

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。 2007. 6. 6

[技術情報]

岩盤内充填粘土挙動試験

— 試験概要および計測結果について —

1994年9月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

転
い

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

複製、
て下さ

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

岩盤内充填粘土挙動試験

—試験概要および計測結果について—



実施責任者 間野 正 石川博久

報告者 杉田 裕 藤田朝雄 菅野 毅

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド環境では、再冠水時に、ガラス固化体の発熱、緩衝材の浸潤および膨潤圧の発生、岩盤内の地下水流動および地圧の作用といった複数の現象が相互に作用する熱水-応力連成現象が起これと考えられる。この連成現象を明かにすることが地層処分性能評価の重要な課題の一つになっている。そこで、性能評価研究の一環として釜石原位置試験場（釜石鉱山内の550mレベル坑道）において岩盤内充填粘土挙動試験を実施した。

計測の結果、次のようなことが分かった。

- ・試験場内の温度分布では、ヒーター温度が80℃の場合でも粘土と岩盤の境界面では30℃弱の値である。
- ・サイクロメーターの計測結果から、地下水は粘土の外側から順次内部へ浸入する。
- ・粘土の膨潤圧の発生は充填粘土の深度や方向によってばらつきが認められる。
- ・粘土の膨張による岩盤への影響は、割れ目近傍では顕著に現れるが、充填孔からの距離が30cmと60cmとを比較すると、60cmでの影響は30cmでの影響の約1/2である。
- ・試験終了後の粘土観察の結果、粘土設置時に見られた粘土ブロック間の境界は膨潤した粘土によって閉鎖される。
- ・試験に用いた計測器は、測定限界のあるサイクロメーターを除いて、計測中トラブルもなくすべて試験終了時まで計測を行うことができた。

岩盤内充填粘土挙動試験

—試験概要および計測結果について—

目次

1. 緒言	1
1.1 はじめに	1
1.2 釜石原位置試験	3
1.3 既往の研究	5
2. 試験概要	7
2.1 レイアウト	7
2.1.1 試験位置	7
2.1.2 予備解析	8
2.1.3 解析結果およびレイアウト決定	10
2.2 試験手順	16
2.3 計測装置	19
3. 計測結果	23
3.1 孔内載荷試験	23
3.2 温度	24
3.2.1 ヒーター温度	24
3.2.2 充填孔内温度	24
3.2.3 観測孔内温度	27
3.2.4 温度分布	27
3.3 粘土膨潤圧	30
3.4 観測孔のひずみ	31
3.5 粘土内部の水分ポテンシャル	34
3.6 亀裂開口幅	37
3.7 間隙水圧	38

4. 結言	40
4.1 まとめ	40
4.2 今後の課題	42
Appendix 室内試験	43
参考文献	44
謝辞	46

1. 緒言

1.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物（以下廃棄物）の処分としては、地層に処分する方法がもっとも確実な方法として考えられている。廃棄物の地層処分においては多重防護の思想から安全確保の仕組みとして多重バリアシステムが検討されている。多重バリアシステムは、人工的に設けられる多層の安全防護系（人工バリア）と、種々の安全防護機能を本来的に備えている地層（天然バリア）との多重の組合せによって構成されている。廃棄物は、ガラス質に熔融され金属容器に封入されて固化された状態（ガラス固化体）で貯蔵される。処分に当たっては、このガラス固化体をさらにオーバーパックとよばれる容器に封入して埋設し、まわりの地層との空間には粘土質の充填物（緩衝材）をつめておくことが、最も有効と考えられている埋設方法である。この地層処分の研究開発において、動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃）は、これまで地層処分技術の確立を目的として、研究対象を明確に規定し得る人工バリアに重点をおいて検討を行ってきた¹⁾。

人工バリア周辺のニアフィールド環境では、ガラス固化体の発熱、緩衝材の浸潤および膨潤圧の発生、岩盤内の地下水流動および地圧の作用といった複数の現象が相互に作用する熱-水-応力連成現象がおこると考えられている。このようなニアフィールド環境における熱-水-応力連成現象を評価することは、再冠水時のニアフィールド環境条件の設定という観点からすると、重要な課題の一つになっている。

これまで人工バリアの熱-水-応力連成現象に関しては、模擬岩盤内に人工バリア（緩衝材内に廃棄体を模擬したヒーターを設置したもの）を設置した室内試験²⁾⁶⁾や原位置に実規模の人工バリアを設置した試験⁷⁾例がある。室内試験では、動燃東海事業所の大型緩衝材試験設備（以下Big-Ben）において工学規模の熱-水-応力連成現象に関する試験²⁾⁵⁾があり、主に人工バリアの緩衝材の挙動に着目した試験を実施している。同じく室内試験のSelvaduraiの行った試験⁶⁾は、緩衝材中の熱の影響に観点をしほっている。原位置試験の例ではSKBの実施したバッファマステスト⁷⁾がある。バッファ

マステストは健全な天然の岩盤内に工学規模の人工バリアを設置しているが、試験時の注水量は試験条件によって制御し、計測に関しては緩衝材に重点をおいている。

これらの試験は、いずれも人工バリアの熱-水-応力連成現象の把握に関する試験であるが、計測項目あるいは着目点が緩衝材に集中している。しかし、地層処分における技術開発の観点からは、ニアフィールド環境である周辺岩盤の挙動が人工バリアに与える影響についても把握する必要があることから、岩盤領域も含めた試験が必要となっている。

そこで、実条件でのニアフィールド環境の把握を目的に原位置における小型の人工バリア試験（岩盤内充填粘土挙動試験（以下「粘土試験」という。））を実施した。粘土試験は、地下水が常時供給されるとともに、岩盤への力学的影響を把握しやすくするため地下水の湧水が豊富である単一割れ目を対象とした試験環境を設定した。本試験は、このような試験環境における実岩盤の割れ目を介した地下水の浸入によるベントナイト（粘土）の膨潤圧、水分量の変動およびそれらの時間変化を調べ、併せて、ベントナイト中にヒーターを設けてニアフィールドでの伝熱特性を調査し、熱および粘土の膨潤が周辺岩盤に及ぼす力学的な影響を明らかにすることを目的とし、釜石原位置試験場において実施した。

試験の結果から、ニアフィールド環境の把握を行うと同時に、原位置における人工バリア施工に関する技術開発の課題抽出も行えるものと考えている。

1.2 釜石原位置試験

釜石原位置試験場は、図-1.1に示すように釜石鉾山内の大峰550m坑内に位置し、栗橋閃緑花崗岩を母岩とした結晶質岩系の原位置試験場である。原位置試験場周辺の岩盤は、おおむね新鮮な中粒角閃黒雲母花崗閃緑岩から成る。坑道壁面観察によれば、平均割れ目頻度は1.3m/本であり、N65°E75°NWに分布のピークをもつ1系統の割れ目が卓越している⁸⁾。原位置試験場では、地質環境条件の調査研究として、水理学的、力学的、熱的に基本となる現象について、その試験技術の検証や開発、およびデータの収集を目的として昭和63年度から平成4年度の5年間（第1フェーズ）にかけて表-1.1に示すように各種試験^{9)~13)}を実施してきた。

試験場の平均被り厚さは300mであり、地圧の大きさは鉛直成分8.9MPa、水平成分の南北方向は18.2MPa、東西方向15.3MPaである。

平成5年度から5年間の計画で第2フェーズ¹⁴⁾試験が開始し、緩衝材および岩盤の力学的挙動に着目した大型人工バリア試験が試験の一つとして計画されている。

表-1.1 釜石原位置試験項目一覧^{9)~13)}

	試験項目
昭和63年度	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道壁面の岩石・試錐岩芯を用いた花崗岩体の岩石物性試験 ・物理探査による岩盤状況の測定 ・坑道湧水の水質状況及びKH-1孔の地下水状況 ・試験箇所周辺の岩盤応力測定 ・坑道掘削に伴う周辺岩盤挙動と物性変化に関する試験 ・鉾山及び周辺地域の自然放射能の測定
平成元年度	<ul style="list-style-type: none"> ・地質環境の調査 ・坑道掘削に伴う周辺岩盤挙動と物性の変化に関する試験 ・簡易ベンチレーション試験および蒸発量測定 ・孔間物理探査法によるトモグラフィー解析 ・岩盤透水試験エリアにおける水理特性調査 ・岩盤透水性試験の実施設計
平成2年度	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤透水試験エリアの地質学的調査 ・岩盤透水性試験 ・単一割れ目における地下水流下試験 ・地下水の地化学的特性調査
平成3年度	<ul style="list-style-type: none"> ・地質性状・岩盤特性調査 ・ベンチレーション試験 ・蒸発量測定
平成4年度	<ul style="list-style-type: none"> ・地化学特性調査 ・水みち割れ目のネットワーク調査 ・総合水理解析のためのデータセットの整備 ・岩盤充填粘土挙動試験

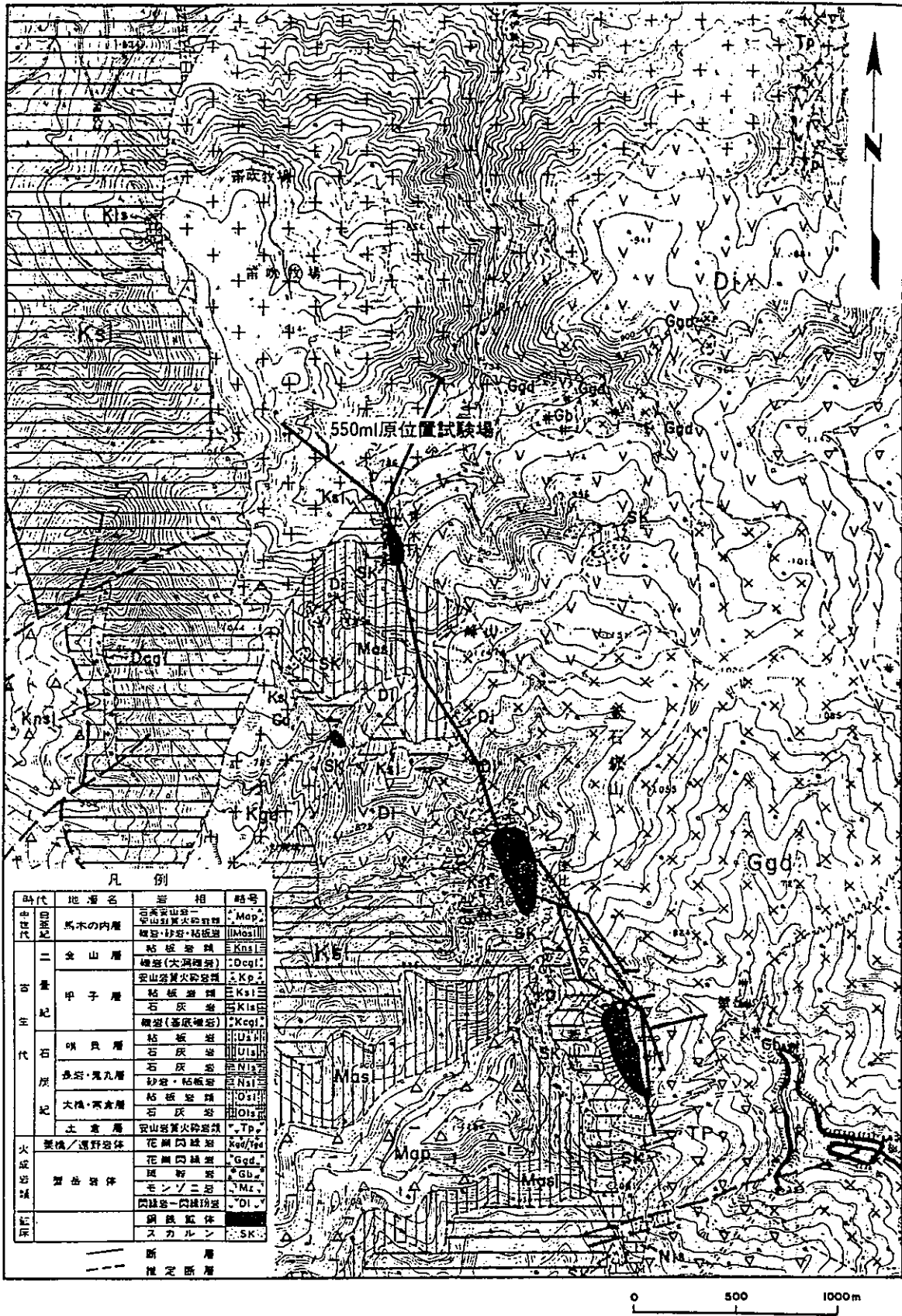


図-1.1 釜石原位置試験場付近の地形図⁹⁾

1.3 既往の研究

人工バリアにおける熱-水-応力連成現象に関する研究は、室内試験に関しては動燃東海事業所におけるBig-Benでの熱-水-応力連成試験²⁾⁵⁾やSelvaduraiが実施した加熱試験⁶⁾等があり、原位置試験ではSKBのバッファマステスト（ストリッププロジェクト）⁷⁾の研究等が挙げられる。

Big-Benでは、人工岩盤内に緩衝材およびヒーターを設置し、緩衝材の挙動に着目した熱-水-応力連成現象に関する試験を行っている。加熱試験、加熱・部分注水試験、加熱・全面注水試験の3条件の試験を行い、加熱注水試験の結果、ヒーター近傍での含水比の低下に伴う緩衝材中の水分分布の再配分が確認された。緩衝材の施工に関してはブロック方式と現地締固め方式の2方法を行い、おのこの施工技術の確認を行っている。

