

高レベル放射性廃棄物を 地下深く^{しま}終う地層処分

増田 純男 著

「高レベル放射性廃棄物を地下深く^{しま}終う地層処分」 発刊にあたり

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

理事長 高 橋 彰

当センターは、昭和51年(1976年)に創立以来、中立的な調査研究機関として、低レベルから高レベルまでの放射性廃棄物の処理・処分の調査研究や高レベル放射性廃棄物の最終処分積立金等の管理を行う資金管理法として事業を展開し、本年度創立40周年を迎えることになりました。これを記念して、放射性廃棄物処分事業の進展に貢献できる事業を計画し、その一つとして放射性廃棄物処分の知識や理解の増進に役立つ以下の三部作を刊行することとしました。

- ◇ 放射性廃棄物処分の原則と基礎
- ◇ 高レベル放射性廃棄物を地下深く^{しま}終う地層処分
- ◇ オーラル・ヒストリー ～地層処分研究開発を語る～

本書は、その中で、高レベル放射性廃棄物の地層処分に焦点を当てたもので、廃棄物の発生や管理、地層処分概念の開発の歴史、安全評価などから、今後の課題や代替技術に至るまでを包括的に解説しています。

本書は、地層処分が専門でない方にも理解できるように解説されていますので、既に地層処分の事業や研究開発に参画している方だけでなく、これからそれらの分野に関わろうとしている方にも役立つと考えます。

著者である増田純男氏には、2年間にわたり、氏の40年に及ぶ経験から得た知識をまとめていただきました。厚く御礼を申し上げます。また、本書を刊行できたのは、当センターの賛助会員を始め、関係各位のご支援とご協力の賜物です。ここに、改めて感謝の意を表します。

2016年12月

まえがき

高レベル放射性廃棄物の最終的な措置として、地層処分するとの方針が決まり研究開発が始まって40年、当初の目論見どおりに進めば既に地層処分事業が始まっていたはずだが、現実には処分地選定の最初の段階である文献調査さえ開始できていない。

2012年に日本学術会議が原子力委員会に報告した「回答 高レベル放射性廃棄物の処分について」において、最終処分事業推進の根源的な問題点として地層処分に対する社会的合意形成が極度に困難である現状に関し、その客観的諸要因を明確にし、直視することの重要性が指摘された。そのような要因の1つについて、日本原子力学会放射性廃棄物地層処分の学際的評価研究専門委員会は、何故当該の選択肢を選んだか、議論の道筋と参照された根拠をアーカイブとして残しておき、後でトレースできるようにすることが、段階を踏んで社会全体における意思決定のプロセスを着実に進めていく上で不可欠であると指摘している。また、原子力委員会は日本学術会議の回答に対する見解の中で、トイレなきマンションという表現に代表されるように、過去の原子力政策や核燃料サイクル政策において、廃棄物処分の取り組みが原子力発電の取り組みと一体で議論されてこなかったのではないかと批判があると考えている、としている。

確かに地層処分の選択に至る過程と技術の現状は、地層処分専門家の間での認識が他の原子力分野の専門家間で共有されてこなかった可能性がある。地層処分問題は他の原子力分野における科学技術的な課題や対話に必要な知識・情報との特異性によって、原子力の専門家にとっても理解が容易ではないという側面があるからではないかと思われる。

原子力委員会も引用している「トイレなき」という表現は「解決策がない」と捉えられている可能性があるが、技術や制度の解決策の欠如ではなく「トイレの位置が決まっていない」状況にあるということである。このような放射性廃棄物という嫌がられがちなものによくある無意識による負の側への誤解を解こうと、本書は地層処分の有する多面的な側面に興味を持ち従事してきた著者が、この40年間に知り得た知見をもとに地層処分の考え方を解説する書である。本書は国民的合意に至る道しるべの最初の通過点として、原子力界における共通認識の醸成を図るために、まずは地層処分を専門としない原子力関係者を想定読者として執筆した。

本書が次世代を担う地層処分研究者を含め、より広範な読者の興味にやささかでも役に立つことを願う。

執筆にあたり，朽山修氏をはじめとする原子力安全研究協会の同僚各位から有益な助言と資料収集や図表作成等の支援をいただいた。厚くお礼を申し上げます。

また，雑駁かつ粗削りな原稿に丹念に目を通してくださり，出版可能な状態に仕上げてくださいましたERC出版の長田高氏と編集を担当された牧智子さんに心よりの謝意を表する。

2016年12月

増田 純男

目 次

発刊にあたり	iii
まえがき	iv
はじめに	2
なぜ地層処分が必要なのか？	2
その安全性の科学的根拠は？	3
 第1章 高レベル放射性廃棄物の発生と管理の現状	6
再処理による高レベル放射性廃棄物の取り出しとガラス固化	6
ガラス固化体の危険性の考え方	7
ガラス固化体とウラン鉱石の放射能の比較における留意点	8
ガラス固化体の貯蔵の現状とその先のエンドポイント	8
米国における高レベル放射性廃棄物の処分オプションの 包括的評価による地層処分概念の選択	10
参考文献	16
 第2章 地層処分概念の開発経緯	18
第1期（1950年代～1970年代中頃）－地層処分黎明期－	19
米国における本格的な検討の開始	19
第1期における日本の状況	21
第2期（1970年代中頃～1980年代中頃）－地層処分概念の骨格形成－	23
国際的な環境問題の認識の高まり	23
Polvani 報告書	24
米国における地層処分概念の骨格形成	26
国際協力プロジェクトの普及	27
Coady 報告書	28
第2期における日本の状況	30
第3期（1980年代中頃～2000年頃） －地層処分概念の発展と実施に向けた具体化－	33
NAS1983 報告書	33
地層処分研究開発の重点項目とその進め方	36
ニアフィールドアプローチ採用の背景	39
動燃における地層処分研究開発の推進	40
重点研究開発プロジェクト	41

研究開発成果の取りまとめ	42
日本における研究開発段階の総括	44
参考文献	46
第3章 地層処分の選択理由	50
廃棄物管理の基本的考え方	50
高レベル放射性廃棄物対策の考え方	50
地層処分選択理由の技術的側面	51
地層処分選択理由の環境・倫理的側面	52
参考文献	54
第4章 地層処分概念の構成	56
地質環境の固有包蔵性能と地層処分システムによる頑健性の確保	56
日本の標準的な地層処分システム	57
地層処分概念の柔軟性	60
参考文献	66
第5章 安全評価による地層処分概念の妥当性の確認	68
安全評価に関する国際的集約意見	68
安全評価の方法	70
H12処分概念の安全評価	70
参考文献	77
第6章 地層処分システムの品質保証	78
地層処分システムの品質保証の特徴	78
地層処分における具体例	79
参考文献	81
第7章 地層処分における安定な地質環境の意味合い	82
地層処分の安全機能において重要な地質環境の広がり	82
地層処分の成立性において意味のある「安定な地質環境」に関する議論	85
参考文献	86
第8章 地層処分で考慮すべき時間枠	88
国際的集約意見	88

日本における評価時間枠の議論	91
参考文献	92
第9章 地層処分実施段階における課題	94
9.1 貯蔵から処分への意思決定	94
NAS2001 報告書	94
ROST 報告書	95
9.2 回収可能性に関する議論	98
廃棄物の回収可能性の備えを有利とする要因	98
廃棄物の回収可能性の備えに対して考えられる反対要因	99
9.3 信頼構築と安全コミュニケーション	100
処分事業の実施における公衆参加による意思決定プロセス	100
多面的な信頼構築	102
DAD 方式から EIC 型コミュニケーションへのパラダイムシフト	103
システム1とシステム2の思考	104
高レベル放射性廃棄物対策に関するEIC型対話モデル	107
9.4 段階的アプローチ	108
処分場の閉鎖までの段階的意思決定を可能とする計画の柔軟性	108
参考文献	110
第10章 地層処分の代替技術としての核種分離・変換技術の効果	112
核種分離・変換技術への期待	112
核種分離・変換技術の効果に対する疑問	112
ピグフォード見解に関する注記	113
参考文献	116
おわりに	118

はじめに

なぜ地層処分が必要なのか？

火力発電は炭素と酸素の化学反応によって生じる熱で蒸気を作り、この蒸気でタービンを回して発電する原理なので、発電量に正比例する量の二酸化炭素（CO₂）が発生する。原子力発電では、ウランの原子核が核分裂生成物に変わる核反応で熱が出て、この熱を火力発電と同じようにタービンで電気に変える。したがって、原子力ではCO₂は出ない代わりに発電量に正比例した量の核分裂生成物が出る。この核分裂生成物をひとまとめに取り出してガラス状態に固めたもの（ガラス固化体）が高レベル放射性廃棄物である。高レベル放射性廃棄物には高い放射能があるので、発生と同時に人間に害が及ばないように隔離され、現在は地上の貯蔵施設に安全に保管されている。このような貯蔵は期間が限られていれば技術的にも経済的にも何ら問題はない。しかし、期限を限らず貯蔵するとなると、高レベル放射性廃棄物の危険性が小さくなるまでには数万年にわたる時間が必要なので、その間、貯蔵施設を何度も建て替え、維持・管理し続けなければならない。高レベル放射性廃棄物を核反応によって消滅させる技術の研究も行われているが、将来の技術として期待されているものの、実用の段階に達するにはまだまだ時間が必要であると考えられている。また、仮に将来新しい技術が開発されたとしても廃棄物が完全になくなるわけではない。

そこで最終的な手段としては、これを人間の生活から遠く離れた場所に持ち去り、そこに確実に留めて置くことが必要になる。このような「遠い場所」として、空（宇宙）、水（海洋）そして地下が考えられる。

高レベル放射性廃棄物を長時間確実に留めておくことができるという意味では、地下深くが最もふさわしい場所ということになりそうである。なぜなら、地下深部では本来のもの動きが極めて小さいという特性があるからである。また、隔離した高レベル放射性廃棄物にテロリズム等により人間が接近する可能性を極力小さくするという意味からも、地下深部を選ぶことは適切である。

国民1人当たりが生涯で使った原子力発電による高レベル放射性廃棄物の量をガラス固化体の大きさに換算するとおよそゴルフボール3個分となる。これまでに行われた原子力発電によって、ガラス固化体に換算すると約2万5000本分の高レベル放射性廃棄物が既に存在している。電気を使った個々人がそれぞれ3個分のガラス固化体の処分を考えることはとても現実的でなく、ひとまとめに1ヵ所の地層処分場に入れる方がはるかに合理的で安全なので、日本では原子力発電環境整備機構（NUMO）を地層処分の事業主体とする高レベル放射性廃棄物の最終処分計画が進められている。

その安全性の科学的根拠は？

地層処分によって長期的に安全性が確保できることは、まだ社会の中で幅広く理解されているとは言えない。その根本的理由は、地層処分の安全性が感覚的に理解しにくいものだからだと思われる。

高レベル放射性廃棄物の危険性の原因となる放射能は、私たちの五感で感じることできるものではない。また、高レベル放射性廃棄物を保管する地下深部の状況をつぶさに見ることはできない。さらに、高レベル放射性廃棄物の危険性が続く遠い将来は経験できるものではない。しかし、地層処分の安全性は、これまでの研究によって科学的に確かなものと考えられている。

金属の鉱床や化石などが数十万年以上にわたって、地下に安定して存在し続けているのはなぜであろう。それは主に地下深部において幅広く見られる次の2つの環境条件が理由である。そしてこれらこそが、地層処分の安全性の根拠にもなっている。

①深層地下水の動きが極めて遅いこと

②地下深部には酸素がほとんど存在せず、化学的に活発な反応を起こしにくいこと（不活性）

①については、深層地下水の年代測定を行ってみると、数万年以上の古いものが多いことから確認することができる。②については、雨水が長い年月をかけて地層の中にしみこんで深層地下水となる過程で、まず地表近くの土壌中の有機物や微生物によって酸素が消費される。さらに深部の岩盤中の鉄鉱物などの還元物質によって酸素が消費される結果、深層地下水は不活性な性質が安定的に保たれる。

地層処分は高レベル放射性廃棄物を岩石と同じようにケイ素を主成分とするガラスとして固め、以上のような好ましい条件を持つ地下深部に定置したうえで、さらに多重の人工バリアに包むことによって、長期にわたる閉じ込め性を確実に保つことができるようにするものである。

安全確保のための技術が実際に有効であることを科学的な方法によって確かめることができる。まず、地層処分した高レベル放射性廃棄物が私たちの生活に影響を与えるかもしれない「プロセス」を科学的に考えてみる。

このようなプロセスとして、まず、火山や断層が地下の処分場を破壊したり、廃棄物を地表に持ち上げるといった可能性が考えられる。また、人間がうっかり処分場に接近するという可能性もある。さらに考えておかななくてはならないのは、地下水が放射性物質を地表に運ぶ可能性である。

火山や断層活動については、過去約200万年間の火山活動や活断層の生じた場所と現在の日本周辺のプレート配置との関係が研究されている。その結果、今後数十万年は日本周辺のプレート配置がこのまま続くと考えられるところから、現在活動中の地域から離れた別の場

所に火山や活断層が新しく生じて処分場に影響を与える可能性は極めて小さいと考えられている。

テロリズムのような目的を持った人間の接近を防ぐという意味では、地層処分は最も有効な対策の1つだということは既に述べたとおりである。そして、鉱物資源の調査など別の意図を持った人間の接近については、価値のある資源が地下に存在しない場所を選べば、人間が地下深部に入って処分場に接近する確率は、遠い将来においても極めて小さいと考えることができる。

地下水は放射線を浴びただけで放射能を帯びることにはならない。放射性物質が地下水によって溶かし出されることが、地下水が放射能を帯びる唯一の可能性である。ガラス固化体から放射性物質が溶かし出されるまでに数万年以上かかり、さらに、深層地下水が地表に戻るまでには数万年という時間が必要となる。これに加えて、放射性物質は岩に吸着することによって、もっと遅く動くため、地表に出てくるまでにはさらに長い時間がかかる。

放射能は時間の経過とともに減衰するという固有の性質を持っているので、数万年を経た時点では、高レベル放射性廃棄物に残された放射能の量は、天然に太古からあるウラン鉱物に含まれる放射能の量を下回るようになる。このため、遠い将来、人間の生活圏に放射性物質が戻ってきても井戸水などの表層水中の放射能濃度は、天然の放射性物質よりもはるかに低くなる。

第 1 章

高レベル放射性廃棄物の発生と管理の現状

再処理による高レベル放射性廃棄物の取り出しとガラス固化

原子力発電に使われた核燃料は、核分裂反応の効率が低下すると、やがて使用済核燃料として取り出され、一定期間原子力発電所において保管される。核燃料のリサイクルを行わない場合には、使用済核燃料はそのまま高レベル放射性廃棄物となる。一方、原子力発電所から使用済核燃料を再処理工場に運び出して再処理する場合には、ガラス固化体が高レベル放射性廃棄物となる。使用済核燃料をリサイクルして利用するため、再処理してウランとプルトニウムを回収する過程で使用済核燃料に閉じ込められていた核分裂生成物や超ウラン元素は、放射性廃液としてひとまとめに分離される。この廃液はガラス原料とともに高温で処理されガラス固化体となる。

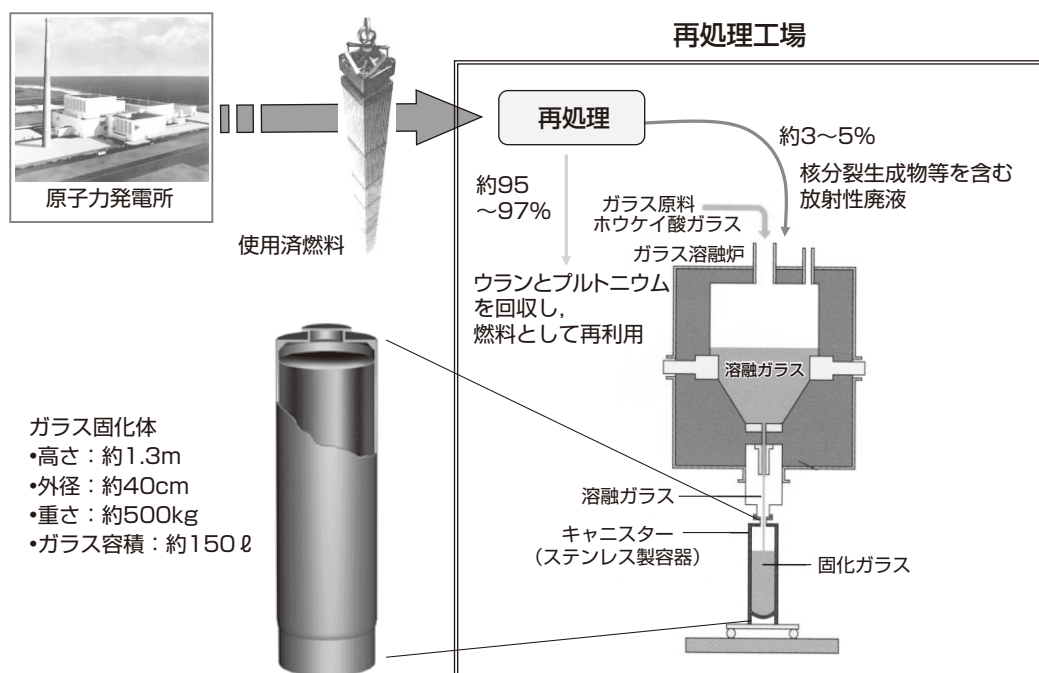


図 1-1 高レベル放射性廃棄物のガラス固化体 【NUMO, 2002より作成】

ガラス固化体の危険性の考え方

ガラス固化体は、無機の固体で揮発性のものや気体を含まない物理的、化学的に極めて安定した物質である。またウランやプルトニウムは回収され除かれているので、臨界の可能性もない。しかし、発生後数百年間は極めて高い放射線を出し続ける。たとえば、仮に発生直後のガラス固化体の表面から1mのところの人が2秒間いると、職業人の年間被ばく限度を超えるほどである【JNC, 1999b; 若杉, 2003】。

このような高い放射線レベルは時間の経過とともに放射性崩壊によって下がり続ける。図1-2は放射能の推移という視点でガラス固化体の特徴を眺めたものであり、核燃料1トン（ウラン1トンからガラス固化体約1.3本が作られる）について、核燃料が原子炉に装荷される時点を中心に、それ以前とそれ以後の放射能の変化を示している【JNC, 1999a】。

4.5%の濃縮度のウラン（U-235を4.5%含むウラン）の核燃料1トンの原料となるウラン鉱石は、品位（鉱石中のウラン含有率）1%の場合、約750トン必要であり、これには放射能を有するU-235やU-238およびそれらの子孫核種が含まれている。鉱石から六フッ化ウランへの転換の過程で子孫核種がミルテーリング（ウラン鉱滓）として取り除かれ、さらに濃縮によって減損ウランが除かれることによって、核燃料の放射能は一旦鉱石分より低くなる。原

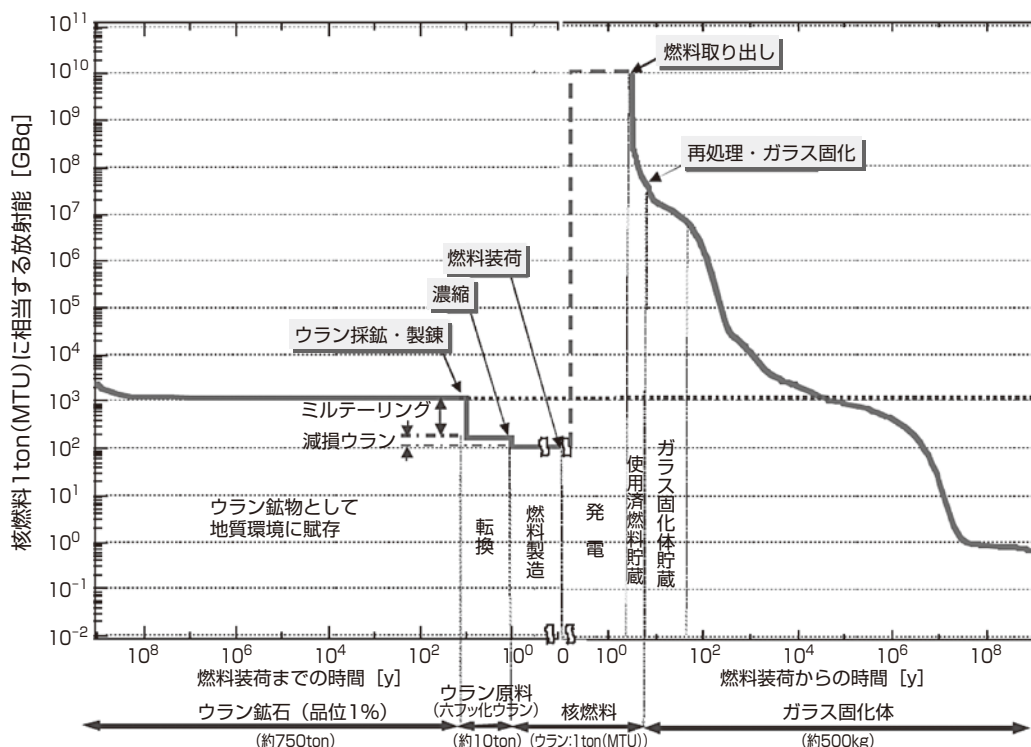


図 1-2 放射能の推移から眺めたガラス固化体の特徴
(濃縮度4.5%の核燃料1MTU相当)【JNC, 1999a】

原子炉に装荷され核分裂によって発生する核分裂生成物やアクチニド等のために、原子炉から取り出された直後の使用済核燃料の放射能は、元のウラン鉱石の放射能と比較すると約7桁（約1000万倍）高くなる。さらにガラス固化体になってから1000年後にはガラス固化時の約2000分の1にまで低下し、ウラン鉱石とガラス固化体の放射能を示す線が交差する数万年程度で総放射エネルギーとして等価になる。

ここで、注意しなければならないことは総放射エネルギーが等価になるということの解釈である。

ガラス固化体とウラン鉱石の放射能の比較における留意点

地球内部にあったウランを地表に取り出し、核燃料に加工して原子力発電に使った結果、ウランは核分裂によってウランより半減期の短い核種に変換されるため比放射能が高くなり、元のウランに比べると総放射エネルギーが著しく増加する。使用済の核燃料を再処理してその廃液をガラスに固めた固化体の総放射エネルギーは、数万年後には放射性崩壊により元の地球内部にあったウランの総放射エネルギーと等しい値にもどる。

750トンに含まれる放射エネルギーがガラス固化体500kgに含まれる放射エネルギーと同じ量ということとは、放射能濃度の比較では、ガラス固化体はウラン鉱石よりも1500倍高いことに注意しなければならない。

ガラス固化体が安全になるのに10万年かかるという表現がしばしば見受けられるが、たとえば10万年後の放射能濃度は、ウラン鉱石が約100万Bq/kgであるのに対して、ガラス固化体は約15億Bq/kgであるので、直接触れても構わないほど安全になるということではない。放射能濃度がウラン鉱石並みになるのは1000年以上先である。

何年経ったらガラス固化体はどのくらい安全といえるのかといった議論で注意すべき大事なことは、その潜在的危険性は、それがどんな形で危害を与えるかに依存するということである。ガラス固化体の場合は現在重コンクリートの遮蔽材が設けられた貯蔵施設にあるが、それがどのようなプロセスを経ると我々に危害を加えることになるのかという考察こそが重要であり、潜在的危険性のみを心配することは杞憂に過ぎない。

一方、発生する廃棄物の物量は他の発電源と比較すると極めて少ない。たとえば出力100万kWの発電所1年間の運転を比較すると、火力発電では約25億m³（約500万トン）の二酸化炭素が発生するのに対し、原子力発電によって発生するガラス固化体は約5m³（約15トン）に過ぎない。外径約40cm、高さ約1.3m、重さ約500kgのガラス固化体1体は、10万人が電気の約3割を原子力によって発電をしたときの1年分の廃棄物の総量である。

ガラス固化体の貯蔵の現状とその先のエンドポイント

日本でこれまでに行われた原子力発電によって、2014年度末時点では、ガラス固化体換

算で約2万5000本の使用済核燃料が発生している【資源エネルギー庁, 2016】。このうち約2200本は既にガラス固化体とされており、青森県六ヶ所村と茨城県東海村の貯蔵施設においてそれぞれ安全に貯蔵管理されている。貯蔵管理は30年から50年継続されることになっており、このような期間を限定した貯蔵は技術的にも経済的にも何ら問題はない。しかしながら、ガラス固化体の危険性が十分小さくなるまでの間、貯蔵管理施設を建て替え、維持・管理し続けることの保証には多くの不確実性がある。少なくとも数万年以上という長い期間になると、その間の事故やテロリズムの危険性が無視できなくなるし、将来世代へ管理責任と経済的な負担を残すことになるので、最終的な措置としては何らかの方法で必ず始末しなければならない。

貯蔵施設において、ガラス固化体は、図1-3に示すように、遮蔽物によって人間環境から隔離されて安全が保たれているが、これとは別の隔離対策として採り得るのは人間環境から遠い場所に置くことである。人間環境から遠い場所としては、宇宙、海洋底、地下深部、離島、あるいは南極/北極などが考えられる。

さらに別な対策としては、現在は見通しが得られていないが、高レベル放射性廃棄物から

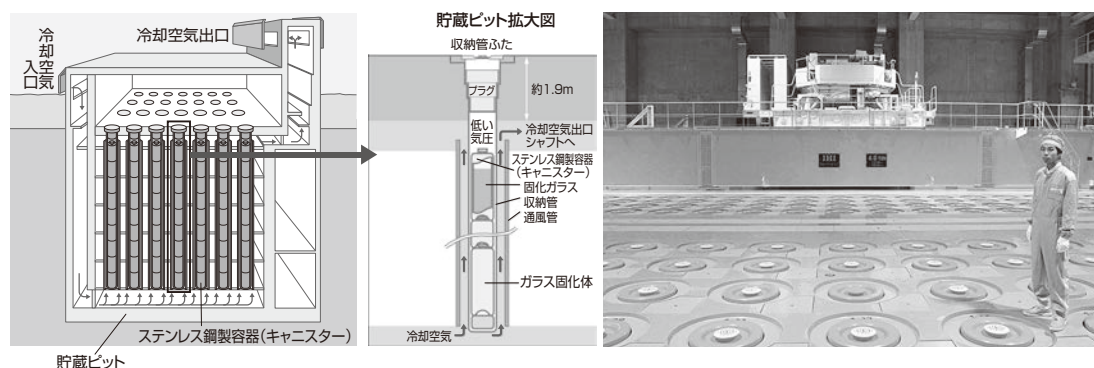


図 1-3 高レベル放射性廃棄物の貯蔵施設【日本原子力文化財団, 2016 ; 日本原燃(株)】

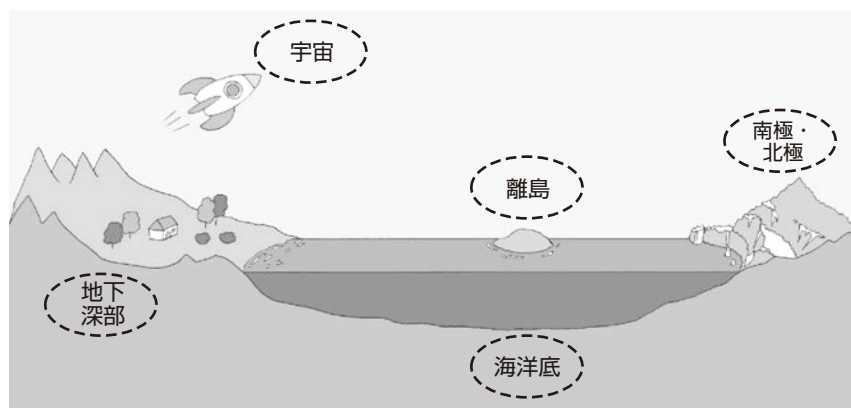


図 1-4 人間環境から隔離した位置

寿命の長い放射性核種を分離して、安定あるいは放射能寿命の短い核種に変換するという未来の技術に期待する考え方もある。

米国における高レベル放射性廃棄物の処分オプションの 包括的評価による地層処分概念の選択

高レベル放射性廃棄物をどこにどのようにして処分するかといういくつかの方法については、1980年に米国エネルギー省（DOE）が高レベル放射性廃棄物およびTRU廃棄物の管理・処分による環境への影響についての分析結果を取りまとめた報告書【DOE, 1980】が包括的な評価の結果として、今なお有力な根拠となっている。

米国においては、1969年に制定された国家環境政策法（National Environment Policy Act of 1969: NEPA）に基づき、連邦政府の関わるあらゆるレベルの行為（政策、計画、事業等）に対して、環境アセスメントを行うことを義務づけ、連邦政府の環境保全の役割、責任を法的に明らかにしている【青山, 2010】。高レベル放射性廃棄物およびTRU廃棄物については、1980年2月に大統領が、地層処分（「現存するおよび将来発生する高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物の地層中の鉱山型処分場への処分」と定義された概念）を行うという政策声明を行った。

この政策声明の根拠となったのは、DOEがNEPAの定めに従って取りまとめた環境影響評価書（Environmental Impact Statement: EIS）【DOE, 1980】である。このEISは約1800ページに及ぶ膨大なものである。

このEISでは、提案措置（proposed action）である地層処分、代替案（alternative action：(1)超深孔処分、(2)海洋底下処分、(3)離島処分、(4)岩石溶融処分、(5)氷床処分、(6)井戸注入処分、(7)核変換、(8)宇宙処分）および現状維持（no action alternative）を比較・検討している。

このうち、現状維持とは廃棄物を発生サイトあるいは地表や浅地中の貯蔵施設に無限時間にわたって保管するというものであるが、これは大統領声明「・・・廃棄物対策問題の解決を将来世代に引き延ばしてはならない・・・」に適合しないとして、他のオプションとの詳細な相対評価を行う以前に退けている。

この結果、地層処分の代替となり得る処分概念として、以下の8つを取り挙げている。

超深孔処分（Very Deep Hole disposal）

廃棄体を地層処分よりも深い地下1万m程度の低透水性の岩盤中に定置することにより、廃棄体は生物圏から完全に隔離され、かつ地下水移行を考慮しても生活圏に至るまでに十分な時間がかかり、放射性核種が確実に崩壊するまで地下深部の岩体に閉じ込められる。

海洋底下処分 (Sub-seabed disposal)

廃棄体を深度3000～5000mの海洋底の下に賦存する安定な堆積層中に定置する方法である。堆積層から海面近くの海水まで核種が輸送される過程は希釈・分散による緩慢な過程であり、加えて、非常に深い水柱（water column）は人間侵入に対するバリアになる。

離島処分 (Island Mined Repository)

陸地から離れた島に地層処分場を建設する概念である。沖合の島の地下水流動は、降水起源の淡水循環系と海水起源の塩水系の間に生じる塩淡水境界によって区分されている。淡水が循環している系（淡水レンズ（freshwater lens）と呼ばれる）の中（図1-5の位置A）に処分場を置く場合は、廃棄体から放射性核種が流出したとしても淡水レンズの中を非常に緩慢に循環して海岸線から排水されることになるので、移行に十分な時間がかかり、放射性核種が確実に崩壊するまで閉じ込められる。一方、位置Bは、動水勾配が存在しないため、塩水領域内の地下水による放射性核種の移行は拡散によるのみであり、この位置に処分場を建設すれば、海洋底下処分と同様の高い閉じ込め機能が期待される。

岩石熔融処分 (Rock Melting disposal)

使用済核燃料の再処理により発生する高レベル放射性廃液をそのまま地下の空洞に注入すると、放射性核種の崩壊熱が周囲の岩石を溶かして岩石と放射性核種が一体化し、やがて約1000年後には再固化して地下深部に安定なマトリクスを構成することになり、放射性核種はその中に閉じ込められるであろうという概念である。

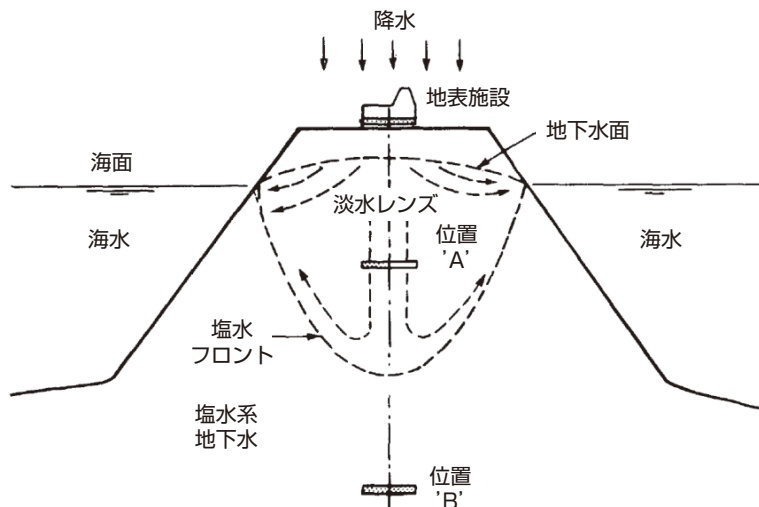


図 1-5 離島における処分位置の水理学的条件による区分【DOE, 1980より作成】

氷床処分 (Ice Sheet disposal)

高レベル放射性廃棄物あるいは使用済核燃料を封入したキャニスターを南極大陸あるいはグリーンランドの氷床に浅い穴を掘り、廃棄物をその中に定置すると、廃棄物の周囲が解けて沈下して周りの厚い氷に囲まれるようになるので、有意な気候変動がなければ、確実に隔離されるという概念である。

井戸注入処分 (Well Injection disposal)

井戸注入技術はもともと石油産業における油田塩水 (oil field brines) を、ポンプを使って元の原油貯留層に戻して処分するために開発された方法であり、さまざまな天然のあるいは産業から出る液体廃棄物の処分のために、実質的に使用されてきた。

核変換 (Transmutation)

長寿命核種を安定なあるいは短寿命の核種に変換することにより、残りの廃棄物に対して要求される閉じ込め期間を短縮することによって、高レベル放射性廃棄物の潜在リスクそのものを小さくすることを期待する概念である。

宇宙処分 (Space disposal)

高レベル放射性廃棄物をスペースシャトルで太陽軌道に投入するというアイデアである。スペースシャトルは廃棄物パッケージを低周回軌道 (low-earth orbit) まで運ぶ。軌道変換機 (Orbital Transfer Vehicle) がシャトルから切り離され、廃棄物パッケージやその他の推進系 (propulsion stage) が地球脱出軌道 (earth escape trajectory) に入る。軌道変換機はシャトルに戻る一方で、残りの推進系は廃棄物パッケージを太陽軌道に投入する (図1-6)。

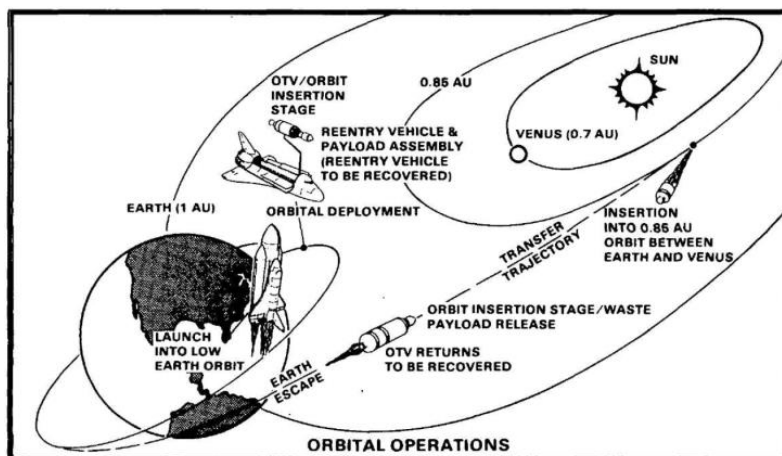


図 1-6 宇宙処分 [DOE, 1980]

DOEは、放射性廃棄物の貯蔵および処分に関する規則の制定において、以下の性能目標を定めていた。

- 廃棄物の閉じ込めは、核分裂生成物による放射線と熱が有意な期間にわたって、最初に定置した位置のすぐ近くの範囲内で実質的に達成されるべきである。また、閉じ込め機能の喪失は、非常に長い期間の後に廃棄物インベントリのごく少量のみが緩慢に放出されるようにすべき、すなわち破局的な閉じ込め機能の喪失は起こらないようにすべきである。
- 処分システムは、少なくとも1万年間、接近可能な環境から隔離されるであろうという合理的な保証を与えるべきである。
- 廃棄物処分システムの操業期間中のリスクは他の核燃料サイクル施設のリスクより大きくならないようにするべきである。
- 廃棄物処分システムに伴う環境影響は合理的に達成可能な範囲で軽減されるべきである。
- 廃棄物処分システムの有効性を実証するための設計と解析モデルは、設計、操業および長期の予測に係る不確実性を補償するために十分に保守的であるべきであり、また、規制基準に適合する合理的な保証を与えるべきである。
- 実施に向けて選定された廃棄物処分システムは、合理的な期間内に実施され得る技術レベルに基づくべきであり、また、現在の能力で評価可能であり、かつ、不合理なほどの将来にわたって能動的維持管理を要するものであってはならない。
- 実施に向けて選定される廃棄物処分システムは、原子力産業の大きさおよび特定の核燃料サイクルや原子炉の設計の論点から独立しているべきであり、また、国策に沿うべきである。

