

# 地層処分システム隔離性能に関する 稀頻度事象定量化手法の検討(Ⅲ)

—地下水シナリオの変動のモデル化に関する概略的検討—

## (要 約)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1995年3月

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
ㄨ	J1222 95-001	1995.8.23
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

株式会社 三菱総合研究所

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱には十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。また今回の配布目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術管理部 技術情報室

地層処分システム隔離性能に関する  
稀頻度事象定量化手法の検討（Ⅲ）  
－地下水シナリオの変動のモデル化に関する概略的検討－

大久保博生\*

要 旨

本年度は、まず、前年度に一例として作成した火成活動に関するインフルエンス・ダイヤグラムに関するパラメータ、方程式、計算モデルなどのリスト・アップ・検討を行った。

次に、複数のFEPからシナリオを自動的に生成するためのシナリオ作成支援システムの試作を行い、パラメータ連鎖を作成するためのシステム概念に関する検討を行った。

最後に、各FEPの基本モデル解析フレームでの取り扱い方法の検討を行った。

---

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により、実施した研究の成果である。

契約番号：060D0249

事業団担当部課及び担当者：東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

牧野 仁史 殿

\* 地球環境研究センター エネルギー・資源研究部

LIMITED DISTRIBUTION  
PNC ZJ1222 95-001  
March, 1995

Study of Quantitative Assessment Methods of Events with  
an Extremely Low Frequency of Occurrence concerning  
Performance of Waste Disposal Isolation System : Part(III)

-Preliminary Study on the modeling of Alternative Groundwater Scenario-

Hiroo Ohkubo\*

Abstract

This year, in the first step, the parameters, equations, and associated calculational models for each of influences on magma intrusion scenario described last year were listed up and discussed.

Secondly, a pilot system model for composing many FEP's to construct various scenarios automatically has been developed, and then, it was discussed on how to expand this model in order to generate the parameter chains.

Finally, which FEP could be treated in each basic analysis model was discussed.

---

This report is the result of research conducted by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No.:060D0249

Department, section, and the name of staff in charge:

Hitoshi Makino, Geological Isolation Technology Section, Waste  
Technology Development Division, Tokai Works

\* Energy and Natural Resources Dept., Research Center for Environment  
and Development.

# 目 次

	頁
まえがき .....	1
1. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオのモデル的取り扱い .....	3
のためのFEP's間の相関関係の検討・整理	
2. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ作成支援システムの構築 .....	7
3. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオのシミュレーション .....	12
方法の検討	
あとがき .....	17
参考文献 .....	19

# 表 目 次

	頁
表 1 P S M上のインフルエンス（F F 5）に関連し得る ----- 定量的な関係の記述例	6
表 2 開発したシナリオ自動展開ツールの特徴-----	7
表 3 各F E P連鎖の影響例と基本モデル解析フレームとの関連性 ----- の有無	1 3

# 図 目 次

	頁
図 1 パラメータベースインフルエンスダイアグラム..... (パラメータ連鎖)作成手順	3
図 2 (1) 火成活動のファーフィールドへの影響を表す ..... インフルエンス・ダイアグラム	4
図 2 (2) 火成活動のニアフィールドへの影響を表す ..... インフルエンス・ダイアグラム	5
図 3 FEP連鎖とパラメータ連鎖の接続概念 .....	1 1
図 4 パラメータ等の相関関係の階層構造表現 .....	1 4
図 5 PSM上のインフルエンス(F F 5)に関連し得る定量的な ..... 関係のモデルフレームへの分類並びに階層構造図としての整理例	1 5

# まえがき

高レベル放射性廃棄物の地層処分の解析・評価において考慮すべき核種移行シナリオは、隕石の落下、火成活動、人間活動、隆起・浸食（断層運動も含む）等の稀頻度事象が原因となって核種が直接生物圏に放出されると考える「接近シナリオ」と、人工バリア、天然バリアを通じて地下水により間接的に核種が生物圏に放出されると考える「地下水シナリオ」の2つに大別される。地下水シナリオは、稀頻度事象（火成活動、隆起・浸食、断層活動等）に起因する幅を内包しており、更に稀頻度事象の不確実性は地下水シナリオの幅の変動要因となる。

本研究では、これまでに接近シナリオを対象として抽出された稀頻度事象のFEP's【特徴（Features）、影響を及ぼす過程（Processes）、事象（Events）】の情報整理及びこれに基づく相関関係図（インフルエンスダイアグラム）の作成、さらにこれらの影響を定量化するための手法並びに地下水シナリオにおいて稀頻度事象の不確実性を取り扱う方法等について調査、検討を行ってきた。しかし、相関関係図上の全てのFEP連鎖のシナリオとしての展開並びにそれらのシナリオの具体的なモデルによる定量評価の段階までには到っていない。

そこで本年度は、稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ群（変動ケース）をモデル化を念頭において作成するために、前年度作成のFEP's間の相関関係のパラメータベースでの整理並びにシナリオへの展開を容易にするためのグループ化（FEPレベルの統一、階層化等を含む）の検討を行う。また、FEP'sの相関関係に基づいたシナリオの作成を容易にするためのシナリオ作成支援システムの検討を行う。さらに、既存のモデル評価体系における地下水シナリオの変動ケースの取り扱い法等、シミュレーション方法の検討を行う。

よって、我が国の高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に資することを目的とする。



1. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオのモデル的取り扱いのためのFEP's間の  
相関関係の検討・整理

前年度の報告書<sup>(1)</sup>において調査・検討したProcess System Model(PSM)<sup>(2)</sup>では、  
パラメータレベルのものと現象レベルのものが混在していた。地下水シナリオ  
を数学的モデルで扱うためには、これらを明確に区別・整理しておく必要がある。

また、パラメータ間の相関関係についても明らかにしておき、これらをベース  
に、あるシナリオに沿ったパラメータ連鎖を自動生成することが考えられる。

そこで、ここでは、パラメータ連鎖を作成するための具体的な手順として、図  
1に示すようなフローを考えた。

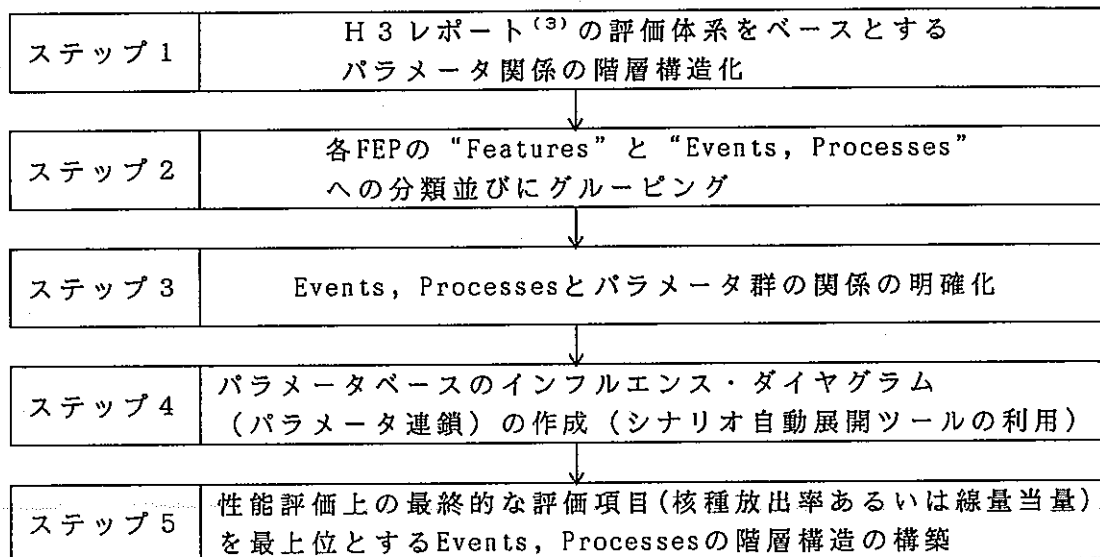


図1 パラメータベースインフルエンスダイアグラム  
(パラメータ連鎖)作成手順

一例として、前年度に作成した火成活動を起点とするインフルエンス・ダイア  
グラム上(図2参照)のFEP間の定量的な関係(パラメータ、方程式、計算モ  
デルなど)を文献(4)に基づき具体的に調査・検討した。FF5の例を表1に示す。

