PNC ZJ1222 96-004

限定資料

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(Ⅳ)

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
Z	J1222 96-004	1996.6.7
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		

(動力炉・核燃料開発事業団　研究委託内容報告書)

1996年3月

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、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

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い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

技術協力部　技術管理室

限　定　資　料
PNC ZJ1222 96-004
１　９　９　６　年　３　月

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（Ⅳ）

大久保博生*

要　　旨

本年度は、まず、稀頻度事象の核種移行への影響解析フレームの全体像を明らかにするため、一例として、火成活動シナリオに対する計算ケースの想定並びに試解析を実施した。また、地震・断層シナリオ及び隆起・侵食シナリオに対するインフルエンス・ダイヤグラム上の境界条件への反映プロセスの検討を行った。

次に、地下水シナリオに対する稀頻度事象の影響の重要度評価を行うため、専門家の知見を反映するための一般的な評価項目の検討、及び火成活動シナリオに対する具体的な専門家判断の必要項目を例示した。

最後に、既存のデータベースシステムとの結合性を考慮したシナリオ自動展開ツールのビジュアル化機能の追加、さらに、リスク評価やＦＥＰの階層的情報活用への本ツールの適用性について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内容結果である。

契約番号：０７０Ｄ０２６５

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
竹安　正則　殿

＊地球環境研究センター エネルギー・資源研究部

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC ZJ1222 96-004
March, 1996

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

Hiroo Ohkubo*

Abstract

This yeat, in the first step, in order to clear an overall frame for the consequence analysis of events with an extremely low frequency of occurrence in the groundwater scenario, an illustrated example of assuming calculational cases and the analysis have been demonstrated for the volcanism scenario, while the fault-activation scenario, and uplift and erosion scenario were discussed how to reflect them on the boundary conditions in the influence diagram.

Secondly, for the purpose of evaluating the significance of influence of external events in the groundwater scenario, which items should be prepared for reflecting expert opinions on the scenario analysis was discussed, generally, and then listing up the requisite items of expert judgement for the volcanism scenario.

Finally, considering the connection with the existing data base system, a function of visualization was added to the scenario-generator system developed last year, and the applicability of this tool to risk assessment and handling the hierarchical information system was also discussed.

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

Contract No.:070D0265

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

Masanori Takeyasu, Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works

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

目　次

頁

まえがき ………………………………………… 1

1．稀頻度事象とファーフィールドのＦＥＰ'ｓをつなぐ境界条件となるパラメータの変化に着目した地下水シナリオに対する稀頻度事象の影響の整理 ……… 3
1.1 火成活動シナリオに対する計算ケースの具体化 ………… 6
1.1.1 火成活動（A.2.3）を起点とするＦＥＰ連鎖の作成 ………… 7
1.1.2 ＦＥＰ連鎖を取り扱う定量的概念の検討 ………… 14
1.1.3 試解析 ………… 27
1.2 地震・活断層シナリオ ………… 62
1.2.1 序論 ………… 62
1.2.2 断層運動と関連地震活動の理論 ………… 65
1.2.3 活断層、休止断層、消滅断層 ………… 72
1.2.4 断層運動が地下水に与える影響 ………… 86
1.2.5 断層封じ込め ………… 94
1.2.6 断層運動と廃棄物処分場の立地場所との関係 ………… 96
1.3 隆起・侵食シナリオ ………… 102
1.3.1 序論 ………… 103
1.3.2 隆起・侵食の概観 ………… 103
1.3.3 沈降・堆積の概観 ………… 105
1.3.4 隆起・侵食の影響 ………… 105
1.3.5 日本列島の隆起・侵食 ………… 109
2．専門家の主観的な判断を用いて稀頻度事象の影響を定量化するための評価項目の抽出 ………… 110
2.1 一般的な評価項目の検討 ………… 111
2.2 具体的な評価項目の検討・設定 ………… 115
2.2.1 シナリオ解析アプローチ法に関する整理 ………… 115
2.2.2 火成活動シナリオ試解析用データ設定のモデル的反映に関する概略的検討 ………… 118

３．地下水シナリオ解析システムの検討 ---------------------------------- １２６
3.1　地下水シナリオ自動展開ツールのビジュアル化 ------------------ １２８
3.1.1　地下水シナリオ自動展開ツールの改良 ---------------------- １２８
3.1.2　ビジュアル化ツールの概要 ---------------------------------- １２９
3.2　本ツールのリスク評価への活用及びＦＥＰの階層的情報 -------- １３６
の明示への活用の検討
3.2.1　シナリオのリスク評価への活用の概略的検討 ---------------- １３６
3.2.2　ＦＥＰの階層的情報の明示への活用に関する概略的検討 --- １３７
3.3　既存データベースシステムとの結合性の検討 ------------------- １４２
3.3.1　ＧＵＩ及びコンピュータの動向 ------------------------------ １４２
3.3.2　ＨＬＷシナリオ解析支援システムの構築 -------------------- １４４

あとがき -- １５１

参考文献 -- １５３

付録 -- １６３
Ａ．地震、活断層、隆起、侵食を中心とする解析・評価事例 ----------- １６５
Ｂ．ｔ→∞近傍（平衡状態）における微分差分方程式体系の ----------- １８７
Laplace逆変換
Ｃ．改良後のシナリオ自動展開ツールによるＦＥＰ連鎖出力例 -------- １８９
Ｄ．計算コード“MENTOR”の概要 ------------------------------------- ２００
Ｅ．放物型偏微分方程式の解について -------------------------------- ２１８

表　目　次

頁

表１　火成活動による境界条件変化の影響リスト ……… 8
表２(1)　地上への噴出によって生じ得る間接的な影響 ……… １３
表２(2)　表層地下への貫入によって生じ得る間接的な影響 ……… １４
表３　ファーフィールドにおけるＰＳＭでのインフルエンス ……… １５
のＨ３レポート基本モデル解析フレームでの取り扱い可能性
表４　火成活動シナリオ試解析用ケース例 ……… ３０
表５(1)　計算ケース設定に用いた火成活動シナリオ関連事象 ……… ３０
の複合的影響
表５(2)　火成活動シナリオ試算例での設定データフレーム ……… ３１
表６(1)　ＦＰ、放射化生成物のインベントリ及び半減期 ……… ４３
表６(2)　アクチニドのインベントリ及び半減期 ……… ４４
表７(1)　Ｋ－Ｉ及び基本ケースで設定された人工バリアシステム ……… ４５
に関するパラメータ値
表７(2)　Ｋ－Ｉ及び基本ケースで設定された亀裂媒体 ……… ４６
に関するパラメータ値
表７(3)　Ｋ－Ｉ及び基本ケースで設定された放射性元素の溶解度 ……… ４７
並びに吸着データ値
表８(1)　基本ケース及び各計算ケースでの ……… ４８
人工バリアシステム関連パラメータ値
表８(2)　地下水組成（タイプ(ａ)及びタイプ(ｂ)） ……… ４９
表８(3)　基本ケース及び各計算ケースでの放射性元素の ……… ４９
溶解度制限値
表９　基本ケース及び各計算ケースでの地質圏関連パラメータ値 ……… ５２
表10　長期走向速度に基づく断層活動の程度の分類 ……… ７６
（RGAF, 1992より）
表11　日本の活断層地域の特徴（RGAF, 1992より） ……… ８４
表12(1)　隆起・侵食によって生じ得る処分場性能の潜在的な変化 ……… １０７
表12(2)　隆起・侵食によって生じ得る処分場性能の潜在的な変化 ……… １０８
表13　ＦＥＰ連鎖（Ａ→Ｂ）の関係定義例[8] ……… １１１
表14　シナリオ自動展開ツール改良化のための検討課題の整理 ……… １２７
付・表-1　Pulse propagation analytic solution ……… １８０
付・表-2　Summary of Selected Models for Evaluating ……… １８６
Erosion of Uranium Tailings Impoundment

図　目　次

頁

図１　火成活動シナリオの影響に関するイベント・ツリー ……… 4

図２　Creation of an External Process System Model ……… 5
Description of Vulcanism EFEP for Repository
Process System Model(PSM).

図３　ＰＳＭを用いたシナリオ解析のステップ ……… 7

図４(1)　火成活動のファーフィールドへの影響を表すインフルエンス・ダイヤグラム ……… １０

図４(2)　ファーフィールドの簡易化されたプロセス・システム・モデルにおけるインフルエンス・ダイヤグラム ……… １１

図４(3)　火成活動のニアフィールドへの影響を表すインフルエンス・ダイヤグラム ……… １２

図５　火成活動ＥＦＥＰに対するインフルエンス・ダイヤグラム ……… １３

図６(1)　火成活動を起点とするパラメータ連鎖概念図 ……… １７

図６(2)　地下水移行シナリオに対する変動解析モデル体系* ……… ２３
－全体像－

図６(3)　地下水移行シナリオに対する変動解析モデル体系 ……… ２４
－各サブモデル例－

図７　影響解析の考え方 ……… ２８

図８(1)　Ｋ－Ｉ－人工バリアシステムから生物圏への直接放出 ……… ５３
[Nagra, 1994より]

図８(2)　Ｋ－Ｉ基本ケースの入力データを用いてMENTORコードで計算した主要放射性核種の線量率 ……… ５４

図８(3)　計算ケースＡに対してMENTORコードで計算した主要放射性核種の線量率 ……… ５４

図８(4)　計算ケースＢに対してMENTORコードで計算した主要放射性核種の線量率 ……… ５５

図８(5)　計算ケースＣに対してMENTORコードで計算した主要放射性核種の線量率 ……… ５５

図８(6)　計算ケースＤ１に対してMENTORコードで計算した　------------　５６
主要放射性核種の線量率
図８(7)　計算ケースＤ２に対してMENTORコードで計算した　------------　５６
主要放射性核種の線量率
図９(1)　計算ケースＡとＫ－Ｉ基本ケースの　-------------------------　５９
全線量率曲線の比較
図９(2)　計算ケースＢとＫ－Ｉ基本ケースの　-------------------------　５９
全線量率曲線の比較
図９(3)　計算ケースＣとＫ－Ｉ基本ケースの　-------------------------　６０
全線量率曲線の比較
図９(4)　計算ケースＤ１とＫ－Ｉ基本ケースの　-----------------------　６０
全線量率曲線の比較
図９(5)　計算ケースＤ２とＫ－Ｉ基本ケースの　-----------------------　６１
全線量率曲線の比較
図９(6)　全計算ケース及びＫ－Ｉ基本ケースの　-----------------------　６１
全線量率曲線の比較
図10(1)　断層活動ＥＦＥＰに対するインフルエンス・ダイヤグラム　---　６３
図10(2)　化学、熱学、力学、水理学の各境界条件への影響を　----------　６４
反映した地震・活断層に関連する様々なプロセス間の関係
図11　背景に地震活動が存在する場合に設定し得る地震動学的体系　------　６８
図12　地殻の断層帯に生じ得る(亜)地震性のすべりに対する　------------　７０
剪断応力τ及び変位(υ)の一時的変化（after Sibson, 1986)
図13　ＲＧＡＦ採用の手順（RGAF, 1992 参照）　------------------------　７５
図14　活断層データに基づく日本の地震地帯　----------------------------　７９
図15　活断層データと地震活動史より推定された日本の　-----------------　８２
地震リスク分布図の例
図16　日本の陸地での活断層から生ずる水平方向の　---------------------　８３
最大圧縮応力（σ_{Hmax}）の方向（RGAF, 1992より）
図17　地震性揚水プロセスの概略図（Scholz et al. (1973)を修正）　---　８７
図18　走向移動断層周囲のダイラタンシー帯の崩壊に続く流体の　--------　８８
散逸（Sibson et al., 1975より）

図19　引っ張り及び圧縮の地質構造的環境下における歪の相互振動 ······ 9 0
　　　による蓄積及び放出を表す簡単なモデル
図20　ベブゲン・レイク、ボラー・ピーク及びイルピニアの地震時 ······ 9 2
　　　における流出流量の観測値（実線）と予測値（点線）
図21　油層に応用された断層封鎖制御法の要旨 ······ 9 5
　　　（Knipe, 1992より）
図22　Sellafieldにおける様々な地質水理学的ユニット領域内の ······ 9 9
　　　地下水流経路のカテゴリーの概念図（Nirex, 1995より）
図23　NAPSAC計算、Fleming Hall及びSeascale断層帯を含む ······ 1 0 0
　　　モデル化された領域の幾何形状（Nirex, 1995より）
図24　タイプⅡの特徴をもつ相互的構造の概念図 ······ 1 0 1
　　　（Nirex, 1995より）
図25　隆起・侵食ＥＦＥＰに関するインフルエンス・ダイヤグラム ······ 1 0 2
図26　ＨＬＷ処分場における潜在的隆起（実線）及び侵食（点線） ······ 1 0 4
　　　の軌跡
図27　隆起・侵食によって生じ得るＨＬＷ処分場への影響の断面図 ······ 1 0 6
図28　ＦＥＰ連鎖の重要度評価のための評価項目の階層化 ······ 1 1 4
図29　シナリオ解析フローにおけるトータル・インフルエンス・ ······ 1 1 6
　　　ダイヤグラムの位置付け
図30　稀頻度事象起点シナリオのモデル解析フレーム概念 ······ 1 2 4
図31　ファーフィールド／ニアフィールド概念とＥＦＥＰ ······ 1 2 5
　　　影響領域／非影響領域概念
図32　地下水シナリオ自動展開ツールのファイル関係 ······ 1 2 8
図33　ＦＥＰ連鎖のリスク値を重要度情報として取り扱う概念 ······ 1 3 7
図34　ＦＥＰの階層的情報表示の基本概念 ······ 1 3 8
図35　ビジュアル化ツール(2)の画面表示 ······ 1 4 0
図36　スーパーＦＥＰ間の関連情報表示用ウィンドウ ······ 1 4 0
図37　パラメータ表示用ウィンドウ ······ 1 4 1
図38　大規模データベースシステムの構造図 ······ 1 4 5
図39　大規模データベースシステムのメニュー構造図 ······ 1 4 6
図40　前提条件として想定した既存データベースのシステム構成 ······ 1 4 7
図41　既存データベースとの結合性を考慮した ······ 1 4 9
　　　地下水シナリオ自動展開ツール及びビジュアル化ツール

付・図-1 Pulse propagation along a fast flow path ------------------ 179
付・図-2 Horizontal grid for the site-scale model ------------------ 181
付・図-3 Alternative conceptualization of the fault ---------------- 182
付・図-4 Schematic logic tree for expert elicitations and -------- 183
aggregated fault rupture hazard model
付・図-5 Water-table response for isotropic permeability -------- 184
and for local vertical permeability enhancement(10 to 10^3)
within 100-m-wide anisotropic region centered on normal
fault simulating zone of vertical fracturing
付・図-6(1) Conceptual dual-permeability fracture network -------- 184
付・図-6(2) Dual-permeability fracture network model ------------- 185
used in laboratory experiments
付・図-6(3) Steady-state pressure distribution in the ------------- 185
dual-permeability laboratory model calculated using
the FRACSL code
付・図-6(4) Positions of tracer particles, injected as a -------- 186
five-minute pulse, after 60 minutes of flow in the
dual-permeability models
付・図-7 MENTORの成要素 -------------------------------- 201
付・図-8 K－Iモデルの人工バリアシステム [Nagra, 1994より] ---- 207
付・図-9(1) 放射性核種^{107}Pd, ^{135}Cs, ^{126}Snの放出率 -------------- 212
(上：K－I [p.198, Nagra, 1994より]、下：MENTOR)
付・図-9(2) 放射性核種^{59}Ni, ^{93}Zr, ^{79}Se, ^{99}Teの放出率 -------- 213
(上：K－I [p.198, Nagra, 1994より]、下：MENTOR)
付・図-10 アクチニド崩壊連鎖4N＋1系列の放射性核種の放出率 ---- 214
(上：K－I [p.199, Nagra, 1994より]、下：MENTOR)
付・図-11 アクチニド崩壊連鎖4N＋2系列の放射性核種の放出率 ---- 215
(上：K－I [p.199, Nagra, 1994より]、下：MENTOR)
付・図-12 アクチニド崩壊連鎖4N＋3系列の放射性核種の放出率 ---- 216
(上：K－I [p.200, Nagra, 1994より]、下：MENTOR)
付・図-13 アクチニド崩壊連鎖4N系列の放射性核種の放出率 --------- 217
(上：K－I [p.200, Nagra, 1994より]、下：MENTOR)

まえがき

火成活動、地震活動、断層活動等の稀頻度事象は、高レベル放射性廃棄物の地層処分の解析・評価において考慮される地下水シナリオ、すなわち人工バリア、天然バリアを通じて地下水により核種が生物圏に放出されると考えるシナリオに多様性かつ不確実性を与える。そのため、これらの影響を評価することは、地下水シナリオの評価上重要である。

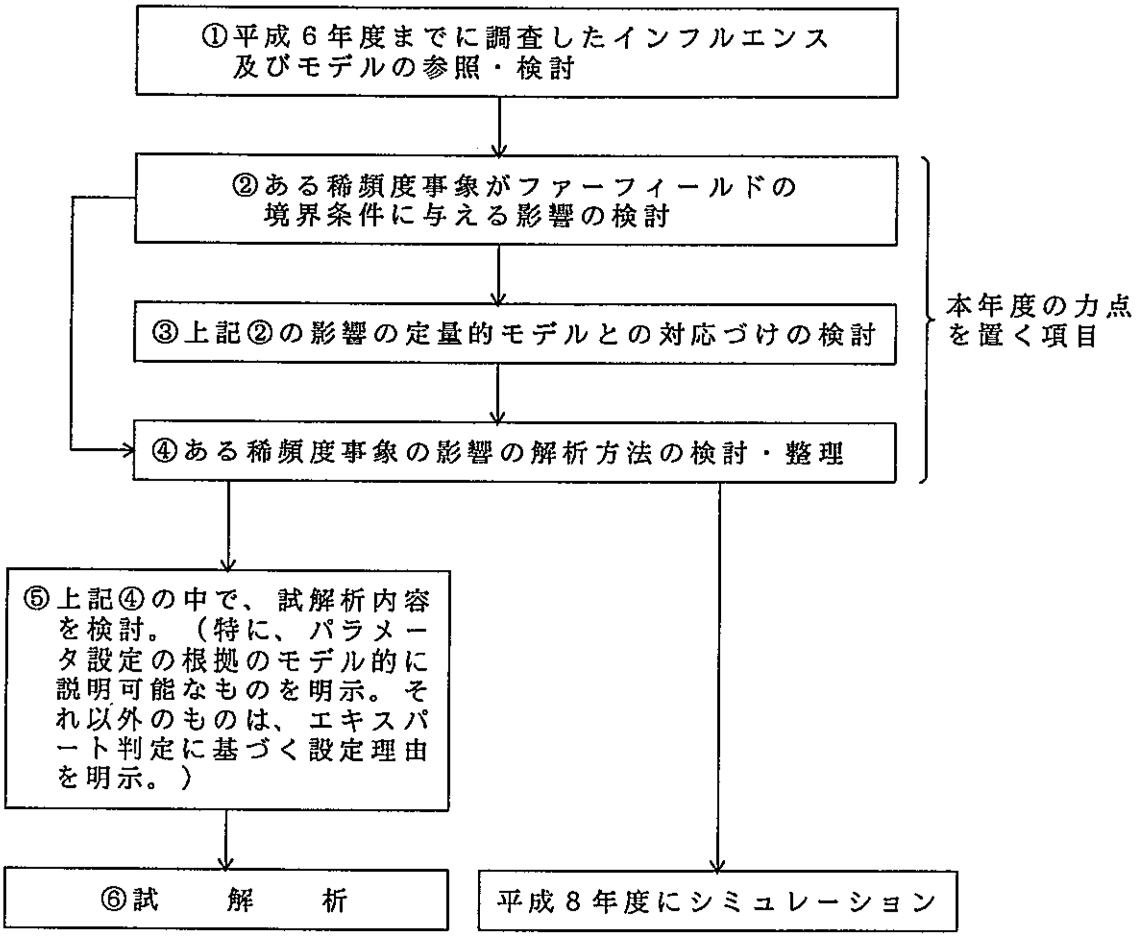
この地下水シナリオに対する稀頻度事象の影響を評価するために、本研究では、これまでに、稀頻度事象を考慮にいれた地下水シナリオの相関関係図（インフルエンスダイヤグラム）の作成、及びそれらの相関関係とモデルあるいはパラメータの対応の検討を行った。また、地下水シナリオに対する稀頻度事象の影響を定量化することを目的として、専門家の主観的な判断を取り入れ、それを定量化するための手法の検討を行った。さらに、FEP's［特徴（Features）、影響を及ぼす過程（Processes）、事象（Events）］の相関関係に基づいて構築されるシナリオの作成を支援するためのシステム（シナリオ作成支援システム）の検討を行った。これらの知見に基づき、稀頻度事象を考慮したシナリオを具体的に検討・作成していくためには、稀頻度事象とファーフィールドのFEP'sをつなぐ境界条件（水理、機械、熱、化学に関係するパラメータ）に着目し、地下水シナリオに対する個々の稀頻度事象の影響を境界条件の変化として整理することが必要である。また地下水シナリオに対する稀頻度事象の影響を専門家の主観的な判断を用いて定量化することも必要となる。さらに、シナリオ作成支援システムの一部として昨年度試作したシナリオ自動展開ツールの機能追加、FEP'sに関するデータベースシステムとの連結などにより、一連のシナリオ解析をより効率的に行えるシステムを構築することが課題として挙げられる。

本年度は、稀頻度事象の発生により変化するファーフィールドのFEP'sとの境界条件（水理、機械、熱、化学に関係するパラメータ）に着目し、地下水シナリオに対する稀頻度事象の影響を整理する。また、稀頻度事象の影響に対して専門家の主観的な判断を求める場合に対象となる評価項目の抽出を行う。この際、専門家の主観的な判断を定量化するため、これまでに検討したＡＨＰ法を用いること

を念頭に置く。また、これまで検討してきたシナリオ作成支援システムの高度化を含めたシナリオ解析システムの整備・構築のための検討を行う。

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

なお、稀頻度事象の影響を評価するための解析フレーム全体像とその中での本年度作業の位置付けの概略を下記に示した。



1．稀頻度事象とファーフィールドのＦＥＰ’ｓをつなぐ境界条件となるパラメータの変化に着目した地下水シナリオに対する稀頻度事象の影響の整理

動燃殿が提示している102のＦＥＰのうち、特に、稀頻度事象として主要と考えられる７つのＦＥＰ（火成活動、地震活動、断層活動、隆起、侵食、気候変動、その他（人間活動etc.））を起点とする地下水シナリオへの反映過程のうち、本年度は前年度までの検討結果(3)(4)及び各種文献情報（(5)(6)(13)の文献情報及び付録Ａなど）をもとに、以下に示す内容を具体的に実施する。

(1) 火成活動シナリオに対する計算ケースの具体化

①力学的、化学的、熱的、水理学的な境界条件への影響を例えばイベント・ツリー形式のようなシステマティックな表現方法で記述（例えば図１，付・図-4参照）

②計算ケースの設定に関する検討

a)影響の詳細説明

b)影響の模式図的記述（図２参照）

c)影響評価のための解析フレームの作成（評価の範囲及びレベルを明示する）

③試解析

上記解析フレームに基づく影響評価の試行

(2) 地震・活断層シナリオ

火成活動シナリオに対して既に作成しているPSM(5)(6)に、地震・活断層によって引き起こされる各境界条件変化（EPSM）を考慮することによって、FEPやインフルエンスへの影響を検討

(3) 隆起・侵食シナリオ

上記(2)項と同じ項目。

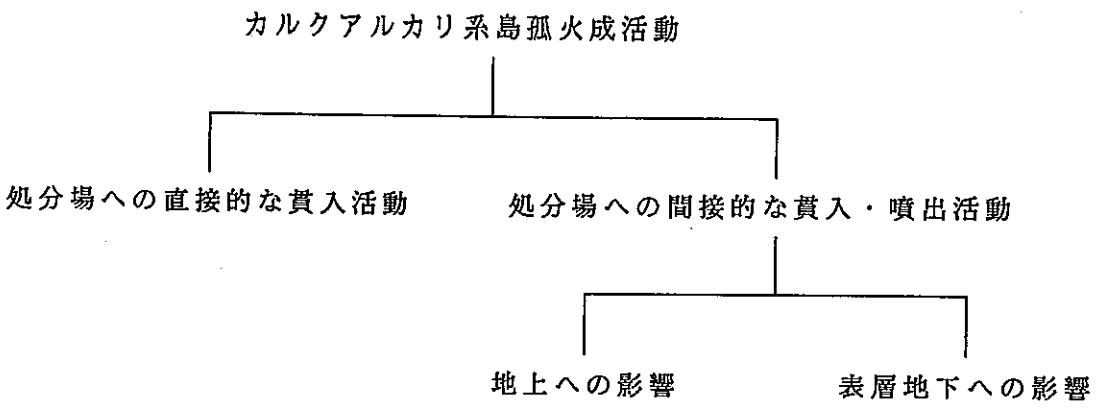


図1　火成活動シナリオの影響に関するイベント・ツリー

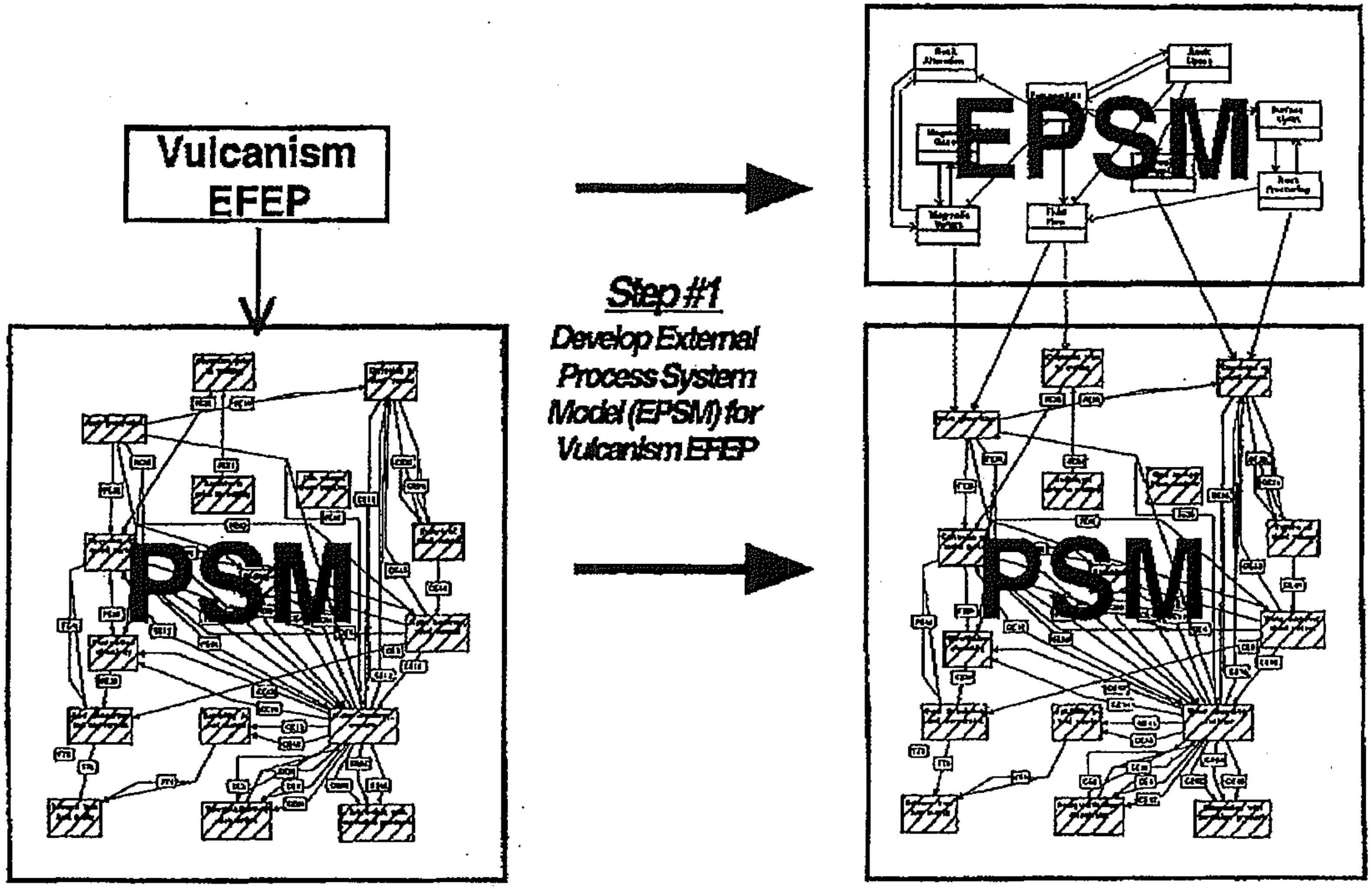


図 2 Creation of an External Process System Model Description of Vulcanism EFEP for Repository Process System Model(PSM).

1.1　火成活動シナリオに対する計算ケースの具体化

前年度までに実施している火成活動シナリオ解析のための予備的検討内容(2)(3)や図３をもとに、対応する計算を試行するに至るまでの全体的なプロセスを示すと以下のようになると考えられる。

①火成活動（A.2.3）を起点とするＦＥＰ連鎖の作成

これには、ＦＥＰ相関行列やEPSMの概念(13)（図２参照）をもとに、ＦＥＰ連鎖を生成するシナリオ自動展開ツールの活用が考えられる。

②①で作成されたＦＥＰ連鎖内容の設定とそれを数量的に表現し得る計算モデル（その概念とそれに対応した変数、定数、パラメータ、初期及び境界条件（場の設定）等）の列挙

この段階では、ＦＥＰ相関関係に関して記述されたＦＥＰメモコメント表の内容に則し、現状で可能な限り詳細化可能なものが一般には定量的な検討の対象となり得る。それ以外のものについては、一般的な概念あるいは専門家の判断等に基づく定性的な検討を行う。

③プロセスシステムモデル（PSM）への反映プロセスの検討

1)モデル構造の検討

②で検討された各ＦＥＰ連鎖別の各種定量的概念を、プロセスシステムモデル（PSM）に反映可能な力学、化学、熱学、水理学、その他といった４ないし５つの主要解析モデル体系に分類・対応づける。

2)1)で検討・設定したモデル構造も考慮した必要データの種類及び値の設定と加工等の検討

④試解析

①③で検討・設定された計算モデル（あるいは概念）及びデータに対し、比較的解析容易な変動ケースの影響をシナリオ内容との対比で説明できるような計算結果を試行的に示す。

なお、計算結果の幅の解釈を行う上では、計算モデルと等価なより簡易化されたシステムを用いて特殊なケース（例えば、線形システムで表現可能なモデルを選び、ある着目状態量の最大値近傍、もしくは $t\to\infty$ 近傍での解挙動（技術的には付録Ｂに示すような取り扱いが可能なもの））を対象とする

感度解析的なアプローチをとることも一般には考えられよう。

<u>ステップ１</u>
重要度付きＦＥＰ間インフルエンスダイヤグラム（ＰＳＭ）の作成

↓

<u>ステップ２</u>
ＰＳＭに基づく影響評価計算に必要な定量的概念や数学モデルの記述

↓

<u>ステップ３</u>
シナリオの初期事象（ＥＦＥＰ）内容の記述

↓

<u>ステップ４</u>
各シナリオの計算ケース用データセットの準備

↓

<u>ステップ５</u>
処分場性能及び安全性影響シナリオに対する計算ケースの実行

図３　ＰＳＭを用いたシナリオ解析のステップ

出典：(13)

1.1.1　火成活動（A.2.3）を起点とするＦＥＰ連鎖の作成

前記①項に対応し、ここでは、EPSM概念モデル（図２参照）の検討結果を反映することが考えられる。即ち、前年度までのＰＳＭでは、境界条件変動に至るまでのプロセスを具体的に記述していなかったが、EPSMは、表１[3]に示す内容に則し、火成活動のファーフィールドＰＳＭ上の境界条件変化Ｂ１～Ｂ７（図４(1)参照）への反映過程をより具体的に示すものである。この情報をもとにして、前年度から開発中のシナリオ自動展開ツールの改良バージョンを用い、前記④項の試解析用のＦＥＰ連鎖を作成することが考えられる。例として、火成活動を起点とし、熱的現象（C.1）に至るパスをリスト出力したものを付録Ｃに示す。

そこで、図４(1)での境界条件変化のうち処分場システムと直接関連しているもののみ取り出して書き直したインフルエンス・ダイヤグラムを図４(2)に示す。特

に火成活動を起点とするEPSMを図5に、また、図1のイベント・ツリーにおける火成活動の間接的な影響内容を具体的に記述したものを表2に示す。

表1　火成活動による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10^3～10^4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、活動の起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) 力学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。10^4～10^5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。

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。

表１　火成活動による境界条件変化の影響リスト（続き）

(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10^3～10^4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ィールド岩石への温度の影響を表す。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ィールド内に、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、文献(3)の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。

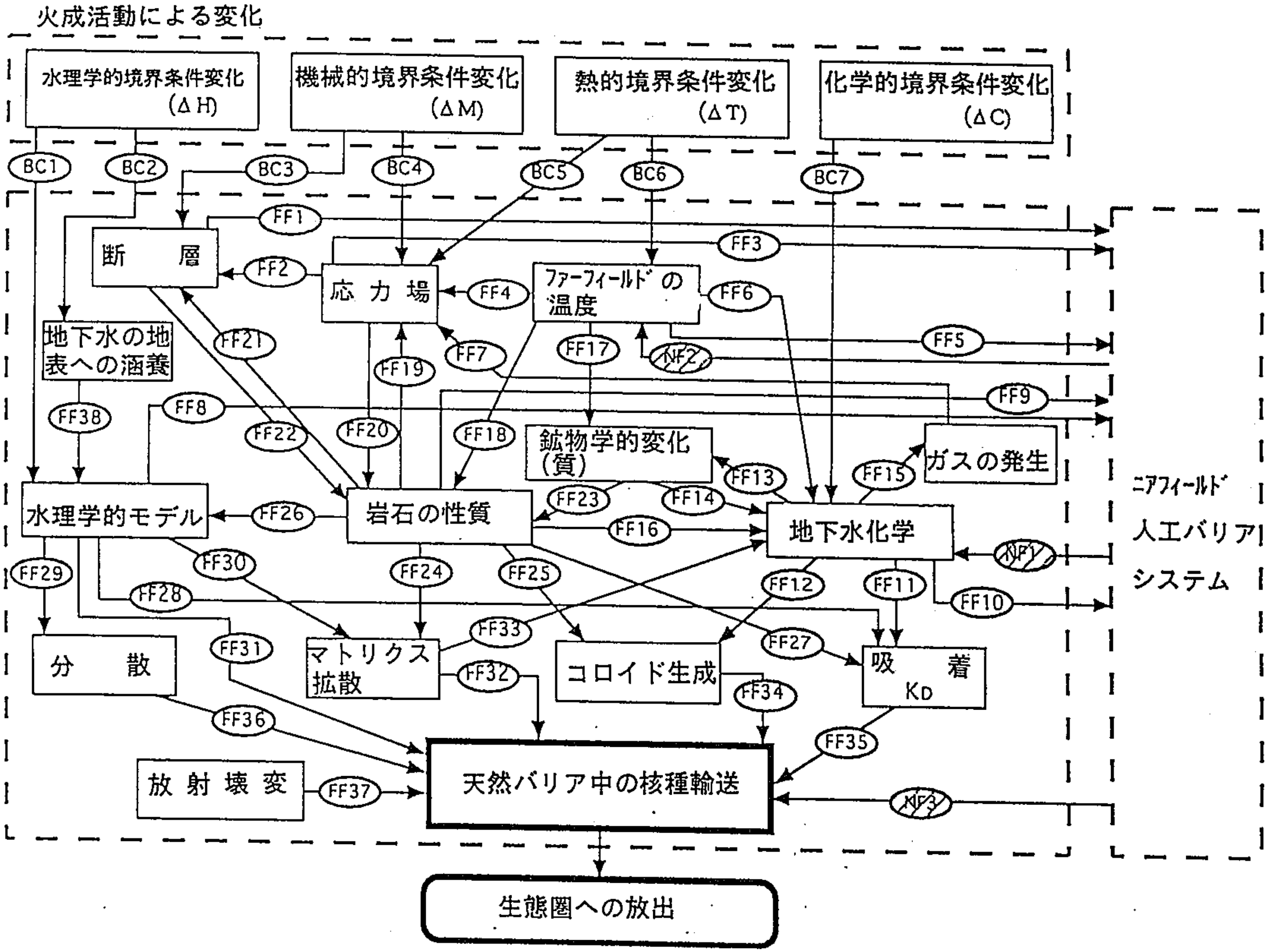


図４(1)　火成活動のファーフィールドへの影響を表すインフルエンス・ダイヤグラム

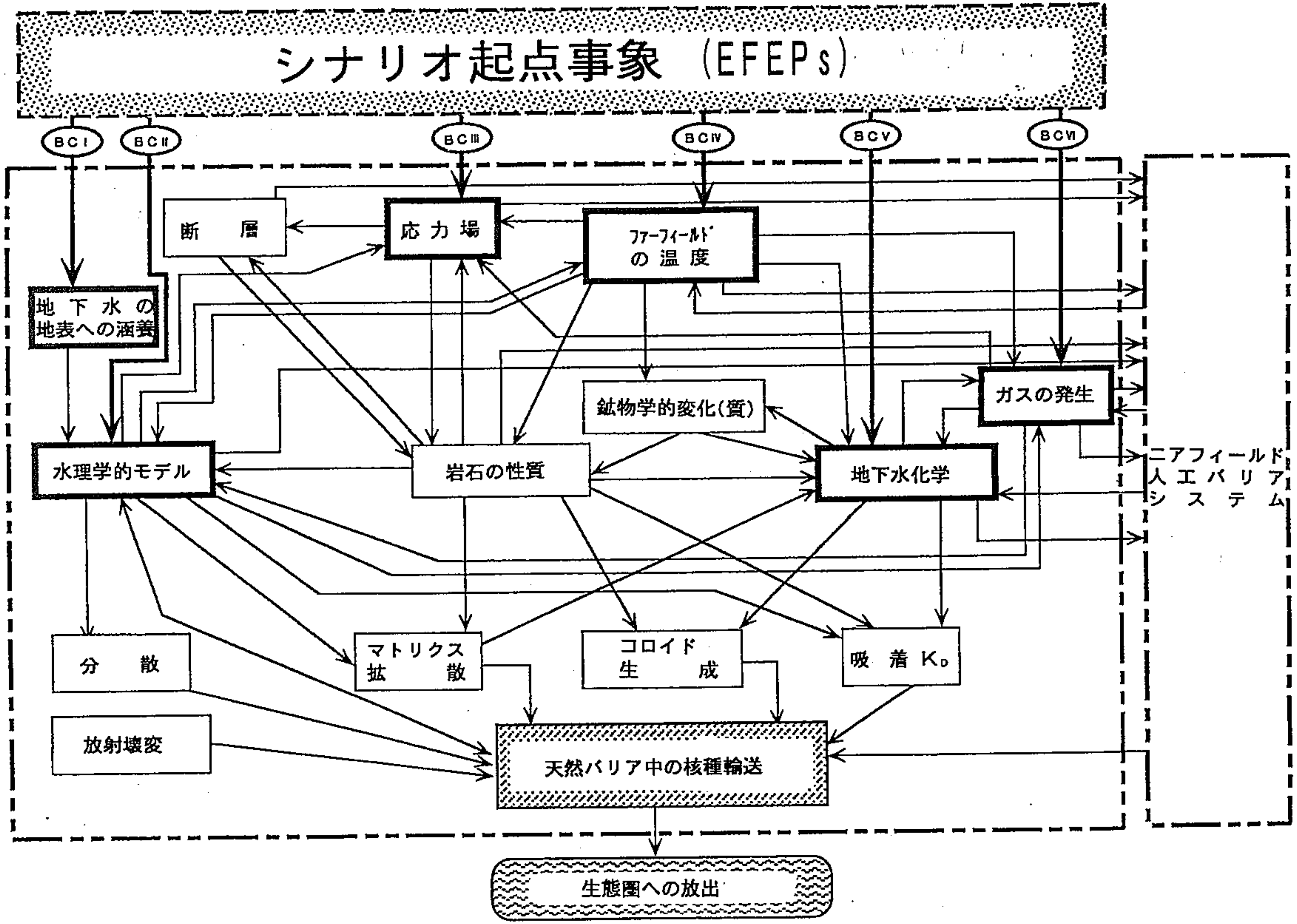


図４(2)　ファーフィールドの簡易化されたプロセス・システム・モデルにおけるインフルエンス・ダイヤグラム

注）図４(1)のＢＣ１～ＢＣ７との対応は以下の通り。

ＢＣⅠ↔ＢＣ２，ＢＣⅡ↔ＢＣ１，ＢＣⅢ↔ＢＣ４，ＢＣⅣ↔ＢＣ６，ＢＣⅤ↔ＢＣ７，ＢＣⅥ↔なし

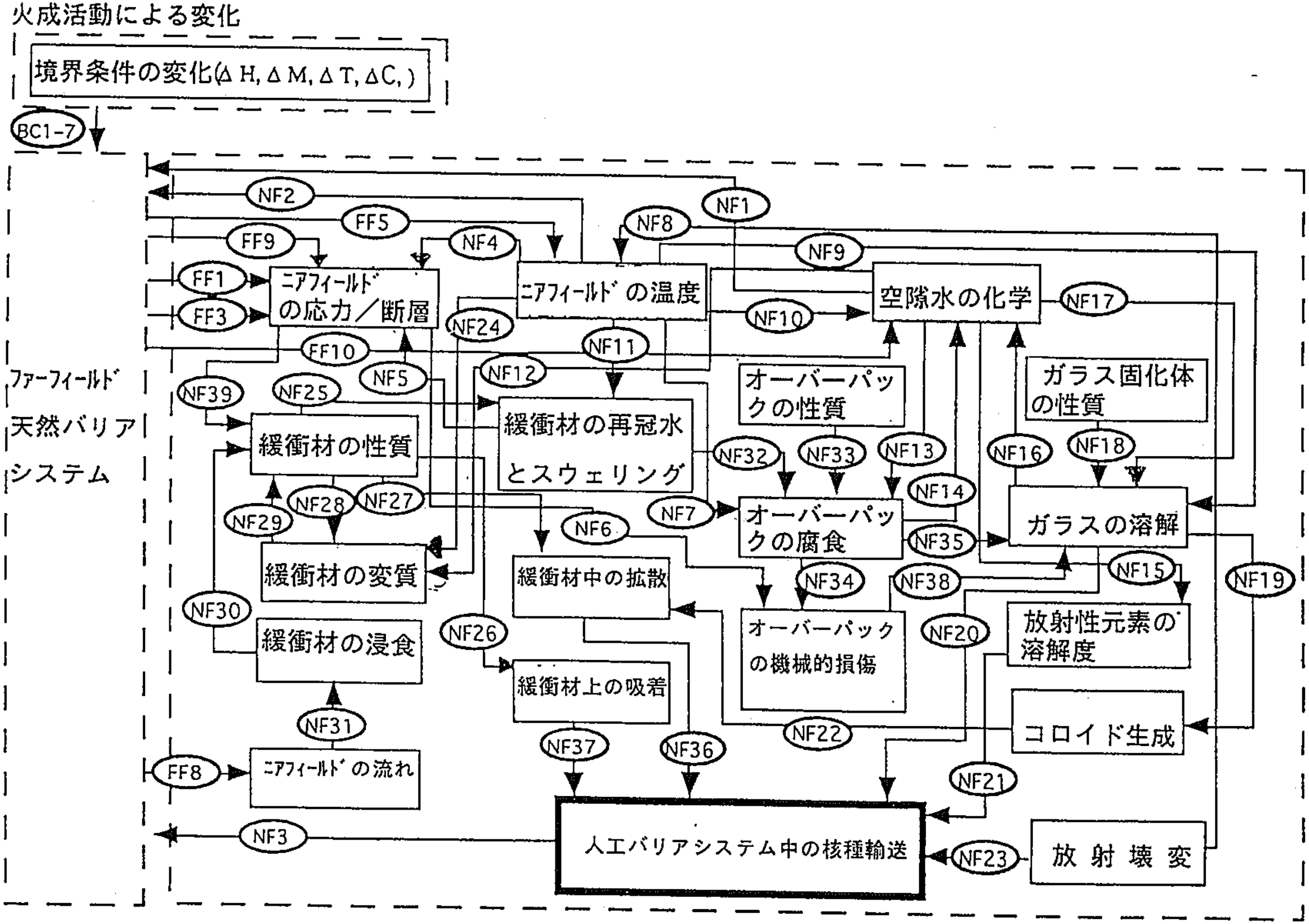


図 4 (3)　火成活動のニアフィールドへの影響を表すインフルエンス・ダイヤグラム

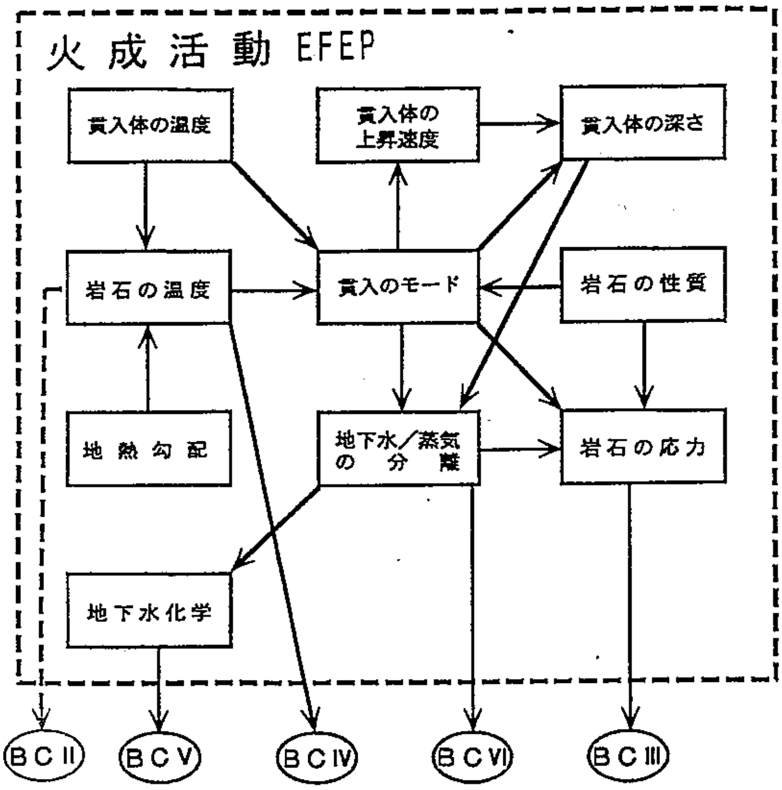


図５　火成活動ＥＦＥＰに対するインフルエンス・ダイヤグラム

表２(1)　地上への噴出によって生じ得る間接的な影響

水理学的影響
- 地表でのネットな地下水涵養／閉塞の低下
- 地形の平坦化（火山からの距離の関数）
- 地下水涵養・流出分布の再形成
- 静水圧の増加

化学的影響
- 新しい反応的な鉱物表面の生成
- 既存の有機物や土壌成分の喪失
- 新しい有機物や土壌成分の生成
- 反応的なアルミ・ケイ酸ガラスの持ち込み
  - 粘土と沸石の形成
  - pH値８～９への緩衝作用
- 水中におけるCO_2，O_2，N_2の増加
- 酸化還元緩衝作用の喪失

熱的影響
- 地表温度の上昇
- 水と岩石の速い反応に対する速度論
- 基盤岩の熱的絶縁化
- 涵養水の加熱

力学的影響
- 沈積物の層の厚さの関数としての負荷荷重の増加
- 変化した応力状態によって生じる断層活動
- 静水圧の微増

表２(2)　表層地下への貫入によって生じ得る間接的な影響*

水理学的影響 ・静水頭（もしくは動水勾配）分布の変化 ・対流（環流）の増加 ・２相流状態の形成 ・透水性の変化 ・空隙率の変化 ・亀裂特性（数、開口幅、伝導性など）の変化 ・貫入後のマグマの冷却による新水路の形成 化学的影響 ・揮発性成分の持ち込み ・pH及び酸化還元状態の変化 ・天水と入り混じったマグマ水の持ち込み 熱的影響 ・短期的には250℃ぐらいまで上昇する表層地下の温度 ・長期的には30℃～150℃ぐらいまでの緩慢な温度上昇 ・熱的浮揚効果（密度変化） ・岩石の熱的変質 ・緩衝材再冠水やオーバーパック腐食のタイミングへの影響 力学的影響 ・母岩への広範囲な断層生成 ・応力変化速度の増加 ・応力変化規模の増加 ・応力循環 ・静水圧及びガス圧の増加 ・処分場母岩の傾き

＊（冷たい地下水の天水（雨、雪などの地表水）の深部循環によるマグマ溜りとの接触）などを原因とする

1.1.2　ＦＥＰ連鎖を取り扱う定量的概念の検討

前記②項に対応し、1.1.1項で作成されたＦＥＰ連鎖のうち、重要度の比較的高いものを一つ選び、そのＦＥＰ連鎖別のモデル例等を列挙する。重要度の大きい順に並べたＦＥＰ連鎖は、付録Ｃに示すような形で表示し得る。

次に、前記②，③に対応し、これに含まれるＦＥＰ連鎖を取り扱い得るモデル概念等を表３[(4)]より抽出し、前年度に各ＦＥＰ連鎖毎に作成したパラメータ・初期及び境界条件間の段階的関係図から作成した図６(1)に示すようなパラメータ間の大雑把な関係（フロー等）をもとにその総合的取り扱い法（EX.複数モデルの連結化（境界条件分野別統合化）に伴う入出データの受け渡し方法や必要データ等）を検討する。具体的には以下の通りである。

表３　ファーフィールドにおけるＰＳＭでのインフルエンスのＨ３レポート基本モデル解析フレームでの取り扱い可能性

ＰＳＭでのインフルエンス	関連する１０２のＦＥＰ	Ｈ３レポートで考慮しているもの	基本モデル解析フレーム: 水理学的モデル (ΔH)	核種移行モデル	地球化学モデル (ΔC)	金属腐食 (ΔC)	圧密・粘弾塑性モデル (ΔM)	ﾆｱﾌｨｰﾙﾄﾞ再冠水及び再冠水後の水理学的モデル (ΔH)	熱解析モデル (ΔT)	放射線の影響	線量評価
ＦＦ１	A.2.7→C.3.2						○ 38				
ＦＦ２	B.1.4,C.3.2→A.2.7						○				
ＦＦ３	B.1.4,C.3.2→C.3.2						○				
ＦＦ４	ファーフィールド温度→B.1.4,C.3.2						○		○		
ＦＦ５	ファーフィールド温度→ニアフィールド温度								○		
ＦＦ６	ファーフィールド温度→A.6,16,＊地下水水質の変化				○				○		
ＦＦ７	A.6.4→B.1.4,C.3.2						○				
ＦＦ８	A.5.3→A.5.3,A.6.1	○	○	○				○			
ＦＦ９	岩石の性質→B.1.4,C.3.2						○				
ＦＦ10	A.6.16etc.，＊地下水水質の変化	○			○						
ＦＦ11	A.6.16etc.，＊地下水水質の変化→A.6.6			○							
ＦＦ12	A.6.1，＊地下水水質の変化→A.6.8			○	○						
ＦＦ13	A.6.1，＊地下水水質の変化 →A.2.8,A.6.7，A.6.1，＊地下水水質の変化			○	○						
ＦＦ14	A.2.8→A.6.16etc.，＊地下水水質の変化				○						
ＦＦ15	A.6.16，＊地下水水質の変化→自由ガス相形成				○						
ＦＦ16	岩石の性質→A.6.16，＊地下水水質の変化				○						
ＦＦ17	ファーフィールド温度→A.2.8										
ＦＦ18	ファーフィールド温度→岩石の性質										
ＦＦ19	岩石の性質→B.1.4,C.3.2						○				
ＦＦ20	B.1.4,C.3.2→岩石の性質						○				

38　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

PSMでのインフルエンス	関連する１０２のＦＥＰ	Ｈ３レポートで考慮しているもの	基本モデル解析フレーム 水理学的モデル (ΔH)	核種移行モデル	地球化学モデル (ΔC)	金属腐食 (ΔC)	圧密・粘弾塑性モデル (ΔM)	ニアフィールド再冠水及び再冠水後の水理学的モデル (ΔH)	熱解析モデル (ΔT)	放射線の影響	線量評価
ＦＦ21	岩石の性質→A.2.7										
ＦＦ22	A.2.7→A.2.8,A.5.2,A.5.3,A.5.4		○ 3',8,24					24			
ＦＦ23	A.2.8										
ＦＦ24	岩石の性質→A.6.3	○		○	○						
ＦＦ25	岩石の性質→A.6.8										
ＦＦ26	岩石の性質→A.5.3		○								
ＦＦ27	岩石の性質→A.6.6										
ＦＦ28	A.5.3→A.6.6		○								
ＦＦ29	A.5.3→A.6.1	○		○							
ＦＦ30	A.5.3→A.6.3	○	○	○							
ＦＦ31	A.5.3→A.6.1	○	○	○							
ＦＦ32	A.6.3→A.6.1	○		○							
ＦＦ33	A.6.3→A.6.16, ＊地下水水質の変化				○						
ＦＦ34	A.6.8→A.6.1			○							
ＦＦ35	A.6.6→A.6.1	○		○	○						
ＦＦ36	A.6.1→A.6.1	○		○							
ＦＦ37	C.4.4→A.6.1	○		○						○	
ＦＦ38	A.5.3,A.3.1→A.5.3		○								

3' 断層・割れ目の生成 ——→系に断層並びに亀裂媒体を含む水理モデル

8 地殻の ┬ 上下変動 ┐ ┌→地表の断層 ——→ 系に断層を含む水理モデル
├ 水平変動 ┤
├ 傾斜変化 ┤ └→地下水面変動 ——→ 地殻変動の影響が地下水面変動を引き起こす水理モデル
└ 伸縮 ┘

24 断層、破砕帯等を有する不均質な地層の考慮 ——→ 非均質媒体、特異点の扱い、地下水移行経路の発生・消滅

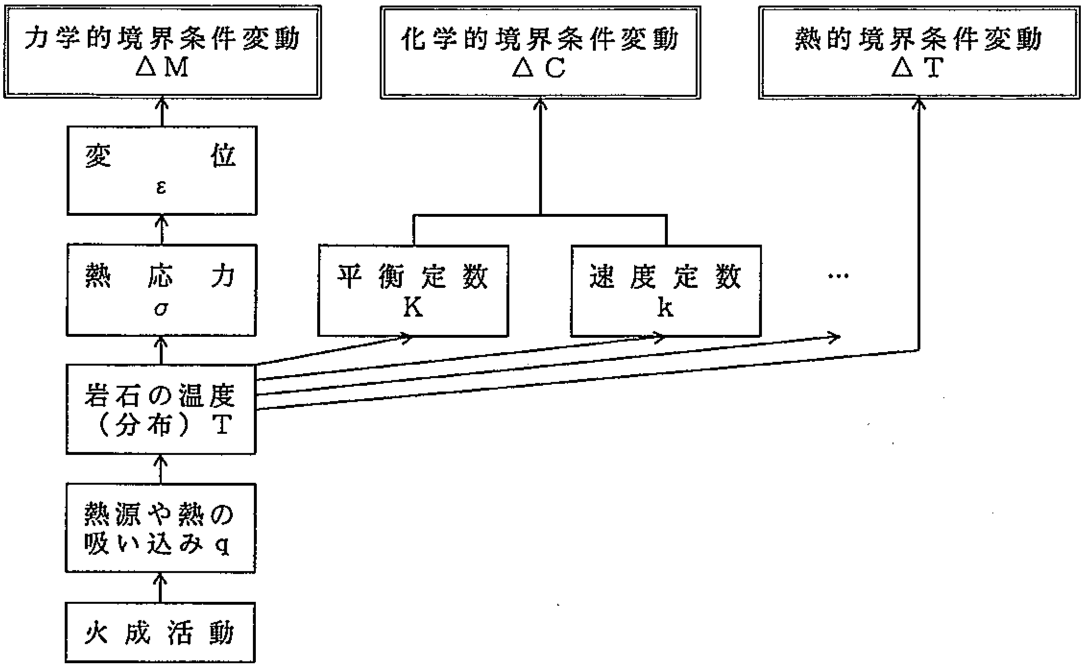


図６(1)　火成活動を起点とするパラメータ連鎖概念図

火成活動等のＥＦＥＰが核種の地下水移行に与え得る影響を解析するフレームとしては、前年度の調査した各ＦＥＰ関連モデルのパラメータの整理結果(4)でも示しているように、主に

－水理学

－力学

－熱学

－化学

の４つのカテゴリーから構成することが適当と考えられる。これらのカテゴリーに属する数学モデルで求められる状態量は、例えば、地下水流速、応力（圧力）、温度といった解析対象領域の“場”を構成する諸量と、これらを変数（又はパラメータ）とする化学系解析フレームに属する各諸量とに分けて考えることが可能である。具体例として、前年度調査した以下の方程式群(4)の適用が可能と考えられる。

温　度　場

1) 内部方程式 (FF5)

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

ここで、

tー 時間〔T〕

C_vー定積比熱〔$L^2/T^{2\circ}K$〕

ρー密度〔M/L^3〕

εー岩石の空隙率〔-〕

Tー温度〔°K〕

λ_tー熱伝導率〔$ML/T^{3\circ}K$〕

vー地下水のダルシー速度〔L/T〕

C_pー定圧比熱〔$L^2/T^{2\circ}K$〕

qー熱源や熱の吸い込み〔M/T^3L〕

"R"と"W"ーそれぞれ岩石と水を表す添字

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

ここで、βは水の熱膨張係数〔1/°K〕、下付きの"0"は、周囲の条件を表している。

2) 境界条件

①ＥＢＳと地質圏の境界 (NF8)

$$-A_{EBS}\lambda_t\nabla T|_A=Q_0 q(t) \quad (3)$$

と表される。ここで、

A_{EBS}ー廃棄物とＥＢＳとの間の境界面の面積〔L^2〕

λ_tー熱伝導度〔$ML/T^{3\circ}K$〕

Tー温度〔°K〕

Q_0ー初期放熱率〔ML/T^3〕

q(t)ー崩壊熱の履歴〔-〕

②地質圏とＥＦＥＰの境界

境界の外側（ＥＦＥＰ影響領域側）を“ー”、内側（地下水移行基本ケース

成立領域側）を“＋”と仮定すると、内部方程式(1)式に対し、

$$[\lambda_t \nabla T - v C_{p,w} \rho_w T]^{\pm} = 0 \quad (4)$$

水　理　場

1）内部方程式(FF7($S_g=0$，$S_w=1$及び$k_{rg}=0$，$k_{rw}=1$とおくとFF8に一致))

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial(\varepsilon S_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho_g v_g) = 0 \\
&\frac{\partial(\varepsilon S_w \rho_w)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho_w v_w) = 0 \\
&v_g = -\frac{k_{ip} k_{rg}(S_g)}{\mu_g}(\nabla p_g + \rho_g g) \\
&v_w = -\frac{k_{ip} k_{rw}(S_w)}{\mu_w}(\nabla p_w + \rho_w g) \\
&S_g + S_w = 1 \\
&p_g - p_w = p_c
\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

ここで、

t－時間〔T〕

v－ダルシー速度〔L/T〕

ρ－密度〔M/L^3〕

ε－空隙率〔-〕

S－相飽和性〔-〕

k_{ip}－固有透過性〔L^2〕

k_{ri}(i=g,w)－相間相対透過性〔-〕

p－圧力〔M/LT^2〕

p_c－毛管圧力〔M/LT^2〕

g－重力加速度〔L/T^2〕

μ－動粘性率〔M/TL〕

"g"と"w"－それぞれ気相、液相を表す添字

2) 境界条件

①地質圏と地表の境界 (FF38)

$$v(r_s) = v_0 \qquad (6)$$

ここで、

v－ダルシー速度ベクトル〔L/T〕

r_s－表面の場所の座標〔L〕

v_0－表面での浸透速度〔L/T〕、表面での涵養率と蒸発率の差

②地質圏とＥＦＥＰの境界

(4)式と同様の考え方で、

$$\left.\begin{array}{l}[\rho_g v_g]^{\pm} = 0 \\ [\rho_w v_w]^{\pm} = 0\end{array}\right\} \qquad (7)$$

応　力　場

1) 亀裂伝播 (FF1)

$$\tau^i = \sum_j (A_{ss}^{ij} D_s^j + A_{sn}^{ij} D_n^j) - (\tau^i)_0$$

$$\sigma_n^i = \sum_j (A_{ns}^{ij} D_s^j + A_{nn}^{ij} D_n^j) - (\sigma_n^i)_0$$

ここで、

τ^iとσ_n^i－それぞれｉ番めの成分のずれ応力と法線応力〔M/LT²〕

$(\tau^i)_0$と$(\sigma_n^i)_0$－それぞれ亀裂のずれ方向と法線方向に変換されたファーフィールドの応力〔M/LT²〕

A_{ss}^{ij}, …A_{nn}^{ij}－影響係数〔M/T²〕

D_s^j, D_n^j－ｊ番めの成分の変位の不連続〔L〕

2) 断層生成

①決定論的アプローチ

－Ｃ, φの特性値を求めるアプローチ

$$\tau = C_s + \sigma_n \tan\phi$$

ここで、

τ ーずれ応力〔M/LT^2〕

σ_nー流体の圧力を含めた法線応力〔M/LT^2〕

Csー凝集力〔M/LT^2〕

ϕ ー内部摩擦角〔°〕

破損面の方向

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$$

ー亀裂充填物質のヤング率、ポアッソン比及び亀裂幅から求めるアプローチ

亀裂帯の硬度〔M/T^2〕は、亀裂の法線方向には

$$K_n = \frac{E_Y}{w}$$

ずれ方向には

$$K_S = \frac{E_Y}{2(1+\nu_p)w}$$

ここで、E_Yはヤングの弾性率〔M/LT^2〕、ν_Pはポアッソン比〔-〕

②統計的アプローチ

変位関数

$$d(x,y,z,t) = [u(x,y,z,t), v(x,y,z,t), w(x,y,z,t)]$$

3) 母岩の特性・構造↔応力場

ー静水圧縮実験での粒状破壊の臨界有効圧力評価モデル

$$P_{cr} = 2.2\,[(1-\nu_p{}^2)^2/(1-2\nu_p)^3]\ [K_{\ell c}{}^3/E_Y{}^2]\ (\alpha_r \varepsilon r_g)^{-3/2}$$

ここで、

P_{cr}ー臨界有効圧力〔M/LT^2〕

ν_pーポアッソン比〔-〕

E_Yーヤング率〔M/LT^2〕

$K_{\ell c}$ー臨界破壊靭性〔M/LT^2〕

α_rー初期の亀裂の長さの、砂粒の半径に対する比〔-〕

ε ー空隙率〔-〕

r_gー砂粒の半径〔L〕

－応力と空隙率の関係を導くモデル（多孔質弾性モデル）

$$\frac{\kappa}{1+\varepsilon_0}\ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)=\varepsilon_{e\ell}$$

ここで、

κ－ヤング率とポアッソン比に関係する係数〔-〕

ε_0－初期空隙率〔-〕

σ_0－初期平均応力〔M/LT^2〕

σ－応力〔M/LT^2〕

$\varepsilon_{e\ell}$－弾性空隙率〔-〕

これらの方程式群は、図４，図５のＰＳＭ並びにＥＰＳＭに応じ、適当な初期条件と境界条件を与えた上で、一般には水理－熱－応力連成解析モデル体系を構成し得、数値的に解き、さらに、このような厳密なモデルの出力を化学系モデル及び核種移行モデルに反映させていく必要がある（図６(2)(3)参照）。

もちろん、もっと一般的にはこれら５種類のモデル系を完全に連立させて解くべきシナリオがないかどうかも検討対象の一つとなろう。しかし、このような数値解析的にも負荷のかかり得るアプローチ法にどこまで厳密さを持たせるべきかは2.2.2節でも述べているように議論のあるところである。もし、解析解が可能な範囲で必要最低限の主要パラメータ群から成るモデル系のアウトプットが得られるならば、それは多分、パラメータの感度の定性的方向性を簡単に定量化した一つの指標といった見方と使い方が可能と考えられる。

一例として、付録Ｅに示した偏微分方程式系の一つ、

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-q(x)u+f(t,x) \qquad (8)$$

$$u(0,x)=u_0(x)$$

$$u(t,0)=\psi(t,0)$$

$$\frac{\partial u(t,\infty)}{\partial x}=0$$

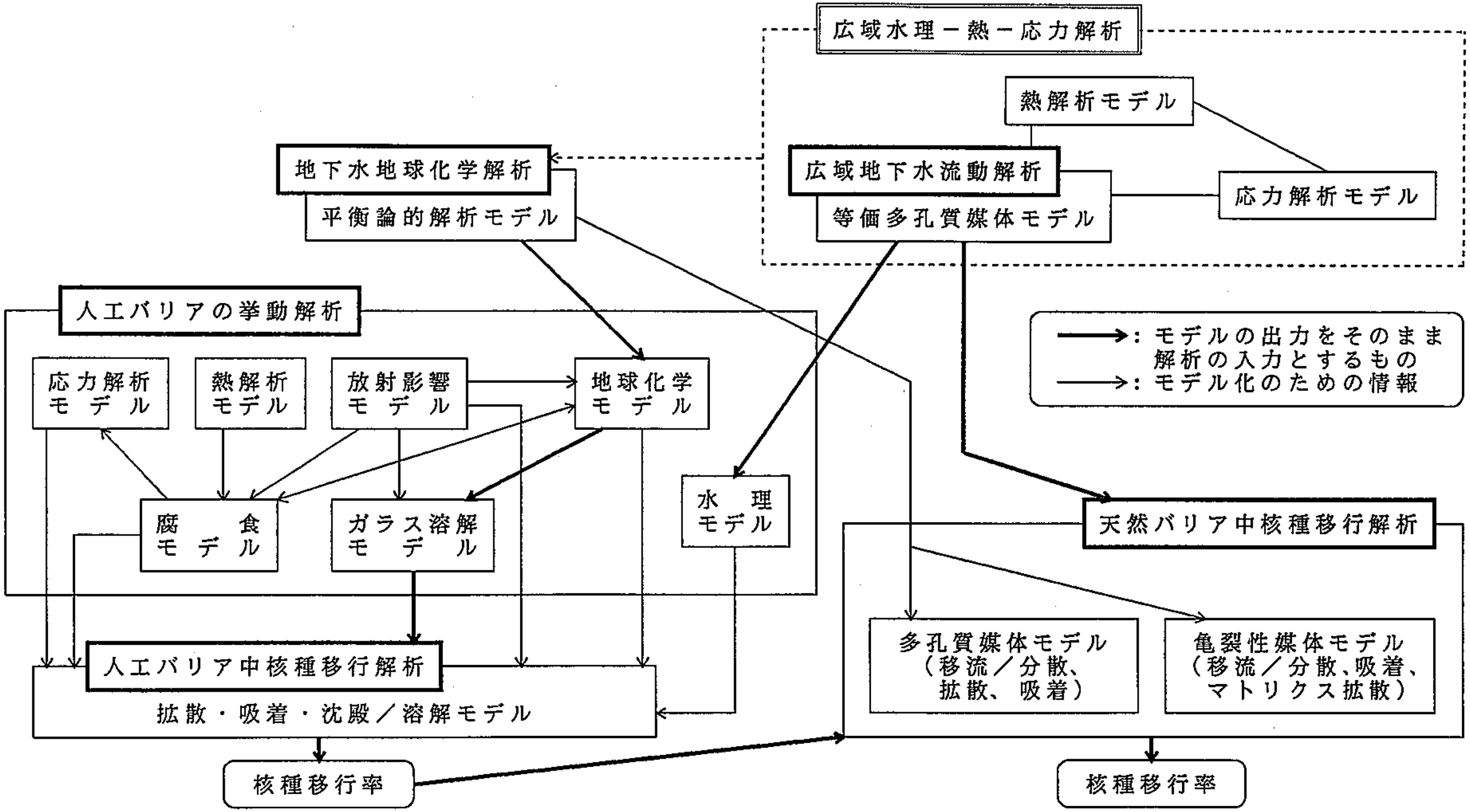


図６(2)　地下水移行シナリオに対する変動解析モデル体系*　－全体像－

*　Ｈ３レポート基本ケースに対する解析モデル体系[(1)]に┆　　　┆部を付け加えたもの

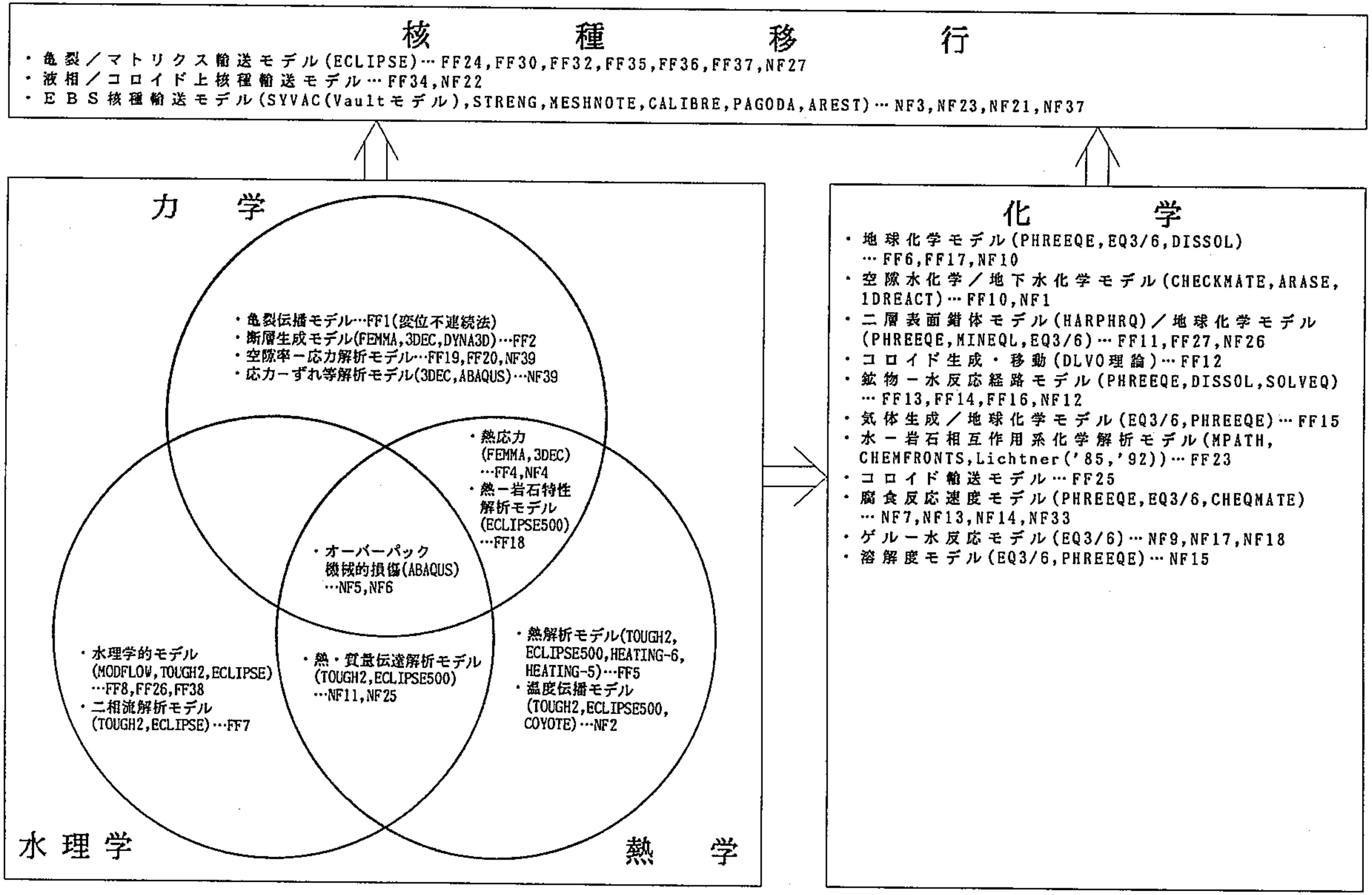


図６(3)　地下水移行シナリオに対する変動解析モデル体系　ー各サブモデル例ー

において、$f(t,x)\equiv f_0(\geqq 0)$, $\phi(t,0)\equiv \phi_0$, $q(x)\equiv q_0(\geqq 0)$, $u_0(x)\equiv u_0$といった簡単なモデルを設定する。前記の温度場の特徴を記述しているモデルで流れ項のないケースもこのタイプに属する（但し、$q_0=0$に対応）。

