

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—

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1994年3月

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
Σ	J122294-001	1994.7.21
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（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、H 3 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

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
1.1 地質環境	7
1.1.1 水理学的モデル	7
1.1.2 地球化学モデル	15
1.2 ニアフィールド環境	21
1.2.1 人工バリア	21
1.2.2 熱的条件	23
1.2.3 水理学的条件：ニアフィールドの再冠水	23
1.2.4 水理学的条件：再冠水後の水理条件	24
1.2.5 人工バリア中の地下水の化学的特性	26
1.2.6 炭素鋼オーバーパックスの腐食挙動	29
1.2.7 構造力学的条件：緩衝材の膨潤圧	32
1.2.8 構造力学的条件：圧縮ベントナイト中のオーバーパックスの変位	33
1.2.9 構造力学的条件：オーバーパックスの腐食生成物による応力	35
1.2.10 構造力学的条件：オーバーパックスの腐食に伴う水素ガス発生・移行	35
1.2.11 構造力学的条件：ニアフィールド水理場における緩衝材の物理的安定性	36
1.2.12 放射線の影響：放射線損傷	37
1.2.13 放射線の影響：放射線分解	38
1.3 人工バリア中の核種移行解析	39
1.4 天然バリア中の核種移行解析	48

2. 稀頻度事象を考慮した地下水シナリオの検討・作成	6 0
2.1 F E P 間関連要因整理のための概略的検討	6 0
2.2 地下水シナリオ（基本ケース）と F E P の関連性	9 5
2.3 F E P 連鎖の整理	1 2 0
2.4 火成活動を起点とするシナリオの作成	1 3 5
2.4.1 シナリオ作成プロセスの試行的検討	1 3 5
2.4.2 火成活動による周辺への影響	1 6 3
2.4.3 Process system modelを用いたシナリオ作成に関する検討.....	1 6 9
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	2 1 3
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 ...	2 1 3
3.2 各 F E P 関連モデルのサーベイ	2 2 4
3.2.1 決定論的モデル	2 2 7
3.2.2 確率論的モデル	2 4 4
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	2 6 8
概略的検討	
3.3.1 境界条件変化の影響の取り扱い方	2 6 8
3.3.2 シナリオに関与するFEPの取り扱い方	2 7 1
あとがき	2 7 5
参考文献	2 7 7
付録 我が国の火山噴火予知に関する資料	2 7 9

表 目 次

	頁
表 1 (1) 地形の相違が反映し得る要因	1 4
表 1 (2) 地下水流れの取扱い上の分類	1 4
表 2 検討用の仕様等 ⁽¹⁾	2 1
表 3 溶解度評価で使用した熱力学データの出典一覧 ⁽¹⁾	4 4
表 4 選定した溶解度制限固相 ⁽¹⁾	4 4
表 5 影響要因・指標（パラメータ値）等（例）	1 3 6
表 6 Typical Hydrothermal Solution from Otake Area, Kyushu,	1 6 8
Japan (Ellis and Mahon, 1977).	
表 7 Process system modelのFEP・リスト	1 7 1
表 8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト	1 8 2
表 9 境界条件変化の影響リスト	1 9 2
表 10 各FEP関連（解析）モデル事例	2 2 8
表 11 確率分布適用事例	2 4 5
表 12 各FEPへの確率的取り扱いに参考となり得る確率分布適用事例 ...	2 6 2
表 13 2.4節の検討に基づくファーフィールドにおける	2 6 9
基本ケースと火成活動起因ケースとの異同	
表 14 境界条件変動の数学的取り扱いパターンの種類	2 7 0
表 15 パラメータ変動の数学的取り扱いパターンの種類	2 7 2

目 次

	頁
図1 地下水シナリオの構成 (H3 レポートベース)	4
図2 地下水シナリオの評価範囲 (H3 レポートベース)	5
図3 解析に用いた地形断面のモデル形状の例 ⁽¹⁾	8
図4 (1) 水収支の相互関係 ⁽³⁾	1 2
図4 (2) 地球表面でのエネルギーバランス ⁽³⁾	1 2
図5 核種移行特性評価上の地下水組成の設定概念 ⁽¹⁾	1 7
図6 地下水の化学的変遷モデル ⁽¹⁾	1 7
図7 検討用の人工バリアシステムの構成 ⁽¹⁾	2 2
図8 人工バリア中の地下水の化学的性質の変化のモデル図 ⁽¹⁾	2 7
図9 多孔質媒体の構造モデルの例 ⁽¹⁾	4 8
図10 亀裂性媒体の構造モデルの例 ⁽¹⁾	4 9
図11 シナリオ作成プロセスのフロー	1 6 2
図12 Schematic Diagram of Main Features of a Geothermal System around Plutonic Intrusion (Henley and Ellis, 1983).	1 6 4
図13 Schematic Diagram of Main Features of a Geothermal System around Strato-Volcanic Intrusion/Extrusion (Henley and Ellis, 1983).	1 6 5
図14 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	1 8 9
図15 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	1 9 0
図16 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	1 9 1
図17 水理的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ 連鎖 (IL=6)	1 9 5
図18 水理的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ 連鎖 (IL=6)	1 9 6
図19 水理的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ 連鎖 (IL=10)	1 9 7

図20	水理学的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ	198
	連鎖 (IL=10)	
図21	機械的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ	199
	連鎖 (IL=6)	
図22	機械的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ	200
	連鎖 (IL=6)	
図23	機械的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ	201
	連鎖 (IL=10)	
図24	機械的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ	202
	連鎖 (IL=10)	
図25	熱的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ	203
	連鎖 (IL=6)	
図26	熱的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ	204
	連鎖 (IL=6)	
図27	熱的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ	205
	連鎖 (IL=10)	
図28	熱的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ	206
	連鎖 (IL=10)	
図29	化学的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ	207
	連鎖 (IL=6)	
図30	化学的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ	208
	連鎖 (IL=6)	
図31	化学的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ	209
	連鎖 (IL=10)	
図32	化学的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ	210
	連鎖 (IL=10)	
図33	シナリオの取り扱い方に関する検討プロセス	225
図34	「火成活動」の波及効果のモデル化可能性から見た重要度を 求めるための階層図	226
図35	シナリオの定量的解析フロー概念	271

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。

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、H 3 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（図1，図2に地下水シナリオの構成並びに評価範囲を示す）について、(1)基本的考え方／前提条件、(2)モデル、(3)データ、を確認・整理する。その上で、各現象に影響を及ぼし得る要因を(4)としてリスト・アップし、後述の第3章との関係上、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。なお、(4)については、現象間の因果関係を原因側 ——→ 結果側で記述し、また、定量的な概念としての取り扱い方として ——→ で記述・整理した。

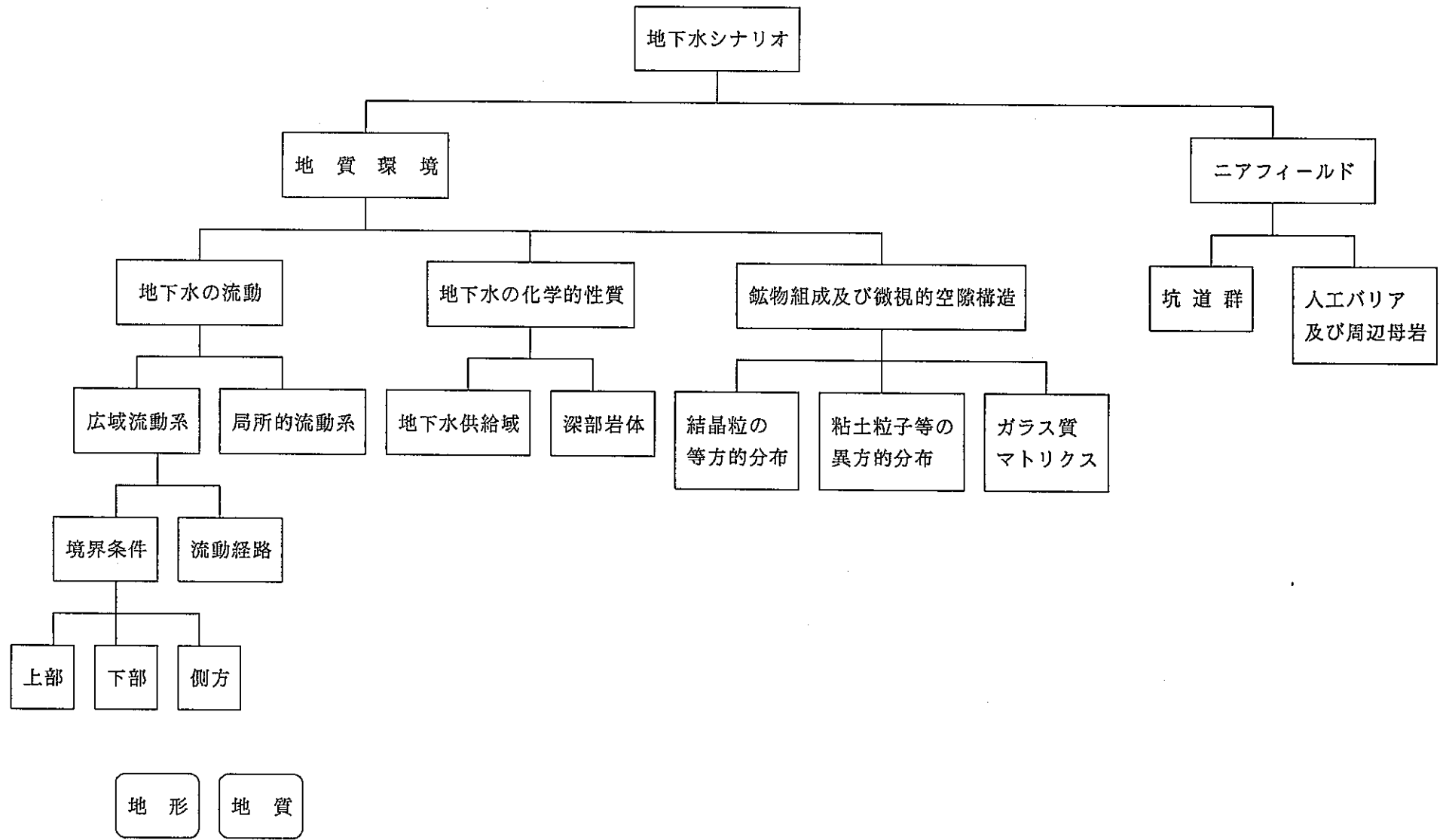


図1 地下水シナリオの構成 (H3レポート記述分)

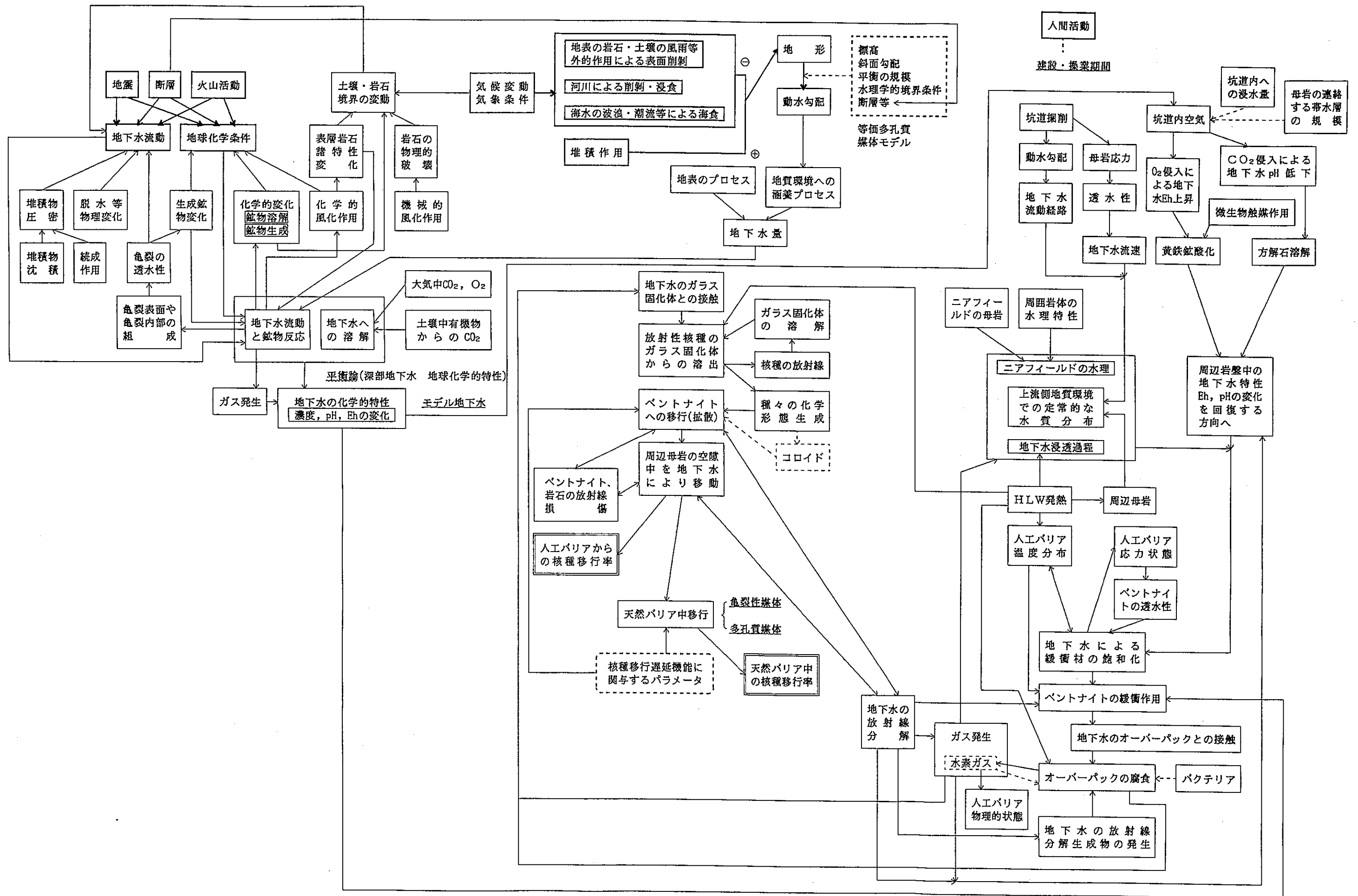


図2 地下水シナリオの評価範囲 (H3レポート記述分)

1.1 地質環境

1.1.1 水理学的モデル

(1) 基本的考え方／前提条件

(i) 地形断面

急峻な断面形状

(a) 山地の斜面規模（山地斜面部の標高差）

- ① 山体が平野もしくは海に臨む場合 1,000m（山頂標高1,200m）
- ② 山体が山地内に位置する場合 1,600m

(b) 山地の傾斜

- ① 山体が平野もしくは海に臨む場合 max 40%
- ② 山体が山地内に位置する場合 max 60%

(c) 山頂から下流側境界までの距離

- ① 平野規模 0km（山地が海岸にせまっているケース）
4km（小規模平野）
10km（多くの平野）
- ② 平野と山地斜面の間（漸移部）→山麓部として1kmにわたる
10%傾斜斜面

(ii) 境界条件

(a) 流入側

- ① 山頂側側面が不透水境界（山地が分水嶺）
- ② 基本地形モデルを含み海岸から28kmの位置に3,000m級の高山が存在し、より広域の地下水流動モデル解析によって得られた基本地形モデルとの境界面の水頭値を流入側境界条件として与える。…固定水頭境界ケース

(b) 流出側

- ① 隣接した水系による干渉（山地）
 - ② 塩水クサビ（海）
- } 鉛直な不透水境界

(c) 上部境界

地形面と地下水位面が一致するよう地表面での圧力水頭 = 0

(d) 下部境界

不透水境界（標高-5,000mの位置）

地下1,000mでの動水勾配に影響がおよばないように

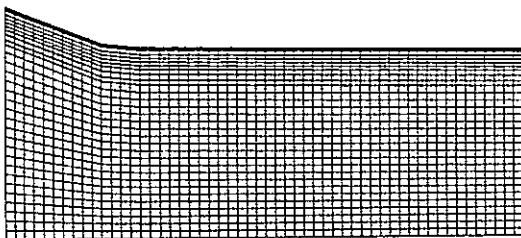
(iii) 透水係数分布

①高透水性の表層（厚さ…30m標準、深層風化のある場合300m）

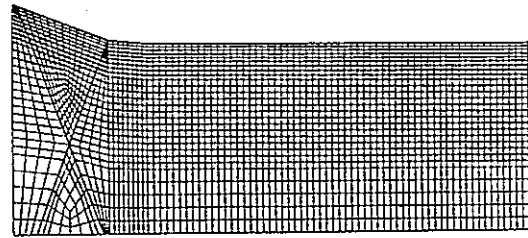
②高透水性の断層、あるいは砂層等（結晶質岩中、山麓付近に位置し上向き流れを促進するような傾斜で断層が1本存在／下向き流れを促進するように最もポテンシャルの高い山頂付近に端を発し、もう1本の断層と交差するような断層）

③低透水性の断層（堆積岩中、山麓に上向き流れを促進する位置に断層が1本存在）

以上の考え方、前提条件の検討結果に基づく基本地形モデルと2本の断層を含むモデルを図示したものが図3である。



(a) 基本地形モデル



(b) 2本の断層を含むモデル

図3 解析に用いた地形断面のモデル形状の例⁽¹⁾

（山頂標高：1,200m，斜面傾斜：40%，

山麓部傾斜：10%，平野規模：10km，

下部境界：標高-5,000m）

(2) モデル

垂直 2 次元 $\rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = 0$ よって、 n 、 α 、 β 、 θ の影響は無視
定常状態

多孔質媒体

ダルシー則と質量保存則 \rightarrow 透水係数一定

$$F \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho}$$

$$F = \frac{\theta}{n} \alpha + \beta \theta + \frac{d \theta}{d h}$$

$$H = h + z$$

ここで、 h : 圧力水頭 [L]

θ : 体積含水率 [-]

n : 有効間隙率 [-]

K_{ij} : 透水係数 [$L T^{-1}$]

Q : 注入流量あるいは排水流量 [$M T^{-3} T^{-1}$]

ρ : 地下水の密度 [$M T^{-3}$]

t : 時間 [T]

x : x 方向 (水平方向) の座標 [L]

z : z 方向 (鉛直方向) の座標 [L]

α : 媒体の圧縮率 [L^{-1}]

β : 地下水の圧縮率 [L^{-1}]

(3) データ

- ・ 透水係数 (表層、断層の考慮)
- ・ 地形断面
- ・ 境界条件

(4) 地下水シナリオ影響要素

(i) 透水係数の深度依存性
透水係数の不均質性 \longrightarrow $K = K(x, z)$ のデータの不確実性を仮定したモデル

(ii) 淡水-塩水境界 \longrightarrow 2層流理論

地熱 \longrightarrow 熱応力 \longrightarrow 断層・割れ目の生成 \longrightarrow 系に断層並びに亀裂媒体を含む水理モデル

地熱 \longrightarrow 地下水温 \longrightarrow 熱密度流並びに温泉の水理

被圧地下水 \longrightarrow 非定常流、変形を考慮した水理

貯留係数 F

{ 媒体の圧縮率 α , 地下水の圧縮率 β ,
有効間隙率 n , 体積含水率 θ }

(iii) 媒体の性状の変化 \longrightarrow 多孔質媒体、亀裂媒体あるいはそれらの混合媒体のモデル化

(iv) 処分場近傍の水理 \longrightarrow 広域流動と局所流動のリンケージ、特異点の取り扱い

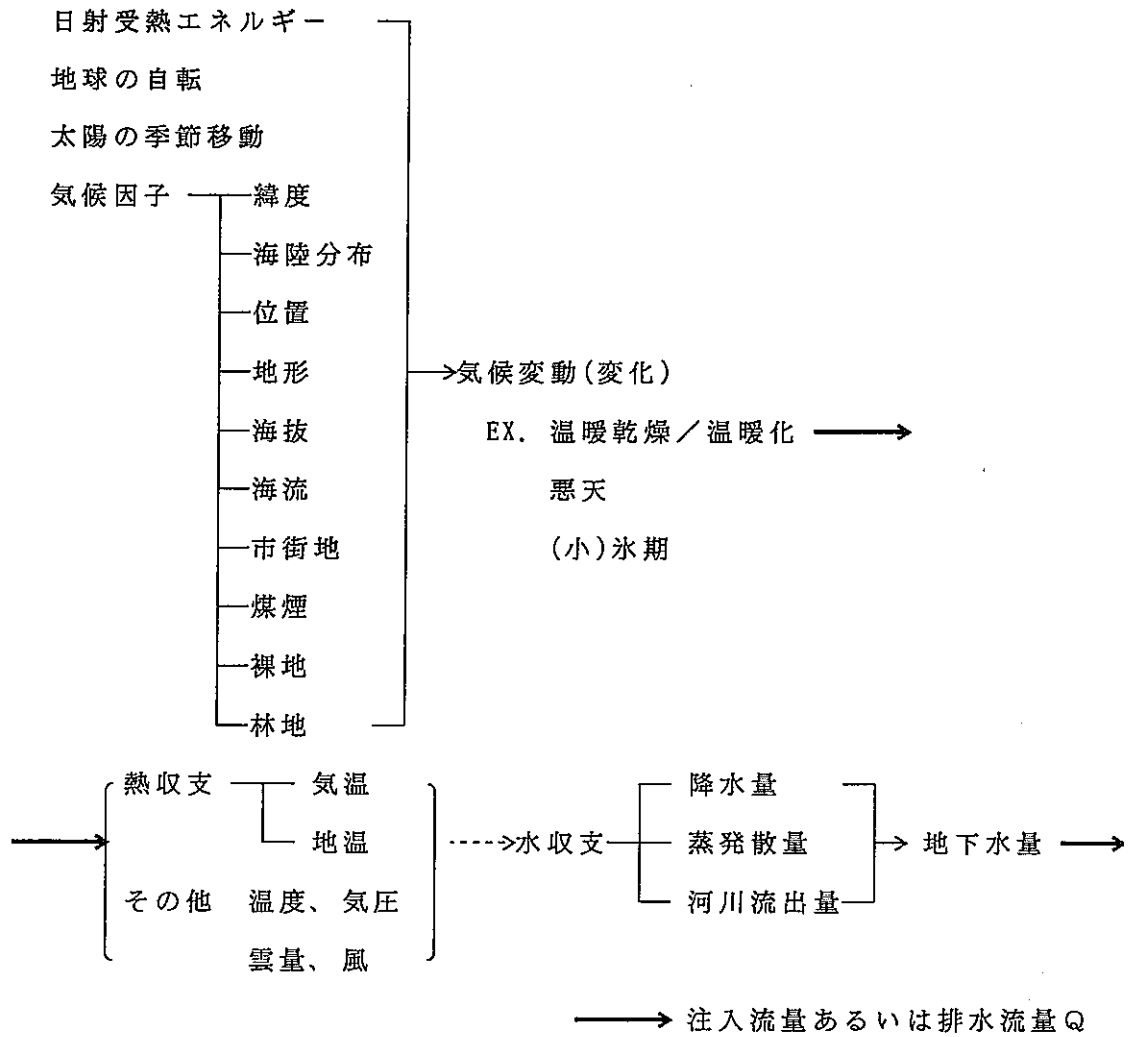
(v) その他の水理特性変動要因

(a) 地殻変動

火山
造山・造陸運動
地塊運動 \longrightarrow (地震) \longrightarrow

\longrightarrow 地殻の $\left\{ \begin{array}{l} \text{上下変動} \\ \text{水平変動} \\ \text{傾斜変化} \\ \text{伸縮} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{地表の断層} \\ \text{地下水面変動} \end{array} \right. \begin{array}{l} \longrightarrow \text{系に断層を含む} \\ \text{水理モデル} \\ \longrightarrow \text{地殻変動の影響} \\ \text{が地下水面変動} \\ \text{を引き起こす水} \\ \text{理モデル} \end{array}$

(b) 気候変動



上記のフローにおける水収支並びに熱収支の部分は、例えば、図4(1)(2)に示す要素とその相互関係、バランス等を組み込んだモデル化が考えられる。

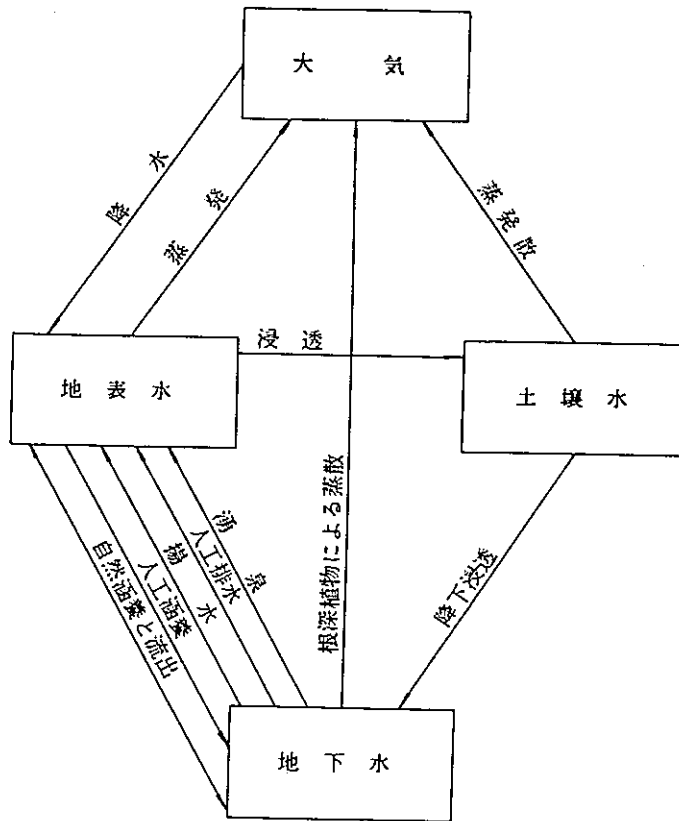


図 4 (1) 水収支の相互関係⁽³⁾

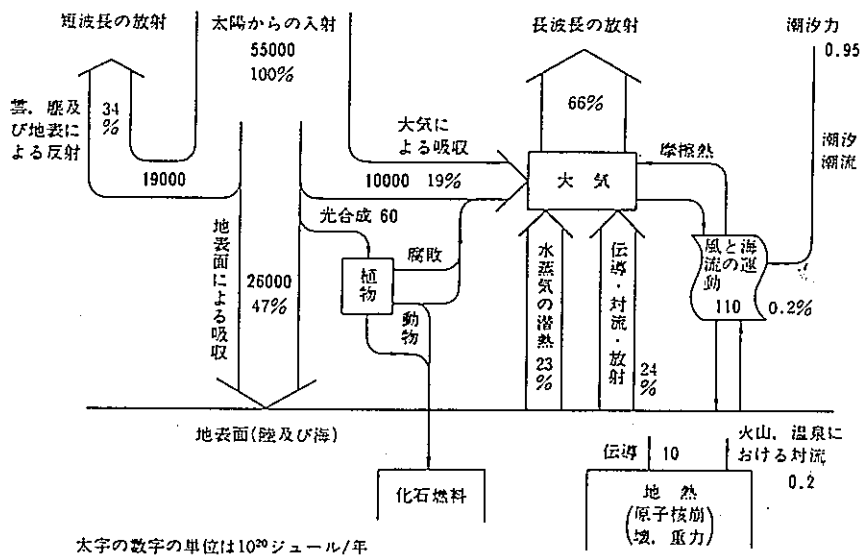
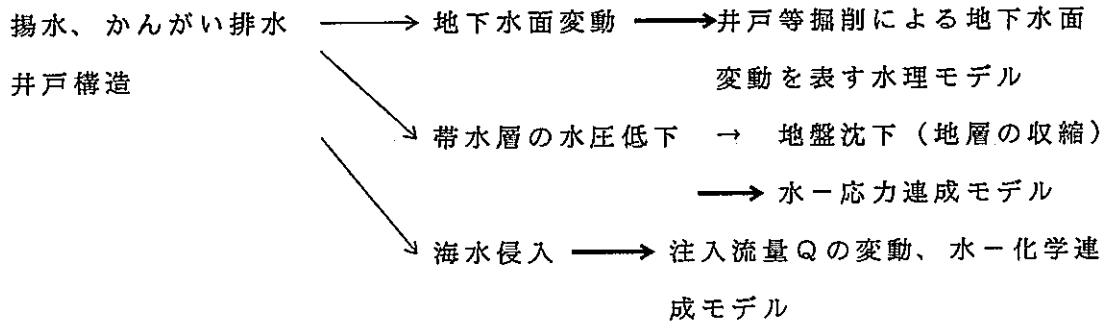
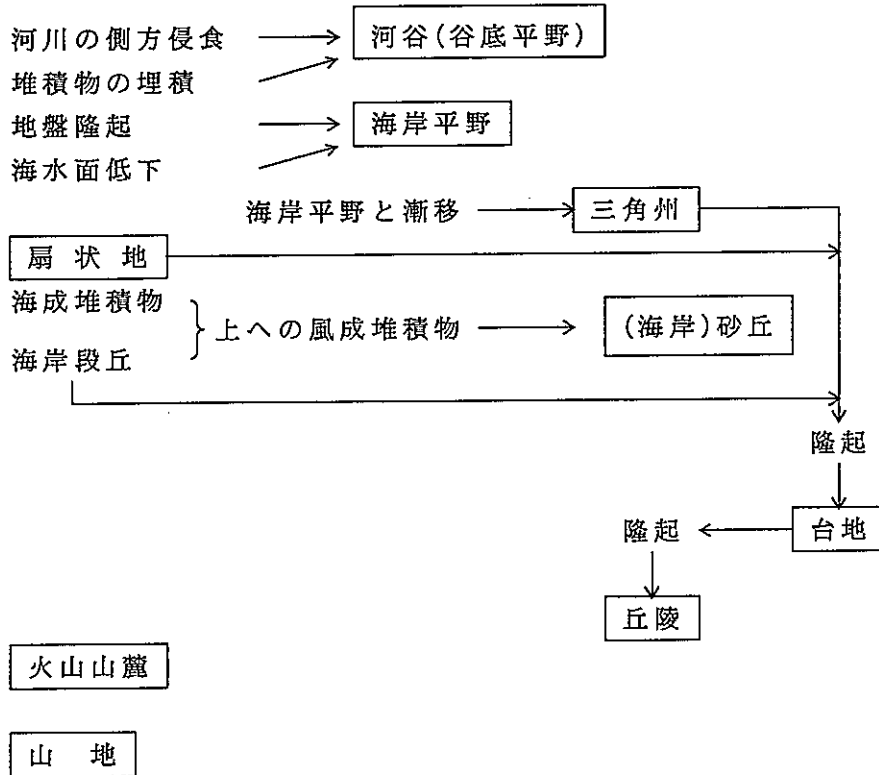


図 4 (2) 地球表面でのエネルギーバランス⁽³⁾

(c) 人間活動



(d) 地形（の変化、輪廻）

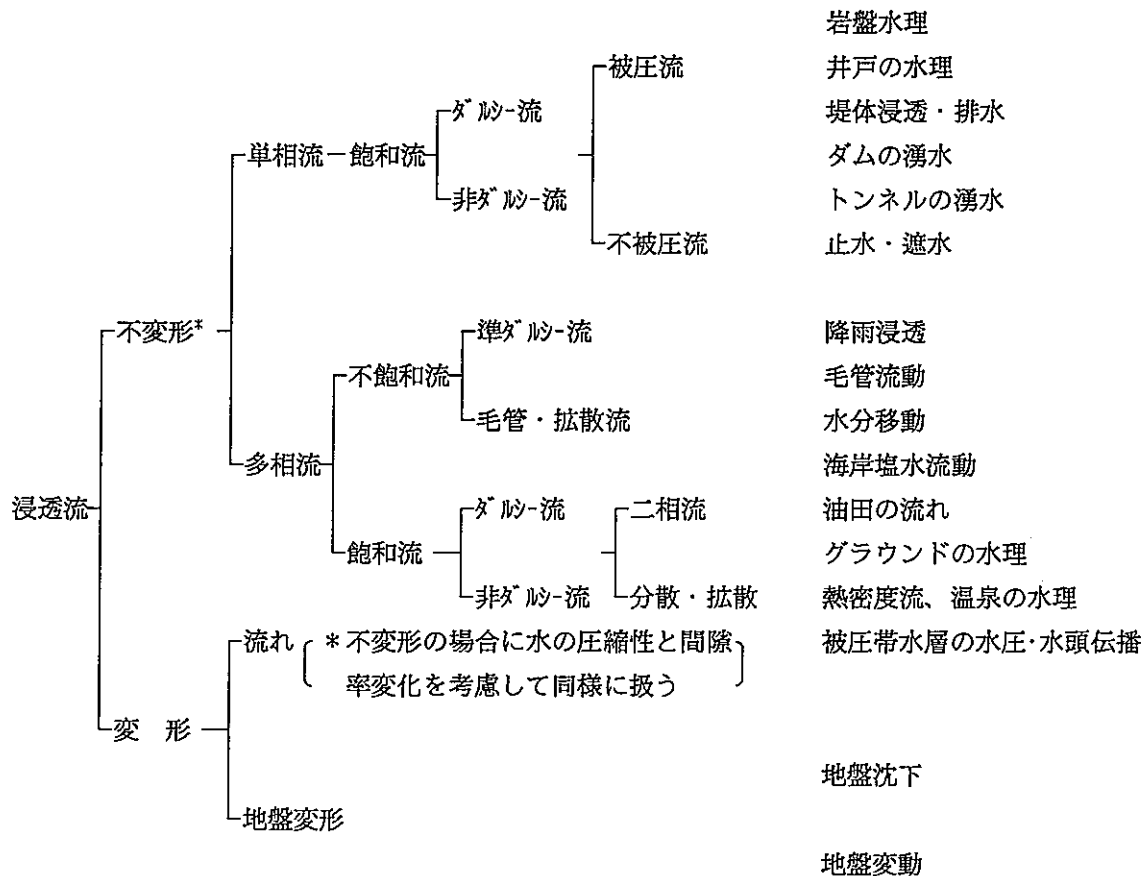


これらの地形もしくは長期間に亘る地形の変遷が地下水理系に与える影響を水理モデルにとり込むことを考えると、表1(1)に示すような因子への反映としての考察が考えられる（一般に、地下水流れの取り扱い、表1(2)に示す通り⁽³⁾）。

表 1 (1) 地形の相違が反映し得る要因

帯水層の形成
断層の存在
自由地下水／被圧地下水の存在比率 → 湧泉等の存在
地下水面深さ／(不)連続性
堆積物の種類・性質等
透水性 ((不)透水層)
斜面規模
地下水保留能
海水／淡水境界の存在

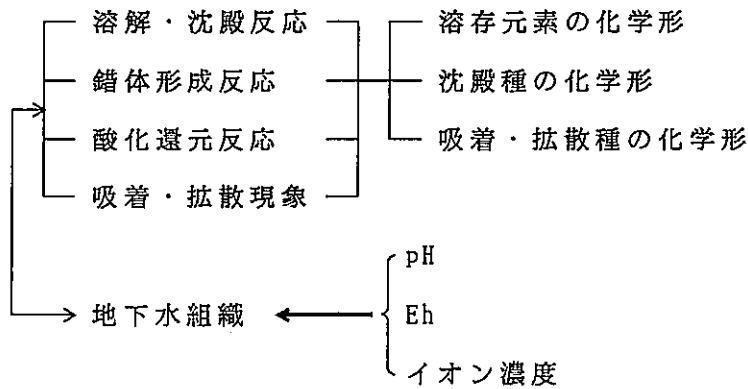
表 1 (2) 地下水流れの取扱い上の分類



1.1.2 地球化学モデル

(1) 基本的考え方／前提条件

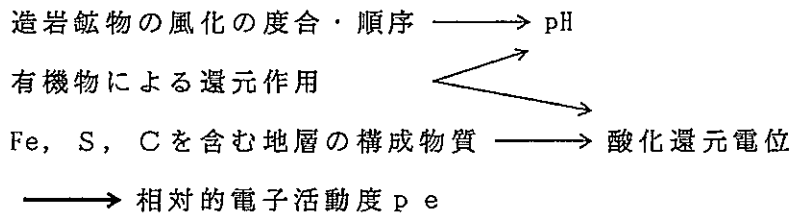
(i) 核種移行挙動への影響を与える地下水特性



(ii) 熱力学的アプローチ

(a) 速度論は使わず、平衡論に基づく

(b) 現実的な地球化学プロセス

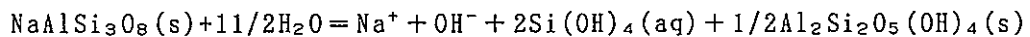


$$p e = \frac{F}{2.3 R T} E h$$

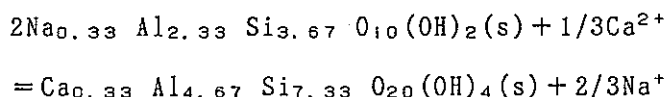
ここで、F：ファラデー定数，R：ガス定数，

T：絶対温度，Eh：標準水素電極に対する電位差

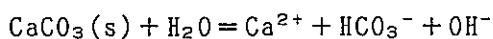
■ アルバイトの風化反応（主にpH及びイオン濃度に関与）



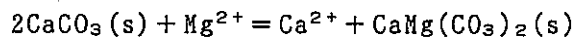
■ 粘土鉱物のイオン交換反応〔（例）Na-モンモリロナイト及びCa-モンモリロナイト間のイオン交換反応、主にイオン濃度に関与〕



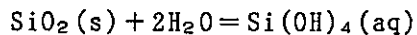
■ 方解石の溶解・生成反応（主にpH及びイオン濃度に関与）



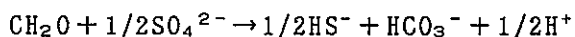
■方解石のドロマイト化反応（主にイオン濃度に関与）



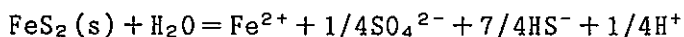
■石英の溶解反応（主にSi濃度に関与）



■有機物による硫酸の還元反応（pH、酸化還元電位、イオン濃度に関与）



■硫化鉱物（黄鉄鉱）の酸化還元反応（主に酸化還元電位に関与）



(2) モデル

(i) 地下水組成

(a) pH及びイオン濃度

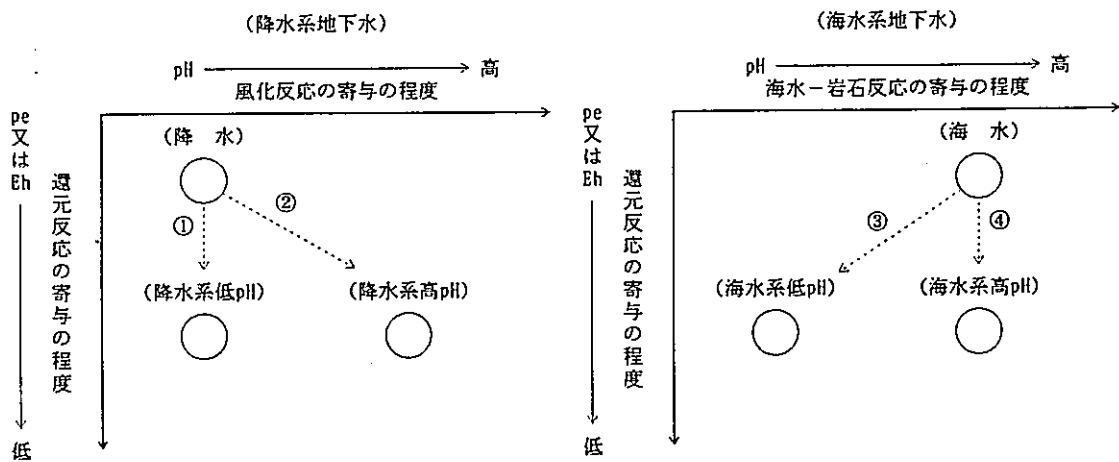
降水／海水の起源の相異
地下水－岩石間の相互作用

→ 弱アルカリ～弱酸性（温泉以外）

(b) Eh

降水起源並びに海水起源の酸化性地下水はとりあえず対象外（今後の検討対象とする）

pH、イオン濃度、酸化還元電位を基軸とする現実的組み合わせから、核種移行特性評価上考慮する地下水組成の設定概念を図5に示す。



- 凡 例 ①：未風化帯における有機物の還元作用
 ②：風化作用の進行
 ③：海水-鉱物反応の進行及び有機物の還元作用
 ④：有機物の還元作用

図 5 核種移行特性評価上の地下水組成の設定概念⁽¹⁾

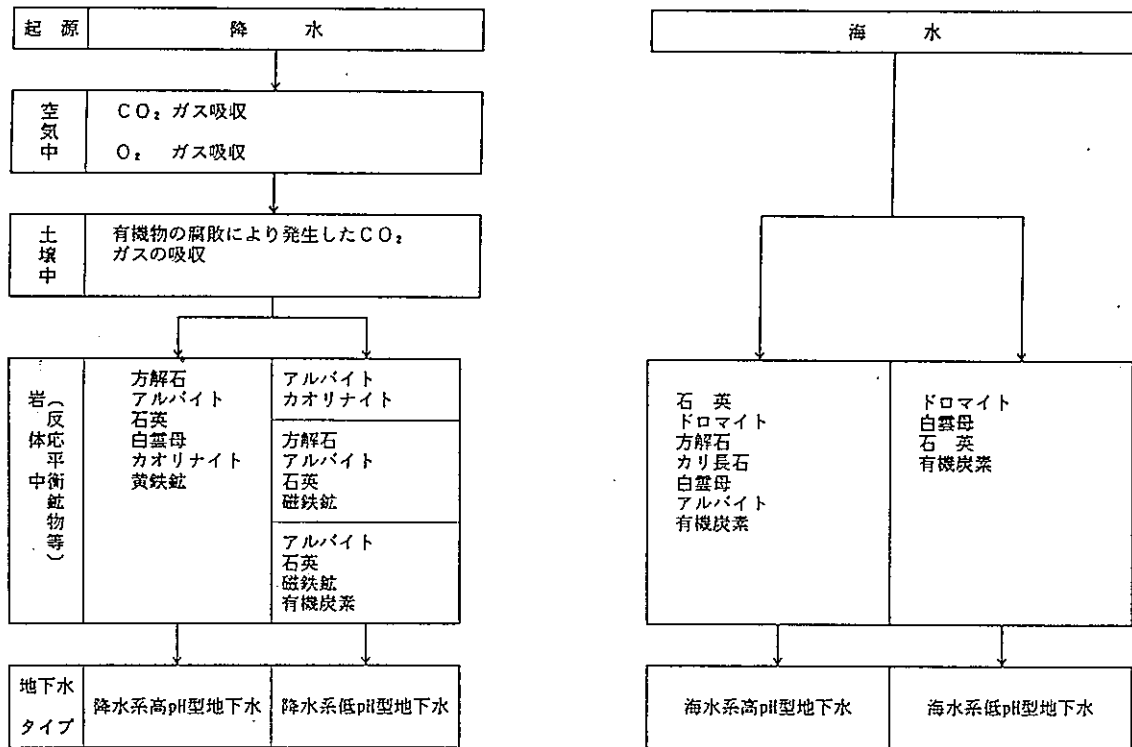


図 6 地下水の化学的変遷モデル⁽¹⁾

(ii) 地球化学プロセス

各起源（降水、海水）に対する地下水の地球化学的変遷モデルを図6に示す。

(a) 降水系高pH型の地下水

pH : 土壌中の有機物の腐敗によって生成したCO₂ガスの水溶液による吸収及びアルバイトとカオリナイト間の化学平衡

酸化還元電位, SO₄²⁻, Fe²⁺ : 黄鉄鉱と水溶液間の酸化還元平衡

HCO₃⁻ : 土壌中の有機物の腐敗によって生成したCO₂ガスの水溶性による吸収

Ca²⁺ : 方解石と水溶液間の溶解平衡

SiO₂ : 石英と水溶液間の溶解平衡

Na⁺ : アルバイトとカオリナイト間の化学平衡

K⁺ : 白雲母と水溶液間の溶解平衡

(b) 降水系低pH型の地下水

pH : 未風化帯における有機物による酸化性化学種（溶存酸素、三価鉄イオン等）の還元反応

酸化還元電位 : 未風化帯における有機物による酸化性化学種（溶存酸素、三価鉄イオン等）の還元反応及び磁鉄鉱と水溶液間の酸化還元平衡

Ca²⁺ : 弱風化帯における方解石と水溶液間の溶解平衡

Fe : 未風化帯における磁鉄鉱と水溶液間の酸化還元平衡

Na⁺ : 強風化帯におけるアルバイトとカオリナイト間の化学平衡

SiO₂ : 石英と水溶液間の溶解平衡

HCO₃⁻ : 未風化帯における有機物による酸化性化学種（溶存酸素、三価鉄イオン等）の還元反応

(c) 海水系高pH型の地下水

pH, K⁺ : カリ長石と白雲母間の化学平衡

酸化還元電位, HCO₃⁻, SO₄²⁻ : 有機物によるSO₄²⁻の還元反応

Ca²⁺, Mg²⁺ : 方解石とドロマイト間の化学平衡

SiO₂ : 石英と水溶液間の溶解平衡

Na⁺, Cl⁻ : 海水組成を維持

(d) 海水系低pH型の地下水

pH, 酸化還元電位, HCO₃⁻, SO₄²⁻ : 有機物によるSO₄²⁻の還元反応

Ca²⁺, Mg²⁺ : ドロマイトと水溶液間の溶解平衡

K⁺ : 白雲母と水溶液間の溶解平衡

SiO₂ : 石英と水溶液間の溶解平衡

Na⁺, Cl⁻ : 海水組成を維持

(iii) その他

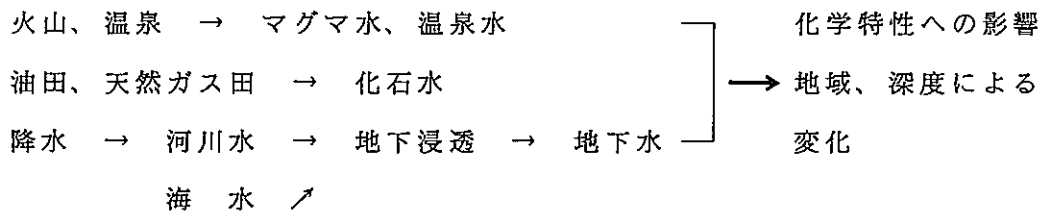
マグマ起源の地下水も今回は除外

(3) データ

- ・ 熱力学データベース (PHREEQEオリジナル及びNEAデータベース: 25℃)
- ・ 鉱物の分布に関する情報 (主要な地球化学プロセスに関する知見)

(4) 地下水シナリオ影響要素

(i) 地下水起源のバリエーション



(ii) 溶存ガス成分

酸化性地下水の考慮 (O₂, CO₂含有量) → 金属腐食、核種溶出の促進

→ 水-化学 (腐食反応系) モデル

その他CH₄蓄積 → 爆発, H₂Sの混入 (火山山麓、温泉等) など⁽³⁾

(iii) 地質構造

地質構造の変化 (EX. 断層) → 水質, 酸素 etc.

(iv) 人為的要因

都市・工場・鉱山の排水 → 地下水起源の変化 → 地球化学モデル

埋設処分地の浸出水 →

過剰揚水 → 塩水化 → 淡水-塩水系モデル

地盤沈下 → 間隙水の脱水・絞り出し現象 → 水-応力連成モデル

人工涵養 → pH, 金属含有量変化 → 地下水水質解析モデル

(v) 平衡論以外の成立性

EX. 鉱物-水反応 → 速度論

1.2 ニアフィールド環境

1.2.1 人工バリア

緩衝材の厚さを厚く設定できる坑道横置方式を想定し、表2、図7のような人工バリア仕様例を設定。

①構成

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材

②仕様

Nagra、CECの設定仕様と大きな違いはない

表2 検討用の仕様等⁽¹⁾

ガラス固化体	処分量	40,000 [本]																
	燃焼条件	燃焼度	: 33,000 [Mwd/t]															
		比出力	: 30 [MW/t]															
		燃焼サイクル	: (275 日燃焼+90日崩壊) × 4															
		U-235 濃縮度	: 3.5 [%]															
	再処理条件	原子炉からの取出し後、3年冷却した後に再処理																
		元素の除去率	<table border="0"> <tr> <td>U</td> <td>: 99.85 [%]</td> </tr> <tr> <td>Pu</td> <td>: 99.33 [%]</td> </tr> <tr> <td>希ガス, I, H</td> <td>: 0.0 [%]</td> </tr> <tr> <td>その他</td> <td>: 100 [%]</td> </tr> </table>	U	: 99.85 [%]	Pu	: 99.33 [%]	希ガス, I, H	: 0.0 [%]	その他	: 100 [%]							
U	: 99.85 [%]																	
Pu	: 99.33 [%]																	
希ガス, I, H	: 0.0 [%]																	
その他	: 100 [%]																	
固化条件	高レベル放射性廃液として1年貯蔵した後にガラス固化																	
処分条件 (中間貯蔵期間)	ガラス固化後30年間貯蔵した後に埋設																	
発熱量	670 [W/本] (埋設時点)																	
寸法等	<table border="0"> <tr> <td>ホウケイ酸ガラス重量</td> <td>: 405 [kg/本]</td> </tr> <tr> <td>直径</td> <td>: 430 [mm]</td> </tr> <tr> <td>長さ</td> <td>: 1,340 [mm]</td> </tr> </table>		ホウケイ酸ガラス重量	: 405 [kg/本]	直径	: 430 [mm]	長さ	: 1,340 [mm]										
ホウケイ酸ガラス重量	: 405 [kg/本]																	
直径	: 430 [mm]																	
長さ	: 1,340 [mm]																	
オーバーパック	材料	炭素鋼																
	外径	1,040 [mm]																
	長さ	1,950 [mm]																
	内厚	300 [mm]																
緩衝材	材料	Na型ベントナイト																
	寸法等	厚さ	: 980 [mm]															
		乾燥密度	: 1.8 [g/cm ³]															
		初期含水比	: 10 [%]															
空隙率		: 0.33 [-]																
組成	<table border="0"> <tr> <td>・Na-モンモリロナイト</td> <td>50~55%</td> </tr> <tr> <td>・石英</td> <td>30~35%</td> </tr> <tr> <td>・長石</td> <td>5~10%</td> </tr> <tr> <td>・方解石</td> <td>1~3%</td> </tr> <tr> <td>・沸石(アナルサイト)</td> <td>1~2%以下</td> </tr> <tr> <td>・ドロマイト</td> <td>1~2%以下</td> </tr> <tr> <td>・黄鉄鉱</td> <td>1~2%以下</td> </tr> <tr> <td>・雲母(黒雲母)</td> <td>1~2%以下</td> </tr> </table>		・Na-モンモリロナイト	50~55%	・石英	30~35%	・長石	5~10%	・方解石	1~3%	・沸石(アナルサイト)	1~2%以下	・ドロマイト	1~2%以下	・黄鉄鉱	1~2%以下	・雲母(黒雲母)	1~2%以下
・Na-モンモリロナイト	50~55%																	
・石英	30~35%																	
・長石	5~10%																	
・方解石	1~3%																	
・沸石(アナルサイト)	1~2%以下																	
・ドロマイト	1~2%以下																	
・黄鉄鉱	1~2%以下																	
・雲母(黒雲母)	1~2%以下																	

③ 廃棄体定置方式

坑道横置方式（検討例）

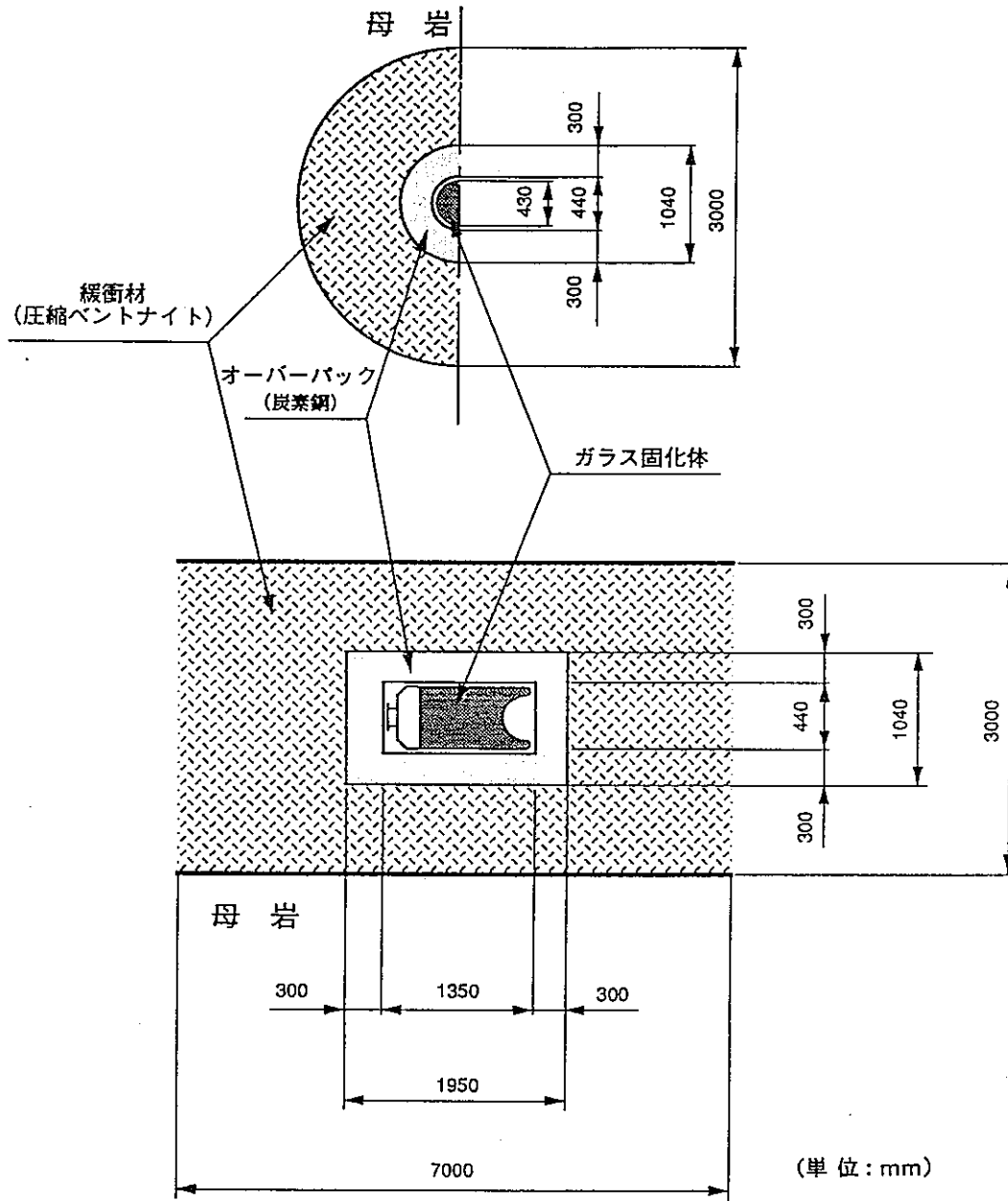


図7 検討用の人工バリアシステムの構成⁽¹⁾

④ 変動要因

処分孔堅置方式にした場合

1.2.2 熱的条件

①地温

地温勾配（地域較差：例えば、火山地帯、熱水循環などの影響による）

②崩壊熱

経時的変化

③変動要因

熱水（又は冷水）注入など的人為的要因の影響

1.2.3 水理学的条件：ニアフィールドの再冠水

(1) 基本的考え方／前提条件

処分初期におけるニアフィールドの再冠水に伴う不飽和緩衝材中への地下水の浸潤に伴う含水比分布は、およそ拡散分布を示す

(2) モデル

① 2次元軸対称モデル

② 緩衝材は均一

③ 周辺母岩は飽和状態

④ 緩衝材周辺全面から十分な地下水が供給される

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla S_r)$$

ここで、 S_r ：飽和度

D ：見かけの水分拡散係数

(3) データ

・ 緩衝材の乾燥密度

初期含水比

飽和含水比

水分拡散係数

・ 幾何形状

(4) 変動要因

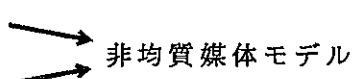
① 周辺岩盤から緩衝材への地下水の浸潤が部分的であるケース

(周辺岩盤からの地下水供給条件に大きく依存)

② 緩衝材施工 → 締め固め等密度分布変化、

特異点等の存在

③ 熱、応力の影響 → 熱-水-応力の連成解析



1.2.4 水理学的条件：再冠水後の水理条件

(1) 基本的考え方／前提条件

媒体	媒体の扱い	透水係数	動水勾配
ガラス固化体	不透水性	—	—
オーバーパック	不透水性	—	—
緩衝材	透水性	定数(固定)	広域地下水 流動解析結果より設定
周辺岩盤	透水性	同上 かつ パラメータ (種々の地質 環境想定)	同上 かつ パラメータ

但し、坑道周辺岩盤の緩み領域での特性変化は未考慮。

(2) モデル

① 透水性媒体は水で飽和

② 地下水流動は非定常状態

一般に、非定常で媒体の異方性を考慮する場合の地下水流動の支配方程式：

$$F \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + \frac{Q}{\rho}$$

$$F = \alpha + \beta n$$

$$H = h + z$$

ここで、 h : 圧力水頭 [L]

t : 時間 [T]

K_{ij} : 透水係数 [$L T^{-1}$] ($i = x, z ; j = x, z$)

Q : 注入流量あるいは排水流量 [$M T^{-3} T^{-1}$]

x : x 方向 (水平方向) の座標 [L]

z : z 方向 (鉛直方向) の座標 [L]

α : 媒体の圧縮率 ($= \partial n / \partial h$) [L^{-1}]

β : 地下水の圧縮率 ($= \partial \rho / (\rho \partial h)$) [L^{-1}]

n : 媒体の空隙率 [-]

ρ : 地下水の密度 [$M T^{-3}$]

において、

① 地下水及び媒体が非圧縮性であること $\longrightarrow F \equiv 0$

② 媒体の透水性に関する等方性 $\longrightarrow K \equiv \text{const. for } \forall x, z$

③ 地下水の湧き出しあるいは吸い込みなし $\longrightarrow Q \equiv 0$

を仮定すると、ラプラス方程式：

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0$$

$$\Phi = K \cdot H$$

ここで、 K : 等方性媒体の透水係数 [$L T^{-1}$]

Φ : 速度ポテンシャル [$L^2 T^{-1}$]

(3) データ

- ① 広域地下水流動解析結果として得られる地表面下1,000m付近で生ずる水平方向並びに鉛直方向の動水勾配に対応する固定水頭を境界条件として与える。
- ② 空隙率及び透水係数（緩衝材、岩盤）…岩盤の透水係数は地質環境の違いを念頭に範囲を設定

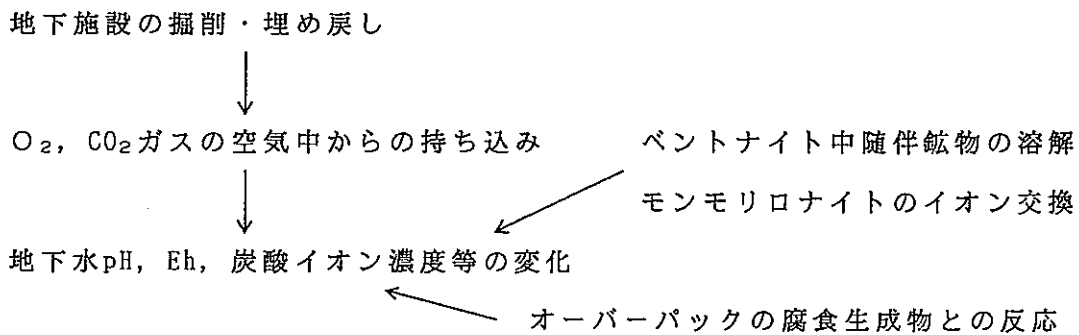
(4) 変動要因

- ① 断層、破碎帯等を有する不均質な地層の考慮 → 非均質媒体、特異点の
- ② 坑道周辺岩盤の緩み領域の存在 → 扱い、地下水移行経路
- ③ 地下水の緩衝材中への浸潤分布の複雑さ → の発生・消滅
- ④ 地下水の密度変化 → 変形を考慮した水理的取り扱い
- ⑤ 緩衝材の地下水への流出 → 境界条件の変動等

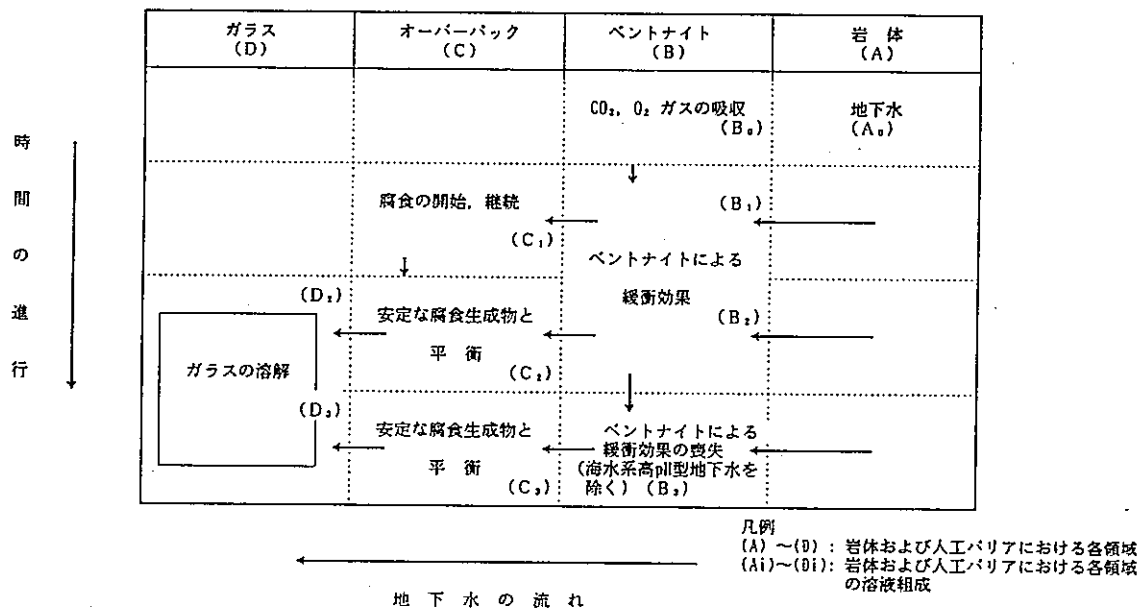
1.2.5 人工バリア中の地下水の化学的特性

(1) 基本的考え方／前提条件

地下水組成は、次のような影響要因によって変化し得ると考え、図8にそのモデル概念を示す。



- ① ベントナイトによって緩衝された間隙水は、オーバーバック（炭素鋼：Fe）と接触し、安定な腐食生成物（ Fe_3O_4 ）と化学平衡に達すると仮定
- ② オーバーバックの腐食により発生する水素によるベントナイト間隙水の化学的性質への影響は未考慮
- ③ “地下水の地球化学モデル”の節で設定した4種類のモデル地下水（降水系高pH型、降水系低pH型、海水系高pH型、海水系低pH型）を対象とする（但し、降水起源の酸化性地下水は除外している）。



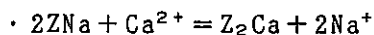
注) 海水系高pH型地下水については、地下水自体が方解石に対して飽和状態であるため、方解石の消費によるpH緩衝性の喪失はないものと仮定。

図8 人工バリア中の地下水の化学的特性の変化のモデル図⁽¹⁾

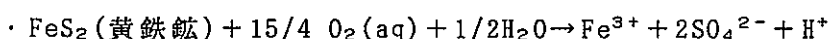
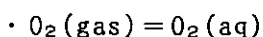
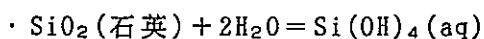
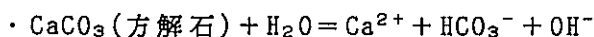
(2) モデル

① pH, 主要イオン濃度に関するベントナイト-水反応をWannerのモデルにて解析 (25°C)

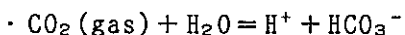
ベントナイトによる化学的緩衝性を支配する主な化学反応



(Z⁻はベントナイトの仮想的なイオン交換サイトを表す)



(ベントナイト中の随伴鉱物黄鉄鉱によるO₂(aq)の消費)



② 化学的緩衝性維持時間を、地球化学コードPHREEQEによって求められるベントナイト中の方解石を消費するまでの地下水交換回数と、1回当りの地下水交換時間の積として求める。

(3) データ

① ベントナイト中の交換性陽イオン量

② ベントナイトのイオン交換平衡定数 (その他の熱力学データ含む)

③ 地下水組成、緩衝材中の方解石の含有量、緩衝材外側の水理地質条件

④ 地下水交換時間

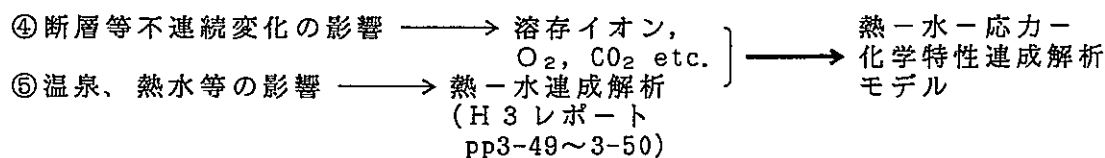
(4) 変動要因

① 地下施設の掘削・埋め戻しに伴う緩衝材中の残留O₂並びにCO₂の地下水化学特性への長期的影響 } → 非平衡モデル

② 降水起源の酸化性地下水の浸入 → Ehの緩衝性

→ pH, Ehを支配する化学種の拡散、炭素鋼、黄鉄鉱等の溶解速度を考慮した連成解析モデル

③ 水素ガス発生量、緩衝材間隙水中での水素ガスの物理化学的挙動



1.2.6 炭素鋼オーバーパッキの腐食挙動

(1) 基本的考え方/前提条件

(i) 腐食環境

- ① 温度：地下1,000mで50℃～100℃
- ② 圧力：緩衝材の膨潤圧 (max数MPa) ～地圧 (地下1,000mで数十MPa)
- ③ 周辺地下水の化学的条件：地下水塩濃度～海水レベル



緩衝作用後のpH7～11

再冠水後、地上から持ち込まれた酸素のオーバーパックや緩衝材中の鉄鉱 (EX. 黄鉄鉱) との反応
 もしくは岩体中への散逸

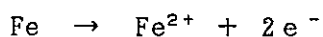


還元性地下水環境中での腐食進行

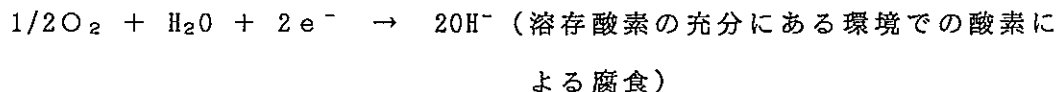
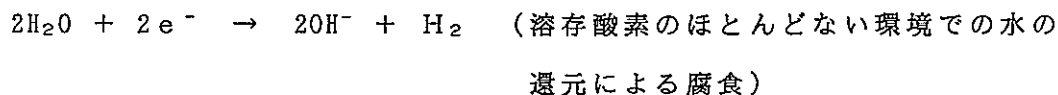
- ④ 放射線：オーバーパック表面でMax 0.84mSv/h

(ii) 腐食反応

① アノード反応



② カソード反応



(iii) 想定

ベントナイト中の酸素が全てオーバーパックと反応

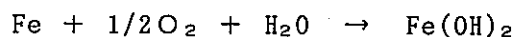
ベントナイト中の酸素がオーバーパックの腐食等により消費後、水の還元による腐食が支配的

(2) モデル/データ

(i) 酸素による腐食

ベントナイトの間に存在する酸素 + ベントナイト表面に吸着された酸素
= 675 mol

酸素と鉄の反応



より、1,350 molの鉄が腐食

オーバーパックの表面積と腐食量より、平均腐食深さ $X_m = 1.2\text{mm}$

よって、最大腐食深さ $P = X_m + 7.9X_m^{0.5} = 9.9\text{mm}$

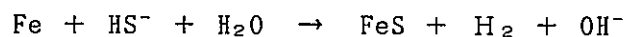
(ii) 水の還元による腐食

腐食速度データ (天然水環境・静水条件・温度100℃以下での腐食試験)

局部腐食による不均一化の影響の考慮 0.02 mm/y

(iii) バクテリアによる腐食

ベントナイト中不純物硫酸塩 (1重量%) がバクテリアにより HS^- に還元、これとFeとの反応



①腐食速度は、ベントナイト中の硫酸塩の拡散律速

②硫酸塩で飽和した地下水の供給

人工バリア仕様 (想定) に基づき、硫酸の拡散方程式より、オーバーパック表面への HS^- の供給総量を計算

↓

オーバーパックの平均腐食深さの算定

(iv) その他の腐食

①放射線により生成される酸化性化学種の寄与

水の放射線分解

↓

酸化性化学種のオーバーパック表面への供給速度

(腐食電流 $\max 1.3 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2 \Rightarrow 1,000$ 年間で $2 \mu\text{m}$ 以下)

②応力腐食割れ

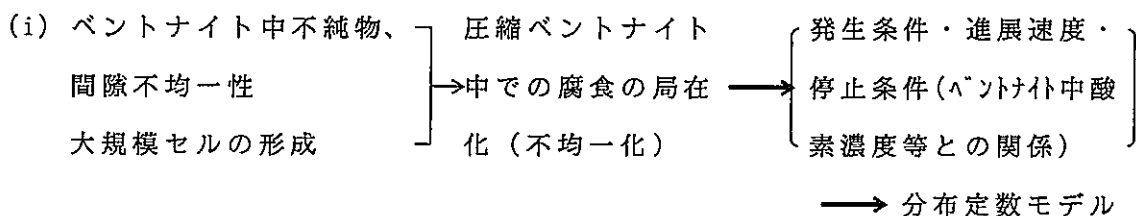
応力腐食割れが発生した場合には、腐食進展速度が大きく、妥当な腐食代の設定は不可能

処分環境では、炭酸塩が濃厚な地下水以外には応力腐食割れの可能性は低い

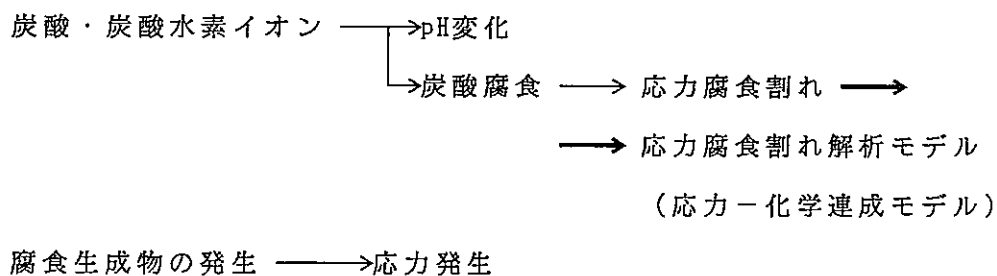
(v) 全長期腐食量 (1,000年間)

酸素による腐食	9.9mm
水の還元による腐食	$0.02 \text{ mm/y} \times 1,000 \text{ y} = 20 \text{ mm}$
バクテリアによる腐食	1.8mm
<hr/>	
計	32mm

(3) 変動要因

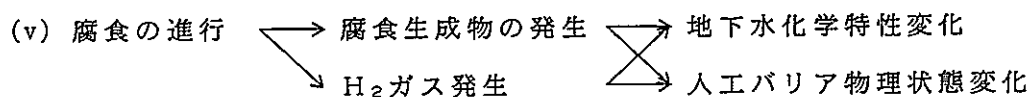


(ii) 炭素鋼



(iii) バクテリアの生息状況

(iv) ベントナイト中酸化剤（酸素等）の量とその輸送特性（拡散係数等）



(vi) オーバーパックからの発熱 → 周囲に温度勾配発生 →
→ 熱変動の腐食速度等への影響を解析するモデル

1.2.7 構造力学的条件：緩衝材の膨潤圧

(1) 基本的考え方／前提条件

人工バリアとその周囲の岩盤まで含めたニアフィールドの再冠水時における応力場の変化を、膨潤圧を熱応力のアナロジーとして扱い、膨潤係数を導入して膨潤圧を簡易的に表現する方法を用いて解析

(2) モデル

膨潤ひずみと飽和度の関係

$$d \varepsilon_{ij} = \beta \cdot \delta_{ij} \cdot d S_r$$

ここで、 ε_{ij} ：膨潤ひずみ， δ_{ij} ：クロネッカーのデルタ，

β ：膨潤係数， S_r ：飽和度

弾性係数と飽和度の関係

$$E = a \cdot S_r + b$$

ここで、 E ：弾性係数， a ， b ：定数

① 膨潤係数 β は、含水比に対し、線形近似

② 緩衝材の弾性係数 E は、飽和度 S_r に比例して低下。

③ 2次元軸対称モデル

有限要素法による汎用弾塑性コード“FINAS”

(3) データ

岩盤 … 結晶質岩系岩盤

地圧 … 地下1,000mの土被り圧相当

必要なパラメータは、岩盤、緩衝材、オーバーバックに対し、それぞれ弾性係数、ポアソン比、膨潤係数である。

(4) 変動要因

① 岩盤の長期クリープによる 人工バリア応力の地圧とバランスする
処分坑道の変形 ところまでの上昇



緩衝材乾燥密度の上昇 →

→ 熱、応力、水それぞれの解析フレーム
あるいは熱-応力-水連成モデル

② オーバーバックの腐食生成物の蓄積による発生応力

③ 緩衝材の膨潤圧の温度変化 → 熱-応力連成モデル

④ その他突発的応力発生（地震、断層等） → パラメータの空間分布を
考慮した応力解析

1.2.8 構造力学的条件：圧縮ペントナイト中のオーバーバックの変位

(1) 基本的考え方／前提条件

緩衝材の充填密度によっては緩衝材の圧密・粘弾塑性変形が発生し、オーバーバックの沈下等の移動が生じ、岩盤と廃棄物との距離が接近し得る。

(2) モデル

(i) 緩衝材中の間隙水の排水を考慮した圧密弾塑性モデル

Cam-Clayモデルによるひずみ増分の構成式

$$d \varepsilon_{ij} = \frac{C_s}{6.9(1+e_0)} \frac{d \sigma_m'}{\sigma_m'} \delta_{ij} + \frac{d S_{ij}}{2G(\sigma_m')} + \frac{(C_c - C_s)}{2.3M^*(1+e_0)} \left[\frac{d(2J_2)^{1/2}}{(M^* \sigma_m' - (2J_2)^{1/2})} + \frac{d \sigma_m'}{\sigma_m'} \right] \cdot \left[\frac{S_{ij}}{(2J_2)^{1/2}} + \frac{(M^* - (2J_2)^{1/2} / \sigma_m') \delta_{ij}}{3} \right]$$

ここで、 ε_{ij} : ひずみ, δ_{ij} : クロネッカーのデルタ,
 e_0 : 初期間隙比, G : せん断弾性係数,
 C_s : 膨潤指数, S_{ij} : 偏差応力,
 C_c : 圧縮指数, M^* : critical state パラメータ,
 σ_m' : 平均応力, J_2 : 偏差応力の第2不変量

有限要素法による汎用弾塑性コード“ABAQUS”を使用

(ii) 非排水条件下の緩衝材の粘弾塑性モデル

SinghとMitchellの実験式

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \cdot \exp \left[\alpha \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right] \cdot \exp \left[-\alpha \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right] \cdot \left[\frac{t}{t_r} \right]^{-n}$$

ここで、 t_r : 規準時間, t : 経過時間
 α : 定数, $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$: 規準軸差応力
 n : 定数, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 破壊軸差応力
 $\dot{\gamma}$: せん断ひずみ速度, $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 軸差応力
 $\dot{\gamma}_0$: 規準時間のクリープせん断速度

(3) データ

オーバーバック … 密度、弾性係数、ポアソン比

緩衝材に対し、上記(i)(ii)モデル中の各設定パラメータ値

(4) 変動要因

隆起、地震（断層）、人的アクセス行為等の影響

1.2.9 構造力学的条件：オーバーパックスの腐食生成物による応力

(1) 基本的考え方／前提条件

オーバーパックスの腐食に伴う体積膨張によって緩衝材に発生し得る応力を検討

(2) モデル

- ① 炭素鋼が腐食によって全て磁鉄鉱に変わる
- ② 緩衝材内側におけるオーバーパックスの2倍の体積膨張を仮定
- ③ 緩衝材の変形係数を保守側に設定
- ④ 有限要素法による汎用弾塑性コード

(3) データ

上記(2)モデルの項に含まれる

(4) 変動要因

- ① オーバーパックス腐食生成物の蓄積
—————→ 核種移行挙動の変化
—————→ 核種移行モデル
- ② 緩衝材や岩盤の圧密、クリープ変形
—————→ 緩衝材の応力緩衝性変化
—————→ 応力解析モデル

1.2.10 構造力学的条件：オーバーパックスの腐食に伴う水素ガス発生・移行

(1) 基本的考え方／前提条件

炭素鋼オーバーパックスの水の還元による腐食で発生する水素ガスは、膨潤した緩衝材中の地下水に溶解し、拡散もしくは通気して人工バリアの外側に移行するか、緩衝材の内側に蓄積

(2) モデル／データ

①炭素鋼の腐食速度 0.02mm／年より、水素発生型腐食の反応式



を用い、オーバーバック表面積から水素発生速度を求める。

②膨潤した緩衝材中の水素ガスの拡散速度

③水素ガスの水への溶解度を緩衝材内側濃度とし、外側濃度＝0と設定して緩衝材中の拡散移行速度を計算

(3) 変動要因

・水素ガス応力 → 周辺岩盤の変形 → 核種移行経路の変化
→ 核種移行モデル

・緩衝材中水素ガス発生による通気経路の形成
→ 緩衝材の膨潤粘弾塑性特性分析モデル

(パラメータ：圧縮ベントナイト密度、移行経路長)

1.2.11 構造力学的条件：ニアフィールド水理場における緩衝材の物理的安定性

(1) 基本的考え方／前提条件

緩衝材の外圧に対する可塑性、応力緩衝性等のため、周辺岩盤の亀裂が充填されるが、亀裂中の緩衝材がゲル化して地下水に溶出し、その欠損分がまた補充されるといった繰り返しプロセスが考えられる。

(2) モデル／データ

①カコウ岩にある一定幅の割れ目を入れ、ベントナイトの侵入試験を行っている。

②ベントナイト粒子を剥離するに必要な地下水流速の検討

(3) 変動要因

速い流速による ($>10^{-4} \text{ m/s}$) 人工バリア周辺母岩における亀裂先端部の緩衝材
ゲル化侵食

- 亀裂中の地下水移行経路変更・核種移行速度等の変化、緩衝材密度の変化
- 核種移行モデルとのリンクージ

1.2.12 放射線の影響：放射線損傷

(1) ガラス固化体への影響

- α 崩壊 ——→ ガラス固化体の密度変化 $0.6\% \sim 1\%$
- ↓ ↘
- ↓ → ガラス固化体の溶解速度変化 試験前と同オーダー
- ↓
- ↓
- ↓
- 有意な影響なし

(2) 緩衝材への影響

① オーバーパックの核種閉じ込め機能維持期間

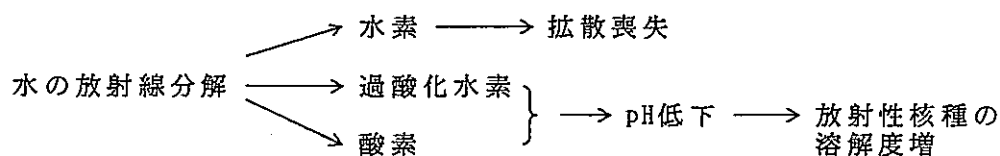
- γ 線照射 ——→ ベントナイトの構造変質
- ↓ ↘
- ↓ → ベントナイトの透水性
- ↓
- ↓
- ↓
- ↓
- ↓
- 有意な影響なし

中性子線 ——→ ベントナイト吸着性能維持

② オーバーパックの核種閉じ込め機能喪失後

- 核種のベントナイトへの吸着
- ↓
- ベントナイトの主成分（モンモリロナイト）のメタミクト化
- ↓
- アモルファスとしても吸着性能有
- ↓
- 有意な影響なし

1.2.13 放射線の影響：放射線分解



■ オーバーバックの核種閉じ込め機能喪失前

- ① オーバーバックのしゃへい効果によりγ線は低強度 (max 0.84mSv/h)
- ② 放射線分解によって生成する酸化種と還元種は量的に限られており、再結合しやすい。
- ③ オーバーバックの腐食速度を増加させるような酸化種の存在 (影響小)
- ④ 再冠水後の溶存窒素の放射線分解による硝酸生成 (無視)

■ オーバーバックの核種閉じ込め機能喪失後

(1) 基本的考え方／前提条件

α線による地下水の放射線分解によって生成する水素は全て再結合しないものと想定し、オーバーバックの腐食生成物のみによって酸化種が緩衝される。

(2) モデル／データ

- ① 地下水の放射線分解に寄与するα崩壊数
 - ・ ガラス固化体表面近傍 (コード: ORIGEN 2)
- ② 放射線分解によって発生する水素発生量
 - ・ 放射線の種類、線量率、pHの影響があるが、およそG値にして1.7程度と想定
 - ・ α線平均エネルギー5 MeVとしてG値1.7より、水素発生量を算定
- ③ オーバーバックの腐食生成物 (磁鉄鉱) の酸化種 (過酸化水素や酸素) 緩衝能力は1オーダー程度の裕度有

1.3 人工バリア中の核種移行解析

(1) 基本的考え方／前提条件

- ① ガラス固化体を埋設後、1,000年でオーバーパックの健全性が喪失し、ガラス固化体と地下水とが接触する。
- ② ガラス固化体と地下水との接触により、ガラス固化体の溶解及びそれに伴う核種の溶出が開始する。
- ③ ガラス固化体から溶出した核種は緩衝材中へ入り、その空隙内を緩衝材に含まれる鉱物への吸脱着、放射性崩壊、溶解・沈殿等の過程を経ながら拡散移行して、周辺岩体へ到達する。

(2) モデル

(i) 溶出開始時期のガラス固化体中の核種インベントリ

埋設後1,000年時の核種のインベントリをガラス固化体からの核種の溶出開始時の初期インベントリとする。

① 評価対象核種

- ・ 溶出開始時の核種のインベントリ
- ・ 放射線学的影響上の重要性
- ・ 半減期

を考慮し、諸外国における評価対象核種も参考にして、以下に示す核種を本解析における評価対象核種とする。

Am-243 - Pu-239 - U-235

Am-241 - Np-237 - U-233

Pu-240 - U-236 - Th-232

U-238 - U-234 - Th-230

Cs-135, Sn-126, Pd-107, Tc-99, Zr-93, Se-79

② 核種のインベントリ

ガラス固化体からの核種の溶出は、埋設後1,000年から始まると想定していることから、その時点でのガラス固化体1本あたりの核種のインベントリを燃焼計算コード ORIGEN 2 を用いて計算。

(ii) ガラス固化体からの核種の溶出

- ① ガラス固化体からの核種の溶出は、ガラス母相と調和溶解（コングルエントな溶解）することによってその溶解速度が決まるものとする。
- ② 核種の固化体表面での濃度は、アクチニド等の難溶性の元素については溶解度が小さいため、ガラス表面で速やかに溶解度まで達するとする考え方を採用。溶解度の高い可溶性元素については、ガラス固化体の長期的な溶解又は変質速度に支配された溶解速度で溶出を続けるものとする。
- ③ ガラス固化体の溶解速度は、固化体中の $\text{SiO}_2(\text{am})$ の溶解に対する一次反応によるSi成分の溶解と緩衝材中のSi成分の拡散とを考慮して決まるガラス固化体の定常的な長期的溶解速度に基づいて、可溶性元素の溶解速度を評価。
- ④ 核種の溶解度を同位体存在比にもとづいて分配する場合と、これを無視して元素の溶解度を各同位体に一律与える場合の両方を考えて解析を行う。

(iii) 緩衝材中での核種移行

- ① 緩衝材中の核種移行機構としては拡散のみを考える。
- ② 緩衝材への核種の吸脱着については、線形吸着を仮定し瞬時に局所平衡が成り立つものとする。
- ③ 核種の移行過程において、崩壊連鎖により沈殿が生成することを考慮。

(iv) 数学的定式化

人工バリア中の核種移行挙動を次のように定式化

$$R_i \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial C_{p_i}}{\partial t} = D_{p_i} \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) - \lambda_i R_i C_i + \lambda_{i-1} R_{i-1} C_{i-1} - \lambda_i C_{p_i} + \lambda_{i-1} C_{p_{i-1}}$$

ここで、 C_i : 核種 i の液相中の濃度 (沈殿物の濃度は含まない) [g / m³]
 C_{p_i} : 核種 i の沈殿物の濃度 [g / m³]
 D_{p_i} : 核種 i の空隙水中の拡散係数 [m² / y]
 λ_i : 崩壊定数 [1 / y]
 R_i : 核種 i の遅延係数 [-]
 t : 溶出開始後の経過時間 [y]
 r : ガラス固化体中心からの距離 [m]

遅延係数 R_i は次のように記述される。

$$R_i = 1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \rho K d_i$$

ここで、 ε : 緩衝材の空隙率 [-]

ρ : 緩衝材の真密度 [kg/m³]

$K d_i$: 核種 i の分配係数 [m³/kg]

沈殿物の生成及びその再溶解は次のように記述

$$\frac{\partial C_{p_i}}{\partial t} = U(C_{p_i}) k_i (C_i - C_i^*)$$

ここで、 k_i : 核種 i に対する沈殿、再溶解の反応速度 [1/y]

C_i^* : 核種 i の溶解度 (= $C_{o_i}^* \times P_i(t)$) [g/m³]

$C_{o_i}^*$: 核種 i に対応する元素の溶解度 [g/m³]

$P_i(t)$: 核種 i の同位体存在度 [-]

$$U(C_{p_i}) = \begin{cases} 1 & (C_{p_i} > 0 \text{ 又は } C_i > C_i^*) \\ 0 & (C_{p_i} = 0 \text{ かつ } C_i \leq C_i^*) \end{cases}$$

初期条件及び境界条件は以下のように入る。

(a) 初期条件 (処分後、1,000年で溶出開始、 $t = 0$)

$$C_i = 0 \quad ; \quad R_1 \leq r \leq R_2$$

$$C_{p_i} = 0 \quad ; \quad R_1 \leq r \leq R_2$$

ここで、 R_1 : ガラス固化体中心からオーバーバック表面までの距離 [m]

R_2 : ガラス固化体中心から緩衝材外側までの距離 [m]

(b) 境界条件

① 内側境界条件 (ガラス固化体/緩衝材界面)

・溶解度制限 (難溶性元素)

$$C_i^*(r, t) = C^* \times P_i(t), \quad \text{at } r = R_1$$

・ガラス固化体との調和溶解 (可溶性元素)

$$J_i(r, t) = J_s \times f_i \times P_i(t), \quad \text{at } r = R_1$$

ここで、 f_i : 元素 i のガラス固化体中の重量分率 [-]

J_s : ガラス固化体の長期的溶解速度 [g/m²/y]

②外側境界条件（緩衝材／岩体界面）

緩衝材／岩体界面において核種濃度を0とする保守的な境界条件を採用。

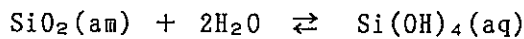
解析は「RELEASE」コードを使用。

(3) データ

(i) ガラス固化体の溶解速度

①ガラス固化体の水への溶解については、主成分であるSiが水和反応で表面に

SiO₂(am)を形成し、さらに水に溶解する以下の反応を律速とする考え方



を遷移状態理論の律速式で示す。

$$d[\text{Si}(\text{OH})_4(\text{aq})]/dt = k_{s1} \cdot \frac{SA}{V} \left[1 - \frac{[\text{Si}(\text{OH})_4(\text{aq})]}{[\text{Si}(\text{OH})_4(\text{aq})]_{\text{eq}}} \right]$$

ここで、 $[\text{Si}(\text{OH})_4(\text{aq})]$: Si(OH)₄(aq)の濃度 [mol/l]

$[\text{Si}(\text{OH})_4(\text{aq})]_{\text{eq}}$: Si(OH)₄(aq)の平衡濃度 [mol/l]

k_{s1} : Siの初期溶解速度 [mol/cm²/s]

SA : ガラス固化体の表面積 [cm²]

V : 浸出液体積 [cm³]

②ガラス固化体からの核分裂生成物（FP）及びアクチニドの溶出挙動

・可溶性元素（Cs等）は、Si(OH)₄(aq)がSiO₂(am)に対する飽和濃度に達するまでは、ほぼ上式に律速されるSiと調和溶解する。

・難溶性元素（アクチニド等）は、ガラス母層の変質によりガラス表面に固相（酸化物、水酸化物、炭酸塩等）を形成し、それらの溶解度に至る反応によって元素の溶出が支配される。

閉鎖系において、ガラス固化体は、Si(OH)₄(aq)がSiO₂(am)に対する飽和濃度に達するまでは一次反応律速で溶解するが、飽和濃度に達した後は、一定の残存溶解速度で浸出すると考えられており、ガラス固化体の溶解速度J_gを下記のとおり表現。

$$J_g = k_g + \left(1 - \frac{C_{si}}{C_{si}^*} \right) + k_r$$

ここで、 C_{Si}^* : $Si(OH)_4(aq)$ の飽和濃度 [mol / l]
 C_{Si} : $Si(OH)_4(aq)$ の濃度 [mol / l]
 k_{c^+} : ガラス固化体の初期溶解速度 (forward reaction rate) [g / m² / d]
 k_r : ガラス固化体の残存溶解速度 (residual reaction rate) [g / m² / d]

したがって、可溶性元素 (i) の溶解速度 J_i は、以下ようになる。

$$J_i = J_c \cdot f_i$$

ここで、 f_i : ガラス固化体中の元素 i の分率

本解析では、対象とする系が Si の散逸を含む開放系であるため、第 1 項の一次反応速度及び緩衝材中の Si の拡散を考慮して、第 1 項の寄与分も含めた定常的なガラス固化体の長期的溶解速度 J_c を設定して境界条件とする。ガラス固化体の残存溶解速度 k_r については、ガラス固化体の浸出試験から求められた値がいくつか報告されており、 $5 \times 10^{-3} \text{ g / m}^2 \text{ / d}$ と設定。この場合、第 1 項の寄与分を考慮し、 J_c としては $SiO_2(am)$ に対する $Si(OH)_4$ の飽和濃度 (C_{Si}^*) にしたがって、降水系高 pH 型地下水に対して、 $1.4 \times 10^{-1} \text{ g / m}^2 \text{ / d}$ 、降水系低 pH 型地下水に対して $5.0 \times 10^{-2} \text{ g / m}^2 \text{ / d}$ 、海水系の地下水に対して、 $4.8 \times 10^{-2} \text{ g / m}^2 \text{ / d}$ と計算された値を用いる。

今回の評価対象核種のうち、Cs は長期的溶解速度によって、それ以外の核種は溶解度により、固化体表面での境界条件を与えて核種移行解析を行う。

- ③ ガラス固化体の内部に亀裂が存在することによって溶出に寄与する表面積が増加することが考えられるが、この効果をガラス固化体の幾何学的表面積を 10 倍して計算。

(ii) 放射性核種の溶解度

(a) 溶解度評価のための溶液条件

溶解度評価のための溶液は、ガラス固化体に接するベントナイト緩衝液であり、図に示すとおり C_2 (ベントナイト空隙水と腐食生成物が平衡になった時の緩衝液組成) 及び C_3 (化学的緩衝性喪失後のベントナイト空隙水と腐食生成物が平衡になった時の緩衝液組成) である。

(b) 熱力学データ

次表参照

表3 溶解度評価で使用した熱力学データの出典一覧⁽¹⁾

元 素	使用した熱力学データ
Geochemical Elements	Original PHREEQE data base + NEA data base
U, Tc	NEA data base
Am	Battelle-PNL data
Se, Zr, Pu, Th, Np	Harwell R12324 data base
Sn	EQ3/6 data base
Pd	Phillips et al.