火成活動による変化

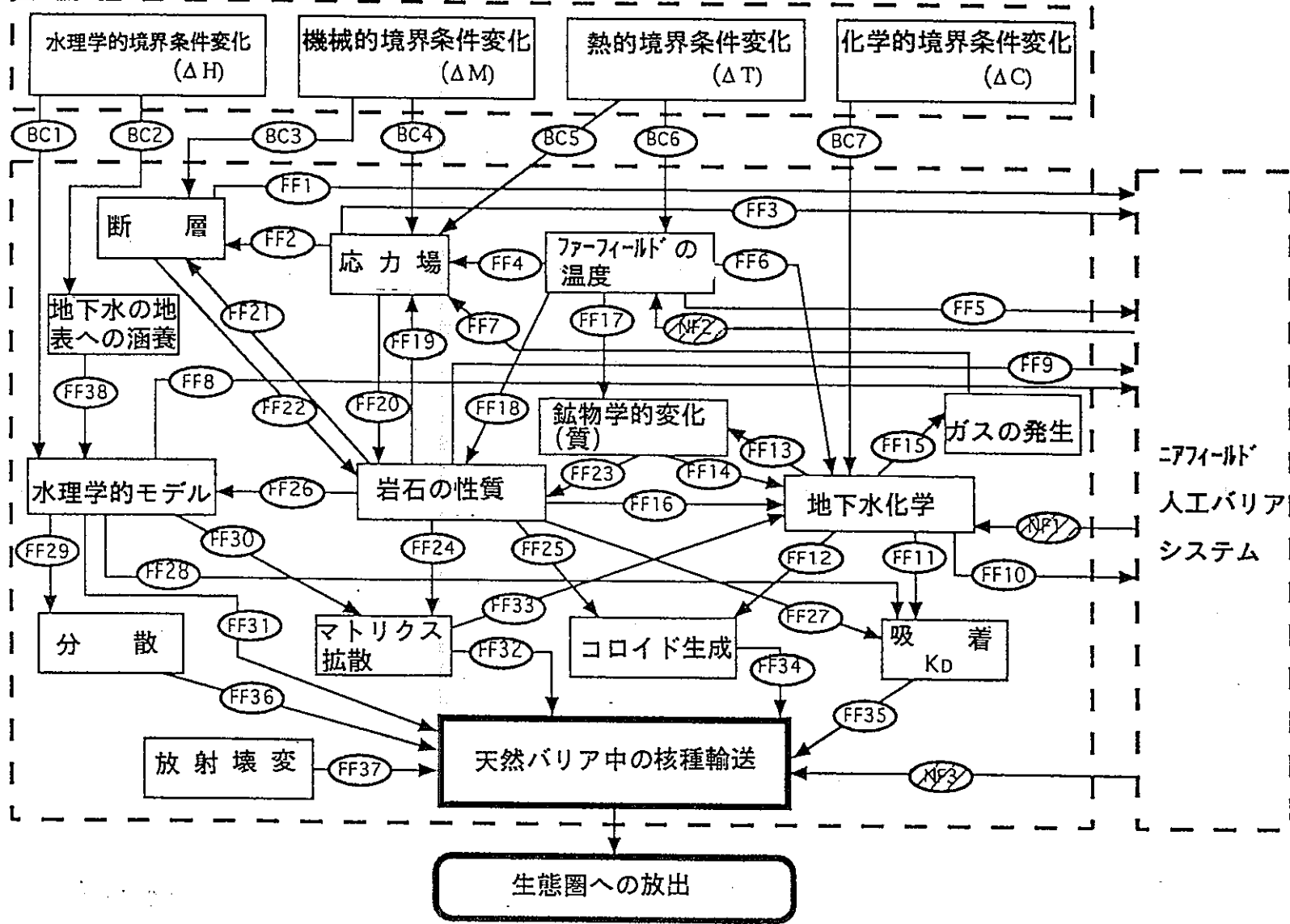


図 2 (1) 火成活動のファーフィールドへの影響を表すインフルエンシ・ダイアグラム

火成活動による変化

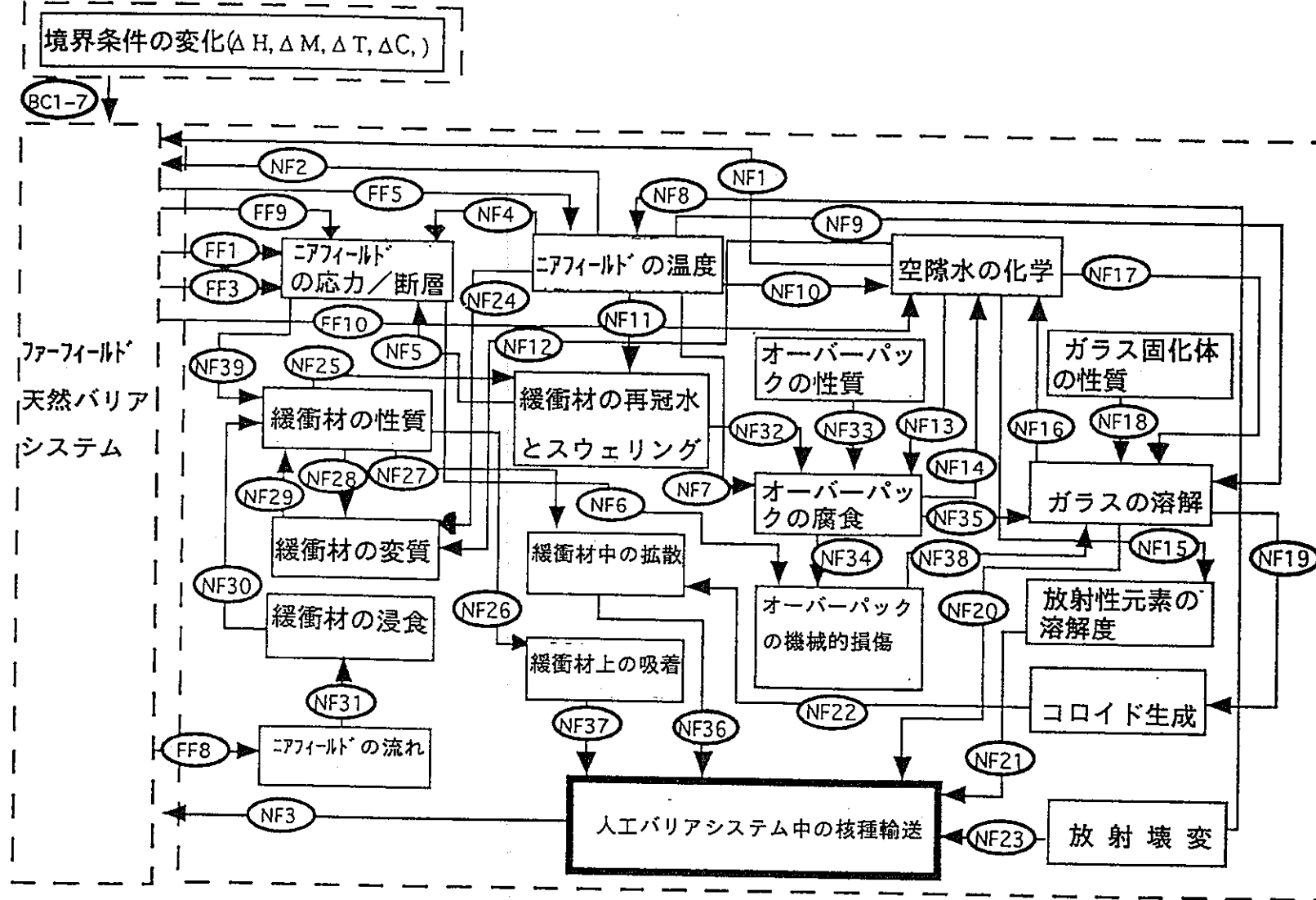


図 2 (2) 火成活動のニアフィールドへの影響を表すインフルエンシ・ダイアグラム

表1 PSM上のインフレンス (FF5) に関連し得る定量的な関係の記述例

FF5: 地質圏の温度場がニアフィールド中の温度に与える影響

灰成貫入体からの放熱によるニアフィールド中の温度分布の変化は、熱伝導と熱対流を通じてニアフィールド中の温度分布に影響を与える。主に岩石の熱拡散や地下水の流れによって、それぞれの熱伝達のメカニズムは制御されている。ニアフィールド中での廃棄物の発熱した期間によっては、ニアフィールド中の温度は、ニアフィールドとの熱交換によって上がったり下がったりするかもしれない。一般には、

灰成貫入体からの熱パルスがニアフィールド中の温度を上げると考えられる。

温度分布は、熱伝達のモード、変数、熱的な境界条件、熱源の条件によって決められる。灰成貫入体による熱伝達のモードには熱伝導と熱対流がある。対流にも、強制的な対流（流体力学的な圧力勾配による地下水の流れによって起こるもの）と、自由な対流（温度勾配に応じた流体の密度が変化することによるもの）とがある。

局所的に熱平衡が成り立っているとすると、飽和岩石中の温度分布を決定する典型的な微分方程式は

$$\left[ C_{v,R} \rho_R (1 - \varepsilon) + C_{v,W} \rho_W \varepsilon \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_t \nabla T) - \mathbf{v} \cdot \nabla (C_{p,W} \rho_W T) + q \quad (1)$$

となる。ここで、

t - 時間 [T]

$C_v$  - 定積比熱 [ $L^2/T^2 \cdot K$ ]

$\rho$  - 密度 [ $M/L^3$ ]

$\varepsilon$  - 岩石の空隙率 [-]

T - 温度 [ $^{\circ}K$ ]

$\lambda_t$  - 熱伝導率 [ $ML/T^3 \cdot K$ ]

$\mathbf{v}$  - 地下水のダルシー速度 [ $L/T$ ]

$C_p$  - 定圧比熱 [ $L^2/T^2 \cdot K$ ]

q - 熱源や熱の吸い込み [ $M/T^3L$ ]

"R" と "W" - それぞれ岩石と水を表す添字

である。

(1)式は、地下水の流れや質量の連続方程式とあわせて解かれたりする (FF8参照)。その場所が不均質であったり非等方的であったりすることが温度の結果に影響を及ぼすかもしれない。灰成貫入体によって熱的攪乱が生じ、もしその乱れが定量的に表せるならば、それは熱の流れや、いま対象となっている場の境界での温度として使われる。

自由な対流を考えるには、温度の関数の形をした水の密度が必要となる。

数学的なモデリングをする時には、ふつうそれは温度の一次関数として表される。

$$\rho_w = \rho_0 - \rho_0 \beta (T - T_0) \quad (2)$$

ここで、 $\beta$  は水の熱膨張係数 [ $1/^{\circ}K$ ]、下付きの "0" は、周囲の条件を表している。

TOUGH2 (Transport of Unsaturated flow of Groundwater and Heat, 地下水と熱の不飽和な流れの伝達) [Pruess, 1991]<sup>(5)</sup> と ECLIPSE500 [Intera, 1995]<sup>(6)</sup> は、熱伝達 (熱伝導と熱対流) と、多相、単相の多孔質媒体中の地下水の流れを合わせてシミュレーションする積分有限差分コードである。どちらのコードも水の状態方程式を内蔵している。ECLIPSE500は、流体と岩石の両方の熱膨張による空隙率の変化についても考えている。熱伝導をシミュレーションするコードは数多くある。例えば、HEATING-6、HEATING-5 [Turner, 1977]<sup>(7)</sup> の改訂版は、多次元系の熱伝導を解くように設計されている有限差分コードである。

パラメータ:  $\lambda_t$  [ $ML/T^3 \cdot K$ ]、 $\mathbf{v}$  [ $L/T$ ]、 $\rho$  [ $M/L^3$ ]、 $\varepsilon$  [-]、 $C_v$  [ $L^2/T^2 \cdot K$ ]、 $C_p$  [ $L^2/T^2 \cdot K$ ]、 $\beta$  [ $1/^{\circ}K$ ] と  $\rho_0$  [ $M/L^3$ ]、 $q$  [ $M/T^3L$ ]

## 2. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ作成支援システムの構築

パラメータ連鎖作成手順（図1のステップ4）に基づき、まず、複数のFEPから構成される様々なシナリオを自動的に展開可能なシステム（ツール）を実際に試作した。その主な特徴を表2に示す。

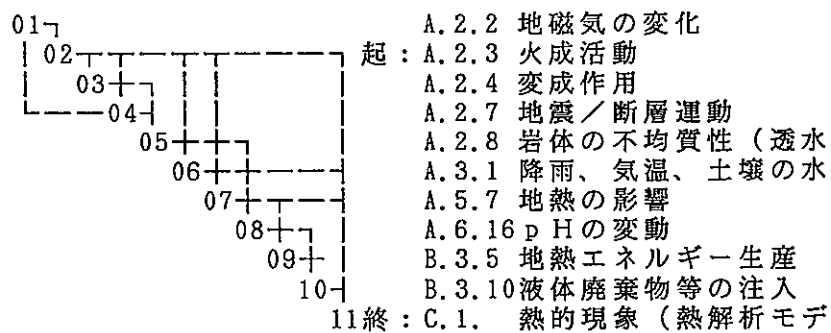
表2 開発したシナリオ自動展開ツールの特徴

- ① 任意のFEP間の関連性を0～1間の重要度で入力
- ② ある重要度範囲の経路（パス）を、その重要度の大きな順にリストアップ  
（但し、重要度算定方法はオプション設定）
- ③ フィードバックループの存在するケースの取り扱いも可能
- ④ 全経路並びに各経路毎の図示可能
- ⑤ その他（始点の複数化、特定FEP経由の限定）

