

JAERI-Review
98-026



JP9950002



SKI SITE-94
深地層処分場性能評価プロジェクト
要約

1999年1月

(訳) 中山真一

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布を行っております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

SKI SITE-94
深地層処分場性能評価プロジェクト*
要約

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター環境安全研究部
(訳) 中山 真一

(1998年11月30日受理)

SITE-94 レポートは、スウェーデン原子力発電検査局 (SKI) によって作成された、使用済み核燃料の仮想的処分場に関する総括的性能評価の演習であり、1997年2月に公開された。本報告書は、そのうちのメインレポートの要約版に対する翻訳である。SITE-94 は、地層処分の実施主体であるスウェーデン核燃料廃棄物管理会社 SKB が行う処分の提案を、規制当局である SKI がレビューできるように、SKI の能力とツールをさらに発展させることが目的である。

スウェーデンは地層処分の研究開発が最も進んでいる国のひとつであり、そこで開発される手法に世界の地層処分関係者が注目している。このような状況に鑑み、本書が広く日本の地層処分関係者の参考になるようにと考え、日本語への翻訳を行った。

*この翻訳は、スウェーデン原子力発電検査局 (SKI) 内の SITE-94 プロジェクト担当者の許可を得て行われたものである。翻訳に際しての誤訳や誤解の責任はすべて翻訳者にある。

**SKI SITE-94
Deep Repository Performance Assessment Project*
Summary**

**Translated by
Shinichi NAKAYAMA**

**Department of Environmental Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken**

(Received November 30, 1998)

SITE-94 is a comprehensive performance assessment exercise for a hypothetical repository for spent nuclear fuel at a real site in Sweden. SITE-94 was carried out to develop the capability and tools to enable Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI) to review fully the proposals for a deep repository which are expected to be made by the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB (the implementor).

Sweden is one of the leading countries in the research and development of geological disposal of radioactive waste. The developed methodology for performance assessment has attracted interests from other countries. The Summary of the main report of the SITE-94 project is translated here into Japanese to allow to make the information on the methodology and the related issues available among Japanese concerned.

**Keywords: Geologic Disposal of Spent Nuclear Fuel, Performance Assessment,
Sweden, SKI, SKB**

* Translated with permission of the SKI project manager for SITE-94. The translator (S.N.) assumes full responsibility for any mistakes in translation.

目 次

| | |
|------------------------------|----|
| 1. はじめに | 3 |
| 1.1 目 的 | 3 |
| 1.2 SITE-94のプレゼンテーションの方法について | 4 |
| 2. 性能評価の方法論 | 5 |
| 3. サイトと処分概念 | 9 |
| 4. システムの説明：Aspöサイトの地質学的評価 | 11 |
| 4.1 地質構造モデル | 11 |
| 4.2 水理モデル | 13 |
| 4.2.1 広域水理構造 | 14 |
| 4.2.2 サイトキャラクター化データの不確実性 | 15 |
| 4.2.3 概略の予察的計算 | 15 |
| 4.2.4 SITE-94構造モデルの定性的評価 | 16 |
| 4.2.5 Aspöの2種類の水理モデル | 17 |
| 4.3 地球化学モデル | 18 |
| 4.4 岩石力学モデル | 19 |
| 5. システムの説明：工学バリアシステム | 21 |
| 5.1 キャニスター | 21 |
| 5.2 ベントナイト緩衝材 | 22 |
| 5.3 埋め戻し材およびシール材 | 22 |
| 6. シナリオの特定 | 24 |
| 6.1 シナリオ生成の手続き | 24 |
| 6.2 標準シナリオ | 26 |
| 7. モデリング：地質圏の変化 | 28 |
| 7.1 ファーフィールドの岩石力学モデリング | 28 |
| 7.2 地下水流モデリング | 29 |
| 7.3 地球化学モデリング | 31 |
| 8. モデリング：ニアフィールドの変化 | 33 |
| 8.1 ニアフィールド岩体のモデリング | 33 |
| 8.1.1 力学的変化 | 33 |
| 8.1.2 水理の変化 | 34 |
| 8.1.3 地球化学的变化 | 35 |
| 8.2 緩衝材、埋戻し材およびシール材の変化 | 35 |
| 8.3 キャニスターの変化 | 36 |
| 8.3.1 キャニスターの破損 | 36 |
| 8.3.2 破損したキャニスター内部の化学的条件 | 37 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|-----|
| 8.4 | 燃料の溶解 | 37 |
| 8.5 | 放出された放射性核種の化学と挙動 | 38 |
| 9. | モデリング：放射性核種の輸送と放出 | 39 |
| 9.1 | ニアフィールドからの移動と放出 | 39 |
| 9.2 | ファーフィールド岩体中における輸送 | 39 |
| 9.3 | ニアフィールドおよびファーフィールドに対する予察的計算 | 40 |
| 9.4 | 生態圏への放出 | 40 |
| 10 | 影響解析：計算ケースの体系化 | 42 |
| 10.1 | レファレンスケースに対するクリアリングハウス変動 | 42 |
| 10.2 | レファレンスケースの計算ケースへの変動の組み込み | 43 |
| 10.3 | 標準シナリオに対する変動およびケース | 43 |
| 11 | 影響解析：結果 | 45 |
| 11.1 | レファレンスケース | 45 |
| 11.2 | 標準シナリオ | 48 |
| 11.3 | 処分場全体：複数のキャニスターの破損 | 48 |
| 12 | 結 論 | 50 |
| 12.1 | 安全評価に対する提言 | 50 |
| 12.1.1 | システムの理解 | 50 |
| 12.1.2 | バリア性能に関する重要事項 | 50 |
| 12.2 | SKIに対する提言 | 53 |
| | 訳者謝辞 | 55 |
| | 付録1 | 103 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 3 |
| 1.1 Objective | 3 |
| 1.2 Presentation of SITE-94 | 4 |
| 2. The Performance Assessment Methodology | 5 |
| 3. The Site and The Disposal Concept | 9 |
| 4. System Description : Geological Evaluation of the Äspö Site | 11 |
| 4.1 Geological Structure Model | 11 |
| 4.2 Hydrogeological Model | 13 |
| 4.2.1 Regional Hydrogeological Setting | 14 |
| 4.2.2 Uncertainties in the Site Characterisation Data | 15 |
| 4.2.3 Simple Scoping Calculations | 15 |
| 4.2.4 Qualitative Assessment of the SITE-94 Structural Model | 16 |
| 4.2.5 Two Hydrogeological Models of Äspö | 17 |
| 4.3 Geochemical Model | 18 |
| 4.4 Rock Mechanical Model | 19 |
| 5. System Description : The Engineered Barrier System | 21 |
| 5.1 The Canister | 21 |
| 5.2 The Bentonite Buffer | 22 |
| 5.3 Backfills and Seals | 22 |
| 6. Scenario Identification | 24 |
| 6.1 Procedure for Generating Scenarios | 24 |
| 6.2 The Central Scenario | 26 |
| 7. Modelling : Evolution of the Geosphere | 28 |
| 7.1 Far-field Rock Mechanical Modelling | 28 |
| 7.2 Groundwater Flow Modelling | 29 |
| 7.3 Geochemical Modelling | 31 |
| 8. Modelling : Evolution of the Near-field | 33 |
| 8.1 Near-field Rock Modelling | 33 |
| 8.1.1 Mechanical Evolution | 33 |
| 8.1.2 Hydrogeological Evolution | 34 |
| 8.1.3 Geochemical Evolution | 35 |
| 8.2 Buffer, Backfill and Seal Evolution | 35 |
| 8.3 Canister Evolution | 36 |
| 8.3.1 Canister Failure | 36 |
| 8.3.2 Chemical Conditions Inside a Failed Canister | 37 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 8.4 | Dissolution of the Fuel | 37 |
| 8.5 | Chemistry and Behaviour of Released Radionuclides | 38 |
| 9. | Modelling : Radionuclide Transport and Release | 39 |
| 9.1 | Mobilisation and Release from the Near-field | 39 |
| 9.2 | Transport in the Far-field Rock | 39 |
| 9.3 | Near and Far-field Scoping Calculations | 40 |
| 9.4 | Releases to the Biosphere | 40 |
| 10. | Consequence Analysis : Formulating the Calculation Cases | 42 |
| 10.1 | Clearing House Variants for the Reference Case | 42 |
| 10.2 | Combining Variants into Reference Case Calculation Case | 43 |
| 10.3 | Variants and Cases for the Central Scenario | 43 |
| 11. | Consequence Analysis : Results | 45 |
| 11.1 | Reference Case | 45 |
| 11.2 | Central Scenario | 48 |
| 11.3 | The Full Repository : Multiple Canister Failures | 48 |
| 12. | Conclusions | 50 |
| 12.1 | Implications for Safety Assessment | 50 |
| 12.1.1 | System Understanding | 50 |
| 12.1.2 | Key Aspects of Barrier Performance | 50 |
| 12.2 | Implications for SKI | 53 |
| | Acknowledgment | 55 |
| | Appendix 1 | 103 |

序 文

スウェーデンの使用済燃料および高レベル放射性廃棄物の深地層処分計画は、現在サイト選定作業の初期段階にあり、5ないし10の自治体においてフィージビリティスタディが行われている。スウェーデン核燃料廃棄物管理会社SKBは、1998年頃までに地表調査の対象とする2ヶ所のサイトを選定し、そのうちの1ヶ所における詳細な地下調査および処分場建設開始の許可申請を来世紀初頭に行うとしている (SKB RD&D Programme, 1995)。

スウェーデン原子力発電検査局SKIは、許可申請書のレビュー作業に備え、性能評価を行うための専門知識を独立に蓄積してきた。その基礎は1991年に公開されたSKIの前の性能評価であるProject-90にある。1992年に始まったSITE-94はProject-90で発展した方法の上に築き上げたものであり、サイトに特有なデータの取り扱いやシステム・シナリオ分析等に関してProject-90以降の進展を強調した。アップデートングが必ずしも完全でないとはいえ、その進展によって、SKIは将来に規制用として利用できる知識とツールを手にしたことになる。本報は過去4年間におけるSITE-94プログラムの結果をまとめたものである。

SITE-94は、SKIの核廃棄物室(室長:Sören Norrby)ならびに多数のスウェーデンおよび国外の専門家によって完成された。SKIのプロジェクトグループは:

| | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Johan Andersson ¹ | (プロジェクトマネージャー 1992-1995; シナリオ) |
| Björn Dverstorp | (プロジェクトマネージャー 1995-1997; 水理学、データ管理) |
| Fritz Kautsky | (地質学、岩石力学) |
| Christina Lilja | (ニアフィールドにおける放射性核種の放出と輸送、キャニスター) |
| Rolf Sjöblom ² | (キャニスター) |
| Benny Sundström | (ファーフィールドにおける放射性核種の輸送、グラフィック) |
| Övind Toverud | (処分概念) |
| Stig Wingefors | (地球化学、放射性核種の化学、ベントナイト) |

1) 現在 Golder Associaste (訳注: 原本では QuantiSci 所属となっていたがその後所属が変わった)

2) 現在 ÅF Energi Stockholm

SKIは本プロジェクトのために運営委員会および顧問専門家グループを発足させた。専門家グループのメンバーは Mick Apted, Neil Chapman (QuantiSci) および Ghislain de Marsily (Université de Paris) である。

本報内に引用したとおり、本プロジェクトは多数の外部専門家の貢献があつて成功を収めた。Karin Pers (KEMAKTA) からは、ニアフィールドにおける放射性核種の放出と移動に関する計算に関して協力を頂いた。本報はSKIのプロジェクトグループによって執筆されたが、その際 Neil Chapman および Joel Geier

(Golder Associates/Clearwater Hardrock Consulting) から助力を得た。また、Timo Vieno (Technical Research Center of Finland) および Phillip Maul (QuantiSci) には草稿をチェックしていただき、編集上大いに役だった。

ストックホルム, 1996年12月30日

1 はじめに

SITE-94 は、使用済み核燃料の仮想処分場に対する総合的性能評価の演習であり、サイトとしてスウェーデン国内の实在の場所が想定されている。スウェーデン原子力発電検査局 (SKI) はこの演習によって性能評価 (PA) の経験を経、能力を高めて、近い将来に行われる処分場のサイティングおよび設計の安全性具申に対する規制側としての備えとする。

SITE-94 プロジェクトは 1992 年 8 月から 1995 年までの 3 年間をかけて行われ、取りまとめられた成果を 1996 年に公開した。1991 年に公開された Project-90 をほぼ受け継ぐものである。Project-90 もまた専門的な意見および知識を発展させるために行われた PA 演習だが、これは使用済み核燃料の処分に対して SKI が独立の PA を行うことが目的であった。一方、SITE-94 は、スウェーデン核燃料廃棄物管理会社 SKB (実施母体、または処分当局) が行う深地層処分の提案を SKI (規制当局) がレビューできるように作成されたものであって、SKI の能力とツールをさらに発展させることが目的である。

この PA 演習は、処分実施にいたる各段階のうちのサイト選定段階を対象にしたものである。この段階では、マッピングやボーリング孔掘削など地表調査から得られる地質学的な観測の結果を基に複数のサイトの比較をし、選定が行われる。したがって、SITE-94 では地質学的情報を PA 手法に取り込むこと、および PA での不確実性の評価を行うことに重きがおかれ、サイト選定にかかわる問題全体を扱うものではない。

SITE-94 では、PA に取り込むサイトデータとしてスウェーデン南部の Äspö サイトの地質データを利用し、このサイトに 'KBS-3' (1983) とほぼ同じ設計の小規模の処分場および工学バリアシステムを想定した。地質データは Äspö にある SKB の Hard Rock Laboratory から得られたものである。したがって、厳密には、使用された地質データは可能性のある複数のサイトからのデータを代表しているわけではない。しかし Äspö のデータが範囲、質および定量性において充分代表性を有しているとみなした。なおこれらのデータの使用にあたっては、SKI は、SKB の好意により、利用できる情報のほとんどについて再評価を行った。

ただし、そのような処分場を Äspö に建設する意思はないことは明言しておかなくてはならない、また、処分概念それ自体についても、あるいは Äspö のようなサイトの処分場についても、その放射線学的安全性の定量的評価が SITE-94 の目的ではないことを強調しておく。

1.1 目的

SITE-94 の主な目的としては、SKI のレビュー能力を高め SKB へのアドバイスを可能にすることとともに、次の 3 点がある：

- ・ サイトスペシフィックなデータをいかにしてPAに取り込むか、またサイトキャラクターションに内在する不確実性がPAの結果にいかなる影響を与えるかを調べる。このためには、情報管理における追跡性を高め、データや概念モデルの不確実性を扱う手段を開発し、地質学、水理学および地球化学的データがPAの中に矛盾なく統合されなければならない。
- ・ 厳密なシステムズアプローチに基づくPA手法の開発と検証。システムズアプローチは、システムに起こる変化のシナリオを構築し、かつ随伴する不確実性を扱う手法である。このアプローチによって、情報の追跡性、種々の決定およびPAのための諸作業が、最終的にPAの品質保証の基礎となる。本プロジェクトでは次の4つの型の不確実性を挙げた：
 - － システムの不確実性
 - － シナリオの不確実性
 - － 概念モデルの不確実性
 - － パラメータの不確実性
- ・ 廃棄物キャニスターの健全性ならびにその寿命や破損率に影響するメカニズムの同定と分析。その重要性はProject-90の研究において注目されたとおりである。

1.2 SITE-94のプレゼンテーションの方法について

このプロジェクトはメインレポートと、個々の分野に対する個別レポートとに分けて公開されている¹。メインレポートの要約版(Summary)が本報告書である。メインレポートは本プロジェクトで行われたすべての作業を詳細かつ包括的にまとめたものであり、実質的には‘stand-alone’の資料である。したがって、メインレポートは主要なPA影響解析など本プロジェクトの全体にわたる本質的内容を含んでいる。この要約版はプロジェクトの論理的流れを示すものであり、メインレポートで扱うような補足的な筋道や議論の多くはカバーされていない。

PA手法では4つの主要セクター、つまり解析レベルを定義する。その一部はこのプロジェクトで発展したものである。解析レベルをPAに対して適用する際は、予察的計算と感度解析からのフィードバックを使って作業を繰り返しながら、おおよそ以下の順序に従って行う：

- ・ システムの同定または定義
- ・ シナリオの同定
- ・ 処分場の変化のモデル化
- ・ 影響解析

メインレポートもこの要約版も、あたかもPAを始めて行うかのように、論理的展開として上の構成に従って記述されているが、実際にはこれら4つの解析レベルを並行して進めた。まず最初にこの構成に基づくPA手法について説明する。

¹ 訳注：メインレポートは2分冊から成る。個別レポートは巻末の付録1に掲載されている約50冊である。

2 性能評価の方法論

前述したように、本プロジェクトにおけるPA手法は‘システムズアプローチ’に基づいている。すなわち、‘処分システム’における処分場、地質圏および生物圏の各要素の内容と境界を明確に規定し、処分システムの変化をコントロールする特質、事象、過程をPAの中で論理的かつ秩序立ててリンクさせる。このアプローチのひとつの目標は、すべてのPA作業、種々の決定および不確実性に関して透明で追跡可能な記録方法を残すことである。それによって、評価の解析方法および結果を将来さらに発展させたり再評価することが可能となる。また新しいデータや新しい知見を取り込む場合や、あるいは目的の異なるPAを行う際に作業の繰り返しや修正が容易となる。

解析レベル1はシステムの同定または定義である。まず最初にシステムの境界を明確にする必要がある。さもなければ地球規模あるいは宇宙規模（たとえば地球軌道の変化による気候変動）に関するプロセスまでもモデル化しなくてはならなくなる。SITE-94ではこの境界を地質圏と生物圏との境においた。処分場および工学バリア、ならびに岩体内における放射性核種の移行に影響するすべてのプロセスは**プロセスシステム**として定義する。システムの境界は、システムの挙動を調べるためのモデルの境界とは必ずしも合致しない。なぜならば、モデルの多くはシステムの下部構成を対象とするものであり、それに対してはモデラーは各自で境界を選ばなければならないからである。このシステムに含まれないプロセスは、生物圏において放射線被ばくの可能性があるすべてのプロセス、システムの挙動を変えてしまう地質構造の変化や気候変動のような天然事象、およびシステムへの人間からの影響である。生物圏は評価の中では、処分システムからの放射性核種の放出を受け入れるひとつの受け皿と見なした。また、天然事象や人間活動は、以下に述べるように、シナリオにおいては外力として扱われた。

プロセスシステム（もともとはProject-90で定義された概念）は**プロセスインフルエンスダイアグラム**（PID）によって表わす。PIDは処分場の挙動に影響する可能性のあるすべての特質（feature）、事象（event）、過程（process）（FEPs）を含むが、それらのFEPは、プロジェクト開始時の詳細な検討および諸外国のFEPリストをもとにして選ばれたものである（図2.1）。FEPの中にはプロセスシステム内に収まるものもあるが、外部FEP（EFEPs）としてシステムの外側にあつてシステムに影響するものもある。PIDはボックスとインフルエンスとから構成される。ボックスは各FEP（通常のバージョンでは総計161）を表わす。インフルエンスはFEPボックス間をつなぐ線（総計668）で示され、FEP間の相互作用を表わしている。

上に述べた第一の型の不確実性である**システムの不確実性**はPIDを構築することによって取り扱うことができる。システムの不確実性とは、当該システムの性質や内容—FEP、それらの影響、相対的重要性—が完全には理解されていないという事実を表わす。しかし、FEPの重要性や影響を定量的に分類するためのエキスパートジャッジメントは可能で、またPIDをさまざまなレベルに分類することも可能である。この場合のレベルとはシステムの分析や記述に応じた信頼性のレベル（‘重要度レベル’）

である。個々のレベルは同じ構造を有するが、重要度が高いレベルではFEPとインフルエンスの数は少ない。異なるレベルにあるPIDは目的の異なるPAに対応可能である。

PA手法の解析レベル2はシナリオの特定である。システムとシステムが含むFEP、およびシステムの外にあるFEP(EFEP)を定義したあと、その次のステップは処分場閉鎖後に起こる変化を特定することである。まず最初に設計基準を設定し、システムに予想される性質や状態—たとえば早期段階でのキャニスターの破損やベントナイト緩衝材の瞬時飽和—をシステムの記述として取り込む。他にも規制側から指摘される事象があるであろうが、それらは設計基準からのずれとみなし、SITE-94では解析対象としない。

システムを記述し設計基準の仮定をした次の段階はレファレンスケースを定義することである。レファレンスケースはその後に続く影響解析の骨格となるものである。レファレンスケースはシステムの‘内部’変化に対するものであって、システムの境界条件を変え得るようなEFEPには影響されない。またレファレンスケースそれ自体をシナリオとは見なさない。なぜならば、もしシステムが外的プロセスからの影響を受けないのであれば、外的プロセスは時間の関数であるから、システムのそのような変化は明らかにシステムの‘将来’ではないからである。レファレンスケースに変動を導入することによって初めて概念モデルの不確実性やパラメータの不確実性を探ることに使うことが可能となる。(概念モデルの不確実性はシステム内のプロセスを記述するという方法で調べる。)パラメータの不確実性を探るとはそのパラメータのバラツキを評価することである。レファレンスケースの記述は上述したPIDを基に構築する。

プロセスシステムの外側にあるEFEPはいくつかの種類に分類される。そのひとつは将来の気候変動に関するFEPである。システムへ影響するかどうかかわからない他のFEPと違い(事象そのものが起こらないかも知れない)気候変動は避けることができない。スウェーデンの将来の気候変動については、その程度と時期が正確に知られているわけではないが、一般的傾向については信頼できるイメージを構築するだけのコンセンサスが存在する。SITE-94においては、この一般的傾向をÄspöの地表環境の13万年間にわたる時間変動とみなして標準シナリオ²に関するモデル化の基礎とした。標準シナリオは、レファレンスケースの上に氷河作用—海面変動—永久凍土が繰り返される気候変動を重ねたものである。一方、本プロジェクトで用いたシステムズアナリシスアプローチでは、標準シナリオはそれ独自のPIDによっても表現可能である。標準シナリオは本質的にはレファレンスケースであり、レファレンスケースに気候に関するEFEPとその影響を加えたものである。

その他のEFEPは、評価、スクリーニング、グルーピングを経て、一連の付加シナリオへと変換する。付加シナリオによる影響は将来のいろいろな時点において標準シナリオによる影響に追加し、最終的な潜在的放射線影響を計算する。SITE-94プロジェクトにおいては、これらのシナリオの意味と適用性

² 訳注：原文はCentral Scenarioである。そのままセントラルシナリオと呼ばれることもある。

について、確率論的取り扱いの価値や解析結果の解釈の仕方の観点からかなりの検討を行った。その結果、付加シナリオは本プロジェクトにおいては定量的解析の対象としないこととし、レファレンスケースや標準シナリオ—これは‘除外不可能’—という、いわばメインストリームの影響解析とは別の観点から検討を行った。その観点とは、付加シナリオは意志決定者が参考にできるような例であるとみなすこと、およびそれらの解析結果を規制値と比較する際には細心の注意をもって行うことである。この問題については将来より深く検討されることを望む。

上に述べたように、いくつもの種類のシナリオが生まれ、また EFEP はいろいろな時点においてさまざまに組み合わせられて適用される。シナリオを生成し、すべての EFEP を説明するという作業によって、前述した第 4 の型の不確実性、シナリオの不確実性を扱うメカニズムが形成される。付加シナリオを十分に広くとることによって、将来の変化の可能性を落ちないように拾い上げることができるという意味で、システムへの主たる影響を‘top-down’または‘outside-in’方式で検証することが可能である。もともと、SITE-94 では逆のアプローチも採用するつもりであった。つまり、システムの将来の状態は内部から生成し、それらの状態の原因を外部要因に求めるという、‘bottom-up’または‘inside-out’分析である。しかし、本プロジェクトでは最終的に後者の方法は採用しなかった。

PA 手法の**解析レベル 3** は、処分場システムの各部分の挙動に対するモデルを開発し、将来の変化のモデリングを行うことである。システムの不確実性ととも、概念モデルの不確実性とパラメータの不確実性が存在するとすれば、モデリングは当然ながら同一の問題およびプロセスに対する複数の取り扱い方の間で矛盾せずに、かつデータのバラツキや不確実性が反映された変動を用いなければならない。したがって、モデリングにはデータ管理と選択、ならびにさまざまな技術的分野からの代替案の評価という作業が含まれる。また、これらのどれも意志決定を要するものである。PID に含まれるすべての知識と情報をモデリングに取り込むためには秩序だった方法が必要であり、その方法として SITE-94 では**評価モデルフローチャート (AMF)** という概念を作った。AMF は、情報源、モデルおよびクリアリングハウスの関係を図解したデータベースである (図 2.2 参照)。クリアリングハウスはある特定分野のモデリングを行うための個々の情報の集まりで、たとえば地球化学や地下水流動といったものである。AMF は、モデリングに必要な情報の流れを図示し、また異なる分野やモデリンググループ間の関わりに対して何が必要かを特定するものである。AMF 上に PID に示されたすべての FEP とインフレンスが載せられ、これによってあるグループがシステムの変化のあらゆる事項に関わり合っていることがわかる。

PA 手法の**解析レベル 4** は実際の**影響解析**である。影響解析はレファレンスケースおよび標準シナリオに対する**変動**および**計算ケース**を基に行う。レファレンスケースは、主にシステム、概念モデルおよびパラメータの不確実性を探るため、また標準シナリオは (付加シナリオとともに) シナリオの不確実性を探るためである。このようにして、影響解析のほとんどはレファレンスケースの変動に対して行われることになる。AMF は影響解析の中で中心的な位置を占め、必要な情報の流れを特定し、またクリアリングハウスの中では計算ケースを開発するための戦略を決める。この意味で、AMF とその要素

は品質保証のための重要な手段としての役割をもつことになる。

これら4つの解析レベルにおいては、個々のシナリオに対してそれぞれ独自のPIDおよびAMFが必要である。したがって、PID、AMF 各々にレファレンスケースに適用される基本となるバージョンがあり、それとは別に標準シナリオに対するバージョンがあり、さらに、原則に従えば、個々の付加シナリオに対するバージョンがある。ただし、前述したように、付加シナリオは本プロジェクトでは解析対象としない。

個々の解析レベルにおいて支配的となる型の不確実性を特定しておくこと、およびそれらの不確実性は評価を通して伝播されることを認識しておくことは重要である。SITE-94のそれぞれの解析レベルで発生する不確実性を図2.3に示す。

3 サイトと処分概念

解析対象とした処分システムは、SKBによる1983年のKBS-3コンセプトとして知られているモデルである。スウェーデン国内の12基の原子炉が2010年までに閉鎖されるとして、それらの原子炉から取り出された燃焼度が比較的高い使用済燃料約6800トン・ウランを処分する。KBS-3ではこの概念はSKBによってのちにさらに発展した使用済燃料を初期重金属換算で1600kgづつ銅・スチール製キャニスターに封入し、キャニスターの耐腐食性は外側の銅製容器によって、機械的強度は内側の鋼製容器によって備えられるとした。ただしキャニスターの仕様に関しては、SITE-94の終了時点においても多くの問題が未解決ままである。処分するキャニスター数については、サイトの地質的特徴のためにSITE-94の処分場を小規模にせざるを得ず、キャニスター数は原子力発電規模から推定される4300本ではなく、最大約400本とした。また、SITE-94の影響解析は単一キャニスターからの放出に限定した。なぜならば、キャニスターの開発段階にある現在、将来のいかなる特定の時点についても破損するキャニスター数を推定することには意味がないと考えたからである。

廃棄物キャニスターは処分場内の、トンネル床面から掘削された埋設孔内に定置する。処分場は花崗岩基盤の岩体内深度約500mである。キャニスターを高圧縮ベントナイトが取り囲む。ベントナイトの主な機能は、キャニスターを力学的に保護すること、キャニスター周囲の地下水流を抑制するバリアとして働くこと、ならびに腐食生成物の容器内への移動および容器からの放射性核種の移動が、拡散という遅い過程に支配されることを確実にすることである。

処分場内のトンネルは、砂・ベントナイト混合土またはベントナイト・粉砕岩石混合物によって埋め戻し、トンネルおよび立坑はコンクリートまたはベントナイトによって何重にもシールされる。

上述した仮想処分場はÄspö島の地下に位置すると仮定した。ストックホルムの南方約330kmのスウェーデン東岸にオスカーシャム原子力発電所があり、Äspö島はその発電所に近い海拔の低い(13m)小島である(図3.1)。このサイトを選んだ理由は、SKBのÄspö Hard Rock Laboratory (HRL)の開発に際して得られた多量の地質学的サイトキャラクターゼーションデータを利用可能だからである。SITE-94の目的を考えたとき、このデータベースは、サイトデータをいかにして性能評価に組み込むかを検討するための実質的な出発点である。

HRLにおける地下の直接観測によって、Äspöの地質学については今日多くの情報が得られている。しかし、SITE-94ではこれら地下での観測から得られた情報は一つも使っていない。サイト選定段階における状況にできる限り近づけるために、初期調査段階(1986-1990)に「地表から得られた」情報のみ(地表からのボーリングを含む)を使用する。サイト選定の予備段階では、サイトから得られる地質学的データを使って、処分場の位置の決定、処分場施設のレイアウト、および予備的でサイトスペシフィックなPAを行う。ただし、HRLサイトの調査ではこの最後のPAは目的に含まれていなかったし、

実際 HRL に求められたことは、そのサイトの特徴の調査に集中することだったであろう。しかし、それにもかかわらず、SKB は、HRL の調査から得られたデータが、ある処分場サイトに対して将来行われる調査から期待されるデータに非常に近いものだと考えた。

SKB の好意により、SKI が利用できるデータベースは、広汎である。そのデータベースに含まれるデータは、リモートセンシング、広域および局所的地球物理学、広域および局所的地質マッピング、詳細なコア検層、水理ならびに地下水化学データ（Äspö における 14 本の深いボーリング孔、多数の浅いボーリング孔、および Ävrö と本土におけるボーリング孔から得られた）、現場での応力測定、実験室における岩石力学試験などの結果である。水理データは単一孔およびクロスホール透水試験、ならびに 3 次元トレーサー試験から得られた。用いた測定技術に起因する不確実性と誤差の要因を特定するために、これらの水理データを詳細にレビューすることが SITE-94 における最初の課題であった。

Äspö サイトに適用する地質データの多くは、SKB が保有する nioiteha データベースに含まれている。それに加え、SITE-94 では、サイトスペシフィックではないジェネリックなデータもある程度利用した。どのような評価においてもジェネリックなデータの利用を避けることはできない。GEOTAB データベースを利用することによって、SKI は、PA におけるデータの実効性の観点、とくに品質保証の観点から、データの記録形態、記録されたデータのタイプ、およびデータ間の関連について有効なコメントをすることができる。対象とした項目は記録方法、位置に関する情報の記録、種々の地球化学的手法によって得られた値、地質学的命名法および地質学的測定方法に及ぶ。SITE-94 におけるデータ評価作業の一部として、ボアホール透水試験のデータに対する徹底的な再評価を行った。再評価の結果、データがいかんして取得され記録されたかに関して留意されていない限り、それ以降の PA でそのデータを使用することは難しく、また影響解析評価の中に不必要な不確実性を持ち込む可能性があり、ひいては取得することが困難な高価な情報を十分に利用しないことになる。

