

JAERI -M

82-163

地下深部における岩盤の熱伝導率測定

1982年11月

下岡 謙司・須田真太郎*・荒木 邦夫

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、お申しこみください。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 Section
Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

地下深部における岩盤の熱伝導率測定

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

* 下岡謙司・須田真太郎・荒木邦夫

(1 9 8 2 年 10 月 19 日受理)

地下深部における岩盤の熱伝導率を測定する手法として、ヒーター加熱による岩盤の温度上昇から熱伝導率を求める手法について述べたものである。

変朽安山岩体内部で地表面下約90mの深さの坑道側壁に、水平・平行に6本のボーリング孔を壁面から2.5m～4.5mの深さに掘り、そのうち1本に電気ヒータを設置し開口部をセメントで埋めた。他の5本にはヒータ中心からの距離0.5m～2.0mで熱電対11本を埋め込み開口部を全てセメントでふさいだ。47mm ϕ 、長さ1mのヒータに、出力880Wで61日間通電し、周囲の岩盤の温度上昇を測定した。

岩盤の熱伝導率は、岩盤が均質で無限大であり、熱伝導率は温度に依らず一定、という仮定のもとに定常計算により求められ、2.1 W/m °Cという値が得られた。この値はコアサンプルの実験室での測定値1.5～1.6 W/m °Cと比較するとわずかに大きな値である。

In situ Measurement of the Thermal Conductivity
in Propylite Rock Mass

Kenji SHIMOOKA, Shintaro SUDA* and Kunio ARAKI

Division of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 19, 1982)

The safety evaluation for the geological disposal of the high level waste becomes an urgent problem to establish the backend of nuclear fuel cycle.

The stability of the original host rock and the flow of groundwater will be perturbed by the thermal disturbances from the waste.

So the heater experiment at a depth of 90 m below the surface was carried out to study the conduction of decay heat.

For measuring the thermal conductivity of propylite rock mass, a cylindrical heater and 13 thermocouples were inserted in 6 boreholes.

The power output of the heater was kept at 880 W constant during the experimental periods of 61 days.

From the observed temperature rise around the heater, the thermal conductivity $2.1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ was calculated by steady-state calculation.

The value of the rock mass was found to be slightly bigger compared with $1.5\text{--}1.6 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ of core samples.

Keywords : Geological Disposal, Decay Heat, Thermal Conductivity,
Propylite, Rock Mass, Radioactive Waste Disposal

* Mitsubishi Metal Corporation

目 次

1. 序 論	1
2. 試験地, 実験方法及び試験機器	2
2.1 試験地とその特徴	2
2.2 実験場所	5
2.3 実験方法	5
2.4 ボーリング孔の配置及びボーリングコア	8
2.5 試験機器及びそれらの設置	14
2.5.1 ヒーター	14
2.5.2 測温棒, 热電対及び热流計	14
2.5.3 その他の测定器, 記録計等	15
3. 結果と考察	22
3.1 試験現場の変化安山岩コアサンプルの特性試験	22
3.2 ヒーター出力決定	29
3.3 ヒーター温度と岩盤温度測定結果	32
3.4 热伝導率計算	36
3.5 比熱計算	39
3.6 定常状態到達期間	41
3.7 热伝導率測定の問題点	42
4. まとめ	44
4.1 測定現場	44
4.2 ヒーター	44
4.3 測温棒	44
4.4 記 錄	44
4.5 測定法	45
4.6 热伝導率	45
謝 辞	45
引用文献	46

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Test site, experimental method and devices	2
2.1 Location and geological characteristics of the test site	2
2.2 Heater experiments area	5
2.3 Determination method of the thermal conductivity of rock mass	5
2.4 Layout of boreholes and those boring cores	8
2.5 Devices and layout	14
2.5.1 Electric heater	14
2.5.2 Temperature and heat flux measuring device	14
2.5.3 Recorder and other devices	15
3. Results and discussion	22
3.1 The properties of prorylite core samples	22
3.2 Determination of a power output of a heater	29
3.3 Heater temperature and rock temperature	32
3.4 Calculation of the thermal conductivity	36
3.5 Calculation of the specific heat	39
3.6 Heating period to reach at steady state	41
3.7 Problems on determining the thermal conductivity	42
4. Conclusion	44
4.1 Experimental site	44
4.2 Heater	44
4.3 Temperature measurement device	44
4.4 Record	44
4.5 Measuring method	45
4.6 Thermal conductivity	45
Acknowledgement	45
References	46

1. 序 論

核燃料サイクルにおいて、使用済み核燃料の再処理工程から発生する高レベル廃棄物の安全かつ経済的な処理処分技術の確立及びその安全評価法の確立は不可欠なものである。

原子力委員会は高レベル放射性廃棄物対策について、「高レベル放射性廃棄物は環境汚染を防止する見地から、半永久的に生活圏から隔離し、安全に管理することが必要である。処分については、当面地層処分に重点をおき、我が国の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査研究¹⁾を早急に進める。」という基本方針を示しており、原研は安全性研究を分担することになっている。

高レベル放射性廃棄物の地層処分にとって、重要な問題の一つは、廃棄物核種の壊変によって生ずる崩壊熱である。岩石自体、分解、転移及び溶融をする温度があり、岩盤も崩壊熱の影響を受けて、強度が低下したり、あるいは熱応力によって割れ目が生じたりすることがあり、その結果として廃棄物が移動しやすくなることが考えられる。²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾

温度分布を推定計算する際、基礎になるのが、地層の熱伝導率である。特に固化体近傍では、⁶⁾この熱伝導率の大小が、温度の大きな違いとして現われるので、実験室における岩石試料片の熱伝導率の値と、原位置における岩盤の値とを充分比較検討し、値の違いが生ずる要因についても解析しておかなければならない。

原位置で崩壊熱の影響を調べる加熱試験に関しては、米国において岩塩中での実験がすでになされている。⁷⁾⁸⁾又花崗岩中における加熱試験も、スウェーデンと米国との共同研究で開始された⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾Stripa鉱山におけるヒーター実験が、大規模で長期間行なわれている。

しかし我が国では、岩盤の熱伝導率は測定された例が無く、測定手法の開発から始めなくてはならない。

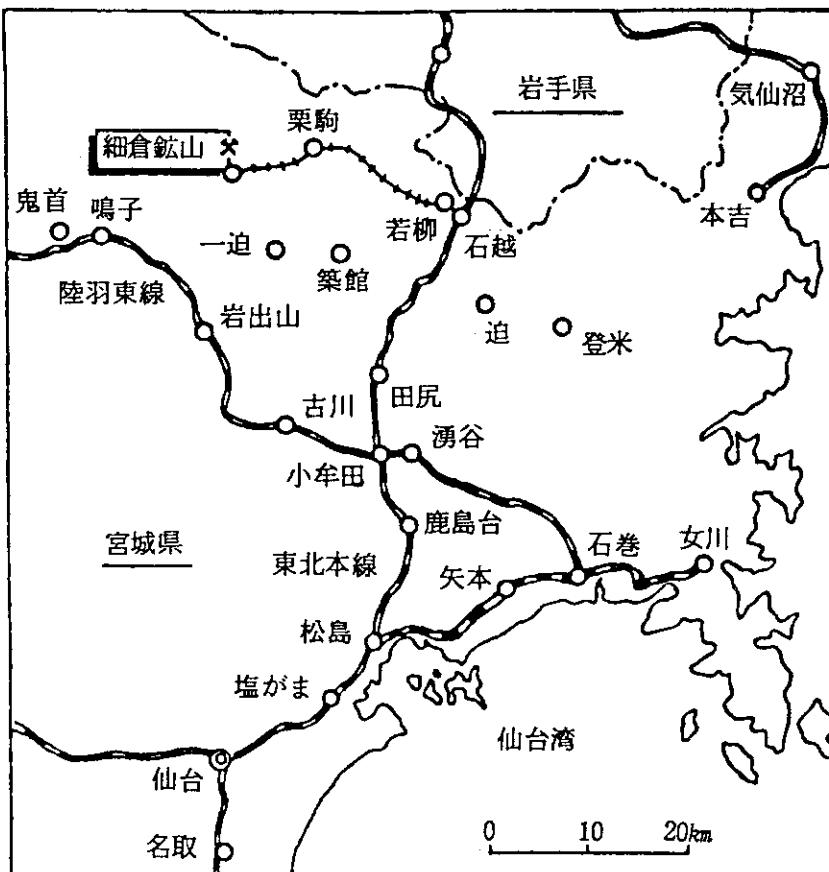
本報告は、岩盤の熱伝導率を測定する手法として、ヒーター加熱による岩盤の温度上昇から、熱伝導方程式の定常計算により、熱伝導率の値を求め合わせて比熱を求める手法について述べたものである。

2. 試験地、実験方法及び試験機器

2.1 試験地とその特徴

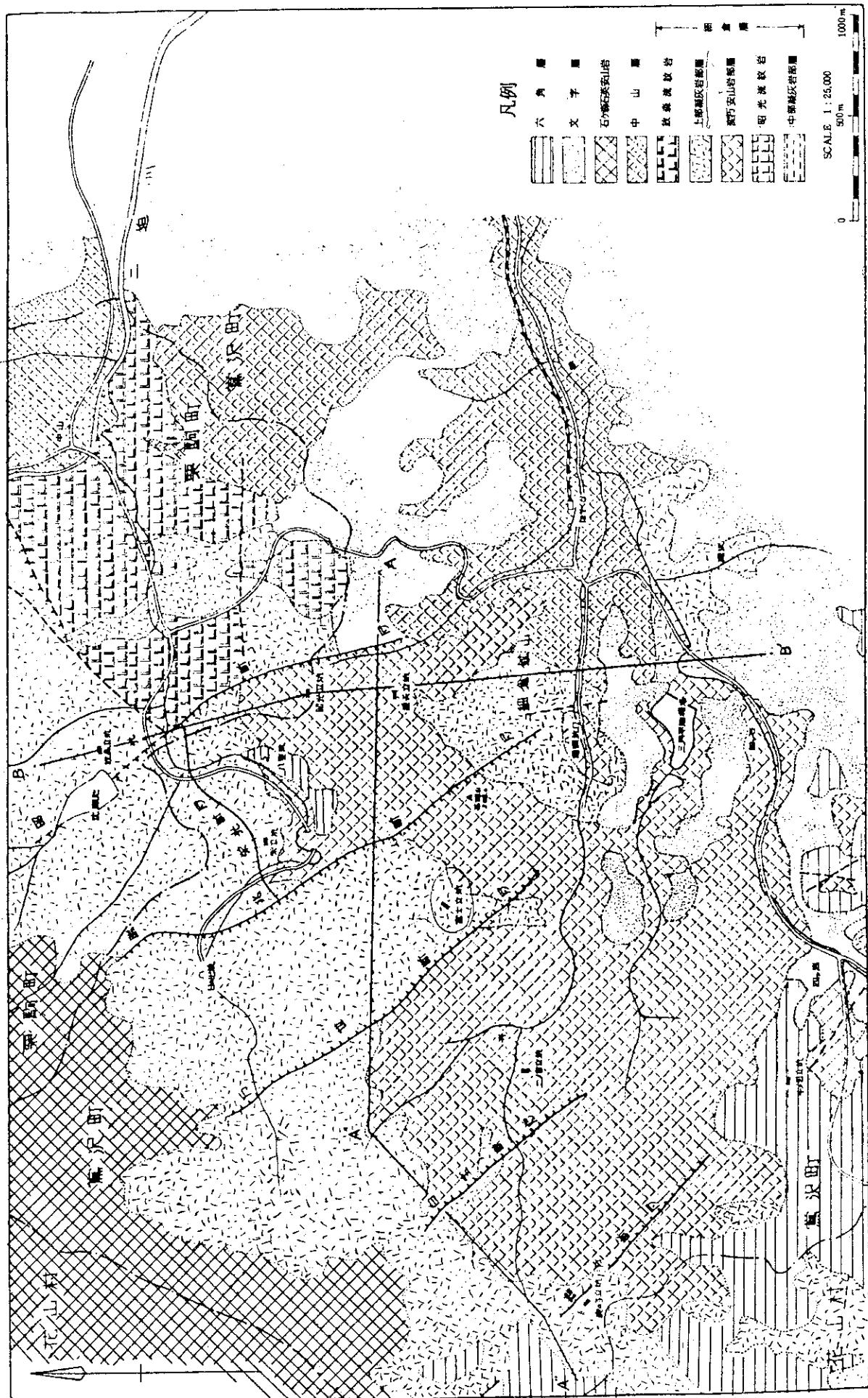
細倉鉱山は、宮城県栗原郡鶴沢町地内にあり、仙台市の北方 84 km 仙台平野の北西辺、奥羽山系東側山間の平坦地にある。概略の位置を Fig. 1 に示す。又、同鉱山は、南北に伸びるグリーンタフ地域の東端近くに位置しており、付近の地質は、第三紀中新世に属する細倉層（流紋岩、変朽安山岩、緑色凝灰岩）、中山層（浮石質凝灰岩、安山岩溶岩流、火山角礫岩）、鮮新世に属する文字層、六角層（石英安山岩質凝灰岩、同質シルト岩）からなる。細倉鉱山付近の地質図を Fig. 2 に示す。鉱山中心部では、細倉層が分布し、北東、南西の外周にかけて中山層さらに外周へ行くと文字層、六角層が分布し、ちょうど鉱山の範囲がドーム状構造を呈しているが如く観察される。地質断面図を Fig. 3 に示す。

試験対象地の岩石は淡灰～淡緑色変朽安山岩であり安山岩が熱水変質した岩石である。緻密な節理をもつ暗緑～淡緑色の特徴ある変質岩で、微晶黄鉄鉱の鉻染や晶洞中に方解石、沸石などが形成される。顕微鏡下では灰曹長石は大部分曹長石となり輝石、角閃石などは緑泥石に変わり、石基中のガラス質物質は、脱ガラス化作用で全体が外郭不明瞭の粒状曹長石と緑泥石との集合体となっている。