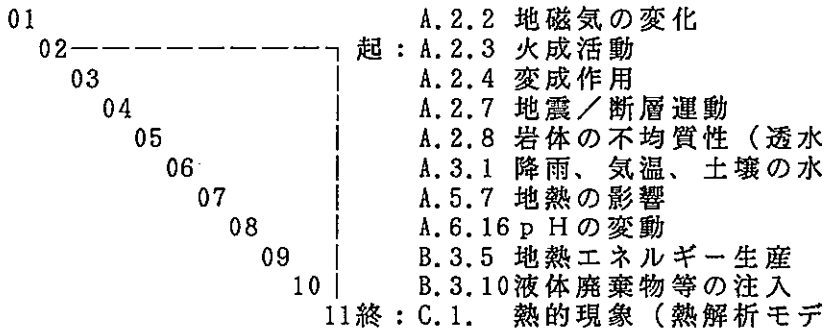
出力例として、火成活動を起点とし、熱的現象を終点とするFEP連鎖（経路あるいはパス）を以下に示す。

[選択された事象数： 11]

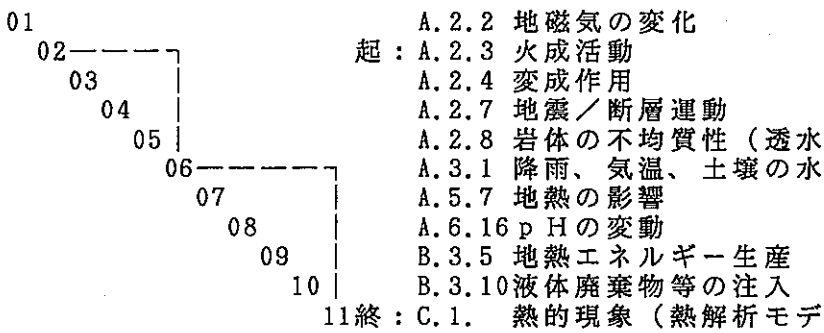
<全経路表示>



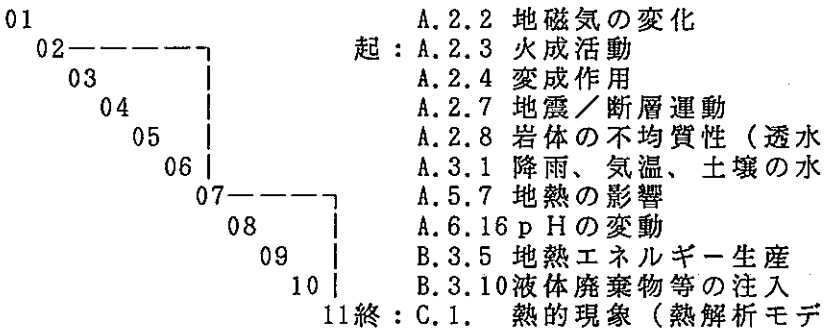
<ROOT NO. 1>



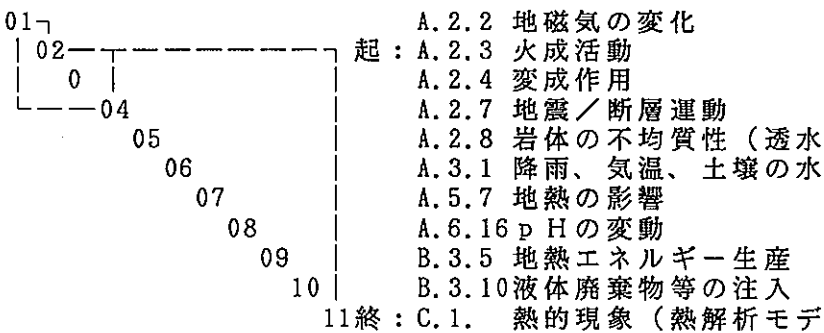
<ROOT NO. 2>



<ROOT NO. 3>



<ROOT NO. 4>



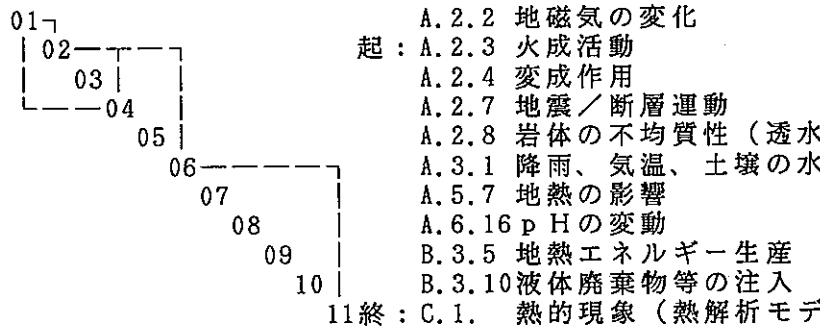
<ROOT NO. 5>



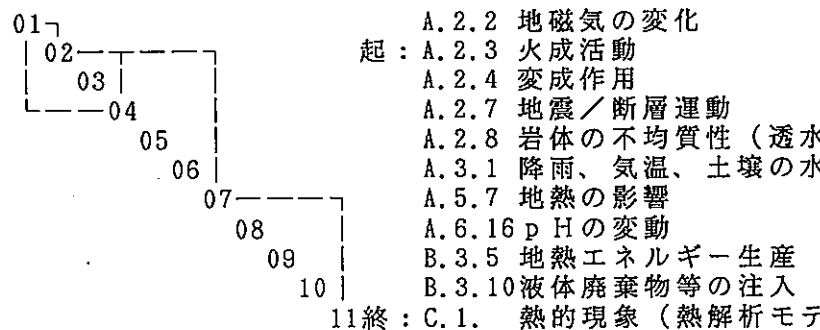
<ROOT NO. 6>



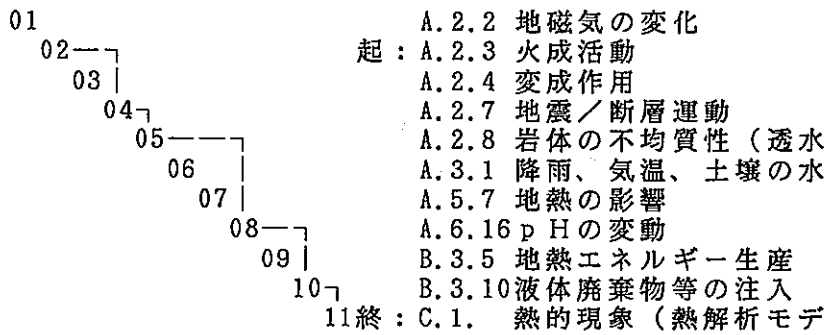
<ROOT NO. 7>



<ROOT NO. 8>



<ROOT NO. 9>



次に、FEP連鎖からパラメータ連鎖を得る方法についての概略的検討を行い、以下の2つの案を提示した。

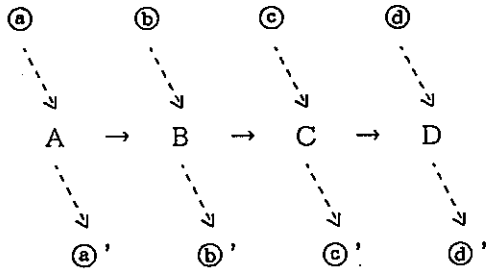
(1) FEPデータを本開発ツールに入力して得られたパスに関するFEPに対し、その関連パラメータを入力して、再度同上のツールを実行する2段階的アプローチ方法

(2) 図3に示すように、FEP連鎖とパラメータ連鎖とのリンクを同一システム内で取り扱えるツールへの拡張。



◎ FEPレベルA～Dをコアとするパラメータ群入出力関係の情報

(重要度ベクトル)を入力。



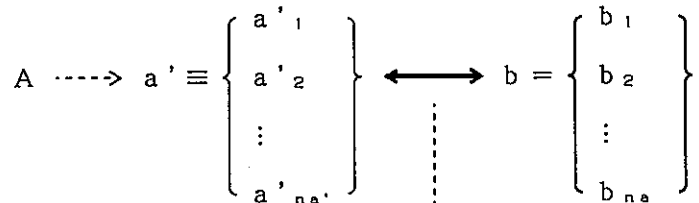
ここで、A～D : Events, Processes

(a) : Aに影響を与えるFeatures (パラメータ)

(a') : Aが影響を与えるFeatures (パラメータ) など

① A → Bのパラメータを媒介とする接続

(但し、パラメータ重要度ベクトル ≠ 0)



a' と b の共通集合  $a' \cap b$  の要素を求める。

$$A \rightarrow B \equiv A \text{ -----} \rightarrow (a' \cap b) \text{ -----} \rightarrow B$$

B

② パラメータ重要度ベクトル = 0 の場合には、エキスパートジャッジ

フロー A -----> B 表示とする。

図3 FEP連鎖とパラメータ連鎖の接続概念

### 3. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオのシミュレーション方法の検討

前年度に検討したFEPメモコメントに基づき、各FEP連鎖の内容を反映し得る基本モデル解析フレームを概略的に検討し、関連箇所にチェックを入れる(表3)形式に整理した。このような整理を行うことにより、あるシナリオに応じて一般には複数のパラメータを同時的に変化させなければならないケースが明かとなり、例えば、熱-水-応力連成モデルのような連立方程式系による取り扱いや、あるいは新たなモデル概念の必要性などを指摘し得ると考えられる。

次に、1章で調査したPSMの火成活動起点シナリオに関連し得るパラメータ間の相関関係を力学、水理学、化学、熱学その他といった5つの解析フレームのどこに属するものかを明らかにするとともに、各インフルエンス毎に、パラメータ間のつながりを図4に示すように階層構造的に整理した。また、その階層構造図の上で火成活動の影響を受けると考えられるパラメータを斜線でチェックした。表1の内容に対する一例を図5に示す。

表3 各FEP連鎖の影響例と基本モデル解析フレームとの関連性の有無

F E P 連鎖	影 響 (例)	H3レポー トで考慮し ているもの	基 本 モ デ ル 解 析 フ レ ー ム									
			水理学的 モデル	核種移行 モデル	地球化学 モデル	金属腐食	圧密・粘弾 塑性モデル	ニアフィード 再冠水及び 再冠水後の 水理学的 モデル	熱 解 析 モデル	放 射 線 の 影 響	線 量 評 価	
⋮												
A.2.3 火成活動												
...												
C.1 熱的現象										○		
* 地下水水質の変化	初生水(マグマ水)、温泉水の生成				○							
⋮												

