

緩衝材の熱物性試験



1992年9月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

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

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)1993

緩衝材の熱物性試験

報告者 藤田 朝雄*
杉田 裕*
納多 勝**
幾世橋 広***

要 旨

高レベル廃棄物の地層処分における緩衝材には止水性、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。現在までのところ、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が有望な候補材料と考えられている。

動燃事業団では、人工バリア技術開発および性能評価の基礎データとするために圧縮ベントナイトの物理的、化学的特性について研究を進めている。

本報告は、圧縮ベントナイトの基本特性データの取得整備の一環として、熱物性値（熱伝導率、比熱）の温度、飽和度依存性についてまとめたものである。試験方法は、ヒートプローブを用いた非定常法であり、試験パラメータは、密度、飽和度、温度である。試験の結果、熱伝導率は飽和度に大きく依存し、乾燥密度 1.4~1.8 g/cm³、飽和度約0.5 ~92%、温度100 °C以下の条件下では、約 0.4~1.5W/(m K)、比熱は約 0.4~1.3 kJ/(kg K)であった。また、温度の熱伝導率及び比熱への影響は小さくほぼ一定の値を示した。

* 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室
** 本社 環境技術開発推進本部 処分研究グループ
*** 東北大学 工学部 資源工学科

目 次

1. はじめに	1
2. 熱伝導率の測定	3
2. 1 測定原理	3
2. 2 試験体	4
2. 3 測定装置	7
2. 3. 1 プローブ	7
2. 3. 2 計測器系	8
2. 3. 3 温度条件設定系	8
2. 4 測定方法	12
2. 5 測定結果	12
2. 5. 1 熱伝導率と温度の関係	15
2. 5. 2 熱伝導率と飽和度の関係	16
3. 比熱の測定	17
3. 1 はじめに	17
3. 2 試験体	18
3. 3 測定原理	19
3. 4 測定方法	20
3. 5 測定結果	21
3. 6 水の影響	22
4. 結語	24
5. 謝辞	24
参考文献	25

1 はじめに

高レベル廃棄物地層処分における緩衝材には止水性、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。現在までのところ、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が有望な候補材料と考えられている。

動燃事業団では、人工バリア技術開発及び性能評価の基礎データとするために圧縮ベントナイトの物理的、化学的特性について研究を進めている[1]～[3]。

各特性のうち熱伝導率や比熱等の熱物性値は、人工バリア及び周辺岩盤の温度状況を把握する上で重要な物性値の一つである。一般に、土質材料は固相、液相、気相の3相から構成されており、この3相の状態により熱的性質は変化することが知られている。土質の分野では、凍結土を対象とした研究が広く行われており、凍結侵入深さを把握する上で熱伝導率や熱容量等の測定が行われている[4]。一般に、土質材料の熱伝導率は含水比、密度の増加により大きくなることが知られている[5]。

緩衝材や埋戻し材の熱物性値については、これまでに多くの試験結果が報告されている。Radhakrishna[6]はベントナイト、花崗岩の粉碎物、カオリン等の熱伝導率を測定し、熱伝導率は含水比、密度の影響を受け、温度の影響はあまり受けないことを報告している。AECL(Atomic Energy of Canada Ltd.)では、この物性値を使用して熱-水理連成現象の解析検討を行っており、鋭意他の連成パラメータの取得を行なっている[7]。Hopkirk等[8]はベントナイトの熱伝導率、熱容量について密度、温度、含水比をパラメータとした実験式を提案しており、実験式より求まる物性値を用いて熱解析を行なっている。Knutsson[9]は、所定の含水比に調整したベントナイトに随時水を浸潤させた状態での熱伝導率、熱容量の測定を行ない、飽和度と間隙比をパラメータとした実験式を提案している。以上の諸外国での熱物性値の計測結果は、MX-80(米国産Na-ベントナイト)を使用したものであるが、いずれも熱物性値は含水比及び密度の依存性を示している。

一方、国産のベントナイトであるクニゲルV1(山形県月布産のNa-ベントナイト、クニミネ工業社製)の熱物性値についても、いくつかの試験結果が報告されている。末岡等[10]は、ヒートプローブを用いた非定常法での熱伝導率を測定し、その測定方法の有効性について報告しているが、測定方法の有効性に重点を置いており、密度や飽和度等のパラメータに関する物性値の取得までは至っていない。鈴木等[1]は、ベントナイト

の熱伝導率をQTM非定常法を用い測定し、含水比、密度、ケイ砂混合量の増加により熱伝導率は大きくなり、温度の影響は小さいことを報告している。QTM非定常法は、センサーを試料に直接押し当てて測定するため概略的な評価には簡便であり、一般に乾燥状態にあるコンクリート、プラスチック等の物質に対して有効である[11]。

本報告は、圧縮ベントナイトの基本特性の把握の一環として、ヒートプローブを用いた非定常法で含水状態における熱伝導率を測定し、また同じ試料を外周から定速で昇温することにより温度伝導率を求め、さらに別に測定した試料の見掛密度とから比熱を算出し、これらの熱物性値の温度及び飽和度依存性についてまとめたものである。

2 熱伝導率の測定

2.1 測定原理[12]

熱伝導率の測定法には図-2.1 に示されるように大きく分けて、定常法と非定常法がある[13]。この内、どの測定法を選択するかは、(1)被測定材料、(2)被測定材料の実際の使用条件、(3)測定条件などの要因によって決まる。

水分含有状態の高圧縮ベントナイト試料を考えると、一次元軸方向による測定法では試験体中へのプローブの取り付けが困難であり、表面にプローブを取り付ける方法では水分の影響を正しく評価できるかどうか問題である。また、測定の迅速性の観点も考慮し、ここでは非定常細線加熱法的一种であるプローブ法を用いた。この方法は、中心の発熱体から単位時間単位長さ当たり一定の熱量を発生させ、プローブ表面の温度の非定常変化を測定する方法である。

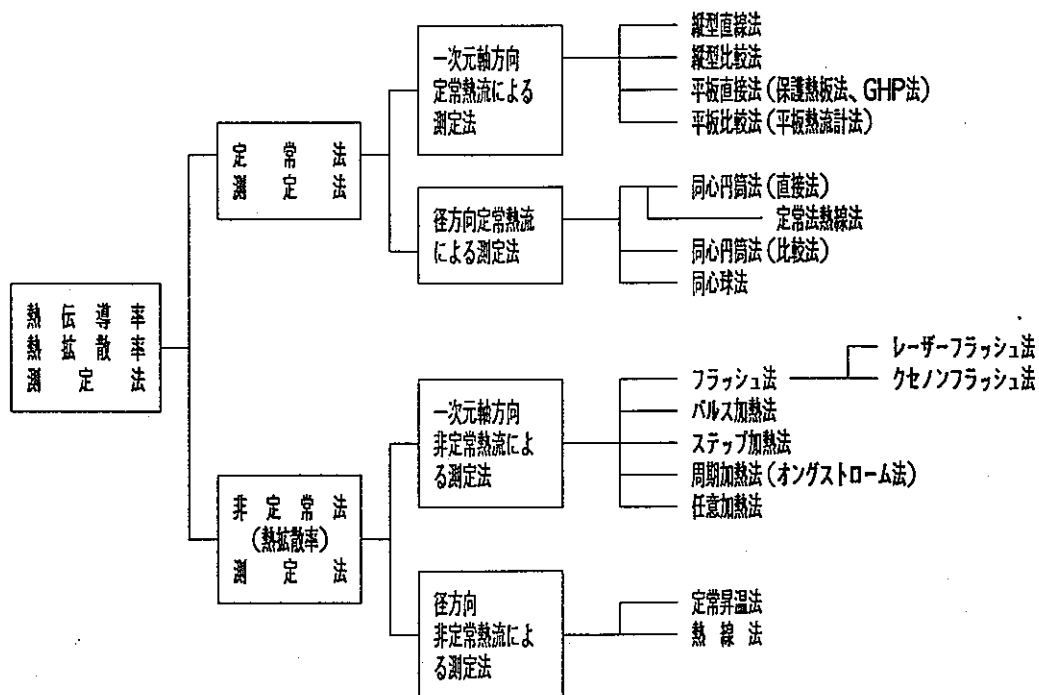


図-2.1 熱伝導率の測定法[13]

熱伝導率が λ で、一様温度 T_0 にある等方性均質無限媒体中に、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と、発熱開始からの時間 t において、熱源中心から半径方向への距離 r の点の温度 T は次式で表される。

