

# Review of Generation IV from the Viewpoint of HLW Geologic Disposal

Needs for Technological development in Geologic Disposal  
for Advanced Nuclear Systems

A report submitted to Radioactive Waste Management  
Funding and Research Center (RWMC)

Joonhong Ahn

Department of Nuclear Engineering  
University of California, Berkeley

March 12, 2003

The author invites comments and would appreciate being notified of any errors in the report.

Joonhong Ahn  
Department of Nuclear Engineering  
University of California  
Berkeley, CA 94720  
USA

[ahn@nuc.berkeley.edu](mailto:ahn@nuc.berkeley.edu)

(財) 原子力環境整備促進・資金管理センター

# GENERATION-IV と高レベル 廃棄物地層処分

---

次世代原子力システムの目指す方向と地層処分に  
求められる開発課題

Joonhong Ahn

March 12, 2003

# GENERATION-IV と高レベル廃棄物 地層処分

次世代原子力システムの目指す方向と地層処分に求められる開発課題

はじめに.....	3
地層処分分野において今後の研究開発が必要な項目.....	3
ヤッカマウンテン処分場.....	5
経緯と概要 .....	5
T S P A の R I P モデルと指標 .....	8
GENERATION-IV における地層処分.....	12
GENERATION-IV の目的.....	12
Gen-IV における地層処分の扱い.....	13
YMR との関係 .....	14
地層処分と新しい原子力システム .....	16
現状認識：なぜ更なる環境負荷低減を目指さなくてはいけないのか.....	16
方向性：どこまで「環境負荷」を低減すべきなのか.....	17

---

## はじめに

---

本レポートは、日本などの主要原子力発電国が参加して現在米国エネルギー省が進めている Generation-IV 計画（以下、Gen-IV と略記）に関し、それが今後どのような影響を地層処分に及ぼすか、という点を中心に要約を試み、さらに、仮にそのような方向にむけて将来の原子力システムが開発される場合、地層処分に関連してどのような問題点や技術開発課題が生じるか、について考察を加えたものである。

Gen-IV が始められた主な動機のひとつは後述するように「持続性」のある原子力システムの開発であり、高レベル廃棄物の地層処分は原子力システム全体の持続性を決定する主要因であるという認識があった。

新たなタイプの原子炉、燃料、リサイクル技術（再処理、燃料加工など）を導入した場合、発生する廃棄物の形態が軽水炉使用済燃料とは大きく異なることが想定され、現在ヤッカマウンテンで進められている処分場計画に影響することも考えられる。

本レポートの構成は次のようになっている。次章において、まず、本レポートの結論である「日本の状況と対照させ、今後地層処分領域においてどのような技術開発をすすめるべきか」に関する見解を述べる。以後の章においては、その見解をサポートするための傍証として、ヤッカマウンテン処分場（以下、YMR と略記）の概略、その性能評価方法の概要、そして、Gen-IV における廃棄物管理の観点を要約する。また、新しいシステムと YMR との関係について論じる。

---

## 地層処分分野において今後の研究開発が必要な項目

---

本レポートにおいて以後の章において示される観察・議論を要約すると次のようになる。

- 第 1 処分場を実現させることが最も重要である。これが実現する、ということは、社会がこのレベルの負荷を受け入れた、と理解できるからである。
- しかし、持続的な原子力利用を考えると、第 1 処分場だけでは足りない。何も技術革新をしなければ、およそ 30 年ごとに同じ規模の処分場が必要になる。
- 将来、処分（場）の規模が拡大するという事態に対して、現在の性能評価モデルは対応できない。問題は、処分場の規模（廃棄体の数、床面積の大きさ、廃棄体の配列の仕方など）がパラメータとして適切にモデルに含まれていない（近似が適切でない）ため、性能評価の結果にこれらのパラメータの効果が正しく反映されない、ということ、性能評価指標として、処分の規模をより敏感に反映するものが用意されていない、という 2 点であると考えられる。

他のサイトで新たな処分場を作る努力と並行して、より現実的な選択として、すでに存在するサイトで容量を拡大することを検討すべきである。このために技術的に次のような点を検討する必要がある：

- 高燃焼度化、高密度埋設のための坑道閉鎖前発熱管理スキームを開発し、高密度処分が物理的に可能であることを示す。<sup>1</sup>
- 一旦、高密度な埋設が可能であるとわかれば、次の段階として、与えられた廃棄物条件、レイアウト条件に対して環境負荷を最小にする処分場設計最適化スキームを開発する。<sup>2</sup>

迅速に多くの設計ケースの性能を調べるため、性能評価の標準化が必要となる。そのための支援ツールとして、計算コード群とデータベースからなるシステムが必要である。また、新たな性能評価指標もあわせて開発する。

- 計算コード群は、多様な人工バリアの幾何学的形状や材質、組み合わせに対応でき、さらに、異なる組成の廃棄物が処分場内部でとる配置の違いを表現できる柔軟な構造のものが必要である。データベースは多様な設計ケースをサポートできるよう広範囲な材料、環境条件を網羅していることが望ましい。
- 新たな評価指標は、処分場の「負荷」に着目して開発されるべきである。<sup>3</sup>

第 1 処分場の後、上記のような高密度化の努力が行われるものの、処分の設計・最適化の対応だけで達成できる程度には限界がある。将来ある時点で次世代の炉と燃料サイクルが導入されることが予想され<sup>4</sup>、廃棄物の形状、組成は大きく変わる可能性がある。また、廃棄物の内容を変更することによって更なる高密度化と環境負荷低減が可能である場合には、例えば、毒性の高い核種の除去、超低浸出率固化体の採用など、固化プロセス、分離プロセス、炉型まで立ち返って、見直しをすることも考えられる。この場合、例えば、処分環境が浸出率を決め、逆に固化体の成分によって処分の環境が変わることが考えられるので、上記のコード群、データベースよりもさらに広範囲なケースに適用できるシミュレーションシステム（コードとデータベースの組み合わせ）が必要となる。<sup>5</sup>

また、新たな固化体、処分概念などに対しては、実験的研究による裏づけが必要である。浸出試験、腐食試験、溶解度測定など、長期の時間を要するものもあるので、将来可能性のある技術オプションは今から優先順位をつけて、長期試験を開始しておく必要がある。

これらの項目は、言い換えれば、H12 レポートでは、固化体のコンディショニング、

<sup>1</sup>単純に高密度化すると環境負荷が増大することが予想されるが、この段階では環境負荷のことは一時棚上げする。

<sup>2</sup>この際、処分規模に敏感な性能評価モデルと指標が必要となる。

<sup>3</sup>「負荷」と「性能」は、よく似た概念でしばしば交換的に用いられるが、同じものの異なる側面を示すと考えられる。例えば、一つ一つはどんなに「性能」のよい廃棄体（低浸出率、など）でも何万本も集まればわれわれはそれを重荷と感じる。「負荷」指標は、この重荷であるという感覚を数量化する必要がある。多くの場合、負担感とはモノの「質量」に関係しているので、新たに用意する指標も廃棄物の質量をもとにしたものであろう。

<sup>4</sup>日本の場合、高速炉システムが最有力である。

<sup>5</sup>イメージとしては、前段までの技術開発は、第 1 処分場型+現在のガラス固化体+現在の燃料サイクルという大枠（関与する材料は変えず、パラメタ値の変更で対応できる範囲）を維持して検討できる範囲であるのに対し、この段階の開発は、処分の形態、固化体の材料、サイクルのスキームなど根幹が変わった場合を想定する。

発熱管理、坑道離間距離、レイアウト、固化体配列など、代表的なケースのみ手作業で検討されていた部分や単純化されていた部分を一般化したモデルで置き換えて、現在の性能評価システムをより汎用性のあるシステムにすることであるといえる。そして、汎用性の高い性能評価システムは、処分場の設計に用いることができ、異なるサイクル概念の比較研究に用いることができる。

---

## ヤッカマウンテン処分場

---

### 経緯と概要

2002年2月14日、アブラハム・エネルギー長官は、20年40億ドルを超える科学技術研究開発の結果に基づき、大統領に対して、ネバダ州ヤッカマウンテンの候補地は高レベル廃棄物地層処分場のサイトとして開発されるべきである、という勧告を行った。ブッシュ大統領はそれを受けて、翌日議会に対してヤッカマウンテンはエネルギー省が処分場建設の申請をするに値するサイトであり議会として必要な承認を与えるよう勧告を発した。大統領の勧告に対して、即日（2月15日）、グイン・ネバダ州知事は YMR の建設を拒否する声明を発した。連邦議会下院に続き、上院においても2002年7月25日議決が行われ、正式に処分サイトとなった。