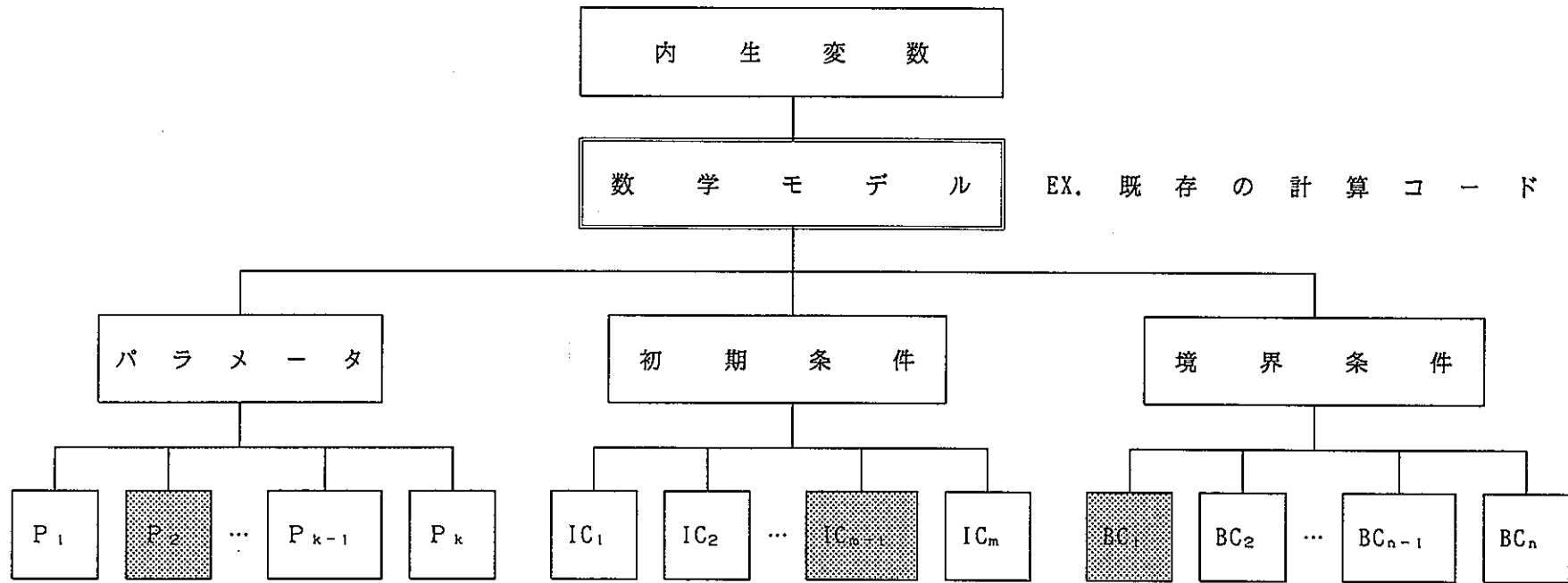
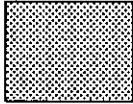


図4 パラメータ等の相関関係の階層構造表現

注)  は、火成活動の影響を受けると考えられるパラメータ等を意味する。

(FF5) 地質圏の温度場がニアフィールド中の温度に与える影響

インフルエンス	カ	学	水	理	学	化	学	熱	学	そ	の	他
FF5												

			$v$ : 地下水のダルシー速度					$T$ : 温度 $\lambda_t$ : 熱伝導率 $C_p$ : 定圧比熱 $C_v$ : 定積比熱 $q$ : 熱源や熱の吸い込み $\beta$ : 水の熱膨張係数	$\rho$ : 密度 $\epsilon$ : 岩石の空隙率 $t$ : 時間
--	--	--	------------------	--	--	--	--	--	--

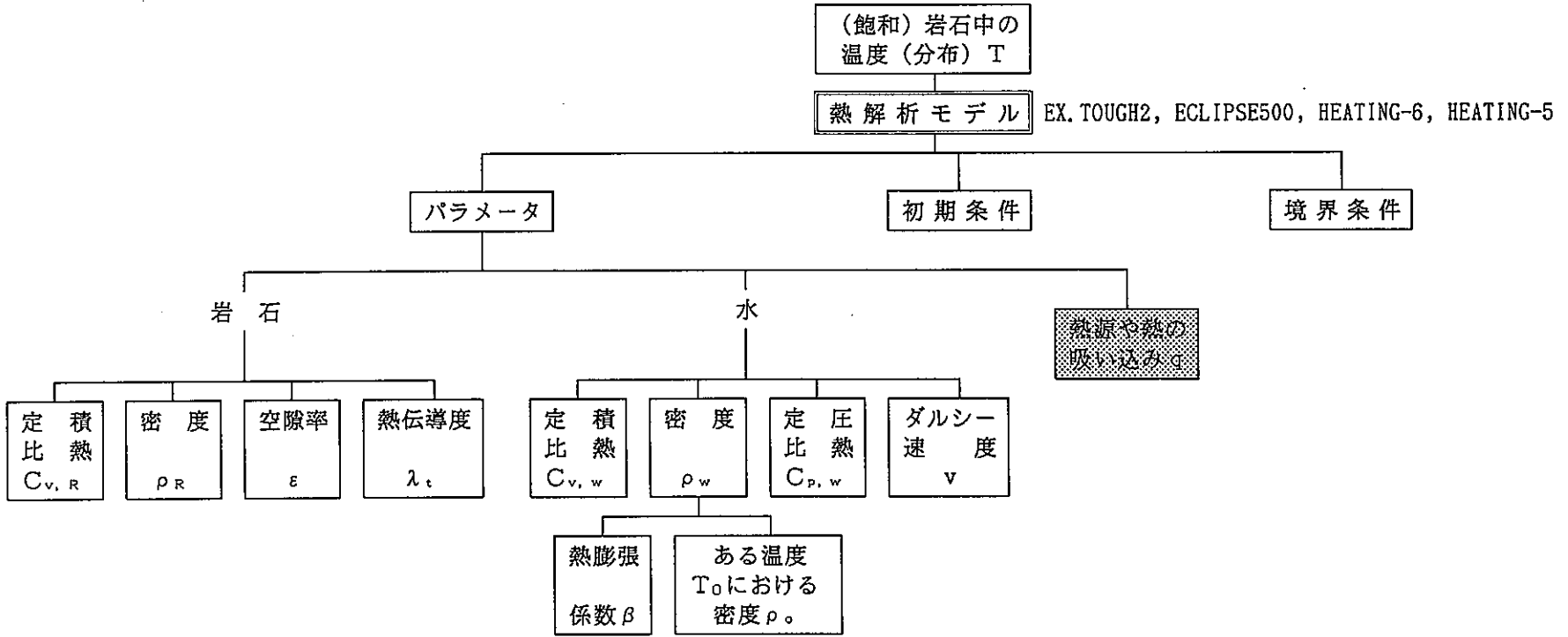


図5 PSM上のインフルエンス (FF5) に関連し得る定量的な関係のモデルフレームへの分類並びに階層構造図としての整理例

# あ と が き

本年度の実施内容は、以下の通りである。

- (1) 前年度に作成した火成活動を起点とするインフルエンス・ダイヤグラムに関するFEP、パス等に関するパラメータ等の定量的諸量の検討
- (2) 複数のFEPからシナリオを自動的に生成するシナリオ作成支援ツールの検討・試作並びにパラメータ連鎖生成概念の概略的検討
- (3) 各FEPの基本モデル解析フレームでの取り扱いに関する検討

その結果として、前年度に作成した火成活動を起点とするインフルエンス・ダイヤグラム（PSM）上の各インフルエンス毎に、関連し得る（既往の）数学的モデル、パラメータ等が明らかとなり、それらの関連性が概略的に分析・整理された。また、102のFEP'sをベースとするインフルエンスの基本モデル解析フレームへの反映可能性が検討・整理された。これらの結果と、PSM並びに102のFEPベースのインフルエンスの相互関係の情報を総合することにより、火成活動を起点とする変動ケースのシミュレーション手法を検討する上での有益な知見を得ることができる。さらに、それらのインフルエンス・ダイヤグラム上のFEP連鎖を自動的に生成するためのシナリオ作成支援システムが具体的に開発され、パラメータ連鎖の展開まで含むシステムの拡張可能性についての見通しが一部得られた。

今後の課題としては、そのようなパラメータ連鎖の展開まで含むシナリオ作成支援システムの具体的な拡張、その支援システムを用いたパラメータ連鎖に基づく変動シナリオの展開、そのシナリオに対するシミュレーション手法の構築及び計算に必要なデータの取得・整備、さらにはそれらのデータやエキスパートの意見等に基づくシナリオの重要度及び発生確率評価への応用・展開、などが指摘し得る。

## 参 考 文 献

- (1) (株)三菱総合研究所  
「地層処分シナリオ隔離性能に関する稀頻度事象定量化手法の検討(Ⅱ)  
ー地下水シナリオの変動に関する概略的検討ー」 PNC委託研究成果報告書、  
PNC ZJ1222 94-001 (1994).
- (2) M.J. Apted (Intera Information Technologies, Inc.) : 「Impacts of  
Igneous Intrusion on HLW Repository Performance - A Process System  
Modelling Approach -」 IED-9310 Version 1, 27. Feb. (1994).
- (3) 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 ー平成3年度ー」  
PNC TN 1410 92-081 (1992).
- (4) W. Zhou et al. (Intera Information Technologies, Inc.)  
「Technical Description of Process Models : Igneous Intrusion  
Scenario」 Draft (to appear).
- (5) K. Pruess : 「TOUGH2-A General Purpose Numerical Simulator for  
Multiphase Fluid and Heat Flow」, LBL-29400, Lawrence Berkeley  
Laboratory, Berkeley, CA (1991).
- (6) Intera : 「ECLIPSE 500, Technical Reference」, Intera Information  
Technologies, Inc., Abington, UK (1995).
- (7) W.D. Turner, D.C. Elrod and I.I. Simon-Tov : 「HEATING-5--An IBM 360  
Heat Conduction Program」, ORNL/CSD/TM-15, Oak Ridge National  
Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (1977).

Study of Quantitative Assessment Methods of Events with  
an Extremely Low Frequency of Occurrence concerning  
Performance of Waste Disposal Isolation System : Part(III)  
-Preliminary Study on the modeling of Alternative Groundwater Scenario-

(Summary)

(REPORT ON RESULT OF PNC-COMMISSIONED RESEARCH)

March, 1995

Mitsubishi Research Institute, Inc.



This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Research and Nuclear Fuel Development Corporation.