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ E_i \left[-\frac{r^2}{4\alpha t} \right] \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、 $\alpha (= \lambda / c\rho)$ は温度伝導率 (c :比熱, ρ :密度), E_i は指数積分関数である。ここで、細線の熱容量は無視されている。ここで、 $E_i(-r^2 / 4\alpha t)$ を展開すると次のようになる。

$$\begin{aligned} & E_i \left[-\frac{r^2}{4\alpha t} \right] \\ &= -\ln n \left[\frac{r^2}{4\alpha t} \right] - 0.5772 + \left[\frac{r^2}{4\alpha t} \right] - \left[\frac{r^2}{4\alpha t} \right]^2 / 2.2 + \dots\dots\dots (2.2) \end{aligned}$$

(2.2)式で $r \rightarrow r_0$ とし、細線の表面とすれば、 $r^2 / 4\alpha t \ll 1$ のとき第3項以下は省略できるから、(2.1)式は次式で表される。

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \ln \left[\frac{4\alpha t}{r^2} \right] - 0.5772 \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

これより、時間 t_1 と t_2 における細線の表面温度を $T(r_0, t_1)$, $T(r_0, t_2)$ として、その差をとると次式が得られる。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \left[\frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T(r_0, t_2) - T(r_0, t_1)} \right] \dots\dots\dots (2.4)$$

すなわち、発熱線の表面温度の時間的変化を測定すれば、式(2.4)より熱伝導率が求まることになる。

2. 2 試験体

使用するベントナイトは国産のベントナイトの一種である山形県月布産の製品(クニゲルV1, クニミネ工業)である。

クニゲルV1の鉱物組成[14]を表-2.1に示す。粘土鉱物であるモンモリロナイトを主成分とし、その含有量は約50%である。随伴鉱物としては、石英、長石のほか方解石、黄鉄鉱等が認められる。また、物理特性[1]を表-2.2に、化学組成分析結果[14]を表-2.3に示す。

表-2.1 クニゲルV 1の鉱物組成[14]

構成鉱物等	含有量
モンモリロナイト	50 ~ 55 %
石英	30 ~ 35 %
長石	5 ~ 10 %
方解石	1 ~ 3 %
沸石(アナルサイト)	1 ~ 2 % 以下
ドロマイト	1 ~ 2 % 以下
黄鉄鉱	1 ~ 2 % 以下
雲母(黒雲母)	1 ~ 2 % 以下

表-2.2 クニゲルV 1の物理特性[1]

項目	物性値
真比重 G_s	2.7 ~ 2.8
液性限界 ω_L	416.0%
塑性限界 ω_P	20.9%
塑性指数 I_P	395.1%
収縮限界 ω_S	10.6%

表-2.3 クニゲルV 1の化学組成[14]

成分	全岩	水ひ試料 (モンモリロナイト)
SiO ₂	69.9	61.3
TiO ₂	0.18	0.16
Al ₂ O ₃	14.4	22.0
Fe ₂ O ₃	1.91	1.78
FeO	0.47	0.22
MnO	0.06	0.02
MgO	1.86	3.58
CaO	1.87	0.68
Na ₂ O	2.70	3.60
K ₂ O	0.30	0.10
P ₂ O ₅	0.05	0.02
強熱減量*1	5.04	6.30
合計	98.74	99.76
その他		
Cl	0.03	
全S	0.55	
SO ₄ ²⁻	0.21	
全S	0.61	
CO ₂	1.7	
乾燥減量*2	8.50	7.71

含有率は105 °C恒温試料重量に対する割合

*1) 1,000°C

*2) 室温放置試料の105 °C恒温までの減量

試験体の寸法を図-2.2 に示す。試験体は円柱状で直径約110mm，高さ約120mm であり，中心軸に沿って，一方の底面から80mmの深さまで，プローブ（後述）挿入用の穴が開けられている。

それぞれの試験体の寸法及び主な物性値を表-2.1 に示す。なお，圧縮固化する際に，高さ120mm の固化体を1回プレスで行うには装置の容量が不足したため，3～4回に分けて最終的に12cm程度になるようにした。

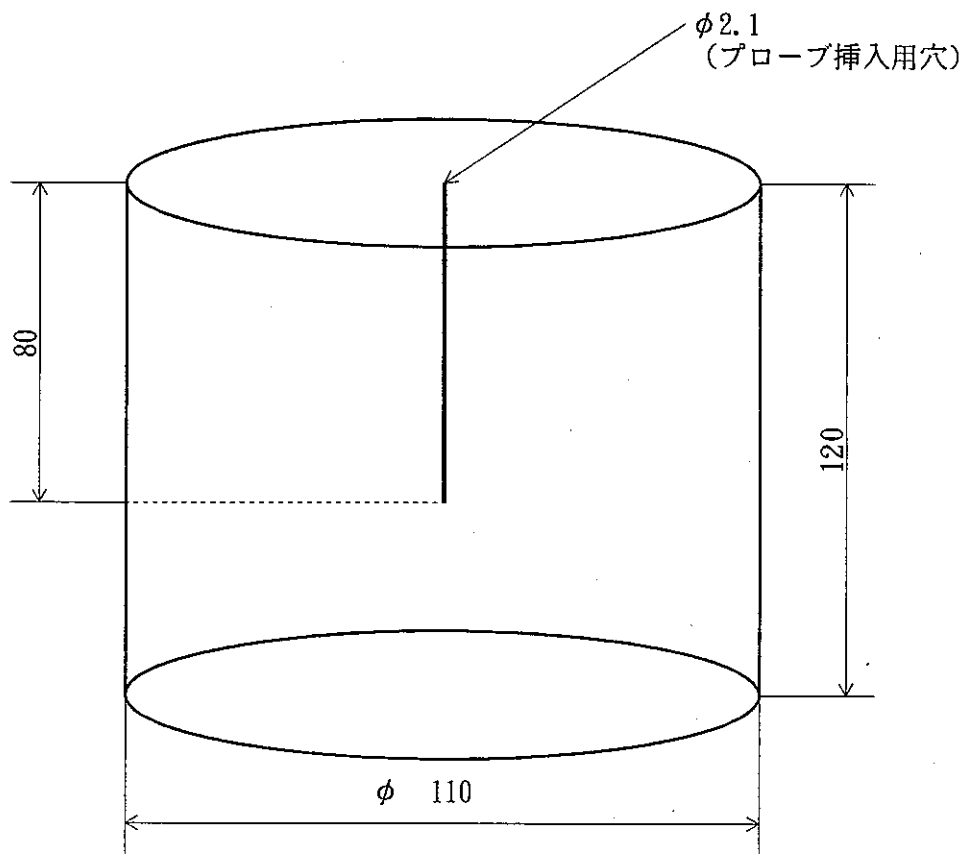


図-2.2 熱伝導率測定用試験体

表-2.1 試験体のパラメータ

試験体番号	直径 [cm]	高さ [cm]	体積 [cm ³]	重量 [g]	乾燥密度 [g/cm ³]	飽和度 [%]
1	11.2	12.3	1209	1872	1.44	23.2
2	11.2	12.0	1186	1865	1.46	23.9
3	11.2	11.5	1182	2200	1.47	85.6
4	11.1	12.2	1176	2111	1.42	79.1
5	11.1	11.7	1127	2196	1.70	67.0
6	11.2	12.5	1227	2442	1.72	74.5
7	11.2	12.3	1212	2440	1.74	76.9
8	11.1	12.1	1168	2386	1.71	90.8
9	11.1	12.0	1163	2390	1.71	92.3
10	11.2	12.1	1190	2130	1.79	0.5
11	11.2	12.1	1192	2253	1.78	32.2
12	11.2	11.9	1172	2265	1.82	34.6
13	11.1	12.2	1178	2382	1.77	74.9
14	11.1	12.0	1159	2389	1.80	78.4

2.3 測定装置

測定装置は、プローブ、計測器系及び温度条件設定系の3つに大きく分けることができる。それぞれについて以下に説明する。

2.3.1 プローブ

プローブ詳細図を図-2.3に示す。本来プローブは、できるだけ細くまた無限長さであることが望ましいが、直径については測定プローブの製作上の問題や固化ベントナイトに穴を開ける方法に制約のあることから2.0mmとした。また、プローブの長さは両端からの熱損失を検討して決める必要があるが、幾世橋[15]によれば、媒体が土や岩石のような熱の不良導体の場合には、プローブの半径 r_0 の60倍の長さがあれば熱損失の影響は無視できるとしているため、 $r_0 = 1\text{mm}$ の80倍をとって80mmとした。なお、熱電対には外径0.25mmのCAシース熱電対を用い、プローブの加熱線として外

