

JAERI - M

87-171

原位置緩衝材試験(II)  
—砂/ベントナイト混合物予備試験—

1987年10月

熊田 政弘・中越 章雄\*・下岡 謙司  
村岡 進・中村 治人

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 山田軽印刷所

原位置緩衝材試験(Ⅱ)  
—砂/ベントナイト混合物予備試験

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

熊田政弘・中越章雄<sup>\*</sup>・下岡謙司

村岡進・中村治人

(1987年9月30日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、人工バリヤの一つである緩衝材の候補に挙げられているベントナイト/珪砂混合物の原位置における特性を調べるため、花崗岩岩盤の地下40mの試験室に掘削した、直徑1m、深さ5mの模擬処分孔(試験孔)に圧縮成型した緩衝材と電気ヒータを埋め込んで加熱試験を行なった。試験孔への地下水の流入を遮断した状態で1800時間の加熱試験を行なった結果、緩衝材は、ヒータ近傍で乾燥し、その外側では水分が濃集して初期含水量を上回る部分が現われ、緩衝材中の水分が加熱に伴い再配分されていることが分かった。緩衝材作成時に測定したデータを基にして有限要素法により計算した温度分布と実測値とを比較することにより、緩衝材の熱伝導率は、温度の上昇と水分の移動に伴って変化していることが明らかとなった。

In-Situ Buffer Material Test (II)

- A preliminary test on a bentonite/sand mixture -

Masahiro KUMATA, Akio NAKAGOSHI\*, Kenji SHIMOOKA  
Susumu MURAOKA and Haruto NAKAMURA

Department of Environmental Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 30, 1987)

Compacted bentonite/sand mixtures are being considered for use as buffer materials, an engineered barrier component of a vitrified high level waste (HLW) package, in the concept for geological disposal of HLW. In order to test thermal characteristics *in situ*, a heater test with the buffer material was carried out at 40 m depth below surface in granite rock mass. The compacted test material was placed around a electric heater in a test hole, 1 m diameter 5 m depth, and heated about 1800 hours with no groundwater flow into the hole. There was a heat-induced redistribution of the original water content through which partial drying took place close to the heater, while water was accumulated the outside of the dry area. Comparing with the observed temperature distribution and the calculated one which was obtained by FEM-based calculation, it was revealed that the thermal conductivity of the buffer material changed depending on the temperature and moisture during the heater experiment.

Keywords: High Level Waste, Geological Disposal, In-Situ Experiment, Buffer Material, Granite, Bentonite/sand Mixture, Heater Test, Moisture Distribution, Thermal Conductivity

---

\* HAZAMA-GUMI, LTD.

## 目 次

1. はじめに	1
2. 緩衝材	2
2.1 原 料	3
2.2 圧縮成形試料	3
3. 原位置試験	9
3.1 試験孔	9
3.2 ヒータ	9
3.3 計測	9
4. 結果及び考察	17
4.1 温度	17
4.2 緩衝材の加熱特性	18
4.3 計算温度と実測温度との比較	19
5. まとめ	35
引用文献	36

## Contents

1. Introduction	1
2. Buffer Material	2
2.1 Rough Materials	3
2.2 Compacted Test Material	3
3. In Situ Experiments	9
3.1 Test Hole	9
3.2 Heater	9
3.3 Measurment	9
4. Results and Discussion	17
4.1 Temperature	17
4.2 Thermal Characteristics	18
4.3 Comparison of Calculated Temperature and Observed One	19
5. Summary	35
References	36

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を地下深部へ地層処分する場合、ガラス固化された高レベル放射性廃棄物は、キャニスター やオーバーパックなどの金属製容器に封入され、処分孔に埋設されるが、この際岩盤との間には緩衝材が充填され、固化体を固定することが計画されている。この緩衝材は、固化体のもつ崩壊熱により高い温度場に曝されるので、その熱特性は安全評価において重要な要因である。低透水性と核種吸着能の点から有望とされるベントナイト<sup>1)</sup>については、すでに予備的な原位置試験を実施した<sup>2), 3)</sup>。今回は、諸外国で候補に挙げられている材料のうち透水性が小さいことと熱伝導性に主眼を置いた“砂 / ベントナイト混合物”<sup>4), 5)</sup>について、原位置での特性を試験した。珪砂を30%含有するベントナイトを圧縮成形し、茨城県笠間市稻田の花崗岩採石場中の地表下40mに設けた原位置試験室<sup>6)</sup>の床面から垂直に掘削した直径1m、深さ5mの模擬処分孔（試験孔）中に大型の電気ヒータと圧縮成形した緩衝材を埋設して1800時間の加熱試験を行ない熱特性を調べるとともに、加熱後の緩衝材からサンプリングを行ない水分測定を行なって緩衝材中の水分の挙動を調べたのでこれを報告する。本報では特に、緩衝材に及ぼす廃棄物固化体の崩壊熱による熱影響を検討することを目的に、地下水が孔壁や孔底から試験孔内へ流入するのを防ぐため鋼製の遮水管を設け、地下水の影響のない状態で基本的な熱特性を調べた。このような状態での緩衝材の特性は、地下水が浸入した場合の緩衝材の特性を理解するための基礎データとなるばかりでなく、固化体を処分した直後の、まだ地下水が緩衝材中に浸入する以前の挙動を理解する上でも有用である。

本研究は、原研の計画に基づく「花崗岩岩盤の特性調査」の一環として、株間組をはじめとする株大林組、株熊谷組、三井建設株、鹿島建設株、清水建設株、大成建設株、株竹中工務店、戸田建設株及びフジタ工業株の10社に委託して行なった実験の一部を構成するものである。

## 2. 緩 衡 材

表1は緩衝材に要求される一般的な性能をまとめたものである。現在、これら要求性能の全てについて優秀な性質を持つ物質は知られていないが、収着性、化学的緩衝性、止水性、膨潤性の点から、Na—モンモリロナイトを主成分とするベントナイト（Na—ベントナイト）が有力候補と考えられている。

表1 緩衝材に要求される性能

要 求 性 能	性 能 の 内 容	主たるパラメータ
(a) 収 着 性	核種を収着する	分配係数 $K_d$ ( $\text{ml/g}$ )
(b) 化学的緩衝性	地下水環境の改善と 緩衝作用	イオン交換容量 $CEC$ ( $\text{meq}/100g$ )
(c) 热 拡 散 性	廃棄物の発熱を周辺 岩盤へ伝える	热伝導率 $\kappa$ ( $\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ ) 比熱 $c$ ( $\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$ )
(d) 機 械 的 強 度	パッケージとしての 強度を有する	一軸圧縮強度 $q_u$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )
(e) 遮 蔽 性	放射線を遮蔽する	密度 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )
(f) 止 水 性	地下水の流入を遅ら せる	透水係数 $K$ ( $\text{cm/s}$ )
(g) 膨 潤 性	地下水に触れた時 岩盤の間をシールす る	膨潤度 $s$ ( $\text{ml/g}$ ) 膨潤圧力 $P_s$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )

## 2.1 原 料

### ① ベントナイト

原料として用いたNa—ベントナイトは市販の製品であり、国際ストリバ計画<sup>7)</sup>の中でも使用されている“Volclay MX-80”<sup>1)</sup>(商品名)を購入して用いた。購入した“Volclay MX-80”は、ベントナイトを90%含有する米国サウスダコタ州Belle Fourche産のもので、生成年代は古生代オルドビス紀とされている。製品カタログによる化学組成を表2に、乾燥状態の粒度分布を図1に示す。その他の性質は以下のようである。

自然状態の水分量：9.2%，嵩比重：1.05，真比重：2.7，pH：9.8，

液性限界：672%，メチレンブルー吸着量：190 mg/g，

陽イオン交換容量：91.1 meq / 100 g

購入したベントナイト粉末を少量採取し、X線回折法によりベントナイトを構成している鉱物の同定を行なった結果では、Na—モンモリロナイトを主成分とし、少量の石英、長石、方解石および微量の白雲母や雲母粘土鉱物を含んでいる。

### ② 珪 砂

珪砂としては、市販の6号珪砂と3号珪砂を1:1の乾燥重量比で混合したものを用いた。化学組成を表3に、粒度分布を図2に示す。6号珪砂の嵩比重は1.5、3号珪砂の嵩比重は1.4、真比重はどちらも2.6である。

## 2.2 圧縮成形試料

### ① 成 形

緩衝材の原料としたNa—ベントナイトと珪砂を7:3の重量比で計量し、これにベントナイト重量に対し23%の水分を添加してソイルミキサーで攪拌混合し、型枠内に充填して加圧成形した。成形した緩衝材の形状を図3及び4に示す。1ブロックの形状は、外径90 cm、内径52.8 cm、高さ15 cm、のリングを8分割したもので、断面積は502.9 cm<sup>2</sup>、体積は7544 cm<sup>3</sup>である。成形圧力は、型枠底部に設置した圧力測定フィルムにより測定した。圧力測定フィルムは、発色剤が圧力に応じて浸出し、これが顕色剤に吸着して化学反応を起こし発色するもので、専用濃度計を用いて色濃度から圧力値を求めた。圧力測定フィルムの検出面積は3 mm<sup>2</sup>、測定精度は測定値の±10%以下である。測定された圧力は、165 kgf/cm<sup>2</sup>～270 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲ではらつき、平均値は約200 kgf/cm<sup>2</sup>となった。このばらつきは、検出面積内の材料(特に砂の粒子)の接触状況の違いによるものと思われる。作成した緩衝材を1ブロックごとビニール袋で包装し、梱包して試験場に搬入した。

### ② 物 性

圧縮成形した緩衝材ブロックから供試体を切り出し、密度、含水量、熱伝導率、比熱および熱膨張率を測定した。密度と含水量は、1ブロックから3個、2ブロックから計6個の5×5×10 cmサイズの供試体を切り出して測定した。測定結果を表4に示す。熱伝導率、比熱および熱膨張率は、1ブロックから3個の供試体を切り出し、供試体を加熱して各温度について測定を行な

った。熱伝導率と比熱の測定結果を表5と6および図5に示す。熱伝導率は温度の上昇とともにない減少しているが、これは緩衝材中の水分の離散による影響<sup>4)</sup>のためと思われる。熱膨張率の測定結果を温度との関係で図6に示す。

表2 ベントナイト化学成分

(重量 %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mg O	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe O	TiO <sub>2</sub>	その他 微量成分	結晶水
58.0	18.0	2.5	2.5	0.1	1.5	0.2	0.2	0.1	0.5	5.0
64.0	21.0	2.8	3.2	1.0	2.7	0.4	0.4	0.2	0.8	6.0

表3 珪砂化学成分

(重量 %)

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	その他
6号珪砂	99.5	0.13	0.03	0.34
3号珪砂	95.8	2.18	0.14	1.88

表4 密度、含水量測定結果

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	平均値
含水量(%) *	15.4	15.1	15.5	17.0	16.3	16.2	15.9
密度(g/cm <sup>3</sup> )**	2.015	2.018	2.015	2.023	2.026	2.022	2.020

\* 含水比=湿潤(室温)試料中の水の質量/炉乾燥(110°C)試料の質量

\*\*ノギス法による室温における供試体の質量/体積

表5 緩衝材熱伝導率測定結果\*

温 度 (℃)	热 伝 导 率 测 定 值 (Kcal/m·hr·℃)				换 算 值 (cal/π s ℃) 平 均
	No 1	No 2	No 3	平 均	
21	0.809	0.824	0.820	0.818	0.227
50	0.777	0.798	0.792	0.789	0.219
100	0.721	0.733	0.732	0.729	0.203
150	0.674	0.687	0.682	0.681	0.189
200	0.657	0.669	0.673	0.666	0.185

\* 電気炉による昇温 速度は毎分2℃とし、所定温度に昇温後1時間一定温度で保ち、試料内の温度の均一化をはかり、その後に熱伝導率を測定した。

表6 緩衝材比熱測定結果

温 度 (℃)	比 热 (cal/g·℃)			
	No 1	No 2	No 3	平 均
25	0.197	0.190	0.203	0.197
50	0.214	0.203	0.222	0.213
75	0.232	0.219	0.247	0.233
100	0.250	0.239	0.284	0.258
125	0.268	0.270	0.334	0.291
150	0.291	0.294	0.364	0.316
175	0.290	0.284	0.326	0.300
200	0.282	0.264	0.287	0.278
225	0.269	0.259	0.267	0.265
250	0.265	0.258	0.258	0.260
275	0.263	0.258	0.258	0.260
300	0.262	0.260	0.260	0.261

