

# 天然バリアの安全評価への地球科学の寄与

竹野直人<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

わが国では、原子力発電での使用済み燃料は、再処理して再利用する<sup>注1)</sup>ことになっています。これを核燃料サイクルと呼んでいます。この過程で発生する高レベル放射性廃棄物は、わが国では地層中に処分されることになっています。そのための処分場は廃棄物の放射能が安全なレベルに減少するまで、長期にわたって廃棄物が漏出することなく封じ込める性能を有することが要請されています。このような放射性核種の移動を妨げる機能をバリアと呼んでいます。これにはキャニスタ、ベントナイト、セメントなどの人工的な容器、あるいは遮蔽物によるバリア(人工バリア)のほかに、処分場の設置される地層そのものにも天然の容器あるいは遮蔽物としてのバリア機能(天然バリア)が期待されており、両者をあわせて多重バリアシステムと称しています。天然バリアに求められる性質は、地層そのものの地下水の流れにくさや放射性核種の吸着性など、地層全体として放射性核種の移動を遅らせることです。

この小文では、天然バリアの地質環境を安全性という視点から評価するための、地球科学的な取り組みについて考察します。議論の中心は、火山や地震などの変動現象よりも、処分場に近い地質環境に置かれていますが、両者が相互に影響しあうことは論を俟たないことです。前者については、山元・小玉(2004)が詳しく論じています。また、地層処分の総括的な説明については日本原子力学会誌の特集(村岡他, 2003; 駒田・河西, 2003; 北山・油井, 2003; 梅木・木村, 2004; 中山他, 2004)を参照ください。なお、この小文は渡部・竹野

(2004)において、著者が分担した部分を基に稿を改めたものであることをお断りします。

## 2. 天然バリアとTSPAの考え方

地層処分施設は活断層や火山から離して設置することが求められています。これらは排除要件と呼ばれるもので、長期的に安定な処分環境の条件と考えられています。ここでは、その想定している評価期間が、きわめて長期であることが独特なものとして強調されます。しかしながら、考え方としては、原子力発電所等の設置の際に配慮される要件と本質的に違うものではなく、わかりやすいものといえます。

一方、天然バリアの考え方は、長期的に見たときの人工バリアの不完全性を、天然バリアによって担保しようというもので、工学技術の限界をあらかじめ織り込んだ考え方です。この考え方は、日常的に高品質の工業製品に取り囲まれて生活している我々には、ややなじみにくいものがあります。また、それほど経験を積んだ考え方とも言えません。それゆえに一段と独特な取り組み方が要求されるともいえます。

放射性廃棄物の毒性は化学的なものもありますが、通常は放射能によるものと考えられています。この放射能は、半減期と呼ばれる期間ごとに、その強さが半分になるので、十分時間がたてば放射能の毒性は弱まることとなります。また、単純に薄めること(希釈)によっても弱まります。天然バリアに期待される性能も、核種が絶対に漏れないのではなく、放射能が十分弱まるまで押さえ込めればよいという考え方に基づいています。