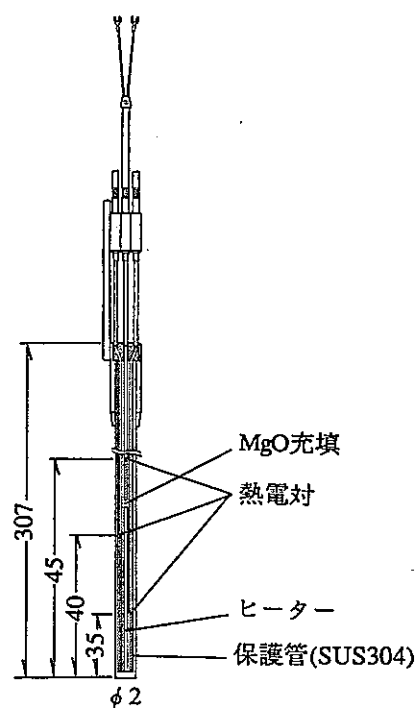


図-2.3 熱伝導率測定用プローブ

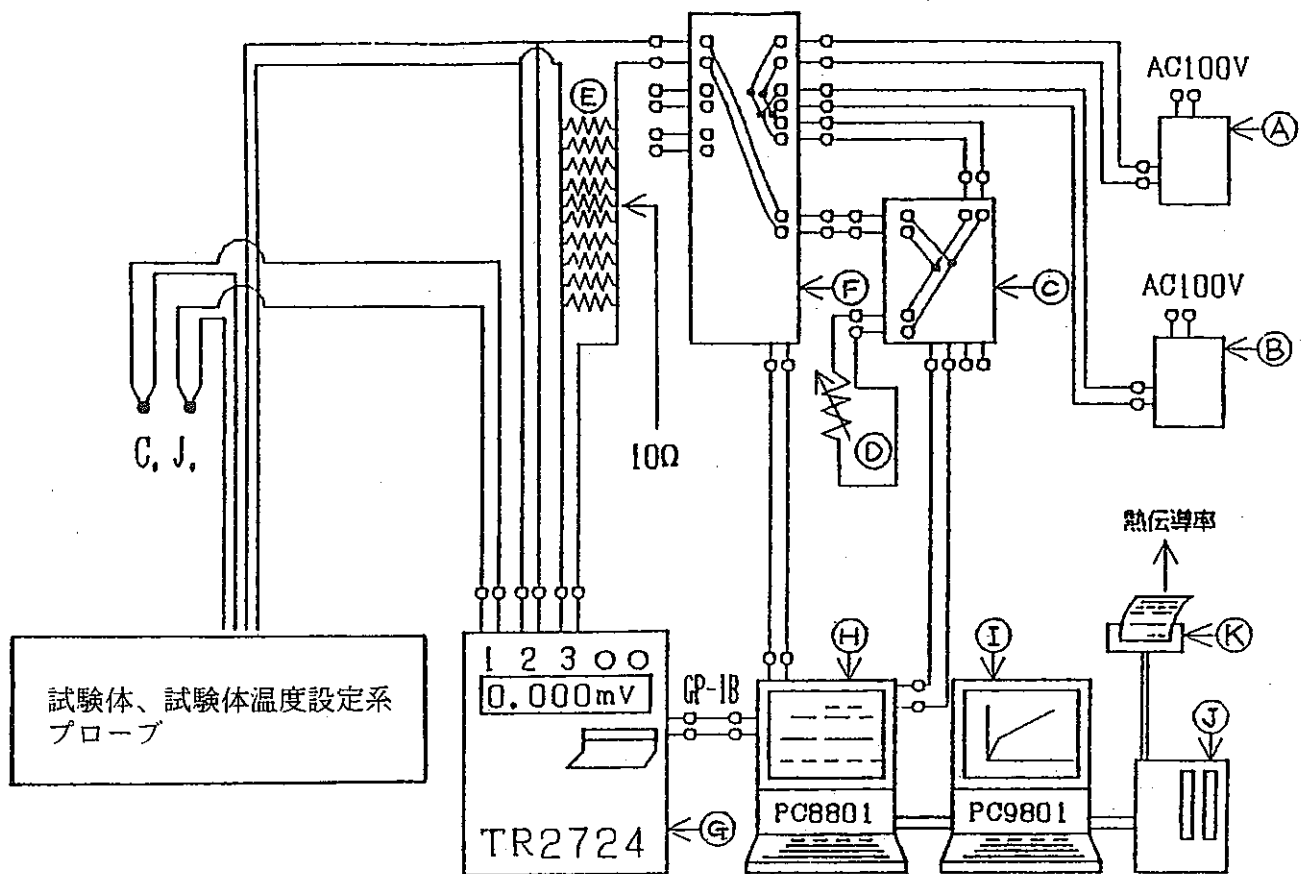
径0.5mmのCAシース熱電対を利用した。プローブ自体は、SUS316製である。内部の空隙には熱の良伝導体である酸化マグネシウム粉末が充填されている。なおプローブ内には温度検出用熱電対が3本挿入され3倍出力の熱電堆（サーモパイル）としており、温度検出感度を0.008K/1 μ Vに高めている。

2.3.2 計測器系

図-2.4に使用した諸計測器の系統図を示す。計測されるデータは、時間、プローブ温度、周囲温度、投入電力等であり、全てのデータはパソコンで管理される。

2.3.3 温度条件設定系

温度条件を、4通り（室温、40 $^{\circ}$ C、60 $^{\circ}$ C、80 $^{\circ}$ C）に設定した。室温における測定では気温の日変化の影響を受けないように、図-2.5に示すような断熱措置を行った。40 $^{\circ}$ C以上の条件においては、高精度の恒温水槽中に試料を入れて測定した。ただし、この場合、試料中の水分が変化しないように試料をブリキ缶に入れ、試料とブリキ缶との隙間にシリコンゴムを充填密閉し、測定に供した。図-2.6に試料の詳細寸法と密閉処理の状態を示す。ブリキ缶内の密封方法は同じであるが、室温用はブリキ缶の周囲を発泡スチロール等で囲み、高温用は試験体を恒温槽に入れ温度を一定に保持した。



- | | |
|---------------|-----------------|
| A. 電力供給装置 I | G. データ収録装置 |
| B. 電力供給装置 II | H. 測定制御用コンピュータ |
| C. センサ・抵抗切替え機 | I. データ処理用コンピュータ |
| D. 模擬抵抗 | J. ディスクユニット |
| E. 電流-電圧変換器 | K. プリンタ |
| F. センサ切替え機 | |

図-2.4 計測器系の系統図

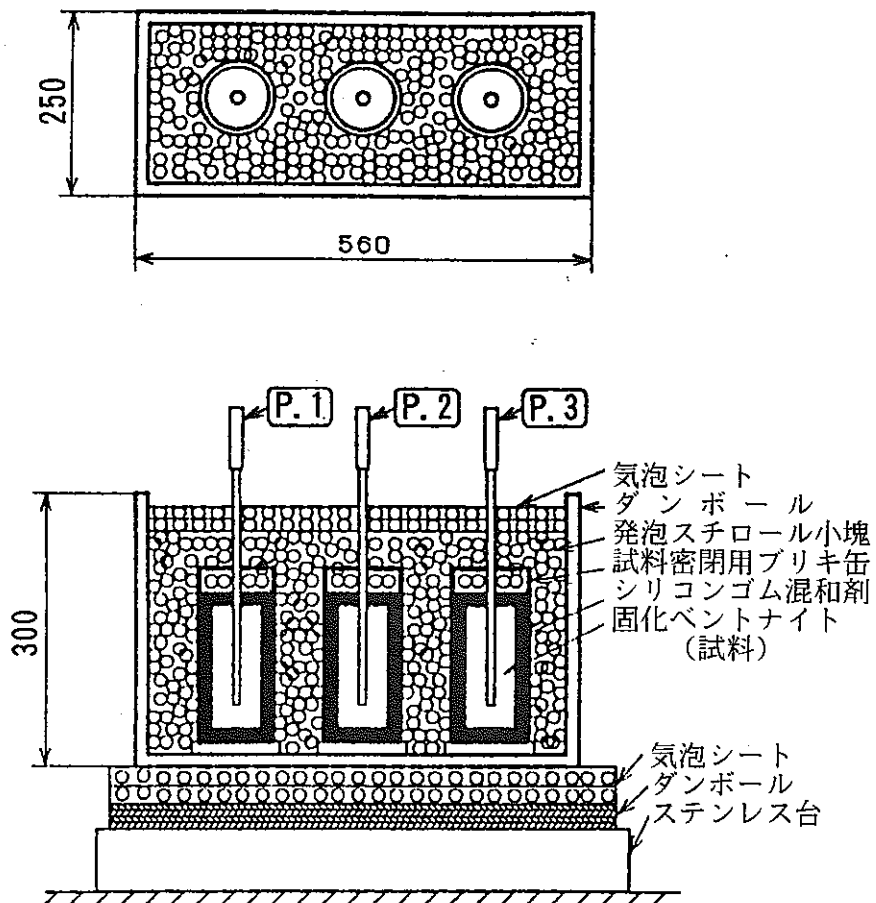


図-2.5 温度条件設定系の概要

(定温での測定)

