

熱的特性の緩衝材仕様に対する影響
(研究報告)

1999年12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下さい。

〒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

熱的特性の緩衝材仕様に対する影響 (研究報告)

報告者 谷口 航*, 鈴木英明**
杉野弘幸*, 松本一浩**
千々松正和*, 柴田雅博*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材には、水理挙動制御性、核種吸着性、膨潤性、熱伝導性など多くの性能が要求される。現在のところ、これらの要求性能の多くを満足するものとして圧縮ベントナイトもしくはベントナイトにケイ砂を混合し圧縮したものが有望な候補材料と考えられている。

核燃料サイクル開発機構では、地層処分場における人工バリア、地下施設の設計、および性能評価に資するため、圧縮ベントナイトの基本特性についてその試験方法を検討するとともにデータを取得している。また、仮想の地質条件の基に、人工バリアおよび地下施設の設計検討を進めている。

人工バリアおよび地下施設の設計においては、緩衝材の熱的変質を避けるために、緩衝材の熱伝導特性が指標の一つとなると考えられている。また、緩衝材が物理的なものとして成立するための最小密度（カサ密度）以下で人工バリアを設計することはありえないため、上記最小密度（カサ密度）も指標の一つとなる。本報告では、緩衝材の熱物性測定を行うとともに、緩衝材の最小密度（カサ密度）についても検討を行った。また、得られた緩衝材熱伝導特性を用い、人工バリアを含んだ周辺の温度解析を行い、緩衝材の制限温度を基に、緩衝材の成立範囲、つまり充填密度、厚さ等の成立範囲を検討した。

得られた成果は、以下の通りである。

1. 緩衝材の最小密度（カサ密度）にはケイ砂混合率依存性が見られ、ケイ砂混合率が大きいほど、最小密度（カサ密度）も大きくなった。
2. 緩衝材の熱伝導率、および比熱の含水比依存性を、乾燥密度およびケイ砂混合率をパラメータにし、定式化した。この結果、含水比が小さい範囲では、ケイ砂混合率が熱伝導率に及ぼす影響は小さいことが分かった。
3. 緩衝材の乾燥密度および人工バリアにおける緩衝材厚さに関して、熱的観点からの成立範囲を、解析により求めた。また、緩衝材の乾燥密度、ケイ砂混合率および含水比に関らず、緩衝材厚さと緩衝材最高上昇温度の関係は、熱伝導率で整理できることが分かった。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター
処分研究部 処分バリア性能研究グループ

** 検査開発株式会社

Design Study of Buffer Material from the View of Thermal Condition

Wataru Taniguchi*, Hideaki Suzuki**, Hiroyuki Sugino*, Kazuhiro Matsumoto**
Masakazu Chijiatsu*, Masahiro Shibata*

ABSTRACT

For the buffer of geological disposal of High-level radioactive waste (HLW) in Japan, it is expected to maintain its low water permeability, self-sealing properties, radionuclides adsorption retardation properties, thermal conductivity, etc. It is considered that compacted bentonite or a compacted sand-mixed bentonite that satisfy many of the expected properties mentioned above are superior.

JNC (Japan Nuclear Fuel Development Corporation) has studied the measurement method for the properties of buffer and measured to use the measurement results for the design and performance assessment analysis. Also, we have conducted the design of engineered barrier and underground facility based on assuming geological condition.

For the design of engineered barrier and underground facility, high thermal conductivity of buffer is design requirement to avoid mineralogical alternation. Also, the design is not conducted using the density of buffer less than the bulk density (powder-mass density). Therefore, the bulk density (powder-mass density) is one of the design requirements.

In this report, the thermal properties and the bulk density (powder-mass density) of the buffer material is measured. Then thermal analysis in the near field is conducted using the measurement results, and we studied the relationships between the dry density, sand-mixed ratio, water content and thickness of the buffer to satisfy the design requirement from the view point of thermal condition, based on the temperature constraint of the buffer.

* Tokai Works, Waste Management and Fuel Cycle Research Center

Waste Isolation Research Division, Barrier Performance Group

** Inspection and Development Corporation

目 次

1	はじめに	1
2	緩衝材の最小密度（カサ密度）の測定	
2-1	検討の目的および考え方	2
2-2	供試体材料および測定方法	2
2-3	最小密度（カサ密度）測定結果	3
3	緩衝材の熱物性試験	
3-1	試験に用いた供試体	5
3-2	熱伝導率の測定および測定結果の整理	5
3-3	熱拡散率の測定および比熱の同定	18
4	ニアフィールド熱解析による人工バリアの緩衝材成立範囲の検討	
4-1	考え方	23
4-2	解析手法	23
4-3	解析条件	24
4-4	解析結果	36
5	まとめ	67
	謝辞	69
	参考文献	70

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材には水理挙動制御性、核種吸着性、膨潤性、熱伝導性など多くの性能が要求される。現在のところ、これらの要求性能の多くを満足するものとして圧縮ベントナイトもしくはベントナイトにケイ砂を混合し圧縮したものが有望な候補材料と考えられている。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、地層処分場における人工バリア、地下施設の設計、および性能評価に資するため、圧縮ベントナイトの基本特性についてその試験方法を検討するとともにデータを取得してきている。また、仮想の地質条件の基に、人工バリアおよび地下施設の設計検討を進めている。

現在のところ、緩衝材の密度、ケイ砂混合率、厚さ等の緩衝材の仕様については、人工バリアの定置時における製作・施工性（緩衝材強度特性、締固め特性）、熱伝導性（人工バリア定置後数十年間で到達する緩衝材最高上昇温度）を設計要件に反映させており、核種移行や緩衝材の流出特性など、超長期にわたる評価が必要となる項目は、安全評価上確認すべき事項として扱っている。

本報は、緩衝材の設計要件の一つである緩衝材の熱伝導性に着目し、乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比、緩衝材厚さをパラメータに以下の検討を行ったものである。

- (1) 緩衝材の最小密度（カサ密度）の測定（パラメータ：乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比）
- (2) 熱伝導率、比熱の測定および特性把握（パラメータ：乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比）
- (3) ニアフィールド熱解析による、緩衝材最高上昇温度に基づいた人工バリアにおける緩衝材の成立範囲（パラメータ：乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比、厚さ）

2. 緩衝材の最小密度（カサ密度）の測定

2-1 検討の目的および考え方

緩衝材の設計を行ううえで、まず、緩衝材が、物理的なものとして成立する密度範囲を把握する必要がある。緩衝材密度の上限は、その材料の真比重（粒子の比重）であるが、現実的には、現場締固めを行う際、もしくは緩衝材ブロックを製作する際の圧縮エネルギーによって制限され、圧縮エネルギーの上昇に伴い、真比重以下において、密度は上昇するものと考えられる。例えば、既往の緩衝材（ベントナイトに KunigelV1、混合材にケイ砂 5 号）の基本特性の測定例では、緩衝材の真比重約 2.7 に対して、最大乾燥密度 2.0 g/cm^3 までの供試体を用いている（鈴木ほか、1992）。

一方、物理的に成立する緩衝材密度の下限は、圧縮する前の緩衝材（粉末状態）の密度、つまりカサ密度となる。このため、物理的に成立する緩衝材密度の下限値を確認することを目的に、ケイ砂混合率および含水比をパラメータに最小密度（カサ密度）の測定を行った。

2-2 供試体材料および測定方法

本測定に用いた試験材料は、ベントナイトに KunigelV1（以下、3. 緩衝材の熱物性の試験も同様）、ケイ砂には 3 号と 5 号の粒径の異なる 2 種類を質量比 1 対 1 で混合したもの（以下、3. 緩衝材の熱物性の試験も同様）を用いた。ケイ砂の混合率（グラフ中 : R_s 、以下同様）は、ベントナイトとの質量比で、0, 30, 50, 80 wt%とした。

砂の最小密度試験方法については、土質工学会において基準化されている（土質工学会、1990）。また、ベントナイトの最小密度試験方法については、粉末ベントナイトの見掛け比重測定方法として基準化されている（クニミネ工業株式会社、1977）。

ここでの検討は、上記基準を参考に、100ml のメスシリンドー内に試料を入れ、20 回振動させたときの密度を測定することにより行った。

2-3 最小密度（カサ密度）測定結果

図 2-1 にケイ砂混合率をパラメータにした含水比と最小密度（カサ密度）の関係（乾燥密度で表記）を示す。

これから、緩衝材の最小密度（カサ密度）は含水比の増加とともに減少し、ケイ砂の混合率の増加とともに上昇することが分かった。また、最小密度（カサ密度）は、含水比 0% の場合、ケイ砂混合率 0wt% で約 1.0g/cm^3 、ケイ砂混合率 80wt% で約 1.8g/cm^3 となった。

したがって、以降の熱特性の測定、およびニアフィールドの熱解析では、廃棄体近傍の緩衝材が廃棄体の発熱により乾燥する可能性を考慮し、各ケイ砂混合率緩衝材に対して、含水比 0% 時における最小密度（カサ密度）（図 2-2 参照）以上の乾燥密度を主な検討対象とした。

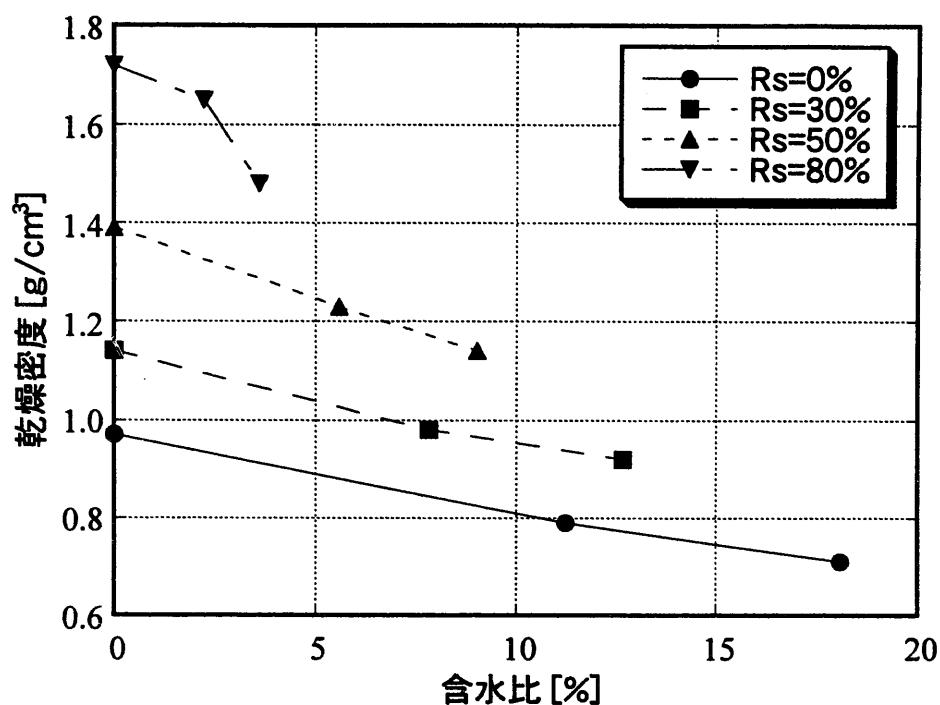


図 2-1 最小密度（カサ密度）の測定結果

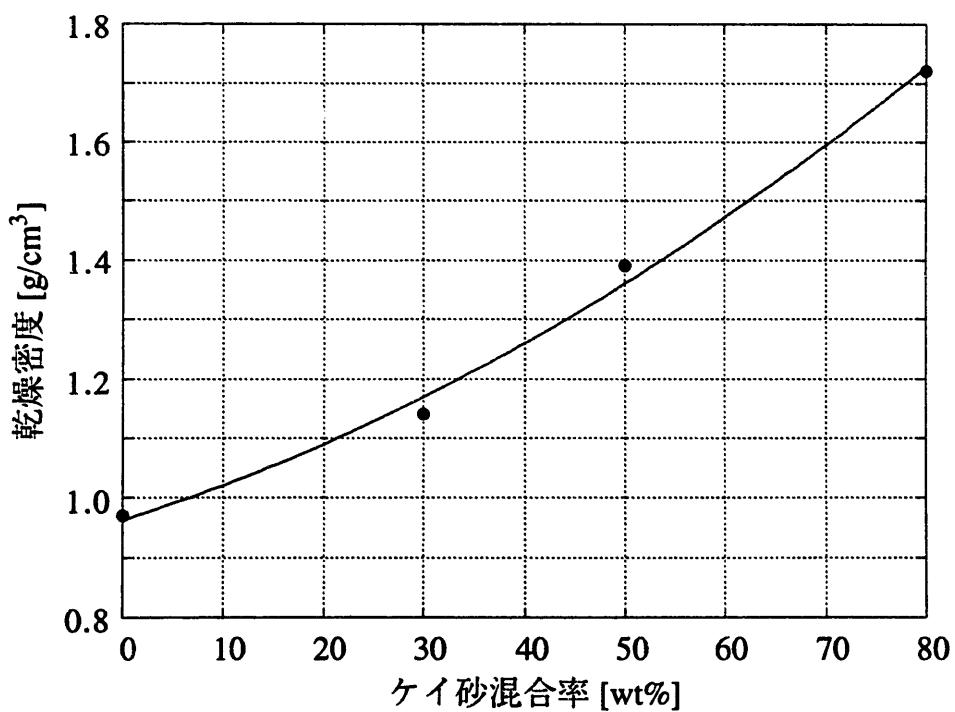


図 2-2 ケイ砂混合率と最小密度（カサ密度）の関係（含水比 0%）

3. 緩衝材の熱物性試験

3-1 試験に用いた供試体

前述した最小密度（カサ密度）の測定結果から、ここでの熱物性試験は、以下の表 3-1 に示す乾燥密度およびケイ砂混合率に対して行った。なお、本測定と同様な条件および手法を用いた既往の研究で取得されたもの（鈴木ほか、1992：鈴木・谷口、1999）も合わせて示し、検討を行った。

表 3-1 緩衝材熱物性試験に用いた供試体

ケイ砂混合率：Rs [wt%]	乾燥密度： ρ_d [g/cm ³]					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0	○	○	**	**	*	**
30		○	○	*	○	
50			○	○	○	
80					○	

○ 本報で取得したもの

* 鈴木・谷口（1999）で取得したもの

** 鈴木ほか（1992）で取得したもの

ただし、**は熱伝導率のみの測定

3-2 热伝導率の測定および測定結果の整理

(1) 測定方法

熱伝導率の測定は、鈴木らによって行われた方法（鈴木ほか、1992：鈴木・谷口、1999）と同様とし、非定常熱線法の一つであるプローブ法の原理を利用した迅速熱伝導率計（昭和電工(株)，Shotherm QTM-DII）を用いた。

図 3-1 に迅速熱伝導率計の概要を示す。

通常の非定常線熱源法は、供試体に孔を開け、そこに線熱源を挿入するか、もしくは二つの供試体で線熱源を挟む方法によって測定するが、迅速熱伝導率計は、一方の熱伝導率が既知の断熱性に優れた材料に置き換えて測定するものであり、以下の（3-1）式で供試体の熱伝導率が求められる。

$$\lambda = K \frac{I^2 \ln(t_2 / t_1)}{V_2 - V_1} - H \quad (3-1)$$

K, H : 热伝導率計のプローブによって定まる定数（ヒータ線の抵抗、熱電対の熱電能、热伝導率既知の基材の热伝導率等を含む）

I : ヒーター線を流れる一定電流[A]

t_1, t_2 : サンプリング時間[s]

V_1, V_2 : 热電対の出力[mV]

本測定装置での測定時間は加熱線に電流を与えてから 60 秒程度であり、その間の温度上昇は 20°C 程度である。

熱伝導率測定用の供試体は、 $50 \times 50 \times 100\text{mm}$ の直方体であり、金型を用いて圧縮成型して製作した。熱伝導率の測定は、成型体として自立するものに対しては金型より抜き出して直方体の 4 側面に対して行った。また、低密度の場合やケイ砂混合率が高く自立しないものに対しては、本熱伝導率計付属の粉体測定容器内あるいは圧縮成型用の金型内において測定を行った。

試験温度に関しては、90°C以下の条件では、温度環境が緩衝材の熱伝導率に与える影響は小さいことが報告されている（鈴木・谷口、1999）ため、ここでは室温での測定とした。

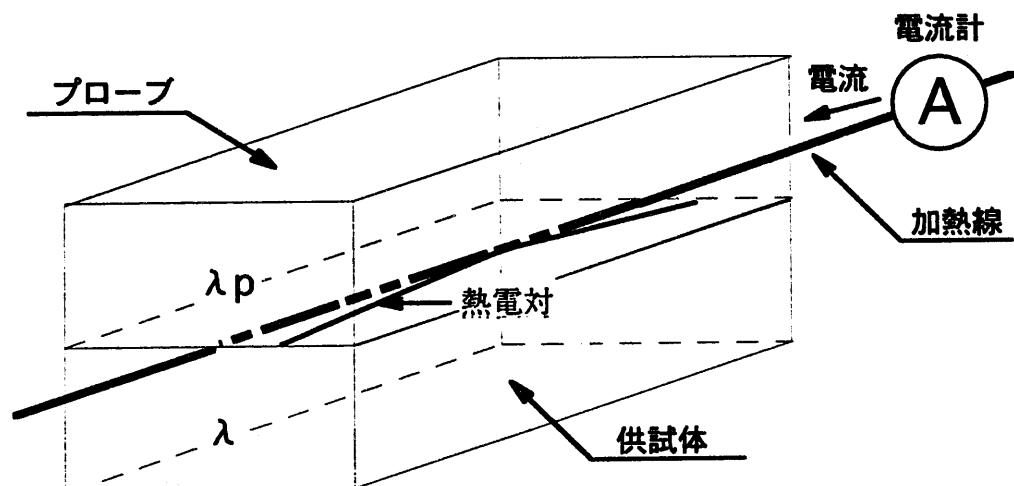


図 3-1 热伝導率計概略

(2) 測定結果

表 3-2 に測定結果を、図 3-2 に測定結果を含水比で整理したものを示す。一般に、土の熱伝導率は、固相率、含水率、石英含量、有機物含量に依存する (Gaylon S. Campbell 著、中野政詩、東山勇訳、1987)。また、土の熱伝導率は低水分領域では空気間隙が、高水分領域では固相の効果が大きくなり、熱伝導率が低い値から高い値へと移る水分域が存在すると言われている。このような現象を表現するため、図 3-2 中では、(3-2) 式および表 3-2 で示すように熱伝導率を含水比の 3 次関数で表した。ただし、これら 3 次関数は、各測定対象において、測定した含水比の範囲内のみでフィティングしたものである。また、図 3-3 に含水比 0% 時における乾燥密度およびケイ砂混合率と熱伝導率の関係を示す。

緩衝材の熱伝導率は、含水比の増加とともに大きくなる結果となった。また、ケイ砂混合率が同じ場合、乾燥密度が大きい、つまり固相率が大きいほど熱伝導率も大きくなかった。これらの傾向は、既往の研究 (例えば、鈴木ほか、1992) でも示されている。

ケイ砂混合率依存性に関しては、含水比が大きいところでその影響が見られ、同乾燥密度の場合、ケイ砂混合率が大きいほど熱伝導率は大きくなった。しかしながら、含水比が小さくなるにつれてその影響は小さくなり、図 3-3 に示すように、含水比 0% 時では、ケイ砂混合率に依存せず、乾燥密度毎にはほぼ同等の値を示す結果となった。ただし、ケイ砂混合率 80wt% の場合、供試体表面が他の供試体に比べ滑らかではないため空気の影響により熱伝導率が小さくなつたものと考えられる。

$$\lambda = a + b \omega + c \omega^2 + d \omega^3 \quad (3-2)$$

λ : 热伝導率 [W/m K]

ω : 含水比 [%]

a, b, c, d : 実験により得られる定数 (表 3-2 参照)

表 3-2 热伝導率試験結果

乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	ケイ砂混合率 Rs [wt%]	含水比 ω [%]	熱伝導率 λ [W/m K]	関係式(3-2)中の係数
1.0	0	0.25	0.129	a=0.129 b=-2.09E-4 c=8.36E-4 d=-6.49E-6
		6.17	0.158	
		21.00	0.433	
1.2	0	0.24	0.178	a=0.178 b=-6.74E-4 c=2.82E-3 d=-7.25E-5
		9.76	0.373	
		20.93	0.736	
	30	0.29	0.159	a=0.159 b=-7.19E-4 c=2.48E-3 d=-8.62E-6
		7.01	0.273	
		14.25	0.628	
1.4	0	0.0	0.275	a=0.275 b=1.79E-2 c=2.09E-3 d=-9.60E-5
		5.0	0.404	
		7.5	0.483	
		10.0	0.574	
		12.5	0.631	
	30	15.0	0.691	
		0.41	0.312	a=0.312 b=-1.51E-3 c=3.71E-3 d=-5.18E-5
		6.73	0.454	
		14.20	0.890	
	50	30.03	1.655	
		0.37	0.227	a=0.227 b=-4.06E-3 c=1.12E-2 d=-5.19E-4
		4.97	0.419	
		9.70	0.765	
		33.05	1.878	

表 3-2 热伝導率試験結果（続き）

乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	ケイ砂混合率 Rs [wt%]	含水比 ω [%]	熱伝導率 λ [W/m K]	関係式(3-2)中の係数
1.6	0	0.0	0.417	
		4.9	0.595	
		6.4	0.687	a=0.417
		9.1	0.787	b=3.12E-2
		12.0	0.955	c=1.66E-3
		14.7	1.073	d=-4.85E-5
		19.8	1.307	
		23.7	1.438	
	30	0.21	0.411	
		0.21	0.511	
		1.76	0.509	
		3.63	0.562	
		4.82	0.585	
		5.12	0.646	
		5.89	0.680	a=0.444
		6.05	0.729	b=1.38E-2
		7.76	0.746	c=6.14E-3
		8.58	0.845	d=-1.69E-4
		10.31	1.105	
		10.34	1.126	
	50	12.69	1.385	
		12.87	1.321	
		15.68	1.558	
		15.86	1.447	
		19.57	1.728	
	50	25.13	1.854	
		25.56	2.144	
	50	0.28	0.440	a=0.438
		4.71	0.607	b=4.31E-3
		10.05	1.050	c=7.63E-3
		24.51	2.192	d=-2.00E-4

表 3-2 热伝導率試験結果（続き）

乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	ケイ砂混合率 Rs [wt%]	含水比 ω [%]	熱伝導率 λ [W/m K]	関係式(3-2)中の係数
1.8	0	0.00	0.556	
		0.00	0.662	
		0.15	0.466	
		0.15	0.453	
		0.18	0.447	
		4.70	0.835	a=0.515
		6.70	0.916	b=5.81E-2
		7.00	0.992	c=1.33E-3
		9.30	1.092	d=-9.34E-5
		11.80	1.191	
		13.80	1.363	
		14.00	1.256	
		17.00	1.585	
		17.71	1.407	
2.0	30	18.32	1.407	
		18.49	1.434	
		0.00	0.731	
		4.58	0.900	a=0.733
		6.84	1.060	b=-4.22E-2
2.0	50	10.00	1.543	c=1.93E-2
		14.65	1.928	d=-7.33E-4
		17.49	1.972	
		0.35	0.688	
		3.25	0.827	a=0.686
		4.77	0.999	b=-2.60E-3
2.0	80	5.00	1.006	c=1.68E-2
		10.27	1.745	d=-6.28E-4
		18.00	2.403	
		0.06	0.482	a=0.478
2.0	0	2.00	0.691	b=7.34E-2
		4.02	1.015	c=1.80E-2
		17.63	3.153	d=-7.69E-4
		0.00	0.777	a=0.777
2.0	0	4.30	1.023	b=1.98E-2
		7.40	1.262	c=1.20E-2
		8.70	1.348	d=-7.78E-4
		10.90	1.410	