SKB が行った Äspö における地表調査は、実際の処分場ではなく研究施設の建設が目的であったことに注意すべきである。さらに、データは主に 1986 年から 1990 年の期間に集められたために、SITE-94 で利用したデータの一部は SKB の現在のサイトキャラクター化能力が反映されているものではない。

4 システムの説明：Äspöサイトの地質学的評価

サイトの地質、水理および地球化学のすべてをモデル化し妥当な方法でPAに組み込むことが、SITE-94において占められるもっとも大きな仕事であり、また本プロジェクトの主目的である。

このために研究者を4つのグループに分け、それぞれのグループが以下の各専門のサイトキャラクターゼーションデータを担当した：

- ・ 地質構造
- ・ 水理
- ・ 地球化学
- ・ 岩石力学

それぞれのグループの研究者はデータを詳細に評価して、サイトの今日の状況を説明できかつ将来の予測をするためのモデルを作成した。いくつかの特質および過程については、さらに代替モデルを開発してデータにフィットもしくはデータを使った較正を行う必要があった。つぎにこれらのモデルの整合性をグループ間でチェックしたが、この整合性チェックこそがサイト評価の心臓部である。将来の全体PAにおいては、各分野の研究者とモデラーとの間での繰り返し作業が、SITE-94で行われたよりもさらに必要とされるであろう。

4.1 地質構造モデル

地質構造モデルの目的は、サイトの特質と特性を理解するための地質構造の基本的構成を示すことである。PAにおいても、またサイト設計においても、すべての作業の基礎となる共通の地質モデルが必要となる。このモデルは、地表およびボーリング孔から得られた地質データを、一次的な、つまりできる限り加工されていない（解釈を入れていない）形態で使って構築した。データベース中のデータの多くは、実際には、加工されている。

モデルを構築するためには次の3つのステップを経る：

- ・ 存在すると思われるタイプの構造を決定するための文献調査
- ・ 広域（35×25 km）、準広域（10×12 km）および局所（2×2 km）各スケールにおける構造の定義と2次元構造・亀裂モデルの作成
- ・ Äspö島全体を含む局所スケール（2×2×1 km 深）に対する詳細な3次元モデルの開発。これが本研究の最終の目的であり、上に述べた共通の基礎モデルである。

Äspöの母岩は変性堆積岩、変性火山岩、花崗岩系列岩から成り、花崗岩や火成岩の貫入がある。この一帯が16.5～18.1億年前のトランススカンジナビア火成岩帯の一部である。Äspö島自体は主にアブラ

イト岩脈（ボーリング孔長の15%を占める）が貫入した葉片状花崗岩系列岩（同76%）とグリーンストーン（9%）とから成り、このアプライト岩脈が水理上重要である。花崗岩系列岩のうちの主要な2つはSmåland花崗岩とÄspö閃緑岩である。Äspö地域の地質図と地勢図を図4.1に示す。

2次元モデルを作成する上で重要な点は、地形上の特徴と亀裂のマッピングを含んでいること、ならびに亀裂の7つの分類（亀裂の形態と方向に基づく）および亀裂間の岩石ブロックを定義することである。これはこの地域の地質変遷を詳細に辿ることによって可能である。そのように綿密に分析を行うことによってこの地域の既存の地質図を見直すことにもなった。

3次元局所スケールモデル（図4.2参照）は、地下の情報を含む上記の2次元マップをデータベースと組み合わせて作成した。このデータベースは、52の特定された亀裂と40の観測パラメータとを関連づけるものである。モデルの作成においては、観測点のない場所へデータを内挿または外挿するための基準を設けた。この3次元局所スケールモデルは今後の処分場サイトにおけるボーリング孔や掘削から得られるデータを用いて検証することになるが、現在のところ、SITE-94では、地震の垂直方向分布に関するデータ—このデータは‘使用されなかった’—との単純な比較がうまくいった例を除いて、この検証作業は行われていない。将来HRLからのデータを用いて行う予定である。

研究者間でデータの解釈が異なる場合があるが、こういう場合には異なったモデルが出来上がる。逆に、もし異なる専門家によって作成されたモデルが非常に似通っているとすると、その共通の基礎モデルの信頼性は高いと言える。モデルが大きく異なっている場合には検討を要する問題があることを意味する。SITE-94では、SKIの専門家グループが作成したモデルを、別の既存の2つのモデル、すなわちHRL建設前にSKBおよびSKN（旧使用済燃料に関する国家委員会）によって作られたモデルとの比較を行った（図4.3）。この比較のために使われた3次元視覚化ソフトウェアは強力な手法であった。

図4.3を見ると、大きな構造の幅がモデル間で違って現れるというように、モデル間の詳細度が異なっているものの構造の主たる特徴はそれぞれのモデル間で一致している。3次元視覚化技術をもっと徹底して使えば、SKIモデルによってより多くの亀裂を表わすことが可能である。モデル間で結果に相違があるとすれば、それは構造の特徴を記述する用語の違いや、データの解釈法の違い、ことに外挿方法の違いによるものである。

データの解釈が違えばサイトの構造モデルの記述の差となって現われ、これは**モデルの不確実性**について考察することに通じる。SITE-94で評価された不確実性とは、形状（構造の方向性）および場所（構造の空間的位置）の不確実性である。**パラメータの不確実性**は、亀裂の大きさ、内部構造および充填物に関するいろいろな記述や詳細レベルの違いとして現れる。近似をするとモデルに不確実性が持ち込まれるが、その近似の大きさを見積もるために2つの方法を試した；3次元構造モデルを、岩体の破砕帯部分の分布図と比較する方法と、亀裂内での地下水流の流跡と比較する方法である。SITE-94の構造モデルでは、地質学的あるいは地球物理学的手法によって特定された破砕帯をキーとなる入力とし

て用いた。地下水の34%はそのような破碎帯から流入していないため、水理モデルは、もしこの基礎モデルのみを基にすれば、水力学的に重要な特質のかなりの部分を含まないことになる。

さらに、ボーリング孔における調査である特定の方向の亀裂を検知できないことが原因で、モデルに偏りが持ち込まれる可能性についても試験を行って調べた。その結果、ボーリング孔は一部の亀裂群を選択的に検知するものの検知されにくい亀裂も存在することがわかった。また、地表からのボーリングでは垂直に近い亀裂は見逃されやすいことはよく知られているが、その亀裂の中でもさらに検出されやすさに違いがあることもわかった。

構造に関するモデリングの最後の作業は、3次元モデルで示されたÄspö地下の岩体に仮想処分場をはじめ込む作業である。小さな処分場ならば建設可能であると考えられる部分が2ヶ所見つかった。その処分場には、深度500mのレベルに平行に走る2本の処分トンネルと、処分場からそれぞれ100m離れた位置に300mおいた2本の立坑がある。トンネルの方向は最大主応力と同方向である。動水勾配は低いがこのことは処分場のレイアウトには影響しない。

処分場は6つの亀裂帯が境界を成すように置いた。その亀裂帯にはさらに10本が貫通し、そのうちのひとつは幅が10m以上である(図4.4)。もし処分トンネルと境界の亀裂帯との間に‘離隔距離’が必要でなければ、その処分場には約380本の廃棄物容器を置くことが可能である。離隔距離を10mとすると160本しか置けない。さらにSKBのKBS-3のように100mと仮定すると、Äspöは処分場サイトとしては使えない。SKIモデルと違い、SKBとSKNの構造モデルでは亀裂の数が少ないために処分場を若干大きくすることが可能である。

これまでの検討によって、サイト決定に際してのひとつの重要な問題が浮かび上がる。ÄspöはHRLには適しているとは言え、比較的高い亀裂性を有するサイトであり、もし現行の(つまりKBS-3と同じ)離隔距離を要求されるとすれば処分場としては適さないことになる。しかし、その要求基準はまだ概念的、任意的なものであり、離隔距離の影響の定量的評価は詳細なPAの結果を待って、より妥当な基準を考える必要があることは明らかである。

4.2 水理モデル

Äspöの水理学的評価の目的は、サイトの地下水流を全般的に把握すること、および水理学的条件の将来予測をするための定量的モデルを開発することである。モデルは、当該サイトについての知見との整合性を取りつつ、データによる較正およびその他の情報に基づく実証を経て開発される。モデルが岩石力学的データ(後述)と整合性を保つことも重要であるが、水理に対する岩石力学の影響は考慮しなかった。

大量のデータを評価するために次のようなアプローチをとった：

- ・ 水理構造の評価と広域水理に関するモデリング
- ・ サイトキャラクターゼーションデータの不確実性の評価
- ・ システムの重要な挙動に関する予察的計算
- ・ 関連する全データを矛盾なく説明できる、SITE-94 構造モデルの水理学的定性的評価
- ・ 定量的代替モデルの開発と解釈

これらの各ステップについて以下に述べる。

4.2.1 広域水理構造

Äspöの母岩は起伏の少ない亀裂性母岩で、沿岸地帯に位置する。年間平均降水量は 185 mm で、そのほとんどは融雪による。スカンジナビアの低地帯に多く賦存する硬質岩母岩と同様に、地下水面は実質的に海水面と等しい。島周囲のバルト海の塩分濃度の低い海水は島の下側の地下水に何ら水理的影響を与えないと考えられており、Äspö島内には淡水の浅いレンズが存在する。

深部地下水の主な流出場所はÄspö島周辺の沿岸地域である。地下水はスウェーデン南部の高地における涵養水を起源とし、広域に流れを広げて通水性の高い亀裂帯を通して流出する。地下水はおもに海岸地帯に直接流出すると考えられているが、部分的にはÄspö島内での流出の可能性も考えられる。島自体が広域流出帯内にあるのか局所的な涵養域内にあるのかは不明である。しかし、この地域内の浅い楕状地岩体内で、深部の広域流れに由来する古代塩水が見つかっており、また何本かの深部ボーリング孔においては、この地帯が広域流出帯にあることを示す多くの化学的証拠が見出されている。

このサイトは過去数百万年間に氷河と海水の侵入を繰り返し受けた複雑な歴史をもつ。地表環境が変わるたびに浅い部分の地下水も、またある程度は深部地下水も、変化を受けてきた。全般的には、この地域の深部地下水は内陸部に深く浸透した天水が、種々の割合で楕状地の塩水と混ざり合って形成されたものである。一方、浅い部分の地下水は、最近の局所的な涵養水がほとんどを占めるものの、氷河を源とする成分も若干含んでいる。

この地域内での地下水流にはっきりとした境界があることを示す証拠はなく、地下水流は大きな広域流れの一部であると考えられている。したがって最初の 2 次元モデルでは非常に大きなスケールに着目した。それは、ノルウェーからスウェーデンを通して、ポーランド南部のバルト海岸に達する地帯の深度 10 km における断面である。この大きな地帯における地下水流と溶質の輸送とを SUTRA コードを用いてモデル化した。解析では温度、圧力および濃度勾配に起因する流体密度と粘性の変化、ならびに地形勾配と流体密度の不均衡をも考慮した。このモデルは、深部の楕状地塩水の形成をシミュレートし、沿岸での流出までを含めた長距離の広域流れを記述するものである。

垂直方向の主な亀裂帯 6 本と、その他に変動としての 3 本の亀裂帯を含む地帯 (7×1.6 km) に対しては

2次元モデルを構築した。3本の亀裂帯のうちのひとつは、深度600mに存在する高透水性の水平に近い亀裂である。このモデルによれば、水の流入・流出は近傍の地形と垂直方向の亀裂によって局所的にコントロールされていることがわかる。この場合の地下水の流出は、Äspö南東に位置する海峡に露出した亀裂帯を通り処分場全幅を通過したものである。深部に行けば流れは水平に近くなり、広域流れに従うようになる。高透水性の水平に近い亀裂は流出にはほとんど関与しない。

広域シミュレーションによれば、局所地下水流システムの深部広域流への浸透深さは透水性の異方性に起因する。処分場はおそらくそれら双方の地下水系あるいはそれらの混合系からの地下水によって横切られるであろう。上方に向かう流れが支配的であることとサイト地域内で広域の流出が起こることは、どのシミュレーションおよび変動ケースにおいても見られた共通の現象である。モデルが扱う規模が小さいほど処分場からの流路が急で、それゆえに流路長は短くなる。

4.2.2 サイトキャラクタリゼーションデータの不確実性

Äspöの非定常地下水流データはボーリング孔でのパッカー試験から得られたものであり、そのデータはすべて再評価した。これは、試験結果を解釈する際に用いる仮定の違いによって生ずる不確実性を見積もるためである。再評価は、SKBによる従来の解釈法とBarker Generalised Radial Flow (GRF) モデルとの比較に基づいて行ったが、その結果、この2つの方法では透水係数に数桁の差を生じ、GRFモデルの方が高い値を示した。

不確実性に関する2番目の評価は、ボーリング孔の透水係数(K)の多変量解析である。これは亀裂やボーリングで得られるその他の地球物理学的パラメータと透水係数との統計的相関を見積もるためである。また、この相関から導かれる別のパラメータを使って、透水係数をどの程度サイト規模でシミュレートできるかも検討した。空間的自己相関はすべての変数について非常に弱く、地球物理学的パラメータが透水係数Kを予測する能力は乏しい。小規模試験(3mボーリング試験)のデータで唯一相関が見られたが、これは、透水係数Kがほとんど亀裂(検出器に検知されたこと、および半花崗岩他岩石の種類の不連続性によって確認された)によってのみ決められることを示したものである。この事実のために、サイト規模に対する詳細な水理モデルの主モデルとして、後述するように、不連続形状モデルを採用することとなった。

4.2.3 概略の予察的計算

地下水流および輸送に関わるパラメータを決める重要な因子を特定するために、流れ場の構成と境界条件とに対して簡単な仮定を置き、一次元の地下水流計算を行った。その結果判明したことは、流れを決める際の最大の不確実性は亀裂の連結度と透水係数Kの空間分布であり、放射性核種の移行を決める際の最大の不確実性は透水性亀裂内の間隙形状であるということである。この結果は、サイトの水理を評価するにあたっては代替となる概念モデルをも使用すべきことの重要な動機となった。この

概略評価の結果は後にもう一度言及する。

4.2.4 SITE-94 構造モデルの定性的評価

3次元地質視覚化パッケージを用いて、水理、構造、地下水化学に関する広範なデータを統合し、Äspöの上部における地下水流に関して定量的イメージを構成した。これは次のようなステップに従って行った：

- ・ 前述した構造モデルを視覚化システムに取り込む
- ・ この構造モデルが、地下水流動帯の位置および圧力の伝播経路を記述可能かどうかを判断する
- ・ その構造が地下水の存在場所あるいは組成が均一な地下水流路を説明できるかどうかを決めるために、その構造モデルと地下水の地球化学的なタイプの分布とを比較する。

初期の段階では、水理データと地球化学データを構造モデルを構築するために使用することは避けた。なぜならば、構造モデルにおいてこれらのデータを独立のチェック項目として使えるようにするためである。

ボーリング孔内の119箇所で、流れの位置と地球物理的検層、岩種および亀裂／破碎帯との相関を調べた。流れの位置と、天然ガンマ線、比抵抗値、ボアホールレーダー、音響検出等との間、およびアプライト中の破碎帯位置との間に良好な相関が見られた。他の岩種内の破碎帯との間ならびに亀裂密度との間にも相関はあるが弱い。岩種との間には相関はない。つまり流れは複数の岩種にわたり均質である。流れの3分の2は破碎帯の内部にあり、残りは不連続な亀裂内にある。

ボーリング孔内で地下水流の存在を示す信号とモデルの構造との空間的相関を調べるために、統計テストを試みた。構造モデル内に設定した52の構造のうち、7つは流れの存在を示さず、さらに11はボーリング孔と交差していない。一方、流れの存在を示す信号の54%がモデルの構造によっては説明されない。つまり、この統計テストは構造モデルの正しさを確認しているわけでもないし、逆に正しさを否定しているわけでもない。クロスホール透水試験から得られた圧力伝播経路に対しても同様な統計テストを試みたが、こちらの方は、少数の経路とモデルの中の構造との間に良好な空間的相関が認められ、30の構造が圧力伝播に預かっていることがわかった。

地下水化学に関する考察（第4.3項）では、地下水の化学組成および同位体組成から、Äspö地下で5つのタイプの地下水が存在することを特定した。それらは、先述したように、深部地下水の流出と、天水、氷河融水および海水起源の地下水の流入とによる混合を表わしている。あるタイプの地下水と別のタイプの地下水が単一の水理構造によって分離されていることはなく、地下水の分布は複数の流れ構造が関与していることで説明できる。どのボーリング孔においても、個々の流れ構造は複数のタイプの地下水を含んでいるようである。これを3次元には外挿しない。どんな構造も2つ以上の型の地下水を含むことができる、つまり流れは個々の構造内で不均一または分離されているとする。

全体的に見て、Äspöの地下水システムは複雑で特定の構造に支配されていることはない。地下水は水力学的に連続した、地下水頭の変化に一様に従う構造の内部で動いている。構造の中で流れが均一である証拠も長距離の流路があるという証拠もない。流れの規則性はほとんど構造モデルによって説明できるものの、流れの半分以上がモデルと相関をもたないことにも注意すべきである。つまり、現在のサイトキャラクタリゼーションの方法、技術、観測の規模は流れの構造までを検出することはできないか、または単に見逃していることになる。しかし、対象としているような岩体の大きさに対しては、いかなる方法も例外なく不完全であることも認識されている。

現段階の評価から得られる主要な結論は、地下水流路を形成している構造のうちかなりの数が構造モデルに含まれていること、実際の流れを予測するに際しては大きな不確実性が存在すること、および構造モデルの特徴によって説明不可能な流れがかなり存在することである。詳細な地下水流モデルには、これまでに特定された構造よりも小さい規模の流路を含める必要がある。これは、概念的に異なる2種類のモデル、すなわち不連続体モデル (Discrete Feature Site Model) および確率論的連続体モデル (Stochastic Continuum Site Model) によって扱われた。

4.2.5 Äspöの2種類の水理モデル

Äspöの水理に対して2種類のモデルを構築した：

1. 不連続体モデル—Discrete Feature Site Model
2. 確率論的連続体モデル—Stochastic Continuum Site Model

領域の中心に、処分場を表わす独立の不連続亀裂ネットワーク (DFN) モデルを有しているのは統合型の不連続体モデルである。

不連続体モデルでは、 $5 \times 5 \times 1$ kmの領域にわたるÄspöの透水構造を、平面状で透過性をもつ形状の集合体として表わす (図4.5)。それらの形状体は相互に連結して3次元ネットワークを形成している。ネットワーク内部の水頭圧と流れは、各々の構造内での2次元流れ方程式、ならびに形状体同士の接点における水頭の連続性と質量保存によって支配される。輸送は形状体同士の接点における質量保存と混合とによって決められ、移流分散方程式を用いてモデル化する。

独立した亀裂、亀裂帯、岩体の透水性 (方向を含む)、および処分場トンネル周囲の掘削影響領域 (EDZ) も形状体によって表わす。ここでは、モデルは、準広域構造—詳細な構造モデルの中で $2 \times 2 \times 1$ kmの範囲に表わされている—とサイト規模の構造とを使って、SITE-94の構造モデルから決定論的に作成した。127のボーリング孔断面をモデルに組み込んだが、それらの断面はクロスホール透水試験で観測された浸透率、水頭分布および水位低下のデータを用いて較正したものである (図4.6)。

統合型の不連続体モデルは、処分場を表わす小さなDFN ($450 \times 320 \times 80$ m) モデルを上述した大規模モ

デルに組み入れたものである(図 4.7)。この確率論的 DFN モデルには、Äspöの代表的な岩種である Småland 花崗岩と Äspö閃緑岩を表わす 2 つの変動がある。

確率論的連続体モデルでは、岩体は水理的に完全に連結した等価の多孔質連続体として扱う。このモデルでは、ボーリング孔のパッカー試験から得られる透水係数 K 値のみを使って、条件付き確率分布に基づき 3 次元透水係数場を生成し、他のいかなるサイトデータとも較正をしない。不連続体モデル (500×700×600 m) よりも狭い領域をシミュレートし、ニアフィールドおよびファーフィールドのダルシー流速やファーフィールドにおける分散など水力学的なパラメータを推定するために使われる。不連続体モデルと異なり、フィールドにおいて測定された透水係数 K の実際の位置と値を直接に表わすように条件が課されている。そのために、確率論的連続体モデルはクロスホール透水試験の重要な特性を把握していることになる。

確率論的連続体モデルの重要な特徴は透水係数の空間的相関である。前述したように、ボーリング孔に沿う統計的テストでは何ら注目すべき空間的相関を見出せなかったが、もし亀裂平面に沿って相関が現れるようであれば、そのようなテスト結果は無効である。なぜならば、連結した流路の形成の可能性は非常に重要であるにもかかわらず、用いた統計的テストはそのような特徴—透水係数の空間的相関—に対して敏感ではないからである。そのような不確実性に対処するために、インディケーターシミュレーション法を用いた別の相関構造を適用した。この方法では、高い透水性を表わす相関を 2 次元の長距離相関と仮定し(これが‘亀裂帯’を模擬している)、他の相関は等方的で相関距離は比較的短いと仮定する。

4.3 地球化学モデル

サイトの地球化学的特性の評価は、鉱物組成、地下水の化学組成および亀裂表面のコーティングに関するデータを基にして行った。これらのデータを使って岩石-水相互作用に関するモデルを作成することが可能である。Äspöの岩体中における輸送特性は HRL のサイトキャラクタリゼーションの調査項目には含まれていなかったため、間隙率およびマトリックス拡散に関するデータは改めて評価する必要がある。岩体の酸化還元能に関するデータは利用可能であった。

地下水の化学組成も放射性核種の輸送も、まず第一には、亀裂表面のコーティングとの相互作用によってコントロールされる。亀裂内に存在するヘマタイト、イライト/スメクタイト粘土、ゲータイト、パイライトおよびカルサイトが中でも重要な鉱物あるいは非晶質物質である。ゲータイトとカルサイトはともに地下水流と強い関係がある。ゲータイトは地下 1000 m までの透水帯の中で生成するが、このことは氷河起源の酸化性地下水が侵入したことをうかがわせる。ヘマタイトは地下水流とはあまり関係がなく、侵入地下水の化学的組成の変化というよりは古代熱水起源だと考えられている。

化学組成のデータを用いて地下水を 5 つのタイプの水質に区別した：

- 新しい水
- 5 g/lに近い塩化物濃度をもつ水
- ‘深部の水’
- 氷河の融水
- ‘海水の痕跡を残す’水

これらの水の特徴を図 4.8 に示す。水質のタイプについては、サイトの構造モデルの点から第 4.2.4 項で考察した。Äspöは、深部起源の塩水が流出する一方で、最近の希薄な水が深度約 100 m まで侵入する地域であることがそのモデルによって確認される。深部の水には‘海水’および‘氷河融水’の痕跡がある。浅い地下の新しい水はほとんど NaHCO_3 型である。塩濃度は深度とともに上昇し、Na-Ca-Cl 型を経てついには Ca-Na-Cl 型に達する。

どの地下水にも溶存酸素は含まれていず、一般的に硫化物系で、非晶質硫化鉄および非晶質ウラン酸化物との飽和に近いまたは過飽和状態にある。処分場深度における Eh 値の測定値は -300 mV に近い（硫酸塩/硫化物対の約 -250 mV で較正）。Eh 値が低いのは硫化物、Fe(II)に富むケイ酸塩、および溶存有機炭素のためである。

岩石-水相互作用に関する熱力学コードを用いた地球化学シミュレーションによれば、クロライトおよびゲータイトが地下水系において反応に預かる重要な固体である。

4.4 岩石力学モデル

処分場の母岩の今後長期にわたる力学的安定性、とくに亀裂構造の変化は、地下水流および放射性核種の輸送に深く関わる。したがって、サイト評価上、サイトの現在の状況と過去に起きた変化を正しく表わす岩石力学モデルが重要な要素となる。そのモデルの上に将来の構造の変化を記述するモデルが構築される。

SITE-94 では 2 種類の岩石力学モデルを開発した。ひとつは Äspö 島全体に及ぶ‘ファーフィールド’規模のモデルであり、他のひとつは単一のトンネルおよび埋設孔に対するニアフィールド規模のモデルである。

ファーフィールドスケールモデル：ファーフィールドスケールモデル (4×4×4 km) は、先述した SITE-94 構造モデルに基づいている。ただし、計算上の制約のために 52 の亀裂帯のうち 23 だけを考える (図 4.9)。このモデルは剛性のもしくは変形可能な岩石ブロックの集合体から成り、ブロックの境界を成す亀裂帯にはさまざまな変形特性を付与することができる。モデルの内部には処分場を包む一辺が 1.5 km の立方体の領域がある。モデル解析には伝導による熱輸送を含めることができる。

応力境界条件はÄspöの3ヶ所のボーリング孔における現場応力測定から得られた。それと同じデータを用いて処分場トンネルの方向を決定した。岩石の重量下に処分場を組み立ててみるのが最初である。

ニアフィールド（処分場スケール）モデル：このモデルでは、トンネル-埋設孔スケールでの亀裂形状の詳細な分解能が必要である。2つのモデルを用意した：上述のDFN水理モデルを用いた亀裂の3次元シミュレーション（図4.10）と岩体の破損を扱う2次元モデルである。3次元モデル（25×25×18 m、一辺が7.5 mの立方体領域を有する）では深度500 mに相当する応力を負荷し、亀裂への影響を3-DECコードを用いて評価する。2次元モデルの方では、氷河到来のように負荷がかかった場合の亀裂伝播を境界要素法により評価する。

5 システムの説明：工学バリアシステム

SITE-94 仮想処分場の工学バリアシステム (EBS) は、廃棄物キャニスター、その周囲のベントナイト緩衝材、処分場の坑道およびトンネルとそれらの埋め戻し材やシール材から構成される。

システムのもう一方の主要要素であるファーフールドは、PA に用いられるまでに (第4節に見たように) かなりの考察を必要としたが、EBS の性質はこれとは違い、プロジェクトのこの段階ではかなりの部分がジェネリックであって、いわば ‘与条件’ である。このプロジェクトでは EBS の各要素の将来挙動を予測するために新たな作業を行ったが、用いた設計および性質に関するデータは既存のものである。

5.1 キャニスター

キャニスターは冷間加工法で製作され、外側の銅製容器が耐腐食性を、内側の鋼製容器が機械的強度を備える。キャニスターは、処分場閉鎖後に放射性核種の放出を抑制するという主要な役割以外に、廃棄物封入施設および処分場への輸送中においては容器であり遮蔽体としても機能しなければならない。キャニスターについては技術開発が今も続けられており、実規模の製作・密封試験、欠陥試験および局部腐食モデリングなどの課題が残されている。

内側の鋼製容器の加工・溶接技術に関しては、レーザービーム溶接によって局所的な脆弱化が起り熱処理が必要になる可能性があるものの、これらはよく知られている標準的な技術である。外側の銅製容器は最終的には電子ビームによる真空溶接で密閉されるが、この溶接が非均質であるという理由で不確実性のソースと見なす。統計的に考えれば、製造されるすべてのキャニスターに不確実性が伴うことになる。この不確実性は封入に関する QA 作業の中で (たとえば溶接の超音波あるいは放射線写真などの方法を使って) 定量的に管理されねばならない。不確実性のいまひとつの原因は加工後の銅の中の結晶粒度分布である。結晶粒度分布は機械的強度や腐食性に影響し、ひいては品質管理上の問題となる。

処分場内に定置後は、EBS の再飽和に伴って発生する静水圧によって、外側の銅製容器が内側の鋼製容器に向かってギャップがなくなるまでクリープ変形し、ついには鋼に負荷がかかるようになる。ここから以降、キャニスターの寿命は銅の腐食および腐食速度によって決められる。SITE-94 の解析では、酸化還元電位、塩化物や硫化物濃度など地下水の化学的性質に起因する均一腐食、および点食に着目した。酸化性で高塩化物濃度下ではキャニスター表面に固体の腐食相は形成されず、均一腐食であると考えられる。還元性環境下で還元形のイオウが存在する場合は硫化物層が生成する可能性がある。これは不動態ではない (電子および銅イオンの移動が起こる) が、一般的には均一腐食が進行する。しかし、この層の内外で銅硫化物の ‘ひげ状結晶’ が生長する可能性については、それが点食に進展することもあるため、さらに分析が必要である。局所的な破損の可能性は、おおよそ、銅内の欠陥の性質

と分布とによって決められる。しかし、SITE-94の時点では加工法も品質保証基準も定められていなかったため、腐食に関する定量的結論は得られなかった。

SITE-94の設計基準では、ひとつのキャニスターには加工の際に生じた面積 5 mm^2 の円形の欠陥がひとつ検出されずに残り銅を貫通している、と仮定した。これによって内側の鋼製容器との接触によるガルバニック腐食が起こる可能性がある。この腐食は銅表面における還元性物質の供給によって律速される。

5.2 ベントナイト緩衝材

緩衝材は高圧密 Volclay MX-80 であり、Na-モンモリロナイトを75%、石英を15%および長石を6%含有する。不純物は炭酸塩、パイライト、有機炭素などである。緩衝材の再飽和に伴い、粘土は膨張してキャニスター埋設孔内およびそれに隣接する空間を埋める。同時にドライ圧密工法の際にベントナイト内に残った間隙も埋められる。再水和した材料中での物質移動は拡散によって支配され、熱的影響や濃度浸透圧の影響など非ダルシー流の影響は小さい。SITE-94ではベントナイトの定置、再飽和、膨張に関してはいかなる工学的観点からの評価も行わなかった。

再水和したベントナイトの透水係数は 10^{-13} から 10^{-16} m/sの間と推定されている。高い方の値は高圧水流装置を用いて得られたもの、低い方の値は超遠心法によって得られたものであるが、後者の方が信頼性が高いとされる。ベントナイト中における放射性核種の実効拡散係数に関しては、いろいろな測定法を検討した結果、概念上不確かな事柄が多数存在することがわかった。たとえば、表面拡散という現象はデータフィッティングによって創り出される現象かも知れない：これは岩石塊から得られる拡散係数と粉砕した岩石から得られる K_d 値とを組み合わせて実効拡散係数を導出しているためである。こうした検討の結果、ベントナイト中の拡散による移動を表わすパラメータは保守的に選ばざるを得なかった。同様な不確実性がベントナイトに対する収着データでも見られる。岩石塊に対する K_d 値は粉砕した試料に対する K_d 値に比べ最大2桁も低い場合がある。このような不確実性は今後のPAでの検討課題である。

5.3 埋め戻し材およびシール材

SITE-94では掘削、補強、グラウティング等の技術、埋戻し材料、プラグ材およびシール材に関しては解析を行わなかった。ただし、これらについていくらかの議論はあった。

