

本資料は 年 月 日付で
登録区分変更する。 [東海事業所技術情報室]

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 (II)

—地下水シナリオの変動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)

1994年3月

株式会社 三菱総合研究所

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
電話:029-282-1122(代表)
ファックス :029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

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

この資料は
配布するもの
この資料の付

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

系者だけに
い。なお、
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(Ⅱ) -地下水シナリオの変動に関する概略的検討-

大久保博生*

要 旨

H L W地層処分の安全評価において、稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ作成のため、まず、H3レポート⁽¹⁾で扱っている地下水シナリオ基本ケースの(1)基本的考え方/前提条件、(2)モデル、(3)データ、(4)各現象に及ぼし得る要因、をリストアップし、各現象に係る状態量、必要とされるモデル的取り扱い法の見通しを概略的に把握・整理した。

次に、動燃事業団設置の102種類の各FEPに対し、①関連要素、②定量的概念、③他のFEPへの直接的な影響、を各種情報に基づき整理表として検討・作成し、地下水シナリオ基本ケースで既に扱われているFEPとそうでないものを明らかにした。また、基本ケースで扱われていないFEPのうち、特に、火成活動を起点とするシナリオを具体的に作成した。

最後に、基本ケースの各モデルにおける定量的諸量(初期条件、境界条件、パラメータ等)を各FEPとの関連性を念頭に明確化し、また、各FEPを個別に扱い得る決定論並びに確率論的モデルをサーベイ・整理した。さらに、作成した火成活動起点シナリオに対する地下水シナリオ解析・評価上の取り扱い方の概略的検討を行った。

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：050D0285

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 エネルギー環境研究室



PNC 第1222 94-002
March, 1994

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

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In order to draw the groundwater scenarios of events with an extremely low frequency of occurrence in the safety assessment of HLW disposal, first, (1) basic concept/assumption, (2) model, (3) data, (4) factors relating to each phenomenon which have been treated as the standard case of groundwater scenario in H3 report⁽³⁾ were listed up, and then state variable appeared on the basic case and the outline method to be required were roughly summarized.

Secondly, according to 102 FEP's which have been defined by PNC, ① factors related to each FEP, ② quantitative concept of each FEP ③ its direct influence on other FEP's were arranged as a table (called memo-comment) based on various informations, and then FEP's which have not yet been treated in the basic case were discriminated from those which have already been treated there. And as a first example, the magma intrusion scenarios were drawn, concretely.

Finally, quantitative concepts such as initial condition, boundary condition and parameter introduced in each model of base case were listed up in connection with each FEP, and some examples of deterministic and probabilistic models which could treat the FEP's respectively were surveyed and arranged. Further, the discussion has been made on how to handle the magma intrusion scenarios in the framework of performance assessment of ground water scenario.

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.:050D0285

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

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

* Energy & Environment Sect., 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作成のための情報の確認・整理	3
2. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオの検討・作成	3
2.1 FEP間関連要因整理のための概略的検討	3
2.2 地下水シナリオ(基本ケース)とFEPの関連性及びFEP連鎖の整理	7
2.3 Process system modelを用いたシナリオ作成に関する検討	8
3. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオの解析、評価上の取扱いに関する概略的検討	14
3.1 地下水シナリオ(基本ケース)の各モデルにおける定量的諸量	14
3.2 各FEP関連モデルのサーベイ	14
3.3 火成活動を起点とするシナリオの取り扱い方に関する概略的検討	14
あとながき	17
参考文献	19

This is a blank page

表 目 次

	頁
表 1 作成された現象リスト	4
表 2 影響要因・指標（パラメータ値）等（例）	9

This is a blank page

目 次

	頁
図1 H3レポートの基本ケースのモデル解析で既に 取り扱われているFEP連鎖	7
図2 シナリオ作成プロセスのフロー	10
図3 基本ケースにおけるファーフィールドのインフルエンス ダイアグラム	11
図4 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	12
図5 火成活動による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	13
図6 シナリオの取り扱い方に関する検討プロセス	15
図7 シナリオの定量的解析フロー概念	16

まえがき

高レベル放射性廃棄物地層処分の解析・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）等の稀頻度事象が起因となって、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、断層運動等）に起因する幅を内包しており、稀頻度事象の不確実性は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稀頻度事象のFEP's [特徴 (features)、影響を及ぼす過程 (processes)、事象 (events)] の抽出及びこれらの影響を定量化するための手法の調査、検討を実施してきた。しかし、地下水シナリオにおいて、これらの稀頻度事象が具体的にどのようなシナリオの幅として展開するのか、また、解析・評価において稀頻度事象の不確実性をどのように取扱うべきかについては、まだ具体的検討は行われていない。

そこで、本年度は、稀頻度事象を考慮した評価を行うにあたり、まず、これまで考えてきた地下水シナリオに対して稀頻度事象を考慮した場合のシナリオの検討・作成を行う。次に、前年度の研究で検討した稀頻度事象の定量化手法を用いて、必要に応じて追加調査・検討を行いつつ、作成された各シナリオにおける不確実性を含む稀頻度事象の解析・評価上の取扱いに関する概略的検討を行う。

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。

This is a blank page

1. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ作成のための情報の確認・整理

H L W処分システムの安全性評価において、稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ作成のため、文献(1)（以下、H3レポートと記述）で考慮している地下水シナリオで取り扱っている現象とその解析について、まず、(1)基本的考え方／前提条件、(2)モデル、(3)データ、を確認・整理した。次に、(4)各現象に影響を及ぼし得る要因をリスト・アップし、各現象に係る状態量、必要とされるモデル的取り扱い方法を検討した。

2. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオの検討・作成

2.1 FEP間関連要因整理のための概略的検討

動燃事業団殿がリスト・アップしている102のFEP（表1）それぞれに対し、

① 関連要素

当該FEPの発生等に何らかの影響、関連のあると考えられる要素、種類などを列挙

② 定量的概念

当該FEPの発生あるいは波及効果等を定量的に表現するために必要と考えられる定量的諸量の概念・モデル等を列挙

③ 他のFEPへの直接的な影響

当該FEPの発生に伴って、あるいはそれが原因（の一つの要因）として何らかの直接的波及効果（影響等）を及ぼし得るFEP（但し、必ずしも102のFEPリストと同一名称を与えるものに限定していない）

を文献(2)～(8)をもとに整理し直した。

表1 作成された現象リスト

- A. 自然現象
- 1. 地球外の現象
 - 1.1 隕石の衝突
 - 1.2 太陽輻射
- 2. 地質学的現象
 - 2.1 プレート運動／テクトニクス的变化
 - 2.2 地磁気の変化
 - 2.3 火成活動
 - 2.4 変成作用
 - 2.5 続成作用
 - 2.6 隆起／沈降
 - 2.7 地震／断層運動
 - 2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- 3. 気候学的現象
 - 3.1 降雨、気温、土壌の水収支
 - 3.2 洪水
 - 3.3 海面変動
 - 3.4 永久凍結層の影響
 - 3.5 氷河作用（氷河侵食等）
- 4. 地形学的現象
 - 4.1 地すべり
 - 4.2 表面削剝
 - 4.3 河川侵食
 - 4.4 河川の蛇行
 - 4.5 海食
 - 4.6 堆積作用
 - 4.7 寒冷気候の影響（ソリフラクション等）
 - 4.8 化学的侵食作用及び風化作用
- 5. 水理学的現象
 - 5.1 地下水循環
 - 5.2 不均質系での地下水流動
 - 5.3 地下水流動状況の変化
 - 5.4 地下水系への海水の侵入
 - 5.5 塩淡境界の影響
 - 5.6 被圧帯水層
 - 5.7 地熱の影響

6. 物質移動及び地球化学的現象

- 6.1 移流／分散
- 6.2 拡散
- 6.3 マトリクス拡散
- 6.4 ガスを媒体とした物質移動
- 6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動
- 6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- 6.7 溶解、沈澱及び結晶化
- 6.8 コロイドの生成、溶解及び移動
- 6.9 錯形成種
- 6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化
- 6.11 土壌や有機物の残骸の蓄積
- 6.12 質量、同位体、化学種の希釈
- 6.13 化学的勾配（電気化学的効果及び化学的浸透）
- 6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流
- 6.15 再濃集
- 6.16 pHの変動
- 6.17 酸化性雰囲気

7. エコロジ－的現象

- 7.1 植物による吸入
- 7.2 動物による吸入
- 7.3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション
- 7.4 土壌生成作用
- 7.5 化学的変化
- 7.6 微生物との相互作用
- 7.7 生態系の変化（山火事等）
- 7.8 気候変動への生態系の追従（砂漠化等）
- 7.9 動植物の進化

B. 人間活動

1. 処分場設計及び建設

- 1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）
- 1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化
- 1.3 立坑あるいは連絡坑道の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化
- 1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）
- 1.5 母岩の脱水
- 1.6 人工材料の欠陥（オーバーパックの早期破損等）

2. 操業及び閉鎖

- 2.1 緩衝材あるいは埋め戻し材の圧縮あるいは空隙の生成
- 2.2 廃棄物の不均質性（物理的あるいは化学的）

3. 閉鎖後の地下活動（処分場への侵入）
 - 3.1 廃棄物あるいは資材回収
 - 3.2 テロ行為あるいは戦争
 - 3.3 試錐
 - 3.4 探鉱
 - 3.5 地熱エネルギー生産
 - 3.6 資源採取
 - 3.7 トンネル工事・利用
 - 3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）
 - 3.9 考古学的調査
 - 3.10 液体廃棄物等の注入
 - 3.11 地下水のくみ上げ
4. 閉鎖後の地表の活動
 - 4.1 記録の喪失
 - 4.2 ダム、貯水池の建設、放水
 - 4.3 河川の引水
 - 4.4 灌漑
 - 4.5 土壌改良及び地下水水質制御
 - 4.6 農（酪農を含む）林水産業
 - 4.7 人口変化及び都市開発
 - 4.8 人間活動による気候変化（温室効果等）
 - 4.9 採石・泥炭採取

C. 廃棄物及び処分場に起因する現象

1. 熱的現象
 - 1.1 母岩の亀裂開口幅変化
 - 1.2 熱による水理条件の変化（対流、水圧・粘性変化）
 - 1.3 熱による化学条件の変化（溶解度・吸着性・分種化の変化・鉱物化）
2. 化学的現象
 - 2.1 金属の腐食（局部／均一腐食、内部因子及び外部因子による腐食、水素等のガス発生）
 - 2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
 - 2.3 有機物による効果
 - 2.4 微生物の効果
3. 力学的現象
 - 3.1 廃棄体の移動
 - 3.2 応力場の変化
 - 3.3 母岩の変形
 - 3.4 処分坑道の破断
 - 3.5 ガスによる効果
4. 放射線学的現象
 - 4.1 放射線分解（ α -ラジオリシス、 β -ラジオリシス）
 - 4.2 照射損傷
 - 4.3 臨界
 - 4.4 放射壊変（崩壊連鎖における）
5. 水理学的現象
 - 5.1 再冠水
 - 5.2 緩衝材中の水の移動

2.2 地下水シナリオ（基本ケース）とFEPの関連性及びFEP連鎖の整理

その整理結果（以下、FEPメモコメントと呼ぶ）をもとにFEP連鎖を作成し、1章で確認・整理された地下水シナリオ（基本ケース）の枠組みの中で既に具体的に取り扱われているFEPとまだ取り扱われていないFEPとを概略的に検討した。