このような性能目標に対する地層処分を含めた9つの処分概念評価の適合性が評価され、表1-1のように取りまとめられた。

その結果、岩石溶融処分、氷床処分、井戸注入処分および核変換が不適合とされ、残った5つの処分概念に対してさらなる比較評価が行われた。

廃棄物処分の性能目標に適合した5つの処分概念、すなわち、地層処分、超深孔処分、離島処分、海洋底下処分および宇宙処分については、以下の判断基準により、さらに詳細な評価が行われた。

- 放射線学的影響
- 非放射線学的環境影響
- 技術開発の見通しと開発可能期間
- 国内法と国際的な合意への適合性
- 将来の原子力産業の規模や方式の推移からの独立性
- 開発および操業のコスト
- 万一の場合の是正、修復措置の可能性

表 1-1 9つの処分概念に対する性能目標への適合性評価結果【DOE, 1980より作成】

	放射線 学的基準	1000年間 の 閉じ込め	1万年間 の隔離	開発 期間	科学的 ブレイク スルー	予測的 可能性	産業 規模	燃料 サイクル	原子炉 の設計	欠陥は正 あるいは 修復能力	維持 管理と 監視
地層処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
超深孔 処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	No	○
岩石溶融	○	No	No	○	○	○	○	○	○	No	No
離島処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
海洋底下 処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
氷床処分	○	○	No	No	○	No	○	○	○	No	○
井戸注入 処分	○	No	No	○	○	○	○	○	○	No	○
核変換	○	・ ・	・ ・	No	○	○	No	○	○	○	○
宇宙処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	No	○

○=適合可能性あり

No=適合可能性なし

表 1-2 処分費用の推計（1980年当時のドル）【DOE, 1980より作成】

	研究開発費 (百万ドル)	処分前管理費 (ドル/トン)		処分施設費			総費用 (0.01ドル/kWh)	
		ワンス ・スルー	再処理	建設 (百万ドル)	操業 (百万ドル)	閉鎖 (百万ドル)	ワンス ・スルー	再処理
地層処分 (6,000トン/年)	3,700	100	170	2,600	87	25	0.7	1.0
超深孔処分 (5,000トン/年)	900	100	170	2,800	2,100	40	2.5	3.0
離島処分	・ ・	150	190	・ ・	・ ・	・ ・	・ ・	・ ・
海洋底下処分 (5,000トン/年)	・ ・	150	190	760	29	54	0.8	0.9
宇宙処分 (1回あたり)	・ ・	210	170	・ ・	46	4	・ ・	・ ・

- 長期的な維持管理，監視の必要性
- 資源の消費量
- リスクの公平性

このうち，開発および操業のコストについては，表1-2のように推計された。

是正・修復措置については地層処分が最も可能性が高い。海洋底下処分の場合は，輸送船から海に落とした廃棄物の回収が重要な問題となる。離島処分は地層処分と海洋底下処分の困難性と利点が組み合わさった問題を示す。宇宙処分では打ち上げや軌道操作中の廃棄物パッケージの欠陥以外は，全ての状況に対する是正措置の可能性のあるものと思われる。超深孔処分では廃棄物を孔に落とした後は是正措置が不可能となる。したがって，是正措置の

可能性について比較した処分概念の順位は、地層処分＞離島処分＞海洋底下処分＞宇宙処分／超深孔処分となった。

長期的な維持管理、監視の必要性については、閉鎖後にはどの概念も必要ないとされた。

資源の消費量については、相互比較の意味はないかもしれないとしつつ、予察的な推計結果として、表1-3のような結果が示された。

リスクの公平性については、いずれの概念にも有意差はないものの、海洋底下処分、離島処分、宇宙処分は、最終処分場所近傍に住民がいないという潜在的優位性があるため、地層処分よりリスクがはるかに小さいという第一印象を与える。しかしながら、リスクや影響は処分後と輸送中のどちらによってもたらされることになるかという視点で判断されるべき問題である。

このような相対評価の結果、5つの処分概念についての優先順位は表1-4のようになり、

表 1-3 処分に要する資源の推計【DOE, 1980より作成】

投入資源	地層処分	超深孔処分	海洋底下処分	宇宙処分
アルミニウム (トン)	220	13,000	13,000	83,000
クロム (トン)	・ ・	14,000	14,000	5,000
ニッケル (トン)	・ ・	7,500	7,500	2,000
水 (m ³)	1,300,000	199,000,000	・ ・	60,000,000
天然ガスまたは プロパン (m ³)	11,500	10,000,000	10,000,000	10,000,000
電気 (kWh)	3,400,000,000	56,000,000,000	20,000,000,000	59,000,000,000
石油由来燃料 (m ³)	5,300,000	6,000,000	5,100,000	1,500,000
その他燃料 (トン)	・ ・	・ ・	・ ・	4,800,000

表 1-4 処分方法の優先順位【DOE, 1980より作成】

放射線学的影響	最高優先度  最低優先度
操業中	(MR) ・ ・ ・ ・ ・ (VDH) ・ ・ ・ ・ ・ (IMR) ・ ・ ・ ・ ・ (SS) ・ ・ ・ ・ ・ (S)
閉鎖後	(S) ・ ・ ・ ・ ・ (MR) ・ ・ ・ ・ ・ (VDH) ・ ・ ・ ・ ・ (SS) ・ ・ ・ ・ ・ (IMR)
非放射線学的 環境影響	(MR, VDH) ・ ・ ・ ・ ・ (SS, IMR) ・ ・ ・ ・ ・ (S)
開発の見通し	(MR) ・ ・ ・ ・ ・ (SS, IMR) ・ ・ ・ ・ ・ (S, VDH)
法令適合性	(MR, VDH) ・ ・ ・ ・ ・ (IMR) ・ ・ ・ ・ ・ (S) ・ ・ ・ ・ ・ (SS)
原子力産業の将来 からの独立性	(MR, VDH, IMR, SS) ・ ・ ・ ・ ・ (S)
是正・修復措置の 必要性	(MR) ・ ・ ・ ・ ・ (IMR) ・ ・ ・ ・ ・ (SS) ・ ・ ・ ・ ・ (S, VDH)

(注) MR=地層処分 VDH=超深孔処分 IMR=離島処分 SS=海洋底下処分 S=宇宙処分；

地層処分が最も早期に実現可能な最終処分の方法であると結論付けられることとなった。また、基礎的な研究開発の対象となり得る候補技術としては、海洋底下処分と超深孔処分が挙げられた。

【参考文献】

- (1) NUMO (2002). パンフレット「処分場の概要」, 原子力発電環境整備機構, 2002年12月.
- (2) JNC (1999b). わ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－別冊 地層処分の背景, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-024.
- (3) 若杉圭一郎, 宮原要, 牧野仁史, 石黒勝彦, 澤村英範, 根山敦史, 西村和哉 (2003). ガラス固化体からの放射線量に関する検討, JNC TN8400 2003-22.
- (4) 資源エネルギー庁 HP (2016). 政策について>電力・ガス>原子力政策について>放射性廃棄物について>高レベル放射性廃棄物>概要>高レベル放射性廃棄物の発生. http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html, 閲覧日:2016年7月.
- (5) 日本原子力文化財団 (2016). エネ百科>原子力・エネルギー図面集2016>第8章 放射性廃棄物>高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の貯蔵概念図. <http://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/2016/03/8-3-4.pdf>, 閲覧日:2016年7月.
- (6) 日本原燃(株). 青森県六ヶ所村の高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター.
- (7) DOE (1980). Environmental Impact Statement, Management of Commercially Generated Radioactive Waste, DOE/EIS-0046F.
- (8) 青山貞一 (2010). 諸外国の環境アセスメントの歴史的考察, 環境アセスメント学会誌8(2), 17-24.

第2章

地層処分概念の開発経緯

1950年代に米国において放射性廃棄物の存在が環境への危機として認識され、その対策に関する本格的な検討が開始されて以来、地層処分は長寿命の放射性廃棄物を人間とその生活環境から恒久的に隔離する方法として最も安全であり、かつ技術的に実現性の高い選択肢であるとする認識が各国のテクニカルコミュニティに共有され、現在はその事業化の段階を迎えようとしている。

テクニカルコミュニティにおけるこのような共通認識は、半世紀を超えるこれまでの期間に実施されてきた多面的でバランスの取れた研究開発の成果を根拠とするものである。また、現在、地層処分の安全性と技術的な実現可能性に関する科学的な知見とその信頼性は、地層処分事業開始に関する社会的意思決定の重要な判断材料として必要十分なレベルに達している。

地層処分の安全性や実現性を裏づける研究開発段階の成果が蓄積されてきている一方で、実施段階に入り処分場予定地の選定など社会との接点が増えるにつれて、地層処分に対する社会的な合意の形成が不十分であることが各国において表面化してきている。

その要因の1つとして、地層処分の安全性、実現性と緊要性に関しては専門家の間で数十年にわたる多角的な議論に基づき国際的な共通認識が構築されてきたものであるとしても、「なぜ今地層処分が必要か」という基盤的な認識が社会に共有されていないことなどが挙げられる。

上記の認識が社会に共有されてこなかった背景には、長期間にわたり生活環境に重大な影響をもたらしうる高レベル放射性廃棄物や使用済核燃料の特性と管理の現状、これを前提とした長期の環境保全の必要性、複数の処分概念の中から最良のものとして地層処分が選択され実用化に向けた研究開発が続けられてきた経緯とその成果等に関する的確な情報が、社会が受け入れやすいような形で整備・伝達されてこなかったという歴史的な経緯があるものと思われる。

地層処分の概念の変遷には、1950年代から約60年の歴史がある。本章では、地層処分概念選択の妥当性を再確認するために、研究開発によって地層処分が選択されるようになった経緯を以下の3つの期間【村野, 1989】に分けて時系列的に整理して、振り返ってみる【安, 2013; Tochiyama, 2013; 増田, 2015】。

◇ 第1期（1950年代～1970年代中頃）

各国において高レベル放射性廃棄物問題が認知され、対策が模索され始めた。

◇ 第2期（1970年代中頃～1980年代中頃）

高レベル放射性廃棄物対策技術として地層処分が選択され、その基本的な概念が確立した。

◇ 第3期（1980年代中頃～2000年頃）

各国において地層処分の研究開発段階から実施段階に移行し始めた。

第1期（1950年代～1970年代中頃） －地層処分黎明期－

米国における本格的な検討の開始

全米科学アカデミー・プリンストン会議

1955年9月、米国のプリンストンにおいて、記念すべき会議が開かれた。この会議は、当時の原子力委員会が放射性廃棄物を地層中へ処分する技術の可能性を明らかにし、さらに処分のために、いかなる研究が必要かを検討するために、全米科学アカデミー（National Academy of Sciences：NAS）に委託して開催されたものである。

会議には、地質学者、地球物理学者を中心とした委員総勢65名が参加し、会議の規模と委員の構成からみて、米国がこの問題を当時としては重要視していたものとみられ、また、世界的にみても、この種のものとしては、これが第1回の会議であった。

この会議の結果は、1957年にNASレポート“The Disposal of Radioactive Waste on Land”【NAS, 1957】として取りまとめられた。

当時、軍事用の原子力施設のあったハンフォードでは、初期の高レベル廃液用のタンクが小規模の漏洩を起こす一方、ハンフォード、オークリッジ等の原子力施設に隣接するサイトでは、一般のゴミ捨て場と変わりのない放射性廃棄物の地下投棄が定常的に行われており、関係者はこの状況を長期に継続するのは問題であるという認識を持つに至ったものと思われる。

会議の成果として出された最も重要な勧告は、放射性廃棄物を岩塩層の中に処分する方法が有望であると考えられること、したがって岩塩に関する研究を直ちに開始すべきであるということであった。

岩塩層は海水が蒸発してできた地層であり、安定で地下水が存在しないという特徴から、放射性廃棄物を長期間閉じ込めるのに極めて好ましい性質を持つものと考えられた。たとえば、可塑性が大きいので、地下の処分空洞に定置された廃棄体周辺の空隙に充填物や緩衝材を施工しなくても、岩塩の母岩自体が廃棄物を包み込むこと、岩塩は水を全く透さないこと、岩塩層を長期間存続させた広域的な地質環境条件を備えていること等である。

岩塩層に関する原位置試験

1965年には、オークリッジ国立研究所（ORNL）がカンザス州Lyonsの廃坑となった岩塩鉱山で原位置試験（In-situ experiment：実際の地質環境で行う試験）を開始した。とこ

ろが、この計画は1972年には中止せざるを得ない状況に陥った。1965年にロッキーフラッツにあるプルトニウム工場で火災があり、事故の処理により超ウラン元素（TRU）で汚染された大量の放射性廃棄物が発生した。1969年になって、これらの廃棄物をアイダホに貯蔵することについて、アイダホ州知事は受け入れる条件として、1970年代末までには州から撤去することを原子力委員会（AEC）に要求した。AECはこの要求に対して、1970年に地元への事前説明なしに、Lyonsを処分場サイトとすると発表、地元と州政府がこれに反対する事態となった。これにより、岩塩層の原位置試験も中止に追い込まれた。

立地に社会的な合意を得ることの重要性について、関係当事者に全くその認識がなかったとして、その後に批判と反省が行われている。

ハンフォードの原子力施設においては、1972年にタンク貯蔵の歴史で最大の漏洩が起こった。タンク貯蔵の管理責任者は、漏洩が発生して以後6週間もの間、タンクの液面が低下している情報があったにもかかわらず、それを廃液の漏洩と結びつけて考えることができなかった。

この事故は関係者に最終処分の必要性和緊急性を再認識させることとなった。すなわち、第1に、高レベル廃棄物を液体の状態で長期に貯蔵してよいのかどうか。第2に、長期的な人間の管理に果たして全面的な信頼をおいてよいのかどうかを改めて検討する契機となった【村野, 1989】。

第2の点について、追い打ちをかけるような計画がAECから発表された。1972年6月、AECは恒久的な地層処分場が利用できるようになるまで使う回収可能地表貯蔵施設（Retrievable Surface Storage Facility：RSSF）を建設する計画を発表した【Peltier, 2010】。計画は米国西部のAECまたは連邦政府のサイトにRSSFを立地することであったが、RSSFのコンセプトをサポートするためにAECが発行した環境影響評価書（EIS）は、一般公衆と環境保護庁（EPA）からの強い批判を受けることとなった。計画には、それに伴うべき処分の計画が示されていなかったために、全体計画としては、むしろ後ろ向きの計画という評価がなされ、計画を認めた場合には、処分の研究開発が進まず、RSSFがなし崩し的に最終処分場になってしまう可能性があるという指摘を受けることとなった。

結局、永久処分場が開発されるとの明確な保証がある場合を除き、暫定貯蔵に進むことは受け容れられなかった。

ハンフォード、ロッキーフラッツの事故等に続き、このような事態を招いた反省からAECは解体されて、新たに原子力規制委員会（NRC）とエネルギー研究開発局（ERDA）へ改編されることとなった。

一方で、これらの動向はできるだけ早い時期に処分場を開設しようとする計画を進める誘因となり、このような経験の反省に立って、1970年代後半以降、米国における高レベル放射性廃棄物対策に関する本格的かつ組織的な研究が展開されるようになった。

第1期における日本の状況

放射性廃棄物に関する最初の原子力委員会報告書

1961年3月31日から1962年2月19日にかけて、原子力委員会に設置された廃棄物処理専門部会が10回の専門部会会合を開催して、中間報告書が取りまとめられた【原子力委員会、1962】。

報告書取りまとめには、斎藤信房（部会長）、三宅泰雄、佐合正雄、田島英三、山本寛、松山義夫、佐々木忠義、小田滋といった学界からの学識経験者、日本アイソトープ協会、放射線医学総合研究所、日本原子力研究所、原子燃料公社、日本原子力発電および民間企業の専門家、並びに関係省庁として農林省、通産省、厚生省、運輸省、水産庁が参加した。委員の専門分野はどちらかというと、海洋と放射線防護の専門家が多い一方、地質の専門家はほとんど参加していなかった。

処分の方式としては、「閉じ込め方式」、「拡散方式」および「準閉じ込め方式」が考えられるとしている。

- 閉じ込め方式

一定地点に安全に閉じ込める方式で、たとえば再処理の高レベル廃液などのタンク貯蔵などが、この方式に当たる。

- 拡散方式

環境の拡散能力を利用する方式で、たとえば極低レベル廃棄物を海洋に廃棄する場合がこれに当たる。

- 準閉じ込め方式

一般環境の一部を使用しても放射能の人間への還元が極めて少なく、何らの障害も起こさないような方式によって廃棄物を一般環境へ放出する方式で、たとえば天然の地質構造の利用がそれに相当する。この方式は、稠密な人口、狭隘な国土、複雑な地質構造、地震などの多い環境条件などから、わが国においてはその実施が困難と考えられる。

この分類によると、現在の地層処分に当たる概念は準閉じ込め方式であるとされていたようである。

また、この報告書が出された時期には、前述のように米国でNASレポート【NAS, 1957】が出されており、岩塩層への処分の方式が提案されていたが、日本には岩塩層が賦存しないことから、地質構造の利用は困難と判断された可能性がある。

さらに、報告書は「高レベル放射性廃棄物に対しては、放射線障害防止の立場から閉じ込め方式を廃棄物処分の原則とするが、タンク貯蔵等の閉じ込め方式は常に管理を必要とするので最終的な処分とはいえない」としており、当時は処分を「当面の措置としての処分」と「最終処分」に分けて考えていたようである。

最終処分方式としては、次の2方式、すなわち、

- 容器に入れて深海に投棄すること
- 放射性廃棄物を人の立ち入ることの不可能な、かつ漏洩の恐れのない土中に埋没したり、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れること

を挙げ、「これらの方式については放射性廃棄物の最終処分の問題の重要性に鑑み、経済性、安全性について最も望ましい方式を確立するため、大きな努力を払って研究を進めなければならないが、国土が狭隘で、地震のあるわが国では最も可能性のある最終処分方式としては深海投棄であろう」としている。

さらに、「現行の放射線障害防止法では、放射性廃棄物の土中埋没は認められていない。わが国における地下水の分布とその利用状況、人口の分布状況などからみて、放射性廃棄物の土中埋没による処分は好ましい方法ではなく、今後も現行法通り禁止すべきであると考ええる。しかし、人の立ち入ることの不可能でありかつ漏洩のない土中、天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層、無人島など放射性廃棄物の処分の可能な場所の調査発見には努力すべきであろう」としていることから、当時は、現在のような方式による地層処分の概念は、構想の対象になっていなかったのではないかと推察される。

一方、専門部会報告書で「研究開発を進める」とされている深海投棄について研究がなされた形跡はなく、最終処分の見通しに関する研究成果に関する当時の実績に関する記録も残っていない。

原子力委員会環境・安全専門部会報告書

続いて、1973年には、前年6月に改訂された原子力開発利用長期計画に示された放射性廃棄物の処理処分に関する計画を実施していくための具体案を作成することを目的として、原子力委員会に環境・安全専門部会放射性固体廃棄物分科会（主査：山崎文雄 日本アイソトープ協会常務理事）が設けられ、12回にわたる審議の結果が取りまとめられた。

報告書においては以下のような見解が示され、「高レベル固体廃棄物の処分方法としては、人造の保管施設を用いた保管方法について、国際的な技術の進展に注目しつつ研究開発を進める」こととされた【原子力委員会, 1973】。

- 高レベル固体廃棄物の処分方法としては、わが国では、アメリカ等と同様人造の保管施設を用いた保管方式を採用することとし、この面での国際的な技術の進展に注目しつつ研究開発をすすめることが適当であると考ええる。
- 放射性廃棄物の最終的な処理処分については、下記のような観点から一元的に行なう機関を設立し、責任体制を明確にして実施する必要があると考えられる。
 - ・ 処分後においても、処分された廃棄物は人間の生活環境から隔離されるべきであり、処分を実施する者も未来永劫にわたって責任を有する組織でなければならない。
 - ・ 経済性の観点からみて、個々の事業者が処分を実施する場合には、無駄があり、エネルギー、コストの上昇を招く一要因となるおそれがある。

- ・ 個々の事業者が処分を実施するよりは専門の機関が行なった方が、統一のとれた安全性の確保を図るうえで望ましい。
- ・ とくに海洋処分の場合には、国際社会に対して、責任を明確にし、国際的な理解を得る必要があるので、個々の事業者による処分の実施は望ましいものではない。
- ・ 処分の実施にあたっては、一般公害の場合と同じく、原則として汚染者負担の考え方を採用するものとするが、エネルギー供給の一翼をになう原子力開発利用の調和のとれた発展が社会的要請となっている現在、その前提となる廃棄物の処分を行なう事業はきわめて公益性が高いと考えられること、莫大な費用がかかること、国際的な責任のかかる事業であること、国民の安全確保に大きな貢献をすること等を考えれば、この一元的な機関の設立には国が積極的な役割を果たすことが望ましい。

このように、わが国において、第1期における国レベルの検討の記録には、「地層処分」という言語は見当たらず、また地層処分とみなされる概念やそれに類似した考え方が議論された経緯がないことから、地層処分という選択肢は検討の対象ではなかったものと考えられる。

第2期（1970年代中頃～1980年代中頃）

－地層処分概念の骨格形成－

国際的な環境問題の認識の高まり

資源、環境等、全地球的な問題に政策提言を行っているローマクラブが1972年に発表した「成長の限界」【Meadows, 1972】において、人口増加や工業発展がこのまま進んだ場合、地球上の天然資源が枯渇し、環境汚染が自然の持つ容量を超えて進行すると警鐘を鳴らしたことが大きな契機となり、国際的に環境問題が注目されるようになった。このような世界的な環境意識の高まりを受けて、同年6月には、ストックホルムで開催された国連の「人間環境会議」において「人間環境宣言」が採択され、国際的な協調と連携による対応が始まった。

高レベル放射性廃棄物の管理についても、当然、このような世界的な動きと軌を一にしてそのあるべき姿が議論され始めた。スウェーデンにおいては、新規原子炉への燃料装荷の許可条件として、電力会社が使用済核燃料あるいは高レベル放射性廃棄物を安全に処分できることを示すことを要求する「原子力条件法」が1977年に成立した。スイスにおいては、国民投票により原子力発電の継続には高レベル放射性廃棄物対策の技術的実現可能性の提示が条件とされ、1978年に原子力施設の必要性の証明と放射性廃棄物の恒久的な安全管理の保証を求めるよう原子力法が改訂された。これらの法定要求に対して、地層処分の実施機関として、スウェーデンにおいてはスウェーデン核燃料管理会社（SKB）が、スイスにおいてはスイス放射性廃棄物管理組合（Nagra）が、それぞれ設立された。

また、カナダにおいては、「核燃料廃棄物管理プログラムに関する1978年の連邦政府とオンタリオ州政府との共同声明」に基づき、カナダ原子力公社（AECL）が地層処分の研究開発を実施することを決定した。

一方、フランス、イギリス、日本といった再処理路線を採る国においては、使用済燃料は資源とみなされるため、高レベル放射性廃棄物は差し迫った問題ということではなかった。実際、イギリスは高レベル放射性廃棄物管理の方針として50年間の貯蔵のみを決定していた。

この時期は、各国で取り組みに差があり、また、原子力の利用に伴う放射性廃棄物の問題解決のために、早くから様々な努力がなされてきたが、それらの努力の多くは断片的あるいは散発的であったと言える。

Polvani報告書

このような状況の下で、1977年に経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）が各国の専門家から成るグループの協力によって取りまとめた「原子力発電計画に伴う放射性廃棄物管理の目標・概念・戦略」報告書【OECD/NEA, 1977】は、廃棄物問題を包括的に捉えた最初の報告書となった。実際、この報告書を出発点として廃棄物に関する活動を組織的に進めることとなった国が多い。本報告書は、これを取りまとめた専門家グループの座長、Carlo Polvaniの名前をとって、Polvani報告書と略称されている。以下にその内容について要約する。

高レベル放射性廃棄物対策の基本方針について

将来技術としての核種分離・消滅処理の展望、当面の処置としての工学貯蔵の可能性に言及しつつ、地層処分を可能性の高い処分方法として推奨している。

- 現世代は放射性廃棄物を一定期間、安全に貯蔵する技術能力を保有する。地層処分に関する大部分の研究開発計画は最近発足したばかりであるという事実から、廃棄物の貯蔵は当分の間行わなければならない。
- 貯蔵は回収する意図を持って廃棄物を措置することであり、継続的な監視を要する一時的な手段である。
- ある種の廃棄物の放射能は将来におけるその危険性が予測できない程長い時間にわたり残存するものである。たとえ封入隔離の健全性を人間による継続的・制度的な管理に頼るとしても、極めて長い期間に及ぶ隔離に信頼を置くことはできない。
- 自らのエネルギー需要を原子力に頼る現世代の責任は、残存する廃棄物が将来世代の重荷にならないような方法で管理する必要性にこそあると考えられる。
- 高レベル放射性廃棄物およびアルファ廃棄物（TRU廃棄物）は、生物圏から長期間の隔離を要する。このための有望な方法は深地層に廃棄物を埋め込むことである。
- アクチニド系の分離技術に関してはさらに開発が行われるべきであり、可能性に関して安全性と経済性に対するさらなる総合的な研究が必要である。
- 処分は回収する意図なく廃棄物を放出しあるいは措置することであり、放流物を環境放出する処分は非可逆的であるが、固体廃棄物を地層処分する場合、回収が可能なことも

あるが、それはもともと意図されたものではない。処分の概念では、継続的監視を必要としないが、限定した期間、監視することが望ましいケースもある。

- 深地層に設ける“実証過程”の試験中は廃棄物の回収が容易であり、その措置は貯蔵の一形態とみなされるが、もはや廃棄物を回収しないとしたら、その措置は処分とみなされなければならない。

地層処分に期待される基本性能

廃棄物の処分に関する地層の適性の基本的条件は、放射能が危険でないレベルに減衰するまで環境から放射性物質を閉じ込め隔離するということであり、地層による封じ込めの安定性が最も重要なバリアであるが、以下のような数種のバリアが廃棄物の隔離に寄与するとして、期待されるバリア機能を挙げている。

- 廃棄物自体の性質：低浸出性の安定固化体への調製（たとえばガラス固化など）は廃棄物と水が接触した場合、放射能の移動を遅延させる。
- 適当な容器への封入：処分地層の地球化学的環境に十分な安定性を有する物質からなる容器の利用は廃棄物の数百年ないし数千年の封じ込めを可能にする。
- 地層の原状保持：これが保持されれば、生物圏へ放射能を移行させる可能性のある地下水から隔離される。
- 処分地点からの廃棄物の移行の阻止：地層の変化が生じたとき、周囲の地層の種々な機能、たとえばイオン交換、濾過や表面吸着などは大部分の放射能の移行を阻止する。この阻止の程度は地層と廃棄物の組成によってかなり相違がある。ある種の粘土質中では移行速度は非常に小さいので、実際には主要な核種の移行はない。このような条件下での元素の移行阻止を支持する証拠が検討されている。たとえば18億年前に天然の連鎖反応が行われた場所である、アフリカのガボン共和国オクロにおける測定はプルトニウムの移行が発生しなかったことを示している。

地層処分の候補となり得る地層

長寿命廃棄物の処分に適していると考えられている地層として、当時、岩塩層への処分が関心を集めているところであったが、粘土質層と硬岩層も候補になり得ることを指摘している。

- 長寿命核種の処分に適していると考えられている地層は、岩塩層、粘土質層、硬岩層の3つのカテゴリーに分類される。
- 岩塩層への廃棄の主要な長所は掘削の容易さ、低い含水率、良好な熱特性および可塑性等である。通常は岩塩鉱山と溶解空隙（solution cavity）の両方への処分技術が実用可能である。欠点は岩塩の天然資源としての価値であり、将来の採掘可能性を残す。他の欠点は低い吸着性と水に対する高い溶解性である。
- 粘土質層のあるものは高い可塑性があり、岩塩と同様にこれは断層形成の場合において

さえ封じ込めの維持を可能にする。粘土物質に関する関心の主な点は通常含まれる水の挙動である。

- 花崗岩，玄武岩，石灰岩，硬石膏および変成岩のような硬岩石は一体のときは不浸透性であるが，継ぎ目や割れ目が交叉し多量の水を透す可能性がある。岩石層に割れ目があれば不浸透性であり，石灰岩や玄武岩がこの一般的な例である。僅少の水を含むかあるいは全く水を含まない硬岩石層は割れ目の二次的封鎖や不透水層による帯水層からの隔離といった特殊な地質構造の場所に存在する。万一，断層によって多少の水との接触が生じたとしても，隔離の重大な喪失を意味しない。廃棄物自体によるバリアや周囲の地層によって移行が阻害されるからである。

米国における地層処分概念の骨格形成

IRG報告書

1974年，核拡散防止条約（Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons: NPT）未加盟のインドがプルトニウムを利用した核実験を実施した事態を憂慮したアメリカのカーター政権は，1977年に商業用再処理とプルトニウム利用の無期限延期政策を発表した。これにより再処理後の高レベル廃液ではなく，使用済核燃料が高レベル放射性廃棄物になるなど，放射性廃棄物対策の大幅な見直しが必要になり，1978年3月，カーター大統領は関係省庁によるタスクフォースの設置を要請する書簡を発した。1979年には，14の関係省庁からなる検討グループ（Interagency Review Group: IRG）が全放射性廃棄物の管理方策についてパブリックコメントを踏まえた報告書を取りまとめて大統領に政策提言を行った【DOE, 1979】。この中で高レベル放射性廃棄物については，6つの候補技術として鉱山型地層処分（mined repository），深海底堆積物中定置（deep ocean sediments），深孔ボーリング（deep drill holes），岩石溶融（rock melting），群分離・消滅（partitioning and transmutation），宇宙放出（ejection into space）を評価し，その中から，鉱山型地層処分概念が最も早期に利用可能な技術であると結論づけた。地層処分技術の開発は，地質環境，処分サイト，工学バリア，廃棄物形態それぞれの選定にシステムアプローチの手法を用いるべきであること，処分場による長期にわたる隔離の程度は，処分場設計，地層，気候および人間活動の変化の影響に関する解析モデルによってのみ評価可能であること，永久的な処分へのアプローチは技術的に保守的な方法で段階的に進めるべきであること，回収可能性概念については，回収が必要な状況や技術的側面に関してさらなる定義が必要であること等，現在においても地層処分に関する主要な論点が，当時のIRG報告書に盛り込まれている。

当初の地層処分は，岩塩層という特殊な地層中に埋設しようというもので，天然の地質環境にのみに依存した方法であった。また，その方法によってなぜ長期の安全性が保たれるかについて，改めて問われることはなかった。

これに対し、改定された地層処分の考え方は、要求される地質環境条件を満たすものであれば、どのような地層であっても、地層処分の候補として研究の対象になり得るとされた。また地層処分に要求される廃棄物を隔離する性能は、自然の条件だけに依存するのではなく、工学的な対策をも含む1つのシステム、すなわち地層処分システム全体により達成されるとする考え方が採り入れられた。さらに、地層処分システムの性能が、長期にわたり、満足できるものか否かについては、合理的、科学的な評価が要求されることとなった。

これらは、今日の地層処分の考え方に引き継がれている技術的な骨格である。地層処分はこの骨格をもとに、適用性の広い信頼性の高い処分方法として発展することとなった。

* IRGレポートには、当時の各国における放射性廃棄物対策計画が要約されており、その中で日本の状況については、日本原子力研究所のサブコントラクターである三菱金属(株)が候補地層の調査研究を行っており、1977年の予備的報告では、花崗岩とゼオライトが有望で、石灰岩、珪藻岩、頁岩も考慮対象になっている旨が紹介されており、日本において本格的な地層処分研究に着手する以前の状況を記したものと興味深い。

1982年放射性廃棄物政策法

1980年代に入ると地層処分の技術的側面に加えて、制度的側面の整備が進められるようになった。

米国において、「1982年放射性廃棄物政策法（Nuclear Waste Policy Act 1982: NWPA1982）」が各国に先駆けて制定され、1983年1月に発効した。この法律は、所見としてまず、高レベル放射性廃棄物の処分についての米国の過去30年の対策が十分ではなかったという認識を述べている。そして、第1に処分対策の責任分担、第2に地層処分場の立地決定のための詳細な手順、第3に処分対策に関する資金の調達等を定めている。

国際協力プロジェクトの普及

1980年代におけるもうひとつの顕著な動向は、地層処分分野における国際協力の進展である。放射性廃棄物の超長期的な対策においては、どのような目標あるいは基準に沿った対策を立てるべきかが重要であり、基本になる基準の確立はむしろ国際的な性格を持った問題であると考えられた。

1980年代を迎えると、各国において地層処分の研究開発が本格化し、国際的にもさまざまな領域において共同研究が実施された。その代表例として、国際ストリバ計画を挙げることができる【Fairhurst, 1993】。

OECD/NEAの国際共同研究として1980年に開始されたこの計画は、スウェーデンの旧鉄鉱山を地下研究の場として、地層処分に必要な調査技術と基礎的な知見を確立し、計画に参

加する各国がそれらを共有することによって、国際的な技術レベルの確立と向上を図ることを目的とした。計画には、日本を含む9カ国が参加し、1992年に終了するまでにさまざまな調査や研究開発が行われ、数々の新しい技術や知見が得られた。

Coady報告書

1980年代には地層処分に関連する基準についての国際的な議論が進み、その成果を示す報告書が次々に発表された。

その代表的なものとして、放射性廃棄物の処分に関する管理の基本原則に関する国際的集約意見としてOECD/NEAが1982年に取りまとめた「放射性廃棄物の処分：原則の概観」、通称Coady報告書が挙げられる【OECD/NEA, 1982】。この報告書はOECD/NEAの放射性廃棄物管理委員会と放射線防護公共保健委員会のもとに設けられたカナダのJohn Coadyを議長とする共同作業グループにより取りまとめられたものである。報告書は放射性廃棄物管理政策の基調となる関連原則の全てに関するバランスの取れた概観を分かりやすい言葉で表現したものとして発刊された。

Coady報告書における主要な集約意見として、特に現在に至って引き続き議論されている点について以下に抜粋して示す。

将来世代に対する責任

- 放射性廃棄物処分における議論の特徴の1つは、将来世代の安泰が重視されることである。
- この点で人々の態度に影響を与える原則には、止められる危害を意図的に発生させるのは間違っており、同時に危害を防止できる行為を行わないのも間違いであるという一般的な前提が含まれる。この2つの前提は、影響を受けるかもしれない人々を予め特定できない場合も当てはまる。
- 別の原則はある行為から利益を得る者がそのコストも負担するというもので、「汚染者支払いの原則」(polluter pays principle)の形態をとる。
- 原子力や放射能の利用により、多くの利益が将来世代に引き継がれて行くことは明らかであるが、放射性廃棄物処分の場合、利益を定量化するほうがリスクを想像するより難しいので、廃棄物処分に関する問題は現世代が負担し、将来世代の負担を極力少なくするという考え方が支持される。
- 絶対的な安全性を保証することはできないので、「どのくらいのリスクなら許容されるか？」ということになるが、現在の社会が自分たちの世代の許容レベルより悪くない条件を将来世代に残すように試みるべきという意見が一般的に受け容れられている。

受動的 (passive) なシステムと永久管理 (perpetual care)

- 放射性廃棄物処分における選択は長期的な人間の関与に依存しない方法と継続して制度的管理が必要とされる方法のどちらを採るかというものである。
- 廃棄物を再利用する意図はないにしても、人間の継続的な関与が必要な設計にすべきであるとする人による「無期限貯蔵」と言われることもある「永久管理」に賛成する議論では、廃棄物は監視下に置き、管理不能な処分という形にしないのがベストであるという意識が反映されている。
- 将来も技術は間違いなく改良され、良い方法が見つかることもあるので、早い時期に1つの方法にこだわると取り返しのつかないことになり、新しい方法を使用できる機会を失うことになると思うのであろう。安全な貯蔵方法が現在も利用可能であり、その間に廃棄物の毒性も減少するので、場合によっては取り扱いが簡単になることもある。
- 受動的な方式の支持者もその主張の根拠を将来世代の問題にしているが、その考え方は様々である。これらの考え方には2つの特徴がある。最初の特徴は処分後の廃棄物の管理が将来世代の負担になることを避けたいという願望である。それは少なくともある適当な期間後は人間の関与を必要としない方法を採用すべきであるという考え方である。第2の特徴は長期の制度的管理に対する悲観的な見方を反映しており、そのような管理は結局中断されてしまうと考え、管理を止めて処分施設の場所も忘れてしまったとしても、リスクはほとんどなく危険が増すこともないという立場である。
- 監視継続の管理方式に賛成しない人たちでも、将来のある一定期間は管理を継続し、部分的に受動的な工学バリアや天然バリアに取り替えて、その施設を使用することが適当との考えには同意している。比較的短期間に無害なレベルに崩壊する廃棄物は、制度的管理に依存した方法で処分することができると思われる。その他の廃棄物では、制度的管理に依存しない受動的な処分方法を開発することが目標である。
- 放射性廃棄物の処分法として現在求められている方法は、ほとんどが受動的な方法であるという事実から見て、その中で使用される制度的管理の継続性とその有効性がどの程度まで信頼できるかが、処分方法の重要な要素であることが分かる。