不確実性とみなされたものは、処分場内各所のEDZの性質とその程度、それらが補修を要するほどにニアフィールドの地下水流に影響を与えるかどうか、またコンクリート構造材、補強材、セメントグラウティングに起因する局所的な地球化学的変化の規模と性質はどのようなものかなどであった。これらの不確実性は、いずれ詳細設計と地下建設に関するデータが整った段階でサイトスペシフィック

に定量化する必要がある。

ベントナイト、ベントナイト・砂混合物、ベントナイト・粉碎岩石混合物やコンクリート製の埋戻し材、プラグ材、シール材等を使用することについては、安全性に関わる多くの議論がある。たとえば、埋戻し材と EDZ との相互作用の時間依存性、埋設孔内での緩衝材と密度の低い埋戻し材との相互作用の時間依存性、粉碎岩石とベントナイトとの混合材中における間隙水の化学的性状の変化、シール材界面の水力学的性質、氷河の荷重に対するシール材やプラグ材の反応、PA の全期間に亘るシール材の性能などである。

これらの不確実性のうちのいくつかについては（たとえばシールのない、もしくは不十分にシールされた立坑の影響を調べるシナリオとして）直接に PA に取り込むことが可能であるが、その他の不確実性については、PA への影響を定量化するために、その規模と影響についてさらに研究が必要である。

6 シナリオの特定

SITE-94 の影響解析の中心はレファレンスケース（第2節参照）に対する解析である。レファレンスケースでは、プロセスシステムの‘内部’変化があるのみで外部の影響は変化しないという仮想的な状況を考えている。したがって、プロセスシステムに対する境界条件は時間に対して一定である。しかし、PAではシナリオ設定の段階で時間依存性やプロセスシステムに与えるEFEPの影響も考慮に入れる必要がある。

処分システムの変化のシナリオに関する不確実性はEFEPの不確実性に集中する：もしすべてのEFEPが特定されれば（‘完全さ’の問題）、システムの境界に対するEFEPの影響は理解されたことになるだろうか。また、もし影響があるとしたら、PAプロセスに納得のできる形で取り込めるほどにEFEPの発生確率を定量化できるであろうか。SITE-94において採られたシナリオ特定の手続きでは、これらの不確実性を取り扱う試みがされている。

SITE-94で採用したシナリオ特定の手法は、1960年代に（原子力分野以外で）行われた方法に基づいている。シナリオの開発と利用に関してSKIは次の点を重視した：

- ・ シナリオは予測をするための道具ではない。シナリオは、想像を刺激し洗練するための手段である。シナリオによって、システムの将来に起こりそうな挙動を描いてみせたり、そのような挙動がいかんにして起こり得るかを明確にするひとつのまとまった方法を示すことができる。
- ・ システムのいかなる‘将来’の状態も、無限に考えられる将来のパターンの一部であるが、解析のためにひとつのパターンを選び、その中のシナリオに条件付きの確率をあてがうことはいかなるシナリオに対しても妥当ではない；一個の事象の確率を推定し、その事象についてシナリオを構築することは可能かも知れないが、ひとつのまとまったシナリオセットを確率的に扱うことは意味があることとは思われない。

6.1 シナリオ生成の手続き

SITE-94においてはシナリオ生成の手続きを開発したが、この手続きが完全に踏まれたのは標準シナリオだけである。

まず、既知のEFEPをもれなくピックアップした目録を作成する。これによって81のEFEPを取り上げ、第2節で示したようなFEP目録が出来上がった。次にこれを取扱い可能な数のシナリオに絞り込んで解析を可能にする。

- ・ まず、処分場の設計基準からのずれとみなされるEFEP（たとえば緩衝材の設置が適切でないなど）は

すべて除かれる。これらは最終的には評価しなければいけないものの、SITE-94の評価のスコープ外とみなされるものである。

- ・ スウェーデンの向こう約10万年間の予想気候変動はすべて考慮することにした。したがって、気候変動に関するEFEPはすべて標準シナリオで扱われる。
- ・ 残ったEFEPは、さらに2つの基準によってスクリーニングされる。まず、SITE-94では処分場への人間の侵入については解析を行わない。これは、PAにおいて通常の評価対象と基本的に性質が異なると考えられるからである。人間侵入をどう考えるかについては規制の観点から別個に検討する必要がある。2番目に、Äspöサイトに関係のないEFEP、影響があると認められないEFEPおよび生物圏の不確実性（SITE-94の解析対象ではない）に関するEFEPは除かれた。
- ・ 最後に、スクリーニングで残ったEFEPは、性質が類似したあるいは関係のあるEFEP同士でいくつかのグループに分類される。こうして4つのグループが出来たが、これらはすべてお互いに組み合わせられ、それらの組み合わせから8つの‘興味ある’具体的な付加シナリオを選んだ。選ばれたシナリオはシステムの将来の可能性を広くカバーするものであり、これによってシナリオ特定に起因する不確実性を無駄なくかつ幅広く探り出し、また示すことが可能になる。

特定されたシナリオは次に示すとおりである：

- ・ 標準シナリオ（気候変動：寒冷化）
- ・ その他の気候変化（温暖化、湿潤）
- ・ 地質構造の変化に起因する地震活動
- ・ 処分場近郊における大規模な採掘および井戸
- ・ 立坑の不完全な閉鎖
- ・ 処分場近傍の亀裂帯への液体廃棄物の注入
- ・ 閉鎖が不十分な立坑への液体廃棄物の注入とそれに伴う井戸や鉱山での揚水
- ・ 地表および地下水の涵養に対する人間の影響
- ・ 地表および地下水の涵養に対する採掘の影響

これらのシナリオを解析するにあたっては、シナリオを構成するEFEPを標準シナリオPIDへ適用し、影響を、FEPリンクの重要度レベルの変化を検討しながら、PIDを通して追跡する。この作業によって、個々のシナリオに特有の新しいPIDとAMFとが作成される。AMFは、それぞれのシナリオを解析するためのモデリングに新しいあるいは追加すべき必要な事柄を表わす。この作業は各シナリオを書き下すという行為によって進められるのであって、その際に専門家の意見を取りいれて、標準シナリオの時間軸の上でEFEPの影響の重要な時点や発生順序を特定する。

ここで使われたシナリオの方法論は、EFEPの膨大な数の組み合わせを評価するという難しい問題に対しては妥当なアプローチと考えられる。このアプローチがこれまで成功してきた理由は、まず多くの

‘ありそうな’ EFEP をプロセスシステムに吸収させたこと、特別な評価思想（たとえば設計基準あるいは人間侵入に対して）を採用したこと、さらにまた、数学的な完全さを求めることを目的としたのではなく、専門家の意見を取り入れつつ見識のある議論に基づいた PID を許すだけのしっかりとしたシステムを作り上げることを明確な目的としたためである。目立たないが、しかし重要な EFEP の組み合わせを見落とす可能性はいつでも残るが、ここで述べたアプローチが将来の複数の評価作業において、可能であれば異なる専門家グループの手で繰り返し行われることによって、重要な EFEP の組み合わせを見落とす可能性は最小限に抑えられるであろう。

前述したように、シナリオ生成を方法論としては十分に発展させることができたが、実際には、SITE-94 では標準シナリオだけを解析した。これについて以下に概要を述べる。

6.2 標準シナリオ

標準シナリオ (CS) は、あり得るとのコンセンサスを得られるであろう気候事象を選び、その事象が処分場システムの変化に与える影響を記述する。このシナリオは以下の記述や情報から構成される：

- ・ 今後 13 万年間に亘って Äspö に起こりそうな気象の決定論的な記述。これはスウェーデンの気候変動モデル（氷河の生長と退行を予測する）および北半球の気候変動モデルをもとに考えたものである。後者のモデルは地球軌道の気候への影響に関する一般的認識に基づいている。
- ・ 各時代の気候条件下において、サイト地域の地表環境がどのようなものでありそうかに関する記述。
- ・ 気候変化が処分システムにどのように影響するかに関する定量的情報。

CS では、Äspö が今後 13 万年間に大きく分けて 7 つの気象状態に変動することが示されている（図 6.1 参照）。その中には、永久凍土が発達する長い期間や、およそ 6 万年後と 11 万年後の 2 度に亘って厚い（1000～2000 m）氷床に覆われる期間がある。また、7 万 5 千年後付近の短い期間には、このサイトはバルト海に沈む。寒冷化が徐々に進み、約 1 万年後には最初の永久凍土が現われる。13 万年の間に、このサイトが永久凍土や氷河や海に覆われず、現在とよく似た状態にあるのは今から 8 万年後前後の短い期間だけである。

サイトの状態、および予想される気象起因のプロセスおよびその処分場システムへの影響は詳細に記述した。またレファレンスケースの PID に対する影響を、地表水の化学的性状、地下水流動の境界条件およびファーフールドの気温に関する主要な ‘ターゲット’ FEP において特定した。さらに CS ではシステムの形状に対する影響の可能性も含んでいる。これも PA では考慮しなくてはならない。

13 万年という時間を考えた場合、氷床の性質、地下水の涵養源、地下水量と化学的性状、機械的応力、

動水勾配など時間的に一定でないパラメータはたくさんある。それらに対して定量的予測を行った。CSに特有なPIDの改訂版を作成し、これを定量的モデルの選択およびのちに述べる影響解析の計算ケースの構築に使った。ただし、AMFは標準シナリオに対してアップデートしなかった。

7 モデリング：地質圏の変化

システムを記述し、レファレンスケースおよびシナリオ（標準シナリオのみ）を解析したあと、SITE-94における次のステップは、サイトが評価期間にわたっていかに変化するかを考察することである。このために、サイトの岩石力学的、熱的、水理および地球化学的变化に関して定量的なモデリングを行なう。水理モデリングおよび地球化学モデリングでは、水理的条件、地球化学的条件それぞれに対する‘ゼロ変動’に加え、パラメータ値のいろいろな組み合わせによって数多くの‘変動ケース’が生成する。以下の影響解析においては、放射性核種の輸送評価を行うに際し、これらの変動を別々に検討し、最後に組み合わせたケースへ統合する（第10節参照）。

7.1 ファーフィールドの岩石力学モデリング

処分場から発生する熱と氷河との共働した影響をCSにおいて見積もるために、熱-力学的解析を行った。この解析では、処分場の加熱が最大である最初の1000年程度を検討するために、レファレンスケースの今日の状態を用い、次にそれ以降の冷却と氷河の影響を取り込むためにCSに移った。次の2種類の計算を行った。この2種類の計算は幾分か重なっている。

- ・ 処分場からの熱と氷河の力学的負荷とに対する岩石の熱-力学連成応答
- ・ 処分場からの熱、地熱および気候変動を地表温度に取り込んだ、CSにおけるシステムの温度変化

モデリングの目的は、熱-力学的影響による岩体内の応力変化と変位を定量化すること、および永久凍土層が処分場自体に影響するかどうかを検討することである。

熱的応力の最大値は約200年後に到来する。このときには水平応力が選択的に増し、岩体内の最小応力/最大応力の比が0.25以下となる場所で新たな亀裂が伝播し始める。亀裂内では最大2、3 cmに及ぶせん断変位が生ずるが、多くの小さな亀裂に沿っての動きはわずかな範囲で留まるであろう。最も起こりやすい変形は亀裂帯の閉鎖である（場所によっては開くところもある）。レファレンスケースに対する結論は、処分場の存在によって断層が生成すると仮定できる理由はまずないが、処分場周辺で透水性は変化するであろう、ということである。ただし、この変化の大きさは解析されなかった。

標準シナリオに対しては、処分場（深度500 m）が凍結することはないという結論が得られた（図7.1）。しかし、地表近くの立坑の埋戻し材やシール材に対する永久凍土の力学的影響については結論が得られなかった。氷期の間、処分場岩体内における垂直応力の最大値は10 MPaから30 MPaへと3倍に上昇するが、これによって大きな亀裂伝播が起こる危険性は小さい。断層や亀裂帯に沿って数cmのせん断変形は起きそうである。トンネルの安定性は影響を受け、応力集中の結果岩体が破壊するかも知れない。掘削、加熱および度重なる氷河作用によって、岩体は応力負荷/開放を繰り返し、その結果、とくに掘削端や亀裂の交点で岩体は弱くなる。このような予測結果は処分場の設計に対する示唆を与

えるものであり、今後完全な熱-水-力学連成モデリングを含め、さらに検討が必要である。

7.2 地下水流モデリング

レファレンスケースに対する解析は、サイトの水理と輸送についての概略的な評価と、第4節で述べた2種類の概念の水理モデルに基づいて行った。取り扱ったスケールは広域(1500 km)から詳細(10~20 m)に及ぶ。レファレンスケースの解析は、概念モデルの不確実性とパラメータの不確実性の影響を探ることが目的である。それ以上の不確実性に対する取り組みとしては、個々のモデル—不連続体モデルおよび確率論的連続体モデル—に合計30以上の変動を持ち込んで分析を行う。またCSでは主として時間依存の広域流を検討する。

レファレンスケース解析：地下水流モデリングの最大の目的は、影響解析のための輸送パラメータを導出することである。このモデリングは、不連続体モデルおよび確率論的連続体モデルを用い、：

- ・ それぞれのモデルに対し、定常流れ場を解き、
- ・ 単一のキャニスター規模におけるニアフィールドパラメータをサンプリングし、
- ・ 空間分布を扱うために、処分場内の各々のキャニスター位置から粒子追跡をし、
- ・ 影響解析コードCRYSTALへの入力値であるファーフールド輸送パラメータを求めるために、輸送媒体を等価な一次元多孔質媒体と考え、それぞれのキャニスターからの放出曲線を考察する。

最初の2つのステップは図7.2に詳細に示されている。地下水流モデリングから、影響解析で必要とされる輸送パラメータの値の範囲を知ることができ、また2つの重要な水理学的パラメータを抽出することができた。そのパラメータはファーフールドにおける輸送性能を表わす指標として非常に有用である。のちに行うが、この2つのパラメータをプロットすると、ファーフールドにおける輸送挙動について考えられ得る範囲をカバーするそのパラメータの幅を簡単に決めることができ、またその範囲から、パラメータの不確実性の取扱いに必要な変動を選ぶことが可能になる。その2つのパラメータとは：

- ・ F 比 (F) = 岩石の単位体積当りの亀裂の濡れ表面積³×輸送距離/ダルシー流速
- ・ ペクレ数 (Pe) = 地下水流速×輸送距離/流れ方向の分散係数

である。したがって、地下水流モデリングでは亀裂の濡れ面積、 a_v 、をいかに評価するかが重要である。不連続体モデルは2つの簡単な平行平板亀裂モデルを含み亀裂と亀裂帯が明示されているが、この不連続体モデルで粒子追跡計算から直接に a_v とダルシー流速を見積もることも可能である。このようにして、見積もられた亀裂濡れ面積の値が解析された流れ場と整合性があることを確かめる。加えて、

³ 訳注：「亀裂の濡れ表面積」flow wetted surface areaの訳で、言い換えれば地下水流れに対して実効的な面積である。以下「濡れ表面積」と表記することにする。

詳細な亀裂ネットワークモデル (VAPFRAC および DISCFRAC)、透水性媒体⁴内部の間隙構造を表わす一連の概念モデルを基にした簡単な予察的計算、²²²Rn の生成に基づく地球化学モデルなどによって、亀裂の濡れ面積を独立に評価した。求められた濡れ表面積の値を、確率論的連続体モデルでの F 比の算定に用いた。

Äspö の地下水流は非常に非均質性が強く、詳細なサイトスケールモデルによれば、処分場から地表までの移行時間は数年から 1 万年と幅広い。このことは、ファーフィールドの岩体中における流れの空間的バラツキの程度が高いことを反映している。つまりこの幅は、サイトキャラクタリゼーションで得られた情報の不確実性ではなく、このサイトの特性に起因する。不連続体モデルや確率論的連続体モデルでこれらのバラツキが示されているので、輸送パラメータを定量的に評価することが可能である。岩体の遅延能力を表わす F 比は、処分場内の‘放出点’の位置によって数桁も変動した。 F 比は、地下水流モデリングにおいて不確実性のランク付けをするために有用な方法であり、それらの不確実性を重要なものから並べると：

- ・ 透水性媒体内部の間隙の空間分布と透水量係数
- ・ 透水係数の分布と空間的相関に関する仮定
- ・ 準広域モデルに対する境界条件と構造モデルにおける不確実性 (たとえば亀裂帯の数と位置)

となる。処分場サイトのキャラクタリゼーションでは、いろいろな規模でトレーサー試験を行う。トレーサー試験は、透水性媒体についての詳細な調査—透水係数、間隙率、濡れ表面積の間の関係を得る—と組み合わせることによって、不確実性を取り扱うための有用なデータを提供できる。

さらに、ニアフィールドの亀裂ネットワークの空間的バラツキは、不連続体モデルにおいてサイトスケール構造と水理的に連結しているキャニスターの数に不確実性を生ずる (ただし、明らかに、確率論的連続体モデルではこのようなことはない。なぜならば解析において概念的な不確実性に重きが置かれるからである)。今後はサイトスペシフィックな亀裂データをもとに、流れのある亀裂に横切られている埋設孔および流れのない亀裂に横切られている埋設孔についての統計的な分布を用い、岩石の体積を特定するための検討を進めることになろう。Äspö に類似したサイトについては、PA 結果に対する最も大きな水理学的影響はキャニスター位置間の空間的バラツキであると言える。

概略的評価と詳細モデルによる評価とでは F 比の予測値はかなり異なる。詳細モデルの方がはるかに高い分解能をもっている (図 7.3 参照)。詳細モデルの概念的仮定はサイトデータによる検証が困難であるため、地下水流および輸送に関する簡単な予察的計算が詳細モデルの妥当性をチェックするための手段としての役割を果たす。不連続体モデルと確率論的連続体モデルとは概念的に異なるにもかかわらず、すべてのパラメータの不確実性を考慮したときの地質の遅延特性や空間的変動に関する予測

⁴ 訳注：この場合、不連続体モデルを構成する個々の要素の意。本ページ内における「透水性媒体」も同じ。

値はよく似ている。図7.4は、不連続体モデルとその変動に対して予測した F 比およびペクレ数の全不確実性—空間的バラツキを含む—を示したものである。図中の各点は、ある特定のキャニスター位置からの放出に対するファーフールドの遅延特性を表わす。各概念モデルおよびその変動の結果をそれぞれ別個にこのようなダイアグラム上に表わすことによって、放射性核種輸送への影響に対する、異なるタイプの不確実性や空間的バラツキを秩序だった方法で図示することができる。

ダルシー流速および濡れ表面積は、キャニスターから生態圏までの流路に沿って空間的に変化するが、 F 比の値はそれらの平均値である。したがって、どちらかのパラメータのバラツキが非常に大きい場合に、かりにパラメータに一定値（実効的な値）を与えて放射性核種輸送の計算をすると、それが付加的な不確実性の原因となる。

ある特定の型のパラメータ不確実性を単一のモデルでは処理できないときには、レファレンスケースに対して複数の概念を取り入れたモデルを適用する。これにより、パラメータおよび概念モデルの不確実性の相対的重要度を定量化可能である。さらに、どのモデルもサイトキャラクタリゼーションデータ全てを使うことはできないので、この補完的なアプローチがサイトデータを解釈する上でのバイアス（偏り）をなくす重要な手段である。

標準シナリオにおける地下水流：広域スケールモデリングは、CSでは、地表環境条件の時間変化に対する地下水流を評価するために使われる。このモデリングによって地下水流位置の変化、流れの方向の変化、および流量の緩やかな変化を予測する。永久凍土期の処分場深さにおける地下水流フラックスは現在の条件とあまり変わらないが、流出域の場所が閉塞されるために流路は長くなる。広域モデルによれば、温暖な基底をもつ氷床が前進するとともに、氷床基底部の融水は深度数kmまでも浸透し、地下水流量は約1桁大きくなり、流出域はÄspöから南東方向の氷河の前方に移動する。この期間中に酸化性地下水が処分場深度に達し、それは数千年間継続する。氷河の退行が始まると、それが引き金となってそれまで氷河下部の高圧によって岩体内に閉じ込められていた地下水が放出され、局所的な流出に移る。氷河の端がサイトを通る短い期間中は、流れがもっと極端になると予測される。いくつかの事象（たとえば、氷河で堰き止められた湖からの流水が、最近に負荷から解放された亀裂帯内部をさらって、その透水量係数を高めるような事象など）が同時に重なることはまずないが、処分場深度において短期間だけフラックスが高くなることはあり得る。

7.3 地球化学モデリング

地球化学モデリングの要件は、EBSの安定性に関するPAを行うための地球化学的条件の範囲を定義すること、およびファーフールドにおける放射性核種の挙動を予測することである。レファレンスケースでは岩体や亀裂内鉱物には大きな変化はないと予測したが、条件によっては亀裂の鉱物組成が影響を受ける。同様に、地下水の化学組成（水質のタイプの分布）はレファレンスケースでは変化しないが、条件によって地下水流の乱れによって影響を受けることもある。レファレンスケースでは、深

度 500 m の条件を考え、中程度の塩分濃度をもつ還元性の水を‘ゼロ変動’として選んだ。

標準シナリオでは、高塩分-還元性と低塩分-弱酸化性との2つの変動を考えた。高塩分濃度は、今から約 7 万年後に、氷河端がサイト上を通過して後退するに伴い深部の塩水が上昇するという、考えにくい状況に対する条件である。低塩分の変動は氷河後の融水の涵養による影響を評価するためである。強酸化性条件についても計算を行った。CS 条件下において酸化性地下水が処分場の岩体に与える影響については、物質移動と水-岩石相互作用のカップリングを準定常状態で近似してモデル化した。もし反応が瞬時に起こるならば、亀裂内での酸化フロントの進行は非常に遅い。しかしながら、鉱物の酸化に関して信頼できる速度論的データが少ないこと、および亀裂帯の多くはすでにそのような水が深く進行して酸化されているという事実は、上のモデルから得られた結論を支持してはいない。さらに研究が必要である。

8 モデリング：ニアフィールドの変化

ファーフィールドの場合とともに、ニアフィールドの変化をモデル化する目的は、影響解析計算への入力データを提供することである。以下に挙げたニアフィールド要素の変化を、レファレンスケースおよびCS条件に対して検討した：

- ・ ニアフィールドの岩体
 - －力学的変化
 - －水理学的挙動
 - －地球化学的变化
- ・ 緩衝材、埋戻し材、シール材
- ・ キャニスターの健全性と内部の化学
- ・ 燃料の溶解
- ・ 放出した放射性核種の化学と挙動

8.1 ニアフィールド岩体のモデリング

8.1.1 力学的変化

掘削、ベントナイトの膨張圧および熱負荷が亀裂の伝播と癒合、亀裂のせん断力と変位、および岩体の安定性に与える影響を評価するために、第4.4項で述べた2次元および3次元モデルを用いた。3次元解析は、3-DEC コードに加え SITE-94 のために開発された特殊な境界要素コードを用いて行った。3-DEC コードでは亀裂ネットワークを用いるが、そのネットワークは単一埋設孔とそれに隣接するトンネルの挙動を評価した水理解析で用いたものと同様である。

レファレンスケース：掘削によって応力分布が大きく変化し、それとともに降伏域の拡大と岩体の局所的な破損が起こる。トンネルを横切る亀裂は閉じ（最大0.14 mm）、一方でトンネル壁中の亀裂はほんのわずかに広がり（最大0.02 mm）、その結果透水係数が変化する。わずかながらせん断変位も生ずる（約1 mm）。ベントナイトは膨張するが岩体の安定性にはほとんど影響せず、亀裂の動きも小さい。一方、熱負荷は大きな応力の原因となり屈伸性を増すことになる。せん断変位は最大約0.5 mmで、すべての亀裂は閉じる。傾斜した節理に沿うせん断変位は降温後も残存し、再度開く亀裂もある。亀裂の伝播と癒合はおおよそ予測可能である。伝播と癒合とによって亀裂は長くなり、したがって連結性は増し、透水係数はさらに変化する。

標準シナリオ：2200 mの氷河がサイト上に被った場合の影響を解析した。2次元モデルによれば、もっとも極端な応力を考えた場合60°の傾斜面に沿う亀裂伝播が起こる。このような応力は、この方向にせん断破壊または断層を引き起こすほどの大きさの応力である。3次元モデルによれば、トンネルお

よび埋設孔壁で岩体が破壊し、影響を受ける岩体の容積は熱負荷の場合と同程度である。亀裂に沿って不可逆的なせん断変位を生ずる（最大0.33 mm；ただし、対象とした亀裂長さに比例する）ものの、亀裂は負荷によって閉じ、また逆に氷河が去ったあとは再び開く可能性がある。このせん断変位はトンネルおよび埋設孔の安定性にはほとんど影響しない。亀裂の癒合は広い範囲に亘って起こり、小規模の断層を生じたり既存の断層を動かすであろう。

一般的に言って、熱負荷が最大になるか、あるいは氷河の負荷によって亀裂の力学的開口幅は約0.4 mm縮まる。このためにトンネル内への地下水流は減り、亀裂のせん断強度は高まる。一方で岩体への応力集中も起こるであろう。降温後または氷河の負荷が去った後は、岩体が収縮することによって亀裂は再び開き地下水流路は変化する。また加熱および氷河双方ともキャニスター回りの地下水流量と流れに変化を与える。

8.1.2 水理の変化

レファレンスケース：ニアフィールドの影響解析モデルに必要な地下水流パラメータ（亀裂間隔、平均開口幅およびダルシー流速）を得るには、不連続体モデルによって多数の流れ場のひとつひとつを再現し、その定常流解析から予測された値をサンプリングする。基本ケースの解析によれば、サイトの43%を亀裂が横切っているにもかかわらずキャニスター埋設孔のうち33%だけを地下水流が通過する（‘flowing sites’）と予測された。ダルシー流速は不確実性に関してもっとも敏感なパラメータである。ニアフィールドにおけるフラックスはファーフィールド（境界条件）における流れの変数によって影響されるものの、多くの場合その影響は大きくはない。確率論的連続体モデルはダルシー流速を予測するためだけに用いられる。つまり個々のキャニスター埋設孔の位置において透水係数の空間分布を再現し、それぞれについてダルシー流速が評価される。不連続体モデルと同様、ダルシー流速の空間的バラツキは約2桁と予測されたが、ファーフィールドにおけるダルシー流速との相関は弱い。流れの空間的バラツキが高いということはニアフィールドに特徴的な事柄のひとつであり、ここでもまた、サイトキャラクターゼーションデータの不確実性というよりはむしろサイトの特徴と考えられる。図8.1にはニアフィールドにおけるダルシー流速の値の範囲を簡単な推定の場合と詳細モデルで推定した場合とについて比較した。不連続体モデルのダルシー流速は、そのモデルのflowing sitesのうち33%を表わすのに対し、確率論的連続体モデルではすべてのキャニスター位置を表わすことをこの図は示している。

標準シナリオ：このシナリオに対する不連続体モデルの予測では、ダルシー流速は約1桁程度しか増加せず、また空間的バラツキはない。しかし、SITE-94のニアフィールドにおける流れの評価には上述の力学的影響が無視されている。また、第7.2節で述べたような、流れのより急激な、しかし確率の低い変化も考慮していない。

8.1.3 地球化学的变化

レファレンスケース：掘削に起因する化学的擾乱は詳細には評価しなかったが、ニアフィールドの地球化学的性能に対する長期的影響はほとんどないと考えられる。ただし、岩体が酸化性になる可能性およびその程度については、今後 SITE-94 よりもさらに解析が必要である。処分場から発生する熱による熱化学的影響として、モデル計算によれば、カルサイトの溶解度が低下し、またシリカの溶解度の上昇による若干の影響が認められる。カルサイトの溶解度が低下すればその沈着がおこり亀裂の透水量係数が低下する。こういった効果は PA の影響解析においては保守的と考えて無視した。さらに、EBS の劣化生成物によるニアフィールドの岩体や亀裂への影響（たとえばベントナイト中の不純物の影響、ベントナイトによるコロイドの生成、金属腐食生成物、コンクリートやセメントの間隙水など）についても考慮しなかった。

標準シナリオ：ファーフィールドで用いた地下水化学の変動（第7.4節参照）をニアフィールドの岩体に対しても用いた。EBS 内における間隙水の性質をモデル化するにあたっては、後述するように、この間隙水を閉鎖系モデルへの入力とした。

8.2 緩衝材、埋戻し材およびシール材の変化

SITE-94 では埋戻し材およびシール材に関する解析は行わず、最終的な安全評価で考慮すべき重要と考えられる課題をとりまとめるにとどめた。緩衝材については 1 点についてだけ新たな解析を行った。それは地下水との相互作用による化学的変質である。

緩衝材の化学的性質の変化はベントナイトの物理的性質に影響し、溶質に対する拡散バリアとしての能力を変える。また、緩衝材を通過する放射性核種の化学的挙動も変化を受ける。地下水からのカルシウムの供給や加熱によるスメクタイトのイライト化は、約 10 万年後においても小さいと考えた。ベントナイト間隙水の組成は閉鎖系反応モデルを用いて地下水と MX-80 ベントナイトとの平衡から計算した。計算は常温（15℃）および廃棄物からの加熱による高温（80℃）に対して行い、酸化還元状態は岩石-水相互作用によってコントロールされると仮定した（他にも酸化性地下水やアルファ線による放射線分解の影響を調べるために酸素分圧を固定した計算も行った）。計算の結果、最初の地下水に比べ Eh は比較的還元性よりも、また pH はアルカリ側に緩衝された（それぞれ -250~-330 mV、7.7~9.3）。また、初期の酸化性状態においてはパイライトが酸化するために pH は 3.5 まで低下するが、スメクタイトが加水分解して平衡を弱アルカリ性まで戻す。溶存炭素濃度はカルサイトと平衡にあるカルシウムの溶解度およびスメクタイトとの相互作用によって決められ、初期濃度よりは 1 桁高くなる。これは緩衝材中における放射性核種のスペシエーションに影響する。また、間隙水中の硫酸塩濃度は数桁上昇する。

ニアフィールド地下水中の塩分濃度を 3 種類に変えてみたが、塩化物濃度は不変で、ベントナイト-

水相互作用にはほとんど影響しなかった。フッ化物濃度およびリン酸塩濃度はともにカルシウム濃度が高いこととフッ化リン灰石の溶解度によって抑えられる。

8.3 キャニスターの変化

現段階では、キャニスターの工業的規模の加工・試験が行われていないために、EBS の変化に伴うキャニスターの破損率を推定するだけの情報がない。したがって SITE-94 では考えられるメカニズムをもとに破損率を仮定し、CAMEO コードを用いて新たに腐食計算を行った。