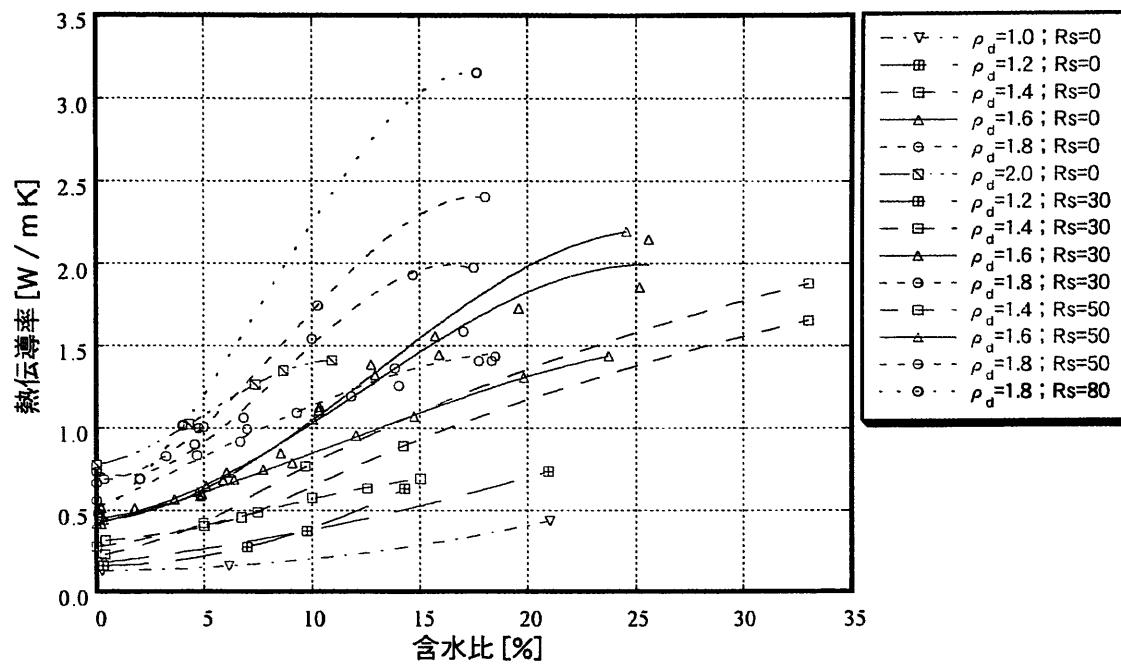
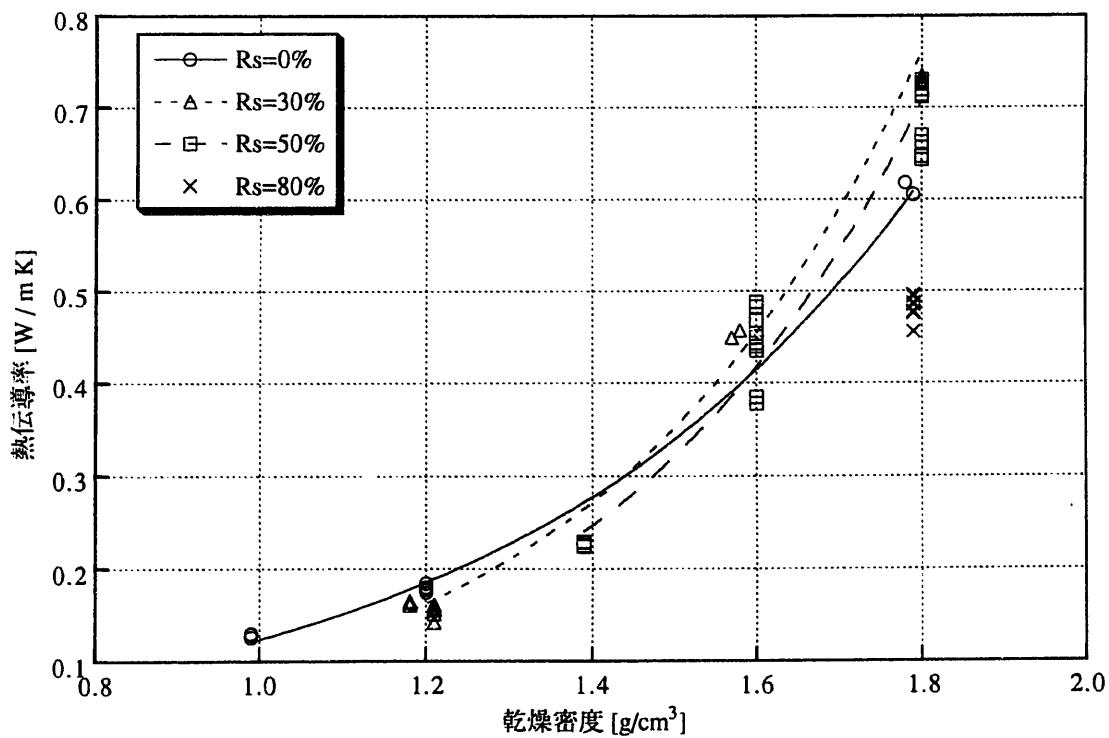


図 3-2 热伝導率測定結果（含水比依存性）

図 3-3 乾燥密度およびケイ砂混合率と熱伝導率の関係（含水比： $\omega = 0\%$ ）

(3) 測定結果の整理

ここでは、熱伝導率測定結果を、次章の解析的検討に用いるために整理を行った。本検討では含水比とケイ砂混合率をパラメータとしているため、ある乾燥密度に対してケイ砂混合の影響がどの程度の含水比から生じ始めるのかを、実験装置の測定精度を考慮し検討した。

1) ベントナイト含水比での整理

(2) で記述したように、熱伝導率のケイ砂混合率依存性は、含水比の低下とともに小さくなり、含水比 0% 時では、その依存性が小さいことが分かった。

含水比 0% 時での測定結果は、ベントナイト粒子とケイ砂粒子の熱伝導率が同じ程度の値を持つことを示している。また、ある含水比以上で熱伝導率のケイ砂混合率依存性が生じる理由については以下のように推測することができる。

ベントナイトの水分保持能力を表すサクションはケイ砂に比べ極めて高い（鈴木・藤田、1999）ため、ケイ砂を混合した供試体の場合、供試体に含まれる水分は主にベントナイト層間およびベントナイト間隙で保水されているものと考えられる。したがって、供試体の含水比が同じ場合、ケイ砂混合率が高いほどベントナイトの含水比は高くなり、ベントナイト粒子自体の熱伝導率が上昇するとともに、ベントナイト層間が水分子を取り込み膨潤するためベントナイト中の空隙は減少し熱伝導率の低い空気の影響が小さくなる。このため、ある含水比以上では、ケイ砂を混合することによって熱伝導率が上昇するものと考えられる。図 3-4 にその概念を示す。

このような考え方のもと、供試体中の水分が全てベントナイトが担保すると仮定し、以下の (3-3) 式で定義されるベントナイト含水比で、熱伝導率の測定結果を整理した。

$$\omega b = \frac{\omega}{\left(1 - \frac{Rs}{100}\right)} \quad (3-3)$$

ωb : ベントナイト含水比[%]

ω : 供試体含水比[%]

Rs : 供試体ケイ砂混合率[%]

図 3-5 に上式で求めたベントナイト含水比と熱伝導率の関係を示す。なお、図 3-5 では、表 3-2 および図 3-2 で示した測定結果全ての供試体含水比をベントナイト含水比に換算し、乾燥密度毎に整理した。その結果、ケイ砂混合率によらず、乾燥密度毎に、ベントナイト含水比の増加にしたがい供試体熱伝導率もほぼ一定の増加傾向を示すことが分かった。図中では、この傾向を線形関係で示し、ベントナイト含水比 0% の、つまり供試体含水比 0% 時にケイ砂混合率によらず乾燥密度毎に一定となるよう仮定した熱伝導率を求めた。以下 (3-4) 式に得られた線形関係を示す。なお、(3-4) 式において右辺第 1 項の定数が供試体含水比 0% 時の熱伝導率となる。

$$\text{乾燥密度 } 1.0[\text{g/cm}^3] \quad \lambda = 0.09924 + 0.015401 \omega b$$

$$\text{乾燥密度 } 1.2[\text{g/cm}^3] \quad \lambda = 0.12919 + 0.025466 \omega b$$

$$\text{乾燥密度 } 1.4[\text{g/cm}^3] \quad \lambda = 0.27173 + 0.026147 \omega b$$

$$\text{乾燥密度 } 1.6[\text{g/cm}^3] \quad \lambda = 0.40951 + 0.042458 \omega b \quad (3-4)$$

$$\text{乾燥密度 } 1.8[\text{g/cm}^3] \quad \lambda = 0.56242 + 0.053965 \omega b$$

$$\text{乾燥密度 } 2.0[\text{g/cm}^3] \quad \lambda = 0.78035 + 0.061286 \omega b$$

λ : 供試体熱伝導率[W/m K]

ωb : ベントナイト含水比[%]

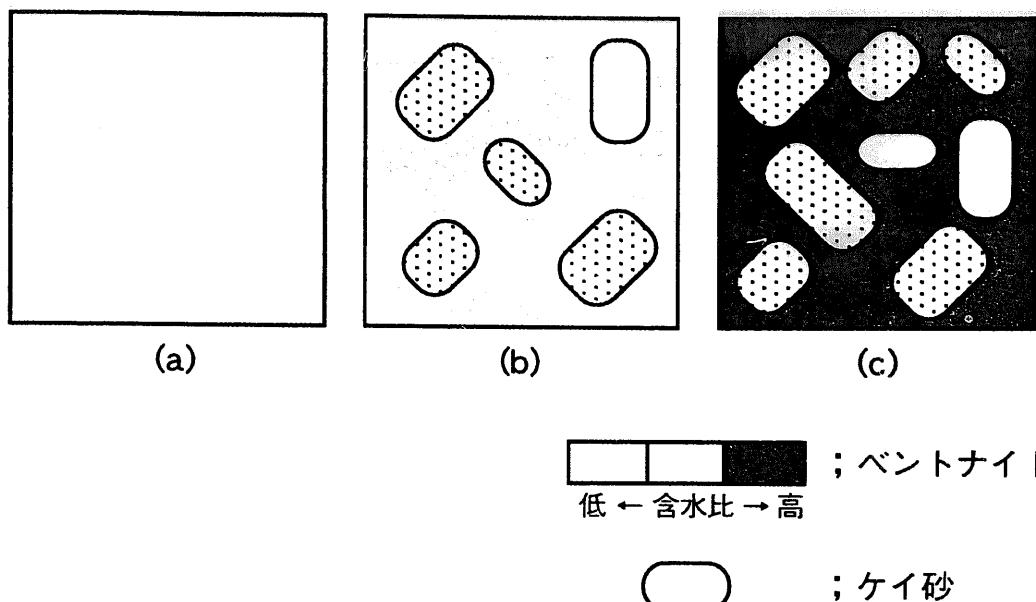
2) 実験装置測定精度の考慮

熱伝導率は、成型体として自立するものに対しては供試体の 4 側面に対しそれぞれ 3 回ずつ測定を行ったが、測定値の平均値に対する標準偏差はおよそ $\pm 2\sim 6\%$ であり、測定結果にはらつきが生じた。これは、測定面となる供試体表面の状態や、圧縮成型時に生じる密度や水分の偏り、そして装置の測定精度などの影響が考えられる。このうち、本検討で用いた迅速熱伝導率

計の測定精度が±5%である（昭和電工(株), Shotherm QTM-DII, 取り扱い説明書）ことから、ばらつきの主な原因は装置の精度であると考えられる。ここでは、乾燥密度およびケイ砂混合率毎に、含水比と供試体熱伝導率の関係を3次曲線で定式化し、測定精度の±5%の範囲を設定することとした。次いで、乾燥密度毎に、その範囲の下限と上限が交差する、つまり測定精度の最大幅を考慮してもケイ砂混合の影響が出始める供試体含水比を求めた。図3-6～3-9に乾燥密度毎に測定結果および測定精度の幅を示す。ただし、図中供試体含水比0%時の熱伝導率は、ケイ砂混合率によらず、1)で検討したベントナイト含水比 ω_b と供試体熱伝導率の線形関係から求めたベントナイト含水比0%時の供試体熱伝導率の値で一定としている。ケイ砂混合の影響が出始める含水比を表3-3に整理する。これらより、乾燥密度およびケイ砂混合率の増加とともに、ケイ砂混合の影響が出始める供試体含水比は小さくなる結果となった。また、ベントナイトの自然含水比を10%（クニミネ工業）とし、ケイ砂が水分を持たないという前提にたてば、ケイ砂混合率30wt%緩衝材の自然含水比は7%，ケイ砂混合率50wt%緩衝材の自然含水比は5%，ケイ砂混合率80wt%緩衝材の自然含水比は2%であるため、本検討で測定した試料に対して、ベントナイト単体を基準とした場合、緩衝材自然含水比以下でケイ砂混合の影響が生じるのは、乾燥密度1.8g/cm³のケイ砂混合率30wt%と50wt%，および乾燥密度1.6g/cm³のケイ砂混合率30wt%であるといえる。

表3-3 ケイ砂混合により熱伝導率に影響が出始める含水比
(ベントナイト単体を基準とした場合)

乾燥密度 [g/cm ³]	ケイ砂混合率 [wt%]	供試体飽和度 [%]	供試体含水比 [%]	ベントナイト含水比 [%]
1.2	30	22.82	10.5	15.00
1.4	30	29.31	10.0	14.29
	50	17.66	6.0	12.00
1.6	30	26.80	6.8	9.64
	50	25.95	6.5	13.00
1.8	30	30.15	5.5	7.86
	50	16.57	3.0	6.00
	80	14.03	2.5	12.50



(a),(b),(c)の供試体含水比は同一であるが、水分を含まないケイ砂の混合率が高いほどベントナイト含水比は高くなり、その結果、熱伝導率は上昇する。

図 3-4 ベントナイト含水比の概念

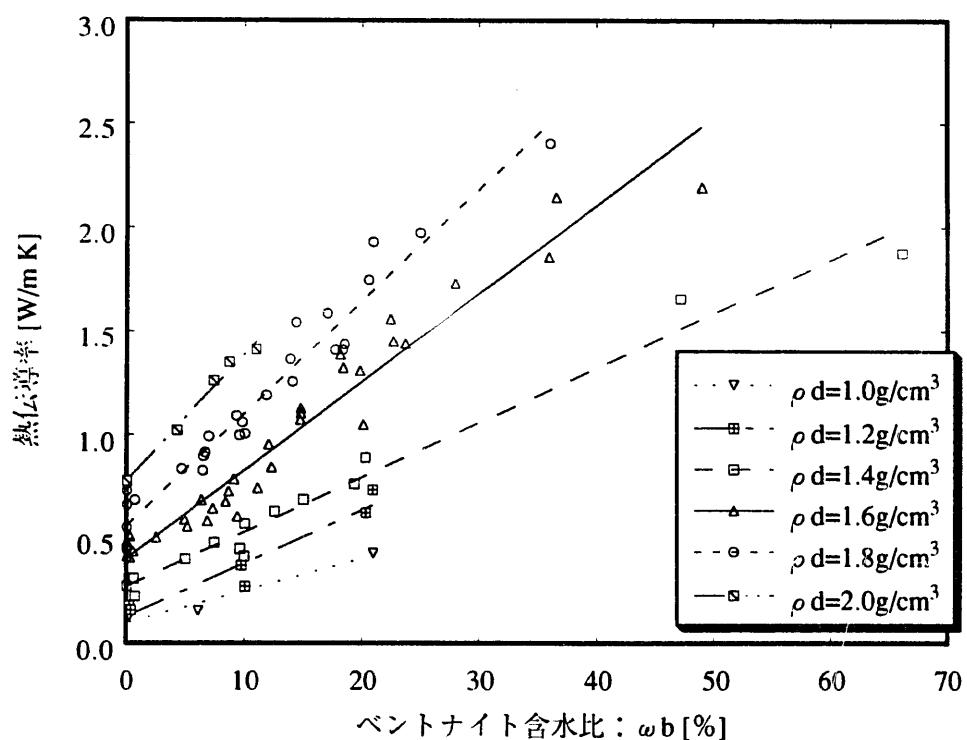
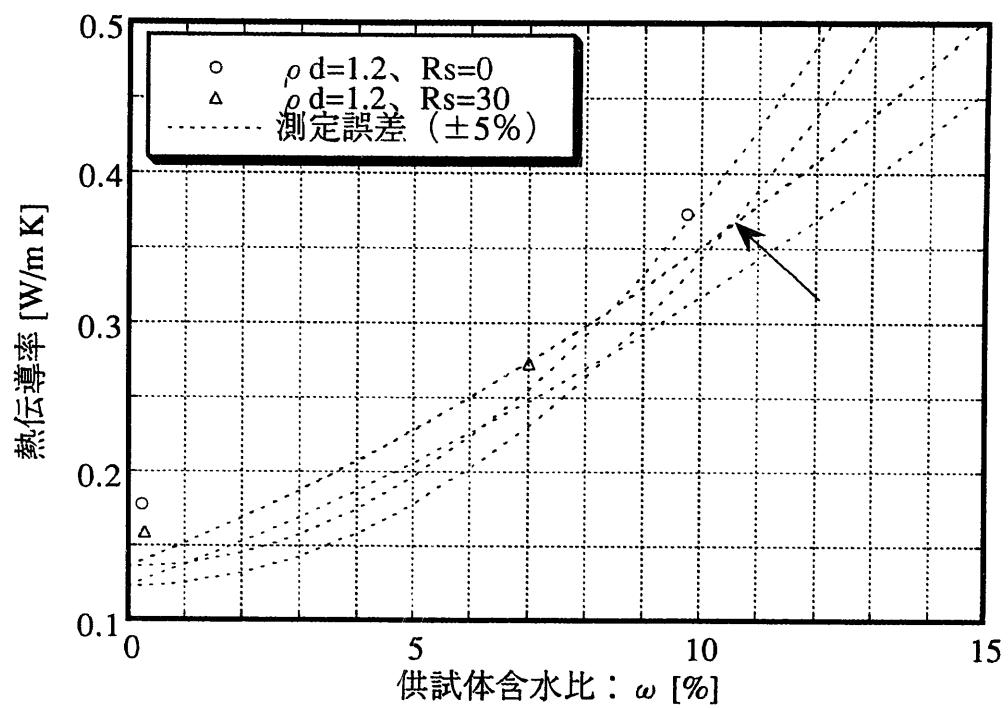
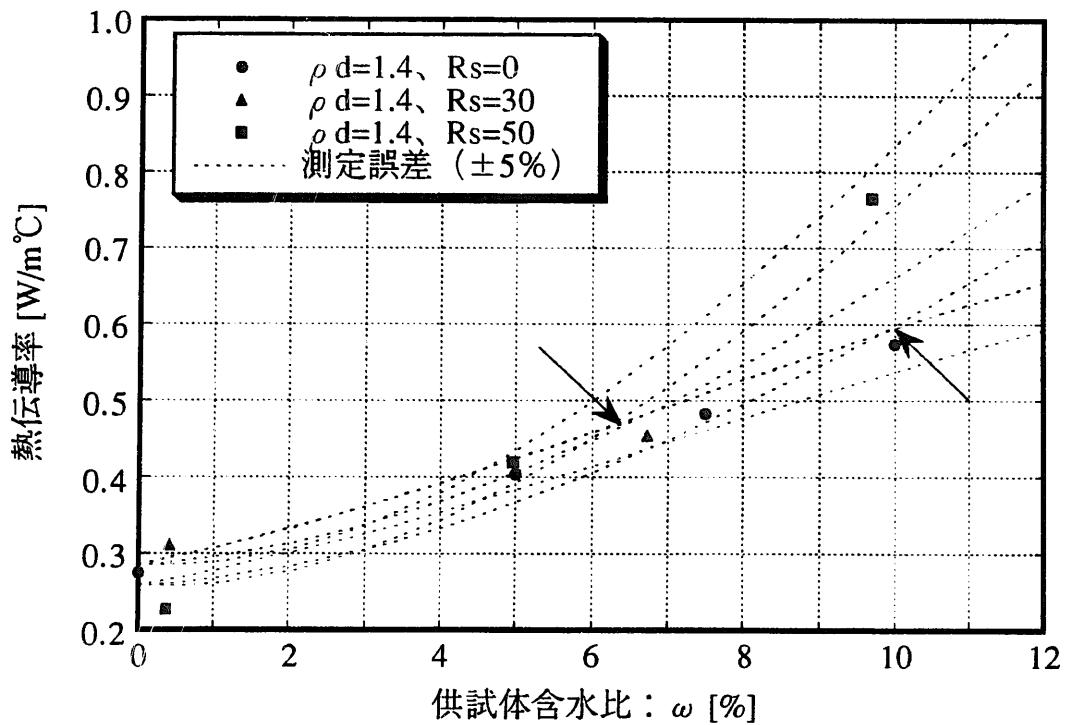
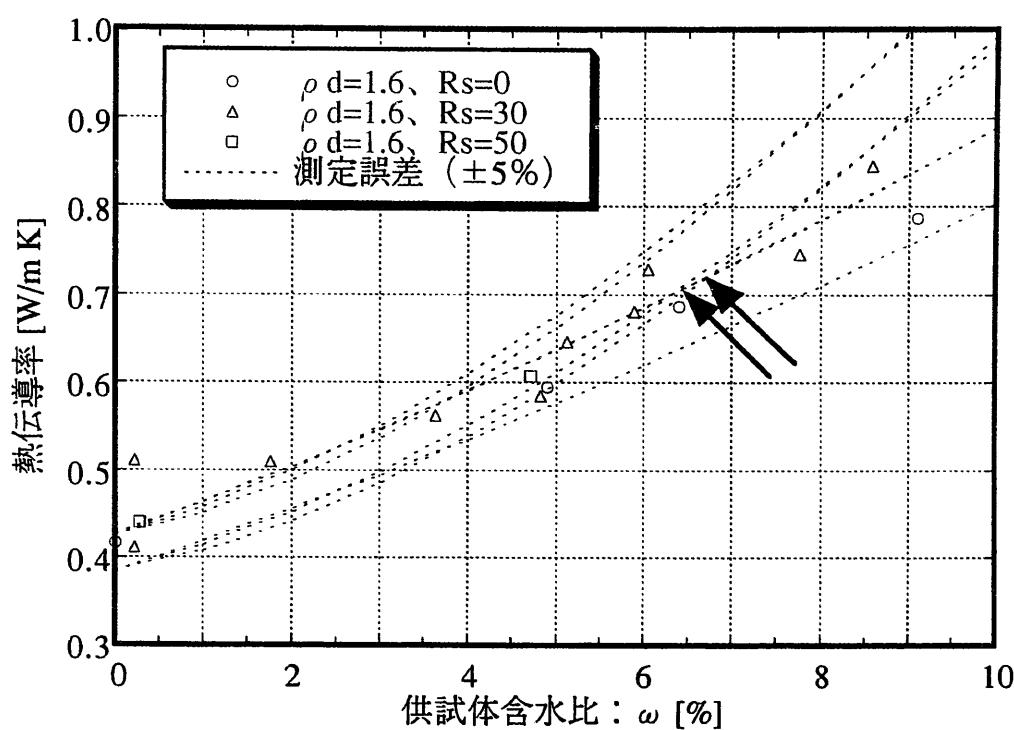
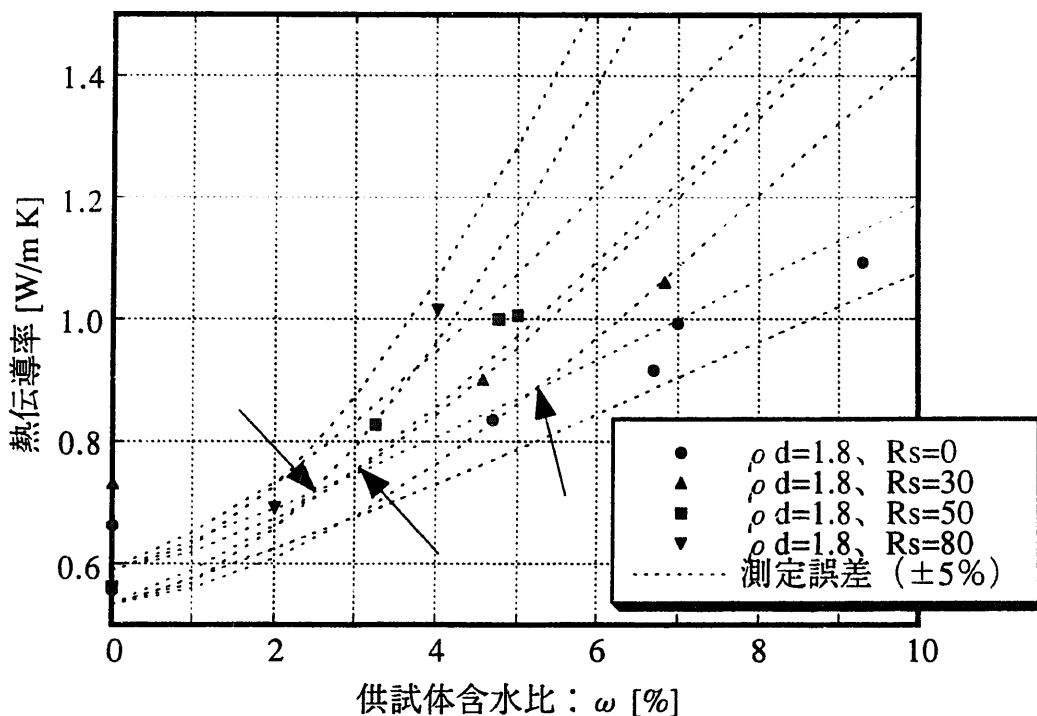


図 3-5 供試体におけるベントナイト含水比と熱伝導率の関係

図 3-6 热伝導率の含水比依存性と測定精度範囲（乾燥密度： $\rho d=1.2\text{g}/\text{cm}^3$ ）図 3-7 热伝導率の含水比依存性と測定精度範囲（乾燥密度： $\rho d=1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ）

図 3-8 热伝導率の含水比依存性と测定精度範囲（乾燥密度： $\rho d=1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）図 3-9 热伝導率の含水比依存性と测定精度範囲（乾燥密度： $\rho d=1.8\text{g}/\text{cm}^3$ ）

3-3 热拡散率の測定および比熱の同定

热拡散率の測定および比熱の同定も、鈴木らによって行われた方法（鈴木、谷口、1999）と同様とした。すなわち、点熱源法（信太ほか、1997）を用い熱拡散率を測定し、熱伝導率の測定結果を用いて、比熱を同定した。なお、比熱の含水比依存性は以下に示す(3-6), (3-7)式で得られるため、ここでは、含水比0%時の熱拡散率を求めた。

