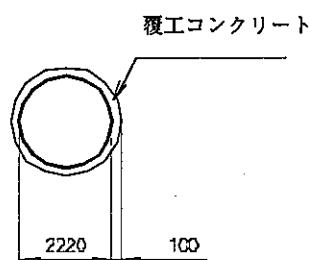
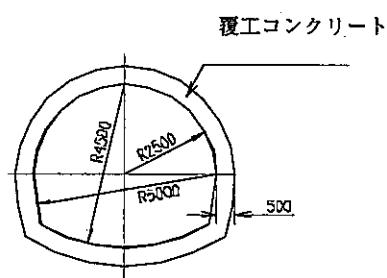


(硬岩系岩盤)

主要・連絡坑道

処分坑道

処分坑道横置き方式　処分孔堅置き方式



(軟岩系岩盤)

(単位 : mm)

図 2-4 第2次取りまとめでの地下施設水平坑道断面仕様（坑道内径）

(黒木ほか, 1999)

2-2 設定の考え方

坑道の配置を検討するうえでは、合理的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組合せを設定する必要がある。図2-5に廃棄体1本当りの専有面積の概念を示す。地下施設の概略の規模は廃棄体1本当たりの専有面積（処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの積で表される）と埋設する廃棄体本数の積により、処分坑道総延長は廃棄体ピッチと埋設する廃棄体本数の積により見積もることができる。したがって、処分坑道離間距離および廃棄体ピッチは、地下施設の規模を小さくしつつ経済的にも有利となるように設定することが望ましい。

図2-6に処分坑道ピッチ及び廃棄体ピッチの設定フローを示す。処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定に対する制限・条件等は、

①人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法

人工バリアおよび処分坑道／処分孔の形状に必要な最小寸法を満足する処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定する。

②建設・操業技術からくる制限

処分孔掘削機械や廃棄体定置機械の大きさ、それらの能力等から、および操業時の作業性の観点から必要となる遮蔽性から制限される廃棄体ピッチを設定する。

③空洞安定性からくる制限

処分坑道または処分孔が力学的安定性を満足し、隣接する処分坑道または処分孔により周辺岩盤が有意な影響を受けない処分坑道離間距離と処分孔離間距離の組み合わせ（処分孔豎置き方式）、または処分坑道離間距離（処分坑道横置き方式）を設定する。

④ニアフィールドの温度からくる制限

ガラス固化体、緩衝材および岩盤の温度が、ガラス固化体の発熱に対して制限温度以下になるよう、処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組み合わせを設定する。

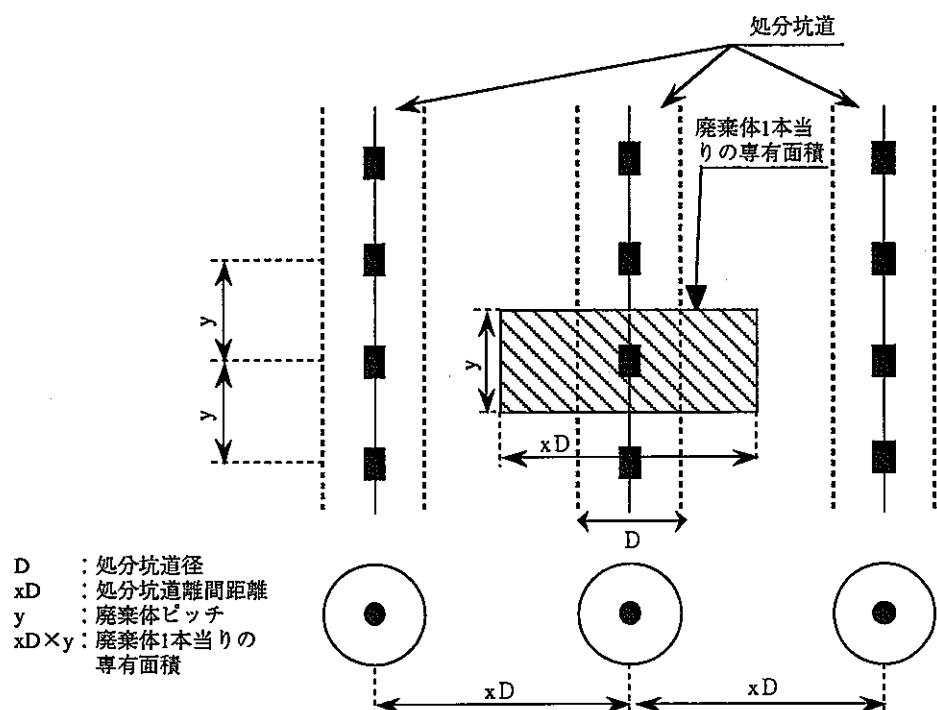
⑤総合的判断

①～④を満足したうえでサイトの地質環境の特性、安全性、経済的合理性等を考慮し、総合的に処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組み合わせを設定する。

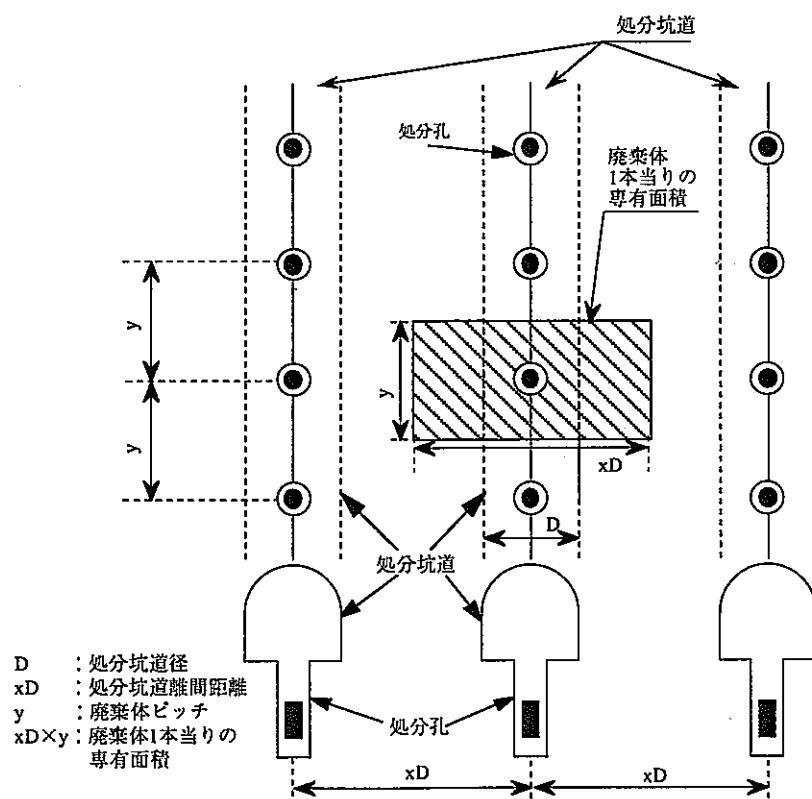
が考えられる。

ここでの検討の流れとしては、前提条件で述べたように人工バリア設計および坑

道断面設計の結果を設定に反映することから上記①は検討の前提条件である。したがって①を基に②～④の項目を全て満足するような最小処分坑道離間距離および最小廃棄体ピッチの組み合わせを求め、次いで⑤により合理的な組み合わせを設定することが考えられる。つまり、本検討では、設計において、処分場の工学的成立性を示すために、「人工バリアを設置するために、かつ作業を行うために必要な空間の確保」および「ニアフィールドに有意な影響を及ぼさないこと」を第1の条件とし、これらを満たす最小処分坑道離間距離および最小廃棄体ピッチの組み合わせを求めた。次いで、現実的な成立性という観点から、総合的判断として、経済的合理性を表す一指標である坑道掘削量について検討し、上記組み合わせの中から設定を行った。



(1) 廃棄体1本当りの埋設レイアウトの概念（処分坑道横置き方式）



(2) 廃棄体1本当りの埋設レイアウトの概念（処分坑道縦置き方式）

図2-5 廃棄体1本当りの専有面積の概念

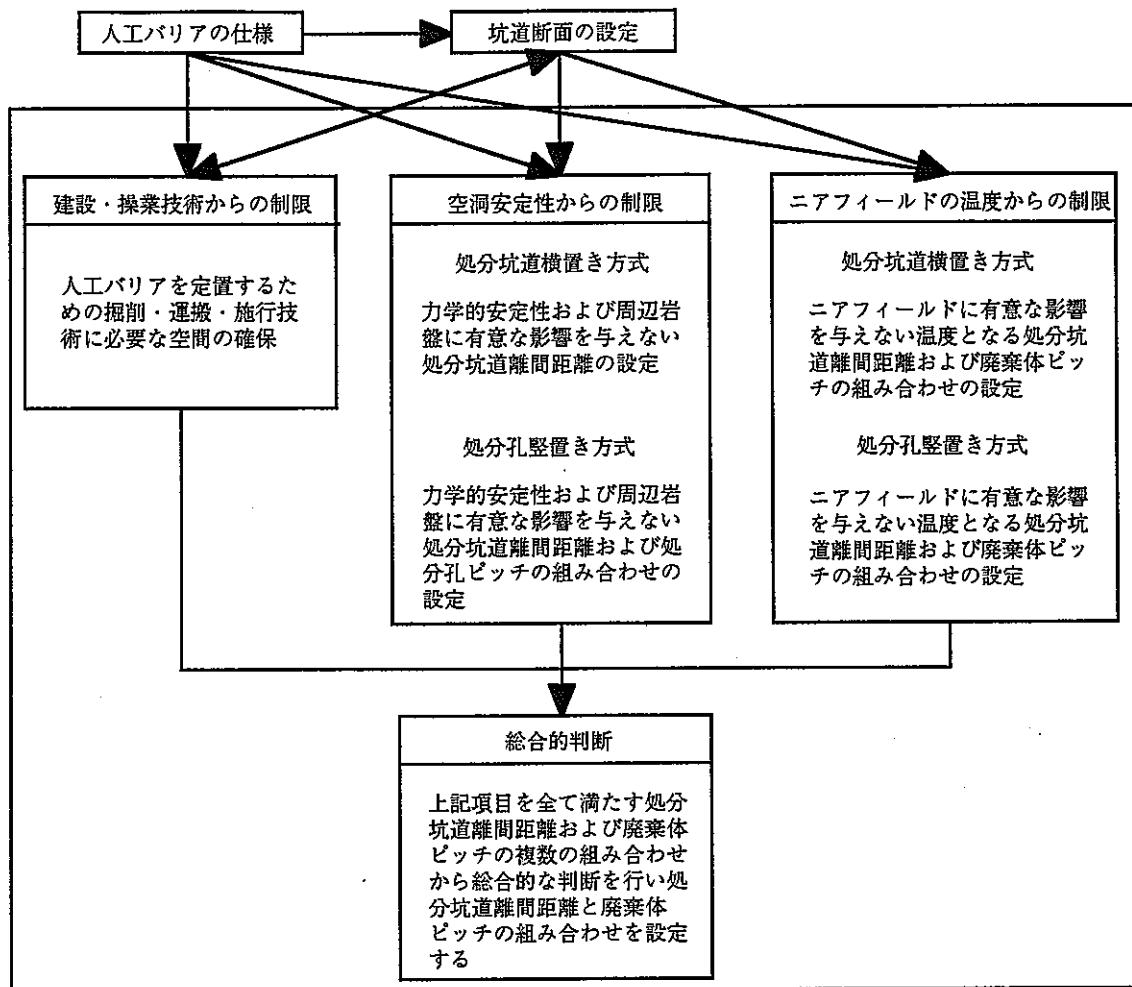


図 2-6 処分坑道離間距離及び廃棄体ピッチの設定フロー

2-3 人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法

処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを検討するうえで、人工バリアおよび処分坑道／処分孔の形状・寸法を考慮に入れる必要がある。図 2-2 で示したように、杉野らによって行われた人工バリアの設計（杉野ほか, 1999）では、直径を 2.22m としている。この検討では緩衝材の厚さは周方向軸方向とも同じ値に設定しており、人工バリアの軸方向最小長さを 3.13m としている。また、図 2-4 で示したように、黒木らによって設計された処分坑道断面においては、支保の厚さも考慮した掘削形状（外寸）を、硬岩系岩盤処分坑道横置き方式では直径 2.22m、硬岩系岩盤処分孔縦置き方式では幅 5m、軟岩系岩盤処分坑道横置き方式では直径 2.42m、軟岩系岩盤岩盤処分孔縦置き方式では幅 6m としており、処分孔は両岩盤とも直径 2.22m としている（黒木ほか, 1999）。

したがって、人工バリアおよび処分坑道の形状寸法により必要な処分坑道離間距離は、硬岩系岩盤処分坑道横置き方式では 2.22m、硬岩系岩盤処分孔縦置き方式では 5m、軟岩系岩盤処分坑道横置き方式では 2.42m、軟岩系岩盤岩盤処分孔縦置き方式では 6m となる。また、廃棄体ピッチに関しては、処分坑道横置き方式では人工バリアの設計で考慮した軸方向最小長さである 3.13m、処分孔縦置き方式では処分孔の直径である 2.22m となる。

以下の表 2-1 に人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチをまとめると。

表 2-1 人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な
処分坑道離間距離および廃棄体ピッチ

	処分孔縦置き方式		処分坑道横置き方式
	処分坑道離間距離	廃棄体ピッチ	処分坑道離間距離
硬岩系岩盤	5[m]	2.22[m]	2.22[m]
軟岩系岩盤	6[m]	2.22[m]	2.42[m]

2-4 建設・操業技術からくる制限

(1) 処分孔堅置き方式

処分孔堅置き方式では、掘削された処分坑道のインバート部分に一定間隔で処分孔を掘削し、この中に廃棄体および人工バリアが設置される。このため、棚井らによって示された処分孔掘削機械（棚井ほか、1999）を、処分坑道内で円滑に操作できるような処分孔間隔を設定する必要がある。さらに、処分孔掘削機械を支える足場が坑道インバート部に確保される必要がある。現在設定している処分坑道の断面幅は5m、処分孔掘削径は2.22mであることから、仮に処分坑道軸方向に連続的に処分孔が掘削されたとしても、処分坑道インバート部は処分坑道壁面から処分孔までの間に $1.39m\ (= (5-2.22)/2m)$ 残ることになり、処分孔掘削機械の足場は確保される。また、操業技術における廃棄体、緩衝材定置機械に必要なエリアも建設時同様に確保され、作業性の観点から必要とする遮蔽性は、図2-2で示すように人工バリア上部に追加の緩衝材を設けている。したがって、建設・操業技術からくる制限はないと考えられる。

(2) 処分坑道横置き方式

処分坑道横置き方式では、廃棄体および人工バリアが円形処分坑道内に、一定間隔で定置される。したがって、廃棄体定置ピッチと処分本数の積は処分坑道の総延長の最小値となる。処分坑道の総延長は、割れ目などの地質環境条件、物流・経済性、処分パネルレイアウト等から制限されることがあるが、建設技術上から、廃棄体1本当りの廃棄体ピッチを制限するものではないと考えられる。また、操業技術における廃棄体、緩衝材の定置装置に関しては処分坑道がそのまま利用されるため、足場の確保などの制限はないと考えられる。さらに、作業性の観点から必要とする遮蔽性は遠隔装置で操業作業を行う（本間ほか、1999b）こととしているため、考慮する必要はない。したがって、処分孔堅置き方式同様、建設・操業技術からくる制限はないと考えられる。

2-5 空洞の力学的安定性からくる制限

空洞安定性から必要と考えられる最小の処分坑道離間距離および廃棄体ピッチ（処分孔間隔）に関しては、2-1「設定に際しての前提条件」で述べた地質環境特性を用いて黒木らにより検討されており、以下の表2-2に示す値としている（黒木ほか、1999）。当然のことではあるが、これらの値は、処分坑道横置き方式における廃棄体ピッチを除いて、2-3「人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法」での値を上回ることとなる。

表2-2 空洞安定性の観点から必要な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチ
(黒木ほか、1999)

	処分孔 竪置き方式		処分坑道 横置き方式
	処分坑道離間距離	廃棄体ピッチ (処分孔離間距離)	処分坑道離間距離
硬岩系岩盤	2D (10[m])	2d (4.44[m])	2D (4.44[m])
軟岩系岩盤	2.6D (13[m])	3d (6.66[m])	2.5D (5.55[m])

D：処分坑道径

d：処分孔径

2-6 ニアフィールドの温度からくる制限

ニアフィールドの温度から必要となる処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの組合せは有限要素法による熱解析で求めることができる。後述の3「ニアフィールドの熱解析」に示すように、ガラス固化体の中間貯蔵期間を30年と50年とした場合、以下の結果が得られている。なお、中間貯蔵期間30年のケースは、後述の3「ニアフィールドの熱解析」に示すように、ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールドの最高上昇温度の比例関係(Taniguchi, et al., 1996, 谷口ほか, 1999b)から推定した結果を用いて検討を行った。

(1) 処分孔竪置き方式

ガラス固化体中間貯蔵期間50年の硬岩系岩盤、軟岩系岩盤の場合、および中間貯蔵期間30年の軟岩系岩盤の場合は、後述の3「ニアフィールドの熱解析」で示

すように、人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法、建設・操業技術からくる制限、および空洞安定性からくる制限から設定された最小処分坑道離間距離および最小廃棄体ピッチの組合せとした場合でもニアフィールドの温度制限を満足する結果となった。

一方、中間貯蔵期間 30 年の場合の硬岩系岩盤においては、後述の 3 「ニアフィールドの熱解析」で示すように、本検討で用いた処分深度および岩盤や緩衝材の物性等の条件下では、解析上現実的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定するのは難しいという結果となった。しかしながら、後述の 3 「ニアフィールドの熱解析」および 4 「熱的観点からの限界処分深度」に示すように、緩衝材の熱伝導率を向上させるため緩衝材の初期設置時含水比を大きくする、ニアフィールドの初期地温を下げるため処分深度を浅くする等により現実的な設定は可能である。

表 2-3 処分孔豎置き方式の処分坑道離間距離と廃棄体ピッチ

(除く、硬岩系岩盤；中間貯蔵期間 30 年)

(中間貯蔵期間 50 年；解析結果、中間貯蔵期間 30 年；推定結果)

岩種	ガラス固化体 中間貯蔵期間	処分坑道 離間距離	廃棄体 ピッチ	廃棄体 専有面積
硬岩系岩盤	50 年	2D (10m)	2d (4.44m)	44.4m ² /本
軟岩系岩盤		2.6D (13m)	3d (6.66m)	86.58m ² /本
	30 年	2.6D (13m)	3d (6.66m)	86.58m ² /本

D : 処分坑道径

d : 処分孔径

(2) 処分坑道横置き方式

後述の 3 「ニアフィールドの熱解析」で、ガラス固化体中間貯蔵期間 50 年の硬岩系岩盤、軟岩系岩盤の場合、および中間貯蔵期間 30 年の軟岩系岩盤の場合について、ニアフィールドの温度制限およびこれまでのその他の制限を満足する処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの組合せを求めた。その結果を、中間貯蔵期間 50 年の場合の硬岩系岩盤については表 2-4 に、軟岩系岩盤については表 2-5 に、中間貯蔵期間 30 年の場合の軟岩系岩盤については表 2-6 に示す。これらから、中間貯蔵期間 50 年の場合の硬岩系岩盤で坑道離間距離 6D 以上、軟岩系岩盤で処分坑道離間距離 4.5D 以上、中間貯蔵期間 30 年の場合の軟岩系岩盤で処分坑道離間距離 12D

以上のときは、2-3「人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法」で示した最小廃棄体ピッチ（3. 13m）でも、ニアフィールドの温度制限を満足する結果となった。

一方、中間貯蔵期間 30 年の硬岩系岩盤では、処分孔縦置き方式と同様、後述の 3「ニアフィールドの熱解析」で示すように、本検討で用いた処分深度および岩盤や緩衝材の物性等の条件下では、解析上現実的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定するのは難しいという結果となった。しかしながら、後述の 3「ニアフィールドの熱解析」および 4「熱的観点からの限界処分深度」に示すように、処分孔縦置き方式と同様、緩衝材の初期設置時含水比を大きくする、処分深度を浅くする等により現実的な設定は可能である。

表 2-4 処分坑道横置き方式、硬岩系岩盤の処分坑道離間距離と廃棄体ピッチ
(解析結果、中間貯蔵期間 50 年)

処分坑道離間距離 [m]	廃棄体ピッチ [m]	廃棄体専有面積 [m ² /本]
4.44(2D)	9.0	39.96
6.66(3D)	5.8	38.63
8.88(4D)	4.4	39.07
11.10(5D)	3.6	39.96
13.32(6D)*	3.13	41.69
15.54(7D)*	3.13	48.64

* : 緩衝材最大上昇温度は 100℃に到達しない。

D : 処分坑道径

表 2-5 処分坑道横置き方式、軟岩系岩盤の処分坑道離間距離と廃棄体ピッチ
(解析結果、中間貯蔵期間 50 年)

処分坑道離間距離 [m]	廃棄体ピッチ [m]	廃棄体専有面積 [m ² /本]
5.55(2.5D)	5.2	28.86
6.66(3D)	4.4	29.30
8.88(4D)	3.3	29.30
9.99(4.5D)*	3.13	31.27
11.10(5D)*	3.13	34.74
13.32(6D)*	3.13	41.69
15.54(7D)*	3.13	48.64

* : 緩衝材最大上昇温度は 100°C に到達しない。

D : 処分坑道径

表 2-6 処分坑道横置き方式、軟岩系岩盤の処分坑道離間距離と廃棄体ピッチ
(推定結果、中間貯蔵期間 30 年)

処分坑道離間距離 [m]	廃棄体ピッチ [m]	廃棄体専有面積 [m ² /本]
5.55(2.5D)	11.9	66.05
6.66(3D)	10.0	66.60
8.88(4D)	7.3	64.82
9.99(4.5D)	6.6	65.93
11.10(5D)	6.0	66.60
13.32(6D)	5.2	69.26
15.54(7D)	4.6	71.48
...
26.64(12D)*	3.13	83.38
28.86(13D)*	3.13	90.33

* : 緩衝材最大上昇温度は 100°C に到達しない。

D : 処分坑道径

2-7 総合的判断

2-6までの検討で、本検討で用いた条件下においては、ガラス固化体中間貯蔵期間 30 年における硬岩系岩盤に関しては、解析上処分坑道横置き方式および処分孔豎置き方式とも、ニアフィールドの温度制限を満足するような現実的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定することは難しいという結果となった。したがって、ここでは、中間貯蔵期間 50 年における硬岩系岩盤／軟岩系岩盤の全ケース、および中間貯蔵期間 30 年における軟岩系岩盤に関して検討を行った。

(1) 処分孔豎置き方式

2-6までの検討で、中間貯蔵期間 50 年における硬岩系岩盤および軟岩系岩盤、また中間貯蔵期間 30 年における軟岩系岩盤では、空洞安定性から制限される最小処分坑道離間距離および最小廃棄体ピッチの 1 つの組み合わせで、ここで考慮した他の制限を全て満足する結果となった。したがって、これらの値、つまり前述表 2-3 で示した値が合理的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチとなる。

(2) 処分坑道横置き方式

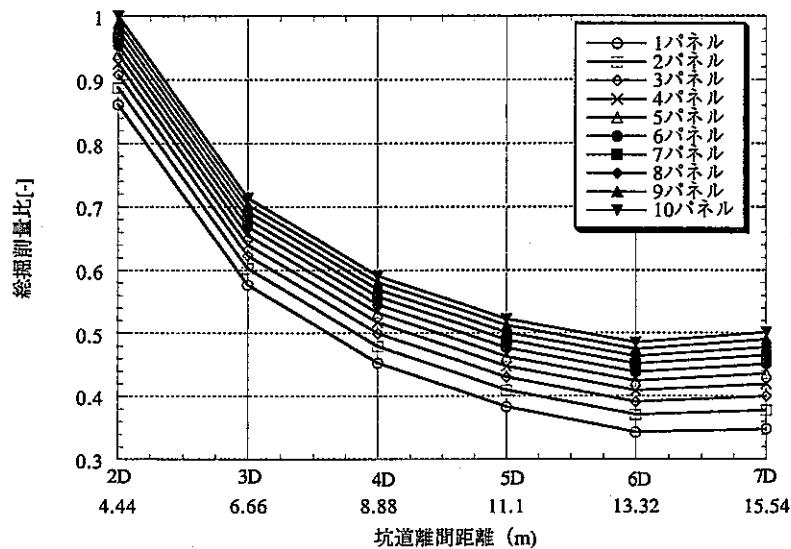
2-6までの検討で処分坑道横置き方式に関しては、人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法、建設・操業技術からくる制限、空洞安定性からくる制限、ニアフィールの温度制限を満足する処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組合せが得られた。サイトが特定されれば、サイトの地質環境の特性、安全性、経済的合理性等を考慮し、その組合せが総合的に判断されると考えられる。ここでは、経済性の目安の 1 つとして、処分パネルを構成する主要、処分坑道の総掘削量が少なくなる処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組合せを検討した。検討に際しては、2-1「設定に際しての前提条件」で述べたように、処分場に埋設するガラス固化体本数は 40,000 本、主要、処分坑道の寸法は図 2-4 で示したものとし、表 2-4～2-6 で示した処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの各組合せに対してパネル数をパラメータに主要、処分坑道の総掘削量比を求めた。ここで、パネルの形状は掘削量が最小となる正方形とし、パネル数が複数の場合は各パネルは同じ大きさになるものとした。

図 2-7 にガラス固化体中間貯蔵期間 50 年における硬岩系岩盤の場合の処分坑道

離間距離と総掘削量比との関係を示す。ここでは、処分坑道離間距離が 4.44m(2D；D は処分坑道径を示す)、パネル数が 10 の場合の主要、処分坑道の総掘削量が 1.0 となるように整理している。パネル数が増すにつれ総掘削量比は大きくなり、すべてのパネル数において処分坑道離間距離 6D 付近で総掘削量比が最小となっている。この処分坑道離間距離 6D は廃棄体定置ピッチが最小（処分坑道の総延長が最小となる）である 3.13m となり、かつニアフィールドが制限温度以下となる最小処分坑道離間距離の場合である。したがって、本検討の条件下では、中間貯蔵期間 50 年における硬岩系岩盤の場合、処分坑道離間距離を 13.32m(6D)、廃棄体ピッチを 3.13m とした。

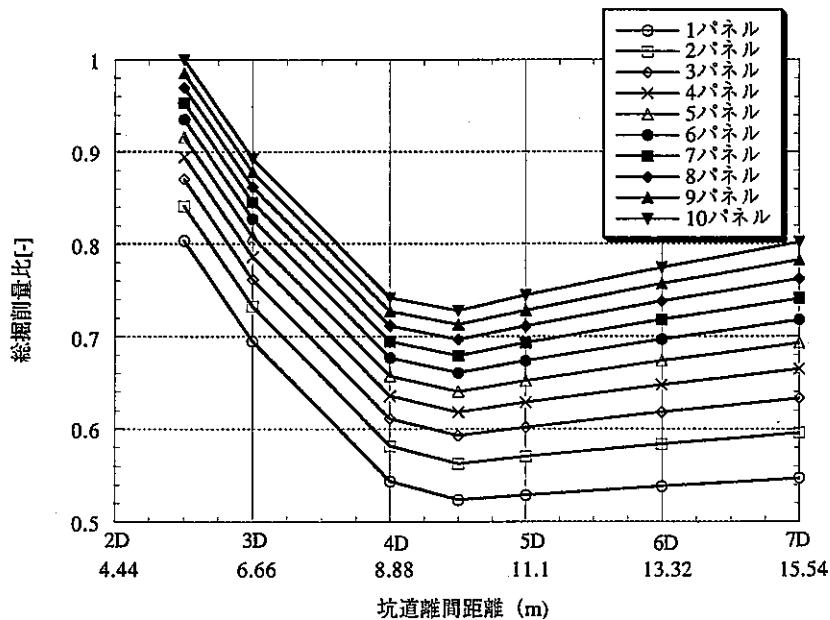
図 2-8 に中間貯蔵期間 50 年における軟岩系岩盤の場合の総掘削量比と処分坑道離間距離との関係を示す。図では処分坑道離間距離が 5.55m(2.5D)、パネル数が 10 の場合の主要、処分坑道の総掘削量が 1.0 となるように整理している。軟岩系岩盤の場合も硬岩系岩盤と同様の傾向を示しており、すべてのパネル数において処分坑道離間距離 4.5D で総掘削量比が最小となっている。この処分坑道離間距離 4.5D は廃棄体ピッチが最小（処分坑道総延長が最小）である 3.13m となり、かつニアフィールドが制限温度以下となる最小処分坑道離間距離の場合である。したがって、本検討の条件下では、中間貯蔵期間 50 年における軟岩系岩盤の場合、処分坑道離間距離を 9.99m(4.5D)、廃棄体ピッチを 3.13m とした。

図 2-9 に中間貯蔵期間 30 年における軟岩系岩盤の場合の総掘削量比と処分坑道離間距離との関係を示す。本図での総掘削量比設定方法は、上記軟岩系岩盤、中間貯蔵期間 50 年の場合と同様である。本図より、本検討の条件下では、中間貯蔵期間 30 年における軟岩系岩盤の場合、処分坑道離間距離を 26.64m(12D)、廃棄体ピッチを 3.13m とした。



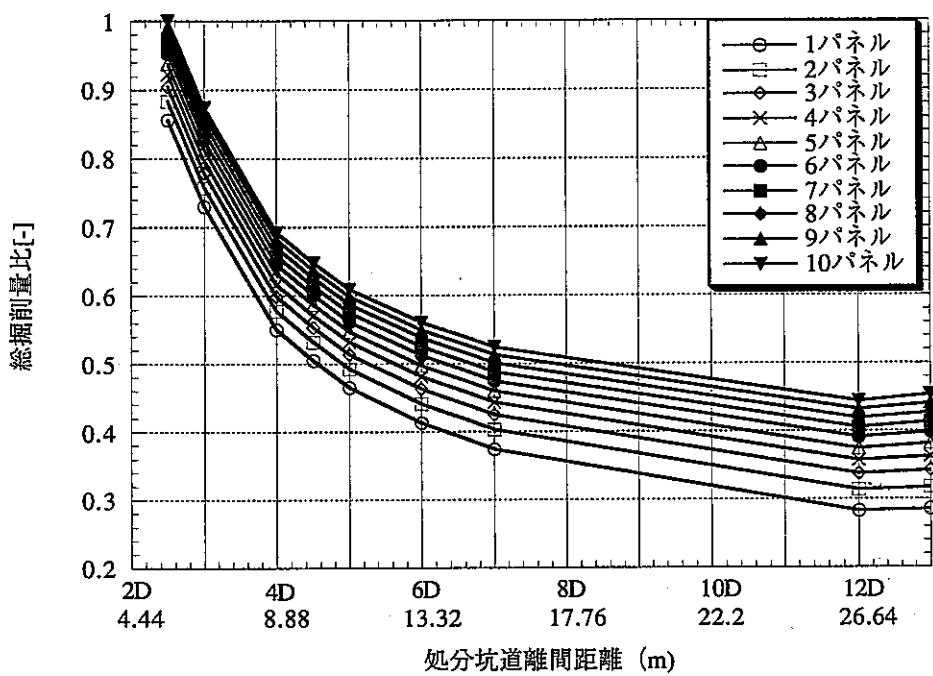
総掘削量比：処分坑道離間距離が 4.44m(2D), パネル数が 10 の場合の主要, 処分坑道の総掘削量に対する比

図 2-7 硬岩系岩盤での総掘削量比と処分坑道離間距離との関係
(中間貯蔵期間 50 年)



総掘削量比：処分坑道離間距離が 5.55m(2.5D), パネル数が 10 の場合の主要, 処分坑道の総掘削量に対する比

図 2-8 軟岩系岩盤での総掘削量比と処分坑道離間距離との関係
(中間貯蔵期間 50 年)



総掘削量比：処分坑道離間距離が 5.55m(2.5D)，パネル数が 10 の場合の主要，
処分坑道の総掘削量に対する比

図 2-9 軟岩系岩盤での総掘削量比と処分坑道離間距離との関係
(中間貯蔵期間 30 年)

2-8 まとめ

上記までの検討を整理して表 2-7 および図 2-10 に設定された処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを示す。なお、表 2-7 には、本検討で取り扱った各種制限のうち、設定に際し支配的なものを合わせて示す。

表 2-7 設定された処分坑道離間距離および廃棄体ピッチ

岩種	ガラス固化体 中間貯蔵期間 (年)	廃棄体 定置方式	処分坑道 離間距離 (m)	廃棄体 ピッチ (m)	廃棄体 専有面積 (m ² /本)	設定時に 支配的な要因
硬岩系岩盤	50	処分坑道横置き方式	13.32 (6D)	3.13	41.69	1-c、2-a
		処分孔豎置き方式	10 (2D)	4.44 (2d)	44.4	1-b、2-b
	30	処分坑道横置き方式	—	—	—	1-c、2-a or c
		処分孔豎置き方式	—	—	—	1-c、2-b or c
軟岩系岩盤	50	処分坑道横置き方式	9.99 (4.5D)	3.13	31.27	1-c、2-a
		処分孔豎置き方式	13 (2.6D)	6.66 (3d)	86.58	1-b、2-b
	30	処分坑道横置き方式	26.64 (12D)	3.13	83.38	1-c、2-a
		処分孔豎置き方式	13 (2.6D)	6.66 (3d)	86.58	1-b、2-b

表中「設定時に支配的な要因」の記号は

1：処分坑道離間距離設定に際して

2：廃棄体ピッチ設定に際して

a：人工バリアに必要な寸法

b：空洞の安定性

c：緩衝材の温度

を示す。

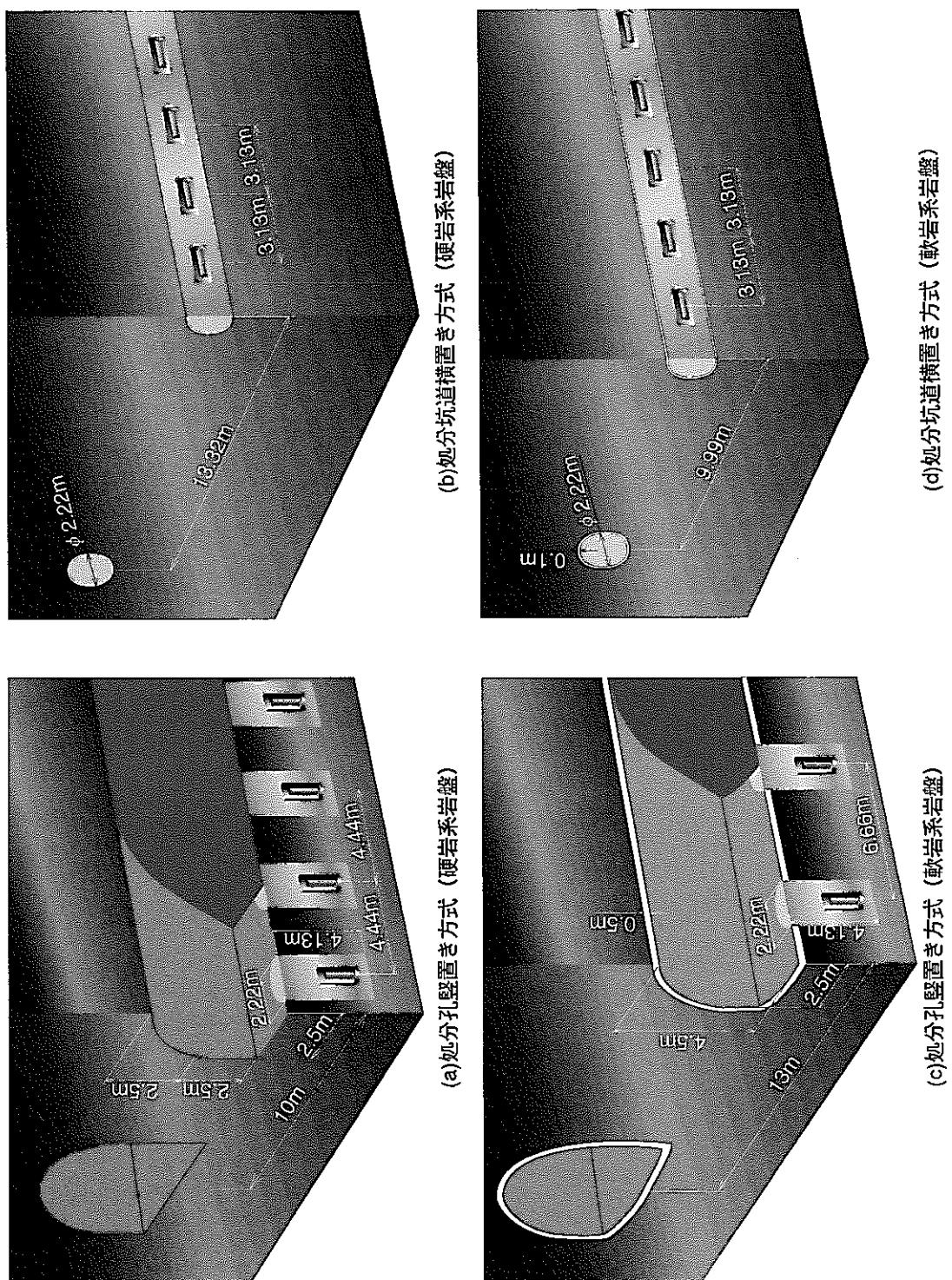


図 2-10-1 設定された処分坑道離間距離および廃棄体ピッチ
(ガラス固化体中間貯蔵期間 50 年)

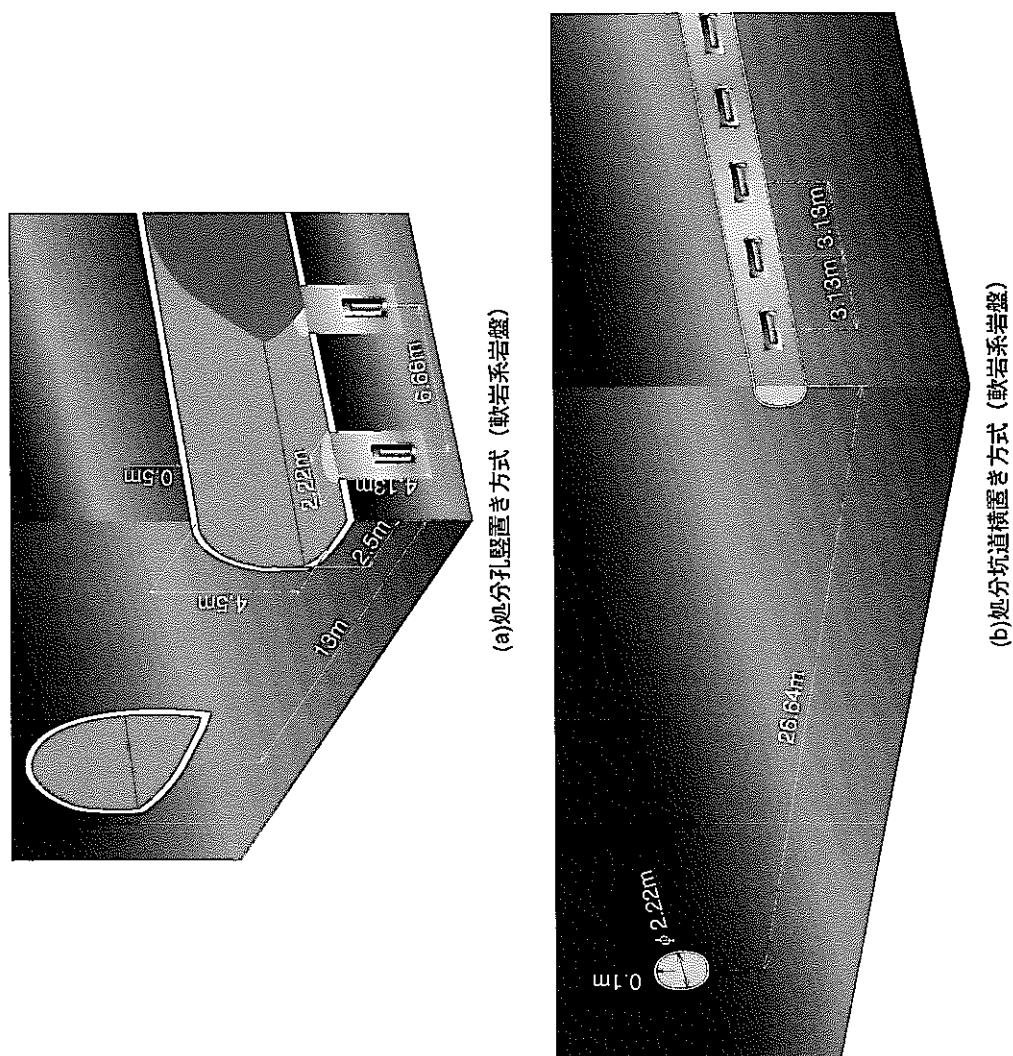


図 2-10-2 設定された処分坑道離間距離および廃棄体ピッチ
(ガラス固化体中間貯蔵期間 30 年)

3. ニアフィールドの熱解析

3-1 概要

2. 「処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定」で述べたように、これら設定に当たっては、ニアフィールドの温度が制限の一つになる。ニアフィールドの温度は、図2-5で示した廃棄体専有面積の増加とともに下がる（五月女ほか, 1992; Taniguchi, W., et al., 1996; 谷口ほか, 1997）。ここでは、上記、処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定、およびニアフィールドの温度分布の把握に資するため、処分坑道離間距離および廃棄体ピッチをパラメータにニアフィールドの非定常熱伝導解析を実施した。

また、地下施設での施工作業上生じると考えられる隙間が温度経時変化に与える影響についても把握した。

3-2 解析手法

廃棄体定置後のニアフィールドでは、廃棄体からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸潤、地下水の浸潤による緩衝材の膨潤圧力、周辺岩盤の地圧などが相互に影響し、ニアフィールドの温度、水理、応力環境等が変化することが予想される。したがって、ニアフィールドの温度変化を詳細に評価するためには、熱-水-応力連成解析が必要となる。熱伝導の観点からは、特に、熱-水の関係に注意する必要があると考えられる。つまり、①廃棄体の発熱によるニアフィールドでの地下水の対流および地下水流速、②人工バリアへの地下水の浸潤もしくは廃棄体の発熱による緩衝材中の水分移動による緩衝材の含水比の変化（千々松・谷口, 1999）つまりそれに伴う緩衝材の熱物性の変化（鈴木・谷口, 1999, 谷口ほか, 1999b）を考慮する必要がある。

①がニアフィールドの温度に及ぼす影響に関して、一般に飽和地盤の熱-水連成現象は、以下に示す浸透流の支配方程式、熱伝導の支配方程式、地下水流速および熱の影響による密度変化（ブジネスク近似）を表す式で表せられる。

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(k\nabla h) - \nabla\{k\beta(T - T_0)\} \quad (3-1)$$

$$(\rho C_v)^m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda^m \nabla T) - \rho' C'_v u \nabla T \quad (3-2)$$

$$u = -\frac{\kappa}{\mu} (\nabla P - \rho' g) = \frac{\kappa}{\mu} \rho' g \left(\frac{\nabla P}{\rho' g} - 1 \right) = k i \quad (3-3)$$

$$\rho' = \rho'_0 \{1 - \beta(T - T_0)\} \quad (3-4)$$

S_s : 比貯留係数

k : 透水係数

h : 全水頭

β : 地盤中水の体積膨張係数

T : 温度

$(\rho C_v)^m$: 地盤の等価熱容量

λ^m : 地盤の等価熱伝導率

$\rho' C'_v$: 地盤中水の熱容量

ρ' : 地盤中水の密度

u : 流速

μ : 地盤中水の粘性係数

κ : 固有透過度

i : 動水勾配

(3-1) および (3-2) 式はそれぞれ地下水の質量保存則、熱エネルギー保存則を表す。なお、(3-1) 式において右辺第1項は地下水の流れ、第2項は温度変化による密度変化の影響、(3-2) 式において右辺第1項は熱伝導による熱移動、第2項は水の流れによる熱移動をそれぞれ表す。また、(3-3) 式はある水頭差つまり動水勾配における地盤地下水の流速を表し、(3-4) 式は地盤地下水の密度変化を表す。(3-3) 式において、地層処分場を対象とした坑道の掘削影響領域での一例の値として設定されている透水係数： $k=10^{-9}\text{m/s}$ (井尻ほか, 1999), もしくは緩衝材の透水係数： $k=10^{-12}\text{m/s}$ (松本ほか, 1997) および動水勾配： $i=0.001$ (井尻ほか, 1999) を与えると、流速は掘削影響領域で $u=10^{-12}\text{m/s}$, 緩衝材で $u=10^{-15}\text{m/s}$ となる。したがって、地下水水流による熱移動を表す (3-2) 式右辺第2項の $\rho' C'_v u$ は、後述する本検討での岩盤および緩衝材の熱物性を用いると、掘削影響領域 (硬岩系、軟岩系岩盤) で $6.36 \sim 7.33 \times 10^{-10}\text{kcal/m}^2\text{Ks}$, 緩衝材で $2.40 \times 10^{-13}\text{kcal/m}^2\text{Ks}$ となり、各々の右辺第1項

における熱伝導率 λ^m (掘削影響領域 (硬岩系, 軟岩系岩盤) : $5.24 \sim 6.67 \times 10^{-4}$ kcal/mKs, 緩衝材: 1.86×10^{-4} kcal/mKs) に比べて小さい。また, (3-4) 式において, 地盤中水の体積膨張係数 β は 4×10^{-4} [1/K] と非常に小さいため, 密度変化による自然対流 (ブジネスク近似) がニアフィールドの熱伝導に与える影響は小さい。

また, ②がニアフィールドの温度に及ぼす影響に関しては, 人工バリア設置時における含水状態での熱物性を用いて解析すれば温度の観点からは保守的な結果を与える (千々松・谷口, 1999) ことが把握されている。

したがって, ここでは水理および応力との連成を考慮しない熱伝導解析により評価を行った。解析には, 有限要素汎用解析コード FINAS (動力炉・核燃料開発事業団, 1992b) を用いた。

3-3 解析条件

(1) 検討対象とする人工バリア, 岩盤, 定置方式および処分深度

2-1 「設定に際しての前提条件」で述べたように, 岩盤に関しては谷口らによって設定されたもの (谷口ほか, 1999a) のうち, 硬岩系岩盤と現実的支保が施工可能な軟岩系岩盤 (黒木ほか, 1999) を, 人工バリア仕様は杉野らによって提案されたもの (杉野ほか, 1999) を対象とした。また, 処分深度に関しては, 硬岩系岩盤で 1000m, 軟岩系岩盤で 500m とし, 廃棄体定置方式に関しては, 代表例である処分坑道横置き方式および処分孔堅置き方式とした。