* 監視や保守という人間の関与を必要としない方法は受動的な方式とされている。受動的とは、期待する機能が人間の意思や行動に関係なく、自然の作用によって自動的に働くということである。人による能動的な機能は「閉じ込める」と表現されるのに対して、自然の機能は「閉じ込められる」と受け身の文体で表現されるので、「受動的機能」といわれる。

回収の可能性

- 処分の定義から明らかなように、処分施設では廃棄物回収の計画はないことが分かる。

したがって、閉じ込め用施設の場合、回収の可能性は閉鎖段階後では施設に必要な設備条件にはならない。

- 回収計画がないことは必ずしも回収ができないことを意味しない。回収作業の難しさや費用は廃棄物の種類や処分場所によって決まるが、最新技術を使用すれば、分散状態ではない物質はほとんど回収することが可能である。
- 技術的ではない何らかの理由で処分施設に廃棄物回収を容易にする機能を含める決定がされた場合、封じ込めシステムの健全性に悪影響を与えないように注意しなければならない。

第2期における日本の状況

放射性廃棄物対策に対する最初の原子力委員会決定

1972年6月にストックホルムで開かれた国連の人間環境会議における決議の1つを受けて、1972年11月、ロンドンで「海洋汚染防止に関する国際会議」が開かれ、「廃棄物その他の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」が採択された。この条約は「ロンドン条約」と通称され1975年8月に発効し、高レベル放射性廃棄物の投棄も禁止の対象として規定されることとなった【外務省HP, 2016】。

このため、原子力委員会放射性廃棄物対策技術専門部会（部会長；佐合正雄 東京都立大学教授）は、諸外国における高レベル放射性廃棄物対策の状況を再調査し、「昭和75年（2000年）頃までに見通しを得ることを努力目標に地層処分を中心に調査研究および技術開発を図る」という、初めて地層処分に言及した研究開発の方針を原子力委員会に報告した。

これを受け、1976年10月8日に、それまでの方針から大きく転換する研究開発方針を原子力委員会決定として発表した【原子力委員会, 1976】。

1976年10月8日、原子力委員会決定

高レベル放射性廃棄物の処分については、当面地層処分に重点をおき、我が国の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査研究を進め、今後3～5年のうちに処分方法の方向付けを行うものとし、さらに、昭和60年代から実証試験を行うことを目標とする。

原子力委員会決定に従い、放射性廃棄物対策専門部会（部会長：山崎文雄 日本アイソトープ協会常務理事）が招集され、高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する研究開発を国のプロジェクトとして位置づけ、国を挙げて推進する体制を採ることとなった。

地層処分研究開発計画の策定

放射性廃棄物対策専門部会は「高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について」と題する報告書を取りまとめ、1980年12月19日には、原子力委員会において了承

された【原子力委員会, 1980】。

この中で地層処分研究開発の基本的考え方として、以下のような地層処分の基本概念と研究開発の進め方が示された。

- (1) 地層処分の意図するところは、地層中に埋設した放射性廃棄物からの放射能の人間環境に対する影響が放射能の減衰によって充分小さくなるまでの間、人間環境から放射性廃棄物を隔離することであり、その手段として「障壁（バリア）」と「人間環境からの距離」を利用することである。処分された廃棄物と人間環境をつなぐ媒体は地下水による溶解と運搬であり、この観点から、できるだけ地下水が少ない安定した地層を選出するよう努めるとともに、多重バリアの考え方、即ち、「地層という天然バリアに工学的バリアを組み合わせることによって処分システムを構成する」という考え方を処分の基本概念とする。
- (2) 地層処分の研究開発には、極めて長期間を要するため、全体として整合性のとれた研究開発を合理的に進めていくためには、長期的な展望のもとに段階的に研究開発を行い、各段階の成果を踏まえて次の段階に進むものとする。

研究開発については、図2-1のような5段階を経て行（以下、「5段階研究開発計画」と呼ぶ）ものとされた。

これらの研究開発については主として動力炉・核燃料開発事業団（動燃：PNC）が担当し、そのうち安全評価研究については日本原子力研究所（原研）が担当するとされた。

また、同専門部会報告では、「現在開発を進めている技術に代替するような技術として、

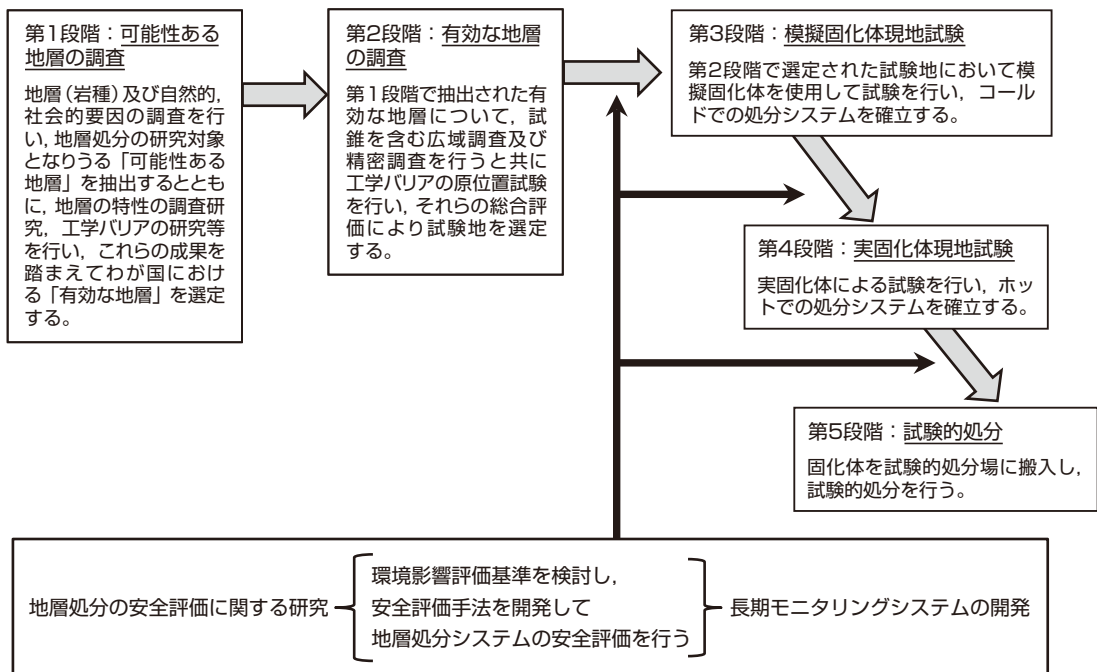


図 2-1 地層処分研究開発の全体像【原子力委員会, 1980】

群分離・消滅処理に関する研究開発、処分の実施が遅れた場合の長期貯蔵に関する研究開発、海洋底下処分に関する調査も推進する必要がある」としている。

第1段階において、動燃は所掌業務の1つであるウラン探鉱によって蓄積された地質データや地質探査手法を活用して、「可能性ある地層の調査」を進め、その結果を同専門部会に報告した。

報告を踏まえ、放射性廃棄物対策専門部会は、1984年8月7日に報告書「放射性廃棄物処理処分方策について（中間報告）」を取りまとめ、公表した。

報告書においては、以下のような評価結果が示された。

- ・わが国における「有効な地層」としては、未固結岩等の明らかに適性の劣るもの以外は岩石の種類を特定することなく広く考え得る。
- ・同一種類の岩石でもそれが賦存する地質条件によって、適性にはかなりの差が認められることから、岩石の種類を特定するのではなく、むしろその地質条件に対応して必要な人工バリアを設計することにより、地層処分システムとしての安全性を確保できる見通しが得られた。
- ・処分予定地の選定に当たっては自然的条件と社会的条件等に柔軟に対応する余地があるものと評価される。
- ・処分予定地の選定は、動燃が電気事業者等の協力を得て行い、選定の結果については、国が所要の評価等を行って、その妥当性を確認することとする。
- ・処分の実施主体については、適切な時期に具体化する。

5段階研究開発計画進展の難航

高レベル放射性廃棄物処分に関するわが国の計画は、1976年の原子力委員会決定に基づき、地層処分に重点を置く基本方針を受けて上記のような5段階に分けて、可能性のある地層の概査からスタートし、第2段階において有効な地層を選定し、さらに、試験地を絞り込み、その地点で模擬固化体、次いで実固化体を用いた試験を行って、地層処分システムを確立するという計画であった。

しかしながら、このような地層と地点を絞り込んでいく方式は、1984年時点で隘路に入り込み、以降それ以上の段階への進展はなかった。

可能性のある地層から有効な地層を絞り込むには、調査結果に基づく地層や地点の諸特性を何らかの尺度と照らして評価する作業が不可欠であるが、そのための客観性のある評価尺度が当時は明示的ではなかった。専門部会報告書に示された手順は、「可能性ある地層に関する調査研究」と「工学バリアに関する研究」のそれぞれの成果を「地層処分システム研究」に集約して「総合評価」を行うことによって、有効な地層を選定するというものであった。総合評価という曖昧さが残る判断基準で、社会的にも関心が高い施設の立地問題が進むという考え方は、楽観的に過ぎ、結局、調査対象の地層に明らかな優劣をつけることは難しく、期待したような地点絞り込みには進展しなかった。

また、当時の地質調査の考え方は、地層中に特異点を発見するための鉱物資源探査に用いられる手法を応用したものであり、地層の種類は地質学的分類によるものではあっても、地層処分システムを構築する一定の広がりを持った地質環境の適性の評価という視点から検証されたものではなかった。

地層の種類やその地層が存在する地点に有意差をつけ、さらに評価結果に対してその地層が存在する地域や地元の住民の関心、たとえば「なぜこの地層、この地点が選ばれたか」という問いに答えられる客観性と公平性のある判断基準が曖昧なままに、立地を進めることは、難しいというより、ほぼ不可能であったことは、現時点で考えると当然のように思われる。

* 別な側面ではあるが、この時代、動燃においては、ガラス固化体の貯蔵技術開発の一環として、1981年から3年間程度長期貯蔵概念が検討されたことがあった。長期貯蔵の概念として、通称「ピラミッド方式」といわれた500年間堅牢な施設に入れて人間の管理を軽減する方式と、「伊勢神宮方式」といわれた100年ごとに建て替えることによって管理を忘れさせない方式、というものであったが、結局これらの成果が日の目を見ることはなかった。

後述する米国のNAS2001報告書、“Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel-The Continuing Social and Technical Challenge”においては、常にバックアップとなる代替オプションを維持する必要性が指摘されることになったように、今振り返ってみると、このような長期貯蔵概念を活用して、地層処分選択の妥当性についての相対評価の対照としておくという戦略が採られていれば、地層処分の理解を助ける上で有効であった可能性がある。

第3期（1980年代中頃～2000年頃） －地層処分概念の発展と実施に向けた具体化－

NAS1983報告書

振り返ってみれば、日本の地層処分概念に最も大きなヒントを与えることになった報告書が取りまとめられた。

カリフォルニア大学バークレー校のトーマス・ピグフォード教授を委員長とする全米科学アカデミーの放射性廃棄物隔離システム研究専門委員会による「放射性廃棄物の地層処分による隔離システムに関する調査」報告書がそれであり、1983年5月に発表された【NAS, 1983】。

本報告書は、公開と同時に日本においても紹介されることになり、月刊誌「エネルギーレビュー」において、1983年10月号から1984年7月号まで10回に分けて、東京大学鈴木篤之助教授（当時）による詳細な解説記事【鈴木, 1983】が掲載された。

本報告の特徴は、自然の地質環境が本来的に備えている隔離性能（自然のバリア効果）に

着眼した考察が科学的丁寧さを持って行われたことであった。

まず、地下深部に処分した廃棄物が生活環境へ影響を及ぼす可能性は、人間侵入や自然事象による廃棄物への接近の経路（直接接近経路）と、地下水による放射性核種の溶解と運搬による経路（地下水移行経路）の2つがあると整理した上で、報告書の大半を地下水移行経路に着目したメカニズムの考察に当てている。

このような考察において、安全性の支配的要因として重要な視点は、廃棄物を地上に置く場合は放射能インベントリの大きさであるが、地下に置く場合は、放射性物質の地下水への移行量が支配的となることに着目している。

さらに、地下水移行経路に対する地層の隔離・閉じ込め性能には2種類のシステムが働くとし、1つは廃棄物と接触する地下水が長期間存在しないことによる完全な閉じ込め性能（岩塩のケース）であり、もう1つは地質環境が本来的に備えている水理特性と地球化学特性に依存する放射性核種の溶解・移行性能であり、このうち報告書における考察の重点は後者の溶解・移行性能に置かれている。

地下水移行に関しては、地層処分場から地下水によって放射性核種が溶け出したとしても、それが生活圏まで到達するかどうかは放射性核種の地下水への溶解度、岩石による放射性核種の収着効果、および地下水の移動速度から決まる放射性核種の生活圏までの移動時間が放射性核種の寿命より長いのか短いかによるとしている。このため、本報告書では、放射性核種の溶解度と岩石への収着効果、および地下深部における地下水の水理特性についての研究成果が整理され表2-1および表2-2に示すようなデータが紹介され、これらの科学的根拠に基づき、地質環境が本来的に有する天然のバリア機能が考察されている。特に、地球化学特性を地層処分システムの観点から丹念に検討したことは、地層処分研究の歴史上、本報告書が最初のものとなった。

高レベル放射性廃棄物中の主要な放射性核種が地下水によって溶解され、運搬され生活環境に影響を及ぼす可能性のあるプロセスにおいて、放射性核種の閉じ込めに寄与する天然のバリア機能が評価され、

- ほとんどの放射性核種はその場所に固体のまま留め置かれる、
 - 溶出した放射性核種のほとんどはその近傍で崩壊する、
 - ごくわずか運ばれる放射性核種を含んだ地下水は地表に至るまでに大量に希釈を受ける、
- ということができるとしている。

また、水理特性と地球化学特性の重要性に鑑みると、単に岩種によって処分場の適否を論ずることは適当ではないことを指摘している。

地層処分研究の初期においては、岩石の種類によって処分の可能性を論じる傾向があった。地質環境の適否を左右する特性の1つである放射性物質の収着効果は、同一の岩石であっても桁違いに違うことがあり、岩種による有意さよりも大きいことがある。収着効果は、岩種との相関より、地下水の化学的特性などの地球化学特性との相関がずっと大きい。もう1つ

の重要な地質環境条件である地下水の移動速度についても、岩種による因果関係があるわけではない。地下水の移動速度が遅く、生活圏までの距離が遠いことは、岩種の違いに優先して考慮すべきであることを銘記すべきとしている。

1983年にはスウェーデンにおいても、SKBが地層処分の実現性評価を行った結果をKBS-3という処分概念として報告した【SKBF/KBS, 1983】。また、1985年には、Nagraが放射性廃棄物処分の実現可能性に関する報告書「Projekt Gewähr '85（保証プロジェクト'85）」を

表 2-1 溶解度限界と岩石ごとの収着による遅延係数のデータ【NAS, 1983】

Table Solubilities and Retardation Factors of Some Hazardous Radioactive Elements										
Element	Solubility. log ppm					Retardation Factor (1+10Kd)				
	Most Probable	Reducing: Eh=-0.2		Oxidizing: Eh=+0.2		Granite	Basalt	Tuff	Clay, Soil, Shale	Salt
		pH=9	pH=6	pH=9	pH=6					
Se	-3(?)	---	---	---	---	5 50 200	5 50 200	5 50 200	5 50 200	20 200 1,000
Sr	High	-0.2	High	-0.2	High	10 200 2,000	50 200 2,000	20 200 10,000	50 200 5,000	1 10 100
Zr	-4	-4	-6	-4	-6	500 5,000 30,000	500 5,000 10,000	500 5,000 10,000	500 5,000 50,000	300 1,000 5,000
Tc	-3	-10	High	High	High	1 5 40	1 5 100	1 5 100	1 5 20	1 5 20
Sn	-3(?)	-4	-4	-4	-4	100 1,000 5,000	100 1,000 5,000	200 1,000 5,000	200 1,000 5,000	10 100 1,000
Sb	-3(?)	---	---	---	---	10 100 1,000	10 100 1,000	10 100 1,000	10 100 1,000	5 50 500
I	High	High	High	High	High	1 1 1	1 1 50	1 1 1	1 1 1	1 1 1
Cs	High	High	High	High	High	100 1,000 10,000	100 1,000 10,000	60 500 10,000	200 1,000 20,000	1 10 2,000
Pb	-1	-1	0	-1	0	10 50 200	20 50 500	20 50 500	20 50 500	5 20 100
Ra	-2	-3	-1	3	-1	50 500 5,000	50 500 5,000	50 500 5,000	50 500 5,000	5 50 500
Th	-3	-4	-4	-4	-4	500 5,000 10,000	500 5,000 10,000	500 5,000 10,000	500 5,000 50,000	300 1,000 5,000
U	-3	-3	-5	High	High	10 50 500	20 50 1,000	5 40 200	50 200 5,000	10 20 60
Np	-3	-4	-4	-2	-1	10 100 500	10 100 500	10 100 500	10 100 400	10 50 300
Pu	-3	-5	-4	-5	-3	10 200 5,000	100 500 5,000	50 200 5,000	500 1,000 20,000	10 200 10,000
Am	-4(?)	-8	-5	-8	-5	500 3,000 50,000	60 500 50,000	300 1,000 50,000	200 800 50,000	300 1,000 5,000
Cm	-3(?)	---	---	---	---	200 2,000 10,000	100 500 10,000	100 500 10,000	200 2,000 20,000	200 1,000 3,000

表 2-2 標準的花崗岩層に関する水文学特性の想定例【NAS, 1983より作成】

	幅 (m)	透水係数 (m/s)	間隙率	単位動水勾配 当たりの速度 =透水係数/間隙率 (m/s)	動水勾配0.001 の時の1km*の 移動時間 (年)
岩体平均 (深度) 1m 500m		10^{-7} 10^{-10}	3×10^{-3} 10^{-5}	3.33×10^{-5} 1×10^{-5}	951 3,170
1次亀裂域 (引張り) (深度) 1m 500m	50	10^{-5} 10^{-8}	3×10^{-2} 10^{-4}	3.33×10^{-4} 10^{-4}	95 317
2次亀裂域 (深度) 1m 500m	10	10^{-5} 10^{-8}	3×10^{-2} 10^{-4}	3.33×10^{-4} 10^{-4}	95 317
2次亀裂域 (せん断) (深度) 1m 500m	20	5×10^{-7} 5×10^{-10}	5×10^{-3} 1.7×10^{-5}	1×10^{-4} 3×10^{-5}	317 1,057
2次亀裂域 (圧縮) (深度) 1m 500m	5	10^{-6} 10^{-9}	5×10^{-3} 1.7×10^{-7}	2×10^{-4} 6×10^{-5}	159 529

訳注：間隙の中の地下水の移行距離，実際の媒体（間隙を持つ岩体）に対する移行距離はこれに間隙率を乗じたものになる。

連邦評議会に提出した【Nagra, 1985】。

奇しくも1983年という同じ年に米国とスウェーデンから相次いで発表された報告書により提案された多重バリアシステムの概念が，現在，日本を含め各国で採用されている地層処分概念の具体化に輪郭を与えることとなった。

地層処分研究開発の重点項目とその進め方

第2期における日本の計画とされていた5段階研究開発計画は，サイトを決めてそこに合う処分システムを作るアプローチであった。このため，動燃が各地で物理探査やボーリング調査を行う必要が生じ，必然的に地域社会との接触が始まった。地域において，これらの調査は将来地層処分場の立地につながるものとして，各地で住民の懸念の聲が上がり，調査は計画通りには進まなくなった。また，合意形成活動が難航した経験から，計画推進に当たって，地層処分についての国民的理解を目指した情報提供や対話の重要性が痛感されることとなった。

国民的理解を得る重要性に鑑み，地層処分システムの性能を明らかにし，これに基づき長期間にわたり安全性が確保できる技術的方法を具体化して，これを公表することの重要性が指摘されるようになった。

このため，まず地層処分に関する研究開発の進め方を提示することを目的として，1988年10月，原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会に，鈴木篤之東大教授を主査とする「高レベル放射性廃棄物処分研究開発検討小委員会」が設置された。

約1年間にわたる検討の結果は、1989年12月19日、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会報告書：「高レベル放射性廃棄物の地層処分の重点項目とその進め方」（以下、「重点項目報告書」という）に取りまとめられ、原子力委員会に報告され【原子力委員会、1989】、委員会はこれを新たな研究開発方針として了承した。

重点項目報告書は、前述のNAS1983年報告書に示された地層処分システムの考え方を参考に、まず、日本の地質学的特徴を考慮した地層処分システムの概念を明らかにするための研究開発方針を示すことに重点が置かれた。

これにより、概括的な地層処分システムを明らかにした上で、それを設置するのに適した地質環境の条件を検討して、日本において考慮すべき地層処分場サイトの要件を具体化して、それを根拠にサイト選定プロセスに移行するというアプローチへの転換を図るものとなった。

地層処分の基本概念として、図2-2および図2-3のような地層処分の基本概念が示された。

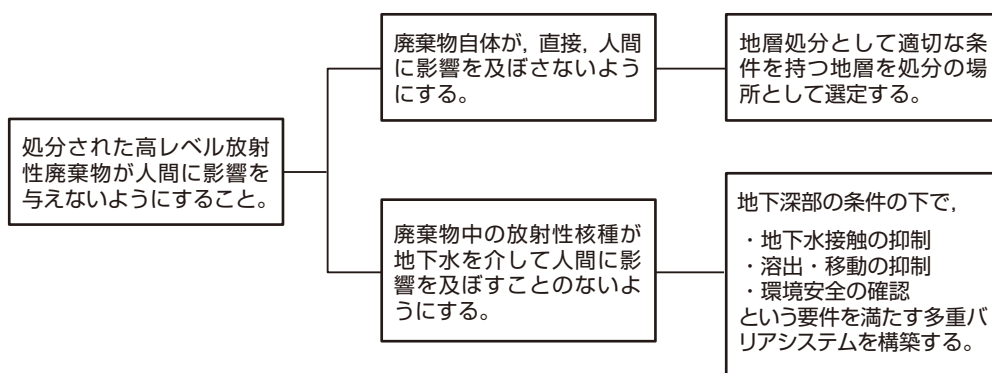


図 2-2 地層処分の基本概念【原子力委員会、1989より作成】

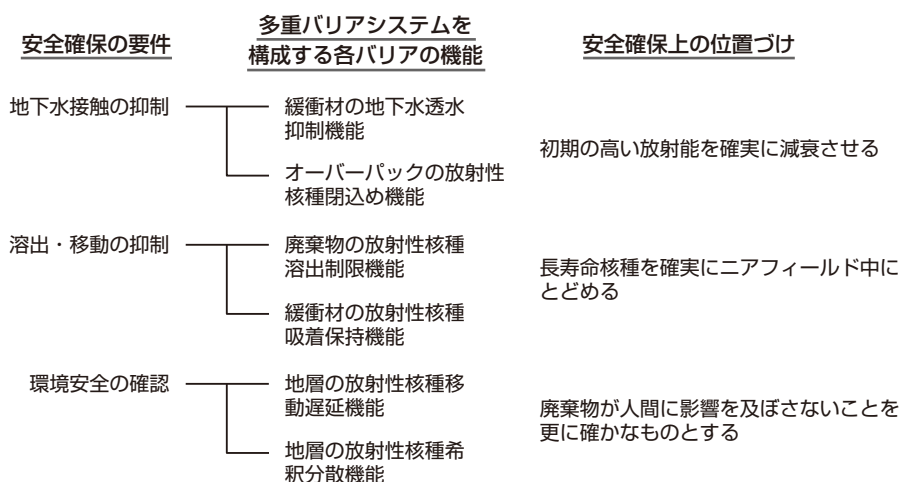


図 2-3 多重バリアシステムの構成とその機能【原子力委員会、1989より作成】

すなわち、

- **地下水接触の抑制**

高レベル放射性廃棄物は発生時点では放射能のレベルが高いものであるが、その放射能のほとんどが発生後数百年の間に急速に減少する。この放射能レベルの高い期間においては、安全確保のために、放射性核種を廃棄物中に閉じ込めておき廃棄物中の放射能を確実に減衰させることが重要である。このためには、廃棄物が地下水と接触する可能性を十分低く抑えて、廃棄物中の放射性核種が地下水中に溶出しにくく、かつ埋設場所から移動しにくいようにする。

- **溶出・移動の抑制**

高レベルの放射能が減衰してからも長期にわたって残留する放射能がある。この長期間においては、安全確保のために、放射性核種を埋設場所とその近傍に留めておくことが重要である。このためには、廃棄物が地下水と接触したとしても、廃棄物中の放射性核種が溶け出しにくくし、かつ埋設場所から移動しにくいようにしておく。

- **環境安全の確認**

さらに一層の安全確保のためには、たとえ放射性核種が埋設場所から移動したとしても、それが非常に長い時間をかけて地層を通して人間の生活圏に到達して、有意な環境影響を及ぼすことのないことを確認する。

というものである。

＊ 当初、3つ目のバリア性能の目標は「安全水利の確保」とされていたが、意味が分かりにくいとの指摘から、最終案では「環境安全の確認」となった。振り返ってみると、深部地下水が地表付近まで移行して帯水層に入り、さらに生活環境に至るまでの移行時間と、その過程での分散・希釈による天然バリアの性能目標を「安全な水を利用できることを保証する」という意味で、性能の目標を示す表現として、より適切であったかもしれない。

多重バリアシステムに関する諸外国でのこれまでの研究開発成果を参考にすると、地層処分の安全性を決定づける重要な要素は、まず人工バリアとその近傍の地層（「ニアフィールド」という）における安全性能であり、その外の広い地層（「ファーフィールド」という）における性能は、その安全性をさらに確かなものとするという役割を担っていることが示された。この観点から、ニアフィールド研究に重点的に取り組んでいくことが適切と考えられた。

このため、ファーフィールドの地層に関する研究を着実に推進しつつ、ニアフィールドの人工バリアとその近傍の地層の研究に重点的に取り組み、多重バリアシステムの性能評価研究に、地質環境の研究成果と人工バリア等の工学技術の開発成果を集約する研究開発アプローチが採られた。

ニアフィールドアプローチ採用の背景

日本において、このようなアプローチ，すなわちニアフィールドの研究に重点を置き，かつ性能評価研究に研究開発成果を集約するという方針がなぜ採られたかということについて，当時の状況を振り返ってみると理解しやすい。

国際的に共通する地層処分実施のアプローチは，基本的には次の3つの課題から成る。

- 地層処分サイトを選定する。(サイト選定)
- このサイトに適合する地層処分システムを開発する。(工学技術開発)
- この地層処分システムの安全性を確認する。(性能評価)

アメリカにおいては，当時既に安全規制基準として，10CFR60が提案されており，その中で，たとえばシステムの性能基準として，固化体の浸出率を年間10万分の1，キャニスターの寿命を1000年，また，地下水が地表に到達するまでの移行年数を1000年，のようにサイト要件や工学設計の目標となる具体的数値が明示されていた。

また，サイト条件として，アメリカでは，テキサス州デフスミスの岩塩層，ワシントン州ハンフォードの玄武岩層およびネバダ州ヤッカマウンテンの凝灰岩が候補地層として挙げられていた。また，カナダやスウェーデンでは楕状地と呼ばれる極めて長期にわたって安定である岩体が，ドイツでは岩塩層がそれぞれ候補地層として想定されていた。

当時日本より先行していた国は，上記3つの課題のいくつかの開発目標が具体的に想定されており，それを境界条件において他の課題に取り組むというアプローチが可能であった。このような各国の状況あるいは条件に引き換え，日本では，境界条件が特定されず，それにより研究開発の起点と集約の方向が曖昧となる可能性が指摘された。

そこで，サイト条件に依存する天然のバリア性能に過度に依存することなく，普遍性のあるシステム要素となり得る人工バリアに多くの閉じ込め性能をもたせる，言い換えれば，人工バリアのみでも閉鎖後の安全性を確保できるような処分システムを開発目標として仮置きする研究方針を採ることとなった。

人工バリアに期待する安全機能について，予測や仮定の不確実性の小さい埋設坑道周辺の限定的な領域における水理学的特性と地球化学的特性に着目した地質環境条件のもとに評価する。すなわちニアフィールド性能評価研究を研究開発計画の中心に置き，工学技術開発と地質環境調査研究に対して課題を提示して研究開発の緩急順序を示し，また両領域の成果を性能評価に集約するというアプローチを採ることとなった。

こうして，ニアフィールド性能評価研究を「管制塔」として，研究課題の過不足を明らかにしつつ課題間の相互フィードバックを図ることにより，合理性の高い研究管理が可能となった。

動燃における地層処分研究開発の推進

わが国における地層処分研究開発の中核推進機関と位置づけられた動燃は、地層処分の技術的実現可能性を確かなものにするための研究開発、すなわち、多重バリアシステムの性能を評価する研究、地層処分システムの技術的裏づけを確立するための処分技術の開発、およびわが国の地質環境に関する調査研究を進めることとして、以下の3つの研究開発を一連の計画として実施することとされた。

性能評価研究

多重バリアシステムの各バリア機能はどのような条件のもとに成り立ち、また、この条件がどのように変化し、その結果として核種がどのような挙動を示すかを明らかにすることによって多重バリアシステムの性能を評価するための研究である。

性能評価研究においては、地層処分の概念がわが国でも有効かつ成立するものであることの確認と安全性確保の観点から、特に重要と考えられる地下水の影響に対する多重バリアシステムの有効性の解析・評価が行われた。研究の対象は人工バリアおよびその環境となる地質環境からなる系（ニアフィールド）と、その外側の天然本来の性質を保つ地質環境からなる系（ファーフールド）とに大別して以下のような研究テーマが取り上げられた。

■ニアフィールドに関する研究

- 緩衝材の透水制限機能の研究
- 人工バリアと地下水の相互作用の研究
- オーバーパックの腐食の研究
- ガラスおよび核種の溶解、緩衝材中の核種移動の研究

■ファーフールドに関する研究

- 地下水理機構の研究
- 地層中における核種の吸着・鉱物化等による移行・遅延および分散・希釈の研究

処分技術開発

性能評価研究の進展に対応して、地質環境单元に対応する地層処分システムを構築するとともに、性能評価の技術的裏付けを具体的に確かめる研究。

- 地層処分システムの設計研究
- 人工バリアの研究開発

地質環境の調査研究

わが国に分布する有効な地層を岩石の種類、年代、地質構造等、地層処分の観点から共通の地質環境特性を持つと考えられる地質環境单元に区分して、地表調査や深部地質環

境調査等を行い、わが国における地質環境特性の適正の評価と性能評価研究および処分技術開発に用いるデータセットとして取りまとめる。また、地質環境調査に必要な調査・評価技術の開発を行う。

重点研究開発プロジェクト

研究項目のうち、研究開発成果の授受、研究手段の共有等相互に関連するものについて、複数の研究項目からなる研究開発プロジェクトに統合することにより、研究管理の効率化が図られた。

◇PACE*計画：ニアフィールド総合評価研究

ニアフィールドの地球化学的条件の経時変化およびそのような条件下でのオーバーパックの腐食、核種の溶解・移行等個別の現象について、それらの評価コードを統合化した人工バリアからの核種放出機構の評価コードが開発されるとともに、アクチニド核種等の熱力学的評価試験（溶解度測定等）が行われた。

* Performance Assessment Center For Engineered-barrier

◇ENTRY*計画：地層処分システム工学研究

地下深部を模擬した工学規模の試験系において、水理・物質移行現象に関する原位置試験等を補完するデータ取得を行い、各現象に関する解析モデルの検証・確認が行われた。また、ニアフィールドを模擬した試験系における複合的現象の観察、加速試験等により性能評価結果の信頼性に関する確認試験が行われた。さらに性能評価結果に基づき長期にわたる複合的現象をシミュレーションし、可視化する技術によって性能評価結果の理解の促進が図られた。

* Engineering-scale Test and Research facility

◇ナチュラアナログ研究計画

放射性核種の溶解・移行に係る現象や人工バリア材の長期挙動等について、それらに類似する天然現象を研究し理解することによって、性能評価手法の確認に反映された。

◇原位置試験計画

鉱山の既存坑道等を利用して、地質環境に係る基礎的な特性や現象についてのデータの取得とそれに必要な技術開発が行われた。

- 釜石原位置試験計画：結晶質岩系の亀裂性媒体における水理試験と地質環境特性調査技術開発
- 東濃原位置試験計画：堆積岩系の多孔質媒体における水理試験と地質環境特性調査技

◇国際共同研究計画

- OECD/NEA 国際ストリパ計画：原位置における水理・物質移行に係る試験・評価手法の開発，原位置人工バリア試験研究
- スイス Nagra との共同研究：放射性物質等を用いた結晶質岩系の小規模割れ目中の核種移行試験等，釜石原位置試験計画を補完
- カナダ AECL との共同研究：放射性物質等を用いた結晶質岩系の大規模割れ目中の核種移行試験等，釜石原位置試験計画を補完
- ベルギー Mol との共同研究：放射性物質等を用いた堆積岩系における核種移行試験等，東濃原位置試験計画を補完
- OECD/NEA 国際アリゲータ・リバー・アナログ計画：高品位ウラン鉱床を利用した核種移行評価，東濃ナチュラルアナログ研究を補完

研究開発成果の取りまとめ

重点項目報告書は，また，地層処分の研究開発を進めていくに当たっては，地層処分について国民の理解を得るよう努めることの重要性を指摘し，このため，研究開発成果を報告書として取りまとめ，情報提供を積極的に行う必要があるとした。これを受け，原子力委員会は中核研究機関である動燃に対し，日本においてもそれまでの研究開発成果をもとに第1次の取りまとめを行う時期にきていると指摘した。

動燃においては，原子力委員会の方針に基づき関係機関と協力しつつ研究開発を進めた結果として，1992年9月，日本における地層処分の安全確保の技術的可能性を示すために「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－」（いわゆる第1次取りまとめ）【PNC, 1992】を取りまとめ，原子力委員会に提出した。

原子力委員会は，この技術報告書の内容を放射性廃棄物対策専門部会において検討した結果，1993年7月に，「わが国における地層処分の安全確保を図っていく上での技術的可能性が明らかにされている」との評価を示すとともに，動燃は引き続き研究開発を行い，2000年前までに第2次の取りまとめを行う必要があること，国は第2次の取りまとめの評価等を通じ，研究開発の進捗状況を見極め，研究開発計画をさらに推進する必要があるとした。

動燃の継承機関である核燃料サイクル開発機構（以下，「サイクル機構」という）は，1997年4月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会（BE部会，部会長：熊谷信昭大阪大学名誉教授）の報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について」【原子力委員会，1997】に従い，関連する研究機関等の協力を得て，「わ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

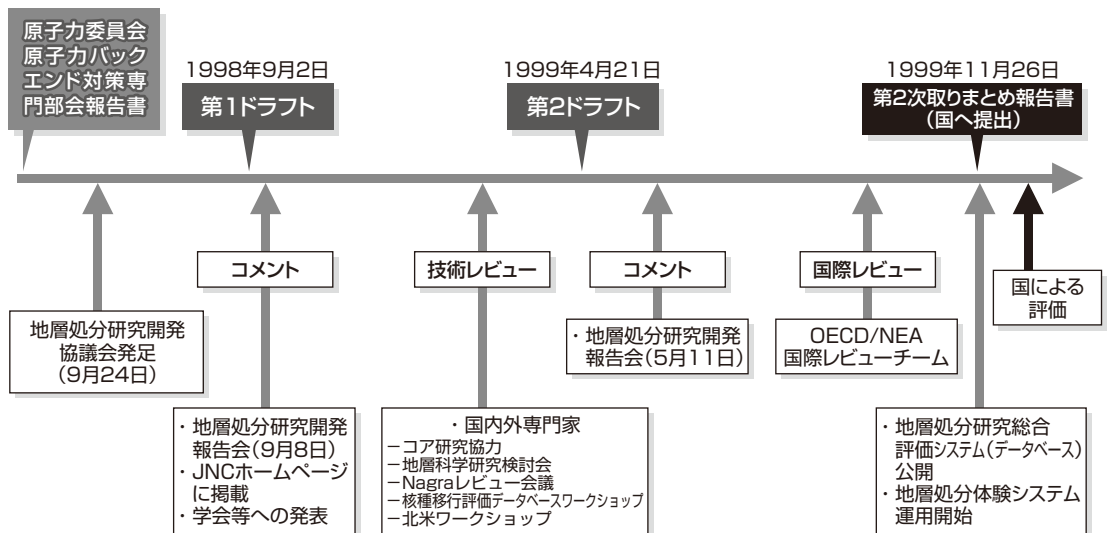


図 2-4 第2次取りまとめの経過

まとめ」報告書【JNC, 1999a】（以下「第2次取りまとめ」という）を作成し、1999年11月26日に原子力委員会に報告した。

第2次取りまとめに当たっては、地層処分について国民の理解を得ることの重要性に鑑み、取りまとめの過程についての透明性と成果の客観性の観点から研究開発の成果を積極的に公開し、あらゆる機会を利用して国内外専門家のレビューを受けるとの方針が立てられた。