細倉鉱業所位置図

Fig. 1 Location of the HOSOKURA MINE



細倉鉱山地質図

Fig. 2 Geologic map around the HOSOKURA MINE

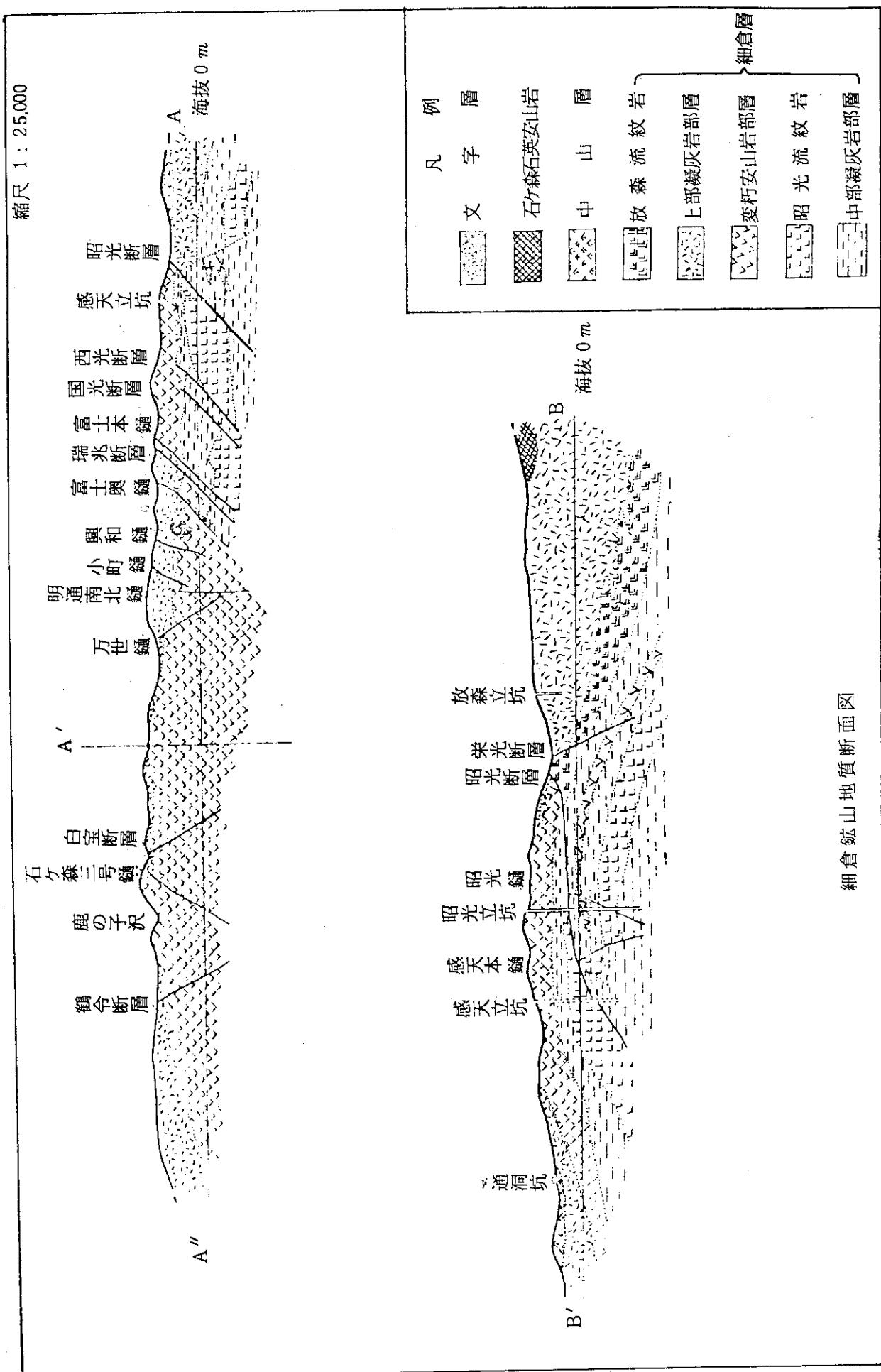


Fig. 3 Geological profile of the HOSOKURA MINE

2.2 実験場所

試験の対象岩体として、細倉鉱山において地下深部より地表まで分布している変朽安山岩体を選び、実験地点は坑口からの距離約1,400m、地表からの深度89mで主要坑道より約7m切込である坑道内に設定した。現場付近の坑内図をFig. 4に示す。周囲の岩石は淡灰～淡緑色変朽安山岩である。現場周辺の岩盤には、数本のルーフボルトの他特に支保は施していないが、浮石は発生しておらず、応力緩和範囲は深くないと考えられている（坑直側壁より2.5m奥では一次圧のみが作用しているものとすれば、地圧の垂直応力成分は、 32.4 kg/cm^2 となる）。坑道内の気温の季節変化および日変化はともにほとんどなく、試験期間を通して $20 \pm 1^\circ\text{C}$ であった。又湿度はほど100%であった。

現場付近には、大きい断層や湧水は観察されない。

2.3 実験方法

熱伝導率の測定には、定常法と非定常法がある。その多くは測定試料を実験室に持ち込み、成形加工して測定するものである。岩石などを試料とする測定法のうち、良く採用される方法としては、定常法では分割棒法、シュレーダー法などであり、非定常法としてはボックス・プロープ法、熱線法、ニードル・プロープ法などである。これらのうち圧倒的に多数の試料を測定している方法はボックス・プロープ法である。これは測定試料の岩石の成形加工が単純で、非定常法のため測定時間が極く短かくて済むという理由による。

熱伝導率の屋外における直接測定として行われている方法としては、熱伝導棒法、ニードル・プロープ法がある。いずれも非定常法であるが、測定対象は土壤あるいはそれに類する軟弱物質である。測定対象が岩石、岩盤の場合はボックス・プロープ法による野外直接測定以外は知られていない。ボックス・プロープ法による岩盤表面における熱伝導率測定は、岩盤表面を平滑加工し、プロープを押しあてて値を求めるという方法である。しかしこの方法では岩盤内部の熱伝導率を測定することができない。

岩盤内部の熱伝導率を求めるには、通常コア・ボーリングを行い、そのコアの室内測定によっている。測定条件を充分整備すれば、対象とする岩盤の熱伝導率を算定することはできる。このための条件としては、岩盤を構成している多種類の岩石を採取すること、固結度のちがった岩石の分布、含水量の分布、温度分布などを知ることである。これらの条件を満たせば、岩盤の熱伝導率を知ることができるが、しかし室内で測定することが不可能な部分が残る。それは主としてクラックの存在である。特にクラック中に水分が存在する場合の岩盤そのものの熱伝導率は、室内における岩石片により測定した熱伝導率とは大きく異なることが考えられる。さらに地下深部の岩盤に通常存在する内部応力の不均衡は、岩盤の地質的構造の不均質となって現れ、それが岩盤の熱伝導率の異方性となってあらわれる。

したがって本実験では、massiveな岩盤の熱伝導率を求める方法として定常法を採用し、半径1m、奥行き4.5mの円柱状内の温度測定領域に適用した。すなわち岩盤を一定電気出力のヒーターで加熱し、温度分布がほぼ定常と見なせる状態に到達したときの温度をヒーターからの距

離の函数として考え熱伝導率を求めた。合わせてコア・サンプルのボックス・プローブ法による
熱伝導率測定も行った。



Fig. 4 Underground map around the heater test site

2.4 ボーリング孔の配置及びボーリングコア

熱源ヒーター用の孔は直径 49.0 mm ϕ , 測温熱電対用の孔は直径 29.4 mm ϕ の孔をあけた。それぞれの孔長すなわち坑道壁面からの深さは応力緩和部より深くするために坑道半径の 2 倍以上の 2 m 以深とし, 2.5 m から 4.5 m の深さとした。ボーリング孔はヒーター用として 1 本 No.3 , 热電対用として 4 本 No.1 , No.2 , No.4 , No.5 , その他熱流量計用として 1 本 No.6 の合計 6 本が, Fig. 5 のボーリング孔配置図の壁面図及び水平断面図に示すような配置で壁面に垂直でかつ各孔が平行になるようにあけられた。又図からもわかるように、各孔の配置は熱流がそれぞれの孔によって乱されるという影響をさけるため、すなわち各測温孔の温度上昇が熱伝導によるという前提をできるだけ満足するために、どの 3 孔をとっても一直線上にならないような配置とした。

各孔の深さは、坑道壁面がでこぼこしており垂直平面ではないため、Fig. 6 に示す基準面を設定してこの面からの深さとし、試錐を行った。

ボーリングコアは全て良好な状態でほぼ 100 % 採取でき、ボーリング中に湧水やクラックには当らなかった。柱状図を Fig. 7 ~ 9 に示す。コアを観察するとはば等質な変朽安山岩であるが、わずかに色や班晶に違いが見られる。しかし物性としては均質としてよいと考えられる。

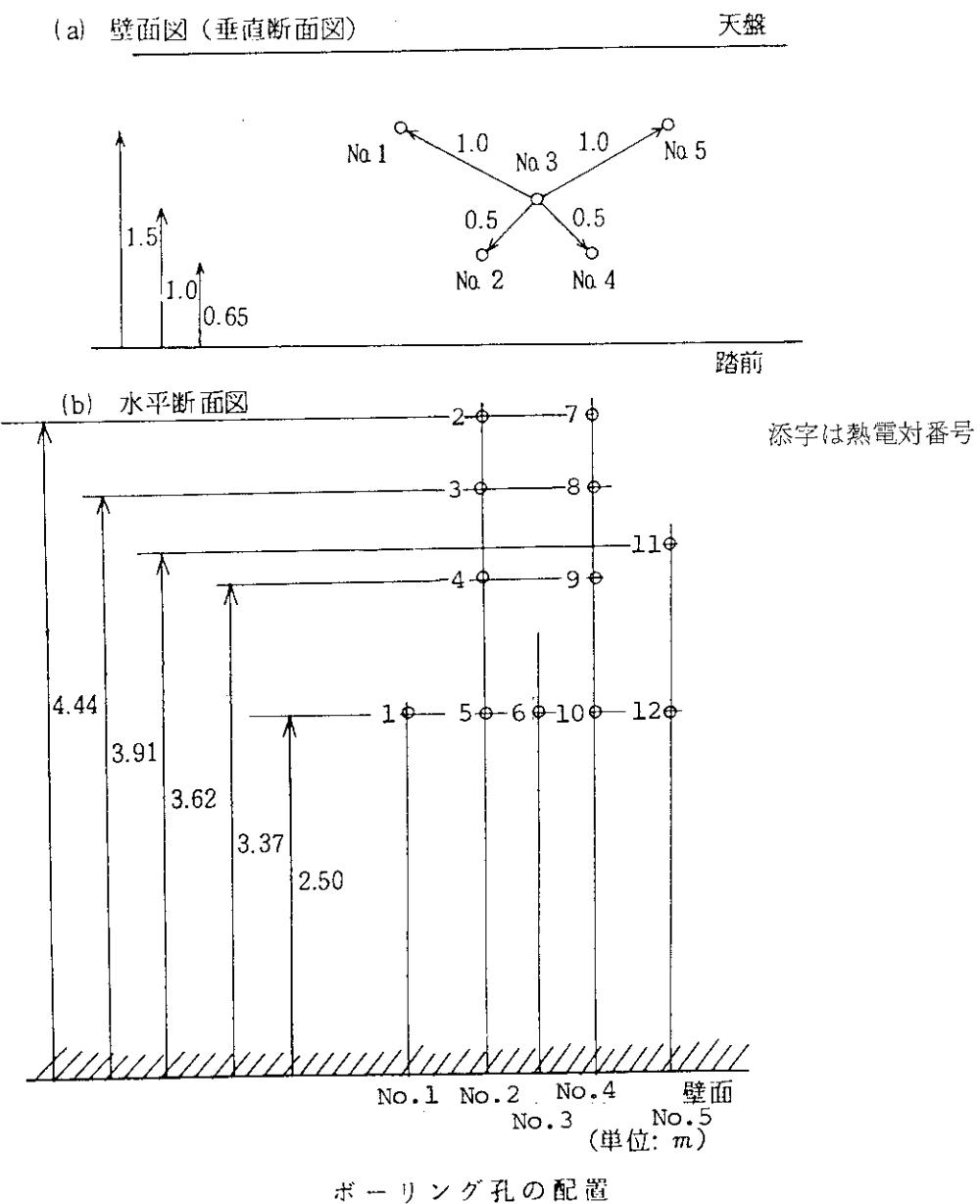


Fig. 5 Arrangement of 5 boreholes and position of 12 thermocouples

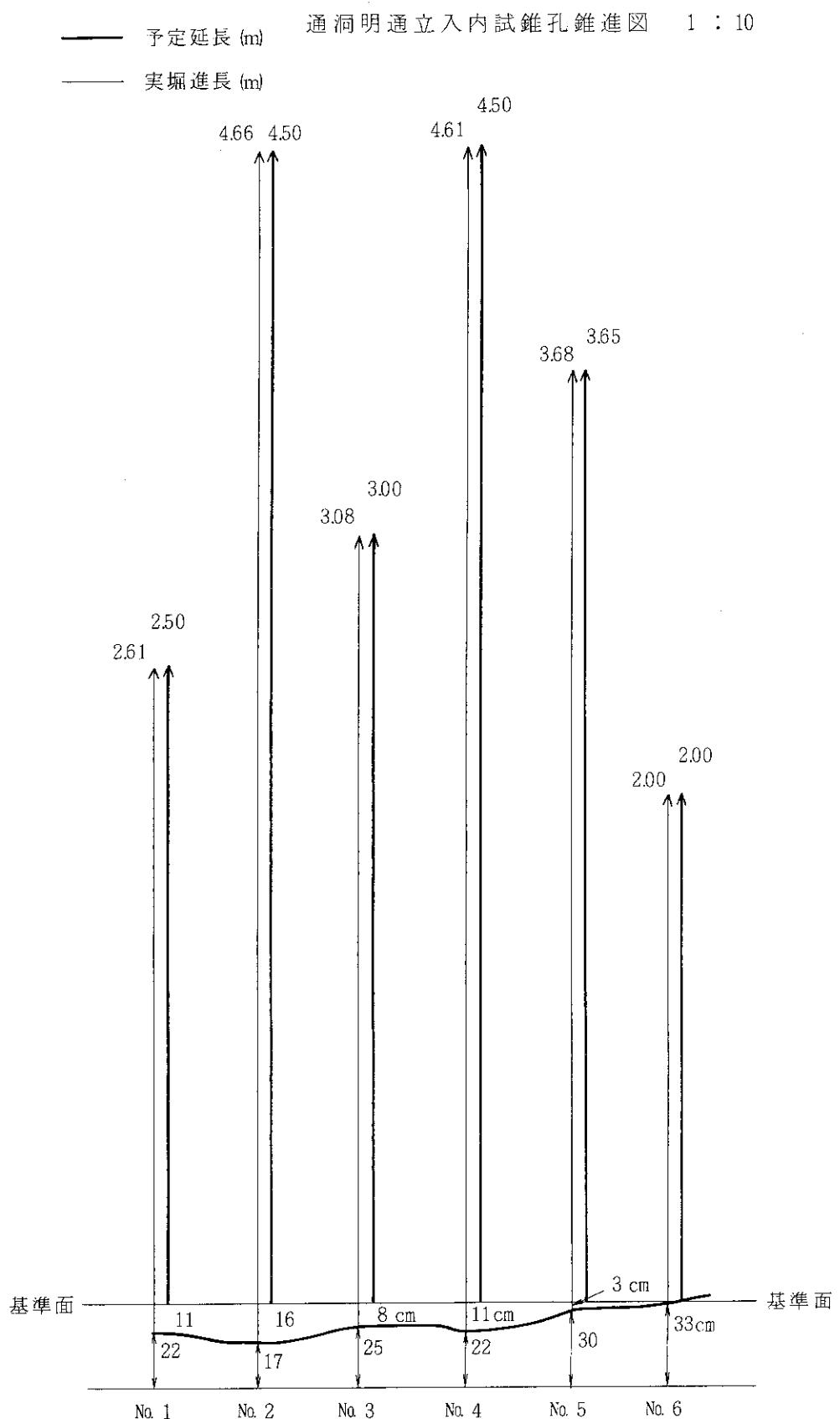


Fig. 6 Length of 6 boreholes

第1孔

第2孔

縮尺 1: 20

年月日	深度	柱状図	番号	記 事	コア 長 m	年月日	深度	柱状図	番号	記 事	コア 長 m
	0 m			淡灰色～淡緑色 変朽安山岩			0 m	△△		淡緑色変朽安山岩 部分的に角礫化	
53								△			
		▽		1.00より 淡緑色変朽安山岩 暗緑色班晶顯著				△△			
	1.00	▽					1.00	△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			
		▽						△			
		▽						△			
		▽						△△			

第3孔

年月日	深度	柱状図	番号	記 事	コア 長
	0 m			淡緑色変朽安山岩	m
	1.00				
53	1.30	V V		1.30より淡灰緑色 変朽安山岩 (緑色班晶顯著)	
	2.00	V V			
	2.50	V V		2.50附近より 暗黒色～暗緑色 変朽安山岩 (緑色班晶あり)	
11.30	3.00	V			
	3.08	V		3.08完了	
	4.00				

第4孔

年月日	深度	柱状図	番号	記 事	コア 長
	0 m			淡灰～淡緑色 変朽安山岩	m
	1.00				
	1.40	△△△△		1.40附近部分的に角礫化	
53	2.00	V V			
	2.50	V V		1.80附近暗灰～暗緑色 変朽安山岩 (部分的に緑色班晶あり)	
	3.00	△△△			
	3.10	△△△		3.10より 灰～緑色変朽安山岩 (部分的に角礫化)	
	4.00	V V			
	4.61	V V		淡緑色変朽安山岩 (緑色班晶あり)	
12/1	4.61			4.61完了	%
					100

