

本資料は 09 年 8 月 9 日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

放射性廃棄物対策における基本的情報に関する調査研究(II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1992年2月

財団法人 エネルギー総合工学研究所

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。注)

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

放射性廃棄物対策における基本的情報に関する調査研究（Ⅱ）

蛭沢 重信*

要 旨

放射性廃棄物対策、特にその長期的対策を確立する過程において、先ずは廃棄物を直接の専門とはしない関連する領域の専門家の理解と合意の元に研究開発が進められることが重要であるため、共通の認識を普及させることを目的とする。

このような関連領域の専門家のためには、廃棄物問題を理解し、自らが判断を下すのに必要な情報（以下、これを「基本的情報」と呼ぶ）との接触が容易でなければならない。

基本的情報の一つとして、放射性廃棄物、特に高レベル放射性廃棄物処分の長期の安全性を示すことに関する問題をとり上げた。国際的な議論、専門家の間でコンセンサスが得られていることなどについて、OECD/NEA、IAEAから出版された報告書に基づいて資料の作成を行った。

廃棄物を直接の専門としない有識者や専門家により構成される懇談会の場において、群分離・消滅処理と地層処分について意見交換・議論を行い、この問題に関する論点に基づいてそれら意見の整理を行った。この懇談会を通じて、群分離・消滅処理に関しては、地層処分との関係も含めて有識者や専門家の意見も入れたあるひとつの基本的な文書の作成の可能性が示唆された。

本報告書は、財団法人エネルギー総合工学研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：030D0101

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発推進本部処分グループ主幹 増田 純男

*：財団法人エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 主任研究員

Research on
the Fundamental Information for the Management of Radioactive Wastes(II)

Shigenobu HIRUSAWA *

In the course of establishing the management method of radioactive wastes, it is important to obtain the understanding and agreement of the scientists and researchers in the relevant fields. The purpose of this research is to disseminate fundamental information to such scientists and researchers, and to obtain the common understanding.

There are too much publications on the management of radioactive wastes in the world. In this research, we selected the issue related to the long-term safety of high-level radioactive waste disposal. We drew up the basic document based on the fundamental publications by IAEA and OECD/NEA which has mentioned the state of the art and the consensus of specialists of this issue.

We hold the meeting of which members are the intelligent including scientists and researchers, to discuss the relation between the partitioning and transmutation of radionuclides and the disposal of HLW. We could get many opinions and comments on this issue, and analysed those in detail.

We recognized that it is necessary and possible to draw up the basic document on this issue including those opinions and comments.

Work performed by The Institute of Applied Energy under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liasion: Sumio Masuda, Isolation System Research Program, Radioactive Waste Management Project

*: Research and Development Division, The Institute of Applied Energy

目次

1. 序	1
2. 放射性廃棄物基本情報計画の概要	3
3. 基本的情報のとりまとめ例 —長期間の安全性をどのようにして評価するか—	6
3.1 高レベル放射性廃棄物処分の目標と特徴	6
3.2 工学施設の安全評価と地層処分の安全評価	8
3.3 長期間の安全性を示すことに関する一般的な疑問	12
3.4 専門家は長期間の安全性をどのように示そうとしているか	14
3.5 安全評価研究の実例	26
3.6 安全評価に関する専門家のコンセンサス	28
4. ハイレベル懇談会における専門家の意見 ・群分離、消滅処理と廃棄物対策について	30
参考資料 高レベル放射性廃棄物の処分とはどういう問題か	42

資料—1	放射性廃棄物の処分：長期の安全性は評価しうるか	74
	(OECD/NEA 1991) 要旨の翻訳	
資料—2	放射性廃棄物の処分：安全評価手法のレビュー	83
	(OECD/NEA 1991) 要旨の翻訳	

1. 序

放射性廃棄物対策、特にその長期的対策を確立するプロセスにおいて、最終的には社会的な理解と合意を得ることが不可欠であるが、その前提として関連する領域の科学者、研究者の理解と合意のもとに研究開発が合理的に進められることが重要である。

このためには科学者や研究者が、廃棄物問題を正しく認識し、適切な判断を下すために必要な情報（基本的情報）が提供されることが必要である。放射性廃棄物に関連する情報の量は極めて膨大であり、その内容も多種多様であること、さらに今後も加速度的に増加する傾向にあることからみて、現実には、科学者や研究者が上述の意味において必要な情報を得ることは容易ではない。