このため、取りまとめ過程で、動燃は1998年9月および1999年4月の2度にわたり、研究開発の進捗をドラフトとして中間的に整理し、BE部会に報告・公表し、さらに、地層処分研究開発報告会の開催、ホームページへの掲載を行い、関係する幅広い分野の専門家等から意見を集約した。また、専門部会報告書の指針に従い、ドラフトの段階でOECD/NEAによる国際レビューを受けるとともに、海外の各研究機関と国際共同研究の枠組みに基づきワークショップ等を通じて海外の専門家とも技術的な内容について意見交換が行われた（図2-4）。

BE部会は、サイクル機構の報告を受け、第2次取りまとめの研究開発成果を総合的に評価するとともに、専門部会報告書で示した技術的重点課題等に沿って適切に達成されているかどうかについて評価を行った。評価の客観性、視点の多様性を確保するため、国内外の専門家を中心に幅広く意見交換を行う国際ワークショップを開催し、海外からの招聘者、国内の専門家、公募による一般の参加者、第2次取りまとめの作成に関わった専門家などにより幅広く議論を行った。原子力委員会はこれらの意見を踏まえてさらに議論を行った結果を取りまとめ、2000年10月11日に「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」報告書を発表した【原子力委員会, 2000】。

評価の結果は、以下のように要約された。

- 第2次取りまとめの研究成果は、我が国の地質環境、地層処分の工学技術および地層処分システムの安全評価の3つの研究開発分野における成果について、それぞれの関連する技術的知見を総合的に検討したことにより得られており、専門部会報告書で示した技術的重点課題等が適切に達成されているとともに、我が国における地層処分の技術的信頼性が示されていると判断できる。
- 第2次取りまとめには、専門部会報告書で求めている処分地選定に当たって考慮すべき地質環境の要件、取得すべき情報とそのための調査手法や機器が示されており、処分予定地の選定に当たっての技術的拠り所とすべき内容が示されていると判断できる。
- 地層処分の工学技術について、専門部会報告書で求めている処分場の設計・施工要件および管理項目が示されるとともに、安全性についての評価手法および評価結果が示されており、安全基準の策定に資する技術的拠り所となると判断できる。
- 以上のことから、第2次取りまとめには、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が示されているとともに、処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価する。このことから、第2次取りまとめは地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となると判断する。

第1次取りまとめは平成3年度までの成果を集約したものであり、Heiseiの頭文字をとってH3と国内外で呼称され、また、第2次取りまとめは2000年（平成12年）に原子力委員会の評価を得たことからH12と通称されるようになった。

日本における研究開発段階の総括

第1次取りまとめおよび第2次取りまとめ報告書の作成経緯を振り返ると、それぞれの時代を反映したいくつかのキーワードを見出すことができる【増田, 2005】。それは、「総合的に評価する時期」、「研究成果の統合・情報化」、「国際協力の推進」、「情報の公開とレビューによる客観性の確保」、「社会との対話促進」、「専門家の育成」などである。

第1次取りまとめの当時、地層処分に積極的に取り組んでいた諸外国においてもこのような総合的な報告書の作成を行っていた例は少なく、その中でスイスNagraの報告書「Projekt Gewähr1985（PG85）」が、日本で地層処分を考える際のさまざまな境界条件の類似性、すなわち変動帯に位置するという地質環境条件、ガラス固化体を対象としているといった点等から、良い参照例とみなされた。このため、Nagraとの協力協定に基づいて、PG85の取りまとめ担当者の日本派遣を求め、このような報告書の取りまとめに関する経験を参考とすることができるよう工夫がなされた。報告書の技術的内容についての国際標準の品質確保を図るため、地層処分の研究開発を進めている国々との協力や国際機関の主催するプロジェクトへの参加が推進された。また、報告書に取り込む情報の客観性、追跡可能性を確保するため、研究開発成果は内外の学会に積極的に発表された。

第1次取りまとめの公表と国のレビューを経て研究開発がより体系化された形でさらに進められるようになり、図2-5に示すように、人的資源、研究予算が大幅に投入されることに

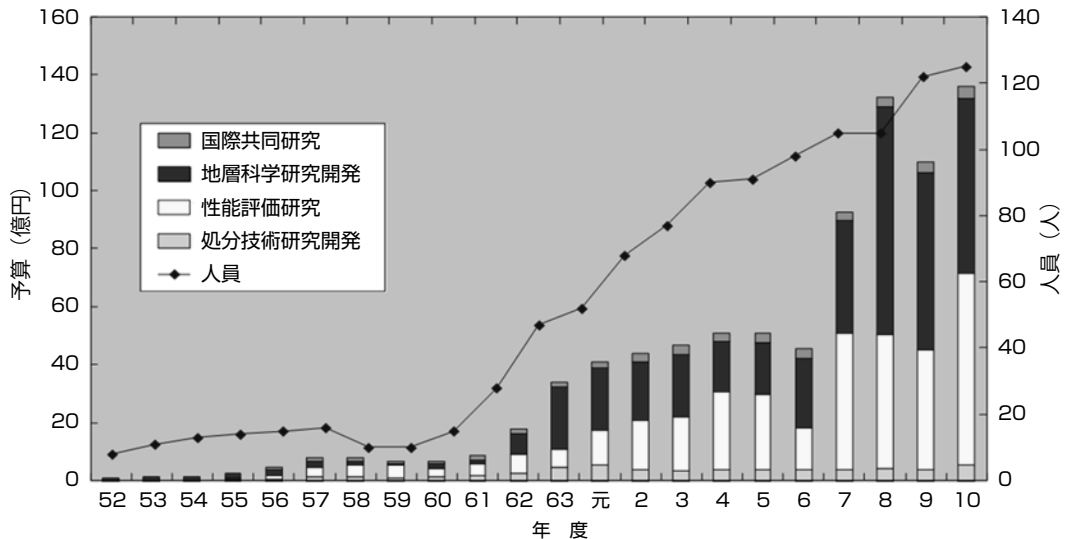


図 2-5 地層処分研究開発予算と人員

なった。このため、サイクル機構においては、関係機関の人的協力を得て第1次取りまとめの当時よりさらに大規模な組織が置かれ、2000年前までの報告書完成を目標に取りまとめ作業が進められた。

併せて、関係研究機関の成果を共有し協力を得るため「地層処分研究開発協議会」が設置され、日本の総力を結集した体制が整えられた。第2次取りまとめは上記目的に従って第1次取りまとめ以降の研究開発成果を総合的に評価し、地層処分を事業開始の段階に進めるための意思決定に必要な技術的情報を提供するという役割を担っていた。このため、その内容を国民に提示して理解を得ることが重要との認識から、情報の透明性、すなわち曖昧さや誤解を避け、分かりやすくする、という要求が加えられた。当時、国の積極的な情報公開の方針を受け、BE部会は公開で審議される最初のケースになったため、会議に配布される資料の品質管理には多くの時間を割くこととなった。この緊張感を持って資料の作成に当たるという経験は、結果として第2次取りまとめの品質レベルを保つことに役立った。

第2次取りまとめについては初期のドラフトから最終版に至る全てのレビューが公開で行われるとともに各ドラフトがウェブサイトに掲載され、常時幅広く意見が受けられるようにされた。また、原子力委員会等が各地で開催した意見交換の場に専門家が積極的に参加し、専門家以外の方と接する機会が日常的となった。

原子力委員会の評価が進む中で、2000年6月には、第2次取りまとめを技術的な背景とした「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が公布され、それまでの四半世紀にわたる研究開発を主体とする段階から、いよいよ実施の段階に入ることとなった。

ここに至る日本のアプローチは、特定のサイト環境条件を想定することなく行うジェネリック（包括的）な研究開発による成果をもとに事業の制度化を図るというものであった。

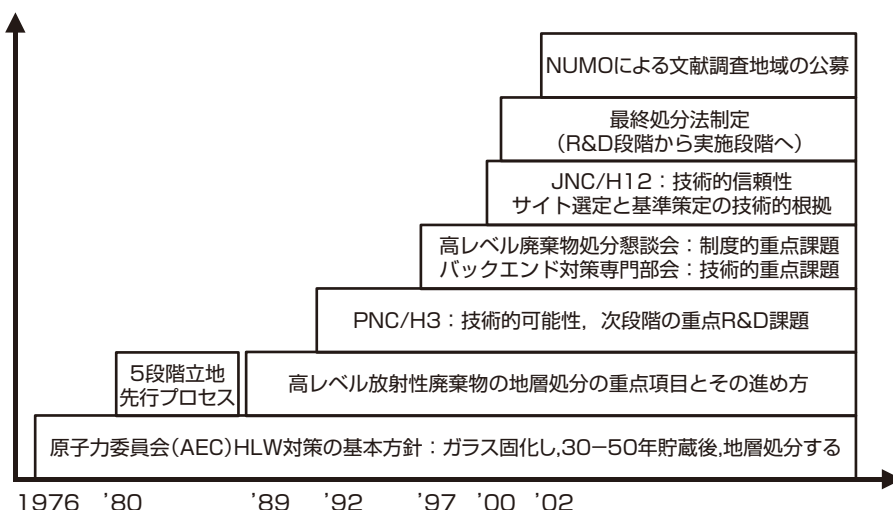


図 2-6 日本の地層処分計画の進展

一方、先進各国の計画には、制度を先行させ、それに適合するよう技術を開発し組み立てて行くアプローチもあり、これと対比して、日本の計画は10年から20年遅れているとみなされることもあった。

現在は地層処分計画を進めている国の中で、処分サイトや候補地を明らかにしている諸国に次いだ段階にあると認識されるようになっており、これから地層処分計画を本格化しようとしている各国においては、ジェネリックな研究の重要性を示す1事例と見られている。

地層処分計画推進の要諦として国際的にも共有されている段階的アプローチ、利害関係者の意思決定への参加、意思決定に必要な情報の的確な提供と説明責任等に関し、実施段階に先立ちH12を取りまとめる過程で関係者がある程度実践できた経験は無視し得ない成果と思われる。

さらに重要な無形の成果として、この2つの報告書の作成に携わることを通じて国内に多くの専門家が育ち、日本の地層処分を支えるテクニカルコミュニティが強化され、国際的にも認知されるようになったことは特筆に値する。

【参考文献】

- (1) 村野徹 (1989). 放射性廃棄物地層処分の基本的考え方, 季報エネルギー総合工学11巻4号.
- (2) 安俊弘 (2013). 高レベル放射性廃棄物地層処分：概念発達史と今日の課題, 科学, 83巻10号.
- (3) Tochiyama, O., Masuda, S (2013). Building technical and social confidence in the safety of geological disposal in Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, 50:7, 665-673.
- (4) 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之 (2015). 地層処分概念の変遷, 原子力学会誌, 57, No. 5. 6. 7.
- (5) NAS (1957). The Disposal of Radioactive Waste on Land, National Academy of Sciences.
- (6) Peltier, R. (2010). The U.S. Spent Nuclear Fuel Policy: Road to Nowhere Part III: Yucca

- Mountain. Master Resource A Free-Market Energy Blog. July 10. <http://www.masterresource.org/2010/07/spent-nuke-fuel-policy-3/> 閲覧日 2016年4月.
- (7) 原子力委員会 (1962). 原子力委員会廃棄物処理専門部会中間報告, 1962.4.
 - (8) 原子力委員会 (1973). 原子力委員会環境安全専門部会報告書, 1973.6.
 - (9) Meadows, D. H. (1972). The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. Universe Pub.
 - (10) OECD/NEA (1977). Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes.
 - (11) DOE (1979). Report to the President by the Interagency Review Group on Nuclear Waste Management, TID-29442.
 - (12) Fairhurst, C., Gera, F., Gnirk, P., Gray, M., Stillborg, B. (1993). OECD/NEA International Stripa Project: overview. SKB, Stockholm, Sweden.
 - (13) OECD/NEA (1982). Disposal of Radioactive Waste: An Overview of Principles Involved. OECD/NEA.
 - (14) 外務省HP (2016). 外交政策>条約>1972年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約の1996年の議定書. http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/treaty166_5.html, 閲覧日: 2016年3月.
 - (15) 原子力委員会 (1976). 放射性廃棄物対策に関する研究開発計画 (中間報告), 原子力委員会放射性廃棄物対策技術専門部会, 昭和51年6月.
 - (16) 原子力委員会 (1980). 高レベル放射性廃棄物処理に関する研究開発の推進について, 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会, 昭和55年12月19日.
 - (17) NAS (1983). A Study of The Isolation System for Geological Disposal of Radioactive Wastes Waste, Isolation System Panel, Board on Radioactive Waste Management Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Resources, National Research Council.
 - (18) 鈴木篤之 (1983). ビグフォード報告 高レベル廃棄物の地層処分について, エネルギーレビュー, 1983.10 ~ 1984.7.
 - (19) SKBF/KBS (1983). Final Storage of Spent Nuclear Fuel: KBS-3, Swedish Nuclear Fuel Supply Co., Division KBS, Stockholm.
 - (20) Nagra (1985). Project Gewähr 1985: Nuclear waste management in Switzerland: Feasibility studies and safety analyses, NGB 85-09. Nagra, Baden, Switzerland.
 - (21) 原子力委員会 (1989). 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方, 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会, 平成元年12月19日.
 - (22) PNC (1992). 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN 1400 92-081, 平成4年9月.
 - (23) 原子力委員会 (1997). 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について, 原

原子力委員会バックエンド対策専門部会, 平成5年4月.

- (24) JNC (1999a). わ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－総論レポート, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-020.
- (25) 原子力委員会 (2000). わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 平成12年10月.
- (26) 増田純男 (2005). H3, H12 レポートから1990年代を振り返って, 原子力バックエンド研究 11 (2), 75-76.

第3章

地層処分の選択理由

廃棄物管理の基本的考え方

地球環境において人間が活用するエネルギーは、人口が限られていた太古の時代には太陽からリアルタイムで得られる（フロー）エネルギー資源だけで賄われていたが、現在は地下に蓄積（ストック）された資源が人間活動に必要な多くの製品の素材と主要なエネルギー源となっている。

地下資源から製品やエネルギーを得る過程で不要なものは廃棄される。また、使用された後、もはや利用の価値がないとみなされる製品あるいは利用効率の低下したエネルギー源は廃棄される。結局、全ての資源はいずれ廃棄物になり、地球の物質収支上、減った資源と同じ質量の廃棄物が発生することになる。また、廃棄物は系外に捨てなければ生命や生産は維持できないという生命の廃棄原理により、廃棄物が無制限に排出されると環境が悪化し、やがて生存が困難となる（廃棄物汚染の定理）といわれている【八田, 1992】。

また、多くの環境問題は、人間が大量の物質を自然界から採取し、大量の廃棄物を自然界に放出することが原因になっており、自然エネルギーというフローで賄いきれないとすれば、なるべく隔離可能なエネルギー源により、自然界との物質交換を最小にすべきであるとの指摘がある【鳥井, 1999】。

このような観点から、確実な廃棄物対策は資源の利用を正当化する上で必須な行為であるということを廃棄物管理における哲学と考える必要がある。

高レベル放射性廃棄物対策の考え方

化石燃料を用いる火力発電では、化石燃料の燃焼、すなわち炭素と酸素の化合の結果、エネルギーと二酸化炭素が発生する。

二酸化炭素は呼吸にも含まれ、廃棄物としての毒性はほぼゼロであるが、その発生量が膨大であるため成層圏に蓄積され温室効果による気候変動の一因となりつつある。

原子力発電の場合は、核燃料物質の原子核反応によってウランが核分裂生成物に変わる際にエネルギーが発生する原理であるため、必然的に核分裂生成物等が高レベル放射性廃棄物として発生する。

廃棄物対策は、廃棄物発生の抑制、資源として再利用、環境汚染防止のための処理処分の

3つが基本と考えられている。二酸化炭素は発生量が膨大であり、一旦発生したものを回収して処理する合理性はないため、発生を抑制することが現実的に可能性のある解決策であるとして、国際条約の批准が促進されている。

原子力発電に伴う放射性廃棄物対策においては、リサイクルによる発生量の低減努力を行うとともに最新の科学技術に基づく確実な処理処分によって、その影響を将来にわたって受けないように環境から隔離する必要がある。

このように、太陽熱や風力などのフローのエネルギー源でない限り、ストックの地下資源を使って電気を起こせば、その発電の原理から必ず廃棄物が出るので、火力発電の二酸化炭素と原子力発電の高レベル放射性廃棄物はいわば「電気文明の負の遺産」と考えられる。この観点から、高レベル放射性廃棄物の最終的な措置については、二酸化炭素の問題と同様、生産者の責任に委ねるだけではなく、電気の恩恵を受けている現代社会が全体でそれぞれの責任を分担して取り組むべき課題であると考えられる。とはいえ、膨大な量の二酸化炭素を各家庭で後始末ができるわけではなく、高レベル放射性廃棄物も扱いきれないので、電力会社などに始末を頼ることになるが、自分で処分はできなくても、せめて自分の問題として関心を持つことが大切である。その意味でも、国民全体の問題として受け止めることが不可欠である【徳山, 2000】。

地層処分選択理由の技術的側面

高レベル放射性廃棄物を人間の管理がなくても確実に留めておく性能に着目して、そのような施設を設置するための条件が安定な場所として地表と地下ではどちらが好ましいかという比較は、以下に述べるように地下の方が有利である【増田, 2005】。1つは安定性の条件に関して、自然現象、人間の行為、物質の動きなどの比較から理解できる。地表では地震、火山、断層、台風、地滑り、津波、さらには隕石など、気圏との境界において生じる多くの自然現象の影響を受ける可能性がある。これに対して、地下深部で影響を受ける可能性のある事象は火山と断層の活動である。また、地下深部に人間が偶発的に接近する可能性は掘削のみであるが、地表においては、様々な人間の行為の影響が及ぶ可能性がある。爆発、火事、公害、戦争、さらにはテロなど、遠い将来にわたる人間の行為はそれを想定すること自体に多くの不確実性が含まれる。人間の行為に対して安全性がどのように確保されるかということについて信頼性の高い精度で予測することは容易ではない。

また、ウラン鉱床などが数十万年以上にわたって動くことなく、安定的に存在し続けていることから分かります。地下深部ではものの動きが極めて制限される。このことは、地下深部において幅広く見られる深層地下水の動きが極めて遅いことと、地下深部には酸素がほとんど存在せず化学的に不活性であること、という環境条件に拠っている。さらに化石や地層は、過去の地球の活動や自然現象の痕跡を数億年以上にわたって記録しており、これに

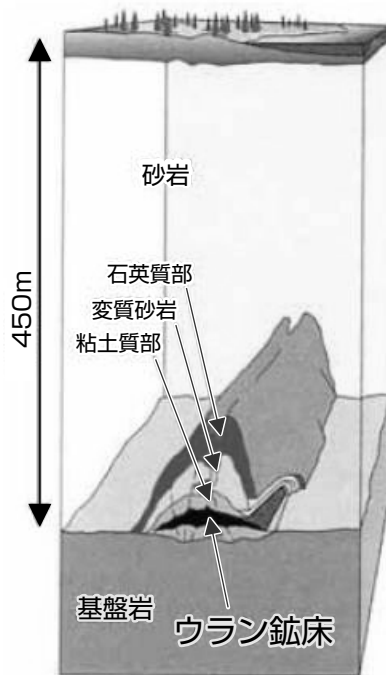


図 3-1 シガーレイクウラン鉱床の概念図【NUMO, 2004a】

基づく地質学を根拠にした将来予測の不確実性は、地表における環境の変遷や人間による制度的管理継続可能性の予測の不確実性に比べると格段に小さい。

地層処分選択理由の環境・倫理的側面

放射性廃棄物の管理原則においては、倫理的側面は技術的側面と表裏一体の関係として重要な柱となっている。このため、1995年には、長寿命の放射性廃棄物の管理に適切に対応していくための倫理的側面について、OECD/NEAの集約意見が取りまとめられた【OECD/NEA, 1995】。この報告書においては、最終処分を実施するに当たって遵守すべき倫理的な規範について、次のような側面から考察が加えられている。

- 放射性廃棄物を処分することの倫理的合理性
- 地層処分を最適なオプションとし、その実施に向けて継続的活動を行うことの倫理的合理性

第1の点については、世代間の公平性、世代内の公平性という2つの視点から、論理展開が行われている。

世代間の公平性については、放射性廃棄物を発生させた世代がその管理について責任を持つこと、将来世代の健康や環境へのリスクを、少なくとも今日と同レベルに維持すること、放射性廃棄物の管理に当たって、将来世代に不当な負担をかけないこと、およびできる限り

将来世代の選択肢を残しておくことを倫理的な規範として掲げている。

また世代内の公平性については、放射性廃棄物の管理は人間の健康と環境の保護のための種々の活動の1つであり、他の活動との関係において資源の配分に留意すること、および関連する種々の社会層が意思決定プロセスへ参加できるようにすることが倫理的に求められるとしている。

これらの倫理的規範に照らして、放射性廃棄物の管理方法として、長期貯蔵（制度的管理）か処分かが論じられている。この問いに対する答えとして、長寿命の放射性廃棄物は処分すべきであることが結論づけられている。

処分の目的は、「廃棄物を生物圏から長期間にわたって隔離し、仮に放射性物質が生物圏に到達したとしても、その濃度は自然の放射能レベルに比べて問題とならない程度に低いことを保証すると同時に、不注意からの人間侵入によるリスクが非常に小さいことを保証すること」とされている。

その倫理的な理由として、発生者である現在の世代が管理方法について責任を持つべきこと、将来の世代に負担をかけるべきでないこと、および放射能寿命の長い廃棄物の管理方法としては、「希釈と分散」という処分方法ではなく「閉じ込めと隔離」によるべきであることが挙げられている。

長期貯蔵により、将来の世代に現在と同じ状態を順送りに引き渡す“rolling present”という考え方は、将来世代に選択肢を残すという観点から一見倫理的と受け取ることができるかもしれないが、結局、現世代はこの問題に対して何も行動を起こさないという理由で非倫理的とみなされている。

処分の目的に合致する具体的な方法として地層処分が広く提案されている。将来の世代に選択肢を残すという観点からは、地層処分は原理的に不可逆的なものではなく、処分場の閉鎖前の段階はもとより、閉鎖後であってもコストがかかるということはあるにせよ、回収可能である。したがって、科学技術の進歩により地層処分以外の選択肢に変更することは不可能ではない。世代内公平性に関する議論は、主として上述した2つ目の側面、すなわち地層処分を最適なものとして今後進めるべきかどうか、またどのようなタイミングで進めるべきかという問題についての倫理的な整合性に焦点が当てられている。世代内の公平性に関する倫理的な要求は、地層処分が何年もかけて段階的に進められることによって満たされるとしている。この過程でいくつもの意思決定が必要であり、これらに対して関連する各種の社会層が参加することによって、地層処分を進めることの公平性を保つことができる。また、この過程で科学技術の進歩を取り込むことができ、他のオプションに対する研究開発の可能性を残し、このことが、資源の配分に関わる公平性を維持している。資源の配分に関する判断として、廃棄物処分という負の遺産対策への投資が他の行為に対する投資を制限してしまうほど大きなものであってはならないという点も指摘している。たとえば、化学的な安定性を重視するあまり金をふんだんに使った容器を使用する、あるいは宇宙空間への投棄のために専用のロ

ケットを開発する，などは冗長で過大な投資であるとみなされるような考え方である。別の経済的側面は，高レベル放射性廃棄物の地層処分施設は必ずどこかの地域が引き受けなくてはならないので，引き受けた地域は，実質的な負担の有無に関係なく，他の大部分のこれに関係しない地域や国民全体から報奨を受け取ることは倫理的と言えるという点である。

【参考文献】

- (1) 八太昭道 (1992). ごみから地球を考える, 化学工学 第56巻第4号.
- (2) 鳥井弘之 (1999). 原子力の未来－持続可能な発展への構想－, 日本経済新聞社.
- (3) 徳山明, 帆足養右, 鳥井弘之, 吉村秀実 (2000). 原発ゴミはどこへ, 電力新報社.
- (4) 増田純男 (2005). 高レベル放射性廃棄物の管理～原子力施設からの放射性廃棄物の管理, NSA コメンタリーシリーズ, No.13.
- (5) NUMO (2004a). 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性, 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-01.
- (6) OECD/NEA (1995). The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD/NEA.

第4章

地層処分概念の構成

地質環境の固有包蔵性能と地層処分システムによる頑健性の確保

現在各国で採用されている多重バリアシステムは、地質環境の固有包蔵性能を基本的な受動的な安全機能として利用し、それをさらに確かなものとして人工バリアを組み合わせるものであり、このシステム概念の考え方については、図4-1のように、説明することができる【増田, 2015】。

鉱物資源や化石の存在のように、深部地質環境は本来的に超長期にわたる物質の包蔵性に優れている。地表で起こるほとんどの自然現象の影響は地下深部には及ばない。また、厚い岩盤は人間環境との隔離性をもたらす。これにより、地下深部に置かれた放射性物質が人間環境へ影響を及ぼす可能性は著しく小さくなる。

地下深部には深層地下水があるので、地下水がやがて放射性核種を溶かし出し、放射性核

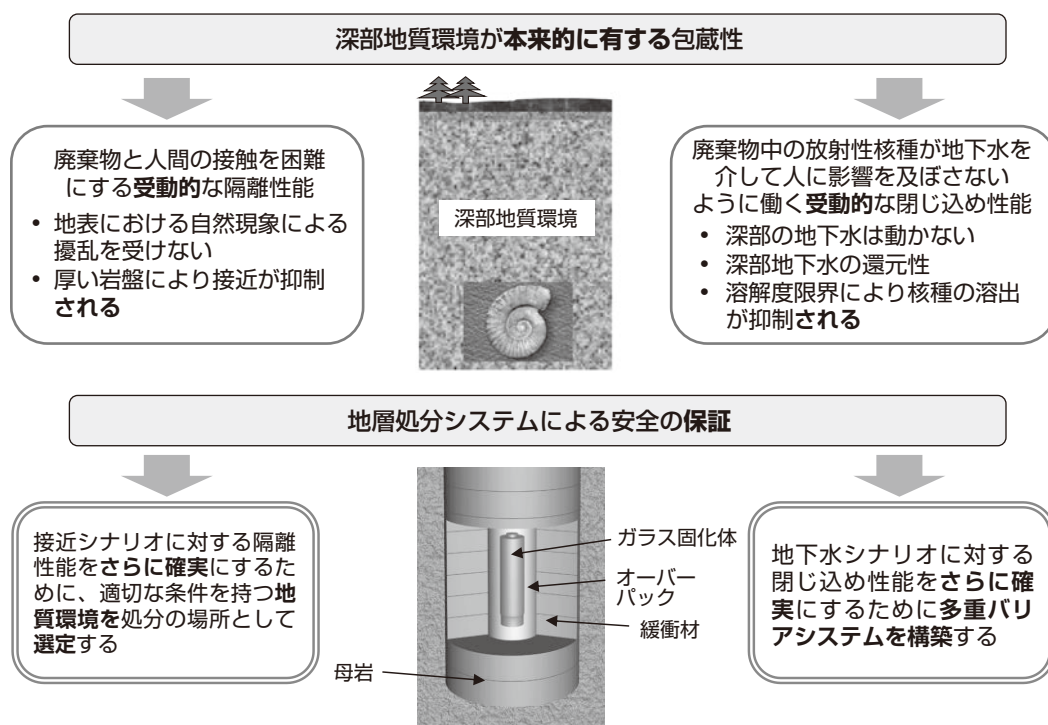


図 4-1 地層処分概念の考え方

種を含む地下水が生活環境に至る可能性を考えておかなければならない。このプロセスにおいては、放射性核種の地下水への溶解度制限と放射性核種の岩石への収着特性が、閉じ込め機能として自然に働く。このような隔離機能と閉じ込め機能は、地下深部の地質環境が有する固有の受動的バリア機能である。

地質環境の有するバリア機能（天然バリア）が自然に働くことによる放射性物質の隔離と閉じ込めをさらに確かなものとするために、人間が期待する安全機能を工学的に作り込んだバリア機能（人工バリア）を多重的に適用して構築されるのが地層処分システムである。地層処分システムの構築により、地層処分概念の安全性の保証に頑健性を与えることができる。

地層処分において頑健性とは、処分場設計とシステム挙動の予測に適用されるが、基本的コンセプトはデータや仮定に含まれる不確実性に敏感であってはならないということである【Chapman, 2003】。

（１）頑健な処分システム

- 理解と明瞭性を高める単純な地質、物理、化学、設計
- 個々のコンポーネントに含まれる大きな安全ファクター
- 安全バリアシステムにおけるある程度の冗長性

（２）頑健な性能評価

- 使われるモデルが十分確証されていること
- モデルとデータが現実的かつ保守的であること
- 全ての潜在的な負のプロセスが解析されること
- 解析結果が合理的パラメータまたはモデルの変更に敏感でないこと

日本の標準的な地層処分システム

地層処分システムの構成

高レベル放射性廃棄物の形体や特性と地質環境条件の違い、最終処分に至るまでの管理の手順、意思決定過程の多様性などによって、放射性廃棄物対策における地層処分の位置づけと開発の段階には各国で差異があるものの、各国の高レベル放射性廃棄物対策に関する計画において共通している最終処分の方法としては、地層処分が最も有力な手段であるとして政策決定もしくはそのための検討が行われている。

システムの構成は、各国の条件に応じたバリエーションがあるが、基本的な概念は多重バリアシステムを構築することによる、というのが国際的に共通している点である。

1999年に核燃料サイクル開発機構が取りまとめ、国に報告した第2次取りまとめ報告書【JNC, 1999a】においては、日本の地層処分システムの概念（以下「H12処分概念」という）として、図4-2のような構成が示された。

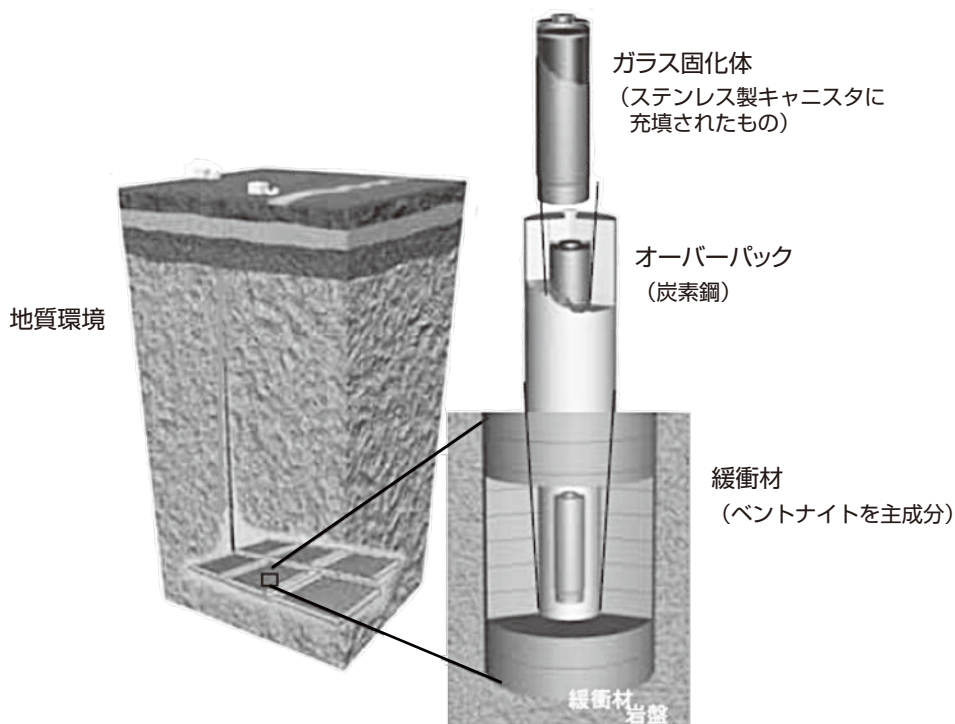


図 4-2 H12処分概念による多重バリアシステムの構成【NUMO, 2004a】

地層処分に適した地質環境の条件は火山活動の影響がない、活断層が存在しない、著しい隆起・侵食が生じない、気候変動によって著しい影響を受けない、資源が存在しない等である。また、日本においては地下水の存在を地域や岩種によらず普遍的な特性として考慮する必要があるが、深部の地下水と岩石は人工バリアの設置環境として、好ましい地下水化学（還元性等）、小さな地下水の動き、力学的安定性、人間環境からの物理的障壁という特性を本来的に有しており、これらの特性を有する地質環境に性能に余裕をもたせた人工バリアを組み合わせ、多重バリアシステムを構成することを標準的な地層処分のシステム概念としている。

この概念は、予めそのようなことが起こらないような措置をできるだけ講じておくとともに、仮に環境への影響をもたらすような事象が生じたとしても、それが有意な影響にはならないことを評価し確認しておくべきという考え方であり、原子力安全の多重防護の考え方に準拠している。

多重バリアシステムは人工的に設けられる多層の安全防護系（人工のバリア機能：人工バリア）と種々の安全防護機能を本来的に備えている地層（天然のバリア機能：天然バリア）との多重の組み合わせによって構成される。

日本においては、高レベル放射性廃棄物はガラス母材とともに熔融され金属容器に封入されて固化された状態（ガラス固化体）に処理されており、これが放射性核種を長期間にわたって安定的に閉じ込める第1のバリアである。ガラスは放射性核種を均一かつ安定的に固定し、

高い化学的耐久性により地下水への放射性核種の溶出を抑制する。また、熱や放射線に対する安定性にも優れている。ガラス固化体はオーバーパックと呼ばれる容器に封入して埋設される。オーバーパックは、ガラス固化体の発熱や放射能が高い期間、地下水とガラス固化体の接触を阻止するとともに、地下水との反応によりガラス固化体近傍の還元性を維持する。

また、鉄が腐食することに伴い生成する腐食生成物へ放射性核種を収着させる効果もあるといわれている。地下深部の岩盤中に掘削される処分孔の周りの岩盤とオーバーパックの空隙には、ベントナイトという粘土質の緩衝材が充填される。緩衝材には、オーバーパックと地下水の接触を抑制する低透水性、小さな物質移動速度、放射性核種の収着、膨潤性と可塑性、化学的緩衝性、間隙水中での低い溶解度、コロイド、微生物、有機物の移動に対するフィルター効果等が期待される。

この場合、人工バリアはガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材という3つの層によって構成される。また、天然バリアは溶出した放射性物質を鉱物の収着作用などによって地層中に長期間にわたって保持するとともに、地下水中の放射性物質を分散させ希釈する効果があるものとして位置づけられている。

地層処分施設

地層処分施設の基本的な構成については、原子力発電環境整備機構（NUMO）が取りまとめた「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」【NUMO, 2004a】に処分場の立地点がそれぞれ有する固有の環境条件に対して、組み合わせられる処分場の地上施設と地下施設のレイアウトや設計例が以下のように示されている。

地上施設

地上施設はガラス固化体を受け入れ、地下に搬送し処分するための所要の準備と地下施設で行われる作業を支援する一群の施設である。具体的には、冷却のための貯蔵が終了したガラス固化体を再処理工場あるいは貯蔵施設から受け入れて検査し、オーバーパックに封入して廃棄体に調製した後、それを地下深部に搬送するために必要な施設や緩衝材の成型、加工に必要な施設に加え、排気・排水処理や環境モニタリングなど地下施設の建設、操業に必要な一連の施設で構成される。また、地下施設の建設で発生した岩や土砂（掘削土）を再び埋戻し材として利用する場合には、利用までの間保管しておくための置き場所が必要となる。さらにサイトの環境条件によってはガラス固化体を受け入れるための港湾施設や専用道路も処分場の敷地内に設置する場合がある。

地上施設は地下施設の建設に先立ってその多くを建設する必要があるとともに、処分場の閉鎖に伴い最終的には撤去されることになる。

なお地上施設の建設や操業には、通常原子力施設や一般の産業施設で確立されている技術を基本的に適用することができる。

地下施設

地下施設は地上施設から廃棄体や建設資材などを搬送するためのアクセス坑道や連絡坑道、廃棄体を定置するための処分坑道あるいは処分孔などから構成される。

アクセス坑道は地上施設と地下の連絡坑道や処分坑道とを結ぶものであり、地上施設との位置関係に応じて柔軟に配置することが可能である。アクセス坑道は廃棄体の搬送だけでなく、緩衝材の搬入、作業員の出入り、掘削土の搬出、換気、排水、エネルギー供給など多様な目的に使用される。搬送手段に応じ、エレベータなどの昇降設備を用いる立坑と、車両・レール方式を用いる斜坑に大別することができる。廃棄体の定置方式には、処分坑道に廃棄体を直接定置する処分坑道横置き方式と、処分坑道から処分孔を一定間隔で掘削しそこに定置する処分孔縦置き方式が基本的なものとして考えられている。