ボーリング柱状図②

Fig. 8 Columnar section of boring core

第5孔

第6孔

縮尺 1: 20

年月日	深度	柱状図	番号	記 事	コア 長 m	年月日	深度	柱状図	番号	記 事	コア 長 m
	0m			淡緑色～淡灰緑色 変朽安山岩			0m			淡灰～淡緑色変朽 安山岩	
53	1.00	V V V V V V V V V V		1.15より 暗灰色～暗緑色 変朽安山岩 (緑色班晶あり)		53	1.00			淡緑色変朽安山岩	
	2.00					12/1	2.00			2.00 完了	% 100
	3.00			3.00より淡緑色～灰色 変朽安山岩			3.00				
12.1	3.68				3.68						
	4.00			3.68m 完了	% 100		4.00				

ボーリング柱状図③

Fig. 9 Columnar section of boring core

2.5 試験機器及びそれらの設置

本試験に使用した主たる試験機器は岩盤加熱用ヒーター、ボアーホール内熱電対固定用測温棒、熱流計及びその他測定器、記録計である。これらの試験機器の製作、設置及び使用に関しては、坑道内試験であるという条件で試験目的に合致するものであり、長期間の使用に耐える信頼性の有るものでなければならないということを考慮した。そこでおののについての設計条件及びそれらの設置について述べる。

2.5.1 ヒーター

岩盤の熱伝導率を測定するためのボアーホール内に埋設し岩盤を加熱するヒーターとして具備すべき条件は、熱解析及び使用条件を考えて下記の条件を満足するものとした。

- 1) なるべく直徑が細いこと。
- 2) 溫度及び出力の調整が可能であること。
- 3) 長期間の高温に耐えられること。
- 4) ヒーターと岩盤との間で良好な熱伝導をすること。
- 5) ヒーター自体の温度が測定されること。

以上の条件のもとに Fig. 10 に示すようなヒーターを設計し製作した。

ヒーター寸法は直徑 47 mm ϕ 、長さ 1,000 mm であり、発熱抵抗としてニクロムを使用し、容量は 200 V 交流電源で 5 kW である。使用可能温度は常用 600°C、最高 700°C であり、ヒーター内部には 1.6 mm ϕ のシーズ熱電対を 2 本埋め込み、そのうち 1 本でヒーター温度が 600°C 以上にならないように制御し、残りの 1 本で温度を測定することにした。又岩盤と発熱部との間の熱伝導を良くするため、ヒーター外面は銅板を巻き、銅板とシーズニクロムの間隙は黒鉛とバインダーからなる伝熱セメントで埋めた。

ヒーターの岩盤内設置は、孔長 3 m の No. 3 ボーリング孔孔底まで長さ 1 m のヒーターを入れた。すなわちヒーター中心位置が坑道壁面から 2.5 m の位置になるように配置した。長さ 3 m のヒーター孔に長さ 1 m のヒーターを入れた残りの 2 m 部に関しては、空気の対流等による熱の逸散を防ぐため奥には石綿を詰め、孔口を水和熱の小さいフェロセメントで密閉した。

2.5.2 測温棒・熱電対及び熱流計

岩盤内半径 1 m、奥行き 4.5 m の領域内の各部温度を測定するため、温度測定孔ボアーホール No. 1, No. 2, No. 4 及び No. 5 に、熱電対を挿入し岩盤の所定位置に密着固定する必要がある。このための測温棒が具備すべき条件は次のとおりである。

- 1) 热電対センサー部が岩盤の所定位置に密着固定すること。
- 2) 溫度の自動記録が可能なこと。
- 3) 測温棒自身の熱伝導率が小さく、熱を逸散させないこと。
- 4) 高温、高湿に対して耐久性があること。

以上の条件を満足するようなものとして Fig. 11 に示す測温棒を設計製作した。直徑は 29.4 mm ϕ で、長さは 4 つの各測温孔にそれぞれ合ったものである。各アロメルークロメル熱電対は、こ

の測温棒がそれぞれの測温孔孔底まで挿入された状態で、各熱電対センサー部が岩盤のそれぞれ所定の位置にくるように取り付けられるようにした。取り付けは外側のピアノ線コイルとシース熱電対を固定し、ピアノ線コイルの伸縮防止はコイル中心に補強線を入れて要所要所銀ろう溶接で固定することにより行うこととした。このピアノ線コイルのスプリングアクションで熱電対センサー部と岩盤を密着させるわけである。

岩盤内部温度測定用熱電対はアロメルークロメルを4本の測温孔内に11本使用した。熱電対センサー部とヒーターとの位置関係は、壁面から2.5mの位置にあるヒーター中心から0.5m, 1.0m, 1.5m及び2.0mの位置に熱電対のセンサー部がくるように配置した。これらの熱電対の番号とヒーター中心からの距離関係をFig. 12及びTable 1に示す。

4本の測温孔の孔口も、空気の対流等によって熱が逸散するのを防ぐ為全てセメントで密閉した。ヒーター孔の左側の2孔No.1とNo.2に関しては、セメントができるだけ孔の奥まで詰め、右側の2孔No.4とNo.5に関してはボア・ホールの開口孔のみセメント詰めの状態とした。セメントの詰め方の違いが、孔内空気の対流等による伝熱に影響し、岩盤内の温度分布に及ぼす影響を見ることとした。

熱流計に関しては、岩盤の壁面から坑道内空气中への熱伝達を測定することを目的として、岩盤壁面に5個、ヒーター孔から2m離れたボア・ホール中の深さ2.5mの孔底に1個のセンサーを取り付けた。センサー取り付けはセメントによる貼りつけであり、貼りつけ位置をFig. 13の熱流計センサー配置図に示す。

2.5.3 その他の測定器、記録計等

電気ヒーターに負荷した積算電力は、岩盤に負荷した熱量計算に用いるので、積算電力計をスライダックとヒーターの間に入れて積算電力を記録した。同時に交流電圧計及び交流電流計により、ヒーターにかかっている電圧及び流れている電流を記録した。その他の使用機器とそれらの概略仕様をTable 2に示す。鉱内に供給されている電源の電圧は200Vなので、100V仕様の機器は、スライダックで電圧を200Vから100Vに電圧をさげて使用した。これらの使用機器の配線図をFig. 14に示す。又機器類は、100%近い鉱内の湿度から守り所定の機能を確保するため、全てビニールハウスに収納し除湿器を連続運転して、湿気による故障を避けた。