1) 産総研 深部地質環境研究センター

キーワード: 高レベル放射性廃棄物, 天然バリア, FEPs, ベースライン, 数値モデル

第1表 OECD/NEA (2000) によるFEPsリスト。地質に関連する1.2と2.2のみ詳細を示した。訳は深部地質環境研究センターによる。

<p><b>0 評価の基礎</b></p> <p><b>1 外的要因</b></p> <p>1.1 処分場に関する事項</p> <p>1.2 地質学的プロセスとその影響</p> <p>1.2.01 構造運動と造山運動</p> <p>1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形</p> <p>1.2.03 地震活動</p> <p>1.2.04 火山・マグマ</p> <p>1.2.05 変成作用</p> <p>1.2.06 熱水活動</p> <p>1.2.07 侵食と堆積</p> <p>1.2.08 続成作用</p> <p>1.2.09 岩塩のダイアピル作用と溶解</p> <p>1.2.10 地質の変化に伴う水文学的/水文地質学的な変化</p> <p>1.3 気候プロセスとその影響</p> <p>1.4 将来の人間の行為(能動的)</p> <p>1.5 その他</p>	<p><b>2 処分システム領域:環境要因</b></p> <p>2.1 廃棄体と人工バリア</p> <p>2.2 地質学的環境</p> <p>2.2.01 掘削で影響を受けるゾーン,母岩</p> <p>2.2.02 母岩</p> <p>2.2.03 地質ユニット,その他</p> <p>2.2.04 不連続性,大スケール(地圏内)</p> <p>2.2.05 汚染物質移行経路の特性(地圏内)</p> <p>2.2.06 力学的プロセスとその状態(地圏内)</p> <p>2.2.07 水力学/水文地質学的プロセスとその状態(地圏内)</p> <p>2.2.08 化学/地球科学的プロセスとその状態(地圏内)</p> <p>2.2.09 生物学/生化学的プロセスとその状態(地圏内)</p> <p>2.2.10 熱的プロセスとその状態(地圏内)</p> <p>2.2.11 ガス源とその影響(地圏内)</p> <p>2.2.12 検出できない特徴(地圏内)</p> <p>2.2.13 地質学的資源</p> <p>2.3 地表の環境</p> <p>2.4 人間のふるまい</p> <p><b>3 放射性核種/汚染物質に関する要因</b></p> <p>3.1 汚染物質の特性</p> <p>3.2 汚染物質の放出/移行に関する要因</p> <p>3.3 被曝に関する要因</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

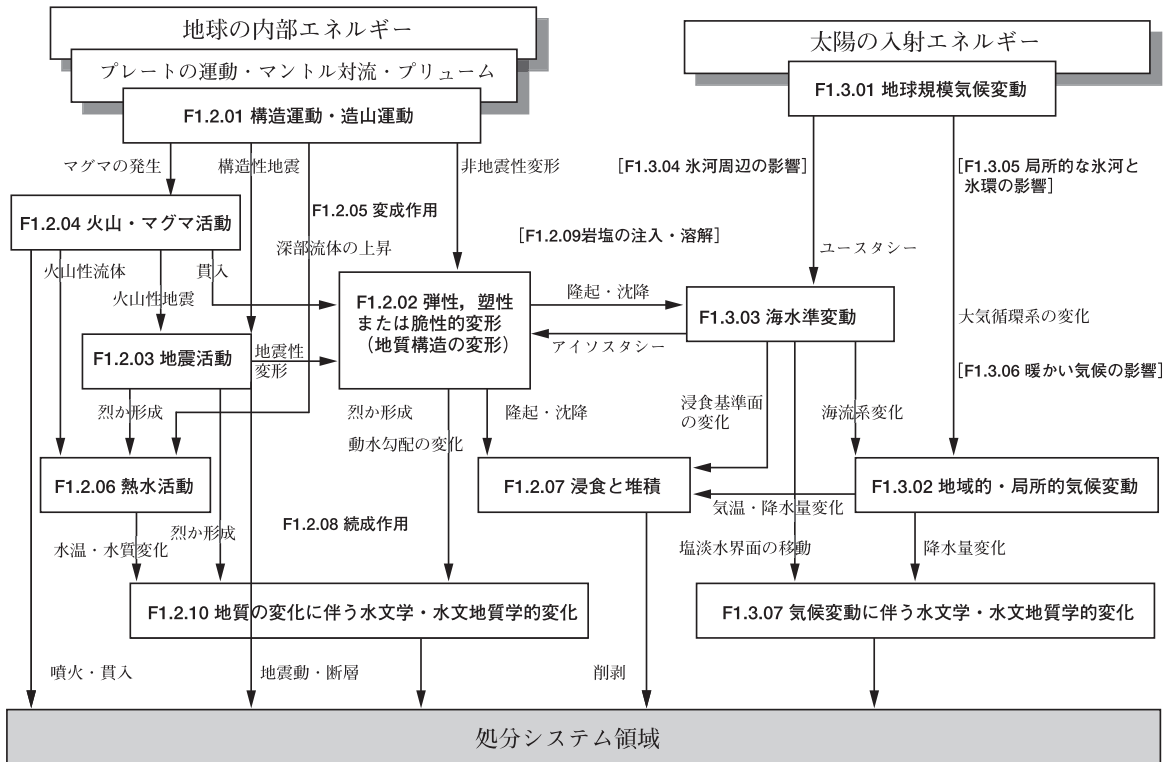
こうした多重バリアシステムの安全性を評価するためにトータルシステムパフォーマンスアセスメント(TSPA)という考え方をするのが主流です。これは、地下水の流れやすさ(透水性)等の特定の性質ごとに安全性の「あしきり条件」をつけるのではなく、システム全体として安全性を評価しようという考え方です。これは工学技術の限界とそれを補完する天然バリアにおいて、天然バリアが地域地質として、場所ごとに異なる性質を持つことを考慮せざるを得ない多重バリアシステムの評価法としては、まことに理にかなった考え方ではないかと思われます。