この解析解は、$q_0\neq 0$ならば、

$$u(t,x)=u_0 e^{-q_0 t}+\frac{f_0}{q_0}(1-e^{-q_0 t})+\alpha(t,x) \qquad (9)$$

但し、

$$\alpha(t,x)=\pounds^{-1}\left[\left\{\frac{\phi_0}{s}-\frac{u_0}{s+q_0}-\frac{f_0}{s(s+q_0)}\right\} e^{-\sqrt{s+q_0}\,x}\right]$$

$\pounds^{-1}$：tに関するラプラス逆変換作用素

と表現できる。さらに、$t\to\infty$近傍では、付録Bの方法を用いると、近似的に

$$\alpha(t,x)\sim\left(\phi_0-\frac{f_0}{q_0}\right)e^{-\sqrt{q_0}\,x}-\left(u_0-\frac{f_0}{q_0}\right)e^{-q_0 t}$$

となるので、$t\to\infty$近傍では

$$u(t,x)\sim\frac{f_0}{q_0}\left(1-e^{-\sqrt{q_0}\,x}\right)+\phi_0 e^{-\sqrt{q_0}\,x} \qquad (q_0\neq 0) \qquad (10)$$

となる。これより、$u(t,x)$が増大するのは、パラメータf_0/q_0, ϕ_0の増加するとき、であることが示し得ること、さらに、$u(t,x)$が$x\to\infty$近傍では$u(t,x)\sim f_0/q_0$(一定)、また場所によらず一定となるのは、$\phi_0=f_0/q_0$のとき、などの概略的な情報が得られる。

しかし、$q_0=0$の場合は、(9)式のラプラス逆変換を具体的に求めると、

$$\alpha(t,x)=(\phi_0-u_0)\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right)$$
$$-f_0\left[\left(t+\frac{x^2}{2}\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right)-x\left(\frac{t}{\pi}\right)^{1/2}e^{-x^2/(4t)}\right]$$

となるので、$t\to\infty$近傍では、

$$\alpha(t,x)\sim\phi_0-u_0-f_0\left\{t+\frac{x^2}{2}-x\left(\frac{t}{\pi}\right)^{1/2}\right\}$$ より、

$$u(t,x)=u_0+f_0 t+\alpha(t,x)$$
$$\sim\phi_0-f_0\left\{\frac{x^2}{2}-x\left(\frac{t}{\pi}\right)^{1/2}\right\}\sim f_0 x\left(\frac{t}{\pi}\right)^{1/2} \qquad (11)$$

即ち、f_0がゼロでない限り、$u(t, x)$は$\sqrt{t}$に比例して単調増大化をたどることになる。

このように、マグマ貫入が処分場のすぐ近隣にあるような場合など、ＥＦＥＰの影響が大きくて内部方程式の一項として反映させる必要のあるシナリオの場合（$f_0 \neq 0$）と、マグマ貫入が処分場からかなり離れている場合のようにＥＦＥＰの影響が比較的小さく$f_0 = 0$として初期条件u_0と境界条件ϕ_0に反映させる場合とでは、$t \to \infty$での平衡状態の有無に大きな違いが生じ得ると考えられる。

このようなアプローチ方法を、前記の温度場、水理場等の特徴を記述している（非線形）偏微分方程式系についてもＥＦＥＰの影響を内部方程式もしくは初期条件並びに境界条件（(4)(6)(7)式もしくは(Ｅ２)(Ｅ３)式参照）に何らかの仮定を通じて反映・設定することによって適用することが考えられるが、解析的に示すことは難しいと思われる。今回の火成活動シナリオ試計算の想定（1.1.3節参照）では、温度上昇が将来的に限りなく続くとは考えていないので、ＥＦＥＰの影響が処分場近傍にまで及び得るシナリオか否かによっては、評価期間のある有限期間にステップ関数的にf_0が内部方程式の一項として付加するケースかあるいはむしろ外側境界条件を付与したケースに対応したもの、と考えた方が適当とも言えよう。

他方、水理場に関しては、もし、(5)式でガスが発生せず地下水流速v_w＝const.ならば、

$$\rho_w(t, x) = f(v_w t - \varepsilon x) \tag{12}$$

但し、$f(\cdot)$は、任意の微分可能関数

なる一般解が得られるが、これに例えば境界条件(7)式を加味すると、

$$v_w \rho_w(t, 0^+) = \phi(t)$$

ここで、$\phi(t)$は外側境界でＥＦＥＰの水理学的影響を表す関数

より、関数$f(\cdot)$の型を$f(y) = \dfrac{1}{v_w}\phi\left(\dfrac{y}{v_w}\right)$と決定し得る。

以上の簡単な解析例で解の特性を支配する主要な要素である各種初期並びに境界条件（あるいは内部方程式の一項）の具体的な数学的表現は、火成活動シナリオの場合には表１に示す水理学、熱学の各境界条件影響リストとどのようなモデ

ルを採用するかの検討結果に基づき、具体的に設定することが可能と考えられる。

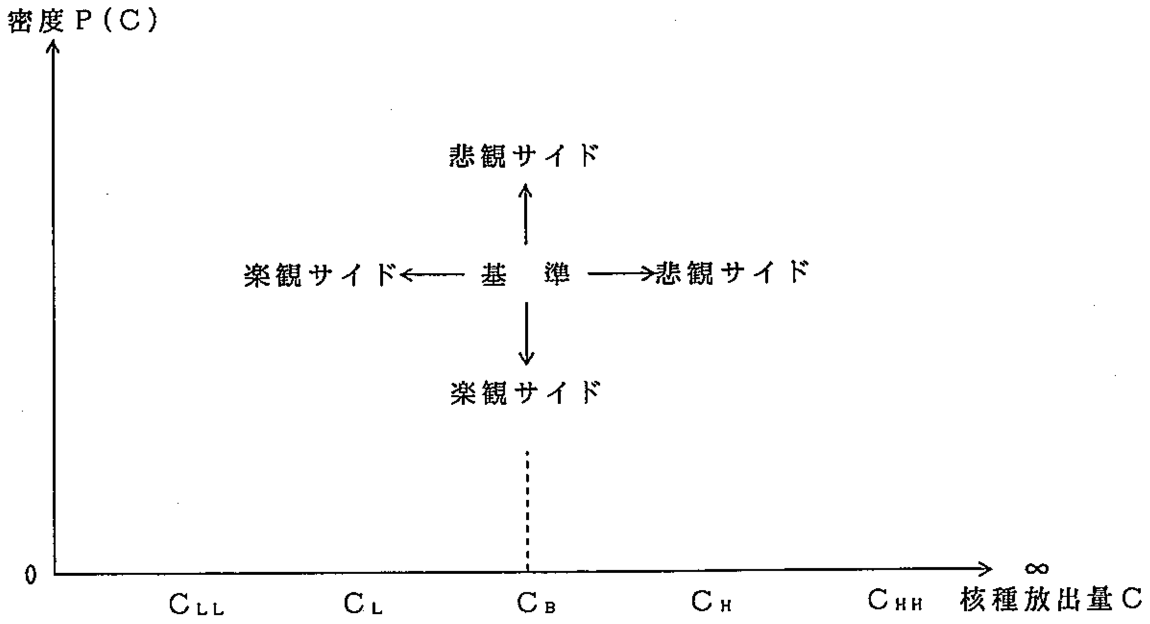
さらに、図6(2)(3)で示した広域水理－熱－応力については、マグマ貫入による応力変化の空隙率εへの影響（応力場）も加えると、(2)(12)式を通じて、地下水流速v_wへの温度T並びに空隙率の影響を(1)式に反映させることが可能と考えられる。

1.1.3　試解析

(1) 計算ケースへのアプローチ

前記③項に対応し、試解析用に簡易化した影響評価ケースを検討・設定する。

簡易化の一つの方法として変数の縮約、初期・境界条件の簡易なタイプの設定、線形近似、t→∞（平衡状態）もしくは着目状態量（EX.ファーフィールド温度ピーク値）近傍の解特性評価などが考えられる。今回の試解析では、境界条件は経時的に変化しないという簡易化を行っている。但し、EPSM部の取り扱いに関しては、エキスパート判断の必要なものもあると考えられるため、図5に示すEPSMをモデル化してファーフィールドの境界条件を定量的に評価することはしていないが、各シナリオに関連し得る数学モデルによるパラメータ変化の説明は表5のあとに述べているように試みている。なお、H3レポートでも行われているように、変動ケースについても何らかの感度解析的な方法を用いることにより、欠落データ情報等に起因する変動ケース自体の解の不確実性幅及びその分布状態を算定することも将来的には考えられる（図7参照）。



ここで、

C_B ：基本ケースに対する値

C_H ：基本ケースのパラメータ変動等（初期条件や境界条件変化を含む）で扱えるシナリオに対する上限値

C_L ：基本ケースのパラメータ変動等で扱えるシナリオに対する下限値

C_{HH}：基本ケースのパラメータ変動等では扱えないシナリオに対する上限値

C_{LL}：基本ケースのパラメータ変動等では扱えないシナリオに対する下限値

図７　影響解析の考え方

今回の具体的な試解析[13]では、

・廃棄物パッケージ設計やＨＬＷ廃棄物形態の類似点

・Kristallin-I（以下Ｋ－Ｉと略記）での情報・データの豊富さ

・スイスで今後百万年間で火成活動が実際に起きることの稀頻度性

・第３者への信頼感を意識し、基本ケースであるＨ３レポート以外の情報源を敢えて使うこと

といった観点から、Nagra（スイス）によるＫ－Ｉでの検討例[12]を参考とした。計算コードとしては、火成活動がもたらし得る主要な化学及び輸送への影響を算定できるMENTOR[13]（Model with an Evolving Near-field and Transport Of Radionuclides）コード（Ｋ－Ｉと同じデータを用いてかなり良い精度で一致したことを実証済のもので、詳細は付録Ｄ参照）を用いた。具体的には表４

に示すいくつかの変動要因を組み合せた表５(1)のような計算ケースを設定した。即ち、火山活動／マグマ貫入による処分場への累積的影響をまず定義した。Ｋ－Ｉの基本ケースから、パラメータが累積的に変化する４つの計算ケースを想定し、まずファーフィールドから始めて、人工バリアシステム（ＥＢＳ）およびＨＬＷ廃棄物のガラスへの影響へと評価を進めていく。

ケースＡ：マグマの貫入による初期の力学的／応力的影響はファーフィールドの流れ特性だけに限定されると想定する。具体的には、ケースＡは移流の流速増大（11m/y→110m/y）、破砕面沿いのマトリクス拡散の深さの減少（0.05ｍ→0.005ｍ）、破砕面沿いの濡れた表面積の減少（2.36×10^{-2} m^{-1}→2.36×10^{-3} m^{-1}）、および岩石のかさ間隙率の減少（0.05→0.005）を含む（数値変更は表９参照）。

ケースＢ：上記のファーフィールドの影響を人工バリアシステムへの影響－特に埋め戻し材の厚さの減少（1.38ｍ→0.3ｍ）としてモデル化される埋め戻し材性能の熱による劣化－と組み合わせる（数値変更は表８(1)参照）。

ケースＣ：ファーフィールドにおける変化と埋め戻し材の厚さの変化を、温度の上昇によるＨＬＷガラスの溶解率の増大（廃棄物固化体溶解時間150000年→1500年）と組み合わせる（数値変更は表８(1)参照）。

ケースＤ：上記のファーフィールド、埋め戻し材、溶解率の変化のすべてを、マグマ水との接触によって生ずる放射性元素の溶解度の全般的増大（Broadlands及びMatsukawa地下水に対するケース：Ｄ１ケース、Ｄ２ケース）と組み合わせる（数値変更は表８(3)参照）。

表５(1)はこれら連続的・累積的影響を一連の計算ケースとしてどのように組み合わせるかを示している。これら計算ケースに使用するデータについては、次の項で論ずるが、各ケースのデータ設定がどのような火成活動シナリオに対応したものかをまとめたものを表５(2)に示した。

表４　火成活動シナリオ試解析用ケース例

<u>温度上昇の影響（BCⅣ）</u>
・スメクタイト粘土のイライト化速度の増加に伴う緩衝材性能の劣化
・放射性元素の溶解度の増加（但し、25℃を超える温度に対するデータの質はあまり良くなく、100℃を越えるデータは皆無に近い）

<u>地下水化学への影響（BCⅤ）</u>
・錯陰イオンの増加
・（特に強酸状態に対する）pHの変化の可能性
・（特に酸化状態に対する）酸化還元電位の変化の可能性
これらの影響に対し、計算では２組の地下水組成を選定
－高塩化物／中性／低塩水
－高硫化物及び高重炭酸塩／酸性／酸化された希釈水

<u>ガス生成への影響（BCⅥ）</u>
・深部マグマ体に帰因する自由ガス相の生成
従来の２相水理学的モデルでは深部の水力学的に飽和しているサイトに対しては適用できないが、火成活動シナリオの評価では必要。しかし、今回の試解析では考えない。

<u>応力場への影響（BCⅢ）</u>
・（本来は、熱－水－応力連成解析を行うところだが、ここでは）地下水流速及び流路の変化に伴うファーフィールドの流れ場における各種パラメータの変化（Ｋ－Ⅰの基本ケースデータ値からの変動を与える）

注）　（　）内のBC…は、図４(2)で定義された境界条件変化を意味する。

表５(1)　計算ケース設定に用いた火成活動シナリオ関連事象の複合的影響

Case Identifier	Far-Field Flow Properties	Backfill Thickness	Dissolution Rate of HLW Glass	Radioelement Solubilities
Base Case	K-1*	K-1	K-1	K-1
A	Altered¶	K-1	K-1	K-1
B	Altered	Altered	K-1	K-1
C	Altered	Altered	Altered	K-1
D_1, D_2	Altered	Altered	Altered	Altered

* "K-1" means data from Kristallin-I report used for these parameters.
¶ "Altered" means parameters are assumed to be changed by magmatic intrusion.

表５(2)　火成活動シナリオ試算例での設定データフレーム

データ設定 ケース ＼ 対象領域	A	B	C	D	備考：対応するシナリオ[*1]	備考：データ設定の技術的判断の根拠
1)人工バリア						
廃棄物固化体溶解時間	Base　150000年		1500年	1500年	温度上昇によるガラス固化体溶解速度の増大［シナリオｃ］	温度上昇で力学的にガラスに亀裂が発生するケースを想定（化学的影響はｹｰｽDに反映）
ベントナイト厚	Base　1.38ｍ	0.3ｍ	0.3ｍ	0.3ｍ	温度上昇によるベントナイトの熱的劣化［シナリオｂ］	･PNC/NAGRAのベントナイト厚値からSKBのそれへの減少を想定 ･残り部での拡散支配的核種移行に支障をきたさない厚さ
ベントナイト外径	Base　1.85ｍ	0.77ｍ	0.77ｍ	0.77ｍ		
ベントナイト表面積	Base 6.26×10^4 ㎡	2.61×10^4 ㎡	2.61×10^4 ㎡	2.61×10^4 ㎡		
ＥＢＳ中溶解度	Base　(表７(3))			D_1…ﾏｸﾞﾏ水溶解度(Broadlands地下水) D_2…ﾏｸﾞﾏ水溶解度(Matsukawa地下水)	マグマ水との接触による放射性元素溶解度の変化［シナリオｄ］	EQ3/6計算コード並びにデータベースを使用
ＤＲＺ厚さ	Base　3.7ｍ	0.77ｍ	0.77ｍ	0.77ｍ	温度上昇によるベントナイトの熱的劣化［シナリオｂ］	
ＤＲＺ表面積	Base 1.35×10^5 ㎡	7.817×10^4 ㎡	7.817×10^4 ㎡	7.817×10^4 ㎡		
ＤＲＺ空隙率	0.025 (但し､K-I Baseは0.01)	0.025	0.025	0.025	マグマ貫入によるﾌｧｰﾌｨｰﾙﾄﾞの割れ目開口増大（力学的／応力的影響）［シナリオａ］	

表5(2)　火成活動シナリオ試算例での設定データフレーム（続き）

データ設定ケース / 対象領域	A	B	C	D	備考：対応するシナリオ*1	備考：データ設定の技術的判断の根拠
ダルシー流速	2×10^{-4}m/y (但し、K-I Baseは 2×10^{-5}m/y)	2×10^{-4}m/y	2×10^{-4}m/y	2×10^{-4}m/y	マグマ貫入によるファーフィールドの割れ目開口増大（力学的／応力的影響） ［シナリオａ］	放射性核種放出率の比例的増加(１桁増)を想定して設定（実際の計算結果(図９(1)参照)に示されるように影響は比例的ではないが）
2)地質圏関連						
地質圏空隙率	0.025 (但し、K-I Baseは 0.0025)	0.025	0.025	0.025	マグマ貫入によるファーフィールドの割れ目開口増大（力学的／応力的影響） ［シナリオａ］	
鉛直方向流速	110m/y (但し、K-I Baseは 11m/s)	110m/y	110m/y	110m/y		
変質岩空隙率	0.005 (但し、K-I Baseは 0.05)	0.005	0.005	0.005		
変質岩のマトリクス拡散深さ	0.005ｍ (但し、K-I Baseは 0.05ｍ)	0.005ｍ	0.005ｍ	0.005ｍ		
変質岩濡れ面積	2.36×10^{-2}/m (但し、K-I Baseは 2.36×10^{-3})	2.36×10^{-2}/m	2.36×10^{-2}/m	2.36×10^{-2}/m		

＊１）シナリオａ～ｄに対応するパラメータ階層ツリー図（前年度報告書の各ＦＥＰ連鎖別パラメータ階層整理結果より作成）は、以下のツリーの太線ラインに示されたものに対応。

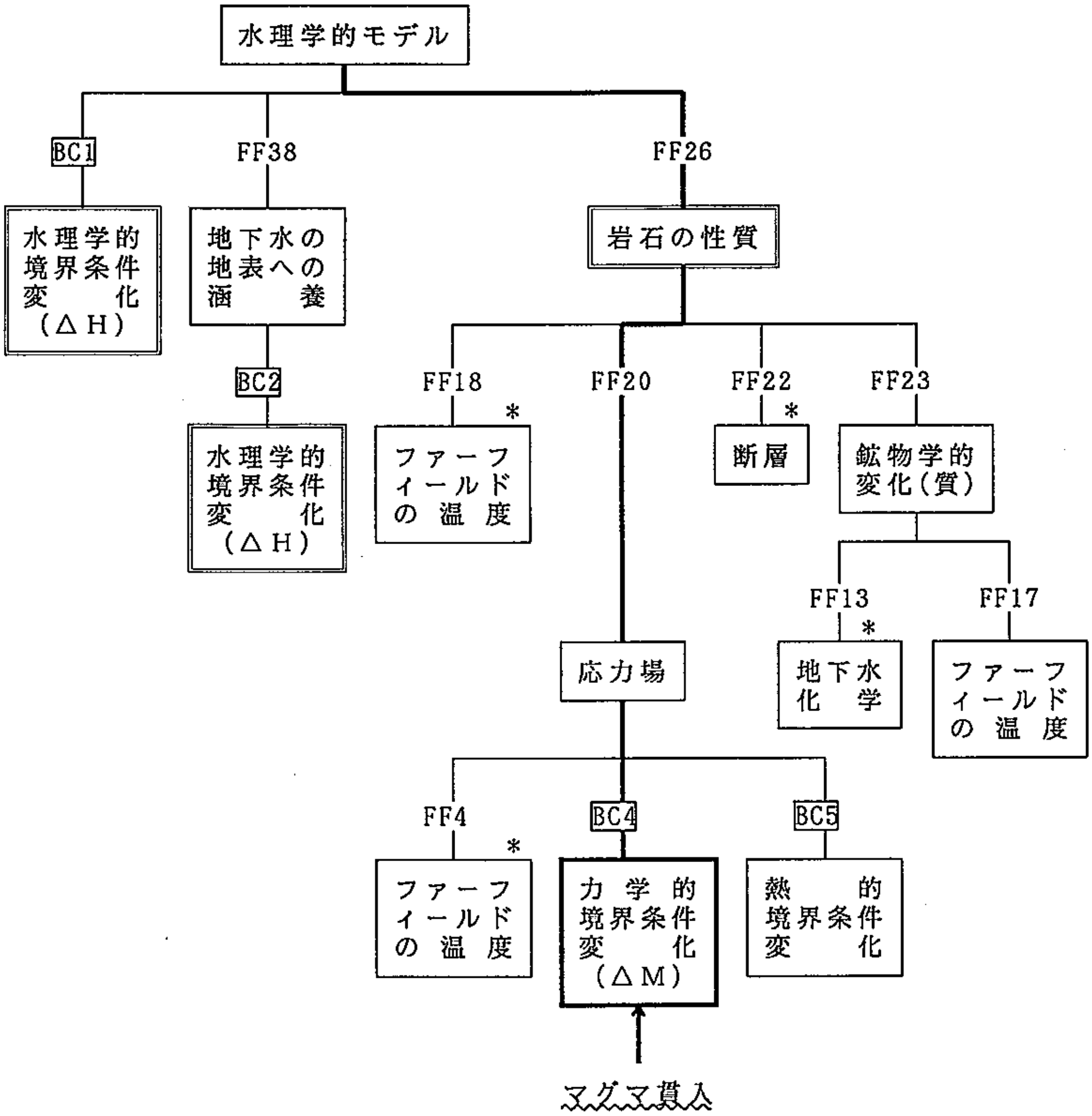
－シナリオａ－

ｉ）ＦＥＰ連鎖のツリー展開図

変化させたパラメータ

・人工バリア…ＤＲＺ空隙率、ダルシー流速

・地質圏…空隙率、鉛直方向流速、変質岩空隙率、変質岩のマトリクス拡散深さ、変質岩濡れ面積



注１）＊マークを付したものは、シナリオａ～ｄの階層図のどこかのサブツリーとして記載されていることを意味する。

注２）境界条件ナンバーは、前年度報告書(4)の定義に基づく（本報告書では、図４(1)(3)参照）。

ii) 変化させたパラメータに関連する数学モデル

①地下水流速（ダルシー則）

FF8：
$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_w)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_w v_w)=0$$

$$v_w=-\frac{k_{ip}}{\mu_w}(\nabla p_w+\rho_w g)$$

ここで、 t ：時間

v ：ダルシー速度

ρ ：密度

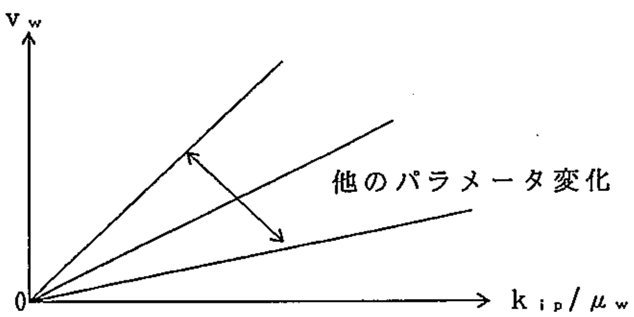
ε ：空隙率

k_{ip} ：固有透過率

μ ：動粘性率

において、 ρ_w， ε が時間、場所に対して一定ならば、

$v_w \propto k_{ip}/\mu$



となる。

従って、マグマ貫入による負荷のために岩石の変形や変位のズレを通じた k_{ip}/μ の変化が、ファーフィールド地下水流速の変化に反映される。今回の試解析では、基本ケースの10倍の流速が設定されたことは、逆に k_{ip}/μ_w の値が10倍程度に大きくなったことの反映とも考えられる。

②空隙率

FF19＆FF20：

－岩質が非弾性多孔質の場合（静水圧縮実験での粒状破壊の臨界有効圧力評価モデル）

$P_{cr}=2.2\,[(1-\nu_p{}^2)^2(1-2\nu_p)^3]\;[K_{\ell c}{}^3/E_Y{}^2]\;(\alpha_r\,\varepsilon\, r_g)^{-3/2}$

ここで、P_{cr}：臨界有効圧力

ν_p：ポアッソン比

E_Y：ヤング率

$K_{\ell c}$：臨界破壊靭性

α_r：初期の亀裂の長さの砂粒半径に対する比

ε：空隙率

r_g：砂粒半径

において、ν_p, $K_{\ell c}$, E_Y, α_r, r_gが一定ならば、

$\varepsilon \propto P_{cr}{}^{-2/3}$

となる。

－岩質が弾性多孔質（EX.ベントナイト緩衝材）の場合

$$\frac{\kappa}{1+\varepsilon_0}\ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)=\varepsilon_{e\ell}$$

ここで、κ：ヤング率とポアッソン比に関係する係数

ε_0：初期空隙率

σ_0：初期平均応力

σ：応力

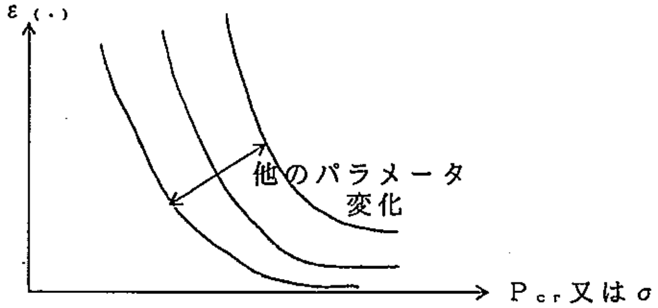
$\varepsilon_{e\ell}$：弾性空隙率

において、κ, ε_0, σ_0が一定ならば、

$\varepsilon_{e\ell} \propto -\ln\sigma$＋定数項

となる。

－いずれの岩質の場合も、マグマ貫入による外圧が高まることにより空隙率は下に凸型の関数型で低下する。



③拡散深さ

これについては、前年度の報告書で調査した亀裂媒体モデル（FF24項）での境界条件設定ではその概念の入っていないモデルとなっていた（即ち、亀裂とマトリクスの境界面での濃度が等しいという境界条件：$C_m(\pm b, z) = C_f(\pm b, z)$）が、今回の試解析では（Ｈ３レポートの亀裂媒体モデルでも定義しているが）、拡散深さでの境界条件を設定している。Ｋ－Ｉでは、実測図との類似モデルをつくって変質岩領域の厚さとの関係からこの値を設定している。マグマ貫入による応力増加で亀裂媒体が広がり流速も10倍になったことから、拡散深さがその分後退して1/10になるものと設定したと考えられる。

④濡れ面積

これについては、前年度の報告書で調査した亀裂媒体モデル（FF24）の遅延係数：

$$R_{f,n} = 1 + \rho K_{d,n}(1 - \varepsilon_m)(\delta_s a_c / \theta)$$

ここで、ρ：岩石の密度

K_d：収着係数

ε：空隙率

δ_s：亀裂の壁への表面収着の有効な深さ

a_c：チャネリング・パラメータもしくは、亀裂のある岩石の単位体積当りの濡れた面積

θ：亀裂のある岩石の空隙率

の中で、パラメータa_cとして定式化されている。これは、Ｋ－Ｉモデルでも亀裂中の充填鉱物が占める単位体積当りの面積比として導入されている。今回の試解析では、マグマ貫入による応力の増加で亀裂開口が増大し、流量が10倍になったことと呼応して、対象領域の体積が1/10に低下した分、10倍になるものと設定していると考えられる。

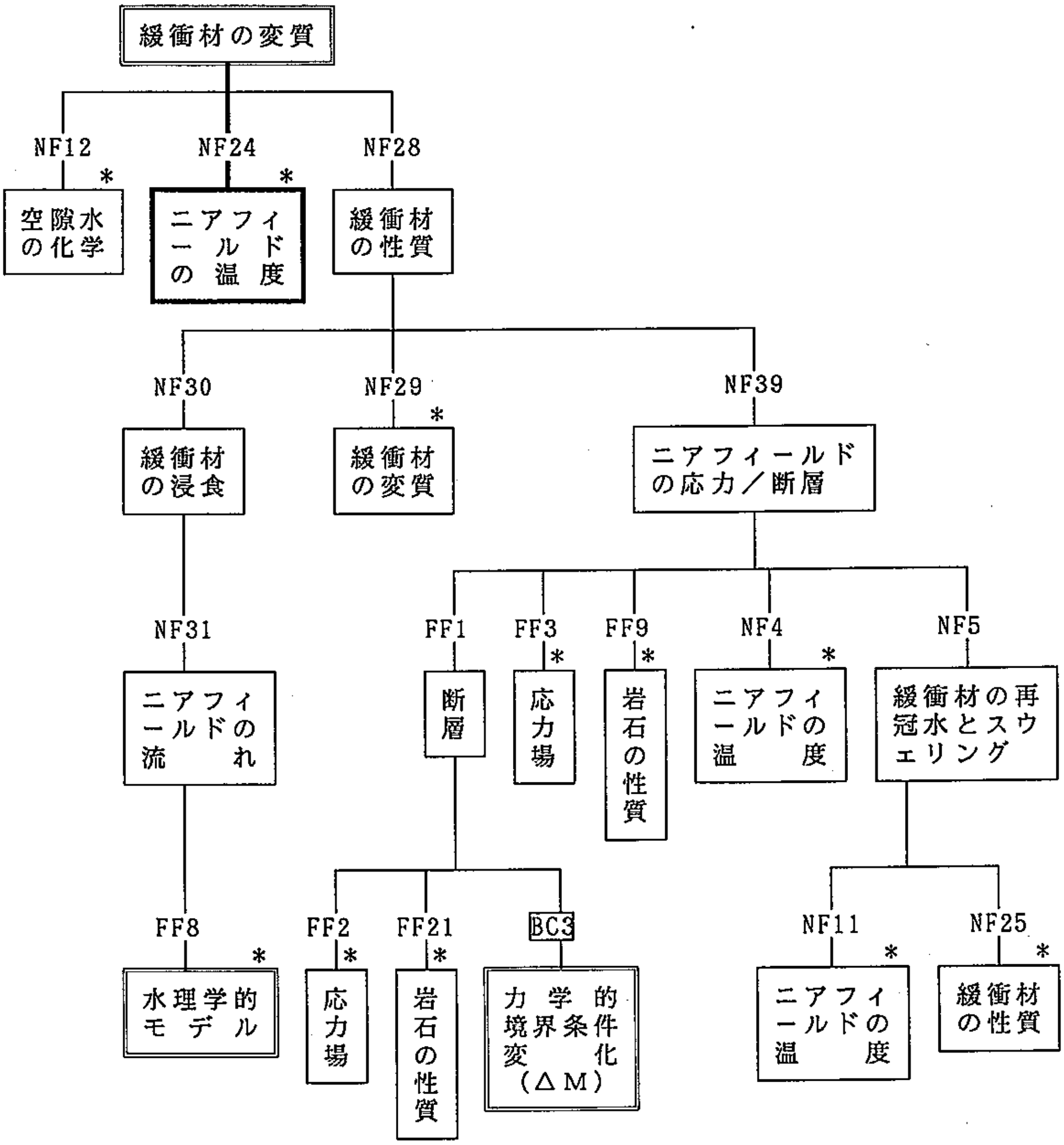
－シナリオｂ－

ｉ）ＦＥＰ連鎖のツリー展開図

<u>変化させたパラメータ</u>

・ベントナイト…厚さ、外径、表面積

・ＤＲＺ…厚さ、表面積



ii）変化させたパラメータに関連する数学モデル

前年度の報告書で調査したモデルで関連し得るものをリストアップすると、FF6，NF12，FF23に関するものを指摘し得る。しかし、これらのモデルと緩衝材厚さ変化量とを結びつけるモデルについては示されていなかった。これについては、指摘されている研究事例[42][58]等を参考に、パラメータ変動範囲の推定において今後どこまでモデリングによる対応が可能かを検討する必要があろう。ちなみに、文献(42)では、経験式として、

$$S = \{1 + (b - 1) k' t\}^{-1/(b-1)}$$

$$k' = k \cdot [K^+]^a$$

$$k = A_r{}^{-E_a/RT}$$ （アレニウスの式：FF6）

ここで、 t ：時間

S ：イライト／スメクタイト混合層中のスメクタイトのモル分率

k ：速度定数

$[K^+]$ ：カリウムイオン濃度

（A_r， E_a， R， T の定義は次項参照）

a， b ：実験データからのフィッティング係数

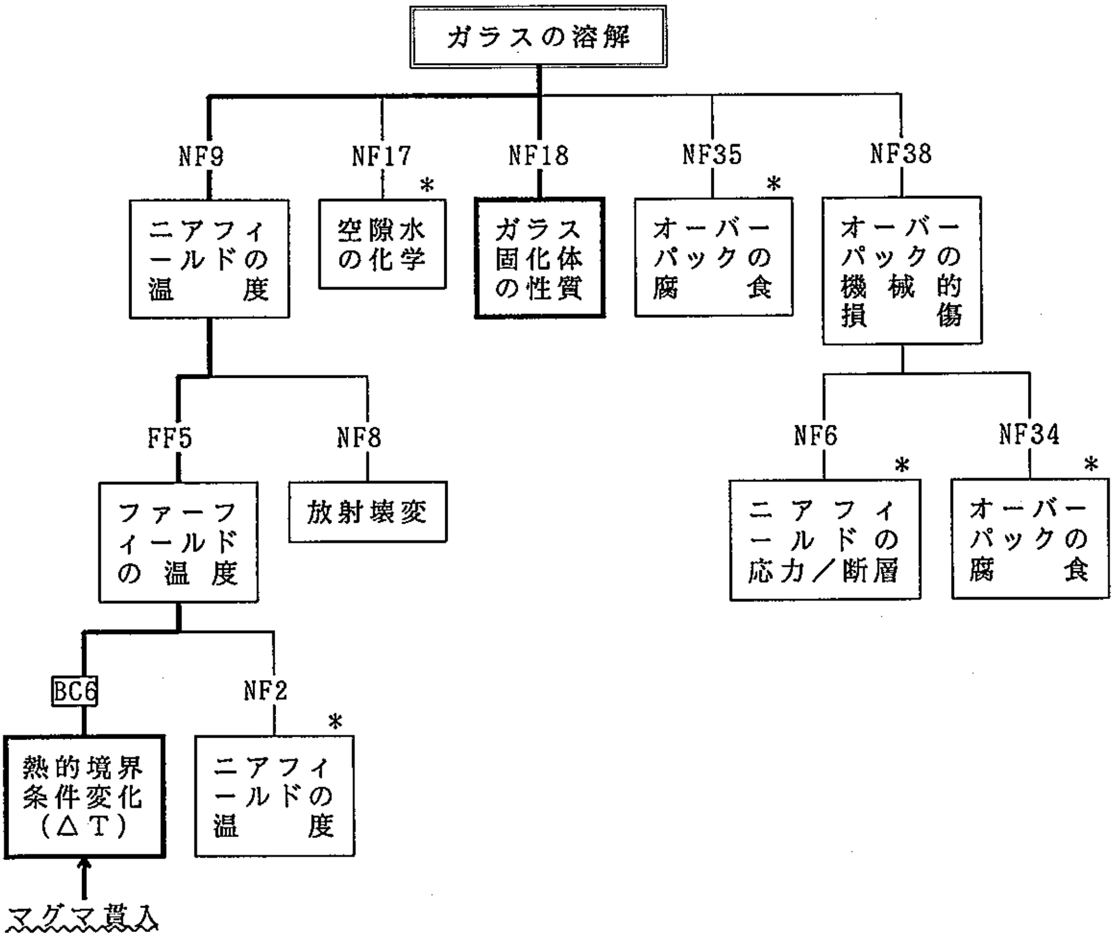
を検討しているが、これより、マグマ貫入による温度上昇は、緩衝材厚低下を速めることが導かれる。

－シナリオｃ－

ｉ）ＦＥＰ連鎖のツリー展開図

<u>変化させたパラメータ</u>

廃棄物固化体溶解時間



ii）変化させたパラメータに関連する数学モデル

火成活動による温度上昇によって、<u>力学的に</u>ガラスに亀裂が生じ、それによってガラスの溶解速度が増加するプロセスのモデル化事例は前年度の報告書ではとり扱っていない。しかし、化学的影響については前年度に調査した以下のモデル事例が参考となる（これはシナリオｄの項でも取りあげるべき内容）。

ガラスの溶解速度

$$\text{NF18:}\quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{A_g}{V} v_i k a_{H^+}^{B^{\ddagger}} (1 - e^{Aff/RT})$$

ここで、C_i：i番目の元素の水溶液中での濃度

A_g/V：ゲルの表面積と水溶液の体積の比

v_i：ゲル中のi番目の元素の化学量論的な比率

k：ゲルの溶解についての速度定数

$= A_r e^{-E_a/RT}$（アレニウスの式：FF6）

A_r：頻度因子（積分定数）

E_a：反応の励起エネルギー

R：気体定数

T：温度

A_{ff}：溶解に関する化学親和力（FF13）

$= RT\ln(K/Q)$

K：平衡定数（無次元）

Q：無次元の反応の活量積

a_{H^+}：H^+の活量

B^*：実験的に同定される指数

において、ガラスの溶解が進行するにつれて溶液中に溶け出した元素iの溶液中濃度C_iが増加すると考えれば、上式の右辺がガラスの溶液速度に対応するものと考えられる。従って、マグマ貫入に伴うニアフィールド温度上昇の影響は、ゲルの溶解についての速度定数kを通じて、

$$\ln\left(\frac{dC_i}{dt}\right) \propto -1/T$$

即ち、溶解速度が増加すると考えられる。

他方、ガラス固化体の溶解速度を

$$L(t) = -\frac{1}{V_0}\frac{dV}{dt} = \frac{3}{T_D}\left[t - \frac{(t - t_c)}{T_D}\right]^2$$

ここで、V_0：廃棄物の初期の体積

$V(t)$：廃棄物の時点tで溶解していない体積

T_D：溶解時間

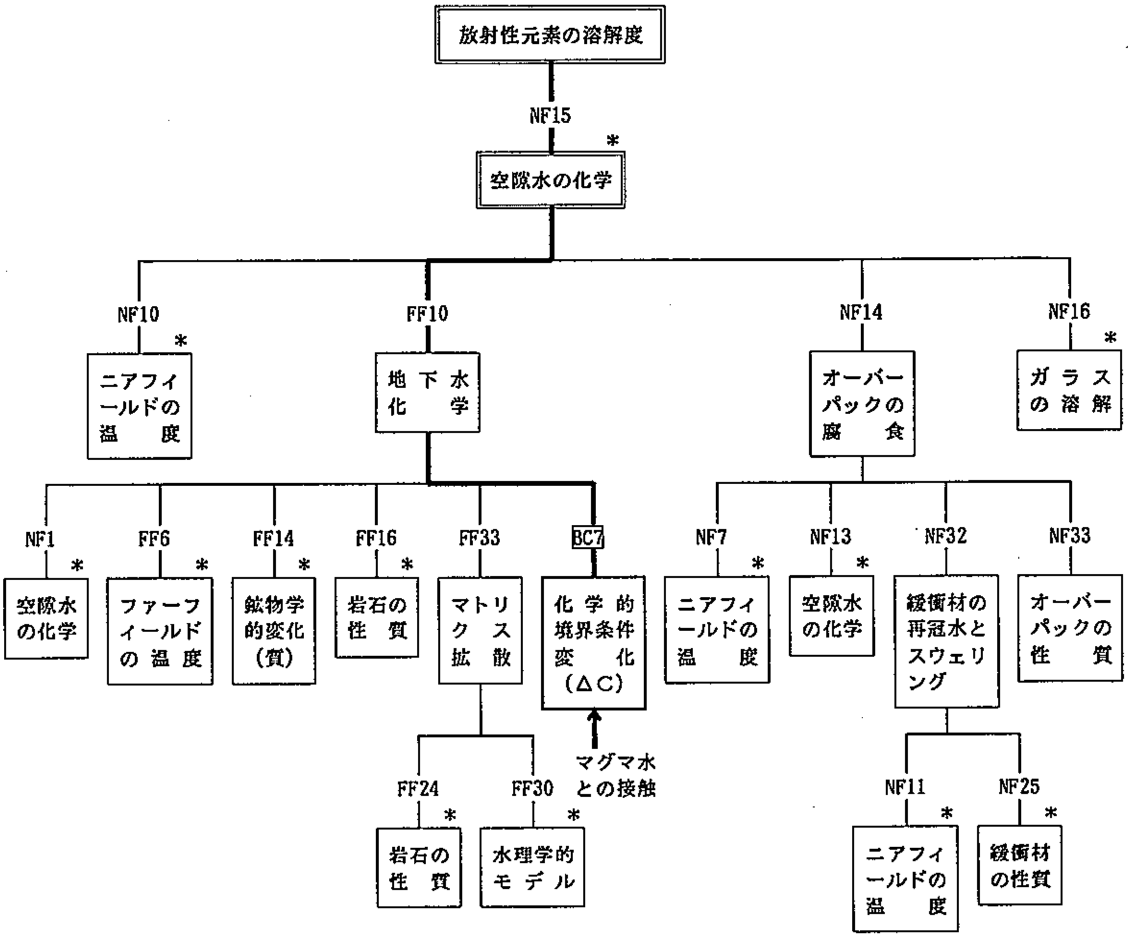
という定式化（NF20）と対比すると、温度Tの増加は、溶解時間T_Dの低下に対応する。今回の試解析では、T_Dが基本ケースの1/100に低下するくらいのニアフィールド温度上昇がマグマ貫入によってもたらされるという状況が想定されている。

－シナリオｄ－

ｉ）ＦＥＰ連鎖のツリー展開図

<u>変化させたパラメータ</u>

EQ3/6計算結果に基づく各放射性元素の溶解度



ii）変化させたパラメータに関連する数学モデル

放射性元素の溶解度が、マグマ水との接触によって組成変化を受けた地下水に対してどのように変化し得るかについては、地球化学計算コードEQ3/6（NF15，FF6等）を用いている。

(2) 入力データ

処分場の境界条件に対するマグマ貫入の影響に関する完全に説得力あるシナリオ分析（図５参照）は、かかる影響の専門的判断、かかる影響の定量的計算、或いはそれら二つの組合せを必要とする。今のところ、このような詳細なシナリオ分析に適したソース基盤も知識基盤も十分ではない。従って、火山活動シナリオについての影響評価試解析に適用するデータは、火山活動／マグマ貫入から想定される温度、地下水の化学組成、ガス発生および応力場に対する個々の影響についての以下の検討に基づいて設定した。

まず、インベントリのデータを表６に示す。これら放射性核種は核分裂生成物、放射化生成物、４Ｎ＋１アクチニド連鎖（ネプツニウム系列）、４Ｎ＋２アクチニド連鎖（ウラン系列）、４Ｎ＋３アクチニド連鎖（アクチニウム系列）および4Ｎアクチニド連鎖（トリウム系列）に分類される。これら放射性元素に対して安定同位元素の質量存在度も考慮する必要があることに注意すべきである。これは元素の溶解限度によって多くの放射性核種の放出率が決まるが、元素の溶解限度は廃棄物ガラスに存在する当該元素の全ての安定同位元素と放射性同位元素に分割する必要があるからである。

Ｋ－Ｉの数値から得られた基本ケースの入力データを表７に示す。マグマ貫入によってＫ－Ｉの数値から変わると想定される主要なパラメータのデータを表８に示す。ほとんどの場合、これら変化は詳細な計算ではなく技術的な判断に基づいている。当然のことながら、将来のシナリオ分析では、これらパラメータの変化についてもっと詳細な正当化が必要となるが、これら数値は以下の感度計算の概略的フローを説明する目的には適している。

① <u>温度への影響（ＢＣⅣ）</u>

マグマの貫入に起因する温度上昇の二つの影響（Ellis and Mahon, 1977）[(35)]、即ち、i)スメクタイト粘土のイライト化による緩衝性能の低下、および ii)ＨＬＷガラスの溶解率の上昇、について検討する。

最近の研究〔Huang et al. (1993)[(42)], Pusch (1993)[(58)]〕は、ベントナイト緩衝材／埋め戻し材の主要な膨潤粘土成分であるスメクタイトの温度と地下水組成（特にK^+の濃度）の関数として、イライト化のモデルに焦点を当

ている。ここでは、予備的な感度計算にこのような高度化モデルを使わない。その代わり、マグマの貫入により持続的に上昇するニアフィールドの温度の上昇が、イライト化による埋め戻し材の外側の劣化の原因になると想定し、厚さ30cmの性能が変化しないベントナイトの内環だけが残ると想定する（表8(1)）。この影響は埋め戻し材の吸収能力を減少させるが、残った変化しない埋め戻し材が廃棄物キャニスターから母岩への放射性核種の拡散支配の物質移動を確保するのに十分と判断される。

表6(1)　ＦＰ、放射化生成物のインベントリ及び半減期

Nuclides	Moles of Stable Element in Repository	Becquerels per Repository	Half-Life (years)
Activation/ Fission Products			
Ni (stable)	6.25×10^4	—	—
Ni-59	—	5.12×10^{12}	7.50×10^4
Se (stable)	2.38×10^3	—	—
Se-79	—	5.66×10^{13}	6.5×10^4
Zr-93	—	2.53 x 1014	1.53×10^6
Tc-99	—	1.80 x 1015	2.13×10^5
Pd (stable)	3.77×10^4	—	—
Pd-107	—	8.08×10^{12}	6.50×10^6
Sn (stable)	2.56×10^3	—	—
Sn-126	—	1.05×10^{14}	1.00×10^5
Cs-135	—	5.12×10^{13}	2.30×10^6
(Inventory is for a repository containing 2693 canisters of vitrified Swiss HLW Glass at four years after unloading of source spent fuel [Nagra, 1994,Tables 3.3.3 and 3.7.1]) Abundance of stable isotopes is given in mass units.			

表 6 (2)　アクチニドのインベントリ及び半減期

Nuclides	Moles of Stable Element in Repository	Becquerels per Repository	Half-Life (years)
4N+1 Chain			
Cm-245	---	1.56×10^{13}	8.50×10^{3}
Pu-241	---	1.02×10^{17}	1.44×10^{1}
Am-241	---	8.89×10^{16}	4.32×10^{2}
Np-237	---	4.31×10^{13}	2.14×10^{6}
U-233	---	2.10×10^{8}	1.59×10^{5}
Th-229	---	1.43×10^{7}	7.34×10^{3}
4N+2 Chain			
Cm-246	---	2.96×10^{12}	4.73×10^{3}
Pu-242	---	1.59×10^{12}	3.76×10^{5}
U-238	---	6.73×10^{10}	4.47×10^{9}
U-234	---	2.53×10^{11}	2.45×10^{5}
Th-230	---	8.35×10^{9}	7.54×10^{4}
Ra-226	---	1.45×10^{7}	1.60×10^{3}
4N+3 Chain			
Am-243	—	1.99×10^{15}	7.38×10^{3}
Pu-239	---	2.96×10^{14}	2.41×10^{4}
U-235	---	4.31×10^{9}	7.04×10^{8}
Pa-231	---	2.34×10^{9}	3.28×10^{4}
4N Chain			
Cm-244	---	1.83×10^{17}	1.81×10^{1}
Pu-240	---	6.46×10^{14}	6.54×10^{3}
U-236	---	5.66×10^{10}	2.34×10^{7}
Th-232	---	8.62×10^{3}	1.41×10^{10}

(Inventory for a repository containing 2693 canisters of vitrified Swiss HLW Glass four years after unloading of source spent fuel [Nagra, 1994, Tables 3.3.3 and 3.7.1])

表７(1)　Ｋ－Ｉ及び基本ケースで設定された人工バリアシステムに関するパラメータ値

Parameter	Units	Value from Kristallin-I	Comment/ Reference (All references are to Nagra, 1994.)
Waste Form Radius [r]	m	0.215	Derived from Table 3.7.2
Waste Form Length [h]	m	1.03	Table 3.7.2
Waste Form Volume	m^3	99*	Table 3.7.2
Waste Form Surface Area ($2\pi rh$)	m2	3.74e3*	Derived from Table 3.7.2
Waste Form Dissolution Time	yrs	1.50e5	Table 3.7.2; Nagra, 1994.
Container Thickness	m	0.25	Derived from Table 3.7.2
Container Surface Area	m^2	1.59e4	Derived from Table 3.7.2
Container Outer Radius	m	0.47	Table 3.7.2
Containment Time	yrs	1036	A 36** year storage period plus 1000 years of post-closure containment.
Bentonite Thickness	m	1.38	Derived from Table 3.7.2
Bentonite Outer Radius [r]	m	1.85	Table 3.7.2
Bentonite Surface Area ($2\pi rh$ x 2693 units)	m^2	6.26e4	Derived from Table 3.7.2
Length of Bentonite Backfill/Canister [h]	m	2.0	Derived from Table 3.7.2
Bentonite Porosity	[-]	0.38	Table 3.7.2
Molecular Diffusion in	m^2/yr	0.0166	Effective diffusion coefficient divided by bentonite porosity; derived from Table 3.7.2.
Bentonite			
Bentonite Density	kg/m^3	2.76e3	Table 3.7.2
Sorption on Bentonite	m^3/kg	See Table7(3), this report.	
Solubilities in the EBS	mol/m^3	See Table7(3), this report.	
DRZ Thickness	m	3.7	See Page 95 & 187.
DRZ Surface Area	m^2	1.35e5	See Page 95.
DRZ Porosity	[-]	0.01	Not defined, est. from Table 3.7.7
Darcy Flow in DRZ	m/yr	2.0e-5	See Pages 95, 96 and Table 3.7.6

* Volume and surface area for 2693 waste form units placed end to end.

** 36 years is used since the initial inventory is at 4 years for a total of 40 years out-of-reactor before disposal

表７(２)　Ｋ－Ｉ及び基本ケースで設定された亀裂媒体に関するパラメータ値

Parameter	Units	Value from Kristallin-I	Comment/ Reference (All references are to Nagra, 1994.)
Path Length	m	200	Tables 3.7.6 & 6.2.2
Geosphere Porosity	[-]	0.0025	Est. From Table 3.7.7
Advective Velocity in water conducting features of low permeability domain	m/yr	11	Table 5.3.2
Peclet Number	[-]	10	Table 3.7.6
Retardation in Unaltered Wall-Rock	[-]	1.0	Dominant retardation assumed to occur in altered wall-rock, p. 221
Porosity of Altered Wall-Rock	[-]	0.05	Tables 5.3.3 & 3.7.7
Density of Altered Wall-Rock	kg/m^3	2.6×10^3	p. 244 ¶ 1
Diffusion in Altered Wall-Rock Matrix	m^2/yr	1.0×10^{-3}	Tables 5.3.4 & 6.2.2
Penetration Depth for Altered Wall-Rock	m	5×10^{-2}	Tables 5.3.3 and 6.2.2
Specific Wet Area per Volume of Altered Wall-Rock	m^{-1}	2.36×10^{-3}	Table 5.3.2
Retardation in Altered Wall-Rock Matrix	m^3/kg	See Table 7(3), this report.	
$R = 1 + [(1-\varepsilon_p)/\varepsilon_p]\rho K_d$			

表 7 (3)　K－I及び基本ケースで設定された放射性元素の溶解度並びに吸着データ値

Element	Solubility Limit [moles/m³]§	Bentonite "Realistic Conservative" K_d [m³/kg]¶ (Table 3.7.3, Nagra, 1994)	Altered Rock "Realistic-Conservative" K_d [m³/kg]] (Table 3.7.8, Nagra, 1994)
Ni	1×10^{-6}	1	0.05
Se	1×10^{-5}	0.005	0.001
Zr	5×10^{-6}	1	0.1
Tc	1×10^{-4}	0.1	0
Pd	1×10^{-8}	1	0.05
Sn	1×10^{-2}	1	0.05
Cs	1×10^{-6}	0.01	0.042 (Nagra, 1994, pg. 244)
Ra	1×10^{-7}	0.01	0.1
Th	5×10^{-6}	5	0.1
Pa	1×10^{-7}	1	0.1
U	1×10^{-4}	5	0.05
Np	1×10^{-7}	5	0.05
Pu	1×10^{-5}	5	0.5
Am	1×10^{-2}	5	0.5
Cm	6×10^{-5}	5	0.5

(§ The "moles/liter" values [Table 3.7.3 of Nagra, 1994] are converted to "moles/m3" by a multiplicative factor of 1000. ¶"Alpha", a dimensionless input parameter of MENTOR, is the product of the sorption Kd value and the density of the bentonite backfill (2.76 x 103 m3/kg)).

表 8 (1)　基本ケース及び各計算ケースでの
人工バリアシステム関連パラメータ値

Parameter	Units	Value for Base Case	Value for Calculational Cases
Waste Form Radius	m	0.215	Held Constant
Waste Form Length	m	1.03	Held Constant
Waste Form Volume	m^3	99	Held Constant
Waste Form Surface Area	m^2	3.74e3	Held Constant
Waste Form Dissolution Time	yrs	150,000	No Change, Cases A & B 1,500 for Cases C & D
Container Thickness	m	0.25	Held Constant
Container Outer Radius	m	0.47	Held Constant
Container Surface Area	m^2	1.59e4	Held Constant
Containment Time	yrs	1026*	Held Constant
Bentonite Thickness	m	1.38	No Change, Case A 0.3, Cases B, C & D
Bentonite Outer Radius	m	1.85	No Change, Case A 0.77, Cases B, C & D
Bentonite Surface Area	m^2	6.26e4	No Change, Case A 2.61e4, Cases B, C & D
Length of Bentonite Backfill/Canister	m	2.0	Held Constant
Bentonite Porosity	[-]	0.38	Held Constant
Molecular Diffusion	m^2/yr	0.0166	Held Constant
Bentonite Density	kg/m3	2.76e+3	Held Constant
Sorption on Bentonite	m^3/kg	See Table 7(3), This report	Held Constant
Solubilities in the EBS	mol/m^3	See Table 7(3), This report	No Change, Cases A, B & C Case D-1, Type (a) Table 8(3) Case D-2, Type (b) Table 8(3)
DRZ Thickness	m	3.7	No Change, Case A 0.77, Cases B, C & D
DRZ Surface Area	m^2	1.35e5	No Change, Case A 7.817e4, Cases B, C & D
DRZ Porosity	[-]	0.01	0.025, Cases A-D
Darcy Flow in EBS	m/yr	2.0e-4	Cases A-D

表８(2)　地下水組成（タイプ(ａ)及びタイプ(ｂ)）

Element	Type (a)-Broadlands	Type (b)-Matsukawa
Na	980	80
K	200	50
Li	12.6	—
Rb	2.2	—
Cs	1.3	—
Mg	0.02	10
Ca	2.4	28.8
F	4.5	—.
Cl	1668	5.4
Br	5.3	—
SO_4	6.5	535
SiO_2	750	387
B	48	21
CO_2	117	-0-
pH (20°C)	8.6	3.5
Source T °C	260	250

タイプ(ａ)は、Broadlands, New Zealand、また、タイプ(ｂ)は、Matsukawa, Japanの地下水に基づく。［単位：ppm］

表８(3)　基本ケース及び各計算ケースでの放射性元素の溶解度制限値

Element	Solubility Limit Base Case	Solubility Limit Case D-1, Type (a) Broadlands Water	Solubility Limit Case D-2, Type (b) Matsukawa Water
Ni	$1 \times 10^{+6}$	4.0×10^{-4}	$1.0 \times 10^{+3}$
Se	1×10^{-5}	1.8×10^{-1}	$1.0 \times 10^{+3}$
Zr	5×10^{-6}	$1.0 \times 10^{+6}$	$1.0 \times 10^{+6}$
Tc	1×10^{-4}	6.7×10^{-5}	1.0 x 10+3
Pd	1×10^{-8}	$1.0 \times 10^{+6}$	$1.0 \times 10^{+6}$
Sn	1×10^{-2}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}
Cs	1×10^{-6}	9.8×10^{-3}	$1.0 \times 10^{+3}$
Ra	1×10^{-7}	$1.0 \times 10^{+6}$	$1.0 \times 10^{+6}$
Th	5×10^{-6}	1.4×10^{-4}	1.0×10^{-7}
Pa	1×10^{-7}	$1.0 \times 10^{+6}$	$1.0 \times 10^{+6}$
U	1×10^{-4}	8.7×10^{-2}	2.3×10^{-2}
Np	1×10^{-7}	2.6×10^{-4}	$1.0 \times 10^{+3}$
Pu	1×10^{-5}	1.1×10^{-4}	1.8×10^{-6}
Am	1×10^{-2}	1.4×10^{-13}	$1.0 \times 10^{+3}$
Cm	6×10^{-5}	$1.0 \times 10^{+6}$	$1.0 \times 10^{+6}$
Pb	1.0×10^{-3}	$1.0 \times 10^{+6}$	$1.0 \times 10^{+6}$

温度がＨＬＷガラスの溶解率にどのような影響を与えるかについても研究が行われている〔Bourcier(1994)[23], Ebert and Mazer(1993)[33]〕。温度の関数としての表面反応率、ガラスの力学的破壊に起因する表面積変化および拡散的物質移動率などこれら全ての要素が詳細分析には重要である。しかし、現段階ではこれらについて十分信頼できるデータも分析手段もないため、マグマ貫入によるニアフィールドの温度上昇の影響でガラスの溶解率が増大することのみが想定されている（表８(1)）。

② 地下水化学組成への影響（ＢＣＶ）

マグマの貫入は、大深度地下水の化学組成をいろいろな方法で乱す可能性があり〔Ellis and Mahan (1977)[35], Yoshida(1991)[82], Hedenquist (1991)[41]〕、これには新しい化学成分の移入、母岩の溶解促進、或いは液相と気相の間での揮発性成分の分割を可能とする二相状況の発生も含まれる（Arthur and Murphy, 1989)[18]。ここでは、マグマの貫入によって追加成分の移入、最終的な陰イオンの増加、pHの変化（特に強酸性へ）、および処分場周辺地下水の酸化還元電位の変化（特に酸化への傾向）がもたらされることを想定する。

地下水化学組成のこのような変化が与える大きな影響は、放射性元素の溶解度に対するものだけと想定される。地下水化学組成の変化に起因する放射性元素の溶解度に関するデータは、かなり強い条件つきで検討しなければならない。これはほとんどの放射性元素の熱力学的データが、温度25℃の場合でも質的に劣っており、また実際に放射性元素を含むどんな固形廃棄物が処分場の中で形成されるかの判定に不確実性があるからである。温度100℃を越える地下水（これは一定の火山活動シナリオの場合、ＨＬＷ処分場の加圧部分で起こり得る）の場合、放射性元素の溶解度に関する信頼できるデータはほぼ皆無と言っていい。

これら計算ケースを説明するために、二つの異なる地下水化学組成を選んだ（必ずしもこれに限定されないが）。それは、ａ)塩化物の多い、pHが中性の還元性塩水、およびｂ)硫酸塩と重炭酸塩の多い、酸性の酸化性希釈水である〔Ellis and Mahon (1977)[35] 62～63ページ、表3-2〕。表8(2)は(ａ)と

(ｂ)の地下水についてそれぞれニュージーランドのブロードランズと日本のMatsukawaから採取したものの化学組成を推定したものである。

これらの水は Data0.com.R22データベースを使ったＥＱ3/6ソフトウェアパッケージに入っている（Wolery，1992）[81]。データの信頼性を最大限に高めるために、25℃の温度を使用した。ＥＱ3/6のソフトウェアは温度の上昇が溶解度に与える影響を計算できるが、高温の場合の熱力学的データがごく少ないため、この分析を拡大適用するのは無意味であり、誤解を生む恐れもある。溶解度を限定する相は酸化物とも水酸化物とも想定され、酸化物または水酸化物が測定されない場合は炭酸塩の相を想定する。同一の放射性元素について水酸化物相と酸化物相の両方の溶解度データがある場合は、前者を選ぶ。これは水酸化物の溶解度の方が控え目に見ても酸化物の場合よりも高いからである。上記二つのマグマ水の計算上の溶解度を、Ｋ－Ｉ報告書で使われた溶解度とともに表８(3)に示す。

放射性元素の多くは、上記の状況と想定のもとではこれら二つのマグマ水に対して、溶解度制限的な固体を形成しないことに注意したい。MENTORの計算上、溶解度の数値はリットル当たり10モルと想定する。但し、実際にこの濃度に到達することはあり得ず、これら放射性元素の初期放出はＨＬＷガラスの溶解率によって制約される。一部放射性元素の場合、これら二つのマグマ水で推定された溶解度は実際にはＫ－Ｉの計算で使われたものより低いことにも注意したい。この違いには、異なる熱力学的データベースの使用、溶解度制限相に関する想定の違い、並びにＫ－Ｉの分析で使われた地下水の化学組成の違いなど多くの理由があると思われる。ここでは、マグマ貫入に起因する地下水の変化が主要放射性元素の溶解度を大幅に変える可能性があることに注目する必要がある。

③ <u>ガス発生への影響（ＢＣⅥ）</u>

大深度マグマ本体に起因する処分場の深さにおける遊離ガス相の形成〔Cathles (1977)[26], Norton(1977)[53], Ellis and Mahon(1977)[35]〕は、いずれ検討しなければならない現象である。二相水理学モデルは、大深度の水理学的に飽和状態のサイトを検討する処分場計画に必ずしも当てはめられ

ないが、一定の火山活動シナリオを理解し評価することは必要と思われる。ただしこの計算ケースでは、二相流のモデル化は行わない。

④ 応力場への影響（ＢＣⅢ）

熱的・水理学的・力学的に完全に連結したコードの概念に関する知識はすでに調査されてはいる（Zhou et al. 1995）(84) が、この計算ケースではそれを使用していない。この試算ケースでは、一部ファーフィールドの流量パラメータをＫ－Ｉでの基準数値から変化させている。この変更は、火山活動の影響を受ける可能性のある流量と流路の変化をシミュレートすることを意図したものである。

マグマ貫入による応力場の変化はファーフィールドの割れ目が開き、地下水の流量が増える原因になると想定される。表９は火山活動によって変化すると想定されるファーフィールドのパラメータを示している。

表９　基本ケース及び各計算ケースでの地質圏関連パラメータ値

Parameter	Units	Value for Base Case	Value for Calculational Cases
Path Length	m	200	Held Constant
Geosphere Porosity	[-]	0.0025	0.025, Cases A-D
Adective Velocity in Water Conducting Features	m/yr	11	110, Cases A-D
Peclet Number	[-]	10	Held Constant
Retardation in Unaltered Rock	[-]	1.0	Held Constant
Porosity of Altered Rock Matrix	[-]	0.05	0.005, Cases A-D
Diffusion in Altered Rock Matrix	m^2/yr	1.0e-3	Held Constant
Penetration Depth for Altered Rock Matrix	m	0.05	0.005, Cases A-D
Specific Wet Area per Volume Altered Rock	m^{-1}	2.36e-3	2.36e-2, Cases A-D
Retardation in Altered Rock Matrix	[-]	See Table 7(3)	Held Constant
Darcy Velocity, Aquifer	m/yr	3.15e+2	Held Constant
Aquifer Porosity	[-]	0.2	Held Constant
Aquifer Cross Section	m^2	4000	Held Constant
Retardation in Aquifer	[-]	1.0	Held Constant

(3) 計算ケースの結果

図８は、Ｋ－Ｉの基本ケースについての計算上の線量率曲線と計算ケースＡ～Ｄを組み合わせたものの線量率曲線を示している。まず図８(1)はＫ－Ｉ報告書から取った実際の線量率曲線をそのまま示している〔Nagra (1994)(12) 346ページ、図6.4.1a〕。図８(2)はMENTORコードを用いたＫ－Ｉ基本ケースについての全線量率曲線と時間の経過とともに放出される主要な放射性核種の個別の線量率曲線とを示す。図８(3)はファーフィールドの流量特性に対する影響だけを考慮した計算ケースＡの場合の結果である。図８(4)は計算ケースＢ（ファーフィールドの流量と埋め戻し材の厚さ減少への影響）の結果を示す。図８(5)はファーフィールド、埋め戻し材、およびＨＬＷガラスの溶解率についての累積的影響を示す計算ケースＣの結果である。最後に図８(6)と図８(7)は、それぞれマグマの貫入がファーフィールドの流量特性、埋め戻し材の厚さ減少、ガラス溶解率上昇、および放射性元素溶解度上昇による累積的影響を想定した計算ケースD_1とD_2の結果を示す。

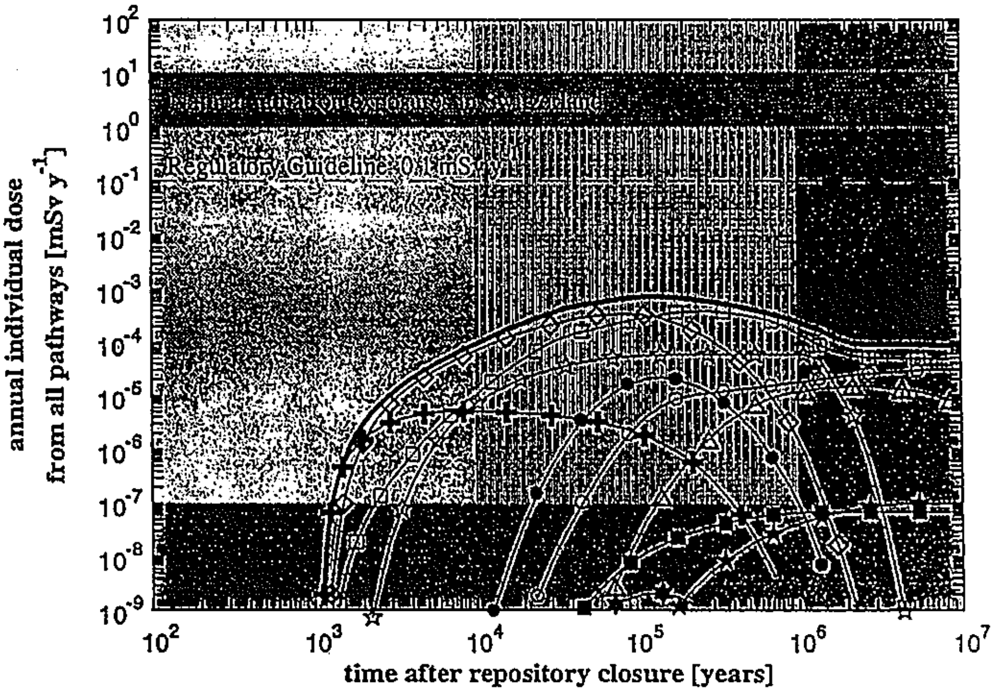


図８(1)　Ｋ－Ｉ－人工バリアシステムから生物圏への直接放出
[Nagra, 1994より]