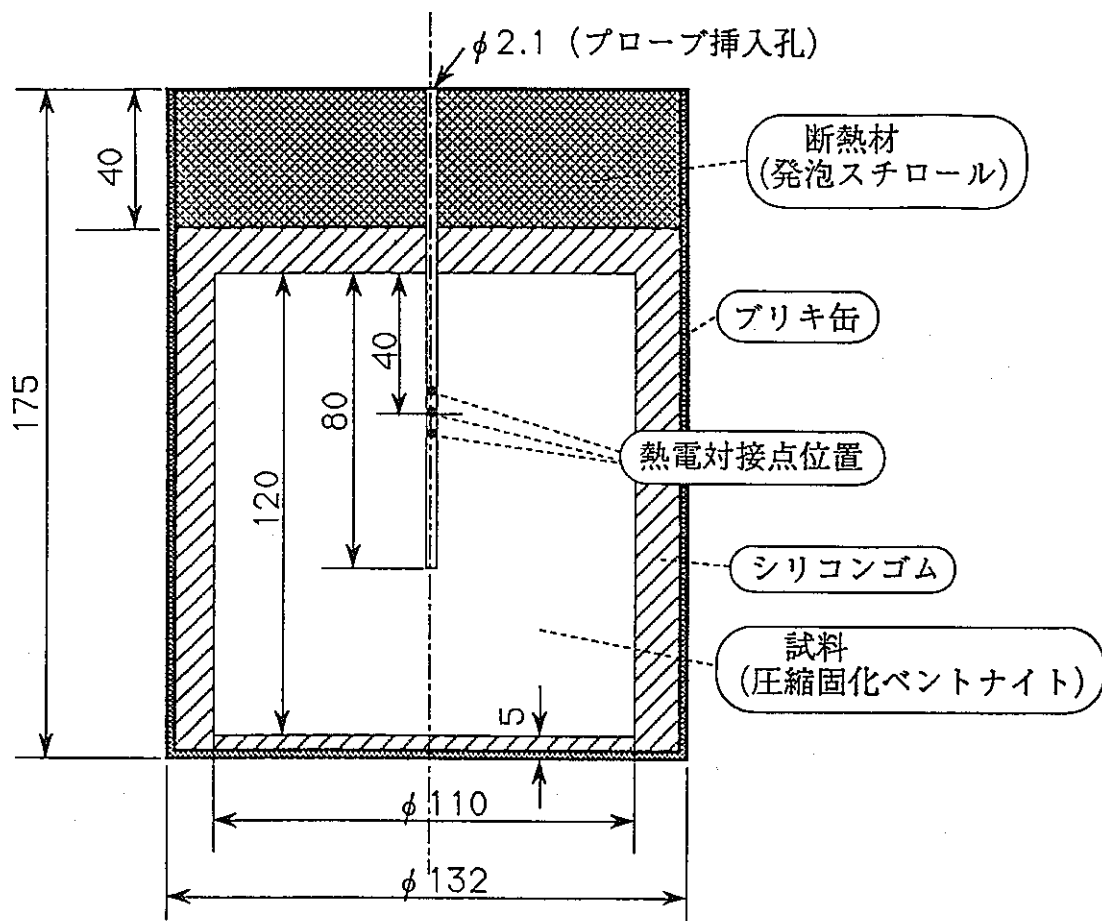


図-2.6 試料の詳細寸法と密閉処理

2. 4 測定方法

固化ベントナイト試験体は、全体のシステムのなかに組み込まれたあと、前述したような温度条件で条件付けた。本測定法では、測定開始前は試料全体の温度が一定温度に保たれている必要があるが、ここでは、プローブ内の熱電対の起電力の変化が10分間で $\pm 1.0 \times 10^{-3} \text{mV}$ ($\pm 0.024 \text{ }^\circ\text{C}$) 以内に保たれることと定義した。また、予備実験の結果、プローブ加熱電力は1.7W前後及び測定時間は1000 s 程度とした。

2. 5 測定結果

本研究では、ある区間において ΔT と $\ln(t)$ との間に直線関係があれば、 $\ln(t)$ による ΔT の2階微分値がゼロになることに着目して、以下のように熱伝導率の算出区間を決定した[16]。

図-2.7 に測定された温度上昇曲線の一例を示す。この曲線に見られるように、電力 Q を発熱線に供給した場合に得られる ΔT 及び $\ln(t)$ の測定データから、1階微分値 $d T / d [\ln(t)]$ 及び2階微分値 $d^2 T / d [\ln(t)]^2$ を計算する。計算した2階微分値が $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内で30個連続する最初の点と同時間の測定データ点を算出区間の始点とし、2階微分値30個に対応する測定データ40個の区間を熱伝導率の算出区間とした。この図においては、AB間が算出区間である。この場合、プローブ単位長さ当たり発熱量は 4.144 W/m で、 $d T / d [\ln(t)]$ は 0.498 であることから、(2.4)式より熱伝導率は、 0.662 W/(m K) と求まる。以上の方法により求めた熱伝導率の一覧を表-2.2に示す。

THERMAL CONDUCTIVITY (HOT WIRE METHOD)

DATE 1992 . 6 / 30 . 13
 RUN NAME 1L1346
 NAME Kiyohashi
 TYPE OF HEATER Probe 3ホ* ネットテ* ンタイ
 SAMPLE 4-13 KATHINE コカヘン* トナイ* ト カセマ
 SENSOR NO ② L SYSTEM NO 1 SENSOR CA
 ROOM TEMPERATURE 0.0 °C REMARKS OF SAMPLE
 LENGTH OF HEATER 0.306 m
 ROOM HUMIDITY 0.0 %

TIME	101 # <----> 337 #	ln (TIME)	4.6 <--> 5.8
TEMPERATURE	25.04 °C <----> 25.63 °C	AVE. TEMP.	25.3 °C
AVE. VOLTAGE	7.878 V	AVE. CURRENT	0.161 A
AVE. POWER	1.268 W 4.144 W/m	COUNT OF DATA	36 DATA
LA COEFFICIENT CORRELATION	0.9989	dT/dln t	0.498
THERMAL CONDUCTIVITY		0.662 W/(m·K)	

