

地層処分システム隔離性能に対する 天然事象影響の定量化

— 地下水シナリオに対する天然事象の影響 —

(核燃料サイクル開発機構 研究概要)

1999年2月

株式会社 三菱総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

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

1999

地層処分システム隔離性能に対する 天然事象影響の定量化

— 地下水シナリオに対する天然事象の影響 —

大久保博生*

要 旨

本年度は、まず、地震・断層、隆起・侵食、気候変動及び人間活動の各シナリオについて、各天然事象が核種移行に及ぼす影響を概略的に評価した前年度の基本ケースに対し、本年度は、基本ケースとは異なる影響のパターンを取り扱うための変動ケースを検討・設定し、その影響解析・評価を行った。

次に、以上の検討結果を踏まえて、火成活動、地震・断層、隆起・侵食、気候変動といった天然事象の組み合わせによる複合的な影響について、その重要性、解析フレームの設定の検討並びに概略的評価を行った。

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：2000年レポートチーム 研究調整グループ

*株式会社 三菱総合研究所

Quantitative Assessment of Consequences of Natural Events
for the Performance of Waste Disposal Isolation System
- On Consequences of Natural Events in Groundwater Scenario -

Hiroo Ohkubo*

Abstract

This year, first, on seismicity and faulting, uplift and erosion, climate change and human activity (intrusion) scenarios, while effects of those scenarios were primarily evaluated in reference cases last year, variant cases with another kind of patterns of models and parameters compared to reference cases, have been studied and set, and their effects have been analyzed and evaluated.

Secondly, referring to the results of the above discussions, a preliminary study was made to evaluate the complex effect caused by combining natural events such as volcanism, seismicity and faulting, uplift and erosion and climate change, where discussions have been made on which combined scenario was more important and how to set the analysis framework.

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : R&D Coordination Group, Geological Isolation Research Project

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 変動ケース計算の背景	3
2.1 計算の前提	3
2.2 ベンチマークケース（ベースケース再計算）	4
2.2.1 計算ケース設定	4
2.2.2 計算結果	5
3. 影響を受ける処分場 PSM 上の FEP	8
4. 火山活動シナリオ	10
4.1 処分場境界条件の変化	10
4.2 岩脈貫入がないケース	10
4.2.1 計算ケース設定	10
4.2.2 計算結果	11
4.3 岩脈貫入があるケース	15
4.3.1 岩脈貫入計算ケースの設定	15
4.3.2 計算結果	16
5. 地震・断層シナリオ	19
5.1 処分場境界条件の変化	19
5.2 計算ケース設定	19
5.2.1 予備的検討	19
5.2.2 MESHNOTE-TIGER 計算ケース	21
5.3 計算結果	22
6. 隆起・侵食シナリオ	26
6.1 処分場境界条件の変化	26
6.2 計算ケース設定	27
6.2.1 予備的検討	27

6.2.2	MESHNOTE-TIGER 計算ケース	28
6.3	計算結果	30
7.	気候変動／複合的シナリオ	35
7.1	処分場境界条件の変化	35
7.2	計算ケース設定	36
7.2.1	予備的検討	36
7.2.2	MESHNOTE-TIGER 計算ケース	37
7.3	計算結果	38
8.	人間活動シナリオ	42
8.1	処分場境界条件の変化	42
8.2	基本ケースと変動ケース	42
8.3	変動ケースの計算結果	43
9.	まとめ	44
9.1	岩脈貫入ケース以外の検討結果	44
9.2	岩脈貫入ケースの検討結果	45
10.	おわりに	47
	参考文献	49

表 目 次

	頁
表 1-1 研究スケジュール	2
表 4-1 火山活動シナリオのケース（岩脈貫入なし）再設定の要約	12
表 4-2 火山活動シナリオ変動ケース（岩脈貫入あり）計算における パラメータ変化のまとめ	16
表 5-1 地震・断層シナリオのケース再設定の要約	22
表 6-1 隆起・侵食シナリオのケース再設定の要約	29
表 7-1 複合的シナリオのケース設定の要約	39

目 次

	頁
図 1-1 JNC 殿 H12 レポートのための各シナリオの プロセス・システム・モデル分析におけるステップの流れ図	2
図 2-1 ベンチマークケースの概念図	4
図 2-2(1) ベンチマークケース(FRHP)計算結果： 全線量率曲線（単体廃棄物パッケージ）	5
図 2-2(2) ベンチマークケース(SRHP)計算結果： 全線量率曲線（単体廃棄物パッケージ）	7
図 2-2(3) ベンチマークケース(FRHP/SRHP)の比較： 全線量率，全 FP 及びアクチニド系列別の線量率曲線 （単体廃棄物パッケージ）	7
図 3-1 JNC 殿作成の処分場 NF のプロセス・インフルエンス・ ダイヤグラム (PID)	9
図 4-1 火山活動シナリオ基本ケース／変動ケース （岩脈貫入なし）の概略図	12
図 4-2(1) 火山活動シナリオ基本ケース（岩脈貫入なし） 再計算結果（イライト化発生ケース）： 全線量率曲線（単体廃棄物パッケージ）	13
図 4-2(2) 火山活動シナリオ変動ケース（岩脈貫入なし） 再計算結果（イライト化なしケース）： 全線量率曲線（単体廃棄物パッケージ）	13
図 4-3(1) 単一岩脈貫入シナリオにおける単体廃棄物パッケージからの 放射性核種線量率	17
図 4-3(2) 単一岩脈貫入シナリオにおける全線量率への主要な寄与核種と その線量率（線形時間スケール）	17
図 5-1 地震・断層シナリオ基本ケース／変動ケースの概略図	20
図 5-2(1) 地震・断層シナリオ基本ケース再計算結果（50m）： 全線量率曲線（単体廃棄物パッケージ）	23

図 5-2(2)	地震・断層シナリオ変動ケース再計算結果 (10m) :	
	全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)	25
図 5-2(3)	地震・断層シナリオ基本ケース/変動ケース再計算結果	
	(50m/10m) の比較: 全線量率, 全 FP 及びアクチニド系列別の	
	線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)	25
図 6-1	隆起・侵食シナリオ基本ケース/変動ケースの概略図	27
図 6-2(1)	隆起・侵食シナリオ基本ケース再計算結果 :	
	全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)	31
図 6-2(2)	隆起・侵食シナリオ変動ケース再計算結果 :	
	全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)	34
図 7-1	気候変動シナリオ基本ケースの概略図	36
図 7-2(1)	複合的シナリオ計算結果 :	
	4n+2 系列線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)	40
図 7-2(2)	複合的シナリオ計算結果 :	
	全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)	41
図 8-1	人間侵入シナリオ基本ケース/変動ケースの概略図	43
図 9-1	岩脈貫入ケース以外の全シナリオ変動ケース計算結果の比較 :	
	全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)	46

1. はじめに

地層処分システムの性能評価上考慮される地下水シナリオ（地下水を媒体として核種が地層中を移行するシナリオ）に関して、シナリオに多様性と不確実性を与える天然事象（火成活動、地震・断層活動等）の影響を評価することは重要である。

本研究の目的は、地下水シナリオにおいて、これら天然事象を考慮したシナリオを具体的に検討、作成すること、およびそのシナリオに基づく地層処分システムの定量的評価を行うための手法を検討することである。

発生頻度が稀な火成活動、地震活動、断層活動等の天然事象は、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に多様性と不確実性を与える。この地下水シナリオに対する天然事象の影響を評価するために、本研究では、天然事象が発生する場と放射性核種の移行の場との間に便宜的な境界を設定する。そして、天然事象を発端事象として起こる様々な影響をその境界における境界条件（水理学、力学、熱学、化学に関するパラメータ）の変化に置き換え、それら境界条件の変化を考慮した核種移行解析を行うことにより、地下水シナリオに対する天然事象の影響を評価し、さらに、地層処分システムの隔離性能に与える影響を評価する。

本研究ではシナリオ分析へのアプローチ法として「プロセス・システム・モデル」（以下、PSMと略記）を採用している（図1-1参照）。

これまでに「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）～（VI）」（MRI, 1993～1998）^{(17)～(22)}として表1-1に示す研究を行ってきた。

本年度は、これまでに得られた成果・知見を踏まえ、地下水シナリオに対する天然事象の影響の定量化のために、地震・断層、隆起・侵食、気候変動および人間活動について、前年度検討した例示的な影響パターン（基本ケース）とは異なる影響のパターンを取り扱うための解析フレームの拡充および評価を行う。また、以上の成果を踏まえて、火成活動、地震・断層、隆起・侵食、気候変動といった天然事象の組合せによる複合的な影響に関する検討を行う。これらの成果を地層処分研究開発の第2次取りまとめ（以下、H12レポート）に反映する。

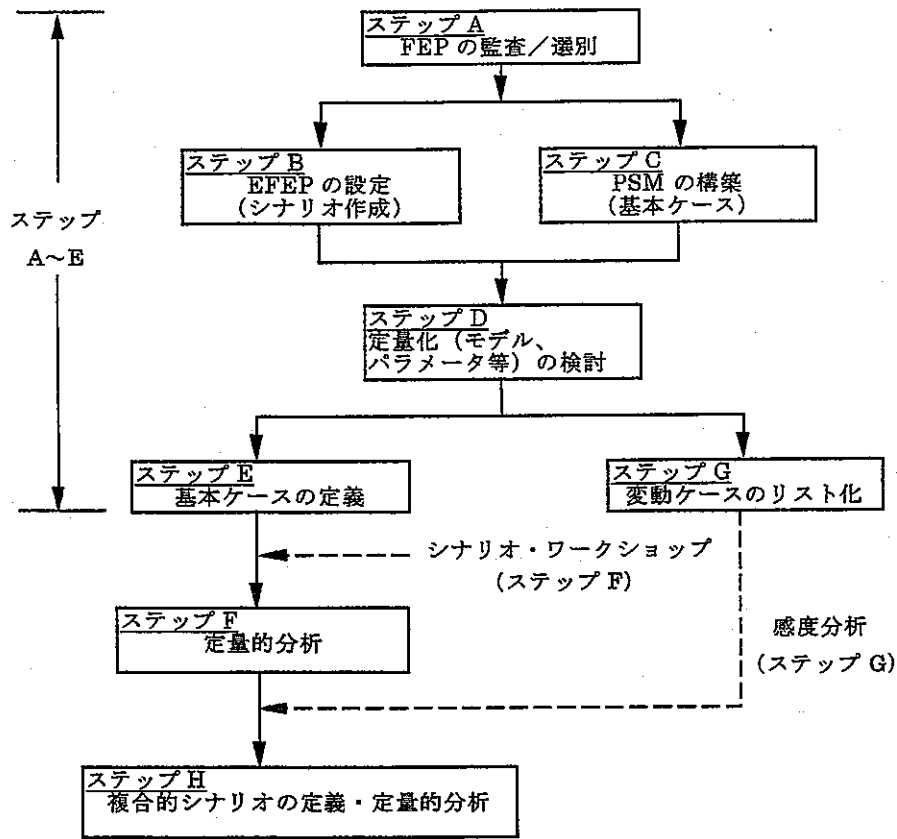


図 1-1 JNC 殿 H12 レポートのための各シナリオの
プロセス・システム・モデル分析におけるステップの流れ図

表 1-1 研究スケジュール

研究項目	火成活動	地震・断層	隆起・侵食	気候変動	人間活動
A 地下水シナリオにおける FEP ^{*1} の監査・選別	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み
B EFEP ^{*2} の設定と関連する現象等の調査	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み
C 天然事象に起因する影響の伝搬に関する概念モデル ^{*3} の検討	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み
D 概念モデルの定量化のための個別モデルやパラメータの調査・検討	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み
E 影響評価の基本フレーム（基本ケース）の検討	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み
F 基本ケースに対する解析フレームの設定・評価	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み	実施済み
G 基本ケース以外の影響パターン（変動ケース）に対する解析フレームの検討・設定・評価	実施済み	本年度実施分	本年度実施分	本年度実施分	本年度実施分
H 複合的な影響を考慮した解析フレームの設定・評価	本年度実施分（一部来年度継続）				

*1 : 特徴 (Features)、事象 (Events)、影響を及ぼす過程 (Processes) の略称

*2 : 天然事象と便宜的な境界の間で生ずる FEP (External FEP)

*3 : EFEP 連鎖内、FEP 連鎖内および両者間での便宜的な境界を介しての影響の伝搬を表す相関関係図

2. 変動ケース計算の背景

2.1 計算の前提

過去2ヵ年度の火山活動、地震・断層、隆起・侵食、気候変動、人間活動の各シナリオ基本ケースの研究では、NF性能評価に対して、MENTORコードが用いられた(MRI, 1997/1998) ⁽²¹⁾⁽²²⁾。

本研究では、各シナリオ毎に基本ケースを設定・解析・検討した後に、基本ケースとは異なる影響のパターンとして、まず変動ケースの検討を行う。これにより、個々のシナリオが核種移行に与える影響の幅を定量的に把握することが可能となる。

次に検討すべきシナリオとして、個々のシナリオを結合した複合的シナリオが指摘される(図1-1参照)。これは、地層処分システムに対して複合的に影響を及ぼし得るプロセス及びシナリオ起因事象を結合したシナリオである。従って、例えば地震・断層、気候変動、そして多分、隆起・侵食によって生ずる影響を結合した解析を行う上では、複雑な時間変化面を構築する必要がある。

そこで、環境条件の時間的な変化を考慮するシナリオの検討に対応でき、かつ、JNC殿のH12レポート作成にも効率的に寄与し得るため、MENTORコードベースの予備的検討に加え、これとほぼ同等の評価フレーム(データ整備、シナリオ計算ケース設定等)をMESHNOTE-TIGERコード体系(Robinson et al., 1992⁽³¹⁾; Robinson and Brown, 1998⁽³²⁾; Humm and Robinson, 1998⁽¹⁰⁾)に対して再検討することとなった。このため、まず、(各シナリオの計算ケースとの対比の基準となる)ベンチマークケースと、天然事象シナリオ(火成活動、地震・断層、隆起・侵食)の基本及び変動の各ケースを再計算した。次に気候変動シナリオと隆起・侵食シナリオを組み合わせた複合的シナリオの検討・解析を行い、各シナリオについての再計算ケースとの比較・検討を行った。

シナリオ計算で用いるベンチマークケース(図2-1参照)での主要なパラメータの初期値は、JNC殿提供のデータ(JNC, 1998) ⁽¹¹⁾に基づいて設定されている。

2.2 ベンチマークケース（ベースケース再計算）

2.2.1 計算ケース設定

ベンチマークケース（図 2-1 参照）では、処分場は将来も現状を維持する（即ち、パラメータは経時的に一定）とする。EBS と、水みちとなるやや鉛直に伸びた亀裂帯との間には、花崗岩又は堆積岩いずれも 100m の母岩からなる経路を想定する。周囲の地下水は、pH のやや高い還元性の淡水（FRHP）を想定する。

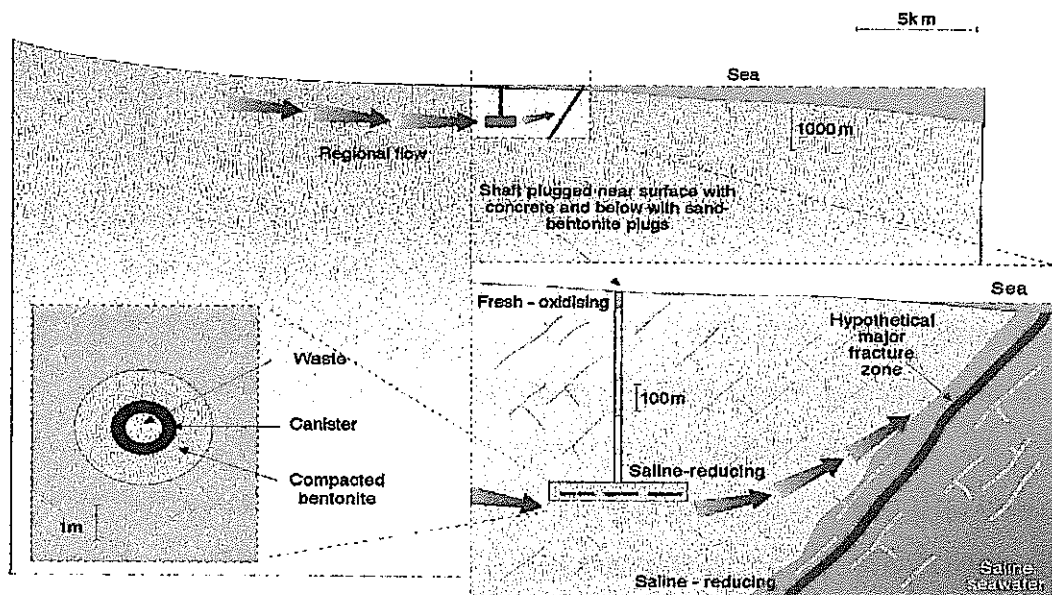


図 2-1 ベンチマークケースの概念図

ベンチマークケース及びそれに続く全てのシナリオについての計算ケースでは、単体の廃棄物パッケージに対して行われる。

処分場の想定深度は、花崗岩の処分場に対して 1000m である。

地下水化学に関して、ここではさらに次のような 3 つの異なる種類の地下水を設定する。

- (a) 浅い表層の天水を模擬したやや pH の高い酸化性の淡水（FOHP）
- (b) 海岸近くの海水の影響を受けた地下水を模擬したやや pH の高い還元性の塩水（SRHP）
- (c) マグマ水を模擬したやや pH の低い還元性の塩水（SRLP）

また、以下の計算では、農夫／農業従事者の生態圏での線量率寄与を表わすものとする。

2.2.2 計算結果

(1) FRHP ケース

図 2-2(1) には、ベンチマークケースの全ての放射性核種に対する全線量率曲線を示す。全線量率への寄与率の大きな核種は、初期が Se-79、中期が Cs-135 と Zr-93 で、長期には Th-229（とその他の $4n+1$ 系列の核種）となっている。

Se-79 は緩衝材には吸着されず、母岩にわずかししか吸着されないため、最初の 1 万年間の全線量率を支配する。Se-79 の溶解度が低いため、その後の Se-79 の放出量の増加は制限される。従って、1 万年後以降の全線量率は、Se よりもインベントリが大きく、可溶性であるが、緩衝材や母岩にはやや吸着される Cs-135 による支配を受ける。Cs-135 の線量率は 28 万年後にピーク値 5×10^{-9} mSv/y に到達する。Cs-135 の枯渇化の帰結として、全線量率曲線は 28 万年後以降、Cs-135 の放出低下とともに低下する。

次のピーク値は、Th-229 の放出による 1.4×10^6 年後以降の増加によるものである。ここで留意すべき点は、 1.2×10^6 年後から 1.4×10^6 年後の間の全線量率は、初期インベントリが大きく、中程度の溶解度と大きな分配係数をもつ Zr-93 による支配を受けることである。

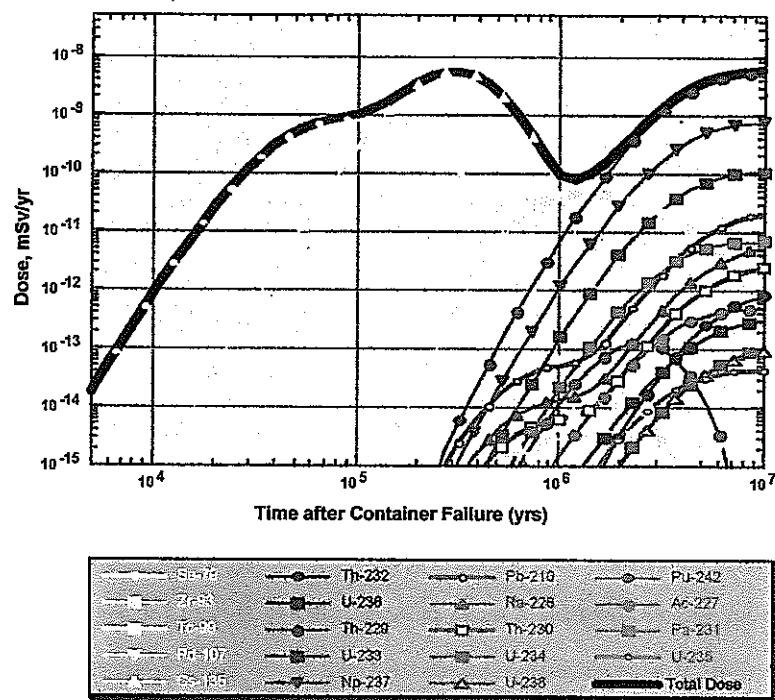


図 2-2(1) ベンチマークケース(FRHP)計算結果:
全線量率曲線(単体廃棄物パッケージ)

4n+1 崩壊連鎖系列で U や Np の下位核種である Th は、U や Np と同じ母岩への分配係数を持ち、生態圏まで到達する Th-229 の放射能は、親及びそのまた親核種である U-233 や Np-237 と本質的に同じである。これらの 3 核種の中で Th-229 の放出率 (Bq/y) から線量 (mSv/y) への換算係数が最も大きい (JNC, 1998) ⁽¹¹⁾ ため、Th-229 は、10⁶ 年後～10⁷ 年後の間の全線量率を支配する。4n+1 系列の次に、4n+2 系列の核種が続くが、その全線量率に占める寄与は図 2-2(1) に示すように相対的に低い。4n 系列、4n+3 系列の核種の全線量率への寄与はもっと低い量として計算される。

ベンチマークケースでは、最初の 10⁶ 年間での最大のピーク値は、30 万年後にあらわれる Cs-135 によって支配される 6×10⁻⁹mSv/y という値である。計算では、同程度のピーク線量率が 10⁷ 年後に Th-229 によってあらわれている。

(2) SRHP ケース

SRHP 地下水に対するベンチマークケースでは、FRHP ベンチマークケースと同様に、経時的に不変の (将来的に一定の) 状態が想定される。唯一異なる点は、想定される深部地下水の塩分が FRHP よりも大きい点である。これは、例えば、深部地下水が海水の影響を受ける海岸近くのサイトに対応するものである。図 2-2(2) に、全線量率曲線を示す。

全線量率曲線は、初期には、Se-79 よりも、Cs-135 により強く支配される。処分場閉鎖後 (10⁵～10⁶ 年後の) 中期には、Se-79 と後になって Zr-93 が線量率へ支配的寄与を与える。10⁶ 年後以降は、Th-229、並びに Np-237, U-233 が線量率に大きく寄与すると予期される。

SRHP ベンチマークケースをまとめると、最初の 10⁶ 年間の最大ピーク線量率は、9 万年後の Cs-135 の寄与による 3×10⁻⁸mSv/y であり、次のピーク線量率の 2×10⁻⁹mSv/y は、10⁷ 年後の Th-229 の寄与によるものと計算された。

図 2-2(3) は、FRHP, SRHP の両ベンチマークケースの線量率曲線を比較したものである。最も大きな違いは、SRHP ケースでの Cs-135 のより早期の急速な放出である。これは、Cs の緩衝材及び母岩への分配係数がいずれも SRHP 状態の方が FRHP 状態より小さくなっているためである。これらの相乗効果の結果として、SRHP ベンチマークケースのピーク線量率は、FRHP 計算ケースのピーク線量率より 5 倍大きくなっている。

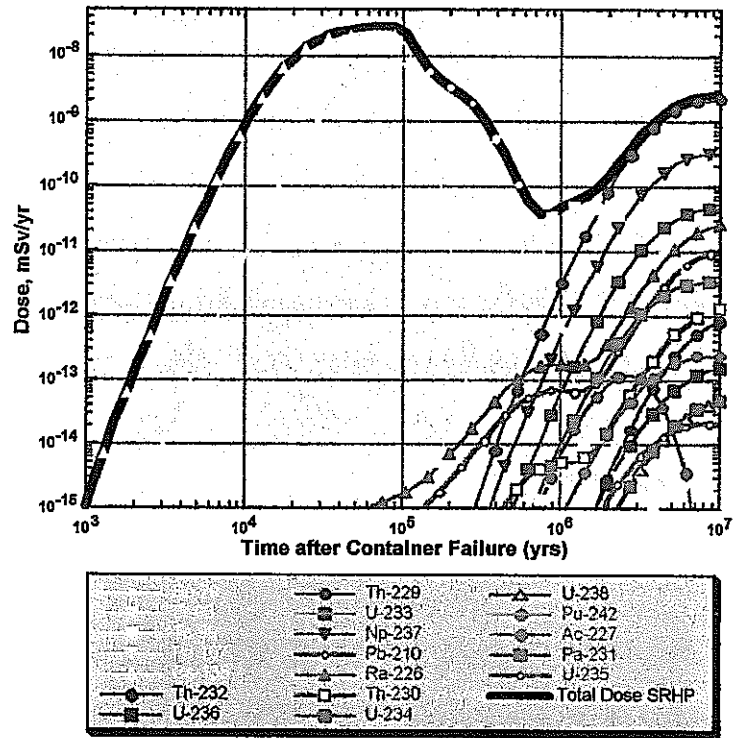


図 2-2(2) ベンチマークケース(SRHP)計算結果:全線量率曲線(単体廃棄物パッケージ)

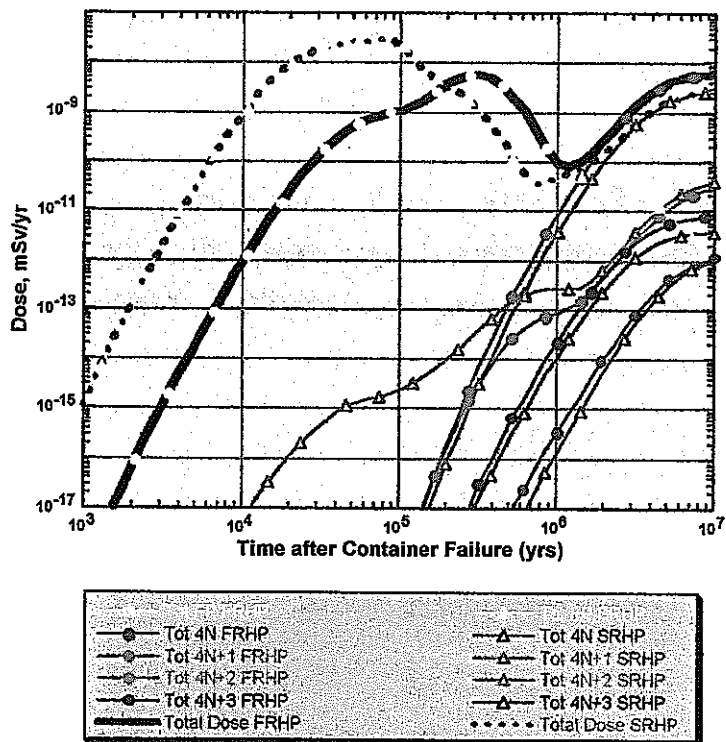


図 2-2(3) ベンチマークケース(FRHP/SRHP)の比較:全線量率, 全 FP 及びアクチニド系列別の線量率曲線(単体廃棄物パッケージ)

3. 影響を受ける処分場 PSM 上の FEP

地下水シナリオのカテゴリーにおいては、次のような3つのNFのFEPへの影響が重要と考えられる。(この3つのFEPが最も重要である理由は、JNC 殿作成のFEP間のインフルエンスに対する重要度階(MRI, 1994)⁽¹⁸⁾を専門家判定によって決定した結果である(MRI, 1998)⁽²²⁾。)

- ・ 母岩の水理学
 - － 地下水流を駆動する水頭の変化(地表の地形変化/広域的水理学的影響)
 - － 流量を支配する岩石の透水特性の変化(岩石の亀裂生成/力学的影響)
 - － 加熱による流量変化(マグマ溜りの深部貫入/広域的熱水理学影響)
- ・ 母岩と緩衝材の地下水化学
 - － 涵養変化による塩淡境界の移動(濃度差に起因した流動/涵養の水理学的影響)
 - － 酸化性地下水の移入(表層水の貫入/広域的水理学的影響)
 - － 温度上昇に伴う鉱物と水の平衡状態の変更(マグマ溜りの深部貫入/広域的な熱的変成作用)
 - － マグマ水の移入・混合(マグマ溜りの深部貫入/広域的な水理学的交代作用)
- ・ 緩衝材の物理化学的性質
 - － 塩分の影響による空隙構造の変化(化学的影響)
 - － 緩衝材の浸食による質量損失(岩石の亀裂生成/力学的応力の影響)
 - － 緩衝材の鉱物学的変質(マグマ溜りの深部貫入/熱化学的影響)

これらのFEPへの影響の他のFEPへの伝播(インフルエンス)を、図3-1(JNC 殿がNFに対して作成した単純化されたプロセス・インフルエンス・ダイヤグラム(PID))に示す。ここでは、前年度報告書(MRI, 1998)⁽²²⁾で検討しなかった火山活動シナリオに関連する水理学(熱で駆動される流れ)と地下水化学(変成的変化/交代的变化)に対する検討結果を加えた。

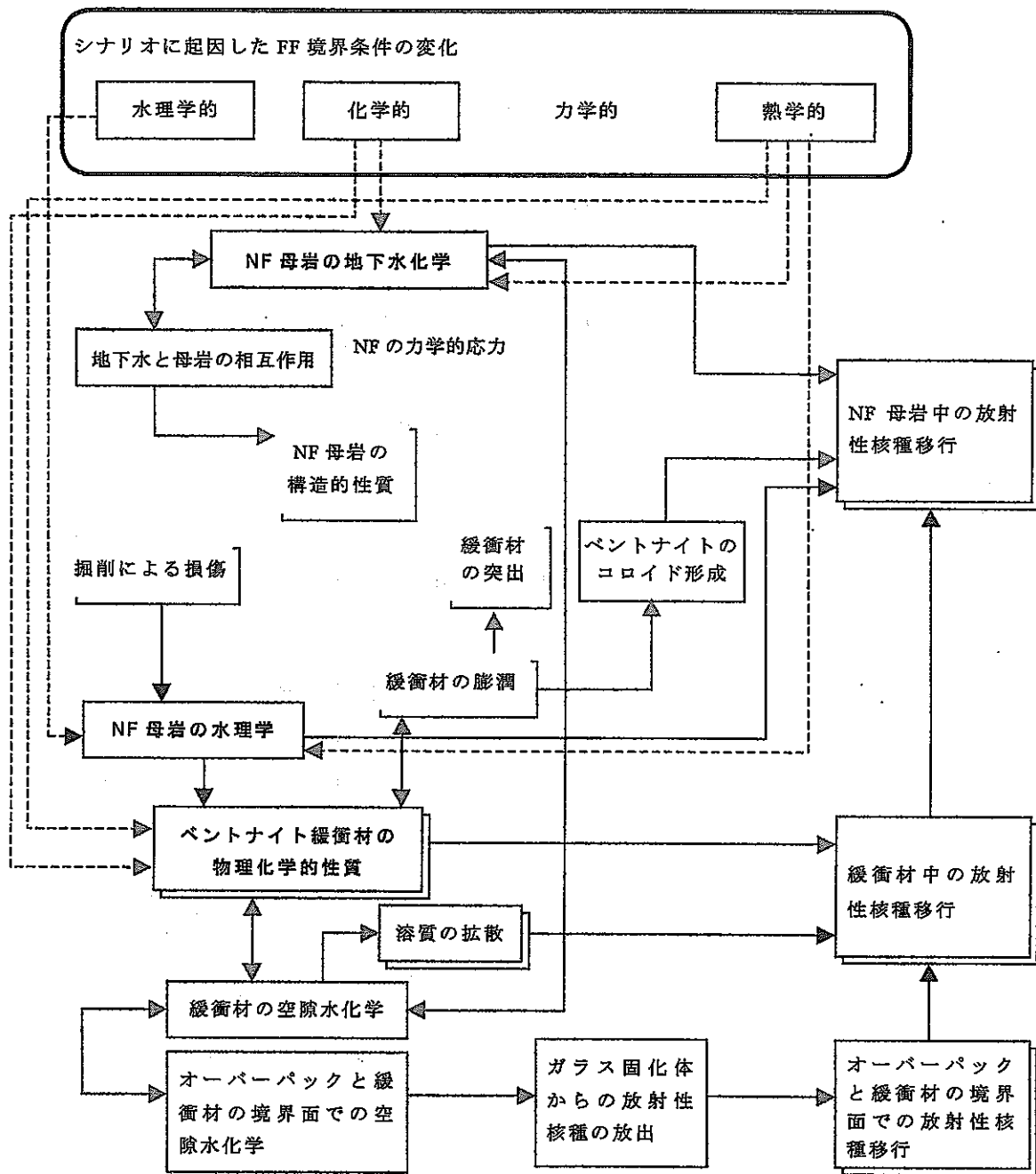


図 3-1 JNC 殿作成の処分場 NF のプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID)
 (本検討対象シナリオのために特別に簡略化表現したもの)