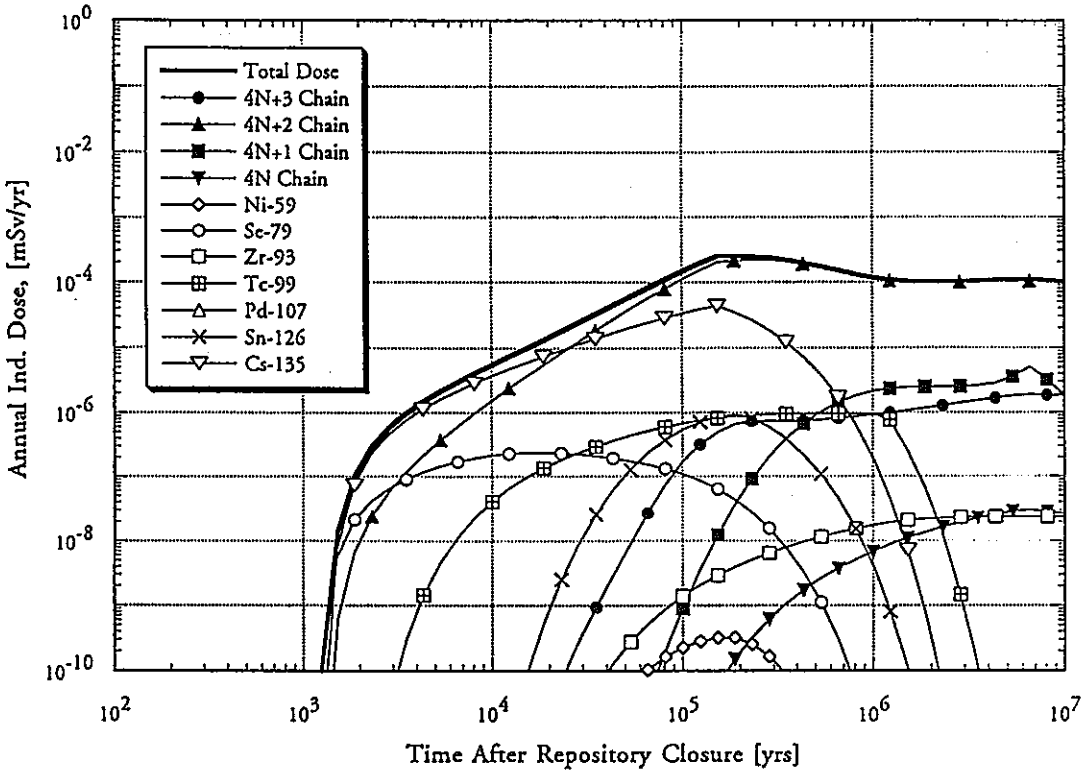


図 8 (2)　K－I 基本ケースの入力データを用いてMENTORコードで
計算した主要放射性核種の線量率

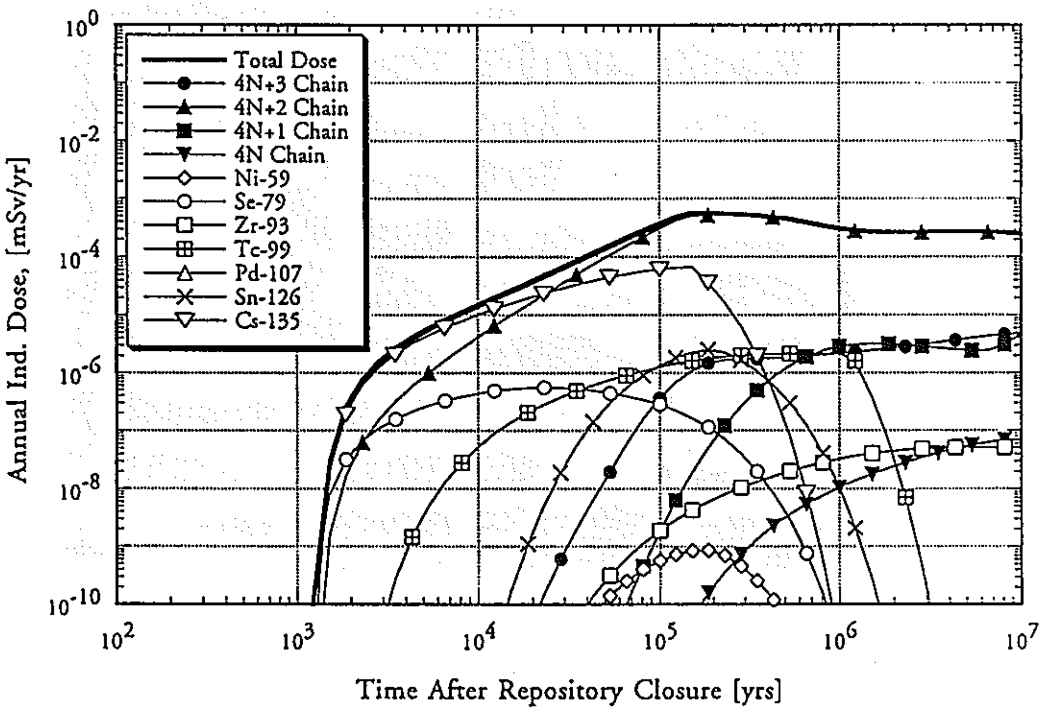


図 8 (3)　計算ケースAに対してMENTORコードで計算した主要放射性核種の線量率

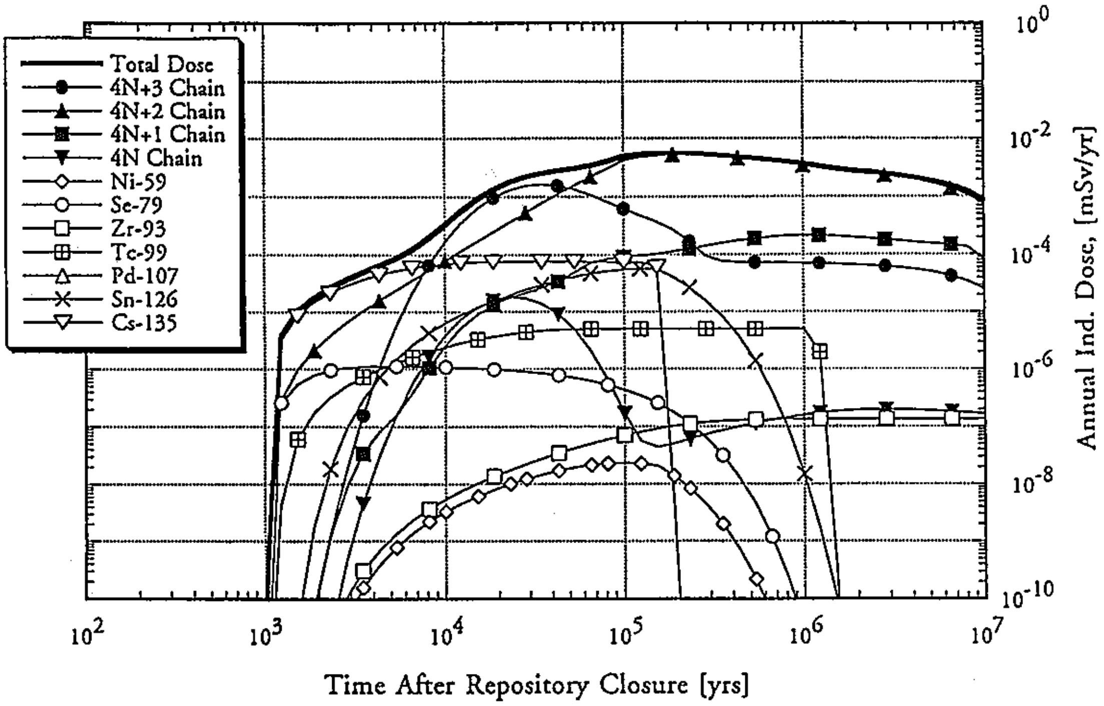


図 8 (4)　計算ケースＢに対してMENTORコードで計算した主要放射性核種の線量率

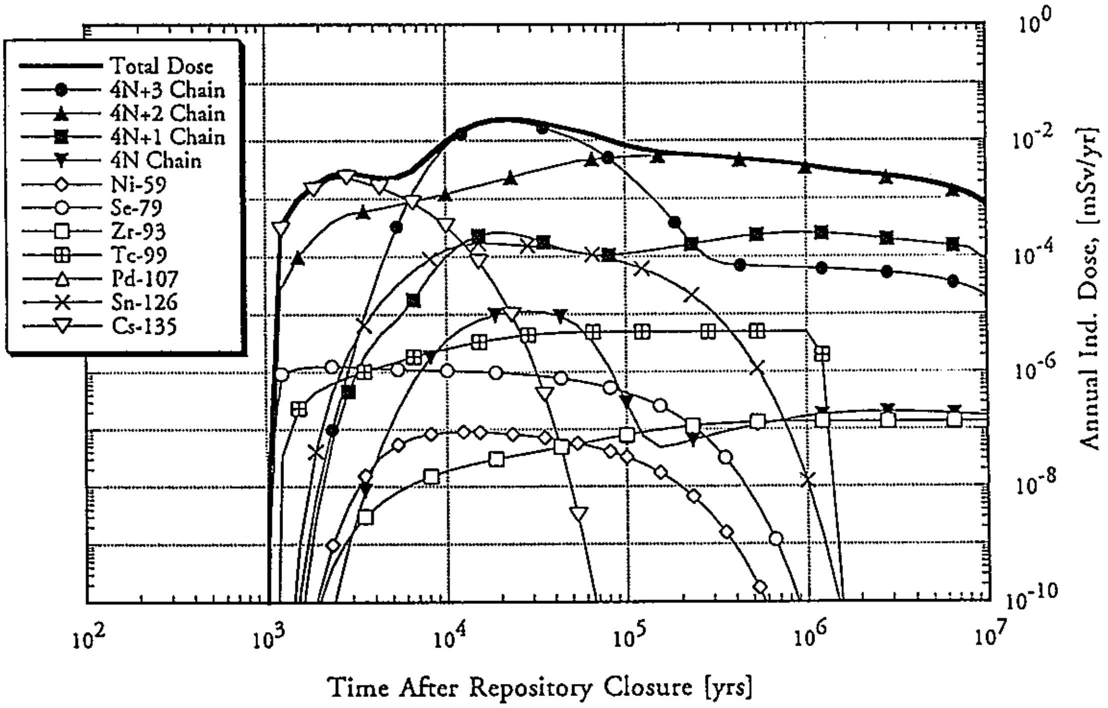


図 8 (5)　計算ケースＣに対してMENTORコードで計算した主要放射性核種の線量率

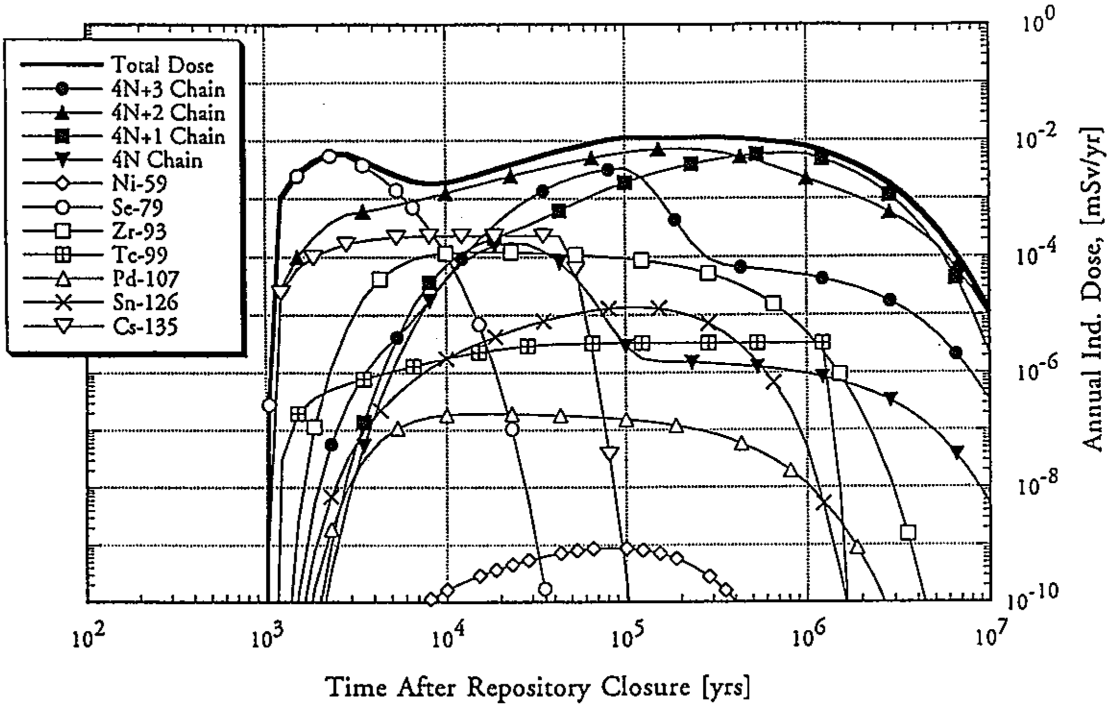


図 8 (6)　計算ケースＤ１に対してMENTORコードで
計算した主要放射性核種の線量率

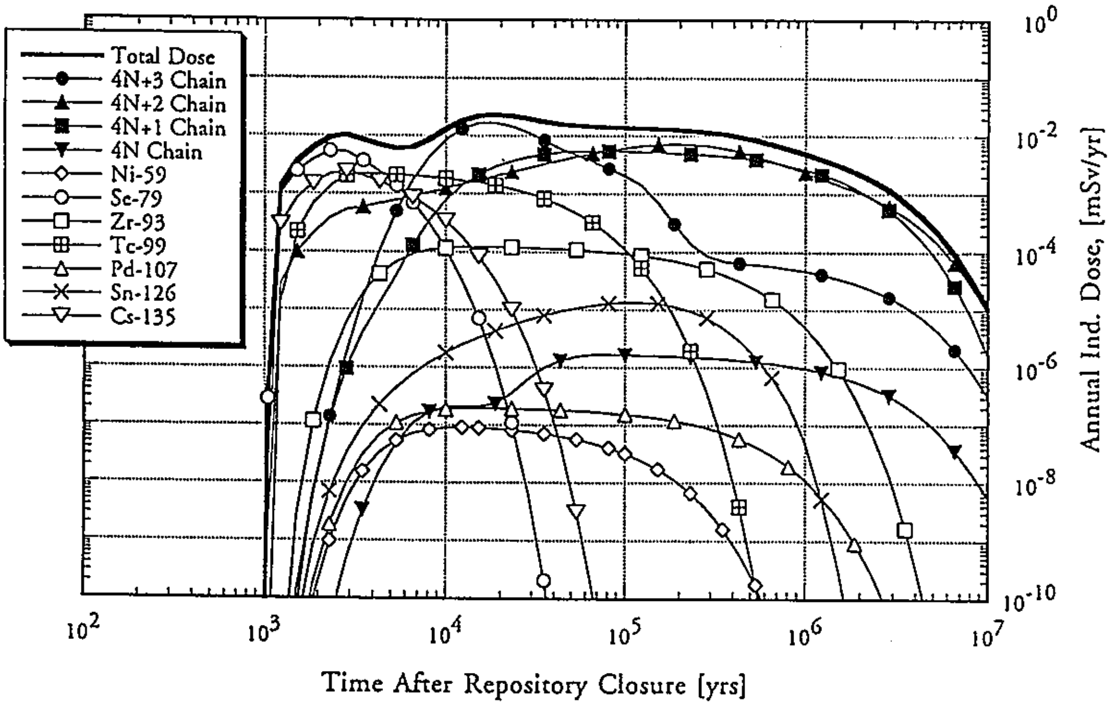


図 8 (7)　計算ケースＤ２に対してMENTORコードで
計算した主要放射性核種の線量率

(4) 結果の検討

図8(1)と図8(2)を比べると、K－Iの入力データを使ったMENTORによる線量率曲線（即ち、基本ケース）とK－Iにおける実際の線量率曲線がよく一致していることがわかる（MENTORの結果とK－Iの実績とを比較したもっと詳細な検討結果については付録Dを参照）。図8(1)も図8(2)も、処分場閉鎖から20万年後に2×10^{-4}mSv／年のピーク線量率が発生することを示している。個々の放射性核種の線量率曲線の位置、形状、規模もよく一致している。二つの計算で若干の違いがあるのは、主として図8(1)の線量率が全ての経路からのものであるのに対して、図8(2)の線量率は飲料水の経路だけからのものであるためである。このため、図8(2)の曲線は図8(1)の曲線より若干低くなっている。二つの曲線の若干の違いは、HLWガラスの溶解度、娘アクチニド元素の放射性崩壊／内部生成の取り扱い、EBSと地質圏のインターフェースの取り扱いに関する概念モデル、およびファーフィールドの流量の概念モデルの違いにも原因がある。これら二つのデータを比較する詳細な分析は本報告書の埒外と考えられる。

図8(1)と図8(2)に基づき、Cs－135と4N＋2（ウラン系列）アクチニド崩壊連鎖のRa－226が、基本ケースの入力パラメータの場合にK－I型処分場で予想される全線量率の大部分を占めることは明らかである。これはファーフィールドの流量状況だけがマグマ貫入によって影響を受ける（即ち、化学的影響はない）計算ケースA（図8(3)）の場合も同じである。

図9(1)は基本ケースと計算ケースAの全線量率曲線を示している。計算ケースAは基本ケースに比べ、約2.5倍で線量率が一様に上昇している。計算ケースAに含まれるファーフィールドの流量特性の変化を考えれば、この差分係数は小さ過ぎるかも知れない。この結果は、処分場の地質圏部分、特にその流量特性が処分場全体の安全性にとってはあまり重要でないという Nagra、SKB、その他HLW処分場の結論を裏付けるものである。

図9(2)は基本ケースと計算ケースBの全線量率曲線を対比したもので、後者はファーフィールドの流量特性の変化とベントナイト緩衝材厚さの減少を含む。計算ケースBの線量率曲線は基本ケースの約30倍高くなっている。更に、図8(4)を見れば、Cs－135と4N＋2アクチニド連鎖（主としてRa－226）に加えて、

約２万年後には４Ｎ＋３連鎖からの核種が一時的に線量率の大半を占めることがわかる。

図９(3)は計算ケースＣ（ファーフィールドの流量特性の変化、緩衝材の厚さの減少、ＨＬＷガラス溶解速度の上昇）と基本ケースの全線量率曲線を示している。計算ケースＣの場合、特に初期（10万年後まで）のCs－135 と４Ｎ＋３アクチニド崩壊連鎖核種の線量率が大幅に増大する（図８(5)参照）。計算ケースＣと基本ケースの比較では、基本的に全ての放射性核種のピーク線量率が大幅に増大し、かつ初期に発生することに注意する必要がある。

図９(4)と図９(5)はマグマ貫入の累積的影響（ファーフィールドの流量特性、緩衝材厚さ、ガラスの溶解速度、放射性元素の溶解度の変化）と基本ケースの全線量率曲線を対比している。初期（１万年後以内）にはCs－135ではなくSe－79が線量を増大させる主要な核種であることが興味を引く。これはマグマ水に対するCsの溶解度が基本ケースで使用された溶解度よりも低く、一方Seのマグマ水に対する溶解度は基本ケースの場合より高く計算されているためである（表７(3)参照）。１万年後以上の期間については、４Ｎ＋２、４Ｎ＋３、および４Ｎ＋１のアクチニド崩壊連鎖核種が全線量率の主要な部分を占めている。

図９(6)は基本ケースと計算ケースＡ～Ｄの全ての全線量率曲線をまとめたものである。全線量率の主要な部分を占める放射性核種は、初期の段階（＜10,000年）ではCs－135とSe－79、後の段階では４Ｎ＋２、４Ｎ＋３、および４Ｎ＋１のアクチニド崩壊連鎖核種である。予想された通り、ファーフィールドからＨＬＷガラスに向かうマグマ貫入の累進的影響がＫ－Ｉ型の仮想的処分場の線量率曲線を累進的に増加させている。全線量率の最大の増加は、ベントナイト緩衝材の劣化とＨＬＷガラスの溶解率上昇に現れる。マグマ水がＨＬＷガラスと接触して発生するアクチニドの溶解度変化の影響は、温度上昇によって想定されるＨＬＷガラスの溶解率上昇にある程度隠されている。

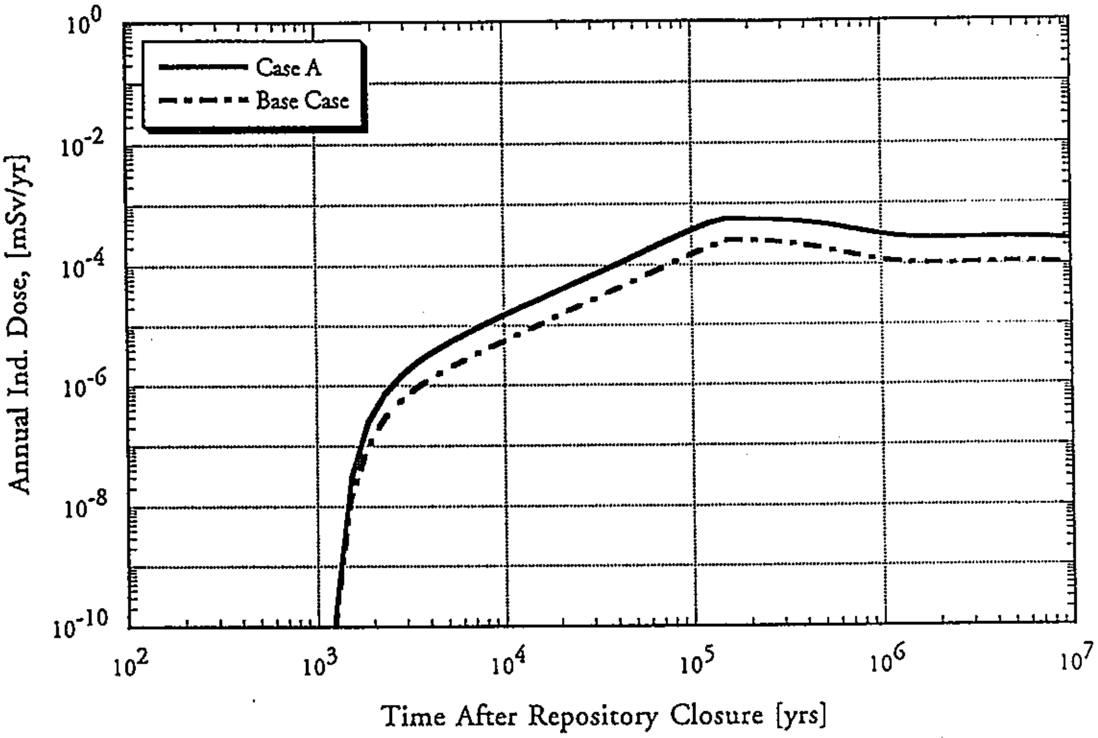


図９(1)　計算ケースＡとＫ－Ｉ基本ケースの全線量率曲線の比較

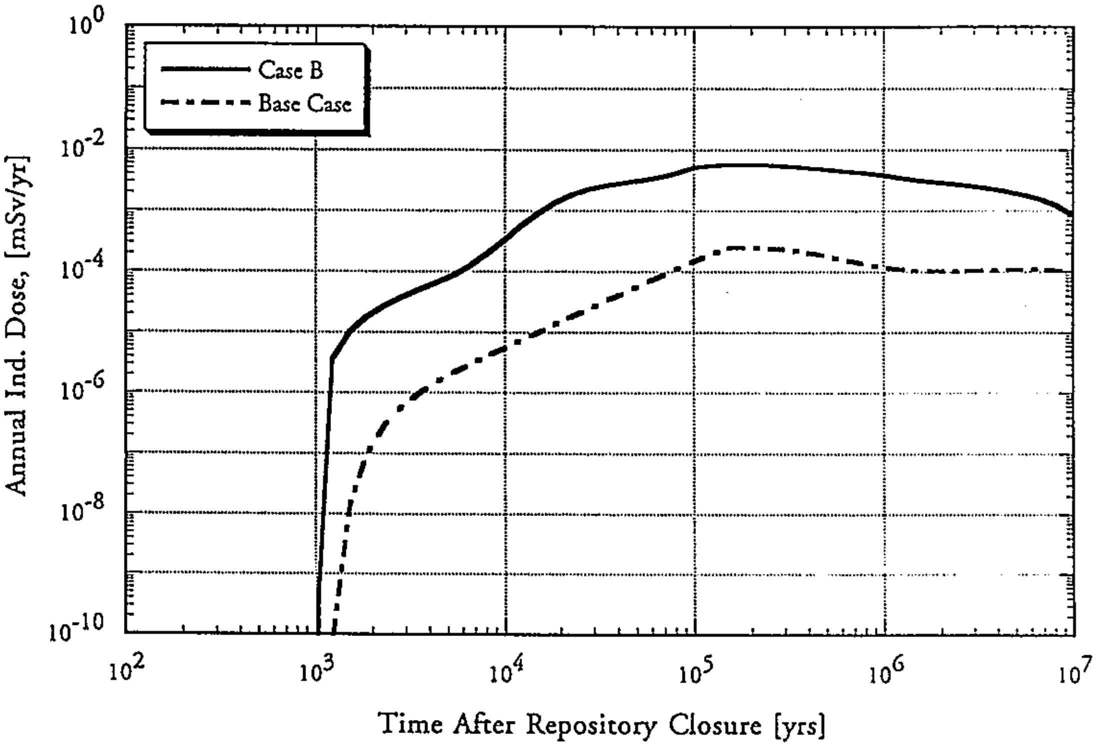


図９(2)　計算ケースＢとＫ－Ｉ基本ケースの全線量率曲線の比較

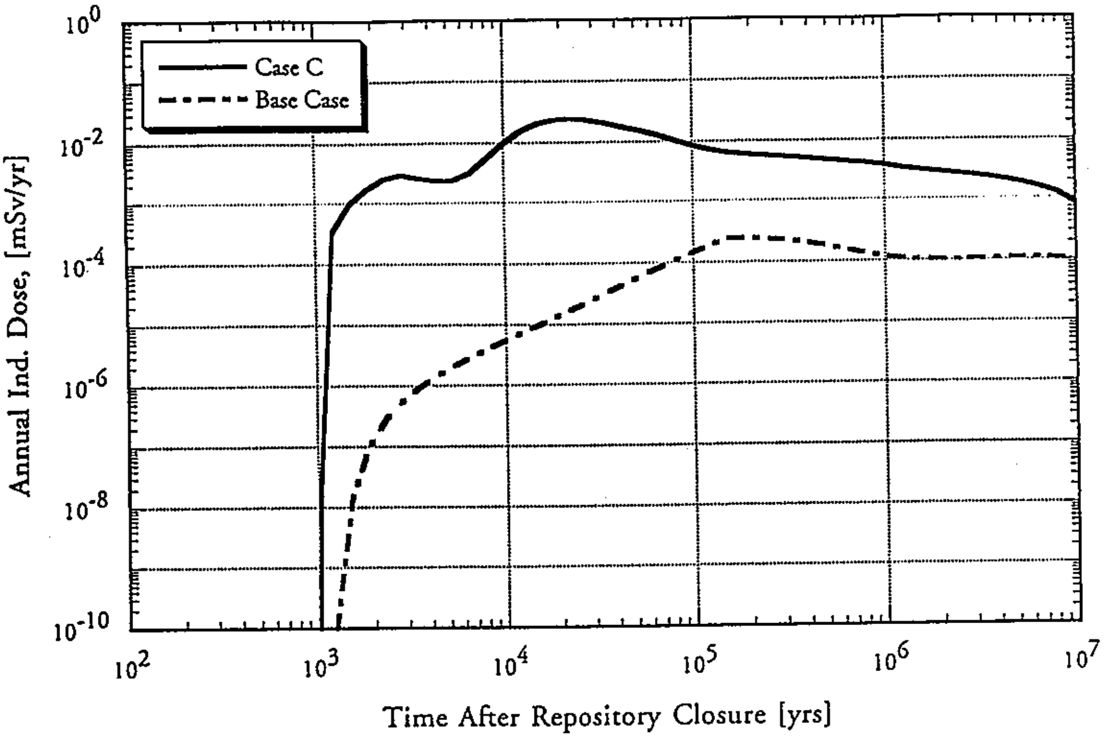


図９(3)　計算ケースＣとＫ－Ｉ基本ケースの全線量率曲線の比較

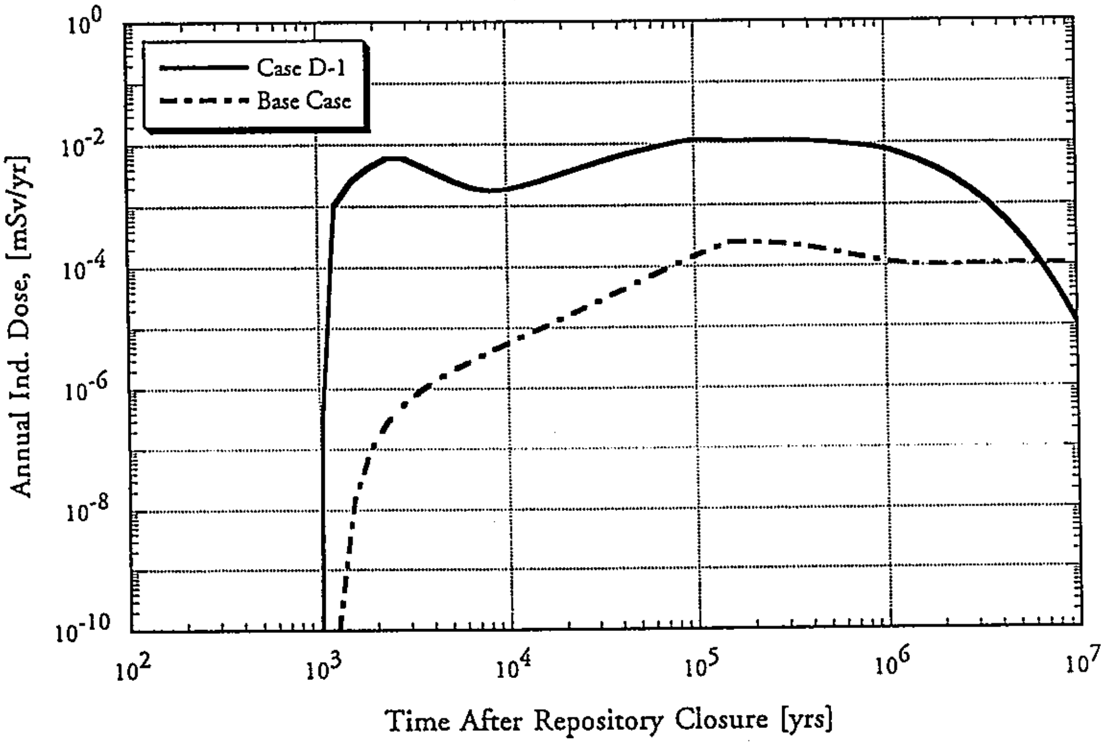


図９(4)　計算ケースＤ１とＫ－Ｉ基本ケースの全線量率曲線の比較

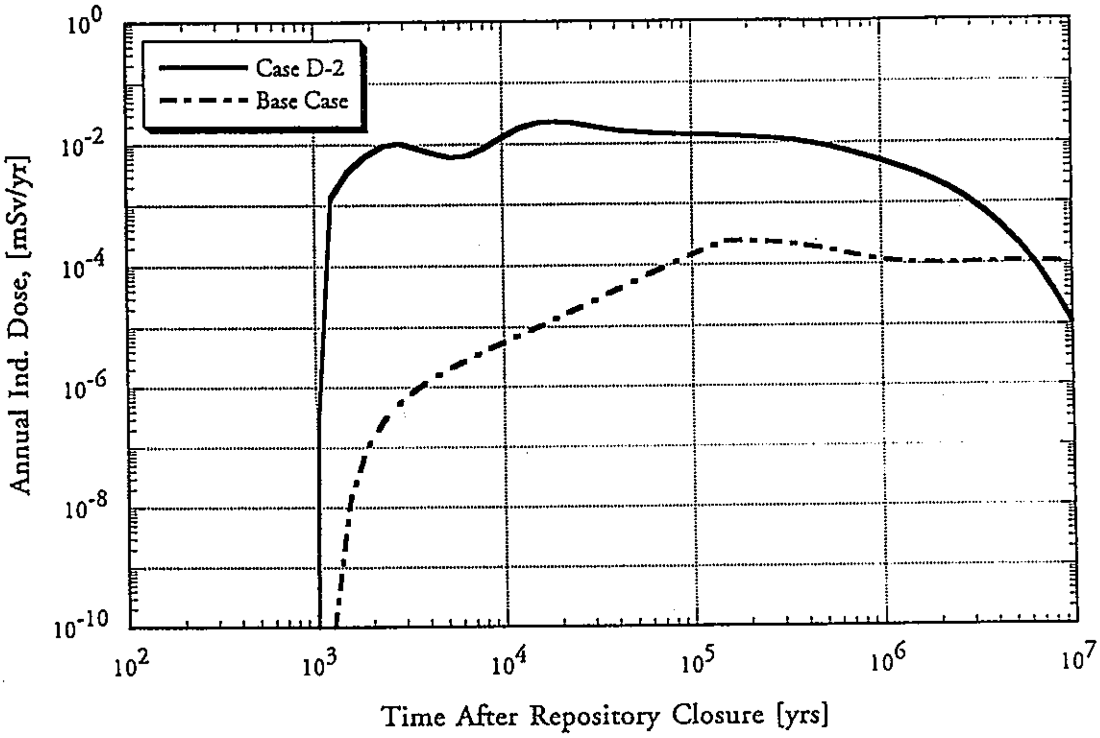


図９(5)　計算ケースＤ２とＫ－Ｉ基本ケースの全線量率曲線の比較

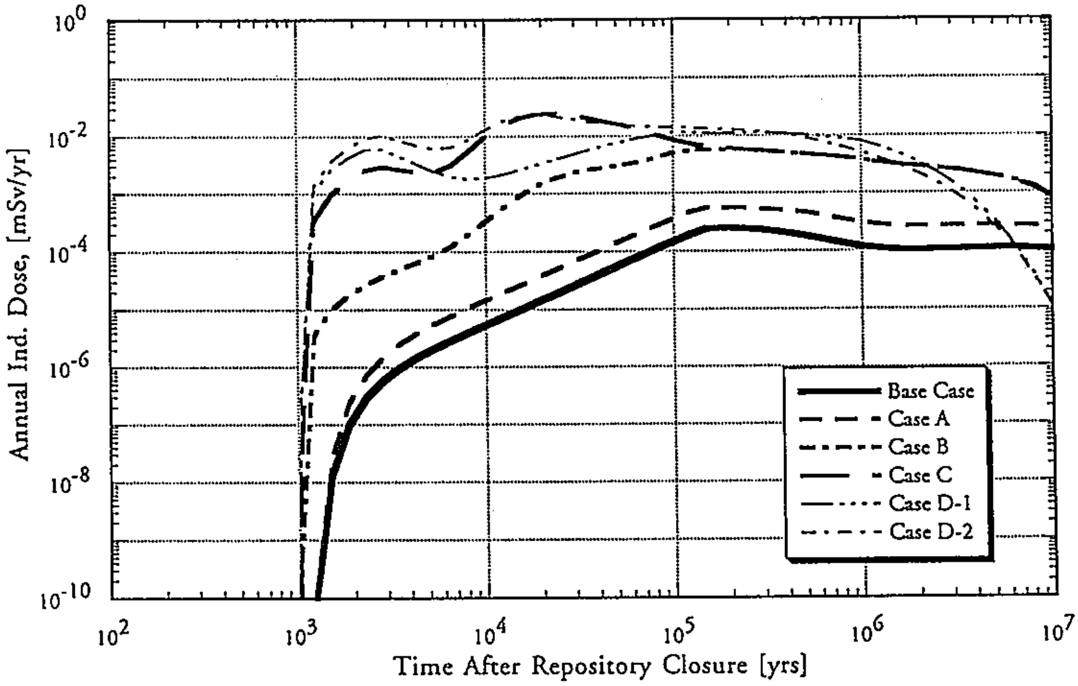


図９(6)　全計算ケース及びＫ－Ｉ基本ケースの全線量率曲線の比較

1.2　地震・活断層シナリオ[13]

地震・活断層を起点とするEPSMを図10(1)に示す。

活断層は、他のシナリオ、特に、火成活動及び隆起・侵食によっても引き起こされる。“すでに存在している断層の特性”には、現存する岩石の不連続部の方向や長さ、処分場に対する空間的な位置、移動の時期や変位の履歴、構造地質学、亀裂の鉱物化、等に関する情報が含まれる。火成活動シナリオ同様、サイト特性によって処分場近隣の将来的な活断層発生規模及び頻度を低減もしくは防止し得る。さらに処分場近隣の未検知もしくは特定できない断層も問題となり得る。最終的には、断層運動により、ファーフィールドの温度や地下水化学の変化に至る可能性も考えられるが、非常に低い影響と考えられるので、ここでは検討対象から除く。

1.2.1　序論

地震・断層活動シナリオは、動燃殿が現在から1999年までの間に研究する問題として選択したシナリオの一つである。現段階の分析では、地震・断層活動シナリオが高レベル廃棄物（ＨＬＷ）処分場の運用に与える影響について、ユニバーサル「プロセスインフルエンスダイアグラム」（ＰＩＤ）の変更を行っている。これは、Apted（1994）の第２／３章で説明されたユニバーサルＰＩＤから始めて、このＰＩＤの中の影響連鎖を変更することによって可能となる。これら変更は、地震・断層活動によって起こり得る力学的、熱的、化学的、水理地質学的特性の外部境界条件を勘案することによって行われる。新たなＦＥＰの可能性も考慮に入れられる。

地震・断層活動に関連する作用を図10(2)に示す。この図には各作用間の相互関係及び地震・断層活動が熱的、化学的、力学的、水理地質学的境界条件に与える影響も示されている。

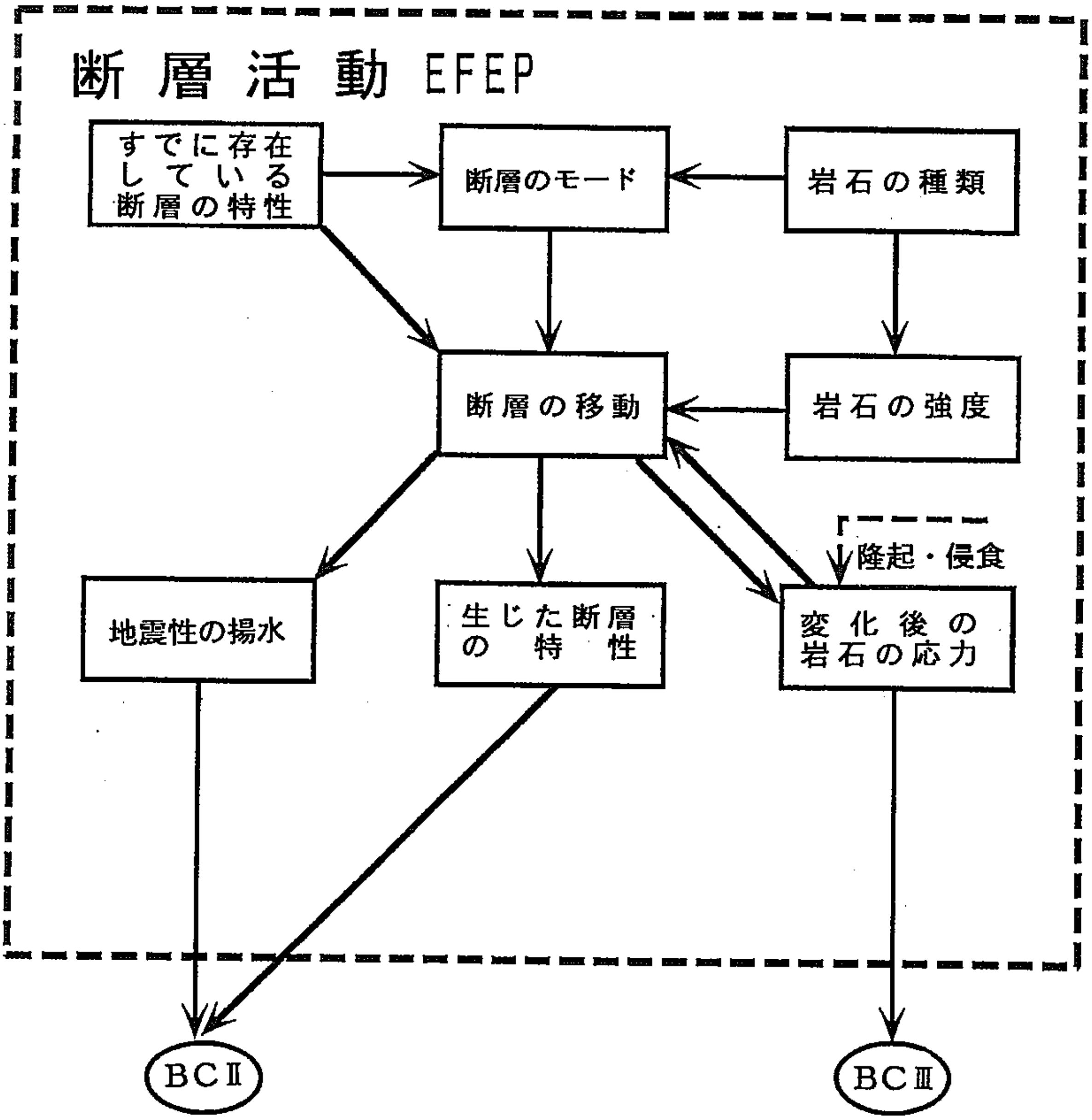


図10(1)　断層活動ＥＦＥＰに対するインフルエンス・ダイヤグラム

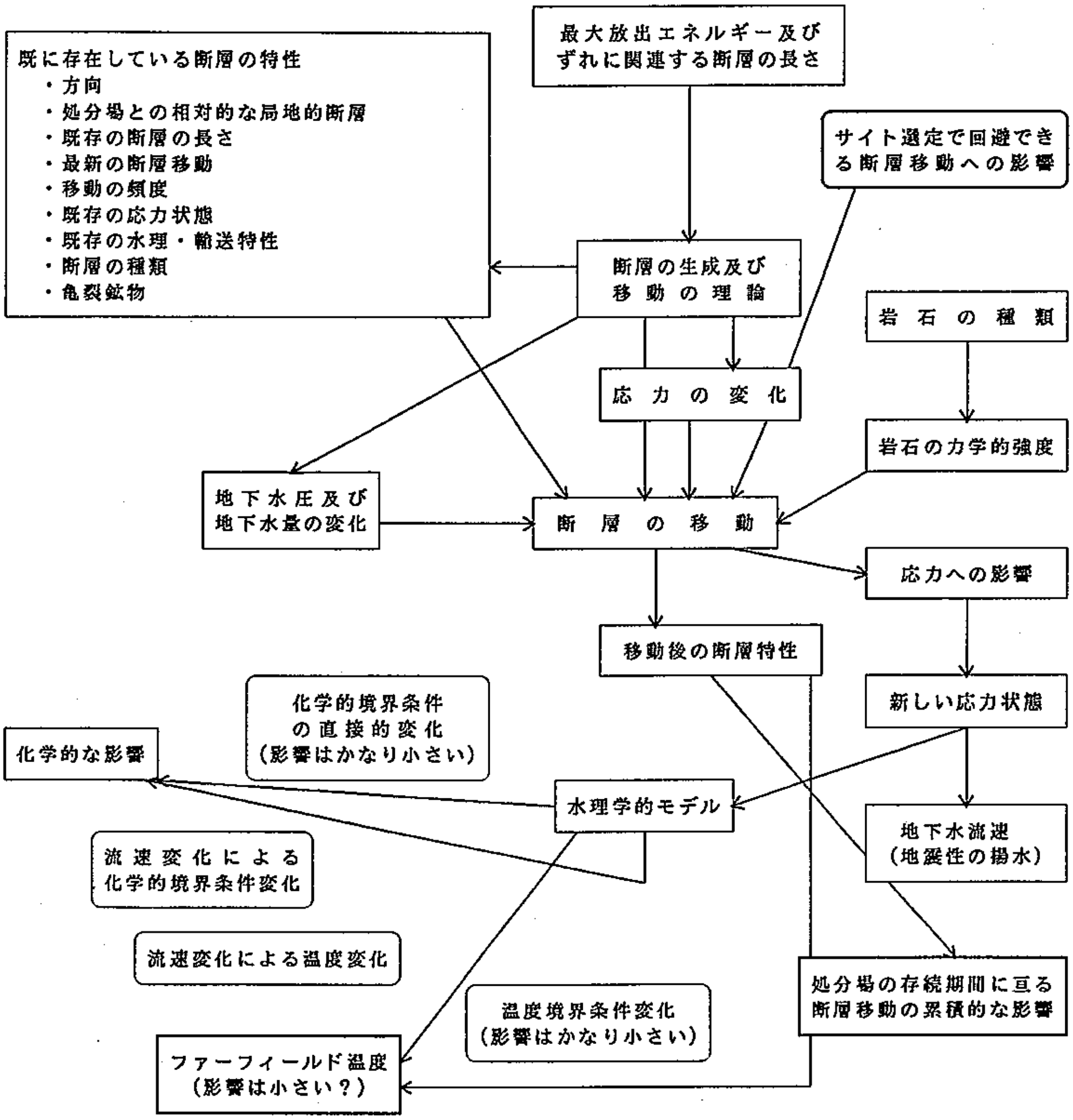


図10(2)　化学、熱学、力学、水理学の各境界条件への影響を反映した地震・活断層に関連する様々なプロセス間の関係

図10(2)にリストアップした作用を以下の各項で説明する。特に下記の作用について論ずる。

・日本における現在の地殻変動の状況との関連における地震・断層運動の重要性

・下記と関連する地震・断層運動の理論

　－現場応力

　－歪率

　－地下水への影響

　－熱の影響

・地震・断層運動に関連する最大エネルギー放出

・断層の長さと地震・断層運動に起因する最大震度との関係

・地震・断層運動の再発間隔

・活断層、休止断層、無地震断層、及び「消滅」断層として分類される断層の定義と、それらの違い

・断層の水理学的特性と溶質物質輸送特性

・地震・断層運動を起こす岩の種類が断層の特性に与える影響

・地震揚水作用の影響

・地震・断層運動の影響を受ける処分場システムで考えられる主要な変化

1.2.2 断層運動と関連地震活動の理論

過去数年来、活発に変形する大陸地殻の上半部（即ち、この意味では日本の大部分）で発生している地殻移動の大部分は地震断層によって起こり、この地域で地殻移動の原因となっているのは大規模地震だけということが明らかになっている〔例えば、Sibson (1989)[65], Bombolakis (1992)[20]〕。伝統的に、地震学者は断層系の中の増分滑動に、また構造地質学者は断層沿いの全面的な地殻移動とそれに関連する限定的であるが複雑な移動に、それぞれ関心を持ってきた。一般的に、地質学者は固い岩盤の回転との関係で起こる限定的な断層移動を、完全な平面の剪断移動を対象とする一定の滑動ベクトルを使用して分析するように教えられている。これら想定のいずれも、地震の際の孤立的な滑動増分についても、

長期的な地殻移動についても、正しいものとは思われない。これに関連して、どの断層運動が本当の脆性破壊作用に入るかという問題がある。地震による破断の場合、最大地震滑動（u_s）と破断の長さ（L_s）の間の比率は、一般的に下記の範囲内にある（Rikitake, 1975）。

$$10^{-4} > u_s / L_s > 10^{-5} \quad (13)$$

この比率は、破断の伝播を伴う剪断応力の変化の近似値である。この値は非常に小さく、岩石の弾性限度の中に十分入るため、地震学者は断層を十分な弾性値を持つ周辺媒体の中に生ずる脆性剪断破断と考える傾向がある。しかし地質学者にとっては、断層上の限定的移動は急速に消えるので、断層がもっと遙かに延性の高い構造に見える。最大有限移動（u_f）の断層全長（L_t）に対する比率は、断層が発達するにつれて大きくなる傾向があり(Walsh and Watterson, 1988)[78]、いずれ下記の数値に到達する可能性がある。

$$u_f / L_f \sim 0.1 \quad (14)$$

これは、断層の末端周辺にも常にこの程度の永久応力が発生することを意味する。

世界で歪が発生している地域、特に米国西部で得られる現場の証拠によると、多くの断層の運動及びそれと関連する褶曲の一部は、断層滑動率が$1\ ms^{-1}$の範囲にある地震断層、または10^{-5}～$10^{-6}ms^{-1}$の範囲にある断層クリープによって発生することを示している（Bombolakis, 1992)[20]。滑動が安定か不安定かを決める基本的要素は、弾性剛性及び速度に左右される断層減衰の二つである。断層の行動を摩擦理論と流れ法則だけを使って特徴づけると、問題が発生する。例えば、断層上の鉱物の鏡肌は通常緩慢な断層クリープを示唆するものと見なされる（必ずしも正しいとは言えないが）。これに対して、液体圧力の変動による鉱物の堆積は、周期的な地震滑動によっていくつかの剪断地帯に沿って鉱床として発達するというように推論されている（例えばSibson et al. 1988）。

地殻上半部（即ち、深さ10～15kmの最上部で、現場の地温勾配とそれによる脆性層／延性層遷移帯への深さによって左右される）は断層によって破壊され各種サイズのブロックになっており脆弱な地帯をなしているが、地殻下半部とマントル上層部では、変形はもっと連続的になっている。何回かの地震に伴う地域的な歪の場は、ある種の連続体で予想される変形とあい通ずるものがある（この場合

の連続体はマントル上層部と地殻下半部である）（Bombolakis[1]，1992)(20)。延性又は粘性が同質の等方性の媒体では、剪断応力は歪又は歪率に比例する。自由表面に働く剪断応力の構成要素と通常の応力は消える筈で、従って水平面の剪断歪と歪率も地表では消える筈である。このため、歪率の主軸は垂直／水平方向でなければならない。いくつかの地域における地震関連の断層運動を分析したEkströms and England (1989)(34)によると、歪率を、当該地域を横切る相対的プレート運動から予測されるのと同類の何組かの要素に「分割する」[2]ことは確かに可能である。

Richard and Cobbold (1989)(61)の実験をまとめたこの分析は、深部における連続的な変形が可能であること、及び地殻上半部、特にプレートが斜めに収斂する地域（即ち、日本）における変形を純粋な走向滑動とその近辺における断層に典型的な純粋な圧縮に分割すれば多くの断層の形状を説明できること、を示している[3]。これに関連する地域的な垂直／水平方向の主応力が垂直方向であるとすれば、地殻上半部のブロックにおける応力は単に当該地域の移動の場（深部では連続的だが、地表近くでは不連続）に適応するのに必要な方向をとるだけである。従ってこの移動の場は、基本的に固いブロック（プレート）の間にある連続的な媒体の形状と作用によって決まる。これに対して地表近くの応力の場は、境界部に近いブロックの相対的運動により複雑になっている（例えば、Weldon and Springer，1988)(79)。

---

[1] しかし日本では、クリープにより変形した断層はないとされている（RGAF，1992）。日本の断層には地震による急速な滑動をはさむ地震間休止期間がある。従ってここでは、日本における全ての断層関連の変形は地震に関連すると想定している。このため、断層運動に随伴する地震を勘案せずにこの運動を論ずることはできない。

[2] 主軸がこういう方向をとると、歪率の場は純粋な走向滑動、純粋なスラストおよび純粋な正断層運動に関連する基本歪と歪の場を重ね合わせたものとして説明することができる。これら三つの基本歪は二つの直交エレメントの一次結合として発生し得る。

(1) 断層に関連する地震活動度

地震活動は変形する大陸地殻の上部３分の１から半分にほぼ限定され、その下限は温度300～350 ℃における緑片岩層変成作用発生条件によって決まるようである（Chen and Molnar, 1983）[29]。これにより、図11〔Sibson (1986)[64] による〕に示すようにバックグラウンド地震活動によって定義される地震生成層という概念が生まれる。力学的に見れば、地震生成層の基部は不安定な摩擦断層運動からマイロナイト（展砕岩）層における準塑性剪断変形への転移帯を表すものと考えられる。これは大規模な地震破断（Ｍ＞６）[4] が発生する傾向のある推定剪断抵抗の高い地域として特殊な力学的特徴を持っている。

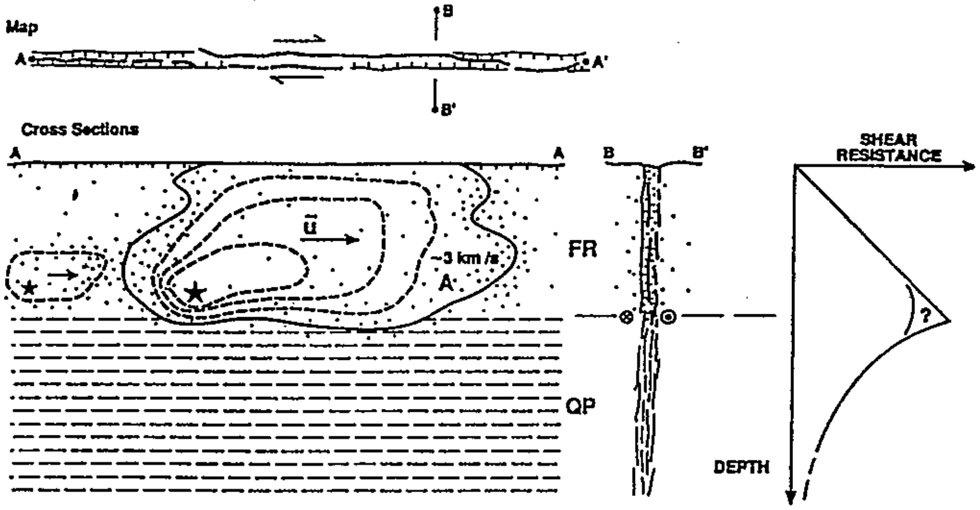


図11　背景に地震活動が存在する場合に設定し得る地震動学的体系

脚註）バックグラウンド微小地震活動によって定義される地震生成層における走向滑動地震破断と余震活動を、断層剪断抵抗とそれが不安定な摩擦断層運動(FR)から局地的な準塑性(QP)剪断変形への転移帯近辺でピークとなる深さを表す合成図との関係で示す〔Sibson (1986)による〕。断層縦断面図は、ＦＲ／ＱＰ転移帯近辺の核形成部分（★部分）から～３km／sの断層面に大きな破断が広がっていることを示す。平均滑動(ｕ)は地震生成地帯の全部または一部を占める最終破断地域(Ａ)における平均値である。

---

[3] 断層活動を分割するための通常の「必要条件」は、この分割が脆弱な断層（即ち、摩擦束縛の弱いもの）の存在によるものということである。この摩擦束縛は必ずしも必要でないが、束縛が強くても断層が脆弱な可能性を否定するものではない。

[4] ここで言う地震のマグニチュードは、Hanks and Kanimori (1979)[39] のモーメント／マグニチュード関係式に基づく、モーメント誘導のマグニチュードＭである。

(2) 地震破断の規模／頻度分布

地震の活発な地域では、各種規模の地震の頻度は、Gutenberg-Richter (1944)(37)の下記の累積的関係式に従う。

$$\log N(M) = a - bM \qquad (15)$$

ここでN（M）はマグニチュードM級又はそれ以上の地震の回数、aとbは当該地域特有の定数である。ほとんどの地域では、bの数値はほぼ1であり、従って一般的にマグニチュードが1ずつ小さくなるにつれて地震の頻度は約10倍多くなる。ニュージーランドなどある程度地震の活発な地域では、例えばM８の地震は平均して100年に一回、Ｍ７は10年に一回、そして恐らくは１年以内にＭ６が一回、～Ｍ５が10回、～Ｍ４が100回というように発生する可能性がある。非常に広い範囲で見れば、地殻地震に関連する剪断応力の低下（Δｒ）は極めて一定している。一般的に言って、Δｒは0.1～10MPaの範囲内、対数平均で～３MPaになる。応力の低下が一定な状況では、地震の頻度とマグニチュードの関係は破断地域Ａの規模／頻度分布として下記の形をとると解釈することもできる（Andrews, 1980）(16)。

$$N(M) \propto 1/A \qquad (16)$$

(3) 「特徴的な地震」という概念

過去数十年の地震研究で主として明らかになったことは、標準的な頻度／マグニチュード関係式（(15)式）が個々の断層地域には当てはまらないという認識である。特定の断層、または大規模断層地帯の一部は、その断層に特有な特徴である最大マグニチュードの地震によりかなり一定間隔で破断が発生する場合が多いという証拠がある。完全に「特徴的な地震」は必ずしも発生しないが（即ち、個々の断層は異なるマグニチュードで破断することが知られている）、同じ断層で大規模地震の間に起こる小規模地震の頻度は一般的に頻度／マグニチュード関係式から予想されるよりずっと少ないことは明らかである。従ってどの地域の場合も、頻度／マグニチュード関係式はそれぞれ特徴的な破断規模を持つ断層集合体の統計的傾向に基づいて、(16)式に従って作成できると思われる。

特徴的な地震作用は、構造的に重要な意味を持つ。この作用は、特定の場所

に特徴的な地震破断の開始と終了を左右する構造的制御機構の存在を必要とする。これら制御機構は、継時的な地震サイクルを通じて長期間存続しなければならない。

(4) <u>応力レベルと応力サイクル</u>

断層運動は、断層に蓄積された剪断応力を解放するために発生する。断層運動の後の剪断応力の減少は、地震学的測定により立証されている。特徴的な地震作用を示す断層地帯の地震生成部分では、剪断応力は$\Delta\tau \leqq$10MPaの範囲内で鋸歯状の振幅を示すと予想される（図12）。このサイクルは下記の四つの段階に分けることができる。

α段階：何世紀にもわたる、主として弾性歪の蓄積

β段階：地震前の非弾性変形の可能性があり、恐らくは前震と加速的な前兆滑動を伴うもの

χ段階：主震破断とエネルギー放出

δ段階（地震後）：減少する事後滑動と余震で、時間に逆比例して衰退

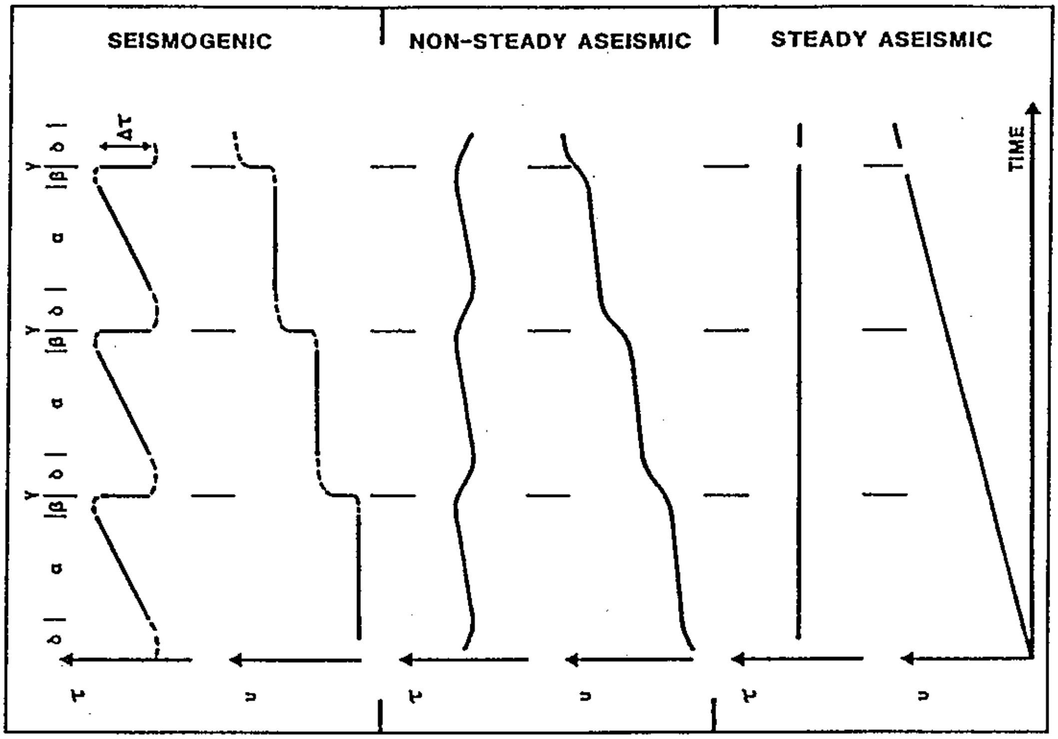


図12　地殻の断層帯に生じ得る(亜)地震性のすべりに対する剪断応力τ及び変位(υ)の一時的変化（after Sibson, 1986)

地震の応力サイクルは、何世紀にもわたる歪が蓄積するα段階、非弾性変形の可能性があるβ段階、応力低下（Δr）を伴う主震破断の発生するχ等震段階、及び事後滑動と余震が減衰するδ段階に分けることができる。

これに対して、サンアンドレアス断層地帯のクリープ部分で発生する、或いは地震生成層より深い所で想定される地震以外による安定的な剪断活動は、恐らくほぼ一定の剪断応力の下で発生すると思われる〔日本では、このような地震以外によるクリープは発生しないようである（RGAF, 1992）(59)〕。

剪断応力の振幅水準は、地震の活発な断層地帯を取り巻く地殻の中で横方向にかなりの距離まで広がっている筈である。応力の乱れている地域の広がりは、主として主震破断の規模に左右される。垂直断層に乗る地震生成層を貫いて広がる非常に長い走向滑動破断によって切断された地殻の場合、移動モデルは、等震歪（と応力）が断層痕跡の両側10～15ｋｍ以内にある地震生成地帯の数値の約50％に低下していることを示している（Mavko, 1981）(47)。断層の間隔が～40kmの地域では、地殻上半部の全部でなくてもほとんどが、これら断層における現象によりある程度の応力サイクルの影響を受けると想定することができる。破断の網目を通る液体の流れなど応力に基づく作用は、応力サイクルにより段階的に変動する可能性がある。

地域的応力の場がかかる応力の変動によって乱される程度は、断層運動を起こす応力の絶対水準に対する応力低下の比率に左右される。地震生成層において滑動が始まる剪断応力の水準（τ_i）は確かでない。地震研究では、下記の両極端を想定する。

1．観測された大規模地震と対比し得るτ_iは～10MPaで、従ってΔr／τ_iは～1となる。この場合、破断の地震効率は高く、放出される歪エネルギーのかなりの部分が地震波として放射される。
2．τ_iが～100MPaで、従ってΔr／τ_i≦ 0.1となり、地震効率は低く、滑動中にエネルギーのほとんどは断層に分散される。

第一の場合、断層周辺における応力の方向は各滑動のあと強く乱される可能性があり、後者の場合、この効果は小さいと思われる。

1.2.3 活断層、休止断層、消滅断層

日本では、活断層研究班（RGAF）（1992）[59]が活断層を、地質学的に最近の時点で繰り返し運動し、将来も再発する可能性のある断層として定義している。この定義はBonilla(1970)[22]による以前の定義に従ったものである。Muir Wood and Mallard (1992)[49]が優先した定義は、活断層として分類するためには反復的な運動がある必要はないという点で若干違っている。Muir Wood and Mallard（前掲）には、「地質学的に最近の時点」という用語の意味に関する議論もある。米国の原子力規制委員会（ＮＲＣ）は「可能性ある断層」という定義を考案し（ＮＲＣ,1982）、過去35,000年以内に１回または過去500,000年以内に複数回運動したものをこれに当てはめている。一方カリフォルニア州では、過去10,000年以内に（即ち、完新世以来）運動したものを活断層としている（ＥＰＡ，1981）。これらの期間は何らかの調査技法による限度（例えば、35,000年というのは^{14}Ｃのほぼ上限）か、或いは単に最近の地質時代の継続期間のいずれかに基づいたものである。Muir Wood and Mallard（前掲）は、「類似の地質構造層」を対象とする期間という考え方が望ましいと提案している。

断層運動は外部の力による反復的な現象である。このような現象では、休止を直接観察することによってだけでなく、かかる現象が何故どのように起こるかを理解することによっても活動が停止したという結論に到達でき、下記の二つの取組方法が採用できる。

- 活動が停止しているという直接観察による結論は、再発極限間隔よりも相当長い期間を根拠とする必要がある。これは、活動が停止しているという現象学的証拠を提供する。
- 再発活動の停止は、外部の誘発力が変わったか、またはかかる誘発力に反応する内因的力が大幅に変わったことを反映している筈である。こうした相互依存関係を完全に理解すれば、活動が停止しているという力学的な証拠を提供できる。

現象学的証拠について見ると、何らかの外因的／恣意的期間（人間の歴史の中で記録されているものなど）ではなく、問題の現象の再発期間を根拠としなければ、活動が停止しているという証拠は十分なものとは言えない。火山の噴火につ

いても同様の取組が可能である。力学的な証拠について見ると、火山の単純なモデルでマグマの供給が途絶えた場合、或いは火口が永久的にふさがれた場合などがこれに当たる。しかし実際面では、非常に長期間にわたって活動が発生していない場合を除いて、かかる力学的な議論に適した十分な証拠を集めることは極めて難しい。

(1) 活断層の分類

しかしここでは、現在日本で使われている活断層の定義と考え方を使用する。日本の断層地質構造はカリフォルニア州などの地域のものとは若干違っており、日本の現在の活断層で連続的クリープによって特徴づけられるものはなく、地震の際に動くだけである（RGAF, 1992）[59]。従って、「活断層」という用語は、現に動いている断層ではなく将来動く可能性のある断層に適用される。断層を活断層と分類する際の第一の基準は、地質学的に最近の時点に活動したという証拠である。RGAFは地質学的に最近の時点の定義として「第四紀」を使っており、従って、活断層とは過去200万年の間に運動したものを言う。

日本では、活断層は下記の4種類に分類される。

・第四紀の地形学的地面または地層を累増的な変位量で置き換える断層。

・第四紀初期の地層を置き換えるが、第四紀後期の地形学的地面または地層は置き換えない断層。

・短期間（例えば、火山噴火の期間）だけ運動し、それ以上活動しない火山地帯の断層。

・日本アルプスなど高山地帯の尾根で観測される小規模の通常の断層で、これら地域の重力的不安定性に関連すると判断されるもの。

これら四種類のうち、第一のものは将来再活性化する可能性が高いので、最も重要である。日本の活断層のほとんどは、この部類に属するが、RGAFは活断層地図に他の分類に属するものも含めている。

日本では過去 100年間に、大地震に関連して約20の地表面断層が発生した（RGAF, 1992）[59]。この種の断層は「地震断層」と呼ばれている。地表面には何の変化もないが大地震と関連する断層は「地震生成断層」と呼ばれる。大規模岩石変形に関する現在の理論（1.2.2節参照）は、地殻上半部の変形の大部分

は大型地震とそれに伴う断層運動によって直接影響を受けるか、それらに関連していると見なしている。ほとんどの地震断層は、地震学的方法で探知されている地震生成断層が地表面に現れたものである。

(2) 活性化の可能性が最も高いのはどんな断層か？

露頭として観察できるもの、反射法地震探査でわかるもの、或いは地震活動度でわかるものを問わず、断層は移動規模の階層的分布を示す。地表面で発見される断層の多くは、地震生成地殻を貫通するもっと大きな断層の二次的派生物か、局地的撓曲に対応して形成される地表面構造のいずれかである。断層運動の歴史が完全に観察できる場合、再活性化の傾向に従って断層の特徴を「分類」することは可能である（Gabrielsen, 1984）[36]。このような証拠は断層の「診断方法」を確立するのに役に立ち、断層運動の歴史が完全にはわからない他の地域にも応用できる可能性がある。

力学的に言って、現在の地質構造の中で動いたことはないと立証できる断層「消滅断層」と呼ぶことができる。この地質構造に何らかの変化があれば－日本では地質学的に言って比較的短期間（100万年以内？）に起こる可能性があるが－そういう断層は再活性化する可能性がある。例えば、古第三紀／新第三紀の境界線における日本の地質変動には明確な不連続性があり、これは西部太平洋プレートの一つのもぐり込む方向が変化したためと思われる。廃棄物処分場の閉鎖後の段階で同規模の変化が起こることも想像できるが、これはありそうもない。

(3) 活断層の認定

日本のように地質が複雑で活造構学的活動が高い水準にある国では、活断層の存在を妥当な信頼度で探知することができるかどうかを知ることが重要である。これら全ての断層を高い信頼度で探知することが可能であれば、廃棄物処分場のサイト選定計画ではこうした断層の存在する場所を除外して、施設に与える可能性のある影響を減ずることができる。選別作業で使用するデータの信頼度が低いと、処分場の長期的性能に対してかかる断層が与える可能性のある

問題を考慮に入れる必要がある[5)]。

今のところ、処分場を活断層から十分離すための効率的なサイト選定計画によってどの程度の軽減策がとれるか判断することは不可能であり、従って当分の間は断層活性化が処分場に与える可能性のある全ての影響を考慮に入れる必要がある。

RGAF (1992)[(59)]は活断層を確度により3段階に区別する－確度水準Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ－ことを提案している。日本で見つかっている確度水準Ⅰの活断層は極めて厳密に定義されており、その位置、移動方向、最後に動いてからの期間から見て90％以上の可能性を持つものとされている。図13は断層の確度水準を判断するのにRGAFが準拠した手順を示している。定義によると、これら断層は地表面には痕跡がないが処分場に重大な影響を与え得るものであり、地図には表示されておらず、詳細なサイト特性調査でのみ探知できるものである。従って、シナリオ分析で詳細に検討するには、活断層の存在、位置、将来の活動について相当な不確実性が内在している。

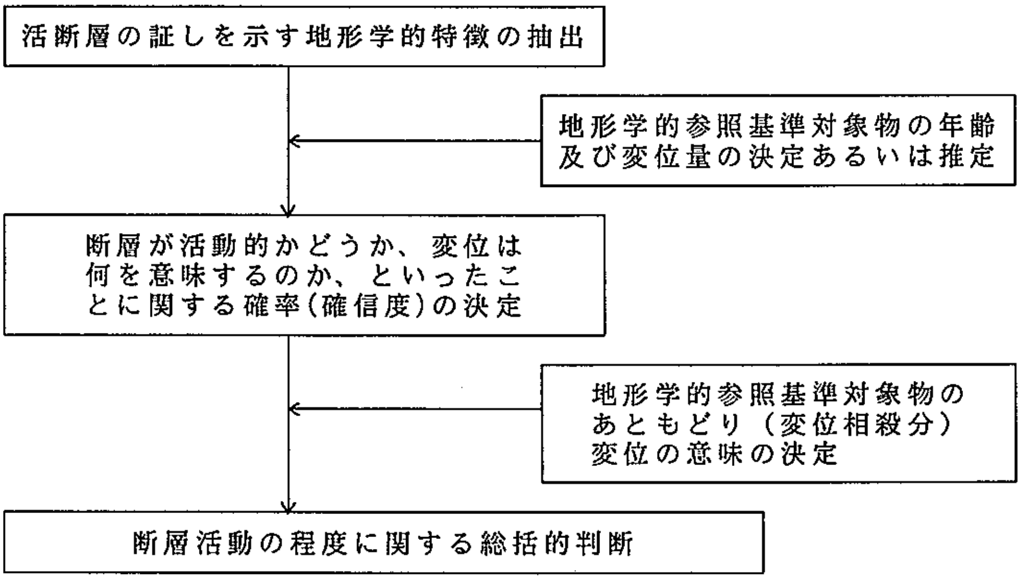


図13　RGAF採用の手順（RGAF, 1992 参照）

5) 活断層が投げかける問題の例として、韓国当局がＬＬＷ処分場候補地としてクルップ島を除外した最近の決定があげられる。これは「相当な地震のリスク」がある少なくとも二つの活断層のためである。

(4) 断層活動の程度

断層活動の程度は長期的（過去何万年以上）な活断層の平均滑動率（即ち、第四紀層または年代で分けた地形的基準の移動量）で表される。断層活動の程度をRGAF (1992)[59]は、Aクラス（10^3年$^{-1}$にメートル単位の規模）、Bクラス（10^3年$^{-1}$に10cm単位の規模）、Cクラス（10^3年$^{-1}$に1cm単位の規模）に分類している（表10参照）。断層活動の程度は将来の地震活動における大規模地震の再発時期を推定する重要な指標となる。断層活動の計算に必要なデータが不十分な場合、クラスA／B／Cの分類に地形的基準の新鮮さ（つまり風化の程度）が使われる。第四紀のいずれかの時点に動いた形跡のない断層（即ち、第四紀後半に動いた可能性のないもの）も同じ方法で分類され、従ってその滑動率の計算は第四紀全体で平均すると極めて小さなものとなる。

表10　長期走向速度に基づく断層活動の程度の分類（RGAF, 1992より）
第4紀期間中の平均走行速度（m 10^3 y^{-1}）

Class	AA	A	B	C
Average slip rate (S)	$100 > S \geq 10$	$10 > S \geq 1$	$1 > S \geq 0.1$	$0.1 > S \geq 0.01$

(5) 海中活断層

海底ではほとんどの場合地上より浸食が遥かに少ないため、断層などの地質構造がよく保存されている。処分場を沖合に立地させるのは、長期的安全性から見て明らかに有利であり、従って海底構造の探知・分析を検討することが重要である。連続的な反射法地震探査により海底の輪郭を正確に知ることができ、RGAFは海底の移動としても海底で層をなしていない堆積物の移動としても活断層活動を探知できる基準を設定している（RGAF, 1992)[59]。

日本周辺の海底では多くの大規模地震が発生しており、その多くは津波を伴っている。日本の太平洋側における大規模地震は、歴史時代全体を通じてほぼ同じ海域で繰り返し発生しており、平均再発間隔は約180年である。これに対して、地上における大規模地震は比較的間隔が長く約1000年であり、日本海側の

地震も数百年の再発間隔となっている。

(6) 日本の地震断層

地球の地殻上半部（深度<15～20km）で大規模地震（M≧７）が発生すると、通常の場合震央に近い地表に地表変形（線状の断層、断崖など）が現れる。RGAFはこれら地震断層を全てリストアップしている（RGAF, 1992）(59)。地震生成断層に関連する地震断層は通常特に明確であり、地震生成断層が地表に現れたものと判断することができる。

地震断層の長さ（ℓ）と移動量（d）は、一般的に関連する地震のマグニチュード（即ち、エネルギーの散逸）が大きくなれば増大する。日本の内陸部地震断層の場合、下記の経験的公式が設定されている。

$$\log \ell = 0.6M - 2.9 \text{（km単位のℓ）} \quad (17)$$

$$\log d = 0.6M - 4.0 \text{（km単位のd）} \quad (18)$$

マグニチュード７／８の地震によって生成される断層の長さは、それぞれ約20kmと約80kmであり、発生する移動はそれぞれ約 1.5ｍと６ｍである（これら数値には大きなバラツキがある）。一回の地震で多数の地震断層が生成されると、全ての地震断層を包含する円の直径はℓに等しくなると想定される。

活断層は地殻上半部で発生する大規模地震の震源であり、歴史上知られている被害の大きかった地震の震央のほとんどは、理論的に言って地図上に示された活断層の近くに位置している筈である。M≧6.5で過去100年間に地上で発生した損害の大きかった地震の80%は、地図に示した活断層の上又は５km以内にある。従って放射性廃棄物処分で考えられる問題は下記の通りである。

- これら地震は全て活断層から妥当な（即ち、判定可能な）距離（即ち、30km以内）で発生したか？
- それが判らない場合、残りの地震の位置の決定要因は何であったか？　また処分場のサイト計画でこれら地域を避けることができるか？
- 日本の中で長期間にわたり大規模（M≧6.5）地震の可能性が小さいと判断できる場所があるか？
- そうでない場合、国の特定の場所で起こり得るマグニチュードの最大限度を想定することができるか？

・地震の再発間隔は特定の場所で変わる可能性があるか（処分場閉鎖後ＰＡ段階で）？

(7) 活断層における地震のマグニチュード予測

日本における活断層は全て地震学的に活性であり、地震の発生にともなって断続的に動いており、地震と地震の間の無活動期間にはクリープはない（RGAF, 1992)(59)。前記の(17)式は地表面変形の原因となる地震のマグニチュードと変形地帯の長さ（地震断層群の全長）との間の関係を定義するものである。一般的に、地震断層が長ければ長いほど、起こり得る地震のマグニチュードは大きくなる。長さＬの活断層によって生成されると予想される地震の最大マグニチュード（M_L）について日本に適用できる経験的公式は下記の通りである。

M_L ＋（log Ｌ＋2.9）／0.6〔(17)式から導いたもの〕 -------- (19)

大規模地震に関連する地表面地震断層は、いくつかの断層線又は断層群からなる場合が多い。従って、(17)式を使って起こり得る地震の最大マグニチュードを推定するために、分布する活断層を一つの単位にまとめる必要がある。一つの大規模地震の原因となった一群の活断層は「地震性活断層」と呼ばれる。日本には、200km以上に及ぶ非常に長大な断層がいくつか存在する（例えば、中央構造線断層系）。

地震の際に、断層の全長にわたって地震に関与する可能性はなく、中央構造線断層系は、例えばサン・アンドレアス断層のように、複数の地震性活断層部分に分割することができる。将来起こり得る地震の最大マグニチュードと再発間隔を推定する際には、この分割状況を明らかにすることが重要である。

日本には、長大な活断層が稠密に分布している地域と、ごく少数の短い断層しかない地域とがある。(19)式を使って、予想される最大規模の地震によって日本を区分けすることができる。図14は日本の「予想最大震度分布図」である。