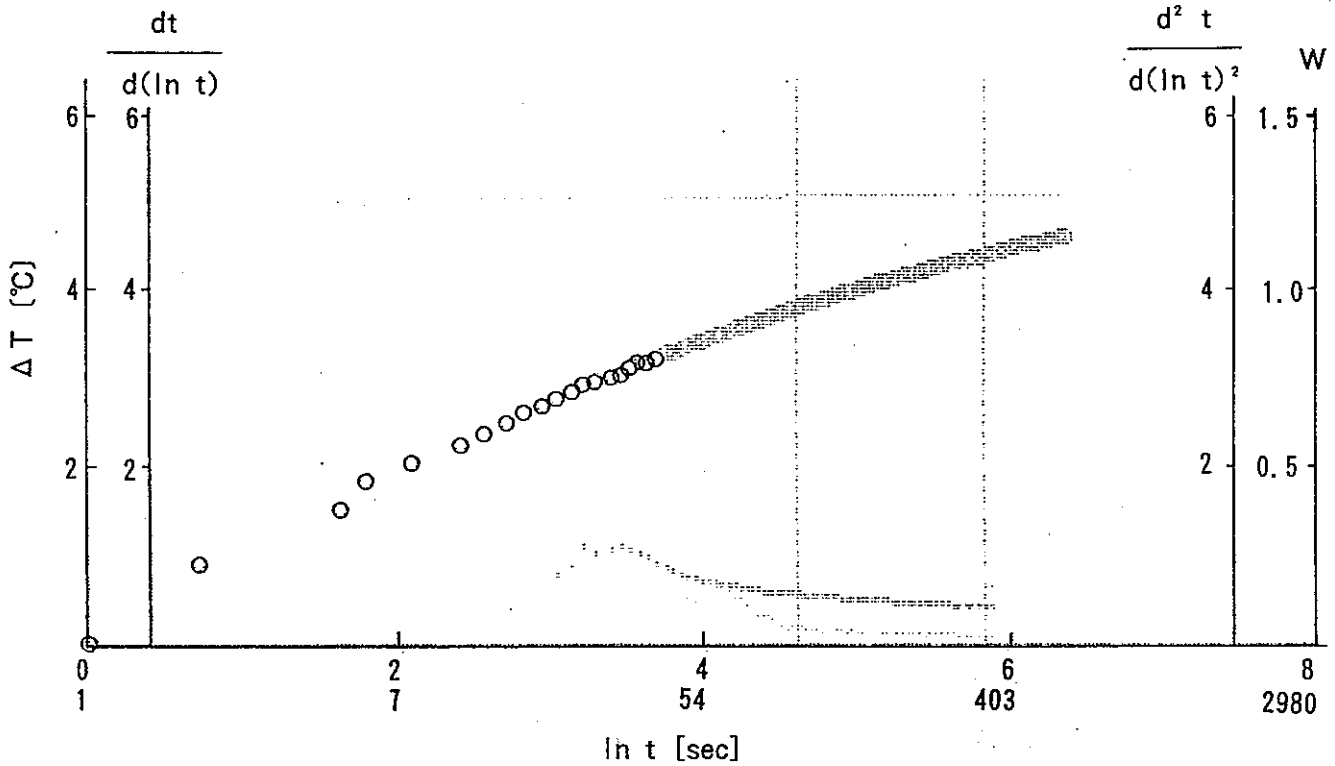


図-2.7 プローブの温度上昇曲線

表-2.2 熱伝導率

試験体 番号	熱伝導率 [W/(m K)]	温度 [°C]	試験体 番号	熱伝導率 [W/(m K)]	温度 [°C]	試験体 番号	熱伝導率 [W/(m K)]	温度 [°C]	
1	①	0.457	26	6	①	1 1	①	0.936	20
		0.471	46					0.913	40
		0.479	66					0.869	60
		0.501	97					0.881	80
	②	0.457	34		②		0.860	20	
		0.468	45				0.822	40	
		0.473	65				0.826	60	
		0.501	97				0.851	80	
2	①	0.474	23	7	①	1 2	①	0.922	20
		0.513	45					0.901	40
		0.519	66					0.952	60
		0.540	97					0.908	80
	②	0.492	26		②		0.947	20	
		0.507	46				0.928	40	
		0.515	66				0.971	60	
		0.537	97				0.928	80	
3	①	1.227	20	8	①	1 3	①	1.256	20
		1.243	40					1.265	40
		1.272	60					1.266	60
		1.229	80					1.228	80
	②	1.211	20		②		1.264	20	
		1.202	40				1.272	40	
		1.322	60				1.283	60	
		1.335	80				1.240	80	
4	①	1.160	20	9	①	1 4	①	1.284	20
		1.206	40					1.315	40
		—	60					1.239	60
		1.314	80					1.201	80
	②	1.159	20		②		1.323	20	
		—	40				1.249	40	
		1.208	60				1.281	60	
		1.248	80				1.245	80	
5	①	1.151	20	1 0	①			0.678	39
		1.161	40					0.676	47
		1.165	60					0.671	68
		1.184	80					0.679	96
	②	1.144	20		②		0.662	25	
		1.154	40				0.678	47	
		1.160	60				0.672	68	
		1.177	80				0.679	96	

2. 5. 1 熱伝導率と温度との関係

熱伝導率と温度の関係を図-2.8 に示す。それぞれのグラフは、縦軸が熱伝導率、横軸が温度である。本試験条件下(温度が100 °C以下)では、温度による熱伝導率への影響は小さく、ほぼ一定の熱伝導率を示している。それぞれの熱伝導率 λ と温度 T との関係は、表-2.3 のようになる。

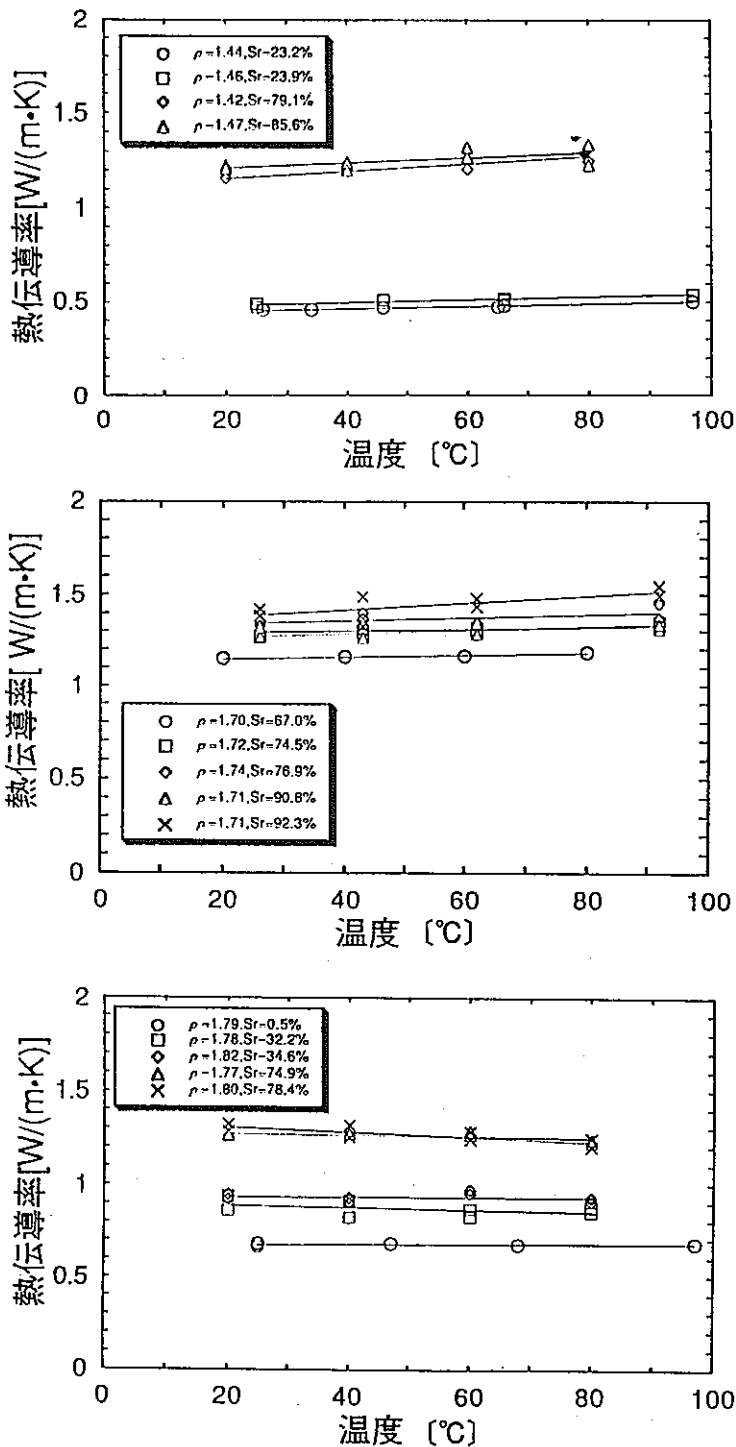


図-2.8 熱伝導率と温度の関係

表-2.3 熱伝導率と温度との関係式

乾燥密度 [g/cm ³]	飽和度 [%]	関係式
1.44	23.2	$\lambda = 0.000632T + 0.4382$
1.46	23.9	$\lambda = 0.000729T + 0.4695$
1.42	79.1	$\lambda = 0.001924T + 1.1196$
1.47	85.6	$\lambda = 0.001318T + 1.1892$
1.70	67.0	$\lambda = 0.000520T + 1.1360$
1.72	74.5	$\lambda = 0.000999T + 1.2445$
1.74	76.9	$\lambda = 0.000795T + 1.3264$
1.71	90.8	$\lambda = 0.000446T + 1.2845$
1.71	92.3	$\lambda = 0.001975T + 1.3416$
1.79	0.5	$\lambda = 0.000095T + 0.6688$
1.78	32.2	$\lambda = -0.000580T + 0.8988$
1.82	34.6	$\lambda = -0.000013T + 0.9328$
1.77	74.9	$\lambda = -0.000360T + 1.2773$
1.77	74.9	$\lambda = -0.001318T + 1.3330$

2. 5. 2 熱伝導率と飽和度との関係

求めた熱伝導率と飽和度との関係を図-2.9 に示す。それぞれのグラフは、縦軸が熱伝導率、横軸が飽和度である。データ数が少ないため、温度との関係のように関数表示は出来ないが、飽和度の増加に伴い熱伝導率も増加していることが分かる。