図1に、すでにH3レポートベースで基本ケースとして具体的にモデル解析を実施しているものをリスト・アップする。

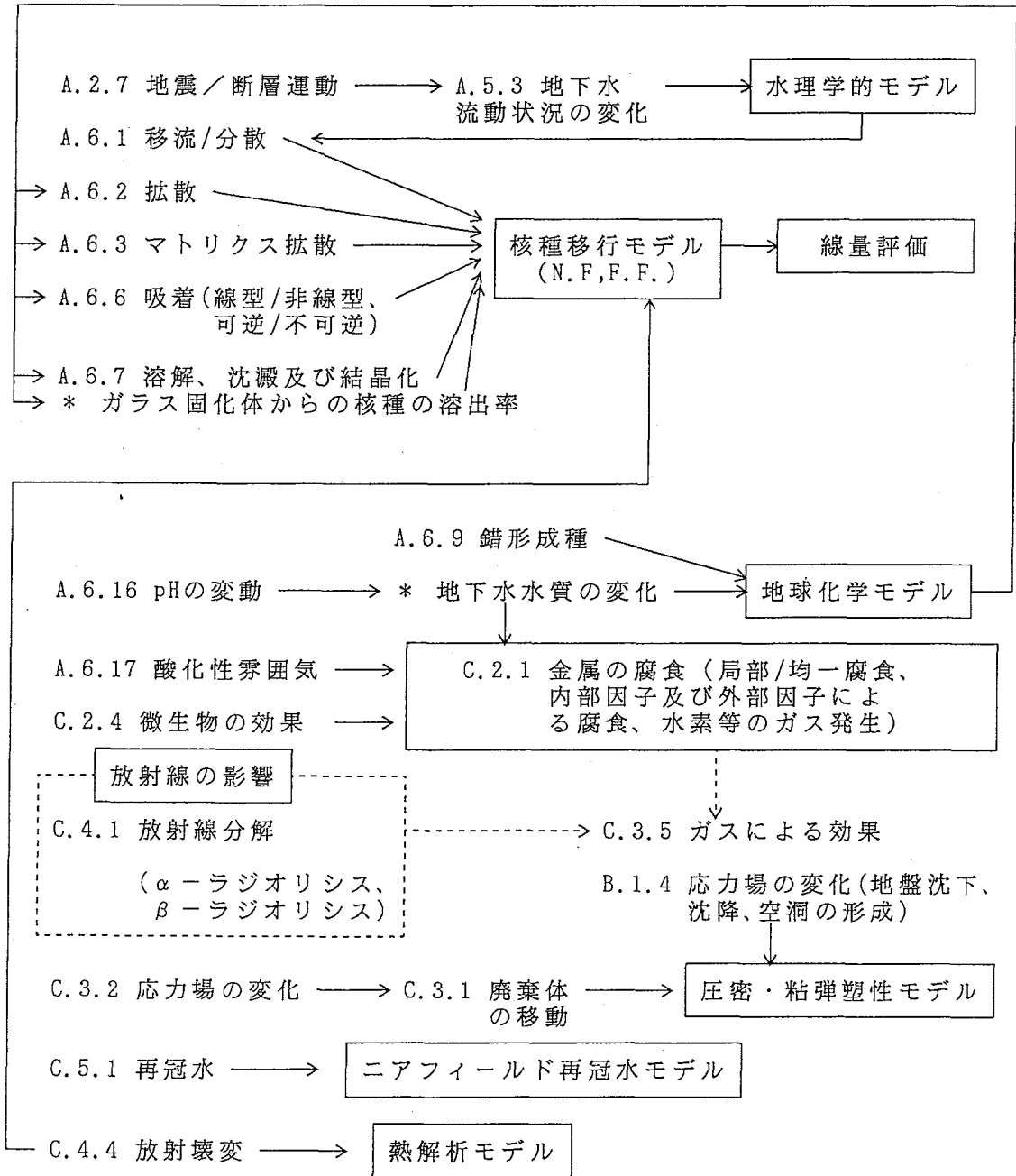


図1 H3レポートの基本ケースのモデル解析で既に取り扱われているFEP連鎖

また、これらの解析モデル等に直接波及し得るF E PをF E P連鎖に従いブレイクした。

他方、H 3レポートの基本ケースでまた取り扱われていないF E P間の関係のうち、比較的他のF E Pへの影響の種類が多くあり得るものをリスト・アップすると、以下の通りである。

A. 2. 3 火成活動

A. 2. 7 地震／断層運動

A. 2. 8 岩体の不均質性（透水性／鉱物組成）

A. 3. 1 降雨、気温、土壌の水収支

A. 6. 16 pHの変動

B. 3. 1～B. 3. 11 閉鎖後の地下活動（処分場への侵入）

B. 4. 1 記録の喪失

これらのF E Pが地下水シナリオの基本的フレームに反映するパスを全て網羅するには解析コードの適用が有効と考えられる。

2.3 Process system modelを用いたシナリオ作成に関する検討

ところで、モデル開発の効率化の観点からは、必ずしも全てのF E Pを基本モデルだけで取り扱えるとも限らないと考えられるので、表2に示すような影響要因・指標（パラメータ値）等を終点とするパスを検討することも必要になると言える。

そこで、例として火成活動を起点とし、表2に示す各影響要因・指標（パラメータ値）等に反映するF E P連鎖として、中間に1つだけ他のF E Pを経由するパスを作成し、重複している、あるいは類似しているパス等を一括整理するなどして表示し直した。次に各パスに対応するシナリオ表現としてどのようなものがあり得るのかを、F E Pメモコメントを参考に例示した。

なお、トップF E Pとして、火成活動以外の他のF E Pに対して任意数の中間F E Pを経由するパスについても、同様のシナリオ作成展開が考えられる。そこで、シナリオ作成（文脈化）までの作業例をフロー化（一般化）すると、図2のようになると考えられる。

以上の概略的検討結果とモデル解析との連結性を鑑み、プロセスシステムモデル⁽¹⁹⁾による火成活動起点シナリオ連鎖（インフルエンスダイアグラム）を、基本ケース、ファーフィールド並びにニアフィールドへの影響に対してそれぞれ図3，図4，図5のように作成した。また、これらの図中のFEP並びにFEP間の連鎖（FF，NF）、さらに水力学、機械、熱、化学の4つの境界条件変化^{(10)~(18)}の影響（シナリオ連鎖）に対し、それぞれの内容の文脈化を行った。

表2 影響要因・指標（パラメータ値）等（例）

<p>(1) ニアフィールド関連</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分場と地下水との接触時期・位置（A.5.3,A.6.1） ・ 人工バリアと地下水との接触時期・位置（A.6.2） ・ 人工バリアの腐食（C.2.1） ・ 埋め戻しの劣化／失敗（B.1.2,B.1.3） ・ ガラス固化体の溶解（A.6.7） ・ ニアフィールドの化学的環境の変化（C.2） ・ ニアフィールドの人工バリアの機械的性質の変化（B.1.4,C.3.1,C.3.2,C.3.3,C.3.4） ・ ニアフィールドの人工バリアの水理・輸送特性の変化（C.5,A.5.3） ・ ニアフィールドの人工バリアの熱的性質の変化（C.1） ・ ニアフィールドの人工バリアの化学的性質・遅延効果の変化（A.6.1,A.6.2,A.6.4,A.6.5,A.6.6,A.6.7,A.6.8,A.6.9,A.6.10） <p>(2) ファーフィールド関連</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水の組成変化（*地下水水質の変化） ・ 核種移行時間の変化（A.5.3,A.6.1） ・ 核種移行経路長の変化（A.5.3,A.6.1） ・ サイト周辺における化学的性質・遅延効果の変化（A.6.1,A.6.3,A.6.6,A.6.8,A.6.9,A.6.10） ・ サイト周辺の水理学的性質の変化（A.5.1,A.5.2,A.5.3,A.5.4,A.5.5） ・ サイト周辺の機械的性質の変化（ニアフィールドにおけるB.1.4,C.3.1,C.3.2,C.3.3,C.3.4のファーフィールドとの対応） ・ サイト周辺の熱的性質の変化（ニアフィールドにおけるC.1のファーフィールドとの対応） ・ 地下水の流速や流れ方向の変化（A.5.3） ・ 核種移行経路の新生成（B.1.4,C.3.2） ・ 新たな地下水タイプ（海水、隕石・地熱等の組成溶解液など）の混入（A.4.8,A.5.4,A.6.4,A.6.5）