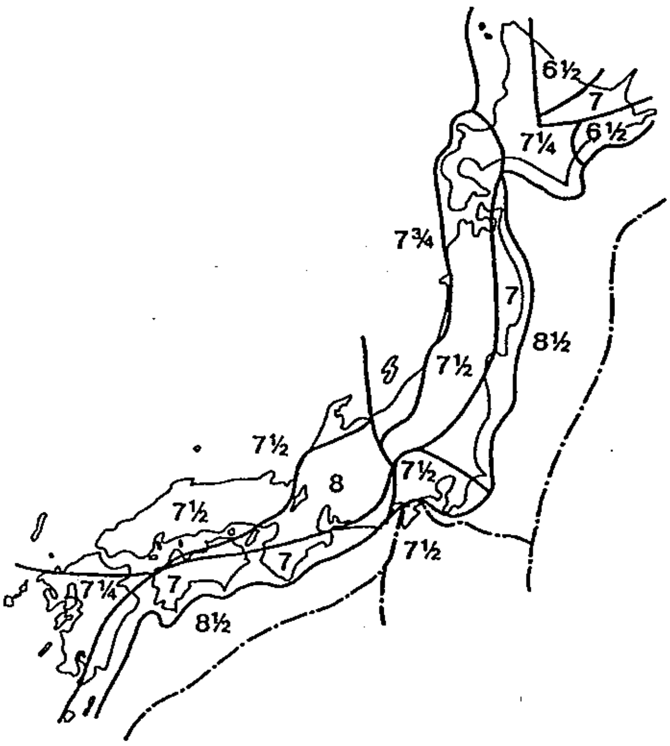


図14　活断層データに基づく日本の地震地帯
（数字は各地帯の推定最大地震規模（マグニチュード）を表す（RGAF, 1992より））

活断層に関連する最大規模の地震は下記の関係式を使っても予想することができる。

$$\log M_o = 1.94 \log L + 23.50 \quad (20)$$

ここで、Lは地震性活断層の長さ（km）、M_o は地震のモーメント（ダインcm）である。この関係式は日本の内陸地震のデータから得られた（Wesnousky et al. 1984）[80]。地震のモーメントは物理的な地震の規模を示し、下記の式で表される。

$$M_o = \mu D A \quad (21)$$

ここで、Dは断層移動（cm）、Aは断層の面積（cm^2）、μ は地殻上半部の剛性（約3.3×10^{-11}ダインcm^{-2}）を示す。

(8) 活断層のない地域

活断層は将来起こり得る地震の発生源であるとともに、過去の地震に関する証拠も持っている。日本の活断層の研究は広範囲にわたっているが、活断層活

動の証拠がない地域で将来地震が発生する可能性を否定するにはまだ十分とは言えない。従って、そういう地域も将来大規模地震（M＞6.5）のリスクが完全にないとは必ずしも言えない。過去の大規模地震が地表面に何の痕跡もとどめていないこともあり得る。更に、(17)式は長さ10kmの活断層がM＜6.5の地震と関連し得ることも示唆している。しかし、この公式をそのように短い活断層に適用することは推奨できない（RGAF，1992）(59)。

長さ数ｋｍの活断層の場合は、下記の可能性を検討する必要がある。

1．地図化が不十分なため及び／又は断層運動の保存に適さない条件のため、断層のごく一部が探知されたに過ぎない可能性。

2．短い断層はもっと長い断層の二次的／三次的断層である可能性。

3．地形の関係で重力効果により短い断層が生成された可能性。

上記１と２の場合、これら短い活断層はもっと大きい断層系の一部である可能性があるので、大規模地震の可能性がまだある。しかし、活断層の少ない地域または全ての活断層が短い地域では、大規模な内陸型地震の可能性は小さい。

(9) 断層活動の程度と地震再発間隔

活断層の活動の程度は、下記の公式による長期的平均滑動率（Ｓ）によって表される。

$$S = D / T \quad (22)$$

ここで、Ｄは期間Ｔの間に累積された断層移動で、日本の場合は通常第四紀のある時点から現在までの期間である。Ｓは平均滑動率として計算され、一定の率の移動を想定しているが、日本における実際の活断層上の移動は急激に移動する時期と長い休止期間（「地震間」期間）によって特徴づけられる。Ｓの数値が年間５～10mm（中央構造線断層地帯の場合）ということは、５～10ｍの地殻移動を伴うＭ８クラスの大規模地震が平均して1000年ごとに発生し得ることを意味する。同じ滑動率の場合、地殻移動がもっと大きく再発間隔Ｒももっと大きい地震は、下記の式に示すように頻度が小さくなる。

$$R = d / S \quad (23)$$

ここで、ｄは一回の地震の地殻移動量である。地震生成活断層によって発生する地震のマグニチュード（M_L）は(17)式を使って得ることができる。(16)式、

(17)式および(23)式を使うと、地震の再発間隔R（年）は下記の式となる。

$$\log R = \log(L/S) + 1.9 \quad \text{(24)}$$

ここで、Sは滑動率、Lは地震生成活断層の長さである。長さが80km、滑動率が年5mmのAクラスの活断層は、1300年ごとにM8クラスの地震を引き起こす可能性がある。日本の活断層に沿ったトレンチ調査から得られた証拠によると、（地殻移動をともなう）活断層によって発生する地震は、かなり一定の間隔で発生している。

(10)地震のリスクと長期的予測

一般的に言って、日本の場合、歴史時代に大規模地震が発生した地域は、将来も同様の再発間隔で同じマグニチュードの地震が発生する可能性が高いと想定できる。再発間隔が短い場所では、当然のことながら関連データが多く、高い確度で想定することができる。太平洋プレートがもぐり込み、大規模地震が頻発する日本の太平洋沖合が、その典型的な例である。歴史時代に大規模地震を引き起こした内陸性活断層は、通常再発間隔が1000年を越えているので、近い将来動く可能性は少ない。

日本における将来の内陸性地震のマグニチュードと再発間隔が、活断層データに基づき推定されている（RGAF, 1992）[59]。図15はこれら断層データに基づく日本における地震のリスクに関する推定の例で、活断層の震央から離れるにつれて地震の頻度が減ることを考慮に入れている。

(11)日本の活断層の地域的特徴

日本の活断層は、その密度、分布パターン、走向、長さ、運動の向き、活動の程度に地域的な特徴がある。活断層の分布と移動ベクトルから得られる日本の地域的構造応力の場を図16に示す。

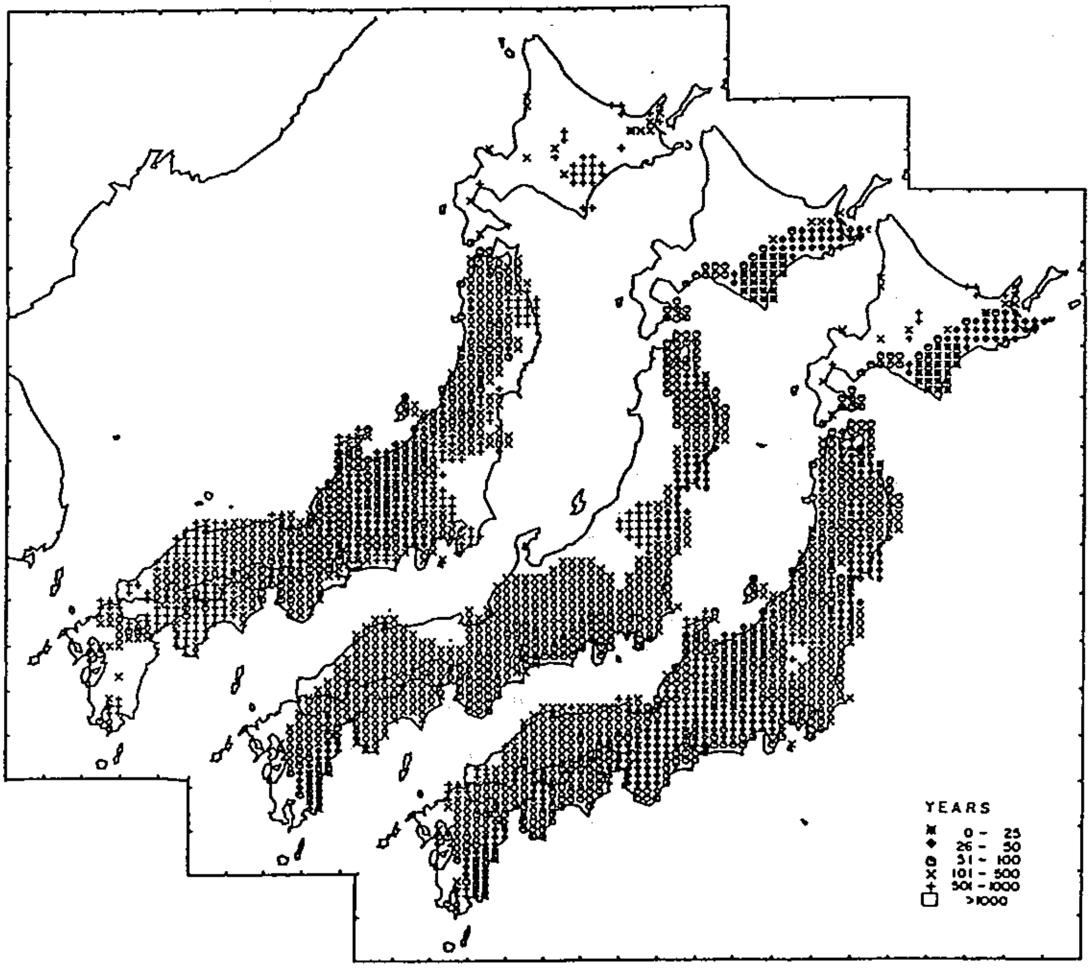


図15　活断層データと地震活動史より推定された日本の地震リスク分布図の例

記号は、震度Ｖ以上の強い地震の再発までの平均期間を表す（RGAF，1992より）

左の地図－内陸または日本海で発生した強い地震の再発間隔（活断層データより推定）。

中の地図－太平洋で発生した強い地震の再発間隔。

右の地図－上記二つのデータを組み合わせた地震のリスク分布図。

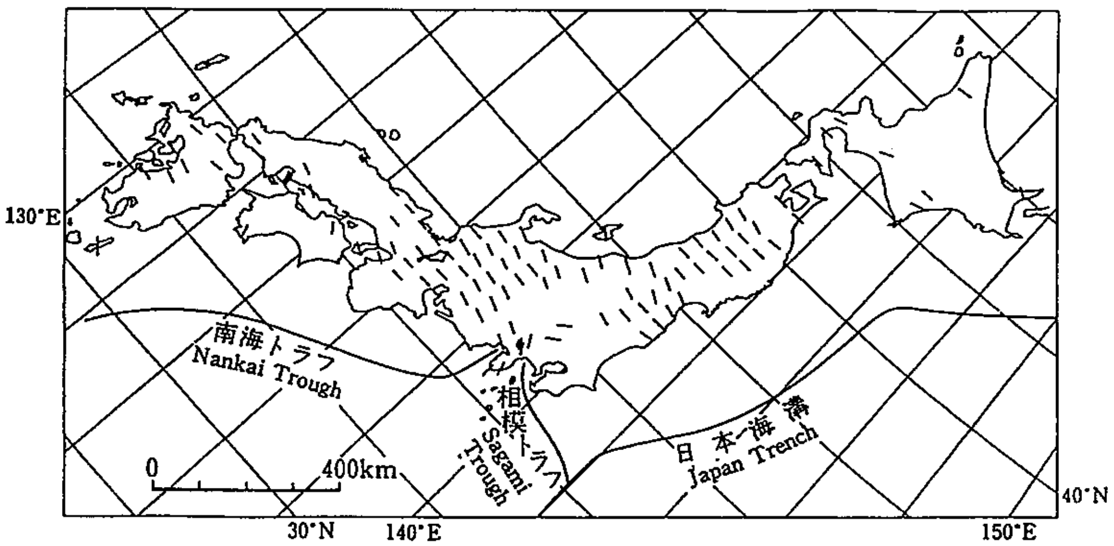


図16　日本の陸地での活断層から生ずる水平方向の
最大圧縮応力（σ_{Hmax}）の方向（RGAF, 1992より）

日本では、最大水平圧縮応力（σ_{Hmax}）の方向の分布は地殻の水平方向収縮の方向に対応し、浅発地震の発震機構によって決まる最大水平応力の方向とほぼ一致する。σ_{Hmax}の方向は下記の通りである。

・逆断層の走向と垂直。

・正断層の走向と平行。

・右水平／左水平走向滑動断層の開先角度の二等分線に等しい。

図16は、圧縮方向がほぼ南北になっている伊豆半島を除いて、日本の水平方向収縮がほぼ東西になっていることを示している。伊豆半島でσ_{Hmax}の方向が違うのは、この部分のプレート収斂が複雑になっていることと関係がある。

表11（RGAF, 1992(59)による）は、断層統計の資料を使って定義された日本の活断層地域の特徴を示している〔Kinugasa（1989）(45)も参照のこと〕。日本には、大規模地震が発生する見込みがなく活断層の活動が少ないと思われる地域を選定できる場所がある。日本には四つの異なる種類の地域があるようである。

1．活断層が短く、活動が少なく（通常Cクラス）、活断層の密度が小さい地域。活断層のほとんどは第四紀応力の場から発生したものではなく、古い断層が再活性化したものと思われる。

表11　日本の活断層地域の特徴（RGAF，1992より）

Province	Sub-province	Density of faults	Length of major faults*	Activity of major faults	Types of faults	Note
I. Main part of Hokkaido	a. Inner belt of main Hokkaido	low	short	C	reverse?	
	b. Outer belt of main Hokkaido	low	medium	B	reverse	
II. Inner belt of NE Japan	a. continental slopes of Inner belt of	high	long	A?	reverse	submarine
III. Outer belt of NE Japan		very low	medium	B	reverse•strike-slip	
IV. Continental slopes off the Pacific coast of NE Japan	a. off the south coast of Hokkaido	high	long	A?	reverse•strike-slip?	submarine
	b. off Sanriku-Joban-Kashimir	high	long	A?	reverse	submarine
V. Northern tip if Izu-Ogasawara Arc	a. around the Kanto Mountains	medium	short	B	reverse•strike-slip	
	b. around Izu Peninusula	high	lshort	A•B	strike-slip	volcanic region
	c. northern margin of Sagami Trough	high	long	A	reverse•strike-slip	mainly submarine
BF. Western Fossa Magna belt		high	short	A	strike-slip•reverse	
VI. Eastern part of inner belt of SW Japan	a. around Noto Peninsula	low	short	B•C	reverse	land & submarine
	b. around Oki Trough	medium	medium	B?	reverse?	submarine
	c. Chuba mountains	high	long	A	strike-slip•reverse	
	BT. Tsuruga Bay-Ise Bay Line belt	high	medium	A•B	strike-slip•reverse	
	d. Kinki Triangle	high	medium	B•A	reverse•strike-slip	
	e. northwestern part of Kinki district	medium	medium	B	strike-slip•reverse	
VII. Western part of Inner belt of SW Japan	a. Chugoku-Setouchi-northern Kyushu	low	short	B•C	strike-slip•reverse	
	b. volcanic field of central Kyushu	high	short	B	normal	volcanic region
BM. Median Tectonic Line belt		high	long	A	strike-slip	
VIII. Outer belt of SW Japan		very low	short	B•C	reverse•strike-slip	
IX. Continental slopes off the Pacific coast of SW Japan	a. landward slope of Nankai Trough	high	long	A	reverse•strike-slip	submarine
	b. landward slope of Ryukyu Trench	medium?	long	A?	reverse•strike-slip	submarine
X. Ryukyu Arc		medium-high	medium	B•C	normal	submarine & land
XI. Okinawa Trough	a. northeastern part of Okinawa Trough	medium	long	B?	normal	submarine
	b. central part of Okinawa Trough	high	medium	A?	normal	submarine
	c. southeasstern part of Okinawa Trough	high	long	A	normal	submarine
XII. Northern part of Izu-Ogasawara Arc						submarine, western area is volcanic region

*short: <20 km, medium: 20-50 km. long: > 50 km.

2．断層密度が中程度で、活断層の長さも断層活動の程度も全般的に中程度の地域（Ｂクラス）。

3．活動程度の大きい（Ａクラス）長くて平行な活断層があり、それら断層が稠密に分布している地域。これら活断層は第四紀の同じ応力状況のもとで生成されたと考えられる。

4．短い断層が圧倒的に多い地域。これは火山地帯にあり、稠密に分布していて活動程度が大きい。

(12)日本の活断層と地震の要約

現在では、日本および地殻構造的に活動的な世界各地における活断層と地震の相互関係がよく立証されている。地震のマグニチュードを活断層の長さ／断層の移動量と関連づける経験的な公式が立案されている。日本でも、カリフォルニア州など他の地域でも、これら経験的な基準を既存の活断層に当てはめることによって、将来の地震のマグニチュードを予測する試みが行われている。しかし、かかる予測には未解決の問題がいくつかある。

1．断層活動が間欠的な地震と関連していると想定して、活断層の再発間隔は長期間にわたって一定かどうか。

2．地震をともなう断層活動には、地殻移動に特徴的な分布があるか（これは活断層による特徴的な地震と関連する）。

3．長い活断層のどの部分が地震にともなって動くか（断層の分節運動の問題）、また次回はどの部分が動く可能性が最も高いか判定することが可能か。

4．地震と直接関係のある断層と、二次的断層または地表面近くの作用で局地的に生成された断層で、地震生成断層とは密接な関係がないものとを区別することができるか。

5．陸地部分の活断層は地震生成断層とどのような関係があるか。

これら未解決の問題は、大深度廃棄物処分場の近辺で断層が再活性化する可能性を否定できないこと、またいかなる総合的性能評価においても断層再活性化に関連する問題を含める必要があることを意味する。

1.2.4 断層運動が地下水に与える影響

日本における断層の運動と断層運動を伴う地震は、断層周辺の地下水の圧力分布と化学組成に大きな影響を与える可能性がある。

本論で関心のある断層運動の主要な影響は二つある。

1．断層運動は、それによって発生する圧力勾配に対応して水を流れさせる可能性がある。地下水は収縮を受ける岩塊の一部から追い出される可能性がある（即ち、細孔収縮または圧壊による容積縮小）。また地下水は膨張した岩塊に流れ込む可能性もある。

2．断層運動につきものの圧力変動により化学組成の異なる地下水が接触し混じり合う可能性がある。地表面近くの酸化される地下水がもっと深い所へ流され、還元された地下水が地表近くに押し上げられる可能性がある。

このように地下水が押し流されるかどうか、その流れの方向と量はどうか、またこの運動が廃棄物処分場にどんな影響を与えるかは、断層運動の形状及び断層地帯と周辺岩石の水理学的特性に左右される。更に、断層運動の形状は現場の構造運動に左右される。

(1) <u>断層運動による水理地質学的影響</u>

断層運動（日本では地震の場合と言ってもいいが）による地下水への影響については、下記のようにいくつかの説明ができる。

<u>振動による水圧伝導率の変化</u>

地下水の放出（運動）は激しい振動の結果として地表面に近い岩石の水圧伝導率（k）が増大することを反映したものと考えられる（例えば、Rojataczer and Wolf, 1992）[62]。このようなモデルでは、地面の振動水準（地面破断の場所への近さ）と水理地質学的反応の規模との間に相関関係を予想している。一部正断層地震と地面の振動（強度表示器による測定）との間には妥当な相関関係があるが、これは恐らく1931年改訂メルカリ（Mercalli）震度階が、正断層地震の圧倒的に多いイタリアで考案されたことと関係があると思われる。この理論は別の種類の断層運動によって示される地下水の異なる反応も、断層運動

のあと一旦増大したｋがどのように逆転するか、またなぜｋの数値にヒステリシスがないのかも説明することはできない。

地震揚水（ダイラタンシー／拡散モデル）

「地震揚水」という用語は、浅発地震における熱水の一時的移動に関連してSibson et al. (1975)[67]が初めて導入した。この移動は、浅発地震（即ち深さが５～15kmの範囲内にあるもの）におけるエネルギー放出に関するScholz et al. (1973) のダイラタンシー／拡散モデルに基づくものである。図17は地震揚水作用の概要をグラフ化したものだが、断層面の中及び周辺の、地下水水圧によって岩石が膨張する地帯の液体の流れは（図18に示す）この地帯の圧壊によって発生する。

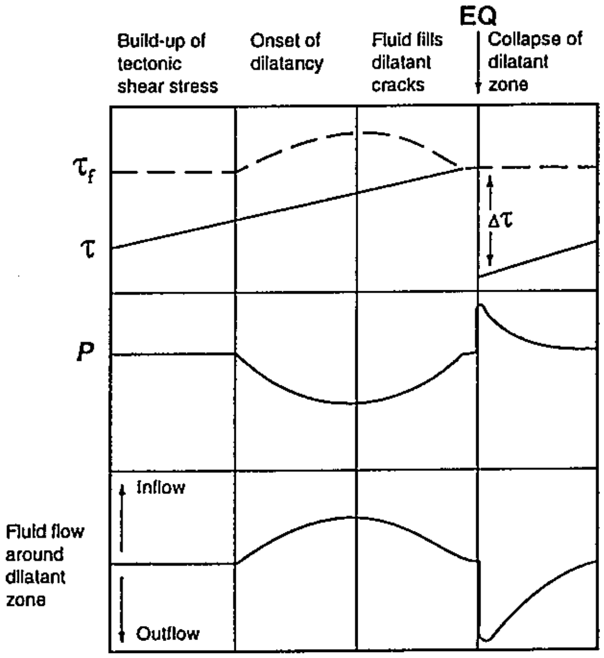


図17　地震性揚水プロセスの概略図（Scholz et al. (1973)を修正）

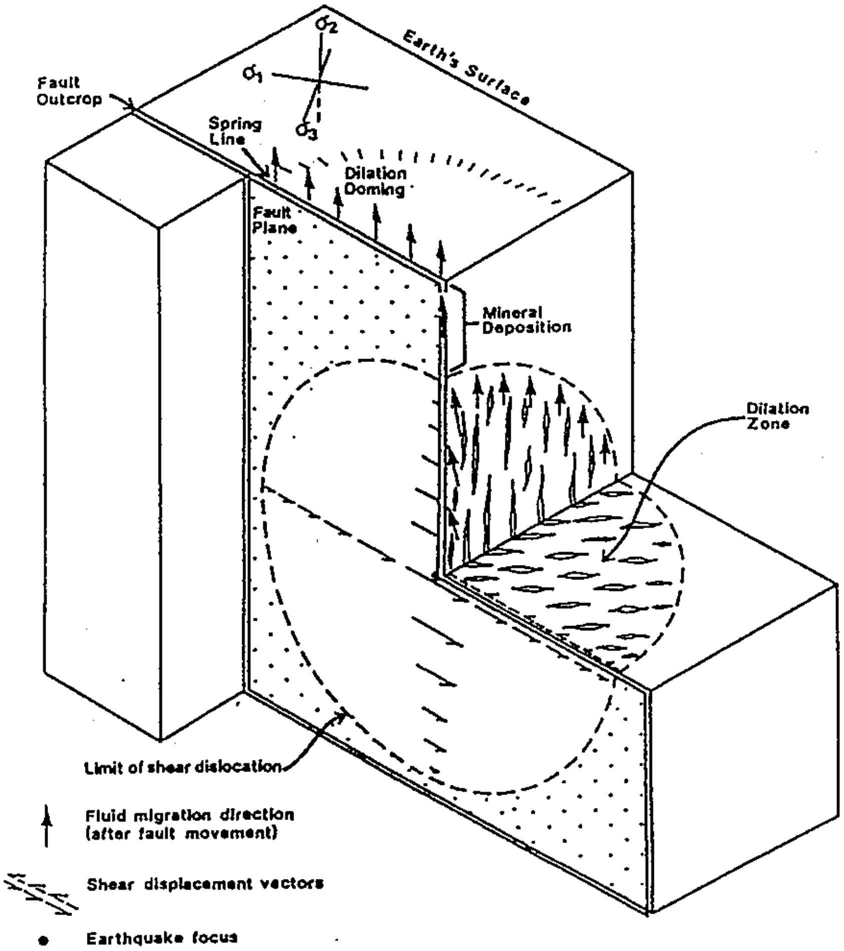


図18走向移動断層周囲のダイラタンシー帯の崩壊に続く流体の散逸
剪断帯の断層が球殻状のダイラタンシー帯の断面にまたがって
広がろうとしている（実際にはあり得ないケースだが）
(Sibson et al., 1975より)

いくつかの大規模断層の周辺では、断層近辺のスプリングライン（泉の水脈）に沿って一過性の相当な水の流出が観測されている。この理論の立案に関連して特に興味があったのは、松代群発地震の際に、CO_2が飽和状態になったNa－Ca－Clの高温のかん水が約10^{10}リットルも地表に排出されたことであった。この群発地震はエネルギー的にはマグニチュード6.3の単発地震に匹敵するもので、長さ約10kmの地震生成断層上における走向滑動によるものである〔Hagiwara and Iwate (1968)(38), Tsuneishi and Nakamura (1970)(72)〕。この流出現象はダイラタンシーの歪が約10^{-4}の震源域の圧壊によるものと解釈されている。

ダイラタンシー／拡散モデルでは、大きな剪断変形に起因する亀裂の開口が、水圧拡散による間隙圧の維持ができなくなったため、歪硬化の段階につながったと想定されている。その後間隙圧が回復すると、岩石が弱くなり断層圧壊が始まる。従って、地下水面が地震に先立って下がり、地震後の段階（恐らくは地震直後）に水が放出されると予想している。ダイラタンシーの圧壊は断層近辺の一部等震効果は説明できるが、この理論をもっと離れた地域に当てはめるのは難しい。更に、剪断に基づくダイラタンシー・モデルは正断層地震と逆断層地震の水理地質学的特性の間に存在する極端な不釣り合いを説明できない。

流体揚水モデルと断層バルブ・モデル

その後Sibson（1981，1990）は、地震を対象とする流体揚水モデルと断層バルブ・モデルという考え方を立案した。前者のモデルでは、断層域ダイラタンシーが圧壊して、地震の際に水を放出するが、後者のモデルでは地震サイクルの作用が間隙率を大きくし、深部の高圧による流体の上昇によって更に大きくなる。このモデルでは、断層は地震のない間は不透水層として作用すると想定されるが、「自然に圧壊した表面の破面粗度の結果として破壊直後に流体の透水性の『極めて高い』水路」を形成する（Sibson，1990）。

Sibson（前掲）は、断層バルブ活動が最も活発に起こるのは圧縮構造層だと示唆している。各種断層運動に伴う水理地質学的影響はバルブ効果では説明できないので、地表面近くの地下水の流れはこの作用で説明できるとは思われない。例えば、正断層地震のあとの方が逆断層地震のあと（地下水面が下がるだけで、水は排出されない可能性がある）に比べて、排出される水が遙かに多い。しかしこの作用は断層運動が脆性層から延性層へ転移する辺で発生する深部の流体運動を説明することはできる。

等震歪モデル

Muir Wood and King（1993）によると、各種形態の断層移動の水理地質学的特性を最もよく説明できるのは、等震歪モデルだという。地殻最上部の変成岩系／火成岩系の石質堆積物では、流動水が保持され、割れ目へ水を運ぶ。現場応力の変動とそれに伴う歪の変化は割れ目開口部の変化と関連があることが知られている。地震サイクルに関連する歪が事前に存在した割れ目を開閉する等

震歪モデルの略図を図19に示す。

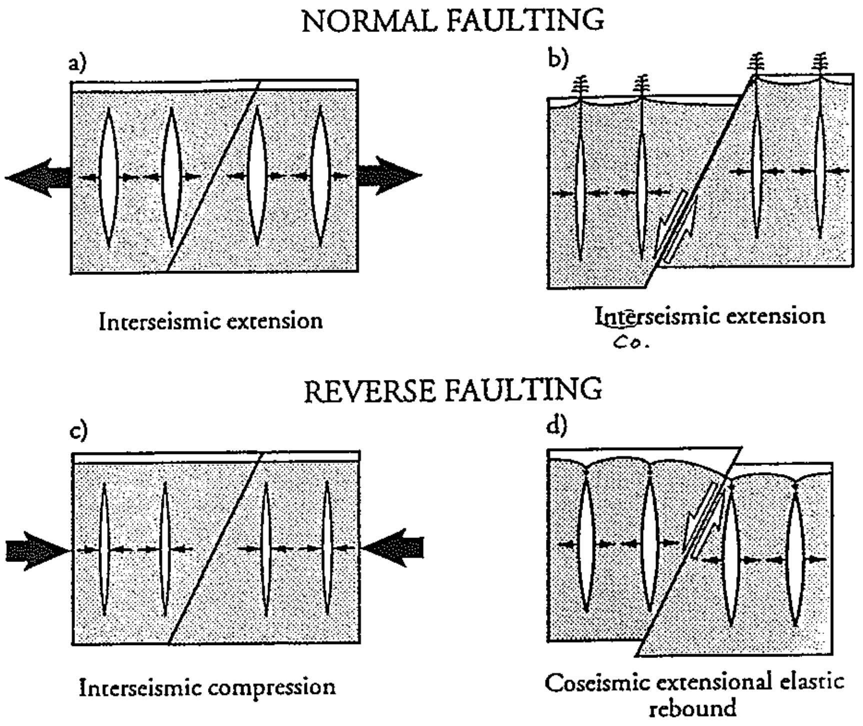


図19　引っ張り及び圧縮の地質構造的環境下における歪の
　　　相互震動による蓄積及び放出を表す簡単なモデル

(a) 伸張断層運動の場合、地震間期間は割れ目の開口及び有効間隙率の増大と関係がある。

(b) 地震の際は割れ目が閉じて水が放出される。

(c) 圧縮断層運動の場合、地震間期間は割れ目の閉鎖及び水の放出と関係がある。

(d)地震の際は割れ目が開いて水を吸い込む。正断層運動の場合、地震の際に水が地表面に向かって放出され、直ちに河川や湧き水に影響を与える場合がある。

逆断層運動の場合、地下水面からの水が割れ目を満たす筈で、河川や湧き水の流量からは観察できない緩慢な作用である。事前に存在した割れ目の場合、垂直的割れ目の開閉が間隙率の変動に圧倒的な影響を与える（図では簡便のため垂直の割れ目だけを示している）〔Muir Wood and King (1993) より〕。

観察される水理地質学的特性の原因を説明する最も単純なモデルは、地表面に向かって開いているが、一定の深さで閉じており、地表面まで到達しない範囲で圧力変化の影響を受ける一連の平面的に均一な割れ目における流れが、この特性の原因となると想定する。一定の深さより下では、割れ目内の圧力が一定（或いは、そういう割れ目がない）と想定する。このモデルの計算方法は、Muir Wood and King (1993) の付属文書で説明されている。割れ目の幅及び「固定深度」（デッドデプスーそれより下は圧力が一定という深さ）の関数としての一連の地下水の流れの時間的変化が計算できる。地震に関連する地下水の流れと水頭変動の観察の大部分（例えば、米国西部におけるボラー・ピークやヘブゲン・レークの地震）は、割れ目の幅が約0.03mm、有効固定深度が２kmでこのモデルに当てはめることができる。破面の割れ目が不規則に分布する場合のもっと複雑なモデルはまだ作られていないが、Muir Wood and King（前掲）によって検討されている。河川の流れの変化に関する観測結果とこれら理論的モデルの適合具合を図20に示す。

大規模地震が大きな影響を与えることから見て、小規模な地震でも水理地質学的状況を変化させると考えられる。水理地質学的な場を地図化した大規模地震のモーメントと小規模地震のモーメントを比較すれば、それがわかる。

(2) 断層近辺の歪

断層の近辺では高度の歪があるはずで、そこでは移動ベクトルの変化、断層の向きの変化、或いは移動面の変化があり得る。断層移動または断層面の変化の性質により、その結果として生ずる歪は膨張型にも圧縮型にもなり得る（Carrigan et al. 1991）[25]。断層近辺における歪の変化の兆候は、地域的な歪の場とも無関係であり得る。従って、断層近辺の泉や井戸への影響は、地域的な反応とは一致しない可能性がある。垂直に近い走向滑動断層の場合、断層関連の影響は断層線に沿ってしか見られない可能性があるが、傾斜滑動断層の場合は深さ数キロメートルに集中する歪が地表面に直接向かい、たとえ断層線からある程度離れていても、上盤にある泉や井戸に影響を与える可能性がある。ボラー・ピークの地震ではこのような影響が観察された。

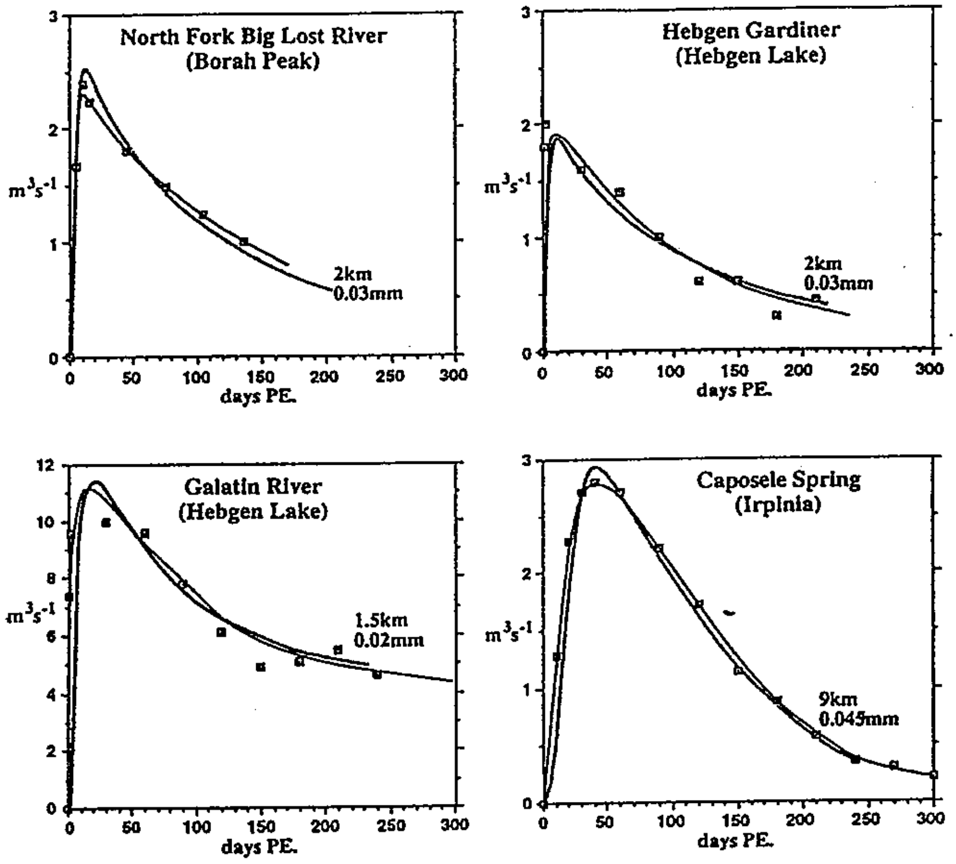


図20　ヘブゲン・レイク、ボラー・ピーク及びイルピニアの地震時における流出流量の観測値（実線）と予測値（点線）

断層の近辺でも、もっと離れた場所でも水理地質学的特性が似ていることは、断層からの遠近によって割れ目の密度があまり影響を受けないことを示唆している。更に、いろいろな地震が類似の水理地質学的特性を持っていることは、このような割れ目の分布が比較的普遍的に存在することを示唆している。

(3) ユッカマウントゥンにおける地下水の変化

ユッカマウントゥンにおける地下水面の大幅上昇の可能性が詳細に調査された。これは、このような変化が非飽和地帯に位置している廃棄物処分場の長期的性能に影響を与える恐れがあったからである。この調査の一環として、近辺の地震が地下水面を大幅に上昇させる原因となる可能性も検討された（ＮＲＣ，1992）。地下水面の大幅上昇の可能性を調査したＮＲＣ委員会は下記を検討した。

・中規模および大規模地震に関連する水理地質学的変化の歴史的資料。

・大規模地震に関連する水理地質学的環境の変化を説明できる地震モデル。

同委員会は水理地質学的環境の長期的変化を説明できると想定されたいくつかのメカニズムを検討した。これらメカニズムは下記の２種類に分類される。

①地震により生成される体積歪に関連する間隙圧の変化。

②動的な地動に起因する透水性の増大。

その後ユッカマウントゥンで起こり得る地下水面上昇をモデル化するために、二つのモデルが使われた。その一つは転位モデルに基づくものであった。このモデルは転位理論を使って、断層を横切る応力の変化を積分する数学的方法によって断層の片側の膨張を他方の側の収縮と結果的にバランスさせる。これにより、応力の変化はゼロとなる。これは、断層の片側における地下水面の上昇が、地下水が他方の側へ流れることによって消えることを示唆する。断層の透水性が異常に低くない限り、圧力も急速に消滅する。このモデルを使って、Ｍ6.5～6.8の地震で地下水面を10ｍ以上上げるには、あり得ない透水性分布を使わなければならない〔Bredehoeft，ＮＲＣ付属文書Ｄ（1992）〕。

第二のモデルはMuir Wood and King（1993）が提案したものに似ている。Cook and Kemeny（1991）は地下水面の上昇の可能性を計算するために、弾性はね返り説に準拠した地域的応力モデルを使用した。ＮＲＣ委員会はこのモデルをユッカマウントゥンに当てはめ、地下水面が約20ｍ上昇するという結果を得た。Cook and KemenyおよびＮＲＣの分析によると、地域的応力変化モデルで計算された地下水面の上昇は特に下記に敏感であることを示唆している。

①応力変化の規模。

②岩石全体の圧縮性と岩石に含まれる鉱物の圧縮性との関係。

③地下水面より上の部分の水分。

厚い非飽和地帯のない日本では、③は無関係である。地下水面の上昇は、地震にともなう剪断応力の地域的低下と関連している。これは地殻にかかる過渡的現象であり、広い範囲の地下水層に一時的に涵養水を供給するのに等しい。超過水量の散逸率は岩石の貯水性および水圧伝導性と比例する。

1.2.5 断層封じ込め

世界中のいくつかの大規模断層地帯の調査によると、これら断層地帯は比較的脆弱だという証拠がある〔但しBombolakis (1992)[20]によると、この脆弱さは小規模の随伴地震活動でも動けるための必要条件ではないという〕。これら断層は低い熱流量及び断層線とほぼ垂直のσ_{Hmax}も随伴している。このため、これら断層地帯は超過圧力のかかった流体を伴っている可能性があるという考え方が生まれる。「圧力封じ込め」または「断層封じ込め」が堆積岩や火成岩にはあるということが石油産業の調査〔例えば、Knipe (1992)[46]〕と断層メカニズムに関する実験的作業からわかっている。こうした封じ込め効果が働けば、断層間の流体の流れを阻止でき、長期間にわたって高い間隙流体圧力を維持することができる。

堆積岩には、大きく分けて下記の3種類の封じ込め機構が認められる（Knipe, 1992)[46]。

①圧壊封じ込め ― 断層地帯の透水性と間隙率が、破砕、粒子変形、溶解により、および粒子の境界滑動により発生する粒子の組成変更に基づく間隙容量の減少によって小さくなる。

②接着封じ込め ― 断層とその周辺の位相の沈澱によって断層を横切る流れが減少する。

③結合封じ込め ― 岩質と各種封じ込め能力との結合による。

硬岩におけるこれら封じ込めの発生は、溶解作用と機械的離解作用による鉱物の再配置によるものとされている（即ち、上記①と②に似た作用）。

断層封じ込めに関する基準は、いくつかの種類の石油地質トラップを理解するのに断層封じ込めが重要な要素となる石油産業のために決められている。これら基準を図21に示す。放射性廃棄物の分野では、関心があるのはトラップされる炭化水素の高さではなく、断層が水理地質学的障壁として機能するかどうかである。図21に示したその他封じ込め基準のほとんどは、本論の場合にも当てはめることができる（例えば、断層は塩分を含む地下水を天水から隔離する封じ込め機構又は障壁として使うことができる）。

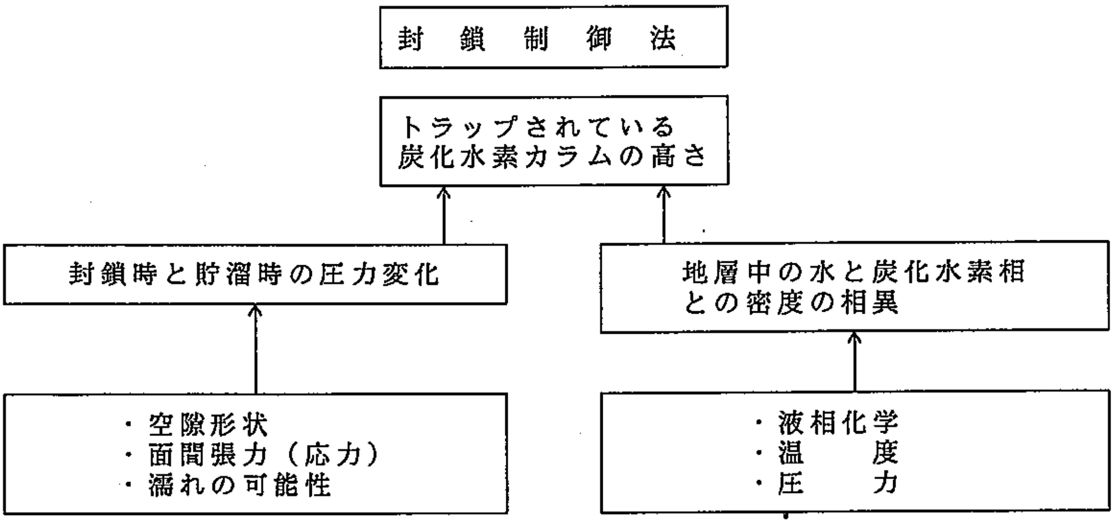


図21　油層に応用された断層封じ込め制御法の要旨（Knipe, 1992より）

これら種類の封じ込めは全て単一断層の封じ込め特性に寄与することができ、その分布は周辺断層地帯の形状および移動パターンと関係づけることができる。断層地帯における接着のパターンと作用は複雑な場合があるが、断層地帯における微細構造の変形と接着連鎖を分析することによって、油層を探査し、他の断層地帯と関連する流体流の状況、タイミング、組成を制御するのに不可欠なデータを入手することができる。各種封じ込め機構の封じ込め能力は計算することができ、その後の地質学的変化におけるこれら封じ込め機構の安定性は、断層地帯の微細構造の変形を調査することによって制御することができる。

特定の断層に影響を与える封じ込め作用の範囲は、堆積岩に影響を与える続成作用の変化の範囲に似ているが、作用する変形メカニズムの範囲によって複雑なものとなる。堆積岩の続成作用の変化の場合と同様に、断層地帯の正確な封じ込め特性を予測する簡単な方法はなく、断層運動のタイミング、継続時間、作用によって変わってくる。

断層活動と断層運動作用から見た封じ込め効果発生のタイミングは、封じ込め機能の安定性にとって重要である。非活断層では、安定的封じ込め機構のほとんどは、その後の変形を受けている可能性のほとんどない、最後の断層運動の際に作られたものと言える。活断層では、下記の理由により廃棄物処分場閉鎖後に相当期間にわたって断層封じ込めが機能するかどうかは明らかでない。

・封じ込め機構が必ずしも働かなくなることはないが、影響を受ける可能性は断層の運動（地震エネルギーの放出）と断層の再発間隔に比例する。断層が活発であればあるほど、封じ込め機構が破壊される可能性が大きい。

・日本の内陸型断層のほとんどの再発間隔は1000～2000年の範囲である。現在の活断層のほとんどは、廃棄物処分場閉鎖後も活断層である可能性が大きい。今後百万年以内に日本へ向かうプレートの動きに大きな変化が生ずる可能性は少ないー即ち、予見可能な将来も現在の地殻構造は変わらないーからである。日本には、現在活断層として分類されているものの多くが第四紀全体を通じて同様の活動水準にあったという証拠がある（RGAF，1994）[59]。断層に封じ込め機構がある場合、廃棄物処分場の性能の点から言って、近い将来に一回以上の地震によってそれが消滅する可能性がある。断層に封じ込め機構があるという事実は、原則として活断層にも封じ込め機構があることを示唆する。従って、断層は一時的な封じ込め機構として働き、当該断層上の地震によって封じ込め機構が生成されることも、既存の機構が破壊されることもある。断層は、最低その再発間隔に等しい頻度で水圧特性が循環する。断層特性のヒステリシスがあるかどうかは明らかでない。

地下水面の上昇の可能性についてユッカマウントゥンの状況を調査したＮＲＣ委員会（ＮＲＣ，1992）[54]は、そこにある断層の一つが十分に封じ込められている可能性が高いと判断した。それが大規模な地下水面の上昇はありそうもないというCarrigan et al.（1991）[25]のモデルによって必要とされた条件であった。

硬岩における断層の封じ込め特性に関する情報は遙かに少なく、調査も遙かに少ない。Knipe（1992）[46]が検討したのと同じ続成作用がこの種の岩石にも当てはまるかも知れないが、硬岩に対して同じ程度の影響を与える可能性はなく、断層封じ込めの傾向はかなり劣ると思われる。

1.2.6　断層運動と廃棄物処分場の立地場所との関係

多くの国で（例えば、スウェーデン、フィンランド、英国、米国、スイス、フランスなど）、いろいろな岩質について（例えば、硬い結晶質岩石、粘土質岩石、岩塩層）処分場と地下研究施設の立地場所選定計画は全て、断層の位置が重要な

要素だと判断した（この意味では破砕帯も同じ）。結晶質岩石地帯でのサイト選定は、基本的にこれら破砕帯の場所、方向および予想される特性を根拠としている。スウェーデンにおける研究施設立地場所の選定〔ＳＫＢ－３（ＳＫＢ，1983)[68]に概説されている〕、フィンランドにおける大深度処分場の立地場所選定（ＴＶＯ，1992）、英国における大深度ＩＬＷ／ＬＬＷ処分施設の立地場所選定計画（Chapman et al. 1986)[28]、北部スイスの地下処分場の立地場所選定（Nagra，1994)[12]およびカナダの楯状地における立地場所選定計画案(AECL，1994)は、全て破砕帯と断層を考慮に入れるべき最重要要素の一つと考えている。

断層（および破砕帯）がこのように重視されるのは、それらがファーフィールドを通る抜け道と見られているためである。特に結晶質岩石では、これら破砕帯が地下水の流れの場の規模と大まかな形態とを決める。他の種類の岩石でも、水圧特性次第で同様水準の基準となり得る。多くの国の放射性廃棄物計画では、破砕帯は周辺の岩石に比べて必然的に透過率が高くなると想定されているが、必ずしもそうとは言えない。セラフィールドに関するNirex社の最近の報告書〔例えば、Nirex（1993／1995)[51][52]〕によると、ボローデール火山帯（ＢＶＧ）では断層の位置と透過率の高さとの間にこのような関係は想定できないという。

以下に、セラフィールドに関するNirex社の最近の報告書を使って、断層地帯の構造とそのモデル化について説明する。他の硬岩における断層や破砕帯でも、似たような関係を示す可能性がある。堆積岩の断層も、少なくとも大規模断層周辺の破砕階層と破砕包絡面の概念については同様と思われる。但し、特に脆弱な堆積岩の場合（例えば、粘土質岩石）、続成作用が変化する傾向が大きいことが断層の特性に影響を与え、岩石の強度が小さいことが断層ネットワークの形状（例えば、石質の断層形状）に影響を与えるため、これが異なる可能性がある。

図22（Nirex社，1995[52]による）は、ＢＶＧの流路とセラフィールドにおけるその他水理地質学的単位の概念モデルを示している。Nirexは発生期限と無関係の用語（即ち、種類０からⅢまでの特徴）を使って可能性ある流路を分類している。Nirexの破砕帯又は断層地帯に関する概念モデル（彼らの用語でいう種類Ⅲで、「キロメートル単位の長さを持ち、通常大型断層と結合している組織化された破砕構造」と説明している）は、それらが種類Ⅱの特徴を持つ組織化された構造のものを想定しており、種類Ⅱの特徴は、「長さが50ｍから５kmの組織化された破

砕構造」と定義されている（図24）。

Nirexの地下水流モデルとその後の性能評価では、種類Ⅲの特徴が地下水流システムの主要な形状的基準となり、主として廃棄物処分地域を通る流れの境界条件となると想定している。ＢＶＧの破砕帯内での流れのモデル化でNirexが使ったNAPSACコード[6]（図23）は、この種類Ⅲの特徴（シースケール／フレミング・ホール断層地帯の）がどのように破砕ネットワーク・モデルの境界線となり、それ自体が破砕帯（実際は種類Ⅱの特徴）の累積物としてモデル化されるかを示している。

種類Ⅱの特徴は、処分場と交差し処分場からの移動をもっと急速にさせる可能性のある長さ５ｋｍ以内の破砕帯または断層に代表される比較的小規模の特徴である。日本に当てはめると、こういう断層は地震生成断層（長さ10ｋｍ以上とされる）と見なされる活断層や大規模地震に関連する断層よりは小さい。しかしこういう断層も、大規模地震断層の運動の結果として起こる地震の際に動く可能性がある。この種類Ⅱの特徴を大規模断層の運動（例えば、相当な地震揚水）に関連する類似の影響と結びつけることはできないが、地震の際にその水圧特性を変える可能性があり、それがかなりの規模になり得る。

他の廃棄物処分当局も、硬岩における破砕階層を同様な方法で概念化している〔例えばＫ－Ⅰ（Nagra, 1994）(12)、ＳＫＢ－91（ＳＫＢ，1992）、ＴＶＯ－92（ＴＶＯ，1992）など〕。粘土質岩石でも、破砕帯と断層が同様の方法で概念化されモデル化されている[7]〔例えば、乳白色粘土に関するNagraの研究（Nagra, 1988)(50)〕。今のところ、この種岩石の破砕帯または断層を通る放射性核種の移行に関する詳細なモデル化は行われていない。堆積岩における処分場立地場所選定計画は、その中の断層も透過通路であることに変わりはないとして、硬岩の断層と同じ方法で取り扱う傾向がある（例えば、Chapman et al. 1986)(28)。

---

[6] NAPSACは地下水の流れと溶質運搬を三次元でモデル化するのに使われる破砕帯ネットワークのコードである。

[7] ＮＥＡの主催により1996年６月に開催が予定されている「粘土質地層の断層と破砕帯を通る流体の流れ」に関する会議で、この分野の問題が検討される予定である。

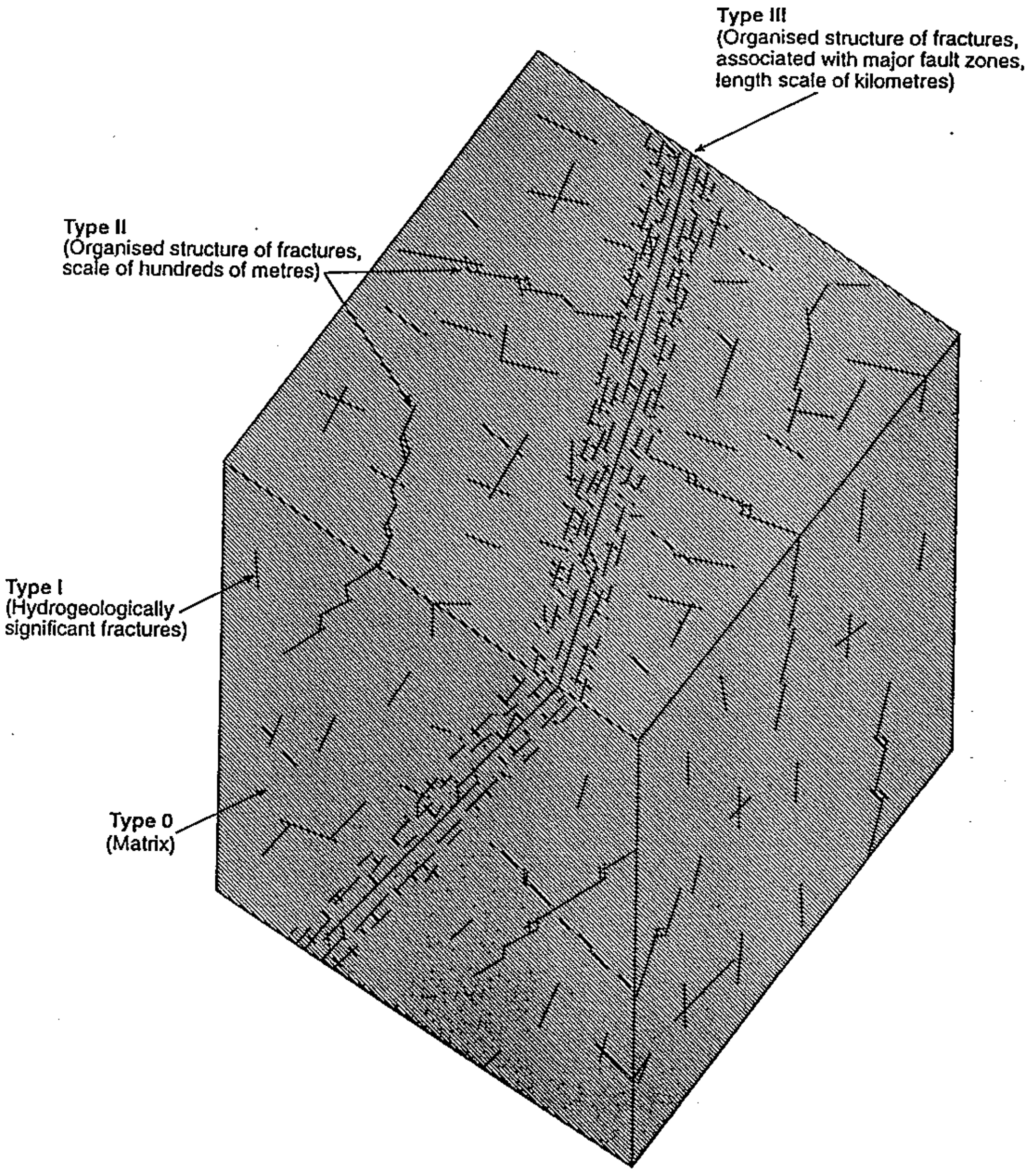


図22　Sellafieldにおける様々な地質水理学的ユニット領域内の
地下水流経路のカテゴリーの概念図（Nirex, 1995より）

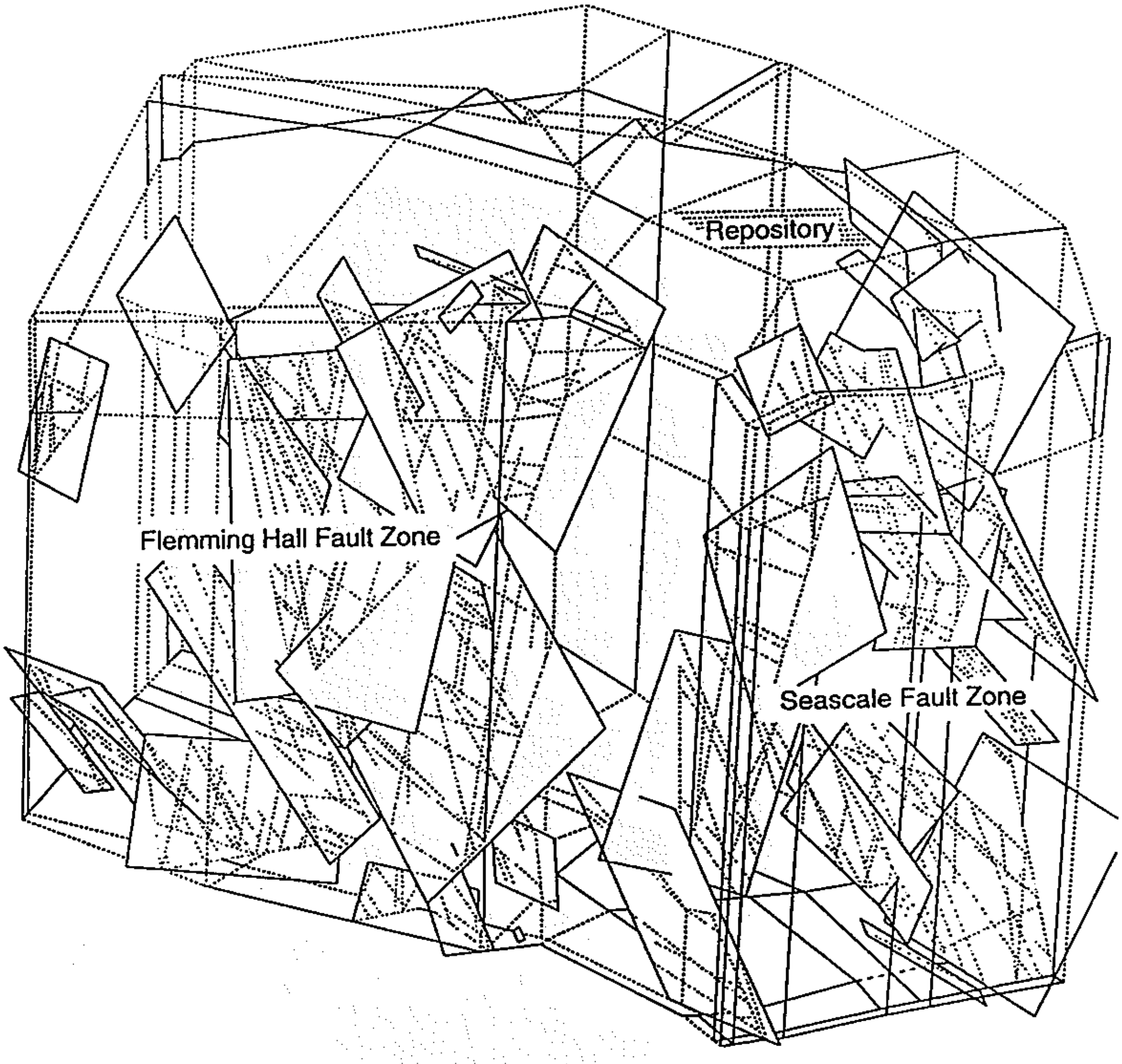


図23　NAPSAC計算、Fleming Hall及びSeascale断層帯を含む
モデル化された領域の幾何形状（Nirex, 1995より）

脚註）ここに表示した面は、点線で破砕ネットワークの接続面を表す種類Ⅱの特徴を示している。二つの断層地帯は、種類Ⅱの特徴が断層面（もっと正しくは断層地帯）に集中していると想定してモデル化されている。実際には、例えばフレミング・ホール断層地帯は小規模断層群の網状集合体またはエシュロン格子状集合体である可能性が高い。

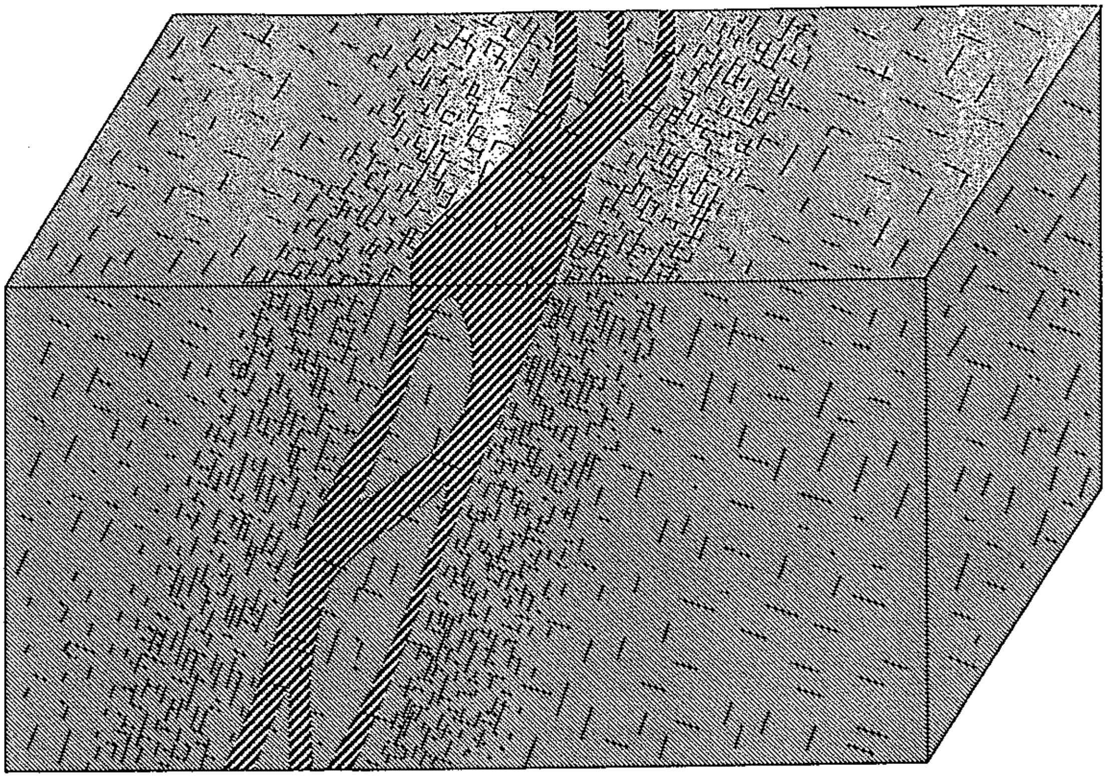


図24　タイプⅡの特徴をもつ相互的構造の概念図（Nirex, 1995より）

1.3　隆起・侵食シナリオ[13]

図25には、隆起・侵食を起点とするEPSMを示す。“隆起のモード”とは、日本列島の構造地質上の要因で、隆起の連続性（定常／エピソディック（EX.河岸段丘））や隆起の原因（EX.マグマ溜りの反跳、膨張など）を示す。境界条件に与える影響の他に非常に重要な事象として、地質圏中の輸送経路の短縮化が指摘し得る。確かに、100万年の間に処分場が地表に露出することは完全には否定できないだろう。

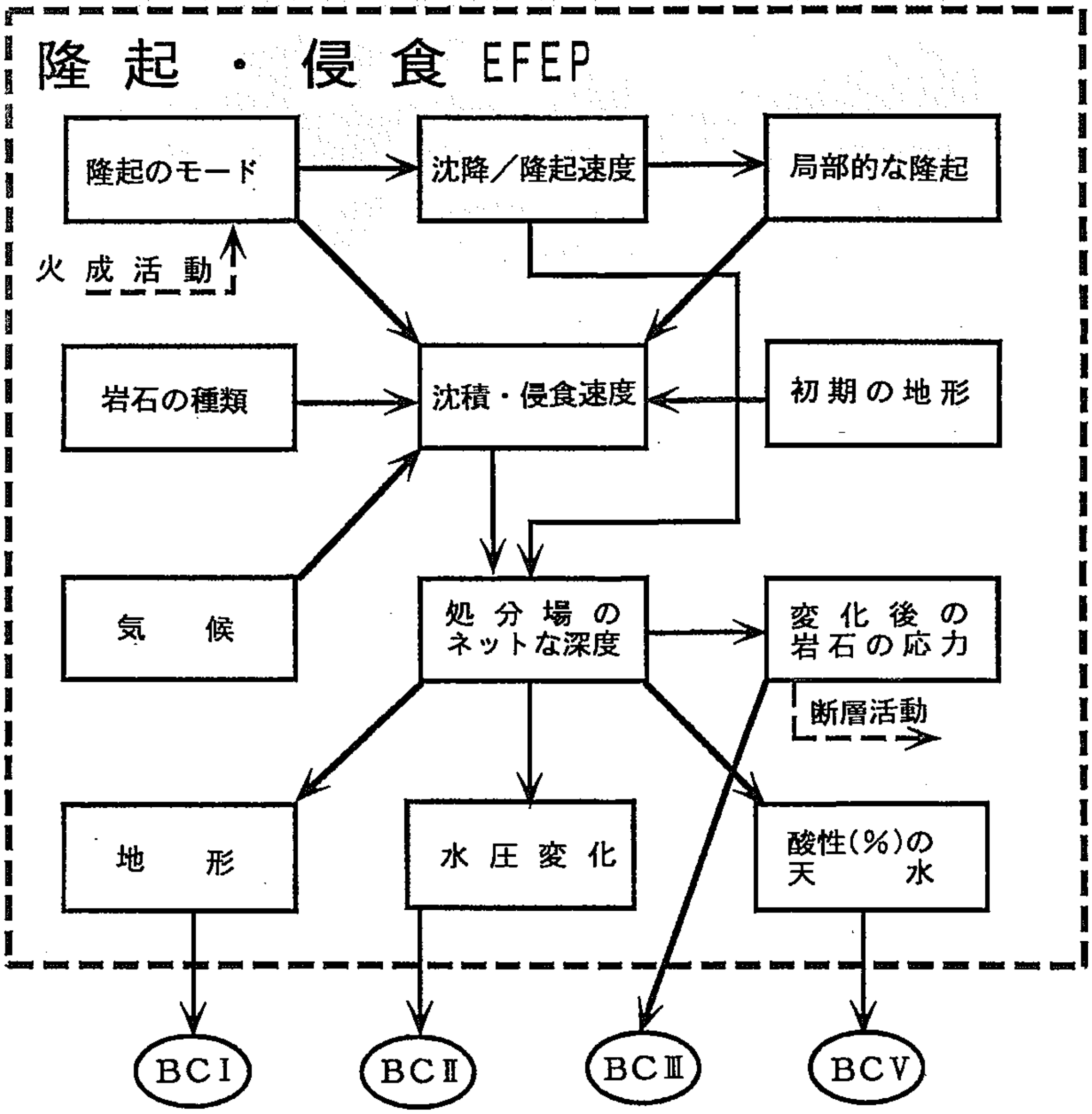


図25　隆起・侵食ＥＦＥＰに関するインフルエンス・ダイヤグラム

1.3.1 序論

プレートテクトニクスから堆積をともなう持続的かつ緩慢な侵食にいたる地質作用は、大深度廃棄物処分場の地表面に対する相対的位置を変える役割を演ずる可能性がある。更に、このような変化は下記三つの重要な分野で地質圏の境界条件（図25参照）を変えることにより、長期的に処分場の性能に影響を与える可能性がある。

・水理学ー地表面涵養（ＢＣＩ）と地下の流れの状況（ＢＣⅡ）の双方

・力学的安定性（ＢＣⅢ）

・化学組成（ＢＣＶ）

処分場の絶対深度の変化により、相対的に小規模の温度の影響も発生し得る。

処分場母岩の局地的隆起とそれに続く侵食は、ごく普通に想定されるシナリオの一つであり、地表面から処分場までの深さを長期的に小さくする。もう一つ考えられるシナリオは母岩の局地的沈降とそれに続く堆積であり、地表面から処分場までの深さを長期的に大きくする。この後者のシナリオは処分場の性能を分析する上でいくつか興味ある特徴を示すが、ここでは前者の隆起・侵食シナリオによって生ずる結果に焦点を当てる。

1.3.2 隆起・侵食の概観

図26は処分場閉鎖後の時間との関係で隆起・侵食が与え得る影響を示すものである。深さ対時間の曲線は、隆起が極端な場合、中程度の場合、小さい場合を示している。侵食の比率は、隆起による高度の上昇と相関関係があるので、長期的に増加する（「加速する」）ことが示されている。

1000年で１ｍという高い隆起率（日本の大部分における現在の隆起率と同じ。後述参照）だけを想定すると（侵食ゼロ）、処分場は約百万年以内に地上に露出する。地表面と処分場との間の距離が約500ｍ縮まる50万年後以降は、地質圏の水理学的・力学的境界条件の大幅な変化が予想される。結晶質岩石中のＨＬＷ処分場を通る水流の組成の変化など化学組成への影響は、処分場閉鎖後２万年のうちには発生する可能性がある。特にニアフィールドの水が比較的希釈性の場合、

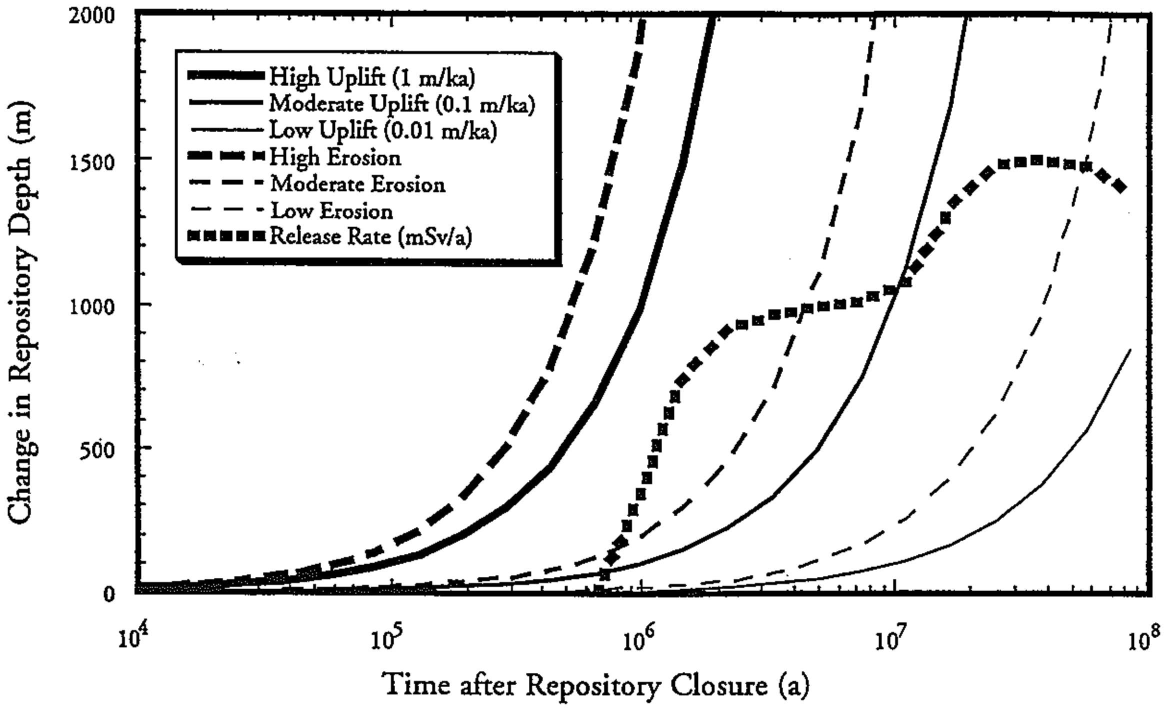


図26　ＨＬＷ処分場における潜在的隆起（実線）及び侵食（点線）の軌跡
侵食経路は、隆起による上昇の影響のため加速される

日本で想定される処分場が海水に近いことは、隆起・侵食中に地下水の組成に大きな変化が生ずることを意味する。もっと中程度の隆起・侵食の場合、処分場の性能に与える大きな影響（例えば、掘り起こし、または地域的流れの境界条件の変化）の時間の尺度はほぼ1000万年以上の規模にある。この場合、地下水の化学組成に対する小規模な影響は早くも20万年後には起こり得る。

河谷内部における、または降水量の増大による局地的な高率の侵食の可能性も考慮に入れる必要がある。高い隆起率と高い侵食率という極端な場合、処分場閉鎖後10万年で地質圏に大きな変化が発生し、50万年後までに完全な掘り起こし（処分場の露出）が行われる可能性がある。

境界条件の変化とともに、もう一つ考慮しなければならないのは隆起と侵食の間の時間の尺度と処分場の時間依存的な放出挙動との比較である。図26には、動燃殿（ＰＮＣ，1992）によって公表された仮想的なＨＬＷ処分場の時間依存的放出率曲線を重ね合わせてある。予想される廃棄物固化体性能と仮想的処分場サイトから放出される放射性核種の移行に関するピーク時放出率は、処分場閉鎖から

数百～数千万年後に発生する。

中程度または高率の隆起・侵食の場合、地質圏そのものはピーク時放出率よりずっと前に実質的に失われている。中程度～低率の隆起・侵食の場合でも、当初の化学組成的、水理学的、力学的境界条件の変化は、時間によって変化しない境界条件を根拠とする安全性計算に大きな疑問を抱かせる。従って、日本で考えられる処分場の性能計算の信頼性をもっと高めるためには、隆起・侵食に起因する地質圏境界条件の変化を考慮に入れる必要がある。

1.3.3　沈降・堆積の概観

ここでは、将来の沈降・堆積の予測については詳しく触れない。これは隆起・侵食と同様な方法で取り扱うことができるからである。例えば、海岸に近い現場は将来沈降し、堆積作用の中心となる可能性がある。堆積が進めば、地質圏の負荷が増して更に沈降する可能性がある。処分場の圧力／温度は、サイトの地下増温率に従って増大するであろう。

沈降・堆積率のどんな組合せでも、処分場の深さは時間とともに増大する。しかし、堆積率が沈降率に追いつかない場合、サイトの高度が減少し、海水面以下になる可能性もある。このように、堆積と沈降の相対的速度によって（沈降は部分的に堆積率の関数であるが）、当初陸上を基地とした処分場が、恐らくは処分場閉鎖後５万年のうちに海面下になることもあり得る。

1.3.4　隆起・侵食の影響

可能性は低いが最も極端な場合を想定すると、隆起・侵食によって100～1000万年という時間の尺度でＨＬＷ処分場の全体または一部が掘り起こされる（露出する）可能性がある。処分場が完全に露出すれば、ＨＬＷから生物圏へ直接排出されることになる。人工バリアも天然バリア（即ち地質圏の）も破壊されるか、そうでなくても物理的に危険にさらされる。移行手段として働く水は酸性（oxic）天水或いは海水に希釈されるであろう。