本調査研究は、廃棄物を直接の専門としない広範な分野の専門家をも対象として、①要求される「基本的情報」とは何か、②情報の伝達方法として何が適切であるかを明らかにするとともに、③①の「基本的情報」に②の伝達手段を適用して、「基本的情報」の理解と共有も促進に資することを目的として、平成2年度から開始されたものである。

昨年度は第1年目の活動として、・廃棄物問題が内包している個々の要素をみることによって基本的情報のフレームワークを示し、・廃棄物問題を直接の専門としない広範な分野の専門家を含むハイレベル懇談会を設置して、基本的情報と考えられるものの中からテーマを取り上げて予め整理した論点等を説明した上で意見の聴取をおこない、それら意見の整理分析を行った。また、・基本的情報の取りまとめとして、地層処分に関する原則について、国際機関の報告書に基づいて文書の作成を試みた。

本年度の調査研究も基本的には昨年度からの継続として実施したものであり、

- ① 基本的情報として、高レベル放射性廃棄物処分の問題を議論する時によく提示される、この問題に特有な「長期間の安全性をどのようにして評価するか」あるいは別の表現をすれば「長期間の安全性は示すことができるのか」ということについて国際機関での議論を中心にして取りまとめる作業を行った。
- ② ハイレベル懇談会では、高レベル放射性廃棄物の処分問題とその研究開発の位置づけが議論の対象になる群分離・消滅処理を取り上げ、「群分離・消滅処理と地層処分について」として意見交換、議論を行った。懇談会での結果については、事前に整理してあった論点に基づいて意見の整理を行った。
- ③ 「高レベル放射性廃棄物の処分とはどういう問題か」と題する資料を別途作成したので

参考として示した。この資料は、本調査研究と同様の趣旨の基に当研究所において作成したものである。

2. 放射性廃棄物基本情報計画の概要

ここでは、昨年度の報告書で述べた、放射性廃棄物基本情報計画の概要について改めて掲載した上で、本年度はその計画に則してどのようなことを実施したかを示す。

本計画では、

(1)まず、要求される基本的情報とは何かについて考える。

(2)次いで、情報の伝達方法として何が適切かについて検討して、次第に明らかにしていく。

(3)更に、廃棄物に関する基本的情報をとりまとめて、主として廃棄物を直接の専門としない広範な分野の専門家を対象にして提供し、この問題の共通認識を得るように努める。

(1)の「要求される基本的情報とはなにか」については、広範な分野の専門家のみならず、政策決定者、社会学者、広く一般公衆と、全ての人々に共通の認識を持って貰う情報があり得る。すなわち、この問題についてそれらの人々が一堂に会して議論を行うことを想定してみたとして、先ずは共通して持たなければならない最低限の情報という性格のものである。例えば、「放射性廃棄物とは何か」、「放射性廃棄物の特徴は何か」、「放射性廃棄物は現在どのように取り扱われているか」、「将来どのように放射性廃棄物を取り扱おうと考えているのか」、「研究開発はどこでどのようなことが行われているのか」など、放射性廃棄物の基本諸量とか特性に関するもの、その取扱いの現状や将来計画といったような情報が考えられる。

次に、もう少し専門的な領域に立った議論を期待する場では、そこに参加する広い分野の専門家（技術系のみならず人文系の方も）にとっては、そのような情報の上に更に現在、国際的な場でこの問題がどのようなところまで議論されているかについての情報が必要になる。比較的この分野では、国際的な議論の成果や過程が極く限られた範囲のいわゆる廃棄物の専門家にしか知られておらず、従来の種々の会議での議論では、そのような国際的な場での議論が十分伝えられて行われてきたとは言いがたい。放射性廃棄物の処分問題がすでに国際的なレベルでの関心事になっており、専門家による国際的

な場での議論がかなり進められている以上、そのような場で行われた議論の成果や過程を共通の認識として共有することは関連する領域の専門家にとっても必要である。従って、国際的な議論が行われてきている IAEA や OECD/NEA などではどのようなことが議論されてきて、どのような結論が得られ、又は課題として残されているかといったことを誰でもが利用できるようにまとめて示すことが必要である。