(c) 溶解度制限固相の設定

溶解度制限固相として水酸化物、酸化物、炭酸塩及び硫酸塩に絞る。

溶解度が高いと考えられる水酸化物系と低いと考えられる酸化物系を溶解度制限固相の両極端と考える。

なお、酸化物系、水酸化物系固相の安定性については、いくつかの議論がある。評価・選定した各元素の溶解度制限固相を下表に示す。

表4 選定した溶解度制限固相⁽¹⁾

元 素	溶 解 度 制 限 固 相		元 素	溶 解 度 制 限 固 相	
	酸化物系	水酸化物系		酸化物系	水酸化物系
Zr	—	Zr(OH) ₄	Np	NpO ₂	Np(OH) ₄
Tc	TcO ₂	TcO ₂ ·2H ₂ O	Pu	PuO ₂	Pu(OH) ₄
Sn	SnO ₂	—			Pu(OH) ₂ CO ₃
Th	ThO ₂	Th(OH) ₄	Am	—	AmOHCO ₃
U	UO ₂ (cr)	UO ₂ (am)	Pd	PdO	Pd(OH) ₂
			Se	FeSe ₂	FeSe ₂

注) — は現状の熱力学データからは、その系での固相を決定することができないものを示す。

(d) 溶解度の算出

表に示した溶解度制限固相を想定して、熱力学データベースを用い、地球化学コードPHREEQEを用いて、人工バリア中の地下水に対する25℃における各元素の溶解度を算出。

(e) 核種移行解析のデータの設定

前記解析結果に基づき、人工バリア中の核種移行解析に用いる溶解度を以下のような考え方で設定。

- ① 4種類の地下水系について、各元素毎にそれぞれ酸化物系、水酸化物系に対する溶解度のデータ、計8種類を計算により設定し、核種移行解析に用いる。
- ② ただし、現時点で酸化物系の熱力学データが存在しない、もしくは信頼性に乏しいという理由で、Am, Zrについては水酸化物系の溶解度を、Snについては逆に酸化物系の溶解度を、共通して核種移行解析に用いる。また、Seについては、天然環境中で存在が認められている鉄化合物についても溶解度制限固相として検討し、熱力学的に最も安定な鉄化合物の溶解度を、共通して核種移行解析に用いる。
- ③ 算出された溶解度が各元素の検出下限値を下回るときには、設定した検出下限値を解析に用いる。
- ④ 降水系地下水及び海水系低pH型地下水ではベントナイトのpH緩衝性がある場合C₂となくなった場合C₃における溶解度を比較して、値の大きい方を核種移行解析に用いる。

(iii) 緩衝材中の分配係数

ガラス固化体からベントナイト空隙水中に溶出した放射性核種の移行解析を行うため、次式で定義される核種*i*のベントナイトに対する分配係数Kd_{*i*}

[m³/kg] を求める。

$$K d_i = \frac{S_i}{C_i}$$

ここで、C_{*i*} : 溶液中の核種*i*の平衡濃度 [kg/m³]

S_{*i*} : ベントナイトに吸着した核種*i*の濃度 [kg/kg-ベントナイト]

核種移行解析に使用するKd値を設定するにあたって、以下の点に留意

- ① 処分環境に近い条件での測定値であること
- ② ベントナイト中のKd値は地下水組成に大きく依存すると考えられるため、各地下水組成に応じたKd値の設定を考慮。
- ③ 熱力学データの信頼性に依存するが各元素のベントナイト空隙水中での支配的化学種の化学形態を考慮。

(iv) 緩衝材中の拡散係数

(a) 拡散係数の定義

多孔質媒体中の定常拡散における核種 i の実効拡散係数 De_i

$$De_i = \varepsilon \cdot D_{p_i} = \varepsilon \cdot \frac{\delta}{\tau^2} D_i^* = FF \cdot D_i^*$$

ここで、 D_{p_i} : 核種 i の空隙水中の拡散係数 ($= \frac{\delta}{\tau^2} D_i^*$)

D_i^* : 核種 i の自由水中の拡散係数

ε : 空隙率

δ : 収れん度

τ : 屈曲度

FF : 圧縮ベントナイトの形状因子(フォーメーションファクター)

FFは拡散経路による遅延で、イオン排除の効果や、分子ふるい効果を含む因子。また一般に核種 i はベントナイトに吸着するため、非定常な拡散を扱うみかけの拡散係数 Da_i は以下のように定義。

$$Da_i = \frac{D_{p_i}}{R_i} = \frac{De_i}{\varepsilon + \rho \cdot Kd_i}$$

ここで、 R_i : 遅延係数 ($= 1 + \frac{\rho}{\varepsilon} Kd_i$)

ρ : ベントナイトの乾燥密度

Kd_i : 核種 i の分配係数

(b) 実効拡散係数の設定

各元素の D_i^* 及び測定されたFFを用いて25℃、60℃での各元素に対する実効拡散係数 (De_i) の値を求める。

De_i の値に大きな差がないため、保守的に全元素とも、最大値である $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ の値を採用。 ε (空隙率)は、ベントナイト (クニゲル V 1 を使用) の真密度を 2.7 g/cm^3 として求めた乾燥密度 1.8 g/cm^3 の時の値 0.33 を採用。

(4) 変動要因

- ①ニアフィールドの水理特性に応じた外側境界条件の設定
————→ (外側) 境界条件の経時変化のモデル化
- ②処分場を単位とした多重のソースからの核種移行
————→ 処分場近傍全体シミュレーションモデル
- ③オーバーパック (炭素鋼) またはその腐食生成物とガラス固化体・核種との反応について、溶出したSiについての鉄イオンとの共沈もしくは腐食生成物による吸着反応、核種と腐食生成物との間の共沈や吸着反応の生じる可能性
- ④ガラス固化体の長期的な溶解速度、特に、圧縮ベントナイト中の長期的な溶解メカニズム
- ⑤溶解度制限固相の同定とその安定性
- ⑥ガラス固化体の溶解及び核種の溶出における固化体近傍の地球化学的条件の時間的变化 ———→ (内側) 境界条件の経時変化のモデル化
- ⑦緩衝材 (圧縮ベントナイト) 中の核種移行における線型的吸着及びフィック型拡散モデルの仮定の妥当性と圧縮ベントナイト中の微細な空隙の物理的・化学的特性 (オーバーパックの腐食生成物による影響やベントナイトの長期的な変質の影響)
————→ 核種の地球化学的な反応と移行プロセスとの連成現象のモデル的取り扱い
- ⑧地下水中にコロイドまたはその一部として存在する核種の移行
- ⑨有機物、微生物等の挙動の核種移行への影響
- ⑩熱力学データの信頼性・充分性 ———→ 不確実データを含む核種移行解析モデル

1.4 天然バリア中の核種移行解析

(1) 基本的考え方／前提条件

(i) 地質媒体の核種移行の観点からの分類

地質媒体中の核種移行は、核種の移行経路と考えられる媒体空隙中における、地下水の流れによる移動（移流）とそれによって生じる機械的分散が、移行経路周辺の岩体や鉱物との吸着等の相互作用を生じながら進行する現象として理解がなされてきている。また、核種移行のモデル上の取扱いとしては、地下水の流路となる空隙構造に対応して、多孔質媒体と亀裂性媒体とに分けて評価を行うことが多い。そこで、地質媒体を多孔質媒体と亀裂性媒体に大別して議論を進める。

(ii) 多孔質媒体中の物質移動

亀裂の発達していない砂岩、泥岩等の堆積岩が該当する。モデル例を図9に示す。

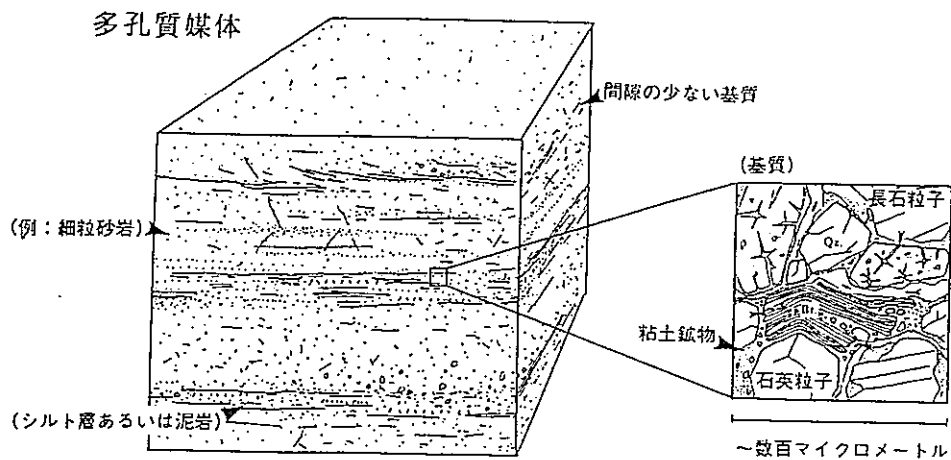


図9 多孔質媒体の構造モデルの例⁽¹⁾

(iii) 亀裂性媒体中の物質移動

地質媒体中に発達した亀裂が存在する場合、媒体中の水の流れ及び核種の移行はその亀裂内を主要な移行経路としている。該当するものとしては、火成岩、変成岩及び亀裂の発達した堆積岩が考えられる。モデル例を図10に示す。

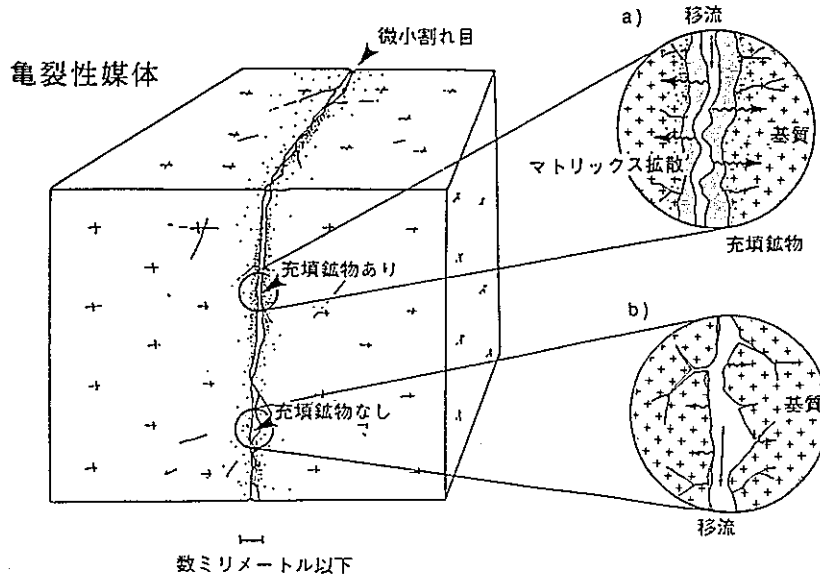


図10 亀裂性媒体の構造モデルの例⁽¹⁾

(2) モデル

(i) 多孔質媒体中の核種移行モデル

多孔質媒体中の核種移行機構としては、移流/分散又は拡散が支配的となる。

①地下水の流れの方向に対して一次元の物質移動を考える。地下水の流れはダルシーの法則に従うものとし、その流れによって溶質の移流と分散が生じるものとする。

②媒体中の全空隙率が物質移動に関して実効的な空隙率に等しいとし、この系の中で溶質の線型吸着が生じることを仮定する。

考慮する基本プロセスは、媒体中の移流/分散、核種の線型吸着及び放射性崩壊である。放射性崩壊についての連鎖を考えれば、このようなプロセスからなる1次元核種移行の支配方程式は次式で示される。

$$\varepsilon R d_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - V \frac{\partial C_i}{\partial z} - \varepsilon R d_i \lambda_i C_i + \varepsilon R d_{i-1} \lambda_{i-1} C_{i-1}$$

ここで、 C_i : 多孔質媒体空隙水中の i 番目の核種濃度	[$M L^{-3}$]
z : 距離	[L]
t : 時間	[T]
D_L : 多孔質媒体中の分散係数	[$L^2 T^{-1}$]
$R d_i$: i 番目の核種の多孔質媒体中の遅延係数	[$-$]
λ_i : i 番目の核種の崩壊定数	[T^{-1}]
V : ダルシー流速	[$L T^{-1}$]
ε : 多孔質媒体空隙率	[$-$]

多孔質媒体中での遅延係数 $R d_i$ は次式で定義される。

$$R d_i = 1 + \frac{(1 - \varepsilon) \rho_b K d_i}{\varepsilon}$$

ここで、 ρ_b : 多孔質媒体の真密度	[$M L^{-3}$]
$K d_i$: i 番目の核種の多孔質媒体中の分配係数	[$L^3 M^{-1}$]

また、分散係数 D_L は次式で定義される。

$$D_L = \alpha_L \cdot V + D_e$$

ここで、 α_L : 分散長	[L]
D_e : 実効拡散係数 (核種に依存しないとする)	[$L^2 T^{-1}$]

以上の方程式系に対して、初期条件及び境界条件を次のように与える。

$$\begin{aligned} C_i(z, 0) &= 0, & z > 0 \\ V C_i - D_L \frac{\partial C_i}{\partial z} &= \Psi(t), & z = 0, t > 0 \\ C_i(\infty, t) &= 0 & t > 0 \end{aligned}$$

ここで、 $\Psi(t)$ は地質媒体入口での人工バリアからの核種移行率の時間変化を表す積分可能な関数である。

(ii) 亀裂性媒体中の核種移行モデル

亀裂性媒体では、亀裂等の卓越した流路における移流・分散と、より微細な空隙における拡散によって物質移動が支配されると考えることができる。

亀裂性媒体に対する核種移行のモデルについては、以下のように考える。

- ①人工バリアから移行した核種の全量はまず、最も速い経路にのみ進入することとし、移行経路は一種類とする（同じ特性のものが複数存在することは考慮する）。
- ②移行経路としては、結晶質岩等における種々の規模の亀裂や礫岩等における礫間の比較的大きな連続した空隙などが考えられるが、本解析では亀裂を中心に議論する。
- ③核種移行に関わる特性を同じくする複数の亀裂が、地下水で飽和した多孔質媒体として扱いうる岩体マトリクス中に、ある一定の間隔で位置する構造を考える。亀裂は平行平板で表現されるものとする。
- ④亀裂内の地下水流速は、上記構造をもつ亀裂性媒体全体を、等価な多孔質媒体とみなして求められるダルシー流速から亀裂の平行平板モデルに基づく三乗則によって与えられるものとする。
- ⑤亀裂内では、物質移動のメカニズムとして亀裂に沿った一次元方向の地下水流による移流と、この地下水流の流動方向に向けての分散を考えるものとする。
- ⑥核種は、亀裂に垂直な方向に拡散することによって岩体マトリクス中を移動するものとする（マトリクス拡散）。
- ⑦核種の亀裂表面及び岩体マトリクス内での吸着、移行途中での崩壊を考慮する。
- ⑧核種の吸着については、瞬時の局所平衡が成立し、可逆的なヘンリー型の線型吸着であると仮定する。

上述した概念モデルに対応する核種移行の支配方程式は、亀裂中での移流・分散と岩体へのマトリクス拡散とを連立したものとなる。

亀裂中での核種移行（移流・分散）；

$$\text{Rd}_i^f \frac{\partial C_i^f}{\partial t} = -V \frac{\partial C_i^f}{\partial z} + D_L \frac{\partial^2 C_i^f}{\partial z^2} - \lambda_i \text{Rd}_i^f C_i^f + \lambda_{i-1} \text{Rd}_{i-1}^f C_{i-1}^f - \frac{1}{b} \varepsilon D_p^m \frac{\partial C_i^m}{\partial x} \Big|_{x=b}$$

$$\text{Rd}_i^f = 1 + K_{a_i} / b$$

岩体マトリクス中の核種移行（マトリクス拡散）；

$$\text{Rd}_i^m \frac{\partial C_i^m}{\partial t} = D_p^m \frac{\partial^2 C_i^m}{\partial x^2} - \lambda_i \text{Rd}_i^m C_i^m + \lambda_{i-1} \text{Rd}_{i-1}^m C_{i-1}^m$$

$$\text{Rd}_i^m = 1 + \rho^m K_{d_i} (1 - \varepsilon) / \varepsilon$$

ここで、添え字（下） i は i 番目の核種に対応しており、また添え字（上）の f は亀裂内、 m は岩体マトリクス中の変数であることを示す。式中の変数は、それぞれの以下のとおりである。

Rd_i^f	： 亀裂表面への吸着による遅延係数	[-]
Rd_i^m	： 岩体マトリクスへの吸着による遅延係数	[-]
C_i^f	： 亀裂内核種濃度	[$M L^{-3}$]
t	： 時間	[T]
V	： 亀裂内地下水流速	[$L T^{-1}$]
z	： 亀裂方向の距離	[L]
D_L	： 亀裂内流れ方向分散係数	[$L^2 T^{-1}$]
D_p^m	： 岩体マトリクス部の空隙中拡散係数	[$L^2 T^{-1}$]
C_i^m	： 岩体マトリクス中の空隙内核種濃度	[$M L^{-3}$]
x	： 亀裂に垂直な方向（岩体マトリクス内）の距離	[L]
λ_i	： 崩壊定数	[T^{-1}]
K_{a_i}	： 亀裂表面への吸着に関する分配係数	[L]
K_{d_i}	： 岩体マトリクスにおける分配係数	[$L^3 M^{-1}$]
$2b$	： 亀裂開口幅	[L]
ε	： 岩体マトリクスの空隙率	[-]
ρ^m	： 真密度	[$M L^{-3}$]

以上の方程式系に対して、初期条件及び境界条件を次のように与える。

$$\begin{aligned}
 C_f(z, 0) &= 0, & z > 0 \\
 C_T(x, z, 0) &= 0, & x > b, \quad z > 0 \\
 V C_f - D_L \frac{\partial C_f}{\partial z} &= \Psi(t), & z = 0, \quad t > 0 \\
 C_f(\infty, t) &= 0, & t > 0 \\
 C_T(b, z, t) &= C_f(z, t), & z > 0, \quad t > 0 \\
 \left. \frac{\partial C_T}{\partial x} \right|_{x=x_1} &= 0
 \end{aligned}$$

ここで、 x_1 は拡散が生じ得るマトリクス方向の距離であり、たとえば、となりあった亀裂の中間点における拡散フラックスの反射等を表現するものとなる。また $\Psi(t)$ は、亀裂入口での人工バリアからの核種移行率の時間変化を表す積分可能な関数である。

(iii) 感度解析

定式化された数学モデルを用いて、モデルに含まれるパラメータに対する天然バリアの核種移行遅延効果の感度を調べるにあたり、人工バリアから地質媒体に移行した核種が、地質媒体中を移行する間に遅延減衰し、人工バリアからの移行率に対して低減する程度によって、この測度を示すこととする。この尺度を $\Theta(z, t)$ とすると、 Θ は、次式で与えられる。

$$\Theta(z, t) = \frac{\Phi(z, t)}{\Psi(t)}$$

ここで、 $\Psi(t)$: 人工バリアから地質媒体への核種移行率

$\Phi(z, t)$: 時刻 t における地質媒体中あるいは亀裂内での z の距離における核種移行率

(a) 概略の感度解析のための解析解

① 多孔質媒体

崩壊連鎖を考慮しない場合には、次式で示される境界条件の下での解析解が得られている。

$$\Psi(t) = \Psi_0, \quad t > 0$$

ここで、 Ψ_0 : 地質媒体入口での一定の核種移行率 [ML⁻²T⁻¹]

解析解は以下のように記述される。

$$\frac{\Phi}{\Psi_0} = \xi(z, t) = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{Vz}{2D_L}\right) \cdot \left[\exp(-\beta z) \operatorname{erfc}\left\{ \frac{z-t\sqrt{\frac{4\lambda D_L}{\varepsilon \cdot Rd} + \left(\frac{V}{\varepsilon Rd}\right)^2}}{2\sqrt{D_L t / \varepsilon Rd}}\right\} \right. \\ \left. + \exp(\beta z) \operatorname{erfc}\left\{ \frac{z+t\sqrt{\frac{4\lambda D_L}{\varepsilon \cdot Rd} + \left(\frac{V}{\varepsilon Rd}\right)^2}}{2\sqrt{D_L t / \varepsilon Rd}}\right\} \right]$$

ここで、

$$\beta \equiv \sqrt{\frac{\lambda \varepsilon Rd}{D_L} + \left(\frac{V}{2D_L}\right)^2}$$

$\Phi(z, t)$: 多孔質媒体内の任意の位置における核種移行率 [$M L^{-2} T^{-1}$]

多孔質媒体入口境界における移行形態として、移行時間 T の矩形型核種ソースを考えると、これに対する解は2つのステップ関数入力の差として表現できる。

一定フラックス Ψ_0 で時刻0から移行が開始される移行時間 T のソースを境界条件として考えると、距離 z における核種移行率は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Phi}{\Psi_0} &= \xi(z, t), & 0 \leq t < T \\ \frac{\Phi}{\Psi_0} &= \xi(z, t) - \xi(z, t - T), & t > T \end{aligned} \right\}$$

定常解は、上式で、 $t \rightarrow \infty$ とすることによって次のように求められる。

$$\frac{\Phi}{\Psi_0} = \exp\left\{ z \left(\frac{V}{2D_L} - \sqrt{\left(\frac{V}{2D_L}\right)^2 + \frac{\varepsilon \lambda \cdot Rd}{D_L}} \right) \right\}$$

拡散支配の場合は、上式で $V = 0$ とおけばよい。

$$\frac{\Phi}{\Psi_0} = \exp\left\{ -z \sqrt{\frac{\varepsilon \lambda \cdot Rd}{D_L}} \right\}$$

② 亀裂性媒体

亀裂性媒体についても、崩壊連鎖やマトリクス拡散距離の制限を考慮しない場合 ($x_1 = \infty$) のTangの解析解は亀裂入口濃度が一定の条件で解いたものであるが、亀裂入口と亀裂内の任意の位置での核種濃度比と核種移行率の比は同じ関数形で与えられる。亀裂表面への核種の吸着に関しては、一般的な知見が充分ではないため、そのプロセスを無視する。

定常解は、亀裂内のフラックスに対して以下のように与えられる。

$$\frac{\Phi}{\Psi_0} = \exp \left[\frac{Pe}{2} - \left\{ \frac{Pe^2}{4} + \frac{Pe \cdot z}{b \cdot V} [b \lambda + \varepsilon (\lambda \cdot R d \cdot D_p)^{1/2}] \right\}^{1/2} \right]$$

ただし、 $b \lambda \ll \varepsilon (\lambda \cdot R d \cdot D_p)^{1/2}$ であることから、 $b \lambda$ の項を無視すると、式は以下のようなになる。

$$\frac{\Phi}{\Psi_0} = \exp \left[\frac{Pe}{2} - \left\{ \frac{Pe^2}{4} + \frac{Pe \cdot \varepsilon \cdot z}{b \cdot V} (\lambda \cdot R d \cdot D_p)^{1/2} \right\}^{1/2} \right]$$

ここで、Pe	: ペクレ数	[-]	(= $V \cdot z / D_p$)
ε	: 岩体マトリクスの空隙率	[-]	
z	: 地質媒体中の評点地点までの距離	[L]	
2 b	: 亀裂開口幅	[L]	
V	: 亀裂内流速	[$L T^{-1}$]	
λ	: 崩壊定数	[T^{-1}]	
R d	: 岩体マトリクス部の遅延係数	[-]	
D_p	: 岩体マトリクス空隙中の拡散係数	[$L^2 T^{-1}$]	

亀裂性媒体に対しても、実際に観測される水理データは、等価多孔質媒体と考えた場合の透水係数である。したがって、後で(3)に示すような等価透水係数の範囲から亀裂頻度を用いて、亀裂開口幅、亀裂内流速に変換することが合理的である。

亀裂開口幅 2 b 及び亀裂内流速 V は亀裂の平行平板モデルに基づく三乗則を用いると、等価透水係数 K_e 、動水勾配 ΔH 及び亀裂頻度 n によって以下のように記述することができる。

$$2 b = \left(\frac{\rho g}{12 \eta} \right)^{-1/3} \cdot \left(\frac{K_e}{n} \right)^{1/3}$$

$$V = \left(\frac{\rho g}{12 \eta} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{K_e}{n} \right)^{2/3} \cdot \Delta H$$

ここで、 ρ	: 水の密度	[ML ⁻³]
g	: 重力加速度	[LT ⁻²]
η	: 水の粘性係数	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
ΔH	: 動水勾配	[-]
K_e	: 等価透水係数	[LT ⁻¹]
D_L	: 分散係数	[L ² T ⁻¹]
n	: 亀裂頻度	[L ⁻¹]

これらを用いると、

$$\frac{\Phi}{\Psi_0} = \exp \left[\frac{Pe}{2} - \left\{ \frac{Pe^2}{4} + \frac{n \cdot z \cdot Pe \cdot \varepsilon}{\Delta H \cdot K_e} (\lambda \cdot R d \cdot D_p)^{1/2} \right\}^{1/2} \right]$$

(b) 詳細解析のための厳密解

① 多孔質媒体

基本モデルについては、Lungらの解析解を利用して、崩壊連鎖を考慮した詳細解析を行う。

$\Psi(t)$ には、解析した人工バリアから天然バリアへのガラス固化体1本あたりの核種移行率を与える。計算された核種移行率の時間変化は、複雑な形状を示しているが、ここでは各核種ごとに全移行量を最大移行率で除して継続時間 T_i を求め矩形関数の関数に近似してこれを扱う。

② 亀裂性媒体

基本モデルについては、ラプラス変換することによって解析的に解くことができ、これを逆ラプラス変換するに際しては、解析的に解くことが困難なため、タルボット法を用いて数値的に逆変換を行う。

この場合にも多孔質媒体の場合と同様の扱いによって $\Psi(t)$ を与える。

③ 評価対象核種

人工バリア中の核種移行解析と同様、以下に示す11元素18核種を評価対象として、これらに対して天然バリアの核種移行遅延効果を示す。なお、²⁴¹Am系列、²⁴³Am系列、²³⁸U系列、²⁴⁰Pu系列の各3核種（合計12核種）については詳細な解析において崩壊連鎖を考慮した解析を実施。

- ・ 対象核種：⁷⁹Se, ⁹³Zr, ⁹⁹Tc, ¹⁰⁷Pd, ¹²⁶Sn, ¹³⁵Cs
- ²⁴¹Am, ²³⁷Np, ²³³U
- ²⁴³Am, ²³⁹Pu, ²³⁵U
- ²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁰Th
- ²⁴⁰Pu, ²³⁶U, ²³²Th

(3) データ

(i) 媒体の空隙構造に関するパラメータ

(a) 空隙率

カコウ岩、凝灰岩、泥岩及び玄武岩に対する水中飽和法による測定データを参考に以下のように設定。

①多孔質媒体：0.3～0.6（代表値0.45） [－]

②亀裂性媒体（岩体マトリクス部）：0.005～0.03（代表値0.01） [－]

(b) 亀裂に関するパラメータ

亀裂頻度については、地下空洞やボーリングコアの調査結果等を参考に、以下の3つの水準を設定。

①頻度 n ：0.1, 1, 10 [本数/m]

亀裂開口幅に対する実測データは極めて限られておりパラメータ評価に用いるだけの十分な情報は得ていない。そこで亀裂開口幅は直接の入力パラメータとはせず、三乗則を利用して岩体の等価透水係数 K_e と亀裂頻度 n により表現する。 K_e 及び n の範囲から導出された亀裂開口幅 $2b$ の範囲は以下のとおりである。

② $2b$ ： $1.9 \times 10^{-6} \sim 1.9 \times 10^{-4}$ [m]

(ii) 水理パラメータ

(a) 透水係数

地下深部での透水係数の範囲を設定。

①多孔質媒体： $10^{-8} \sim 10^{-4}$ [cm/s]

②亀裂性媒体： $10^{-8} \sim 10^{-4}$ [cm/s]

(b) 動水勾配

処分深度に相当する地下深部における動水勾配の範囲と、詳細な移行解析に用いる現実的な動水勾配の値を設定。

①動水勾配の範囲：0.01～0.6 [－]

②詳細解析における動水勾配の設定値：0.05 [－]

(c) 地下水流速

ダルシー則又は三乗則に基づき、動水勾配、透水係数及び亀裂頻度または空

隙率をパラメータとして地下水流速を表す。上述したパラメータ範囲における地下水流速の範囲は以下ようになる。

- ①多孔質媒体中の空隙内流速： $5.3 \times 10^{-5} \sim 6.3 \times 10^{-1}$ [m/y]
- ②亀裂内流速： $1.7 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^6$ [m/y]

(iii) 核種の吸着に関するパラメータ

評価対象元素について岩体に対する分配係数（K_d値）について、元素ごとのK_dの範囲を設定。

岩石に対する核種の分配係数は、以下のように設定。

(a) 各岩種に対して、以下の岩石を検索対象し、検索にはOECD/NEAの吸着データベース（SDB）を主として利用。

- ①カコウ岩類 … カコウ岩、カコウ閃緑岩
- ②凝灰岩・泥岩類 … 凝灰岩
粘土岩（粘土鉱物ではなくclayと記載されているもの）
シルト岩、海洋性堆積物、頁岩、泥岩
- ③玄武岩類 … 玄武岩、ハンレイ岩

固相の状態、液相の化学組成、核種の化学形態を考慮した上で分配係数値を設定。

(iv) 拡散及び分散に関するパラメータ

(a) 拡散係数

実効拡散係数D_e及びεD_pについては、カコウ岩、凝灰岩、泥岩及び玄武岩に対するトリチウム水を用いたスルーディフュージョン試験、あるいは電気伝導度法による評価結果をもとに以下のように設定。

- ①多孔質媒体： $5 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-10}$ [m²/s]
- ②亀裂性媒体の岩体マトリクス部： $10^{-14} \sim 10^{-12}$ [m²/s]

(b) 分散係数

核種移行モデルに現れる分散係数は以下のように定義されている。

- ①多孔質媒体： $D_L = \alpha_L \cdot V_d + D_e$ [m²/s]
ここで、α_L：分散長 [m]

V_d : ダルシー流速 [m/s]

D_e : 実効拡散係数 [m²/s]

② 亀裂性媒体 : $D_L = \alpha_L \cdot V_o + D_v$ [m²/s]

ここで、 α_L : 分散長 [m]

V_o : 亀裂内流速 [m/s]

D_v : 自由水中の拡散係数 [m²/s]

分散係数 D_L を決めるパラメータのうち、分散長 α_L 以外のものは、すでに設定されている。

分散長の設定は、地質媒体中の評価地点までの距離 L に対し、

$$\alpha_L = \frac{L}{10}$$

(4) 変動要因

① 移行経路に関する不確実性

————→ 移行経路としての亀裂構造と亀裂内充填鉱物の影響評価、新しい移行経路の発生・消滅

② コロイド形態の核種移行挙動評価

③ 特性の異なる亀裂の組み合わせの効果

④ 移行特性に対する不均質性を含む媒体の評価

多孔質媒体、亀裂媒体の

混合（組み合わせ）モデル

⑤ 多重ソースの干渉 ———→ 処分場領域全体シミュレーションモデル

⑥ その他、広域地下水流動モデル、地球化学モデルと核種移行モデルの連成モデル化

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 F E P 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F E Pそれぞれに対し、

① 関連要素

当該F E P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F E P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F E Pへの直接的な影響

当該F E P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F E P（但し、必ずしも102のF E P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。その結果を以下の表形式にて示すものとする。

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
A. 自然現象 1. 地球外の現象 1.1 隕石の衝突	(1) 飛来位置 小惑星群 (2) 種類 ・石質隕石 ・石鉄隕石 ・隕鉄隕石 (3) 起源 ・A. E. Ringwood説 ・J. A. Wood-E. Anders説 ・H. Urey説 (但し、全ての観測事実を十分に説明できるモデルはない) (4) 落下地点	(1) 大きさ・数 宇宙塵～Hoba隕鉄(60ト)約1,600個 (2) 年代 ・第一の年代…約 10^8 年 ・固化年代… $\leq (4.5 \pm 0.2) \times 10^9$ 年 ・宇宙線照射年代 石鉄隕石… $\leq 2 \times 10^9$ 年 石質隕石… $\leq 10^9$ 年 ・最後の年代 石鉄隕石… 10^6 年 石質隕石… $\geq 10^4$ 年	(1) 地表の地形変形 EX. 直径1,300m, 深さ174m (米、アリゾナ) (2) 地表の鉱物組成、化学組成の局所的な変質 (3) マグマ活動の誘発(隕石痕) (4) 地下水流動状況の変化
1.2 太陽輻射	(1) 電磁放射エネルギー ・可視光線 ・赤外線 ・紫外線 (2) 地球表面に到達する太陽放射のスペクトル ・大気中の物質の吸収によるくぼみ ・散乱、反射による減光	(1) 地表の受け取る太陽放射量の変化(ミランコビッチ曲線) ・地軸の傾きの変化 周期…約 4×10^4 年 ・地球の公転軌道の離心率の変化 周期…約 9.2×10^4 年 ・太陽及び月の引力による地軸の歳差運動 周期…約 2.1×10^4 年(その後、ファンベルクの曲線に修正) (2) 黒点数 ・周期的に増減	(1) (超)長期的気候変動 ・寒冷期の存在 ・氷期・亜氷期年代 ・黒点の影響 (2) 地球磁場のかく乱
2. 地質学的現象 2.1 プレート運動／テクトニクス的変化	(1) プレートの位置・回転運動 (但し、 10^8 年以上になると、運動の復元は困難(資料不十分))	(1) 地球表層部の剛体近似 (2) プレートの回転中心の位置(緯度・経度)と回転の角速度	(1) プレート境界地震(日本列島内陸部あたりの地震) (2) 隆起・沈降

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他 の F E P へ の 直 接 的 な 影 響
2.2 地磁気の変化	<p>(1) 変化の種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・永年変化 ダイナモ理論 ・日変化 電離層の存在 ・西方移動 ・北方移動 ・磁気あらし <p>(2) 磁気異常</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火山地帯(大島、富士山など) ・強磁性鉱物を含有する岩石が分布する地域(地下構造変化と関連):磁鉄鉱賦存領域 <p>(3) 地震の発生あるいは予知問題とも関連</p>	<p>(1) 経時変化の規則性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・周期/非周期 ・移動速度 西方移動 …0.06°/年 (双極子成分) …0.2°/年 (非双極子成分) 北方移動…1m/年 	<p>(注) 火成活動(マンテル対流)や地震と何らかの因果関係があると考えられる。</p>
2.3 火成活動	<p>(1) 火山活動</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火山灰の噴出 ・溶岩の流出 ・火山体の形成 ・火砕物の堆積 ・噴火現象(マグマ、火山ガスの放出、水蒸気爆発) ・噴気作用 ・火山地震 ・火山性地殻変動 ・温泉作用 ・火成岩体の貫入 <p>(2) 深成活動</p> <ul style="list-style-type: none"> ・変質作用 ・鉱化作用 <p>(3) 火山の位置</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火山前線 ・火山帯(断層等に沿った火山列) <p>(4) 噴火前兆現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火口又は火山体付近の噴気・地熱地帯における放熱・噴気・温泉現象 ・火山体を中心とした局地的地殻変動(隆起・沈降・傾斜などの変動や膨張・収縮・断層・割れ目の形成) ・火山性地震・微小地震・脈動などの発生の時空間的变化 ・火山体を中心とした地磁気・地電流などの異常 	<p>(1) 噴火の総エネルギー - $1.6 \times 10^{10} \times M \text{ erg}$ (M: 噴出物の重量グラム)</p> <p>(2) マグマ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・温度…$650 \sim 1,300^{\circ}\text{C}$ ・粘性…$\geq 10^6 \sim 10^9 \text{ poise}$ 	<p>(1) マグマと地下水・海水の(地下浅所での)接触(水蒸気噴火)</p> <p>(2) 初生水(マグマ水)の生成</p> <p>(3) 火山放出物や火山泥流の堆積</p> <p>(4) 火山灰の風化(土壌変化)</p> <p>(5) 噴出水蒸気等による雲の発生(日射等)</p> <p>(6) 火山性地震、局地的地殻変動(隆起・沈降、傾斜変動、膨張・収縮、断層運動、割れ目発生)</p> <p>(7) 変成作用</p> <p>(8) マグマ貫入</p> <p>(9) A. 5. 7地熱</p>

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他の F E P への直接的な影響
2.4 変成作用	<p>(1) 発生条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・既存の岩石(化学組成)に対し、できた時と異なる温度・圧力等の外的条件下で地下深部で発生。 <p>(2) 随伴現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火成作用 ・構造運動(岩石・地層をそれらの形成後に変位・変形させ、褶曲・断層などの構造的変形や破壊をひき起こす原因となる運動) <p>(3) 種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・深成岩体周辺での温度上昇で生ずる接触(あるいは熱)変成 ・造山運動により、既存の岩石や地向斜堆積物が地下深部にもたらされ、高温・高圧と変形運動によって生ずる広域変成(片岩、片麻岩の存在) ・断層などの著しい変位が、岩石の凝集力が失われない深さで起こり、岩石が変形・破碎される動力変成 	<p>(1) 発生の温度上限(火成作用と区別する意味で)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最高圧力の場合で $\leq 800^{\circ}\text{C}$ ・低圧ではそれ以上になり得る。 <p>(2) 変成相(系列)の存在</p> <ul style="list-style-type: none"> ・化学組成 ・温度・圧力 <p>(3) 変成反応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・吸熱反応(常温常圧で安定な鉱物からなる碎屑岩) ・発熱反応(源岩が火成岩の場合) ・H_2O, CO_2 の関与する反応が重要。 	<p>(1) 岩石の総化学組成(鉱物組み合わせ)変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新鉱物形成 ・構成鉱物不変(石灰岩の場合) <p>あるいは、岩石の不均質性(透水性、鉱物組成)</p>
2.5 続成作用	<p>(1) 堆積後の堆積物地層化までのプロセスの包含範囲</p> <ul style="list-style-type: none"> ・圧密 ・膠結 ・再結晶 ・交代作用 	<p>(1) 物理的プロセス(広義の圧密)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・荷重の増加 ・脱水、構成粒子の再配列に伴う体積減少 ・自然密度の増加 ・間隙率の減少 ・強度や粘着力の増加 <p>(2) 化学的プロセス</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セメンテーション ・自成作用 ・再結晶 ・鉱物の再成長・巨大化 ・セグリゲーション(分結)による団塊・瘤塊の成長 ・(堆積岩)層内溶解 	<p>(1) 堆積物(地層)の続成作用による堆積岩の生成</p>

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他のF E Pへの直接的な影響
2.6 隆起／沈降	(1) 地殻の広い範囲にわたる(水平方向の変位を伴わない)鉛直方向の上下運動。 ・地盤運動 地震による地殻変動 造山運動／造陸運動 ・海面変動 ・自然圧密／疎密 ・地下水圧変動 ・地下掘削	(1) 隆起／沈降速度 (2) 鉛直方向累積隆起／沈降量	(1) 隆起 ・沿岸海底の隆起によって生ずる海岸 ・地球内部熱の地殻押し上げによって生ずる隆起円頂丘 ・隆起準平原の形成 ・山脈地形の出現 (2) 沈降 ・沈降海岸 海食作用 ・堆積盆地 (3) 地下水流動状況の変化 (4) トンネル工事等人間活動の誘因

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他 の F E P へ の 直 接 的 な 影 響
2.7 地震／断層運動	<p>(1) 地震</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火山性地震(火山活動と関連する場合) ・構造性地震(急激な断層活動に伴う場合)の多くはプレート境界地震(地震帯)、プレート内部地震(原因説明は不十分) ・誘発地震(大型ダムの貯水、地下核爆発実験など) <p>(2) 地震先行現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地殻の局地的異常隆起 ・地震流抵抗値の急変 ・地下水中トロン量変化(大地震直前に生ずる新しい割れ目からのトンの地下水中への溶解) ・井戸水の水位・水質の変化 <p>(3) (活)断層の種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉛直断面で見た見かけのずれ 正断層／逆断層 ・断層面と地層面との幾何学的な関係から 走向断層／傾斜断層 ・実移動の方向により 走向移動断層／傾斜移動断層 ・地域的な地質構造との関係から 横断断層／縦走断層 ・断層群の分布形により 平行断層／放射状断層／雁行状断層／共役断層 ・応力と運動の関係により 重力断層／衝上断層／走向移動断層 	<p>(1) 大地震発生に関する統計的な法則</p> <ul style="list-style-type: none"> ・周期性 ・他地域の地震活動の変化との関連性 ・大地震発生の地域的推移 <p>(2) 地震発生確率</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地殻内部歪の蓄積速度 ・岩石強度 <p>(3) 構造性地震によって生ずる弾性波エネルギー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上限10^{25}erg <p>(4) 地震規模</p> <ul style="list-style-type: none"> ・マグニチュード ・最大有感半径 <p>(5) 地震活動度</p> <ul style="list-style-type: none"> 地震発生に関する ・空間的分布 ・エネルギーないしマグニチュード別頻度 ・時間的分布 ・発震機構 ・震源過程の特質 <p>(6) 活断層の将来的な運動可能性(プレート境界面上のずれ運動)</p>	<p>(1) 地震型山くずれの発生</p> <p>(2) 地震磁気効果の発生(地磁気の変化)</p> <p>(3) 地震断層の発生(水平ずれ、垂直ずれ)(断層地震説)</p> <p>(4) 地震隆起の発生(隆起量>沈下量)</p> <p>(5) 海底地震による津波の発生</p> <p>(6) 断層崖の生成</p> <p>(7) 断層海岸線の生成</p> <p>(8) 断層角礫の生成(断層面の間に存在)</p> <p>(9) 断層谷(構造谷)の生成</p> <p>(10) 断層褶曲山地の生成</p> <p>(11) 断層棚の生成(山地や丘陵の側面にある階段地形)</p> <p>(12) 断層クワプの発生(地震を伴わず徐々に動く)</p> <p>(13) 地上と地下深部の通気、連絡口の形成</p> <p>(14) 岩体の不均質性(透水性、鉱物組成)</p> <p>(15) 地下水流動状況の変化</p> <p>(16) 処分坑道の破断</p> <p>(17) 人工バリヤ、廃棄体の損傷・破壊(廃棄体内核種の周囲への飛散)</p>

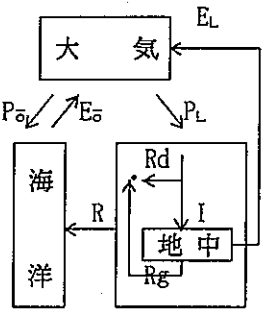
F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他 の F E P へ の 直 接 的 な 影 響
2.8 岩体の不均質性 (透水性、鉱物組成)	(1) 透水性 ・多孔体自体の幾何的性質(多孔体の形状、空隙代表寸法、粒径分布、粒子形状量、空隙率、断層・割れ目(の方向性)、亀裂数、岩質劣化、圧縮性など) ・流れの構造(乱流発生、再層流化など) ・帯水層の存在(被圧/不被圧) (2) 鉱物組成 ・層序(定常的/突発的(EX. 火山噴出物の堆積)) ・断層/貫入(突発的) ・調査用試錐孔、立坑、連絡坑道の埋め戻し	(1) 透水(量)係数(地下水水理) ・飽和浸透流/不飽和浸透流 ・単相流(飽和流)/多相流 ・多孔体変形の考慮 (2) 鉱物分布に基づく複合領域、境界条件の設定(非均質媒体) (3) 統計的扱い ・空隙径、粒径分布 ・亀裂分布 ・鉱物組成の(不)規則性	(1) 地下水流動状態の分布 ・圧力水頭 ・動水勾配 ・地下水流路 ・流速 ... (A. 5. 2不均質系での地下水流動参照。) (2) 岩体の熱伝導特性の分布(C. 1熱的現象) (3) 岩体の耐震特性の分布(応力分布) (4) 土壌・岩石からの溶出・化学反応等による地下水水質の変化
3. 気候学的現象 3.1 降雨、気温、土壌の水収支	(1) 気候変動 ・日射受熱エネルギー ・地球の自転 ・太陽の季節移動 ・気候因子(気候的コントロール、局地的な影響要因) ・人間活動	(1) 気候の簡便な表現 ・各種の平均値(30年平均) (2) 気候変化 ・数10年以上のオーダーの変化 (3) 気候要素 ・日射 ・気温 ・地温 ・湿度 ・蒸発散 ・降水 ・天気 ・雲量 ・気圧 ・風 ... (4) 熱収支・水収支及びそれらの連成収支 図-4(1)(2) 参照	(1) 生態系の変化(A. 7. 7参照) (2) 気候変動への生態系の追従(砂漠化等) ・生物の移動(移住と興亡) (3) 地下水循環 (4) 生態圏での影響 ・洪水 ・地形学的現象 ・物質移動、地表の化学的变化 ・人間活動(農林業等)

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
3.2 洪水	(1) 降雨・融雪の影響 ・台風や梅雨期の豪雨	(1) 発生頻度(規模別) 1年～数年に1回(堤防等の築造物のない天然の川)	(1) 地形学的現象 ・河川の流量増大・河川侵食(土砂運搬・堆積等) ・堆積段丘の砂礫層の更新 (2) 地下水系への海水の侵入 (3) 人間活動 ・ダム建設 ・捷水路建設 ・河道広大
3.3 海面変動	(1) 種類 ・構造的(地盤運動) ・氷河性(気候変動) 但し、日本では、更新世中期以前は、地盤運動の効果も大きい。更新世後期以降の地形発達史には、氷河性が大きく影響。	(1) 海水量変化(一定)説 ・地質時代の海水量一定 (2) 海面変化量 ・最大海面低下量100m前後(約 2×10^4 年前) ・平均上昇速度5~8 mm/年(上昇開始から約 6×10^3 年前まで)	(1) 地形学的現象 ・海岸低地における海進・海退(堆積輪廻) ・海岸平野(沖積層)の生成 ・海食 (2) 水理学的現象 ・地下水系への海水の侵入・後退 ・塩淡水境界の変動
3.4 永久凍結層の影響	(1) 周氷河現象 (2) 分布位置 ・北欧を除きほぼ 50°N 以北(北半球) ・高緯度に向かって分散帯、断続帯、連続帯に区分	(1) 厚さ(アラスカ) ・分散帯… 10~30 m ・断続帯… 60~120 m ・連続帯… 250~370 m (2) 季節変化の影響のない地下深部温度はほぼこの地点の年平均気温	(1) 人間活動 ・土木・建築面の障害 ・排水不良による災害 (2) 水理学的現象 ・地下水流動状況の変化 (3) 土壌生成作用

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他 の F E P へ の 直 接 的 な 影 響
3.5 氷河作用 (氷河侵食等)	(1) 周氷河現象 (2) 作用の種類 ・侵食(氷食)…研磨、 破碎 ・運搬 ・堆積(漂礫土) (3) 氷河時代原因説 ・地球外 宇宙塵説 太陽放射熱変動(及 び減少)説 太陽に対する地球運 動の周期的変動説 … ・地球内 極移動説 大陸漂移説 水陸分布説 海流説 海洋説 大気の組成変化説 火山灰説 大気大循環の変動説 海水準(海面)変動説 (造山運動の周期性) … (4) 氷期の気候 ・極高圧部 ・寒冷乾燥化 ・寒帯前線の南下(凝 結が盛ん) ・大気大循環活動の弱 体化	(1) 氷期・間氷期の変動 周期(天文学的説) (2) 気温 氷期と間氷期の気温 の較差は、年平均で 10℃(中緯度の大陸 氷河周辺)	(1) 地形学的現象 ・氷河擦痕の発生 ・氷河地形の生成 ・氷食湖の生成 ・氷食谷の生成 ・氷食棚の生成 ・氷食輪廻(山地氷河 の侵食) ・氷成堆積物(氷堆積) (2) 流水の到来 (3) 海面変動

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
4. 地形学的現象 4.1 地すべり	<p>(1) 発生条件等(降雨が確実な誘因とは限らない)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地すべり粘土など、地質的に起こりやすい構造又は岩質をもった地域 ・地すべり地帯の存在 <p>(2) 種類 地質的条件による分類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・第四紀層地すべり ・第三紀層地すべり ・破碎帯地すべり ・温泉地すべり <p>形態的分類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地すべり性崩壊 ・一次地すべり(間欠的地すべり、継続的地すべり) ・二次地すべり 	(1) 長期的予測は難しい	<p>(1) 地すべり地形の生成</p> <p>(2) 土砂流・土石流の発生</p> <p>(3) A. 4. 6 堆積作用</p>
4.2 表面削剥	<p>(1) 地表の化学的、物理的風化作用</p> <p>(2) その他の作用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・雨、雪等(雨食・雪食・氷食) ・流水(河食) ・風(食) ・波(食) ・溶食(雨水、地下水の溶解作用) <p>(3) 侵食基準面(地表面低下の一定限界)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・河食の場合…海面 ・溶食の場合…地下水面 ・山岳氷河の場合…雪線 ・海食の場合…波食の及ぶ下限 	(1) 侵食速度	<p>(1) 侵食基準面までの地表面低下</p> <p>(2) 地形的現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・侵食谷(河川の流水や氷河等の侵食作用) ・侵食砂丘(海岸砂丘) ・侵食段丘(河岸段丘)
4.3 河川侵食	<p>(1) 種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下方侵食 ・側侵食 <p>(2) 河床の固結度</p> <ul style="list-style-type: none"> 小…洗堀 大…磨食 	(1) 河侵速度	<p>(1) 河食輪廻 侵食基準面までの削剥による準平源化</p> <p>(2) 河岸段丘</p>
4.4 河川の蛇行	<p>(1) 河川の運動</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上流の河道の曲がり ・河道内の砂礫堆による河流の偏向 	<p>(1) 河川流量</p> <p>(2) 河床勾配</p> <p>(3) 流送土砂量</p>	(1) 三日月形の湖沼の生成

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他の F E P への直接的な影響
4.5 海食	(1) 海水の運動 ・波浪 ・潮流 (2) 海面変動 ・長期間に亘る海面のゆるやかな相対的上昇(広い海食面形成)	(1) 海食速度	(1) 海食崖 (2) 海食準平原(海食輪廻) (3) 海食台地 (4) 海食洞 (5) A. 5. 5塩淡水境界の影響
4.6 堆積作用	(1) 影響要因 ・常温常圧 ・風、流水、氷河の作用と重力 ・運搬、篩別、堆積、続成作用 ・気候 ・地形 ・流体 ・化学的、生物的プロセスと形成物 (2) 堆積物 ・岩石の碎屑物 ・生物の遺体 ・火山噴出物 ・隕石 ・氷成堆積物 ... (3) 堆積輪廻	(1) 堆積速度(堆積厚) 大規模な堆積盆地で $\geq 10\text{km}/\sim 10^7\text{年}$	(1) 堆積物(地層)の生成 (2) 堆積岩の生成(堆積物の続成作用による) (3) 堆積盆地(地向斜)の生成
4.7 寒冷気候の影響(ソリフラクション等)	(1) 周氷河現象 ・表層中の水の凍結・融解 岩石の破碎 表層の擾乱 表層物質の移動(流土: 岩塊流、岩石氷河) 排せつ岩層の増加(霜食) ・終局的に起こる平坦化 ・寒冷乾燥気候下の風の作用 (2) 分布(主に周氷河地域) ・高緯度地方の氷河周辺 ・中・低緯度での高山地域の氷河周辺	(1) 周氷河気候域 ・ 0°C を上下する気温変動の頻度(日本の高山: 森林限界以上)	(1) 水理学的現象(水の凍結と日射の影響) ・地下水温 ・地下水-氷間の境界 (2) A. 7. 7生態系の変化(山火事等)参照 ・微生物の発育低下 (3) A. 7. 8気候変動への生態系の追従(砂漠化等)参照

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
4.8 化学的侵食作用及び風化作用	(1) 溶食(石灰岩地方のカルスト輪廻) ・雨水の溶解作用 ・地下水の溶解作用 (2) 風化作用 ・物理的風化(温度変化と水の凍結膨張: 機械的に破砕化) ・化学的風化(岩石の水和、炭酸化、酸化、加水分解、溶解など水との接触反応による分解、洗脱) (3) 風化循環理論	(1) 化学反応速度 $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$ 方解石、カスミ石の溶解度変化 ・CO ₂ 分圧(の増加) ・水温(の低下) (2) 水の浸透速度(雨量・排水) (3) 風化抵抗度 火山ガラス、方解石は最小	(1) 溶食基準面までの地形低下 (2) 石灰華段の形成 (3) カルスト準平原
5. 水理学的現象 5.1 地下水循環	(1) 成因 ・処女水(地殻内部で生成され、温泉や火山の噴気に混じって出てくる): マグマ水 ・化石水(地層形成時に閉じ込められた水: 油田や天然ガス田のかん水) ・循環水(地表水又は大気中の水蒸気と循環過程にある) (2) 賦存形態 ・空隙水(地層の空隙を満たして流動) ・裂か水(岩石の節理、亀裂又は断層破碎帯の間隙を満たして流動) ・空洞水(石灰岩や溶岩の空洞中) (3) 変動要因 ・地質 ・気候 ・地形 ・生態系(植生、人間活動等)	(1) 水収支  <p>P : 降水量 R : 流出量 E : 蒸発量 R_d : 直接流出量 R_g : 地下水流出量 I : 浸透量 添字L : 陸地 ○ : 海洋 (図-4(1)参照)</p> (2) 地下水年齢 (3) 循環の速さ ある時点で水の循環系のある部分に存在する水の量を、循環系その部分を1年間に通過する水の総量で割った値[年単位] ・大気中の水と可川水 ……10 ⁻² ・土壌水…10 ⁻¹ ・深層地下水 ……10 ¹ ~10 ⁴ ・積雪…10 ⁻¹ ・氷河…10 ¹ ~10 ⁴	(1) 地下水流動系(局地/中間/地域流動系) ・流路 ・涵養量 ・浸透量 ・地下水流出量 (2) 母岩の亀裂開口幅変化

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
5.2 不均質系での地下水流動	(1) A. 2.8岩体の不均質性(透水性、鉱物組成)参照。 (2) その他 ・地下水瀑布(不透水性の地層・岩石の介在、難透水性地層の消滅・階段状の低下等) ・地下水堆(水路、かんがい等による浸透、粘土層等の難透水層の地域的存在)	2.8岩体の不均質性(透水性、鉱物組成)参照。	(1) 地下水流動(分布) ・圧力水頭 ・動水勾配 ・地下水流路 ・流速 ・地下水賦存量 ・地下水面 …
5.3 地下水流動状況の変化	(1) 広域流動変化要因 ・地下水循環 ・不均質系での地下水流動 (2) ファーフィールド流動変化要因 ・隕石落下 ・地質 ・気候 ・地形 ・水理 ・人間活動 (3) ニアフィールド流動変化要因 ・熱 ・金属の腐食 ・母岩-地下水と廃棄物・人工材料との相互作用 ・応力場の変化 ・再冠水 ・緩衝材中の水の移動	(1) 地下水流動取り扱い(表1(2)参照)の各体系に基づく解析パラメータ、初期条件、境界条件等。	(1) 地下水流動 A. 5.2不均質系での地下水流動参照。 ・地震、海洋潮汐の発生に伴う地下水面変動
5.4 地下水系への海水の侵入	(1) 循環地下水の化学成分 ・雨水が取り込んだエアロソル ・土壌、岩石からの溶出 ・生物の排せつ物 ・人類の生活生産活動による廃棄物 (2) 地震津波 (3) 海面変動	(1) 2層流理論 (2) 海水汚染度 Cl/HCO_3 (3) 地下水水質 ・電気伝導度 ・透視度 ・水温 ・pH ・無機、有機化学成分 ・バクテリア …	(1) 塩水くさびの形成(A. 5.5塩淡境界の影響) (2) 地下水水質の変化 ・pH ・飲料水、工業用水、かんがい水としての適否

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
5.5 塩淡境界の影響	(1) 海岸帯水層の塩水くさび (2) 海岸線の変化要因 ・海面変動 ・海食	(1) 2層流理論 ・淡水-塩水系における塩分濃度分布	(1) 塩淡境界付近の地下水流動 (2) 地下水水質の変化 ・pH ・飲料水、工業用水、かんがい水としての適否
5.6 被圧帯水層	(1) 透水層内の水頭・水位変化の要因 ・境界変化 ・降雨浸透 30~40m以浅の地下水は、気象・水文条件に敏感、深層では揚水など人為的要因に敏感	(1) 帯水層の拡がり、規模 (2) 被圧地下水流動 ・有効空隙率 ・透水係数 ・貯留係数 ・水の圧縮率 ・土の鉛直圧縮率 ・単位面積・時間当りの流入流出量	(1) 地下水流動 A. 5.2不均質系での地下水流動参照。 (2) 波動伝播(深層水圧変動:人工バリア材の安定性)
5.7 地熱の影響	(1) 地熱の起源 ・地殻中の放射性物質の衰変 ・マントルからの熱の流れ ・火山、温泉活動をもたらすマグマ (2) 地熱地帯 ・蒸気や熱水の噴出 ・粘土化した地熱変質帯(カオリン、モンモリロナイト)	(1) 地下温度(熱収支) ・熱伝導率 ・熱拡散率 ・熱源の発熱率	(1) 地熱開発の動機 (2) 地下水温の上昇 (B. 3.5地熱エネルギー生産参照) (3) 地熱蒸気、地熱流体の地上への噴出(生態系への影響) (4) 熱水作用 ・鉱床生成 ・母岩の変質
6. 物質移動及び地球化学的現象 6.1 移流/分散	(1) 移動媒体 ・地下水 ・ガス ・地表水 (2) 移動媒体の化学的環境 ・pH-Eh (3) 岩体の不均質性(透水性、鉱物組成)	(1) 水移動係数 ⁽⁴⁾ (但し、沈殿を律する取着は含まれない) $K_x = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$ ここで、 m _x : 水中の元素の含有量(mg/l) n _x : 岩石中の元素の含有量(%) a: 水中の鉱物残留量(mg/l) (K _x が大きいほど、高移動性) (2) 流速場の不均質性に基づく確率統計的表現(分散現象) ・分散係数 (レイノルズ数、ペクレ数の関数)	(1) 放射性核種の移行 時間・濃度分布等 ・人工バリア ・天然バリア ・生態圏

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他のF E Pへの直接的な影響
6.2 拡散	(1)分子拡散 ・自由水中の拡散 ・表面拡散(ペントナイトの空隙水中) ・移行媒体の幾何形状	(1)フィックの法則(分子拡散) ・拡散係数(レイノルズ数、ペクレ数の関数) ⁽³⁾ ・空隙率等 (2)表面水の粘性	(1)A.6.1移流/分散参照
6.3 マトリクス拡散	(1)岩体(マトリクス)の不均質性 (2)チャンネル流 (3)後方拡散	(1)岩体マトリクス部の空隙中拡散係数 (2)マトリクス拡散の侵入深さ	(1)A.6.1移流/分散参照
6.4 ガスを媒体とした物質移動	(1)初生ガス ・蒸気 ・温泉水 (2)化学反応発生ガス ・地下水流動と鉱物反応 ・オーバーパックの腐食 (3)地下水の放射線分解 (4)放射性核種の揮発性	(1)化学反応系 ・圧力 ・温度 ・pH-Eh (2)ガス発生量・移動速度 (3)地下水多相流系流動解析	(1)A.6.1移流/分散参照 (2)A.6.5多相流及びガスに駆動された地下水流動
6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動	(1)HLW発熱による地下水の蒸発(ガラス固化体近傍) (2)マグマ溜り近傍の加熱・加圧された地下水の圧力低下	(1)地下水流動取り扱い(表1(2)参照)中、多相流に対する扱い(気相、液相に分けた連立方程式系)	(1)地下水流動A.5.3不均質系での地下水流動参照。 (2)A.6.1移流/分散参照
6.6 吸着(線型/非線型、可逆/不可逆)	(1)物理吸着 ・吸着水(結晶水、層間水) (2)化学吸着 (3)核種の化学形態(価数、水和状態、錯形成の有無)と固相・液相又は気相間の接触境界面の特性 (4)岩体の不均質性	(1)吸脱着の発生条件・速度 (2)吸着量の溶質濃度依存性 ・線形(ヘンリー型) ・非線形	(1)A.6.1移流/分散参照 (2)溶解、沈澱、コロイド、結晶化

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他 の F E P へ の 直 接 的 な 影 響
6.7 溶解、沈殿及び結晶化	<p>(1) 液相中の化学種の活量と固相の溶解度積</p> <ul style="list-style-type: none"> ・pH-Eh ・温度 <p>(2) 収着型バリア</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地表水及び地下水からの微量元素の沈殿 <p>(3) 酸-7糊り型バリア</p> <ul style="list-style-type: none"> ・石灰岩との接触時、炭酸系物質に富む深い層と弱酸性の土壌層との境界 ・河川水による酸性の鉱山水及び沼沢水の希釈 <p>(4) 酸化還元型バリア</p> <ul style="list-style-type: none"> ・酸素に乏しい地下水及び沼沢水が酸素に富む地表水と接触 ・地表水中で鉄及びマンガンの酸化物が多くの微量元素の吸着を伴って沈殿 ・硫化物形の沈殿 ・ウラン、バネウム、モリブデン等の一連のイオン生成金属の沈殿 <p>(5) 硫酸塩、炭酸塩型バリア</p> <p>(6) 蒸発型バリア</p> <p>(7) 力学的バリア</p> <p>(8) ガラス固化体内結晶化</p>	<p>(1) 沈殿物生成モデル</p> <p>(2) ガラス固化体溶解速度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・遷移状態理論の律速式 <p>(3) 放射性核種の溶解度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溶解度制限固相 <p>(4) 反応速度</p>	<p>(1) 地質環境中での岩石の地球化学的变化(岩体の不均質性)</p> <p>(2) 地下水水質</p> <p>(3) ガラス固化体からの核種の溶出率</p> <p>(4) 緩衝材中での核種移行(天然バリアへの移行率)</p>
6.8 コロイドの生成、溶解及び移動	<p>(1) コロイドの供給源(収着担体)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粘土鉱物中の微細に分散した懸濁物 ・緩衝材 ・腐植質の有機コロイド ・Fe, Al, Mn, Siなどの水酸化物(ガラス固化体からの核種の溶出) <p>(2) 岩体の不均質性</p> <p>(3) 外的事象(氷河、断層...)のコロイド濃度変化への影響</p> <p>(4) コロイド生成可能な環境中でのEh-pH勾配の存在</p>	<p>(1) コロイド生成、溶解、移動速度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・粒径分布 ・表面電位 ・地下水水質 	<p>(1) A.6.1 移流/分散参照</p>

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
6.9 錯形成種	(1) 配位子(OH ⁻ , CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , F ⁻ 等)とアクチニド, FPとの難溶性塩形成	(1) A. 6. 7溶解, 沈澱及び結晶化参照	(1) A. 6. 1移流/分散参照 但し, 液相, 固相別の物質移動 (2) ガラス固化体からの核種の溶出率
6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化	(1) 物理的風化 ・温度変化 ・水の凍結膨張 (2) 化学的風化 ・地下水と岩石あるいは亀裂内充填鉱物間の反応と反応生成物の蓄積	(1) 亀裂数, ネットワーク (2) 風化抵抗度 (3) 地下水-岩石間化学反応系	(1) 岩体の不均質性(透水性, 鉱物組成) (2) 岩体中亀裂のチャネリング(流路変更) (3) 放射性核種の吸着特性の変化 (4) A. 6. 1移流/分散参照 (5) C. 1. 1母岩の亀裂開口幅の変化
6.11 土壌や有機物の残骸の蓄積	(1) A. 7. 4土壌生成作用参照 (2) 土壌生成母岩の影響 ・火山活動地域…砒素 ・重晶石上…バリウム ・鉱床及び鉱物露出地域…植物による元素の吸収 (3) 人間活動の吸収の活性化の影響 ・産業廃棄物 ・排ガス ・核実験 ・化学肥料, 農薬 ・工場排水, 合成洗剤 ・大気汚染 (A. 7. 5化学的变化参照)	(1) 土壌, 有機物残骸の蓄積量, 分布 (2) 元素含有量, 分布	(1) 堆積作用 (2) 生態圏における(放射性)核種の移動, 濃縮, 分散
6.12 質量, 同位体, 化学種の希釈	(1) 希釈媒体 ・降水 ・河川水 ・地下水(塩淡水混合希釈) ・ガス (2) 同位体希釈 ・安定同位体の存在	(1) 溶質濃度低下 (2) 溶出・吸着等の物理的・化学的制約条件等	(1) 放射性核種の溶解・移行性能の変化 ・溶出制限 ・吸着制限 (2) 生態圏における(放射性)核種の移動, 濃縮, 分散

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
6.13 化学的勾配(電気化学的効果及び化学的浸透)	(1) 電気化学的効果 ・酸化還元作用 EX. 土壌中の化学変化や微生物作用の大部分 ・拡散電位、膜電位 ・コロイド粒子の帯電(電気泳動) (2) 化学的浸透 ・流体相の圧力と周囲の岩圧が異なるときの地殻内部の割れ目の壁を介した化学平衡(浸透平衡)	(1) 水溶液中での鉱物の安定性 ・Eh-pHダイアグラム (2) 電子授受バランス (3) 化学反応曲線 ・温度-圧力図	(1) 酸化性雰囲気 (2) A. 6.7 溶解、沈澱及び結晶化 (3) A. 6.8 コロイド生成、溶解、移動
6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流	(1) 流路の偏在 ・亀裂表面の幾何学的形状(風化、鉱物化等) ・岩体中の応力場 ・充填鉱物の分布	(1) 亀裂ネットワークモデル	(1) A. 6.1 移流/分散参照 ・地下水流速の増加 ・地下水-岩石あるいは溶質との相互作用減少 ・放射性核種の吸着、マトリクス拡散による遅延効果の低下 ・酸化性雰囲気の醸成
6.15 再濃集	(1) 核種の移行経路上の物理的・化学的条件の激変(沈澱) ・pH, Eh特性変化に追随する核種の低溶解度化 ・放射性壊変による低溶解度核種への変化 ・地下水の蒸発(塩化、石膏化) (2) A. 6.7 溶解、沈澱及び結晶化参照 (3) 動・植物における元素の濃縮	(1) 沈澱物生成モデル	(1) A. 6.1 移流/分散参照
6.16 pHの変動	(1) 空間的変動要因 ・岩体の不均質性(鉱物組成) ・亀裂ネットワーク ・断層 (2) 時間的変動要因 ・地表水の特異変化(酸性雨、肥料等) ・塩水の流入 (3) その他(人為的要因) ・人工涵養	(1) pH変動モデル ・地下水の滞留時間 ・酸化還元反応 ・風化作用	(1) 移動媒体の化学的環境の変動 (2) 溶解、沈澱及び結晶化の条件変動 (3) コロイドの生成、溶解及び移動の条件変動 (4) 化学的勾配

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
6.17 酸化性雰囲気	(1)出現要因 ・断層 ・チャンネル流 ・立坑閉鎖不完全 ・地下掘削行為 ・有機物含有量低下 (隆起・侵食等による地表近傍への近接の結果) ・地下水の放射線分解 ・気候変動(酸性雨・霧・雪) ・その他(人為的要因) <div style="margin-left: 20px;"> } 酸素の供給源 </div>	(1)A. 6. 16pHの変動参照	(1)オーバーパックの腐食速度の変化 (2)放射性核種の溶解度、吸着特性の変化 (3)岩石の風化作用の進展度合の変化 (4)植物の元素吸収量増大化 ・原子価の大きい状態の元素がより活発に移動し、吸収される。 (5)バクテリアの生息条件への影響
7. エコロジー的現象 7.1 植物による吸入	(1)気候要因(日照量、降水量等)の影響 ・元素の吸収、同化作用 ・元素含有量 (2)取込み易い元素の存在形態 ・溶液中の元素 ・土壌のコロイド粒子表面上の吸着状態での存在 (3)pH, Ehの溶解度、吸収量への影響 (4)土壌中における微生物の組成・活動	(1)根の深度(空間)分布 (2)吸収能(pH等依存性) (3)蓄積分布(量) ・根、茎、葉	(1)放射性核種の生態圏での移行 ・食物連鎖による人間直接被曝 ・表面土壌汚染 (2)動・植物(自体)の生息分布
7.2 動物による吸入	(1)食物連鎖 ・各動物の食物摂取、行動パターン等(草食、肉食…) (2)排せつ等	(1)摂取元素の蓄積分布(器官等での)量	(1)A. 7. 1植物による吸入参照
7.3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション	(1)水底生物の生息(条件等) (2)穴掘り ・未固結表層堆積物	(1)水底生物の移動範囲 ・温度 ・pH ・養分 (2)穴、空隙等の規模、分布等	(1)表層近傍での地下水経路の変化(空隙生成等) (2)岩石の不均質性

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
7.4 土壌生成作用	<p>(1) 生成(環境)因子</p> <ul style="list-style-type: none"> ・母岩 ・生物…分解/合成、集積/拡散 ・気候…水分、熱状況の左右 ・地形(地表の起伏)…太陽熱、湿度の再配分、排水、侵食・再堆積、土壌物質の移動 ・人為…土壌肥沃度を左右 <p>(2) 種類(基礎的土壌生成作用)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・初生土壌生成作用(微生物・地衣類・コケ類の働きによる) ・粘土化作用(熱水液の作用による) ・ラテライト化作用(風化作用、地下水からの水酸化鉄の沈澱による) ・腐植蓄積作用 ・泥炭蓄積作用 ・塩類化作用 ・脱塩化作用 ・グライ化(土層の水による飽和化、有機物分解による酸素不足による)と斑紋形成(土壌断面中、地下水面変動に伴う酸化・還元の反復による)作用 ・レシバージュ作用と偽ポドゾル化作用 ・ポドゾル化作用 	<p>(1) 土壌の化学組成</p> <p>(2) 土壌の元素含有量</p> <p>(3) 土壌溶液のpH</p> <p>(4) 岩石の可塑性</p> <p>(5) 土壌の透水性</p>	<p>(1) 岩石表層の変化</p> <p>(2) 岩石の粘土鉱物への交代</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緑泥石化 ・絹雲母化 ・カオリン化 ・パイロフィライト化 ・モンモリロナイト化 <p>(3) Fe, Alの含水酸化物の風化</p> <p>(4) 腐植、草本植物の根系による屑粒状構造の発達、地表の蓄積元素の変化</p> <p>(5) 泥炭土の発達</p> <p>(6) 塩類・脱塩類化</p> <p>(7) グライ化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水田土壌作土 ・下層のち密な粘質土層のための浸透水の停滞 ・地下水面以下のグライ化(低地に発達) ・永久凍結地帯での地下氷層による融氷水の停滞 <p>(8) 斑紋形成</p> <p>(9) ポドゾル・偽ポドゾル化</p>

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他 の F E P へ の 直 接 的 な 影 響
7.5 化学的变化	(1) 土壌生成母岩の影響 ・ 鉱床付近及び鉱物露出地域 ・ 火山活動地域(A. 7. 4 土壌生成作用参照) (2) 人為的な影響(汚染等) ・ 産業廃棄物 ・ 排ガス ・ 核実験 ・ 化学肥料農薬(B. 4. 6 農(酪農を含む)林水産業参照) ・ 工場排水、合成洗剤 ・ 大気汚染(A. 6. 11 土壌や有機物の残骸の蓄積参照) (3) 地下水等の核種移行媒体への人工バリア構成成分の混入	(1) 植物の元素吸収(促進)量 (2) 有害化学物質の土壌中への蓄積量 (3) A. 7. 4 土壌生成作用参照 (4) 化学変化を引き起こすプロセスの反応方程式等	(1) 植物の異常な病的形態の発生・枯死 ・ はげ地の出現 ・ 森林破壊 (2) 表層土壌、地表水の化学的組成の変化 ・ 酸化条件 ・ pH変化 ・ 錯体生成 (3) A. 6. 13 化学的勾配の発生参照
7.6 微生物との相互作用	(1) 微生物の生息(条件等) (2) 岩石の分解とそれに伴う元素の可溶性化合物の生成 (3) 空气中及び水溶液中からの生物起源元素及び混在微量元素の抽出並びに有機体へのそれらの蓄積 (4) 有機物の死骸の蓄積、分解及び鉱化作用	(1) 元素の生物学的移動、濃集、分散特性を表す諸量 (2) 微生物酸化反応 ・ 有機物の炭酸への完全酸化 ・ アンモニア、第一鉄、イオウ化合物の酸化 ・ 石油の酸化	(1) A. 7. 3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション参照 (2) A. 7. 4 土壌生成作用参照 (3) 微生物の繁殖 (4) 地下水の水質変化 (5) 化学的勾配への影響
7.7 生態系の変化(山火事等)	(1) 植生の変化要因 ・ 土壌生成、変化(火山活動、山火事等) ・ A. 7. 4 土壌生成作用、A. 7. 5 化学的变化参照 (2) 水循環系の変化要因 ・ 水収支、エネルギーバランス(図-4(1)(2)参照)	(1) 降雨・浸透量、蒸発散量、河川流出量(A. 3. 1 降雨、気温、土壌の水収支参照) (2) 気温、地温(A. 3. 1 降雨、気温、土壌の熱収支参照) (3) 地下水の水質 ・ 化学成分 ・ pH-Eh (4) 養分等移動量 (5) 化学的風化速度	(1) 植生変化の輪廻もしくは変動 ・ はげ地 → 植生定着 ・ 土壌生成要因(A. 7. 4 参照)の時間的空間的変動 (2) 地下水への供給量変化 (3) 地下水の水質変化 ・ 土中養分の地下への溶脱(化学成分) ・ その他 pH-Eh

F E P	関連要素	定量的概念	他のFEPへの直接的な影響
7.8 気候変動への生態系の追従(砂漠化等)	(1)気候変動(長期的) ・温暖乾燥/温暖化 ・砂漠化 ・寒冷化 ・氷河期の到来 (2)その他A.3気候学的現象参照	(1)A.7.7生態系の変化(山火事等)参照 (2)水分量、養分量の変動 (3)A.3.5氷河作用(氷河侵食等)、並びにA.3.3海面変動、A.4.7寒冷気候の影響参照 (4)食物連鎖プロセスにおける物質移行係数	(1)人間・動物等の移動・地球規模 (2)地下水利用頻度の変化
7.9 動植物の進化	(1)上向進化と下向進化(退化) (2)進化24則 ・放散 ・特殊化(漸増、交代、追増)及び非特殊化 ・体軀増大 ・収れん ・平行 ・単系統、多系統進化 ・移動 ・変異漸減 ・進化限局、無限局 ・系統進化速度不同 ・段階 ・痕跡器官消失 ・相関、非相関進化 ・進化上昇 ・進化不可逆 ・連続、不連続進化 ・指向性(定向)進化 (3)地球規模的環境変化要因 ・自然現象(氷河、隕石等) ・社会現象(科学技術の進展の影響等)	(1)進(退)化速度 ・遺伝速度 ・形態速度 ・分類速度又は生物速度 ・系列速度 ・群速度 (2)食物連鎖プロセスにおける物質移行係数 (3)生物の濃縮係数	(1)動植物(種)の生存、生息分布、期間等の変化 (2)食物連鎖の構成、プロセス、物質移動の変化 (3)被曝によるダメージの変化

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
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) 未検知要因 ・未記録もしくは記録の喪失(あるいは部分的欠落) ・事前サイト・サーベイ不十分 ・情報不完全の必然性	(1) 掘削規模 ・地下深度 ・形状 ・分布 (2) A. 2. 8岩体の不均質性(透水性)、A. 5. 3地下水流動状況の変化参照	(1) A. 5. 2不均質系での地下水流動参照 (2) 地下への降水等水の直接的流入 (3) 地下水化学特性の時間的、空間的変化 (4) 地下への大気の流れ (5) 人間・動物の処分場への侵入
1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化	(1) 閉鎖欠陥 ・閉鎖材選定(材質等)、設計、製造不備 ・閉鎖不完全 (2) 閉鎖材劣化 ・閉鎖材特性 ・自然劣化要因(岩盤クリープ、水の流入等)	(1) 調査用試錐孔の規模 ・地下深度 ・形状 ・分布 (2) A. 2. 8岩体の不均質性(透水性)、A. 5. 3地下水流動状況の変化参照	(1) B. 1. 1未検出の過去の掘削(試錐孔等)参照 (2) 止水性の喪失
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) B. 1. 2調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化参照	(1) B. 1. 2調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化参照	(1) B. 1. 2調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化参照
1.4 応力場の変化(地盤沈下、沈降、空洞の形成)	(1) 地盤沈下 ・海面上昇 ・自然圧密 ・地下掘削 ・地下水圧の低下 ・地震による地殻変動 (2) 沈降 A. 2. 6隆起/沈降参照 (3) 空洞の形成 ・坑道開削	(1) 応力分布(方向、大きさ)解析 ・主応力 ・剪断応力 ・垂直応力 (2) 岩石の応力-歪曲線 ・温度 ・封圧 ・歪速度 ・外圧	(1) 母岩の変形 (2) 亀裂開口幅の増大
1.5 母岩の脱水	(1) 坑道近傍の水理学的現象 ・揚水等による地盤沈下(地層の圧密収縮) ・湧水処理	(1) 土・岩石中の含水量(含水比) (2) 地温・圧力変化 (3) 地下水流動解析 ・不飽和流(坑道掘削後操業期間中) ・被圧地下水の水収支(脱水、絞り出し現象) (4) 岩石の酸化還元反応(空気の供給)、岩石-水の化学反応による水の生成・消費	(1) 地下水経路の生成 ・空洞水 ・地下川 (2) 母岩・地下水の相互作用