更にもっと関心があるのは、完全に露出する以前の一定期間に発生する影響で

ある。完全露出の前に影響を受ける可能性のある主たる作用には下記が含まれる（図27参照）。

・地表面に近い立坑／ボーリング孔の封じ込め機構の損傷で、処分場の隔離に影響を与える。

・処分場を覆う岩石が薄くなり形状が変化することによる動水勾配（従って流れのパターン）の変化。

・流れのパターンの変化にともない、酸性天水（または海水）の循環および地表水との混合が促進される。

・人工バリアシステムにかかる静岩圧と静水圧の段階的減少。

・海面水位の相対的変化による地下水の流れと化学組成の変化。

・高度の変化による気候と生物圏の変化。

これら作用の多くは、方法は違うものの沈降・堆積によっても影響を受けることに注意したい。

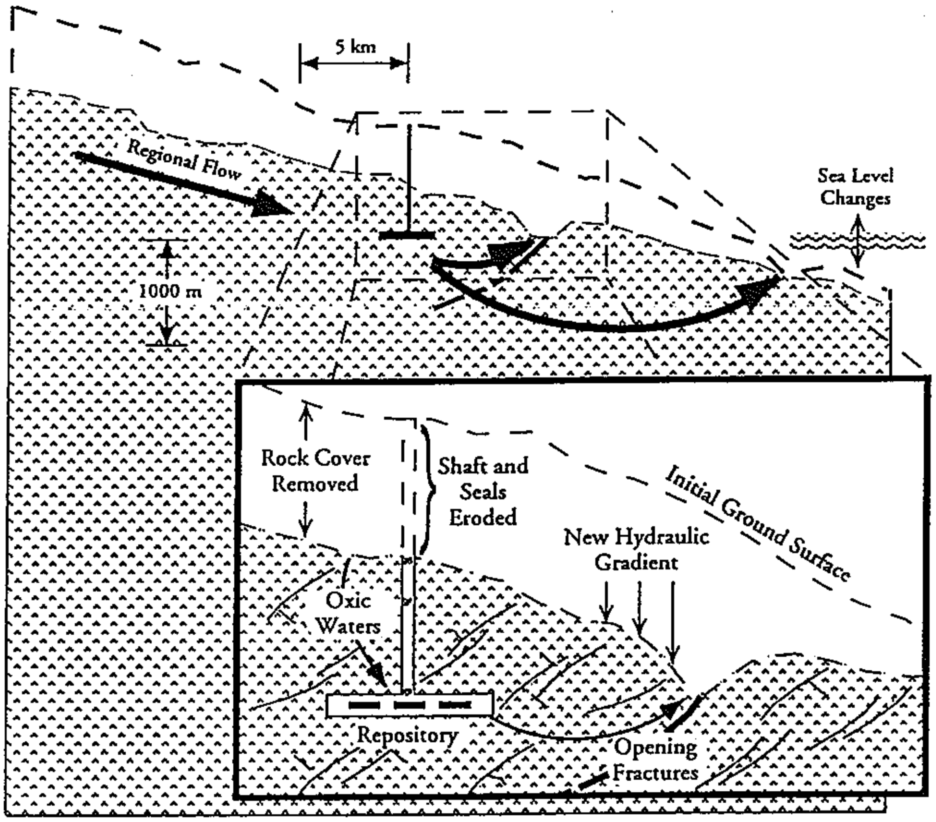


図27　隆起・侵食によって生じ得るＨＬＷ処分場への影響の断面図

これら変化がバリアに影響を与えることも考えられる。表12で、これらの影響を簡単に説明する。

隆起・侵食シナリオによる他の影響も推定できるが、それらの影響は処分場の性能と安全性に対する相対的重要性について分析する必要がある。バリアに対する一部の影響はあまり重要ではない。例えば、ＥＢＳへの酸性水の流入は、鋼製キャニスターの予想寿命（2000～5000年）よりはるかに遅れる（２万年以上）ので、キャニスターの故障時間には影響を与えない。同様に、力学的影響によりＨＬＷのガラスが割れ、ＨＬＷの表面積が広がる可能性がある。しかしこうした影響は溶解度制限を受けない少数の放射性核種（例えば、Se－79やCs－135）の放出率をごくわずか増やすに過ぎない。人工／天然バリアを移行中の若干の分散でも、これら溶解度制限を受けない核種の表面積増大による何らかの影響を排除するに十分である。

表12(1)　隆起・侵食によって生じ得る処分場性能の潜在的な変化

パラメータ	変化の内容（原因等）
水　　理	
岩石の空隙率	以下の原因による岩石空隙率の変化 a)岩石の過負荷からの解放 b)地表水の深部への循環による亀裂鉱物の溶解／沈澱
平均透水係数	以下の原因による平均透水係数の変化 a)岩石の過負荷からの解放 b)地表水の深部への循環による亀裂鉱物の溶解／沈澱
亀裂生成頻度	岩石の過負荷からの解放による新しい亀裂の生成
亀裂の開口	以下の原因による亀裂開口（及び流体の濡れ表面積）の変化 a)岩石の過負荷からの解放 b)地表水の深部への循環による亀裂鉱物の溶解／沈澱
動水勾配	地表の上昇と地形の変化による動水勾配の増加
処分場深度	隆起・侵食速度の関数として、処分場深度の経時的低下

表12(2)　隆起・侵食によって生じ得る処分場性能の潜在的な変化

パラメータ	変化の内容（原因等）
温　度	処分場深度の低下に伴う温度の増加
化　学	
pH	岩石・緩衝材系での電荷バランス上で示されるpH値の増加
Eh	酸性の地表水の深部への循環によるEh値の増加
陽イオン濃度	a)初期の地表水が薄い天水と混合することによる陽イオン濃度の低下 b)初期の地表水が相対的に濃度の高い海水と混入することによる陽イオン濃度の増加
陰イオン濃度	a)初期の地表水が薄い天水と混合することによる陰イオン濃度の低下 b)初期の地表水が相対的に濃度の高い海水と混入することによる陰イオン濃度の増加
力学的安定性	
緩衝材の侵食	粘土粒子の除去による緩衝材サイズの減少
緩衝材の透水性	以下の原因による透水性の増加 a)侵食による粘土の除去 b)変化した地下水との反応による化学的変化
オーバーパックの位置	緩衝材の質量と耐性容量の減少に伴うオーバーパックの沈下
処分孔の破壊（高速流路）	以下の原因による透水性の増加 a)侵食による粘土の除去 b)変化した地下水との反応による化学的変化 c)力学的負荷の解放
立坑の破壊（高速流路）	以下の原因による透水性の増加 a)侵食による封鎖物の除去 b)力学的負荷の解放

1.3.5 日本列島の隆起・侵食

第四紀以来、日本列島は1000年当たり平均 0.5～1 mの隆起をしている (Simizu et al. 1992)[63]。この隆起率の差は地形によるもので、山岳地域の隆起率が大きく、低地地域は極めて小さい。低地地域では1000年当たり0.01mという隆起率を示すこともあり得るが、そういう低い隆起率の場所はごく少ない。日本では第四紀隆起率（現在の高度に基づく）と侵食率との間の明確な関係が立証されており（Yoshikawa, 1974)[83]、隆起率が大きい所では、現在の侵食率が大きい。これは、隆起率が大きくなるにつれて（即ち、高度が大きくなるにつれて）侵食率が「加速的」に大きくなるという前述の状況を確認するものである。この侵食率と隆起率の相関関係は、隆起と急速かつ深い侵食とが組合わさって処分場の被覆岩石が大幅に薄くなり、処分場が露出する可能性があることを意味する。

日本列島の全体的な隆起状況は、列島が太平洋側に連続的に沈降していることによって更に複雑なものとなる。沈降率は1000年当たり 8 mには達しないまでも、隆起率（第四紀中に1000年当たり平均 1 m）とほぼ同じとされている（Dambara, 1971)[32]。

2．専門家の主観的な判断を用いて稀頻度事象の影響を定量化するための評価項目の抽出

ＨＬＷ処分性能評価プロセスにおけるエキスパート・オピニオンの反映のしかたとして、インフルエンス・ダイヤグラム上の各ＦＥＰ連鎖の重要度をＡＨＰ法(7)などの主観的評価手法の援用によって求めることの適切さについては、既にＨ４年度(2)，Ｈ５年度(3)の報告書で述べた通りである。即ち、ＡＨＰ法は、10^4年以上といった評価期間を対象とする上で必然的に生じ得る評価結果の不確実性を考慮して、各専門分野のエキスパートの最善の知識・情報等をもとに可能な限り各ＦＥＰ連鎖の重要性を定量的に把握していくための一つのアプローチ法と言える。

そこで、本研究では、次のステップとして、ＡＨＰ法を適用することを念頭において、まず一般的な評価項目の検討・設定を行い、さらに第１章や付録Ａの調査結果などを基に具体的な評価項目の検討・設定を行う。

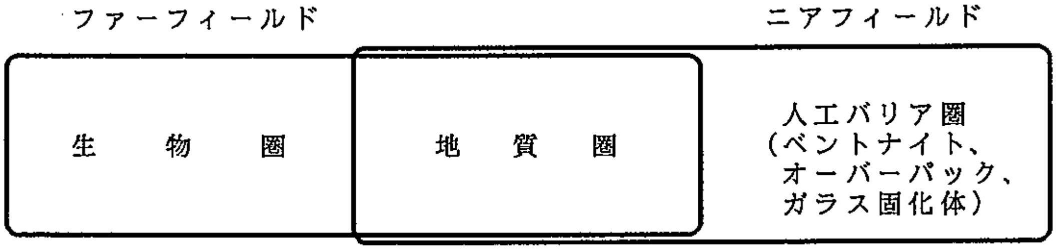
2.1　一般的な評価項目の検討

一般に、稀頻度事象を含むシナリオ評価体系では、シナリオを構成するＦＥＰ連鎖の意味（例えば、表13参照）を明らかにした上で、以下のような評価視点に基づくＦＥＰ連鎖の取り扱い方や、重要度（優先度）の与え方が考えられる。

表13　ＦＥＰ連鎖（Ａ→Ｂ）の関係定義例[8]

・因果関係：ＡはＢの原因である。
・影響関係：ＡはＢに影響する。
・貢献関係：ＡはＢのために役立つ（必要である）。
・優劣関係：ＡはＢより優れている（重要である）。
・選好関係：ＡよりＢを選ぶ。
・包含関係：ＡはＢに含まれる。
・依存関係：ＡはＢに依存している。
・手順関係：Ａの前にＢを行う必要がある。
・空間関係：ＡはＢの東にある。
・大小関係：ＡはＢより大きい。

(1) ＦＥＰ連鎖が属する次のようなカテゴリーを設定し、各ＦＥＰ連鎖がどこに属するか、といった視点



(2) サイトスペシフィックな性質とジェネリックな性質のいずれに属すると考えられるか、といった視点（例えば、岩種、地形の日本と海外、あるいは国内での地域間の違い等）

(3) 定量的な評価モデルで取り扱い可能かどうか、さらに定量的取り扱い可能なものは決定論／確率論あるいはタイム・スケールの設定との係りで速度論的（非平衡論的）／静学的（平衡論的）のいずれか（あるいは双方）で対応すべきか、といった視点

(4) 学問領域的な分類視点

これらについては、既にＨ３レポートに応用されているように、地下水移行シナリオの基本ケースでの評価体系に対して具体的に論じられているが、変動ケースの設定・評価においても、原理的には同様の視点に基づくべきと考えられる。

特に変動ケースの評価で対象とされる稀頻度事象の影響を定量的な方法で解析するためには、様々なシナリオを構成するＦＥＰ連鎖毎に、まず、そのＦＥＰ連鎖が定量的な評価モデルで取り扱いが可能かどうか、といった分類が考えられる。その分類を行った後に、

(1) 取り扱い可能な定量的解析モデルのあるＦＥＰ連鎖については、

①そのモデルが、基礎理論ベースか、経験則ベースか

②パラメータ階層構造図上の各パラメータに対し、以下の情報が得られるか（データ取得性）

・パラメータの取り得る範囲（上、下限値）

・その範囲でのパラメータの重要度分布

(2) そうでないＦＥＰ連鎖については、

重要性の判断に寄与し得るファクター

EX.・リスク概念の明確さ（危険度、規制対象・レベル…）

・因果関係の強さ

・影響（直接放出／間接放出、長期的／短期的、可逆的／不可逆的、…）や貢献度の強さ

・頻度

・包含関係や依存性の強さ

・回避可能性（サイティング、処分場設計（深度、レイアウト、人工バリア設計…）のフレキシビリティ、…）

・その他（社会的合意形成性、経済性、技術進展性の予測、…）

なお、各エキスパートに対し、判定に対する姿勢・態度（選好度など）を効用理論[9]やＡＨＰ法を組み合わせて例えば以下のようにカテゴリー化しておくことも考えられる。

・平均的ケース重視型

・最悪ケース重視（悲観）型

・最良ケース重視（楽観）型

・最悪と最良の中間ケース重視型

・後悔最小化型

・以上の加重平均化重視型

その結果として、上記カテゴリー別のケーススタディ結果を得ることが可能となる。このような結果は最終的な総合判断に寄与し得ると考えられる。

以上の概略的検討プロセスを反映したＦＥＰ連鎖重要度評価のための評価項目の階層図を図28のようにまとめた。

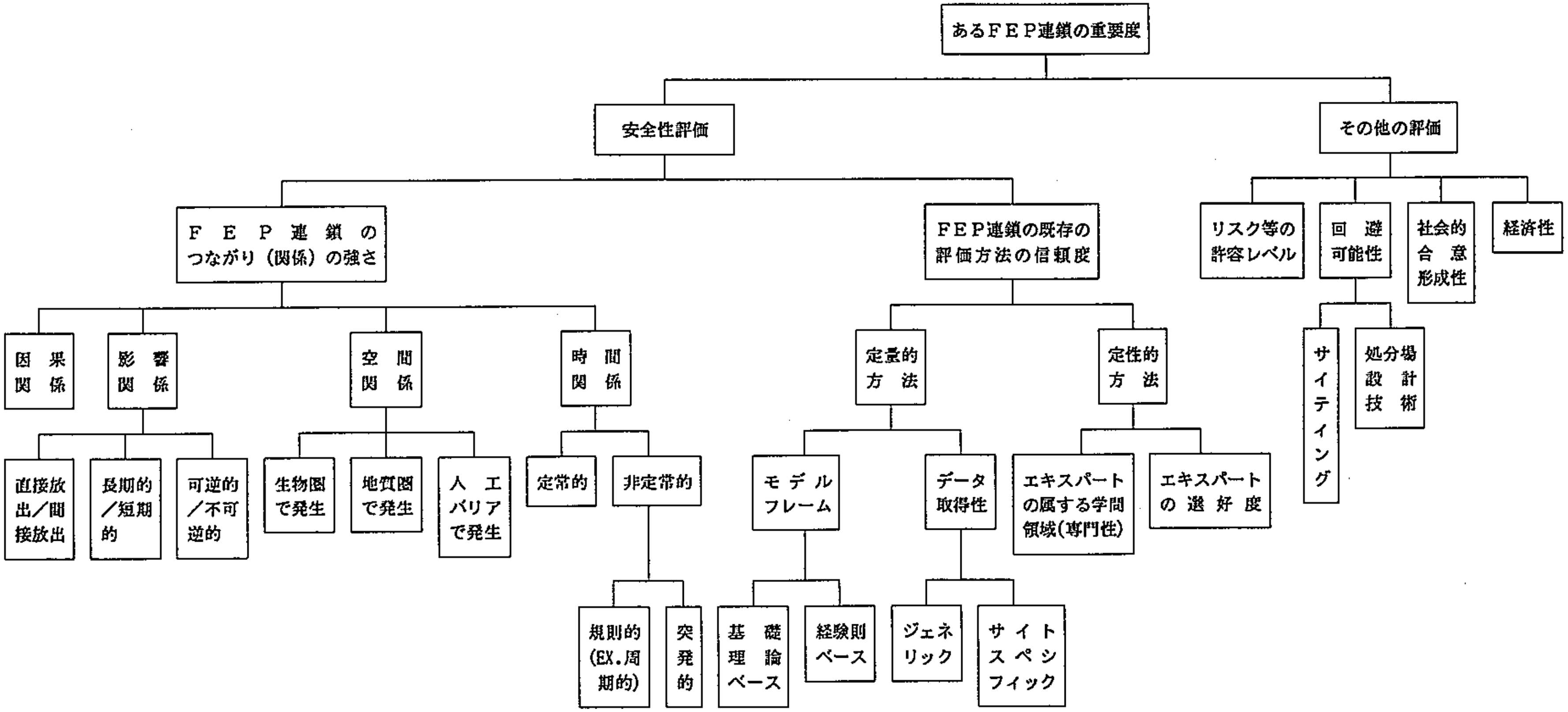


図28　ＦＥＰ連鎖の重要度評価のための評価項目の階層化

2.2 具体的な評価項目の検討・設定

ここでは、第１章及び付録Ａで調査したシナリオ（火成活動、地震・断層、隆起・侵食）の影響評価への反映において重要と考えられる評価項目を、2.1節で検討した一般的な評価項目に基づいて検討・設定する。

2.2.1 シナリオ解析アプローチ法に関する整理

そこで、まず最初に、第１章で試解析した火成活動シナリオに対する評価プロセスを念頭に置きつつ、エキスパート判断の役割や位置付けを明らかにするため、本研究でのシナリオ解析フレームの全体像を検討した。

前年度までに検討を進めてきているシナリオ作成支援システムによるインフルエンス・ダイヤグラムの作成、というプロセスは、ＨＬＷ処分の性能評価を行う目的に必要と考えられるＦＥＰとそれらのインフルエンスを抽出し、これらからシナリオを構築していくという所謂ボトム・アップ的なアプローチ法と言える。

他方、火成活動シナリオに対して実施した今回の試解析（1.1.3節参照）でも示したように、作成されたシナリオに対して具体的な定量的評価を行う段階では、計算モデルのフレームに合わせて、どういったシナリオ要素をどのパラメータや境界条件あるいはモデル構造に反映させたらよいのか、といった所謂トップダウン的なアプローチ法を用いて決定していくのが効率的であると考えられる。そして、その両アプローチの接点が、境界条件を介したＥＰＳＭとＰＳＭから構成されたトータル・インフルエンス・ダイヤグラムという概念であろう（図29参照）。

このトータル・インフルエンス・ダイヤグラムを性能評価解析モデルにリンクしていく具体的な方法としては、大きく以下の２つに分けられる。

1)全体をＥＰＳＭ部とＰＳＭ部に分け、ＰＳＭ部のＦＥＰ連鎖を扱い得るモデルを基本フレームとする解析モデル体系（パラメータ、境界条件等）に、ＥＰＳＭ部で生成される様々なケースを間接的に反映させる。

2)全体を統合的に扱い得る解析モデル体系を構築し、そのフレームの中で、ＥＰＳＭ部で生成される様々なケースを直接的に反映させる。

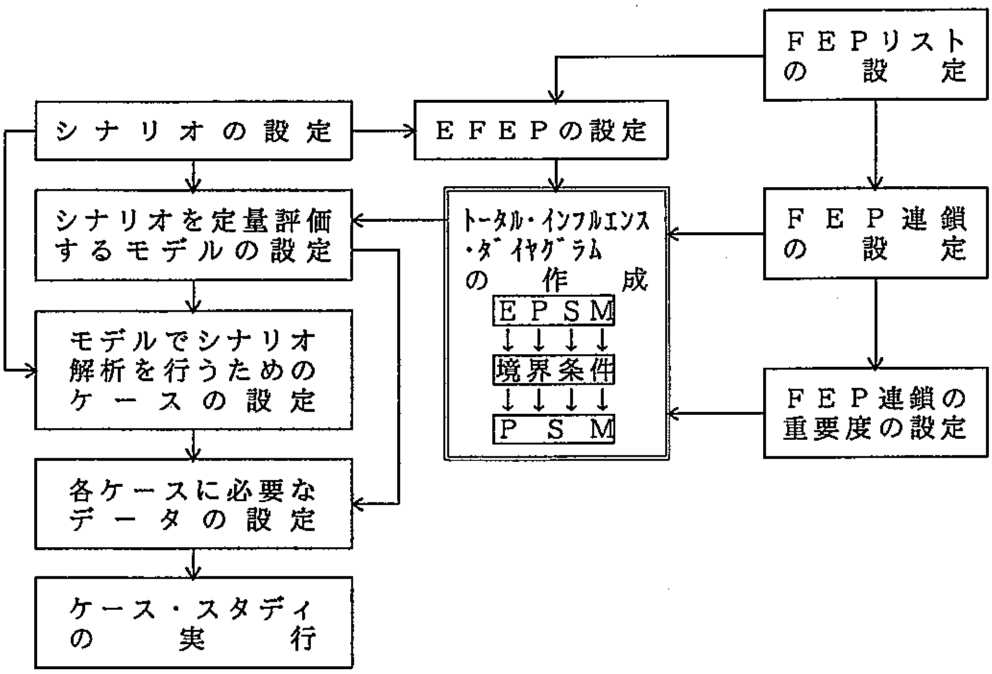


図29　シナリオ解析フローにおけるトータル・
インフルエンス・ダイヤグラムの位置付け

確かに、2)の方法の方が、様々な領域のモデルをどの専門家にも納得のゆくように矛盾なく構築できるのであれば正攻法的なアプローチと言えるが、そもそも、各ＥＦＥＰ毎に、それに関係する全てのシナリオを扱い得るモデルを作成することは、非常に効率が低下すると考えられる。むしろ、どのＥＰＳＭについてもほぼ共通基盤的に扱えるＰＳＭ部のモデルを作成しておき、その境界条件入力としてＥＰＳＭ部の出力を反映させる1)の方法の方が、より適切なアプローチとも考えられる。

いずれのアプローチをとるにしても、任意のＦＥＰ間の関係（ＦＥＰ連鎖）あるいは何らかの基準に基づき一段上のレベルに集約したＦＥＰ（これを後述の3.2.2節のＦＥＰ階層化の検討に合わせてスーパーＦＥＰと呼ぶ）（連鎖）毎に直接あるいは間接的に取り扱い得る定量評価方法の検討結果を積み上げることによって、（スーパー）ＦＥＰ連鎖から構成されるシナリオに対する定量的なモデル解析フレームの作成が可能かどうか、などの検討が必要になると考えられる。

この場合、できれば信頼度の高い（できれば実績を有する）モデルの適用が可能ならば極力そのモデルを用いた方がよいと考えられるが、こうした効率化を優

先した場合、そのモデルで取り扱い得る範囲に何らかの制約が生ずることも考えられる。それを各分野のエキスパート知見によって補完することも考えられよう。

そのようなエキスパートの判断を考慮して（スーパー）ＦＥＰ連鎖の取り扱いを考える場合には、その（スーパー）ＦＥＰ連鎖の重要性を図28に示したような何らかの評価基準によって決定することができれば、各シナリオの重要度を求めることが可能となり、それが確率で評価される場合には所謂リスク解析に帰着させることも可能であろう。

今回の火成活動シナリオ試計算では、上記1)，2)のいずれのアプローチをとるかがまだ決められていなかったため、少なくとも2)のアプローチはとっていない。敢えて言えば、1)のトップダウン的アプローチ（あるいは今後2)のボットアップ的アプローチも含む双方向的な方法を採用するものとするならば、その前段のステップと言うべきかもしれない）を踏襲した状況になっている。即ち、火成活動起点シナリオが具体的にMENTORコードのどのパラメータあるいは境界条件等に反映されているかは表５(2)のようなデータ設定フレームの中で説明し得る。その技術的判断によるデータ変更の考え方としては、以下のようなものが指摘し得る。

1)安全解析フレームの範囲内であること（EX.マグマ貫入に伴う緩衝材の熱的劣化による厚さ減少量の想定で、拡散支配的核種移行の可能な程度に残った部分を確保するといった観点）

2)詳細解析用データの不十分さを補う保守的設定（EX.マグマ貫入に伴うニアフィールド温度上昇の影響でガラス固化体の溶解率の増大化を想定、あるいはマグマ貫入に伴うマグマ水との接触での地下水化学組成のかく乱・変化を考慮するための、放射性元素溶解度の計算におけるpHの異なる地下水化学組成の設定（信頼性の高い25℃熱力学データの使用））

3)詳細モデル解析のアウトプットイメージの定性的傾向の反映（EX.マグマ貫入に伴う応力場変化によるファーフィールドの割れ目開口の増加を反映した地下水流量の増加）

2.2.2　火成活動シナリオ試解析用データ設定のモデル的反映に関する概略的検討

ここでは、1.1.3節に示した火成活動シナリオの試解析用に設定されているデータについて何故そのような設定が行われているのかを、前年度に調査した各ＦＥＰ連鎖関連モデル(4)(6)との対比でどの程度説明可能なものかを概略的に検討した。また、これを通じ、どのような点に関してエキスパート判定が必要になってくるかも具体的にアンダーラインで例示した。（なお、一般的な水理－応力－熱解析フレームに関する概略的な評価体系については1.1.2節に示した。）

1)シナリオａ

①地下水流速（ダルシー則）

FF8：
$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_w)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho_w v_w) = 0$$

$$v_w = -\frac{k_{ip}}{\mu_w}(\nabla p_w + \rho_w g)$$

ここで、ｔ：時間

ｖ：ダルシー速度

ρ：密度

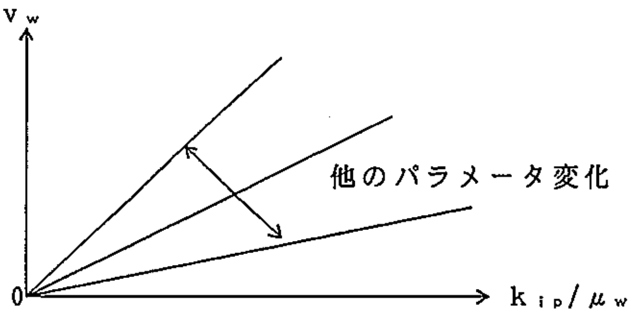
ε：空隙率

k_{ip}：固有透過率

μ：動粘性率

において、ρ_w，εが時間、場所に対して一定ならば、

$v_w \propto k_{ip}/\mu$



となる。

従って、マグマ貫入による負荷のために岩石の変形や変位のズレを通じたk_{ip}/μの変化が、ファーフィールド地下水流速の変化に反映される。今回の試解析では、基本ケースの10倍の流速が設定されたことは、逆にk_{ip}/μ_wの値が10倍程度に大きくなったことの反映とも考えられる。

②空隙率

FF19&FF20：

－岩質が非弾性多孔質の場合（静水圧縮実験での粒状破壊の臨界有効圧力評価モデル）

$$P_{cr}=2.2\,[(1-v_p{}^2)^2(1-2v_p)^3]\ [K_{lc}{}^3/E_Y{}^2]\ (\alpha_r\,\varepsilon\,r_g)^{-3/2}$$

ここで、P_{cr}：臨界有効圧力

v_p：ポアッソン比

E_Y：ヤング率

K_{lc}：臨界破壊靭性

α_r：初期の亀裂の長さの砂粒半径に対する比

ε：空隙率

r_g：砂粒半径

において、v_p, K_{lc}, E_Y, α_r, r_gが一定ならば、

$$\varepsilon \propto P_{cr}{}^{-2/3}$$

となる。

－岩質が弾性多孔質（EX.ベントナイト緩衝材）の場合

$$\frac{\kappa}{1+\varepsilon_0}\ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)=\varepsilon_{el}$$

ここで、κ：ヤング率とポアッソン比に関係する係数

ε_0：初期空隙率

σ_0：初期平均応力

σ：応力

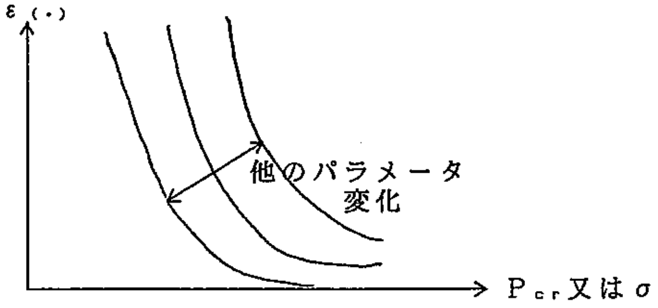
ε_{el}：弾性空隙率

において、κ, ε_0, σ_0が一定ならば、

$$\varepsilon_{el}\propto -\ln\sigma+\text{定数項}$$

となる。

－いずれの岩質の場合も、マグマ貫入による外圧が高まることにより空隙率は下に凸型の関数型で低下する。



－実際のサイトのような非均質岩体系でのε－P（又はσ）線図がどうなるかはエキスパート判定が必要と考えられる。

③拡散深さ

これについては、前年度の報告書で調査した亀裂媒体モデル（FF24項）での境界条件設定ではその概念の入っていないモデルとなっていた（即ち、亀裂とマトリクスの境界面での濃度が等しいという境界条件：$C_m(\pm b, z) = C_f(\pm b, z)$）が、今回の試解析では（H３レポートの亀裂媒体モデルでも定義しているが）、拡散深さでの境界条件を設定している。K－Ｉでは、実測図との類似モデルをつくって変質岩領域の厚さとの関係からこの値を設定している。マグマ貫入による応力増加で亀裂媒体が広がり流速も10倍になったことから、拡散深さがその分後退して1/10になるものと設定したと考えられる。

④濡れ面積

これについては、前年度の報告書で調査した亀裂媒体モデル（FF24）の遅延係数：

$R_{f,n} = 1 + \rho K_{d,n}(1 - \varepsilon_m)(\delta_s a_c / \theta)$

ここで、ρ：岩石の密度

K_d：収着係数

ε：空隙率

δ_s：亀裂の壁への表面収着の有効な深さ

a_c：チャネリング・パラメータもしくは、亀裂のある岩石の単位体積当りの濡れた面積

θ：亀裂のある岩石の空隙率

の中で、パラメータa_cとして定式化されている。これは、K－Iモデルでも亀裂中の充填鉱物が占める単位体積当りの面積比として導入されている。今回の試解析では、マグマ貫入による応力の増加で亀裂開口が増大し、流量が10倍になったことと呼応して、対象領域の体積が1/10に低下した分、10倍になるものと設定していると考えられる。

2)シナリオb

前年度の報告書で調査したモデルで関連し得るものをリストアップすると、FF6，NF12，FF23に関するものを指摘し得る。しかし、これらのモデルと緩衝材厚さ変化量とを結びつけるモデルについては示されていなかった。これについては、指摘されている研究事例(42)(58)等を参考に、パラメータ変動範囲の推定において今後どこまでモデリングによる対応が可能かを検討する必要があろう。ちなみに、文献(42)では、経験式として、

$S=\{1+(b-1)k't\}^{-1/(b-1)}$

$k'=k\cdot[K^+]^a$

$k=A_r{}^{-E_a/RT}$（アレニウスの式：FF6）

ここで、t：時間

S：イライト／スメクタイト混合層中のスメクタイトのモル分率

k：速度定数

$[K^+]$：カリウムイオン濃度

（A_r，E_a，R，Tの定義は次項参照）

a，b：実験データからのフィッティング係数

を検討しているが、これより、マグマ貫入による温度上昇は、緩衝材厚低下を速めることが導かれる。経験則が一般に適用可能かどうかはエキスパート判断が必要と考えられる。

3)シナリオc

火成活動による温度上昇によって、力学的にガラスに亀裂が生じ、それによってガラスの溶解速度が増加するプロセスのモデル化事例は前年度の報告書ではとり扱っていない。しかし、化学的影響については前年度に調査した以下のモデル事例が参考となる（これはシナリオdの項でも取りあげるべき内容）。

ガラスの溶解速度

NF18: $$\frac{dC_i}{dt} = \frac{A_g}{V} v_i k a_{H^+}^{B^*} (1 - e^{A_{ff}/RT})$$

ここで、C_i：i番目の元素の水溶液中での濃度

A_g/V：ゲルの表面積と水溶液の体積の比

v_i：ゲル中のi番目の元素の化学量論的な比率

k：ゲルの溶解についての速度定数

$= A_r e^{-E_a/RT}$（アレニウスの式：FF6）

A_r：頻度因子（積分定数）

E_a：反応の励起エネルギー

R：気体定数

T：温度

A_{ff}：溶解に関する化学親和力（FF13）

$= RT \ln(K/Q)$

K：平衡定数（無次元）

Q：無次元の反応の活量積

a_{H^+}：H^+の活量

B^*：実験的に同定される指数

において、ガラスの溶解が進行するにつれて溶液中に溶け出した元素iの溶液中濃度C_iが増加すると考えれば、上式の右辺がガラスの溶液速度に対応するものと考えられる。従って、マグマ貫入に伴うニアフィールド温度上昇の影響は、ゲルの溶解についての速度定数kを通じて、

$$\ln\left(\frac{dC_i}{dt}\right) \propto -1/T$$

即ち、溶解速度が増加すると考えられる。

他方、ガラス固化体の溶解速度を

$$L(t)=-\frac{1}{V_0}\frac{dV}{dt}=\frac{3}{T_D}\left[t-\frac{(t-t_c)}{T_D}\right]^2$$

ここで、V_0：廃棄物の初期の体積

$V(t)$：廃棄物の時点tで溶解していない体積

T_D：溶解時間

という定式化（NF20）と対比すると、温度Tの増加は、溶解時間T_Dの低下に対応する。今回の試解析では、T_Dが基本ケースの1/100に低下するくらいのニアフィールド温度上昇がマグマ貫入によってもたらされるという状況が想定されている。

4)シナリオd

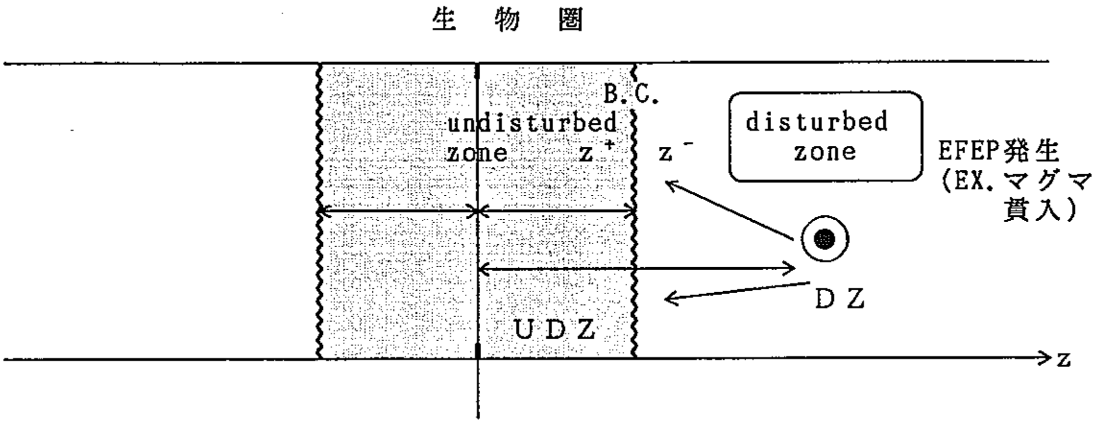
放射性元素の溶解度が、マグマ水との接触によって組成変化を受けた地下水に対してどのように変化し得るかについては、地球化学計算コード（NF15, FF6等）を用いており、元素毎に影響の受け方が異なっている。今回の試解析では２種類のマグマ水（いずれも温度が250℃以上とかなり高い）を想定しているため、溶解度限界溶解域から調和溶解域に遷移した挙動を示す元素が多い結果となっている。この遷移点の温度等のパラメータに対する依存度は、対象とする高温領域のデータに対する実測データの取得が可能かどうかの検討から始め、不可能ならば、理論面からの推測とエキスパートによる外挿的判断等の手法を用い、総合的検討を通じた設定が必要になる。

以上、モデル解析とエキスパート判断の役割や位置付けを明らかにするため、試解析を通じて学んだ今後のシナリオ解析への反映事項として、以下のものをリスト・アップした。

①ＥＰＳＭ，ＰＳＭといった分類は、モデル化といった視点で見た場合には必ずしも区別する必要がないこと、即ち、ＥＰＳＭ部に生ずる自然現象の定量的モデル表現においてはＰＳＭ部で生じ得る同等の自然現象であれば、同じ

モデルを用いてもよいと考えられること（パラメータ連鎖図的には、図６のような境界条件への反映の方向性をとることが多いと考えられる）

②このことを受けて、火成活動以外の稀頻度事象を起点とするシナリオの定量的解析も含め、図30に示すようなモデル解析評価体系（図29のトータル・インフルエンス・ダイヤグラムに対応）を提示する。



着　目　量　$x(t, z)$

$f(x(t, z)) = 0$　on　$z \in UDZ$

s.t.　$g(x(t, z^{+}), (x(t, z^{-}))\Big|_{\substack{z^{+} \in UDZ \cap B.C. \\ z^{-} \in DZ \cap B.C.}} = 0$

$h(x(t, z)) = 0$　on　$z \in DZ$

図30　稀頻度事象起点シナリオのモデル解析フレーム概念図

一般に、B.C.は熱源の移動に伴う時間の関数と考えるべきであり、B.C.の時間変化に伴い、ＵＤＺの領域も変動し得る。即ち、マグマ貫入部が相対的に処分場領域に近づいてきたら、ＵＤＺが消滅し、全てＤＺ内のモデル解析を行うべきとなろう。この場合、熱源は、内部方程式の境界条件として反映するのではなく、内部方程式内の項として直接取り扱うことになる。

このような概念は、モデル的取り扱いの観点にそった場合のものであり、ニアフィールド、ファーフィールドといった空間的な識別概念とは異なるものととらえるべきであろう。今回の火成活動シナリオの試解析ではニアフィールドへ及ぶ影響についても扱われているので、図31の斜線のような位置付けになると考えられる。

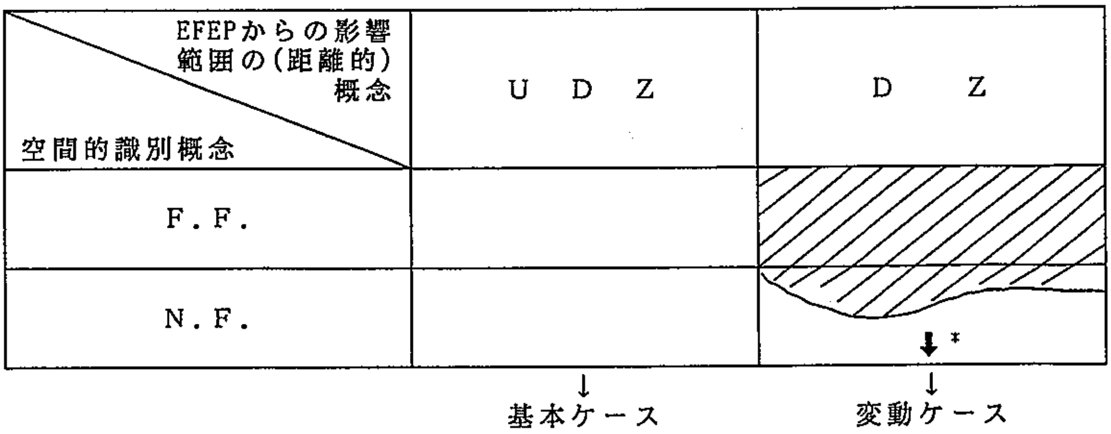


図31　ファーフィールド／ニアフィールド概念と
ＥＦＥＰ影響領域／非影響領域概念

＊この境界が廃棄物の方向へ逐次近づいていくような解析ケース設定を行う。今回の試解析用ケースＡ～Ｄは、火成活動の影響の伝播の方向性（ファーフィールド地下水流→緩衝材→ＨＬＷガラス固化体→溶解度）の順番に累進的に加味したものとなっている。

③エキスパート判定が必要なものとしては、一般には図28の階層的整理項目が考えられるが、より具体化されたシナリオを通じ、特に以下の点が指摘し得る。

－モデル化の範囲の設定（EX.ＥＦＥＰ自身の発生・挙動メカニズム（火成活動シナリオでは、例えば、火山岩形成、マグマ溜り規模・進化・温度・組成変化等ダイナミクス、マグマ結晶作用、貫入マグマ量、熱流量、マグマ移動（上昇、割れ目中移動）とその経路など）をどの程度モデル化対象と考えるべきか）

－実証できないシナリオに対する評価において採用すべき解析モデルあるいは解析手法の適切性

－そのモデルの入力データの信頼性と不足データに対する補間方法

－評価目標に照らし合わせた評価結果の適用範囲・意義付け等とその課題に対する詳細分析等の目標設定（どこまで詳細分析が必要かの判断、特に、１つの計算モデルで複数のパラメータを同時に変動させる必要があるケースでのエキスパート判断の限界点（どのパラメータがどのパラメータのどの程度の変動に対してどの程度の変化量を示すかの判断など）との係り；1.1.2節参照）

３．地下水シナリオ解析システムの検討

前年度までに開発してきたシナリオ自動展開ツールの本年度の作業項目を明らかにするため、表15に示すような一般的な検討課題７つを整理し、それぞれに対する現行システムでの対応状況と将来的なバージョンアップ等による対応可能性を検討した。このうち、本年度は、（①，②項の将来的対応可能性欄に示すように）データベースシステムとのリンクの可能性の検討とその結果を念頭に置きつつ、④，⑤項の検討課題を考慮した出力画面表示設計の検討・試作を行う。

表14　シナリオ自動展開ツール改良化のための検討課題の整理

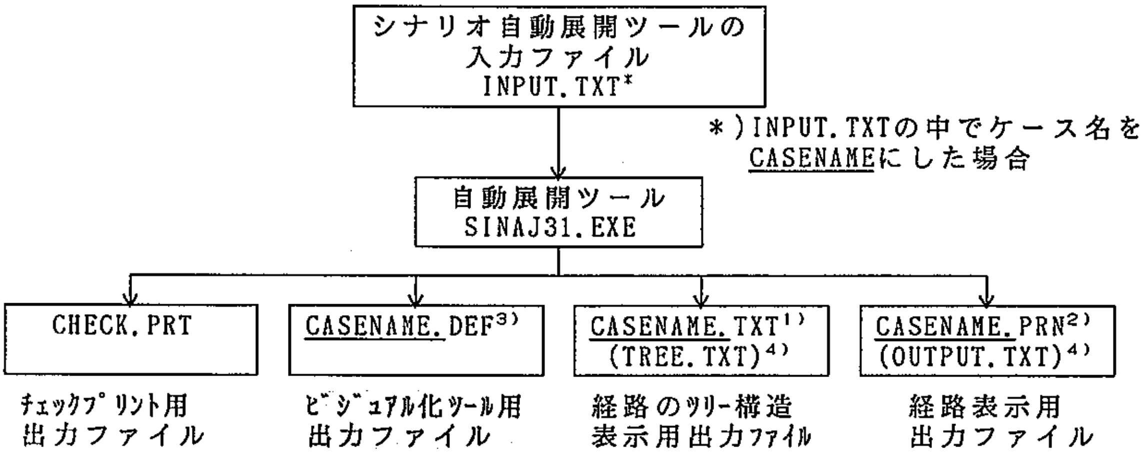
検　討　課　題	現行システムでの対応性(制限等も含め)	将来的対応(バージョンアップ等)可能性
①諸外国（他機関）の研究事例の参照	基本的にはOECD/NEAやIAEAの考え方[10]を踏襲し、また、INTERAのＰＳＭモデル情報（境界条件の媒介、ファジイ理論の組み込みの考え方など）を参考に開発している。	ＳＫＢ，ＴＶＯの表示例[11]（主要なＦＥＰを対角成分に入れ、それに関連するものを非対角成分に入れる)等を参考に、ＦＥＰメモコメント（データベース）とのリンクを想定したシステムバージョンアップを志向。
②現象等の理解の進捗やシナリオ解析結果のスクリーニング等に応じ必要なＦＥＰの追加入力（あるいは削除等)	インフルエンス・ダイヤグラムに含めるべきＦＥＰの総数の上限制約はほぼないが、ルート探索の過程で関係し得るパスを構成するＦＥＰ数が最大55個で打ち切られる。	ｼｽﾃﾑの制限が解除できれば対応可能。
③ＦＥＰ連鎖の意味、内容（範囲等）の明確化（原因と現象の仕分け、形態によってかかる時間の違い等）に伴う画面表示法の高度化（矢印の長さや太さ、色分け等)	インフルエンスＡ→Ｂの意味は、「ＦＥＰ Ａ がＦＥＰ Ｂ に何らかの影響を与える」となっており、両方向表示も可能（但し、その場合にはループが生じ得るが、ループ対応もある程度可能）。	2.1節で検討した一般的評価項目で必要と考えられるＦＥＰ間の関係を新たに追加し、その関係別展開・表示を可能とする。また、ループ対応ロジックを可能な限り厳密化する。
④ＦＥＰ連鎖への重要度（確率的概念も含め）付与	エキスパート知見が反映できるよう数ランクの重要度設定とスクリーニング等のための重要度範囲指定が可能。	エキスパート知見等を反映するためのＡＨＰ法やフォールト・ツリー法のような重要度（あるいは（主観的）確率）算定プログラムとのリンクが考えられる。
⑤時間軸（タイムスケール）別、データの種類別（パラメータ、変数、定数）、影響レベル、４ないし５つの主要境界条件反映領域（分野）別（力学、化学、熱学、水理学、その他）などの表示	ＦＥＰに関するデータ(Ｉ)とパラメータ等(Ⅱ)に関するデータに分類後、まず入力データ(Ｉ)でツールを実行し、出力された該当パス事象に関するパラメータ等のデータを入力データ(Ⅱ)に入れてツールを実行するといった２段階的アプローチで対応可能。	・ＦＥＰ（連鎖）毎にあらかじめ入力設定されているキーワード（時間、関連パラメータ、分野、現象…）別に検索できる機能を追加し、指定キーワード別にＦＥＰ連鎖を求める。 ・各レベル別のサブシステムを作成し、ＦＥＰレベルの展開で出力されたもの（重要度評価項目にあらかじめこれらのレベル別の重要度を付与しておき、ｽｸﾘｰﾆﾝｸﾞされた結果残ったもの）に関するサブシステム同志をリンクして表示することなどが考えられる。
⑥ＦＥＰスクリーニング・プロセスの軌跡の記録化	議論の出発点として動燃殿が設定した102のＦＥＰをベースに入力されたものに対するＦＥＰ連鎖に、エキスパートが判断する（予定の）重要度に基づいてスクリーニングされたパス（全経路及び重要度順の各パス）が表示される。	スクリーニング前のインフルエンスダイヤグラムとスクリーニング後のインフルエンス・ダイヤグラムが比較できるようなシステム機能（スクリーニング・ステップに従った記録化と参照化（重畳表示等）の追加。
⑦シナリオ構築手順の自動化	ＦＥＰ選定からＦＥＰ連鎖出力及びそれに沿ったシナリオの文章化とモデル解析に必要なパラメータ等のリストアップまでのステップに対し、各ステップのバッチ的連携運用が可能。	シナリオ解析に必要な入力データをデータベースから読み込み、計算結果を表示、記録するシステムへの拡張とその結果を反映したＦＥＰスクリーニングプロセスへの再フィードバックまで盛り込んだ連続システム運用形態への進展。

3.1 地下水シナリオ自動展開ツールのビジュアル化

前年度に試作した地下水シナリオ自動展開ツールの情報をファイルへ出力可能なように改良する。さらに、3.3節の検討結果を踏まえ、ビジュアル表示が可能な言語を用いて出力された情報を読み込み、ビジュアル表示するプログラムを作成する。

3.1.1 地下水シナリオ自動展開ツールの改良

前年度に試作した地下水シナリオ自動展開ツールでは入力データファイルと計算結果の出力ファイルは一対一対応（入力ファイル名：INPUT.TXT, 出力ファイル名：TREE.TXT,OUTPUT.TXT）でファイル名は固定していたが、ビジュアル化ツールとの結合及びケースラン対応のために、入出力ファイルの名前を明示的に定義できるように、シナリオ自動展開ツールの改良を行う。また、同時にビジュアル化ツールで使用する情報の出力ファイルを作成するように改良する（図32参照）。

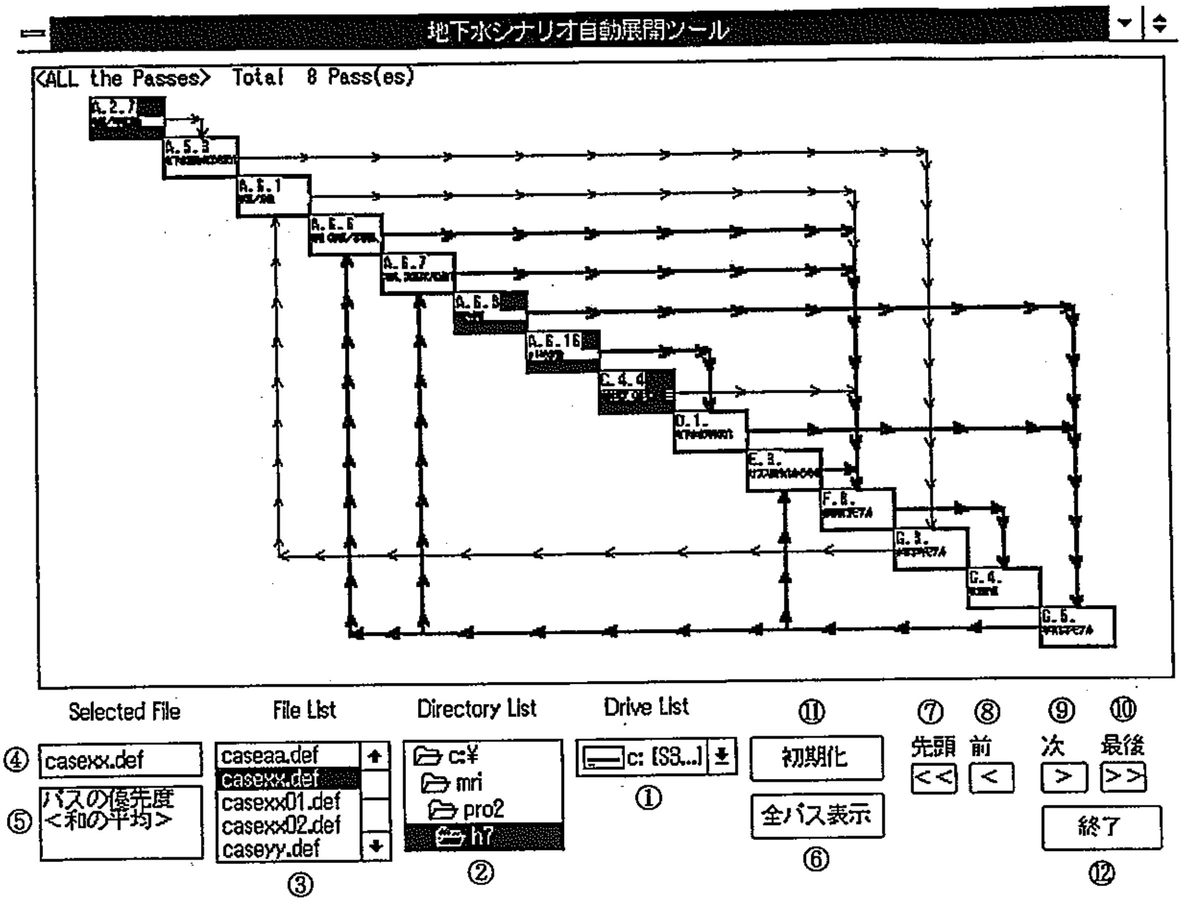


注 1）ファイル名は拡張子.TXTを持つ。アンダーライン部分の名前はINPUT.TXTより。
2）ファイル名は拡張子.PRNを持つ。アンダーライン部分の名前はINPUT.TXTより。
3）ビジュアル化ツールのために追加したファイル名で拡張子.DEFを持つ。アンダーライン部分の名前はINPUT.TXTより。
4）（　）内は昨年度のファイル名を示す。

図32　地下水シナリオ自動展開ツールのファイル関係

3.1.2 ビジュアル化ツールの概要

画面－1



［画面の説明］

1．この例は全経路を表示したものです。選択されたＦＥＰは全部で14です。

2．経路数は全部で８ルートあることを示しています。

3．図中の太い枠線はＦＥＰです。ＦＥＰは次のように色分けされています。

(1) 始点のＦＥＰは赤色

(2) 終点のＦＥＰは黄色

(3) 必ず通らなければならないＦＥＰは水色

(4) 上記以外は白色

4．図中の矢印はＦＥＰ間のつながりを表します。

(1) 一度しか通らない場合、細い青色

(2) 二度以上通る場合、太い青色

[ボタンの説明]

① Drive List　　　　ドライブの選択ができます。

② Directory List　　ディレクトリの選択ができます。

③ File List　　　　ツール入力データファイルリストです。①で選択したドライブ上で②で選択したディレクトリの中にある入力データファイルを全て表示します。拡張子.DEFのファイル名が該当します。このファイルの中でツールで使用するファイルをどれか一つだけクリックしてから、実行ボタン（⑥～⑩）を押さないとエラーになります。

④ ③のFile Listでクリックしたファイル名*が表示されます。

*) File Listに表示されるファイル名はシナリオ自動展開ツールの入力データファイルに記入することができるように改良しました。

⑤ 実行用ボタン（⑥～⑩）を押した後、このウィンドウをクリックすると、パスの優先度が表示されます。

⑥ 全パス表示ボタン　　全経路を１画面上に表示させる。

⑦ 先頭ボタン　　　　先頭（ルートNo.１）の経路を表示させる。

⑧ 前ボタン　　　　　１つ前の経路を表示させる。

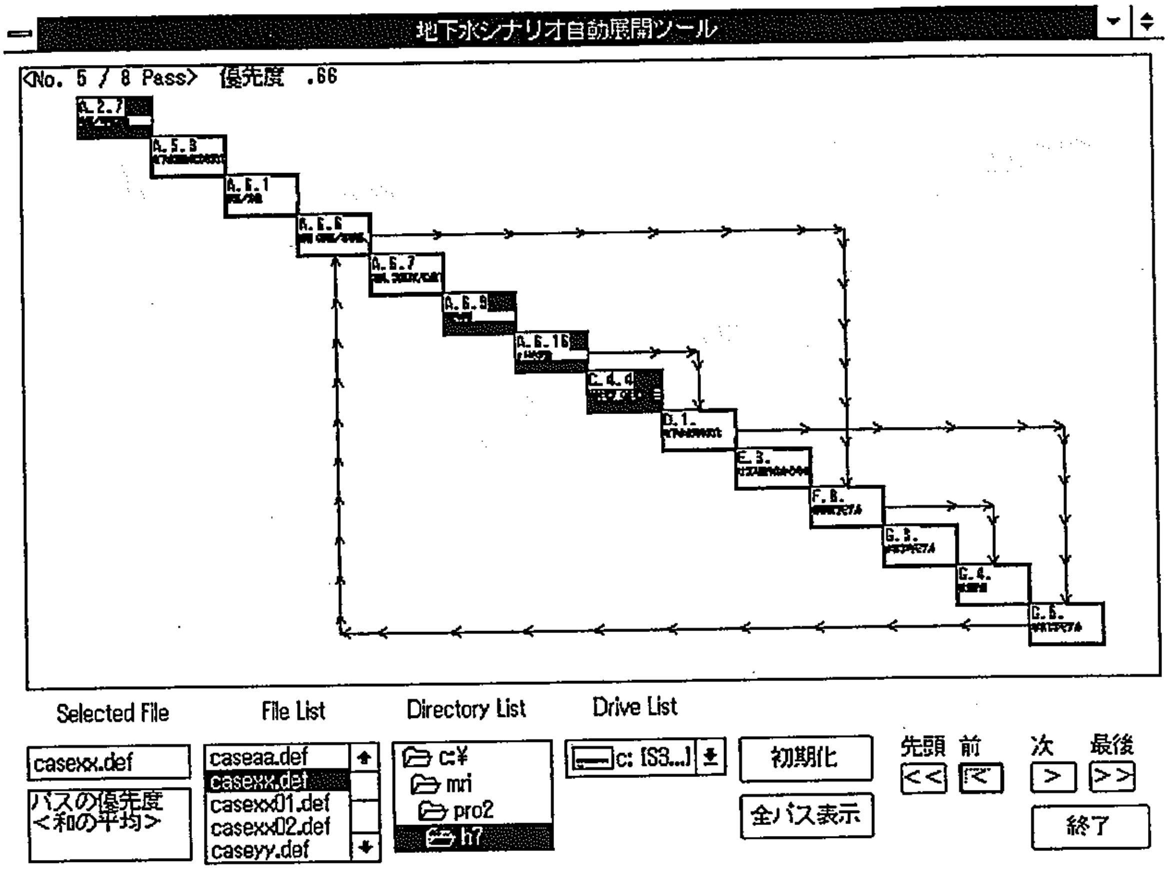
⑨ 次ボタン　　　　　１つ次の経路を表示させる。

⑩ 最後ボタン　　　　最後の経路を表示させる。

⑪ 初期化ボタン　　　画面表示をクリアする。

⑫ 終了ボタン　　　　システム終了。

画面－２

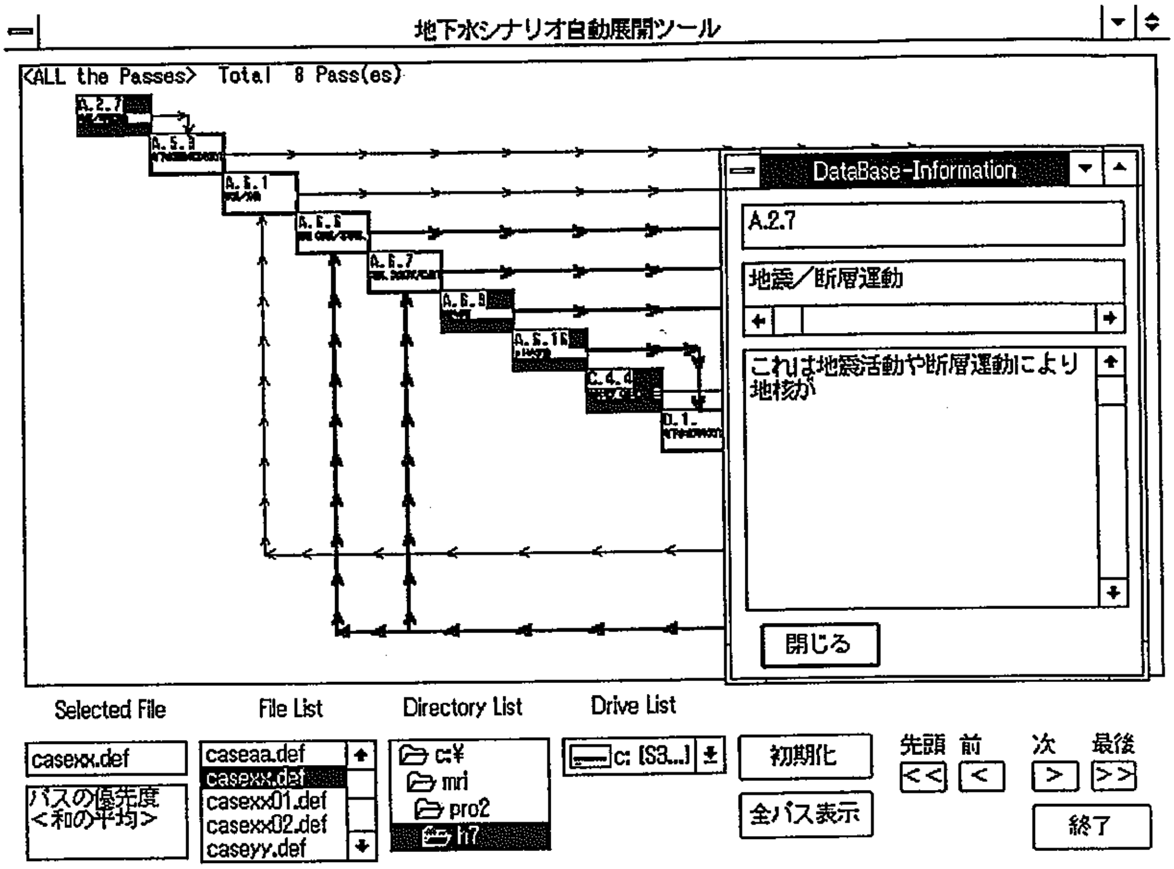


［画面の説明］

画面－１で⑨ボタンを５回押して、５番目のルートを表示させたものです。

パスの優先度は0.66と表示されています。

画面－3



［画面の説明］

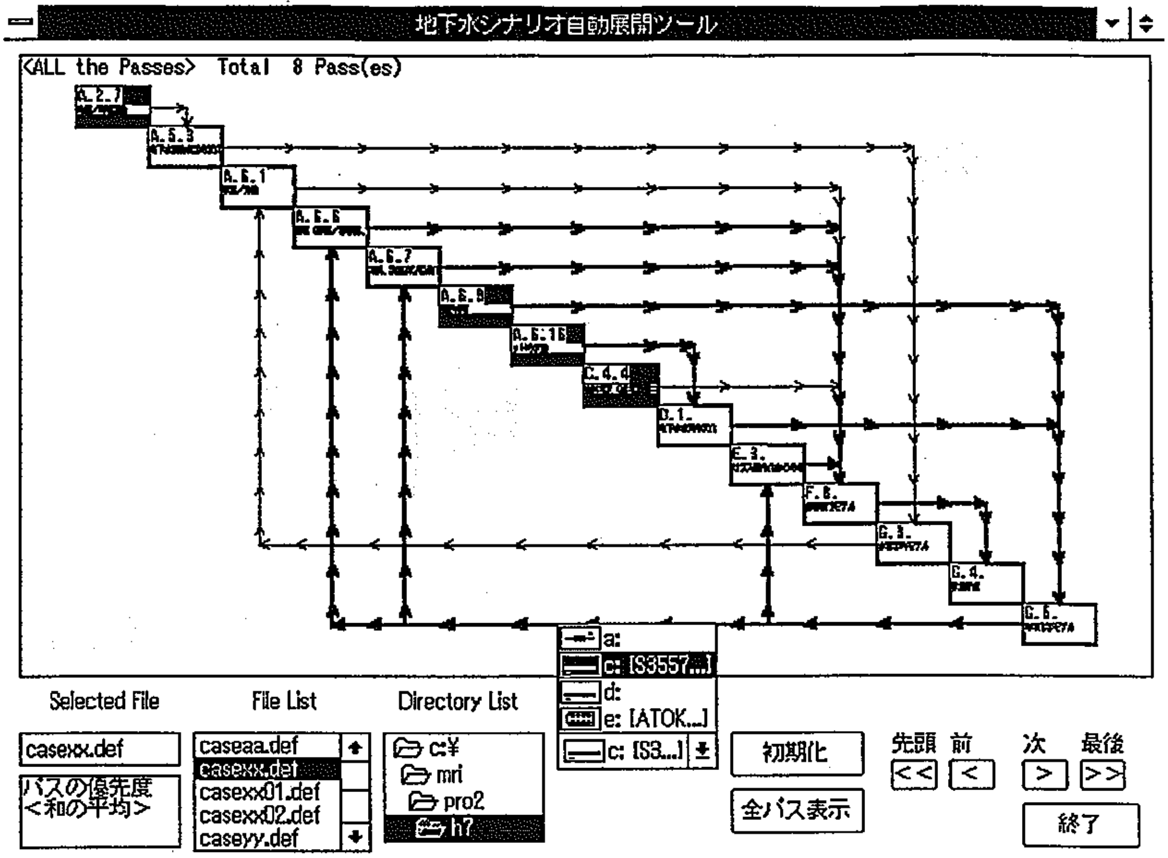
画面－1で、マウスをFEPの枠内にもって行き、マウスの左ボタンを押したものです。

FEPの内容説明（データベースの文字情報(*)）が表示されます。

(*)現在、これは一定フォーマットのもとで書かれたテキストファイルを読み込んで表示しています。

また、FEPの枠内にマウスをもって行き、マウスの右ボタンを押すと、始点のFEP（赤色）の場合、このFEPで始まるルートだけが色が変わります。

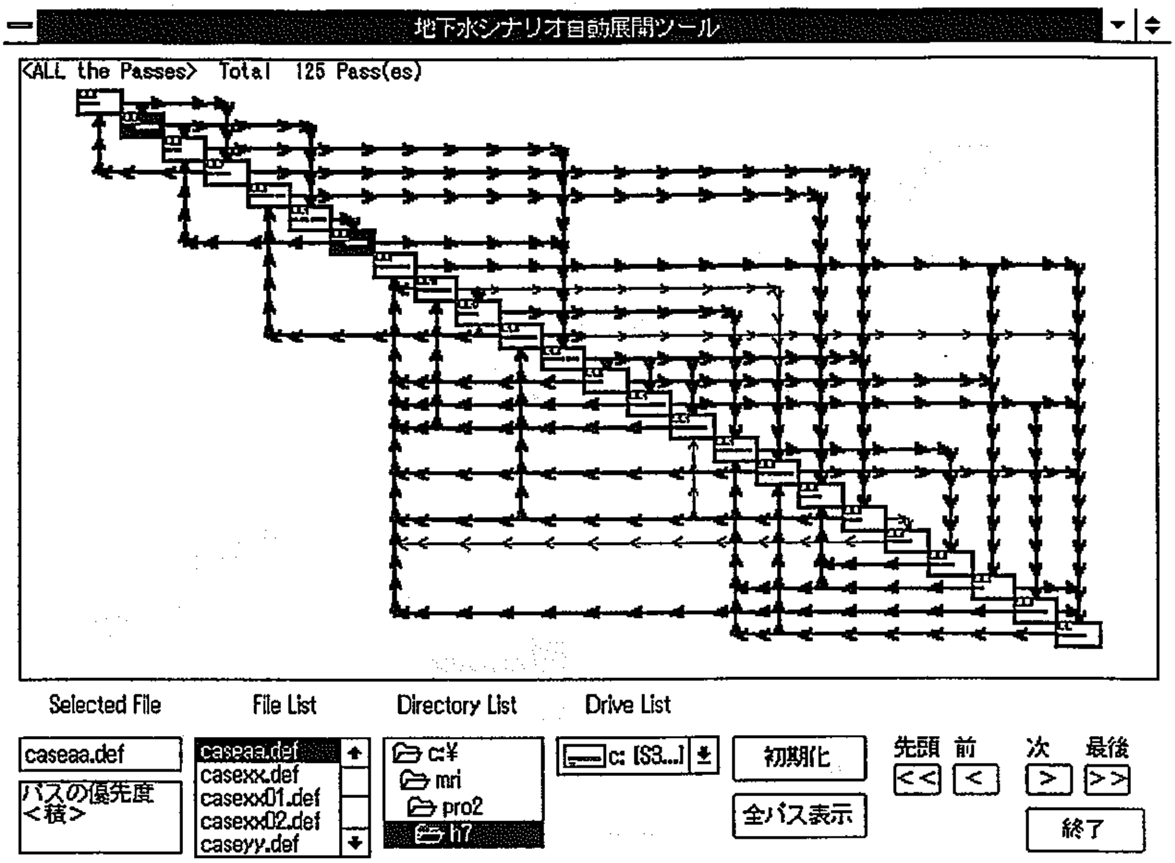
画面－4



[画面の説明]

画面－1で① Drive Listを押した状態のものです。

画面－５

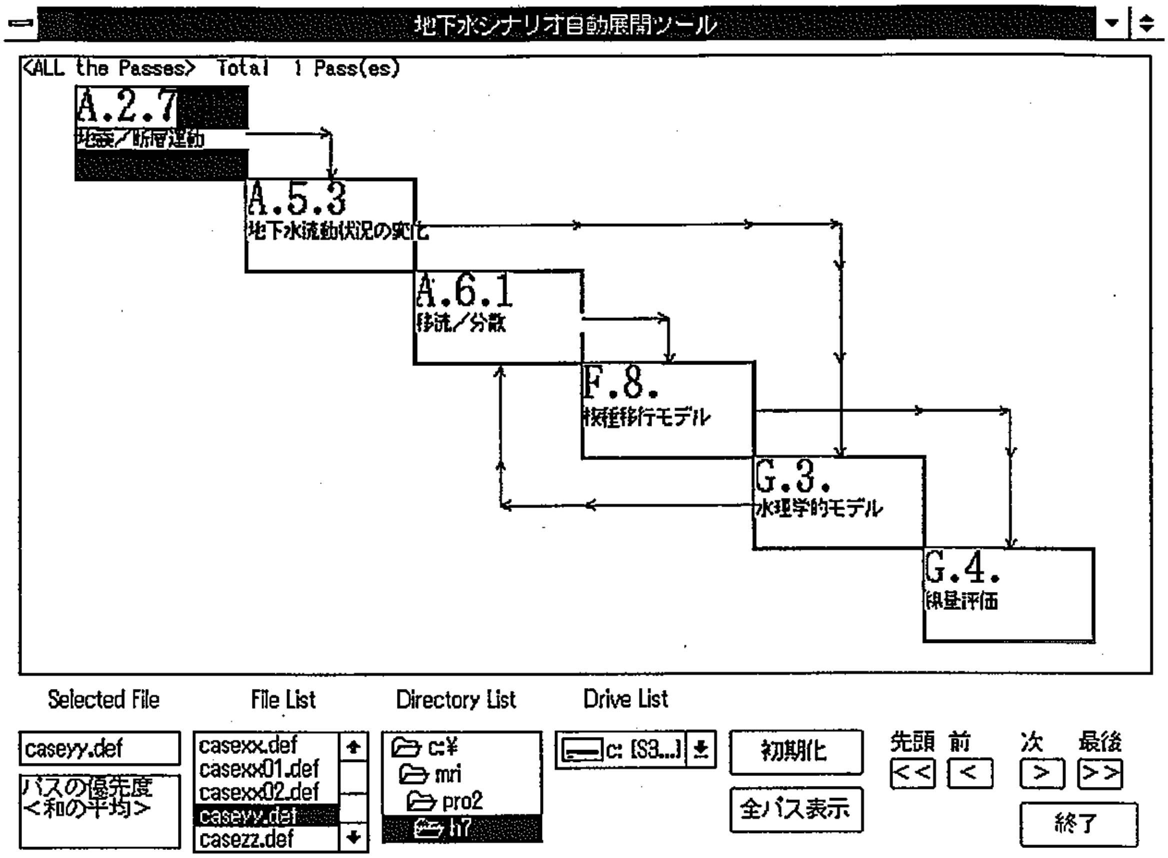


［画面の説明］

入力データファイルを変えて選択されたＦＥＰが24個の場合です。

自動展開ツールのケースランの内容如何で、選択されるＦＥＰの数も変わるため、ＦＥＰの枠や文字の大きさも変化します。

画面－6



[画面の説明]

ＦＥＰが６個の場合です。

3.2 本ツールのリスク評価への活用及びＦＥＰの階層的情報の明示への活用の検討

前年度に試作した地下水シナリオ自動展開ツールは事象（Events,Processes）間のパスをある重要度の範囲にある事象間に限って、始点（複数）と終点を指定し、全パスの探索ロジックを構築し簡易ツリー図を出力するものであった。

今年度は、表15の検討課題④⑤項の認識のもとに、リスク評価及びＦＥＰの階層的情報の明示について、前年度に試作したツールの適用可能性について検討する。具体的には、事象（Events,Processes）間のインフルエンスの具体的内容としてパラメータ（温度、密度、流れの場etc.）を考慮する場合、事象とパラメータは階層的な関係となるため、本研究では前年度試作したツールのこれら階層的情報の取扱への適用について検討する。

3.2.1 シナリオのリスク評価への活用の概略的検討

ＨＬＷ処分のリスク評価を安全評価の観点から行うためには、まず、地下水移行シナリオをＦＥＰ連鎖をもとに作成した後、各シナリオのリスクを求めるために、そのシナリオに関与するＦＥＰ（連鎖）の発生確率とその影響（ＦＥＰ連鎖の場合にはそれらのシリーズ）とを計算した結果を情報として与える必要がある。その情報は、前年度作成したシナリオ自動展開ツールの中では、各ＦＥＰ（又はパラメータ）連鎖間の重要度の一種として取り扱うことが可能である。その概念を図33に示す。その結果、シナリオ自動展開ツールにより、ＦＥＰ連鎖の重要度算定方式に基づき、各シナリオの重要度（リスク）評価とこれに基づくシナリオの優先順位付けを行うことが可能となる。実際にＦＥＰ連鎖 $i \rightarrow j$ に関与するモデルで定義される各パラメータ p_{ijk} （$k = 1, 2, \cdots, n$）の取り得る範囲 $p_{ijk} \in [p_{ijk}^{min}, p_{ijk}^{max}]$ と、その区間における確率密度関数 $f_{ijk}(p_{ijk})$ を求めるには、各種データと、これを補完するエキスパート知見の反映とが必要になると考えられる。特に、後者の主観的確率とも言うべき定量化の考え方の取り扱い方については、効用理論やＡＨＰ法に基づくフレーム、及びこれにファジイ理論を融合する方法等の導入が適用可能と考えられる(2)。