(2) ガラス固化体発熱特性

ガラス固化体の埋設時発熱量は, ニアフィールドの温度を規定する大きな要因であり, ガラス固化体の仕様および冷却・貯蔵期間により大きく変化する。

わが国で処分が想定されるガラス固化体に関しては, 海外再処理計画に基づき仏国 COGEMA 社および英国 BNFL 社からの返還固化体, サイクル機構東海事業所で発生するも, および日本原燃株式会社再処理工場で発生するものがある (石原ほか, 1999)。また, 使用済燃料は原子炉から取りだされた後 4 年以上の貯蔵を経て再処理されガラス固化されることになっており (日本原燃株式会社, 1996), ガラス固化体は冷却を目的に 30~50 年貯蔵されることになっている (原子力委員会, 1994)。

本検討では, 一例として, 日本原燃株式会社再処理工場で発生するガラス固化体

を対象とし、再処理までの冷却期間4年、貯蔵期間50年（炉取りだし後埋設までの冷却期間54年、以下、中間貯蔵期間50年とする）の場合の発熱特性を主に検討に用いることとした。また、再処理までの冷却期間4年、貯蔵期間30年（炉取りだし後埋設までの冷却期間34年、以下、中間貯蔵期間30年とする）の場合の検討も、ガラス固化体の埋設時発熱量が増すことによる処分場の規模に及ぼす設計上の影響を把握するため、補足的に行った。図3-1に検討に用いたガラス固化体の埋設後からの発熱量の経時変化を示す。

解析におけるガラス固化体の発熱方法は、解析モデルでガラス固化体を構成する各要素の各節点に集中発熱として与え、その合計がガラス固化体の総発熱量となるように設定した。また、各節点に対する入熱の振り分け比に関しては、ガラス固化体を構成する各要素における発熱量が均等となるようにした（谷口ほか、1997）。

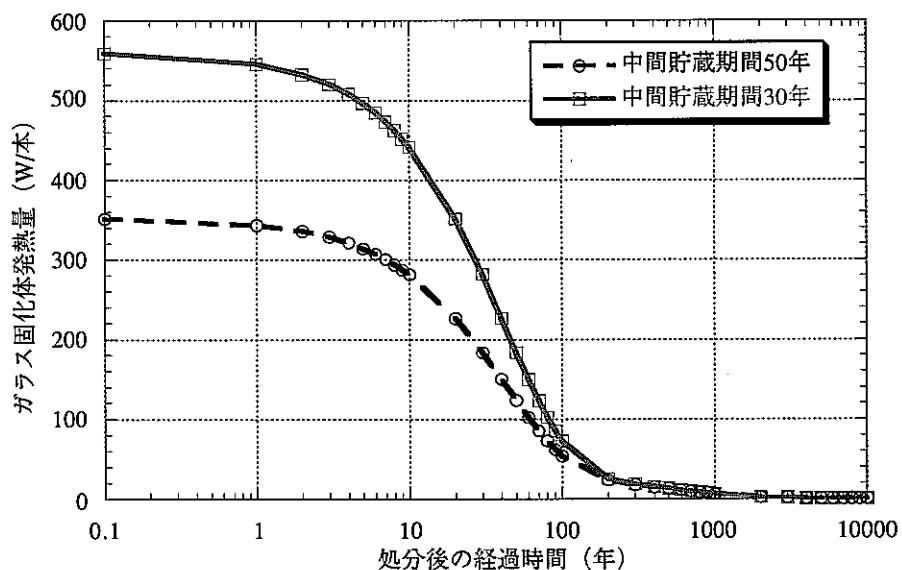


図3-1 ガラス固化体発熱特性（石原ほか、1999）

(3) 解析モデルおよび境界、初期条件

図3-2に処分坑道横置き方式、図3-3に処分孔堅置き方式における解析モデルおよび境界、初期条件を示す。ただし、本図では、後述する人工バリア周囲の隙間を考慮していない。隙間を考慮する場合は、本図における人工バリア部分のみの寸法を、後述する図3-6、3-7のように若干変化させたモデルで解析を行った。

図3-2、3-3において、鉛直方向に関しては、ガラス固化体上下200mの範囲をモ

ル化すれば境界の影響は受けない（谷口・藤田，1997）ことより、地表面から処分深度+200m（硬岩系岩盤：1200m、軟岩系岩盤：700m）までをモデル化した。また、初期の温度条件としては、わが国における一般性、平均を考慮し、地表面の温度を15°C（谷口ほか，1999a）とし、深度方向に3°C/100mの地温勾配（谷口ほか，1999a）を用い設定した。境界条件としては、上述したように発熱体であるガラス固化体から十分に距離があるため、地表面を初期温度である15°Cでの、モデル底面（硬岩系岩盤：深度1200m、軟岩系岩盤：深度700m）も同様に初期温度（硬岩系岩盤：51°C = $15^{\circ}\text{C} + (3/100^{\circ}\text{C}/\text{m}) \times 1200\text{m}$ 、軟岩系岩盤： $36^{\circ}\text{C} = 15^{\circ}\text{C} + (3/100^{\circ}\text{C}/\text{m}) \times 700\text{m}$ ）での固定境界とした。

水平方向に関しては、複数の廃棄体が一定間隔で定置されることを考慮し、処分坑道横断方向および軸方向、それぞれガラス固化体中心から処分坑道離間距離の半分まで、ガラス固化体中心から廃棄体ピッチの半分までをモデル化し、側面の境界条件は断熱境界とした。

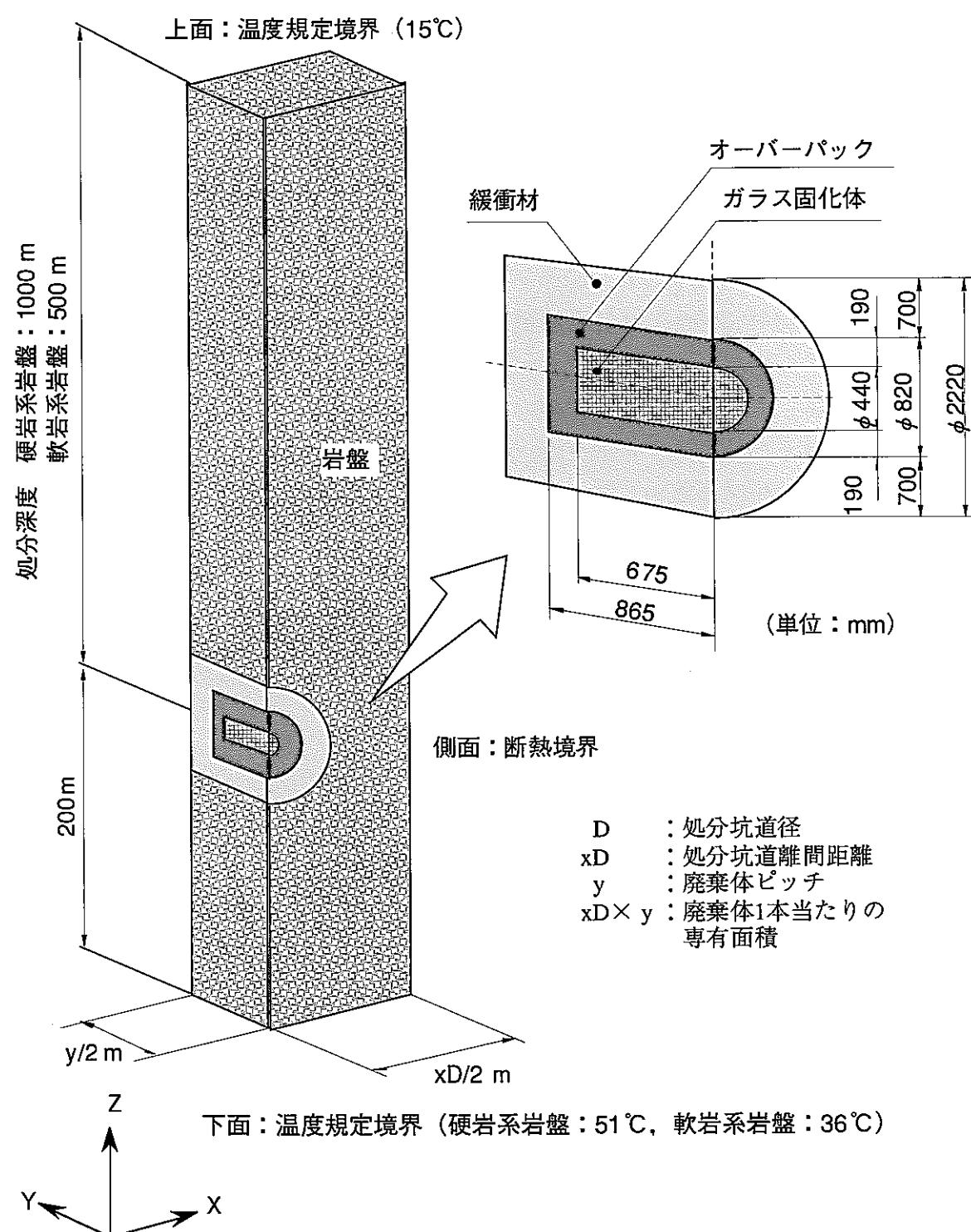


図 3-2 解析モデル (処分坑道横置き方式)

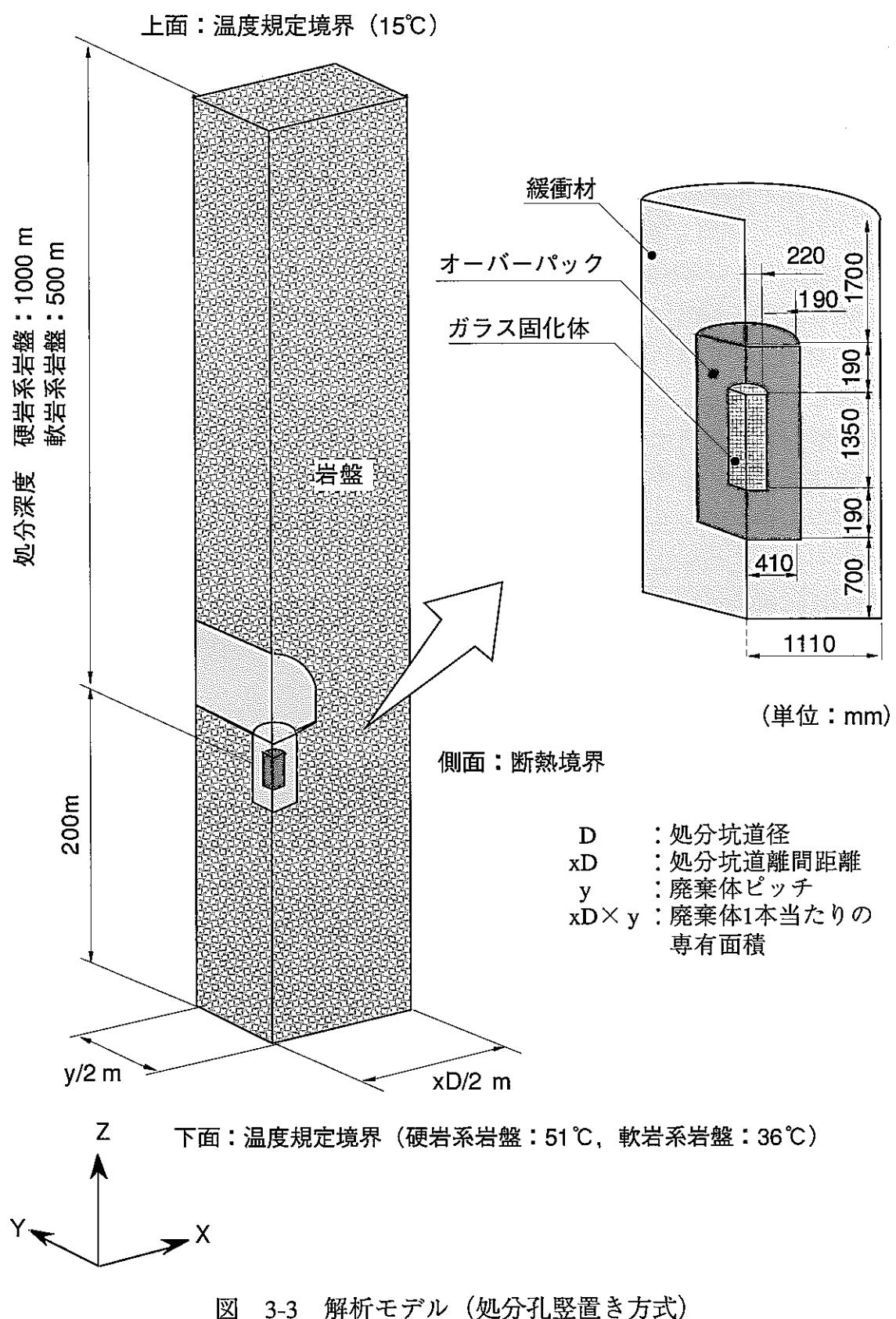


図 3-3 解析モデル (処分孔豎置き方式)

(4) 人工バリア各材料間の隙間の設定および解析出力点

図 3-4 に隙間を考慮しない場合の処分坑道横置き方式における人工バリアの寸法および解析出力点、図 3-5 に隙間を考慮しない場合の処分孔堅置き方式における人工バリアの寸法および解析出力点を示す。

また、図 3-6 に隙間を考慮したモデルでの処分坑道横置き方式における人工バリアと隙間の寸法および解析出力点、図 3-7 に処分孔堅置き方式における人工バリアと隙間の寸法および解析出力点を示す。なお、本検討での隙間の寸法は、千葉らによって示されたオーバーパックの内寸およびガラス固化体の外寸（本間ほか、1999a）、また千々松らによって示された緩衝材の製作・施工（千々松ほか、1999）から検討した緩衝材周囲の隙間寸法に基づくとともに、重力の影響を考慮し、処分坑道横置き方式の場合人工バリア各材料間が底部では密着し上部では隙間が生じる形状、処分孔堅置き方式の場合人工バリア各材料間が上底部では密着し側面では隙間が生じる形状とした。この形状では、隙間の熱伝導性が緩衝材より悪い場合、隙間が生じる部分では断熱効果が生じる。したがって、人工バリア各材料間が密着している部分から熱が岩盤に伝導しやすい状況となり、人工バリア各材料間が密着している部分での緩衝材温度が理想モデルより上昇することになる。

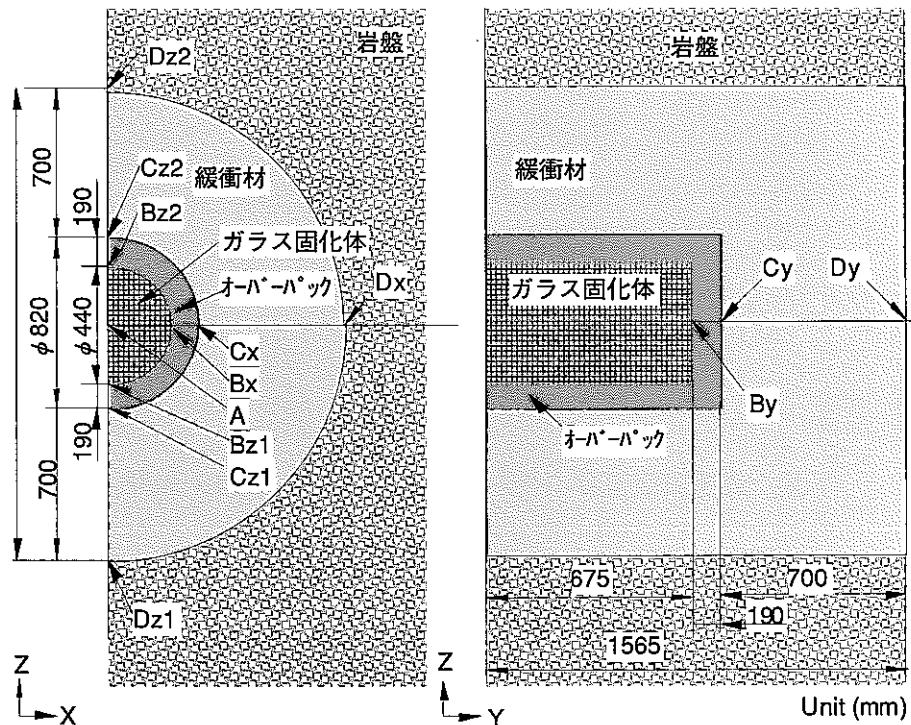


図 3-4 隙間なしの人工バリアの寸法および解析出力点（処分坑道横置き方式）

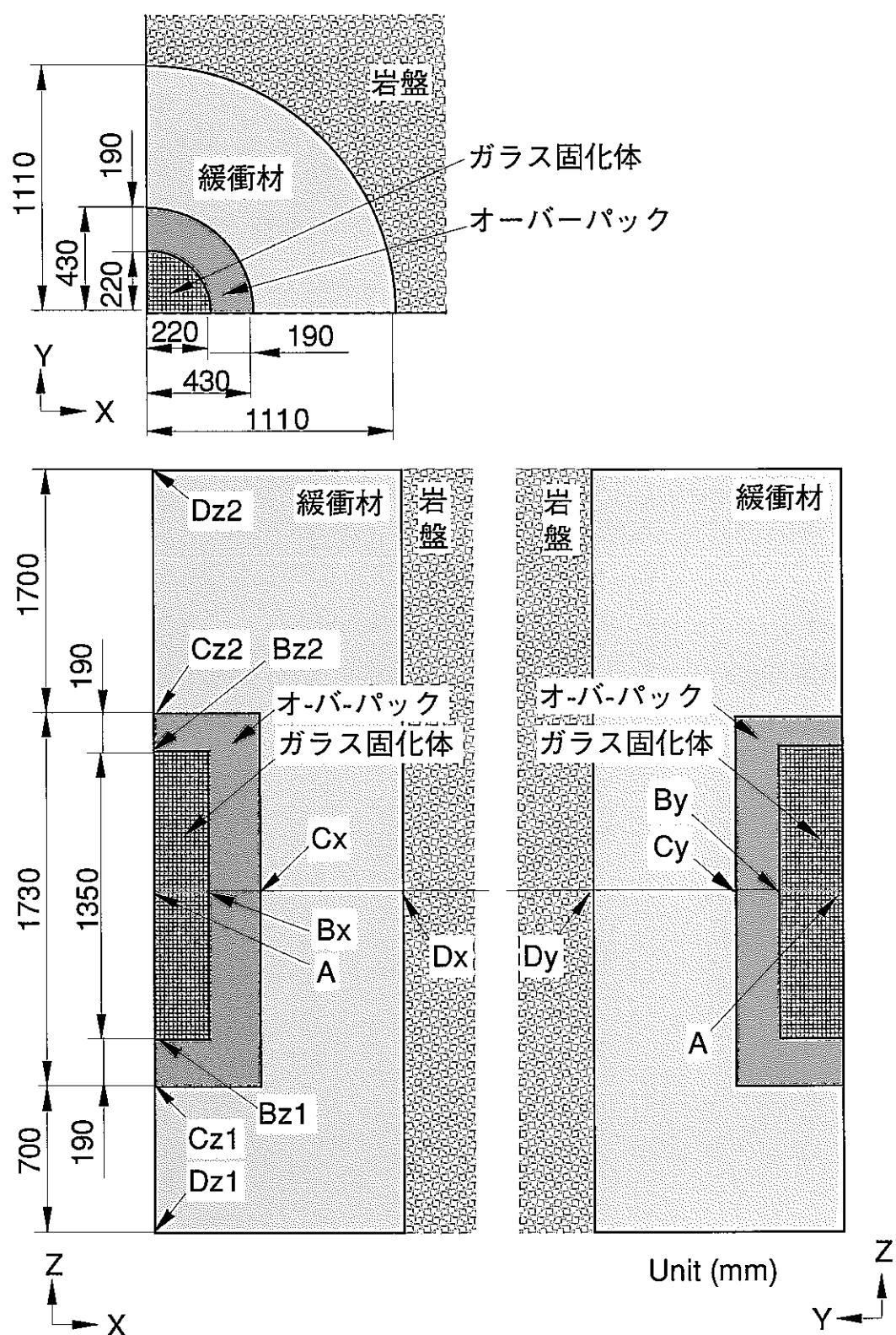


図 3-5 隙間なしの人工バリアの寸法および解析出力点（処分孔堅置き方式）

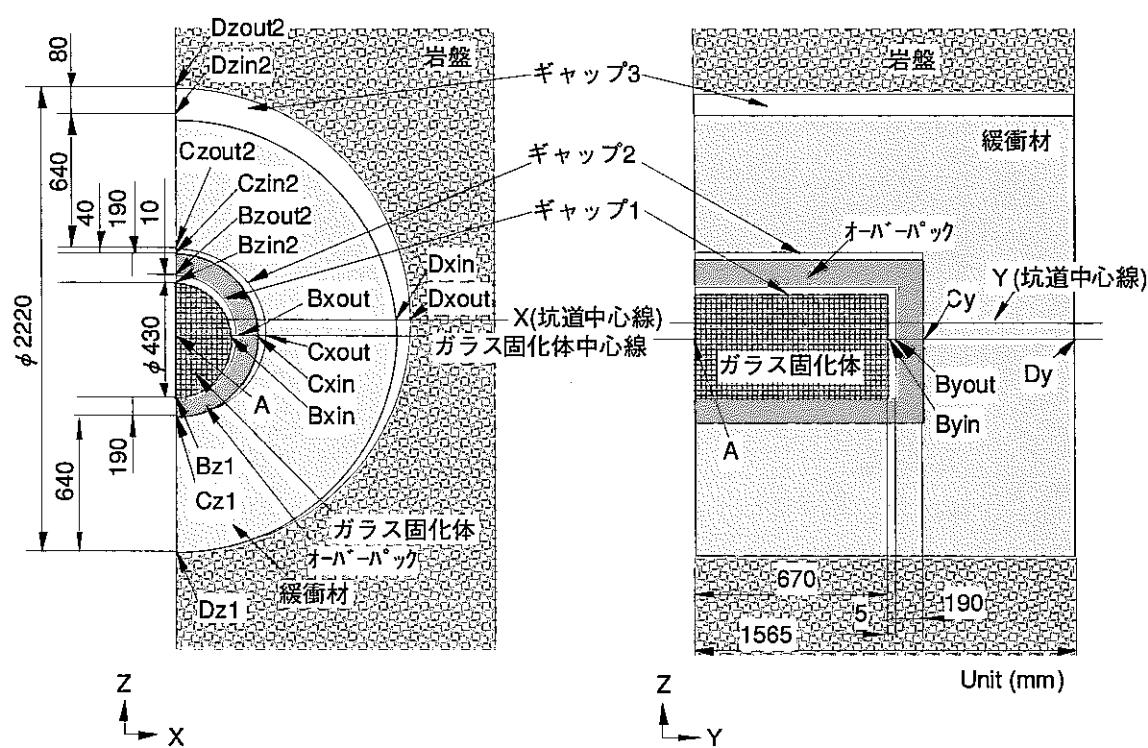


図 3-6 隙間考慮の人工バリアの寸法および解析出力点（処分坑道横置き方式）

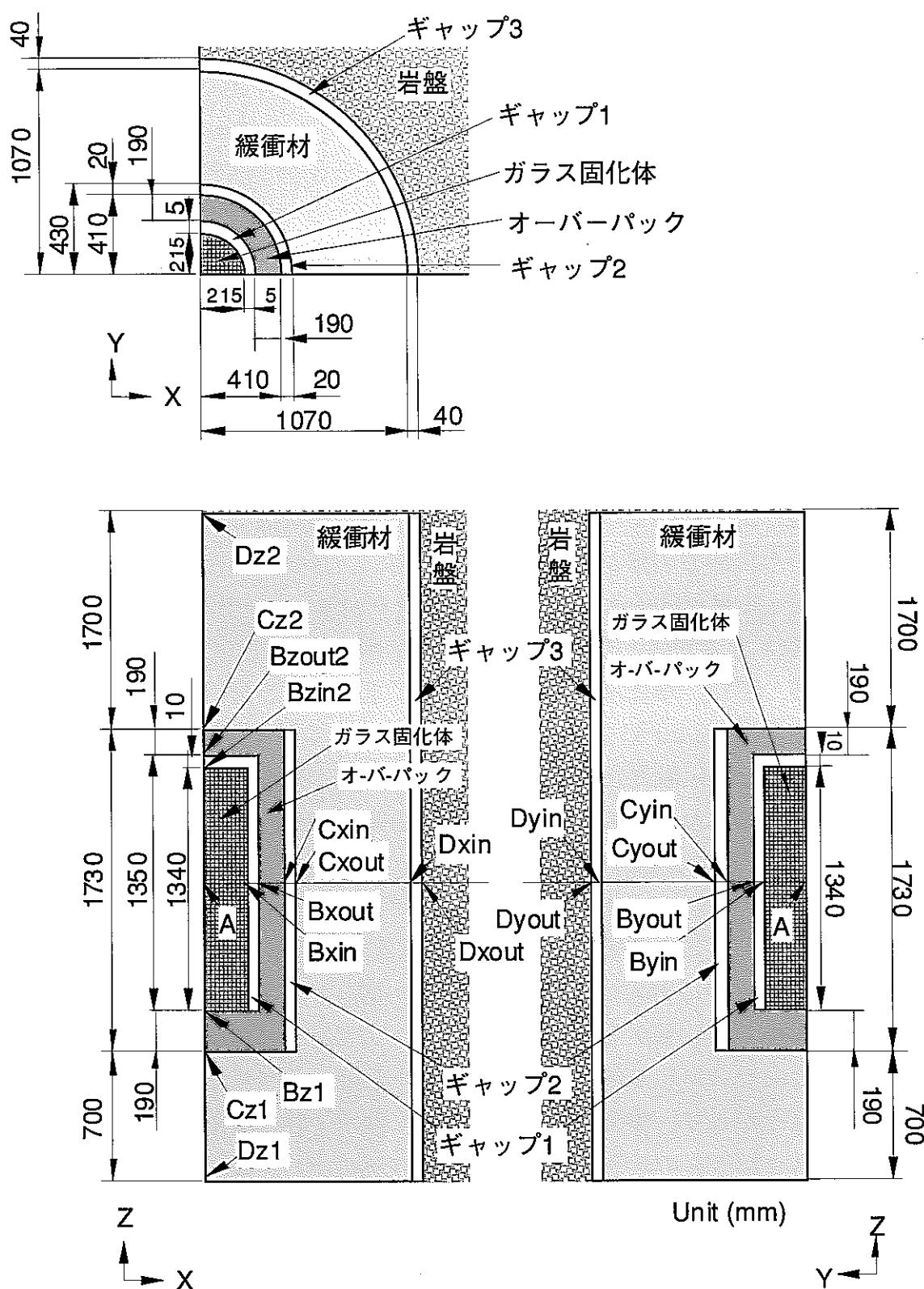


図 3-7 隙間考慮の人工バリアの寸法および解析出力点（処分孔堅置き方式）

(5) 解析で用いた熱物性

1) 人工バリアおよび岩盤の熱物性

ガラス固化体の物性に関しては、既往の文献（たとえば McElroy et al., 1983；作花ほか, 1975）より、ガラス固化体として用いられるホウケイ酸ガラスの熱物性は、その組成に大きく依存しないことが報告されている。ここでは、COGEMA 仕様(Nagra, 1985) のガラス固化体に関する熱物性を参考に設定した。

オーバーパックに関しては、伝熱工学資料（日本機械学会, 1966）に基づき温度 27°C (300K) での値を用いた。

緩衝材に関する施工方法としては、ブロック定置方式および現場締め固め方式が中心に検討されている（千々松ほか, 1999）。また、緩衝材の熱伝導率は含水比の増加とともに大きくなることが把握されている（谷口ほか, 1999b；鈴木・谷口, 1999；鈴木ほか, 1992）。本検討では、熱伝導の観点から、現時点では、緩衝材の含水比が低く緩衝材の熱伝導率の値が小さい（鈴木・谷口, 1999）ため、ニアフィールドの温度環境に対しては保守的と考えられるブロック定置方式（千々松・谷口, 1999；谷口ほか, 1999b）を対象とした。杉野らによって示された人工バリアの緩衝材の初期設置密度に関しては、地下水の浸潤により施工上の隙間を膨潤により閉塞した後の状態で乾燥密度 1.6 g/cm³ になるように仕様を設定している（杉野ほか, 1999）。したがって、ブロック定置方式の場合、設置時の乾燥密度は 1.8 g/cm³ になる（杉野ほか, 1999；千々松ほか, 1999）。ここでは、緩衝材の膨潤による隙間閉塞過程の評価が難しいこと、および緩衝材は乾燥密度が小さいほど熱伝導率が小さいこと（谷口ほか, 1999b；鈴木ほか, 1992）から、緩衝材の温度上昇に対して保守的な乾燥密度 1.6 g/cm³ の値を用いることとした。ブロック定置方式設置時の含水比に関しては、7%で人工バリアが設計されている（杉野ほか, 1999）。また、千々松らによる熱一水一応力連成解析での結果から、ブロック定置方式設置時の含水比での熱物性を用いれば緩衝材の温度に対して保守的に評価可能なことが示されている（千々松・谷口, 1999）。したがって、緩衝材の熱物性には、鈴木・谷口によって取得されたケイ砂混合率 30wt% 緩衝材の熱物性（鈴木・谷口, 1999）のうち、乾燥密度 1.6 g/cm³、含水比 7% の値を用いることとした。また、ガラス固化体中間貯蔵期間 30 年のケースでは、ガラス固化体埋設時の発熱量が増加するため、ニアフィールドの最高上昇温度が高くなり、ニアフィールドの制限温度を満足することが厳しくなる可能性がある。したがって、上記緩衝材に対し、緩衝材の熱伝導率の値を高くした場合にニアフィールドの温度、および処分坑道離間距離・廃棄体ピッチに及ぼす影響を把握

するために、一部の解析ケースでは、緩衝材に対して含水比 10%および 13%の物性値を用いて検討を行った。

処分孔豎置き方式における埋め戻し材に関しては、緩衝材と比較して、地下水の浸潤速度が速くかつ廃棄体の発熱の影響は小さいと考えられる。また、緩衝材と同程度の含水比であれば、ケイ砂混合率が緩衝材より高い（杉田ほか, 1999）ため熱伝導率は緩衝材と同程度以上、比熱は同程度の値となる（谷口ほか, 1999b）。したがって、人工バリアの温度に対して保守的に評価するため緩衝材の熱物性と同じ値を用いることとした。

岩盤に関しては、谷口らによって設定されたもの（谷口ほか, 1999a）のうち、硬岩系岩盤および現実的支保が施工可能な軟岩系岩盤（黒木ほか, 1999）の物性値を用いた。

2) 隙間の物性

緩衝材が接する隙間への対策としては、ベントナイトペレット充填方式、粉末ベントナイト噴射方式、ベントナイトスラリー投入方式等が考えられている（千々松ほか, 1999）。熱伝導の観点から、上記 3 種の隙間充填材を比較すると、密度、含水比の影響から粉末ベントナイト噴射方式が保守的と考えられる。また、隙間にに対する対策を行わない場合、坑道壁面からの湧水により水が、または、坑道掘削時の湧水対策のため人工バリア設置初期段階では空気が隙間を支配すると考えられる。

したがって、ここでは、オーバーパック-緩衝材間および緩衝材-岩盤間の隙間の物性として、粉末ベントナイト、空気、水を設定した。ただし、ガラス固化体-オーバーパック間の隙間に関しては、空気のみとした。

隙間を考慮したモデルの解析ケースを表 3-1 に示す。

粉末ベントナイトの熱物性に関しては、本検討での使用を目的に取得されたデータ（鈴木・谷口, 1999），すなわち測定時最低自然含水比（約 6%）における測定技術上の最低乾燥密度（約 1.0 g/cm^3 ）での値を用いた。空気、水に関しては、後述するように緩衝材の制限温度が 100°C であることから、伝熱工学資料（日本機械学会, 1966）に基づき 100°C 近傍での値を用いた。

表 3-2 に解析に用いた熱物性を示す。

表 3-1 隙間を考慮したモデルの解析ケース

ケース名	隙間の位置		
	ガラス固化体-オーバーパック間 * (ギャップ 1)	オーバーパック-緩衝材間 * (ギャップ 2)	緩衝材-岩盤間 * (ギャップ 3)
CASE.A	空気	空気	空気
CASE.B	空気	粉末ベントナイト	粉末ベントナイト
CASE.W	空気	水	水

*ギャップの位置に関しては図 3-6, 3-7 参照

表 3-2 人工バリア、岩盤および隙間の物性

	熱伝導率: λ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比熱: C (kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	単位体積重量: ρ (kg · m ⁻³)	
ガラス固化体	1.2	0.96	2800	*
オーバーパック	51.6	0.473	7860	300Kでの炭素鋼の値
緩衝材	0.78	0.59	1712	含水比: 7% 乾燥密度: 1.6g/cm ⁻³
	1.02	0.69	1760	含水比: 10% 乾燥密度: 1.6g/cm ⁻³
	1.29	0.78	1808	含水比: 13% 乾燥密度: 1.6g/cm ⁻³
埋戻し材	0.78	0.59	1712	上記含水比7%緩衝材と同様
岩盤 硬岩	2.8	1	2670	**
軟岩	2.2	1.4	2200	**
隙間	吹付 ベントナイト	0.158	2.17	1040 含水比: 6% 乾燥密度: 0.98g/cm ⁻³
	空気	0.03	1.01	0.9799 360K常圧下での空気の値
	水	0.6761	4.212	960.37 370K飽和水の値

*既往の文献（たとえば McElroy et al., 1983；作花ほか, 1975）より、ガラス固化体として用いられるホウケイ酸ガラスの熱物性は、その組成に大きく依存しない。ここでは、COGEMA 仕様 (Nagra, 1985) のガラス固化体に関する熱物性を参考に設定した。

**谷口らによって設定された値（谷口ほか, 1999a）のうち硬岩系岩盤 HR と軟岩系岩盤 5 種のうち SR-C

(6) ニアフィールドの制限温度

1) 緩衝材

緩衝材の材料であるベントナイトは、環境条件（温度、溶液組成など）によっては、主要構成鉱物であるスマクタイトの層間陽イオンの交換やスマクタイトの鉱物学的変化、溶存シリカの沈殿等によるセメンテーション等が生じ、緩衝材の諸特性に変化を及ぼす可能性がある。

温度環境条件下での鉱物学的な変化として考えられるものとしてスマクタイトのイライト化が挙げられる。スマクタイトのイライト化は天然の埋没続成作用や熱水

変質作用の結果として広く認められる現象である。Aoyagi and Kazama (1980) は、わが国の統成作用の事例研究より、スメクタイトからイライト-スメクタイト混合層への転移温度は約 100°C であるとしている。しかしながら、Pusch (1993) や Kamei et al. (1992) による温度、時間履歴、化学環境等を明らかにしたナチュラルアナログ研究においては、100°C を越える条件で 100 万年以上スメクタイトが安定に存在していた例が報告されている。また、石川ほか (1994) は、スメクタイトのイライト化に関する反応速度式を用いてイライト化率の時間変化の計算を行い、100°C を越える期間が数十年におよび、かつ、最高上昇温度が 130°C 程度になる場合であっても著しいイライト化は生じないことを示した。

また、スメクタイトあるいは随伴鉱物の溶解に伴い、アモルファスシリカ等の2次鉱物の沈殿（セメンテーション）が起き、鉱物学的な変化が顕著でない場合でも、これが緩衝材特性に影響を及ぼす事も考えられる。天然のベントナイト鉱床（Pusch and Karnland, 1988）やストリッパ鉱山での原位置試験（Pusch et al., 1993）および室内試験（Pusch et al., 1991；Couture, 1985a, b）等において顕微鏡レベルでのセメンテーションの観察や、膨潤圧、透水係数、クリープ特性等の変化が報告されているが、これらは、いずれも 100°C を越える温度を経験したベントナイト試料である。Pusch (1993) は、様々なイライト化やセメンテーションに関する文献調査の結論として、随伴鉱物の存在状態によってはイライト化やセメンテーションの可能性を否定しきれないものの、純粋なスメクタイトに対しては 100°C を越えない温度ではイライト化や顕著なセメンテーションは起きないとしている。

設計の観点からは、諸外国でも、緩衝材に温度制限を設けており、その値は概ね 100°C としている（NAGRA, 1994；AECL, 1994；佐々木ほか, 1995）。

以上より、緩衝材の制限温度は 100°C とした。

2) ガラス固化体および岩盤

ガラス固化体、オーバーパック、岩盤にも熱的変質等を避ける制限温度を考慮する必要がある。既往の文献によるとガラスの相転移温度は 400～500°C (IAEA, 1983), 岩石の熱的変質の制限温度は 150～300°C (IAEA, 1983) である。したがって、ニアフィールドの制限温度は、ガラス固化体に対して 400°C、緩衝材に対して 100°C、岩盤に対して 150°C とした。なお、オーバーパックに関しては、金属材料であるため、融点等の熱的変質温度は、緩衝材、岩盤およびガラス固化体の制限温度に対して極めて高い。したがって、ここでは考慮しなかった。

(7) 解析ケース

ここでは、与えられた人工バリアを定置することをまず考え、次いでニアフィールドが所期の性能を発揮することを考慮するという手順を踏んだ。すなわち、ニアフィールドの熱解析において処分坑道離間距離および廃棄体ピッチをパラメータにする本検討では、2. 「処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定」で示した人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法、建設・操業技術からくる制限、および空洞安定性からくる制限を満足する最小処分坑道離間距離および廃棄体ピッチ以上でこれらをパラメータにし解析を行った。

3-4 解析結果

ここでは、2.「処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定」；2-5「ニアフィールドの温度からくる制限」における処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせを検討するために、まず、隙間を考慮しないモデルで、処分坑道離間距離と廃棄体ピッチをパラメータに解析を行い、ニアフィールドの最高上昇温度を求めた。このときのガラス固化体発熱特性には、中間貯蔵期間 50 年のものを用いた。次いで、数ケースにおいて中間貯蔵期間 30 年のガラス固化体発熱特性を用いた解析を行い、同条件下の中間貯蔵期間 50 年の場合の解析結果と比較し、ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールドの最高上昇温度の比例関係（Taniguchi, et al., 1996, 谷口ほか, 1999b）を確認し、中間貯蔵期間 30 年の場合の処分坑道離間距離と廃棄体ピッチをパラメータとしたニアフィールドの最高上昇温度を推定した。

ニアフィールドの温度変化および隙間の影響に関しては、2.「処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定」で設定されたものについて検討を行い、隙間の影響が小さいことを確認した。このときの、ガラス固化体中間貯蔵期間は 50 年とした。

中間貯蔵期間 30 年の場合は、ニアフィールドの温度が上昇し、制限温度を満足しないことが考えられるため、緩衝材の含水比を増す、つまり緩衝材の熱伝導率を大きくした場合についても一例として解析を行った。

(1) ニアフィールドの最高上昇温度と処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの関係

1) ガラス固化体中間貯蔵期間 50 年

(a) ニアフィールドの最高上昇温度と廃棄体専有面積の関係

図 3-8 に硬岩系岩盤処分坑道横置き方式、図 3-9 に硬岩系岩盤処分孔縦置き方式、図 3-10 に軟岩系岩盤処分坑道横置き方式、および図 3-11 に軟岩系岩盤処分孔縦置き方式それぞれにおける廃棄体専有面積とニアフィールドの最高上昇温度の関係を示す。

グラフの傾向としては、廃棄体専有面積の増加とともに、ニアフィールドの最高上昇温度は下がるが、ある廃棄体専有面積を越えると一定の最高上昇温度の値に収束する、つまりある廃棄体専有面積以上のときは、それ以上の廃棄体専有面積にしてもニアフィールドの最高上昇温度を下げるとはできないことが分かった。本検

討では、概ね $100\text{m}^2/\text{本}$ を越えると最高上昇温度はほぼ一定になった。その値は、

硬岩系岩盤処分坑道横置き方式

ガラス固化体 約 $105\sim 108^\circ\text{C}$

緩衝材 約 $80\sim 85^\circ\text{C}$

岩盤 約 $58\sim 65^\circ\text{C}$

硬岩系岩盤処分孔堅置き方式

ガラス固化体 約 102°C

緩衝材 約 80°C

岩盤 約 53°C

軟岩系岩盤処分坑道横置き方式

ガラス固化体 約 $92\sim 94^\circ\text{C}$

緩衝材 約 $66\sim 70^\circ\text{C}$

岩盤 約 $41\sim 46^\circ\text{C}$

軟岩系岩盤処分孔堅置き方式

ガラス固化体 約 88°C

緩衝材 約 66°C

岩盤 約 41°C

となり、緩衝材においては廃棄体定置方式によらずほぼ同じ値となった。また、同廃棄体専有面積における処分坑道離間距離がニアフィールドの最高上昇温度に及ぼす影響は小さいことが分かった。

ニアフィールドの制限温度に関しては、岩種、廃棄体定置方式、処分坑道離間距離、廃棄体ピッチ、および廃棄体専有面積にかかわらず全てのケースにおいて、ガラス固化体および岩盤の最高上昇温度は 3-3 (6) 「ニアフィールドの制限温度」で示した値を下回った。また、処分孔堅置き方式では、岩種にかかわらず、緩衝材の最高上昇温度も全てのケースでその制限温度 100°C を下回った。一方、処分坑道横置き方式では、処分坑道離間距離にかかわらず、緩衝材の最高上昇温度がその制限温度を下回るためには、硬岩系岩盤で約 $40\text{m}^2/\text{本}$ 、軟岩径岩盤で約 $30\text{m}^2/\text{本}$ の廃棄体専有面積が必要となる結果となった。また、これらの結果から、緩衝材の最高上昇温度がニアフィールドの温度制限に関して支配的であることが分かった。

(b) ニアフィールドの温度制限からの処分坑道離間距離および廃棄体定置ピッチ

(a) で記述したように、処分孔堅置き方式における中間貯蔵期間 50 年の場合は、全てのケースでニアフィールドの制限温度を下回った。ここでの処分坑道離間距離および廃棄体ピッチに関しては、ニアフィールドの温度制限以外の条件から設定された最小値以上をパラメータにしているため、ニアフィールドの温度制限以外の条件により処分坑道離間距離および廃棄体ピッチが設定される結果となった。

一方、処分坑道横置き方式では、処分坑道離間距離にかかわらずほぼ一定の廃棄体専有面積で緩衝材の最高上昇温度がその制限温度なる結果となった。ただし、廃棄体専有面積が一定であっても、処分坑道離間距離により廃棄体ピッチは変化する。図 3-12 に処分坑道横置き方式における廃棄体ピッチと緩衝材最高上昇温度の関係、表 3-3 に図 3-12 より読み取った緩衝材最高上昇温度がその制限温度になる廃棄体ピッチ、つまり、本検討の条件下でのニアフィールドの温度制限を満足し、かつその他の条件を満足する処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組み合わせを示す。これらから、硬岩系岩盤で処分坑道離間距離 6D 以上、軟岩系岩盤で処分坑道離間距離 4.5D 以上のときには、前述 2-3 「人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法」での最小廃棄体ピッチであっても緩衝材最高上昇温度はその制限温度以下になることが分かった。

2) ガラス固化体中間貯蔵期間 30 年

(a) ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールドの最高上昇温度の関係

(解析結果)

図 3-13 に硬岩系岩盤処分坑道横置き方式、図 3-14 に硬岩系岩盤処分孔堅置き方式、図 3-15 に軟岩系岩盤処分坑道横置き方式、および図 3-16 に軟岩系岩盤処分孔堅置き方式それぞれにおけるガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールドの最高上昇温度の関係を示す。ただし、ガラス固化体の埋設時発熱量に関しては、中間貯蔵期間 50 年と 30 年のものを、廃棄体専有面積に関しては、処分坑道離間距離を 2.「処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定」で設定された値とした場合の $100\text{m}^2/\text{本}$ および $300\text{m}^2/\text{本}$ を対象とした。

これらから、本検討での条件下での、ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールドの最高上昇温度の比例関係 (Taniguchi, et al., 1996, 谷口ほか, 1999b) が確認された。

したがって、中間貯蔵期間 30 年の場合の廃棄体専有面積とニアフィールドの最

高上昇温度の関係には、中間貯蔵期間 50 年における解析結果から上記比例関係で推定したものを用いることとした。

(b) ニアフィールドの最高上昇温度と廃棄体専有面積の関係

(推定結果)

図 3-17 に硬岩系岩盤処分坑道横置き方式、図 3-18 に硬岩系岩盤処分孔堅置き方式、図 3-19 に軟岩系岩盤処分坑道横置き方式、および図 3-20 に軟岩系岩盤処分孔堅置き方式それぞれにおいて、上記比例関係を用いて推定したガラス固化体中間貯蔵期間 30 年の場合の廃棄体専有面積とニアフィールドの最高上昇温度の関係を示す。

グラフの傾向としては、中間貯蔵期間 50 年の場合と同様となったが、ニアフィールドの最高上昇温度は、ガラス固化体埋設時の発熱量が増加するため、相対的に高い結果となった。

ニアフィールドの制限温度に関しては、ガラス固化体の最高上昇温度は、全てのケースにおいてその制限温度 (400°C) を下回ったが、岩盤の最高上昇温度は、硬岩系岩盤処分坑道横置き方式の廃棄体面積約 25m²/本以下、および軟岩系岩盤処分坑道横置き方式の廃棄体面積約 21m²/本以下でその制限温度 (150°C) を上回り、処分孔堅置き方式では、岩種によらず全てのケースで制限温度を下回る結果となった。緩衝材の最高上昇温度は、軟岩系岩盤処分孔堅置き方式では全てのケースでその制限温度 (100°C) を下回ったが、硬岩系岩盤では廃棄体定置方式によらず最高上昇温度がほぼ収束している廃棄体専有面積 300m²/本でも場合によっては制限温度 (100°C) 若干上回り、軟岩系岩盤処分坑道横置き方式では約 70m²/本で制限温度 (100°C) となる結果となった。また、上記岩盤の最高上昇温度および制限温度と比較すると、ニアフィールドの制限温度はガラス固化体中間貯蔵期間 50 年のときと同様緩衝材の最高上昇温度が支配的となることが分かった。

(c) ニアフィールドの温度制限からの処分坑道離間距離および廃棄体定置ピッチ

(推定結果)

上述したように、硬岩系岩盤において、廃棄体定置方式に関わらず、緩衝材の温度制限を下回ることが難しいことが分かった。したがって、本検討で用いた条件下では、解析上現実的な処分坑道離間距離および廃棄体定置ピッチの設定はできないという結果となった。しかしながら、後述の (2) 「ニアフィールドの温度分布および隙間の影響」および 4 「熱的観点からの限界処分深度」に示すように、緩衝材の