処分場の深度と規模

1987年に改定された「原子力開発利用長期計画」以降、高レベル放射性廃棄物対策の基本方針として、ガラス固化体は冷却のために30～50年間程度貯蔵した後、数百m以深の地層中に処分することとされ、2000年に公布・制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では300m以深と明記された。地層処分の目的である、長期間にわたって高レベル放射性廃棄物を人間の生活圏から安全に遠ざけておくという観点から、処分場の深度をある程度深くすることにより、地表における環境の変化や人間活動の影響が及ばないようにすることは重要である。一方、深度を大きく取るとともに、コスト増の要因にもなることに留意する必要がある。

したがって技術的な観点から、処分場の深度は、地下300m以深を対象に、地層処分の長期安全性、地質環境の特性、現状における建設技術や調査技術の適用範囲、設計上成立する処分深度の範囲という4つの観点から総合的検討を行って設定される。

処分場の規模としては、2020年頃までの原子力発電によって発生すると見込まれているガラス固化体の総本数に相当する4万本を年間1000本の能力で処分することとされた。

地層処分概念の柔軟性

世界の地層処分場の標準的な設計の多くは1980年代に開発されたもので、主目的は地層処分のフィージビリティ検討の際のリファレンスとなるよう概括的に設定されたものであった。現在処分場概念として日本においてしばしば引用される図4-3のようなH12処分概念は、日本における幅広い地質環境条件に対して頑健性を持つように設計されている。

2000年の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」制定に当たって、処分費用の見積もりが行われる必要があり、その根拠となる処分場概念としてH12処分概念が参照された。処分費用は電気料金に上乗せして徴収されるが、徴収された資金が運用され、支出され

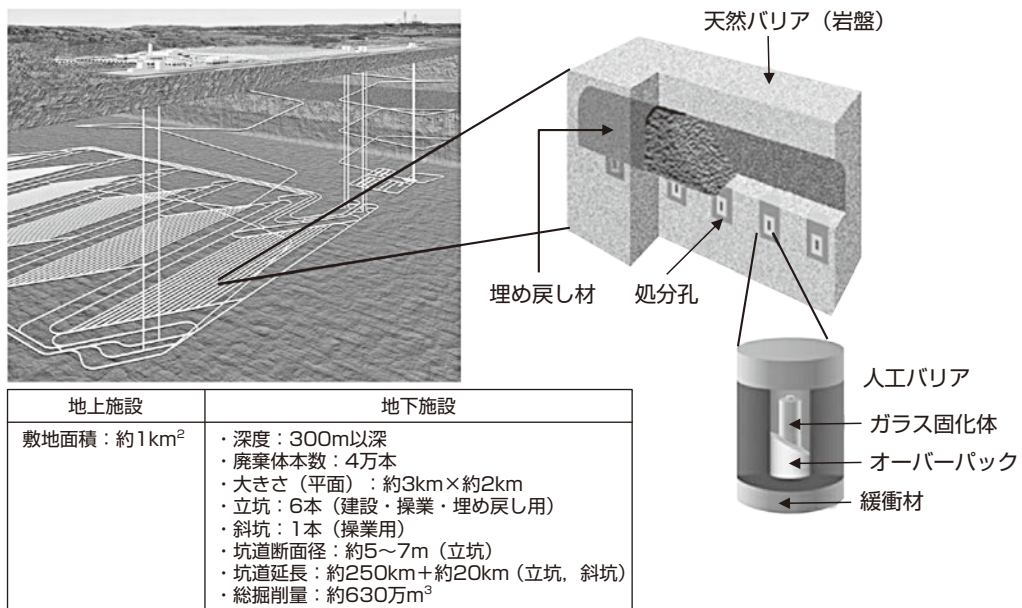


図 4-3 H12処分概念に基づく地層処分場の設計例

る数十年後に過大な資金不足が生じないような見積もりが求められるという側面も有していたため、H12処分概念は保守的な設計とする必要があった。このためH12処分概念は、実用性、経済性あるいは効率性といった実際に処分場を建設する場合において重要となる他の側面も含め、また品質保証上の要件も考慮して総合的に評価を行って最適化されたものとはなっていない。

一方、高レベル放射性廃棄物や長寿命廃棄物の各国における処理処分計画の具体化、あるいは廃棄物発生源である原子力発電や核燃料サイクル事業の進展等によって、処分概念に関する技術的、社会経済的な境界条件は国際的にも変わってきており、処分場概念の具体化と最適化への関心が高まってきている。

特に日本では、地層処分場サイトを公募方式に基づいて選定することを基本方針としているため、応募サイトの地質環境特性に応じて、あるいは地域コミュニティの処分事業に対する要望等、サイト固有の条件にできるだけ確に應えるためには、柔軟性のある処分場概念として可能な範囲を広げておく必要がある。

NUMOの「処分場概念カタログ」【NUMO, 2004b】

処分場の設計は、段階的に進められるサイト選定に応じて蓄積されていくサイト環境条件に関する情報に基づき、立地点に対して最適化される必要がある。2004年に示されたNUMOの処分場概念カタログには、図4-4に示すような複数の処分オプションが提示されており、応募地域の条件に適合しやすい特定のオプションを選定することができる。それぞれ

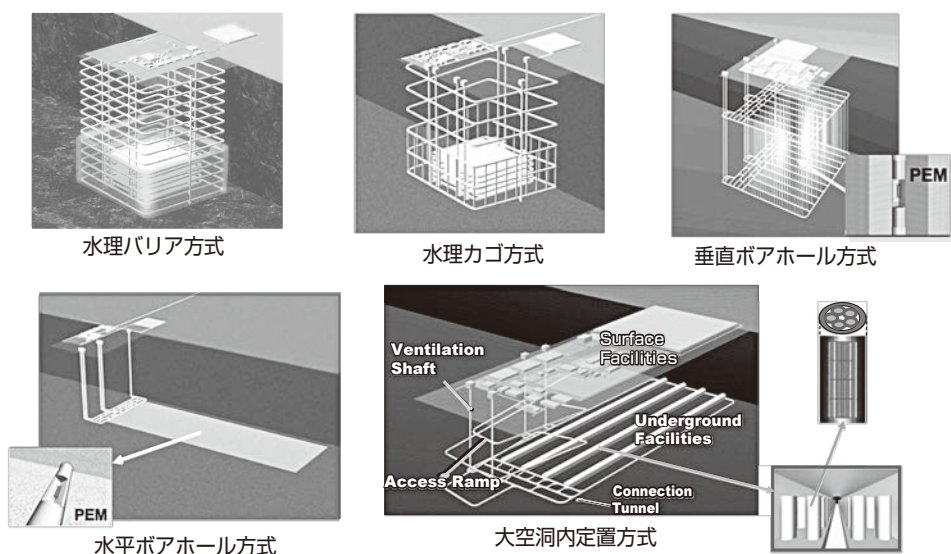


図 4-4 NUMO処分場概念カタログ【NUMO, 2004bより作成】

の特徴を以下に要約して示す。

■ 水理バリア方式

- 高透水性岩盤の処分サイトの場合に適用可能
- 多層の処分パネルの外側周囲にスパイラルな坑道を設け最終的な坑道の埋戻し時にグラウトして強固な水理バリア形成

■ 水理カゴ方式

- 部分的に高透水性岩盤が含まれるサイトの場合に適用可能
- 処分場の周囲に高透水性の領域を設け水路を形成

■ 垂直ボアホール方式

- 敷地面積の制限に適用可能なコンパクトな設計
- 地下の空洞から垂直に処分用ボーリング孔を開削し、プレハブの人工バリアモジュール（PEM：Prefabricated Engineered-barrier Module）を設置

■ 水平ボアホール方式

- 狭隘なサイト条件、特に沿岸の軟弱岩盤等に適用可能
- 地下の坑道から水平に処分用ボーリング孔を掘削しボーリング孔にPEMを挿入

■ 大空洞内定置方式

- 回収可能性やモニタリングの要求に対応し、狭隘なサイト条件の場合にも適用可能
- 地下の大空洞に複数の廃棄物パッケージをモジュール化して定置

より長期的視点で放射性廃棄物問題を考える背景には国際的な資源エネルギー安定供給と地球環境問題があり、最近の国際的議論にみられるように、21世紀は国家規模、地球規模

で原子力発電を含むエネルギー構成が再検討される必要がある。

すなわち、処分場プロジェクトは本来的に数十年の時間スケールにわたって計画され、実施されるので、今始められる廃棄物処分プロジェクトがそれを建設・操業・閉鎖することになる将来世代にとっても適切な状態に保たれることを保証するために、あらゆる不確実性への対処が常に考慮されなければならない。

CARE概念

「Management with CARE」【Masuda, 2004】という長寿命放射性廃棄物対策の考え方も処分概念の柔軟性確保の一方策と考えられる。CARE (CAvern REtrievable) 概念は、地層処分施設が最終的に埋め戻され閉鎖される決定がなされるまでの期間にわたって、再取り出しの容易さと長期モニタリングの実施に関する柔軟性が最大となるよう、地下に定置された高レベル放射性廃棄物へのアクセス性を向上させた設計である。

この概念においては、図4-5、図4-6、図4-7に示されるように、放射性廃棄物は発生元から、埋戻し後にはオーバーパックよりも頑丈な人工バリアの機能を果たすことが期待される大型の輸送キャスクに入れて運ばれ、地下に掘削される大空洞 (Cavern) にそのまま定置される。埋戻しの決定がなされるまでは地表の貯蔵管理施設と同様、空調システムで換気され、作業

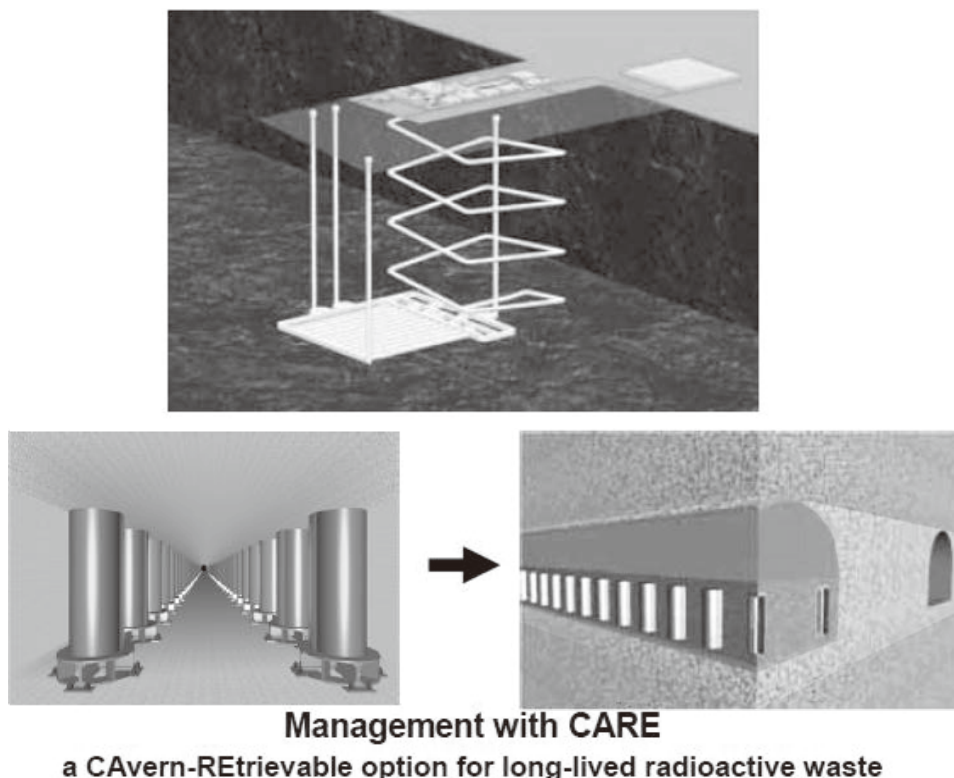


図 4-5 CARE概念(1) 【Masuda, 2004】

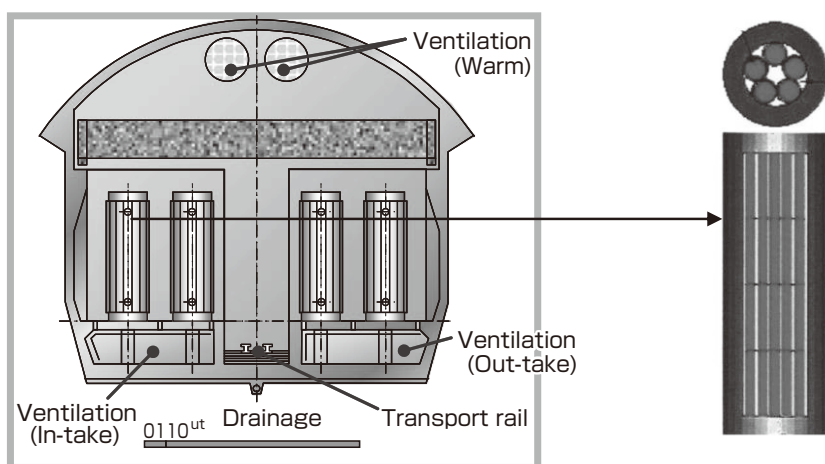


図 4-6 CARE概念(2)【Masuda, 2006】

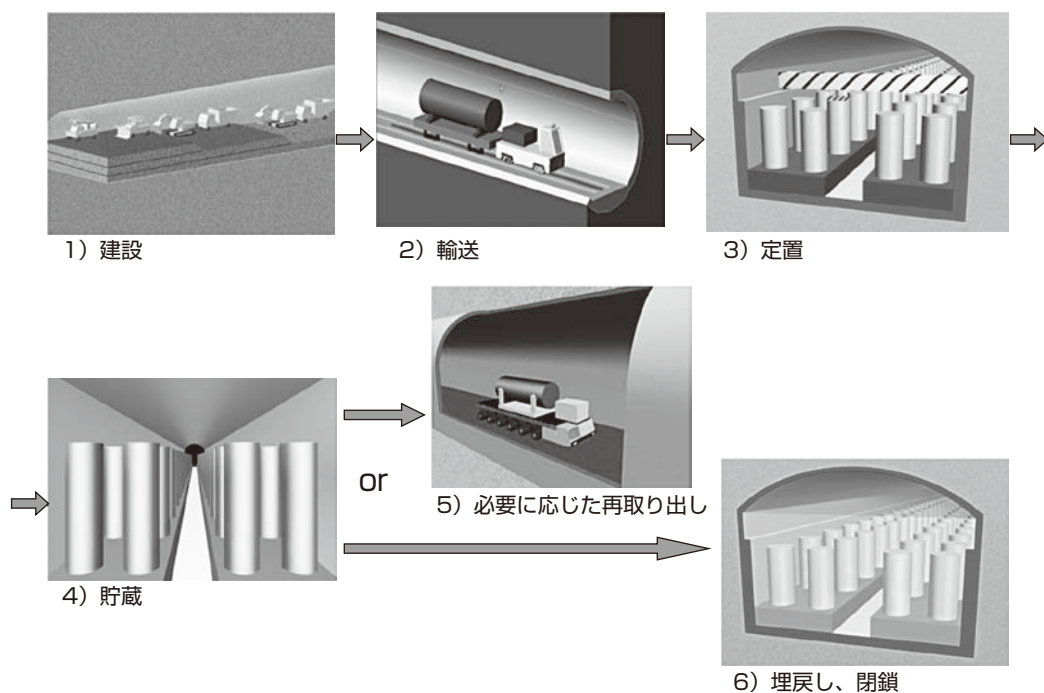


図 4-7 CAREの操業・プロセス【Masuda, 2006】

員が接近して管理することも可能な状態に置かれる。

CARE 概念における各工程の手順、内容と特徴は下記のようなになる。

- (1) 処分空洞はコンクリートライナーを備えた通常の方法によって建設される。
- (2) 斜坑アクセスは、道路またはレールによる多目的（輸送/貯蔵装置/処分）キャスクの容易な輸送を可能にする。

- (3) キャスクは、能動的あるいは受動的な換気によって冷やされるコンクリートライナーの空洞に定置される。
- (4) 処分場を閉じる最終決定がなされるまでの期間、空洞は開けたままにされ、この期間、空洞はモニターすることができ、また完全に検査することができる。この期間、必要に応じて空洞刷新工事のために、廃棄物キャスクは容易に再取り出しあるいは移動することができる。
- (5) 必要に応じて再取り出しできるようにしておき、処分場を閉じる最終決定がなされた時に、空洞は埋戻される。
- (6) 最終的に閉鎖され、従来の処分場デザインと類似の受動的な多重バリアシステムによって安全性が確保される。

処分場が埋戻されるまでの人間による管理の期間中、空洞とそこに定置されるキャスクに収納された廃棄物は検査可能で、何か異常があればどのキャスクも、いつでも再取り出しすることができ、万一廃棄物を再取り出しする必要がある場合でも、取り出した固化体を地下で別なキャスクに移し替えることにより、専用のスペースを予め地上に準備しておく必要がない。

処分場を閉じる決定が下されたら、全ての操業用設備が撤去され、空洞は埋戻され、密閉される。その後は、H12処分概念のような標準的な深地層処分システムにおける多重の天然バリアと人工バリアと同様の機能を発揮する。

H12処分概念と比較して、以下のように処分場に必要面積、掘削量、施工する緩衝材や埋戻し材の物量等を大幅に少なくすることができる可能性がある（図4-8）。

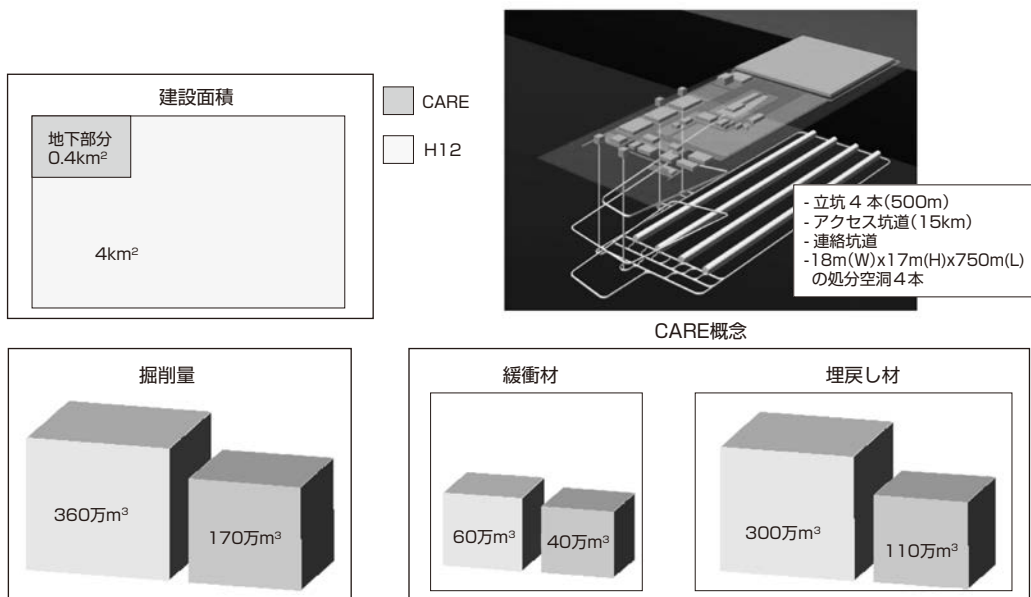


図 4-8 CARE概念とH12処分概念との比較【Masuda, 2006】

【参考文献】

- (1) 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之 (2015). 地層処分概念の変遷, 原子力学会誌, 57(6).
- (2) Chapman, N., McCombie, C. (2003). Principles and Standards for the Disposal of Long-lived Radioactive Wastes, Elsevier.
- (3) JNC (1999a). わ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－総論レポート, 核燃料サイクル開発機構, TN1400 99-020.
- (4) NUMO (2004a). 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性, 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-01.
- (5) NUMO(2004b). NUMO, Development of repository concepts for volunteer siting environments, NUMO-TR-04-03.
- (6) Masuda, S., Umeki, H., McKinley, I. G., Kawamura, H. (2004). Management with CARE, Nuclear Engineering International, 49 (604), pp.26-29.
- (7) Masuda, S., Kawamura, H., McKinley, I. G., Umeki, H. (2006). Optimising repository design for the CARE Concept, IHLRWM 2006, Las Vegas, NV, April 30-May4.

第5章

安全評価による地層処分概念の 妥当性の確認

安全評価に関する国際的集約意見

1991年にOECD/NEAは、「放射性廃棄物の処分：長期安全性は評価できるのか？」という問題を取り上げ、これに対する当時のテクニカルコミュニティの集約意見を報告書として取りまとめている【OECD/NEA, 1991】。

報告書においては、まず超長期の安全性を評価する必要性について、最終処分プロジェクトの計画および実施に際しては、次の2つの前提、すなわち、

- 第1に、長期にわたる潜在的な放射線学的危険性が十分に把握され、将来世代が少なくとも我々が受け入れているものと同様のレベルで防護されることを確実にする責任が広く認められている。
- 第2に、この要請の直接の結果として、提案される解決策の長期間の安全性は処分に先立ち確信を持って示されなければならない。

という視点から安全評価が不可欠であることを強調している。

その上で、長期の安全評価に関して次のような3つの重大な疑問を呈している。

- 処分システムのふるまいおよびその人間と環境への潜在的影響は数千年以上にわたって十分に理解され得るであろうか？
- 専門家と所管当局は予測したふるまいが実際に起こるであろうふるまいを代表していると確信できるであろうか？
- 潜在的な放射線学的影響とこのような影響を評価する方法は広範な読者に分かりやすく（transparently）説明することができるであろうか？

これらの疑問に答えるという目的は以下の3つの方法、すなわち

- 広範な国際的コンセンサスが得られている主要な全体的問題を示すこと
- 長期安全評価の定量的結果は一般的にどのように解釈されるかを説明すること
- 評価結果の受容性に影響するいくつかの鍵となる問題を手短かに議論すること

によって、達成されるとしている。

安全評価に期待されることは何かという視点に対しては、放射性廃棄物の処分システムを含め、あらゆる技術システムに対して安全なふるまいが続くという絶対的な証明は不可能で

ある。達成されなければならないことは、提案された処分システムが現在および将来世代に十分なレベルの安全を与えることを確信するという、間接的な実証である。このため、処分場から放射性核種が放出される可能性により将来のある時点でのサイト周辺住民の被ばく線量を評価するための計算が行われる。

これらの計算に関して、2つの重要な観察がなされる。

- システムの安全バリアの漸進的な劣化を含む、起こる可能性のある状況と一連の安全バリアの破壊を含む可能性の低い状況のもとで、廃棄物処分場からの放射性核種の放出を想定する。リスクを評価するために、これらの結果が、どのくらい深刻か、どのくらい起こりそうかという観点から見る。
- 遠い将来の生活状況の予測は不確かなので、環境に放出される放射能によって数千年以上後の被ばく線量の計算は現在の生活習慣に基づく。したがって、そのような計算は遠い将来の人の受ける実際の線量を予測するというより、そのような放出がもし今起きたらどのくらいの線量になるかを示すという観点で行われる。

としている。

以上のような専門家のコンセンサスとして、OECD/NEAの放射性廃棄物管理委員会と国際原子力機関（IAEA）の国際放射性廃棄物管理諮問委員会は以下の共同声明を発表した。

- 処分計画に対する正確かつ十分な理解が意味のある安全評価実施の基本的な前提条件であることを認識し、
- 処分場候補地から収集されるデータやその評価は今後の進捗状況に必要な大事な業務であることに留意し、
- 安全評価の実施機能に大きな進歩があったことを確認し、
- 定量的な安全評価は常に定性的な証拠によって補完されることを確認し、
- そして、安全評価手法は進行中の研究活動の結果としてさらに進歩することに注目しなければならないと考える。

これらのことを留意しつつ両委員会は、

- 人類や環境に対して、注意深く設計された放射性廃棄物処分システムの長期の潜在的な放射線の影響を正しく評価するために、現在利用可能な安全評価手法の存在を確認し、
- 現在および将来の世代に対して、所定の処分システムが社会に対し満足できる安全性のレベルを提供できるかどうかを確認するために、処分場候補地から収集された十分な情報と照らし合わせて、適当な安全評価を行うことが可能であると考察する。

この共同声明は放射性廃棄物管理分野における欧州共同体の行動計画として、欧州共同体委員会（CEC）の専門家によって承認された。

安全評価の方法

地層処分の安全評価の特徴

地層処分システムは天然の地層という大きな空間領域を含むシステムが極めて長い時間枠にわたって機能する必要がある。このようなシステムの安全評価は通常の工学システムのように設計に基づいて試験的にシステム全体を構築し、これを実際に運転してその安全性を実証するという直接的な方法をとることができない。これが地層処分の安全評価の特徴である。

したがって、地層処分システムの安全性はシナリオに基づくモデルを構築して予測によって、間接的に実証する手段が用いられる。

安全評価による間接的な安全性の実証

安全評価における予測というのは、遠い将来にわたる人間への影響を言い当てるということではなく、地層処分の安全性を判断するための情報を整えるために行われる【梅木, 2008】。安全評価は、地層処分の安全性に影響すると考えられる現象を考慮して、地層処分システムの将来の挙動をシナリオとして記述する。日本の地質環境には地下水が存在することが普遍的な特徴であるので、必ず想定しなければならないシナリオは、長期間のうちにはガラス固化体に含まれる放射性核種が地下水によって人間の生活環境に運ばれるという地下水シナリオである。

H12処分概念の安全評価

第2次取りまとめでは、H12処分概念に対する安全評価を地下水シナリオ（Groundwater Scenarios）と接近シナリオ（Isolation Failure Scenarios）の2つに大別して行っている【JNC, 2000】。

○ 地下水シナリオ

（a）解析モデル

安全評価を行うための解析モデルの中心となるのは、ガラス固化体中の放射性核種が地下水によって移動する過程を想定する地下水シナリオに基づいて解析するための一連の物質移動モデルである。

核種移行の経路は、図5-1に示されるように、多重バリアシステムの要素に沿って、大きく人工バリア中の核種移行（ガラス溶解、緩衝材中核種移行）、天然バリア中の核種移行（母岩、断層破砕帯などの地質構造要素中の核種移行）および生物圏移行（地表環境における核種移行、人間の被ばく）に分類してモデル化され、それらを統合して安全性を示す指標として放射線被ばく線量（ μ Sv/年）によって表されている。

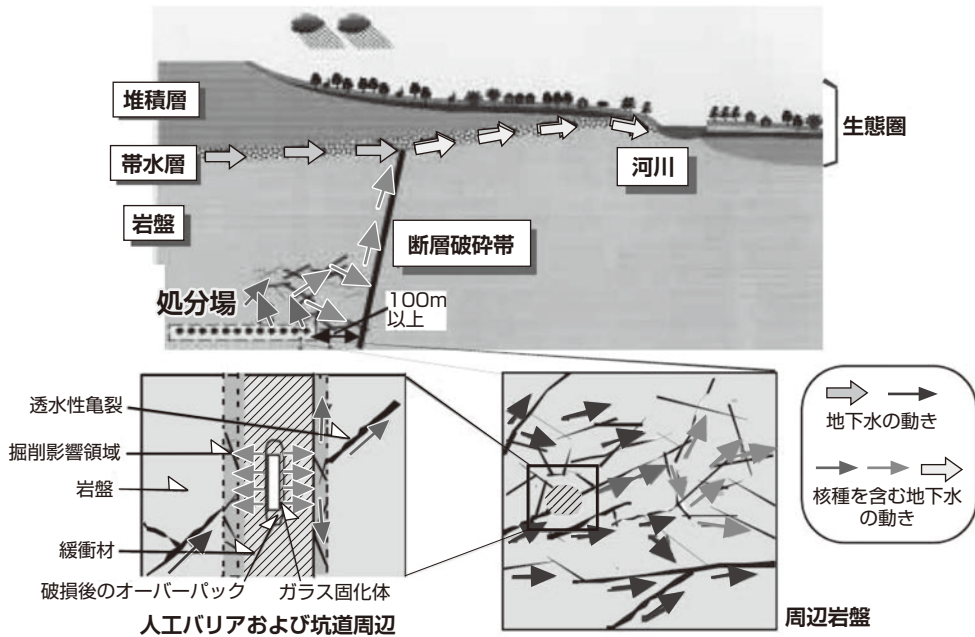


図 5-1 地下水シナリオのレファレンスケースで想定したシステム【JNC, 1999a】

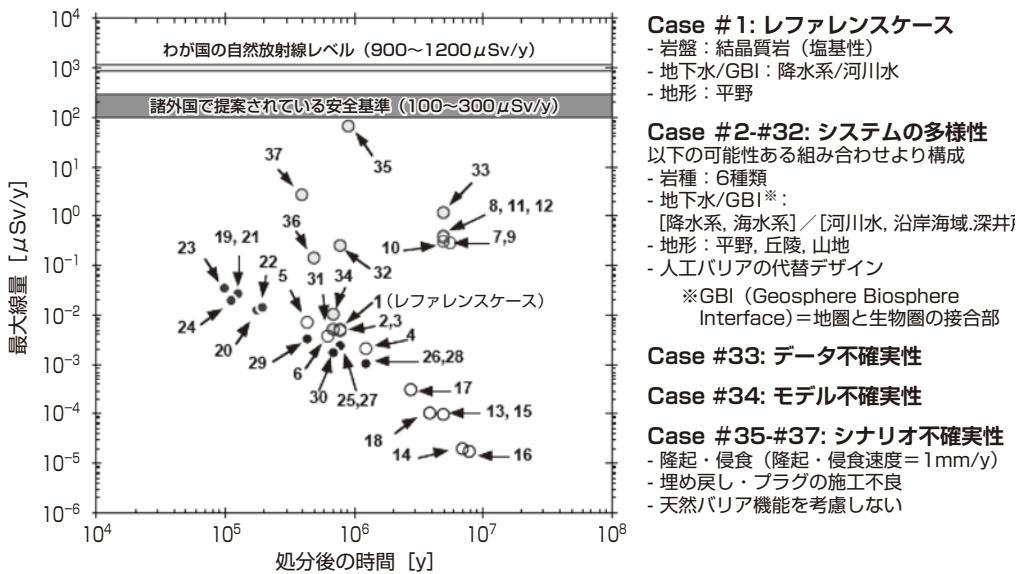


図 5-2 多重バリアシステムの安全評価結果【JNC, 1999a】

(b) 解析ケースと評価結果

第2次取りまとめにおける解析ケースとしては、モデルやデータの不確実性、天然現象などによる処分場システムへの影響、さらに地質環境と人工バリア仕様の多様性が考慮され、図5-2の右側に示される#1～#37の37ケースについて、線量の最大値が解析されている。

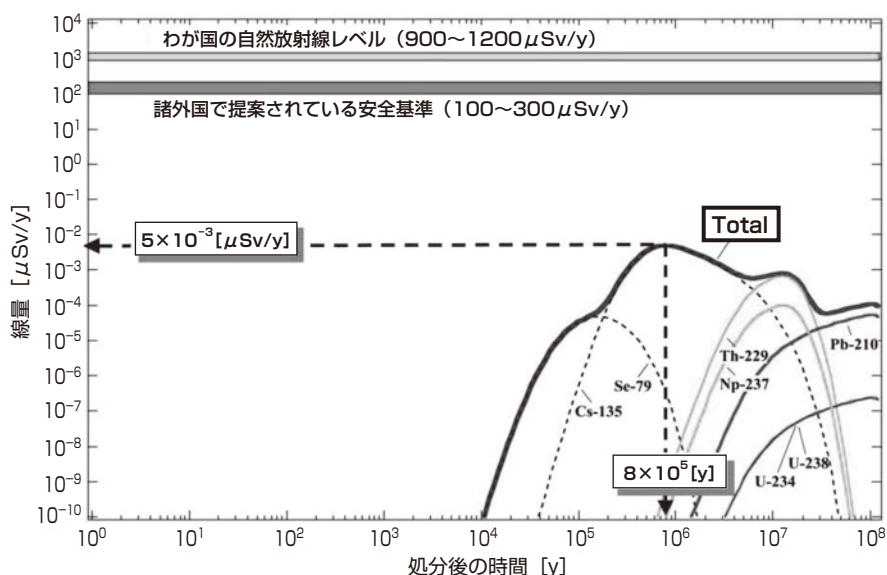


図 5-3 レファレンスケース(ケース#1)の評価結果【NUMO, 2004a】

図5-2の中の各ケースの番号を付して示されている○印は、図5-3のレファレンスケース(ケース#1)の評価結果に見られるような処分後の時間に対する線量の関係の曲線から、最大線量値とその出現時間を示している。

ケース#2から#31までが地質環境変更ケース、ケース#32は代替デザインケース、ケース#33はデータ不確実性ケース、ケース#34は概念モデル変更ケース、ケース#35と#36は変動シナリオそれぞれの評価結果に対応する。

さらに、人工バリアのみの性能に焦点を当てるため、非現実的な想定ではあるが岩盤による核種移行遅延効果を考慮せず、人工バリアから移行した核種が直接生物圏に至ることを想定したケースの評価結果がケース#37に該当する。

このような総合安全評価の結果から明らかなように、いずれのケースにおいても、たとえば諸外国で地層処分に対して提案されている年間の防護レベル(100～300 μSv)を下回ることが示されている。また、日本の自然放射線レベル(900～1200 μSv)と比較しても、放射線影響のリスクは極めて小さいとされている。

(c) リスクの解釈の例

地層処分に伴う放射線の影響のリスクを理解するために、他のさまざまな人間の行為に伴うリスクと比較した研究事例がある【Cohen, 1991】。

この事例では、リスクの指標として寿命短縮日数(Loss of Life Expectancy: LLE)、つまり当該リスクによる人の寿命の平均損失日数が用いられている。たとえば、40歳の統計的平均余命が34.3歳(平均寿命77.3歳)である時、直ちに死に至る確率が1%のリスク

表 5-1 様々な危険性の比較【JNC, 1999b】

行為	寿命短縮日数
独身（男性）	3,500
喫煙（男性）	2,250
心臓病	2,100
独身（女性）	1,600
30%肥満	1,300
ガン	980
脳卒中	520
飲酒	230
自動車事故	207
肺炎／インフルエンザ	141
自殺	95
殺人	90
大気汚染	80
エイズ	70
火事／火傷	27
自然放射線	8
航空機墜落	1
原子力産業	0.02
地層処分	0.007
屋内煙検知器	-10
エアバッグ	-50

地層処分に対する危険性は以下と同程度

- 肥満の人がパンを一切れ余計に食べるリスク
- タバコを1本余計に吸うリスク
- 3年間に歩行者が1度余計に道を横切ったことに対するリスク
- 1年間に0.2マイル車を余計に運転したことに対するリスク

を冒す場合、そのリスクは $1\% (0.01) \times 37.3\text{年} = 0.373\text{年}$ （約136日）となる。これは、その人と同年代の1000人が当該行為を行った場合、その中の恐らく10人の寿命が34.3年縮まるであろうが、残りの990人は命を落とすことがなく、したがって寿命損失はないというものの、この1000人の平均としてみれば寿命の短縮は0.373年であるとするものである。

このような比較は、上記第2次取りまとめの一連の報告書のうち「別冊 地層処分の背景」【JNC, 1999b】においても、表5-1のようなリスクの比較が第2次取りまとめの安全評価における最大線量の値を相対的に理解するための手法の1つとして紹介されている。

○ 接近シナリオ

地下深部に処分した高レベル放射性廃棄物と人間が再び接近する可能性を想定するシナリオを接近シナリオとして安全評価が行われている。接近シナリオについては、適切な処分地の選定や処分場設計により、その影響を排除することが基本であるが、火山噴火や断層活動といった天然現象に起因する接近シナリオについては、サイト調査によって実際の

サイト環境条件やそれに対する処分場概念が明らかにされるに従い、その地域で発生する可能性についてより現実的に評価することになる。一方、人間活動に起因する接近シナリオとしては、将来の世代が廃棄物の存在やその危険性を知った上での意図的な侵入と偶発的な侵入が想定されるが、前者についてはその時点の社会の保安上の責任と考え、地層処分システムの安全評価には取り上げないことが国際的にも合意されている。偶発的な侵入は、「処分場の位置を知らず、その目的も忘れ、もしくはその影響を認知していないために、処分場あるいはバリア機能を有する地層処分システムに偶発的に侵入してしまうこと、又はその性能を損なう行動をとること」と定義されている【OECD/NEA, 1995】。処分場への意図的ではない偶発的な人間侵入が生ずる可能性については、有用な鉱物資源がないと考えられるサイト環境条件のもとでは基本的にサイトに依存しないと考えられる。管理の継続の不確実性などから長期的な安全確保の要件とはなり得ないが、立入り制限や記録の保存といった制度的管理によって一定期間の効果は期待できる。この「一定期間」を安全評価上数百年から1000年間程度は有効としている国もある【DSIN, 1991; AECB, 1985】。

しかし100年以上先の人間活動を技術的に予測することは困難であり、将来の侵入を完全に排除することはできないため、1つ以上のもっともらしい様式化した侵入シナリオをもとに評価を行うことが適切と考えられている【ICRP, 2013; IAEA, 2012】。様式化したシナリオの評価で示される危険性には、①侵入者自身に対する危険性、②地表へ運ばれる放射性物質によって公衆が受ける危険性、③処分システムの所期性能が損なわれることによる危険性、が挙げられ、米国研究評議会（NRC）は、①、②については仮に評価を行ったとしても、システムによらず同様の結果となるため、処分地の選定や処分場設計によって明確となる地層処分システム固有の安全機能に関して有益な情報を与えないとし、③に重点を置くことが重要であるとしている【NRC, 1995】。