さらに、リスク値をベースとしたシナリオ解析を行うには、ＦＥＰ連鎖毎のリスク値からシナリオのリスク値を算定する必要があるが、その場合には、従来からのツリー解析に基づいたリスク値算定ロジック等に基づく重要度算定方法を適用することも考えられる。そして、そのシナリオリスク値算定ロジックにおいても、ファジイ理論などの主観的ファクターを取り込むことが可能と言えよう。

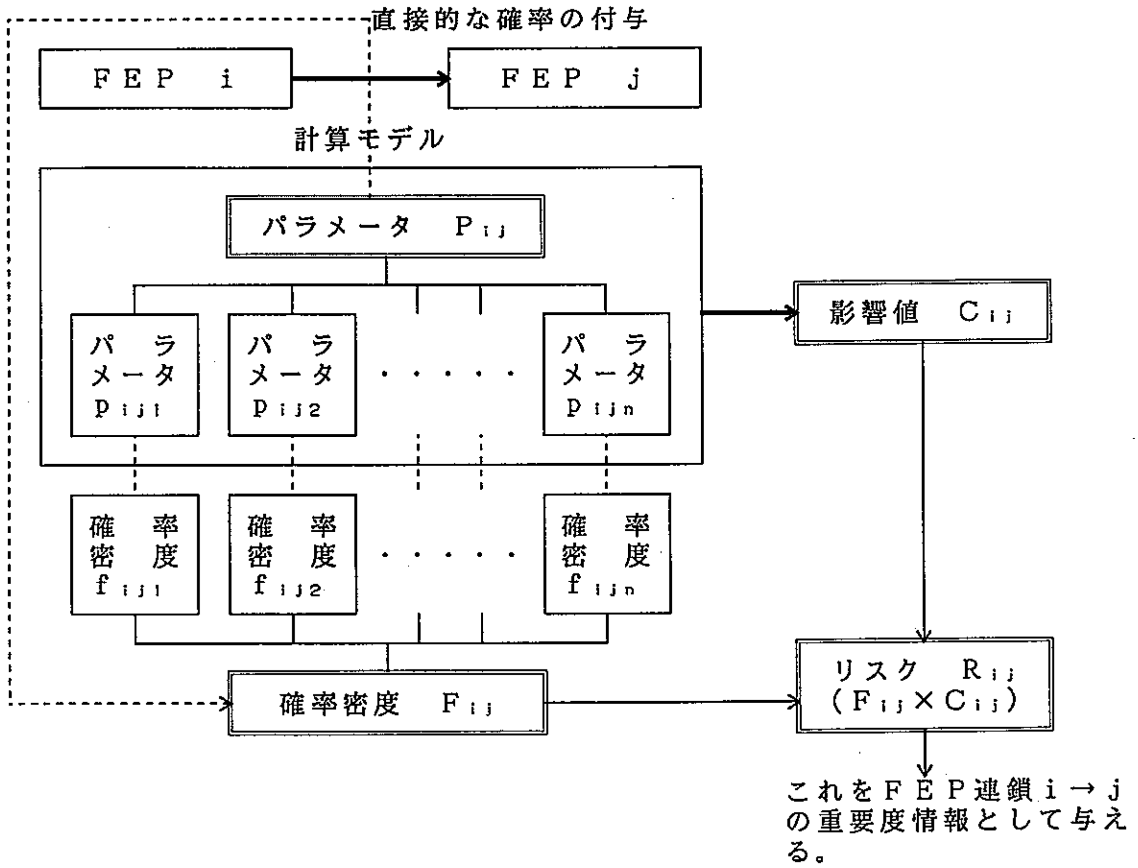


図33　ＦＥＰ連鎖のリスク値を重要度情報として取り扱う概念

3.2.2　ＦＥＰの階層的情報の明示への活用に関する概略的検討

前年度に作成したシナリオ自動展開ツールでは、任意のＦＥＰ間の関連性をマトリクス形式で入力し、その入力した全ＦＥＰに対して、ＦＥＰ連鎖表示を行う仕様となっている。しかし、無限に多くのＦＥＰを扱うことはできないこと、また、入力ＦＥＰにも、パラメータレベルで入力した方が適当と考えられ、結果的

にＦＥＰレベルとパラメータレベルの双方が混在してくる情報にも対処できること、などの要求が考えられる。そこで、ここでは、シナリオ解析で対象とするＦＥＰをいくつかの視点から階層化しておき、その最上位レベルに対するＦＥＰ（ここではスーパーＦＥＰと呼ぶことにする）のみを入力マトリクスの対角成分に、それ以外の下位に属する任意の２つのスーパーＦＥＰ（ここではサブＦＥＰと呼ぶことにする）間の情報をその２つのスーパーＦＥＰの行と列を要素とする交叉部に表示できるようなシステムの概念（図34参照）を検討した。

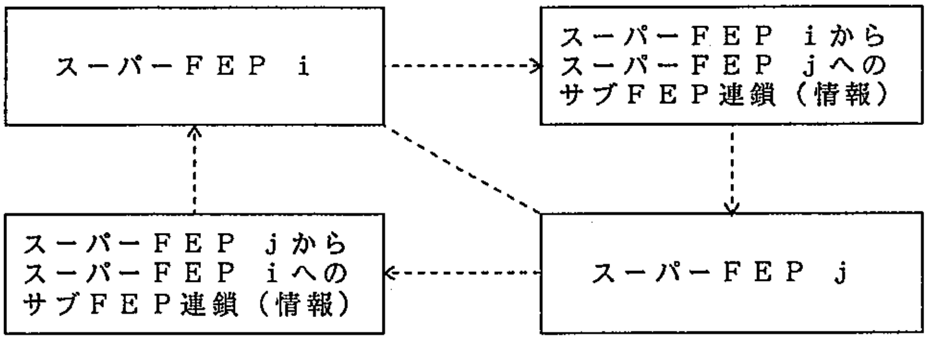


図34　ＦＥＰの階層的情報表示の基本概念

(1) シナリオ自動展開ツール上のイメージ

図35に先に開発したシナリオ自動展開ツール上でのビジュアル化ツール（以下、今回システム開発したツールをビジュアル化ツール(1)とし、ここで新たに検討するツールをビジュアル化ツール(2)と呼ぶことにする）の画面イメージを示す。この画面は自動展開ツールで見つけた全パスのうち、スーパーＦＥＰのみを表示する。

図35はＦＥＰがＡからＪまで10個あったとき、スーパーＦＥＰはＡ，Ｄ，Ｆ，Ｇ，Ｊの場合の画面を想定している。

スーパーＦＥＰのＡからＦへ至る経路はＡ→Ｂ→Ｉ→Ｆとすると、図35の斜線のセルＸにはＢとＩのＦＥＰが関係している。このセルＸをクリックすると、図36のウィンドウが表示され、ＢとＩのＦＥＰを表示する。

また、ＦからＪへの経路の関連する情報はセルＹに入っているし、ＧからＡ

への経路に関連する情報はセルZに入っている。

図35でスーパーFEPのセルや関連情報が入っているセル（X，Y，Z）は色を変えてわかりやすく表示する。

図35の下部に表示されるパスの優先度、FileList、DirectoryList等の窓はビジュアル化ツール(1)と同じである。

なお、ビジュアル化ツール(1)の画面からビジュアル化ツール(2)の画面へ、また逆のこともできるように双方の画面に移行ボタンを付けることも考えられる。

(2) 検討課題

スーパーFEPの定義をどの段階で行うのか、自動展開ツールの段階か、このビジュアル化ツールの段階で行うのか、または別途定義するのかを検討する必要がある。

(3) 階層的情報の取り扱いについて

FEPには階層関係を持つ事象（Events,Processes）とパラメータ（温度、密度、流れの場etc.）がある。ここでは、ビジュアル化ツールにおいてこの階層的な関係を表示する方法について検討する。

図35の画面は、対角線上のセルにはスーパーFEPが表示され、それ以外のセル（例えばセルX，Y，Z等）には二つのスーパーFEP間に関係するFEPの情報が入っている。階層的な関係を表示する例として、図35に表示されているFEPはすべて事象であると考え、これら事象と階層的関係にあるパラメータをセルのクリック操作で表示させる方法がある。

マウスを使用した場合、左右のボタンで異なる内容を表示できるため、通常使用する左ボタンはFEPの内容表示（間接的なデータベースの参照）を行い、右ボタンはパラメータ表示を行うようにすることができる。

具体的には、図35において、対角線上のスーパーFEPのセルの場合には左ボタンでDB内容、右ボタンでパラメータ内容を表示する。非対角線上のセルの場合には左ボタンで図36のウィンドウ表示を行い、図36の中で左ボタンでDB内容、右ボタンでパラメータ内容を表示する。

このような階層的関係を表示するためには、事象とパラメータの階層関係を記述したデータファイルを持つ必要がある。この階層関係ファイルとシナリオ自動展開ツールの結果であるビジュアル化ツール用出力ファイル（*.DEF）を用いてビジュアル化ツールを作成する。

図37にパラメータ表示の例を示す。パラメータには事象に影響を与えるパラメータ（図37ではIN）と事象に影響を受けるパラメータ（図37ではOUT）があり、それらのパラメータを表示する。

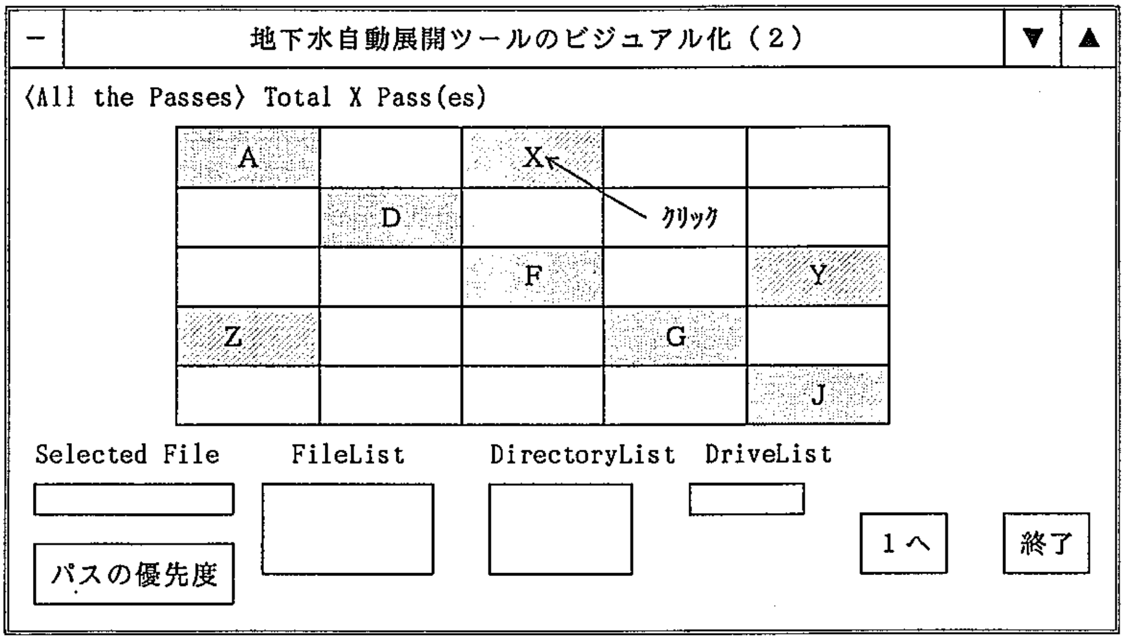


図35　ビジュアル化ツール(2)の画面表示

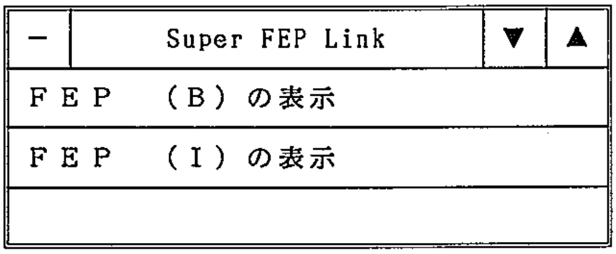


図36　スーパーＦＥＰ間の関連情報表示用ウィンドウ

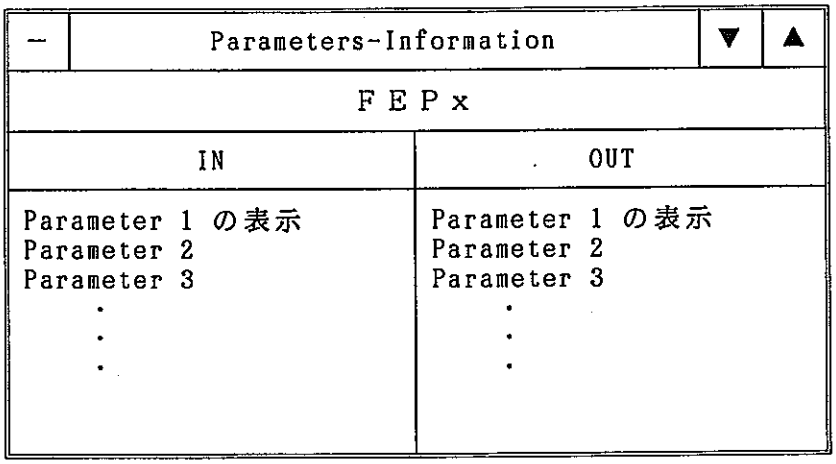


図37　パラメータ表示用ウィンドウ

注記）スーパーＦＥＰの下位に属するサブＦＥＰも、このようなシステムにより階層的に取り扱うことも可能である。また、下位に属するパラメータ同士の連鎖についても原理的には表示可能である。

3.3 既存データベースシステムとの結合性の検討

地下水シナリオ自動展開ツールと既存データベースシステムとの結合方法について、リンク方法とその特徴、メリット・デメリットを検討する。

3.3.1でデータベースやビジュアル化ツールの環境であるＧＵＩやコンピュータの動向を検討し、3.3.2でＨＬＷシナリオ解析支援システムの構築について検討する。

3.3.1 ＧＵＩ及びコンピュータの動向

ＨＬＷシナリオ解析支援システムで取り扱うデータは、一般的な文字情報と数値情報の他に、画像情報も考えられている。データベースにおける文字や数値の取扱いは、技術面、運用面及び実際の利用面からみても大きな問題はない。画像情報については、ＧＵＩ（グラフィカルユーザーインターフェイス）として統一的な体系を持ったコンピュータとソフト（例えばマッキントシュやWindows対応パソコン、ワークステーションのOpen Windows等）を用いれば、設計図や写真等をコンピュータの画像情報として取り扱うことも容易である。

(1) ＧＵＩの動向

① 狭義のＧＵＩ

ＷＳやＰＣで、人と計算機の対話を容易にするユーザーインターフェイス（ＵＩ）のことである。多重ウィンドウを管理・制御するウィンドウシステムの上に、ボタンやスクロールバーなどグラフィックスを利用した表示部品を配して、直観的で親しみやすいＵＩの構築が望まれている。コンピュータにとって、既に基幹ソフトウェアの一部となったこうした表示ツール群は、狭い意味でＧＵＩと呼ばれている。

② 広義のＧＵＩ

標準ソフトウェア層の上に作られる各種応用システムの視覚的なＵＩは、広い意味でのＧＵＩである。これは、ほぼビジュアルインターフェイスと同義語であり、２次元描画はもちろん、動画や３次元グラフィックスを駆使した研究

が活発である。

③ ＧＵＩを支える基幹ソフトウェアの動向

ａ．ウインドウシステム

○ワークステーション

・ＭＩＴで開発された無償ソフトのＸ Ｗｉｎｄｏｗ Ｓｙｓｔｅｍ（Ｘ）

・Ｓｕｎ Ｍｉｃｒｏｓｙｓｔｅｍｓ社のＯｐｅｎ Ｗｉｎｄｏｗｓ

・ＮｅＸＴ Ｃｏｍｐｕｔｅｒ社のＮｅＸＴＳｔｅｐ

○パーソナルコンピュータ

・ＭＳ－Ｗｉｎｄｏｗｓ（Windows3.1,WindowsNT,Windows95）

・Ａｐｐｌｅ社のＭａｃｉｎｔｏｓｈでの独自のＯＳによるグラフィックス

ｂ．ツールキット

○Ｘ Ｗｉｎｄｏｗ Ｓｙｓｔｅｍ上のツール

・ＸＴｏｏｌｋｉｔ（ＭＩＴ）

・ＩｎｔｅｒＶｉｅｗ（Ｓｔａｎｆｏｒｄ大学）

○Ｍｏｔｉｆ

・Ｏｐｅｎ Ｓｏｆｔｗａｒｅ Ｆｏｕｎｄａｔｉｏｎ

○ＯＬＩＴ、ＸＶｉｅｗ

・Ｕｎｉｘ ＩｎｔｅｒｎａｔｉｏｎａｌのＯｐｅｎＬｏｏｋスタイルガイドに基づくソフト

○ＮｅＸＴＳｔｅｐのツール

○Ｍａｃｉｎｔｏｓｈのツール

○ＰＣのＷｉｎｄｏｗｓのツール

(2) パソコン及びワークステーションの動向

① パソコンの動向

Windows95が発表されて以来、95対応パソコンやソフトが宣伝媒体に多く見られるようになってきたが、当面は従来のDOS/V対応のWindows3.1やWindows NTも対応ソフトの数や既存ユーザーの利便性から残るものと思われる。

マッキントッシュはＧＵＩの独自性から離れがたいユーザーが多く、また、

Windows95の機能がマックの機能に比べてまだ少し劣っているせいか、95の発表以降ユーザー数が増加したとも聞いているため、今後も根強く残って行くであろう。但し、Apple社が仕様を公開していないためか、アプリケーション開発の可能なソフト会社の数はWindowsに比べ少ない。

② ワークステーションの動向

ワークステーションは今まで、高速処理を要求される科学技術計算やデータベース処理のために使われることが多く、パソコンのように所謂ＯＡ機器として安易には使用されてこなかった。しかし、サン・マイクロソフト社のＯＳであるSolarisでは、パソコンのアプリケーションソフトをそのまま起動できるようになってきている。起動できるソフトの数は少ないが、代表的な表計算ソフトのLotus1-2-3，EXCEL，ワープロの一太郎などは使えるため、今後ますますパソコンとの境界が狭くなると思われる。

3.3.2 ＨＬＷシナリオ解析支援システムの構築

ＨＬＷシナリオ解析支援システムにおいて画像情報を取り扱う際のアプローチの仕方として大きく３つのケースが考えられる。

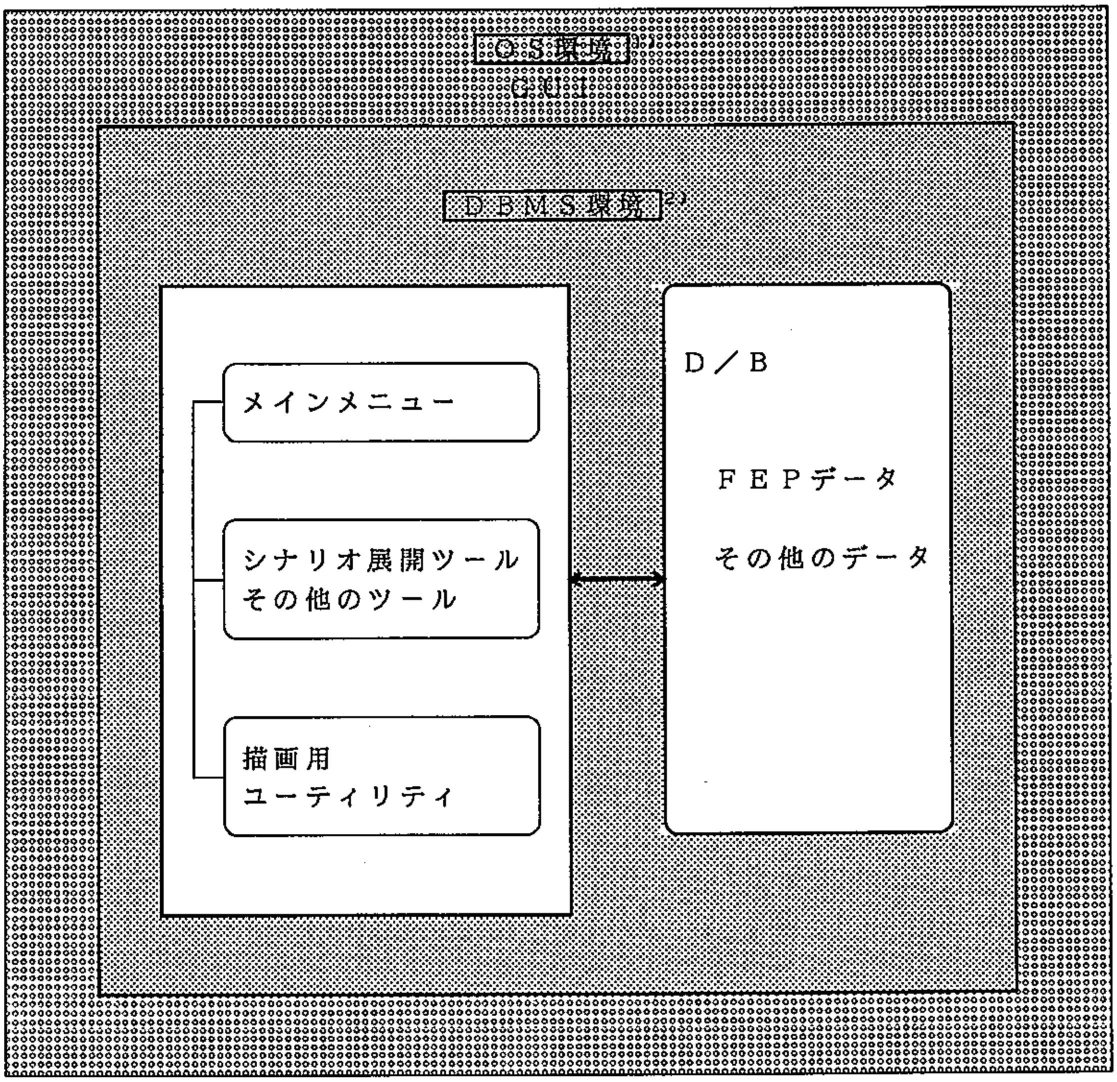
(1) 小規模な画像データベースシステム

これは、印刷された画像データ（例えば3.1節の地下水シナリオ自動展開ツールのビジュアルな出力結果）をスキャナーで取り込み、データベース化するケースである。この場合、技術面で特に大きな問題はないと思われる。なお、印刷物ではなく、画面上に表示されたデータの取扱いについてはさらに検討する必要がある。

(2) 大規模なデータベースシステム

これは、データベースの中にビジュアル化までのステップを組み込むケースである。これは、ＤＢＭＳ（データベースマネージメントシステム）の中で、例えば地下水自動展開ツールを起動し、ビジュアルな出力結果をデータベース化する場合である。この場合は、ハード（パソコン、ワークステーション）と

ソフト（ＯＳ、ＧＵＩ環境、アプリケーションツール）についての検討が必要である（図38及び図39参照）。



1）ＧＵＩを備えたＯＳ環境
2）ＤＢＭＳの管理下でシナリオ展開ツールや描画用ユーティリティが起動できる環境
*　これらの環境を備えたコンピュータ・システムとしてワークステーションが想定される。

図38　大規模データベースシステムの構造図

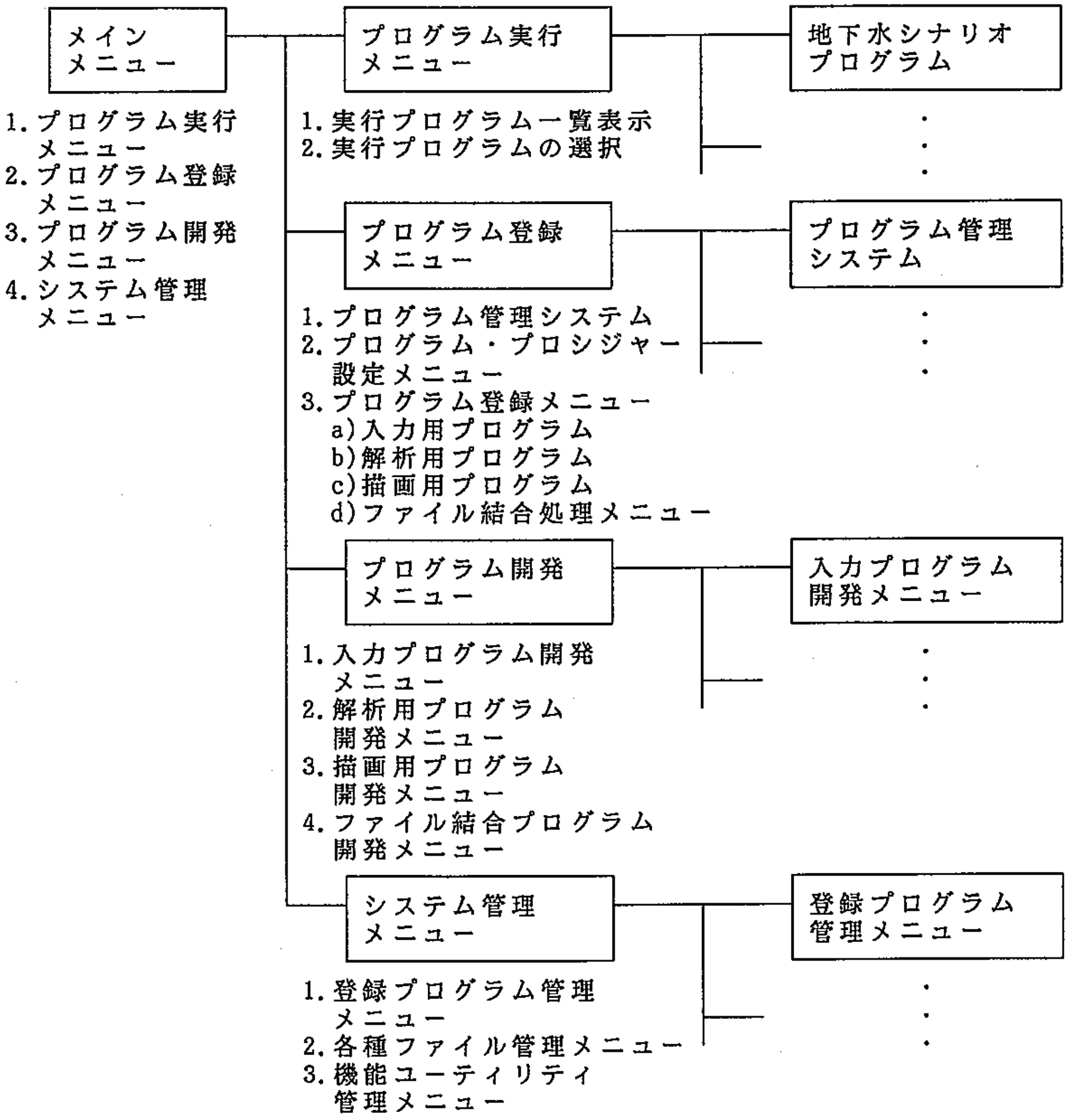


図39　大規模データベースシステムのメニュー構造図

(3) 既存アプリケーションツールの組み合せによる中規模なシステム

これは、データベースとの通信機能、データベースとのアクセス機能、ビジュアル化機能等を既存のアプリケーションツールを組み合わせてシステムを構築する方法である。

以下に具体的なシステムの内容を示すが、本年度のビジュアル化ツールはこの概念に沿って開発した。

① データベースと結合性を考える上での前提条件

一般的にワークステーションのシステムの場合、図40のようなネットワークシステムが想定される。

図40はワークステーションをサーバマシン（ホストマシン）とし、他のワークステーションやパソコンをＬＡＮ接続[1]し、データベース（文字情報、数値情報）上の情報を共有化するようなシステムを表している。

以下では、図40の環境を想定し、既存データベースと地下水シナリオ自動展開ツール及びビジュアル化ツールとの結合性について検討した。

注１）ＬＡＮとして有名なものにイーサネット、トークンリング、ＦＤＤＩ等があるが、ここではイーサネット方式、通信プロトコルＴＣＰ／ＩＰ通信を想定した。

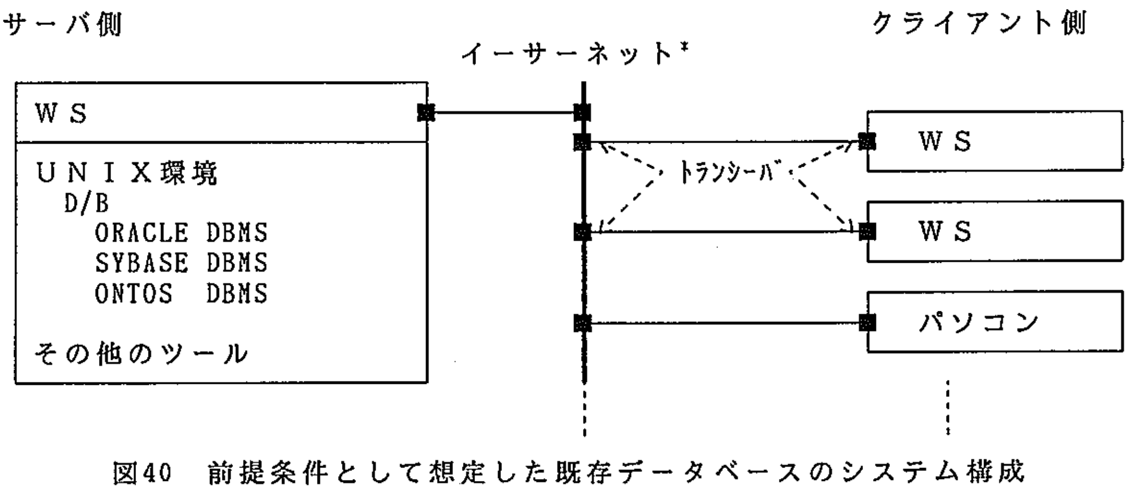


図40　前提条件として想定した既存データベースのシステム構成

*）イーサネット（Ethernet）はアメリカのXEROX社のＬＡＮの登録商標で、同軸ケーブルを使ったＬＡＮである。各端末はトランシーバを介して一本の同軸ケーブルに接続される。

② 既存データベースと地下水シナリオ自動展開ツール及びビジュアル化ツールとの結合について

地下水シナリオツール及びビジュアル化ツールはパソコン側にあり、データベースはワークステーション側（サーバマシン）にあると想定し、既存データベースと地下水シナリオ自動展開ツール及びビジュアル化ツールとの結合を考え、ソフト面を中心にまとめたイメージを図41に示す。

図41はビジュアル化を含め地下水シナリオ関係のツールはWindows環境下のパソコン側で運用するシステムである。ＷＳとパソコンについて、そのＧＵＩ環境、ＤＢＭＳ、ビジュアル化等のアプリケーションソフトについては整理する必要はあるが、今後はパソコンのハード／ソフトの機能はさらに向上すると予想されており、また、開発がＷＳに比べ容易なパソコン側でのシステム構築を考えたものである。

図41で使用するワークステーション及びパソコンのアプリケーションソフトは以下のものを想定した。

ワークステーション側のアプリケーション

ＤＢＭＳ　→　ＯＲＡＣＬＥ（Ver. 7が望ましい）

パソコン側のアプリケーション

コンパイラー

ＦＯＲＴＲＡＮコンパイラー　→　MicrosoftFortran

ＢＡＳＩＣコンパイラー　→　MicrosoftVisualBasic

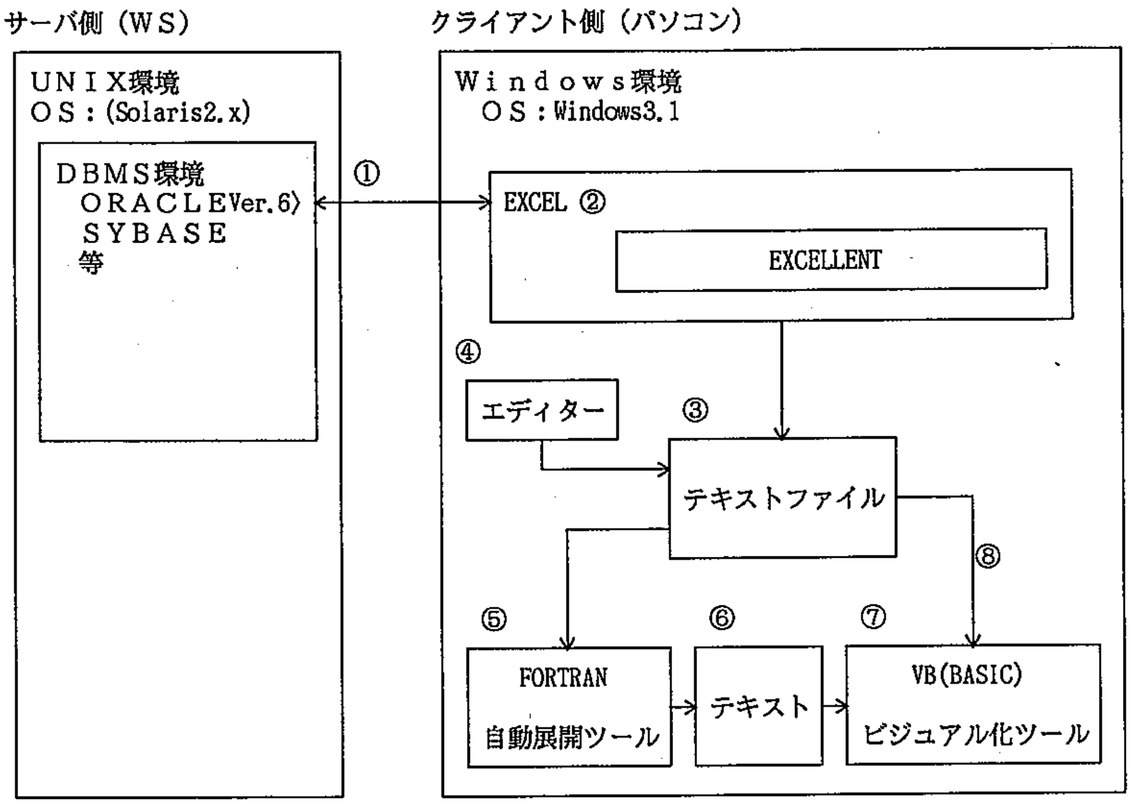
表計算ソフト　→　MicrosoftEXCEL

ＰＣの表計算ソフトからＵＮＩＸのＲＤＢをアクセスする

→　EXCELLENT（システムコンサルタント）

通信ソフト　→　CenterNet PC/TCP

エディター　→　テキストファイルの作成が可能なソフト（ワープロも可）



①イーサネットLAN方式でTCP/IP通信プロトコルを使用した通信ソフトを使用する。

②表計算ソフトEXCELのADD INソフトとしてEXCELLENTを使用し、UNIX上のRDB(ORACLE, SYBASE, Informix, Ingres, ADABAS)に対してアクセスし、EXCELのワークシート上にデータを貼り付ける。

③EXCELのワークシート上のデータをEXCELのテキストファイル変換機能を使用してテキストファイルへ変換する。

④地下水自動展開ツールで必要な③以外のデータを作成する。

⑤FORTRAN言語を用いて開発した地下水自動展開ツールでシナリオを自動展開する。

⑥自動展開ツールの計算結果である。

⑦VisualBasic言語を用いて地下水自動展開ツールの結果をビジュアル表示する。
なお、ビジュアル表示は、以下のアプリケーションでも可能である。
- EXCELに内蔵されているマクロ作成言語（VisualBasicと似たBASIC言語）、但し、これはマクロ言語であり、実行速度が遅く、開発にも手間がかかる。
- FORTRAN言語のMicrosoftFORTRAN PowerStationVer.1(32Bit)、但しこれは英語モードであり、日本語のビジュアル表示はできない。

⑧ビジュアル化した画面上のFEP（連鎖）をクリックすることにより付随する情報をテキストファイルより抽出（間接的なDB内のデータの参照）

図41　既存データベースとの結合性を考慮した地下水
シナリオ自動展開ツール及びビジュアル化ツール

あとがき

本年度の実施内容は、以下の通りである。

(1) 前年度までに検討している火成活動シナリオに対し、影響解析の全体像を明らかにするとともに具体的な核種移行計算までの影響解析手順の検討を実施した。また、火成活動以外のシナリオとして、地震・断層、隆起・侵食を起点とするシナリオの概略的検討を行った。

(2) (1)の検討結果を踏まえ、本研究での、シナリオ解析に専門家の知見を反映するための評価項目の検討を行った。

(3) 前年度に試作したシナリオ自動展開ツール出力のビジュアル化機能を、既存のデータベース情報との結合性の検討結果を踏まえた上で、具体的に追加した。また、リスク評価やＦＥＰの階層的情報の明示への活用の本ツールの適用性についての概略的検討（概念設計等）を行った。

今後の課題としては、火成活動シナリオの影響に対する具体的な解析、他の稀頻度事象を起点とするシナリオについての影響解析手順の検討と試解析の実施、火成活動シナリオで定量的な評価が困難な評価項目に対する専門家知見の反映、また、以上の検討結果を通じた影響解析フレーム全体像の整理、本年度検討したデータベース及びＦＥＰの階層的情報の明示への活用を前提としたシナリオ自動展開ツールの改良、などが考えられる。

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) (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).

(3) (株)三菱総合研究所
「地層処分シナリオ隔離性能に関する稀頻度事象定量化手法の検討(Ⅱ)
－地下水シナリオの変動に関する概略的検討－」 PNC委託研究成果報告書、
PNC ZJ1222 94-001 (1994).

(4) (株)三菱総合研究所
「地層処分シナリオ隔離性能に関する稀頻度事象定量化手法の検討(Ⅲ)
－地下水シナリオの変動のモデル化にに関する概略的検討－」
PNC委託研究成果報告書、PNC ZJ1222 95-001 (1995).

(5) 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).

(6) W. Zhou et al. (Intera Information Technologies, Inc.)
「Technical Description of Process Models : Igneous Intrusion Scenario」 Feb. (1995).

(7) 刀根：「ゲーム感覚意思決定法－ＡＨＰ入門－」日科技連(1986).

(8) 大内、水野、岡野：「FISMによる集団合意形成支援：新規事業開発への利用」
オペレーションズ・リサーチ、No.11, pp557-561 (1991).

(9) 市川編：「多目的決定の理論と方法」(社)計測自動制御学会(1980).

(10)NEA：「Systematic Approaches to Scenario Development」 A report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Redioactive Waste Disposal, Paris (1992).

(11)T. Eng, J. Hudson, O. Stephansson, K. Skagius and M. Wiborgh : 「Scenario Development Methodologies」 SKB Technical Report 94-28 (1994).

(12)Nagra : 「Kristallin-1 Safety Assessment Report」 Nagra Technical Report NTB 93-22E (1994).

(13)M. Apted et al. : 「Process System Modeling of Volcanism, Fault-Activation, and Uplift and Erosion Scenarios」 QSI-9524-1, Feb.(1996).

(14)AECL : 「Environmental Impact Statement (EIS) on the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste」 AECL Report AECL-10711, COG-93-1 (1994a).

(15)AECL : 「The disposal of Canada's nuclear fuel waste : The geosphere model for post-closure assessment」 AECL Report AECL-10709, COG-93-9 (1994b).

(16)D.J. Andrews : 「A stochastic fault model.(1)The static case.」 Journal of Geophysical Research, 85, pp3867-3877 (1980).

(17)M.J. Apted : 「Impacts of Igneous Intrusion on HLW Repository Performance: A Process System Modelling Approach」 QuantiSci Internal Document IED-9310 (1994).

(18)R.C. Arthur and W.M. Murphy : 「An analysis of gas-water-rock interactions during boiling in partially saturated tuff」 Sci. Geol. Bull., 42(4), pp313-327 (1989).

(19)M.L. Blanpied, D.A. Lockner and J.D. Byerlee : 「An earthquake mechanism based on rapid sealing of faults」 Nature, 358, pp574-578 (1992).

(20)E.G. Bombolakis : 「Role of elastic stiffness and fault damping during thrust sheet emplacement in a foreland belt」 In: Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks, B. Evans and T-F Wong (eds.), Academic Press, pp417-434 (1992).

(21)E.J. Bonano, S.C. Hora, R.L. Keeney and D. von Winterfeldt: 「Elicitation and Use of Expert Judgement in Performance Assessment for High-Level Radioactive Waste Repositories」 NUREG/CT-5411, SAND 89-1821, Washington, D.C., U.S. Nuclear Regulatory Commission (1990).

(22)M.G. Bonilla: 「Surface faulting and related effects」 in Wiegel,RL (ed.), Earthquake Engineering, Prentice-Hall, pp47-74 (1970).

(23)W.L. Bourcier: 「Waste glass corrosion modelling comparison with experimental results」 Mat. Res. Soc. Sym Proc., V.333, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, pp67-82 (1994).

(24)J. Byerlee: 「Model for episodic flow of high pressure water in fault zones before earthquakes」 Geology, 21, pp303-306 (1993).

(25)C.R. Carrigan, G.C.P. King, G.E. Barr and N.E. Bixler: 「Potential for water table excursions induces by seismic events at Yucca Mountain, Nevada」 Geology, 19, pp1157-1160 (1991).

(26)L.M.Cathles: 「An analysis of the cooling of intrusives by groundwater convection which includes boiling」 Econ. Geol., 72 pp804-826 (1977).

(27)N.A. Chapman, J. Andersson, K. Skagius, C.-O. Wene, M. Wiborgh and S. Wingefors: 「Devising scenarios for future repository evolution: A rigorous methodology」 Mat. Res. Soc. Sym Proc., V.353, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, p495 (1994).

(28)N.A. Chapman, T.J. McEwen and H. Beale: 「Geological environments for deep disposal of intermediate level wastes in the UK」 Proceedings of IAEA Symposium on Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wates, Hanover, Germany, March 1986. IAEA, Vienna, Austria, pp311-328 (1986).

(29)W.-P. Chen and P. Molnar: 「Focal depths of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere」 Journal of Geophysical Research, 88, pp4183-4214 (1983).

(30)W. Cook and J.M. Kemeny: 「A mechanistic estimate for water level change due to a normal faulting earthquake」 EOS, 71, p116 (abstract) (1991).

(31)R.M. Cooke: 「Experts in Uncertainty, Opinion, and Subjective Probability in Science」 Oxford University Press, New York, N.Y. (1991).

(32)T. Dambara: 「Synthetic vertical movements in Japan during the recent 70 years」 Journal of the Geodetic Society of Japan, 17, pp100-108 (in Japanese) (1971).

(33)W.L. Ebert and J.J. Mazer: 「Laboratory testing of waste glass aqueous corrosion: Effects of experimental parameters」 Mat. Res. Soc. Sym Proc., V.333, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, pp27-40 (1994).

(34)G. Ekström and R. England: 「Seismic strain rates in regions of distributed continental deformation」 Journal of Geophysics Research, 94, pp10231-10257 (1989).

(35)A.J. Ellis and W.A.J. Mahon: 「Chemistry and Geothermal System」 Academic Press, New York, New York (1977).

(36)R.H. Gabrielsen: 「Long-lived fault zones and their influence on the tectonic development of the southwestern Barents Sea」 Journal of the Geological Society, 141, pp651-662 (1984).

(37)B. Guttenberg and C.F. Richter: 「Frequency of earthquakes in California」 Bulletin of the Seismological Society of America, 34, pp186-188 (1944).

(38)T. Hagiwara and T. Iwate: 「Summary of the seismographic observations of the Matsushiro earthquake」 Bulletin of Earthquake Research Institute of Tokyo University, 46, pp651-661 (1968).

(39)T.C. Hanks and H. Kanamori: 「A moment-magnitude scale」 Journal of Geophysical Research, 84, pp2348-2350 (1979).

(40)J.S. Hanor : 「Physical and chemical controls on the composition of waters in sedimentary basins」 Marine and Petroleum Geology, 11(1), pp31-45 (1993).

(41)J.W. Hedenquist : 「Special issue: the geochemistry of newly developed geothermal systems in Japan」 Geochem. Jour. of Japan, 25, pp199-202 (1991).

(42)W.-L. Huang, J.M. Longo and D.R. Pevear : 「An experimentally derived Kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer」 Clays and Clay Minerals, 41, pp162-177 (1993).

(43)K. Ito : 「Cutoff depth of seismicity and large earthquakes near active volcanoes in Japan」 Tectonophysics, 217 pp11-21 (1993).

(44)Y. Kanaori, S-i Kawakami and K. Yairi : 「Space-time correlations between inland earthquakes in central Japan and great offshore earthquakes along the Nankai Trough: Implications for destructive earthquake prediction」 Engineering Geology, 33, pp289-303 (1993).

(45)Y. Kinugasa : 「Seismotectonic Zoning Based on the Characteristics of Active Faults in Japan. The 7th US-Japan Seminar on Earthquake Predictions」 US Geological Survey Open File Report 90-98, pp15-17 (1989).

(46)R.J. Knipe : 「Faulting processes and fault seal」 In: Structural and Tectonic Modelling and its Applications to Petroleum Geology, R.M. Larsen, H. Brelle, B.T. Larsen and E. Talleraas (eds.) Norwegian Petroleum Society (NPF) Special Publication 1, pp325-342, Elsevier (1992).

(47)G.M. Mavko : 「Mechanics of motion on major faults」 Annual Review of Earth and Planetary Science Letters, 9, pp81-111 (1981).

(48)P. Molnar : 「Brace-Goetze strength profiles: the partitioning of strike-slip and thrust faulting at zones of oblique convergence and the stress-heat flow paradox of the San Andreas fault」 In: Fault mechanics and transport properties of rocks, B. Evans and T-F Wong (eds.), Academic Press, pp435-459 (1992).

(49)R. Muir Wood and D.J. Mallard : 「When is a fault 'extinct'?」 Journal of the Geological Society, 149, pp251-255 (1992).

(50)Nagra : 「Sediment study-Intermediate report 1988. Disposal options for long-lived radioactive waste in Swiss sedimentary formations. Executive Summary」 Nagra Technical Report 88-25E (1988).

(51)Nirex : 「The geology and hydrogeology of the Sellafield area - Interim Assessment」 UK Nirex Report 524, Vols.1 to 4 UK Nirex Ltd, Harwell, U.K. (1993).

(52)Nirex : 「Post closure performance assessment. Nirex-95: A preliminary analysis of the groundwater pathway for a deep repository at Sellafield; 3 volumes」 Nirex Science Report S/95/012 (1995).

(53)D. Norton and J. Knight : 「Transport phenomena in hydrothermal systems: cooling plutons」 Amer. Jour of Sci., 277, pp937-981 (1977).

(54)NRC(National Reserch Council) : 「Groundwater at Yucca Mountain. How high can it rise? Final report of the Panel on Coupled Hydrologic/ Tectonic/Hydrothermal Systems at Yucca Mountain」 National Academic Press, Washington, D.C. (1992).

(55)A. Nur and J. Walder : 「Time-dependent hydraulics of the earth's crust」 In: The Role of Fluids in Crustal Processes,J.D. Bredehoeft, and D.L. Morton (eds.), National Academic Press, Washington D C, pp113-127 (1990).

(56)A. Nur and J. Walder : 「Hydraulic pulses in the Earth's crust」 In: Fault mechanics and transport properties of rocks, B. Evans and T-F Wong(eds.), Academic Press, pp460-473 (1992).

(57)PNC : 「Research and Development on Geological Disposalof High-Level Radioactive Waste」 PNCTN1410 93-059, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Tokyo, Japan (1992).

(58)R. Pusch : 「Evolution of Models for Conversion of Smectite to Non-expandable Minerals」 SKB Technical Report 93-33, Stockholm, Sweden (1993).

(59)Research Group for Active Faults of Japan(RGAF) : 「Maps of Active Faults in Japan with an Explanatory Text」 University of Tokyo Press (1992).

(60)J.R. Rice : 「Fault stress state, pore pressure distributions and the weakness of the San Andreas fault」 In: Fault mechanics and transport properties of rocks, B. Evans and T-F Wong(eds.), Academic Press, pp475-503 (1992).

(61)P. Richard and P. Cobbold : 「Structures en fleur positives et déchrochments crustaux: modélisation analogique et interprétation méchanique」 Comptes Rendues Academie de Sciences de Paris, Série 11, 308, pp553-560 (1989).

(62)S. Rojstaczer and S. Wolf : 「Permeability changes associated with large earthquakes: an example from Loma Prieta, California」 Geology, 20, pp211-214 (1992).

(63)K. Shimizu, K. Ishimaru, K. Furuya and Y. Yusa : 「Natural processes and events relevant to long-term stability of geological environment in Japan, in Waste Disposal and Geology; Scientific Perspectives」 Proceedings of Workshop WC-1 of the 29th International Geological Congress, Tokyo, pp391-394 (1992).

(64)R.H. Sibson : 「Earthquakes and lineament infrastructure」 Philosophical Transaction of the Royal Society of London, A317, pp63-79 (1986).

(65)R.H. Sibson : 「Earthquakes faulting as a structural process」 Journal of Structural Geology, 11, pp1-14 (1989).

(66)R.H. Sibson : 「Load-strengthening versus load-weakening faulting」 Journal of Structural Geology, 15, pp123-128 (1993).

(67)R.H. Sibson, J.McC. Moore and A.H. Rankin : 「Seismic pumping - a hydrothermal transport mechanism」 Journal of the Geological Society, 131, pp653-659 (1975).

(68)SKB : 「SKB91- Final Storage of Spent Nuclear Fuel」 KBS-3, Vols.1-5. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden. (1983).

(69)SKB : 「SKB91- Final Storge of Spent Nuclear Fuel. Importance of the Bedrock for Safety」 SKB Technical Report 92-20. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden (1992a).

(70)SKB : 「Tretment and final disposal of nuclear waste. The Äspö Hard Rock Laboratory, Background Report to the R&D Programme 92」 Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden (1992b).

(71)M. Thury, A. Gautschi, M. Mazurek, W. Müller, H. Naef, F.J. Pearson, O. Voborny, S. Vomvoris and W. Wilson : 「Geology and hydrogeology of the crystalline basement of northern Switzerland」 Nagra Technical Report NTB 93-01E (1994).

(72)Y. Tsuneishi and K. Nakamura : 「Faulting associated with the Matsushiro earthquakes」 Bulletin of Earthquake Research Institute of Tokyo University, 48, pp29-51 (1970).

(73)TVO : 「Final disposal of spent fuel in the Finnish bedrock. Technical plans and safety assessment」 TVO Report YJT-92-31E. The Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, Finland (1992a).

(74)TVO : 「Final disposal of spent fuel in the Finnish bedrock -Preliminary site investigations」 TVO Report YJT-92-32E. The Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, Finland (1992b).

(75)N. Umino, A. Hasegawa and A. Takagi : 「The relationship between seismic patterns and fracture zones beneath northeastern Japan」 Tohoku Geophysics Journal (Science Report Tohoku University, Series 5), 33, pp149-162 (1990).

(76)US EPA：「Standards Applicable to Owners and Operators of Hazardous Waste Treatment Storage and Disposal Facilities」 Code of the Federal Regulations, Title 40, parts 122,25(1) and 264.18(a) (1981).

(77)US NRC：「Appendix A Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants」 Code of the Federal Regulations-Energy, Title 10, Chapter 1, Part 100 (AppA, 10, CFR 100), Sept. (1982).

(78)J.J. Walsh and J. Waterson：「Fault dimensions, displacements and growth」 Pure and Applied Geophysics, 124, pp365-373 (1988).

(79)R.J. Weldon and J.E. Springer：「Active faulting near the Cajon Pass well, southern California: implications for the stress orientation near the San Andreas fault」 Geophysics Research Letters, 15, pp993-996 (1988).

(80)S.G. Wesnousky, C.H. Scholz, K. Shimazaki and T. Matsuda：「Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic riks: a case study of Japan」 Bulletin of the Seismological Society of America, 74, pp687-708 (1984).

(81)T.J. Wolery：「EQ 3/6: A Software package for geochemical Modelling of Aqueous Systems: Package Overview and Installation Guide」 UCRL-MA-110662 PT1, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA (1992).

(82)Y. Yoshida：「Geochemistry of the Nigorikawa geothermal system, southwest Hokkaido, Japan」 Geoch. Jour of Japan, 25, pp203-222 (1991).

(83)T. Yoshikawa：「Denudation and tectonic movement in contemporary Japan」 Bull Dept. Geogr. Fac. Sci., University of Tokyo, 6, pp1-14 (1974).

(84)W. Zhou, P.F. Salter, R.C. Arthur and M.J. Apted：「Technical Description of Process Models: Igneous Intrusion Scenario」 QuantiSci Internal Document IED-9410 (1995).

(85)伊藤：「偏微分方程式」 新数学シリーズ26，培風館 (1966).

付　　　　　録

Ａ．地震、活断層、隆起、侵食を中心とする解析・評価事例

第１章の調査結果を補足し、第２章での具体的な評価項目等の検討・設定に資するため、地震、活断層、隆起、侵食を中心として、それらを解析・評価している事例をＪＩＣＳＴ（日本科学技術情報センター）文献検索により調査し、各文献で議論されている主な評価項目、指標等を以下の表形式でまとめた。

(1) (地震(活動)+(活)断層(活動)+隆起+侵食)×
(リスク+安全性+シナリオ解析+モデル分析)×日本

文献No〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典(書籍、雑誌巻号)名 / 概要	評価項目、指標等
HLW−1	小出仁(地質調所) 「日本列島の自然環境と高レベル放射性廃棄物地層処分」地質調査所月報 VOL.42, NO.5 pp235-248 (1991) ―――――― 日本の地質環境に合わせた、高レベル放射性廃棄物地層処分の長期性評価のために、通常・基本・変動・異常シナリオの4つを解説した。我が国が選ぶシナリオに対する条件として、11の項目を挙げた。特に地殻変動の長期予測、岩盤中の断層や割れ目の評価及び長期の水-岩石相互作用が重要であるとした	・地震や火山分布の地域偏在性 ・地殻変動の長期予測、岩盤中の断層や割れ目、長期の水・岩石相互作用が特に重要 ・急斜面が多いため侵食や斜面災害の危険にも注意が必要 ・施設構造のフレキシビリティ ・建設コストの立地条件依存性 ・人口(密度)の偏在性、酪農・漁業への風評などの社会的要因 ・定量的概念 ①岩石・地質 −岩体の連続性や均質性 −岩盤の割れ目分布や性質及び強度への影響 −透水性 −核種吸着性 −風化及び変質特性 ②気候・地下水 −地下水流速 −地下水系の分岐の程度 −塩水くさび(地下水塩濃度・組成分布) ③地殻変動・地震・火山 −隆起・沈降速度及び水平変化速度 −活断層の平均変位(変形)速度(1回動くとしばらく動かない、といった間欠性) −地震発生頻度(長期予測:EX.1万年間に震度Vクラスの地震が100回程度発生) −地震変動による影響 ・割れ目開口変化 ・地下水流路及び水位の変化 ・岩盤や断層のゆるみによる透水性の増加 −火山前線の不動性及び火山前線からの距離(火山活動の確率) −地熱分布 ④人為的要因 −地下資源の種類と賦存量 −地熱や温水及び地下水利用の適地性 −処分場位置・意義等に対する知識量 ⑤評価期間 −予測期間における天然事象の不確実性による変動幅 −米国環境庁設定の評価基準では1万年、他方、処分実施側のエネルギー省は、気候サイクルや地下水文学的プロセスや地球化学的プロセスで10万年、侵食による直接露出については100万年という努力目標を設定 ⑥シナリオの種類 −通(正)常シナリオ …核種がほとんど出てこない −基本シナリオ…地下水移行 −変動シナリオ …地下水移行への影響を与え得るシナリオ(EX.海水準変動や気候変動、地殻変動・地震、井戸取水等人為的影響による地下水流の変化、塩水化や酸性化等の地下水化学変化、火山・地熱による熱的変化) −異常シナリオ …廃棄物の直接露出や核種の空中放出のようなカタストロフィックなプロセス(EX.隕石・彗星の衝突、マグマ貫入、地殻隆起、戦争・テロ・資源採取)

文 献 No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　要	評 価 項 目、指 標 等
		⑦シナリオ選定上、考慮すべき日本の国土の特徴 ー国土が狭く、人口が多いこと ー島国であること ー雨が多く、地下水位が高いこと ー地形が急峻であること ー地殻変動が激しいこと ー岩盤に断層や割れ目が多いこと ー活断層が多いこと ー火山・温泉・地熱活動があること ー地質が複雑で、大きな均質な岩体が見出し難いこと ー岩盤の風化・変質が著しいこと ⑧シナリオの候補 1)基本シナリオ ・地下水移行シナリオ 2)変動シナリオ ・井戸取水ーボーリングシナリオ ・気候変動ー海面変動シナリオ ・塩水シナリオ ・地盤隆起ー侵食シナリオ ・地盤沈下ー堆積埋没シナリオ ・岩盤応力変動ー岩盤変形シナリオ ・断層形成ー断層変位シナリオ ・地震シナリオ ・大規模噴火シナリオ ・マグマ貫入ー熱水シナリオ ・割れ目系岩盤地下水移行シナリオ ・未検出欠陥シナリオ ・風化・変質シナリオ 3)異常シナリオ ・隆起シナリオ(直接露出に至るもの) ・マグマ貫入噴出シナリオ 特に、地殻変動関連が重要で、それに続いて、過去の地殻変動で生じた割れ目・断層評価、火山・地殻活動による熱水の間接的影響に注意が必要
ＨＬＷ－２	(日本原子力産業会議) 「高レベル放射性廃棄物対策と貯蔵システム技術米加調査団報告書」（日本原子力産業会議Ｓ） 高レベル放射性廃棄物対策と貯蔵システム技術米加調査団報告書　平成２年（1990） 本調査団は４月８日から15日間、米・加両国を訪れ、「第１回高レベル放射性廃棄物管理国際会議」に参加した。本会議は38のセッションより成り、セッションごとにプログラム、概要などをまとめた。各セッションの議題は次のとおり。1)調査立坑施設の設計と建設、2)プレート内地震と火山活動、3)移行プロセス、4)トータルシステム性能、5)輸送システム、6)基本的な社会システム問題、7)高レベル廃棄物の水文学一般、8)工学的バリア、9)地山特性の評価と試験、10)使用済燃料の動態パフォーマンス、他28。またWIPP、ユッカマウンテン、オコーネ原子力発電所、サリー原子力発電所、ウェスト・バレー・デモンストレーション・プロジェクト、カナダ・URL地下研究所を訪問し、訪問施設の概要などをまとめた。	・調査立坑施設の設計と建設 ー環境・安全性及び健康面からの評価 ・プレート内地震と火山活動 ー最新火山活動開始時期 ー火山分布 ー火口・岩脈・断層分布をもとにした危険度（５段階評価：ユッカマウンテンは３番目の危険度地域） ー地形・地質データをもとにした地震活動の危険度 ー断層の運動形態からの地震発生機構の評価 ー断層変位速度(堆積物の時代と変位量の見積りに対する不確実性幅の検討が必要) ー地震マグニチュードと地表面における変位域の長さ及び最大変位量との関係を示す経験式 ・核種移行プロセス ー生態圏での移行経路及びメカニズム ー地下水中の放射性元素の濃度分布と岩盤との収着プロセスとの関係 ー層序、地球化学、鉱物学的データをもとにした核種移行モデル

文献No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概要	評価項目、指標等
		・規制と基準プロセス －地層の不安定性、国土の制約、高人口密度といった問題(中華民国) －サイト選定を行う際の公衆による審査(カナダ) －国際保障措置 －放射性物質の輸送 ・社会的受容性 －処分施設決定プロセスへの公衆の参加の必要性 －放射性廃棄物の潜在的危険性を考慮した安全評価の必要性 －処分サイトの経済効果(雇用、地方物産、収入) ・人工バリアシステム(ＥＢＳ)の性能 －性能評価期間(米国ＥＰＡは１万年) －ＥＢＳの健全性維持期間(米国ＮＲＣは300～1000年) －ガラス固化体からの核種放出率への影響因子(ガラス固化体長期溶解速度、核種の溶解性・輸送率・インベントリ) －緩衝材中の核種移行特性(拡散係数、緩衝材中水分含有量) －ニアフィールドの熱的条件の評価(母岩温度、ガラス固化体表面温度履歴及び分布 －ガラス固化体の核種密封性の評価(維持期間、空気混入による酸化促進、放出ガスの生態圏への流出) ・水理学的評価 －処分空洞の建設・閉鎖に伴う種々の境界条件変化が地下水流動に与える影響 －岩盤内亀裂開口幅の統計分布に基づく透水係数及び分散性の評価 －応力作用下における亀裂の形状と流れの相関性の評価 －フラクタル幾何学を用いた亀裂形状諸元と飽和浸透流との相関性の評価 －断層・破砕帯中を流れる地下水流動 ・サイト特性調査 －岩盤の均質性 －地下資源(将来的発見性、経済的有用性) －複数の破砕帯 －地山応力・熱応力に対する地山挙動(割れ目の動き、透水性、弾性波の伝播度) ・地球化学 －熱による母岩の変化 －熱力学データをもとにしたガラス固化体の溶解メカニズムと平衡理論に対する過程 －母岩の高温下における体積膨張とそれに伴う応力 －加熱による岩石の力学的特性変化 ・気候と風土学の問題 －1000年～１万年間のサイトの気象予測
ＨＬＷ－３	Araya S. (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp., JPN); Ishii T., Sekijima K., Utsugida Y., Watanabe K., Imazu M. (Shimizu Construction Co. Ltd., Tokyo, JPN) 「Conceptual Design of Geological Repositories for High Level Wastes」Siting Des. Constr.	・日本の異なる地質媒体の分類 －硬さ(処分場の深度、トンネル設計に重要) －亀裂特性(地下水流動と核種移行の理解に重要) －岩盤形態(地下水のマクロ的挙動の理解に重要)

文 献 No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　要	評 価 項 目、指 標 等
	Undergr. Repos. Radioact. Wastes pp495-506 (1986) 日本における種々の地質学的構成は、２つのグループに分けられる。塊状で割れ目のある硬い岩石。軟かいか、中程度に硬い多層性、均一の岩石。前者は花こう岩で、後者は第三紀泥板岩及び砂岩である。地質学的貯蔵所の設計においては多くの点につき研究する必要がある。たとえば、深層におけるトンネルの機械的安定性、地震に対する安定性、地下水に溶解した放射性物質に対する住民の安全性、放射性廃棄物の発熱の影響などがあり、これらはすべて原子力関係の施設に要求されるものである。ここでは10000の廃棄物形態を１つの系と仮定し、操作変数により地質学的貯蔵所の設計を論じている。固形化物の中間貯蔵と最終埋没処分可能と結論した。	・安定性に関する設計 －掘削後の硬岩及び地震動下での安定性 －崩壊熱発生による影響(処分孔間ピッチの決定)

(2) 地震(活動)×モデル×放射性廃棄物

文 献 No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　要	評 価 項 目、指 標 等
HLW－4	Richardsin A.M., Schmidt B., St. John C.M., Stinebaugh R.E. (Sandia National Lab., NM, USA) 「A proposed Concrete Shaft Liner Design Method for an Underground Nuclear Waste Repository」 US DOE Rep. (1989) 落盤対策、立坑設備の取付け、換気流に対する低い抵抗性、岩壁の風化防止のためのコンクリートライナの設計の方法論を概説した。ライナにかかる荷重としては地圧、熱および地震によるものを考えた。応力解析における変形モデルとして、フープ変形と軸方向変形、曲げ変形およびずれ変形を仮定した。性能規準も付記した。	・処分場の立坑ライナーにかかる荷重(地圧、熱的負荷(崩壊熱で加熱された母岩のファーフィールドでの熱膨張)、震動)に対する解析評価 －主要な変形モード(輪状及び軸状の変形、曲げ、せん断)の設定とそれらの組み合せ
HLW－5	Godefroy P. (Bureau de Recherches Géologiques et Minieres, France) 「Etude Geoprospective d'un Site de Stockage Volume 6 La Prise en Compte de l'Activite Sismique」 NO.EUR-9866-FR-VOL-6 (1985) 放射性廃棄物の地層処分の安全解析における地震活動の寄与についての考察結果を述べた。本報告の第１章では地震の基本概念と地震活動による予測解析の信頼性について短（千年間）、中（１万年）、長（10万年以上）期について論じた。ヨーロッパおよびフランスでの地質構造と地震について第２章で述べた。第３章では地震現象の確率論的評価を行った。第４章では地下の構造物への地震による影響についてその性質と程度について考察した。これについては大地震後の地下施設の損害、各種深度での地震と核事象の比較、地震による張力と変位の測定のために開発した理論モデルを考慮した。第５章では大地震の地域的水文地質学への影響を考察。	

文 献 No 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　要	評 価 項 目、指 標 等
HLW－6	Coats D.W.Jr. (Univ. California) 「Natural Phenomena Hazards Project for Department of Energy Sites」 NO.UCRL-93226 (1985) 原子炉、核燃料再処理プラント、高レベル廃棄物貯蔵・処理施設及び特定核物質施設を含む米国内のDOEサイトについて、地震及び風による災害モデルを開発した。サイト及び基準施設の情報集収を行い、ある大きさ以上の上記災害を受ける確率を評価するモデルの開発を始めた。このモデルは基準施設の統一設計・評価基準の確立に利用できることが期待される。	・地震災害の解析 －決定論的解析(あるマグニチュード又は強度の地震が、ある場所で発生→サイトへの伝播→影響評価)による保守側評価 －確率論的解析(将来地震の発生数、サイズ、位置に関する不確実性の定量評価及び耐震設計のコスト高など社会経済的損失の評価) ・竜巻災害並びに風速の解析(あるしきい値を越える確率の評価)
HLW－7	Smith T.H. (EG&G Idaho,Inc.); Keneshea F.J. (Quadrex Corp.) 「Risk Evaluations of Transuranic Waste at the Idaho National Engineering Laboratory」 Vol.1 pp79-91 (1980) 標記研究所（INEL）内に貯蔵してある廃棄物を対象とし、1)現状のまま、2)封じ込めを改良する、3)取り出して処理し施設外の貯蔵所に輸送する、4)取り出して処理しINEL内に処分するというシナリオに対して、事故時のリスク評価を実施。即ち洪水、竜巻、地震、火山の爆発などの自然現象、取り扱い中の事故、飛行機の事故、侵入者などを想定して、空気、地下水、食物連鎖などを経由した人体の被曝量をモデルにより計算した。その結果取り扱い中の事故、地震などは問題なく、火山と侵入者を想定した場合に最も重大な影響を与えることがわかった。	(低レベル軍事ＴＲＵ廃棄物) ・長期管理方策の評価項目 －コスト －環境への影響(放射線／非放射線) －作業員への影響(放射線／非放射線) －事故又は管理不能な核種放出による被曝リスク ・リスク解析(管理可能なものに限定) －線量預託、確率、リスクの算出 －評価期間の長さ(短期／長期)、人口変化、社会的管理期間の設定 －外乱事象(竜巻、火災、臨界、地震、輸送事故、火山爆発、溶岩流、ダム洪水、人間侵入(掘削、農耕))

(3) (活)断層(活動)×モデル×放射性廃棄物

文 献 No 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　要	評 価 項 目、指 標 等
HLW－8	Cline K.M., Fenster D.F. (TRW Environmental Safety Systems, Washington, D.C.); Rogers R. (TRW Environmental Safety Systems, NV); Summerson J.R. (Office of Civilian Radioactive Waste Management, U.S. Dep. Energy, Washington, D.C.) 「Detachment Faults-Regulatory Implications for the Yucca Mountain Site」 Vol.2, pp1826-1834 (1993) ユッカマウンテンとその周辺に関して標記断層を含む構造モデルについて紹介し、原子力規制委員会の規制との関係を論じた。本断層に関する幾つかのモデルを述べ、走行ずれ断層との関係を説明した。次いでこの地域における地質構造的及び地震構造的モデル開発の重要性を述べ、放射性廃棄物の地層処分地としての適性評価について各規制項目との関係を議論した。	・断層のモデル化 －detachment fault model (走向移動断層と関連) －initial high-angle fault model －continuous low-angle dip fault model ・ユッカマウンテンサイトの妥当性と許認可性 －テクトニクス、サイスモテクトニクス、水理に関する各モデルとデータの適合性をチェック後、DOEがこれらのモデルとデータに対し、NRC10 CFR Part 60. 122(c)(地下水の流れに悪影響を及ぼし得る隆起のような構造的変形との関連に基づく断層の存在の検討、第４紀変形・断層やサイトへ悪影響を及ぼし得る地震歴、地震の発生頻度や規模の増大可能性に関する検討(典型的な地層処分サイトとの比較))やEPAの規制項目の充足性を検討しなければならない －DOEのサイティングのガイドライン10 CFR 960に対するサイトの適切性の評価 断層存在下での廃棄物隔離性(生態圏からの放射性核種の物理的隔離性)、地下水移行時間、放射性核種の放出に至る将来のテクトニックプロセス・事故の発生可能性

文 献 No 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　要	評 価 項 目、指 標 等
HLW－9	Wang J.S.Y, Cook N.G.W., Wollenberg H.A., Carnahan C.L., Javandel I., Tsang C.F. (Univ. California, CA) 「Geohydrologic Data and Models of Rainier Mesa and their Implications to Yucca Mountain」 Vol.1, pp675-681 (1993) Rainier Mesaの地下水データをYucca山の調査研究施設計画に役立てるために行った比較検討について述べた。この二つのサイトの凝灰岩の地下水特性を比較し、Rainier Mesaトンネル中の天水の存在を示す化学的データをまとめた。断裂又は断層に沿った水の過渡的なパルス伝搬評価による解析法を用い、速い流れが天水とマトリックス間隙水の混合なしに起こると判断し、上記計画への対応を論じた。	・サイトの地球化学的データの分析結果の解釈(説明)のためのモデリング及び輸送メカニズムの推定 －深度別のデータ変化(透水係数、空隙率、鉱物学的性質、浸透率、飽和度) －複数の断層からの地下水の供給量 －地下水移行時間 －地下水経路 －亀裂の閉塞性 －地表からの亀裂もしくは断層を通る高速地下水流路に沿ったパルス伝播解析モデル概念(付・図-1及び付・表-1参照)) $V(t)=bWH(t)$ ここで、t：時間 V：過渡的な水の量 H：過渡的な水のパルスの高さ b：亀裂の幅 W：マトリクスに生じているギャップの長さ $S\propto(v_f t_D)^{-1}$　但し、$H(t_D)\equiv 0$ S：吸着性 v_f：亀裂中流速 ・各サイト特性の予測の容易さ(難しさ) ・亀裂及びマトリクス中の不均質な地下水流の理解には水理、地球化学、地球物質の各分野を結合した分析が必要
HLW－10	Wittwer C.S., Chen G., Bodvarsson G.S. (Lawrence Berkeley Lab., CA) 「Studies of the Role of Fault Zones on Fluid Flow Using the Site-Scale Numerical Model of Yucca Mountain」 Vol.1, pp667-674 (1993) 標題三次元モデルから抜き出した二次元の定常状態シミュレーションにより標題地域の断層帯の研究を行った。断層帯は種々の透水性特性を仮定した多孔質媒体としてモデル化し、マトリックス流はvan Genuchten モデルで近似し、また溶結帯における断裂流を説明するのに等価連続近似を用いた。シミュレーションは均一な浸透率で行い、水分流分布と好ましい通路の位置に与える断層特性の影響を論じた。	・ユッカマウンテンの不飽和帯の断層の水理系への影響を調べるため、サイトスケールの流体解析シミュレーションモデル(TOUGH 2 (Transport of Unsaturated Groundwater and Heat))を適用 ・断層帯は、周囲の岩石に比べて相対的に大きい、もしくは小さい飽和透水性を想定した多孔質媒体としてモデル化(付・図-2参照) －17層別の水理ﾃﾞｰﾀのﾍﾞｽﾄ推定値を設定。 －$Se=[1+(\alpha\cdot P_{cap})^n]^{-m}$ 但し、$Se=(S_l-Sr)/(Ss-Sr)$ Se：実効飽和度 S_l：液体の飽和度 Sr：残余飽和度 Ss：完全飽和度 P_{cap}：毛管圧 α, n, m：経験的ﾌｨｯﾃｨﾝｸﾞ係数 これより、相対的透水係数： $k_{rel}=\sqrt{Se}\,[\{1-(Se)^{1/m}\}^{1/m}]^2$ ・亀裂特性の表現 $S_{th}=\phi_m/(\phi_m+\phi_f)$ ここで、S_{th}：飽和度しきい値 ϕ_m：マトリクスの空隙率 ϕ_f：亀裂の空隙率 ・断層帯(高透水性帯、低透水性帯、及び両者を含む断面)の特性に対する解析
HLW－11	Tsang Y.W., Pruess K., Wand J.S.Y. (Lawrence Berkeley Lab., CA) 「The Role of Fault Zone in Affecting Multiphase Flow at Yucca Mountain」 Vol.1, pp660-666 (1993) Yucca山中の最も顕著なGhost Dance断層について、放射性廃棄物処分施設設置前後の状態について液体及び気体の流れに対する断層の影響を調べた。この影響に	・ユッカマウンテンサイトにおける気液多相流に与える断層の影響の解析(TOUGH2ｺｰﾄﾞ適用) －Genuchten modelなどの想定はHLW－12の文献内容とほぼ同じ －断層の概念としては、断層内に２種類の空隙特性の記述を要するケースと、単一の空隙特性のみでよいケースとを設定(付・図-3参照)。