F E P	関連要素	定量的概念	他のFEPへの直接的な影響
1.6 人工材料の欠陥 (オーバーパックの早期破損等)	(1) 緩衝材 ・施工不良による密度等の不均一化 ・成型ブロック間の埋め戻しの失敗 ・不純物、残留酸素の持ち込み (2) オーバーパック ・溶接部の密封不完全 ・残留応力 ・鋼材の品質管理の不備 (3) 地下水水質 ・酸化性地下水	(1) 品質管理 ・統計解析 ・経年劣化評価 (2) 緩衝材再冠水モデル ・締め固め等密度分布変化 (3) ニアフィールド地下水化学特性分析 ・緩衝在中残留酸素 (4) オーバーパックの腐食量 (5) 緩衝材の膨潤圧	(1) 緩衝材の不均一な膨潤 (2) 地下水流入経路の形成 (3) オーバーパック応力腐食割れ (4) A.6.1 移流/分散参照
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	(1) 周囲からの圧縮応力の作用 ・操業時の衝撃 ・埋め戻し時の衝撃 ・地震/断層運動 (2) 空隙の生成 ・乾燥による体積減少	(1) ニアフィールドの再冠水モデル ・変形を考慮した多孔質媒体モデル (A.5.3地下水流動状況の変化参照)	(1) 再冠水時の地下水流路の生成
2.2 廃棄物の不均質性(物理的あるいは化学的)	(1) 処分場全体で見た場合の廃棄体間の特性の不均質性 ・燃焼度、比出力、濃縮度等の使用済燃料特性 ・廃棄物含有量、ガラス組成等の固化時の特性、形状、寸法 (2) 個々の廃棄体内の不均質性 ・ガラス固化体製造時とその後の結晶化等空間分布における特異点の発生	(1) 燃焼計算モデル (2) 品質管理 ・統計解析 (3) ガラス固化体からの核種溶出モデル	(1) ガラス固化体からの核種の溶出率の不均一化

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
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	(1) 廃棄物容量のオーバー (2) 処分場周辺での大規模災害の発生 ・大地震 ・火山爆発 (3) 処分場の上方(地上)での放射能異常の検知 (4) 処分場の改良 (5) 新たな処理処分技術の(部分的)適用 ・消滅処理 ・他の処分方式	(1) 掘削規模 ・地下深度(処分場深度) ・形状 ・分布 (2) A. 5. 3 地下水流動状況の変化参照	(1) 掘削(汚染)土壌の地上への搬出 (2) 掘削部の埋め戻しによる岩体の不均質性(透水性、鉱物組成)の発生 (3) 地下水あるいは地表水流入経路の形成(地下水水理への影響) (4) 地下水中之への異物混入 (5) 人工バリア材の損傷(力学的影響)
3.2 テロ行為あるいは戦争	(1) サイト住民等の原子力反対運動やテロ行為のターゲットあるいは戦争での攻撃目標化 (2) 放射性核種を含む兵器製造	(1) 掘削規模 ・地下深度 ・形状 ・分布 (2) 人工地震規模 ・核攻撃による破壊エネルギー ・核爆発で生成する穴の深度	(1) 掘削(汚染)土壌の地上への搬出 (2) 核攻撃による地形変化(穴の生成など) (3) 人工地震 (4) 力学的影響 ・母岩の崩壊、周囲岩盤のひび割れ亀裂等の発生 ・人工バリア材の損傷
3.3 試錐	(1) 地質構造調査 (2) 鉱物資源調査、探鉱	(1) 試錐孔(広域調査)の規模 ・地下深度 ・形状 ・分布	(1) 地震探査用振動源(火薬類、ガス等爆発物)の強度制御の失敗による穴の発生 (2) (掘削後埋め戻さない場合)人間・動物の処分場(近傍)への侵入 (3) 掘削埋め戻し段階 B. 3. 1 廃棄物あるいは資材回収参照
3.4 探鉱	(1) 種類 ・試錐探鉱 ・坑道探鉱 ・井戸掘探鉱 ・溝掘探鉱 (2) 鉱床開発のための精密調査	(1) 試錐孔(精密調査)の規模 ・地下深度 ・形状 ・分布	(1) B. 3. 3 試錐参照 (2) 資源採取

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他の F E P への直接的な影響
3.5 地熱エネルギー生産	(1) 利用技術 ・地熱発電 ・高温岩体発電 ・温泉等 (2) 地熱探査、開発用試験 (3) 高温岩体への注水、人工的貯留層の造成	(1) 掘削規模 ・地下深度 ・形状 ・分布 (2) 高温岩体への注水量/人工的貯留層の規模	(1) 探査、試験段階 B. 3. 3 試験参照 (2) 発生蒸気の流通経路の生成(A. 6. 4 ガスを媒体として物質移動参照) (3) 地熱、温泉利用のための都市化・観光地化
3.6 資源採取	(1) 対象資源(生物以外の地下賦存有用資源) ・石油 ・ガス ・石炭 ・ウラン ・鉱物資源 ・水資源 ・岩塩 ・地熱 など	(1) 掘削規模 ・地下深度 ・形状 ・分布 ・定常性	(1) 探査、試験段階 B. 3. 3 試験参照 (2) 土壌生成母岩の変化(A. 7. 5 化学的变化参照)
3.7 トンネル工事・利用	(1) 鉄路 ・地下鉄、地下歩道 (2) 水路 ・農業用水路、河川導水路 ・環境防災用地下河川トンネル ・分水路、放水路	(1) 掘削規模 ・地下深度(≤100m) ・形状 ・分布	(1) 探査、試験段階 B. 3. 3 試験参照 (2) 処分場近傍の水路生成による地下水水理への影響
3.8 地下構造物建設(居住、他の廃棄物の処分)	(1) 都市・産業、物流・輸送、エネルギーの各分野、各種別毎に、 ・地下利用ニーズ ・サイト選定(条件) ・立地環境(条件) ・利用技術 ・規制法規が異なる。	(1) 掘削規模 ・地下深度 ・形状 } 線的/面的/水 ・分布 } 平方向/垂直 } 方向/多層・多面的 (2) 利用形態 ・有人/無人	(1) 探査、試験段階 B. 3. 3 試験参照 (2) 水系関連施設(地下河川、トンネル河川施設等、地下ダム、調整池・貯留池、分水路・放水路、熱水地下貯蔵、地下式水力発電所) 建設・運用による地下水系水理への影響
3.9 考古学的調査	(1) 遺物・遺跡の発掘調査	(1) 掘削規模 ・地下深度 ・形状 ・分布	(1) B. 3. 3 試験参照

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他 の F E P へ の 直 接 的 な 影 響
3.10 液体廃棄物等の注入	(1) 人工的地下水涵養 ・地盤沈下の対策 (2) 液体状化学廃棄物の処分 (3) pH調整用注水 (4) 高温岩体への注水 (B. 3. 5地熱エネルギー生産参照)	(1) 掘削して注入する場合の掘削規模 ・地下深度 ・形状 ・分布 (2) 注入量	(1) 掘削の影響 B. 3. 3試錐参照 (2) 地下水水質の変化 ・A. 6. 16pHの変動 (3) (表層) 土壌等の汚染・植生への影響(A. 7. 5化学的变化参照)
3.11 地下水のくみ上げ	(1) 用途 ・農業用 ・工業用 ・水道用(上下水道) ・雑用(雑、消雪等) ・観測用(地下水位・水質、地盤沈下など) (2) ダム利用との競合 (コスト的には有利、地盤沈下規制等)	(1) 井戸掘削規模 ・地下深度 ・形状 ・分布 (2) 産出量 ・地質、水理条件 ・味(成分等) (3) 井戸理論 ・揚水量の推定 ・水位低下量の予知 ・地盤、岩盤の水理定数(透水係数、貯留係数など)の決定 (4) モデル ・定常流/非定常流 ・単井(完全貫入、部分貫入)/群井 ・帯水層(水平単一層、累層と傾斜層) ・水理条件(被圧・不被圧流、降雨・漏水浸透の有無) ・境界条件(井内又は近傍と水平・傾斜・有限あるいは無限、水源(河川・湖)の近傍) ・揚水、注水方法(揚水量(注水量)一定、井内水位一定)	(1) 井戸掘削 B. 3. 3試錐参照 (2) 地下水系水理への影響

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
4. 閉鎖後の地表の活動 4.1 記録の喪失	(1) 発生要因 ・保管中や更新時の伝承もれ、記載事項もれ ・意図的又は偶発的(破壊)行為(核戦争など)による劣化・消失 ・媒体の自然劣化(氷河期到来も含み得る) ・後世文化、社会情勢等の変化(言語体系の変化、移民族の流入など)	(1) 発生頻度 (2) 記録の喪失の程度(質、量) ・完全喪失 ・部分的喪失	(1) 地下掘削行為又は地表での人間活動の非規制要因となり得る(但し、意図的なものは除く)
4.2 ダム、貯水池の建設、放水	(1) 用途 ・一般水力発電 ・上・下水道 ・治水工事、工水 ・農業用水 (2) 河川や谷のせき止め (3) 建設施設 ・貯水池 ・導水路 ・放水路 ・水圧管路 ・ドレントンネル (4) 地下水くみ上げとの競合性	(1) ダム、貯水池の規模 (2) 放水量、放水パターン	(1) 建設に伴う生態圏の変化 ・人工的な地形変化 ・植生変化 (2) 表層地下水系の水理条件への影響 ・地下水面変動 ・地下水流速 (A. 5. 3地下水流動状況の変化参照) (3) 大地震等によるダム決壊の影響 ・河川の洪水、氾濫(A. 3. 2洪水参照) ・地下水水理への影響 ・地表の侵食(地形変化) ・地表水文学的影響 ・生態圏での核種移行経路の変化
4.3 河川の引水	(1) 目的 ・運河の建設による水運利用 ・治水工事(堤防、護岸等による洪水防御) ・産業用水の確保(農業用水、河川近隣の工場用水など) ・灌漑、干拓(海、湖沼、河川の埋め立てなど)	(1) 水路網、規模(水量等)	(1) 建設に伴う生態圏の変化 ・核種移行経路の変化 (2) 表層地下水系の水理条件の変化 (A. 5. 3地下水流動状況の変化参照)

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
4.4 灌漑	(1)水源 ・河川 ・貯水池 ・地下水 (2)農業用(田畑への注水)	(1)B. 4. 3河川の引水参照	(1)B. 4. 3河川の引水参照
4.5 土壌改良及び地下水水質制御	(1)土壌改良(A. 6. 11土壌や有機物の残骸の蓄積参照) ・土地利用 ・汚染対策 (2)人工地下水涵養 ・地表涵養法(溜池、溝渠) ・井戸涵養法(B. 3. 10液体廃棄物等の注入参照)	(1)土壌成分(土壌生成母岩、動植物の活動による再配分) ・空間的分布 ・時間的变化(自然変化、人為的变化) (2)涵養対象地下水、帯水層と注入水の水質 ・地下水成分濃度 ・pH	(1)土壌組成の時間的・空間的分布の変化 (2)地下水水質の変化 ・成分 ・pH
4.6 農(酪農を含む)林水産業	(1)適地条件(自然) ・気候、地形 ・土壌 ・海流 (2)社会的要因 ・食生活変化 ・市場分布 ・生産形態変化	(1)生産種目別生産量 (2)食物連鎖プロセスにおける物質移行係数	(1)化学肥料等の土壌から河川、地下への浸透による水系の化学的变化(A. 7. 5化学的变化参照) (2)農業用水のひき込みによる地下水への水理学的影響(B. 4. 3河川の引水、B. 4. 4灌漑参照) (3)食物連鎖を通じた生態圏での核種移行経路への影響 ・内部被曝 ・外部被曝 (4)森林伐採等の影響 ・植生変化 ・山林の土壌水吸引の減少 ・(地すべり等)地盤の軟弱化

F E P	関連要素	定量的概念	他のFEPへの直接的な影響
4.7 人口変化及び都市開発	<p>(1)人口構成(静態)要因</p> <ul style="list-style-type: none"> ・男女、年齢構成 ・社会構成 ・労働力構成 ・世帯構成 <p>(2)都市化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・歴史的過程(産業革命、独占主義等)と地域の様相の関連 ・土地開発(地域振興政策等) 	<p>(1)処分場近隣の居住人口動態・地域分布(集中、分散)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・生死(自然動態) ・流出入(社会動態) <p>(2)人口密度</p> <p>(3)処分場閉鎖後の人間活動発生規模、頻度</p>	<p>(1)処分場閉鎖後の地下活動の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地下アクセス行為(特に都市・産業関連、B.3.7トン補工事・利用、B.3.8地下構造物建設参照、B.4.2が、貯水池の建設、放水、B.4.5土壌改良及び地下水水質制御参照) <p>(2)土地利用形態の変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・農地から工業用地への変更 ・生態圏での核種移行経路の変化
4.8 人間活動による気候変化(温室効果等)	<p>(1)人間活動に関連する気候因子</p> <ul style="list-style-type: none"> ・市街地(都市化) ・煤煙(工場、自動車等排気ガス) ・裸地 ・林地 <p>(2)気候変化の種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・温暖化(温室効果)/寒冷化/氷期 ・砂漠化 ・酸性雨 	<p>(1)CO₂、大気汚染物質(NO_x、SO_x、フロン等)濃度の変化</p> <p>(2)A.3.1降雨、気温、土壌の水収支参照</p>	<p>(1)A.4.7寒冷気候の影響(リフレクション等)</p> <p>(2)A.6.17酸化性雰囲気参照</p> <p>(3)A.7.8気候変動への生態系の追従(砂漠化等)</p> <p>(4)海面上昇</p>
4.9 採石・泥炭採取	<p>(1)採石(建築、土木等の用途)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・花崗岩、閃緑岩、斑れい岩、かん岩、斑岩、ヒ岩、輝緑岩、粗面岩 ・安山岩、玄武岩、礫岩 ・砂岩、頁岩、粘板岩、凝灰岩、片麻岩、ジャ紋岩、結晶片岩、バントナト、酸性白土、珪藻土、陶石、雲母、ヒ石(採石法) <p>・広義には、石灰岩、粘土などの露天採掘場も含み得る。</p> <p>(2)隆起もしくは海面低下や断層運動による地下の岩石の地表への部分的露出</p> <p>(3)泥炭(堆積、生化学的分解)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・沼沢地、湖など湿潤地 ・微生物の発育の少ない寒冷地 	<p>(1)隆起、海面低下の速度</p> <p>(2)断層運動の規模・頻度</p> <p>(3)気候条件(微生物生育条件)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・温度、湿度 ・pH 	<p>(1)石切場、泥炭採掘場開発の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地形変化 ・地上への切り出し、採取物の堆積 ・植生変化

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他の F E P への直接的な影響
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) 崩壊熱の発生 (2) 地温勾配 ・火山地帯 ・熱水循環 (3) 変動要因 ・熱水(又は冷水)注入などの人為的要因 (4) 母岩の不均質性(膨張係数等の不均質性) ・結晶岩質	(1) 母岩中亀裂開口幅もしくは新亀裂形成(亀裂性媒体モデル) (2) 熱収支 ・人工バリア材、母岩の熱容量、熱伝導率、熱拡散率等 (3) 熱応力 (4) 母岩の変形(圧縮、膨張等解析モデル)	(1) 地下水系の水理学的変化 ・地下水流路の変化 ・地下水流速の変化
1.2 熱による水理条件の変化(対流、水圧・粘性変化)	(1) C. 1.1 母岩の亀裂開口幅変化参照	(1) 地下水密度、粘性の温度勾配依存性(透水係数変化) (2) A. 5.3 地下水流動状況の変化参照 (3) 熱-水連成モデル	(1) 対流による地下水流動、熱移動 (2) 地下水の蒸気・凝集による気液二相流のサイクル形成 (3) 地下水系の水理学的変化
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)	(1) C. 1.1 母岩の亀裂開口幅変化参照 (2) 熱による反応の進行・制限	(1) 平衡論/速度論モデル	(1) 母岩の風化 (2) ペントナイトの変質 (3) 各種溶解反応 ・既存鉱物の溶解 ・新たな鉱物の沈澱 (4) 地下水の化学特性変化 (5) A. 6.1 移流/分散参照
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)	(1) 様式 ・局部腐食(孔食、隙間腐食、応力腐食割れ、ガルバニック腐食) ・均一腐食 (2) 金属容器(オーバーバック等)の地下水中的腐食 ・酸化剤(溶存酸素、水、硫酸塩、 H_2O_2) ・その他(塩素イオン、フッ素イオン等) ・水の放射線分解で生成する酸化性化学種 ・ H_2 ガスの発生 ・応力腐食割れ(引張応力の付加) (3) 圧縮ベントナイト中の腐食の局在化	(1) 腐食反応系 ・腐食深さ(平均、最大) ・腐食生成物発生量 (2) pH (3) バクテリアの生息条件 (4) 酸化剤の量 (5) 熱-腐食連成モデル	(1) 地下水とガラス固化体との接触時期の早期化 (2) 腐食生成ガス(H_2 等)の影響 ・圧縮ベントナイト中の蓄積・加圧 ・圧縮ベントナイト中の通気経路生成 (3) オーバーバックの応力腐食割れ

F E P	関連要素	定量的概念	他のFEPへの直接的な影響
2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用	(1)ベントナイト中の 随伴鉱物 ・方解石 ・黄鉄鉱 ・有機物等 (2)残留酸素、CO ₂ の地下水化学特性への影響	(1)pH-Eh、主要イオンに関するベントナイト-水反応系 (2)化学的緩衝性維持時間	(1)地下水の化学的特性変化 ・ベントナイト近傍 ・オーバーバック近傍 ・ガラス固化体近傍 (2)ベントナイト成分の変化 (3)ベントナイトの膨潤、可塑性による母岩中亀裂内の充填 ・地下水水理(透水性等)への影響 (4)浸食されたベントナイトの地下水中コロイド化 (5)A. 6. 4ガスを媒体とした物質移動
2.3 有機物による効果	(1)深部地下水に含まれる有機物 ・フミン酸 ・フルボン酸	(1)地下水含有成分 (2)放射性核種の溶解度	(1)錯化合物の生成 ・吸着等、核種移行能力への影響(A. 6. 9錯形成種参照)
2.4 微生物の効果	(1)嫌気性バクテリア ・硫酸塩還元細菌 ・メタン細菌 ・脱窒細菌 など (2)地下水と放射性核種との反応の触媒作用 (3)放射性核種の吸着 (4)オーバーバックの腐食因子	(1)バクテリアの生息条件(養分、pH、酸素量等)とそれに基づく分布 (2)pHの変動 (3)A. 6. 6吸着(線型/非線型、可逆/不可逆)参照 (4)A. 6. 8コロイドの生成、溶解及び移動参照 (5)C. 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)参照	(1)地下水水質への影響(A. 6. 16pHの変動参照) (2)コロイドの生成 (3)オーバーバック、ベントナイト中の腐食
3. 力学的現象 3.1 廃棄体の移動	(1)オーバーバックの沈下 ・緩衝材の圧密、粘弾塑性変形 ・地震/断層運動、人間侵入	(1)緩衝材の圧密/粘弾塑性モデル ・オーバーバック沈下量(速度)	(1)岩盤と廃棄物との距離の接近 ・緩衝材機能の効力低下

F E P	関連要素	定量的概念	他のFEPへの直接的な影響
3.2 応力場の変化	<ul style="list-style-type: none"> (1) 緩衝材の膨潤圧発生 ・含水 ・オーバーパック腐食生成物の発生(密度低下により) ・岩盤の長期クリープ ・緩衝材の温度変化(廃棄物の発熱等、C. 1.1母岩の亀裂開口幅変化参照) ・その他(地震/断層運動、人間侵入) 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 地下深部における静水圧、静岩圧分布・膨潤圧分布(C. 3.1廃棄体の移動参照) (2) 熱-応力連成モデル (3) C. 1.1母岩の亀裂開口幅変化参照 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 母岩の変形 ・クリープ(可塑性に富む粘土層) ・亀裂開口幅変化(結晶質岩等、固い岩、C. 1.1母岩の亀裂開口幅変化参照)
3.3 母岩の変形	<ul style="list-style-type: none"> (1) プレート運動(A. 2.1プレート運動/テクトニクス変化参照) (2) 応力場の変化 ・人間活動(B. 1.4応力場の変化(地盤沈下、沈降、空洞の形成)参照) ・C. 3.2応力場の変化参照 	<ul style="list-style-type: none"> (1) A. 5.3地下水流動状況の変化参照(特に、母岩の変形を扱うパラメータ) (2) 亀裂ネットワーク (3) 応力-歪解析モデル 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 地下水流動への影響(A. 5.2不均質系での地下水流動参照) (2) 母岩の亀裂開口幅変化 (3) 人工バリアの幾何学的変形 (4) 処分坑道の破断 (5) 閉鎖材劣化
3.4 処分坑道の破断	<ul style="list-style-type: none"> (1) 地震/断層運動、人間侵入等による急激な応力変化、変位 (2) 母岩の緩慢な変形 (3) 坑内爆発 ・ガス爆発 ・臨界 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 地震/断層運動による衝撃の大きさ(累積)(A. 2.7地震/断層運動参照) (2) 応力-歪解析モデル 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 人工バリア、廃棄体の損傷・破壊 ・(廃棄体内)核種の周囲への飛散 (2) 実効的な緩衝材厚の減少 (3) 地下水流路の新形成
3.5 ガスによる効果	<ul style="list-style-type: none"> (1) A. 6.4ガスを媒体とした物質移動参照 	<ul style="list-style-type: none"> (1) A. 6.4ガスを媒体とした物質移動参照 (2) ガスの蓄積量 	<ul style="list-style-type: none"> (1) ガスを媒体とした物質移動(A. 6.1移流/分散、A. 6.4ガスを媒体とした物質移動、A. 6.5多相流及びガスに駆動された地下水流動参照) (2) C. 3.2応力場の変化(オーバーパック腐食生成物の発生による密度低下) (3) ガス爆発 ・処分坑道の破断 ・人工バリア損傷

F E P	関連要素	定量的概念	他のF E Pへの直接的な影響
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)	(1)水の放射線分解 ・水素の発生 ・過酸化水素、酵素の発生	(1)地下水の放射線分解に寄与する α 崩壊数 (2)水素発生量 ・放射線の種類 ・線量率 ・pH (3)オーバーパックの腐食生成物(磁鉄鉱)の酸化種(過酸化水素、酸素)緩衝能力	(1)C. 3.5ガスによる効果参照 (2)pH低下(放射性核種の溶解度増)
4.2 照射損傷	(1)放射線発生 ・ α 崩壊 ・ γ 線 ・中性子線	(1)放射能強度、粒子エネルギー等分布モデル	(1)ガラス固化体への影響(α 崩壊) ・密度変化 ・溶解速度変化 (2)緩衝材への影響 ・構造変質(γ 線) ・透水性(γ 線) ・陽イオン交換量(γ 線) ・吸着性能(中性子線) ・モリブデンのミミト化 ・アモルファスとしての吸着性能
4.3 臨界	(1)放射性核種の濃集 ・自発核分裂 ・テロ、戦争行為(核攻撃等)	(1)臨界計算モデル	(1)母岩の崩壊 (2)人工バリアの破壊 (3)廃棄体中の核種並びに核分裂生成物の飛散
4.4 放射壊変(崩壊連鎖における)	(1)核種崩壊系列	(1)崩壊連鎖モデル (2)被曝リスク関連パラメータ	(1)娘核種の特性 ・化学的特性(溶解度等) ・移行特性(分配係数等) ・人体への影響

F E P	関 連 要 素	定 量 的 概 念	他の F E P への直接的な影響
5. 水理学的現象 5.1 再冠水	(1) 操業中の排水による母岩中不飽和浸透流の発生	(1) ニアフィールド再冠水モデル ・緩衝材の乾燥密度、初期含水比、飽和含水比、水分散係数 ・再冠水時間 (2) 熱-水-応力連成モデル ・緩衝材施工技術の考慮 ・気相部の考慮	(1) 地下水による緩衝材の飽和化 (2) 地球化学プロセスへの影響 (3) 緩衝材の膨潤圧発生(C. 3. 2 応力場の変化)
5.2 緩衝材中の水の移動	(1) 冠水過程 C. 5. 1 再冠水参照 ・廃棄物の発熱による温度勾配(C. 1. 1 母岩の亀裂開口幅変化参照) (2) 人工材料の欠陥 (3) 人工バリア損傷	(1) 冠水過程 C. 5. 1 再冠水参照 (2) A. 5. 3 地下水流動状況の変化参照 ・低透水性(分子拡散支配)	(1) オーバーパックと地下水の接触 (2) 地下水水質の変化

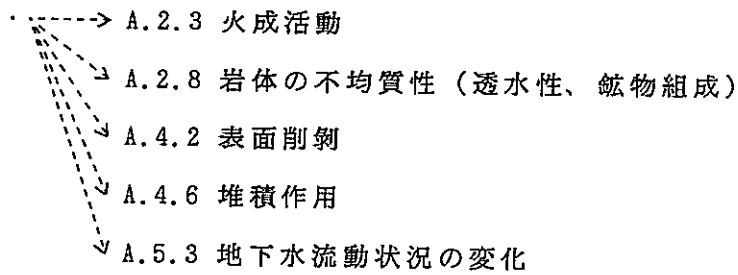
2.2 地下水シナリオ（基本ケース）とF E Pの関連性

前節での整理結果（以下、F E Pメモコメントと呼ぶ）をもとに、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F E Pとまだ取り扱われていないF E Pとを概略的に検討した。

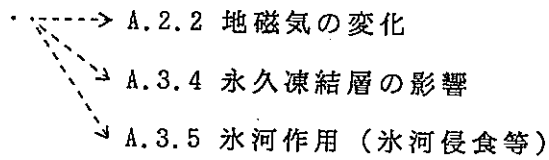
検討方法としては、1章で整理された地下水シナリオ（基本ケース）各々に対して何らかの関連性を有するF E P連鎖を、前節の整理表をもとに作成し、F E P並びにF E P連鎖毎に、既に取り扱われているものには実線で、まだ取り扱われていないものには点線でそれぞれ表記した。その結果を以下に示す。

注) なお、F E Pリストの名称以外の言葉で記述したり、あるいは、同一名称でも、具体的な内容にやや異なりが生じているものについては、*マークを付記した。

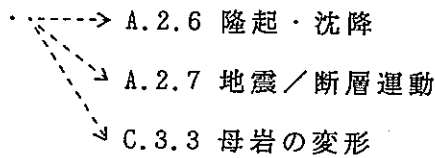
A.1.1 隕石の衝突



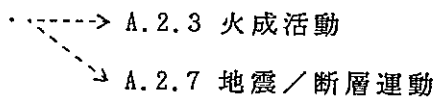
A.1.2 太陽輻射



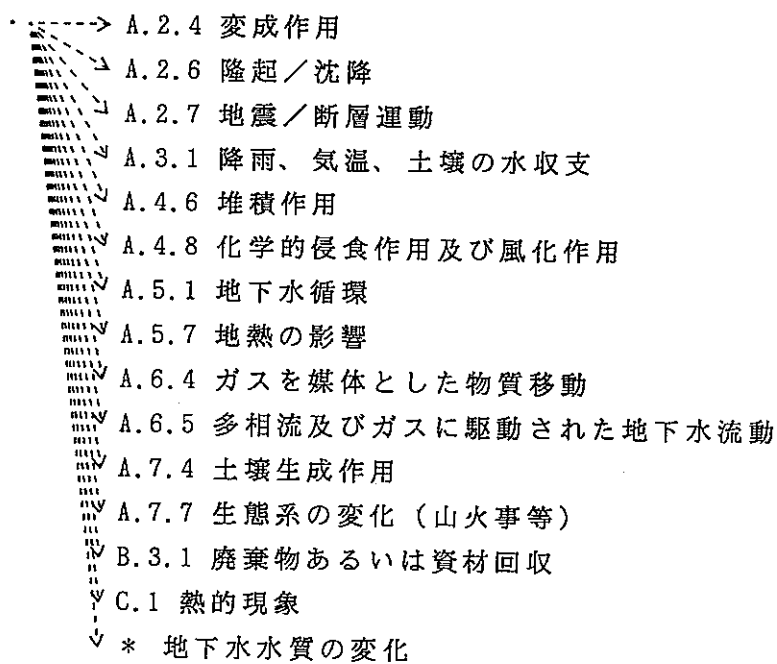
A.2.1 プレート運動/テクトニクス的变化



A.2.2 地磁気の変化



A.2.3 火成活動



A.2.4 変成作用

·-----> A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

A.2.5 続成作用

·-----> A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

A.2.6 隆起／沈降

·-----> A.4.5 海食

↓ A.5.3 地下水流動状況の変化

↓ A.5.4 地下水系への海水の浸入

↓ B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）

↓ B.3.7 トンネル工事利用

↓ B.4.9 採石・泥炭の採取

↓ C.3.1 廃棄体の移動

↓ * 地形の変形

A.2.7 地震／断層運動

·-----> A.2.2 地磁気の変化

↓ A.2.6 隆起／沈降

↓ A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

↓ A.3.2 洪水（津波）*

↓ A.4.1 地すべり（山くずれ等）*

↓ A.5.3 地下水流動状況の変化

↓ B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）

↓ B.3.1 廃棄物あるいは資材回収

↓ C.3.1 廃棄物の移動

↓ C.3.2 応力場の変化

↓ C.3.3 母岩の変形

↓ C.3.4 処分坑道の破断

↓ * 地形の変形

↓ * 通気連絡口の形成（A.6.17 酸化性雰囲気）

↓ * 人工バリア材の損傷・破壊

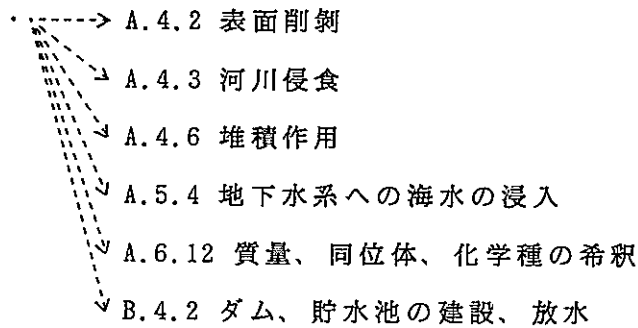
A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

- A.5.2 不均質系での地下水流動
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.6.1 移流／分散
- A.6.3 マトリクス拡散
- A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A.6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流
- A.6.16 pHの変動
- C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
- C.3.2 応力場の変化
- * 岩体の熱伝導特性の分布（C.1 熱的現象）

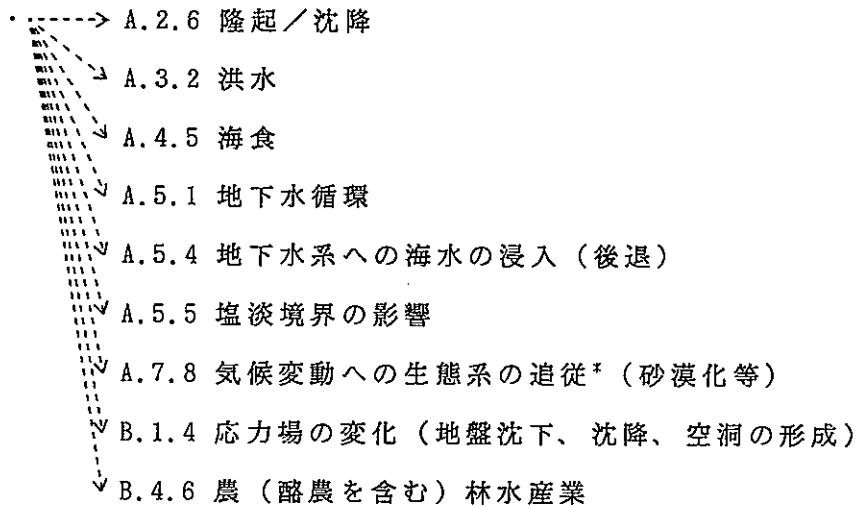
A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

- A.3.2 洪水
- A.3.3 海面変動
- A.4.1 地すべり
- A.4.2 表面削剝
- A.4.6 堆積作用
- A.4.8 化学的侵食作用及び風化作用
- A.5.1 地下水循環
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の浸入
- A.5.6 被圧帯水層
- A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
- A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化
- A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈
- A.7.1 植物による吸入
- A.7.3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション
- A.7.4 土壌生成作用
- A.7.7 生態系の変化（山火事等）
- A.7.8 気候変動への生態系の追従（砂漠化等）
- C.1 熱的現象
- * 地下水水質の変化（A.6.16 pHの変動、A.6.17 酸化性雰囲気）

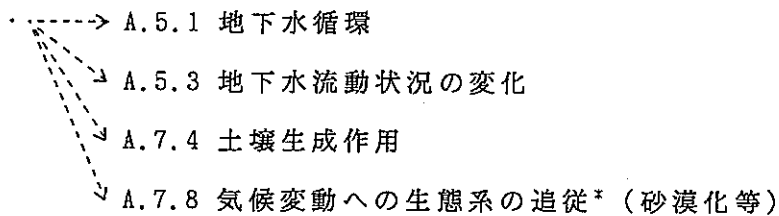
A.3.2 洪水



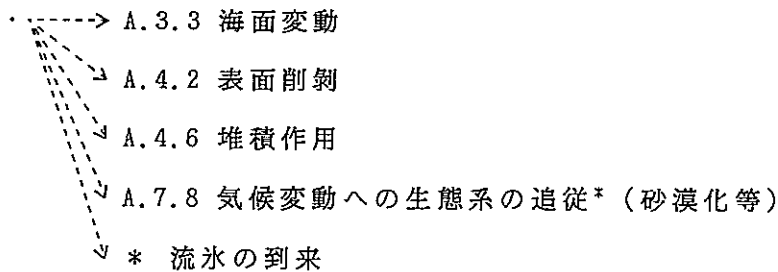
A.3.3 海面変動



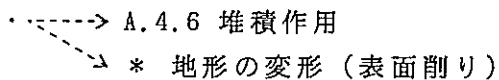
A.3.4 永久凍結層の影響



A.3.5 氷河作用（氷河侵食等）



A.4.1 地すべり



A.4.2 表面削剝

- > * (侵食基準面までの) 地表面低下 (A.6.17 酸化性雰囲気)
- > * 地形の変形 (A.7.4 土壌生成作用)

A.4.3 河川侵食

- > * 地形の変形 (A.7.4 土壌生成作用)

A.4.4 河川の蛇行

- > A.5.1 地下水循環
- > * 湖沼の生成

A.4.5 海食

- > A.5.5 塩淡境界の影響
- > * 地形の変形

A.4.6 堆積作用

- > A.2.5 続成作用
- > A.7.4 土壌生成作用
- > * 地形の変形

A.4.7 寒冷気候の影響 (ソリフラクション等)

- > A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支
- > A.5.1 地下水循環
- > A.5.5 塩淡 (特に氷と地下水) 境界の影響
- > A.7.4 土壌生成作用
- > A.7.7 生態系の変化 (微生物の発育等)
- > A.7.8 気候変動への生態系の追従* (砂漠化等)
- > C.1 熱的現象

A.4.8 化学的侵食作用及び風化作用

- > * (溶食基準面までの) 地形低下
- > * 地形の変形

A.5.1 地下水循環

- > A.5.3 地下水流動状況の変化
- > C.5.1 再冠水
- > * 地下水水質の変化

A.5.2 不均質系での地下水流動

- > A.5.3 地下水流動状況の変化
- > * 地下水水質の変化

A.5.3 地下水流動状況の変化

- > 水理学的モデル
- > A.6.1 移流/分散
- > C.5.1 再冠水
- > * 地下水水質の変化

A.5.4 地下水系への海水の侵入

- > A.5.5 塩淡境界の影響
- > * 地下水水質の変化 (A.6.16 pHの変動)

A.5.5 塩淡境界の影響

- > A.5.3 地下水流動状況の変化
- > * 地下水水質の変化

A.5.6 被圧帯水層

- > A.5.3 地下水流動状況の変化

A.5.7 地熱の影響

- > A.5.1 地下水循環
- > A.5.3 地下水流動状況の変化
- > A.6.4 ガスを媒体とした物質移動
- > A.6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動
- > A.7.4 土壌生成作用
- > A.7.7 生態系の変化 (環境破壊等) *
- > B.3.5 地熱エネルギー生産
- > C.1 熱的現象

----- * 人工バリア損傷

- > A.6.1 移流/分散

-----> 核種移行モデル

A.6.2 拡散

-----> 核種移行モデル

A.6.3 マトリクス拡散

・ → 核種移行モデル

A.6.4 ガスを媒体とした物質移動

・ - - - - - → A.6.1 移流／分散
・ - - - - - → A.6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動
・ - - - - - → A.6.15 再濃集

A.6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動

・ - - - - - → A.5.3 地下水流動状況の変化

A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）

・ → 核種移行モデル
・ - - - - - → A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
・ - - - - - → A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動
・ - - - - - → A.6.9 錯形成種
・ - - - - - → C.2.4 微生物の効果
・ - - - - - → * 地下水水質の変化

A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化

・ → 核種移行モデル
・ - - - - - → A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動
・ - - - - - → A.6.15 再濃集
・ - - - - - → * 地下水水質の変化

A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

・ - - - - - → A.6.1 移流／分散
・ - - - - - → A.6.2 拡散
・ - - - - - → A.6.3 マトリクス拡散
・ - - - - - → A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
・ - - - - - → A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
・ - - - - - → A.6.9 錯形成種
・ - - - - - → A.6.13 化学的勾配（電気化学的効果及び化学的浸透）
・ - - - - - → A.7.1 植物による吸入
・ - - - - - → * 地下水水質の変化

A.6.9 錯形成種

- A.6.2 拡散
- A.6.3 マトリクス拡散
- A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
- A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化

- A.2.8 岩石の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.6.1 移流／分散
- A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A.6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流
- C.1.1 母岩の亀裂開口幅の変化*
- * 地下水水質の変化

A.6.11 土壌や有機物の残骸の蓄積

- A.4.6 堆積作用
- A.6.1 移流／分散
- A.6.15 再濃集
- A.7.4 土壌生成作用
- A.7.6 微生物との相互作用
- C.2.3 有機物による効果
- * 地下水水質の変化
- * 生態圏における核種の移動、濃縮、分散

A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈

- A.6.2 拡散
- A.6.3 マトリクス拡散
- A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
- * ガラス固化体からの核種の溶出率
- * 生態圏における核種の移動、濃縮、分散

A. 6. 13 化学的勾配（電気化学的効果及び化学的浸透）

- A. 6. 7 溶解、沈澱及び結晶化
- A. 6. 8 コロイドの生成、溶解及び移動
- A. 6. 17 酸化性雰囲気

A. 6. 14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流

- A. 5. 3 地下水流動状況の変化
- A. 6. 3 マトリクス拡散
- A. 6. 6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A. 6. 17 酸化性雰囲気
- C. 2. 2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用

A. 6. 15 再濃集

- A. 6. 1 移流／分散
- A. 6. 2 拡散
- A. 6. 3 マトリクス拡散
- A. 6. 6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A. 7. 4 土壌生成作用
- C. 4. 3 臨界

A. 6. 16 pHの変動

- A. 6. 2 拡散
- A. 6. 6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A. 6. 7 溶解、沈澱及び結晶化
- A. 6. 8 コロイドの生成、溶解及び移動
- A. 6. 13 化学的勾配（電気化学的効果及び化学的浸透）
- A. 7. 1 植物による吸入
- A. 7. 3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション
- A. 7. 4 土壌生成作用
- B. 3. 10 液体廃棄物等の注入
- C. 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）
- C. 2. 2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
- * 地下水水質の変化

A.6.17 酸化性雰囲気

- A.4.8 化学的侵食作用及び風化作用
- A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）
- A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
- A.7.1 植物による吸入
- A.7.2 動物による吸入
- C.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）
- C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
- C.2.4 微生物の効果*

A.7.1 植物による吸入

- A.6.15 再濃集
- A.7.2 動物による吸入
- * 生態圏における核種の移動、濃縮、分散

A.7.2 動物による吸入

- A.6.15 再濃集
- * 生態圏における核種の移動、濃縮、分散

A.7.3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション

- A.2.8 岩石の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流
- A.7.1 植物による吸入

A.7.4 土壌生成作用

- A.2.8 岩石の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.7.5 化学的变化
- A.7.7 生態系の変化（山火事等）

A.7.5 化学的变化

- A.6.13 化学的勾配（電気化学的効果及び化学的浸透）
- A.7.1 植物による吸入
- A.7.4 土壌生成作用
- * 地下水水質の変化（A.6.9 錯形成種、A.6.16 pHの変動、A.6.17 酸化性雰囲気）

A.7.6 微生物との相互作用

- A.6.13 化学的勾配（電気化学的効果及び化学的浸透）
- A.7.3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション
- A.7.4 土壌生成作用
- * 地下水水質の変化

A.7.7 生態系の変化（山火事等）

- A.5.1 地下水循環
- A.7.1 植物による吸入
- A.7.2 動物による吸入
- A.7.4 土壌生成作用
- * 地下水水質の変化

A.7.8 気候変動への生態系の追従（砂漠化等）

- A.7.1 植物による吸入
- A.7.2 動物による吸入
- A.7.9 動植物の進化
- B.3.11 地下水のくみ上げ
- B.4.7 人口変化及び都市開発

A.7.9 動植物の進化

- A.7.1 植物による吸入
- A.7.2 動物による吸入

B.1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散
- A.6.17 酸化性雰囲気
- B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入

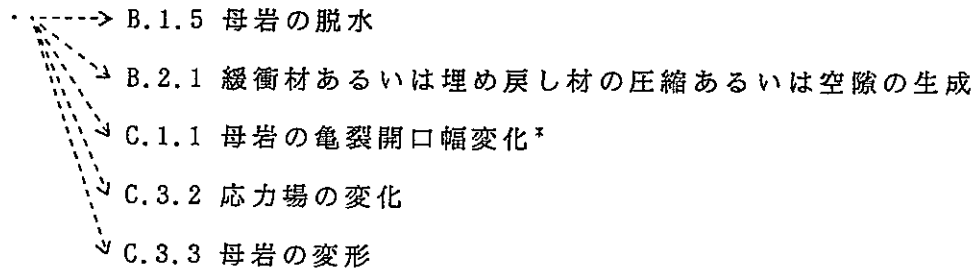
B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散
- A.6.17 酸化性雰囲気
- B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入

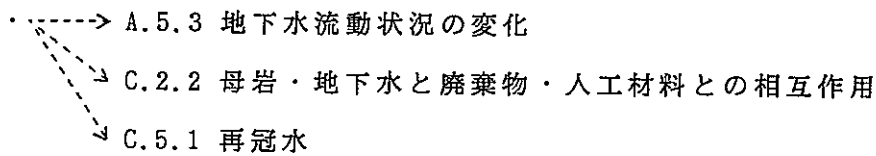
B.1.3 立坑あるいは連絡坑道の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散
- A.6.17 酸化性雰囲気
- B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入

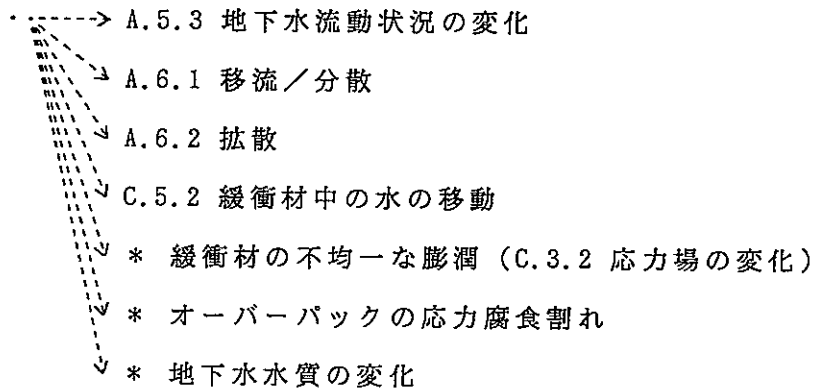
B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）



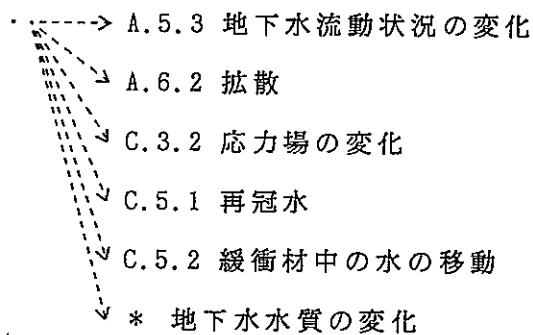
B.1.5 母岩の脱水



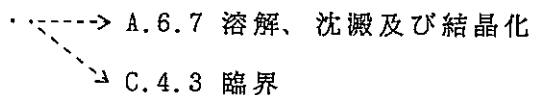
B.1.6 人工材料の欠陥（オーバーパックスの早期破損等）



B.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



B.2.2 廃棄物の不均質性（物理的あるいは化学的）



B.3.1 廃棄物あるいは資材回収

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.3.1 廃棄体の移動*
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷

B.3.2 テロ行為あるいは戦争

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.3.1 廃棄体の移動*
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- C.4.3 臨界
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷
- * 地形の変形（核攻撃）
- * 母岩の崩壊

B.3.3 試錐

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷
- * 地形の変形（火薬類、ガス等爆発物）

B.3.4 探鉱

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- B.3.6 資源採取
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷
- * 地形の変形

B.3.5 地熱エネルギー生産

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.4 ガスを媒体とした物質移動
- A.6.17 酸化性雰囲気
- B.3.10 液体廃棄物等の注入*（高温岩体への注水）
- B.4.7 人口変化及び都市開発
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷

B.3.6 資源採取

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷
- * 地形の変形

B.3.7 トンネル工事・利用

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷
- * 地形の変形

B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷
- * 地形の変形

B.3.9 考古学的調査

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷

B.3.10 液体廃棄物等の注入

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- C.1 熱的現象
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的变化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷

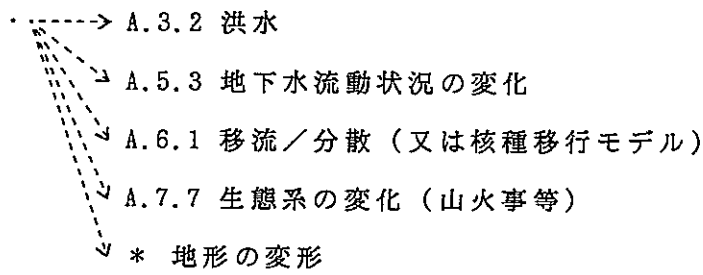
B.3.11 地下水のくみ上げ

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- A.6.17 酸化性雰囲気
- B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水*
- B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御
- C.3.2 応力場の変化
- C.3.4 処分坑道の破断
- * 掘削土壌の地表への搬出（A.7.5 化学的変化）
- * 地下水水質の変化
- * 人間・動物の処分場への侵入
- * 人工バリア材の損傷

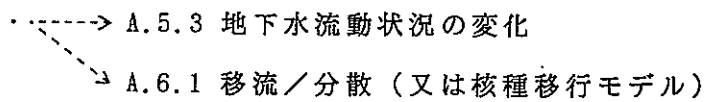
B.4.1 記録の喪失

- B.1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）
 - B.3.3 試錐
 - B.3.4 探鉱
 - B.3.5 地熱エネルギー生産
 - B.3.6 資源採取
 - B.3.7 トンネル工事・利用
 - B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）
 - B.3.9 考古学的調査*
 - B.3.10 液体廃棄物等の注入*
 - B.3.11 地下水くみ上げ
 - B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水
 - B.4.3 河川の引水
 - B.4.4 灌漑
 - B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御
 - B.4.6 農（酪農を含む）林水産業
 - B.4.7 人口変化及び都市開発
 - B.4.9 採石・泥炭採取
- } 但し、準意図的の行為とも考えられる。

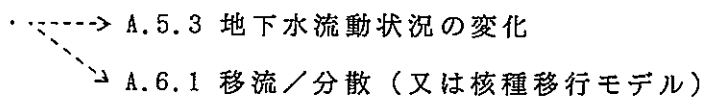
B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水



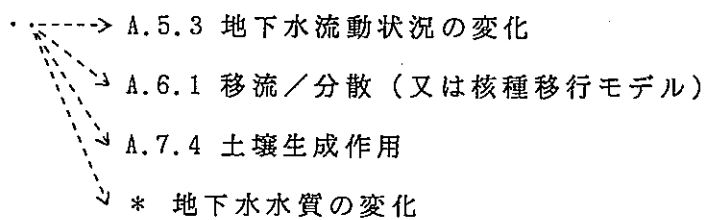
B.4.3 河川の引水



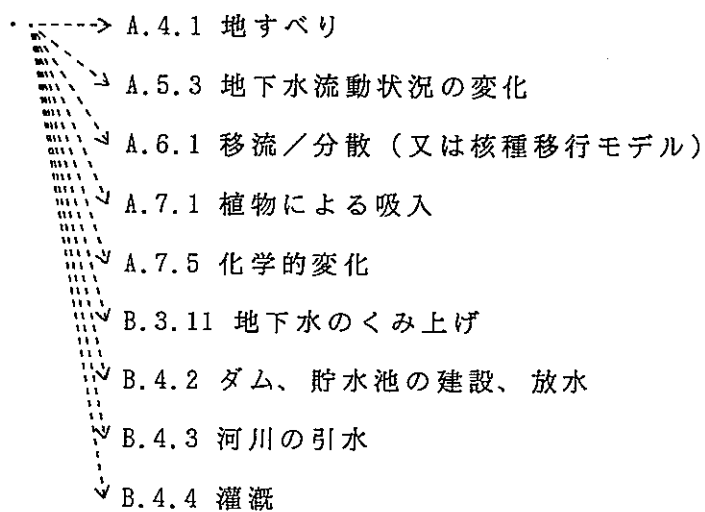
B.4.4 灌漑



B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御



B.4.6 農（酪農を含む）林水産業



B.4.7 人口変化及び都市開発

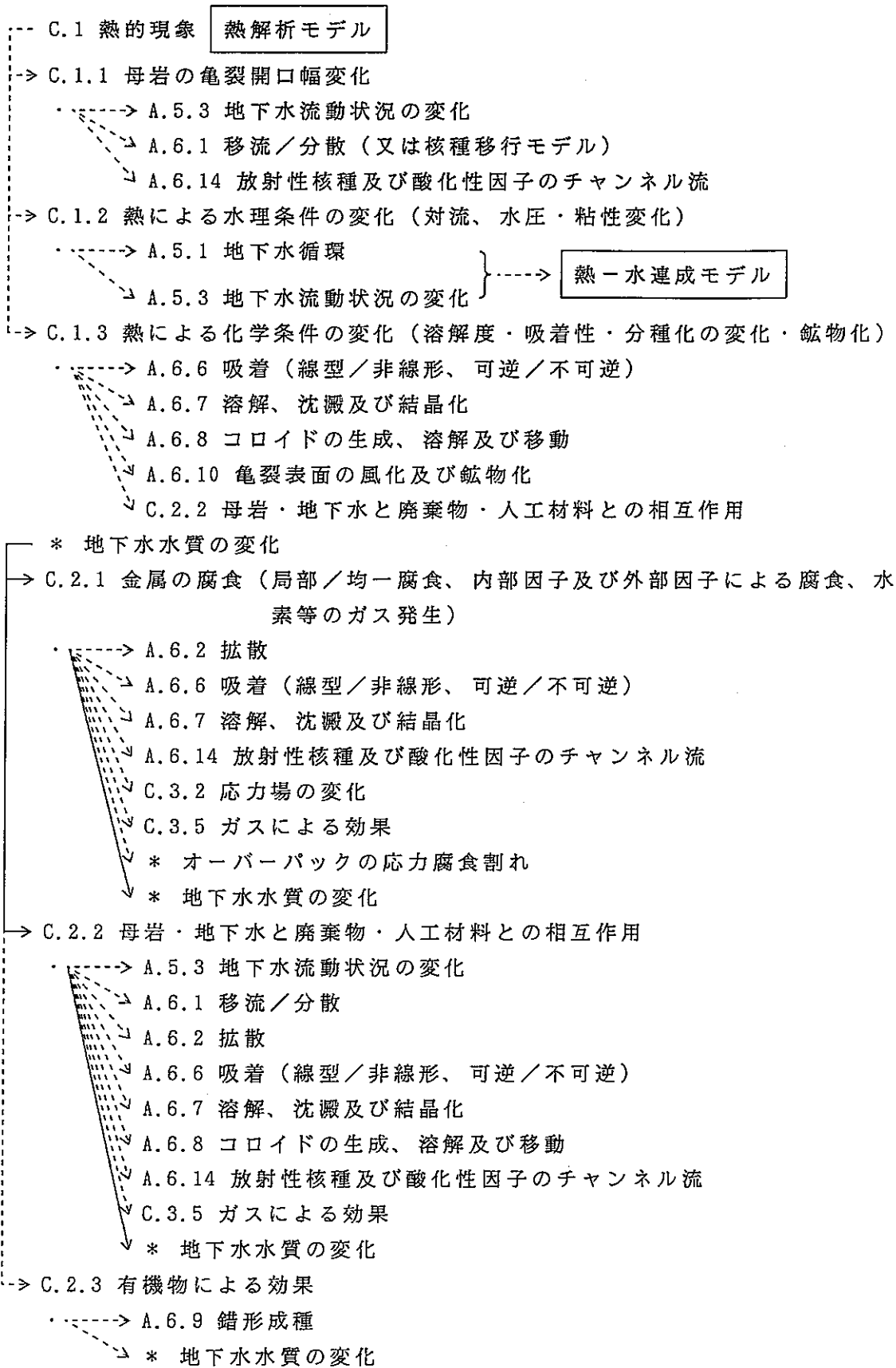
- ・-----> A.6.1 移流／分散（又は核種移行モデル）
- > A.7.5 化学的变化
- > B.3.7 トンネル工事・利用
- > B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）
- > B.3.11 地下水のくみ上げ
- > B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水
- > B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御
- > B.4.6 農（酪農を含む）林水産業
- > B.4.8 人間活動による気候変化（温室効果等）

B.4.8 人間活動による気候変化（温室効果等）

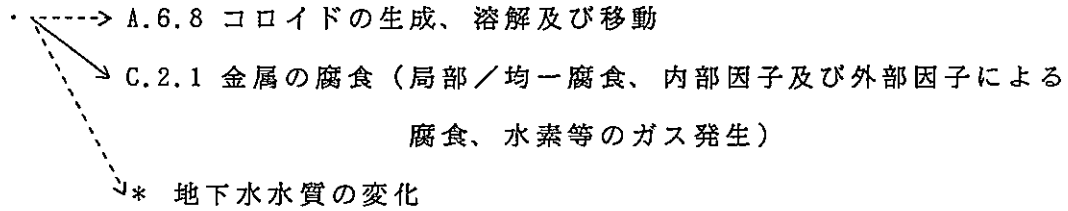
- ・-----> A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支
- > A.3.3 海面変動
- > A.4.7 寒冷気候の影響（ソリフラクション等）
- > A.6.17 酸化性雰囲気
- > A.7.8 気候変動への生態系の追従（砂漠化等）
- > B.4.6 農（酪農を含む）林水産業

B.4.9 採石・泥炭採取

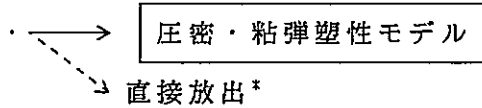
- ・-----> A.7.1 植物による吸入
- > * 地形の変形
- > * 採取物による直接放出



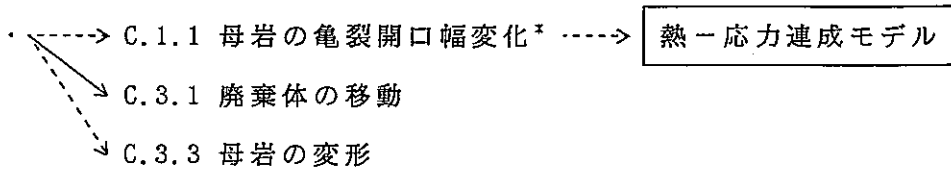
C.2.4 微生物の効果



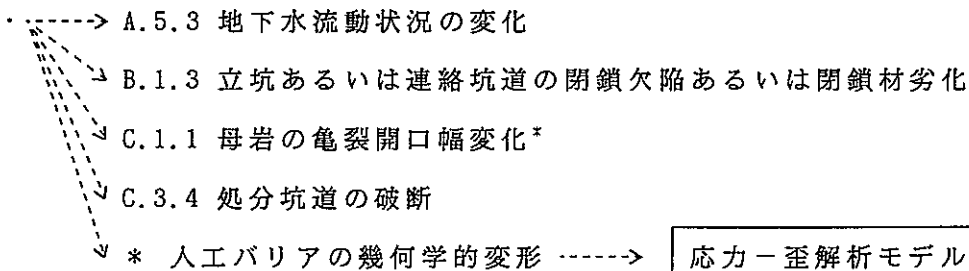
C.3.1 廃棄体の移動



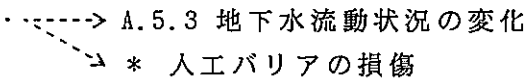
C.3.2 応力場の変化



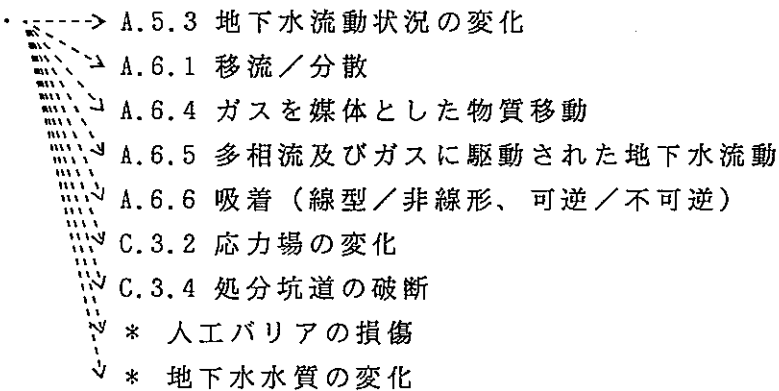
C.3.3 母岩の変形



C.3.4 処分坑道の破断



C.3.5 ガスによる効果



C.4.1 放射線分解 (α -ラジオリシス、 β -ラジオリシス)

- > A.6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流
- > A.6.16 pHの変動
- > A.6.17 酸化性雰囲気
- > C.3.5 ガスによる効果

C.4.2 照射損傷

- > * 人工バリア損傷

C.4.3 臨界

- > * 母岩の崩壊
- > * 人工バリア損傷
- > * 核種の飛散

C.4.4 放射壊変 (崩壊連鎖における)

- > 核種移行モデル
- > C.1 熱的現象

C.5.1 再冠水

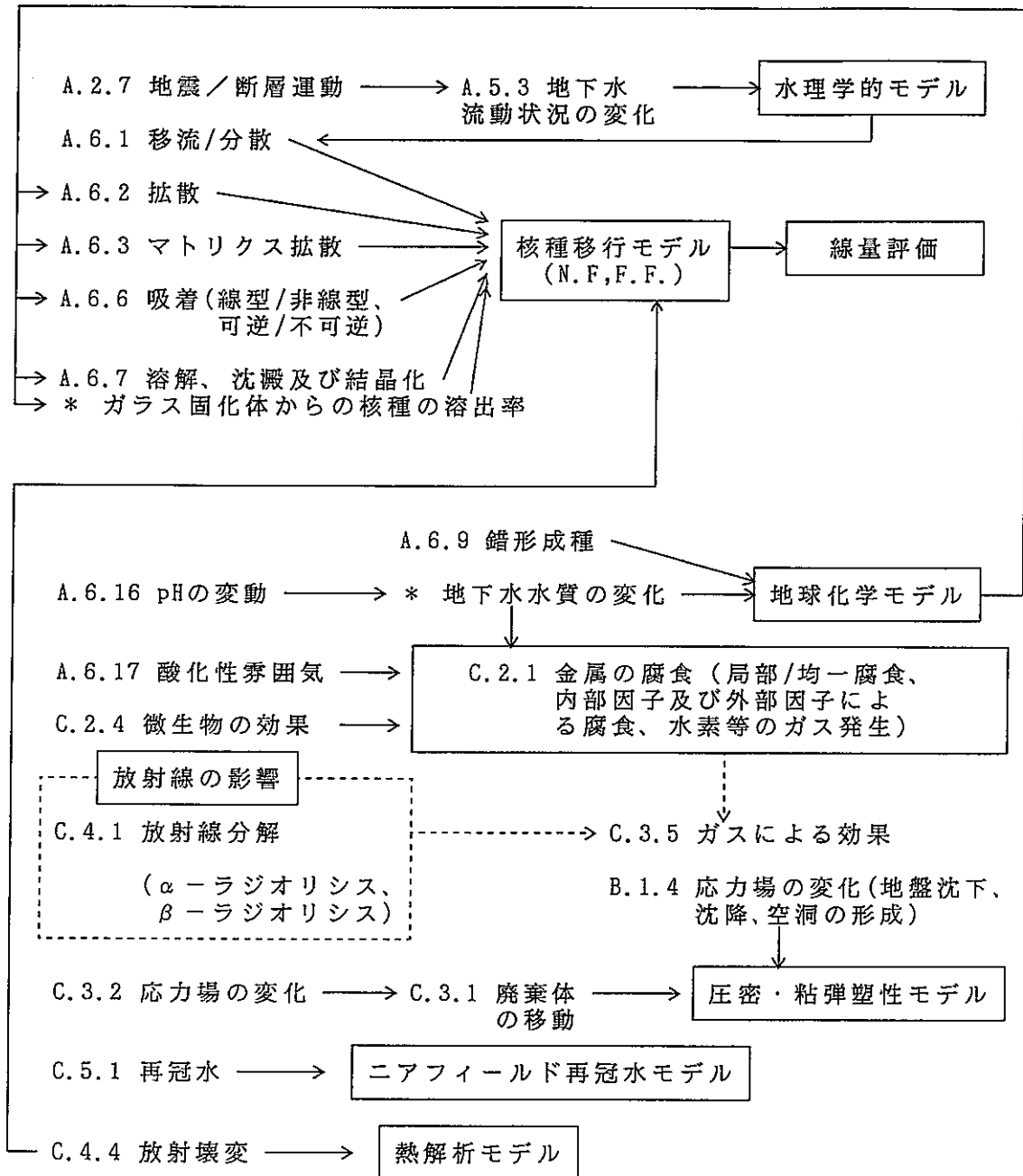
- > ニアフィールド再冠水モデル
- > C.2.1 金属の腐食 (局部/均一腐食、内部因子及び外部因子による腐食、水素等のガス発生)
- > C.3.2 応力場の変化 -----> 水-応力連成モデル
- > C.5.2 緩衝材中の水の移動
- > * 地下水水質の変化

C.5.2 緩衝材中の水の移動

- > A.5.3 地下水流動状況の変化
- > A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
- > C.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)
- > * 地下水水質の変化

2.3 F E P 連鎖の整理

以上の整理結果に基づき、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（実線の連鎖）をリスト・アップすると、以下の通りである。



さらに、これらの解析モデル等に何らかの影響を及ぼし得るFEPをブレイクしたものを以下に示す。

水理学的モデル 即ち、

“A.5.3 地下水流動状況の変化”に何らかの影響を及ぼし得る F E P

(○印は、基本ケースで考慮されている F E P)

- A.1.1 隕石の衝突
- A.2.6 隆起／沈降
- 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.3.4 永久凍結層の影響
- A.5.1 地下水循環
- A.5.2 不均質系での地下水流動
- A.5.5 塩淡境界の影響
- A.5.6 被圧帯水層
- A.5.7 地熱の影響
- A.6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動
- A.6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流
- B.1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）
- B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化
- B.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
- B.1.5 母岩の脱水
- B.1.6 人工材料の欠陥（オーバパックの早期破損等）
- B.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
- B.3.1 廃棄物あるいは資材回収
- B.3.2 テロ行為あるいは戦争
- B.3.3 試錐
- B.3.4 探鉱
- B.3.5 地熱エネルギー生産
- B.3.6 資源採取

- B.3.7 トンネル工事・利用
- B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）
- B.3.9 考古学的調査
- B.3.10 液体廃棄物等の注入
- B.3.11 地下水のくみ上げ
- B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水
- B.4.3 河川の引水
- B.4.4 灌漑
- B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御
- B.4.6 農（酪農を含む）林水産業
- C.1.1 母岩の亀裂開口幅変化
- C.1.2 熱による水理条件の変化（対流、水圧・粘性変化）
- C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
- C.3.3 母岩の変形
- C.3.4 処分坑道の破断
- C.3.5 ガスによる効果
- C.5.2 緩衝材中の水の移動
- * 地形の変形**

** 但し、

“* 地形の変形”に何らかの影響を及ぼし得るF E Pは以下の通り。

- △A.2.6 隆起／沈降
- △A.2.7 地震／断層運動
 - A.4.1 地すべり
 - A.4.2 表面削剥
 - A.4.3 河川侵食
 - A.4.5 海食
 - A.4.6 堆積作用
 - A.4.8 化学的侵食作用及び風化作用
- △B.3.2 テロ行為あるいは戦争
- △B.3.3 試錐
- △B.3.4 探鉱
- △B.3.6 資源採取
- △B.3.7 トンネル工事・利用
- △B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）
- △B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水
- B.4.9 採石・泥炭採取

（このうち、前記と重複しているものには△印を付した。）

核種移行モデル 即ち、

“ * ガラス固化体からの核種の溶出率 ” “ A.6.1 移流 / 分散, A.6.2 拡散, A.6.3 マトリクス拡散, A.6.6 吸着 (線型 / 非線型、可逆 / 不可逆), A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化, C.4.4 放射壊変 (崩壊連鎖における) ”
に何らかの影響を及ぼし得る F E P

(○印は、基本ケースで考慮されている F E P)

- 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.5.3 地下水流動状況の変化
- A.6.4 ガスを媒体とした物質移動
- A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動
- A.6.9 錯形成種
 - A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化
 - A.6.11 土壌や有機物の残骸の蓄積
 - A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈
 - A.6.13 化学的勾配 (電気化学的効果及び化学的浸透)
 - A.6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流
 - A.6.15 再濃集
- A.6.16 pHの変動
 - A.6.17 酸化性雰囲気
- B.1.1 未検出の過去の掘削 (試錐孔等)
- B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化
- B.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
- B.1.6 人工材料の欠陥 (オーバーパックの早期破損等)
- B.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
- B.2.2 廃棄物の不均質性 (物理的あるいは化学的)
- B.3.1 廃棄物あるいは資材回収
- B.3.2 テロ行為あるいは戦争
- B.3.3 試錐
- B.3.4 探鉱
- B.3.5 地熱エネルギー生産
- B.3.6 資源採取
- B.3.7 トンネル工事・利用
- B.3.8 地下構造物建設 (居住、他の廃棄物の処分)
- B.3.9 考古学的調査

- B. 3.10 液体廃棄物等の注入
 - B. 3.11 地下水のくみ上げ
 - B. 4.2 ダム、貯水池の建設、放水
 - B. 4.3 河川の引水
 - B. 4.4 灌漑
 - B. 4.5 土壌改良及び地下水水質制御
 - B. 4.6 農（酪農を含む）林水産業
 - B. 4.7 人口変化及び都市開発
 - C. 1.3 熱による化学的条件の変化（溶解度・吸着性・分種化の変化・鉱物化）
 - C. 1.1 母岩の亀裂開口幅変化
 - C. 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）
 - C. 2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
 - C. 3.5 ガスによる効果
 - C. 5.2 緩衝材中の水の移動
- * 人工バリア損傷**

** 但し、

“* 人工バリア損傷等”に何らかの影響を及ぼし得る F E P は以下の通り。

- A. 2.7 地震／断層運動
- △B. 3.1 廃棄物あるいは資材回収
- △B. 3.2 テロ行為あるいは戦争
- △B. 3.3 試錐
- △B. 3.4 探鉱
- △B. 3.5 地熱エネルギー生産
- △B. 3.6 資源採取
- △B. 3.7 トンネル工事利用
- △B. 3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）
- △B. 3.9 考古学的調査
- △B. 3.10 液体廃棄物等の注入
- △B. 3.11 地下水のくみ上げ
- C. 3.3 母岩の変形
- C. 3.4 処分坑道の破断
- △C. 3.5 ガスによる効果
- C. 4.2 照射損傷
- C. 4.3 臨界

（このうち、前記と重複しているものには△印を付した。）

“A.6.9 錯形成種, A.6.16 pHの変動” “* 地下水水質の変化”

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

(○印は、基本ケースで考慮されている F E P)

- A.2.3 火成活動
- 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.5.1 地下水循環
- A.5.2 不均質系での地下水流動
- A.5.4 地下水系への海水の侵入
- A.5.5 塩淡境界の影響
- A.6.6 吸着 (線型/非線型、可逆/不可逆)
- A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化
- A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動
- A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化
- A.6.11 土壌や有機物の残骸の蓄積
- A.7.5 化学的变化
- A.7.6 微生物との相互作用
- A.7.7 生態系の変化 (山火事等)
- B.1.1 未検出の過去の掘削 (試錐孔等)
- B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化
- B.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
- B.3.1 廃棄物あるいは資材回収
- B.3.2 テロ行為あるいは戦争
- B.3.3 試錐
- B.3.4 探鉱
- B.3.5 地熱エネルギー生産
- B.3.6 資源採取
- B.3.7 トンネル工事・利用
- B.3.8 地下構造物建設 (居住、他の廃棄物の処分)
- B.3.9 考古学的調査
- B.3.10 液体廃棄物等の注入
- B.3.11 地下水のくみ上げ
- B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御
- C.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)
- C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
- C.2.3 有機物による効果
- C.2.4 微生物の効果
- C.4.1 放射線分解 (α -ラジオリシス、 β -ラジオリシス)
- C.5.2 緩衝材中の水の移動

金属腐食の分析 即ち、

“C.2.1 金属の腐食（局部／不均一腐食、内部因子及び外部因子による腐食、水素等のガス発生）” に何らかの影響を及ぼし得る F E P

（○印は、基本ケースで考慮されている F E P）

○A.6.16 pHの変動

○A.6.17 酸化性雰囲気

○C.2.4 微生物の効果

△＊ 地下水水質の変化

圧密・粘弾塑性モデル 即ち、

“C.3.1 廃棄体の移動” “C.3.2 応力場の変化”
に何らかの影響を及ぼし得る F E P
(○印は、基本ケースで考慮されている F E P)

A.2.6 隆起／沈降

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）

B.1.6 人工材料の欠陥（オーバパックの早期破損等）**

B.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

B.3.1 廃棄物あるいは資材回収

B.3.2 テロ行為あるいは戦争

B.3.3 試錐

B.3.4 探鉱

B.3.5 地熱エネルギー生産

B.3.6 資源採取

B.3.7 トンネル工事・利用

B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）

B.3.9 考古学的調査

B.3.10 液体廃棄物等の注入

B.3.11 地下水のくみ上げ

○C.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）

C.3.5 ガスによる効果

C.5.1 再冠水

* 人工バリアの幾何学的変形（C.3.3 母岩の変形）

○** 緩衝材の膨潤圧の検討

ニアフィールド再冠水及び
再冠水後の水理学的モデル

即ち、

“C.5.1 再冠水”又は“C.5.2 緩衝材中の水の移動”

に何らかの影響を及ぼし得るF E P

(○印は、基本ケースで考慮されているF E P)

- A.5.1 地下水循環
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- B.1.5 母岩の脱水
- B.1.6 人工材料の欠陥（オーバーパックの早期破損等）
- B.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

熱解析モデル

即ち、

“C.1 熱的現象”に何らかの影響を及ぼし得るF E P

(○印は、基本ケースで考慮されているF E P)

- A.2.3 火成活動
- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）**
- A.3.1 降雨、気温、土壌の水取支
- A.4.7 寒冷気候の影響（ソリフラクション等）
- A.5.7 地熱の影響
- A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化**
- B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）**
- B.3.10 液体廃棄物等の注入
- C.3.2 応力場の変化**
- C.3.3 母岩の変形**
- C.4.4 放射壊変（崩壊連鎖における）
(但し、**マークのものは、熱-応力連成モデルとして取り扱うべきもの
とも考えられる。)

放射線の影響 即ち、

“C.4 放射線学的現象”に何らかの影響を及ぼし得るF E P
(○印は、基本ケースで考慮されているF E P)

- A.6.15 再濃集
- B.2.2 廃棄物の不均質性（物理的あるいは化学的）
- B.3.2 テロ行為あるいは戦争

線量評価

に何らかの影響を及ぼし得るF E P
(○印は、基本ケースで考慮されているF E P)

- A.5.1 地下水循環
- A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈
- A.6.15 再濃集
- A.7.1 植物による吸入
- A.7.2 動物による吸入
- A.7.5 化学的变化
- A.7.6 微生物との相互作用
- A.7.7 生態系の変化（山火事等）
- A.7.8 気候変動への生態系の追従（砂漠化等）
- A.7.9 動植物の進化
- B.3.11 地下水のくみ上げ
- B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水
- B.4.3 河川の引水
- B.4.4 灌漑
- B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御
- B.4.6 農（酪農を含む）林水産業
- B.4.7 人口変化及び都市開発
- B.4.8 人間活動による気候変化（温室効果等）

以上のF E Pは、さらに原因側のF E Pからの連鎖が結合し得るが、いずれも地下水移行シナリオの範囲でとらえることが可能と言える。

また、動燃事業団殿のリストアップしている102のF E Pの名称と異なるもの（*マークを付記したもの）のうち、既出の“地形の変形”、“人工バリア損傷等”、“地下水水質の変化”、“* ガラス固化体からの核種の溶出率”の他のものとしては、

- ① 流氷の到来（氷河期の到来に伴う）
- ② 湖沼の生成（河川の蛇行の結果として）
- ③ 人間・動物の処分場への侵入（特に、動物）
- ④ 母岩の崩壊
- ⑤ 採取物による直接放出（採石・泥炭採取の結果として）
- ⑥ 直接放出（廃棄体移動の結果として）

が指摘し得るが、今回の検討対象は、地下水移行シナリオ（間接放出シナリオ）への反映であるから、主に直接放出シナリオに関連すると考えられる③、⑤、⑥は今回のシナリオ作成対象からは除外してもよいと言える。他方、①、②は、生態圏での核種移行シナリオで、また、④は、ニアフィールドでの地下水移行シナリオとして、それぞれ部分的に考慮することが考えられるため、シナリオ作成対象になり得ると考えられる。

他方、点線で示される 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）

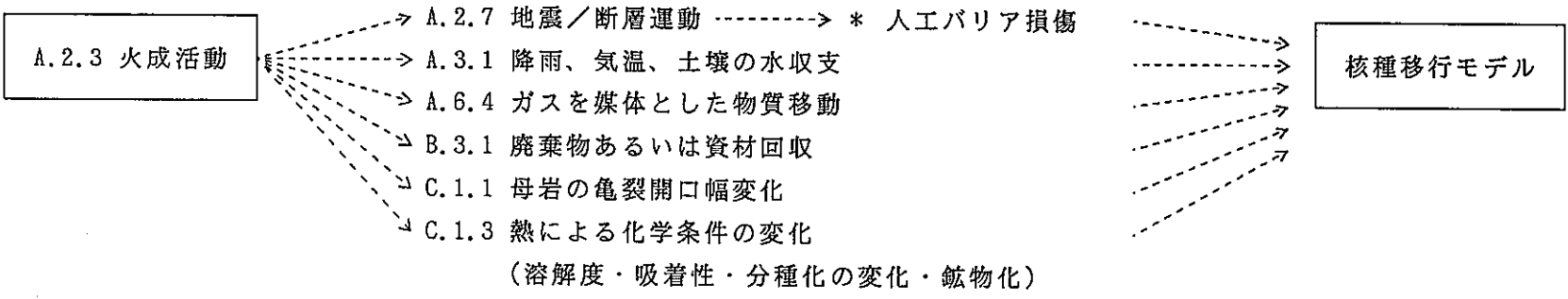
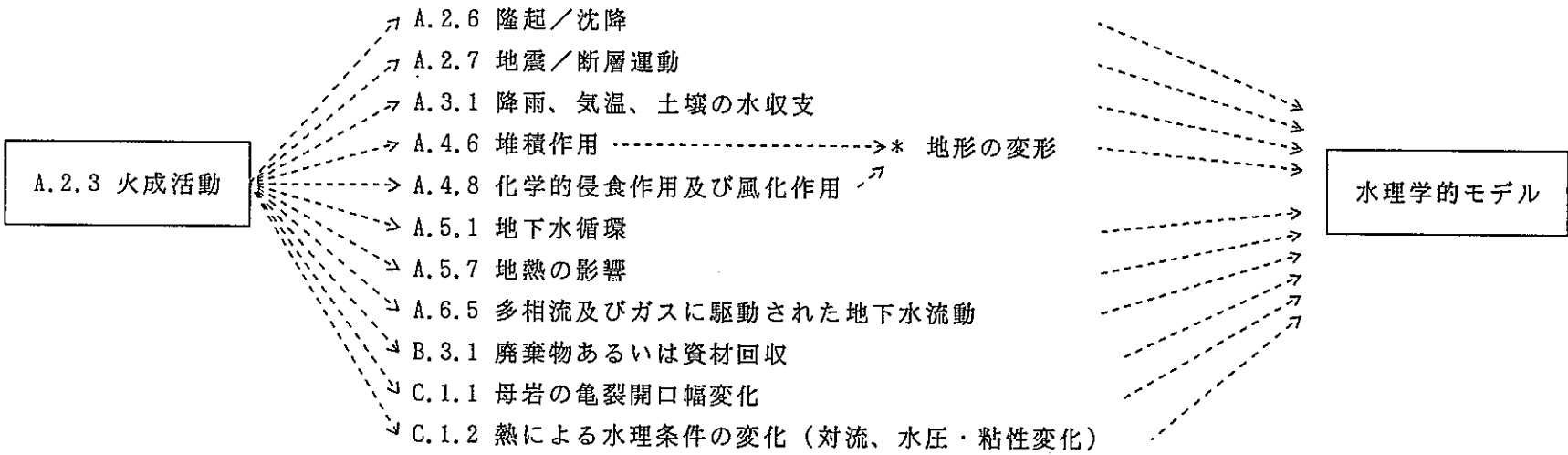
A. 3. 1 降雨、気温、土壤の水収支

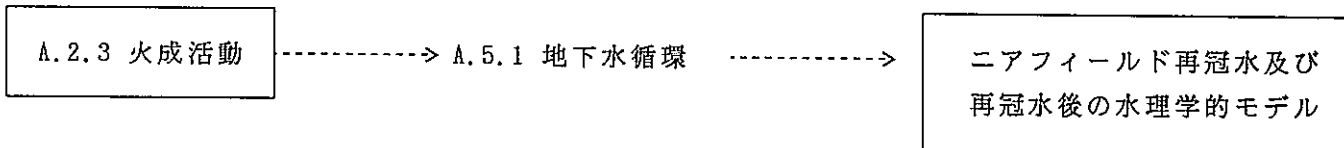
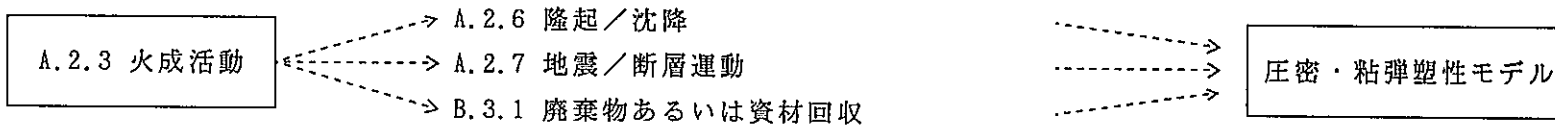
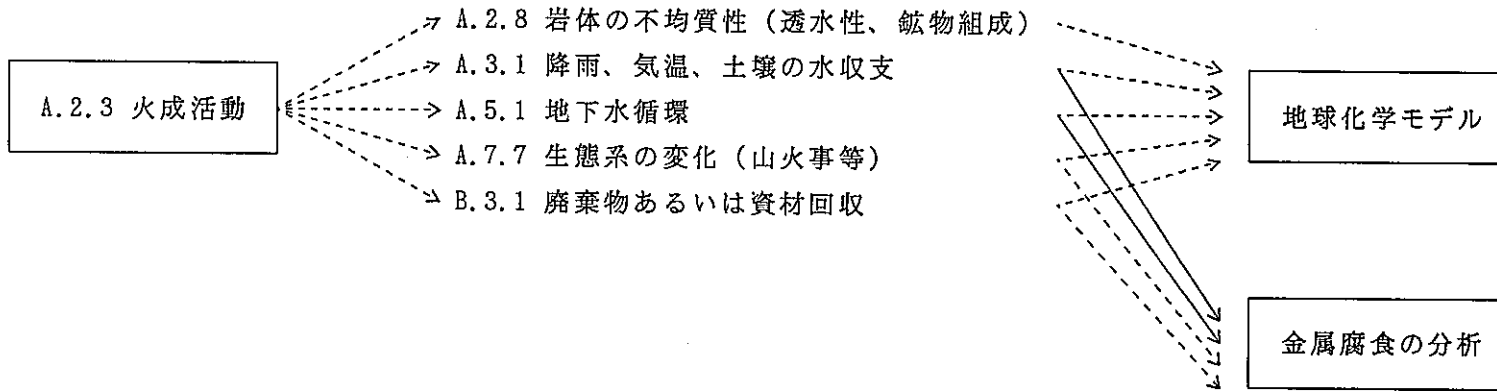
A. 6. 16 pHの変動（＊地下水水質の変化も含む）

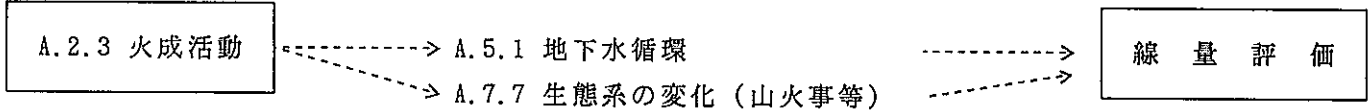
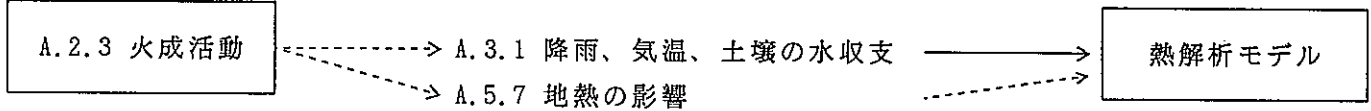
B. 3. 1～B. 3. 11 閉鎖後の地下活動（処分場への侵入）

B. 4. 1 記録の喪失

これらの F E P 6種が地下水シナリオの基本的フレームに影響を与え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が、例えば火成活動を起点とし、他の F E P を1つだけ経由するパスだけ抽出すると、以下のようになる。







2.4 火成活動を起点とするシナリオの作成

2.4.1 シナリオ作成プロセスの試行的検討

以上は、H3レポートの基本モデルに至るパスを示したものであるが、シナリオ拡張に伴い、モデル開発を進めていく観点からは、基本モデルに影響を与える指標（パラメータ値）に至るパスや基本モデルで扱えない影響因子に至るパス等も検討しておく必要がある（表5に、影響因子・指標（パラメータ値）の例を示す。但し、意味を明確にするため102のFEPと異なる名称で表記しているものもあるため、102のFEPとの対応（あるいは関連し得るもの）を明記している）。そこで、まず、表5の影響因子・指標（パラメータ値）に対応（あるいは関連）し得るFEPに何らかの影響を及ぼし得る他のFEPをリスト・アップすると以下のようなになる。

表5 影響要因・指標（パラメータ値）等（例）

(1) ニアフィールド関連

- ・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）

(2) ファーフールド関連

- ・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）

<A.4.8 化学的侵食作用及び風化作用>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.3 火成活動

A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

A.6.17 酸化性雰囲気

<A.5.1 地下水循環>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.3 火成活動

A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

A.3.3 海面変動

A.3.4 永久凍結層の影響

A.4.4 河川の蛇行

A.4.7 寒冷気候の影響（ソリフラクション等）

A.5.7 地熱の影響

A.7.7 生態系の変化（山火事等）

C.1.2 熱による水理条件の変化（対流、水圧・粘性変化）

<A.5.2 不均質系での地下水流動>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

但し、A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）に何らかの影響を及ぼし得る F E P は以下の通り。

A.1.1 隕石の衝突

A.2.4 変成作用

A.2.5 続成作用

A.2.7 地震／断層運動

A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化

A.7.3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション

A.7.4 土壌生成作用

B.1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）

B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化

B.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

B.3.1 廃棄物あるいは資材回収

B.3.2 テロ行為あるいは戦争

B.3.3 試錐

B.3.4 探鉱

B.3.5 地熱エネルギー生産

B.3.6 資源採取

B.3.7 トンネル工事利用

B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）

B.3.9 考古学的調査

B.3.10 液体廃棄物等の注入

B.3.11 地下水のくみ上げ

<A.5.4 地下水系への海水の侵入又はA.5.5 塩淡境界の影響>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.6 隆起／沈降

A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

A.3.2 洪水

A.3.3 海面変動

A.4.5 海食

A.4.7 寒冷気候の影響（ソリフラクション等）

B.1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）

B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化

B.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

B.3.1 廃棄物あるいは資材回収

B.3.2 テロ行為あるいは戦争

B.3.3 試錐

B.3.4 探鉱

B.3.5 地熱エネルギー生産

B.3.6 資源採取

B.3.7 トンネル工事利用

B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）

B.3.9 考古学的調査

B.3.10 液体廃棄物等の注入

B.3.11 地下水のくみ上げ

<A.6.1 移流／分散>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

- A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）
- A.5.3 地下水流動状況の変化
- A.6.4 ガスを媒体とした物質移動
- A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動
- A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化
- A.6.11 土壌や有機物の残骸の蓄積
- A.6.15 再濃集
- B.1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）
- B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化
- B.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
- B.1.6 人工材料の欠陥（オーバーパックの早期破損等）
- B.3.1 廃棄物あるいは資材回収
- B.3.2 テロ行為あるいは戦争
- B.3.3 試錐
- B.3.4 探鉱
- B.3.5 地熱エネルギー生産
- B.3.6 資源採取
- B.3.7 トンネル工事・利用
- B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）
- B.3.9 考古学的調査
- B.3.10 液体廃棄物等の注入
- B.3.11 地下水のくみ上げ
- B.4.2 ダム、貯水池の建設、放水
- B.4.3 河川の引水
- B.4.4 灌漑
- B.4.5 土壌改良及び地下水水質制御
- B.4.6 農（酪農を含む）林水産業
- B.4.7 人口変化及び都市開発
- C.1.1 母岩の亀裂開口幅変化
- C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用
- C.3.5 ガスによる効果