Please contact about this paper as follows below:  
Technology Administration Dept., Technology Information Office  
Power Research and Nuclear Fuel Development Corporation  
9-13, Akasaka 1-chome, Minato-ku, Tokyo 107

LIMITED DISTRIBUTION  
PNC ZJ1222 95-001  
March, 1995

Study of Quantitative Assessment Methods of Events with  
an Extremely Low Frequency of Occurrence concerning  
Performance of Waste Disposal Isolation System : Part(III)  
—Preliminary Study on the modeling of Alternative Groundwater Scenario—

Hiroo Ohkubo\*

Abstract

This year, in the first step, the parameters, equations, and associated calculational models for each of influences on magma intrusion scenario described last year were listed up and discussed.

Secondly, a pilot system model for composing many FEP's to construct various scenarios automatically has been developed, and then, it was discussed on how to expand this model in order to generate the parameter chains.

Finally, which FEP could be treated in each basic analysis model was discussed.

---

This report is the result of research conducted by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No.:060D0249

Department, section, and the name of staff in charge:

Hitoshi Makino, Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works

\* Energy and Natural Resources Dept., Research Center for Environment and Development.

地層処分システム隔離性能に関する  
稀頻度事象定量化手法の検討（Ⅲ）  
－地下水シナリオの変動のモデル化に関する概略的検討－

大久保博生\*

## 要 旨

本年度は、まず、前年度に一例として作成した火成活動に関するインフルエン  
ス・ダイヤグラムに関するパラメータ、方程式、計算モデルなどのリスト・アッ  
プ・検討を行った。

次に、複数のF E Pからシナリオを自動的に生成するためのシナリオ作成支援  
システムの試作を行い、パラメータ連鎖を作成するためのシステム概念に関する  
検討を行った。

最後に、各F E Pの基本モデル解析フレームでの取り扱い方法の検討を行った。

---

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託によ  
り、実施した研究の成果である。

契約番号：060D0249

事業団担当部課及び担当者：東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

牧野 仁史 殿

\*地球環境研究センター エネルギー・資源研究部

## TABLE OF CONTENTS

Foreword .....	1
1. Discussion and arrangement of the FEP's on the influence ..... diagram for the modeling of the groundwater scenario with an extremely low frequency of occurrence	3
2. Development of a system for drawing groundwater scenario ..... of FEP's with an extremely low frequency of occurrence	7
3. Discussion on how to simulate the ground water scenario ..... of FEP's with an extremely low frequency of occurrence	12
Afterword .....	17
References .....	19

CONTENTS OF TABLES

Table 1	An Illustrated Description on the Quantitative Relationship related to the Influence (FF5) of PSM	6
Table 2	Characteristics of a Pilot System (tool) for Generating Scenarios Automatically	7
Table 3	Influence (Example) of each FEP Chain and Relation to Each Basic Model Analysis Frame	13

## CONTENTS OF FIGURES

Fig.1	Procedure for Generating Parameter Chain .....	3
Fig.2(1)	Influence Diagram for Far-field Impacts .....	4
	of Igneous Intrusion	
Fig.2(2)	Influence Diagram for Near-field Impacts .....	5
	of Igneous Intrusion	
Fig.3	Concept on Conjunction of FEP Chain and Parameter Chain .....	1 1
Fig.4	Hierarchical Expression of the Relationships .....	1 4
	among the Parameters etc.	
Fig.5	An Illustrated Arrangement of the Quantitative .....	1 5
	Relationship related to the Influence (FF5) of	
	PSM by Classification into Model Categories and	
	Hierarchical Description	

## Foreword

In the performance assessment of HLW disposal, the nuclide migration scenario can be classified into two categories, one of which is called as "direct release scenario" where the nuclides will be released to biosphere directly, and the other is "groundwater scenario" where the nuclides will be carried by the groundwater through artificial and natural barriers to be released there indirectly. The groundwater scenario includes variations caused by uncertainties of events with an extremely low frequency of occurrence such as magmatic activity, uplift, erosion and/or denudation, and fault activation.

In the past studies, the information of FEP's (features, events and processes) with an extremely low frequency of occurrence which has been selected as the direct release scenario was arranged to develop the influence diagram, and then it has been discussed on how to handle the uncertainties when we would try to quantify the FEP's appeared in the groundwater scenario.

However, the list up of all the scenarios which could be generated by combining the FEP's in the influence diagram and therefore the assessment for them by using some models have not yet been made.

Thus, in order to draw and quantify the alternative cases in the groundwater scenario using some models, the first matter of this year is to discuss on the arrangement as the parameter level and the grouping of the FEP's on the influence diagram developed in the last year. The second matter is to discuss on the development of the system for composing many FEP's on the influence diagram to construct various scenarios automatically. The third matter is to discuss on how to treat the alternative cases in the groundwater scenarios.

Through these efforts, this report aims to contribute to the safety assessment of Japan's HLW disposal.

1. Discussion and arrangement of the FEP's on the influence diagram for the modeling of the groundwater scenario with an extremely low frequency of occurrence

In the Process System Model (PSM) discussed in the previous report<sup>(1)</sup>, both types of FEP's of the parameter level and the phenomenon level have been appeared. It is necessary to classify these FEP's into each level in order to treat them by some mathematical models, and also clarify the relationship between the parameters to generate the parameter chains along the scenarios automatically.

Therefore, the procedure for developing the parameter chains as shown in Fig.1 was proposed.

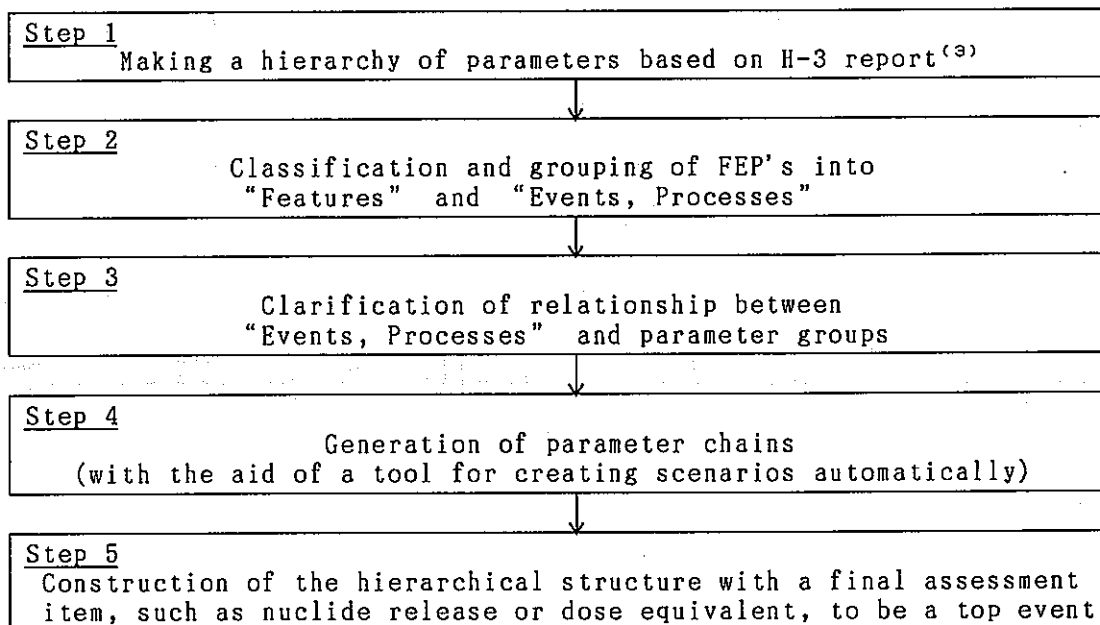


Fig.1 Procedure for Generating Parameter Chain

As an illustrated example, the parameters, equations, and associated calculational models for each of influences on magma intrusion scenario described last year (see Fig.2) were investigated and discussed according to ref.(4). A description on FF5 is presented in Table 1.