4. 火山活動シナリオ

日本の火山島弧は、2枚の構造プレートの収斂によって形成されている。火口の分布は、もぐり込み構造プレートの幾何学的形状に大きく制約される。日本の最近（第四紀）の「火山フロント」は、下にもぐり込むプレートの形状を決めるワダティ・ベニオフ震域の真上 80~150km にある。火山フロントの陸地側（アジア大陸側）の方が、最近の火山活動はより広く分布し、活動的な火山フロントに比べると噴出量は少なくなる。物理的・化学的指標及び計算によると、火山活動の影響は、火山中央部から 10~15km 以内に限られる。この地域の境界内もしくは近くに処分場がある場合は、考えられる処分システム性能評価シナリオの1つとして火山活動の影響を勘案する必要があるだろう。

4.1 処分場境界条件の変化

主要なマグマ活動事象として、深部マグマ溜りの貫入と成層火山の発達を選定した。

マグマ溜りの貫入によって生ずる熱学的-化学的-水理学的影響に関する研究が従来より行われてきている（例えば、Cathles, 1977⁽³⁾; Norton and Knight, 1977⁽²⁵⁾）。熱学的-化学的-水理学的影響の時空間的大きさをさらに明瞭化するため、TOUGH2 コード (Pruess, 1987) ⁽²⁸⁾ を用いたマグマ貫入に関する一連の熱-水結合感度解析が行われた（平成 8 年度報告書 1.1.9 項 (MRI, 1997) ⁽²¹⁾ 参照）。

地下のマグマが処分場と直接交叉することは考えない。そのような事象は、本研究の対象外である接近シナリオを構成することとなろう。広範なカルデラ崩壊の生成も、このような火口は日本の現在の火山活動の典型ではない、などの理由により、考察対象とはしない。しかし、処分場近くへの岩脈貫入は、変動ケースとして検討し得る。

4.2 岩脈貫入がないケース

4.2.1 計算ケース設定

岩脈貫入を伴わない火山活動シナリオの再計算では、前年度までの解析結果及び JNC 殿との議論に基づき、以下の想定及び条件を設定する。

- ・ 処分場は、将来の火山活動の生ずる可能性のない“安全圏”ではなく、将来の火山活動の生ずる可能性のある所謂日本の“疑わしい領域”の内側（又は境界）に位置する。
- ・ （富士山のような）日本の孤状列島型火山に典型的な成層火山が形成される。
- ・ 計算期間全体に亘りマグマ溜りから一定の熱流量が出続ける。
- ・ 処分場はマグマ溜りの端から 10km 離れた地点に位置する。
- ・ マグマ貫入は処分場を直撃しない。この想定は、EBS の隔離機能の喪失を直接的にもたらし得る接近シナリオを避けるという H12 レポート指針に基づくものである。
- ・ 処分場の母岩は、結晶質岩もしくは堆積岩層である。
- ・ マグマ貫入の影響が処分場にあらわれるまでに 1 万年かかる。影響として次のようなものが考えられる。
 - 温度が永続的に周囲より 20°C 上昇する。
 - （マグマ性塩水により）地下水が永続的に低 pH の塩水状態（SRLP 地下水で模擬）に変化する。
- ・ 処分場での持続的な温度上昇と、多分、マグマ性塩水中のカリウム溶解量の増加により、緩衝材外側でイライト化が進展し、10⁶ 年後に緩衝材外側の 50% がイライト化する、という保守的想定を行う。緩衝材のイライト化した部分では、空隙率と拡散係数は緩衝材の不変部分と同じ値を維持するものと想定するが、分配係数はどの放射性元素も保守的にゼロになるとする。スメクタイトのイライト化の速度論（例えば、Pytte, 1982⁽³⁰⁾; Pusch, 1993⁽²⁹⁾; Huang et al., 1993⁽⁹⁾; Velde, 1995⁽³⁷⁾）は今だに不確実性の大きい状況にあると認識されている。さらにマグマ性地下水の将来的な化学組成に対しても幅広の制約しか定義し得ない。従って、イライト化が生じないという変動ケースについても検討する。

図 4-1 に岩脈貫入を伴わない火山活動シナリオ再計算ケースの概念図を示す。また、表 4-1 には、これらの想定される変化を反映するための MESHNOTE と TIGER コードでのパラメータ変化を示す。

4.2.2 計算結果

図 4-2(1) には、本計算ケースの全ての放射性核種に対する全線量率曲線を示す。

比較のため、図 4-2(2) に、緩衝材でのイライト化が生じないケースの全線量率曲線を示すが、両者の差異はほとんどない。

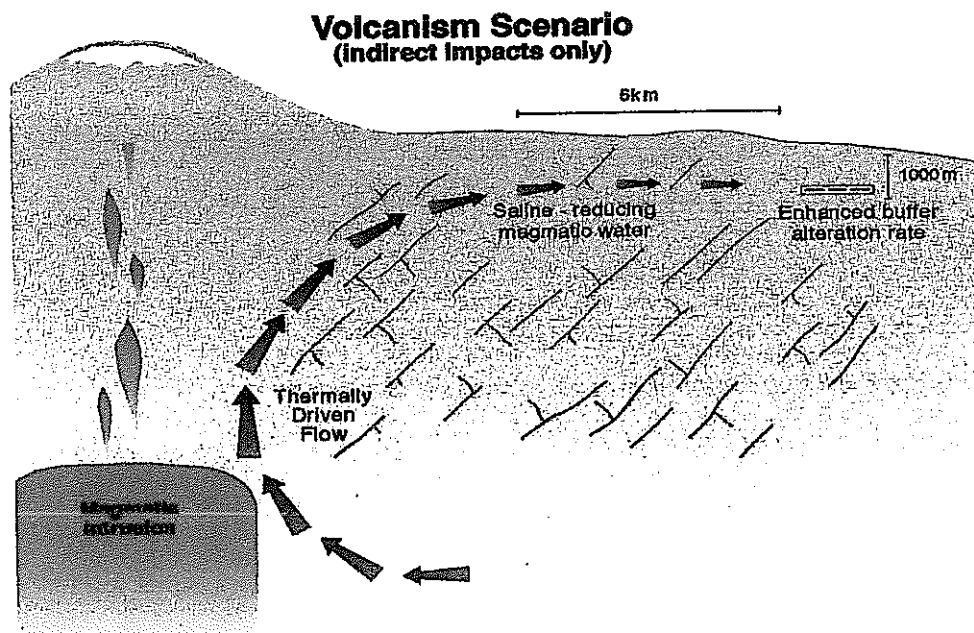


図 4-1 火山活動シナリオ基本ケース/変動ケース(岩脈貫入なし)の概略図

表 4-1 火山活動シナリオのケース(岩脈貫入なし)再設定の要約

	基本ケース		基本ケース
ΔQ_R	NC	緩衝材	外側の 50% がイライト化*
変化の開始時点		変化の開始時点	110,000 年後
変化の型式		変化の型式	10 ⁶ 年後まで (外側から内側への) 累進的進行
変化に要する期間		変化に要する期間	瞬時
$\Delta \text{Chemistry}$	FRHP → SRLP	FF 経路長	NC
変化の開始時点	110,000 年後	変化の開始時点	
変化の型式	永続的	変化の型式	
変化に要する期間	瞬時	変化に要する期間	
ΔD_p	FRHP → SRLP	BC	= ベンチマークケース設定値
変化の開始時点	110,000 年後	ΔQ_R	= 健全な母岩での流量変化
変化の型式	永続的	$\Delta \text{Chemistry}$	= 地下水化学の変化
変化に要する期間	瞬時	ΔD_p	= 緩衝材の空隙拡散係数の変化

NC = ベンチマークケース設定値と同じ

* この変動ケースとして、「イライト化なしケース」を設定。

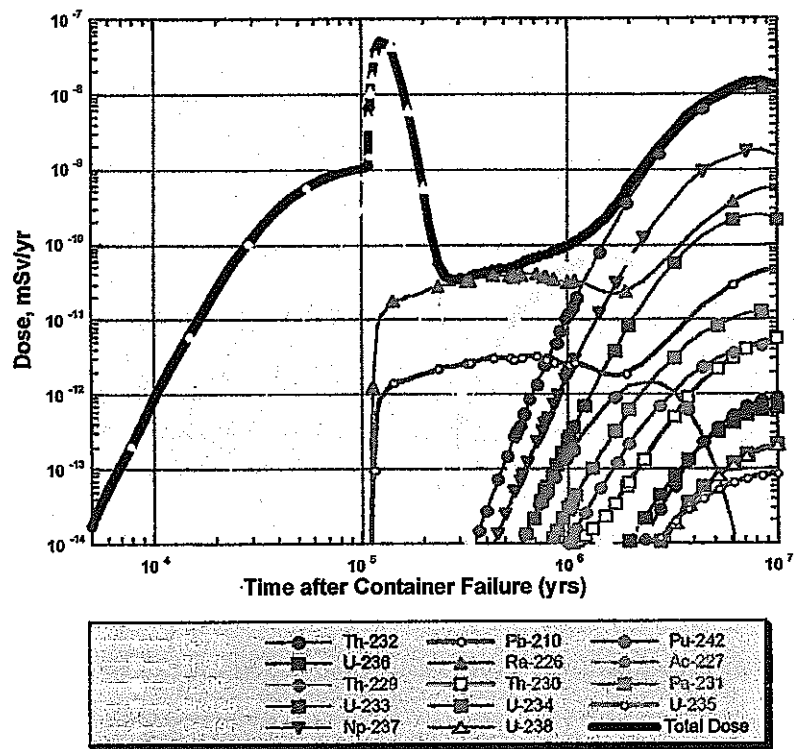


図 4-2(1) 火山活動シナリオ基本ケース(岩脈貫入なし)再計算結果
(イライト化発生ケース):全線量率曲線(単体廃棄物パッケージ)

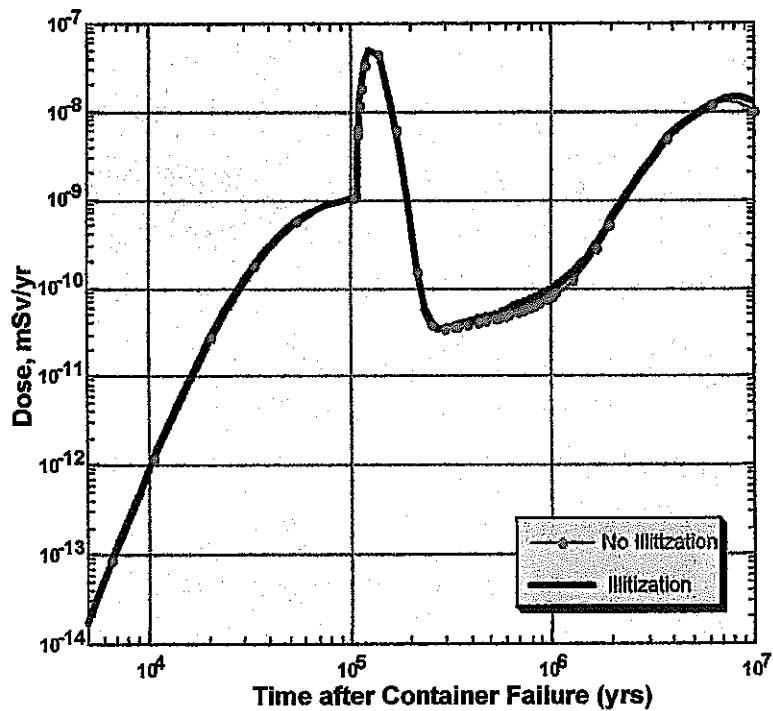


図 4-2(2) 火山活動シナリオ変動ケース(岩脈貫入なし)再計算結果
(イライト化なしケース):全線量率曲線(単体廃棄物パッケージ)

(処分場閉鎖後およそ 11 万年後の)火山活動の影響があらわれる時点までは、本計算ケースの線量率曲線は、予期される通り、ベンチマークケースの計算結果と同じである。初期はまず Se-79 が、その後 Cs-135 が線量率寄与上主要な核種である。

火山活動による複合的な影響により、11 万年後に、Cs-135 の線量率が 100 倍近く増加する(図 2-2(1), 図 4-2(1) 参照)。Ra-226 と Pb-210 の線量率がベンチマークケースに比べてかなり大きく増加している。Se-79 はこの時点で 4 倍程度の増加となっており、その他の放射性核種の多くの線量率曲線は、ベンチマークケースより早期側にシフトされている。

Cs-135 が大きく増加しているのは、SRLP 状態の地下水に対し、緩衝材、母岩のいずれの分配係数もかなり小さくなっていることによる。すでに吸着されていた Cs-135 が早急に脱着され、移行により放出される。同様に、Ra-226 の線量率の大きな増加の理由は、SRLP 状態のもとで Ra の溶解度の増加と母岩での分配係数が大きく低下することによる。Pb-210 は、FRHP と SRLP とで溶解度、分配係数ともほとんど変化しないにもかかわらず、線量率が増加しているのは、Pb-210 が処分場からかなり高いフラックスを放出している Ra-226 の娘核種だからである。Pb-210 の線量率曲線は、大きく増加しているが、Ra-226 のそれより下にあり、それらの位置関係はベンチマークケースと逆転している。これは SRLP 状態では、Ra の母岩への分配係数が Pb より小さいが、FRHP 状態では Pb より大きいからである。従って、火山活動/マグマ貫入によって塩水状態が発生した後は、寿命の長い親の Ra-226 より、寿命の短い Pb-210 の方が移行中に、より強く遅延化される。

大部分の放射性核種の線量率曲線が早期側にシフトする理由は、アクチニド系列の親核種 (Cm, Am, Pu) の溶解度が、SRLP 状況下で増加することによる。(10⁶ 年後以降の) 長期的な将来には、ベンチマークケース同様、4n+1 系列の核種 (Np-237 とその娘核種) が線量率曲線を支配する。

最初の 10⁶ 年間では、本計算ケースのピーク線量率は、1.2×10⁵ 年後の (Cs-135 に支配された) 約 6×10⁻⁸ mSv/y である。これは、ベンチマークケースの同期間におけるピーク線量率の約 10 倍である。その次のピーク線量率は、Th-229 に支配された約 10⁷ 年後の 3×10⁻⁹ mSv/y である。

4.3 岩脈貫入があるケース

火山活動シナリオ基本ケース (MRI, 1997/1998) ⁽²¹⁾⁽²²⁾ の検討から提起された処分システムの性能に影響を与える可能性のあるパターンとして、岩脈貫入のケースが変動ケースとして含まれていた。前年度の解析 (MRI, 1998) ⁽²²⁾ でも示したように、周囲の岩体は、マグマ体の貫入の始まりから冷却までの間、熱学的-水理学的-力学的-化学的 (T-H-M-C) 擾動を受ける。本年度は、前年度 (MRI, 1998) ⁽²²⁾ に用いた岩脈貫入概念モデルに基づき、性能評価計算を行う。但し、岩脈貫入で接近シナリオを定義しないという条件によって、計算ケースはさらに制約を受ける。

4.3.1 岩脈貫入計算ケースの設定

岩脈貫入によって引き起こされる T-H-M-C 状態の時空間的変化に関する限界的ケース計算結果 (MRI, 1998) ⁽²²⁾ に基づき、本計算ケースを以下のように定義する。

- ・ 処分場閉鎖後 10 万年後に、単一的岩脈貫入事象が結晶質岩に起きると考える。
- ・ 幅 1m の岩脈が貫入し、1 年以内に固化する。
- ・ 岩脈が処分場 (廃棄物パッケージ) から 100m 上流側に貫入する。この距離は十分に大きいので、処分場領域の局所的流れが岩脈の不透水性のため流れ方向を変えて流れることはないと考えられ、従って、処分場から 100m 下流側の亀裂帯への周囲の水平方向流れの想定が保たれる。
- ・ 岩脈貫入が処分場 (廃棄物パッケージ) に与える熱的影響は無視できる (周囲の温度からの上昇は 100 年以内の間で 10°C 未満である。)
- ・ 処分場 (廃棄物パッケージ) と亀裂帯の間の母岩中の地下水流速は、岩脈貫入後 1 年後に 2 桁 (100 倍に) 増加する。
- ・ 母岩中の地下水化学は、岩脈貫入後 500 年間で、最初の FRHP 地下水からマグマの影響を受けた SRLP 塩水に変化する。それから 500 年後に再び FRHP 状態に戻る。
- ・ (緩衝材と廃棄物を含んだ) 廃棄物パッケージ中の地下水化学は、岩脈貫入後 1000 年間で FRHP 状態から SRLP 状態に変化する。その後、1000 年後

に再び FRHP 状態に戻る。SRLP 状態の期間が長期化するの、母岩中の水が一旦 FRHP 状態に戻ると SRLP 状態の水が緩衝材の外側へゆっくりと拡散することを反映するからである。

この岩脈貫入シナリオに対し、表 4-2 に示すパラメータ変化を設定し、MESHNOTE-TIGER コード体系を用いて計算する。

表 4-2 火山活動シナリオ変動ケース(岩脈貫入あり)計算における

パラメータ変化のまとめ

期間	ニアフィールド			ファーフィールド		
	混合槽の流量	EBS の K_d , D, 溶解度	他のパラメータ	亀裂中のダルシー流速	母岩の K_d	他のパラメータ
0-10 ⁵ 年	BC (0.01m ³ /yr)	BC (FRHP)	BC	BC (15.7m/yr)	BC (FRHP)	BC
10 ⁵ 年-100001年	1m ³ /yr	SRHP	BC	1570m/yr	SRHP	BC
100001年-100500年	BC	SRHP	BC	BC	SRHP	BC
100500年-101000年	BC	SRHP	BC	BC	BC	BC
101000年-10 ⁷ 年	BC	BC	BC	BC	BC	BC

BC：ベンチマークケースと同一の値

4.3.2 計算結果

図 4-3(1) は、本計算ケースにおける全ての主要な放射性核種の線量率の計算結果である。ベンチマークケース並びに他のシナリオに対する計算ケースの場合と同様、初期(処分場閉鎖後 10 万年間)の主要な線量率寄与核種は、Cs-135 と Se-79 である。

単一岩脈貫入シナリオの開始時点における処分場システムの最初の反応は、全ての放射性核種のスパイク的な放出増加である。これは、マグマの熱い平板と隣接する岩体中の空隙流体の急速な動的加圧によって生ずる流量増加によるものである。この圧力波は、急速に消滅するため、流量は、急速に周囲の値に戻るが、岩体に永続的な水理学的破碎を発生させないものとする。もちろん、連続的(又は多重)岩脈貫入ケースでは、高空隙圧状態は長期化が想定され、その結果、高流量持続期間が長期化することになるであろう。

図 4-3(2)は、岩脈貫入後 1500 年間における主要な線量寄与核種 (Cs-135, Se-79, Ra-226, Pu-239) の線量率計算結果である。1 年間続く空隙圧のパルス波によって増加した流量に直接比例して、4 核種とも線量率が大体 100 倍に増加している。

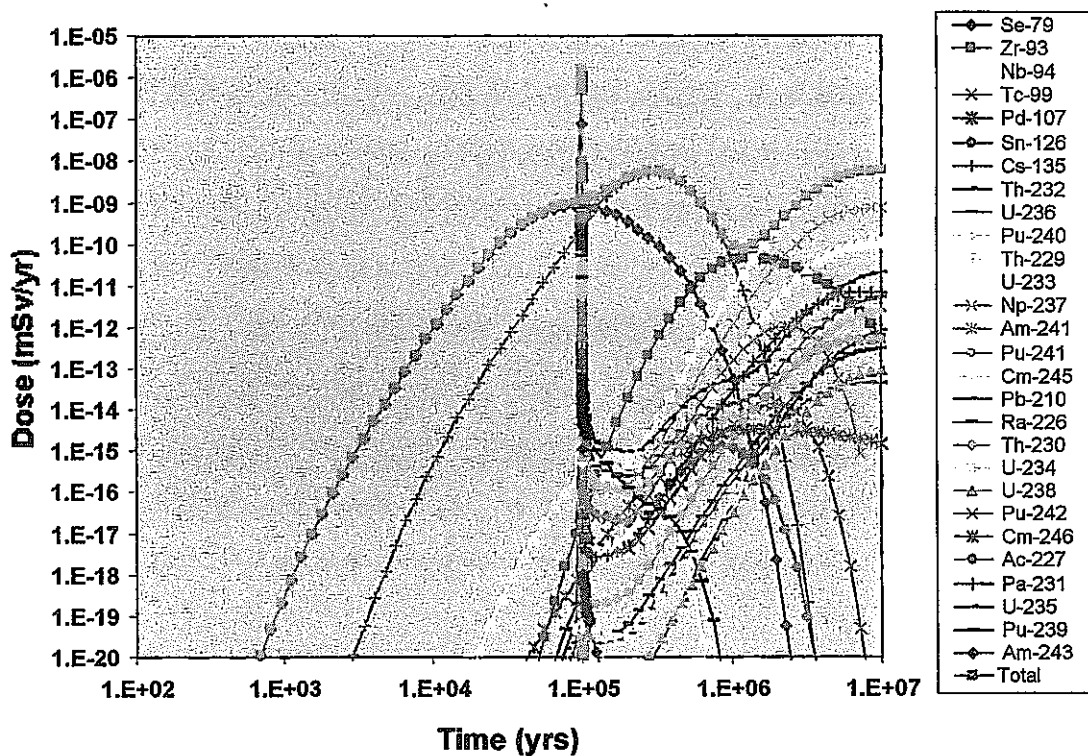


図 4-3(1) 単一岩脈貫入シナリオにおける単体廃棄物パッケージからの放射核種線量率(時間軸は、処分場閉鎖後の時間)

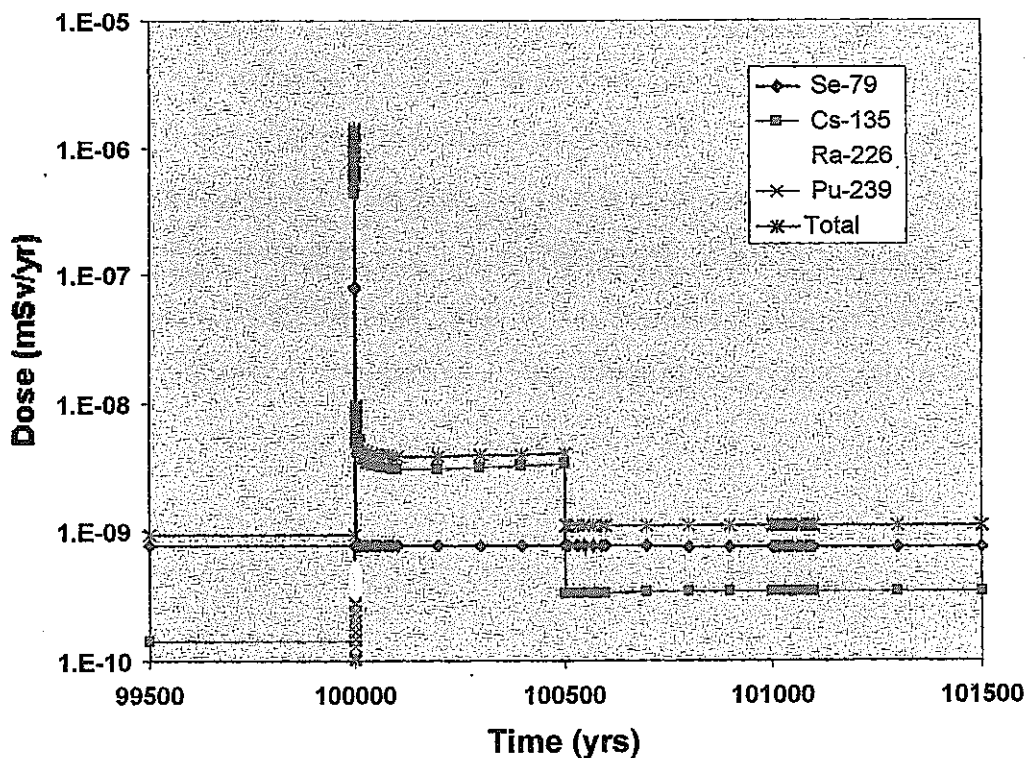


図 4-3(2) 単一岩脈貫入シナリオにおける全線量率への主要な寄与核種とその線量率(線形時間スケール)

Cs-135 では、線量率が岩脈貫入前の値より大きい状態が 500 年間続く期間が存在する。Cs の溶解度は、FRHP, SRLP と同じなので、変化の要因は、SRLP 状態での緩衝材と母岩への Cs の分配係数の低下によるものである。500 年経つと、母岩の地下水は初期の FRHP 状態に戻ると想定されるため、Cs-135 の線量率は、再び岩脈貫入前の値の方へ低下する。Cs-135 の線量率が岩脈貫入前の値より大きいのは、緩衝材ではさらに 500 年間 SRLP 状態が続いていること、及び、Cs-135 の放出率曲線がこの期間に増加していること（図 4-3(1) 参照）による。

Se-79 では、線量率が岩脈貫入前の値近くにまですぐに戻っている。JNC 殿のデータベース（JNC, 1998）⁽¹¹⁾ によると、Se の溶解度は、塩分増加とともに若干低下するが、この効果は、多塩分状況下では、Se の母岩への分配係数の低下によって相殺される。

Ra-226 と Pu-239 の放出線量率も、岩脈貫入とその後の処分場の状態変化によって、大きく増加している。Ra-226 では、この変化は、FRHP 状態に対し、SRLP 状態での結晶質岩への分配係数が低下することによって引き起こされる。Pu-239 については、（線量率への寄与のかなり小さい他の Pu 同位体と同様）放出率の増加は、JNC 殿の溶解度データベース（JNC, 1998）⁽¹¹⁾ によると、FRHP 状態に対し、SRLP 状態の地下水での Pu の溶解度が約 3.5 桁増加することによる。

ここで留意すべき点は、単一岩脈貫入の絶対的な影響の大きさは、それがいつ起きるかによって変わることである。もし岩脈貫入が処分場閉鎖後 10^6 年後に起きると、想定される流量の 100 倍増加によって、線量率は 10^{-10} mSv/y から 10^{-8} mSv/y に増加すると考えられるが、この値は、処分場閉鎖後 30 万年後に生ずるベンチマークケースのピーク線量率と同じくらいの大きさである。

5. 地震・断層シナリオ

5.1 処分場境界条件の変化

日本では、多くの地域で、様々の規模の、活動的なものから非活動的なものまでの断層が見受けられる。本シナリオの潜在的な重要性を確実に評価するためには活断層の位置と処分場位置との関係を検討することが必要である。結果的には、以下のような想定が加味されるべきである。

- ① (特に伸張性の)断層運動がもたらす NF の亀裂開口とこれによって促進されるベントナイト緩衝材の累進的突出と侵食
- ② 緩衝材内の空隙水が一時的に静岩圧を超える可能性を最優先で考慮すべきこと
- ③ 母岩全体の透水性が永続的に変化することによる流量の増加 (例えば、Davies and Archambeau, 1997⁽⁴⁾)

しかし、H12 レポートの検討で、断層によって EBS が分断されるようなシナリオ (所謂、接近シナリオ) は除いていることに留意する。

比較的小さく、多分短期的な温度変化は、地震揚水のようなプロセスの影響として考えられるが、これらは重要とは考えられないので、ここでは検討しない。地下水化学の変化をもたらす得る他の地震動プロセスは、地震揚水によるどんな影響よりもかなり長期的プロセスとなり得るが、本検討では考慮しない。

5.2 計算ケース設定

5.2.1 予備的検討

(1) 基本ケースと変動ケース

前年度までの検討から、地震・断層が処分システムの性能に与える影響に関与する変数や不確実性が多数あることは明らかである。図 5-1 にいくつかのケースを示す。

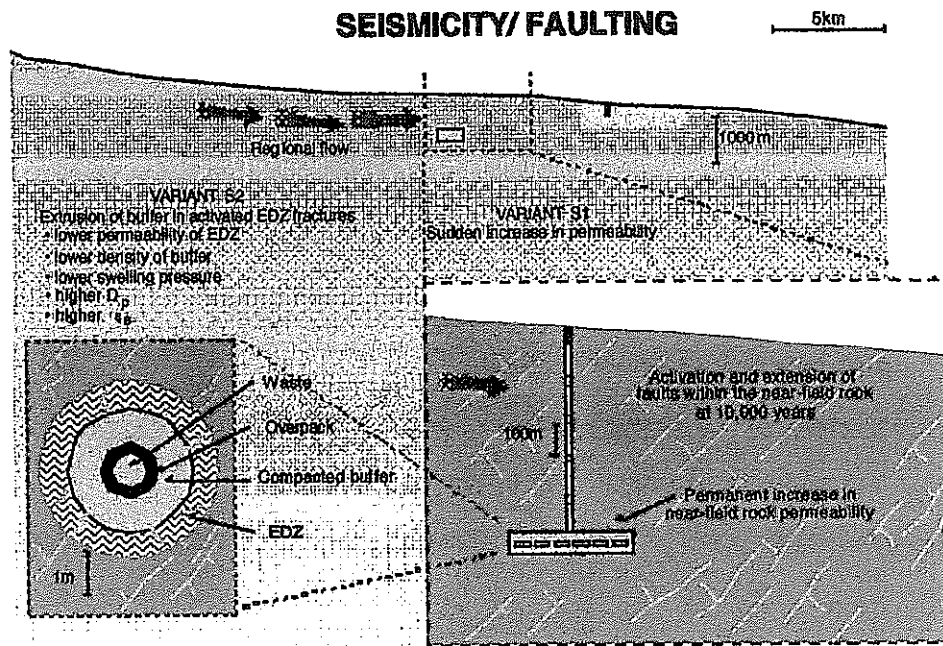


図 5-1 地震・断層シナリオ基本ケース/変動ケースの概略図

出典: MRI, 1998⁽²²⁾

(1-1) 変動ケース S_1

基本ケース S_0 (MRI, 1998)⁽²²⁾ に対する 1 つ目の変動ケースは、NF 母岩の透水性変化速度がもっと大きくなるケースである。一回の瞬時的事象によっても、多分、局所的に高透水性の亀裂が生成されるであろうが、NF 母岩の透水性の全体的な増加には、持続的な地震活動が少なくとも 50 年間続く必要があると考える。

(1-2) 変動ケース S_2

変動ケース S_2 は、変動ケース S_1 において、EDZ (掘削損傷領域) と緩衝材の双方に断層の影響が生ずる場合である。初期の健全な母岩と同様に、EDZ にも亀裂を生成するのに十分大きな地震事象が発生するものと仮定する。EDZ に新たな亀裂の裂け目が開口すると、緩衝材が EDZ 中にめり込んでいく (突出する) と考えられる (前年度報告書 3.3.2 項 (MRI, 1998)⁽²²⁾ 参照)。これらの変化は全て 50 年間で発生するものとする。

EDZ 内にめり込む緩衝材に対して距離 0.5m、空隙率 0.2 を仮定すると、緩衝材の初期の乾燥密度 1.6g/cm^3 は、約 1.2g/cm^3 に低下すると推定される。クニゲル V

1 のベントナイトの密度の関数として拡散係数を測定した結果（例えば、Kozaki et al., 1996⁽¹³⁾; Saito et al., 1997⁽³³⁾）より、拡散係数は、1.2 倍に増加する。同様に、同じ大きさの埋設横抗内に残された低密度の緩衝材の空隙率は、再計算により、1.37 倍に増加する。

(2) 変動ケースの計算結果

変動ケース S_1 , S_2 に関する予備計算結果を本編付録 A に示す。

5.2.2 MESHNOTE-TIGER 計算ケース

前項での検討結果並びに JNC 殿との議論に基づき、地震・断層シナリオの再計算では以下の想定を行う。

- ・ 将来の断層活動が処分場特性に与える主要な影響は、FF 経路長の短縮化である。
- ・ 処分場の母岩は、結晶質岩であり、FRHP 地下水系の地下 1000m に処分場が位置する。
- ・ 重大な地震・断層活動が、処分場閉鎖後 10 万年後、即ち、閉じ込め喪失後 9.9 万年後に発生するものと仮定する。
- ・ その事象によって、処分場からわずか 50m（もしくは 10m）のところにある大きな水みちとなる断層が活性化され、FF 経路長を実質的に半分に短めるものとする。
- ・ 将来の断層活動事象が処分場を直撃することは考えない。

もちろん、処分場から 50m のところに断層事象が発生するとした想定距離は、任意である。同様に FF での断層の発達（又は再活性化）が、処分場端から 10m のところに発生するとしても構わないだろう。

計算ケースでは、NF 母岩への緩衝材の突出は想定しない。また、伸張性プレートテクトニクス場における他のサイトで考慮された母岩の透水性の極度な変化（Davies and Archambeau, 1997）⁽⁴⁾ は、日本の広域的な圧縮場の処分場に対しては適当とは考えにくい。従って、母岩の透水性、即ち、流量並びに、付随し得る地下水化学の変化は、MESHNOTE-TIGER 計算ケースで扱う地震・断層シナリオ基本ケース／変動ケースではないものとする。

