



熱-水-応力連成モデルの開発・確証に関する国際共同研究「DECOVALEX」の経緯と今後の取り組みについて

藤田 朝雄 千々松正和

東海事業所環境技術開発部

資料番号：95-10

Results and Future Plan on International Co-operative Research Project, 'DECOVALEX'

Tomoo Fujita Masakazu Chijimatsu
(Waste Technology Development Division, Tokai Works)

「DECOVALEX」は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における熱-水-応力連成モデルの開発・確証を目的とした国際共同研究であり、7カ国11機関の参加のもとに、1991年9月より3カ年計画で、各機関から提案された連成試験データ等の解析、モデル/解析コードの比較検証等の作業が進められてきた。動燃事業団は、本研究の効果的推進と国際協力等の観点から「DECOVALEX」には、発足の準備段階から参画し、緩衝材大型試験設備で取得したデータを提供して、共同解析、取りまとめを行う等、積極的に対応した。本共同研究により、各国の連成試験データ等が共有化され、各種の連成モデル/解析コードの適用性、改良点、課題等が明らかにされた。

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における廃棄体周辺では、廃棄体の発熱、緩衝材への地下水の浸潤および浸潤による膨潤圧の発生、岩盤内の地下水流動および地圧の作用という複数の現象が相互に作用し合って生じることが予想される。この現象の解明は、地層処分の研究を行っている国に共通の重要な課題の一つである。「DECOVALEX」(International co-operative project for the DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation)は、このような熱-水-応力連成モデルの開発・確証を目的とした国際共同研究であり、7カ国11機関の参加のもとに、1991年9月より3カ年計画で、各機関から提案された連成試験データ等の解析、モデル/解析コードの比較検証等の作業が進められてきた。

本報告では、「DECOVALEX」の経緯(目的、運営方法、組織等)、動燃事業団の対応および成果と今後の取り組み等について論ずるものである。

2. 「DECOVALEX」の経緯

「DECOVALEX」は、スウェーデンのSKI

(Swedish Nuclear Power Inspectorate)の提案により、1991年4月に発足し、以下のとおり研究活動を進めてきた。

2.1 目的

「DECOVALEX」では、一同に会した場において熱-水-応力連成試験データの相互提供、熱-水-応力連成モデル/解析コードの適用性評価および検証、熱-水-応力連成モデルの確証試験の設計提案を目的としている。

2.2 運営方法・組織(図1参照)

「DECOVALEX」では、参加機関(Funding Organization)の代表者による調整会議(Steering Committee meeting)とワークショップが年1~2回程度開催される。調整会議は、プロジェクトの運営、予算管理、ワークショップの開催等について調整を図る場であり、原則として参加機関の参加の下に行われる。ワークショップでは、各参加機関が編成する研究チーム(Research Team)の参加の下に、実際の解析結果の発表・討議を行う。また、研究チームは活動成果の論文作成等も行う。その他、専属事務局が設置されプロジェク