初期設置時含水比を大きくする、処分深度を浅くする、等により現実的な処分坑道離間距離および廃棄体定置ピッチの設定は可能である。

ここでは、軟岩系岩盤に関して検討を行う。堅置き方式の場合は、中間貯蔵期間50年の場合と同様、全ての解析ケースでニアフィールドの最高上昇温度がその制限温度を下回ったため、ニアフィールドの温度制限以外の条件により処分坑道離間距離および廃棄体ピッチが設定される結果となった。一方、処分坑道横置き方式の場合は、中間貯蔵期間50年の場合と同様、処分坑道離間距離には関わらずほぼ一定の廃棄体専有面積で緩衝材の最高上昇温度がその制限温度となる結果となった。そのため、中間貯蔵期間50年の場合と同様、緩衝材の最高上昇温度がその制限温度となる処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせを検討した。図3-21に廃棄体ピッチと緩衝材最高上昇温度の関係を示す。また、図3-21で示したように、本検討でパラメータにした処分坑道離間距離の範囲では、前述2-3「人工バリアおよび処分坑道／処分孔断面に必要な寸法」での最小廃棄体ピッチで緩衝材最高上昇温度が制限温度となる処分坑道離間距離が求まらなかったため、その処分坑道離間距離を推定した。図3-22に処分坑道離間距離（処分坑道径の倍数で表示）と緩衝材最高上昇温度の関係を示す。これから、上記最小廃棄体ピッチで緩衝材の最高上昇温度が100°Cとなる処分坑道離間距離は12D（D：処分坑道径）、つまり26.64mとなった。このときの廃棄体専有面積は83.38m²/本となり、この値は、処分坑道離間距離2.5~7Dの範囲で求まった緩衝材最高上昇温度がその制限温度になる廃棄体専有面積約70m²/本と比較して、保守的である。表3-4に、図3-21より読み取った緩衝材最高上昇温度がその制限温度になる廃棄体ピッチ、および図3-22から検討した上記最小廃棄体ピッチで緩衝材最高上昇温度がその制限温度になる処分坑道離間距離、つまり、本検討で用いた条件下でのニアフィールドの温度制限を満足しがつその他の条件を満足する処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組み合わせを示す。

表 3-3-1 緩衝材最高上昇温度が緩衝材制限温度になる廃棄体ピッチ
(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年)

処分坑道離間距離 (m)	廃棄体ピッチ (m)	廃棄体専有面積 (m ² /本)
4.44 (2D)	9.0	39.96
6.66 (3D)	5.8	38.63
8.88 (4D)	4.4	39.07
11.10 (5D)	3.6	39.96
13.32 (6D)*	3.13	41.69
15.54 (7D)*	3.13	48.64

* 緩衝材最大上昇温度は100°Cに到達しない。

D : 処分坑道径

表 3-3-2 緩衝材最高上昇温度が緩衝材制限温度になる廃棄体ピッチ
(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年)

処分坑道離間距離 (m)	廃棄体ピッチ (m)	廃棄体専有面積 (m ² /本)
5.55 (2.5D)	5.2	28.86
6.66 (3D)	4.4	29.30
8.88 (4D)	3.3	29.30
9.99 (4.5D)*	3.13	31.27
11.10 (5D)*	3.13	34.74
13.32 (6D)*	3.13	41.69
15.54 (7D)*	3.13	48.64

* 緩衝材最大上昇温度は100°Cに到達しない。

D : 処分坑道径

表 3-4 緩衝材最高上昇温度が緩衝材制限温度になる廃棄体ピッチ
(軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 30 年)

処分坑道離間距離 (m)	廃棄体ピッチ (m)	廃棄体専有面積 (m ² /本)
5.55 (2.5D)	11.9	66.05
6.66 (3D)	10.0	66.60
8.88 (4D)	7.3	64.82
9.99 (4.5D)	6.6	65.93
11.10 (5D)	6.0	66.60
13.32 (6D)	5.2	69.26
15.54 (7D)	4.6	71.48
• •	•	•
26.64 (12D)*	3.13	83.38
28.86 (13D)*	3.13	90.33

* 緩衝材最大上昇温度は100°Cに到達しない。

D : 処分坑道径

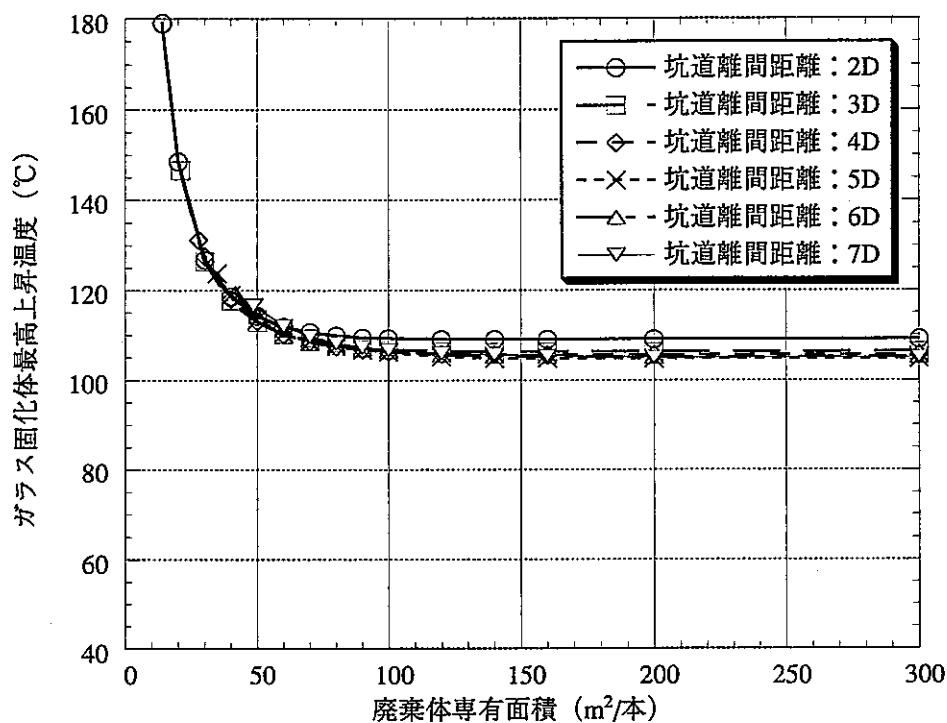


図 3-8-1 ガラス固化体の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年、解析結果)

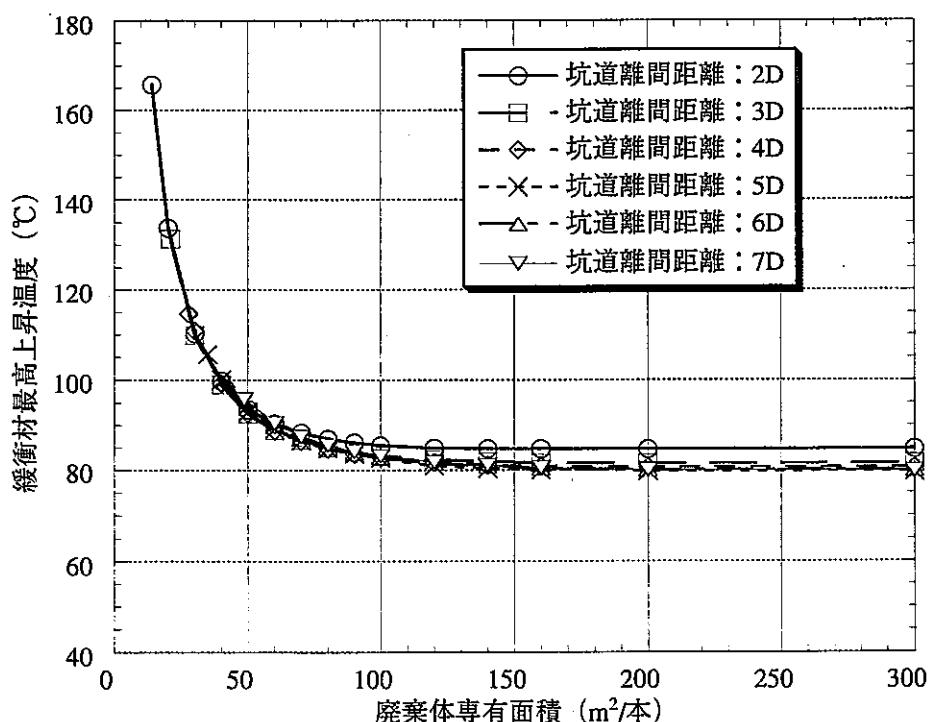


図 3-8-2 緩衝材の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年、解析結果) *以下、凡例中 D は処分坑道径(2.22m)を表す

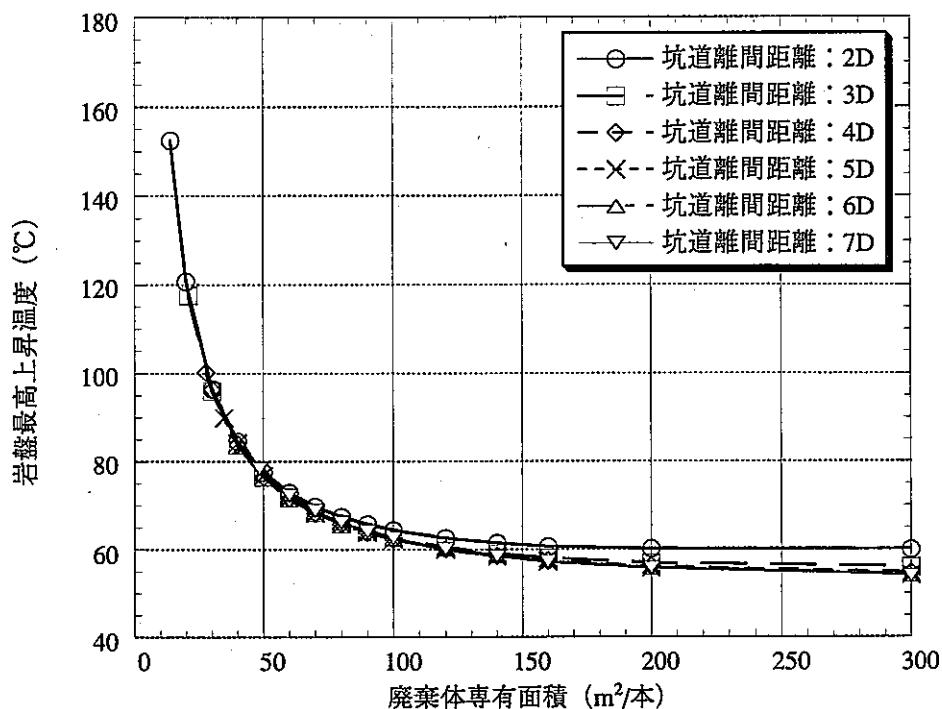


図 3-8-3 岩盤の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年、解析結果)

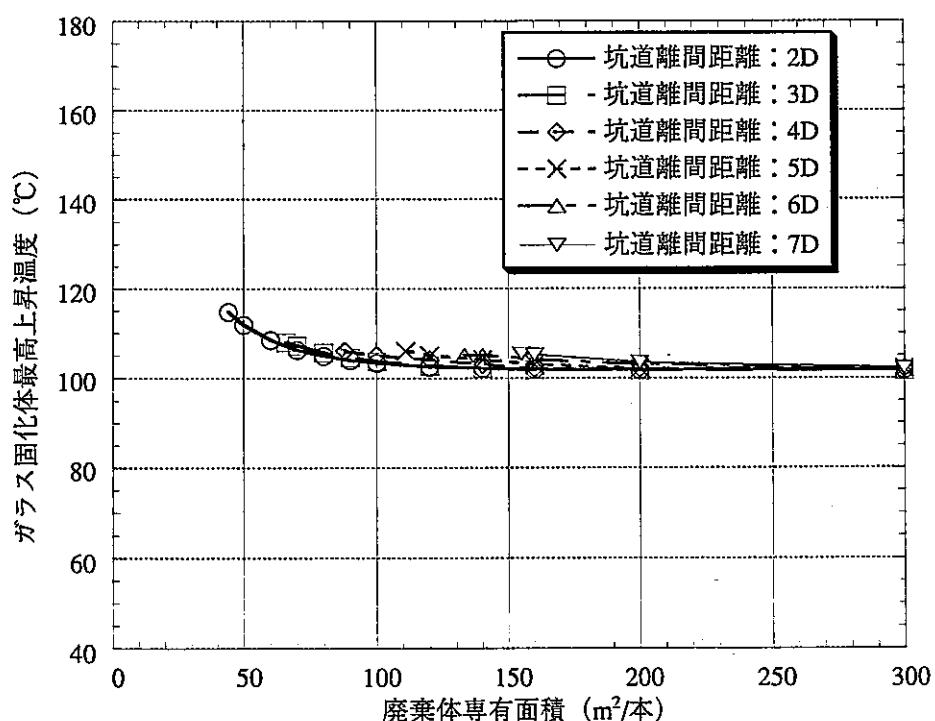


図 3-9-1 ガラス固化体の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分孔縦置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年、解析結果)

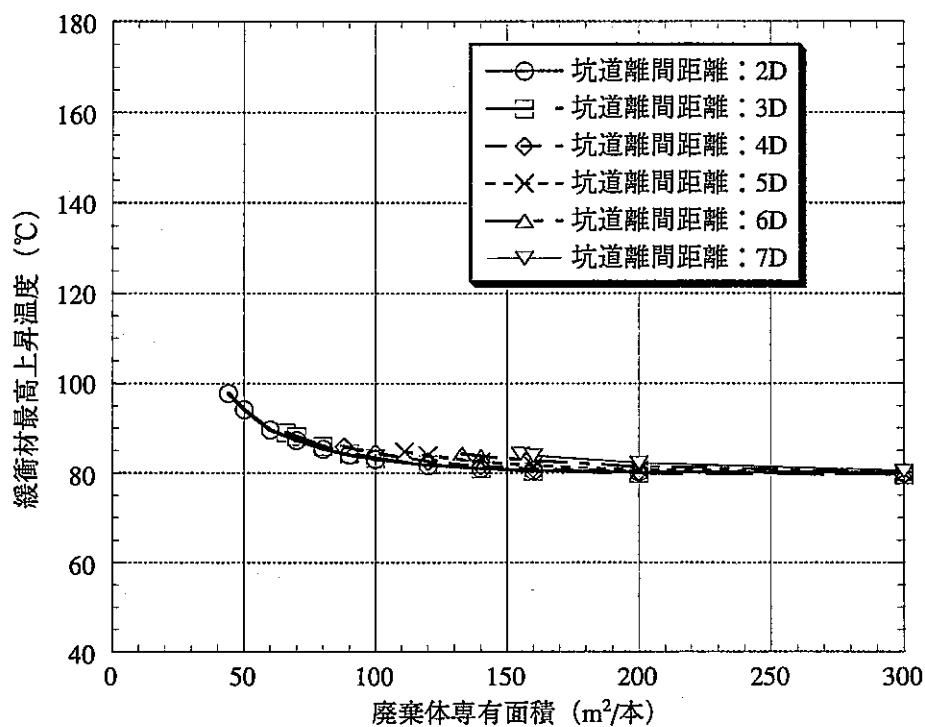


図 3-9-2 緩衝材の最高上昇温度（硬岩系岩盤，処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年，解析結果)

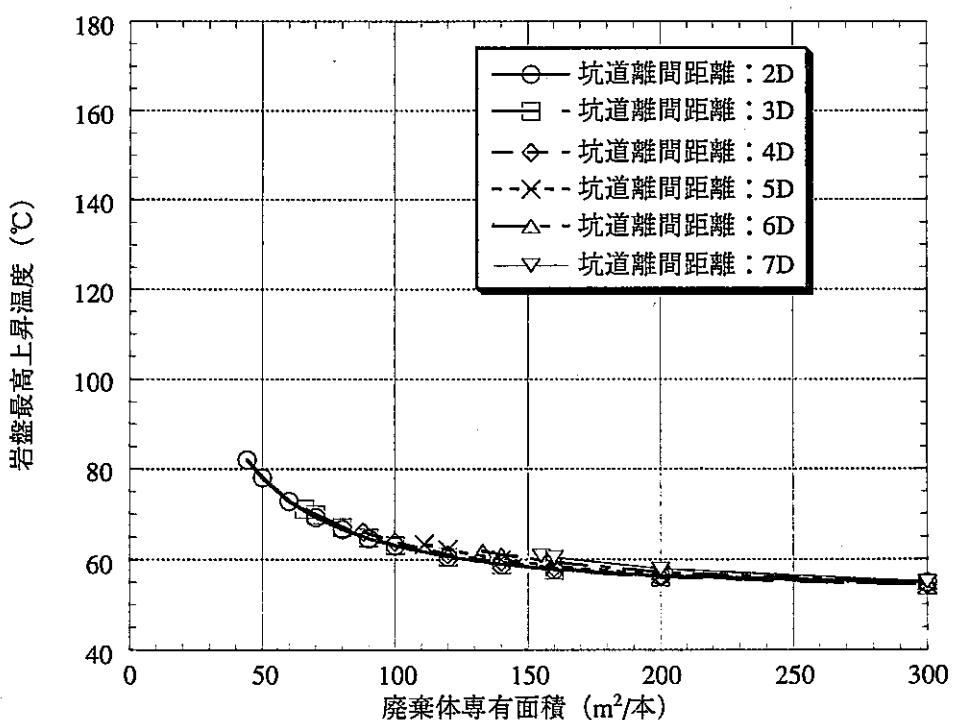


図 3-9-3 岩盤の最高上昇温度（硬岩系岩盤，処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年，解析結果)

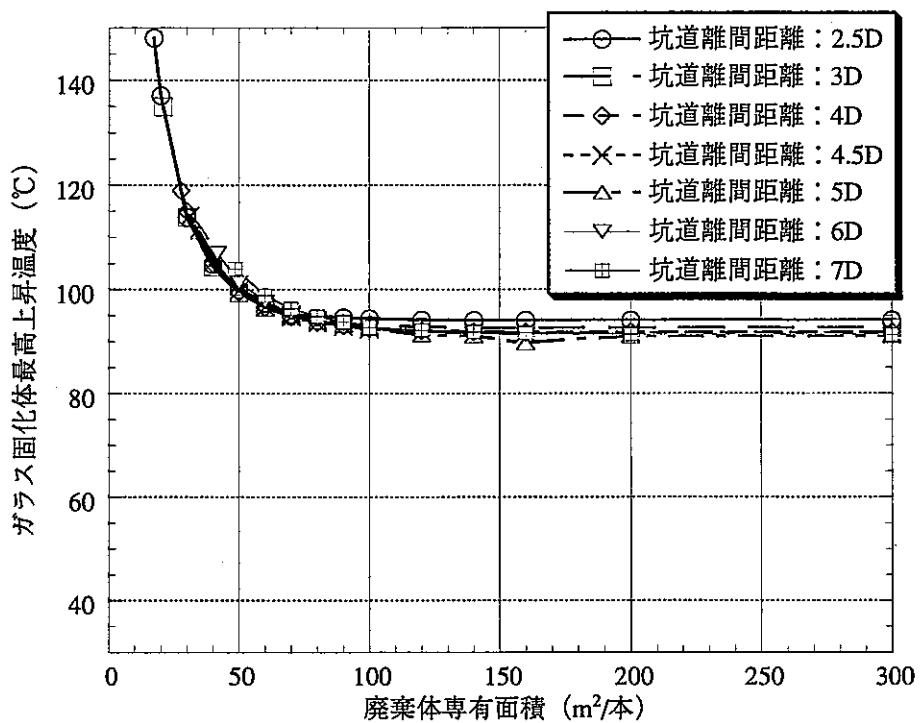


図 3-10-1 ガラス固化体の最高上昇温度（軟岩系岩盤，処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年，解析結果)

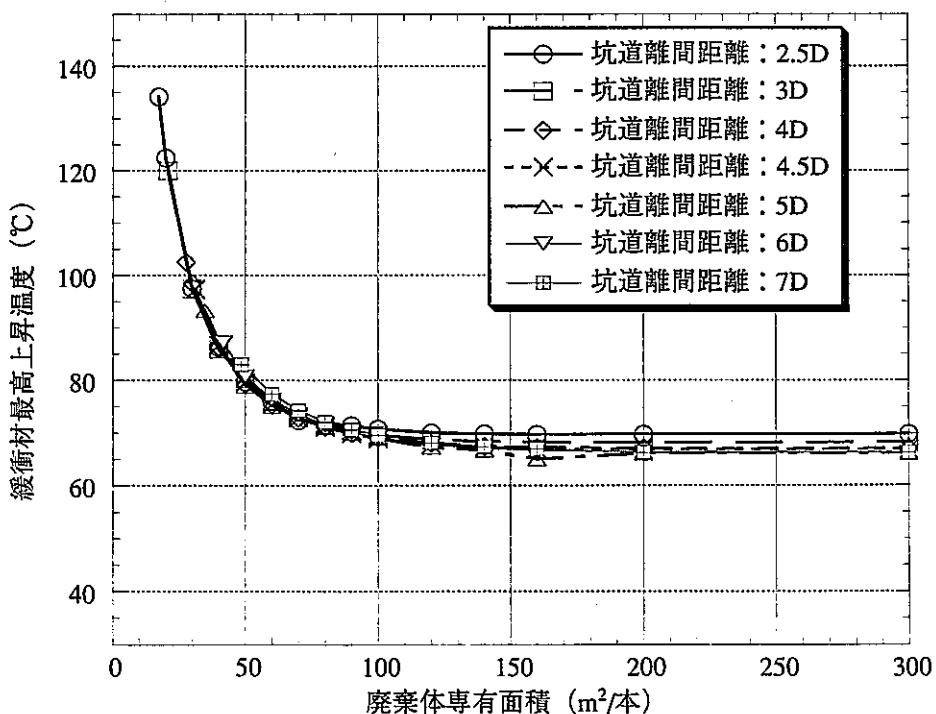


図 3-10-2 緩衝材の最高上昇温度（軟岩系岩盤，処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年，解析結果)

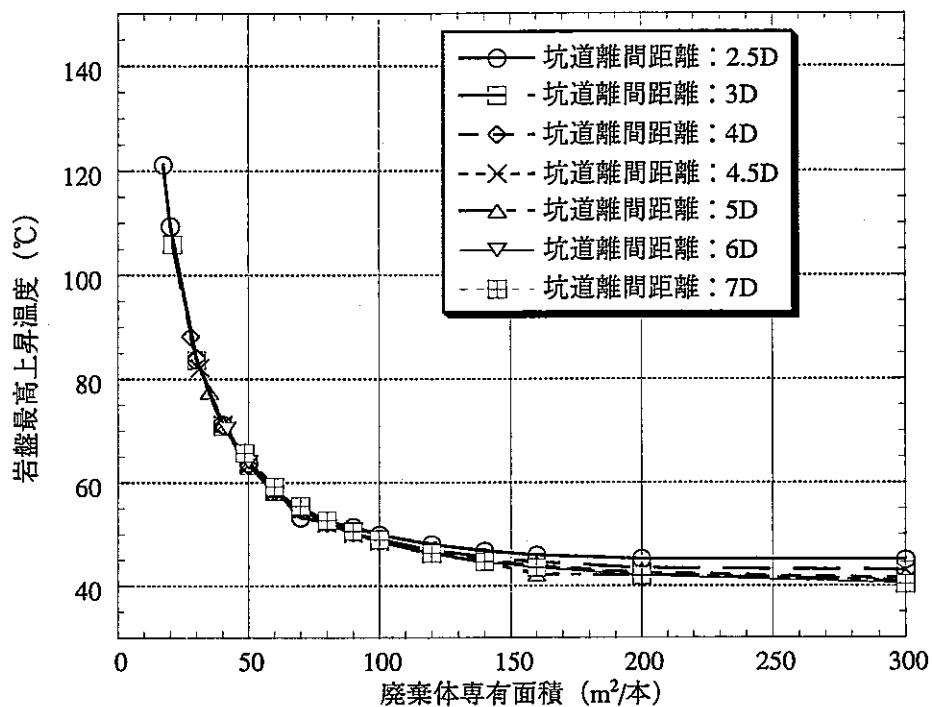


図 3-10-3 岩盤の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年、解析結果)

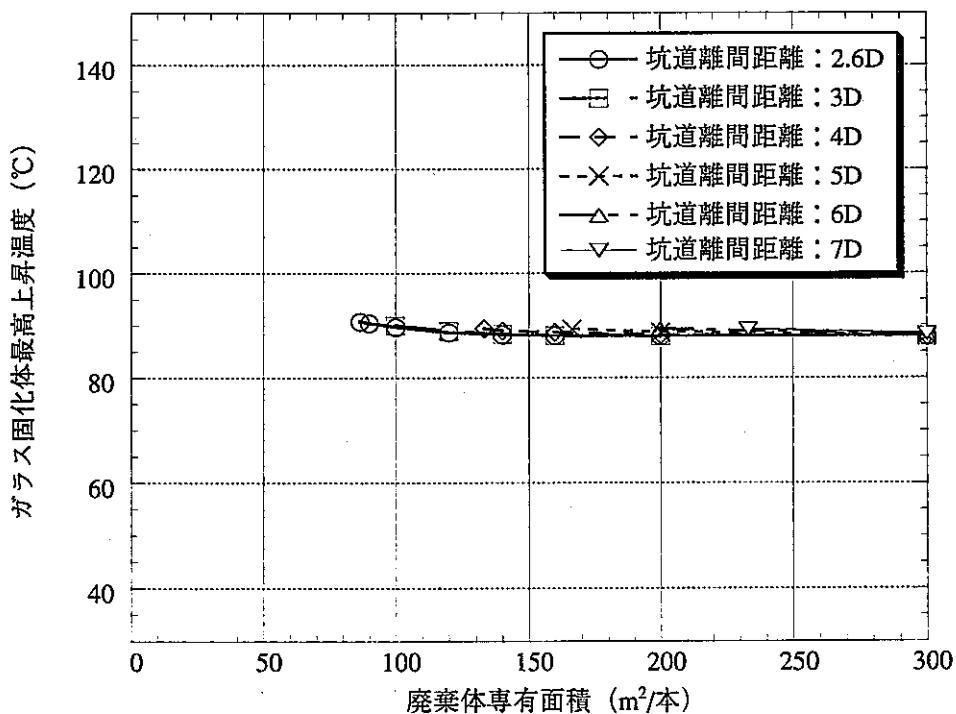


図 3-11-1 ガラス固化体の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分孔縦置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年、解析結果)

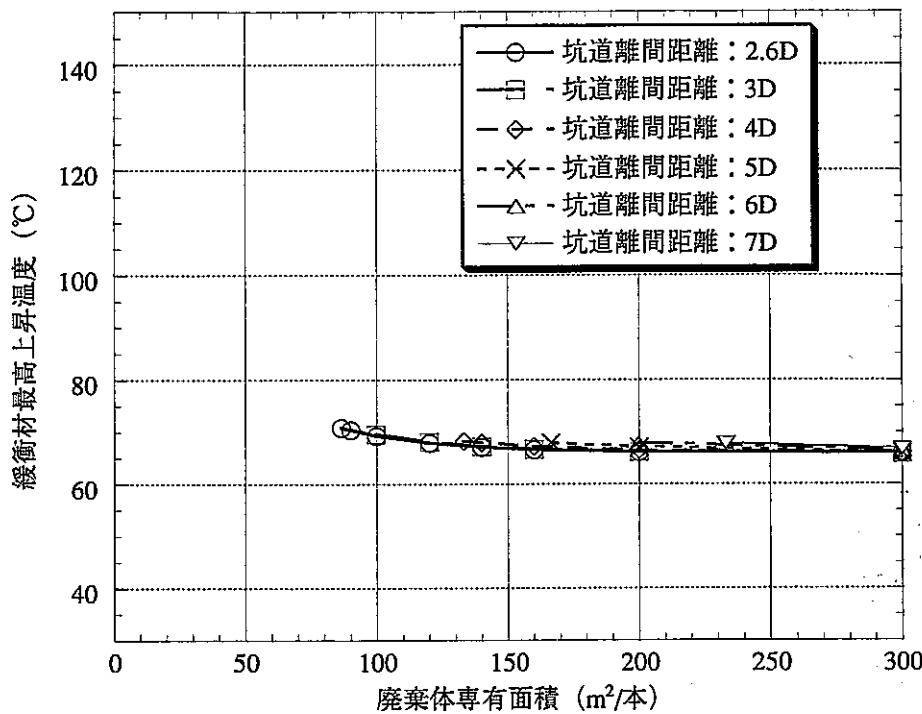


図 3-11-2 緩衝材の最高上昇温度（軟岩系岩盤，処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年, 解析結果)

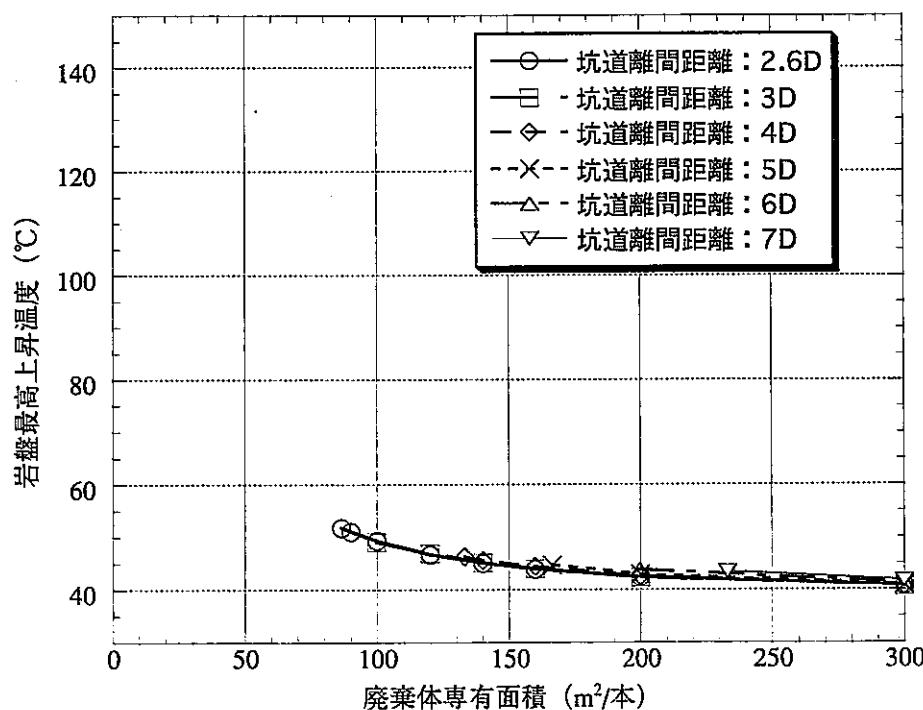


図 3-11-3 岩盤の最高上昇温度（軟岩系岩盤，処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 50 年, 解析結果)

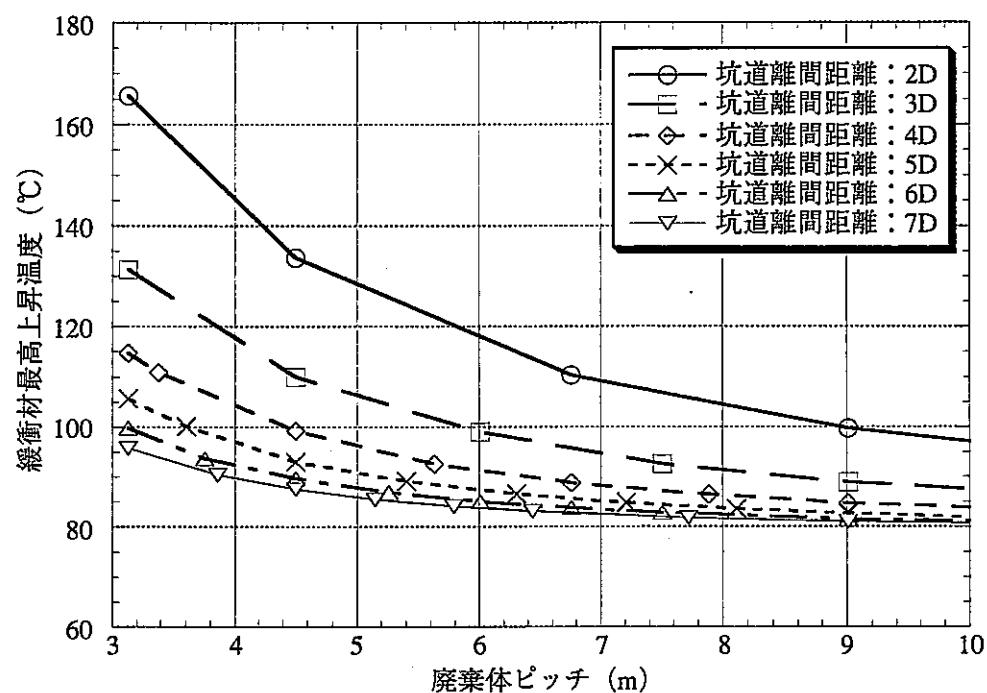


図 3-12-1 廃棄体ピッチと緩衝材の最高上昇温度の関係
(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年, 解析結果)

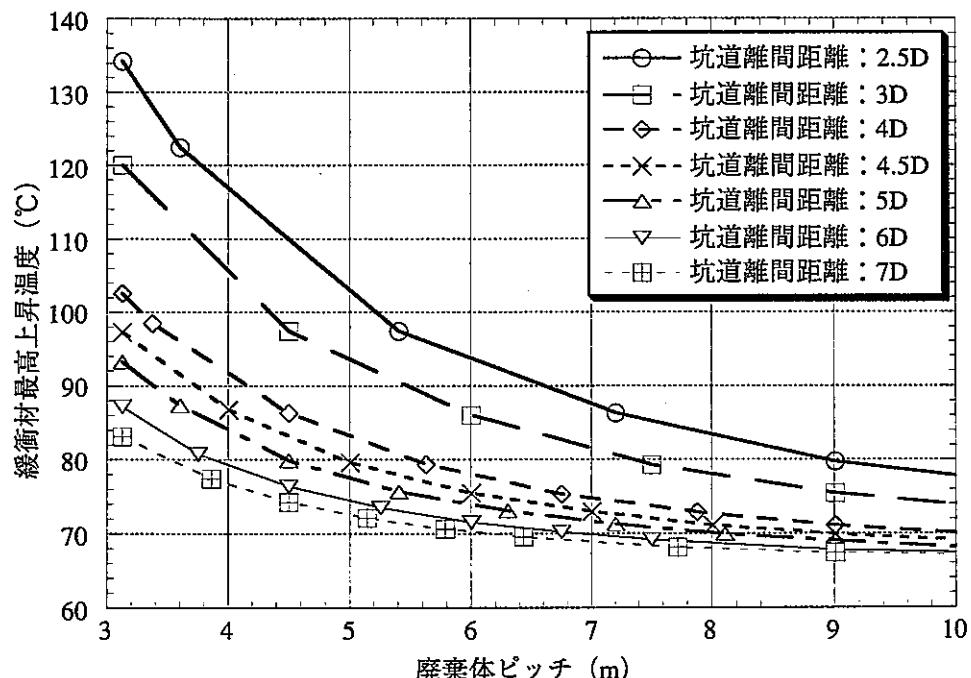


図 3-12-2 廃棄体ピッチと緩衝材の最高上昇温度の関係
(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年, 解析結果)

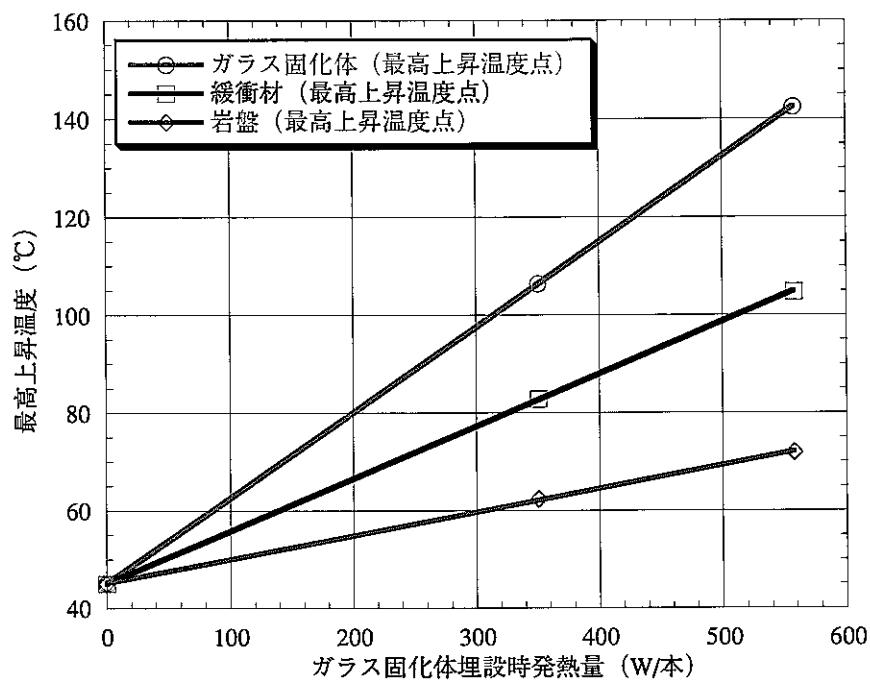


図 3-13-1 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）

（硬岩系岩盤，処分坑道横置き方式，

処分坑道離間距離:6D(13.32m)，廃棄体ピッチ:7.51m，廃棄体専有面積:100m²/本）

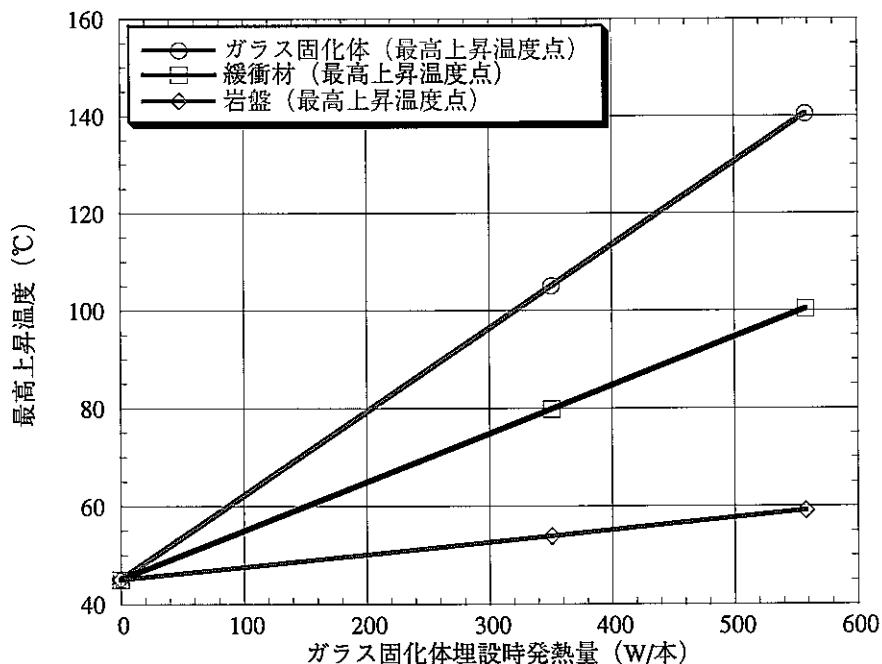


図 3-13-2 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）

（硬岩系岩盤，処分坑道横置き方式，

処分坑道離間距離:6D(13.32m)，廃棄体ピッチ:22.52m，廃棄体専有面積:300m²/本）

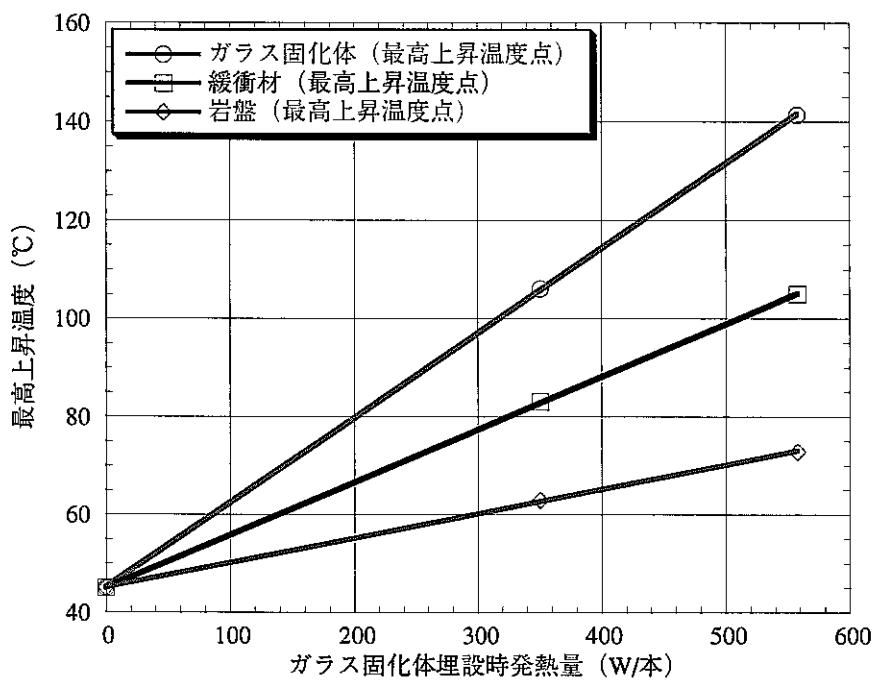


図 3-14-1 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）
 （硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、
 処分坑道離間距離:2D(10m), 廃棄体ピッチ: 10m, 廃棄体専有面積:100m²/本）

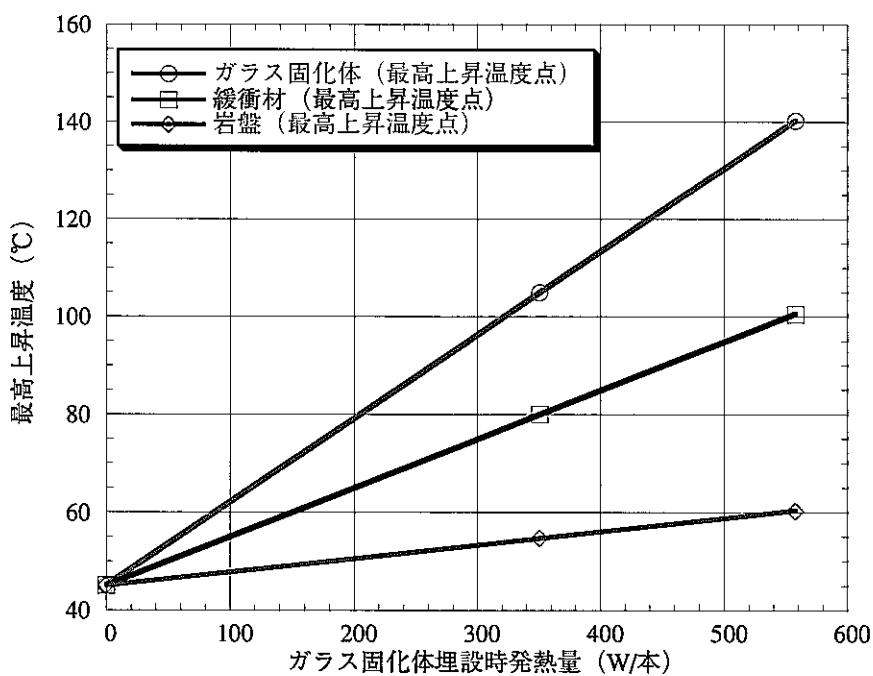


図 3-14-2 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）
 （硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、
 処分坑道離間距離:2D(10m), 廃棄体ピッチ: 30m, 廃棄体専有面積:300m²/本）

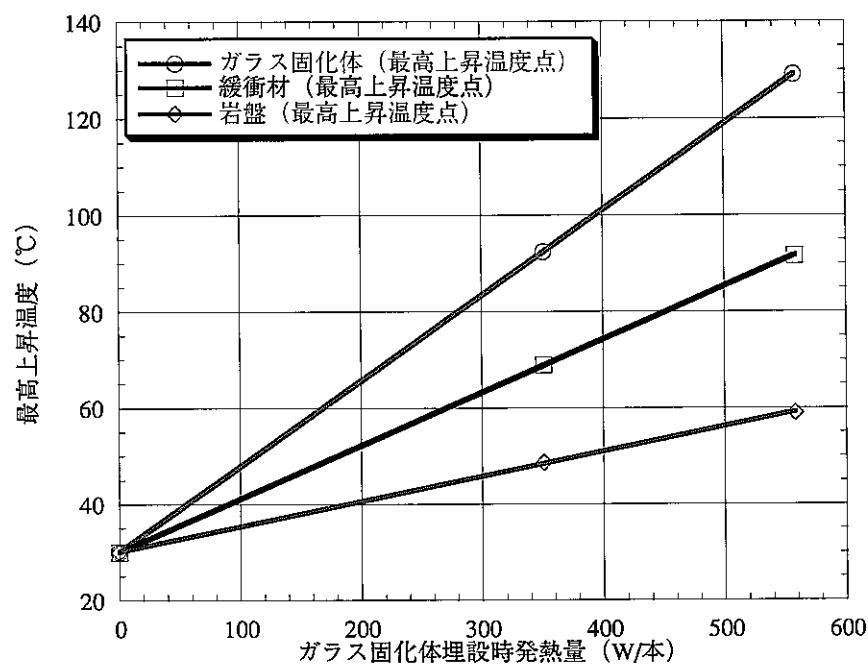


図 3-15-1 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）
 （軟岩系岩盤，処分坑道横置き方式，
 処分坑道離間距離:4.5D(9.99m), 廃棄体ピッチ:10.01m, 廃棄体専有面積:100m²/本）