SKBのバッファマステストは図-1.2に示すような地下環境において実施された試験である。試験の結果、温度分布、浸潤状況、膨潤圧等のデータの取得に加え、緩衝材

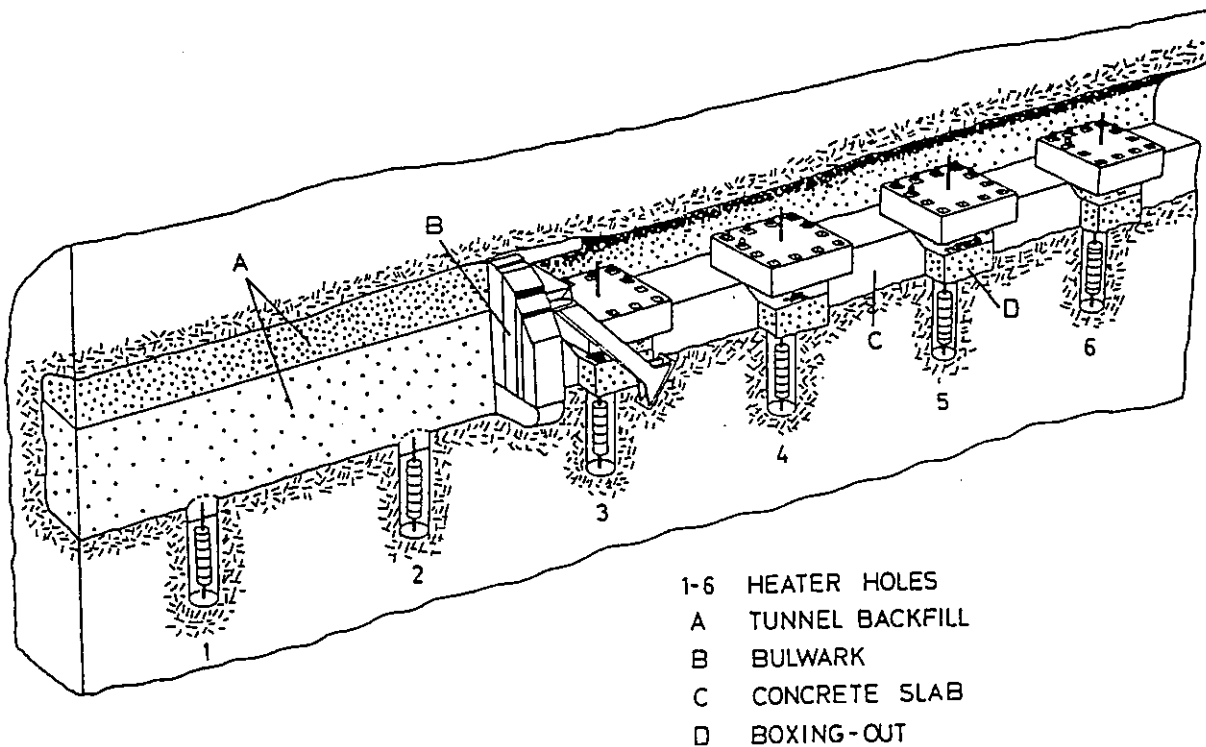


図-1.2 バッファ・マステスト レイアウト⁶⁾
 (ストリッププロジェクト)

ブロック間や施工時に見られた空隙は、供給された地下水によって膨潤したベントナイトによって閉鎖されることからベントナイトの自己シール性が確認された。

Selvaduraiの試験は、図-1.3に示すような人工岩盤内にヒーターと緩衝材を組み込んだものである。この試験では、緩衝材内の変化に着目し、ヒーターの加熱による温度分布および含水率の分布を測定している。試験の結果、温度分布ではヒーターの中心部分が最も高い温度を示し、ヒーター熱はトータルの試験期間で緩衝材の水分を35%程度取り除くことを示している。この結果、緩衝材には熱収縮による亀裂の発生が多数確認され、開口幅は最大8mmにも及ぶことが示された。

以上が人工バリアの熱-水-応力連成現象に関する既往の研究である。

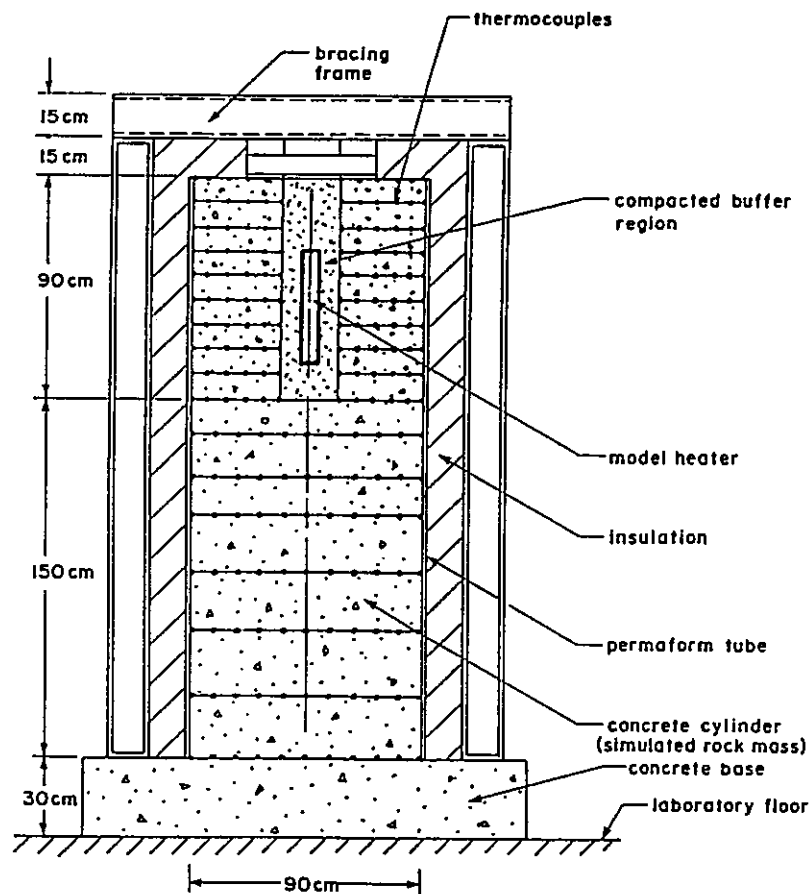


図-1.3 Selvaduraiの加熱試験装置概観図7)

2. 試験概要

2.1 レイアウト

2.1.1 試験位置

原位置試験場の位置は、図-2.1に示すように釜石鉾山の550m坑道の最北部NW押し出し坑道内の坑口から約4000 mの地点である。試験対象地域の地質は、栗橋花崗閃緑岩である。本試験地近傍には、坑道壁面や床面からの湧水が多く、卓越した単一の割れ目が存在している。この付近では、第1フェーズにおいてトレーサー試験およびLABROCK試験岩体の採取等が行われた。図-2.2に示す割れ目は、1990年に実施された「単一割れ目における地下水流下試験」¹⁾において坑道東側の水理特性を調査した割れ目であるが、ここで行なわれたトレーサー試験の結果から、岩盤内においても水みちがあることが示されている。これより、この割れ目を本試験で着目する単一割れ目として選定した。

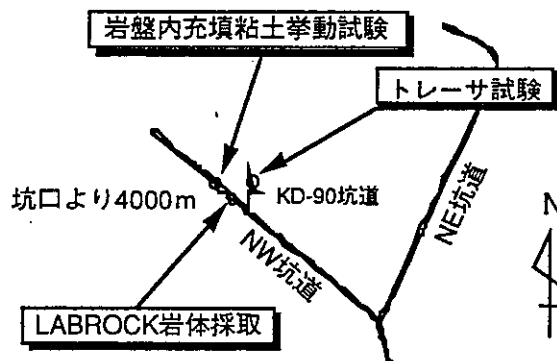


図-2.1 試験位置

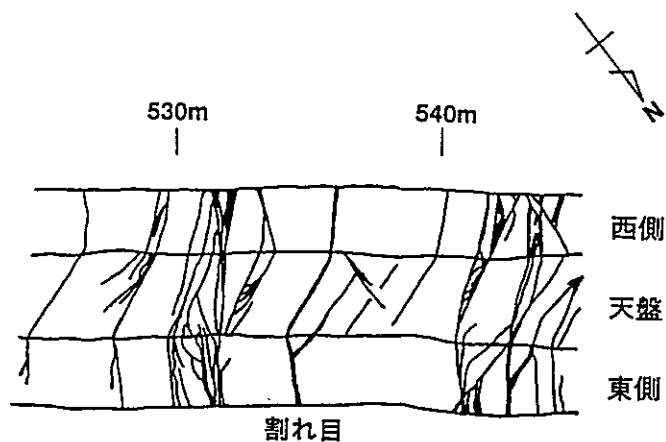


図-2.2 亀裂スケッチ

2.1.2 予備解析

粘土試験の実施に当り、ヒーターに要求される出力能力を設定すると同時に岩盤へのヒーター熱の影響範囲を把握し、試験孔（人工バリアを形成するための充填孔および岩盤の挙動を把握するための観測孔）の配置関係を決定するため、非定常熱伝導解析を実施した。試験孔配置は図-2.3（ここでは、解析の結果決定した配置を示している。）に示すようになっており、充填孔と観測孔間の間隔を本解析結果により決定することとした。

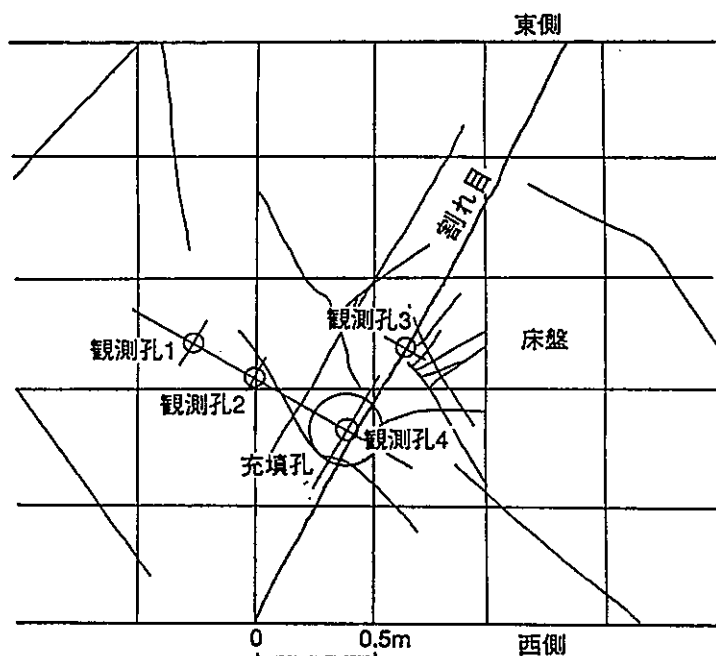


図-2.3 試験孔配置

粘土試験では、充填孔の深さが100cm、直径30cmであり、内部に設置されるヒーターは直径8cm（解析時は10cmとして実施した）、長さ90cmである。観測孔は長さが150cmである。

解析では、坑道を簡便に評価するため、上面が解放された無限場と仮定し、図-2.4に示すような軸対称モデルを用いた。解析には表-2.1に示すようにこれまでに取得された各熱物性値を用いた¹⁵⁾¹⁶⁾。

表-2.1 解析に用いた各物性値¹⁵⁾¹⁶⁾

	結晶質岩盤	ベントナイト	炭素鋼
熱伝導率 [cal/cm sec °C]	6.9×10 ⁻³	2.2×10 ⁻³	0.13
比熱 [cal/g °C]	0.20	0.14	0.11
密度 [g/cm ³]	2.7	1.9	7.8

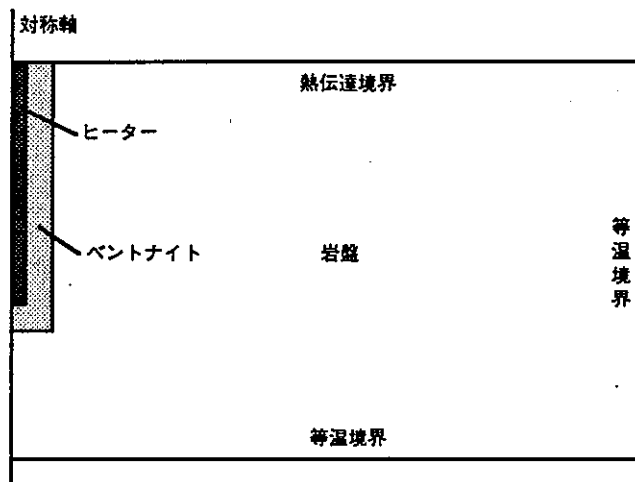


図-2.4 解析モデル

ヒーターの発熱能力は、表-2.2に示すように4段階に設定し、それぞれの能力における温度分布を求めた。解析に用いた計算コードは、汎用性非線形構造解析システム FINAS¹⁷⁾である。

空気との接触面の熱伝達係数は、地表面の境界条件で用いる10~20[kcal/m² h °C]¹⁸⁾の平均値である4.16×10⁻⁴[cal/cm² sec °C] (=15[kcal/m² h °C])とした(地上の温度は15°C一定)。岩盤内の初期温度を15°Cとし、水平方向20mおよび垂直方向10mの地点を等温境界とした。また、観測孔の間隔を30cmと50cmの2通りについて検討した。

表-2.2 ヒーターの発熱能力

ヒーター出力 [kw]	2	1	0.5	0.1
単位体積単位時間 当たりの発熱能力 [cal/sec cm ³]	0.135	0.068	0.034	0.007

2.1.3 解析結果およびレイアウト決定

定常後の各部の温度の一覧を表-2.3に示す。ここでは、ヒーターの中心である深さ45cmの断面の温度を示している。これより、ヒーター出力0.5kw以上では中心温度が280℃以上となり、ヒーター能力が過大であることが分かった。試験条件としては、ベントナイトとヒーターの接触面が100℃以内で設定することから、ヒーター出力が0.1kw程度であれば妥当であることが分かった。