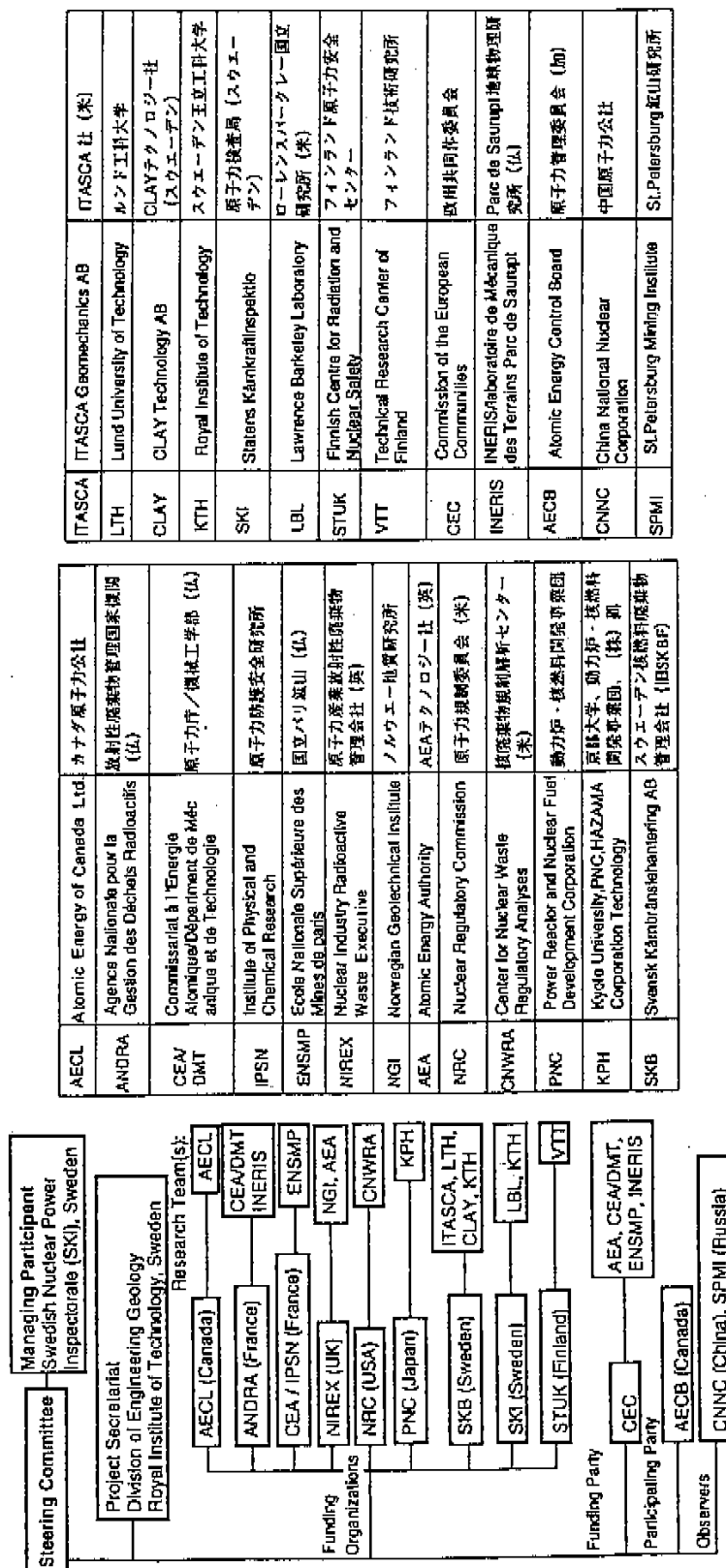


図1 DECOVALEXの組織

ト報告書、図書の作成等を行っている。

2.3 研究活動

これまでの研究活動を以下に示す。

- ・1990年6月 発足準備会：3カ年研究計画、組織運営計画(案)作成
- ・1991年4月 プロジェクト発足会議：3カ年研究計画、組織、体制の承認
- ・1991年9月 第1回調整会議
- ・1992年5月 第1回ワークショップ、第2回調整会議(スウェーデン)
- ・1993年3月 第2回ワークショップ、第3回調整会議(アメリカ)
- ・1993年10月 第3回ワークショップ、第4回調整会議(日本)
- ・1994年5月 第4回ワークショップ、第5回調整会議(イギリス)
- ・1994年10月 第5回ワークショップ、第6回調整会議(フランス)
- ・1995年3月 第7回調整会議(アメリカ)

これまでに扱った解析例題(BMT;ベンチマークテスト、TC;テストケース)を表1に、活動スケジュールを図2に示す。また、研究成果報告書等は以下のとおりである。

(1) DECOVALEX発行

- * DECOVALEX—Mathematical Models of

Phase I	BMT1					
	BMT2					
	TC1					
Phase II	BMT3					
	TC1:2					
Phase III	TC2					
	TC3					
	TC4					
	TC5					
	TC6					
Workshops	Series No.	1	2	3	4	5
	Date	'92.5	'93.3	'93.10	'94.6	'94.10
	Location	Sweden	USA	Japan	UK	France

図2 活動スケジュール

Coupled T-H-M Processes for Nuclear Waste Repository I, SKI report, 1993

- * DECOVALEX—Mathematical Models of Coupled T-H-M Processes for Nuclear Waste Repository II, SKI report, 1994

- * Development of Coupled Models and Their Validation against Experiments—DECOVALEX Project, GEOVAL '94

- * DECOVALEX—Mathematical Models of Coupled T-H-M Processes for Nuclear Waste Repository III, SKI report, 1995 (作成中)