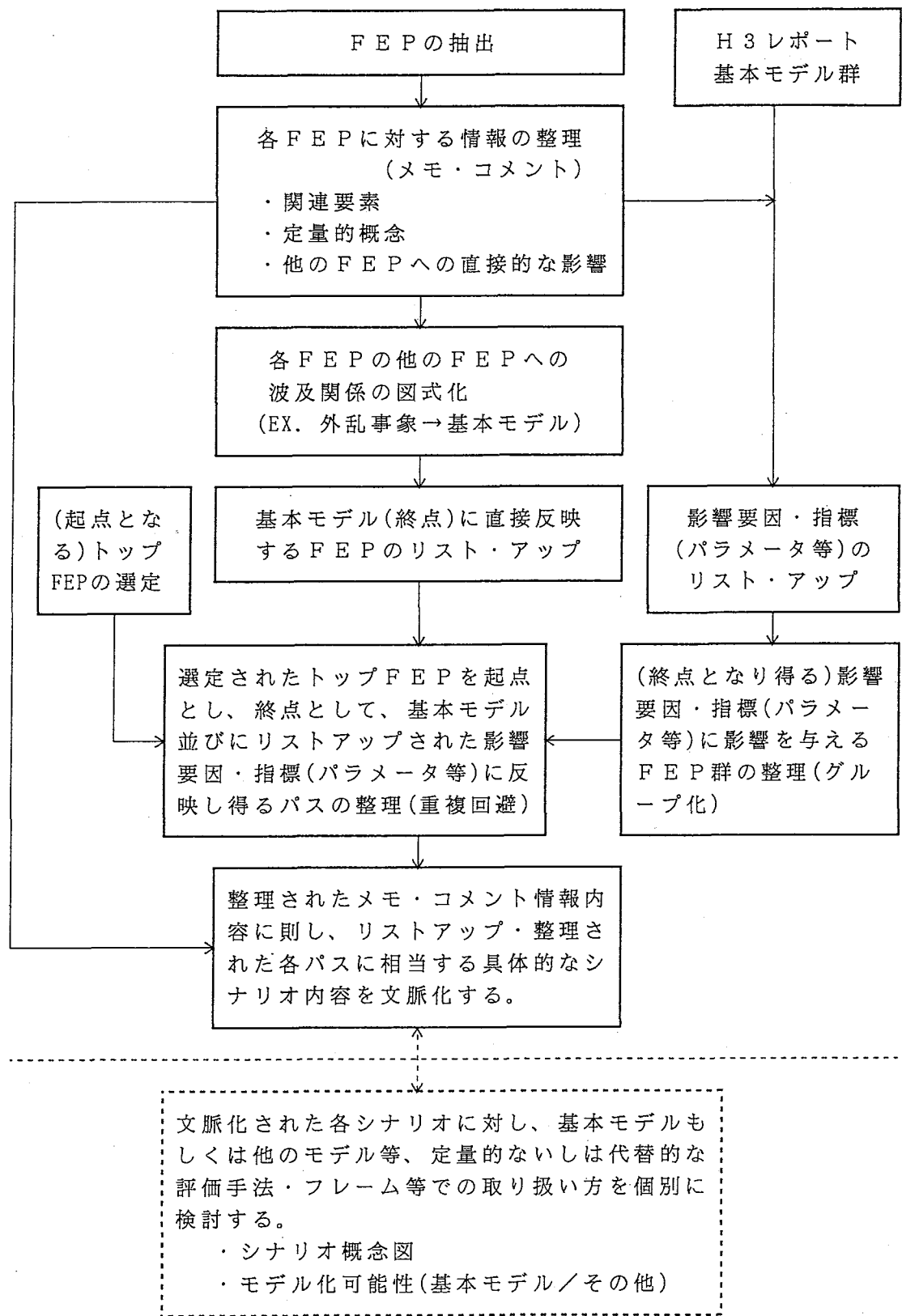


図2 シナリオ作成プロセスのフロー

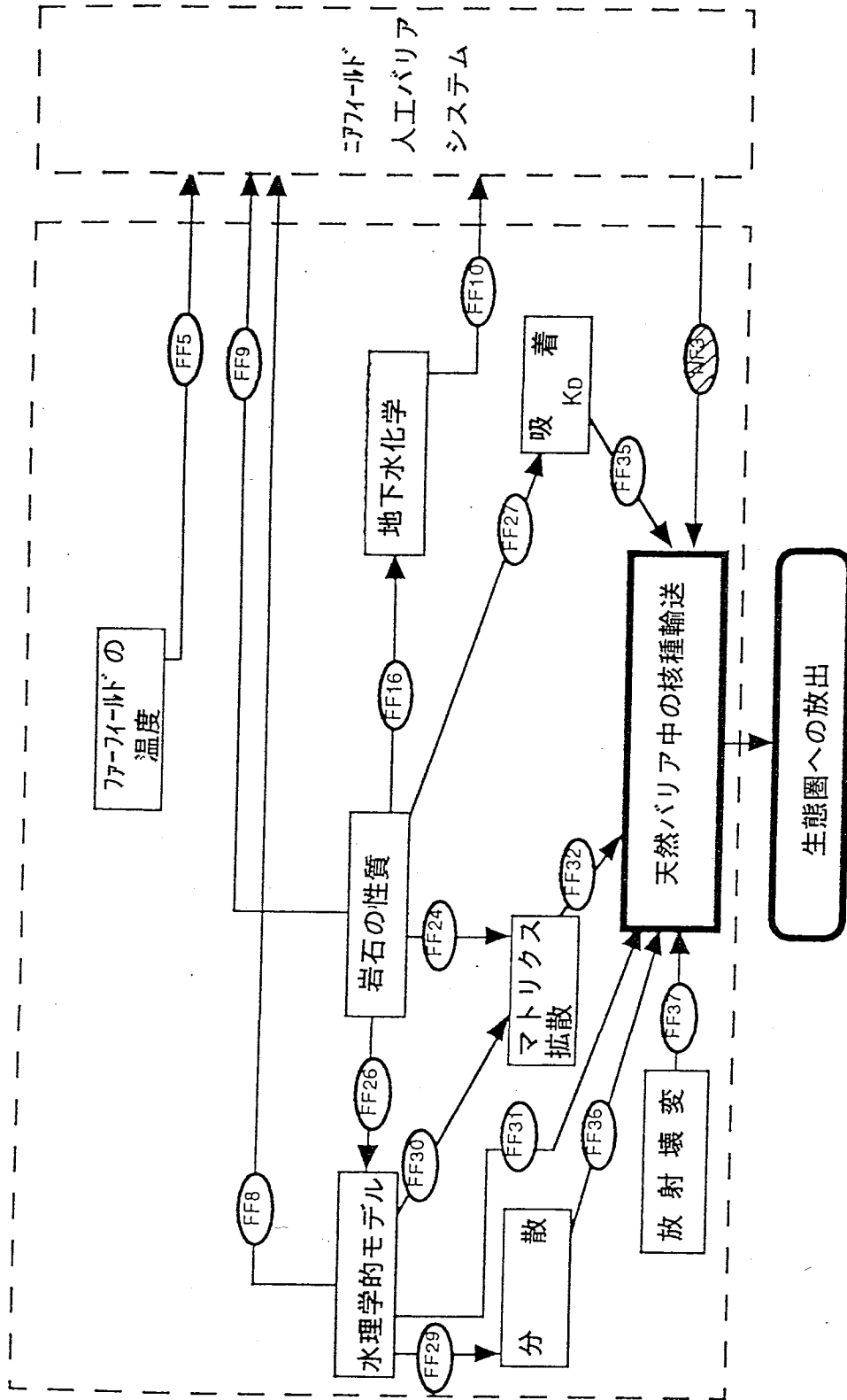


図 3 基本ケースにおけるファールフィールドのインフルエンス・ダイヤグラム

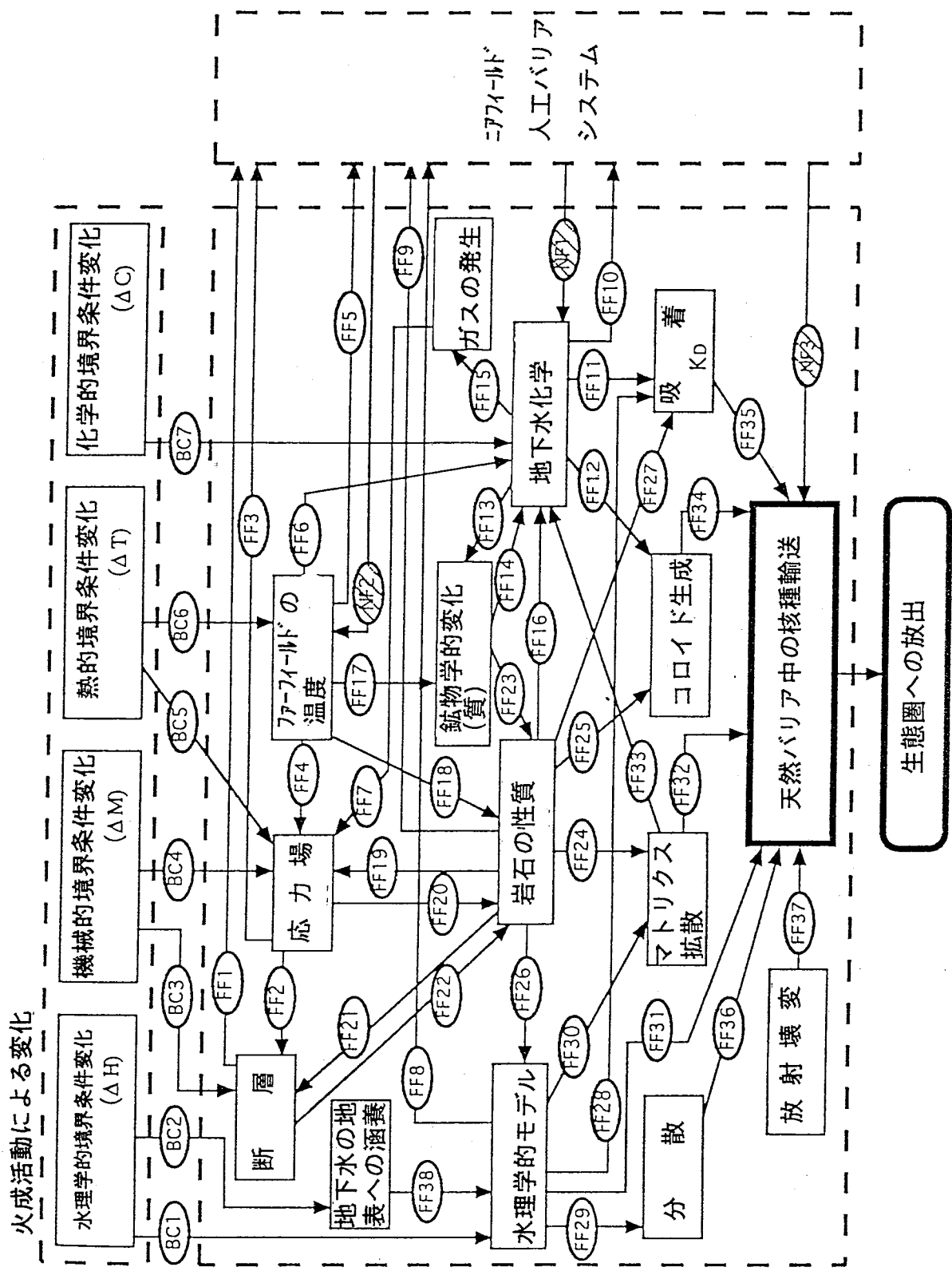


図4 火成活動のフアフィールドへの影響を表すインフルエンス・ダイアグラム

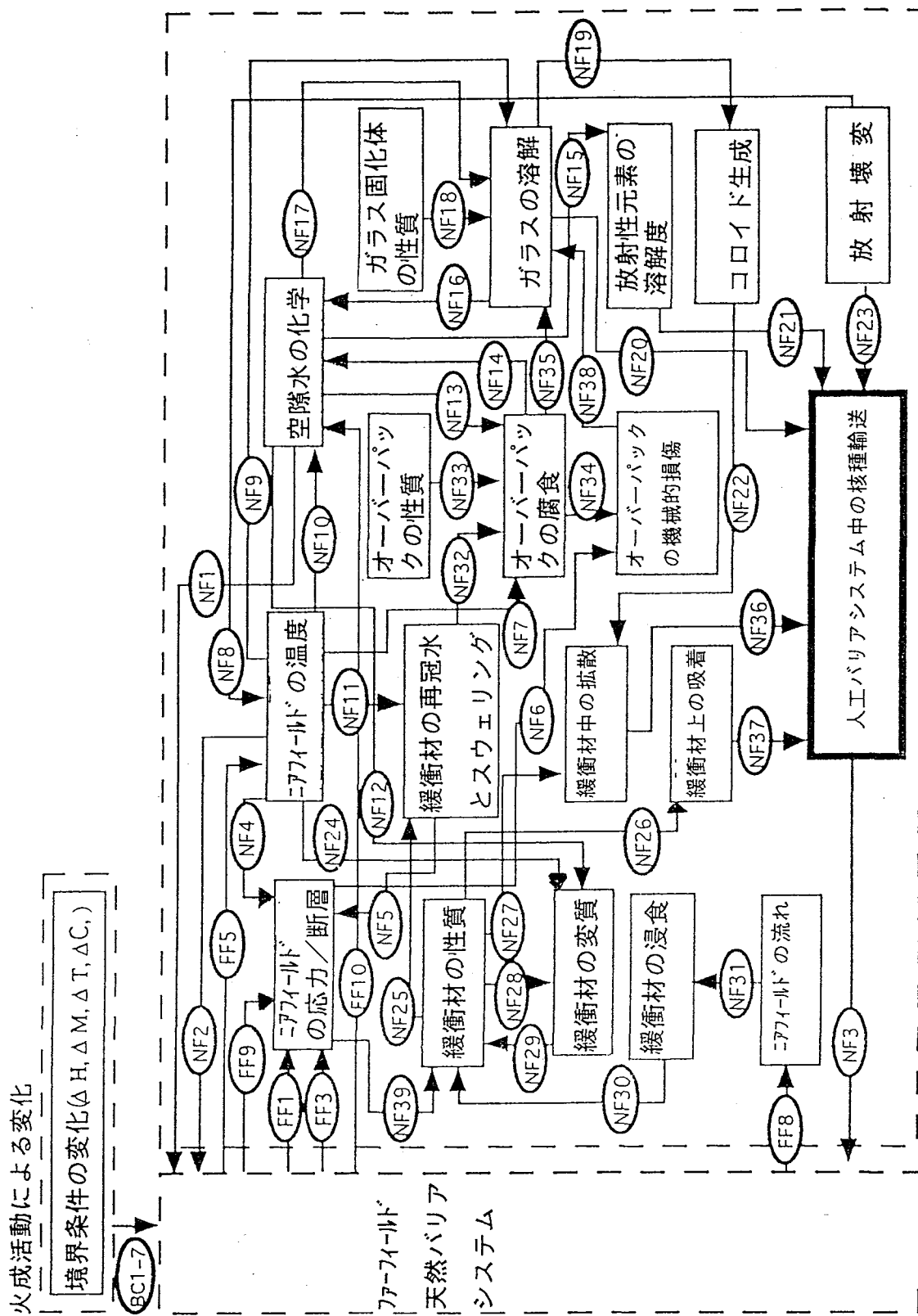


図 5 火成活動によるコアフィールドへの影響を表すインフルエンス・ダイアグラム

3. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオの解析、評価上の取扱いに関する概略的検討

3.1 地下水シナリオ（基本ケース）の各モデルにおける定量的諸量

1章で確認・整理された地下水シナリオ（基本ケース）の各モデルにおいて定義されている定量的諸量に対して、2章で検討・整理した102のFEPの反映・取り扱い可能性を検討するため、まず、基本ケースの各モデルに対する各諸量リストを作成し、各モデルの主たる出力変数、初期条件、境界条件、パラメータ等を各FEPとの関連性を念頭に、明確化した。