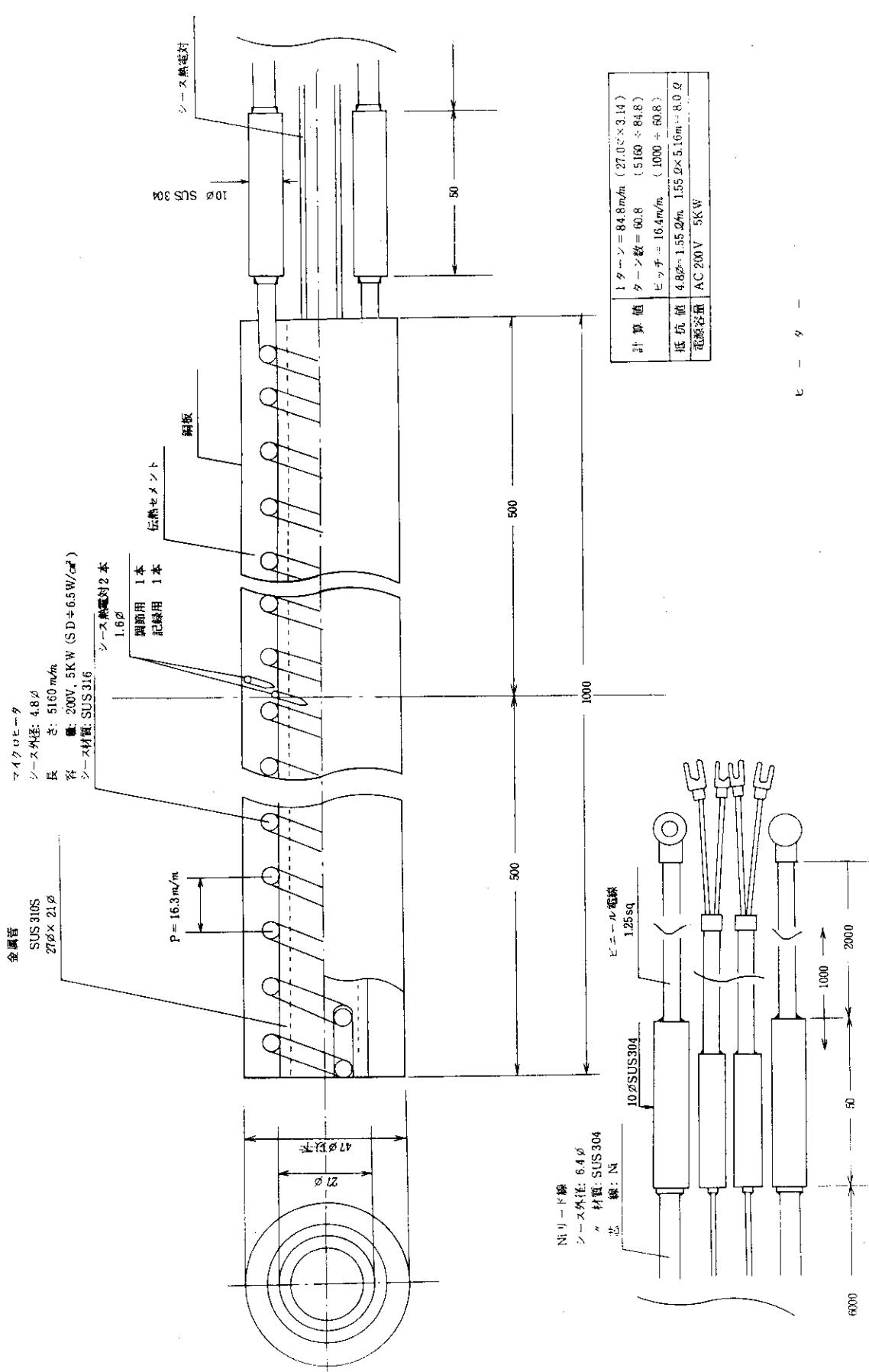


Fig. 10 Heater

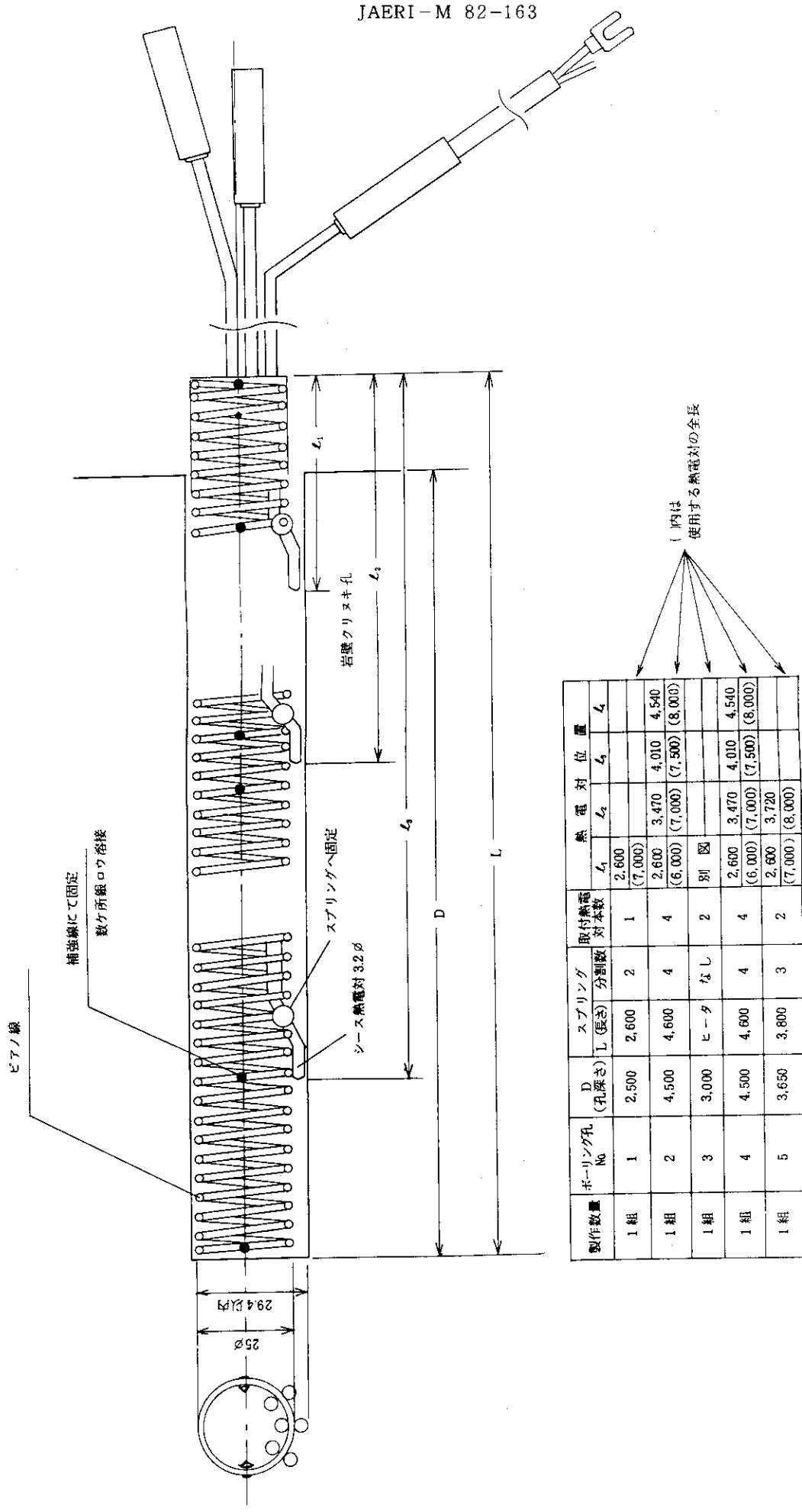


Fig. 11 Borehole temperature measurement device 測温棒

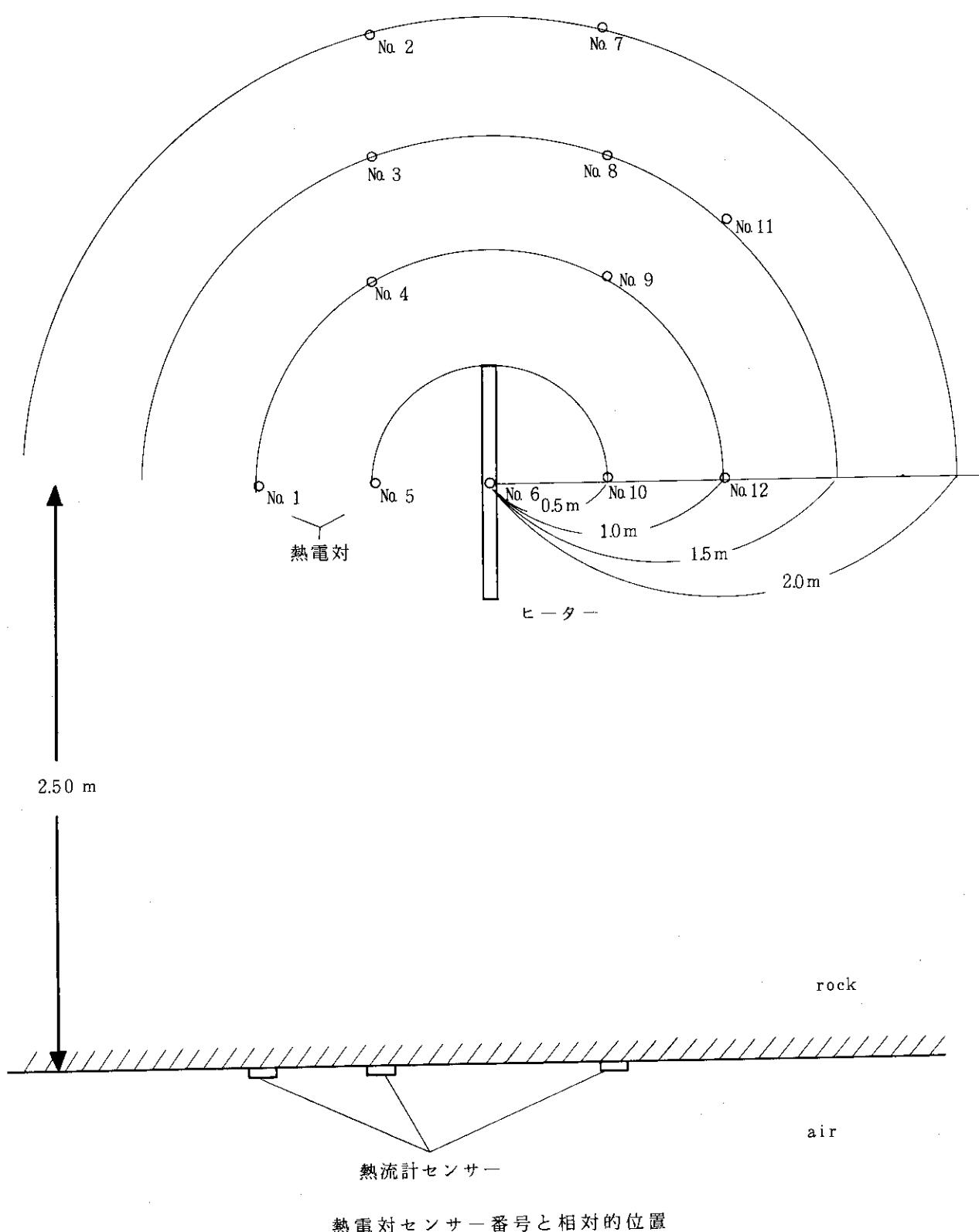


Fig. 12 The relative position of 12 thermocouples around the heater

Table 1 Position of thermocouples in 5 boreholes

温度計センサー配置

ボーリング孔	孔長	No.3よりの距離	センサー位置 (上段は孔口よりの距離 下段はヒーター中心よりの距離)			
1	2.50	1.0	2.50 1.0			
2	4.50	0.5	2.50 0.5	3.37 1.0	3.91 1.5	4.44 2.0
3	3.00	0	2.50 0			
4	4.50	0.5	2.50 0.5	3.37 1.0	3.91 1.5	4.44 2.0
5	3.65	1.0	2.50 1.0	3.62 1.5		

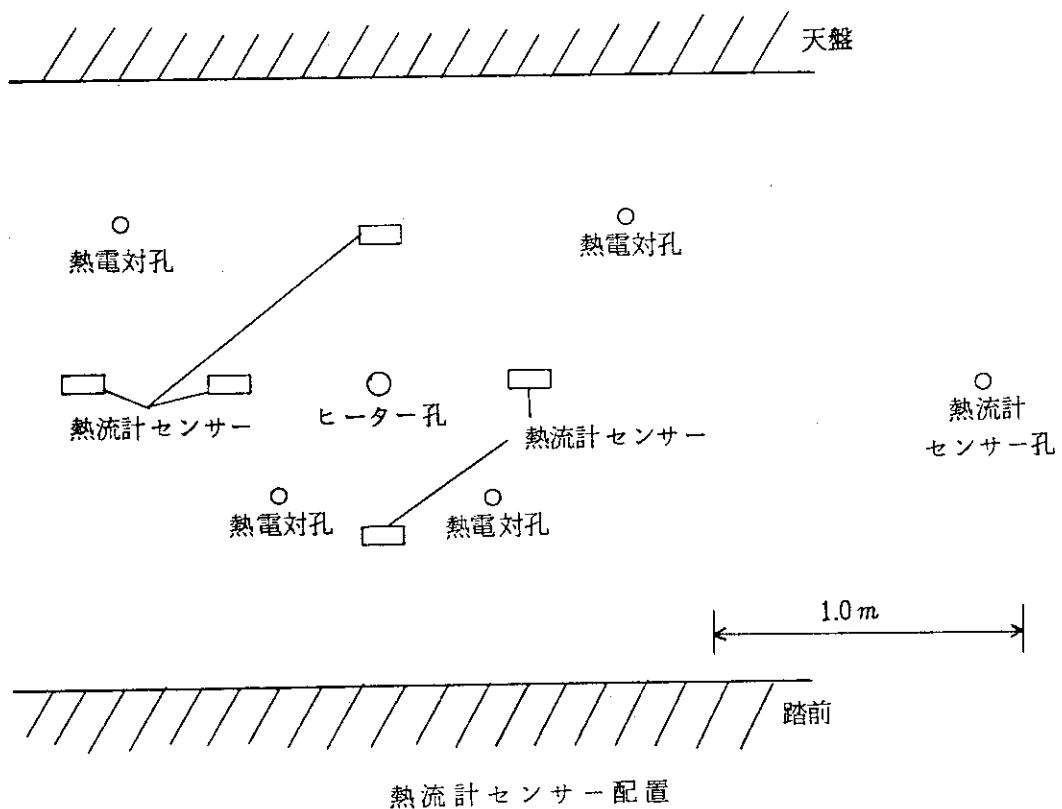


Fig. 13 Position of heatflux sensors

Table 2 Devices and electric specification

使 用 機 器		
No.	機 器 名	概 略 仕 様
1.	スライダック	AC 200 V - 10 kw
2.	積算電力計	200 V - 30 A
3.	交流電圧計	150 V / 300 V
4.	交流電流計	10 A / 50 A
5.	ナイフスイッチ	AC 200 V - 30 A
6.	温度調節器	AC 200 V, 0 ~ 800 °C
7.	電磁開閉器	AC 200 V, 35 A
8.	コンセント	AC 100 V, 5 A
9.	12打点記録計	AC 100 V, 0 ~ 600 °C
10.	12打点記録計	AC 100 V, 0 ~ 10 mV
11.	HFM-MCV (II)	AC 100 V
12.	除 濕 器	AC 100 V, 130 w
13.	圧 力 計	
14.	乾湿球温度計	

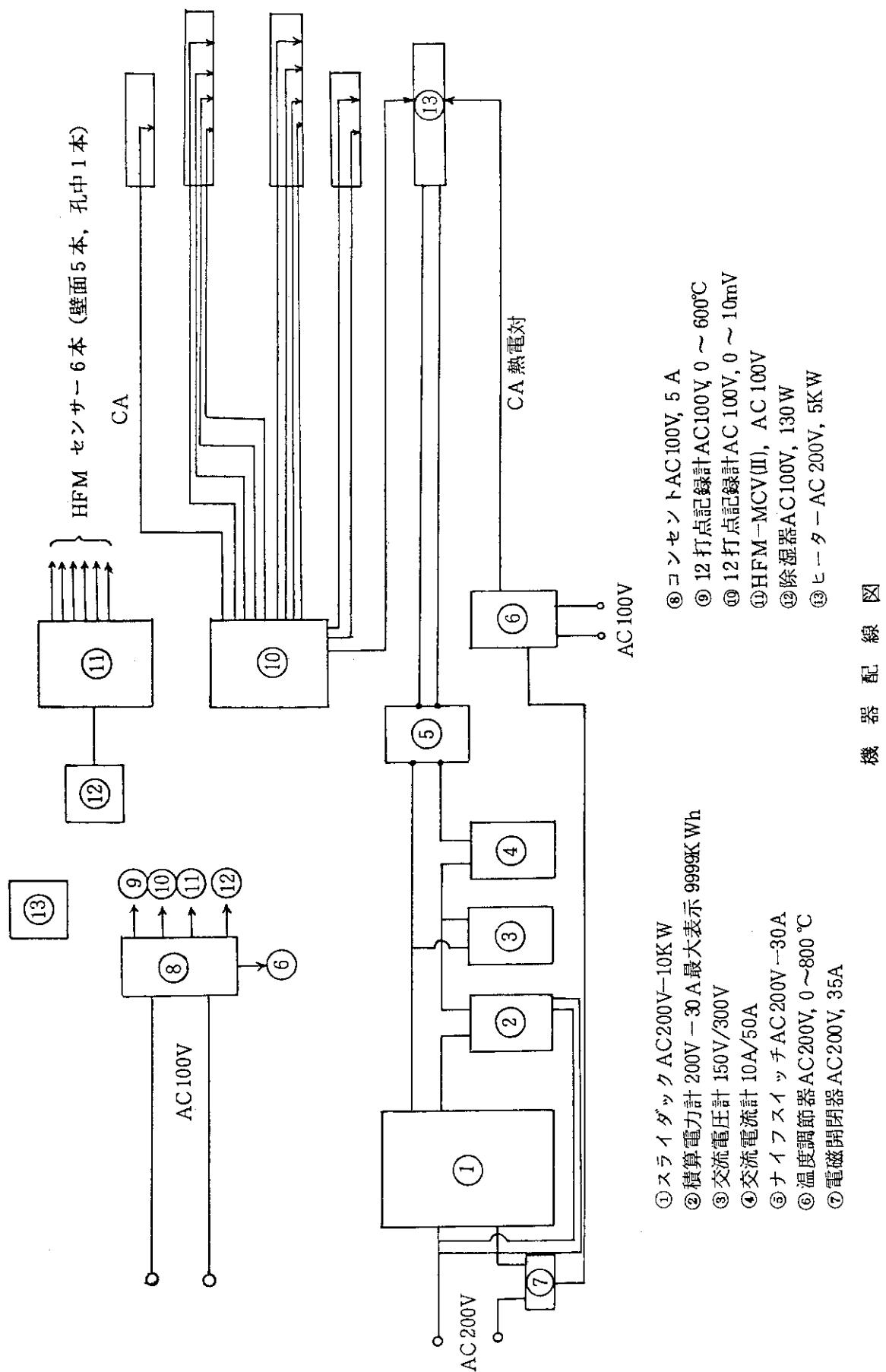


Fig. 14 Wiring diagram of each devices

3. 結果と考察

3.1 試験現場の変朽安山岩コアサンプルの特性試験

試験坑道壁面の変朽安山岩の密度、比熱、熱伝導率等の値を測定すると同時に試験岩盤の均質性を確認るために、測温孔No.1, No.2, No.4, No.5 およびヒーター孔No.3 のボーリングコアを回収し岩石の特性試験を行った。その結果ボーリングコアの回収率はほぼ 100 %で、Fig. 7 ~ 9 に示したようにクラックの存在は観察されなかった。

試験項目を Table 3 に、それらの試験結果を Table 4 ~ 16 及び Fig. 15 に示す。採取コアの平均密度は 2.38 g/cm^3 であり、平均有効間隙率は 12.4 %で約 3.8 重量 %の水分を含んでいる。比熱は $0.21 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ 、熱伝導率は平均 $3.86 \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}^\circ\text{C}$ という値が測定された。示差熱分析の結果から、 500°C から 750°C の間に大きな吸熱ピークが有りこの吸熱とともに重量減が始まる、すなわち 500°C から熱分解が始まることがわかった。岩質は変朽安山岩で、コアーサンプルを詳細に観察すると淡緑色の変朽安山岩にまじって暗緑色の班晶が見られる所があつたり、石英質あるいは方解石の細脈が見られる所があつたりするが、岩盤全体としてはほぼ均質と見なし得るものである。

Table 3 Items of rock tests and standards

試験No.	試験項目名	条件	規格	結果
1	密度測定		J I S, A 5003	Table 4
2	含水率測定		建設省土木試験基準（案）	Table 5
3	有効間隙率測定		建設省土木試験基準（案）	Table 6
4	一軸圧縮強度測定	室温	J I S, M 0302	Table 7
5	静弾性係数測定		建設省土木試験基準（案）	Table 8
6	圧裂引張強度測定	室温	J I S, M 0303	Table 9
7	比熱測定			Table 10
8	熱伝導率測定			Table 11
9	熱膨張率測定			Table 12
10	顕微鏡検鏡			Table 13 14 15
11	化学分析			Table 16
12	示差熱分析			Fig. 15

Table 4 Density of propylite core samples

測定値 試料No.	1	2	3	平均密度 (g / cm ³)	備考
1	2.27	2.31	2.22	2.27	自然状態
2	2.44	2.49	2.43	2.45	自然状態
3	2.44	2.41	2.45	2.43	自然状態

Table 5 Water content of propylite core samples

測定値 試料No.	1	2	3	平均含水率 (%)	備考
1	2.73	4.29	3.77	3.60	
2	4.58	3.49	4.10	4.10	
3	3.24	3.68	4.35	3.80	

Table 6 Effective porosity of propylite core samples

測定値 試料No.	1	2	3	平均有効間隙率 (%)	備考
1	12.16	16.24	15.76	14.72	
2	11.50	8.84	11.30	10.55	
3	11.45	12.70	11.64	11.93	

Table 7 Uniaxial compressive strength of propylite core samples

測定値 試料No.	1	2	3	平均一軸圧縮強度 (kg / cm ²)	備考
1	831	1,186	633	883	
2	1,902	1,313	1,544	1,586	
3	840	930	872	881	

Table 8 Elastic coefficient of propylite core samples

測定値 試料No.	1	2	3	平均静弾性係数 (kg / cm ²)	備考
1	2.990×10^{-5}	3.833×10^{-5}	2.105×10^{-5}	2.976×10^{-5}	
2	3.522	3.650	3.151	3.441	
3	1.826	1.691	1.855	1.791	

Table 9 Tensile strength of propylite core samples

圧裂引張強度測定結果

測定値 試料No.	1	2	3	平均圧裂引張強度 (kg / cm ²)	備考
1	83.3	49.6	62.2	65.0	
2	182	161	95.8	146.3	
3	60.8	54.3	98.0	71.0	

Table 10 Specific heat of propylite core samples

試料 No	1	2	3
測定値 (cal/g °C)	0.216	0.206	0.205

Table 11 Thermal conductivity of propylite core samples

測定値 試料 No	測定値 (kcal/m·h·°C)					換算測定値 (cal/cm·s·°C)	
	1	2	3	4	5		
1							
2	1.337	1.344	1.335	1.341	1.338	1.399	3.886×10^{-3}
3	1.367	1.401	1.389	1.386	1.359	1.380	3.833×10^{-3}

No. 1 は試料不足のため測定不能

Table 12 Thermal expansion coefficient of propylite core samples

熱膨張率測定結果

測定条件				
加熱電気炉：シリコニット 使用熱電対：P, R ホルダー：アルミナ 昇温速度：5 °C / min		チャートスピード：200 m / h ホルダーの熱膨張率：アルミナ (8.0×10^{-6}) 霧 囲 気：Ar 霧 囲 気		
測定温度	試料 No	1	2	3
	試料長さ	20.180	19.288	20.952
100 °C	($\times 10^{-6}$)	8.00	6.13	6.84
200		8.55	8.57	9.31
300		9.77	10.20	10.54
400		10.22	11.38	11.50
500		10.79	12.51	12.46
600		11.84	15.56	14.89
700		13.03	17.11	16.89
800		13.40	14.42	15.69
900		14.48	13.46	15.03
1000		18.97	13.27	15.10