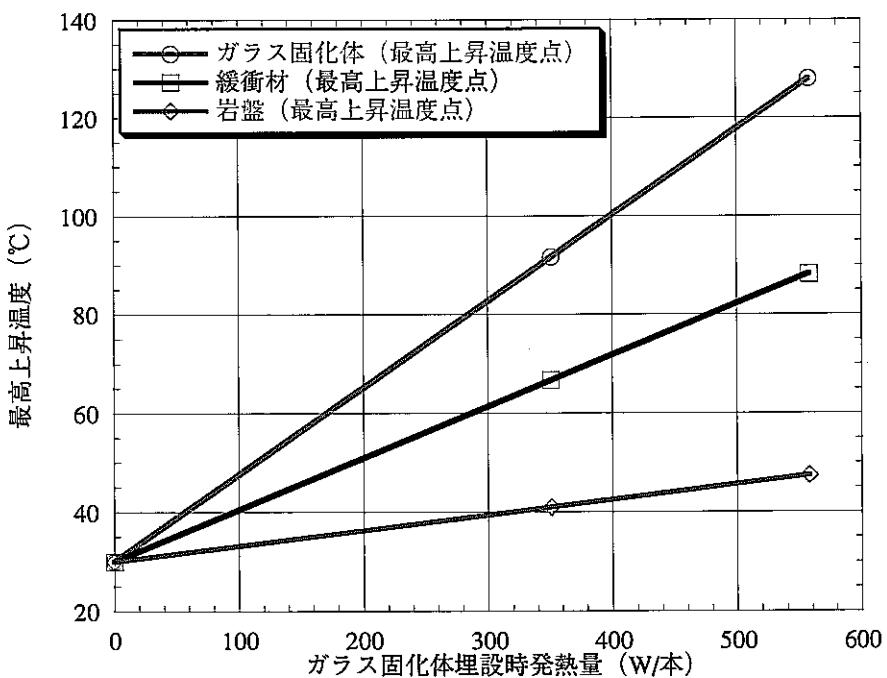


図 3-15-2 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）
 （軟岩系岩盤，処分坑道横置き方式，
 処分坑道離間距離:4.5D(9.99m), 廃棄体ピッチ:30.03m, 廃棄体専有面積:300m²/本）

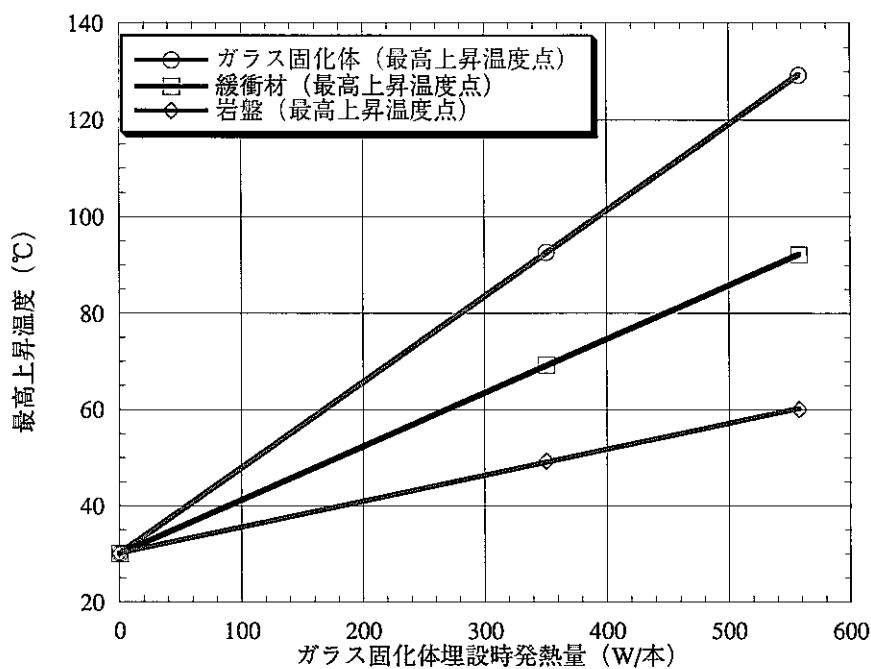


図 3-16-1 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）

(軟岩系岩盤、処分孔堅置き方式、

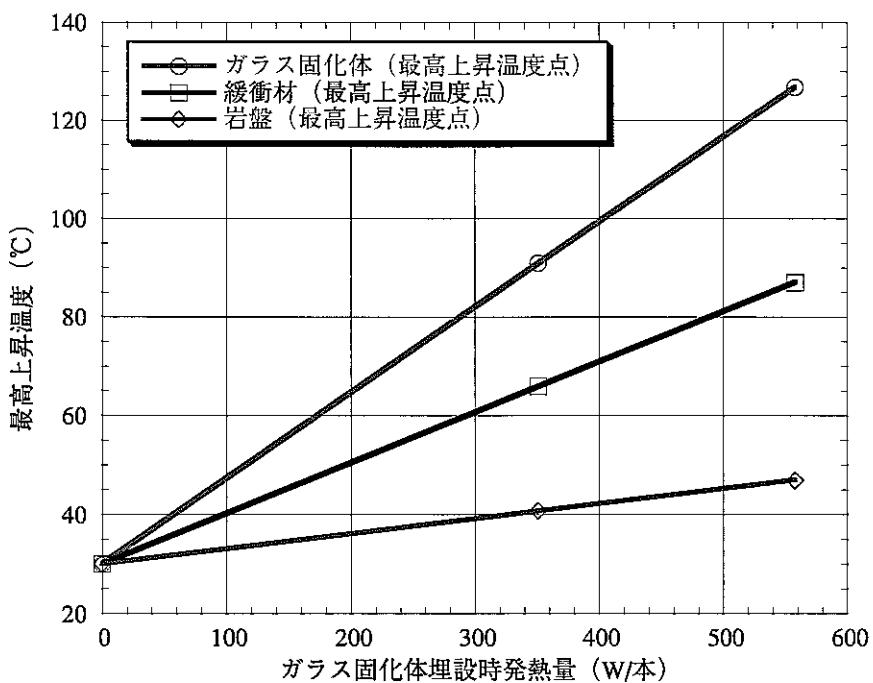
処分坑道離間距離:2.6D(13m), 廃棄体ピッチ:7.69m, 廃棄体専有面積:100m²/本)

図 3-16-2 ガラス固化体埋設時発熱量とニアフィールド最高上昇温度の関係（解析結果）

(軟岩系岩盤、処分孔堅置き方式、

処分坑道離間距離:2.6D(13m), 廃棄体ピッチ:23.07m, 廃棄体専有面積:300m²/本)

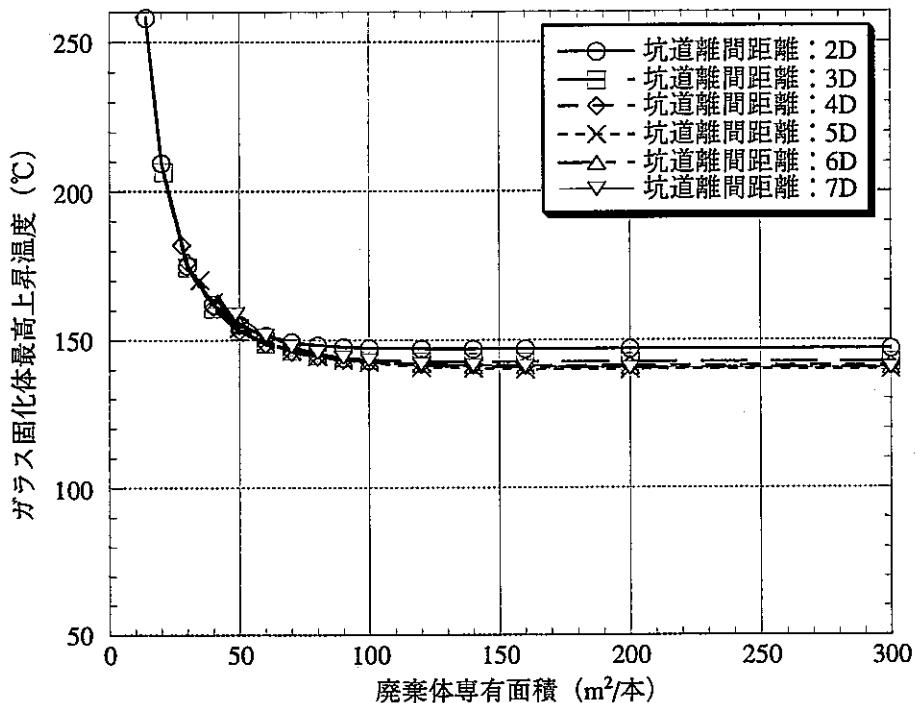


図 3-17-1 ガラス固化体の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

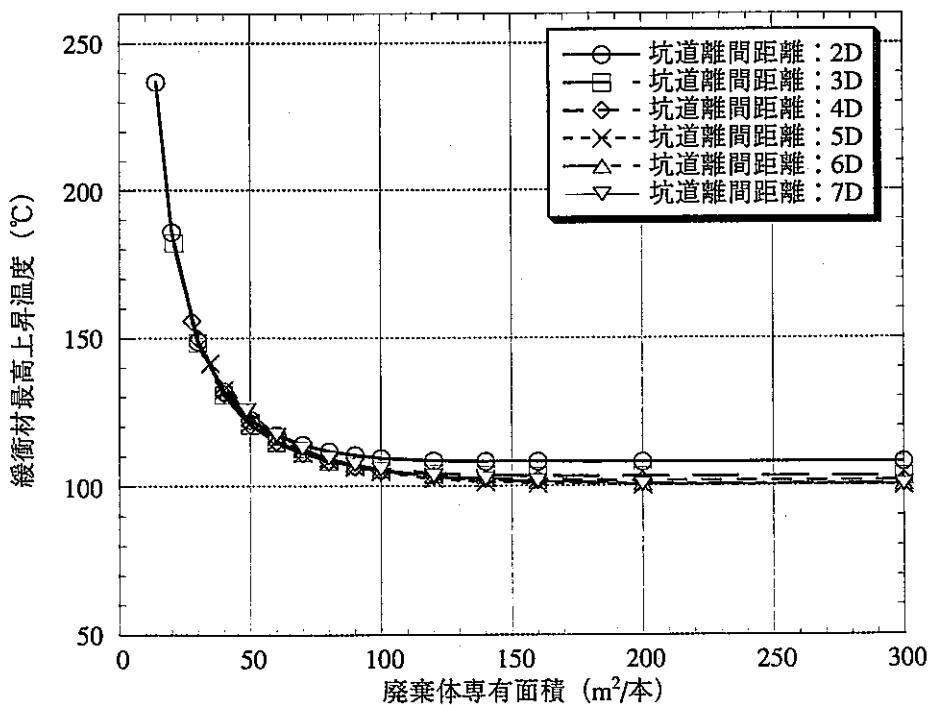


図 3-17-2 緩衝材の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

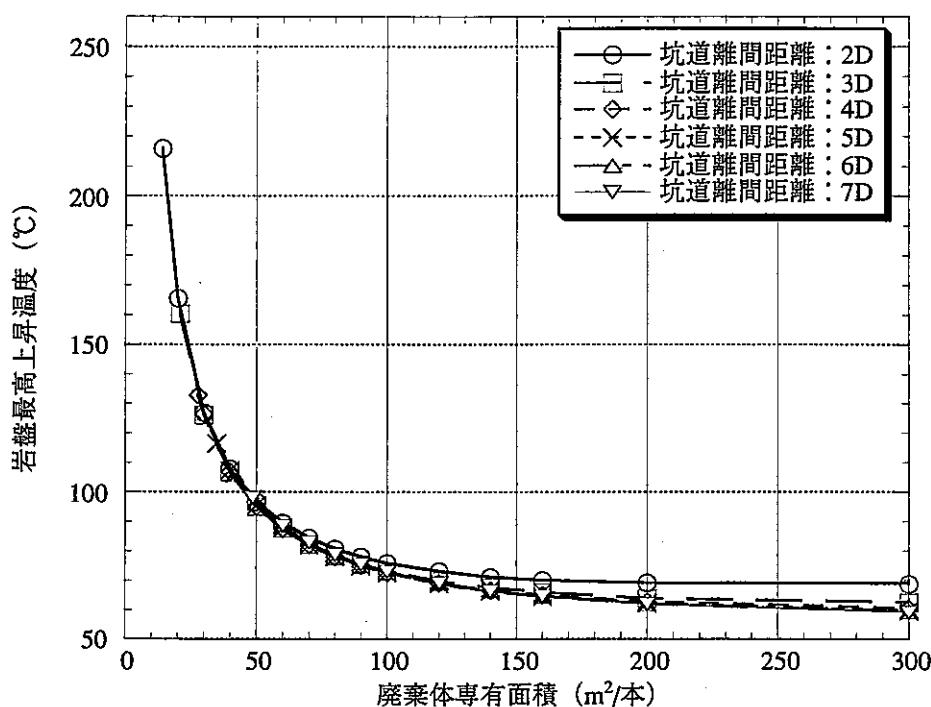


図 3-17-3 岩盤の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

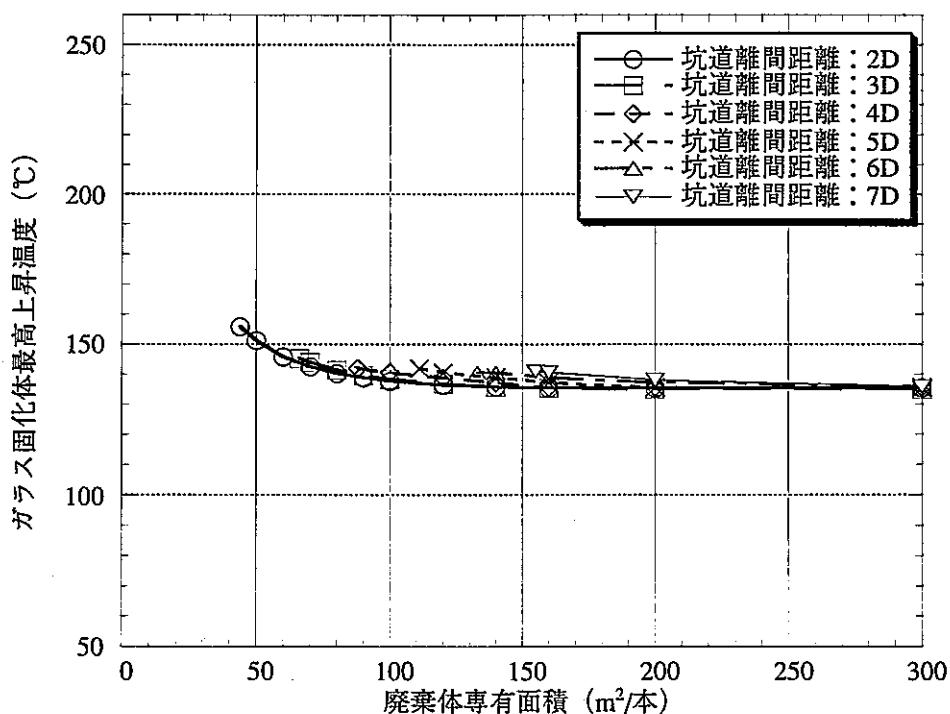


図 3-18-1 ガラス固化体の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分孔縦置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

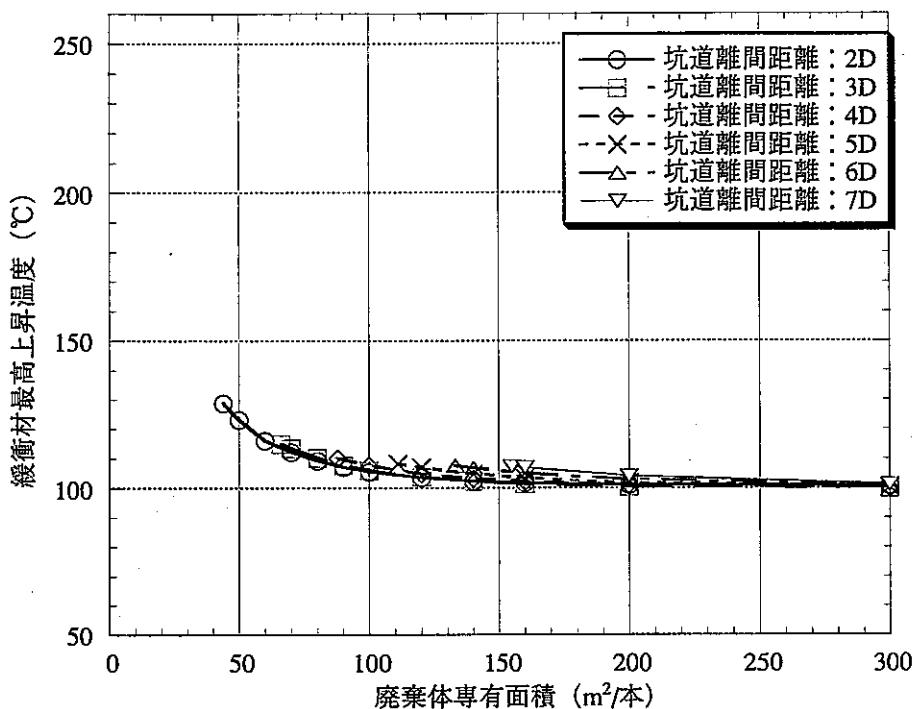


図 3-18-2 緩衝材の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

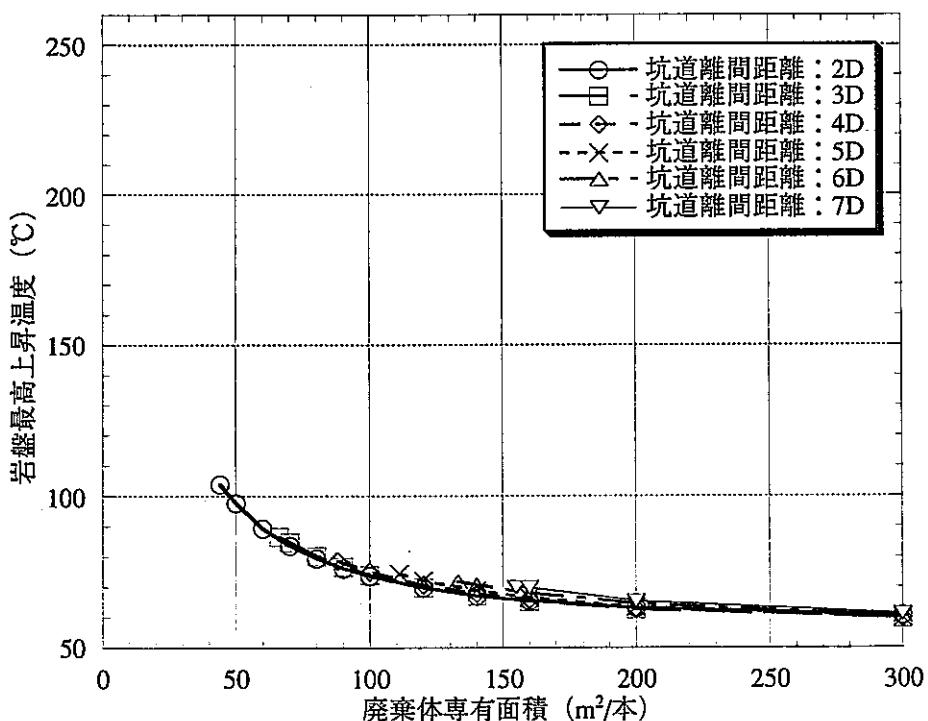


図 3-18-3 岩盤の最高上昇温度（硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

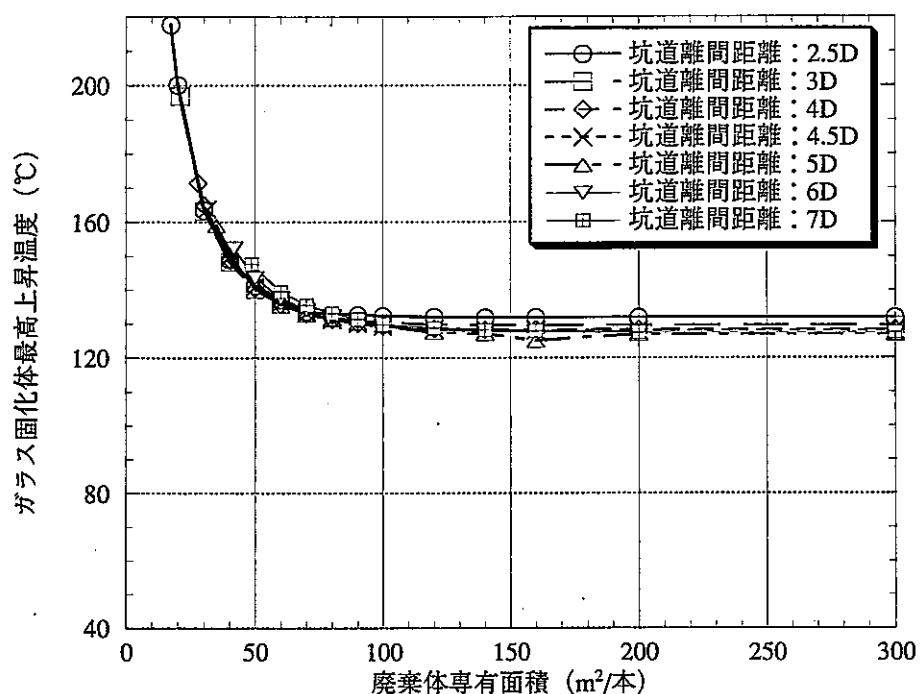


図 3-19-1 ガラス固化体の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

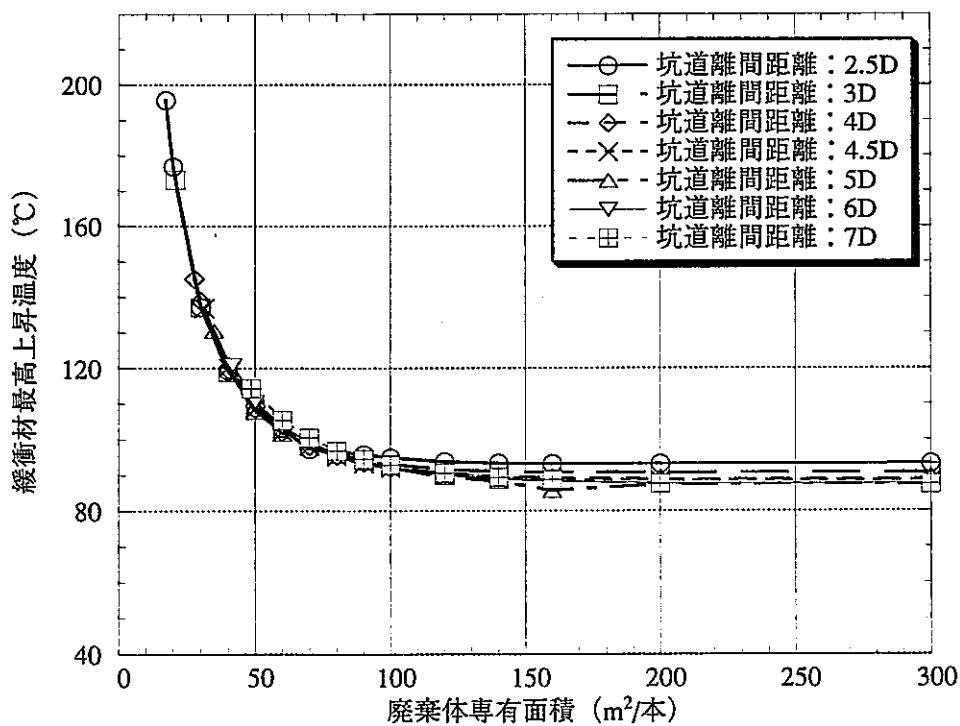


図 3-19-2 緩衝材の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

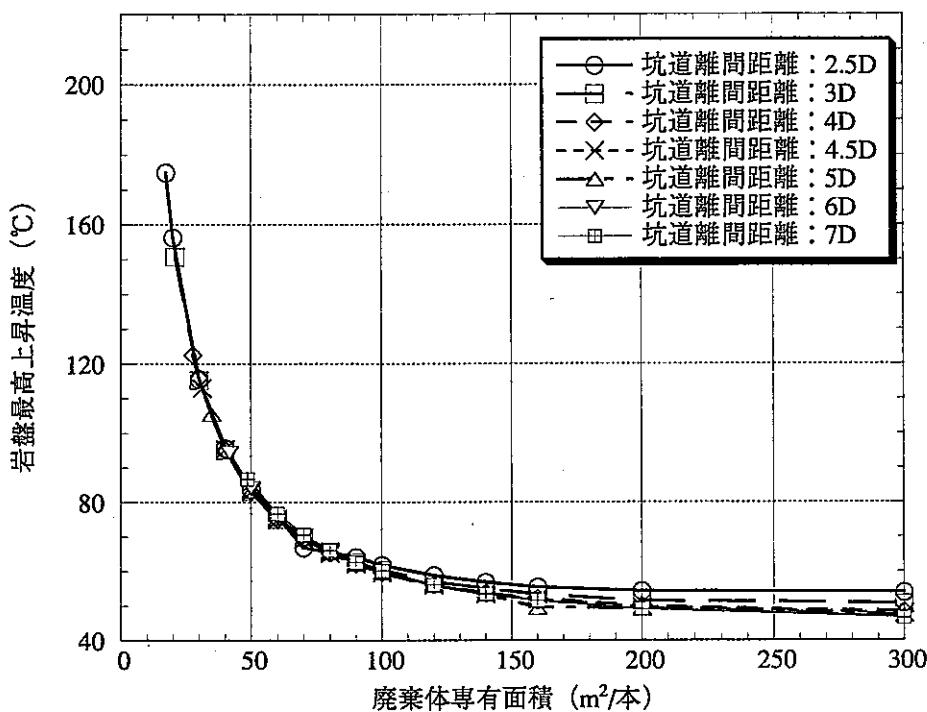


図 3-19-3 岩盤の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

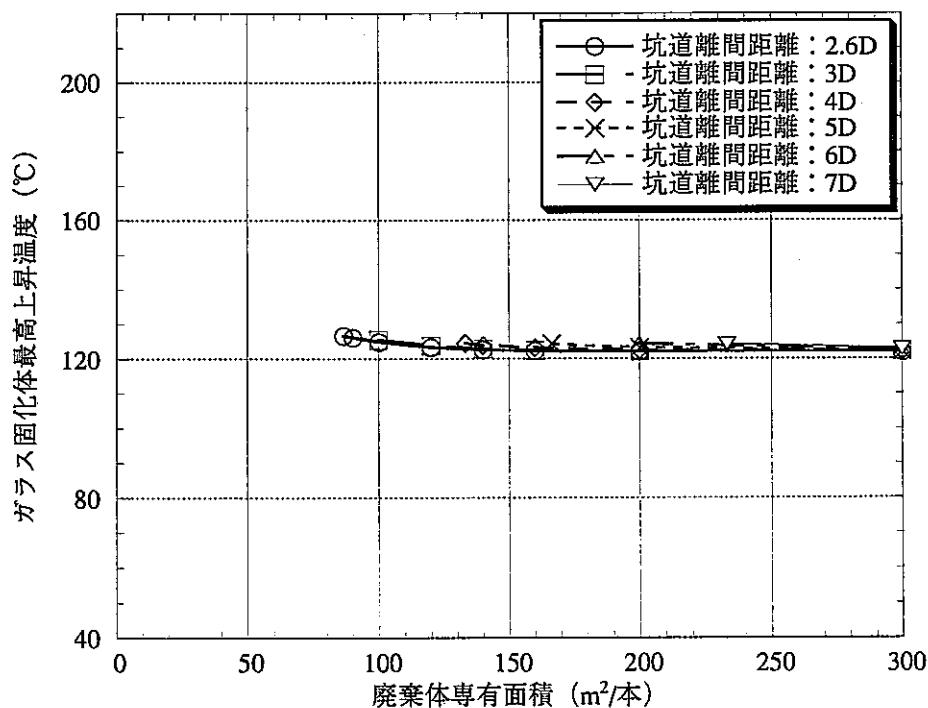


図 3-20-1 ガラス固化体の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分孔縦置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

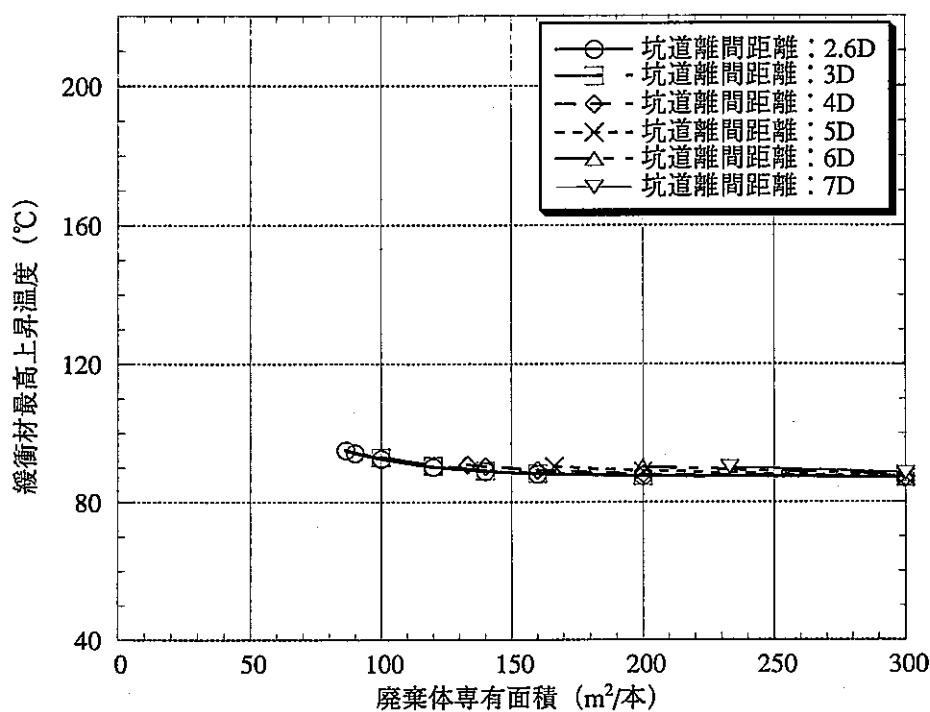


図 3-20-2 緩衝材の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

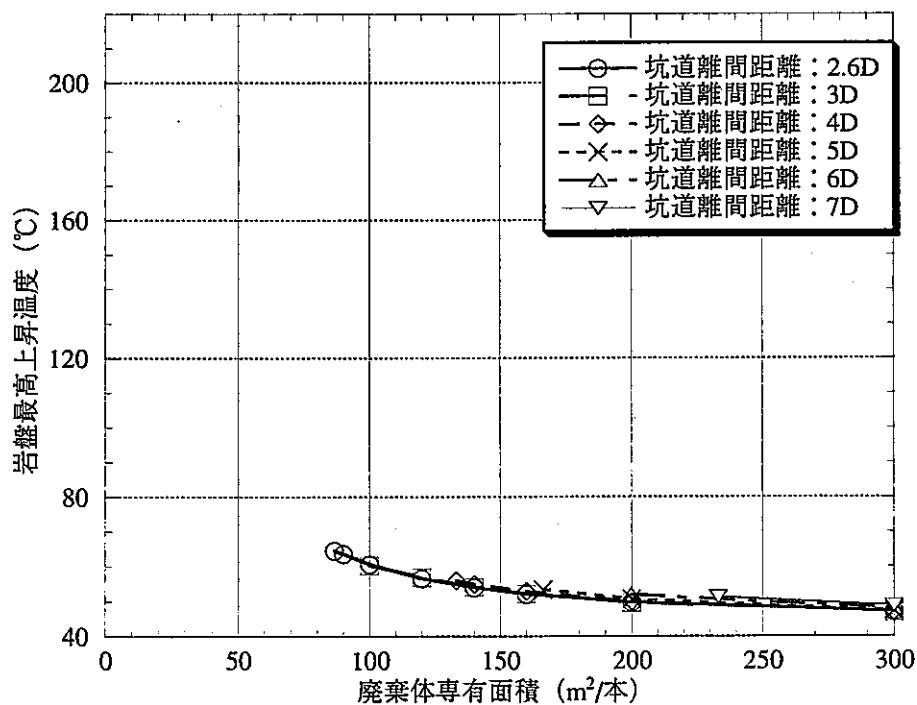


図 3-20-3 岩盤の最高上昇温度（軟岩系岩盤、処分孔堅置き方式）
(中間貯蔵期間 30 年、推定結果)

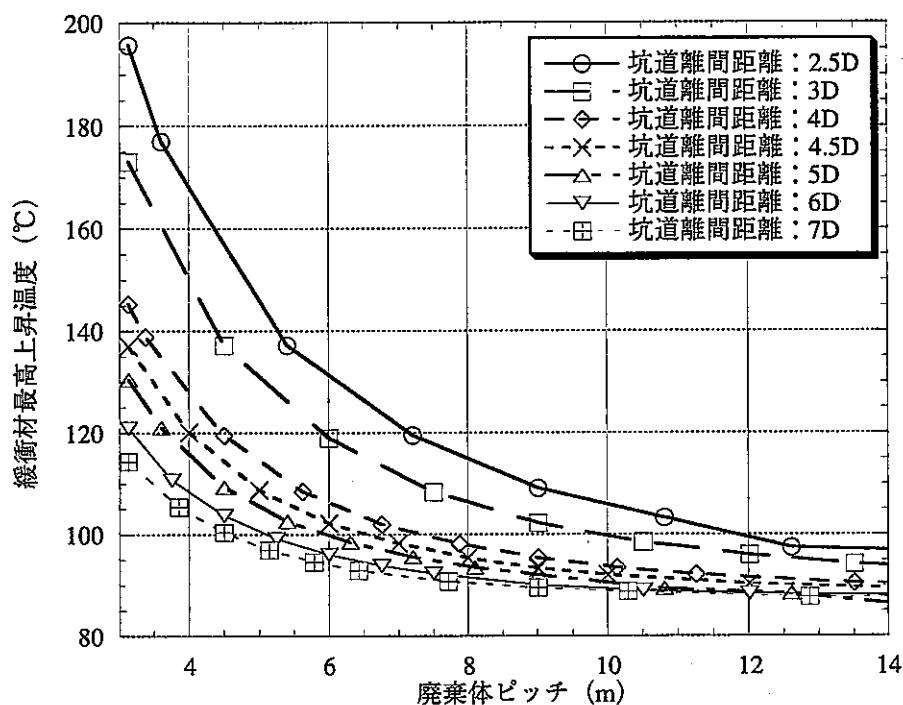


図 3-21 廃棄体ピッチと緩衝材の最高上昇温度の関係
(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 推定結果)

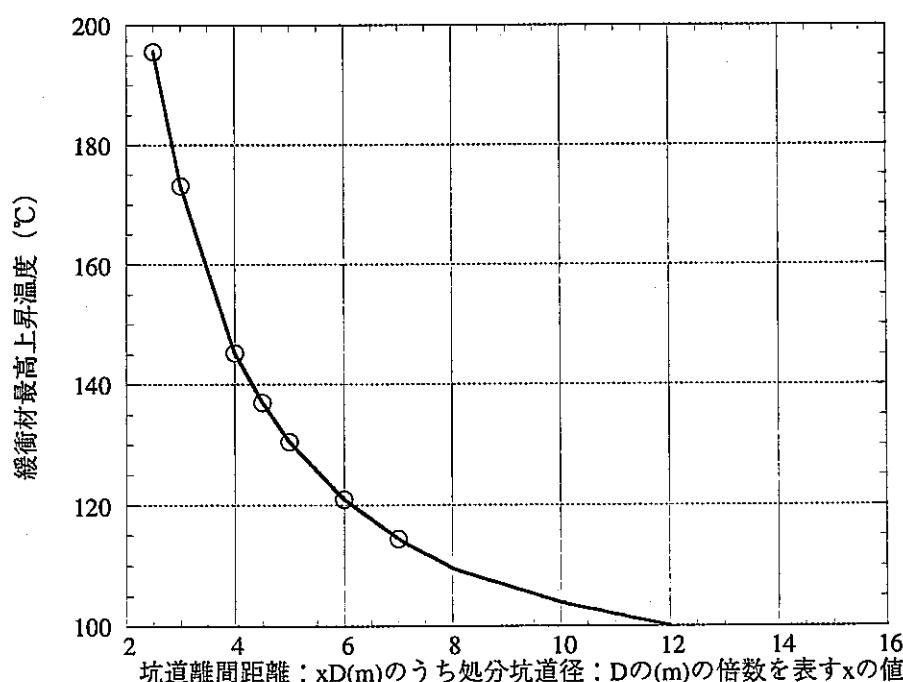


図 3-22 廃棄体ピッチ 3.13(m)時の処分坑道離間距離と緩衝材最高上昇温度の関係
(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 推定結果)

(2) ニアフィールドの温度分布および隙間の影響

ここでは、(1) の検討結果を受け 2. 「処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定」で設定された処分坑道離間距離と廃棄体ピッチに対して検討を行った。

1) 中間貯蔵期間 50 年

(a) ニアフィールドの温度の経時変化

図 3-23～3-26 に岩盤（岩種）、廃棄体定置方式、隙間の有無および隙間に考慮した充填材料をパラメータにした各解析ケースの温度の経時変化を示す。また、図 3-27～3-30 に、隙間を考慮しないモデルでの各種岩盤および廃棄体定置方式におけるニアフィールドの温度分布コンターを、経過時間（処分後 10, 20, 30, 40, 50, 100, 1000, 10000 年）毎に示す。

ニアフィールドの温度の経時変化は、上記パラメータに関わらず、全解析ケースで同様な傾向となった。以下にその傾向をまとめると。

- ・緩衝材の内側（オーバーパックもしくはオーバーパック-緩衝材間の隙間と緩衝材が接する部分）では、人工バリア定置後約 10～20 年で最高上昇温度に到達しその後温度が低下する。
- ・緩衝材の外側（緩衝材と岩盤もしくは緩衝材-岩盤間の隙間が接する部分、また処分坑道横置き方式において隣接する人工バリアと接する部分）では、人工バリア定置後約 20～40 年で最高上昇温度に到達し、その後温度が低下する。
- ・廃棄体定置後約 1000 年で人工バリア内の温度分布は一定になり、その時の温度は、処分深度 1000m の硬岩系岩盤では約 60°C、処分深度 500m の軟岩系岩盤縦置き方式では約 40°C、軟岩系岩盤横置き方式では約 50°C となった。この結果と、人工バリアの最高上昇温度結果から、廃棄体定置後約 1000 年時の人工バリアの温度は、初期の地温が支配的であるといえる。
- ・廃棄体定置後約 10000 年で人工バリアの温度は初期地温に戻る。

(b) ニアフィールドの温度に及ぼす隙間の影響

表 3-5 に岩盤、廃棄体定置方式、隙間の有無および隙間に考慮した充填材料をパラメータにした各解析ケースの解析出力点最高上昇温度を示す。また、図 3-31～3-34 に緩衝材が各ケースで概ね最高上昇温度となる時間（廃棄体定置後 10 または 20

年)での温度分布センター(緩衝材のみ表示)を示す。

人工バリアに隙間が生じることを考慮した結果、ガラス固化体の最高上昇温度は30°C以上高くなつた。しかしながら、ガラス固化体の制限温度(400°C)を上回ることはなかつた。また、岩盤の最高上昇温度に関しては、隙間の考慮の有無に関わらず、ほぼ同等の値となつた。したがつて、隙間を考慮しても、ガラス固化体および岩盤は、熱的に安定であるといえる。

緩衝材に関しては、緩衝材が接する隙間に空気の熱物性を用いた場合(CASE.A)、緩衝材の許容温度100°Cを最大で17°C、水の物性を用いた場合(CASE.W)、最大で1°C、吹付ペントナイトの物性を用いた場合(CASE.B)、最大で4°C上回る結果となつた。しかしながら、空気の物性では輻射、対流の熱伝達に与える影響を考慮していないこと、人工バリア定置直後には、建設・操業の作業性から湧水対策が施されるが、徐々に地下水位は回復し緩衝材中への地下水の浸潤が始まることから緩衝材および緩衝材-岩盤間の熱伝導性が向上すること、また緩衝材が膨潤し隙間が閉塞されること等を考慮すると隙間が緩衝材の最高上昇温度に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、上記センター図より、隙間を考慮しないモデルと比較して、隙間を考慮したモデルでの緩衝材の温度が高くなるのは、オーバーパック近傍の一部であることが分かる。

以上より、これら隙間がニアフィールドの温度およびその性能に及ぼす影響は小さいといえる。

2) 中間貯蔵期間30年

(1) の検討より、本検討で用いた条件下では、ガラス固化体中間貯蔵期間30年の場合、硬岩系岩盤においては、解析上現実的な処分坑道離間距離・廃棄体ピッチ、つまり廃棄体専有面積を設定することは、緩衝材の最高上昇温度およびその制限温度の観点から、難しいという結果となつた。

ここでは、各種岩盤および廃棄体定置方式において、2.「処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定」で設定された処分坑道離間距離および(1)「ニアフィールドの最高上昇温度と処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの関係」の検討で緩衝材最高上昇温度がほぼ収束する廃棄体専有面積を例にとり緩衝材の設置時含水比、つまり熱物性を変化させた場合について検討を行つた。具体的には、廃棄体専有面積を100, 300m²/本、緩衝材含水比をこれまでの検討で用いた7%, および10, 13%として検討を行つた。なお、1)での検討で、人工バリア周囲の隙間が、ニアフィールドの温度制限の中で、最も支配的である緩衝材最高上昇温度に及ぼす影響は小さい

ことが分かったため、ここでの検討は隙間を考慮しないモデルで行った。

図 3-35～3-38 に、上記解析条件でのニアフィールドの温度経時変化を示す。また、図 3-39 に、廃棄体専有面積 100m²/本における緩衝材の含水比とニアフィールドの最高上昇温度の関係を示す。

これらから、緩衝材の含水比は、つまり緩衝材の熱伝導率は、ガラス固化体、および緩衝材の最高上昇温度に大きく影響を及ぼす結果となった。しかしながら、ニアフィールドの温度変化の傾向、例えば、最高上昇温度に到達する時間等、および岩盤の最高上昇温度に及ぼす影響は小さい結果となった。

硬岩系岩盤においては、廃棄体定置方式に関わらず、含水比を 10% および 13% にすれば、廃棄体専有面積 100m²/本においても緩衝材最高上昇温度がその制限温度 (100°C) を下回り、また、図 3-39 より緩衝材設置含水比を 9% 程度にすれば廃棄体専有面積 100m²/本において緩衝材最高上昇温度がその制限温度 (100°C) になることが推測された。したがって、ガラス固化体中間貯蔵期間 30 年における硬岩系岩盤の場合、(1) 「ニアフィールドの最高上昇温度と処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの関係」の検討条件下で、緩衝材設置時含水比を 10% 以上 にすれば、現実的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチは設定可能となる。

表 3-5-1 解析出力点最高上昇温度
 (硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

出力点	CASE.B 吹き付けペントナイト	CASE.A 空気(360K)	CASE.W 水	隙間なしモデル
A	153.3	168.6	145.2	116.7
Bxin	140.4	155.3	135.5	100.0
Bxout	104.1	117.5	100.4	
Byin	116.2	129.9	111.8	99.4
Byout	102.8	115.6	99.2	
Bz1	105.3	118.4	101.4	100.0
Bzin2	160.2	175.8	155.1	100.0
Bzout2	103.7	117.2	100.0	
Cxin	103.7	117.1	100.0	99.8
Cxout	99.5	101.7	99.0	
Cy	102.6	115.5	99.1	99.1
Cz1	103.9	116.9	100.6	99.8
Czin2	103.4	117.0	99.7	99.8
Czout2	96.9	99.1	97.7	
Dxin	85.1	91.2	83.6	83.1
Dxout	83.0	82.6	83.1	
Dy	90.1	97.6	88.4	88.4
Dz1	83.9	85.6	83.4	83.1
Dzin2	85.6	92.8	83.6	
Dzout2	82.2	81.1	82.7	83.0

表 3-5-2 解析出力点最高上昇温度
 (硬岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

出力点	CASE.B 吹き付けペントナイト	CASE.A 空気(360K)	CASE.W 水	隙間なしモデル
A	149.9	168.3	144.7	114.7
Bxin	123.0	140.4	118.2	98.0
Bxout	102.0	118.2	98.2	
Byin	125.3	142.8	120.4	98.0
Byout	102.0	118.2	98.2	
Bz1	101.6	117.1	97.9	97.3
Bzin2	139.4	157.2	134.4	97.3
Bzout2	100.9	116.5	97.3	
Cxin	101.8	117.9	98.0	97.7
Cxout	97.7	100.2	97.0	
Cyin	101.7	117.9	98.0	97.7
Cyout	97.8	100.2	97.0	
Cz1	101.0	116.3	97.4	96.9
Cz2	100.8	116.3	97.1	97.0
Dxin	83.7	89.6	82.2	81.7
Dxout	81.5	80.9	81.7	
Dyin	84.0	89.8	82.6	82.0
Dyout	81.9	81.3	82.0	
Dz1	81.3	82.6	81.0	81.0
Dz2	79.7	80.8	79.5	79.5

表 3-5-3 解析出力点の最高上昇温度
 (軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

出力点	CASE.B 吹き付けペントナイト	CASE.A 空気(360K)	CASE.W 水	隙間なしモデル
A	145.9	160.6	141.2	111.7
Bxin	133.9	148.2	129.3	97.6
Bxout	101.5	112.6	97.9	
Byin	111.3	124.5	107.7	96.9
Byout	100.3	111.1	96.7	
Bz1	102.5	113.6	99.0	97.6
Bzin2	152.4	167.4	147.5	97.5
Bzout2	101.2	112.4	97.5	
Cxin	101.2	112.3	97.6	97.3
Cxout	97.0	99.4	96.5	
Cy	100.2	111.0	96.6	96.6
Cz1	101.7	112.4	98.1	97.3
Czin2	101.0	112.2	97.2	97.3
Czout2	94.3	96.6	95.2	
Dxin	84.0	89.9	82.7	82.2
Dxout	82.1	81.6	82.2	
Dy	88.7	95.3	86.9	86.9
Dz1	83.1	84.9	82.5	82.1
Dzin2	84.2	90.9	82.5	
Dzout2	80.9	79.6	81.6	82.0

表 3-5-4 解析出力点最高上昇温度
 (軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

出力点	CASE.B 吹き付けペントナイト	CASE.A 空気(360K)	CASE.W 水	隙間なしモデル
A	138.8	158.5	133.1	90.7
Bxin	105.0	124.3	99.6	71.2
Bxout	76.5	94.8	71.5	
Byin	105.0	124.3	99.6	71.2
Byout	76.5	94.8	71.5	
Bz1	75.8	93.3	71.0	70.3
Bzin2	118.7	138.0	113.3	70.4
Bzout2	75.1	92.8	70.3	
Cxin	76.2	94.5	71.2	70.9
Cxout	70.9	74.2	70.0	
Cyin	76.2	94.5	71.2	70.9
Cyout	70.9	74.2	70.0	
Cz1	75.1	92.6	70.4	69.7
Cz2	74.9	92.6	70.2	69.9
Dxin	53.8	60.8	52.2	51.6
Dxout	51.4	50.6	51.6	
Dyin	53.9	60.9	52.3	51.8
Dyout	51.6	50.8	51.8	
Dz1	51.3	53.1	50.8	50.8
Dz2	49.0	50.3	48.8	48.8