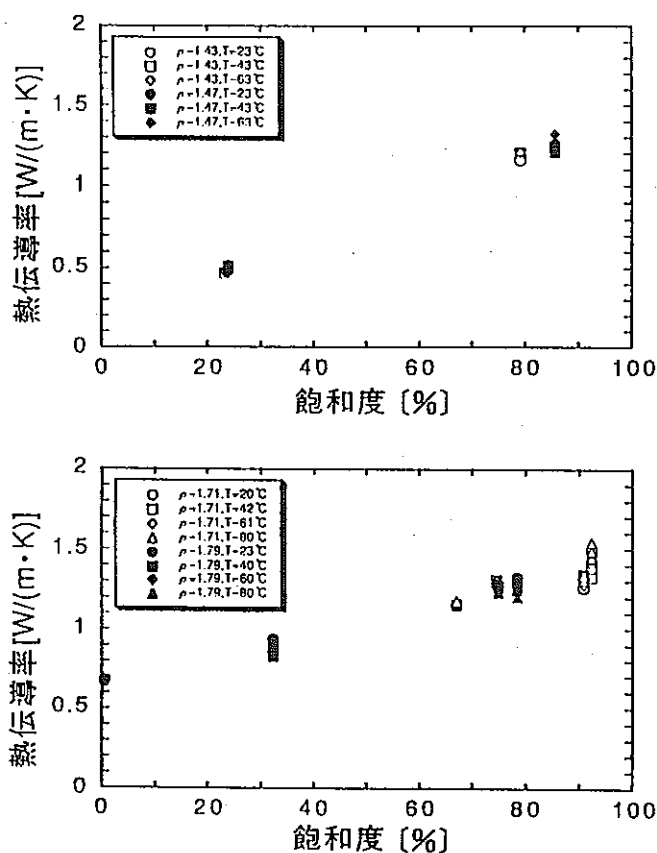


図-2.9 熱伝導率と飽和度の関係

3 比熱の測定

3.1 はじめに

比熱（比熱容量）とは、単位質量当たりの熱容量である。熱容量とは、物質の温度を 1℃上昇させるために必要な熱量と定義される。熱容量の単位はJ/K である。また、熱容量には、加熱時の条件によって定圧熱容量 C_p と定容熱容量 C_v の 2 通りの定義があり、それぞれ以下の式で表される。

$$C_p = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta T} \right)_p \quad \text{----- (3.1)}$$

$$C_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta T} \right)_v \quad \text{----- (3.2)}$$

熱容量の測定には、図-3.1[13] に示すようにいくつかの方法があるが、試料である高圧縮ベントナイトが、水と接触すると膨潤すること、また、過度の加熱による乾燥に対して脆くなることが予想されるなど、その他の方法を考えなければならない。今回は、熱伝導率、温度伝達率及び密度を測定して間接的に比熱を測定した。

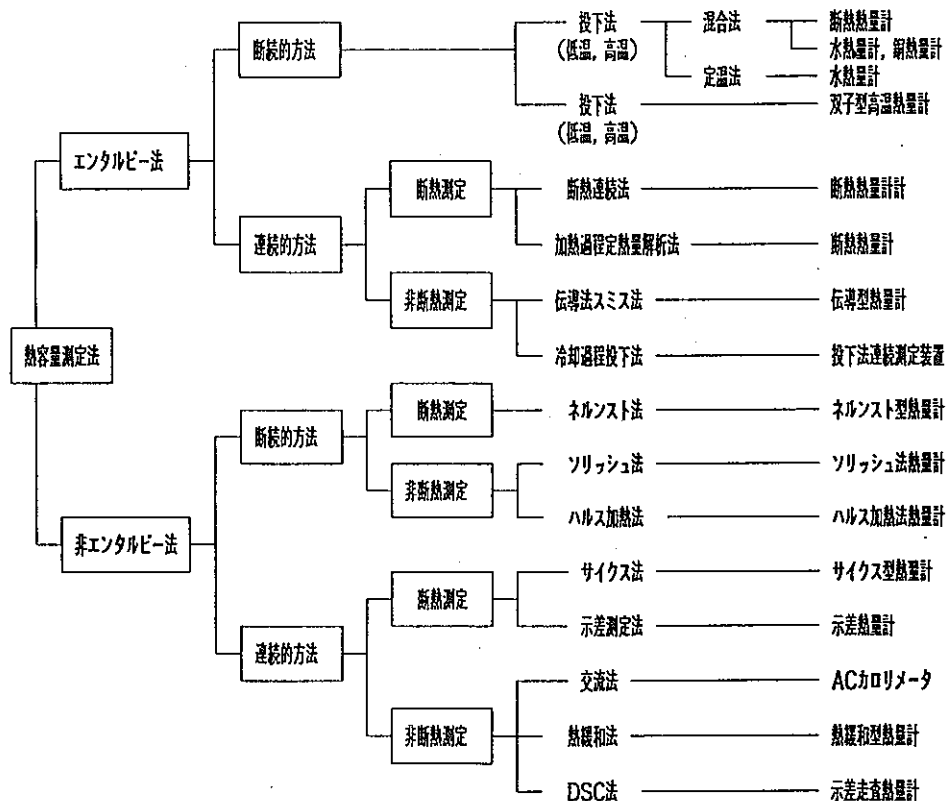


図-3.1 熱容量測定方法の分類[13]

3. 2 試験体

比熱測定用試料，すなわち温度伝導率測定用試料は，熱伝導率測定用試料と全く同一の試料を用いた。表-3.1 に試料の詳細を示す。また，図-3.2 に示されるように，試料に温度伝導率測定用の熱電対を挿入するための穴として直径1.1mm の穴が2箇所，熱伝導率測定用の穴（直径 2.1mm）が1箇所設けられている。

表-3.1 比熱測定試料の詳細

試験体番号	直径 [cm]	高さ [cm]	体積 [cm ³]	重量 [g]	乾燥密度 [g/cm ³]	飽和度 [%]
1	11.2	12.27	1208.8	1872	1.44	23.2
2	11.2	12.04	1186.2	1865	1.46	23.9
3	11.2	12.50	1227.0	2442	1.72	74.5
4	11.2	12.30	1211.8	2440	1.74	76.9
5	11.2	12.08	1190.1	2130	1.79	0.5

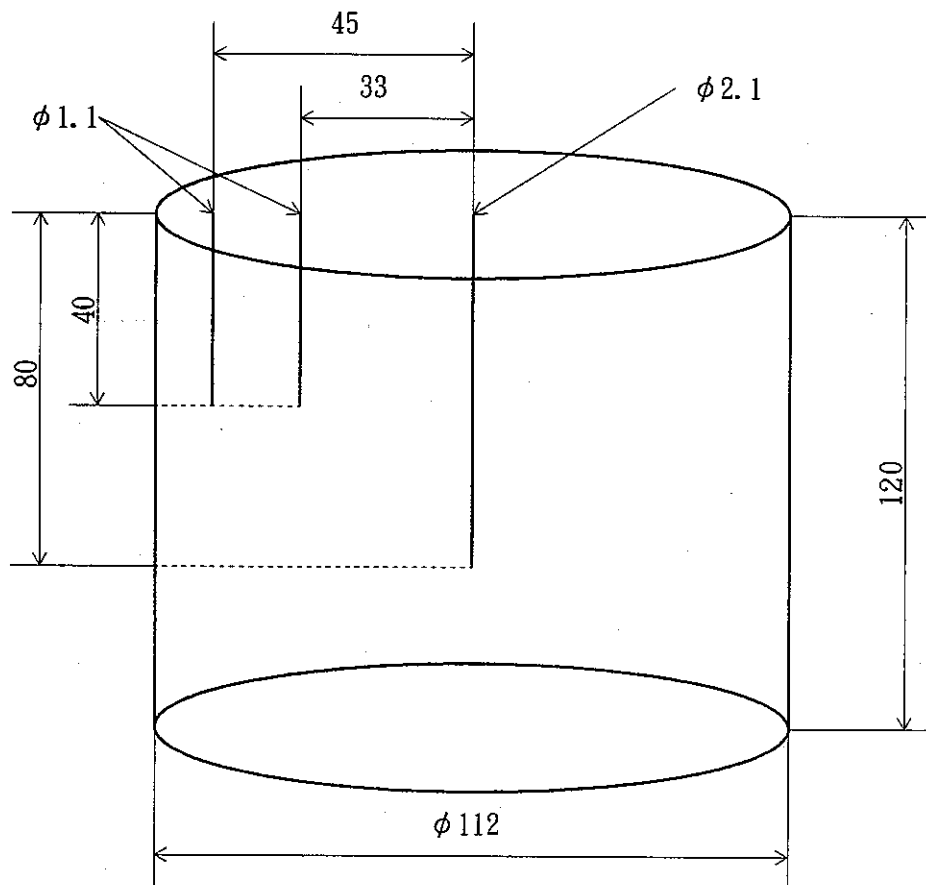


図-3.2 試料の寸法及びプローブと熱電対挿入用穴の詳細

3.3 測定原理([17] ~ [18])

熱伝導率 λ ，温度伝導率 α ，密度 ρ 及び比熱 c との間には次式の関係がある。

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \rho} \quad \text{---(3.3)}$$

従って，比熱 c は次式より計算できる。

$$c = \frac{\lambda}{\alpha \rho} \quad \text{---(3.4)}$$

密度は既知であり，熱伝導率は前章の方法で測定される。温度伝導率は以下の方法で測定される。

図-3.3 に示すように，温度伝導率 α [m^2/s] を測定するため，試料の半径方向に2本，外表面（カーボランダム充填部分）に1本の計3本の熱電対を設置した。