Table 13 Result of microscopic examination
顕微鏡検鏡結果 ①

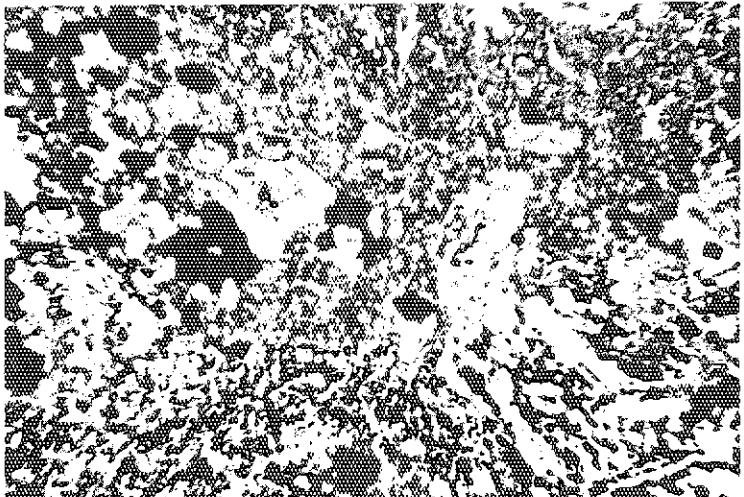
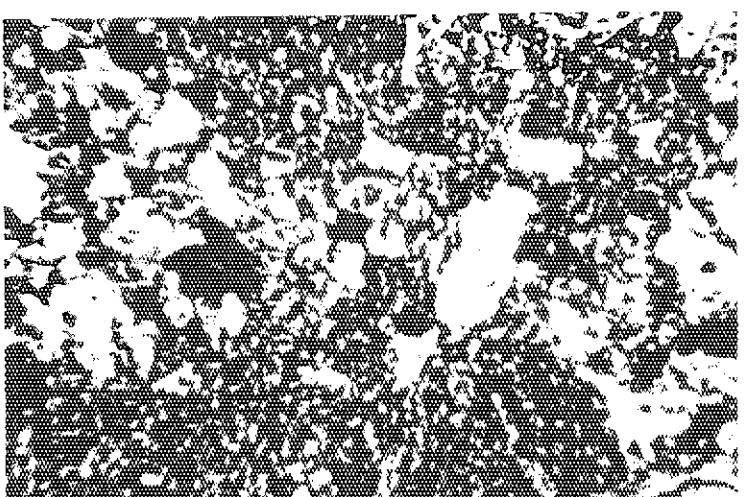
試料 No	1
鏡下の性質	初生の苦鉄質鉱物は斑晶・石基とも全て緑泥石、炭酸塩鉱物等に完全に変質し、長石も斑晶の殆んど全ては強弱はあるものの緑れん石、炭酸塩鉱物、緑泥石等により交代されている。石基は曹長石・緑泥石・炭酸塩鉱物・白チタン石等から成る。
写真 ×33 上:平行ニコル 下:クロスニコル	
	
写真説明	左上隅は方解石・緑泥石・不透明鉱物（黒色鉱物）から成る集合部。中央やや右寄りおよび右下の斑晶は緑泥石化・緑れん石化を受けた長石

Table 14 Result of microscopic examination
顯微鏡検鏡結果 ②

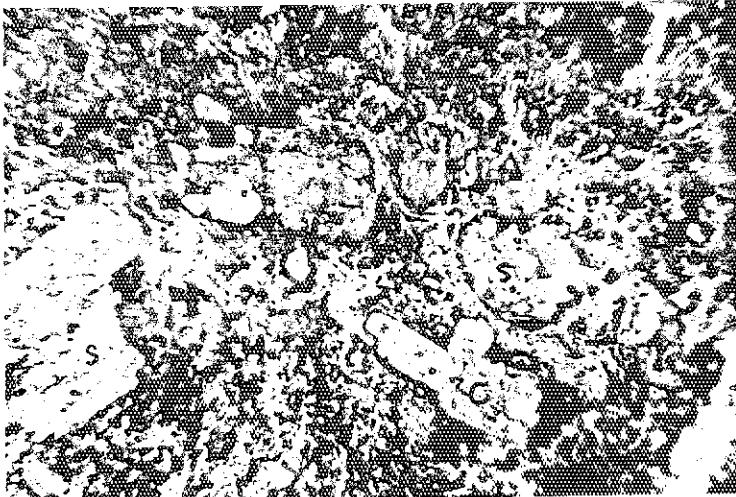
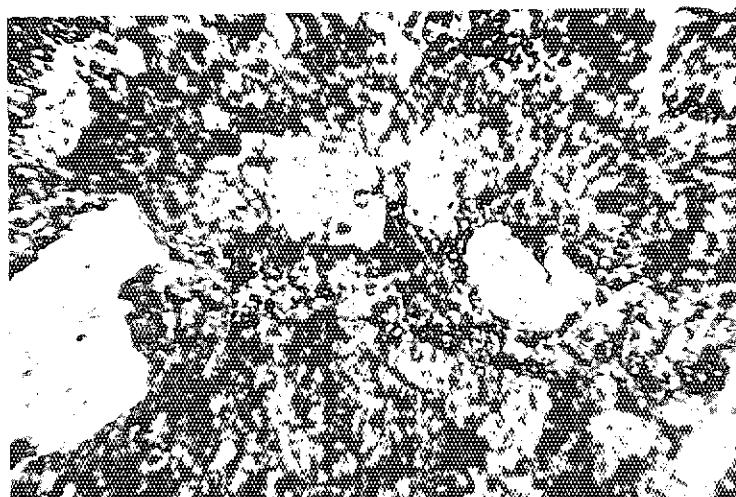
試料 No.	2
鏡下の 性質	斑晶の長石および苦鉄質鉱物は全て完全に変質し、それぞれ絹雲母および 緑泥石・緑泥石+方解石等の集合体に変化している。石基は曹長石・緑泥 石・石英等から成る。少量ではあるが沸石鉱物の集合体も認められる。
写真 ×33 上:平行 ニコル 下:クロス ニコル	
	
写真説明	長石および輝石斑晶の仮像をなす絹雲母(S)および緑泥石(C)。

Table 15 Result of microscopic examination
顯微鏡検鏡結果 ③

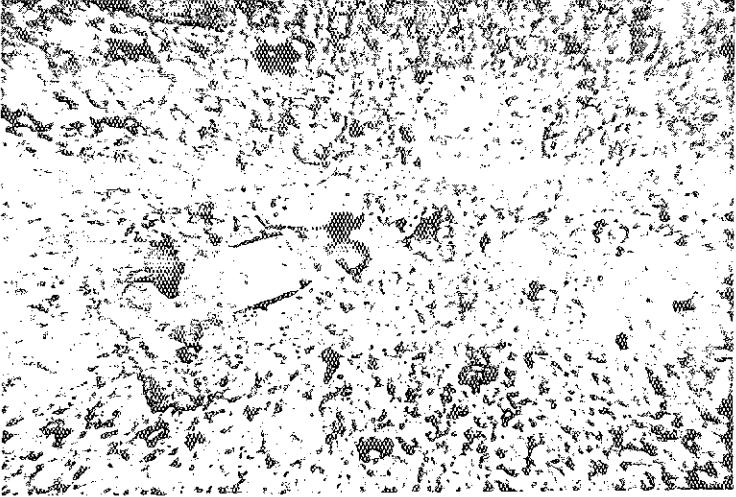
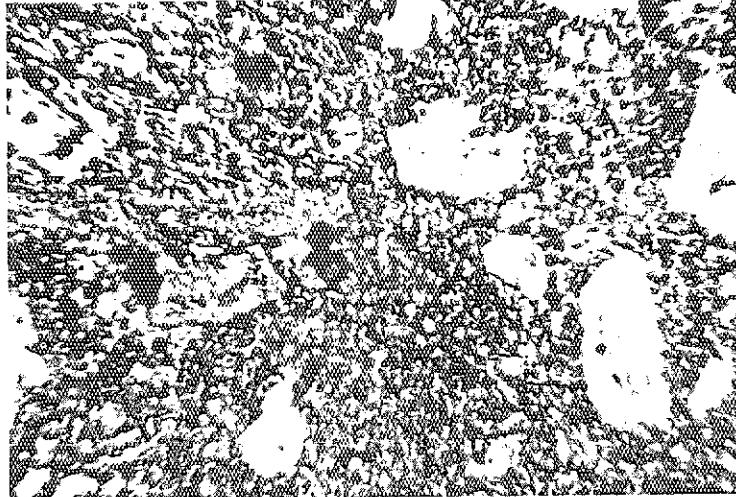
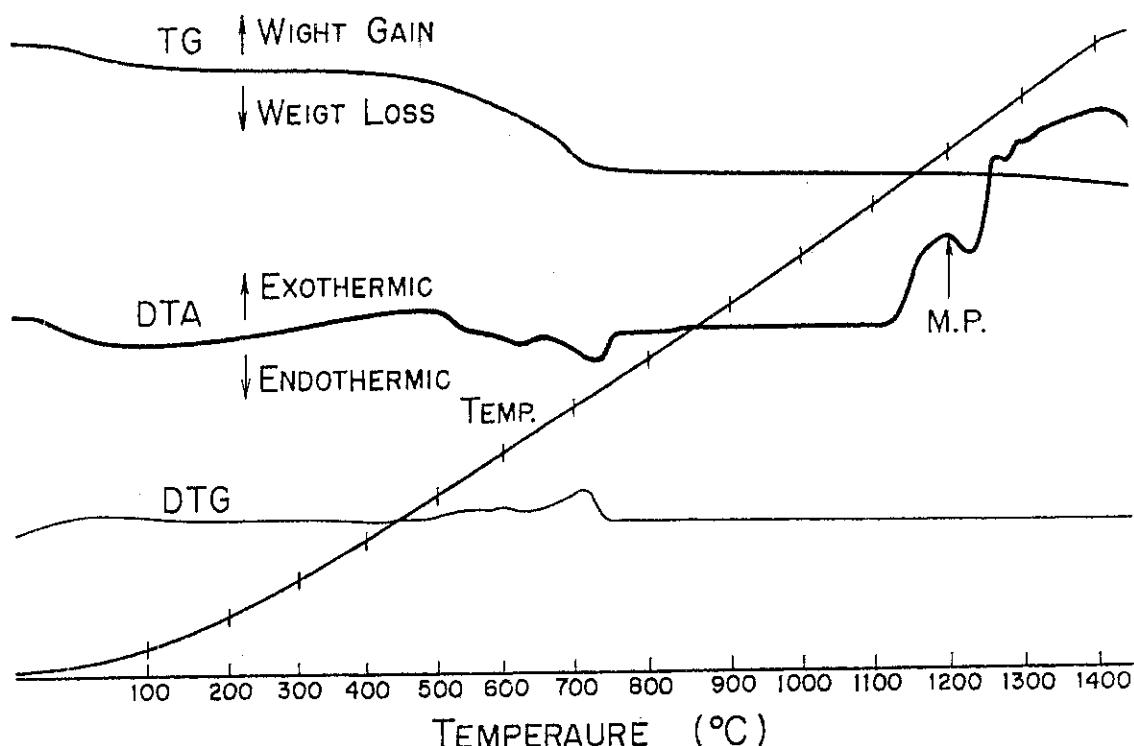
試料 No.	3
鏡下の 性質	<p>Na 2 と同様、斑晶鉱物は完全に絹雲母および緑泥石集合体に変質している。 石基は長石および緑泥石・石英・炭酸塩鉱物等の変質鉱物から成る。</p>
写真 ×33 上:平行 ニコル 下:クロス ニコル	
	
写真 説明	斑状鉱物は長石および輝石斑晶を交代して生じた絹雲母(S)および緑泥石(C)集合体。

Table 16 Chemical composition of test site rocks

分析項目 試料	化 学 成 分 (%)								
	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
粘 土	5.7	53.2	20.7	7.3	29	27	0.2	3.04	272
第 2 孔	8.8	48.0	17.3	10.0	6.2	3.8	0.4	0.12	3.89
第 3 孔	8.7	51.9	16.6	8.1	5.8	3.0	0.0	0.96	3.05
第 5 孔	13.9	42.9	13.6	7.8	11.9	27	0.0	0.95	274
孔 底	4.4	63.8	16.8	5.6	16	27	0.1	3.75	1.70
壁 面	3.8	59.3	17.8	5.1	20	3.2	0.0	25.0	6.40

Sample : Propylite

Sample weight	24.14	mg
TG full scale	10	mg
DTA full scale	±100	μV
Derivative sensitivity	0.5	
Heating rate	20	°C/min
Temperature range	20	mV
Chart speed	5	mm/min

Fig. 15 Differential thermal analysis of propylite ²⁾

3.2 ヒーター出力決定

ヒーター出力決定のために2つの事項を考慮した。すなわちヒーターの設計最高使用温度と岩盤の熱変性温度である。4.7 cm ϕ ヒーターの設計最高温度が表面で約700°Cであり、この温度以上で長時間使用すると内部のニクロム線が断線する危険性がある。もう1つの事項は、熱伝導率を測定しようとしている変形安山岩のヒーター周辺の部分が熱変性を受ける温度である。この温度はコアーサンプルの示差熱分析の結果から、熱分解を始める温度すなわち500°Cとした。したがってヒーター表面温度が500°Cを越さないようにヒーター出力を設定することにした。一方熱伝導率を求めるためには、岩盤の常温からの温度差が大きい方が測定もしやすく解析しやすいということを考慮して、ヒーター表面温度が450°Cから500°Cの範囲に入るようにヒーター出力を設定した。この手順をFig. 16に示す。

ヒーター出力調整及び決定は、Fig. 16に示す熱源出力決定フローシートに示す手順に従って行った。昭和53年12月20日午前11時42分に、坑内200V電源をスライダックで電圧を75Vに落としヒーターに電流を8.5 A流し、すなわち出力をまず638 Wに設定し通電を開始した。通電開始後ヒーター表面の長さ方向の中心部温度はただちに上昇し11時45分には100°C、46分には115°C、47分には128°C、12時58分に最高温度278°Cを記録しほぼ温度上昇が止まった。その後午後13時37分に272°Cを記録し温度変化が落ち着いて来た。この6°Cの温度降下は、鉱業所の昼休みが12時に終り、始業開始とともに大型機械の電源を入れたため一時的に電圧が下降したため生じたものである。午後14時02分に、スライダックにより電圧を84V、電流を9.6Aに、即ち出力を806 Wに上昇した。約4時間ヒーター温度上昇を観察した結果、806 Wの出力ではヒーター温度は約370°C位にしか上がらなかった。そこで出力をさらに909 Wに上げた。909 Wの出力で17時間加熱続けると、ヒーター温度はほぼ420°C一定となり所定の温度範囲450°C～500°Cに近づいて來た。この後、最後の微調整として12月21日午前11時14分に、電圧を93V、電流を10.3 Aにすなわち出力を958 Wに上げた。638 W、806 W及び909 Wに出力を上昇し、その後のヒーター温度上昇を観察した結果、大体2、3時間で温度上昇が着つくことがわかったので、この958 W出力で数時間、ヒーター温度上昇を観察した。ヒーター出力上昇分と温度上昇との関係を考慮し、最終温度を推定すると、約450°C位に落ち着き所定の温度範囲に入ると思われたので、この出力958 Wをもって、ヒーターの所要出力と決定した。

上記出力調整期間約32時間の、ヒーター出力とヒーター温度との関係をFig. 17に示す。ヒーター部温度が若干波打つて変動しているが、これは電源電圧が約2V位変動し、ヒーター出力が変化している為である。ヒーター出力を約960 Wで設定後、ヒーターには昭和54年3月3日まで計73.25日間通電を続行した。この間2回にわたる計2時間5分の停電が有ったが、岩盤温度分布に対する影響は無かった。この間のヒーターに通電した電圧、電流及び電力の記録をTable 17に示す。