1998年末現在で38、500トンの発電炉使用済燃料が33州72カ所の発電所サイトと一カ所の集中貯蔵所に分散して保管貯蔵されている。2035年までにすべての発電炉が設置許可の期限を終えるころ（図1）にはこの二倍以上の使用済燃料が存在しているものと推計されている（図2参照）。その他、長年の核兵器開発・製造に伴う高レベル廃棄物、核兵器物質製造炉や原子力艦船の船用炉からの2、500トンの使用済燃料、冷戦終結後の核兵器解体にともない発生する兵器級プルトニウムや高濃縮ウランなども存在する。これらのうち、ネバダ州ナイ郡に建設される YMR には63、000トンの商業用発電炉使用済燃料と7、000トン相当の軍事関連使用済燃料／高レベル廃棄物の計70、000トンが処分される計画となっている。

1987年の核廃棄物政策法修正条項により最終処分にむけた唯一の研究調査対象サイトとなったヤッカマウンテンに対して、その後15年にわたり精力的なサイト特性調査が行われ、1991年、93年、95年に「総合システム性能評価（TSPA）」がエネルギー省によって公表された。また、それらの集大成として、1998年12月、「バイアビリティ・アセスメント（TSPA-VA）」がエネルギー省から公表された。1992年のエネルギー政策法に基づき1995年に答申された科学アカデミー報告では、YMR 関連規制法令の大幅見直しを勧告している。TSPA-VA はこのアカデミー報告の考え方に準拠している。TSPA-VA は、廃棄物容器と処分場の設計、処分場の性能評価結果、原子力規制委員会（Nuclear Regulatory Commission, NRC）へ認可申請するまでの作業とそれに要するコストの見積、処分場建設・運用のコスト見積を示している。

YMR はエネルギー省によって建設、操業の認可申請が行われ、原子力規制委員会（Nuclear Regulatory Commission, NRC）、環境保護庁（Environmental Protection Agency, EPA）、運輸省（Department of Transportation, DOT）の規制を受ける。NRC は原子力施設としての安全性、EPA は環境安全（主に地下水と大気汚染に伴う影響）、DOT は使用済み燃料輸送時の安全性を監督する。中でも NRC と EPA の管轄になる規制（それ

それ10CFR60および40CFR191) について、1992年のエネルギー政策法でYMR 特有の状況を考慮したものに改定されることが定められていたが、2001年末にそれらが10CFR63、40CFR197として最終的に発効した。それまでの10CFR60では多重バリアのそれぞれの隔離性能を規定し、40CFR191によって処分場から5キロメートルの地点での放射性核種の積算放出量を規制していたが、10CFR63、40CFR197では将来の住民の被ばく線量率評価に基づく不確実性を考慮したリスク・ベースの規制体系に代わっている。

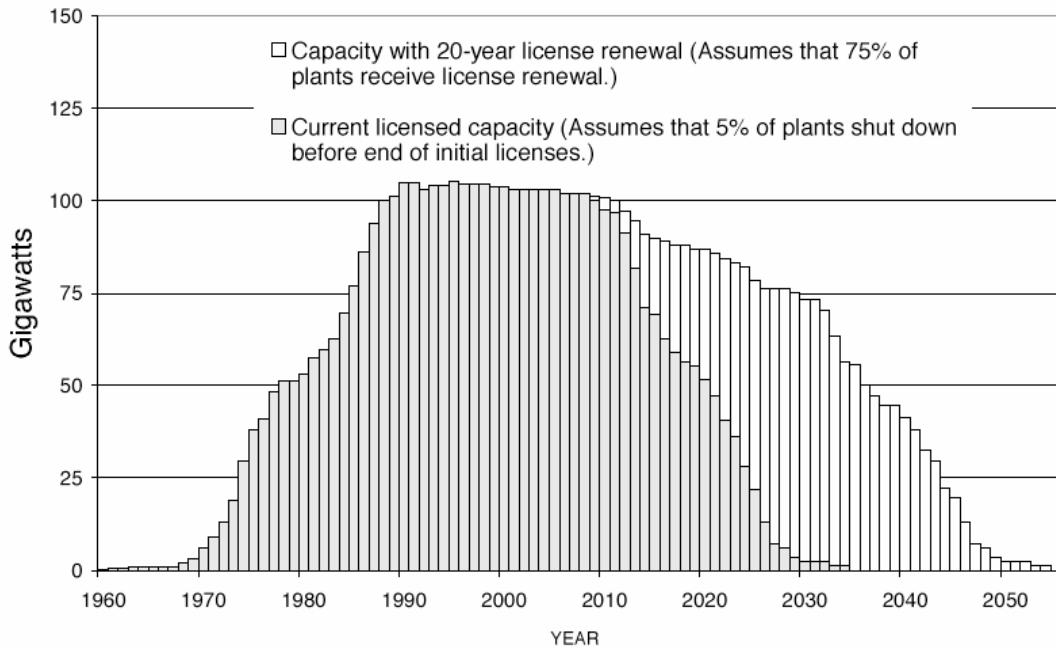


図 1: 1997 年大統領諮問委員会 (PCAST) 報告に示された米国の原子力発電容量予測。

YMR サイトは国有地に含まれ核実験場に隣接している。年間降水量が20センチメートル前後という乾燥した火山性凝灰岩地帯である。このため、万一埋設した放射性物質を包む金属製容器やその周りの人工バリアが壊れ地下水が侵入しても放射性物質が地下水に運ばれて地中を移行する速度は大変遅いことが解析により示されている。次節に述べるように、20キロメートル離れたアマルゴサ溪谷に住みそこで汲み上げる地下水ですべての生活需要をまかなう仮想的な将来の住民が、地下水に含まれる放射性物質を摂取することによってうける被曝線量率は30万年後に最大値の年間300ミリレムになり、以後減少するという評価結果が示された。これは現在の自然界の放射能による被曝線量率、年間360ミリレムと同程度である。

この報告書の後エネルギー省は、環境影響評価書 (EIS) のドラフトを1999年7月に公表し、各界から180日間コメントを受け付けた。さらにその後何回かの改定を加え、エネルギー長官が大統領に勧告をする直前にネバダ州知事に対して提示された。EISは、YMRの建設、廃棄物の搬送、操業、モニタリング、閉鎖などの行為に伴い発生すると考えられる環境影響を評価しその結果を示す。また、EISの根拠となる国家環境政策法では要求していないが、処分場を建設しない場合 (No-Action) を二ケース想定して評価し比較を示している。その一つは、現在の77カ所の貯蔵サイトの施設を100年毎に更新しながら制度的管理のもとで監視を続け、1000年



経ったところで監視を解くという想定、もう一つは、現在の77の貯蔵サイトで100年間制度的管理しその後は放置するという想定である。EISでは、処分場とそれに関連する活動を要約し、地下水、大気、騒音など多岐にわたる環境影響について評価している。