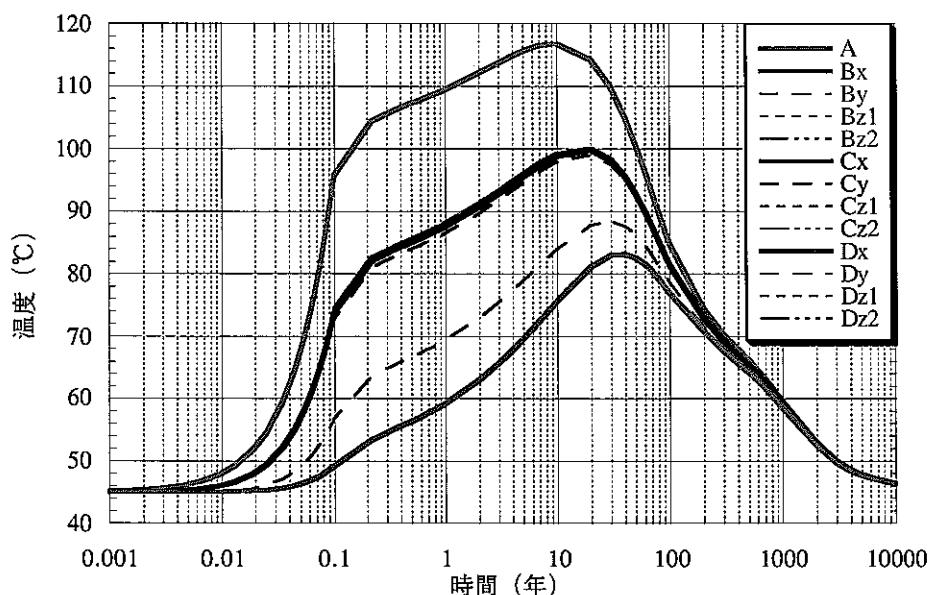


図 3-23-1 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
 (硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

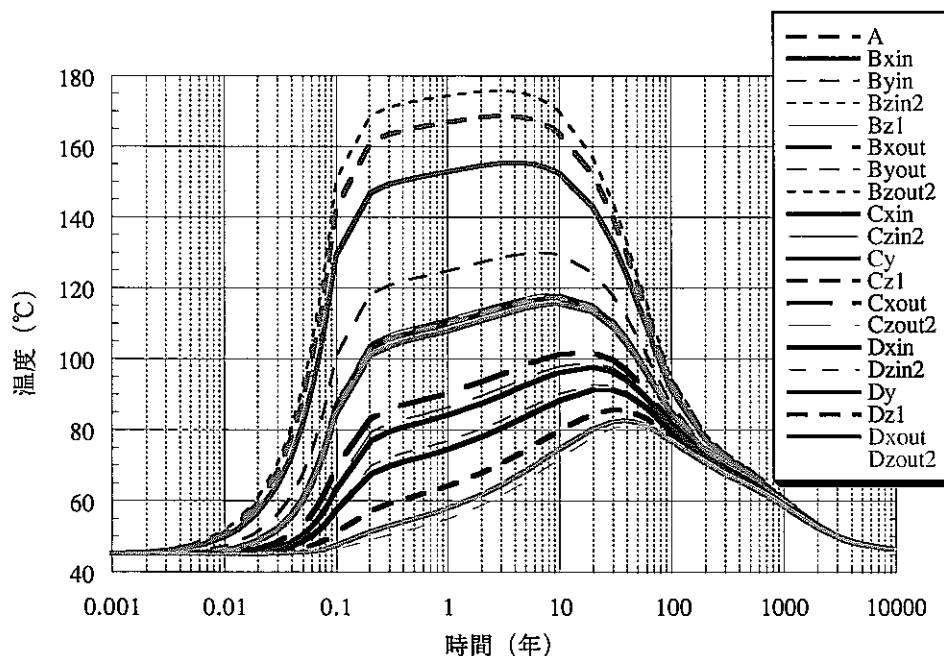


図 3-23-2 溫度の経時変化（隙間モデル, CASE.A）
 (硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

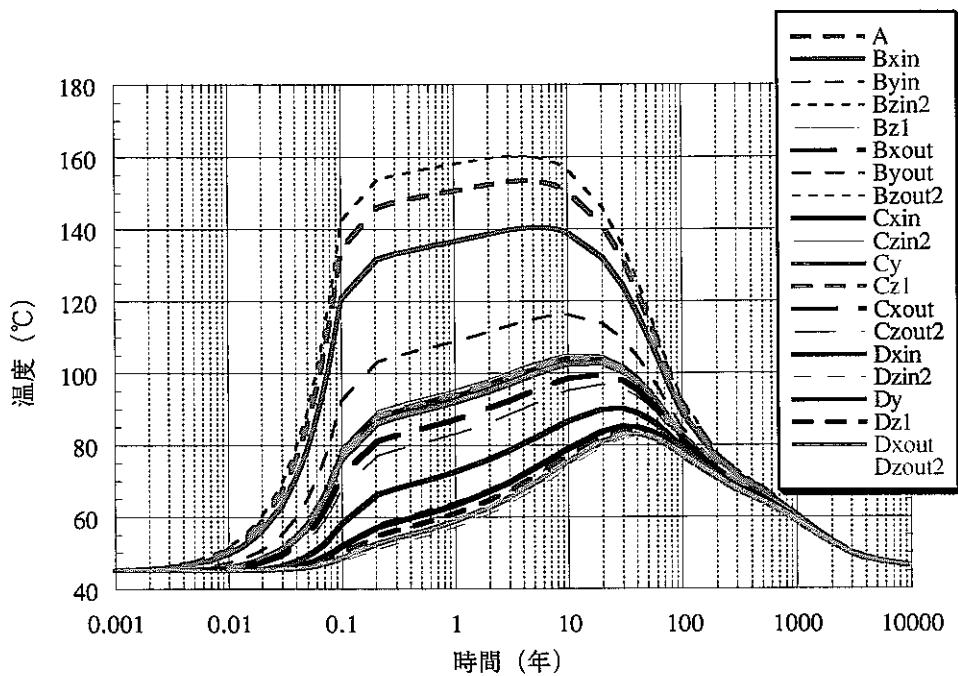


図 3-23-3 温度の経時変化 (隙間モデル, CASE.B)

(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年)

坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

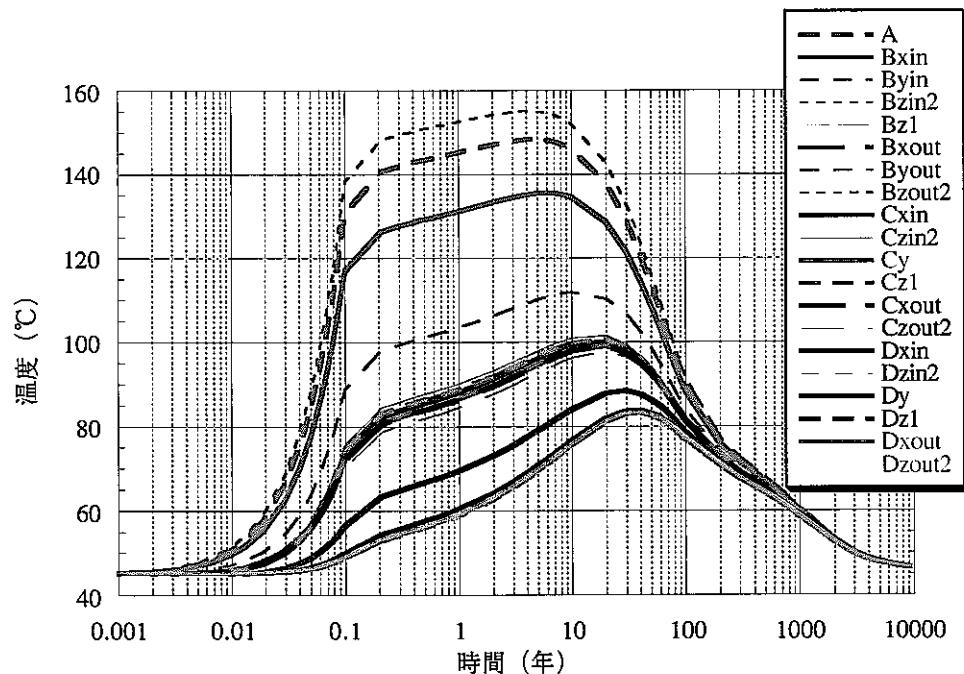


図 3-23-4 温度の経時変化 (隙間モデル, CASE.W)

(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年)

坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

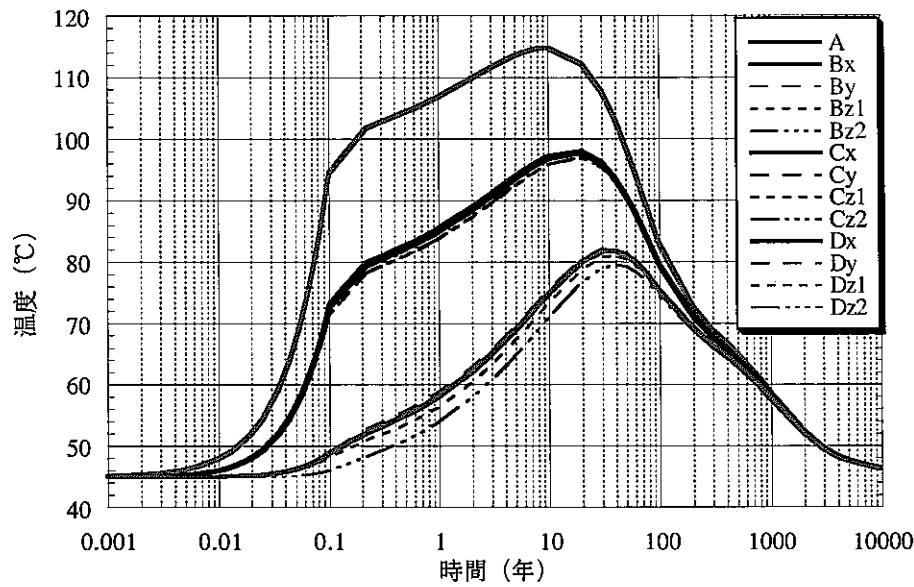


図 3-24-1 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
 (硬岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

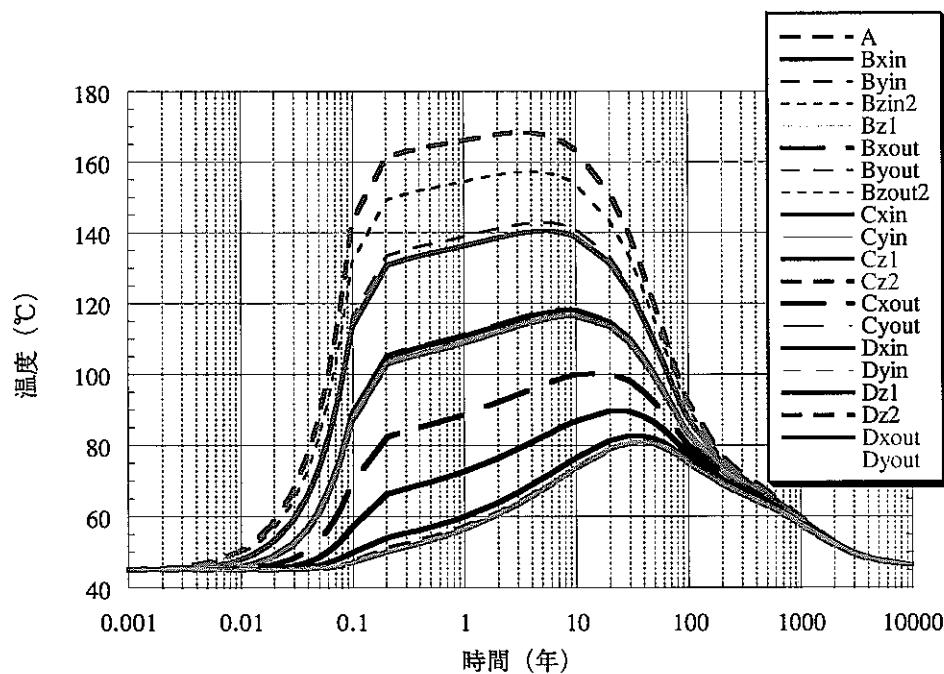


図 3-24-2 溫度の経時変化（隙間モデル, CASE.A）
 (硬岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

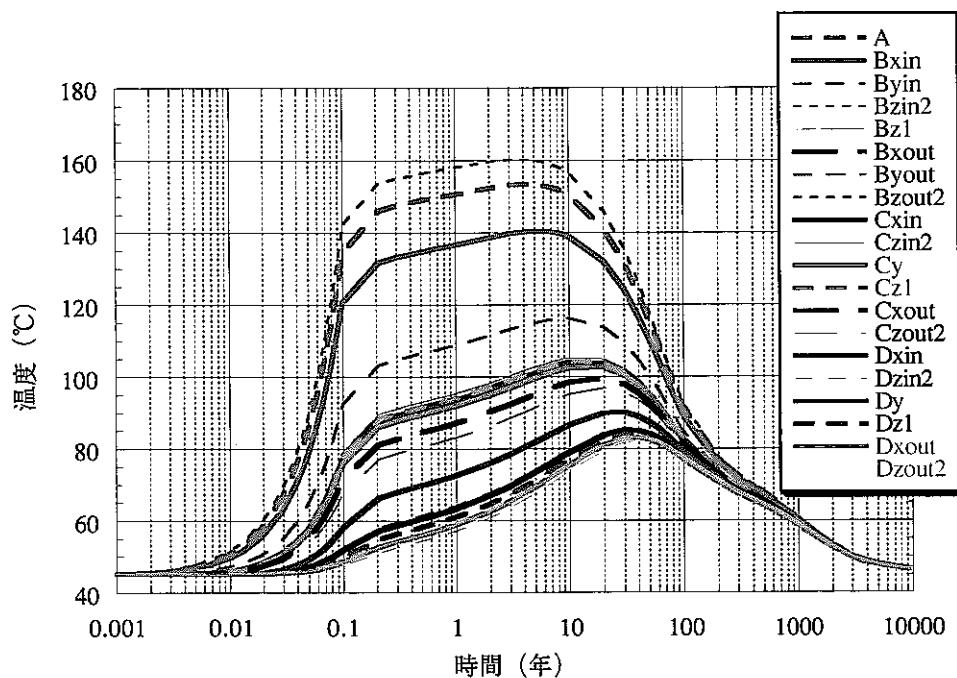


図 3-24-3 溫度の経時変化（隙間モデル，CASE.B）

（硬岩系岩盤，処分孔堅置き方式，中間貯蔵期間 50 年

坑道離間距離 10m(2D)，廃棄体ピッチ 4.44m(2d)，廃棄体専有面積 44.4m²/本）

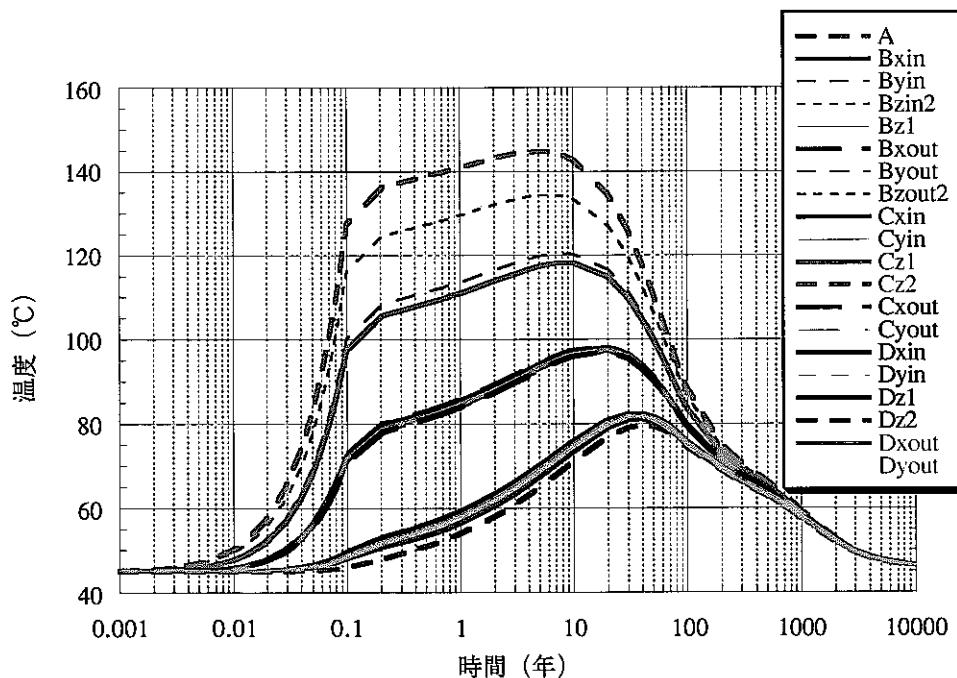


図 3-24-4 溫度の経時変化（隙間モデル，CASE.W）

（硬岩系岩盤，処分孔堅置き方式，中間貯蔵期間 50 年

坑道離間距離 10m(2D)，廃棄体ピッチ 4.44m(2d)，廃棄体専有面積 44.4m²/本）

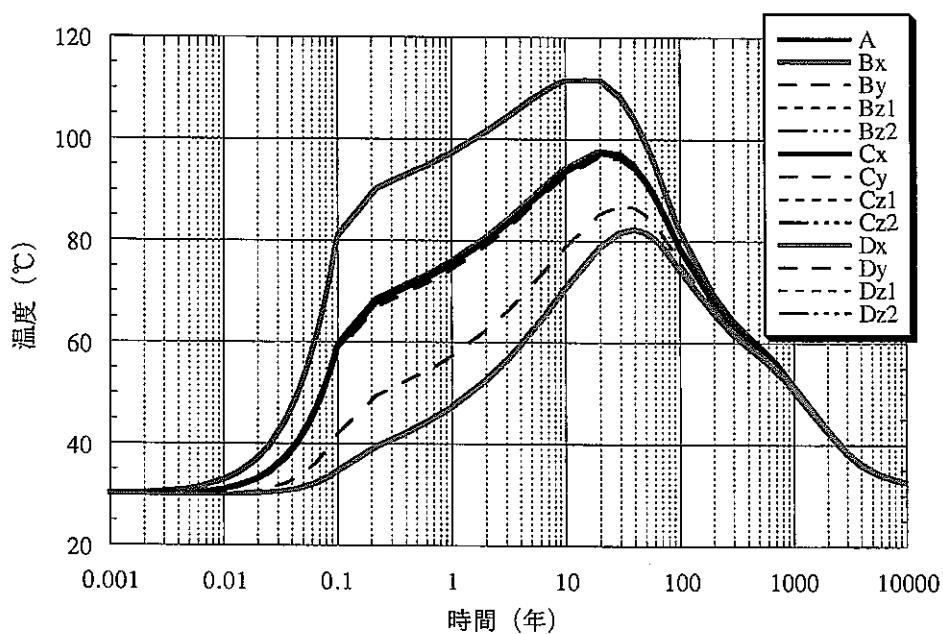


図 3-25-1 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

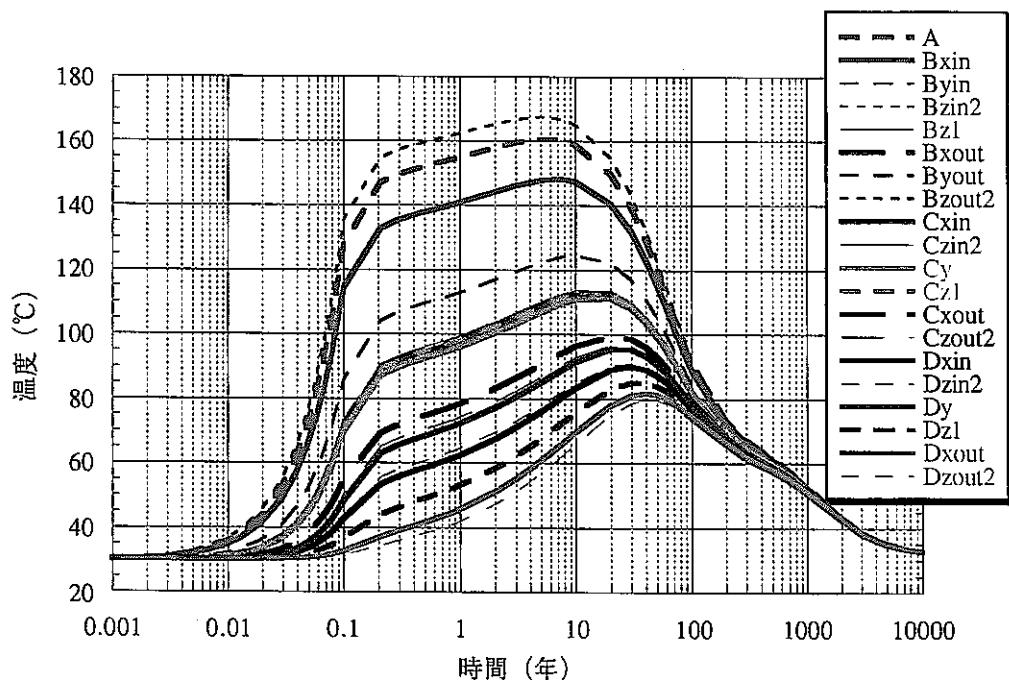


図 3-25-2 溫度の経時変化（隙間モデル, CASE.A）
(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

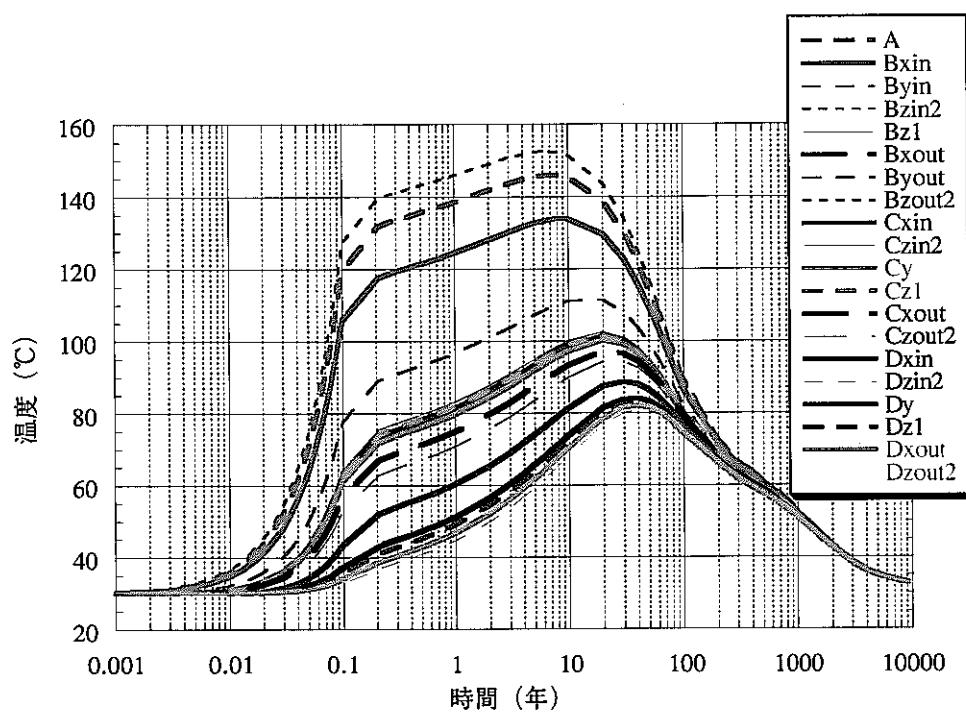


図 3-25-3 溫度の経時変化（隙間モデル, CASE.B）
 (軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

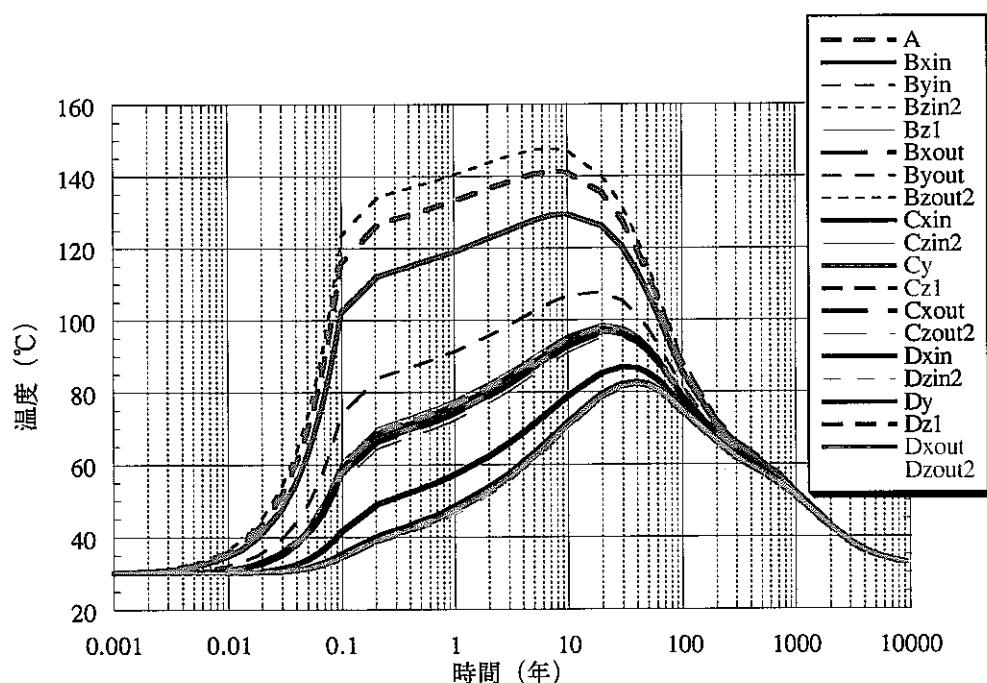


図 3-25-4 溫度の経時変化（隙間モデル, CASE.W）
 (軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

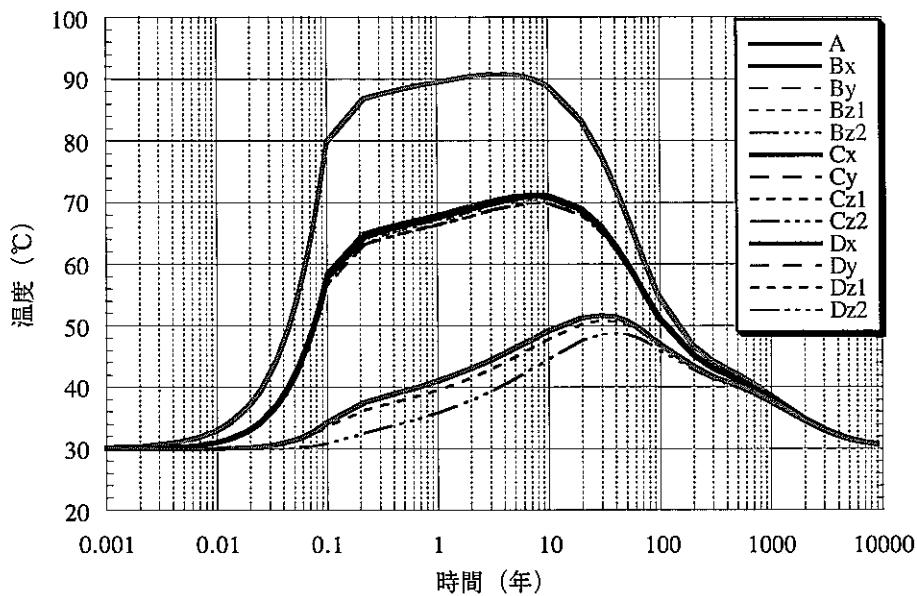


図 3-26-1 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
 (軟岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

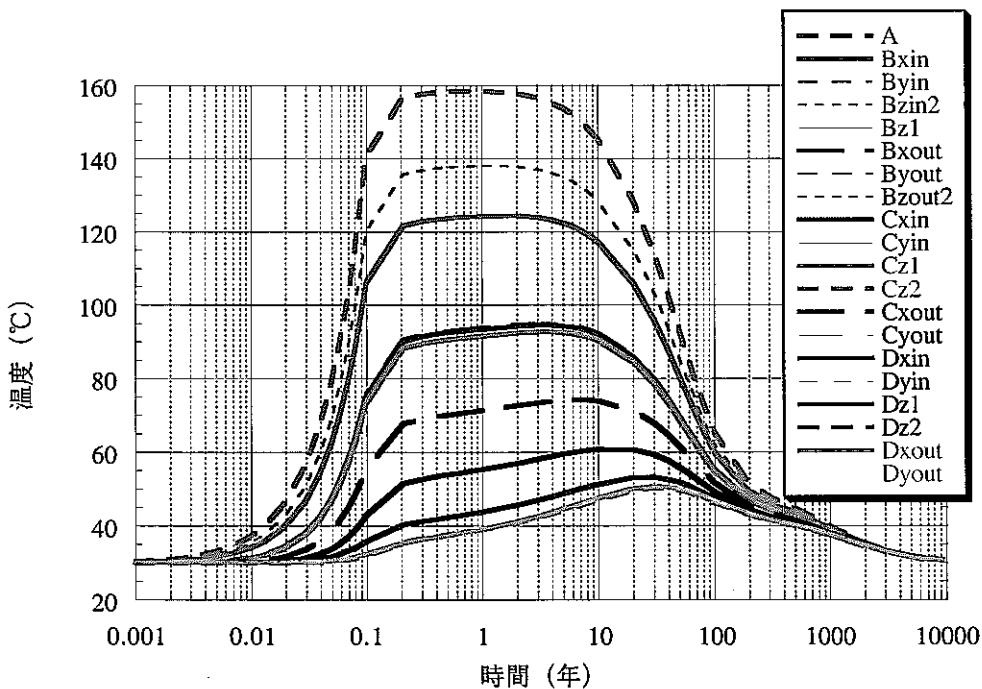


図 3-26-2 溫度の経時変化（隙間モデル, CASE.A）
 (軟岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
 坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

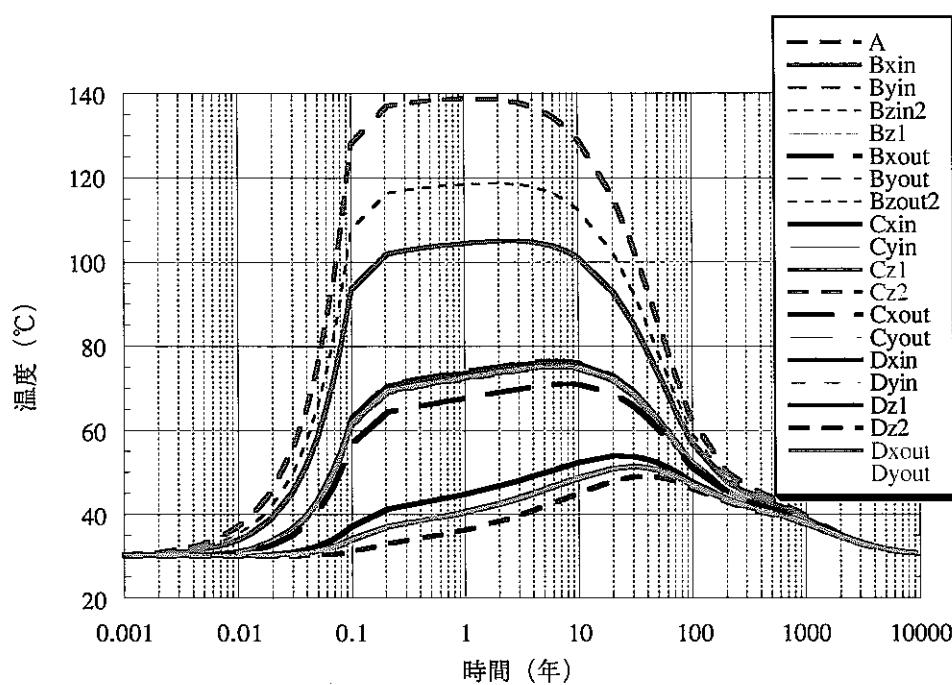


図 3-26-3 温度の経時変化（隙間モデル, CASE.B）

(軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 50 年)

坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

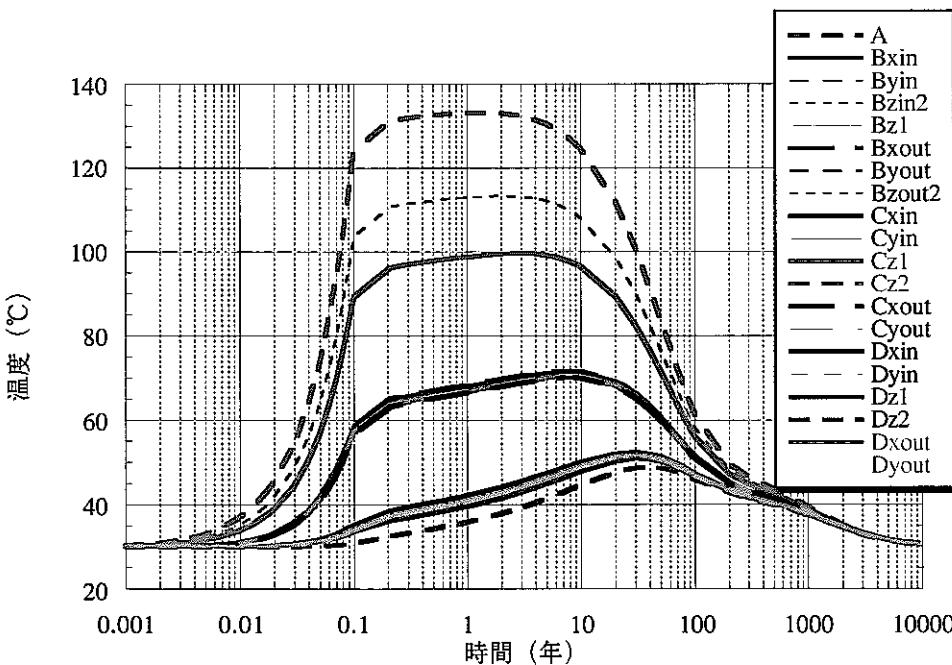


図 3-26-4 温度の経時変化（隙間モデル, CASE.W）

(軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 50 年)

坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

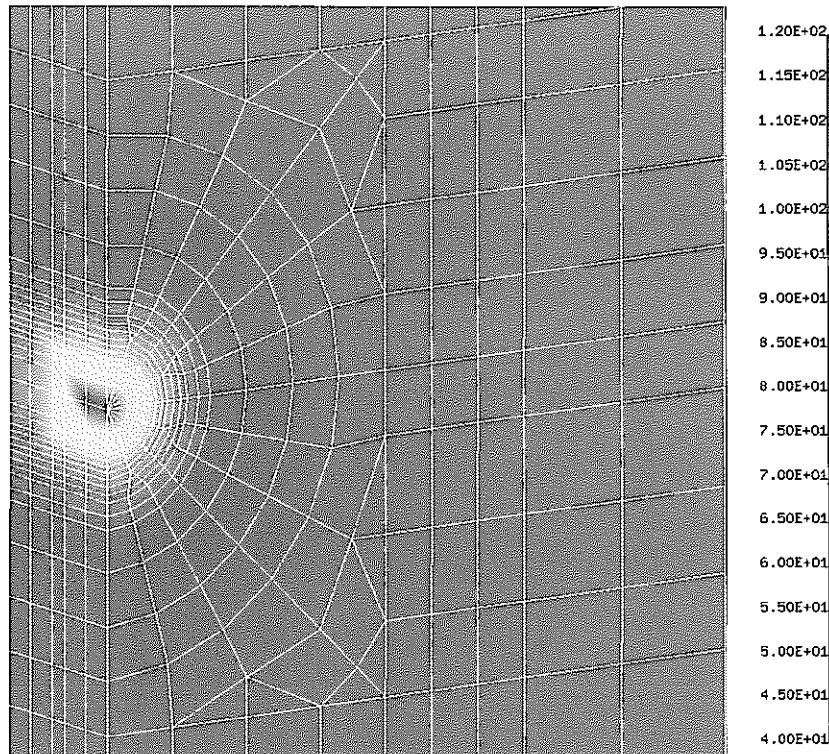


図 3-27-1 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

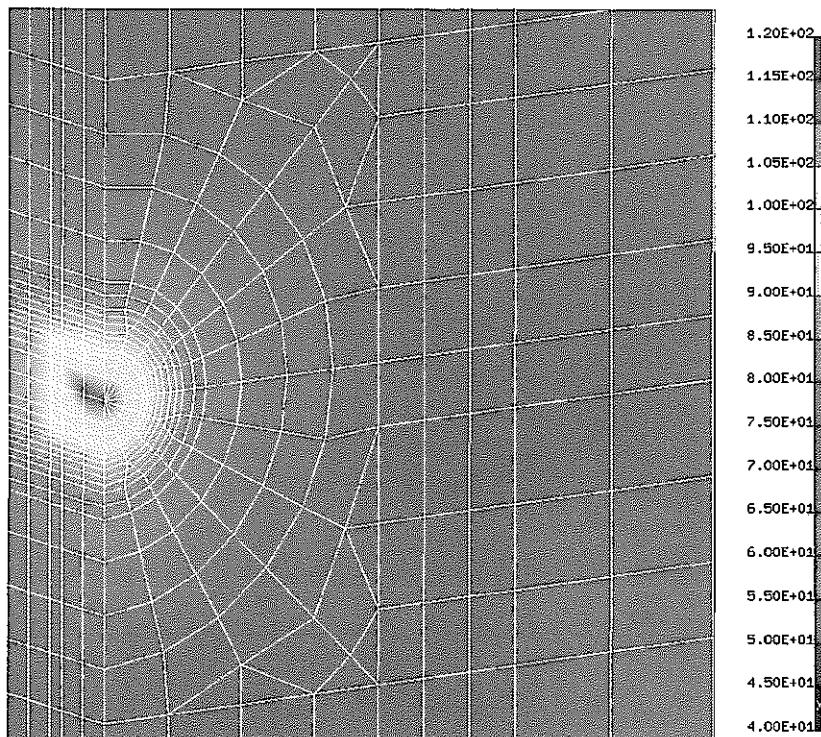


図 3-27-2 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

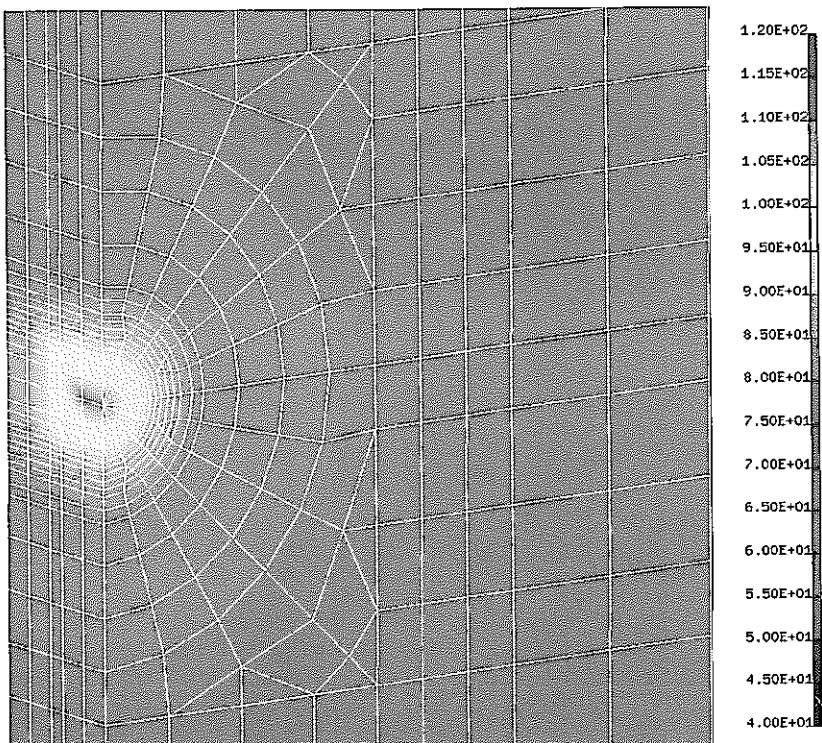


図 3-27-3 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：30 年）
(隙間なしモデル、硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D)、廃棄体ピッチ 3.13m、廃棄体専有面積 41.69m²/本)

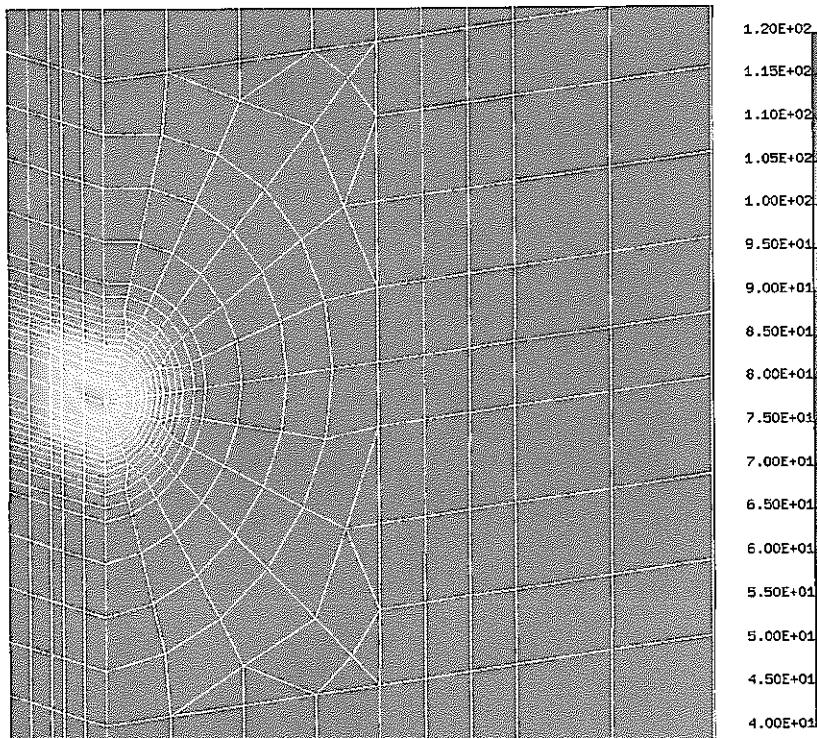


図 3-27-4 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：40 年）
(隙間なしモデル、硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D)、廃棄体ピッチ 3.13m、廃棄体専有面積 41.69m²/本)

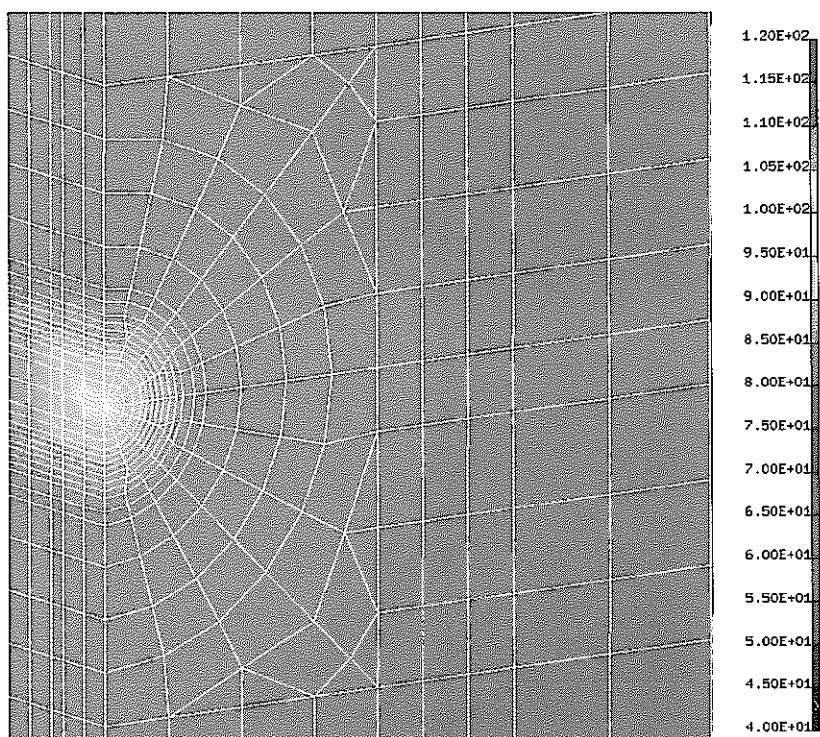


図 3-27-5 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：50 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

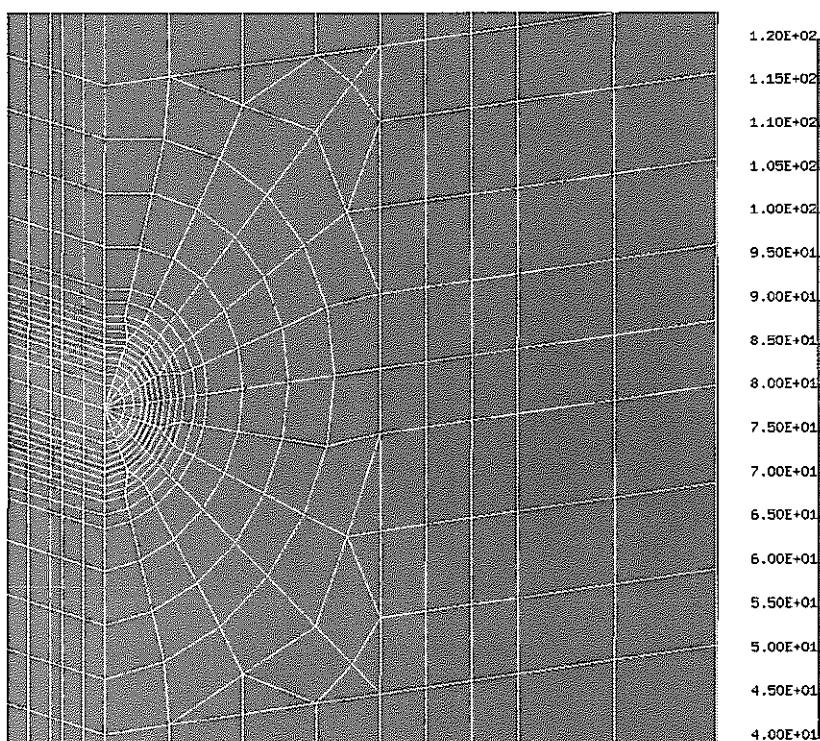


図 3-27-6 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：100 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