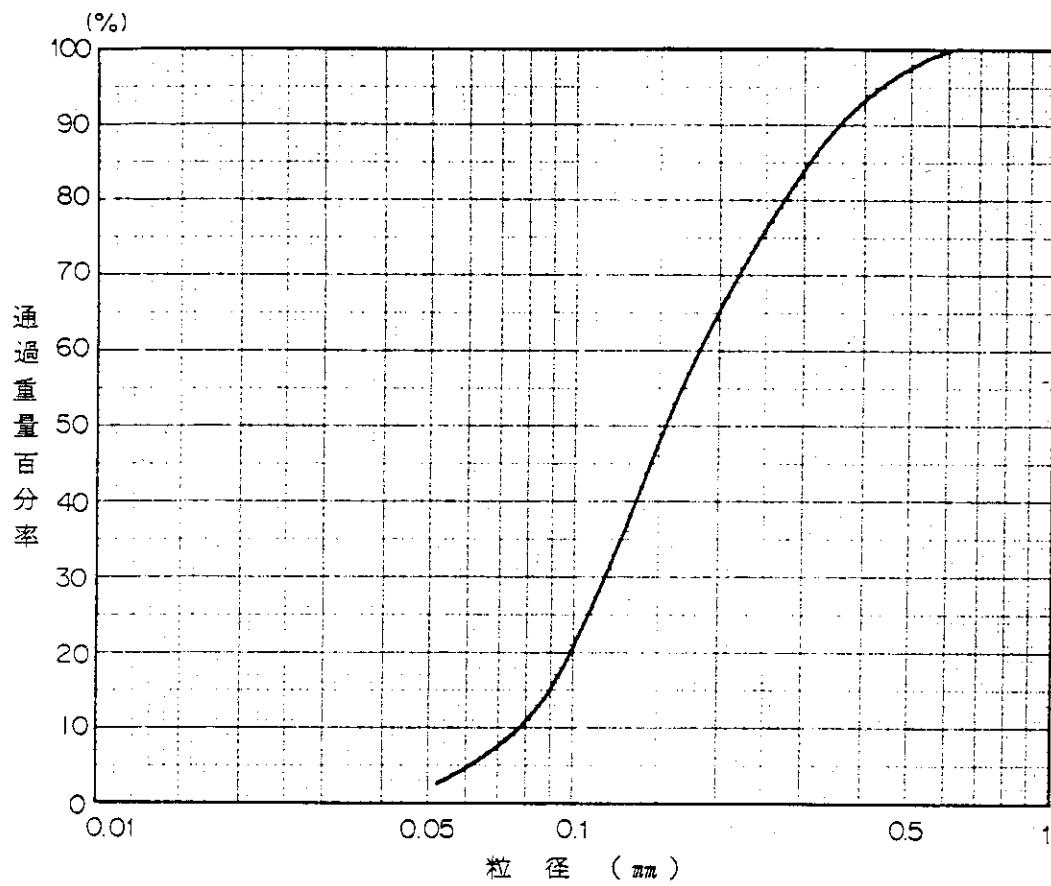


図1 ベントナイト粒度分布

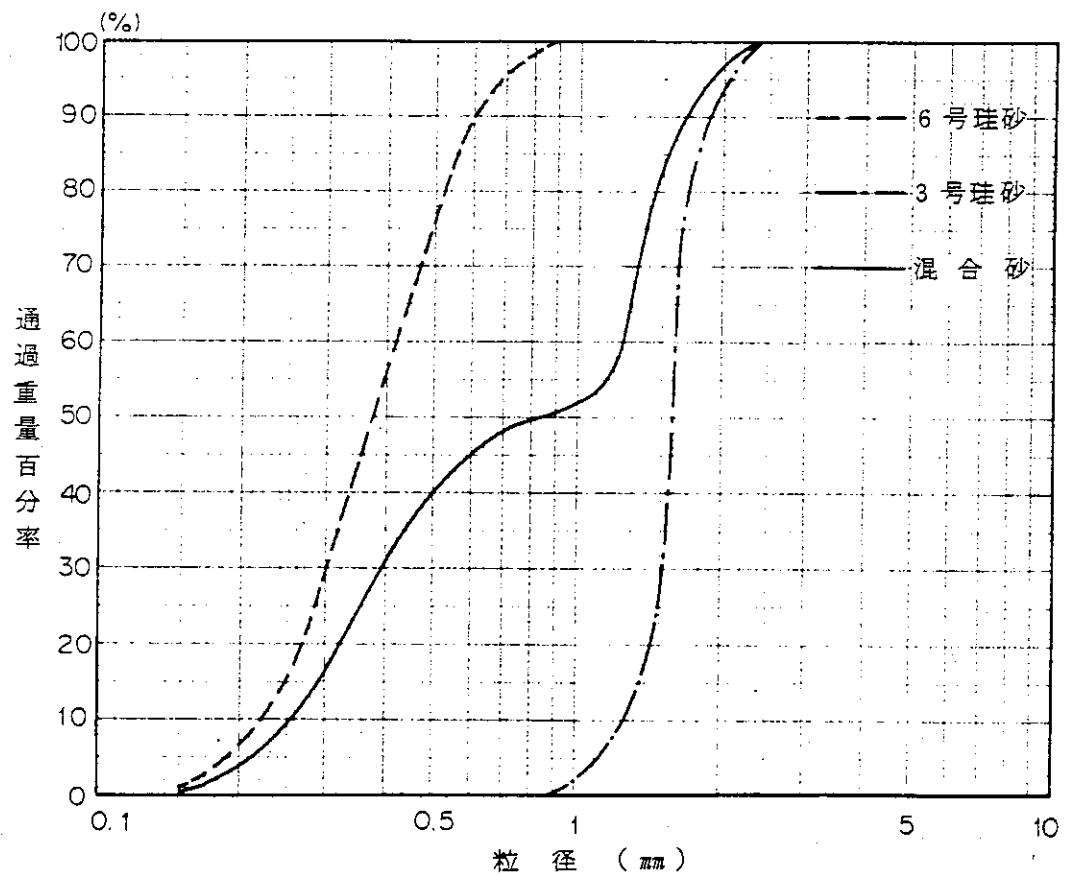


図2 硅砂粒度分布

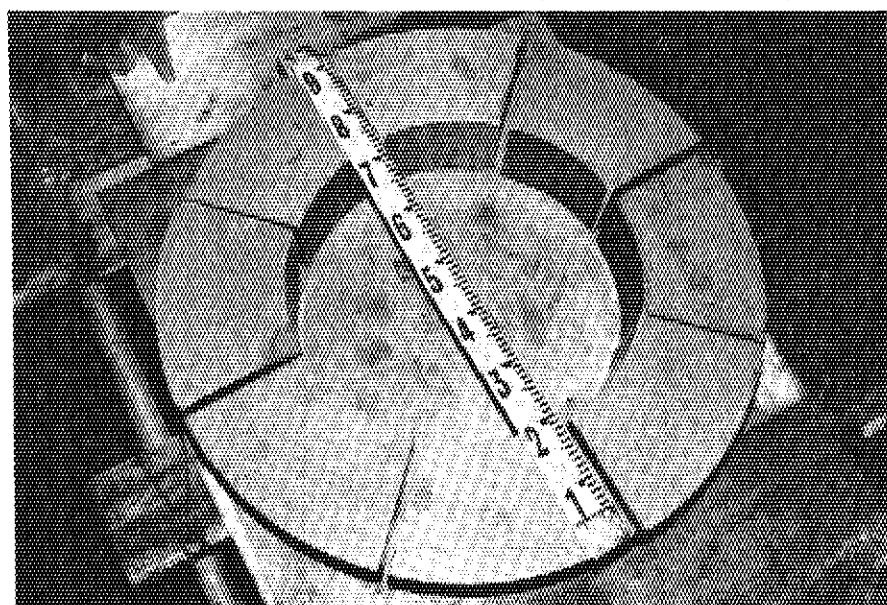


図3 緩衝材

(単位 mm)

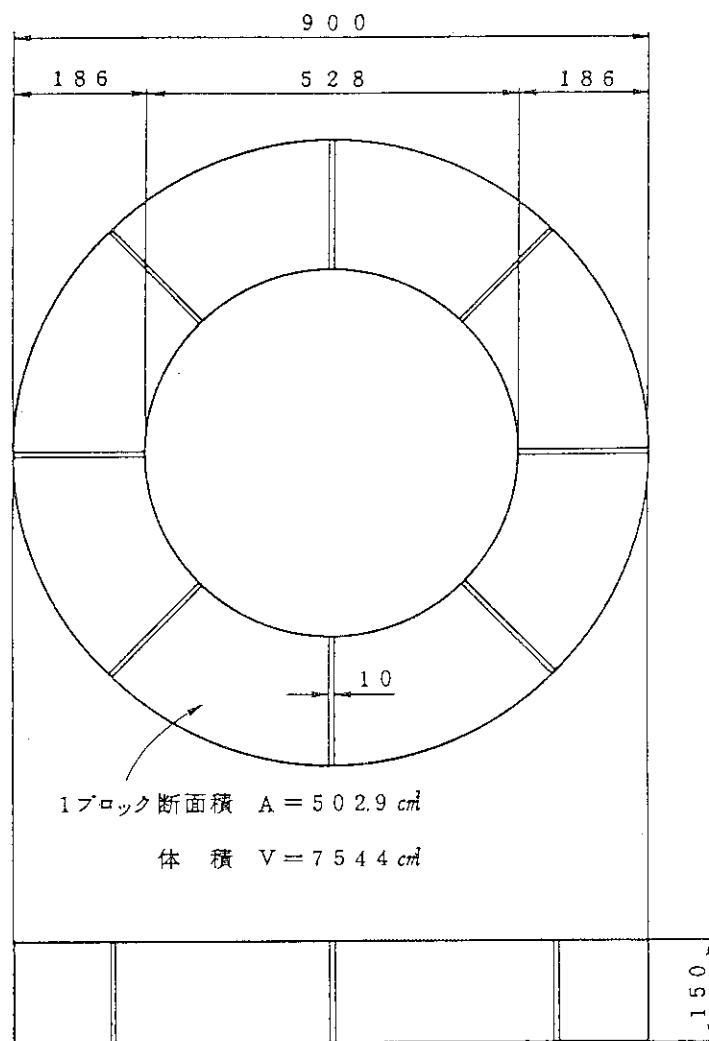


図4 緩衝材形状

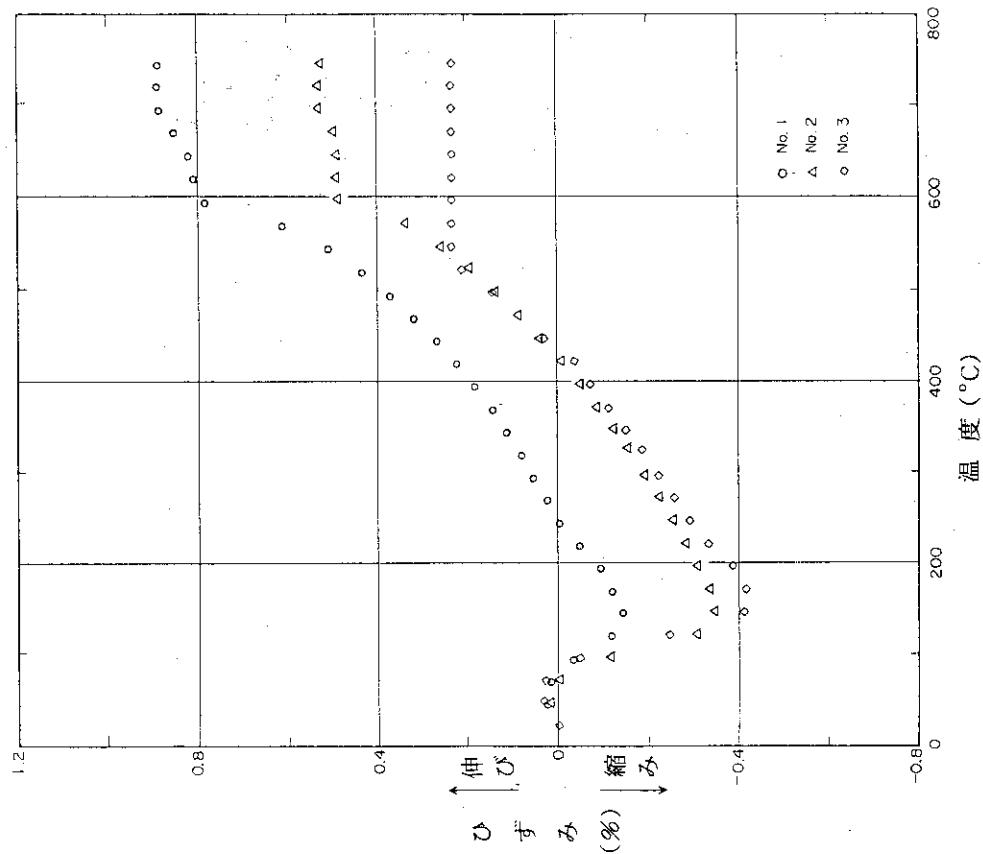


図 6 緩衝材熱膨張率測定 温度～ひずみ関係図

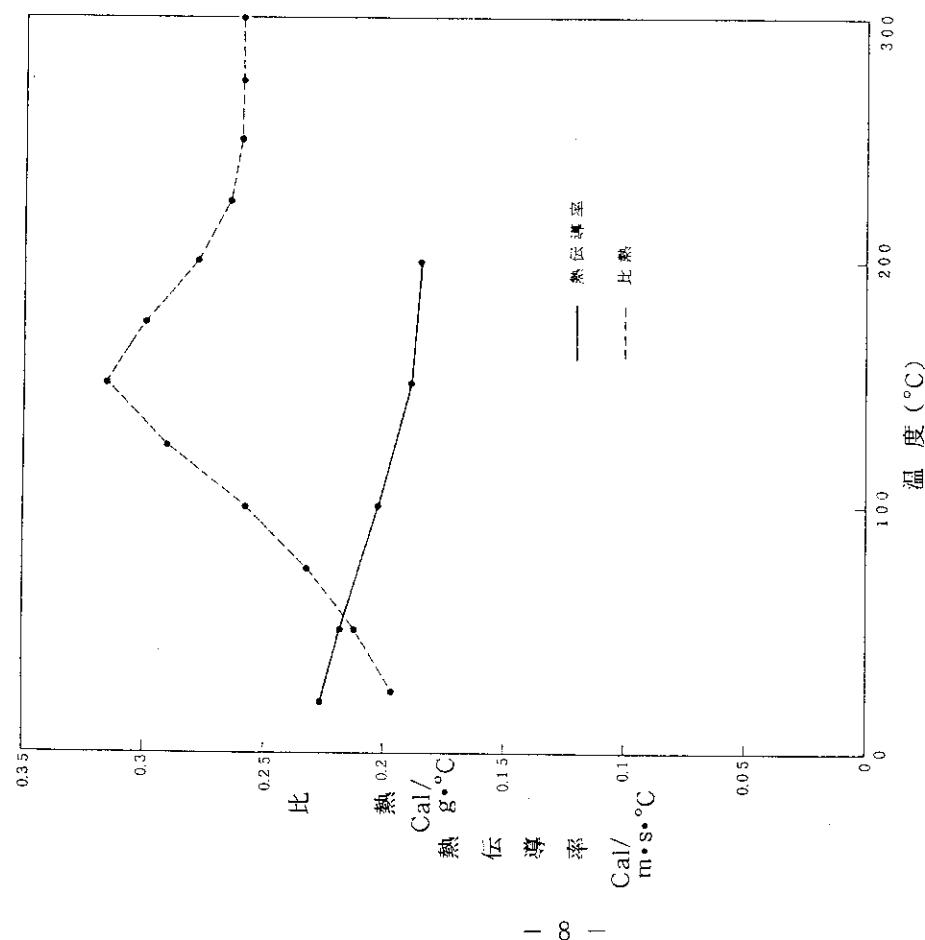


図 5 温度～熱伝導率及び温度～比熱関係図

### 3. 原位置試験

#### 3.1 試験孔

高レベル廃棄物固化体の処分形態は、いまだ確立されていないがスウェーデンの概念では、再処理後の廃棄物固化体は、処分坑道床面から垂直に掘削された直径1m、深さ5mの処分孔に、緩衝材とともに埋設される計画になっている<sup>8)</sup>。そこで、今回の試験では、地表下約40mの花崗岩岩盤中に設けた試験室床面から垂直に直径1m、深さ5mの模擬処分孔を掘削し、これを試験孔として実験を行なった。試験孔付近には、幅1.5mほどの走向N75E～N85Eではほぼ鉛直の亀裂帯が存在している（図7）。孔内への地下水の流入を防ぐため試験孔の内側に外径914.4mm、厚さ7.9mm、長さ5mの底つきの遮水鋼管を設置した。岩盤と遮水鋼管との間の幅約46mmの空隙は、現地の花崗岩を粉碎した砂で充填した（簡略のため、この花崗石の砂を以後「裏込め砂」と称する）。遮水鋼管の底の中央に台座を設け、試験孔の孔口平均レベルから3.75mm下方となる位置にヒータの発熱部の中心を設置し、ヒータ、端子箱およびフレキシブルパイプを鋼管（被覆鋼管）で覆った。ヒータと被覆鋼管との間には、ステンレスメッシュ（SUS 304）を充填し、ヒータからの速やかな熱の伝導をはかった。また発熱部の上部と端子箱周囲には断熱材（線状ファインフレックス製）を取り付け端子箱の温度の上昇を防いだ。試験孔内の空隙（被覆鋼管と遮水鋼管との間）に加圧成型した緩衝材を設置した。遮水鋼管と岩盤との間の隙間から地下水が流出することにより熱が損失されるのを防ぐため、隙間の上部をモルタルで充填した。試験孔内の詳細を図8に示す。