表-2.3 計算結果一覧

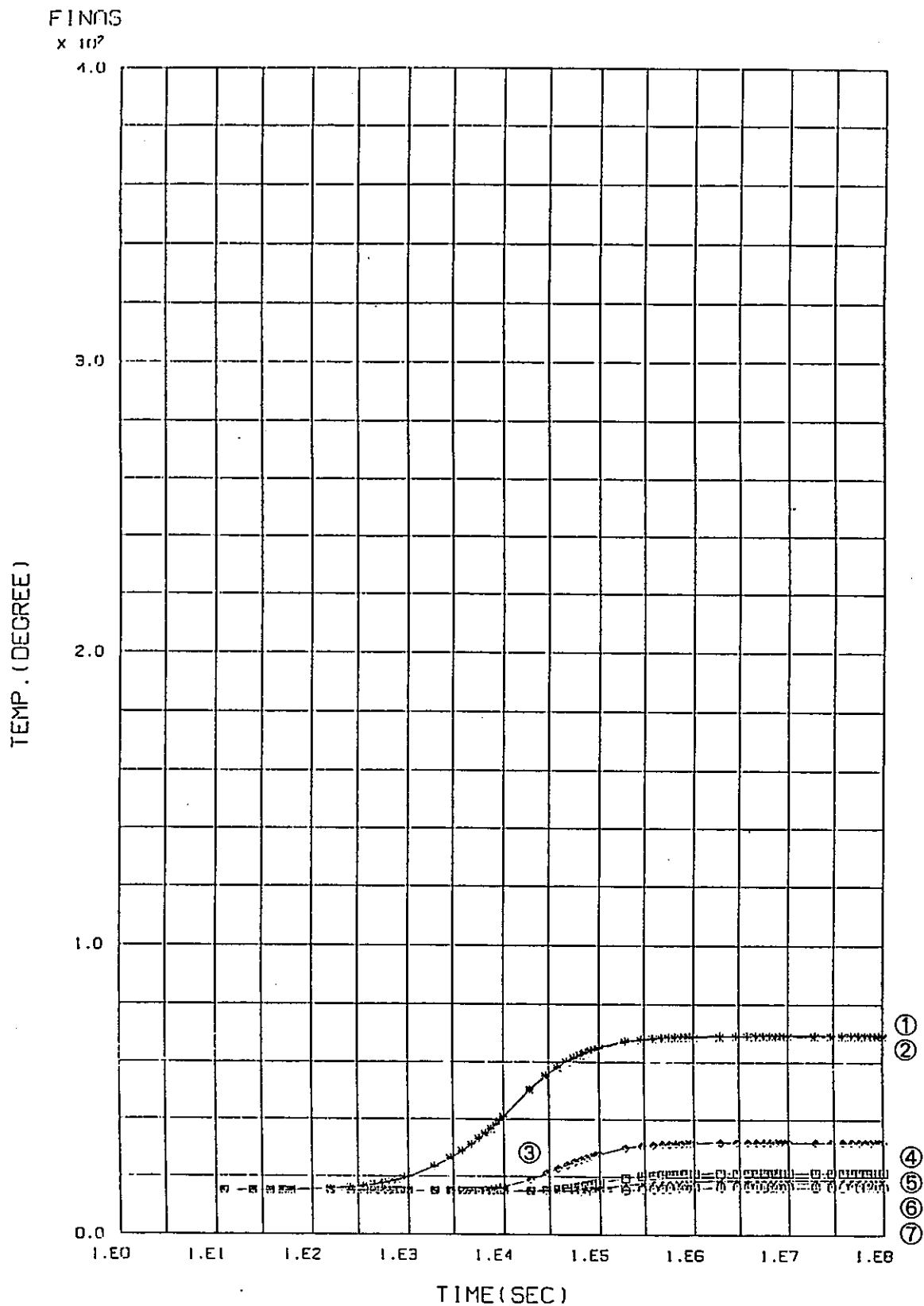
ヒーター 出力 [kw]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	中心 温度 [℃]	ヒーターと ベントナイト [℃]	ベントナイト と岩盤 [℃]	岩盤内 30cm [℃]	岩盤内 50cm [℃]	岩盤内 60cm [℃]	岩盤内 100cm [℃]
0.1	70	70	30	20	15	15	15
0.5	280	280	100	50	30	20	15
1.0	540	540	180	80	55	45	30
2.0	1000	1000	350	140	90	75	45

次に、ヒーター出力0.1および0.5kwの温度の経時変化およびコンター図を図-2.5～8に示す。それぞれの図内の番号は表-2.3の番号と一致している。

図-2.5はヒーター出力を0.1kwにした場合の経時変化を示している。縦軸が温度、横軸が対数時間である。この場合、温度は最高で70℃であり、ベントナイトと岩盤の境界において30℃である。岩盤内50cm付近で岩盤と同じ15℃となり、ほぼ一日で定常状態の温度に達していることが分かった。

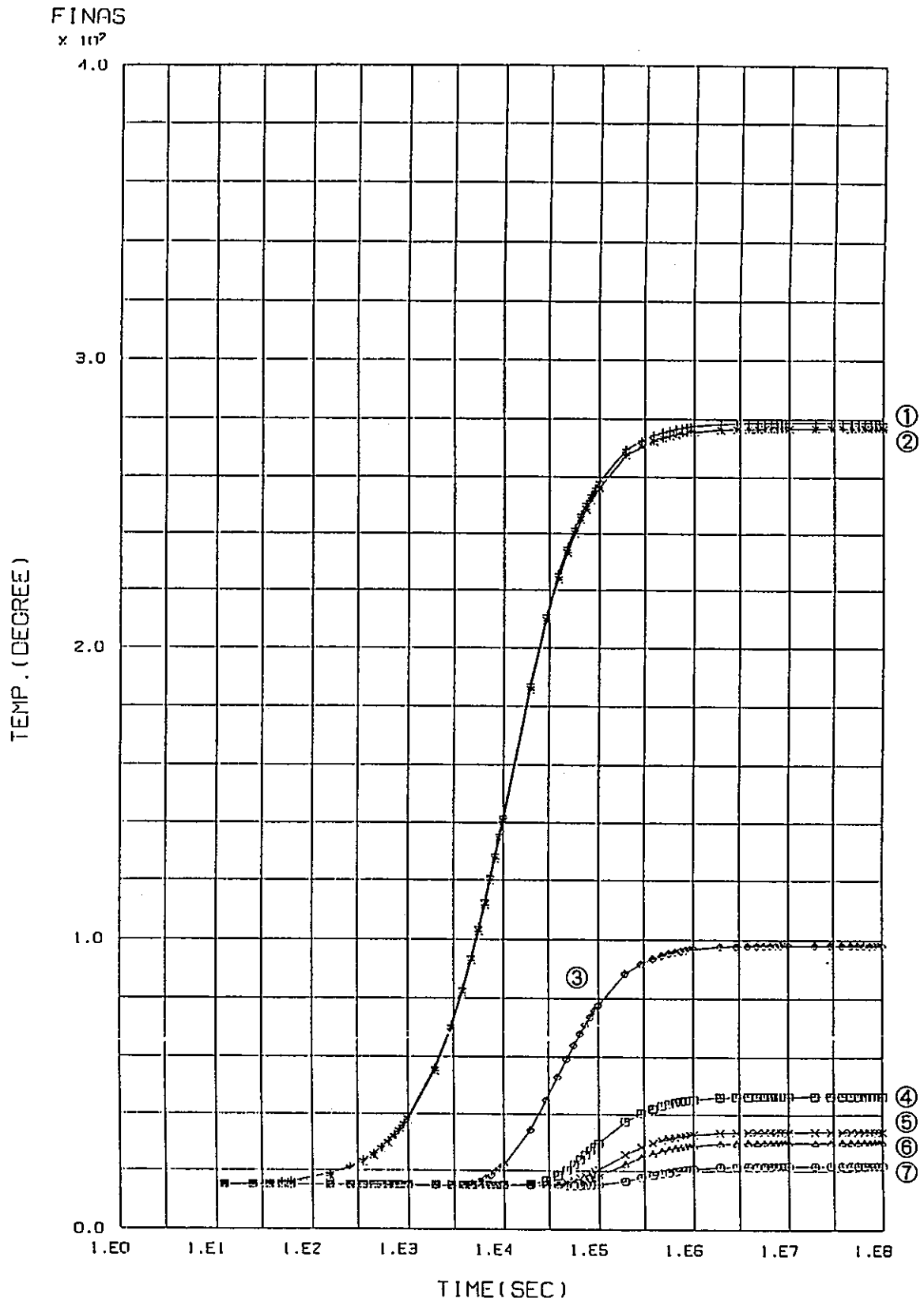
図-2.6はヒーター出力を0.5kwにした場合の経時変化である。この場合、温度は最高で280℃であり、ベントナイトと岩盤の境界において100℃である。岩盤内100cmでも20℃を保っている。また、温度上昇については0.1kwの場合とほぼ同様の傾向である。

図-2.7および2.8は加熱後50日目の温度分布をコンター図で示したものである。図



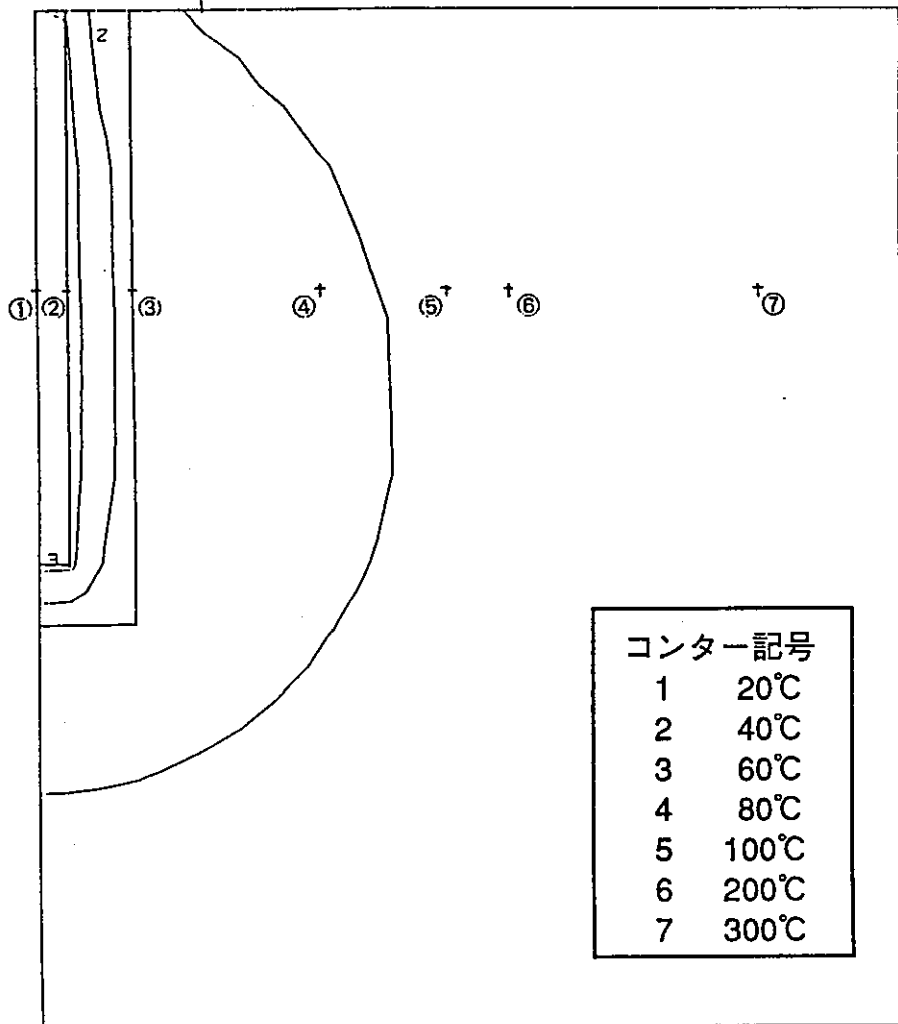
TIME HISTORY OF NODAL TEMPERATURE (HEATER 0.1kW)

図-2.5 温度分布の経時変化
(ヒーター出力0.1kw)



TIME HISTORY OF NODAL TEMPERATURE (HEATER 0.5KW)

図-2.6 温度分布の経時変化
(ヒーター出力0.5kw)

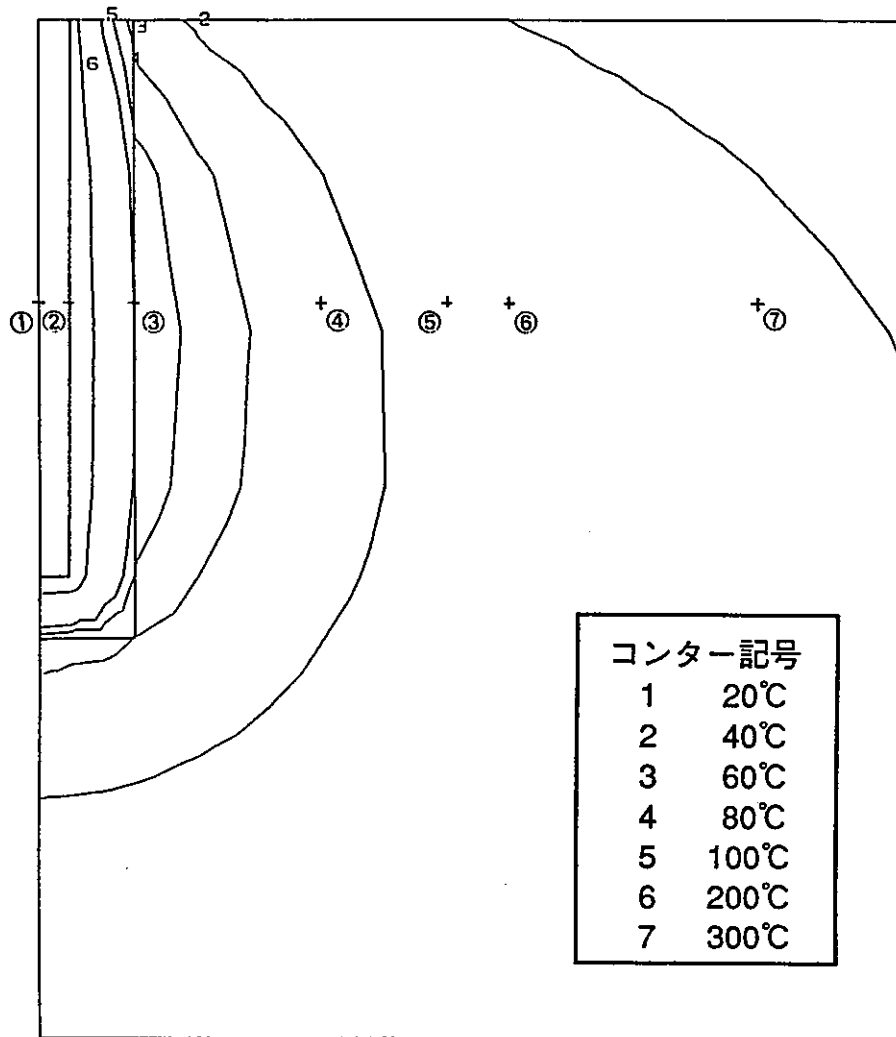


STEP NO. 66

GEO1. SCALE  20.0000

KAMAISHI INSITU HEAT ANALYSIS (HEATER 0.1KW)

図-2.7 温度収束後の温度分布 (充填孔周辺)
(ヒーター出力0.1kw)