<A.6.2 拡散>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

A.6.9 錯形成種

A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈

A.6.15 再濃集

A.6.16 pHの変動

B.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

C.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）

C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用

<A.6.3 マトリクス拡散>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

A.6.9 錯形成種

A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈

A.6.15 再濃集

<A.6.4 ガスを媒体とした物質移動又は

A.6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.3 火成活動

A.5.7 地熱の影響

B.3.5 地熱エネルギー生産

C.3.5 ガスによる効果

<A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

A.6.9 錯形成種

A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化

A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈

A.6.15 再濃集

A.6.16 pHの変動

A.6.17 酸化性雰囲気

C.1.3 熱による化学的条件の変化（溶解度・吸着性・分種化の変化・鉱物化）

C.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）

C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用

C.3.5 ガスによる効果

＜ガラス固化体の溶解＞即ち、

A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）

A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

A.6.9 錯形成種

A.6.12 質量、同位体、化学種の希釈

A.6.13 化学的勾配（電気化学的効果及び化学的浸透）

A.6.16 pHの変動

A.6.17 酸化性雰囲気

B.2.2 廃棄物の不均質性（物理的あるいは化学的）

C.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）

C.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）

C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用

C.4.4 放射壊変（崩壊連鎖における）

C.5.2 緩衝材中の水の移動

<A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）

A.6.9 錯形成種

A.6.16 pHの変動

C.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）

C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用

C.2.4 微生物の効果

<A.6.9 錯形成種>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）

A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

C.2.3 有機物による効果

<A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

C.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）

<B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）、C.3.2 応力場の変化>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.6 隆起／沈降

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.3.3 海面変動

B.1.1 未検出の過去の掘削（試錐孔等）

B.1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化

B.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

B.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

B.3 閉鎖後の地下活動（処分場への侵入）

C.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）

C.3.5 ガスによる効果

C.5.1 再冠水

<C.2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.8 岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）

A.6.6 吸着（線型／非線型、可逆／不可逆）

A.6.14 放射性核種及び酸化性因子のチャンネル流

A.6.16 pHの変動

A.6.17 酸化性雰囲気

B.1.5 母岩の脱水

C.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）

* 地下水水質の変化（前述の地球化学モデルの項参照）

<C.2.3 有機物による効果>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.6.11 土壌や有機物の残骸の蓄積

* 地下水水質の変化（前述の地球化学モデルの項参照）

<C.3.3 母岩の変形又はC.3.4 処分坑道の破断>

に何らかの影響を及ぼし得る F E P

A.2.1 プレート運動／テクトニクス的变化

A.2.7 地震／断層運動

B.1.4 応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）

B.3.1 廃棄物あるいは資材回収

B.3.2 テロ行為あるいは戦争

B.3.3 試錐

B.3.4 探鉱

B.3.5 地熱エネルギー生産

B.3.6 資源採取

B.3.7 トンネル工事利用

B.3.8 地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）

B.3.9 考古学的調査

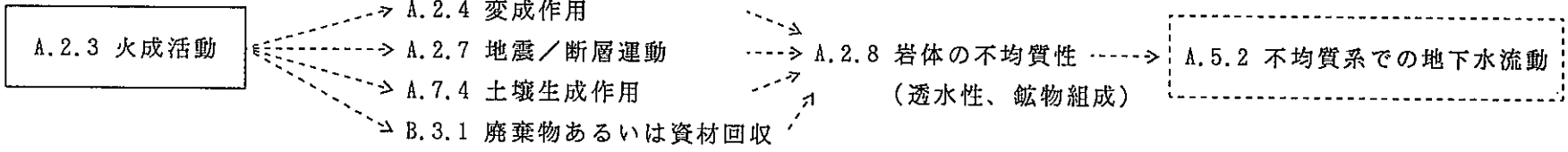
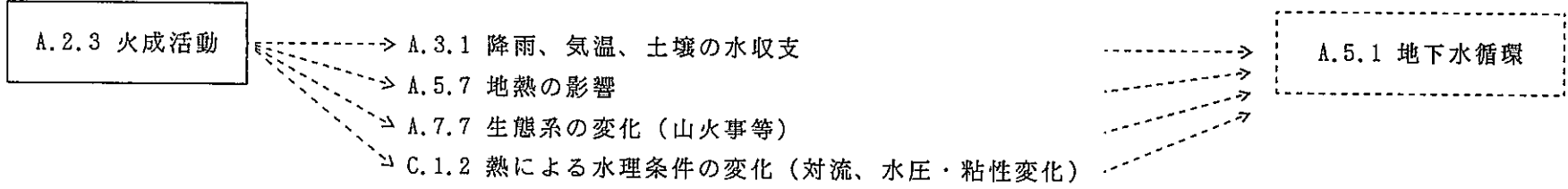
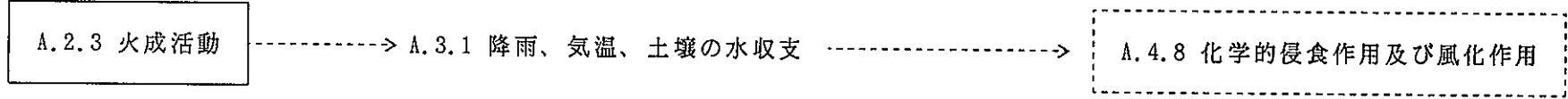
B.3.10 液体廃棄物等の注入

B.3.11 地下水のくみ上げ

C.3.2 応力場の変化

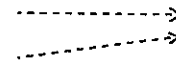
C.3.5 ガスによる効果

次に、火成活動を起点とし、これらのF E Pを終点とし、その間に1つだけ他のF E Pを経由するパスだけ抽出すると、以下のようなになる。



A.2.3 火成活動

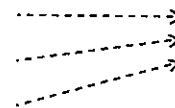
- - - - -> A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支
- - - - -> B.3.1 廃棄物あるいは資材回収



A.5.4 地下水系への海水の侵入
又はA.5.5 塩淡境界の影響

A.2.3 火成活動

- - - - -> A.6.4 ガスを媒体とした物質移動
- - - - -> B.3.1 廃棄物あるいは資材回収
- - - - -> C.1.1 母岩の亀裂開口幅変化



A.6.1 移流／分散

A.2.3 火成活動

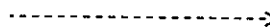
- - - - -> A.5.7 地熱の影響



A.6.4 ガスを媒体とした物質移動
又はA.6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動

A.2.3 火成活動

- - - - -> C.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)



A.6.6 吸着
(線型／非線型、可逆／不可逆)

A.2.3 火成活動

→ A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

→ C.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)

ガラス固化体の溶解

A.6.7 溶解、沈澱及び結晶化

A.2.3 火成活動

→ C.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)

A.6.8 コロイドの生成、溶解及び移動

A.2.3 火成活動

→ A.3.1 降雨、気温、土壌の水収支

→ C.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)

A.6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化

A.2.3 火成活動

→ A.2.6 隆起／沈降

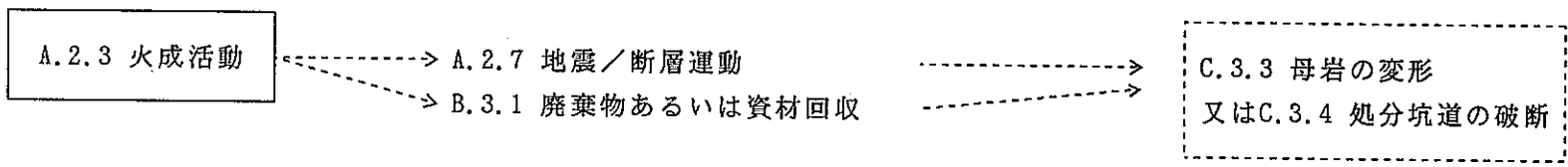
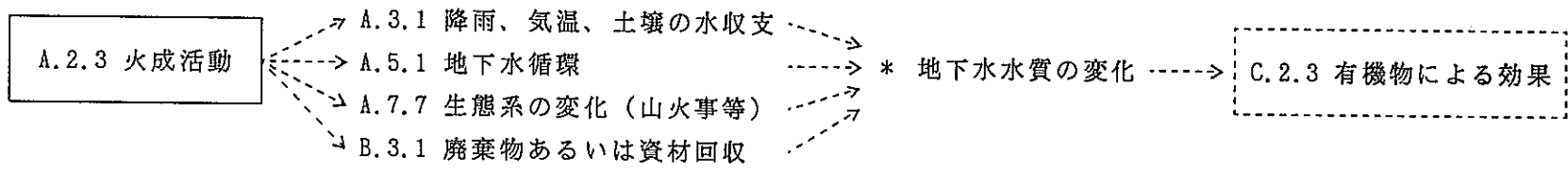
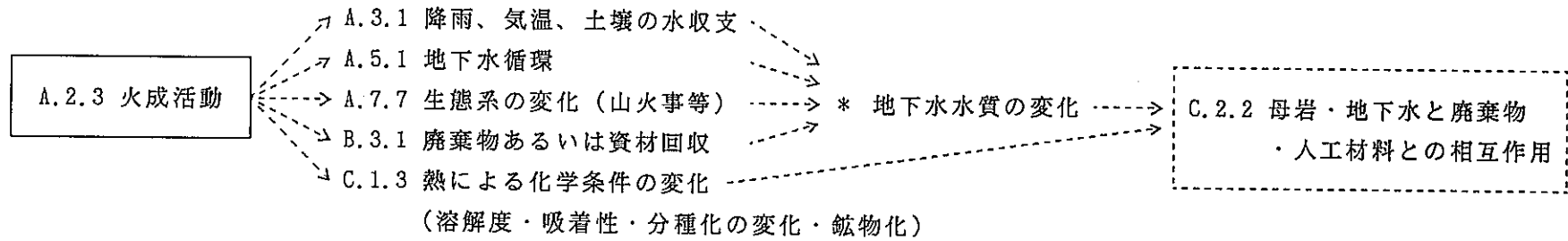
→ A.2.7 地震／断層運動

→ B.3.1 廃棄物あるいは資材回収

B.1.4 応力場の変化(地盤沈下、沈降、

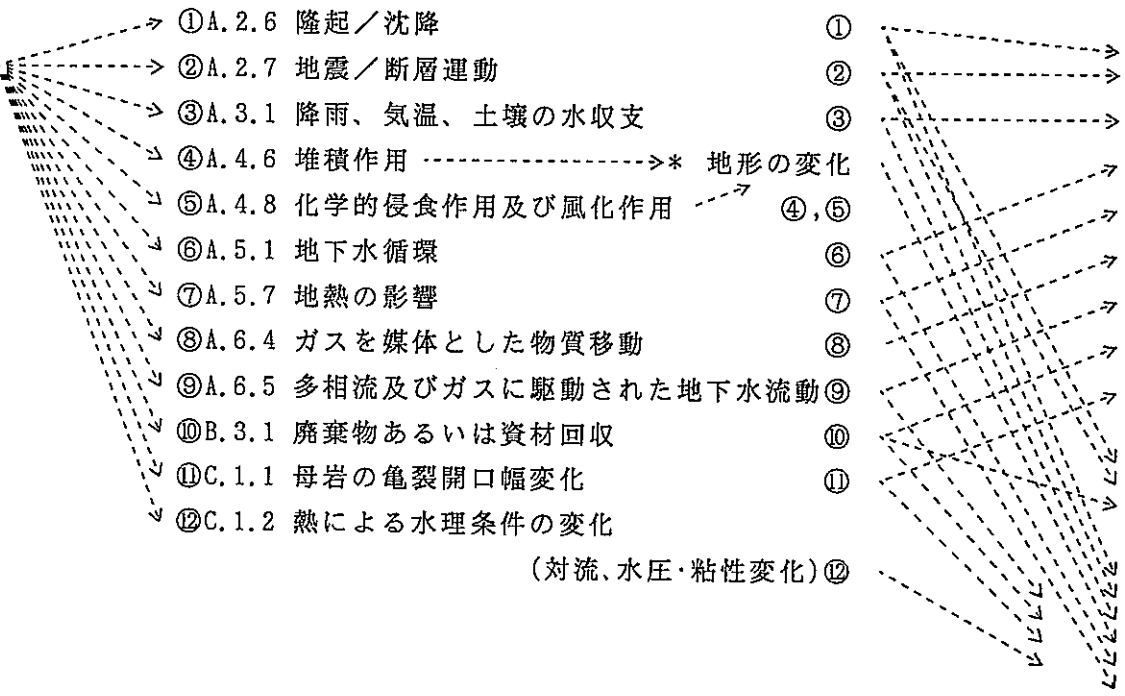
空洞の形成)又は

C.3.2 応力場の変化



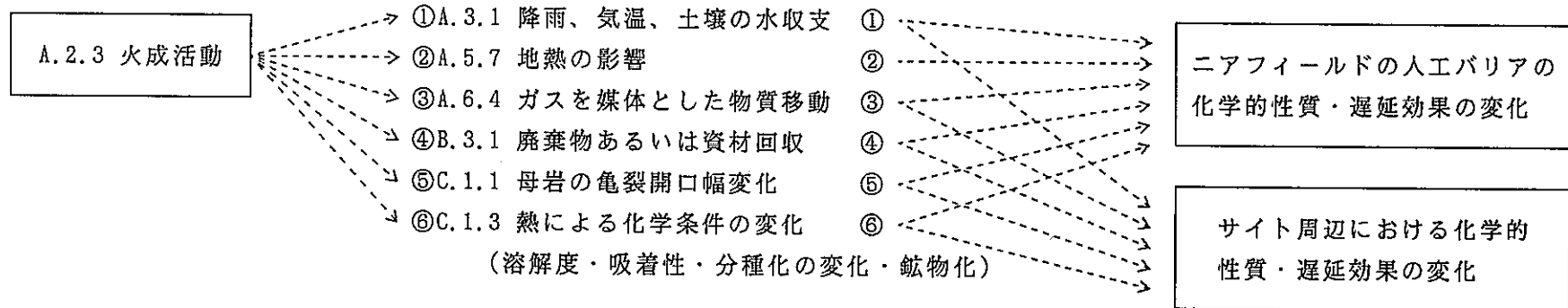
以上のFEP連鎖を用い、火成活動を起点とし、表5に示す各影響要因・指標（パラメータ値）等（意味を明確にするために複数のFEPをくくり直したもの）に反映するFEP連鎖として、中間に1つだけ他のFEPを経由するパスを作成し、重複している、あるいは類似しているパス等を一括整理するなどして表示し直した。次に各パスに対応するシナリオ表現としてどのようなものがあり得るのかを、2.1.1節で概略的に検討したFEPメモコメントを参考に例示した。ここで、定量的取り扱い可能な諸量には実線でアンダーラインを付し、他方、より包括的な表現となっているためにさらに具体的な表現内容を求める必要のある文脈部には、波線を付記した。

A.2.3 火成活動

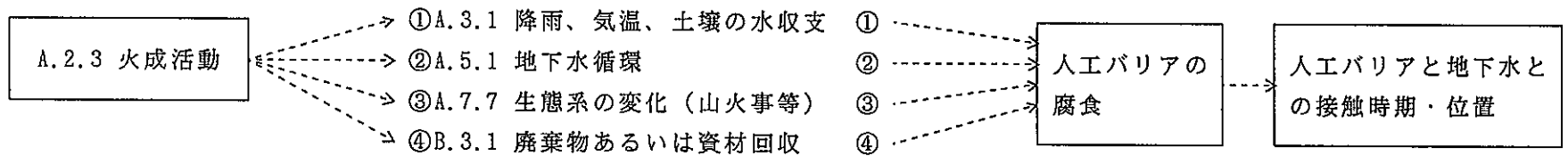


- ① 処分場(もしくは人工バリア)と地下水との接触時期・位置
- ② 核種移行時間の変化
- ③ 核種移行経路長の変化
- ④ 核種移行経路の新生成
- ⑤ 地下水の流速や流れ方向の変化

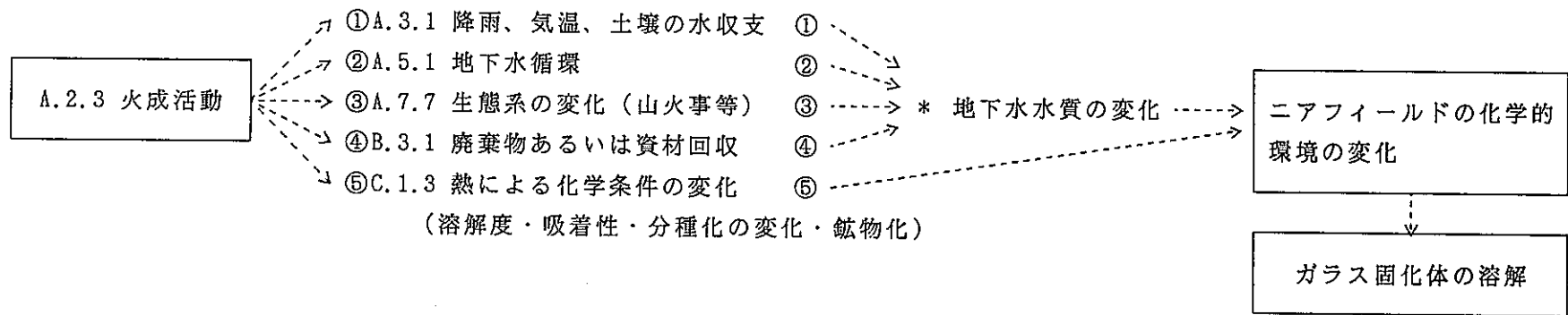
- EX. ① } 火成活動による局地的地殻変動による土地の隆起もしくは沈降が生じる、あるいは火山性地震もしくは火山活動に連動した
- ② } 断層運動の発生により、処分場と地下水流路との位置関係が変化し、処分場と地下水との接触時期・位置、核種移行経路長の変化並びに核種移行経路の新生成に伴い、核種移行時間が変化する。
- ③ } 火山爆発による噴出水蒸気等の発生により、日射量、降雨量が変化し、地下水循環流量変化に伴い、地下水流速、処分場と
- ⑥ } 地下水との接触時期、核種移行時間の変化が生ずる。
- ④ } 火山放出物や火山泥流の堆積又は放出堆積した火山灰の風化により地形が変形し、地下水流速や流れ方向が変化する。
- ⑤ }
- ⑦ } 火成活動の盛んな地熱地帯における熱水作用により、母岩の変質に伴う透水係数変化や熱（温度上昇）による対流、水圧・
- ⑪ } 粘性変化などの水理条件変化並びに母岩の亀裂開口幅の変化が生じ、（ニアフィールド）地下水流速や流れ方向の変化や
- ⑫ } 処分場と地下水との接触時期・位置、核種移行時間の変化が生ずる。
- ⑦ } 火成活動の盛んな地熱地帯において、上昇地熱流体と地下水が交差し、発生ガスもしくは多相流駆動の地下水流動と高速
- ⑧ } （流速変化後）の物質移動により、処分場と地下水との接触時期、核種移行時間の変化が生ずる。
- ⑨ }
- ⑩ 処分場付近の火山活動の発生により、危険回避のため、廃棄物あるいは資材回収のニーズが高まり、処分場への地下侵入により、地下水系のかく乱に伴う地下水流速や流れ方向の変化並びに核種移行経路が新たに生ずる。



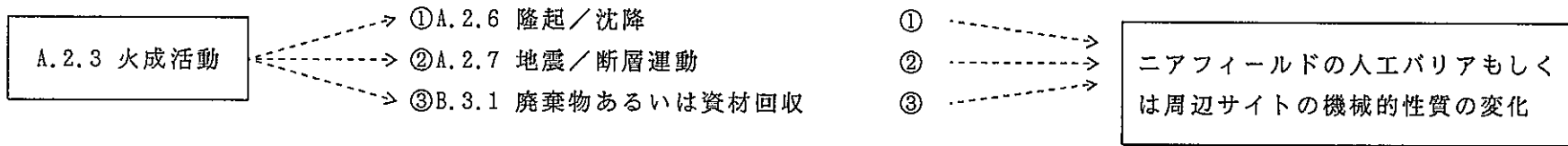
- EX. ①噴火により放出・堆積した火山灰の風化により、サイト周辺の土壤が変化し、サイト周辺あるいは変化した土壤成分が地下水循環によってニアフィールドまで波及して人工バリアの化学的性質・遅延効果の変化が生ずる。
- ② } 火成活動の盛んな地熱地帯において、上昇地熱流体と地下水が交差し、発生ガスもしくは多相流駆動の地下水流動と高速の
- ③ } 物質移動が生ずる。
- ④処分場付近の火山活動の発生により、危険回避のため、廃棄物あるいは資材回収のニーズが高まり、処分場への地下水侵入により、異材が地下水中に混入し、ニアフィールド並びにサイト周辺の化学的性質・遅延効果が変化する。
- ⑤火成活動に伴うニアフィールド又はサイト周辺の温度上昇により、母岩の亀裂開口幅が変化し、ニアフィールド又はサイト周辺の遅延効果が変化する。
- ⑥火成活動に伴うニアフィールド又はサイト周辺の温度上昇により、吸着性・溶解度・沈澱(量)・結晶化(割合)などの熱による化学的条件の変化に伴い、ニアフィールド又はサイト周辺の化学的性質・遅延効果の変化が生ずる。



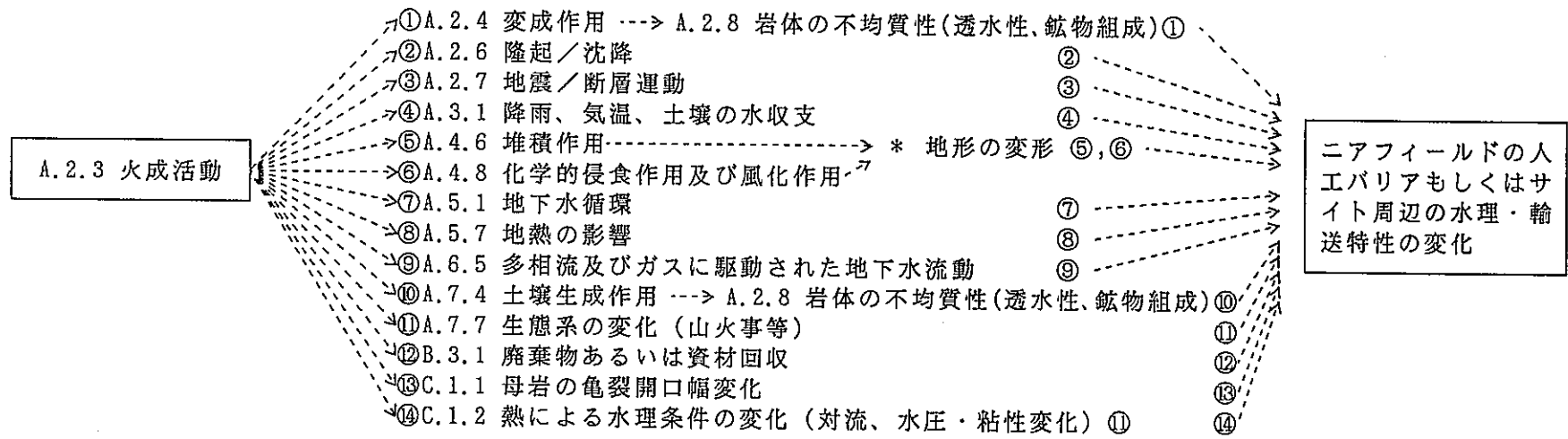
- EX. ① } 火山爆発による噴出水蒸気等の発生により、日射量、降雨量が変化する、あるいは、火山活動により、周囲の植生に変化が
 ② } 生じ、（輪廻の結果）はげ地が出現することにより、地下水循環を通じ、人工バリアへ接触する地下水量が変化する。
 ③ }
- ④ 処分場付近の火山活動の発生により、危険回避のため、廃棄物あるいは資材回収のニーズが高まり、処分場への地下侵入により、大気が地下深部に流入し、人工バリアの腐食速度を加速する。



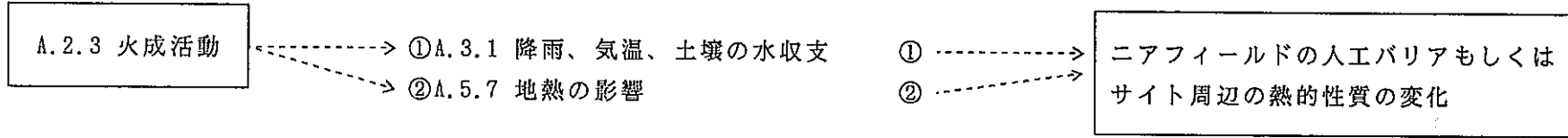
- EX. ① 火山爆発による噴出水蒸気等の発生により、日射量、降雨量が変化する、あるいは火山活動により、周囲の植生に変化が生じ、
- ② (輪廻の結果) はげ地が出現する、あるいは処分場付近の火山活動の発生により、危険回避のため、廃棄物あるいは資材回収
- ③ のニーズが高まり、処分場への地下侵入により、地下水循環並びにpH等地下水水質の変化を通じ、ガラス固化体の溶解速度が
- ④ 変化する。
- ⑤ 火山地帯における地温高の影響により、ガラス固化体周囲の温度が上昇し、ガラス固化体の溶解度、吸着性等が変化する。



- EX. ① } 火成活動による局地的地殻変動による土地の隆起もしくは沈降が生じる、あるいは火山性地震もしくは火山活動に連動した断
 ② } 層運動の発生により、ニアフィールドの人工バリアもしくはサイト周辺の応力場が変化する。
 ③ 処分場付近の火山活動の発生により、危険回避のため、廃棄物あるいは資材回収のニーズが高まり、処分場への地下侵入により、ニアフィールドの人工バリアもしくはサイト周辺の応力場が変化する。

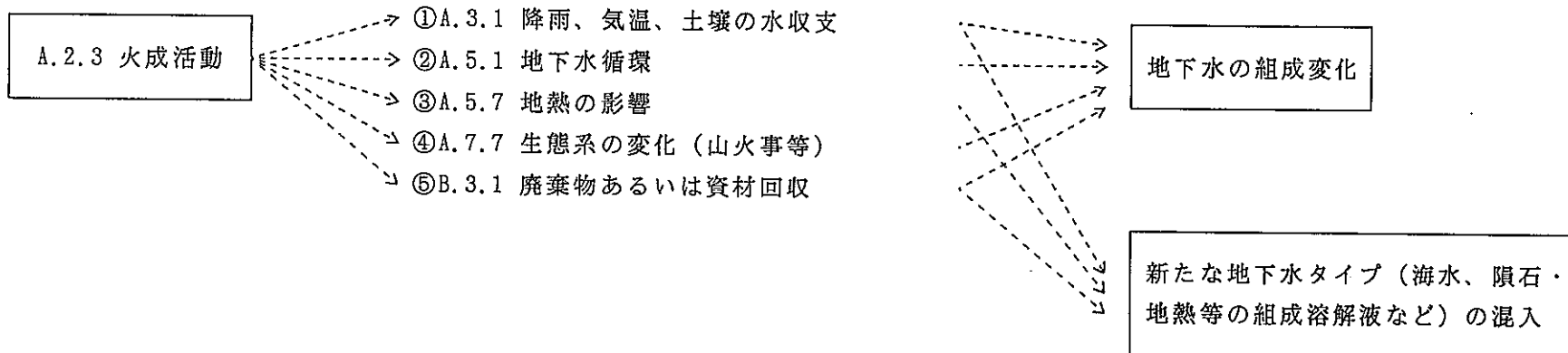


- EX. ①火成活動に伴伴する変成作用が生じ、広域的に周囲母岩の不均質性が生ずることにより、透水係数分布が変化する。
- ②火成活動により、局地的に地殻変動が生じ、土地の隆起もしくは沈降が生じる。その結果、地下水圧が変動する。
- ③火山性地震もしくは火山活動に連動した断層運動の発生により、地下水流動状況が変化する。
- ④火山爆発による噴出水蒸気等の発生により、日射量、降雨量が変化し、地下水循環を通じ、地下水量が変化する。
- ⑤火山放出物や火山泥流が堆積し、地形が変形することにより、地下水流動状況が変化する。
- ⑥放出堆積した火山灰の風化により、地形が変形することにより、地下水流動状況が変化する。
- ⑦火成活動によって生成された初生水(マグマ水)が地下水循環経路に流れ込み、地下水流動状況が変化する。
- ⑧火成活動の盛んな地熱地帯における熱水作用により、母岩が変質し、透水係数が変化する。
- ⑨火成活動に連動して生ずる蒸気や熱水の噴出経路に地下水系が交差し、地下水流動状況が変化する。
- ⑩放出堆積した火山灰の風化により、土壌が変質し、サイト周辺の岩体の不均質性が生じ、係数係数分布が変化する。
- ⑪火山活動により、周囲の植生に変化が生じ、(輪廻の結果)はげ地が出現することにより、周囲の水理輸送特性が変化する。
- ⑫処分場付近の火山活動の発生により、危険可避のため、廃棄物あるいは資材回収のニーズが高まり、処分場への地下侵入により、地下水の経路が変化する。
- ⑬火山性地震もしくは局地的地殻変動により、ニアフィールド母岩の亀裂開口幅が変化し、地下水経路や地下水流速等が変化する。
- ⑭マグマや地熱地帯からの放熱によるニアフィールドの水理条件の変化(対流、水圧・粘性変化)が生じ、地下水流動状況が変化



EX. ①火山爆発による噴出水蒸気等の発生により、日射量、降雨量が変化し、サイト周辺の気温、水の蒸発散量等が変化する。これが長期間続くことにより、地下水循環を通じ、ニアフィールドの人工バリアへ接触する地下水温が変化する。

②火成活動の盛んな地熱地帯における熱水作用により、高温の地下水が人工バリア近隣に流れ込む。



- EX. ①火山爆発による噴出蒸気等の発生により、日射量、降雨量が変化し、気温変化に伴い、地下水への溶解物質あるいは析出物質に変化が生ずる。
- ② } 火成活動によって生成された初生水（マグマ水）あるいは地熱で噴出するガス等の混入成分が地下水循環経路に流れ込み、
- ③ } 地下水組成が変化する。
- ④火山活動により、周囲の植生に変化が生じ、（輪廻の結果）はげ地が出現することにより、土壌成分等の地下水への混入組成が変化する。
- ⑤処分場付近の火山活動の発生により、危険回避のため、廃棄物あるいは資材回収のニーズが高まり、処分場への地下侵入過程において、地下水への異物混入が生ずる。

ここでは、トップFEPとして、火成活動を選定し、終点のFEPまでに他のFEP1つを経由するパスのみ対象としているが、さらに他のトップFEPに対して任意数の中間FEP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。よって、以上のシナリオ作成（文脈化）までの作業内容例をフロー化（一般化）すると、図11のようになると考えられる。

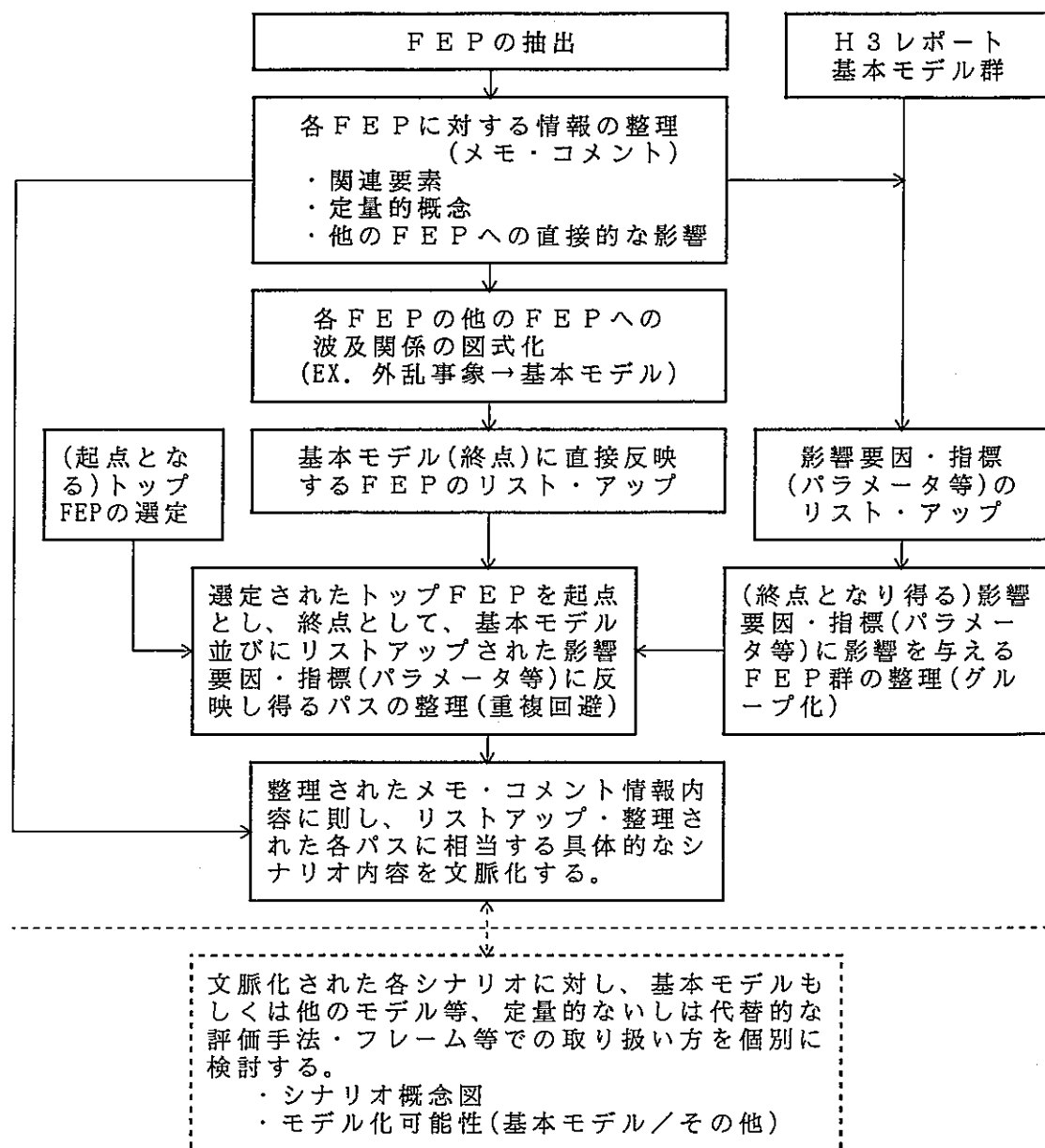


図11 シナリオ作成プロセスのフロー

2.4.2 火成活動による周辺への影響

図12、図13は、文献(10)に示されている地下（深成岩活動）並びに地表（噴火活動）の火成活動の概念を描いたものである。深成マグマ溜りが地下での影響しかないのに比べ、火山爆発による噴出物は、地下と地表の両方に影響を与え得る。日本列島の火山活動の期間は、複数の深成並びに噴火活動を含めると、およそ $10^6 \sim 10^7$ 年のオーダーである⁽¹¹⁾。個々の活動に関する熱水理学的な活動の大部分は、重要な熱水理学的な流れは連続的というよりはむしろ間欠的なものではあるが⁽¹²⁾、 $10^4 \sim 10^5$ 年のオーダーである⁽¹³⁾。

(1) 深成活動／深部での相互干渉

5 km以深の深部でのマグマ溜りでは、冷たい地下の天水（雨、雪などの地表水）が深部に循環し、マグマ溜りと接触する。マグマ溜りからは、熱、ガス、塩化物、ふっ化物、硫化物、高塩分含有マグマ水、その他の可溶性物質が供給される。熱は、深部マグマ活動によって生じる断層や亀裂を通して、中性に近い塩化物に富む水の上昇対流を生む。文献(12)によると、このような熱は、比較的短い $10^3 \sim 10^4$ 年間を速い上昇対流で、次の $10^4 \sim 10^5$ 年間を加熱された小規模の上昇深部流体として、断続的かつ循環的なものである。

フィールド並びに実験室での実証によると、深部活動の対流的冷却により、およそ 10^5 年間、 500°C までの温度で $20 \sim 50 \text{ km}^3$ の大きな結晶質の体積を維持し得るという⁽¹⁰⁾。

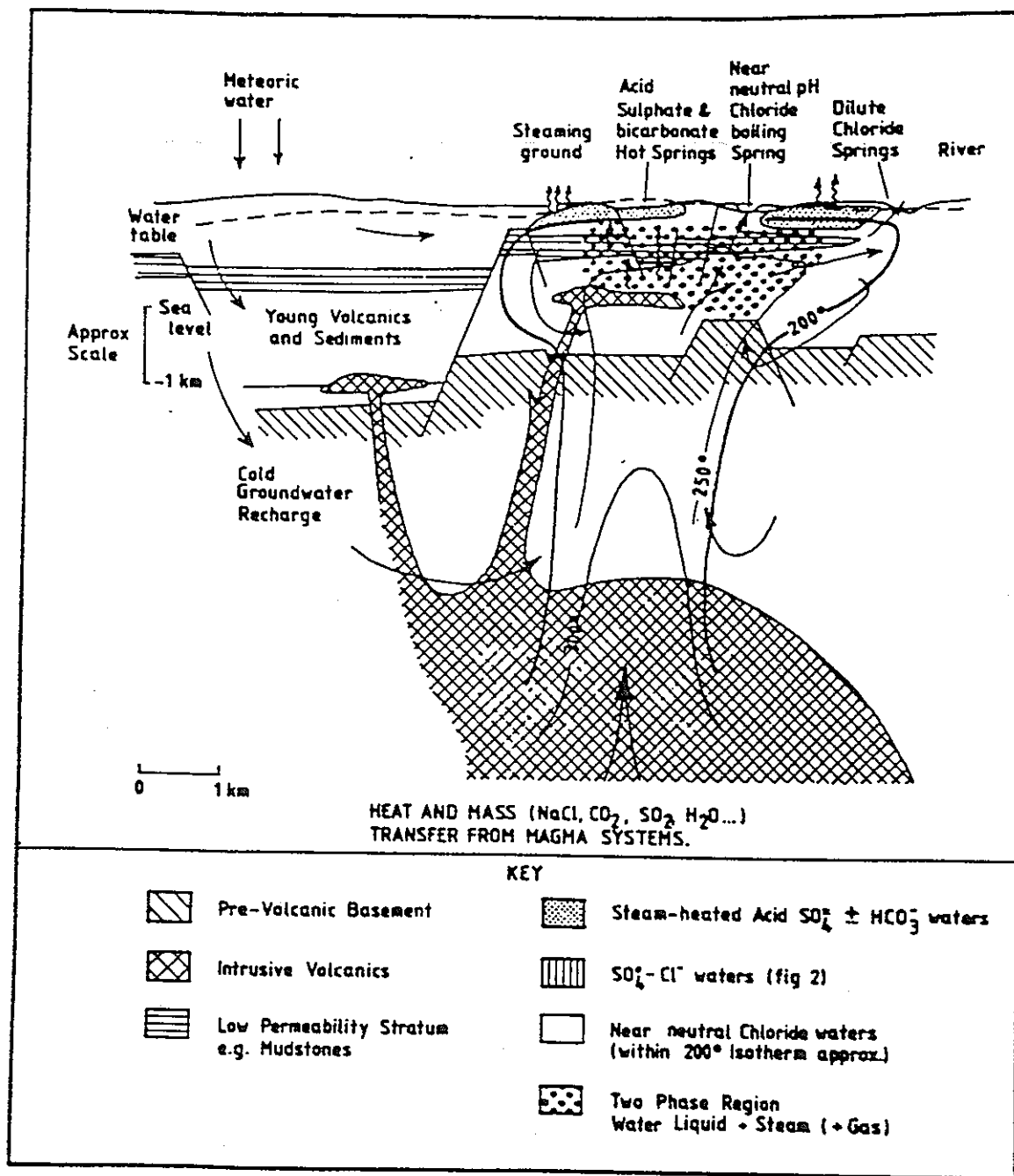
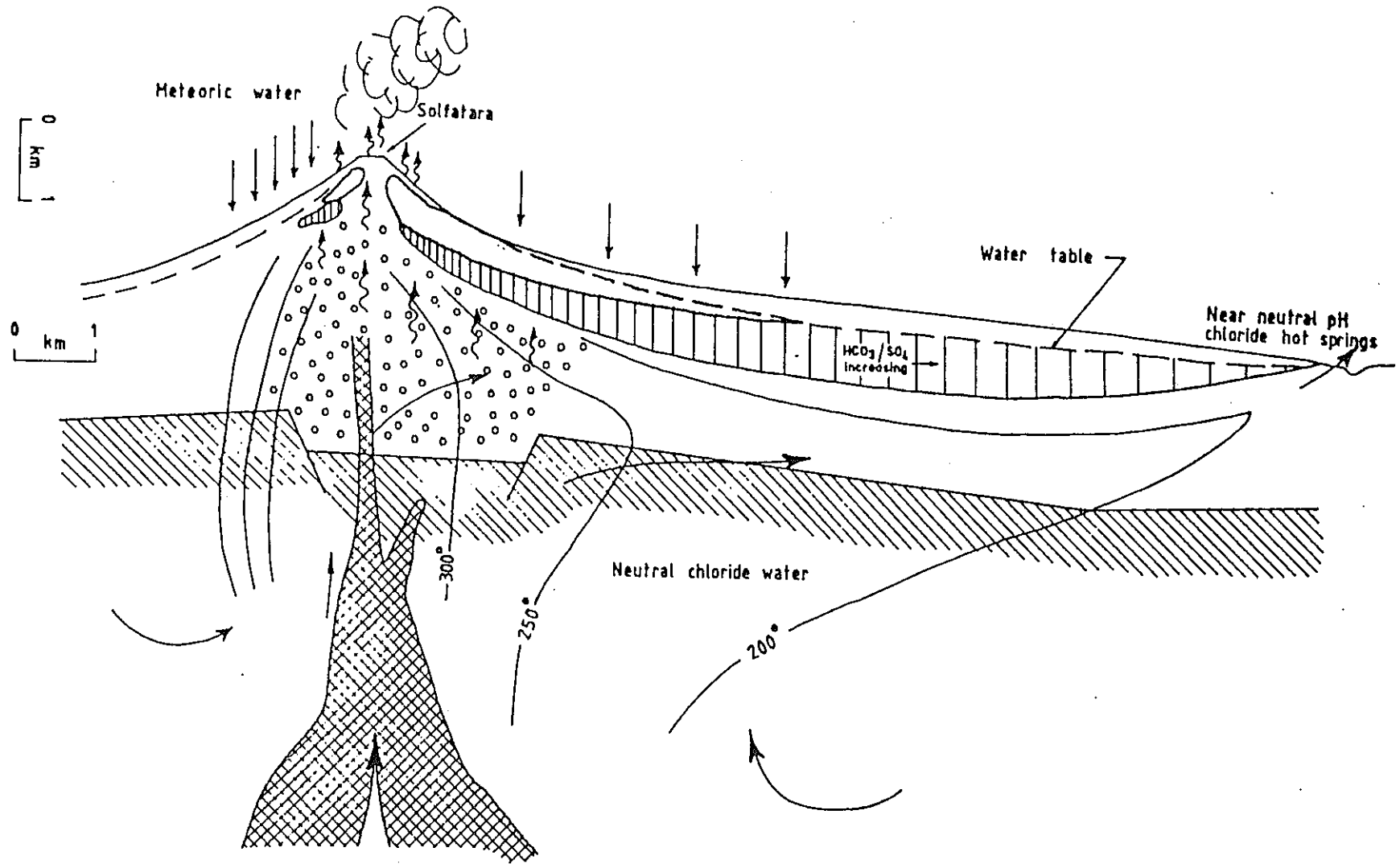


Fig 12 Schematic Diagram of Main Features of a Geothermal System around Plutonic Intrusion (Henley and Ellis, 1983).



13 Schematic Diagram of Main Features of a Geothermal System around Strato-Volcanic Intrusion/ Extrusion (Henley and Ellis, 1983).

(2) 深成活動／地表近くでの相互干渉

マグマ溜りとの相互干渉による水の熱的特性や密度は、地表近くの水に対し、流れ特性を支配している局所的な動水勾配に効いてくる。多孔質地帯では、上昇する熱水は、局在化する深部マグマ溜りから数kmの範囲に亘って飛散するかもしれない。亀裂の多い地帯では、上昇する熱水は、亀裂や割れ目を移行する。これらの熱水は、母岩中を上昇していくうちに、追加物質を一掃し、極度の高温により、溶解ガス成分に富み、静岩圧の低下とともに、上昇流を沸騰させる。上昇流体は、地表から1 km以内まで到達し、冷却されると、水と蒸気の2相に分離する。よって、地下500~1,000 m以内の岩石は、熱水、蒸気あるいはその両方と接触し得る。

蒸気分離プロセスは、浅層地下水による噴気並びに蒸気／ガス吸収を生ずる。このような混合プロセスによって、希釈された天水から硫酸塩、重碳酸塩から塩化物に富むマグマ塩水までの範囲の混合水が生ずる。地下数100 mで200℃以上の温度状態に達し、熱泉や過熱水、ガスに富む噴気水を放出する。多くの地熱システムで観測されているように、数100~数1,000 l / 秒の高放出率となっている⁽¹²⁾。火成活動地域内では、1~350 kg / m³・年の大量の水が循環する⁽¹⁴⁾。熱水の側方流の程度は、深成岩の端から、3~5 kmのオーダーに広がり得る⁽¹³⁾。

熱水やガスの移行は、地表近くの母岩の極度の変質を招く。これには一次的な亀裂鉱物の変質も含まれるとともに、空隙率、透水係数、亀裂特性（数、開口幅、伝導性など）のような岩石の性質の変化も含まれる。これらの性質の変化は、動水勾配、不安定な滞水層の形成、岩石中のせき止め並びに被覆（水流やガス流に対し、岩を効果的に封印するケイ土の沈積物の形成など）及びこれによる局所流の方向転換のようなより広範囲な岩石の性質に影響を与え得る。

深部での新しいマグマ溜りの出現、もしくは既存のマグマ溜りの成熟化でさえ、その領域の接続的かつ高まる地震活動並びに新しい断層（活動）を導く⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾。主要なマグマ溜りからの小規模の貫入は、地下1~2 km以内に到達し、そこで冷えて（鉛直方向には）水路のようなみぞ、あるいは（水平方向には）岩床を生成する。

(3) 噴火活動

図13には、島孤火山活動に関連する富士山のような成層火山の断面を示している。この体系では、同様の地下プロセスが生ずる。しかしながら、上昇マグマとの接触によって組成変化する側方熱水の広がり程度は、深部マグマ溜りの場合よりもかなり大きい。熱水は、火山性地熱場の中心から20km以内に生じ得る⁽¹⁰⁾。

地表近くで凝結した火山性ガスと蒸気は、空気飽和した天水の酸化状態と結合して、火口中の硫酸塩水となる。通常これは、酸性の火口湖の発端となる。

これに対し、上昇井水の中性近傍のpH、塩化物に富む水の放出は、活火山の噴気口から数10kmの範囲にわき水を生じる。確かに、噴気孔から数km以内のこのような水の放出は、火山構造の平均地高の持ち揚げなどの激しい起伏により、抑制されている。火山の周囲に降る天水は、下降するほど段階的に加熱され、中央火山噴気口の周り数10kmに広がる熱勾配まで現れる。大部分のこのような熱水の流れは、中心的な火山活動による地表近くの側方の極端な温度上昇を招く。地下水の放出パターンは、火山の周囲に蓄積する噴出物によって生ずる地形変化に支配される。溶岩や火砕物（灰、軽石、大規模な火砕流堆積物）の大気中への散乱は、火山活動中央から数100kmの範囲に及ぶ。これらの堆積物は、地表の排水パターンを変化させ、湖沼の形成の原因となる。これらの詳細を生態圏モデルに直接取り込むのは難しいと考えられるが、火山活動による放出物や地表の状態変化は、引き続き線量計算に反映すべきであろう。

(4) 火成活動／日本のアナログ・サイト

日本列島形成における島孤火山活動の果たした大きな役割から推測できるように、日本には数々のわき泉と地熱システムがある⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾。例えば、九州の地熱地帯⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾は、深部マグマ活動の活発な表れである。地下200~400mには、215~290℃の熱水が存在する。熱水力学的に強く変質した岩（葉蠟岩、沸石、緑色片岩の面々）は、上昇する地熱流体の主要な媒体を形成すると考えられる断層、亀裂、割れ目と関連する。いくつかの領域では、酸性の硫酸-塩化物の水に関連して、酸化変質（カオリン鉱物や葉蠟石の形成）が地下600~700m付近で生ずる。表6には、中性付近のpH、薄い塩水に関する沸石の形成で

特徴付けられた変質地帯の組成を示す。これに比較して、本州や北海道での地熱場⁽¹²⁾⁽¹⁸⁾は、活火山の中央上あるいはその近くに位置している。ここでの深部地下水は、200℃以上の温度で、弱アルカリかつ薄い塩水となっている。

(5) まとめ

深成活動と噴火（火山）活動の影響は、地下の水理学的、機械的、熱的、化学的な4つのカテゴリーに分類される。5つ目のカテゴリーとして地表への影響を含むと完璧であろう。生態圏のモデルは、H3レポートの解析には含まれていないため、この生態圏への影響は、次節のシナリオ作成の対象とはしない。地下への影響に対する4つのカテゴリーは、ファーフィールド、天然バリアシステムについての一連の境界条件変化のベースとなるものである。処分場の火成活動までの近接さによって、人工バリアシステムに直接的ないしは間接的な影響が働くであろう。

表6 Typical Hydrothermal Solution from Otake Area, Kyushu, Japan (Ellis and Mahon, 1977).

Component	Concentration (mg/l)	Component	Concentration (mg/l)
pH	8.15 (25°C)	Mn	0.01
Li	5.2	F	4.65
Na	936	Cl	1474
K	131	Br	3.4
Rb	2.4	I	0.26
Cs	0.84	SO ₄	136
NH ₄	0.06	HCO ₃	46
Ca	12.3	B	19.7
Mg	0.19	SiO ₂	665

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

既に2.4.1節において、火成活動を起点とするシナリオ作成を概略的に検討しているが、それは、動燃事業団殿設定の102のFEPリストをベースに、図11のシナリオ作成プロセスに従って表5に示す影響要因・指標（パラメータ）に至るパスを文脈として展開したものであった。ここでは、2.4.2節での検討結果も踏まえ、また、後述する3章でのモデル解析との連結性を鑑み、核種輸送に至るFEPをファーストフィールドとニアフィールドに分けて考えた。また、火成活動以外のFEPを起点とするシナリオの展開も一般には必要と考えられることから、前述の102のFEPの定義との対比を考慮しつつ、Sandiaの方法論⁽¹⁹⁾をもとにprocess system model⁽²⁰⁾によるコードを用いたシナリオ作成の方法を検討する。

プロセスシステムモデルをシナリオ作成に適用するためのステップは、以下の通りである。

1. FEPリストの作成
2. FEP及びFEP間の影響関係を記述したProcess system modelの開発
3. FEP間の影響関係に対する重要度(IL:influence level影響レベル)の割り当て（性能評価上の重要度の高いものから10段階表示（下表参照））

Description of Influence Level (IL) Values.

IL Value	Significance of an Influence on a Full-System PA
10	Total loss of confidence in PA if influence is excluded
8	Considerable loss of confidence if influence is not considered
6	Influence should be included, but marginal effect on confidence
4	PA would be just acceptable without including the influence
2	It would be interesting to include the influence
0	No loss in confidence in the PA if influence is excluded

4. エキスパートグループの知識ベース又はFEPの影響を記述する性能評価（計算）モデル、の適切さの判定
 (IL=10で適切な知識ベースがないインフルエンスは、その計算基盤を開発していく必要があるし、逆に実際的なモデルがあってもIL=2のインフルエンスについてはこれ以上の検討は多分正当化されない)
5. Process system modelの運用結果より得られるFEP並びにFEP間の影響に関する有益な知見に関する考察（例、周囲からの影響に対するIL値が低く、IL値が高いFEPだけで閉じたグループを構成しているケースの発見）
6. Process system modelのメリットを生かした使い方
 - a. 地球化学、冶金学、化学工学、水文学、保健物理学の各異分野のエキスパート間のFEPのILレベルに対する共通のコンセンサスの取得
 - b. 見落とされていた新しいFEP間インフルエンスの認知並びにそのILレベルが高ければさらにデータ収集の方向付けのサポート
 - c. 異なるタイプのFEP間の、共通のコンセンサスに立脚した相対的重要度付け。言い換えれば、性能評価上のデータ収集の優先度の明確化
 - d. 基盤となり得る性能評価計算群の一連の手順の明確化
7. Process system model内部構成要素から除いたFEP (EFEP) を新規境界条件変動要因（始点）として取り扱うことによるEFEPの内部FEPインフルエンスへの影響の把握
8. ある影響レベルに対応した性能評価モデルフローチャート（モデル化の過程、評価に適用可能な計算コード、コード間の入出力データ受け渡し）の作成

そこで、この方法論に従って、具体的に火成活動を起点とするシナリオの作成を行うため、表7、表8のようなFEP並びにFEP間の連鎖（文脈）リストを再作成した。

表7 Process system modelのFEP・リスト

1. ファーフィールド／天然バリアシステム

(1) ファーフィールドにおけるコロイド生成 (A.6.8)

コロイドは、1～100nmの大きさの粒子であり、溶液からの直接的な沈殿物もしくは溶液中の小粒子の懸濁液から生成し得る。ファーフィールドでは、岩石の化学的変質 (A.4.8)、存在する亀裂表面の風化 (A.6.10)、亀裂に沿っての機械的分断などによって生じ得る。コロイドは、地下水中の放射性核種を吸着するかもしれないため、放射性核種輸送の大きな潜在要因である。

(2) 分散 (A.6.1)

流れ場の記述の中では、移流項として陽表的に記述できない速度変化が常に存在する。拡散及びこのような速度変化による放射性核種の広がり、一般には“分散”項として記述され、特に放射性核種輸送に関連して重要である。初期に到達する少量の核種でさえ、放射壊変の時間によっては、かなりの放射能を運び得る。分散は長時間に亘って放射性核種の到達時間を広げる働きをするため、放出率のピークは低くなる。

(3) ファーフィールドにおける温度 (-)

地圏における温度変化は、地質学的事象 (A.2)、気候変化 (A.3)、人間活動 (B) によって生じ得る。地圏での温度変化は、ニアフィールド岩石中の温度に影響を与え、逆に、ガラス固化体からの発熱によるニアフィールド岩石温度の上昇もまた、地圏に影響を与え得る。ファーフィールドの温度は、水理学的 (A.5.3, C.1.2)、機械的 (C.1.1, C.3)、化学的プロセス (C.1.3, C.2, * 地下水水質の変化) の各形態や変化率と鋭敏に連動し得る。

表7 Process system modelのFEP・リスト(続き)

(4) 断層 (A.2.7)

断層は、地震等の応力状態の突発的変化あるいは造山運動や火成活動 (A.2.3) のような岩体の緩慢な動きによって生じ得る。その結果、亀裂が生じ、また亀裂に沿った動きによって断層が生ずる。亀裂や断層は流れ場や母岩の特性に影響を与える。

(5) 水理学的モデル (A.5)

岩体中の地下水の流れ及び地下水の流れ、規模、分布、方向の変化に関するもの。流れは、処分場周囲では人工バリアや近くの岩石の変化により、ファーフールドでは、岩石変化と広域的には地下水涵養 (A.5) によって局地的に変化し得る。流れは、更に温度、熱的浮力、断層 (A.2.7) の変化によって影響を受け、ガス生成と移行 (A.6.5) 及び塩水の勾配 (A.6.13) によって変わる。

(6) ガスの発生 (A.6.4)

ファーフールドでは、上昇・減圧熱水もしくは深層メタンガスの過飽和によって生ずる蒸気のように分離ガス相形式に至るプロセスが考えられ、ニアフールド内では、スチール製オーバーバックの腐食 (C.2.1) より生成し得る水素ガスの発生とこれによる緩衝材の損壊 (*人工バリアの幾何学的変形) が考えられる。

(7) 地下水化学 (A.6.16etc., *地下水水質の変化)

ファーフールド地圏内の地下水化学とpH、酸化還元、塩分、陰イオン、有機物、溶解ガス等の地下水組成変化に関するもの。地下水化学は、共存する岩石内の岩-水相互作用 (C.2.2) や鉱物的変質によっても変化し得る。

(8) マトリクス拡散 (A.6.3)

岩石中の亀裂を流れる水中の核種並びに他の化学種が拡散によって多孔質岩中に移行するプロセスを意味し、亀裂充填物や岩体の基質部の各特性 (空隙、鉱物種) に依存する。

表7 Process system modelのFEP・リスト(続き)

(9) 鉱物学的変化(質)(A.2.8)

地下水、岩石、亀裂中鉱物の化学的相互作用(C.2.2)の進行により、処分場からの流路に沿った連続的な固相変化が生ずる。これにより、岩石鉱物の風化(A.4.8)並びに既存あるいは新生成亀裂による再生などが生じ得る。また、地下水化学の変化(A.6.16 etc., *地下水水質の変化)によって風化(A.4.8)や亀裂の特性変化(A.6.10)が生じ得る。さらに、岩石中の温度上昇により、岩石鉱物の変質増加とともに、固相の沈澱・溶解(A.6.7)が生じ得る。これらの変化は、多孔質及び亀裂母岩の流れ特性に影響を与える。

(10)天然バリア中の核種輸送(A.6)

溶解したもしくはコロイドとしての放射性核種の岩石中水流による地圏から生態圏への放出に関するもの。放出率は、人工バリアシステムからの放出に影響され、コロイド形成(A.6.8)、吸着性(A.6.6)、マトリクス拡散(A.6.3)、分散(A.6.1)、放射壊変(C.4.4)、他の付随する輸送プロセスの影響を受ける。

(11)岩石の性質(-)

地下水流並びに岩石中の放射性核種輸送にとって重要な岩石の諸性質・諸状態(条件)に関するもの。断層(A.2.7)、応力(B.1.4,C.3)、変質、温度などの様々なプロセス並びに事象により、これらの性質は時間的に変化し得る。

(12)放射壊変(C.4.4)

放射性核種の壊変特性は周知の通りであり、岩石中を移行する放射性核種の量が減少する。但し、 U^{235} からの Pa^{231} のように娘核種の生成も考慮しなければならない。

表7 Process system modelのFEP・リスト (続き)

(13) ファーフィールドにおける吸着性 (A.6.6)

全ての吸着、ろ過並びにファーフィールド岩石を通過する放射性核種の輸送を妨げたり遅らせたりする他のプロセスを表す。吸着に関する様々なモデルとして、経験的かつ簡単なKd値によるアプローチから、もっと基礎的な2重-3重層モデルまで、開発・提案されてきている。岩石空隙率の時間的变化、吸着鉱物の空間分布の不均質性 (A.2.8)、鉄・アルミニウムのアモルファス酸化物/水酸化物による鉱物粒の被覆 (A.4.8, A.6.10)、チャンネル化した亀裂中の溶存化学種並びに鉱物表面間の接触効率、の全てが考慮対象となり得る。

(14) ファーフィールドにおける応力場 (B.1.4, C.3.2)

結晶質岩中の流れに関する複雑な主要潜在要因は、岩石が変形していること (A.2.8, C.3.3) である。亀裂開口幅が少しだけ変化した (C.1.1) としても、透水性が開口の立方に比例するため透水性の変化は大きくなる (A.5.3)。岩石は、応力場 (C.3.2) に従って変形する。地下水流 (A.5.3) 並びに温度場の変化は岩石に影響を与える応力に変化を生じさせ、それはまた、亀裂の性質、従って地下水流を変化させる。それ故に、岩石の変形 (ゆがみ)、流れ、熱輸送は結合され、廃棄物処分場の性能評価で重要なプロセスとなり、特に火成活動 (A.2.3) のように高熱流を含むシナリオについては重要である。

(15) 地下水の地表での涵養 (A.5, A.3.1)

地下水涵養ゾーンの規模並びに量の変化に関するもの。涵養の速度及び位置は、広域水理特性 (A.5.3) に影響を与え得る。地表への涵養は、気候変化 (A.3)、隆起 (A.2.6)、海面変化 (A.3.3)、あるいは地上の沈澱物もしくは火山灰層の堆積 (A.4.6) によって影響され得る。

表7 Process system modelのFEP・リスト(続き)

2. ニアフィールド/人工バリアシステム

(1) 緩衝材の変質(一)

- 一 地下水中の成分との相互作用、オーバーバックの腐食(C.2.1)からの溶解元素との化学反応、並びに緩衝材中の熱的負荷(C.1.3)により、緩衝材の材質の化学的変質及びそれによる物理的、化学的性質の変化が生じ得る。
- 一 イオン交換によるベントナイト中のNaと空隙水中のK, Caの置換あるいは固溶体加水分解により(C.2.2)、Naベースのベントナイトの可塑性とスウェリング性能の低下が生じ得る。水中のCaは、ベントナイトから溶出した炭酸とともに、方解石の沈澱(A.6.7)を生ずる。このプロセスの可能性は、方解石の溶解度(A.6.7)が温度上昇とともに低下するので、高温の間は最も大きくなる。方解石の沈澱、セメンテーションは、緩衝材中の空隙のブロック化と弾塑性の低下につながり得る。
- 一 オーバーバックの腐食中に溶解したFeは、イオン交換によりベントナイトと相互作用(C.2.2)し、NaはFeによって置き換えられるかもしれない。このプロセスは、Na-K-Ca交換と競合して発生し、ベントナイト緩衝材の物理的性質にNa-K-Ca交換と同様の効果を与えることが考えられる。さらに、Feは、緩衝材中で沈澱(A.6.7)し、その結果空隙率が低下し、同時に弾塑性も低下するかもしれない。
- 一 ガラス固化体から溶出した元素のベントナイト緩衝材中での沈澱(A.6.7)により、緩衝材の空隙率が低下し、同時にセメンテーションと可塑性低下を生じ得る。

(2) ニアフィールドにおけるコロイド生成(A.6.8)

ニアフィールドのコロイドは、ガラス固化体の溶解(A.6.7, *人工バリアの幾何学的変形)や粘土あるいはオーバーバックの腐食生成物(C.2.1)の懸濁粒子から生成し得る(ファーフィールド(1)参照)。

表7 Process system modelのFEP・リスト(続き)

(3) オーバーパットの腐食(C.2.1)

- 損壊と緩衝材の水の貫通(C.5.1)後のオーバーパット外表面の腐食、及び損壊とオーバーパットの水の貫通後の連続するオーバーパット内表面の腐食に関するもので、全面腐食、局部腐食(ピitting)、応力腐食、ステンレススチール製キャニスターの存在によるガルバニック腐食、クレビス腐食等を含む。
- 水と接触するスチール表面は、腐食を受け易い。もし酸素が存在すれば(A.6.17)、酸化並びにスケールからの鉄の溶解及び鉄酸化物が生じる。水素発生型の腐食は、酸素のないところで生じ得る。水素圧の蓄積は、分離ガス相の形成並びに移行によって緩衝材の物理的崩壊(多分一過的なもの)が生じ得る(C.3.5)が、およそ腐食速度を抑制する方向に働くであろう。
- 酸化物もしくは水酸化物層の存在は、不動態層として作用し、従って腐食速度を低減する。しかし、不動態層の安定性は、時間的に限界が存在し得る。オーバーパット内の温度と水の組成は、腐食速度と腐食生成物の種類に影響を与える。スチールの腐食に影響を与える化学種は、炭酸塩、塩化物、硫酸塩、硫化物、窒化物である。炭酸塩は、陽子供給の担い手として作用し、スチールの腐食に触媒的な効果を持つ。酸化性雰囲気(A.6.17)においては、塩化物は局部腐食のきっかけを与える担い手として作用し、還元雰囲気のもとでは不動態の酸化物層は塩化物の存在する中では、不安定となる。硫酸塩は、還元雰囲気のもとでは酸化の動因として作用するが、すぐには還元されない。しかしながら、もし、炭素源が、鉄の酸化と溶解を引き起こしながら存在するならば、硫酸塩は微生物活動によって硫化物となる。硫酸塩並びに硫化物と同様に、窒化物は、還元雰囲気のもとではカーボンスチールによって還元されるかもしれない。

(4) 緩衝材中の拡散(C.5.2)

冠水した緩衝材中の水溶性化学種、ガス、コロイド/粒子等の拡散輸送に関するもの。圧密ベントナイト埋め戻し材の非常に低い透水性のために、移流による輸送(C.5.1)が全く抑制され、人工バリアシステム内の元素の輸送メカニズムは拡散支配と考えられる。圧密ベントナイトの微細空隙構造もまたフィルターとして有効に作用し、緩衝材を通るコロイドあるいは大粒子等の拡散輸送を妨げる。

表7 Process system modelのFEP・リスト(続き)

(5) 緩衝材の浸食(*人工バリアの幾何学的変形、A.4.8)

緩衝材中の固体状の物質は、流れる地下水によってけずりとられ運搬されるかもしれない。そしてその物質の欠損によって緩衝材の透水係数や空隙率等の性質に影響が生じ得る。このプロセスは、同時に生じ得る化学的変質とは区別して考えるべきであろう。

(6) ガラスの溶解(A.6.7、*人工バリアの幾何学的変形)

ガラスの溶解速度や放射性核種の初期放出に関するもの。溶解速度は、温度、Eh、pH及び炭酸塩、リン酸塩、その他の錯形成の動因となるイオン濃度の関数になり得る。ガラスからの崩壊熱は、温度に影響する。水の放射線分解(A.4.1)により生成した酸化性物質の存在は、オーバーパックの腐食(C.2.1)による溶解した鉄とともに酸化還元状態にとって重要である。他のイオン濃度は、オーバーパックを貫通する水の組成に影響される。放射性核種濃度は、その後溶解度制限によって支配され得る。

(7) オーバーパックの機械的損傷(*人工バリアの幾何学的変形)

腐食は、最終的にはオーバーパック厚の外側の腐食許容部位を取り除いてしまいうだろう。腐食したオーバーパック厚が構造的許容厚以下になると、オーバーパックは機械的に損壊するものと想像される。オーバーパック上に作用する機械的応力もしくは剪断力の増加(C.3.2)は、影響の大きさ、オーバーパックの設計圧、加工・設置等に依存し得る機械的強度低減程度によっては早期損壊(B.1.6)を引き起こし得る。損壊の時期は、ガラス溶解の開始に影響を与える。

(8) ニアフィールドの流れ(A.5.3、A.6.1)

緩衝材周囲の加速された流れは、トンネル掘削の機械的効果(C.3.2)あるいはファーフールドの流れ場(A.5)の変化により、水理学的特性の一連の変化となって現れ得る。選択的流路が、応力弛緩もしくは緩衝材周りの岩石のセメント化の結果として形成され得る。また、あらゆる化学的、物理的劣化プロセスによってこの領域の全体的な流れの性質の変化を引き起こし得る。この領域の加速された流れの一次的効果として、緩衝材物質の浸食(*人工バリアの幾何学的変形、A.4.8)が考えられる。また、ニアフィールド岩石中の流れの二次的効果としては、緩衝材を通る放射性核種輸送の境界条件への影響(A.6.2)が考えられる。

表7 Process system modelのFEP・リスト(続き)

(9) ニアフィールド応力場と断層(C.3.2,A.2.7)

処分場掘削(B)並びにガラス固化体からの発熱と結合したオーバーバック用掘削穴による応力変化は、処分場近傍での透水性(A.5.3)に影響を与える。ニアフィールド中の応力変化の他の原因としては、ベントナイト緩衝材の膨潤圧とオーバーバックの鉄腐食生成物の広がり(C.2.1)が考えられる。さらに、ファーフールド岩石の熱-水-応力連成効果(B.1.4,C.1)は、ニアフィールド岩石と人工バリアシステムの応力場と断層に影響を与え得る。これらの変化は、オーバーバックの初期の機械的あるいは、緩衝材の物理的崩壊(*人工バリアの幾何学的変形、A.4.8)をもたらし得る。

(10) ニアフィールド温度(-)

緩衝材中の温度の時間的、空間的变化に関するもの。ガラス固化体での崩壊熱は、伝導と対流により周囲に伝播していき、ベントナイト緩衝材中の温度上昇をもたらし得る。水で飽和しているベントナイト中の熱伝導は、不飽和状態のベントナイト中の熱伝導よりも効率的と言える。これは、飽和状態に到達するまでの時間が初期のベントナイト中の温度レベルへ何らかの影響を及ぼし得るという意味である。ベントナイト厚上の温度差、温度勾配もまた初期に最も高く、ベントナイト緩衝材の再冠水(C.5.1)に影響を与え得る。もし、ニアフィールド温度が(たとえば、近くの火成活動(A.2.3)による外熱の影響により)長時間100℃をかなり越えるような場合には、圧密ベントナイト緩衝材中の粘土は変質し、緩衝材の性質が変化し得る。ベントナイトへの主要な熱的影響は、方解石の沈澱(A.6.7)、ケイ砂の溶解度や沈澱(A.6.7)、モンモリロナイトのバイデライト化あるいは含水雲母化(イライト化)などの熱変成に関連し得る。形成された粘土鉱物種は、溶存カリウム濃度に依存する。即ち、低濃度は、バイデライト化に寄与し、高濃度ならば、非膨張性のイライト化を生ずる。

(11) 人工バリアシステム中の核種輸送(A.6.1, A.6.2)

緩衝材中の拡散プロセス並びに水流によるベントナイト緩衝材からの放射性核種並びに溶解物質やコロイド状のものの放出に関するもの。放出率は、損傷したオーバーバックからの放出、ガラスの溶解、溶解限度固相の沈澱(A.6.7)、緩衝材中の遅延プロセス(A.6.6)により影響される。コロイドの輸送(A.6.8)は、緩衝材の空隙特性、即ち、緩衝材がどの程度、コロイドのフィルターとして作用し得るかに依存する。緩衝材からの放出は、引き続き、多孔質あるいは亀裂状ファーフールド岩中の放射性核種輸送に影響を与える。

表 7 Process system modelのFEP・リスト (続き)

(12) 空隙水の化学 (A.6.16 etc., *地下水水質の変化)

- ベントナイト緩衝材の寿命、オーバーパックの腐食 (C.2.1)、オーバーパックから放出される放射性核種の化学的分配 (A.6.9) に影響する化学種の濃度に関するベントナイト緩衝材中の水化学に関するもの。酸化還元状態 (Eh)、pH (A.6.16)、錯体陰イオン (A.6.9) と関連し得る。
- 再冠水の間、ベントナイト中にトラップされる空気の溶け込みによって水中に酸素が含有される (A.6.17)。侵入水の組成は、ベントナイトとの相互作用の結果、変化し得る。Na-ベントナイトと侵入水中のK, Caのイオン交換は、硫化物、硫酸塩、有機混合物 (C.2.3)、炭酸塩のような微量な相の溶解と同様、水の化学組成に影響を及ぼし得る。ガラス表面近傍の水の放射線分解 (C.4.1) は、酸素、過酸化水素、水素を生成し得る。また、水の組成は、オーバーパックの腐食 (C.2.1) 結果としても変化し得る。
- 人工バリアシステム内の空隙水の組成は、溶解度、吸着性のような放射性元素の溶液特性と同様、緩衝材、オーバーパック、廃棄体の反応率や安定性に影響を与える。

(13) ベントナイト緩衝材の性質

- ベントナイト緩衝材の水理的、化学的、機械的性質に関するもの。緩衝材の主要な機能は、水理的バリアとして作用することと、オーバーパックを機械的に保護することである。それ故に、緩衝材は、低透水性を確実にするスウェリング能力と機械的なインパクトに抵抗するための良好な弾塑性、自己回復力を持つべきである。さらに、高い吸着能により、損壊したオーバーパックから逸脱する放射性核種輸送の遅延効果が高められよう。
- これらの諸性質は、緩衝材の劣化の結果として、時間的に変化し得る。スウェリング性能と可塑性の低下あるいは損失は、イオン交換、緩衝材のセメンテーションの起因となる沈澱 (A.6.7)、イライト化への転換、ゼオライトと含水ケイ酸塩の形成 (C.2.2) による化学的劣化によって生じ得る。また、空隙水の高塩分化 (A.5.4) は、粘土のスウェリング性能を低下させる。その結果として、機械的、水理的抵抗の低減並びに緩衝材中の選択的流路の形成 (A.5.3) があり得る。

表7 Process system modelのFEP・リスト(続き)

-
- ガスの発生・輸送 (A.6.4) の結果として緩衝材は部分的に不飽和化し得る。これは、緩衝材中の水相での水流 (A.5.3) 並びに放射性核種輸送 (A.6.1) に影響を与える。
 - 周囲の空洞と損壊したオーバーパックへのスウェリングもしくは緩衝材の浸食 (* 人工バリアの幾何学的変形、A.4.8) による緩衝材密度、希釈の低下は、緩衝材の水力学的抵抗を低減し得る。化学的劣化は、損壊したオーバーパックから放出した放射性核種に対して有効な吸着能 (A.6.6) を低減し得る。イライトやゼオライトもしくは含水雲母への転換のような緩衝材組成の変化は、吸着に影響を与える緩衝材表面の特性を変化し得る。

(14) オーバーパックの性質 (-)

性能評価計算に必要な軟スチール製オーバーパックの諸性質に関するあらゆる情報に関するもの。即ち、組成、大きさ、形状/方向、強度、耐食性、封入/溶接法などに関する全ての情報を含む。

(15) ガラス固化体の性質 (-)

ガラス固化体の性能に関する諸性質、即ち、組成、放射性核種インベントリ、大きさ、密度、質量、体積、割れ係数などが含まれる。

(16) 放射壊変 (C.4.4)

放射壊変により、ガラス固化体内の放射エネルギーが変化し、崩壊熱を生ずる (ファーフィールド(12)参照)。

(17) 放射性元素の溶解度 (C.1.3)

オーバーパックが損壊した後、オーバーパックに入り込む空隙水中へのガラスの溶解によって放出される固化体含有放射性元素の溶解度に関するもの。溶解度はガラス溶解により放出される放射性元素の多く (ほとんどとは言えなくとも) のニアフィールド中の濃度と人工バリアシステムからの放出率を制限し得る。溶解度は、温度並びに酸化還元、pH (A.6.16)、元素の化学種分配に影響する陰イオンと錯体 (A.6.17) の濃度に依存する。

表 7 Process system modelのFEP・リスト (続き)

(18) 緩衝材の再冠水とスウェリング (C.3.2, C.5.1, * 人工バリアの幾何学的変形)

- 処分孔中のベントナイト埋め戻し材は、周囲の母岩から水を吸い込み、材料のスウェリングを引き起こす。水が飽和してスウェリングした後、ベントナイトは低い透水係数と材料の均質化と自己回復を導く高い膨潤圧を持つ。
- ベントナイトの完全な飽和までにかかる時間は、ベントナイト中の初期の水量、近隣の岩石から処分ゾーンへの地下水流 (A.5.3)、及びオーバーバック内側のガラスからの発熱量 (C.1) にある程度依存する。
- 飽和期間中、オーバーバックに近接する緩衝材中の温度が高くなると、水中の元素の沈澱 (A.6.7) とともに入ってくる地下水の蒸発が生ずる。この沈澱は、緩衝材材料のセメンテーションを引き起こし、粘土のスウェリング性能低下をもたらす得るが、同時に透水係数の低下も引き起こし得る。蒸発並びに沈澱は、初期に水で飽和しているベントナイト中では生じない。
- 一連の水のとり込みの結果として、ベントナイト緩衝材は、処分孔中のオーバーバックと母岩との間の空間を埋めつくすまで膨潤するだろう。処分孔を横切る亀裂中へのスウェリングも考えられよう。スウェリングの程度は、ベントナイトの水理学的性質と膨潤圧に影響する。結局、処分孔を横切る亀裂内へのさらなるスウェリングは、処分孔に束縛されたスウェリングと比べて透水係数の増加と膨潤圧の低下をもたらす得る。
- 膨潤圧は、オーバーバックと周囲の岩体に影響を与える。オーバーバックは、ベントナイト膨潤圧に耐え得る設計でなければならない。しかしながら、オーバーバック材よりもかさばった腐食生成物の蓄積 (C.2.1) によって、ベントナイト埋め戻し材の圧縮と膨潤圧の増加が生ずる。ベントナイトの損壊したオーバーバック内部へのスウェリングも考慮しなければならないだろう。これにより、緩衝材中の水理学的並びに輸送の抵抗が低減する。不均一なスウェリングが生じ得るが、多分、過渡的な状態 (再飽和期間の) を示すだろう。材料構造の欠陥 (B.1.6) やセメンテーション化などは、定常的な不完全さを引き起こし得る。不均一なスウェリングは、選択的流路もしくは拡散のかわりに、流れ (A.5.4, A.6.2) さえ生じ得る。品質管理 (B.1.6) が良好ならば、そのような確率は低いと考えられる。

表7 Process system modelのFEP・リスト (続き)

(19)ニアフィールドにおける吸着 (A.6.6)

人工バリアシステム、特に圧密ベントナイト埋め戻し材を通る放射性核種輸送を妨害もしくは遅延化するように作用するあらゆる吸着、フィルター効果、その他のプロセスを表す (ファーフィールド (B) 参照)。

表8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト

1. ファーフィールド/天然バリアシステム

- FF1 (断層→ニアフィールドの応力/断層) ファーフィールド中に発生した断層 (A.2.7) のニアフィールドへの広がり (C.3.2, A.2.7)
- FF2 (応力場→断層) 岩石中の応力 (B.1.4, C.3.2) 変化によるファーフィールド地圏中断層 (A.2.7) 発生
- FF3 (応力場→ニアフィールド応力/断層) ファーフィールド中の応力場 (B.1.4, C.3.2) のニアフィールド中応力場 (C.3.2) への影響
- FF4 (ファーフィールド温度→応力場) 温度変化によるファーフィールド地圏中岩石応力 (B.1.4, C.3.2) の変化
- FF5 (ファーフィールド温度→ニアフィールド温度) ファーフィールド地圏中温度のニアフィールド岩石温度への影響
- FF6 (ファーフィールド温度→地下水化学) ファーフィールド地圏中の地下水溶解核種濃度への温度の影響
- FF7 (ガス発生→応力場) ファーフィールド地圏中生成ガス (A.6.4) の岩石中圧力状態 (B.1.4, C.3.2) への影響
- FF8 (水理学的モデル→ニアフィールドの流れ) ファーフィールド地圏中地下水流 (A.5) のニアフィールド岩石中地下水流 (A.5.3, A.6.1) への影響

表 8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト (続き)

-
- FF9 (岩石の性質→ニアフィールドの応力/断層) 母岩の性質と母岩構造の応力場 (B.1.4,C.3.2) への影響
- FF10 (地下水化学→ニアフィールド空隙水の化学) ファーフィールド岩石中の水の非放射性核種輸送 (A.6) の、ニアフィールド岩石中の水のこれらの核種濃度 (A.6) への影響
- FF11 (地下水化学→吸着) 競合し得る非放射性核種濃度、錯形成の要因の量、他の供給源から発生する同元素の濃度 (同位体希釈) に関するファーフィールド地圏中の吸着性 (A.6.6) への地下水化学 (A.6.16etc., *地下水水質の変化) の影響
- FF12 (地下水化学→コロイド生成) pHやイオン強度 (A.6.1, *地下水水質の変化) のファーフィールド中地圏でのコロイド生成並びに安定性 (A.6.8) への影響
- FF13 (地下水化学→鉱物学的変化 (質)) bulkの鉱物学的変化 (A.2.8) や無水ケイ酸、方解石、粘土のような亀裂鉱物の溶解、沈澱 (A.6.7) への地下水化学 (A.6.1, *地下水水質の変化) の影響
- FF14 (鉱物学的変化 (質) →地下水化学) bulkや亀裂鉱物の変化 (質) (A.2.8) の地下水組成 (A.6.16etc., *地下水水質の変化) への影響
- FF15 (地下水化学→ガス発生) 地下水化学 (A.6.16, *地下水水質の変化) の自由ガス相形成への影響
- FF16 (岩石の性質→地下水化学) 岩石鉱物や亀裂充填鉱物 (例えば、酸化還元緩衝性、pH緩衝性など) のファーフィールド地圏中地下水化学 (A.6.16, *地下水水質の変化) への影響
- FF17 (ファーフィールド温度→鉱物学的変化 (質)) 温度のファーフィールド地圏中 (亀裂鉱物まで含め) の変質反応、平衡、速度論 (A.2.8) への影響
- FF18 (ファーフィールド温度→岩石の性質) 温度変化のファーフィールド地圏の性質への影響
- FF19 (岩石の性質→応力場) 岩石の性質や岩石構造の応力場 (B.1.4,C.3.2) への影響
-

表 8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト (続き)

FF20	(応力場→岩石の性質) 岩石応力変化 (B.1.4,C.3.2) によるファーフールド地圏中亀裂の開口、閉鎖、スリッピング
FF21	(岩石の性質→断層) 岩石の性質や岩石構造のファーフールド地圏中亀裂の開口、閉鎖、スリッピングへの影響
FF22	(断層→岩石の性質) 断層 (A.2.7) によるファーフールド地圏の強度や透水性の変化 (A.2.8) 及び断層 (A.2.7) による深部の水と表層水との結合 (A.5.2,A.5.3,A.5.4)
FF23	(鉱物学的変化(質)→岩石の性質) 鉱物の変化(質) (A.2.8) によるファーフールド地圏亀裂表面の鉱物組成、亀裂開口、透水性分布の変化 (A.2.8)
FF24	(岩石の性質→マトリクス拡散) ファーフールド地圏中の亀裂に沿った岩石マトリクスの亀裂表面積や空隙の性質あるいは詰まりの、核種含有水との接触におけるマトリクス拡散 (A.6.3) への影響
FF25	(岩石の性質→コロイド生成) ファーフールド地圏における亀裂や空隙の性質(フィルター効果)のコロイド輸送 (A.6.8) への影響
FF26	(岩石の性質→水理学的モデル) ファーフールド地圏の透水性や飽和状態の岩石中の水流の規模、分布、方向 (A.5) への影響
FF27	(岩石の性質→吸着) ファーフールド地圏の亀裂表面+bulk岩の化学的性質の吸着性 (A.6.6) への影響
FF28	(水理学的モデル→分散) 地下水流 (A.5) の吸着規模 (A.6.6) への影響
FF29	(水理学的モデル→分散) ファーフールド地圏における亀裂中の水の速度や複数の流路の結合 (A.5) の分散 (A.6.1) への影響
FF30	(水理学的モデル→マトリクス拡散) 地下水流 (A.5) のマトリクス拡散規模 (A.6.3) への影響
FF31	(水理学的モデル→天然バリア中核種輸送) 地下水流(極端なチャンネル流も含む)の規模、分布、方向 (A.5) の、ファーフールド地圏からの放射性核種の分布及び放出 (A.6) への影響

表 8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト（続き）

-
- FF32 （マトリクス拡散→天然バリア中核種輸送）ファーフィールド地圏中の放射性核種の岩石マトリクス中への拡散（A.6.3）の、地圏からの放射性核種放出率（A.6）への影響
- FF33 （マトリクス拡散→地下水化学）ファーフィールド岩石中マトリクス拡散（A.6.3）の地下水化学（A.6.16，*地下水水質の変化）への影響
- FF34 （コロイド生成→天然バリア中核種輸送）コロイド・粒子・微生物と結合した放射性核種（A.6.8）のファーフィールド地圏中輸送の地圏からの放射性核種の分布及び放出（A.6）への影響
- FF35 （吸着→天然バリア中核種輸送）（表面並びにマトリクス内の）放射性核種の吸着（A.6.6）の、ファーフィールド地圏からの核種の分布及び放出（A.6）への影響
- FF36 （分散→天然バリア中核種輸送）ファーフィールド地圏中の分散（A.6.1）の、地圏からの核種の分布及び放出（A.6）への影響
- FF37 （放射壊変→天然バリア中核種輸送）放射壊変（C.4.4）の、ファーフィールド岩石中放射性核種輸送並びにファーフィールド地圏からの放出（A.6）への影響
- FF38 （地下水の地表への涵養→水理学的モデル）地圏表層での水の涵養量（A.5,A.3.1）の、岩石中の水流の規模、分布、方向（A.5）への影響

2. ニアフィールド／人工バリアシステム

- NF1 （空隙水の化学→（ファーフィールド）地下水化学）ニアフィールド空隙水から出る非放射性核種（A.6）の、ファーフィールド地圏中の水中でのこれらの核種濃度（A.6）への影響
- NF2 （ニアフィールド温度→ファーフィールド温度）ニアフィールド岩石中温度のファーフィールド地圏温度への影響
- NF3 （人工バリアシステム中核種輸送→天然バリア中核種輸送）人工バリアシステムからの核種放出（A.6.1,A.6.2）の、ファーフィールド地圏中の核種輸送（A.6）への影響
-