3.2 各FEP関連モデルのサーベイ

2章で作成した各シナリオを取り扱うためには、具体的な解析フレーム（AHP法や効用関数法によるFEP間インフルエンスの重要度評価も含むシステム）を作成する必要があると考えられる。そのためには、まず各シナリオを構成し得るFEPそれぞれを個別にモデル化し得るものかどうかを検討しておくことが望ましい（図6参照）。そこで、各FEPに関連し得る決定論的モデルと確率論的モデルとしてどのようなものがあり得るのかをサーベイ・整理し、適用事例の各FEPとの対応づけを行った。

3.3 火成活動を起点とするシナリオの取り扱い方に関する概略的検討

2.4節で検討した火成活動起因シナリオに対し、基本モデルのパラメータ変動（あるいは感度）解析や境界条件変動で扱えるもの、新たなモデル概念やモデル融合の可能性の検討が必要なもの、などを概略的に検討した。その結果、全ての作成シナリオに対して、図6に示すようなアプローチをとることがデータ・情報等の不足によって不可能な場合もあると考えられるため、図7に示すように、基本モデル群での定量的諸量変動の影響が大きいと考えられるシナリオに対してのみ、シナリオ関連FEPのサブモデル詳細解析を行うといったフロー概念を示した。

また、このようなモデル化を進めるに当たって解決すべき課題を整理した。

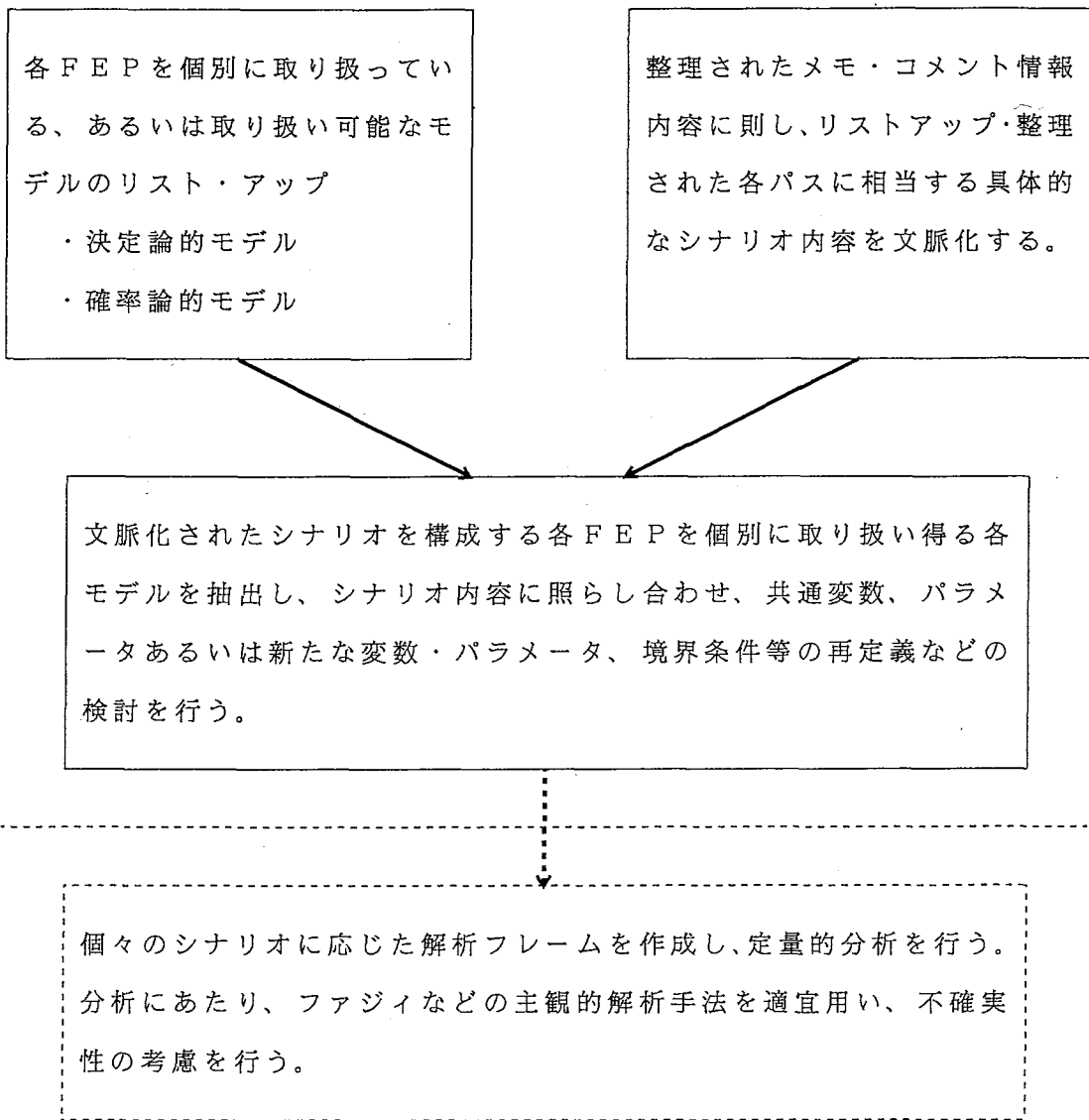


図6 シナリオの取り扱い方に関する検討プロセス

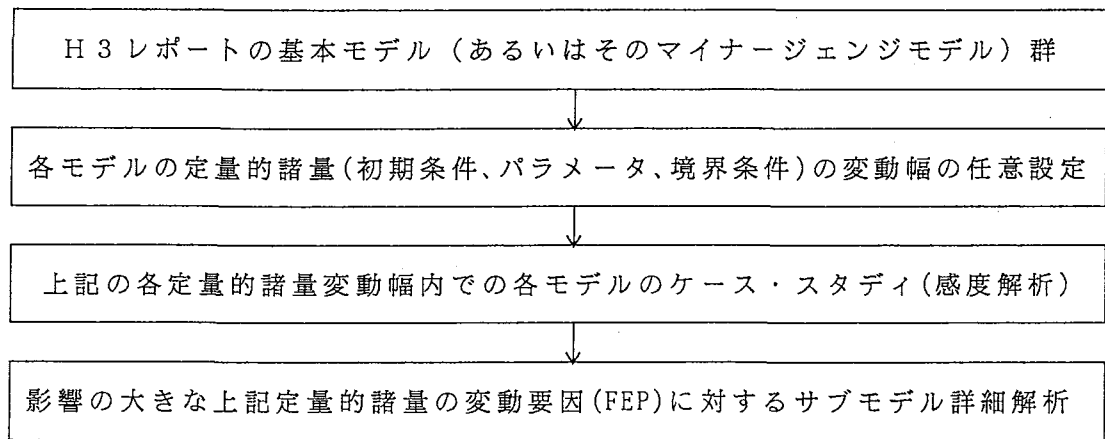


図7 シナリオの定量的解析フロー概念

あとがき

H L W地層処分の安全評価における稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ作成のため、地下水シナリオ基本ケース内容並びに102のF E Pに係る諸情報の確認・整理、及び稀頻度事象を反映した地下水変動シナリオ作成プロセスの検討を経て、具体的に火成活動起点シナリオを作成し、地下水シナリオ解析・評価上の取り扱い方を概略的に検討した。これにより、任意のF E Pを起点とする地下水変動シナリオ作成手順並びにモデル解析等への反映方法が明確化されたと言える。

今後は、より高度なシナリオ自動作成やファジィ理論のようなシナリオ・リスク解析手法の適用を検討し、任意の変動シナリオを具体的に作成していくとともに、必要なモデル開発を行うことにより変動シナリオに関する解析・評価を実施していくことが望まれる。

This is a blank page

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 TN 1410 92-081(1992).
- (2) 地学団体研究会、地学事典編集委員会編
「増補改訂－地学事典」 平凡社(1981).
- (3) 地下水ハンドブック編集委員会編
「地下水ハンドブック」 建設産業調査会(1979).
- (4) A. A. ベウスら著（藤森訳）
「環境の地球化学概論」 現代工学社(1980).
- (5) (株)三菱総合研究所
「我が国における地層処分性能評価シナリオ作成に関する研究」
PNC委託研究成果報告書、PNC SJ4222 89-001(1989).
- (6) (株)三菱総合研究所
「我が国における地層処分性能評価シナリオ作成に関する研究（Ⅱ）
－シナリオ・スクリーニングに関する研究－」
PNC委託研究成果報告書、PNC SJ4222 90-001(1990).
- (7) (株)三菱総合研究所
「我が国における地層処分性能評価シナリオ作成に関する研究（Ⅲ）」
PNC委託研究成果報告書、PNC ZJ1222 91-002(1991).
- (8) (株)三菱総合研究所
「我が国における地層処分性能評価シナリオ作成に関する研究（Ⅳ）
－人的行為シナリオの確率論的評価－」
PNC委託研究成果報告書、PNC ZJ1222 92-001(1992).
- (9) (株)三菱総合研究所
「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（Ⅰ）」
PNC委託研究成果報告書、PNC ZJ1222 93-001(1993).

- (10) R.W. Henley and A.J. Ellis:「Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review」, Earth-Sci. Rev., 19, pp1-50 (1983).
- (11) B.D. Marsh:「Island-arc volcanism」, American Scientist, 67, pp161-172 (1979).
- (12) A.J. Ellis and W.A.J. Mahon:「Chemistry and Geothermal Systems」, Academic Press, New York, New York, p392 (1977).
- (13) L.M. Cathles:「An analysis of the cooling of intrusives by groundwater convection which included boiling」, Econ. Geol., 72, pp804-826 (1977).
- (14) D. Norton and J. Knight:「Transport phenomena in hydrothermal systems : cooling plutons」, Amer. Jour. Sci., 277, pp937-981 (1977).
- (15) J.W. Hedenquist:「Special issue : the geochemistry of newly developed geothermal systems in Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp199-202 (1991).
- (16) T. Takenaka and S. Furuya:「Geochemical model of the Takigami geothermal system, northeast Kyushu, Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp267-281 (1991).
- (17) Y. Seki:「The physical and chemical structure of the Oku-aizu geothermal system, Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp245-265 (1991).
- (18) Y. Yoshida:「Geochemistry of the Nigorikawa geothermal system, southwest Hokkaido, Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp203-222 (1991).
- (19) 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).