STEP NO. 66

GEOM. SCALE 1:20.0000

KAMAISHI INSITU HEAT ANALYSIS (HEATER 0.5KW)

図-2.8 温度収束後の温度分布 (充填孔周辺)
(ヒーター出力0.5kw)

-2.7がヒーター出力0.1kwのものであり、図-2.8がヒーター出力0.5kwのものである。どちらの場合も空気との接触面からの放熱がかなり温度分布に効いていることが分かる。また、ベントナイト中で温度勾配が大きいことが分かった。

これより、ベントナイトとヒーターの接触面で100℃以下となるような試験条件では、充填孔からの距離が50cm以上離れた地点では岩盤の温度とほぼ同じ値になっており、温度勾配を正確に把握できない可能性がある。また、原位置試験場は地下水による冷却効果が大きいと考えられることから、熱の伝達領域はこれより更に制限されるものと考えられる。よって、岩盤内の温度勾配を測定するためには50cmの内側と外側に数個の観測孔を設置することが望ましい。しかしながら、試験領域の制限等があり、今回は観測孔の間隔を30cmとした。

解析結果をもとに決定した試験場のレイアウトを図-2.9に示す。充填孔の中心およびその周りには、周辺岩盤の挙動を観察するために直径7.6cm、長さ150cmの観測孔を4本穿孔した。観測孔1,2,4は坑道床面から鉛直下向きに穿孔した。観測孔3は、割れ目の挙動を観察するために割れ目に添って穿孔した。充填孔は直径31cm、長さ100cmで、床面から鉛直下向きに割れ目と交差するように穿孔した。

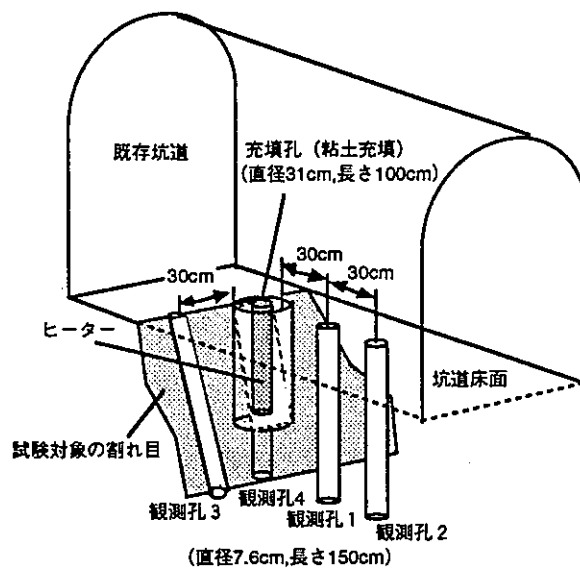


図-2.9 試験場レイアウト

2.3 試験手順

充填された粘土は、割れ目からの湧水を受けて膨潤し、充填孔の壁面に応力を発生させる。粘土試験では、この応力が周辺岩盤に影響を及ぼす範囲を測定するが、観測孔に設置する計測器は変位計を用いるため孔内載荷試験を実施し、岩盤の弾性係数を求めた。

充填した粘土は、国産のベントナイト（クニゲルV1¹⁹⁾）である。ベントナイトの施工に関しては、Big-Benでブロック方式と現地締固め方式の施工技術の確認を行っている²⁾⁵⁾が、本試験では充填孔が1/5スケールと小さいためセンサー等の設置が困難と考えられることから、予め所定の位置にセンサー類を設置できるブロック方式を採用した。粉末ベントナイトを直径30cm（内径8cmのヒーター用穴あり）、厚さ10cmの半円状のブロックに圧密し（写真-2.1）、二つを組み合わせて円状にしたものを10段組み上げた（写真-2.2）。乾燥密度を1.8 g/cm³とし、初期含水比を10%とした。クニゲルV1は、乾燥密度1.8g/cm³の場合、水の浸潤による膨潤圧が約5MPa発生するため、粘土のはらみ出しを抑制するための蓋を設置し、アンカーボルトにて反力をとることとした。充填粘土の設置状況を図-2.10および写真-2.3に示す。粘土と岩盤の間には、地



写真-2.1 粘土ブロック
（土圧計を設置したもの）

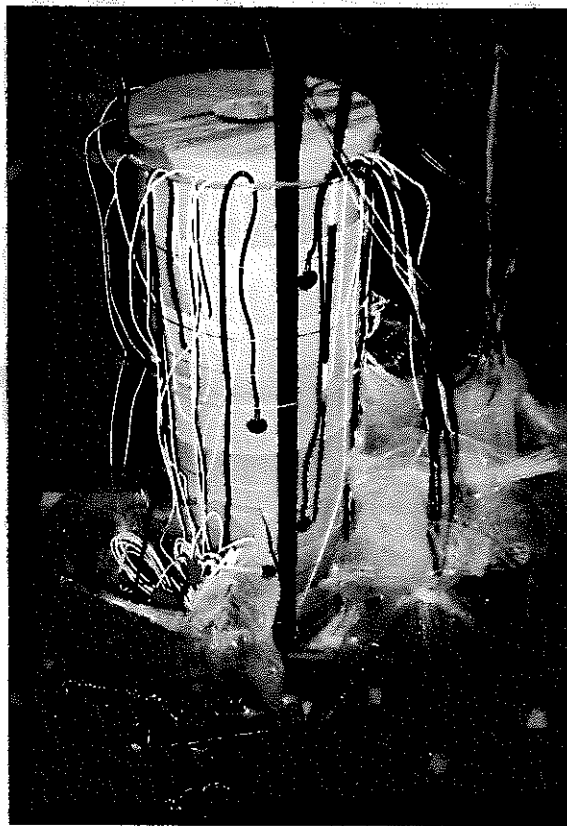


写真-2.2 組み上げた粘土ブロック

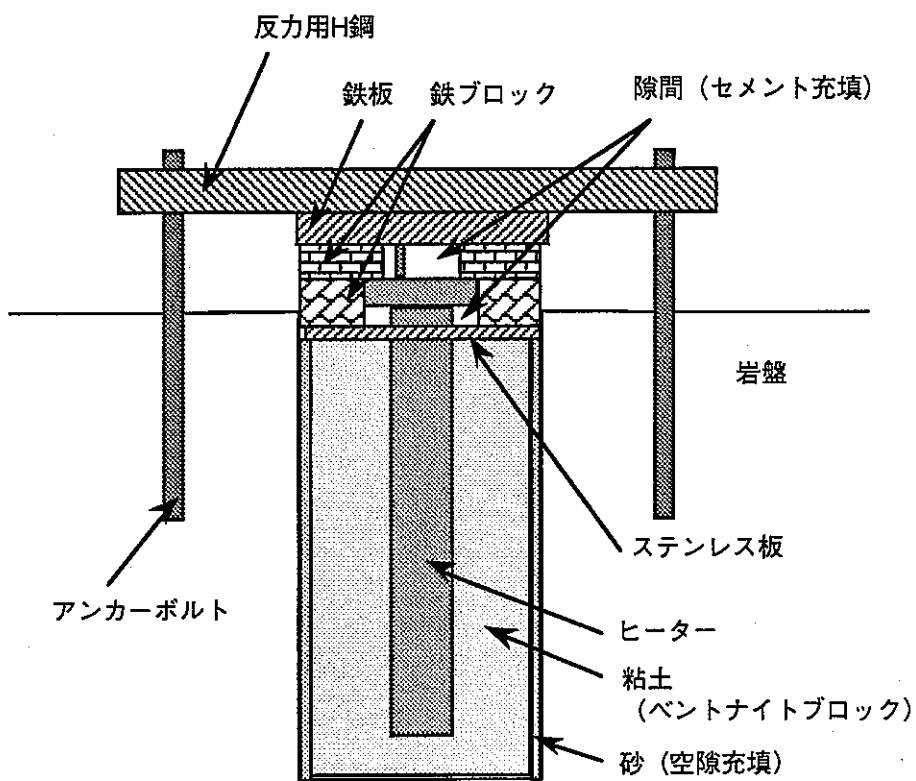


図-2.10 充填孔模式図

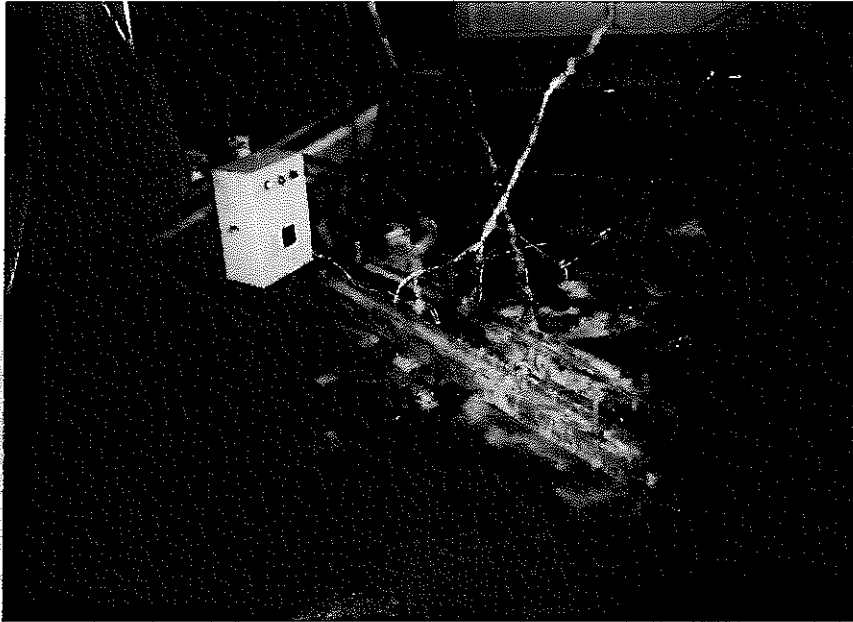


写真-2.3 充填粘土の設置状況
(赤いのは反力用H鋼，左はヒーター熱制御用ボックス)

下水の浸潤を均等にするための浸潤層として砂（同じ550mレベル坑道内，大峰付近で採取したザクロ石をクラッシャーで粉碎したもの（粒度分布を表-2.4に示す））を充填した。

試験対象の「割れ目」からの充填孔への水の流入量は，試験開始時で600cc/分とかなり多量であったことから，試験開始後，蓋の隙間から粘土が流出した。これは，粘土の膨潤による目詰まり効果が働く以前に，膨潤した粘土が多量の水に押し流されたものと考えられる。「水みち」からの粘土流出を抑制するため，隙間を閉鎖する処置を試験期間中数回にわたり実施した。粘土設置後，31日目にヒーターの中心温度を80℃に制御し，加熱試験を開始した。その後，計測を続け計測211日目に加熱を停止し，除熱の効果を確認するため，計測を続けた。そして，計測273日目に内部ベントナイトのサンプリングを行い，試験を終了した。

表-2.4 粉碎ザクロ石の粒度分布

粒径[mm]	0.075	0.106	0.25	0.425	0.85	2
通過質量百分率[%]	1.0	1.4	21.7	54.8	89.5	100

2.4 計測装置

各計測器を粘土内の所定の位置に埋設し、粘土を充填孔内に設置した。観測孔1~4には変位計と熱電対を埋設した。粘土中には圧力計、水分計、間隙水圧計、熱電対を、また、粘土の中心には加熱試験用のヒーターを配置した。図-2.11に観測孔の各計測器の設置位置を、図-2.12に充填孔内粘土中の各計測器の設置位置を示す。計測機器は、ヒーターの長さ95cmの中心にあたる上部から45cm（450レベル）の所に重点的に配置し、その上下20cm（250レベルおよび650レベル）のところにも配置した。図-2.12においてメッシュの円内にヒーターを設置した。

計測機器の一覧を表-2.5に示す。計測に用いた熱電対は助川電気T90を用いた。熱電対は粘土内、観測孔内および坑道内部の温度計測に用い、計測数は粘土内で3点、観測孔内で12点そして坑道内で2点とした。間隙水圧は、ST研究所BP-2KRSを用いた。設置場所は粘土内で2点および観測孔内で1点とした。土圧計はST研究所PS25-50を用いた。設置位置は粘土表面に8点とした。そのうち2点は粘土ブロックの上下の各面に配置した。サイクロメーターはWESCOR社を用いた。設置場所はヒーターの高さの中心である450レベルとその上下20cmのところに重点的に配置し、最下点に1点設けた。ひずみ計は共和電業BS-8F(BS-76BS24316の改造型)を用いた。これは、口径変位を測定するため、観測孔の直径にあわせ製作したものである。測定は観測孔の直径の変化を計測するものであるが、予め岩盤の弾性係数を把握することで応力を算出すること

表-2.5 計測機器一覧

	計測位置	センサー	数
温度	粘土内	熱電対	3
	観測孔		12
	坑道		2
間隙水圧	粘土内	間隙水圧計	2
	観測孔		1
膨潤圧	粘土内	土圧計	8
水分ポテンシャル	粘土内	サイクロメーター	19
岩盤ひずみ	粘土内	ひずみゲージ	10
亀裂開口幅	割れ目表面	π ゲージ	2