従って、より透水性の高い新断層に沿った深部地下水との多くの混合も生じないものとする（表 5-1 参照）。

表 5-1 地震・断層シナリオのケース再設定の要約

	基本ケース		基本ケース
ΔQ_R	NC	緩衝材	NC
変化の開始時点		変化の開始時点	
変化の型式		変化の型式	
変化に要する期間		変化に要する期間	
$\Delta\text{Chemistry}$	NC (FRHP)	FF 経路長	BCx0.5*
変化の開始時点		変化の開始時点	100,000 年後
変化の型式		変化の型式	永続的
変化に要する期間		変化に要する期間	瞬時
ΔD_P	NC		
変化の開始時点			
変化の型式			
変化に要する期間			

BC = ベンチマークケース設定値
 ΔQ_R = 健全な母岩での流量変化
 $\Delta\text{Chemistry}$ = 地下水化学の変化
FRHP = 還元性高 pH 淡水地下水
 ΔD_P = 緩衝材の空隙拡散係数の変化
NC = ベンチマークケース設定値と同じ
* この変動ケースとして、「BC×0.1 ケース」を設定

5.3 計算結果

断層生成後の線量率計算値には 2 つのソースが含まれることに留意されたい。第 1 のソースは、単体廃棄物パッケージから引き続き放出され続ける分である。もう 1 つのソースは、新しい断層が形成された時点から新旧断層間の母岩領域に存在する放射性核種からのものである。これらの放射性核種は、旧断層に移行し続け、新断層と同様の生物圏に放出されるものと想定する。

(1) 50m ケース

図 5-2(1) には、全ての放射性核種に対する全線量率曲線を示す。

全線量率曲線は、初期時点から 10^5 年後まではベンチマークケースと同様である。ベンチマークケースのこの期間と同様に、この期間の主要な支配的核種は Se-79 と Cs-135 である。断層活動が生ずる 10^5 年後の直後に、経路の短縮化により、全ての核種の放出線量率がベンチマークケースと比較してより早期側にシフト

トする（図 2-2(1) と図 5-2(1) 参照）。

ベンチマークケースに比べ、本ケースでは、放出率の早期化に加え、ほとんどの放射性核種のピーク線量率が約 2 倍（又はそれをやや下回った倍率）に増加する。本ケースでは、FRHP 状態での結晶質岩への分配係数が比較的大きい中寿命の溶解限度型核分裂生成物 (Tc-99, Sn-126) のピーク放出率が明らかに著しく（約 100 倍以上）増加している。これは、FF 経路長の短縮化が、母岩への分配係数の大きな単一の放射性核種への影響が相対的に最も大きいということを反映している。4 つの異なる崩壊系列から生ずる異なる半減期の多くの同位体を含んだアクチニド崩壊連鎖系列上の核種も、断層発生時からしばらくは、ベンチマークケースよりも 2 桁以上に線量率が増加するが、全期間におけるピーク線量率にはあまり影響がない。

まとめると、地震・断層シナリオ基本ケース計算（50m ケース）では、最初の 10^6 年間でピーク線量率は、10.5 万年後の Cs-135 の放出によって支配される 1.65×10^{-8} mSv/y である。これは、FRHP ベンチマークケースのピーク線量率の約 2 倍の値である。2 つ目のピーク放出率は、 6×10^6 年後の Th-229 による 2×10^{-8} mSv/y と計算される。

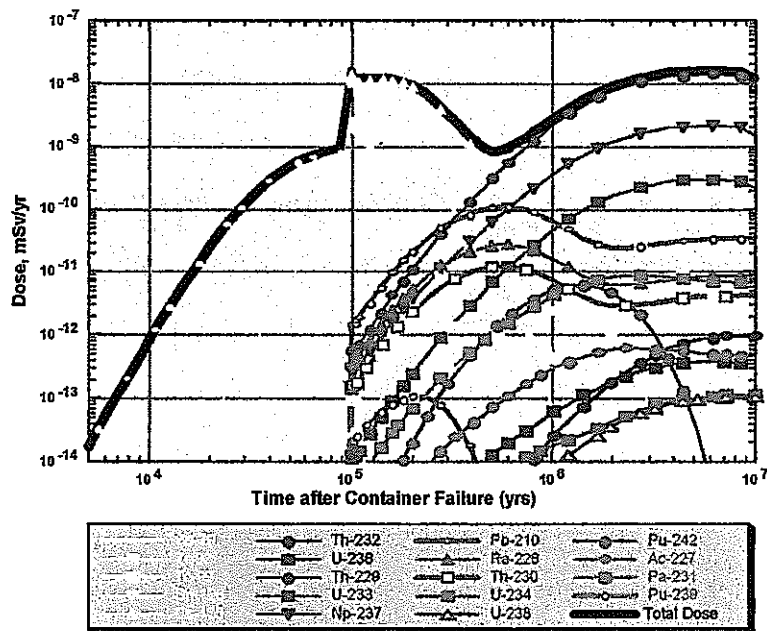


図 5-2(1) 地震・断層シナリオ基本ケース再計算結果 (50m) :
全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)

(2) 10m ケース

この変動ケースでは新しい断層が処分場閉鎖後 10^5 年後に処分場（廃棄物パッケージ）からわずか 10m の地点に発生する。図 5-2(2) には、全ての放射性核種の放出線量率の総計が示されている。

本ケースの線量率曲線は、断層事象が発生する 10^5 年後までは FRHP ベンチマークケースと同じものである。処分場から 10m の至近距離に生物圏に通じる断層が形成される結果、全ての核種の放出率曲線がベンチマークケースに比べてかなり早期側へシフトされる（図 2-2(1) と図 5-2(2) 参照）。また、FF 経路長が短くなるほど、移行時間が短くなるため、放射性核種のピーク放出率の減衰が不十分となり、結局 FF 移行期間中の放射性崩壊がより小さくなる。主要な線量率寄与核種は、Se-79, Sn-126, Cs-135, Pb-210, Ra-226, Th-229, Th-230, Np-237 である。FRHP 状態における結晶質岩への分配係数の比較的大きい放射性元素の同位体は、FF 経路長が 10m に短縮されたときのピーク線量率の増加が非常に大きい。このことは、半減期の比較的短い単一の同位体をもつ放射性元素についても本質的にはあてはまる。

図 5-2(3) は、断層が処分場から 50m, 10m 地点に生ずるケースでの線量率を比較したものである。50m ケースでは、処分場閉鎖後 10^5 年後に Cs-135 と Th-229 の寄与によりベンチマークケースのピークの約 2 倍の 1.65×10^{-8} mSv/y になっているのに対し、同じ時点に断層が生ずる 10m ケースでは、ベンチマークケースのピークの約 20 倍に増加する。その主な寄与核種は、Se-79, Sn-126, Cs-135, Pb-210, Ra-226, Th-229, Th-230, Np-237 である。

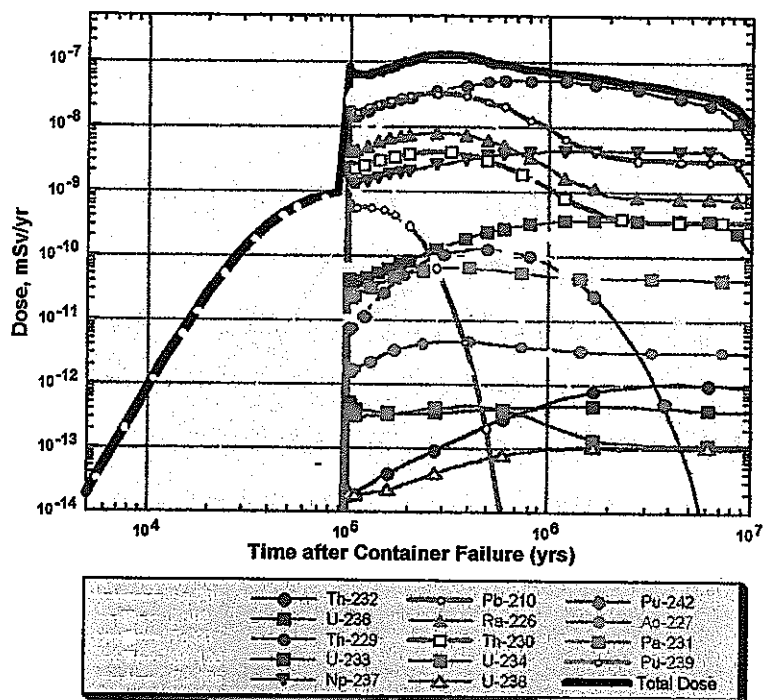


図 5-2(2) 地震・断層シナリオ変動ケース再計算結果(10m):全線量率曲線
(単体廃棄物パッケージ)

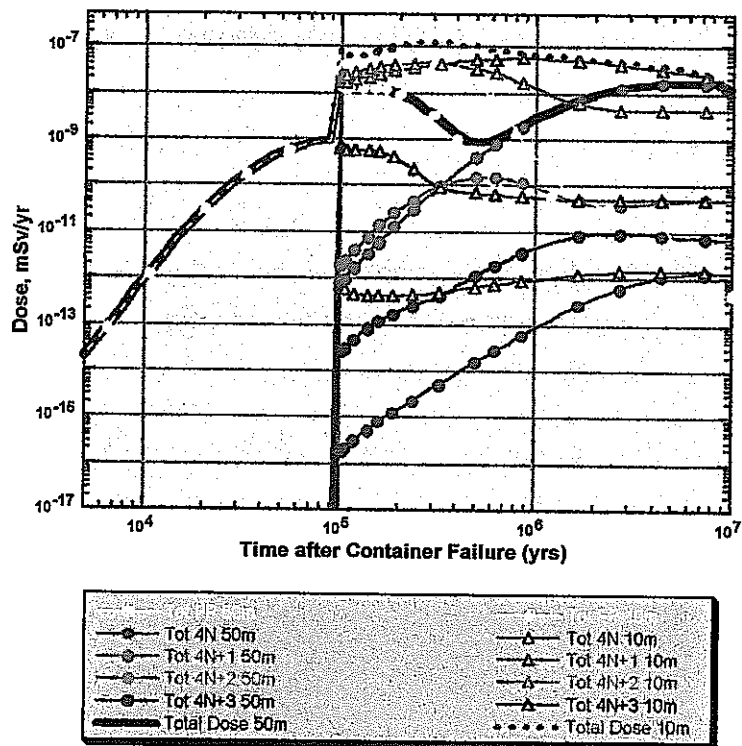


図 5-2(3) 地震・断層シナリオ基本ケース/変動ケース再計算結果(50m/10m)
の比較:全線量率,全FP及びアクチニド系列別の線量率曲線
(単体廃棄物パッケージ)

6. 隆起・侵食シナリオ

日本列島には隆起地域と沈降地域の双方があり、一般的に列島の弧状と平行に伸びている（例えば、Hashimoto, 1991）⁽⁸⁾。

第四紀以来、日本列島の隆起率は年間平均 0.5～1 mm となっている（Shimizu et al., 1992）⁽³⁴⁾。この変動の大部分は地形に関係があるようで、山地で高く（年間平均 1～2 mm）、低地で低く（年間平均 0.1～0.5 mm）なっている。

6.1 処分場境界条件の変化

日本における第四紀の隆起率（現在の標高を基準とする）と侵食率との間に、ある関係が見出されている（Yoshikawa, 1974⁽⁴⁰⁾; Ohmori, 1978/1985⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾）。一旦、侵食率が隆起率に到達すると、定常状態が維持されるものとする。

本シナリオでは、処分場は日本の低地帯に位置すると想定する。本シナリオ計算では、将来の隆起率の予測に不確実性があること及びサイト特性データの欠落のため、一定の隆起率を用いる。日本の第四紀及び最近の隆起率に基づき、0.1(～1) mm/y という値を選定する。この値は、広い範囲にあてはまる代表的な平均速度の幅である。

本計算ケースの目的のために、結晶質岩の処分場では深度 1000m、また、堆積岩の処分場では、深度 500m から、それぞれ始まるものとする。但し、処分場が完全に露出するケースは本検討では対象としない。さらに、処分場が地表から 10m 以内に近づくと、（例えば水採取、資源探査といった）人間侵入の方が、多分、検討すべきより確信的なシナリオとなろう。

隆起・侵食の結果、処分場は、地表近くの希釈された酸化性地下水帯域まで上昇する（Langmuir, 1997）⁽¹⁴⁾。このような地下水が NF に到達する深度は、局所的な水理学的状態変動に依存するため、不確実である。

6.2 計算ケース設定

6.2.1 予備的検討

(1) 基本ケースと変動ケース

隆起・侵食シナリオの基本ケースと変動ケースの概要を図式化したものを図 6-1 に示す。

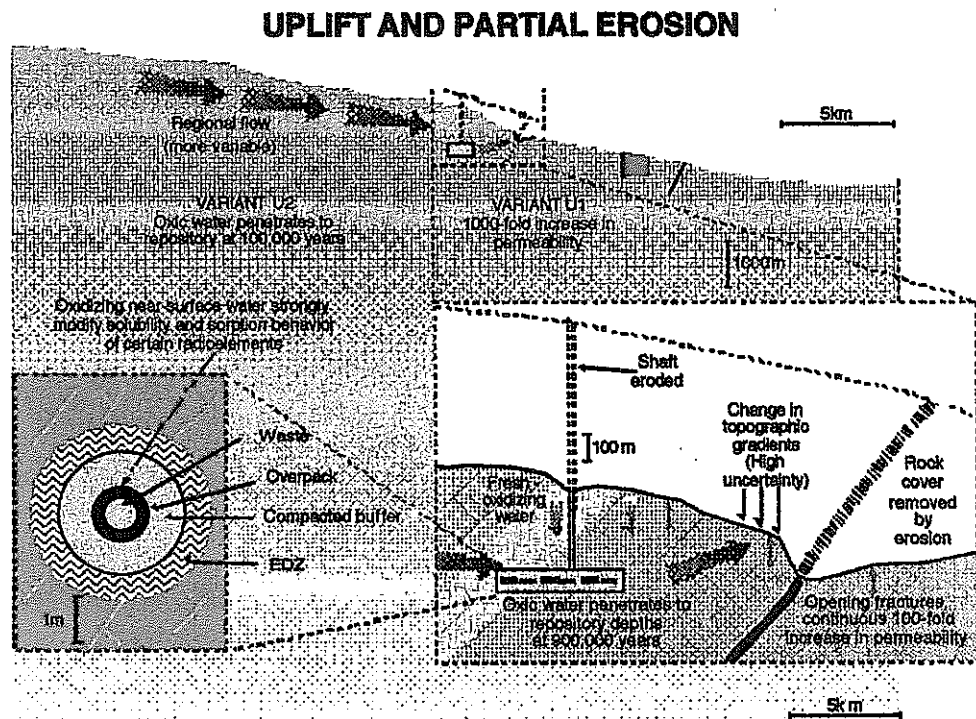


図 6-1 隆起・侵食シナリオ基本ケース／変動ケースの概略図

出典：MRI, 1998⁽²²⁾

(1-1) 変動ケース U_1

変動ケース U_1 は、母岩の透水性が 100 倍に増加する（従って、ダルシー流速は 1000 倍まで増加する）と考えている以外は、基本ケース U_0 。（MRI, 1998）⁽²²⁾ と同じである。

(1-2) 変動ケース U_2

この変動ケースは、処分場閉鎖後 10 万年時点で酸化性地表水が NF に浸入して

くる点を除けば、基本ケース U_0 と同じである。これは、基本ケース U_0 及び変動ケース U_1 に比べると、酸化性地表水がかなり深部にまで浸透するケースに対応するであろう。

(2) 変動ケースの計算結果

変動ケース U_1 , U_2 に関する予備計算結果を本編付録 B に示す。

6.2.2 MESHNOTE-TIGER 計算ケース

隆起・侵食シナリオの再計算では、前項での検討結果並びに JNC 殿との議論に基づき、以下の想定及び制約を設定する。

- ・ HLW 処分場は、初め、FRHP 地下水の結晶質岩地下 1000m の深度に位置するものとする。
- ・ 純隆起率（侵食率＝隆起率）は 0.1mm/y（即ち、処分場は、 9×10^6 年後に地表から 100m 以内に到達し、 10^7 年後に地表に達する）。
- ・ 処分場が最後の 100m を地表に向けて上昇するとき、放出経路は、100m 離れた断層地帯への水平方向ではなく、むしろ、地表への鉛直方向をとる（但し、放出先は同じ生態圏とする）。
- ・ 希釈された酸化性天水（FOHP）が亀裂帯に沿って局所的に地表から一様に約 10m の深度まで浸透し得る（例えば、Langmuir, 1997⁽¹⁴⁾; Nagra, 1990⁽²³⁾）。
- ・ 最後の 100m 部分の地表へ向けた隆起の間、EBS から最も遠くにある FF 母岩の外側 10m 部が酸化性（FOHP）状態となる。引き続き隆起・侵食により、次の FF 母岩域が酸化性状態となる。
- ・ 処分場が地表から 10m 以内になると、偶発的人間侵入の方がより確信的な検討用放出シナリオになると考えられるので、計算を停止する。

以上の検討結果より、本計算ケースでのパラメータ変化を表 6-1 のように設定する。

表 6-1 隆起・侵食シナリオのケース再設定の要約

	基本ケース(a=0.1)* ¹
ΔQ_R	NC
変化の開始時点	
変化の型式	
変化に要する期間	
$\Delta \text{Chemistry}$	FRHP → FOHP
変化の開始時点	$(9/a) \times 10^5$ 年後
変化の型式	a mm/y の速度で $(9.9/a) \times 10^5$ 年後まで EBS 方向への累進的な永続的变化
変化に要する期間	瞬時
ΔD_p	NC* ²
変化の開始時点	
変化の型式	
変化に要する期間	
緩衝材	NC
変化の開始時点	
変化の型式	
変化に要する期間	
FF 経路長	侵食により 10m 領域毎に徐々に減少
変化の開始時点	$(9/a) \times 10^5$ 年後
変化の型式	a mm/y の速度で $(9.9/a) \times 10^5$ 年後まで EBS 方向への累進的な永続的变化
変化に要する期間	瞬時

- BC = ベンチマークケース設定値
 ΔQ_R = 健全な母岩での流量変化
 $\Delta \text{Chemistry}$ = 地下水化学の変化
 ΔD_p = 緩衝材の空隙拡散係数の変化
 NC = ベンチマークケース設定値と同じ

*1 この変動ケースとして、「隆起率 (= 侵食率) 1mm/y (即ち a=1) ケース」を設定。

*2 $(9/a) \times 10^5$ 年後から始まる FOHP 状況下で、 $D_p(\text{Se}) = \text{BC} \times 0.17$;
 $D_p(\text{Cs}) = \text{BC} \times 2$; $D_p(\text{Tc}) = \text{BC} \times 0.17$; $D_p(\text{Np}) = \text{BC} \times 0.1$; $D_p(\text{U}) = \text{BC} \times 0.065$
 その他の全放射性元素の D_p 値は BC のものと変わらない。

6.3 計算結果

(1) 隆起率 (= 侵食率) 0.1mm/y ケース

図 6-2(1) には、全ての放射性核種に対する全線量率曲線を示す。全核種の線量率は、予期されるように、 9×10^6 万年後までは FRHP ベンチマークケースと同様である。

9×10^6 年後以降、いくつかの放射性核種 (例えば、Se-79, Tc-99) のインベントリは、無視し得るレベルにまで減衰し、また、他の放射性核種 (例えば、Cs-135) は、処分場から外へ移行してしまう。線量への主要寄与核種は、アクチニド系列の親核種 (例えば、Np-237, U-233, Th-229) と娘核種 (例えば、Pa-231, Ra-226) である。

酸化還元電位に鋭敏な放射性元素 (U, Np, Pu) では、FF 母岩に対して酸化性地帯が累進的に増えるにつれて、結晶質岩への分配係数が低下する (JNC, 1998)⁽¹¹⁾。従って、地表近くの酸化フロントが最初に 100m FF 経路長を侵食するとき、U, Np, Pu の放射性核種の放出率が即時に増加する (図 6-2(1)参照)。これは、FF 母岩外側の酸化性状態となった部分から、吸着していた U, Np, Pu の核種が最初に急速に放出された結果である。これらの酸化還元電位に鋭敏な親核種の初期の急速な脱着と放出の結果と関連して、酸化還元電位に鋭敏でない娘核種 (例えば、Pb-210, Ra-226, Th-229, Th-230) の線量率が、酸化性地帯が FF に侵入するにつれて、最初に低下する。

隆起・侵食の第 2 の影響は、FF 経路長が隆起率 0.1mm/y と同じ速度でゆっくり減少することである。このような FF 経路長のゆっくりした短縮化によって、放射性核種の線量率曲線を全体的に増加させる (図 6-2(1)参照)。この増加傾向は、親核種の半減期、線量率及び親・娘両核種の相対的な吸着特性の違いなどの要因によって変更を受ける。

全期間的には、最大のピーク線量率は、Np-237, U-233, Th-229 の放出に支配され、 9.9×10^6 年後に約 2×10^{-8} mSv/y となる。これは、同期間内におけるベンチマークケースのピーク線量率より 3 倍大きい値である。

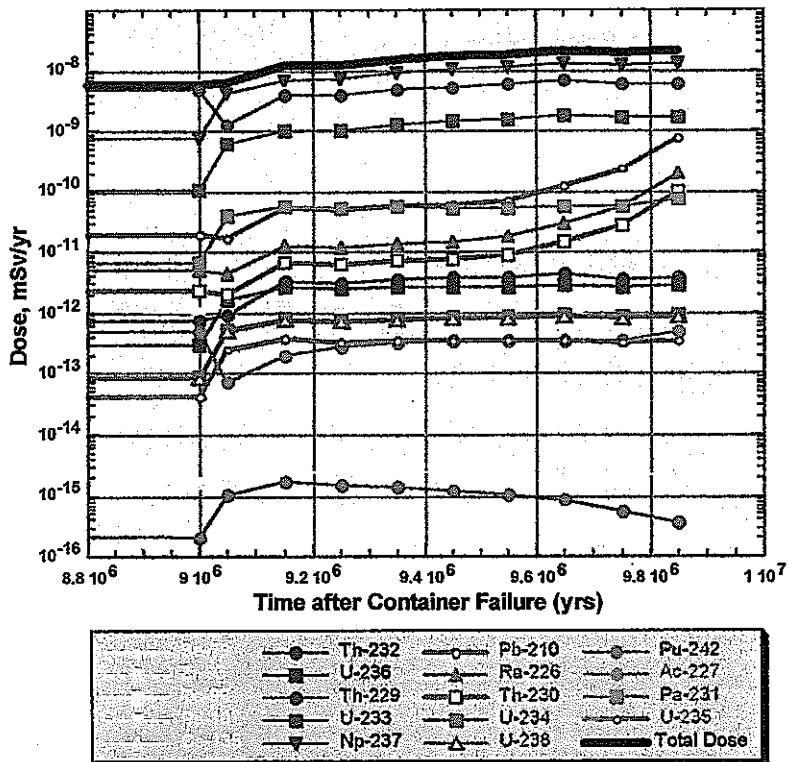
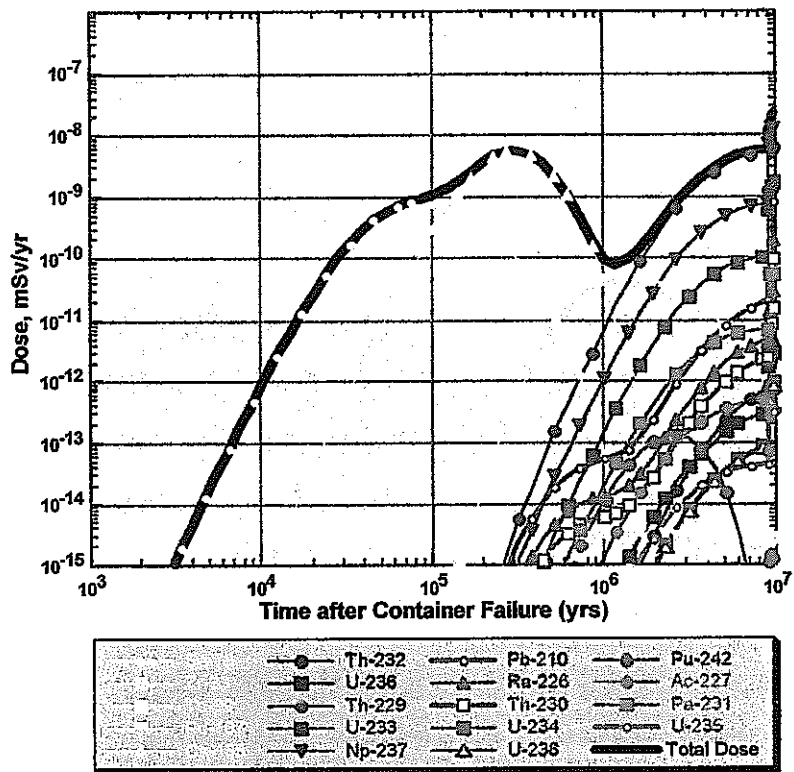


図 6-2(1) 隆起・侵食シナリオ基本ケース再計算結果：
 全線量率曲線(単体廃棄物パッケージ)
 上図：対数時間スケール表示
 下図：線形時間スケール拡大表示

(2) 隆起率 (=侵食率) 1mm/y ケース

保守的なケースとして、隆起率 (=侵食率) が 1mm/y の全線量率計算結果を図 6-2(2) に示す^(註)。

全核種の線量率は、90 万年後まではベンチマークケースと同様で、Se-79, Cs-135 が線量率を支配する。

90 万年後以降は、Np-237 と Tc-99 の線量率が大きく増加し、線量率を支配するようになる。これは、まず、酸化性 (FOHP) 状態の下でこれらの放射性元素の母岩に対する分配係数がかなり大きく低下することによる。Pu, U, Se の母岩への分配係数も FOHP 状態の下で大きく低下し、線量率の著しい増加をもたらしている。確かに、Np と U の母岩への分配係数は、(酸化還元電位に鋭敏な) Th よりもかなり小さいため、Np-237 と U-233 の線量率への寄与は、実際、ベンチマークケースと逆転して、Th-229 のそれよりも上回っている。

FF 母岩の多くの部分が酸化性・高流量状態となっていくことの影響は、全放射性核種の線量率をベンチマークケースのそれより早期側にシフトする効果をもたらすことである。FF の核種移行遅延効果は、処分場が地表へ隆起していくにつれて次第に低下していき、処分場から生態圏への経路が実効的に短縮化・加速化されることとなる。こうして、Tc-99 と Np-237 の支配的なピーク線量率がますます大きくなる。

10⁶ 年後には、EBS が酸化性状態となる。この段階で、酸化性状態が緩衝材への分配係数と放射性元素の溶解度に与える影響が明らかとなる。この時点で Np-237 は、FOHP 状態で溶解度がかなり大きくなり、また、緩衝材への分配係数がかなり低下することにより、線量率が 100 倍に増加する。U-233 も、FOHP 状態の地下水における溶解度と緩衝材への分配係数が同様の变化を示すため、線量率がかなり大きく増加する。Th-229 は、Np-237 と U-233 の娘核種であるため、やはり線量率が増加するが、酸化性状態での母岩並びに緩衝材への分配係数が先行核のそれより大きいいため、線量率はそれらより下回った状態となる。

U 同位体とその娘核種を含むその他のアクチニド崩壊連鎖系列も、この期間で

^(註) 但し、ここでは、表 6-1 において、 ΔQ_R も $\Delta Chemistry$ と同様のパターンで BC×5 に変化する場合 (時間ウェイト付け平均化法未使用 ; EBS の酸化性状態も想定) を表示する。

のピーク線量率が著しく増加しているが、これは、EBSが酸化性状態になると、Uの溶解度が著しく増加し、緩衝材への分配係数が低下することによる。

酸化性のFOHP状態の下では、Tcも溶解度が大きく増加し、緩衝材への分配係数が低下する。この期間の最後の区間でTc-99の線量率曲線がスパイク（突出的増加）を示しているが、Np-237及びその娘核種ほどの大きな増加ではない。その理由は、Tc-99のインベントリが、放射性崩壊と放出の早期化とが相俟って、この時点で実質的に枯渇化しているからである。EBSはTc-99に対しこの時点で実質的に空き家（empty house）状態となっている。

全期間的には、この変動ケースの最大のピーク線量率は（Np-237, U-233, Th-229, Tc-99の放出に支配され） 1.01×10^6 年後に約 2×10^{-5} mSv/yとなる。これは、同期間内におけるベンチマークケースのピーク線量率より3桁大きい値である。

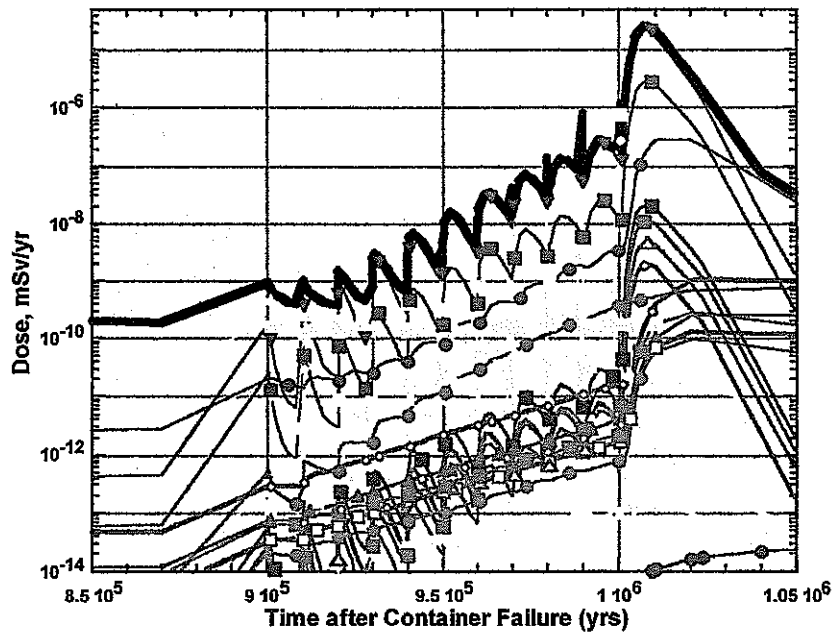
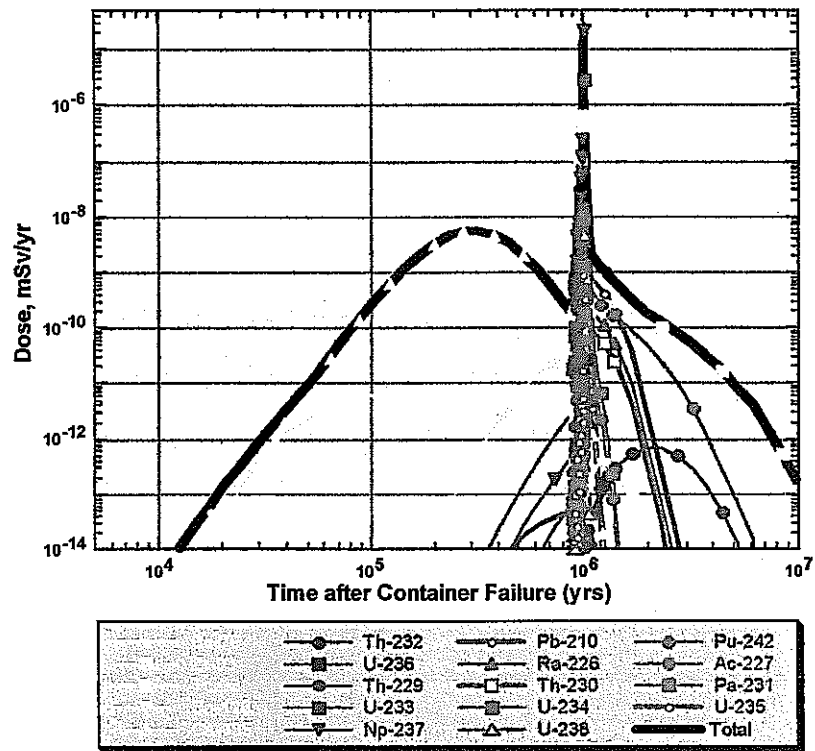


図 6-2(2) 隆起・侵食シナリオ変動ケース再計算結果:全線量率曲線
(単体廃棄物パッケージ)

上図:対数時間スケール表示

下図:線形時間スケール拡大表示

7. 気候変動／複合的シナリオ

日本のいかなる場所に設置される HLW 処分場にとっても、最も確実な“天然事象”シナリオは、将来の気候変動であろう。気候変動の正確なメカニズムはなおも論争の対象となるであろうが、次の数百万年間の気候変動によって生ずる境界条件変動は、古気候のかなり規則正しくかつ周期的変化より導かれ決定され得る。

7.1 処分場境界条件の変化

地質年代で言う過去 300 万年は第四紀にあたり、氷河期と間氷期が交互に発生している。この周期は、だんだん厳しくなる氷河期がおよそ 9 万年続いたあと突然約 1 万年続く間氷期になるという特徴がある。現在の間氷期（過去 11000 年）は「完新世」と呼ばれる。