(1) 热拡散率測定方法

热拡散率の測定は、図3-10に示す球状プローブ（芝浦電子社製PBT-43-S2）を用いた点熱源法により行った。点熱源法において、球状プローブは、サーミスタ微粒子に白金リード線を取り付け、それをガラスで保護した構造となっており、熱源と同時に温度変化による電気抵抗の変化を利用して温度センサーとしての役割も持つことになる。サーミスタの温度は、0.5秒毎に30秒間測定し、サーミスタの温度上昇のプロファイルを求めた。その後、数値解析により測定媒体、球状プローブを構成するサーミスタ、ガラス被膜、リード線を含む複合系での非定常熱伝導方程式を、熱拡散率をパラメータとして解いた場合の温度上昇プロファイルと測定によるプロファイルとの誤差が最小となる熱拡散率を求めた。測定では、図3-11に示すように、直径20mm、厚さ10mmのアクリル製セル内に所定の密度に充填したものを2ヶ作成し、サーミスタをその間に挟んで設置した。

試験温度に関しては、熱伝導率と同様、90℃以下の条件では、温度環境が緩衝材の比熱に与える影響は小さいことが報告されている（鈴木、谷口、1999）ため、ここでは室温での測定とした。

(2) 比熱の同定方法

上記測定方法により得られた同一試験条件下での熱拡散率と熱伝導率から、以下に示す(3-5)式から比熱を同定した。

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (3-5)$$

ここで、 α は熱拡散率 [m^2/s]、 λ は熱伝導率 [W/m K]（ただし、熱拡散率の検討時には[kJ/s m K]に換算）、 c は比熱[kJ/kg K]、 ρ は単位体積重量 [kg/m^3]である。

本検討では、含水比 0%時の比熱を求め、比熱の含水比依存性を以下の考えに基づき設定した。

一般に、土の比熱は、土を構成する基質部、液相、気相の単位体積当たりの重量比で表せることが知られており（例えば、Gaylon S. Campbell 著、中野政詩、東山勇監訳、1987），(3-6) 式で表される。

$$c = c_s \rho_s + c_w \rho_w + c_a \rho_a \quad (3-6)$$

ここで、 ρ は単位体積当たりの重量比、添字 s 、 w 、 a は各相を表し $\rho_s + \rho_w + \rho_a = 1$ である。このうち、気相の項は他に比べて十分小さいので無視することができるため、(3-7) 式で表すことができる。

$$\begin{aligned} c &= c_s \frac{m_s}{m_s + m_w} + c_w \frac{m_w}{m_s + m_w} \\ &= c_s \frac{1}{1 + \frac{m_w}{m_s}} + c_w \frac{1}{1 + \frac{m_s}{m_w}} \\ &= c_s \frac{1}{1 + \omega} + c_w \frac{1}{1 + \frac{1}{\omega}} \\ &= \frac{c_s + c_w \omega}{1 + \omega} \end{aligned} \quad (3-7)$$

ここで、 m は質量を、 ω は緩衝材の含水比を表す。

したがって、含水比が 0%の熱伝導率と熱拡散率を測定し、両者の関係から含水比 0%の比熱を求めれば、緩衝材の水分の増加にともなう比熱の変化を理論的に予測することができる。

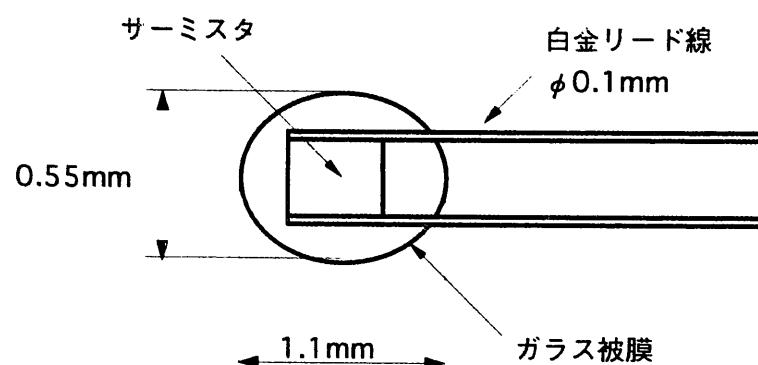


図 3-10 サーミスタプローブ

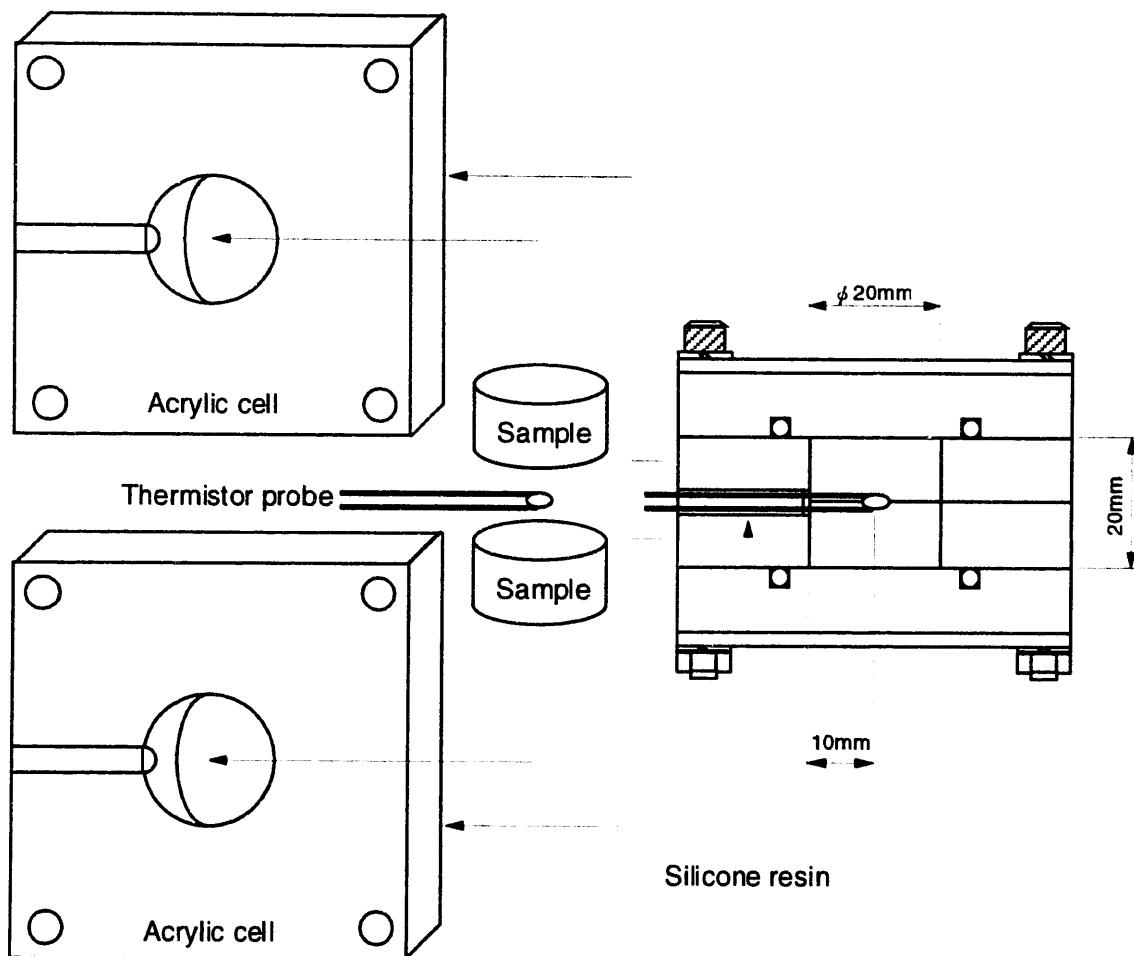


図 3-11 热拡散率測定装置

(3) 測定結果および同定結果

供試体含水比 0%の熱拡散率の測定結果を図 3-12 に示す。熱拡散率は供試体密度が大きいほど大きな値を示した。

上記、熱伝導率および熱拡散率測定結果から、(3-5) 式を用いて供試体含水比 0%の比熱を同定した。同定結果である乾燥密度と比熱の関係を図 3-13 に示す。これから、含水比 0%の緩衝材の比熱は、ケイ砂混合による影響はほとんどない、つまり、ケイ砂とペントナイトの比熱は同等であることが分かった。また、比熱は乾燥密度とともに僅かながらも大きくなり、含水比 0%の場合の比熱 c [kJ/kg K] と乾燥密度 ρ_d [g/cm³] の関係を (3-8) 式のように定式化した。しかしながら、(3-6) 式で示される理論式から十分に値が小さい気相の項を無視すると、緩衝材の比熱の乾燥密度依存性は無く、一定となる。本測定および同定で、若干の乾燥密度依存性が生じた理由は、緩衝材の場合、空隙率が大きいため空気の影響が出てしまい、空隙率のより大きい低乾燥密度の方で比熱が小さくなつたことと考えられる。

本検討では、測定で得られた値から、つまり含水比 0%時の比熱の乾燥密度依存性を考慮し、(3-7), (3-8) 式に基づき、緩衝材の比熱を乾燥密度および供試体含水比をパラメータに以下の (3-9) 式のように定式化した。

$$c_s = 0.111\rho_d + 0.123 \quad (3-8)$$

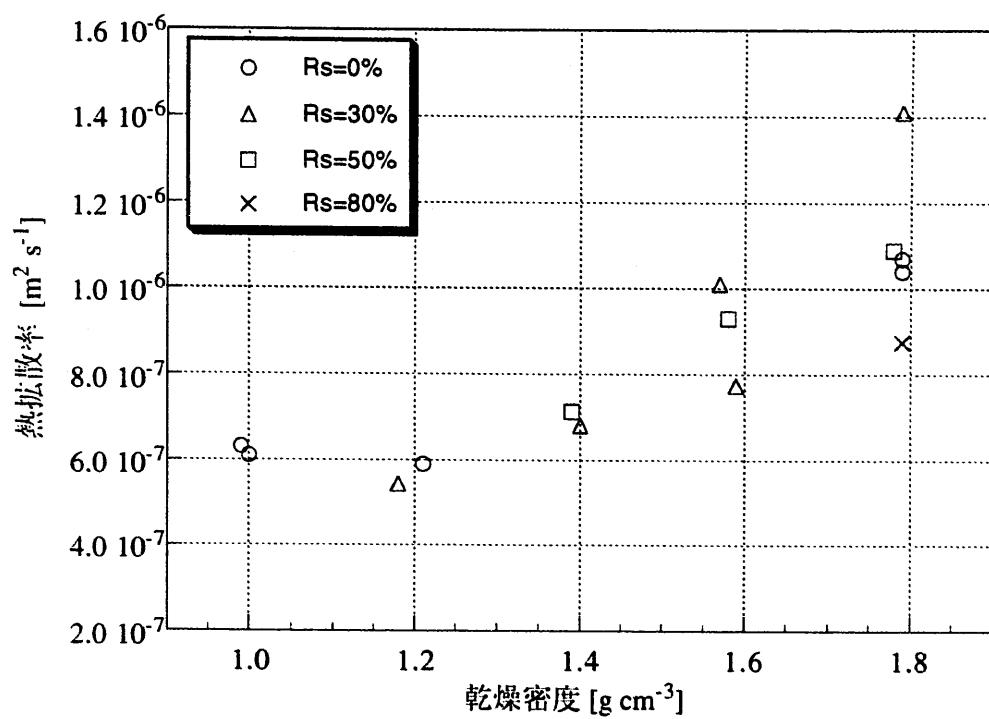
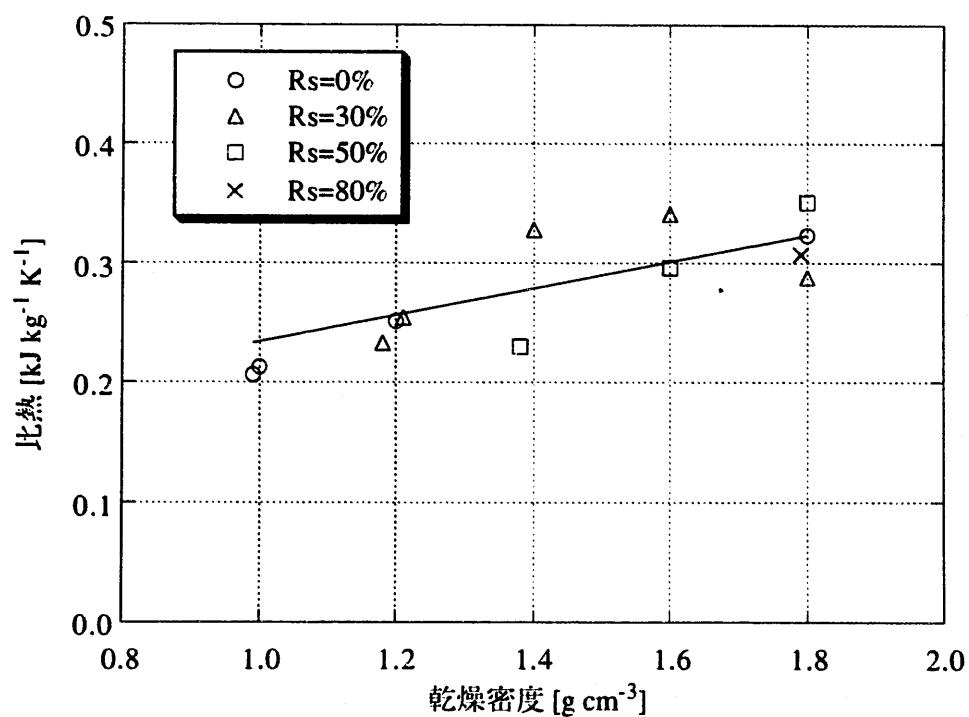
$$c = \frac{11.1\rho_d + 12.3 + 4.18\omega}{100 + \omega} \quad (3-9)$$

c_s : 緩衝材基質部（固相）比熱

c : 緩衝材比熱

ρ_d : 乾燥密度

ω : 含水比

図 3-12 供試体乾燥密度と熱拡散率の関係（含水比： $\omega=0\%$ ）図 3-13 供試体乾燥密度と比熱の関係（含水比： $\omega=0\%$ ）

4. ニアフィールド熱解析による人工バリアの緩衝材成立範囲の検討

4-1 考え方

前述したように、現在のところ、人工バリアの設計においては、熱伝導性、つまり人工バリアおよび周辺岩盤がその機能を維持するよう物理的・化学的に変質を起こさないための制限温度を設計要件に反映させている。人工バリアおよび周辺岩盤の制限温度に関しては、既往の解析検討（五月女ほか, 1992；谷口・藤田, 1997；谷口・岩佐, 1999）より緩衝材の制限温度が支配的であることが把握されている。また、緩衝材の最高上昇温度は、廃棄体 1 本当りの専有面積の増加とともに小さくなるが、ある専有面積を越えると一定の温度に収束することが把握されている（谷口・岩佐, 1999）。したがって、ここでは、緩衝材の最高上昇温度がほぼ収束すると考えられかつ現実的な施工範囲内である廃棄体専有面積の場合を対象とし、解析入力値に対し、緩衝材の乾燥密度、含水比、ケイ砂混合率、人工バリアにおける緩衝材の厚さをパラメータにし、人工バリアおよび周辺岩盤を解析領域に含めたニアフィールドの熱伝導解析を行った。次いで解析結果から、緩衝材の許容温度を基に、緩衝材の最高上昇温度が、制限温度以下になるような範囲、つまり、人工バリアにおける緩衝材厚さ、乾燥密度、含水比、およびケイ砂混合率の熱的観点からの成立範囲を検討した。

4-2 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。しかしながら、廃棄体定置直後から人工バリアが最高温度に至る数十年間以内（谷口・岩佐, 1999；谷口・藤田, 1997）は、地下深部での地下水の移動速度は非常に小さく熱伝導に与える影響が小さいこと、廃棄体の発熱によるニアフィールドの地下水の対流が熱伝導に与える影響が小さいこと（谷口・岩佐, 1999），地下

水の浸潤により緩衝材の熱伝導性が上昇するため、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環境の観点からは保守的な結果を与える（千々松・谷口, 1999）こと等により、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, 1992a）を用いた。

4.3 解析条件

(1) 検討対象とする人工バリア

人工バリアは、高レベル放射性廃液をガラス固化したガラス固化体、ガラス固化体を格納するためのオーバーパック、およびオーバーパックと岩盤の間に充填される緩衝材から構成される。人工バリアの定置方式は、処分坑道横置き方式と処分坑道堅置き方式について検討が進められている（例えば、動力炉・核燃料開発事業団, 1992b）が、緩衝材の最高上昇温度の観点からは、両者の定置方式による影響が小さい（谷口・岩佐, 1999）ため、ここでは一例として処分坑道横置き方式とした。

1) ガラス固化体

わが国で処分が想定されるガラス固化体に関しは、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の、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、使用済み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）の場合の発熱特性を用いた検討も補足的に行った。図 4-1 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。

2) オーバーパック

オーバーパックに関しては、本間ほか（1999）によって一例として設計された炭素鋼製のものを用いた。

3) 緩衝材

緩衝材に関しては、前章までで対象とした圧縮されたベントナイト、もしくはベントナイトにケイ砂を混合したものとし、乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比、人工バリアにおける緩衝材厚さをパラメータとした。また、人工バリアの定置時の緩衝材施工の面では、ブロック定置方式（千々松ほか、1999）と現場締固め方式（千々松ほか、1999）の場合を考慮した。パラメータの一つである人工バリアにおける緩衝材の厚さに関しては、解析に用いる FEM モデルに合わせて、18, 24, 31, 38, 45, 57.5, 70, 109 cm とした。

図 4-2 に検討の対象とする人工バリアを示す。

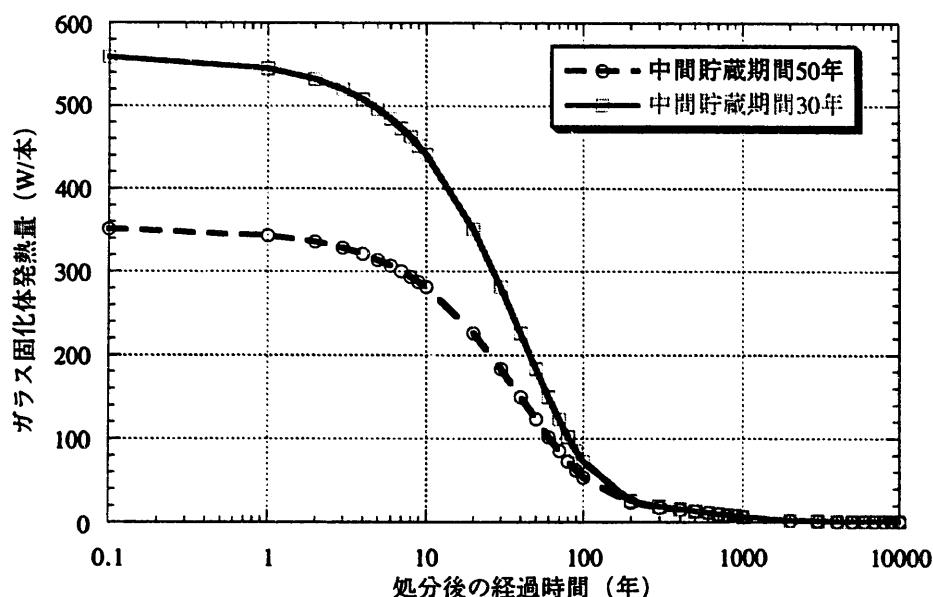


図 4-1 ガラス固化体発熱特性（石原ほか、1999）

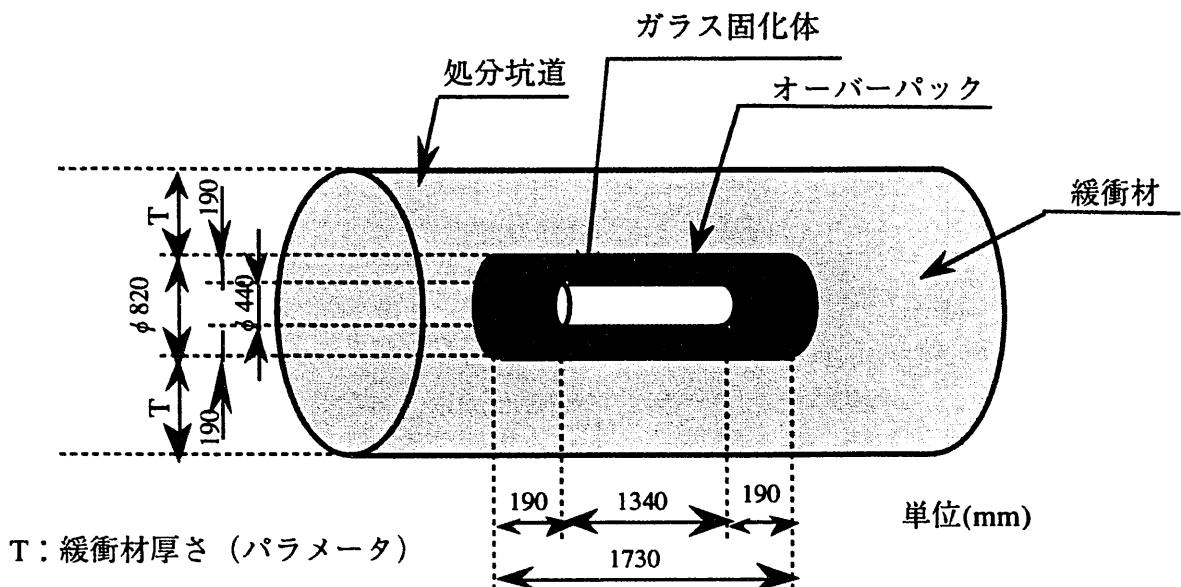


図 4-2 検討対象とする人工バリア

(2) 検討対象とする岩盤、処分深度、廃棄体定置方式および廃棄体専有面積

1) 岩盤および処分深度

人工バリアは、地下数百メートル以深に掘削される処分坑道に定置されることになる（動力炉・核燃料開発事業団, 1992b）。その深度に関しては、地層の隆起、沈降、侵食などの天然現象、坑道の力学的安定性や地温の影響といった設計、調査時および建設時の技術的制限、天然バリア機能として期待する地層の広がりなどの長期安全性、将来の地下利用等を考慮して決定されると考えられる。ここでは、一例として、硬岩系の岩盤（谷口ほか, 1999）を対象とし、処分深度を 1000m とした。なお、サイトが未定の現段階では、地下の地盤温度は、深度が増すごとに地温が上昇する地温勾配によって定義することになるため、深度 1000m での検討は、熱的観点からは保守的と考えられる。

2) 廃棄体定置方式および廃棄体専有面積

廃棄体の定置法式に関しては、現在のところ処分坑道横置き方式および処分孔縦置き方式が中心に検討が進められている。

また、廃棄体1本当たりの専有面積は、図4-3に示すように、処分坑道離間距離と廃棄体定置ピッチの積によって定義される。

緩衝材の最高上昇温度の観点からは、この両定置方式の影響は小さいが、廃棄体専有面積の影響は大きく、ある廃棄体専有面積を越えると一定値に収束する傾向がある（谷口・岩佐、1999）。また、同廃棄体専有面積に対する処分坑道離間距離の影響は小さい（谷口・岩佐、1999）。図4-4に上記傾向を示した解析結果の一例を示す（谷口・岩佐、1999）。これによると、緩衝材最高上昇温度は廃棄体専有面積 $100\text{m}^2/\text{本}$ 程度で収束することが示されている。

したがって、本検討では、処分坑道横置き方式における処分坑道離間距離を緩衝材厚さ 70cm 時の処分坑道径の 6 倍（13.32m）とした場合の廃棄体専有面積 $300\text{m}^2/\text{本}$ を解析の対象とした。