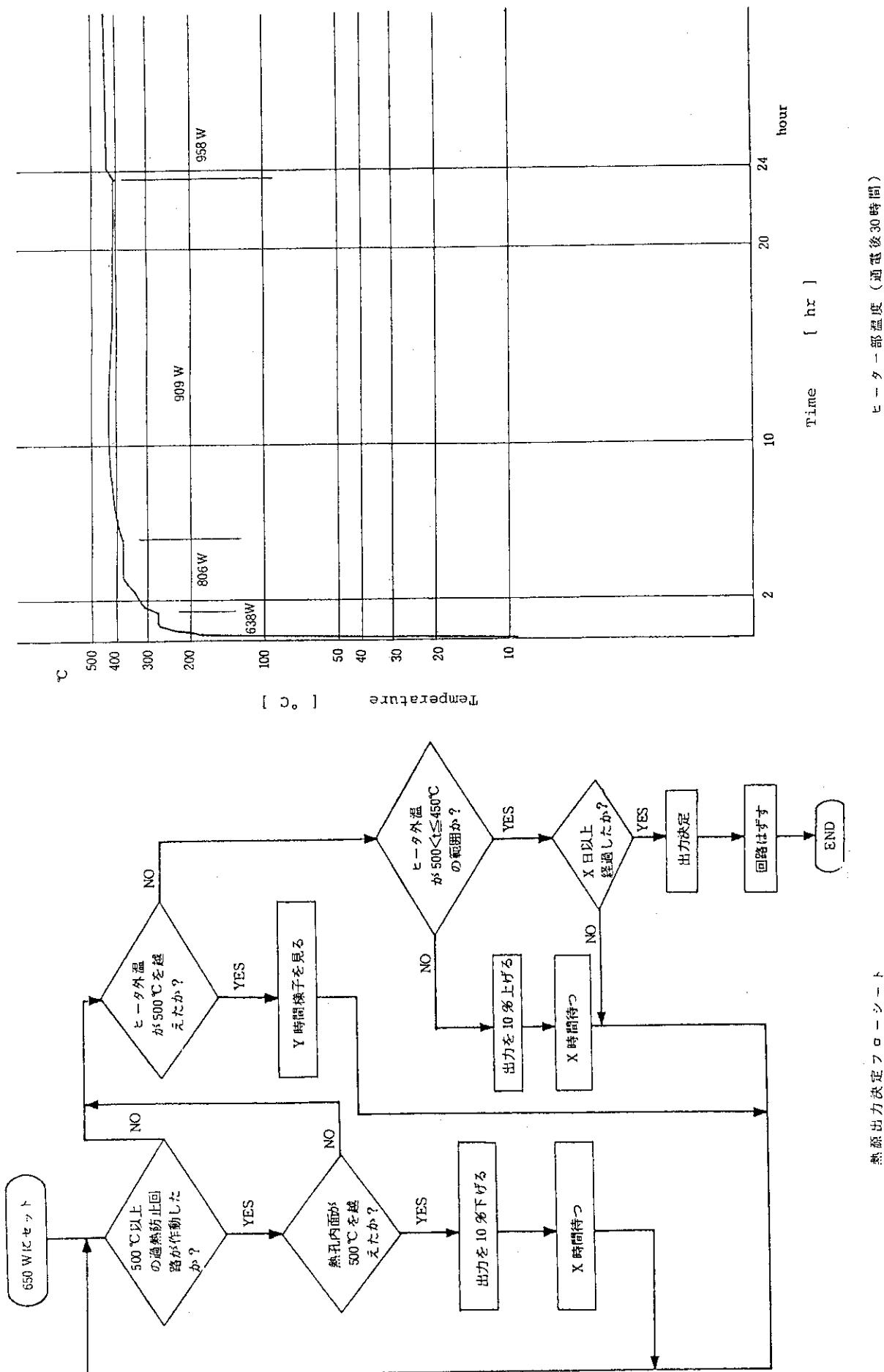


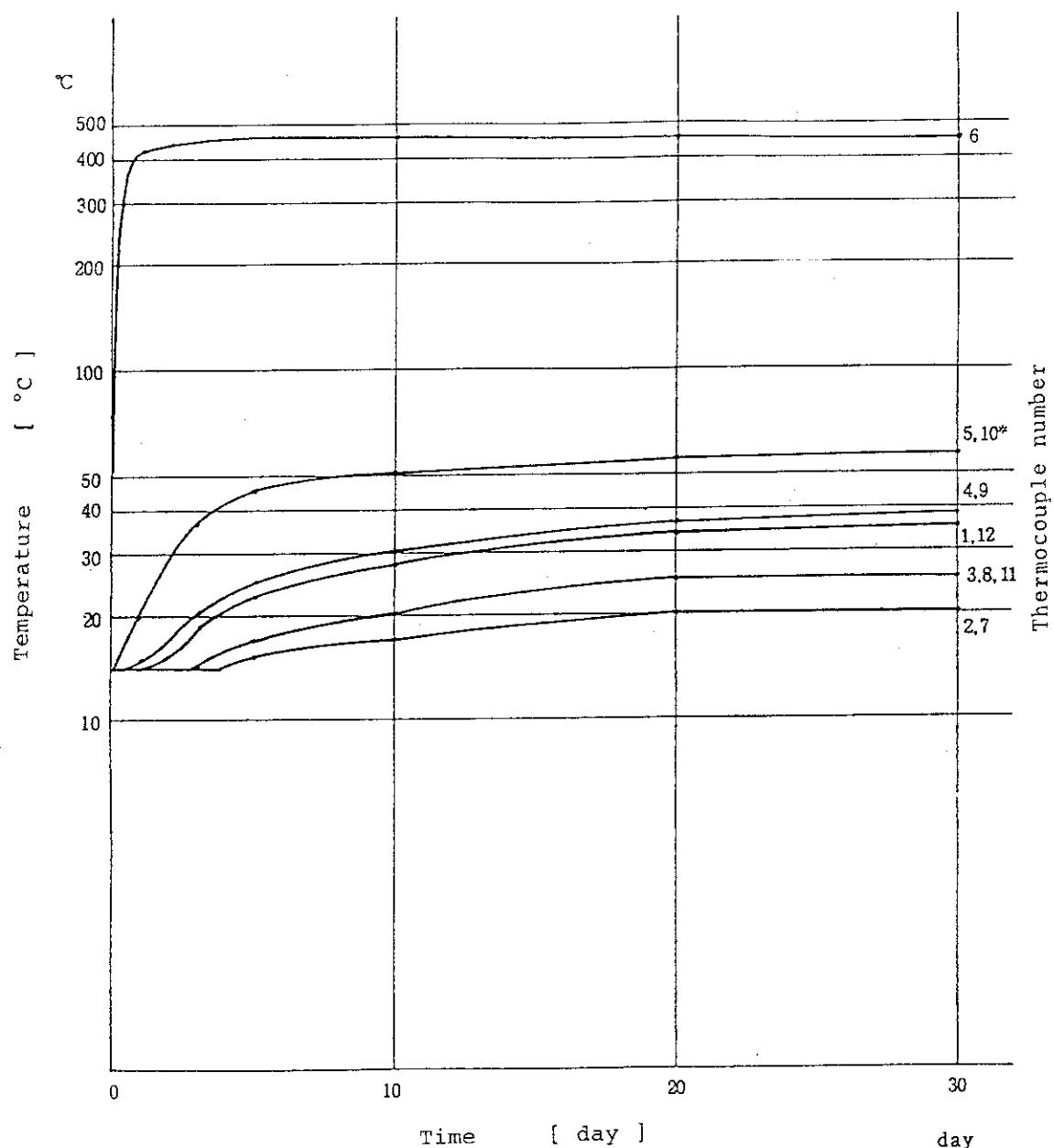
Table 17 Output record of the heater

ヒータ一出力記録									
日付	時間	電圧 V	電流 A	電力 W	日付	時間	電圧 V	電流 A	電力 W
12/20	11:42	75	8.5	638	12/26	13:10	91	10.0	
"	13:50	75	8.6	629	12/29	13:20	93	10.2	
"	14:02	84	9.6	806	1/4	9:30	95	10.4	
"	15:10	85	9.5		1/10	14:30	95	10.3	
"	15:50	85	9.5		1/13	13:10	93	10.2	
"	17:50	85	9.5		1/16	14:00	95	10.5	
"	17:50	90	10.1	909	1/22	13:20	94	10.5	
"	19:30	91	10.1		1/23	9:30	92	10.2	910~998
"	20:00	91	10.1		1/27	16:20	93	10.3	
"	22:00	92	10.1		1/30	11:30	94	10.4	
12/21	0:00	91	10.1		2/2	10:00	92	10.2	
"	2:00	91	10.1		2/6	17:10	95	10.5	
"	4:00	92	10.1		2/9	13:10	95	10.5	
"	6:00	92	10.1		2/13	13:10	92	10.2	
"	8:00	91	10.1		2/16	13:15	94	10.4	
"	10:00	90	10.0		2/19	13:20	95	10.5	
"	11:15	93	10.3	958	2/22	13:30	93	10.3	
"	12:00	93	10.3		2/25	15:55	95	10.5	
"	14:00	94	10.4		2/28	16:55	95	10.5	
12/23	13:10	94	10.2		3/3	14:30	0	0	0

3.3 ヒーター温度と岩盤温度測定結果

ヒーター温度及び岩盤内11ヶ所、ヒーターからの距離0.5～2.0m範囲の温度を自動記録した。温度変化の急激な間は1時間ごとに、かなり定常状態になったと思われる期間になってからは24時間おきに温度を読み取った。ヒーター出力調整期間約32時間のヒーター中心部温度をFig. 17に示す。スライダックで電圧調整後のヒーター温度の小さな変動は鉱内電源電圧が常時約2V位上下変動をしているためであり、ヒーター出力650W時及び900W時の温度降下は鉱内作業開始に伴って大型機械始動のため電圧が一時的にさがったためである。

その後30日間のヒーターおよび周囲岩盤の温度上昇の様子をFig. 18に示す。この図から見ると20日から30日間の一定通電で、温度は定常状態に達しているとみなすことができる。61日後の温度分布をヒーター中心からの距離ごとにみていくとFig. 19のようになる。この図から熱の伝達はヒーター中心から同心円状に拡がって行っていることがわかる。1日、33日及び61日経過後の距離ごとの温度をTable 18及びFig. 20に示す。



通電後30日間の温度変化

* 数字は熱電対のナンバー

Fig. 18 Temperature rise of each thermocouples

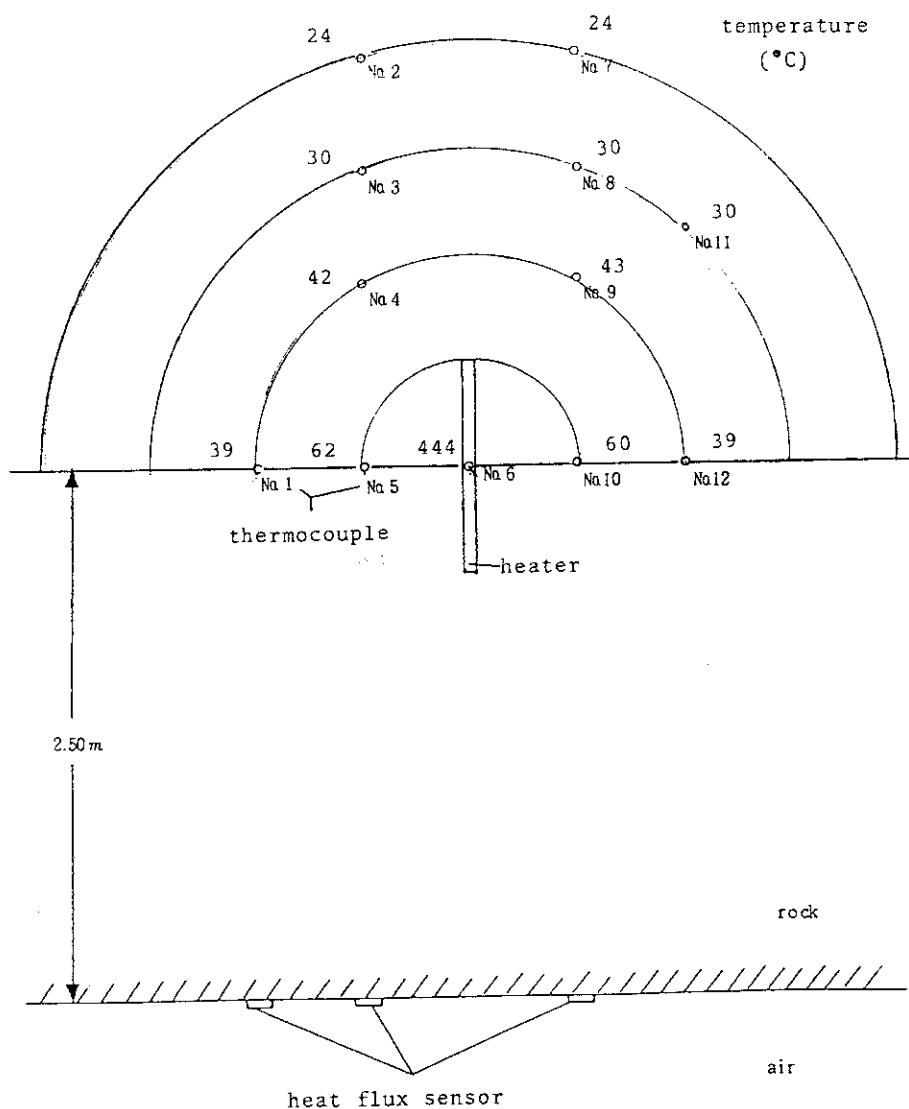


Fig. 19 Temperature distribution around the heater after
61 days of heating

Table 18 Temperature rise at the position of each distance
in a rock mass

Distance from the heater (m)	Thermocouple number	Temperature (°C)		
		after 1 day	after 33 days	after 61 days
0.0	6	424	438	444
	5	22	57	62
	10	20	57	60
0.5	1	15	36	39
	4	15	39	42
	9	14	39	43
1.0	12	15	36	39
	3	14	27	30
	8	14	27	30
1.5	11	15	27	30
	2	14	21	24
	7	14	22	24
2.0	1	15	30	33
	61	15	36	40
	0	15	30	33

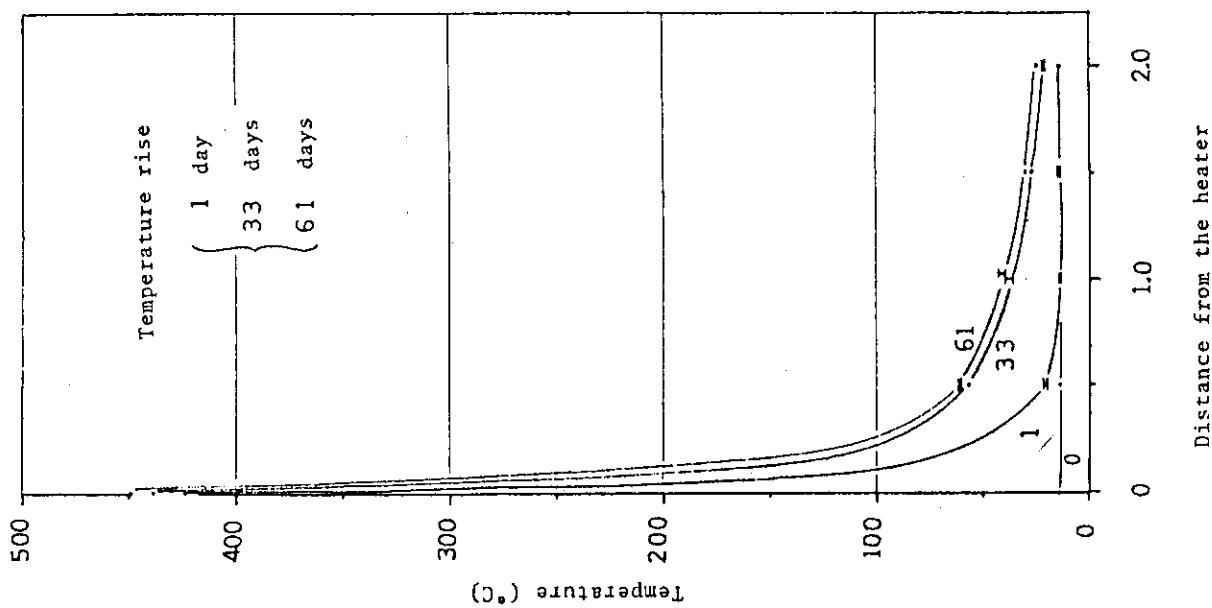


Fig. 20
Distance from the heater

Temperature rise as a function of distance from
the center of the heater at various times