地球規模の気候周期は、HLW 処分場の性能に次のような影響を与え得る。

- ・ 山岳氷河の直接的な形成で、それにともない一般には陸地表面の力学的・水理学的境界条件に変化が起こり得る (King-Clayton et al., 1997) ⁽¹²⁾。
- ・ ユースタシー的の海面の変化で、現在の海水面より昇降する可能性がある。
- ・ 永久凍土層の形成をもたらす気温の変化 (McEwen and deMarsily, 1991) ⁽¹⁵⁾
- ・ 年間降雨量（従って、涵養率）の変化

日本の HLW 処分場が高地あるいは山岳地帯の中もしくは境界上に設置されなければ、処分場が山岳氷河から受ける影響は、容易に除くことができよう。

また、(500m 以深の) 大きな深度に処分場を設置することにより、残存する影響は確実に緩和・遅延化され、除外することも可能であろう。

従って、気候変動から受ける影響は、気候変動シナリオが隆起・侵食シナリオと結び付いたときのみ最も重要性が増すと考えられる。このような可能性の高い不可避的な自然現象同士の結合は、他の処分場計画 (SKI, 1996) ⁽³⁵⁾ では、“中心的シナリオ”と呼ばれている。

処分場性能が、気候変動と隆起・侵食の結合から受ける影響の 1 つは、海面変動を起因とする地下の塩淡混合層の移動 (Glover, 1964⁽⁷⁾; Domenico and Schwartz, 1998⁽⁶⁾) で生ずる NF 地下水の周期的変動である。海面は、現在歴史的に最高位にある。将来、氷河状態へもどると、海面が低下し、塩淡混合層は海側へ移動す

るであろう。従って、塩淡水混合層が処分場を通過して、周期的に移動することによって影響が出るとすれば、それは、提示する処分場が、低起伏の海岸線にあって、現在の処分場深度での地下水が塩水状態にある場合である。

塩淡水境界面の深度は、母岩の透水係数、海岸線の単位長さ当りの淡水流量、地層の厚さといったサイト特性パラメータの関数である (Domenico and Schwartz, 1998)⁽⁶⁾。本研究の実例的な目的としては、代表的な塩淡水境界面の深度として 500m を設定する。

7.2 計算ケース設定

7.2.1 予備的検討

(1) 基本ケースと変動ケース

気候変動シナリオで生ずると考えられる影響（基本ケース）の概要を図式化したものを図 7-1 に示す。

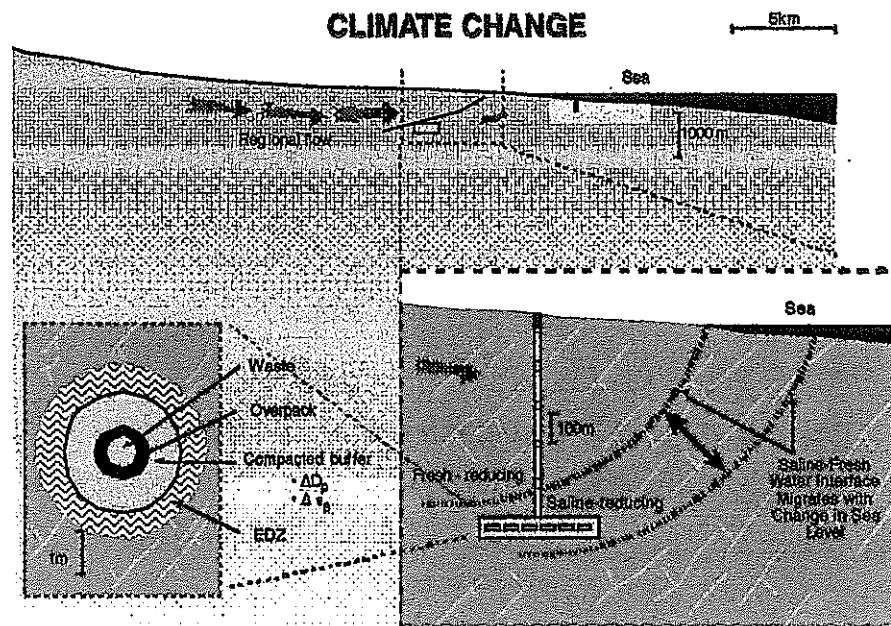


図 7-1 気候変動シナリオ基本ケースの概略図

出典：MRI, 1998⁽²²⁾

もし、気候変動と他のシナリオ事象（特に隆起・侵食シナリオ）とを結合する

ならば、もっと大きな変動がNFにもたらされる可能性があると考えられる。

(2) 変動ケースの計算結果

気候変動シナリオの基本ケースC₀。(MRI, 1998)⁽²²⁾に対する変動ケースは、本来、どの他のシナリオにも加えておくべき潜在的に不可避な天然事象と考えられる。従って、後述するように複合的シナリオのベースケースとして反映・計算した。

7.2.2 MESHNOTE-TIGER 計算ケース

気候変動シナリオで生ずると考えられる影響は、複合的シナリオ計算ケースとして、(6章で検討した)隆起・侵食による影響に加えられるものである。そこで、複合的シナリオ計算ケースでは、JNC 殿との議論に基づき、以下を考える。

- ・ 初期の処分場の位置は、緩やかな地形の海岸線にある結晶質岩の地下1000mのところである。
- ・ 初期の処分場の地下水は、SRHP(塩水)である。
- ・ 処分場には、一定の純隆起率(侵食率=隆起率)0.1mm/yを想定する。
- ・ 比較的急峻な塩淡境界面が、ある深度で、塩水の上に淡水がのるように形成されている。
- ・ この境界面が変動する位置は、間氷期(海水位高)には地表から400mの深度であり、また、海水位が低下して陸地側からの淡水のくさび部が海側へ移動する最大氷河期には、地表から500mの深度であるものとする。
- ・ 塩淡境界面は、処分場が地表から500mの深度まで上昇してくると、海面変動により、処分場を横断して移動する。処分場を横断する境界面の移動は、処分場が地表から400m以内まで上昇してくると、停止する。
- ・ 母岩の透水性が十分であるため、海面変化速度に追従した復往のない境界面移動が生じ(de Marsily, 1990)⁽⁵⁾、母岩の塩分変化に呼応して、1万年以内の時間スケールで、緩衝材の空隙水の塩分が変化するものとする(Wanner, 1987)⁽³⁹⁾。
- ・ 各気候周期の期間は、9万年間の最大氷河期のあとに1万年間の間氷期が続くという10万年周期とする。

以上の検討結果より、本計算ケースのパラメータ変化を表 7-1 のように設定する。

7.3 計算結果

図 7-2(2) には、全ての放射性核種に対する全線量率曲線を示す。本シナリオの線量率曲線は、予期される通り、 5×10^6 年後以前では、SRHP ベンチマークケースと同じである。

周期的気候変動による塩淡境界面移動の影響は、 5×10^6 年後から出始める。この時点で、塩分変化に鋭敏な分配係数と溶解度をもつ放射性元素で、処分場システム内にまで残っているものは、Ra だけである。Ra は、SRHP 状態では、FRHP 状態に比べ、分配係数が小さく、また、溶解度も大きくなる (JNC, 1998) ⁽¹¹⁾。これらの数値の変化により、SRHP 状態での Ra-226 の線量率は、FRHP 状態の場合に比べて、約 1 桁大きくなる (図 7-2(1) の上図参照)。Ra-226 の線量率の周期的変化は、処分場が、変動する塩淡境界領域の上方に抜け出す 6×10^6 年後の時点まで続く。Cs と Se の分配係数と溶解度も塩分変化の影響を受けるが、Cs-135 と Se-79 は、 5×10^6 年後にはすでに処分場システム内に存在しない (図 7-2(2) の上図 (対数時間スケール) 参照)。

6×10^6 年後以降、線量率曲線は、 9×10^6 年後までは FRHP ベンチマークケースの傾向に従う。その時点で、線量率曲線は、予期される通り、隆起・侵食シナリオ基本ケースの傾向に従う。

全期間では、最初の 10^6 年間の最大ピーク線量率は SRHP ベンチマークケースと同様、 $3 \times 10^{-8} \text{mSv/y}$ である。 10^6 年後以降でのピーク線量率は、隆起・侵食シナリオ基本ケースと同様、 $2 \times 10^{-8} \text{mSv/y}$ である。

表 7-1 複合的シナリオのケース設定の要約

	計算ケース
ΔQ_R	NC
変化の開始時点	
変化の型式	
変化に要する期間	
$\Delta \text{Chemistry}$	SRHP \leftrightarrow FRHP \rightarrow FOHP
変化の開始時点	5 $\times 10^6$ 年後から 6 $\times 10^6$ 年後までの期間；そのあと 9 $\times 10^6$ 年後に FOHP 状態に変化
変化の型式	周期的*；9 $\times 10^6$ 年後から 9.9 $\times 10^6$ 年後まで、0.1mm/y の速度で EBS 方向へ累進的に FOHP 状態へ永続的に変化
変化に要する期間	瞬時
ΔD_P	SRHP \leftrightarrow FRHP
変化の開始時点	5 $\times 10^6$ 年後から 6 $\times 10^6$ 年後までの期間
変化の型式	周期的*
変化に要する期間	瞬時
緩衝材	SRHP \leftrightarrow FRHP
変化の開始時点	5 $\times 10^6$ 年後から 6 $\times 10^6$ 年後までの期間
変化の型式	周期的*
変化に要する期間	瞬時
FF 経路長	侵食により 10m 領域毎に徐々に減少
変化の開始時点	9 $\times 10^6$ 年後
変化の型式	0.1mm/y の速度で 9 $\times 10^6$ 年後から 9.9 $\times 10^6$ 年後まで EBS 方向への累進的な永続的な変化
変化に要する期間	瞬時

BC = ベンチマークケース設定値

ΔQ_R = 健全な母岩での流量変化

$\Delta \text{Chemistry}$ = 地下水化学の変化

ΔD_P = 緩衝材の空隙拡散係数の変化

NC = ベンチマークケース設定値と同じ

*周期的 = {
 SRHP on t \in [5 $\times 10^6$, 5.01 $\times 10^6$)
 FRHP on t \in [5.01 $\times 10^6$, 5.09 $\times 10^6$)
 SRHP on t \in [5.09 $\times 10^6$, 5.1 $\times 10^6$)
 FRHP on t \in [5.1 $\times 10^6$, 5.19 $\times 10^6$)
 SRHP on t \in [5.19 $\times 10^6$, 5.2 $\times 10^6$)

以降同様に 10 万年周期で 6 $\times 10^6$ 年後まで続く

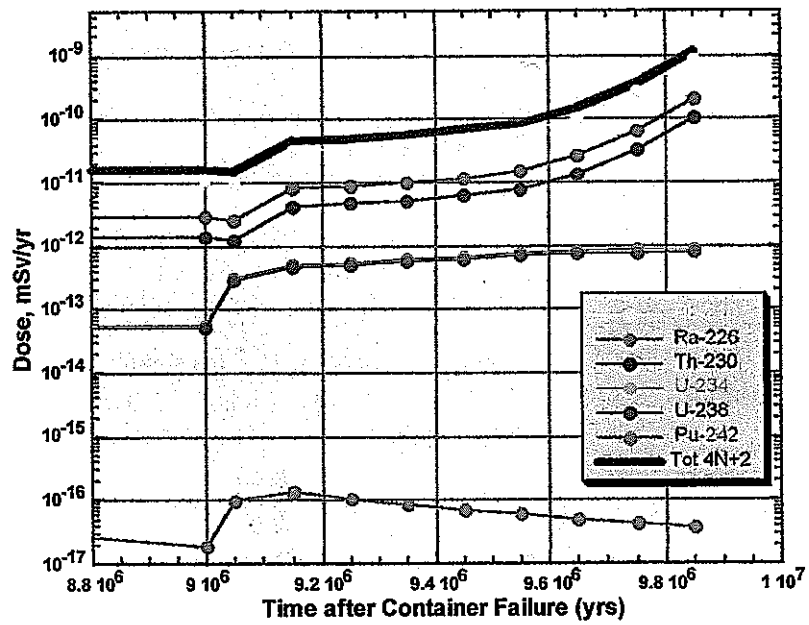
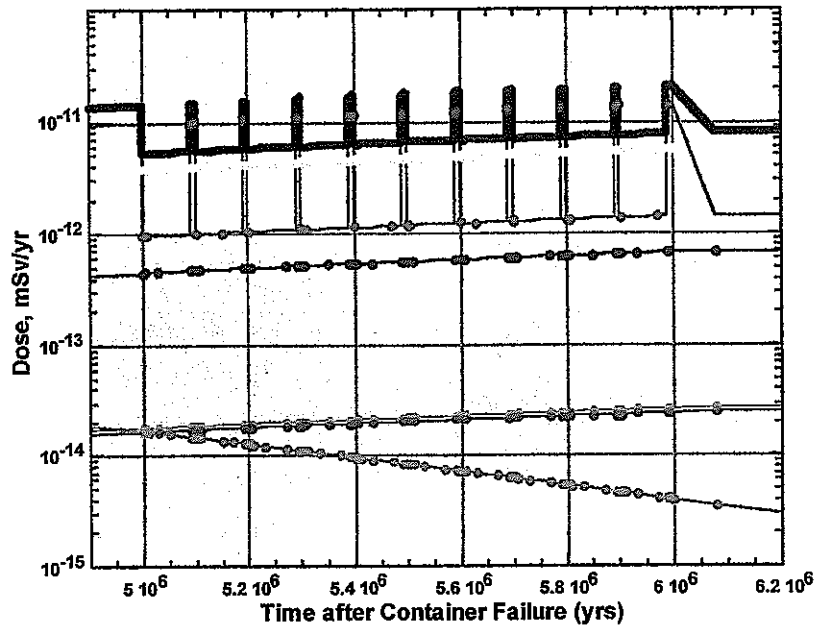


図 7-2(1) 複合的シナリオ計算結果:

4n+2 系列線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)

上図: 気候変動期間の拡大表示

下図: 隆起・侵食期間の拡大表示

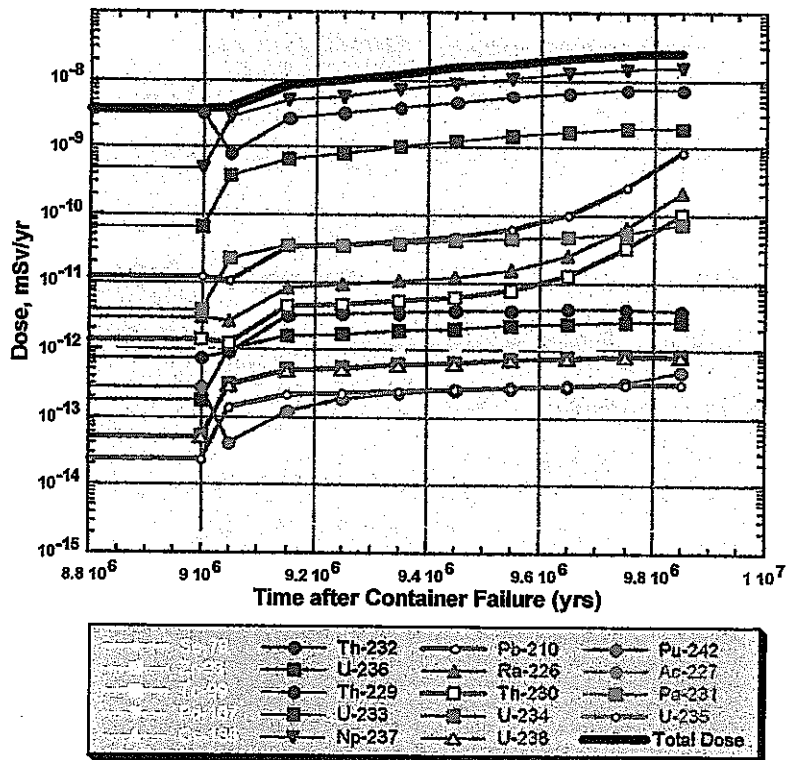
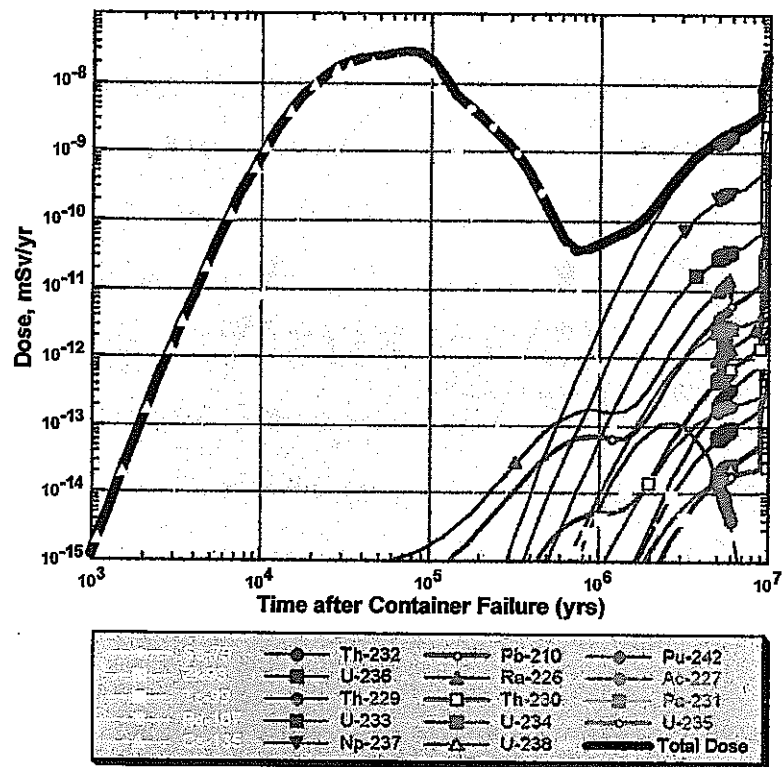


図 7-2(2) 複合的シナリオ計算結果：
 全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)
 上図：対数時間スケール表示
 下図：線形時間スケール拡大表示

8. 人間活動シナリオ

ここでは、人間活動（侵入）シナリオを、HLW 地層処分場近くに水採取用井戸を偶発的に掘削する行為として定義する。井戸については、下記の場合が考えられる。

- ・ 直接貫通：井戸が処分場と EBS の NF へ直接貫入すると想定。
- ・ 間接交差：井戸が処分場の周辺へ貫入すると想定。

ここでは間接的な侵入を想定する。

8.1 処分場境界条件の変化

間接的侵入ケースでは、水採取用井戸は、NF 母岩端の EBS から 10m 離れたところに貫入されると想定する。直接反映されると考えられる FEP には以下のものが挙げられる。

- ・ NF 母岩の構造的性質（水理学的破碎生成による母岩の透水性の永続的増加）及び一時的に高まる動水勾配によって影響を受ける NF 母岩の水理
- ・ 処分場の下方にある塩淡境界の一時的なアップコーニング（前年度報告書 3.2.2 項（MRI, 1998）⁽²²⁾ 参照）によって影響を受ける NF 空隙水化学
- ・ 塩分の一時的変化と、NF 母岩及び EDZ の透水性の永続的変化によって影響を受ける緩衝材の物理化学的性質

他のシナリオと比べ、人間侵入シナリオでの NF 特性の変化は、即時的な扱い方に近いと考えられる。放射性核種が直接混入した井戸水採取の可能性や掘削による作業員及び地上への影響は、接近シナリオとも通じるところがあると考えられるため、本シナリオでは考えない。

8.2 基本ケースと変動ケース

井戸水採取シナリオの影響に関する基本ケースと変動ケースの概要を図式化したものを図 8-1 に示す。

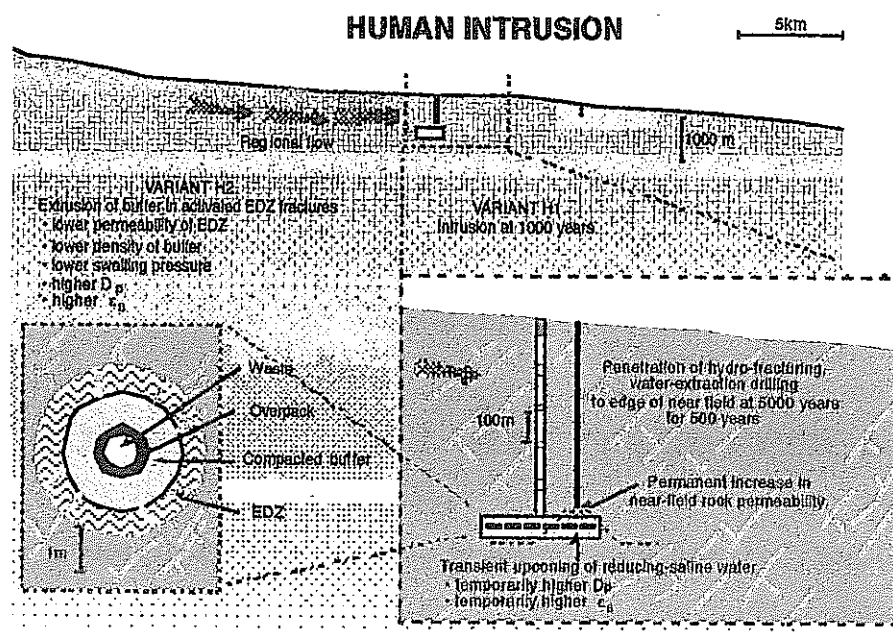


図 8-1 人間侵入シナリオ基本ケース/変動ケースの概略図

出典：MRI, 1998⁽²²⁾

(1) 変動ケース H_1

本シナリオ変動ケース H_1 は、掘削侵入が将来 2000 年後（閉じ込め喪失後 1000 年後）に生ずると想定されている以外、基本ケース H_0 (MRI, 1998) ⁽²²⁾ と本質的に同じである。

(2) 変動ケース H_2

変動ケース H_2 は、水理学的破碎生成によって同様に生ずると考えられる母岩の透水性（従って、NF 母岩の流量）増加が 100 倍に小さくなる点以外は、基本ケース H_0 と同じである。

8.3 変動ケースの計算結果

変動ケース H_1 , H_2 に関する計算結果を本編付録 D に示す。なお、本シナリオについては、MESHNOTE-TIGER 計算ケースの解析は行っていない。今後、隆起・侵食シナリオと結合した複合的シナリオの一つ（補足的シナリオ）として取り扱うことが考えられるからである。

9. まとめ

9.1 岩脈貫入ケース以外の検討結果

図 9-1 は、本章で MESHNOTE-TIGER コードにより計算した各天然事象シナリオ（除、岩脈貫入を伴う火山活動シナリオ変動ケース）の全線量率を相互に比較したものである。これらの結果の内容を以下にまとめる。

- ① FRHP 地下水を想定した天然事象シナリオのピーク線量率は全て、時間一定の SRHP ベンチマークケースのピーク線量率のおよそ 3 倍以下である。従って、ここで定義した天然事象シナリオ計算ケースからの性能への影響は、淡水とは反対の塩水環境下に処分場が立地する場合の影響とほぼ同程度の範囲のものと言える。もし、高塩分がサイト除外基準として採用されるべきであるという提言がなされないならば、これらの天然事象シナリオ計算ケースによって、線量率が全体的に大規模な（桁のオーダーの）変化と関係すると考えるのは軽率であろう。
- ② 最も大きな影響は、処分場端から 10m の地点に新しく形成されると想定した水みちとなる大規模断層から生ずる影響である。ある意味で、この極端なシナリオは、日本の HLW 処分場において、もし安全な隔離が EBS にしか効果がなかった場合に起こり得る性能を示しているとも言えよう。これは、Nagra の K-I 研究 (Nagra, 1994) ⁽²⁴⁾ で検討された“頑健”シナリオと類似している。
- ③ 本結果より、比較的少数の放射性核種 (Se-79, Cs-135, Zr-93 及び Np-237 とその娘核種) の化学及び輸送に関するデータが特に重要であることが指摘される。今後、将来の処分場環境のもとでのこれらの核種の化学的挙動を理解するための研究を進めることは、十分に正当化し得るだろう。
- ④ これらのシナリオ解析結果は、本計算と並行してベンチマークケースのデータの不確実性を感度分析している JNC 殿の計算結果と比較されるべきであろう。例えば、溶解度 (Vuorinen et al., 1998) ⁽³⁸⁾ や分配係数 (Stenhouse and Pöttinger, 1995⁽³⁶⁾; McKinley and Scholtis, 1993⁽¹⁶⁾) では、様々な国の処分場計画で用いられる基本データ間で大きく異なっている。このような不確実性は、計算される線量率に対し、本研究で検討した天然事象シナリオに対する計算ケース以上に

大きな影響を与え得る。同様に、概念モデルの不確実性も、計算される線量率に対し、本天然事象シナリオで見出された変化以上に大きな変化をもたらし得る。

- ⑤ 天然事象シナリオに対する処分場性能の頑健性をもっと完全に示すためには、さらにいくつかの変動ケースを検討する必要がある。例えばもっと大きな隆起率を設定し、 9×10^6 年後よりもっと早くに処分場が地表近くまで上昇する場合の影響を検討すべきである。緩衝材への負の影響、特に、緩衝材の突出あるいは侵食に関する検討も必要である。

9.2 岩脈貫入ケースの検討結果

前年度（及び今回）の検討結果より、岩脈貫入の影響は、深部処分場の性能に対して有害なものと考えられる。特に、マグマの高温が原因となって一連の連成事象が生じ得る。ここで検討した単一の岩脈貫入マグマの急速な冷却（固化）の結果、1年間続く空隙圧のパルス波による流量増加に比例して、ピーク線量率はベンチマークケースの約100倍増となった。この結果は、岩脈貫入の期間（時期や持続時間）と量とに依存するため、今後、より確信的な岩脈貫入シナリオの範囲を検討する上で、これらの不確実要素をより詳細な T-H-M-C 計算コード体系（Apted et al., to appear⁽²⁾）で分析・解明していくことが望まれる。

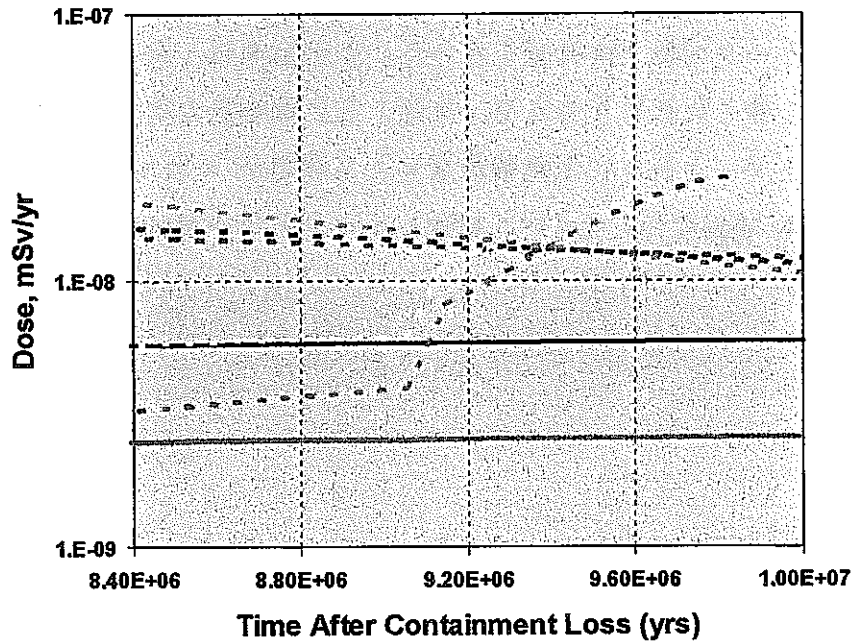
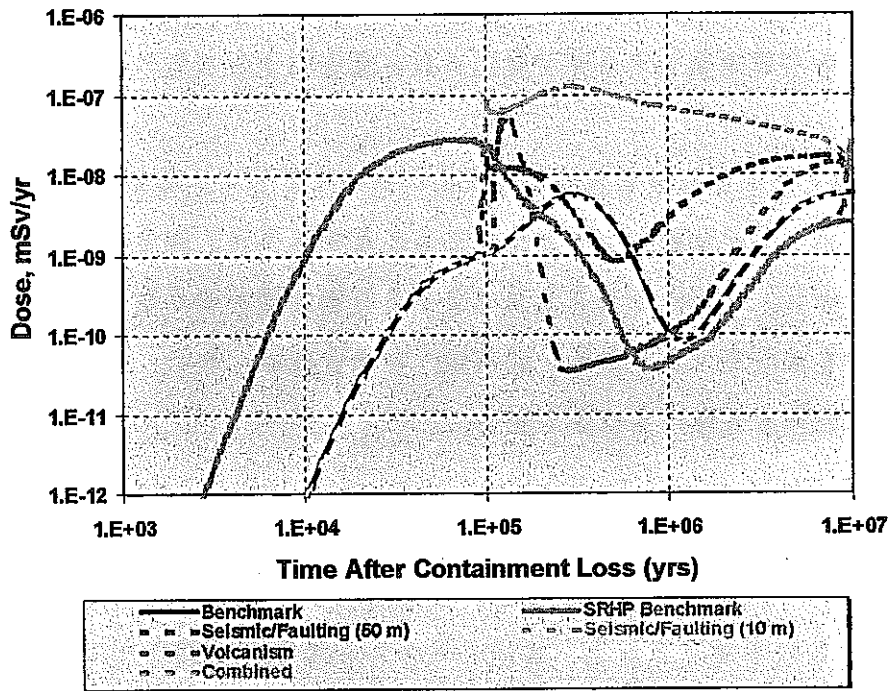


図 9-1 岩脈貫入ケース以外の全シナリオ変動ケース計算結果の比較:

全線量率曲線 (単体廃棄物パッケージ)

上図: 対数時間スケール表示

下図: 線形時間スケール拡大表示

10. おわりに

本年度の実施内容は、以下の通りである。

(1) 地震・断層シナリオ、隆起・侵食シナリオ、気候変動シナリオ、人間活動シナリオに対し、

- ① 変動ケースとして考慮すべき影響パターンの検討
- ② 変動ケースの設定とそれに対する解析フレームの設定
- ③ 上記解析フレームを用いた評価

(2) 火成活動シナリオ、地震・断層シナリオ、隆起・侵食シナリオ、気候変動シナリオからなる天然事象の組み合わせ（複合的シナリオ）に対し、

- ① 天然事象の組み合わせとその重要性の検討
- ② 複合ケースの設定とそれに対する解析フレームの設定
- ③ 上記解析フレームを用いた概略的評価

今後の課題として、以下のものが指摘し得る。

- ① 上記各シナリオの変動ケースもしくは複合ケースの補足分（補足的シナリオ）に対する核種移行への影響解析
- ② 上記以外のシナリオ（例えば、EBS 欠陥など）に対する検討・解析
- ③ 複合モデル（例えば、TOUGH2 改良型コードなど）の構築・解析

参 考 文 献

- (1) M.J.Apted, W.Zhou and P.F.Salter : 「Reference Case Calculations for Natural-Event Scenarios」 QuantiSci Report, QSCI-9810-1/2, QuantiSci, Inc., Denver, Colorado (to appear).
- (2) M.J.Apted, W.Zhou and P.F.Salter : 「Calculational Case for Dike Intrusion : Single Intrusion Variant」 QSCI-9810-5 (to appear).
- (3) L.M.Cathles : 「An analysis of the cooling of intrusives by ground-water convection which includes boiling」 *Economic Geology*, Vol. 72, pp804-826 (1977).
- (4) J.B.Davies and C.B.Archambeau : 「Geohydrological models and earthquake effects at Yucca Mountain」 *Nevada, Environ. Geology*, 32, pp23-35 (1997).
- (5) G.de Marsily : 「Validation of conceptual models of flow and transport in porous or fractured media」 *GeoVal90*, Nuclear Energy Agency, Paris, France (1990).
- (6) P.A.Domenico and F.W.Schwartz : 「Physical and Chemical Hydrogeology」 John Wiley & Sons (1998).
- (7) R.E.Glover : 「The pattern of freshwater flowing in a coastal aquifer, in sea water in coastal aquifers」 *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 1613-C, pp32-35 (1964).
- (8) M.Hashimoto, (ed) : 「Geology of Japan: Developments in Earth and Planetary Science, 08」 Terra Scientific Publishing Company, Japan and Kluwer Academic Publishers, Holland, p249 (1991).
- (9) 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).
- (10) J.P.Humm and P.C.Robinson : 「TIGER Transport in a Geochemically Evolving Region, Theoretical Background」 MC-6113A-5, QuantiSci, Henley-on-Thames, UK (1998).
- (11) JNC : written communication of data files (1998).
- (12) L.King-Clayton, N.Chapman, L.Ericsson and F.Kautsky (eds.) : 「Glaciation and hydrology: Workshop on the impact of climate change and glaciations on rock stresses, groundwater flow and hydrochemistry—past, present and future」 SKI Technical Report

- 97:13, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1997).
- (13) T.Kozaki, H.Sato, A.Fujishima, S.Sato and H.Ohashi : 「Activation energy for diffusion of cesium in compacted sodium montmorillonite」 *Journal of Nuclear Science and Technology*, 33(6), pp522-524 (1996).
 - (14) D.Langmuir : 「Aqueous Environmental Geochemistry」 Prentice Hall (1997).
 - (15) T.McEwen and G.deMarsily : 「The Potential Significance of permafrost to the Behavior of a Deep Radioactive Waste Repository」 SKI Report 91:8, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1991).
 - (16) I.McKinley and A.Scholtis : 「A comparison of radionuclide sorption databases used in recent performance assessments」 *J.Contam. Hydrol.* 13, pp347-363 (1993).
 - (17) ㈱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).
 - (18) ㈱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 (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).
 - (19) ㈱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 (III) -地下水シナリオの変動のモデル化に関する概略的検討-」PNC 委託研究成果報告書、PNC ZJ1222 95-001 (1995).
 - (20) ㈱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 (IV)」PNC 研究委託内容報告書、PNC ZJ1222 96-004 (1996).
 - (21) ㈱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 (V)」PNC 研究委託内容報告書、PNC ZJ1222 97-003 (1997).
 - (22) ㈱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 (VI)」PNC 研究委託内容報告書、PNC ZJ1222 98-003 (1998).
 - (23) Nagra : 「Pocos de Caldas Report No. 15: Summary and Implications for Radioactive Waste Management」 Technical Report 90-33, Nagra, Baden, Switzerland (1990).
 - (24) Nagra : 「Kristallin-I Safety Assessment Report」 Technical Report 93-22, Nagra, Baden, Switzerland (1994).
 - (25) D.Norton and J.Knight : 「Transport phenomena in hydrothermal system: Cooling plutons」 *American Journal of Science*, Vol. 277, pp937-981, October (1977).