### 3. FEPsとは

TSPAでは、廃棄体から人間の日常生活圏までの放射性核種の移行の全行程とそれに基づく最終的な被爆線量を見積もります。この方法では全行程がどのようなものであるかを示すことが大切です。これを通常シナリオと呼んでいます。演劇で言うシナリオと同じようなものと考えていただくといいと思います。ただ役者、演技(ふるまい)と出来

事にあたるものが演劇とは異なります。放射性廃棄物の議論では、これをFeatures(特徴)、Events(事象)、Processes(プロセス)と呼んでいます。起因事象とも訳しますが、簡単にFEPsと呼ぶことも多いです。どれがどれに対応するというような演劇とのアナロジーをこれ以上詮索しても益が無いのでやめますが、大事な点はシナリオを作成する上で、Features、Events、Processesが重要で、これ無しではシナリオが作成できないことです。放射性廃棄物の安全性の議論の中でしばしばFEPsが取り上げられるのもこのためです。

TSPAのところでふれましたように、システム全体の性能は全行程に関わることでですから、FEPsとしてさまざまなものが、いろいろな機関の手によってリストとしてあげられています。ここではOECD/NEA(経済協力開発機構/原子力機関)の国際FEPsリストとしてよく知られているもの(OECD/NEA, 2000)を一例として第1表に示します。このリストは階層構造を作っていますが、例では地質に関連する部分のみを最下層まで示しました。ちなみに、前章であげた火山や地震は「1 外的要因」に包含される内容で、この小文がカバーする



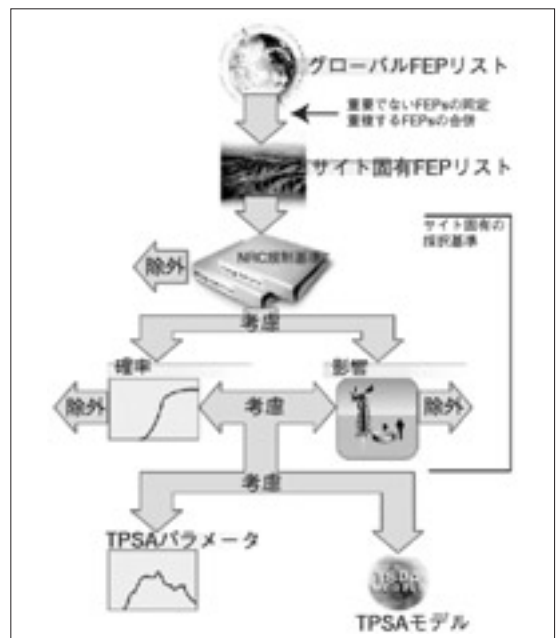
第1図 地質および気候関連事象の相関関係図(山元・小玉, 2004).