第2次取りまとめ【JNC, 1999a】では、意図的ではない人間侵入に対する評価として、ボーリングによる処分場への掘削を想定し、侵入者が処分場に関する情報の入手や保持、処分場の存在の探知と危険性の認識、処分場のある地下へのボーリングの中止、掘削やボーリングコア観察の作業中における廃棄物の存在検知といった全ての行為に失敗するという仮定のもとに廃棄物に接近してしまうというシナリオが考えられている。

このような仮定のもとに、掘削によりガラス固化体を貫通する確率とそれが発生した場合の被ばく線量をもとに、偶発的な人間侵入による侵入者への潜在的な影響についてリスクを指標とした評価が行われている。被ばくの形態としては、ボーリングコアの観察の際に観察者が受ける外部被ばくと掘削作業に伴う掘削屑を吸入することによる内部被ばくが想定されており、侵入者として同一の人間がボーリング掘削とコア観察を行うことが仮定されている。その結果、ボーリングによってガラス固化体を貫通することによるリスクは最大でも諸外国で提案されている安全基準や指針（ $10^{-6} \sim 10^{-5}/y$ ）を下まわっていることが示されている。

○ 天然現象に起因する仮想的シナリオ

• 隆起・侵食

第2次取りまとめでは、適切なサイト選定や処分場の設計により、基本的には隆起・侵食に起因して処分場が地表に露出し有意な影響が生じることを排除することができるが、そのサイトで仮に処分場が最終的に地表に露出するという状況に至った場合、どの程度の影響を及ぼすものかを把握することを目的に評価が行われている。隆起と侵食が同じ速度で進むという保守的な仮定により、1mm/yの速度で処分場の深度が継続的に減少し、地表付近（100m以浅を仮定）に到達した時点での影響が、変動シナリオとして扱われている（図5-2のケース35参照）。

さらに、仮想的なシナリオとして、その後処分場を含む岩盤が地表に露出した場合の影響について、処分場を含む岩盤の侵食により生ずる処分場起源の核種フラックスを天然放射性核種のフラックスと対比して考察している。これによって、天然放射性核種を起源とする核種フラックスに比べ有意な影響を及ぼす可能性は小さいことが示されている。

• 火山活動

第2次取りまとめでは、サイト調査により、過去数十万年～百数十万年程度の火山活動の時間的・空間的变化に基づき、将来10万年程度の活動場を評価することが可能であり、処分場を現在の火山地域からその影響の範囲を考慮して離すことによって火山活動の影響は避け得ることとしている。

また、200万年前以降に新たに形成された第四紀火山の数をもとに、火山が処分場（4km²と仮定）に重大な影響を及ぼす確率が検討されている。これによれば、発生した火山が処分場に直接影響を及ぼす確率は、 $1.8 \times 10^{-9}/y$ と評価され、処分後10万年時点に発生する火山の影響により人工バリアに保持されている核種が生物圏に放出されるという想定に対

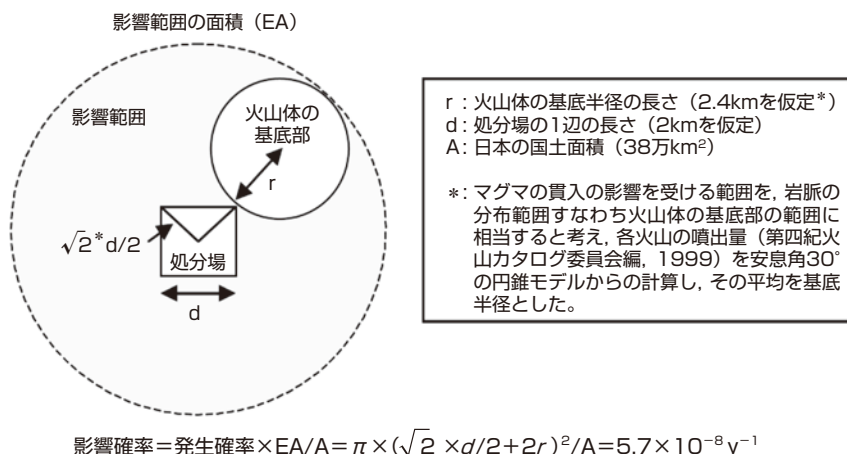


図 5-4 火山が処分場に直接影響を及ぼす確率【JNC, 1999a】

しては $5.7 \times 10^{-8}/y$ となり、十分に小さい値と考えることができるとしている。

さらに、処分後10万年以降に火山が処分場を直撃し、人工バリアに保持されている核種が放出されるという仮定のもとに評価が行われ、大規模なマグマが廃棄体300本分（廃棄体1本の専有面積を約 $40 \sim 90 \text{ m}^2$ とした場合、半径 $60 \sim 90 \text{ m}$ の円内に含まれる廃棄体の本数に相当）を直撃するとして、マグマとともに地表に放出される処分場起源の放射性核種の量を、マグマに含まれる天然の放射性核種の量と比較した評価が行われている。その結果、マグマとともに噴出する処分場起源の放射性核種の放射エネルギーは、約 $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ （ウラン濃度を1ppmと設定）のマグマに含まれる天然の放射性核種の潜在的危険性を、全てU-238に換算して求めた場合の放射エネルギーに匹敵することが示されている。火山活動による噴出物の量が火山体積（平均は約 $4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ）に等しいと仮定すると、この火山体積が1回の火山活動によるものではないことを勘案しても、マグマとともに地表に放出される処分場起源の放射性核種の量は、火山活動によって噴出されるマグマに含まれる天然の放射性核種の量に比べてそれほど大きいものではないとされている。

• 地震・断層活動

第2次取りまとめでは、サイト調査により、10万年程度の将来について、現在までの活動の継続として断層活動を評価することが可能と考えられ、個々の活断層について処分場との間に適切な距離を確保するという対策をとることができることが示されている。断層が発達している日本では、全く弱面の存在しない岩盤に新たに断層が発生する可能性は小さく、仮に新たな断層が生じたとしても初期の断層は小規模な破断の集合帯として徐々に成長するため、これが大きな変位を生じさせる大断層に急速に成長する可能性は極めて小さいとされている。これらのことを踏まえたうえで、処分場内に新たな活断層の発生の可能性の検討と、仮に発生した場合、地層処分システムに対してどの程度の影響を与えるかを把握することを目的に評価が行われている。

評価では、第四紀に繰り返し活動する活断層の数をもとに、活断層の発生を時間的、空間的にランダムな事象ととらえ、発生した活断層が処分場（ 4 km^2 と仮定）に直接的な影響を及ぼす確率が $1.3 \times 10^{-8}/y$ と求められている。また、処分後1000年、1万年、10万年それぞれの時点において活断層が処分場を直撃し、人工バリアに保持されている核種が放出するという想定に基づく線量の推定が行われている。評価解析に当たっては、処分場内に廃棄体が200体×200体の正方形のレイアウトで配置されるとき、対角線上に位置する約300の廃棄体と、それを取り囲む人工バリアを横切るように断層が発生することが仮定されている。これは、処分場を横切る一度の活断層の発生によって、最も多くの廃棄体が影響を受けることを想定したものである。また、この断層発生によって人工バリアが断層面に沿ってずれ、緩衝材による移行遅延機能（拡散、収着）が失われて、核種は沈殿生成を経た後、断層を流れる地下水によって生物圏に運ばれること、人工バリア領域（ガラス固化体、オー

バーバック、緩衝材)は瞬時混合領域とみなされ、断層発生時までに人工バリア領域に存在していた核種量は、断層発生後にその領域内で均質に分布することなどが仮定されている。

断層を流れる地下水流量として、廃棄体1体当たり $0.01 \text{ m}^3/\text{y}$ と $0.1 \text{ m}^3/\text{y}$ が設定されている。このような仮定のもとに、処分後1000年、1万年、10万年の時点で断層が発生したとして、核種移行解析が行われた結果、断層中の地下水流量が $0.01 \text{ m}^3/\text{y}$ の場合、発生時期に対応して、最大線量はそれぞれ、160, 90, $270 \mu \text{ Sv/y}$ となることが示されている。また、断層中の地下水流量が $0.1 \text{ m}^3/\text{y}$ と10倍になった場合では、線量の最大値はそれぞれ10倍の値となっている。

【参考文献】

- (1) OECD/NEA (1991). Can long term safety be evaluated?: An International Collective Opinion, OECD/NEA.
- (2) 梅木博之 (2008). 放射性廃棄物処分の安全評価 日本リスク研究学会編リスク学用語小辞典.
- (3) JNC (2000). H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, JNC TN1410, 2000-001.
- (4) JNC (1999a). わ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－総論レポート, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400, 99-020.
- (5) NUMO (2004a). 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性, 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-01.
- (6) Cohen, B. L. (1991). Catalogue of Risks Extended and Updated, Health Physics 61 (3), 317-335.
- (7) JNC (1999b). わ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－別冊 地層処分の背景, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400, 99-024.
- (8) OECD/NEA (1995). Future Human Actions at Disposal Sites: A Report of the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites, OECD/NEA.
- (9) DSIN (1991). Stokage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde, Règle Fondamentale Sûreté III.2.f., Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires, フランス原子力施設安全局.
- (10) AECB (1985). Regulatory policy statement. Deep geological disposal of nuclear fuel waste: background information and regulatory requirements regarding the concept assessment phase. カナダ原子力管理委員会, AECB Regulatory Document R-71.
- (11) ICRP (2013). Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste, 国際放射線防護委員会, ICRP Publication 122.
- (12) IAEA (2012). The Safety Case and Safety Assessment for Radioactive Waste Disposal, IAEA SSG-23.
- (13) NRC (1995). Technical Bases for Yucca Mountain Standards, National Research Council, National Academy Press.

第6章

地層処分システムの品質保証

地層処分システムの品質保証の特徴

地層処分の安全性は多重バリアシステムの安全機能によって確保されるように設計されるので、システムを構築するために行われる活動、すなわち、サイト選定、処分場の設計・建設および構築されたシステムの性能評価を行うプロセスの品質管理が決定的に重要である。

地層処分システムにおける安全機能に要求される品質は人工バリアと天然バリアでは基本的な違いがある。

オーバーパックにより地下水との接触を抑制する、放射性核種をガラスに固め、溶け出し難くする、ベントナイトに放射性核種を吸着させる等の人工バリアシステムの機能は個々のコンポーネントを的確に設計、製造、施工することによって確保される。この場合は、人工バリアや処分施設を作り上げる技術の品質がポイントであり、原子炉等を含め一般的な工学システムと同様な品質管理が可能である。

一方、地質環境によって、ガラス固化体が岩盤中に安定的に隔離される、地下水によって溶かされ運ばれる、放射性核種が岩石に収着され、地下水に希釈される等の機能は、受け身の文体で表されるように、人の能動的な行為によって作り出される機能と対比し「受動的機能」といわれる。受動的機能は地下深部の岩石と地下水が本来的に有し、自然に作用する機能であり、これらの機能を知識として活用し、的確に性能評価することが地層処分システムに要求される。すなわち、受動的機能に関しては、それらに関する科学的な知識の品質が重要であり、システム性能の品質を保証する上で鍵となるという点が地層処分に特有なものとして考慮しなければならない特徴である。

また、地層処分システムの性能は時間的・空間的制約から、直接観察することが不可能であるため、性能評価による間接的なものとならざるを得ない。間接的実証において、性能評価の品質は特に重要である。地層処分の性能評価のほか、品質管理の対象が「もの」でないことによって結果の直接的な確認が不可能な事例は国防計画や宇宙開発計画、あるいは金融システムのシミュレーションなどとも共通する特徴である。

品質保証の対象

人工バリアシステムはガラス固化体の特性を内側、地質環境の特性を外側のそれぞれ境界条件として、期待するバリア性能を設計施工して、処分システムが構成されることとなる。

各システム構成要素は通常の原子力施設や核燃料と同様の品質保証プログラムを適用することによって、設計品質との適合性を評価することが可能であり、ガラス固化体、緩衝材、オーバーパック、埋戻し材等の人工バリアと処分施設はそれぞれの設計・製作・施工の各プロセスが品質保証の対象となる。品質保証手法としては、プロセスの管理とプロセスの結果である製品の検査によって可能である。

一方、廃棄体と地質環境はそれらの特性が目的のために適切に評価されていることについての保証が重要であり、このため、特性評価（characterization）のプロセスが品質保証の対象となる。

さらに、このようにして構成される地層処分システムの性能の妥当性については数学モデルと科学的・技術的データを用いた性能評価によって示されることになる。したがって、性能評価の品質保証が地層処分に適用される品質保証プログラムに固有の特徴であり、品質保証の対象は用いられる知識と情報、性能評価の手法として用いられるソフトウェアおよび解析作業のプロセスとなる。

地層処分における具体例

米国では、国立研究所や軍事施設の核廃棄物がTRU廃棄物の処分施設である廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）に運び込まれている。実施主体はDOE、規制当局は環境保護庁（以下、EPA）である。

WIPPの品質保証はEPAが定めた連邦基準40 CFR 194において、ソフトウェアやセーフティケースの一部である超長期の予測解析の考え方に関する規定として、放射性廃棄物処分における科学・技術情報の収集に関する要求事項としてNQA-3（Quality Assurance Program Requirements for Nuclear Facilities）を定めている。

WIPPの品質保証システムは、1970年代のサイト特性評価段階から、事業とともに進展した規制に応じて段階的に整備されてきた。このシステムでは、“T2R3”と呼ばれる

- 透明性（Transparency）、
- 追跡性（Traceability）、
- 客観性（Review）、
- 再現性（Reproducibility）、
- 検索の容易性（Retrievability）

の確保を基本としている【石川, 2001】。

透明性の定義：

透明性とは、何がなされたか、結果が何であるか、そして、なぜ結果がそうであるか、ということについて、異なる読者の異なる満足に対して等しく鮮明に理解できるように書

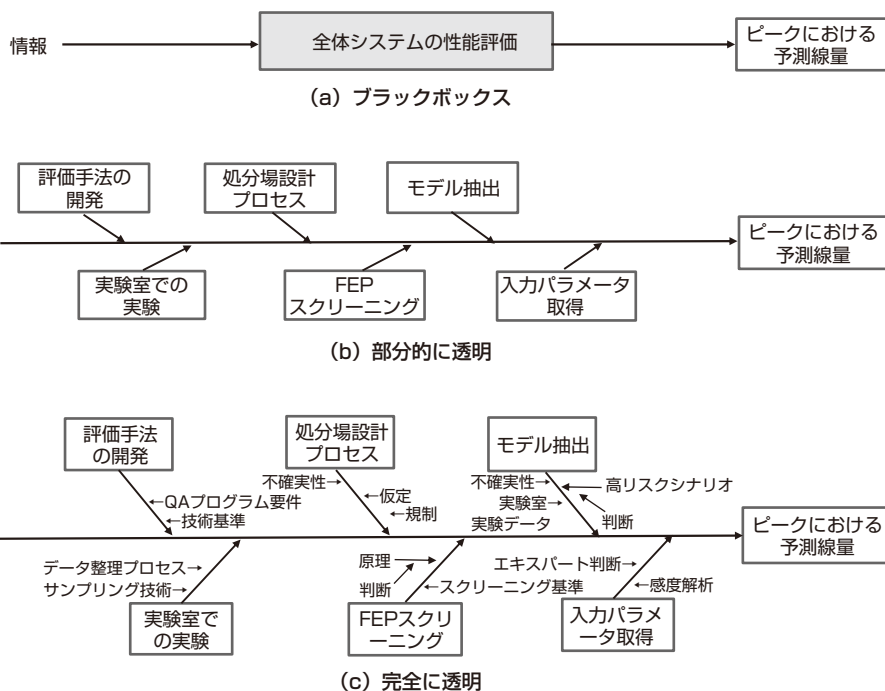


図 6-1 性能評価の透明性の程度の例 【Mohanty, 2001より作成】

かれる程度のことをいうが、満足の程度は読者に依存し、たとえば規制当局にとっての明白性のある文書と一般公衆にとっての明白な文書という意味は異なる【Mohanty, 2001】。

図6-1は透明性の程度の違いを例示的に示したもので、(a)のように、性能評価のプロセスを全く示さず、評価計算の結果のみを提示する場合には、中身はブラックボックスとなり、全く伝わらないので透明性はない。これに対して (b) では、用いた性能評価の手法、設計、どのようにFEP (Feature, Event, Process : 特質, 事象, プロセス) をモデル化したか、そのモデルの確証のための実験、用いたモデル、性能評価計算に用いたパラメータが示されており、透明性は増している。しかし、評価の信頼性を示すためには、さらに (c) のように、(b) に示された性能評価プロセスのそれぞれについての信頼性の程度 (品質保証) に関する評価の議論が必要となり、これらが加わって初めて透明性が確保されることになる。

追跡性の定義：

追跡性とは、なされた決定と仮定と所定の結果に到達する際に使われたモデルとデータの明白で完全な記録が追跡でき、確認できることを意味している。追跡性の対象となる「記録」には、次のようなものが含まれる。

- 各種の決定と仮定は、いつ、誰によってなされたかに関する情報
- 仮定の根拠

- これらの決定と仮定はどのように実行されたか
- どのバージョンのコードとデータセットが用いられたか

すなわち、なされた決定と仮定、および結果に到達する際に使われるモデルとデータの明白で完全な記録、評価の結果（たとえば最終的な線量計算）と使われたモデル、仮定、専門家の意見とデータを関連づけている完全なチェーンがあるときは、追跡性があることになる。

【参考文献】

- (1) 石川博久 (2001). 原子力の研究開発における品質保証活動の取組, サイクル機構技報 No.10.
- (2) Mohanty, S., Sagar, B., Miklas Jr., M. P. (2001). Transparency and traceability in performance assessment of high-level nuclear waste repositories, Waste Management 2001 Conference, Tucson, AZ.

第 7 章

地層処分における安定な地質環境の意味合い

変動帯に位置する日本列島においては、地層処分に適する安定な地質環境を探し出すことには、困難を伴うという指摘がなされることがある。

本来、地質環境の安定性に関する論点は地層処分による放射性核種の隔離と閉じ込め性能という、地層処分の安全性に関する本質的な論点と結びつけられている。ところが、専門家の間においても、地層処分の性能を保証する地層と地質環境の安定性に関する認識が共有されていない場合には、しばしば本質的な論点からの逸脱が生じ、議論のかみ合わないことが多い。

そもそも、「地質環境（geological environment）」という言葉は、地層処分という分野で意図を持って明示的に用いられるようになったものである【OECD/NEA, 1977】。

では、地層処分の安全性を確保する上で注目すべき地質環境とは、どの程度の広がりにおけるどのような特質に関するものであり、それらの安定性とはどういうことであろうか。

地層処分の安全機能において重要な地質環境の広がり

地層処分とは、深部の地質環境が本来的に有する物質の包蔵性に着目して、そのような環境の固有特性をさらに確かなものとするため、そこに工学的なシステムを構築することである。そうすることによって、人間環境からガラス固化体を隔離して人間との直接の接触が防止され、さらに、放射性核種の人間環境への移行可能性を考慮して放射性崩壊に必要な時間枠にわたって、放射性核種が地下に閉じ込められた状態にすることが可能になるのでは、との意図である。

地下深部にガラス固化体を置くことによって、深さに相当する岩盤の厚さによる物理的な隔離性が確保される。地下深部にあるガラス固化体と人間環境との距離が縮まる要因となり得るのは、地層の隆起・侵食による緩慢な深度減少と鉱物資源の探査等の掘削行為による人間からの接近である。また、火山の噴火に伴う放射性核種の噴出は突発的に隔離機能を失う事象となる。このため、隔離性を確保するため、地層処分を行う位置を決める際には、隆起・侵食の著しい地域と地下に鉱物資源の賦存する可能性のある地域、および火山地帯は避けなければならない。また、このような地域を避けることによって、それらの事象の影響を受ける可能性は極めて小さくなるとしても、万一の場合には、これらが発生するかもしれないとして、念のため安全評価のシナリオを想定し、大きな影響はないことを確認しておかなければ

ばならない。

接近シナリオで考慮する地層の広がりを論じる範囲は一樣ではない。

隆起・侵食は広域的な事象であるので、安全評価においては地層処分施設が設置される範囲の全域にわたる広がりが評価の対象となる。人間の行為による接近シナリオに関しては、比較的浅いところに処分する低レベル放射性廃棄物の処分施設においては、処分施設全体を掘り起こすシナリオを評価する必要があるが、地層処分施設の場合は、施設全体に人間が接近する可能性は考えにくいので、鉱物資源の探査のために地表からボーリングを行う行為を様式化して評価することが一般的である【IAEA, 2012】。この場合に考慮の対象となる地表や地下深部の広がりは、ボーリング孔の内径程度の極めて限定的な範囲となる。

一方、火山の噴火に伴う放射性核種の噴出による影響評価の場合、火山が処分場に影響を及ぼす確率については、処分場全体の広がりを考慮する必要があるが、マグマとともに噴出する放射性核種の放射エネルギーの想定においては、マグマの火道や岩脈の広がりが考慮すべき対象となる。

これらの接近シナリオの評価については前章に述べられているように、万一これらの事象が発生したとしても、広域に破局的な影響が生じるような結果とはならないとされている【JNC, 1999a ; DOE, 2008】。

なお、地層処分に否定的な見解において、しばしば指摘される事象である地震と活断層は距離を短縮する要因とはならず、以下に述べる地下水の移行に擾乱を与える可能性に関するシナリオにおいて考慮すべき事象であることに注意する必要がある。

ガラス固化体と人間環境との間の隔離が保たれたとしても、放射性核種の人間環境への影響について考慮すべきもう1つの可能性は、日本列島の地下深部に普遍的に存在する地下水を介して廃棄物中の放射性核種が人間の生活環境に還流して人に影響を及ぼすプロセスである。地下水は放射線を受けても放射能を有することにはならないが、地下水に放射性核種が溶解することによって地下水の動きとともに放射性核種が運搬される可能性が生じる。このため、地層処分システムを設計する上での基本的な性能を満たさせるために、地下水による人間環境への影響について、地下水移行シナリオを想定した安全評価を行うことが不可欠である。地下水移行シナリオに基づいて、地層処分システムによる閉じ込め性能が評価されることになる。

安全評価の対象は地層処分された状態になったガラス固化体を放射線源とする人間の被ばく量である。地層処分された状態とは、オーバーパックに収納されたガラス固化体と母岩を掘削した処分孔の間隙に緩衝材が施行されることにより、ガラス固化体の周囲を多重のバリアが取り囲んだ状態である。この状態にあるシステムの挙動を支配する環境が、「地質環境」であり、この環境を構成する物質は岩石と水であるので、地質環境の特性は岩石と水によって特徴づけられる。

地下水移行は、ガラス固化体の外側から内部に地下水が浸潤することが発端事象となるの

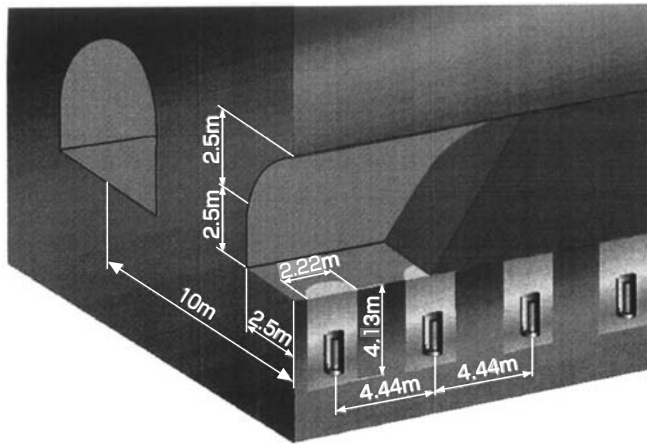


図 7-1 ニアフィールド領域【JNC, 1999a】

で、地下水接触を抑制するオーバーパックと緩衝材がいつまで、どのように働くかについて、バリア効果を評価する。次に、いつかは地下水接触バリアが有効ではなくなるとして、ガラスからの地下水への放射性核種の溶解挙動を評価し、続いて周辺の地質環境への移行挙動が評価される。このような地下水移行の安全性を決定付ける重要なプロセスは、ニアフィールド岩盤中で想定される挙動である。

図7-1に示すように、隣接するガラス固化体を含む系と共有する数m程度の岩盤（ニアフィールド）が取り巻いている範囲が関心の高い多重バリアシステムの大きさである。ニアフィールド領域から地下水に溶け出す放射性核種がその外側100mの岩盤（ファーフィールド）を通過して、地表の生物圏に直結した破碎帯に入るという経路を通して生物圏に達すると想定して、決定グループである農作業従事者に対する放射性核種の量を基準に、ガラス固化体1体による被ばく線量が算出される。

地下水移行シナリオにおける4万本のガラス固化体が処分された地層処分場からの総被ばく量は、最も保守的な評価となるように、1体当たりの被ばく線量を4万倍することにより求めている。

保守的という意味合いは、隣り合った系の地下水は、バリア材やガラスから溶け出した成分で飽和している可能性が高いが、その効果を見捨て、常に新鮮な地下水によって、ガラスやバリア材との化学反応が進むとすることである。

すなわち、地層処分の安全性の評価はガラス固化体1体に対するものが基本となっているので、安全評価において重要な「地質環境特性」とは、ニアフィールドの岩盤における岩石と水の特性からもたらされるガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材の特性を変える化学反応を支配する地球化学的な特性と、ファーフィールドの岩盤の水理学的特性および核種の岩石への収着挙動に影響する岩石と地下水の地球化学的な特性である。

このように、地層処分システムの性能を決定付ける上で、「安定な地質環境」とは、広範

囲な地質環境が動くことによって、処分施設やガラス固化体が破壊するか否かといった物理的な挙動よりも、放射性核種の溶出移行挙動を支配する廃棄体近傍あるいは核種の移行経路に沿った微視的な領域の水理学的および地球化学的な安定性が重要なものであり、その安定性が期待される地質環境の広がり、ニアフィールド地質環境については数m程度、ファーフールドの特性については100m程度の領域である。

地層処分の性能において、地質環境に期待する機能と問題となる地質環境の広がり、比較的限られた領域における主として化学的特性の安定性に委ねられるので、地層処分の安全性を論じる場合には、批判的な見解を述べる専門家が指摘する日本列島全体の地質環境の物理的な安定性や広がりに関する論点は、曖昧な議論となりがちである。

あえて言えば、変動帯に位置する日本列島全体の安定性の予測の困難性や日本列島の地質環境の安定性は期待できないという理由から、地層処分概念の成立性を根本的に否定する議論には、惑わされるべきではない。

地層処分の成立性において意味のある「安定な地質環境」に関する議論を以下に要約する。
【増田, 2016】

地層処分の成立性において意味のある「安定な地質環境」に関する議論【増田, 2016】

1. 地層処分の要件となる安定な地質環境とは何か？

- ① 地下深部の位置は本来的に人間の居住する環境とは岩盤で隔離された環境である。
- ② 地質環境は岩石と地下水で構成されている。
- ③ 深部の岩盤は透水係数が小さく、またその深さでは動水勾配が小さいので、地下水の動きは極めて小さい（低透水性）。また、深層地下水は還元性である。この2つの特性は、日本列島が変動帯に位置するか否かに影響されることのない地下深部の地質環境が本来的に有する固有の特性である。
- ④ 地表の環境よりはるかに安定な地質環境を高レベル放射性廃棄物の処分位置として利用しようというのが、地層処分概念発想の起点であり、人間と高レベル放射性廃棄物が直接接触する可能性に対しては深部に至る厚い岩盤の隔離機能が、地下水によって高レベル放射性廃棄物から放射性核種が溶かし出され地表に運ばれる可能性に対しては、低透水性と還元性を基本とする閉じ込め機能が自然にはたらく。
- ⑤ 地層処分にとっての「安定な地質環境」については国際的な共通認識があり、「地層処分システムを構成する領域における地質環境内部での、また、外部からの擾乱に対して、その地質環境が有する本来的な緩衝能力により、長期にわたって突発的あるいは急激な機能喪失を生ずる可能性の低いものをいう。また、擾乱をもたらす地質学的な事象やプロセスが排除できるか、十分頻度が低いか緩慢であるか、あるいは結果としての影響が十分小さいなどの条件により、処分場の安全性について必要な時間枠に

わたって考慮する必要がないならば、サイトは地質学的に安定であると考えられる」とされている【OECD/NEA, 2009】。

2. 安定な地質環境特性を乱す要因は何か？

- ① 隔離性を乱す要因となり得るのは、隆起・侵食による緩慢な深度の減少プロセスと火山の噴火に伴う放射性核種の噴出、および鉱物資源探査等による人間の掘削行為である。
- ② 閉じ込め性を乱す要因となり得るのは、断層による地下水移行経路の短絡、熱水や深部流体の流入、海水準変動による酸化性地下水の流入などであるが、これらの擾乱因子が突発する可能性のある位置は限定的であり、あるいはそもそも変化が緩慢である。

3. 安定な地質環境の選定とはどういうことか？

- ① 地層処分の観点（廃棄物を人間環境から隔離し、放射性核種の移行を遅らせるための機能）からみた深部の地質環境は、時間的にも空間的にも地表の環境に比べて相対的に長期にわたってはるかに安定であるという意味で「安定な」という形容詞を付けて地質環境を表現している。
- ② 変動帯に位置する日本列島には限られた「安定な地質環境」と広範囲な「安定でない地質環境」が存在すると捉え、その中から地層処分に適した「安定な地質環境」をサイト選定によって探し出すということではない。本来的に安定な地質環境に対して擾乱を与える自然事象や、人間の行為の影響が小さい地域をより好ましいとすることがサイト選定行為である。

【参考文献】

- (1) OECD/NEA (1977). "Objectives, Concepts and Strategies for The Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes".
- (2) IAEA (2012). No. SSG-23: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste.
- (3) JNC (1999a). わ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－, 核燃料サイクル開発機構, TN1400 99-020.
- (4) DOE (2008). U.S. Department of Energy, "The Safety of a Repository at Yucca Mountain".
- (5) 増田純男 (2016). 地層処分に適した安定な地質環境について－地層処分の安全性を担保する地質環境の安定性とは－, 原子力学会誌, Vol.58, No. 2.
- (6) OECD/NEA (2009). "Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste".

第8章

地層処分で考慮すべき時間枠

地層処分のセーフティケース（Safety Case：安全を裏付ける論拠を収集したもの）の開発において鍵となる問題点は、処分される放射性廃棄物の危険性が残留する長期の時間枠に関するものである。そのような期間にわたって、多くの異なる時間枠に従って進展する広汎な事象とプロセスが処分場とその環境に作用する。このような事象とプロセス、それに付随する不確実性、それらが処分場の変遷と性能に対して与え得る影響を特定し、評価し、セーフティケースにおいてその内容を示さなければならない。

国際的集約意見

時間枠の取り扱いに関する問題は2002年にパリで開催されたOECD/NEAのワークショップで議論され、このワークショップで得られた教訓と提示された課題については2004年の報告書で報告された。さらに、2009年には質問表に対する13のOECD/NEA加盟国からの回答の分析とその後の会合での議論に基づき、地層処分場の閉鎖後に考慮すべき時間枠について次のような視点から報告書が取りまとめられた【OECD/NEA, 2009】。

- ・ 長寿命放射性廃棄物の地層処分における時間枠に関する事項の取り扱いについての現状と進行中の議論のレビュー
- ・ 各国の計画における一致点と相違点の抽出
- ・ 安全評価やセーフティケースの構築と提示においてこの問題を取り扱う方法論に改良・発展の余地があるかどうかの見極め

時間枠の取り扱いにおいて考慮すべき一般論的原則として、以下の点が挙げられた。

倫理的原則

放射性廃棄物が危険を示す長い時間を考えると、今日および近い将来の人間が廃棄物の管理について行う意思決定は、遠い将来に被ばくを受けるかもしれない世代に対してリスクをもたらす可能性がある。したがって、現世代の人間が将来世代に対して有する注意義務や達成すべき防護のレベルといったような倫理的事項について考察する必要がある。処分の計画・実施の段階的アプローチに関する意思決定は倫理の次元に関する内容を含んでいる。特に、再取り出し可能性の確保の意思決定、すなわち、できるだけ早い現実的時期に処分場を閉鎖するか、閉鎖しない期間をより延長するかは意思決定は、これにより、将来世代が意思決定

をするための柔軟性を与えるとともに、負担責任が将来世代に受け渡される。これに関する倫理原則である世代間の公平性や世代内の公平性および持続可能性といった原則は、さまざまに異なる解釈がなされ、ときには競合的なものとなる。

競合する原則についてなされる解釈や妥協点を見出すことは判断の問題であり、国やステークホルダーにより異なることもあるので、たとえばOECD/NEA廃棄物管理委員会（RWMC）の長期安全基準（LTSC）タスクグループにおける議論のように国際的に議論されている事項となっている。

危険性の変遷

放射性廃棄物に付随する危険性は主として、適切な隔離（遮蔽を含む）と廃棄物の閉じ込めが機能しない場合に起こる外部・内部放射線被ばくによりもたらされる。廃棄物の放射能は時間とともに大きく減少するが、非常に長寿命の核種が存在するということは、廃棄物は極端に長期にわたってあるレベルの潜在的危険性を有することを意味している。

危険の性質は、外部被ばくによる潜在的線量、放射性核種の摂取または吸入による潜在的線量および廃棄物や容器に含まれる化学毒性物質による潜在的影響が考えられる。これらの危険性の変遷として、図8-1のコアサンプルの観察による外部被ばく量の解析の例でも分かるように、使用済核燃料や高レベル放射性廃棄物の潜在的危険性は時間とともに顕著に減少するが、本質的に無害であると言えるようになることはなく、外部被ばくの危険性の面から重要と考えられる核種は100万年以上残留する（たとえば、Np-237の子孫核種のTl-209は100万年後でも遮蔽が必要である）。この例からも分かるように、極端な事例を考えれば、どのようなものも危険となる。危険性は潜在的危険性が顕在化する事象とそのつながり（シ

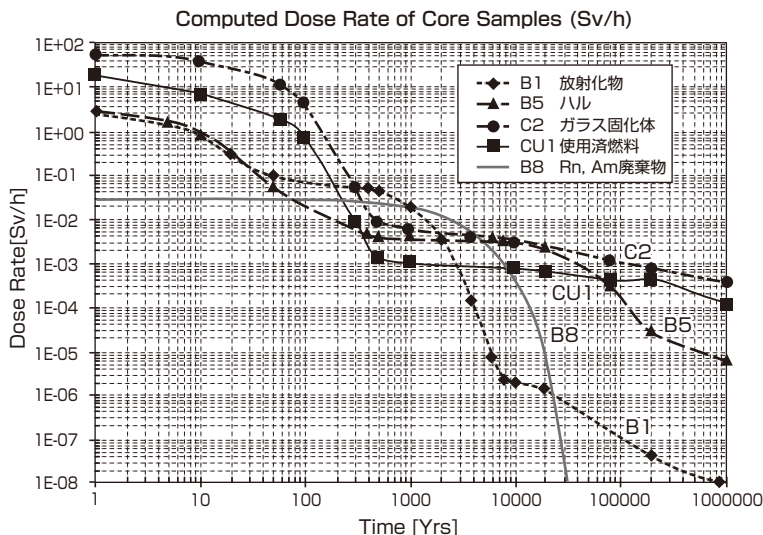


図 8-1 コアサンプルの観察による外部被ばく量【OECD/NEA, 2009より作成】

ナリオ）に依存し、安全はこの事象のつながりを断つことにより達成される。

処分場の変遷における不確実性

処分場については、廃棄物を隔離し閉じ込めることにより長寿命の放射性廃棄物に付随する危険から人々と環境を防護するように、サイトが選定され設計がなされる。サイトの選定と人工バリアの設計は、一般的に長期に安定で予測が可能なように行われるが、それにもかかわらず、処分場の変遷は一般的に時間とともに増大する避けることのできない不確実性の影響を受ける。放射線被ばくの形態は個々人の生活習慣に密接に関係しているため、非常に短い期間についてしか予測できない。廃棄物の危険性が時間とともに減少することが、安全評価に付随する不確実性に対し高くなる要求を部分的に相殺する結果、処分場の性能に対する要求水準は低下する。それにもかかわらず、いくらかの危険性は極めて長期に残留するので、不確実性が増大するということは、危険に対する処分場の防護能力に関して何らかの意味のあることをどのくらい長期までいえるかについては限界があるということを意味している。セーフティケースはこのような限界があることを認める必要がある。

地質環境の安定性と予測可能性

地層処分に必要な安定な地質環境とは、その内部、外部からの擾乱に対する緩衝能力により、長い時間枠にわたって突然の、あるいは急速な有害な変化を受ける可能性が低いものを行い、安全評価に必要な情報を与えることができる程度に予測可能であること、地質環境の履歴が理解されている程度とその理解がどのくらい将来までの予測を可能とすると考えられているかに依存する。