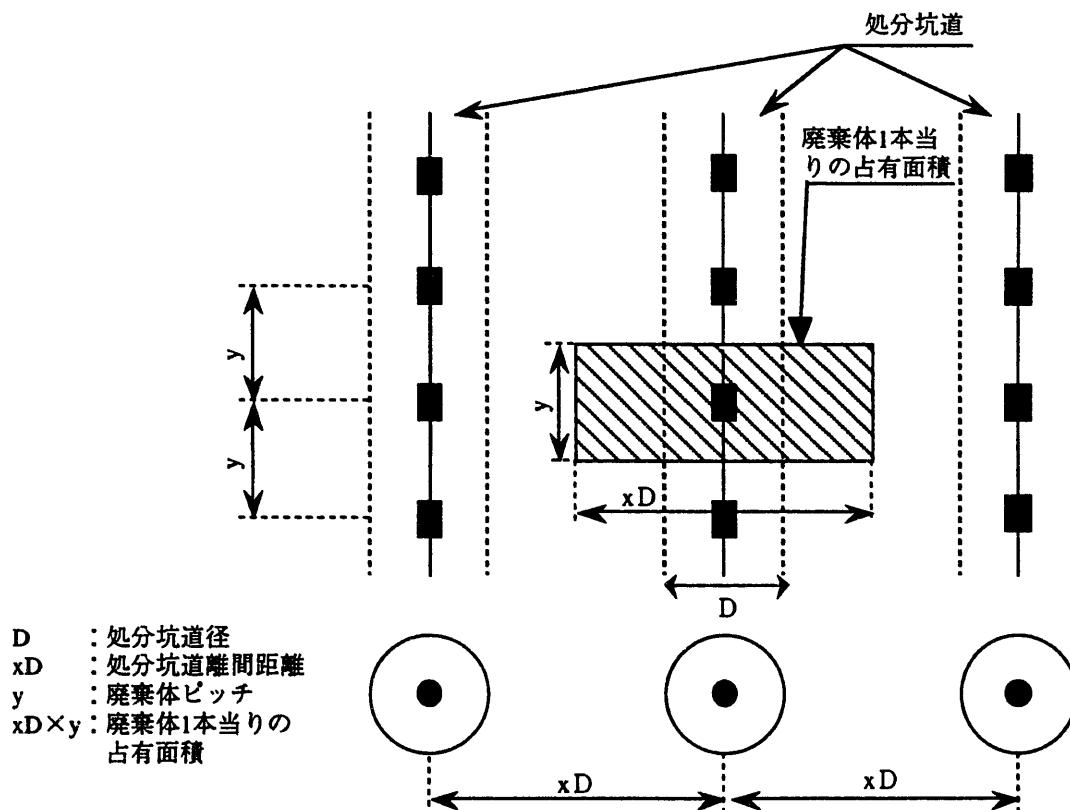


図4-3 廃棄体専有面積の定義（処分坑道横置き方式）

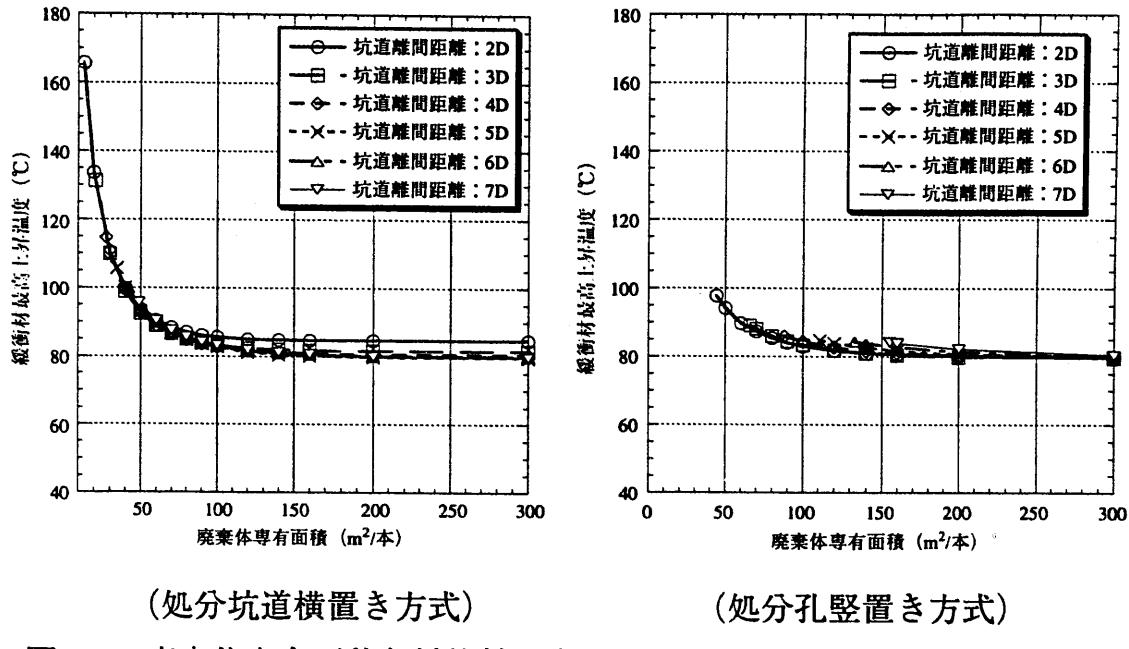


図 4-4 廃棄体専有面積と緩衝材最高上昇温度の関係（谷口・岩佐, 1999）
 （緩衝材乾燥密度 : 1.6g/cm^3 , 含水比 : 7%, 硬岩系岩盤, 処分深度 : 1000m,
 ガラス固化体中間貯蔵期間 : 50 年, 凡例中 D は処分坑道径 (処分坑道横置き
 方式 : 2.22m, 処分孔堅置き方式 : 5m) を示す）

(3) 解析に用いた熱物性

1) ガラス固化体およびオーバーパック

ガラス固化体の熱物性は第 1 次取りまとめ（動力炉・核燃料開発事業団, 1992）と同様とした。オーバーパックに関しては、伝熱工学資料（日本機会学会, 1966）に基づき温度 27°C (300K) での値を用いた。

2) 緩衝材

本検討では、緩衝材の熱物性をパラメータに検討することになる。緩衝材の熱物性は、前述したように、その乾燥密度、含水比、およびケイ砂混合率に依存する。また、これらは、緩衝材の他の特性、特に、人工バリアの定置時に考慮する必要がある力学特性、および締固め特性にも影響を及ぼす（千々松ほか, 1999；高治・鈴木, 1999）。本検討では、熱伝導の観点からの保守性を考慮し、緩衝材の自然含水比（ケイ砂混合率 0wt%時で自然含水比 10%, ケイ砂混合率 30wt%時で自然含水比 7%, ケイ砂混合率 50wt%時

で自然含水比 5%, ケイ砂混合率 80wt%時で自然含水比 2%) (クニミネ工業, 私信) 以下の検討を主とした。また, 現場締固め施工を考慮し, 緩衝材含水比が 10%を越える範囲でも検討を行った。

以下に, 緩衝材の乾燥密度, ケイ砂混合率および含水比に関するパラメータ設定の考え方, 解析用入力熱物性設定の考え方を, ブロック定置方式と現場締固め方式の場合に分けて記す。

(a) ブロック定置方式

ブロック定置方式は, あらかじめ地上施設にて製作した緩衝材ブロックを現地において定置するものである (千々松ほか, 1999)。したがって, ブロックを運搬・定置する作業が必要であり, これらに耐えうる強度特性が必要となる (千々松ほか, 1999)。緩衝材の一軸圧縮強度は含水比の増加とともに低下する (高治・鈴木, 1999) ため, 含水比が低い状態でブロックを製作するほうが望ましい。また, 热伝導の観点からは, 前述の試験結果により, 含水比が低いほど熱伝導率が小さく, 設計上厳しい評価となる。したがって, 緩衝材ブロック運搬時にブロックが乾燥する可能性があることを考慮すると, 热伝導保守性の担保の観点から, ブロック製作含水比は上記した自然含水比以下であることが望ましい。このような理由から, 本検討では, ベントナイトの自然含水比以下の含水比を対象とし, 含水比: $\omega=0, 3, 5, 7, 10\%$ の熱物性を用いた。なお, これらの値は, 前述の試験整理結果および同定に基づいて設定した。以下に緩衝材の熱物性の設定および熱物性のパラメータ範囲を記述する。

a) ベントナイト単体緩衝材

含水比に関しては, ベントナイトの自然含水比以下の含水比 $\omega=0, 3, 5, 7, 10\%$ とした。熱伝導率に関しては, 前述の試験結果を受け, (3-2) 式および表 3-2 で示した含水比と熱伝導率の関係式から設定した。比熱に関しても, 前述の試験結果を受け, (3-9) 式に従い設定した。

b) ケイ砂混合率 30wt%緩衝材

含水比に関しては, ケイ砂混合率 30wt%緩衝材の自然含水比以下の含水比: $\omega=0, 3, 5, 7\%$ を主としたが, 10%での検討も補足的に行つ

た。熱伝導率に関しては、表 3-3 に示すように、乾燥密度 1.2 および $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ における含水比 10% 以下、乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ における含水比 6% 以下、および乾燥密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ における含水比 5% 以下の条件では、熱伝導率のケイ砂混合率依存性はないものとして扱えることから、この含水比範囲にあるものは、上記ベントナイト単体と同値とした。したがって、新たに設定した物性は乾燥密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ および $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ における含水比 7% 、含水比 10% のものであり、これらも (3-2) 式および表 3-2 で示した含水比と熱伝導率の関係式から設定した。比熱に関しても、前述の試験結果を受け、(3-9) 式に従い設定した。

c) ケイ砂混合率 $50\text{wt}\%$ 、およびケイ砂混合率 $80\text{wt}\%$ 緩衝材

ケイ砂混合率 $50\text{wt}\%$ 緩衝材については、熱伝導率に関して、自然含水比（ケイ砂混合率 $50\text{wt}\% ; 5\%$ ）以下で、乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ のものはケイ砂混合率 $30\text{wt}\%$ の場合と同値、乾燥密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ のものはケイ砂混合率 $30\text{wt}\%$ の場合より若干大きい値となるがほぼ同値と見なせる（表 3-3、図 3-3 参照）ため、ここでの解析では検討対象外とした。

(b) 現場締固め方式

現場締固め方式は、含水比調整した緩衝材材料を処分空間に供給し、締固め機械を用いて緩衝材を現場で締固めて施工するものである（千々松ほか、1999）。図 4-5 に緩衝材の締固め特性曲線の一例を示す（千々松ほか、1999）。これから、緩衝材のケイ砂混合率に対する最適含水比が分かる。ケイ砂混合率 $0\text{wt}\%$ 時の最適含水比は 30% であり、その時の最大乾燥密度は約 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ である。一方、ケイ砂混合率 $30\text{wt}\%$ 時の最適含水比は 17% であり、その時の最大乾燥密度は約 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ である。したがって、現場締固めの場合、ケイ砂を混合した緩衝材の方が乾燥密度を大きくすることが可能である。さらに、緩衝材に要求される物理的な機能の多くが、乾燥密度の大きいほど優れた特性を示す（鈴木ほか、1992）。また、施工性の観点から、ブロック形式よりも緩衝材設置時含水比が大きいと想定されるため熱伝導率も大きくなり、熱伝導の観点からも設計上有利となる。これらの理由により、ここでは、ケイ砂混合率 $30\text{wt}\%$ 緩衝材のみを対象とし、解析においては、その含水比を最適含水比である 17% とし、熱伝導率は、ブロック定置

方式の場合と同様、(3-2) 式および表 3-2 より求められる値に設定した。比熱に関しても同様に (3-9) 式に従い設定した。

3) 岩盤

岩盤の熱物性に関しては、サイトが未定の地層処分場の設計のために、谷口ほか (1999) によって設定された仮想の硬岩系岩盤の物性を用いた。

表 4-1 に解析に用いたガラス固化体、オーバーパックおよび岩盤の熱物性を、表 4-2 にパラメータとした緩衝材の熱物性を示す。

表 4-1 解析に用いた物性（ガラス固化体、オーバーパック、岩盤）

	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
岩盤	2.8	1.0	2670

表 4-2 解析に用いた物性（緩衝材）

緩衝材			解析入力物性				
	乾燥密度 : ρ_d (g · cm ⁻³)	ケイ砂混合率 : Rs (wt%)	含水比 : ω (%)	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)	備考
ブロック定置方式	1.0	0	0	0.129	0.230	1000	
	1.2			0.178	0.252	1200	
	1.4			0.275	0.275	1400	
	1.6			0.417	0.298	1600	
	1.8			0.518	0.321	1800	
	2.0			0.777	0.344	2000	
	1.0	0	3	0.136	0.345	1030	
	1.2			0.199	0.367	1236	
	1.4			0.345	0.389	1442	
	1.6			0.524	0.411	1648	
	1.8			0.705	0.433	1854	
	2.0			0.923	0.455	2060	
現場 締め固め 方式	1.0	0	5	0.148	0.418	1050	
	1.2			0.236	0.439	1260	
	1.4			0.404	0.461	1470	
	1.6			0.608	0.483	1680	
	1.8			0.833	0.504	1890	
	2.0			1.079	0.562	2100	
	1.0	0	7	0.166	0.488	1070	
	1.2			0.287	0.509	1284	
	1.4			0.469	0.531	1498	
	1.6			0.699	0.552	1712	
	1.8			0.959	0.573	1926	
	2.0			1.237	0.594	2140	
現場 締め固め 方式	1.0	0	10	0.204	0.589	1100	
	1.2			0.381	0.609	1320	
	1.4			0.567	0.630	1540	
	1.6			0.845	0.651	1760	
	1.8			1.136	0.672	1980	
	2.0			1.397	0.692	2200	
	1.0~1.8	30	0	0.780	0.552	1712	
	1.0~1.8			1.077	0.573	1926	
	1.0~1.8			1.023	0.651	1760	
	1.0~1.4			1.328	0.672	1980	
現場 締め固め 方式	1.0	30	17	0.533	0.804	1117	*
	1.2			0.822	0.823	1404	**
	1.4			1.104	0.842	1638	**
	1.6			1.620	0.862	1872	
	1.2			0.628	0.742	1371	実測値 **
	1.4			0.890	0.761	1599	実測値 **

* 乾燥密度 1.0g/cm³ の条件については熱伝導率を取得していないが、(3-2) 式に示す含水比と熱伝導率の関係式を用い、乾燥密度 1.0g/cm³ ケイ砂混合率 0 wt% 含水比 17% の熱伝導率の値に、乾燥密度 1.2g/cm³ ケイ砂混合率 30wt% 含水比 17% と乾燥密度 1.2g/cm³ ケイ砂混合率 0wt% 含水比 17%との熱伝導率の値の差を加算して熱伝導率値を設定した。

** 乾燥密度 1.2 および 1.4g/cm³ の条件での熱伝導率の測定は、含水比 0~14% の範囲で実施し、定式化を行っている。したがって、含水比 17% の場合の熱伝導率は推定値となるが、(3-2) 式により求めた値が図 3-2 に示す曲線の延長上にくること、(3-2) 式が適用できる最大含水比の 14% に近い値であることから、(3-2) 式を適用して求めた含水比 17% 時の熱伝導率は妥当であると判断し、関係式をそのまま適用した。ただし、上表に示すように実測値を用いての検討も行った。

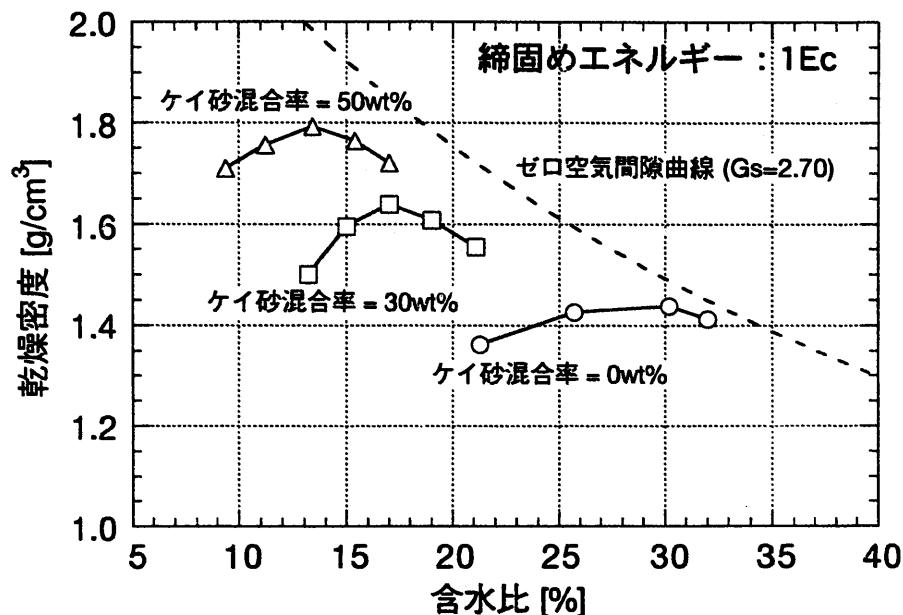


図 4-5 現場締固め方式での緩衝材締固め特性（千々松ほか, 1999）

(4) 解析モデルおよび境界、初期条件

図 4-6 に解析モデルおよび境界、初期条件を示す。

鉛直方向に関しては、ガラス固化体上下 200m の範囲をモデ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 である 1200m 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 とし、深度方向に 3°C/100m の地温勾配を用い設定した（谷口ほか, 1999）。境界条件としては、上述の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（深度 1200m）を同様に初期温度である 51°C ($15^{\circ}\text{C} + (3/100^{\circ}\text{C}/\text{m}) \times 1200\text{m}$) 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定置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。

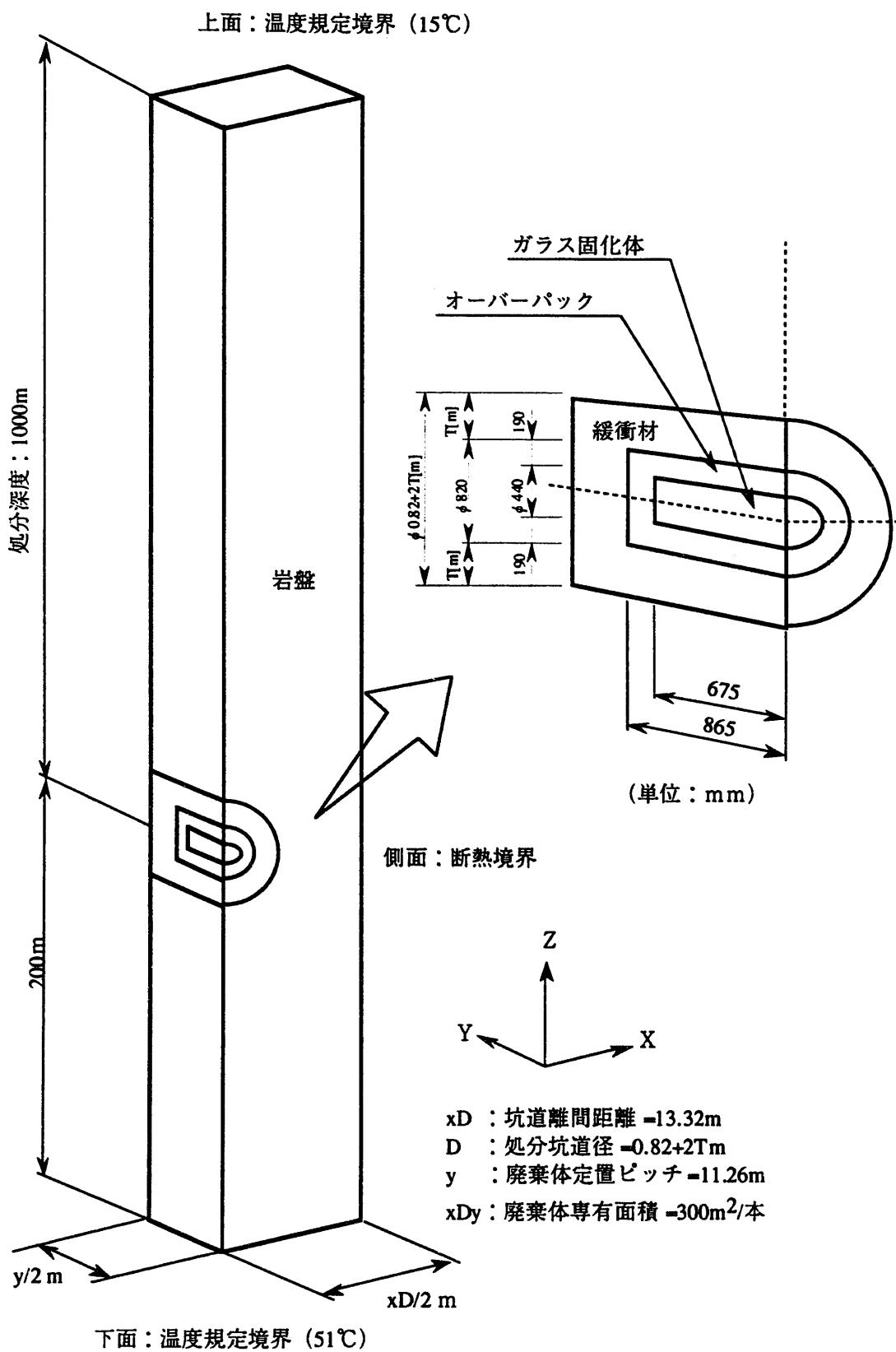


図 4-6 解析モデル

(5) 緩衝材の許容温度

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）によつては、主要構成鉱物であるスメクタイトの層間陽イオンの交換やスメクタイトの鉱物学的变化、溶存シリカの沈殿等によるセメンテーション等が生じ、緩衝材の諸特性に变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变化として考えられるものとしてスメクタイトのイライト化が挙げられる。スメクタイトのイライト化は天然の埋没続成作用や热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、わが国の続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つ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、鉱物学的な变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、純粹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。

4-4 解析結果

ここでは、緩衝材厚さをパラメータに緩衝材乾燥密度と解析結果である緩衝材最高上昇温度の関係のグラフを作成した。ついで、このグラフより、緩衝材厚さ毎に、緩衝材最高上昇温度が緩衝材の許容温度である 100°C になる乾燥密度を求め、熱的観点からの緩衝材成立範囲を検討した。なお、中間貯蔵期間 50 年の場合は本検討で行った解析結果を、中間貯蔵期間 30 年の場合は本検討で行った解析結果、および発熱量と緩衝材最高上昇温度の比例関係 (Taniguchi, et al., 1996) から推定した結果の両者を用い検討した。

(1) 中間貯蔵期間 50 年

- 1) 解析結果、および緩衝材が成立する範囲
 - a) ブロック定置方式

図 4-7～4-12 に乾燥密度と解析結果である緩衝材最高上昇温度の関係を示す。

これから、緩衝材熱伝導率が大きくなるにつれ、グラフの傾きは小さく、つまり、緩衝材乾燥密度が緩衝材最高上昇温度に及ぼす影響は小さくなつた。また、熱伝導率が大きいほど、緩衝材厚さが緩衝材最高上昇温度に及ぼす影響は小さくなつた。

図 4-13～4-18 に図 4-7～4-12 を用いて求めた熱的観点からの緩衝材成立範囲（緩衝材最高上昇温度が 100°C となるときの緩衝材乾燥密度と緩衝材厚さの関係）を含水比 0% 時の最小密度と合わせて、すなわち、本検討で得られた緩衝材成立範囲を示す。なお、含水比 0% 時の最小密度（カサ密度）を指標に用いたのは、廃棄体近傍の緩衝材が廃棄体の発熱により乾燥することを考慮したためである。また、図において熱的観点から緩衝材が成立する範囲は図中実線の曲線および点線の直線を境に矢印方向（右下方向）である（以下、成立範囲を示すグラフは全て同様）。これらから、各緩衝材仕様（含水比、およびケイ砂混合率）毎に、熱的観点から必要となる乾燥密度が求められることとなる。例えば、図 4-14 より、緩衝材含水比 3%，ケイ砂混合率 0wt% の緩衝材仕様において緩衝材厚さを 70cm としたときに熱的観点から人工バリアを成立させるのに必要な緩衝材乾燥密度は約 1.53 g/cm³ 以上

となる。

b) 現場締固め方式

図 4-19 に乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係を示す。また、図 4-20 に図 4-19 で示した解析結果を含水比 0% 時の最小密度と合わせて、緩衝材乾燥密度と緩衝材厚さの関係を示す。これらから、本検討での条件下における現場締固め方式および緩衝材厚さ 109cm 以下では、廃棄体近傍の緩衝材が廃棄体の発熱により乾燥する可能性があることを考慮した場合における最小乾燥密度（含水比 0% 時のカサ密度）以上であれば、熱的観点からの制約条件はないことが言える。ただし、この結果は、これまでの実績で示された緩衝材現場締め固め施工性を考慮した場合であり、今後の技術開発により、低含水比での施工が可能となればブロック形式と同様な熱的観点からの成立範囲が示されることになる。

2) 緩衝材熱伝導率での整理

図 4-21 に緩衝材の乾燥密度、ケイ砂混合率および含水比に関らず、熱伝導率と緩衝材の最高上昇温度の関係にプロットしたものを示す。

これから、緩衝材の最高上昇温度は、緩衝材厚さ毎に、緩衝材の熱伝導率で整理できることが分かった。すなわち、熱伝導方程式を支配する緩衝材の物性に関して、単位体積重量および比熱の及ぼす影響はほとんどなく、緩衝材の最高上昇温度を支配するのは熱伝導率であることが分かった。このことは、後述の理論的検討で考察する。熱伝導率と最高上昇温度の関係の傾向としては、緩衝材の熱伝導率が良好になるほど、グラフの傾きは小さくなり、かつ緩衝材厚さに関らず一定の緩衝材最高上昇温度に収束する、つまり、緩衝材の熱伝導率が良好になるほど緩衝材の最高上昇温度に及ぼす影響は小さくなり、かつ、緩衝材の厚さが緩衝材の最高上昇温度に及ぼす影響も小さくなつた。

図 4-22 に図 4-21 を用いて求めた熱的観点からの緩衝材成立範囲（緩衝材熱伝導率と緩衝材厚さの関係）を示す。本図と図 3-3 で示した緩衝材熱伝導率結果を用いれば、熱的観点から必要となる緩衝材仕様が求められることなる。例えば、緩衝材厚さを 70cm としたときに必要な緩衝材熱伝導率は約 0.45W/mK