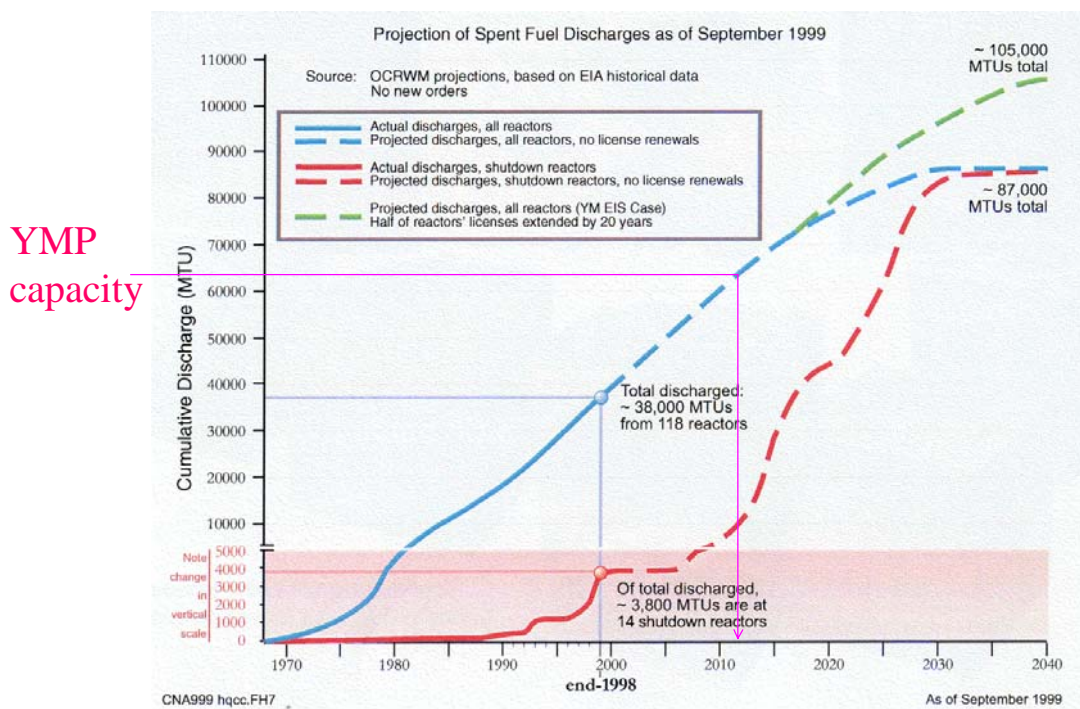


図2：米国における使用済み燃料の蓄積。

結論として、100年以内の短期的な環境影響は、処分場を設ける場合やNo-actionの二つのケースの間で顕著な差は見られないものの、長期（一万年）にわたる影響を比べると、処分場を設ける場合の影響は処分場から漏えいした比較的少ない放射性物質が地下水を汚染しそれが下流にすむ将来の住人に被曝をもたらすという影響であるのに対して、制度的管理がない場合には77のサイトから広範に及ぶ汚染が推定される、としている。また制度的管理を続ける場合にはそれに伴うコストが後世への負担になることを指摘している。処分する場合には、処分地までの輸送に伴う影響が加わる。

YMRの科学的妥当性を確実なものにするため、1987年の修正法に基づき、大統領の指名・任命により「核廃棄物技術評価委員会（Nuclear Waste Technical Review Board, NWTRB）」が設置されている。委員会はエネルギー長官の勧告に先立ち、議会とエネルギー長官の双方に対して提言をしている。提言では、処分場の性能評価がそもそも複雑で難しい点を多く含んでいることを認めながら、エネルギー省のこれまでの研究開発が技術的に見て及第点すれすれかそれ以下という厳しい評価をしている。<sup>6</sup>（ただし、

<sup>6</sup>委員会の指摘は次の3点である。  
(footnote continued)

委員会はヤッカマウンテンサイトが勧告されるべきかどうかと言う点は慎重に回避している。この判断は政治的多面的な判断を必要とされるからである。）

この評価、提言に対して、エネルギー省は、決定的な否定的要因が指摘されておらず、TSPA-VA などのこれまでの研究成果が容認された、と肯定的に捉えているのに対して、ネバダ州や環境保護団体は、エネルギー省の処分場計画は技術的に不十分である、と主張する根拠にしている（たとえば、ネバダ州知事の2002年2月15日の声明）。

議会が同意し正式にサイトとして承認されたため、今後エネルギー省はNRCに対して処分場建設認可申請を行う。許認可、処分場建設、廃棄体設置（2010年開始、2033年終了を想定）、モニタリング（2033年から2110年まで）、処分場閉鎖（2110年から6年かかると想定）までの総費用は1998年価値で187億ドルと見積もられている。このほか、全国に分散する貯蔵地点から処分場までの使用済燃料輸送コストが67億ドル、ネバダ州などへの交付金が32億ドル、プロジェクト管理に要する費用が25億ドルとなっている。これに、1983年から98年までにすでに消費した費用を加えると、総額約400億ドルとなる。

### TSPAのRIPモデルと指標

YMR の性能評価指標は、地下水中の放射性核種濃度をもとに求められる。まず、廃棄体からの放出と地下水による地層中の移行のモデルが立てられ、放射性核種の濃度が得られる。さらにそれを入力値として生物圏での核種の移行が評価され、最終的に被曝線量率（Sv/年）、あるいはリスクの形で評価指標の値が得られる。指標を「正しく<sup>7</sup>」求めるためには、地下水中の核種濃度を求めるモデルを正しく立てる必要がある。

YMR の性能評価TSPA-VAでは評価指標を求めるためRIP (Repository Integration Program) モデル<sup>8</sup>を用いる。RIPモデルにおいては、核種移行経路を複数の領域に分けて核種移行をモデル化した後再度結合する。結合の際、隣り合う領域間の境界面における核種のマスフラックスの連続性は保たれているものの濃度の連続性は保たれていない。<sup>9</sup>ここでは、TSPA-VA本報告書の下位に位置付けられる技術文書<sup>10</sup>の

o エネルギー省の開発した性能評価モデルはそれが立脚するデータと仮定の両面においてリアリティと無視できないギャップがあり、そのギャップのために結果に不確かさを伴っている。YMR を完全に排除する理由は見当たらないものの、委員会としては、この不確かさのため、処分場の性能について完全なお墨付きを与えるわけにもいかない。

o 処分場の挙動の根本的な科学的理解を確立することが重要である。そのため、エネルギー省は今後とも、規制法令に準拠していることを示すのは当然のこととして、さらに、根本的な科学的理解の増進のためいっそうの研究を行うべきである。

o 人工バリア、特に金属性キャニスタの耐腐食性能に依存するところが大きい。処分場の設計を高温条件下で行うか比較的低温条件下で行うかは不確実性の問題も絡むので、エネルギー省はどちらを選ぶかの決定に際し、完全で客観的な比較研究をするべきである。

<sup>7</sup> 「正しさ」は必ずしも「正確さ」でなくともよい。ここでは、数学的、物理的に整合性のとれた、合理的で矛盾のないモデルのことを指す。数学的には Rigorous、物理的には rationale と言い換えてもよい。

<sup>8</sup> Golder Associates の開発したもの。処分場各構成要素のモデル群からなり、性能評価指標の確率統計分布を求めることができる。

<sup>9</sup> このような不適切な領域の再結合はしばしば行われており、これはRIPモデルだけの問題ではない。

<sup>10</sup> Civilian Radioactive Waste Management System Management and Operating Contractor (CRWMS M&O), TSPA-VA Analyses Technical Basis Document (TBD), Chapter 6, Waste form degradation, radionuclide mobilization, and transport through the engineered barrier system, B00000000-01717-4301-00006 REV. 01, November 13, 1998, prepared by TRW Environmental Safety Systems Inc.

記述をもとに、考察を進める。

図 3 に R I P のソースタームモデルの構造を示す。処分場は 6 つの領域に分けられる。廃棄体には、商業用発電炉からの使用済み燃料、軍事再処理に伴う高レベル廃棄物、軍事利用に伴う使用済み燃料の 3 つの種類がある。さらに、処分後の地下水流れの環境（降水パターンによって主に決定される）に対して 4 ケースを想定している。したがって、全部で 7 2 の場合がある。図 3 は、そのうちの商業用発電炉使用済み燃料、基本ケース地下水流の場合を示している。

人工バリア内部は 3 つの完全混合セルに分割されている。中心部には廃棄体セルが置かれている。ここからの核種の放出には、使用済み燃料マトリックス溶解速度律速モデル（いわゆる調和溶解モデル）、溶解度限界モデル、二次鉱物生成モデルが開発されたが、基本ケースに用いられるには最初の 2 つだけである。

人工バリア最外縁部には、SF last という仮想的なセルを設けている。セル体積は仮定された  $10^6 \text{ m}^3$  / 年という地下水流量に対して十分小さく設定されるため、ここでの核種濃度は事実上ゼロとなり、核種の放出率は『保守的』に見積もられていると主張されている。

処分場の 6 つの領域それぞれに対応して一つの out という混合セルが用意される。そのセルでは、同一領域に存在する 3 つの異なる種類の廃棄体から放出されてきた同一核種を混合する。仮想的な out セルでの滞留時間をできるだけ短くするため、このセルの体積は  $10^6 \text{ m}^3$  と小さく設定されている。このセルからの核種放出量がファーフールド計算の入力となる。

ファーフールドの計算は、6 領域それぞれにつながる経路に対して行われ、図 4 のような結果が得られている。図 4 左で処分場平面から地下水面までの点線で示された部分は不飽和領域である。図 4 右において核種の移行経路が示されている。放射性核種の移行経路が分散していないのが観察される<sup>11</sup>。

ファーフールドモデルは、生物圏モデルに接続し、被曝線量評価が行われる。図 5 はその前提となった人口分布（左）とそれに基づく結果である。結果は 3 群に分かれている。第 1 群が「アマルゴサ溪谷の住民」、第 2 群が「半自給自足農民 (Resident farmer)」、第 3 群が「自給自足農民 (subsistence farmer)」である。第 1 群が基本ケース（現在の水利用、食生活を元にした評価）、第 2 群は、食べるものの半分がファーフールド計算によって得られた最大濃度で汚染した地下水で育てられた作物を食べる農民、第 3 群は最も保守的で、すべての食物を最大濃度で汚染した地下水で育てている場合である。それぞれの中に現在の降水量と同じ場合、2 倍の場合、3 倍の場合の 3 ケースが示されている。