内容は「2.2 地質学的環境」と「2.3 地表の環境」に包含されると考えてよいでしょう。

ところで、ただのリストでは使いにくいものがあります。当然、シナリオするには重要な役者、出来事等にあたる Features, Events, Processesを決める必要があります。しかもこの場合、重要性は場所によって変わることも考慮せねばなりません。

しかしこのような場所 (site specific) の議論に入る前に、FEPs間の関係を整理しておくことは有用です。基本的には因果関係といってよいと思いますが、インフルエンスダイアグラムと呼ばれています。当センターの研究者が国際FEPsを基に作成したものを一例として第1図に示します(山元・小玉, 2004)。

米国ヤッカマウンテン処分場の例ではFEPsから低確率性 (low probability) のものと低影響性 (low consequence) のものを考慮から除外していますが(第2図)、これらは場所によるものです。FEPsの議論は場所の選定過程と深く関わって深められてい



第2図 ヤッカマウンテンでのFEPsのスクリーニングフロー図。訳は著者による(OCRWM, 2000)。

くものと思われま。この際、地質学的なFEPsの重要度の判定に必要とされるデータと論理については、地球科学の寄与が求められています。

#### 4. ベースラインと地球科学的モニタリング

処分地の選定は文献調査、概要調査、精密調査と段階を追って進められることになっています。概要調査では地表調査、物理探査、トレンチ、ボーリングなどがなされ、精密調査に値する地域が選びだされることになっています。次に、精密調査では実際に坑道を掘削して、観測施設を設置したりします。さらに、実際の操業に至れば、大規模な施設が地下に設置されることになるでしょう。このような施設が地下に構築されると、坑道の周りで応力解放が起きたり、大規模な地下水のくみ上げによる不飽和帯が発生したり、空気が入ることで嫌気的な雰囲気好気的な雰囲気に変わったり、場合によっては遠くの地下水や海水を引き込んだり、地質環境が坑道掘削前の状態と大きく変わることとなります。このような変化が起こる領域を、ここでは掘削影響帯(EDZ)と呼ぶことにしますが、先の国際FEPsにもリストされている事象です。EDZというとトンネル掘削時にトンネル周りにつけてしまう傷と、その傷を通じて放射性核種が移動してしまうバリア性能の劣化をさすものと考えられがちですが、ここでは上に記したように、掘削によって引き起こされるさまざまな擾乱をさす広義の使い方をしています。

EDZに生じた擾乱は、時間をおけばある状態に落ち着くと思われま。それは掘削前の元の状態とは異なるものである可能性があります。そして当然、天然バリアの性能に影響を及ぼすものとなりま。TSPAではこれも評価の対象に当然含めなければなりません。精密調査時に坑道から得られたデータが原初の状態のままのものなのか、掘削によって影響を受けてしまったものなのか、影響を受けたものならば、今後どの状態に向かって落ち着いていくのか、性能評価において避けて通れない議論ではないでしょうか。このとき決定的に重要なことは坑道掘削前の状態をできるだけ正確に把握しておくことです。掘ってしまっからでは二度と取れないデータというものがあります。

このような掘削による擾乱を受ける前の原初の状態をベースラインと呼ぶことがあります。話は変わりますが、筆者は以前、地熱の研究に関わっていました。地熱開発では、貯留層から蒸気を生産すると地下の状態が変わりますが、そうした生産をする前の状態を自然状態と呼んでいます。ベースラインと自然状態はほぼ同じ概念といえます。ベースラインデータの不十分さが英国セラフィールドでの地下実験施設不認可の一因ともされています(<http://www.jpbc.co.uk/nirexinquiry/nirex.htm>)。