- (26) H.Ohmori : 「Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development」 Bull. Dep. Geogr. Univ. Tokyo, 10, pp31-85 (1978).
- (27) H.Ohmori : 「A comparison between the Davisian scheme and landform development by concurrent tectonics and denudation」 Bull. Dep. Geogr. Univ. Tokyo, 17 (1985).
- (28) K.Pruess : 「TOUGH User's Guide」 LBL-20700, NUREG/CR-4645, SAND86-7104, Lawrence Berkeley National Laboratories, University of California at Berkeley (1987).
- (29) R.Pusch : 「Evolution of models for conversion of smectite to non-expandable minerals」 SKB Technical Report 93-33, Stockholm (1993).
- (30) A.M.Pytte : 「The kinetics of the smectite to illite reaction in contact metamorphic shales」 Thesis M.A., Dartmouth College, N.H. (1982).
- (31) P.C.Robinson, M.J.Williams and K.J.Worgan : 「A Description of MESHNOTE」 IM3479-1, Intera Information Technologies, Henley-on-Thames, UK (1992).
- (32) P.C.Robinson and R.Brown : 「MESHNOTE 3, Description of Input and Output Files」 MC-6114A-2, QuantiSci Limited, Henley-on-Thames, UK (1998).
- (33) N.Saito, A.Fujishima, T.Kozaki and H.Ohashi : 「Diffusion of chloride ions in compacted Na-montmorillonite」 1997 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, p563 (1997).
- (34) 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, pp381-394 (1992).
- (35) SKI : 「SKI SITE-94: Deep Repository Performance Assessment Project」 SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1996).
- (36) M.Stenhouse and J.Pöttinger : 「Comparisons of sorption databases used in recent performance assessments involving crystalline host rock」 Radioch. Acta, 66/67, pp267-275 (1995).
- (37) B.Velde, (ed.) : 「Origin and Mineralogy of Clays」 Springer-Verlag, Berlin, Germany (1995).
- (38) U.Vuorinen, S.Kulmala, M.Hakanen, L.Ahonen and T.Carlson : 「Solubility Database for TILA-99」 POSIVA 98-14, POSIVA OY, Helsinki, Finland (1998).

- (39) H.Wanner : 「Modeling interactions of deep groundwaters with bentonite and radionuclide speciation」 Nuclear Technology, 79, pp338-347 (1987).
- (40) T.Yoshikawa : 「Denudation and tectonic movement in contemporary Japan」 Bull. Dept. Geogr. Fac. Sci. Univ. Tokyo, 6, pp1-14 (1974).
- (41) W.Zhou and M.J.Apted : 「Conceptual Model Evaluation of Dike Intrusion Scenario」 QuantiSci Report, QSCI-9709-3, QuantiSci, Inc., Denver, Colorado, July (1998).

Quantitative Assessment of Consequences of Natural Events for the Performance of Waste Disposal Isolation System

- On Consequences of Natural Events in Groundwater Scenario -

(REPORT ON RESULT OF JNC-COMMISSIONED RESEARCH SUMMARY)

February, 1999

Mitsubishi Research Institute, Inc.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

|| Japan Nuclear Cycle Development Institute
1999

Quantitative Assessment of Consequences of Natural Events
for the Performance of Waste Disposal Isolation System
- On Consequences of Natural Events in Groundwater Scenario -

Hiroo Ohkubo*

Abstract

This year, first, on seismicity and faulting, uplift and erosion, climate change and human activity (intrusion) scenarios, while effects of those scenarios were primarily evaluated in reference cases last year, variant cases with another kind of patterns of models and parameters compared to reference cases, have been studied and set, and their effects have been analyzed and evaluated.

Secondly, referring to the results of the above discussions, a preliminary study was made to evaluate the complex effect caused by combining natural events such as volcanism, seismicity and faulting, uplift and erosion and climate change, where discussions have been made on which combined scenario was more important and how to set the analysis framework.

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : R&D Coordination Group, Geological Isolation Research Project

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

地層処分システム隔離性能に対する 天然事象影響の定量化

－ 地下水シナリオに対する天然事象の影響 －

大久保博生*

要 旨

本年度は、まず、地震・断層、隆起・侵食、気候変動及び人間侵入の各シナリオについて、各天然事象が核種移行に及ぼす影響を概略的に評価した前年度の基本ケースに対し、本年度は、基本ケースとは異なる影響のパターンを取り扱うための変動ケースを検討・設定し、その影響解析・評価を行った。

次に、以上の検討結果を踏まえて、火成活動、地震・断層、隆起・侵食、気候変動といった天然事象の組み合わせによる複合的な影響について、その重要性、解析フレームの設定の検討並びに概略的評価を行った。

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：2000年レポートチーム 研究調整グループ

*株式会社 三菱総合研究所

TABLE OF CONTENTS

	page
1. Introduction	1
2. Background to Calculation of Variant Cases	3
2.1 Background for calculation	3
2.2 Description of Benchmark Case (Re-calculation of Base Case)	4
2.2.1 Calculation Case	4
2.2.2 Calculation Results	5
3. Impacted FEPs of the Repository Process System Model	9
4. Volcanism Scenario	11
4.1 Changes in Repository Boundary Conditions	11
4.2 No Dike Intrusion Case	11
4.2.1 Calculation Case	11
4.2.2 Calculation Results	13
4.3 Dike Intrusion Case	16
4.3.1 Calculation Case for Dike Intrusion	16
4.3.2 Calculation Results	17
5. Seismicity and Faulting Scenario	20
5.1 Reference and Variant Cases	20
5.2 Calculation Case	20
5.2.1 Preliminary Study	20
5.2.2 Calculation Case for MESHNOTE-TIGER Code	22
5.3 Calculation Results	23
6. Uplift and Erosion Scenario	27
6.1 Changes in Repository Boundary Conditions	27
6.2 Calculation Case	28
6.2.1 Preliminary Study	28

6.2.2	Calculation Case for MESHNOTE-TIGER Code	29
6.3	Calculation Results	31
7.	Climate/Combined Scenario	36
7.1	Changes in Repository Boundary Conditions	36
7.2	Calculation Case	37
7.2.1	Preliminary Study	37
7.2.2	Calculation Case for MESHNOTE-TIGER Code	38
7.3	Calculation Results	39
8.	Human Intrusion Scenario	43
8.1	Changes in Repository Boundary Conditions	43
8.2	Reference and Variant Cases	43
8.3	Calculation Results on Variant Cases	44
9.	Summary	45
9.1	Results Except for Dike Intrusion Case	45
9.2	Results on Dike Intrusion Case	46
10.	Concluding Remarks	48
	References	49

CONTENTS OF TABLES

	page
Table 1-1 Research schedule	2
Table 4-1 Summary table for re-defined case for volcanism scenario	13
Table 4-2 Summary of parameter change in the dike intrusion scenario calculation ·	17
Table 5-1 Summary table for re-defined case for seismicity and faulting scenario ··	23
Table 6-1 Summary table for re-defined case for uplift and erosion scenario	30
Table 7-1 Summary table for calculation case for combined scenario	40

CONTENTS OF FIGURES

	page
Fig.1-1 Process System Model analysis diagram of scenarios for JNC's H12 report	2
Fig.2-1 Conceptual diagram for benchmark case	4
Fig.2-2(1) Benchmark case FRHP results: total dose (dose from a single waste package)	6
Fig.2-2(2) Benchmark case SRHP results: total dose (dose from a single waste package)	8
Fig.2-2(3) Comparison of FRHP and SRHP benchmark cases: total dose from a single waste package by total FP and Actinide Chain doses	8
Fig.3-1 Process Influence Diagram (PID) developed by JNC for repository NF ..	10
Fig.4-1 Schematic diagram of reference case and variant cases for volcanism scenario (with no dike intrusion)	13
Fig.4-2(1) Volcanism reference case results (with no dike intrusion and illitization of buffer) total dose (dose from a single waste package)	14
Fig.4-2(2) Volcanism variant case results (with no dike intrusion and no illitization of buffer) total dose (dose from a single waste package)	14
Fig.4-3(1) Doses of radionuclides from a single waste package for single-dike intrusion scenario	18
Fig.4-3(2) Primary contributors to the total dose and their doses for the single-dike intrusion scenario (Note linear time scale)	18
Fig.5-1 Schematic diagram of reference case and variant cases for seismicity and faulting scenario	21
Fig.5-2(1) Seismic and faulting reference case (50m) results: total dose (dose from a single waste package)	24

Fig.5-2 (2) Seismic and faulting variant case (10m) results:	
total dose (dose from a single waste package)	26
Fig.5-2 (3) Comparison of reference (50m) and variant (10m) seismic and faulting cases: total dose from a single waste package by total FP and Actinide Chain doses	26
Fig.6-1 Schematic diagram of reference and variant cases for uplift and erosion	28
Fig.6-2(1) Uplift and erosion reference case results: total dose (dose from a single waste package)	32
Fig.6-2(2) Uplift and erosion variant case results: total dose (dose from a single waste package)	35
Fig.7-1 Schematic diagram of reference case for climate change scenario	37
Fig.7-2(1) Combined case results: 4N+2 chain (dose from a single waste package) ·	41
Fig.7-2(2) Combined case results: total dose (dose from a single waste package) ··	42
Fig.8-1 Schematic diagram of reference case and variant cases for human intrusion scenario	44
Fig.9-1 Summary of all scenarios results except for dike intrusion case: total dose (dose from a single waste package)	47

1. Introduction

It is important to evaluate effects of natural events (igneous, seismic, and fault activities, etc.) on HLW disposal system performance in groundwater scenarios (radionuclides are mobilized by groundwater and transferred in strata), because rare events make the scenarios diversified and uncertain.

This research project aims at developing groundwater scenarios that take into account these natural events and studying methods to quantitatively evaluate HLW disposal system performance based on the scenarios.

Rare natural events such as igneous, seismic, and fault activities affect HLW disposal system performance in groundwater scenarios by making the scenarios diversified and uncertain. In this research project, effects of natural events on groundwater scenarios will be evaluated. First, imaginary boundary will be assumed between a region in which natural events occur and the fields that dictate transfer of radionuclides in strata. Next, a number of effects of natural events will be replaced by the changes of boundary conditions (hydrological, mechanical, thermal, and chemical parameters.) Effects of natural events will then be evaluated by analyzing transfer of radionuclides under the changes of these boundary conditions, for the assessment of impacts on the performance of waste disposal isolation system.

In this research "process system models (PSM)" is employed to analyze scenarios (see Fig.1-1). For past years, the research titled by 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System (I)~(VI)」(MRI, 1993~1998)^{(17)~(22)} has been made as shown in Table 1-1.

This year, first, in order to make an quantification of consequence of natural events in the groundwater scenario, based on the results obtained previously, on seismicity and faulting, uplift and erosion, climate change and human intrusion scenarios, variant cases, in which the model and parameters are varied to treat another kind of patterns compared to those discussed previously (called reference case) , will be studied and set, and their effects will be studied and evaluated. Secondly, referring to the results of the above discussions, a preliminary study will be made to evaluate the complex effect caused by combining the natural phenomena such as volcanism, seismicity and faulting, uplift and erosion and climate change. These results will be reflected on JNC's H-12 report.

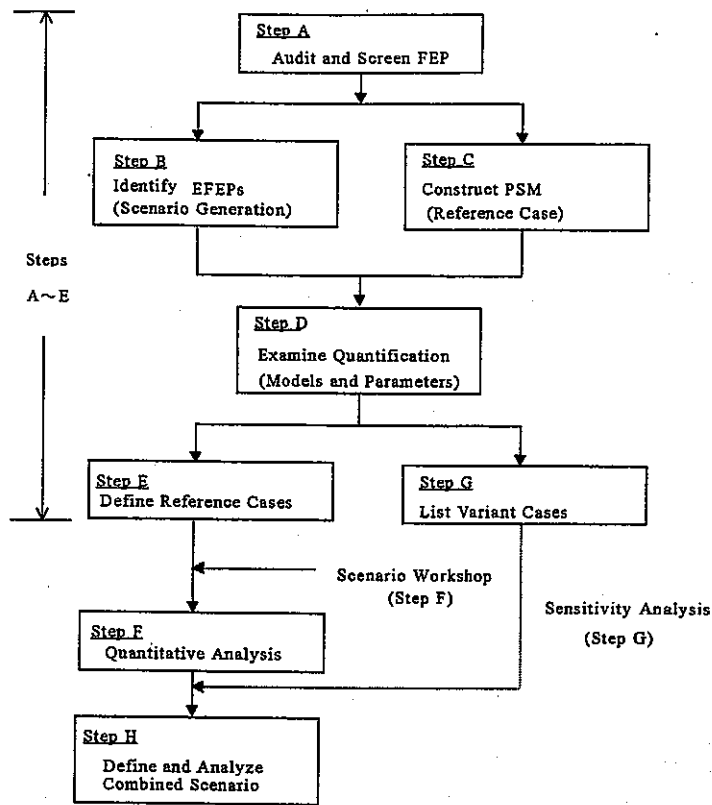


Fig. 1-1 Process System Model analysis diagram of scenarios for JNC's H12 report

Table 1-1 Research schedule

research item		volcanism	faulting and seismicity	uplift and erosion	climate change	human intrusion
A	audit and screening FEPs ^{*1} in the groundwater scenario	completed	completed	completed	completed	completed
B	identification of EFEP ^{*2} and investigation into relevant phenomena etc.	completed	completed	completed	completed	completed
C	study on the conceptual model ^{*3} concerning transfer of effects of natural phenomena	completed	completed	completed	completed	completed
D	examining mathematical models and parameters to quantify conceptual models	completed	completed	completed	completed	completed
E	defining a basic framework (reference case) for consequence analysis	completed	completed	completed	completed	completed
F	setting and evaluation of analysis framework on reference case	completed	completed	completed	completed	completed
G	study, setting and evaluation of analysis framework on variant case with another kind of consequence patterns compared to reference case	completed	<u>this year</u>	<u>this year</u>	<u>this year</u>	<u>this year</u>
H	setting and evaluation of analysis framework on the combined case	<u>this year (partly continued next year)</u>				

*1 : an abbreviation of Features, Events and Processes

*2 : External FEP defined as FEP that may occur between natural events and the imaginary boundary

*3 : models describing interrelations among EFEP chains, FEP chains and transfer of EFEP effects through FEP chains

2. Background to Calculation of Variant Cases

2.1 Background for calculation

The MENTOR code for near-field performance assessment has been previously described in the study of Reference Case for the volcanism, faulting and seismicity, uplift and erosion, climate change and human intrusion scenarios (MRI, 1997/1998)⁽²¹⁾⁽²²⁾.

The first step after defining, analyzing and discussing on reference case for each scenario in this research is to discuss variant cases as another patterns compared to reference cases. Through this step, a range of impact on nuclide migration caused by each scenario can be quantified.

The second step is to discuss a scenario combining each scenario with another one (see Fig.1-1). This is a scenario that combines the processes and scenario-initiating events that would impact on a repository complexly. Thus, impacts arising from seismicity/faulting, climate change and possibly uplift and erosion should be combined together into a complex time-evolution profile.

Thus, scenario study was performed based on the analysis by using not only MENTOR code in preliminary study but also MESHNOTE-TIGER computation code (Robinson et al., 1992⁽³¹⁾; Robinson and Brown, 1998⁽³²⁾; Humm and Robinson, 1998⁽¹⁰⁾) as the similar assessment framework (on arrangement of data and definition of scenario calculation case) to consider the time-variant environmental conditions and make an efficient contribution to JNC's H-12 final report. Therefore, first, benchmark case (a standard case for all the scenario calculation cases) and the reference and variant cases defined for natural events (volcanism, faulting and seismicity, uplift and erosion) were re-calculated. Then, a combined scenario was constructed by combining climate change with uplift and erosion to be analyzed and compared to each re-calculation case.

The initial values for key parameters in benchmark case (see Fig. 2-1) to be used in the scenario calculations were taken from JNC data sources (JNC, 1998)⁽¹¹⁾.

2.2 Description of Benchmark Case (Re-calculation of Base Case)

2.2.1 Calculation Case

The “benchmark case” (Fig.2-1) assumes that present-day conditions at a repository site remain unchanged into the future (time-independent parameters). A 100-m pathway of rock, either granitic or sedimentary in character, is assumed between the EBS and a major water-bearing, sub-vertical fracture zone. The ambient groundwater is assumed to be fresh water with moderately high pH and reducing character (FRHP).

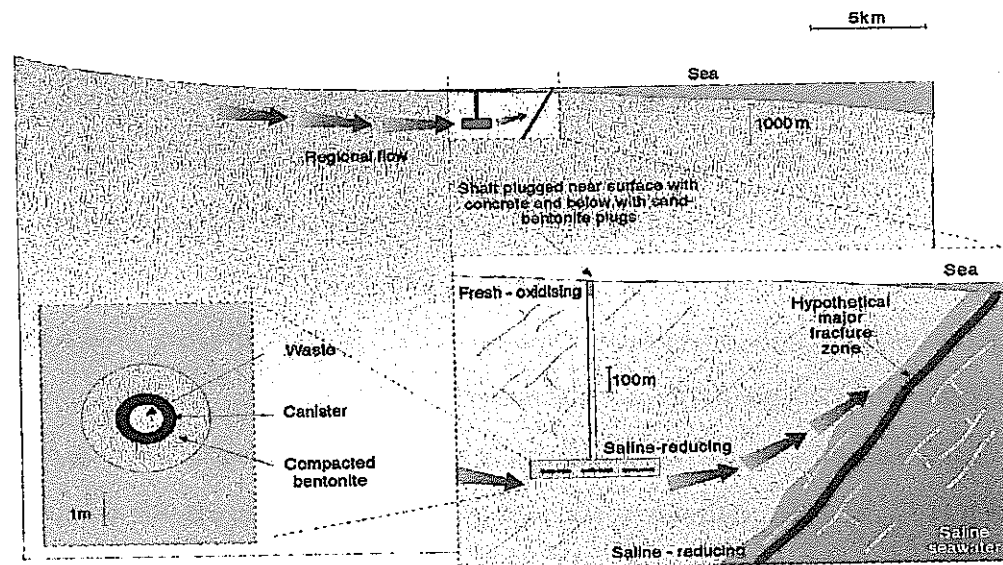


Fig.2-1 Conceptual diagram for benchmark case

For the benchmark case and all subsequent scenario case calculations, simulation is conducted for a single waste package.

The assumed depth of a repository is 1000 meters for a repository in granitic rock.

With respect to groundwater chemistry, three other types of “scenario” groundwaters are also listed here.

- (a) fresh water with moderately high pH and oxidizing character (FOHP) assumed to represent shallow surface meteoric waters
- (b) saline water with moderately high pH and reducing character (SRHP) assumed to represent groundwaters at near-coastal sites influenced by sea water
- (c) saline water with moderately low pH and reducing character (SRLP) assumed to represent magmatic waters.

The calculation result is represented as the dose contribution to a farmer / agricultural-worker biosphere.

2.2.2 Calculation Results

(1)FRHP Case

Fig.2-2(1) presents the total dose curve for all radionuclides for the benchmark case. The primary contributors to the total dose include Se-79 at early time, Cs-135 and Zr-93 in intermediate time, and Th-229 (and other members of the $4n+1$ actinide series) at long time.

Because Se-79 is not sorbed in the buffer and is only slightly sorbed in the host rock, it dominates the total dose for the first 10,000 years. The low solubility of Se imposes a restraint for further increase in Se-79's release at later times. After 10,000 years, the total dose is dominated by Cs-135, a nuclide that has a greater inventory and is soluble, but is more strongly sorbed in both buffer and host rock than Se. The dose of Cs-135 peaks at 280,000 years, giving the peak dose at this time of 5×10^{-9} mSv/yr/canister. As a consequence of depletion of Cs-135, the total dose curve falls after 280,000 years with the fall-off of Cs-135 release.

Peak dose then increases again at 1.4×10^6 years due to the release of Th-229. It should be noted that between 1.2×10^6 years and 1.4×10^6 years, the total dose is dominated by Zr-93, a nuclide with high initial inventory, moderate solubility, and high sorption coefficient.

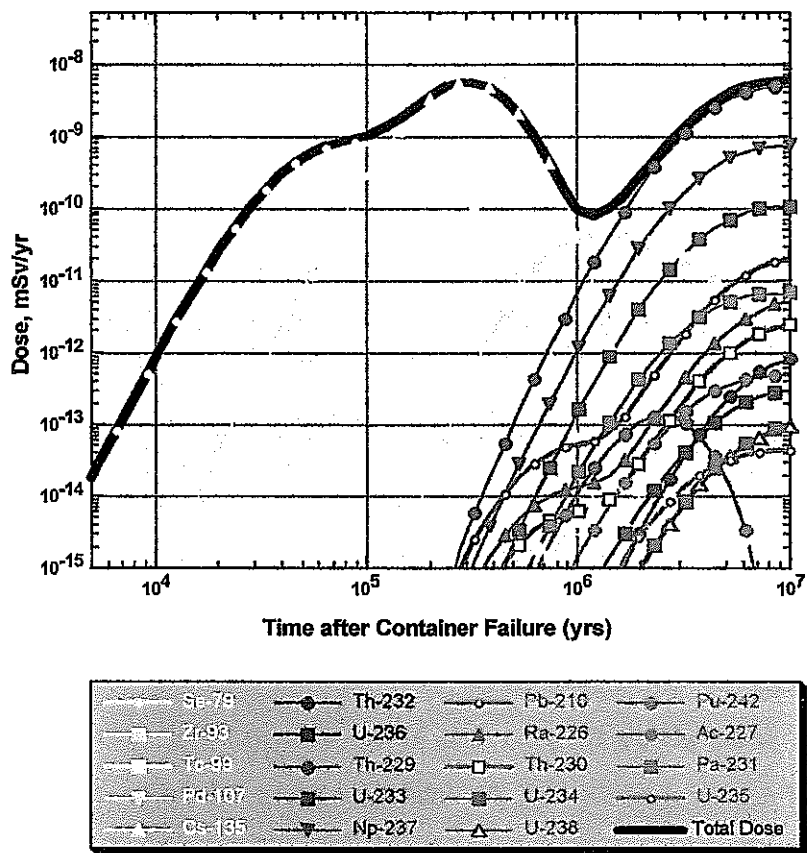


Fig.2-2(1) Benchmark case FRHP results: total dose (dose from a single waste package)

Being the last radionuclide in $4n+1$ decay series and Th having the same sorption coefficient as U and Np by the rock, Th-229's activity as it exits into the biosphere is essentially the same as its parent and grandparent nuclides: U-233 and Np-237. Th-229 has the highest dose conversion factor from "Bq/yr" to "mSv/yr"(JNC, 1998)⁽¹¹⁾ among the three nuclides. Hence, Th-229 dominates the total dose between 10^6 years to 10^7 years. Following the $4n+1$ series, nuclides from $4n+2$ decay series make relatively insignificant contributions to the total dose, as can be seen from Fig.2-2(1). Nuclides from the $4n$ and $4n+3$ series contribute even lower amounts to the total dose calculation.

In the first 10^6 years the maximum peak dose for the benchmark case is 6×10^{-9} mSv/yr/canister occurring at about 300,000 years dominated by Cs-135. A similar peak dose rate is calculated to occur at 10^7 years from Th-229.

(2)SRHP Case

The benchmark case for SRHP groundwater assumes the same time-invariant (constant future) conditions as described for the FRHP benchmark case. The sole difference is that the assumed deep groundwater has a higher salinity than FRHP. This might, for example, represent near-coastal sites in which deep groundwater is affected by seawater. The total, integrated dose rate curve is shown in Fig.2-2(2).

The total dose rate curve is initially dominated by Cs-135 rather than Se-79. At intermediate time after re-pository closure (10^5 to 10^6 years), Se-79 and then Zr-93 are the dominant contributors to dose rate. At times greater than 10^6 years, Th-229, as well as Np-237 and U-233, are expected to be the major contributors to dose rate.

In summary for the SRHP benchmark case, in the first 10^6 years the maximum peak dose is 3×10^{-8} mSv/yr/canister occurring at about 90,000 years dominated by Cs-135. A second peak dose rate of 2×10^{-9} mSv/yr/canister is calculated to occur at 10^7 years attributable to Th-229.

Fig.2-2(3) compares the dose rate curves for the FRHP and SRHP benchmark cases. The most significant difference is earlier, more rapid release of Cs-135 for the SRHP case. This is because Cs sorption on both the buffer and the host rock is lower under SRHP conditions than under FRHP conditions. Combined these factors, a peak dose rate for the SRHP benchmark calculation case is 5 times higher than the peak dose rate for the FRHP calculation case.

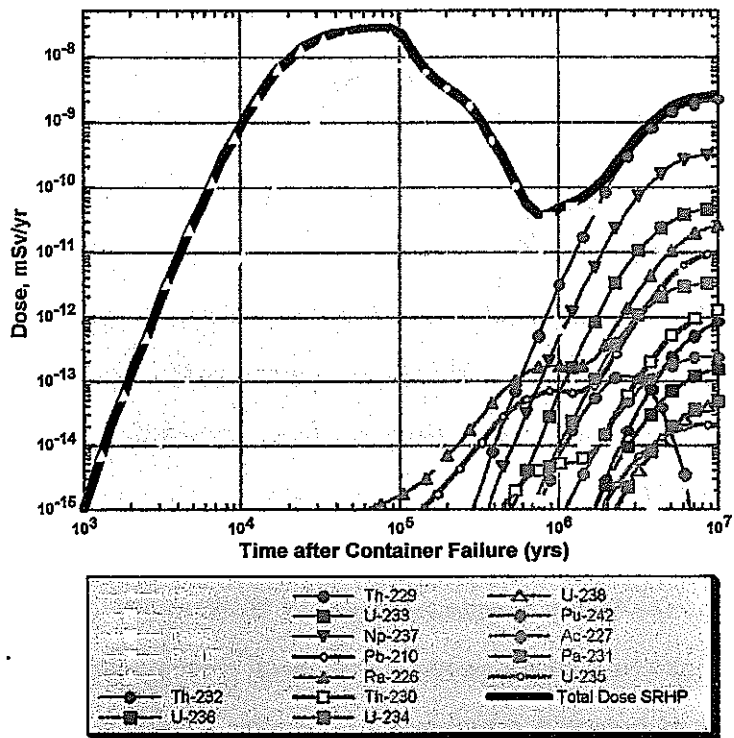


Fig.2-2(2) Benchmark case SRHP results: total dose (dose from a single waste package)

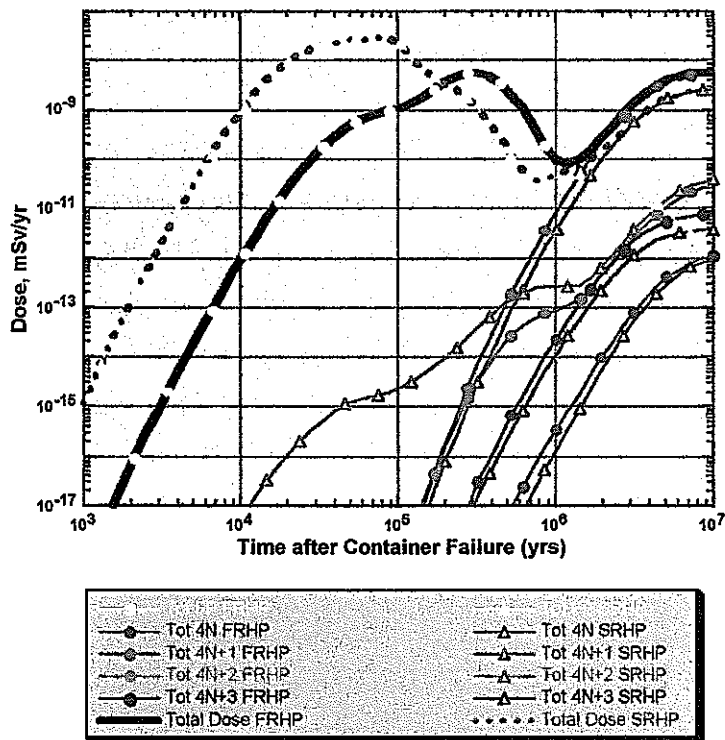


Fig.2-2(3) Comparison of FRHP and SRHP benchmark cases: total dose from a single waste package by total FP and Actinide Chain doses

3. Impacted FEPs of the Repository Process System Model

For the *groundwater scenario* category, the three critical near-field FEPs that may be impacted are:

- Hydrology in the host rock
 - change in hydraulic head driving groundwater flow (change in surface topography/ regional hydrology effect)
 - change in rock permeability controlling flow (rock fracturing/ mechanical effects)
 - change in flow due to heating (deep-seated intrusion of magma chamber/ regional hydrological-thermal effect)
- Groundwater chemistry in the host rock and buffer
 - migration of *saline* water interface driven by changes in recharge (density-driven flow/ recharge-hydrology effect)
 - influx of *oxidizing* groundwater (penetration of surface waters/regional hydrology effect)
 - elevated temperatures displacing mineral-water equilibria (deep-seated intrusion of magma chamber/ regional thermal-metamorphic effect)
 - influx and mixing of magmatic water (deep-seated intrusion of magma chamber/ regional hydrological-metasomatic effect)
- Physicochemical properties of buffer
 - pore structure changes as a function of salinity (chemical effects)
 - erosional mass-loss of buffer material (rock fracturing/mechanical stress effects)
 - mineralogical alteration of the buffer (deep-seated intrusion of magma chamber/ thermal-chemical effects).

Why these three FEPs were selected is based on the IL(influence level) values(MRI, 1994)⁽¹⁸⁾ assigned by expert judgement (MRI, 1998) ⁽²²⁾. These impacted FEPs and their influence on other FEPs are shown in Fig.3-1, as a simplified process influence diagram (PID) developed by JNC for the near-field. This year, the results of discussions on thermally driven flow in hydrology and metamorphic change / metasomatic change in groundwater chemistry are reported since they were not mentioned in previous report (MRI, 1998) ⁽²²⁾.