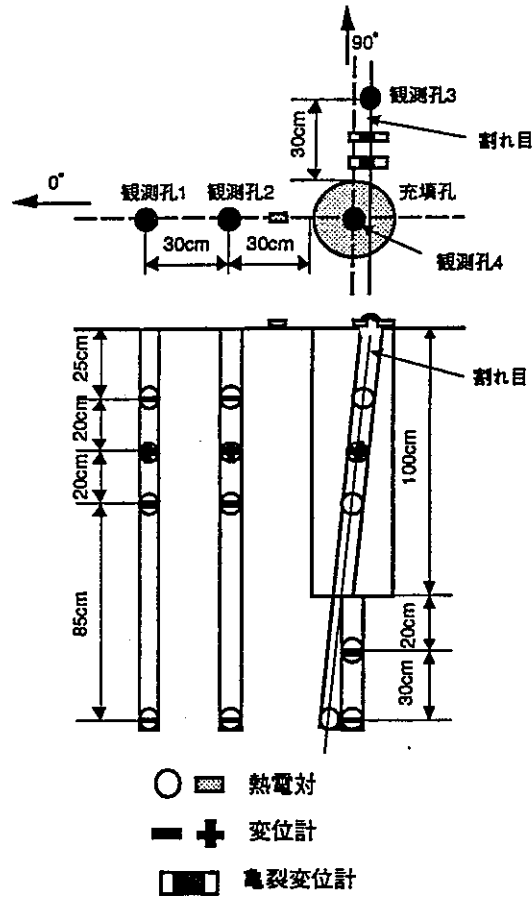


図-2.11 観測孔の計測器設置位置

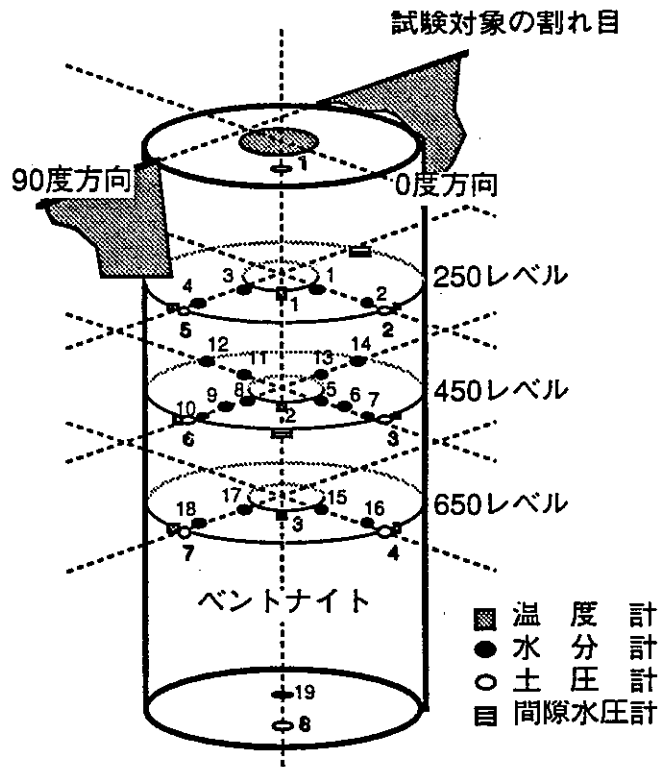


図-2.12 充填粘土内計測器設置位置

が可能である。ひずみ計も、450レベルには縦横2方向に設置した。 π ゲージは共和電業BCD-5Bを用いた。坑道床面に露出している割れ目の開口幅を測定するため、試験孔から10cmおよび20cmのところに設置した。ヒーターは坂口電熱の特注品で、温度制御用の温度計は坂口電熱Kタイプ4対式を用いた。

次に、計測ダイアグラムを図-2.13に示す。小型ひずみ計，亀裂変位計，土圧計および間隙水圧計は，スキャナ（共和電業(USB-50A-32)）を介してデータロガー（共和電業(UCAM-10A)）に接続し，熱電対は温度記録計（日本電子科学(T-839)）を介してデータロガーに接続し，パソコン（日本電気(PC-98NOTE)）に接続した。サイクロメータは，スイッチボックス（WESCOR(PS-10)）を介してボルトメータ（WESCOR(HR33T)）で計測を行った。

坑道内における計測状況を写真-2.4に示す。写真下の坑道床面が試験孔を設置した地点であり，坑道奥にはスキャナ，温度記録計，データロガー，パソコン，スイッチボックスおよびボルトメータを配置した計測小屋を設けた。

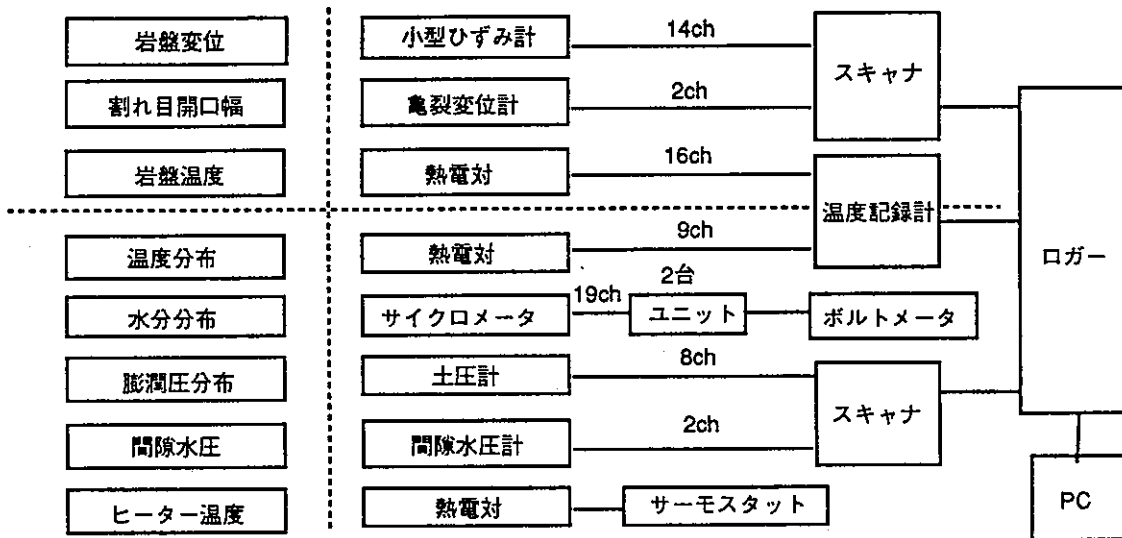


図-2.13 計測ダイアグラム

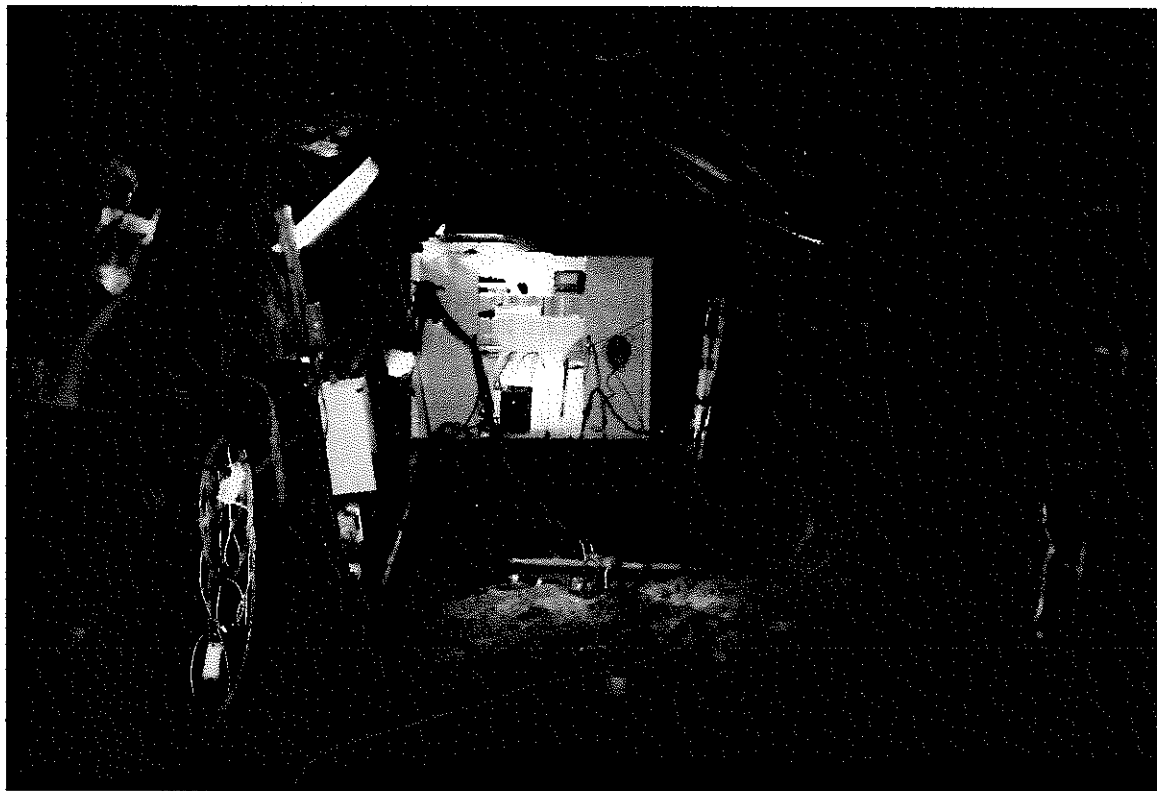


写真-2.4 坑道内部
(坑道床面に試験孔を設置。奥が計測用小屋)

3 計測結果

3.1 孔内載荷試験

孔内載荷試験は等分布載荷法（エラストメータ200）²⁰⁾とした。この方法は、試験孔内にゴムチューブ製のプローブを挿入し、水圧により試験孔孔壁に均等荷重をかけるものである。これより、孔径の変位から応力とひずみの関係を求め、孔内平均の弾性係数を求める。試験箇所はそれぞれの孔の中間点で行った。載荷パターンは、設定荷重まで増加し、その後除荷するという繰り返し載荷パターンを採用した。載荷荷重は、5.0MPaごとに設定し、最高20MPaまで実施した。載荷速度および除荷速度は、それぞれは0.5MPa/min, 1.0MPa/minである。求めた弾性係数の一覧を表-3.1に示す。

今回の測定結果は、表-3.2に示す昭和63年に実施された「坑道掘削に伴う周辺岩盤の岩盤挙動と物性変化に関する試験」の孔内載荷試験⁹⁾の結果とほぼ同じ値であった。観測孔3における測定値が他のものと比較して1桁小さくなっているが、これは割れ目の影響によるものと考えられる。

表-3.1 孔内載荷試験結果一覧

	弾性係数 (MPa)
観測孔1	31360MPa
観測孔2	23520MPa
観測孔3	3920MPa
観測孔4	11760MPa

表-3.2 深度別坑壁内部の弾性係数一覧⁹⁾

	弾性係数 (MPa)
D-1	55860MPa
D-2	18620MPa
D-3	13720MPa
D-4	22540MPa
D-5	37420MPa

3.2 温度

3.2.1 ヒーター温度

ヒーターは、サーモスタットを介して温度制御を行える設計とした。ヒーター表面温度はヒーター表面に設置した3深度での熱電対（図-2.12参照）によって計測した。ヒーター表面温度の経時変化を図-3.1に示す。

ヒーター温度は加熱時に中心温度が80℃になるように設定した。計測の結果、深度の高いHeater1（250レベル）の温度が80℃であり、Heater3（650レベル）での温度が約70℃で推移していることから、深度が浅いほうが温度が高くなった。充填孔から少し離れた所での岩盤表面の温度はほぼ12℃前後で一定の値であった。これは、ヒーターの影響以外の影響因子がほとんど見られないことを示している。

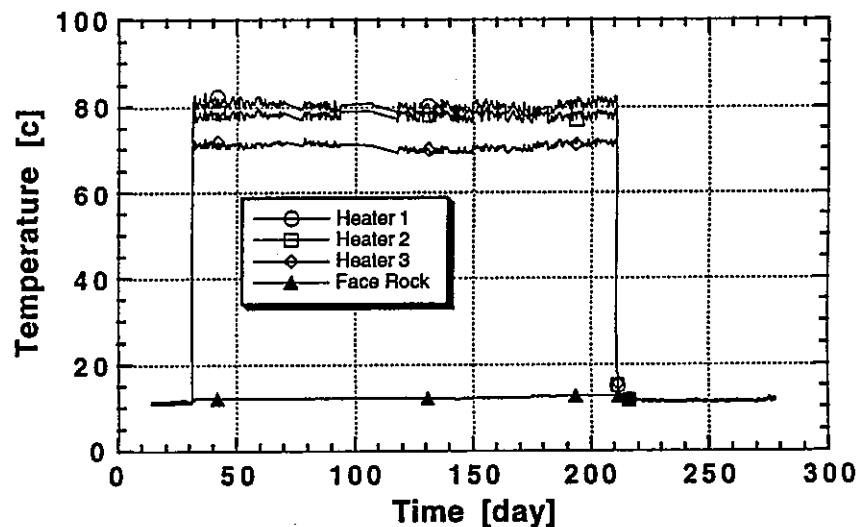


図-3.1 ヒーター表面温度経時変化

3.2.2 充填孔内温度

充填粘土の内部および表面には、ヒーターの加熱に伴う温度分布を計測するため、合計25点（内19点は温度計を兼ねたサイクロメーター）の熱電対を設置した（図-2.12参照）。粘土表面温度の経時変化を図-3.2に示す。また、粘土内部温度の経時変化を0度方向および90度方向別に図-3.3に示す。

粘土表面温度は、90度方向、250レベルで28℃、450レベルで30℃にほぼ加熱と同時に達した。650レベルでは26℃となった。90度方向はレベルが上がるにつれて温度が低くなった。一方、0度方向はレベルと温度の関係では450レベルが最も低い値となった。90度方向との温度の比較では、650レベルでは方向による温度差はないが、その他のレベルでは90度方向が7℃前後低い値となった。これは、割れ目からの地下水の供給が270度方向450レベル付近から発生しているため、0度方向では90度方向と比較して地下水による冷却作用が大きいためと考えられる。

加熱停止後は、もとの温度に加熱停止とほぼ同時に下がっており、深度や位置の違いによる温度差は見られなかった。

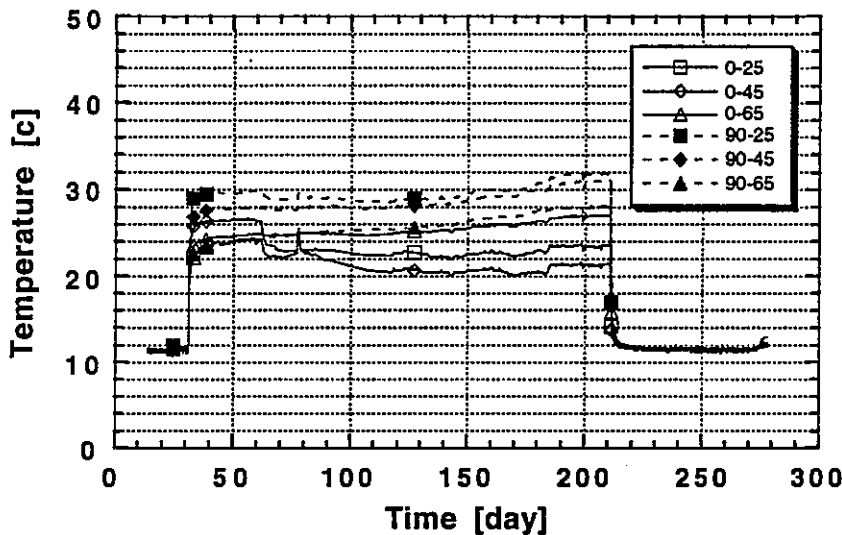


図-3.2 充填粘土表面温度分布
(凡例の0および90は測定方向、
25、45、65はレベルを表している。)