ベースラインデータを把握しておく、EDZでの変化をそこからの差としてとらえることができます。これは地熱開発において貯留層の変動をとらえようとすると同様です。地熱開発では、このような変動をとらえることに重力、比抵抗、自然電位などの物理探査データがおもに使用されますが、地熱のように相変化をとらえる地熱流体と処分地における地下水等の変化をとらえることでは要求される精度も異なることでしょう。放射性廃棄物の処分におけるベースラインとして何をどれだけの精度で測定し、処分地の地質環境の変動のモニタリングにいかに関与するかは、我々地球科学者の提案すべき課題といえま。なお、ここでいうモニタリングとは、原子力関係者が通常、想定するような放射能のモニタリングのほか、先に上げた物理探査をはじめとする地球科学的モニタリングもさしていることに注意してください<sup>注2)</sup>。

ベースラインの概念には、核種の予想外の漏洩などの好ましくない変化が地質環境に起こってしまった時の判断に資することも想定されています。安全性の証明を追及する方向とは少し異なる視点かもしれないま。しかし、安全規制サイドの視点では重視されて良いのではないかと考えま。

#### 5. 数値モデリング

数値モデルは、観測された事実をうまく説明するように、自然科学の法則をもとに数式を組み立てて作成します。一般にパラメータと呼ばれる変数を調整して、観測事実にあわせるようにしますが、現象が複雑になるとパラメータの数も多くなりがちで、いかようにでもあわせられてしまうということになりかねま。モデルの任意性が大きくなるとい



す。このような状態になると、なかなか将来予測を信頼性を持って行うことが困難になります。

たとえば地下水の話を取ると、地下水の流れに影響を大きく与えて、かつ決めにくいパラメータは透水係数です。透水係数は場所によって異なりますが、実測して決められるのは限られた部分です。これを他の部分について自由に決めたのでは、うまく観測事実を説明できたとしても任意性がかなり残ることになります。普通は地質構造を考慮して、同じ地質のところは同じ透水係数を与えるなどの制限(拘束条件)を加えて任意性を減らします。地下水の情報に地質の情報を組み合わせると確からしきが増す。これなど当たり前といっても良いくらい日常的に用いられている考え方ですが、このように異なる分野の知見を組み合わせる任意性を減らす手法は地質に限らず、物理探査や地球化学探査との組み合わせにも見出すことができます。これを協調解析と呼んでいます。異なる分野の現象間の結びつきが強い場合は現象を記述する式を連立させたり、相前後して解いたりしますが、この場合は連成解析と呼んだりもします。ベースラインの項であげたような物理探査手法などは実際に地熱モデルの任意性低減において有効性が確かめられつつありますが(當舎ほか, 2001)、放射性廃棄物をはじめとした他の分野でも、研究を深めるべき余地があると考えています。

放射性廃棄物処分の場合、先に示したFEPsとそれらのインフレンス図の例にもありますように現象間の相互の影響の評価が重要になりますので、協調解析や連成解析のアプローチは本質的に重要ではないかと考えられます。さらに、地球科学的モニタリングと組み合わせ、ベースラインからの変動を定量的に表現することで、地質特性の解析に数値モデルを役立てることができます。

## 6. Validation と信頼性のスパイラル

数値モデルと数値シミュレーションは切っても切り離せない関係にあります。それが実際に役に立つのかということは常に意識せねばなりません。ここでvalidationあるいは有効性の確認<sup>注3)</sup>として考えてみたいと思います。

放射性廃棄物処分においては、水理関係におい



第3図 信頼性のスパイラル。

て、特にこのことは重視されていて、INTRAVAL (例えばOECD/NEA, 1997)、DECOVALEX (例えばSTUK, 2000)などの国際的な取り組みもなされてきました。