表 8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト (続き)

NF4	(ニアフィールド温度→ニアフィールドの応力/断層) 温度変化によるニアフィールド岩石応力 (C.3.2) の変化
NF5	(緩衝材の再冠水とスウェリング→ニアフィールドの応力/断層) ベントナイト緩衝材の再冠水とスウェリング (C.3.2, C.5.1, *人工バリアの幾何学的変形) によるニアフィールド応力 (C.3.2) の増加
NF6	(ニアフィールドの応力/断層→オーバーパックスの機械的損傷) ニアフィールド岩石中の応力場と断層 (C.3.2, A.2.7) によるオーバーパックスの機械的損傷 (*人工バリアの幾何学的変形) (への影響)
NF7	(ニアフィールド温度→オーバーパックスの腐食) 温度のオーバーパックスの腐食速度や腐食モード (C.2.1) への影響
NF8	(放射壊変→ニアフィールド温度) ガラス固化体の崩壊熱発生 (C.4.4) による温度への影響
NF9	(ニアフィールド温度→ガラスの溶解) 温度のガラス固化体の溶解 (A.6.7, *人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF10	(ニアフィールド温度→空隙水の化学) 温度のニアフィールド/人工バリアシステムの水に対する化学種の化学平衡及び濃度 (A.6.16 etc., *地下水水質の変化) への影響
NF11	(ニアフィールド温度→緩衝材の再冠水とスウェリング) 温度の緩衝材の再冠水やスウェリング (C.3.2, C.5.1, *人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF12	(空隙水の化学→緩衝材の変質) 緩衝材中の水化学 (Ca, 炭酸塩, K, Fe, Cu, pH等) (A.6.16 etc., *地下水水質の変化) の緩衝材変質への影響
NF13	(空隙水の化学→オーバーパックスの腐食) 緩衝材中の水化学 (A.6.16 etc., *地下水水質の変化) のオーバーパックス腐食モードや腐食速度 (C.2.1) への影響
NF14	(オーバーパックスの腐食→空隙水の化学) オーバーパックス腐食 (C.2.1) の溶解している多価金属イオン濃度や酸化還元状態 (A.6.16 etc., *地下水水質の変化) への影響

表 8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト (続き)

NF15	(空隙水の化学→放射性元素の溶解度) 水化学 (Eh, pH, 陰イオン濃度など) (A.6.16 etc., * 地下水水質の変化) の、溶解限度固相の形態、安定性、濃度 (C.1.3) への影響
NF16	(ガラスの溶解→空隙水の化学) ガラス溶解 (A.6.7, * 人工バリアの幾何学的変形) のニアフィールド空隙水組成 (A.6.16 etc., * 地下水水質の変化) への影響
NF17	(空隙水の化学→ガラスの溶解) 水化学 (A.6.16 etc., * 地下水水質の変化) のガラス固化体溶解速度 (A.6.7, * 人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF18	(ガラス固化体の性質→ガラスの溶解) ガラスの性質 (組成、表面積など) のガラス固化体の溶解速度 (A.6.7, * 人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF19	(ガラスの溶解→コロイド生成) ガラス溶解 (A.6.7, * 人工バリアの幾何学的変形) の放射性コロイド形成 (A.6.8) への影響
NF20	(ガラスの溶解→人工バリアシステム中核種輸送) ガラス固化体溶解速度 (A.6.7, * 人工バリアの幾何学的変形) の、緩衝材と人工バリアシステムを通過する核種輸送速度 (A.6.1, A.6.2) への影響
NF21	(放射性元素の溶解度→人工バリアシステム中核種輸送) 放射性核種に対する溶解度制限相の形成 (C.1.3) の、人工バリアシステムからの核種の輸送並びに放出 (A.6.1, A.6.2) への影響
NF22	(コロイド生成→緩衝材中の拡散) コロイド/粒子 (A.6.8) の緩衝材中放射性核種の拡散輸送 (C.5.2) への影響
NF23	(放射壊変→人工バリアシステム中核種輸送) 放射壊変 (C.4.4) の人工バリアシステムからの放射性核種放出 (A.6.1, A.6.2) への影響
NF24	(ニアフィールド温度→緩衝材の変質) 温度並びに温度勾配の緩衝材中鉱物の変質への影響
NF25	(緩衝材の性質→緩衝材の再冠水とスウェリング) 緩衝材性質の緩衝材の再冠水並びにスウェリング特性 (C.3.2, C.5.1, * 人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF26	(緩衝材の性質→緩衝材上の吸着) 緩衝材の鉱物学的性質の緩衝材吸着性 (A.6.6) への影響
NF27	(緩衝材の性質→緩衝材中の拡散) 緩衝材性質の、緩衝材中の水溶性化学種、ガス、コロイド化学種の拡散 (C.5.2) への影響
NF28	(緩衝材の性質→緩衝材の変質) 鉱物学的含有量、粒の大きさ、空隙率、その他緩衝材特性の緩衝材変質への影響
NF29	(緩衝材の変質→緩衝材の性質) 緩衝材変質効果による緩衝材の透水性、可塑性、空隙率、吸着性の変化

表 8 Process system modelにおけるFEP間の影響リスト (続き)

NF30	(緩衝材の浸食→緩衝材の性質) 緩衝材浸食 (*人工バリアの幾何学的変形, A.4.8) の緩衝材性質への影響
NF31	(ニアフィールドの流れ→緩衝材の浸食) ニアフィールド岩石中地下水流規模 (A.5.3, A.6.1) の緩衝材浸食 (*人工バリアの幾何学的変形, A.4.8) への影響
NF32	(緩衝材の再冠水とスウェリング→オーバーパックの腐食) 緩衝材の再冠水並びにスウェリング (C.3.2, C.5.1, *人工バリアの幾何学的変形) によるオーバーパック腐食開始時期並びに腐食モード (C.2.1) への影響
NF33	(オーバーパックの性質→オーバーパックの腐食) オーバーパックの組成や加工履歴による腐食モード及び腐食速度 (C.2.1) への影響
NF34	(オーバーパックの腐食→オーバーパックの機械的損傷) 腐食モード及び腐食速度 (C.2.1) によるオーバーパックの機械的崩壊開始時期 (*人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF35	(オーバーパックの腐食→ガラスの溶解) オーバーパック腐食モード及び腐食速度 (C.2.1) の、オーバーパックによる格納機能喪失後のガラス溶解速度 (A.6.7, *人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF36	(緩衝材中の拡散→人工バリアシステム中核種輸送) 緩衝材中の核種の拡散 (C.5.2) の、人工バリアシステムからの核種の輸送並びに放出への影響
NF37	(緩衝材上の吸着→人工バリアシステム中核種輸送) 緩衝材中の放射性核種の吸着の、人工バリアからの核種の輸送並びに放出 (A.6.1, A.6.2) への影響
NF38	(オーバーパックの機械的損傷→ガラスの溶解) オーバーパックの機械的損傷 (*人工バリアの幾何学的変形) によるガラス溶解開始時期 (並びに開始時期分布) (A.6.7, *人工バリアの幾何学的変形) への影響
NF39	(ニアフィールドの応力/断層→緩衝材の性質) 応力の増加もしくは断層生成 (C.3.2, A.2.7) によるニアフィールド岩石の透水性並びに機械的性質の変化

これらの文脈を連結することによって火成活動を起点とする全シナリオの作成を可能とするため、FEP並びにFEP間連鎖に関するH3レポートベース(基本ケース)のインフルエンス・ダイヤグラムを図14に示す。同様にファーフィールド並びにニアフィールドへの影響を表すインフルエンス・ダイヤグラムをそれぞれ図15、図16に示す。

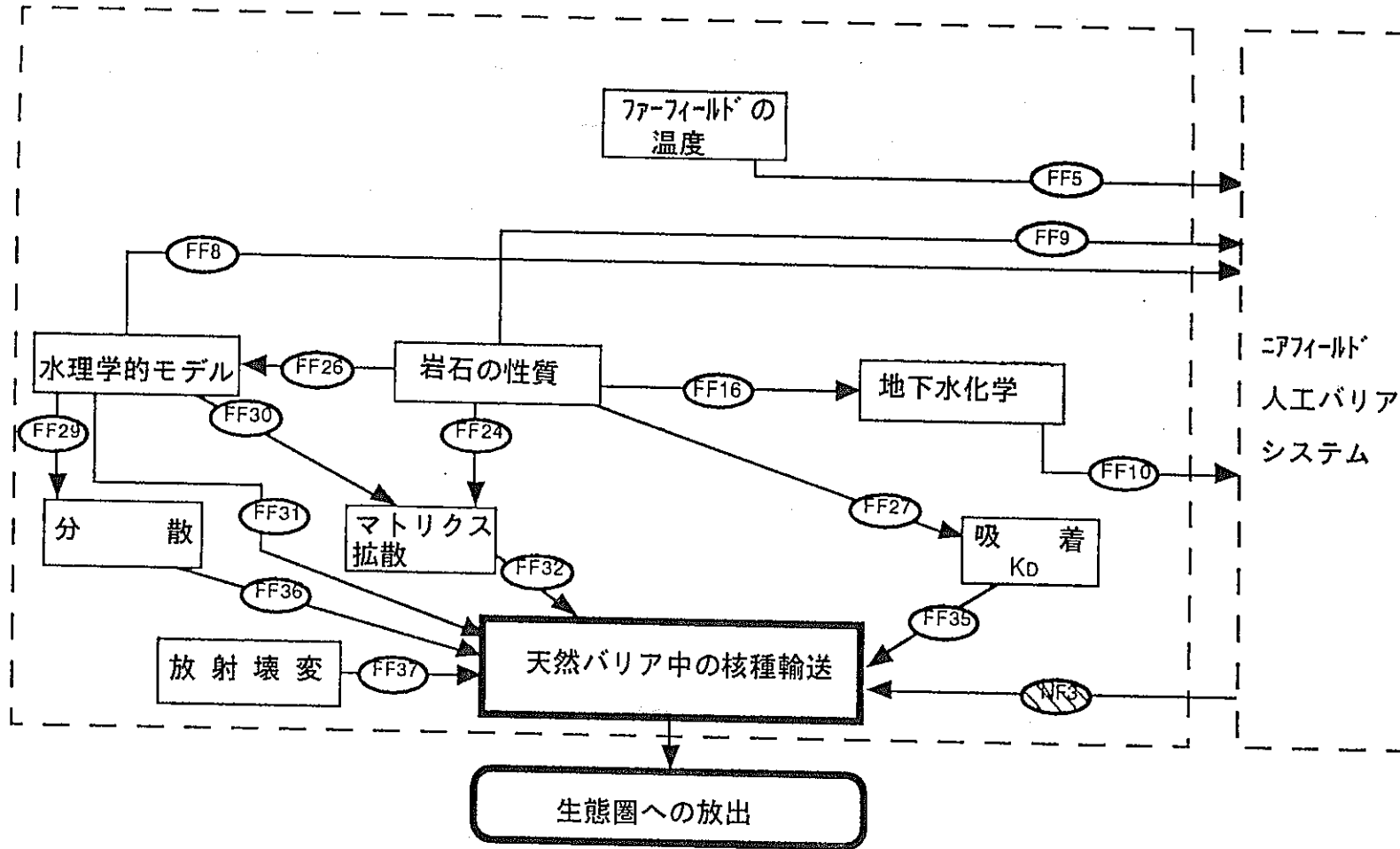


図14 基本ケースにおけるファーフールドのインフルエンス・ダイアグラム

火成活動による変化

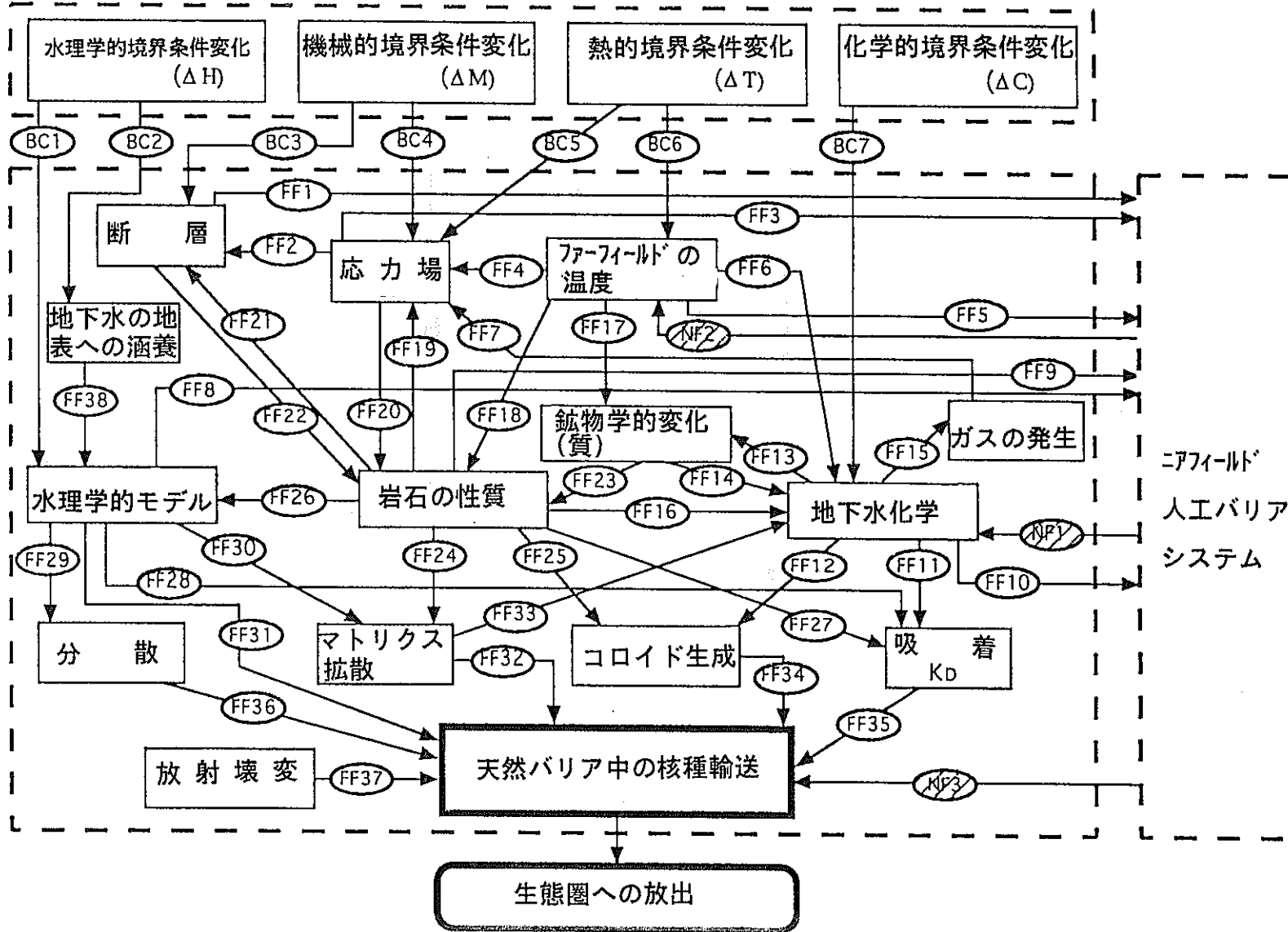


図15 火成活動のファーフイルドへの影響を表すインフルエンス・ダイアグラム

火成活動による変化

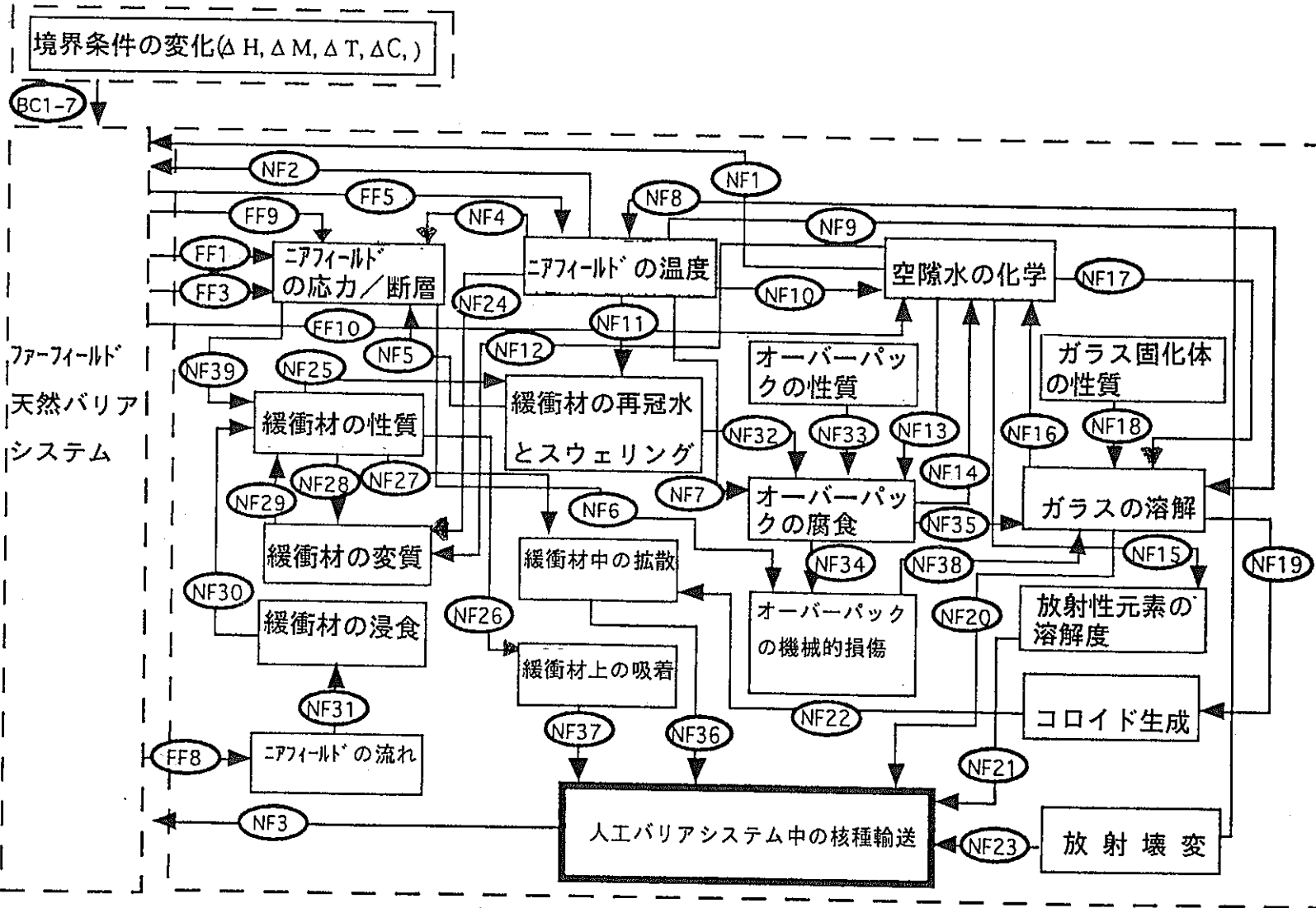


図16 火成活動によるニアフィールドへの影響を表すインフルエンシ・ダイアグラム

ここでは、火成活動による影響は、2.4.2節の考察で示したように、4つのカテゴリ、即ち、水理学的、機械的、熱的、化学的境界条件変化を介して、他のFEP並びにFEP間連鎖に波及していくものと考えた。なお、境界条件変化の影響を表すインフルエンスBC1～BC7の概要についても、同様に表9に記述した。

表9 境界条件変化の影響リスト

(1) 水理学的境界条件変化の影響 (BC1,BC2)

深成活動もしくは火山活動により、活動部から数10kmの範囲で地表水の流れが変動する。この変動は、深部熱流体（過熱水）の強力な上昇対流による。亀裂内の流速は、流量とともにばらつきはあるものの、毎秒数1,000リットルにもなり、およそ $10^3 \sim 10^4$ 年で循環している。さらに、溶岩や火山灰の突出や深成活動による隆起は、地表の排水や涵養パターンに変化を与えるが、この影響は、比較的小さい。

インフルエンスBC1は、火成（深成及び火山）活動による強い局所的な上昇流の流れ場への影響を表し、影響の循環的性質と期間の有限性に留意すべきであろう。

インフルエンスBC2は、火成活動や突き出しによる地下水の地表への涵養パターン変化への影響を表し、活動のおこった時点での変化をステップ関数として表現し得るであろう。

(2) 機械的境界条件変化の影響 (BC3,BC4)

マグマ活動によって、母岩への広範囲な断層生成並びに周囲母岩内の応力増加が生じ得る。 $10^4 \sim 10^5$ 年の活動期間に亘っての最大の断層ずれは、マグマ溜りの上部を直接おおうあるいは近傍の領域に対して数cm～数100mのオーダーである。岩石の耐圧強度までの局地的な増加は、地震の規模と発生周期との間の何らかの関係を与える。

ずれ並びに増加した応力の規模（地震発生周期並びに規模）の分布は、活動地点からの距離の減少関数となり、感度解析の対象となり得る。

表9 境界条件変化の影響リスト (続き)

インフルエンスBC3は、火成活動による周囲母岩中に発達する断層への影響を、他方、インフルエンスBC4は、火成活動周囲の局地的な応力場への影響を、それぞれ表す。これらの影響は、火成活動期間の時間スケール上で何らかの連続的ふるまいをすると考えられる。

(3) 熱的境界条件変化の影響 (BC5, BC6)

熱流体(水と蒸気)の伝導と上昇対流との混合により、火成活動周囲の母岩温度が上昇する。地下200m程度の浅層では最高300℃くらいが予想される。処分場の深度(地下500~1,000m)では、火成活動地点から数10kmの範囲もしくは多孔質岩中では、100℃以上になり得る。このような高温状態の時間スケールは、およそ $10^3 \sim 10^4$ 年程度と、活動事象の全持続期間に比べれば短い。

インフルエンスBC5は、火成活動による熱的境界条件変化の、岩石の熱力学的応力場への影響を示す。同様に、インフルエンスBC6は、熱的境界条件変化の処分場から広がり、かつ放射性核種移行経路に沿ったファーフールド岩石の温度への影響を表す。これらの影響は、火成活動の全期間中、一定の高値に迅やかに到達するものと考えられるべきであろう。

(4) 化学的境界条件変化の影響 (BC7)

火成活動はファーフールド内に、新しいガス、固体、水相中の成分を招来し得る。深部マグマ溜りから地表近く(500~1,000m)への間の移行経路は、熱水の亀裂や断層中の上昇によるものが最も信頼し得る。このような上昇溶液の組成に依存して、周囲母岩が変容もしくは交代作用によって変質するにつれて、付随成分が漏出する。また、2.4.2節で述べたように、地表付近でのこれらの流体の冷却と減圧による蒸気分離は、水の成分の広域化をもたらす。多くの場合、 H_2S のような溶解ガスの離容によって酸性の硫酸塩と塩化物の水が生じ、さらに母岩との相互作用によって変質が進む。

地球化学モデルでは、火成活動に起因する地下水化学と岩石の変質の過程をモデル化している。

インフルエンスBC7は、岩石-水相互作用によるガス、固体、水の成分の可動性と処分場境界内への招来に与える火成活動の影響を表す。このような影響の周期と期間は、水理学的境界条件変化でモデル化され得る周期並びに期間に結びつけられるだろう。

次に、これらの境界条件変化毎に、ファーフールド、並びにニアフィールドへの影響を展開したシナリオ連鎖を、

・影響レベル (IL) = 10 のケース :

もしこのインフルエンスがなければ性能評価の信頼性は完全に失われるケース

・影響レベル (IL) = 6 のケース :

このインフルエンスは除くべきではないが、このインフルエンスがなくなることによる性能評価への信頼性が喪失するか否かのぎりぎりのケース (ILがこれ以下だと、このインフルエンスがなくても性能評価は受容し得るという限界レベル)

のケース別に図示すると、図17～図32のようになる。

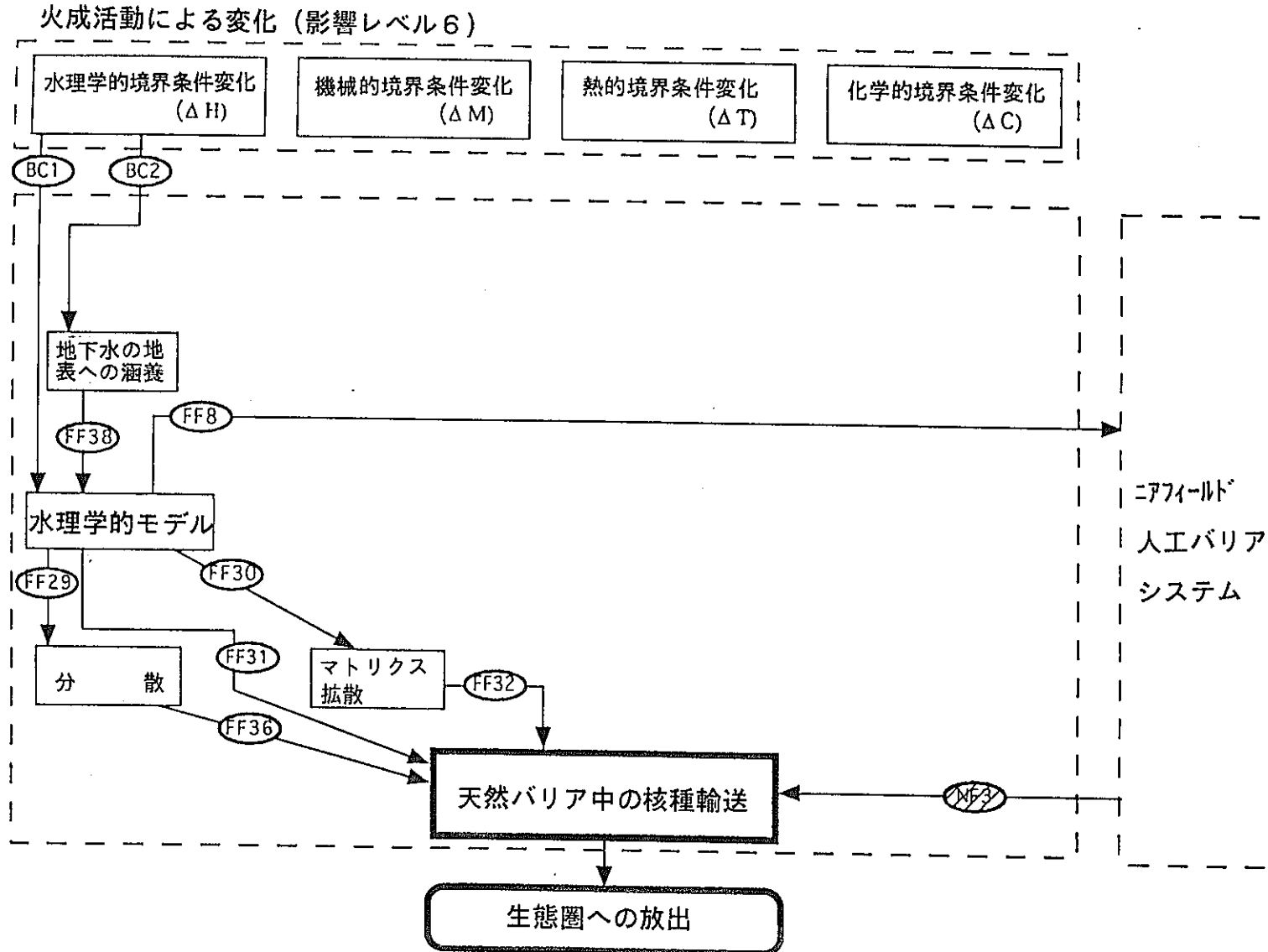


図17 水文学的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ連鎖 (IL=6)

火成活動による変化 (影響レベル6)

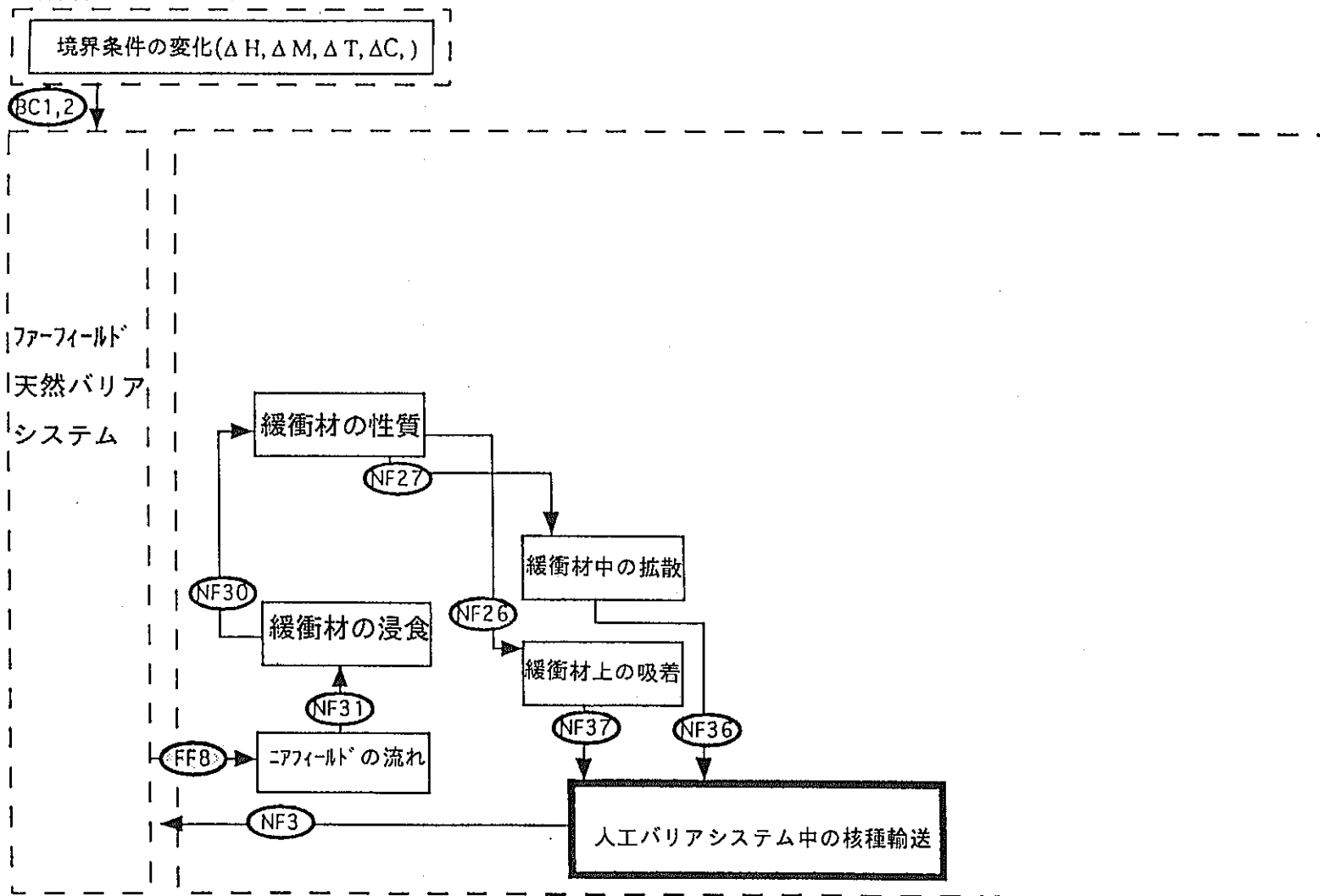


図18 水理学的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=6)

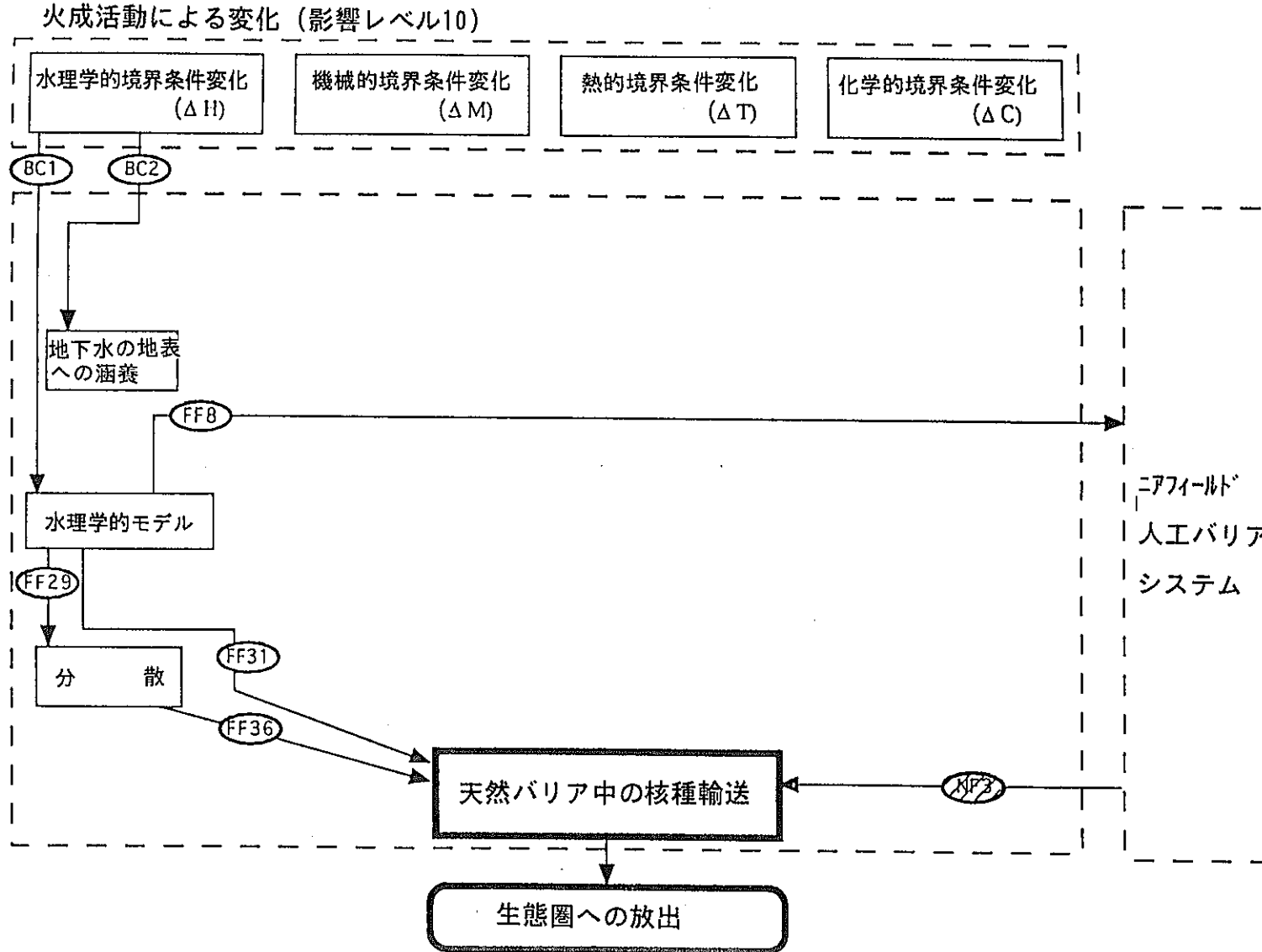


図19 水文学的境界条件変化に対するファーフールドシナリオ連鎖 (IL=10)

火成活動による変化 (影響レベル10)

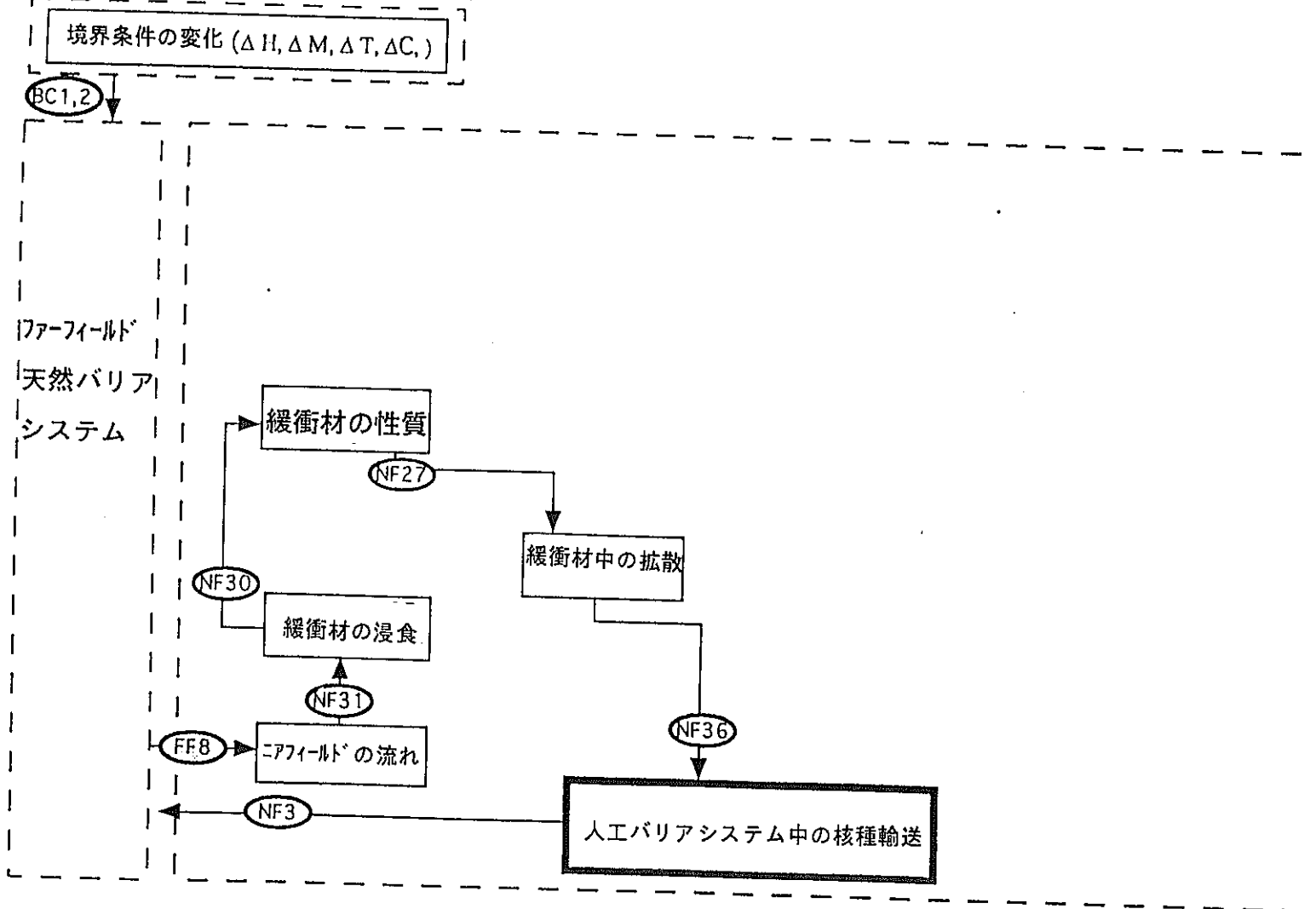


図20 水理学的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=10)

火成活動による変化 (影響レベル 6)

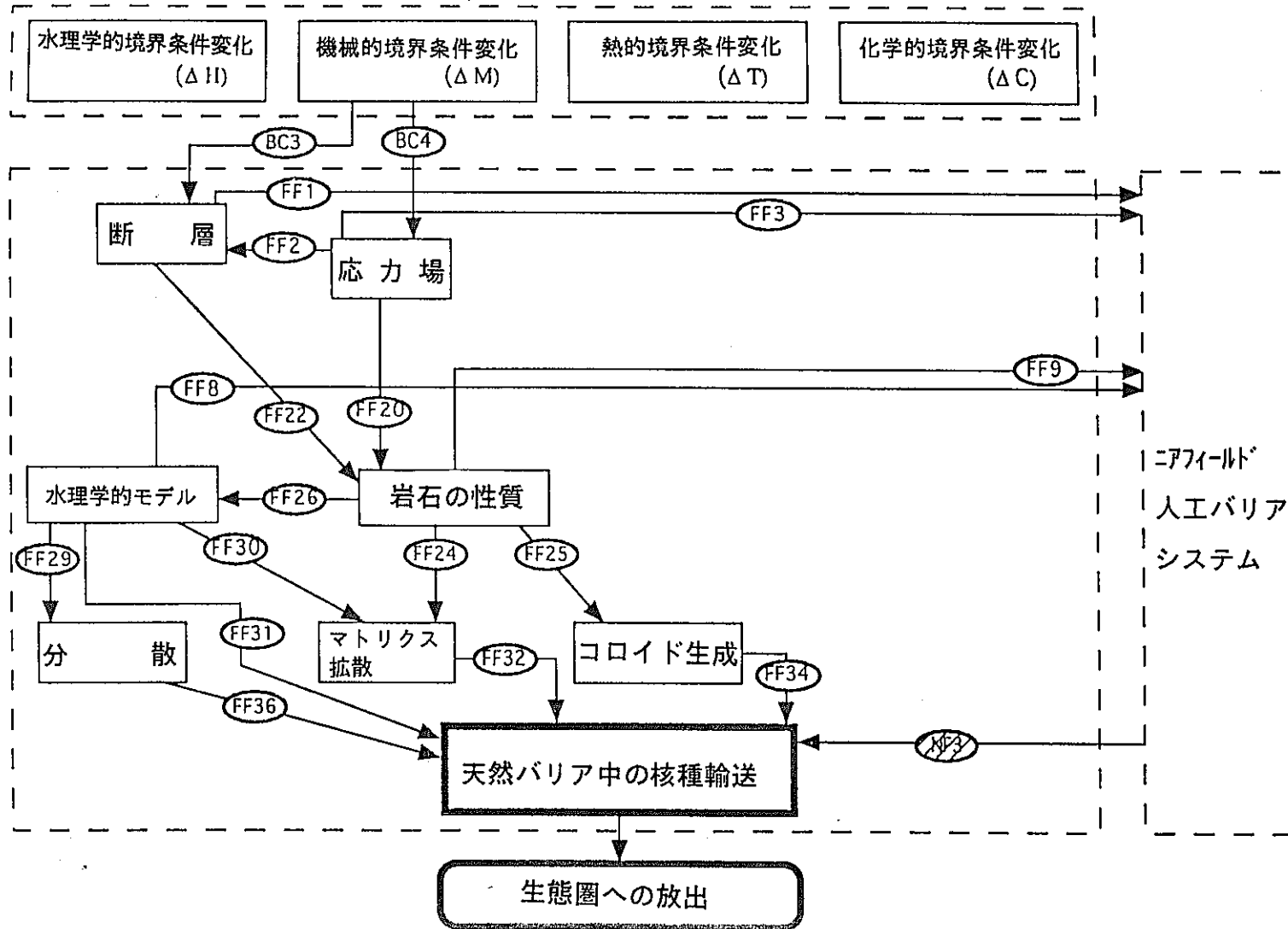


図21 機械的境界条件変化に対するファーフールドシナリオ連鎖 (IL=6)

火成活動による変化 (影響レベル 6)

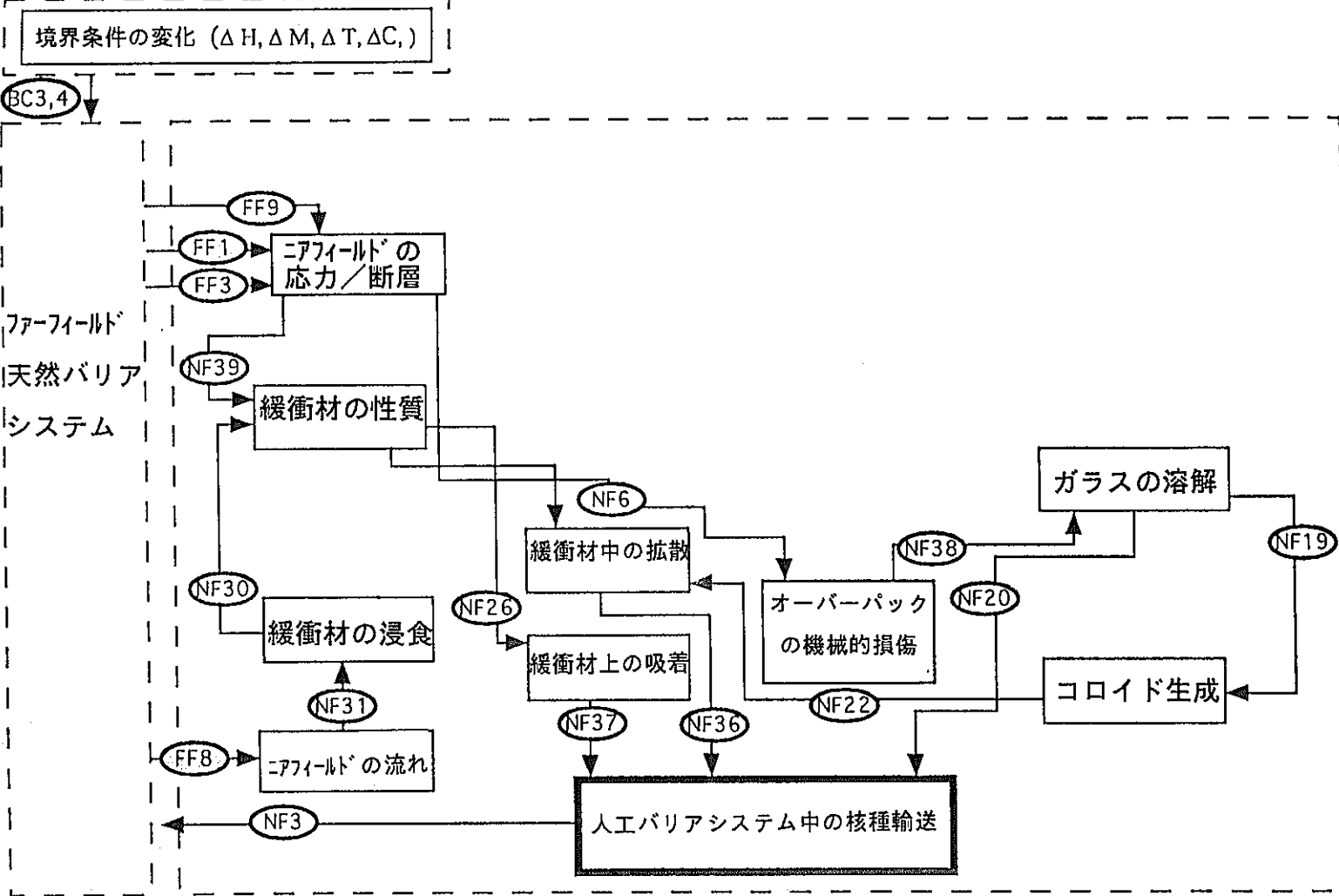


図22 機械的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=6)

火成活動による変化 (影響レベル10)

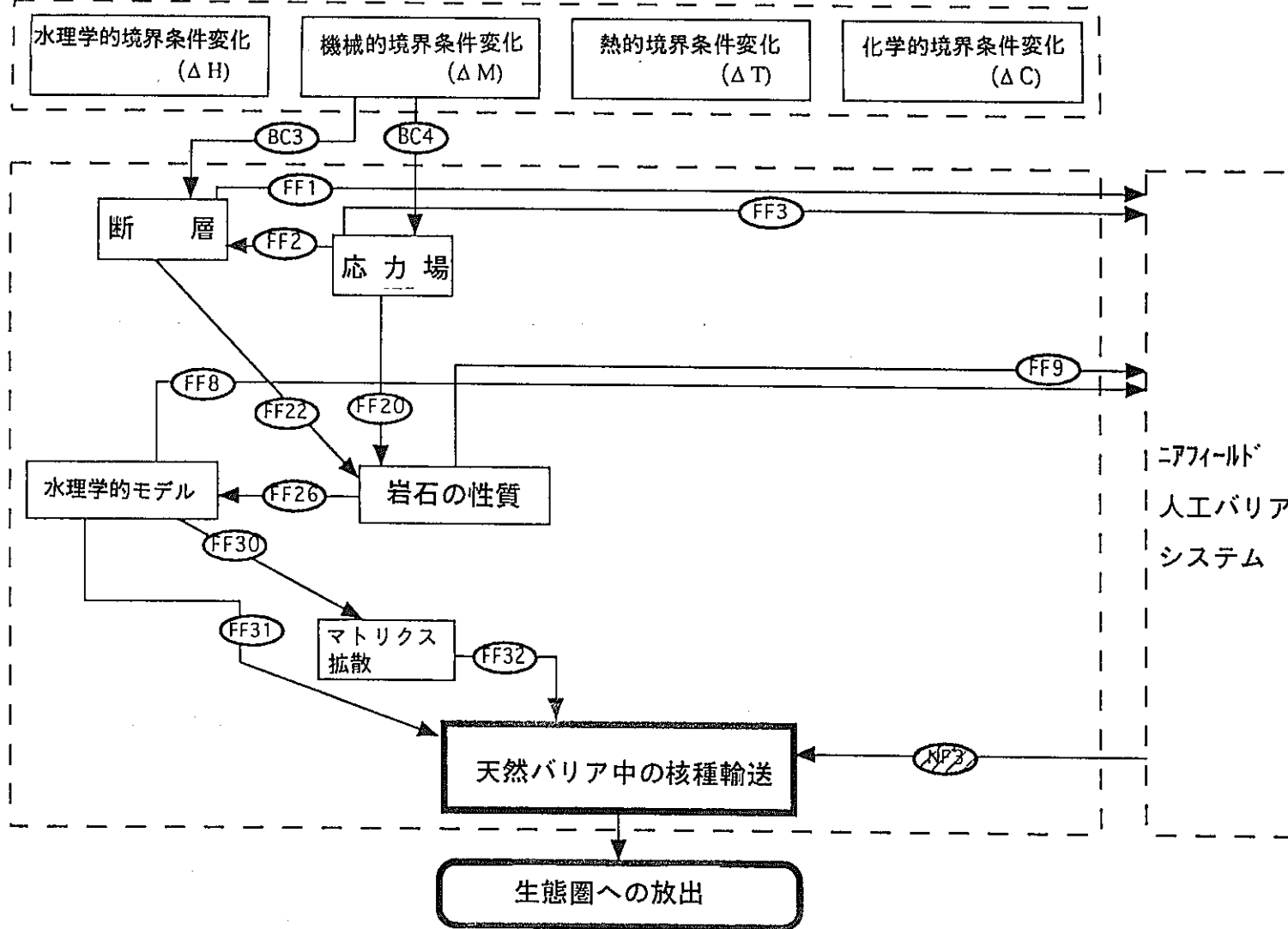


図23 機械的境界条件変化に対するファーフールドシナリオ連鎖 (IL=10)

火成活動による変化 (影響レベル10)

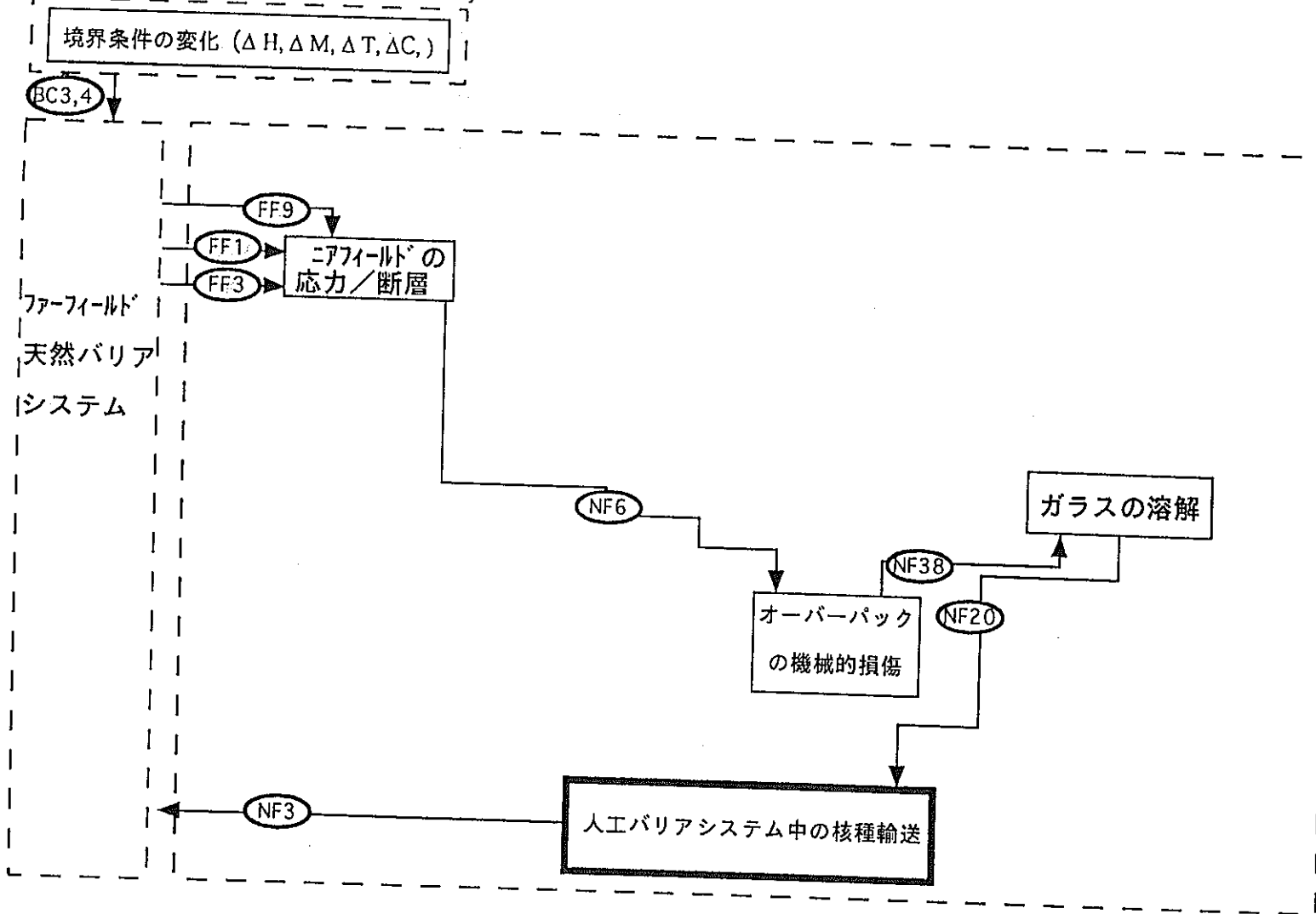


図24 機械的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=10)

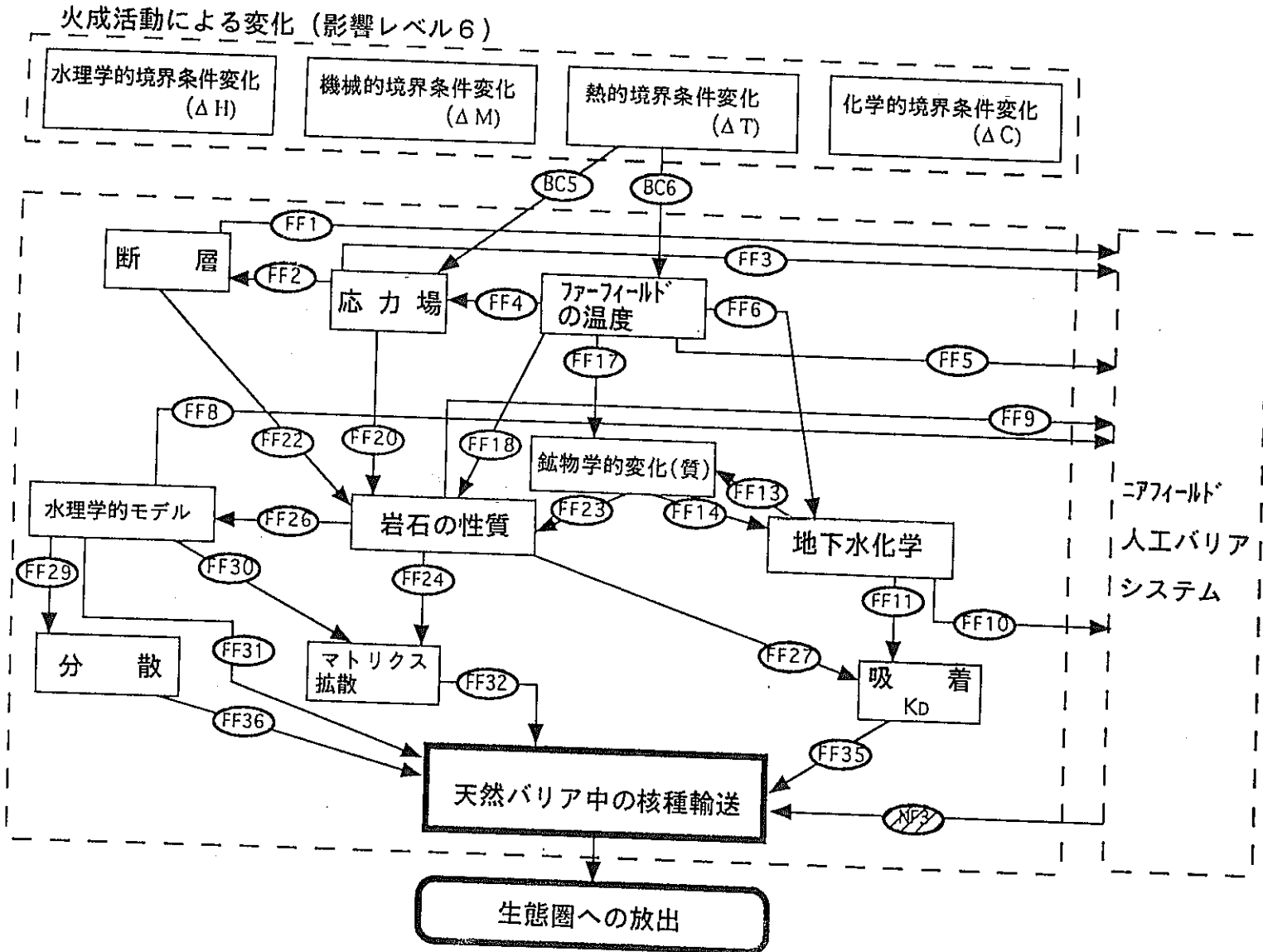


図25 熱的境界条件変化に対するファーフールドシナリオ連鎖 (IL=6)

火成活動による変化 (影響レベル 6)

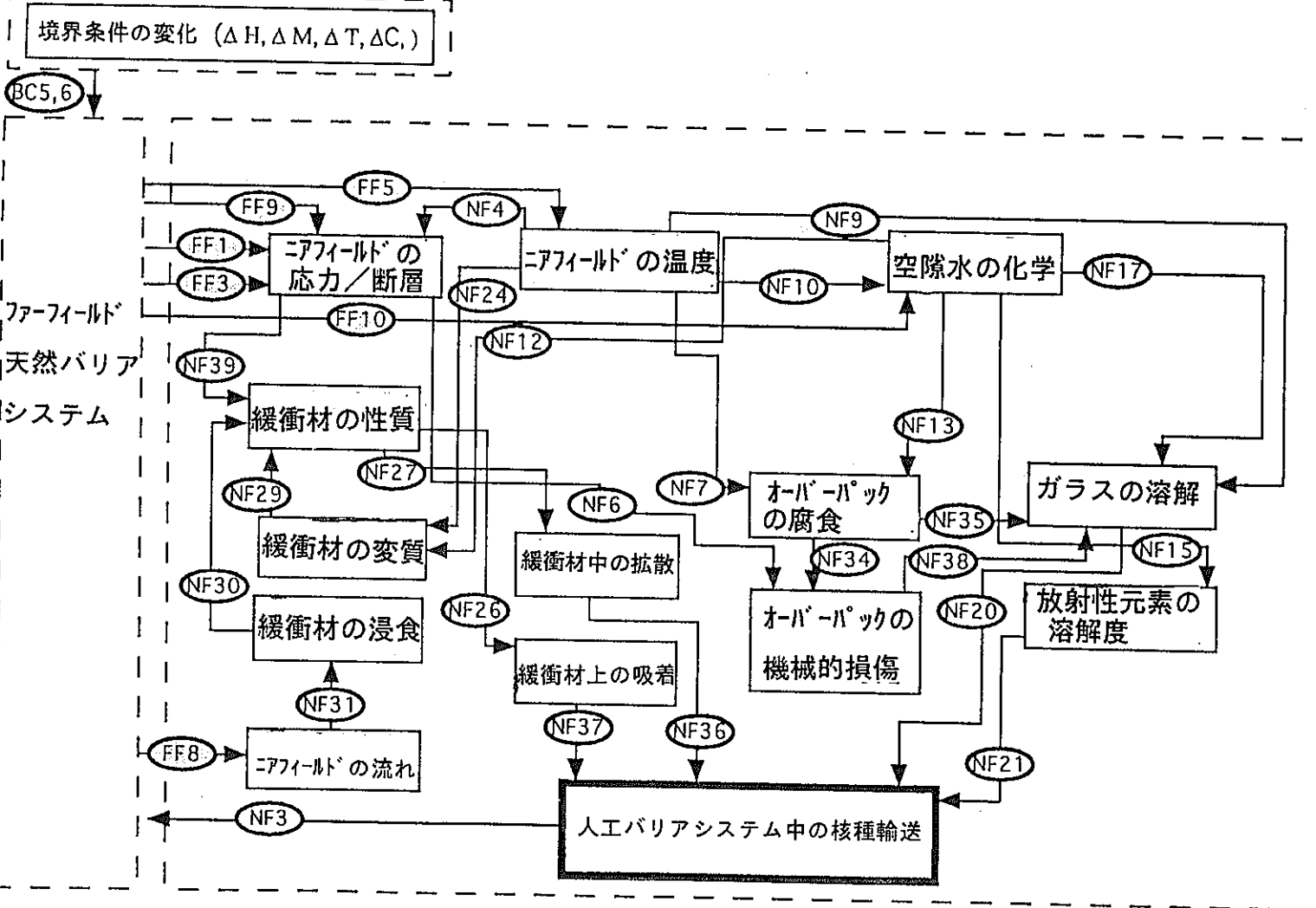


図26 熱的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=6)

火成活動による変化 (影響レベル10)

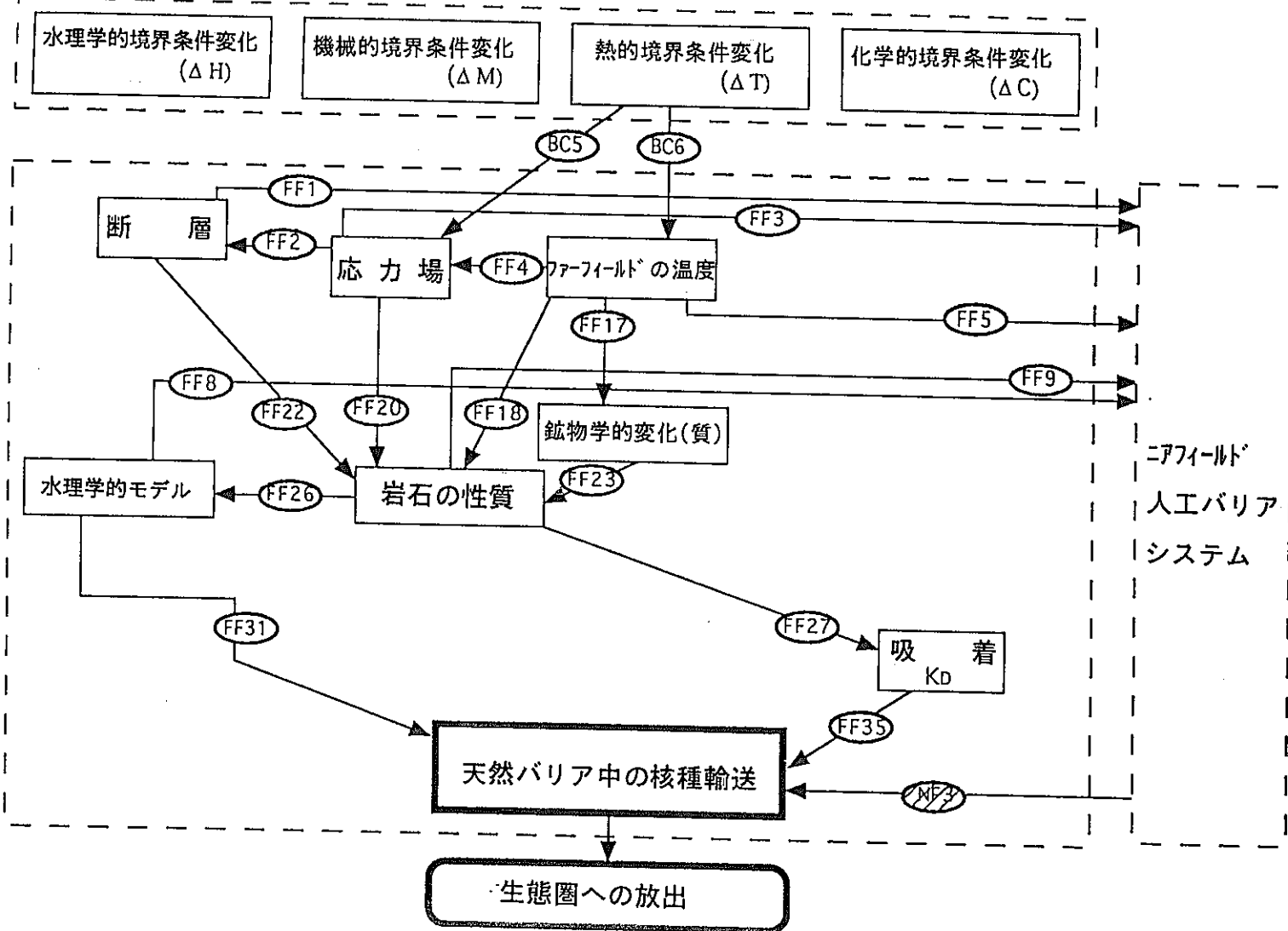


図27 熱的境界条件変化に対するファーフィールドシナリオ連鎖 (IL=10)

火成活動による変化 (影響レベル10)

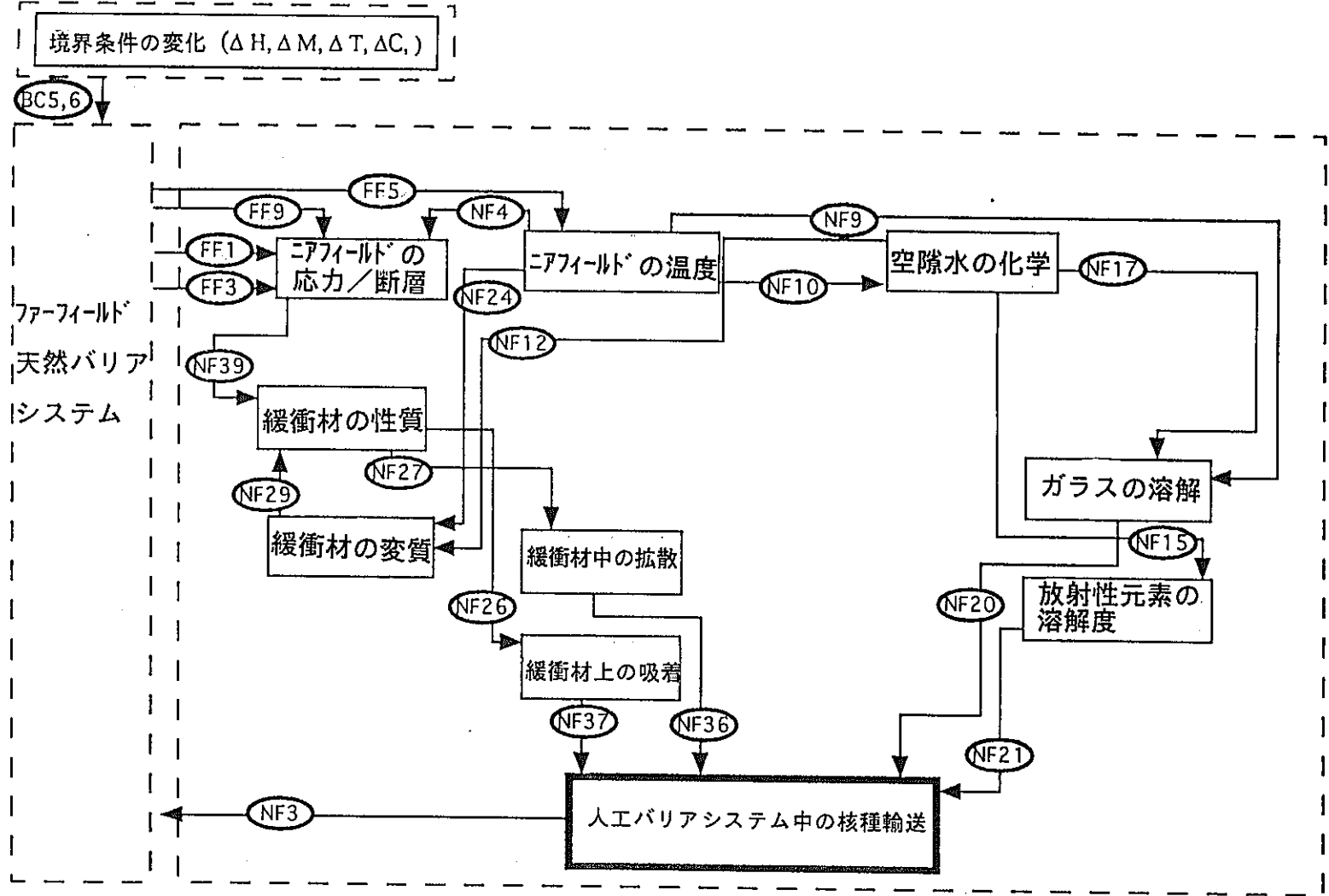


図28 熱的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=10)

火成活動による変化 (影響レベル 6)

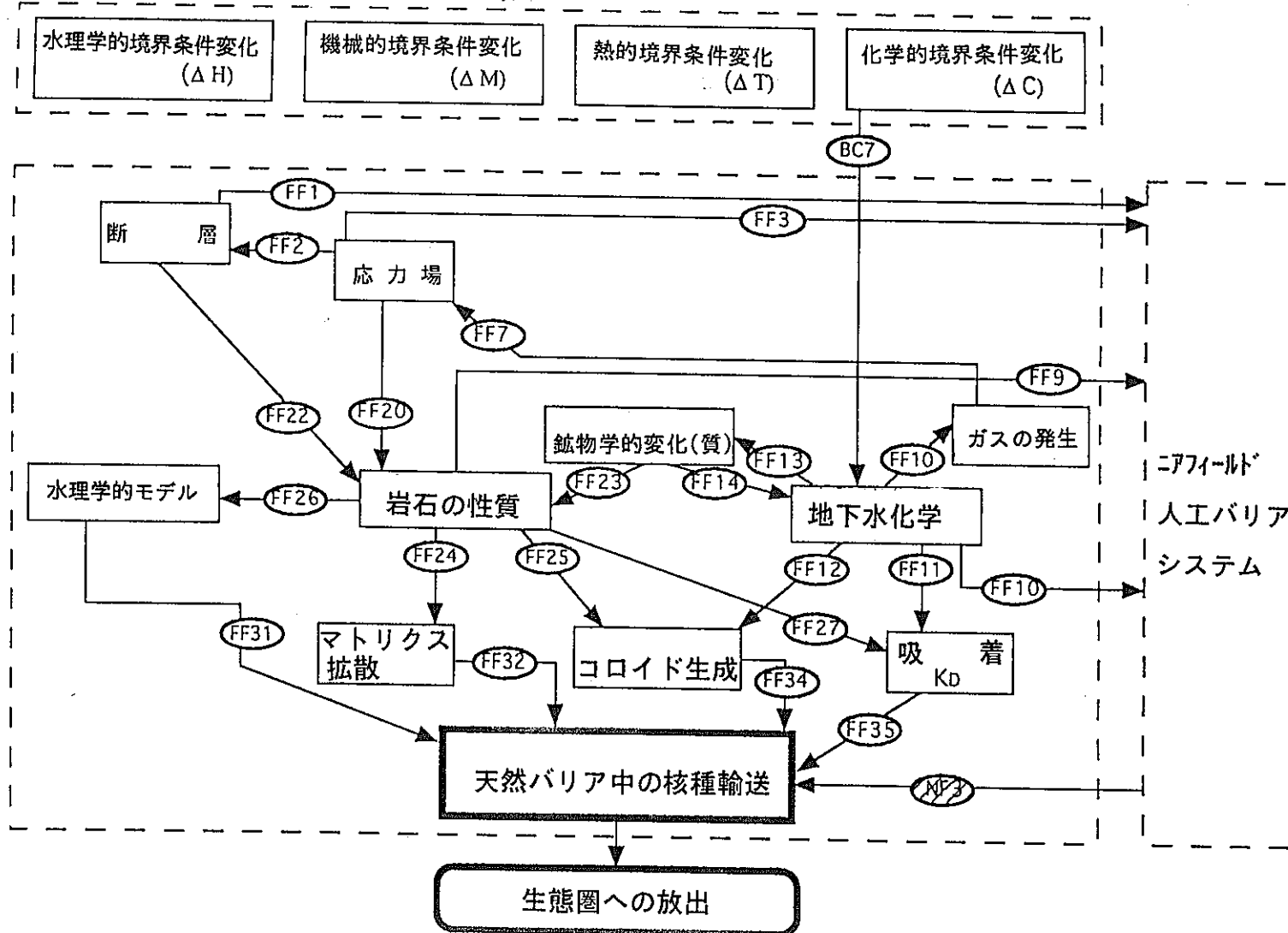


図29 化学的境界条件変化に対するファーフールドシナリオ連鎖 (IL=6)

火成活動による変化 (影響レベル6)

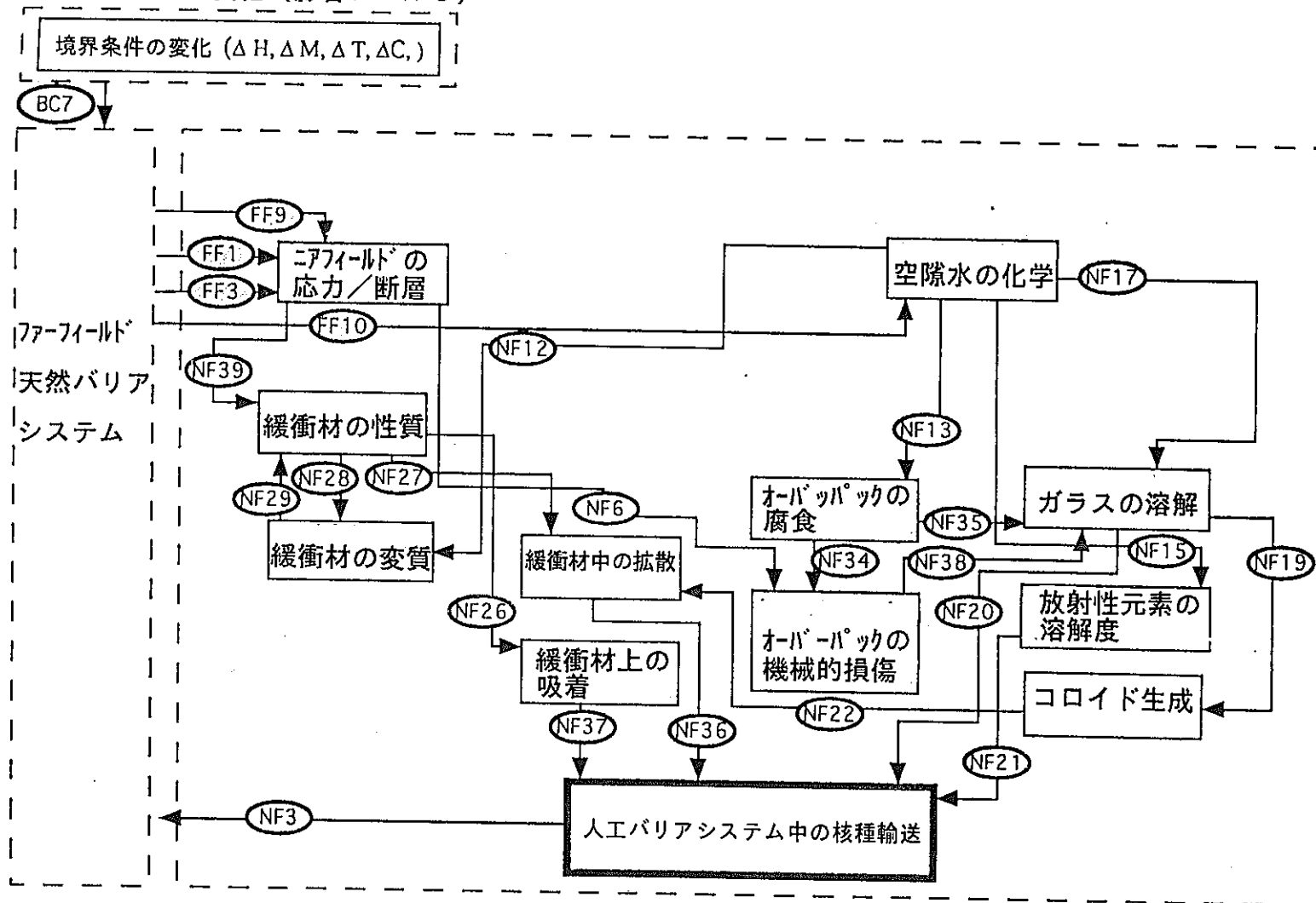


図30 化学的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=6)

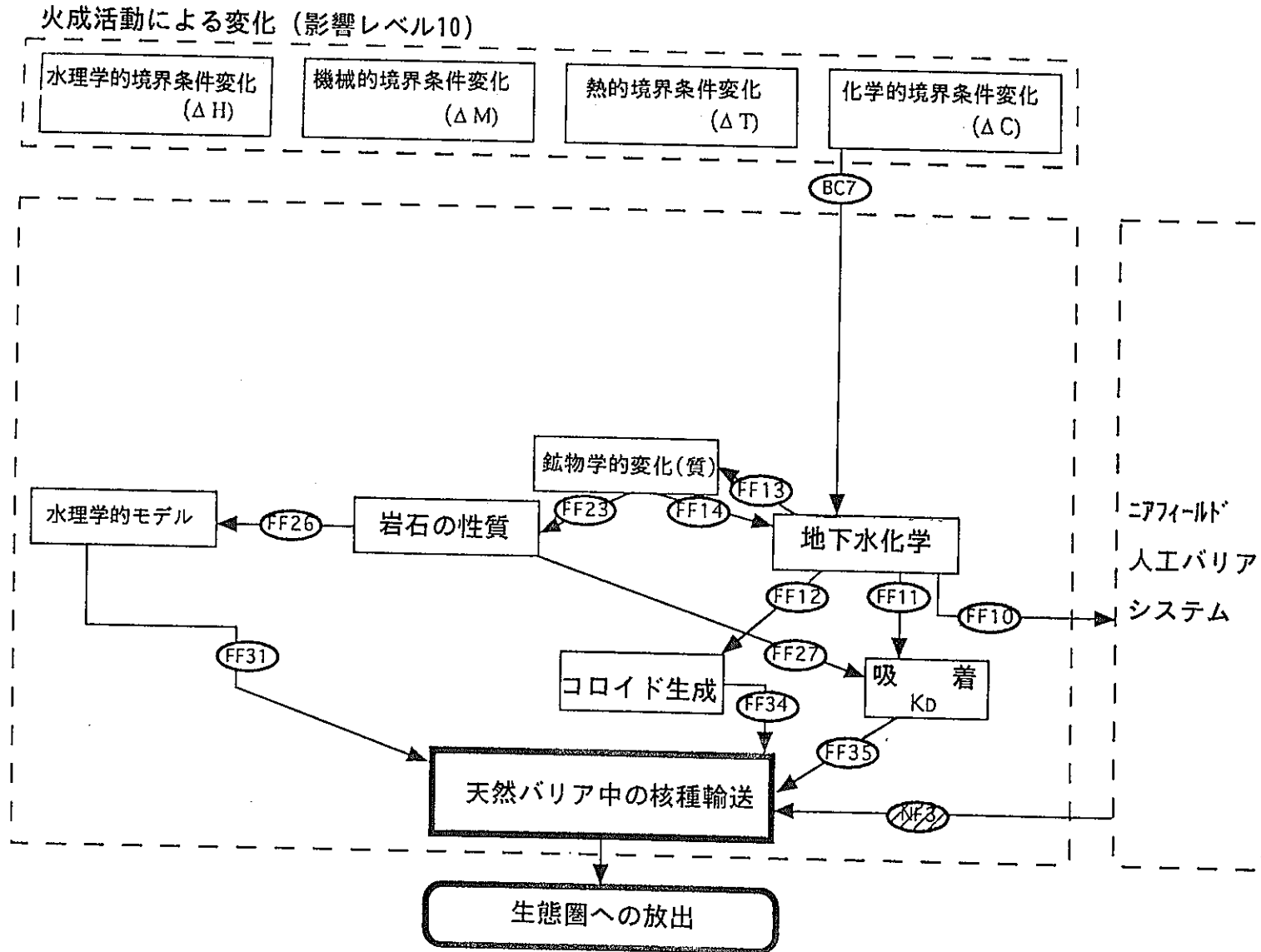


図31 化学的境界条件変化に対するファーフールドシナリオ連鎖 (IL=10)

火成活動による変化 (影響レベル10)

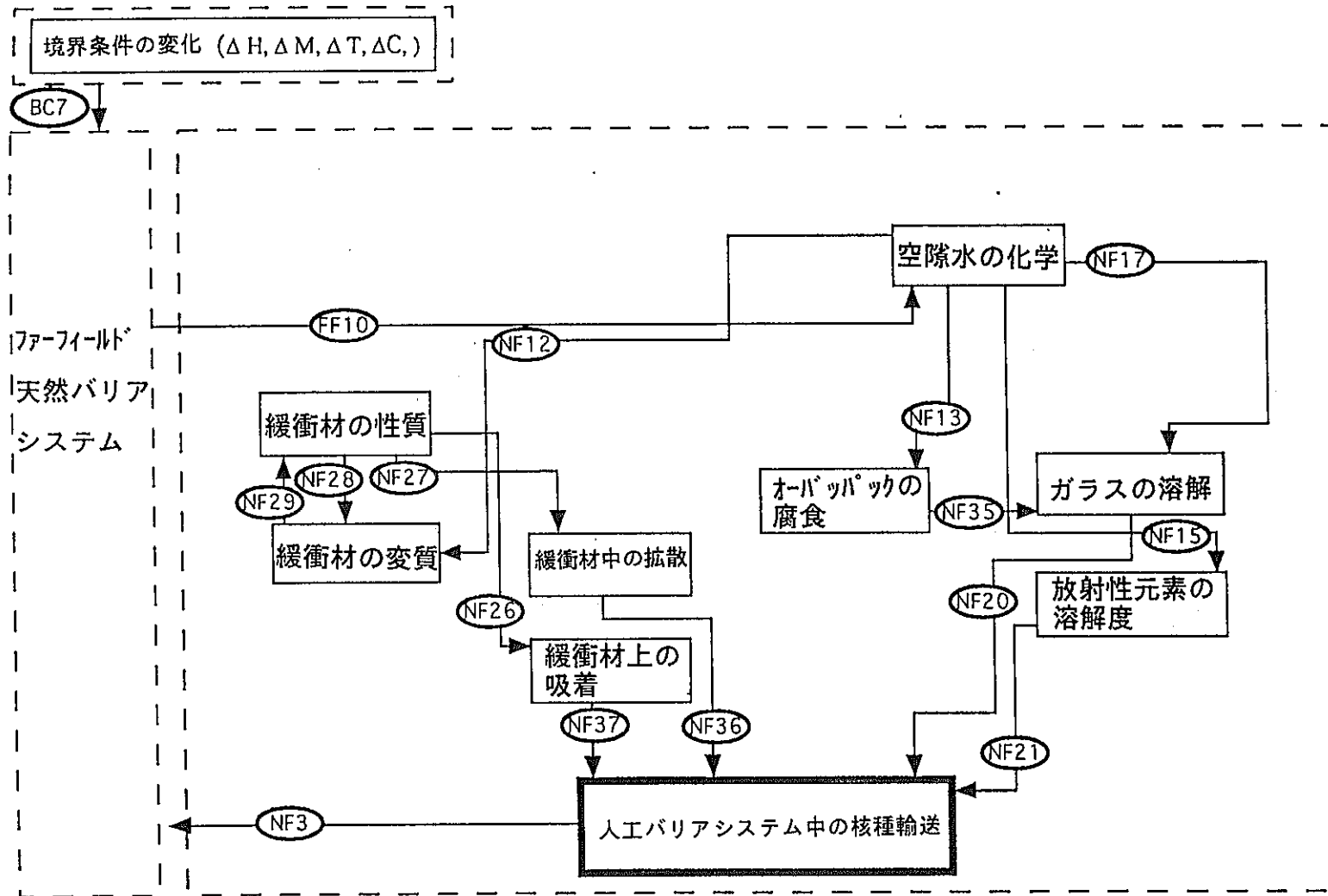


図32 化学的境界条件変化に対するニアフィールドシナリオ連鎖 (IL=10)