- * Mathematical modelling and experimental studies of coupled thermo-hydro-mechanical processes in fractured media. —Recent developments based on the DECOVALEX—project on issues related to geological disposal of radioactive waste, (出版準備中)
- * THERMO—HYDRO—MECHANICAL COUPLING IN ROCK MECHANICS, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1995

(2) 動燃事業団発行

- * Technical report of TC-3, Big-Ben experiment (作成中)

- * 放射性廃棄物処分場を想定した亀裂性岩盤の熱-水-応力連成解析について、第9回岩の力学国内シンポジウム、1994

- * 亀裂性岩盤の連成解析手法の確証プロジェクト DECOVALEX, 土と基礎, 1995(投稿中)

表1 DECOVALEXで検討された問題一覧

問題名	問題の概要	目的
BMT1	二つの直立する亀裂を持つ領域(横3,000m×高さ1,000m)の中央部に処分施設が設置され、そこから発熱する状態で二次元熱・水・応力連成問題	多くの亀裂を含む広い領域での問題に対する計算コード適用性の検討
BMT2	4つの交差する亀裂と9つの岩体ブロックからなる塊(0.75×0.5m:二次元)で発熱元を持つ熱・水・応力連成問題	無対流を含む塊での熱・水・応力連成コードの比較。特に亀裂形状が単純であるので不連続体と連続体手法の直接比較が可能
BMT3	現実的なランダムな分布を持つ亀裂場(50×50m:二次元)での処分場周辺の熱・水・応力連成問題	ニアフィールドの解析可能性の検討
TC1	単一亀裂を持つ供試体のせん断挙動と透水性変化の試験	単一亀裂のせん断応力-ひずみの構成則と開口幅-透水係数関係モデルの検証
TC1:2	TC1と基本的に同じだが、実験の幾何学的条件を改良した試験	同上
TC2	フランスで行われた原位置岩盤加熱試験(10×10×5m)	特に、熱・応力連成問題の実験問題をを用いた検証
TC3	日本で行われた大規模縫合材試験による熱・水・応力連成問題	縫合材中の飽和、不飽和領域での熱・水・応力連成問題の検証
TC4	フィンランドで行われた温度制御のによるせん断試験。単一亀裂を供試体が含む。	単一亀裂の熱・水・応力連成挙動の構成則の検証
TC5	アメリカで行われた直接せん断試験によるせん断-流れ試験	自然亀裂の熱・水・応力連成挙動の構成則の検証
TC6	スウェーデンで行われた単一亀裂に対する単孔式注入試験	自然の原位置亀裂の熱・水・応力連成挙動の解析の検証

3. 動燃事業団の対応

3.1 研究チーム

動燃事業団は、大学等の研究者を含む研究チームKPH (Kyoto university, PNC, and Hazama) を編成し、連続体の連成コードTHAMESを改良して、不連続性岩盤の連成現象に関する解析評価や、緩衝材大型試験データを提供し、その解析結果の取りまとめ等の作業を進めてきている。

<研究チームメンバー>

- ・京都大学 大西有三教授
- ・岩手大学 小林晃助教授
- ・ハザマ 千々松正和、雨宮清
- ・動燃事業団 原啓二、藤田朝雄、茂呂吉司

3.2 これまでの成果

熱-水-応力連成現象に関する様々なベンチマークテスト、テストケース(表1)の解析比較を通じて、各種の連成モデル/解析コード(表2)の適用性、改良点、課題等が明らかになった。本研究チームは主として、BMT-1、BMT-3、TC-3の連成問題に取り組み、様々な知見を得るとともにこれまで開発したモデル/解析コードがおおむね適用し得ることや、改良点、今後の課題等を明らかにすることができた。BMT-1

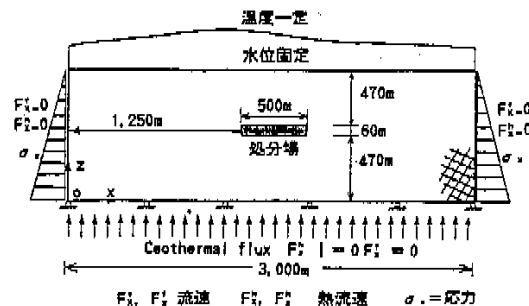


図3 ファーフィールド問題 (BMT-1)