INTRAVALの場合、フェーズ1とフェーズ2がありました。基本的に解析コード(シミュレーションをするためのプログラム)を複数の研究機関が持ち寄って、テストケースとして提示された地域に適用して結果を比較するものです。INTRAVALフェーズ2の場合、地下水流動とトレーサを用いた物質移行を対象とした解析で、テストケースとして提示された地域は10地域で、それぞれ、多孔質、フラクチャー、飽和、不飽和といった特性の異なる組み合わせを持った地域が取り上げられています。データの一部を解析チームに開示しないで解析させ、結果をその隠したデータと比較するといった目隠しテストの手法を取る場合もあります。

DECOVALEXの場合はDECOVALEXから始まりDECOVALEX II/IIIに至っています。こちらは熱-水理-力学プロセスをモデル化する取り組みで、廃棄体の発熱の坑道周りの母岩への影響のような廃棄体に近接した(nearの)問題から、氷床が発達したときの影響のような広域的な(farの)問題まで取り扱われ、ベンチマークテストまで含む内容になっています。

数値モデルおよび数値シミュレーションにおいて

第2表 検討すべき妥当性のリスト.

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. サンプル取得方法の妥当性<br/>現位置試験においては,場所の妥当性.</p> <p>2. サンプル測定方法および解析方法の妥当性<br/>現位置試験においては,試験方法と解析方法の妥当性.</p> <p>3. データの評価の妥当性<br/>データそのものの信頼性およびデータの代表性.</p> <p>4. モデルの構築と選択の妥当性<br/>モデルに使用されるデータが適切か.モデルとデータのミスマッチはないか.<br/>モデルは観測を十分説明するか.<br/>モデルの任意性を小さくするだけの観測を実施したか.<br/>モデルが複数提案され,かつそれらが以上を満たすときの判断.</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

信頼性を向上させるにはどのように取り組むべきかについてまとめたのが第3図です.

観測事実を説明するためにモデルを作成し,パラメータを与えます.これを基にシミュレーションと解析を実施します.この結果を観測値と比較します.うまく説明できない点があれば,パラメータを直したり,場合によってはモデルそのものを見直すこととなります.これに基づいて調査や実験を見直して,データをさらにも取ることも必要となります.そして,さらにモデルやパラメータを改良する.図に示したようにこの作業の繰り返しによってループを回り,モデルの信頼性を高めることを目指します.このような信頼性のスパイラルを生み出すために,信頼性を高める方向のベクトルとして,すでに書いたことのほかにシミュレーション側では協調解析や連成解析などの手法の改良が想定されますし,調査側では新たな技術開発による新手法やデータの量的拡大が想定されることとなります.これらの有効性を確認しつつ信頼性のスパイラルを上ってゆくことが大切です.

自然科学においては当たり前とあってよい,取り立てて新しいアプローチではありませんが,どうしたら有効性が確認されるか.これ自体,難しい問いかけではないかと思えます.今後も取り組まねばならない重要な課題と考えます.

## 7. 地質学的多様性と不確実性の低減にむけて

放射性廃棄物処分と数値モデルという視野の中で我々の扱う現象を見ると,結局その本質は時間的・空間的な外挿ではないかと思うことがあります.

よく言われるように,内挿の場合は経験式で済むことが,外挿の場合はそれでは済まされず,精度が悪くても理論的背景が必要とされる.同じようなことが放射性廃棄物処分問題においても言えるのではないのでしょうか.

岩石の特性を平均値とそのずれで評価する統計学的手法がある一方で,このような地質学的多様性を理論的に理解していくアプローチ,つまり地質学的アプローチにこだわりたいと思うのもこのような考えのもとです.天然バリアの不確実性の多くは地質学的多様性に由来することが多いと思われま.保守性をよりどころにした統計的扱いだけでなく理論的理解が必要とされる理由もこの辺にあるものと推察されます.

これに関連して,妥当性の判断に付いて少し触れてみたいと思います.第2表にさまざまなレベルでの妥当性をあげてみましたが,その多くは自然科学に共通するものです.ただ,廃棄物処分問題に関連してこれを眺めるならば,これは必要条件ではあるけれども,十分条件ではないといえます.すでにふれたようにシナリオの妥当性が大変重要であると思います.おそらく,このリストには,まだ見落としがあると思いますので,それをご指摘いただけるとありがたいです.