上記のモデル構造を簡略化して示すと図 6 のようになる。仮想的な SF last というセルを加えることにより、R I P モデルでは人工バリア外側境界においてゼロ濃度境界を導入している。したがって、放射性核種の濃度の連続性はこの地点において失われている。また、その後に設けられている out セルに異なる廃棄体からの放出がすべて混合されるため、このモデルで求められる「濃度」の持つ意味はさらに不明確となる。一方、

<sup>11</sup>T S P A では、保守的評価の観点から、放射性核種の地層中移行中の分散現象を無視している。

放射性核種のマスフラックスの連続は、この仮想的セルにおいても以後の out セルにおいても保たれている。例えてみれば、out セルは強力な吸引力を持つ「掃除機」のようなものである。SF last セル等3つの吸引口から吸い込んだ核種をほとんど時間差無しで out セルから吐き出す<sup>12</sup>。

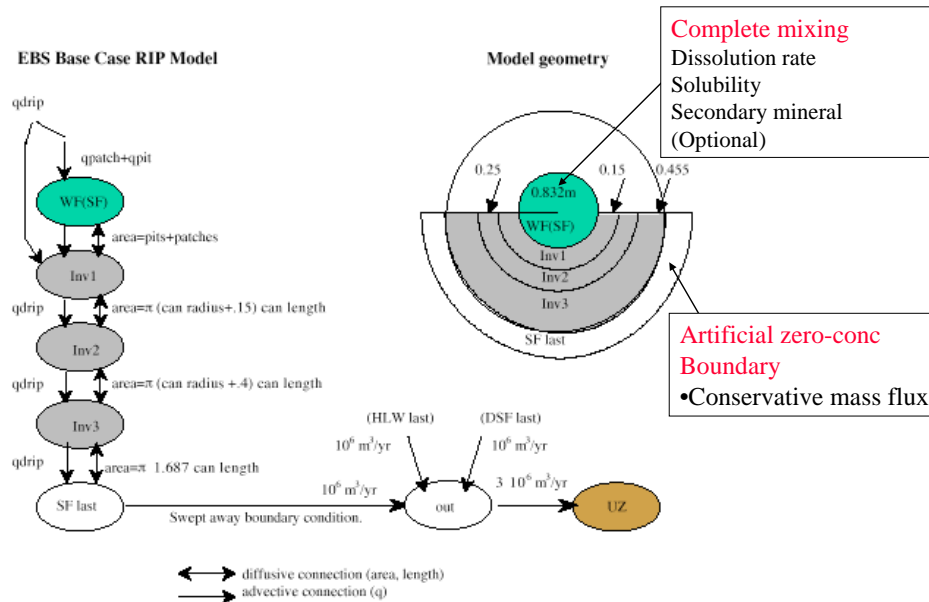


図 3：RIP のソースタームモデルの構造

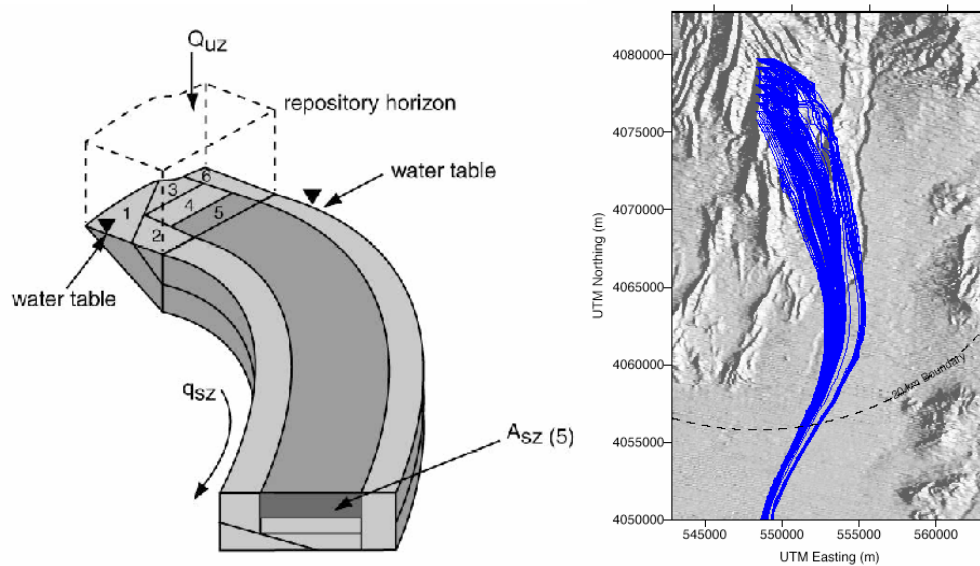
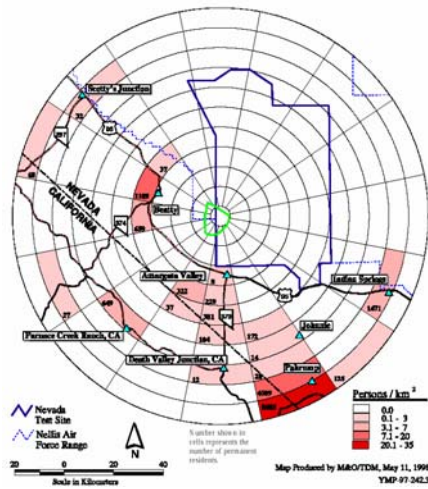


図 4：ファーフールドモデルの構造と結果の一例

<sup>12</sup> そのような「掃除機」が果たして系の中に存在するのか、というのが、『正しい』モデルという観点からの疑問である。もちろん、答えは、否である。



Differences in BDCF Values as a Function of Receptor and Precipitation Regime

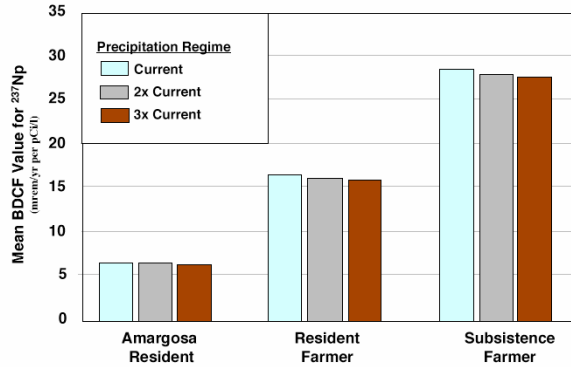


図 5：生物圏モデル

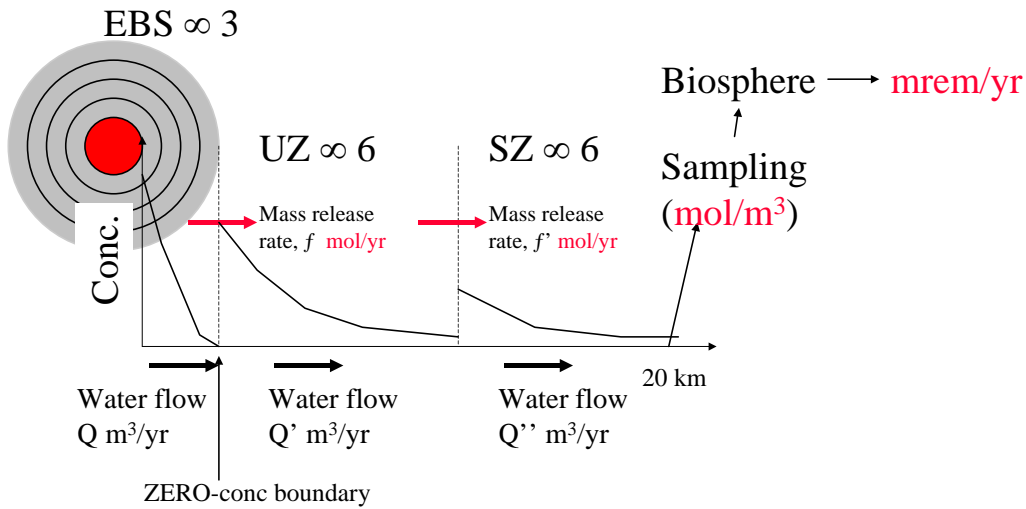


図 6：性能評価モデルの構造

一旦境界面でのゼロ濃度を仮定すると、人工バリアの直後にある不飽和層の入り口境界の放射性核種の濃度は、核種の放出マスフラックス ( $\text{mol}/\text{m}^2$  年) を断面積 ( $\text{m}^2$ ) で乗し地下水体積流量 ( $\text{m}^3/\text{年}$ ) で除して求められる。しかし、そのようにして求められた核種濃度は、地下水流量と移行経路断面積が合理的に設定されないかぎり物理的な意味を持たない。仮想的な SF last というセルに対して仮想的に大きい地下水流量を設定した後に続く領域で現実的な流量を設定すると、今度は地下水質量バランスに対して不整合となる。