以上であり、これを満たす緩衝材の含水比または乾燥密度、ケイ砂混合率を図3-3で求めることとなる。

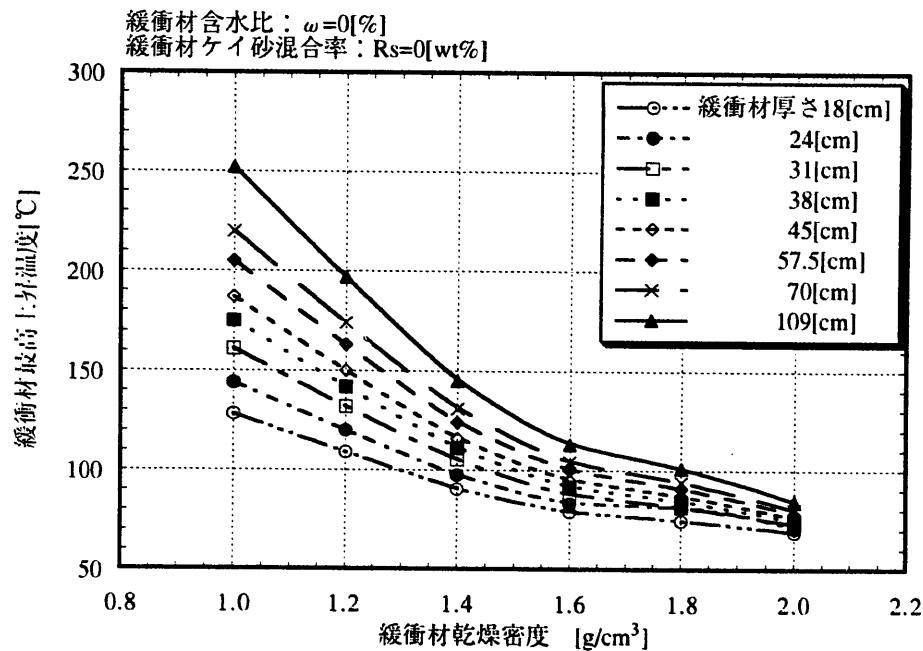


図 4-7 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係
(緩衝材含水比 : $\omega = 0\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0, 30\text{wt\%}$)

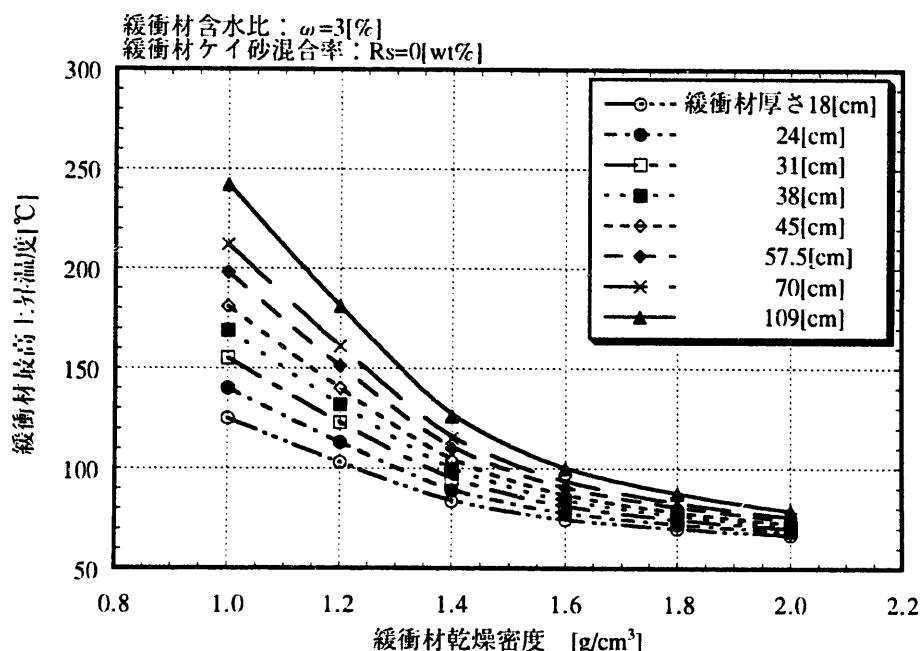


図 4-8 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係
(緩衝材含水比 : $\omega = 3\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0, 30\text{wt\%}$)

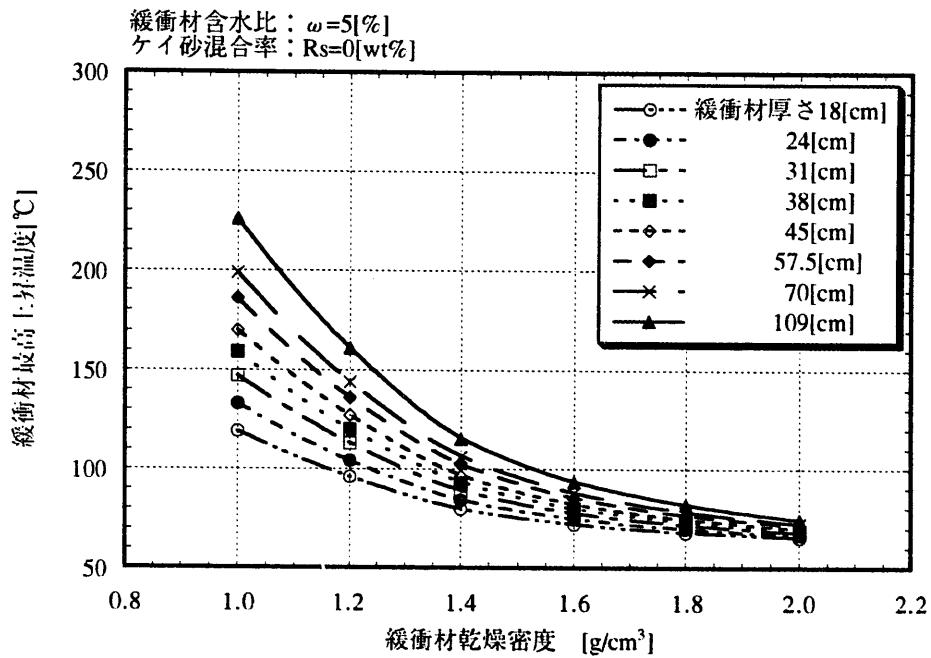


図 4-9 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係
(緩衝材含水比 : $\omega = 5\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0, 30\text{wt}\%$)

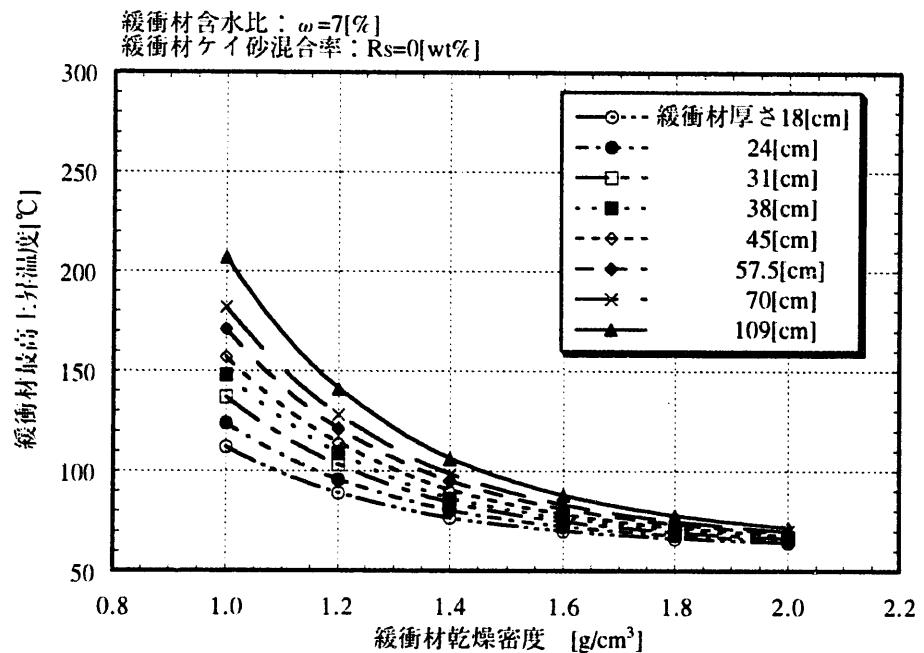


図 4-10 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係
(緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{wt}\%$)

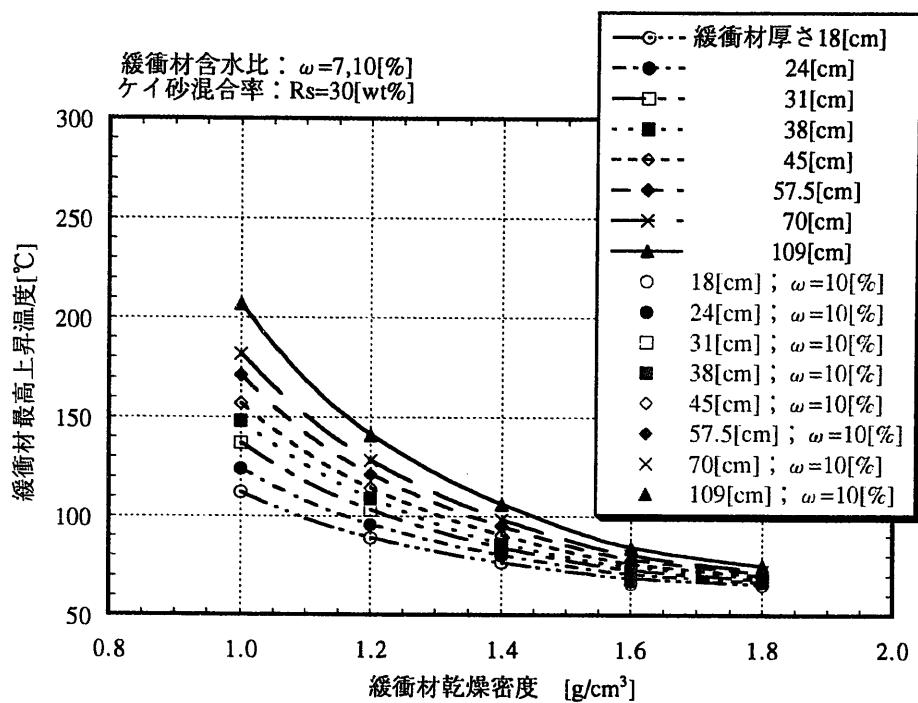


図 4-11 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係
(緩衝材含水比 : $\omega = 7, 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30\text{wt\%}$)

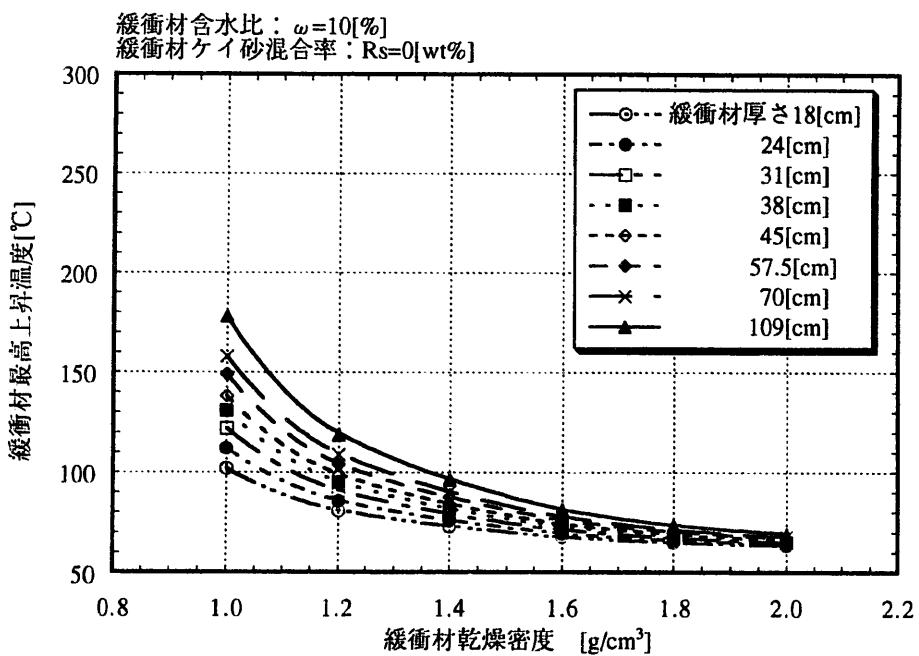


図 4-12 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係
(緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{wt\%}$)

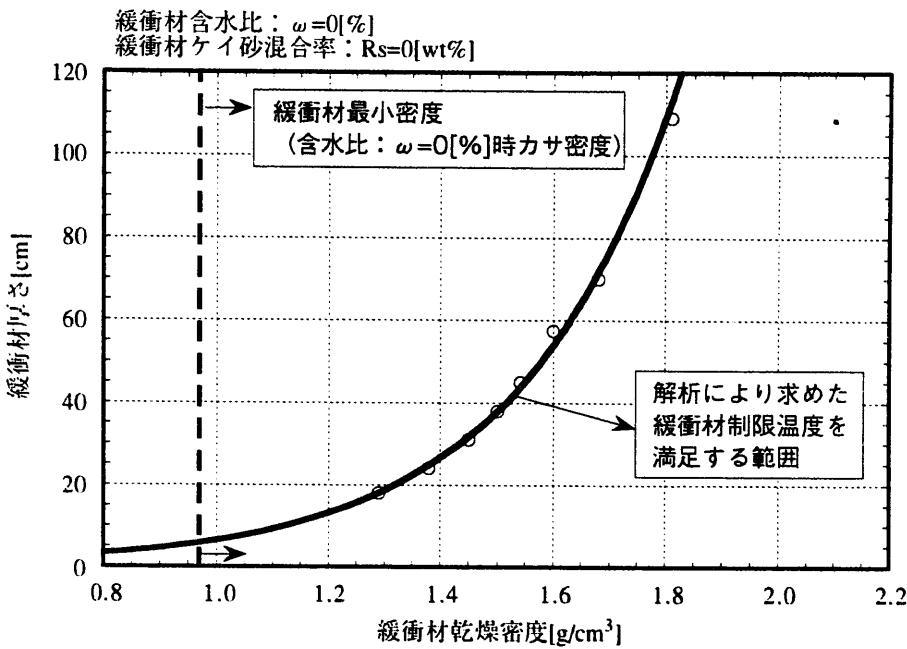


図 4-13 热的観点からの緩衝材成立範囲
(緩衝材含水比 : $\omega = 0\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0$, 30wt%)

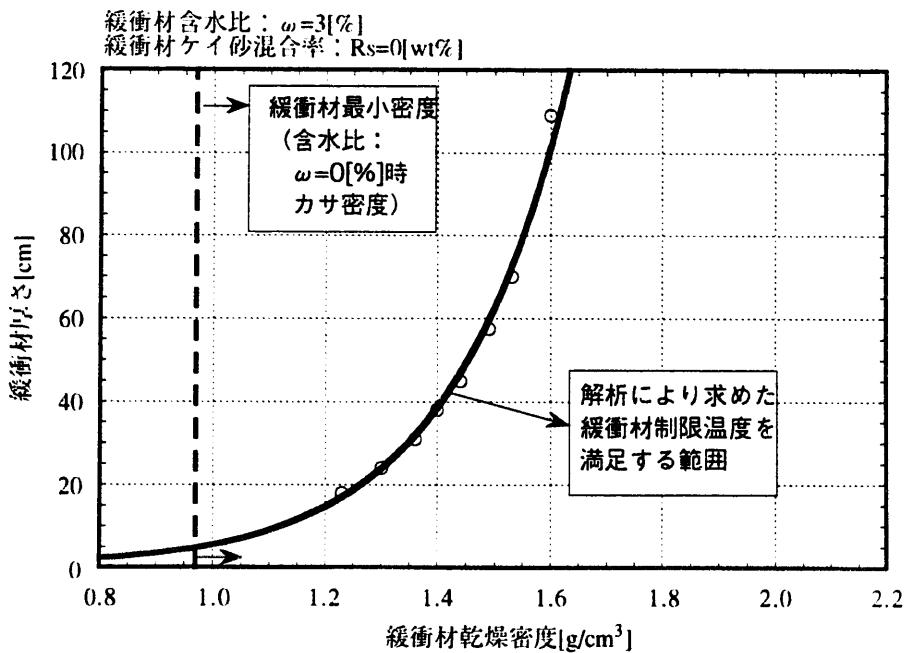


図 4-14 热的観点からの緩衝材成立範囲
(緩衝材含水比 : $\omega = 3\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0$, 30wt%)

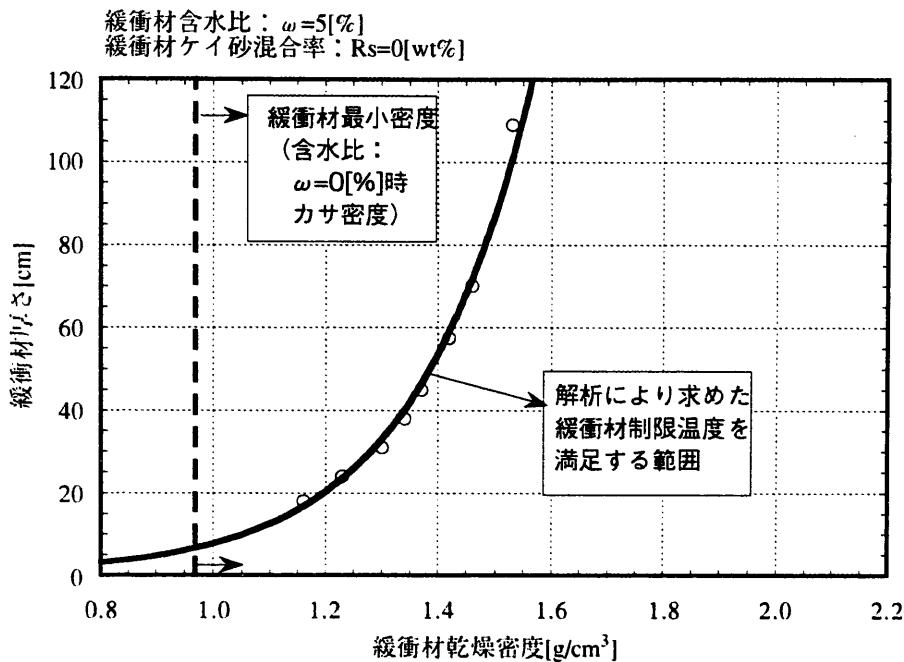


図 4-15 热的観点からの緩衝材成立範囲
(緩衝材含水比 : $\omega = 5\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0, 30\text{wt}\%$)

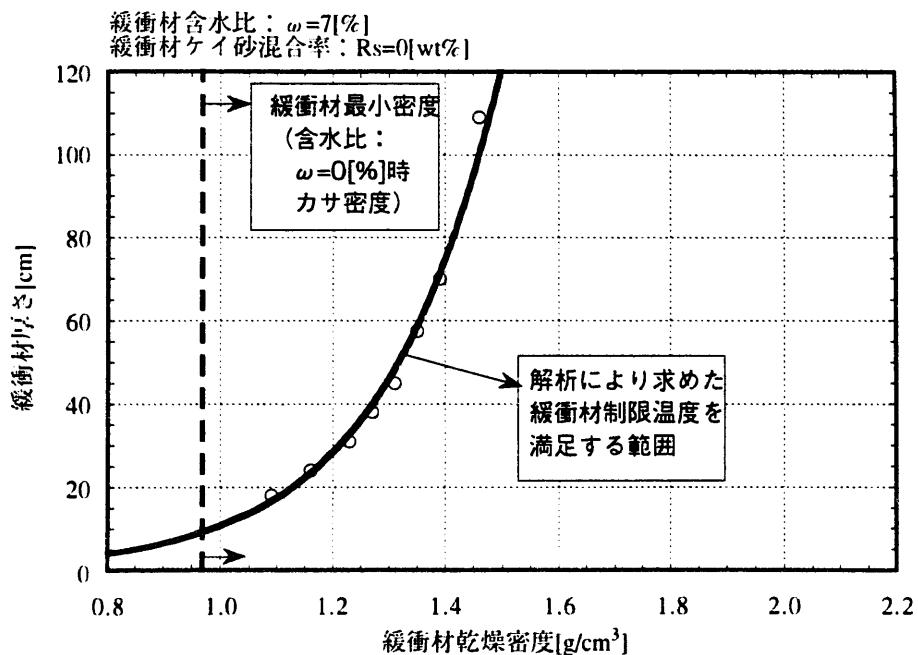


図 4-16 热的観点からの緩衝材成立範囲
(緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{wt}\%$)

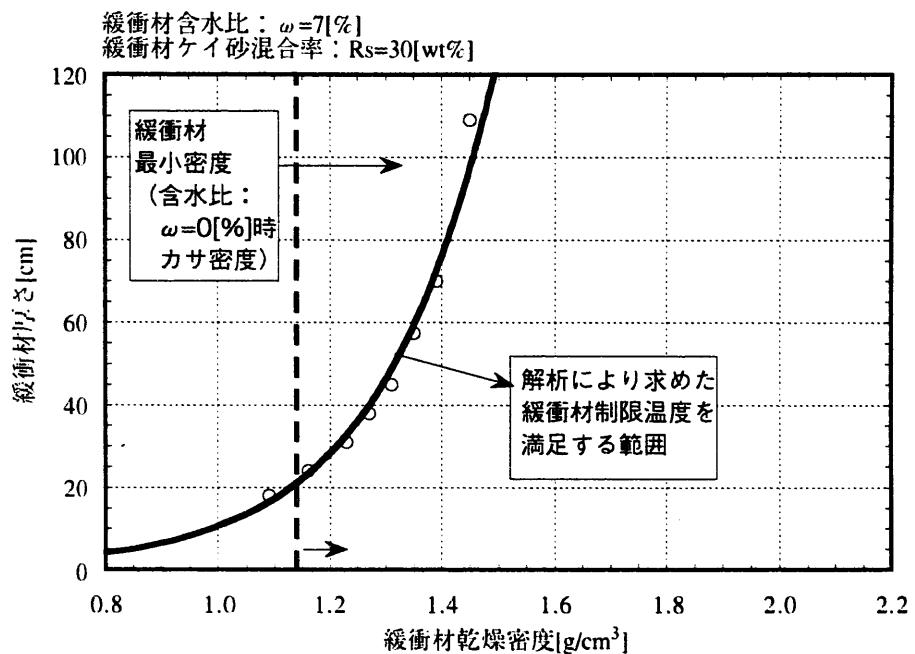


図 4-17 热的観点からの緩衝材成立範囲
(緩衝材含水比 : $\omega=7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs=30\text{wt\%}$)

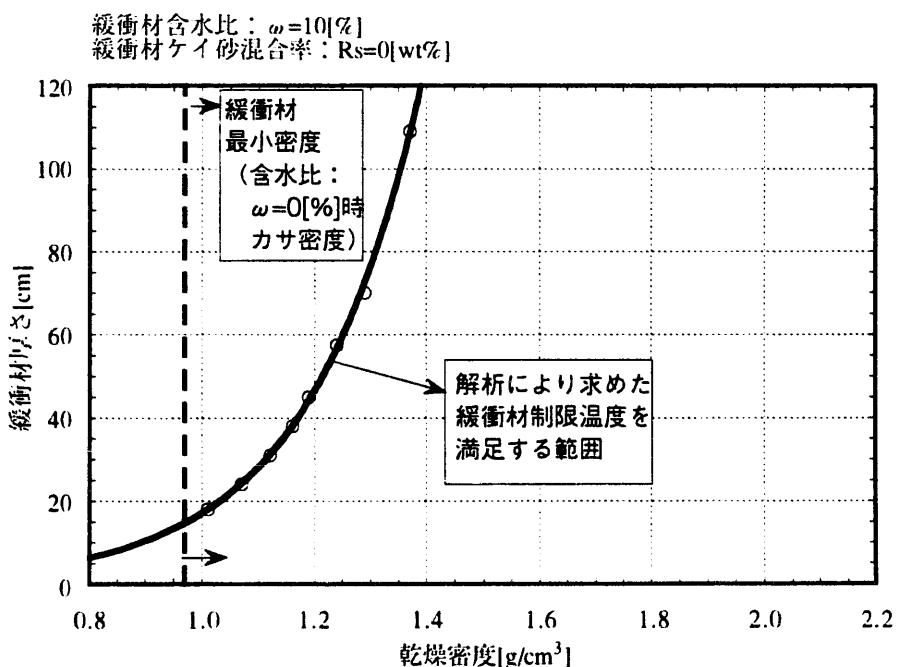


図 4-18 热的観点からの緩衝材成立範囲
(緩衝材含水比 : $\omega=10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs=0\text{wt\%}$)

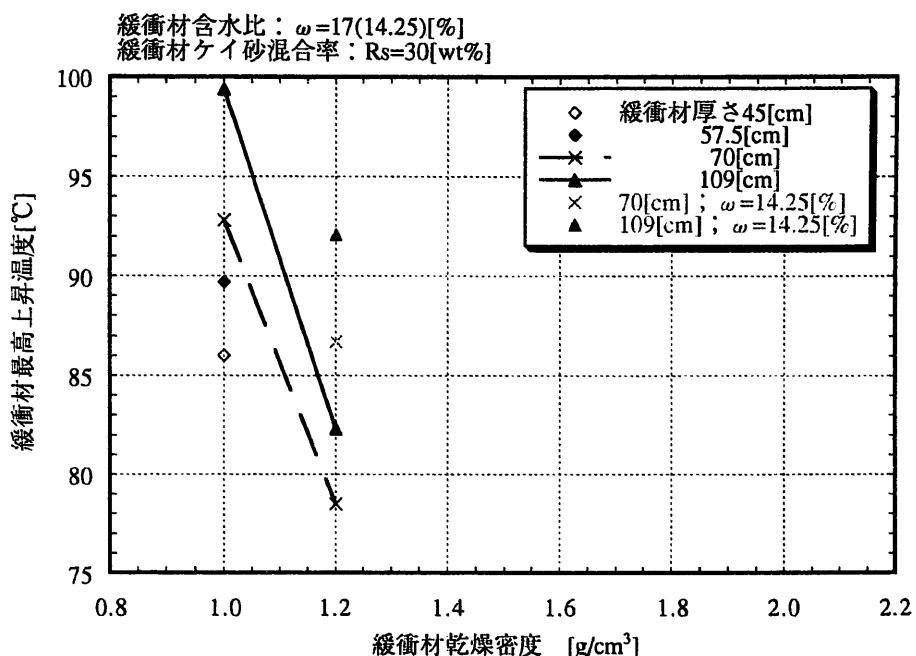


図 4-19 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係
(緩衝材含水比 : $\omega=17(14.25)\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs=30wt\%$)