## 8. まとめ

これまで述べた地球科学の寄与と強調したい点をまとめます.まず,天然バリアの扱いには独特な視点があって,特にシナリオ・FEPsの重要性はその最たるものであることです.地質学的なFEPsの

重要度の判定のために必要とされるデータと論理については、最も寄与が求められることです。そして、ベースラインデータ取得の重要性と地球科学的モニタリングについて強調しました。基本となるのは数値モデルですが、その任意性の減少のための協調解析・連成解析と有効性の確認、さらに多様性の理論的理解などの研究的側面においても寄与すべきことが多々あると思います。

**謝辞：**本小文を記すにあたり、独立行政法人原子力安全基盤機構の川上博人氏をはじめとする方々との議論、深部地質環境研究センターの同僚との議論は考えをまとめるにあたり大変有益でした。またベースラインの考え方の重要性の認識については、地質調査所地殻熱部所属時代からの石戸経士博士との仕事に負うところが大きかったです。当センターの渡部芳夫博士には草稿を読んで意見をいただきました。これらの方々に謝意を表します。

#### 文 献

- 北山一美・油井三和 (2003) : 放射性廃棄物の処分 (3) 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する工学技術, 日本原子力学会誌, 45, 787-797.
- 駒田広也・河西 基 (2003) : 放射性廃棄物の処分 (2) 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関連するわが国の地質環境, 日本原子力学会誌, 45, 723-734.
- 村岡 進・佐藤正知・大江俊昭 (2003) : 放射性廃棄物の処分 (1) 放射性廃棄物概論, 日本原子力学会誌, 45, 634-646.
- 中山真一・田中 知・佐藤正知 (2004) : 放射性廃棄物の処分 (5) 廃棄物との共存を目指して, 日本原子力学会誌, 46, 253-265.
- OCRWM (2000) : Disruptive Events Processes Model Report, TPR-NBS-MD-000002 REV00 ICN01.
- OECD/NEA (2000) : Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste An International Database.
- OECD/NEA (1997) : The International Intraval Project Phase2, Summary Report (Larsson, A., Pers, K., Skagius, K., and Dverstorp, B. Eds.), 118p.
- STUK (2000) : DECOVALEX II The summary report of the Finnish contributions 1995-1999 (Eloranta, D. ed.), STUK-YTO-TR163, 38p.
- 當舎利行・石戸経士・中西繁隆・横井浩一 (2001) : 地熱地域における貯留層診断技術-熱水流動シミュレーションと組み合わせた解析方法, 物理探査, 54, 433-454.
- 梅木博之・木村英雄 (2004) : 放射性廃棄物の処分 (4) 地層処分システムの安全評価, 日本原子力学会誌, 46, 38-51.
- 山元孝広・小玉喜三郎 (2004) : 日本の地層処分で考慮すべき地質及び気候関連事象について, 月刊地球, 26, 452-456.
- 渡部芳夫・竹野直人 (2004) : 安全評価における地質環境のモデル化, 月刊地球, 26, 457-461.

注1) 最近、再処理を経ない直接処分が話題になっていますが、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律の中では『特定放射性廃棄物』とは、使用済燃料の再処理後に残存する物を固形化したもの」とされています。

注2) モニタリングは必ずしも連続観測をさしません。対象によって1年に1回とか数年に1回とかもありうると思います。観測間隔などの適切な観測法については、研究にその根拠を求めるべきでしょう。

注3) validationの訳として「確証」をあてるようですが、わかりにくいので「有効性の確認」としました。

TAKENO Naoto (2004) : Contribution of Earth Science to the Safety Assessment of Natural Barrier System.

< 受付：2004年7月5日 >