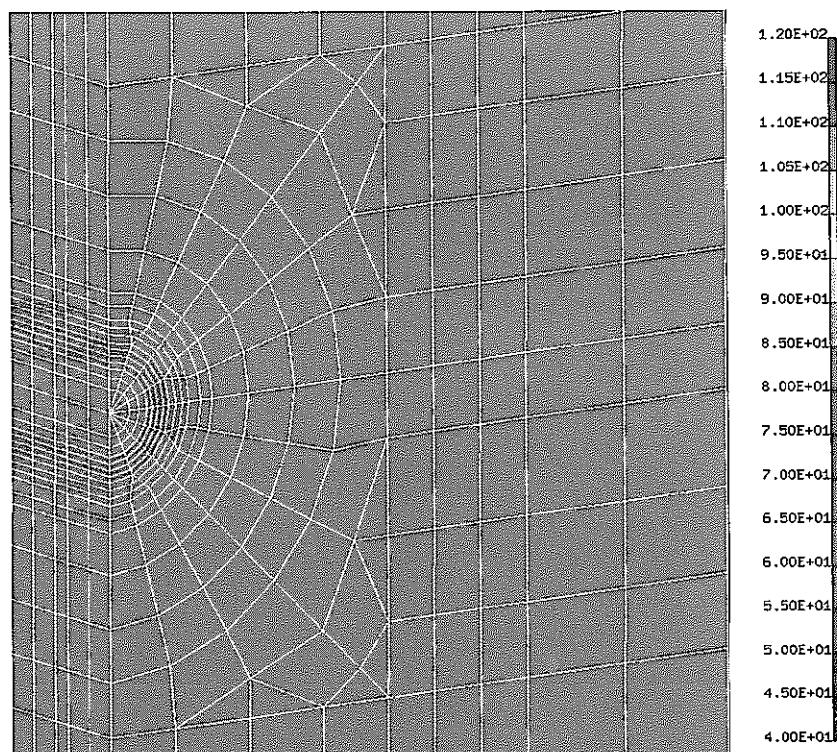


図 3-27-7 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：1000 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

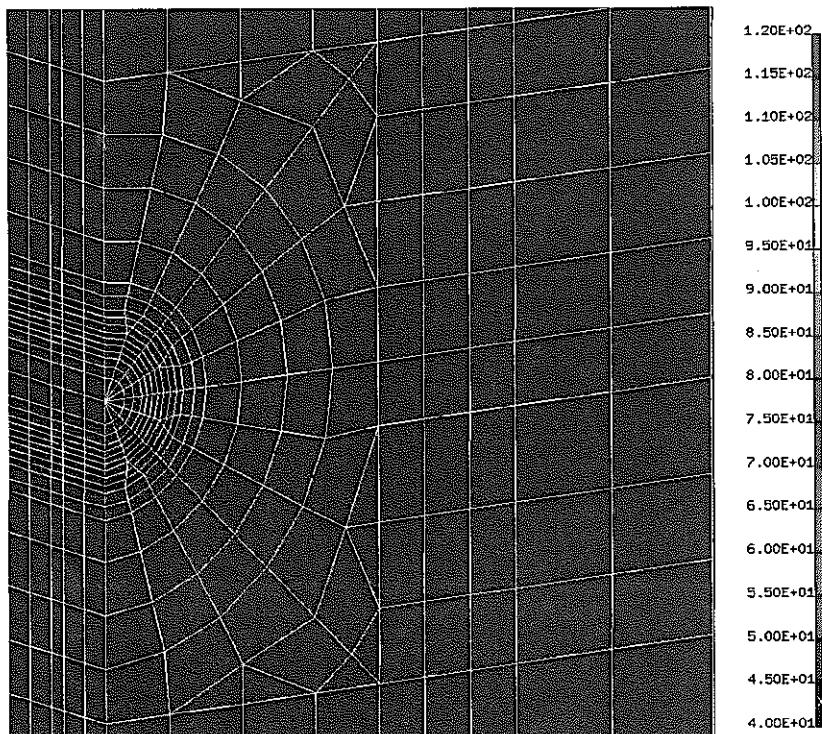


図 3-27-8 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：10000 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

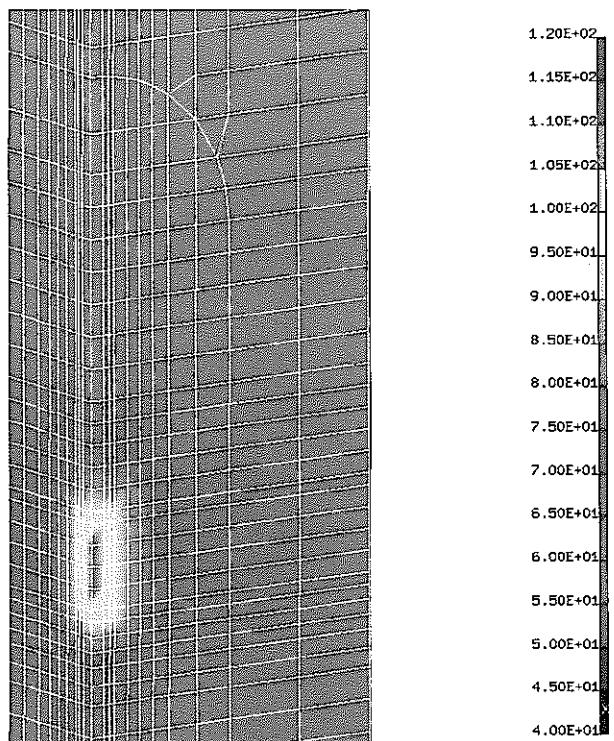


図 3-28-1 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

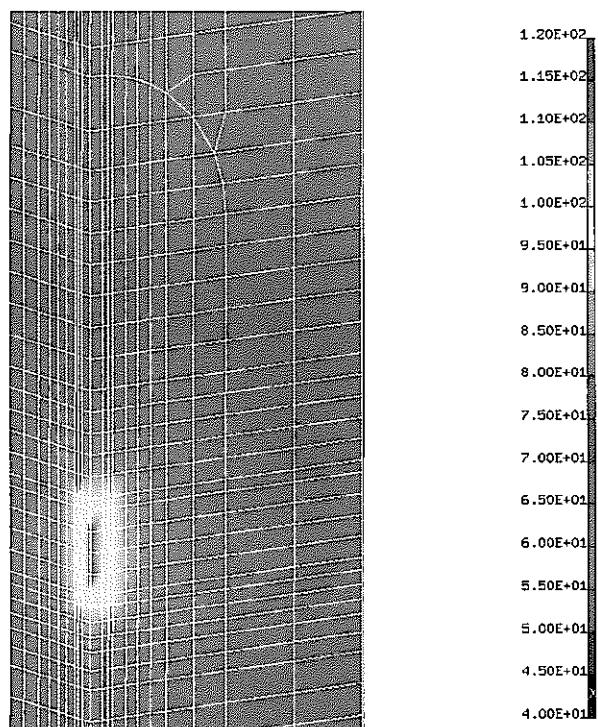


図 3-28-2 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

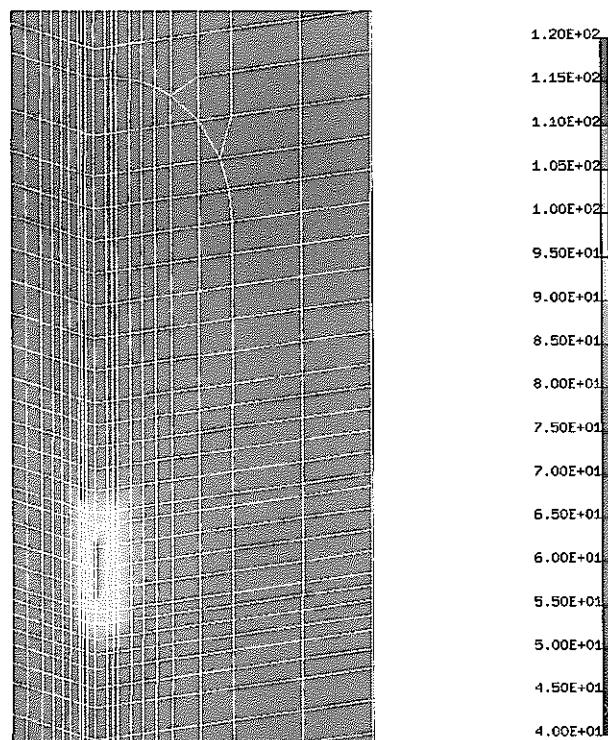


図 3-28-3 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：30 年）
（隙間なしモデル、硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D)、廃棄体ピッチ 4.44m(2d)、廃棄体専有面積 44.4m²/本）

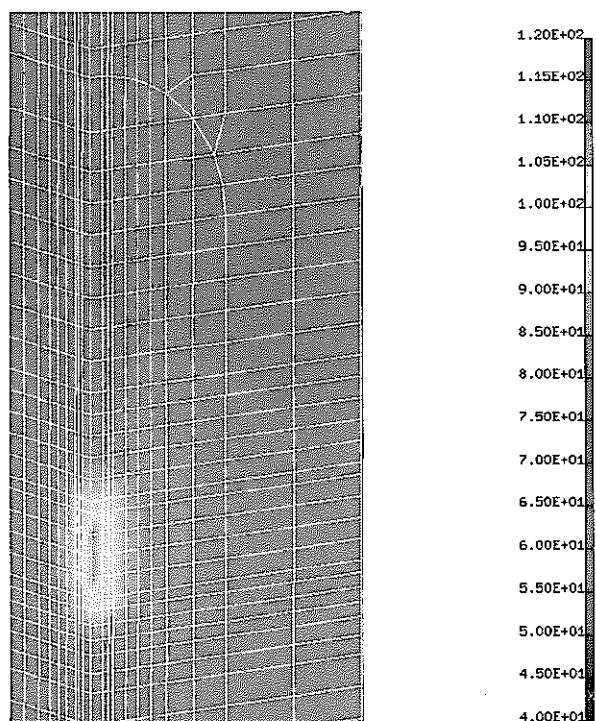


図 3-28-4 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：40 年）
（隙間なしモデル、硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D)、廃棄体ピッチ 4.44m(2d)、廃棄体専有面積 44.4m²/本）

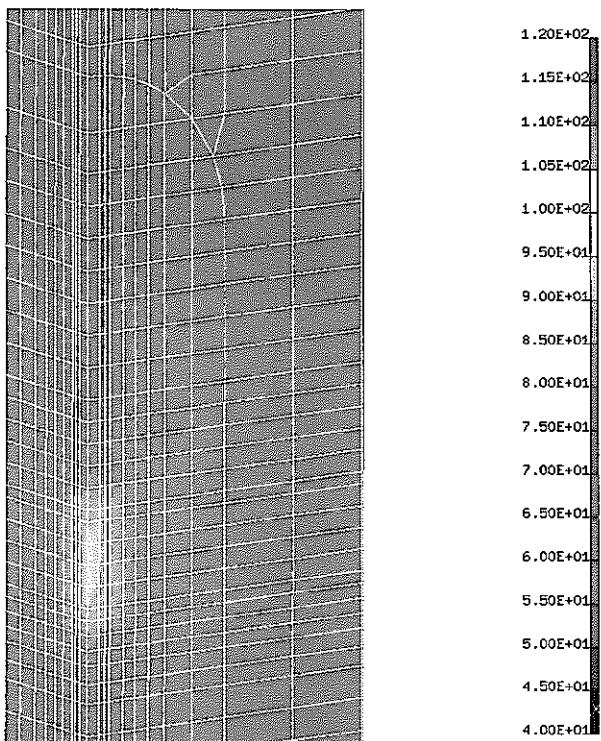


図 3-28-5 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：50 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

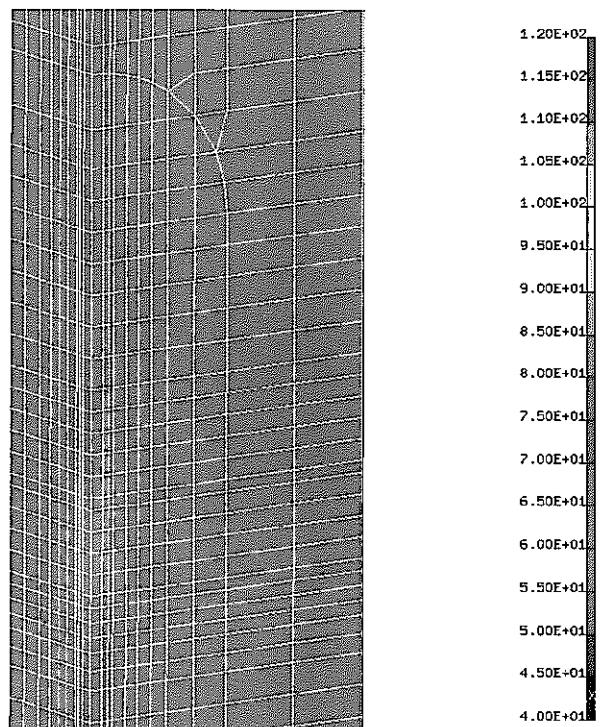


図 3-28-6 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：100 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

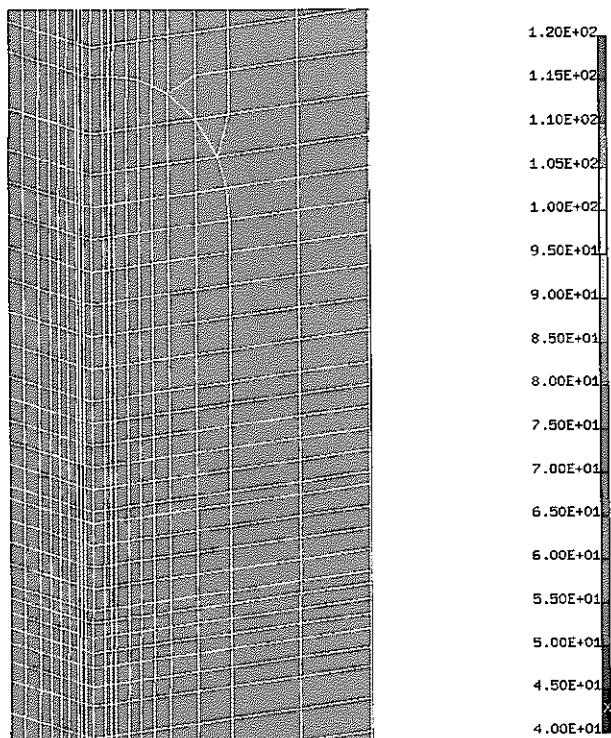


図 3-28-7 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：1000 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

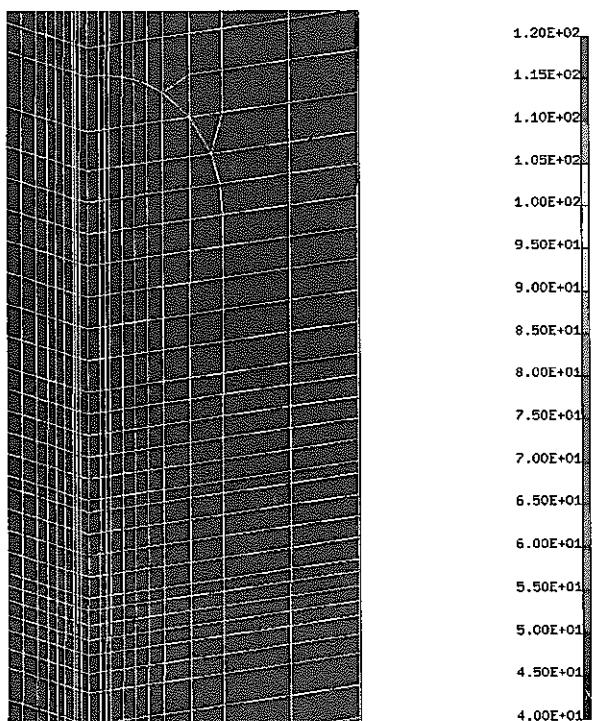


図 3-28-8 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10000 年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

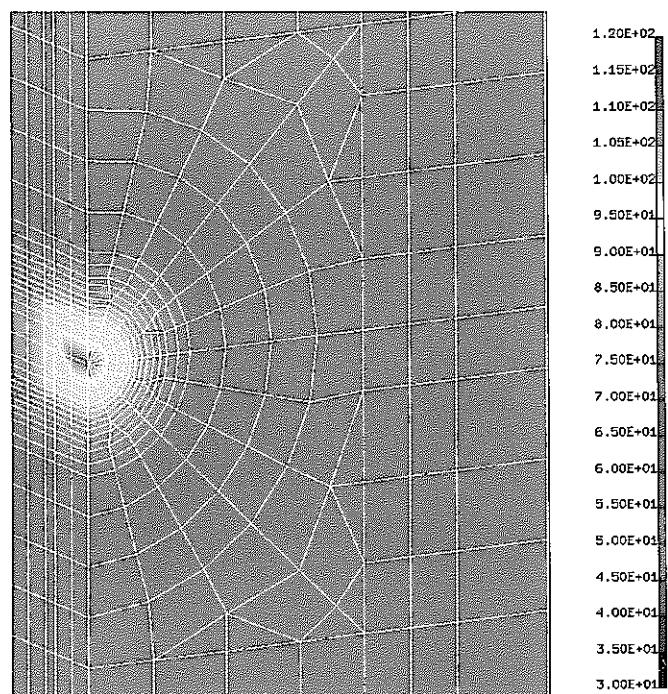


図 3-29-1 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

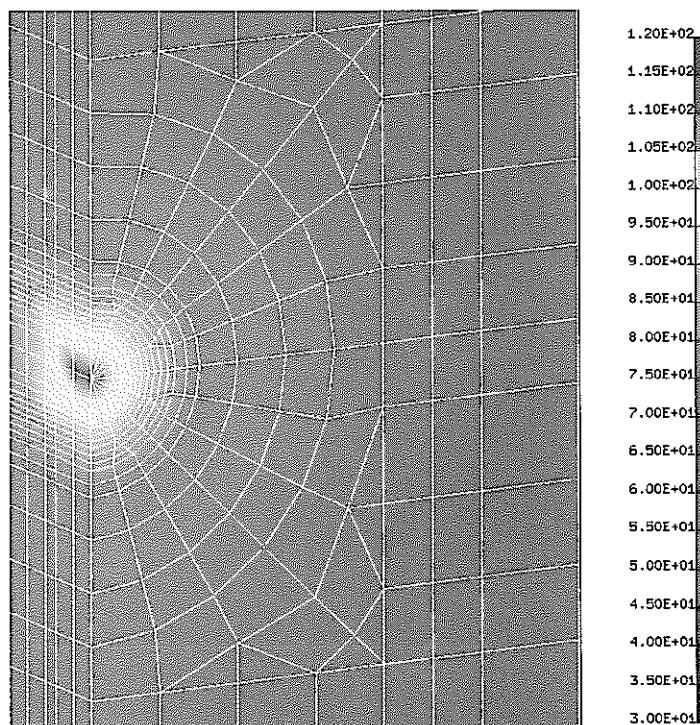


図 3-29-2 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

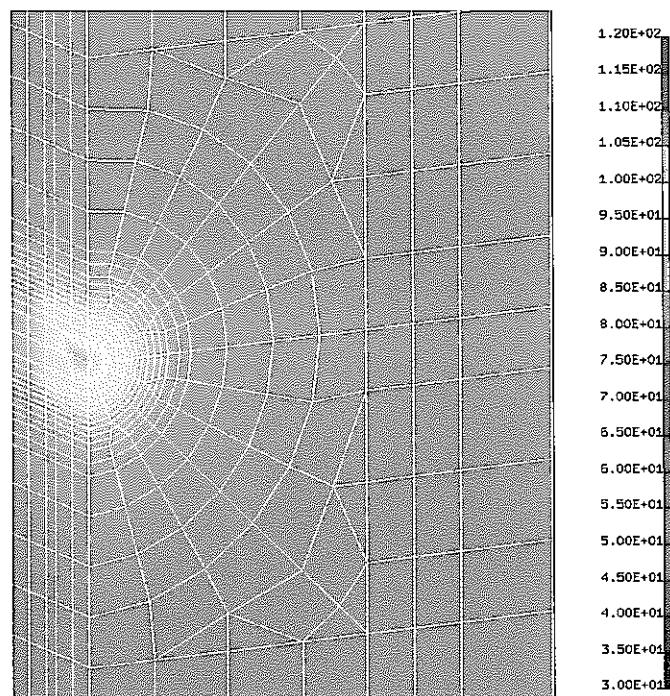


図 3-29-3 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：30 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

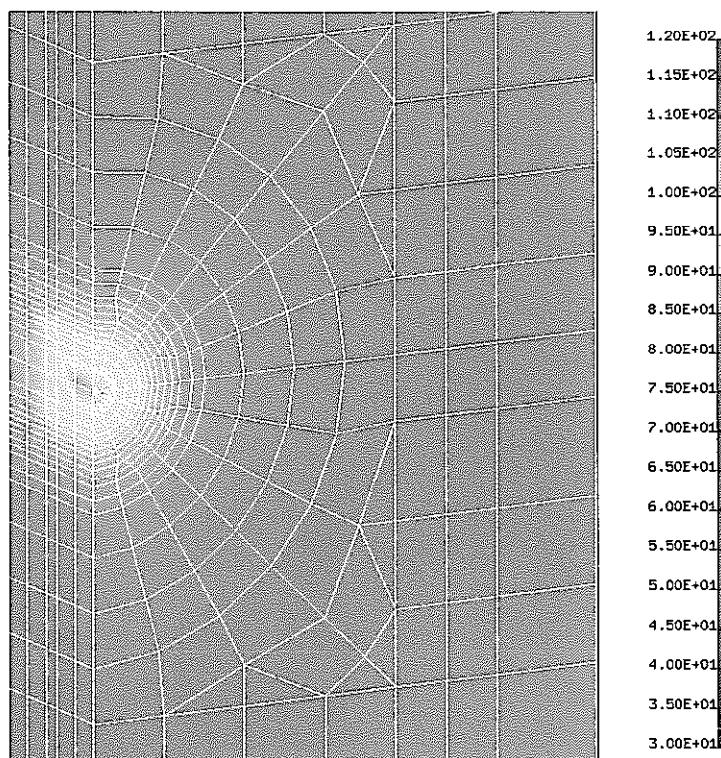


図 3-29-4 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：40 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

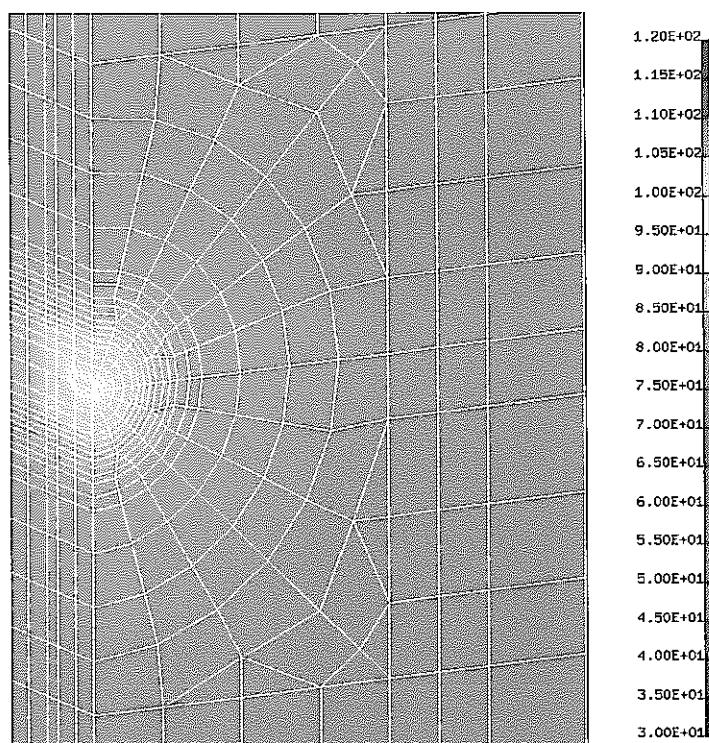


図 3-29-5 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：50 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

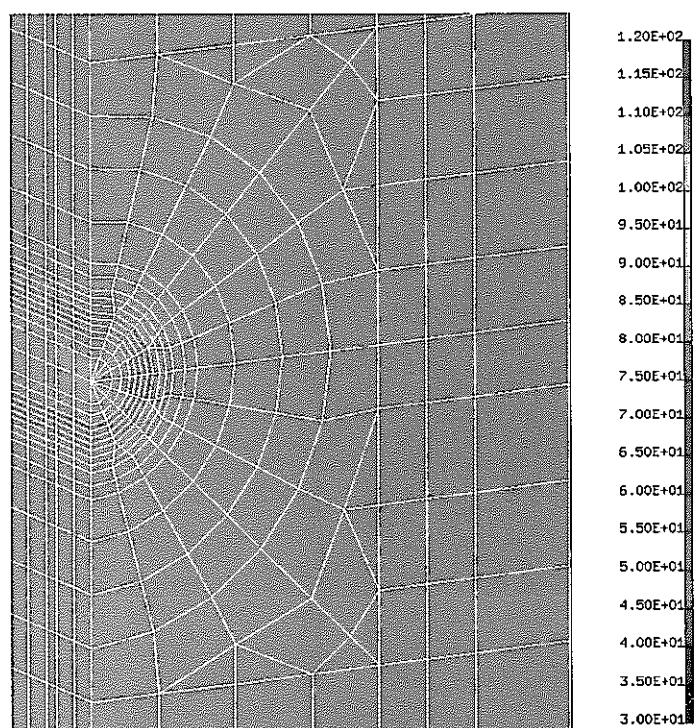


図 3-29-6 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：100 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

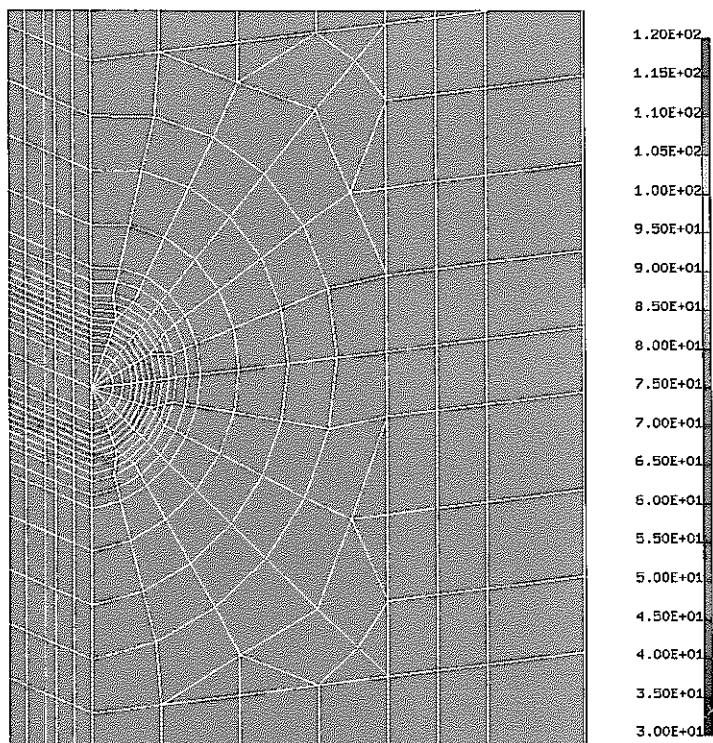


図 3-29-7 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：1000 年）
(隙間なしモデル、軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

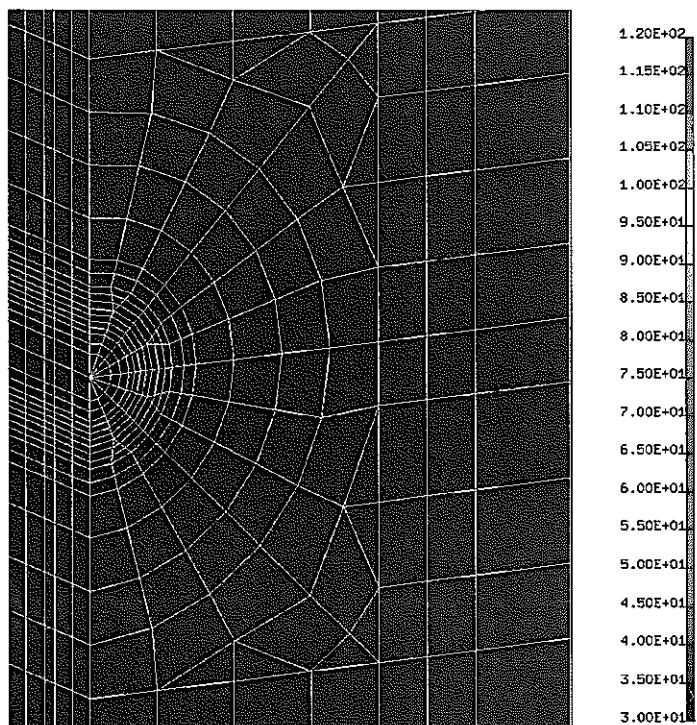


図 3-29-8 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10000 年）
(隙間なしモデル、軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

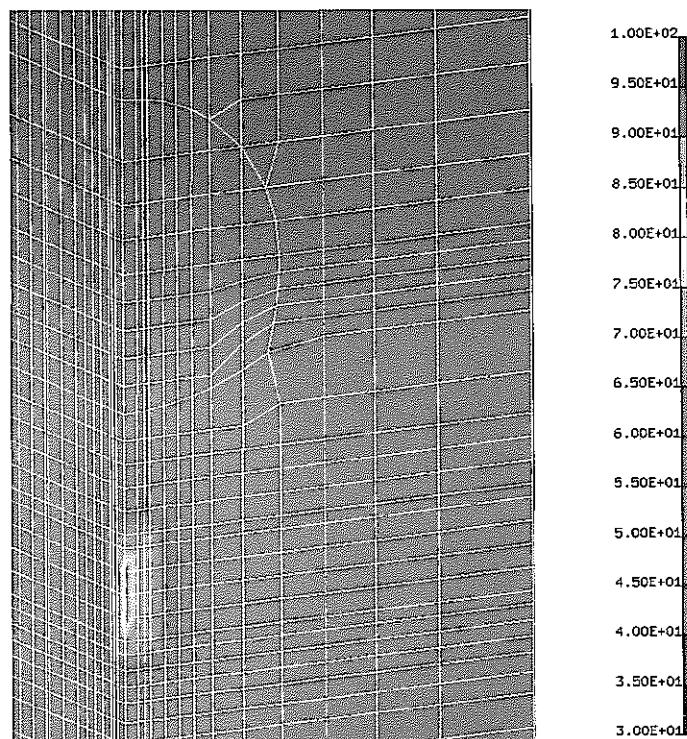


図 3-30-1 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

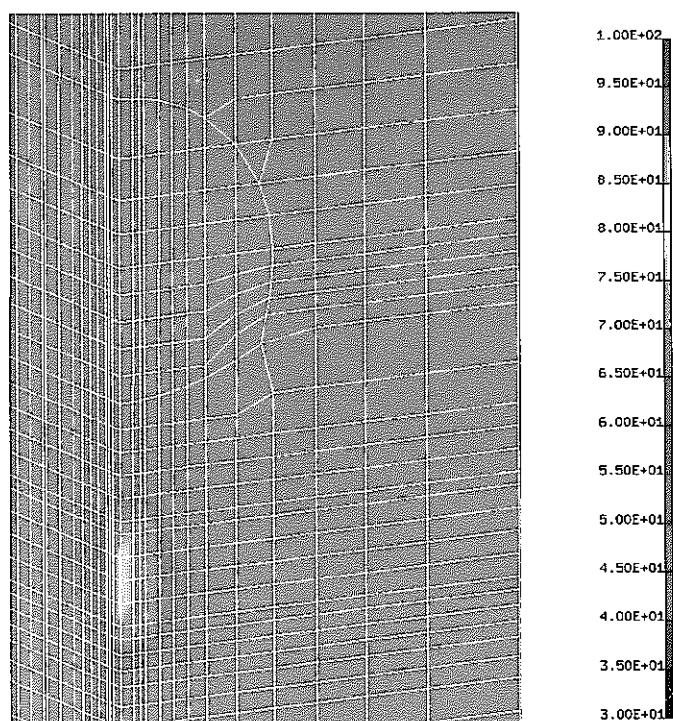


図 3-30-2 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.A, 軟岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

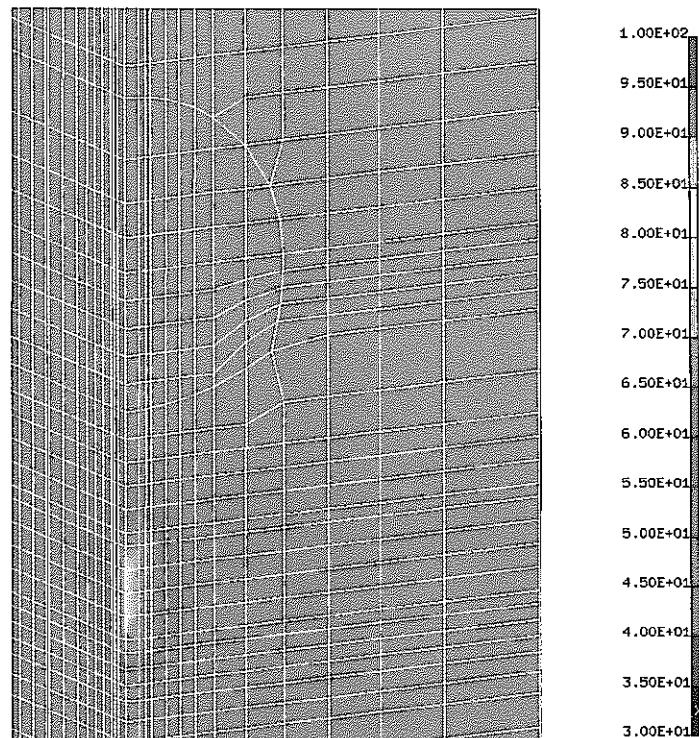


図 3-30-3 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：30 年）
(隙間モデル：CASE.B, 軟岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

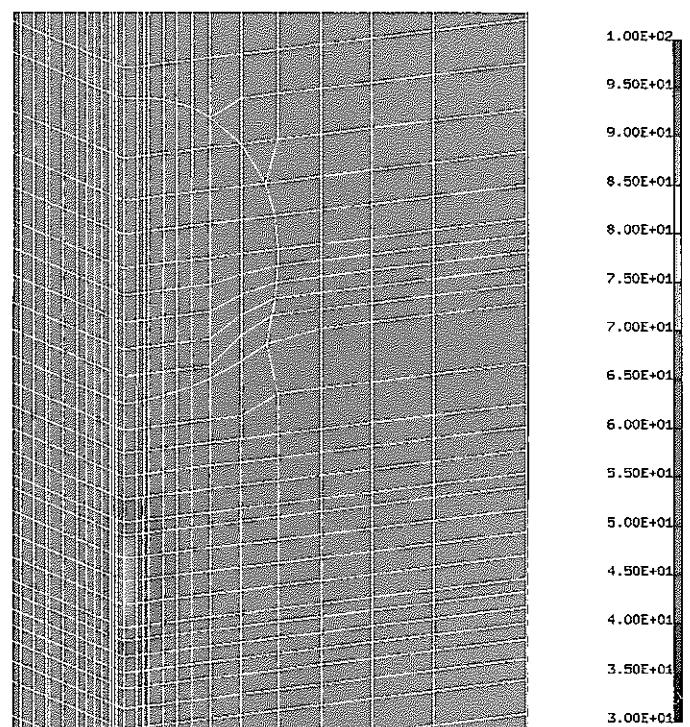


図 3-30-4 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：40 年）
(隙間モデル：CASE.W, 軟岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

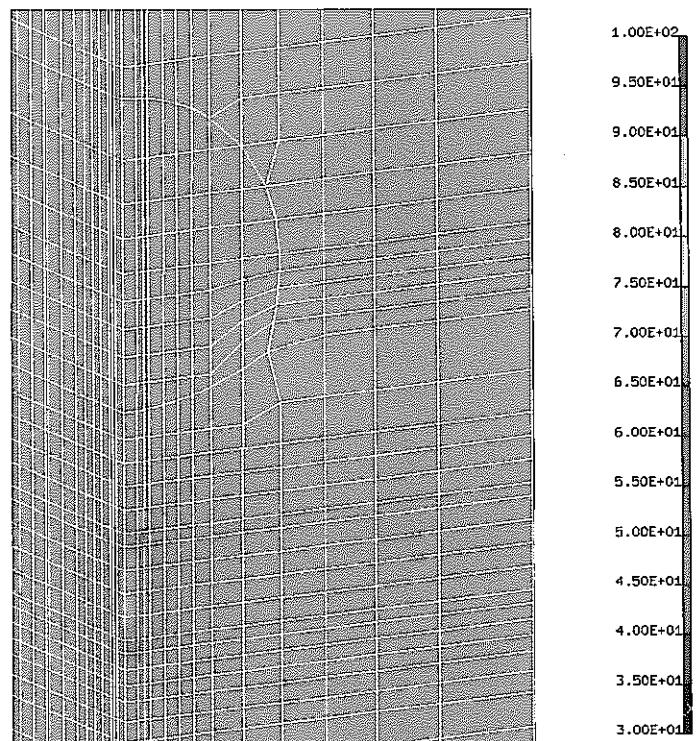


図 3-30-5 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：50 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

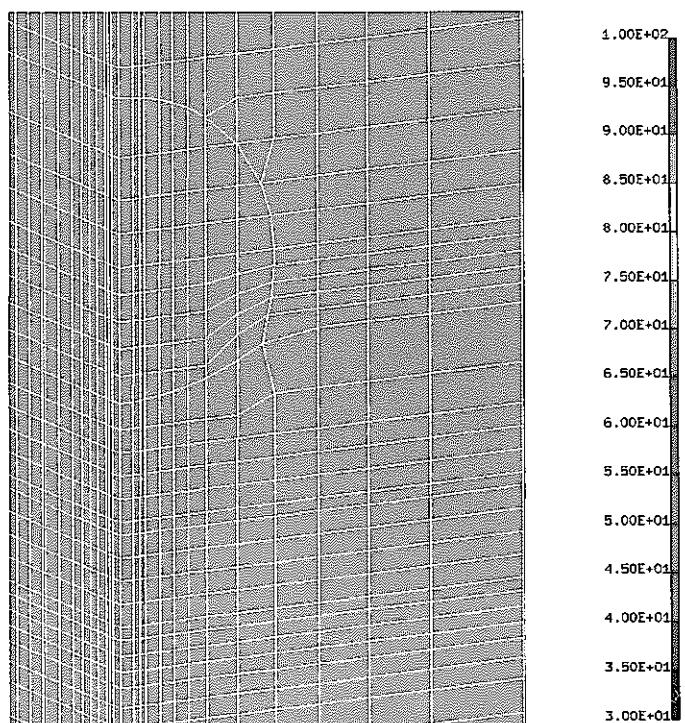


図 3-30-6 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：100 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分孔豎置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

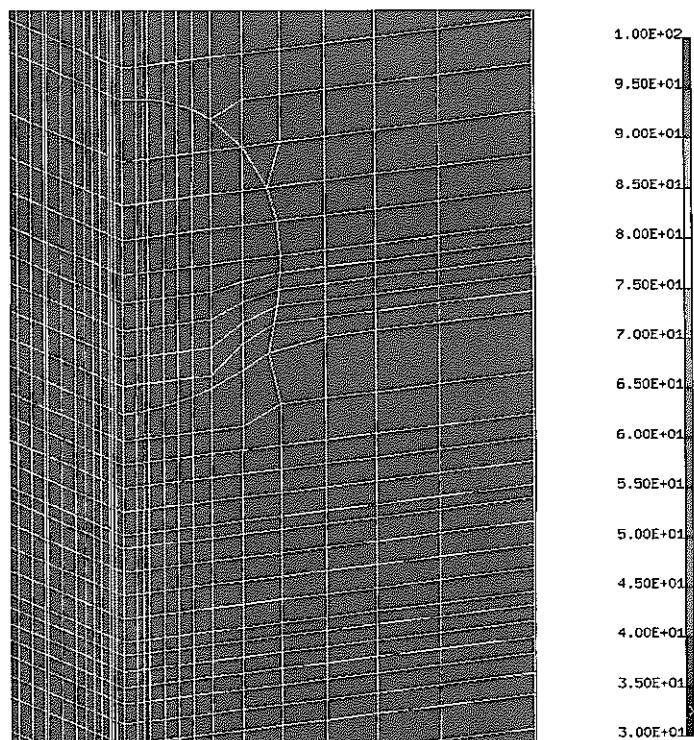


図 3-30-7 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：1000 年）
（隙間なしモデル、軟岩系岩盤、処分孔豎置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D)、廃棄体ピッチ 6.66m(3d)、廃棄体専有面積 86.58m²/本）

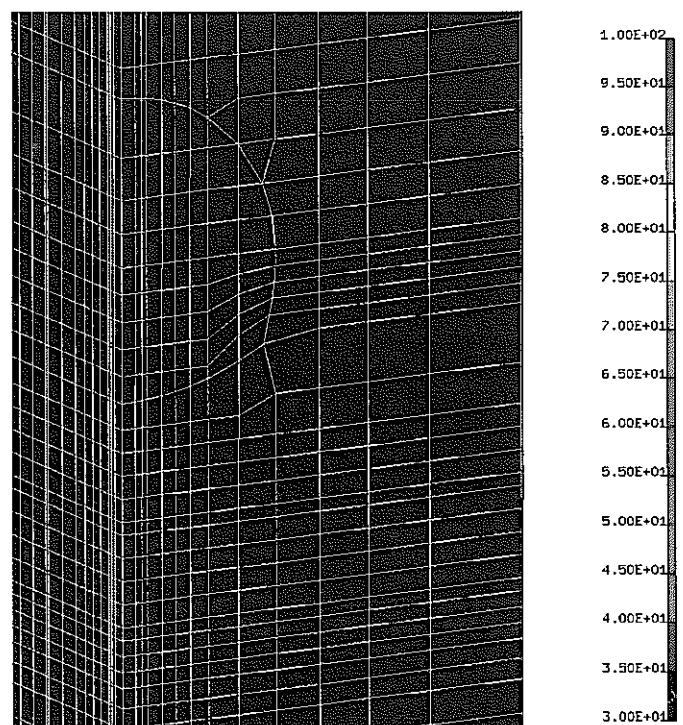


図 3-30-8 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10000 年）
（隙間なしモデル、軟岩系岩盤、処分孔豎置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D)、廃棄体ピッチ 6.66m(3d)、廃棄体専有面積 86.58m²/本）

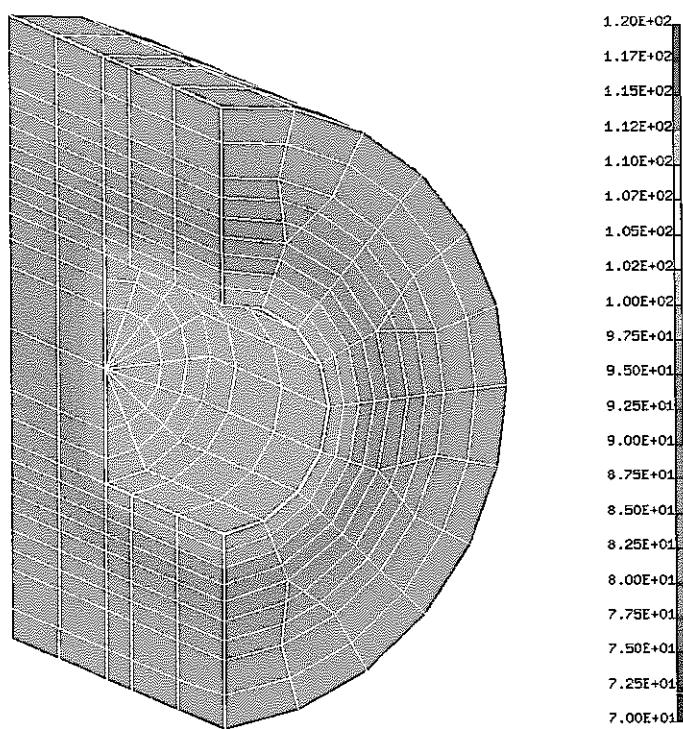


図 3-31-1 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20年）
(隙間なしモデル, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

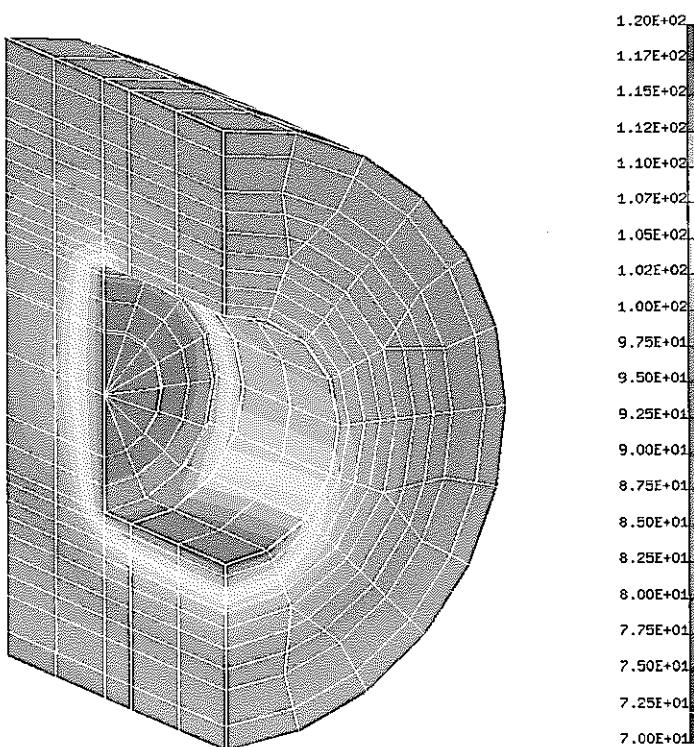


図 3-31-2 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10年）
(隙間モデル：CASE.A, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

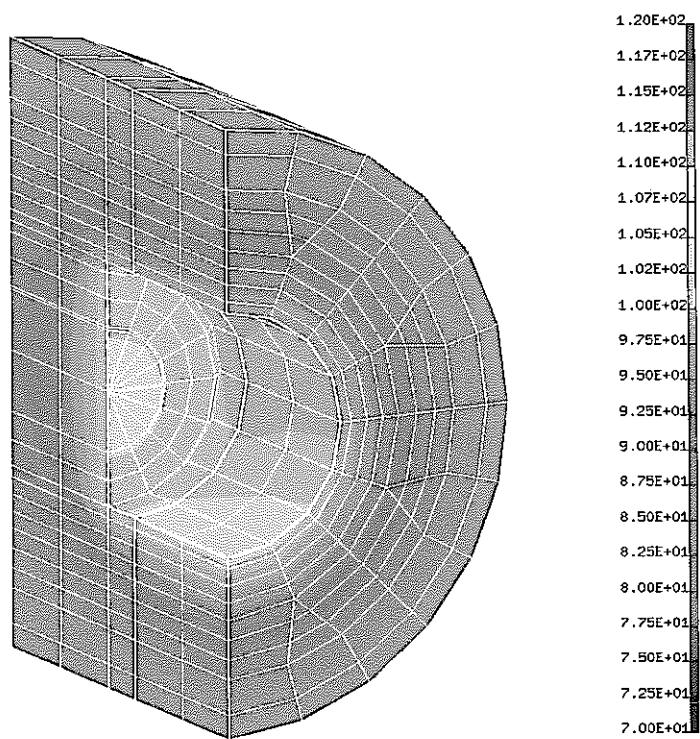


図 3-31-3 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.B, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