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

(Summary)

(REPORT ON RESULT OF PNC-COMMISSIONED RESEARCH)

March, 1994

Mitsubishi Research Institute, Inc.

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

電話:029-282-1122(代表)
ファックス :029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

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

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

This document
may not be
reproduced or
discussed in
written or
oral form
without the
written consent
of the
Japan Nuclear
Cycle Development
Corporation

reference
prior
to
comment

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



PNC ~~2~~⁷J1222 94-002
March, 1994

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

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In order to draw the groundwater scenarios of events with an extremely low frequency of occurrence in the safety assessment of HLW disposal, first, (1) basic concept/assumption, (2) model, (3) data, (4) factors relating to each phenomenon which have been treated as the standard case of groundwater scenario in H3 report⁽³⁾ were listed up, and then state variable appeared on the basic case and the outline method to be required were roughly summarized.

Secondly, according to 102 FEP's which have been defined by PNC, ① factors related to each FEP, ② quantitative concept of each FEP ③ its direct influence on other FEP's were arranged as a table (called memo-comment) based on various informations, and then FEP's which have not yet been treated in the basic case were discriminated from those which have already been treated there. And as a first example, the magma intrusion scenarios were drawn, concretely.

Finally, quantitative concepts such as initial condition, boundary condition and parameter introduced in each model of base case were listed up in connection with each FEP, and some examples of deterministic and probabilistic models which could treat the FEP's respectively were surveyed and arranged. Further, the discussion has been made on how to handle the magma intrusion scenarios in the framework of performance assessment of ground water scenario.

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. :050D0285

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

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

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

This is a blank page



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(Ⅱ)
-地下水シナリオの変動に関する概略的検討-

大久保博生*

要 旨

H L W地層処分の安全評価において、稀頻度事象を考慮した地下水シナリオ作成のため、まず、H3レポート⁽¹⁾で扱っている地下水シナリオ基本ケースの(1)基本的考え方/前提条件、(2)モデル、(3)データ、(4)各現象に及ぼし得る要因、をリストアップし、各現象に係る状態量、必要とされるモデル的取り扱い法の見通しを概略的に把握・整理した。

次に、動燃事業団殿設定の102種類の各FEPに対し、①関連要素、②定量的概念、③他のFEPへの直接的な影響、を各種情報に基づき整理表として検討・作成し、地下水シナリオ基本ケースで既に扱われているFEPとそうでないものを明らかにした。また、基本ケースで扱われていないFEPのうち、特に、火成活動を起点とするシナリオを具体的に作成した。

最後に、基本ケースの各モデルにおける定量的諸量(初期条件、境界条件、パラメータ等)を各FEPとの関連性を念頭に明確化し、また、各FEPを個別に扱い得る決定論並びに確率論的モデルをサーベイ・整理した。さらに、作成した火成活動起点シナリオに対する地下水シナリオ解析・評価上の取り扱い方の概略的検討を行った。

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：050D0285

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 エネルギー環境研究室

TABLE OF CONTENTS

Foreword 1

1. Confirmation and arrangement of the information used to 3
draw the groundwater scenarios reflecting events with an
extremely low frequency of occurrence

2. Discussion and development of the groundwater scenarios 3
concerning events with an extremely low frequency of
occurrence

2.1 Preliminary Study for the arrangement of relationships 3
among FEPs

2.2 Relationships between the groundwater scenario (base case) --- 7
and FEPs, and arrangement of the FEP's chains

2.3 Construction of magma intrusion scenarios 9

3. Preliminary study on the analysis and assessment of the 1 5
groundwater scenarios considering events with an extremely
low frequency of occurrence

3.1 List up of quantitative concepts of (base-case) models 1 5
of the groundwater scenario

3.2 Survey of models associated with each FEP 1 5

3.3 Preliminary study on how to treat the magma intrusion 1 5
scenarios

Afterword 1 9

References 2 1

This is a blank page

CONTENTS OF TABLES

Table 1. Preliminary FEP List	4
Table 2. Factors/Influences and Index (parameter) etc.	10

CONTENTS OF FIGURES

Fig.1	FEP's Chain Treated in the Base Case Model Analysis	8
	of H3 Report	
Fig.2	Flow of Scenario-Drawing Process	1 1
Fig.3	Influence Diagram for Far-field Impacts for	1 2
	Base Case Scenario	
Fig.4	Influence Diagram for Far-field Impacts of	1 3
	Igneous Intrusion	
Fig.5	Influence Diagram for Near-field Impacts of	1 4
	Igneous Intrusion	
Fig.6	Discussion Process for Handling Scenarios	1 6
Fig.7	Concept of the Flow of Quantitative Scenario Analysis	1 7

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 approach 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 direct approach scenario has been highlighted so that the FEP's (features, events and processes) with an extremely low frequency of occurrence has been selected, and the discussion and investigation have been made on how to treat them quantitatively. However, the discussion has not yet been made concretely on how the variations of scenarios could be expressed and how the uncertainties of the FEP's with an extremely low frequency should be handled in the performance assessment.

Therefore, the first matter of this year is to discuss and draw the various groundwater scenarios reflecting the FEP with an extremely low frequency. The next matter is to study how to treat the uncertainties of the FEP with an extremely low frequency appeared in each scenario, by considering the quantitative methods for handling events with an extremely low frequency as discussed last year and using the additional methods, if necessary, investigated this year.

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

This is a blank page

1. Confirmation and arrangement of the information used to draw the groundwater scenarios reflecting events with an extremely low frequency of occurrence

In order to draw the groundwater scenarios in the safety assessment of HLW disposal system, the important issues such as (1) basic concept/assumption, (2) model, (3) data, which have already been described and analyzed in reference (1) (called H3 report), were confirmed and arranged. Next, (4) factors which might influence each phenomenon were listed up and the state variables related to each phenomenon and the model-based approach for handling each phenomenon were discussed.

2. Discussion and development of the groundwater scenarios concerning events with an extremely low frequency of occurrence

- 2.1 Preliminary Study for the arrangement of relationships among FEPs

For 102 FEP's listed up by PNC as shown in Table 1,

- ① related factors such as some kinds of causes of each FEP
- ② quantitative concept and models which could handle the cause and effect of each FEP
- ③ direct impacts which might be induced by each FEP's occurrence

have been re-arranged using the informations and results of refs. (2)~(8).

Table 1. Preliminary FEP List

- A. NATURAL PHENOMENA
 - 1. EXTRA-TERRESTRIAL
 - 1.1 Meteorite Impact
 - 1.2 Solar Insolation
 - 2. GEOLOGICAL
 - 2.1 Plate Movement/Tectonic Change
 - 2.2 Changes in the Earth's Magnetic Field
 - 2.3 Magmatic Activity
 - 2.4 Metamorphic Activity
 - 2.5 Diagenesis
 - 2.6 Uplift and Subsidence
 - 2.7 Seismicity/Fault Activation
 - 2.8 Rock Heterogeneity (Permeability, Mineralogy)
 - 3. CLIMATOLOGICAL
 - 3.1 Precipitation, Temperature and Soil Water Balance
 - 3.2 Flooding
 - 3.3 Sea-Level Change
 - 3.4 Permafrost
 - 3.5 Glaciation (Glacial Erosion, etc.)
 - 4. GEOMORPHOLOGICAL
 - 4.1 Land Slide
 - 4.2 Denudation
 - 4.3 River, Stream, Channel Erosion
 - 4.4 River Meander
 - 4.5 Coastal Erosion
 - 4.6 Sedimentation
 - 4.7 Frost Weathering (Solifluction, etc.)
 - 4.8 Chemical Denudation and Weathering
 - 5. HYDROLOGICAL
 - 5.1 Groundwater Circulation
 - 5.2 Groundwater Flow in Heterogeneous System
 - 5.3 Groundwater Flow Change
 - 5.4 Saline Intrusion in Groundwater System
 - 5.5 Effects at Saline-Freshwater Interface
 - 5.6 Confined Aquifer
 - 5.7 Geothermal Effects

6. TRANSPORT AND GEOCHEMICAL

- 6.1 Advection/Dispersion
- 6.2 Diffusion
- 6.3 Matrix Diffusion
- 6.4 Gas Mediated Transport
- 6.5 Multiphase Flow and Gas Driven Flow
- 6.6 Sorption (Linear/Non-Linear, Reversible/Irreversible)
- 6.7 Dissolution, Precipitation and Crystallisation
- 6.8 Colloid Formation, Dissolution and Transport
- 6.9 Complexing Agents
- 6.10 Fracture Weathering and Mineralisation
- 6.11 Accumulation in Soils and Organic Debris
- 6.12 Mass, Isotopic and Species Dilution
- 6.13 Chemical Gradients (Electrochemical Effect and Osmosis)
- 6.14 Transport of Radionuclide and Oxidant through Channel
- 6.15 Reenrichment
- 6.16 pH Perturbation
- 6.17 Oxidizing Condition

7. ECOLOGICAL

- 7.1 Plant Uptake
- 7.2 Animal Uptake
- 7.3 Soil and Sediment Bioturbation
- 7.4 Pedogenesis
- 7.5 Chemical Transformation
- 7.6 Microbial Interactions
- 7.7 Ecological Change (Forest Fire Cycles, etc.)
- 7.8 Ecological Response to Climate (Desert Formation, etc.)
- 7.9 Plant and Animal Evolution

B. HUMAN ACTIVITY

1. DESIGN AND CONSTRUCTION

- 1.1 Undetected Past Intrusions (Boreholes, etc.)
- 1.2 Investigation Borehole Seal Failure and Degradation
- 1.3 Shaft or Access Tunnel Seal Failure and Degradation
- 1.4 Stress Field Changes (Settling, Subsidence or Caving)
- 1.5 Dewatering of Host Rock
- 1.6 Material Defects (Early Overpack Failure, etc.)

2. OPERATION AND CLOSURE

- 2.1 Inadequate Buffer or Backfill Compaction and Voidage
- 2.2 Heterogeneity of Waste Forms (Chemical, Physical)

3. POST-CLOSURE SUB-SURFACE ACTIVITIES (INTRUSION)

- 3.1 Recover of Waste or Repositoty Materials
- 3.2 Sabotage and Act of War
- 3.3 Exploitation Drilling
- 3.4 Exploratory Drilling
- 3.5 Geothermal Energy Production
- 3.6 Resource Mining
- 3.7 Tunnelling
- 3.8 Underground Construction
(Settlement or Other Waste Disposal)
- 3.9 Archaeological Investigation
- 3.10 Injection of Liquid Wastes
- 3.11 Groundwater Abstraction

4. POST-CLOSURE SURFACE ACTIVITIES

- 4.1 Loss of Records
- 4.2 Dams and Reservoirs, Built/Drained
- 4.3 River Rechanneled
- 4.4 Irrigation
- 4.5 Altered Soil or Surface Water Chemistry
- 4.6 Agricultural and Fisheries Practice Change
- 4.7 Demographic Change and Urban Development
- 4.8 Anthropogenic Climate Change (Greenhouse Effect, etc.)
- 4.9 Quarrying and Peat Extraction

C. WASTE AND REPOSITORY EFFECTS

1. THERMAL (Nuclear and Chemical)

- 1.1 Host Rock Fracture Aperture Changes
- 1.2 Induced Hydrological Changes
(Density Convection, Fluid Pressure and Viscosity)
- 1.3 Induced Chemical Changes
(Solubility, Sorption, Species Equilibrium, Mineralisation)

2. CHEMICAL

- 2.1 Metallic Corrosion
(Pitting/Uniform, Internal and External Agents,
Gas Generation eg. H₂)
- 2.2 Interactions of Host Materials and Groundwater with
Repository Material
- 2.3 Effects by Organic Matter
- 2.4 Microbiological Effects

3. MECHANICAL

- 3.1 Overpack Movement
- 3.2 Changes in In-situ Stress Field
- 3.3 Host Rock Deformation
- 3.4 Tunnel Failure
- 3.5 Gas Effects

4. RADIOLOGICAL

- 4.1 Radiolysis (α -Radiolysis, β -Radiolysis)
- 4.2 Irradiated Failure
- 4.3 Nuclear Criticality
- 4.4 Radioactive Decay and Ingrowth (Chain Decay)

5. Hydrological

- 5.1 Resaturation
- 5.2 Groundwater Movement in Buffer Material

2.2 Relationships between the groundwater scenario (base case) and FEPs, and arrangement of the FEP's chains

Then, by constructing the FEP's chains based on the results of this re-arrangement (called FEP memo comment), the FEP's which have already been involved in the base-case model of the ground water scenarios as conformed and arranged in chap.1 were roughly discriminated from those which have not yet been treated there. Fig.1 shows the FEP's chains which have already been treated in the base-case model analyses of H3 report.