これらの説明を特にIL = 6, 10の違いに留意して以下に概述する。

(1) 水理学的境界条件変化に対するシナリオ連鎖

IL = 6 (図17, 図18) の場合、火成活動に関する水理学的境界条件変化の主要な影響は、流れの方向転換への二次的な影響を有する流速の増強が考えられる。加速化された流れは、地圏を通過する核種輸送に負の影響を与え、もし緩衝材に重大な浸食があれば、人工バリアシステムの性能に有害な影響を与え得る。

IL = 10 (図19, 図20) の場合、地表の涵養の変化は、性能予測上の信頼性を全く失うことなく省くことが可能であろう。加速化された流れの、ファーフールドでのマトリクス拡散への影響は、より厳格な予測レベルでは省略される。ニアフィールドに関しては、吸着への影響がこの影響レベルで除外される。しかし、浸食された緩衝材の拡散性能への影響は無視できない。

(2) 機械的境界条件変化に対するシナリオ連鎖

断層及び岩石の応力の増加によって生じ得る火成活動の影響は、地圏並びに人工バリアシステム性能の両方に影響を与える。確かに、母岩の主要な役割の一つは、人工バリアシステムの性能を阻害しないような長期の機械的安定性を提供することである。

IL = 6 (図21, 図22) の場合、ファーフールドへの直接的な影響は、断層と岩石応力の増大化である。と同時に、岩石の透水係数の増加、流れの加速化、亀裂表面及び亀裂表面プロセス (マトリクス拡散) の変化、コロイド生成の可能性が考えられる。人工バリアシステム内では、断層並びに岩石応力の増加によって緩衝材の直接的な不連続性 (加速化した流れによる浸食、緩衝材の物理的不連続性、拡散機能の喪失) とオーバーバックの機械的損傷が生じ得る。

IL = 10 (図23, 図24) の場合、ファーフールドでのコロイド生成と分散への影響は除外される。人工バリアシステム内では、緩衝材の浸食並びに物理的不連続性の影響が除かれる一方で、オーバーバックの機械的不連続性は残される。緩衝材は、人工バリアシステムからの放射性核種のゆっくりとした拡散支配による放出を長期間保証する上で極めて重要である。IL = 10においても、緩衝材の機械的不連続性を残しておく余地はあり得よう。

(3) 熱的境界条件変化に対するシナリオ連鎖

火成活動の熱的影響は、地圏並びに人工バリアシステムの双方に対し、極めて広範なものである。温度の上昇は、多くの水理学的、機械的、化学的プロセスを活性化し、また、加速化する。

IL=6 (図25, 図26) の場合、温度の上昇は、機械的応力、岩石-水反応による化学的変質、水理学的流れプロセスと鋭敏に連動する。さらに、基本的な岩石の性質は、温度に鋭敏である。熱的影響もまた、人工バリアシステム中を広範囲にわたって伝播する。これらには、岩石中の加速化した流れによる緩衝材の浸食、オーバーパックスの腐食率に負の影響を与える空隙水化学の変化、ガラス溶解率、放射性元素の溶解度、適度な拡散並びに吸着・遅延化特性の低下を導く緩衝材の物理化学的変質、が含まれる。

地下水化学、マトリクス拡散、分散への熱的影響は、ファーフールド評価の信頼性にはさほど決定的なものではないように思われるため、IL=10 (図27, 図28) の場合には除外される。人工バリアシステムについては、ベントナイトの浸食への影響とオーバーパックス損傷への負の影響とが除かれる。後者の理由は、オーバーパックスの寿命(廃棄物設置後数1000年)が、将来の火成活動の時間的スケールに比べて比較的短いことによる。

(4) 化学的境界条件変化に対するシナリオ連鎖

火成活動による化学的影響もまた非常に広範なものであり、温度上昇を伴って発生するときに非常に促進される。特に、放射性核種の可動性は、地下水の化学的組成(Eh, pH, 陰イオン濃度)に対して鋭敏である。

IL=6 (図29, 図30) の場合、ファーフールドとニアフィールドの化学的影響は、岩石-水(あるいは人工バリア-水)の反応率並びに種類の変化に帰着される。地下水組成変化の主要な影響は、人工バリア(緩衝材、オーバーパックス、ガラス固化体)の安定性と反応率並びに放出される放射性核種の諸性質(溶解度、吸着性など)に直接的な影響を与える。

このような反応の二次的影響としては、水力学的状態(空隙率や透水係数の変化など)や機械的状态(ガス発生による地層中の加圧や亀裂の封鎖など)の変化があり得る。人工バリアシステム内においては、岩石の機械的不連続性による二次的な影響として、オーバーパックスの機械的損傷とコロイド生成が考えられる。IL=10 (図31, 図32) の場合には、これらの二次的影響は除外される。

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以下のように作成した。ここで、2重アンダーラインは、各モデルの主たる出力変数を、それ以外は初期条件、境界条件、パラメータ等を表す。

地下水シナリオ（基本ケース）に対する各モデルの定量的諸量リスト

熱解析モデル (C.1)

熱-水-応力連成解析モデル

- 土中水と土の平均熱容量
- 土中水と土の平均熱伝導率
- 土中水の密度
- 土中水の比熱
- 土中水の流速ベクトル（ダルシー平均流速）

温度

- 圧力
- 浸透係数
- 土中水の粘性係数
- 重力ベクトル
- 土水中の体積膨張係数

水理学的モデル (A.5.3)

(仮想的二次元) 水理地質解析モデル

- 圧力水頭（もしくは動水勾配）
- 体積含水率
- 有効間隙率
- 透水係数
- 注入流量あるいは排水流量
- 地下水の密度
- 媒体の圧縮率
- 地下水の圧縮率

地下水化学特性並びに地球化学プロセス

pH

酸化還元電位 (又は、相対的電子活動度)

イオン濃度

a) 降水系高pH型の地下水

土壌中の有機物の腐敗によって生成したCO₂ガスの水溶液による吸収及び
アルバイトとカオリナイト間の化学平衡

黄鉄鉱と水溶液間の酸化還元平衡

土壌中の有機物の腐敗によって生成したCO₂ガスの水溶液による吸収

方解石と水溶液間の溶解平衡

石英と水溶液間の溶解平衡

白雲母と水溶液間の溶解平衡

b) 降水系低pH型の地下水

未風化帯における有機物による酸化性化学種 (溶存酸素、三価鉄イオン
等) の還元反応

未風化帯における有機物による酸化性化学種 (溶存酸素、三価鉄イオン
等) の還元反応及び磁鉄鉱と水溶液間の酸化還元平衡

弱風化帯における方解石と水溶液間の溶解平衡

未風化帯における磁鉄鉱と水溶液間の酸化還元平衡

強風化帯におけるアルバイトとカオリナイト間の化学平衡

石英と水溶液間の溶解平衡

c) 海水系高pH型の地下水

カリ長石と白雲母間の化学平衡

有機物によるSO₄²⁻の還元反応

方解石とドロマイト間の化学平衡

石英と水溶液間の溶解平衡

海水組成

d) 海水系低pH型の地下水

有機物による SO_4^{2-} の還元反応

ドロマイトと水溶液間の溶解平衡

白雲母と水溶液間の溶解平衡

石英と水溶液間の溶解平衡

海水組成

ニアフィールド再冠水モデル (C.5.1, C.5.2)

ニアフィールド再冠水

飽和度

見かけの水分拡散係数

ニアフィールド再冠水後の水理学的モデル (C.5.2, A.5.3)

前記の水理地質解析モデルと等価

速度ポテンシャル

核種移行モデル (A.6.1)

再冠水後の（定常状態における）緩衝材中物質移動メカニズム

ペクレ数（地下水流速、代表長さ、実効拡散係数）

地球化学モデル (* 地下水水質の変化)

人工バリア中の地下水の化学特性

イオン交換反応平衡定数

鉱物組成

緩衝液組成

pH

相対的電子活動度

イオン濃度

化学的緩衝性維持時間

金属腐食の分析 (C.2.1)

オーバーパックの長期的腐食挙動

オーバーパック一体当りのベントナイト体積

ベントナイト中間隙体積

間隙に存在する酸素量

ベントナイト表面への酸素吸着量

オーバーパック一体当り表面積での腐食深

ベントナイト中不純物量

腐食速度 (拡散律速)

オーバーパック表面への H₂S 供給総量

水の放射線分解生成酸化性化学種のオーバーパックへの供給速度 (腐食電流)

応力腐食割れ発生下限濃度

オーバーパック表面での濃縮

圧密・粘弾塑性モデル (B.1.4,C.3.2)

a) 緩衝材の膨潤圧の発生

膨潤ひずみ

膨潤係数

飽和度

弾性係数

ポアソン比

緩衝材の膨潤圧によるニアフィールドの応力分布

b) 緩衝材の圧密弾塑性モデル

緩衝材（ベントナイト）のひずみ

初期間隙比

せん断弾性係数

膨潤指数

偏差応力

圧縮指数

critical state パラメータ

平均応力

偏差応力の第2不変量

c) 緩衝材の粘弾塑性モデル

(規準) 軸差応力

破壊軸差応力

緩衝材（ベントナイト）のせん断ひずみ速度

クリープせん断速度

放射線の影響 (C.4)

a) ガラス固化体の密度変化

放射能強度

b) 緩衝材（ベントナイト）への放射線損傷 (C.4.2)

ベントナイト透水性

ベントナイト中陽イオン交換容量

ベントナイトへの吸着量（性能）

ベントナイトの変質後生成物質（アモルファス）量

c) 水の放射線分解 (C.4.1)

水溶性化学種濃度

温度

放射線の種類

分解生成化学種（水素、過酸化水素、酸素）発生量

pH

ガラス固化体表面積

α 崩壊数

G 値（100eV のエネルギー吸収で生成消滅する分子数、吸収する放射線の種類、線量率、pH に依存）

核種移行モデル (A.6.1)

a)人工バリア中の核種移行モデル

核種の液相中の濃度(沈殿物の濃度は含まない)

核種の沈殿物の濃度

核種の空隙水中の拡散係数

インベントリ

崩壊定数

核種の遅延係数

溶出開始後の経過時間

ガラス固化体中心からの距離

人工バリアからの核種放出率

移行時間

沈殿フロント

蓄積放出量

(遅延係数)

緩衝材の空隙率

緩衝材の真密度

核種の分配係数

(沈殿生成・再溶解)

核種に対する沈殿、再溶解の反応速度

核種の溶解度

核種に対応する元素の溶解度

核種の同位体存在度

(溶出開始時点)

人工バリアと地下水の接触時期

(人工バリアの幾何形状)

ガラス固化体中心からオーバーバック表面までの距離

ガラス固化体中心から緩衝材外側までの距離

(ガラス固化体/緩衝材界面での核種濃度境界条件)

元素の溶解度

元素・核種のガラス固化体中の重量分率

ガラス固化体の長期的溶解速度

(緩衝材／岩体界面での核種濃度境界条件)

ゼロ濃度

mixing cell

b) ガラス固化体の溶解速度 (A.6.7)

ガラス固化体の表面積

接触空隙水の体積

接触空隙水の組成

$\text{Si(OH)}_4(\text{aq})$ の飽和濃度

$\text{Si(OH)}_4(\text{aq})$ の濃度

ガラス固化体の初期溶解速度

ガラス固化体の残存溶解速度

ガラス固化体中の元素の分率

Siの拡散係数

c) 放射性核種の溶解度 (A.6.7)

空隙水の組成

熱力学データ

溶解度制限固相

d) 緩衝材中の分配係数

核種の化学種形

e) 緩衝材中の拡散係数

核種の化学種形

核種の空隙水中の拡散係数

核種の自由水中の拡散係数

緩衝材の空隙率

収れん度

屈曲度

圧縮ベントナイトの形状因子

f)天然バリア（多孔質媒体）中の核種移行モデル

多孔質媒体空隙水中の核種濃度

多孔質媒体中の分散係数

核種の多孔質媒体中の遅延係数

核種の崩壊定数

ダルシー流速

多孔質媒体空隙率

（遅延係数）

多孔質媒体の空隙率

多孔質媒体の真密度

核種の多孔質媒体中の分配係数

（分散係数）

分散長

実効拡散係数

（初期条件）

全ての領域で核種濃度ゼロ

（境界条件）

人工バリアからの核種移行率

g)天然バリア（亀裂性媒体）中の核種移行モデル

岩体マトリクスへの吸着による遅延係数

亀裂内核種濃度

亀裂内地下水流速

亀裂内流れ方向分散係数

亀裂開口幅

亀裂頻度

岩体マトリクス部の空隙中拡散係数

岩体マトリクス中の空隙内核種濃度

崩壊定数

(遅延係数)

岩体マトリクスにおける分配係数

岩体マトリクスの空隙率

岩体マトリクスの真密度

(初期条件)

全ての領域で核種濃度ゼロ

(境界条件)

人工バリアからの核種移行率

線量評価

評価地点における線量当量率

評価地点に流入する核種の放射能

排水中の濃度限度

評価地点における水量

3.2 各F E P関連モデルのサーベイ

2章で作成した各シナリオを評価するためには、具体的な解析フレー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F E P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33参照)。そこで、各F E P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・整理した。

なお、火成活動(特に、我が国の火山噴火予知)に関する具体的研究事例を付録に添付した。これらは、火成活動起点シナリオと地下水シナリオとの接点(例えば、温度、応力、地下水移行経路の変化など)を検討し、モデル解析・評価に反映する上でも参考になるものと考えられる。

また、昨年度報告書⁽⁹⁾の第2章で提案しているA H P法の評価フレームを用いる場合、今後、このような資料データをベースに、シナリオ解析における火山噴火事象の重要度評価を、エキスパートに判定してもらい、これらの火山活動を起点とする地下水シナリオ発生の確信度評価を展開していくことが考えられる。

即ち、2.4.3で検討したprocess system modelにおける影響レベルの設定のところで、インフルエンスの重要度評価を行うときにA H P法を適用することが考えられる。この場合、各インフルエンスの重要度を算定するための評価項目を定義し、これらの階層構造を作成し(例えば図34参照)、階層構造に従って評価項目間の相対的重要度を算定し、これに各インフルエンスの評価項目別評点を乗して加算することによって、インフルエンス各々の総合評点が求められる。従って、結果的にprocess system modelで定義された10ランクの影響レベルよりもきめ細かな評点(小数点レベルまでの評点)の算出が可能となる(なお、各評価項目の評点の算出には、別途スコアリング基準を作成しておく必要があり、具体的には、効用理論をベースとした評点付けが考えられる)。

今後、process system modelで採用している影響レベルの定義も含め、より汎用性のある重要度評価フレームを具体的に構築し、シナリオ作成と同時にシナリオの重要度が算定できるシステムの開発が課題として指摘される。

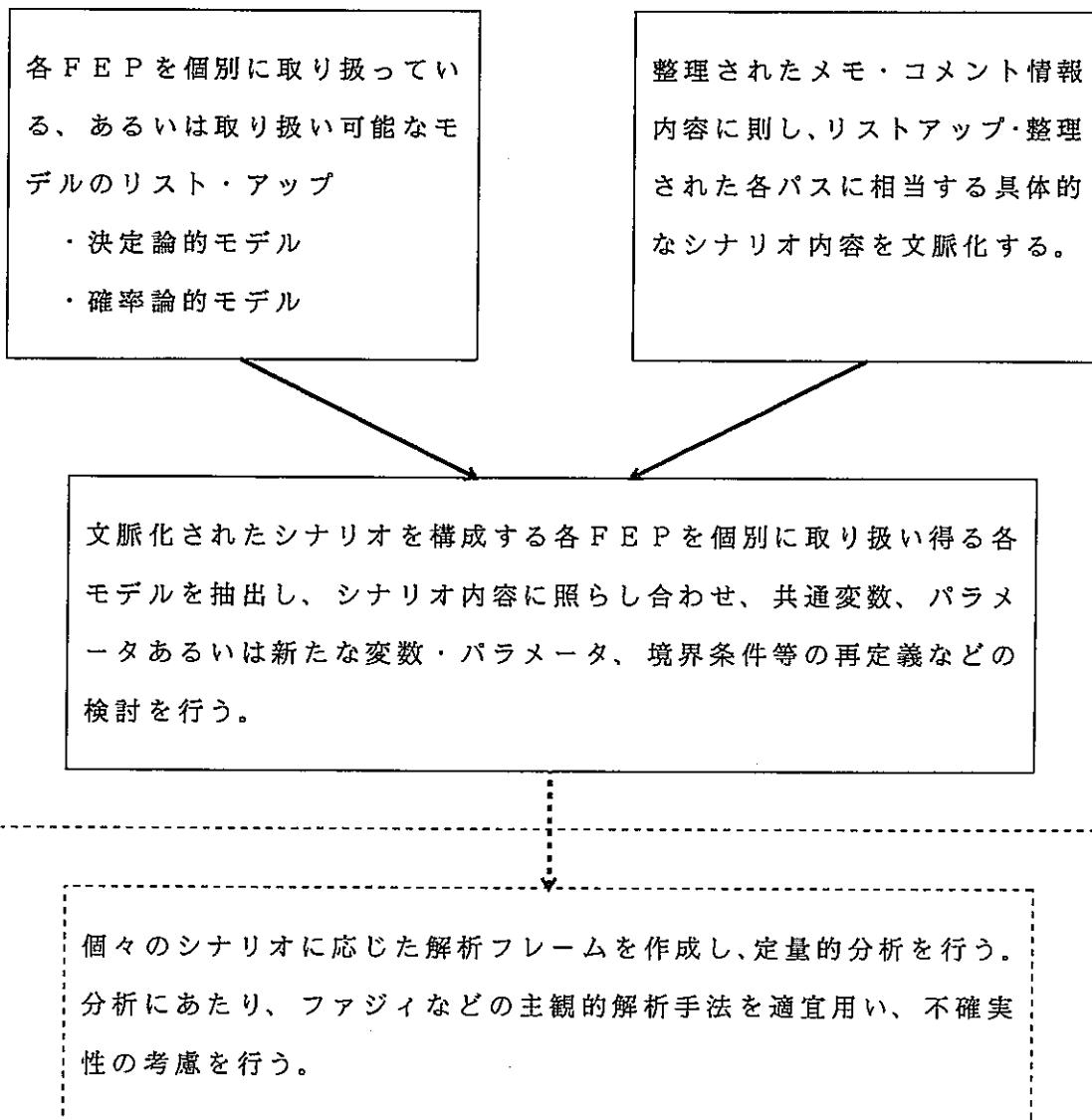


図33 シナリオの取り扱い方に関する検討プロセス

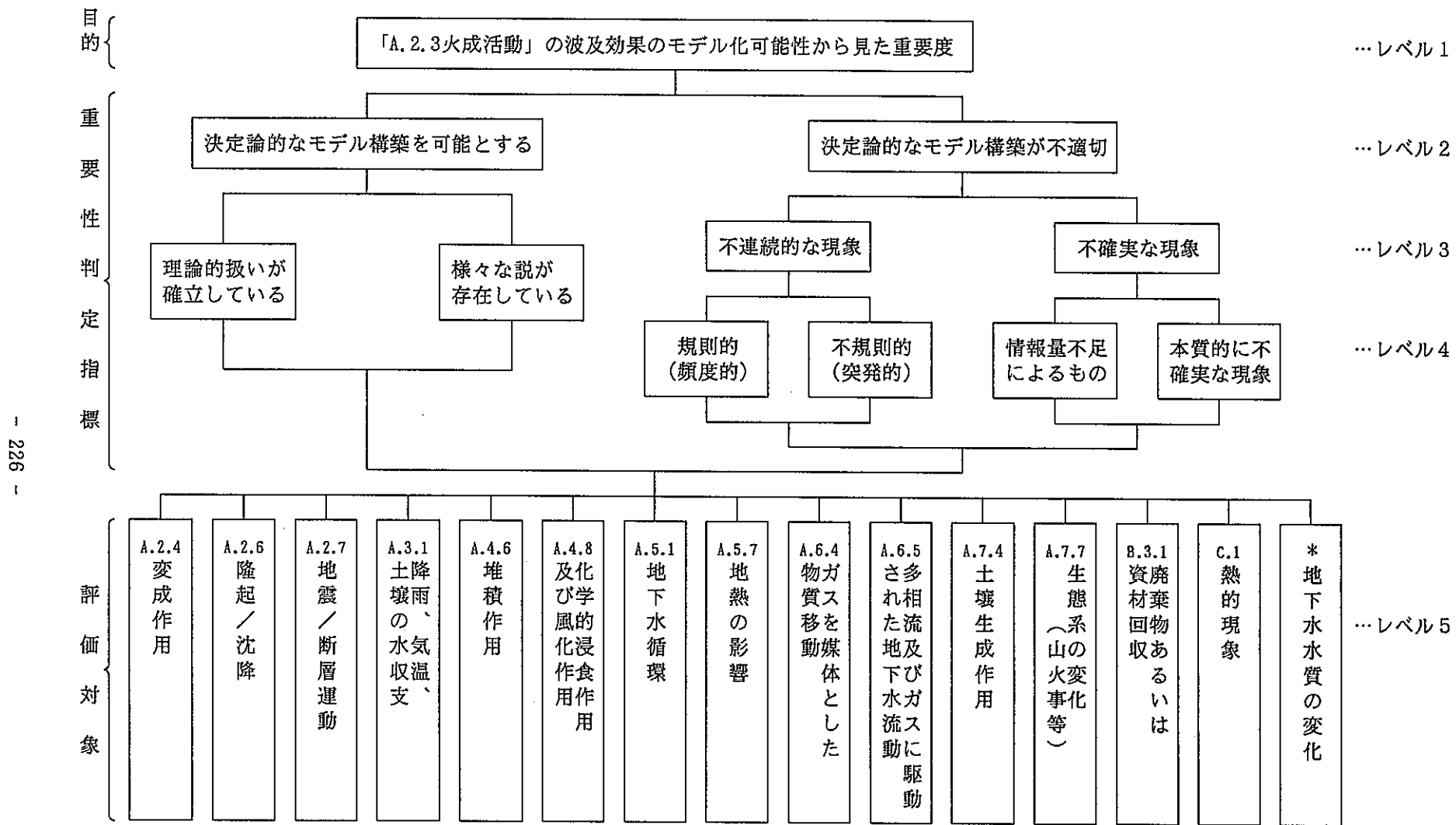


図34 「火成活動」の波及効果のモデル化可能性から見た重要度を求めるための階層図

3.2.1 決定論的モデル

各 F E P に関連し得る決定論的モデルをサーベイするため、主要なキーワード（分野）を決め、ここ数年内の比較的新しい J I C S T 文献の検索を行い、それぞれの解析対象内容の概要並びにモデルタイプ（検索した結果として確率論に基づくモデルも見られたので、決定論に基づくものを D と記述し、確率論に基づくものを P と記述した）を整理した。その結果を表10に示す。

表10 各FEP関連（解析）モデル事例

分野	解析の対象	タイプ
隕石 (A.1.1)	1. 人工衛星表面に衝突する宇宙デブリ(粒子)のクレータ分布予想衝突数の計算、流体力学衝突計算機シミュレーション	P/D
	2. 月の隕石データから鉱物/溶融体の微量成分分配率、マグマオーシャンの集積物、液体の割合やそれらの微量成分組成等の計算によるマグマオーシャンの存在、その結晶作用の歴史、集積相の形成、地殻の生成等のモデル化	D
	3. 母天体中の溶融マグマの上昇によりグラファイトが酸化し高圧CO ₂ ガスの発生・爆発によるユレイライトの宇宙空間への飛散を説明するユレイライト隕石成因モデル	D
	4. 800年前に解体したHコンドライト母体からの地球への飛来隕石の説明モデル	D
	5. 太陽以外の星における惑星形成で放出される残しのサイズ分布の仮定の下にそれが地球で流星体として観測される流束の期待値の計算	P
	6. 月面のクレータ地形から形成時の過渡的クレータを推定し、衝突天体の質量を見積るモデル(地球マンツルの親鉄元素の存在度からの結果と一致、衝突による揮発性物質や非生物起源の有機物の供給量を推定できる)	D
	7. 隕石由来のNaが上層大気に存在する形態としてNaHCO ₃ , Na ₂ CO ₃ などの化合物の噴散質量を分析するモデル	D
	8. 太陽星雲中の炭化水素の初期濃度が十分あれば隕石中に芳香族ができ得ることを論ずるモデル(CH ₄ とC ₂ H ₂ の生成とCの濃度を非平衡力学モデルにより計算)	D
	9. 異なるサイズと形状のコンドライトにおけるBe ¹⁰ , Al ²⁶ , Mn ⁵³ , He, Ne, Arなどの宇宙線照射核種の生成率を計算するモデル(隕石の深さ分布データと照合)	D
太陽輻射 (A.1.2)	1. 太陽放射スペクトル、太陽フレア陽子、宇宙線モデル	D
	2. 太陽地球関係モデル(太陽黒点、太陽電波、各種地磁気活動度指数など)	D
地質学 (A.2)	1. 中南部カナダ楕状地のSudbury構造の初期北西-南東規模の有限要素モデルによる推定	D
	2. 地電位測定により得られる自己電位異常変動を説明するための岩石亀裂-流体拡散-電荷分極モデル(地震では、岩層の新しい割れ目への流体侵入、火山活動ではマグマ侵入)	D

分野	解析の対象	タイプ
地質学 (A.2)	3. 複雑な物体の幾何学的なモデル表現として離散平滑内挿法を用い、複雑な曲面を2次元グラフで表現する手法	D
	4. (巨大な)破壊ゾーンを形成する破壊パターンをベースとする地質構造の水文学的モデル	D
	5. 圧縮造山帯の動力学的3次元有限要素コンピュータモデル(既存の構造やプレート境界の形態により決定される強制的な変形と、破壊則に依存する地殻(鉛直方向には衝上断層面、水平方向にはせん断帯として存在し、両者が強く結合)の弾塑性レオロジーで決定される変形	D
	6. 接触変成岩の組織解析に基づく空間構造形成のシミュレーションモデル	D
	7. 上部白亜系リン酸塩チョーク鉱床の堆積・続成作用のモデル(有機炭素と炭酸塩の堆積速度を維持する収支、全体的な堆積物集積の減少、バイオターベーション増加速度の必要性)	D
プレートテクトニクス (A.2.1)	1. ウクライナ楕状地のクリボイ・ログ盆地に対する海洋地殻西方沈降を含むプレートテクトニクスモデル	D
	2. (オホーツク海がどのプレートに属するかを調べるための)日本-千島海溝に沿う浅発地震のスリップ方向とNUVEL-1モデルの適用(カイ二乗検定)	D/P
	3. 海洋リソスフェアの厚さ、構造・進化を求めるモデル(海嶺近傍領域での熱拡散率、海洋底年代データ等)	D
	4. 海洋性沈み込み帯で生ずる斜めすべり並びに前弧での変形速度を見積もるモデル	D
	5. 2重沈み込みや沈み込み極反転などの複雑なテクトニックプロセスを解釈し得るリソスフェア沈み込みモデル	D
	6. 北米プレート下に沈み込む太平洋プレートとの間の各種構造帯の構造運動と物理探査データの特徴を関連付けた2.5次元フォワードモデル	D
	7. 原生代中-後期、Balticaプレートの運動学的歴史モデル(プレートの離れ→回転→衝突→変形運動→花崗岩形成熱イベント)	D
	8. 物性、力のバランス、ベキ乗則薄板近似を用いたプレートのモデル化(表面プレート内の変形、表面熱流量、平均プレート速度などのモデル間比較)	D
	9. 展張的構造場を示す正断層群、マグマ活動による深成岩の複雑な貫入関係などを説明する低速拡大海嶺断片構造モデル(キプロス、南部トルコのオフィオライトに対し)	D

分野	解析の対象	タイプ
プレートテクトニクス (A.2.1)	10. 揚子江下流域の累層の岩質・層相変化(堆積作用)パターンのプレートテクトニクスに基づく古地理進化モデル	D
	11. 重力異常と地殻の厚さとの相関関係に基づき、海嶺の拡大率とマントル上昇とを関連させたモデル	D
	12. プレート力学と構造進化にバックストップが与える影響(バックストップに関する応力と歪)を解析する数理モデル	D
	13. 中部本州沖三重点の過去10 ⁶ 年間の構造的変化(進化)モデル	D
地磁気 (A.2.2)	1. マックスウェル流体の均質マントルと粘性のない均質流体核が、氷河の消長、潮汐トルクや他の核-マントル境界で作用する帯状関数の有起源に対し、差動回転する地球モデル(氷河の後退→西向相対運動→地磁気の西方移動)	D
	2. 開いた磁気圏の特異性のないモデル(太陽風からの作用に対する磁気圏の応答など)	D
	3. 球キャップ調和解析法(SCHA)の適用によるスペイン近傍の地磁気永年変化モデル	D
	4. 磁気圏尾の幾何学的構造及び含まれているプラズマの量を取り入れた地磁気活動度モデル(太陽風と磁気圏の相互作用を説明する非線形動力学モデル)	D
	5. IGRF(International Geomagnetic Reference Field)モデル-地球磁場ポテンシャルを級数展開した際の球面調和関数の係数で構成された主地球磁場とその永年変化を表すモデル群	D
	6. 単純なソースフリーマントル/フローズン-フラックスコアの地球モデルにおける地磁気カオスの定常運動	D
	7. チャンドラーウォブル、自転速度、地磁気、地震活動、気候などの連動性を説明するモデル	D
火成活動 (A.2.3)	1. 東北日本弧の火山岩形成モデル(テクトニクス変遷との関係)	D
	2. 急速に拡大する海嶺におけるマグマ留まり弾性波モデル(低速度帯上部の小マグマ留まりの推定、マグマ留まり規模推定)	D
	3. 海嶺-トランスフォーム断層系下のマントルの3次元受動流動に対する粘性率の温度圧力依存性解析(有限要素法で物質移動を、有限差分法で温度を解析)	D
	4. 源からおおよそ放射状に広がるニュートンレオロジーをもつ溶岩流の動きを冷却が制限する仕方を説明するモデル(チャンネル化した流れのモデルとの比較)	D

分野	解析の対象	タイプ
火成活動 (A.2.3)	5. メルト-結晶境界層における化学種と結晶成長速度間のフィードバック効果、質量作用・鉱物成長速度則、及び拡散・移流を取り込んだ定量モデル(振動マグマ結晶作用)	D
	6. 物質収支計算・分配データによる結晶作用モデルと活動期間の長さを基に、関係再充填マグマ溜りにおいて各周期の終わりにマグマが全て噴出あるいは固結するというモデル	D
	7. 粘性、火道の大きさ、火道上の溶岩の厚さ等を反映した噴火の経路を有する物理的モデル(非爆発性溶岩噴火における流速対体積の関係付け)	D
	8. 多くの人命と家屋や田畑を奪った雲仙普賢岳噴火の例に基づく火砕流の流下機構モデル	D
	9. 円筒形の火道での火口進展計算モデル(火道形状とマグマ放出速度の関係や噴出軽石に混じる岩片量と拡大する火道との関係)	D
	10. 大きな体積をもつケイ酸性マグマシステムのマグマ溜りの進化のタイムスケール算定	-
	11. デイサイトマグマ噴火・脱ガス機構モデル	D
	12. 自己重力と水平方向熱輸送を考慮したマントル対流方程式を用い、ジオイド異常と表面对流速度場を満足するモデル	D
	13. 浅熱水環境におけるマグマ流体進化モデル(地温約400°Cでの延性-脆性遷移により下部の静岩圧・低水/岩石・延性岩石の条件下に水に富むマグマ甲皮から、この遷移より上部の静水圧・高水/岩石・脆性岩石帯に上昇して鉱石を沈澱するマグマ流体)	D
隆起/沈降 (A.2.6)	1. ココス海嶺の沈み込みに伴うコスタリカ太平洋岸の第四紀の隆起運動	D
	2. 板変形に基づく三次元バックストリップング法を発展させた堆積盆地の地質構造史解析モデル(表面の曲がる効果とリソスフェアの応力緩和の両方を考慮したモデル: 局所的沈降を伴った堆積域のゆっくりとした増加→急速な沈降に伴う堆積域の大きな増加→局所的かつゆっくりとした沈降)	D
	3. リソスフェアとマントルプリュームの相互作用によるホットスポットウェルの地形的膨らみと力学的侵食・隆起のプロセスモデル(再加熱によるリソスフェアの侵食効果も加味)	D
隆起・侵食 (A.2.6, A.4)	1. 2次元熱伝導モデルにおける大陸-海洋トランスフォーム境界での大陸リソスフェアの熱的進化(大陸ふちでの堆積物の侵食量算定)	D

分野	解析の対象	タイプ
地震 (A.2.7)	1. 前震、余震活動をベースとするピーク地加速度減衰モデル	D
	2. 相模トラフ北西部周辺域地震資料(70年間隔発生地震)と津波の数値実験をベースとする西相模湾断裂モデル、関東型、大磯型地震モデル	D
	3. 回転しながら上昇するマグマの通路である磁気垂直チムニーがリソスフェアの蓋の周囲に垂直圧力を及ぼすというモデル(プレートテクトニクスの地中海の地震活動度への応用)	D
	4. 中央サンアンドレアス断層のクリープ地域と大地震後ロックされている隣接地域との時空間的相互作用を三次元有限要素法により解析するモデル(地震の再来周期など)	D
	5. 震源近くの堆積構造と海底地形が浅発沈み込み帯地震による遠震P波形に及ぼす影響(2次元速度)モデル	D
	6. 千島沈み込み帯で500km深さの震源からくるP波を解析する不均質性と非等方性を考慮した3次元モデル	D
	7. 数回の地震を経験して耐力が低下した建物の耐震信頼性解析を行うためのマルコフモデル	D
	8. 物理的相互作用のある断層セグメントに対する地震繰り返しプロセスの現象論的確率モデル(地震危険度、サイト危険度の近似解析式)	P
	9. 傾斜断層上の動的破壊過程の3次元波動方程式による解析モデル(強度過多、応力下降量の推定)	D
	10. 地震断層の幾何学形状とその空間分布をパーコレーションフラクタルによって説明するモデル	P
	11. 地震ハザード及びリスク評価並びに経済的損失解析	D/P
	12. 海洋リソスフェアのマントル中へ沈み込む弱いスラブ変形モデル(剛体ではなく粘性液体としての振るまい)	D
	13. 非排水弾塑性モデルによる、ダム地震後の変形解析(液状化した材料の破壊モデル)	D
	14. サンアンドレアス断層系の微小地震の分布と地殻の熱的構造モデルの相関分析	D
	15. 地震に対して速度とともに摩擦が小さくなる、カオス運動と孤立波伝播を有する地震断層モデル(Burridge-Knopoffモデル)	D
	16. 余震の発振機構の多様性と本震-余震相互作用の力学モデル	D

分野	解析の対象	タイプ
地震 (A.2.7)	17. 過去300年間の地震記録と金井式を用い、地震発生確率モデルに基づく方法と地動推定強度の累積頻度分布に基づく方法による東京、大阪の地震危険度の評価(プレート境界地震との関係など)	P
	18. Pu用グローブボックスの有限要素法解析コードMSC/NASTRANによる耐震解析	D
断層 (A.2.7)	1. 剛体窪みを持つ斜め衝突モデル導入のクラトン間主要構造モデル(干渉構造を形成した多相に亘る変形の方向性の示唆)	D
	2. アルプス西部(フランス)における白亜紀後期-第三紀初期の剥離断層モデル(地殻の展張と同時に高圧岩石の地表への露出と広範囲のフリッシュの堆積)	D
	3. トランスフフォーム断層の摩擦抵抗によるエネルギー消費と相対変位速度、断層の長さ、プレート運動、断層の横方向へのエネルギー発散の関係を表すモデル	D
	4. カオリナイトとベントナイトを3:1の割合で混合し、含水比を150~100%に調整し、非排水強度を1~2.5 kPaの粘土層をつくり、この粘土層が岩盤上に堆積した模型(断層破壊のケーススタディ: 飽和粘土層のせん断破壊領域の高さと、岩盤の移動量並びに土の応力歪(特に土の破壊歪)との関係)	-
	5. デンマークDanish盆地の基盤断層が多くの岩塩ダイヤピルの成長を開始させたという説を説明する岩塩構造シミュレーションモデル	D
気候 (A.3)	1. 酸性降雨及び危険状態にある水資源の影響を受けた湖の数の推定モデル	P
	2. 5億7千万年に亘る古生代・中生代・新生代を通じての大気CO ₂ 濃度モデル(変動要因、温室理論)	D
	3. 地表エネルギー収支シミュレーションモデル(複雑な地形の影響を解析)	D
	4. 海洋でのCO ₂ ・熱収支モデル(ウィンドシアアの有無による物質の交換速度や海水の汚れの物質移動に及ぼす影響)	D
	5. 土壌内の熱及び水流の力学的モデルによる日裸地土壌蒸発量と土壌表面水分の重要性解析(日可能蒸発量や風速などの付加変数の必要性)	D
海面変動 (A.3.3) 土壌や有機物の残骸の堆積 (A.6.11)	1. 海水面変動の影響下にある蒸発残留岩盆地における海成堆積シミュレーション並びに残留堆積物の粘土-炭酸塩相に多い有機物のシミュレーション	D

分野	解析の対象	タイプ
地形学 (A.4)	1. 花崗岩のような節理系の発達した岩盤での風化・劣化プロセスを表すモデル(風化・劣化グレードの時間的空間的分布の計算)	D
	2. 米中央ペンシルベニアの谷や高地の周氷河成層斜面堆積(物)モデル(成層斜面堆積物、花粉データ、全地球気候シミュレーションより作成)	D
	3. 岩石学的制約やカタストロフィ的事象が重要な役割を果たす山地河川の長期的河床変動プロセスを表す地形学的モデル(疑似平衡縦断形の考え方を採用)	D
	4. 水文学・地形学・生物学的プロセスの空間変動の間接的尺度として地形属性の空間分布を適用したデジタル標高モデル(地形デジタル表示を利用した水文モデル)	D
	5. 花崗岩斜面で発生する表層崩壊を表土層分布情報から予測するモデル	D
	6. 氷河湖上の氷面地形学を湖の境界域の長さに関係付けたモデル(湖の存在は基盤のせん断応力を減少させる要因)	D
	7. 多湿温暖地域にある荒れた流域の地表水文学(水文学的周期現象の時間的発生量の定量化、並びに地理情報システムデータをデータ源とするモジュール型水文学モデルで、非平衡状態にある水域での地形学関連諸量を定量化可能)	D
	8. 気候、水文学、地形学の動的支配因子並びに空間状況及び利用可能ポテンシャルエネルギーの束縛条件付き総合的三次元河川網の定量的ランダムモデル	P
	9. 流水(網)侵食による地形シミュレーションモデル(流水網によって生成される谷のプロファイルを応力パラメータにより表現)	D
	10. 削剝基準面低下による沖積河床の流路方向低下に対する拡散方程式型モデル(流量や流域面積と拡散係数との相関、遷移点の河床低下による移動)	D
	11. 侵食作用に関する河川系統流域シミュレーション、傾斜侵食、川の活動などの三次元プロセス解析モデル	D
	12. 河口における粘着性の堆積物からなる多層河床モデル(河床と水中間の土砂の交換シミュレート、単独もしくは多重連結河道系における塩水侵入と堆砂による河道形状変化の影響評価)	D
	13. ダムの波浪による表面侵食プロセス並びに斜面剝離を含む寄せ波拡大シミュレーションモデル	D
	14. 流域の長期に亘る平均損失量、流砂量、栄養物をシミュレートするモデル(農地からの化学物質、雨水流出、侵食を扱うモデルを適用)	D

分野	解析の対象	タイプ
水理学 (A.5)	1. 交差性割れ目条件下の地下水挙動を明らかにするための分離型二重孔隙率解析モデル(地質学/水文学/地球物理学的モデルと等価不連続モデルへの二重孔隙率概念の応用)	D
	2. 帯水層や断層のような浸透性構造に対し、地下水循環に関する定常及び非定常温度攪乱を記述したモデル	D
	3. 低水流量統計量推定(地球水文学-地形学的関係)のための流域規模に拡張した河川-滞水層モデル(基底流量低減係数は、流域透水係数及び排水土壌間隙率の代用として用いる)	D
	4. 地質、水文、地形及び水文化学現象の空間的变化を考慮した堆積盆地の滞水層モデル(間隙率が線形である以外はガウス型であり、滞水層厚、透水係数、貯留係数、全溶解固形物、地下水位、地下水流速のKriging mapを算出)	D
	5. 海岸平野の河岸林の非点源汚染を抑制する水質緩衝帯の遅滞作用・時間モデル	D
	6. 扇状沖積地の分岐流域の洪水時非定常流解析のための多次元流解析モデル(侵食及び沈澱輸送、伝達損失及び浸透を表現するモデルの組み込み可能性などの指摘)	D
	7. 複雑な乱流である洪水時の河川の流れを把握するための乱流モデルと乱流量の輸送方程式型モデル	D
	8. 地熱貯留層の流体流動フラクチャーネットワーク概念モデル	D
	9. 時間当りの雨量と流量を求める水理学システムにおいて、入出力データにファジィ概念を適用した(カルマンフィルタ拡張型と考えられる)モデル	P/D
	10. 一次元定常河口流を表す確率水理方程式型モデル(Manningの粗度係数を不確定要因とする、水深と流量に関する確率方程式)	P
	11. 川の水理学的条件(水深と流速)をシミュレートし、流量に伴う魚生息地の変化を評価	D
	12. 地熱地帯に適合した孔井内の高温熱水の気化噴出モデル	D
	13. 土壌中の物質移動を表す垂直動水モデルを拡張した不飽和土壌における水平動水モデル(水平流速はダルシー則)	D
物質移動 (A.6)	1. グラフ化した地質学、水文地質学、化学及び生物学に関するデータを総合したものをパラメータとして組み立てた、地下水中の化学物質移動モデル	D

分野	解析の対象	タイプ
物質移動 (A.6)	2. 粘土質及び石灰質砂質土壌を通るSrの輸送を記述する平衡モデル(分散と移流を考慮に入れた流れモデルに種分化メカニズム…カルゴ-カルボニック平衡水の解離、Ca/Srイオン交換、ストロンチアン石と方解石の沈降/溶解…を取り入れたモデル)	D
	3. 断裂帯を通る移流とマトリックスを通る拡散を想定した多孔質媒体の二元孔隙率モデルに化学反応(溶解・沈澱、複合化)を取り入れたモデル	D
	4. 地形の変化並びに不安定な天候条件を考慮した大気汚染物質拡散モデル	D
	5. 河道中を流動する放射能核種濃度変化を支配する河底や掃流土砂への吸着、河川の形状、流量、洗掘などの主因子を含む一連の方程式系のモデル	D
	6. 地層内の溶質拡散-吸着のFick型モデルと拡散等価速度パラメータをもつ一次運動モデル	D
	7. 移動流体の分散-対流方程式及び停滞流体の拡散方程式によるキャパシタンス効果を表す多孔質媒体内物質移動モデル	D
	8. 固相と溶質の相互作用に起因する分配係数項を有する、天然水中の溶質輸送を表すモデル	D
	9. 熱力学的平衡の仮定又は運動力学的にコントロールされた反応に基づく、貯留岩内の塩基性pH伝播モデル	D
	10. 熱力学的平衡に基づく化学モデルと液相の移動及び分子の拡散による元素の輸送モデルとの結合モデル	D
	11. 定常蒸気流方程式、移流拡散輸送方程式、多化合物多相化学的分配モデルを組み合わせたモデル(空間可変透水係数場、加圧層透水係数、初期汚染物濃度の考慮、平衡分配則(Henry則又はRaoult則)による化学相分布の計算)	D
	12. 6種のガラス状重合体中の水のトラッピング拡散モデル	D
	13. レドックス制御多種多次元反応性化学輸送モデル(移流、拡散・分散、酸素の輸送、酸化還元、酸塩基反応、水中化合、沈澱・溶解、動的無機物溶解を含む輸送・反応連立方程式系)	D
	14. 貯留岩からのガスの逸散に対するガス-水系の孔隙状態並びに熱力学系の数式からなるモデル	D
地球化学 (A.6)	1. 岩しょうガス、噴気などの熱水学的分析、岩しょうガスと熱水との相互作用(火山活動の指標としての化学成分分析)	-

分野	解析の対象	タイプ
地球化学 (A.6)	2. 火山中のイオン交換挙動をシミュレートする地球化学モデリングコード(EQ3NR/EQ6)(クリノプティコライト/液相反応の記述に対するVanselow及びISMモデルの妥当性)	D
	3. 金属と腐植質の結合を記述する安定度定数一定の離散型多重配位子モデル	D
吸着 (A.6.6)	1. 酸化鉄、二酸化マンガン、カオリナイト粘土からなる試料の水溶液中Znの(金属)吸着モデル(Freundlich等温式)	D
	2. 土壌内の吸着性溶質線形輸送モデル	D
溶解 (A.6.7)	1. 石英の溶解プロセスのモデル(表面粗さと滑らかさの差となる活動度エネルギーの差による溶解の異方性、表面組成の階段化等結晶表面への影響の解析)	D
沈澱 (A.6.7)	1. プルトニウム溶液貯槽における異常過渡事象解析コード(酸性度の低い注入液(極端には、水や塩基性溶液)が貯槽溶液に添加された場合のプルトニウムポリマ生成)	D
結晶 (A.6.7)	1. 晶析-飽和槽中で過飽和状態をつくる化学的非定常晶析過程の数学モデル(結晶化溶液濃縮、晶析物の形成粒度状態の計算など)	D
コロイド (A.6.8)	1. モンモリロナイトのゲル状モデルと、沈降・圧密に対するオイルサンドの抽出残スラッジ中粒子充填のネットワーク構造の類似性分析	D
	2. スイス北部の放射性廃棄物地下貯蔵岩盤中の深部地下水に対し、天然コロイドの粒度分布、組成、吸着特性をベースとする放射性核種輸送モデル(可逆吸着及び非可逆吸着を生ずるメカニズム)	D
	3. 溶液中の錯体の対称性と分布の対称性に基づく無機コロイド粒子の形成に対する定性的モデル(平衡とかけ離れている場合、速度論的因子の考慮が必要)	D
	4. 固体粒子の分子動力学と流体に対する格子-Boltzmannモデルを組み合わせた固体-流体懸濁系のシミュレーションモデル(短時間でのコロイド粒子の動力的シミュレーション)	
錯体 (A.6.9)	1. 土壌中の酸化アルミニウム、酸化鉄、粘土鉱物などによるCd, Pd, Cu, Al, Se, As, Bなど微量毒性元素の吸着挙動を記述する化学的表面錯形成モデル	D
希釈 (A.6.12)	1. 川に排出した残留塩素の下流における混合希釈を定量化する二次元混合モデル	D

分野	解析の対象	タイプ
浸透 (A.5) (A.6.13)	1. かんがい水路に水を満たすときや排水時に起きるような一時的な浸透を一次元のRichards式の拡張解析解で表したモデル(重力効果の変化を含む)	D
	2. 不飽和土の透水係数の解析的表現に、土の構造を毛細管の束として扱う毛細管浸透モデル(地下水汚染や地下水涵養への主要な応力場である大空隙内の流れを取り扱う)	D
	3. 含まれる液体の浸透性を容易に変えられる壁が無限の枚数、平行に配置された多孔系中の流体シミュレーションモデル	D
酸化還元 (A.6.16)	1. 電気化学的分極曲線をモデル化し、電気化学反応の酸化還元挙動をシミュレートするモデル(ステンレス鋼等、不動態の解析)	D
	2. 局部的に電荷移行をする遷移金属錯体系を表現した定性的理論モデル	D
	3. 酸化還元の当量関係式と反応速度式から作成した酸化反応モデル(高塩分有機排水の電解処理)	D
生態学 (A.7)	1. 大気汚染物質沈降に対する生態系モデル(限界負荷値の推定など)	D
	2. 土壌-液相間の各種化学物質移動過程、汚染物質の系外損失過程、系外からの侵入増大過程などの影響を考慮し、ある土壌、気候条件下で広範囲の土壌中汚染物質濃度を推定するための方法(算土壌モデルベースの回帰分析)	D
	3. 集水池における地下水の酸性化モデル(MAGIC)	D
	4. 植生と気候との平衡関係と、 $10 \sim 10^3$ 年の時間スケールでの環境変化に対する植生応答分析モデル(木の誕生、生長、死をシミュレートする森林群落モデル、及び地形学や土壌特性のような環境因子や火事・風のような不規則な乱れも考慮できるモデル)	D
	5. 大気モデル、牧草モデル、毒性動学的牛モデルからなるダイオキシンの数学的連鎖モデル	D
	6. 樹冠の各位置から幹のふりい部へ流入する同化物質量の時間的変化をベータ分布として年輪幅の垂直分布を求める一般化ランダム・ウォークモデル及び拡散方程式型モデル	P/D
	7. 進化する生物系のシミュレーションモデル(生物の多様性パターンの解析)	D
	8. 樹木の繁茂と生産の森林生態プロセスに対する大気汚染及び酸性雨の影響シミュレーションモデル(地域開発用森林生態系プロセスモデルと植物の繁茂と汚染のモデルを組み合わせたもの)	D

分野	解析の対象	タイプ
生態学 (A.7)	9. 捕食者と餌の双方の最小の生存可能固体数レベルと自己制限的密度、捕食者の代替食物源、および構造的安定性を考慮した捕食者-餌モデル	D
	10. 米国西部砂漠に自生する落葉性灌木の変異と気候条件の相関を分析する成長期での水蒸気勾配モデル(温度や湿度の環境勾配に対する植物の水利用効率)	D
	11. 太平洋系群におけるブリ成魚のポピュレーションダイナミクスを解析するマトリックスモデル(仔魚産出数、漁獲率等の吟味)	D
	12. 人口の時間的変動を表すロジスティック曲線モデル	D
	13. 泥沼地に生育する林分に対し、土壌条件から平均年間材積成長量を推定する多変量解析モデル(土壌のC/N比、空隙率及び水素イオン濃度に依存)	D
	14. コンパートメントモデルによる放射性Csの連続摂取下における経時変化の計算(摂取する食品の違いの考慮)	D
微生物 (A.7.6)	1. 滞水層の同位体地球化学における微生物活動と堆積物の有機炭素の影響を解析するモデル(微生物の呼吸率、微生物による有機炭素の酸化)	D
	2. 河床に付着した鉄酸化バクテリアによって形成された微生物膜による河川の水質変化を解析するモデル	D
	3. メソスケールモデルにおける不飽和地質媒体中の微生物によるCO ₂ 生産の分析	D
進化 (A.7.9)	1. 新期原生代の海洋地殻の藻化により海洋海洋盆容量と大陸の乾陸が増大し、海水準低下が生じ、それによる侵食、堆積作用、生物生産性と埋没作用が、動物の進化をもたらす大気中の酸素増加につながったとするモデル	D
欠陥 (B.1.6)	1. 亀裂先端部での繰り返し塑性歪域に粒内亀裂成長速度が関連するという限定すべり可逆過程に基づく疲れ亀裂成長モデル(変形と破壊動力学理論の適用に際し、疲れ亀裂成長速度に関する物理的構成則を導入)	D
資源 (B.3.3~ B.3.6)	1. 地質/エンジニアリング(石油・ガス採取地の収集分析、発見プロセスモデル)、経済モデル、ハイブリッドモデルなど、石油及びガスの供給に関する経験的モデリング	D
	2. (石油の発生と分解、細孔圧の形成及び流体の排除に関する)常圧昇温熱分解、含水熱分解、詳細熱分解及び排除コード、速度モデル	D
	3. 天然ガス生産までの関連地質・ガス生産情報の編集・解析モデル	D

分野	解析の対象	タイプ	
資源 (B.3.3～ B.3.6)	4. 地熱貯留層評価と貯蔵量推定のモデル	D	
	5. 石油探鉱対象地域の石油地質評価シミュレーションモデル	D	
	6. 油・ガス含有堆積盆地の進化の計算機シミュレーションモデル(有機物の熟成時間、地域及び石油根源とその集積の動的環境に関する盆地データを入力し、炭化水素生成を計算)－異常高圧と古気温の初期・境界値問題－	D	
	7. 初期カレドニア造山運動のErgun成長褶曲系に属する地域での鉱床生成のための地域的地質学的差し込み、主要鉱床種類の鉱物化の特徴及び地域的鉱床生成進化と鉱床生成モデル	D	
	8. 石油探鉱のためのシミュレーションモデル(バックワードモデル、フォワードモデル、層序モデルなど)	D	
	9. 北鹿ベースンの地質構造・火成活動と黒鉱鉱床形成場のモデル	D	
	10. 大分県九重火山に対する火山発電のための火山直下の熱構造モデル並びに当地域総合的熱過程モデル	D	
	11. 岩塩ドームと石油トラップの形成モデル(粘弾性力学方程式の無次元化によるスケーリング則の導出)	D	
	12. せん孔資料と地形に基づいた鉱床モデル(採石所の採掘実施計画の推定基準の開発)	D	
	13. 地球規模的及び広域的鉱物資源評価法 1) 地球規模的評価 $\left\{ \begin{array}{l} \text{地殻存在度モデル } M_i = W \cdot k_i \cdot A_i \\ \text{地球統計学モデル } M_i = W \cdot p_i \cdot q_i \end{array} \right.$ ここで、 M_i : 地殻中の評価する元素(例えば金属量) W : 地殻の質量 A_i : 元素 i の地殻存在度 k_i : 元素 i についての比例定数 q_i : 元素 i の品位 p_i : その品位の確率密度関数 2) 広域的評価 $\left\{ \begin{array}{l} \text{URPV法(単位地域生産値法)} \\ \text{鉱床モデル } M = N \cdot T \cdot Q \end{array} \right.$ ここで、 N : 鉱床数, T : 平均鉱量, Q : 平均品位	D / P	
	地下水 (B.3.11)	1. 水文地質的マッピングと組み合わせた一様流解析モデル(地理情報システムの利用)	D
	地下空間利用 (B.3.8)	1. 地下空間開発の波及効果を解析するためのシステム・ダイナミックスモデル	D
	人口/人口 密度	1. マルコフ連鎖による継続時間依存型多国家モデルでの多国家安定成長並びに人口構造変遷の解析	D
2. 人口推移を生産率と生産性をパラメータにもつ差分方程式で表すモデル		D	

分野	解析の対象	タイプ
人口／人口密度	3. 建てかえや住居床の用途転換により10～20年位将来の人口規模・世帯数がどれだけ減少するか、またある種の土地利用規模を通じて定住人口確保のための公共介入による人口規模への影響はどのくらいかを分析するモデル	D
病気	1. 流行病の拡散に関する状態変数モデル(感染予備軍者数と感染者数を変数とする一階非線形微分方程式系)	D
	2. 実際上あるいは感覚上のさまざまなリスクや利益のある食品、食事を消費者が選択するシミュレーションモデル	D
	3. ヒトにおける鉛排せつモデル(血中分配、血しょうと組織(肝、腎、骨)、胃の代謝活性部位、胃の拡散部位、食事及び環境からの吸収、血しょうへの排せつパラメータ等)	D
交通	1. 交通施設投資、交通需要管理、土地利用管理などの広範な変数を、長期的な代替変数としてグループ化し、旅行及び土地利用モデルと交通システムを連続してシミュレーション解析するモデル	D
	2. 操船者の主観的な危険度判断に関する知識構造をシミュレータ実験結果から、相対距離・その変化率・相対方位の変化率をファジィで表現して主観的危険度を推論する、ふくそう海域での避航操船モデル	P
	3. 低所得諸国における自動車保有とその利用のモデル化(自動車の保有の所得弾力性や駐車場整備のための予測値など)	D
	4. 死亡事故率予測モデル(アルコール消費量、若年運転者人口、失業率、所得水準、年平均気温、年間降水量など経済、地理、交通関連の15の変数を含む)	D/P
	5. 買物・娯楽行動に焦点をあてた、消費者の商業地区での選択問題と回遊行動に関する分析(認識の不確実性を考慮した意思決定モデルと、非定常確率モデルによる回遊行動のモデル)	D/P
経済	1. 地域金融市場と地域成長との相互作用モデル(利率誘導型の地域的支出より、信用誘導型の地域的支出をベースとするモデルの方が適合)	D
	2. 個々のごみ収集場所と最終処分場の中間に位置するごみ中継場を建設する場合において、生態系、行政、運搬、経済及び空間を考慮に入れた多基準評価モデル	D
	3. 気候変化が電気事業の経営に与える影響の定量的評価モデル(現在の供給力と運用条件、将来の供給技術や燃料価格、気候変動、CO ₂ 排出規制などの想定のもとにシナリオを想定し、需要構造と対応する最適電源構成と発電原価差を評価)	D

分野	解析の対象	タイプ
閉鎖後の地表の活動 (B.4)	1. 貯水池、水力発電施設、かんがい池、人工内陸航行水路からなる河川システムと、水理学・技術・社会政策・経済上の制約を考慮した多目的水資源システム分析計画モデル(LP, MILPモデル)	D
熱 (C.1)	1. 地殻内地震の電源の下限からリソスフェアの脆性-延性遷移面に相当すると仮定した、地下温度分布モデル(中部日本の熱的状态、レオロジー、地震活動)	D
	2. カムチャッカ半島6ヶ所の地殻熱流量測定値に基づく三次元温度構造モデル	D
	3. 熱水上昇帯での孤立亀裂、垂直・水平亀裂群のシリカ沈澱及び熱弾性応力による亀裂系閉塞速度の解析モデル	D
	4. 負荷と温度勾配を受ける多結晶体の非定常応答シミュレーションモデル(結晶粒と集合した多結晶体の両方の弾性、クリープ、熱及び成長特性における異方性の考慮並びに粘弾性係数及び内部応力の時間的変動を記述…静水圧力を受ける原子炉管材の照射クリープ及び成長特性の解析)	D
	5. 地下空間における熱と質量の連成モデルによる地下水蒸発の数値解析(地下空間の水収支は主に浸透流、蒸発、温度、湿度、空調条件等に依存)	D
	6. 使用済燃料の崩壊熱生成率算定モデル(ANS-79崩壊熱モデル)	D
	7. 鉄骨柱の火災時の熱座屈に関する微分方程式型モデル(鉄の非弾性モデルとクリープの考慮)	D
有機物 (C.2.3)	1. 堆積物中の有機物が O_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} によって継続的に酸化されるプロセスのモデル(間隙水のpHと方解石飽和状態に対する解析)	D
	2. フミン質の化学特性に基づく膜-ミセル腐植モデル(動植物死体の部分的酸化残さを有機物源とする両親性分子が土壌鉱物粒子と反応して膜状被膜のフミン質を形成し、溶液中ではミセル及び単量体単位で存在)	D
	3. 有機ヨウ素化合物や有機物に配位した水酸化物形をとる放射性ヨウ素の挙動解析モデル(シリカゲルに化学的に結合したフミン酸、もとのシリカゲル、土壌中の金属酸化物のモデルに対する焼成土壌でのヨウ素の吸着特性分析)	D
	4. フルボ型腐植性有機物による微量金属物質及びアルカリ土類カチオンの結合における競合効果を説明するフミンイオン結合モデル	D
応力 (B.1.4, C.3.2.)	1. 建築物(免震構造物も含む)の地震応答解析モデル	D

分野	解析の対象	タイプ
廃棄物及び 処分場に起 因する現象 - 化学的現 象 - (C. 2)	1. 変質作用後の岩石-水相互作用による U^{238} - U^{234} - Th^{230} - Ra^{226} 系の長半減期核種の活量推移を記述するモデル	D
	2. セメント間隙流体と岩石間の反応の化学的・物理的モデル(鉱物溶解反応速度、セメント間隙流体の化学組成、断裂帯岩石の水文地質学的特性データを用い、化学的交換による間隙率の変化、ゼオライトとCSHの遅延効果を分析)	D
	3. 環境誘起割れモデル(アノード反応、すべり溶解、アノード反応誘起へき開、表面原子移動及び水素脆性などのモデル；多数の亀裂発生、亀裂の合体及び枝分かれ並びに応力等が複雑に発生している系)	D

3.2.2 確率論的モデル

一般に、確率論的モデル概念が適用されている事例にどのようなものがあり、具体的にどのような確率分布型が用いられているのかを調査し、表11に整理・例示した。ここで、1～273までは40件以下の確率型分布を示し、このうち、番号1～182までは、およそ同種の確率分布型の順に並べており、他方、番号183～273までは、動燃事業団選定F E Pリストの大項目（地質学、水理学、物質移動、地球化学、熱、応力、放射線、化学又は科学、なお、気候については番号1～182番に含まれている）別にリストを作成した。また、番号274～306までは、件数40を超える確率分布型のうち、1990年以降のみ選定対象としたものを表す。つぎに、これらの確率的事象のどの適用事例が各F E Pの確率的取り扱い方の参考となり得るのかを検討し、関連し得る上記の番号を、各F E P毎に割り振り、表12を作成した。（なお、1つの確率適用事例が複数のF E Pにまたがっているケースもあり、また、細項目レベルのF E Pに該当しないがそれを含む大項目レベルに属すると考えられるものは大項目レベルに割り振った。）

これらの確率論的な取り扱いは、昨年度報告書⁽⁹⁾でも調査・検討しているように、データ・情報の本質的に少ない稀頻度事象など、ファジィ理論で置き換えるべき要素も含まれていると考えられるので、確率変数扱い可能なものとファジィ数として扱うべきものとを明らかにした上で解析・評価していくことが望まれる。

表11 確率分布適用事例

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
1	航法誤差	両側指数分布、ワイブル分布
2	航空機の高速維持誤差	両側指数分布
3	航空機相対垂直距離	両側指数分布
4	日本語音韻・音節認識率	多次元正規分布
5	動脈中pH, pCO ₂ , 塩基過剰(BE)	多次元正規分布
6	γ線光子のエネルギースペクトル	ローレンツ分布
7	半導体検出器より得られる特性X線スペクトル	ローレンツ分布
8	品質(エラー等)関連コスト	パレート又はローレンツ分布
9	断層先端付近の点欠陥によって生ずるランダム応力	コーシー分布
10	まさ土の粘度	対数正規分布、パスカル分布、正規分布
11	交通(需要)量	正規分布から多項分布、ディリクレ分布に更新(ベイズ推計法)
12	年齢別漁獲量	対数正規分布、多項分布
13	地域間トリップ(trip)	多項分布
14	地震マグニチュード	指数分布、多項分布
15	新しい星、長周期すい星の軌道(分布)	ポアソン分布、多項分布
16	自動車の人身事故率	多項分布
17	甲状腺機能の3つの症状とその人数	症状と人数間の条件付確率を多項分布、各症状の確率をディリクレ分布
18	暗号システムでの入出力の相互情報量	カイ二乗分布
19	天然ガス資源の統計的性質	ガンマ分布、カイ二乗分布
20	原子力発電所タービンミサイル損傷破壊形態	正規分布、カイ二乗分布
21	選鉱テーブル両側における鉱石粒子位置	パスカル分布
22	個々人の健康状態	ディリクレ分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
23	河川の氾濫(洪水)	ディリクレ分布(母数変化によるベイズ推定)
24	輸出用及び国内用製材の断面寸法	ラプラス分布
25	洪水頻度、しきい値超過	パレート分布
26	振動条件監視実験データ	パレート分布
27	都市規模	パレート分布
28	企業の資産	パレート分布
29	地理的用地規模	パレート分布
30	個人収入	パレート分布
31	所得金額	対数正規分布
32	高額所得者の所得金額	パレート分布
33	同種の生産活動の割り振り(サービス)	ガンマ分布、対数正規分布、パレート分布
34	職業技術者の収入	パレート分布
35	油田間掘りにおける予測価格	三角分布
36	コンクリート応力(終局時)	三角分布、曲線分布
37	天然資源意思決定過程での経済・環境のウェイト	三角分布
38	深層混合処理地盤における地盤の側方土圧	台形分布
39	トカマクプラズマにおける低減ハイブリッド波の速度空間における拡散係数	台形分布
40	地盤中初期含水量	一様分布、台形分布
41	鉄筋コンクリート3連梁にかかる荷重	三角分布、台形分布、一様分布
42	結核性肋膜炎患者の年齢	台形分布
43	ケーソン防波堤の揚圧力	台形分布
44	溶接継手部せん断応力	三角分布、台形分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
45	施削における工具損傷	定常損傷…対数正規分布、 初期破損…台形分布
46	地震・風等の水平荷重の作用による構造物偏心荷重の地盤反力	台形分布
47	高速電気垂鉛めっきのノズルによる噴流の流速	台形分布、正規分布
48	一降雨群中の降雨部分の発生個数	対数級数分布
49	交通事故頻度	対数級数分布、整数の負の二項分布
50	人口の流入・流出割合	対数級数分布(都市規模に相関していないという仮定のもとに)
51	地球大気圏再突入時の飛翔体の半径方向重心	レイリー分布
52	最大波高・加速度	レイリー分布 (ある場合には、ライス分布)
53	浅水うねりの波高	レイリー分布
54	材料等疲労寿命	レイリー分布、 2パラメータワイブル分布
55	輝緑凝灰岩、粘板岩の引張り強度(頻度)	レイリー分布
56	ロータリー耕耘後の土塊	レイリー分布
57	インド南西岩沖の波高・周期	浅水域の波高…グルホフスキー分布、 相対波形がゼロ近傍…レイリー分布
58	地形の複雑な地形での風速	ワイブル分布(レイリー分布はあまり適合しない)
59	不規則応力ピーク分布に対する疲労寿命	レイリー分布、指数分布
60	魚のエコーの包絡線振幅	レイリー分布
61	弱い減衰性をもつ構造物の地震応答パワースペクトル	レイリー分布(確率過程地震モデル)
62	小地震の原因となる断層の長さ	一様分布
63	需要量と入荷ロットの不良率	一様分布
64	あるユニットシステムの故障時間	一様分布、指数分布、ガンマ分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
65	交通シミュレーションにおける車間分布	一様分布、指数分布
66	多孔質媒体内の毛細管圧力と分散相システム(泡)の流動分圧	ベータ分布
67	雲量の頻度	ベータ分布
68	日照時間から導出した日別雲期間(度数)	ベータ分布
69	軍隊の人的能力需要と利用可能な人的資源	ベータ分布
70	炭田立坑の深度別建設時間	ベータ分布
71	ライフサイクルコストのフレームにおける信頼性関連コスト	ベータ分布
72	異常出生率	発生…二項分布、前方分布…ベータ分布 ⇒(ベイズ推定)発生率後方分布…ベータ分布
73	ヒト免疫不全症 感染者1人1月当りの新たな感染者発生	ベータ分布
74	一定電位分極下のSUS304隙間腐食に対する誘起時間/孔食萌芽の発生	指数分布
75	PH処理中の溶鋼中介在物粒径	指数分布
76	セメントペーストの細孔径	指数分布と正規分布の混合型
77	腐食環境下のパイプライン表面初期ピット深さ	腐食環境が過酷でない場合…ワイブル分布 腐食環境が過酷な場合…ある確率モデル (文献で提案されているもの)
78	石炭燃焼期間における排出粒子径	微細化モデル…単一粒子径分布、 その他…指数分布
79	高温高純度水環境及び中性低濃度濃化物環境における鋭敏化ステンレス合金の粒界応力腐食割れ寿命	指数分布
80	定常ガラス外乱を受ける骨組やトラスの弾性限度を越える塑性変化	指数分布
81	基礎研究への投資を考慮した企業の資源割当における便益	指数分布、正規分布
82	生存時間	指数分布、ガンマ分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
83	人口約23万人の地方都市における民間デベロッパーによる宅地開発速度	指数分布、ロジスティック分布
84	都市における基幹産業従業者数の都心からの時間距離に対する分布	指数分布
85	電離放射線による白血病・胃がんの潜伏期間	ハイブリッド分布
86	脳腫瘍患者の生存率	対数正規分布、ガンマ分布、ワイブル分布
87	都市域における自動車の車頭間隔(時間分布)	指数分布(車両密度が比較的低い場合)
88	道路交通騒音	指数分布、正規分布、対数正規分布、ワイブル分布(カイ二乗検定結果ワイブル分布の適合性が最も高かった)
89	海嶺及び沈み込み帯の位置に対するホットスポット	フラクタル次元で2より1に近い指数分布
90	直列円柱まわりの流れの各モードの継続期間	ガンマ分布
91	月及び季節の総降水量(USA)	ガンマ分布
92	アメダス資料に基づく日本の確率降水量	ガンマ分布
93	キャピテーション浸食モデルにおける泡の崩壊の際に生ずる衝撃力	ガンマ分布
94	直接せん断試験における表面凹凸部接触面の変形(節理表面の粗さ)	ガンマ分布
95	雷雨継続時間の頻度	ガンマ分布
96	地震発生機構	ポアソン過程、ガンマ分布
97	地下水涵養量	ガンマ分布(通常の気候及び地下水面データから浸透伝達関数の空間的分布を決定するため)
98	霧滴の粒度	ガンマ分布
99	降雨量分布(熱帯赤道地方)	ガンマ分布、対数正規分布
100	在庫管理問題における需要	指数分布、ロジスティック分布、正規分布、ガンマ分布、ポアソン分布、カイ二乗分布、t分布、ワイブル分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
101	電話需要予測誤差	ガンマ分布
102	石灰石の粒径	対数ガンマ分布
103	水のピーク使用量の頻度	ガンマ分布
104	LSIパッケージの熱衝撃によるサイクル寿命	ワイブル分布
105	マトリックス中繊維強度	ワイブル分布
106	GFRP積層板の低温破壊じん性のばらつき	ワイブル分布
107	グラファイト・エポキシ系複合材の切欠き材の強度	ワイブル分布
108	脆性材料の引張ひずみの密度	ワイブル分布
109	先端複合材料航空機構造の運航中の疲労強度	ワイブル分布
110	ソフト・ハード溶接の降伏点	ワイブル分布
111	HTGR燃料殻圧縮破壊強度	ワイブル分布
112	BWR起動停止繰り返し変動でのSUS 304のSCC加速試験での破断時間	ワイブル分布
113	球軸受やすべり軸受のような接触磨耗する機械部品の破損状態 (モード)	ワイブル分布
114	温泉地域における機構部品の接触抵抗特性	ワイブル分布
115	風速: EX. ギリシア西海岸、三浦半島(剣崎)、サウジアラビアMakkah、紅海沿岸部、島根県9ヶ所	ワイブル分布(従来型の他に、ワイブル分布を一般化した多項式指数関数分布、混合型など)
116	バスを持つ運輸会社における設備の故障時間と修復時間	故障時間…ワイブル分布、 修復時間…対数正規分布
117	鉄の人工海水中腐食疲労寿命	対数正規分布、ワイブル分布
118	コンクリート強度(曲げ、圧縮強度)	ワイブル分布
119	マルセイユの乾天連続頻度の月別分布	負の二項分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
120	核分裂連鎖反応系の中性子確率分布	二項分布
121	臨床放射線性せき髄疾患における潜伏期間	二項分布
122	岩石の孔径分布	二項分布
123	遊漁の漁獲分布	行程当りの漁獲…二項分布
124	天然での鮎床の存在	二項分布、ポアソン分布
125	水文事象 (洪水、…)	二項分布、ポアソン分布
126	出生死亡過程における平衡人口	二項分布
127	肺がん死亡率と人口	負の二項分布
128	稀頻度事象 (先天性機能障害児の出生)	負の二項分布をポアソン分布で近似
129	染色体異常細胞数	ベータ二項分布
130	スクリーニングによって見落された疾病を有する人の数	負の二項分布
131	英国の長距離鉄道トリップの割合	負の二項分布
132	交差点の事故頻度	対数級数分布
133	交通量ピーク時における都市幹線道路での交通量	負の二項分布
134	コンクリート中のクラックの発生位置	ポアソン分布
135	就業者 1 人当りの労働災害数の頻度	ポアソン分布
136	局部腐食過程における観測された孔食への移行電流	ポアソン分布
137	地球磁場の極性反転	ポアソン分布
138	あるシステムの故障時間間隔と予備部品に対する需要	故障時間間隔…指数分布、 予備部品に対する需要…ポアソン分布
139	薬物副作用症例頻度	ポアソン分布
140	農家別牛流行熱発生頭数の度数	ポアソン分布
141	多発奇形・重症心身障害児	ポアソン分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
142	交通事故件数の変動	ポアソン分布
143	乗客のバス停への到着分布	ポアソン分布
144	油田規模分布	対数幾何分布
145	需要のラグ分布	幾何分布
146	被曝線量	ハイブリッド対数正規分布(低減努力を反映、他に、資源消費の経済効果や降雨量等にも適用可能)
147	利根川、相模湖、相模川、淀川を 取水源とする6地点のNH ₄ -N値	対数正規分布
148	エーゲ海付近の新第三紀きょう炭 層地質・層序・炭層厚	対数正規分布
149	各試すい孔からの地下水産出量	対数正規分布
150	滋賀県東南部の風化花崗岩山地に おける表層土厚	対数正規分布
151	降雨量分布	年間降雨シリーズ発生…対数正規分布、 正規分布 月間降雨シリーズ …立方根正規分布
152	濁水流量頻度	対数正規分布
153	低品質エネルギー資源又は局地的 鉱物埋蔵分布	ウラン…対数正規分布、 石炭…正規分布
154	施工費構成要素相関を考慮したコ スト分布	多変量対数正規分布
155	ダイヤモンド鉱床中の宝石価格	対数正規分布
156	建築物への荷重	Gumbel分布、正規分布、対数正規分布
157	消費者の新製品に対する評価額 (値踏み価格)	対数正規分布
158	貯蓄保有額	対数正規分布
159	米国家庭内でのラドン捕集器中ラ ドン水準	対数正規分布
160	ポルトガルにおける水力発電変動 補填のための火力発電輸入コスト	対数正規分布
161	経済的打切結果としての油田規模 分布	対数正規分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
162	大都市地区の地域的人口分布	対数正規分布
163	都市人口	対数正規分布
164	人口密度地域分布	対数正規分布
165	空中微生物(真菌)の粒径	対数正規分布
166	大領域都市規模	対数正規分布
167	アルミニウム平板曲げ疲労試験における亀裂進展寿命	対数正規分布
168	大気中を浮遊する人工繊維の粒径と長さ	対数正規分布
169	道路交通流の速度分布	非渋滞流…正規分布、 渋滞流…対数正規分布
170	都市流出水中の炭化水素濃度	対数正規分布
171	市街地における大気エアロゾル粒子粒径	対数正規分布、正規分布
172	自動車走行影響を受ける地点におけるSO ₂ , CO, 非メタン炭化水素, NO _x , O ₃ の濃度	対数正規分布
173	破壊又は破砕生成物の質量	対数正規分布
174	乱流のエネルギー散逸率の揺ぎ	対数正規分布
175	自然現象(微粒子半径、太陽風電子速度、気管支、生体組織の活性、経済生産活動)の空間スケール分布	正規分布、対数正規分布、1/f分布
176	銀河の光度分布	正規分布、対数正規分布
177	林木の直径	正規分布
178	表流水と深井戸の全有機ハロゲン生成能	正規分布
179	地下水水質(イオン濃度 等)	正規分布、対数正規分布
180	熱帯湿潤地方の降雨による年平均流量及び洪水ピーク流量	正規分布
181	工業化市街地域における最大水消費量	Pearson分布(この変数の適当な変換により正規分布で表される)
182	乗用車とバスの旅行時間	正規分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
183	地質学・海洋学など地球科学現象の空間分布	(地質学) 正規分布
184	粒径ひん度分布	(地質学) 正規分布
185	地震のコロラドリニアメント中の集中分布	(地質学) 二項分布
186	鉱物中のウラニウム一様分布に対する核分裂飛跡(フィッション・トラック)計数統計への適用	(地質学) ポアソン分布
187	河川ネットワーク間リンク長	(水理学) 指数分布
188	侵食しやすい土壌表面の流水(降雨からの流出水)により生じる小川の流速分布	(水理学) 正規分布
189	アメリカ北西部の年間・月間降雨量	(水理学) 正規分布
190	溶質輸送に対する種々の団粒径分布	(物質移動) 一様分布、正規分布、対数正規分布、離散分布
191	リル流下水の平面斜面土壌侵食作用の潤辺周囲分布(Hairsine・Roseの平面斜面土壌侵食モデル)	(物質移動) 一様分布
192	表面浸食境界(移動境界)を持つ2領域スラブ内を拡散する過渡物質の拡散に影響する媒体内トラッピング核	(物質移動) 一様分布
193	樹冠の垂直分布及び樹冠の各位置から幹のふるい部へ流入する同化物質量の時間的变化	(物質移動) ベータ分布
194	多分散組成の球形固体の粒子径分布	(物質移動) 指数分布、正規分布
195	亀裂媒体の亀裂開口(もしくは断面積)	(物質移動) 指数分布
196	非均一性多孔質媒体の空隙率半径分布(Brinkman-Forchheimer-Darcyモデル)	(物質移動) 指数分布
197	亀裂媒体の割れ目断面積(層流管路モデル)	(物質移動) ガンマ分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
198	く形流路内平板での水蒸気と冷水との間の物質移動を伴う向流層状流れにおける界面波のひん度分布 (水平に近い流れ…正規分布、傾斜角大…ガンマ分布)	(物質移動) ガンマ分布、正規分布
199	異なる空隙率をもつ土壌が水平層をなす場での地表から鉛直に一定の流れを与えたときのある流量に到達するまでの時間と距離	(物質移動) 正規分布
200	ウラン濃縮施設事故によるUF ₆ 漏出後大気中拡散	(物質移動) 正規分布
201	長い沿岸線における堆積物の年間純移動率	(物質移動) 正規分布
202	粉体層中での移流分散物質(トレーサとしての食塩水)濃度分布	(物質移動) 正規分布
203	地下水汚染物質分布	(物質移動) 対数正規分布
204	透水係数	(物質移動) 対数正規分布
205	粉状鉱物の粒径分布	(物質移動) 対数正規分布
206	不飽和帯中における溶存物質の輸送係数(分散係数、対流速)分布	(物質移動) 対数正規分布
207	亀裂の入った乱れのない粘土の湿潤なコアを通過する非定常流物質移動時間	(物質移動) 対数正規分布
208	腐食による不溶解粉末と溶解成分が伝熱面に堆積・析出する系における微粒子粒径分布	(物質移動) 対数正規分布
209	K-Ar法鉱物年代測定におけるAr ⁴⁰ 消失分布	(地球化学) 一様分布
210	単一地球化学過程がもたらす単一地質体中の元素存在度	(地球化学) 正規分布
211	海岸地域の滞水層中のイオン濃度分布(海水浸入、肥料、CO ₂ 溶解、海水中イオンの粘土への吸着による)	(地球化学) 正規分布
212	天然における化学元素の分布(熱力学的平衡化作用)	(地球化学) 正規分布
213	アクチノ閃石や白雲母の粒径分布	(地球化学) 対数正規分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
214	除熱対象となる熱源分布	(熱) 一様分布
215	凍土上での熱と水分の連成移動系における水圧パラメータ変動	(熱) ベータ分布
216	電気と熱の複合ストレスを加えたときの固体絶縁材料の電氣的寿命	(熱) ワイブル分布
217	エポキシ樹脂のアルミニウムリング注型片の形状と温度差(ストレス)を関係付けた寿命分布	(熱) ワイブル分布
218	移動熱源分布	(熱) 正規分布
219	中国大陸の地殻熱流量分布	(熱) 正規分布
220	溶接時熱作用(温度分布、残留応力、ひずみ)に関する熱電流密度分布	(熱) 正規分布
221	天然物質(化石燃料など)の化学反応速度を説明するための平均活性化エネルギーや各種幅	(熱) 正規分布
222	粗い地面上の境界層内での風速分布	(熱) 正規分布
223	地熱系のある一定地域内における貯留層温度別貯留層発生頻度数	(熱) 対数正規分布
224	S 38C 炭素鋼への印加応力に対する破断確率分布	(応力) ベータ分布
225	S 38C 炭素鋼の疲労寿命分布	(応力) ワイブル分布
226	粘性土における繰り返し載荷時の間隙(水)圧	(応力) ガンマ分布、ベータ分布、正規分布
227	根の伸長力、根の曲げストレス、ペネトロメータでの土壌団粒の力の各分布	(応力) ベータ分布
228	中性塩化物溶液中の鋭敏化した304ステンレス鋼の粒界応力腐食割れ寿命	(応力) 指数分布
229	一本の炭素繊維をエポキシ樹脂に埋め込んだ複合材料の力学試験における印加応力に対する繊維の切断長分布	(応力) 指数分布
230	脆性材料の亀裂半径分布	(応力) 指数分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
231	Westerly花崗岩のクラック開口分布(マイクロメカニックモデル)	(応力) フラクタル分布
232	疲労曲線の指数のばらつきによる等価サイクル数の計算誤差を生ぜしめる負荷の振幅	(応力) レイリー分布、指数分布、正規分布
233	多アスペリティ断層モデルにおけるアスペリティの応力降下量の統計的分布及び最大加速度分布	(応力) 指数分布
234	土のせん断(三軸圧縮)試験に対する応力-歪曲線の軸方向応力を側圧で割って基準化した曲線への適用	(応力) 指数分布とコーシー分布の組み合わせ
235	軟鋼材の疲労亀裂伝播挙動を調べるための設定ランダム荷重分布	(応力) 指数分布
236	ストレス-強度分布関数	(応力) 指数分布、正規分布、対数分布、ガンマ分布、ワイブル分布
237	地震間時間分布を酔歩で表せるように変化すると仮定したときの一对の地震の時間間隔	(応力) 指数分布
238	高温純水中における鋭敏化304鋼の粒界腐食割れ寿命分布	(応力) 指数分布
239	引張・圧縮の繰り返し荷重によるガラス/ポリエステル積層材料の疲れ寿命の統計的分布	(応力) 指数分布
240	平面応力条件下における内部亀裂を有する薄板の横方向変形	(応力) 二項分布
241	片持ちRC短柱にかかる雪、風の荷重分布	(応力) ポアソン分布
242	等価亀裂で表したランダムな内部亀裂を有するある部材の亀裂状欠陥	(応力) ポアソン分布
243	等価亀裂で表したランダムな内部亀裂を有するある部材の破壊じん性値	(応力) ワイブル分布
244	土壌中の放射線源分布	(放射線) 一様分布
245	電離放射線による白血病・骨がんの潜伏期間	(放射線) ハイブリッド分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
246	石油タンク底板下面の腐食データ (最大孔食深さの成長速度、余寿命評価)	(放射線) 指数分布
247	連続して記録された2つの一次宇宙線粒子(空気シャワー)間時間間隔	(放射線) 指数分布
248	屋内Rn ²²² 放射線濃度	(放射線) 対数正規分布
249	Cs ¹³⁷ 降下物の森林土壌中深度方向濃度(線量)分布	(放射線) 対数正規分布
250	カナダのウラン鉱山での労働者の被曝線量	(放射線) 対数正規分布
251	カールスルーエ再処理プラント周辺の畑地土からの農作物及び飼料植物によるI ¹²⁹ , I ¹²⁷ の濃縮係数	(放射線) 対数正規分布
252	HLW処分施設へのリスク限度ライン(ICRP及び国連科学委員会(UNSCEAR))	(放射線) 対数正規分布
253	サバンナ川原子力プラント施設のスティール川流域はんらん原のγ線量率空間分布	(放射線) 対数正規分布
254	大気汚染物質の濃度分布	(放射線) 対数正規分布
255	米国LWRプラントにおける職業放射線被曝	(放射線) 対数正規分布
256	不均質材料の粒径分布	(放射線) 二項分布
257	岩盤損傷の変動度合(表面のランダムな亀裂分布特性の計測)	(化学又は科学) ベータ分布
258	損傷材料の損傷数	(化学又は科学) ベータ分布
259	岩盤の亀裂長	(化学又は科学) ワイブル分布
260	岩盤の単位面積当りの亀裂数	(化学又は科学) 一様分布
261	小砂漠の山間河川の流れ(河床土砂輸送の有効流量、循環間隔)	(化学又は科学) ガンマ分布
262	エアロゾル粒子の粒径分布	(化学又は科学) ガンマ分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
263	炭田露天採掘地区の硬いきょう炭層岩石の比容積、孔隙率分布 炭田露天採掘地区の硬いきょう炭層岩石の圧縮強さ、引張強さ 炭田露天採掘地区の硬いきょう炭層岩石の縦波速度	(化学又は科学) 正規分布 (化学又は科学) 指数分布、ガンマ分布 (化学又は科学) 正規分布、ガンマ分布
264	雲の水平方向の広がり	(化学又は科学) 正規分布、ガンマ分布
265	成層圏エアロゾルの各成分(75% 溶液硫酸滴、隕石起源粒子、火山性エアロゾル、各種塩粒子、その他バックグラウンド)の粒径分布(火山活動活発時光学的厚さの高度分布も試算)	(化学又は科学) ガンマ分布
266	低歪速度試験中に発生・進展する応力腐食割れにおける応力拡大係数 低歪速度試験中に発生・進展する応力腐食割れにおける亀裂進展速度	(化学又は科学) ワイブル分布 (化学又は科学) 指数分布
267	脆性材料の活性化された亀裂歪密度	(化学又は科学) ワイブル分布
268	ファインセラミックスの熱衝撃後の残留曲げ強度	(化学又は科学) ワイブル分布
269	地域水文学における非正規な母集団から得られる比較的短期間のサンプルの歪度	(化学又は科学) ワイブル分布
270	ガラス繊維強化プラスチック(FRP)被覆断熱構造材の故障分布	(化学又は科学) ワイブル分布
271	原子力発電プラントの鋼製原子炉格納容器の超音波検査におけるシャルピー吸収エネルギー	(化学又は科学) ワイブル分布
272	粘土質きょう炭層岩石の水中での破碎及び粉化(孔隙率、深度、鉱物学的組成の影響)	(化学又は科学) ワイブル分布
273	爆発事故で放出・汚染した土壌中のTCDD濃度分布	(化学又は科学) ポアソン分布
274	粒子径分布を反映した速度定数分布をもつテヘロ系の反応速度解析のための粒子径(TiO ₂ コロイドとメチルピオロゲンを含む液)	対数正規分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
275	Na ₂ O-B ₂ O ₃ -SiO ₂ 系分相ガラス中の液滴状分散相の等温条件下での成長する粒径	二並数分布型、対数正規分布型、三並数分布型の間で周期的に変化
276	液相焼結したZnO-BaO系セラミックスの成長する粒度	対数正規分布
277	セメント板とモルタル中の気孔径	複数の対数正規分布の和
278	強塩基溶媒中の遊離塩基と共役酸の吸収帯	対数正規分布
279	硫酸塩の洗浄比(降水中硫酸塩取り込み機構)	対数正規分布
280	多孔質膜不均一モデルと多分散懸濁液の細孔直径	両対数正規分布
281	反応器モデル化における部分化学平衡同定に対する化学ポテンシャルと活動度係数	対数正規分布
282	Seの血清濃度	対数正規分布
283	スペインのある河口水域での貝中病原菌濃度	対数正規分布
284	パキスタンのある市内の正常男女の血中Cd濃度	対数正規分布
285	ホルスタイン種乳牛の末梢血液中卵巣ステロイドホルモン濃度	対数正規分布
286	乳癌の倍增時間	対数正規分布
287	フェライト母地中の平均粒径をもつFe ₃ C粒子における臨界面応力によるボイド生成速度	正規分布
288	機械加工面の非等方的、ランダム粗さをもつ表面分布	正規分布 (弾塑性モデル)
289	ガラス瓶の強度のばらつき	対数正規分布
290	熱荷重を受ける円筒の破損確率	正規分布、対数正規分布
291	宇宙線のエネルギー分布	ポアソン分布、正規分布
292	シリカガラスへインプラされた非希ガスイオンの分布	正規分布
293	原子炉圧力容器亀裂深さ	正規分布、指数分布