文 献 No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概 要	評 価 項 目、指 標 等
	関する数値解析モデルを説明し、Yucca山測定データにある透水性及び毛管現象に関する関係が上記断層に成り立つとして解析した。水のチャネリングにはほとんど影響ないが、設置後のガスの上方への流れは加速されるとの結果を得た。	－毛管径と飽和透水係数との関係を裏付ける観測データの傾向に依存して、断層の存在が液体の流れと気体の流れのいずれに強い影響を与えるのかが変わり得る（フィールドデータの情報をもっと集める必要がある）
HLW－12	Buesch D.C. (U.S. Geological Survey, NV) ; Neldon J.E., Dickerson R.P. (Science Applications International Corp., CO); Spengler R.W. (U.S. Geological Survey, CO) 「Development of 3-D Lithostratigraphic and Confidence Models at Yucca Mountain, Nevada」 Vol.1, pp943-948 (1993) Yucca山放射性廃棄物処分のための地質に関する計算モデルを紹介した。岩相層序単元の厚み及び面の変化並びにこれらの断層による崩壊の状態を詳細に三次元可視化する計算モデルについて述べ、その結果を示した。また、専門的判断及び地質統計的解析を組み合わせた確実性のモデルの概念を説明し、両者を統合することによって地質条件のシミュレーションを向上する有用性を述べた。	・ユッカマウンテンサイトの岩相層序に対するモデル解析 －エキスパート判断（知識・教養、経験、観測範囲）による主観的評価 －地質統計的解析（複数の決定論もしくは確率論的数値解析モデルラン結果の同一結果への収束性を調べる） －上記２つの方法の結合（モデル分析の信頼度の向上化） ・岩相の境界と断層の位置に対する不確実性の存在
HLW－13	Coppersmith K.J., Youngs R.R., Perman R.C. (Geomatrix Consultants, Inc., California); Shaw R.A. (Electric Power Research Inst., California) 「Preliminary Assessment of Fault Rupture Hazard at the Yucca Mountain Site Based on Expert Judgement」 Vol.1, pp6-13 (1993) 標記場所の放射性廃棄物処分場について、一万年間の閉鎖期間における断層変位の可能性を地震学的に予測した結果を述べた。地震災害モデルの成分として、研究法の立場の差、変位発生の原因、地質構造モデル、イベント発生の大きさと発生率、処分場内に起こった場合の効果等の議論を紹介した。専門家の立場により異なるこれらの見解を統合した結果を示し、キャニスタ事故につながる破壊に関する不確実性を論じた。	・７人の地球科学のエキスパートによるユッカマウンテンサイトで処分場閉鎖後１万年間で発生し得る断層変位の可能性を定量化 －断層の発生に伴うハザード －地域的なテクトニクスモデル（現在の応力状態、最近の地質的変形の発生位置と時期、変形を引き起こし得る地質構造） －断層変位源（原因）の分布（断層変位が地震を引き起こし得る潜在性など） －最大の地震マグニチュードもしくは各断層変位源（原因）別の最大共振変位 －断層が処分場を貫通する可能性 －変量の累積量 ・エキスパートがとった基本的な２つのアプローチ法 －地震発生位置と確率を推定してから関連し得る断層変位を推測（earthquake approach） －断層変位の発生位置と確率を直接とりあげて推測（displacement approach） ・エキスパートが用いたモデルの各構成要素に対し不確実性評価が行われ、さらにそれらの結果から、キャニスターの損壊確率分布が作成された －エキスパートの判断結果を集約するために付・図-4のような論理樹木を作成 －各ノード毎にエキスパートが確率を割り与え、それらを積算してキャニスターが損壊する頻度分布を算出
HLW－14	Carrigan C.R. (Lawrence Livermore National Lab., California); King G.C.P. (Inst. Physique du Globe, Strasbourg, FRA); Barr G.E., Bixler N.E. (Sandia National Lab., New Mexico) 「Potential for Water-Table Excursions induced by Seismic Events at Yucca Mountain, Nevada」 VOL.19, NO.12 pp1157-1160 (1991) 高レベル放射性廃棄物処分施設を計画している標記地	・ユッカマウンテンの断層近傍の地震活動による地下水面の潜在的移動量の検討 －応力歪が深部帯水層の上昇に与える影響をモデル解析 －テクトニクスと水理学の結合モデル（地震によるすべりの発生→間隙圧分布の変化（計算）→水理系解析モデルへ入力） $P=(-E/3)(e_{xx}+e_{yy})/(1-2\nu)$ ここで、P：間隙圧

文献No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概要	評価項目、指標等
	区の地下水問題について、地殻の弾性二次元境界要素法を用いて地震発生後の間隙水圧分布の数値計算を行い、水位上昇の見積りを行った。地震マグニチュードを6.8とした2種類の正断層モデルの計算では、最大でも水位上昇は20m以下であり、予測危険上昇量である100～200mには及ばなかった。	e_{xx}, e_{yy}：(平面上)応力歪成分 E：ヤング率 ν：ポアソン比 $n\partial(\rho S)/\partial t = \nabla \cdot j$ $j = -(\rho K/\mu) \cdot \nabla P$ ここで、S：飽和度 j：地下水流束ベクトル ρ：液の密度 n：空隙率 t：時間 K：透水係数テンソル μ：地下水の粘度 ・解析では異方性を無視。最悪状態を仮定しても断層の片側50mの範囲にわたり垂直方向に最大12m程度の地下水面上昇が示されるだけであった(付・図-5参照)
HLW－15	Costin L.S., Chen E.P. (Sandia National Lab., NM, USA) 「An Analysis of the G-Tunnel Heated Block Experiment Using a Compliant-Joint Rock-Mass Model」 Proc. U.S. Symp. Rock Mech. VOL.29th, pp625-632 (1988) 岩盤構造モデルと数値モデルとでは節理、断層その他岩盤変形に関連する自然の不連続性等の影響をいかに数量化するかが問題となるが、本文では機械的荷重に従う節理のある岩盤の大きなブロックの応答をシミュレートするために連続体岩盤モデルを用いてこの問題を検討した。Gトンネルの加熱ブロック実験の2次元有限要素法による解析結果と実験結果とはよく一致した。	・岩盤変形に与える節理、断層、その他の不連続な自然現象の影響を連続体岩盤モデルを用いて解析 －2つの直交する節理を含んだ岩盤に対し、3つの要因(岩盤変形、節理の膨張及び剪断)による変位を考慮。 －局所的な領域に対する岩盤挙動を示しているにすぎず、よりグローバルスケールの解析が今後の課題である
HLW－16	Carpenter D.W., Chung D.H. (Lawrence Livermore National Lab., CA) 「Effects of Earthquakes on Underground Facilities: Literature Review and Discussion」 NO.NUREG-CR-4609 (1986) 調査の結果、少しの矛盾はあるが次の結論を得た。断層変位がサイト中に起きてもその損害は予測可能で、地表より深部の損害は少ない。地震も深さとともに減少するが、サイト特性に大きく依存する。地震運動の頻度は地下の開口部の安全性評価に重要。モデル研究として立坑、廃棄物取扱施設の場合について実施。	・地震の影響 －地盤の振動・損傷 －断層生成 －津波 ・地震に対する基準は、浅層処分のLLWケース(地上施設のそれに類似)と深層処分のHLWケースでは異なる ・地下施設は、地上施設に比べて、地震によるダメージが少ないとするレポートに対し、マグニチュード4.5以下の地震でも、重大なダメージや地下作業員死亡を引き起こしたケースを指摘しているレポートもある ・0.5g 以下の地表の振動だけではトンネルは崩壊せず、また、0.19g 以下の地表の加速度ではトンネルには何のダメージも与えず、0.19g ～0.4g だと小さなダメージが発生し得る。他方、交叉する断層の移動では、全てのトンネルの崩壊が発生した。軟弱な土壌や岩体のトンネルだと、地下深部のトンネルでもダメージが大きいかもしれないが、断層がトンネルのボアホールを横切らない限り、ふつうは小さな岩崩れと新しい亀裂の生成ぐらいで済む ・断層の移動・交叉がなくても、強烈な地震の震央に位置する鉱山なら、振動でも大きなダメージを被り得る。又、亀裂の拡大もしくは連結により、洪水が生じ得る。震央以外の鉱山はほとんど地震による損傷を受けない。振動及びダメージの強さは岩質を向上するにつ

文　献　No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　　要	評　価　項　目、指　標　等
		（下記参照）

れて弱まる
- 地上と地下5000フィート(1524m)での地震に関する記録には大きな差は見られなかったとするレポートと、1秒間のP波の振幅が、地下5000フィートの方が地下300フィート(91.4m)の2倍あったとするレポートがある。また、地上の最大変位は、地下300mでのそれの6～10倍あるとの報告もあるが、その倍率の大きさは、風化を受けた岩体よりも沖積層に対する方が大きい
- 東京の4サイトでマグニチュード4.8～7.2の地震に対する観測結果では、地上の動きの地下110～150mのそれに対する倍率は岩石質のところで1.5、粘土質のところで3.5の範囲であった
- 井戸や立坑のような垂直構造物に対する地震のダメージは、地上施設への影響ほどではない。(しかし、逆の結論を示すレポートもあるのでさらに調査が必要)
- 核爆発から得られる加速度と変位に関するデータが、大規模地震に対する上限近傍の値を与え得る
- 地上と地下での地震の影響は、地震波の伝播経路の地質によるところが大きく、震源の位置や地質にはあまりよらない
- 地震の無活動地域は非常に限られる
- サイト選定及び設計に影響し得る許認可上の論点
  - 評価期間中の地質的及びテクトニクス的なプロセスに関する知識の不確実性
  - 解析モデルを検証するための観測データベースの不完全性
  - 確率論的アプローチ対決定論的アプローチ
  - 長期に亘るテクトニクス的活動が水理系に与える影響
- 地震の影響としては、処分場の閉鎖及び埋め戻し後の立坑周囲での透水性への影響が考えられる
- 地盤の動きと、トンネル及びホールに対するダメージの関係を示す指標
  - ピーク速度
  - 応力歪

ダメージのレベル	対応するパーティクル速度	断層表面破裂点から5km地点でのピーク速度ﾒｼﾞｱﾝ値	マグニチュード
1(完全なダメージ)	40		
2(岩体破壊)	20	--14	--8
3(連続的スラブ化)	5	-- 4.4	--7
4(不連続的スラブ化)	1.5	-- 1.4	--6
5以上(ダメージなし)		-- 0.5	--5

  - ピーク変位
  - ピーク加速度

文献No 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概　　要	評価項目、指標等
HLW−17	Hull L.C. (EG&G Idaho Inc.) 「Laboratory Validation of a Dual-Permeability Reservoir Code」 NO.EGG-M-27884 (1985) 大きな、複雑な地層の破面系をモデル化する際には、主要な破面や断層だけを取扱い、小さな破面は浸透性が大きく、多孔質の連続体として扱う。この概念に基づくFRACSL貯蔵所コードのアルゴリズムの検証のため、データを得ることを目的に二次元透性モデルに関する実験室規模の実験を実施中である。	・多孔質媒体と分散する亀裂及び２種類の透水性をもつ媒体(亀裂とマトリクスの間の移流と分散)を取り扱える２次元、有限差分コードと模擬実験モデルとの比較(付・図-6) −定常状態における圧力分布(閉塞した近接２亀裂(但し、全く別の場所で亀裂ネットワークに接続)間に発生する圧力の不連続性をシミュレーション結果として表現。溶液が２つの亀裂の間でマトリクス中に流れ込むことを説明)
HLW−18	Wickens L.M., Robinson P.C. (AERE, Harwell, England) 「Finite-Element Modelling of Groundwater Flow in Hard Rock Regions Containing a Heat-Emitting Radioactive Waste Depository」 VOL.11, NO.1/2 pp15-25 (1984) 硬い岩石中の仮定の放射性廃棄物処分場の周囲の地下水の流れの場について種々のパラメータの影響を調べるために有限要素法を使った。処分場の選択には次の要因が重要な影響を及ぼす；その地方の地形、大きな断層、地殻の地熱温度勾配、貯蔵所内の放射性廃棄物の放射性核種の崩壊熱。これらの要因と水の移動との関係を考察。	・地下水流への影響を調べるための考慮要因 −地形の変化(圧力境界条件、ﾊｰﾄﾞﾛｯｸ貫入) −大きな断層 −地球の地熱温度勾配 −透水性の深度依存性 −処分場からの放射性核種の崩壊熱 ・流体方程式(多孔質媒体系) −質量保存則 $\partial(\phi\rho_f)/\partial t+\nabla\cdot(\rho_f q)=0$ ここで、 ρ_f：流体(水)の密度〔kg/㎥〕 ϕ：流れのある岩石での空隙率〔−〕 q：ダルシー流速〔m/s〕 t：時間〔s〕 −ダルシー則(ﾚｲﾉﾙｽﾞ数が小さい場合に成立) $q=\{-K/\mu(T)\}\cdot(\nabla P-\rho_f g+\rho_0 g)$ ここで、 q：体積平均流速 P：全圧から静水圧分を差し引いたもの(非静圧力)〔N/㎡, Pa〕 K：岩石の透水性〔㎡〕 μ：流体の粘度(温度Tに依存)〔Ns/㎡〕 ρ_0：平均流体密度〔kg/㎥〕 g：重力加速度〔kg/㎥〕 −エネルギー保存則(岩石と流体の共通の温度Tに対する) $(\rho C)_a(\partial T/\partial t)$ $=\Gamma_a\nabla^2T+H-\rho_f C_f q\cdot\nabla T$ $(\rho C)_a=\phi\rho_f C_f+(1-\phi)\rho_s C_s$ $\Gamma_a=\phi\Gamma_f+(1-\phi)\Gamma_s$ $q=\phi V_f$ ここで、 C：熱容量〔J/kg・K〕 Γ：伝導／分散係数〔W/m・K〕 V_f：空隙中の平均流速〔m/s〕 H：熱源の強度〔w/㎥〕 添字 f, s：流体、固体 −熱力学系(非圧縮性空隙水に対する) $\rho_f(T)=\rho_0(1-\beta(T)\cdot T)$

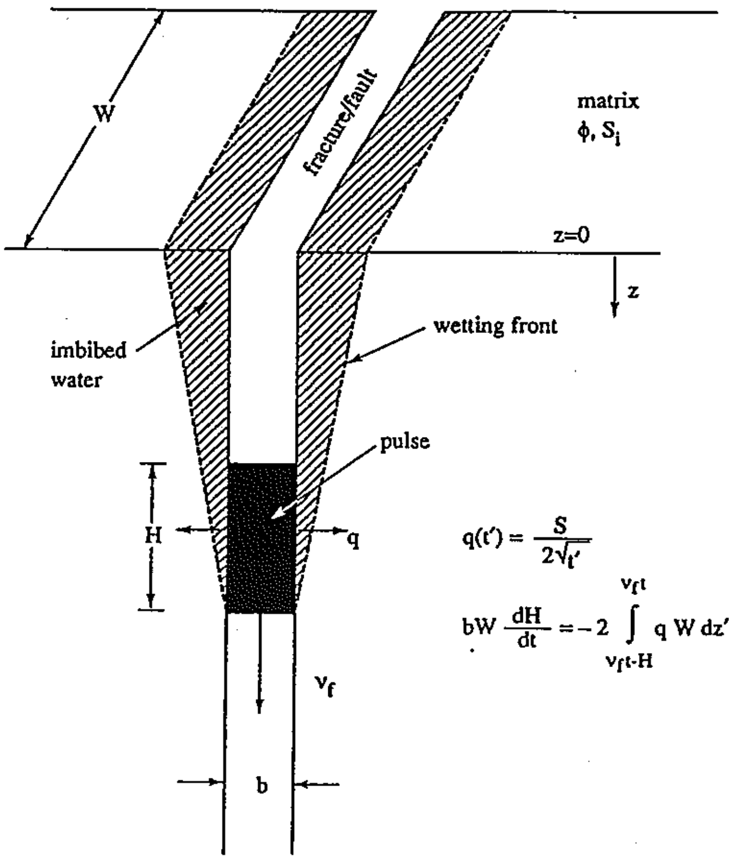
文献 No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概要	評価項目、指標等
HLW－19	Rasmussen N.H., Rohay A.C. (Rockwell International, WA) 「The Impact of Seismicity on the Stability of an Underground Repository」 NO.RHO-BW-SA-269-P (1982) BWIPプロジェクトでは耐震設計の方法を確立するために、南アフリカ金鉱における地殻の動きに関する記録とBruneの円形断層モデルに基づき経験的関係を導出、地震衝撃を最大地速度、地震規模、地表面距離等の関係でグラフ表示した。処分場位置での振動負荷、母材、埋め戻し材の破損等は処分場の設計、封鎖後の性能評価で重要である。地震断層が処分場を横断する程度に大なる時振動損傷しきい値を超過する。最大地速度が岩石、支持構造に依存して25～100m/sならば振動損傷が生じる。年間の種々の規模の地震発生確率を決めるため、特定の半球体積内のランダムな地震発生確率とともに再発曲線を考慮した。	・地震で生じた断層によってトンネル壁が変位し、ダメージを被る ・地震による地下の動き、減衰特性、応力低下(stress drop)、再発可能性の関係をサイト特性データをもとに推定 －振動特性 $\ln V = a + bM - \ln R$ ここで、V：ピーク地盤速度 M：地震のマグニチュード R：震央からの距離 －断層横断特性 $R_0^3 = c(M_0/\Delta\sigma)$ $\ln M_0 = e + fM$ ここで、R_0：断層の半径 M_0：地震モーメント M：地震のマグニチュード $\Delta\sigma$：地震による応力低下 $d = M_0/(\mu\pi R_0^2)$ $(\mu = \rho\beta^2)$ ここで、d：断層の変位(平均値) （μ：地殻応力 ρ：地殻密度 β：地殻速度） －再発性 $\ln N = \alpha - \beta M$ $(2/3)\pi r^3 N = \mathrm{const.}$ ここで、N：半径rの半球体積内での地震発生頻度 ・変位の増加に伴う透水性の変化
HLW－20	Scawartz F.W., Donath F.A. 「Influence of Faulting on Groundwater Flow and Contaminant Transport」 VOL.4, pp117-136 (1982) ２次元の解析モデルを用いて、垂直方向にのびる断層が、貯蔵所の隔離性能にどのような効果をもたらすかを解析した。その結果、透水係数の２次元的分布に、たとえ小さな変化でも生ずると、地下水流や放射性核種の移行に、相当な影響をもたらすこと、などが明らかになった。	・断層生成が生態圏までの核種移行経路の短縮化をもたらす可能性の検討及びその処分場許認可プロセス作成への指針としての反映 ・輸送方程式系の記述 $(\partial/\partial x_\alpha)(D_{\alpha\tau}\partial c_i/\partial x_\tau)$ $-\partial(c_i v_\alpha)/\partial x_\alpha + \sum_{j=1}^{n} R_{ij}$ $= \partial(\varepsilon c_i)/\partial t$ ここで、$D_{\alpha\tau}$：分散係数 c_i：i成分の質量濃度 v_α：ダルシー流速のα方向成分 ε：空隙率 R_{ij}：n種のプロセスにおいて反応jからi成分が生成される速度 x_α：独立系の軸 $\alpha = 1, 2; \tau = 1, 2$ ・４つの水理学的層序(岩種別、透水係数及び空隙率の(断層の存在による不連続的)変化) －高透水係数領域の一つに低透水係数帯が不連続的に入っている場合には、地下水流への影響が大きい
HLW－21	Cranwell R.M. (Sandia Lab., NM); Donath F.A. (Univ. Illinois) 「An Application of Geometric Probability to the Existence of Faults in Anisotropic Media」 Vol.2, pp787-794 (1980) 深地層中での放射性同位体の移動過程を検討する際、断層の存在が重要な問題となり得る。断層として、廃	・確率論的な取り扱い －処分場閉鎖後t年間に少なくとも１度は断層が処分場を横断する確率P： $P = 1 - e^{-\lambda(t)pA}$ ここで、 p：処分場周囲半径Rの範囲に一つの断層が存在していて、それが処分場を横切る条件付確率

文献No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概要	評価項目、指標等
	棄物処分地を1)横切るが観測できないもの、2)新たに到達するもの、3)取りまく地下水の移動を可能にするなど全ての場合を考え、幾何学的に断層の方向と密度を知り、応力測定や地震活動のデータから、モデルを得て、1)や2)のケースにつき検討した。	A：半径Rの面積 $\lambda(t)$：処分場閉鎖後t年経た時点における半径Rの領域内の平均断層密度、非定常ポアソン過程に従うとすれば、 $\lambda(t)=\lambda_0+\int_0^t \lambda_1(\tau)d\tau$ 但し、λ_0：半径R内に現時点ですでに存在している断層の平均密度 λ_1：閉鎖後新しい断層が単位面積当り生成する率 ∵）時点tまでに半径Rの領域にN個の断層が存在している確率 $P(N, t) = \frac{[\lambda(t)A]^N}{N!}\exp[-\lambda(t)A]$
HLW－22	Gupta S.K., Cole C.R., Kincaid C.T., Kaszet A.F.E. (Pacific Northwest Lab., Washington)「Description and Applications of the FE3DGW and CFEST Three-Dimensional Finite-Element Models」NO.LBL-11566 pp77-85 (1980) 標掲は、詳細な局所的、地域的な粗い格子で分けた大きな地下水盆のシミュレーションに適するモデルである。このモデルでは、等価な多孔質媒体として断層と亀裂を考えている。大きな亀裂あるいは断層帯はより高い透水係数、あるいは空隙率をもった別々の要素として効果的にシミュレートされる。水理学上の特性や境界条件における２つの空隙率や、別々に分離している亀裂中の流れ、またモデル化の不確実性に関する能力を持つようにさらに改良が進められている。	・複雑な多層系のポテンシャル、流路、移行時間を計算する有限要素３次元等温飽和地下水流モデル。さらに、四季の滞水層におけるエネルギー貯蓄量、滞水層中の化学的廃棄物の処分、塩分を含む滞水層中の無塩水の貯蓄量、無塩地下水への塩水の侵入などが扱えるモデルへ拡張。モデルでは、単層流、伝導及び対流によるエネルギー輸送、分散・拡散・対流による溶液輸送を表現。今後は以下の点の考慮が必要。 －２つの空隙率と個々の亀裂中の流れ －水理特性と境界条件における不確実性 －水理－熱－溶液系の結合並びに局所的、隣接的、広域的な領域の結合

(4) 侵食×モデル×放射性廃棄物

文献No. 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概要	評価項目、指標等
HLW－23 (ウランテイル)	Walters W.H. (Battelle, WA)「Computational Methods for Estimating Overland Erosion of Uranium Tailings」VOL.26, NO.2 pp192-199 (1985) ウラン鉱さいからのラドン放出防止のために土壌で表面を覆うが、雨などにより土壌が侵食され流出する。それらの侵食率と土壌流失について、５通りのモデルを作り、長期間の影響についてコンピュータを使用して評価した。	・長期土壌侵食モデルとして以下の２つのモデルの長・短所等を検討(付・表-2) －統計解析モデル(簡易だが、適用範囲に限界がある) $A=R\cdot K\cdot LS\cdot C\cdot P$ $Y_s=a(Q_v q_p)^b K\cdot LS\cdot C\cdot P$ ここで、 A：年間の平均土壌損失(単位面積当りの質量で表示) R：降水侵食因子(降水の運動エネルギーや強度の関数) K：土壌侵食性因子(土壌組成(粘土・細粒砂・粗粒砂・有機物質)及び土壌構造、透水性の関数) LS：幾何学的因子(地形の傾斜角及び傾斜長(規格化)の関数)

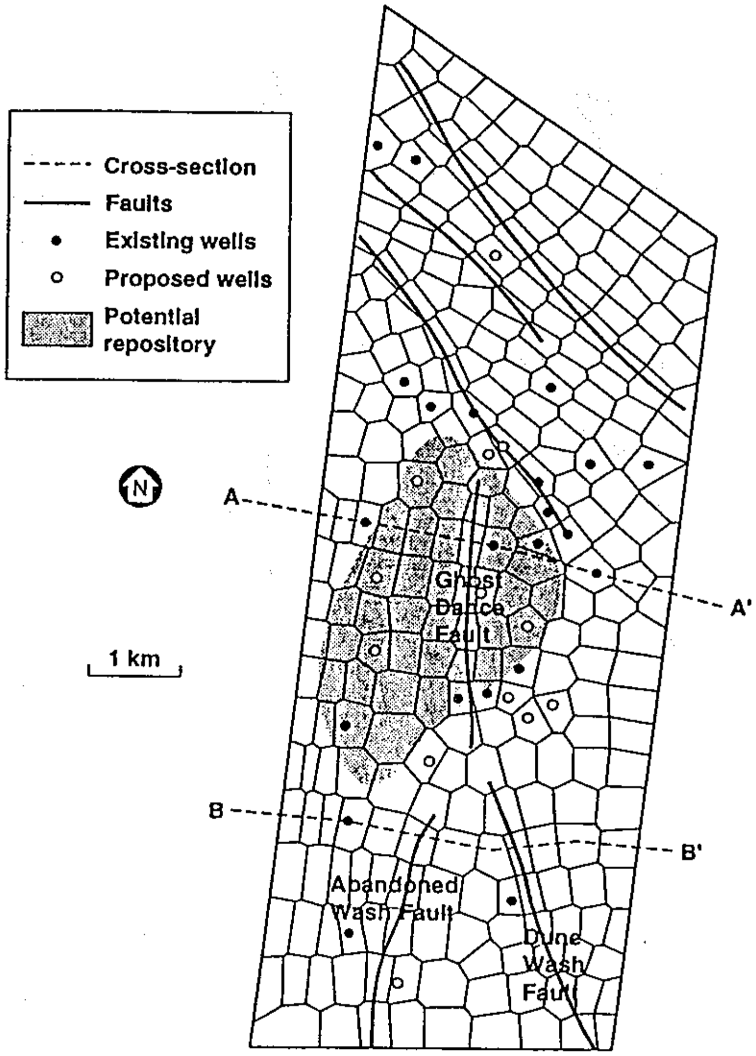
文 献 No 〔キーワード〕	著者名、タイトル、出典（書籍、雑誌巻号）名 概 要	評 価 項 目、指 標 等
		C：農地での土壌損失量の粗野な土地でのそれに対する比率(農地での損失量の方が通常はかなり小さい) P：保守的(補助)因子(外輪郭化、非農地化、段丘化などの実際的な影響を考慮した要因) Y_s：沈積物の量 Q_v：流出量 q_p：最大流量 a，b：係数 －物理的プロセスシミュレーションモデル(融通がきくが、広範なデータを必要とする)水理学的要因(土壌の種類、土地利用形態の考慮、蒸発散・パーコレーションモデル等による水バランスの表現) ・ウランのテイル処分と管理計画の目標 －放射線被爆量の低減 －人間の誤利用の防護 －陸水の汚染の回避 ・土壌の侵食防止のための被覆設計計画への適用性
HLW－24 (LLW)	Mckenzie D.H., Cadwell L.L., Kennedy W.E. JR., Prohammer L.A., Simmins M.A. (Pacific Northwest Lab., WA, USA) 「Relevance of Biotic Pathways to the Long-Term Regulation of Nuclear Waste Disposal」 NO.NUREG-CR-2675-VOL-6 (1986) 民間低レベル放射性廃棄物処分用地の評価と許可手続きに生物経路を盛り込むために先に開発したBIOPORTコードの再検討を行った。このモデルの修正改良を行いリッチランドおよびバーンウェルの低レベル廃棄物処分施設の用地評価に適用した。特に覆土の外形、浸食、植物と動物の数、廃棄物パッケージの健全性などの生物による核種移動パラメータの被曝線量への影響を論じた。感度解析の結果も示した。	・処分場閉鎖時点から、制度的管理終了後のある時期までの期間において、動・植物がサイトに育成している状態を対象とした解析。 －廃棄物パッケージ形態の分解(廃棄物埋設後の移動可能な廃棄物割合) －人間侵入シナリオ(NCRの10CFR61：家屋建設、閉鎖されたサイトまでの掘削、建設後の家屋への住居、井戸水摂取) －土壌侵食シナリオ(侵食率(基準値及び加速化)、加速化の開始時期・頻度・持続期間) －掘削した地下の空隙(空間)の崩壊シナリオ －植物摂取モデル(土壌対植物濃縮ファクターもしくは濃縮比(CR)) $Q=\sum_{\ell=1}^{p} C_{Sx}\cdot R\cdot B_{\ell k}'\cdot K\cdot f_{\ell Sx}$ ここで、 Q：植物に摂取される放射性核種の量〔C_i/ha･y〕 p：(着目する)植物の総数 C_{Sx}：放射性核種の最高濃度を示す層S_xでの放射性核種濃度〔C_i/㎡〕 R：放射性核種の濃縮比 $B_{\ell k}'$：連続相k中の植物ℓの全質量〔kg/ha･y〕 K：土壌密度の逆数〔㎡/g〕 $f_{\ell Sx}$：層S_x中における植物ℓの根の占める割合 ・人間の被曝線量に影響を与え得る要素 －トレンチカバー厚さ －動物が掘る穴の深さや植物の根の深さ ・解析結果から得られた知見 －動物の侵入による廃棄物材や汚染土壌の分散 －侵入する植物の根からの吸入による放射性核種移行経路の選別化 －動・植物による廃棄材の鉛直方向への移動による将来居住者の被曝への影響



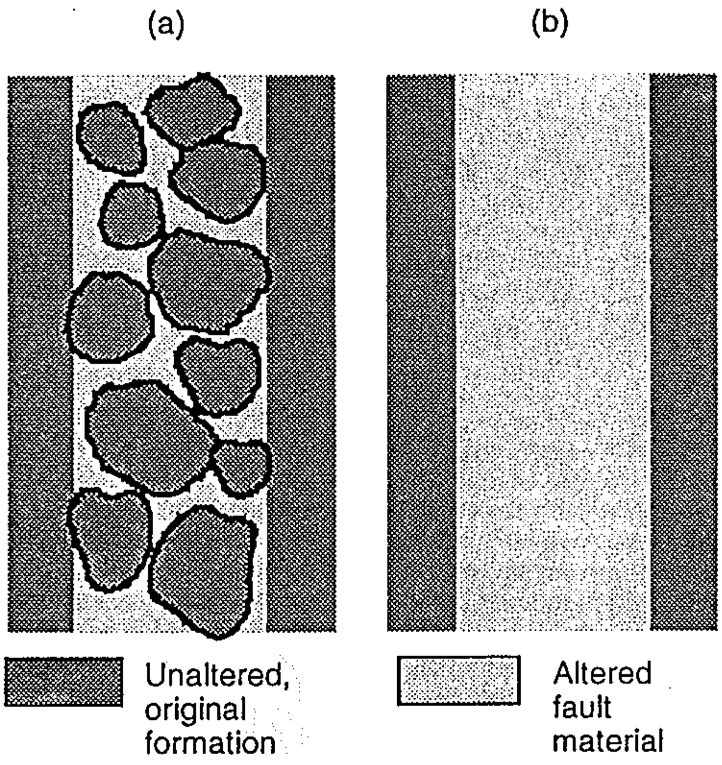
付・図-1　Pulse propagation along a fast flow path

付・表-1 Pulse propagation analytic solution

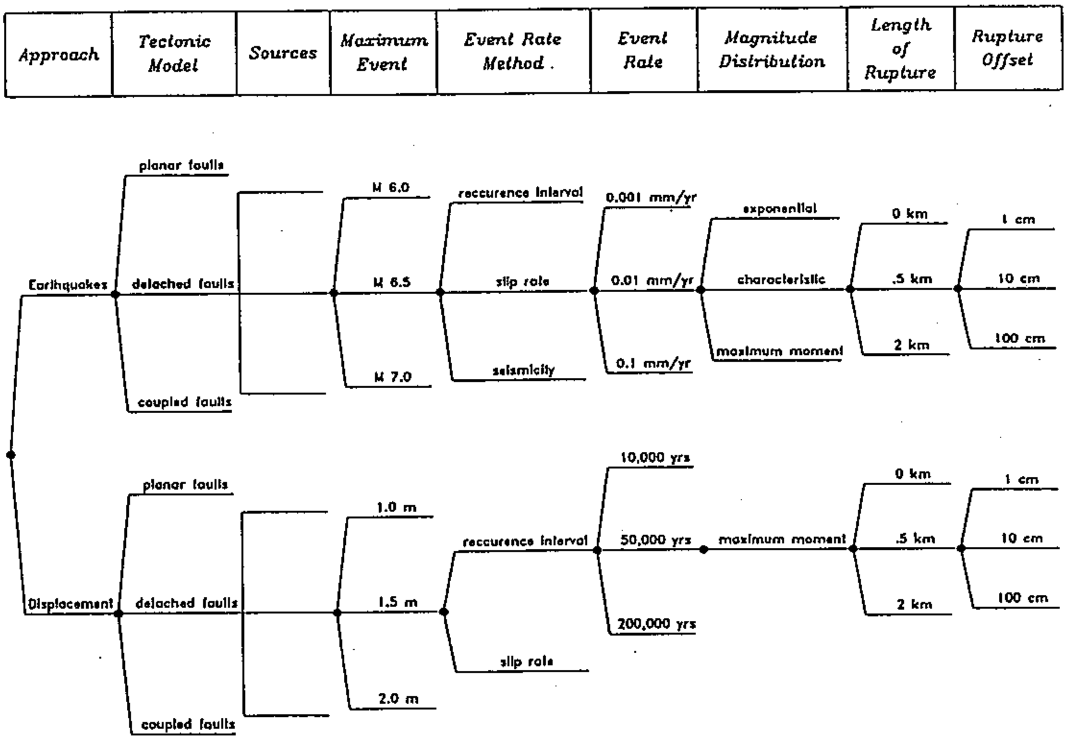
fracture-matrix flux	$q(t')=\dfrac{S}{2\sqrt{t'}}$ Philip's approximation
solution	$H(t)=\left[\sqrt{H_0}-\dfrac{S\sqrt{v_f}}{b}t\right]^2$
characteristics model	van Genuchten-Mualem
illustrative examples	PT_{nv}· Rainier Mesa
amount of water in a pulse volume/area	23.7 mm (94.8 mm)
fracture/fault length	W＝1210m
matrix permeability	2.49×10^{-14} m² ($5.96\times10^{-16}-2.22\times10^{-13}$ m²)
capillary scaling factor	$0.157\ m^{-1}$
porosity	0.4
pore-size distribution index	2.4 (0.22－9.56)
ambient matrix saturation	64% (88%)



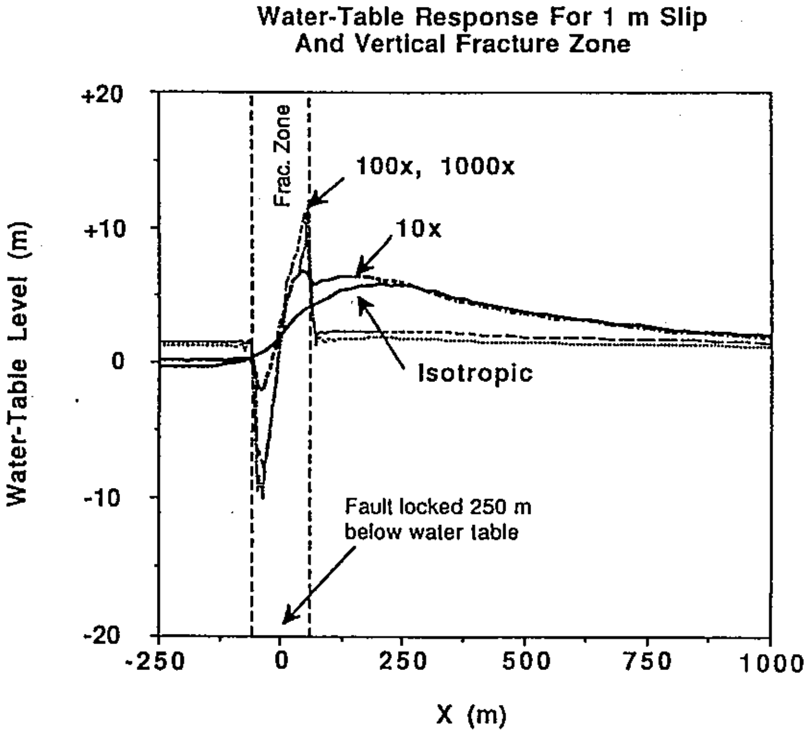
付・図-2　Horizontal grid for the site-scale model.



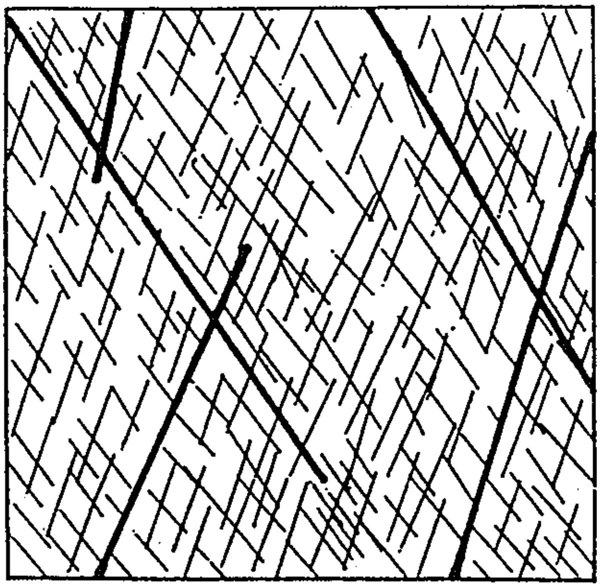
付・図-3 Alternative conceptualization of the fault (a) doubleporosity effective continuum, (b) single porosity medium.



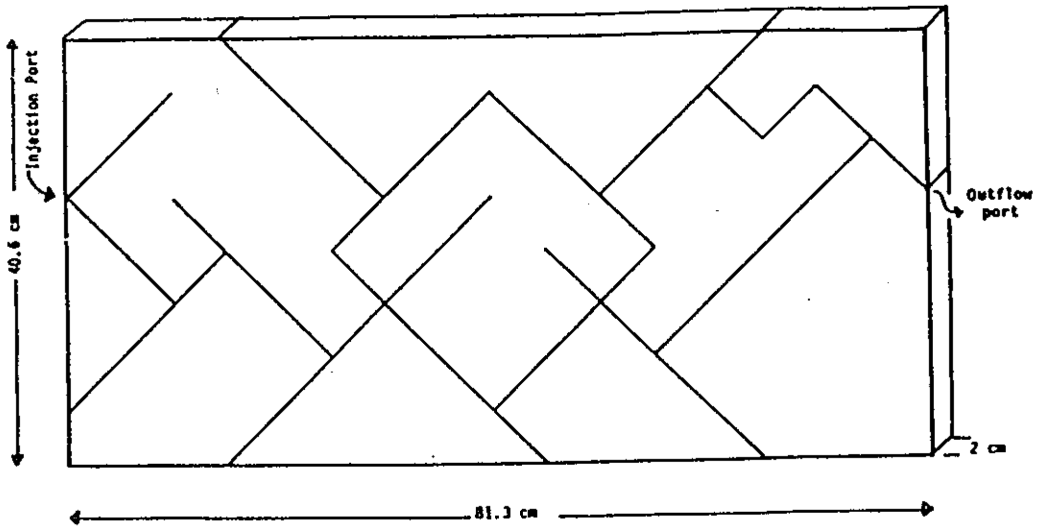
付・図-4 Schematic logic tree for expert elicitations and aggregated fault rupture hazard model. Each node of the logic tree represents a component of the model. (Parameter values shown are for illustration purposes only). Each branch is assigned a relative weight that specifies the relative likelihood that each parameter value is the correct value.



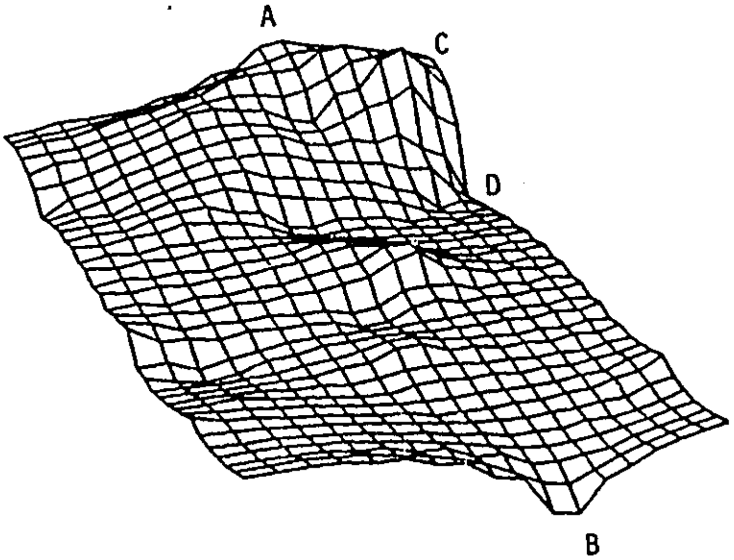
付・図-5 Water-table response for isotropic permeability and for local vertical permeability enhancement(10 to 10^3) within 100-m-wide anisotropic region centered on normal fault simulating zone of vertical fracturing.



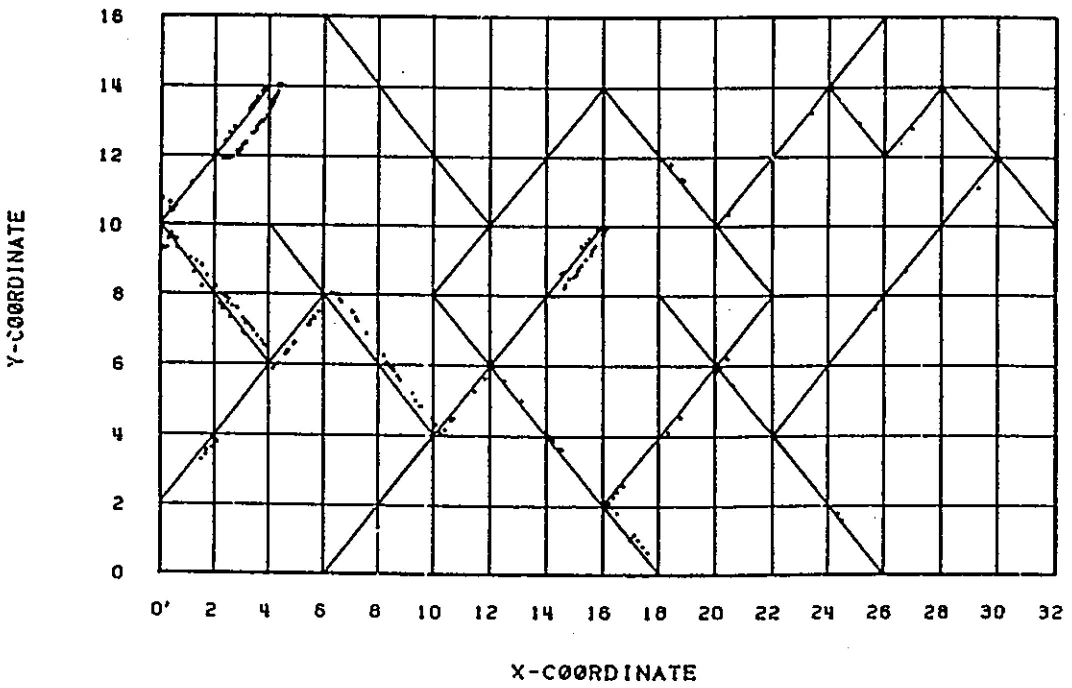
付・図-6(1) Conceptual dual-permeability fracture network.



付・図-6(2)　Dual-permeability fracture network model used in laboratory experiments.



付・図-6(3)　Steady-state pressure distribution in the dual-permeability laboratory model calculated using the FRACSL code.



付・図-6(4) Positions of tracer particles, injected as a five-minute pulse, after 60 minutes of flow in the dual-permeability models. Predictions based on the FRACSL code.

付・表-2 Summary of Selected Models for Evaluating Erosion of Uranium Tailings Impoundment

Model	Hydrologic component	Sediment component	Results	Application
USLE	Annual rainfall erosivity factor	Soil erodibility factor, sediment delivery ratio	Soil loss; sediment yield (with sediment delivery ratio)	Preliminary evaluation and screening
MUSLE	Peak discharge and runoff volume for single event; annual storm-weighted water yield	Uses universal soil loss equation	Sediment yield	Preliminary evaluation and screening
CREAMS	Soil Conservation Service curve number; infiltration	Overland flow; channel flow; impoundment (pond) deposition	Sediment yield; particle size distribution	Final cover design
ARM	Runoff simulation; infiltration interflow	Raindrop impact; overland flow; (clay/silt-sizes only), groundwater flow	Sediment yield based on overland flow simulation	Final cover design
MULTSED	Infiltration; kinematic flow; channel routing	Raindrop impact; overland flow; channel flow	Sediment yield based on overland flow simulation; channel erosion, transport, and deposition; particle size distribution	Final cover design

B．$t\to\infty$近傍（平衡状態）における微分差分方程式体系のLaplace逆変換

Ｈ３レポート[1]で取り扱われている地下水移行シナリオを構成する各種性能評価モデルでは、微分方程式系の数学モデルが多く見受けられる。しかし、取り扱う内容の複雑なままであらゆる理論や学説を取り込もうとすると計算の困難化に至る可能性も考えられる。そこで、ここではある平衡状態近傍の着目状態量のまわりでテイラー展開等の線形近似をあらかじめ行った$t\to\infty$近傍状態での微分方程式体系の解析を対象とし、以下のようなLaplace変換法の特徴を活用することが考えられる。

①一般に、変数$P(t)$，$F(t)$，$T(t)$のLaplace変換形$P(s)$，$F(s)$，$T(s)$の間に、

$$P(s)=F(s)T(s) \qquad (B1)$$

なる関係があり、しかも、$T(t)=Ae^{gt}$である時、

$$P(s)=A\frac{F(s)}{s-g}=\frac{A}{s}F(s)\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{g}{s}\right)^n$$

$$=A\sum_{n=0}^{\infty}\frac{g^n}{s^{n+1}}\cdot F(s) \qquad (B2)$$

ところが、$\dfrac{1}{s^{n+1}}\to\dfrac{t^n}{n!}$；$F(s)\to F(t)$であるから、（B２)式をLaplace逆変換すれば、“たたみこみ定理”より

$$P(t)=A\sum_{n=0}^{\infty}\frac{g^n}{n!}\int_0^t(t-\tau)^nF(\tau)d\tau$$

$$=A\int_0^t e^{g(t-\tau)}F(\tau)d\tau$$

$$=Ae^{gt}\int_0^t e^{-g\tau}F(\tau)d\tau \qquad (B3)$$

ところで、$F(s)=\int_0^\infty e^{-s\tau}F(\tau)d\tau$であるから、$t\to\infty$近傍では、（B３）式より、

$$P(t)=Ae^{gt}\cdot F(s)|_{s\to g} \qquad (B4)$$

が成り立つ。

②次のようなdelay項を含む線形の微分差分方程式体系を考える。即ち、

$$\dot{x} = Ax(t) + \sum_{i=1}^{m} B_i x(t-\tau_i) + Ce^{-\lambda t} + D \qquad (B5)$$

$x \in R^{n\times 1}$, $\tau_i \in R$ $(i=1, 2, \cdots, m)$, $\lambda \geqq 0$

$A \in R^{n\times n}$, $B_i \in R^{n\times n}$ $(i=1, 2, \cdots, m)$, $C \in R^{n\times 1}$, $D \in R^{n\times 1}$

今、全変数をLaplace変換し、$t\to\infty$近傍では、$x(0)\approx 0$と見なせる。すると（B5）式は、

$$s\,x(s) = Ax(s) + \sum_{i=1}^{m} B_i e^{-\tau_i s} x(s) + \frac{C}{s+\lambda} + \frac{D}{s}$$

よって、

$$x(s) = \left[s\cdot E - A - \sum_{i=1}^{m} B_i e^{-\tau_i s}\right]^{-1}\cdot\left(\frac{C}{s+\lambda} + \frac{D}{s}\right) \qquad (B6)$$

となるが、これをLaplace逆変換すると、

$$x(t) = M(-\lambda)\cdot Ce^{-\lambda t} + \lim_{s\to 0} M(s)\cdot D \qquad (B7)$$

ここで、

$$M(s) \triangleq \left[s\cdot E - A - \sum_{i=1}^{m} B_i e^{-\tau_i s}\right]^{-1}$$

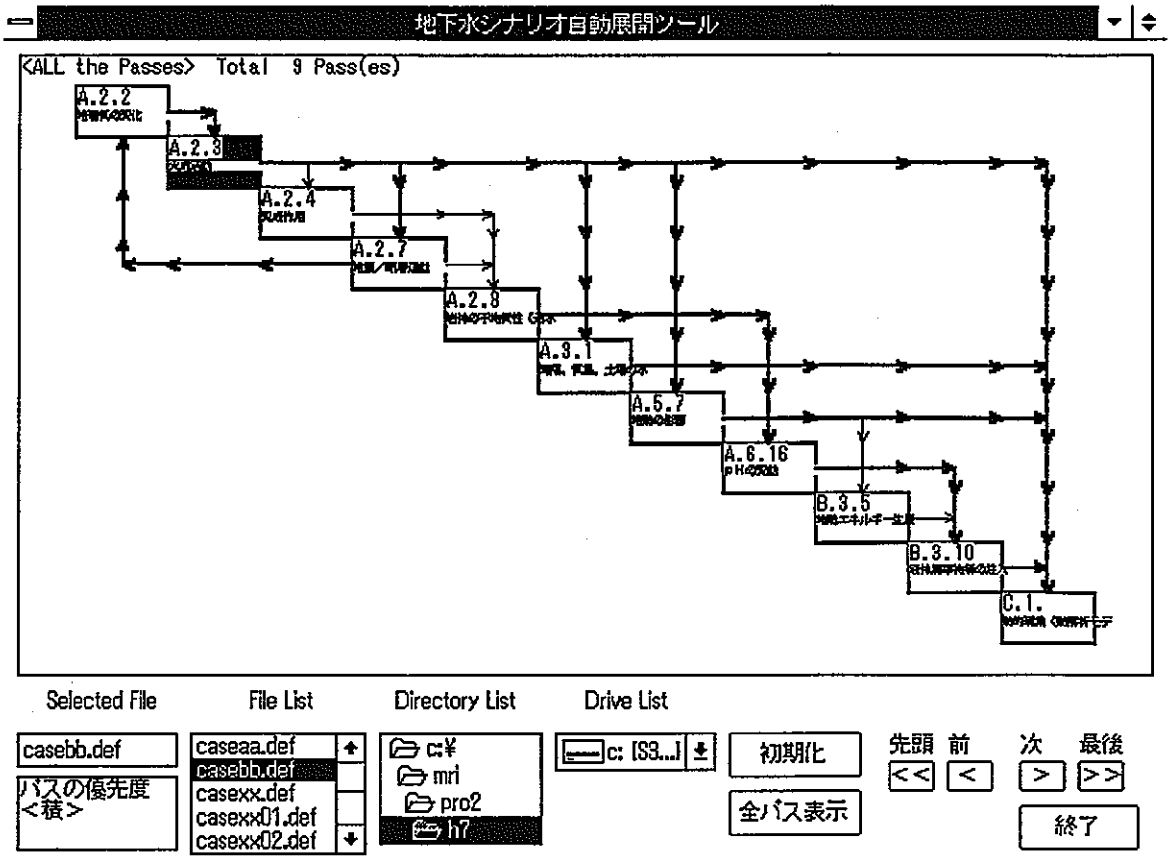
となる。従って、（B5）式の$t\to\infty$近傍（平衡状態）における解は、（B7）式のように、

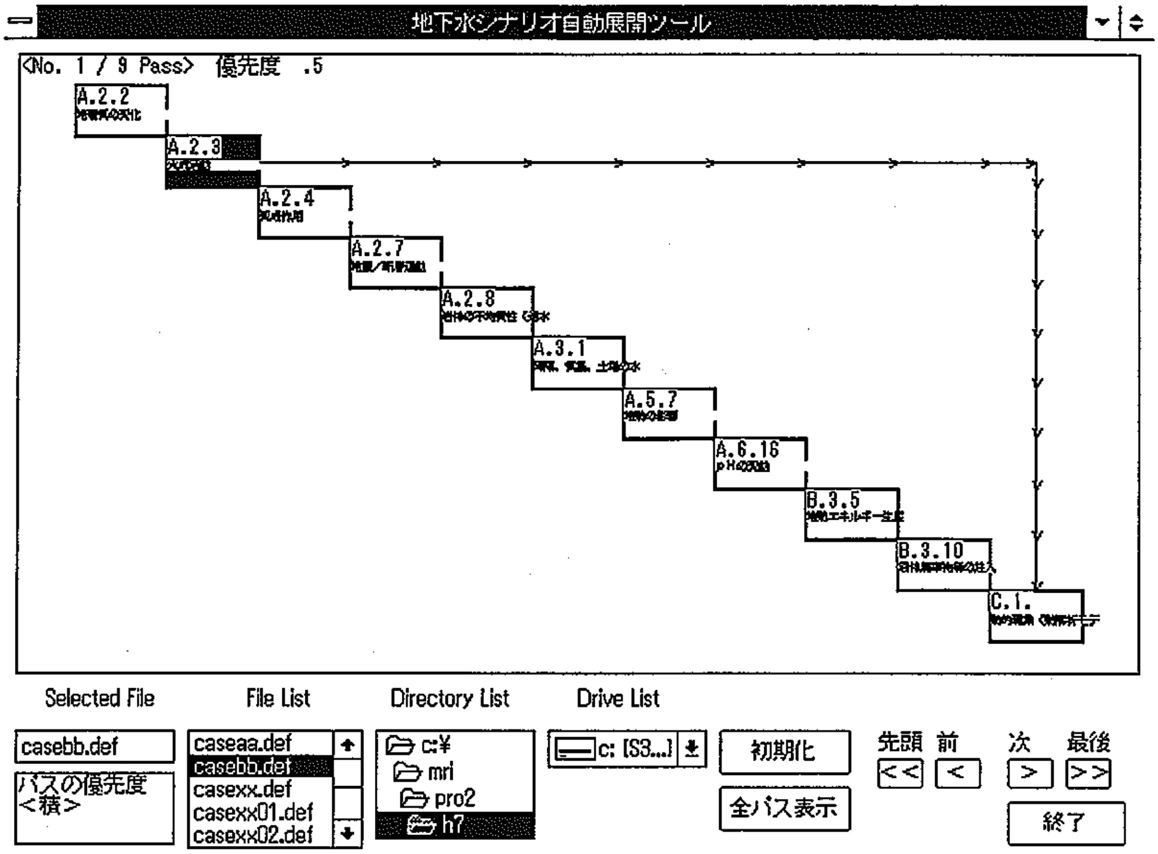
$$x_i(t) = \alpha_i e^{-\lambda t} + \beta_i \qquad (i=1, 2, \cdots, n) \qquad (B8)$$

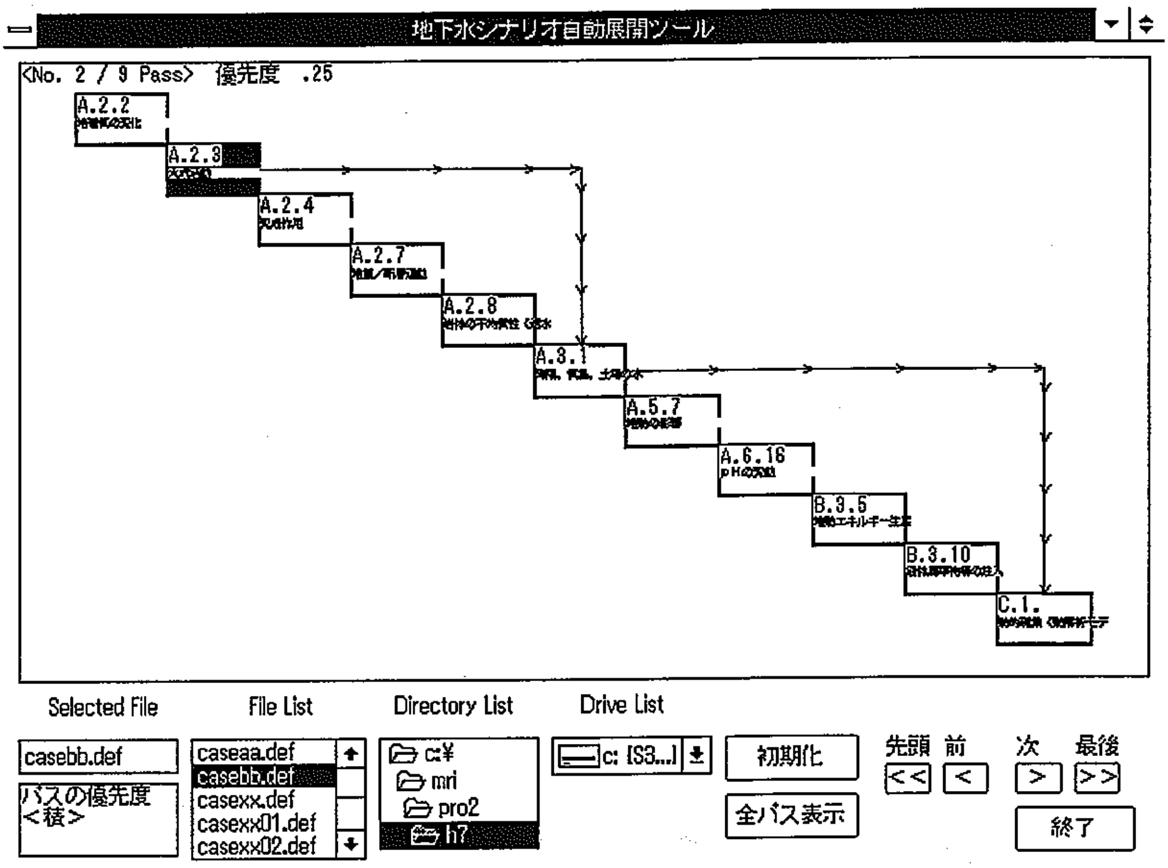
とはじめから係数α_i, β_iを用いて（B5）式に代入してα_i, β_iを決定するという方法で得られる。

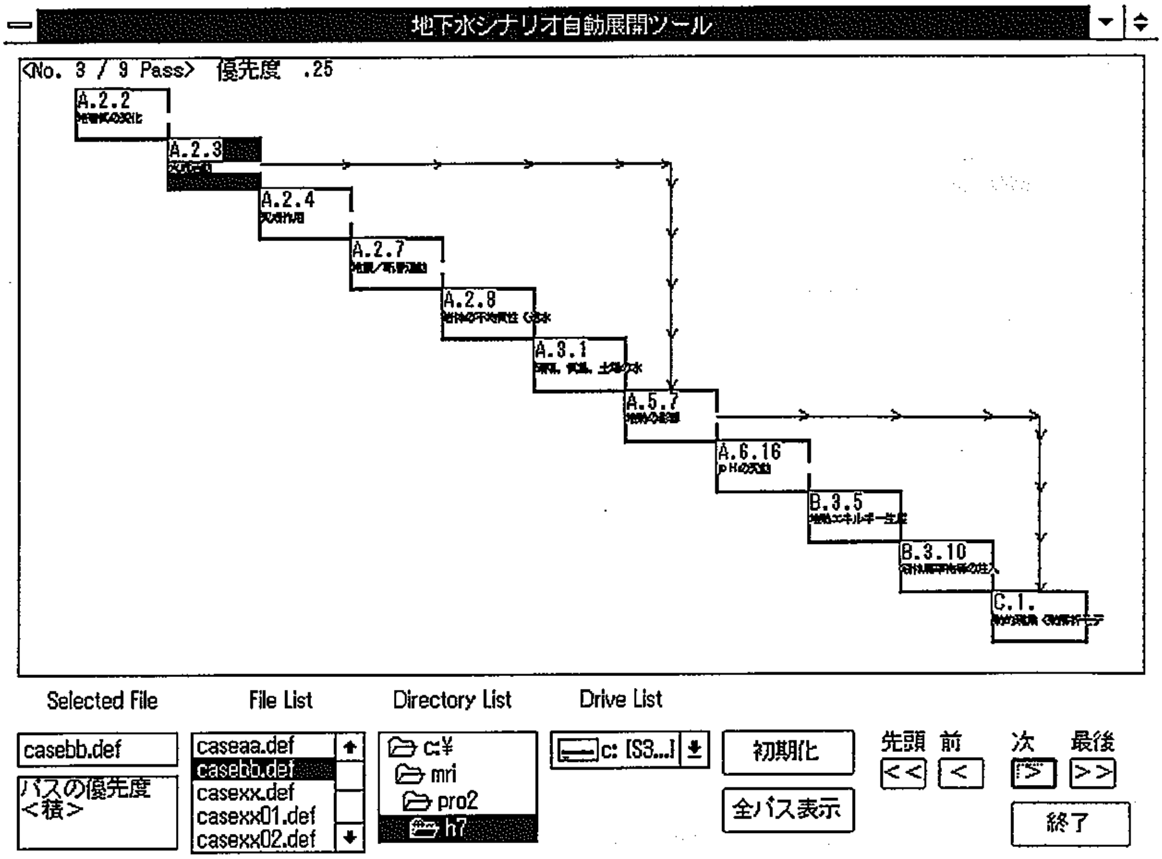
C．改良後のシナリオ自動展開ツールによるＦＥＰ連鎖出力例

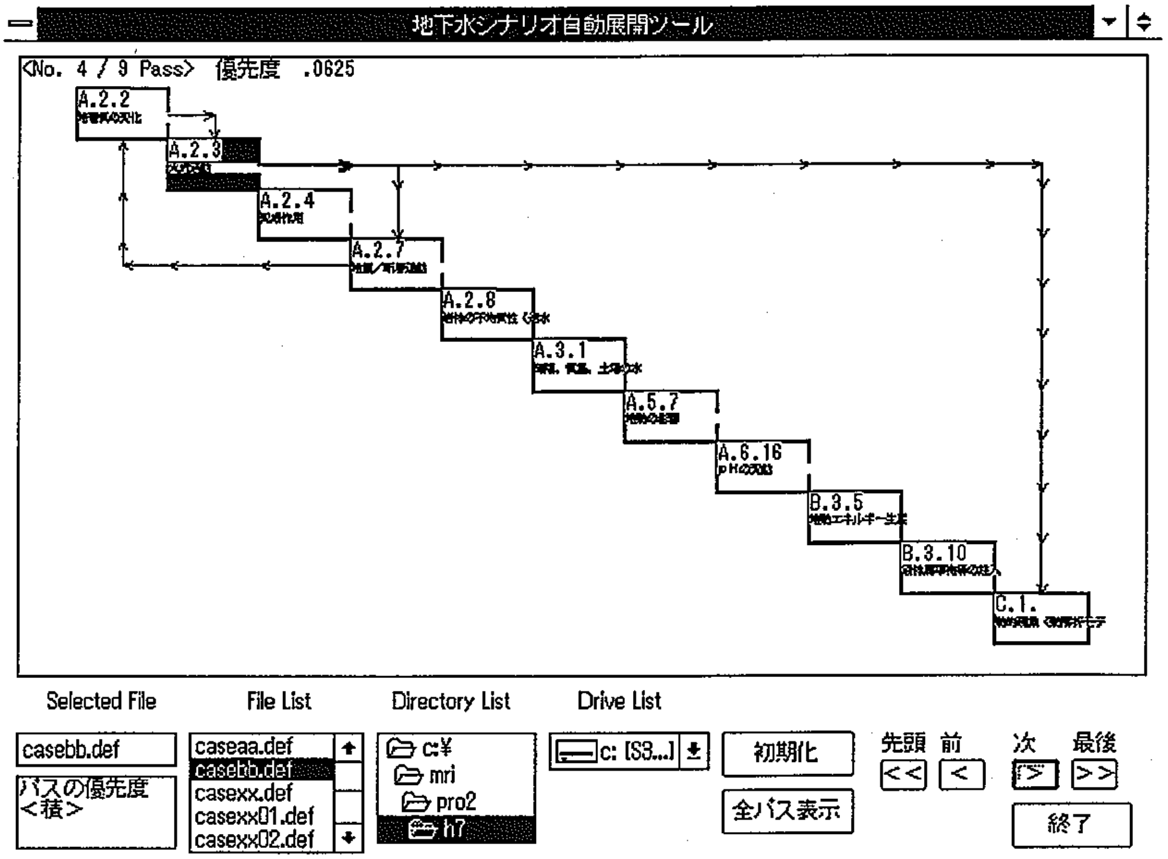
第３章で検討・改良したシナリオ自動展開ツールを用い、前年度報告書2.1.2節の出力例と同じ火成活動（A.2.3）を起点とし熱的現象（C.1）を終点とする全経路及びＦＥＰ連鎖（積の重要度判定順）を以下に示す。

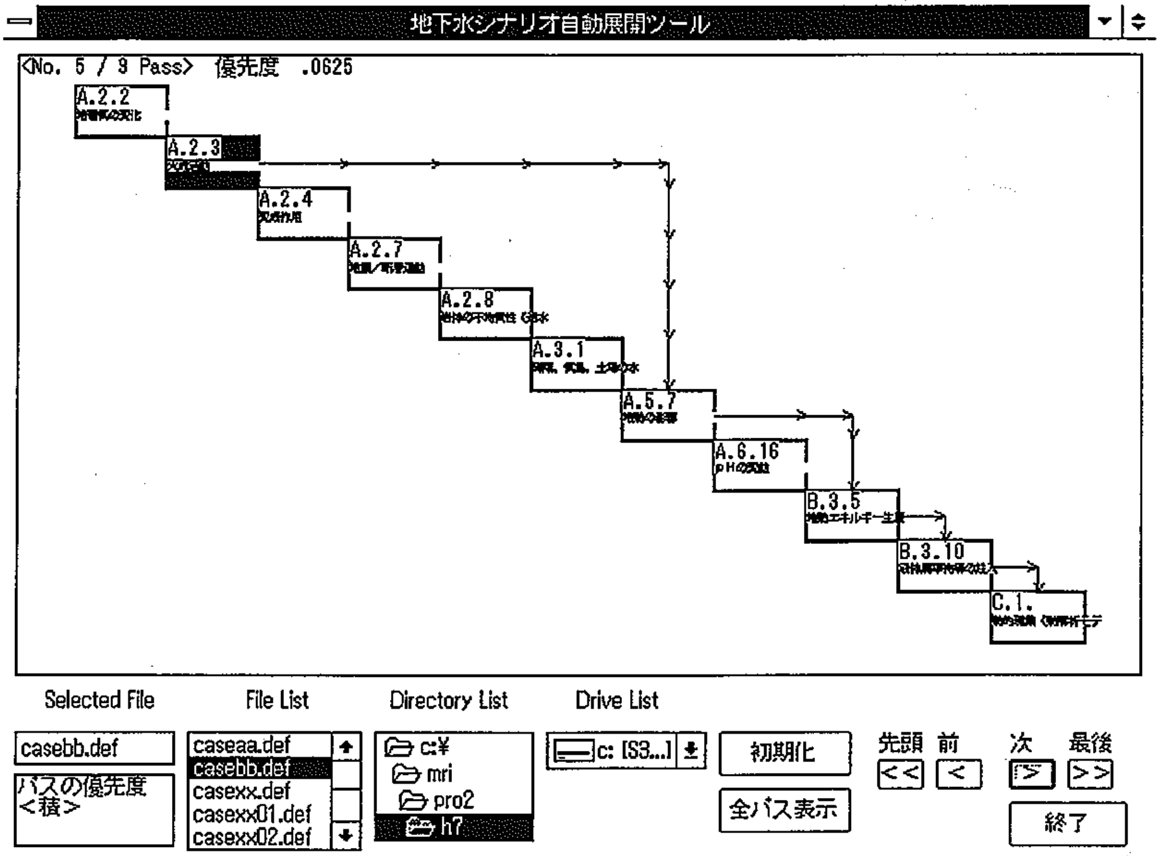

地下水シナリオ自動展開ツール
<ALL the Passes> Total 9 Pass(es)
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
<<
<
>
>>
終了


地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 1 / 9 Pass> 優先度 .5
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
<<
<
>
>>
終了

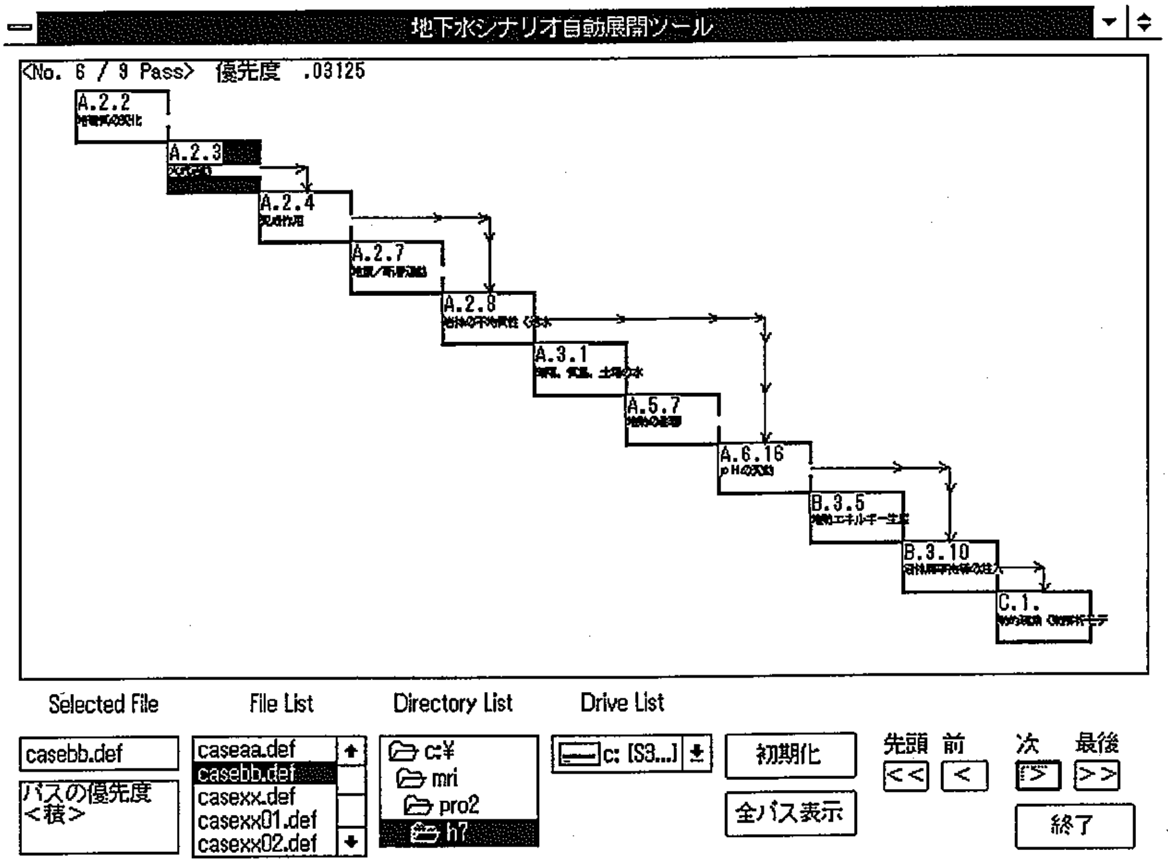

地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 2 / 9 Pass> 優先度 .25
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
<<
<
>
>>
終了