は、二つの直交する亀裂を持つ領域(横3,000m×深さ1,000m)の中央部に処分施設が設定されている場(ファーフィールド)を対象とし、処分施設からの発熱状態における二次元熱-水-応力連成問題である(図3)¹⁾。BMT-3は、現実的なランダムな分布を持つ亀裂場(50×50m:二次元)での人工バリア周辺(ニアフィールド)の熱-水-応力連成問題である(図4)²⁾。TC-3は、動燃事業団で実施した緩衝材大型試験設備(BIG-BEN)における熱-水-応力連成問題である(図5)³⁾。以下にそれらの共同解析を通じて得られた知見等の概要を示す。

(1) BMT-1

温度変化により生じる浮力の影響による自然対流現象を表現するためには、地下水の基礎式において、水圧の差による地下水移動の項を改良する必要がある。このような取り扱いを行わない場合には、自然対流現象が全く異なって表現される。

地下水流速は、透水係数の応力依存性のモデル化の違い、連続体・不連続体の違いにより、全く異なる結果になる可能性がある。

亀裂部分と岩体部分の熱的特性に差がない場合には、温度分布は連続体・不連続体手法とも、おおよそ同じ結果となる。

変形は、亀裂を陽に評価する不連続体手法の方が連続体手法よりも大きい結果となる。また、不連続体手法として、ジョイント要素を用いても個別要素法を用いても変形の評価はさほど変わらない。

(2) BMT-3

日本では、個別要素法による解析は余り一般的ではないが、欧米では、かなり用いられている。しかし、岩盤の亀裂が多い場の問題では、解析領域の拡張、主要な亀裂のみの抽出、統計処理等が必要となる。また、非定常解析を行うためには、かなり高速な計算機が必要となり、ハード面での

表2 DECOVALEXで用いられた解析コード一覧

コード名	解析チーム	連成問題	特徴
MOTIF	AEOL(カナダ)	BMT2, TC1, TC11, 2, TC6	有限要素法: 三次元の浸透流、熱移動および類似定常の熱-水-応力連成解析
THAMES	KPH(日本)	BMT1, BMT3, TC3, TC5	有限要素法: クラッキングテンソルを用いた熱-水-応力連成解析
ADINA-T & JRTEMP	VTT(フィンランド)	BMT2	有限要素法、二次元熱移動解析(ADINA-T) 浸透流を伴わない変形解析(JRTEMP)
ROCKMAS	LBL(アメリカ) KTH(スウェーデン)	BMT2, TC1, TC11, 2, TC6	有限要素法: ジョイント要素を用いた二次元熱-水-応力連成解析
CHEF HYDREF VIPLEF	ENSMP(フランス)	BMT1, TC2	有限要素法: ジョイント要素を用いた二次元熱-水-応力連成解析
TRIG-EF & CASTEM-2000	CEA/DMT(フランス)	BMT1, BMT3	有限要素法: 熱-水-応力連成解析
NAPSAC	AEA(イギリス)	BMT3, TC6	亀裂ネットワーク手法(DEN): 浸透流解析
FRACON	AEOL(カナダ)	TC6	有限要素法: ジョイント要素を用いた熱-水-応力連成解析
ADAQUS	CNWR(アメリカ) CLAY(スウェーデン)	TC3, TC5	有限要素法: 熱-水-応力連成解析
FLAC(2D)	ITASCA(スウェーデン)	BMT3	差分法: 熱-水-応力連成解析
UDEC	CNWR(アメリカ) INERIS(フランス) NCI(ノルウェー) ITASCA(スウェーデン) VTT(フィンランド)	BMT1, BMT2 BMT3, TC1, TC11, 2	個別要素法(DEM): 変形するブロックの熱-水-応力連成解析
3DEC	INERIS(フランス)	TC2	個別要素法(DEM): 三次元熱-応力連成解析