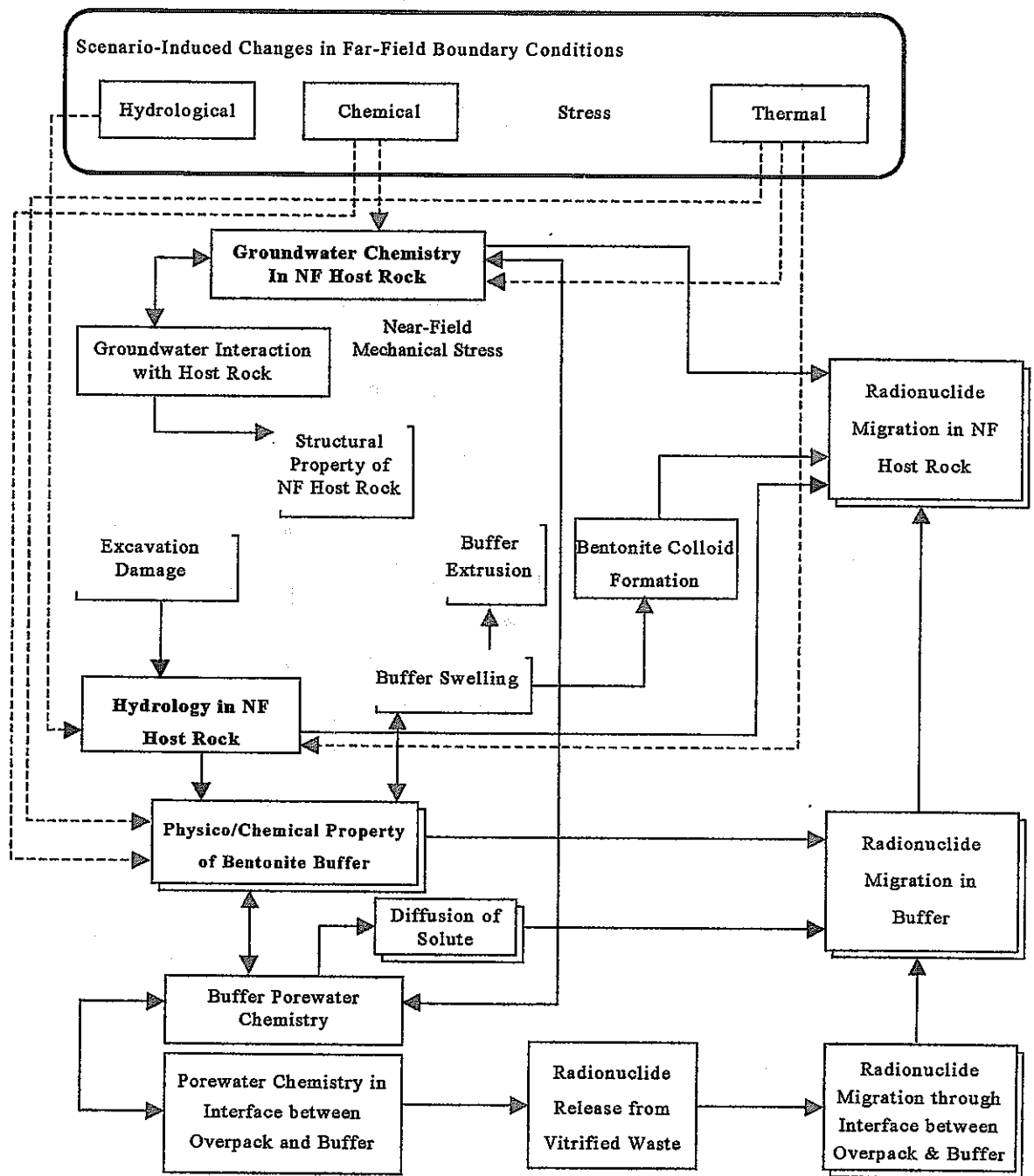


Fig.3-1 Process Influence Diagram (PID) developed by JNC for repository NF (Simplifications have been made for the specific scenarios considered in this report.)

4. Volcanism Scenario

A volcanic island arc, such as Japan, is formed by the convergence of two tectonic plates. The distribution of volcanic centers is strongly controlled by the geometry of subducting tectonic plates. The recent (Quaternary), active volcanic front in Japan is 80 to 150 km vertically above the Wadati-Benioff seismic zone that defines such subducting plates. Landward of the volcanic front, toward the Asian continent, recent volcanism is more widely distributed and of reduced volume compared to the actual volcanic front. A variety of physical and chemical indicators and calculations suggest that impacts of volcanism are limited to within 10 to 15 km of volcanic centers. Location of a repository within or near the boundary of this terrain would be required to treat volcanism as a credible scenario for repository performance assessment.

4.1 Changes in Repository Boundary Conditions

The intrusion of a deep-seated magma chamber and development of an overlying strato-volcano is selected as the magmatic event.

Previous studies of thermal-chemical-hydrological effects arising from intrusion of magma chambers have been conducted (e.g., Cathles, 1977⁽³⁾; Norton and Knight, 1977⁽²⁵⁾). To further elucidate the spatial and temporal extent of thermal-chemical-hydrological effects, a series of coupled thermal-hydrological sensitivity calculations were made (see section 1.1.9 in MRI, 1998⁽²¹⁾) of a magmatic intrusion using the TOUGH2 code (Pruess, 1987)⁽²⁸⁾.

No direct intersection of sub-surface magma with the repository is envisioned. Such an event would constitute an isolation failure scenario that lies outside the scope of these calculations. Formation of a broad collapse caldera is also not considered, in part because such centers are not typical of current volcanism in Japan. A dike intrusion near a repository, however, will be considered as a variant case.

4.2 No Dike Intrusion Case

4.2.1 Calculation Case

Based on the results of previous analysis and discussions with JNC, the re-calculation case for the volcanism scenario without dike intrusion includes the following assumptions and constraints:

- The repository is sited within (or at the boundary of) the so-called “suspect-terrain” of Japan where future volcanism is possible, rather than in the “secure-terrain” where future volcanism is impossible.
- A stratovolcano, typical of Japanese island-arc volcanoes (e.g. Mount Fuji), is formed.
- The magma chamber maintains a constant heat flow over the entire period of the simulation.
- The repository is located 10-km from the volcanic center.
- Direct magmatic intrusion of the repository does not occur. This assumption is based on H-12 guidelines to avoid isolation failure scenarios in which the isolation functions of the EBS are directly compromised.
- The repository host rock is either crystalline or a sedimentary rock formation.
- There is a 10,000 year period after magma intrusion until the effects of the intrusion impact the repository. These impacts include:
 - permanent increase in temperature by 20°C above ambient, and
 - permanent change to a low pH saline condition (like a SRLP groundwater (magmatic brine)).
- The sustained elevated temperature in the repository, plus the increase in dissolved potassium in the magmatic brine, is conservatively assumed to cause the outer part of the buffer to progressively illitize until the outer half of the buffer is illitized at 10⁶ years. The illitized portion of the buffer is assumed to retain the same porosity and diffusion coefficients as the unaltered buffer, but to possess no sorption capability toward any radioelement conservatively. It is acknowledged that kinetics of illitization of smectite (e.g., Pytte, 1982⁽³⁰⁾; Pusch, 1993⁽²⁹⁾; Huang et al., 1993⁽⁹⁾; Velde, 1995⁽³⁷⁾) remain highly uncertain. Furthermore, only broad constraints can be defined for future chemical composition of a magmatic groundwater. Hence a variant case in which no illitization occurs is also examined.

Fig.4-1 shows a schematic diagram of re-calculation case for volcanism scenario with no dike intrusion. Changes in parameters for MESHNOTE-TIGER code caused by these assumptions are summarized in Table 4-1.

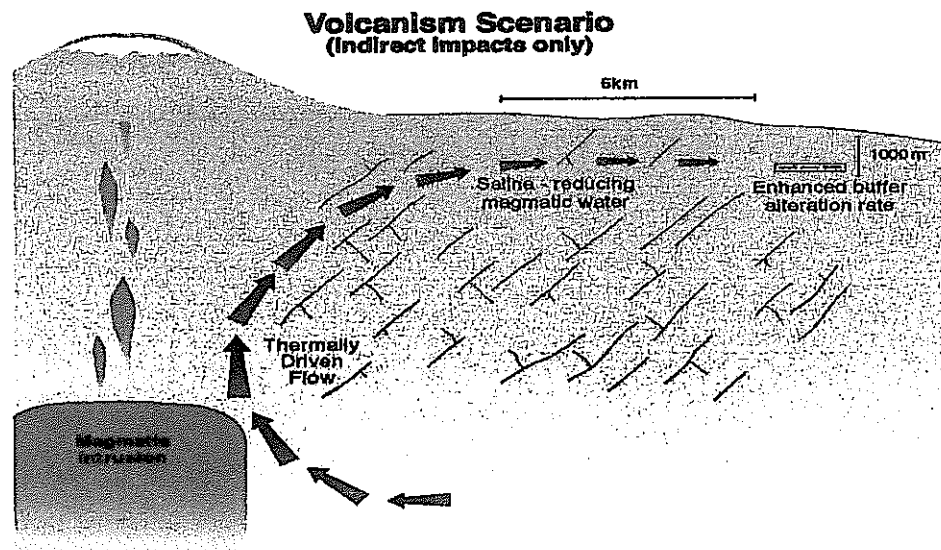


Fig.4-1 Schematic diagram of reference case and variant cases for volcanism scenario (with no dike intrusion)

Table 4-1 Summary table for re-defined case for volcanism scenario

	Reference Case		Reference Case
ΔQ_R	NC	Buffer	Outer 50% converts to illite*
Initiation Time for Change		Initiation Time for Change	110,000 yrs
Type of Change		Type of Change	Progressive (outside inwards) complete at 10^6 yrs
Rate of Change		Rate of Change	Instantaneous
Δ Chemistry	FRHP \rightarrow SRLP	Far-field Path Length	NC
Initiation Time for Change	110,000 yrs	Initiation Time for Change	
Type of Change	Permanent	Type of Change	
Rate of Change	Instantaneous	Rate of Change	
ΔD_p	FRHP \rightarrow SRLP	BC = Benchmark case values.	
Initiation Time for Change	110,000 yrs	ΔQ_R = Change in flow rate in intact rock.	
Type of Change	Permanent	Δ Chemistry = Change in chemistry of groundwater.	
Rate of Change	Instantaneous	ΔD_p = Change in pore diffusion coefficient of buffer.	

NC = No change from benchmark case value.
* "No illitization" is defined as a variant case.

4.2.2 Calculation Results

Fig.4-2(1) presents the total dose curve for all radionuclides for the volcanism scenario. Fig.4-2(2) compares the volcanism variant case (no illitization of the buffer) with the variant case (illitization of the buffer). There is no difference between these two total dose curves.

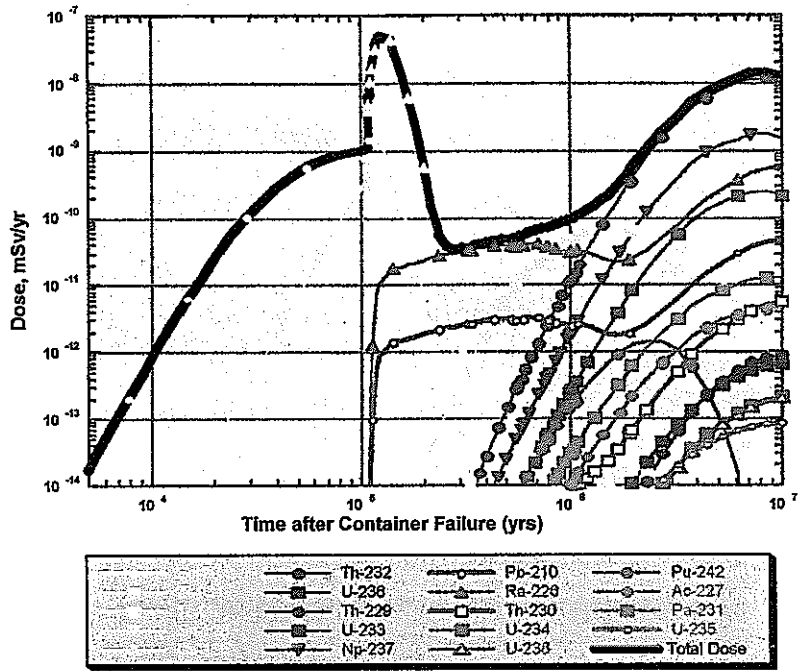


Fig.4-2(1) Volcanism reference case results
 (with no dike intrusion and illitization of buffer)
 total dose (dose from a single waste package)

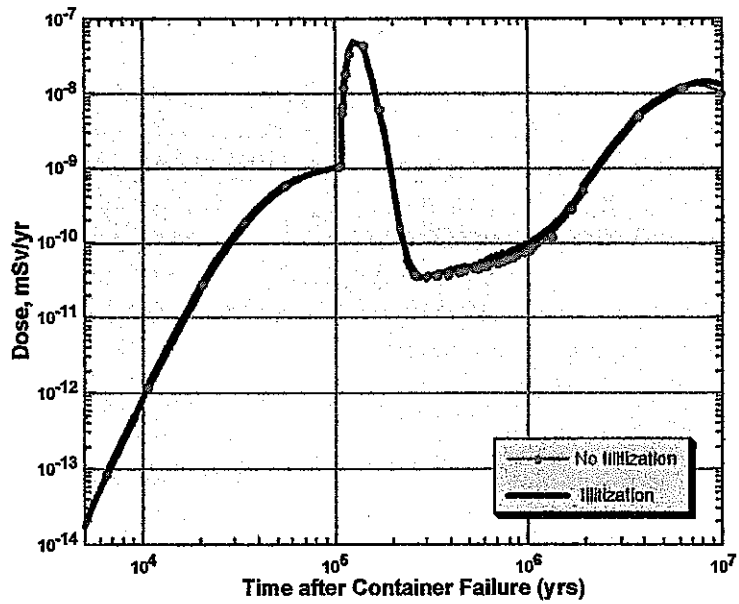


Fig.4-2(2) Volcanism variant case results
 (with no dike intrusion and no illitization of buffer)
 total dose (dose from a single waste package)

Up to the time of the volcanism impacts (approximately 110,000 years after repository closure), the dose-rate curves for the volcanism scenario are identical to those calculated for the benchmark case, as expected. At this early time first Se-79 and then Cs-135 are the main contributors to dose.

At 110,000 years, the combined impacts of volcanism cause more than an approximately 100-fold increase in the dose-rate of Cs-135 (Compare Figs.2-2(1) and 4-2(1)). Even greater increases in dose-rates of Ra-226 and Pb-210 are observed compared to the benchmark case. Se-79 shows a more modest 4-fold increase at this time, and the dose-rate curves of most of the rest of the radionuclides are displaced to earlier times than the benchmark case.

Cs-135 increases so greatly because of the much lower sorption of cesium by both the buffer and rock for SRLP groundwater. Previously sorbed Cs-135 is rapidly de-sorbed and released for migration. Likewise, the reason for the significant increase in dose-rates of Ra-226 is the significant decrease in solubility and sorption of Ra by the rock under SRLP conditions. The dose-rate for Pb-210 increases despite no changes in solubility or sorption between FRHP and SRLP conditions. This is because Pb-210 is a decay daughter of Ra-226 that is experiencing a much higher flux out of the repository system. Note that the dose-rate curve for Pb-210, although greatly increased, is below that of Ra-226, whereas their positions are reversed for the benchmark case. This is because the sorption coefficient for Ra by the rock is lower than Pb for SRLP conditions, but higher for FRHP conditions. Thus, after volcanism/ magmatic intrusion imposes saline conditions, the short-lived Pb-210 is being relatively more retarded in transport than is its longer-lived parent Ra-226.

The shift in dose-rate curves of most radionuclides to earlier times is explained by the increases in solubilities of actinide parents (Cm, Am, Pu) under SRLP conditions. At longer times ($> 10^6$ years), the $4n+1$ nuclides (Np-237 and daughters) dominate the dose release-rate, as in the benchmark case.

In the first 10^6 years, the volcanism scenario leads to a maximum peak dose of about 6×10^{-8} mSv/yr/canister, occurring at 1.2×10^5 years (dominated by Cs-135 release). This is about a factor of 10 higher than the peak dose of the benchmark case for the equivalent period. A second peak dose rate of 3×10^{-9} mSv/yr/canister occurs at about 10^7 years and is controlled by Th-229.

4.3 Dike Intrusion Case

Analysis of impacts on repository performance arising from reference volcanism scenario included identification of a "dike intrusion variant" (MRI, 1997 / 1998)⁽²¹⁾⁽²²⁾. From the beginning of the intrusion to the cooking of magma body, the surrounding rock will experience thermal, hydrological, mechanical, and chemical (T-H-M-C) perturbations, as analyzed by MRI (1998)⁽²²⁾. This year, the "dike intrusion" conceptual model evaluated by MRI (1998)⁽²²⁾ is the basis for this set of performance assessment calculations. But the prohibition against defining an isolation failure scenario for dike intrusion goes further in constraining the calculation case.

4.3.1 Calculation Case for Dike Intrusion

Based on the bounding results from MRI (1998)⁽²²⁾ regarding temporal and spatial changes in T-H-M-C conditions arising from dike intrusions, the following calculation case is defined:

- A single dike intrusion event is considered to occur in a crystalline rock 100,000 years after repository closure.
- A 1-m wide dike is injected and solidifies within a one year.
- The dike intrudes 100-m upstream from the repository (waste package). This distance is believed to be large enough to assure that local flow in the repository region is not re-directed because of the impermeable nature of the dike, thus maintaining the assumed ambient horizontal flow to a fracture-zone located 100-m downstream of the repository.
- The thermal impact from the dike intrusion on the repository (waste package) is negligible (<10°C rise above ambient temperature for less than 100 years).
- Groundwater flow velocity in the host rock between the repository (waste package) and the fracture-zone increases by two orders of magnitude (100-fold) for one year after the intrusion.
- Groundwater chemistry in the host rock changes from an initial fresh, reducing, high-pH (FRHP) water to a magmatically influenced saline, reducing low-pH (SRLP) brine for 500 years after the dike intrusion. This is then shifted back to FRHP after 500 years.

- Groundwater chemistry in the waste package (buffer and waste container) changes from FRHP to SRLP conditions for 1000 years after the dike intrusion. Conditions are then shifted back to FRHP after this 1000-year interval. The longer interval of SRLP conditions reflects the slow diffusion of SRLP water out from the buffer once the water in the rock is restored to FRHP conditions.

For this dike intrusion scenario, changes in parameters are set as summarized in Table 4-2 to be used in MESHNOTE-TIGER code.

Table 4-2 Summary of parameter change in the dike intrusion scenario calculation

Time Periods	Near-Field			Far-Field		
	Mixing Cell Flow Rate	EBS K_d , D , and Solubilities	Other Parameters	Fracture Darcy Velocity	Host Rock K_d	Other Parameters
0-10 ⁵ yrs	BC (0.01m ³ /yr)	BC (FRHP)	BC	BC (15.7m/yr)	BC (FRHP)	BC
10 ⁵ -100001 yrs	1m ³ /yr	SRHP	BC	1570m/yr	SRHP	BC
100001-100500 yrs	BC	SRHP	BC	BC	SRHP	BC
100500-101000 yrs	BC	SRHP	BC	BC	BC	BC
101000-10 ⁷ yrs	BC	BC	BC	BC	BC	BC

BC : Benchmark case values

4.3.2 Calculation Results

Fig.4-3(1) presents the calculated dose rates for all key radionuclides for this variant case. As with calculation cases for other scenarios, including the benchmark case, the key dose-contributing nuclides at early time (up to 100,000 years after repository closure) are Cs-135 and Se-79.

The initial response of the repository system at the onset of the single-dike intrusion scenario is a spiked increase in release of all radionuclides. This is attributable to increase in flow rate arising from the rapid dynamic pressurization of pore fluid in rock adjoining the hot slab of magma. This pressure pulse rapidly dissipated, hence, the flow rate returns rapidly to ambient value assuming that there has been no permanent hydraulic fracturing of the rock. Of course, with a continuous (or multiple) dike-intrusion case, the elevated pore pressure condition might be assumed to be prolonged, leading to a prolonged period of elevated flow rates.

Fig.4-3(2) shows the calculated dose rates for the key dose-contributing nuclides (Cs-135, Se-79, Ra-226, Pu-239) for the 1500-year period immediately following dike intrusion. All four nuclides show the characteristic 100-fold increase in dose rate that is directly proportional with the elevated flow rates driven by the pulse in pore pressure that persists for one year.

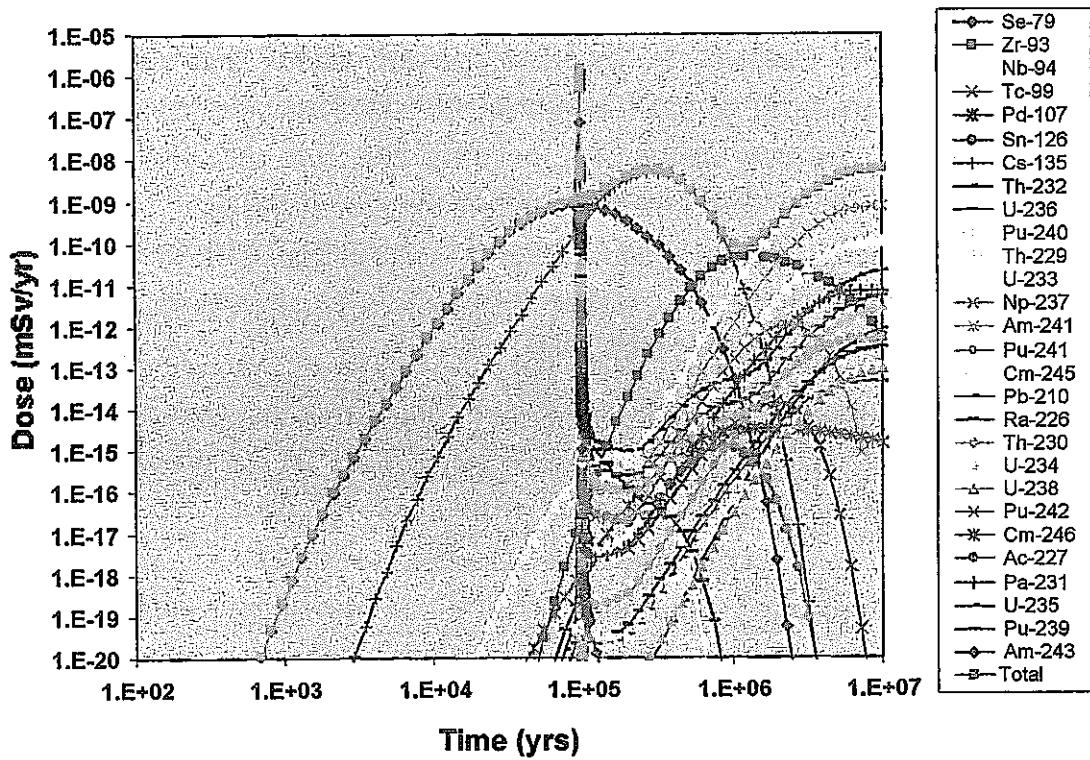


Fig.4-3(1) Doses of radionuclides from a single waste package for single-dike intrusion scenario (The "Time" axis is for time after repository closure.)

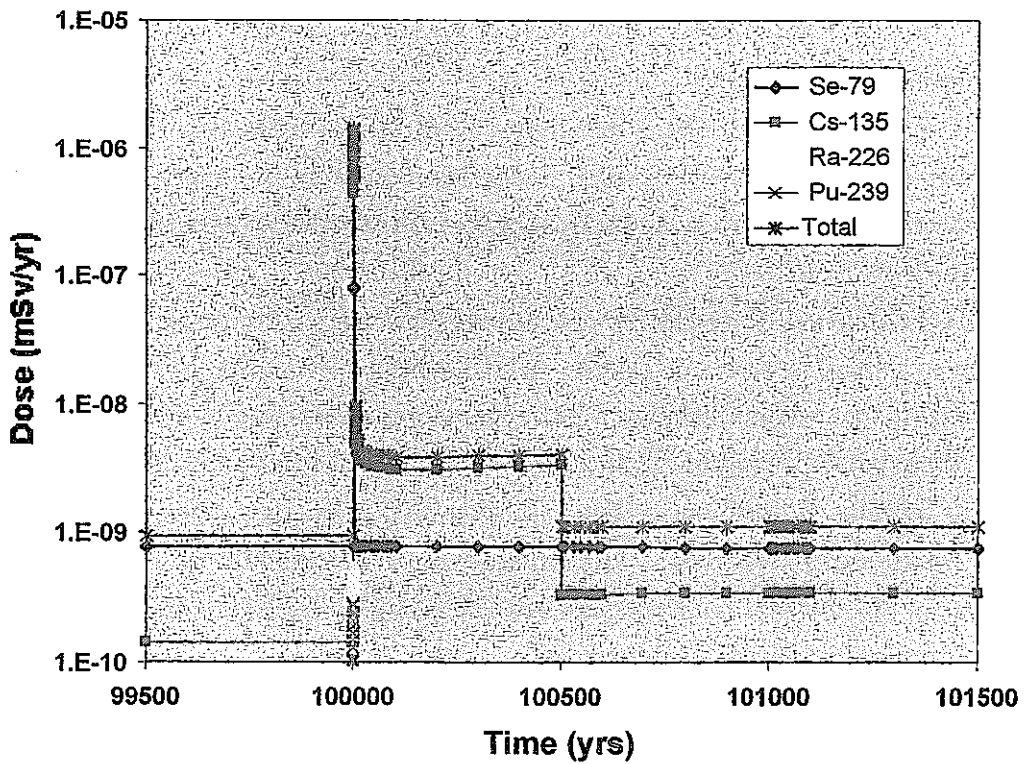


Fig.4-3(2) Primary contributors to the total dose and their doses for the single-dike intrusion scenario (Note linear time scale).

For Cs-135, there is a sustained 500-year period in which the dose rate remains elevated above the pre-intrusion value. Cs solubility is the same for FRHP and SRLP waters, hence the change is solely attributable to the decrease in Cs sorption by buffer and host rock under SRLP conditions. Note that at 500 years, when the groundwater in the host rock is assumed to return to the initial FRHP conditions, the calculated dose rates for Cs-135 decrease back toward their pre-intrusion values. The dose rates for Cs-135 remain higher than the pre-intrusion values because of the SRLP conditions that are assumed to persist in the buffer for another 500 years and the fact that the release-rate curve for Cs-135 is still increasing during this time (see Fig.4-3(1)).

For Se-79, the calculated dose rate returns rapidly to near its value prior to the dike intrusion. The solubility for Se is assumed to only slightly decrease with increasing salinity in the JNC data base (JNC,1998)⁽¹¹⁾, and this effect is compensated by the decrease in sorption of Se by the rock under more saline conditions.

The dose rates for the release of Ra-226 and Pu-239 also show a marked increase due to the dike intrusion event and subsequent changes in repository conditions. For Ra-226, this change arises from a decrease in sorption coefficient on crystalline rock under SRLP conditions compared to FRHP conditions. With respect to Pu-239, the increase in its release rate (as well as other Pu isotopes that contribute significantly less to dose rate) is attributable to the increase in Pu solubility by about 3.5 orders of magnitude in SRLP water compared to FRHP water, based on JNC's reference solubility data base (JNC,1998)⁽¹¹⁾.

Note that the absolute impact of the single-dike intrusion is a function of when it occurs. If the dike intrusion occurs at 10^6 after repository closure, the assumed 100-fold increase in flow rate would lead to an increase in calculated dose rate from 10^{-10} mSv/yr to a value of 10^{-8} mSv/yr. This latter value is no greater than the peak dose rate that occurs for the benchmark case at 300,000 years after repository closure .

5. Seismicity and Faulting Scenario

5.1 Reference and Variant Cases

Faults at a variety of scales, and ranging from active to inactive, are found over much of Japan. The location of active faults with respect to an actual repository site would need to be considered in order to refine the key assumptions for this scenario on a credible basis. Variant assumptions should eventually be examined, such as

- ① faulting (especially under extension) leading to opening of fractures in the near-field that promote a progressive extrusion and erosion of the bentonite buffer
- ② the potential for transitory super-lithostatic pressurization of pore water within the buffer due to seismicity should be assigned a high priority
- ③ increase in flow rate attributable to permanent changes in bulk rock permeability (e.g., Davies and Archambeau, 1997⁽⁴⁾).

Note, however, that the discussion in H12 report has excluded consideration of fault-induced disruption of the EBS (so-called *isolation failure scenarios*).

Relatively small and probably short-lived changes in temperature are possible to the effects of processes such as seismic pumping. These are not thought to be significant and will not be considered further. Other seismic processes which could result in changes to the chemistry of the groundwater are likely to be a considerably longer-term process than any effects due to seismic pumping, but are not considered in these calculations.

5.2 Calculation Case

5.2.1 Preliminary Study

(1) Reference and Variant Cases

From the discussions previously, it is apparent that there are many possible variables and uncertainties associated with the impact of faulting and seismicity on the performance of a repository. Some of the options are shown in Fig. 5-1.

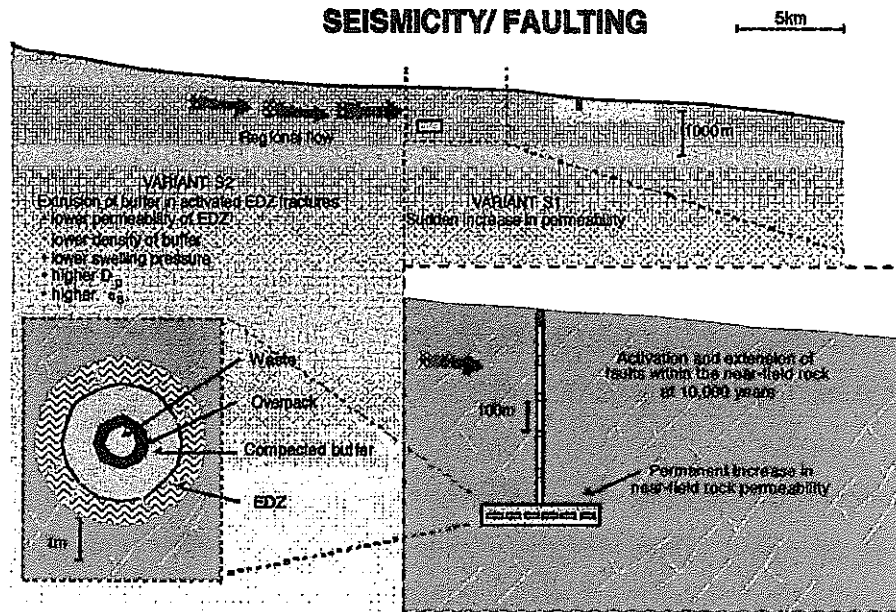


Fig.5-1 Schematic diagram of reference case and variant cases for seismicity and faulting scenario source : MRI, 1998⁽²²⁾

(1-1) Variant Case S_1

The first variant to the reference case S_0 (MRI, 1998)⁽²²⁾ is to envision a much quicker change in permeability throughout the near-field rock. While single, instantaneous events could conceivably create localized fractures of high permeability, the global increase in bulk permeability of the near-field rock is considered to require at least 50 years of sustained seismic activity.

(1-2) Variant Case S_2

Variant S_2 is identical to variant S_1 , with the addition of fault-induced impacts on both on the EDZ (excavation damage zone) and the buffer. It is postulated that the seismic event is sufficient to cause further fracturing of the EDZ, as well as the initially intact rock. The opening of new fractures apertures in the EDZ, in turn, is believed to permit enhanced extrusion of the buffer into the EDZ (see section 3.3.2 in MRI,1998⁽²²⁾). All three events are expected to occur within the same 50 year interval.

Based on the distance (0.5 m) and porosity (20%) envisioned for buffer extrusion into the

EDZ, an initial buffer at 1.6g/cm³ dry density is predicted to be reduced to a density of about 1.2g/cm³. Based on measurements of diffusion coefficient with density for Kunigel V1 bentonite (e.g., Kozaki et al., 1996⁽¹³⁾; Saito et al., 1997⁽³³⁾), an increase by a factor of 1.2 is expected. Likewise, porosity for the remaining lower-density buffer within the same dimensions of the emplacement drift is recalculated to be increased by a factor of 1.37.

(2) Calculation Results on Variant Cases

The preliminary calculation results on variant cases S₁ and S₂ are presented in Appendix A of this main report.

5.2.2 Calculation Case for MESHNOTE-TIGER Code

Based on the above results and discussions with JNC, the following assumptions are made regarding the seismicity/ faulting re-calculation case:

- The dominant effects from future fault activity on repository characteristics is on shortening of the far-field pathway.
- The repository host rock is in crystalline rock at a depth of 1000 m with FRHP groundwater.
- A significant seismic/faulting event is postulated to occur 100,000 years after repository closure, or 99,000 years after loss of containment.
- The event activates (or reactivates) a major-water bearing fracture that is only 50 meters (10-m as a variant case) from the repository, effectively cutting the far-field path-length in half.
- Direct intersection of the repository by a future faulting event is not considered..

Of course this assumed location of this faulting event 50-m from the repository is arbitrary. Development (or reactivation) of a fault in the far field could be equally well postulated to occur 10-m from the repository.

No extrusion of buffer into the near-field rock is assumed for this calculation case. Extreme changes in rock permeability speculated for other sites in extensional plate tectonic regimes (e.g., Davies and Archambeau, 1997⁽⁴⁾) are unlikely to be relevant to a repository site in the broadly compressional regime of Japan. Accordingly, no change in rock permeability, hence flow rate, and accompanied groundwater chemistry, is assumed for the seismicity/ faulting reference case and variant case using MESHNOTE-TIGER code.

Thus, no enhanced mixing of deeper waters along the new, more permeable fault is assumed (see Table 5-1).