この計画では、今述べたうちの前半は勿論ではあるが、後者に主に力を注いでそのような情報をなるべく網羅して取り上げ、その中から伝えるべき基本情報は何かを良く分析、検討し、その上でその内容を誰もがトレースできるような文書を作成する。

(2)の「情報の伝達方法として何が適切か」については、

①有識者を中心にした懇談会において情報を提供し、意見交換を行う。

②作成した文書を関係者に随時配布する。

の二つを当面行うこととするが、

このうち、①の懇談会形式については、取り上げた情報の適切さ、情報の伝え方の適切さ、情報の内容の分かり易さや適切さなどについてその場で得られる意見に基づいて、更に伝達すべき基本情報、その伝達の仕方、情報の示し方など常により良いものにするを行う。更に、懇談会に参加する人々を固定するのではなく内容に応じて参加者を変えるなどして、いろいろな領域の人々の意見を聞けるようにする。このような反復する過程を通じてどのような人々がどのような情報を欲しているかを分析して、情報を伝える対象に応じた情報とその伝達方法を粘り強く、徐々に的確なものとしていく。

このような情報伝達の繰り返しを行いながらある程度文書としてまとまった段階で広く関係者に配布する。

(3)の「廃棄物に関する基本的情報をとりまとめて、主として廃棄物を直接の専門としない広範な分野の専門家を対象にして提供する」ことについては、

(1)で述べたように、主として国際機関等で議論されてきている事柄について簡潔にしかも要点をはずさないようにして文書を作成し、(2)でのべた懇談会などにより情報として提供して意見交換を行う。

上記基本的情報計画に沿って本年度行った活動の概要について述べる。

(1)の「要求される基本的情報とは何か」に関しては、二つのテーマを取り上げた。

一つは「長期間の安全性をどのようにして評価するか」という問題であり、もう一つは「群分離・消滅処理と地層処分について」である。

高レベル放射性廃棄物の処分問題が議論される際には、その潜在的な毒性が従来の工学システムで考えられてきた時間枠を大幅に越える長期にわたることから、その長期の安全性をどのように示すのか、また示すことが出来るのか、といった疑問が常に提起されている。長期間の安全性を示すこと、あるいは言葉を変えていえば安全評価に関しては、国際原子力機関等が主催した国際会議が多くの専門家を集めて1989年にパリで開催されたこと、この国際会議を契機として経済協力開発機構／エネルギー機関から専門家のコンセンサスを取りまとめた文書が1991年に発行されたことなどがあり、基本的情報として取りまとめるには非常にタイムリーであることから対象にした。

群分離・消滅処理と地層処分の問題については、それぞれの間の関係であるとか、群分離・消滅処理研究の廃棄物対策の中での位置づけなど、余り明確には議論がされてこなかった問題であり、過去のハイレベル懇談会においてもしばしばこのテーマについて議論を望むとの声があった。この研究は、わが国内のみならず、日本のイニシアチブのもとで国際的な研究としてもすでに進行している実績があるので、どのような考え方で、どのような研究開発が実施中あるいは計画されているかを研究の当事者から説明を受けた上で議論を行った。計画の概要の中でもあるように「懇談会に参加する人々を固定するのではなく」との趣旨に従って、この懇談会には研究開発の当事者ばかりでなく、研究開発計画の策定にも深く関わった専門家も参加した。この懇談会の開催は、(2)の「情報の伝達方法として何が適切か」を実施したのものである。

(3)の「廃棄物に関する基本的情報をとりまとめて、主として廃棄物を直接の専門としない広範な分野の専門家を対象にして提供する」ことについては、別途、当研究所として、原子力に関係が深い人々または関心の深い人々ではあるが、直接高レベル放射性廃棄物処分の問題に係わってはいない人々を主に対象として今どのようなことが行われていて、これから更に対処しなければならない問題点は何か等について参考になる小冊子を作成することを計画している。その第一冊として「高レベル放射性廃棄物の処分とはどういう問題か」を作成したので参考として示すことにした。