試料側面の温度が一定速度 P [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$] で上昇するとき，試料の半径方向に生じる温度差 ΔT は次式により与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{r_2} - T_{r_1} \\ &= (P/2\alpha) \left\{ (r_2^2 - r_1^2) / 2 + r_1^2 \ln(r_2 / r_1) \right\} \quad \text{---(3.5)} \end{aligned}$$

ここで， r_1 ， r_2 は，熱電対①及び②の円柱中心からの距離， T_{r_1} ， T_{r_2} は熱電対①及び②で測定された温度である。(3.5) 式を温度伝導率 α について解けば，次式の関係が求まる。

$$\alpha = \frac{P \left\{ (r_2^2 - r_1^2) / 2 + r_1^2 \ln(r_2 / r_1) \right\}}{2 (T_{r_2} - T_{r_1})} \quad \text{---(3.6)}$$

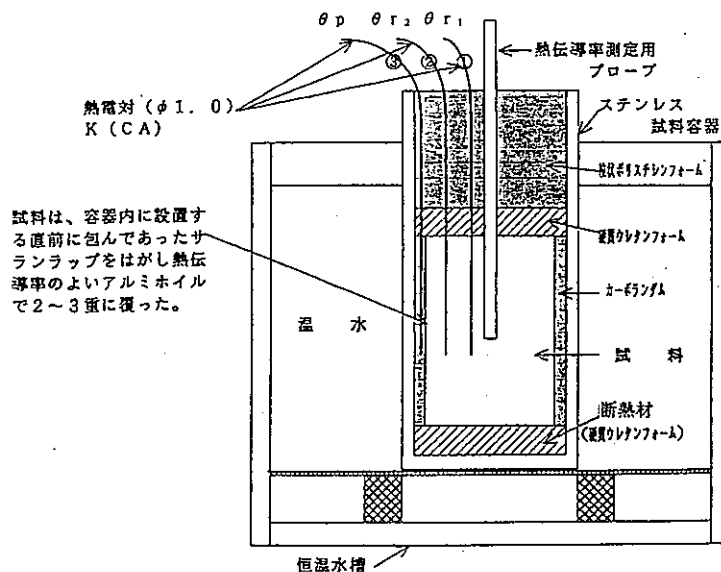


図-3.3 温度伝導率測定装置

3.4 測定方法

図-3.4 に測定手順を示す。測定は1つの試料に対して $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C} \rightarrow 60^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$ 及び $70^{\circ}\text{C} \rightarrow 92^{\circ}\text{C}$ の4条件で行った。恒温槽の温度を一定温度Pで上昇させ、2本の熱電対の温度差が時間的に一定になった時点で、 $T_{r,2} - T_{r,1}$ を定め、(3.5)式によって α を求める。求められた α と熱伝導率 λ 及び密度 ρ を(3.4)式に代入すると比熱 c が算出される。なお、4点目の $70^{\circ}\text{C} \rightarrow 92^{\circ}\text{C}$ の測定は $60^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$ の測定終了後、試料をほぼ 70°C まで自然冷却後、恒温槽の最大能力である 92°C まで昇温し測定を行った。

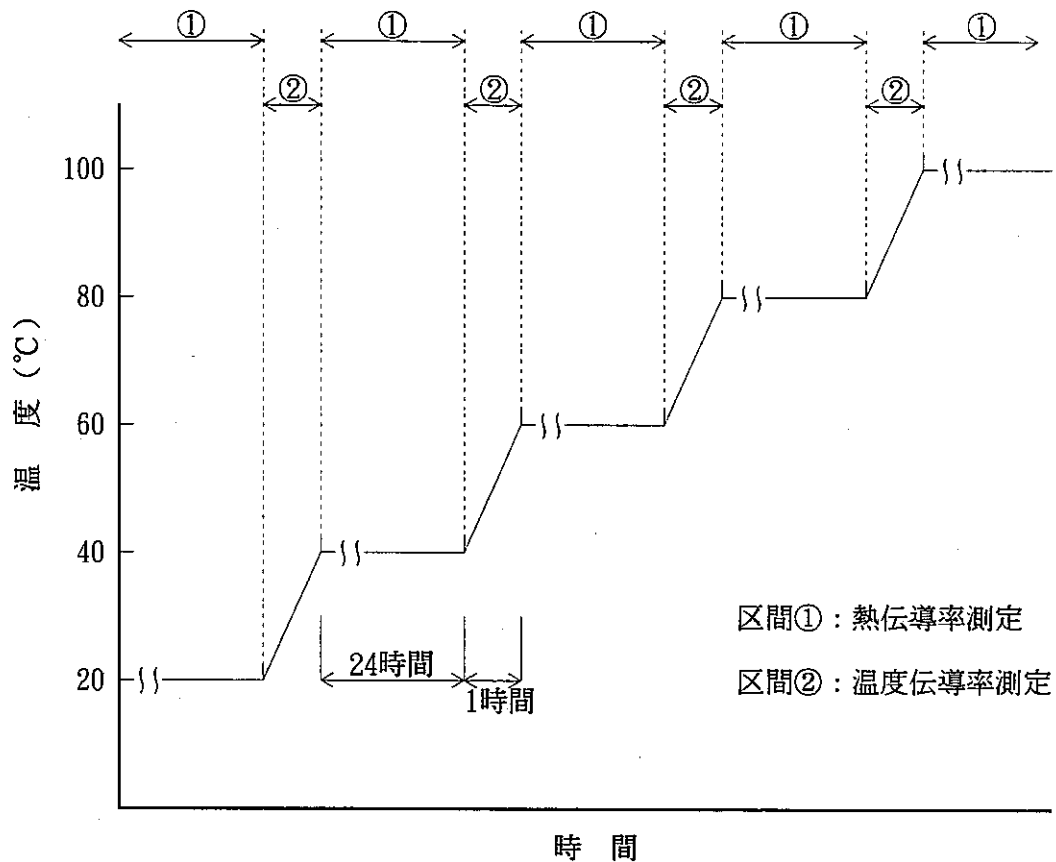


図-3.4 測定手順

3. 5 測定結果

表-3.2 に試料の熱伝導率，温度伝導率及び算出された比熱の値をまとめる。

表-3.2 試料の熱伝導率，温度伝導率及び算出された比熱

試料番号	乾燥密度 [g/cm ³]	飽和度 [%]	熱伝導率 [W/(m·K)]	温度 [°C]	温度伝導率 ($\times 10^{-7}$) [m ² /s]	比熱 [kJ/(kg K)]	
1	①	1.44	23.2	0.457	25.8	6.83	0.43
				0.471	45.8		0.44
				0.479	65.8		0.45
				0.501	96.8		0.47
1	②	1.44	23.2	0.457	33.7	6.83	0.43
				0.468	45.8		0.44
				0.473	65.0		0.45
				0.501	96.8		0.47
2	①	1.46	23.9	0.474	24.6	5.99	0.50
				0.513	45.6		0.55
				0.519	65.7		0.55
				0.540	96.7		0.57
2	②	1.46	23.9	0.492	24.6	5.99	0.52
				0.507	45.6		0.54
				0.515	65.7		0.55
				0.537	96.7		0.57
3	①	1.72	74.5	1.274	25.7	5.08	1.26
				1.282	42.8		1.27
				1.307	62.2		1.29
				1.326	92.2		1.31
3	②	1.72	74.5	1.262	25.8	6.09	1.04
				1.309	43.0		1.08
				1.291	62.3		1.07
				1.351	92.1		1.11
4	①	1.74	76.9	1.333	25.8	5.39	1.23
				1.369	43.0		1.26
				1.347	62.4		1.24
				1.450	92.3		1.34
4	②	1.74	76.9	1.355	25.8	5.39	1.25
				1.400	43.0		1.29
				1.340	62.4		1.24
				1.372	92.3		1.27
5	①	1.79	0.5	0.678	38.6	8.67	0.43
				0.676	46.9		0.43
				0.671	67.5		0.43
				0.679	96.3		0.44
5	②	1.79	0.5	0.662	25.3	8.67	0.42
				0.678	46.8		0.43
				0.672	68.1		0.43
				0.679	96.3		0.44