粘土内部温度では、0度方向に比べ90度方向の方が全体的に温度が高い値を示した。450レベル、0度方向の測点11および12と180度方向の測点5～7はヒーターをはさんで反対側の温度を示しているが、方向による差異はなくほぼ同様な温度分布となった。一方、90度方向の測点13および14と270度方向の測点8～10の比較では、測点14が早期

に計測限界（粘土内はサイクロメーターによる測定のため、水分量に対して計測範囲がある）を超えており、測点13も46℃付近と低い値で推移し計測限界を超えた。これは、この測定機器の位置付近の割れ目からちょうど湧水が発生しており、優先的に水の浸入が行われたものと考えられるため、試験終了後サンプリングを行い、確認を行うこととした。

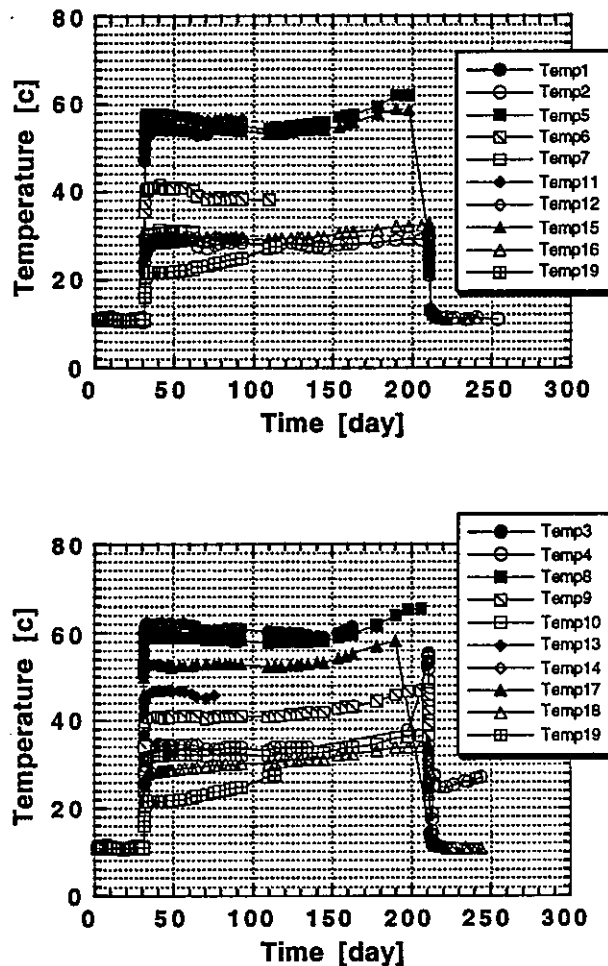


図-3.3 粘土内部温度変化
(上；0度方向，下；90度方向)

粘土内部の温度分布は、上記のものを除けば中心部で温度が最も高く、外側に向かって連れて温度が下降する状態となった。ヒーター中心温度がほぼ80℃であるのに対して粘土外側の0度方向では30℃前後、90度方向で30℃強であった。

加熱停止後は、0度方向ではほぼ加熱前の温度と等しくなっているが、90度方向では外側のものが26℃と温度が下がりきらなかった。

3.2.3 観測孔内温度

観測孔の温度は充填孔周囲に4本設置している熱電対（図-2.12参照）によって計測した。それぞれの温度の経時変化を図-3.4に示す。

観測孔1では初期温度10℃に対し、加熱後1500レベルを除きほぼ14℃となった。1500レベルでは11℃であり、ヒーター熱の影響が小さい。また、加熱試験期間中温度の変化はほとんどみられない。加熱停止後は、ほぼもとの温度である10℃に戻った。

観測孔2では、温度変化の傾向は観測孔1とほぼ同様であった。初期の温度はほぼ同じであるが、加熱後の温度は観測孔1と比較してすべての計測点において小さく、高いところで12℃程度であった。1500レベルにおいては観測孔1とほぼ同じ値となった。

観測孔3では、1500レベルの温度変化は観測孔1と同じような傾向となった。他の深度に関しては、250および450レベルはほぼ同様な値を示し、650レベルは加熱試験中全体を通して2℃弱低くなった。また、他の観測孔では温度上昇がほとんど見られないのに対して、250、450および650レベルでは時間経過にともない約2℃上昇した。

観測孔4では、1500レベルは他の観測孔と同様の傾向を示しており、値も観測孔3の物とほぼ同一の値となった。また、1200レベルでは1500レベルに対して加熱期間中約1℃高い値であった。

3.2.4 温度分布

これまで、ヒーター、充填孔内および岩盤内の温度の経時変化を示した。次に、試験場内の温度分布の経時変化を図-3.5に示す。これは、450レベルの断面の温度分布を示している。図では、縦軸が温度、横軸がヒーターの中心からの距離である。断面の計測点は、ヒーター表面、粘土内（3点）、粘土表面、観測孔1および2の7点である。計測範囲内の温度は加熱後一日で定常状態に達した。ここでの温度分布は、ヒーター

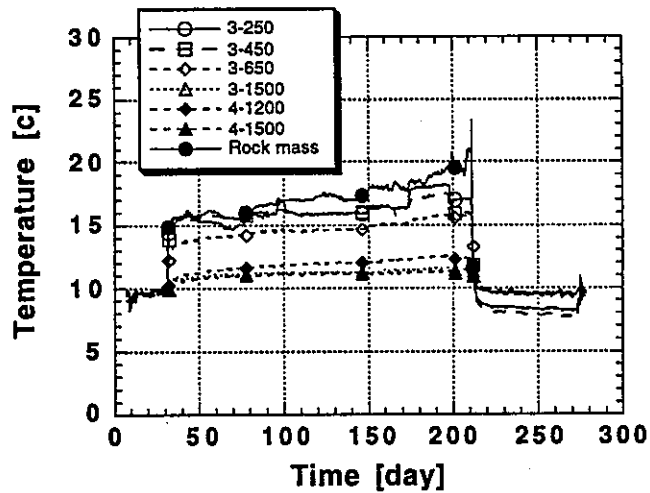
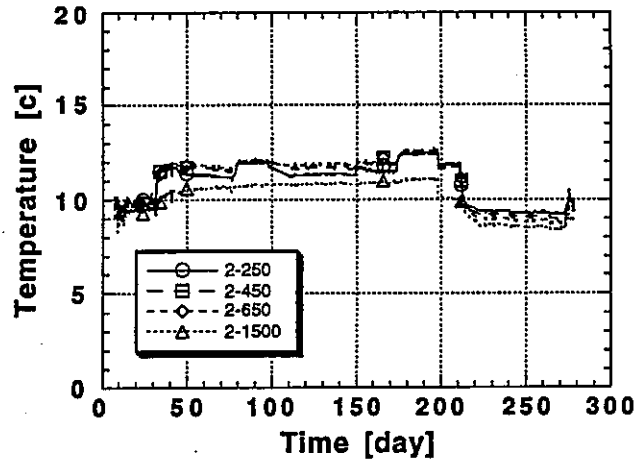
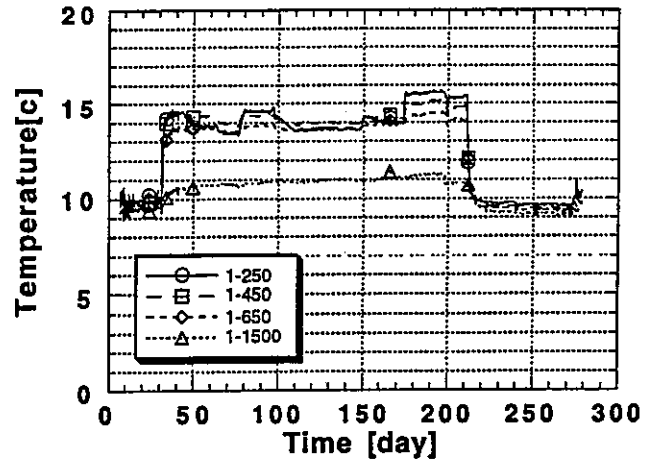


図-3.4 観測孔温度の経時変化
 (上；観測孔1, 中；観測孔2, 下；観測孔3及び4)

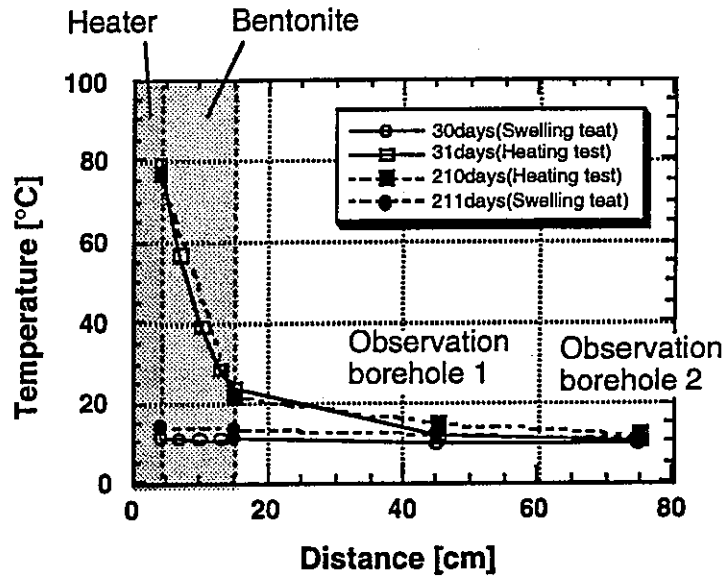


図-3.5 450レベルの温度分布

中心が80℃である場合、ベントナイト内で温度が下がり岩盤との境界面では30℃弱となった。岩盤内の温度勾配は粘土内と比較するとかなり緩やかである。この温度分布は、加熱試験中ほぼ一定であった。加熱試験終了後は、加熱時と同様ほぼ一日で温度が下がった。加熱終了時の温度は加熱試験前の温度とほぼ同じであった。

3.3 粘土膨潤圧

粘土の膨潤圧は粘土表面に設置した8つの土圧計（図-2.12参照）によって計測した。それぞれの膨潤圧の経時変化を図-3.6に示す。

計測開始後当初では膨潤圧が部分的に負の値を示したが、これは粘土設置後2日目に計測を開始したことにより既にある程度膨潤圧が発生した段階を初期値として零点設定したことが原因と考えられる。よって、図-3.6は計測終了時のサンプリングにあたり解放された膨潤圧を零として補正した値を示している。

最初の膨潤過程では、250レベルのNo.2を除いて10日目以降ほぼ定常に落ち着いた。0度方向（No.2,3,4）は約1.6MPaの膨潤圧となった。一方、90度方向では値に多少のばらつきがあり、中心にあたるNO.6では3.6MPaと比較的大きな値を示しているが、その上のNo.5で1.4MPa、下のNo.7で1.0MPaとなった。

加熱後、すべての地点で膨潤圧の減少がみられるが、その後はほぼ一定値で推移した。膨潤圧の大きさとしては、0度方向ではすべて0.8MPa以下になり、90度方向ではNo.6が2.5MPa前後である以外は、ほぼ1.0MPaとなった。

加熱停止後は、一時的に膨潤圧の低下が全体でみられるが、その後ほぼ一定値まで回復した。

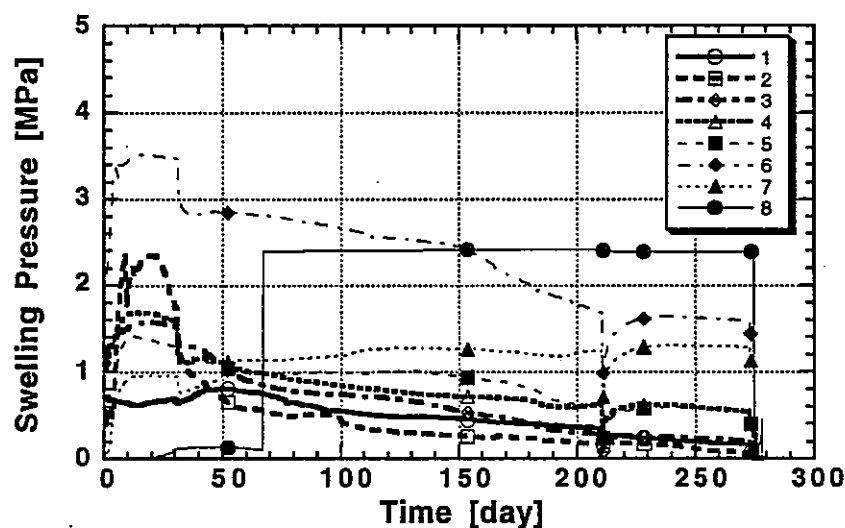


図-3.6 膨潤圧の経時変化

3.4 観測孔のひずみ

観測孔のひずみは小型ひずみ計（図-2.11参照）で計測した。ひずみの経時変化を図-3.7に示す。

充填粘土は初期の10日まで増加し、その後定常に達したのに対し、観測孔1のひずみは試験開始より20日過ぎまで僅かながら増加（口径が膨張）した。大きさは最大で450レベルの充填孔の接線方向（90度方向）が約 50μ であり、半径方向（0度方向）が 35μ であった。また、250、650および1500レベルでは半径方向のみの測定であるが、650レベルでは殆ど反応がみられず250および1500レベルでは初期値から 20μ の増加となった。加熱後は、すべてのセンサーにおいて急激に値が減少し、5日程度で値が落ち着いたが、二箇所において負の値（口径が収縮）になった。その後、徐々に値が上昇し、250レベルではほぼ 0μ 、450レベルでは接線方向が 60μ 、半径方向が 40μ 、650レベルでは -35μ 、1500レベルでは 15μ となった。加熱停止後は、加熱の場合とは反対にすべてのセンサーにおいて値が急激に上昇した。値の上昇後は約10日ではほぼ一定値に収束し、250レベルでは 45μ 、450レベルでは接線方向が 100μ 、半径方向が 75μ 、650レベルでは 10μ 、1500レベルでは 35μ となった。