Table 5-1 Summary table for re-defined case for seismicity and faulting scenario

	Reference Case		Reference Case
ΔQ_R	NC	Buffer	NC
Initiation Time for Change		Initiation Time for Change	
Type of Change		Type of Change	
Rate of Change		Rate of Change	
Δ Chemistry	NC (FRHP)	Far-field Path Length	BCx0.5*
Initiation Time for Change		Initiation Time for Change	100,000 yrs
Type of Change		Type of Change	Permanent
Rate of Change		Rate of Change	Instantaneous
ΔD_p	NC	BC = Benchmark case values. ΔQ_R = Change in flow rate in intact rock. Δ Chemistry = Change in chemistry of groundwater FRHP = Fresh, reducing high pH groundwater ΔD_p = Change in pore diffusion coefficient of buffer. NC = No change from benchmark case value. * "BCx0.1" is defined as a variant case.	
Initiation Time for Change			
Type of Change			
Rate of Change			

5.3 Calculation Results

Note that the calculated dose rates after the faulting event include two sources. The primary source arises from continued release from the single waste package. The secondary source is composed of those radionuclides existing in the portion of rock between the new and the original faults at the time of the formation of the new fault. These radionuclides are assumed to continue to migrate to the original fault, where they are then conducted to the same biosphere as for the new fault.

(1) 50m Case

Fig. 5-2(1) presents the total dose curve for all radionuclides for the seismicity and faulting scenario. It can be seen from this figure that the total dose curve follows that in the benchmark case from beginning up to 10^5 years. As in the benchmark case during this period, the primary contributors to dose are Se-79 and Cs-135. Soon after the faulting event at 10^5 years, the dose rates for all nuclides are displaced to earlier times compared to the benchmark case (contrast Figs.2-2(1) and 5-2(1)) due to the shortening of the pathway.

In addition to occurring at earlier time, the peak dose rates for most radionuclides are also about a factor of 2 (or less) higher in this case compared to the benchmark case. Certain long-lived, solubility-limited fission products (Tc-99, Sn-126) that have relatively high sorption coefficients for the crystalline rock under FRHP conditions show a much more pronounced increase (a factor of about 100) in peak release rate in this case. This is attributable to the fact that shortening the far-field pathlength will have the greatest relative impact on single-isotope radionuclides having high sorption on the rock. The actinides and decay daughters having multiple isotopes with different half-lives arising from four different decay chains also show an order of 2 (or more) higher dose rate for a long time after faulting occurrence, although unchanged in peak dose rate compared to the benchmark case.

In summary, in the first 10^6 years the maximum peak dose is 1.65×10^{-8} mSv/yr/canister occurring at about 105,000 years, dominated by Cs-135. This is about a factor of 2 higher than the peak dose rate for the FRHP benchmark case. A second peak dose rate of 2×10^{-8} mSv/yr/canister is calculated to occur at 6×10^6 years, and is attributable to Th-229.

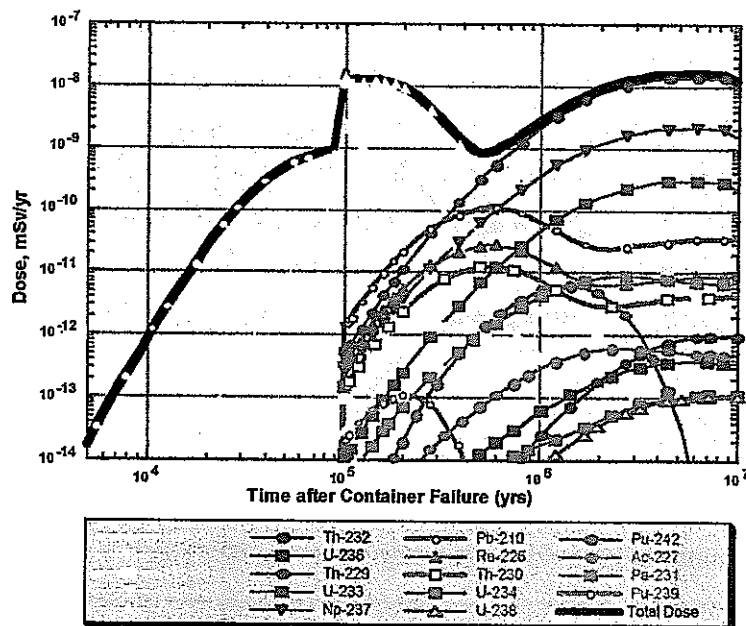


Fig.5-2(1) Seismic and faulting reference case (50m) results:
total dose (dose from a single waste package)

(2) 10m Case

In this variant case the new fault occurs at a distance of only 10-m from the repository (waste package) 10^5 years after repository closure. Fig.5-2(2) shows the total dose rate integrated for all radionuclides.

The dose rate behavior for this variant case is the same as the FRHP benchmark case up to the time of the faulting event at 10^5 years. As a consequence of forming a fault pathway to the biosphere only 10-m from the repository, the dose rate curves for all radionuclides are moved to much earlier times compared to the benchmark case (contrast Figs.2-2(1) and 5-2(2)). The shorter far-field pathway also leads to far-less attenuation of peak dose rates for radionuclides because of shorter transit time, hence less radioactive decay during far-field migration. Key dose-contributing radionuclides include Se-79, Sn-126, Cs-135, Pb-210, Ra-226, Th-229, Th-230, and Np-237. The isotopes of radioelements with relatively large sorption coefficients on the crystalline rock under FRHP conditions show extremely large increases in peak dose rates when the far-field path length is shortened to 10 m. This is especially true for radioelements with a single isotope having a relatively short half-life.

Fig.5-2(3) compare the calculated dose rates for scenarios in which a fault occurs at 50-m and at 10-m from the repository. In the 50-m case, a fault occurring 50-m from the repository 10^5 year after repository closure leads to a peak dose rate of 1.65×10^{-8} mSv/yr/canister that is a factor of about 2 higher than the benchmark case, arising from Cs-135 and Th-229. For the variant case of a fault occurring at the same time but only 10 m from the repository, however, the peak dose rate is about 20 times higher than the benchmark case. For this variant case, the key radionuclides contributing to dose include Se-79, Sn-126, Cs-135, Pb-210, Ra-226, Th-229, Th-230, and Np-237.

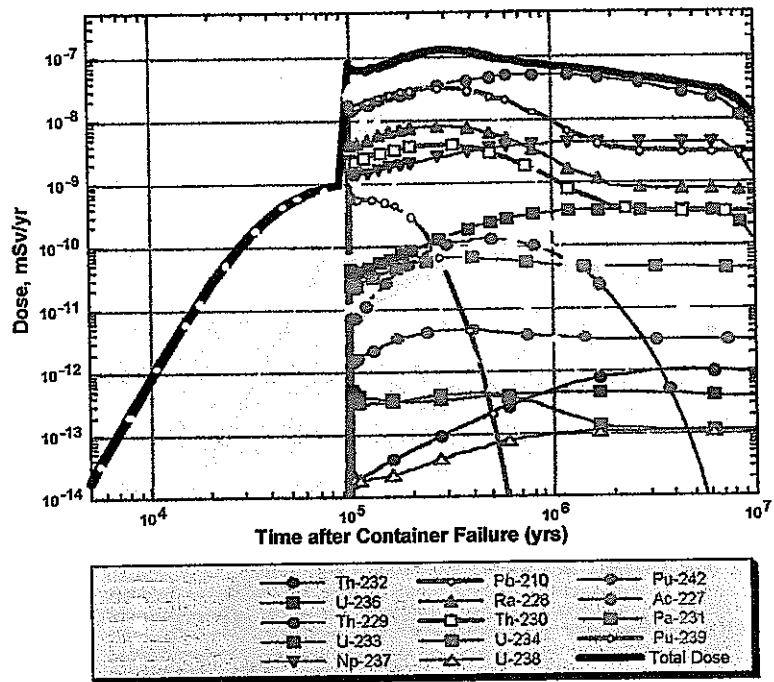


Fig.5-2 (2) Seismic and faulting variant case (10m) results:
total dose (dose from a single waste package)

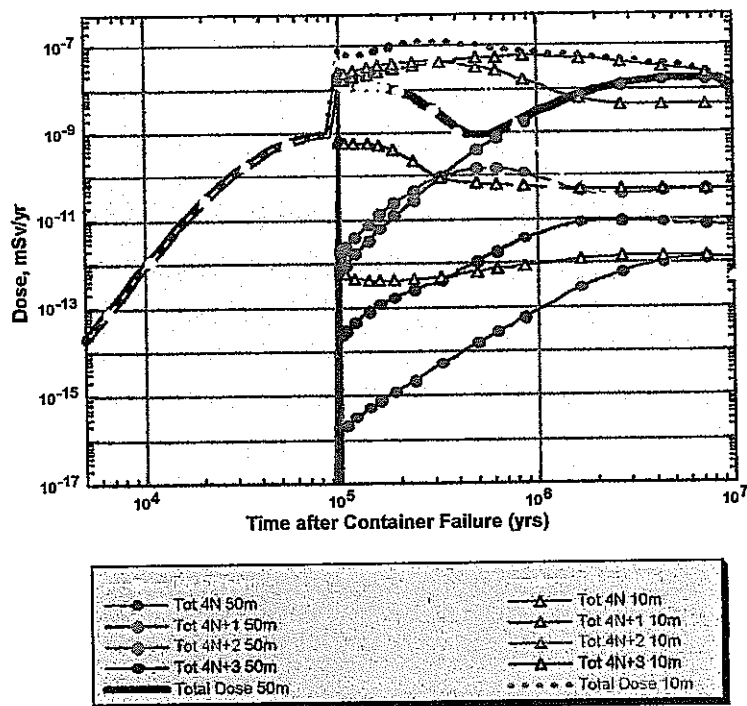


Fig.5-2 (3) Comparison of reference (50m) and variant (10m) seismic and faulting cases: total dose from a single waste package by total FP and Actinide Chain doses

6. Uplift and Erosion Scenario

In the Japanese island arc, both uplift zones and subsidence zones occur and generally run parallel to the elongation of the arc (e.g. Hashimoto, 1991⁽⁸⁾).

Since the Quaternary period, the Japanese islands have been subjected to substantial uplift rates that average between 0.5 and 1 mm/year (Shimizu et al, 1993)⁽³⁴⁾. Most of the variation appears to be related to topography, with higher rates in mountainous areas (averaging 1 to 2 mm/year) and lower rates in lowland areas (averaging 0.1 to 0.5 mm/year).

6.1 Changes in Repository Boundary Conditions

A relationship has been found between Quaternary uplift rates (based on present elevations), and denudation rates in Japan (Yoshikawa, 1974⁽⁴⁰⁾; Ohmori, 1978/1985⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾). Once denudation rates reach those of uplift, steady-state conditions are assumed to prevail.

It is assumed for this scenario that a repository would be located on the lowland area of Japan. For these scenario calculations, constant rates of uplift are used due to the uncertainties associated with the prediction of future uplift rates and lack of site-specific data. Based on Quaternary and recent uplift rates for Japan, a value of 0.1(~1) mm/year is selected. This value is a range of a representative average rate that may apply to a wide range.

For the purpose of this case, it is assumed that a repository in crystalline rock starts at a depth of 1000 m, whilst a repository in sedimentary rock starts at a depth of 500 m. It is not necessary to examine the complete exhumation of the repository in this study. Furthermore, when the repository is within 10 m of the surface, human intrusion (e.g., water extraction, resource exploration) becomes perhaps a more credible scenario to be considered.

Uplift and erosion will eventually cause the repository to rise up into a near-surface zone of dilute, oxidizing waters (Langmuir, 1997)⁽¹⁴⁾. The depth at which such waters may reach the near-field is uncertain, because this will depend on fluctuating local hydraulic conditions.

6.2 Calculation Case

6.2.1 Preliminary Study

(1) Reference and Variant Cases

The conceptual model for uplift and erosion is shown in Fig.6-1.

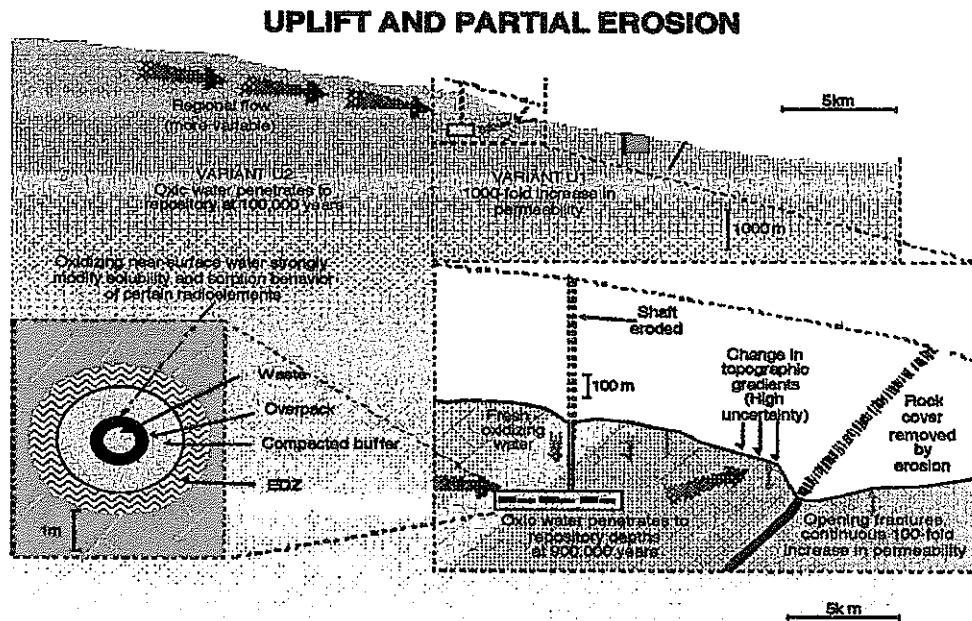


Fig.6-1 Schematic diagram of reference and variant cases for uplift and erosion scenario source : MRI,1998⁽²²⁾

(1-1) Variant Case U_1

Variant case U_1 is identical to the reference case U_0 (MRI,1998)⁽²²⁾, except that a 100-fold increase in rock permeability (hence, a cumulative 1000-fold increase in Darcy flow rate) is considered.

(1-2) Variant Case U_2

This variant case is also identical to the reference case U_0 , but the timing of intrusion of oxic waters is at 100,000 years after repository closure. This might correspond to a much greater depth of penetration of oxic water compared to the first two cases.

(2) Calculation Results on Variant Cases

The preliminary calculation results on variant cases U_1 and U_2 are presented in Appendix B of this main report.

6.2.2 Calculation Case for MESHNOTE-TIGER Code

Based on the above results and discussions with JNC, the re-calculation case for the uplift and erosion scenario includes the following assumptions and constraints:

- A HLW repository is assumed to be located at an initial depth of 1000-m depth for crystalline rock with FRHP groundwater.
- The net uplift rate (erosion rate equal to uplift rate) of 0.1 mm/year (the repository will approach to within 100 meters of the surface at 9×10^6 years and will reach the surface at 10^7 years).
- When the repository is ascending the last 100-m towards the surface, the release pathway is *vertical* toward the surface rather than *horizontal* to a 100-m distant fault zone (the same "biosphere" is assumed for discharge, however).
- Dilute, oxic meteoric water (FOHP) can penetrate in a localized manner along fracture zones to a uniform depth of about 10-m below the surface (e.g., Langmuir, 1997⁽¹⁴⁾; Nagra, 1990⁽²³⁾).
- During the last 100-m of uplift to the surface, the outer 10-m portion of the far-field rock furthest away from EBS will become oxidized (FOHP conditions). Successive 10-m portion of far-field rock become oxidizing as a consequence of continued uplift and erosion.
- When the repository is within 10 meters of the surface, calculations are terminated because inadvertent human intrusion becomes a more credible release scenario for consideration.

Based on the above discussions, changes in parameters due to this scenario are set as summarized in Table 6-1.

Table 6-1 Summary table for re-defined case for uplift and erosion scenario

	Reference Case (a=0.1) *1
ΔQ_R	NC
Initiation Time for Change	
Type of Change	
Rate of Change	
Δ Chemistry	FRHP → FOHP
Initiation Time for Change	$(9/a) \times 10^5$ yrs
Type of Change	Permanent change progressively toward EBS at the rate of a mm/yr until $(9.9/a) \times 10^5$ yrs
Rate of Change	Instantaneous
ΔD_p	NC*2
Initiation Time for Change	
Type of Change	
Rate of Change	
Buffer	NC
Initiation Time for Change	
Type of Change	
Rate of Change	
Far-field Path Length	Gradually reduced to 10 m due to erosion
Initiation Time for Change	$(9/a) \times 10^5$ yrs
Type of Change	Permanent change progressively toward EBS at the rate of a mm/yr until $(9.9/a) \times 10^5$ yrs
Rate of Change	Instantaneous

BC = Benchmark case values.

ΔQ_R = Change in flow rate in intact rock.

Δ Chemistry = Change in chemistry of groundwater.

ΔD_p = Change in pore diffusion coefficient of buffer.

NC = No change from benchmark case value.

*1 "Uplift rate (=erosion rate) 1mm/y (that is, a=1)" is defined as a variant case.

*2 $D_p(\text{Se}) = \text{BC} \times 0.17$; $D_p(\text{Cs}) = \text{BC} \times 2$; $D_p(\text{Tc}) = \text{BC} \times 0.17$; $D_p(\text{Np}) = \text{BC} \times 0.1$;

$D_p(\text{U}) = \text{BC} \times 0.065$ for FOHP conditions starting at $(9/a) \times 10^5$ years. All other radioelement D_p values are unchanged from BC.

6.3 Calculation Results

(1) Uplift Rate (= Erosion Rate) 0.1mm/y Case

Fig.6-2(1) shows the total dose rate curve integrated over all radionuclides. The dose rate curves are identical to those for the FRHP benchmark case up to 9×10^6 years, as expected.

Note that after 9×10^6 years, the inventories of some radionuclides have decayed to insignificance (e.g., Se-79, Tc-99), while other radionuclides have migrated out of the repository (e.g., Cs-135). The dominate contributors to dose can be expected to be parent actinides (e.g., Np-237, U-233, Th-229) and actinide decay-daughters (e.g., Pa-231, Ra-226).

For certain redox-sensitive radioelements (U, Np, Pu), the progressive advancement of an oxidizing zone through the far-field rock leads to a lower sorption coefficient on crystalline rock (JNC,1998)⁽¹¹⁾. Thus, when the near-surface oxidizing front initially encroaches upon the 100-m far-field path length, there is an immediate increase in release rates of U, Np, and Pu radionuclides (see Fig.6-2(1)). This reflects rapid initial release of sorbed U, Np and Pu nuclides from the outer, oxidized 10-m portion of the far-field rock. A related consequence of initial rapid de-sorption and release of these redox-sensitive parent nuclides is that the dose rates for redox-insensitive daughter nuclides (e.g., Pb-210, Ra-226, Th-229, Th-230) initially decrease as the oxidizing zone impinges upon the far field.

The second impact of uplift and erosion is that the far-field path length slowly decreases at a rate equal to the uplift rate of 0.1 mm/yr. This slow shortening of the far-field path length causes a general increase in the dose rate curves for radionuclides over time (see Fig.6-2(1)). This increasing trend is modified by a number of factors such as half-life, the dose-rate trends of parent nuclides, and the relative sorption behavior of parent and daughter nuclides.

Overall, the uplift and erosion scenario leads to a maximum peak dose of about 2×10^{-8} mSv/yr/canister, occurring at 9.9×10^6 years and dominated by Np-237, Th-229, and U-233. This is about a factor of 3 higher than the peak dose of the benchmark case for the equivalent period.

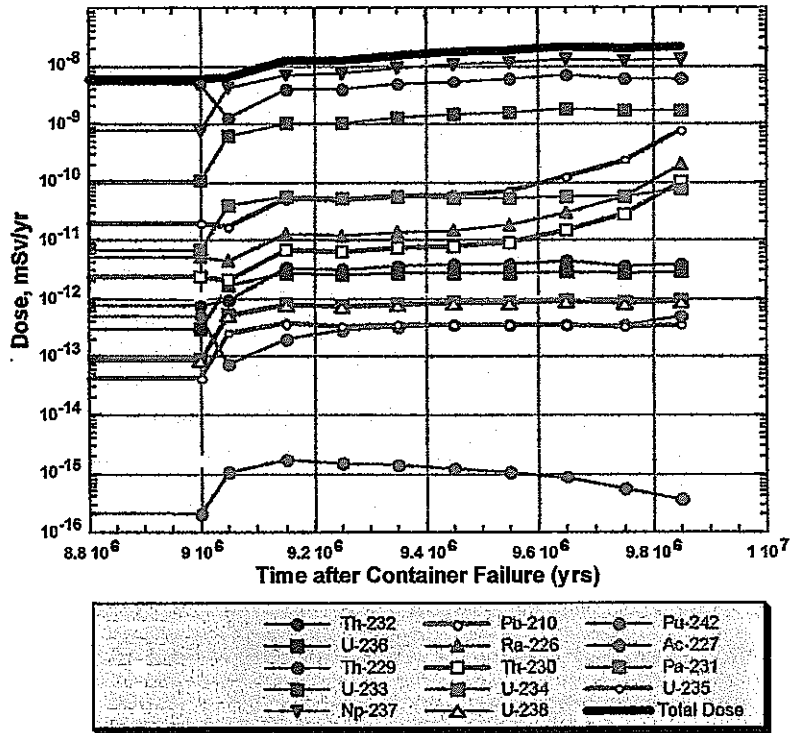
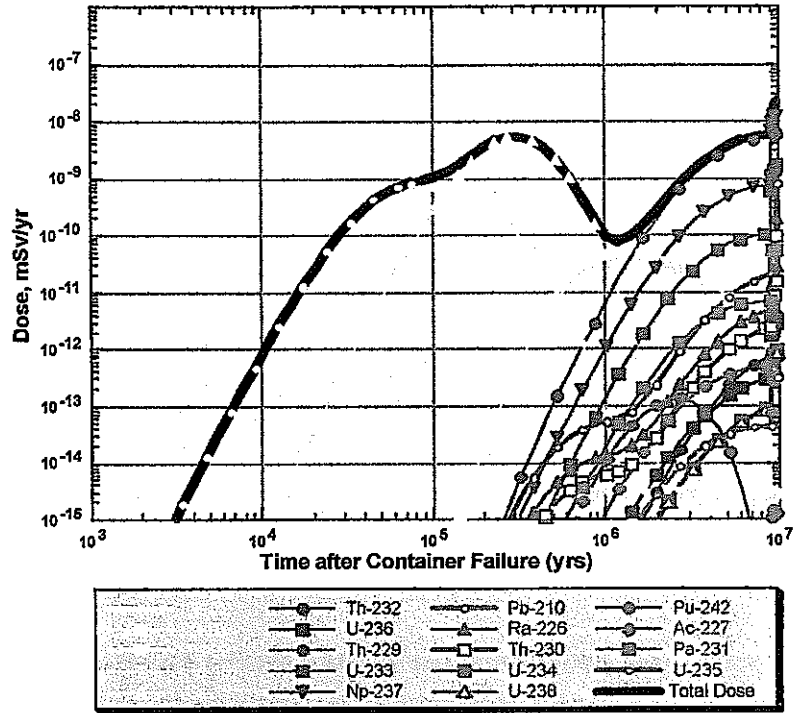


Fig.6-2(1) Uplift and erosion reference case results: total dose
 (dose from a single waste package)
 top: log time scale
 bottom: enlargement/linear time scale

(2) Uplift Rate (= Erosion Rate) 1mm/y Case

Fig.6-2(2) shows the total dose rate curve calculated for the case of uplift rate (= erosion rate) 1mm/y as a conservative case*.

The dose-rates for all radionuclides are identical to the benchmark case up to 900,000 years, as expected, with Se-79 and Cs-135 being the dominant contributor to dose.

After 900,000 years, the dose-rates for Np-237 and Tc-99 increase significantly, becoming the dominant contributors to dose. This is initially attributable to the much lower sorption of these radioelements by the rock under oxidizing (FOHP) conditions. The sorption of Pu, U, and Se by the rock also decreases significantly under FOHP conditions, leading to noticeable increases in their dose rates. Indeed, the sorption by the rock of Np and U is so much lower than Th (which is redox insensitive), that the dose contributions of Np-237 and U-233 actually exceed that of Th-229, which is the inverse of the benchmark case.

The impact of having progressively more of the far-field rock under higher flow, oxidizing conditions is that the dose rate curves for all radionuclides move to earlier times than for the benchmark case. The effectiveness of the far field to delay radionuclide transport is progressively compromised as the repository rises to the surface, leading to effectively "shorter" and "faster" pathways from the repository to the biosphere. Thus, the peak dose rates, dominated by Tc-99 and Np-237, become increasingly larger.

At 10^6 years, the EBS become oxidizing. At this timestep, the impacts of oxidizing conditions on buffer sorption and radioelement solubilities becomes apparent. There is a 100-fold increase in the dose rate for Np-237 at this time, driven by a much higher solubility and lower buffer sorption under FOHP conditions. There is an even greater increase in U-233 because of similar changes in solubility and buffer sorption in FOHP groundwater. The dose curve for Th-229, a decay daughter from Np-237 and U-233 also

* * This is the case (with no use of the time-weighted average method and with assuming EBS is also oxidized) where ΔQ_R also changes to "BC \times 5" according to the same pattern as Δ chemistry in Table 6-1.

increases, but remains below that of its precursors because of its higher sorption coefficient on rock and buffer under oxidizing conditions.

Other actinide decay chains involving U isotopes and their daughters also show a pronounced increase in peak dose at this interval. This is because of the pronounced increase in U solubility and decrease in U sorption by buffer as the EBS becomes oxidizing.

Under oxidizing FOHP conditions, the solubility for Tc also increases significantly and the buffer sorption decreases. The dose curve for Tc-99 does show a spike at this last interval, but not as significant an increase as for Np-237 and daughters. The reason for this is that the Tc-99 inventory is essentially depleted at this time, through a combination of radioactive decay and earlier release. The EBS is essentially an "empty house" for Tc-99 at this time.

Overall, this variant case leads to a maximum peak dose of about 2×10^{-5} mSv/yr/canister, occurring at 1.01×10^6 years (dominated by Np-237, U-233, Th-229 and Tc-99 release). This is about three orders of magnitude higher than the peak dose of the benchmark case for the equivalent period.

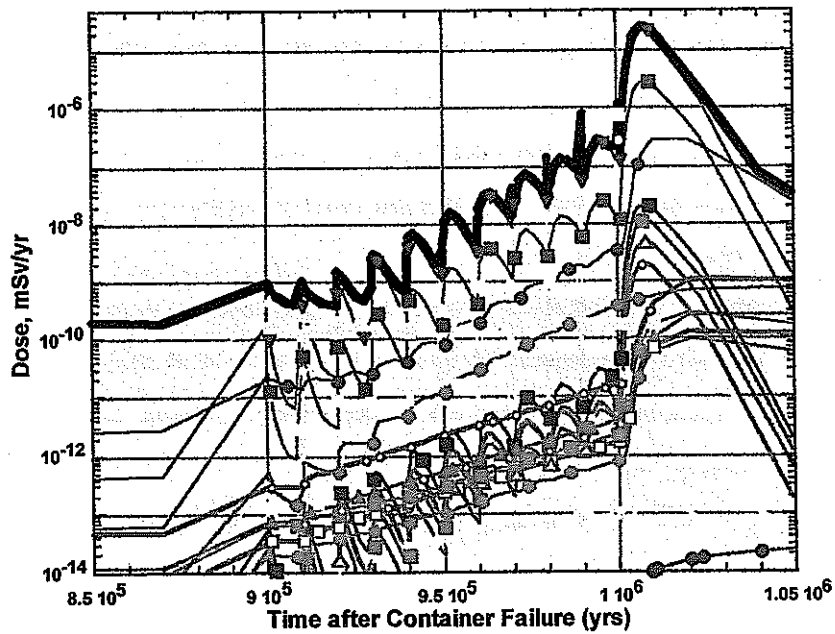
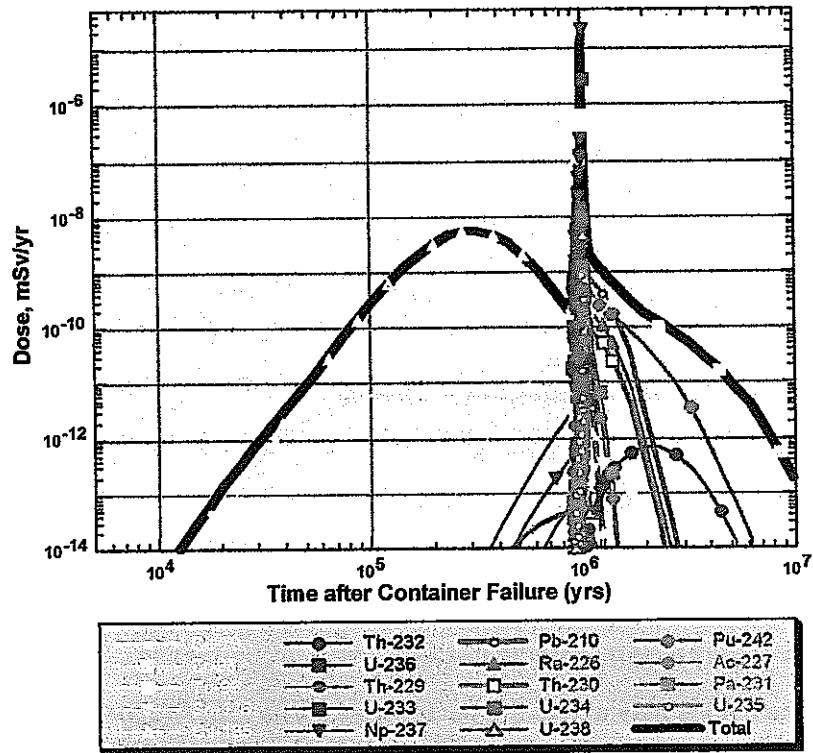


Fig.6-2(2) Uplift and erosion variant case results: total dose
 (dose from a single waste package)
 top: log time scale
 bottom: enlargement/linear time scale

7. Climate/Combined Scenario

The most assured “natural-phenomena” scenario for a HLW repository site located anywhere in Japan is that of future climate change. Determination of changes in boundary conditions arising from climate change over the next several million years can be guided by these remarkably regular and periodic changes in past climate, even though exact mechanisms for climate change are still debated.

7.1 Changes in Repository Boundary Conditions

The past 3 million years of geological time encompass the Quaternary, which is characterized by alternating glacial and interglacial periods. These cycles are characterized by a 90,000 year glacial period of increasing severity, followed abruptly by an interglacial period of about 10,000 years duration. The present interglacial period (the last 11,000 years) is called the Holocene.

Global climate cycles may affect the performance of a HLW repository in a number of ways:

- direct formation of glaciers, with possible attendant changes in mechanical and hydrological boundary conditions at the land surface glaciers (King-Clayton et al., 1997)⁽¹²⁾,
- eustatic sea level changes that may raise or lower present day sea level,
- change in temperature, with resulting permafrost formation (McEwen and deMarsily, 1991)⁽¹⁵⁾, and
- changes in annual precipitation (hence recharge) rates.

Unless a HLW repository in Japan were to be located in or at the border of highlands or mountains, the associated impacts on a repository arising from mountain-style glaciation can be readily dismissed.

Furthermore, for a repository situated at great depth (≥ 500 meters), the remaining impacts are certainly mitigated and delayed, and may even be obviated.

Therefore, impacts arising from climate change are most likely to be of consequence only if a climate change scenario is combined with an erosion and uplift scenario. This combination of likely or inevitable natural phenomena has been termed “Central Scenario” in other repository programs (SKI, 1996)⁽³⁵⁾.

One impact on repository performance from the combination of uplift/erosion with climate change is cyclic changes in near-field groundwater arising from sub-surface

migration of a sea-water/ fresh-water mixing layer, driven by changes in sea level (Glover, 1964⁽⁷⁾; Domenico and Schwartz, 1998⁽⁶⁾). Sea levels are currently at their maximum historical values. Future return to glacial conditions should cause a corresponding drop in sea levels, and migration of the mixing layer seaward. Thus, this impact of cyclic migration of a saline/fresh water mixing layer across a repository can only be expected if a proposed repository is placed at a coastal site with low relief and the present-day groundwaters at the repository depth are saline.

The depth of the saline-fresh water interface is a function of several site-specific parameters, including hydraulic conductivity of the rock, the rate of fresh water discharge per unit length of coastline, the thickness of the geological formation (Domenico and Schwartz, 1998)⁽⁶⁾. For the illustrative purposes of this scenario study, a value of 500-m depth for a saline-fresh interface is selected as representative.

7.2 Calculation Case

7.2.1 Preliminary Study

(1) Reference and Variant Cases

Fig.7-1 shows a schematic diagram of possible consequences arising from climate change.