#### 3.2 ヒータ

ヒータは、32本のヒータエレメントを縦方向に並列に配線し、これをSUS 304製の長さ1.5m、外径0.4mのケーシング中に設置したものである（図9）。ヒータの有効発熱部長は1.35m。ヒータエレメントの最高使用温度は600℃、電源容量は200V、5kWである。ヒータエレメントおよびケーシングの温度モニターのため、K型（クロメル・アルメル）熱電対を18点設置した（図9中の★印）。ヒータへの通電は、1800時間にわたり実施された。通電は当初4kWで開始されたが、加熱開始後約66時間後ヒータの端子箱の温度が上昇し、ヒータの故障の危険性が生じたため、以後出力を3kWに落して試験を継続した。

#### 3.3 計測

試験孔に充填した緩衝材中に60点、周辺の岩盤中に45点の測温点を設け、加熱に伴う温度変化を計測した。緩衝材中には、試験孔中心から亀裂帯をほぼ垂直に切る方向を0℃とし、水平面上に、時計回りに120°間隔で3方向に、K型（クロメル・アルメル）熱電対を埋め込んだ。岩盤中

では緩衝材中と同じく3方向に、S1からS6までの6本の測温孔を掘削して計測した（図7平面図参照）。図10に緩衝材中の測温点を、図11に岩盤中の測温点の位置を示す。図中、測温点は、“T”の記号のあとに、ヒータ中心からの距離・方向・深さの順で示した。従って、“T12・120・50”は、ヒータ中心からの距離12cm, 120°方向, 深さ50cm位置の熱電対を表わしている。岩盤内測温孔にはさらに3.75m深さの位置に熱流計を設置して熱流束の計測を行なった。計測はパーソナルコンピューターで制御した。加熱試験後の緩衝材から36個のサンプリングを行ない、水分量の測定を行なった。実施した計測項目と計測位置の一覧を表7に示す。

データの測定間隔は次の通りである。

加熱中：通電開始又は出力変更から	5時間まで	10分間隔
5時間後から	48時間まで	30分間隔
48時間後から	270時間まで	1時間間隔
270時間以降	通電終了まで	2時間間隔
放冷中：	通電終了から	5時間まで
	5時間後から	48時間まで
	48時間以降	計測終了まで

加熱試験に先立つ初期状態としての緩衝材及び岩盤の温度は、岩盤内の深度0.5mで10～12°C, 2.75mで13～14°C, 3.75m～7.0mで14～15°Cと深度とともにわずかに増加している。緩衝材中でも深度0.5mで11～12°C, 深度3.75m以深で14～15°Cと岩盤と同様の温度を示した。

表7 計測項目と計測位置

計測項目	計測位置	計測点数
ヒータ出力		1
ヒータ温度	0°方向, 120°方向, 240°方向について, ヒータエレメント, ケーシング管で測温 (図9参照)	18
緩衝材温度	120°方向を主断面とし36点 0°方向, 240°方向は各12点 (図10参照)	60
遮水钢管温度	0°方向 深度 0.5m, 3.75m, 4.75m	3
岩盤温度	模擬処分孔表面, S1~S6孔 (図11参照)	45
岩盤内熱流束	S1, S4孔 深度 3.75m, 4.75m	2
岩盤表面熱流束・温度	座標(987, 93, 100)位置の岩盤表面 (図11参照)	1
気温	坑口付近の外気温 試験室気温	2
緩衝材含水量	120°方向36点(測温点位置) 加熱終了後室内試験	36