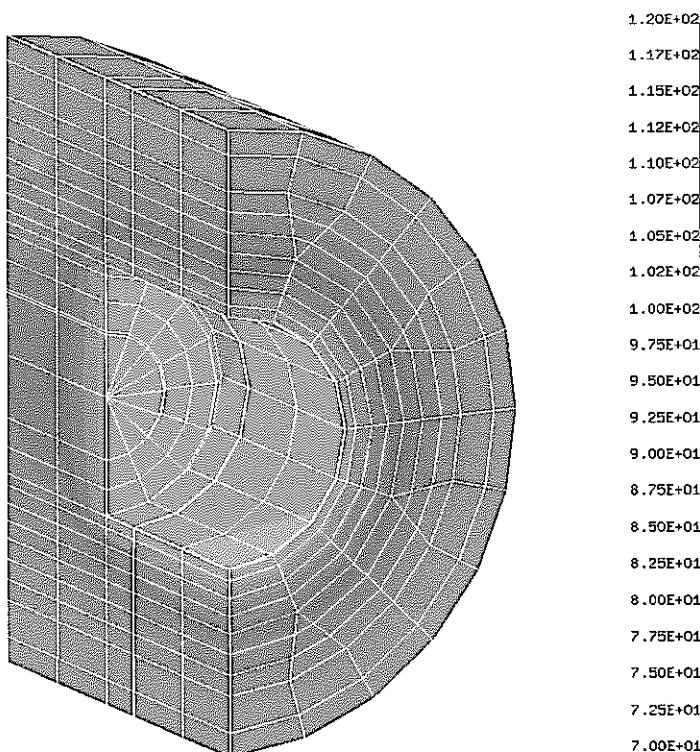


図 3-31-4 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.W, 硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 41.69m²/本)

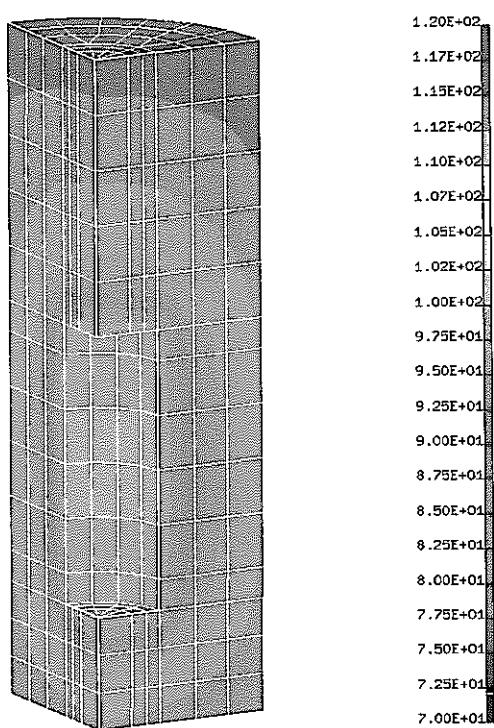


図 3-32-1 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間なしモデル、硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D)、廃棄体ピッチ 4.44m(2d)、廃棄体専有面積 44.4m²/本)

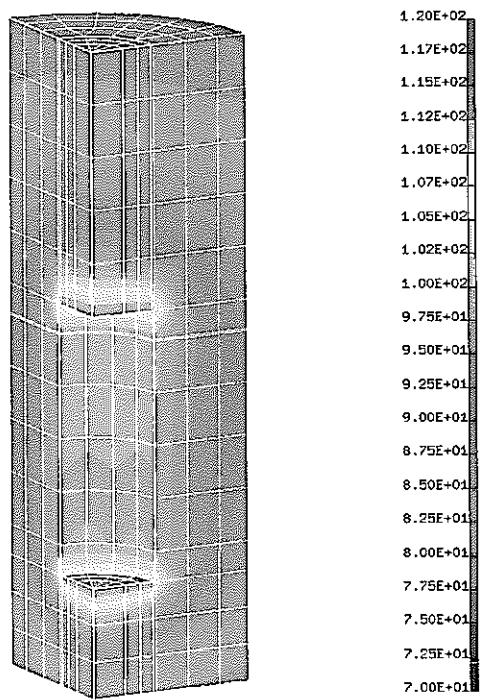


図 3-32-2 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.A、硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D)、廃棄体ピッチ 4.44m(2d)、廃棄体専有面積 44.4m²/本)

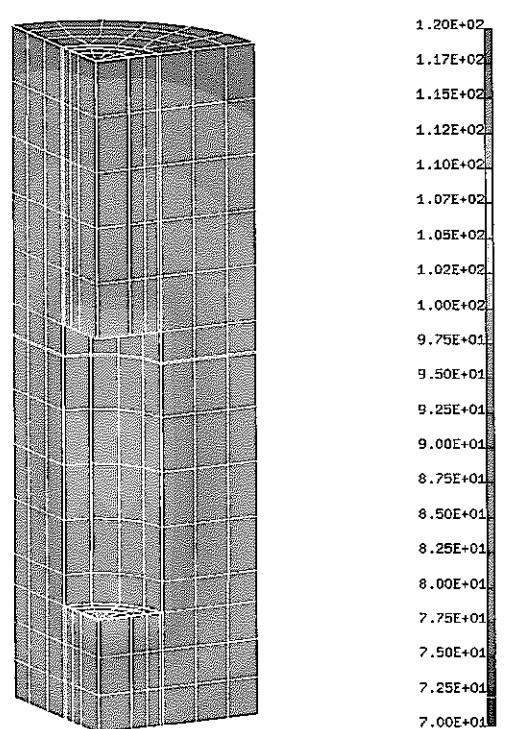


図 3-32-3 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.B, 硬岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

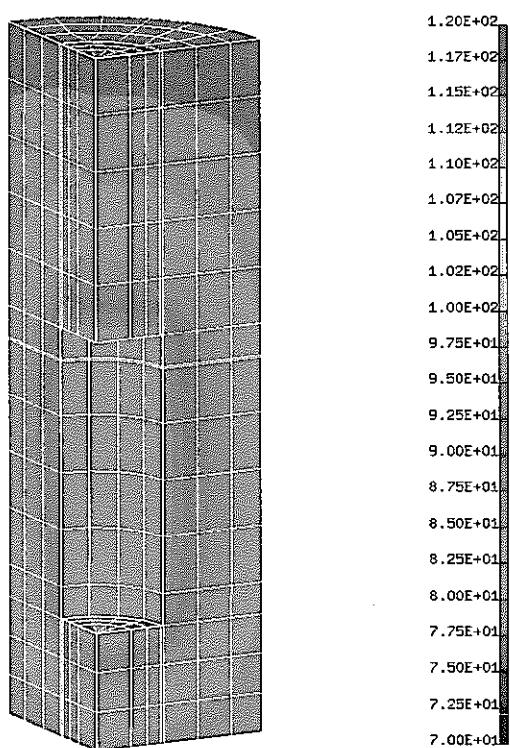


図 3-32-4 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.W, 硬岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 4.44m(2d), 廃棄体専有面積 44.4m²/本)

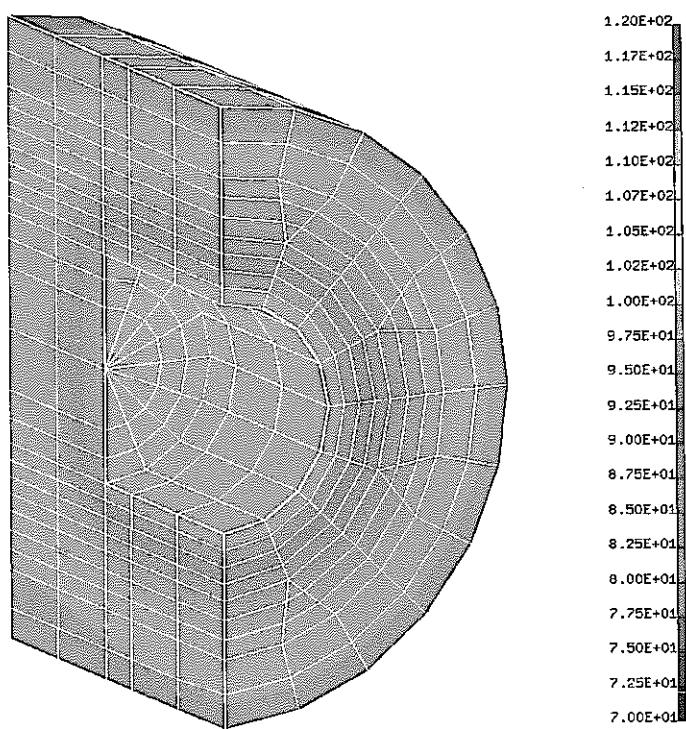


図 3-33-1 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

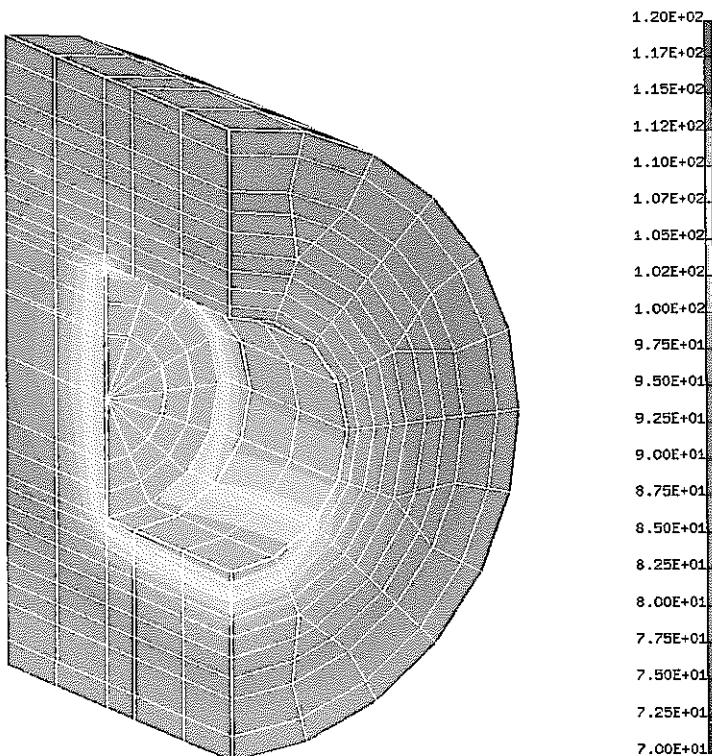


図 3-33-2 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.A, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

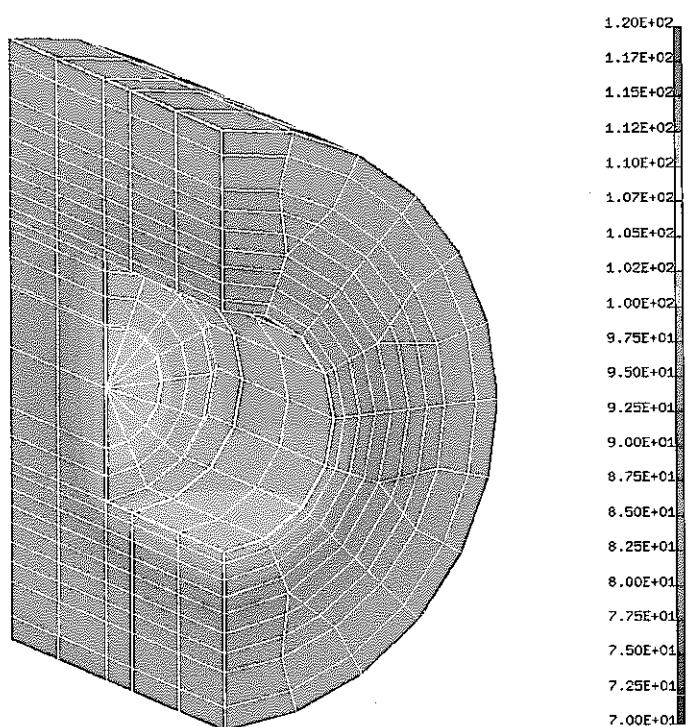


図 3-33-3 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.B, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

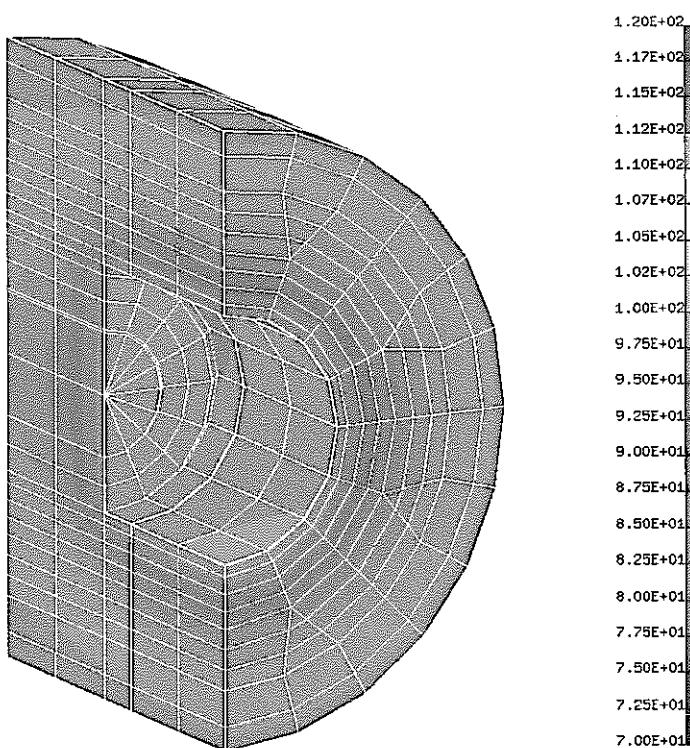


図 3-33-4 ニアフィールドの温度分布センター（廃棄体定置後：20 年）
(隙間モデル：CASE.W, 軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 3.13m, 廃棄体専有面積 31.27m²/本)

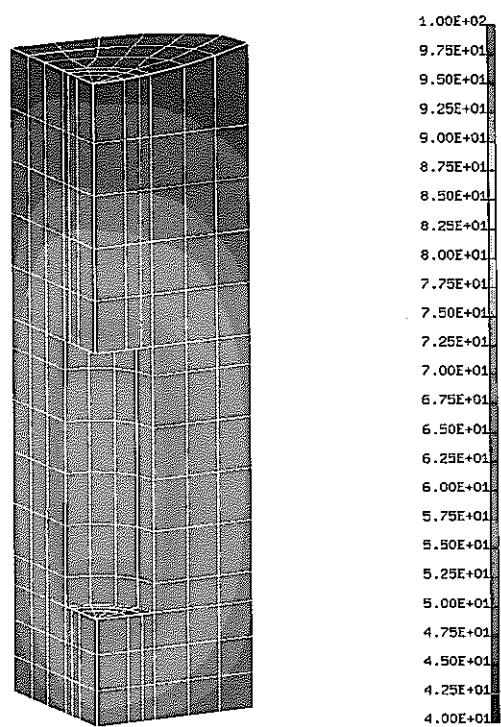


図 3-34-1 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間なしモデル, 軟岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

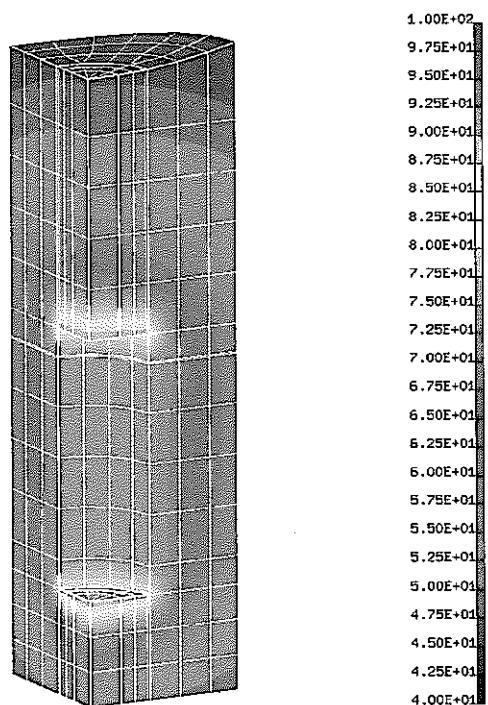


図 3-34-2 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間モデル：CASE.A, 軟岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

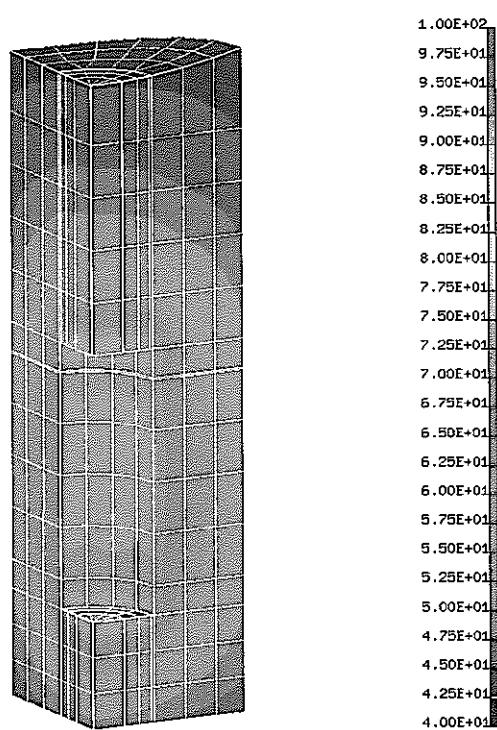


図 3-34-3 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間モデル：CASE.B, 軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

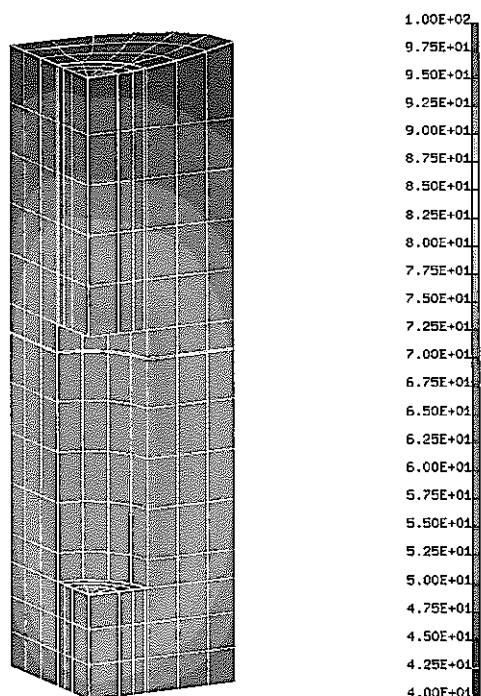


図 3-34-4 ニアフィールドの温度分布コンター（廃棄体定置後：10 年）
(隙間モデル：CASE.W, 軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 50 年
坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 6.66m(3d), 廃棄体専有面積 86.58m²/本)

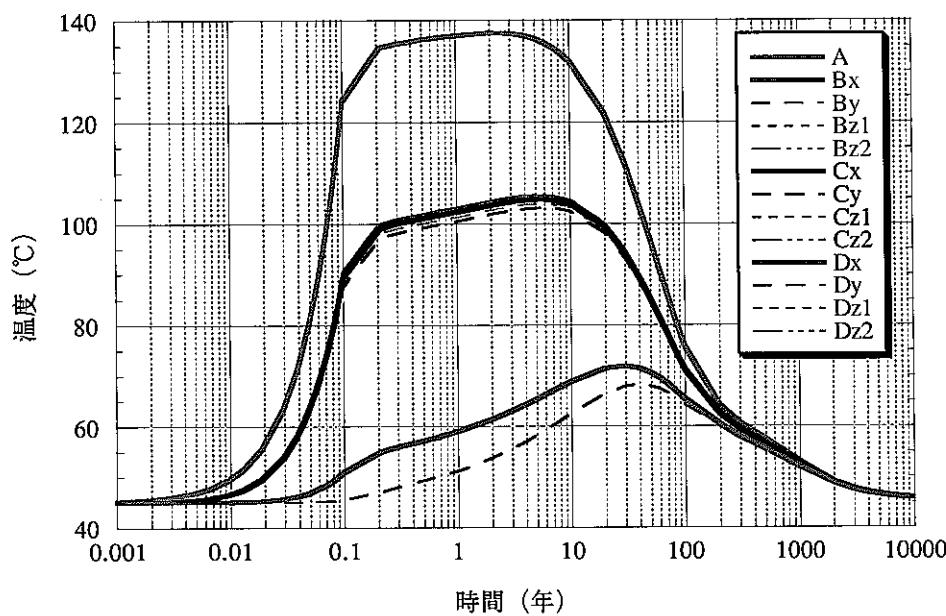


図 3-35-1 温度の経時変化（隙間なしモデル）

（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 30 年、緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 13.32m(6D)、廃棄体ピッチ 22.52m、廃棄体専有面積 300m²/本）

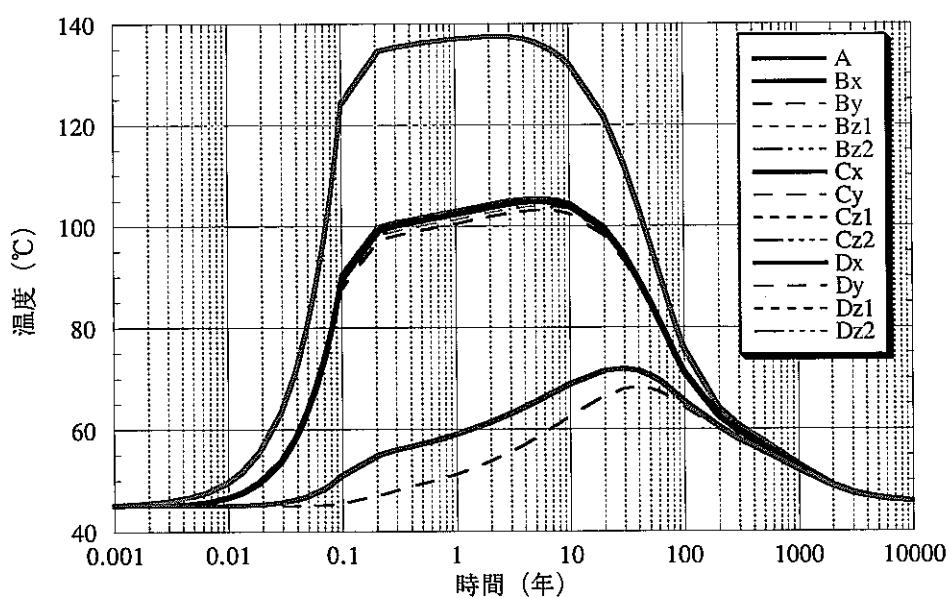


図 3-35-2 温度の経時変化（隙間なしモデル）

（硬岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 30 年、緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 13.32m(6D)、廃棄体ピッチ 7.51m、廃棄体専有面積 100m²/本）

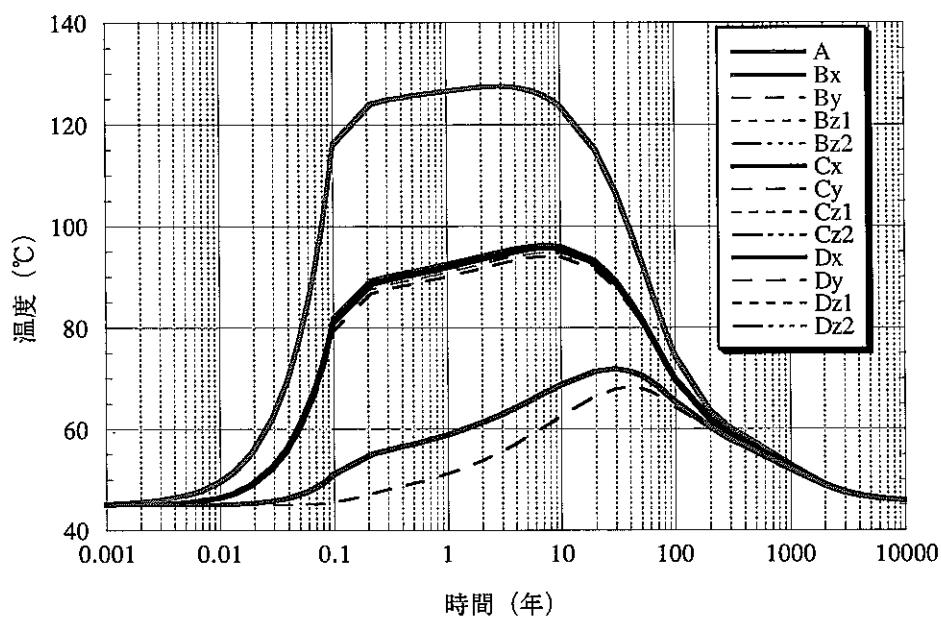


図 3-35-3 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 10%
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 7.51m, 廃棄体専有面積 100m²/本)

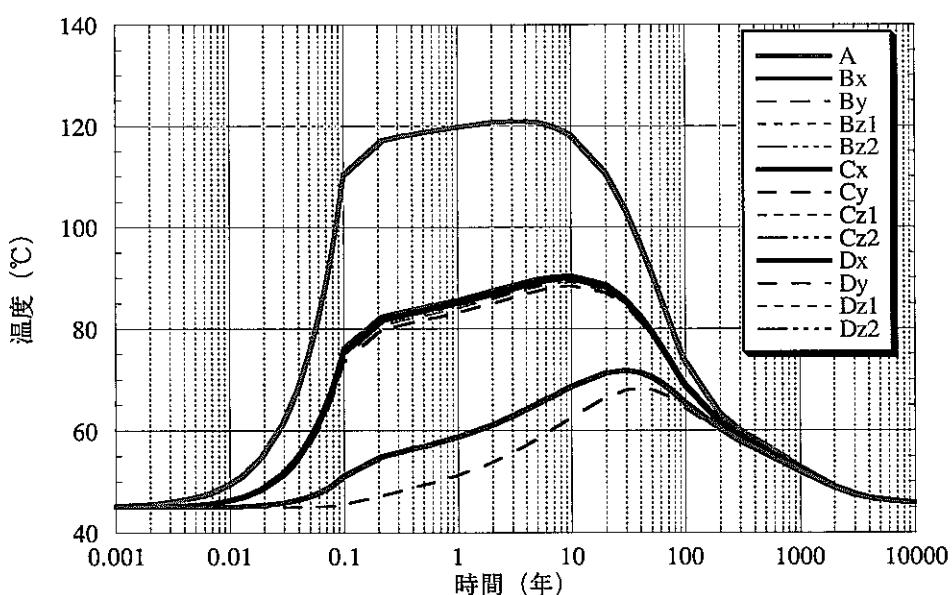


図 3-35-4 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 13%
坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 7.51m, 廃棄体専有面積 100m²/本)

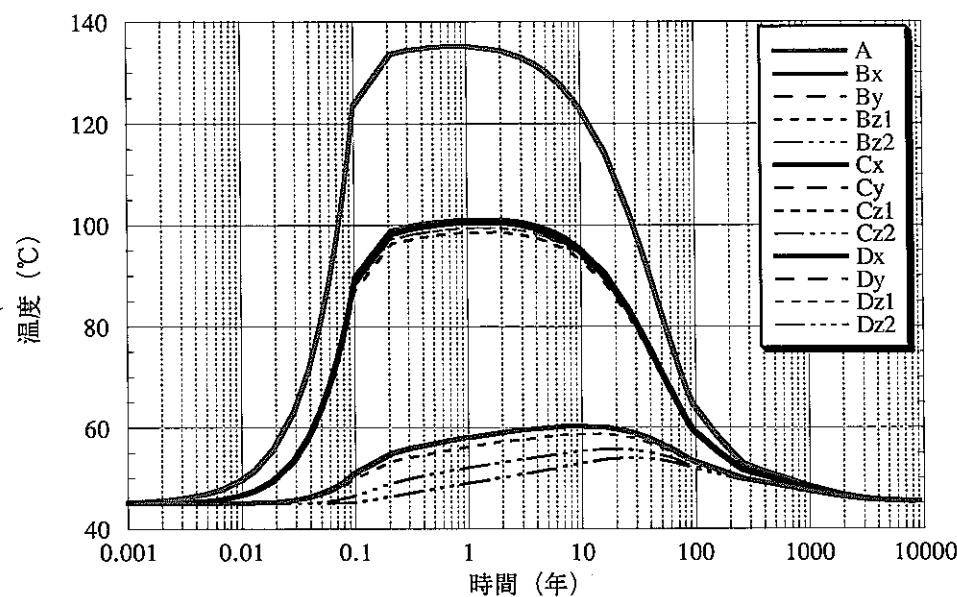


図 3-36-1 温度の経時変化（隙間なしモデル）
(硬岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 30m(13.51d), 廃棄体専有面積 300m²/本)

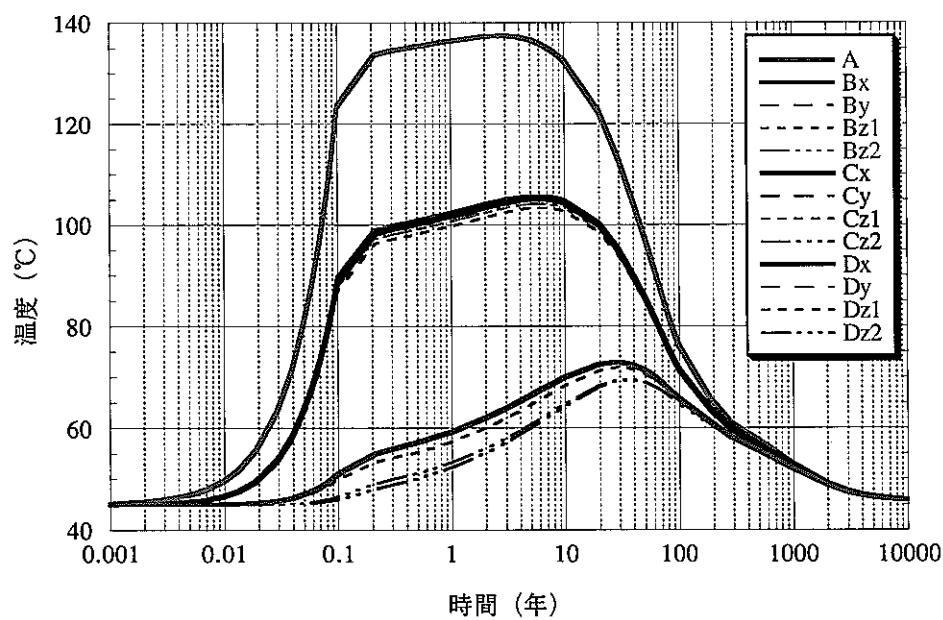


図 3-36-2 温度の経時変化（隙間なしモデル）
(硬岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 10m(4.5d), 廃棄体専有面積 100m²/本)

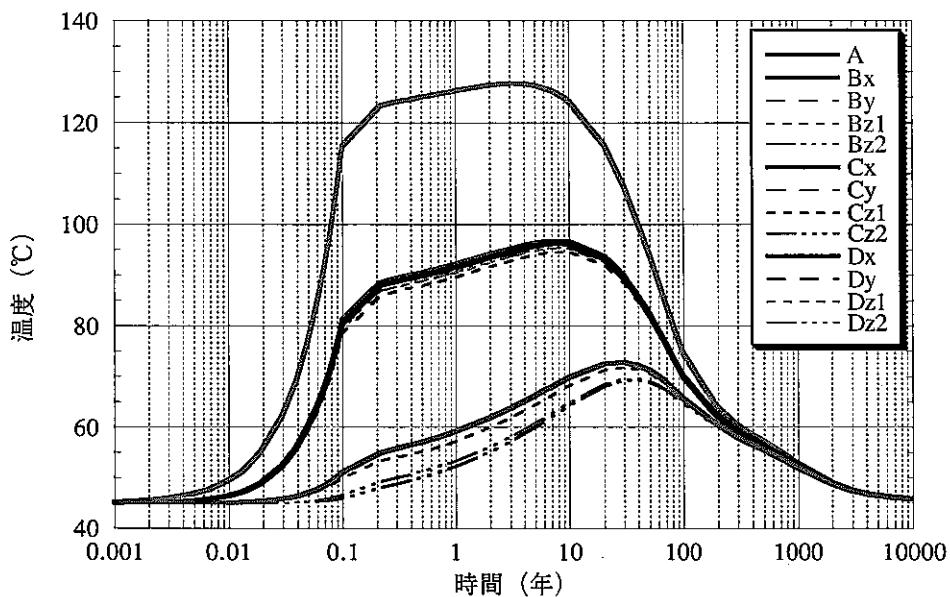


図 3-36-3 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

（硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、中間貯蔵期間 30 年、緩衝材含水比 10%
坑道離間距離 10m(2D)、廃棄体ピッチ 10m(4.5d)、廃棄体専有面積 100m²/本）

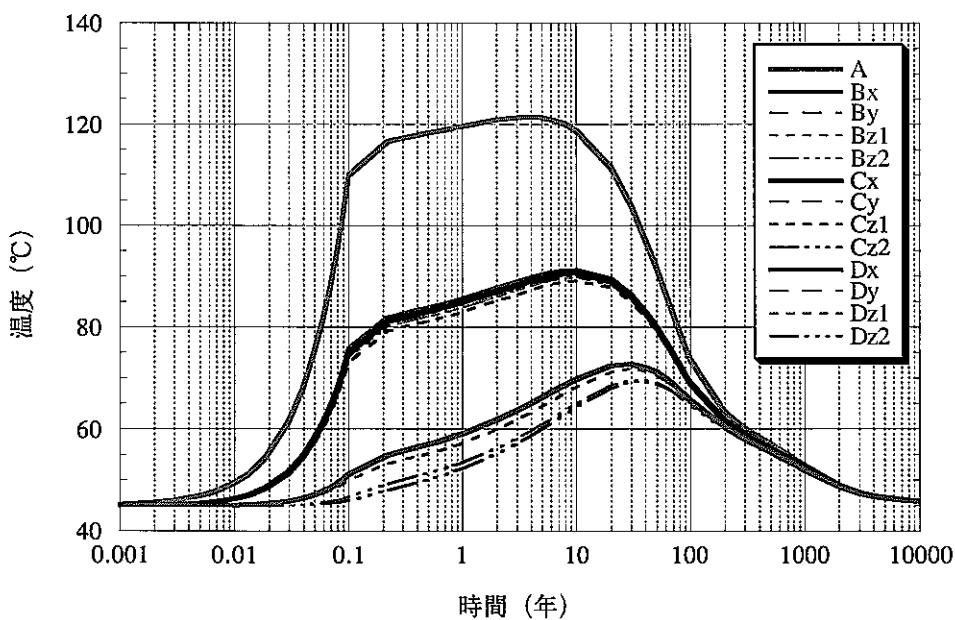


図 3-36-4 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

（硬岩系岩盤、処分孔堅置き方式、中間貯蔵期間 30 年、緩衝材含水比 13%
坑道離間距離 10m(2D)、廃棄体ピッチ 10m(4.5d)、廃棄体専有面積 100m²/本）

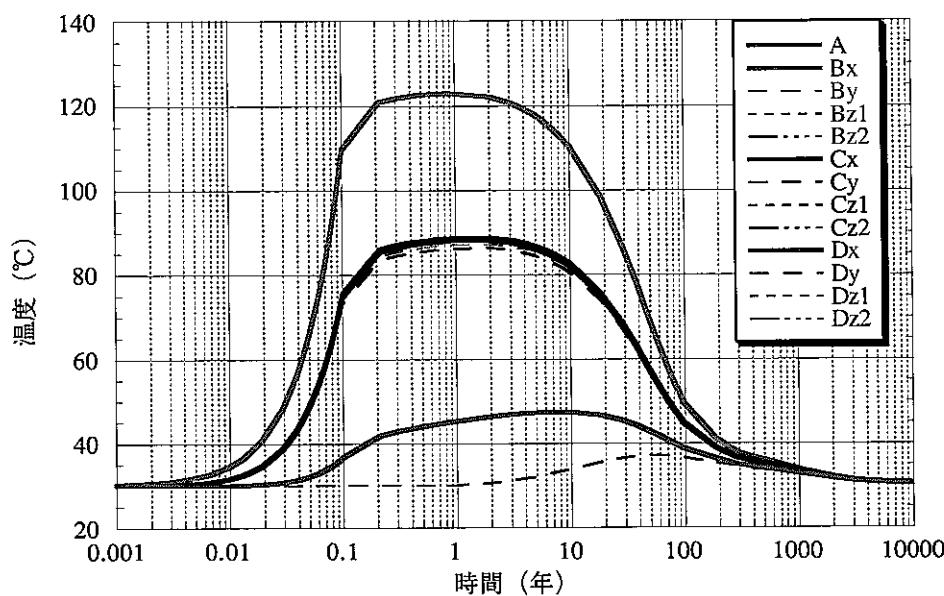


図 3-37-1 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

（軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 30 年、緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 9.99m(4.5D)、廃棄体ピッチ 30.03m、廃棄体専有面積 300m²/本）

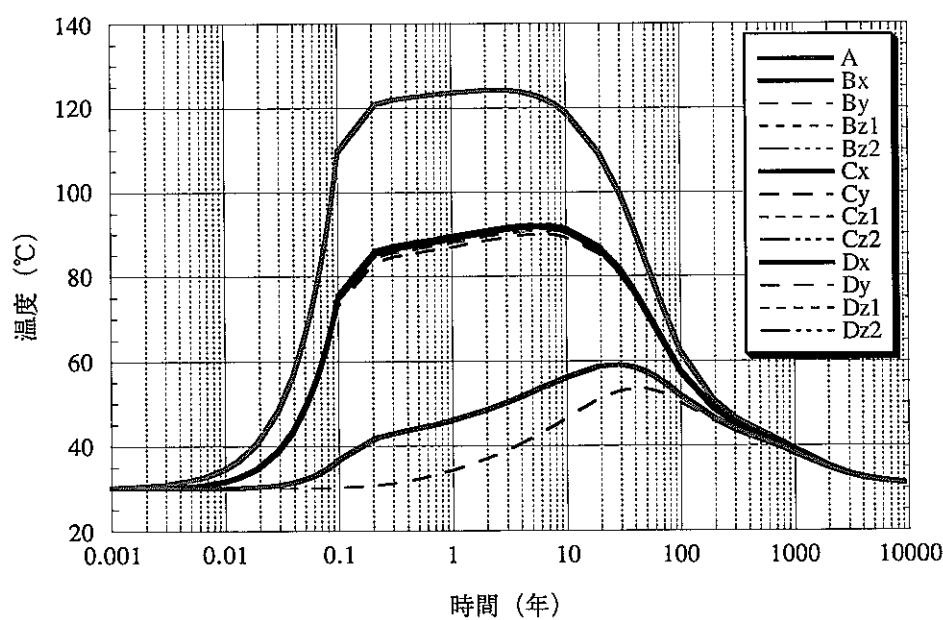


図 3-37-2 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

（軟岩系岩盤、処分坑道横置き方式、中間貯蔵期間 30 年、緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 9.99m(4.5D)、廃棄体ピッチ 10.01m、廃棄体専有面積 100m²/本）

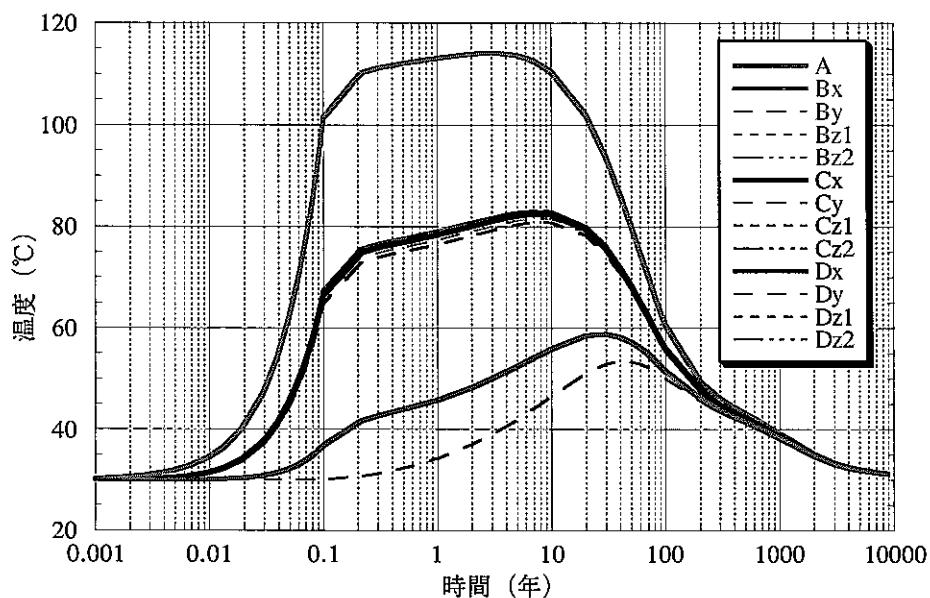


図 3-37-3 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
 (軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 10%
 坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 10.01m, 廃棄体専有面積 100m²/本)

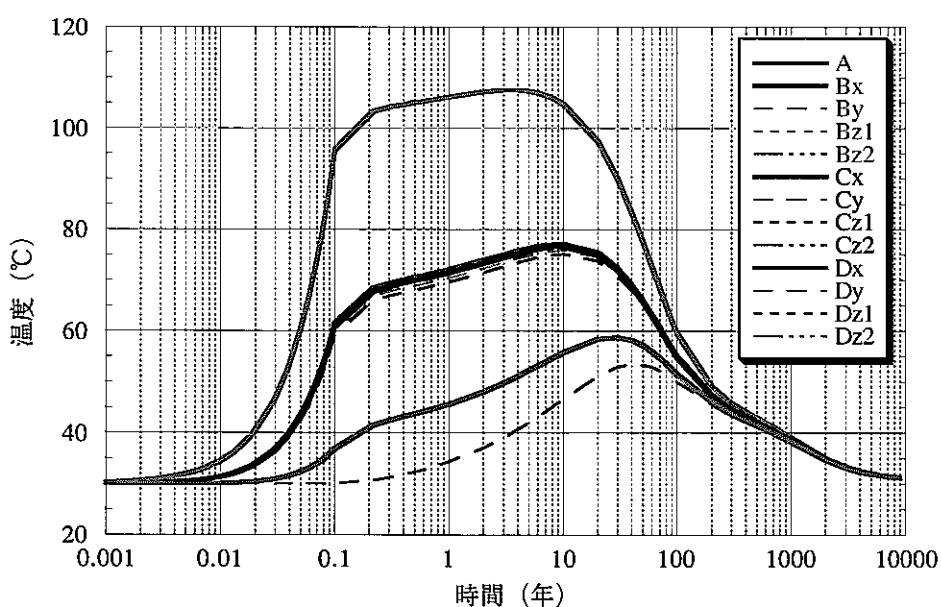


図 3-37-4 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
 (軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 13%
 坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 10.01m, 廃棄体専有面積 100m²/本)

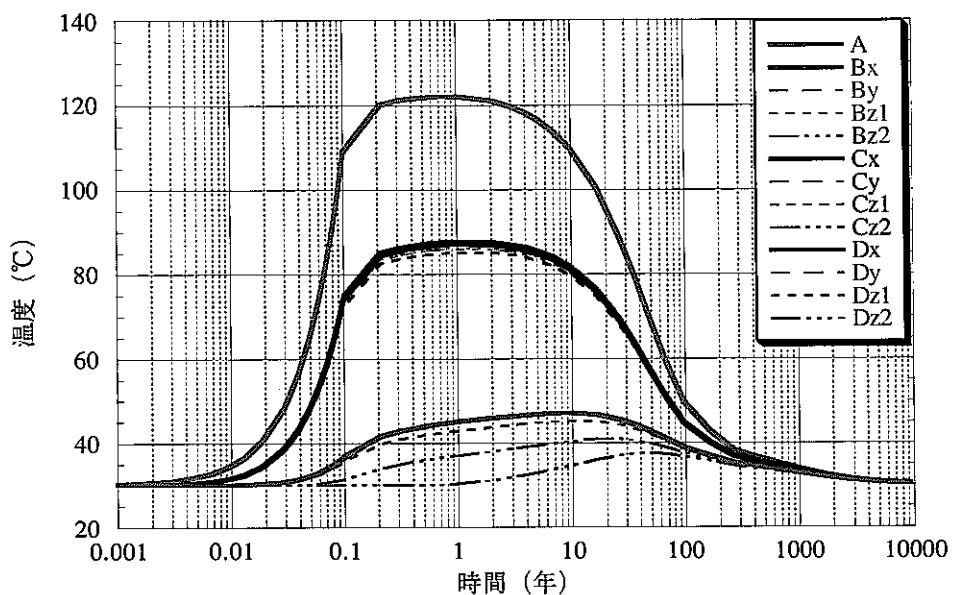


図 3-38-1 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

（軟岩系岩盤，処分孔縦置き方式，中間貯蔵期間 30 年，緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 13m(2.6D)，廃棄体ピッチ 23.08m(10.4d)，廃棄体専有面積 300m²/本）

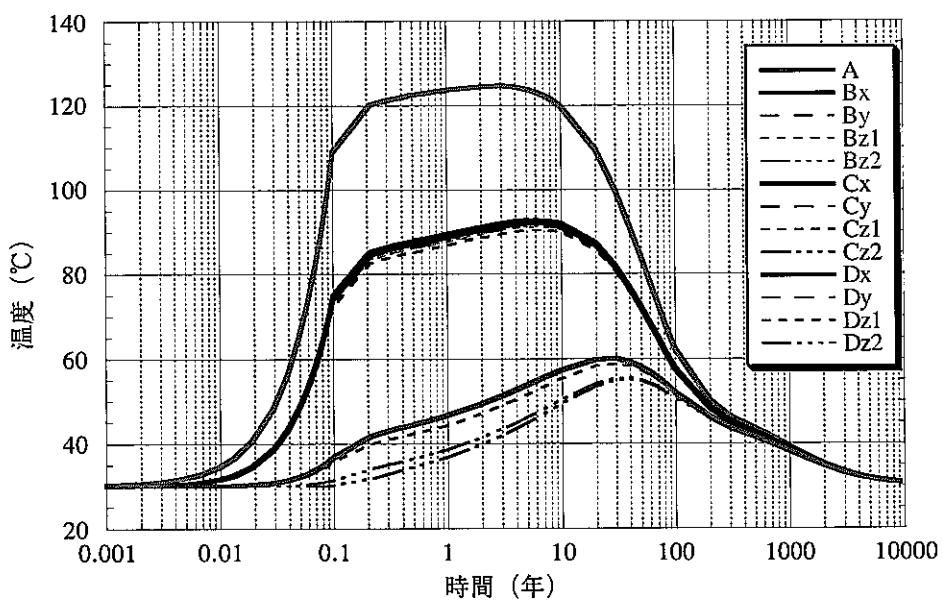


図 3-38-2 溫度の経時変化（隙間なしモデル）

（軟岩系岩盤，処分孔縦置き方式，中間貯蔵期間 30 年，緩衝材含水比 7%
坑道離間距離 13m(2.6D)，廃棄体ピッチ 7.69m(3.47d)，廃棄体専有面積 100m²/本）