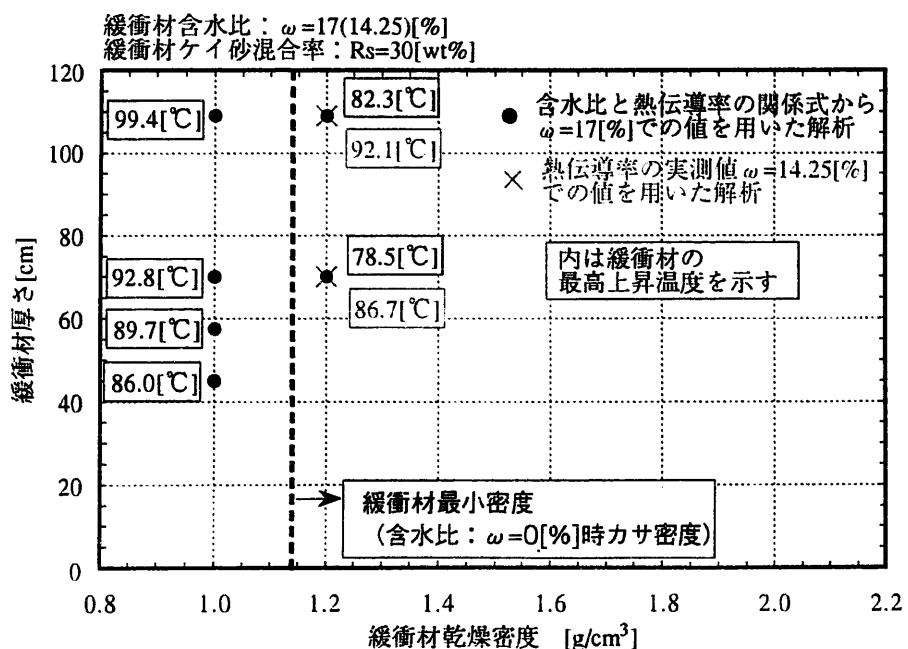


図 4-20 热的観点からの緩衝材成立範囲
(緩衝材含水比 : $\omega=17(14.25)\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs=30wt\%$)

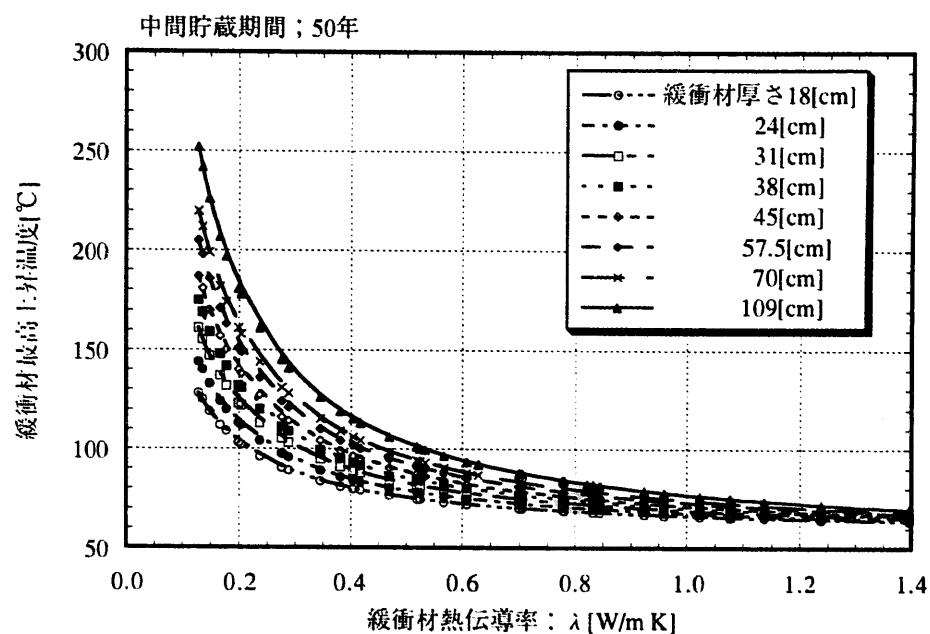


図 4-21 緩衝材熱伝導率と緩衝材最高上昇温度の関係（中間貯蔵期間；50 年）

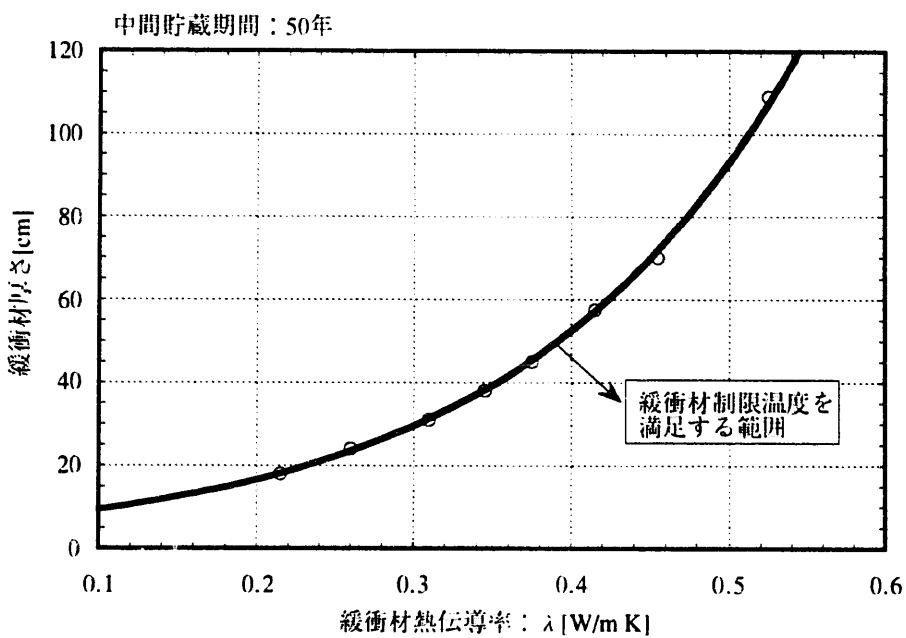


図 4-22 緩衝材熱伝導率と緩衝材厚さに対して熱的観点から緩衝材が成立する範囲（中間貯蔵期間；50 年）

(2) 中間貯蔵期間 30 年

中間貯蔵期間 30 年の検討では、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結果、および同緩衝材仕様（厚さ、乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比）での中間貯蔵期間期間 50 年のガラス固化体発熱特性を用いた解析結果からガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度が比例する関係（Taniguchi, et al., 1996）用い推定した結果の両者を用い検討した。ここでは、

- 1) 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結果、およびそれから求められる緩衝材成立範囲
- 2) 同緩衝材仕様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結果と中間貯蔵期間 50 年のガラス固化体発熱特性を用いた解析結果を比較し、本検討条件下での上記ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度が比例する関係（Taniguchi, et al., 1996）の妥当性
- 3) 上記 2) の比例関係から推定された中間貯蔵期間 30 年の場合の緩衝材乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係、およびそれから求められる緩衝材成立範囲
- 4) 緩衝材熱伝導率での整理

の順に検討を行った。

1) 解析結果および解析結果から求められた緩衝材成立範囲

ここでは、緩衝材含水比 7%，ケイ砂混合率 30wt%に対して乾燥密度 1.2～1.8g/cm³ の仕様、および緩衝材含水比 10%，ケイ砂混合率 30wt%に対して乾燥密度 1.2～1.8g/cm³ の仕様について検討を行った。ただし、表 4-2 で示したように、両含水比とも乾燥密度 1.2～1.4g/cm³ については、ベントナイト単体のものと同じ熱物性である。

図 4-23, 24 に乾燥密度と解析結果である緩衝材最高上昇温度の関係を示す。また、中間貯蔵期間 50 年の場合と同様、図 4-25, 26 に図 4-23, 24 を用いて求めた熱的観点からの緩衝材成立範囲（緩衝材乾燥密度と緩衝材厚さの関係）を含水比 0%時のカサ密度と合わせて、つまり、本検討で得られた緩衝材

成立範囲を示す。中間貯蔵期間 50 年の場合と比較すると、ガラス固化体埋設時発熱量が増すことにより、高乾燥密度にもしくは緩衝材の厚さを薄くすることが、熱的観点から緩衝材を成立させるために必要である。例えば、緩衝材含水比 7%，緩衝材ケイ砂混合率 30wt%の場合、中間貯蔵期間 50 年では図 4-17 より、緩衝材厚さを 70cm としたときには緩衝材乾燥密度は約 1.38g/cm^3 以上、緩衝材乾燥密度を 1.5g/cm^3 としたときには緩衝材厚さは約 120cm 以下となる。一方、中間貯蔵期間 30 年では図 4-25 より、緩衝材厚さを 70cm としたときには緩衝材乾燥密度は約 1.65g/cm^3 以上、緩衝材乾燥密度を 1.5g/cm^3 としたときには緩衝材厚さは約 35cm 以下となる。

しかしながら、緩衝材厚さをパラメータとした緩衝材乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係や熱的観点からの成立範囲を示すグラフの傾向は、中間貯蔵期間 50 年の場合と同様となった。

2) ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係

ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係を検討した既往の解析では、動力炉・核燃料開発事業団による第 1 次取りまとめ（動力炉・核燃料開発事業団、1992）で示された処分仕様（緩衝材乾燥密度 1.8g/cm^3 、含水比 6%，熱伝導率 0.9W/mK 、緩衝材厚さ 100cm）に対して、ガラス固化体埋設時発熱量を $424\sim1104\text{W/本}$ の範囲で検討している。その結果、ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係は比例するとしている（Taniguchi, et al., 1996）。したがって、本検討で、同緩衝材仕様（乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比）において中間貯蔵期間 30 年および 50 年の両ケースで解析を行っているものに対し、上記比例関係が成立することを確認した。なお、本検討での中間貯蔵期間 50 年の場合のガラス固化体埋設時発熱量は 351W/本 、中間貯蔵期間 30 年の場合には 558W/本 である。また、上記検討では緩衝材の熱物性および厚さを固定しているのに対し、本検討では緩衝材の熱物性および厚さに幅を持たせている。図 4-27～33 にガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係を示す。これから、本検討での解析結果もガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係に関して、緩衝材の熱物性および厚さに依存することなくほぼ比例で表せる結果となった。

以下に、この比例関係に関して、簡単な等方均質無限媒体、つまり緩衝材

のみを考慮した系での理論的検討を行う。

熱伝導率が λ で、一様温度 T_0 にある等方均質無限媒体中に、半径 r_0 の無限に長い細い発熱体があり、この発熱線がある瞬間から単位長さ当たり q の発熱を開始したとする。これを、本検討に当てはめると図 4-34 のようになる。図 4-34 において、ガラス固化体埋設時の発熱量を持つ熱源としては、オーバーパックも含め $r_0=0.41\text{m}$ とし、オーバーパックが連続的につながり、その長さは廃棄体の定置ピッチと同じとした。また、緩衝材が最高上昇温度に到達する時間を $t=10\text{year}$ とした。発熱開始からの時間 t において、熱源中心からの半径方向への距離 r の点の温度 T は次式で表せる。

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ E_i\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right)\right\} + T_0 \quad (4-1)$$

$\alpha (= \lambda/\rho c)$: 熱拡散率

λ : 热伝導率

ρ : 単位体積重量

c : 比熱

E_i : 指数積分関数

ここで、 $E_i\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right)$ を展開すると次のようになる。

$$E_i\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = -\ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - 0.5772 + \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^2 / 2.2 + \dots \quad (4-2)$$

(4-2) 式で $r \rightarrow r_0$ とし細線の表面、つまりオーバーパックと緩衝材の接する部分とすれば、 $r^2/4\alpha t \ll 1$ のとき第 3 項以下は省略できるから、(4-1) 式は以下の (4-3) 式で表せる。

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - 0.5772 \right\} + T_0 \quad (4-3)$$

(4-3) 式より、緩衝材の物性および発熱体の発熱量が時間に関係なく一定、かつ最高上昇温度に到達する時間が一定であれば、発熱体表面、つまりオーバーパックと緩衝材が接する部分での温度は発熱量に比例するのは明らかである。ただし、本検討においては、発熱量が時間とともに減衰する。図 4-35 に緩衝材が概ね最高上昇温度に到達するまでの間、つまり廃棄体埋設後 10 年までのガラス固化体発熱特性を示す。これから、中間貯蔵期間 30 年と 50 年の場合を比較すると、廃棄体埋設時の初期の発熱量の値が違うのみで、両者とも時間に対する発熱量の減衰率（グラフの傾き）は経過時間に関わらず一定であり、また両者の減衰率も同程度と見なすことができる。したがって、廃棄体埋設後初期の 10 年以内に限れば、ガラス固化体の発熱による仕事量は埋設時の初期発熱量で規定される。また、解析結果より緩衝材が最高上昇温度に到達する時間は概ね 10 年以内であり、(4-3) 式において $t \leq 10$ であれば、 t が温度 $T(r, t)$ に及ぼす影響は小さい。よって、本検討のガラス固化体発熱特性の範囲では、緩衝材の 10 年後の温度、つまり最高上昇温度は廃棄体埋設時の初期の発熱量に比例することが言える。

ここでは、解析結果との比較のために (4-3) 式を用いて 10 年後の緩衝材と発熱体が接する部分の温度を計算した。ただし、緩衝材の物性は、ブロック定置方式を対象とし、熱伝導率の最大幅を勘案し、ベントナイト単体の乾燥密度 1.0g/cm^3 、含水比 0%，乾燥密度 2.0g/cm^3 、含水比 10% のものを用いた。また、ガラス固化体の発熱量は埋設時の値で一定とした。本検討における上記式に必要なパラメータの値の範囲を以下の表 4-1 に、(4-3) 式を用いた理論計算結果を表 4-2 に示す。その結果、概ね解析結果と同等な傾向を示した。

したがって、上記解析結果および理論的検討の結果から、中間貯蔵期間 30 年で解析を行っていないものに対しては、上記比例関係で緩衝材最高上昇温度を推定し、熱的観点からの緩衝材成立範囲を求ることとした。

また、前述した緩衝材の熱容量、つまり比熱と単位体積重量が緩衝材の温度に及ぼす影響については、(4-3) 式中において、ここで考慮した緩衝材熱拡散率の幅を代入した場合、

$$\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - 0.5772 = 7.77 \sim 8.26 \quad (4-4)$$

となり、(4-4) 式の変動幅は小さい。

したがって、比熱および単位体積重量が温度に及ぼす影響は小さく、緩衝材の熱伝導率と発熱量で解析結果が整理できることが言える。

3) 推定結果から求められた緩衝材成立範囲

図 4-36～40 にブロック定置方式を対象とした場合の、図 4-46 に現場締め固め方式を対象とした場合の乾燥密度と推定結果（含む、解析結果）である緩衝材最高上昇温度の関係を示す。

また、中間貯蔵期間 50 年の場合と同様、図 4-41～45 に図 4-36～40 を用いて求めた熱的観点からの緩衝材成立範囲（緩衝材乾燥密度と緩衝材厚さの関係）を含水比 0% 時の最小密度と合わせて、つまり、本検討で得られた緩衝材成立範囲を示す。

これらのグラフの傾向は、中間貯蔵期間 50 年の場合と、また、1) で示した中間貯蔵期間 30 年の解析結果から求めたものと同様となった。

4) 緩衝材熱伝導率での整理

図 4-47 に緩衝材の乾燥密度、ケイ砂混合率および含水比に関らず、熱伝導率と緩衝材の最高上昇温度の関係にプロットしたものを示す。なお、本図には、解析で求めたものと、上記推定で求めたものを合わせて示している。

熱伝導率と最高上昇温度の関係の傾向としては、中間貯蔵期間 50 年の場合と同様、緩衝材の熱伝導率が良好になるほど、グラフの傾きは小さくなり、かつ緩衝材厚さに関らず一定の緩衝材最高上昇温度に収束する、つまり、緩衝材の熱伝導率が良好になるほど緩衝材の最高上昇温度に及ぼす影響は小さくなり、かつ、緩衝材の厚さが緩衝材の最高上昇温度に及ぼす影響も小さくなつた。

図 4-48 に図 4-47 を用いて求めた熱的観点からの緩衝材成立範囲（緩衝材熱伝導率と緩衝材厚さの関係）を示す。本図と図 3-3 で示した緩衝材熱伝導率結果を用いれば、熱的観点からに必要となる緩衝材仕様が求められることなる。例えば、緩衝材厚さを 70cm としたときに必要な緩衝材熱伝導率は約 0.79W/mK 以上であり、これを満たす緩衝材の含水比または乾燥密度、ケイ

砂混合率を図 3-3 で求めることとなる。

表 4-1 理論的検討におけるパラメータの値の範囲

ガラス固化体				
中間貯蔵期間		埋設時 発熱量	単位 系統一	
30年		558 (W/本)	1.866.E+05 (kcal/year/m)	
50年		351 (W/本)	1.174.E+05 (kcal/year/m)	
緩衝材				
乾燥密度 : ρ_d	含水比 : ω	物 性	単位 系統一	
1.0	0	熱伝導率 : λ	0.129 (W/m/K)	968.606 (kcal/year/m/K)
		比熱 : c	0.230 (kJ/kg/K)	0.0548 (kcal/kg/K)
		単位体積重量 : ρ	1000 (kg/m ³)	1000 (kg/m ³)
2.0	10	熱伝導率 : λ	1.397 (W/m/K)	10489.474 (kcal/year/m/K)
		比熱 : c	0.692 (kJ/kg/K)	0.1648 (kcal/kg/K)
		単位体積重量 : ρ	2200 (kg/m ³)	2200 (kg/m ³)

表 4-2 理論計算による結果

中間貯蔵期間	緩衝材		
	乾燥密度 含水比	1.0g/cm ³	2.0g/cm ³
		0%	10%
30年		164.3	56.7
50年		120.0	52.4

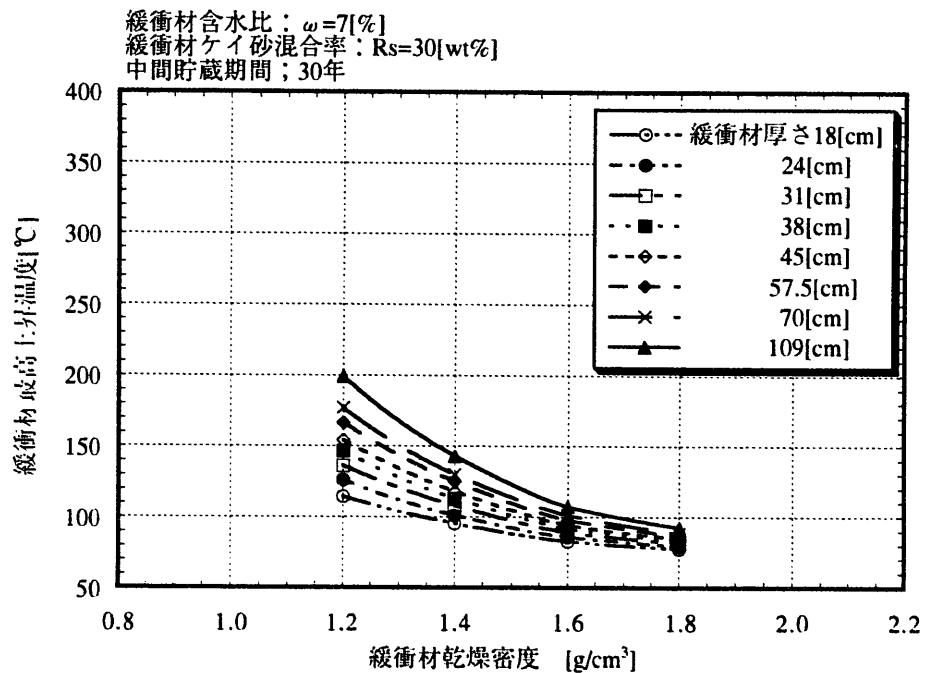


図 4-23 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30\text{wt\%}$ ）

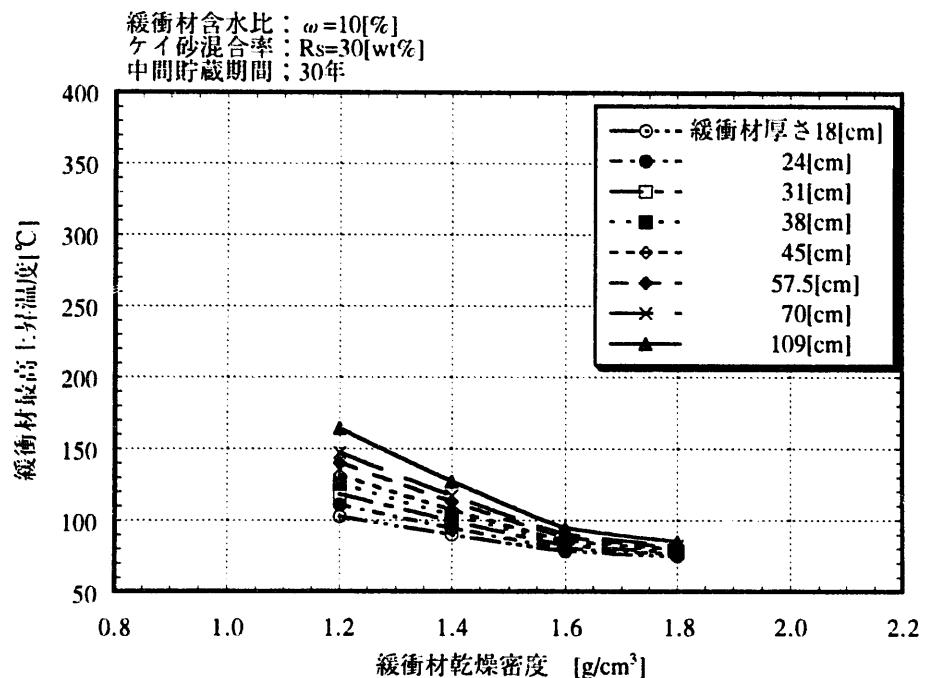


図 4-24 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30\text{wt\%}$ ）

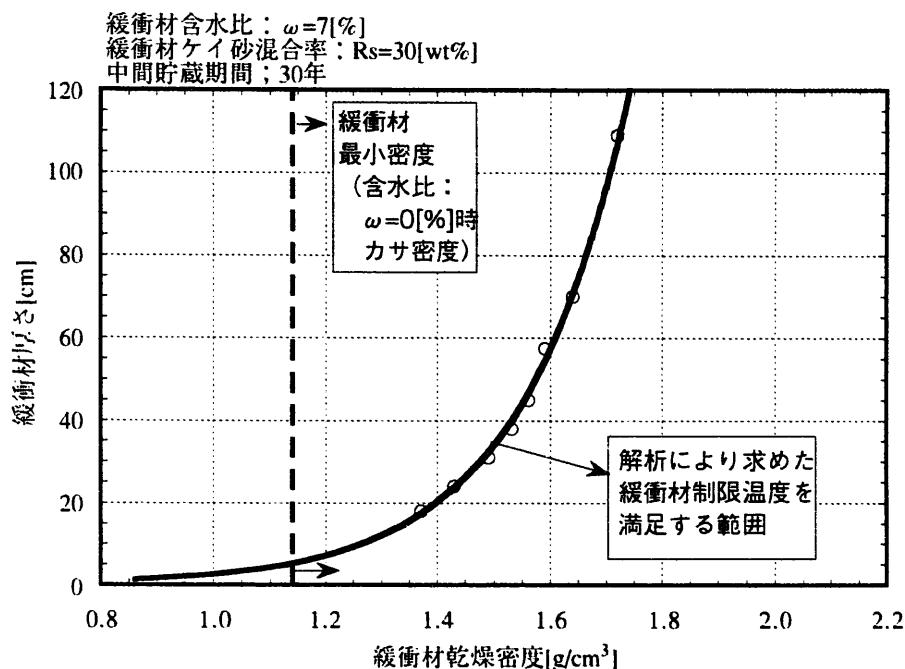


図 4-25 热的観点からの緩衝材成立範囲（中間貯蔵期間；30年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30\text{wt}\%$ ）