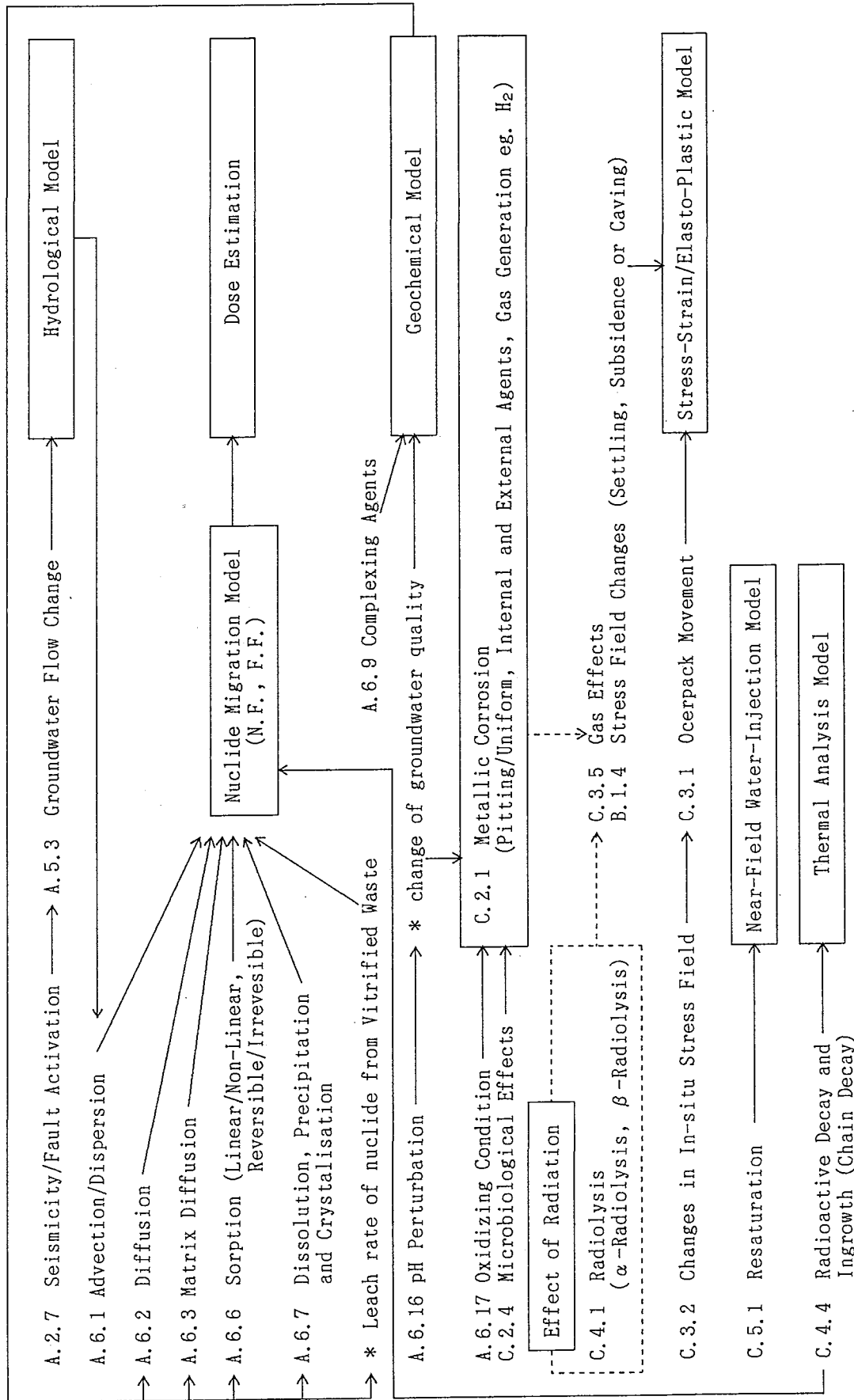


Fig. 1 FEP's Chain Treated in the Base Case Model Analysis of H3 Report

Then, the FEP's which could impact on these analytic models were more listed up.

As for FEP's which have not yet been treated in H3 report, the FEPs which could have more impacts on the other FEPs were listed up as

A.2.3 Magmatic Activity

A.2.7 Seismicity/Fault Activation

A.2.8 Rock Heterogeneity (Permeability, Mineralogy)

A.3.1 Precipitation, Temperature and Soil Water Balance

A.6.16 pH Perturbation

B.3.1~B.3.11 Post-Closure Sub-Surface Activities (Intrusion)

B.4.1 Loss of Records

It is recommended to use the analysis code efficiently to search and select all the passes of these FEPs which may lead to the basic frame of the groundwater scenarios.

2.3 Construction of magma intrusion scenarios

By the way, it is necessary to consider the passes leading to the factors/influences and index (parameter etc.) as indicated in Table 2, since, generally, all the FEPs cannot be treated in the framework of the base-case models only.

Thus, for an example, the FEP chains initiated by volcanic activity to pass only one FEP to reach the factors etc. of Fig.2 were listed up without degeneracy, and these passes were converted to the documents, referring to the FEP memo-comment.

In the same way, it is possible to develop all the scenarios initiated from any FEP through any intermediate FEPs. Fig.2 summarizes a generalized procedure for developing the scenario (up to the documentation).

Based on the above discussions and the connection between the FEPs and their model analyses, the process system model⁽¹⁹⁾ was used to construct the scenario chains (influence diagrams) initiated by volcanic activity for base case, far-field impact and near-field impact as shown in Fig.3, Fig.4 and Fig.5, respectively. And, the document was made for the contents of FEPs, FEPs' chains denoted as FF and NF, and changes of four (hydrological, mechanical, thermal and chemical) boundary conditions^{(10)~(18)}.

Table 2. Factors/Influences and Index (parameter) etc.

<p>(1)Repository Factors/Influence</p> <ul style="list-style-type: none"> · Time and location of contact of water with repository, (A.5.3, A.6.1) · Time and location of contact of water with overpack/canister, (A.6.2) · Corrosion of overpack/canister,(C.2.1) · Degradation/failure of backfill,(B.1.2, B.1.3) · Dissolution of vitrified waste form,(A.6.7) · Changes in near-field chemical environment,(C.2) · Changes in mechanical properties of near-field barriers, (B.1.4, C.3.1, C.3.2, C.3.3, C.3.4) · Changes in hydrological/transport properties of near-field barriers (C.5, A.5.3) · Changes in thermal properties of near-field barriers,(C.1) · Changes in chemical/retardation properties of near-field barriers. (A.6.1, A.6.2, A.6.4, A.6.5, A.6.6, A.6.7, A.6.8, A.6.9, A.6.10) <p>(2)Site Factors/Influence</p> <ul style="list-style-type: none"> · Changes in groundwater composition, (* change of groundwater quality) · Change in transport time of nuclides,(A.5.3, A.6.1) · Change in transport path-length for nuclides,(A.5.3, A.6.1) · Change in chemical/retardation properties of site, (A.6.1, A.6.3, A.6.6, A.6.8, A.6.9, A.6.10) · Change in hydroiological properties of site, (A.5.1, A.5.2, A.5.3, A.5.4, A.5.5) · Changes in mechanical properties of site, (corresponding to B.1.4, C.3.1, C.3.2, C.3.3, C.3.4 as far-field) · Changes in thermal properties of site, (corresponding to C.1 as far-field) · Changes in flow rate and direction of groundwater,(A.5.3) · Gencration of new pathways for nuclide transport,(B.1.4, C.3.2) · Introduction and mixing of new groundwater types (sea water, meteoric, hydrothermal solutions)(A.4.8,A.5.4, A.6.4, A.6.5).