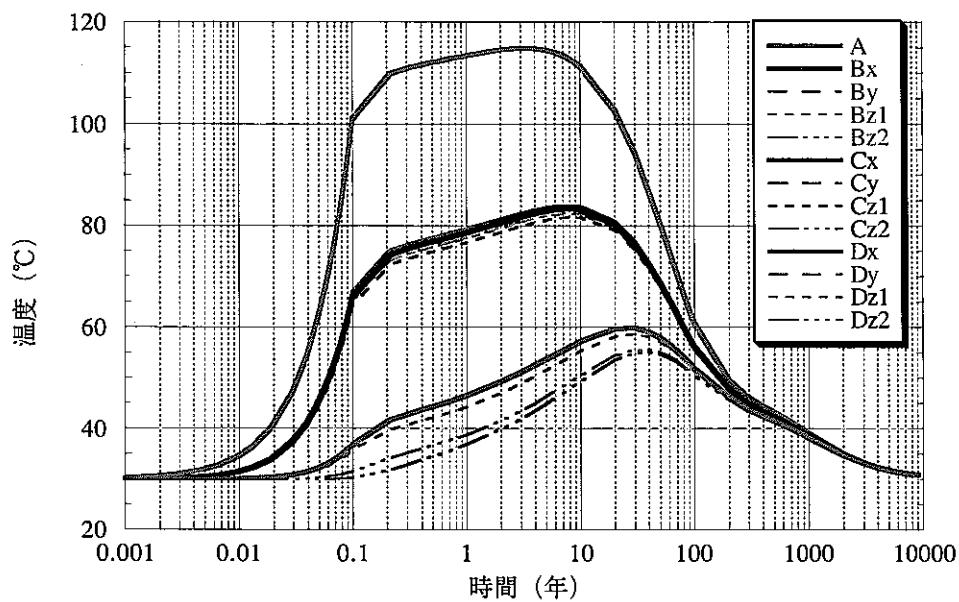


図 3-38-3 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
 (軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 10%
 坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 7.69m(3.47d), 廃棄体専有面積 100m²/本)

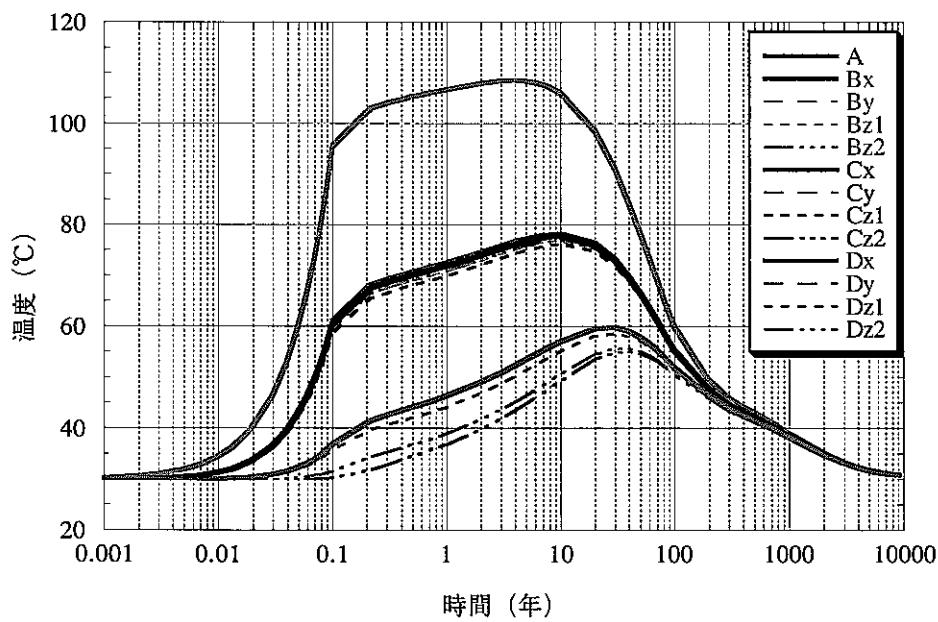


図 3-38-4 溫度の経時変化（隙間なしモデル）
 (軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 13%
 坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 7.69m(3.47d), 廃棄体専有面積 100m²/本)

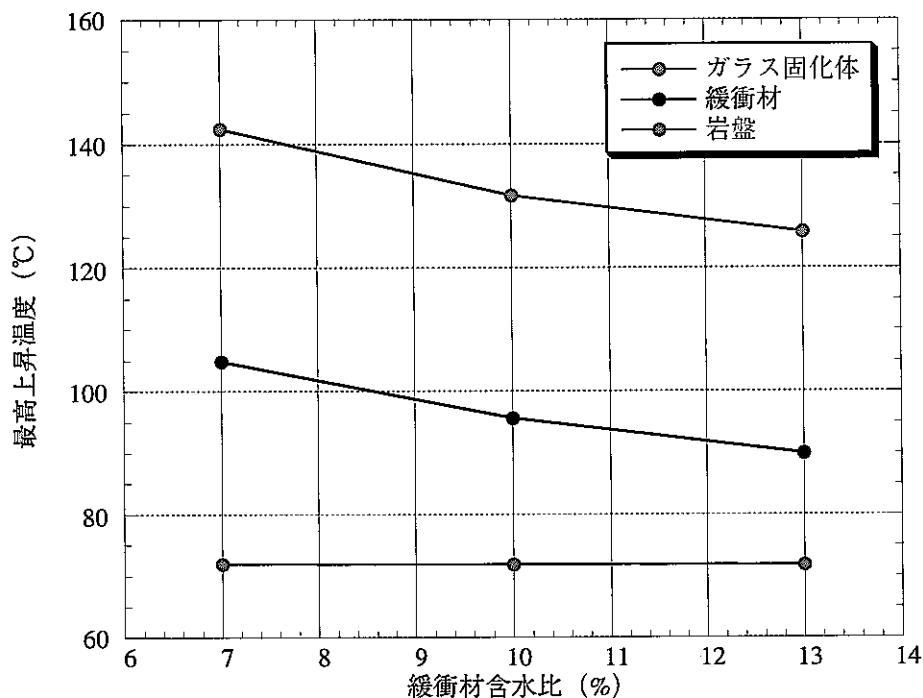


図 3-39-1 緩衝材含水比と最高上昇温度の関係（隙間なしモデル）
 (硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 7~13%
 坑道離間距離 13.32m(6D), 廃棄体ピッチ 7.51m, 廃棄体専有面積 100m²/本)

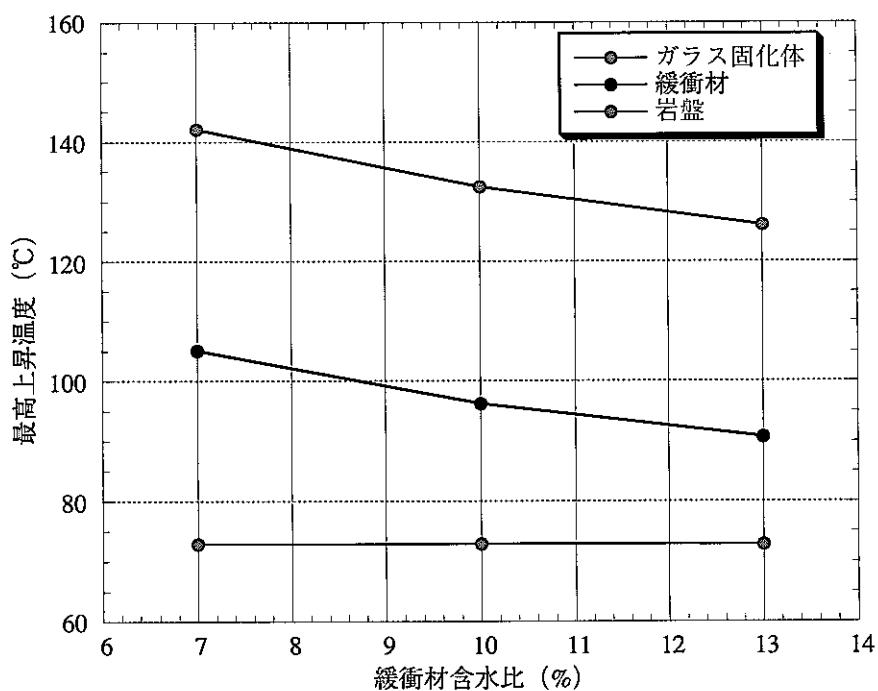


図 3-39-2 緩衝材含水比と最高上昇温度の関係（隙間なしモデル）
 (硬岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 7~13%
 坑道離間距離 10m(2D), 廃棄体ピッチ 10m(4.5d), 廃棄体専有面積 100m²/本)

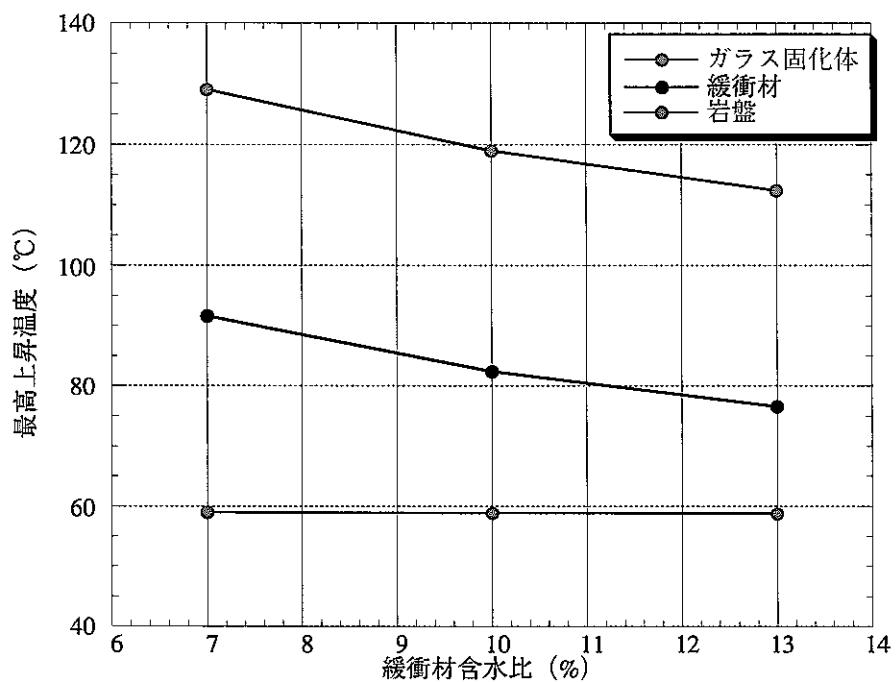


図 3-39-3 緩衝材含水比と最高上昇温度の関係（隙間なしモデル）
 (軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 7~13%
 坑道離間距離 9.99m(4.5D), 廃棄体ピッチ 10.01m, 廃棄体専有面積 100m²/本)

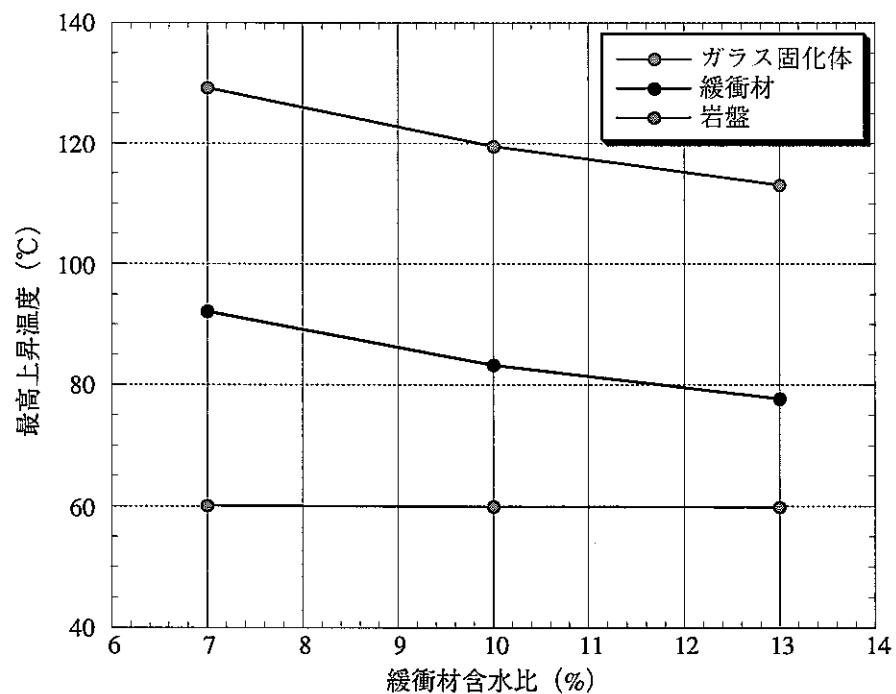


図 3-39-4 緩衝材含水比と最高上昇温度の関係（隙間なしモデル）
 (軟岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 中間貯蔵期間 30 年, 緩衝材含水比 7~13%
 坑道離間距離 13m(2.6D), 廃棄体ピッチ 7.69m(3.47d), 廃棄体専有面積 100m²/本)

4. 热的観点から設定される処分深度の範囲

4-1 考え方

地層処分の目的である、長期間にわたって高レベル放射性廃棄物を人間の生活環境から安全に遠ざけておくということからは、廃棄体を処分する深度をある程度深くして、地表における環境の変化や人間活動の影響が及ぼさないようにしておく必要がある。一方、深度を大きくすると、処分場の建設技術、地質環境の調査技術等の技術的負担が増し、コスト増の要因ともなる。

処分深度については、将来処分サイトが特定されれば、地層処分の長期安全性、そのサイトにおける地質環境の安定性、対象となる岩盤の広がり、地下水の地球化学特性（酸化還元状態等）や地下水流动特性等の地質環境の特性、建設技術や調査技術の適用範囲等が考慮される。また、設計の観点からは、深度が増すごとに地圧が増すために空洞の安定性（黒木ほか、1999）が、また深度が増すごとに地温が増すためにニアフィールドへの熱的影響が、深度を決定する要因の1つとなる。

ここでは、上記ニアフィールドへの熱的影響の観点から、処分深度を考察した。

前述の3、「ニアフィールドの熱解析」では、硬岩系岩盤で処分深度を1000m、軟岩系岩盤で処分深度を500mとし、ニアフィールドの最高上昇温度と廃棄体専有面積の関係を求め、ニアフィールドの最高上昇温度およびその制限温度から処分坑道離間距離・廃棄体ピッチつまり廃棄体専有面積を検討した。このとき、解析の初期条件としてニアフィールドの初期温度は深度が増すごとに温度が増加する地温勾配で定義したため、ニアフィールドの初期温度、つまり処分深度がその最高上昇温度を規定する要因の1つである。解析結果の傾向としては、緩衝材の最高上昇温度がニアフィールドの温度制限に関して支配的であり、また、ある廃棄体専有面積を越えると緩衝材の最高上昇温度は収束する、つまりある廃棄体専有面積を越えると廃棄体専有面積をそれ以上に大きくしても緩衝材の最高上昇温度は下がらないことが把握された。

したがって、深度を変化させることによりニアフィールドの初期温度が変化した場合に、上記収束した緩衝材最高上昇温度が緩衝材の制限温度を下回る否かで、熱的影響の観点からの処分深度の範囲を考察することが可能である。ここでは、このような考え方に基づいて検討を行った。

4-2 検討ケース

3. 「ニアフィールドの熱解析」で前述したように、ニアフィールド熱解析では解析モデルの鉛直方向に対し、地表面温度（15°C）および地温勾配（3°C/100m）で定義される初期地温を設定し、非定常熱伝導解析を行った。このとき、ガラス固化体からの発熱を考慮する前は温度に関して定常状態であり、ガラス固化体からの発熱が駆動力となりニアフィールドの温度上昇が非定常で変化する。そのため、ニアフィールドの温度は、物性値に温度依存性がなければ、初期地温とガラス固化体の発熱による温度変化分を足しあわせた値として求めることができる。したがって、処分深度が変わることによるニアフィールドの初期地温の変化がニアフィールドの最高上昇温度に与える影響は、3. 「ニアフィールドの熱解析」で求めた最高上昇温度の結果から、初期地温の変化分を加算もしくは減算したもので検討すればよいことになる。

3. 「ニアフィールドの熱解析」で示したように、処分坑道離間距離が廃棄体専有面積とニアフィールドの最高上昇温度の関係に及ぼす影響は小さいことが把握されている。したがって、ガラス固化体中間貯蔵期間 50 年の検討で得られた処分坑道離間距離を例にとり、これまでの中間貯蔵期間 50 年と 30 年の解析および推定で得られた廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係から、処分深度を変化させた初期地温の増減分を平行移動し、検討を行った。なお、初期地温を定義する地表面温度および地温勾配はこれまでの検討と同様、それぞれ 15°C、3°C/100m とした。

以下に、検討対象とする処分坑道離間距離を示す。

硬岩系岩盤；処分坑道横置き方式 ···· 6D (13.32m)

硬岩系岩盤；処分孔縦置き方式 ···· 2D (10m)

軟岩系岩盤；処分坑道横置き方式 ···· 4.5D (9.99m)

軟岩系岩盤；処分孔縦置き方式 ···· 2.6D (13m)

D：処分坑道径

4-3 考察

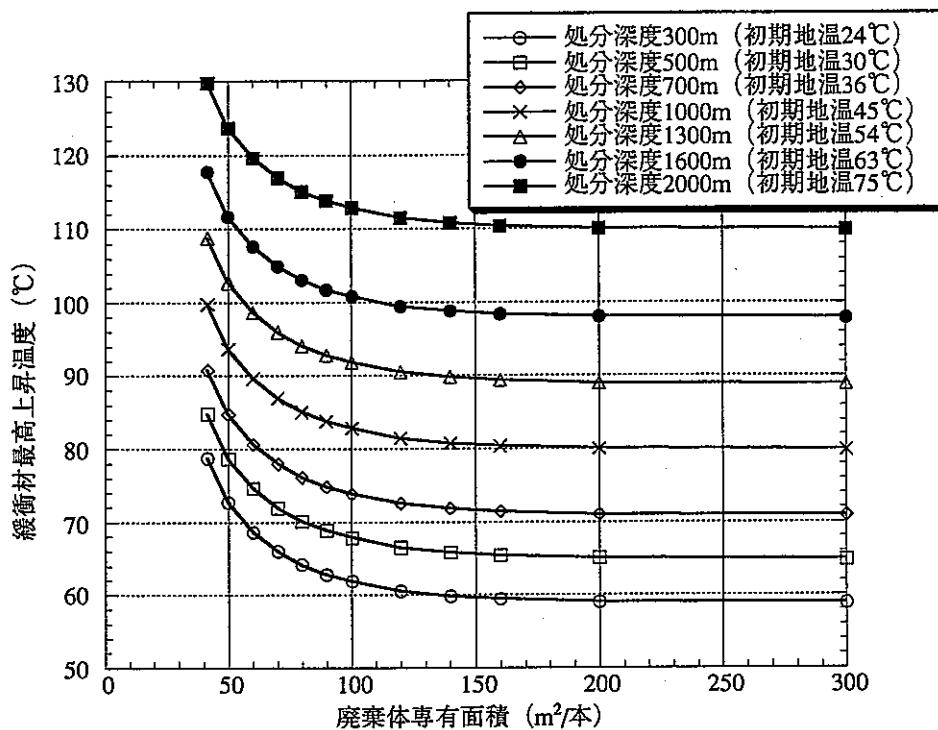
図4-1-1～4-1-4に中間貯蔵期間50年における、図4-2-1～4-2-4に中間貯蔵期間30年における処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係を示す。

また、本検討の条件下において、緩衝材最高上昇温度がほぼ収束する廃棄体専有面積、つまり廃棄体専有面積 $300\text{m}^2/\text{本}$ でも緩衝材最高上昇温度がその制限温度(100°C)を下回らない熱的観点から設定される処分深度の範囲は、概ね以下の表4-1のようになる。

前述3.「ニアフィールドの熱解析」で記したように、ガラス固化体中間貯蔵期間30年の硬岩系岩盤に関しては、廃棄体定置方式に関わらず、解析上処分深度1000m(初期地温 45°C)では、緩衝材最高上昇温度がその制限温度を下回ることが難しいという結果となった。しかしながら、ここで示すように処分深度を浅くする、つまり処分深度における初期地温を下げれば、緩衝材最高上昇温度がその制限温度を下回る現実的な廃棄体専有面積を設定することは可能である。例えば、ガラス固化体中間貯蔵期間30年の硬岩系岩盤において、処分深度を700m(初期地温 36°C)とすれば、本検討の条件下では、廃棄体専有面積は約 $80\text{m}^2/\text{本}$ となる。

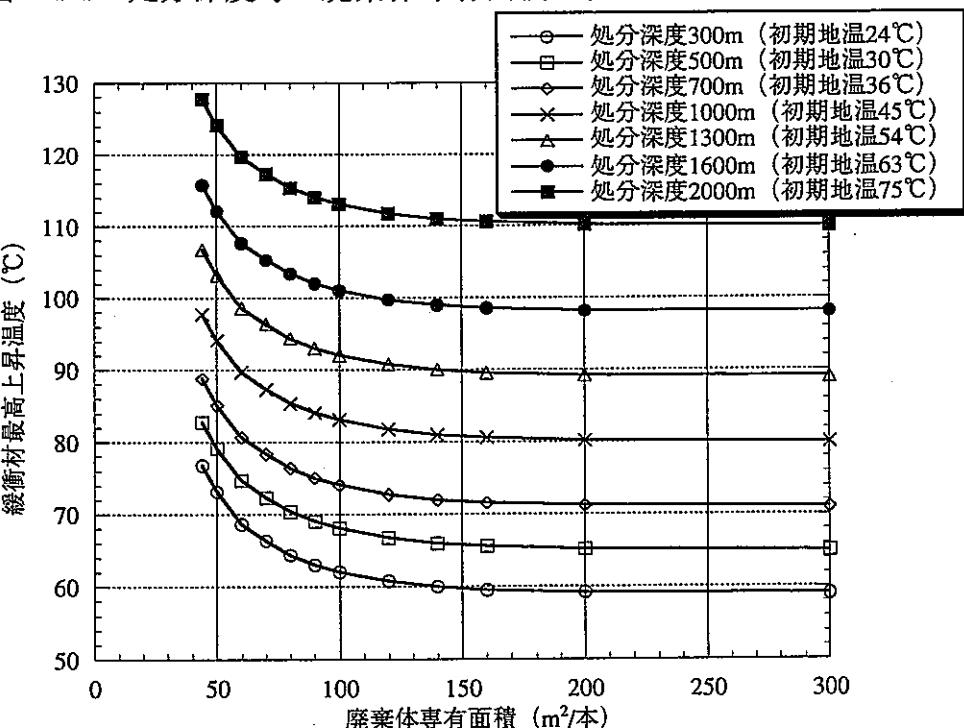
表4-1 热的観点から設定される処分深度の範囲

岩種	ガラス固化体 中間貯蔵期間 (年)	廃棄体 定置方式	热的観点から設定される 処分深度の範囲(最高深度) (m)
硬岩系岩盤	50	処分坑道横置き方式	1660
		処分孔豎置き方式	1660
	30	処分坑道横置き方式	960
		処分孔豎置き方式	960
軟岩系岩盤	50	処分坑道横置き方式	1600
		処分孔豎置き方式	1620
	30	処分坑道横置き方式	900
		処分孔豎置き方式	920



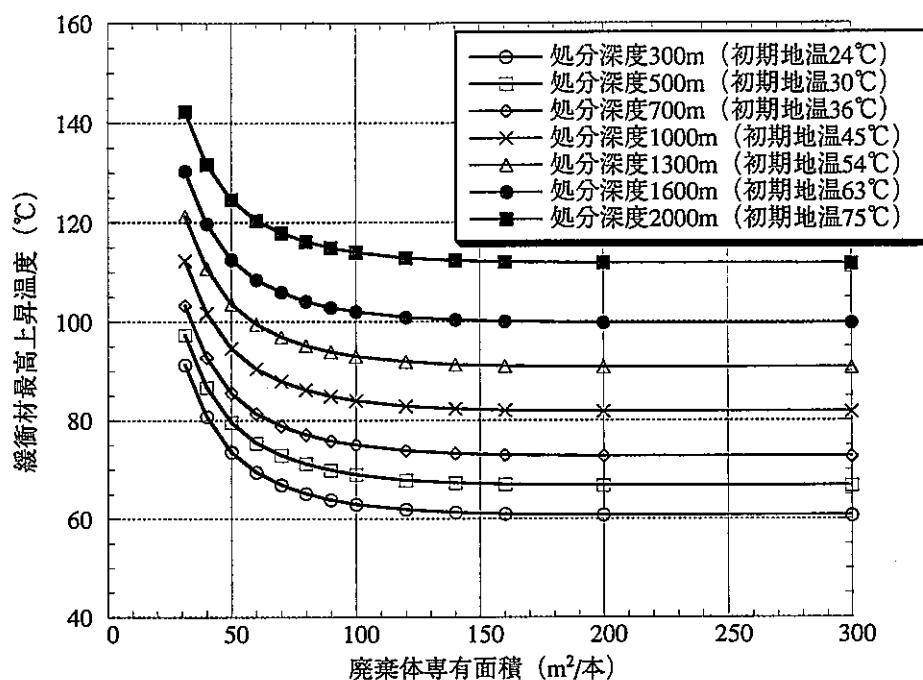
(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 処分坑道離間距離 6D (13.32m), 中間貯蔵期間 50 年)

図 4-1-1 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係



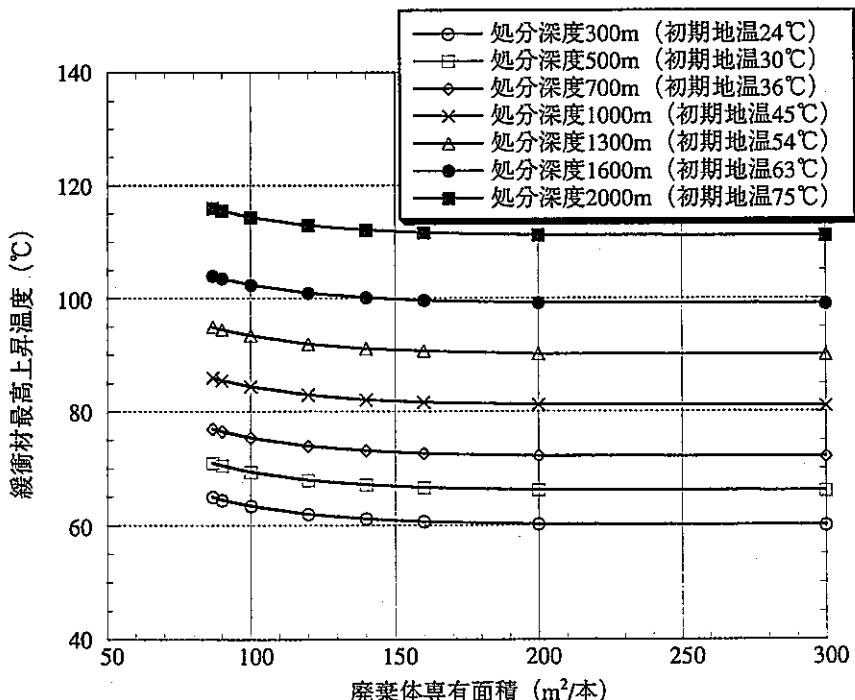
(硬岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 処分坑道離間距離 2D (10m), 中間貯蔵期間 50 年)

図 4-1-2 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係



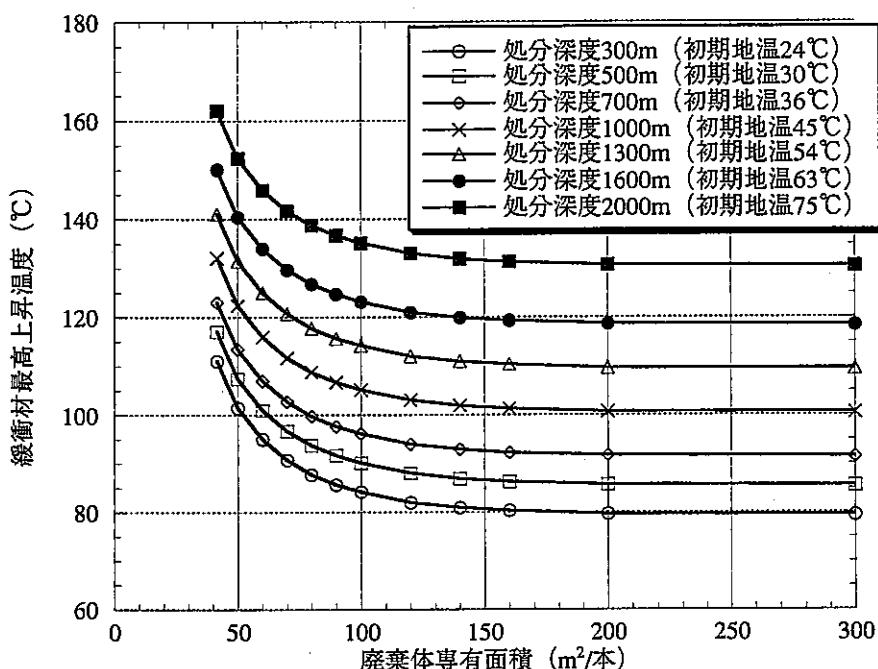
(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 処分坑道離間距離 4.5D (9.99m), 中間貯蔵期間 50 年)

図 4-1-3 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係



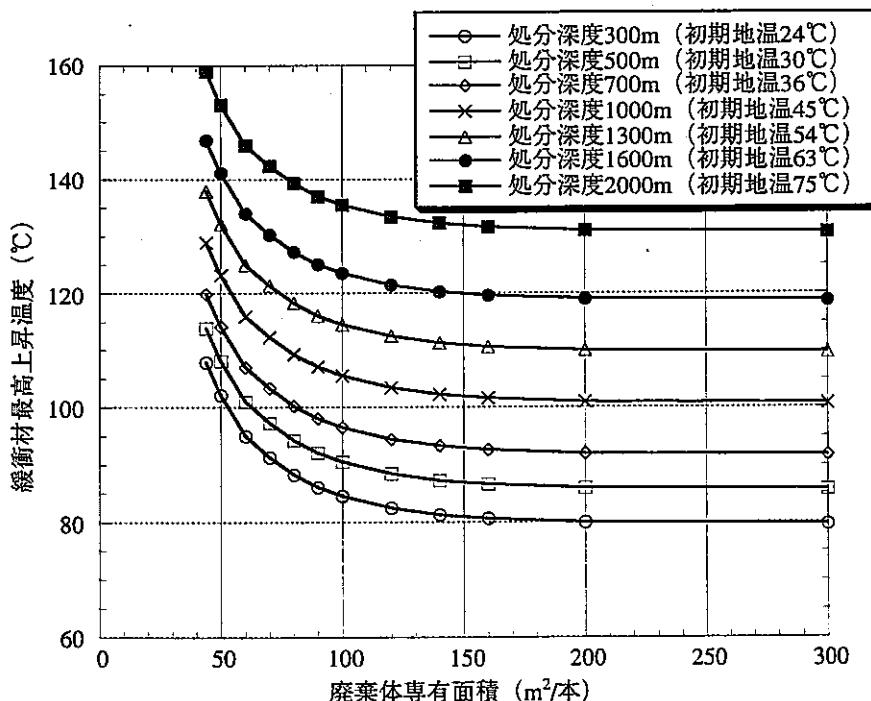
(軟岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 処分坑道離間距離 2.6D (13m), 中間貯蔵期間 50 年)

図 4-1-4 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係



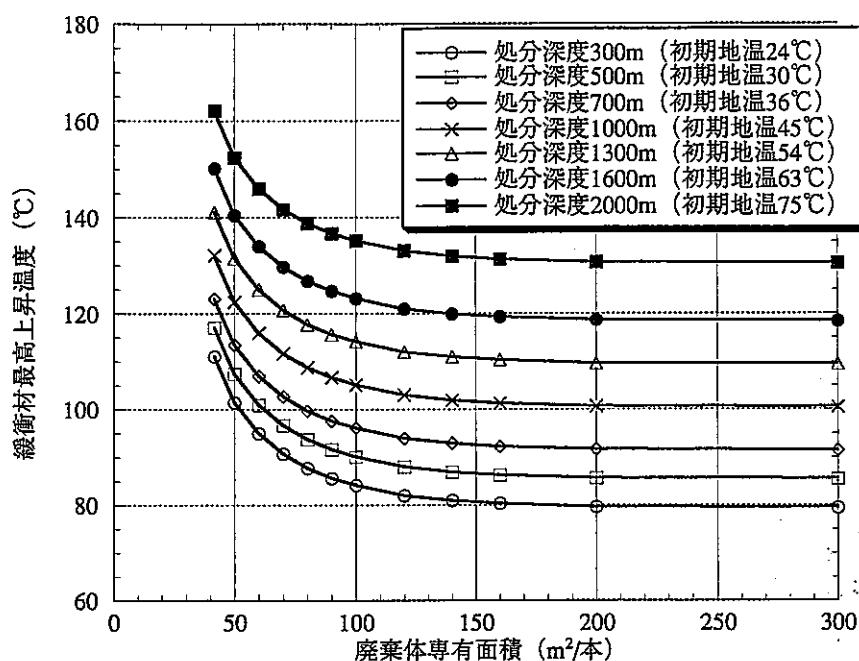
(硬岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 処分坑道離間距離 6D (13.32m), 中間貯蔵期間 30 年)

図 4-2-1 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係



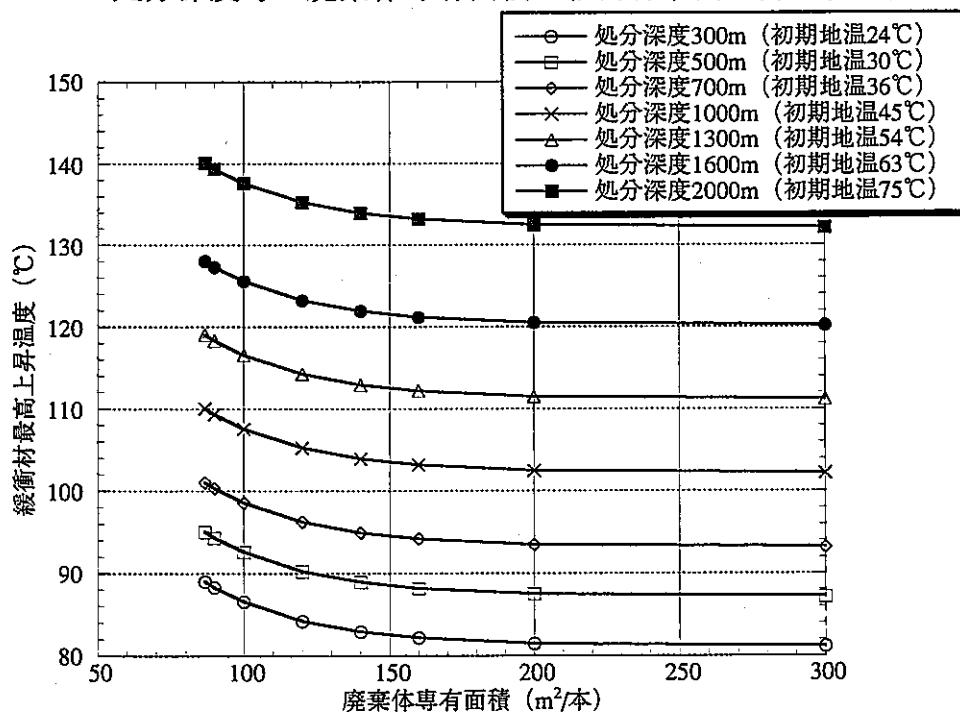
(硬岩系岩盤, 処分孔縦置き方式, 処分坑道離間距離 2D (10m), 中間貯蔵期間 30 年)

図 4-2-2 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係



(軟岩系岩盤, 処分坑道横置き方式, 処分坑道離間距離 4.5D (9.99m), 中間貯蔵期間 30 年)

図 4-2-3 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係



(軟岩系岩盤, 処分孔堅置き方式, 処分坑道離間距離 2.6D (13m), 中間貯蔵期間 30 年)

図 4-2-4 処分深度毎の廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係

5. まとめ

第2次取りまとめの処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定、ニアフィールドの温度分布および温度変化の把握、人工バリア周囲の隙間がニアフィールドの温度分布に及ぼす影響の把握および熱的観点から設定される処分深度範囲の検討に資するため、ニアフィールドの熱解析を行った。また、処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定の考え方を示すとともに、第2次取りまとめの条件下での設定を試みた。

本検討で得られた成果を要約すると以下のようになる。

(1) 処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定

・ガラス固化体中間貯蔵期間 50 年

処分孔堅置き方式では、硬岩系岩盤、軟岩系岩盤とともに、空洞安定性の観点から必要とされる処分坑道離間距離と廃棄体ピッチ（処分孔離間距離）において、ニアフィールドの温度制限を含めたその他の制限を満足する。一方、処分坑道横置き方式では、人工バリアの寸法から規定される最小廃棄体ピッチにおいて、緩衝材の温度制限を満足する処分坑道離間距離を設定するのが合理的である。

・ガラス固化体中間貯蔵期間 30 年

硬岩系岩盤では、処分坑道横置き方式、処分孔堅置き方式とともに、本検討の条件下では、解析上緩衝材の温度制限を満足する処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定するのは難しいという結果となった。しかしながら、緩衝材の設置含水比、処分深度等を変化させることにより、現実的な処分坑道離間距離および廃棄体ピッチを設定することは可能であることも分かった。軟岩系岩盤では、ガラス固化体中間貯蔵期間 50 年の場合と同様、処分孔堅置き方式の場合は空洞の安定性の観点から、処分坑道横置き方式の場合は人工バリアの寸法から規定される最小廃棄体ピッチにおいて緩衝材の温度制限を満足する処分坑道離間距離を設定するのが合理的である。

(2) ニアフィールドの温度分布および温度変化

人工バリアの温度は、概ね処分後数十年までに最高に達し、その後徐々に下がる。また、約 1000 年後には、人工バリアの温度分布差はなくなり、10000 年後には初期の地温に戻る。

(3) 人工バリア周囲の隙間の影響

人工バリアの施工上生じる隙間がニアフィールドの温度に及ぼす影響を把握するため、これら隙間に空気、粉末ベントナイトおよび水の熱物性を考慮し検討を行った。その結果、これら隙間がニアフィールドの温度に及ぼす影響は小さいことが分かった。

(4) 温度制限から設定される処分の範囲

緩衝材の温度制限の観点から、処分深度の範囲を検討した。その結果、本検討の条件下での熱的観点から設定される処分深度の範囲は、ガラス固化体中間貯蔵期間 30 年の場合 900m、中間貯蔵期間 50 年の場合 1600m 程度である。

ただし、本検討で得られた定量的な値は、岩盤の熱物性（含む初期地温）、ガラス固化体発熱特性、人工バリア仕様により変わり得る。また、核種移行評価、経済性、断層等の地層の状態も考慮する必要がある。したがって、サイトが決定され、詳細設計がなされる段階で再度類似の検討が行われ、処分深度、および処分坑道離間距離・廃棄体ピッチなどが最適化されることになると考えられる。

謝辞

本検討における空洞の安定性評価においては、処分バリア性能研究グループの黒木繁盛氏の成果を、緩衝材の制限温度においては、同グループ柴田雅博氏の成果を反映させて頂いた。また、処分孔掘削技術、および人工バリア周囲に生じる隙間については同グループ千々松正和氏に、処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの設定については同グループ杉野弘幸氏および東京事務所 2000 年レポートチーム長谷川宏氏に御相談させて頂いた。

解析データ整理に当たっては、原子力システム株式会社小尾繁氏および検査開発株式会社酒井祐一氏に御協力頂いた。

ここに記して感謝の意を表す。

— 参考文献 —

AECL (1994) : Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear fuel Waste, The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste : Engineering for a Disposal facility, AECL-10715, COG 93-5.

Aoyagi, K. and Kazama, T. (1980) : Transformation changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis, Sedimentology (1980) 27, pp. 179-188

千々松正和, 谷口航 (1999) : 熱-水-応力連成モデルを用いたニアフィールド解析評価, JNC TN8400 99-014.

千々松正和, 杉田裕, 雨宮清 (1999) : 緩衝材の制作・施工技術に関する検討, JNC TN8400 99-035.

Couture, R. A. (1985a) : Rapid Increase in Permeability and Porosity of Bentonite - Sand Mixtures due to Alteration by Water Vapor, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 44, pp.515-522.

Couture, R. A. (1985b) : Steam Rapidly Reduces the Swelling Capacity of Bentonite, Nature, 318, pp.50-52.

動力炉・核燃料開発事業団 (1992a) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—, PNC TN 1410 92-081.

動力炉・核燃料開発事業団 (1992b) : 汎用非線形構造解析システム FINAS Version 12 使用説明書, PNC TN 520 92-006.

原子力委員会 (1994) : 原子力の研究, 開発および利用に関する長期計画 (平成6年).

本間信之, 千葉恭彦, 棚井憲治 (1999a) : オーバーパック設計の考え方, JNC TN 8400 99-047.

本間信之, 千葉恭彦, 棚井憲治 (1999b) : 地層処分場の操業システムの検討, JNC TN8400 99-050.

IAEA (1983) : Effects of Heat from High-Level Waste on Performance of Deep Geological Repository Components.

井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃 (1999) : 我が国の岩盤の水理・物質移行特性について, JNC TN8400 99-090.

石原義尚, 牧野仁史, 大井貴夫, 石黒勝彦, 宮原要, 梅木博之, 赤坂秀成, 藤原啓司 (1999) : 高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価, JNC TN8400 99-085.

石川博久, 柴田雅博, 藤田朝雄 (1994) : 放射性廃棄物地層処分における緩衝材のイライト化変質シュミレーション, 粘土科学, 34 pp.149-156.

Kamei, G., Oda, C., Shinozaki, T., Yusa, Y., Sasaki, N. (1992) : Natural Analogue Study on the Long-Term Durability of Bentonite. -Time-Temperature Condition and Water Chemistry on Illitization at the Murakami Deposit, Japan.

黒木繁盛, 谷口航, 小尾繁, 長谷川宏, 杉野弘幸, 齋田茂, 堀田政國 (1999) : 地下空洞の力学的安定性評価, JNC TN8400 99-037.

McElroy, J. L. et al. (1983) : The treatment and Handling of Radioactive Waste, Ed. By A. G. Blasawitz et al., 171, Battelle Press.

松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明 (1997) : 緩衝材の飽和透水特性, PNC TN 8410 97-296.

NAGRA (1994) : Kristallin-I, Safety Assessment Report, TR NTB 93-22.

日本原燃株式会社（1996）：再処理事業所再処理事業変更許可申請書，添付書類六，追補1.

日本機械学会（1966）：伝熱工学資料，改定第4版

Pusch, R. (1983) : Use of Clays as Buffers in Radioactive Repositories, KBS TR 83-46.

Pusch, R. and Karnland, O. (1988) : Geological Evidence of Smectite Longevity. The Sardinian and Gotland Cases, SKB Technical Report 88-26.

Pusch, R., Karnland, O., Hokmark, H., Sanden, T., Borgesson, L. (1991) : Final Report of the Rock Sealing Project – Sealing Properties and Longevity of Smectitic Clay Grouts. Stripa Project Technical Report 91-30.

Pusch, R., Karnland, O., Lajudie, A., Lechelle, J. and Bouchet, A. (1993) : Hydrothermal Field Test with French Cadidate Clay Embedding Steel Heater in the Stripa Mine, SKB Technical Report 93-02.

Pusch, R. (1993) : Evaluation of Models for Conversion of Smectite to Non-Expandable Minerals. SKB TR 93-33.

作花済夫，境野照雄，高橋克明（1975）：ガラスハンドブック，朝倉書店。

五月女敦，藤田朝雄，原啓二，納多勝（1992）：地層処分場の熱的安定性の検討，PNC TN 1410 92-054.

佐々木憲明，原啓二，秋好賢治（1995）：海外における人工バリアシステムの概念，PNC TN 1420 95-023.

総合エネルギー調査会原子力部会（1999）：総合エネルギー調査会原子力部会中間報告（案）—高レベル放射性廃棄物処分事業制度のあり方—。

杉野弘幸, 藤田朝雄, 岩佐健吾, 長谷川宏 (1999) : 緩衝材設計の考え方, JNC TN8400 99-096.

杉田裕, 藤田朝雄, 棚井憲治, 長谷川宏, 古市光昭, 奥津一夫, 三浦一彦 (1999) : 地下施設の埋め戻し, JNC TN8400 99-039.

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 TN 8410 92-057.

鈴木英明, 谷口航 (1999) : 緩衝材の熱物性試験 (II), JNC TN 8430 99-006.

棚井憲治, 岩佐健吾, 長谷川宏, 三浦一彦, 奥津一夫, 小林正明 (1999) : 処分場の建設技術に関する検討, JNC TN8400 99-046.

Taniguchi, W., Fujita, T., Kanno, T., Ishiguro, K. and Ishikawa, H. (1996) : Sensitivity Analysis of Temperature Distributions in Deep Geological Repository for High-Level Radioactive Waste, The 8th International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Proc. Vol.3, pp.1793-1802.

谷口航, 藤田朝雄 (1997) : 地層処分場設計研究における熱解析～ニアフィールド熱解析による処分場設計仕様（処分坑道横置き方式）の概略的検討～, PNC TN 8410 97-212.

谷口航, 長谷川宏, 岩佐健吾, 佐藤稔紀 (1999a) : 地層処分場設計のための地質環境基本特性, JNC TN8400 99-053.

谷口航, 鈴木英明, 杉野弘幸, 松本一浩, 千々松正和, 柴田雅博 (1999b) : 热的特性の緩衝材仕様に対する影響, JNC TN8400 99-052.