8.3.1 キャニスターの破損

レファレンスケース：緩衝材の膨張によってキャニスターには最大 10 MPa の均一な力学的負荷がかかる。局所的な膨張による不均一負荷もあり得、それによって銅の不均一クリープや局所的な肉厚減少が起こると考えられるが、SITE-94 では不均一負荷に対する解析は行わなかった。応力は欠陥近傍に集中し、1000 年から 5 万年の間に少数の容器が破損する。処分場全体が不均一に飽和された場合には、一部の容器が大量の残存酸素にさらされることになる。しかし、EBS 内に残ったほとんどの酸素は岩石との反応や緩衝材中のパイライトとの反応によって消費される。その後は、残ったわずかの酸素または硫化物（還元性環境下；地下水およびベントナイト中のパイライトから供給される）のベントナイトからキャニスター表面への拡散、および銅腐食生成物（たとえば酸化性環境下では銅の塩化物）のキャニスター表面からの移動とによって銅の腐食が律速される。CAMEO コードの予測によれば、均一腐食によって外側の銅キャニスターが破損するに要する時間はおよそ 10^7 年以上である。もし溶存硫酸塩（Åspö のニアフィールドの地下水では硫化物に比べ最大 1000 倍の濃度で存在する）が緩衝材を透過し微生物によって還元されるとすると、銅キャニスターは約 10^4 年で破損すると予測される。現在のところ、不均一腐食（たとえばひげ状結晶の成長や欠陥に起因する腐食）に対する適切なモデルは存在しない。SITE-94 では、外側の銅製容器が破損した場合には、内側の鋼製容器は 1000 年後に破損すると仮定した。レファレンスケースの条件では、キャニスターを破損させる共通のメカニズムは特定されない。

標準シナリオ：氷河を被った場合には 30 MPa 程度の力学的／静水力学的負荷がかかる。この圧力はキャニスターの破損限界に近いので、解析を行うにはキャニスターの詳細仕様が必要である。もしキャニスター表面が極度に酸化性になった場合には、CAMEO によればキャニスターは約 10^4 年で破損する。しかし、氷河は処分場上を通過して行き、それによる負荷は一時的なものであることを考えれば、そのような酸化性条件が緩衝材を通過してキャニスター表面まで達し、かつそこに長期間に亘って留まるということは考えにくい。

このような分析をもとに考えると、2、3 の容器が閉鎖後 10 万年以内に破損するという仮定は妥当なものである。したがって、SITE-94 の影響解析では 3 種類の異なる破損時間を考える：1000 年、1 万年および 10 万年である。ただし、定量的情報がないために、これらの時点における実際の破損数の予測は

憶測に過ぎなくなる。SITE-94で複数のキャニスターの破損を考えないのはこの理由からである。

8.3.2 破損したキャニスター内部の化学的条件

キャニスター内の間隙水の化学的条件に対する‘外部からの’影響を調べるために、ベントナイト-地下水反応の予測に用いた閉鎖系反応モデルを、ベントナイト間隙水と鋼製キャニスターとの平衡計算にも適用した。温度は15°Cおよび80°Cとし、銅とその腐食生成物は計算に含めなかった。計算の仮定では、腐食は金属鉄がすべてマグネタイトに変質するまで一定の小さな速度で進行し、また間隙水の化学的条件はマグネタイトとの平衡に向かう遅い反応によって律せられるとした。弱還元性から酸化性にかけては、マグネタイトは鉄の酸化水酸化物、ゲーサイトを経て最終的にヘマタイトにまで変質する。モデルではヘマタイトが生成する場合と生成しない場合とを扱った。

このモデリングの結果によると、還元性環境下でベントナイトとすでに平衡にある水はマグネタイトとの平衡に近く、また強い酸化性条件下ではマグネタイトの変質相と平衡にある。マグネタイトと水との相互作用によって生成した溶液の組成は、ヘマタイトを反応生成物と仮定した場合とかなり異なり、マグネタイト、パイライトおよびヘマタイトの安定な混合相によって決められる。その溶液は強い還元性(-500 mV)でアルカリ性(pH=12)である。容器内での放射線分解による酸化性物質の生成についても計算を行ったが、その結果によれば、破損したキャニスター内部の還元性は容器の還元能力と容器の腐食生成物とによって決められる。かりにキャニスターと燃料の還元能力を保守的にゼロと仮定すると、キャニスター破損直後(約400年以内)にベントナイト中で**酸化還元(酸化性)フロント**が形成され始め、緩衝材中を速やかに移動することが考えられる(キャニスターが1000年後に破損するとして)。しかし計算によれば、酸化還元フロントの移動は急速に減速し、約100万年間に岩体中を1メートル程度しか移動しない。

キャニスター内の間隙水の化学的性質を計算することによって、キャニスター内の条件を表わす多くの地球化学的変動を規定することができ、それらの変動は、溶解した燃料から放出される放射性核種の溶解度とスペシエーションとを予測するために使われる。結論として、ニアフィールドの化学に関する地球化学的モデルにはまだ概念上の不確実性が残っており、PAにおけるその重要性はサイトの性質に関する不確実性のそれと同程度である。

8.4 燃料の溶解

燃料からの放射性核種の放出速度は、 UO_2 燃料マトリックスが放射線分解による酸化溶解によって酸化数の高い酸化物へと溶解する速度と同じ速度である。例外は被覆管のギャップに蓄積する放射性核種(Cs, I)および粒界に残る核種(Cs, I, Sb, Mo, Tc, Sr)である。上に述べたように、キャニスター内の間隙水はバルクには還元性であるが、燃料表面は局部的に酸化性であり、燃料の溶解は複数の速度論的プロセスに影響される：たとえば酸化性物質の生成、燃料表面からの酸化性物質の移動、燃料の

酸化、酸化性物質を消費する反応、燃料表面からの酸化されたウランの移動、その他の反応物質の移動などである。燃料マトリックスの変質速度は酸化性物質の生成速度に対応させ、また保守的に、この酸化性物質はすべて燃料と反応すると仮定した。さらに、 UO_2 は U_3O_8 へ変化して H_2O_2 が唯一の酸化性物質であると考えた。

8.5 放出された放射性核種の化学と挙動

溶解度およびスペシエーション：EBSの各領域における地下水や間隙水、およびファーフールドにおける地下水に関する化学的情報が得られれば、熱力学的モデルを使って移行経路中での放射性核種の溶解度とスペシエーションを予測することが可能になる。不確実性の原因は、溶解度制限固相および溶存化学種についてデータが欠落していたり、データの精度や整合性の点で熱力学データベースが完全ではないことである。

前出した閉鎖系反応モデルでは、ニアフィールドの地下水はまずベントナイトと反応し、次に鉄製キャニスターの腐食生成物と反応し、最後に使用済燃料と反応する。このモデルを使って、EBSの異なる領域と状態に関する合計9種類の変動ケースに対し、それぞれ間隙水組成および溶解度制限固相を与えた。モデルではレファレンスケースと標準シナリオ、酸化性条件と還元性条件、および2種類の温度に対してシミュレーションを行い、溶解度制限固相の種類やそれらがアモルファスか結晶質かという点について概念モデルの不確実性を探った。計算のために、還元性および酸化性条件に対し個々の放射性核種について以下の数値を揃えた：

- ・ 溶解度制限固相
- ・ 放射性核種の溶解度の範囲 (mol/L)
- ・ 10 mol%以上存在する溶存化学種

溶解度については、保守的に、生成可能性のある固相の中でもっとも溶解度の高い固相の溶解度を上限値とした。計算で得られた溶解度の値を、ニアフィールド条件を考慮しながら、実験で得られた値と比較し、Am、Np、Pu、Tc、ThおよびUについては良好なもしくは保守側の一致を得た。実験値が存在しない元素 (Ni、Se、Sn、Sr、Zr および Ra) については、類似の条件における安定同位体の地球化学的データをもとにエキスパートジャッジメントに依った。さらに熱力学的データも地球化学的データも存在しない元素 (Pd、Ce、Sm など) に対しては文献値を用いた。また、ニアフィールドにおけるCsおよびIの濃度は溶解度の制限を受けないと仮定した。こうして選ばれた値が、放射性核種移行についての以下の影響解析で使用される。

収着：Äspöと同種の岩体およびベントナイトに対する、酸化性および還元性条件の淡水中での分配係数の文献値を採用した。Np(V)に対しては表面収着モデルを試み、酸化性条件での従来の K_d 値が表面収着モデルで得られた範囲内に収まることを確認した。

9 モデリング：放射性核種の輸送と放出

ファーフィールドおよびニアフィールドのモデリングから得られた情報は、次に放射性核種の移動・移行計算に組み込まれ、最終的に生態圏への放出が評価される。EBS およびニアフィールドからの放出の計算には CALIBRE コードを使い、ファーフィールドにおける輸送計算には CRYSTAL コードを使った。最後に、単純な生態圏モデルを用いて放出量を線量に換算した。

9.1 ニアフィールドからの移動と放出

CALIBRE コード (図9.1) は、燃料内のギャップ、粒界およびマトリックスからの放射性核種の放出、ジルカロイ被覆管およびその他の金属部分の腐食による放射化生成物の放出、ならびにキャニスター、緩衝材およびニアフィールド岩体中での移動をシミュレートする。ここで、Cs、I および C の 10% と Tc の 1% はギャップ放出、Sr の 100%、残りの Cs、I、C、および Tc の 10% は粒界放出と仮定した。マトリックスからの放出は燃料の酸化溶解と調和的であると仮定し、放射性核種は移動を始めるかまたは溶解度の制限によってキャニスター内に蓄積される。ニアフィールドに存在する放射性核種は、間隙水中に溶存しているか、ベントナイトや岩石へ収着しているか、または沈殿しているかである。燃料および腐食生成物への収着は無視した。また、ほとんどの場合キャニスター壁による物理的閉じ込めは無視した。キャニスターの破損と同時に燃料の溶解が始まる。キャニスター埋設時点からの放射性崩壊は計算されている。

放射性核種の輸送は、キャニスターおよびベントナイト中では拡散によって、ニアフィールド岩体中では移流と拡散とによって起こると仮定し、モデル化した領域が小さいことによる分散は考慮しなかった。特別な場合としてピンホールからの放出もモデル化した。放射性核種は、岩体の多孔質マトリックス内では拡散により輸送されるが、平行平板状亀裂に沿う輸送は移流と拡散とによる。亀裂はキャニスター側面に垂直な方向に等間隔に存在する。チャネリングの面積 (亀裂の濡れ表面積) も輸送計算に含めた⁵。これは岩体中へのマトリックス拡散に影響する。CALIBRE コードではニアフィールドにおける輸送に対する酸化還元の影響もモデル化した。まず、燃料から外側に向かう酸化性物質の輸送とニアフィールドの各領域における酸化還元状態の時間的変化を計算し、つぎにそれぞれの放射性核種の溶解度や収着特性への影響を計算する。

9.2 ファーフィールド岩体中における輸送

ニアフィールドからファーフィールドの亀裂性岩体への放射性核種の輸送は、地下水中の移流および流れ方向の分散によると考えてモデル化した。この際、岩体中へのマトリックス拡散と間隙表面への

⁵ 訳注：つまり実質的な流路面積を考えたの意。

収着を考えた。コロイドの形態での輸送は考えない。CRYSTAL コードではファーフィールドにおける輸送を、平行に走るいくつかの亀裂中での一次元輸送とみなすが、これは明らかに、前述した実際の地下水流れ場をかなり単純化したものである。ニアフィールドと同様、亀裂の濡れ表面積を解析に含めた。これはマトリックス拡散を制限する効果を示す。岩体マトリックス内の間隙表面への収着は考えるが、亀裂表面への収着は考えない。

9.3 ニアフィールドおよびファーフィールドに対する予察的計算

影響解析に入る前に、CALIBRE および CRYSTAL を使っていくつかの簡単な予察的計算を行った。これは用いた仮定やパラメータに対するシステムの感度を調べるためである。この計算によって影響計算の対象範囲を絞ることができる。たとえば、ファーフィールドからの放射性核種の放出はある範囲以上あるいは以下の値（たとえばダルシー流速など）には左右されにくいことがわかった⁶。

また CALIBRE コードを、放射性核種が亀裂内へ放出されるよりも、キャニスター埋設孔上方のトンネル内へ放出される場合についても使った。その計算によれば、埋設孔の緩衝材上面における境界条件を、モデルで仮定しているようにゼロ濃度に維持するためには、トンネルの掘削影響領域において非現実的なほどの高い地下水フラックスが必要との結果を得た。また岩体中の亀裂位置に対するキャニスターのピンホールについても評価したが、ピンホールからの放出がもっとも重要とされる閉鎖後 1 万年間においても、ピンホールの位置は何の影響も生じないことがわかった。この結果を受けて、影響解析では任意位置の単一のピンホールからの放出を評価することとした。

ファーフィールドに対する予察的計算は、放出率に対する F 比および Pe 数の影響に絞った。その結果、岩体中における放射性核種の輸送はこの 2 つのパラメータだけで特徴づけることができることがわかり、最大放出率は F 比および Pe 数の関数として容易に記述可能である (図 9.2)。 F 比が支配的パラメータであり、この値が小さい (亀裂の濡れ表面積が小さくダルシー流速が大きい) ほど高い放出率を与える。

9.4 生態圏への放出

スウェーデン放射線防護研究所 (SSI) は、SITE-94 のレファレンスケース (生態圏が変化しない) および標準シナリオについて、放射性核種の放出とそれによる人間への年間個人被ばく線量を評価する簡単な生態圏モデルを開発した。そのモデルでは、近い将来に対しては Äspö 周辺の隆起および浅層地下水の枯渇、遠い将来に対してはバルト海の汽水化を取り入れた。生態圏への流入経路はレファレンスケースでは Äspö 島上の 1 箇所の井戸とし、その井戸は約 100 名の住民および Botholmsfjärd 湾に飲料水と灌漑用水 (10000 m³/yr) を供給する。Botholmsfjärd 湾は Äspö 島を囲む浅い汽水湾であり、放射性核種は

⁶ 訳注：原文はこうなっているが、ダルシー流速に関して言えば、ある値以上ならば放射性核種の放出に影響しないが、ある程度小さいと影響する。

その堆積層に収着する（被ばくはない）か、または魚類に蓄積し、それを食することによって被ばくを受けるとした。CSではさらに簡単な取扱いをし、5万年以降は氷河に覆われたり気候が居住には寒冷にすぎるために、井戸の利用者はいないと仮定した。したがって、Botholmsfjärdの汚染した堆積層は1000年以降は隆起のために農業利用が可能になるものの、5万年以降はこの経路は計算に含めない。10万年以降には、処分場から放出された放射性核種はすべてバルト海とその堆積層に存在することになると仮定する。

被ばく経路に関して有用な情報が得られたものの、レファレンスケースでも標準シナリオでも、ほとんどの放射性核種について飲料水摂取が支配的被ばく経路であることがわかった。したがって影響解析ではこの経路に対する計算だけを行った。たとえその経路がCSで考える時間帯のほとんどにおいて非現実的であるとしても、この経路が影響を保守的に見積もることになるからである。

10 影響解析：計算ケースの体系化

前3節において説明したモデリングはクリアリングハウス（第2節参照）内部で行われたものである。各クリアリングハウスは、PAの影響解析に最終的にどのような計算が必要かを選択するための情報やパラメータを示すものであった。情報は‘ゼロ変動’に対する1組と‘変動’に対する2組についてそれぞれのクリアリングハウスから与えられる。2組とはレファレンスケースおよび標準シナリオで、これらはクリアリングハウス（たとえば地下水流）という独特の方法の機能を探るために設定されたものである。これらのクリアリングハウス変動がいろいろな方法で組み合わせられ、統合された計算ケースが作り上げられる。

10.1 レファレンスケースに対するクリアリングハウス変動

パラメータを幅広くとっておく努力は要されるものの、解析される変動やケースの数を取り扱い可能なグループへと削減しておく必要があり、そのための正当な手続きが必要である。クリアリングハウスの内部では、第9.3項で説明したような感度解析によってパラメータ間の相関を調べたり、また重複した変動（インプットパラメータが差異を生じない）を見つけ出したりすることによって、変動数の削減がなされている。クリアリングハウスからの入力値を組み合わせる段階でクリアリングハウス変動間の相関を考慮し、概念モデルの不確実性、パラメータの不確実性およびパラメータのバラツキに関するすべての解析はレファレンスケースに基づく計算ケースに限って行うこととした。その他のいろいろな指標は、例となり得るような代表的なセット（計算ケースの）を作るのに用いた。ただし、このような削減方法に限界があることは認識しておくなくてはならない。

水理学のクリアリングハウスの変動は最も範囲が広い。ここでは、不連続体モデルをもとにゼロ変動を選んだ。ダルシー流速と亀裂の濡れ表面積の‘極端な’組み合わせに対応する変動を含め、フラックス、亀裂の濡れ表面積、亀裂開口幅および亀裂間隔などの不確実性やバラツキを表わす25ものニアフィールド変動を挙げた。ファーフィールドの変動としては、 F 比- Pe 数を極端に広く採って合計44の変動を考えた。また、概念モデルの不確実性を探るために確率論的連続体モデルを使い、ダルシー流速、分散係数および亀裂の濡れ表面積の高、中、低の値を組み合わせるとして135の変動を定義した。さらに、概念モデルの不確実性と空間的バラツキをカバーするためにニアフィールドの変動とファーフィールドの変動とを組み合わせるとして59の変動を選ぶとともに、これらに加え、概略的水理モデルによって推定されたダルシー流速の最大値を含めたいくつかの変動を設定した。

地球化学クリアリングハウスでは、酸化還元フロントの移動など酸化還元条件、温度および放射性核種の溶解度—これは酸化還元状態に影響されるが—などの違いに起因する変動を考えた。収着に関する変動もまた酸化還元状態および K_d 値の不確実性に関係がある。 K_d 値はすでに3分の1に削減されていたものである。ファーフィールドでは、溶解度制限や酸化還元フロントは考えられていないので、地球化学的変動は2種類の酸化還元状態と2種類の収着データだけである。酸化還元状態はニアフィー

ルドとファーフィールドとに共通した変動である。

ベントナイトがその塑性を失い割れを生ずると、キャニスターとニアフィールド岩体とが直結することになる。このような場合をひとつの変動として考えた。EBS の物理的性質、すなわち拡散性、岩体の密度、間隙率などに関する不確実性やバラツキを評価するための変動は、サイトスペシフィックなデータがほとんどないか全く存在しないため、考慮しなかった。

キャニスターの破損時期に関するゼロ変動は 1000 年であるが、これに対し 3 種類の変動を考えた。10000 年後に完全に破壊する場合、10 万年後に完全に破壊する場合、および埋設時に銅製キャニスターにピンホールが生じ、その後 1000 年間で完全に破壊する場合である。

第 9.4 項で述べたように、影響解析において生態圏に対する変動は一切考えなかった。すなわち、すべての計算ケースにおいて飲料水摂取経路を仮定し、またファーフィールドを通過した放射性核種のフラックス全体が井戸に流入するという保守的な仮定をおいた。言い換えれば、その井戸では汚染した水のプルーム（広がり）を見ることはない、ということである。

10.2 レファレンスケースの計算ケースへの変動の組み込み

各々のクリアリングハウスについて変動の数を内部で削減した結果、解析のために選ばれた変動は水理について 42 個、地球化学について 7 個およびキャニスターについて 4 個である。また残ったクリアリングハウスはゼロ変動である。これらのそれぞれの変動は残ったクリアリングハウスのゼロ変動と組み合わせられ、結局 35 ケースのニアフィールド計算と 29 ケースのニアフィールド／ファーフィールド統合計算ケースを生成した。

10.3 標準シナリオに対する変動およびケース

CS に対する解析には、地下水流、地球化学、岩体の応力および地表環境の時間的変化を含み、変動およびケースではこれらのシステムの変化に重点をおいた。概念上の不確実性およびパラメータの不確実性やバラツキには重点がおかれなかったが、それらはレファレンスケースで処理済みだからである。地下水流と地球化学とを結び付けた変動については、10 万年間を 5 つの時代に分けて考え、地下水流フラックスは現在のフラックスに比べて最大 10 倍で、酸化性と還元性、低塩分と高塩分、低有機物含有量と高有機物含有量の地下水を仮定した。氷河の負荷によるキャニスターの破損は評価せず、代わりに 1000 年において破損するというレファレンスケースのゼロ変動の場合の条件を CS でも使った。ニアフィールド／ファーフィールド統合型の設定はひとつだけで、ニアフィールドの基本ケースの地下水流とそれぞれの時代（ニアフィールドからの放出が最高になる時代）における地球化学の変動とを結び付けた設定である。このときのファーフィールドは、レファレンスケースのゼロ変動でダルシー流速を一桁高くした場合を選んだ。解析は 5 万 5 千年から 7 万年の氷河期だけに対して行った。

本解析の結果わかったことは、CSを完全に解析するために、形状、性質および境界条件の時間依存性を少なくとも2次元で扱えるように、SITE-94の影響解析コードをさらに発展させる必要があるということである。これは本プロジェクトの中では行えなかった。その意味ではCSの計算ケースには限界があると見なすべきである。しかし、時間的変化を受けるファーフールドでの放射性核種の放出と輸送に対し、CSの影響を、LAPLACE-2Dコードを用いた2次元の予察的計算によって示すことができた。

11 影響解析：結果

影響解析の結果では、ニアフィールドおよびファーフィールドからの放射性核種のフラックス、および単一のキャニスターからの放出が Bq/year 単位で示される。ファーフィールドからのフラックスは Äspöでの飲料水井戸経路を仮定して個人線量率 (Sv/year/キャニスター) に変換される。ニアフィールドから (地質圏へ) のフラックスも同様に個人線量率に変換されるが、その値は生態圏への実際の放出を表わしてはいないため、**潜在的中間線量率 (IDP)** と呼ばれる。

生態圏のモデルが不完全であることを考えれば、以下に示す線量値は、規制値と比較できるような現実の影響を予測するものではないことを強調しておく。むしろ、それらの結果が、いろいろなケースに対する放出量の見通しを得るための材料であることを意図している。

11.1 レファレンスケース

図 11.1 にはゼロ変動ケースに対するニアフィールドからの放射性核種の放出フラックスを、図 11.2 にはこのフラックスを IDP に変換した結果を示す。天然の崩壊系列中にある放射性核種はベントナイトおよびニアフィールドの岩体に強く収着される。ただし、Pa と Th はあまり遅延されない。Pu、Np、U および Am はすべて溶解度に達する。ヨウ素は、 ^{226}Ra に取って代わられるまでの最初の 2 万年に亘って IDP を支配し、 ^{226}Ra の IDP は約 20 万年後にピークを迎える。図 11.3 はキャニスター破損後 3 つの異なる時点における ^{129}I 、 ^{99}Tc および 4N アクチナイド系列元素の存在場所 (ニアフィールドの EBS や岩体中に残存しているか、あるいはファーフィールドへ移行しているか) や崩壊したかどうかについて示している。 ^{99}Tc のほとんどはニアフィールド内で崩壊すること、4N アクチナイド元素のほとんどもニアフィールドを出ないが 100 万年を経過しても崩壊していないこと、 ^{129}I はほとんどが 2、3 千年の間にニアフィールドを出てしまうことがこの計算結果からわかる。

ニアフィールドの水理学的な変動に対する解析から次のようなことがわかった：

- ・ ダルシー流速を幅広く変化させても放出の最大値は 2 桁程度しか変化しない。放出量はダルシー流速の線型関数ではない。
- ・ 地下水流速が小さいときは岩体マトリックス内および亀裂内での拡散が輸送を支配する。ただし ^{36}Cl と ^{129}I は例外である。前者のピーク放出率は地下水流速に依存しない。後者は収着性の放射性核種に比べて地下水流速への依存性は小さい。
- ・ 不連続体モデルにおいては、バラツキや不確実性をすべて含んだ変動において最大フラックスは 2 桁以内の範囲で変動する。確率論的連続体モデルでは、地下水流速のフラックスが小さく予測される分だけ放射性核種の放出も若干小さくなる。

- ・ ダルシー流速が非常に低い場合を除いて、亀裂の滯れ表面積はニアフィールドにおける放出率に何ら影響を与えない。ダルシー流速が非常に低い場合でも影響は小さい。

ニアフィールドの地球化学的変動に対する解析によって以下の事柄が示された：

- ・ ニアフィールド全域が酸化性である場合には、溶解度の上昇または収着の減少またはそれらふたつの現象によって、いくつかの重要な放射性元素の放出が大きく増加する。 ^{99}Tc では放出率の増加は4桁以上、 ^{237}Np では3桁以上である。ニアフィールド岩体の内部へ2, 3メートル長の酸化還元フロントを仮定すると、これら2つの放射性元素は亀裂内で沈殿し、放出は実質的になくなる。ただし、ゼロ変動ケースではまだ非常に高い。フロントにおける ^{237}Np の沈殿は娘核種のソースとして働き、他のケースでも娘核種のフラックスが増加する。
- ・ 温度の上昇は放出をあまり増加させない。溶解度の上昇による放出率の増加は5倍程度以下（Uで10～20倍）である。収着のバラツキや不確実性を探ったケースでも同様に影響は小さい。

ベントナイト緩衝材の劣化による影響を調べたケースでは、放出率が明らかに上昇すること、および破過時間が非常に早くなることが示された。 ^{129}I の最大IDPは2, 3桁高くなり、短半減期核種からの寄与が大きくなる。このことは処分システムにおける緩衝材の重要性を示すものである。キャニスターの破損が遅れた場合（1万年）、短半減期核種の放出は低減し、 ^{129}I のフラックスは半減する。これは燃料溶解速度が小さくなる（破損が遅ればマトリックス放出の時間が長くなる）ためであり、粒界からの ^{129}I の放出量に影響を与える。破損がさらに遅れると（10万年）、いくつかの放射性核種（ ^{14}C および Pu、Am、Cmの短半減期同位体）はキャニスター内で崩壊する。

どのニアフィールド計算においても、 ^{129}I が初期の放出量を支配し、そのあとは ^{226}Ra および ^{230}Th または ^{229}Th が支配した。単一のキャニスターからの最大IDPは約 $10^{-7}\sim 10^{-4}$ Sv/yearである。

図 11.4 は、各核種に対するニアフィールドIDPの合計のピーク値をその出現時刻に対してプロットしたもので、これまでの計算ケースのいくつかで得られた結果をまとめた。それぞれのケースにおいて最大IDPに寄与する主要核種を点の横に示してある。A3 ケースはゼロ変動、A5 と A18 ケースは高ダルシー流速（A18 ケースはダルシー流速が最も高く亀裂の滯れ表面積が最も低い‘質の悪い’ニアフィールドの場合）、A16 ケースは亀裂の性質が好ましくない場合（亀裂間隔が短い）、E1 ケースは酸化性のニアフィールド、B2 ケースはキャニスターの破損が10万年、そしてD1 ケースは劣化したベントナイトの場合で、このときIDPは最も高い。

図 11.5 および 11.6 は、地質圏から生態圏へ放出された放射性核種のフラックスおよび個人線量率を示す。レファレンスケースのニアフィールド/ファーフィールド統合型ゼロ変動ケースに対する計算結果である。図 11.1、図 11.2 と比べるとニアフィールドから放出されたフラックスが地質圏によ

で減少することがわかる。収着性の弱い¹²⁹Iや³⁶Clは岩体中を遅延されずに通過するが、ニアフィールドで遅い時期に現れた²²⁶Raや²³⁰Thの最大IDPは生態圏において数桁も低下する。実際、 $Kd < 0.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ の放射性核種には地質圏による遅延効果を期待できないが、 $Kd > 1 \text{ m}^3/\text{kg}$ の核種の遅延は大きい。ニアフィールドで F 比が低い場合（つまりダルシー流速が大きく、亀裂の濡れ表面積が小さい場合）には、すべての放射性核種に対して地質圏の有する遅延効果は見込めない。 F 比が高い場合は逆が成り立つ。つまり、地質圏は F 比と Kd との組み合わせによって、放射性核種の移行に対する良好なバリアにも貧弱なバリアにもなり得る。

ニアフィールドとニアフィールドとの両方が酸化性条件を経験する場合（その結果Np、Pu、Se、TcおよびUの Kd 値が小さくなる）、 F 比が高めの値をとらない限り、ニアフィールドからの放射性核種の放出がニアフィールドによって減少することはない。ただし、このような F 比であっても⁹⁹Tcおよび²³⁷Npはほとんど影響を受けず、高い放出率を維持する。

ニアフィールドに対する図11.4と同様に、ニアフィールド/ニアフィールド統合型の計算ケースの結果を図11.7にまとめた。点は図の左下と右上の2つの群に分かれているが、これは、地質圏が良好に機能する場合に¹²⁹Iがどのように最大放出率を支配するかを示している。最大放出率はたいてい10万年までに現れる。一方、地質圏が良好に機能しない場合には、²²⁶Raおよび²³⁷Npが最大放出率を支配することになる。それは10万年以降である。‘質の悪い’ニアフィールド（A18ケース）とそれと同じように‘質の悪い’ニアフィールド（FF37および41）を組み合わせた場合が最も高い放出率を与える。酸化性のニアフィールドが‘質の悪い’ニアフィールドと組み合わせさせた場合には、放出率は²²⁶Raよりも²³⁷Npによって支配される。FF4ケースはニアフィールドの水理条件が良好（ F 比が高い）な場合の効果を、またFF15は、ゼロ変動の場合に比べて、ピーク値が低下し¹²⁹Iのピーク値発現時期を10万年以降に遅らせている効果を示している。

このように、ゼロ変動条件下における放射性核種の放出に対しては、ニアフィールド、ニアフィールドともに重要なバリアとして機能する。ニアフィールドではダルシー流速は中ほどの値のときのみ重要で、水理学的パラメータの不確実性が単独で放出率の計算結果に影響を与えることはほとんどない。前述したように、ニアフィールドにおいては、ダルシー流速の計算値の差異はほとんど空間的バラツキに起因する。もし、処分場内で流速の高い埋設孔の位置を特定できず、またそれらを避けることができないならば、キャニスターのうちのいくつかは岩体内の望ましい場所で、また残りのキャニスターは望ましくない場所で破損すると仮定せざるを得ない。ニアフィールドでは、 F 比に代表される水理学的パラメータのバラツキが収着性の放射性核種の移行に大きな影響を与える（図11.8参照）。岩体内での非均質性や輸送特性の空間的バラツキが大きいことによって、概念モデルの多くで F 比は小さくなる。したがって、非常に有効に機能するバリアもある一方で、全くバリアが存在しない移行経路も仮定しておかなくてはならない。これらの空間的バラツキや不確実性をどの程度まで扱えるかがサイトキャラクタリゼーションやモデリングにおいて重要である。

11.2 標準シナリオ

CSに対するニアフィールド計算は、氷期における地下水流速および酸化還元条件の変化による影響を調べるために行った。そのうち1ケースは酸化条件が廃棄物まで及んだ場合であり、もう1ケースはニアフィールドの岩体とベントナイトが酸化された場合である。計算は一部の放射性核種 (^{129}I 、 ^{99}Tc およびアクチナイド系列元素) について10万年までの期間に対して調べた。10万年をとればCSにおける最初の氷河期(5万5千年~7万年)が含まれる。図11.9は、2つのケースのうち最初のケース(保守的な方)に対するIDPを示す。IDPを支配する元素はレファレンスケースと同じであるが、大きな違いは氷期における ^{99}Tc および ^{237}Np の挙動である。これらの元素の溶解度が大きく上昇し、収着が大きく減少するからである。全体的に見て、CSの氷期におけるIDPはレファレンスケースのゼロ変動の同時期に比較して約2桁高い。実際、氷期におけるアクチナイド元素の放出率はレファレンスケースより約300倍も高い。しかし、レファレンスケースのピークIDP値(約20万年後)を越えることはない。 ^{99}Tc は、氷期の1万5千年間に侵入する酸化性地下水によって、その全量がニアフィールドから放出される。酸化性地下水が突然侵入すると、たとえそれが短期間であっても、酸化還元条件に敏感な放射性核種の移動性を高める可能性があることを示している。