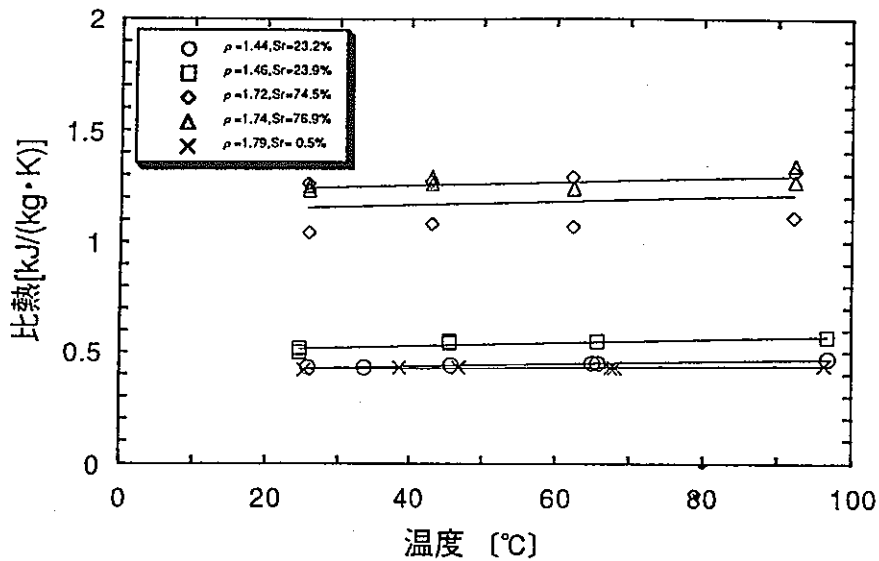


図-3.6 比熱と温度との関係

表-3.3 熱伝導率と温度との関係式

乾燥密度 [g/cm ³]	飽和度 [%]	関係式
1.44	23.2	$c = 0.000588T + 0.4126$
1.46	23.9	$c = 0.000770T + 0.4990$
1.72	74.5	$c = 0.000839T + 1.1320$
1.74	76.9	$c = 0.001511T + 1.1831$
1.79	0.5	$c = 0.000224T + 0.4177$

図-3.6 に比熱と温度との関係を示す。いずれの場合においても、温度の上昇が比熱に及ぼす影響は小さく、ほぼ一定値を示している。それぞれの温度と比熱との関係は、温度 T 、比熱 c とすると表-3.3 のようになる。

3.6 水の影響

一般に土は、固相、液相、気相の3相から構成されており、土の比熱は次式で表される[17]。

$$c = c_1 p_1 + c_2 p_2 + c_3 p_3 \dots \dots \dots (3.7)$$

ここで、添字1,2,3 はそれぞれ固相、液相、気相を表し、 c は土全体の比熱、 p は単位体積当たりの各相の質量比である。第3項の $c_3 p_3$ は、他に比べ十分小さいので無視することができることが知られている。(3.7) 式を使用し、測定結果から水の影響を外すと、表-3.4 のように飽和度 0%の比熱が求まる。ベントナイトの比熱より水の比熱が大きいため試料全体の比熱は水の含有量に大きく依存することが分かる。

表-3.4 飽和度 0%の比熱

試料番	料号	乾燥密度 [g/cm ³]	飽和度 [%]	温度 [°C]	試料の比熱 [kJ(kg·K)]	水の比熱 [kJ(kg·K)]	飽和度 0% の比熱 [kJ(kg·K)]
1	①	1.44	23.2	25.8	0.43	4.179	0.149
				45.8	0.44	4.179	0.160
				65.8	0.45	4.187	0.170
				96.8	0.47	4.212	0.189
	②	1.44	23.2	33.7	0.43	4.179	0.149
				45.8	0.44	4.179	0.160
				65.0	0.45	4.187	0.170
				96.8	0.47	4.212	0.189
2	①	1.46	23.9	24.6	0.50	4.180	0.224
				45.6	0.55	4.179	0.278
				65.7	0.55	4.187	0.277
				96.7	0.57	4.212	0.297
	②	1.46	23.9	24.6	0.52	4.180	0.246
				45.6	0.54	4.179	0.267
				65.7	0.55	4.187	0.277
				96.7	0.57	4.212	0.297
3	①	1.72	74.5	25.7	1.26	4.179	0.802
				42.8	1.27	4.186	0.813
				62.2	1.29	4.185	0.835
				92.2	1.31	4.207	0.855
	②	1.72	74.5	25.8	1.04	4.179	0.547
				43.0	1.08	4.179	0.539
				62.3	1.07	4.185	0.581
				92.1	1.11	4.207	0.624
4	①	1.74	76.9	25.8	1.23	4.179	0.767
				43.0	1.26	4.179	0.802
				62.4	1.24	4.185	0.778
				92.3	1.34	4.207	0.890
	②	1.74	76.9	25.8	1.25	4.179	0.790
				43.0	1.29	4.179	0.836
				62.4	1.24	4.185	0.778
				92.3	1.27	4.207	0.809
5	①	1.79	0.5	38.6	0.43	4.178	0.426
				46.9	0.43	4.180	0.426
				67.5	0.43	4.188	0.426
				96.3	0.44	4.211	0.436
	②	1.79	0.5	25.3	0.42	4.179	0.416
				46.8	0.43	4.180	0.426
				68.1	0.43	4.119	0.426
				96.3	0.44	4.211	0.436

4 結 語

本報告では、圧縮ベントナイトの基本特性の把握の一部として、ヒートプローブを用いた非定常法で含水状態における熱伝導率を、また併せて行った温度伝導率の測定とから比熱を求めた結果を述べた。結果を要約すると、熱伝導率は試験体の乾燥密度約 $1.4 \sim 1.8 \text{g/cm}^3$ 、飽和度約 $0.5 \sim 92\%$ 、温度 100°C 以下の条件下では、約 $0.4 \sim 1.5 \text{W/(m K)}$ の値である。比熱は、試験体の乾燥密度約 $1.4 \sim 1.8 \text{g/cm}^3$ 、飽和度約 $0.5 \sim 77\%$ 、温度 100°C 以下の条件下では、約 $0.4 \sim 1.3 \text{kJ/(kg K)}$ の値である。また、温度による熱伝導率、比熱への影響は小さく、ほぼ一定の値を示す。

今回の検討ではデータ数が少ないため関数化できないが、飽和度の増加に伴い熱伝導率、比熱は増加する。熱伝導率、比熱の飽和度、密度の関数化のためには、今後、さらに多くのパラメータについての計測が必要である。

5 謝 辞

本研究の実験に当たっては、鹿島建設株式会社の吉田宏氏をはじめ多数の方々に多大な御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1. 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬, "緩衝材の特性試験 (I)", 動燃技術資料 [PNC TN8410 92-057], 1992
2. 山形順二, 鈴木英明, 柴田雅博, "緩衝材の特性試験 (II)", 動燃技術資料 [PNC TN8410 92-169], 1992
3. 藤田朝雄, 五月女敦, 原啓二, "緩衝材の力学試験", 動燃技術資料 [PNC TN8410 92-170], 1992
4. 土木学会監修, 最上武雄編著, "土質力学", 技法堂出版株式会社, 1969.
5. 土質工学会編, "土質工学ハンドブック", 1982.
6. H. S. Radhakrishna, "THERMAL PROPERTIES OF CLAY-BASED BUFFER MATERIALS FOR A NUCLEAR FUEL WASTE DISPOSAL VAULT.", AECL Report No. 7805, 1984.
7. H. S. Radhakrishna, K-Ching Lau, "Modelling the In-site Performance of Bentonite-Sand buffer", MRS Scientific Basis for Nuclear Waste Management X III, Symp., Nov., 1989.
8. R. J. Hopkirk, W. H. Wagner, "Thermal loading in the near field of repositories for high and intermediate level nuclear waste.", Nagra, Technical Report 85-54, 1986.
9. S. Knutsson, "On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite.", SKBF/KBS, Technical Report 83-72, 1983
10. 末岡徹, 小林淳志, 今村聡, 小川輝繁・村田重美, "高圧縮ベントナイトの熱的特性", 大成建設技術報告書, No. 23.
11. 昭和電工株式会社, "Shotherm QTM 迅速熱伝導率計 DII 取扱説明書".
12. 日本機械学会 "伝熱工学資料 改訂第 4版", 1989.
13. 長崎誠三監修, "熱分析実験技術入門 第 2 集", 科学技術社, 1982.
14. クミネ工業(株)資料 私信
15. 幾世橋広, "高温・高圧下における岩石の熱物性値と地熱開発(2)", 地熱エネルギー vol. 13, No. 2, 1988
16. 出口衛, 幾世橋広, 鈴木舜一, "細線加熱比較法による岩石の熱伝導率の高精度測定法", 資源・素材学会誌, 107, 1991, No. 1, pp18~22.
17. 小坂岑雄, 朝比奈正, 生田史朗, "定速昇温法による熱拡散率の測定 (第 2 報), 鋼およびチタニウムへの適用", 名古屋工業技術試験報告, 第27巻, 4号, pp107~110, 1978.
18. 小坂岑雄, 朝比奈正, 埜田博史, 生田史朗, "定速昇温法による熱拡散率の測定 (第 4 報), 高粘度液体への適用", 名古屋工業技術試験報告, 第28巻, 3号, pp79~83, 1979