番号	確率的事象 (変数もしくは対象)	確率密度関数型
294	非平衡定常状態に近づく線形過程の一次元輸送における拡散、熱伝導、粘性流	正規分布(確率理論による化学反応速度と輸送の記述)
295	岩石の亀裂、空隙の存在による構造的強度低下指数(平均強度と圧縮強度の比)	正規分布
296	自然地震に対する構造物の応答倍率	その年によって正規分布に適合したり、ずれの著しい年がある。
297	水理学(水文モデル)一般	非整数位統計量分布(正規分布の一般化等)
298	インドの大多数の集水域における年間流出量	正規分布
299	ダイズにおける水ストレス反応検出に対する葉温頻度分布	正規分布
300	スペインの8観測点の地球的太陽放射照度の日及び時間の月平均値	正規分布
301	アルミニウム発色建材のふっ素樹脂でアニオン電着塗装するための電着液のゼータ電位	正規分布
302	2Sアルミの孔食発生数、工業用純アルミの孔食発生時間分布、アルミ(A1050)の孔食成長過程における深さ分布	ポアソン分布、正規分布
303	犬の心臓・肺動脈にみられる自然感染虫体の成長頻度分布	正規分布、負の二項分布、ポアソン分布
304	水俣市近くの海岸付近の住民の赤血球中の水銀濃度	正規分布
305	でこぼこの高さ	ワイブル分布
306	第一3ヶ月期の胎児染色体異常	ロジスティック分布

表12 各FEPへの確率的取り扱いに参考となり得る確率分布適用事例

A. 自然現象	
1. 地球外の現象	176,247,291
1.1 隕石の衝突	1,2,3,15,51
1.2 太陽輻射	175,300
2. 地質学的現象	148,183
2.1 プレート運動/テクトニクス的变化	89
2.2 地磁気の変化	137
2.3 火成活動	265
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	9,14,26,46,61,62,96,185,233,237,296
2.8 岩体の不均質性(透水性、鉱物組成)	10,94,102,122,184,186,199,205,209,213,231,257,259,260,263,277,288,295
3. 気候学的現象	46,58,67,68,115,222,223,241,264
3.1 降雨、気温、土壌の水収支	48,91,92,95,98,99,119,151,152,180,189,298
3.2 洪水	23,25,125,253
3.3 海面変動	43,52,53,57
3.4 永久凍結層の影響	215
3.5 氷河作用(氷河侵食等)	
4. 地形学的現象	58,93,261,269
4.1 地すべり	
4.2 表面削剝	191,192
4.3 河川侵食	188
4.4 河川の蛇行	187

4.5 海食	
4.6 堆積作用	150,201
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	40,174,199,215,261,269,297
5.1 地下水循環	298
5.2 不均質系での地下水流動	94,122,195,196,197,272,280
5.3 地下水流動状況の変化	97
5.4 地下水系への海水の侵入	
5.5 塩淡水境界の影響	
5.6 被圧帯水層	
5.7 地熱の影響	114,219,223
6. 物質移動及び地球化学的現象	294
6.1 移流／分散	66,78,90,147,159,168,170,171, 172,188,190,194,195,196,197, 201,202,203,204,206,207,211, 218,248,249,253,254,259,260, 262,265,273
6.2 拡散	39
6.3 マトリクス拡散	
6.4 ガスを媒体とした物質移動	47
6.5 多相流及びガスに駆動された 地下水流動	47,174,198,280
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	274
6.9 錯形成種	
6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化	150
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	280
6.13 化学的勾配 (電気化学的効果及び化学的浸透)	281,301
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	5,75,179,278
6.17 酸化性雰囲気	280
7. エコロジ－的現象	22,42,72,73,82,85,86,127,128 129,130,135,139,141,146,200, 245,250,251,252,255,283,286, 306
7.1 植物による吸入	177,193,227,299
7.2 動物による吸入	17,121,140,282,284,285,303, 304
7.3 土壌及び堆積物中の バイオターバージョン	
7.4 土壌生成作用	210,212
7.5 化学的変化	211,249,273
7.6 微生物との相互作用	164
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	8,24,26,44,45,71,75,76,80, 100,105,107,108,109,110,111, 112,113,118,154,173,216,220, 225,229,230,235,236,258
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	54,59
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	54,59

1.4 応力場の変化 (地盤沈下、沈降、空洞の形成)	9,36,38,41,46,55,156,224,226 232,233,234,287
1.5 母岩の脱水	40
1.6 人工材料の欠陥 (オーバーパックの早期破損等)	63,134,167,235,239,240,242, 243,267,270,271,289,293
2. 操業及び閉鎖	44,45,64,71,80,100,109,138, 154,271
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)	214,244,256,258,305
3. 閉鎖後の地下活動(処分場への侵入)	28,29,30,31,32,33,34,37,145, 157,158,186,209
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	18,20,69
3.3 試錐	81,124,153
3.4 探鉱	124,153
3.5 地熱エネルギー生産	219,223
3.6 資源採取	19,21,35,70,124,144,153,155, 161
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	103,149,178,179,181,203,211
4. 閉鎖後の地表の活動	28,29,30,31,32,33,34,37,101, 145,157,158,186,209
4.1 記録の喪失	4
4.2 ダム、貯水池の建設、放水	103,160,181
4.3 河川の引水	
4.4 灌漑	

4.5 土壤改良及び地下水水質制御	
4.6 農（酪農を含む）林水産業	12,56,60,123
4.7 人口変化及び都市開発	11,13,16,27,49,50,65,83,84, 87,88,116,126,127,131,132, 133,142,143,162,163,164,166, 169,172,175,181,182
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	263
C. 廃棄物及び処分場に起因する現象	
1. 熱的現象	104,114,216,217,218,268,290
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）	215
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）	221,275,276
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）	74,77,79,117,136,208,228,238 246,266,302
2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料 との相互作用	292
2.3 有機物による効果	
2.4 微生物の効果	
3. 力学的現象	26,38,41,46,106,118,173,224, 229,230,232,235,236,239,240, 242,243
3.1 廃棄体の移動	296
3.2 応力場の変化	9,36,156,226,233,234,287,295
3.3 母岩の変形	55
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	6,7
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	120
4.4 放射壊変 (崩壊連鎖における)	186,214
5. 水理学的現象	226,272
5.1 再冠水	40
5.2 緩衝材中の水の移動	

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

2.3, 2.4節で検討した火成活動起因シナリオにおいて、H3レポートベースの基本ケースシナリオと共通のFEP（2.4節との対応は表13参照）については、3.1節に示したH3レポートの各基本モデル及びそれらの連成モデルの変数やパラメータの変動として、あるいは感度解析さらには境界条件変動のモデル化による取り扱いが可能と考えられる。しかしながら、H3レポートに記述されていない新たなFEPやインフルエンス（連鎖）については、基本モデルのフレームをそのまま用いるよりも、むしろ、新たな性能評価モデルを開発すべきものもあると考えられ、これらの概略的検討は、すでに第1章の各基本モデル毎に記述した(4)項のリスト・アップにより行っているが、詳細検討は実際にモデル化する段階での今後の課題と言える。

3.3.1 境界条件変化の影響の取り扱い方

火成活動によって引き起こされる様々な境界条件への影響可能性は、2.4.3節のBC1～BC7の概要（表9参照）の中でも一部述べているが、ここではそれ以外の点について記述する。

(1) 水理学的境界条件変化（BC1, BC2）

深成活動と火山活動に分けて独立したモデルを作成する必要がある。これらのモデルは、日本列島のナチュラル・アナログサイトとの比較をベースに作成し得る。この影響の大きさは、処分場からの距離とともに減少するので、火成活動は、感度分析用の一変数として扱うべきである。また、この影響の循環的性質と期間の有限性にも留意すべきである。

(2) 機械的境界条件変化の取り扱い方（BC3, BC4）

断層ずれの規模並びに増加する応力（地震発生周期並びに規模）分布は、火成活動地点からの距離の減少関数となるので、一つのパラメータとして感度解析の対象となり得る。

表13 2.4節の検討に基づくファーフィールドにおける基本ケース
(H3レポートベース)と火成活動起因ケースとの異同

① 境界条件の変動	
BC1,BC2,BC3,BC4,BC5,BC6,BC7の全てが基本ケースで未考慮	
② F E P	
共通のもの	ファーフィールドの温度(-)、水力学的モデル(A.5)、岩石の性質(-)、地下水化学(A.6.16 etc. *地下水水質の変化)、分散(A.6.1)、マトリクス拡散(A.6.3)、吸着(A.6.6)、放射壊変(C.4.4)、天然バリア中の核種輸送(A.6)
新たなもの	断層(A.2.7)、応力場(B.1.4,C.3.2)、地下水の地表への涵養(A.5,A.3.1)、鉱物学的変化(質)(A.2.8)、ガスの発生(A.6.4)、コロイド生成(A.6.8)
③ F E P 間の影響	
共通のもの	FF5,FF8,FF9,FF10,FF16,FF24,FF26,FF27,FF29,FF30,FF31,FF32,FF35,FF36,FF37,NF3
新たなもの	FF1,FF2,FF3,FF4,FF6,FF7,FF11,FF12,FF13,FF14,FF15,F17,FF18,FF19,FF20,FF21,FF22,FF23,FF25,FF28,FF33,FF34,FF38

(3) 熱的境界条件変化の取り扱い方 (BC5, BC6)

水と蒸気加熱流体の熱伝導と熱対流の双方による熱的な影響を表すモデル群の構築が必要である。データは、日本等の地熱システムのナチュラル・アナログサイトからの取得が考えられる。

(4) 化学的境界条件変化 (BC7)

火成活動に起因する地下水水質変化と母岩変質の共通過程を記述する地球化学モデルは、経済的鉱石の研究において開発されている。日本における活発な地熱サイトの研究によって、サイト特定データを与え、これらのモデルによる予測精度向上を図ることが可能であろう。

これらの境界条件変化がファーフールドやニアフールドの核種移行にどのような影響を与えるのかを評価するためには、核種移行モデル（あるいはその他の基本モデル）のフレームにおいて、これらの境界条件変化が表14に示すような境界条件の数学的取り扱いパターンのどれに属し得るものかを検討する必要があると考えられる。

表14 境界条件変動の数学的取り扱いパターンの種類

(1) 境界固定ケース

- ①境界上での着目変数 (EX. 濃度、温度等の状態量) の時間的変化項を含まないケース (EX. ラプラス方程式系水理モデル)
- ②境界上での着目変数 (EX. 濃度、温度等の状態量) の時間的変化項を含むケース (EX. 亀裂媒体核種移行モデル)

(2) 境界が移動するケース

- ①連続的移動ケース (EX. 水と氷の接触面、連続的隆起/沈降)
- ②不連続的移動ケース (EX. 断層)

3.3.2 シナリオに関与するFEPの取り扱い方

2.4.3節の表7に記述している各FEPは、2.1節に示す102のFEPリストにほぼ含まれていると考えられるので、一般には、2.4.3節にインフルエンス・ダイアグラムとして図示・展開している各シナリオ連鎖上に介在するFEP各々に対し、3.2節で検討した102のFEPに関連する決定論的並びに確率論的モデルのうち、概当するFEPに対応するものを取り出し、変数並びに境界条件等のモデル構成要素を一つずつ吟味した上で、2.4.3節の表8に記述した各FF, NFの文脈（シナリオ）に沿って、それらのFEPを数学的にリンクしていけばよいものと考えられる。

しかし、火成活動を起因とする様々な地下水シナリオへの影響全てに対し、このようなアプローチ（図33参照）をとることがデータ・情報等不足のために不可能な場合も考えられる。そこで、まず、H3レポートに記述されている基本モデル（あるいはそのマイナーチェンジモデル）中に定義されているパラメータや境界条件等の変化の着目諸量への感度を評価し、かなり大きな影響があると判断される場合に対してのみ、そのパラメータの取り得る範囲や境界条件の変動要因等を説明し得るサブモデルで詳細に定量化する試みが一つのアプローチ方法として考えられる（図35参照）。

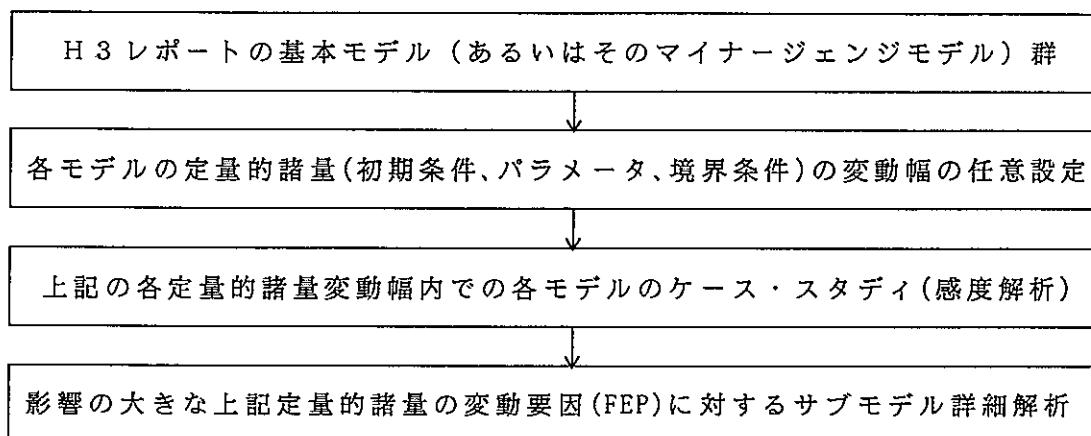


図35 シナリオの定量的解析フロー概念

このサブモデルのタイプとしては、3.2節に示したように、決定論と確率論があり、さらに、前者については、時間的変動性や空間分布の考慮、未考慮並びに連続／不連続性の扱い方や微分次数の非整数化といった数学的概念自体からの再検討を要するものが、また、後者については、パラメータや境界条件の変動確率を内生的に求めるためのサブモデル入力データ・情報の整備や本質的情報欠落状況に対するファジィ理論の適用性⁽⁹⁾の検討を要するもの、などが今後の具体的検討対象として含まれ得ると言えよう（表15参照）。この場合、シナリオによっては複数のサブモデルを結合もしくは融合した概念モデルが必要になる可能性もあり、どのFEPあるいはFFやNFを組み合わせることによってどのようなサブモデルを構築すべきかを決定する必要があるものと考えられる。

表15 パラメータ変動の数学的取り扱いパターンの種類

- | |
|--|
| <p>(1) パラメータ変動のダイレクト・シミュレーション型</p> <p>① パラメータへの関数付与型</p> <p>1) 連続（一般にはC^α級（α：実数））関数付与ケース（基本モデル中のほとんどのパラメータ）もしくは、ディラックデルタ関数あるいはステップ関数のような不連続関数付与ケース（EX. 突発的断層や火山爆発、隕石落下）</p> <p>2) 線型又は非線型関数付与ケース（EX. 吸着）</p> <p>② パラメータ変動が有するシステムの不安定性を反映する方法</p> <p>1) カタストロフ理論に基づくモデル（EX. 火山爆発の発火点モデルとのアナロジー）</p> <p>2) カオス現象を表すモデル（EX. 地磁気カオス）</p> <p>(2) パラメータ変動特性の不確実性概念への変換型</p> <p>① 確率モードへの変換（EX. 火成活動活発化の周期（ひん度）特性、非均質媒体特性の収約化、その他表11参照）</p> <p>② ファジィモードへの変換（EX. 雨水や流水量を求める水力学的現象解析モデルの入力データ（表10参照））</p> <p>③ フラクタルのような幾何学的概念の導入（EX. 地震断層の幾何学形状と空間分布（表10参照））</p> |
|--|

このようなモデル化を進めるためには、今後、具体的なモデル化を念頭に置いた変動シナリオを作成していく必要があるが、本年度はエキスパート判定に近い整理を行っていること、また、ここで選定されているFEPは、評価に直接使用されるモデルパラメータとモデルパラメータを変動させる因子とがおよそ同列的に扱われていることから、以下のような解決すべき課題が指摘し得る。

- ① 動燃事業団殿選定の102のFEP間のインフルエンスのパラメータベースでの整理
- ② 動燃事業団殿選定の102のFEPのパラメータベースでのグループ化あるいはFEPのレベルの統一あるいはFEPの階層化分類
- ③ 以上の整理結果を反映した変動シナリオ取扱概念モデルの概略的検討

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。

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) R. M. Cranwell et al. : 「Risk Methodology for Geologic Disposal of Radioactive Waste -Scenario Selection Procedures-」, NUREG/CR-1667, SAND80-1429, December 1982, revised April 1990 (1990).
- (20) 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).

付 録

我が国の火山噴火予知に関する資料

付録の目次

1. 火山活動	付-5	(283)
2. 活火山の定義	付-5	(283)
3. 噴火予知	付-6	(284)
4. 日本列島の火山	付-7	(285)
5. 予測と実際	付-11	(289)
(1) 火山噴火予知計画	付-11	(289)
(2) 長期的予測	付-11	(289)
①活動の周期性	付-11	(289)
②噴出率と噴火間隔	付-12	(290)
③活動間隔が長い火山と噴火予知	付-17	(295)
(3) 噴火の前兆現象の予知	付-18	(296)
(4) 予測の実例	付-22	(300)
①北海道	付-22	(300)
②伊豆大島（三宅島も含む）	付-27	(305)
③東伊豆単成火山群	付-39	(317)
④浅間山	付-40	(318)
⑤白山	付-44	(322)
⑥御岳	付-51	(329)
⑦立山	付-53	(331)
⑧蔵王山、秋田駒ヶ岳	付-56	(334)
6. 噴火機構のモデル化例	付-61	(339)
(1) 発泡による重力不安定に基づくモデル	付-61	(339)
(2) マグマ貫入による地殻変動の解析と噴火予知	付-64	(342)
①はじめに	付-64	(342)
②深部でのマグマ貫入による地表変動	付-64	(342)
③不連続性岩盤へのマグマ貫入の解析	付-65	(343)
④火山噴火予知への応用	付-67	(345)
付録の参考文献	付-75	(353)

1. 火山活動⁽¹⁾

一般に火山活動とは地下深くでマグマが発生して移動上昇し、地表に突出する過程を指す。従って、噴火とか爆発は火山活動の最終の現象であり、噴火予知の可能性は如何にこの最終現象に至る過程を補足するかにかかっている。

マグマの動きに付随して地表では、二次的現象として、地震活動、火山性微動の発生、土地の隆起・沈降、地割れ、重力値・地磁気・温度の変化、噴気活動などの現象がある。

2. 活火山の定義⁽²⁾

日本の活火山は気象庁(1984)のリストでは77火山であり、その他数種類のリストごとにその数は多少異なる。その理由は、各リストはKUNO(ed.,1962)に基本的に従っているが、リストごとの基準で少数の追加(例えば、噴火の歴史記録がなくても¹⁴C年代測定などによって歴史年代に噴火したことが明らかになったもの、など)が行われているためである。調査の進行とともに新しい事実が発見され、その数は増加する。しかし、1火山(または単成火山群)の $10^4 - 10^5$ 年台のライフサイクル中で後期になるほど噴火率が低下するとすれば、噴火間隔は次第に長くなるので、なお噴火の可能性はあるか、最早噴火するポテンシャルをもたないか、つまり、その火山が活火山(あるいは生火山、live volcano; WALKER, 1974)か、死火山か、の判定は難しい。もし、区別することが必要ならば、現状では活動年代に関して人為的な基準を設けるしかない。KATSUI(ed.,1971)は2000年、SIMKIN et al.(1981)は10000年以降活動した火山を入れている。

北海道南部の活動的な3火山、樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳は、そのどれもが、1000-数1000年の休止期を経て、最近の300年間に活動期に入った(勝井、1988)。もし日本の活火山を、2000年あるいは10000年以降の活動を基準にとると、その数はある程度増える。活動間隔の長い火山が噴火する確率は低いが、日本では最近の約10年間に御岳山と東伊豆単成火山群との2回の歴史上初めての噴火を経験した。この2火山は噴火以前から活火山に数えられていたが、今後活火山とされていなかった‘生火山’が噴火する可能性も十分にある。

3. 噴火予知⁽³⁾

噴火予知は、実務としての噴火予知とそれを支える基礎科学としての火山学との2部分に分けることができる。

噴火予知の問題は以下のように整理できる。

- 1. どこか? {
 - a. どの火山? → 2. b
 - b. その火山のどこか? 3. b, c

- 2. いつか? {
 - a. 超超長期: 低確率事象
 - b. 超長期: {
 - ポテンシャル
 - 再来周期
 - c. 長期 (数年以下)
 - d. 短期 (数日以下)

- 3. どんな? {
 - a. 規模
 - b. 様式
 - c. 経過

火山活動の監視・観測による狭義の噴火予知作業は2. c, dと3 (主にc)である。2. aはカルデラ形式を伴うような大規模火砕噴火の可能性であり、重要な問題ではあるが、確率の低い事象として、当面の噴火予知とは別に扱われるのが適当と考えられる(町田、1987)。

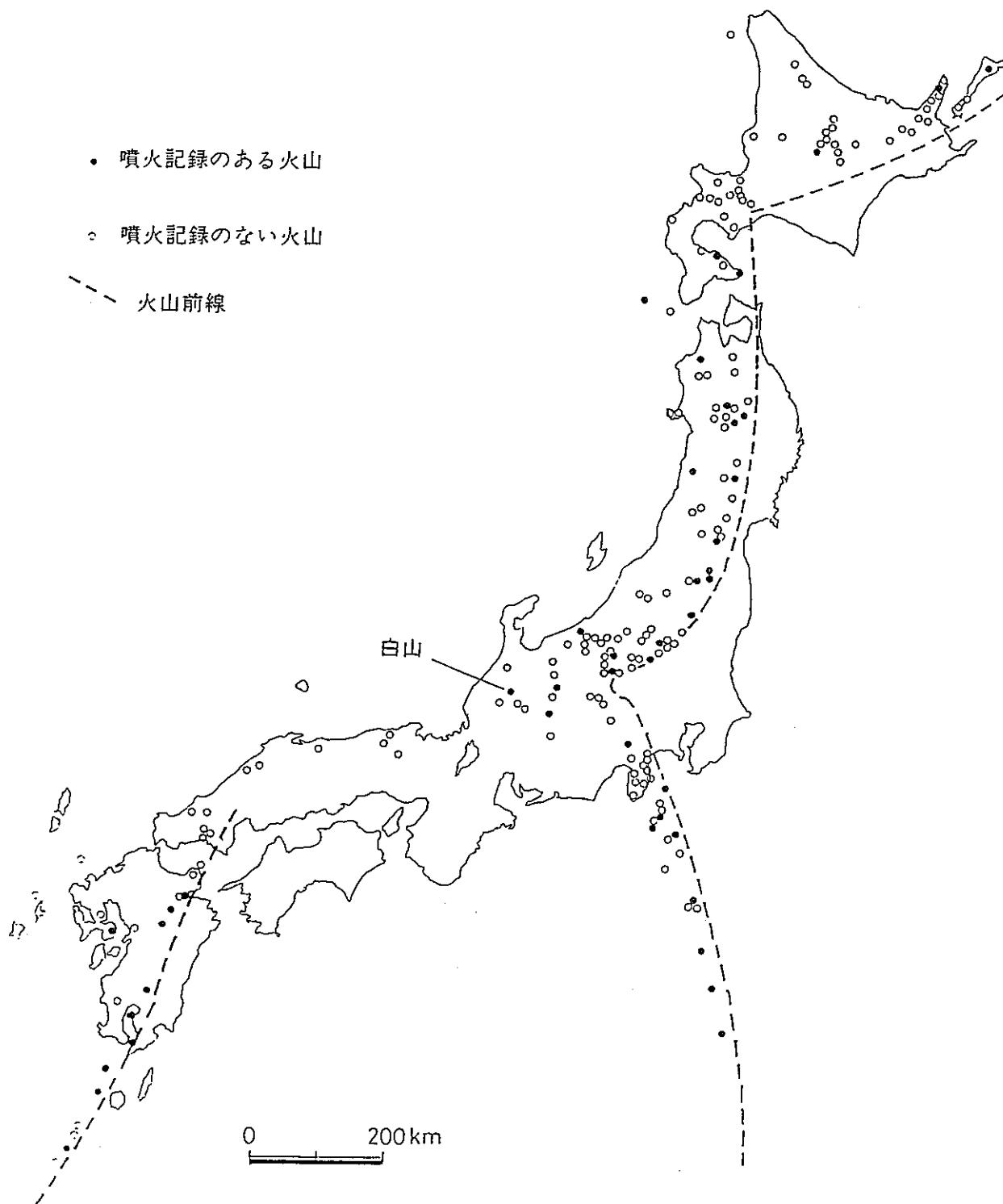
4. 日本列島の火山⁽²⁾・⁽⁴⁾

日本列島は火山の多いところとして、世界的に知られている。地質時代でいうと第四紀（今からおおよそ160万年前以降から現在まで）という新しい時代に誕生した火山は、200近くにもなる。

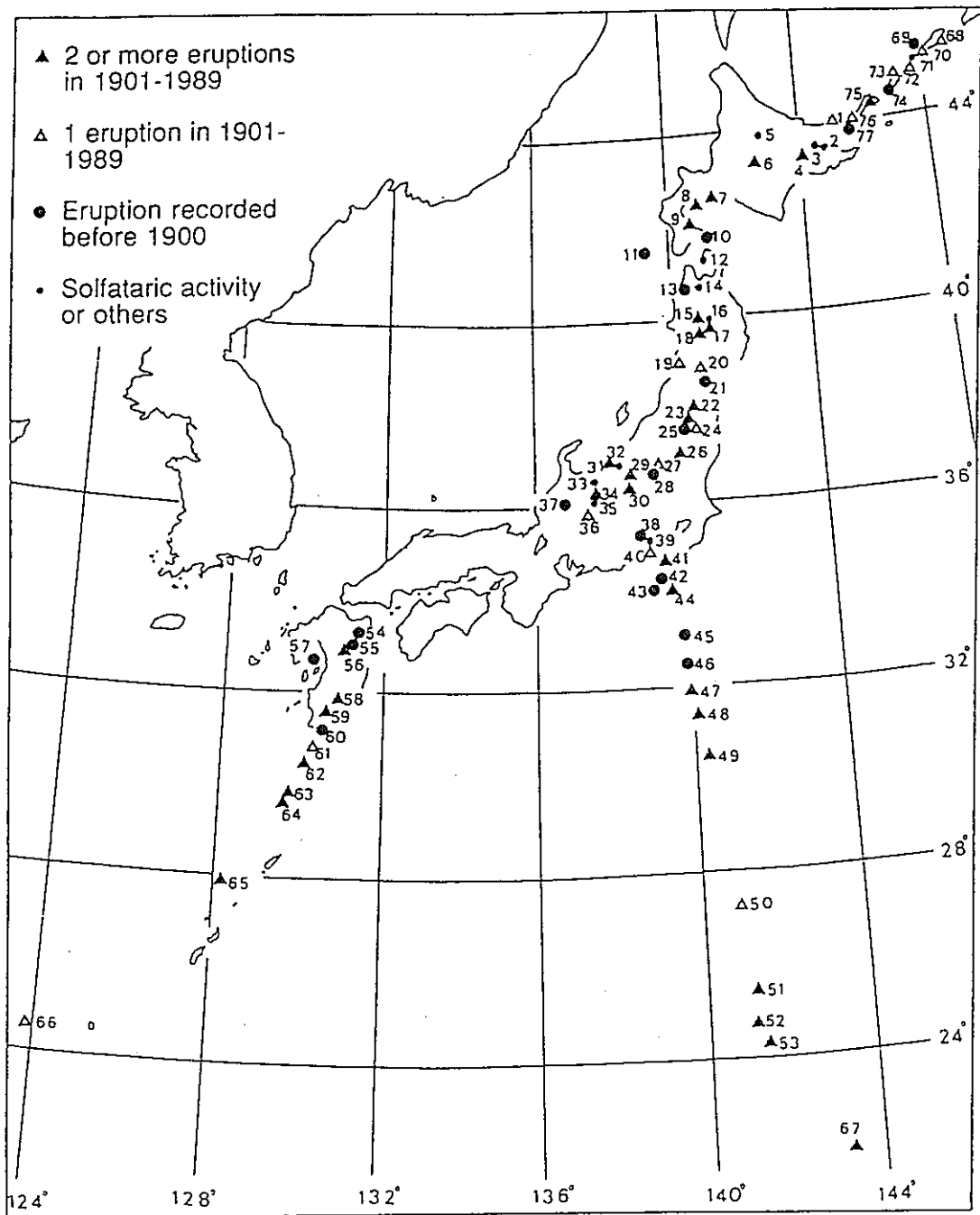
火山は日本列島のいたるところに、平均的に分布しているわけではなく、火山の分布が密なところと、そうでないところがある。東北日本でいえば、中央部に多くの火山が分布しているが、東の太平洋側の方へいくと、火山が存在しないようになる。その変化は顕著で、ある線を境に火山が存在する地域と存在しない地域に区分できるように見える。その境界を火山前線、もしくは火山フロントとよんでいる。火山前線は北海道から東北地方をへて伊豆諸島へ続く地域や九州では明瞭であるが、近畿から山陰・山陽にかけての地域には火山が少なく、火山前線はそれほどはっきりしてない。（付・図-1参照）

日本列島の火山のなかには、古い書物に活動の記録が残されているものと、そうでないものがある。活動記録があるということは、それだけ将来活動する可能性が高いといえる。活動記録のない火山は今後活動する可能性が低いとはいえ、噴火しないということを必ずしも意味しているわけではない。歴史時代の活動記録がない御岳山が、1979年に噴火したのはそのよい例である。

日本の活火山（気象庁、1984、による）を、噴火回数なども考慮して、付・図-2に示す。頻繁に活動している火山は意外に少なく、20世紀になってから2回以上噴火した火山は77火山中32火山、42%である。また、最近約10年間の日本の顕著な火山活動とその地質学的特質を付・表-1に示す。付・図-2と付・表-1から、日本の火山活動は、多くの火山が、一つ一つ長い間隔で、それぞれが個性的な活動をすること、つまり全体として見ると、きわめて多様な活動であることが分かる。このことは、ハワイ島キラウエア火山が、頻繁に活動しているが、活動の様式はいかにもハワイ的である（それでもかなり多様であり、いわゆるハワイ式の活動に限られているわけではない）ことと対照的で、日本の火山活動を一括して扱うことの難しさを示している。



付・図-1 日本列島の第四紀火山の分布（大森ほか、1988をもとに作成、一部 改変）おおよそ160万年前以降に誕生した火山⁽⁴⁾



付・図-2 Active volcanoes of Japan. Localities and numbers are after JMA(1984).⁽²⁾

付・表-1 最近の顕著な噴火と地質的特徴⁽²⁾

噴火年	火山	特徴
1977 - 78	有珠	活動の推移 プリニー型噴火 → (軽石放出) → 〔潜在円頂丘 水蒸気爆発〕
1979	阿蘇	非爆発的噴火 と 爆発 噴煙 (火山灰放出) 低温火砕流
1979	御岳	水蒸気爆発, 有史はじめて (寝耳に水発言)
1983	三宅島	割れ目噴火 噴火様式の多様性 とくにマグマ水蒸気爆発
1986 - 87	伊豆大島	活動の推移 中心噴火 と 割れ目噴火 (A火口) (B・C火口列)
1988 - 89	十勝岳	小規模火砕流, 泥流
1989	伊豆東方沖 (東伊豆単成火山群)	単成火山の誕生, 有史はじめて 海底噴火

5. 予測と実際

(1) 火山噴火予知計画⁽¹⁾

わが国の火山噴火予知計画は、文部省所管の測地学審議会で、研究計画案が作成され、政府に対して建議された上で実行されている。参加機関は火山観測所を持つ各国立大学、気象庁、海上保安庁、国土地理院、地質調査所、国立防災科学技術センターである。また、火山噴火予知連絡会が設置され、上述の機関に科学技術庁、文部省、国土庁が加わっている。その機能は、各活火山の活動状態を定期的に、また、異常がみられたときにはその都度、資料を検討して火山活動の評価を行い、必要に応じて、統一見解を公表している。

噴火予知計画は第1次が昭和49年から、第2次は昭和54年から、第3次は昭和59年から、それぞれ、5ヵ年計画として実施されてきて、現在、第4次計画が策定されている。

(2) 長期的予測

①活動の周期性⁽³⁾

成長期の火山は、山体を形成する（地形を変える）ような活動を比較的規則的な活動間隔で行っている。最も有名なものは伊豆大島火山であり、全島に降下火山灰を地層として分布させる程度の噴火の間隔は100-300（110-260）年である（NAKAMURA, 1964; 田沢, 1981など）。

このような噴火活動の周期性が重視されるのは、周期性は火山へのマグマの供給率が一定であることを反映していると考えられる立場からである。ハワイのキラウエア火山では、マグマの噴出率は算定する期間の長さを変えてもほぼ一定である（SHAW, 1987）。しかし、噴火の間隔自体は、最近の約30年間では数年の活動期ごとに変わり、しかも、その期間ごとには、明瞭な周期性をもっている（TILLING et al., 1987）。この場合、長期的に安定している噴出率はマントルからマグマの供給率を意味し、地表付近の噴火（・貫入）現象は、浅部のマグマ溜まりより上部の配管系（plumbing system）内で規定されているのであろう。火山体構造が世界で最もよく研究されているキラウエア火山でも、配管系が、いつ、どのように、切り換えられるかの予測はできて

いない。しかし、一つの活動期（配管系）内では、個々の噴火と地殻変動、地震活動などが見事に対応し、その期間内ではほぼ確実な噴火予知ができています。もちろん、この場合、周期性からは噴火を期待することができるが、噴火予知の実務は観測によっておこなわれる。

三宅島・有珠では最近の活動間隔が約30年である。しかし、周期性の原因が不明な‘めくら経験則’には過度に信をおくことができないことも明らかである。一般に、歴史時代の活動記録から活動の再来周期を求めるのは難しい、阿蘇・富士のように多数の噴火が歴史に記録されている火山があるが、それぞれの活動の規模が不明確で、単に活動の年代だけから周期をもとめても無意味に思われるからである。

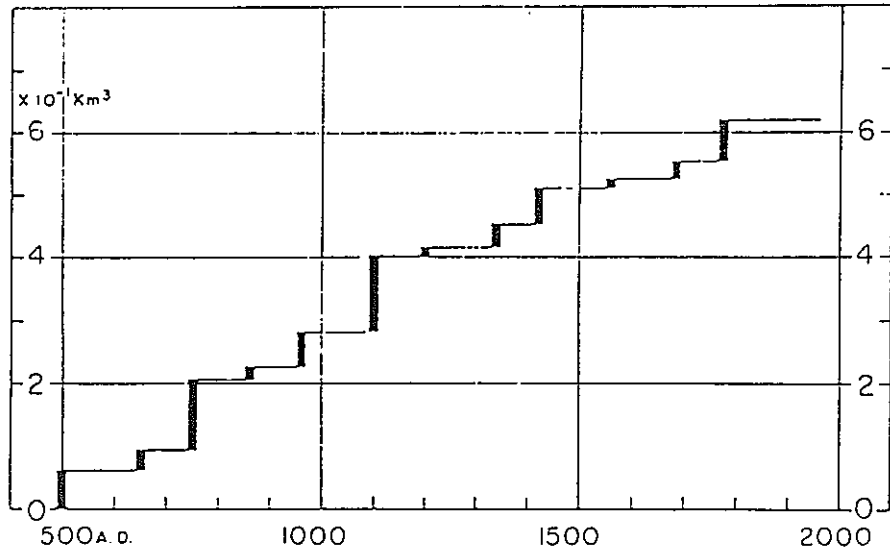
②噴出率と噴火間隔⁽²⁾

火山の活動度について、短期的な尺度としては活動の頻繁さ（時間間隔）を考えてもよいが、長期的には単位時間あたりの噴出量（以下単に噴出率という）がよい（守屋, 1983, p.117）。

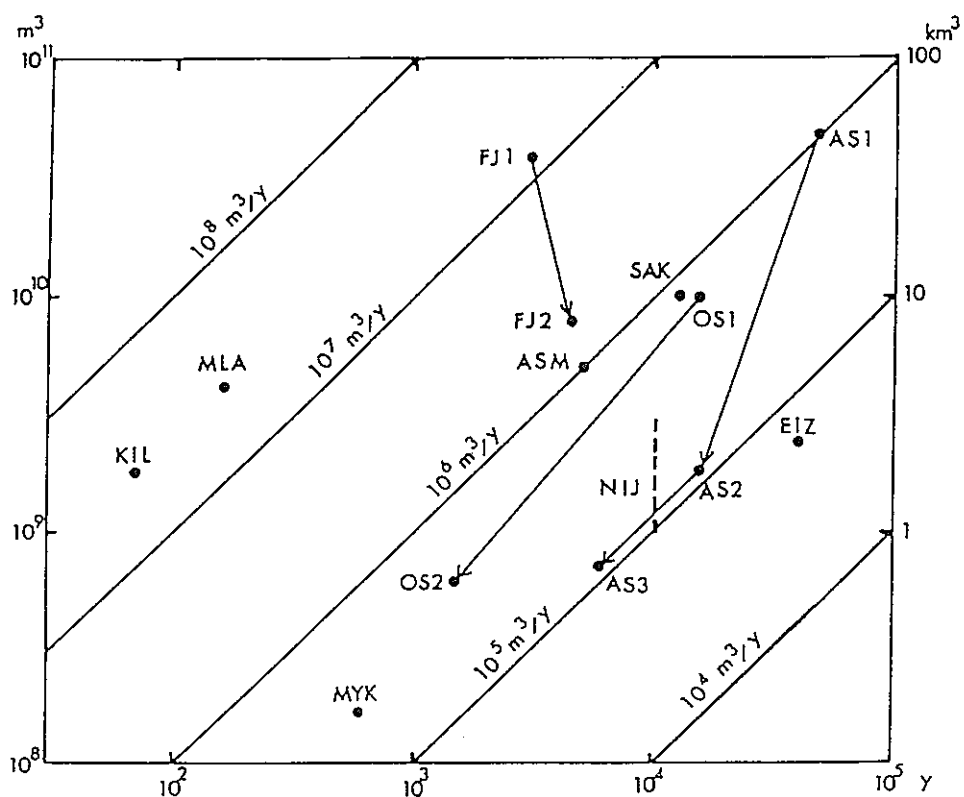
付・図-3はNAKAMURA (1964)による伊豆大島火山の最近1500年間の噴出率である。噴出率の見事な定常性が、最来周期による時間的長期予測の大きい根拠である。さらに、田沢 (1981)は、約1万年の期間の平均噴火間隔も最近1500年間と同様であることを示した。噴出率も、 10^7 年台から 10^1 年台まで、取り扱う時間の長さによって意味が異なるであろう。

$10^7 - 10^9$ 年台の噴出率は、ホットスポットでのマグマの生産やプレート運動など、深いレベル、大きいテクトニクスに関わる現象に対応している筈である。

日本の多くの火山の寿命は $10^5 - 10^4$ 年台である。付・図-4にいくつかの活火山の噴出率を示す。多くの火山は $10^5 - 10^8 \text{ m}^3 / \text{y}$ ($= 1 - 10 \text{ k m}^3 / 10^4 \text{ y}$)の範囲にある。多くの第四紀後期の火山 ($10^4 - 10^5$ 年代)の体質は $10^1 - 10^2 \text{ k m}^3$ 台であるので、正確な噴出年代のデータがなくても、噴出率はほぼ上述の範囲にあると考えてよいことが理解される。なお、ハワイのキラウエア・マウナロア両火山はともに $10^7 \text{ m}^3 / \text{y}$ の桁にある。



付・図-3 Cumulative volume of fall deposits the summit craters on the main core of Izu-Oshima volcano (NAKAMURA, 1964).⁽²⁾



付・図-4

Eruption rates of some active volcanoes. Numerals in parentheses after volcano names or abbreviations are dealt duration by ages before present. ⁽²⁾

FJ1 (11000 - 8000), FJ2 (4500 -) : Shin (new) - Fuji : MIYACHI (1988).

ASM : Asama (Maekake, 5000 -) : ARAMAKI (1968).

SAK : Sakurajima (13000 -) : FUKUYAMA and ONO (1981).

OS1 (10000 -), OS2 (1500 -) : Izu - Oshima : OS1, TAZAWA (1981) ; OS2, NAKAMURA (1964).

AS1 (70000 - 22000), AS2 (22000 - 6000), AS3 (6000 -) : Central cones of Aso : ONO and WATANABE (1985).

MYK : Miyakejima (1500 -) : ISSHIKI (1977).

NIJ : Niijima (ca.10000 -) : ISSHIKI (1987).

EIZ : Higashi (east) - Izu : ARAMAKI and HAMURO (1977).

KIL : Kilauea (1920AD -) : SHAW (1987).

MLA : Mauna Loa (1840AD -) : SHAW (1987).

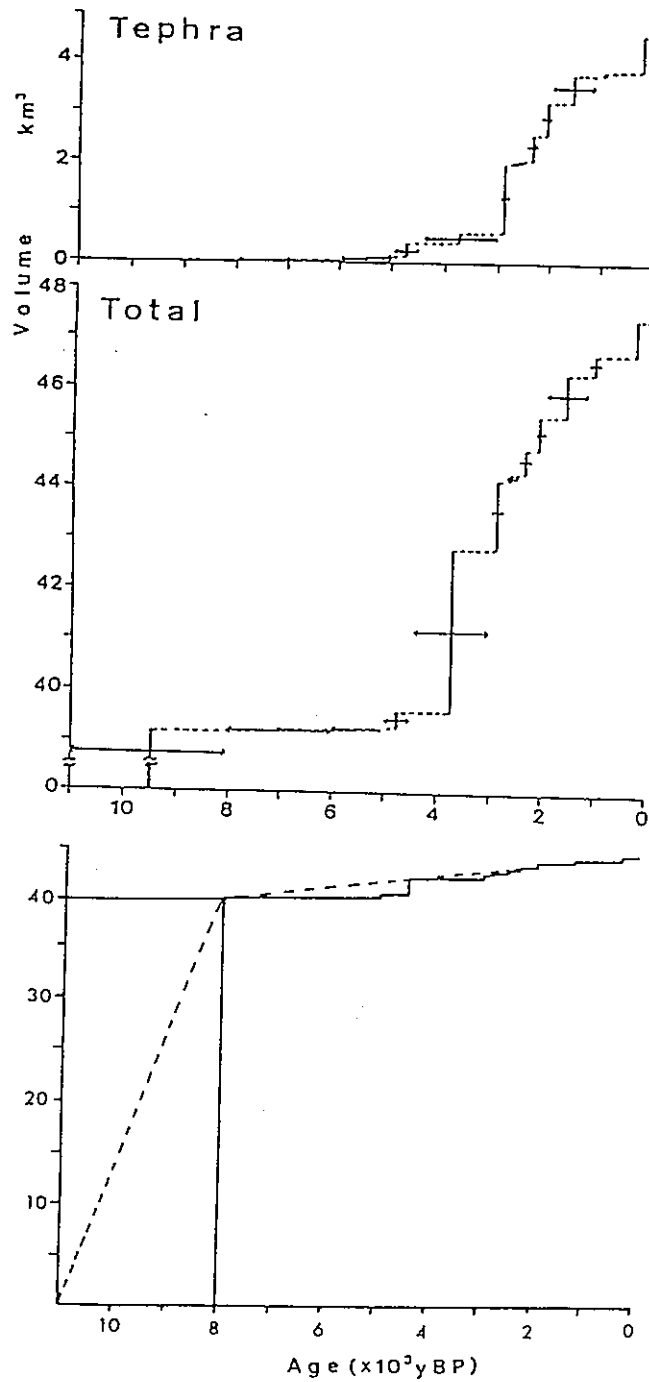
しかし、火山に寿命がある以上、その火山のライフサイクル内で噴出率の定常性に限界があるのは明かである。噴出率は一つの火山でも算定の期間を変えれば異なる。

早津（1985）は妙高火山群の研究から、妙高・黒姫・飯綱の3火山は、それぞれが4・2・2個の成層火山の重なりであること、おのおのの成層火山は $2 - 3 \times 10^4$ 年程度（1火山は不明）の長さの活動期に作られ、各活動期（成層火山）の間に $2 - 20 \times 10^4$ 年程度の休止期を挟むこと、3火山を通じて各活動期ごとの噴出率は $2 - 4 \times 10^5 \text{ m}^3 / \text{y}$ で、日本の円錐火山の平均値程度であること、さらに1活動期内では噴出率は火山体成長の初期ほど大きく、後期程減少する傾向があること、などを明らかにした。

富士火山についての宮地（1988）の研究によって新富士火山の噴出率を計算すると、その初期の3000年間は $10^7 \text{ m}^3 / \text{y}$ であり、その後現在までの8000年間よりも1桁多い（付・図-5）。初期3000年内では時間分解能がないために噴出率一様として計算してあるが、実際には、その中にさらに1桁程度噴出率の大きい時期があって、新富士火山全体は指数関数型なのかもしれない。さらに長期的にみて、新富士火山の1.1万年間と古富士火山から新富士火山までを合わせた8万年間（守屋、1983）の噴出率はほぼ同じである。

上に述べた伊豆大島の噴出率の定常性も、全期間にわたって一様なのではなく、大噴火輪廻（噴出率が初期に大きく、全体が指数関数型をなす）の繰り返しであるという考えがある（田沢、1981;小野、1988a）。

以上の例から、日本の多くの火山は、 10^4 年代のサイクル（早津、1983、の1火山輪廻）の1または複数個で作られ、1サイクル内では噴出率が初期に大きい、パルス型の活動（か、その繰り返し）をしているということが分かる。パルスは地下深部からのマグマのインプットに対応していると考えられる。TSUKUI et al.（1986）は噴出率とマグマの性質からマグマ溜まりの大きさの推定を行った。火山岩の精度の高い年代測定を大量に行うことにより、より精密な噴出率の議論が可能となり、火山活動をよりよく理解することができるとであろう。



付・図-5 Erupted volume of Shin(new)-Fuji volcano versus time(MIYACHI,1988). Top : volume of tephras ; middle : total volume(lavas and tephras) ; bottom : total volume(redrawn in this paper). Volume of tephras is recalculated on a basis of dense rocks.⁽²⁾

日本の火山でも噴火間隔に定常性がみられる例がある。前に述べた伊豆大島の噴出率や長期的な噴火間隔の定常性は、深部からのマグマの供給の定常性を反映していると考えられる。三宅島や有珠の近年の活動が30-60年程度であるのは、より浅い場所での過程（たとえば結晶作用にともなう水蒸気圧の上昇、2種のマグマの混合の進行など）に起因しているかもしれない。マグマ溜りで進行している過程の復元やモデル化には、噴出物の岩石学が役立つであろう。いずれにせよ、噴火間隔がほぼ一定していても、その機構が明かでないものは盲目的経験則であって、時間的予測のためには目安となる程度と考えるべきである（横山，1979のP.99）。

③活動間隔が長い火山と噴火予知⁽²⁾・⁽³⁾

活動間隔の長い火山には、いろいろな場合がある。マントルからの長期的供給率は、小さくないが、1噴火輪廻の噴出量が大きくて、噴火輪廻間の間隔が長いもの（新島）、成長期を過ぎて、マグマ供給率が低い、あるいは、水蒸気爆発など周期性が不確実な活動に移行したもの（蔵王、吾妻、磐梯等東北地方の多くの火山）、などである。

成長期を過ぎた、噴出率の低い火山は、活動間隔が長い、しかし、逆に、活動間隔が長い火山は噴出率が低いとは限らない。

伊豆諸島中の流紋岩単成火山群である新島と神津島は、ともに9世紀に大規模な噴火を起こし、それぞれ向山火山・天上山火山が作られた。その後1100年間噴火が無いので、活動度が低いと考えられやすい。両火山群とも年代データが少なく、信頼性は低い。新島の長期的噴出率は $1 - 2 \times 10^5 \text{ m}^3 / \text{y}$ と算定され、三宅島の最近500年間よりやや低い程度である（付・図-5）。これらの火山群は、1回の噴火サイクルに大量のマグマを放出し、次の噴火サイクルまで長く休む性質をもつのであって、長期間噴火が無いことは活動度（噴出率）が低いことを決して意味していない。しかし、噴火に結びつくような短期的異常または前兆現象は現在検知されてなく、これからの一定時間内に噴火する確率は低い。

活動間隔の長い火山では、噴出率の高低にかかわらず、実用的意味をもつ時間的予測はできない。

日本の多くの活火山は、長期的噴出率の高低に関わらず、活動間隔が長く、活動の再来確率が低い。多くの火山は100年に1回噴火しないと思われる。このような火山のすべてについて、短期予知を可能にするような高密度で常時型の観測を行うことができないのは明かである。かりに観測を始めたとしても、次の噴火を予知するために必要な噴火の観測例を蓄積することができない。この種の火山についても、地質、とくに従来の地質調査では注意されなかったような小規模噴火（その火山としては再来確率は高い）の噴出物、の精密な調査によって、活動の様式・間隔などの特性を調べておくことが必要である。地震や測地の広域の観測網によってその火山付近に異変が発見されたときの対応のために、このような基礎知識が最も役立つと考えられる。

これまで巨大火砕噴火（たとえばVEI = 6かそれ以上）は確率が低い事象として、噴火予知に関する議論では扱われていない。研究観測だけでなく、防災の見地からみても噴火の再来確率の低いものは現実の考慮から外されるのが普通である。しかし、自然災害の対策のなかで、地震や暴風については、それらの大型のものが考慮されているようである。火山防災までを含む、実務としての噴火予知の観点では、活動頻度あるいは噴火確率が低くても、大型の噴火が歴史上あるいは地質学的事実として存在している以上、それを考慮する必要がある。たとえば、確率と災害の大きさとの積などの評価によって、小規模で確率の高い噴火から大規模で確率の低い噴火まで、合理的で一貫した扱いがなされることが望ましい。

(3) 噴火の前兆現象の予知^{(5)・(6)}

火山噴火の前兆現象は多種多様である。従って、前兆現象にもとづいて噴火の予知を行うためには、種々の現象を火山活動プロセスと対応つけて理解する必要がある。また、前兆現象のうちで普遍的なものと火山毎にあるいは噴火毎に異なるものを識別することも必要である。噴火に至るプロセスは、火山体の地下（のマグマ溜り）でのマグマの蓄積と地表への移動とに分けて考えることができる。それぞれに対応して、噴火の予知を中期的予測と短期／直前予知とに分けて考える。もちろん、この様な区別は便宜的なものであって、実際には区別が困難なことも多い（たとえば、噴火が頻繁に繰り返す場合）。

マグマの所在と挙動を定量的に把握することが中期的予測の基本であるが、それは噴火直前の多様な異常現象を的確に認識するための基礎としても重要である。現在、マグマの所在と挙動がある程度定量的に把握されているのは噴火頻度の高い少数の火山（キラウエア、桜島等）のみであり、静穏期の後に噴火した火山で事前にマグマの蓄積過程が捉えられた例はない。マグマの蓄積過程を把握するうえで現在最も普遍性のある概念は、「膨張－収縮」であるが、その現れ方は火道の物理的状态によっても異なる。マグマが溜りから火道を通り地表へ移動を開始すると、火道およびその周辺の変化に対応して様々な前兆現象が現れる。火山噴火予知計画の始まった1974年以降に限ってみても、国内外のいくつかの火山において噴火の短期的前兆現象が明瞭に捉えられ、短期予知の実用化の試みもなされている。

地震活動の活発化は、浅間山、桜島、キラウエア等の火山でも、噴火前にしばしば観測される。従って、火山性地震の活動度は、噴火の発生を知る上で、確かに役立つ。

しかし、それを噴火の予知に実際に使おうとすると、様々な問題点がでてくる。第1に、地震の数は、地震計の感度や設置場所に依存し、絶対的な意味をもたない。従って、頻度がどこまで増えたら噴火が起こるかを、定量的に決めることが難しい。第2に、地震の数が増えたからといっても、それがいつも噴火と結びつくわけでもない。

1種類の観測に頼らずに、異なる観測項目を組み合わせたら、事態は改善されるだろうか。伊豆大島の1986年11月の噴火をとりあげれば、噴火前の観測データは、付・表-2のように要約される。この時点では、観測体制はまだ整備されておらず、常設観測点は貧弱だったが、各種の臨時観測も含めて、多様なデータがそろっていた。一例として電気抵抗の測定結果を付・図-6に示す。この図では、電極の組み合わせCから得られた電気抵抗の値が、噴火の約3カ月前から急速に下がり始めたことが注目される。

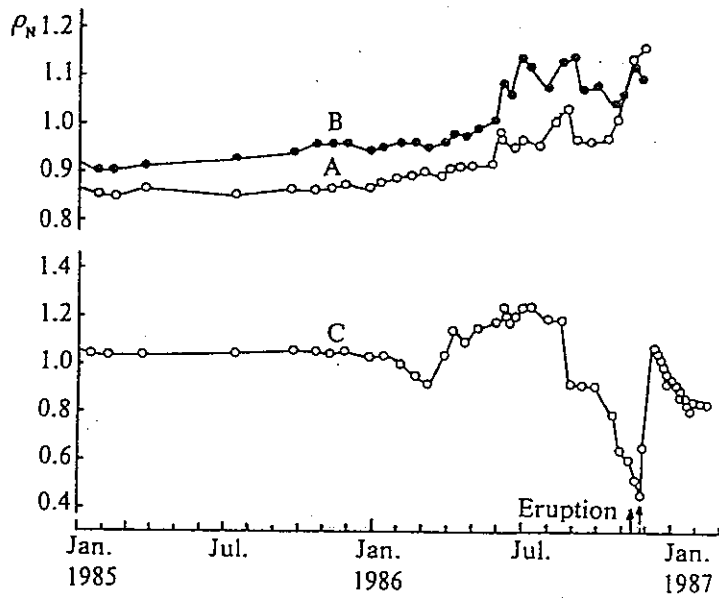
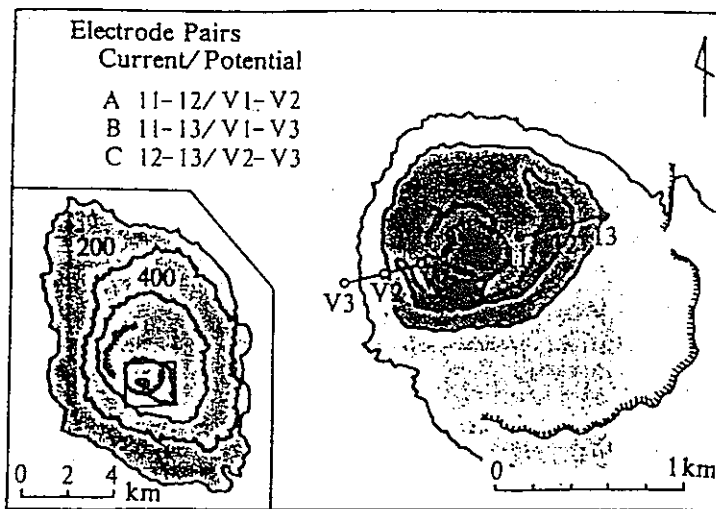
各観測項目の中で、どれが噴火の前兆現象かを判別する作業は結構難しい。たとえば、付・図-6の電気抵抗の変化をみると、電極の組み合わせAとBには顕著な変化がなく、Cだけに異常な現象が見られる。これは、本当にマグマの活動に由来する変化だろうか。実は、火山学者の多くが、これをはっきりと

前兆現象と認めたのは、噴火後に変化が逆転して、元の値に戻ってからであった。事前の予知のためには、せめて、電気抵抗が低下するのが、噴火に近づく兆候であるとしても分かっているとよい。現実には、1986年11月の噴火前には、同じ電気抵抗の値は増加傾向であり、それが加速して噴火に至った。

確実な成功例もある。それは、同じような様式の噴火が、同じ火山でくり返される場合である。いいかえれば、過去の経験に照らして、どのような観測項目にどのような前兆がでるかが、よく分かっている場合である。たとえば、ハワイのキラウエアや桜島の様に、噴火の頻度が高い火山では、地震活動や地殻変動の前兆的な変化を捉えて、かなりの確実さで次の噴火を予知することができる。しかし、これらの火山でも、噴火予知が完全にできるようになったわけではない。たとえば、桜島では、現在の様式で頻繁に起こる小噴火では、その発生の1時間ぐらい前に、かなりの確率で予測できるようになった。しかし、大正の噴火（1914年）のような大噴火が発生するとき、それを予知できるかは別の問題である。

付・表-2 伊豆大島で1986年11月15日の噴火前に得られた観測事実⁽⁶⁾

観測項目	観測結果
地震	7月より火山性微動発生。10月末から連続微動 島の北部と西部で微小地震。4月と9月に群発 三原山近傍は極めて低い地震活動 10月に伊豆半島東方沖で群発地震
地殻変動	元町からみて、三原山とその周辺は数年間沈降 三原山周辺のカルデラは2年前から顕著な収縮 島の北端と御神火の間は10年以上前から伸び 三原山頂の火口底が20年以上前から上昇 元町北部の体積歪は5年余り縮み
電磁気	三原山頂直下で数箇月前から電気抵抗が急減 三原山の南方、カルデラ内の全磁力が数年前から減少
熱	三原山頂南部で噴気温度の上昇 三原山火口南壁に高温部の発生
火山ガス	三原山頂の火山ガス中の H ₂ , CO ₂ 濃度が3年前と比べ顕著に増大



付・図-6 伊豆大島火山1986年11月の噴火と対応した三原山の電気抵抗の変化。火山体の東側で電流を流し、反対側でそれに対応した電位差をはかる。そのときの電流と電位差の比が、ここで定義する(見かけ上の)電気抵抗である。電極の組み合わせにより、3組のデータA, B, Cが得られる。(6)

(4) 予測の実例

①北海道⁽⁷⁾・⁽²⁾

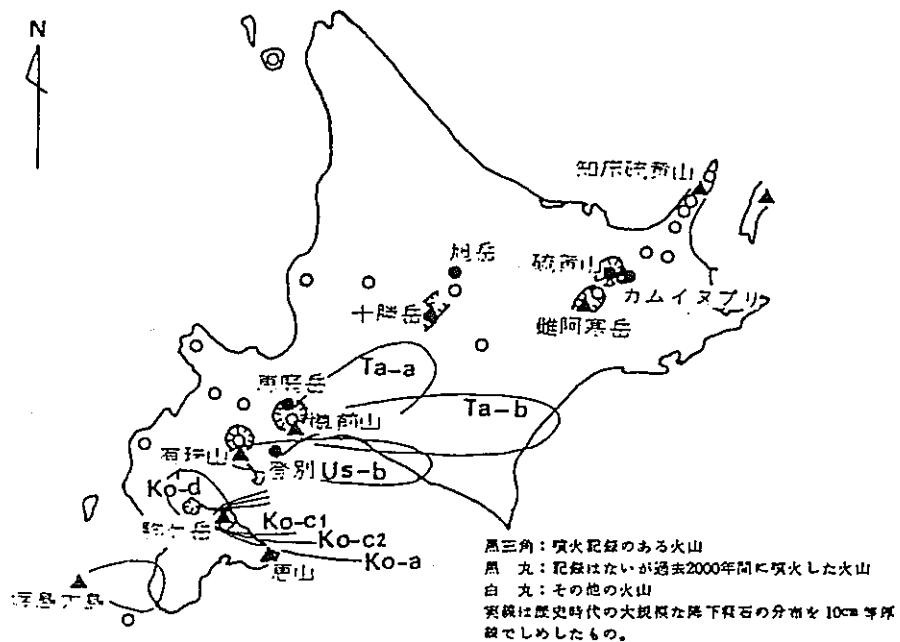
北海道は千島弧と北本州弧という活動的な島弧の会合点にあたっていて、地殻変動や地震活動とともに火山活動もまた活発で、40以上の第四紀火山がある。短い歴史時代においても、1640年以降に8火山が噴火し、合計2400名余りが噴火の犠牲となっている（付・図-7）。

個々の火山について現状を観測するとともに、古記録と噴火物から活動史を調べ、将来の噴火を予測する必要がある（付・表-3）。北海道のように歴史時代の記録に乏しい地方では、テフクロロジー手法に基づき、出来るだけ過去に遡って活動史を調べる必要がある。この方法で約2000年前から活動史を調べると、北海道では上記8火山のほかに5火山が噴火している（付・図-7）。火山は数100年以上も休止してから、活動を再開することもある。少なくとも上述の合計13の火山は、将来噴火する可能性をもつ“生火山”と考えられる。

噴火の時期、様式・規模などは様々で、簡単な規則性は見出しにくい（付・表-4、5は有珠山の場合）。しかし、多くの火山が、少なくとも10年という休止期をおいて顕著な活動をおこしている。特に、十勝岳・樽前山・有珠山・駒ヶ岳などは、数100年～数1000年の休止期の後に、300年ほど前から顕著な活動を数10年おきに反復している。

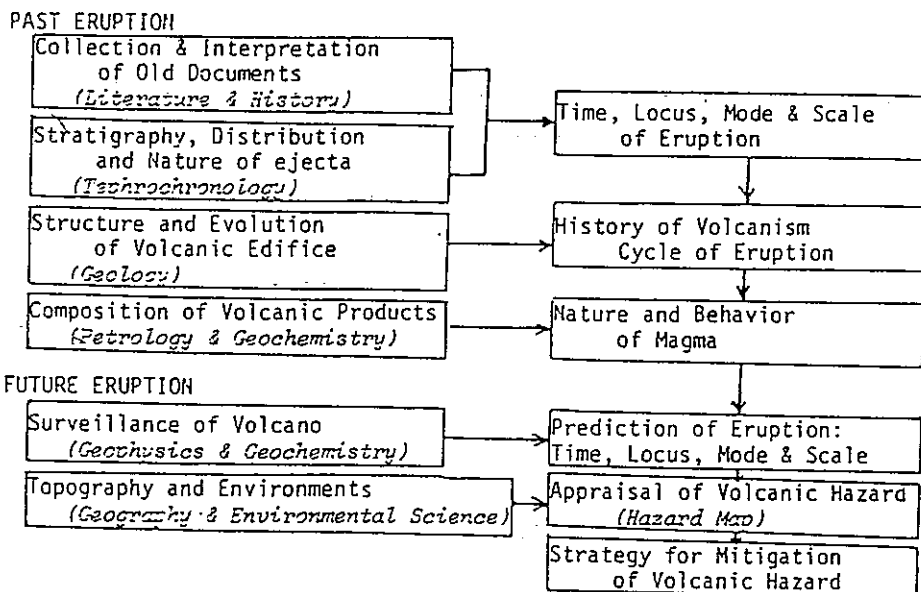
1977年～1978年の有珠山噴火に先立ち、以上の考察から将来の噴火について付・表-6のように噴火位置・噴火時期・マグマの性質・噴火の性質と随伴現象・災害等について予測が行われた。1977年～1978年の有珠山噴火は、火砕物降下・泥流（土石流）・地殻変動により多大の噴火災害をもたらした。

予測の確度が高かったのは、文書記録のある活動を含め、新しい地質時代に複数回の活動があり、その噴出物について詳細な地質調査がなされていて、過去の活動像がかなりの程度まで明らかにされていたからである。



付・図-7 北海道の火山分布⁽⁷⁾

付・表-3 APPRAISAL OF VOLCANIC HAZARD⁽⁷⁾



付・表-4 有珠山噴火の時期・規模⁽⁷⁾

Usu	
Δ1663	○ ↑ ↑ → Δ (g) ☒ †5 killed Us-b pumice, Us-blvb6 ash
1769	○ ↑ → (g) ? Us-Va pumice
1822	○ ↑ → Δ (g) ☒ †50 killed Us-IVa pumice
1853	○ ↑ → Δ (g) Us-IIIa pumice
1910	☒ ↑ → Δ (g) ☒ †1 killed Us-IIa ash
1943-45	☒ ↑ ↑ Δ (g) ☒ †1 killed Us-Ia ash
1977-78	○ ↑ ↑ Δ (g) ☒ ~ †3 killed Us-1977 pumice Us-1978 ash

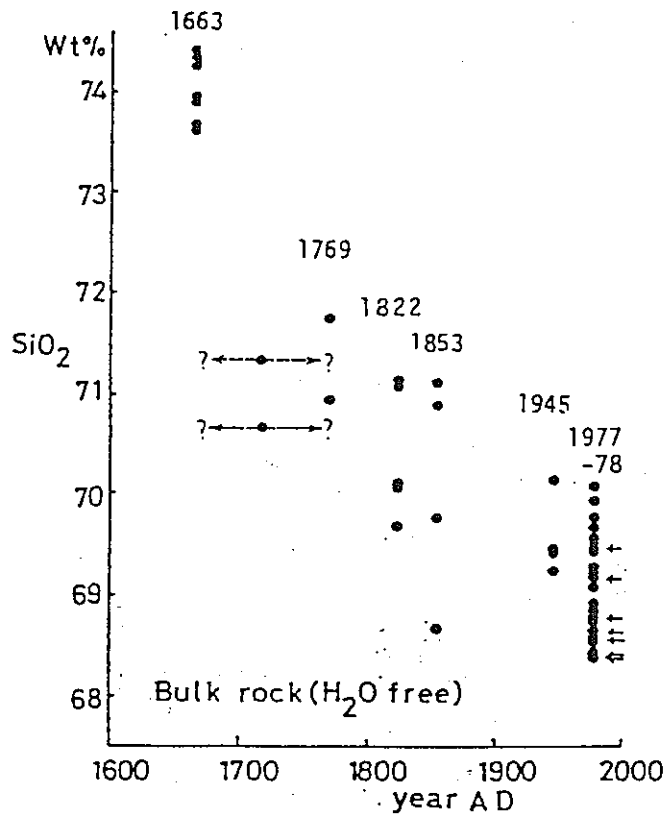
○	Eruption in the central crater	↑	phreatic explosions, mud eruptions
☒	eruption in a parasitic crater	→	mud flows
○	eruption in a radial fissure	☒	tidal waves (tsunamis)
↑	normal explosions	☒	destruction of arable land
→	eruptions producing guéges ardentes*	†	casualties
⇒	lava flows		
Δ	extrusion of a lava dome		
(* including ash flow, pumice flow etc.)			

<補足>

噴火による噴出物が、水蒸気や空気などのガスと一体になって高速度で流れ下る現象を火砕流と呼び、溶岩流と区別する。熱雲と表現されることもある。これに対し、崩壊した山体のかけらや削られた土砂など、直接マグマによらない物質を主体とする流れは、岩屑流とか岩なだれとか呼ぶことが多い。⁽¹⁰⁾

付・表-5 有珠山噴火による死者数⁽⁷⁾

Usu	1663	5	ash fall (& base surge ?)
	1822	50	pyroclastic flow
	1910	1	mudflow
	1944	1	ash fall (suffocation)
	1978	3	mudflow (debris flow)



付・図-8 VARIATION IN SiO₂ CONTENT OF HISTORIC PRODUCTS OF USU VOLCANO WITH TIME (Oda and Katsui, 1983)⁽⁷⁾

付・表－6 有珠山の噴火予測と1977～1978噴火
 (噴火予測は横山ほか、1973による)⁽²⁾

予測事項	噴火予測 (1973年)	1977～1978年噴火
噴火地点	山頂～北麓	山頂
噴火時期		
長期的予測	1945年から30～50年後	1945年から32年後
直前の予測	火山性地震が先行 地震発生から多くは 3～10日後に噴火開始	火山性地震が先行 地震発生から32時間 後に噴火開始
マグマの組成	デイサイト質	デイサイト質
噴火の様式	爆発的噴火	軽石噴火・水蒸気～ マグマ水蒸気爆発
降下火砕物の堆積量	山麓で数～10数cm, 最大で3～5m	山麓で30～50cm
火山岩塊の最大到達距離	1.5～2.5km	2km
火砕流	発生	発生せず
潜在円頂丘	形成	形成(有珠新山)
溶岩円頂丘	出現	出現せず
災害	火砕物降下・火砕流・ 地殻変動・泥流による 災害発生	火砕物降下・地殻変動・ 泥流による災害発生。 死者2, 行方不明1名

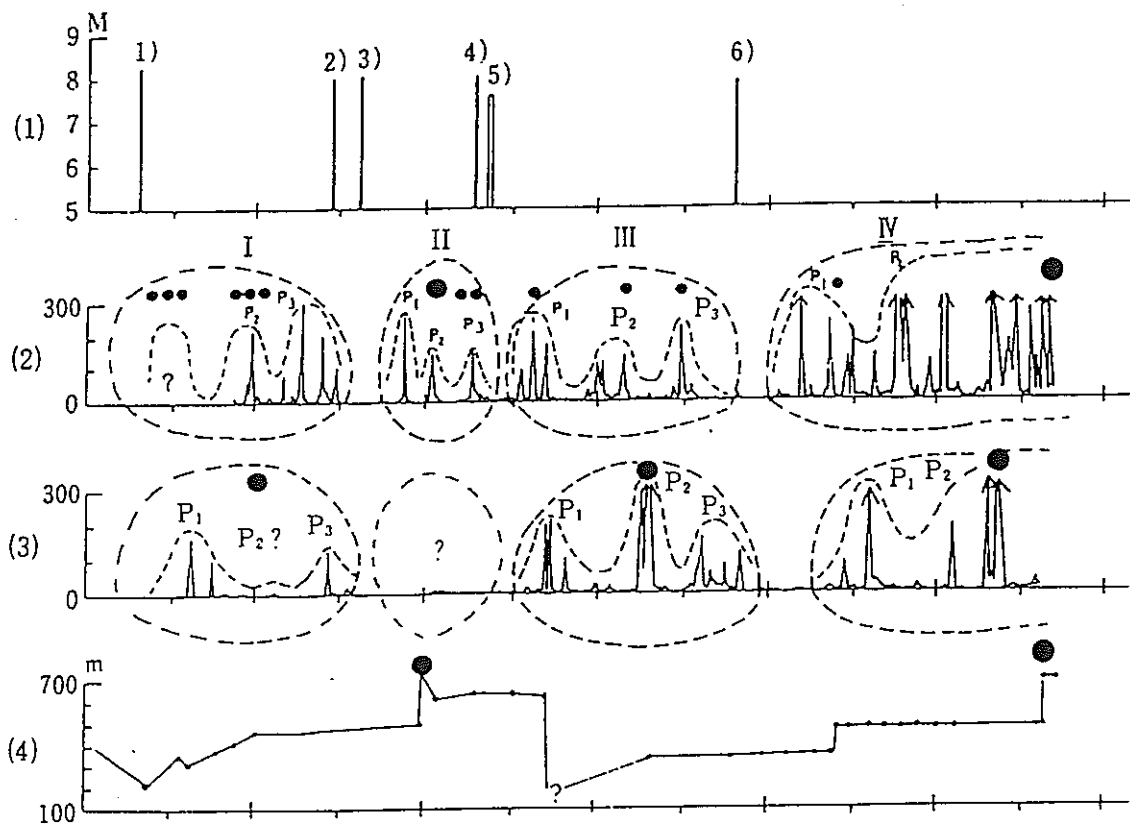
予測と実際とが合っていなかった‘細部’について考えてみる⁽²⁾。勝井(1988)は、過去7回の噴火のうち3回が火砕流を伴ったこと、1977~1978年の噴火の軽石は火砕流を伴った噴火の軽石に比べて発泡が悪いこと、を示し、火砕流に関する限り、明治以降の3回の噴火と災害に関する我々の経験は、あまり役に立たないと述べている。勝井(1988)は、火砕流を伴った3回の噴火について、被災記録および地形から、火砕流または火砕サージは、堆積物の分布によって現在確認されている範囲より遠方まで到達したことを図で示した。図示された地域には現在多数の人が居住しており、火砕流または火砕サージ発生の予測はきわめて重大な意味をもつ。

②伊豆大島(三宅島も含む)

1) 予知理論⁽⁸⁾

a) 地震と噴火の関係

付・図-9は木村(1983)によるデータに新たなデータを加えて大島の火山活動に関連すると思われる諸現象を示したものである。(3)によると、1962年の三宅島大噴火(大噴火とは噴出物量が 10^7 m³より大)の際、噴火時とその前と後の時期に三宅島付近に地震が群発している。この噴火の前の群発地震が集中する時期を P_1 、噴火時のそれを P_2 、噴火後のそれを P_3 とする(図では破線で示した波の山の部分)と、 P_1 と P_3 は P_2 を中心としてほぼ対称的に発生して、さらに大きな1つのグループ(図中破線で囲まれた大きな円)を形成しているようにみえる。これらの地震群発のメカニズムは決して単純ではないと思われるが、この P_2 に対する P_1 と P_3 の関係は、本震に対する前震及び余震に似て、おそらく力学的に一連の現象が進行してゆく状態を示しているものと思われる。しかも、この期に、少しずれているが、大島でもほぼ三宅島の P_1 - P_3 と対応する時期に山が出ている(付・図-9-(2))。そこで、ここで示された地震と噴火の関係は、テクトニックな歪の進行とそれに支配されるマグマの挙動を示すものであると仮定する。即ち、大島も三宅島も同じ様な応力場のもとで地殻歪が蓄積され、歪の解放もほぼ同様に進行する。



付・図-9 大島火山の活動と関連すると思われる諸現象⁽⁸⁾

- (1) 日本周辺のプレート境界型巨大地震。 1)：三陸地震 (M=8.3, 1933) 2)：東南海地震 (M=8.0, 1944) 3)：南海道地震 (M=8.1, 1946) 4)：十勝沖地震 (M=8.1, 1952) 5)：房総沖地震 (M=7.5, 1953) 6)：十勝沖地震 (M=7.9, 1968)。 出典：理科年表
- (2) 伊豆大島付近の地震 (S-P ≤ 3.5 秒) の月別回数。 出典：気象庁大島測候所の観測台帳
- (3) 三宅島火山付近の地震 (S-P ≤ 7 秒) の月別回数。 出典：気象庁三宅測候所の観測台帳
- (4) 三原山火孔底の変化。縦の目盛りは海拔高度。

しかし、マグマ溜りにマグマが供給されているという意味での臨界状態に達している方の火山が、 P_2 時に大噴火（マグマの地表への絞り出し）をすることである。

1940年の三宅島大噴火の際は P_2 が判然としないが、 P_1 、 P_3 はよく認められる。このとき、大島では三宅島大噴火時に対応して P_2 が出、三宅島の P_2 に対応する山も認められる。このことから、基本的には、1962年噴火と同様にして1940年三宅島噴火の活動期が識別される。この期の三宅島の P_2 が判然としないのは、1962年以降の地震計の倍率が1000倍であるが、それ以前が300倍と低かったことによるのかもしれない。大島で三宅島噴火の活動期のそれと対応する群発地震の山を取り除くと、1950年大島大噴火を含む $P_1 - P_3$ の山が三宅島と同様に識別される。これが大島の大噴火に関する活動期ということになる。

以上によって、両火山の活動をI - IV期に区分することができる。大噴火に関しては、I期とIII期が三宅島活動期、II期が大島活動期となる。注目すべきことは、各活動期の境目付近で日本付近のプレート境界でMあるいは M_s 8クラスの巨大地震が発生していることである。これらの巨大地震は、南海・東南海両地震を例外として、南関東の土地傾動に影響を与えているとみられる（藤田、1978）ことから、両火山帯への影響も当然考えられる。すなわち、両火山の活動は、東北（・西南）日本全体にわたるような広域なテクトニック応力場と関係があるとみられる。

b) 三原山火孔底の高度変化

今世紀に入ってから三原山山頂火孔内の堅孔状火孔の火孔底の高度変化は、すでに、広域的・持続的応力変化と対応づけられている（中村、1971；Kimura, 1976）。そこで、三原山火孔底高度変化と両火山の活動については次のような見方ができる。I期には三宅島が臨界状態に達していたため、進行した圧縮歪によりマグマが絞り上げられ大噴火となった。大島でも時を合わせてマグマ頭位（≡火孔底）の上昇が起こったが、これより前の時期の1912年以降の大噴火による溶岩流出によってこの時点ではマグマ供給が不十分であったため、火孔底上昇は海拔500mより下位でとどまって

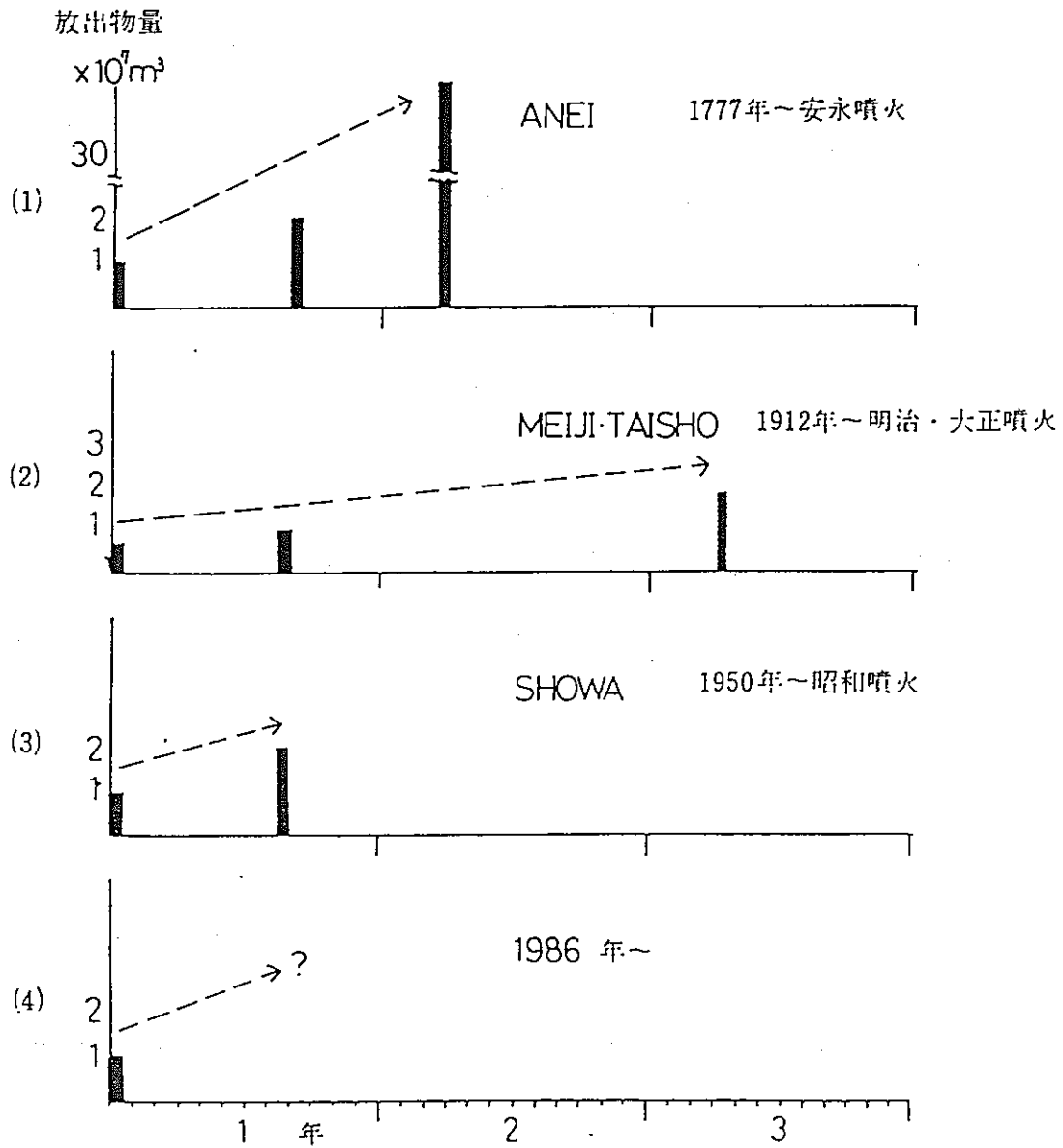
しまった。ところが、Ⅰ期とⅡ期の境で発生した巨大地震は三原山のマグマ溜りを押し縮め (Yamashina and Nakamura, 1978)、Ⅱ期にマグマを上昇させる方向に作用した。かつ、Ⅱ期にはいると、大島でのマグマの蓄積も十分な量に達していたため、三原山火孔底は海拔700m程度まで上昇し、1950年代噴火に至った。Ⅱ期の終わりに相模トラフで発生した1953年房総沖地震は大島付近の歪を解放させる方向に働き、マグマ頭位は低下した。ただし、火口床が固結していたためか、火孔底の低下は巨大地震発生からかなり時間がたっている。つづいてⅢ期に入るとまた歪が蓄積され、三宅島の大噴火時には三原山火孔底も上昇を示す。そしてⅢ期とⅣ期の境の巨大地震は、大島のマグマ溜りを圧縮し、マグマを上昇させる方向に働いたため、Ⅳ期に入り、1974年に三原山の火孔底の100m近い上昇をもたらし、海拔450m程の高さとなった (木村・豊田、1975)。これは、大島の歪がさらに蓄積されたと解される。

c) 大島火山のマグマ蓄積量

付・図-10は、大島の有史以降噴火の経過が明かなものについて、噴火の癖を示した。噴火開始直後の噴火を第1波とすると、必ず第2波がおそってきている。大きな噴火となると第3波もある。しかもそれが2波、3波と大きくなっている。

第1波の始まりから第2波の始まりまでの間隔はほぼ8ヵ月きれいにそろっている。

昭和25年噴火に際しては、ほぼ2回目の群発地震のピークが P_2 期となり、それに直結して大噴火が発生した。しかし、1986年は、1970年以降 P_1 が始まり、2度目の顕著な地震群発のピーク時に火孔底上昇があったにもかかわらず、この時期に一気に火孔底上昇があり大噴火には至らなかった。それは、1974年に付近で比較的大きな地震が発生して、やがて、火孔底上昇がやんだことによる。そして、結果的には P_1 の始まりから P_2 の1986年の大噴火まで12年もかかった。 $P_1 - P_2$ が昭和25年の噴火に比べて異常に長いというのが1986年の特徴である。



付・図-10 大島巨大噴火の癖⁽⁸⁾

縦の黒棒はその期の溶岩流出を主として火山放出物量をまとめてしめたもの。
過去3回の例では主要噴火の第2波あるいは第3波がきていることがわかる。

そもそも $P_1 - P_3$ の間隔は、付・図-9 の日本付近のプレート境界型の巨大地震発生との関係でみる限り、必ずしも個々の火山特有のものでなく、日本全体の歪応力のバランスで決まってくるようにみえる。間隔が長いと言うことは、日本のどこかで次に割れるべき空白域に、応力集中するのに時間がかかるということである。すなわち、それによって $P_1 - P_3$ 間隔が決められてくる。1986年は、歪応力蓄積にたっぷり時間がかけたのであるから、この大島地域にも通常より大きい歪蓄積が起こっている。そのため1974年、1978年その他に発生した伊豆大島付近の中規模地震を発生させた。特に、1978年に発生した断層は、おそらくマグマ溜り近傍に亀裂を生じさせ、それが火道あるいはマグマ溜りに通じたと思われる（付・図-11-(2)）。すなわち、もう一つのマグマ溜り（b）を作ったと考えられる。そして、マグマがその空隙を満たすのに時間がかかったのではないか。すなわち、周辺の歪蓄積が大きいほど $P_1 - P_2$ の時間がかかる。また、それは、一つのマグマ溜りに加えて、周辺にマグマの蓄積される量が増えるわけであるから、これが P_2 で放出される量は通常の大噴火以上の噴火になると考えられる。

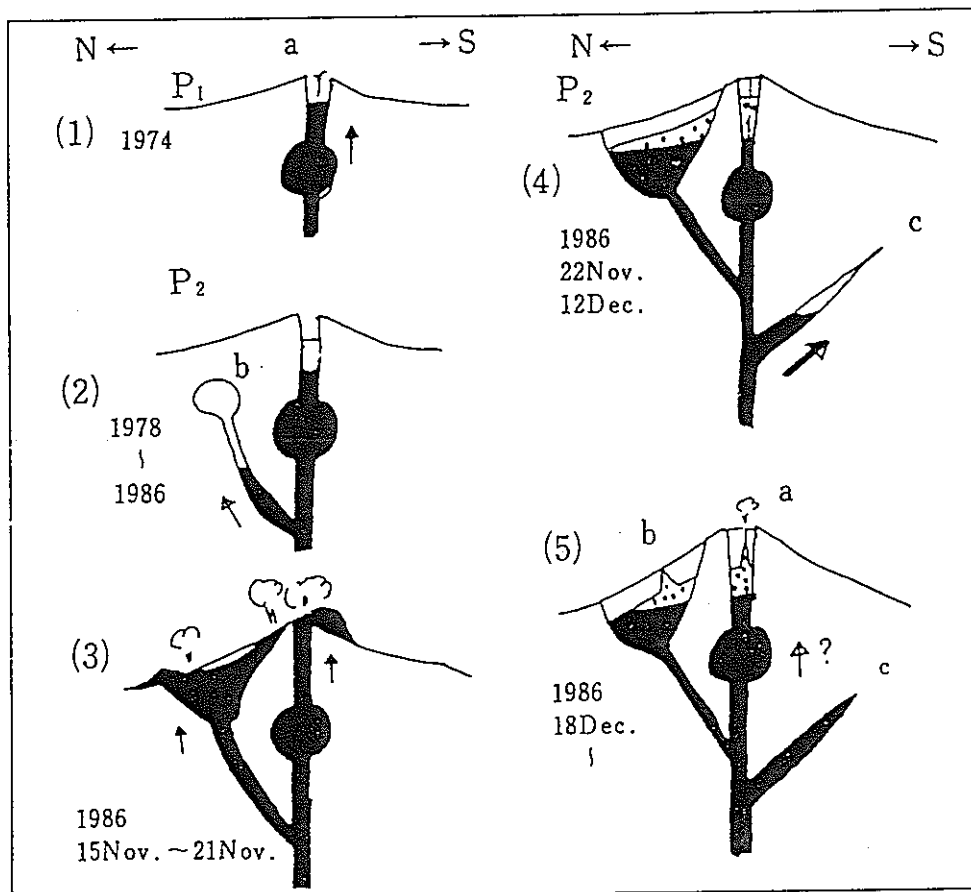
以上に加え次のような事実がある。①これまで大島では100~150年に一度大噴火があったが、ここ200年間そのような噴火はない。②山腹噴火はこれまで巨大噴火の際に生じている。③スパターが外輪山斜面にまで飛ぶような噴火は、これまでは巨大噴火の際に行われた（中村一明、1987年談）。これからは、1986年の大島のマグマの蓄積量は相当大きいと推定されることと矛盾しない。

d) 水蒸気爆発の可能性

伊豆大島南部の水蒸気爆発の可能性が最も注目されている。が、そこに、これまでに溶岩が噴出した証拠はない。また、かつ主火道と直結するような断層が地表に達した証拠はない。以上の点からみると、もし、地下のマグマが噴き出すとすれば、すでに地表に口を開いていて、しかもマグマ頭が顔をのぞかせている a か b（付・図-11-(5)）の方に噴火が先行すると考える方が考え易い。たとえ、南部にマグマが移動したにしろ、地表まで

達するのはそれほど、容易なことではないように見える。おそらく、aとbがほとんど同時、あるいは、火道が太いという点では、aが先行し、次いでbで噴くという経過が予想し易い。そこで噴いてもエネルギーが解放できない場合、ことによるとcがくることもある。しかし、a・bで先に噴き出してしまうと、通常はcにおけるマグマが地表へ行くより、a・bを経由してa、bの火口からエネルギーの解放を行う方が容易と思われる。そのため、一般には噴火がおこりにくいと考えられる。これは、有史以降、個々の巨大噴火についてみると、中央火口の噴火と北の山腹噴火域は中央火口と北の山腹噴火のどちらかの組合せが多いということと調和的である。1986年は、あたかも1338年からの活動様式に類似している。

付・図-11 伊豆大島火山火道発達概念図⁽⁸⁾



2) 予測と実際

伊豆大島についても、活動予測が行われており、実際に噴火がおきたケースであるので、その比較表を示している（付・表-7）。この場合にも、過去の詳細な地質調査がなされていたため、確度よく予測できたと言える。しかし、伊豆大島（曾屋、1987）の場合、可能性が低いと予測された割れ目噴火が1986年噴火で起きた。ストロンボリ式噴火という先入観にとらわれ⁽⁹⁾、可能性が低い（しかし、ある）と予測した理由は、カルデラの外にまで及ぶ割れ目噴火は15世紀のY4サイクルを最後とし、その後3回の大噴火では起きていないことが地質調査によってわかっていたからである。しかし、何故最近の大噴火では割れ目噴火が起きていないかの理由は明らかになっていない。

その他、比較的観測設備の整っていると言われる三原山の噴火予知が何故できなかったか。また、中央火口丘をオーバーフローする溶岩の活動力を、何故軽視したのかという問題もあった⁽⁹⁾。

付・表-7 伊豆大島の噴火予測と1986年噴火⁽²⁾

予測事項	噴火災害予測 (1986年)	1986年噴火
マグマの組成	玄武岩質	玄武岩・玄武岩質安山岩
噴火地点	三原山山頂火口 可能性大 山腹割れ目火口 可能性少ない	発生：A 火口 発生：B・C火口列
溶岩流	山頂噴火：発生率大 側噴火：発生率50%以上	発生：LA 発生：LB, LC
火砕流 (広義の火砕流)	山頂噴火：発生率0ではないが発生 したときの危険は大きい 側噴火：発生率0ではないが発生 したときの危険は大きい 到達範囲：火口から 2~3km	発生せず 発生せず
爆風		
火砕物の降下		
スコリア・火山灰	山頂噴火：発生率100% 側噴火：発生率100% 到達範囲：火口から〇〇km 分布方位：北東-東北東 南西-西南西	発生 発生 東 (5km以上) 南西 (3km)
火山岩塊	山頂噴火： 側噴火： 破壊力は大きい 到達範囲：火口から半径 1km	半径 1km以上 半径 数100m
泥流	発生する可能性は少ない	発生せず

* This was actually presented on Oct. 30, 1986, shortly before the commencement of the eruption of 1986, at the Meeting of the Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruptions.