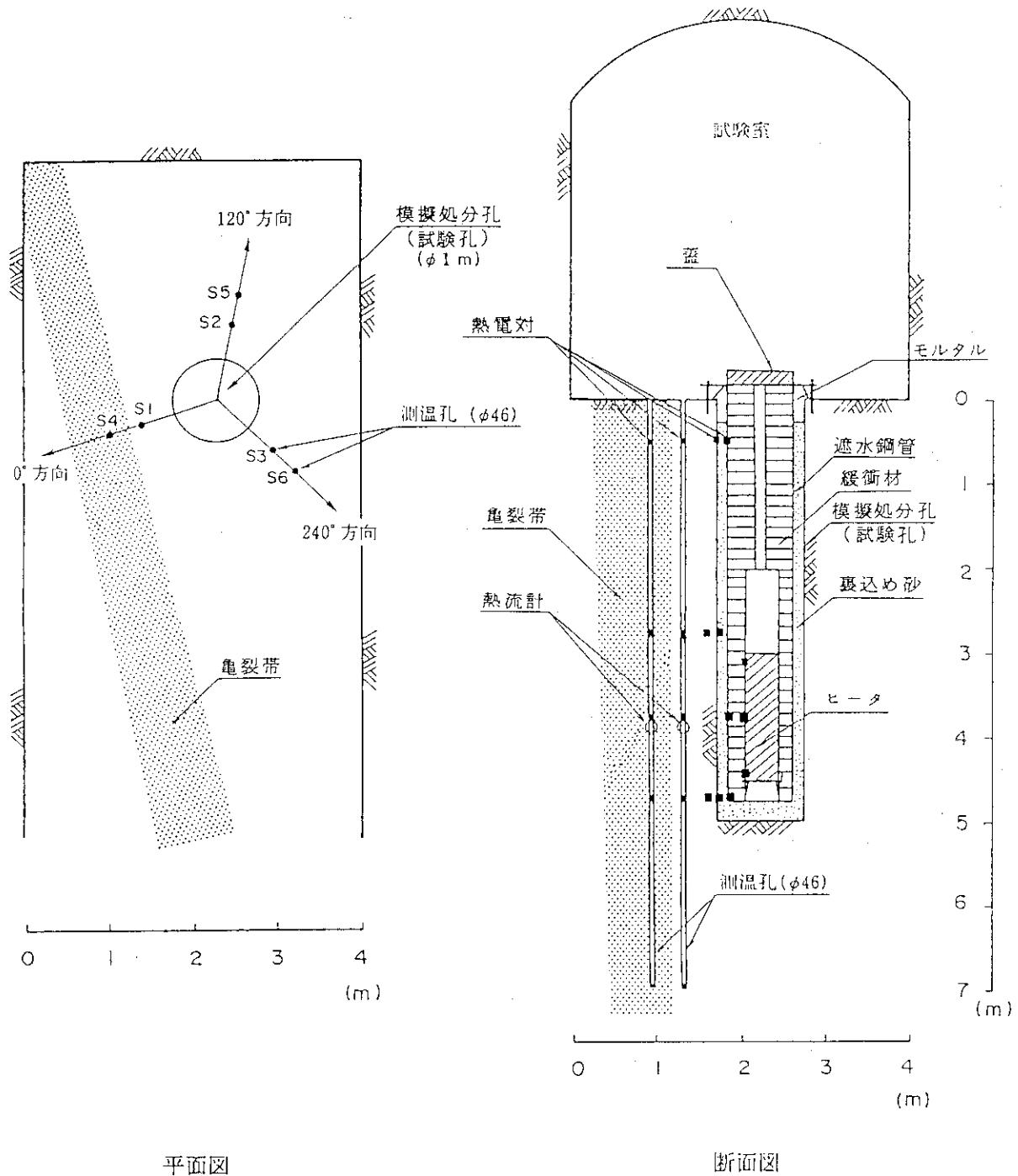


図 7 緩衝材加熱試験概略図

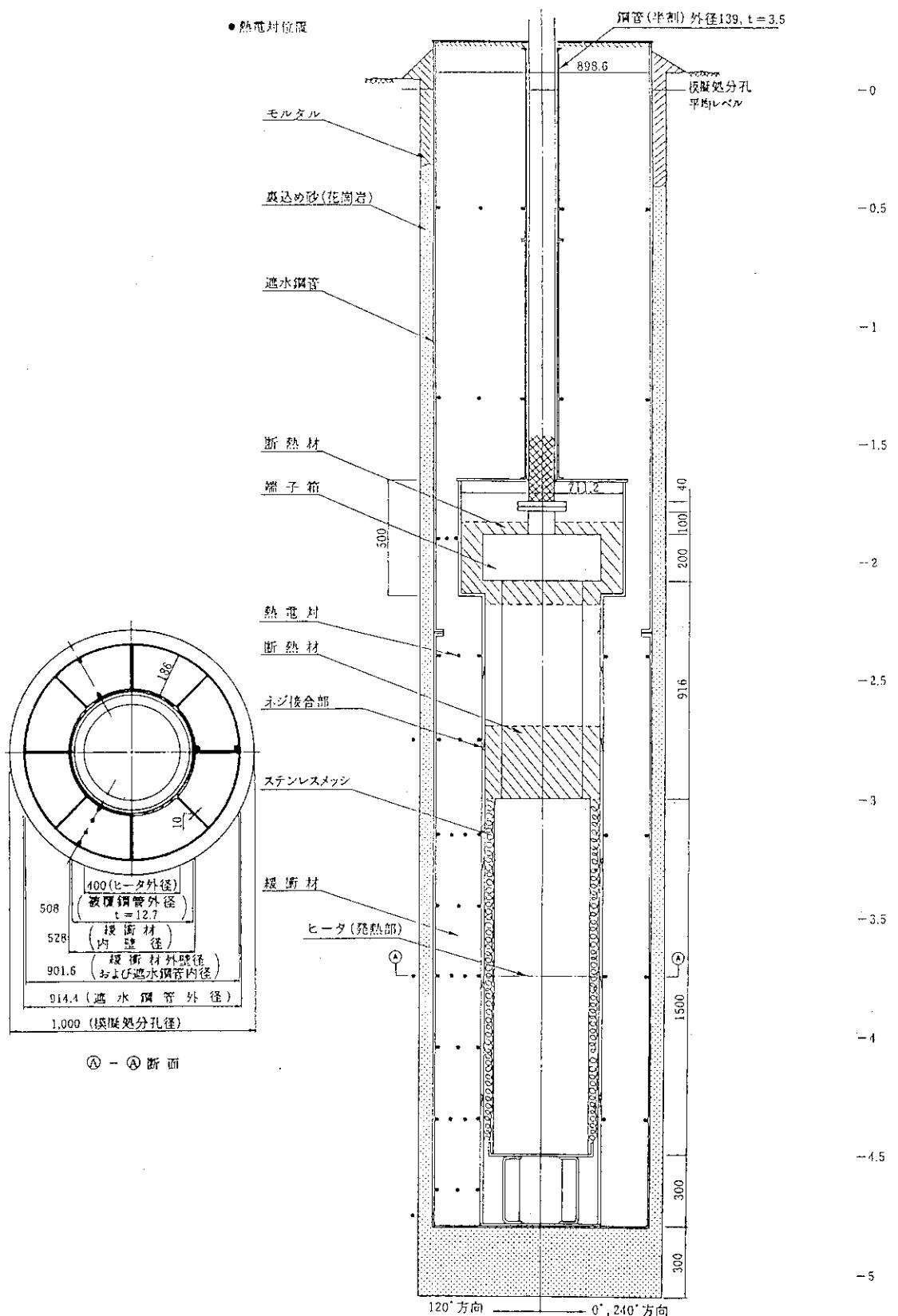


図8 試験孔内配置図

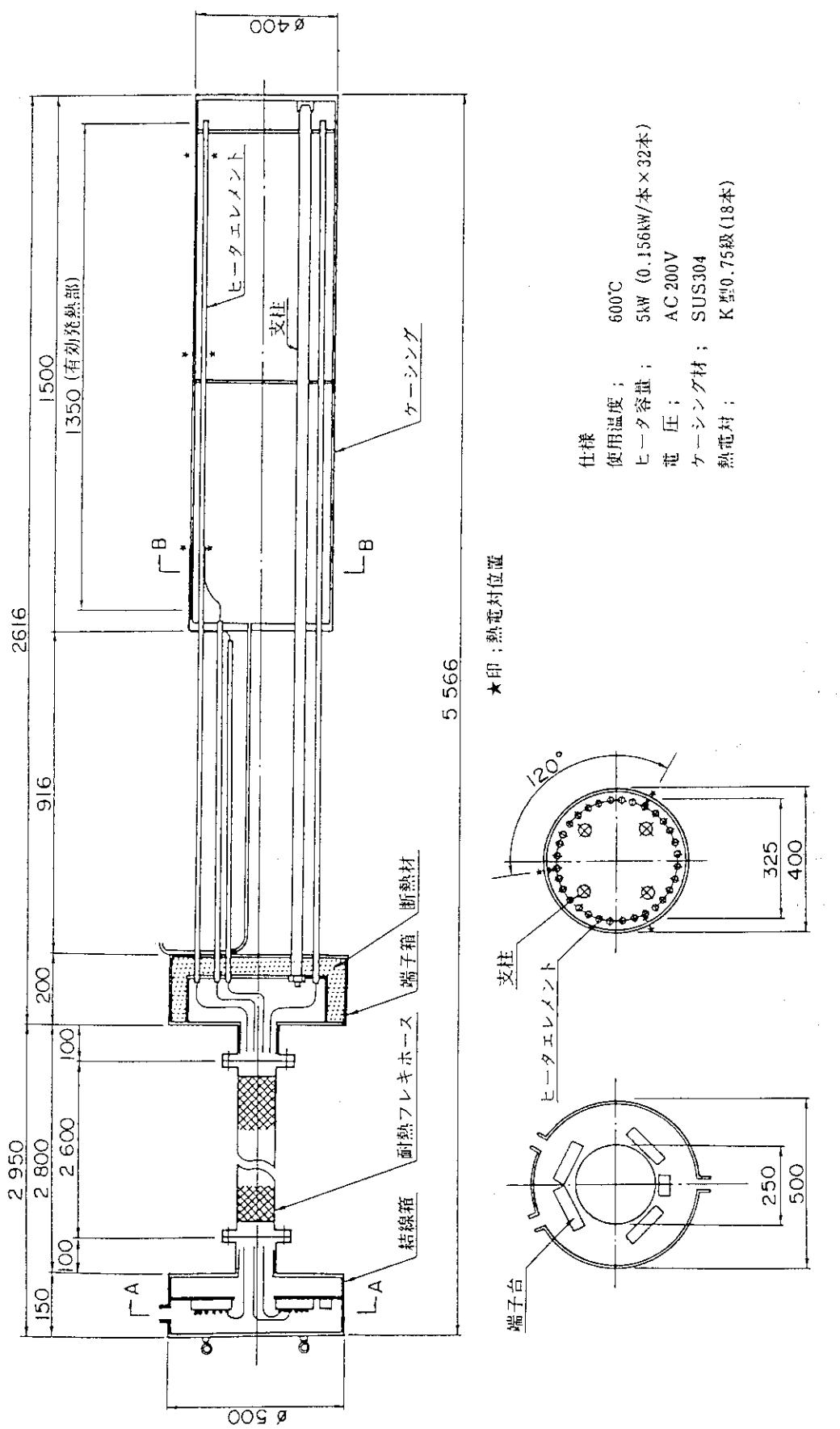


図9 ヒータ詳細図

B-B断面

A-A断面

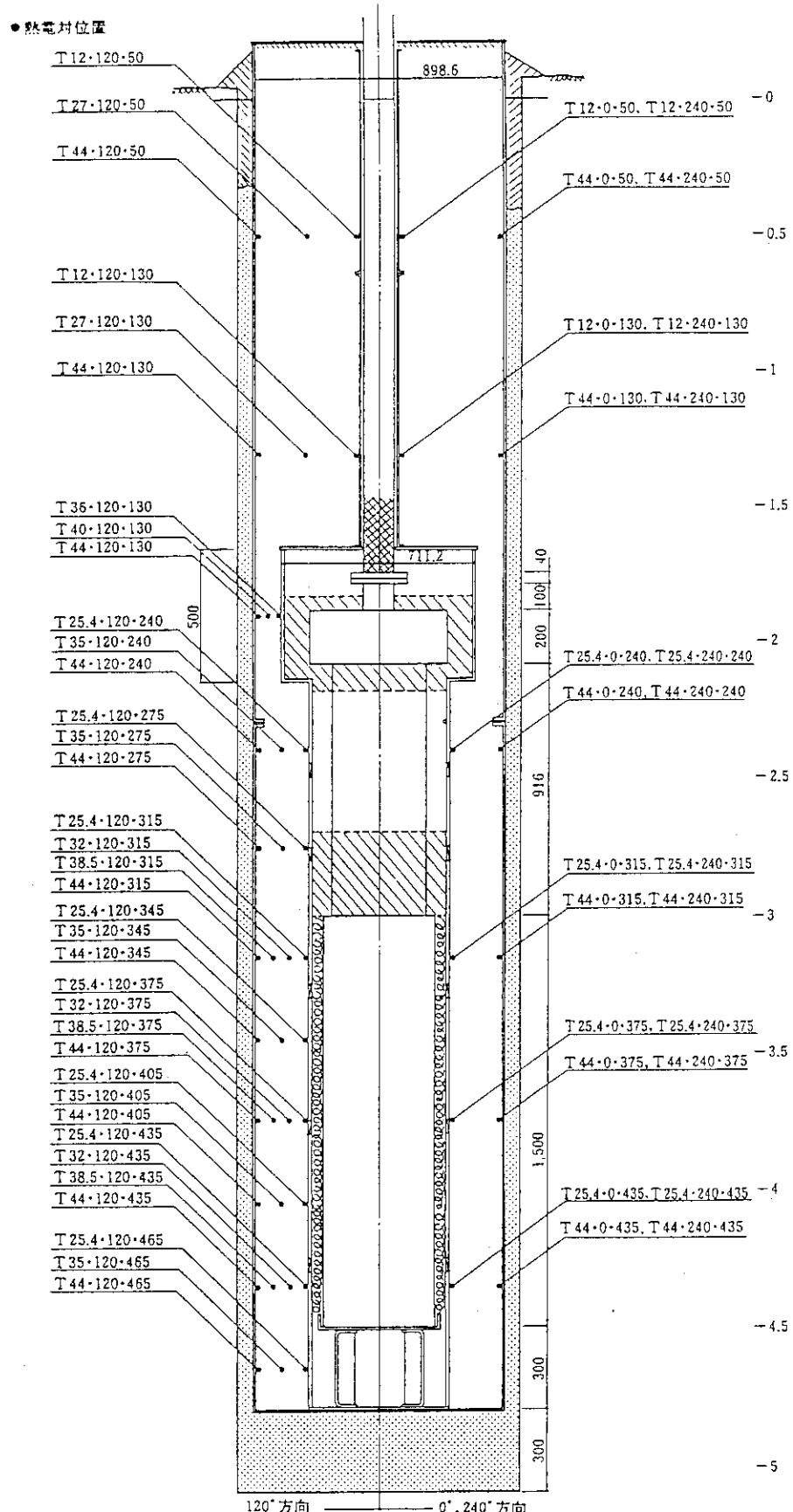


図 10 緩衝材測温点位置

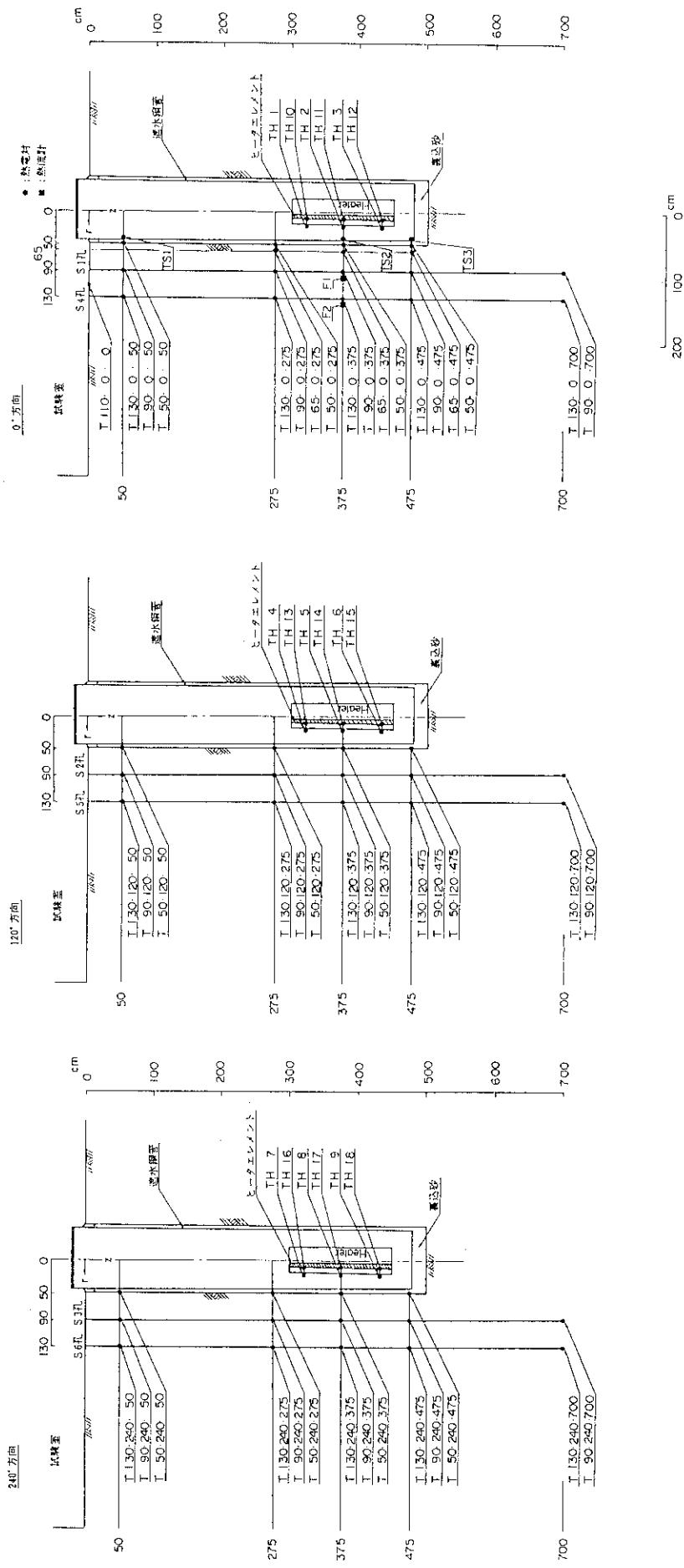


図 11 岩盤中の測温点位置図

## 4. 結果及び考察

1800時間にわたる加熱試験の期間中、開始から約280, 330および1180時間後に一時的な停電が生じたが、これは全体の温度分布についてほとんど影響していない。

### 4.1 温度

#### ① 緩衝材及び岩盤温度の時間変化

深度 3.75 mにおける緩衝材及び岩盤温度の時間変化を図12に示す。緩衝材と岩盤は加熱開始後数十時間の間に急激な温度上昇を示すが、それ以降は定常に近い状態で漸増し続けている。

深度 3.75 mにおける、ヒータ中心からの距離と緩衝材及び岩盤温度の関係を加熱後の経過時間ごとに示したもののが図13である。各経過時間における曲線の形は緩衝材と岩盤とで著しく異なっており、緩衝材中の温度勾配は急で、岩盤中ではそれに比べて緩やかになっている。ヒータ最近傍の緩衝材の温度は、加熱開始50時間後に一旦最高値を示し、その後低下して1000～1800時間後に再び最高値を示している。これは、加熱開始66時間後にヒータ出力を4 kWから3 kWに下げた影響が現われたもので、出力を下げた時点の温度に再び到達するのに 1000～1800 時間かかる。しかしながら、このような変化はヒータから44 cm離れた緩衝材中では現われていない。このことは、緩衝材による断熱効果が大きいことを示すもので、岩盤温度は、ヒータ温度が360 °Cまで上昇しているのに対して 86.5 °C と低く抑えられている。

#### ② 加熱1800時間後の温度分布

緩衝材を含む鉛直断面における1800時間後の温度分布を図14及び15に示す。各深度における水平面上の等温線を図16に示す。緩衝材の温度は、深度 3.75 m の 208.8 °C から 0.5 m の 25 °C までの範囲にあり、ヒータ中心部近傍で最高温度に達している。

岩盤温度は初期状態として 10～15 °C であったものが、ヒータ中心レベルの深度 3.75 m ではヒータ最近傍で最高 86.5 °C まで上昇し、ヒータ中心から 1.3 m 離れた地点でも 40 °C 近い温度になった。試験室床面の岩盤表面では 17 °C で加熱前の温度とほとんど変わらなかった。表 8 にヒータ中心からの方向による岩盤内温度の違いを示す。緩衝材中では方向による違いは見られなかったが、岩盤中ではヒータから離れるにしたがい方向により温度に差が現われている。深度 3.75 m では 0° 方向が 120°, 240° 方向に対して 5～7 °C 低くなっている。これは 0° 方向に存在する岩盤中の亀裂の影響が現われたもので、亀裂中を流れる地下水により熱が運搬されているためと考えられる。

#### ③ 热流束

岩盤内の深度 3.75 m に設置した熱流束計の測定結果を図17に示す。F 1 はヒータ中心から 0.9 m, F 2 はヒータ中心から 1.3 m 離れた地点での計測値を示している。熱流束は加熱開始から 100 時間の間に急激に増加しており、100～500 時間で定常に近い状態になっている。加熱後 100～500 時間の間の熱流束は、F 1 で 26～28 Kcal / m²・hr, F 2 で 15～17 Kcal / m²・hr

であり、1800時間後の熱流束もこの範囲にあった。

一方、岩盤表面で計測した熱流束計の測定結果では、加熱開始時には $2\text{ Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ であったものが、その後時間とともに漸増して1800時間後には $24\text{ Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ まで増加した。岩盤表面は熱伝達境界となっているため、岩盤の表面自身は $17^\circ\text{C}$ とあまり温度上昇していないが、熱流束の大きさは、ヒータ中心から $0.9\text{ m}$ 位置の岩盤中に匹敵する程であり、坑道内へ熱が逃げ放熱されていることを示している。従って、固化体の発熱期間中に坑道を埋め戻すような場合には、埋め戻し材の熱伝導率に依存して処分孔周辺岩盤の温度、特に孔口付近の温度は上昇すると思われる。