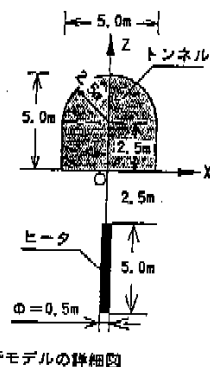
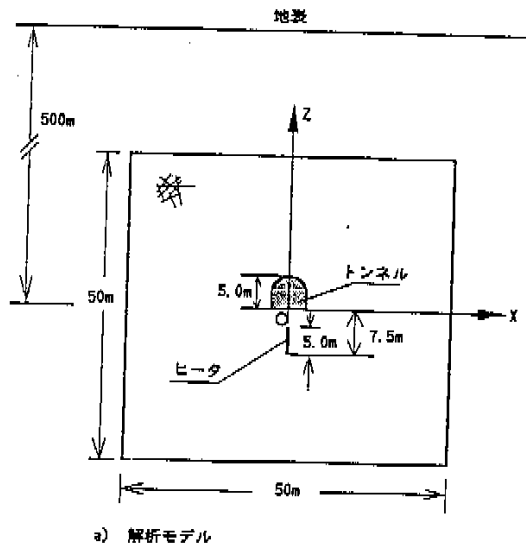


図4 ニアフィールド問題 (BMT-3)

課題があることが明らかになった。

連続体モデルは現在のところ最も連成問題に適用しやすいモデルといえるが、亀裂場のモデル化に課題が残る。今回の検討の結果、変形による透水性の変化を、どのようにモデル化するかが、解析結果に大きく影響することが明らかになった。

亀裂ネットワークモデルは浸透流解析に重点がおかれており、地下水の流れが変形に与える影響を考慮することは現状では難しい。

温度解析については、全モデルで同様の結果を示したが、温度の亀裂内の浸透流への影響を考慮することは難しく今後の課題となっている。変形と浸透流は、モデルにより異なる結果を示しており、亀裂のせん断特性のモデル化、亀裂面内の浸透経路等の評価が今後の課題となっている。

(3) TC-3

緩衝材を取り扱ったテストケースとして動燃事

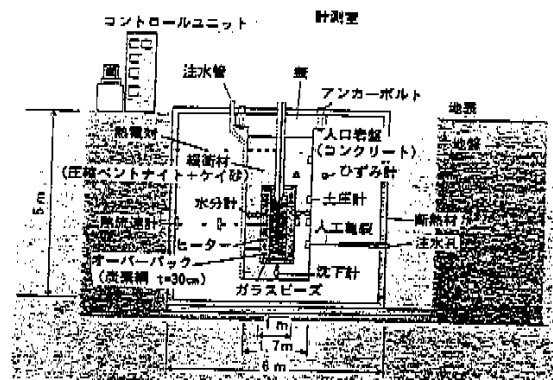


図5 緩衝材大型試験設備 (TC-3)

業団で実施した緩衝材大型試験の結果を提案するとともに他のモデルとの比較を実施した。この問題には、熱-水-応力が完全に連成したモデルと水-応力のみで連成モデルに熱解析をイテレーションで組み込むモデルが用いられた。また、日本、スウェーデンチームは、不飽和水分移動に温度勾配による水分拡散を考慮し、アメリカチームはそれを考慮せずに不飽和浸透流のみの解析を実施した。その結果、高含水領域の浸潤挙動はどの解析でも実験値にほぼ一致した。これは、それぞれ含水比に対するパラメータの非線形性を考慮したことと、高含水領域では、水分拡散の影響が小さいためである。水分量が初期値より低下する低含水領域については、水分拡散が大きく寄与することから、信頼性の高い水分拡散係数の温度依存性のデータが重要となる。また、膨潤挙動に関しては、現在のところ直接その挙動を取り扱うモデルはなく、膨潤挙動モデルの開発が今後の課題となっている。

4. 今後の取り組み

1994年10月にフランスで行われた第6回調整会議において、当初の3カ年研究計画をさらに3カ年延長して共同研究を進めることが確認された。動燃事業団としても、本試験研究の効果的推進等の観点から、継続して積極的に対応していくこととした。

第2フェーズでは、不飽和・不連続性岩盤中の熱-水-応力連成モデル/解析コードの開発・検証に関する研究として、原位置試験に重点を置くことになり、Task 1としてNIREX (イギリス) の提案するSellafieldにおける立坑試験をTask 2