3. 基本的情報のとりまとめ例

—長期間の安全性をどのようにして評価するか—

この節では、高レベル放射性廃棄物処分の長期間の安全性をどのようにして評価するか（安全評価）という問題について、専門家間で議論されている事柄に基づいてコンセンサスが得られている点、議論となっている点等を簡潔に整理して紹介することを目的とする。

このため、まず 3.1節では、安全評価について考える出発点として、放射性廃棄物処分の目標はどういうところにあるかを改めて整理した。3.2節では、比較的一般的に馴染みのあると考えられる工学施設、ここでは原子力発電所の安全評価の目的と概略を簡単に示した上で、放射性廃棄物処分の安全評価の持つ特徴が理解されるようにした。3.3節では 3.2節で明らかにした放射性廃棄物処分の安全評価上の特徴から、一般に言われる疑問を提示した。続いて 3.4節では 3.3節で示した疑問に関連して専門家の間では放射性廃棄物処分の長期間の安全性をどのように評価しようとしているかについて紹介した。3.5節では、今まで行われた安全評価の実例について簡単に紹介した。最後に 3.6節で専門家の間で、長期間の安全性の評価に関してコンセンサスが得られている点について紹介した。

3.1 高レベル放射性廃棄物処分の目標と特徴

放射性廃棄物処分の目標に関しては、1982年に経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)から出版された報告書「放射性廃棄物の処分 含まれる原則についての考察」において次のように表現されている。すなわち、

廃棄物処分の目標は、人間の健康および環境を防護する方法で廃棄物が扱えることを確実にすること、並びに同時に社会的および経済的要因を考慮しても将来世代にかかる負担を最小にすることである。

この第一義的な目標に対して、それを具体的に実現させるための技術的な方策に関して同じく OECD/NEA から 1991 年に出版された報告書「長期間の安全性は評価しうるか？」において次のように述べている。すなわち、

放射性廃棄物処分システムは、環境への放射性物質の将来の潜在的な放出が受け入れられないリスクとならないことを確実にするために、必要な期間人間および環境から廃棄物を隔離するように設計される。

ここでは、先に示した廃棄物処分の目標を、放射性廃棄物を隔離することによって達成することとし、そのために必要な期間人間および環境から廃棄物を隔離するための要件を満たす処分システムを採用することを述べている。

さらに「隔離するように設計される。」ことに関しては次のように述べている。

高レベルで長寿命の廃棄物については地質媒体中の深い地下に建設されることが広く考えられている。

これら放射性廃棄物処分の目標と目標を達成するための方策の要点を簡潔にまとめると次の通りである。

廃棄物処分の目標

- ・人間の健康と環境を防護すること
- ・将来世代にかかる負担を最小にすること
- ・技術のみならず社会的、経済的要因を考慮すること

目標を達成するための方策

- ・人間および環境から放射性廃棄物を隔離すること
- ・処分システムとして設計すること
- ・必要な期間にわたって考慮すること
- ・環境への放射性物質の潜在的な放出を考慮すること
- ・リスクを考慮すること
- ・地質媒体中の深い地下への建設が考えられていること

3.2 工学施設の安全評価と地層処分の安全評価

3.2.1 原子力発電所の安全評価の概要

(1)安全評価の目的

原子力発電所を運転すれば、それに伴って原子炉内に多量の放射性物質が蓄積される。原子力発電所の安全評価では、この原子炉内に蓄積された放射性物質が原子力発電所施設外へ放出されることによって公衆に過度の被曝が生じないことを確認することが最大の目的である。

具体的な目的については、施設が安全に設計されているかを審査するという観点から、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）（以下「安全評価指針」と略す）の「安全設計評価の目的」において次のように述べられている。

原子炉施設の安全設計の基本方針の妥当性は、「安全設計審査指針」によって審査される。原子炉施設の幾つかの構築物、系統及び機器は、通常運転の状態のみならず、これを越える以上状態においても、安全確保の観点から所定の機能を果たすべきことが、「安全設計審査指針」において述べられている。したがって、原子炉施設の安全設計の基本方針の妥当性を確認する上では、以上状態、すなわち「運転時の異常な過度変化」及び「事故」について解析し、評価を行うことが必要である