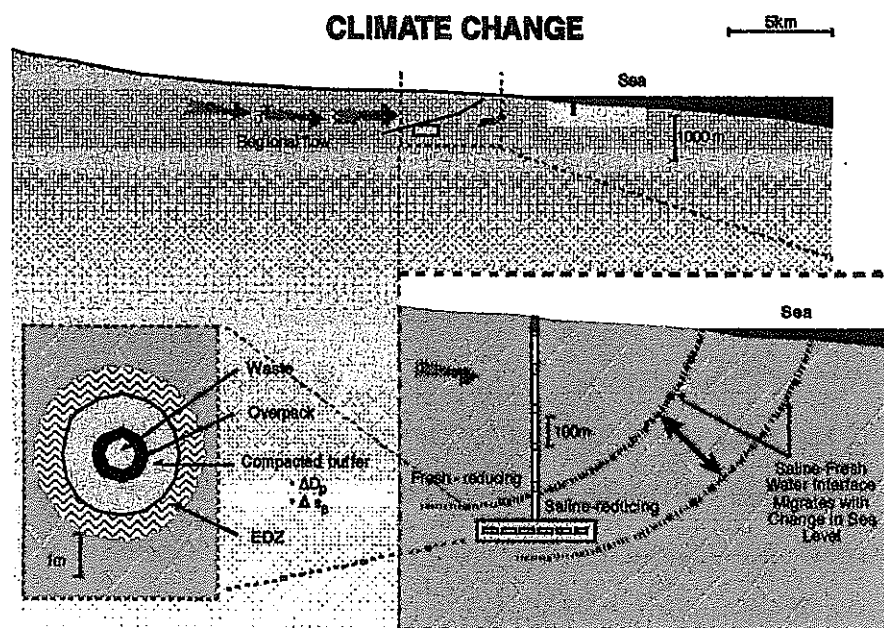


Fig.7-1 Schematic diagram of reference case for climate change scenario

source : MRI,1998⁽²²⁾

If climate change were combined with other scenario events (notably uplift and erosion), then a greater perturbation on the near-field might be anticipated.

(2) Calculation Results on Variant Cases

Variant cases of climate change scenario, compared to reference case C_0 discussed previously (MRI, 1998⁽²²⁾), should be considered as potentially inevitable natural phenomenon to be combined with any other scenarios. Therefore, calculation results were described later as base case of combined scenario.

7.2.2 Calculation Case for MESHNOTE-TIGER Code

The impacts in climate change scenario are to be added to the impacts attributable to uplift and erosion (discussed in chapter 6) for a combined scenario. Therefore, based on the discussions with JNC, the calculation case for the combined scenario considers the following:

- The initial repository is located at a low-relief coastal site in crystalline rock at a depth of 1000 meters.
- The initial repository groundwater is SRHP (saline water).
- The repository is assumed to experience a uniform, net uplift rate (uplift rate equal to erosion rate) of 0.1 mm/yr.
- A relatively sharp saline-fresh water interface exists at depth, with the fresh water overlying the saline water.
- The fluctuating position of this interface is at 400 meters below the surface during inter-glacial (high sea level) periods and at 500 meters during glacial maxima as sea level drops and the fresh water wedge from the land migrates seaward.
- The saline and fresh water interface will migrate across the repository driven by changes in sea level change once the repository has been uplifted to a depth of 500 meters below the ground surface. Migration of the interface across the repository will stop once the repository has been uplifted to less than 400 meters below the surface.
- It is assumed that the permeability of the host is sufficient to assure that the

migrating interface follows the rate of sea level change with no hysteresis (deMarsily, 1990)⁽⁵⁾ and that the pore water of the buffer changes salinity on a time scale of less than 10,000 years in response to changes in salinity of the host rock (Wanner, 1987)⁽³⁹⁾.

- The duration of each climate cycle is 100,000 years, with a 90,000-year glacial maximum followed by a 10,000-year inter-glacial period followed by the next cycle.

Based on the above results, changes in parameters for this case are summarized in Table 7-1.

7.3 Calculation Results

Fig.7-2(2) presents the total dose curve for all radionuclides for the combined scenario. Note that the dose rate curves for the combined scenario are identical to the SRHP benchmark case up to 5×10^6 years, as expected.

The cyclic climatic impacts of the migrating saline-fresh water interface initiated at 5×10^6 years. At this time, Ra is the only radioelement still present in the repository system whose sorption and solubility are sensitive to changes in salinity. Ra is both less strongly sorbed on crystalline rock and has a higher solubility under SRHP conditions compared to FRHP conditions (JNC,1998)⁽¹¹⁾. Together, these changes lead to dose rates for Ra-226 during SRHP conditions that are about one order of magnitude higher than for FRHP conditions (see top in Fig.7-2(1)). The cyclic changes in dose rate for Ra-226 continues until 6×10^6 years, at which point the repository is assumed to have been uplift above the zone of the fluctuating saline-fresh water interface. Note that the sorption and solubility of Cs and Se are impacted by changes in salinity, but Cs-135 and Se-79 are no longer present within the repository system at 5×10^6 years (see log-time plot of Fig.7-2(2)).

After 6×10^6 years, the dose rate curves follow the trend for the FRHP benchmark case up to 9×10^6 years. At this point, dose rate curves follow those of the uplift and erosion reference case, as expected.

Overall, the combined scenario displays a peak dose rate of 3×10^{-8} mSv/yr/canister during the first 10^6 years, identical to that for the SRHP benchmark case. After 10^6 years, the peak dose rate is 2×10^{-8} mSv/yr/canister, identical to that for the reference case for uplift and erosion.

Table 7-1 Summary table for calculation case for combined scenario

	Calculation Case
ΔQ_R	NC
Initiation Time for Change	
Type of Change	
Rate of Change	
Δ Chemistry	SRHP \leftrightarrow FRHP \rightarrow FOHP
Initiation Time for Change	5×10^6 yrs until 6×10^6 yrs; then change to FOHP at 9×10^6 yrs
Type of Change	Cyclic*; then permanent change to FOHP progressively toward EBS at 0.1 mm/yr until 9.9×10^6 yrs
Rate of Change	Instantaneous
ΔD_p	SRHP \leftrightarrow FRHP
Initiation Time for Change	5×10^6 yrs until 6×10^6 yrs
Type of Change	Cyclic*
Rate of Change	Instantaneous
Buffer	SRHP \leftrightarrow FRHP
Initiation Time for Change	5×10^6 yrs until 6×10^6 yrs
Type of Change	Cyclic*
Rate of Change	Instantaneous
Far-field Path Length	Gradually reduced to 10 m due to erosion
Initiation Time for Change	9×10^6 yrs
Type of Change	Permanent change progressively toward EBS at 0.1 mm/yr until 9.9×10^6 yrs
Rate of Change	Instantaneous

BC = Benchmark case values.

ΔQ_R = Change in flow rate in intact rock.

Δ Chemistry = Change in chemistry of groundwater.

ΔD_p = Change in pore diffusion coefficient of buffer.

NC = No change from benchmark case value.

*Cyclic = $\left\{ \begin{array}{l} \text{SRHP on } t \in [5 \times 10^6, 5.01 \times 10^6) \\ \text{FRHP on } t \in [5.01 \times 10^6, 5.09 \times 10^6) \\ \text{SRHP on } t \in [5.09 \times 10^6, 5.1 \times 10^6) \\ \text{FRHP on } t \in [5.1 \times 10^6, 5.19 \times 10^6) \\ \text{SRHP on } t \in [5.19 \times 10^6, 5.2 \times 10^6) \end{array} \right.$
 then repeat on a 10^5 year cycle until 6×10^6 yrs.

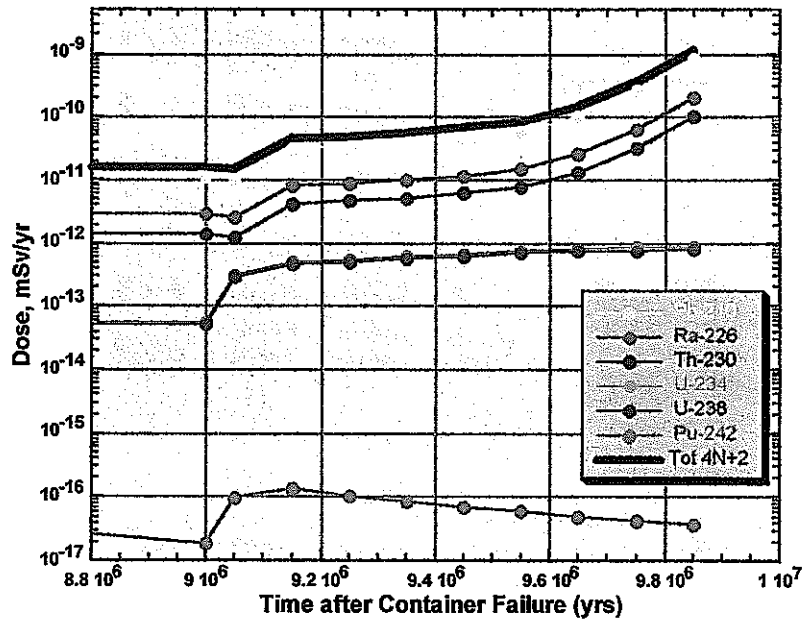
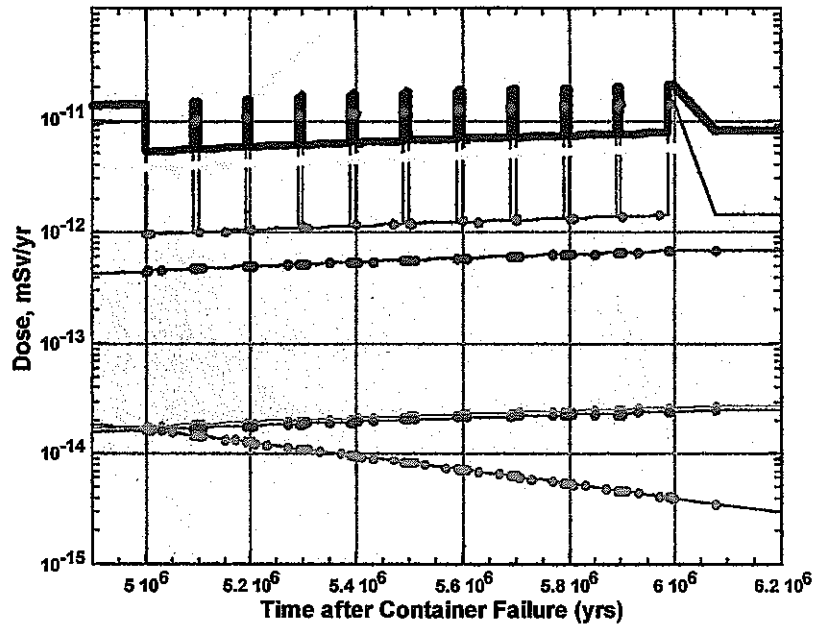


Fig.7-2(1) Combined case results: 4N+2 chain (dose from a single waste package)
top: enlargement, climate change period
bottom: enlargement, uplift period

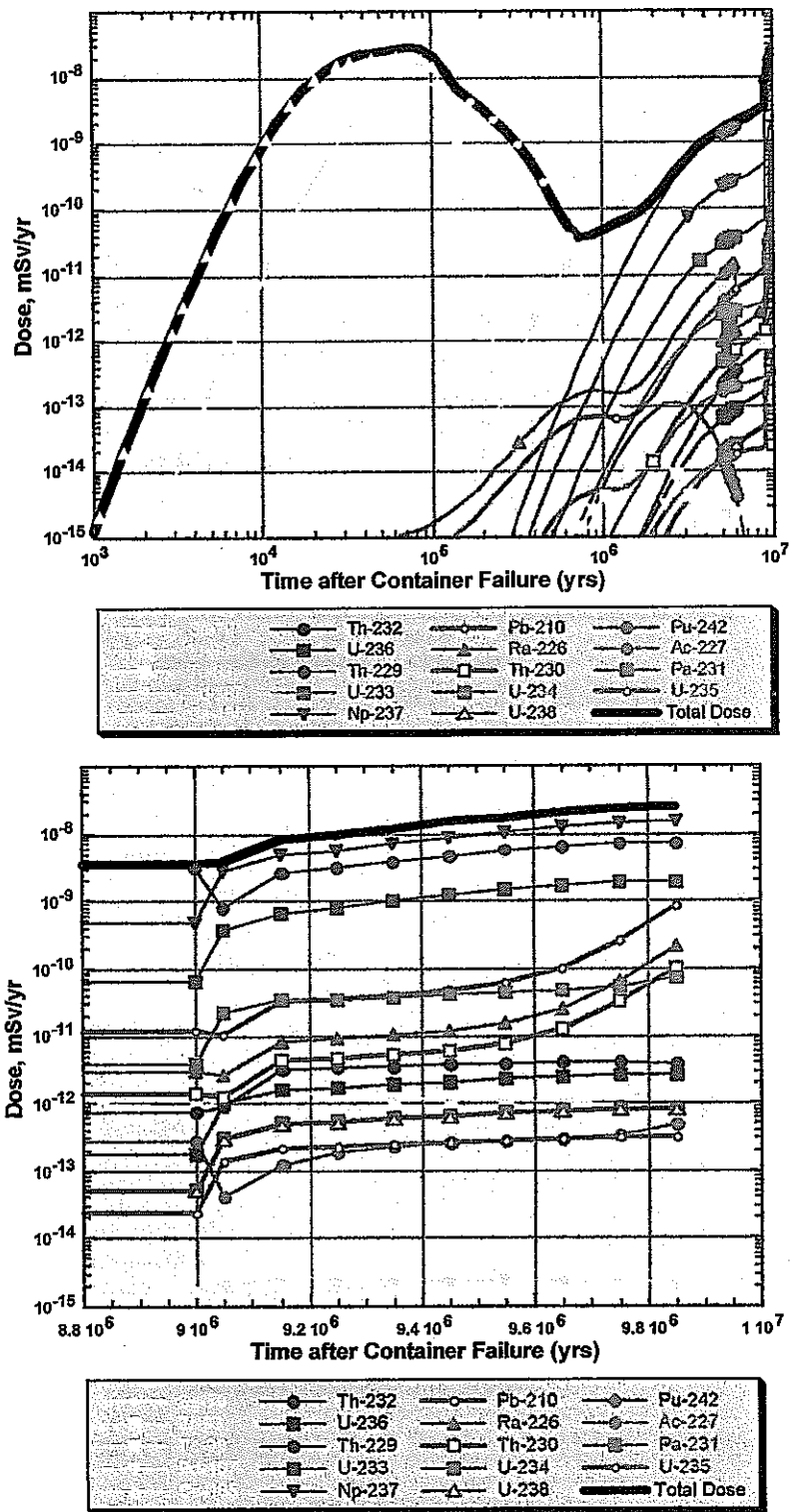


Fig.7-2(2) Combined case results: total dose (dose from a single waste package)

top: log time scale

bottom: enlargement/linear time scale

8. Human Intrusion Scenario

The human intrusion scenario is here defined as unintentional drilling of a water-extraction well near a HLW geological repository. The well can either be a:

- Direct Intrusion. The well is assumed to directly intrude through the near-field of a repository and the engineered barrier system (EBS) , or
- Indirect Intrusion. The well is assumed to intrude at location nearby the repository.

The assumption of an indirect intrusion is made in this study.

8.1 Changes in Repository Boundary Conditions

For an indirect intrusion, the water-extraction well is envisioned to be located 10-m away from the EBS at the edge of the near-field rock. Near-field FEPs that might be directly affected include:

- hydrology in near-field rock, arising from both structural properties of near-field rock (permanent increase in rock permeability from hydro-fracturing) and temporary high hydraulic gradient
- chemistry of the near-field pore waters, arising from temporary up-coning of a saline interface lying below the repository (see section 3.2.2 in MRI,1998⁽²²⁾)
- physicochemical properties of the buffer, arising from both temporary changes in salinity and permanent changes in permeability of near-field rock and the EDZ.

Compared to other scenarios, the human intrusion scenario closely approaches an instantaneous change in near-field properties. Note that possible extraction of radionuclide-bearing waters directly into the well and impacts on both the worker and the surface by drilling are not considered in this scenario.

8.2 Reference and Variant Cases

Fig.8-1 presents the conceptual model for near-field impacts arising from a water extraction well scenario, where the reference case and variant cases are also shown.

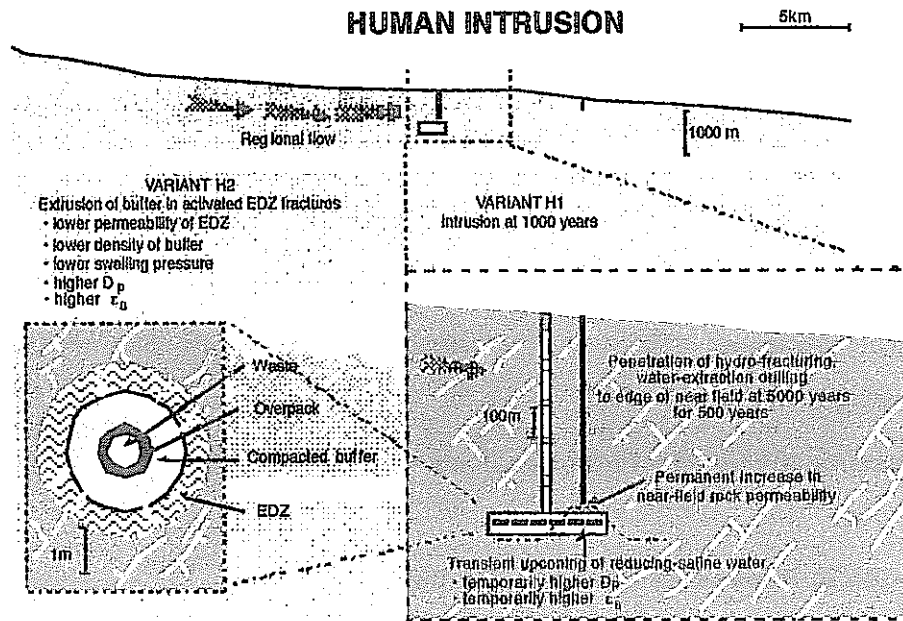


Fig.8-1 Schematic diagram of reference case and variant cases
for human intrusion scenario source : MRI,1998⁽²²⁾

(1) Variant Case H₁

This variant case H₁ is essentially the same as reference case H₀ (MRI,1998)⁽²²⁾, with the exception that the drilling intrusion is assumed to occur 2000 years in the future (1000 years after the assumed loss of containment).

(2) Variant Case H₂

Variant case H₂ is the same as the reference case H₀, except that a less-severe 100-fold increase in rock permeability (hence, flow rate in the near-field rock) is considered likely from hydro-fracturing.

8.3 Calculation Results on Variant Cases

The calculation results on variant cases H₁ and H₂ are presented in Appendix D in this main report. The analysis using MESHNOTE-TIGER code for this scenario has not been made since this scenario may be combined with uplift and erosion scenario as another combined scenario (or supplementary scenario).

9. Summary

9.1 Results Except for Dike Intrusion Case

Fig.9-1 plots the total dose rate curves for all of the natural phenomena scenarios (except for volcanism variant case with dike intrusion) calculated using MESHNOTE-TIGER code in this study. It is necessary to place these results into an overall context as follows:

- ① Note that the peak dose rates for all natural phenomena scenarios assuming FRHP groundwater are less than a factor of 3 higher than the peak dose rate for the time-invariant SRHP benchmark case. Thus, performance impacts from the calculation cases for natural phenomena scenarios, as defined here, are within a similar order of magnitude as impacts attributable to siting a repository in saline as opposed to fresh water. Unless it is proposed that high salinity should be adopted as a site "exclusion" criterion, it would be premature to be overly concerned with the order-of-magnitude changes in dose rates arising from these calculation cases for natural event scenarios.
- ② The most extreme impact arises from assumed formation of a new, major water-bearing fracture 10 meters from the edge of the repository. In a sense, this extreme scenario indicates the expected performance of a HLW repository in Japan that would occur if safe isolation was placed solely on the EBS. This is similar to the "robust" scenario case examined by Nagra in their Kristallin-I study (Nagra, 1994)⁽²⁴⁾.
- ③ The results point out the great importance of chemical and transport data for relatively few radionuclides (Se-79, Cs-135, Zr-93, Np-237 and its daughters). Future studies focused on understanding the chemical behavior of these species under expected repository conditions would be well justified.
- ④ These scenario results should be contrasted with parallel JNC calculations that explore the sensitivity of data uncertainty on the benchmark case. Significant differences in solubility data (e.g., Vuorinen et al., 1998)⁽³⁸⁾ and sorption data (Stenhouse and Pöttinger, 1995⁽³⁶⁾; McKinley and Scholtis, 1993⁽¹⁶⁾) occur

between reference data from various national repository programs. Such uncertainties may have a much more significant impact on calculated dose rates than do these natural phenomena scenario calculation cases. Likewise conceptual model uncertainty also could engender much larger changes in calculated dose rates than the changes observed for these natural-event scenarios.

- ⑤ Additional variant cases must be considered to more fully establish the robustness of repository performance for natural phenomena scenarios. For example, higher rates of uplift could be considered, in which impacts of the repository rising to the surface occur well before 9×10^6 years should be evaluated. Variants that consider adverse impacts on the buffer, particularly enhanced buffer extrusion or erosion are needed.

9.2 Results on Dike Intrusion Case

In conclusion from a discussion in previous year (and this year), the impacts of dike intrusion can be expected to be detrimental to the performance of a deep repository. In particular, the high temperature of the magma may initiate a series of consecutive and completely coupled events. The calculation results shows that about 100-fold increase in peak dose rate compared to the benchmark case would occur because of the proportionality of peak dose rate to increase in flow rate driven by the pulse in pore pressure that persists for one year resulting from quickly quenching (solidification) of magma in a single dike intrusion discussed here. Since this result depends on the factors such as a duration (timing and length of time) of the dike intrusion, it is desirable to make a more detailed analysis on these uncertain factors by using T-H-M-C calculation code (Apted et al., to appear)⁽²⁾ in examining the range of credible dike intrusion scenarios.

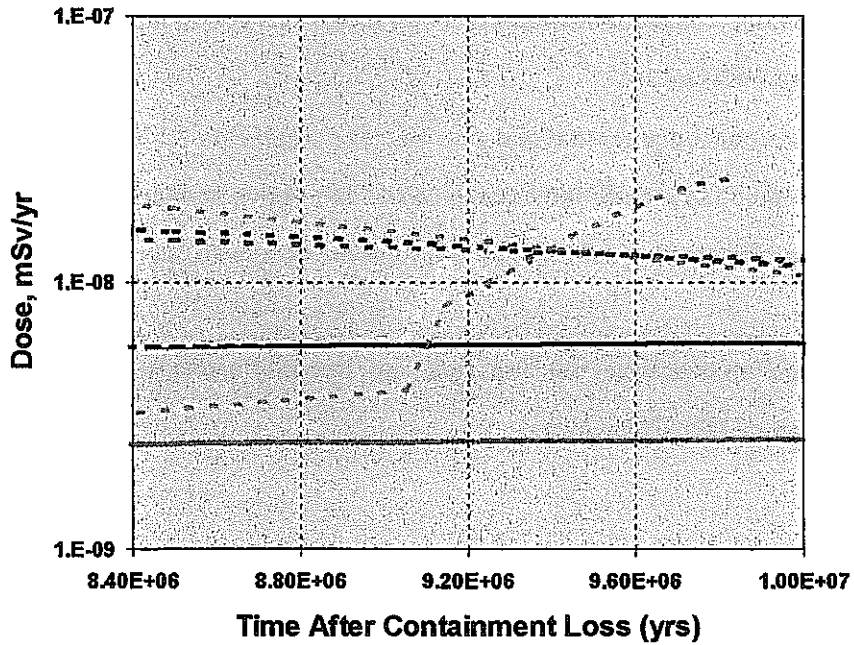
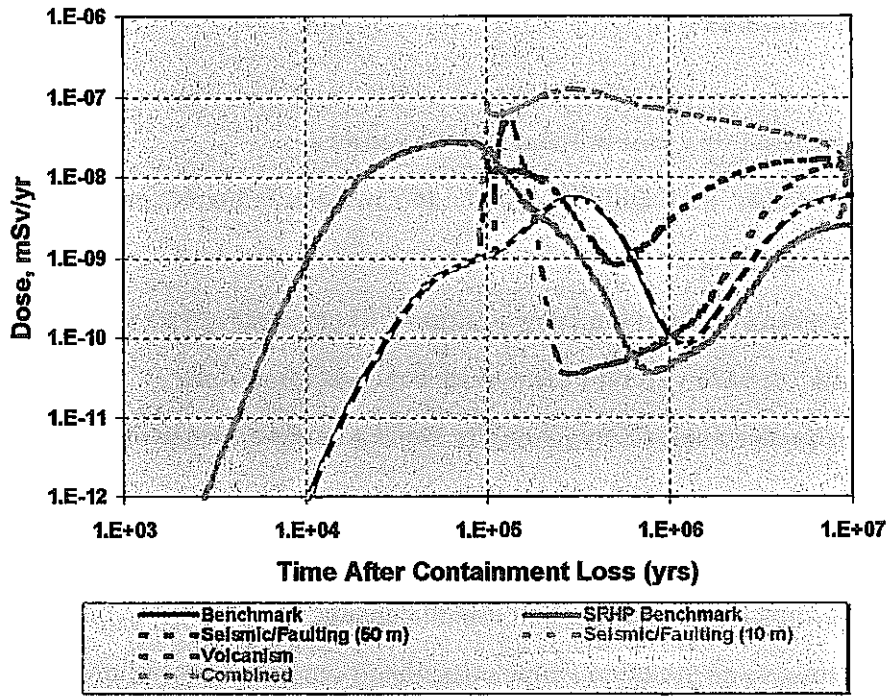


Fig.9-1 Summary of all scenarios results except for dike intrusion case:
 total dose (dose from a single waste package)
 top: log time scale
 bottom: enlargement / linear time scale

10. Concluding Remarks

The tasks performed this year are listed up as follows :

- (1) For seismicity and faulting, uplift and erosion, climate change and human intrusion scenarios
 - ① discussion and study on some patterns of consequences as variant cases
 - ② setting for each variant case and its analysis framework
 - ③ consequence analysis by using the above analysis framework

- (2) For a scenario combined by some natural events of volcanism, seismicity and faulting, uplift and erosion, and climate change
 - ① discussion and study on which combined scenario is more important
 - ② setting for a combined scenario and its analysis framework
 - ③ preliminary consequence analysis by using the above analysis framework

The next subjects will be

- ① making consequence analysis on nuclide migration in variant cases, and/or (supplementary) combined scenarios of the above scenarios
- ② making discussion and analysis on another scenario (such as deficiencies of EBS)
- ③ making construction and analysis on coupled process modeling (such as improved TOUGH2 code)

References

- (1) M.J.Apted, W.Zhou and P.F.Salter : 「Reference Case Calculations for Natural-Event Scenarios」 QuantiSci Report, QSCI-9810-1/2, QuantiSci, Inc., Denver, Colorado (to appear).
- (2) M.J.Apted, W.Zhou and P.F.Salter : 「Calculational Case for Dike Intrusion : Single Intrusion Variant」 QSCI-9810-5 (to appear).
- (3) L.M.Cathles : 「An analysis of the cooling of intrusives by ground-water convection which includes boiling」 *Economic Geology*, Vol. 72, pp804-826 (1977).
- (4) J.B.Davies and C.B.Archambeau : 「Geohydrological models and earthquake effects at Yucca Mountain」 *Nevada, Environ. Geology*, 32, pp23-35 (1997).
- (5) G.de Marsily : 「Validation of conceptual models of flow and transport in porous or fractured media」 *GeoVal90*, Nuclear Energy Agency, Paris, France (1990).
- (6) P.A.Domenico and F.W.Schwartz : 「Physical and Chemical Hydrogeology」 John Wiley & Sons (1998).
- (7) R.E.Glover : 「The pattern of freshwater flowing in a coastal aquifer, in sea water in coastal aquifers」 *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 1613-C, pp32-35 (1964).
- (8) M.Hashimoto, (ed) : 「Geology of Japan: Developments in Earth and Planetary Science, 08」 Terra Scientific Publishing Company, Japan and Kluwer Academic Publishers, Holland, p249 (1991).
- (9) 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).
- (10) J.P.Humm and P.C.Robinson : 「TIGER Transport in a Geochemically Evolving Region, Theoretical Background」 MC-6113A-5, QuantiSci, Henley-on-Thames, UK (1998).
- (11) JNC : written communication of data files (1998).
- (12) L.King-Clayton, N.Chapman, L.Ericsson and F.Kautsky (eds.) : 「Glaciation and hydrology: Workshop on the impact of climate change and glaciations on rock stresses, groundwater flow and hydrochemistry—past, present and future」 SKI Technical Report

- 97:13, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1997).
- (13) T.Kozaki, H.Sato, A.Fujishima, S.Sato and H.Ohashi : 「Activation energy for diffusion of cesium in compacted sodium montmorillonite」 Journal of Nuclear Science and Technology, 33(6), pp522-524 (1996).
 - (14) D.Langmuir : 「Aqueous Environmental Geochemistry」 Prentice Hall (1997).
 - (15) T.McEwen and G.deMarsily : 「The Potential Significance of permafrost to the Behavior of a Deep Radioactive Waste Repository」 SKI Report 91:8, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1991).
 - (16) I.McKinley and A.Scholtis : 「A comparison of radionuclide sorption databases used in recent performance assessments」 J.Contam. Hydrol. 13, pp347-363 (1993).
 - (17) MRI : 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (I) 」 Report on Result of PNC - Commissioned Research, PNC ZJ1222 93-001 (1993).
 - (18) MRI : 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (II) - Preliminary Study on Alternative Groundwater Scenario -」 Report on Result of PNC - Commissioned Research, PNC ZJ1222 94-001 (1994).
 - (19) MRI : 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (III) - Preliminary Study on the Modeling of Alternative Groundwater Scenario -」 Report on Result of PNC - Commissioned Research, PNC ZJ1222 95-001 (1995).
 - (20) MRI : 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (IV) 」 Report on Result of PNC - Commissioned Research, PNC ZJ1222 96-004 (1996).
 - (21) MRI : 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (V) 」 Report on Result of PNC - Commissioned Research, PNC ZJ1222 97-003 (1997).

- (22) MRI : 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (VI) 」 Report on Result of PNC - Commissioned Research, PNC ZJ1222 98-003 (1998).
- (23) Nagra : 「Pocos de Caldas Report No. 15: Summary and Implications for Radioactive Waste Management」 Technical Report 90-33, Nagra, Baden, Switzerland (1990).
- (24) Nagra : 「Kristallin-I Safety Assessment Report」 Technical Report 93-22, Nagra, Baden, Switzerland (1994).
- (25) D.Norton and J.Knight : 「Transport phenomena in hydrothermal system: Cooling plutons」 American Journal of Science, Vol. 277, pp937-981, October (1977).
- (26) H.Ohmori : 「Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development」 Bull. Dep. Geogr. Univ. Tokyo, 10, pp31-85 (1978).
- (27) H.Ohmori : 「A comparison between the Davisian scheme and landform development by concurrent tectonics and denudation」 Bull. Dep. Geogr. Univ. Tokyo, 17 (1985).
- (28) K.Pruess : 「TOUGH User's Guide」 LBL-20700, NUREG/CR-4645, SAND86-7104, Lawrence Berkeley National Laboratories, University of California at Berkeley (1987).
- (29) R.Pusch : 「Evolution of models for conversion of smectite to non-expandable minerals」 SKB Technical Report 93-33, Stockholm (1993).
- (30) A.M.Pytte : 「The kinetics of the smectite to illite reaction in contact metamorphic shales」 Thesis M.A., Dartmouth College, N.H. (1982).
- (31) P.C.Robinson, M.J.Williams and K.J.Worgan : 「A Description of MESHNOTE」 IM3479-1, Intera Information Technologies, Henley-on-Thames, UK (1992).
- (32) P.C.Robinson and R.Brown : 「MESHNOTE 3, Description of Input and Output Files」 MC-6114A-2, QuantiSci Limited, Henley-on-Thames, UK (1998).
- (33) N.Saito, A.Fujishima, T.Kozaki and H.Ohashi : 「Diffusion of chloride ions in compacted Na-montmorillonite」 1997 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, p563 (1997).
- (34) 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, pp381-394 (1992).
- (35) SKI : 「SKI SITE-94: Deep Repository Performance Assessment Project」 SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1996).
 - (36) M.Stenhouse and J.Pöttinger : 「Comparisons of sorption databases used in recent performance assessments involving crystalline host rock」 Radioch. Acta, 66/67, pp267-275 (1995).
 - (37) B.Velde, (ed.) : 「Origin and Mineralogy of Clays」 Springer-Verlag, Berlin, Germany (1995).
 - (38) U.Vuorinen, S.Kulmala, M.Hakanen, L.Ahonen and T.Carlson : 「Solubility Database for TILA-99」 POSIVA 98-14, POSIVA OY, Helsinki, Finland (1998).
 - (39) H.Wanner : 「Modeling interactions of deep groundwaters with bentonite and radionuclide speciation」 Nuclear Technology, 79, pp338-347 (1987).
 - (40) T.Yoshikawa : 「Denudation and tectonic movement in contemporary Japan」 Bull. Dept. Geogr. Fac. Sci. Univ. Tokyo, 6, pp1-14 (1974).
 - (41) W.Zhou and M.J.Apted : 「Conceptual Model Evaluation of Dike Intrusion Scenario」 QuantiSci Report, QSCI-9709-3, QuantiSci, Inc., Denver, Colorado, July (1998).