地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 3 / 9 Pass> 優先度 .25
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
<<
<
>
>>
終了

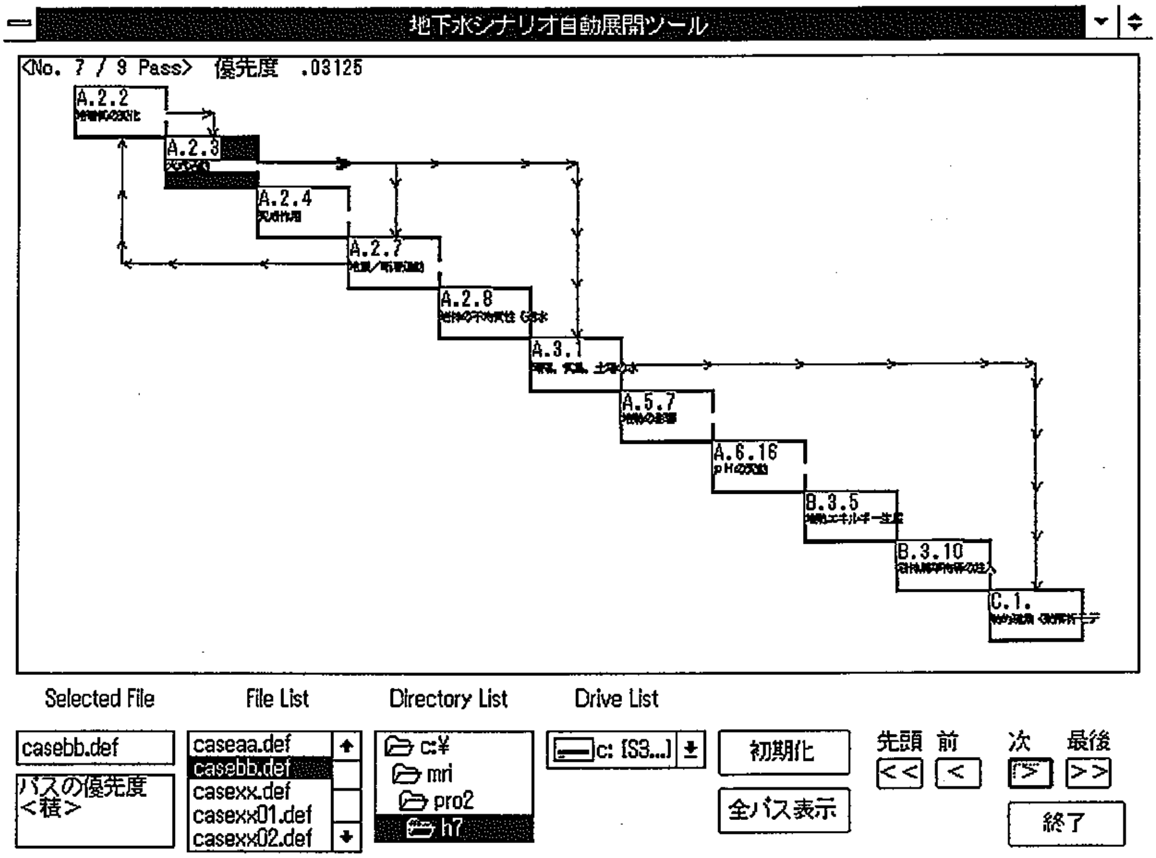

地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 4 / 9 Pass> 優先度 .0625
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
<<
<
>
>>
終了



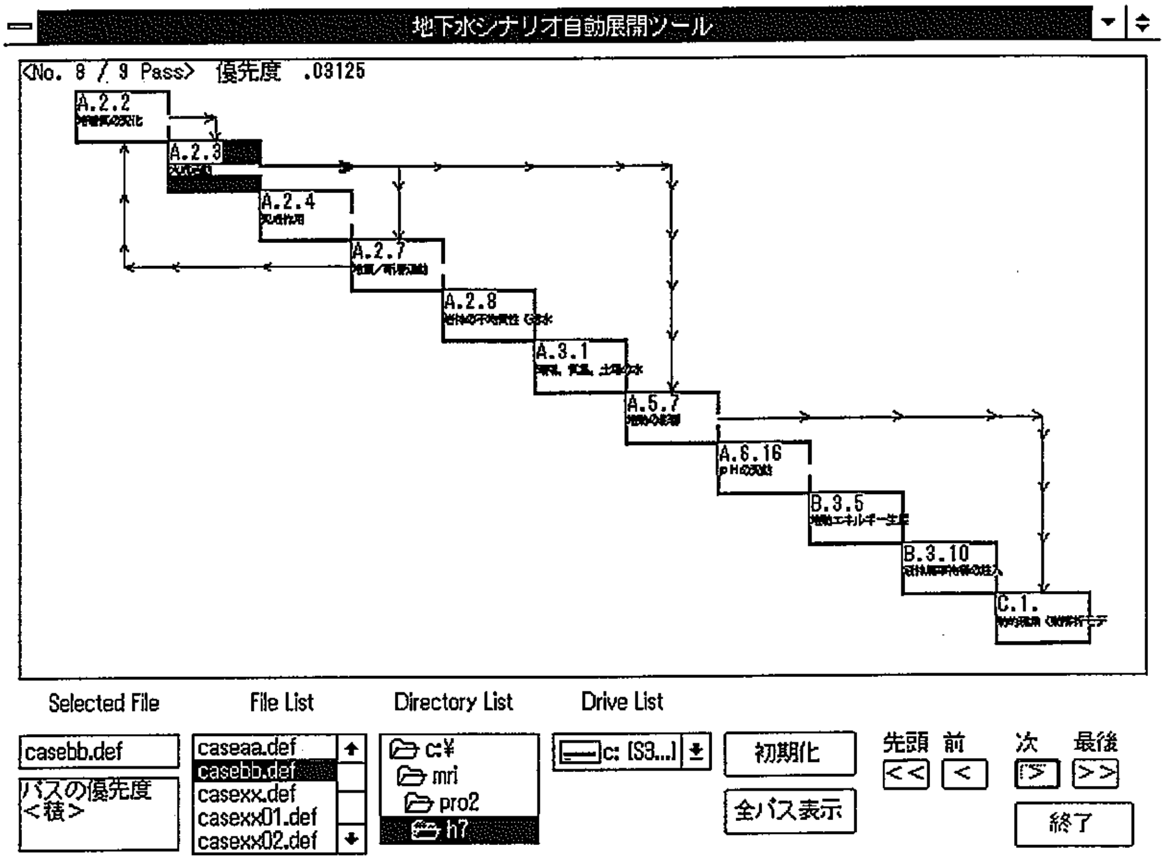
地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 5 / 9 Pass> 優先度 .0625
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
pHの変化
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
終了



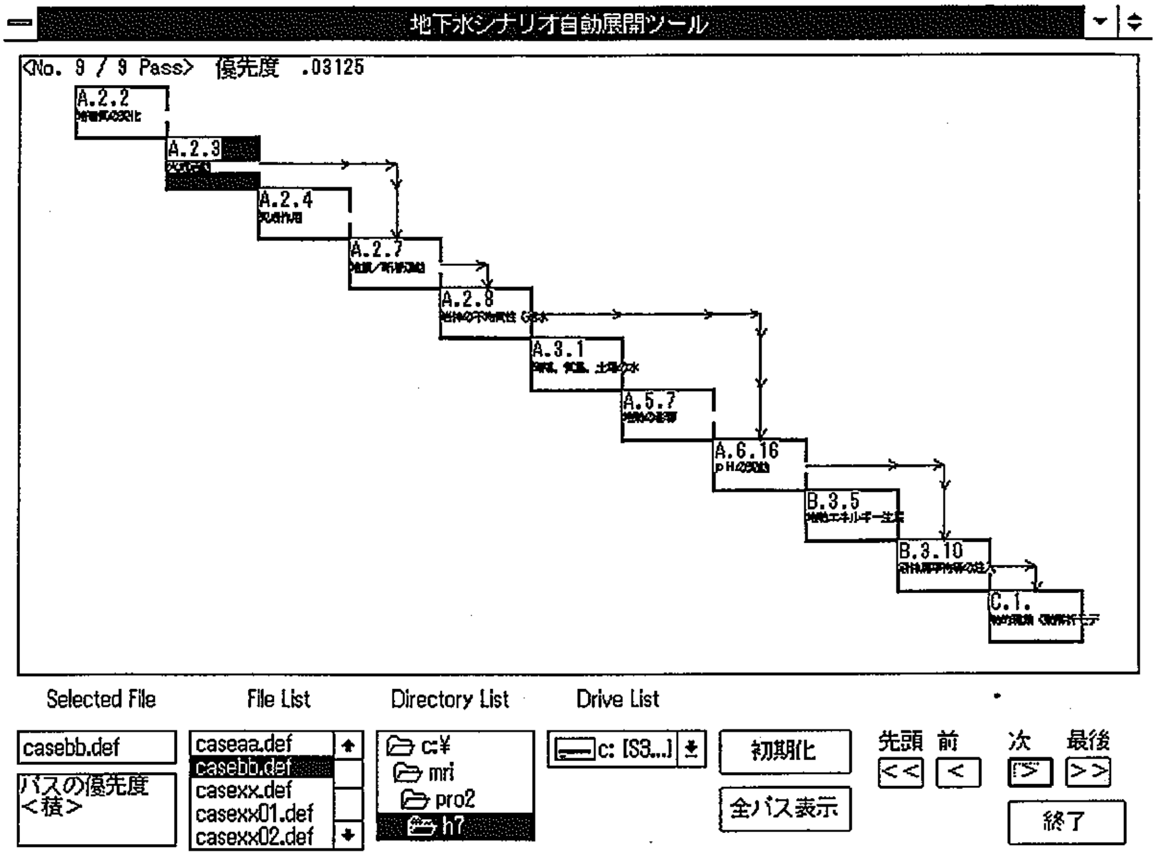
地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 6 / 9 Pass> 優先度 .03125
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
<<
<
>
>>
終了



地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 7 / 9 Pass> 優先度 .03125
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
終了



地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 8 / 9 Pass> 優先度 .03125
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
<<
<
>
>>
終了


地下水シナリオ自動展開ツール
<No. 9 / 9 Pass> 優先度 .03125
A.2.2
A.2.3
A.2.4
A.2.7
A.2.8
A.3.1
A.5.7
A.6.16
B.3.5
B.3.10
C.1.
Selected File
File List
Directory List
Drive List
casebb.def
パスの優先度
<積>
caseaa.def
casebb.def
casexx.def
casexx01.def
casexx02.def
c:¥
mri
pro2
h7
c: [S3...]
初期化
全パス表示
先頭
前
次
最後
終了

Ｄ．計算コード“MENTOR”の概要

D.1　はじめに

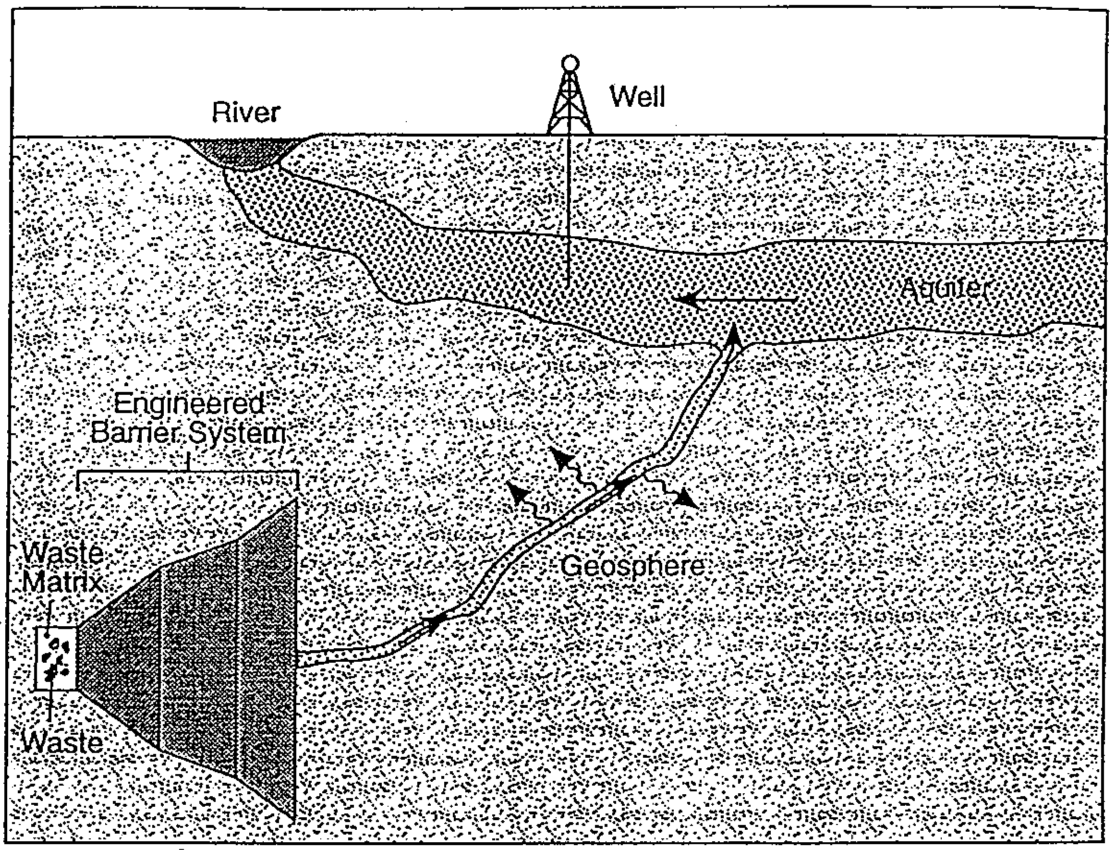
MENTOR（ニアフィールドの変化と放射性核種の移動に関するモデルの略称）は、放射性廃棄物の処分場から生物圏への放射性核種の移動について、一次元計算を可能とするコンピューター・コードである。これには、大深度処分場の安全性を評価する際に考慮する必要のある重要な物理的・化学的作用が組み込まれているが、ごく短い操作時間で処理方式を評価する強力な手段として使用することができる。ここでは、MENTORコードの要約と概要を簡単に説明し、MENTORコードによる結果とNagraのＫ－Ｉ報告書（Nagra, 1994）で報告されたＥＢＳ放出率との間のベンチマーク比較について論ずる。

付・図-7は放射性廃棄物から人間を保護するために、MENTORが考慮に入れた各種バリアからなる処分システムの構成要素を示す。廃棄物は、廃棄物と地質圏の間に設置する一または複数の人工バリアシステム（ＥＢＳ）によって囲まれた廃棄物マトリックスの中に収納されている。廃棄物そのもの、廃棄物マトリックス及びＥＢＳを合わせてニアフィールド（near field）と総称する。「地質圏」は岩石マトリックスへの拡散作用が明確に現れている亀裂媒体を意味する。地質圏を通って移動する放射性核種は帯水層に到達して、そこで希釈が行われるが、単純な生物圏との接触ルートとして、帯水層に掘られた井戸から汲み出される水を経由するものと、地表の河川への移動によるものとの二つを考慮する。これら地質圏、帯水層および生物圏を合わせてファーフィールドと総称する。

MENTORは各連鎖につき８つの構成要素まで複数の放射性核種崩壊連鎖を考慮に入れることができる。複数のＥＢＳ区域（最大10まで）を含めることができるので、ニアフィールドの空間的特異性の特徴を表すことができる。更に、このコードにはモデルのパラメータを期間ごとに変える－５つまでの期間を考慮することができる－ことにより、ニアフィールドの時間的変動を表せる特徴がある。ニアフィールドの化学組成の時間的変動に関する情報は、ユーザーが提供する。

ニアフィールドにおける放射性核種の横方向への広がりを一次元モデルで表すために、放射性核種が運ばれる各地域の横断面面積を変えることができる

（Intera, 1994）。単純化のために、この変化は各地域の横断距離に対して線形をなすと想定される。人工バリアと地質圏の間のインターフェースは、境界付近の状況が物理的に妥当な方法で示せるメカニズムと考えられる混合セル（隔室）で表される。この混合セルはニアフィールドのバリア全体の固有の一部と見なされる。



付・図-7 MENTORの構成要素

D.2 ニアフィールド

放射能が廃棄物そのものから離れた場合の放射性核種は明確に三つの種類に分けられる－「水性核種」「吸着核種」および「沈澱核種」である。吸着はラングミュア吸着等温式を使ってモデル化する。これら三つの構成要素については、一次数量としてその合計－単位容積当たりの放射性核種の合計量（質量）－を採用するのが数学的に便利である。水性、吸着、沈澱の各数量は、この合計量から直接導き出すことができる。

以下の各項では、廃棄物からの放射能の放出とそれに続く廃棄物マトリックス、人工バリアシステム、混合セルへの移動について説明する。続いて、放射能をこれら三つの異なる形態に分割するのに使用した方法について説明する。

導き出された数式を解くのに使われる方法の詳細は、MENTORに関する以前の文書〔Maul et al. (1993) , Intera (1994) 〕を参照したい。

D.2.1 廃棄物自体

封じ込め容器から周辺環境への核種の放出は、封じ込め時間およびその後は浸出時間によってモデル化される。この式には放射性核種崩壊と内部生成も含まれている。MENTORには、特定の時間における放射性核種のインベントリと半減期、封じ込め時間と浸出（溶解）時間が入力される。

D.2.2 廃棄物マトリックス

廃棄物マトリックスは、廃棄物からの放出が発生する均質的な媒体と考えられる。放射性核種の濃度は、マトリックスの中でずっと変わらないと想定される。マトリックス内の放射性核種の移流は、人工バリアシステムへの拡散流束および放射性崩壊／内部生成と同様にモデル化される。MENTORの現行バージョンでは、廃棄物の異質性は封じ込め時間と放出時間によってニアフィールドのバリア性能に影響を与えるだけである。廃棄物の断面面積、間隙率および容積がMENTORに入力される。廃棄物マトリックスバリア領域ではダルシー速度も指定される。

D.2.3 人工バリアシステム

MENTORは人工バリアシステムの各バリアについても、廃棄物マトリックスでモデル化された移流、分散および放射性崩壊の同じ作用をモデル化する。時間とは無関係に幾何学的なパラメータが採用される — 断面面積は距離の関数に過ぎず、地域の長さは定数である。断面面積は各地域の間で連続しており、各地域の終点の数値の間で線形に変化するものとする。間隙率と分散／拡散係数は区分的に定数で、各地域の中では変わらないが、地域間では断続的に変わることもあり得る。ダルシー速度も各地域について区分的に定数で指定されるが、このコードは放射性核種に関連する水の流束（ダルシー速度と断面面積の積）の連続性を確保するためにこれら数値を若干変更する。この流束は、ある地域の出発点の数値から当該地域の終点における数値まで線形に変化するものとする。MENTORは、水の流束がある地域から次の地域へ向かって減少するような場合には使うことはできない。このような事例は物理的に非現実的であり、誤解を生む結果を出す可能性があるからである。放射性核種の流束は地域間の境界で連続的なものと想定される。

それぞれの人工バリアについて、下記のパラメータがMENTORに入力される。即ち、バリアの断面面積、バリアの長さと厚さ、ダルシー速度、分子拡散係数、形成係数（ねじれ／収縮の数値）、間隙率、およびペクレ数および／または分散の長さ。MENTORには放射性核種の溶解度と吸着データ（ラングミュア吸着等温係数）も入力されるが、これらは各人工バリアによって異なる場合がある。

D.2.4 混合セル

混合セルはＥＢＳと地質圏との間のインターフェースとなり、ニアフィールドの不可分な一部と考えられる。これは均質性で、全放射能は距離によって変わらないと見なされる。MENTORは混合セルの長さを人工バリアの合計長さの10分の1としている。

D.2.5 放射能の区分

ニアフィールドでは、水性（Ｃ）、吸着（Ｓ）、沈澱（Ｐ）の放射性核種の濃度は、吸着等温式と関連溶解限度を当てはめて当該全放射能（Ａ）から導くこと

ができる。人工バリアの場合、これらおよび関連数値は距離と時間の関数となるが、廃棄物マトリックスと混合セルの場合は時間だけの関数である。

D.2.6 数式の解

迅速な実行時間とするために、放射能崩壊は移動項から分断され、ベートマン方程式の迅速な解法を使って分析的に解く。この手順は、処分の研究に関係ある放射性核種を対象とする放射性崩壊の時間の尺度が、一般的に移流／拡散方程式を解くのに使われるタイムステップよりずっと長いという事実によって正当化される。いずれにしても、MENTORのタイムステップ調整メカニズムによって、正確度は確保される。

D.3 ファーフィールド

D.3.1 地質圏

付・図-7には地質圏の概念モデルも示されている。これは一組の平行な平面的破砕帯によって示されている。地下水は破砕帯だけを通って、破砕帯の開口部から開口部へ一定の速度で流れると想定する。これは拡散が開口部から開口部への濃度を等しくすると想定される開放式破砕帯の平均値で表す。放射性核種は、放射性核種崩壊／内部生成、移流、縦方向の分散／拡散、線形平衡吸着、岩石マトリックスへの拡散などいくつかの物理的・化学的作用の影響を受ける。岩石マトリックスへの拡散は破砕帯の壁に垂直に発生し、岩石マトリックスの内部では線形平衡吸着が行われると想定する。これは種類の異なる三つのブロック（平面状、球状、円筒状）またはそれらブロックの組合せで発生する。数学的に単純な均質間隙媒体の事例は、破砕帯間隙率を間隙媒体の間隙率と等しくし、マトリックスへの拡散を無視することにより容易に得ることができる。

破砕帯中の水の速度はダルシー速度ではなく放射性核種の移流を決めると想定される（即ち、破砕帯中の水の速度はダルシー速度を割れ目の生じた組織の間隙率で割ったものに等しい）。拡散の中では、分散が圧倒的に多いと想定される。地質圏からの最終結果は、ニアフィールドの出力と地質圏の反応項を「たたみこむ」ことによって得られる。地質圏の場合に入力されるパラメータは、流速、移

動の長さ、放射性核種の遅延係数、間隙率、およびペクレ数および／または分散の長さである。岩石マトリックスに拡散が発生すると想定される場合に入力されるマトリックス・パラメータは、マトリックスの間隙率、マトリックスにおける放射性核種の保持、マトリックスにおける放射性核種の間隙／水分拡散係数、岩石単位容量当たりの比湿潤面積、及び拡散／保持の貫入深度である。

「岩石単位容量当たりの比湿潤面積」というパラメータは、「母岩の範囲内にある開いた流路の密度」の平均値と見なすことができ、これが母岩の鍵となる特徴である。この用語はＳＫＢ91の評価で定義された「マトリックス拡散の比表面積」という用語とも同じである〔Nagra (1994)，ＳＫＢ (1992)〕。Ｋ－Ｉの評価では、このパラメータは処分場周辺の透水性の低い領域における水伝導機構の頻度と形状（例えば、水伝導機構内の破砕帯の分離状況と開口部、および破砕帯内の流路の幅と分離状況）から導き出される（Nagra，1994）。

D.3.2　帯水層

帯水層は移流が主体の間隙媒体と考えられ、放射性核種の移動を決定する方程式は帯水層の間隙率を破砕帯の間隙率と等しくし、マトリックスへの拡散を無視することによって、破砕された地質圏に対する方程式から直接導くことができる〔Intera (1994) を参照のこと〕。入力するパラメータは、ダルシー速度、井戸への距離、河川への排出点までの距離、放射性核種の遅延係数、間隙率、帯水層断面面積、およびペクレ数および／または分散の長さである。MENTORコードでは、放射性核種の濃度の境界条件を地質圏と帯水層の境界線ではゼロと設定しているので、ここでは帯水層のパラメータは重要ではない。境界条件をゼロとしているのは、帯水層内の水の流量が破砕された地質圏よりずっと大きいと想定されるので適切である。帯水層への流束を過大評価する傾向があるので、これは控え目な想定でもある。

D.3.3　生物圏

簡単な生物圏への接触のルートとして、井戸と河川の二つを選んだ。MENTORでは、放射性核種の濃度と流束を決定集団線量率へ転換するのに、事前に計算された係数を使用した。生物圏について入力されるパラメータは、各接触ルートに関

するBq／Sv換算係数である。ほとんどの放射性核種について、省略時ファイルがこれら係数を提供する。安定的な同位元素の場合、この数値はゼロを使用する。MENTORの生物圏構成要素は、ここに示す計算では使われない。その代わり、モル／年で報告されるＥＢＳおよび／または地質圏からの放射性核種の流束を、Ｋ－Ｉ報告書（Nagra，1994）の付属文書６に記載された換算係数を使ってmSv／年当たりの線量に変換する。この変換は、各種計算ケースが処分場からの放出に与える影響を比較しやすくするために行われる。

D.4 MENTORによる計算とＫ－Ｉの計算とのベンチマーク比較

本項では、MENTORコードとスイスのＨＬＷ処分に関するＫ－Ｉ報告書(Nagra,1994)で報告されたソース・ターム放出率とのベンチマーク比較結果をもっと詳しく説明する。Ｋ－Ｉの結果はベンチマークとして極めて有益である。何故なら、１）これは日本で処分する予定のものとよく似たホウケイ酸ＨＬＷガラス固化体を処分する人工バリア設計に関するものであり、２）Ｋ－Ｉのソース・ターム放出率の計算に使われた入力・データと出力結果がよく記述されているからである。

放出率曲線の形状と位相の定量的比較は、計算上の放出率曲線の絶対値の単純な一致と同様に、或いは恐らくもっと、重要なものである。放出率曲線の形状と相対的位置の一致は、各種作用（例えば、溶解度、移行、吸着、放射能崩壊）の複雑な結合が両ベンチマーク・コードとも数学的に同じ方法で表されていることを示すものである。

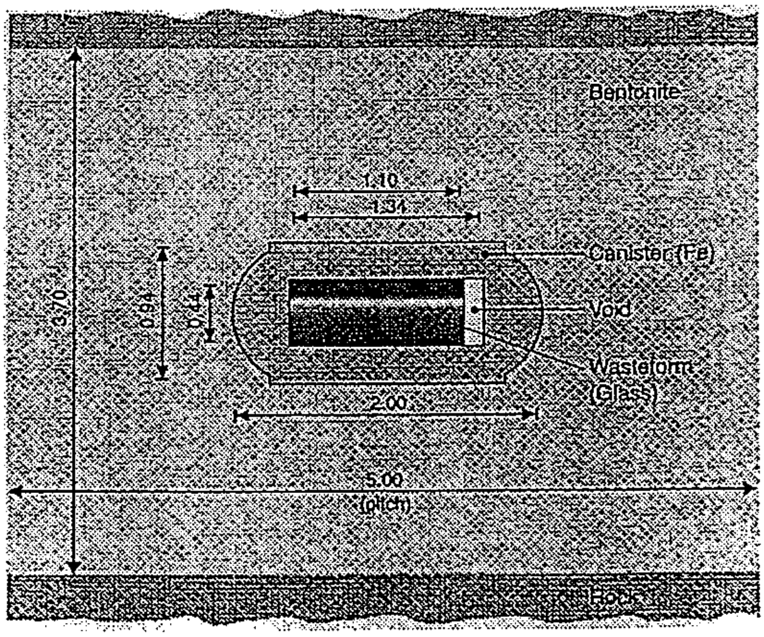
ベンチマーク作業を定量的に比較する場合（例えば、ピーク放出率の数値、ピーク放出率に到達する時間）は、注意する必要がある。形状、溶解方式、境界条件、データ採取地点の密度、モデル化の想定事項の違いにより、名目データセットを使う二つのコードの結果が大幅に異なることもあり得る。場合によっては、一つのソース・タームモデルがベンチマーク比較で使われる第二のコードに含まれていないパラメータまたはプロセスを使う場合すらあり得る。ベンチマークされたソース・タームコードの間では、100の係数によるピーク放出率の違いは「一致」と見なされている。２桁以下の違いであれば、「優秀な一致」と見なすべきである。複雑なアクチニド・システムの場合は、特にそれが言える。

一つのアクチニド崩壊連鎖の結果を比較する場合は、特に注意を要する。これは一つのアクチニド崩壊連鎖の中のアメリシウム、プルトニウム、ウラニウム、トリウムの同位元素は半減期の異なる他の三つのアクチニド崩壊連鎖の同位元素と「共有元素溶解限度」の拘束に入るのが普通だからである。四つの異なる崩壊連鎖、共有元素溶解、および同じ元素でも半減期の異なる同位元素の組合せが、極端に複雑な、直観に反した放出率挙動の原因となり得る〔Worgan and Apted (1992) を参照のこと〕。

D.4.1　K－Iからの入力データ

2693個のキャニスターを収納するHLWガラス固化体処分場を対象とするK－Iのソース・ターム計算に含まれる放射性核種のインベントリと半減期は、本文表6に示した。下記の付・図-8はEBSシステム・パラメータの根拠となったEBSの概略図である。

MENTORのベンチマーク計算で使われるK－Iに基づく人工バリアシステム（EBS）のパラメータ（「基本ケース」の数値）も、表7(1)に示した。



付・図-8　K－Iモデルの人工バリアシステム［Nagra, 1994より］

Ｋ－Ｉから得たいくつかのパラメータを組み合わせてハイブリッド（または合成）パラメータを作り、それをMENTORで使っている場合もある（例えば、溶解されるＨＬＷガラス固化体の表面積、分子拡散係数）。Ｋ－Ｉから取り、MENTORで使用した元素溶解／吸着係数に関する放射化学データは表７(3)に示されている。表７(2)はＫ－Ｉから取り、MENTORで使用した、破砕岩石を通る地下水の流量／移行パラメータをリストアップしている。帯水層、井戸、生物圏に関するデータはＥＢＳからの放出率の計算とは基本的に無関係であり、どんな妥当な数値でも使用できる。ＥＢＳからの放出の計算はＫ－Ｉの分析では独立して行われ、地質圏に関する対比可能な放出データはＫ－Ｉでは報告されていないので、ベンチマーク比較はＥＢＳからの放出の比較だけに限定される。

D.4.2　MENTORの結果とＫ－Ｉの結果のベンチマーク比較

以下の付・図-9 ～付・図-13はモル／年による計算上の放出率を、Ｋ－Ｉの場合と上記D.4.1項及び第１章で説明したＫ－ＩのデータセットによるMENTORコードの場合について比較したものである。図の説明にはＫ－Ｉ報告書の該当するページも記してある。データポイントの数は計算によって異なるので、Ｋ－ＩとMENTORの結果を比較する場合、ピーク放出率の位置の若干のずれと放出率曲線の急激な変化があり得ることに注意したい。

Ｋ－Ｉの場合、ＥＢＳ放出計算は地質圏移行計算から切り離されている。地質圏移行モデルへＥＢＳ流束データを入力しやすくするために、ＥＢＳモデルは処分場内部の地下水流量状況を表す混合セル境界条件を使っている。MENTORの場合、ＥＢＳと地質圏は完全に連結されている。従って、Ｋ－Ｉの分析で使われたこの混合セル境界条件をシミュレートするために、廃棄物包装システム周辺の「乱された岩石地帯」を使っている。この地帯の流量パラメータはＫ－Ｉ報告書で指定された処分場流量状況を表すように設定された。その結果、ＥＢＳからの放出はＫ－Ｉ報告書で指定されるベントナイトと岩石のインターフェースではなく、この「乱された岩石地帯」の終点における放出と見なされる。この追加の「地帯」および（Ｋ－Ｉ報告書で規定されていない）この地帯の間隙率に関する不確実性が、MENTORとＫ－Ｉ報告書におけるＥＢＳからの放出に若干の差異が出る主要な原因となる。ＥＢＳにおける流束の差異のもう一つの原因は廃棄物本体の溶解モ

デルの差で、K－Iの場合、廃棄物本体の溶解は等価球体を使ってモデル化しており、冷却の際の破砕による表面積の増加を容認している。この表面積の増加は、このベンチマーク計算では考慮されていない。

付・図-9(1)は核分裂と放射化による生成物の放出率グラフを示している。K－IとMENTORの計算によるPd－107、Sn－126およびCs－135を対象とする付・図-9(1)上下を比較願いたい。同一放射性核種の曲線の形状と絶対値は「良好～優秀」と言える程度に一致している。例えば、K－Iの計算によるCs－135の曲線は0.03モル／年のピーク放出率が10万年後になっているが、MENTORを使った計算では0.03モル／年のピーク放出率が～18万年後となっている。K－IではSn－126のピーク放出率～1×10^{-5}モル／年が10,500年後と予測されているが、MENTORの計算では、～20,000年後に1×10^{-5}モル／年と予測されている。また、K－IとMENTORの計算によるNi－59，Zr－93，Se－79およびTc－99を対象とする付・図-9(2)上下を比較しても、放出曲線の形状が「優秀な」一致を示している。いずれの場合も、ピーク放出時間はMENTORの方が若干長くなっているが、これはMENTOR計算の場合追加の「バリア」（即ち、乱された岩石地帯）があるためと思われる。

付・図-10は4N＋1アクチニド核種連鎖の放出率曲線を示している。長寿命のNp－237同位元素の短寿命の先行核は、10^{-10}モル／年未満の比率でしかEBSから放出されないため、図には示されていない。この場合も付・図-10に示すK－IとMENTORの計算で形状と絶対値がよく合っていることに注目したい。例えば、Np-237の放出率は10^{7}年でいずれの場合も1.3×10^{-7}であり、いずれの場合も放出曲線がこの時点でまだ上昇すると予測している。核分裂生成物の場合と同様に、放出の開始はMENTORの方がK－Iの場合より若干遅れている。

付・図-11に示す4N＋2アクチニド連鎖の放出率曲線も良好に一致している。曲線は極めてよく似ているが、付・図-11下に示すMENTORの放出率曲線は同図上に示すK－Iの結果より若干遅れている。ピーク放出率は、K－Iの場合より約2～3倍低いRa－226を除けば、よく一致している。Ra－226の場合は、二つのコードの間で初期インベントリの計算または崩壊連鎖の取扱に差異があったためと思われる。それでも、両者の曲線は優秀な一致を示していると判断される。

4N＋3アクチニド崩壊連鎖の放出率曲線は付・図-12に示されている。ここでも同図下に示すMENTOR放出率曲線は、同図上に示すK－Iの計算より若干遅れて

いるが、曲線の形状と数値は優秀な一致を示している。Pu－239のピーク放出率はMENTORの結果の方が約２桁分だけ低くなっているが、10^7年におけるＵ－235とPa－231の放出率は両者が全く同一となっている。

最後に４Ｎアクチニド崩壊連鎖の放出率曲線を付・図-13に示す。他の全てのアクチニド崩壊連鎖の場合と同様に、Ｕ－236とTh－232の曲線はMENTORの結果（同図下）の方がＫ－Ｉの結果（同図上）に比べて若干遅れている。しかし、曲線の形状とピーク放出率は両者の間で優秀な一致を示している。

D.4.3　要約的コメント

安全性に関係ある放射性核種の放出率曲線は、Ｋ－Ｉから得られた入力パラメータからなる基本ケースに基づき、STRENGソース・タームコードを使って作成された（Nagra, 1994）。Ｋ－ＩとMENTORの結果をベンチマーク比較することにより、ＥＢＳからの放出について極めて良好な一致が確認された。定性的に見て、放出率曲線はほぼ同じ時間に同一の傾向と勾配変化を示している。定量的に見て、MENTORの放出率曲線はＫ－Ｉの場合に比べて一様に若干遅れているが、ピーク放出率の数値は両者の間で基本的に一致する。ピーク放出時間の若干のずれは、両コードの概念化および／または想定の違いに起因するものである。

もっと信憑性の高い分析をするためには、MENTORコードとSTRENGコードにおける概念モデルと数学モデルを詳細に評価する必要がある。特に、MENTORはニアフィールドの性能と地質圏流量モデルを明確に関連づけているのに対して、STRENGは混合セル境界条件だけを使用している。MENTORの概念モデルには、システム境界条件をＥＢＳ・境界線における放出の評価と合わせ、火成岩貫入の計算ケースに関連して必要とされる地質圏の変分を許容するために、追加のバリア地帯も加えられた。もっと詳細なベンチマーク分析が望ましい場合は、Ｋ－Ｉ報告書で引用された放射性核種のインベントリの入力数値の不一致も調査する必要がある。これら注意事項を勘案しても、ここで報告されたベンチマーク計算は両コードの間で優秀な整合性と一致を示している。

D.5. 参考文献

Intera [1994], *MENTOR Version 2.1: A Computer Code for Assessing Disposal Options for TRU Wastes,* Intera Report IS3576-2, Version 2. Intera Information Technologies, Henley-on-Thames, UK.

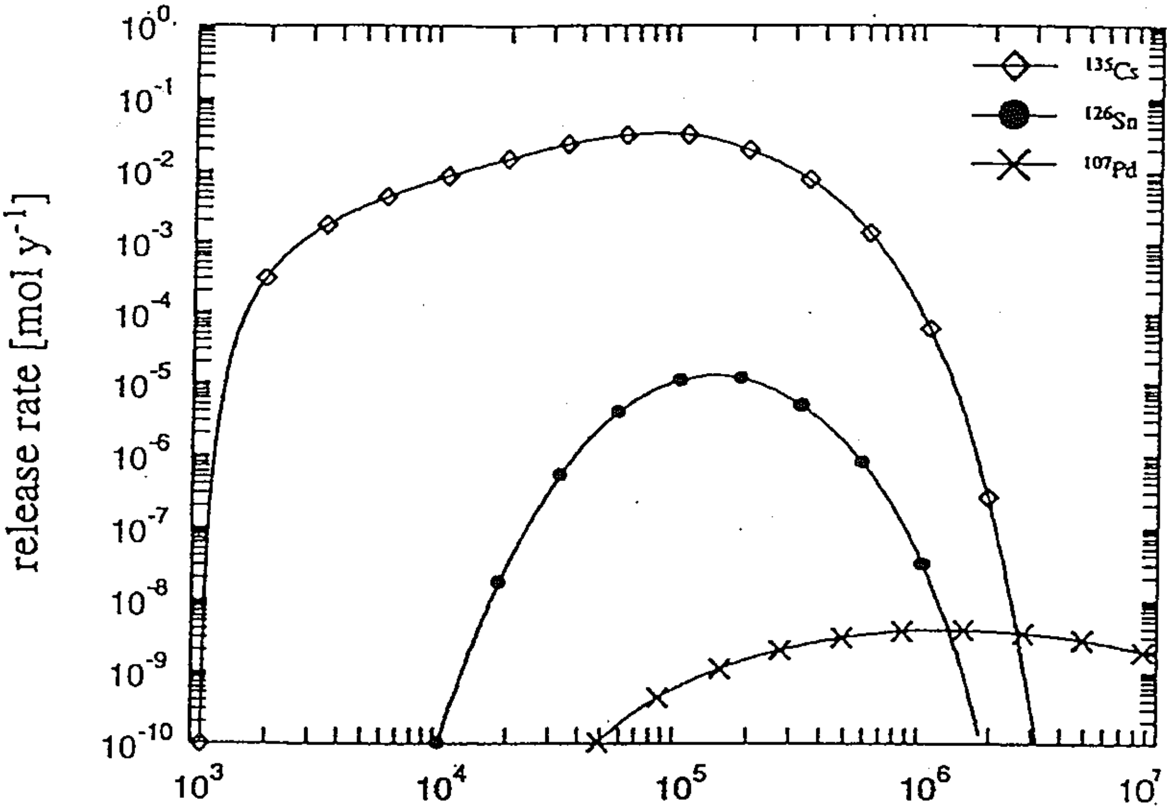
Maul, P. F., Cooper, N. S., and Robinson, P C. [1993], *MENTOR: A Prototype Computer Code for Assessing Disposal Options for TRU Wastes.* Intera Report IS 3576-1, Version 1. Intera Information Technologies, Henley-on-Thames, UK.

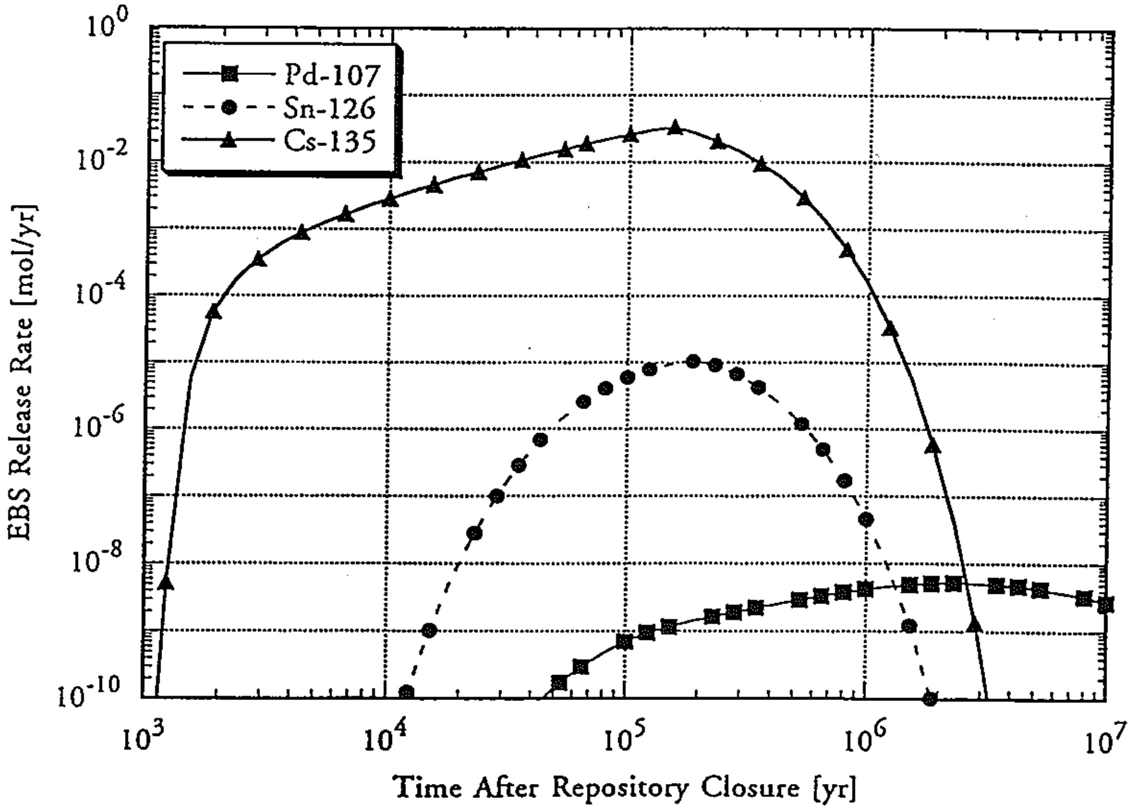
Nagra [1994], *Kristallin-I, Safety Assessment Report,* Nagra Technical Report 93-22, Nagra, Wettingen, Switzerland.

SKB [1992], *Final Disposal of Spent Nuclear Fuel: Importance of the Bedrock for Safety,* SKB Technical Report, 92-20, SKB, Stockholm, Sweden.

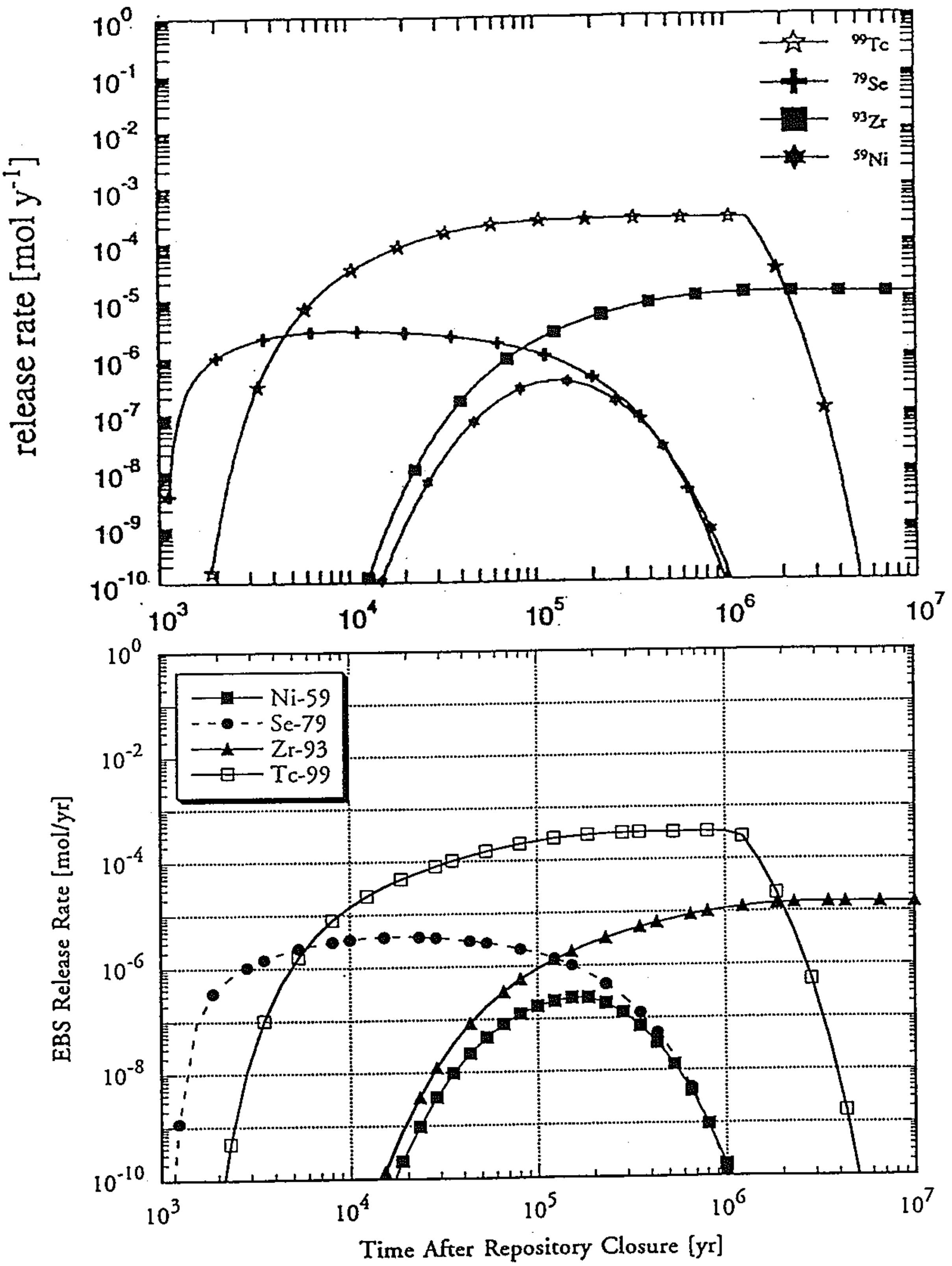
SKB [1992b], Elert, M., Neretnieks, I., Kjellbert, N. And A. Ström, *Description of the Transport Mechanisms and Pathways in the Far-Field of a KBS-3 Type Repository,* SKB Technical Report 92-09, SKB, Stockholm, Sweden.

Worgan, K. And M Apted [1992], "The Effect of Precipitation Fronts Induced by Radionuclide Chain Decay and Elemental Solubility Limits on Near-Field Mass Transport," in *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XV,* ed. C. Sombret, Mat. Res. Soc., Pittsburgh, PA, pp. 705-712.

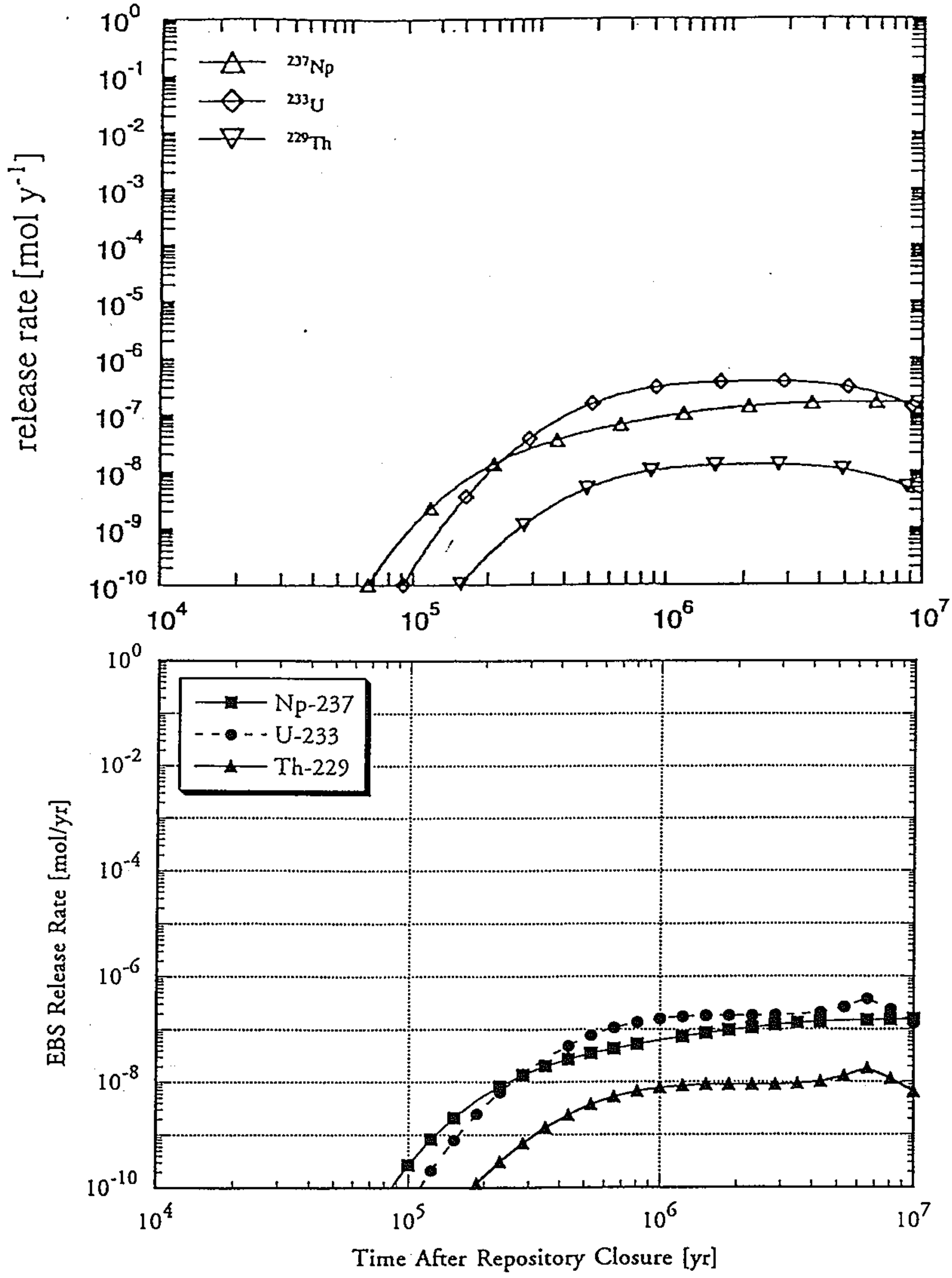




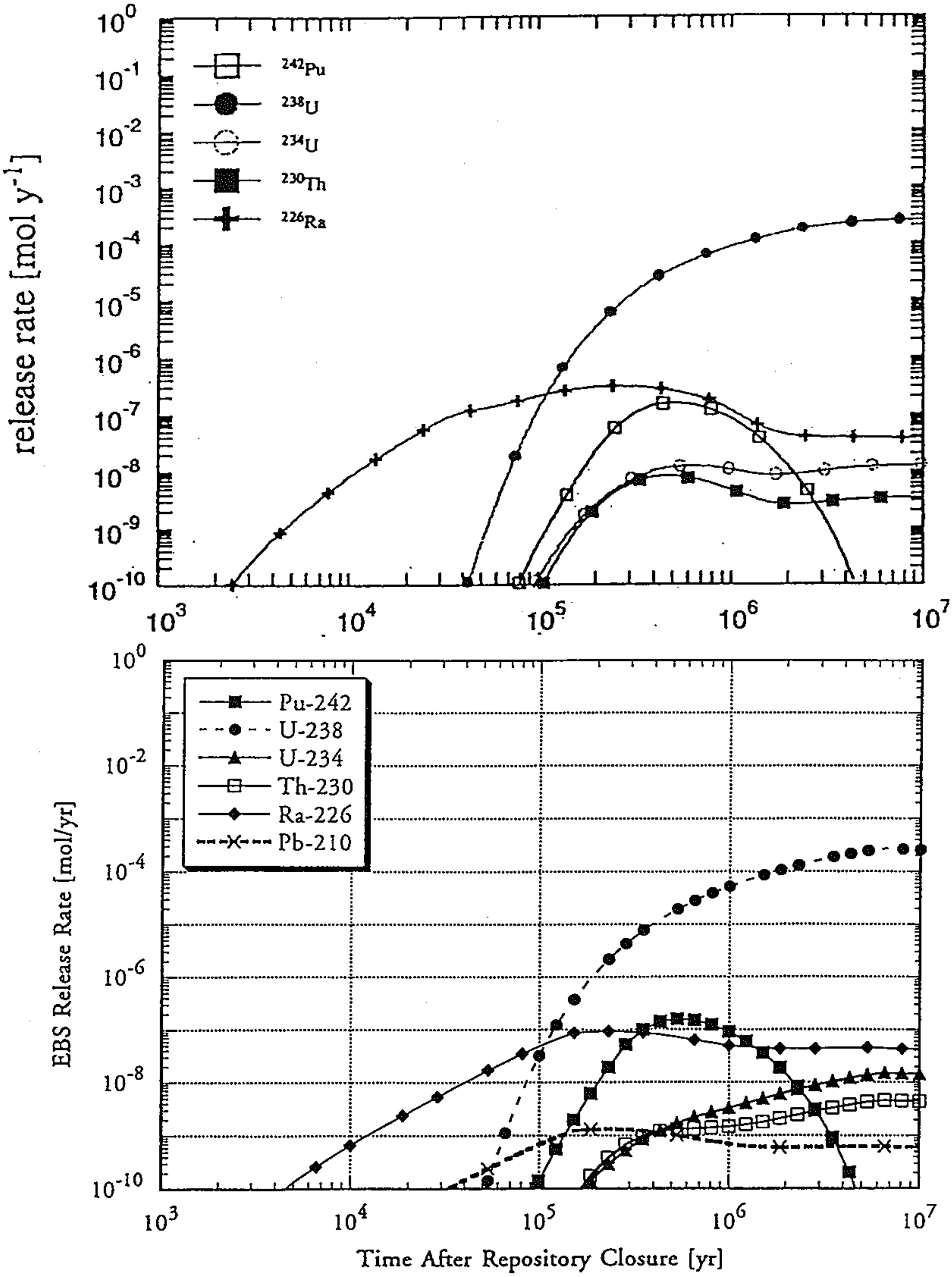
付・図-9(1)　放射性核種^{107}Pd，^{135}Cs，^{126}Snの放出率
(上：K－I［p.198，Nagra，1994より］、下：MENTOR)



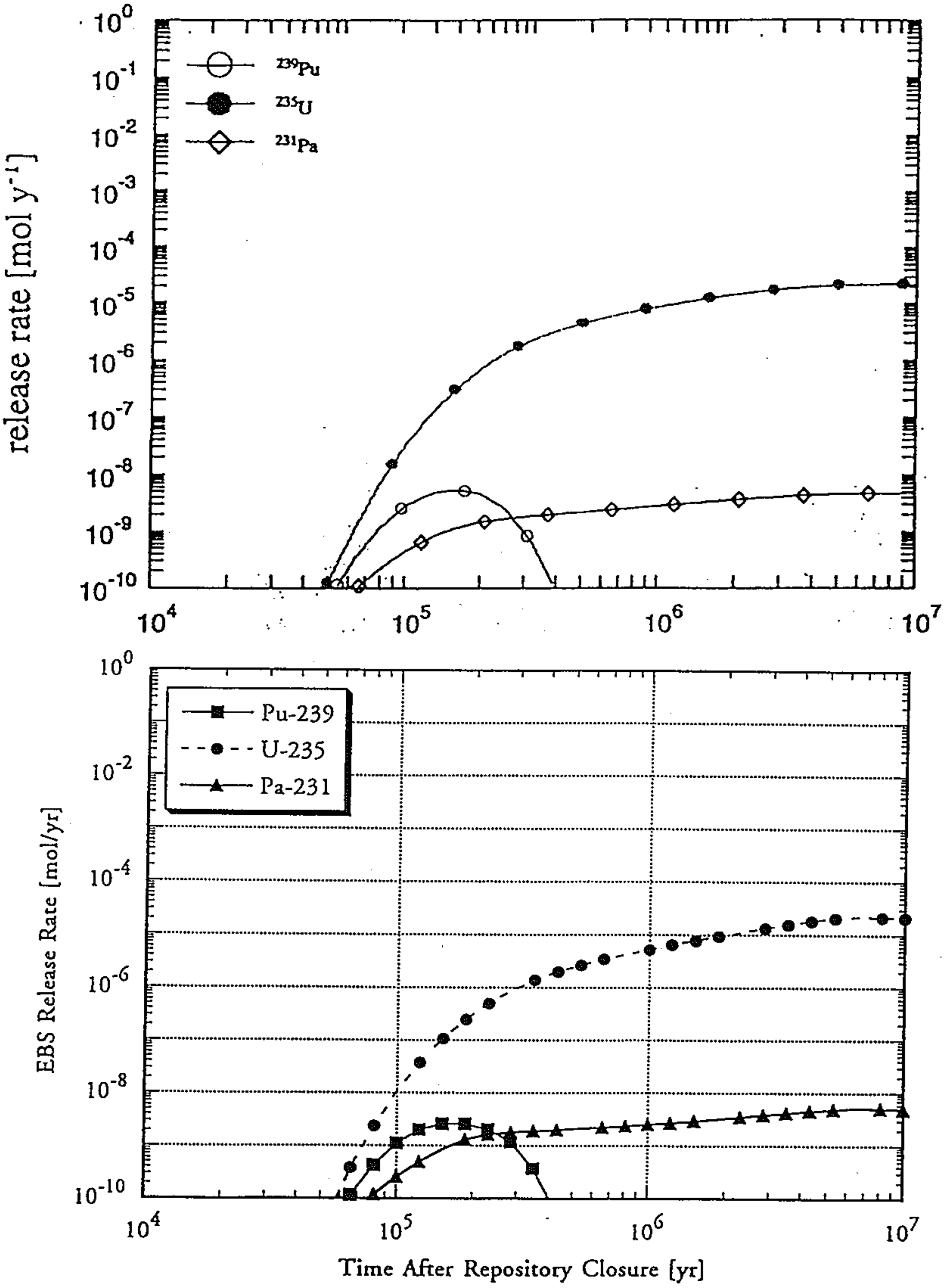
付・図-9(2)　放射性核種^{59}Ni, ^{93}Zr, ^{79}Se, ^{99}Teの放出率
(上：K－I [p.198, Nagra, 1994より]、下：MENTOR)



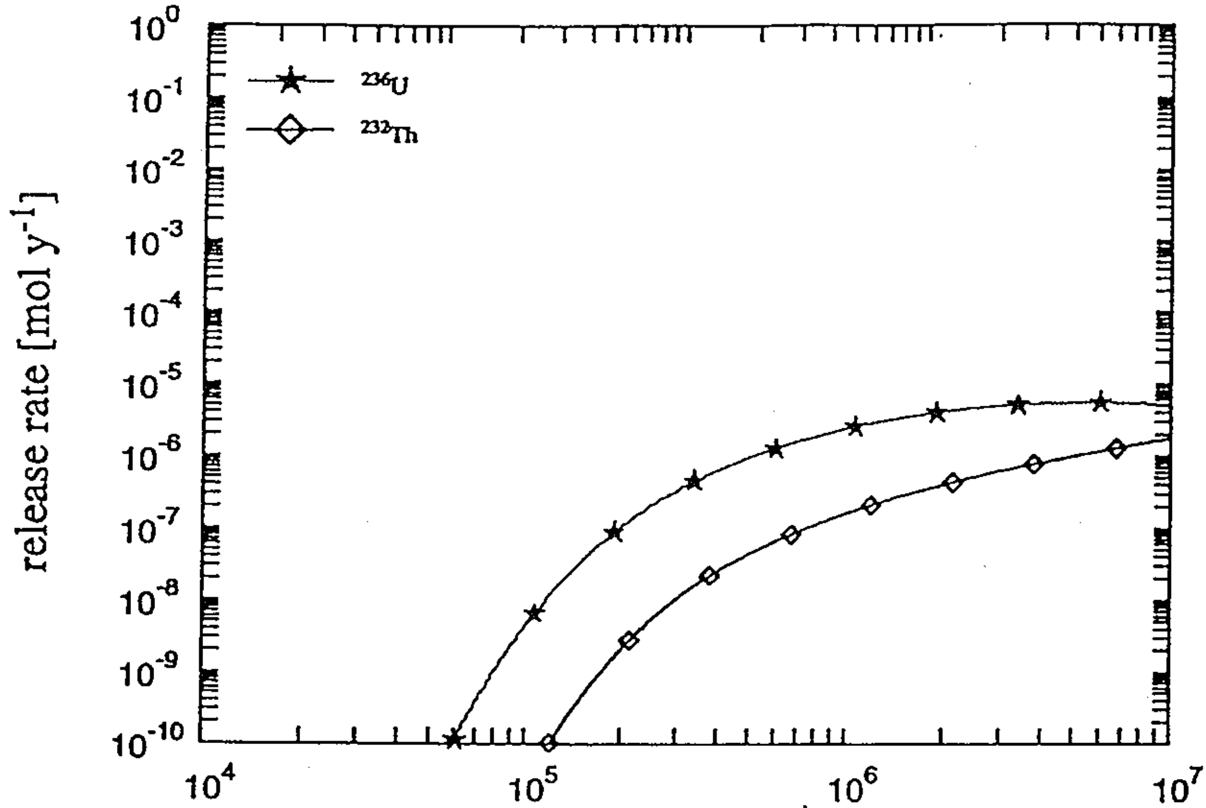
付・図-10　アクチニド崩壊連鎖４Ｎ＋１系列の放射性核種の放出率
（上：Ｋ－Ｉ［p.199, Nagra, 1994より］、下：MENTOR）

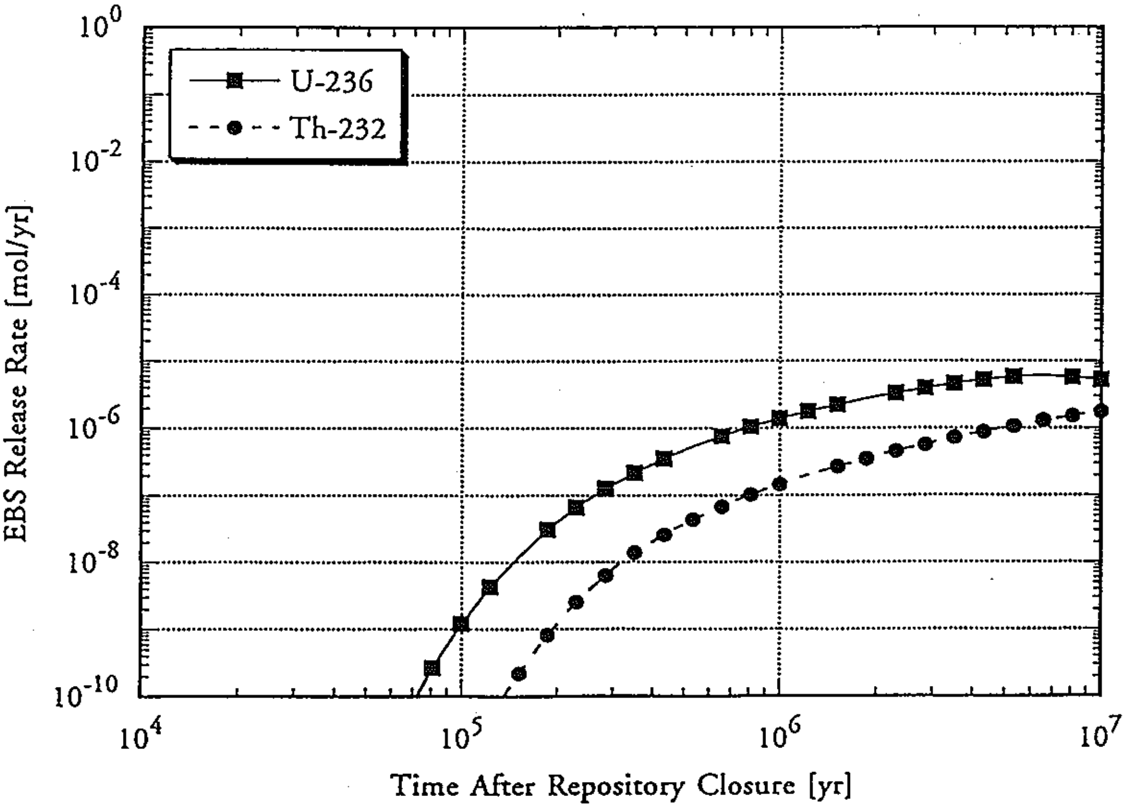


付・図-11　アクチニド崩壊連鎖４Ｎ＋２系列の放射性核種の放出率
（上：Ｋ－Ｉ［p.199, Nagra, 1994より］、下：MENTOR)



付・図-12　アクチニド崩壊連鎖４Ｎ＋３系列の放射性核種の放出率
（上：Ｋ－Ｉ［p.200, Nagra, 1994より］、下：MENTOR）





付・図-13　アクチニド崩壊連鎖４Ｎ系列の放射性核種の放出率
（上：Ｋ－Ｉ［p.200, Nagra, 1994より］、下：MENTOR）

E．放物型偏微分方程式の解について

付録Bでは、$t \to \infty$近傍の微分方程式の解特性に関するLaplace変換適用の概略的検討を示したが、前年度調査(4)(6)の各FEP連鎖関連の数学モデルを見ると、より一般的には時間$t \in (0, \infty)$及びm次元空間領域Dにおける放物型偏微分方程式系で記述されるモデルを検討対象とすることが多いと考えられる。

そこで、ここでは放物型偏微分方程式の解析解導出に必要な基礎的情報を以下に整理した。

Dを$\mathbf{R}^m$中の有界領域、Sをその境界とするとき、

非斉次放物型方程式

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = A u(t,x) + f(t,x) \quad \text{on} \quad (0,\infty)\times D$$

$$A \equiv \Delta - q(x) \qquad \text{(E 1)}$$

・初期条件

$$\lim_{t\to 0} u(t,x) = u_0(x) \qquad \text{(E 2)}$$

・境界条件

$$\alpha(\xi) u(t,\xi) + \{1-\alpha(\xi)\} \frac{\partial u(t,\xi)}{\partial n} = \phi(t,\xi)$$

$$\text{on} \quad (0,\infty)\times S \qquad \text{(E 3)}$$

の解$u(t,x)$ on $(t,x)\in(0,\infty)\times D$は、基本解*$U(t,x,y)$を使って、次のようにユニークに決定できる(85)。

$$u(t,x) = \int_D U(t,x,y)\,u_0(y)\,dy$$
$$+ \int_0^t d\tau \int_D U(t-\tau,x,y)\,f(\tau,y)\,dy$$
$$+ \int_0^t d\tau \int_S \left\{U(t-\tau,x,\xi) - \frac{\partial U(t-\tau,x,\xi)}{\partial n_\xi}\right\} \phi(\tau,\xi)\,dS_\xi \qquad \text{(E 4)}$$

＊基本解の例

ここでは、（E 1）式において$A\equiv\Delta$（すなわち$q(x)\equiv 0$）の場合を、いろいろの領域Dで考える。以下の各例の中では

$$K(t,x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \exp\{-x^2/(4t)\} \qquad (t>0,\ -\infty<x<\infty)$$

とする。

A）<u>D＝（－∞，∞）（直線全体）の場合</u>は、基本解は

$$U(t,x,y)=K(t,x-y)$$

で与えられる。（この場合はDの境界はないから、境界条件は考えない）。

B）<u>D＝（0，∞）（半直線）の場合</u>は、x＝0における境界条件が；

i）　u＝0ならば

$$U(t,x,y)=K(t,x-y)-K(t,x+y);$$

ii）∂u／∂x＝0ならば

$$U(t,x,y)=K(t,x-y)+K(t,x+y);$$

iii）αu－（1－α）∂u／∂x＝0[1]（αは0＜α＜1なる定数）ならば

$$U(t,x,y)=K(t,x-y)+K(t,x+y)$$
$$-\{2\alpha/(1-\alpha)\}\exp\{(\alpha y)/(1-\alpha)\}\cdot$$
$$\int_{-\infty}^{-y}\exp\{(\alpha z)/(1-\alpha)\}K(t,x-z)\,dz$$ [2]

C）<u>D＝（0，a）（有限区間）の場合</u>は、境界（x＝0およびx＝a）の上での境界条件が；

i）　u＝0ならば

$$U(t,x,y)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\{K(t,x-y+2na)-K(t,x+y+2na)\}$$
$$=\frac{1}{2\sqrt{\pi t}}\sum_{n=-\infty}^{\infty}[\exp\{-(x-y+2na)^2/(4t)\}$$
$$-\exp\{-(x+y+2na)^2/(4t)\}];$$

ii）∂u／∂n＝0ならば

$$U(t,x,y)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\{K(t,x-y+2na)+K(t,x+y+2na)\}$$
$$=\frac{1}{2\sqrt{\pi t}}\sum_{n=-\infty}^{\infty}[\exp\{-(x-y+2na)^2/(4t)\}$$
$$+\exp\{-(x+y+2na)^2/(4t)\}];$$

1）D＝（0，∞）の境界x＝0における外向きの微分∂u／∂nは－∂u／∂xである。

2）この式でα→0とすればii）のU（t，x，y）になることは明らかである；またα→1とするとi）のU（t，x，y）に近づくことも証明できる。

A')<u>$D=\mathbf{R}^m$（m次元空間全体）の場合</u>は（$x=(x_1,\cdots,x_m)\in\mathbf{R}^m$に対して$|x|^2=x_1^2+\cdots+x_m^2$として）

$$U(t,x,y)=\frac{1}{(2\sqrt{\pi t})^m}\exp\{-|x-y|^2/(4t)\}$$

これは、A)の１次元の場合の基本解の積になっている。次のB')，C')についても同じである。但し、このようになるのは、領域が直積の形であってA＝Δの場合に限ることに注意。

B')<u>$D=(0,\infty)\times\cdots\times(0,\infty)$（m個の半直線の直積）</u>とし、境界上で$u=0$なる境界条件を与えた場合は

$$U(t,x,y)=\frac{1}{(2\sqrt{\pi t})^m}\prod_{j=1}^{m}[\exp\{-(x_j-y_j)^2/(4t)\}-\exp\{-(x_j+y_j)^2/(4t)\}]$$

これはB)のi)に対応するものである。B)のii),iii)に対応するものも同様に書ける。

C')<u>$D=(0,a_1)\times\cdots\times(0,a_m)$（m次元の直方体）</u>とし、境界上で$u=0$なる境界条件を与えた場合は

$$U(t,x,y)=\frac{1}{(2\sqrt{\pi t})^m}\prod_{j=1}^{m}\sum_{n=-\infty}^{\infty}[\exp\{-(x_j-y_j+2na_j)^2/(4t)\}-\exp\{-(x_j+y_j+2na_j)^2/(4t)\}]$$

D)<u>$D=\{x=(x_1,x_2);\ x_1^2+x_2^2<c^2\}$（平面上の半径cの円；$c>0$）</u>とし、境界上で$u=0$なる境界条件を与えた場合。極座標$(r,\theta)$を導入すれば、基本解$U(t,x,y)$において$x=(r,\theta)$，$y=(r',\theta')$とするとき

$$U(t,x,y)=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\pi c^2J_1(\alpha_{0k}c)^2}J_0(\alpha_{0k}r)J_0(\alpha_{0k}r')\exp(-\alpha_{0k}^2t)+\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2}{\pi c^2J_{n+1}(\alpha_{nk}c)^2}J_n(\alpha_{nk}r)J_n(\alpha_{nk}r')\cdot\cos n(\theta-\theta')\exp(-\alpha_{nk}^2t),$$

但し、$n=0,1,2,\cdots$に対して、$\alpha_{nk}(k=1,2,\cdots)$は、$J_n(\alpha c)=0$の根$\alpha$の値である。