このため、放射性物質に対して多重の工学的な障壁を設けることにより、過度の放射線被曝が生じるような事態に至らないように多重障壁による深層防護の考えに基づく設備の設計が図られている。多重障壁としては、燃料ペレット、燃料被覆、一次冷却材圧力バウンダリ、原子炉格納容器と呼ばれるようなものである。

(2)安全評価の方法

まず、原子力発電所が実際に考えられる外乱や故障または万一の事故に対して、どのように応答し、どのような事態になるのかを具体的に検討する安全解析を実施する。これはあくまでも原子力発電所内を対象とした解析である。この解析に基づいて、先に述べた、燃料ペレット、燃料被覆、一次冷却材圧力バウンダリ、原子炉格納容器などの障壁の健全性の度合いを調べ、障壁に損傷があると判断される場合にさらに放射性物質の放出の様相、一般公衆に与える影響の度合いを評価するのが安全評価である。このような作業を行うこ

とによって、原子力発電所の具体的な設計の安全上の妥当性を確認することになる。

(3)安全評価の範囲

安全評価の対象とする範囲は、「安全評価指針」の「評価すべき範囲」において明確に示されている。

①運転時の異常な過度変化

原子炉の運転中において、原子炉施設の寿命期間中に予想される機器の単一の故障若しくは誤動作又は運転員の単一の誤操作、及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって生じる異常な状態に至る事象を対象とする。

②事故

「運転時の異常な過度変化」を超える異常な状態であって、発生する頻度はまれであるが、発生した場合は原子炉施設からの放射性物質の放出の可能性があり、原子炉施設の安全性を評価する観点から想定する必要のある事象を対象とする。

このように、原子力発電所の安全評価で対象とする事象の範囲は、工学的な施設であるが故に当然のことながら、その発生の頻度は少ない（まれ）であるにしてもそのプロセスが全く予想できないものを対象にするのではなく、理論的あるいは工学的に可能性が考えられる事象を対象にしている。

また、安全評価が対象にする期間は、原子力発電所の寿命期間中である。

3.2.2 地層処分安全評価の概要

(1)安全評価の定義

国際原子力機関(IAEA)から出版された「放射性廃棄物管理用語集」によれば、安全評価およびそれに関連して安全解析の定義を次のように述べている。

安全評価(safety assessment)

安全解析の結果を、受入れの規準、その評価および評価されるシステムの受入れ性に関してなされた結果としての判断と比較すること。

(A comparison of the results of safety analysis with acceptability criteria, its evaluation, and the resultant judgements made on the acceptability of the

system assessed.)

安全解析(safety analysis)

提案される活動を実行することに関する危険度（リスク）の解析と計算。

(The analysis and evaluation of the hazards (risks) associated with the implementation of a proposed activity.)

(2)安全評価の目的

国際原子力機関(IAEA)から1981年に出版された安全シリーズ No.56「放射性廃棄物の地下処分のための安全評価」の第2章「安全評価の目的と手順」において、安全評価の目的を次のように述べている。

安全評価の目的は、地下処分システムの安全に関連する施設の予期される性能、特に処分場から人間への放射性核種の移行の可能性について解析し、このような安全解析の結果を受入れ規準と比較し、さらにシステムと計画された活動の受入れ可能性について適切な判断を行うことである。

さらに、安全評価の結果については、適切な規制機関によって以下の目的のために使われるであろうことを述べている。

- ① 関連する受入れ規準に比較して、サイトが受入れられるかどうか、また処分場が建設され、操業され、閉鎖され、さらに密閉されるであろうか、ということについて決定を下すため
- ② 関連する防護と保護のためのシステムと方法（封じ込め、バリア、システムの安定性等）が仮定したように機能するかどうかを評価するため
- ③ 処分場の設計、操業およびサーベイランスのための必要な「認定限度」と仕様（廃棄物の調整のための要求事項、温度限界、放射能レベルなど）を決定するため
- ④ 伝統的な安全に関する規準および環境保護と資源保護のための規準に従ってしることを確認するため
- ⑤ 処分による総合的な放射線学的影響を評価するため