観測孔2の計測結果では、経時変化や温度変化による測定値の変化は観測孔1とほぼ同様の傾向を示した。また、全体的にその振れ幅は小さくなり観測孔1に比較して充填孔の変化の影響は半分程度であった。ここでは、加熱前は250レベルで 25μ 、450レベル接線方向で 30μ 、半径方向で 5μ 、650レベルで 35μ 、1500レベルで 10μ で、すべて膨張傾向となった。加熱後の値は250レベルで 20μ 、450レベル接線方向で 50μ 、半径方向で -20μ 、650レベルで 35μ 、1500レベルで 5μ となった。加熱停止後は、250レベルで 50μ 、450レベル接線方向で 60μ 、半径方向で 10μ 、650レベルで 70μ 、1500レベルで 20μ となった。

観測孔3では、観測孔1および2に比較して値が大きかった。これは、孔内載荷試験の結果（Appendix参照）からも分かるように観測孔3が外力に対して変形しやすいためと考えられる。加熱後の挙動は、観測孔1および2では値は一時的な減少の後、増加して

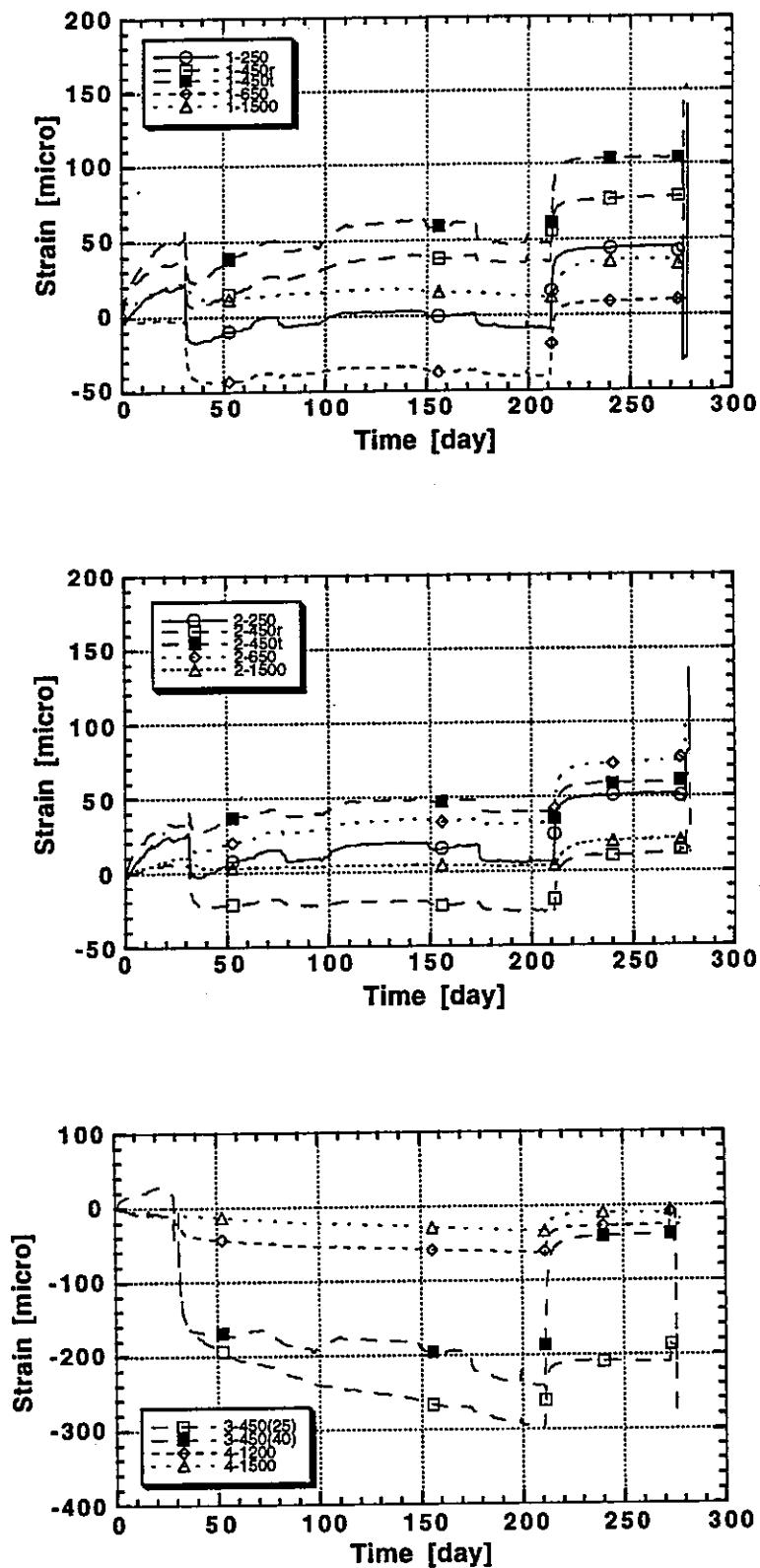


図-3.7 観測孔ひずみの経時変化
 (上；観測孔1, 中；観測孔2, 下；観測孔3及び4)

いるが、観測孔3では一時的な値の減少の後も減少の傾向は継続した。加熱停止後の挙動は観測孔1および2と傾向は同じであった。観測孔4の経時変化も観測孔3と同様の傾向であった。

3.5 粘土内部の水分ポテンシャル

充填粘土の内部には、粘土内に浸潤する水の動きを観測するため、合計19点のサイクロメーターを設置した（図-2.12参照）。経時変化および加熱に伴う粘土内部の水分ポテンシャルの変化を0度方向および90度方向別に図-3.8に示す。

粘土内水分ポテンシャルでは、粘土設置後10日頃から外側のサイクロメーターで急激な水分ポテンシャルの上昇が見られた。また、加熱直後に粘土の中間にあるサイクロメーターで水分ポテンシャルの上昇が始まった。しかし、この開始点が加熱による

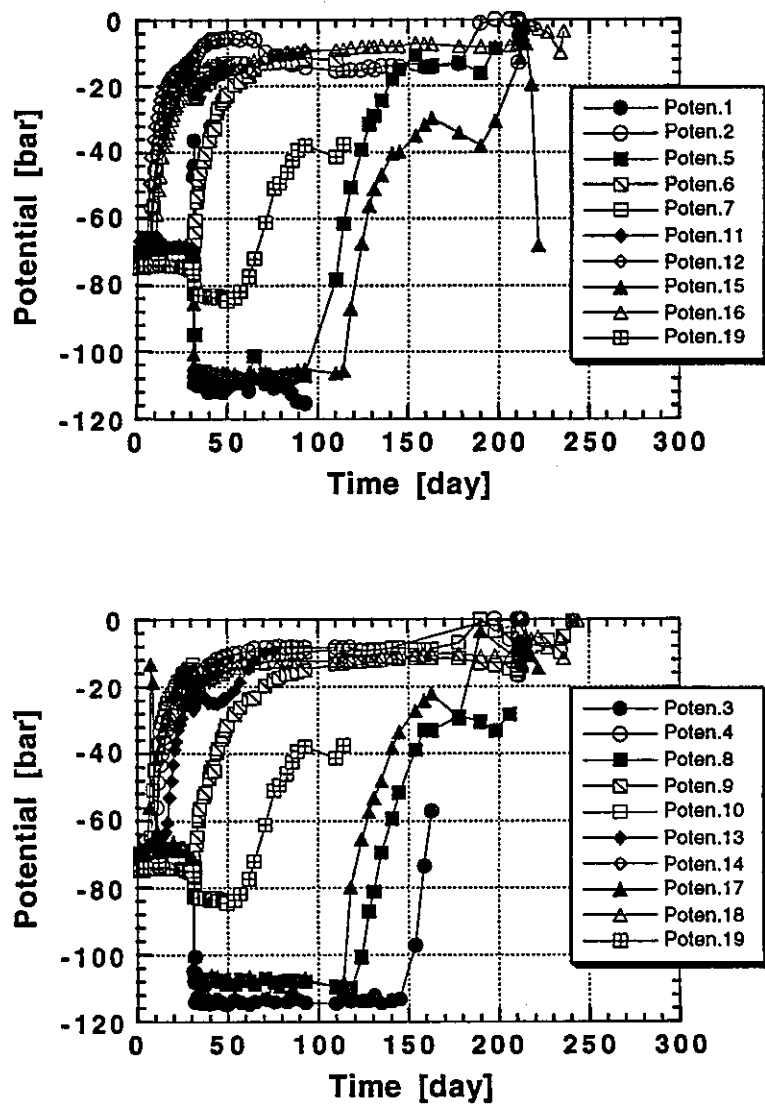


図-3.8 粘土内部水分ポテンシャル変化
(上；0度方向、下；90度方向)

ものか時間的なものかの判別はつかなかった。また、その後30日でヒーター下部に設置したサイクロメーターで値の上昇が始まった。ここで、計測が途中で終了しているものがあるが、このサイクロメーターの計測限界は飽和度100%であることから、その地点で粘土が飽和したものと考えられる。粘土内部に関しては、100日過ぎから値の上昇が始まっており、粘土内の方向による差異はなくほぼ同時期に開始した。

90度方向では、測点14が早期に測定限界以上となり測点13も20日過ぎには値が上昇していた。これは、粘土内側の水分ポテンシャルが100日過ぎから上昇しているのと比較して80日も早く内部に水の浸入が及んでいることになる。このことは、前節で述べたごとく温度が低かったことにも関連するものと考えられる。

これについては、この測定機器の位置付近の割れ目からちょうど湧水が発生しており、優先的に水の浸入が行われたと考えられるため、試験終了後サンプリングを行い、含水比を測定し確認を行うこととした。

また、緩衝材内の水分に関しては室内試験の結果から乾燥密度1.6g/cm³および1.8g/cm³の場合の含水比とサクシヨンの関係が求められている。ここで、サクシオンおよび水分ポテンシャルが共に圧力を測定していることに着目し、水分ポテンシャルから含水比を算出することを試みた。これまでの試験結果から、含水比 ω およびサクシオン ψ の間には、上記密度の範囲では密度に関係なく、以下のような関係式が成り立つことが分かっている²¹⁾。

$$\omega = 0.694 + (-0.106)\log(\psi) \quad (1)$$

ここで、サクシオン ψ と水分ポテンシャルの関係である次式

$$1\text{bar} = 1019.72\text{cmH}_2\text{O} \quad (2)$$

を代入して水分ポテンシャルと含水比の関係式を得る。この関係より求めた粘土内部含水比の経時変化を図-3.9に示す。ここでは、サイクロメーターの測定範囲内のポテンシャル値のみを有効と考え、換算値である含水比18%以上のものを表示した。

これより、粘土内は約28%の含水比で定常となっていることから、この状態を飽和とすると、理論的²²⁾には乾燥密度が1.6g/cm³弱ということになるが、膨潤圧が約1MPa

であることから推測することができる。この値が正しいとすると、試験を通じて確認された粘土の流出による密度の減少の程度は約 0.2g/cm^3 となるが、密度に関しては、サンプリングにより確認を行うこととした。

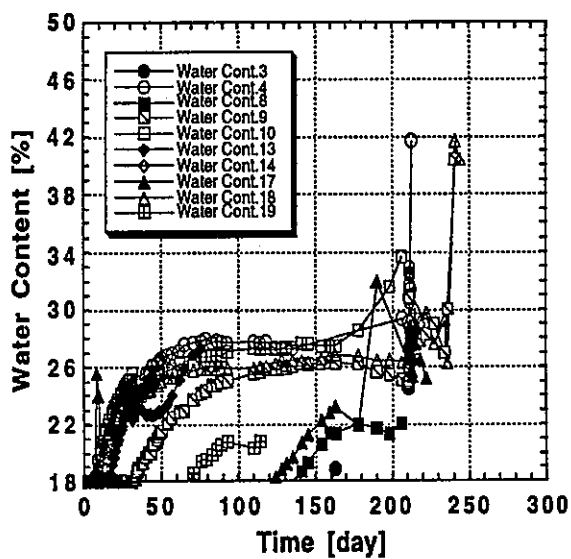
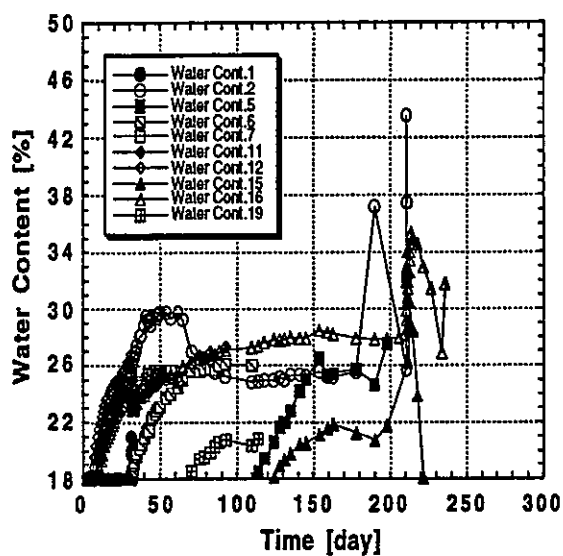


図-3.9 粘土内部含水比の経時変化
(上；0度方向，下；90度方向)

3.6 亀裂開口幅

試験対象としている割れ目には、粘土の膨潤やヒーターの加熱による熱応力の影響を把握するため、開口幅（初期の開口幅は数mm程度）を計測するひずみゲージを2つ設置した（図-2.11参照）。ここで、Disp1が充填孔側でDisp2が観測孔3側である。この、亀裂幅計測の経時変化を図-3.10に示す。

初期段階では、Disp1は亀裂の開口はほとんど変化しないがDisp2が徐々に収縮の方向に進んだ。Disp2が収縮を続けるうちに、それに引っ張られるようにDisp1が断続的に収縮の方向に値が動いた。その後、加熱と同時に両者とも開口の方向に進んでいるが、100日頃収縮のピークが発生した。その後は、再び開口の方向に進んでいるが、180日前後に収縮のピークが現われた。その後は、加熱停止後に大きく開口の動きを示し、その値でほぼ推移した。