地下水流量の合理的な見積もりは、処分安全評価研究で「希釈水量問題」として長年の懸案である。これは分断した領域のモデルをつなぐとき、地下水流量の連続をとらないで外部的に決定していることを示す。これは経路の断面積の決定と硬貨の裏表の関係みある。濃度の連続を無視したモデルでは、外部的に決定される 2 つの量 (隣接す

る下流の領域での断面積と地下水流量)に性能評価指標値が比例することになり、その恣意性のゆえにモデルの信頼性を失わせる原因となっている<sup>13</sup>。

---

## GENERATION-IV における地層処分

---

### GENERATION-IV の目的

米国は現在世界最多の104基の原子炉で総発電量の20%をまかなっているが、電力消費の伸び率の低下、低コストの他電源との競争、原子炉建設に要する資本費の高騰、放射性廃棄物/使用済燃料の処分問題、核拡散と安全性への懸念、などの理由から過去20年にわたり発電炉の新規発注がない。現在運転中の炉のうち57基については2017年までに設置許可の期限を迎える。この結果、2035年ころには発電炉がほとんど存在しない、というシナリオも想定される(図1参照)。

1997年12月の大統領科学技術諮問委員会報告(いわゆる PCAST レポート)をきっかけにはじめられた Gen-IV の原子力システム開発は、エネルギー省が主体となって、産業界も含めて推進されている<sup>14</sup>。約30年後をめどに第4世代の新しいシステムを大規模に展開することを目標とし、新しい原子力の姿が次のようにまとめられている。

- 広範な国民の支持を得ること。そのためには「透明性」(国民がシステムの安全性、その元となるデータ、解析などを容易に理解できること)を確保する必要がある。
- 世界規模でエネルギー需要に対応できること。
- 炉だけではなく、サイクル、廃棄物処分まで含めた一貫したシステムであること。
- 現世代の需要だけを満たすのではなく、将来世代の可能性を冒さないようなシステムであること。

「持続性」、「安全性」、「信頼性」、「経済性」がキーワードになっていることがわかる。廃棄物処分に関連してみると、「持続性」が今後の重要なキーワードとなると考えられる。GEN-IV における持続性の考え方は次のようにまとめられる。

- 効率的な燃料利用によって、世界規模で持続的なシステムを可能にする。
- 廃棄物発生を最小限に抑え、公衆の健康と環境の保護を現在のレベルよりも顕著に高いレベルで実現し、将来世代の廃棄物管理の負荷を軽減する。
- システムが利用し、またその結果発生する核物質を極力「魅力の少ない」物質とし、拡散、盗用の懸念を払拭する。

---

<sup>13</sup> たとえば、円柱形状の人工バリア領域のモデルによって、ゼロ濃度境界を適用して外側境界面での放出率を求めたとする。この後、例えば、並行平板亀裂モデルによるファーフィールド移行計算をするとすると、どれだけの断面積の亀裂開口部に人工バリアから放出される核種を投入するか、どれだけの地下水流量を亀裂内で仮定するか、によって亀裂内部での核種濃度は比例して変動する。

<sup>14</sup> これらの動きと平行して、「群分離・消滅処理(P&T)」に対しては、加速器を用いた ATW 計画が1999年からエネルギー省のプロジェクトとして遂行された。2001年度からは、エネルギー省の原子力科学技術局(NE)が主管で、複数のシステムについてその性能を比較検討する研究が続いている。国立研究所での研究と大学での研究を分離し、前者をロスアラモス国立研究所が、後者をネバダ大学ラスベガス校が管轄し、プロジェクトも AAA 計画と称された。さらに今会計年度からは AFCI としてすすめられている。

廃棄物に対する条件が、公衆の健康と環境保護だけではなく、核不拡散、臨界安全にまで拡大していることがわかる。世界的規模で展開可能なシステム、経済的に競争力のあるシステムを追求すると、これらは当然の条件である。

従来の米国の使用済燃料直接処分という国策から考えると、これらの一連の動きは政策の再検討・転換と見ることもできる。その背景の一つには、前述のように将来の原子力をどうするのか、という問題があると思われる。原子力利用を続けるにしても、これまで経済的に成立しているとはいえ軽水炉システムにはいろいろ問題点も指摘されるので、それらを解決できるかどうか見極めよう、ということである。状況の変化としては、冷戦の終結により解体核兵器から大量のプルトニウムが発生したこと、これにより地層処分の困難さの新たな側面が再認識されたためであろう。解体兵器プルトニウムの存在により、処分場に将来埋設される使用済燃料中にも大量のプルトニウムをはじめとする兵器転用可能物質が存在することが再認識された。将来原子力を続け世界各地に処分場ができた場合、兵器転用可能物質を大量に含む廃棄物によって潜在的に核拡散の懸念が生じうることを示している。

### GEN-IV における地層処分の扱い

本節は、Gen-IV の”Report of the Fuel Cycle Crosscut Group, March 18, 2001”と”A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, December 2002”、及びこれらの下部に位置するドキュメントを元に記述する。

Gen-IV では、現在6つのシステムが候補として残り精査を受けている。その6システムとは、「ガス冷却高速炉」、「液体金属冷却高速炉」、「熔融塩炉」、「ナトリウム冷却高速炉」、「超臨界圧水冷却炉」、「超高温炉」である。精査のポイントは、「持続性」、「経済性」、「安全性・信頼性」、「核不拡散性」の4点で、さらに8つの細目に分けられる。その8細目のうち、地層処分に関連すると考えられるのは、「持続性」に含まれる「廃棄物最小化と管理」である。これはさらに、「廃棄物最小化」と「廃棄物管理・処分の環境負荷」に細分され、「廃棄物最小化」の検討項目として、「廃棄物質量」、「体積」、「熱負荷」、「放射性毒性」が挙げられている。「廃棄物管理・処分の環境負荷」の項目には、「環境負荷」が上げられている。

結論から述べると、Gen-IV におけるここまでの検討の中で、地層処分「性能評価」は対象に入っていない<sup>15</sup>。最も詳しい記述は、「熱負荷」に対して見出される。これは、YMR が不飽和層に建設される処分場であることと密接に関連しているものと考えられる。<sup>16</sup>直接処分の場合、発熱管理の方法として、処分前中間貯蔵期間の最適化、処分場閉鎖前の積極的な空冷、リサイクルをする場合、セシウム、ストロンチウムの分離貯蔵が挙げられている。これらの発熱管理による利点として、

- 処分場の容量は熱密度で決められるので、これらの処分場への定置を遅らせることにより処分場容量は実質的に増大する。

<sup>15</sup>コストの評価などは行っているが、すべて現在の YMR 設計を元にした評価であると考えられる。各システムから発生する廃棄物の違いにより、処分場が異なる設計を持ちうることを考慮に入れた比較ではない。

<sup>16</sup>不飽和層であるため、あえて処分場全体を高温に保って廃棄体と地下水の接触を長期にふせぐ、という概念も検討されているように、発熱管理は不飽和処分場のほうが柔軟にできる。

- 放射線遮蔽や輸送などに伴う困難が低減する。
- 初期のストロンチウムによる高い毒性を処分場に持ち込まなくてすむ。
- 比較的大きな効果が簡便な変更で得られる。

ということが挙げられている。

リサイクルを伴うシステムの場合、廃棄物はいくつかの流れに分けられ、それに対応する処分の形態がありうるということが指摘されている。現在の高レベル廃棄物からアクチノイドを分離すると、発熱成分はセシウム、ストロンチウムだけとなり、これらも除去すれば、残る部分は現在 TRU 廃棄物と呼ばれているものに近い低発熱の廃棄物になるため、処分場の設計の自由度はさらに大きくなる。

処分容量の合理的な利用に伴うコストの変化に関しては、現在の計算方法（キロワット時ベースの課金）を変えない限り、処分場に向かう廃棄物の量が大幅に削減されてもその効果は現れないことが示されている。現在の 0.1 セント／キロワット時の課金を埋設量 70,000 トンごとに 0.01 セントずつ増加させていくと仮定する場合でも、サイクルコストの主要部分は鉱さいであることが示されている。