#### ④ 緩衝材と岩盤温度

周辺岩盤に与える緩衝材の影響を検討するため、今回の実験系から緩衝材だけを除いた系で行なった1800時間の加熱試験結果<sup>8)</sup>と、今回の1800時間にわたる加熱試験結果とを比較してみると、緩衝材を除いた系では、出力が $4\text{ kW}$ であったのに対して今回は $3\text{ kW}$ と低く総熱量が異なるので、緩衝材の存在が周辺岩盤に与える影響を直接的に示すことはできないが、今回の結果では、低出力であったにもかかわらず、加熱1800時間後のヒータ表面の温度は前回より約 $110^\circ\text{C}$ 高くなっている。岩盤温度は、総熱量が小さいにもかかわらず、ヒータ中心レベル（深度 $3.75\text{ m}$ ）ではほとんど同じであった。又、亀裂帯を含む $0^\circ$ 方向の岩盤温度は今回の方が高く、岩盤内の熱流束の大きさはほぼ同じであるなど、ヒータ出力が同じ場合には、緩衝材の存在によって岩盤温度が上昇することが予想される。

深さ方向の違いでは、深度 $4.75 \sim 7.00\text{ m}$ の深い位置の岩盤温度は、緩衝材のある場合のほうが高く、深度 $0.5 \sim 2.75\text{ m}$ の浅いところでは逆に緩衝材のあるほうが岩盤温度は低くなつた。これは緩衝材が無い系では緩衝材の代わりに空間を満たしている空気が加熱によって対流を起した結果として、ヒータより上部に高温域ができ、下方には熱が伝わりにくかったためと考えられる。岩盤を含めた実験系の温度分布は、緩衝材を充填したことにより、より実際の処分環境に近づいたと思われる。

#### 4.2 緩衝材の加熱特性

1800時間加熱後の緩衝材の温度は $200.7^\circ\text{C}$ まで上昇したが、途中、試験開始66時間後ヒータ出力を $4\text{ kW}$ から $3\text{ kW}$ に変更した直前に、緩衝材温度は最高温度 $208.8^\circ\text{C}$ まで達している（図12参照）。加熱終了後、412時間放冷した時点で緩衝材の熱変化と水分分布を調べるために、試験孔から緩衝材を取り出した。取り出した緩衝材のうち、深度 $3.75\text{ m}$ レベル（ヒータの中心レベル）付近で、最高温度がほぼ $100^\circ\text{C}$ を越えた領域のテストブロックに半径方向に伸びた亀裂が認められた（図18-a）ほか、 $200^\circ\text{C}$ 近くまで上昇した領域のものには長柱状の小ブロックに分解したものがあった（図18-b）。緩衝材中の水分分布を調べるために、取り出した緩衝材から36個の試料をサンプリングし、電気炉で乾燥して重量変化から含水比を求めた。また、緩衝材を構成している鉱物の変化について調べるためにX線回折法による検討を行なつた。含水比の測定結果を表9に示す。含水比と加熱1800時間後の緩衝材の温度との関係を図19に示す。

$120^\circ$ 方向の縦断面において、加熱1800時間後の緩衝材中の等温線に対比させて等水分線として

含水比の測定結果を示したものが図20である。含水比の分布は温度分布とよく似ており、ヒータ中央部の200°C 等温線に相当する部分で含水比が2%と最小値を示し、外側に向かって含水比が大きくなっている。緩衝材製作時の平均含水比15.9%に相当する等水分線の位置は1800時間加熱後の緩衝材中の100°Cの等温線位置付近にあり、緩衝材中の水分は、100°Cの等温線を境に等温線の内側では製作時の平均含水比15.9%より減少しており、その外側では逆に増加している。これは、100°C以上に加熱された領域の水分が外側に押しやられ、100°C以下になるあたり(図ではヒータ発熱部の上部と孔底部)に濃集したことを示すものと考えられ、測定された含水比は1800時間加熱後の緩衝材中の水分分布を反映していると判断される。従って、上述したように、回収した緩衝材ブロックで、100°C以上になった領域のブロックに発生した亀裂は、水分が移動して乾燥した結果として緩衝材が体積収縮を起こした(図6参照)ためであり、亀裂が発生したことによりその後の水分の移動は速やかであったと想像される。乾燥した領域に連続する100°C以下の部分では亀裂の発生は認められず、移動してきた水分は緩衝材の持つ低透水性と保水力により100°Cを越えた領域を取り巻く形で高水分領域が形成されたと考えられる。緩衝材中の温度は1800時間後においても漸増しており、加熱時間がもっと長期にわたれば100°Cを越す領域ももっと広がることが予想され、緩衝材中の水分はさらに試験孔上部に押しやられることになる。これは、遮水鋼管が無く、地下水の浸入の少ない処分孔において、緩衝材中の初期含有水分が固化体の崩壊熱により再配分する<sup>10)</sup> ようを示していると考えることができる。

X線回折の結果、加熱後の試験では加熱前とその鉱物構成に大きな変化は認められなかった。温度が200°Cまで上昇した試料中のモンモリロナイトの底面反射は、15 Åから12.65 Åに変化していたが、これはモンモリロナイトの層間に含まれている層間水が失われたことを示すものである。又、試験後の試料は、水の入ったビーカー内で膨潤し、加熱により緩衝材の膨潤性は失われなかつたことが分かった。

#### 4.3 計算温度と実測温度との比較

実験結果から将来の予測に対する検討を行なうために、緩衝材と岩盤との温度分布を解析用プログラムMARCを使用して有限要素法により解析した。実験系を、ヒータを軸とする回転体とみなすと、軸対象回転体座標系における熱伝導による温度分布は、以下の基礎方程式(1)で与えられる<sup>11)</sup>。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r\alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r\alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

ただし、 $\alpha = \kappa / c\rho$

$\kappa$  : 熱伝導率,  $c$  : 比熱,  $\rho$  : 密度

式(1)についてGalerkin法を用いた離散化解析を行うと、式(2)の有限要素法非定常熱伝導解析の基礎式が得られる。

$$[\dot{M}] \{ \dot{T} \} + ([K] + [F]) \{ T \} = \{ Q \} + \{ S \} \quad (2)$$

- ここで、 $\{T\}$ ：節点温度ベクトル
- $\{Q\}$ ：熱流ベクトル
- $\{S\}$ ：熱伝達による熱量ベクトル
- $[M]$ ：熱容量マトリックス
- $[K]$ ：熱伝導マトリックス
- $[F]$ ：熱伝達マトリックス

式(1), (2)に基づき緩衝材と岩盤内の温度を熱伝導解析するため、解析条件等を以下のように設定した。

解析範囲は、緩衝材と裏込め砂及び花崗岩岩盤を含むヒータから半径13 m、床面からの深さ19 mまでの平面とする。この平面を四角要素と三角要素とを用い、図21に示すように482の要素と464の節点に分割する。解析平面内の断面区分と解析条件を図22に示すように設定し、各々の境界は次のようにする。

強制温度変化の境界（図22のAB, BC）は、緩衝材と接しているヒータ外側の鋼管表面の温度を時間関数として与える。

熱伝達境界（AF）での岩盤表面の熱伝達係数は、試験室の底盤表面に設置した熱流束計の実測値及び試験室底盤温度と試験室の気温との差とから求めた平均値27.8 cal / m<sup>2</sup> · s · °C (=10 Kcal / m<sup>2</sup> · h · °C) とする（表10）。

一定温度境界（DE）は岩盤内の初期温度分布から14.5°Cとする。

また、岩盤の遮水鋼管との間の裏込め砂は、花崗岩と地下水が1:1の割合で混合されている（空隙率50%で花崗岩砂が詰められており、空隙は全て地下水により満たされている）とみなしたうえで、実測の温度変化に一致する見掛けの熱伝導率の値を求め、これを入力値とする。

以上の設定のもとに、緩衝材の熱伝導率が異なる2つのケースについて解析を行なった。2つのケースに用いた解析用の物性値を表11に示す。解析で用いたCASE 1の緩衝材の熱伝導率は、製作した圧縮成形物からノコギリで切り出したままの面で測定したもので、CASE 2では圧縮成形した平滑な面で測定した値を用いた。CASE 1の測定面はCASE 2の面に比べて粗く、得られた熱伝導率の値もCASE 2に比べて小さくなっている。緩衝材作成時に測定した熱伝導率の値は、試料面の性状によりばらついている。

加熱500時間後及び1800時間後の120°方向の断面での温度分布を各深度毎に示したものが図23及び24である。図には解析した2ケースの計算結果と実測値とを同時に示した。加熱後500時間経過時点における岩盤内での温度勾配は、各深度とも実測値と計算値とが良く一致しており、120°方向のように亀裂のない岩盤中の温度分布は岩石コアから求めた物性値を用いて十分に予測することができると思われる。

緩衝材中では実測値と計算値との温度勾配の様子が深度により異なっている。深度0.5mでは実測した温度の示す温度勾配は解析した2ケースよりも小さくなっている。深度2.75mでもやはり実測値の温度勾配は解析した2ケースよりも小さいが、ほぼCASE 2に近いものになっている。深度3.75mの実測値の温度勾配はほぼCASE 1と2との中間に位置している。深度4.75mでは実測値の温度勾配は一様でなく途中で折れ曲がった、矩形となっている。この様子は、1800時間経過後の温度分布を見てもほとんど変わりがない。このように温度勾配が解析からズレるのは、各

深度において緩衝材の熱伝導率が異なっているためと思われる。

ベントナイトを主体とする緩衝材の熱伝導率はその水分量に依存しており、水分量の減少とともに熱伝導率も減少することが知られている<sup>4, 12)</sup>。また、本実験で用いた緩衝材の熱伝導率は図5に示したように高温になるにつれて減少している。1800時間後の緩衝材中の温度と水分の分布は、深度0.5m、約30°Cにおける水分量は、14.3～15.8%（図20参照）で製作時のものと変化がなく、深度2.75mでは、温度は75.1～99.4°Cと高温になってはいるが100°C以下で、ちょうど水分が集まつた部分に相当しており、緩衝材中の水分は15.6～22.3%と多くなっている。深度3.75mでは、温度は100.3～200.7°Cまで上昇し、水分も2.2～12.3%と製作時より乾燥している。

深度2.75mでは実測の温度勾配が解析の2ケースより小さいのに対して、深度3.75mでは両ケースの中間に位置しており、相対的に熱伝導率が小さくなっていることを示している。これは、緩衝材中の温度が100°Cを越え、水分が離散して熱伝導率が小さくなつたためと考えることができる。このように、解析と実測値とのズレは、緩衝材中の温度と水分の移動によって説明することができる。深度0.5mの水分は、製作時と変わっていないので、この深度で実測された温度分布が表わす熱伝導率が、原位置における緩衝材の初期熱伝導率を示すものとみなせる。それは平滑な面で測定した室内測定値より多少大きいようである。

岩盤中及び緩衝材中の温度分布を正確に予測するためには、緩衝材中の温度変化及び水分変化に伴う熱伝導率の経時変化を正しく捉える必要があることが分かった。周囲からの地下水の流入のない今回の実験条件下では、実測された緩衝材の熱伝導率の変化は、計算した2ケースの熱伝導率の範囲内に収まっており、温度分布は、熱伝導機構で十分説明することができ、水分の移動による熱の伝播の影響は小さいようである。しかしながら、周辺岩盤から地下水が流入するような場合には、緩衝材中の水分量の変化も大きくなると予想されるので、水分変化に伴う緩衝材の熱伝導率の変化を考慮しなければならないであろう。

表 8 加熱 1800 時間における緩衝材 / 岩盤温度の方向による違い (深度 3.75 m)

(単位 ℃)

距離 (m) 方向	緩 衡 材		岩 盤		
	0.254	0.440	0.500	0.900	1.30
0°	208.8	106.9	85.7	54.7	38.9
120°	200.7	100.3	86.5	61.9	45.1
240°	200.3	100.0	84.7	60.3	44.2

表 9 緩衝材の温度, 含水比 (120°方向)

試料番号 位置 (r, z)	含水比 % 温度 ℃	試料番号 位置 (r, z)	含水比 % 温度 ℃	試料番号 位置 (r, z)	含水比 % 温度 ℃
1 (12, 50)	14.3 30.9	13 (25, 275)	15.6 99.4	25 (38.5, 375)	8.2 125.4
2 (27, 50)	15.6 28.1	14 (35, 275)	20.3 86.1	26 (44, 375)	123 100.3
3 (44, 50)	15.8 27.3	15 (44, 275)	22.3 75.1	27 (25.4, 405)	1.9 197.7
4 (12, 130)	14.8 47.5	16 (25.4, 315)	9.6 141.0	28 (35, 405)	7.4 142.6
5 (27, 130)	15.1 42.9	17 (32, 315)	9.7 118.0	29 (44, 405)	12.5 98.1
6 (44, 130)	16.1 39.5	18 (38.5, 315)	19.4 98.7	30 (25.4, 435)	3.4 166.9
7 (36, 190)	14.1 70.0	19 (44, 315)	18.7 88.2	31 (32, 435)	7.5 132.4
8 (40, 190)	15.6 64.2	20 (25.4, 345)	4.1 178.3	32 (38.5, 435)	12.1 107.5
9 (44, 190)	13.8 57.4	21 (35, 345)	11.2 131.3	33 (44, 435)	17.5 89.4
10 (25.4, 240)	12.6 98.9	22 (44, 345)	16.4 97.3	34 (25.4, 475)	17.4 126.9
11 (35, 240)	16.8 79.5	23 (25.4, 375)	2.2 200.7	35 (35, 475)	19.5 91.5
12 (44, 240)	20.2 67.9	24 (32, 375)	4.9 156.3	36 (44, 475)	23.0 77.1

表 10 試験室底盤熱流束実測値より計算される熱伝達係数

加熱後時間 (hr)	底盤表面温度 Tr (°C)	試験室気温 Ta (°C)	温度差 $\Delta T = Tr - Ta (°C)$	熱流束 q (kcal/m² · hr)	熱伝達係数 $H = q / \Delta T$ (kcal/m² · hr · °C)
200	11.2	10.1	1.1	9.228	8.38
500	12.8	10.6	2.2	14.25	6.48
1,000	14.7	12.6	2.1	21.79	10.38
1,500	15.9	13.8	2.1	20.95	9.98
1,800	17.0	15.2	1.8	24.30	13.50
					平均 9.74