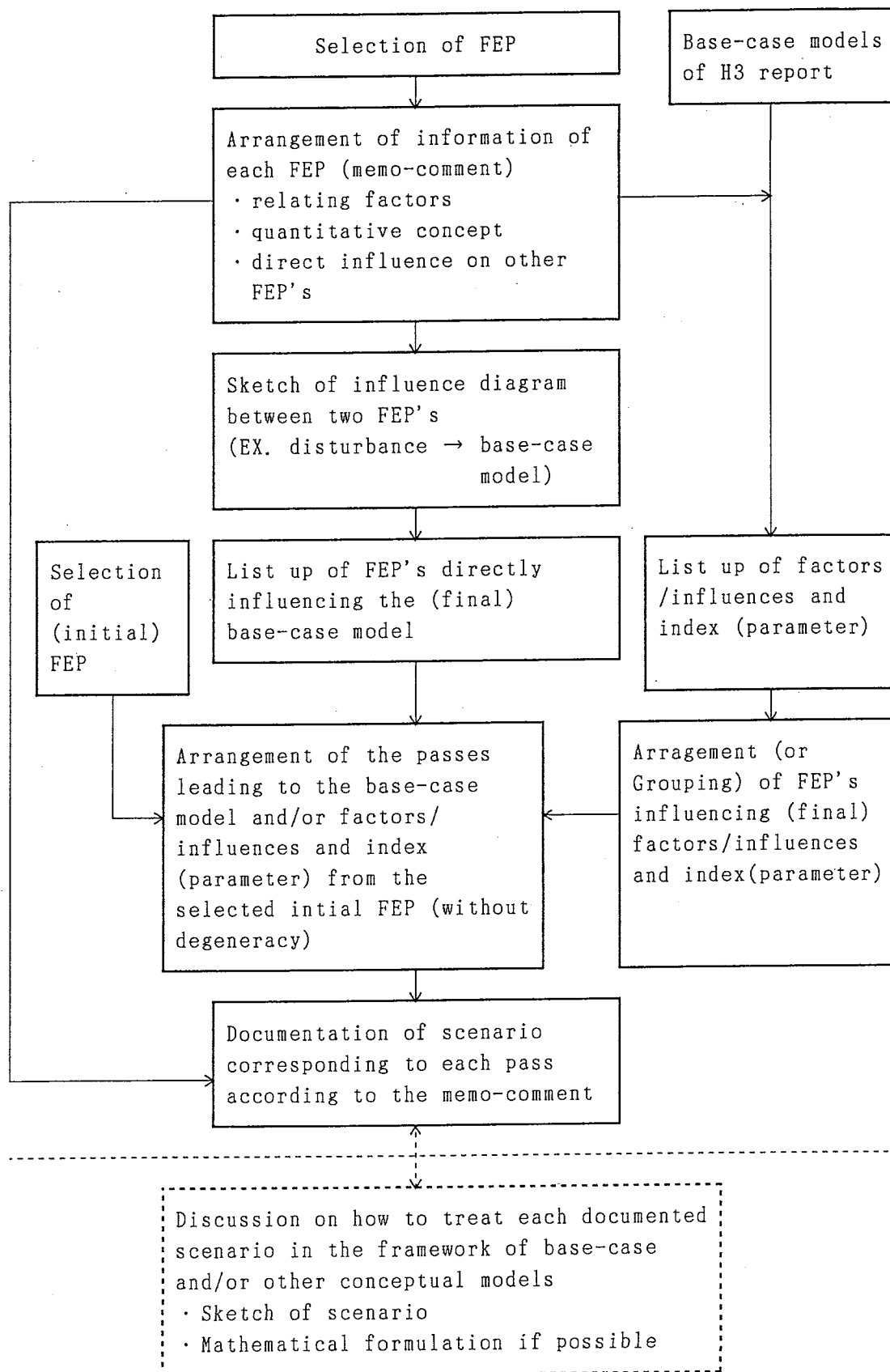


Fig.2 Flow of Scenario-Drawing Process

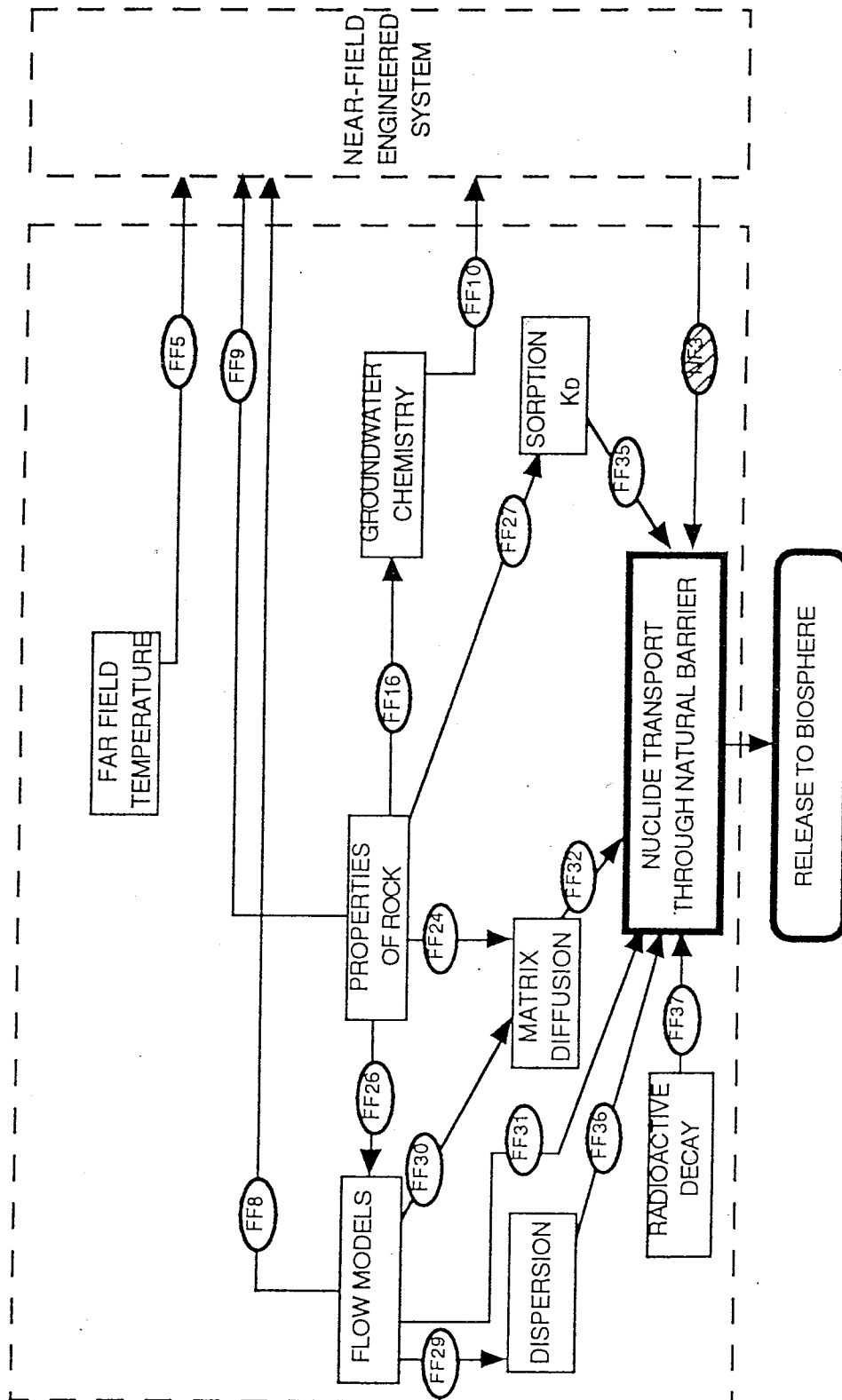


Fig. 3 Influence Diagram for Far-field Impacts for Base Case Scenario

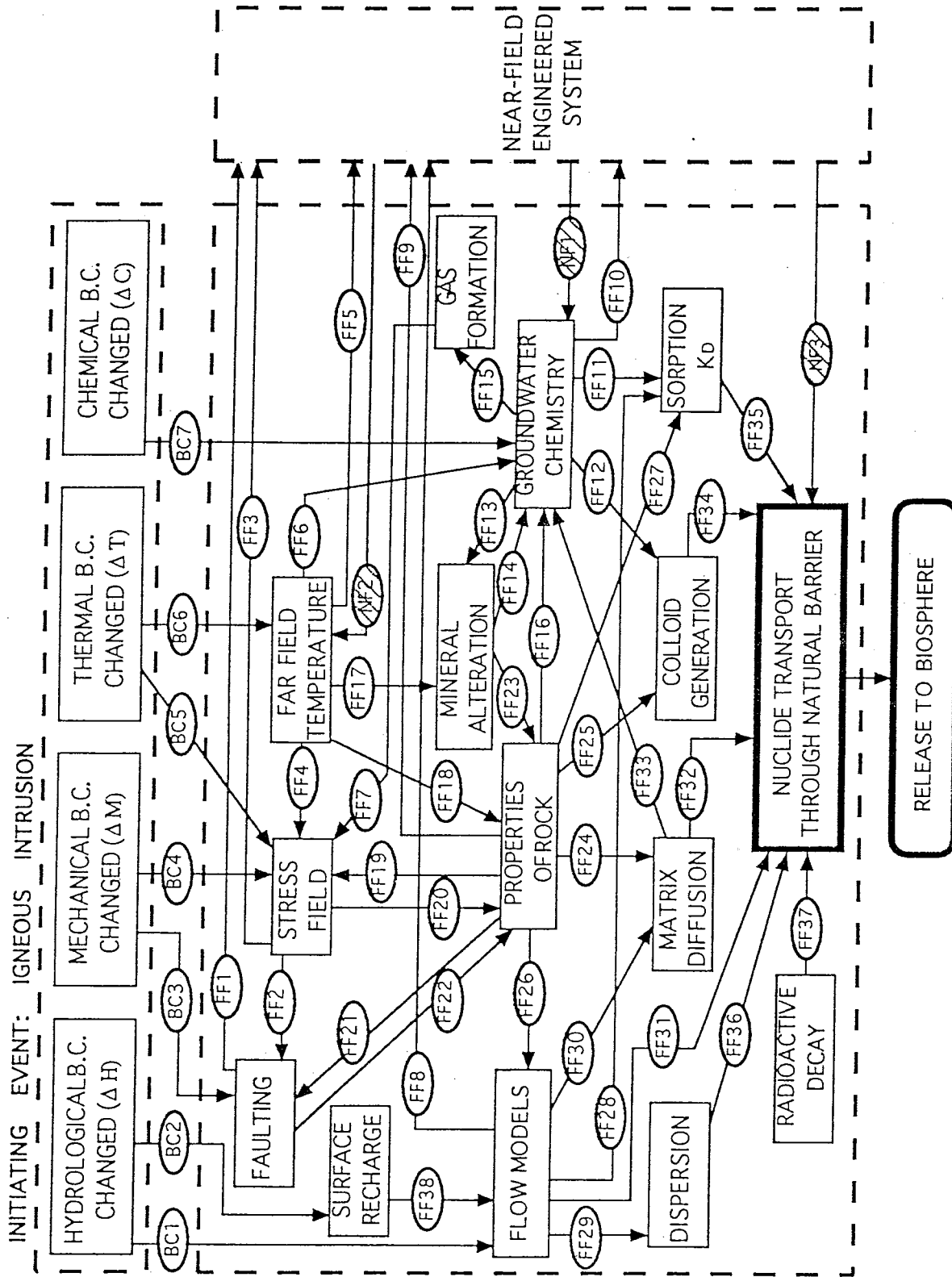


Fig. 4 Influence Diagram for Far-field Impacts of Igneous Intrusion

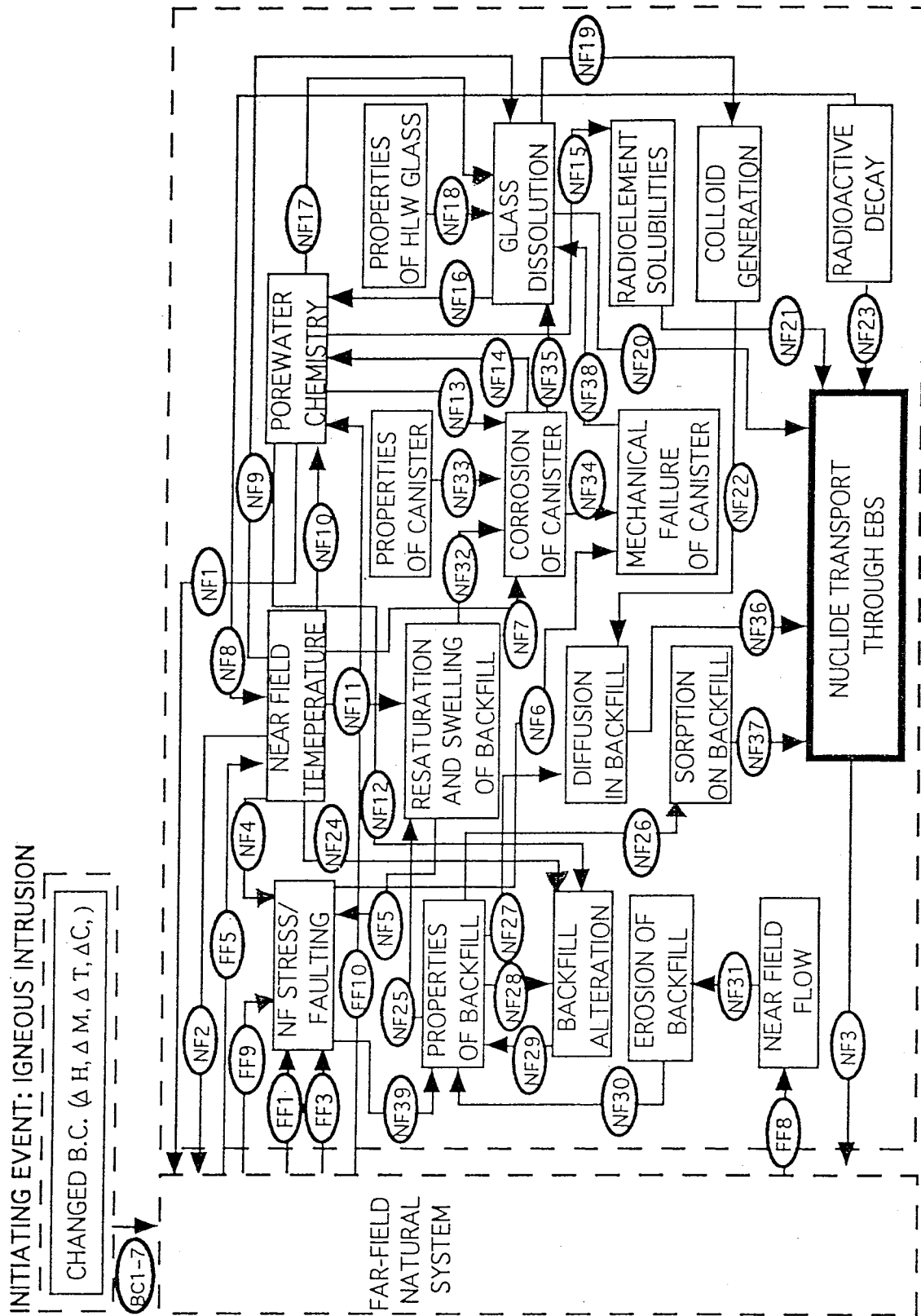


Fig. 5 Influence Diagram for Near-field Impacts of Igneous Intrusion

3. Preliminary study on the analysis and assessment of the groundwater scenarios considering events with an extremely low frequency of occurrence