特徴的なことは、ウラン鉱山からの鉱さいや濃縮工程からの劣化ウランの環境負荷が嚴重に地層処分される高レベル／使用済み燃料に比べて、その環境影響が大きいことが指摘され、実際、サイクル全体として環境負荷を考える場合は、これらの低減を考えることがより合理的であると指摘されていることである。

低レベル、中レベルの廃棄物、リサイクルに伴う 2 次廃棄物の発生もより重要になることが指摘されている。これらは、どのようにリサイクルシステムを設計しても必ず発生し、しかもシステムの規模が増大するに伴い増大する事が避けられない。

### YMR との関係

2010 年ころ YMR が開業することを前提とすると、Gen-IV との関連で次の 4 点を指摘できる。

まず第 1 は、10CFR63 など YMR の対する規制体系は使用済み燃料を想定しているため、異なる種類の廃棄物が発生したとき、それが YMR にコンパチブルであるかどうか、処分場の設計だけでなく規制の変更も含めて検討する必要がある。例えば、「超高温炉」の燃料は大量のグラファイトを含んでおり、もし、YMR に埋設するならば、適切なキャニスタを決めなければならない。また、燃料物質をリサイクルする場合、現在は使用済み燃料の質量で決められている処分容量は発電量をベースに再定義する必要がある。

第 2 に、Gen-IV のこれまでの検討では、廃棄物の持つ毒性、発熱量など、廃棄物そのものの仕様によって比較できる部分でのみ比較が行われ、処分性能の比較は含まれていない。しかし、Gen-IV が環境負荷の低減をめざす限り、検討されている 6 つのシステムが本当に環境負荷を低減し持続性のあるシステムであるかどうか比較するために、(1) 廃棄物の形態を特定し、(2) その上でそれに最もマッチする処分場のコンセプトを示したうえで、(3) 前節で紹介した TSPA のような検討をしなくてはならない。このような TSPA 型の評価をしようとする場合、地層処分の性能評価が必要とする作業量が多いため、必要性は認識しつつも、実際にはできない、ということが実態であろう。TSPA のように行えば処分場の仕様は YMR を踏襲するという簡略化がなされても 1 システムを



解析するのに、優に1年はかかる。

第3は、図2に示すように、YMRが首尾よく2010年に開業しても、その時点ですでにその収容能力は限界に近づいていることである。使用済燃料63,000トンという上限は1987年の修正法が成立したときに、第2処分場を確実なものとするために政治的に設定された値で、技術的には何の根拠もない。しかし、これまでの経緯を見ると、YMRのほかにもうひとつ処分場を持つことは当分非常に難しい（事実上不可能に近い）。このような状況では、処分場の収容能力によって将来の原子力の行方が左右され、原子力の持続的な利用は画餅となる。

1つの処分場をできるだけ長く供用しようとする、方法は2つしかない。1つは、処分場の規模（床面積）そのものを拡張する方法、もう一つは、廃棄物の発生量を少なくすることである。仮に、数百年間原子力発電量が年間数%の緩やかな成長をしたとしてもYMR級の処分場1個で済む、という状況が持続性条件を満たしているとする、使用済燃料の発生量は単位発電量に対して100分の1程度まで削減される必要がある。これが、Gen-IVやATW（あるいはAAA、AFCI）計画で目指す目標であることが窺える。実際には使用済燃料（広く高レベル廃棄物）発生量の削減と処分場容量の拡大は同時に模索されねば、およそ2桁の改良を目指す技術革新は難しい。つまり、処分技術と炉も含めた燃料サイクル技術の改善可能な部分をすべて検討し包括的で調和の取れた技術開発をする必要がある。

第4点は、これまで地層処分では世代間の倫理の問題があるため、閉鎖後のモニタリングを行わなくてもすむよう努力してきたが、原子力を将来どのように位置づけるかによって、見方が大いに異なる。ここでは2つの極端なシナリオを考える。

まず第1は、遅くとも今世紀半ばまでには現存の原子力システムを廃止しその後は核分裂エネルギーに依存しないというシナリオである。第2は、現存の原子力システムは次第に退役するかもしれないが、徐々に新しいシステムが普及し、その結果少なくとも100年以上（おそらく数百年）何らかの形で核分裂エネルギーを利用し続ける、というシナリオである。多くのヨーロッパ諸国は第1のシナリオに向かっている。米国は、近年まで第1シナリオかと思われていたが、Gen-IVでは第2の可能性を検討していることになる。日本は、第2のシナリオに近いと考えられる。フランスはおそらくもっとも明確に第2の路線を選んでいると考えられる。

これらのシナリオの違いを処分の観点から見るとどうなるか。スウェーデンなどのヨーロッパ諸国の処分プログラムは国民の意見を取り入れる透明性や研究プログラムの遂行の計画性など、日本でも多くの点が見習われているが、この透明性、研究計画の論理性は、第1のシナリオを取っていることによる部分が大きいと考えられる。すなわち、あと何年で原子力から撤退する、と決定すれば、発生する廃棄物の量は確定し、処分場の規模も確定する。その後、原子力を続けないのであれば、後数10年以内に原子力利用世代とそうでない世代の分かれ目がはっきりとつくという状況が前提であるので、なるべく将来世代への負担を残さない形で最終閉鎖しモニタリングをしなくてもいいようなシステムを求める、というのが論理の当然の帰結である。しかし、再取り出し可能性、可逆性、モニタリングの正当性、記録の保存などの地層処分に伴う解決困難な問題のほとんどすべては、この最終閉鎖という行為から派生している。

第2のシナリオを取ると、「将来世代」の定義が不明瞭になる。今仮に、原子力を

利用する間は同世代に属するというにすることにする。何らかの形で核分裂エネルギーが300年間利用されるとしたら、300年間は同じ責任を共有することになり、処分に対する見方は大きく変わる。処分場を急いで閉鎖する必要は小さい。逆に、なるべく長く処分場を使いたいので、最終閉鎖はあったとしても遠い将来になる。実際、この場合、人間の生物的な1世代を30年とすると、多くの世代が処分場の閉鎖を見ないであろう。その間、処分場と中間貯蔵施設の区別はないに等しい。

現在の YMR を含めて、直接処分の処分場の重要性は今後とも変わらない（むしろ増大する）が、将来を見た場合、将来のリサイクルシステムの開発は、廃棄物の設計、発熱の合理的管理をふくむ高度化した処分場設計の開発とともに進めなければならないことが指摘される。

また、今後ともサイティングは困難であると考えられるので、与えられたサイトにおいて処分容量を拡大するメカニズムを開発することは経済的にも社会的にも新しいシステムの受容性を大いに高めることになる。YMR の場合、発熱に対処する方法は飽和処分場よりも選択肢が多いので、まず、発熱の合理的な管理が突破口になることは間違いない。

---

## 地層処分と新しい原子力システム

---

現在の日本の軽水炉システムから発生する主な廃棄物は再処理後の高レベル廃液をガラス固化して発生する高レベル廃棄物である。日本においては 1999 年末に核燃料サイクル開発機構（JNC）がいわゆる H12 レポート<sup>17</sup>を完成させ、日本において地層処分が可能であること、十分な安全性を長期にわたり確保できることを明らかにした。一方で JNC による高速炉サイクルの実用化戦略調査研究では、新システムが満たすべき要件の一つとして「環境負荷の低減」を挙げている。地層処分のこれまでの研究では、1 万年以上にわたる超長期の安全性を十分確保できるとの結論が得られている。

Gen-IV のレポートの中でも明確に示されていないのが、「環境負荷」とは何か、どのように測定すべきか、さらにどの程度、どのようにして減らすべきか、である。ここでは、これらの点を考察し、日本の地層処分研究開発において今後何が必要となり、何を準備すべきか、検討を加える。

### 現状認識：なぜ更なる環境負荷低減を目指さなくてはいけないのか

まず、今後短くとも 100 年以上（おそらく数百年）にわたり核分裂エネルギーが利用されるであろう、と仮定する。もし、そのような長い時間にわたり核分裂エネルギーを利用すると、処分場の収容量問題が早晚浮上する。現在日本が直面しているサイト選定の困難さを考えると将来第 1 処分場のサイトが確定した場合、それをできるだけ長く使用したいということになるのはほとんど必然的であると思われる。この状況は前述の

---

<sup>17</sup>核燃料サイクル開発機構、我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ一、JNC TN1400 99-021, 1999 年。