表 11 解析に用いた物性値

要素	記号 単位	熱伝導率	比 熱	密 度	備 考
		$\kappa$ cal $m \cdot s \cdot ^\circ C$	c cal $kg \cdot ^\circ C$	$\rho$ $kq$ $m^3$	
CASE 1	岩 盤	0.918	$1.83 \times 10^2$	$2.64 \times 10^3$	20 °C コア室内試験 (自然状態)
	裏込め砂	0.418	$5.83 \times 10^2$	$1.82 \times 10^3$	c, $\rho$ : 花崗岩/水 = 1/1 で混合と仮定し算出 $\kappa$ : c, $\rho$ 設定後, 実測値と合うよう見掛けの値を求めた。
	緩衝材	0.227	$1.97 \times 10^2$	$20.2 \times 10^3$	21 °C 室内試験 $\kappa$ : JIS R 2618 QTM 法 (試料表面 粗い)
CASE 2	岩 盤				CASE 1 と同じ
	裏込め砂		CASE 1 と同じ		CASE 1 と同じ
	緩衝材	0.367			$\kappa$ : JIS R 2618 熱線法 (試料表面 平滑)

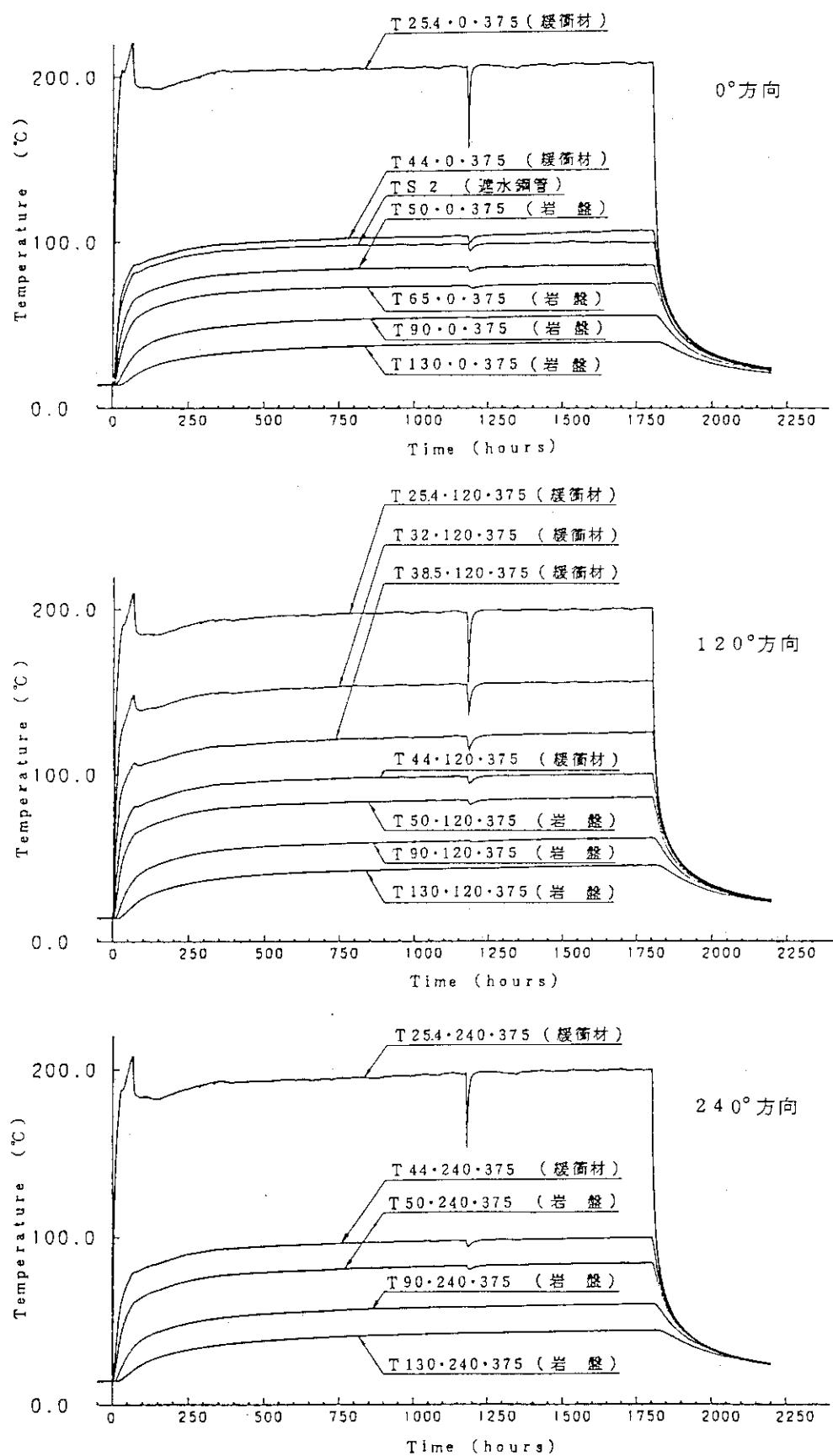


図 12 緩衝材と岩盤の温度一時間曲線 (深度 3.75 m)

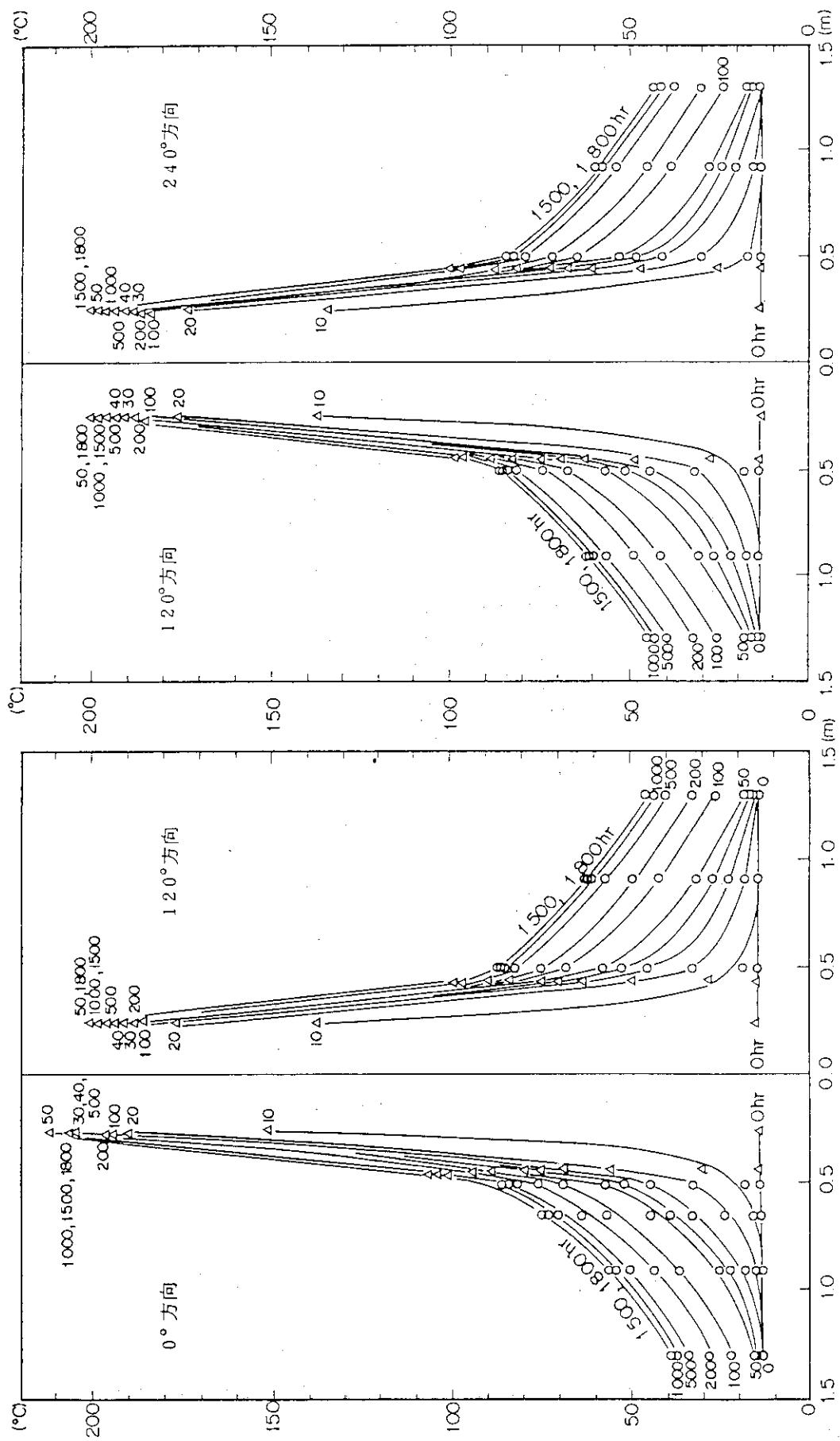


図 13 ヒータ中心からの距離に対する緩衝材と岩盤の温度（深度 3.75m）  
 (△：緩衝材、○：岩盤、図中の数字は加熱開始後の経過時間を表わしている)

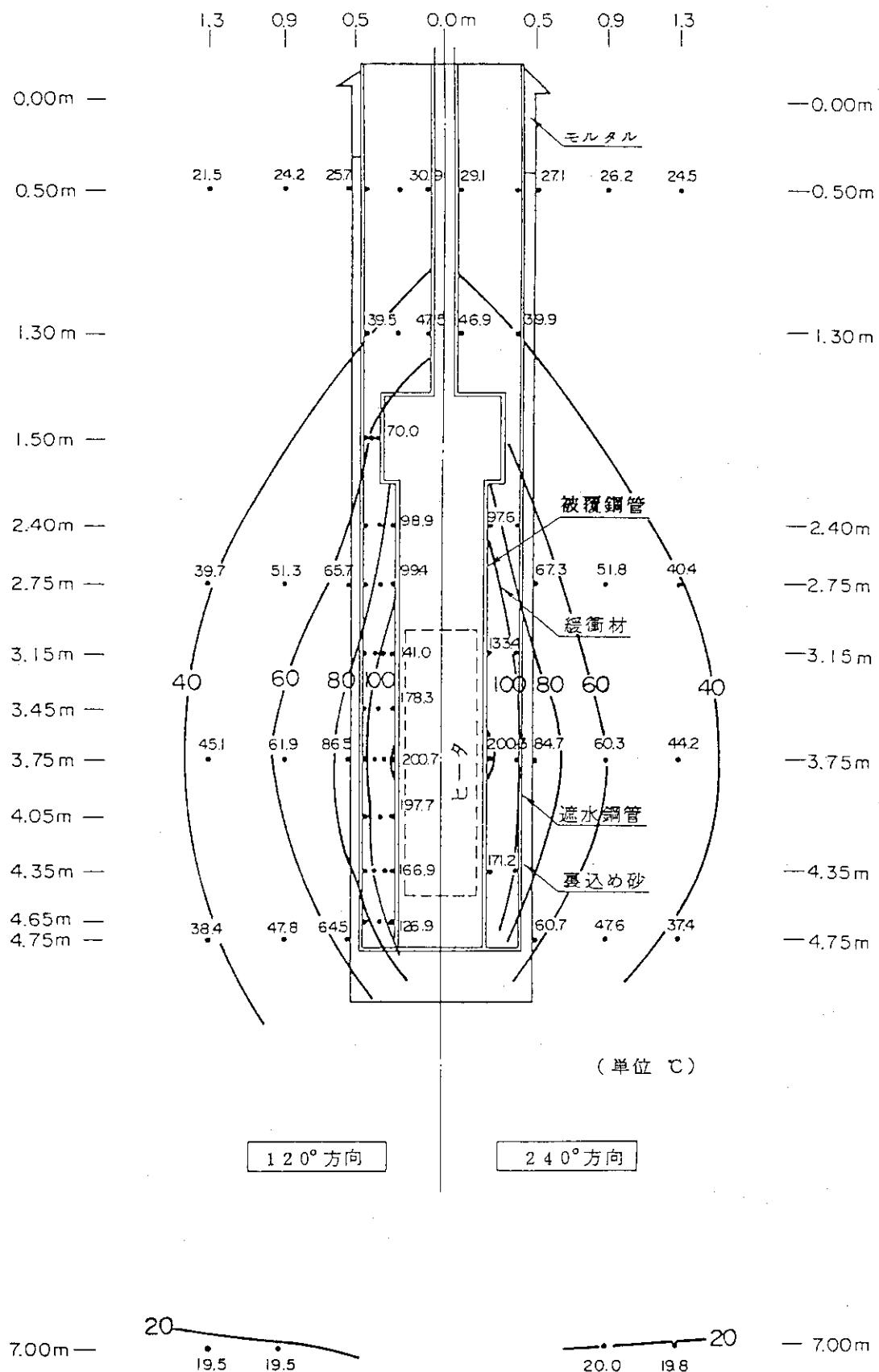


図14 120° 及び240° 方向の鉛直断面における緩衝材と岩盤の温度分布  
(加熱1800時間後)