処分場のサイトは地質環境が安定しており長期の予測が可能なところを選ばれる。最も安定なサイトでさえ、その変遷の予測は十分な長期の時間枠に対しては不確実となるが、ほとんどの国の計画では、より長期の時間枠における地質学的履歴の理解に基づいて、数百万年以上の時間枠にわたって安定で予測可能と考えることのできるサイトを選定することを目指している。

図8-2は、処分場を構成する種々の要素の変遷とその変遷の予測に伴う不確実性を要約したものである。廃棄物の近傍の地質環境の変遷は極めて緩やかなもので、かつ外部からの擾乱に対してもかなりの確からしさと将来予測が可能である。一方、地表の生活環境の変遷は多くの事象の影響を受け予測が不確かなものとなり、人間活動に至ってはほんの数十年でさえ予測が困難である。しかし、放射性物質が人工バリアとその周辺の母岩という長期にわたって変化の極めて小さい領域に閉じ込められており、その領域が火山や隆起・侵食さらには人間侵入といった極端な外的擾乱事象から隔離されていることが確実に予測できれば、人間活動の将来予測が不確実であっても、基本的に危険な放射性物質が生活環境にもたらされることがなく、人に危険をもたらしなことが確実性を持って予測できるというのが、放射性廃

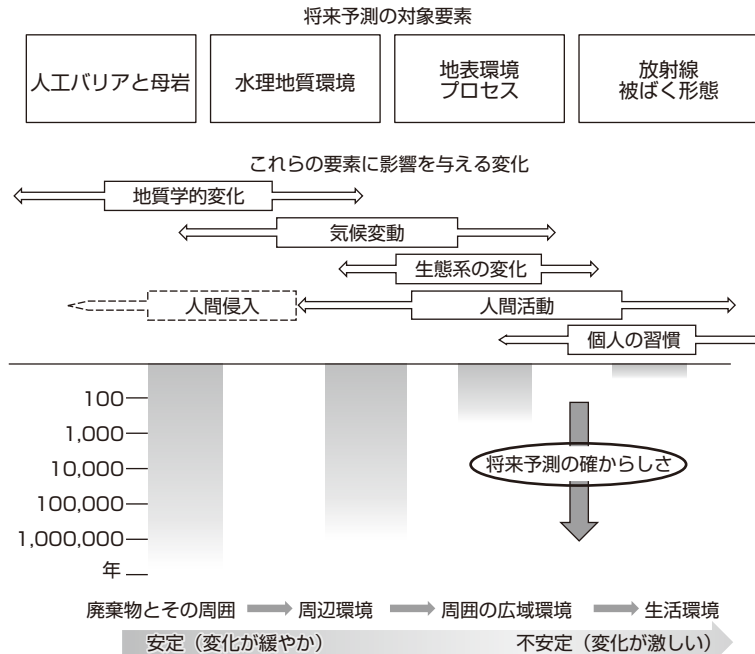


図 8-2 処分場の変遷と付随する不確実性【OECD/NEA, 2009より作成】

棄物の地層処分における隔離と閉じ込めの基本戦略の考え方である。

日本における評価時間枠の議論

第2次取りまとめにおいては、性能評価の前提となる地質環境の変遷が外挿法により十分な程度の信頼性を持って予測できる期間は以下のような考え方に基づいて、将来10万年程度と考えることが妥当との意見集約がなされた。

- 地震・断層活動や火山・火成活動などの急激かつ局所的な現象については、過去数十万年の時間スケールでは、これらの現象は規則的に起こっていることから、今後10万年程度であればその規則性および継続性からそれらの影響範囲を推論できる。
- 隆起・沈降・侵食および気候・海水準変動などの緩慢かつ広域的な現象は過去10万年程度については、広域にわたる比較的正確な地質学的な記録が残されている。それらの記録をもとに将来についても10万年程度であれば、その影響の性質や大きさ、また、影響範囲の移動や拡大の速度などを推測できる。
- したがって、地殻変動の一樣継続性に基づく外挿による予測の考え方として、第四紀後期（約50万年前から現在）の地殻変動の一樣継続性（変位方向の一樣性、変位の等速性）が成立している場合には、過去から現在までの変動傾向・速度を同程度の将来まで外挿することは可能である【松田, 1988】。

- 外挿法による予測が可能な期間を検討するためには、現在に連続する地質構造運動の中で変動の一樣継続性がどの地域でいつ頃に成立したかを地形・地質学的な情報から検討する必要がある。
- 過去から現在までの現象の履歴が、どのような相互関係があったか（自己回帰性）を解析し、その関係性が比較的短い時間は継続すると仮定して、予測値として取り扱う方法が適用可能であり、時系列解析モデル（たとえば、自己回帰移動平均モデル）の研究例によると、過去の期間（ N ）に成り立っていた関係性（定常性）は、将来になればなる程、その関係性そのものが変化していると考えられるので、 $0.1N \sim 0.2N$ 程度であれば関係性が継続する確率が高いと考えられている【梅田, 2013】。
- 地形・地質学的情報によると日本列島の多くの地域で、現在の変動方向・速度（一樣継続性）が成立したのは、中期更新世以降と考えられる。
- 山地発達モデルによると、日本海東縁変動帯や新潟－神戸歪集中帯等の地域では、中期更新世以降に現在の隆起速度と同程度になったと推定できる。

以上から、中期更新世以降に地殻変動の一樣継続性が成立した地域では、外挿法による信頼性が高い予測が行われる期間は、将来10万年程度と考えることが妥当と思われるとされた。

第2次取りまとめ以降も、プレート運動に関する最新の知見をもとに、断層運動、火山活動等、天然現象の将来予測の不確実性が大きくならない期間についての検討が続けられ、現時点では、将来10万年程度であれば、地殻変動の傾向が継続する可能性が高いと考えられている【総合資源エネルギー調査会, 2014】。

【参考文献】

- (1) OECD/NEA (2009). Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste, OECD/NEA.
- (2) 松田時彦, 衣笠善博 (1988). 第四紀テクトニクスの特徴と問題点. 第四紀研究, 26, 251-254.
- (3) 梅田浩司, 谷川晋一, 安江健一 (2013). 地殻変動の一樣継続性と将来予測 —地層処分の安全評価の視点から—, 地学雑誌, 122(3)385-397.
- (4) 総合資源エネルギー調査会 (2014). 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—, 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術 WG, 平成26年5月.

第9章

地層処分実施段階における課題

2000年以降各国におけるプログラムが研究開発を主体とする段階から地層処分事業の実施段階に入った。この時期における主な国際的議論として、地層処分サイト選定等の事業段階における社会的課題も考慮した地層処分概念の要求の拡大があり、次のような課題について多様なステークホルダーの関心に的確に応えられるよう、多面的な議論を整理することが重要と考えられるようになってきた。

1. 貯蔵と処分の関係
2. 廃棄物の回収可能性
3. 信頼構築と安全コミュニケーション
4. 段階的アプローチ

9.1 貯蔵から処分への意思決定

NAS2001報告書

地層処分は安全に実施可能との科学的合意があるにもかかわらず、多くの国で地層処分計画が困難に遭遇、あるいは遅れが出ていることを知って、米国科学アカデミー（NAS）は、高レベル放射性廃棄物に関する研究委員会を設置して、地層処分についての技術的側面と社会的な観点からの議論を行った。

2度の国際ワークショップの意見集約を経て2001年6月に報告書「高レベル廃棄物と使用済燃料の処分：未解決の社会的および技術的課題」が取りまとめられた【NAS, 2001】。

報告書は貯蔵と処分の関係について、貯蔵は実行可能なオプションであるが、管理の継続の不確実性のために、地層処分オプションを抜きにして貯蔵オプションのみを追求することは賢明であるとは言い難いという点を強調している。

ただし、意思決定とは最低でも2つのオプションからの選択であり、常に選択が可能でなくてはならないので、放射性廃棄物管理計画の策定に当たり、必要とされる限り十分な貯蔵能力を確保するとともに、深地層処分オプションを追求すべきであるとされた。

また、社会的・科学的な理由から、各国の廃棄物管理計画は公衆との対話と科学的分析を通じた段階的なアプローチを採るべきである。各国の廃棄物管理計画では、数十年単位に及ぶ長期にわたる貯蔵の安全性と核拡散抵抗性に関するデータも含めた現実性のある代替オプションの調査も行われるべきである。このデータは、代替オプションの評価を行う際の基礎

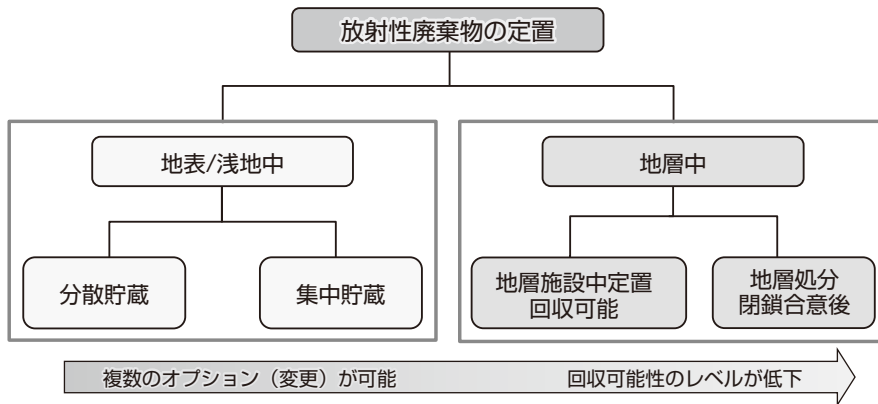


図 9-1 廃棄物の定置方法と回収可能性【NAS, 2001より作成】

となるばかりでなく、深地層処分に向けた一歩となるだろうとしている。さらに、国家計画に関与する者は公衆が変更不能な措置を受容することに対して拒否反応を示すことを理解し、モニタリングと処分した放射性廃棄物の回収可能性を強調すべきであると指摘している。

このほか、以下の点が主要な勧告として提起された。

- 地球規模での国際協力は全ての国が思恵を受けることができる。技術レベルでの国際協力は既に活発に行われているが、戦略・政策レベルの国際協調も強化されるべきである。一部の国々は放射性廃棄物の処理、貯蔵あるいは処分場を共有することで合意すべきである。放射性廃棄物の発生国から受け入れる意思と能力を持った国への移送を阻害する法律や規則、倫理的主張は、健全なオプションの安全性、核拡散抵抗性、経済性を損ないかねない。
- 放射性廃棄物管理計画の実施とそれに伴う規制活動においては、貯蔵施設と処分場の安全性・核拡散抵抗性を確実なものとするを視野に入れた統合・包括的かつリスク・ベースのシステムを採るべきである。

ROST報告書

高レベル放射性廃棄物対策の選択肢として、地層処分による受動的管理が可能であるという点については、原子力コミュニティにおいても必ずしも共有された認識とはなっていない。実際、OECD/NEAにおいて、原子力技術開発委員会（NDC）のメンバーから、なぜ貯蔵では不十分かという問いかけが廃棄物管理委員会（RWMC）になされ、これを契機に両委員会の共同作業として、貯蔵と処分の関係について検討する場が設けられた。

使用済核燃料と放射性廃棄物の長期管理のための代替戦略について、貯蔵の役割拡大の実行可能性、より長期間に拡大する動機とその意味合いの検討等が行われ、議論の結果は、「長

寿命放射性廃棄物の管理における貯蔵の役割」, 通称 ROST (Roles of Storage) 報告書として取りまとめられ, 2006年に発刊された【OECD/NEA, 2006】。

主要な論点

- 従来の貯蔵の役割は, 放射性物質の安全性と安全保障および人間と環境の防護を確保するとともに, 必要に応じて再利用を可能にするように設計された放射性廃棄物管理戦略の枠内で実施されるものである。
- 貯蔵の価値
 - ・ 放射性崩壊貯蔵: 廃棄物管理戦略の次のステップまたはプロセスが実行される前に, 廃棄物の放射能レベルと発熱量を十分に低下させること
 - ・ 緩衝貯蔵: 現在進行中のプロセス, 輸送または処分に先立って在庫を用意すること
 - ・ 中間貯蔵: 必要とされる施設または輸送能力がまだ利用可能でない廃棄物管理ステップを待ってなされる待機貯蔵と, 特定の廃棄物または物質にとっての次のステップに関する決定がなされるまでの待機貯蔵
 - ・ 戦略的貯蔵: すぐには必要とされないが, 将来何らかの潜在的な利用方法または価値が見込まれており, したがって廃棄物として宣言されてない物質を対象とする貯蔵
- 各国において以下のような貯蔵の役割の拡大が検討されている。
 - ・ 最終処分決定前に貯蔵を当面の終結点 (endpoint) とする廃棄物管理戦略 (たとえばオランダの高レベル放射性廃棄物中間貯蔵施設 (HABOG))
 - ・ 廃棄物管理戦略の選択肢の1つとして長期貯蔵概念を位置付け (フランスのバタイユ法, カナダ/核燃料廃棄物法, 英国放射性廃棄物管理委員会 (CoRWM) の提案)
 - ・ 小規模原子力国は多国間地域共同処分場を待つまでの貯蔵に関心 (チェコ, ハンガリー, スロバニア, スイス)
- 長期貯蔵あるいは貯蔵の長期化に関する動機として, さまざまなステークホルダーはそれぞれ異なった理由により長期貯蔵を支持あるいは不支持としている。
 - ・ 地層処分場が利用可能になるまでに長期間を要する適用可能な方策がないという実際的な理由
 - ・ たとえば核種分離・変換技術等の将来技術への期待
 - ・ 将来, 放射性廃棄物が資源となる可能性 (特に使用済核燃料の場合)
 - ・ 将来世代による選択肢の排除は必ずしも倫理的とはいえない, 取り消し不能な決定を避ける社会的・政治的傾向がある, 処分概念に対するパブリック・アクセプタンスが未成立である, といった倫理的・社会的な配慮
 - ・ 地層処分システムの長期安全性, 処分技術の立証に必要とされる時間が確保される可能性がある, という技術および信頼面での理由
 - ・ 支出の発生を遅らせることによる費用節減の可能性, 短期間で処分場を建設し廃棄

物の収容作業を行う方が経済的（処分場の建設前に廃棄物の蓄積が進んでいる方が有利）、放射性崩壊により、廃棄物をより高密度で定置可能となる、といった経済的およびそれに関連する技術的な理由

- 地層処分場に対する立地地域の政治的な反対や一般市民の反対によって国の政策の実施に遅れが生じたり、妨げられたりする可能性がある、といった政治的理由
- 期限を定めない貯蔵を支持することにより原子力に反対する、といったイデオロギー的な理由
- 廃棄物の量が比較的少ない国々の場合、他の国と共同出資して1ヵ所の処分施設を開発することにより、経済面で重要な利益が得られる可能性があるから、国際的・多国間での解決策実現を待つ、といった理由

総合的な結論

- 長期貯蔵の政策が起こり得る将来の展開、たとえば新たな技術開発あるいは多国間施設に基づく解決策を念頭に置いて採用されたものである場合、この種の政策を採用した国はこうした解決法に関する調査を実施し、開発するための活動を活発に進めなければならない。したがって、ただ単に待つだけでは十分ではない。
- その定義からして、貯蔵を放射性廃棄物管理に関する終結点とすることはできない。さらに、貯蔵施設の複数回の更新を伴う極めて長期間にわたる貯蔵計画は非現実的であり、現世代の管理の及ばない著しい不確実性が組み込まれるものと考えられる。これらの不確実性の1つとして、この種の貯蔵が履行を怠られることによって事実上の終結点になってしまう可能性（endpoint by default）が挙げられる。そしてこれは満足 of いく結果ではない。
- 責任が将来の世代に手渡されるのであれば、いずれかの時点でその将来の世代がその責任を取り除くことができるように、その責任に対処する手段も一緒に引き継がなければならない。これは、財政面および知識面での責任の問題である。この問題について理解して、我々の現時点での理解に従って解決策をもたらすことは我々の責務である。
- 期限が設定されていない貯蔵などの「確定していない」解決策は、持続可能なものではない。これは、この種の解決策が定量化されていない（そしておそらくは定量化することのできない）影響と資源の利用を意味しているためである。それが持続可能であるためには、将来の社会、科学および技術面での展開に関する推測に依存しない完全な廃棄物管理戦略を定義することが重要である。完全であるためには、当該戦略には明確な終結点が設定されていなければならない、またその終結点に到達する経路（または代替経路）が指定されていなければならない。成功を収めるためには、現世代と将来の世代の両方が、貯蔵が適切な時点で終了できるようにするための作業を継続する必要がある。
- 必要な決定を先延ばしにすることによって廃棄物を際限なく貯蔵し続けることは、安全性の観点から、最も多くの不確実性を伴う最悪のオプションである。

- したがって貯蔵は、決して放射性廃棄物管理にとっての終結点となることはできない。

9.2 回収可能性に関する議論

廃棄物の回収可能性は前記のようにPolvani報告書が取りまとめられた地層処分概念検討の黎明期から、地層処分概念との関係でその意味合いが議論されている課題である。

多くの国の地層処分計画が実施段階に近づくにつれ、廃棄物の回収可能性に関する見通しがステークホルダーの関心事として注目されるようになっており、廃棄物管理の意思決定と措置に可逆性を持たせることを法定要件とする国、あるいは処分計画に取り入れ社会的・政治的・経済的な自由度を確保しようとする国などが現れるに従い、国際的なフォーラムや報告書で以下のような多様な視点から議論されてきている。

- 廃棄物管理戦略に組み込むべきか否か【OECD/NEA, 1995】
- どの程度組み入れるべきか【OECD/NEA, 2001】
- 政策や安全規制に取り入れるべきか【OECD/NEA, 2009】
- 回収の技術的意味合いは【IAEA, 2009】
- 回収可能性のスケールは【OECD/NEA, 2012a】

このような報告書の中で、OECD/NEAが2001年に取りまとめた報告書【OECD/NEA, 2001】は、廃棄物の回収可能性の備えを有利とする要因と反対要因が示され、報告書の副題に“国際レベルでの反省”(Reflections at the International Level)としているように、回収可能性を用意することに関する誤解を含めた多様な視点が整理されており、回収可能性の考え方を理解するための基礎となり得るので、以下に紹介する。

廃棄物の回収可能性の備えを有利とする要因

処分システムが予期する性能を発揮しない場合の対策

サイトや処分場の監視から得られた新たな所見や科学的理解の進歩により、処分場の長期的安全性を損なう予想外の特性または現象が明らかになることはあり得る。また将来、安全基準が変更され、既存の処分施設が新しい基準を満たさない状況が生ずるかも知れない。このような場合、廃棄物の回収はより受容可能な別の廃棄物管理の解決策が採用できる場合に限り実施されるべきである。

資源としての利用可能性

使用済核燃料は資源としての価値から、必ずしも廃棄物とは見なされないかもしれない。ガラス固化体や長寿命廃棄物が有用なエネルギー源となり得ることは考えにくい、希少な

あるいは天然には存在しない元素が将来の技術で用途を持った場合、これを回収したいという願望はあり得る。その他の処分場材料の資源としての可能性については、処分場開発を決定する時に検討する必要がある。

将来開発されるかもしれない新技術による廃棄物管理の利用への願望

核種分離と核変換についての研究が続けられており、地層処分に代わる現実的な代替手段を提供するとは認められていないが、処分される廃棄物を減量しその特性を変えるため、廃棄物管理戦略に取り入れられる可能性はある。たとえそうであっても、この選択肢を特に念頭において設計が行われていない限りは、安全性の観点から見て定置済みの廃棄物の回収が受け入れられることを意味しない。他にも新しい廃棄物管理技術が開発されるかもしれないが、もし地層処分の実現が成功するならこのような技術開発の動機は小さくなる可能性がある。

社会的な受容とリスク認識あるいは政治的要求の変化への対応

回収可能性を廃棄物処分プログラムに取り入れることは、倫理的理由から、また一般の人々の信頼を得る上からいくつかの国で好ましい政策とされている。もし事故が生じた場合にどうするかが分かっているならば、人々は技術の安全性が高いと考えるし、回収が常に1つの選択肢であることが知られていれば、地層処分に対する一般の人々の懸念も和らぐ可能性がある。

廃棄物の回収可能性の備えに対して考えられる反対要因

操業安全性、長期的安全性に対するマイナス効果の不確実性

処分場の操業や監視・保守の期間を延長する措置により、マイナス効果のプロセスが導入される可能性がある。たとえば、地下の開放型接近路の期間が延長されている間に生ずる処分場材料やニアフィールド岩盤条件の劣化である。回収可能性の備えを導入することによって長期的安全性が不利となってしまうはならず、たとえば回収を容易にするため最適な位置よりも浅い位置に処分場を立地させることは受け入れられない。また、保守と監視あるいは回収作業や廃棄物の再パッケージ等は作業員の被ばく線量の増加と長期にわたる産業事故や掘削事故の危険の増大の可能性もある。

最終的な閉鎖と密閉に関する不確実性

回収可能性と結びついた操業期間の延長で生じ得るリスクの1つは、処分場が適切に閉鎖されず、密閉されないかもしれないことである。これは、組織的あるいは財務的な制度により、あるいは技術能力の喪失により生じ得る。このため処分場への接近路は開放されたままとなり、保守が行われず、あるいは貧弱な密閉しか行われられないかもしれない。この場合、開放された、おそらく崩落した、または埋戻しが貧弱な接近路は地下水、ガス、汚染物質の移

動経路となり、偶発的なあるいは無責任な処分場への干渉のためのアクセスをいっそう容易にするかもしれない。

処分場への無責任な立ち入りまたは干渉の機会の増大

処分サイトの維持と管理から将来の世代の負担を開放すること、これが、地層処分概念が提案され開発された主な理由の1つである。数十年の期間ですら、社会の中で法律、規制の遵守は弱まる可能性がある。経済情勢の変動、政治的混乱や戦争の場合は特にそうである。このような場合、廃棄物の回収可能性の備えを持つ処分場はそれを持たない処分場に比べ、廃棄物、人工バリア材料の無責任な回収あるいは悪意ある損傷のターゲットとなりやすい。

保障措置を強化する必要がある可能性

使用済核燃料の処分場の場合、廃棄物の回収可能性を高めるどのような措置も、核物質の軍事目的流用をできるだけ困難にするという目的と対立する。条約締結国とIAEAとの間で結ばれた協定は、IAEAの判断のもとで当該核物質が「実際に回収不能」である場合にのみ保障措置を解除することができる、と定めている【IAEA, 1972】。回収可能性の備えは核物質の回収をより困難にはではなく、むしろ容易にすることにより、保障措置と監視のレベルの強化を不可欠にするかもしれない。たとえば、処分場開放期間の延長に要求される保障措置レベルは最終的な閉鎖後に要求されるレベルよりはるかに高くなる可能性がある。同様に、閉鎖後でも廃棄物が容易に回収できるよう設計された処分場はそうでない処分場よりいっそう注意深い監視が必要であり、将来の世代に望ましくない負担をかける可能性がある。

9.3 信頼構築と安全コミュニケーション

処分事業の実施における公衆参加による意思決定プロセス

1950年代にアメリカにおいて初めて検討されて以来、高レベル放射性廃棄物の最終処分の方法としては、世界各国において、地層処分が実現性の最も高いオプションとして採用されている。また、地層処分を実施するための前提である安全評価とそれに基づく安全な地層処分の実施が可能であるという点について、地層処分分野の技術的専門家の間では国際的に一致した合意がある。

一方、これまで最終処分場の立地について公衆の支持を得ることの難しさがかなり過小評価されてきた。公衆の参画を拡大して信頼を得る機会が失われてきていることは、各国において、今日、廃棄物処分の最大の課題は社会的な問題であり、各国の高レベル放射性廃棄物管理計画は単に技術開発プロジェクトに留まることなく、公衆参加による意思決定プロセスを実現すべきであることも指摘されるようになってきた【たとえば、NAS, 2001】。

処分事業の実施に当たっては、全段階において、あらゆる事象に対し安全確保を万全とす

ることが大前提であり、処分場の建設、操業時における適切な放射線防護対策、一般労働安全対策や環境保護に関する諸対策はもとより、処分場閉鎖後においても多重バリアシステムを構築することによって安全性を確保し、併せてこれら安全性について分かりやすく説明する責任を果たすことも重要な課題となっている。

専門家の安全性に関する説明が信頼を持って受け容れられ、公衆の安心を得るためには信頼の構築が最大の課題である。

地層処分に対する信頼には、さまざまな概念からなる信頼が複合的に達成されなければならない。地層処分の技術的信頼性の理解のためには、安全性に関する透明性と追跡可能性のある情報提供が不可欠である。処分事業への信頼を得るためには、処分事業者の技術的、法的、財政的基礎の存在と事業運営姿勢に対する信頼が重要である。政策に対する信頼については、特に政策立案者が処分事業者と公衆とのコミュニケーションの橋渡しの役割を果たすという視点から重要性を考えるべきである。さらに、地層処分は現代の社会がその解決を必要とする極めて公共性の高い事業であり、安全規制当局の一般的な営利事業活動を規制するという役割は限定的なもので、政策立案者と協調して信頼構築に役割を果たすことが期待される。

このような観点から、段階的なアプローチによる事業計画の進め方、計画の柔軟性の向上を目的とした可逆性と回収可能性の概念、地層処分の安全性に関する意思決定者の判断材料としてのセーフティケースの作成、意思決定プロセスへの利害関係者の参加といった議論が、国際機関における集約意見に基づいて、各国の処分計画においても活発に取り入れられるようになってきている。

地層処分が科学的・技術的に実現可能であることについては、国際的合意があり、さまざまな地質環境や工学材料に関して蓄積された広範囲な調査研究データと処分システムの安全評価によって、概括的な安全性が支持されている。

地質環境、人工バリアの長期的耐久性あるいは将来の人間活動に関する科学的な調査や研究が提供することができる知識には限界があることは避けられない事実である。これらの限界はより進んだ研究によって縮小することができるが、完全に除去することはできない。しかしながら、不確実性の存在により予測結果は異なってくるので、不確実性の注意深く広範囲な分析が大抵の疑問を解決することができる。

今日、廃棄物管理コミュニティの中では、安全評価により予測される安全性の信頼はシステム概念の頑健さ、評価方法の品質と段階的・可逆的な意思決定の過程のような開発戦略を保証することによって補強することができる。また決定は、各々の決定ポイントで到達した信頼度に基づいてなされるべきであると認識されている【Chapman, 2003】。言い換えれば、全ての慣習において未解決の不確実性と共存することは避けられない。地層処分の場合は、段階的開発プロセスにおける各段階での社会的意思決定に必要な科学的インプットを供給する知識のレベルが適切かという問題ということである【OECD/NEA, 2008; West, 2006】。

一方、処分プログラムが地層処分サイトの特定のフェーズに移行しつつある日本および他

の国々は、公衆の支持を得ることに深刻な困難さに遭遇している。一部の公衆は、地層処分システムの将来の振る舞いを理解する上で専門家の能力だけでなく高レベル放射性廃棄物管理に関与する組織とプロセスも信頼していない。したがって、たとえその継続的な管理が将来世代に対する負担であるかもしれない、このように考える一部の公衆は廃棄物の能動的な管理の終了に反対である。

そのような公衆の反対と不信を克服するための社会的信頼構築が、廃棄物管理プロセスの中心的課題になってきており、国の放射性廃棄物計画は技術的なプロジェクト開発であるという認識を超えて、ステークホルダーを参加させる実施のプロセスに努力を拡張するべきであることが指摘されている【Chapman, 2003】。ここでいうステークホルダーとは、放射性廃棄物管理に関する役割のある、あるいは意思決定過程に関心を持つ全ての人、グループあるいは組織を意味する。

多面的な信頼構築

地層処分プログラム全般に全面的な信頼を得るためには、多面的な安全性に対する信頼が確保されなければならない。専門外の一般大衆における信頼醸成の前提であり、先行しなければならない科学的な理解に対する技術的な信頼は、研究と評価を通じて開発され、関連情報とともに透明で追跡可能なように取りまとめられ文書化されなければならない【IAEA, 2012】。

さらに、廃棄物管理プロセスに関して表明されるいくつかの社会的不安は、管理あるいは運営する機関に対する信用の失墜あるいは信頼を損なうような行為から生じる可能性が大きい。このように、信頼構築は、地層処分の実施に関与する機関が組織機能、使命および行動の点で適切な特性を具備しなければならないという命題を課す。

組織的な特性としては、独立性、役割の明確性、専用かつ十分な資金調達、非営利であるというステータスおよび当該分野におけるレベルの高いスキルと力量が必要とされる。使命の特性としては、明瞭な権限と明確な目標、特定の経営計画、十分な根拠に基づく明瞭なアイデンティティが要求される。行動の特性としては、開放性、透明性、誠実性、一貫性、テストされる意欲、限界の認識、献身的でやる気のあるスタッフの関与、組織的なゴールの統一が要求される【OECD/NEA, 2012b】。

安全当局あるいは規制者は公衆の健康と環境の保護に責任を負う。放射性廃棄物問題の解決策を見つける努力には高い公共性があるので、安全規制当局には、単に従来の営利事業に対する規制要件やガイダンスを規定する役割を越えた重要な役割を果たすことが期待される。その1つとして、オープンで公平な規制プロセスを維持するために、ステークホルダーに対し規制による監督と意思決定のメカニズムを分かりやすく説明する役割が、ますます重要になる。

全体として、高レベル放射性廃棄物の地層処分は技術的努力だけでなく社会的努力である。科学的小び社会的な不確定性存在下の社会的意決定については、実施機関と規制機関おびより広い科学界に従事するスペシャリストのような専門家だけでなく、異なる価値感を持ったさまざまなステークホルダーの間のコンセンサスに達しなければならない。それ故、この厄介な問題解決のためには、さまざまなステークホルダー間のコミュニケーションが不可欠であるので、対話とステークホルダーの関与が廃棄物管理プロセスの中心部分になるような公衆の参加に重要な変化が起こらなければならない。

DAD方式からEIC型コミュニケーションへのパラダイムシフト

人間が空を飛ぶ説明は長らく困難であったに違いないが、ライト兄弟による動力飛行（1903年12月17日、ノースカロライナ州、キティホーク）によって“百聞は一見に如かず”となり、難解な流体力学の説明を聞かなくても、今では誰もが飛行機が空を飛ぶことを理解し、大型旅客機を日常生活で利用している。

高レベル放射性廃棄物の危険性の原因となる放射能は目に見えない、地下深部は直接見ることができない、また、高レベル放射性廃棄物の危険性が継続する遠い将来は経験できない、地層処分の安全性は自然に起こる変遷の科学的予測に基づくため科学的知識なしには容易に理解できないので、地層処分の安全要因は、本質的に“一見”を拒否する側面を内包している。したがって、対話による“百聞”が理解の唯一の手段となり得る。“百聞”といっても、同じことを100回聞かせるということではなく、地層処分の安全性を納得できるまでに必要な情報を何通りでも用意して対話が円滑に進むよう、周到な準備が不可欠である【増田, 2014】。



図 9-2 ライト兄弟による初動力飛行

対話のスタイルはDAD方式を改めなければならない。DADとは、決めた（Decide）ことを子供に伝え（Announce）、子供が異論を唱えても主張を守り切る（Defend）という、頑固オヤジ（Dad）と子供との対話のようなスタイルである。

これまで、さまざまな機会ですばしば行われた地層処分についての対話は、「高レベル放射性廃棄物対策として最善の技術は地層処分である」という主張のDAD方式による展開であった。非専門家が「何故地層処分か?」、「地震の多い日本では危険ではないか?」などの疑問を呈すると、それに答え、さらに異論が述べられると、プレート理論や核種移行メカニズムなど、難解な科学の領域に踏み込んで解説するという流れで行われてきた。専門家が自らの主張を守り切るまで対話を続ければ、やがて非専門家も理解するようになると思い込んだ対話スタイルである。これを改め、技術的関心と社会的関心の両方が建設的な結果に等しく重要であると考ええるEIC（Engage, Interact and Cooperate）（関与を促し、相互に交流し、協働する）型コミュニケーションへのパラダイムシフトが放射性廃棄物分野における国際的な傾向となってきた。

システム1とシステム2の思考

認知心理学者でありノーベル経済学賞を受賞したダニエル・カーネマンは、近著「Thinking, Fast and Slow」【カーネマン, 2012】において、人の認知・判断を導く脳の働きを、架空の2つの異なるシステム（システム1とシステム2と本書では呼ばれている）に分類した思考モードにより説明できると論じている。

システム1はいわゆる感情的システムで、システム2は理性的システムとされている。システム1は人々が本来的に進化の過程で獲得してきた思考モードである。人々は、過去の経験から危険や不利を学び、これを感情や情緒という形で記憶しており、大抵の場合、感情をもとに無意識的、自動的、即座に判断、意思決定をする。経験の持ち合わせがないときには、関連がありそうで似たことを判断の材料にする。たとえば、 $2+2$ の計算は瞬時に、他のことをしながらでも答えが浮かぶ。これに対して、 17×24 の場合は、これがかけ算の問題であることにはすぐ気付くが、まず学校で教わったかけ算のやり方を記憶から呼び出し、1桁目のかけ算の計算結果を覚えておき、2桁目のかけ算と足し算する、という骨の折れる知的作業を必要とする。このように熟考を意識したときだけ発動されるのがシステム2の思考モードである。両者はピアノの演奏を最初に習うときはシステム2を発動させて譜面を見ながら意識して鍵盤をたたくが、システム1で自動的に指が動くようにならないとピアニストにはなれない、といった関係にあるということもでき、表9-1に示すように、特性には大きな違いがある。システム2の主な機能の1つとして、システム1が「提案」した考えや行動を監視し、制御することであり、「提案」を却下し修正するようにはたらく。その例として、次のような問題を直感に従って答える場合が挙げられている。

バットとボールは合わせて1ドル10セント
バットはボールより1ドル高い
では、ボールはいくらか？

浮かぶ答えは多分10セントだが、検算すればすぐに間違いに気付く（1ドル高いバットは1ドル10セントになるので合計が1ドル20セントに。正解は5セント）。しかし、システム2が機能しないと間違いは修正されない。

このように、システム1の思考は多種多様の複雑な情報をさばくには非常に有効で、人は大抵の場合この思考によりうまく意思決定している。しかしその一方、思考の過程に論理的でない飛躍を伴うため、ときに間違えることもある。このため、これをチェックするシステム2の思考が発達してきたとしている。

地層処分に関するコミュニケーションにおいて、地下のことは経験も知識もない、10万年先のことなど考えたことがない非専門家は、高レベル放射性廃棄物問題をどう考えるかと問われたとしても、地層処分により達成される安全のレベルを考えるというシステム2による思考は困難に違いない。むしろ、「原子力」、「放射能」、「廃棄物」、「地層」、「処分」、などの言葉や、原発事故に関する報道などからシステム1が発動して、地層処分を否定的に思考する結果になる可能性が高い。

感情ヒューリスティック（affect heuristic）という概念を開発したポール・スロビック【Slovic, 2010】によれば、私たちが生活の多くの場面で抱く意見や選択には、好き嫌いの感情や恐ろしさ、未知性などの危険に対する感覚による選好が気付かぬうちに表れているという。さまざまな技術について個人的な好き嫌いを言ってもらった上で、それぞれのメリット

表 9-1 2つの情報処理システム【カーネマン, 2012より作成】

	速い思考	遅い思考
名称	システム1（いわゆる感情的システム）	システム2（いわゆる理性的システム）
特徴	日常的に使われる情報処理 （大抵はこれで十分だがときに大きく間違える）	慎重な考慮が必要なときの情報処理 （普段は休眠、怠け者）
機能	経験的システム（経験で類推） 暗黙のモード（知らないまま起動） ヒューリスティック処理（類似物で置換して判断）	分析的システム（合理的システム） 明示的システム システムティック処理
判断に導く思考	定性；大小；多少；善悪；危険、安全；白黒；好き嫌い 感情志向 無意識的・自動的・直観的 具体的イメージや話に基づく判断 快・不快基準 全体論的で印象を重視 素早く、低負荷（ $2+2=4$ ）	定量；計量；検算；科学的思考 論理志向 意識的・制御的・熟考的 抽象的な確率や記号操作に基づく判断 正・誤基準 分析的で個々の論拠を重視 時間がかかり高負荷（ 17×24 ）

表 9-2 非専門家のシステム1に基づく貯蔵と地層処分の認知

	マイナス面	プラス面
地層処分	•地下は見えない、怖い •処分なんて無責任 •何か起こったら大変なことになる	•専門家から安全を説明されても理解できないし、信用できない
貯蔵		•見えるから安心 •実績がある •管理が行き届く •科学の進歩に期待

（プラス面）とリスク（マイナス面）を書き出してもらうという実験では、2つの答えは非常に高い負の相関を示したということである。ある技術に好感を抱いている場合はメリットを高く評価し、リスクはほとんど顧慮しない、逆に、ある技術を嫌いな場合はリスクを強調し、メリットはほとんど思い浮かばないということが判明した、と論じている。