Gen-IV の状況にほぼ一致する<sup>18</sup>。

実質的な収容量を増加させる方法は前述のようにいくつかある。しかし、処分場面積を増やすことによって「環境負荷」<sup>19</sup>が線形に増大した場合、処分場を複数作ったのと実質的には変わらないし、廃棄体を集約・減容し処分場のスペースを節約したとしても、処分場から放出される放射性核種の量が増大すれば、環境負荷は増大する。ここに、地層処分のこれまでの研究成果をベースとして、さらに「環境負荷低減」に取り組まなければならない動機が存在する。以上をまとめると、

- サイト確保の困難さから考えて、処分場の収容量を発電量ベースで現在の 10 倍程度に拡大し 300 年間処分場を 1 つで済ませることが安定的持続的な原子力の維持拡大に不可欠である。
- その際、処分場のもたらす「環境負荷」を H12 レポートで処分場がもたらすと想定されたレベルと同等、あるいはより小さくすることが求められている<sup>20</sup>。

### 方向性：どこまで「環境負荷」を低減すべきなのか

この問いに答えるために、「処分場の性能」ということを再考する必要がある。ここでのポイントは、「性能評価モデル」「指標」の 2 つである。処分場の性能は、YMR でも見られたように、処分場から放出された放射性核種を将来の周辺住民が摂取した結果生じる被曝線量率で表されてきた。被曝線量率を求めるため、処分場に埋設される廃棄体の特定、処分場のレイアウトの設計、人工バリアの設計、処分場周辺の天然バリアの特定、生物圏における核種移行のモデル化がおこなわれ、それを統合して性能評価モデルが構築された。住民の被曝は放射性核種が処分場内の埋設地点から漏洩、移行して住民の体まで到達して初めて発生するため、性能評価モデルの主要なパーツは核種移行モデルであるといってもよい。

地層処分の核種移行モデルでは複雑な移行経路を取り扱うため、前述のように移行経路を「人工バリア」「ニアフィールド母岩」「天然バリア」「生物圏」に分割し、それぞれに対してサブモデルを樹て、再結合することで構築される。この再結合の際に問題が生じることを前節で YMR の例をとって論じた。

従来の性能評価モデルを用いると「ゼロ濃度境界」「独立廃棄体」の仮定に加え溶

<sup>18</sup>例えば、H12 レポートで想定されている処分場はガラス固化体 4 万本の収容量を持つ。当該レポートでの想定を基に計算すると、これはおよそ 36 年分の収容量に相当する。数百年核分裂エネルギーを利用すると仮定した場合、これは 1 世紀あたり 3 つの 4 万本相当の高レベル処分場を作らなくてはならないことを意味する。

<sup>19</sup>「環境負荷」の定義が重要である。現在の地層処分性能評価では数キロはなれたところに住む未来の住民の被曝線量率をもって評価する。後述のように、環境負荷の定量化は他の指標を用いても行えるし、そのほうが便利なこともある。

<sup>20</sup>つまり、H12 で構築された地層処分システムでもたらされる「環境負荷」は受容可能なレベルを達成しているという前提に立っていて、今後の技術開発の目標は、拡大した処分量でもこのレベルを達成することに当面おかれるべきであると考える。その意味で、従来の地層処分研究の成果は今後の技術開発の方向性を定める基準線となり、非常に重要である。これは、次節で詳述する（図 9 参照）。

解度限界メカニズム<sup>21</sup>により、被曝線量率で見る性能評価結果には、埋設する廃棄体の特性（特にアクチノドのような地下水中で低溶解性の核種の質量）、複数廃棄体のレイアウトの影響がほとんど現れない。これは、地層処分の技術的成立性を保守的に（つまり、考えるあらゆる状況の中で可能だと）示すためには必要なモデルの特性であったが、前節で述べたような（処分場の収容量が焦点となっている）状況の下では、埋設する廃棄体の特性、処分場の規模とレイアウトの影響がどのように現れるかを正しく反映する評価モデルが求められている。

ゼロ濃度境界ではなく境界面での濃度連続を仮定し複数廃棄体の配列の効果を考慮した VR モデルを用いた先行的研究<sup>21</sup>によって、処分場からの放射性核種放出率は廃棄体の配列に依存すること、廃棄体に含まれる放射性核種の質量を変化させることにより放出率も変化すること、そしてその変化の仕方が廃棄体の配列によって異なることが示されている。この結果は、廃棄体の特性（燃料サイクル、固化プロセス等によって決まる）と処分場の設計が互いに関連し処分性能に密接に影響していることを示している。

そのようなモデルを用いるとして、次に考慮しなくてはならないのが「指標」である。前述のように、これまでの性能評価では将来の周辺住民への被曝線量率を指標としてきた。しかし、核種移行経路末端においてさまざまなメカニズムによりすでに希釈された核種の濃度をもとに求められる被曝線量率はもともと廃棄体の特性の違いを表しにくい。また、解析で用いられる移行経路と移行メカニズムには多くの仮定が含まれており、求められた被曝線量率の数値を解釈するのに多くの注意を必要とする。多くの不確定要素を含む被曝線量率だけではなく、処分性能を直接的に表現でき、さまざまな設計上のバリエーションに対して敏感に応答する指標を開発し「環境負荷」として明確に定義する必要である<sup>22</sup>。

ここでは、次の 2 つを指標として考える。ひとつは、処分場外の領域において存在する放射性核種の毒性<sup>23</sup>の総和であり、もうひとつが、処分場内部に存在するアクチノド核種の質量である。前者を環境負荷の指標<sup>24</sup>として、後者を核拡散抵抗性の指標として用いる。

図 7 は H12 レポートで考慮された高レベル廃棄物地層処分をしたときの環境負荷を示す。この指標で見た場合、被曝線量率の結果から一般に支配的といわれている長寿命の核分裂生成物の影響よりも Np-237 とその娘核種の寄与の支配的なことがわかる。

---

<sup>21</sup> Ahn, J., D. Kawasaki, P. L. Chambré, Relationship among Performance of Geologic Repositories, Canister-Array Configuration, and Radionuclide Mass in Waste, *Nuclear Technology*, 126, Oct. 2002.

<sup>22</sup> これはサイクルと処分との関係を考えるために必要なだけでなく、処分場設計そのものにも不可欠である。従来のような処分概念の成立性を示すための保守的モデルではなく、今後は設計の違いを敏感に表現できるモデルが求められる。

<sup>23</sup> ここでは「毒性」を「ある領域に存在する当該核種の放射能 (Bq)」を「経口摂取の最大許容濃度 (Bq/m<sup>3</sup> 水) で除した量で表す。単位は「m<sup>3</sup>」であり、経口摂取できる溶液まで希釈するのに必要な水の体積と解釈できる。

<sup>24</sup> 処分場外に存在する放射性核種の毒性の総和は、将来住民の被曝を直接的に評価したものではないという意味で、潜在的（間接的）指標である。しかし、処分場から外への核種放出率を評価するために処分場内部での核種移行を評価する必要があり、そのプロセスにおいて処分場の「核種保持」性能を取り込んだことになると考えられる。その点から考えると、廃棄物そのものの放射性毒性によって分離核変換の性能を比較してきた[5]これまでの毒性評価とは異なるものであることに注意されたい。