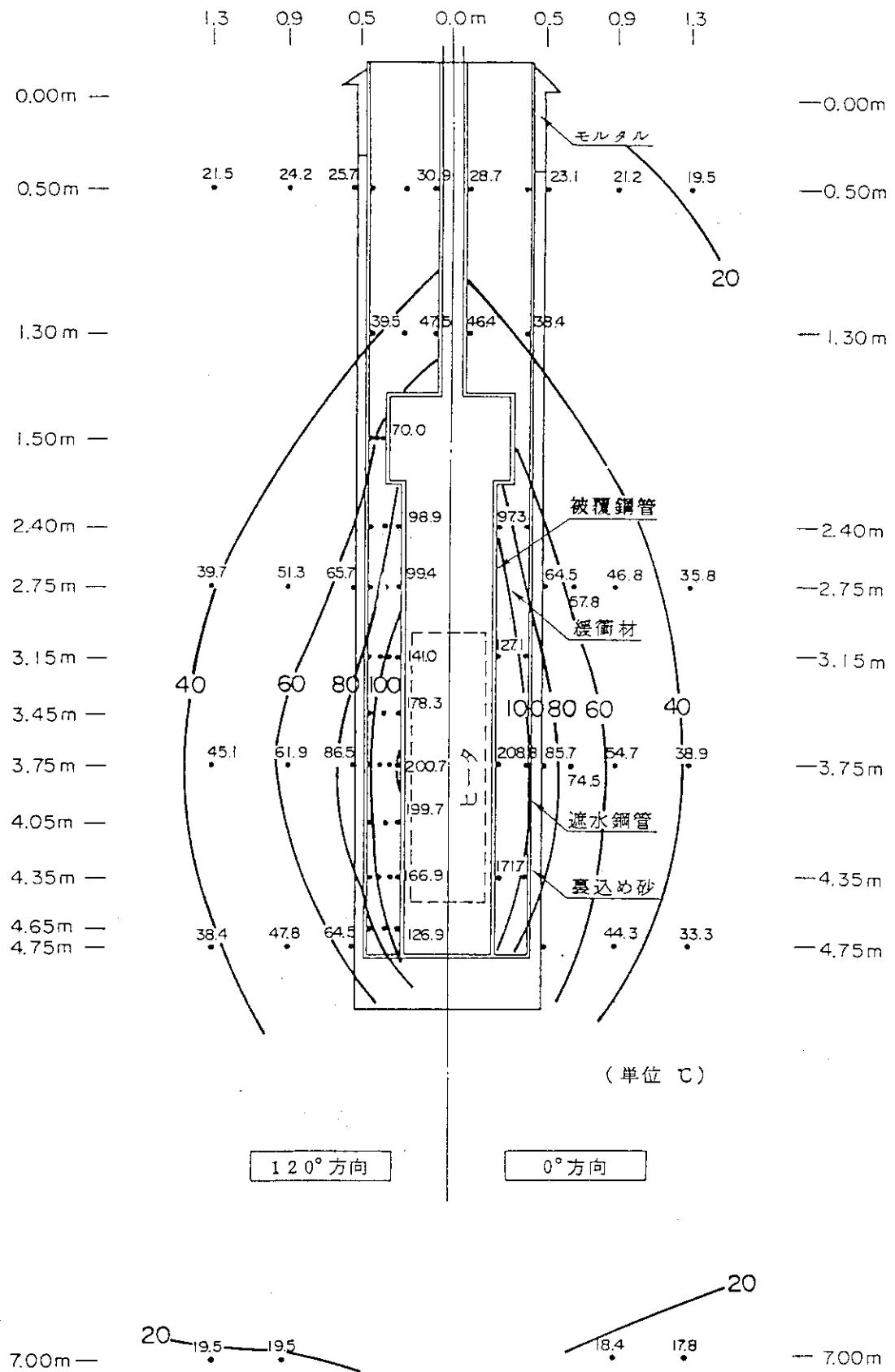


図15 0° 及び120° 方向の鉛直断面における緩衝材と岩盤の温度分布  
 (加熱1800時間後)

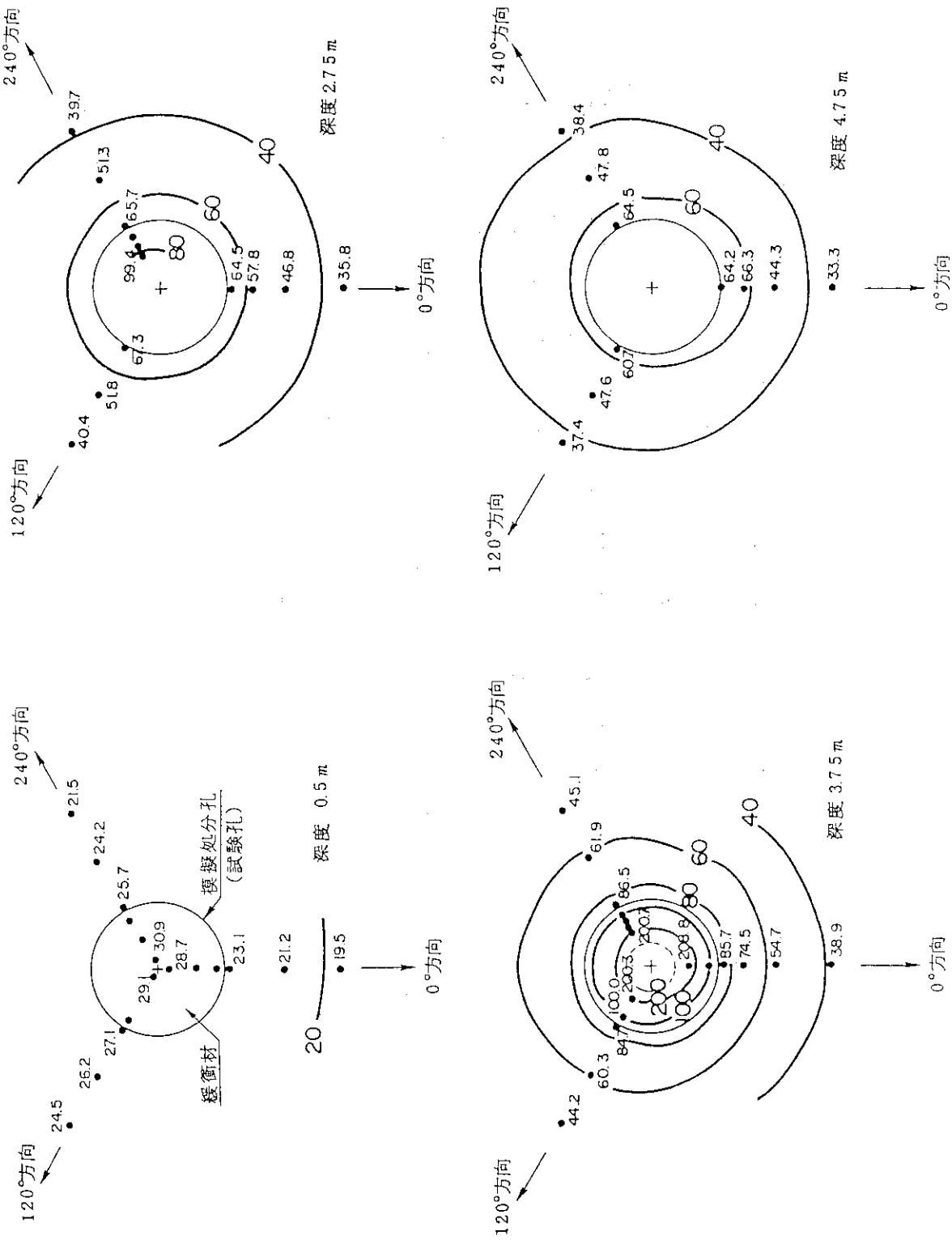


図16 緩衝材と岩盤の等温線図(加热1800時間後)

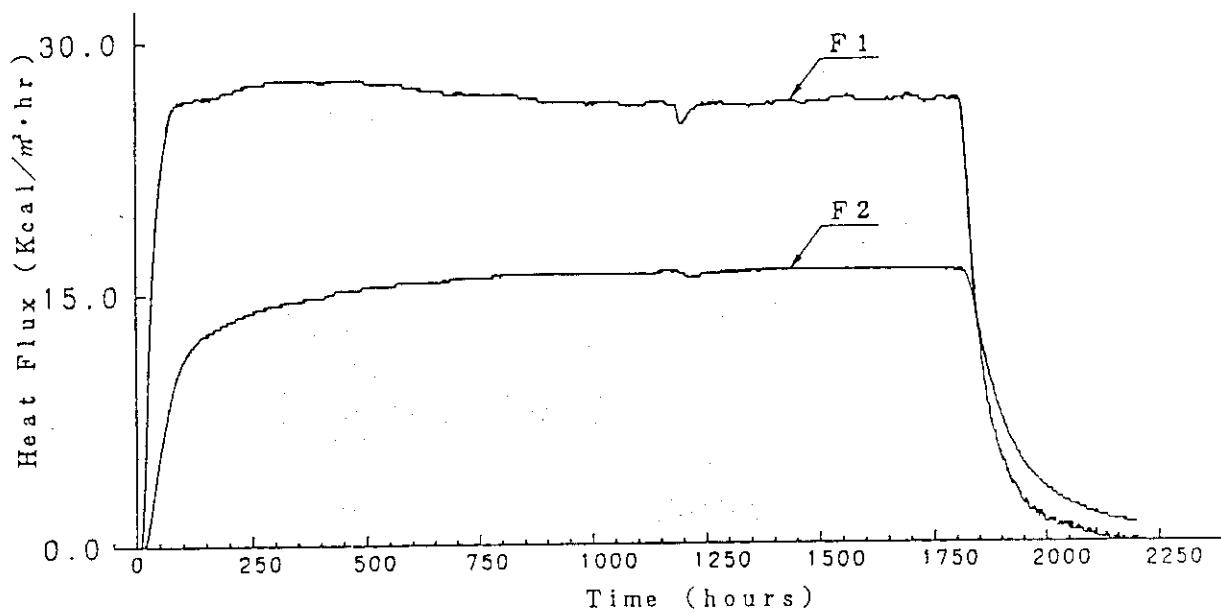


図 17 岩盤内の熱流束一時間曲線

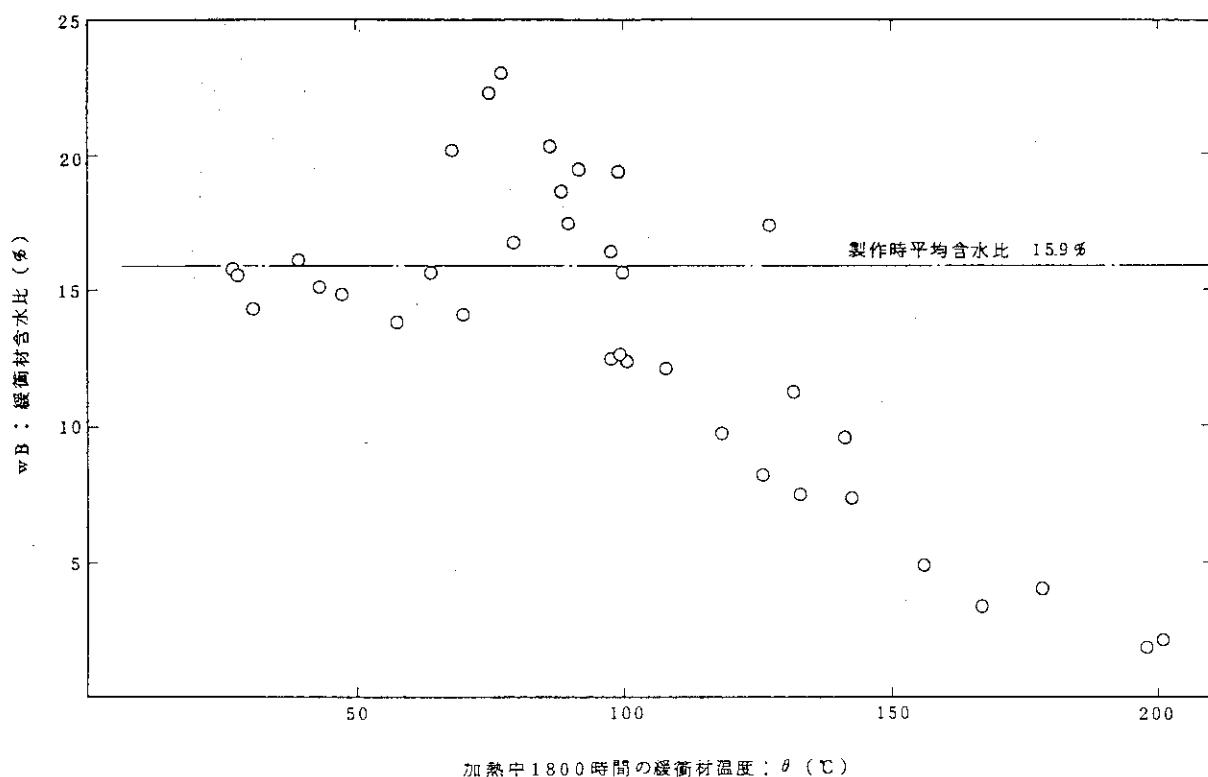


図 19 緩衝材温度と含水比の関係

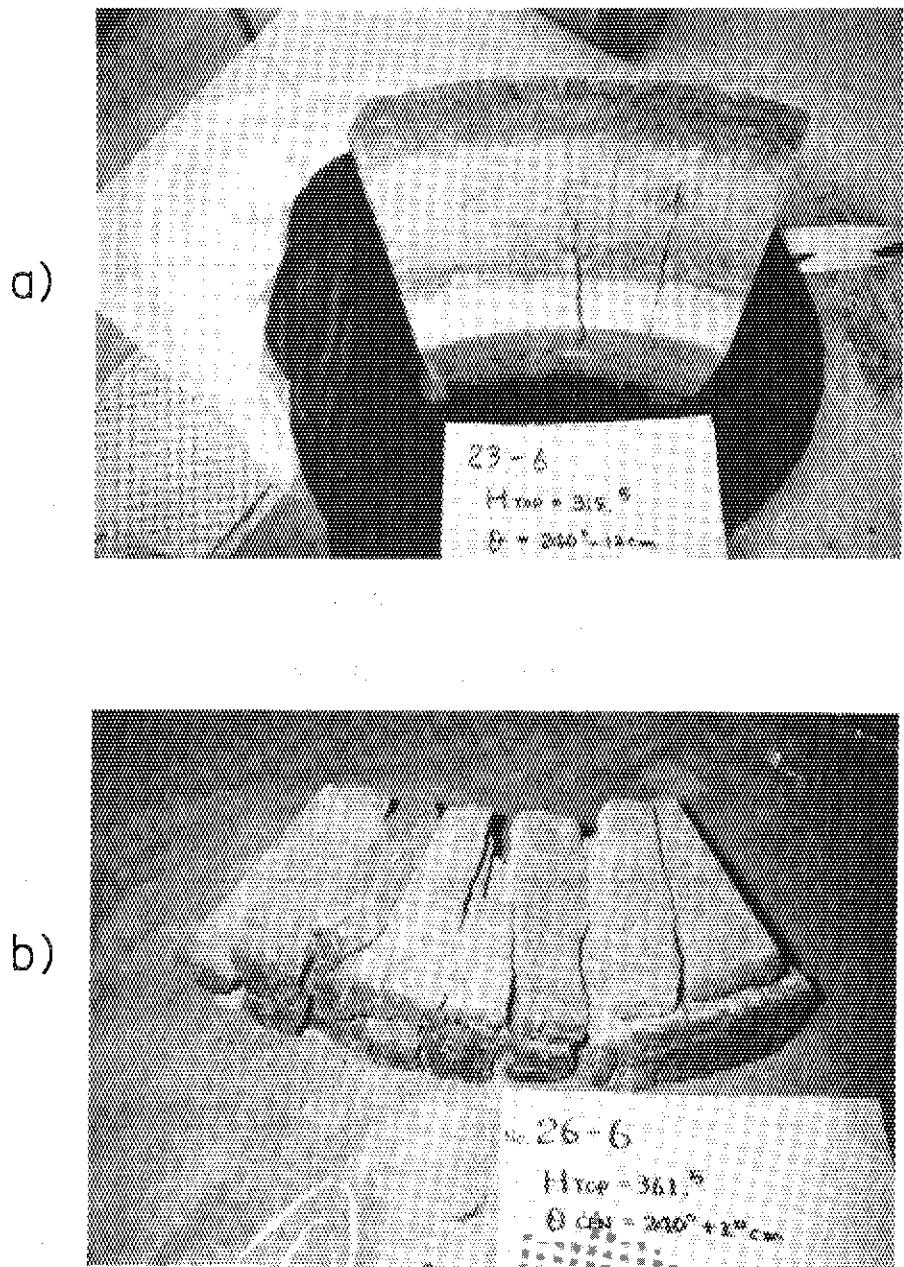


図18 1800時間加熱後の緩衝材：a) 龜裂の入ったブロック(98~140°C)、  
b) 長柱状に別れたブロック(125~200°C)