CSにおけるニアフィールド/ファーフィールド統合型の計算は氷期だけに着目したものである。その計算では、レファレンスケースの線量との比較を容易にするために、ニアフィールド、ファーフィールド双方が完全に酸化されると仮定し、また仮想的な飲料水井戸を考えた。計算結果によれば、ニアフィールドにおける放出率が増加すること、ダルシー流速が上昇すること、およびファーフィールドにおける収着が減少することによって、この期間中の線量率は数桁も上昇する。この期間の線量は引き続き ^{226}Ra によって支配されるが ^{99}Tc と ^{237}Np の寄与も無視できない。

すでに言及したように、CSに対して時間に依存しない影響解析を行うことには限界がある。このため、CSの13万年間全体を対象としたモデリングをLAPLACE-2Dを用いて行うことで上述の計算を補完することとし、いろいろな地下水流れの条件に対して(地球化学的変動はシミュレートしなかった) ^{129}I および ^{79}Se の挙動を計算した。 ^{79}Se は平均的な収着性の放射性核種として選んだ。このモデリングの目的は、地表への放出の変動をCSのすべての異なる気候状態に対して探ることであった。これによって、地下水流境界条件を固定した場合に比べて、放出率が数桁も増加あるいは減少する可能性のある時期を特定することができたが、その時期には、それ以前の永久凍土時に蓄積・濃集した放射性核種が地質圏から‘洗い流された’時期も含まれている。時間依存性によって不確実性が誘引されるときには、当然ながら処分場の挙動予測は慎重に行うべきである。SITE-94では、気候変化による影響のうち多くがPA段階の影響解析にまで持ち込まれることはなかった。

11.3 処分場全体：複数のキャニスターの破損

これまでの影響解析は単一の廃棄物キャニスターの破損に対して行ってきた。その結果を吟味すると、

現在の規制目標規準に近づくほどの影響が現れるためには、レファレンスケースの変動において、キャニスターの多くが1000年から10万年の間に破損する必要があることがわかる。放出が長期間に亘ることを考えれば、破損の正確な時間分布はそれほど重要ではない。それよりも、もし酸化性条件下において、数体のキャニスターが F 比の低いファーフールドの経路に直結するような位置で破損するならば、その処分場は正常には機能しないであろう。また、低い F 値に加えて緩衝材の劣化が起これば、破損が許されるのはたったひとつか2つのキャニスターである。しかし、氷期が到来するまでは、そのような望ましくない条件が発生することは極めてまれであると判断できる。

12 結 論

SITE-94 から 2 つの点に関して結論を得た：ひとつは処分概念に対する安全性評価についての提言であり、もうひとつはサイト選定、システム設計および許可申請などの規制に対する SKI の対応の進め方についての提言である。

12.1 安全評価に対する提言

KBS-3 処分概念の安全性に関して得られた重要な技術的知見は、処分システムを理解する上で定量化が不可能なものと、バリア性能に関する定量化可能なものとに分けられる。

12.1.1 システムの理解

プロセスインフルエンスダイアグラムは、システムを理解するための FEP とリンクのすべてを表わすと考えられているが、極端な未来に関するダイアグラムは必要ではない。本プロジェクトに参画した以外の専門家グループに PID を使ってもらい、各プロセスに彼らが考える重要度レベルを割り当てもらうことは行う価値のあることであろう。これによって、別の見方に対して、システムがどのように着実に理解されていくかを知ることができるからである。SITE-94 はシステム挙動全体を扱ったものではない。とくに：

- ・ SITE-94 は EFEP の一部に対する評価を行ったのみであり、付加シナリオについて定量的評価は行っていない。
- ・ レファレンスケースにおいてさえも無視されたプロセスは少なくない：ガス発生、微生物作用、コロイドおよびベントナイトの長期物理的・化学的挙動などである。
- ・ CS に対しては PID および関連する AMF を作成しなかったため、ところどころを取り出して影響解析を行ったにすぎない。このことは、逆に、リストアップの道具としての PID と AMF の価値を浮き彫りにすることになった。

これらの事柄に関しては今後検討すべきである。

12.1.2 バリア性能に関する重要事項

SITE-94 の段階では、EBS の設計および品質保証の手続きが整っていたとは言い難い。したがって、EBS の挙動に関する多くの結論は予備的と考えるべきであり、また起こりそうな影響が特定された段階でそれに合わせて設計を修正して行く機会は残されている。

EBS：使用済燃料：キャニスターの破損時期が早期であればそれだけ燃料の溶解は速い：たとえば

1000年後に破損すれば1万5千年で溶解し切るが、10万年後に破損すれば36万年間を要する。放射線分解による燃料の酸化溶解のモデリングにはまだかなりの不確実性が残っており、関与するすべてのメカニズムを結び付けたモデルは知られていない。燃料内やEBS内における放射性核種の溶解度および沈殿／溶解挙動については、SITE-94では保守的に取り扱った。それでもなお条件によって放射性核種が大きな移動性を示すときは、より現実的なモデルとより詳細なデータを用いるべきであろう。これは、間隙水や地下水の化学的性質に時間変化がある場合や付加シナリオのいくつかにおいては重要なことである。

EBS：キャニスター：キャニスターの寿命が非常に長ければ（少なくとも10万年のオーダー）、複数のキャニスターが同時に破損する機会を減らし、短寿命放射性核種の影響を低減し、さらに長寿命放射性核種からのリスクをも低減させることができるという点において有利である。そこそこの寿命では短寿命（たとえば1000年）とほとんど変わらない。キャニスター性能に関しては、実規模の銅製キャニスターの挙動や性質についてのデータがないために、現段階では定量的評価が不可能である。また、氷河が到来した場合の破損原因としてどのような可能性があるかや、全面腐食、局所腐食の速度とメカニズムなどについてもまだまだ疑問の余地があるのが現状である。

EBS：緩衝材：キャニスターが侵食されたあと、処分システム全体を代表する輸送抵抗となるという点において、もし設計通りに機能すれば、間違いなくEBSの最重要部分である。緩衝材劣化の場合の変動解析を行ってみるとシステム全体の性能が極めて悪くなることが示される。ただしSITE-94では、緩衝材の長期力学的変化、キャニスターとの相互作用、緩衝材中でのガスの移動、ニアフィールド岩体内での地下水化学性状や応力状態の変化による影響は考慮されていない。さらに、拡散データおよび収着データに不確実性があることも認識しておかねばならない。

地質圏：サイトの理解：SITE-94では利用できるサイトデータはすべて分析した。サイトの3次元モデル化はデータの取扱いと視覚的効果の点で優れている。また、サイトの地下水条件の変化を理解するためには大規模地下水流と地下水化学に関するモデリングが有効であった。今回開発されたサイトモデルはほとんどのデータと整合性があるものの、異なるサイト調査‘方法’から得られたデータセット間の関係はまだ弱い。たとえば、非常に多くの水理データがあるが、それらのデータが水理的な連続性と必ずしも整合しないという点でまだかなりの不確実性が存在するし、データの欠落も見られる。移行経路に沿う輸送／遅延特性（ F 比）についても同様である。それらのデータをすべて取り込んだ単一のモデリングは今のところなされていない。さらに、それらのデータには、異なる概念モデルを明確に区別できる情報は含まれていない。それだけに、概念の異なるモデルは概念上の不確実性を被うためにPA作業の中に残しておかねばならない。

地質圏：水理：サイトにおけるデータの密度は、大規模地下水輸送構造の特性をすべて把握できるほど充分ではない。したがって、構造のいくつかはサイトモデルには含まれていないし、さらに、もっと小さなスケールで見ると亀裂の長さや連続性は不均質である。影響解析では、これらはどちらも確

率論的モデルで多変量変動と見なして扱われた。不均質性のスケールが小さいために、現在のサイトデータからでは、このような小さな不均質性が単一キャニスターの規模における透水係数へ与える影響を正確に知ることはできない。実際、モデリングの結果によれば無視できないほどの空間的バラツキが存在する。これらのバラツキはサイトの特徴であり、必ずしもデータをさらに取得すれば小さくできる類の不確実性ではない。複数のキャニスターが破損するモデルに対しては、空間的バラツキに関する情報は、単一キャニスター回りの地下水流のパラメータのバラツキとして取り込むのではなくPAで直接に使うことができる。したがって、空間的バラツキに関する情報は‘良好な’キャニスターの位置の数を判断する材料になり、またサイトの受入れ可能性に対する判断にも利用できる。F比は、放出の位置によって大きな不確実性と空間的バラツキを示し、サイトの保持能力についての予測を可能にする重要なパラメータのひとつであることがわかった。

地質圏：力学的挙動：埋設孔は、レファレンスケースおよびCS条件下で力学的に安定であることが示されている。つまり熱負荷がかかってもまた氷河の負荷がかかっても、亀裂方向のせん断変位は小さく、安定性に対する影響は無視できる。しかし、ニアフィールドにおける透水係数の分布は掘削、加熱/冷却、気候変動によって時間とともに変化し、岩体バルクの透水性は変化しないものの、移行経路の位置に影響を与える。SITE-94の岩石力学的解析でも、たとえば概念モデルや選択されたパラメータの値に関して不確実性は存在する。また、SITE-94では水一応力の連成効果は解析されていない。力学的に安定な処分場環境が重要であることが基本的に認識されれば、この問題にさらに取り組む余地はある。

地質圏：地球化学：処分場閉鎖後数千年間にわたって地球化学的環境は安定であろうが、気候変動の影響によってその環境が変化する可能性はある。もっとも重大な現象は氷河の退行に伴う酸化性地下水の侵入であろう。ニアフィールドの酸化還元条件は、放射性核種の溶解度と収着との双方に影響するために、PAではもっとも重要である。サイトキャラクタリゼーションは今でも多くの有用な地下水化学データを提供しているが、もし最初から酸化還元条件を意図して行われていれば、より質の高い情報を提供できたであろう。

放射性核種移行：ニアフィールドにおいては、処分場の全体性能は‘濡れた’埋設孔の数と‘乾いたままの’埋設孔の数、すなわち地下水流のバラツキの関数によってほぼ決められる。しかし、放射性核種が‘濡れた’埋設孔から移行するとしても、亀裂の濡れ表面積やニアフィールドの亀裂の開口幅、亀裂間隔のバラツキの影響を受けることはほとんどない。収着データの不確実性を小さくする価値はある。なぜならば、EBS中での弱収着性核種の遅延に対する評価を好ましい方向へ向けると考えられるからである。ニアフィールドが(その緩衝作用に関して)酸化性地下水に敏感であることは良く理解しておかなくてはならない。一部の放射性核種(^{99}Tc)はEBSの深部まで酸化性条件が及ぶことによって動きやすくなるからである。Äspöサイトにおける放射性核種の放出点がファーフィールドの広域にわたっていることは、地下水の移行時間が短くなる可能性があることを意味し、そうであれば弱収着性核種が地質圏において遅延することは期待できない。他の放射性核種については、地質圏にどれ

だけの遅延機能を期待できるかは、地下水流モデルの不確実性—SITE-94では F 比で代表されている—に極めて敏感である。ファーフィールドの地下水流に関する空間的バラツキが十分に把握されていない場合に、そのバラツキの影響を評価できる点において半確率論的地下水流モデルは有効である。このモデルによって、放射性核種の移行に対するバリアとしての地質圏の性能は非常に変動が大きいものであることがわかる。つまり、ほとんどバリアとして機能しない移行経路も存在すれば、非常に有効に機能する経路も存在する。したがって、全体の性能はファーフィールドの移行経路とキャニスターの位置との関係に大きく依存すると言える。

放射性核種移行に関する SITE-94 の解析では、さらに2種類の不確実性が考えられる。ひとつは、たとえマトリクス拡散（および収着）が評価計算の中に取り込まれ、また亀裂表面のコーティングに一切の収着を期待しないとしても、それらによる保守性の程度が明確ではない点である。しかし、保守性の程度は、亀裂表面のコーティングの分布やマトリクスの間隙率についてのサイトスペシフィックなデータの質がよければ、より精度よく見積もることができるであろう。第二に、CS条件では移行率および放出率がかなり上昇し、偶発的な放出、生態圏における摂取位置の変化、‘押し出し’的な一時的影響が起り得ることがわかった。これらの事象に関しては SITE-94 の解析よりもさらに綿密な解析が必要である。

12.2 SKIに対する提言

SITE-94プロジェクトによって、SKIは、PA手法、実際のサイトデータのPAへの取り込み、および不確実性の取扱いなどに関して、技術的な前進が可能になった。

SITE-94以前には、SKIはサイトデータの取扱いについては何ら経験を有していなかった。また、サイトスペシフィックなデータを本プロジェクトのように詳細かつ広範にわたって使い、複数の異なるモデルや変動解析を用いて不確実性を総合的に扱ったPAは他に存在しなかった。したがって、SKIは‘生の’サイトキャラクタリゼーションデータを解釈し、PA計算に正しく取り込むための加工の方法については全く初めから開発する必要があったのである。SKIがSITE-94から学んだことは、有用な情報とはどういうもので、それをいかに貯え、いかに管理し、いかに示すかということである。

SITE-94で発展したシステムズアプローチ的なPA手法は、PAを構築し管理する統括的手段の提示、シナリオの構築、計算ケースの定義、および情報の管理・記載などを可能にしたことにおいてユニークである。この点から見れば、将来提示される安全評価をレビューするための品質保証について確固たる基礎を築いたといえる。PIDおよびAMFという手法は、将来SKBが評価を行い、提示したその手法や結果をレビューするための有効な道具である。しかし、SITE-94で発展したすべての方法を検証することは可能ではなく、このアプローチが規制面で使われるまでにはさらに検討が必要である。

SKIは、スタッフを教育し、PAの道具類をさらに発展させ、またレビューのための内部手続きを整え

て、PAをレビューする能力を発展させてきた。SITE-94は、おおまかに言えば、SKIがSKBからの正式なPAの提示を受け、それに対する評価を示すために使用される備えである。一方で、SITE-94が研究段階のものであるという性質上、現時点で必要な詳細の多くが欠落している。

PID、関連するデータベースおよび異なる解釈に基づくモデリング（とくに水理の分野における）の経験があるということは、SKIは将来アップデーティングやレビューに集中すればよい、ということである。SITE-94で行った演習の多くは、たとえサイトが異なっても、もう一度繰り返す必要はない。かつてProject-90が終了した際、SKIは、スウェーデンにおける使用済燃料の安全な最終処分は可能であると、それ以前の政府の結論（KBS-3のレビューを受けて）はそのまま有効であると述べた。SITE-94はこの結論を何ら変更するものではない。また、SKIは、KBS-3の処分概念が、SKBが今後の研究開発対象として取り組むべきひとつの現実的な選択肢であることに異を唱えない。ただし、いくつかの重要な不確実性が解決される必要があることを指摘しておく。それは工学バリアの長期的性能、とりわけキャニスターに関する不確実性と、地質圏の変化に関する不確実性である。将来アップデートされた性能評価がなされるならば、その役割は将来の研究開発を指揮し、統合する重要な役割である。選択された処分概念をサイトスペシフィックな諸特性に適合させ、その選択されたサイトに対して、完全に統合されたサイトスペシフィックな性能評価を発展させることによって初めて最終的な検証が可能となる。

SKIがまもなく取り組むことになるレビューというタスクを考えれば、SKIが傾注すべきは、SITE-94で開発された方法論の改良と、重要な不確実性を解決するための研究に向かうことである。

訳者謝辞

翻訳にあたっては、池田孝夫氏（日揮株式会社）、梅木博之氏（核燃料サイクル開発機構）、高須亜紀氏（原子力安全研究協会）および宗像雅広氏（日本原子力研究所）から専門用語についてご教示をいただきました。また木村英雄氏（日本原子力研究所）からは専門用語ならびに内容につきまして貴重なご意見をいただきました。感謝いたします。

目 次

- 図 2.1 SITE-94 のプロセスインフルエンスダイアグラム (PID) の一部。FEP とインフルエンスが示されている。
- 図 2.2 SITE-94 の評価モデルフローチャートの一部。クリアリングハウス、データソース、モデルおよび情報伝達のリンクが示されている。
- 図 2.3 SITE-94 の 4 つの解析レベルにおける不確実性とその伝播。
- 図 3.1 スウェーデン南東海岸の Äspö 島の位置。囲み地図には、SKB の Hard Rock Laboratory のアクセストンネルおよび掘削坑道の地表への投影も示してある。
- 図 4.1 Äspö 地域の地質図と地勢図。
- 図 4.2 SITE-94 において作成された Äspö の 2 次元局所スケール構造地図、およびその 2 次元モデルと地下に関するデータとから作成した 3 次元局所スケールモデル。
- 図 4.3 Äspö の SKI SITE-94、SKB および SKN 構造モデルの比較。
- 図 4.4 構造モデルを基にした SITE-94 の仮想処分場の位置とレイアウト。島との位置関係を示す 3 次元図および深度 500m の平面図。
- 図 4.5 SITE-94 不連続体モデルの $5 \times 5 \times 1$ km 領域。亀裂の傾斜は模式的に描いた。領域の中心に Äspö 島が見える。
- 図 4.6 不連続体モデリングの結果。2 つの垂直断面とひとつの水平断面 (および仮想処分場周辺の局所的な水平断面) に沿う亀裂帯について水頭を示した。また、亀裂内のダルシー流速を水平面について示した。
- 図 4.7 PA のための統合型不連続体モデルの模式図。キャニスター埋設孔スケールの亀裂 1 本 1 本を含む不連続亀裂ネットワークが示されている。
- 図 4.8 Äspö のボーリング孔から採取された地下水に対する、塩化物の関数としての酸素-18 および重水素のプロット。記号は SITE-94 で見つけられた異なるタイプの地下水を表わす (さらに詳細は SITE-94 のメインレポート参照のこと)。
- 図 4.9 ファーフィールド規模の岩石力学モデル。SITE-94 の構造モデルの簡略版に基づいて 23 の亀裂帯が含まれている。外側のブロックは一辺が 4 km の立方体、内側は一辺が 1.5 km の立方体である。

- 図 4.10 不連続亀裂ネットワーク水理モデルからの亀裂分布を用いた、ニアフィールドの 3-DEC 岩石力学モデルの一。
- 図 6.1 SITE-94 の気候変動標準シナリオ。Äspö サイトにおける今後 12 万年間と過去 2 万年間の推測を示したもの。約 5000 年以降、サイトが今日と似た状態にあるのは (およそ 8 万年後の) ほんの短い期間であり、それ以外は永久凍土、氷河または水によって覆われることがわかる。
- 図 7.1 標準シナリオの期間における Äspö の永久凍土厚さの予測値。氷床の性質および処分場からの加熱効果の有無に対していくつかのモデルを考えた。
- 図 7.2 3 次元水理モデルから、影響解析計算へインプットする地下水流および輸送に関するパラメータを抽出する過程。 U_{ff} は流体の速度、 q_{ff} はダルシー流速、 D_{Lff} は流れ方向の分散係数、 a_{ff} は岩体の単位体積当たりの濡れ表面積、 Φ_{ff} は間隙率、下付文字 ff はファーフィールドパラメータであることを示す。
- 図 7.3 いくつかのモデルによって推定されたファーフィールドの F 比の範囲 (空間的バラツキ)。概略評価ならびに不連続体モデルの 10% 値、メジアン値、90% 値を示した。LO と HI は間隙に関する変動であることを表わし、下の 2 本の線がそれぞれ最低および最高のメジアン F 比を与える変動である。
- 図 7.4 不連続体モデルのすべての変動に対する F 比およびペクレ数の全不確実性の予測値。各点は個々のキャニスターからの放出に対する計算結果。
- 図 8.1 簡単な水理評価モデル、不連続体モデル (DF) および確率論的連続体モデル (SC) から得られたニアフィールドにおけるダルシー流速の範囲 (空間的バラツキ)。図中の点は、10% 値、メジアン、90% 値である。2 つの詳細モデルそれぞれに対して、最大・最小メジアンを与える場合とともに基本ケースを示してある。
- 図 9.1 ニアフィールド影響解析コード CALIBRE でモデル化したニアフィールド要素の模式図。
- 図 9.2 ファーフィールドからの最大放出率の F 比およびペクレ数への依存性。 F 比が支配的因子であることは明らかである。
- 図 11.1 ニアフィールドからのフラックス。レファレンスケースのニアフィールドゼロ変動ケースに対する計算値。
- 図 11.2 ニアフィールドからの放出率の潜在的な中間線量。レファレンスケースのニアフィールドゼロ変動ケースに対する計算値。

- 図 11.3 レファレンスケースのニアフィールドゼロ変動ケースにおいて、キャニスター破損後の 3 種類の時点での 4N アクチナイド元素、 ^{129}I および ^{99}Tc の物質収支 (モル数、初期インベントリで規格化)。それぞれの時点における各領域での存在量を影をつけて区別した。
- 図 11.4 レファレンスケースにおけるニアフィールドからの合計 IDP のピーク値とその発現時間。主要な放射性核種をそれぞれの点の横に示した。詳細は本文参照。
- 図 11.5 レファレンスケースの統合型ゼロ変動ケースにおけるファーフィールドからのフラックス。崩壊系列中の核種のフラックスはキャニスター当たり $<10^2$ Bq/year である。
- 図 11.6 レファレンスケースの統合型ゼロ変動ケースに対するファーフィールドからの放出を線量率に変換した結果。
- 図 11.7 レファレンスケースにおけるファーフィールドからの合計線量率のピーク値とその発現時間。主要な放射性核種をそれぞれの点の横に示した。詳細は本文参照。
- 図 11.8 100 万年までの最大 (ピーク値の合計) 線量率を F 比およびペクレ数の関数として表わした。ここでも F 比が支配的因子であることは明らかである。
- 図 11.9 ニアフィールドからの放出に対する潜在的中間線量の値。標準シナリオのひとつに対して算出されたもので、最初の氷期の影響にだけ着目した。一部分の放射性核種についての値。

This is a blank page.

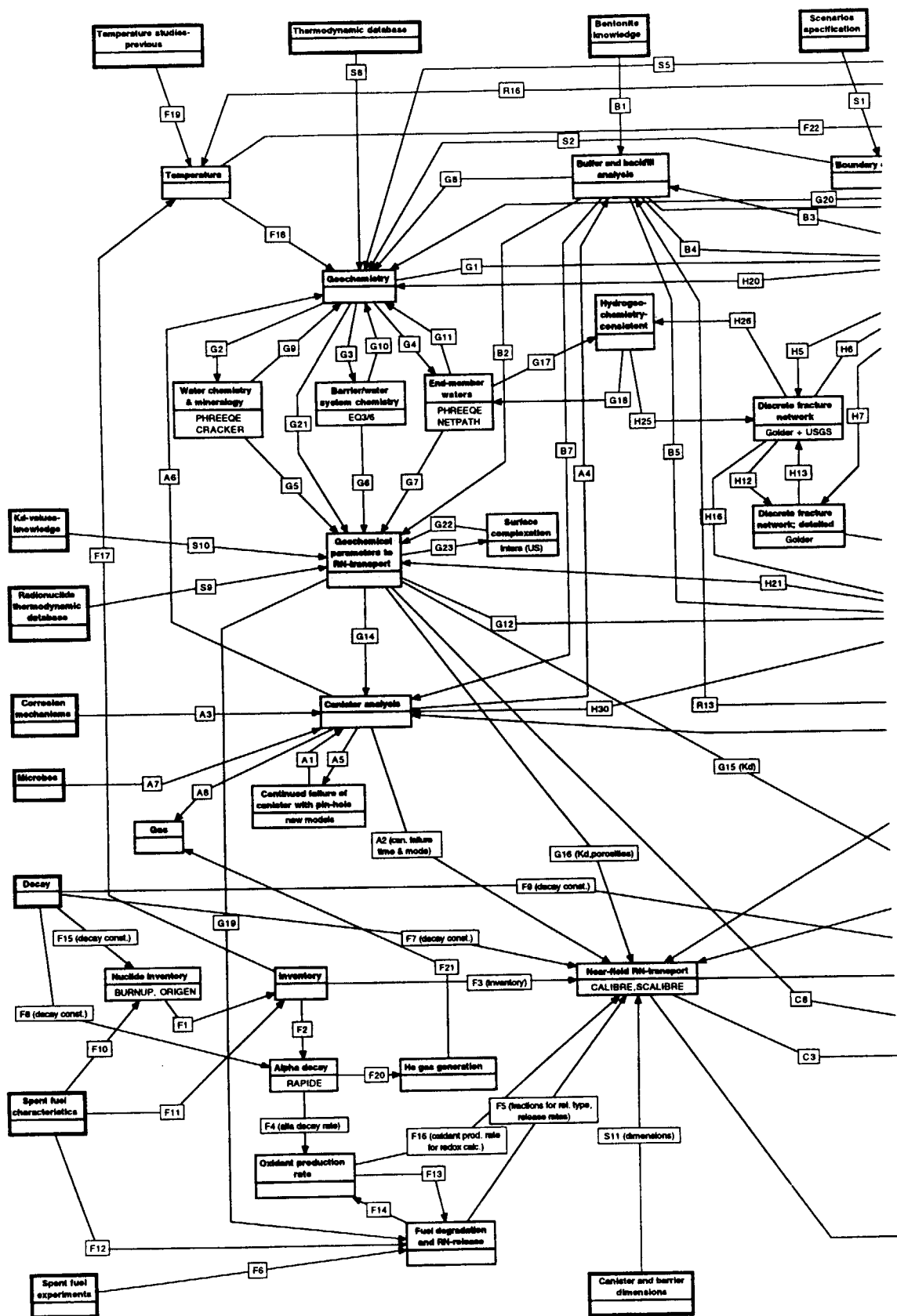
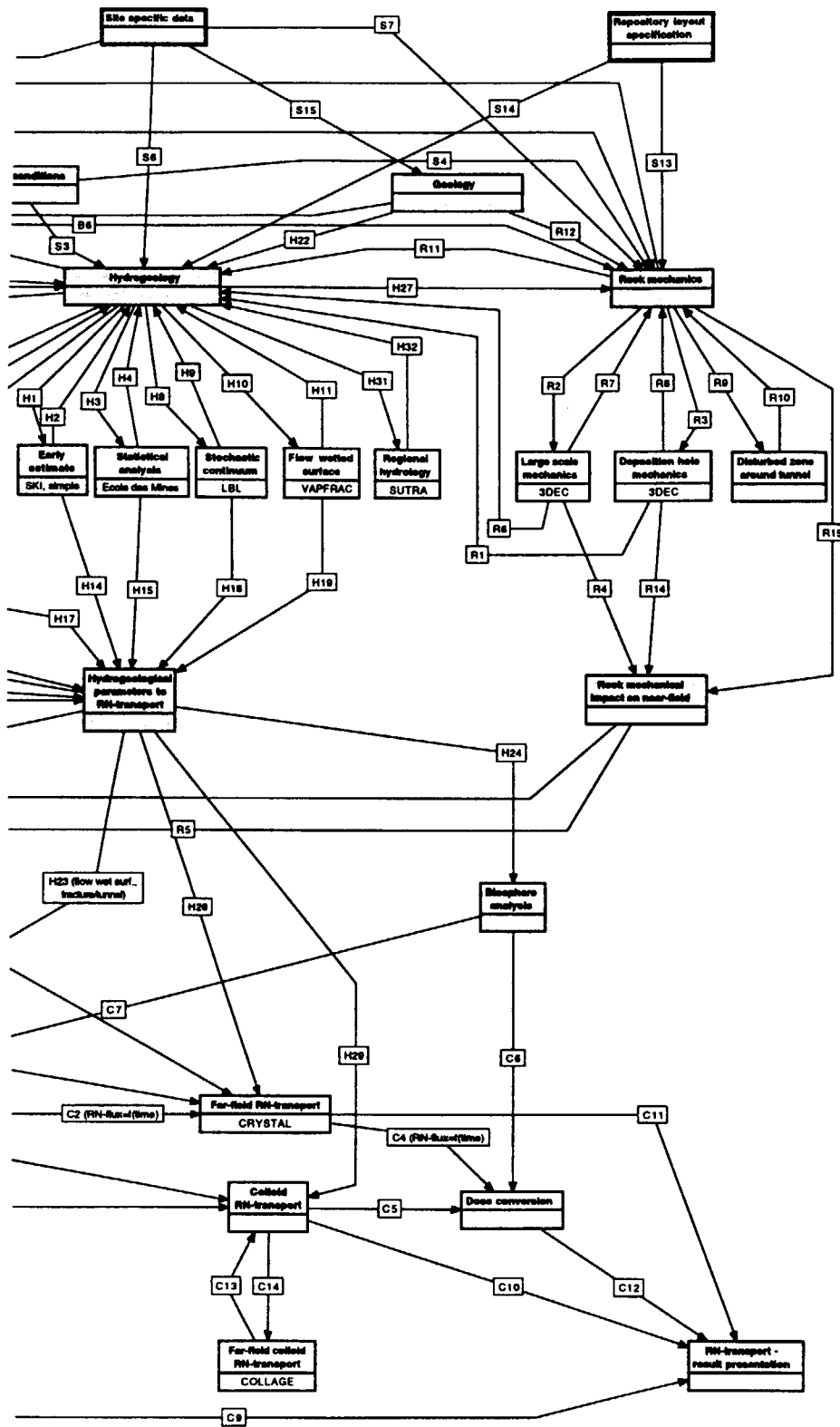


Figure 2.2 A section of the SITE-94 Assessment Model Flowchart, showing Clearing Houses, Data Sources, Models and information transfer links.