亀裂開口の変位量は、最大で0.06mm程度となった。

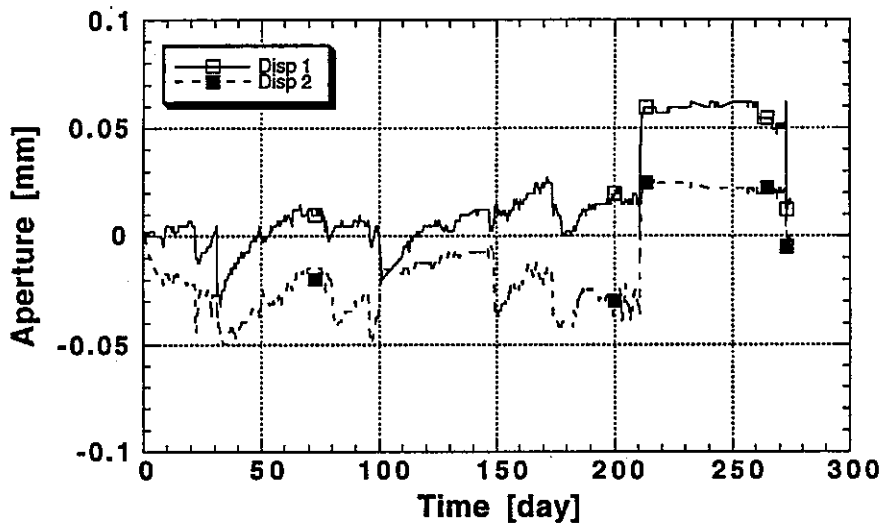


図-3.10 亀裂開口幅の経時変化

3.7 間隙水圧

試験孔周辺の水理状態（ここでは、間隙水圧の変化のみに着目）を把握するため、充填孔表面、粘土内および観測孔5（この孔は亀裂の変位を正確に測るために開発された亀裂変位計を設置するために設けられたもので、充填孔に対して観測孔3と対称な位置に配置されており、割れ目に対してほぼ直行していることから割れ目内の間隙水圧を測定することが可能である。）の3点に間隙水圧計を設置した（観測孔5以外のものは図-2.12参照）。

試験当初の試験領域の間隙水圧は約0.3MPaであったことから、粘土の膨潤による目詰まり効果で間隙水圧が回復することが予想された。また、割れ目内の間隙水圧と充填孔内の間隙水圧に差が生じれば、膨潤した粘土が試験対象の割れ目に浸入し割れ目と充填孔を別の空間に分離したことを表す一つの指標となると考えた。

粘土内の間隙水圧計は、充填粘土が飽和した後、充填孔内の水圧と粘土内の水圧を比較することで水のつながり具合を測る一手法になると考えた。間隙水圧の経時変化を図-3.11に示す。

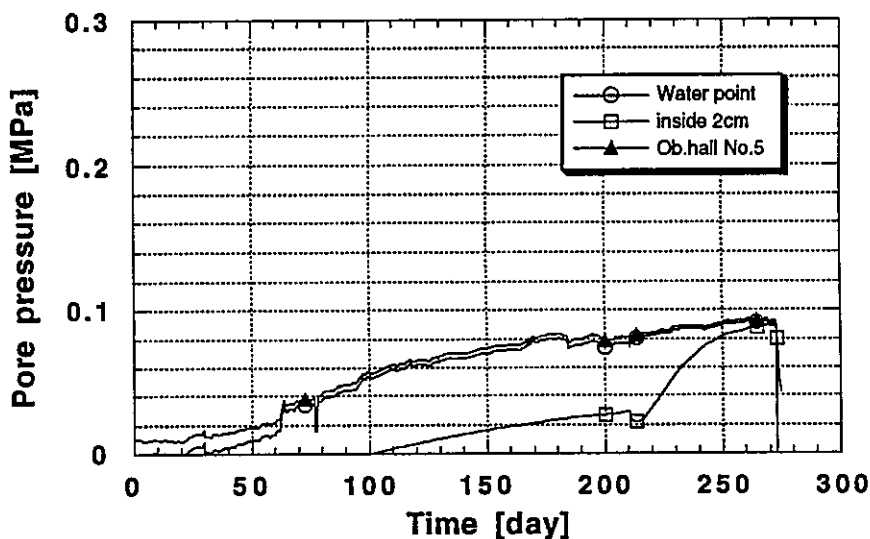


図-3.11 間隙水圧の経時変化

間隙水圧は、観測孔5および充填孔表面では粘土充填後徐々に上昇を始めているがその値は0.1MPa以下と小さい値となった。この原因として、充填孔上面からの漏水が考えられる。試験開始後から充填孔上面の止水を確実に行うことができなかったことから、水圧が思うように上がらなかったと考えられる。充填孔上面に関しては、試験と平行して漏水を抑さえるために再三にわたって止水工事を実施しており、充填孔上面からの湧水量も軽減しており、この効果が間隙水圧の上昇に関与しているものと考えられる。

また、粘土内の間隙水圧は100日まで正常な値を示していないが、これは計測器を粘土内に設置したため、計測器の周りの粘土が飽和するまで間隙水圧計の受感部に気泡が残っていることが原因と考えられる。この100日前後は、粘土内の水分の移動においても間隙水圧計近傍の値がほぼ飽和に達した時点である（図-3.8参照）。100日以降は徐々に水圧が上昇し、加熱停止後は急激な上昇へと変化し、充填孔表面の値とほぼ同じ値を示した。

4. 結言

4.1 まとめ

釜石原位置試験場において、熱-水-応力連成現象に関する性能評価研究の一環として、実条件でのニアフィールド環境の把握を目的に原位置における小型の人工バリア試験（粘土試験）を実施した。

計測の結果、次のようなことが分かった。

- ・試験場内の温度分布では、粘土の厚さが11cmの場合、ヒーター温度が80℃のとき、粘土と岩盤の境界面では30℃弱の値である。
- ・地下水の粘土への浸入に関しては、サイクロメーターの計測結果からブロックを用いた場合でもブロック間の境界は水みちとはならず、水は粘土の外側から順次内部へ浸入する。
- ・粘土の膨潤圧の発生は充填粘土の深度や方向によってばらつきが発生する。
- ・粘土の膨張による岩盤への影響は、割れ目近傍では顕著に現れるが、充填孔からの距離が30cmと60cmとを比較すると、60cmでの影響は30cmでの影響の約1/2である。
- ・試験終了後の粘土観察の結果、粘土設置時に見られた粘土ブロック間の境界は膨潤した粘土によって閉鎖されていた。この事は、ブロック間の境界は水みちとはならず、水は粘土の外側から順次内部へ浸入したという事実と一致する。
- ・試験に用いた計測器は、測定限界のあるサイクロメーターを除いて、計測中トラブルもなくすべて試験終了時まで計測を行うことができた。

しかし、本試験では、計測を行う上での問題点がいくつか挙げられる。本試験で選定した「割れ目」は、当初の水の流出量が600cc/分と比較的多いところであったことから、ベントナイトの膨潤圧を早期に発生させる意味では、この「割れ目」は膨潤圧の発生に適した環境であったと見なすことができる。本試験の充填粘土の流出現象を検証すると、膨潤粘土の流出挙動に関しては、菅野等の亀裂を模擬した実験によれば、完全拘束の状態まで膨潤した粘土は周辺の亀裂へ流出を開始し、膨潤圧は以後低下す

ることが示されている²³⁾。この実験では、0.3mmの模擬亀裂も扱っており、膨潤粘土がかなり細かい隙間へも浸入できることが明らかになっている。このことは、亀裂がやがて閉鎖するような状況では目詰まり効果が期待されるが、解放系では粘土が流出し続けることを示している。本試験の施工では、蓋の設置直後から計測用のコード伝い（「水みち」が発生）に水が溢れる状態であった。上記の膨潤粘土の特性から、この「水みち」は水を吸収した膨潤粘土の抜け道になってしまったものと考えられる。

試験の計測を続行するため、「水みち」を塞ぎ、適切な粘土の膨潤圧の測定を行えるよう止水作業を数回にわたり行ったが、閉鎖系を形成することはできなかった。この結果は、粘土膨潤圧に関して、試験孔上部の値がヒーターの加熱に対して他のセンサーとは異なり余り影響を受けていないものが、時間を追うに従い値が減少していることに影響が現われていると考えられる。つまり、この値の減少が粘土の流出を表していると考えられる。

本試験では、これらの影響を把握するため、試験終了後にサンプリングを実施し、分析を行うこととしている。分析の対象として、粘土の密度分布、含水比および流出粘土を含めた鉍物分析を実施する。

また、卓越した割れ目への粘土の浸入現象を把握するため、割れ目内の粘土粒子を採取し、鉍物分析を実施する。

4.2 今後の課題

本試験は、小型の人工バリアを対象とした原位置試験であるが、試験の結果、原位置での熱-水-応力連成現象に関する試験を行うために必要となる技術開発がいくつか挙げられる。これらをまとめると、

- ・人工バリアの施工では、試験期間中は坑道内は埋め戻されず空間を維持することから、粘土充填孔を閉鎖系とするための蓋の設置を確実に行わなければならない。
- ・地下水の供給が豊富なところでは、粘土の膨潤等設置初期から反応が現れることから、計測機器の計測は試験の設置後直ちに行わなければならない。
- ・水分計に関しては、低水分量から高水分量までの水分量に対応できる測定領域の広いセンサーの開発、あるいは各水分量に対応した水分計の併用が必要となる。
- ・各種計測コードの取り出しは地下水の「水みち」となる可能性が高いことからシールを確実に行わなければならない。
- ・湧水が極端に多いところでは、緩衝材の施工時には地下水の流量をコントロールする必要がある。

粘土試験でえられた経験は、すべて大型人工バリア試験へ活かされることが望まれる。

Appendix 室内試験

試験場での孔内載荷試験では岩盤の力学特性のYoung's率の測定を行ったが、試験の対象となる栗橋花崗閃緑岩のより詳細な岩盤物性を取得するため、各試験孔から得られたボーリングコアを用いて、室内試験を実施した。試験項目は、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、圧裂引張試験、熱伝導率、比熱、熱膨張率である。求められた物性値の一覧を表-Iに示す。室内試験では、ヤング率が約60000MPaとなっており、孔内載荷試験の結果から求められた約30000MPa弱の値と比較して2倍近い値となっている。これは、供試体では割れ目の影響が現れず、原位置での試験では割れ目の影響が現れた結果と考えられる。

熱伝導率では、解析に用いた値が 6.9×10^{-3} [cal/cm・sec・℃]であるのに対し、測定結果は 6.5×10^{-3} (2.71[W/m・K])であり、ほぼ妥当な値を解析に用いたといえる。また、比熱は0.2[cal/g・℃]であり、解析に用いた値と同じであった。

表-I 室内試験物性値一覧
(上；力学的物性値、下；熱的物性値)

岩盤物性	
一軸圧縮強度 (MPa)	119.9
ヤング率 (MPa)	59228
ポアソン比	0.3
圧裂引張強度 (MPa)	11.0
内部摩擦角 (Sc) (°)	22.6
粘着力 (MPa)	25.5

岩盤物性	室温	60℃	90℃
熱伝導率 (W/m・K)	2.71	2.61	2.54
比熱 (自然乾燥状態)(cal/g・℃)	0.201		
比熱 (強制乾燥状態)(cal/g・℃)	0.199		
熱膨張率($\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)	8.21		

参考文献

- 1)動力炉・核燃料開発事業団；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 TN1410 92-081,1992
- 2)佐藤信二他；緩衝材の熱-水-応力連成試験，—緩衝材大型試験設備の概要および加
熱試験計画について—,PNC N8410 90-060,1990
- 3)佐藤信二他；緩衝材の熱-水-応力連成試験，第2報，—加熱試験結果について—,PNC
N8410 91-075,1991
- 4)佐藤信二他；緩衝材の熱-水-応力連成試験，第3報，—加熱・部分注水試験結果につ
いて—,PNC N8410 92-043,1992
- 5)茂呂吉司他；緩衝材の熱-水-応力連成試験，第4報，—加熱・全面注水試験結果につ
いて—,PNC N8410 93-294,1993
- 6)A.S.P. Selvadurai；Thermal performance of a buffer material developed for use in a nuclear
waste disposal vault borehall -I.Experimental modelling,1988
- 7)R.Pusch and L.Börgesson；Final Report of the Buffer Mass Test-Volume II: test results,SKB
Technical report,85-12,1985
- 8)福田和寛；花崗岩中のトンネル掘削に伴う岩盤挙動と物性変化,第8回岩の力学国内
シンポジウム,pp.231-236,1992
- 9)浜辺修二他；花崗岩における原位置試験（昭和63年度）,動力炉・核燃料開発事業団
委託研究,PNC SJ4380 89-002,1989
- 10)浜辺修二他；花崗岩における原位置試験（平成元年度）,動力炉・核燃料開発事業
団委託研究,PNC PJ1380 90-002,1990
- 11)長久他；花崗岩における原位置試験（平成2年度）,動力炉・核燃料開発事業団委託
研究,PNC PJ1380 91-001,1991
- 12)長久他；花崗岩における原位置試験（平成3年度）,動力炉・核燃料開発事業団委託
研究,PNC PJ1380 92-001,1992
- 13)長久他；花崗岩における原位置試験（平成4年度）,動力炉・核燃料開発事業団委託

研究,PNC PJ1380 93-002,1993

14)長久他；釜石鉱山における深部地質環境特性調査（平成5年度）,動力炉・核燃料開発事業団委託研究,PNC ZJ1380 94-001,1994

15)五月女敦他；地層処分場の熱的安定性の検討,PNC TN1410 92-054,1992

16)藤田朝雄他；緩衝材の熱物性試験,PNC TN1410 92-052,1992

17)動力炉・核燃料開発事業団；汎用非線形構造解析システム FINAS version 11.0使用説明書,PNC N9520 89-019,1989

18)日本瓦斯協会；LNG地下式貯蔵指針,1981

19)クニミネ工業（株） 私信

20)たとえば土質工学会；岩の調査と試験,1989

21)竹内真司,原啓二；高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材中の水分の気・液二相移動,動燃技報No.89,pp.57-62,PNC TN8410 93-302,1993

22)たとえば中野政詩；土の物質移動学,東京大学出版会,1991

23)菅野毅,若松久夫；ベントナイト緩衝材の流出挙動,日本原子力学会「1991春の大会」要旨集,1991

謝辞

本試験において、原位置試験では試験の設置から計測全般において日鉄工業（株）の野口氏に、試験の設置において（株）間組の雨宮氏に非常なご協力をお願いした。また、室内試験の実施においては三井建設（株）の木山氏に多大のご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。