3.4 热伝導率計算

熱源周辺の熱伝導による温度変化を計算する方法は、基本的に熱の伝達を時間変化と空間の函数として扱う非定常法と、単位面積、単位時間あたりに流れる熱流が一定だとする定常法に分けられる。岩盤の熱伝導率の値は直接測定できるものではなく、岩盤の温度分布から計算される数値であるので、この求め方にも定常計算あるいは非定常計算が使用される。ところで非定常計算によって熱伝導率の値を求めるためには、比熱の値が既知でなければならない。これに対し定常計算では比熱の値が不要である。そこで本報告では、岩盤の熱伝導率は定常計算によって求めた。すなわち有限長直線熱源に対する定常時の温度分布計算を熱伝導率をパラメータとして変化させて行い、岩盤での実測温度分布と最も良く合致する温度分布が得られる熱伝導率をもって岩盤の熱伝導率の値とした。計算には三つの仮定すなわち(1)熱伝導媒体は一様かつ無限大とする。(2)熱伝導率、比熱、密度は温度によらず一定とする。(3)発熱体は一定出力であるような点熱源とする。という仮定をもうけ、Fig. 21 に示すような r , z 2 次元の空間で考えた。

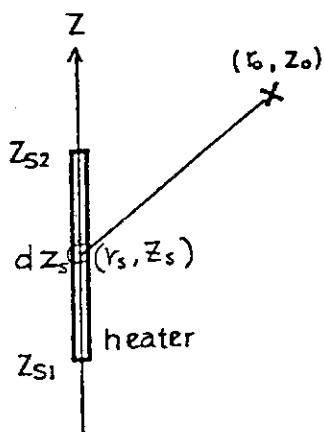


Fig. 21 Steady-state calculation model

熱源は r_s の位置に有る Z_{s1} から Z_{s2} までの有限長直線であるとし、これによる (r_o, Z_o) 点の温度上昇 ΔT を考えることにした。熱源上の 1 点を Z_s とし、 Z_s のまわりの長さ dZ_s の部分の発熱による (r_o, Z_o) 点の温度上昇を dT とすると、点熱源に対する温度分布の一般式を用いて

$$dT = \frac{Q}{4\pi\lambda} \cdot \frac{dZ_s}{\sqrt{r_o^2 + (Z_s - Z_o)^2}} \quad (1)$$

となる。式(1)を $Z_s = Z_{s1}$ から Z_{s2} まで積分すると結果は式(2)のようになり、点 (r_o, Z_o) における温度上昇 ΔT が求まる。

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \cdot \ell \ln B \quad (2)$$

ここに B は

$Z_{s1} \leq Z_o$ のときは

$$B = \frac{|Z_{s2} - Z_o| + \sqrt{r_o^2 + (Z_{s2} - Z_o)^2}}{|Z_{s1} - Z_o| + \sqrt{r_o^2 + (Z_{s1} - Z_o)^2}}$$

$Z_{s2} \leq Z_o$ のときは

$$B = \frac{|Z_{s1} - Z_o| + \sqrt{r_o^2 + (Z_{s1} - Z_o)^2}}{|Z_{s2} - Z_o| + \sqrt{r_o^2 + (Z_{s2} - Z_o)^2}}$$

$Z_{s2} > Z_o > Z_s$ のときは

$$B = \frac{\{ |Z_{s1} - Z_o| + \sqrt{r_o^2 + (Z_{s1} - Z_o)^2} \} \{ |Z_{s2} - Z_o| + \sqrt{r_o^2 + (Z_{s2} - Z_o)^2} \}}{r_o^2}$$

である。Q は線出力 (W/m), λ は熱伝導率 (W/m·°C) である。

本実験のように比較的短期間のヒーター加熱では、温度測定範囲の岩盤が 100% 定常状態に到達しているとはいえないで、岩盤内の実測温度分布と定常計算による温度分布とを比較するにあたっては、一つの基準点を選定してこの基準点からの温度差を比較した。(2)式から熱伝導率は

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{\ell n B}{\Delta T}$$

とあらわせるので、実測温度と計算温度との比較を $\frac{\ell n B}{\Delta T}$ の形で行ない、最小自乗法により最適

の熱伝導率を決めることにした。すなわち測定点 n における実測温度を $T_e(n)$ 、基準点の実測温度を T_{be} とし、n 点における計算温度を T_{bc} とすれば

$$D_{ev.} = \sum_{n=1}^{(測定数)} \left\{ \left[\frac{1}{T_e(n) - T_{be}} - \frac{1}{T_{bc}(n) - T_{be}} \right] \omega(n) \right\}^2 \quad (3)$$

$$\omega(n) = \ell n B$$

となる。この(3)式が極小値をとるときの熱伝導率を岩盤の熱伝導率とした。

計算にはヒーターの出力として、ヒーターに流した平均電流と抵抗から求めた 880W を使用し、基準点として Fig. 5 及び Fig. 12 に示す熱電対 No. 2 を選んだ。この計算結果を Table 19 に示す。これからわかるように $\lambda = 2.1 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ で計算した各測定点における温度上昇 ΔT_c が実測温度上昇 ΔT_e に最もよく合致し、偏差も極小値を取る。

すなわち、麥朽安山岩の試験岩盤の熱伝導率は 2.1 W/m·°C の値とされた。コアーサンプルの値 1.5 W/m·°C ~ 1.6 W/m·°C という値を比較すると約 30% ~ 40% ほど大きな値を示している。この原因としては計算上の仮定と実際の岩盤との違いである岩盤の不均質性すなわち岩盤内の鉱物組成の違い、微小クラックの存在、及び岩盤内に閉じ込められている空気あるいは水分による影響が考えられる。又岩盤表面からの放熱、岩盤内流動水による熱の輸送も無視できないと思われる。その外熱伝導率の温度依存性が考慮されていないという事もある。

Table 19 Temperature distribution at various distances
calculated for various conductivities from
 $1.6 \text{W/m}^{\circ}\text{C}$ to $2.5 \text{W/m}^{\circ}\text{C}$

λ	セイサ-№	1	(基準)	Dev.								
				2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T _e	25.0	10.0	16.0	28.0	48.0	43.0	10.0	16.0	29.0	46.0	16.0
	ΔT_e	15.0	6.0	18.0	38.0	—	0.0	6.0	19.0	36.0	6.0	15.0
1.6	T _c	4.21	22.3	30.2	45.9	77.2	—	22.3	30.2	45.9	77.2	29.5
	ΔT_c	19.9	7.9	23.6	58.9	—	0.0	7.9	23.6	54.9	7.2	19.9
1.7	"	4.00	21.0	28.4	43.2	72.6	—	21.0	28.4	43.2	72.6	27.7
	"	1.97	7.5	22.2	51.7	—	0.0	7.5	22.2	51.7	6.8	18.7
1.8	"	3.74	19.8	26.8	40.8	68.6	—	19.8	26.8	40.8	68.6	26.2
	"	1.76	7.0	21.0	48.8	—	0.0	7.0	21.0	48.8	6.4	17.6
1.9	"	3.55	18.8	25.4	38.6	65.0	—	18.8	25.4	38.6	65.0	24.8
	"	1.67	6.7	19.9	46.2	—	0.0	6.7	19.9	46.2	6.1	16.7
2.0	"	3.37	17.8	24.2	36.7	61.7	—	17.8	24.2	36.7	61.7	23.6
	"	1.59	6.3	18.9	43.9	—	0.0	6.3	18.9	43.9	5.8	15.9
2.1	"	3.21	17.0	23.0	34.9	58.8	—	17.0	23.0	34.9	58.8	22.5
	"	1.51	6.0	18.0	41.8	—	0.0	6.0	18.0	41.8	5.5	15.1
2.2	"	3.06	16.2	22.0	33.4	56.1	—	16.2	22.0	33.4	56.1	21.4
	"	1.44	5.8	17.2	39.9	—	0.0	5.8	17.2	39.9	5.2	14.4
2.3	"	2.93	15.5	21.0	31.9	53.7	—	15.5	21.0	31.9	53.7	20.5
	"	1.38	5.5	16.4	38.2	—	0.0	5.5	16.4	38.2	5.0	13.8
2.4	"	2.81	14.8	20.1	30.6	51.4	—	14.8	20.1	30.6	51.4	19.7
	"	1.32	5.3	15.7	36.6	—	0.0	5.3	17.7	36.6	4.8	13.2
2.5	"	2.70	14.3	19.3	29.3	49.4	—	14.3	19.3	29.3	49.4	18.9
	"	1.27	5.1	15.1	35.1	—	0.0	5.1	15.1	35.1	4.6	12.7

3.5 比熱計算

岩盤の比熱は、定常計算から求めた熱伝導率の値及びコアーサンプルの密度の測定値を使用し非定常計算から求めた。非定常計算については、線熱源を適當な数の等長な小線熱源に分割し、各小線熱源の中心点にその小線熱源の熱出力をすべて集めた点熱源であると考えて計算した。岩盤に熱出力が加わっている間の時刻 t における温度上昇 ΔT は近似的に次式で与えられる。⁽⁴⁾

$$\Delta T = \frac{b}{4 \pi a} \sum_{n=1}^{n_{\text{div}}} \frac{1}{r_n} E R X \left(2, \frac{r_n}{2\sqrt{at}} \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}, \quad b = \frac{Q}{\rho C_p}$$

ここで

- λ : 热伝導率 ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)
- Q : 热出力 (W)
- ρ : 密度 (kg/m^3)
- C_p : 比熱 ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
- t : 時刻 (day)
- n_{div} : 分割数
- r_n : n 番目の点熱源からの距離(m)

$$E R X \left(2, \frac{r}{2\sqrt{at}} \right) = \frac{r}{2\sqrt{\pi a}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4a(t-\tau)}}}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} d\tau$$

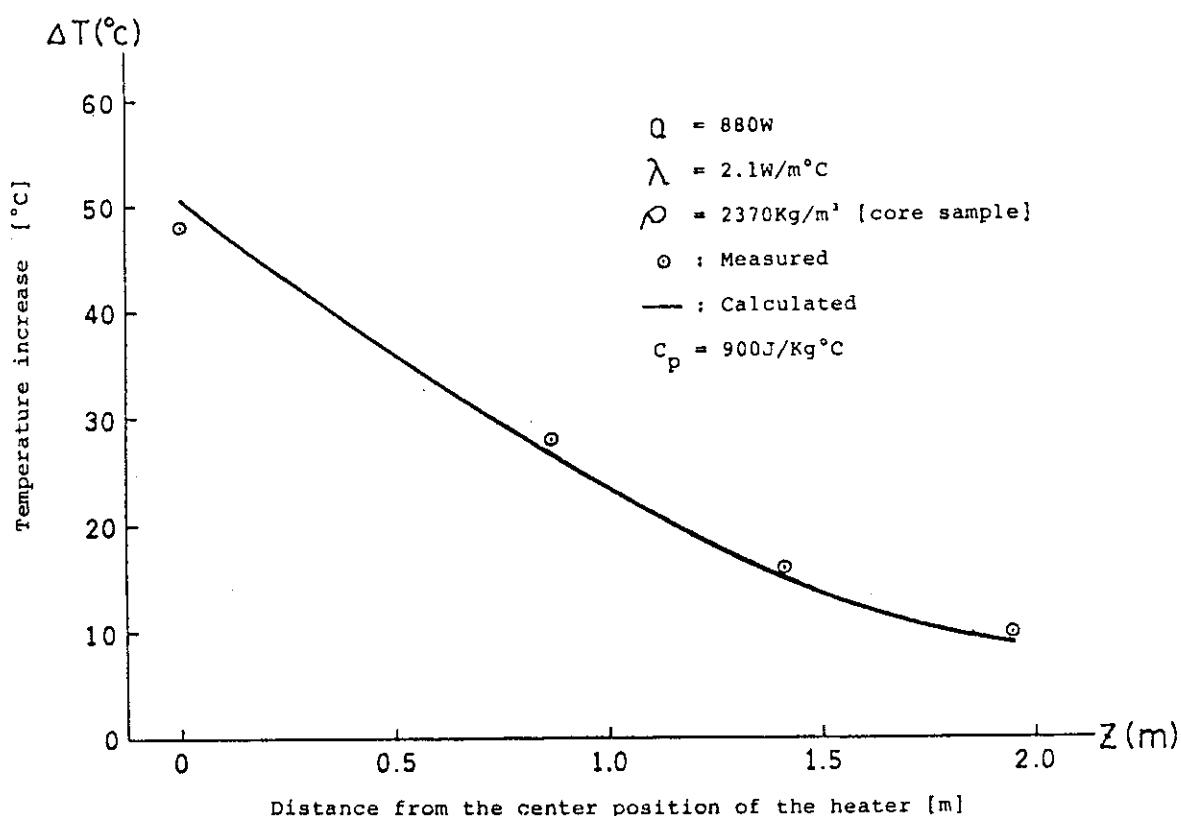
である。

計算には熱出力として、ヒーターに流れた電流とヒーターの抵抗値から求めた値 880 W を用い、密度はコアーサンプルの値 $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$ を用いた。又熱伝導率は定常計算で求めた $2.1 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ を使用した。ここで比熱の値をパラメータとして $620 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ から $900 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ まで変化させて温度を計算し、実測温度と最も良く合致する値をもって試験岩盤の比熱の値とした。

比熱を $900 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ としたときの各熱電対センサー位置の計算温度と実際の測定温度を Table 20 及び Fig. 22 に示す。これらからわかるように比熱の値を $900 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ としたとき計算値と実測値が良く合致する。したがって岩盤の比熱は $900 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ であるとした。これはコアーサンプルの値 $875 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ とはほぼ同じ値である。

Table 20 Calculated and measured temperature at various distances from the heater at various times

Distance from the heater (m)	Thermocouple number	Calculated temperature (°C)				Measured temperature (°C)		
		1 day	33 days	61 days	INF	1 day	33 days	61 days
0.1	6					424	438	444
0.5	5	25.3	61.7	64.6	72.8	22	57	62
	10	25.3	61.7	64.6	72.8	20	57	60
1.0	1	14.4	35.3	38.0	46.1	15	36	39
	4	15.5	38.1	40.9	48.9	15	39	42
	9	15.5	38.1	40.9	48.9	14	39	43
	12	14.4	35.3	38.0	46.1	15	36	39
1.5	3	14.0	26.7	29.2	37.2	14	27	30
	8	14.0	26.7	29.2	37.2	14	27	30
	11	14.0	26.2	28.8	36.7	15	27	30
2.0	2	14.0	21.0	23.3	31.0	14	21	24
	7	14.0	21.0	23.3	31.0	14	22	24

Fig. 22 Calculated for conductivity of $2.1\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ and measured temperature at various distances