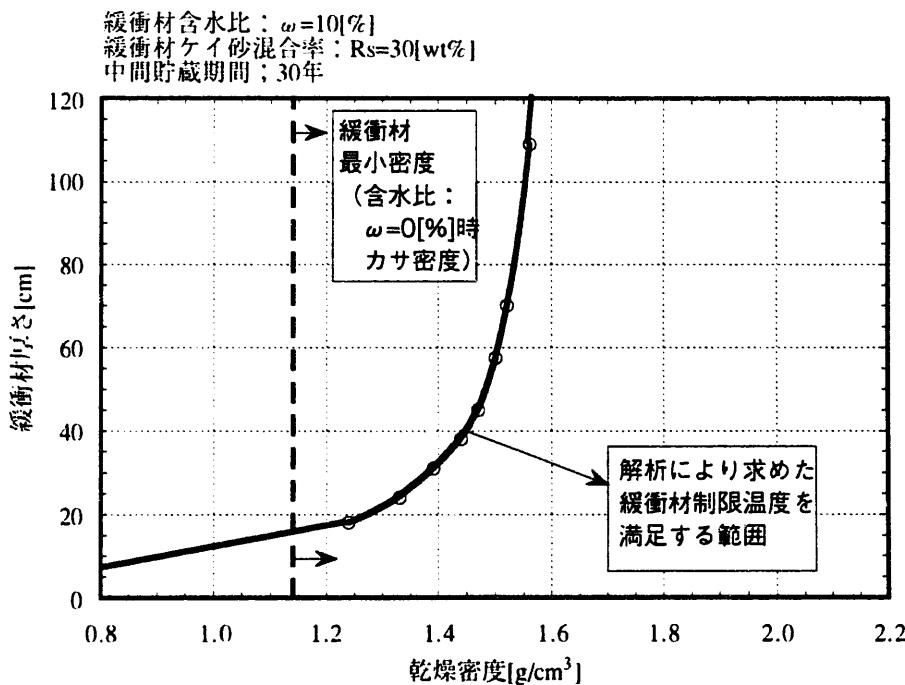


図 4-26 热的観点からの緩衝材成立範囲（中間貯蔵期間；30年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30\text{wt}\%$ ）

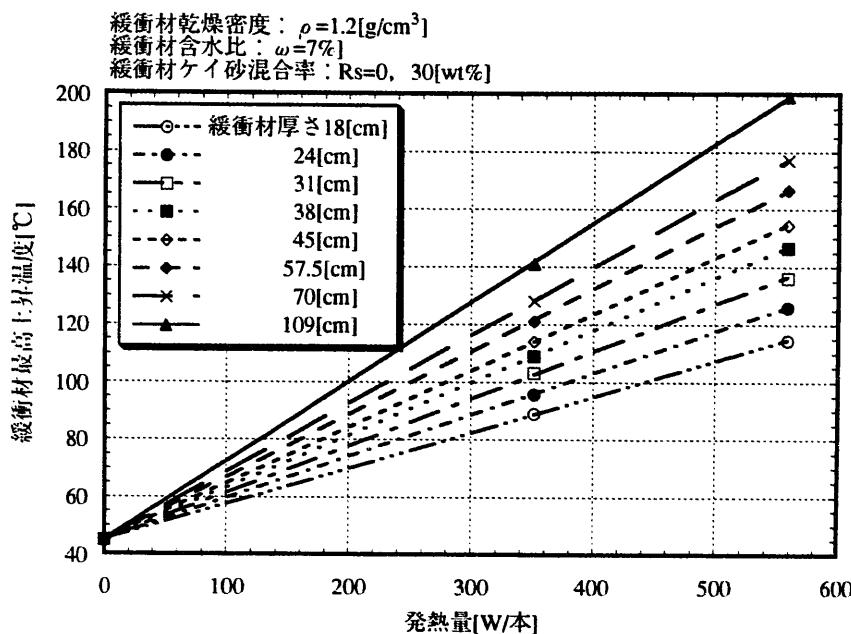


図 4-27 ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係
 (緩衝材乾燥密度 : $\rho = 1.2[\text{g/cm}^3]$,
 緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $\text{Rs}=0, 30[\text{wt}\%]$)

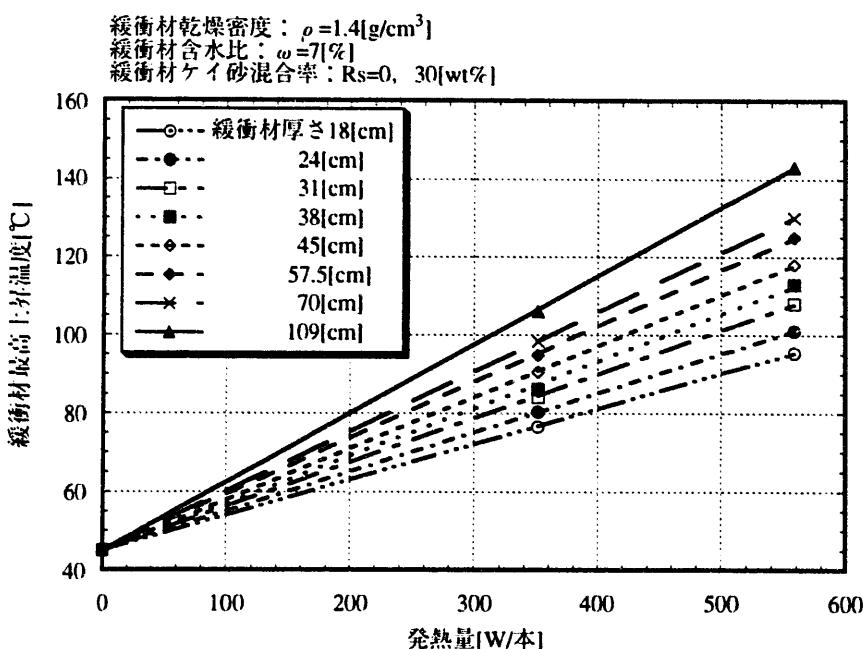


図 4-28 ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係
 (緩衝材乾燥密度 : $\rho = 1.4[\text{g/cm}^3]$,
 緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $\text{Rs}=0, 30[\text{wt}\%]$)

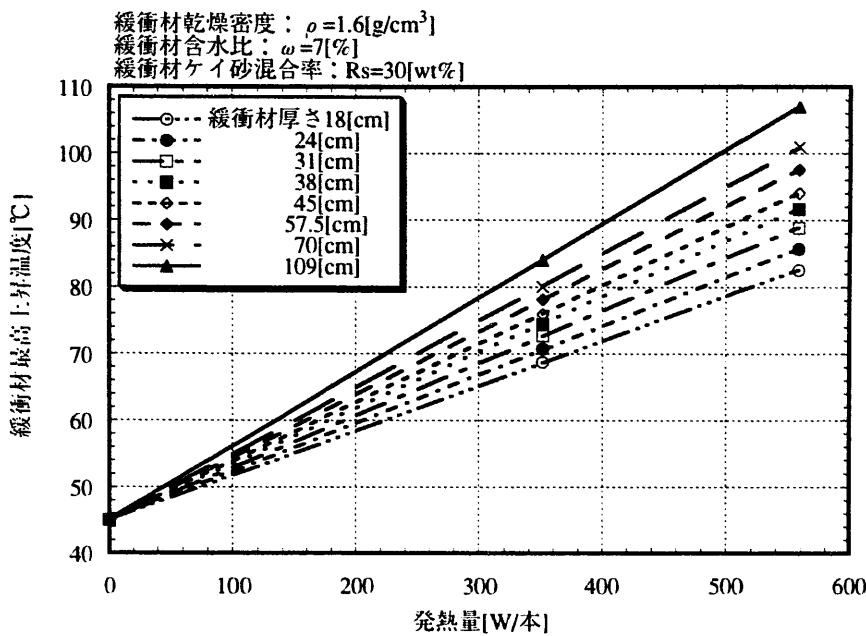


図 4-29 ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係
 (緩衝材乾燥密度 : $\rho = 1.6[\text{g}/\text{cm}^3]$,
 緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30[\text{wt}\%]$)

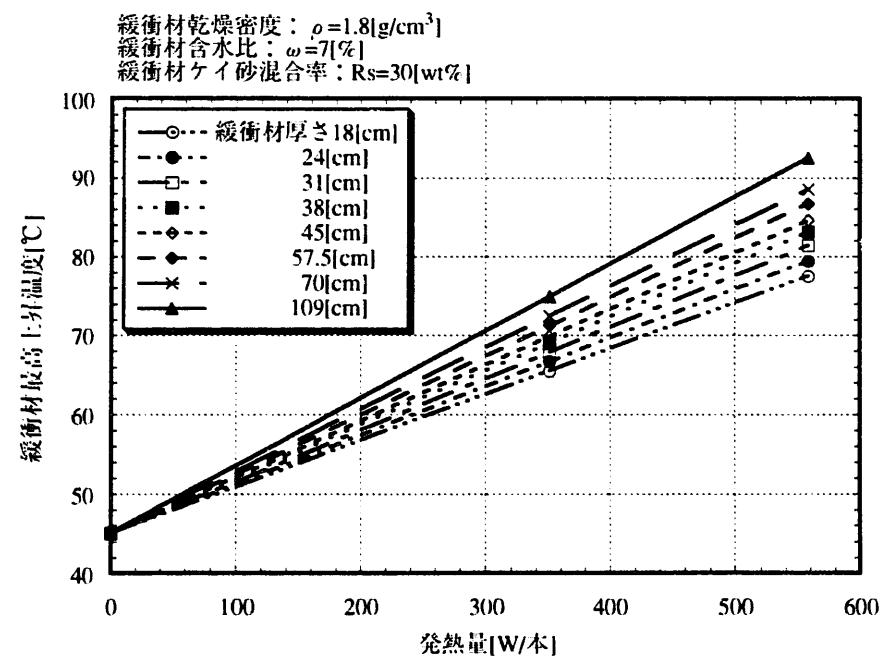


図 4-30 ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係
 (緩衝材乾燥密度 : $\rho = 1.8[\text{g}/\text{cm}^3]$,
 緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30[\text{wt}\%]$)

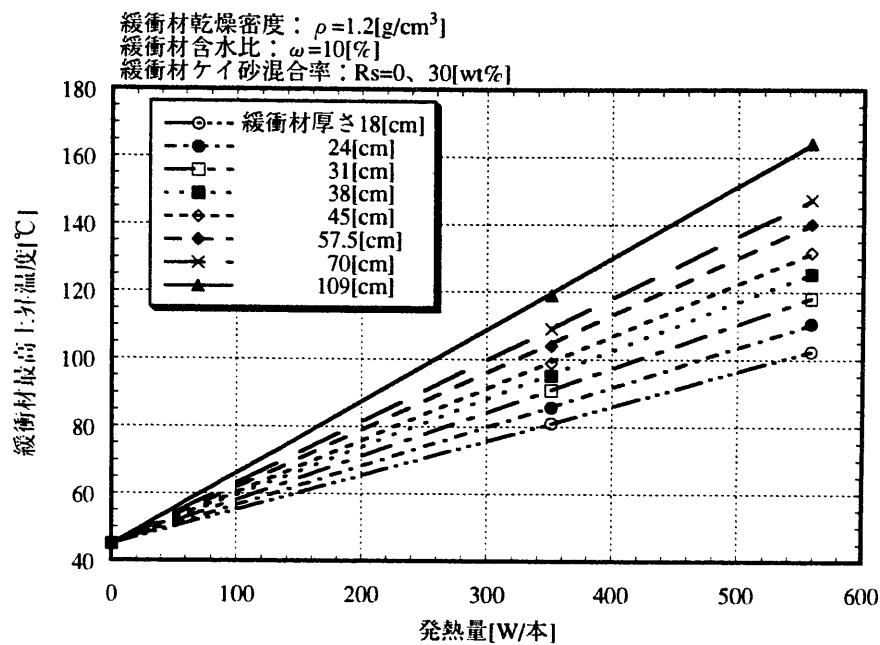


図 4-31 ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係
 (緩衝材乾燥密度 : $\rho = 1.2[\text{g/cm}^3]$,
 緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $\text{Rs}=0, 30\text{wt}\%$)

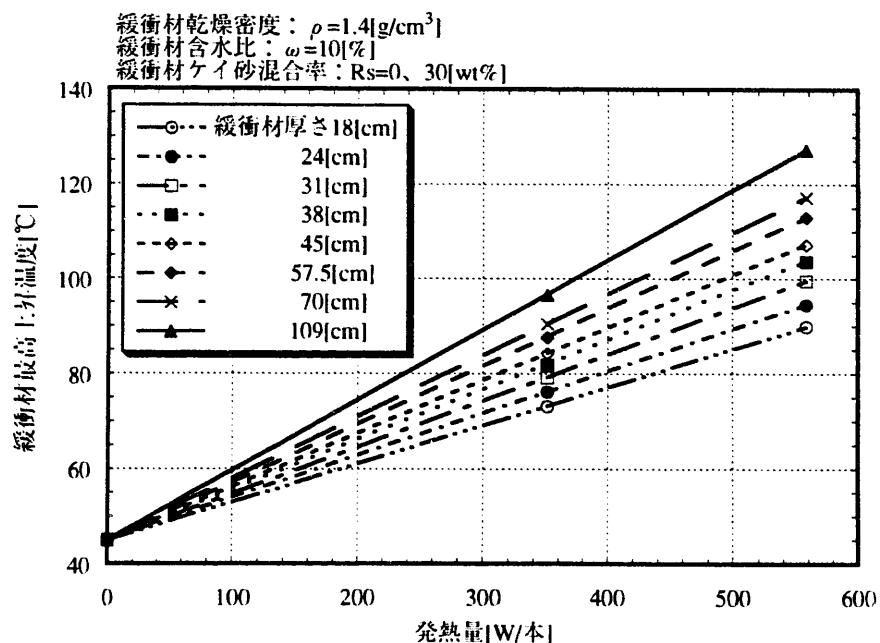


図 4-32 ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係
 (緩衝材乾燥密度 : $\rho = 1.4[\text{g/cm}^3]$,
 緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $\text{Rs}=0, 30\text{wt}\%$)

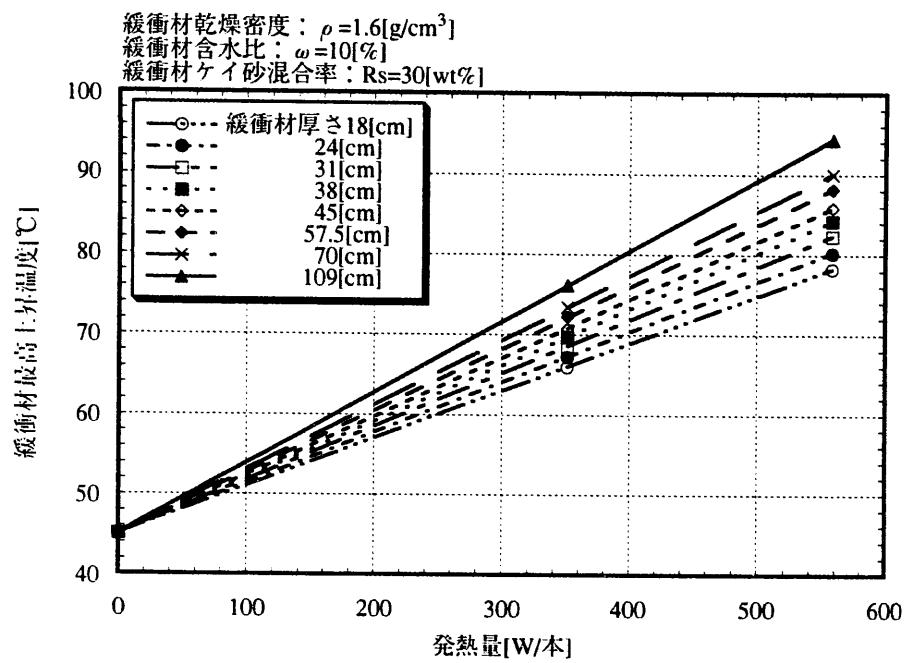


図 4-33 ガラス固化体埋設時発熱量と緩衝材最高上昇温度の関係

(緩衝材乾燥密度 : $\rho = 1.6[\text{g/cm}^3]$,
 緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 30\text{wt}\%$)

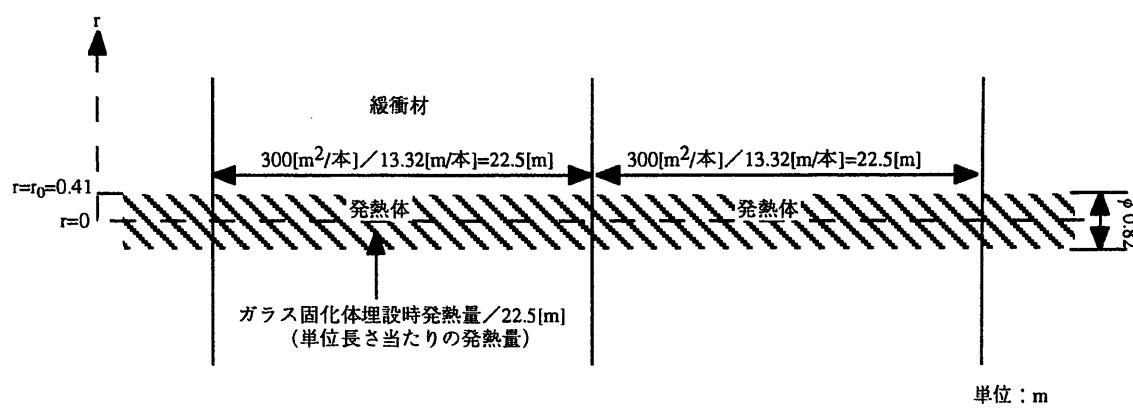


図 4-34 理論的検討における概念モデル

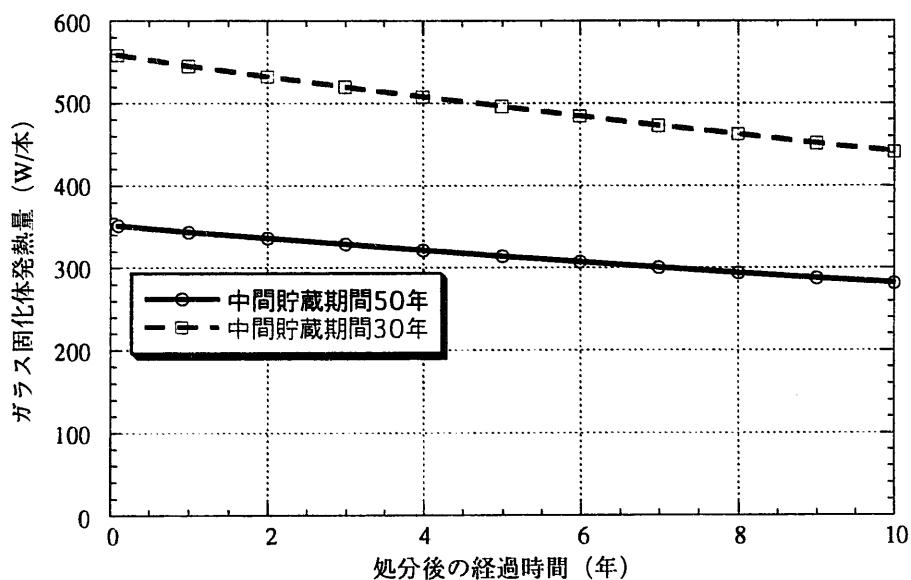


図 4-35 ガラス固化体発熱特性（処分後：0～10 年）

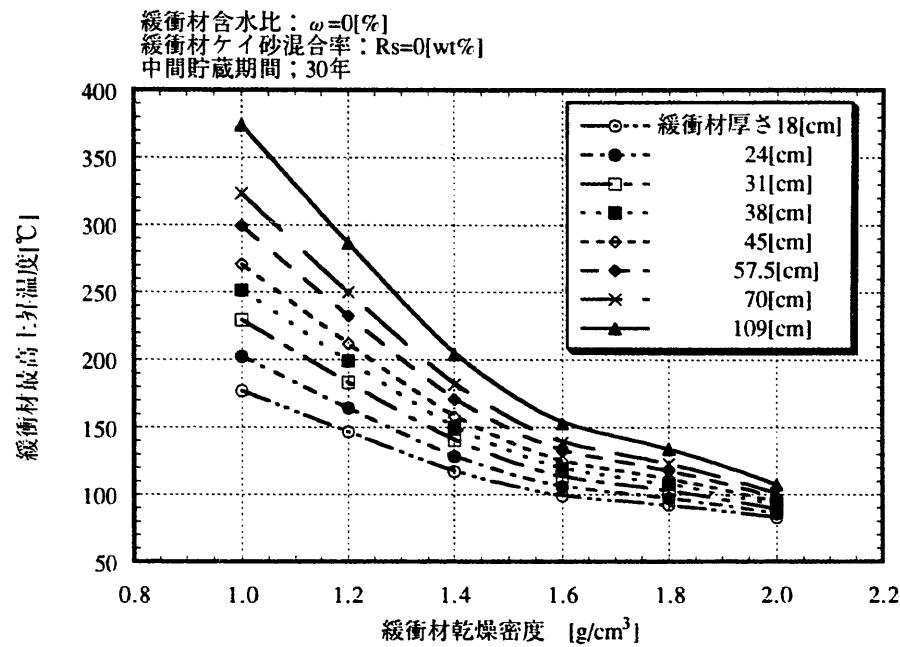


図 4-36 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（推定）（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega=0\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs=0$, 30wt%）

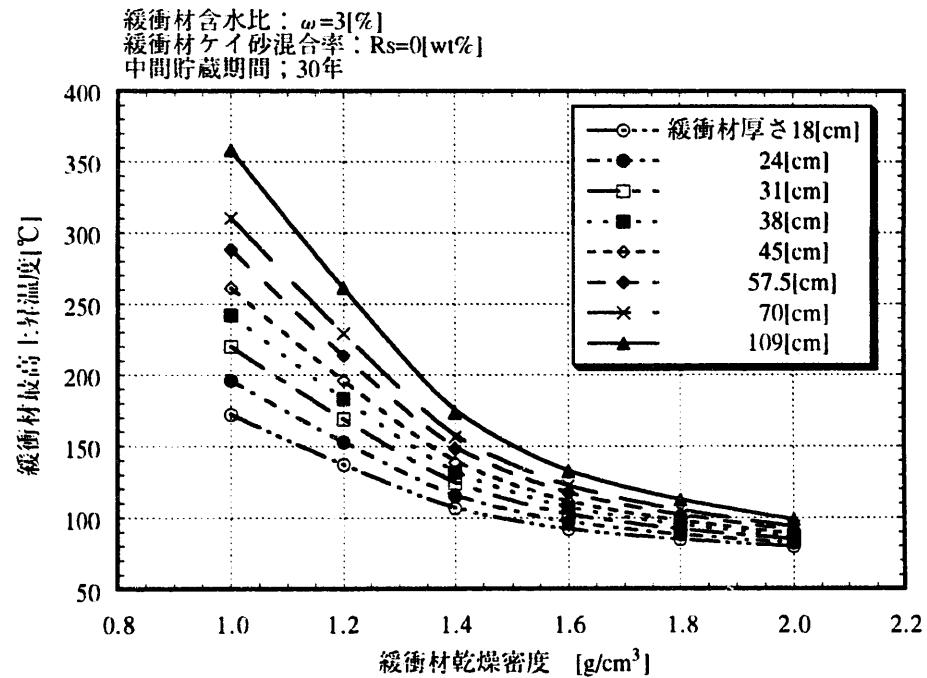


図 4-37 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（推定）（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega=3\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs=0$, 30wt%）

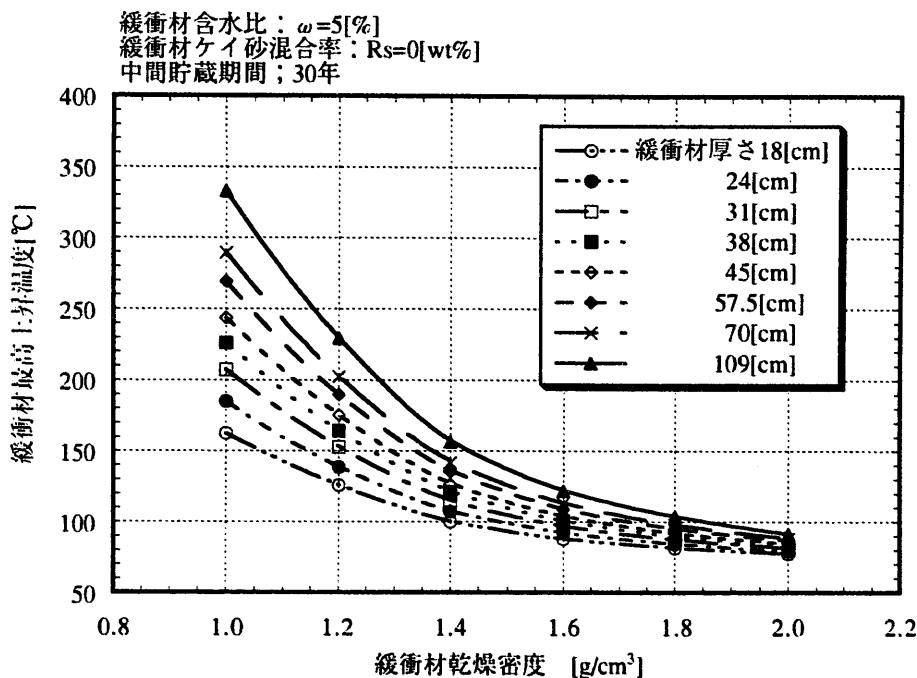


図 4-38 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（推定）（中間貯蔵期間；30年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 5\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{, 30wt\%}$ ）