(3)安全評価の方法

安全評価の方法に関しては、経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)が1991年に出版

した報告書「放射性廃棄物の処分：長期の安全性は評価しうるか？」の参考1「安全評価手法の現状に関する要約」の「一般的アプローチ」において次のように説明している。

- ① 選定された処分システムの可能性ある将来の展開の
広範な同定（シナリオ開発）
- ② 適切なモデルの開発と適用
- ③ 総合的な評価による潜在的な放射線学的結果の評価
- ④ 不確実性解析および感度解析
- ⑤ 評価の全ての構成要素の確証とレビュー
- ⑥ 評価結果の規準との比較評価
- ⑦ 評価の文書化

(4)安全評価の範囲

「(2)安全評価の目的」の中でその対象とする範囲がすでに示されている。すなわち、物理的な広がりに関しては、処分のために設計される廃棄物処分システムと周辺の地質環境、ならびに人間への放射性核種の移行の可能性について解析することから処分場から人間に至る地質環境まで含まれることになる。

また、時間的な広がりに関しては、建設、操業、閉鎖段階は勿論であるが、地層処分ではむしろ処分場を閉鎖した後が安全評価の主な対象になる。

3.3 長期間の安全性を示すことに関する一般的な疑問

高レベル放射性廃棄物の処分に関して、計画された処分システムの長期的安全性を示すことについて 3.2節で示したように、従来の工学施設とは異なる特徴を有することからいくつかの一般的な疑問が上げられる。例えば次のようなものである。

- ① 高レベル放射性廃棄物の潜在的な毒性は非常に長い、そのようなものの処分の安全性は果して示すことができるのだろうか？
- ② 安全性を示すための技術的な方法はあるのだろうか？
- ③ 担当者は、技術的にはどのような考え方と方法で安全性を示そうとしているのだろうか？
- ④ 評価のための技術はすでにあるのだろうか？
- ⑤ そのような技術が未だ確立されていないとすれば、どの程度までの開発が進んでいるのだろうか？

また、OECD/NEAの報告書「放射性廃棄物の処分：長期の安全性は評価しうるか？」においては、通常の社会的および技術的計画の範囲を遙に超えた時間スケールにわたって処分の安全性を解析することに関して、次の3つの重要な疑問が上げられている。

- ・ 処分システムのふるまいや人間および環境への潜在的な放射線学的影響は、高レベルで長寿命の廃棄物について数千年を超える範囲にわたって十分に良く理解されうるであろうか？
- ・ 専門家および管轄機関は、予測したふるまいが実際に起こることを代表している、ということを確認を持って示しうるであろうか？
- ・ 潜在的な放射線影響をそれらの影響の見積もりの意味が、広く一般の人々に対して分かりやすく説明されうるであろうか？

これらの疑問を整理すると、次のようにまとめられると考えられる。

- ① 長期間の安全性を示す可能性
- ② 専門家の予測の代表性
- ③ 一般の人々への分かりやすい説明
- ④ 長期安全評価の技術

⑤ 技術の現状

次の節では、これらの疑問を中心にして、専門家の間で行われてきている安全性を示すことに関する考え方、研究の現状、議論の重点等について紹介する。

3.4 専門家は長期間の安全性をどのように示そうとしているか。

この節では、前節で示した疑問点を中心に置いて、専門家の間で検討が進められている、安全性を示す考え方、研究の現状、議論の力点等について、OECD/NEAの文書「放射性廃棄物の処分：長期の安全性は評価しうるか？」を主に取り上げて、概略どのようなことを述べているのかをまとめる。

同報告書の流れも考慮して、次のような順序でこの節を進めることにする。

- ① 長期の安全性を評価する必要性
- ② 地層処分の場合長期の安全性を示すとはどういうことか
- ③ 地層処分の安全評価の一般的な方法
- ④ 安全評価から期待されること
- ⑤ 安全性の判断の問題

3.4.1 長期の安全性を評価する必要性について

長期の安全性を評価する必要性に関しては、次のように述べている。

- ① 放射線学的な潜在的長期毒性は、明白に認められているし、少なくとも、我々が受け入れているものと等しいレベルで将来の世代を防護することを保証する責任は広く受け入れられている。
- ② 提案される解決策の長期安全性が、処分に先立って人を信用させるように示されなければならない。