3.1 List up of quantitative concepts of (base-case) models of the groundwater scenario

In order to discuss which and how FEPs arranged in Chap.2 could be handled in each base-case model of the groundwater scenario conformed and arranged in Chap.1, the quantities defined in each base-case model were listed up and arranged to clarify the main outputs, initial conditions, boundary conditions and parameters etc. in connection with each FEP.

3.2 Survey of models associated with each FEP

In order to evaluate each scenario drawn in Chap.2, it is necessary to develop something like analytic frame (including the assessment of importance of influence between FEPs using AHP and utility analysis. For the first step (as shown in Fig.6), it is desirable to check whether each FEP can be quantified as a mathematical model. Therefore, some examples of the deterministic model and the probabilistic model were surveyed and arranged to clarify the correspondence of each model to each FEP.

3.3 Preliminary study on how to treat the magma intrusion scenarios

Concerning the magma intrusion scenarios constructed in section 2.4, the discussion was roughly made on whether they could be treated by the parameter variation (or sensitivity analysis) and changes of boundary

condition in the base-case model or whether some new models should be developed or combined. As a result, since all the scenarios made here could not be treated by the same approach of Fig.6 because of lack of related data and information, a concept of detail analysis using sub-model was shown in Fig.7 for the scenarios with larger impacts which would be identified through case study (or sensitivity analysis) of base-case models.

And, some subjects were listed to be solved to proceed the above modelling process.

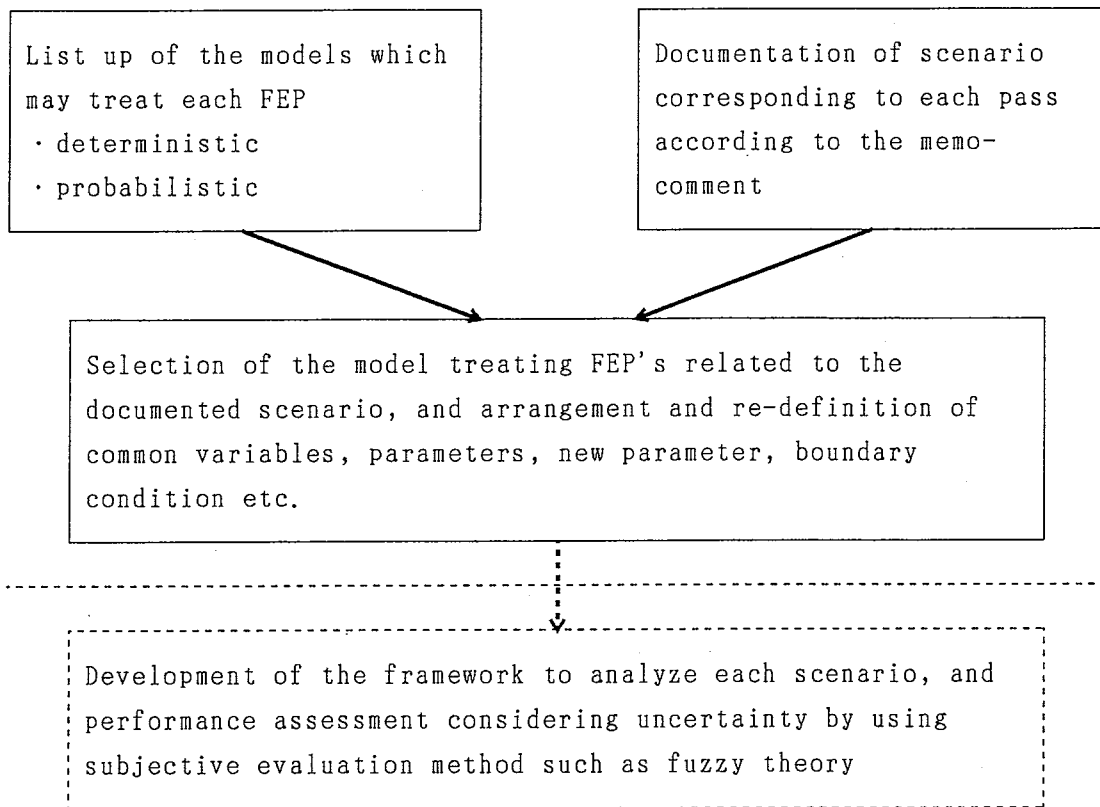


Fig.6 Discussion Process for Handling Scenarios

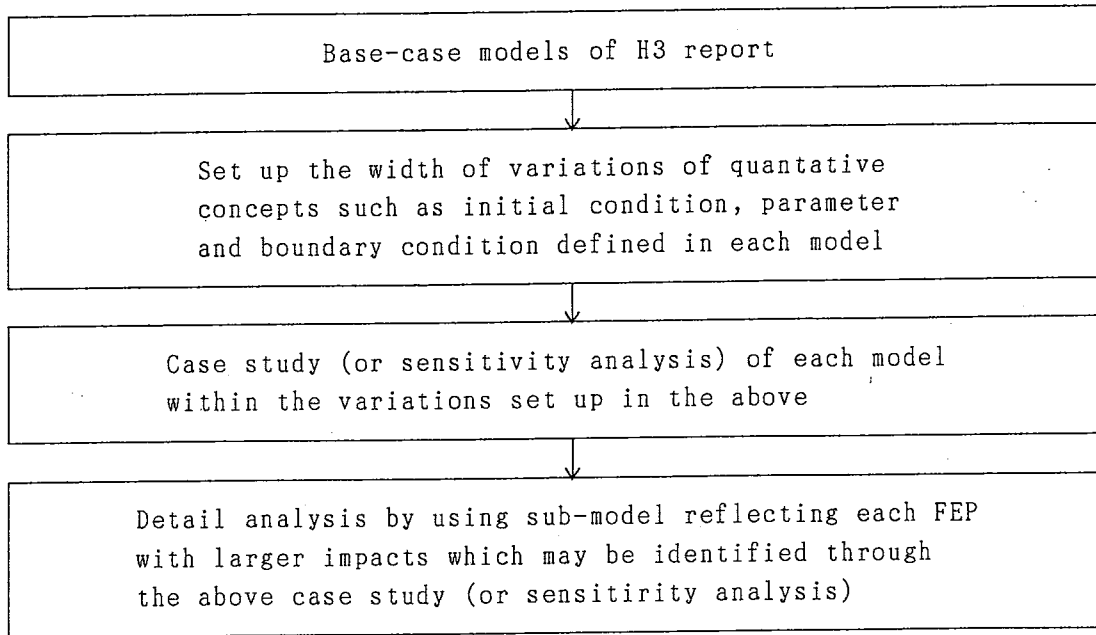


Fig.7 Concept of the Flow of Quantitative Scenario Analysis

This is a blank page.

Afterword

In order to draw the groundwater scenarios reflecting events with an extremely low frequency of occurrence, the confirmation and arrangement of the groundwater base-case scenarios and informations concerning 102 FEP's have been made, and after discussing the scenario-drawing process on the groundwater scenario reflecting the FEP's with a extremely low frequency, the magma intrusion-initiated scenarios have been drawn and roughly discussed on how to be treated in the framework of the groundwater scenario analysis and assessment. It can be said that, through these efforts, a perspective of how to draw and treat the arbitrary FEP-initiated groundwater alternative scenarios in the model analyses has been clarified.

In the next step, it will be desirable for the arbitrary alternative scenarios to be drawn by using an automatic scenario-making tool based on scenario-risk analysis method such as the fuzzy theory, and analyzed through the development of required models.

This is a blank page.

References

- (1) PNC
「Technical Report on the R & D of HLW — the third fiscal year of Heisei —」 (in Japanese) PNC TN 1410 92-081 (1992).
- (2) The Association for Geological Collaboration ed.
「Dictionary of Physical Geography」 (in Japanese) Heibon-sha (1981).
- (3) Committee on Groundwater Handbook ed.
「Groundwater Handbook」 (in Japanese) Committee on Construction and Industry (1979).
- (4) A. A. Beus
「Geochemistry on Environment」 (in Japanese) Gendai-Kougaku-sha (1980).
- (5) MRI
「A Study on the Scenario concerning Development of Waste Disposal Performance Assessment in Japan」 Report on result of PNC-Commissioned research PNC SJ4222 89-001(1989).
- (6) Ibid : 「Ibid(II)」 PNC SJ4222 90-001(1990).
- (7) Ibid : 「Ibid(III)」 PNC ZJ1222 91-002(1991).
- (8) Ibid : 「Ibid(IV)」 PNC ZJ1222 92-001(1992).
- (9) Ibid
「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (I)」 PNC ZJ1222 93-001 (1993).
- (10) R. W. Henley and A. J. Ellis: 「Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review」, Earth-Sci. Rev., 19, pp1-50 (1983).

- (11) B.D. Marsh:「Island-arc volcanism」, American Scientist, 67, pp161-172 (1979).
- (12) A.J. Ellis and W.A.J. Mahon:「Chemistry and Geothermal Systems」, Academic Press, New York, New York, p392 (1977).
- (13) L.M. Cathles:「An analysis of the cooling of intrusives by groundwater convection which included boiling」, Econ. Geol., 72, pp804-826 (1977).
- (14) D. Norton and J. Knight:「Transport phenomena in hydrothermal systems : cooling plutons」, Amer. Jour. Sci., 277, pp937-981 (1977).
- (15) J.W. Hedenquist:「Special issue : the geochemistry of newly developed geothermal systems in Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp199-202 (1991).
- (16) T. Takenaka and S. Furuya:「Geochemical model of the Takigami geothermal system, northeast Kyushu, Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp267-281 (1991).
- (17) Y. Seki:「The physical and chemical structure of the Oku-aizu geothermal system, Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp245-265 (1991).
- (18) Y. Yoshida:「Geochemistry of the Nigorikawa geothermal system, southwest Hokkaido, Japan」, Geochem. Jour. of Japan, 25, pp203-222 (1991).
- (19) 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).