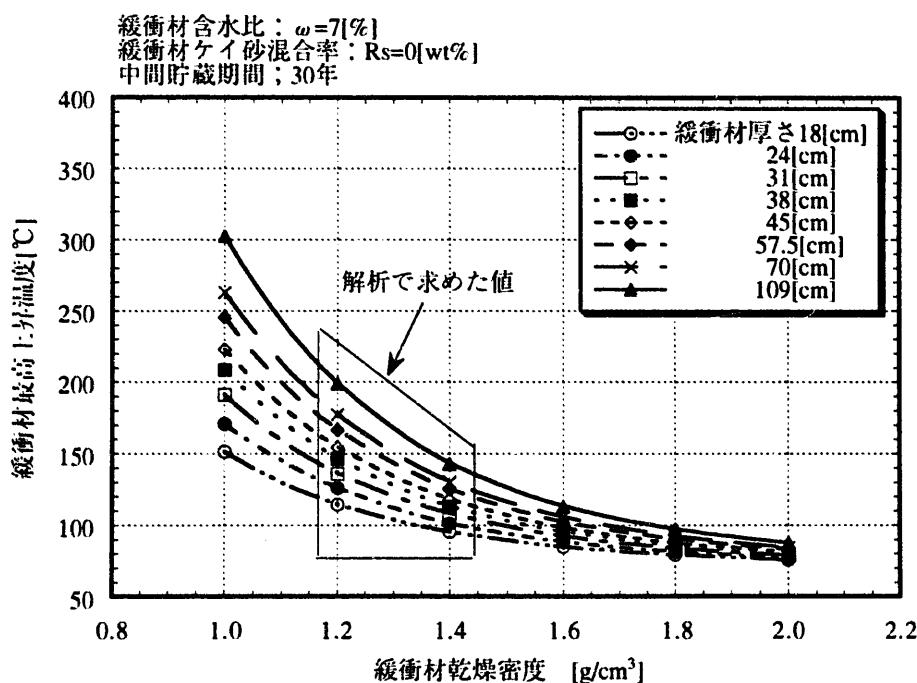


図 4-39 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（推定）（中間貯蔵期間；30年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{wt\%}$ ）

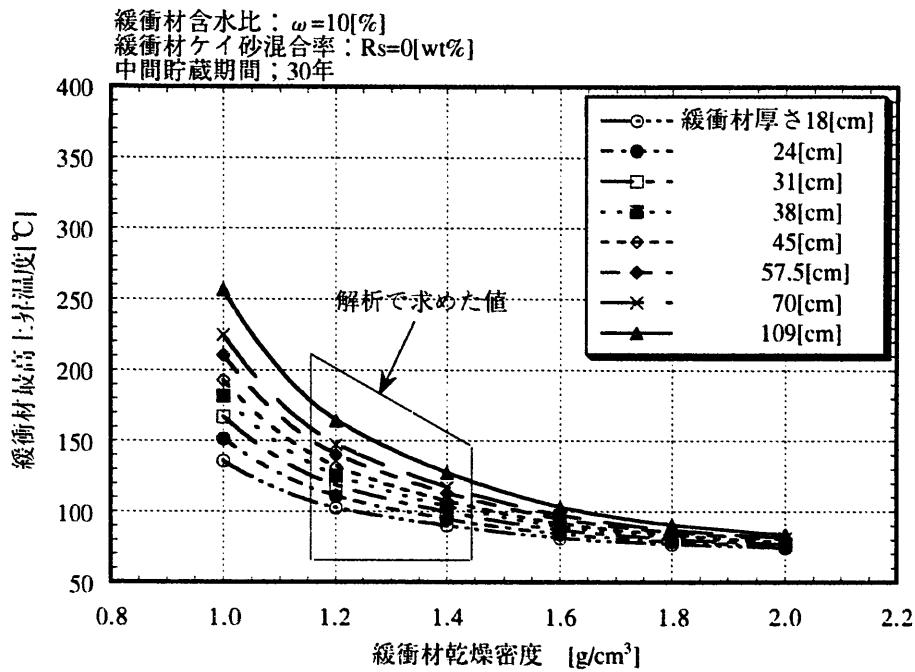


図 4-40 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（推定）（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{wt\%}$ ）

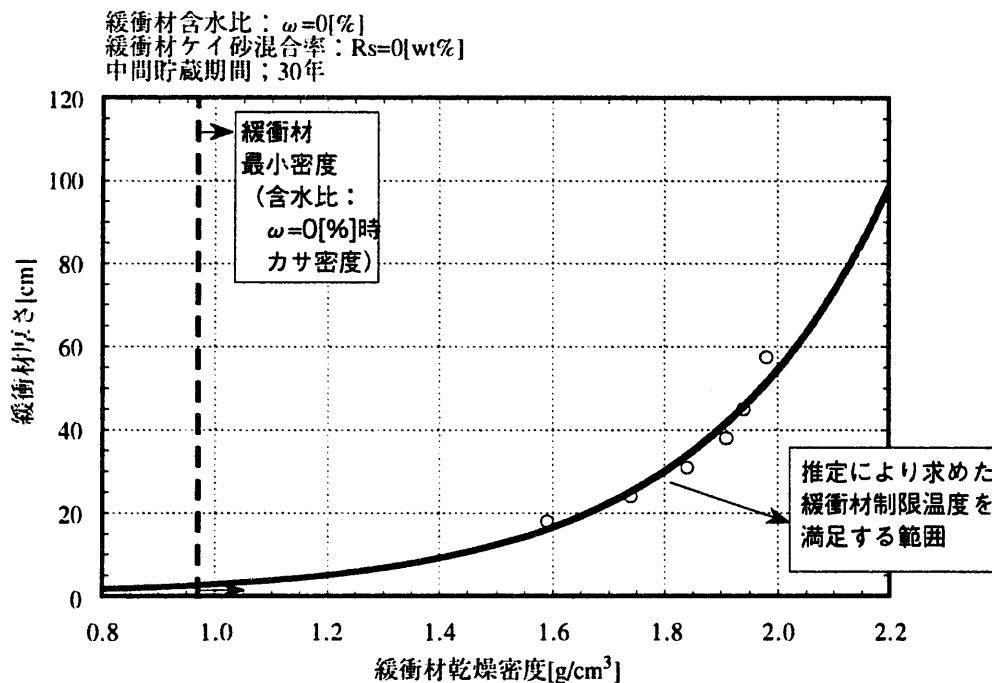


図 4-41 热的観点からの緩衝材成立範囲（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 0\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0, 30\text{wt\%}$ ）

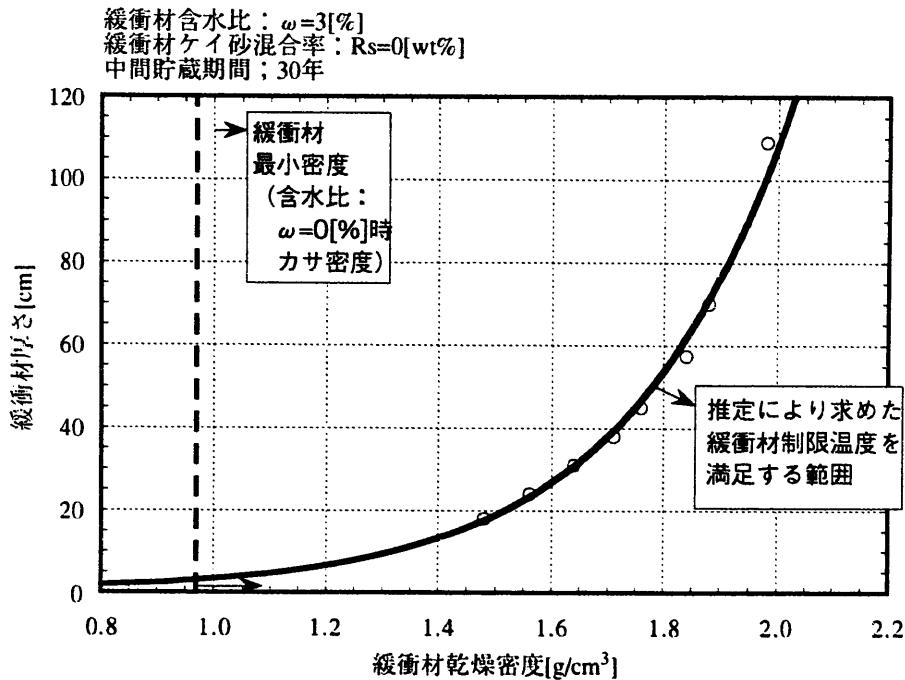


図 4-42 热的観点からの緩衝材成立範囲（中間貯蔵期間；30 年）
(緩衝材含水比： $\omega=3\%$, 緩衝材ケイ砂混合率： $\text{Rs}=0$, 30wt%)

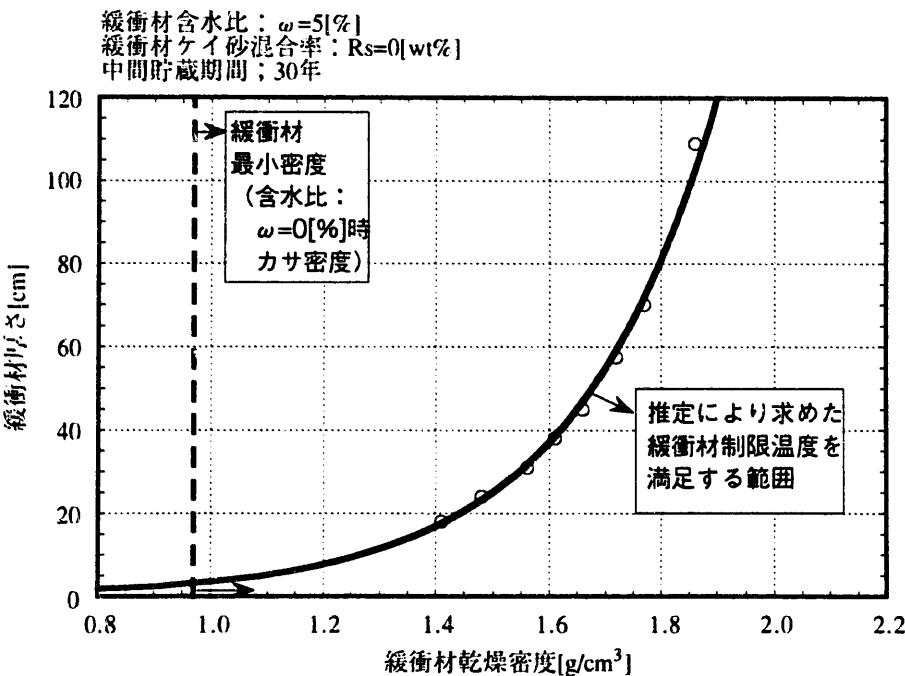


図 4-43 热的観点からの緩衝材成立範囲（中間貯蔵期間；30 年）
(緩衝材含水比： $\omega=5\%$, 緩衝材ケイ砂混合率： $\text{Rs}=0$, 30wt%)

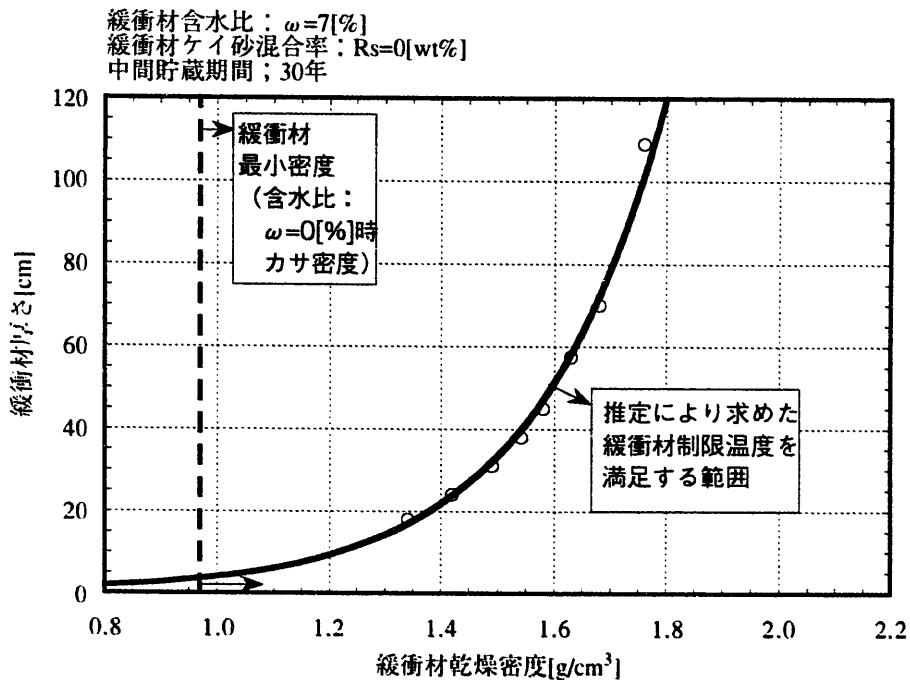


図 4-44 热的観点からの緩衝材成立範囲（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 7\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{ wt\%}$ ）

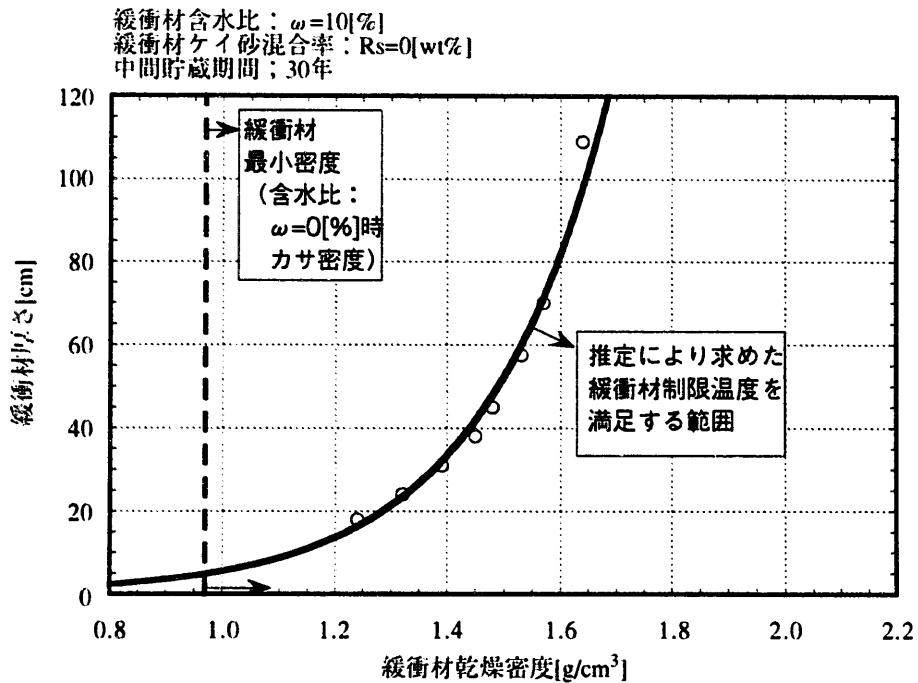


図 4-45 热的観点からの緩衝材成立範囲（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 10\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs = 0\text{ wt\%}$ ）

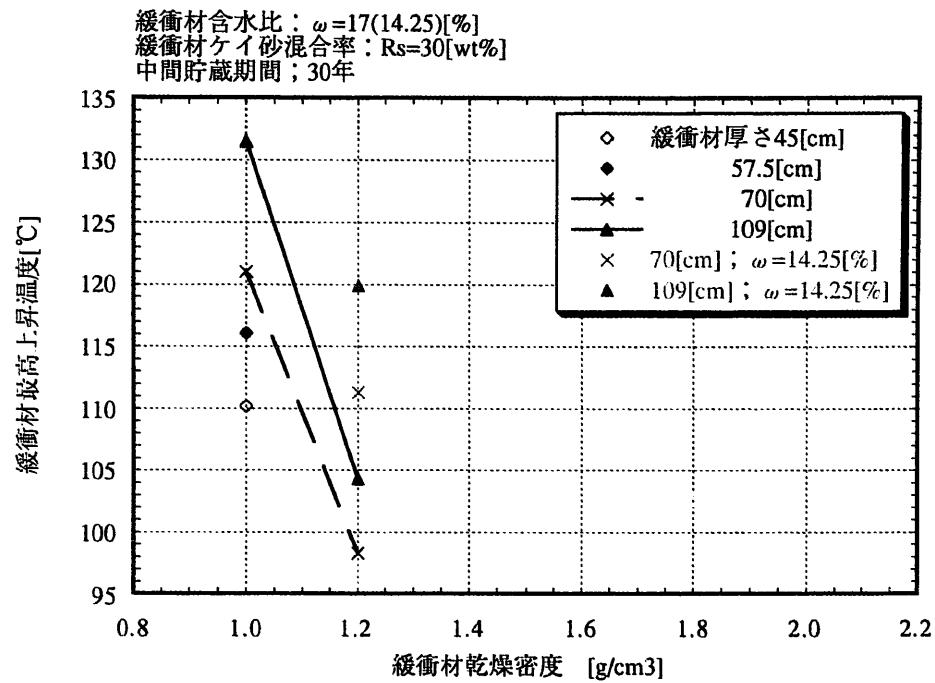


図 4-46 乾燥密度と緩衝材最高上昇温度の関係（推定）（中間貯蔵期間；30 年）
 （緩衝材含水比 : $\omega = 17(14.25)\%$, 緩衝材ケイ砂混合率 : $Rs=30\text{wt}\%$ ）

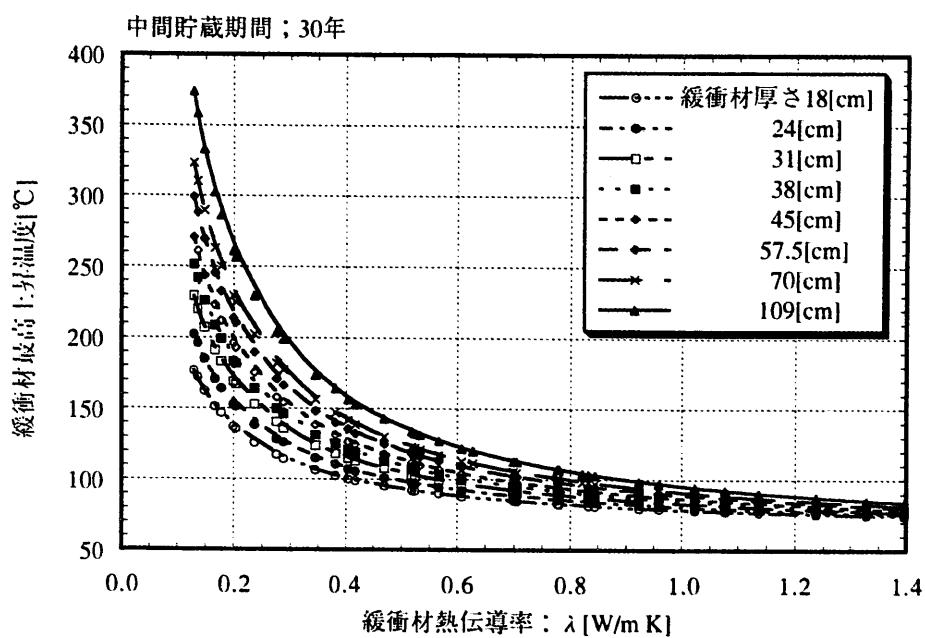


図 4-47 緩衝材熱伝導率と緩衝材最高上昇温度の関係（推定）
(中間貯蔵期間；30 年)

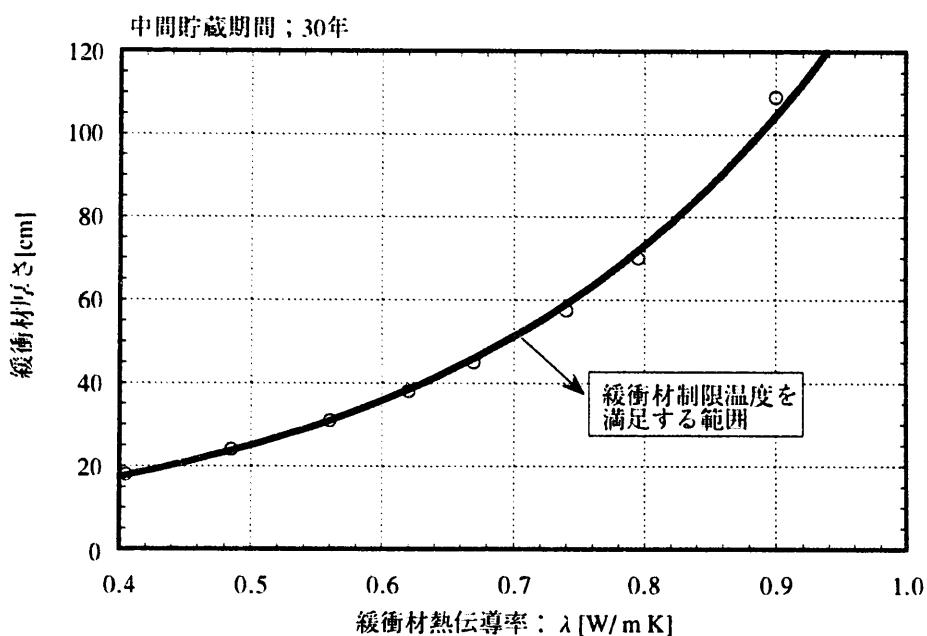


図 4-48 緩衝材熱伝導率と緩衝材厚さに対して熱的観点から緩衝材が成立する範囲（推定）（中間貯蔵期間；30 年）

5. まとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分場のシステム成立性の検討を行ううえで、人工バリアの成立可能性を示すことは、地下施設の検討およびシステムの性能評価を行ううえでの前提条件となる。本検討では、人工バリアの設計要件における緩衝材の熱伝導性に着目し、まず、含水比、ケイ砂混合率をパラメータに緩衝材の最小密度（力サ密度）の測定を行った。次いで、乾燥密度、含水比、ケイ砂混合率をパラメータに緩衝材の熱特性を測定し、その結果を用い、ニアフィールドの熱解析を行い、緩衝材が制限温度を満足する緩衝材仕様（乾燥密度、ケイ砂混合率、含水比、人工バリアにおける緩衝材厚さ）範囲について検討した。本検討で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 緩衝材の最小密度（力サ密度）は、含水比の増加とともに減少し、ケイ砂混合率の上昇とともに上昇する。
- (2) 緩衝材の熱伝導率の測定を行い、緩衝材の熱伝導率を含水比の関数で定式化した。
- (3) 緩衝材の熱伝導率におけるケイ砂混合依存性は、含水比の低下とともに小さくなり、含水比 0% 時では、その依存性はないことが分かった。これは、緩衝材に含まれる水分がケイ砂およびケイ砂近傍の間隙では担保されず、ベントナイトおよびベントナイト近傍の間隙で担保されるためである。また、ケイ砂混合の影響が生じ始める含水比についても検討を行った。
- (4) 含水比 0% 時の緩衝材の熱拡散率の測定を行い、同条件下の熱伝導率測定結果を用い、含水比 0% 時の緩衝材の比熱を同定した。また、比熱の含水比依存性を理論式から定式化した。
- (5) 上記熱特性測定結果を用い、ニアフィールドの熱解析を行い、緩衝材の最小密度（力サ密度）の測定結果と合わせて、熱的観点からの緩衝材の成立範囲を、緩衝材乾燥密度と緩衝材厚さの関係で示した。また、熱的観点からの緩衝材の成立範囲を緩衝材の熱伝導率で整理できることが分かった。

ただし、本検討での熱的観点からの緩衝材成立範囲は、岩盤の熱物性、処

分深度およびガラス固化体発熱特性等により変わりうる。したがって、サイ
トが決定され、詳細設計を行う段階で、再度類似の検討が行われ、人工バリ
アの最適化が行われることになると考えられる。

謝辞

緩衝材熱伝導率測定および供試体作製にあたり、検査開発株式会社の菊池広人氏に御協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

— 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, (1999a) : 热-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) : 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

動力炉・核燃料開発事業団 (1992b) : 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

土質工学会 (1990) : 土質試験の方法と解説

Gaylon S.Campbell 著, 中野政詩, 東山勇訳 (1987) ; 「パソコンで学ぶ土の物理学」, 鹿島出版会.

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（1999）：オーバーパック設計の考え方、JNC TN 8400 99-047.

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ミュレーション、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-.

クニミネ工業株式会社：クニゲル V1 商品パンフレット

クニミネ工業株式会社（1977）：日本ベントナイト工業会標準試験方法、Japan Bentonite Manufacturers Association Standard (JBAS, 1977)

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

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., 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., 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.

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.

信太拓, 坂下弘人, 熊田俊明 (1997) : 点熱源法による緩衝材の熱物性値測定法の開発, 日本原子力学会, 1997 秋の大会

昭和電工 (株) : Shotherm QTM 迅速熱伝導率計 D II, 取扱説明書

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, 藤田朝雄 (1999a) : 緩衝材の不飽和水理特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-010.

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

高治一彦, 鈴木英明 (1999) : 緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041.

Taniguchi, W., Fujita, T., Kanno, T., Ishiguro and K., 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, 岩佐健吾 (1999) : ニアフィールドの熱解析, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-051.

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