* (噴火予測は曾屋, 1987による; この予測は1986年噴火直前の同年10月30日の噴火予知連絡会において発表された)

3) 木村モデルへの批判⁽⁹⁾

三原山の噴火を予知したという、琉球大学の木村政昭助教授の発言を、この際、検討しておきたい。

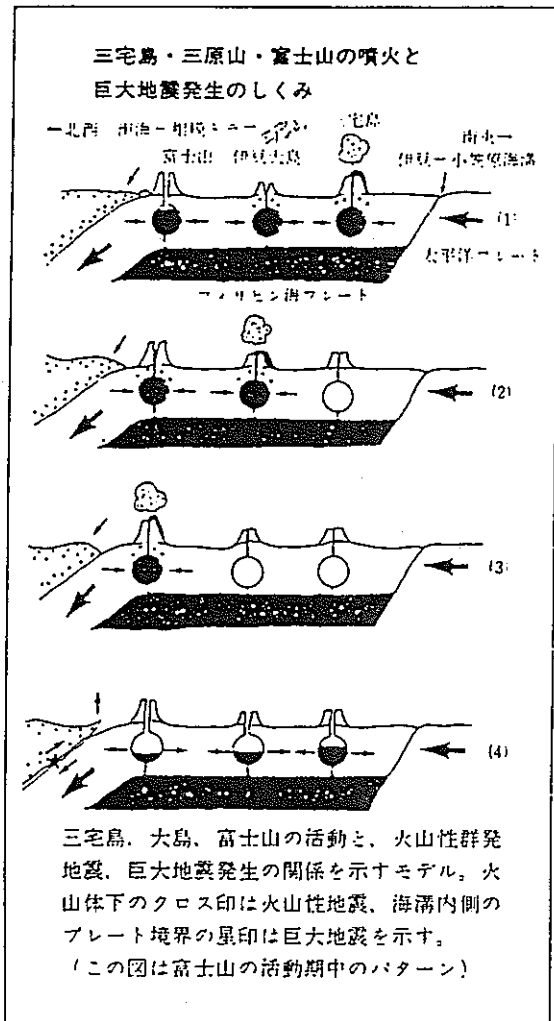
最近、木村政昭博士は、《一大島三原山大噴火のつぎに来るものー日本列島が危ない・大災害回避への提言》（二見書房）という著書のなかで、彼の考えを述べている。

プレートテクトニクスという学説にたって、三宅島の噴火→三原山の噴火→富士山の噴火というモデルを考えている（付・図-12参照）。

このモデルの致命的な欠陥は、三宅島の南にも、たくさんの火山島があるのに、それらは無視されていること、大島から富士山までのあいだに、伊豆半島などにたくさんの火山があるのに、それらも無視されていることである。

木村モデルでは普遍性がないので、たとえば西之島新島などの噴火予知にはまったく役にたたない。

木村モデルでは、三原山の噴火予知ができたとはいえない。



付・図-12 木村政昭（琉球大学助教授）モデル⁽⁹⁾

4) 噴火予知の難しさ⁽²⁾

三宅島火山の1983年の噴火では、噴火割れ目が海岸まで延び、海岸付近でマグマ水蒸気爆発を起こした。しかし、同火山の1940年と1962年の噴火では、噴火割れ目が海岸近くまで達したが、マグマ水蒸気爆発は起きなかった。詳細な地質調査は、歴史時代を含めた過去の噴火で、海岸付近で多くのマグマ水蒸気爆発が起きたことを明らかにしていた（一色、1960）が、1983年の噴火前には噴火予知関係者間でもマグマ水蒸気爆発の危険を強く意識していたとはいえない。

このような事例は、日本の火山中では最近の噴火活動が最もよくわかっている有珠、伊豆大島、三宅島火山でも、次の活動に対するイメージは、よく記録され、また、記憶されているごく最近の活動に強く影響されること、それは、一般の人だけでなく専門家についても同様であり、原理が理解されていない限り経験を過信してはいけないことを示している。

同時にこの例は、火山活動の様式が火山ごとに著しく異なること、従って噴火予知（防災）の方策は、特定の、対象火山ごとに考える必要があることを示している。

③東伊豆単成火山群⁽²⁾

1989年7月伊豆半島東岸、伊東市沖で海底噴火が起きた。この噴火は東伊豆単成火山群（ここでは荒牧・葉室、1977、の東伊豆単成火山群に、葉室ほか、1980、の東伊豆沖単成火山群を加えたものとする）の歴史上確認された最初の噴火活動である（小野ほか、1990）。

東伊豆単成火山群が活火山のリストに入れられた最初は、多分活火山カタログ（KUNO ed., 1962）である。久野はこのカタログの序文で、活動の記録のある火山、硫気孔活動のある火山の他、火山活動に明らかに関係した地震活動のあった火山を採録したと述べている。この最後の基準による火山は、1930年の群馬地震を経験した大室山火山群（現在の東伊豆単成火山群の主要部）である。

東伊豆単成火山群の活動間隔を、荒牧・葉室（1977）に基づいて単純に計算すると700年程度になるが、この地域の噴火は歴史に記録されていない。理由はいくつか考えられる。例えば、

- 1) 複数の単成火山が同じ噴火サイクルに形成されたので噴火サイクルの数は少なく、従って実際の噴火間隔は火山数から求めた単純平均より長い
- 2) もともと噴出率が低く、噴火間隔が長いために、そのばらつきも大きい
- 3) 1サイクルの噴出量に大きいばらつきがあり、それに規制されて次の噴火までの間隔もばらつきが大きい
- 4) 1989年の噴火のように小規模の噴火があっても歴史に記録されなかったなどである。なお、この火山群の噴出率は荒牧・葉室（1977）の陸上77火山の総噴出量と年代データによって算出してあるが、それによると大室山火山の噴出量だけで全77火山の噴出量の38%を占めている。このような場合、全体を通じた噴出率の算出はあまり意味が無いかもしれない。

いずれにせよ、この火山の噴火間隔は長い（1989年の活動の噴火サイクルが終わったかどうかは、まだわからない）と見るべきで、1989年噴火は確率の低い、まれな事件に出会ったことになる。久野がこの火山を活火山のリストに加えたのは正しかったと考えられるが、それは噴火が起きて実証されたという結果論からではなく、低確率で噴火しない可能性の方が大きいとしても、噴火のポテンシャルがあるのでリストに入れたからである。

④ 浅間山⁽¹⁰⁾

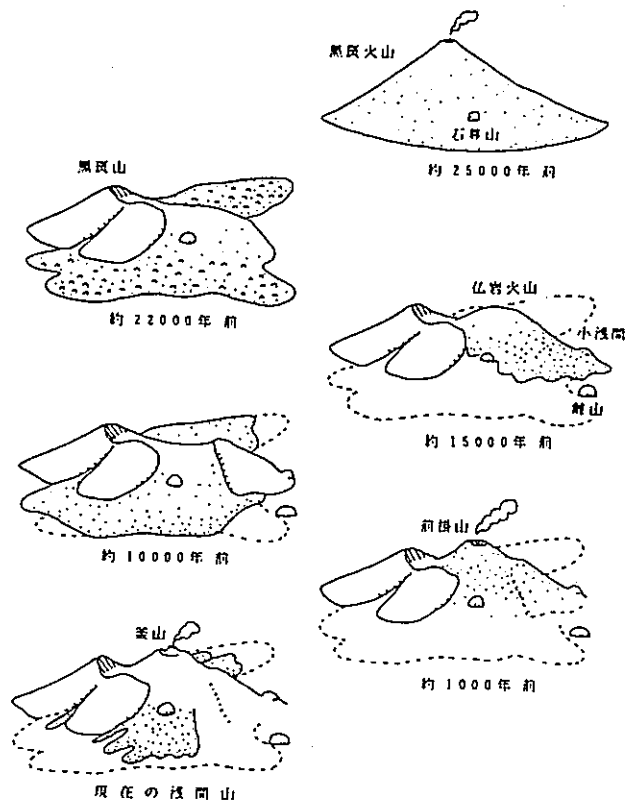
1) 浅間山の発達史

浅間山は初め、黒斑火山として生長した。その黒斑火山が大爆発を起こしたのは、今から2万2000年くらい前ではないかと言われる。山体の東半分が崩壊し、南側と北側へ大規模な岩屑流（岩なだれ）となって流れ下った。南麓の塚原地区に点在する小山は、このときに流れてきた黒斑火山の山体のかけらと考えられている。一方、北側への流れは、吾妻川の谷に沿って前橋方面にまで達したらしい。

崩壊した黒斑火山東半部のあとに、仏岩火山が発達した。しかし、規模の大きい火砕流を噴出する事件が何回か繰り返されたのち、約1万年、またはもう少し前には、軽石を主体とした大規模な火砕流（軽石流）が2回にわたって発生した。山の南麓、北麓の200km²もの広い範囲が、このときの堆積物で覆われたという。両者を合わせた厚さは、厚い所では30mを越え、4km³もの体積になるらしい。天明や天仁の大噴火をはるかに上回る規模である。この事件のため、仏岩火山は、南東側の部分を残して崩壊した。

現在浅間山と呼ばれているのは、その後の1万年足らずの間に発達した若い火山、前掛山のことである。前掛山は、西側を黒斑、東側を仏岩火山の古い山体の名残りに挟まれながら、標高2500mを越える高い山に生長した。その間、天明、天仁級の大噴火を何度も繰り返してきたことが知られている。

前掛山の山頂には、直径約1kmの火口がある。しかしその火口は、現在では中央火口丘である釜山（標高2568m）にほとんど埋められている。釜山が生まれた時期についてはまだ十分にはわかっていないが、天明の噴火のために山頂部の地形がかなり変わり、ほぼ現在の姿になったことはまちがいない。その釜山には、直径350mほどのたて穴状の火口が生じている。1912年頃には、溶岩が火口内を満たしていたらしいが、その後凹みが顕著になり、現在では最深の深さが180mを越える深いたて穴になっている（付・図-13参照）。



付・図-13 浅間山の歴史⁽¹⁰⁾

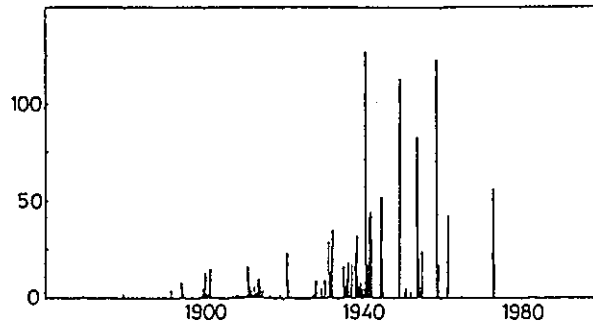
2)活動の予測

近年の浅間山は、長い浅間山の歴史の中では、ごく静かな時期にあっている（付・図-14参照）。しかし、それが通常の姿だと思って安心しているわけにはいかない。天明級やさらに大きな噴火の可能性も含め、将来いつか活動的な時期が再来することはまちがいない。

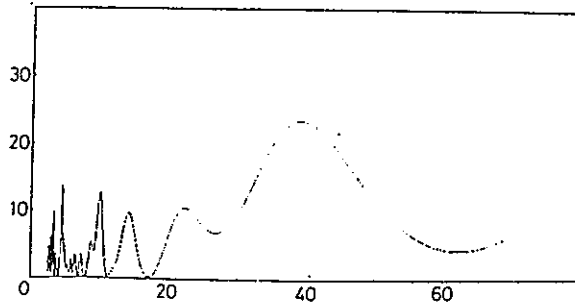
浅間山の噴火の場合、それに先だって地震活動が活発化したり、N型と呼ばれる振動が頻発した例が知られている。噴火の前後に、火山性微動と呼ばれる特徴ある振動が続くこともある。地殻変動や化学的調査なども含め、どのようにして火山活動を予測していくか、努力が続けられている。

ここでは、明治以後の噴火の起こり方について、統計的な側面を議論する。付・図-15は、噴火がどのような間隔で発生しているかをみるために、パワースペクトルをとったものである。これをもとに、主要な周期について、噴火の起こり易さともいうべき関数を合成したものが、付・図-16に示されている（ただし、噴火の強さは考慮されていない）。最近の1973年、1982～1983年、1990年の噴火活動が、ほぼ10年周期のピークの位置にそれぞれ一致していることは、大きな特徴のひとつである。この傾向に変化がなければ、噴火を起こし易い状態が1991年もまだ続く可能性がある。1990年末現在、大きな活動がさし迫っていることを示す兆候は認められないが、研究者としては、あらゆる可能性に対応できるような備えをしておく必要がある。

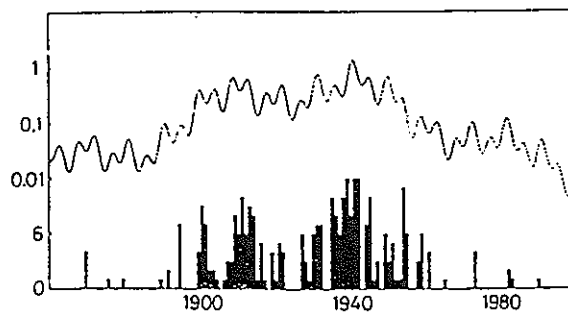
一方、1990～1960年前後にかけてみられたような活発な期間が、どういう間隔で再来し得るかという点も、大きな問題である。図では天明の噴火以来の活動とみなしたが、その間隔がもっと短ければ、早い時点で活動全体が上向きに転じるかもしれない。今後の重要な検討課題である。



付・図-14 月別の噴火発生回数 1868～1990年（ただし1992年代以前は、数え落としが大きい）。気象庁の資料による。⁽¹⁰⁾



付・図-15 噴火の発生間隔に関するパワースペクトル 横軸は間隔を年数で示す。⁽¹⁰⁾



付・図-16 噴火の危険度 噴火の起こり易さを表す関数の一例（上）と、1868～1990年の期間における各年の噴火発生月数の変化（下）。⁽¹⁰⁾

⑤ 白山⁽⁴⁾

1) 白山及び白山周囲の山々

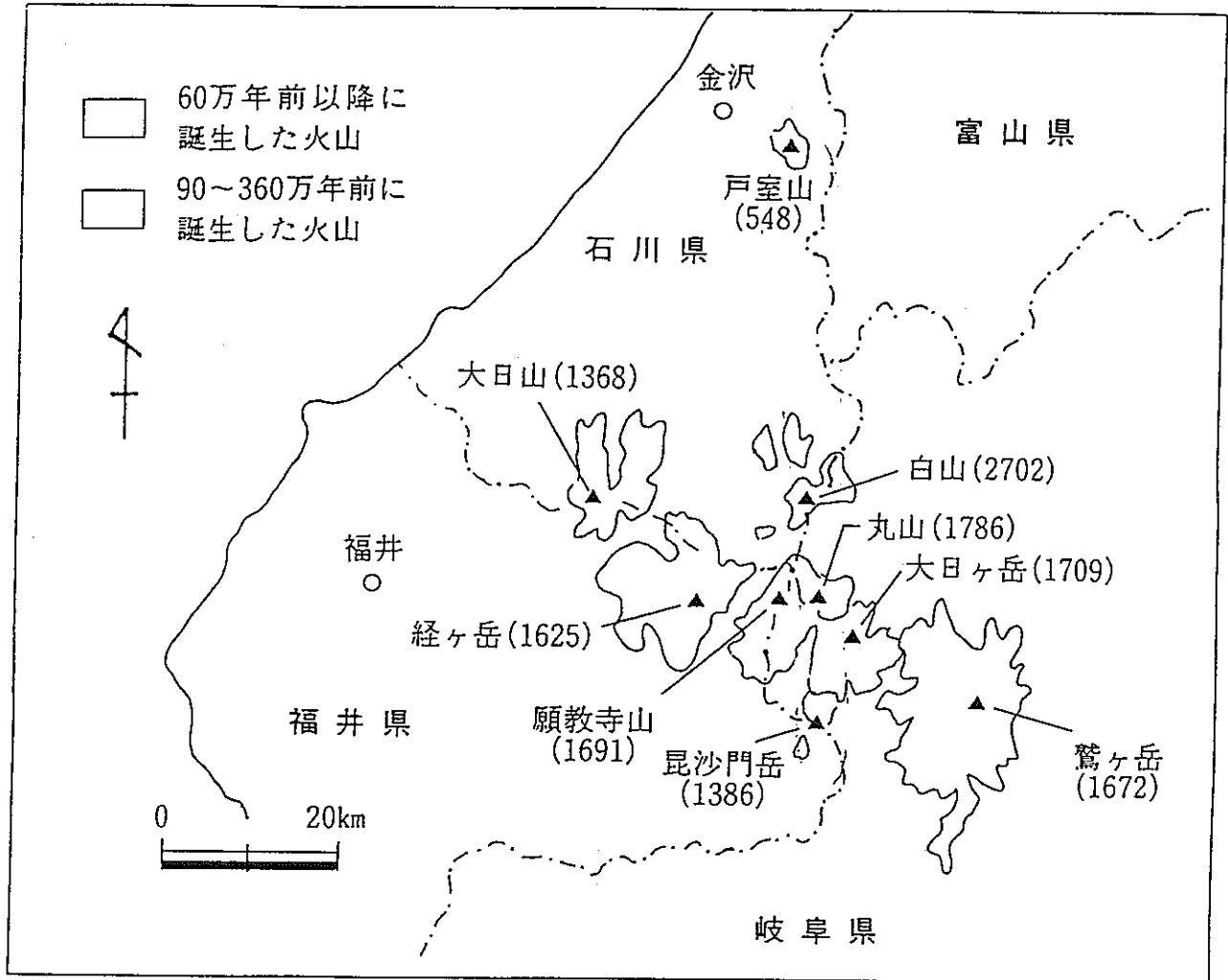
白山は2,702mの標高を有する独立峰である。白山火山が火山活動を開始したのは、今から30～40万年前である。当時は、尾添尾根の加賀室跡付近を中心に噴火していた。その後、活動場所は、中ノ川支流の地獄谷へと移動し、現在の山頂部から噴火を始めたのは、いまから数万年前と考えられている。その間、古い時代に形成した火山体は侵食でほとんど消滅し、その後、新しい火山が他の場所に誕生するということを、繰り返してきた。ほとんど変化がないと思われる山の歴史も、10万年から数十万年の間をみれば、様々な変遷を経てきたことがわかる。白山火山の活動は歴史時代まで続き、最も新しい噴火は今から330年ほど前のものである。

石川・岐阜・福井の各県にまたがる白山山系には、1,500～2,000m級の山が数多くある。そのうち、白山・大日山・経ヶ岳・丸山・願教寺山・毘沙門岳・大日ヶ岳・鷲ヶ岳が、ここ360万年の間に形成された火山である。他に標高はそれ程高くないが、金沢市の戸室山も火山である。これらの火山が形成した年代は、戸室山が40～60万年前、大日山が330～360万年前、経ヶ岳が90～130万年前、願教寺山が270～310万年前、丸山が30～40万年前、毘沙門岳が30～40万年前、大日ヶ岳が90～100万年前、鷲ヶ岳が120～150万年前である。白山火山は誕生したのが約40万年前で、活動は歴史時代まで続いている。白山山系では、歴史時代の活動記録をもつ唯一の火山である。

これらの火山の配置を形成年代をもとにみると、60万年より新しい時代に誕生した戸室山や白山・丸山・毘沙門岳の火山は、南北方向に並んでいる。一方、90万年より古い火山は、北西－東南の方向に並んでいる。それぞれの火山の並びを、白山火山列と九頭竜火山列と名付けている（付・図-17参照）。火山を誕生させる原因は、地下の深いところにあり、これらの火山列を形成した時の地下の状態が、70～80万年前より以前と以降とは異なっていたと考えられる。

火山は長い年月の間に少しづつ侵食を受け、もとの形を変えていく。白山や戸室山などの新しい時代に誕生した火山は、頂上部に火山地形や火山の斜面がよく残されているが、古い時代に誕生した火山は、もとの火山の地形を

残している部分が少なくなっている。年齢が100万年を越えると、誕生当時の地形はほとんど残されていないようである。



付・図-17 白山周辺地域の火山の分布⁽⁴⁾
おおよそ360万年前以降に誕生した火山。
カッコ内の数字は標高 (m) を示す。

2) 最近 1 万年の活動

弥陀ヶ原や南竜ヶ馬場・清浄ヶ原などの平坦地には、ところどころ深く掘り込まれた所がある。長い年月の登山者の踏圧や雨水などの流水によるためである。そのようなところで、厚く堆積した地層の断面を観察することができる。地層の大半は、黒っぽい色をしている。これは泥炭とよばれているもので、かつて生育していた植物が、腐って黒い土になったものである。他に、黒い地層の間に、白色や橙色の薄い地層がはさまれている。この薄い地層が火山灰の地層で、これまで18層確認されている。そのうち1つは、約6400年前に南九州の鬼界ヶ島付近の海底から噴出してきたアカホヤ火山灰で、残りのほとんどが白山火山から噴出した火山灰である。

火山灰が噴出した年代は直接測定することはできないが、泥炭ができた年代は炭素年代測定法によって知ることができる。その泥炭の年代から、泥炭にはさまれている火山灰の噴出年代を、おおよそ推定することができる。最も古い火山灰は、10400年程前に噴出したもので、最も新しいものは450年ほど前のものである。単純に計算すると、およそ700年に1回の割合で火山灰を噴出していたことになる。しかし、火山灰が降下しても雨水などによって流されることもあるので、これよりも多くの割合で活動があったとみたほうがよいであろう。

およそ9500年前と3000年前頃に噴出した火山灰は特に量が多く、弥陀ヶ原火山灰と南竜火山灰と名付けられている。これらの火山灰を噴出した活動は、特に活発だったと考えられており、南竜火山灰は剣ヶ峰が誕生した際の活動によるものと推定されている。

3) 歴史時代の活動

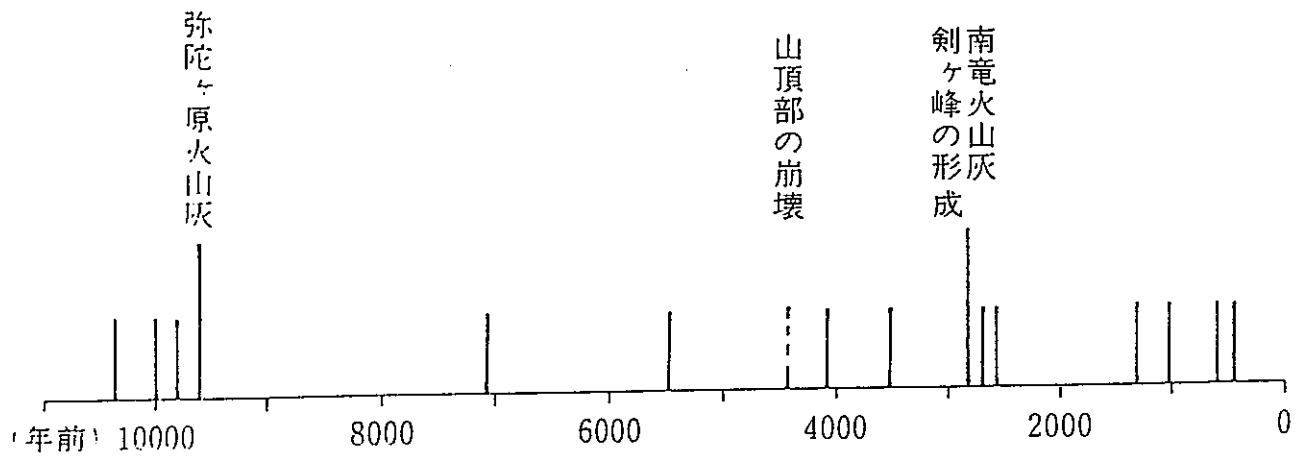
白山火山の活動に関連あると考えられる記録のなかで最も古いのが、706年の記録である。これは越前の国の山火事を、白山火山の噴火によると考えたものである。当時、白山は越前の国に属していた。853年と859年の記事は、白山の比よの神に対する位階の授受を、火山活動を鎮めるために行ったと解釈するわけである。これらの記事は他の解釈も可能で、信頼性は他の記事に比べて低いといえる。

1042年から以降の記事は、その内容が白山の活動を示しており、信頼できるものである。1042年の記事のなかに記されている越前室は、現在の室堂付近にあったものである。加賀室は、当時、大汝峰と千蛇ヶ池の間にあった。加賀室に1人残された僧が、夜中にしかもかなり近くからこの活動を観察している。それにもかかわらず、火が見えたとか明るくなったとかいうようなことは記されていない。また、埋もれた室が木材でできているのに、燃えたとか焼け焦げたとかいうような記述もない。そのことから、この時の活動は水蒸気爆発と考えられている。

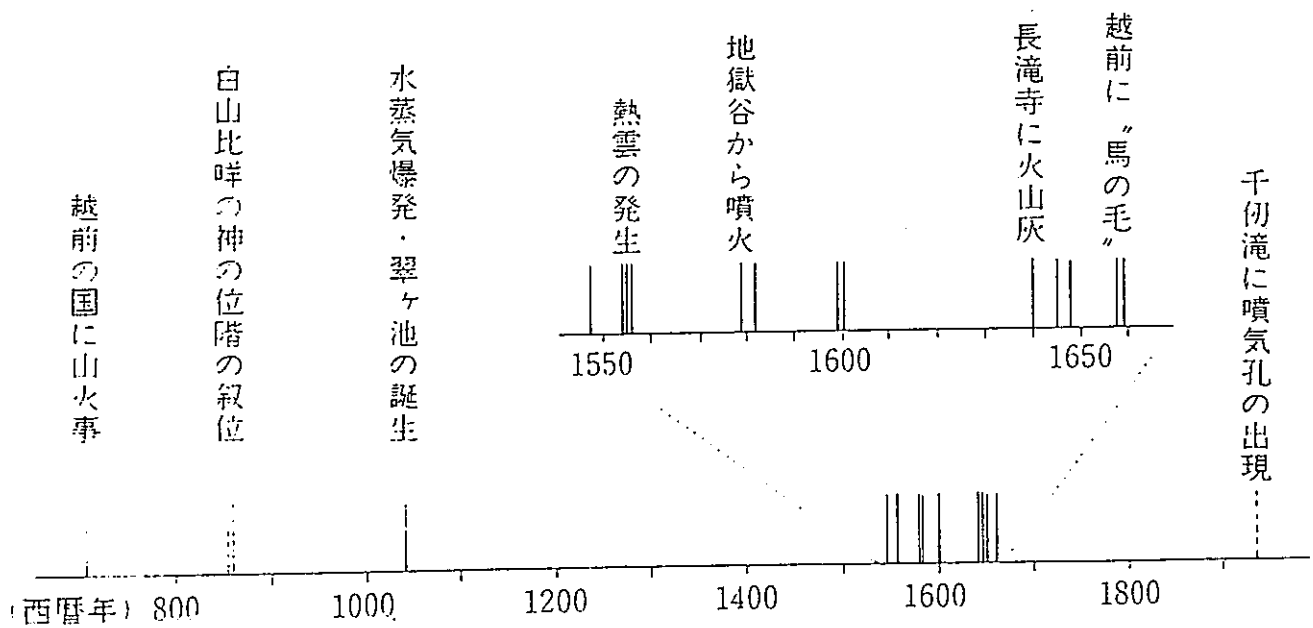
1554年から始まった活動は、記されている内容から高温のマグマを噴出していることがわかる。このときの活動で、噴煙は鶴来の白山本宮まで届き、活動は断続的に2年間続いている。活発な活動であったことが想像できる。この時の活動が遠く肥後国（熊本県）まで、知れわたっていたということが、他の史料に記されている。翠ヶ池から西の方に延びている緩斜面にみられる熱雲堆積物は、植物の育成もまだほとんどなく、比較的新しい時代のもので、1554年から始まった噴火によって、噴出したものと推定されている。

1659年に越前に降った“馬の毛”とは、マグマが細長くのばされ繊維状になったものをいうのであろう。

歴史時代で白山火山が活動を行ったのは、10世紀以前の信頼性の低いものを除けば、1042年とあとは1547年から1659年までのほぼ100年間に集中している。この100年間は、白山火山の活動期といえる。一方、1659年以降現在までと11世紀中頃から16世紀中頃までは、休止期といえるであろう。白山火山が将来活動を再開した場合、古文書からみると、16世紀中頃から17世紀中頃までのように、100年間ほど断続的に活動が続くと予想することもできる。



付・図-18 最近1万年間に噴出した火山灰と主なできごと⁽⁴⁾
 (遠藤、1985と山崎ほか、1987をもとに作図)



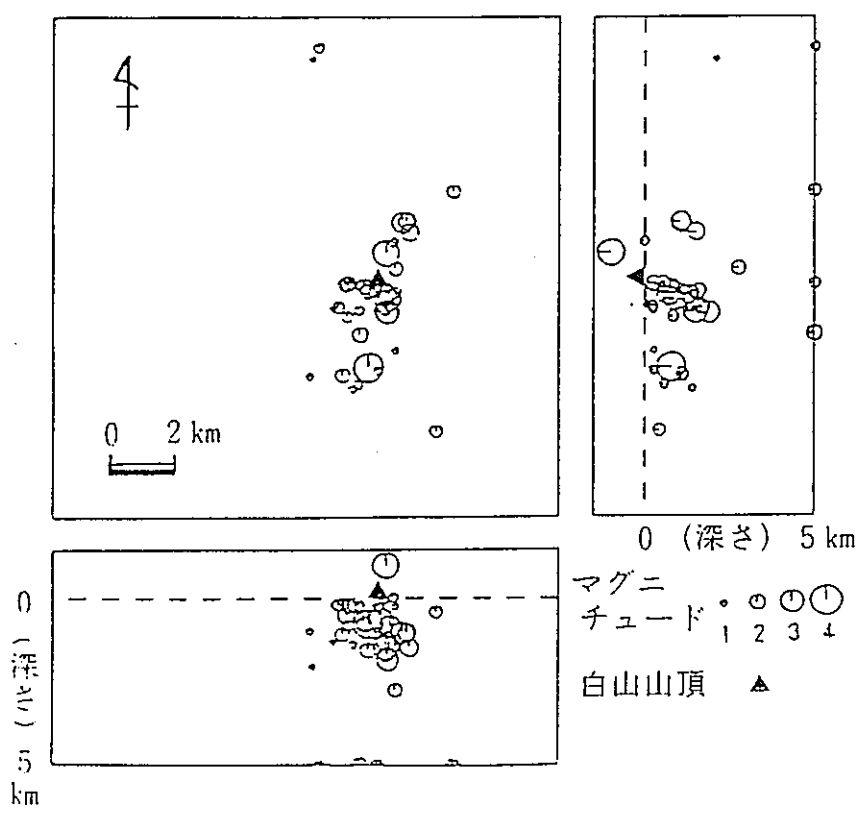
付・図-19 白山火山の歴史時代の活動⁽⁴⁾

4) 白山周辺の地震

火山の活動は、地下で発生したマグマが地上にでてくる現象と考えることができる。白山火山の将来のことを考えるとき、地下で最近どのようなことが起きているのか、調べる必要がある。直接に地中深くもぐって観察する方法はないが、断片的な情報なら得ることができる。その情報の1つが、地震である。

白山周辺に発生する地震は、これまで大学の観測所などで観測され、それぞれの地震の発生場所や大きさが決定されてきた。それによると、白山の周辺がほかの地域よりも地震活動が多いことがわかっていた。最近、ここ10年程の間に白山周辺地域で発生した地震について、精度よく震源が決定された。その結果、これまで白山の付近に比較的多く地震が発生していると漠然と思われていたものが、ほぼ白山の頂上の真下に集中して発生しているのが明らかになってきた（付・図-20参照）。これらの地震が白山火山の活動と直接関係しているのか、もしくは、他の原因によるものかは、地震だけの研究からはまだ結論がでていないが、白山火山の火口の直下であるということを見ると、白山火山と関係があるものと考えるのが自然であろう。

白山は現在噴煙を上げるなどの表面的な活動を行っていないが、これまで観測された白山地域の地震は、白山が火山として生きていることを示す証拠の一つとってよいであろう。



付・図-20 白山付近で発生した地震の震源分布（河野・東田、1991より）⁽⁴⁾
 1980年4月から1989年6月にかけて発生したもの。右図と下図が断面。
 マグニチュードは地震の大きさをあらわし、数が大きい程大きい。

⑥御岳⁽¹¹⁾

直接マグマに由来する噴出物を地表にもたらず火山活動を比較的頻繁にくりかえしている活動期の火山（いわゆる活火山）においては、観察・観測された噴火状況と噴出物の地質学的研究によって、とくに前兆現象や噴火の特性、周期性などについて知見が得られ噴火予測・予知が可能となる（たとえば、勝井・大場・曾屋、1978）。

しかし、活動記録のない火山や記録はあっても回数が少ない火山では記録にたよる噴火予測はできないし、そのような火山が稀におこす火山活動がマグマの直接的生産物をみない小規模な水蒸気爆発であることが多い。火山活動にあって本質的な意味をもつマグマの生産物があらわれないが故に、水蒸気爆発は火山噴火の中では副次的な意味しかもたないという意識に加えて、水蒸気爆発では特殊な場合（たとえば山体の大規模崩壊など）を除き噴火に伴う地形変化は小さく、噴出物も通常はごく少量でその保存もわるく、生産された噴出物は類質火砕物のみであるため個々の噴出物の同定に困難があるなどの技術的理由からも、従来の火山地質学研究においては水蒸気爆発などの小規模噴火がほとんど顧慮されなってきた。したがって、水蒸気爆発などの火山活動にかかわる基礎的研究はあまり蓄積がなされていない。また、そのような火山でも経常的に生産されている噴気ガスや温泉生成物など火山生産物についても静穏期の火山では火山噴火予測・予知を目的とした基礎的資料が十分あるとはいいがたい。しかし、御岳1979年活動に際して、噴火口から約4 km離れた濁河温泉の温泉水に異常があったことが知られ（山田、1982；杉浦、本報告）ており、平時からの試料の採取・分析が必要であることを示すものと思われる。

防災面からみた場合水蒸気爆発など小規模噴火は一般にその影響の及ぶ範囲は狭い。しかし、大規模噴火にくらべてその回数が1桁は多いと思われる小規模噴火が、従来その予測にほとんど手がかりをもっておらず、噴火突発による社会的影響も少なくない。とりわけ、近年の安易な観光「開発」が火山地域へ多くの人々を接近させ、火口やその周辺に容易に到達しうる事態をつくっており、ごく小規模な噴火で大惨事をまねく恐れも生じている。

ほとんど死んでいるかに感じられる火山が突然活動を再開するのは、静穏

期にある火山が数100～数1,000年の周期で活動を行っているからであり、このような長い静止期をはさんで起こる火山活動の把握には活発な活動をくりかえしている火山での地球物理学的方法に基礎をおく活動予測・予知とは異なった方法論を必要とするように思われる。

御岳は1979年10月28日、何の前ぶれもなく噴火した。その後、約1年間は火口から熱泥水、火山灰などを噴気と共に放出していたが、最近では、噴気活動のみとなり、噴気量は年々減少している。一方、焼岳は1907年から1939年にかけて活発な火山活動を行った後、一時その活動を休止していたが、1962年6月17日、何の前ぶれもなく噴火した。その後、1963年6月まで小規模な爆発を繰り返したが、1965年頃からは頂上付近の数ヶ所から噴気を放出し続けている。

火山ガスや温泉の組成は火山活動と密接に関連しており、火山活動の推移を考察する上で、有力な情報を提供してくれるものと思われる。この考えに基づき、両火山において、噴気孔ガスおよび温泉水の化学組成および噴気凝縮水（火山性蒸気）の水素および酸素同位体比の経年変化を観測している。

御岳では噴気孔温度が上昇し、 CO_2 、 H_2S および SO_2 が増加しているが、これらは、火山ガスに対する地表付近における地表水の影響が減少していることを示していると考えられる。全噴気量の低下および山麓の濁河温泉の泉質の安定化などから、御岳の火山活動は沈静化しつつあると考えられる。一方、焼岳は、噴気温度が上昇気味であること、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比および H_2 濃度が増加していること、そして地盤変動が活発化していることなどから、火山活動は幾分活発化していると考えられる。

⑦立山⁽¹¹⁾

立山火山がマグマを噴出する活動を行ったのは約4～5万年前まで（町田・新井、1979）で、それ以降現在にいたる期間は地表へのマグマ噴出をみない水蒸気爆発や噴気・温泉などの活動のみであった。この時期がYAMASAKI, et al. (1966)による第4期である。

YAMASAKI, et al. (1966)によれば立山火山の活動史は4つの時期に分けられ、それぞれの活動期の間には火山活動の休止と山体の侵食の時期がある（第1期～第3期については主にYAMASAKI, et al. (1966)によって記述する。付表-8を参照）。

従来 of 火山地質学においてこのような静穏期の火山活動を対象とする研究はあまり行われなかった。それは、静穏期の火山活動は一般にその規模が小さいため生成物の保存がわるく、生成物のほとんどが類質テフラ層で識別・同定しにくいなどの技術的難点とともに静穏期の火山活動はマグマ生産物がないため火山研究者の岩石学的興味の対象になりえない事にもかかわってあまり調査の目が向けられなかったためと思われる。

したがって、活動記録もない火山が突然活動を再開する例は多く認められ、そのようにして再開される火山活動が水蒸気爆発であることは多いのに、それら静穏期火山の火山活動、とくに水蒸気爆発を中心とする活動状況や周期性など噴火予測に必要な基礎資料を欠くのが現状である。水蒸気爆発による被災は一般にその及ぶ面積が少ないとはいえ発生回数は多く、活動突発による社会的影響はすくなくない。しかも、立山のように近年の「観光開発」により毎年100万人にもおよぶ人々が火口や周辺地域に容易に近づける状況が生まれてくると、火山活動の規模としては小規模であっても大惨事となる恐れがある。

以上のような社会的問題と、立山が高山であるにもかかわらず火口周辺に広い平坦地をもちそこに泥炭層が発達し小規模なテフラ層の保存条件がよいなどの理由で静穏期火山の最近の活動史や活動度研究の一例として、立山火山地獄谷火口の、最近の火山活動についての研究が行われた。

第1期 溶岩と火砕物によって成層火山を形成した時期で、噴出物の岩質は主に複輝石安山岩質で少量の角閃石と黒雲母を含むものも存在する。時代を判定する資料はほとんどない。

第2期 多量の軽石流放出とひきつづくスコリア流の放出によって弥陀ヶ原、五色ヶ原などの火砕流台地を形成した時期である。現在の火山体の主要部はこの時期の噴出物によって作られている。岩質は、軽石流堆積物が黒雲母含有、普通輝石角閃石しそ輝石デーサイト、スコリア流堆積物が普通輝石しそ輝石安山岩である。年代は約8万年BPかそれより少し前(小林、1976)とみなされる。なお、YAMASAKI, et al. (1966)は、この時期の多量な火砕流放出が立山カルデラの原形を作ったとしたが、後述(第4期の項参照)するように、立山火山第4期中頃(約2万年BP)になっても室堂山～天狗山の現在のカルデラ壁の南や五色ヶ原の西には氷河をいただく高い山が存在したとみられ、カルデラの形成機構やその時期、形成以降の変化についてはなお検討の余地がある。

第3期 室堂山、国見岳、天狗山などを作る溶岩と火砕流の噴出期で、噴出物は黒雲母や石英を含有する角閃石普通輝石しそ輝石安山岩や黒雲母しそ輝石角閃石デーサイトなどである。第3期末期の溶岩が約4.5万年BPの大山倉吉軽石層におおわれており(町田・新井、1979)、第3期はこの頃に終了したとみなされる。室堂～地獄谷において急崖を作って広く露出する溶岩は第3期の玉殿溶岩(YAMASAKI, et al 1966)であり、この地域では第3期末期を示す噴出物である。なお、玉殿溶岩おおわれ氷河堆積物が存在しており、第3期には氷河拡大期があったらしい(深井、1974)。

第4期 第1期～第3期までの活動期と異なりこの時期は静穏期で、地獄谷など爆裂火口の水蒸気爆發による類質テフラ層と噴気・温泉生成物以外に火山の生成物は認められない。火山産物以外では、ヴユルム極相に相当する氷河堆積物が玉殿溶岩をおおい広い分布を示し、玉殿溶岩を刻んだ氷食地形とともにこの時期を象徴している（小林、1982）。なお、氷河堆積物・氷河地形を形成した際に存在したはずの氷河涵養域はその後のカルデラ壁の著しい後退（又はカルデラの生成）によって失われ、カルデラ壁には今なお重力的不安定さによる重力断層を生じている。また、この氷河堆積物は、弥陀ヶ原から地獄谷にかけてWSW－ENE方向に約7km続く右ずれの弥陀ヶ原活断層群（羽田野・小林、未発表）によっても切られており、このような変動が地獄谷火口の活動を準備した可能性も否定できない。ただ、現在までの調査では更新世における地獄谷火口の活動を示す証拠は得られていない。完新世になると初頭から泥炭層の形成が始まったらしい。弥陀ヶ原では、泥炭層最下部の木片について $8730 \pm 220^{14}C$ 年BP（Gak-8753）という測定値が得られており、この値は、アカホヤ火山灰（約6,000年BY）などと泥炭層との関係などからみて室堂～地獄谷周辺においても泥炭層最下部を示す値として扱いうるようと思われる。地獄谷火口の水蒸気爆發による類質テフラ層は、この泥炭層の存在ゆえ比較的よく保存された。泥炭層形成以前、すなわち更新世には類質テフラ層の保存条件が格段に悪く、したがってテフラ層を確認しえないのかもしれない。

⑧蔵王山、秋田駒ヶ岳⁽¹²⁾

1)蔵王山

蔵王山は奥羽山脈の南部、宮城・山形両県境に位置し、那須火山帯に属している。

最高峰の熊野岳（1840.5m）を主峰とする北の雁戸山から南は不忘山に至る南北約20km、東西約15kmの山群の総称である。

狭義に蔵王火山と呼ばれているものは熊野岳、刈田岳、五色岳、地藏岳、三宝荒神山、中丸山、冷水山などの中央蔵王の山々である。これらの山々はいずれも火山碎屑物によってできた成層火山である。

この火山群は次から次へと時を隔てて活動して複合火山ができた後に、熊野岳から刈田岳に至る馬の背を外輪とする大きな馬蹄形の爆裂火口ができ、その中に中央火口丘として成層構造の明瞭な五色岳が噴出した。

最後に五色岳と馬の背との間に爆裂が起こり直径約400mのほぼ円形な火口ができ、その後、この火口に水が溜り海拔1570m、直径約360mの水面を有する現在の火口湖御釜（五色沼）が生成された。

有史以来、被害を伴うような噴火のすべては御釜の内外で起こっている。現在も硫気活動の盛んな所があり、北西側中腹には強酸性の温泉が多量に湧出している。

1963年（昭和38年）国定公園に指定され、至るところに雄大な自然の景勝の地やスキー場が多数あり、また山腹、山麓には温泉街が多く、山頂付近まで自動車道が整備されており、四季を通じて訪れる人々が年々増加している。蔵王山の過去の火山活動を付・表-9に示す。

付・表－9 蔵王山の過去の火山活動⁽¹²⁾

1183年 5月28日 (寿永2年) 噴火
1227年 (安貞元年) 噴火：噴石による人畜の被害多数。
1230年 11月29日 (寛喜2年) 噴火：噴石
1331年～1333年 (元弘元年～3年) 噴煙
1350年頃 (観応年間) 噴煙
1620年 (元和6年) 噴火
1622年 (元和8年) 噴火
1623年 5月15日 (元和9年) 噴火
1624年 11月25日 (寛永元年) 噴火：鳴動、噴石、降灰。
1625年 (寛永2年) 鳴動？
1626年 (寛永3年) 鳴動？
1630年 (寛永7年) 噴火
1641年 (寛永18年) 噴火
1668年 (寛文8年) 噴火
1669年 (寛文9年) 噴火：降灰
1670年 (寛文10年) 噴火：4月26日より噴煙、9月26日遠方まで降灰。
1694年 5月29日 (元禄7年) 噴火：神社焼失。 8月30日地震、河川毒水化、魚死す。
1794年 9月22日 (寛政6年) 噴火：御釜の南東に9個程の新火孔、降灰砂、 12月頃まで活動。
1796年 3月24日 (寛政8年) 噴火
1804年 (文化元年) 噴火
1806年 (文化3年) 噴火
1809年 12月29日 (文化6年) 噴火：6月から活動をはじめ、この日に爆發、 硫黄流入し川魚被害。
1821年 1月27日 (文政3年) 噴火：鳴動、御釜の濁水沸騰、濁川水増し硫黄 堆積。
1821年 5月1日 (文政4年) 噴火

付・表-9 (続き)

1830年(天保元年)噴火

1831年11月22日(天保2年)噴火

1833年(天保4年)噴火:度々噴火、降灰。

1867年10月21日(慶応3年)噴火:鳴動、御釜沸騰、硫黄まじりの泥水が増水し洪水を起こし死者3名。

1873年8月~9月(明治6年)小噴火

1894年(明治27年)噴火:3月ころから噴煙、7月には降灰、8~10月湯の噴出。

1895年2月15日(明治28年)噴火:12日ころから火口付近に有感地震。

15日に爆発、鳴動、白煙、御釜沸騰し川魚被害。

19日にも爆発し、鳴動、御釜の沸騰、河川増水、有毒ガス発生。

3月22日にも白石川の洪水。

8月22日降灰。

9月27日爆発、鳴動、降灰等。

1896年9月1日(明治29年)噴煙、御釜の水はらん。

1897年1月14日(明治30年)鳴動、噴煙。

1918年(大正7年)御釜沸騰。

1923年(大正12年)8月に御釜の湖心からガス噴出強まる(その後次第に弱まり1928年に止む)。

1935年6月下旬(昭和10年)地震群発。

1939年(昭和14年)御釜の水が変色泡立つ、新温泉湧出。

1940年2月(昭和15年)小活動:新噴気孔生成。

1962年8月19~20日(昭和37年)地震・鳴動。

1966年(昭和41年)異常:噴気、温泉活発化。

1971年10月4日(昭和46年)異常:地鳴り

1972年5月(昭和47年)異常:地鳴り

2) 秋田駒ヶ岳

秋田駒ヶ岳は秋田県に所属するが、岩手県との県境近くに位置し、十和田八幡平国立公園の最南端を占める。この火山は男女岳（1,637m）、男岳（1,623m）、女岳などの火山体によって構成され、これらの間には南西に開くように長径約3km、短径約1.5kmのほぼ楕円形のカルデラを形成している。

カルデラの北方には男女岳、男岳があり、男女岳は火山群中の最高峰である。

1970～71年に噴火した女岳は、3個の中央火口丘中の最大でカルデラの北部に位置し、頂部と南西斜面には各数個の火口跡がある。西麓には寄生火口丘があり、女岳の東隣には大きな火口をもつ子岳があり、カルデラ南端部には形の不完全な南岳がある。

女岳・子岳は侵食が進まず、多数の火口跡もよく保存されているが、本火山の活動の記録はごく乏しい。しかも、それらの有史以後の噴火はすべて水蒸気爆発であった。1970年（昭和45年）9月18日、女岳頂部付近で38年ぶりの噴火があり、数ヶ月にわたる混合型大噴火であった。そのうえ、女岳などの従来の後カルデラ溶岩や大部分の外輪山溶岩が玄武岩であるのに対して、1970年の溶岩は安山岩で、しかも、噴火様式は安山岩質らしからぬものであった。

翌年1月末、噴火活動は一応終息するに至ったが、その後も依然として高い地熱が続き、数回にわたり現地観測が行われた。

山体の周辺には、温泉場が多く北麓には蟹場・黒湯・大釜などの乳頭温泉郷、西麓には田沢湖高原温泉・水沢温泉などの田沢湖高原温泉郷、南麓には国見温泉（岩手県）がある。

また、スキー場や観光施設等も多く年々利用客が多くなっている。秋田駒ヶ岳の過去の火山活動を付・表-10に示す。

付・表-10 秋田駒ヶ岳の過去の火山活動⁽¹²⁾

807年（大同2年）噴火？

1888年～1905年（明治21～38年）小噴火？

1890年12月～1891年1月（明治23～24年）噴火・鳴動、噴石。

1932年7月21日～30日（昭和7年）噴火：新火孔、新噴石丘生成、泥流、降
灰、樹木の枯死、有毒ガスの発生。

1933年3月20日～（昭和8年～）鳴動、女岳白煙、国見温泉急騰。

1942年10月18日～25日（昭和17年）群発地震。

1962年12月10日～12日（昭和37年）地鳴を伴う地震群発（最大震度Ⅳ程度）

1970年～1971年（昭和45年～46年）噴火：1970年8月末ころ女岳山頂付近に
噴気孔生成。

9月15日更に新たな噴気孔が出現
し9月18日より噴火、ストロンボ
リ式噴火、溶岩流出、噴出物総量
 $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

1971年1月26日まで続く。

1972年（昭和47年）噴気地帯新生。

1975年2月（昭和50年）噴気：女岳北側山腹で噴気活動活発。

1976年7月（昭和51年）噴気：女岳山頂及びその付近で地中温度が1年前に
比べてやや高温化、噴気活動も多少活発。

6. 噴火機構のモデル化例

(1) 発泡による重力不安定に基づくモデル⁽⁶⁾

経験的な噴火予知の限界をのりこえるためには、火山活動や噴火の物理過程に関する理解を深める必要がある。すなわち、単に噴火するかどうかだけでなく、どのような様式と規模の噴火が、いつどこで発生するかを、ある程度予測しなければ、噴火予知の意味が実用的には余りない。これらの問題には、観測データが異常かどうかだけを議論していたのでは、答えようがない。もう一歩踏みこんで、火山の地下がどういう状態にあり、そこでどんな現象が進行しているかを、観測データに基づいて把握しなくてはならない。

火山の噴火とは、物理的には、マグマが浮力で上昇してきて、地表からふき出すだけの現象と思えるかも知れない。実際には、力学の基本的な枠組の中にも、もっと複雑な要素がからんできている。まず、マグマは常に浮力を保持しているわけではない。地表近傍では、固体岩石中のかなりの体積が空隙でしめられるために、地殻の平均的な密度は、マグマよりむしろ低くなる。そこで、マグマはある深さまで上昇すると浮力を失い、それ以上自力で上昇できなくなる。そのような条件下でマグマが集積して、「マグマだまり」が形成されると考えられる。マグマだまりで一旦力学的な平衡に達したマグマが、何らかの原因で再び上昇を始めて地表に達するのが、噴火である。

この理解に立てば、マグマだまりからマグマが再度上昇する機構と条件を解明することが、噴火予知の物理学にとって中心的な課題となる。また、マグマだまりの状態をこの条件との関連で把握することが、火山観測の目的になる。

噴火にむけて地表にマグマを供給する機構としては、更に深部からの上昇流が蓄積して、マグマだまりがあふれる可能性や、圧縮的な地殻応力が高まって、マグマがしぼり出される可能性がある。いずれの場合も、マグマだまりの圧力が高まることが噴火の原因である。この考えは、噴火の膨張収縮モデルとよばれて、古くから様々な形で主張されてきた。しかし、そのような受動的なマグマの流出は、火口周辺にしばしば見られるカルデラや更に小規模な陥没地形の存在を説明できない。また、爆発的な噴火の性質も、十分に説明ができない。

マグマには、水蒸気等の揮発性成分が、飽和近くまで溶解している。もし、

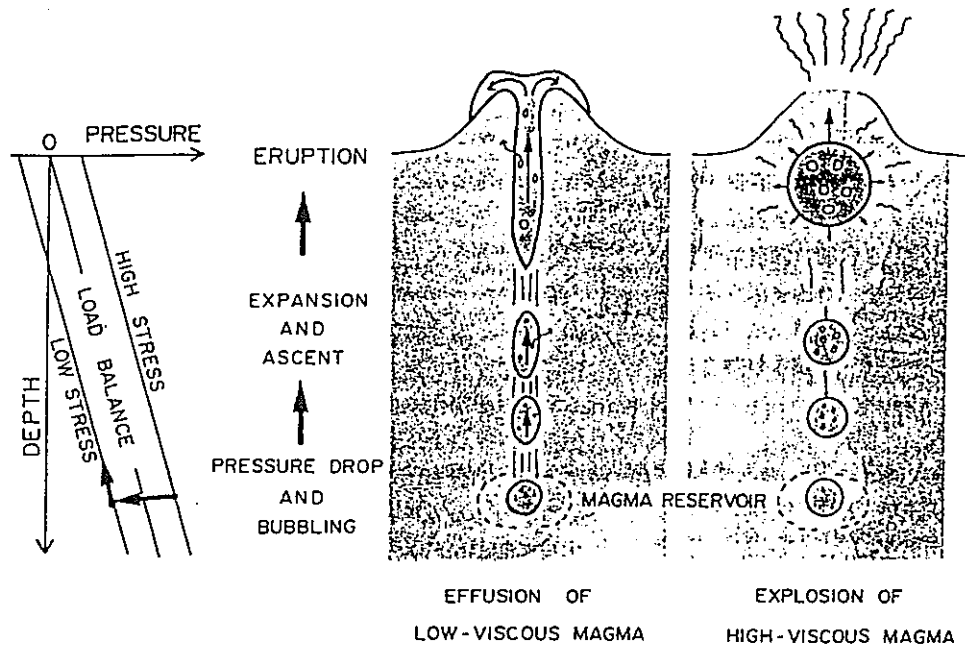
地殻応力が変化するなどして、マグマの圧力が下がると、溶解度の減少のために揮発性成分が発泡して、マグマ中に気泡ができる（付・図-21）。気泡の存在によりマグマの平均的な密度が下がれば、重力平衡が破れて、マグマの上昇が開始する。マグマが地表に近づくにつれて、圧力は降下するため、発泡は更に進行し、上昇は加速する。このような重力不安定による噴火の発生は、噴火の間欠性や突発性はもちろん、火口周辺の陥没地形の存在も自然に説明する。

玄武岩質マグマとよばれる低粘性のマグマは、溶岩流として、火口から流出することが多い。ところが、もっと粘性率の高い安山岩質マグマが噴出する場合には、噴火はしばしば爆発的になる。火口底近くまで上昇してきたマグマは、爆発して細かく砕け、細粒の火山灰となって飛散したり、空気と混合して火砕流となったりする。文献⁽⁶⁾のモデル（付・図-21）では、このような爆発性も、揮発性成分の発泡と、それに伴う体積増加のせいだと考える。高粘性のマグマからは気泡が逃げにくく、マグマの膨張は、火口底や火山体を破壊するまで続き、破壊に伴う急激な減圧が爆発的な発泡を生ずる。逆にマグマの粘性率が低い場合には、気泡が容易にマグマから抜けて、体積増加の効果をおさえ、マグマは、比較的自由に形態を変化させて、周囲に高い応力を発生せずに流出する。

ここまでの議論は、噴火がマグマの上昇に起因すると考えて進めてきたが、小規模な水蒸気爆発などには、それは必ずしもあてはまらない。例えば、1988年～1989年の十勝岳の噴火には、新たに上昇してきたマグマの関与が、はっきりとは認められていない。それどころか、伊豆大島の1986年11月の小噴火は、マグマ後退期の出来事であったと考えられる。噴火に伴って火口底が大きく陥没したが、陥没部分の体積は、地表に放出された噴火物の1,000倍にも達した。1986年11月の噴火以後、三原山火口および割れ目火口にそって、沈降が継続している。この沈降は、1986年の噴火時に火口付近まで上がってきたマグマが、その後深部に逆流しているためと解釈できる。この解釈は、重力の測定値が、地下の質量の減少を示すこととも調和する。

マグマの後退期に噴火が発生するのは、火道内にできた空洞が急激につぶれて、その反動で爆発や物質の放出が起こるためかもしれない。あるいは、マグマからの気泡の放出が、一方でマグマの平均的な密度を高めて沈降の原因をつくり、他方で気体の圧力を増加させて爆発を起こすのかもしれない。いずれに

せよ、噴火予知では、このような変則的な噴火の存在にも考慮を払う必要がある。



付・図-21 発泡による重力不安定に基づく噴火機構のモデル⁽⁶⁾
 (a) 低粘性のマグマの溶岩流出。
 (b) 高粘性マグマの火山爆発。

(2) マグマ貫入による地殻変動の解析と噴火予知⁽¹³⁾

① はじめに

地震予知や火山噴火予知を実現するためには、地殻の破壊のプロセスを理解し、破壊に伴う地殻の変形やその他の前兆現象を定量的に解明する必要がある。このような場合、巨大な体積の天然の岩体が対象となるので、不均質性や不連続性が重要なファクターとなる。そして、地下水やマグマやガスといった流体の効果も大きい。また、熱の影響もある。

不連続性岩盤の応力解析には、様々な方法があるが、本論文では川井の提案による剛体バネモデル (RBSM) を用いて、1986年の伊豆大島噴火に伴う地殻変動の解析を試みた。解析は主に2次元で行ったが、3次元解析も実施した。

② 深部でのマグマ貫入による地表変動

火山の噴火に先立って、地下でマグマの移動があれば、地表に何らかの変動があると期待される。地下のマグマ溜り内部でマグマ圧が増大すれば、マグマ溜り直上を中心にドーム状の隆起が生じる場合があることが、茂木によって理論的に示されている。火山の地下でマグマ圧が増大し、それが噴火に結びつくとなれば、噴火直前に火山の中央部が隆起することは、直観的にも理解しやすい。これは茂木モデルと呼ばれ、実際に噴火前後の多くの火山地表部の隆起・沈降の観測例にほぼ適合することが明らかになっている。したがって、火山中央部の隆起現象は噴火の前兆であり、もっとも信頼できる噴火予知のための指標と考えられている。茂木モデルは点集中力が作用した時の弾性解に基づいている。しかし、地下のマグマ溜りは実際にははるかに複雑であり、その形態によって、マグマ圧による地表への影響が大きく異なり、マグマ圧が増大すると地表が沈降する場合があることが指摘されている。1986年の伊豆大島噴火は地下のマグマ圧増加によって地表が逆に沈降した例になった。

三次元弾性論の解析解に基づいた予測によると、マグマ溜りの形状が球に近い場合は、茂木モデルで示されたと同様に、マグマ圧によって地表にドーム状の隆起が生じる。しかし、水平断面が円形でも、深さ方向に伸びた偏長

型のマグマ溜りの場合には、広域的には球状マグマ溜りと同様にドーム状に隆起するが、ドームの頂部には逆に小円形のカルデラ状陥没が生じる。また、鉛直に立った板状（岩脈状）のマグマ溜りの場合には、グラーベン状の陥没と周囲の広い隆起域が生じる。上下に伸びたマグマ溜りの中のマグマ圧が増加すると、マグマ溜りの頂部を押し上げる力以上に、地下深部で横方向に拡げる効果が大きいため、地表に近い天井部分が深部の拡大に引きずられて落ちこむもので、アーチ状石組の両脚部を拡げると頂部の「キーストーン」が落ちこむ現象から、キーストーン効果と呼ばれる。しかし、このモデルは弾性解に基づいているため、重力の影響や岩盤の不均質や非弾性変形の影響が不明であった。

③不連続性岩盤へのマグマ貫入の解析

火山付近では、通常は割れ目が多く、岩盤は破碎された状態に近い。数値計算法として多く用いられている従来の有限要素法や境界要素法でも、割れ目の多い岩盤の変形を予測するためには十分とはいえない。

このように割れ目が多く、不連続な岩盤の変形を見積もるために適した数値計算法として、RBSM（剛体バネモデル）が提案されている。RBSMは、不連続面によって岩体があらかじめ分割されているとして、隣接する剛な要素の不連続面での相互変位を見積もることにより、岩体全体の変形を計算する。

ここでは地下にマグマ溜りが存在するとして、マグマ圧の上昇により周囲の岩体中のクラックの発生と進展をRBSMにより追跡すると共に、地表の変位を調べた。解析はまず、2次元の平面ひずみ状態で行い、マグマ溜りの形状は鉛直方向の半径が b 、水平方向の半径が a であるような楕円形とする（付・図-22）。 a と b の比を、 $a/b = 1$ （円形）、 $a/b = 1/5$ 、 $a/b = 1/10$ 、 $a/b = 0$ （きわめて狭いスリット）の各場合の計算を行うことにより、マグマ溜りの形状の効果調べた。RBSM法による数値計算のためのメッシュ分割を付・図-23に示す。 $h = 100\text{ m}$ 、 $b = 200\text{ m}$ の場合の、割れ目の進行過程を示す（付・図-24）。図中の波線は引っ張り割れ目、太実線が剪断割れ目であり、円中の数字は割れ目発生時のステップ数を示す。マグマ溜りが円に近い場合は、地表から割れ目が入り出すが、アスペクト比が大き

い細長い円状のマグマ溜りでは、マグマ溜り頂部から上方へ扇型に破壊が進行している。

地表における上下変位（付・図-25）は、円形のマグマ溜り上では単純な隆起であるが、細長い円状マグマ溜り上では、中央部では激しい沈下となり、その外側で隆起する。大局的には三次元弾性解の結果と同様に、いわゆるキーストーン効果によるグラベン（地溝）状の沈降帯が形成され、その外側は広く隆起する。

アスペクト比のもっとも極端な場合として、マグマ溜りの幅 $a = 0$ の場合を、計算した。アスペクト比 $a / b = 1 / 10$ の場合と大局的には似ている。すなわち、アスペクト比 $1 / 10$ 程度以下になると、ほとんどアスペクト比の効果は地表変動には表れないことがわかる。このように細長い形状のマグマ溜りを岩脈モデルと呼ぶことにする。マグマ溜りの頂部までの深さ h を 100m 、 1000m 、 2000m 、 4000m として、地表の上下変動を調べると、変位のパターンは相似だがスケールが変わることがわかる（付・図-26）。沈降帯の幅は、地表からマグマ溜りまでの深さのおおよそ2倍程度となっている。

2次元モデルは、3次元的にはマグマ溜りが奥行き方向に無限に伸びている場合に相当するが、実際はマグマ溜りは有限である。そこで3次元解析を行って、3次元的なマグマ溜りの形状の効果を調べた。マグマ溜りの幅 $a = 0$ とした岩脈モデルで、マグマ溜り頂部までの深度 $h = 1000\text{m}$ とする。岩脈の奥行き方向（水平）の半長を 2000m とした場合の地表変位の概要を付・図-27に示した。すなわち、中心部の地表で隆起沈降量をもっとも大きく（マグマ圧 10MPa の時、最大沈降量 23cm 、最大隆起量 13cm ）、沈降帯の幅をもっとも狭い（約 1.5km ）。岩脈の貫入範囲より外側では、沈降量が小さくなると共に沈降幅は拡がり、しだいに沈降域が不明瞭になる。破壊の進展を調べると、上方および側方に破壊域が放射状に拡がり、マグマ溜りが拡大して行くことが判る（付・図-29）。

建設省国土地理院による伊豆大島における水準測量によれば、昭和57年の測量結果と比較して、噴火のあった昭和61年11～12月の測量結果は、島の北西から南東にかけて最大約 30cm 以上の沈下を示し、その両脇に当たる島の北東及び南西部では約 10cm 以上の隆起となった（付・図-29）。地溝状の沈降

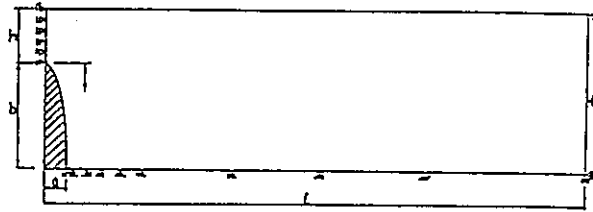
域の幅はおおよそ4～6 km程度であるから、本解析結果から、この地殻変動を生じたマグマ溜り本体の頂部は伊豆大島の南東部約2～3 kmの深度にあり、岩脈状に北西～南東方向に伸びていると推定される（付・図-30）。山科・多田らは弾性くいちがいモデルによるあてはめを行い、ほぼ同様な結論を得ている。RBSMと弾性くいちがいモデルがほぼ同様な結果を得たことから、地下の岩盤の性状が多少異なっても地表変位にはあまり影響していないと考えられる。マグマ圧は岩脈の長さによって変わるが、本解析結果からは少なくとも6 MPa以上は上昇したと考えられる。マグマ溜りの頂部の周囲に生じた割れ目を通して、マグマはさらに上昇し、北西部で噴火に至ったと考えられる。

④火山噴火予知への応用

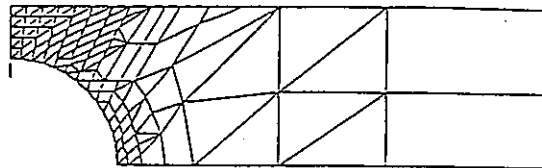
1986年11月の伊豆大島三原山の噴火は、正確な噴火の予知ができなかったとして、各方面に様々な波紋を投げた。その原因のひとつとして、特に、噴火直前には山頂部が隆起するという予想に反し、水準測量等のデータが山頂部の沈降を示していたため、噴火の切迫という判断に踏みきれなかったといわれている。

地下のマグマの圧力が増大したとき、マグマ溜りの形態によって、直上の地表部が隆起する場合と、逆に沈降する場合があることが明らかになった。広域的にはいずれの場合も隆起する。玄武岩質の粘性の低いマグマは、細い割れ目中に貫入しやすいので、岩脈型マグマ溜りを作り、マグマ貫入による沈降現象が生じやすい。1986年の大島の割れ目噴火は、その典型であると考えられる。

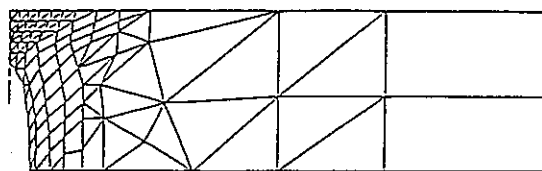
火山噴火予知のための地殻変動の観測は有効であるが、小数点の上下変動観測のみでは十分ではない。かなり広い範囲での面的な観測が必要であり、また水平歪や応力変化等の観測との併用も望まれる。地下の巨大な岩脈の貫入が噴火直前であったが、あるいはかなり前に貫入していたかというような問題も、長期継続的かつ面的な観測があってはじめて明らかになるだろう。



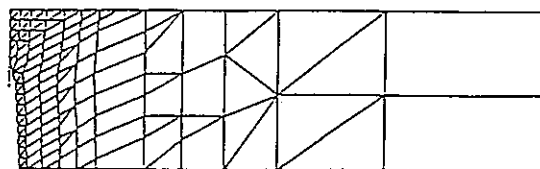
付・图-22 Model for calculation of magma intrusion⁽¹³⁾



(a)Aspect ratio $(b/a)=1$

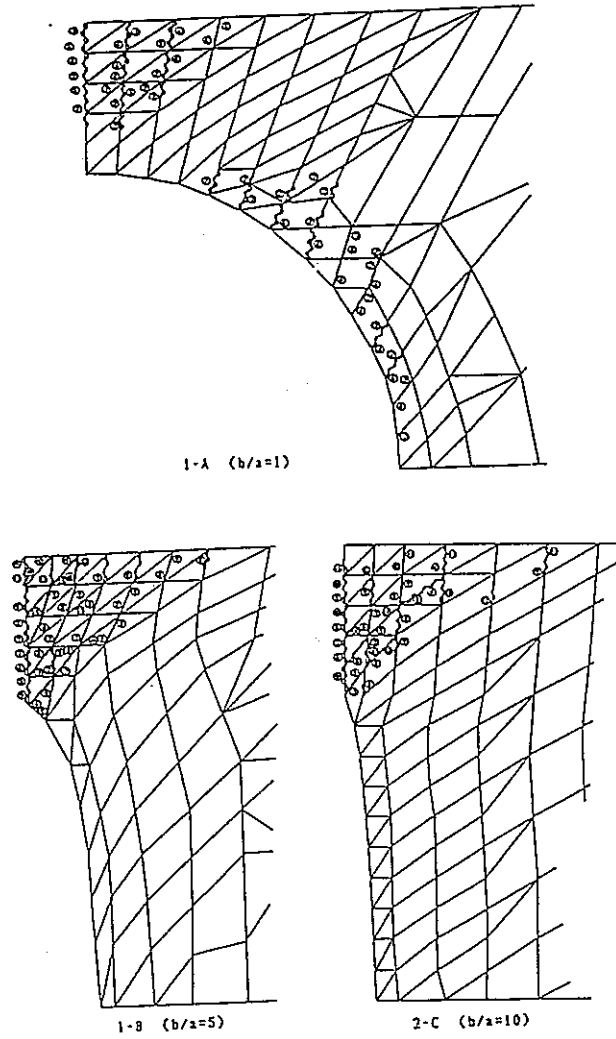


(b)Aspect ratio $(b/a)=5$

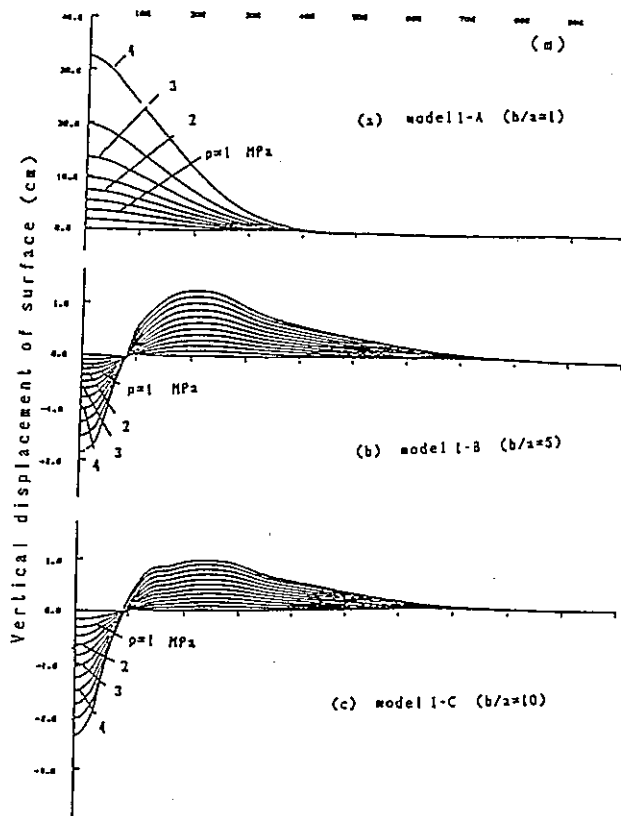


(c)Aspect ratio $(b/a)=10$

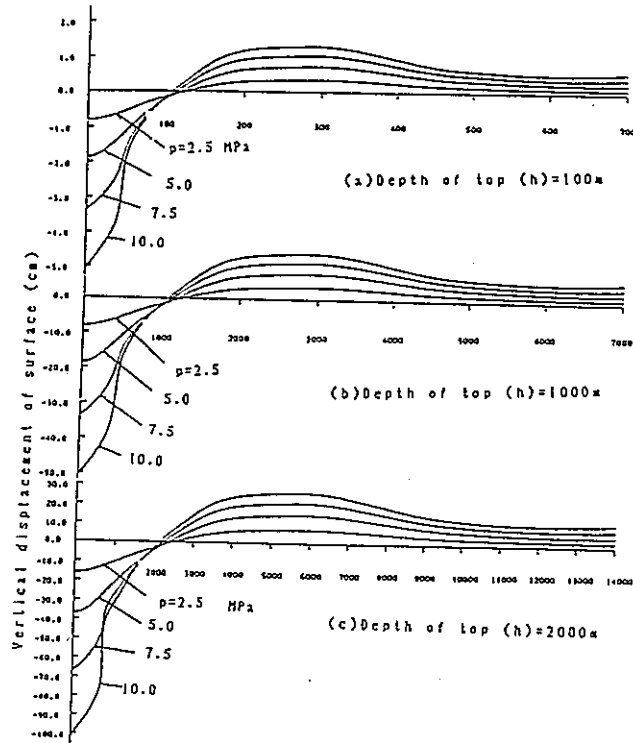
付・图-23 Element divisions for rigid-body-spring method(RBSM)⁽¹³⁾



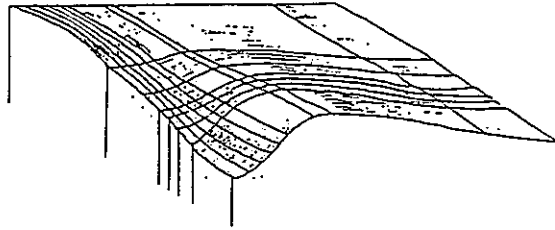
付・図-24 Extension of fractures($h=100m, b=200m$)
 around the magma intrusion.
 Waved lines indicate tensile fractures and
 thick lines denote shear fractures. The
 numbers in circles indicate steps when
 fractures are formed.
 (13)



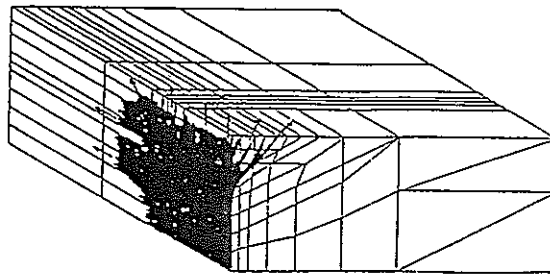
付・図-25 (13) Vertical displacement of surface over subsurface magma intrusion ($h=100\text{m}, b=200\text{m}$).



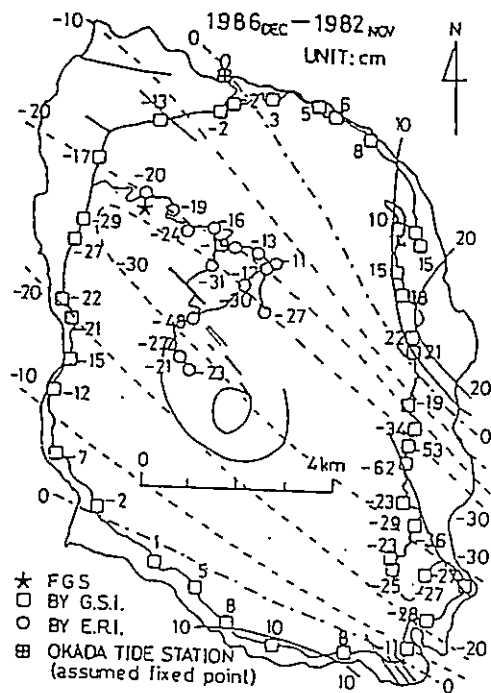
付・図-26 Vertical displacement of surface over a subsurface very thin dike-like magma intrusion ($a=0$).⁽¹³⁾



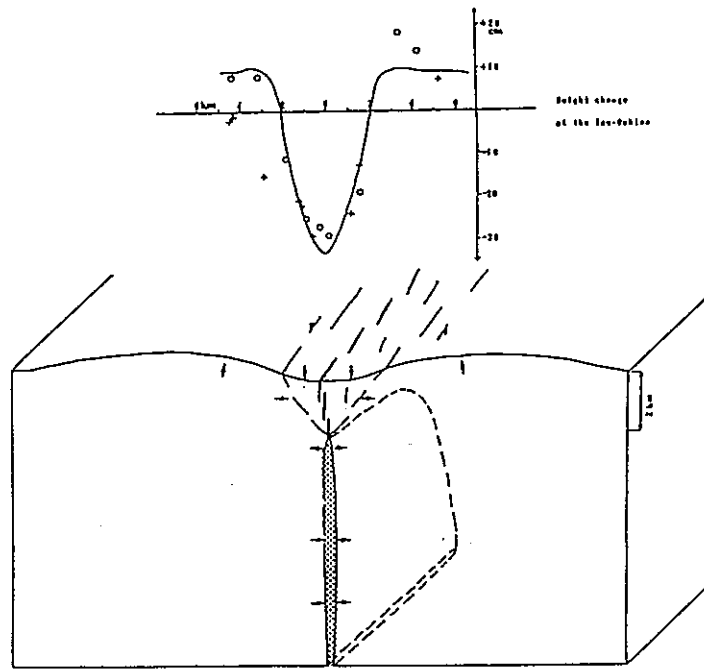
付・図-27 Sketch of vertical displacement of volcanic surface due to a subsurface dike-like intrusion calculated from the three dimensional RBSM model.⁽¹³⁾



付・図-28 Extension of fractures around a dike-like magma intrusion estimated from the three dimensional RBSM model.⁽¹³⁾



付・図-29 Vertical displacement of the Izu-Oshima volcano measured by leveling during the time interval including the volcanic eruption (after Tada and Hashimoto, 1987). (13)



付・図-30 Model of graben subsidence over a large dike-like magma intrusion in the Izu-Oshima volcano.

The upper diagram shows the vertical displacement measured in the Izu-Oshima volcano with the theoretical curve where the magma pressure is 6MPa. (13)

付録の参考文献

- (1) 加茂「桜島の火山活動」日本温泉気候物理医学会雑誌、Vol.51,N0.4, pp207-209(1988).
- (2) 小野「火山噴火の長期的予測」火山、Vol.34,N0.特別号、pp201-214(1990).
- (3) 小野「噴火史」火山、Vol.33,N0.2,pp145-148(1988).
- (4) 石川県白山自然保護センター「白山火山 白山の自然誌 12」白山の自然誌、N0.12(1992).
- (5) 渡辺「噴火の前兆現象と予知」火山、Vol.34,N0.特別号、pp215-226(1990).
- (6) 井田「火山噴火予知の物理学」日本物理学会誌、Vol.44,N0.11, pp809-815(1989).
- (7) 勝井「北海道における火山噴火と災害の予測」自然災害科学総合シンポジウム講演論文集、Vol.20th,pp104-107(1983).
- (8) 木村「1986年大島大噴火」全測連、Vol.19,N0.2,pp20-28(1987).
- (9) 青木「火山噴火の予知と誤診」全測連、Vol.19,N0.2,pp10-19(1987).
- (10) 山科「浅間山噴火の歴史と観測態勢、活動予測」全測連、Vol.23,N0.1, pp15-21(1991).
- (11) 小林「中部日本の休火山に関する活動予知のための基礎的研究」昭和57年度科学研究費補助金自然災害特別研究(1)報告書 課題番号 57020017(1983).
- (12) 仙台管区気象台「蔵王山・秋田駒ヶ岳 東北地域火山移動観測実施報告 (平成2年7月～11月実施) 第10号」、平成3年3月(1991).
- (13) 小出 et al.「マグマ貫入による地殻変動の解析とその噴火予知への応用」岩の力学国内シンポジウム講演論文集、Vol.7th,pp479-484(1987).