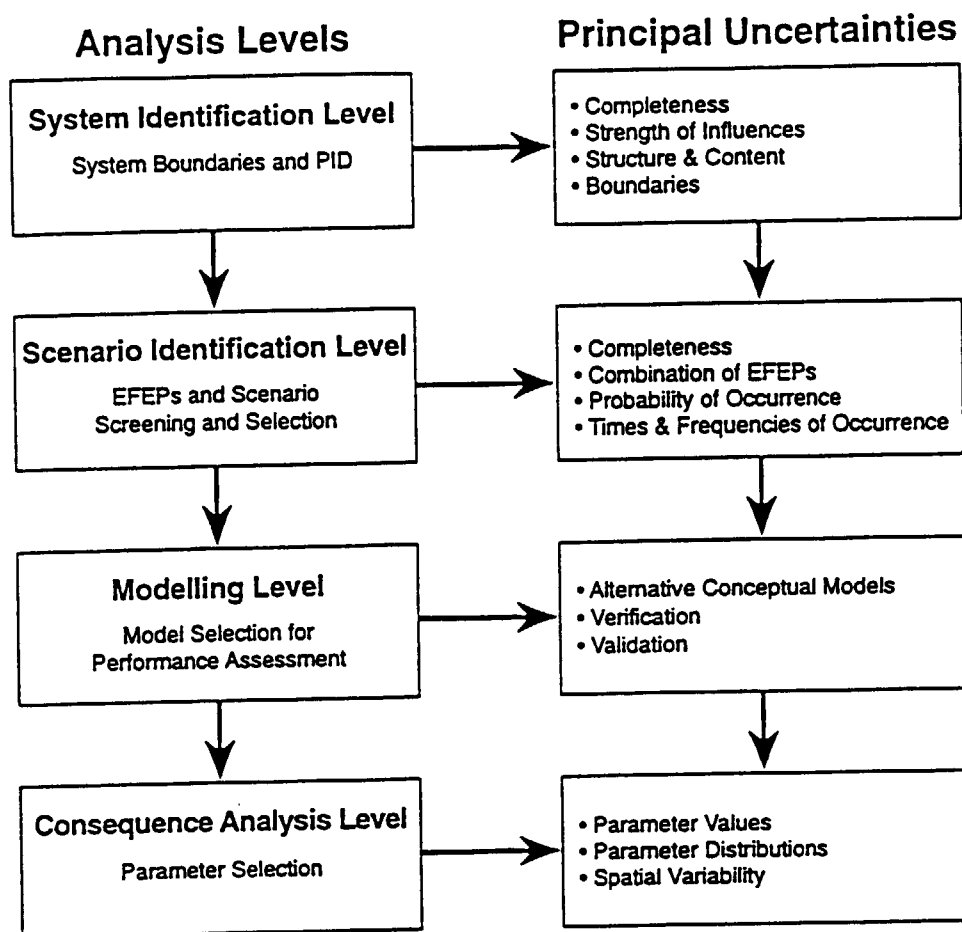


Figure 2.3 Schematic illustration of the identification and propagation of uncertainties through the four analysis levels of SITE-94.

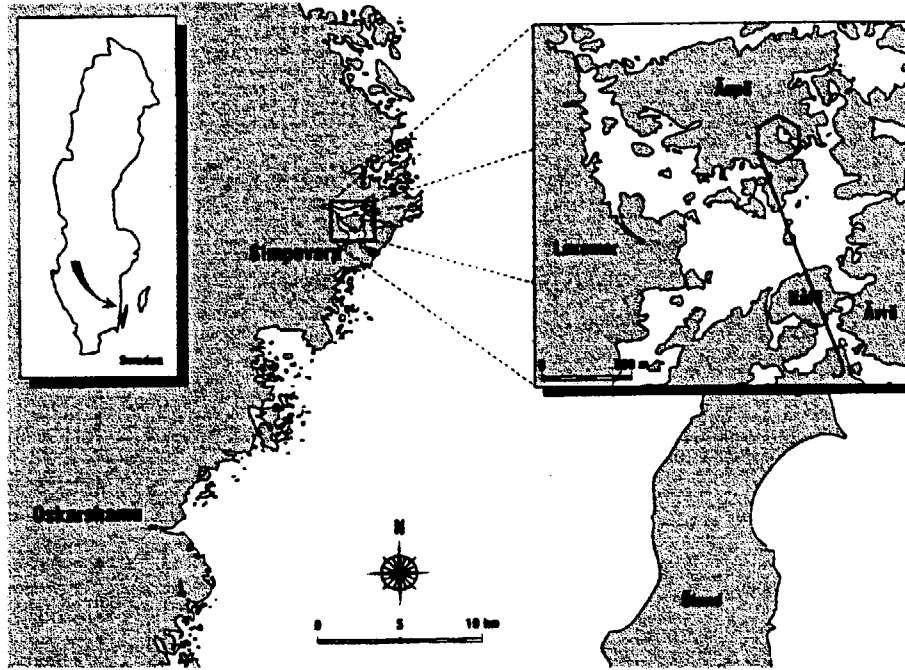


Figure 3.1 The location of Äspö island on the south east coast of Sweden. The inset map also shows a projection to the surface of the access tunnel and excavations for SKB's Hard Rock Laboratory (SKB, 1996).

This is a blank page.

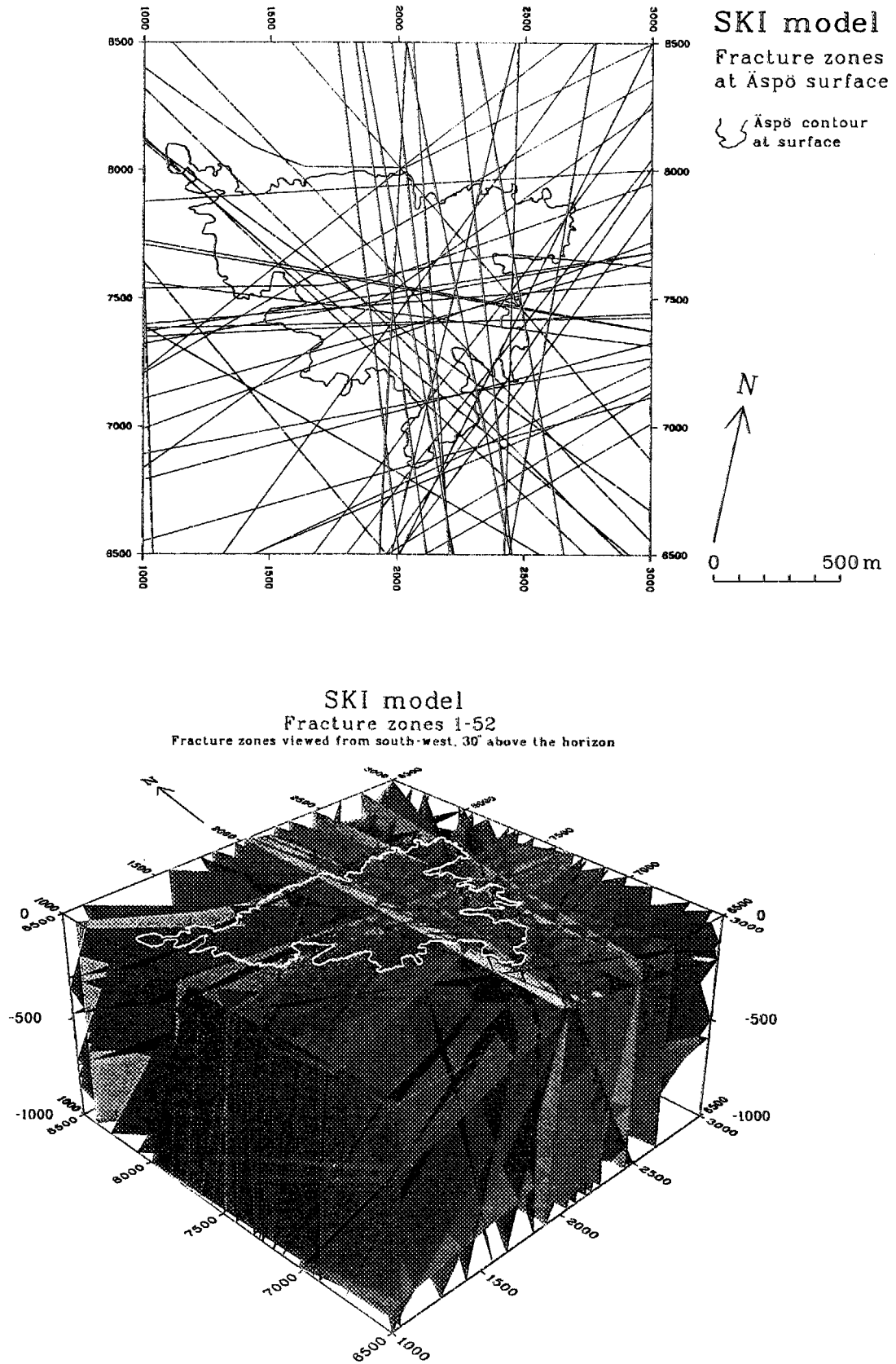


Figure 4.2 The 2D local scale structural map of Äspö produced in SITE-94 and the 3D local scale model developed from it and the various sources of underground data.

This is a blank page.

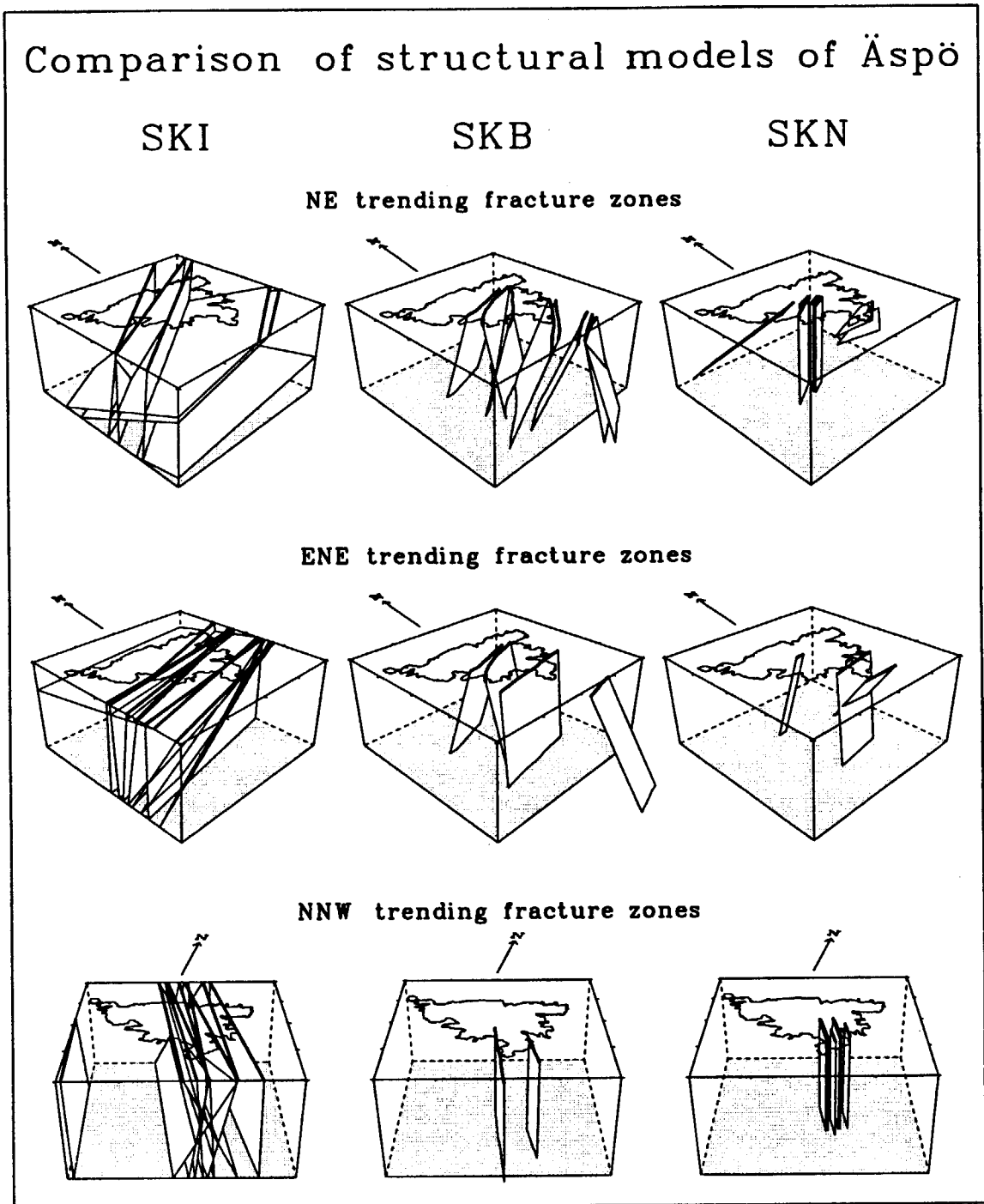


Figure 4.3 Comparison of the SKI SITE-94, SKB and SKN structural models of Äspö.

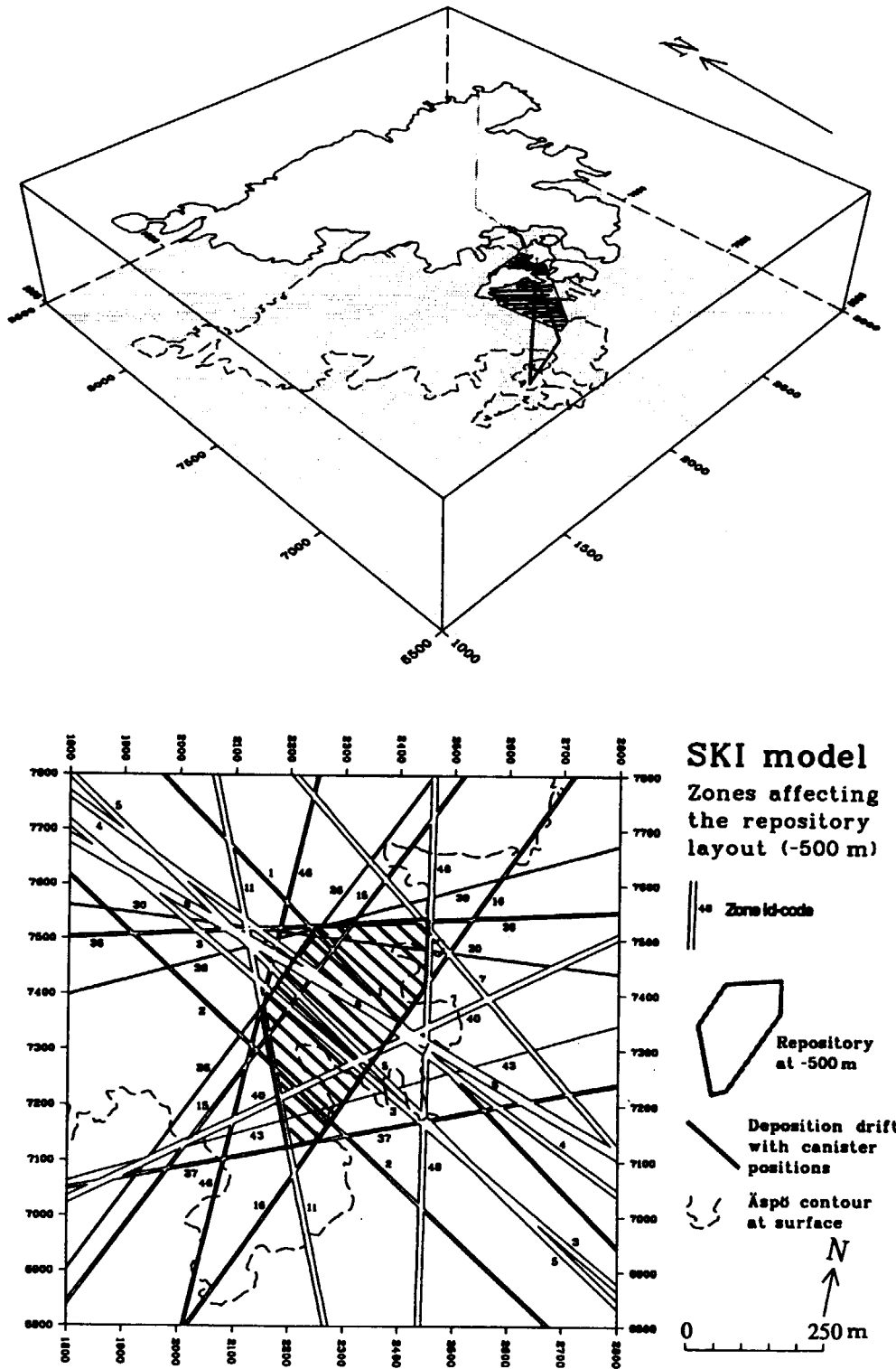


Figure 4.4 Location and layout of the SITE-94 hypothetical repository based on the structural model, showing a 3D view of the location with respect to the island and the plan at the -500m level.

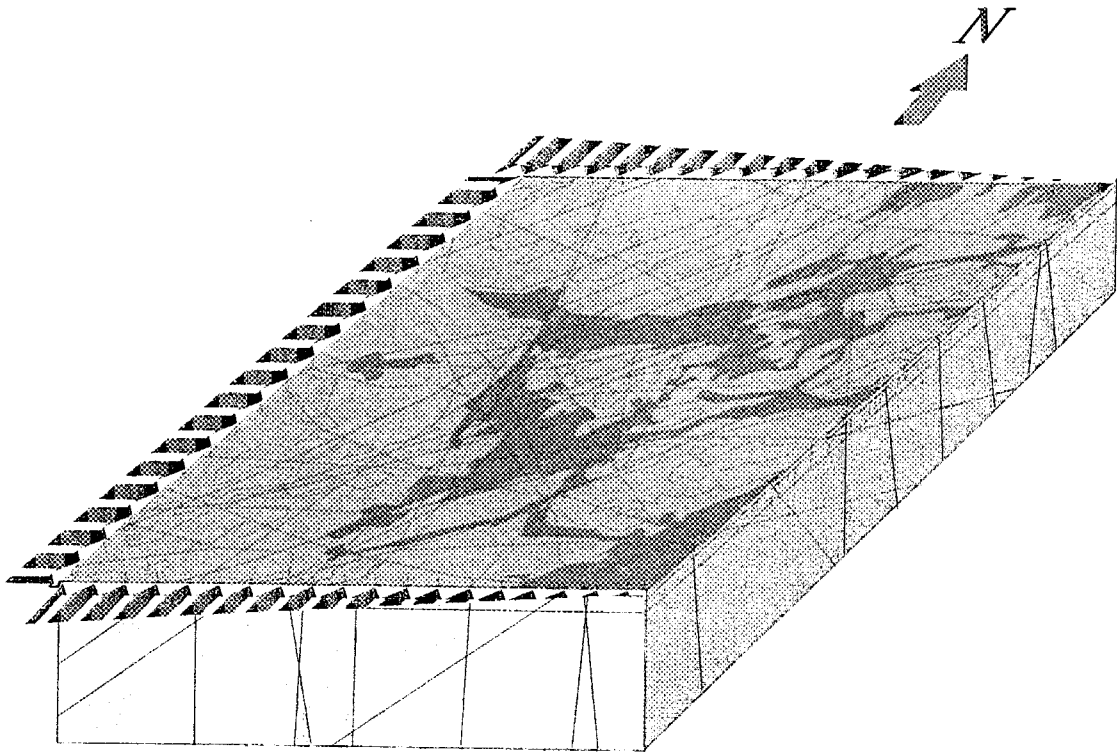
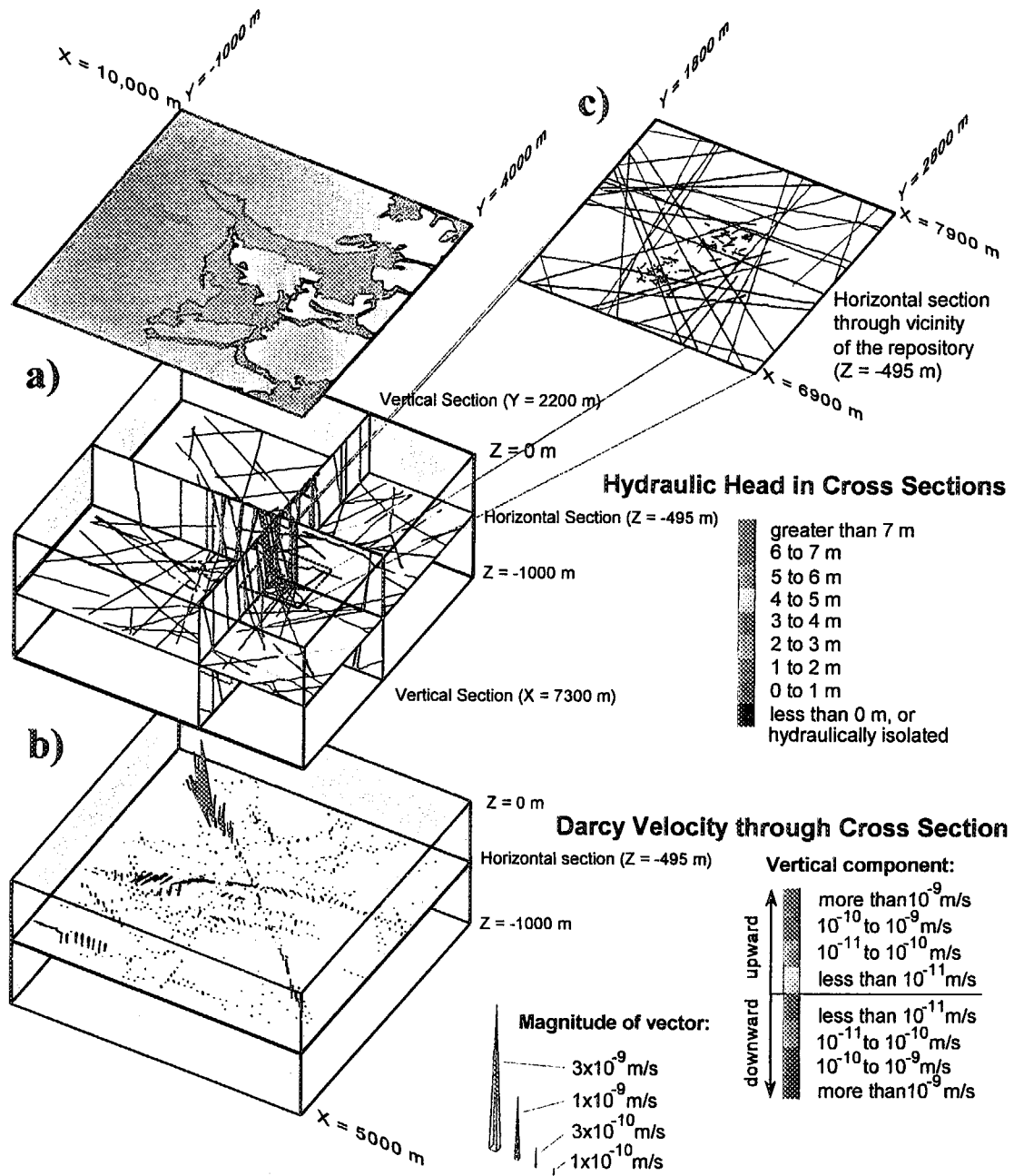


Figure 4.5 Domain of the SITE-94 Discrete Feature model in a $5 \times 5 \times 1$ km block. The dips of the fracture zones are schematic. The island of Äspö can be seen at the centre of the domain.

This is a blank page.



DWG0161

Figure 4.6 Results of the Discrete Feature modelling, showing hydraulic heads in fracture zones along two vertical and one horizontal cross sections (and a local horizontal section around the hypothetical repository zone), together with Darcy velocities within fractures in the plane of the horizontal section.

This is a blank page.

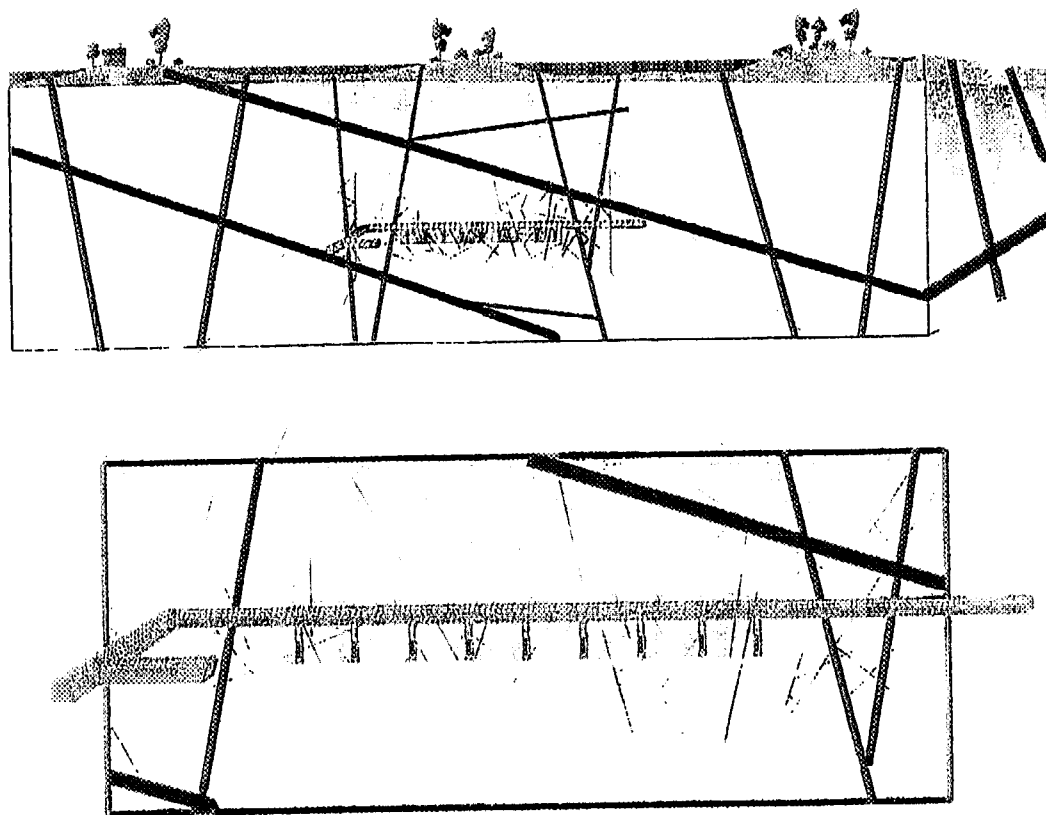


Figure 4.7 Schematic illustration of the integrated Discrete Feature model used for PA purposes, with a nested Discrete Fracture Network model of individual fractures at the canister deposition hole scale.

This is a blank page.

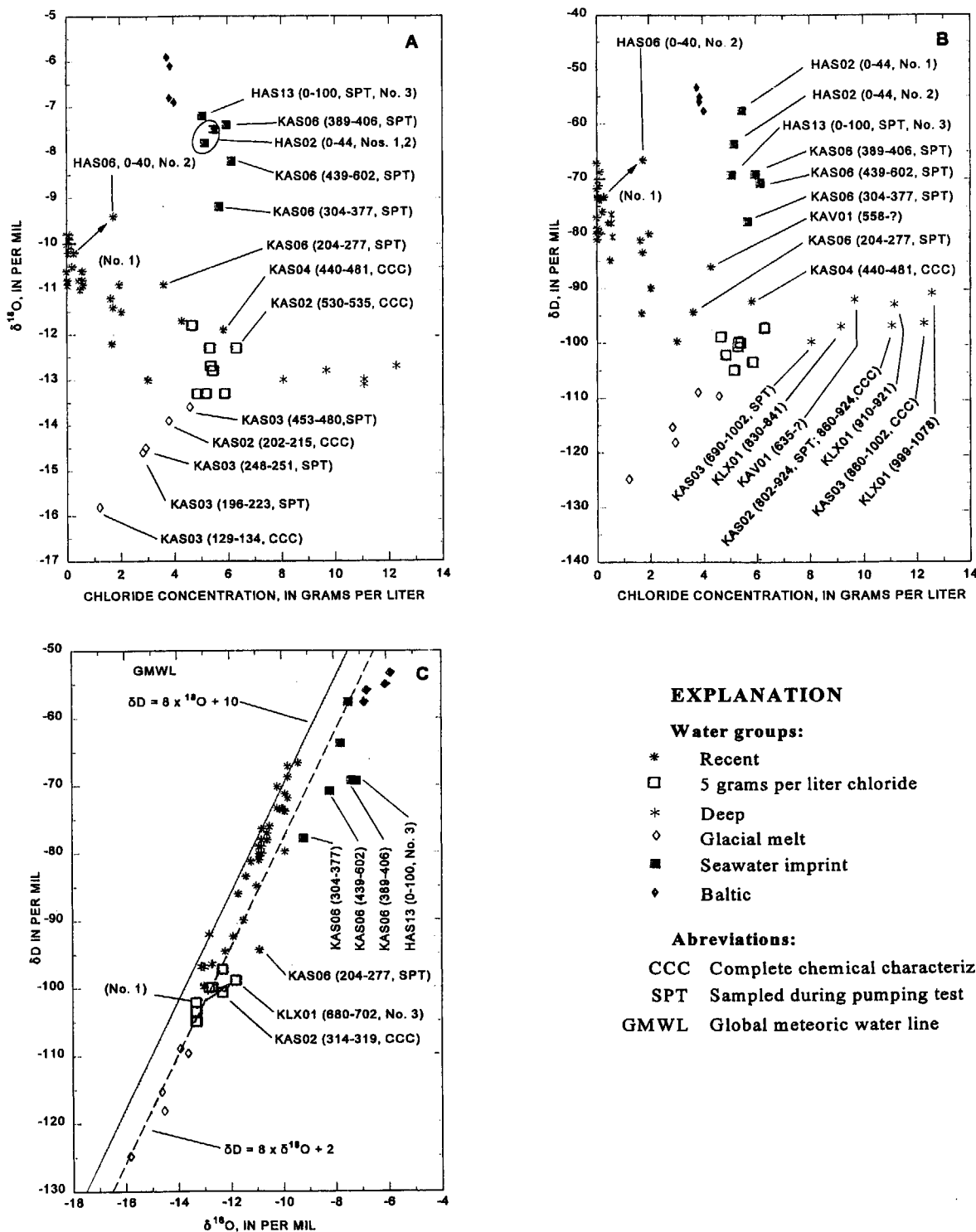


Figure 4.8 Plots of oxygen-18 and deuterium as function of chloride for groundwater samples from boreholes at Äspö. The markers indicate the different groundwater types identified in SITE-94 (for further details see SITE-94 main report).

This is a blank page.