3.6 定常状態到達期間

岩盤の熱伝導率を定常計算から求めたわけであるが、この前提として、岩盤の温度分布がほぼ定常と見なし得るという事が成立していなければならない。

このために何日間位ヒーターに一定通電をすれば岩盤の試験範囲が定常と見なし得るかを検討した。Table 21 の岩盤内各熱電対位置の計算温度で、ヒーター通電時間を無限時間にしたときが定常状態であるが、61日間の通電ではどの点をとっても温度そのものは定常時の温度になっていないことがわかる。したがって温度分布の形状を、一定時間通電と無限時間通電で比較してみることにした。このため仮りに基準点を熱源から 0.5 m にとって任意の点における温度と基準点での温度との差、すなわち $\Delta T(r, t) = T(0.5, t) - T(r, t)$ の距離との時間差による変化を調べた。この結果をさらに $f_{\Delta t}(r, t) = \Delta T(r, t) / \Delta T(r, \infty)$ の比をとり整理すると Table 22 のようになる。この Table の熱電対は No. 2 及び No. 7 の位置すなわち熱源からの距離 2.0 m の位置以内の領域では、基準点との温度差と定常状態との比が、20 日もたてば 0.950 以上であり、定常状態に比べて 5.0 % 以内の誤差になってしまふ。61 日経過後ではこの比は 0.988 以上であり 1.2 % 以内の誤差になってしまふ。したがって絶対的な温度上昇ではなく、基準点との温度差だけを考慮して熱伝導率を計算する限りでは、61 日ほど経過すればほぼ定常と見なし得るといえる。

Table 21 Variation of temperature $\Delta T(r, t)$ as a function of distance and time

熱電対 No.及び距離(m)	経過日数 (t)日	1	5	10	20	30	50	61	∞
5, 10	0.5								
4, 9	1.0	8.8	20.7	22.5	23.4	23.6	23.8	23.7	23.9
1, 12	1.0	0.9	23.4	25.4	26.2	26.4	26.6	26.6	26.7
3, 8	1.5	10.3	28.7	32.6	34.5	35.0	35.3	35.4	35.6
11	1.5	10.3	29.0	33.0	34.9	35.4	35.8	35.8	36.1
2, 7	2.0	10.3	31.1	36.7	39.7	40.6	41.2	41.3	41.8

Table 22 Ratio of $T(r, t) / T(r, \infty)$

熱電対 No.及び距離(m)	経過日数 (t)日	1	5	10	20	30	50	61
4, 9	1.0	0.368	0.866	0.941	0.979	0.987	0.996	0.992
1, 12	1.0	0.034	0.876	0.951	0.981	0.989	0.996	0.996
3, 8	1.5	0.289	0.806	0.916	0.969	0.983	0.992	0.994
11	1.5	0.285	0.803	0.914	0.967	0.981	0.992	0.992
2, 7	2.0	0.246	0.744	0.878	0.950	0.971	0.986	0.998

3.7 热伝導率測定の問題点

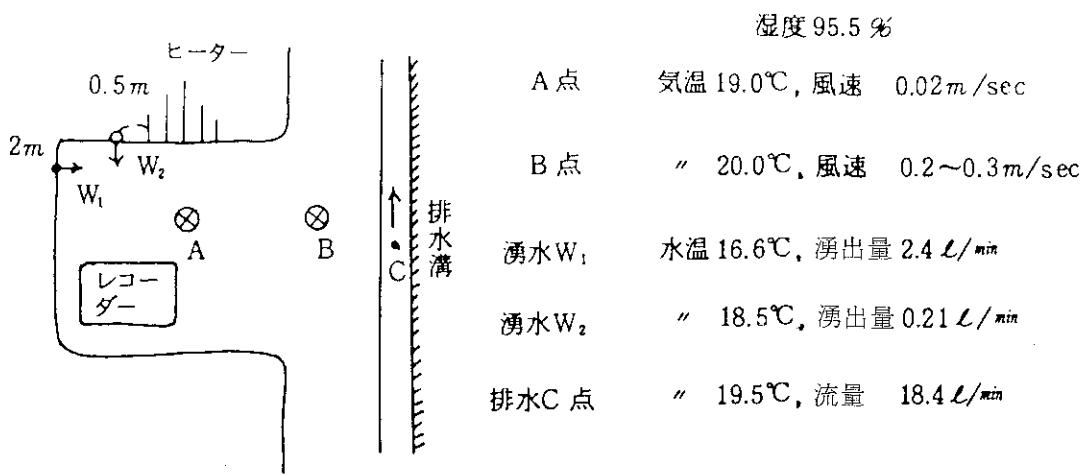
コアーサンプルの熱伝導率の値の幅 $1.5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \sim 1.6 \text{ W/mg}$ は、主として測定精度上の問題であるが Table 16 に示した化学分析結果及び Table 13 ~ 15 の検鏡結果からもわかるように各孔によってコアーサンプルの化学組成及び鉱物組成の違いが有ることに起因することも考えられる。すなわちアルミニウム、珪素、アルカリ土類、アルカリ元素といった熱伝導率の大きな元素の組成比によって差が生じることも考えられる。

岩盤のみかけ熱伝導率がコアーサンプルの値よりも 30~40% 大きな値を示した原因としては、熱伝導率を計算する上で設けた仮定条件と実際の岩盤の条件との違いが考えられる。計算では熱伝導媒体は均質で無限であると仮定したが実際の岩盤は Fig. 7 ~ 9 の柱状図で示したように鉱物組成の違い、微小クラックの存在、水の存在があり不均質である。又坑道側には壁面があり、通気による放熱も有り無限熱伝導媒体ではない。

いま岩盤内流動水による熱の輸送を考えてみる。Fig. 23 に示した場所 W_1 及び W_2 からヒーター通電開始約 60 日後に W_1 で 16.6°C の水が 2.4 l/min , W_2 で 18.5°C の水が 0.21 l/min で湧水を続けていた事から、初期の岩盤水の温度を 14°C とし、ヒーター通電開始 2 週間後から水温が上記温度に上昇していたとして試算してみた。すると岩盤内の流動水によって運ばれる熱量は

$$\begin{aligned} & (16.6^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C}) \div 50 \text{ 日} \times 2.4 \text{ l/min} \times 60 \text{ min/h} \times 24 \text{ h/day} \\ & + (18.5^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C}) \div 50 \text{ 日} \times 0.21 \times 60 \times 24 \\ & = 207 \text{ Kcal/day} \end{aligned}$$

となる。この熱量はヒーターの一日の発熱量の約 1% にあたり、岩盤のみかけの熱伝導率を大きくする事になる。



気象条件と湧水状況 (1979年2月21日9時46分)

Fig. 23 Wind velocity and temperature in the drift

次に岩盤表面からの放熱を考えてみる。

岩盤表面にセメントではり付けた熱流計センサー 5 点のうち、ヒーター孔から 50 cm の等距離にある 4 点は、ヒーター加熱中に同様な熱流の変化を記録した。岩盤内を流れる熱流の変化は非常にゆるやかであったので、毎日 1 回午前 0 時の値を読み取った。この 4 点の熱流計の読み取りの平均値記録を Table 23 に示す。負の記号は熱の流れが岩盤表面から内部へ向かっている事を示す。

Table 23 Changes of the thermal flux on the wall

熱流量測定結果

日	熱 流 量	日	熱 流 量	日	熱 流 量
12 / 22	- 3 kcal/m ² ·h	1 / 1	0 kcal/m ² ·h	1 / 11	2.9 kcal/m ² ·h
23	- 2.3	2	0	12	3.4
24	- 2.3	3	0	13	3.4
25	- 2.0	4	+ 0.3	14	4.3
26	- 1.7	5	1.4	15	4.3
27	- 1.7	6	1.7	16	4.3
28	- 0.6	7	1.7	17	4.3
29	- 1.1	8	2.0	18	4.3
30	- 0.6	9	2.3		
31	0	10	2.6		

この熱流量観測結果からわかるように、ヒーター通電開始後 15 日以降は、それまでの壁面の吸熱状態とは反対に放熱状態に変わっている。すなわち坑道の通気により熱が運ばれており、これが岩盤のみかけの熱伝導率の値を大きくする作用を果していると考えられる。

4. まとめ

4.1 測定現場

測定現場はクラックや湧水が無く外見上ほぼ均質と見なし得る変成安山岩岩盤を選定した。細かく見ていくとボーリングコア柱状図に示したように各所に班晶が見られたり又各コアーサンプルの熱の輸送に関連すると考えられる密度、比熱、間隙率及び含水率などの物性値もばらついていた。

4.2 ヒーター

ヒーターは使用前に、温度上昇に伴う放熱特性を測定しておくべきである。温度による抵抗の変化、熱容量の変化も知っておきたい。ヒーター管は長く細いほど温度推定の計算が容易であるので、現在の温度測定範囲から考えると、ヒーター管の長さを2m位にした方が都合が良い。又今回の実験では坑内の電源を直接使用したのでヒーターにかける電力が不安定であり、温度、熱流の伝播の不安定を起こし測定結果の解析を困難にした。今後は電力安定装置を使用すべきであろう。

4.3 測温棒

今回はボーリング孔内に熱電対を密着させるため、金属製のコイルとスプリングを利用した。その結果岩盤への密着は満足すべき結果が得られたが、挿入の問題から熱電対の位置に誤差が生じた。この誤差は半径方向で30mm程度、深さ方向で1mm程度有ると思われる。

熱電対を設置した後の測温孔のセメント処理は、孔口をセメントで閉塞して置けば、測温孔の奥までセメントを詰めなくても空気の対流による伝熱は小さいこと、すなわち1本のボーリング孔に数点の測温点を設けても有効であるという事がわかった。

又岩盤温度測定誤差を小さくするためには、試験孔に挿入する物質の熱伝導率を岩盤と同じ位の値を持つ物にした方が良いと考えられる。

4.4 記録

約500°C位の高温になるヒーター部温度と岩盤内部温度とを同一感度の記録計で記録をしたので、温度読み取り精度が悪かった。今後は0.1°C位の精度を持つデジタル温度計の使用が好ましい。

4.5 測定法

Massive な岩盤の熱伝導率及び比熱を測定するための方法として、ヒーター加熱による岩盤の上昇温度分布から、熱伝導率を定常計算で求め、比熱を非定常計算で求める方法は、クラックや湧水の無い岩盤内部の平均値を求めるのに、比較的短期間に精度良く行なえる方法であることがわかった。ヒーター近傍の温度は 2 日もすればほぼ定常状態に到達し、ヒーターから 2 m の所でも 2 ヶ月もたてば定常状態からの誤差が 1 % 以内で取り扱える事がわかった。

4.6 热伝導率

熱伝導率の測定誤差の要因としては、温度、水分、盤圧が考えられる。岩石と岩盤との値を比較する場合は特に岩盤内の割れ目による影響があるものと思われる。即ち熱伝導以外の熱の伝播が有るものと考えられる。今回はいずれの要因も定量的に取り扱う事はできなかったが、実験室において湿潤状態、乾燥状態における比熱と熱伝導率を測定し、かつヒーター試験前後の試験岩盤の含水率を測定すれば、水分の影響の推定は可能であると思われる。盤圧に関しては今後更に深部でのヒーター実験と地圧測定をあわせて行う事によって解明が可能と思われる。

謝 辞

本試験は、高レベル廃棄物地層処分の安全評価手法に関する調査(Ⅱ)として三菱金属株式会社に委託したものである。試験遂行に当って御指導と御援助を賜った元環境安全研究部部長、現名古屋大学教授、天野 恕博士に感謝申し上げます。合わせて、三菱金属株式会社柏木高明原子力部部長に感謝申し上げます。

温度分布推定並びに熱伝導率計算に当って御指導を頂いた安全性コード開発室の小林健介研究員阿部清治研究員並びに計算を手伝っていただいた高レベル廃棄物処理処分研究室の木村英雄研究員に感謝致します。

現地試験立ち合い、並びに有益な御助言を頂いた石崎寛治郎氏、岡本雅道氏に感謝致します。

本報告書をまとめるに当って有益な御助言並びに御指導を頂きました元高レベル廃棄物処理処分研究室室長、現WASTEF管理室 田代晋吾室長に感謝致します。

4.5 測定法

Massive な岩盤の熱伝導率及び比熱を測定するための方法として、ヒーター加熱による岩盤の上昇温度分布から、熱伝導率を定常計算で求め、比熱を非定常計算で求める方法は、クラックや湧水の無い岩盤内部の平均値を求めるのに、比較的短期間に精度良く行なえる方法であることがわかった。ヒーター近傍の温度は 2 日もすればほぼ定常状態に到達し、ヒーターから 2 m の所でも 2 ヶ月もたてば定常状態からの誤差が 1 % 以内で取り扱える事がわかった。

4.6 热伝導率

熱伝導率の測定誤差の要因としては、温度、水分、盤圧が考えられる。岩石と岩盤との値を比較する場合は特に岩盤内の割れ目による影響があるものと思われる。即ち熱伝導以外の熱の伝播が有るものと考えられる。今回はいずれの要因も定量的に取り扱う事はできなかったが、実験室において湿潤状態、乾燥状態における比熱と熱伝導率を測定し、かつヒーター試験前後の試験岩盤の含水率を測定すれば、水分の影響の推定は可能であると思われる。盤圧に関しては今後更に深部でのヒーター実験と地圧測定をあわせて行う事によって解明が可能と思われる。

謝 辞

本試験は、高レベル廃棄物地層処分の安全評価手法に関する調査(Ⅱ)として三菱金属株式会社に委託したものである。試験遂行に当って御指導と御援助を賜った元環境安全研究部部長、現名古屋大学教授、天野 恕博士に感謝申し上げます。合わせて、三菱金属株式会社柏木高明原子力部部長に感謝申し上げます。

温度分布推定並びに熱伝導率計算に当って御指導を頂いた安全性コード開発室の小林健介研究員阿部清治研究員並びに計算を手伝っていただいた高レベル廃棄物処理処分研究室の木村英雄研究員に感謝致します。

現地試験立ち合い、並びに有益な御助言を頂いた石崎寛治郎氏、岡本雅道氏に感謝致します。

本報告書をまとめるに当って有益な御助言並びに御指導を頂きました元高レベル廃棄物処理処分研究室室長、現WASTEF管理室 田代晋吾室長に感謝致します。

引 用 文 献

- 1) 放射性廃棄物対策専門部会，“高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について”，（昭和55年12月19日）
- 2) 下岡謙司, 石崎寛治郎他, “高レベル廃棄物の処分岩体および処分地層としての岩石の熱特性” (1980)
- 3) F. Holzer and L. Ramspott ; "Proceedings of a workshop on thermo-mechanical modeling for a hardrock waste repository" ONWI-98 UC-70, (1979)
- 4) Ove Landström, Carl-Erik Klockars et al ; "In situ experiments on nuclide migration in fractured crystalline rocks" KBS TEKNISK RAPPORT 110 (1978)
- 5) OECD/NEA and the DEC ; "Proceeding of the workshop on the migration of long-lived radionuclides in the geosphere" (1979)
- 6) J. S. Deane and A. A. Hollies ; "Practical aspects of heat transfer in radioactive-waste repository design" AERE-R9343 (1979)
- 7) Bradshaw, R. L. and McClain, W. C. ; "Projected Salt Vault : A demonstration of the disposal of highactivity solidified wastes in underground salt mines" CRNL-4555 (1971)
- 8) Starfield, A. M. and McClain, W. C. ; "Project Salt Vault : A case study in rock mechanics" International journal of rock mechanics, Mineral sciences and geomechanical abstracts, vol. 10, (1973)
- 9) Kärnbranslesäkerhet (KBS) ; "Handling of spent nuclear fuel and final storage of vitrified high level reprocessing waste" vol. 5 (1977)
- 10) OECD/NEA ; "In situ heating experiments in geological formations" (1978)
- 11) Lars Lundström and Hakan Stille ; "Large scale permeability test of the granite in the stripa mine and thermal conductivity test" LBL-7052, SAC-02 (1978)
- 12) Neville G. W. Cook and Michael Hood ; "Full-scale and time-scale heating experiments at Stripa : preliminary results" LBL-7072 (1978)
- 13) Tin Chan, Neville G. W. Cook and Chin-Fu Tsang ; "Theoretical temperature fields for the Stripa heater project" LBL-7082 (1978)

- 14 Hans Carlsson ; "A pilot heater test in the Stripa granite"
LBL-7086 (1978)
- 15 Carslaw and Jaeger ; "Conduction of Heat in Solids" Second edition
(1959)