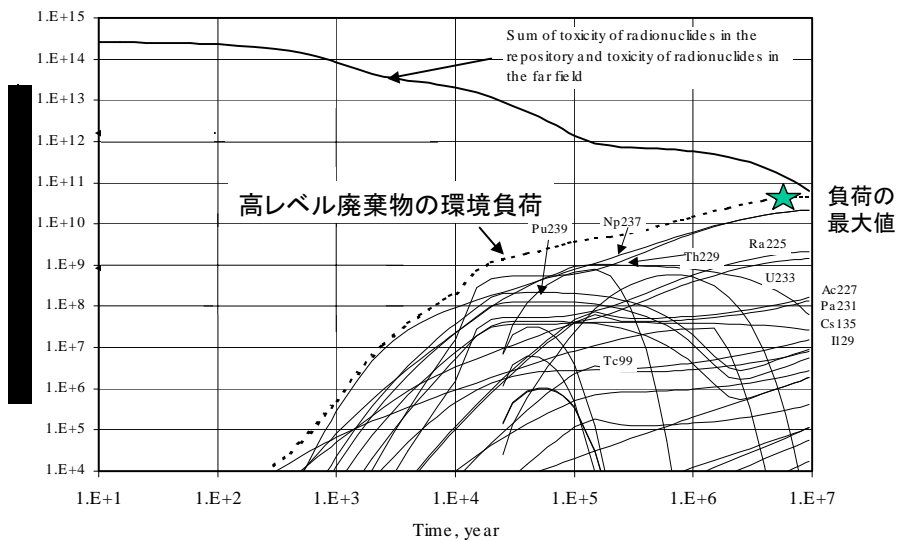


図 7: 軽水炉使用済み燃料再処理で発生した 4 万本の高レベル廃棄体による環境負荷<sup>25</sup>

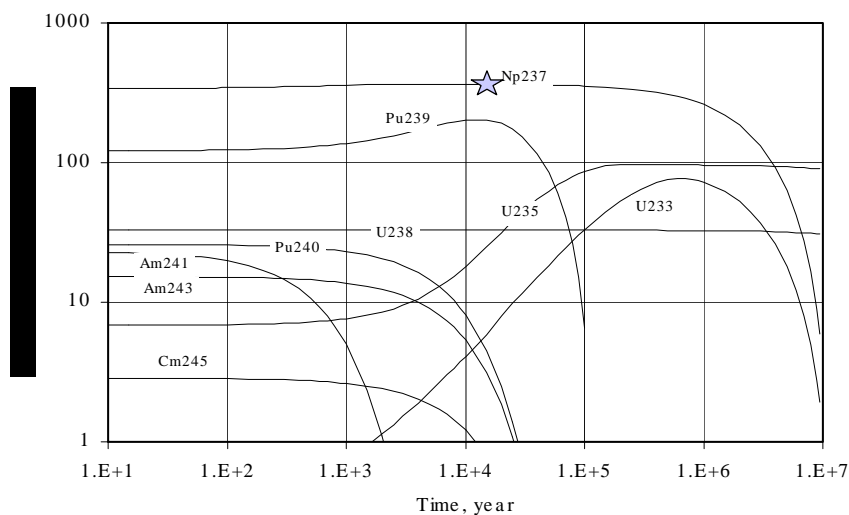


図 8: 軽水炉使用済み燃料再処理で発生した 4 万本の高レベル廃棄体による核拡散負荷<sup>25</sup>

図 8 は同じ仮定のもとで求めた兵器転用可能物質の総量を裸の球形臨界質量で割って規格化したものを示す。およそ 100 本の廃棄体を回収すれば Np から最小臨界質量を回収できることを示している<sup>26</sup>。

<sup>25</sup> Ahn, J., Advanced Nuclear Fuel Cycle for Improved Safety of Geologic Disposal, 2nd NUCEF Int'l Symp., Hitachinaka, Nov. 16-17, 1998, JAERI, 1999.

<sup>26</sup> 最近の研究によれば、処分場から数百本の廃棄体を査察の目をかいくぐって秘密裏に回収することは経済的にも技術的にもさほど困難なことではないことが示されている。また、花崗岩等の硬岩系の母岩のほうが盗掘時の雑音発生を検知し易いという観点から、粘土等の軟岩系の母岩よりもよいという指摘もされている。

また、VR モデルを用いて、埋設時廃棄体に含まれる  $N_p$  の量を変化させた結果を比較すると、(1) 同じ量の  $N_p$  を含む場合でも廃棄体の配列によって処分場からの放出率が異なること、(2) 図 7 で示される環境負荷指標と図 8 で示される核拡散抵抗性指標は  $N_p$  の廃棄体中含有量にほぼ比例して変化すること、が確認されており、指標の敏感性という点も満たしているといえる。

これらの指標を用いて地層処分による負荷を評価するとして、では、どこまでの負荷低減を目指せばよいのであろうか。

図 7 によれば、およそ 700 万年のあたりで処分場外側に放出された放射性核種の総毒性（環境負荷）がピークを迎える。H12 レポートでは図 7、8 で想定されたのと同じ処分場からの放射性核種放出による周辺住民への被曝は十分小さいことが示されている。そこで、図 7 のピーク値でも許容できる環境負荷であると仮定する。

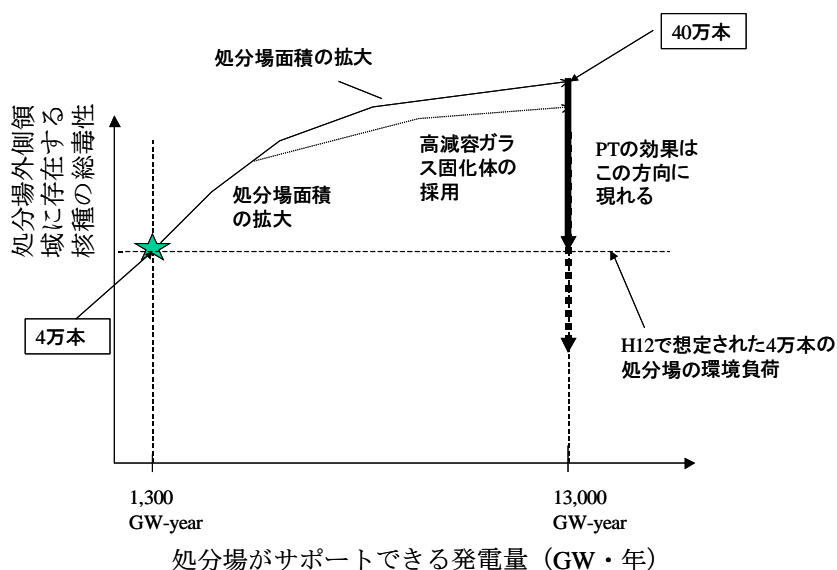


図 9: 処分容量の拡大と環境負荷。

図 9 において、☆印で示された点が、図 7 のピーク値で示される環境負荷である。横軸は処分場がサポートできる発電量であり、☆印のケースは H12 レポートで仮定された使用済み燃料仕様によればおよそ 1300GW 年の発電量に相当する。もし、同じ軽水炉を継続して使用し同じ廃棄体を発生し続けて 10 倍の発電量に相当する廃棄体を処分場に収容しようとするとき、40 万本の廃棄体の埋設が必要となる。VR モデルを用いた結果によれば、環境負荷は廃棄体の数に必ずしも比例して増加するのではなく、廃棄体の配列によっては非線形に増加する。図 9 には無数にある可能な曲線のうちの 2 ケースを示す。例えば、200 本×200 本のレイアウトである 4 万本の処分場を 40 万本に拡大するとき、地下水流れと平行な方向の数 200 を保ったまま流れと垂直な方向の廃棄体の数を 2000 に拡大すると、環境負荷は比例して 10 倍に増加する。しかし、流れ方向の数を 2000 にし、流れと垂直な方向の数を 200 で保つと、環境負荷はほとんど増加しない。実際には処分場を限られた方向にだけ 10 倍も拡張することは想定しがたく、この両極端の間に現実が存在すると考えられる。

また、同じ地質条件の岩体を確保できないなどの理由から面積の拡大を数倍にとどめ、残りを廃棄体の高減容化で対応することも考えられる。この場合廃棄体の発熱特性

が変わることが予想されるので、廃棄体埋設間隔などの処分場設計自体の変更を伴う。この場合も数倍の負荷増大が想定される。

いずれの場合も発電量で 10 倍の収容量を想定すると、最大で 10 倍の負荷増大が見込まれる。これをもとの 4 万本レベルの負荷まで低減しようとする、詳細な計算の結果によれば一番寄与の大きい Np の廃棄体中の含有量を現在の 100 分の 1 程度まで低減すればよいことがわかる。

核不拡散の観点からは、図 8 によると高レベル廃棄体に含まれる Np と Pu の質量を 10 分の 1 にできれば、4 万本の処分場全体の兵器転用可能物質の量を臨界質量で数百個から数 10 個分に減らすことができる。さらに、発電量を 10 倍にしつつ兵器転用可能物質の量を数 10 個に抑えようとする、廃棄体に含まれるこれらの核種の量を 100 分の 1 に減らす必要がある<sup>27</sup>。

### まとめ

本章での議論は次のようにまとめることができる。

- 廃棄物（あるいはそれに含まれる核種）の質量をベースにした評価指標を用いることによって、処分場の規模、レイアウト、配列などの影響を表すことができる。
- そのような指標を評価した結果、これらの変数は確かに指標に対して重要な影響をおよぼす。
- このことから、処分場の設計とそこに持ち込まれる廃棄物の中身を決めるプロセスは同時に考慮する必要がある。

---

<sup>27</sup> 廃棄体に含まれる兵器転用可能物質の濃度が低ければ、盗掘回収する魅力が薄くなる。従って、核拡散負荷を評価するためには処分場に埋設される物質の総量だけでなく、廃棄体中の濃度も重要な指標である。[7]によれば、盗掘から兵器を製造するまでのコスト（廃棄体 1 体当たりの濃度が重要なパラメタ）と白紙から Pu 生産炉を作り兵器を製造するまでのコストの比較により、廃棄体に含んでもよい限界濃度を求められると指摘しているが、明確な数値は示されていない。