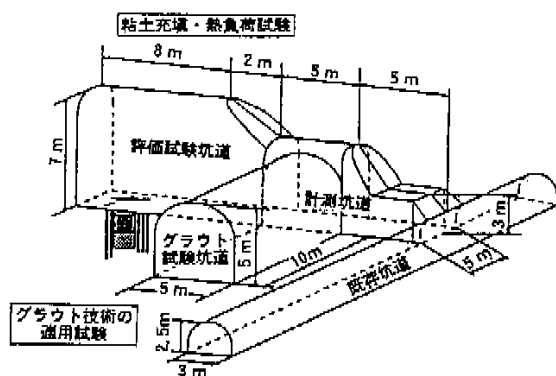


図6 釜石人工バリア試験鳥瞰図

として動燃事業団が釜石で実施中の人工バリア試験を中心に共同解析を進めることになった。また、前フェーズでも議論された岩盤不連続面のモデル化(Task 3)と性能評価における連成現象の取り扱いに関する科学的見解のとりまとめ(Task 4)も行うこととなっている。

4.1 釜石人工バリア試験(図6参照)⁴⁾

これまでに動燃事業団東海事業所の大型緩衝材試験設備において、人工バリアの熱-水-応力連成現象に着目した工学規模の試験を実施している。今後は、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の把握、周辺岩盤を含むニアフィールド性能の定量的評価および大型試験による人工バリアの品質性能の確認を行い、地層処分技術の信頼性向上をはかることが重

要となっている。そのため、釜石原位置試験場において、人工バリアの品質性能の確認およびその実岩盤条件下でのニアフィールド連成挙動を評価することが必要となっている。そこで、原位置において粘土膨張・熱負荷によるゆるみ領域の影響評価試験を実施することとした。

試験工程は試験坑道の掘削、岩盤特性調査、試験孔の掘削および試験、緩衝材施工、連成試験の順であり、約1年半かけて熱-水-応力連成データを取得する(表3)。

5. おわりに

本報告では、地層処分における熱-水-応力連成モデルの開発・検証を目的とした国際共同研究「DECOVALEX」の経緯(目的、運営方法、組織等)、動燃事業団の対応および成果ならびに今後の取り組みについて論じた。

「DECOVALEX」に参加することにより、熱-水-応力連成現象に関する様々なモデルや解析コードを一つの場で議論することができ、その多くのベンチマークテストやテストケースに関する適用性を評価することができた。また、各々の室内試験や原位置試験のデータを共有化することができた。これらの活動は、今後、熱-水-応力連成現象に関するモデル化や試験に資するものと思われる。

「DECOVALEX」の目的の一つに、熱-水-応力連成現象に関する数学モデルの検証がある。しかしながら、実際は各モデルを用いた計算結果や実験結果との比較に留まっており、モデルの確

表3 熱膨張・熱負荷による緩み領域の影響評価工程

項 目	内 容	工 程				
		平成5年	平成6年	平成7年	平成8年	平成9年
試験計画書の検討						
試験坑道および計測坑道の掘削						
岩盤特性調査	試験・計測孔内壁面観察 透水試験 孔内膨張試験 機軸設置 計測					
試験孔の掘削および試験	試験・計測孔内壁面観察 試験孔掘削・壁面観察					
岩盤特性調査	ポンプ 孔内膨張試験 室内岩石試験					
緩衝材施工	孔口周り工事 緩衝材の設置(締め固め方式) 加熱体、緩衝材中の計測の設置 プラグ(ふた)の施工					
連成試験	膨張・加熱 注水ポンプ 計測 トモグラフィ 孔内膨張試験 透水試験					

証方法やモデルを性能評価上どのように使用していくかまでの知見は得られていない。これらは、今後の第2フェーズで取り扱われる重要な項目になっている。

参考文献

1) DECOVALEX—Mathematical Models of Coupled T—H—M

- Processes for Nuclear Waste Repository I, SKI Report, (1993).
- 2) DECOVALEX—Mathematical Models of Coupled T—H—M Processes for Nuclear Waste Repository II, SKI Report, (1994).
- 3) DECOVALEX—Mathematical Models of Coupled T—H—M Processes for Nuclear Waste Repository III, SKI Report, (1995) (作成中).
- 4) T.Fujita, Y.Sugita, T.Sato, H.Ishikawa and T.Mano : Plan of Coupled Thermo—Hydro—Mechanical Experiment at the Kamiishi Mine. PNC TN8020 94-005, (1994).