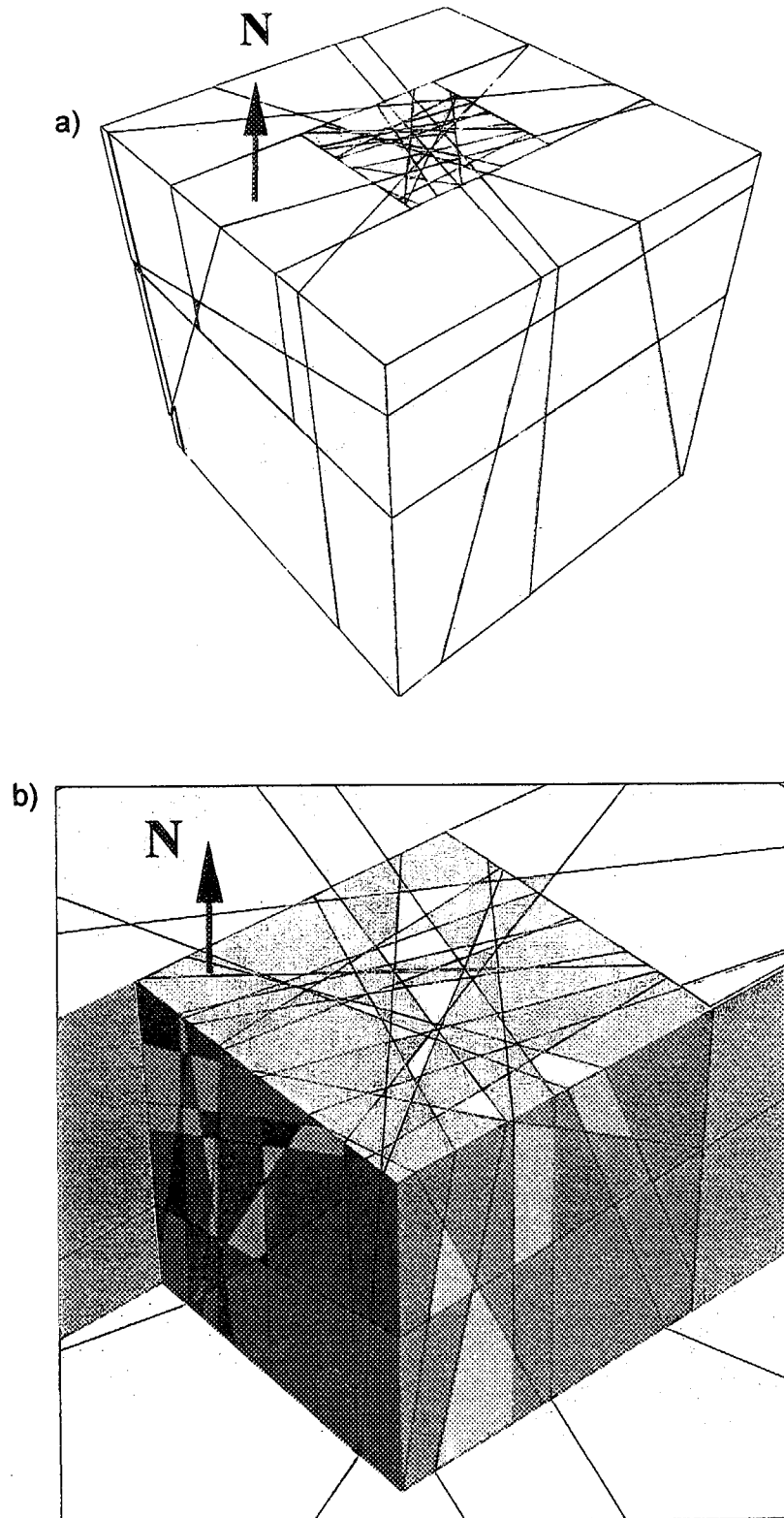


Figure 4.9 The far-field scale rock mechanical model based on a reduced version of the SITE-94 structural model, showing the 23 fracture zones included. The outer block is a 4 km cube and the inner block is a 1.5 km cube.

This is a blank page.

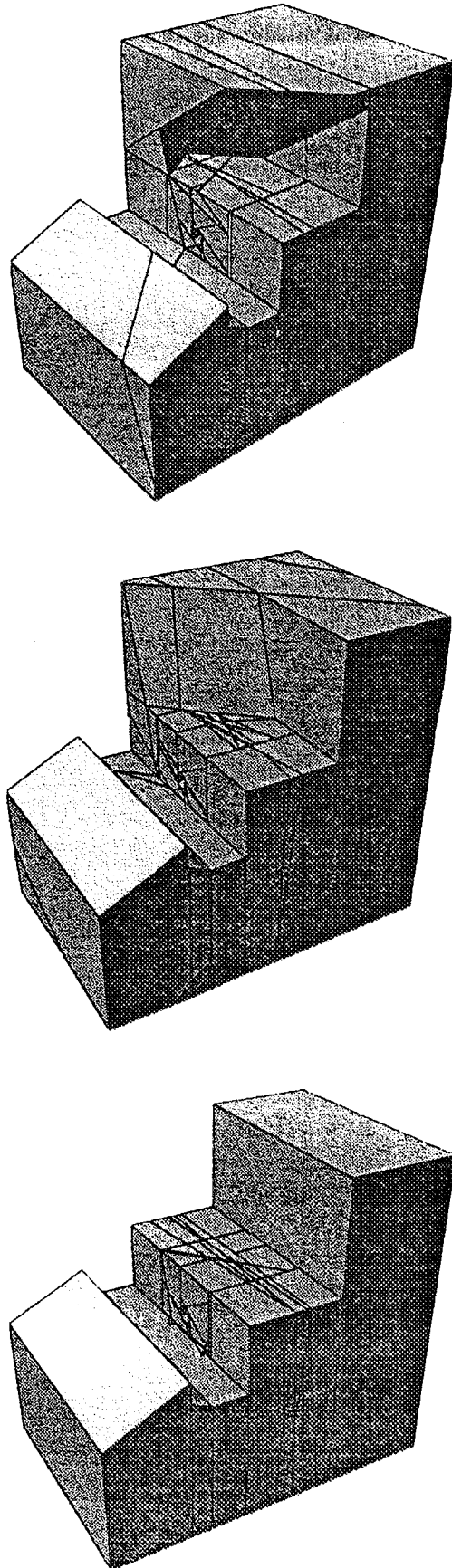


Figure 4.10 One of the 3-DEC rock mechanical models of the near-field which uses the fracture distribution from the Discrete Fracture Network hydrogeological model.

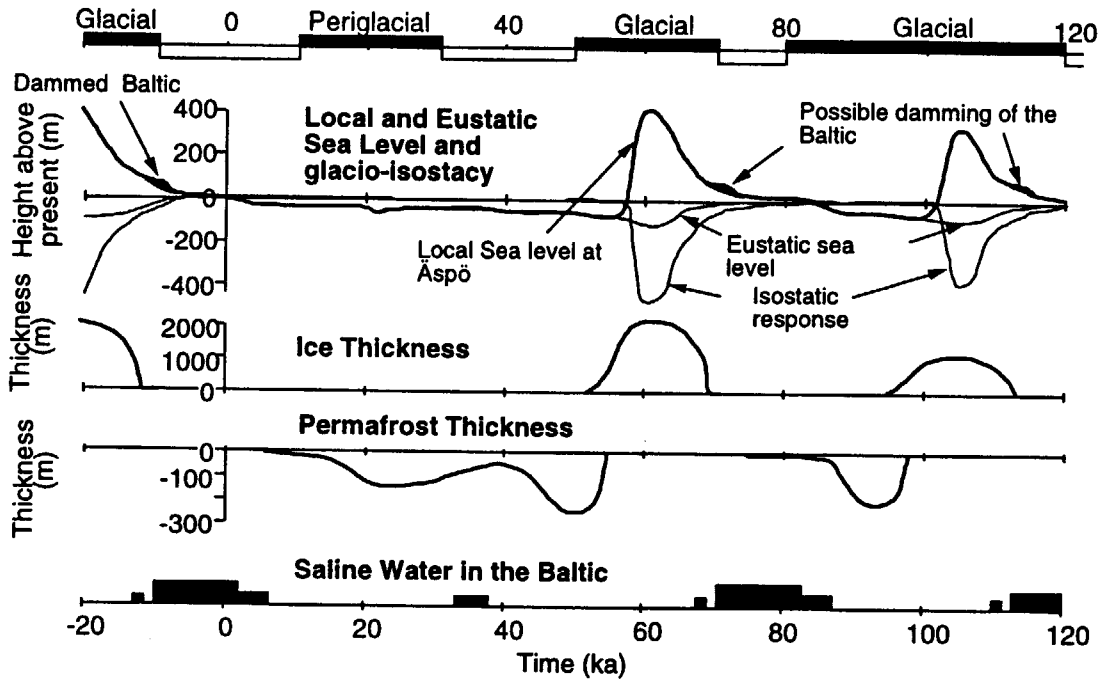


Figure 6.1 The SITE-94 climate change Central Scenario, illustrating projected conditions at the Åspö site over the next 120 ka and the last 20 ka. It can be seen that, after about 5000 years, there is only a short period (around 80 ka into future) when the site might have conditions similar to those of the present day, otherwise it is affected by permafrost, ice, or water cover.

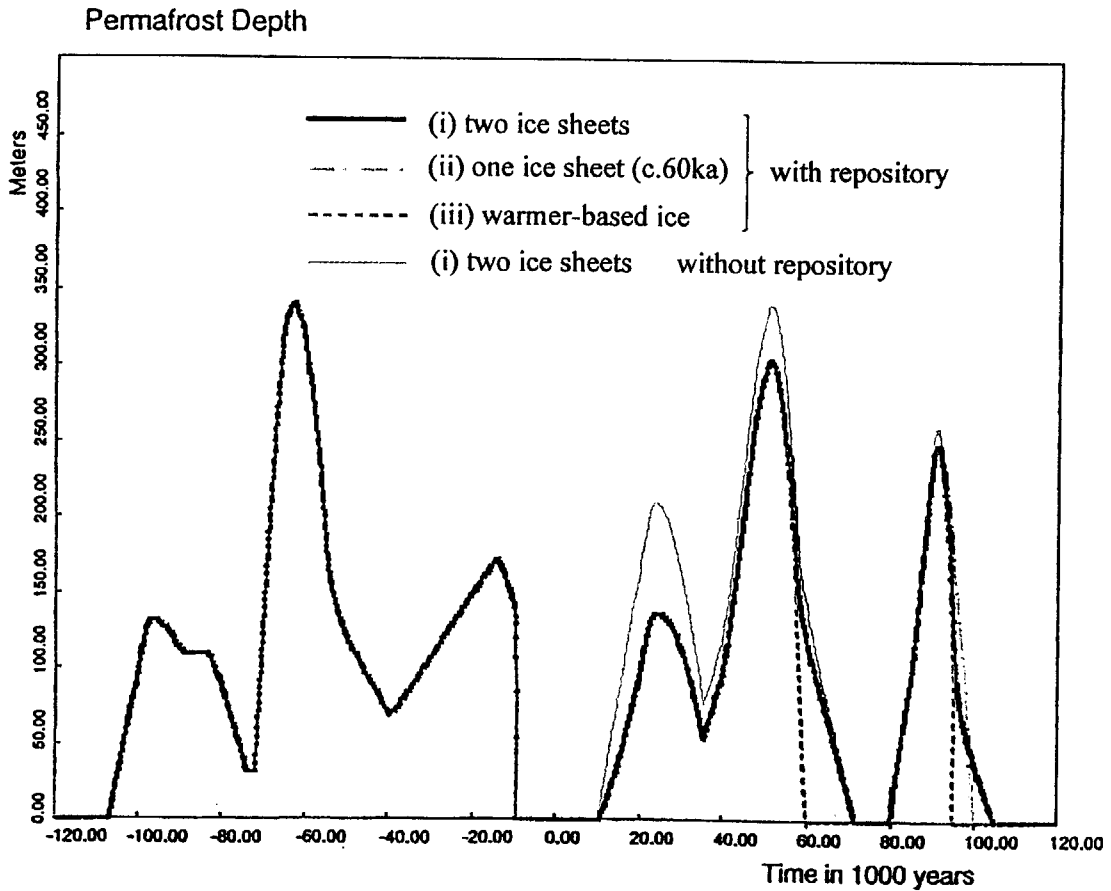


Figure 7.1 Calculated permafrost thicknesses at Äspö for the duration of the Central Scenario, for different models of ice sheet properties and with or without the heating effect of the repository.

This is a blank page.

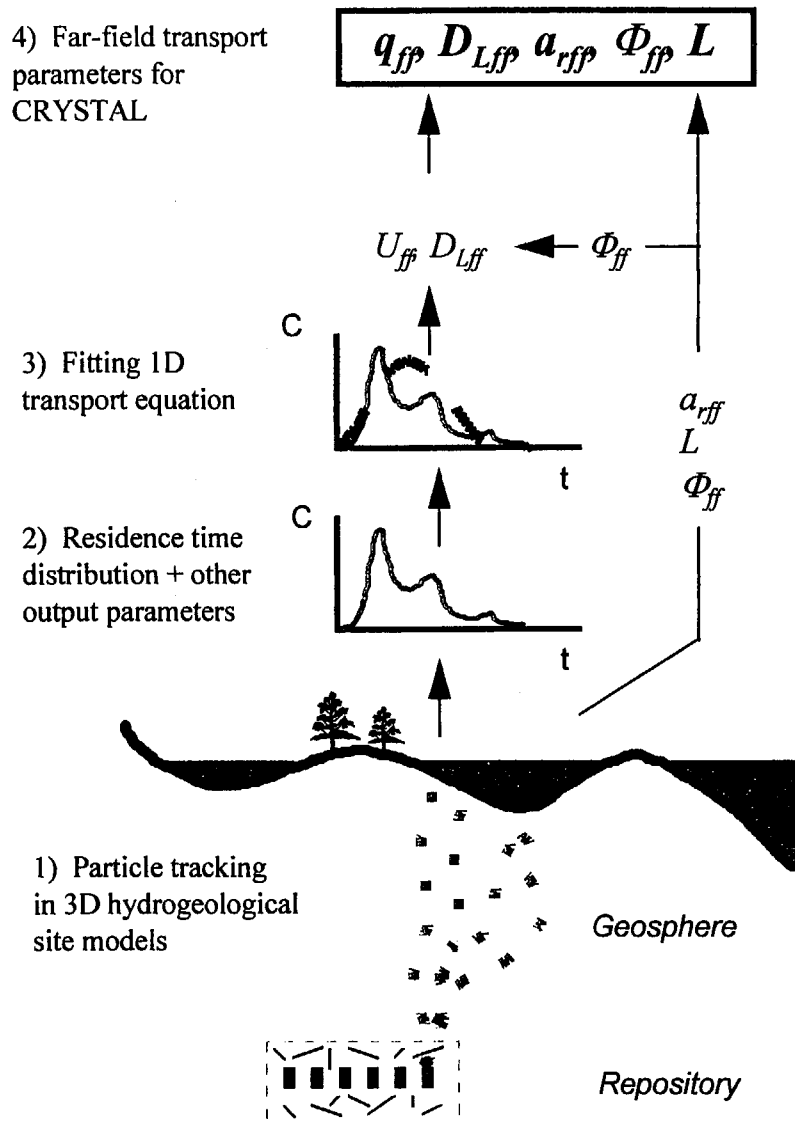


Figure 7.2 Steps in the procedure for abstracting effective flow and transport properties from the 3D hydrogeological site models, for input to the consequence analysis calculations. U_{ff} is the fluid velocity, q_{ff} the Darcy velocity, D_{Lff} the longitudinal dispersion coefficient, a_{rff} the flow wetted surface area per volume of rock, Φ_{ff} the porosity and the subscript ff indicates a far-field parameter.

This is a blank page.

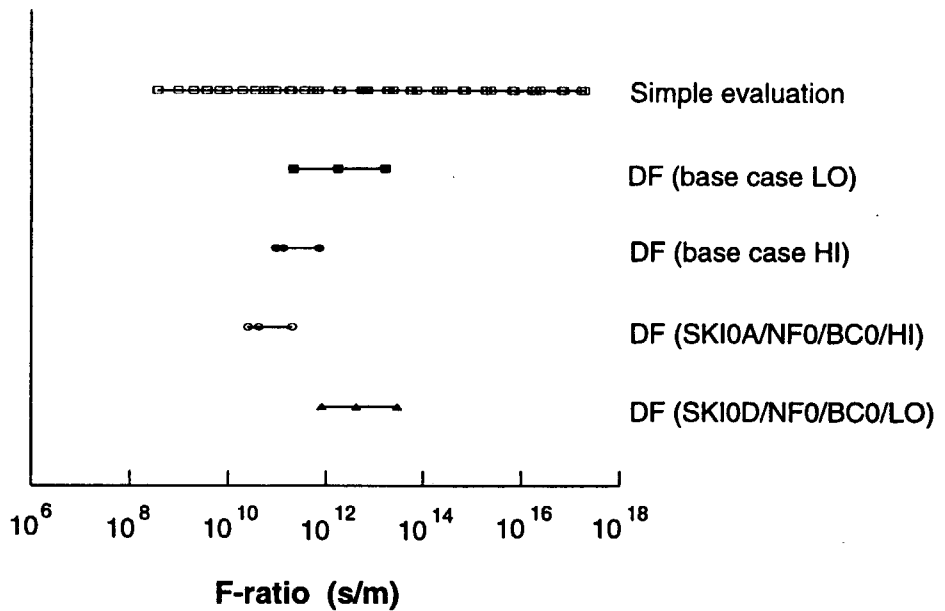


Figure 7.3 Different ranges of far-field F-ratio (spatial variability) estimated by the different hydrogeological models; the simple evaluation and the 10th, median and 90th percentile of the Discrete Feature (DF) model. LO and HI are porosity variants and the two lower lines are variants which gave the lowest and highest median F-ratio.

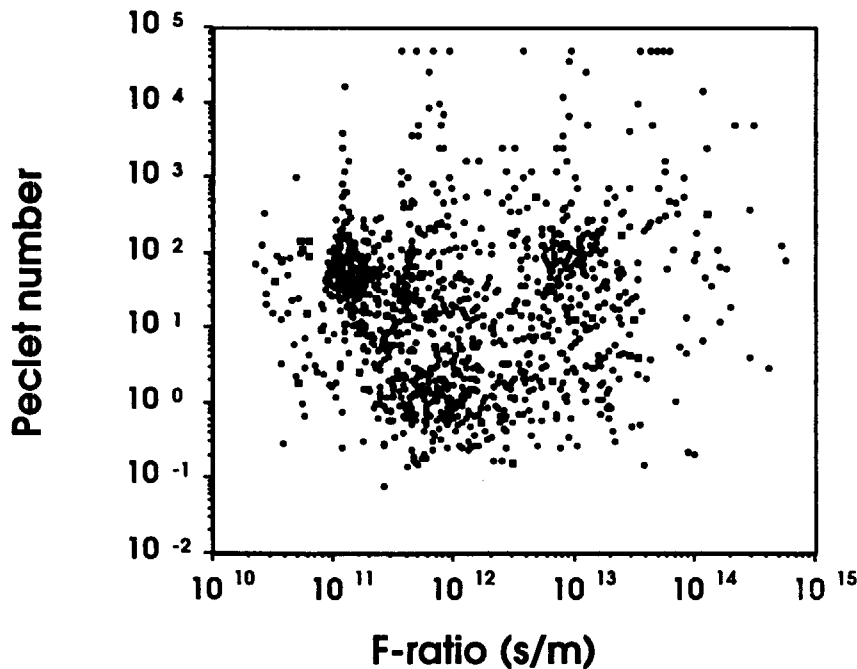


Figure 7.4 The total prediction uncertainty in F-ratio and Peclet number for all the Discrete Feature model variants. Each point represents the result from a single canister release point calculation.

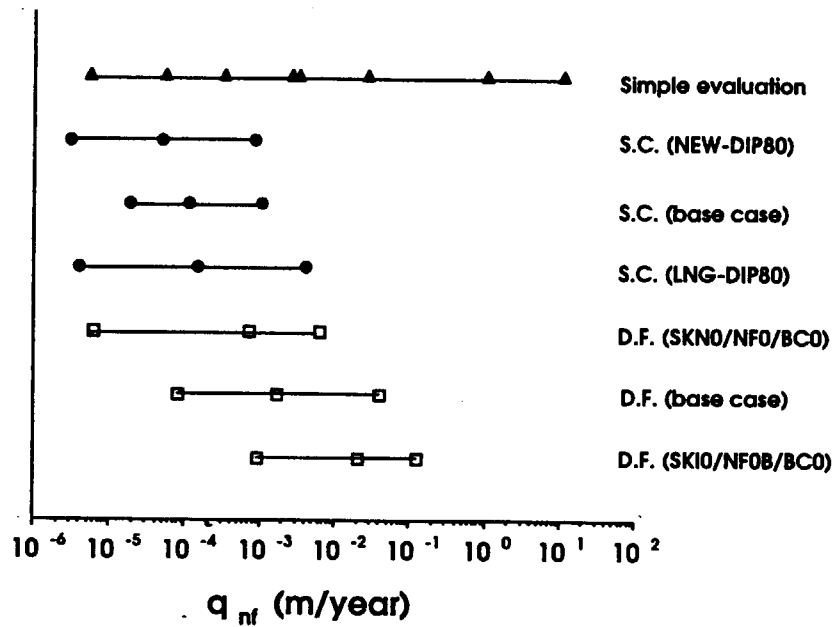


Figure 8.1 Estimated range (spatial variability) in near-field Darcy velocity for the simple hydrogeological evaluation model and for the Discrete Feature (DF) and Stochastic Continuum (SC) models. The points are the 10th, median and 90th percentiles. The Base Case for each of the two detailed models is shown, together with the variants which gave the highest and lowest median values.

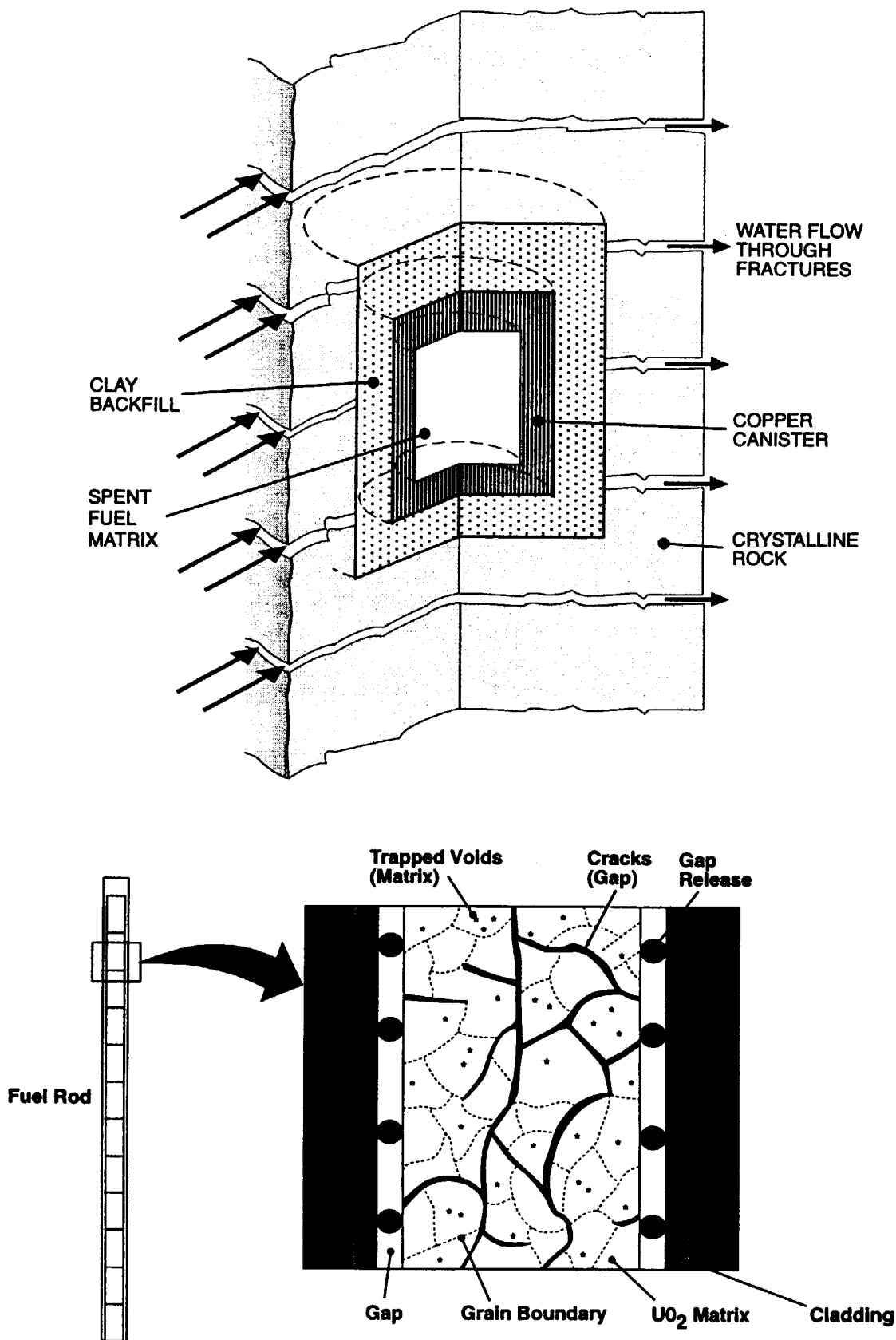


Figure 9.1 Schematic illustration of the components modelled by the CALIBRE near-field consequence analysis code.

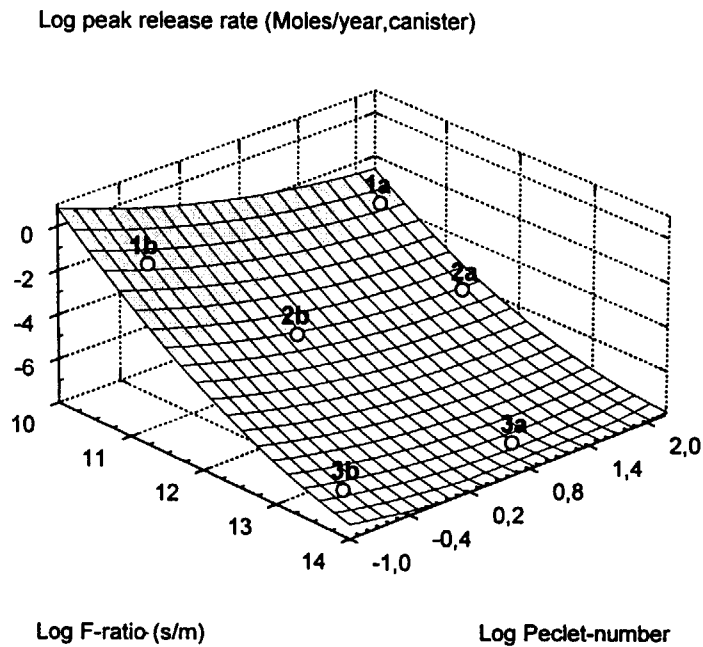


Figure 9.2 Dependence of peak release rate from the far-field on F-ratio and Peclet number. The dominant effect of the F-ratio is clear.

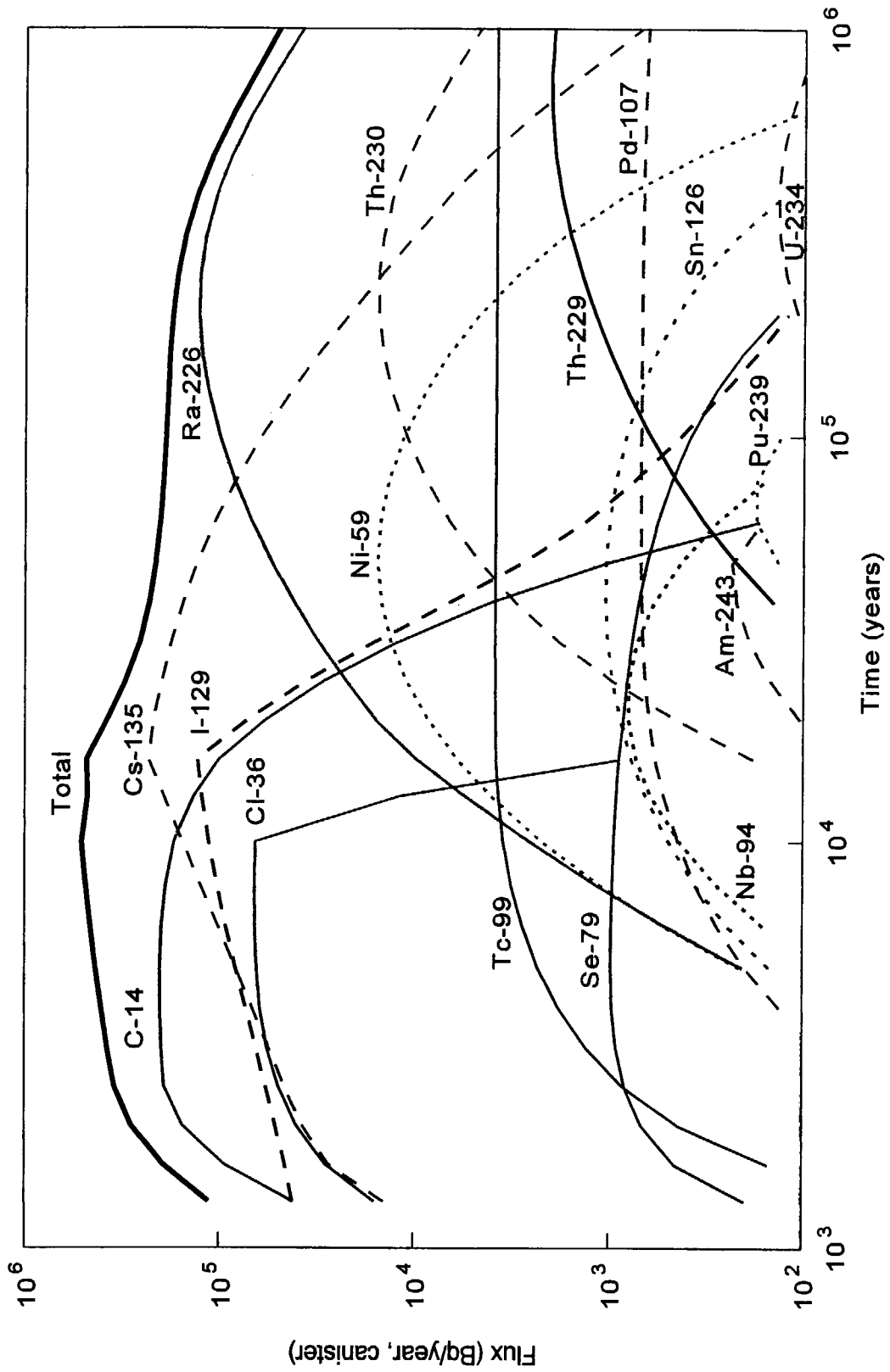


Figure 11.1 Flux from the near-field for the near field zero variant case of the Reference Case.

This is a blank page.