感情ヒューリスティック理論に基づく、「高レベル放射性廃棄物の地層処分」という言葉を聞いて、先に思い付くのはメリットよりもリスクとなり、それを貯蔵による管理や将来技術への期待をメリットとして理由づけるという思考になるものと推定される。このような思考により、地層処分に関する知識や経験がない非専門家は、表9-2のように、貯蔵についてはプラス面が、地層処分についてはマイナス面の感情を含む形で表明されるのは善し悪しの問題ではなく、必然と考えなければならない。

もちろん、専門家の側もこのようなヒューリスティック・バイアスが避けられない。あまり起こりそうもないことの影響や生起確率を懸念する非専門家は過大評価する一方、専門家はこれらを過小評価する可能性もある。非専門家の懸念は、むしろこのような専門家の「自信過剰」に対するものとも考えられる。

このようなヒューリスティック・バイアスによる影響を排除するには、両者ともに客観的情報に基づくシステム2による思考が必要となるが、対話のきっかけはシステム1思考による話題の方が、コミュニケーションが円滑に進む可能性が高いと考えられる。そのため、貯蔵に関する話題を呼びかけて高レベル放射性廃棄物問題への関与（Engage）を促し、表9-2で空欄になっている貯蔵のマイナス面についても話し合う（Interact）段階を経て、システム2思考による解決策に向けた協働作業（Cooperate）ができれば、EIC型対話の進行が期待できる。この際、専門家は非専門家の知識の充実を助ける協働経験によって、非専門家の懸念の本質を正しく受け取り、専門家が有しているかもしれない錯誤や、懸念を払拭するための戦略の不具合を修正することができる。このような相互関係の確立によって専門家に対する不信感が払拭されて対話が進み、非専門家もシステム2により高レベル放射性廃棄物問題を思考するようになって、漸く地層処分問題の対話になるものと考えられる。OECD/NEAの集約意見「放射性廃棄物の地層処分：国を挙げての取り組みと地元および地域の関与」【OECD/NEA, 2012b】では、放射性廃棄物の地層処分に対する社会的合意を確保し続ける

という複雑な課題に対して、「国を挙げての取り組み」と「地元および地域の関与」が、必要不可欠な2要素であるとして、DAD型の説明からEIC型の対話への転換の必要性を論じている。

高レベル放射性廃棄物対策に関するEIC型対話モデル

「高レベル放射性廃棄物は確かな解決策が見つかるまで貯蔵する」という主張から始まる対話の展開を考えてみる。

まず、高レベル放射性廃棄物対策を話し合う上で共有すべき基礎知識として、高レベル放射性廃棄物の危険性、期待できる確かな方法としてどのようなものがあるか、貯蔵施設の形態や、それをどこに置くか、そしてどのような管理をするのか、といった事項についてデータを専門家が準備し、提供する。

高レベル放射性廃棄物の危険性については、時間の経過とともに放射能レベルがどの程度に下がるか、どのくらい先まで有効な対策が必要かなどを示し、人類史を超えた時間スケールの考察が必要なことについて問題提起する。将来に期待される対策技術としては、特に関心の高い「核変換技術」を取り上げ、高レベル放射性廃棄物対策への効果とともに、核変換工程を導入することにより追加的に発生するTRU廃棄物等対策の負担増についても話し合う。また、科学技術の発展による技術オプション拡大の可能性が考えられる一方、実現可能な技術の見通しが付かない限りは貯蔵を継続する必要があること、また、確かな方法の選択肢の1つには、地層処分があることを付け加える。貯蔵施設の場所については、自然災害や人間活動による影響の受けやすさと、管理や問題が生じた場合の是正措置の容易さ等について、地表と地下におけるメリット／デメリットを考えてみる。貯蔵施設の管理については、人間侵入に対する立ち入り制限や、施設と廃棄物の健全性についてのモニタリングと是正措置の方法、施設の更新のための資金や技術の確保の方法等について検討する。管理期間が超長期に及ぶ場合には、管理に必要な人的・財源的資源確保の方策、将来世代への管理継承の確実性なども重要な検討テーマとなる。未来の人間活動の予測と地球科学的な予測に係る不確実性の対比、制度的管理の負担から貯蔵管理の打ち切りに係る意思決定もあり得ることなどについても対話が進むと、地下における貯蔵の場合には、最終的な措置に埋戻し・閉鎖を用意すれば地層処分の状態になることについても、話し合えるようになるかもしれない。

このような対話の発展によって、長期貯蔵と地層処分の両オプションを同じ尺度で議論が行えるようになれば、高レベル放射性廃棄物問題の認識を専門家と非専門家の間で共有した状況となり、システム2思考による解決策の話し合いが軌道に乗るものと期待される。また、対話を通じて、高レベル放射性廃棄物問題における万年単位にわたり有効な対策というものは、人類が初めて取り組む大きなチャレンジであるということに気付き、地層処分の是非を問う議論への積極的参加が促されることも期待される。

ときに不信関係に陥るステークホルダー間の信頼関係構築の重要性に鑑み、問題の認識ギャップを埋めることは、同じ視線での協働的コミュニケーションによってのみ可能となるものと考えられる。

9.4 段階的アプローチ

処分場の閉鎖までの段階的意思決定を可能とする計画の柔軟性

ここ数年の間、国際的にみても多くの国の高レベル放射性廃棄物処分計画で、具体的な処分サイトを視野に入れた事業展開が中心的な課題となるに至っている。

これまでの研究開発の成果によって、安全に地層処分を行う科学技術は成熟してきているといえるが、今後の計画を進めるためには、社会的、政治的、法的、倫理のおよび経済的側面からの配慮が必要となっている。

日本における高レベル放射性廃棄物処分事業は公平性と透明性の観点から公募によってサイト選定が進められている。これは、事業における最初の重要な意思決定に利害関係者である地域住民が積極的に参加する枠組みを整え信頼構築を図っていく上で、極めて重要なものであるという認識に基づくものである。処分事業の実施に当たっては、全段階において、あらゆる事象に対し安全確保を万全とすることが大前提であり、処分場の建設、操業時における適切な放射線防護対策、一般労働安全対策や環境保護に関する諸対策はもとより、処分場閉鎖後においても多重バリアシステムを構築することによって安全を確保し、併せてこれらの安全性について分かりやすく説明する責任を果たすことも重要な課題となっている。

段階的な意思決定による慎重な計画の推進の前提は計画の柔軟性であり、近年は、制度的管理の意義について、地層処分場においても積極的なモニタリングにより、必要に応じて適時に的確な措置を取ることができるような管理を行って、最終的に安全に対する公衆の理解

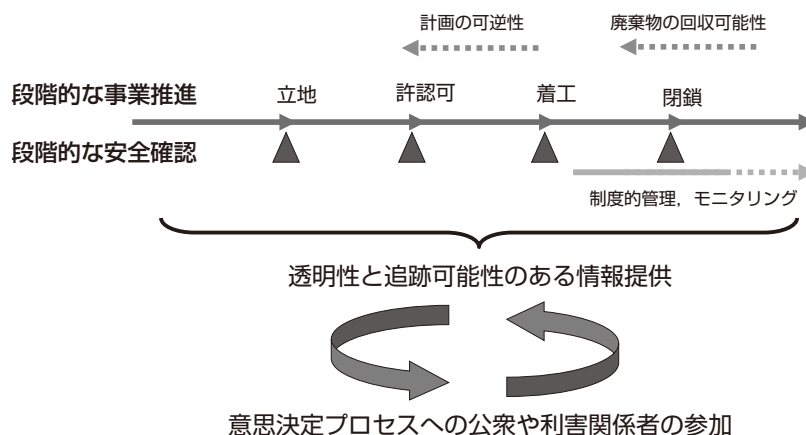


図 9-3 段階的意思決定プロセス

が得られるまでは、地層処分場の閉鎖を行わないという考え方も支持されるようになってきている。

処分施設を埋戻し、処分場を閉鎖することについて、最終的な決定がなされれば、その時点で埋戻し材が充填され、受動的な安全システムに基づく普遍的な地層処分概念が構築されることになる。

OECD/NEAの取りまとめた「放射性廃棄物の地層処分に向けた進展：我々はどこにいるのか／国際的評価」【OECD/NEA, 1999a】においては、段階的な処分の実施が社会的な意思決定の機会を与えるものであるとの認識が示されている。また、「長期的な放射性廃棄物管理に関する意思決定の段階的なアプローチ」【OECD/NEA, 2004】では、放射性廃棄物管理の長期的な解決策を実施するには、一般的に数十年の期間が必要であるため、段階的な意思決定のみが、立案と実施に関する主要な決定を下す上での実現可能な手段であると考えられることとされている。また、「放射性廃棄物管理の戦略的領域－放射性廃棄物管理委員会の見解と活動の方向性」【OECD/NEA, 1999b】においては、次の段階に進めるための決定はセーフティケース（安全を裏付ける論拠を収集したもの）で通常裏付けられるとしている。

全米科学アカデミーは、「ONE STEP AT A TIME：高レベル放射性廃棄物地層処分の段階的開発」【NRC, 2003】の中で、適応性のある段階化（adaptive staging）は地層処分場開発の成功のために有望な手法を提供すること、安全性に対する重大な負のインパクトを持たないこと、セーフティケースの反復的な審査は地層処分場の適応性のある段階化の中心にあること、ステークホルダー（実施者、規制者以外の利害関係者）と一般公衆とのやりとりの機会を増やすとの考え方を示すとともに、これが現在の規制システムと互換性を持つものであるとしている。同報告書は、ユッカマウンテンにおけるDOEの処分場計画について、部分的には適応性のある段階化の原則に沿うものであるが、全体的なアプローチとしてはより直線的であり、適応性があるとはいえないと指摘している。

地層処分の実施計画を段階的に進めるというアプローチは基本的枠組みとして共有され各国で具体化されている。たとえば、カナダでは、「適応型段階的管理（APM；Adaptive Phased Management）」と呼ばれ、不測の事態への対応策として、処分地の浅地中に貯蔵施設を建設する可能性が検討されており、これは暫定的な貯蔵段階を設けることで意思決定過程の柔軟性を確保しようとする考え方である。

地層処分計画の意思決定にはさまざまなステークホルダーが関わり、地層処分の安全性が社会に受け容れられるためには、多様なステークホルダー相互の間に、廃棄物管理の現状、地層処分の緊要性と実施方法、並びに事業や安全確認の進め方などに関する理解が共有され信頼が構築されていることが重要である。このため、それぞれの意思決定過程は、関連するステークホルダーが適切に関与できる透明性を備えたものであることが必要である。

こうした要件に対応するためのアプローチとして提言されているものには、規制機関が安全規制のプロセスを社会一般に公表するだけでなく積極的に広聴・広報活動を行う、あるいは

は独立した第三者の視点を導入するといった方法がある。実際、スウェーデンやフィンランドでは、規制機関自ら処分予定地選定の早い段階から地元公衆との対話を一貫して行っている。米国やフランスでは、議会、実施主体や規制機関とは別の独立した専門家組織が処分事業の適性や透明性について監視する仕組みを設けている。

また、処分施設の立地から閉鎖に至るさまざまな意思決定の時点で、最新の科学技術的な知見に基づき、あるいは政策や社会経済的な理由によって処分計画を柔軟に修正・変更することを可能にするという観点から、可逆性と回収可能性を段階的なアプローチに組み合わせる考え方が注目され、国際的に議論された結果、フランスやスイスのように、この考え方を法律で定めることとした国もある。

地層処分の最終目標は処分場を閉鎖し、システムを受動的な安全系に移行させることにある。「使用済核燃料管理および放射性廃棄物管理の安全に関する条約」によれば、処分施設の閉鎖とは、放射性廃棄物を処分施設に定置した後の全ての作業の完了を意味し、これらには処分施設を長期的に安全な状態にするために必要な最終工事その他の作業が含まれる。処分施設の閉鎖は、放射性廃棄物を処分することについての最終的な行為であり、安全性の観点からは廃棄物を回収する必要があるという意思決定に基づくものである。閉鎖は、科学技術的な妥当性が明らかにされるのみならず、関連する社会に受容されてはじめて行われるものである。

【参考文献】

- (1) NAS (2001). Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel, Committee on Disposition of High-Level Radioactive Waste Through Geological Isolation, Board on Radioactive Waste Management, National Research Council of National Academies, National Academy Press, Washington, D.C.
- (2) OECD/NEA (2006). The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste, OECD/NEA.
- (3) OECD/NEA (1995). The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes, OECD/NEA.
- (4) OECD/NEA (2001). Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste: Reflections at the International Level, OECD/NEA.
- (5) OECD/NEA (2009). Reversibility and Retrievability Project: Phase-2, OECD/NEA, RWMC.
- (6) IAEA (2009). Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability.
- (7) OECD/NEA (2012a). Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste: Considerations for National Geological Disposal Programme, OECD/NEA.
- (8) IAEA (1972). The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States

- Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons. Information Circular INFCIRC/153 (Corrected).
- (9) N. Chapman and C. McCombie (2003). Principles and Standards for Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes, Volume 3, Elsevier.
 - (10) OECD/NEA (2008). Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste, OECD, Paris.
 - (11) J. West and L. McKinley (2006), Building confidence in the safe disposal of radioactive waste, In: Deep Geological Disposal of Radioactive Waste eds. W.R. Alexander, L.E. McKinley, Elsevier.
 - (12) IAEA (2012). International Atomic Energy Agency, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide, No. SSG-23, IAEA, Vienna.
 - (13) OECD/NEA (2012b). Geological Disposal of Radioactive Waste: National Commitment, Local and Regional Involvement: Collective Statement of the OECD/NEA Radioactive Waste Management Committee.
 - (14) 増田純男 (2014). 原安協だより, 第259号.
 - (15) ダニエル・カーネマン (2012). ファスト&スロー (上, 下) あなたの意思はどのように決まるか? (村井章子訳), 早川書房.
 - (16) Slovic, P. (2010). The Feeling of Risk: New Perspectives on Risk Perception, Earthscan Risk in Society, Routledge.
 - (17) OECD/NEA (1999a). Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? An International Assessment, OECD/NEA.
 - (18) OECD/NEA (2004). Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management: Experience, Issues and Guiding Principles, OECD/NEA RWMC.
 - (19) OECD/NEA (1999b). Strategic Areas in Radioactive Waste Management: The Viewpoint and Work Orientations of the NEA Radioactive Waste Management Committee, OECD/NEA.
 - (20) NRC (2003). One Step at a Time – The Staged Development of Geologic Repositories for High-level Radioactive Waste, National Research Council.

第 10 章

地層処分の代替技術としての 核種分離・変換技術の効果

核種分離・変換技術への期待

高レベル放射性廃棄物対策のオプションのうち、廃棄物中の放射性物質によるリスク要因を根本的に取り除くために、廃棄物対策の必要性が議論され始めた数十年前から現在に至るまで、たびたび、核種分離・変換技術の可能性が議論されている。1977年に前述のPolvani報告書において最初に言及され【OECD/NEA, 1977】、米国の放射性廃棄物対策オプションの検討【DOE, 1980】の対象とされ、また、1990年代には日本の提案によりOECD/NEAが国際的な分離変換プロジェクト、「オメガ計画：OMEGA (Options for Making Extra Gains from Actinides and fission products) Programme」を立ち上げたこともあった。

最近では、日本学術会議が原子力委員会に回答した報告書において、暫定保管および総量管理を柱とした高レベル放射性廃棄物処分政策を提言する根拠として核変換技術への期待を挙げている【日本学術会議, 2012】。

このような期待の特徴的な点は、地層処分が社会的合意を形成できない状況を核種分離・変換技術により解決しようとしていることである。

一方、処分のリスクと経済性を軽減できるという核種分離・変換技術への期待については、かなり早い時期から疑問が投げかけられている。

核種分離・変換技術の効果に対する疑問

現在各国で採用されている地層処分概念に輪郭を与えた「NAS1983報告書」の取りまとめに当たったカリフォルニア大学バークレー校のトーマス・ピグフォード教授は、4半世紀も前に核種分離・変換技術に関する以下のような見解を発表している【Pigford, 1990】。その後、この見解が変わるような研究の進展はみられておらず、現在も最も有力な科学的論考と考えられている。

- 核種変換については、テクニカルコミュニティが問題視し、したがって結果的に公衆の疑問となると予想されるいくつかの技術的な争点が存在する。
- 核種変換を支持する人々が主張する利点は処分のリスクを軽減できるというところにあるが、

以下の疑問点がある。

- ・放射性核種の毒性は廃棄物処分のリスクを考慮する上で有効な指標であるのか
- ・公衆へのリスクの指標として用いられる被ばく線量において、地層処分された高レベル放射性廃棄物からの被ばく線量は公衆の健康と安全に問題を与えるようなリスクとなるのか（注記1）
- ・核種変換を支持する人々が仮定するように、地層処分場におけるアクチニド元素によるリスクはアクチニド元素のインベントリに比例するものなのか（注記2）
- ・核種変換によって生成される新たな放射性核種は何であり、それらの核種はどのように変換されるのか、もし新たに生成した核種が変換されないのであればそれらは地層処分のリスクにどのように影響するのか
- ・核種変換に伴う顕在リスクと将来（1000～1万年後）の潜在リスクのバランスをどうみるのか
- ・アクチニド元素の燃焼およびストロンチウム、セシウムの300年間貯蔵の結果として、地層処分場により多くの核分裂生成物を持ち込むことになる利点と欠点は何か
- ・核種分離－変換コンセプトを実現するためのコストはどのくらいか、そのようなコストはアクチニド専焼炉や商業規模再処理施設に対する支出という観点から現実的なものなのか
- ・米国におけるインフラを前提とした場合、多数のアクチニド専焼炉（1.4GWe級を40年間にわたり年1基）とそれを前提とした再処理施設の建設を見越すことに現実性があるのか
- ・再処理とアクチニド元素の燃焼を経て地層処分する場合と使用済核燃料の直接処分の許認可を比較した場合、前者の方が、問題が少ないと言えるのか、核拡散上の問題点はどちらのコンセプトにより多いのか
- ・安全性の支配要因は、廃棄物を地上に置く場合は放射エネルギーとなり得るが、人間環境から隔離された地下に廃棄物がある場合は、人間に影響を及ぼすプロセスに注目する必要がある。そのプロセスを支配するのは廃棄物中の放射性核種が地下水へ移行する量（溶解度）である。したがって、放射能毒性はリスクの支配的要因ではなく、放射能が生態系に達するプロセスとその確率が考慮されるべきである。（注記3）
- ・地層処分の安全解析では、Tc-99、I-129、Cs-135などの長寿命FPによる放射線量が懸念されるが、アクチニドの分離・変換によっては解決不能である。
- ・新たに分離施設と変換施設が必要になり、そのプロセスからさらに廃棄物が増加する。（注記4）
- ・地層処分の安全性が国民レベルまで理解されていないのは、まだ、十分に伝わっていないためであり、不安全なためではない。原子炉の安全性が理解されるようになったのは、つい最近のことである。
- ・核種変換と地層処分のトレードオフは純技術的に成り立たない。技術的に成り立たないものは、結局国民を裏切ることになり、社会的受容に有利とはなり得ない。

ピグフォード見解に関する注記

（注記1）

地層処分されたガラス固化体に含まれる放射性核種が再び人間の生活環境に戻ってくる可能性を支配するプロセスは、地下水による放射性核種の溶解と運搬である。地下水に溶

けた放射性核種が人間環境に到達するには、極めて長い時間がかかるので、その間にほとんどの放射性核種は減衰する。第2次取りまとめ【JNC, 1999a】によれば、残った長半減期の放射性核種が人間環境の近くの帯水層に移行し、それを人間が摂取することにより、内部被ばくとして受ける放射線被ばくは80万年後に自然放射線の数十万分の1程度である。また、これを支配する核種はアクチニドではなく、Cs-135である。

(注記2, 3)

図10-1は、原子炉から取り出し後4年で再処理し、高レベル廃液をガラス固化した時の固化後のガラス固化体に含まれる放射能の時間変化を示したものである。初期の高い放射能はSr-90とCs-137に支配されるが、次第に減衰し、1000年後には約1000分の1にまで低下する。その後Am-241とAm-243に支配される放射能も1万年後には当初の1万分の1となり、その時間帯にはガラス固化体を生じる元の天然にあるウラン鉱石に含まれる放射能インベントリと等価になる。

Pu-239, 240やNp-237などの長寿命アクチニドはもともと放射能インベントリの多い核種ではないにもかかわらず核種分離・変換技術において、しばしば研究の対象とされる理由は理解し難い。地層処分されるガラス固化体において、何らかの困難性の原因となり得ない放射性核種だからである。

さらにこれらの核種は、地層処分されたガラス固化体の安全性を決定する重要な因子である地下水への溶解度が極めて小さく、かつ岩石への吸着性が高いので、極めて小さい被ばく線量さえも支配する核種とはならない。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分によ

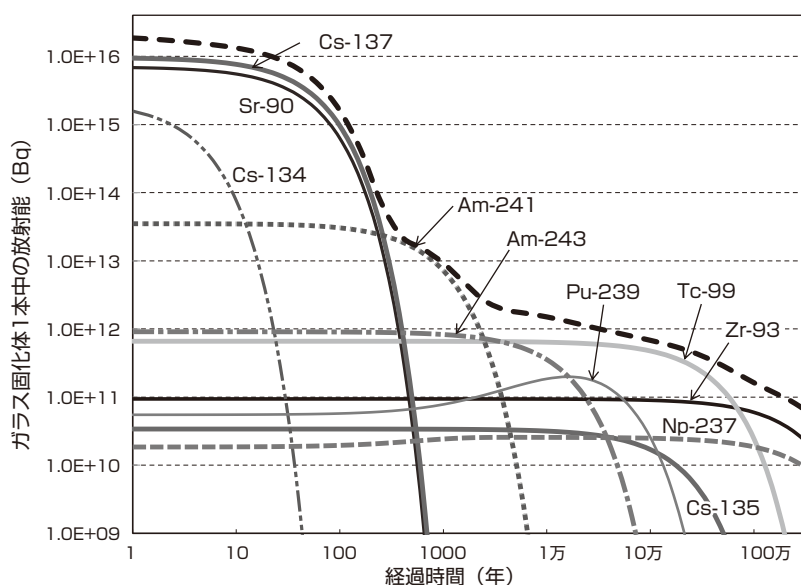


図 10-1 ガラス固化体に含まれる放射能量の時間的変化

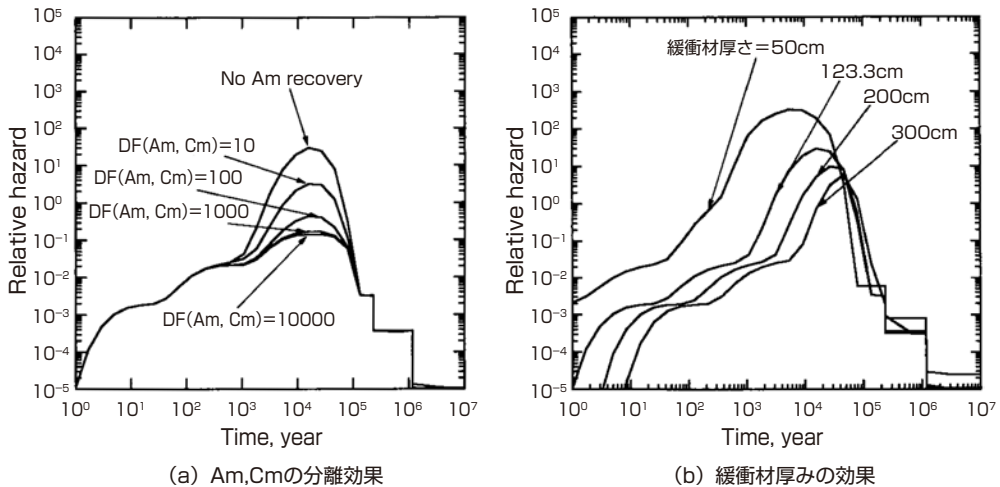


図 10-2 人工バリア外側境界における相対放射能毒性に対するAm ,Cmの分離効果と緩衝材厚みの効果【安, 1995より作成】

る毒性は、地層処分システムの設計パラメータの変更によっても低減され、たとえば図10-2に示すように、緩衝材を厚くすることによって、ピーク値が減るだけでなく、核種分離・変換では得られなかったピーク前の毒性低減が可能であるという評価がなされている【安, 1995】。

処分する廃棄物の総量を減らすことに寄与するかどうかについては、どうであろうか。Np-237を比較的多く含む放射性廃棄物はガラス固化体のほかにも、地層処分対象TRU廃棄物がある。地層処分対象のガラス固化体4万本に相当するTRU廃棄物の総量は約2万6000m³であり、それに含まれるNp-237の総インベントリは 1.1×10^{12} Bqと見積もられている【JNC・電気事業連合会, 2005】。

たとえば、ガラス固化体中のNp-237の99%が核種分離・変換により短半減期の核種に変換された場合、ガラス固化体1本のNp-237のインベントリとしては、元の 1.8×10^{10} Bq/本が 1.8×10^8 Bq/本に下がるが、地層処分する4万本の総インベントリは 7.2×10^{12} Bqとなり、別に地層処分する予定のTRU廃棄物の量と等価である。総量の観点からも、長寿命アクチニドを核種分離・変換する利点はない。

(注記4)

核種分離プロセスには、再処理工程、MOX工程と類似の施設が必要であり、変換プロセスに使われる工程も原子炉と同様の施設が必要となるので、現在の燃料サイクルと同様、TRU廃棄物と低レベル放射性廃棄物が発生する。したがって、ガラス固化体の処分の代わりに、量が多く化学的安定性の点ではガラス固化体より劣るTRU廃棄物をより多く地層処分することになり、取扱量が増えることにより処分場操業の負荷はかえって増すこと

になる可能性が高い。また、遠い将来世代が受ける可能性がある極低レベル放射線被ばくを少なくする代わりに、核種分離・変換作業に従事する作業者の職業被ばくが明らかに増えることになる。良好な放射性廃棄物管理を行う上では、取り扱う放射能の高さとともに取り扱う廃棄物の総量についても配慮しなければならない。

このほかに、処分場の面積を小さくできるというメリットが言われることがあるが、核種分離・変換を導入しなくても処分場設計により、はるかに安価に処分システムを構築することが可能である。たとえばCARE（63ページ参照）はH12デザインに比べて処分場面積を10分の1の面積にすることが可能である。

【参考文献】

- (1) OECD/NEA (1977). Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes.
- (2) DOE (1980). Environmental Impact Statement, Management of Commercially Generated Radioactive Waste, DOE/EIS-0046F.
- (3) 日本学術会議（2012）.「回答 高レベル放射性廃棄物の処分について」.
- (4) Pigford, T. H. (1990). Actinide Burning and Waste Disposal, An Invited Review for the MIT International Conference on the Next Generation of Nuclear Power Technology, UCB-NE-4176.
- (5) JNC (1999a). わ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－総論レポート, 核燃料サイクル開発機構, TN1400 99-020.
- (6) 安 俊弘（1995）. 高レベル廃棄物の消滅処理研究, 原子力学会誌, Vol.37, No.3.
- (7) JNC・電気事業連合会（2005）. TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02.

おわりに

1991年にフランスの放射性廃棄物管理に関する法律を草案したクリスチャン・バタイユ上院議員は、法律を提案する報告書において、以下を結論として締めくくっている。

責任と透明さと民主主義、この3つの言葉が今後廃棄物処分およびより一般的に原子力平和利用政策に関するあらゆる措置を導くものでなければならない。

責任とは、私たちが廃棄物をフランス国内に処分せねばならず、外国に処分すると言う新植民地主義的思考をすべて排除せねばならないからである。他方、私たちはこの問題を今解決すべきであり、将来の世代に、即ち子供たちに問題を押し付けるのは避けなければならない。

透明さとは、90年代は原子力に関した秘密主義文化の終焉を告げるときであり、この産業の起源の軍事的性格がこの厭うべくも執拗な秘密主義的風習の原因であると思われるけれども、ほぼすべてのフランス人が原子力エネルギーの恩恵に浴しているいま、このような態度はもはや許されるものではない。

民主主義とは、これまで権威主義的また官僚主義的方法が主流を占めてきたことによる。この態度は、フランスに於ける原子力エネルギーの開発に何も障害がなかった時期に相応している。研究者や技術者の能力に疑問を呈するわけではないが、これは技術的科学的幻惑に身をゆだねるという危険を伴っていた。現在の事情はこれと違い、国民は情報を強要し、決定に参加することを要求する。長寿命放射性廃棄物の処分に関する限り、報告者の結論は当初の目標に似ているといえると思う。しかし、ここでは民主主義と情報資源に訴え、以前とは別の道を取ることを提案している。原子力と言うエネルギー生産のこの洗練された手法には、開かれた決定手続きで臨むべきである。

我が国に於ける原子力エネルギーの未来は、民主主義を発達させるその能力にかかっている。

【出典：クリスチャン・バタイユ議員による高レベル放射性廃棄物の管理に関する報告書、フランス議会科学技術選択評価局(高橋哲夫訳)、PNC PN1510 91-003,1990年12月】

ここに挙げられている3つのキーワードは、広く国際的に共有されている認識であり、わが国においても1998年の原子力委員会・高レベル放射性廃棄物処分懇談会の報告書において、たびたび言及されている。

この中で、「透明さ」については、秘密主義を排してオープンに、ということは言うまでもないことであるが、それだけでなく、地層処分の概念や安全性を説明するために必要な情報の“Transparency”については「明瞭性」という意味も含まれなければならない。曇りガラス越しに見るとネコとイヌの区別が付きにくい、透明なガラス越しに見れば誰でもハッキリとイヌかネコかを認識できるという意味での透明さがより重要な意味合いである。地層処分の実施段階に入り、地層処分概念を正しく理解することは、既に専門家の間における共通認識だけでは不十分となっており、地層処分の考え方が全てのステークホルダーに

「ハッキリと見える」ようになることは、今後の最も重要な課題の1つである。

地層処分することを同じ時空間で実証的に再現することはできないことから、予測解析という科学的手段によってその概念を浮かび上がらせるために、1980年代に“性能評価”という方法が用いられるようになった。そして各国で性能評価を司令塔においた包括的な研究開発が進められ、地層処分場とそのセーフティケースを構築するための技術情報が相次いで取りまとめられてきた。性能評価は地質学、地球化学、土木工学、原子力工学、化学工学、材料工学、溶液化学、数理学、情報処理工学など、多くの科学技術分野の知識を必要とする。このような多分野の専門分野の協力の組み合わせは地層処分の研究開発が契機となって初めて生まれたものであり、これにより専門家の間で地層処分概念やその安全性が「見える」ようになってきた。

一方、社会一般における地層処分概念やその安全性の理解はわが国を含め多くの国において顕著には進んでいない。その根本理由は地層処分概念には本質的に“見えない”側面があるため、感覚的にはなかなか理解しにくいものであり、また、専門家から説明を受けて「見える」ようになるには、ある程度の科学的知識が必要だからと思われる。以前、「地層処分の専門家は音楽を楽譜で説明しているようなものだ。演奏して聞かせなければ専門家以外の人にはわからない」といわれたことがある。専門家でなくても何らかの方法で実感できる、あるいは一部でも“見える”ようにできれば、人々が地層処分概念を理解する助けになることは間違いない。たとえばヴァーチャル・リアルティ技術や物理探査技術の高度化などによって「誰でも地層処分が見えるようになる技術」の開発は地層処分研究の新たな研究領域として今後挑戦する価値のある課題ではないかと思われる。

索引

数字

- 5段階研究開発計画 32
- 1982年放射性廃棄物政策法 27

C

- CARE概念 63
- Coady報告書 28

D

- DAD方式 103

E

- EIC型コミュニケーション 103
- ENTRY計画 41
- Environmental Impact Statement 10

H

- H3 44
- H12 44

I

- IRG報告書 26

K

- KBS-3 35

N

- NAS1983報告書 33

P

- PACE計画 41
- Polvani報告書 24
- Projekt Gewähr '85 35

R

- rolling present 53
- ROST報告書 95

あ

- 安全コミュニケーション 100
- 安全評価 68

い

- 意思決定プロセス 53, 100
- 井戸注入処分 12

う

- 宇宙処分 12
- 埋戻し材 59
- ウラン鉱石 7

え

- 永久管理 29
- エンドポイント 8

お

- オーバーパック 59
- オクロ 25
- 汚染者支払いの原則 28
- オメガ計画 112

か

- 回収可能性 26, 98
- 回収可能地表貯蔵施設 20
- 海洋底下処分 11
- 拡散方式 21
- 核種移行 70
- 核種分離と核変換 112
- 核変換 12
- 隔離機能 57
- 隔離・閉じ込め性能 34
- 火山 51
- 火山活動 75, 76
- 仮想的シナリオ 75
- カナダ原子力公社 23
- ガラス固化体 6
- ガラス固化体とウラン鉱石の放射能の比較 8
- 岩塩層 19, 25
- 環境アセスメント 10
- 環境安全の確認 38
- 環境影響評価書 10
- 頑健性 56
- 緩衝材 59
- 感情ヒューリスティック 105
- 岩石溶融処分 11

間接的実証 78

き

気候・海水準変動 91

希釈と分散 53

客観性 79

凝灰岩 39

け

原位置試験 19

原位置試験計画 41

検索の容易性 79

原子力委員会環境・安全専門部会報告書 22

原子力委員会決定 30

原子力委員会報告書 21

原子力バックエンド対策専門部会（BE 部会） 42

玄武岩層 39

こ

工学技術開発 39

硬岩層 25

鉱山型地層処分 26

高レベル放射性廃棄物 6

国際共同研究計画 42

国際ストリパ計画 27

コロイド 59

さ

再現性 79

サイト選定 39

し

地震 51

地震・断層活動 76

システム1 104

システム2 104

シナリオ 89

収着効果 34

重点項目報告書 37

受動的機能 56, 78

受動的なシステム 29

受動的バリア機能 57

準閉じ込め方式 21

処分技術開発 40

処分場概念カタログ 61

処分場の深度 60

深海投棄 22

人工バリア 39, 57

信頼構築 100

す

スイス放射性廃棄物管理組合 23

垂直ボアホール方式 62

水平ボアホール方式 62

水理力ゴ方式 62

水理特性 34

水理バリア方式 62

スウェーデン核燃料管理会社 23

せ

制度的管理 74

性能評価 39, 79

性能評価研究 40

セーフティケース 88

接近シナリオ 73

た

第1次取りまとめ 42

大空洞内定置方式 62

第2次取りまとめ 42

多重バリアシステム 58, 78

楯状地 39

段階的アプローチ 108

断層 51

ち

地下水移行経路 34

地下水シナリオ 70

地下水接触の抑制 38

地球化学特性 34

地質環境単元 40

地質環境の安定性 82

地質環境の調査研究 40

地層処分研究開発協議会 45

地層処分研究開発計画の策定 30

地層処分研究開発の全体像 31

地層処分システム 27

地層処分選択理由	52	包蔵性	56
超深孔処分	10	保証プロジェクト`85	35
直接接近経路	34	よ	
貯蔵の現状	8	溶解度	34, 59
つ		溶出・移動の抑制	38
追跡性	79	り	
て		リスクの解釈の例	72
天然バリア	57	離島処分	11
と		隆起・侵食	75
透明性	79	倫理的原則	88
特性評価	79	倫理的合理性	52
閉じ込め機能	57	ろ	
閉じ込めと隔離	53	ロンドン条約	30
閉じ込め方式	21		
な			
ナチュラルアナログ研究計画	41		
に			
ニアフィールド	38, 40, 84		
ニアフィールドアプローチ	39		
ニアフィールド性能評価研究	39		
人間侵入	74		
ね			
粘土質層	25		
は			
バリア機能	25		
ひ			
微生物	59		
ヒューリスティック・バイアス	106		
評価時間枠	91		
氷床処分	12		
品質管理	78		
品質保証	78		
ふ			
ファーフィールド	38, 40, 84		
不確実性	90		
プリンストン会議	19		
ほ			
放射能インベントリ	34		
放射能の推移	7		

〔著者紹介〕

増田 純男（ますだ すみお）

（公財）原子力安全研究協会研究参与。1944年東京生まれ，成蹊大学工学部大学院修士課程修了，1969年動力炉・核燃料開発事業団（現「日本原子力研究開発機構」）の第一期生として入社しプルトニウム燃料開発に従事，1976年に新設された廃棄物対策室にて高レベル放射性廃棄物の処理処分研究開発に従事，その間，カリフォルニア大学バークレー校にて高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価研究に参加して以来，地層処分研究開発に従事し，1999年に「地層処分研究開発第2次取りまとめ」を統括した後，2000年に原子力発電環境整備機構理事に就任，2003年から3年間OECD/NEAの放射性廃棄物管理委員会ビューローメンバーを務める。



高レベル放射性廃棄物を地下深く^{しま}終う地層処分

2016年12月9日発行

[著者] 増田 純男

[監修] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

[発行] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0052

東京都中央区月島1丁目15番7号 パシフィックマークス月島8階

TEL 03-3534-4511 (代表) FAX 03-3534-4567

URL <http://www.rwmc.or.jp/>

[組版・印刷] 株式会社ERC出版

〒107-0062

東京都港区南青山3-13-1

TEL 03-3479-2150 URL <http://www.erc-books.com>

乱丁・落丁本はお取り替えいたします。

本書の転載などの問い合わせは(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター
企画部までお願いいたします。