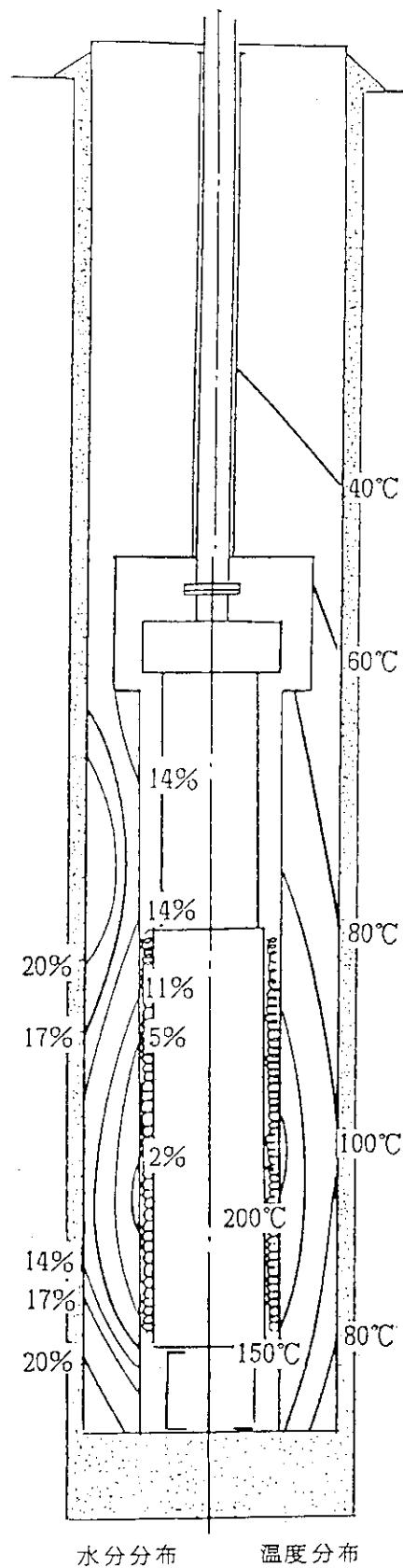


図 20 緩衝材中の水分分布（加熱試験終了後）と  
温度分布（加熱1800時間後）（120° 方向）

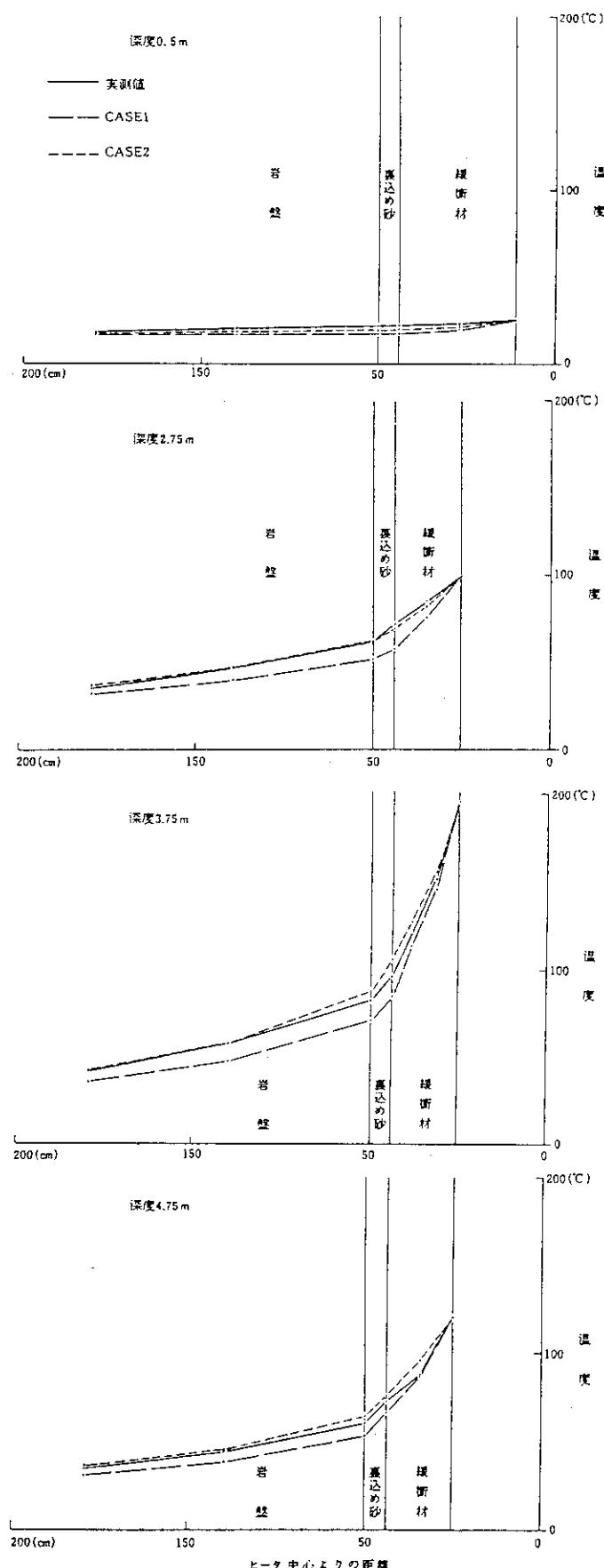


図23 実測及び計算による加熱500時間後の  
緩衝材と岩盤の温度分布（120° 方向）

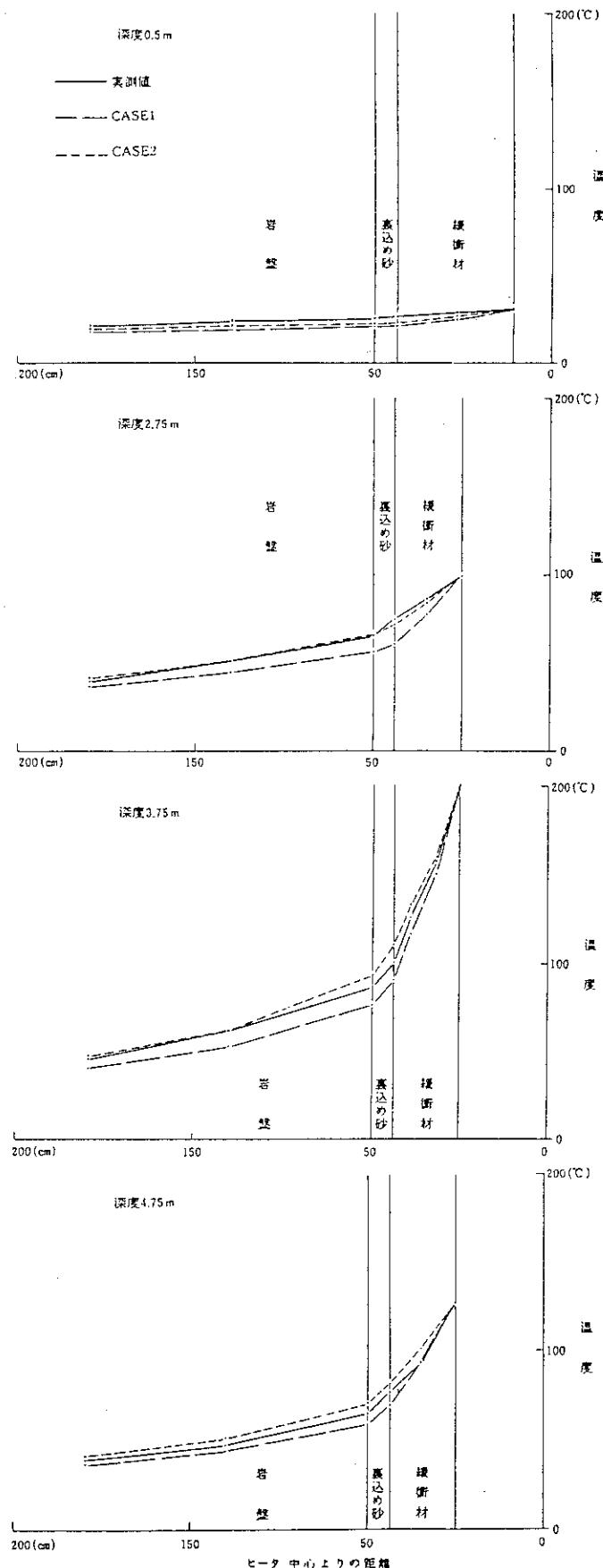


図24 実測及び計算による加熱1800時間後の  
緩衝材と岩盤の温度分布(120°方向)

## 5. ま　と　め

緩衝材の候補に挙げられている圧縮したペントナイト / 珪砂混合物について、地下40mの花崗岩岩盤内に掘削した模擬処分孔（試験孔）中で、周囲からの地下水の流入を遮断して電気ヒータによる加熱試験を行なった結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 約200kgf / cm<sup>2</sup>の圧力で圧縮成型した緩衝材は、平均2.02 g / cm<sup>3</sup>の密度と約15.9%の水分を持ち、この緩衝材を直径1m、深さ5mの試験孔に充填して1800時間の加熱を行なった結果、緩衝材温度は最高208.8°C、岩盤温度は最高86.5°Cまでそれぞれ上昇した。このときのヒータ表面温度は、360°Cに達していた。
- 2) 今回の実験系から緩衝材だけを除いた場合の試験結果と比較すると、今回の方がヒータ出力が小さく、総熱量が少ないにもかかわらず、岩盤内の最高温度と熱流束はほぼ同じとなり、ヒータ出力が同じ場合には、緩衝材の存在によって岩盤温度が上昇すると予想された。
- 3) 加熱終了後の緩衝材中の水分測定結果は、1800時間加熱後の緩衝材中の水分分布を反映しており、ヒータ周辺に充填した緩衝材中では、加熱すると温度上昇に伴って水分が移動することが明らかとなった。100°Cを越えた領域では、緩衝材は乾燥して体積収縮を起こし、ブロックに亀裂が発生した。100°Cを越えた領域の外側に、これを取り巻くように、初期含水比を上回る領域が生じた。
- 4) 加熱後の緩衝材には鉱物学的に顕著な変化は認められず、モンモリロナイトの膨潤性も変わらなかった。
- 5) 緩衝材作成時のデータを基にして有限要素法を用いて計算した温度分布と実測値とを比較することにより、緩衝材中の熱伝導率は温度の上昇と水分の移動に伴って変化していることが明らかとなった。

## 引　用　文　献

- 1) Pusch , R. ( 1979 ) : Nuclear Technology , vol . 45 , pp . 153 ~ 157 .
- 2) 下岡謙司他, ( 1982 ) : 日本原子力学会, 昭和57年秋の分科会「J 23」, 予稿集 p . 127 .
- 3) 熊田政弘他, ( 1987 ) : JAERI -M, 87 — 164 .
- 4) Moss , M. & Molecke , M. A. ( 1983 ) : Scientific Basis for Nuclear Waste Management VI, MRS Symp. Proc ., pp . 719 ~ 726 .
- 5) Nuttall , K. et al . ( 1986 ) : Siting , Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes , IAEA , IAEA-SM—289 / 21 , pp. 431 ~ 448 .
- 6) Kumata , M. et al . ( 1986 ) : Proc. 2 nd . Int . Conf . Radioactive Waste Management , Canadian Nuclear Society , pp. 326 ~ 331 .
- 7) Carlsson , H. S. ( 1984 ) : Radioactive Waste Management vol. 3, Proc. Int. Conf ., IAEA-CN—43 / 69 , pp. 265 ~ 274 .
- 8) Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste , KBS , 1978 .
- 9) 熊田政弘他, ( 1986 ) : JAERI -M, 86 — 044 .
- 10) Pusch , R. ( 1986 ) : In Situ Experiments in Granite Associated With the Disposasl of Radioactive Waste , Proc. Symp. OECD / NEA , pp. 120 ~ 131 .
- 11) Structure Analysis With MARC—CDC Course Note , vol. VI, MARC Analysis Research Co.
- 12) Radhakrishna , H. S. & Tsui , K. K. ( 1981 ) : Naer — Field Phenomena in Geologic Repositories for Radioactive Waste , OECD/NEA Workshop , pp. 329 ~ 344 .