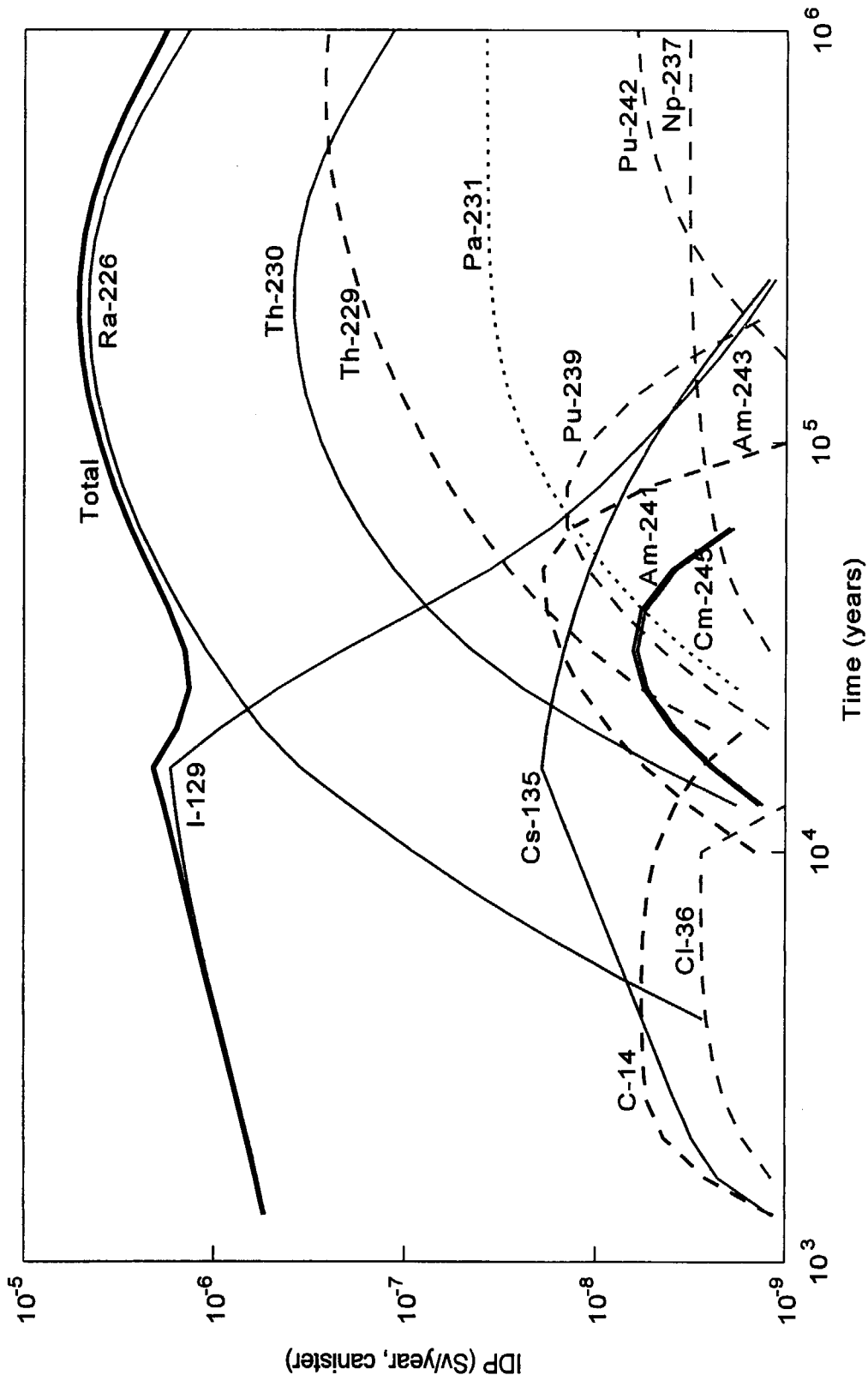


Figure 11.2 Intermediate Dose Potentials for releases from the near-field Zero Variant Case of the Reference Case.

This is a blank page.

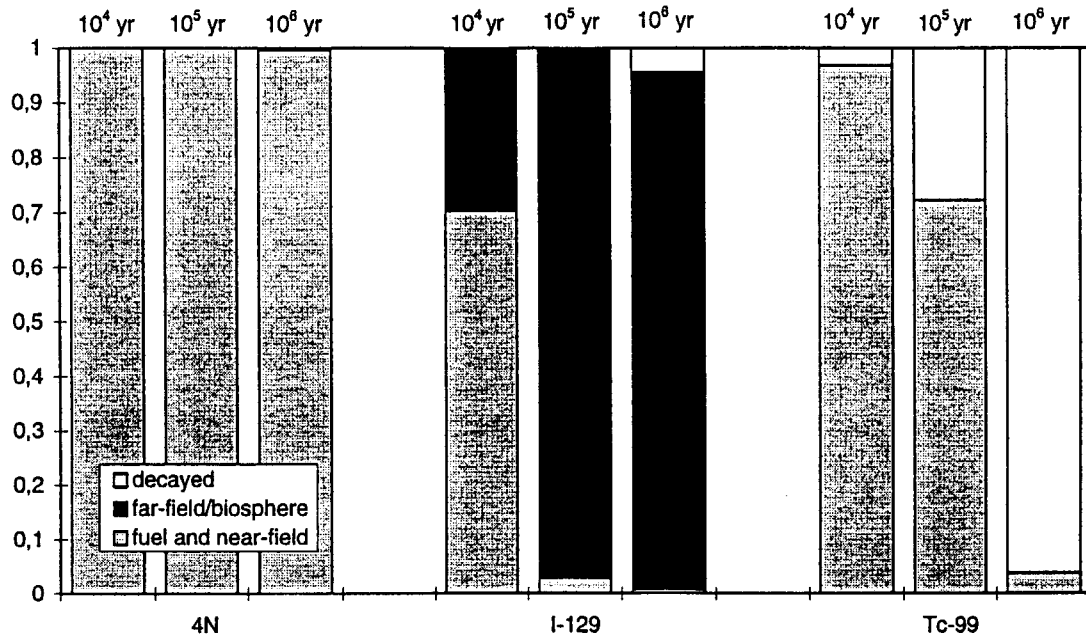


Figure 11.3 Mass balance (moles, normalised to initial inventory) at three times after canister failure for the 4N actinide chain, ¹²⁹I and ⁹⁹Tc for the Zero Variant Case for the Reference Case. The shading indicates amounts present in different regions at each time.

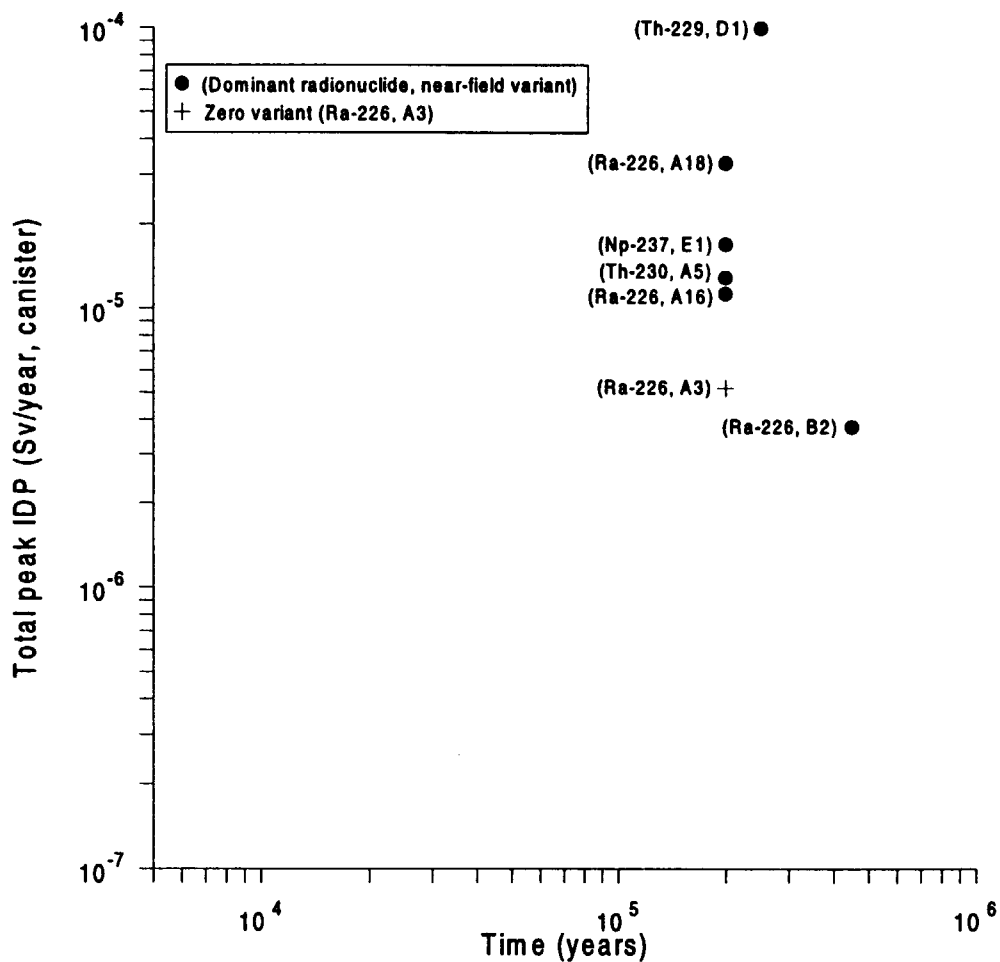


Figure 11.4 Total peak IDPs from the near-field for the Reference Case and the times at which they occur. The principal radionuclides responsible for the peak are shown by each point. See text for details.

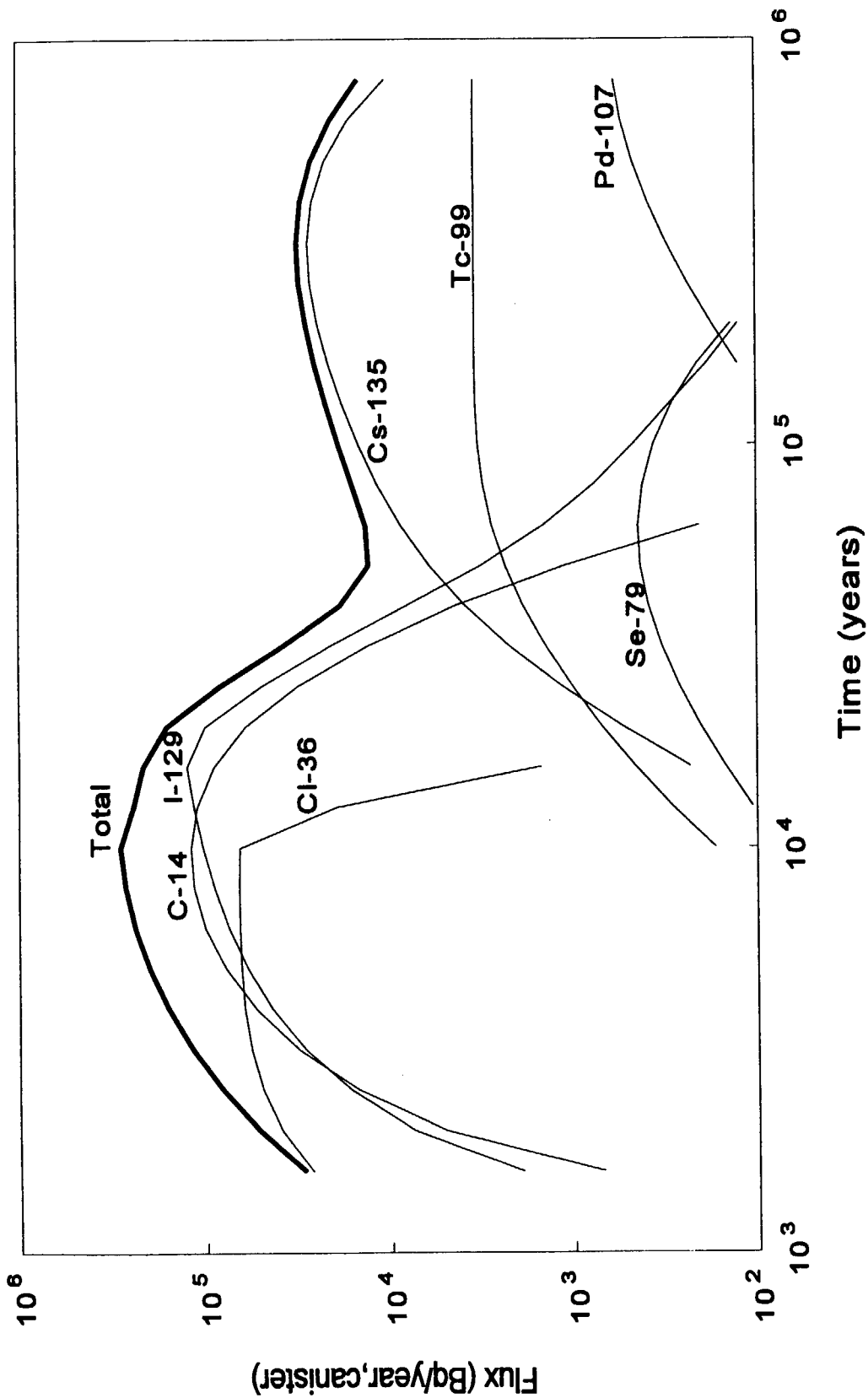


Figure 11.5 Flux from the far-field for the integrated Zero Variant Case for the Reference Case. Note that the decay series nuclides have a flux $< 10^2$ Bq/year, canister.

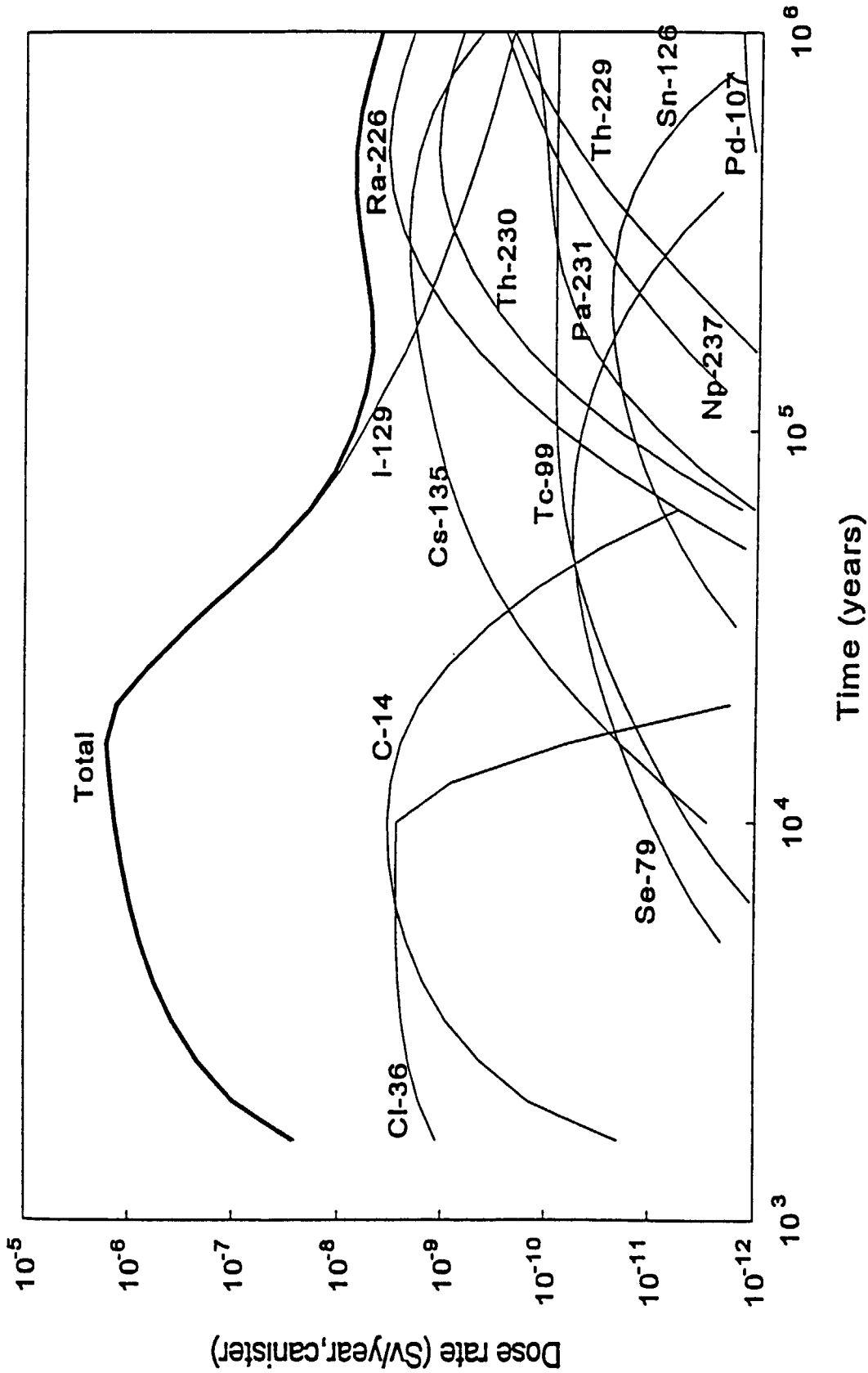


Figure 11.6 Dose rates for releases from the far-field for the integrated Zero Variant Case for the Reference Case.

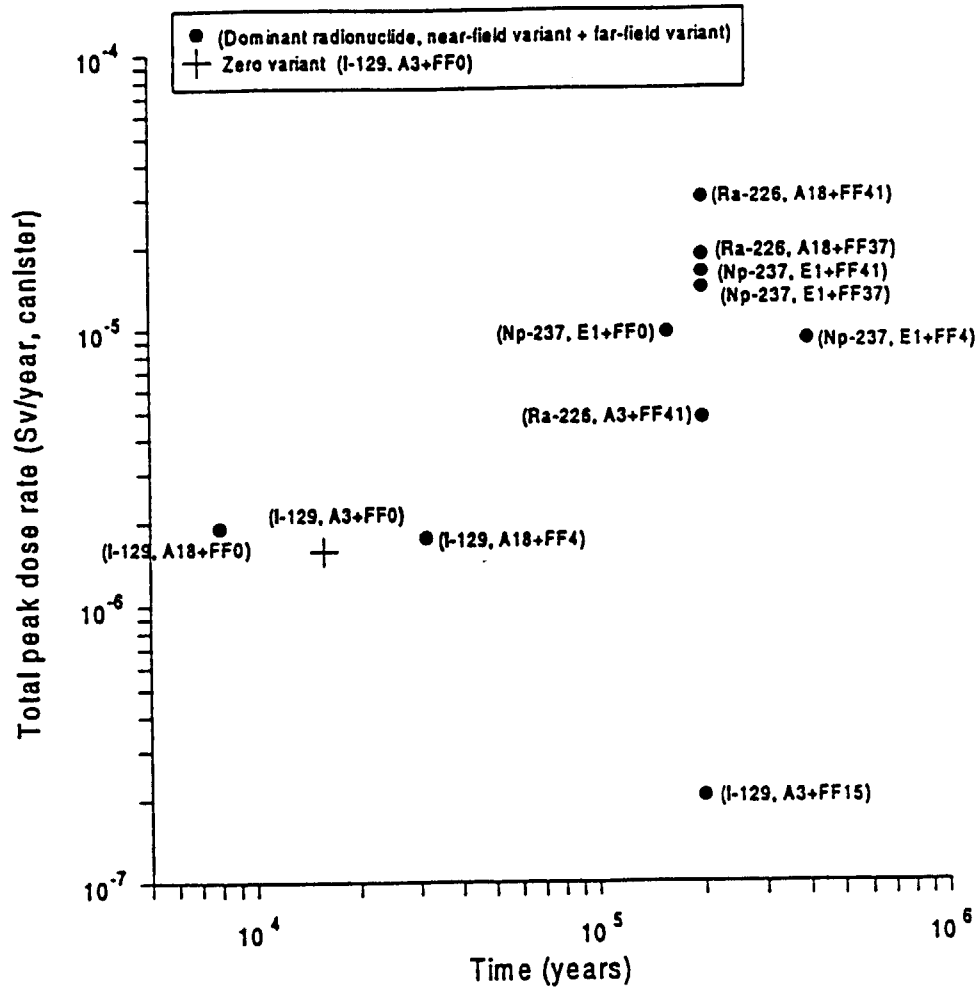


Figure 11.7 Total peak dose rates from the far-field for the Reference Case and the times at which they occur. The principal radionuclides responsible for the peak are shown by each point. See text for details.

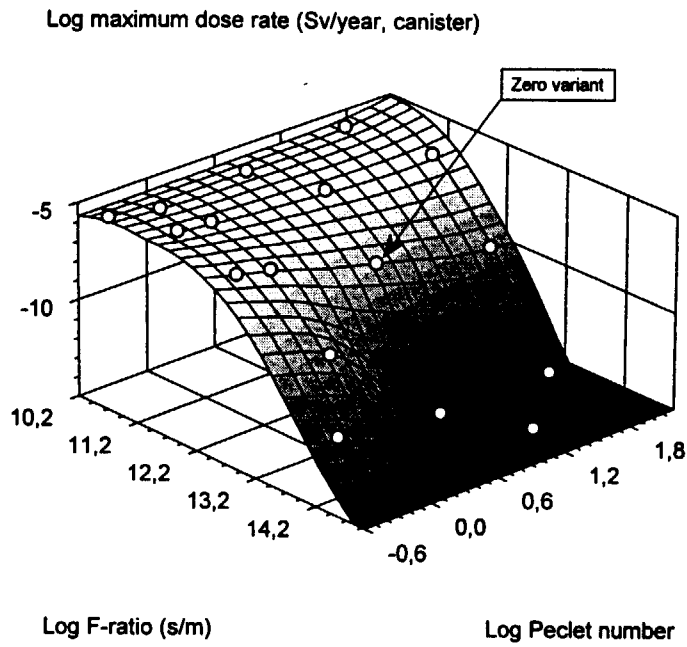


Figure 11.8 Maximum (total peak) dose rates up to 1 Ma as a function of F-ratio and Peclet number; the dominant effect of the former is again evident.

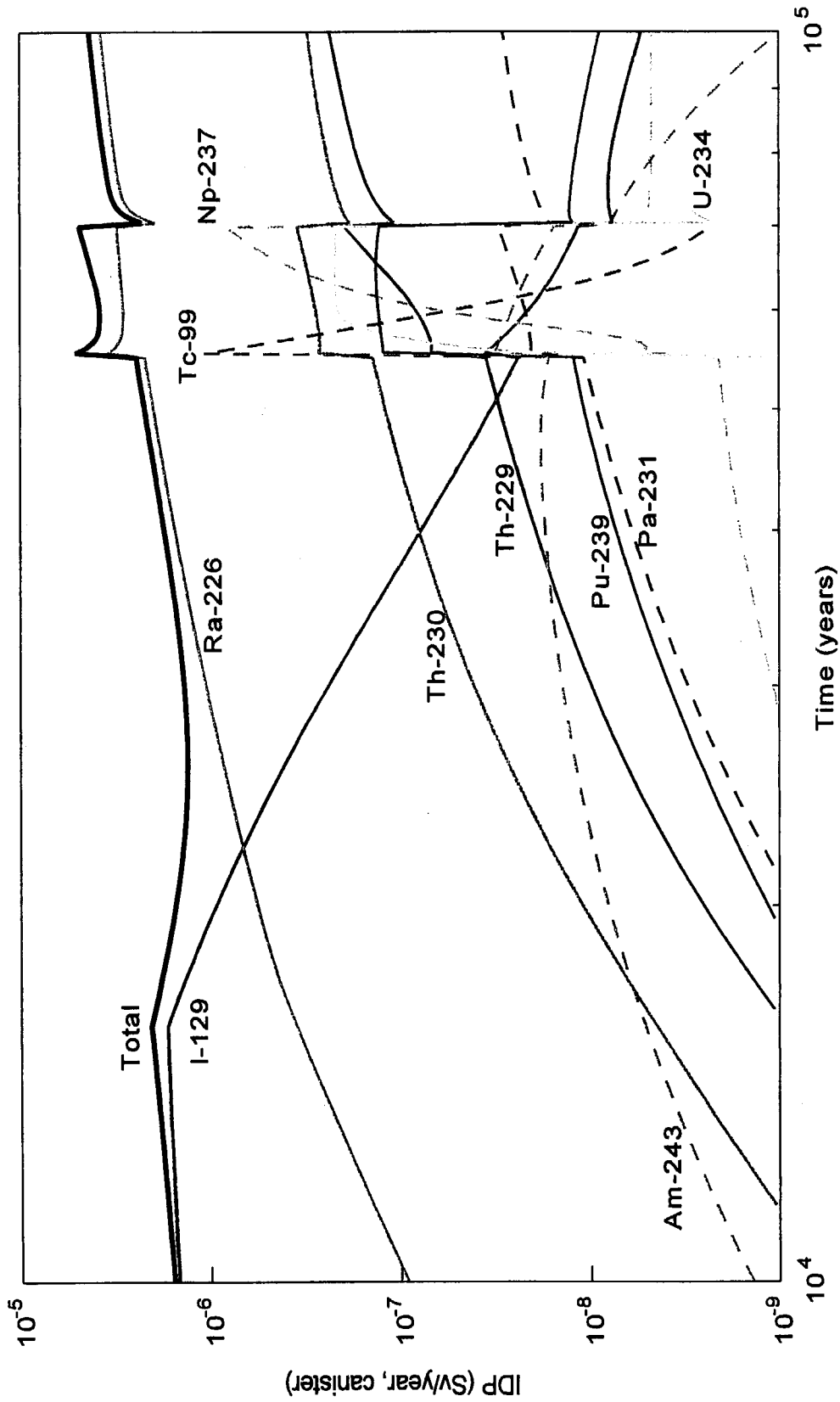


Figure 11.9 Intermediate Dose Potentials for releases from the near-field for one of the Central Scenario cases, based on a subset of radionuclides and focussing on impacts of the first glacial period (see text for details).

This is a blank page.

APPENDIX 1

SITE-94 BACKGROUND REPORTS

SKI Technical Report

- 93:23 Site characterization in fractured crystalline rock, A critical review of geohydraulic measurement methods
Andersson, P., Andersson, J-E., Gustafsson, E., Nordqvist, R., and Voss, C.
- 93:25 Initial two dimensional groundwater flow calculations for SITE-94.
Boghammar, A., and Grundfelt, B.
- 93:27 Scenario development FEP audit list preparation: Methodology and presentation
Stenhouse, M., Chapman, N., and Sumerling, T.

SKI Report

- 94:6 Korrosion av kopparmaterial för inkapsling av radioaktivt avfall - En litteraturstudie (Corrosion of copper materials for encapsulation of radioactive waste - A literature study; in Swedish)
Engman, U., and Hermansson, H-P.
- 95:12 User guide for CALIBRE, version 2
Worgan, K., and Robinson, P.
- 95:13 The CALIBRE source-term code: Technical documentation for version 2
Worgan, K., and Robinson, P.
- 95:26 Systems analysis, scenario construction and consequence analysis definition for SITE-94
Chapman, N., Andersson, J., Robinson, P., Skagius, K., Wene, C-O., Wiborgh, M., and Wingefors, S.
- 95:29 Some properties of copper and selected heavy metal sulfides, a limited literature review
Hermansson, H-P.
- 95:30 On the specific surface area parameter: a sensitivity study with a Discrete Fracture network model
Nordqvist, W., Dverstorp, B., and Andersson, J.
- 95:40 Far-field rock mechanics modelling for nuclear waste disposal
Hansson, H., Stephansson, O., and Shen, B.

- 95:41 Rock mechanics modelling for the stability and safety of a nuclear waste repository. Executive summary
Hansson, H., Shen, B., Stephansson, O., and Jing, L.
- 95:42 The Central Scenario for SITE-94
King-Clayton, L., Chapman, N., Kautsky, F., Svensson, N-O., de Marsily, G., Ledoux E.
- 95:44 The SKN conceptual model of Äspö
Sundquist, U., and Torssander, P.
- 95:55 The CRYSTAL geosphere transport model: Technical documentation, version 2.1
Worgan, K., and Robinson, P.
- 95:56 User guide for CRYSTAL, version 2.1
Worgan, K.
- 95:73 Revised Pourbaix diagrams for copper at 5-150 °C
Beverkog, B., and Puigdomenech, I.
- 96:2 Chemical and physical transport parameters for SITE-94
Andersson, K.
- 96:4 Generalized radial flow interpretation of well tests for the SITE-94 project
Geier, J.E., Doe, T.W., Benabderrahman A., and Hässler, L.
- 96:5 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 1. Discrete-fracture network models for the repository scale
Geier, J.E., and Thomas, A.L.
- 96:6 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 2. Development of the integrated site-scale model
Geier, J.E.
- 96:7 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 3. Predictions of hydrogeological parameters for performance assessment
Geier, J.E.
- 96:8 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 4. Source data and detailed analysis procedures
Geier, J.E.
- 96:9 Stochastic Continuum hydrological model of Äspö
Tsang, Y.W.
- 96:10 Site-specific base data for the performance assessment
Geier, J.E., Tirén, S., Dverstorp, B., and Glynn, P.

- 96:11 Glaciation and regional ground-water flow in the Fennoscandian shield
Provost, A., Voss, C., and Neuzil, C.
- 96:12 Transport sensitivity studies for SITE-94: Time-dependent site-scale modelling
of future glacial impact
King-Clayton, L., and Smith, P.
- 96:13 Hydrogeology of Äspö Island, Simpevarp, Sweden
Voss, C., Tirén, S., and Glynn, P.
- 96:14 Simple evaluation of groundwater flux and radionuclide transport at Äspö
Dverstorp, B., Geier, J., and Voss, C.
- 96:15 Preliminary analysis of geostatistical structure of Äspö borehole data
Le Loc'h, G. and Osland, R.
- 96:16 Development of a geological and structural model of Äspö, southeastern Sweden
Tirén, S., Beckholmen, M., Voss, C., and Askling, P.
- 96:17 Near-field rock mechanical modelling for nuclear waste disposal
Shen, B., and Stephansson, O.
- 96:18 Modelling of rock fracture propagation for nuclear waste disposal
Shen, B., and Stephansson, O.
- 96:19 Comparison of the SKI, SKB and SKN geological and structural models of the
Äspö area
Tirén, S.
- 96:29 Geochemical characterization of Simpevarp ground waters near the Äspö Hard
Rock Laboratory
Glynn, P., and Voss, C.
- 96:30 Radionuclide solubilities for SITE-94
Arthur, R., and Apted, M.
- 96:31 Modelling of near-field chemistry for SITE-94
Arthur, R., and Apted, M.
- 96:32 Modelling of groundwater chemistry at Äspö Hard Rock Laboratory
Emrén, A.
- 96:33 Mineralogy at the Äspö site
Andersson, K.
- 96:34 Adaption of mechanistic sorption models for performance assessment calculations
Arthur, R.

- 96:35 Estimated rates of redox-front migration in granitic rocks
Arthur, R.
- 96:36 SKI SITE-94, Deep repository performance assessment project
- 96:46 CAMEO: A model of mass-transport limited general corrosion of copper canisters
Worgan, K., and Apted, M.
- 96:55 Korrosionsscenarier för koppar-järnkapseln vid slutförvar av använt kärnbränsle (Corrosion scenarios for the copper/iron canister at final disposal of spent nuclear fuel; in Swedish)
Beverkog, B.
- 96:62 A biosphere model for use in SITE-94
Barrdahl, R.
- 97:5 SKI SITE-94, Deep repository performance assessment project, Summary
- 97:6 SKI SITE-94, Säkerhetsanalysprojekt för djupförvar i kristallint berg, Sammanfattning (Swedish summary)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|---------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N·m |
| 工率, 放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量, 電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位, 電圧, 起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメンズ | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光強度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量当量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オングストローム | Å |
| バ | b |
| バール | bar |
| ガリ | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JIS では流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

| 力 | N (=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---|--------------------------|----------|----------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 |

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

| 圧 | MPa (=10 bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg (Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| 力 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322 × 10 ⁻⁴ | 1.35951 × 10 ⁻³ | 1.31579 × 10 ⁻³ | 1 | 1.93368 × 10 ⁻² |
| | 6.89476 × 10 ⁻³ | 7.03070 × 10 ⁻² | 6.80460 × 10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J (=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal (計量法) | Btu | ft·lbf | eV |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ |
| | 1.60218 × 10 ⁻¹⁹ | 1.63377 × 10 ⁻²⁰ | 4.45050 × 10 ⁻²⁶ | 3.82743 × 10 ⁻²⁰ | 1.51857 × 10 ⁻²² | 1.18171 × 10 ⁻¹⁹ | 1 |

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-------------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