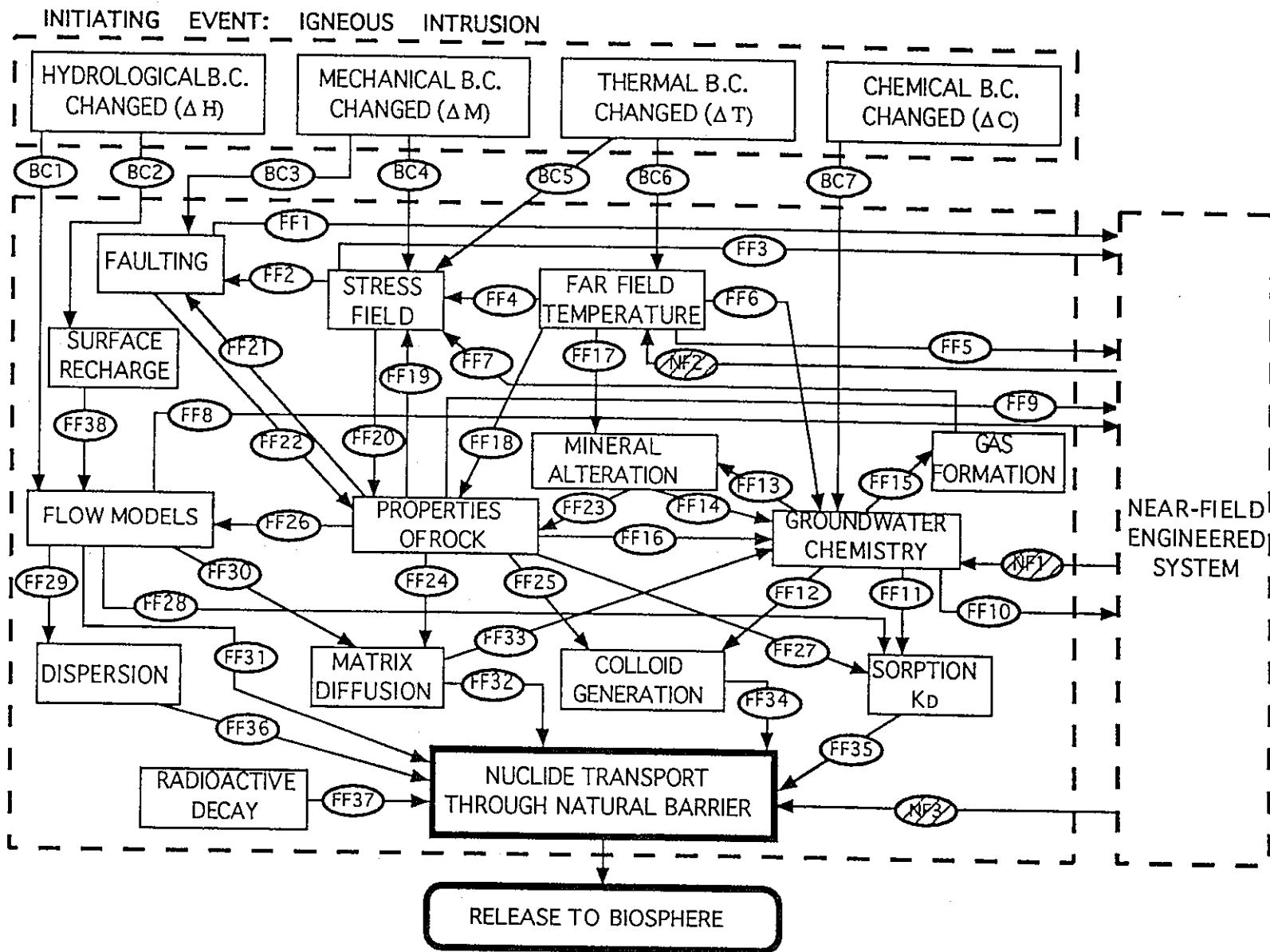


Fig. 2(1) Influence Diagram for Far-field Impacts of Igneous Intrusion

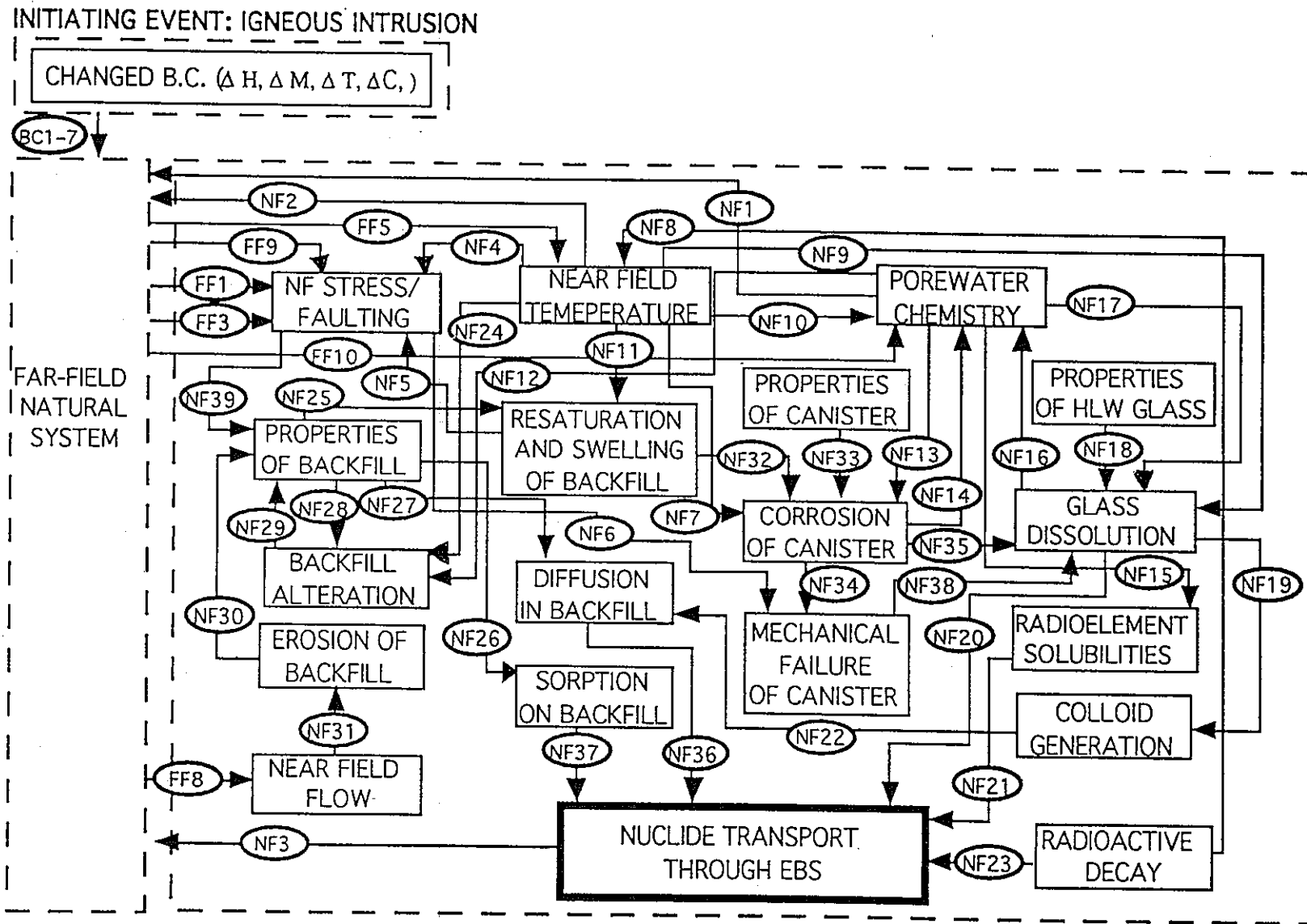


Fig. 2 (2) Influence Diagram for Near-field Impacts of Igneous Intrusion

Table 1 An Illustrated Description on the Quantitative Relationship related to the Influence (FF5) of PSM

FF5 : Influence of geosphere temperature field on temperature in near-field

Changes in far-field temperature distribution due to heating from an igneous intrusion will affect near-field temperature distribution through conduction and convection. Rock thermal diffusivity and groundwater flow will be the main factors to control the respective heat transfer mechanism. Depending on the waste heating period in the near-field, temperature in the near-field may be increased or decreased by heat exchange with far-field. In general, the thermal pulse from an igneous intrusion is expected to raise the near-field temperature.

The temperature distribution is determined by the heat transfer modes, parameters, and thermal boundary and source conditions. The heat-transfer modes due to igneous intrusion include conduction and convection. Convection includes forced convection (caused by groundwater flow due to hydrodynamic pressure gradient) and free convection (due to fluid density change in responding to thermal gradient).

Assuming local thermal equilibrium, the typical differential equation for determining temperature distribution in a saturated rock is

$$\left[ C_{v,R} \rho_R (1 - \varepsilon) + C_{v,W} \rho_W \varepsilon \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_t \nabla T) - v \cdot \nabla (C_{p,W} \rho_W T) + q \quad (1)$$

where

- t - time [T],
- $C_v$  - specific heat at constant volume [ $L^2/T^2 \cdot K$ ],
- $\rho$  - density [ $M/L^3$ ],
- $\varepsilon$  - rock porosity [-],
- T - temperature [K],
- $\lambda_t$  - thermal conductivity [ $ML/T^3 \cdot K$ ],
- v - groundwater Darcy velocity [L/T],
- $C_p$  - specific heat at constant pressure [ $L^2/T^2 \cdot K$ ],
- q - heat sources or sinks [ $M/T^3 L$ ].
- "R" and "W" - subscripts for rock and water respectively.

Eq. (1) may be solved in coupling with groundwater flow and mass continuity equations (see FF8). The site heterogeneity and anisotropy may affect temperature results. Thermal disturbances caused by igneous intrusion may serve as prescribed heat flux or temperature at the boundaries of the field studied, provided that these disturbances can be expressed quantitatively.

To consider free convection, water density as a function of temperature is required. In mathematical modeling, it is usually expressed as a linear function of temperature:

$$\rho_w = \rho_0 - \rho_0 \beta (T - T_0) \quad (2)$$

where  $\beta$  is water thermal expansion coefficient [ $1/^\circ K$ ] and subscript "0" refers to ambient conditions.

TOUGH2 (Transport of Unsaturated flow of Groundwater and Heat) [Pruess, 1991]<sup>(5)</sup> and ECLIPSE 500 [Intera, 1995]<sup>(6)</sup> are integral finite difference codes that simulate coupled heat transfer (both conduction and convection) and groundwater flow in both multi- and single-phase porous media. Both codes have built-in equation-of-state for water. ECLIPSE 500 also considers porosity change due to thermal expansion of rock as well as fluids. There are numerous codes for simulating heat conduction. For example, HEATING-6, A revised version of HEATING-5 [Turner, 1977]<sup>(7)</sup>, is a finite difference code designed to solve heat conduction in multi-dimensional systems.

PARAMETERS :  $\lambda_t$  [ $ML/T^3 \cdot K$ ], v [L/T],  $\rho$  [ $M/L^3$ ],  $\varepsilon$  [-],  $C_v$  [ $L^2/T^2 \cdot K$ ],  $C_p$  [ $L^2/T^2 \cdot K$ ],  $\beta$  [ $1/^\circ K$ ] and  $\rho_0$  [ $M/L^3$ ], q [ $M/T^3 L$ ]

2. Development of a system for drawing groundwater scenario of FEP's with an extremely low frequency of occurrence

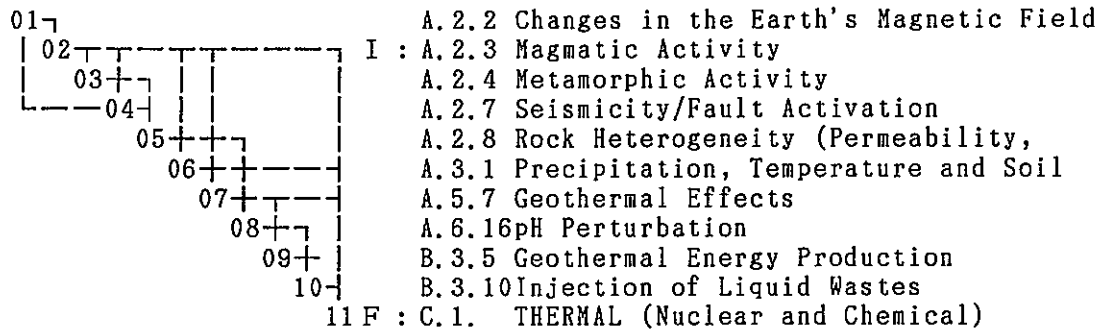
According to the procedure for generating parameter chain (as proposed in Fig.1), a pilot system (tool) by which various scenarios could be automatically constructed from many FEP's has been developed. The main characteristics of this tool is presented in Table 2.

Table 2 Characteristics of a Pilot System (tool)  
for Generating Scenarios Automatically

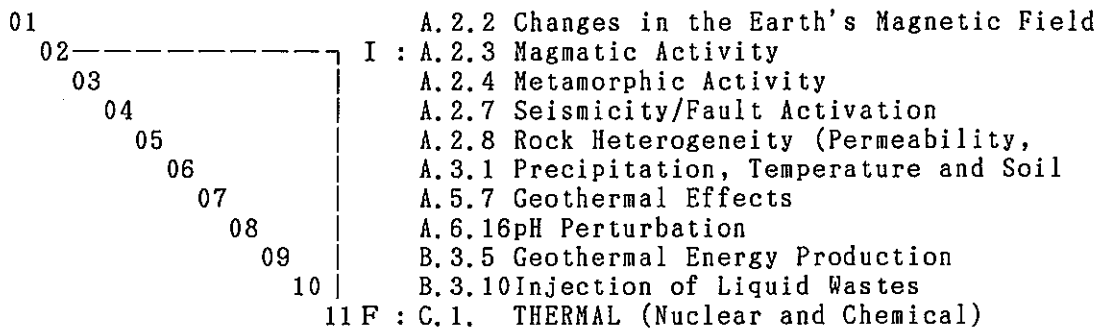
- ① We have only to assign a value between 0 and 1 for each FEP chain according to a degree of importance.
- ② All the passes can be listed up, within a given range of importance, which can be ordered according to the degree of importance. (We may select how to calculate the degree of importance.)
- ③ The case with feedback loop can be treated.
- ④ All the passes and each pass can be displayed graphically.
- ⑤ Others. (Multiple FEP's can be selected as initial points, and the pass that must include a specified FEP can be listed up.)

As an illustrated example, the FEP chain from magmatic activity to thermal phenomenon is listed up as follows :

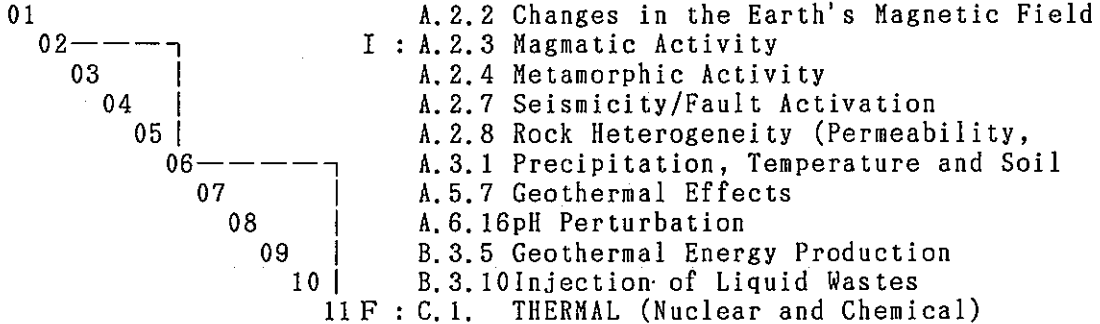
<display of all the passes (I : initial FEP, F : final FEP)>



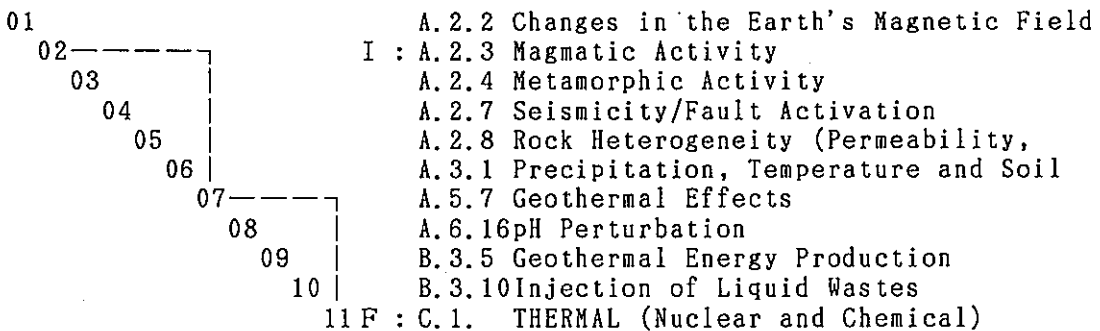
<ROOT NO. 1>



<ROOT NO. 2>



<ROOT NO. 3>



<ROOT NO. 4>

01┐		A. 2.2 Changes in the Earth's Magnetic Field
02┐		I : A. 2.3 Magmatic Activity
0		A. 2.4 Metamorphic Activity
└─04┘		A. 2.7 Seismicity/Fault Activation
	05	A. 2.8 Rock Heterogeneity (Permeability,
	06	A. 3.1 Precipitation, Temperature and Soil
	07	A. 5.7 Geothermal Effects
	08	A. 6.16pH Perturbation
	09	B. 3.5 Geothermal Energy Production
	10┐	B. 3.10 Injection of Liquid Wastes
		11 F : C.1. THERMAL (Nuclear and Chemical)

<ROOT NO. 5>

01		A. 2.2 Changes in the Earth's Magnetic Field
02┐		I : A. 2.3 Magmatic Activity
03		A. 2.4 Metamorphic Activity
04		A. 2.7 Seismicity/Fault Activation
05		A. 2.8 Rock Heterogeneity (Permeability,
06		A. 3.1 Precipitation, Temperature and Soil
07┐		A. 5.7 Geothermal Effects
08		A. 6.16pH Perturbation
09┐		B. 3.5 Geothermal Energy Production
10┐		B. 3.10 Injection of Liquid Wastes
		11 F : C.1. THERMAL (Nuclear and Chemical)

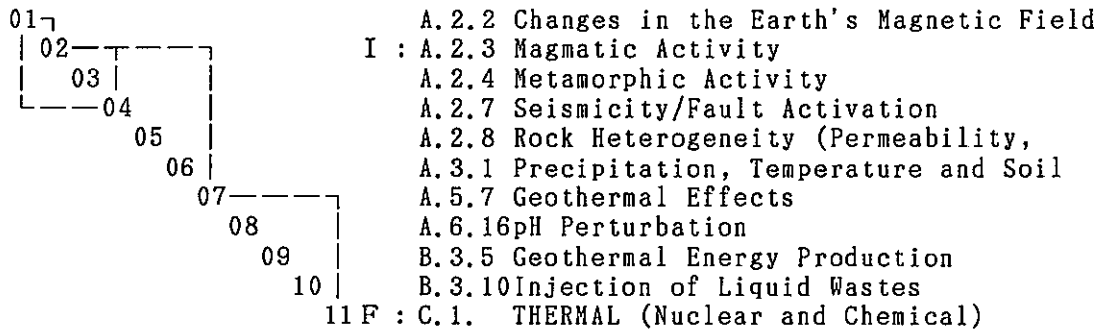
<ROOT NO. 6>

01		A. 2.2 Changes in the Earth's Magnetic Field
02┐		I : A. 2.3 Magmatic Activity
03┐		A. 2.4 Metamorphic Activity
04		A. 2.7 Seismicity/Fault Activation
05┐		A. 2.8 Rock Heterogeneity (Permeability,
06		A. 3.1 Precipitation, Temperature and Soil
07		A. 5.7 Geothermal Effects
08┐		A. 6.16pH Perturbation
09		B. 3.5 Geothermal Energy Production
10┐		B. 3.10 Injection of Liquid Wastes
		11 F : C.1. THERMAL (Nuclear and Chemical)

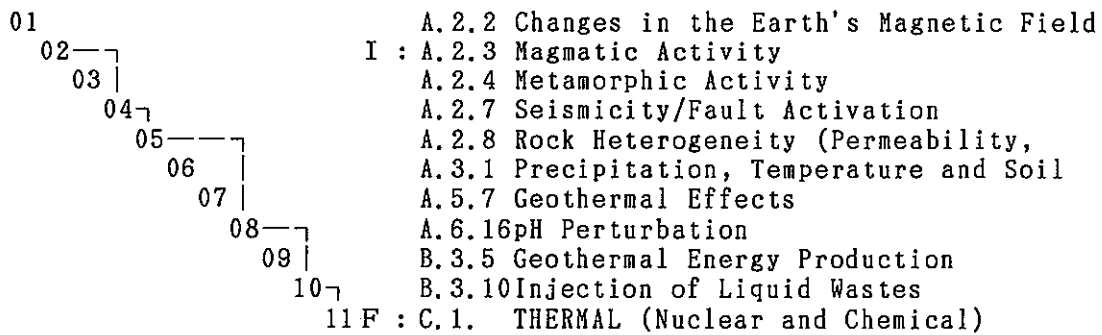
<ROOT NO. 7>

01┐		A. 2.2 Changes in the Earth's Magnetic Field
02┐		I : A. 2.3 Magmatic Activity
03		A. 2.4 Metamorphic Activity
└─04┘		A. 2.7 Seismicity/Fault Activation
	05	A. 2.8 Rock Heterogeneity (Permeability,
	06	A. 3.1 Precipitation, Temperature and Soil
	07	A. 5.7 Geothermal Effects
	08	A. 6.16pH Perturbation
	09	B. 3.5 Geothermal Energy Production
	10┐	B. 3.10 Injection of Liquid Wastes
		11 F : C.1. THERMAL (Nuclear and Chemical)

<ROOT NO. 8>



<ROOT NO. 9>

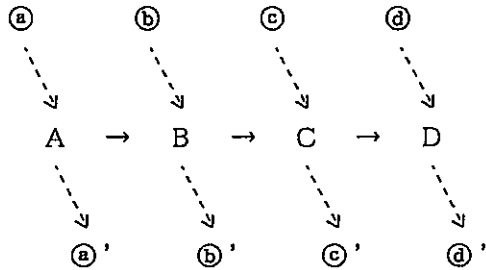


Next, it was discussed on how to obtain the parameter chains from the FEP chains, and two approaches were proposed as follows :

(1) Two steps approach using the above developed tool where in the first step, input the data of FEP level to get the passes and related FEPs. Then, input the parameters related to these output FEPs to obtain parameter chains.

(2) As shown in Fig.3, develop an expanded system where both types of FEP and parameter chains can be treated uniformly.

① input the information on the relation between parameter groups through FEP levels A ~ D

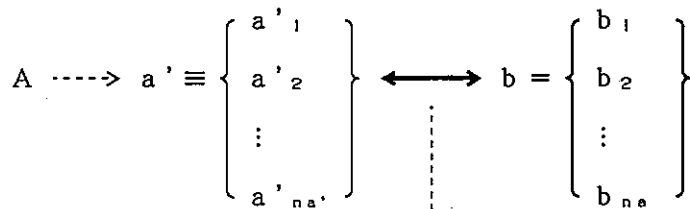


where A ~ D : Events, Processes

ⓐ : Features (parameter) affecting A

ⓐ' : Features (parameter) affected by A etc.

② Connect A to B parameters (parameter's importance vector  $\neq 0$ )



obtain the element of family  $a' \cap b$

$$A \rightarrow B \equiv A \text{ -----} \rightarrow \text{ⓐ}' \cap \text{ⓑ} \text{ -----} \rightarrow B$$

B

③ Expert judgement flow is displayed as  $A \text{ -----} \rightarrow B$  in the case of parameter's importance vector = 0

Fig.3 Concept on Conjunction of FEP Chain and Parameter Chain



### 3. Discussion on how to simulate the groundwater scenario of FEP's with an extremely low frequency of occurrence

Based on the FEP memo comment discussed in the last year, it was discussed on which FEP to be treated in each base case model, and then the result was arranged as the format of Table 3 where the related parts were checked. Through these efforts, we can identify some scenarios where more than one parameters should be changed simultaneously such as a case of thermal-hydro-mechanical combination models, or the others which must be treated in the new concept models.

Next, the relationships among the parameters appeared in each of influences on magma intrusion scenario of PSM investigated in chap. 1 were clarified through the classification of them into five categories such as mechanical, hydrological, chemical, thermal and other analytical frames, and the parameter chain for each influence was expressed hierarchically as shown in Fig.4. And which parameters could be influenced by magmatic activity was also checked on the hierarchical diagram as shown in the hatching lines of Fig.4. An illustrated example for the contents of Table 1 is presented in Fig.5.

Table 3 Influence (Example) of each FEP Chain and Relation to Each Basic Model Analysis Frame

FEP chain	influence (example)	already treated by H3 report <sup>(3)</sup>	basic model analysis frame								
			hydrological	nuclide migration	geochemical	metal corrosion	mechanical	nearfield resaturation ,and hydraulics after resaturation	thermal	radiation effect	dose evaluation
:											
A.2.3 Magmatic Activity											
...											
C.1 Waste and Repository Thermal Effects (Nuclear and Chemical)									○		
* Change of Groundwater Quality	juvenile water (magmatic water), generation of hot spring water				○						
:											

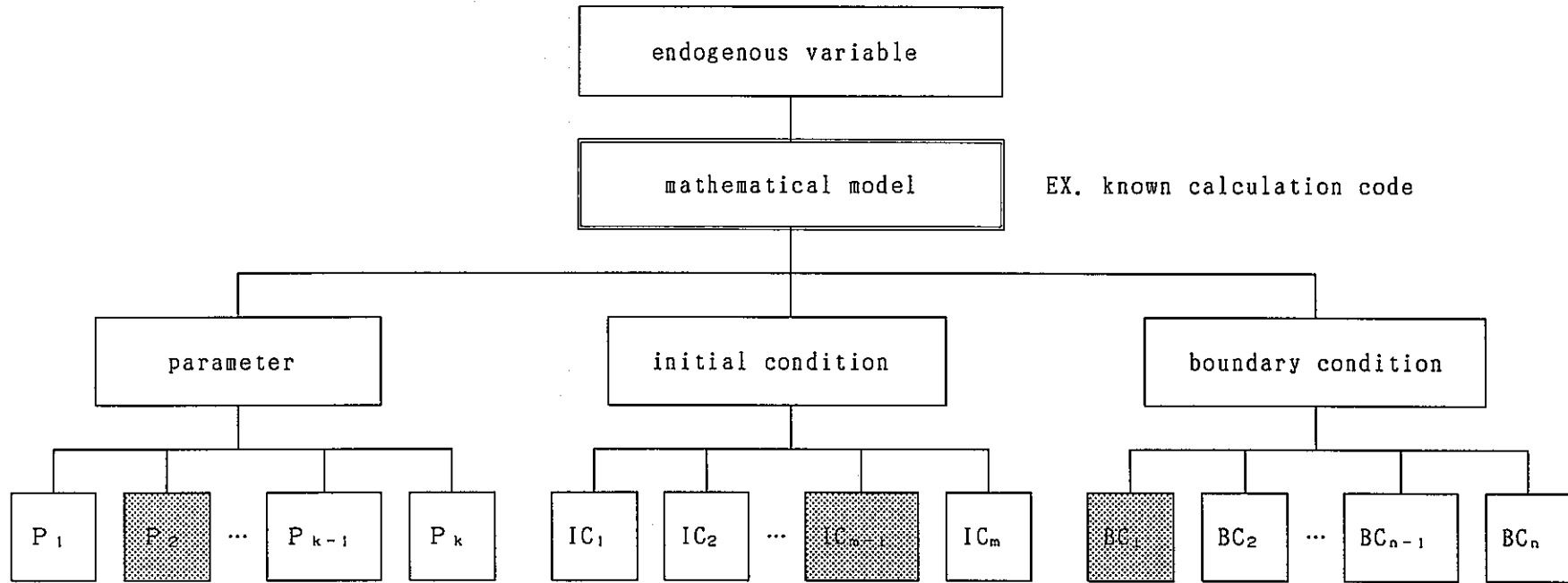
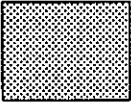


Fig. 4 Hierarchical Expression of the Relationships among the Parameters etc.

Note:  means that the parameter etc. may be influenced by magmatic activity.

(FF 5) Influence of geosphere temperature field on temperature in near-field

Influences	Mechanical	Hydrological	Chemical	Thermal	Other
FF 5		$v$ : groundwater Darcy velocity		$T$ : temperature $\lambda$ : thermal conductivity $C_p$ : specific heat at constant pressure $C_v$ : specific heat at constant volume $q$ : heat sources or sinks $\beta$ : water thermal expansion coefficient	$\rho$ : density $\epsilon$ : rock porosity $t$ : time

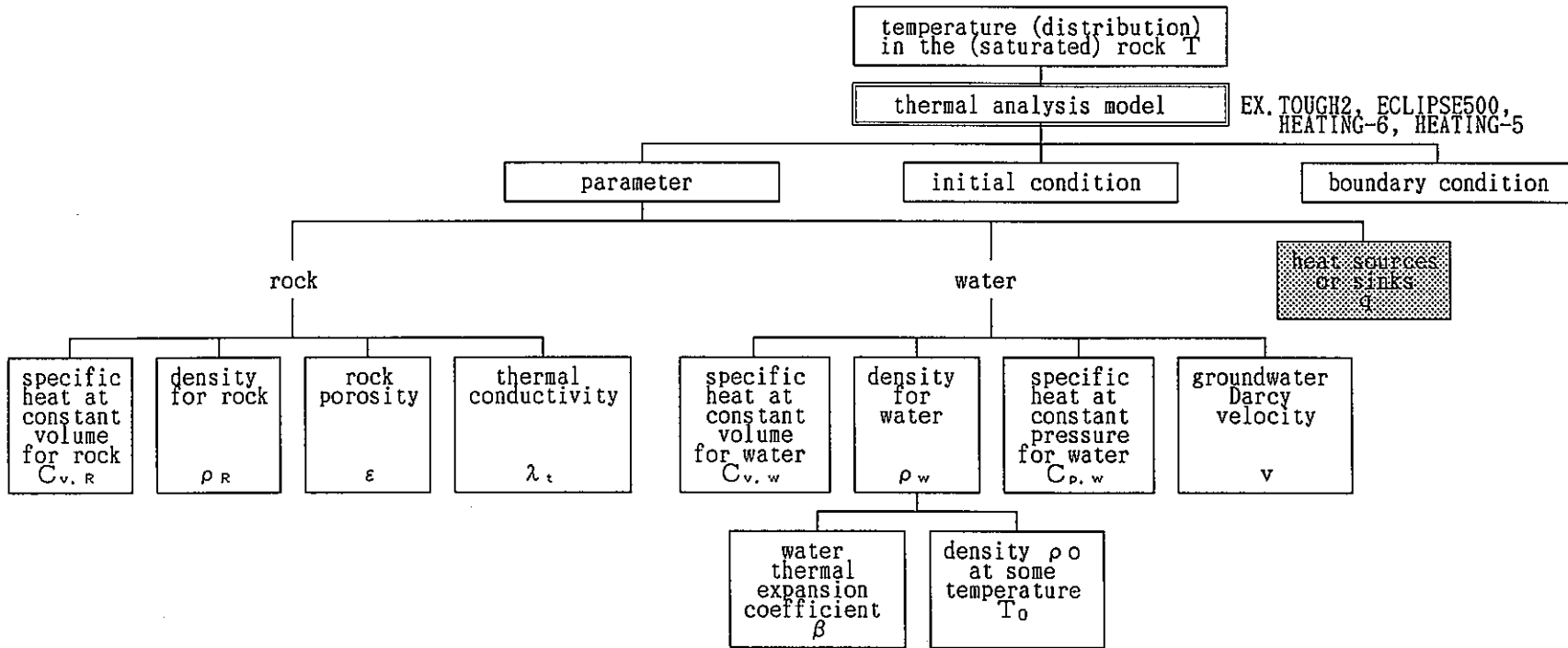


Fig.5 An Illustrated Arrangement of the Quantitative Relationship related to the Influence (FF5) of PSM by Classification into Model Categories and Hierarchical Description

## Afterword

This year, the following three tasks were done;

- (1) Discussion on the quantitative variables such as parameters related to the FEP's, and the passes on the influence diagram initiated by igneous intrusion made in the last year,
- (2) Discussion and development of a pilot tool for generating scenarios automatically from many FEP's, and a preliminary study on the concept of generating parameter chains,
- (3) Discussion on how to handle each FEP in the base case model.

As a result, the (known) mathematical models and the parameters related to each influence on the PSM initiated by magmatic activity, which had already been described last year, were clarified, and the influences among those parameters were analyzed and arranged. And, which (102) FEP's (defined by PNC) could be treated in each basic analysis model was also discussed and arranged. Using these results and synthesizing the information on the correspondence between PSM and 102 FEP-based influences, we will be able to obtain some useful informations on how to simulate the alternative cases initiated by magmatic activity. Further, a pilot system model for composing many FEP's to construct various scenarios automatically has been developed, and a prospect to improve this model in order to generate the parameter chains was also obtained.

In the next subject, it is desirable to make an extension of this pilot tool to a system where parameter chains can be also treated explicitly, to construct the alternative scenarios based on the parameter chains with the aid of this tool, to establish the calculation method to simulate the scenarios together with the required data arrangement, and also, to evaluate the significance and/or the probability for each scenario, based upon those data and the expert opinions.

## References

(1) MRI

「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part(II) - Preliminary Study on Alternative Groundwater Scenario -」 PNC ZJ1222 94-001 (1994).

(2) M.J. Apted (Intera Information Technologies, Inc.) : 「Impacts of Igneous Intrusion on HLW Repository Performance - A Process System Modelling Approach -」 IED-9310 Version 1, 27. Feb. (1994).

(3) PNC

「Technical Report on the R & D of HLW - the third fiscal year of Heisei -」 (in Japanese) PNC TN 1410 92-081 (1992).

(4) W. Zhou et al. (Intera Information Technologies, Inc.)

「Technical Description of Process Models : Igneous Intrusion Scenario」 Draft (to appear).

(5) K. Pruess : 「TOUGH2-A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow」, LBL-29400, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA (1991).

(6) Intera : 「ECLIPSE 500, Technical Reference」, Intera Information Technologies, Inc., Abington, UK (1995).

(7) W.D. Turner, D.C. Elrod and I.I. Simon-Tov : 「HEATING-5--An IBM 360 Heat Conduction Program」, ORNL/CSD/TM-15, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (1977).