このように要旨の中で、この問題が特に放射性廃棄物に特有な問題であるのではなく、放射性廃棄物を含めてどのような有害廃棄物であれ、その人間および環境への潜在的な影響が長期間にわたることが予想される場合には、処分システムの長期間にわたる安全性は、その実施に先立って人々を確信させることができるように示されなければならないことが一般的に認められているとしている。

この必要性は、国際原子力機関(IAEA)の安全原則に関する文書で述べている、将来世代への責任問題を実現するための必要条件になると位置づけることができる。

IAEAの文書では、高レベル放射性廃棄物の地層処分の上位目標を二つ上げている。

すなわち、

- ① 処分システムの健全性を維持するために、将来の世代に依存することなく、あるいは

処分場の存在によって将来の世代に重大な強制を課することなく、長期の時間スケールにわたって人間環境から高レベル廃棄物を隔離すること（将来の世代に対する責任）

- ② 現在国際的に合意されている放射線防護の原則に従って、長期間の人間および環境の放射線防護を確実にすること（放射線学的安全性）

3.4.2 地層処分の場合長期の安全性を示すとはどういうことか

長期の安全性を評価する必要性について理解したとして、その次に上げられる疑問は「では地層処分の場合長期の安全性を示すとはどういうことなのか」というものである。

そこでまず、放射性廃棄物処分システムの実際的な目標はということかについて理解する必要があると考えられる。これについて NBA の報告書では次のように述べている。

放射性廃棄物処分システムの実際的な目標は、放射性物質の環境への潜在的な放出が受入れられないリスクとならないことを保証するために、必要な期間、人間および環境から廃棄物を隔離することである。

3.2 節で工学施設の安全評価との比較で地層処分の安全評価についてみた際に明らかにされた特徴は、

- ① 評価すべき期間が、工学施設の場合には施設の寿命期間、すなわち施設が運用されている期間（例えば、30年とか40年）を対象としているのに対し、地層処分の場合には、施設の操業期間を越えた必要な期間とされていること。むしろ、地層処分の安全評価の対象期間は処分施設が操業を終了し、埋め戻された後の期間を主に対象にしていること。

ただし、この「必要な期間」については今のところ国際的にもコンセンサスが得られているとは言いがたく、よく議論で出されるのは10,000年あるいはそれ以上の数字であって従来の常識的な工学施設の対象としてきた期間を遙に越えていること。

- ② 評価の対象物は、工学施設にあっては専ら工学施設そのものであるのに対し、地層処分の場合には、処分システムが、廃棄物とその周囲を直接取り囲む工学的な施設（人工バリア）と施設を取り囲む地質学的環境（天然バリア）から成り立っていることから、この両者が安全評価の対象とされること。

- ③ 評価結果の検証に関しては、工学施設の場合には、実証試験等を通じて基本的には検証が可能であるのに対し、地層処分の場合には、①と②を併せて考えると安全評価の大きな部分が将来の長期間の地質学的環境のふるまいを評価しなければならないことから、本質的に安全評価を実施する時点での評価結果の検証は不可能であること。

先に掲げた地層処分システムの目標と安全評価の特徴を理解した上で、ここで再度地層処分の安全評価の定義について改めてみると、安全評価とは、総合的な廃棄物処分システムの将来のふるまいおよび人間および環境へ与えるその潜在的な影響を解析し、その評価結果を適切な安全規準と比較することにより安全性の判断を行うことであった。

以上のことをまとめると地層処分の長期の安全性を示すことは、その役割とフレームワークを示すことによって次のように簡潔に整理することができる。

- ① 処分システムの将来のふるまいを充分よく理解すること。
- ② 処分システムの将来のふるまいを予測モデルを用いて記述すること。
- ③ 処分システムの将来の変動を記述する広い範囲の科学的情報を必要とすること。
- ④ 安全解析の結果を安全性の判断規準と比較検討して判断すること。

これらに加えて NEAの報告書では、地層処分の一連のプロセス、すなわち研究開発、立地、設計、建設、操業、閉鎖を通じて処分場開発プログラムの不可欠のものとして位置づけられなければならないと述べている。すなわち5番目として、

- ⑤ 処分システムの立地と開発を進めていくプロセスの中で繰り返して行わなければならない性格のものであること。

3.4.3 地層処分の安全評価の一般的な方法

高レベル放射性廃棄物を含む放射性廃棄物の安全評価の一般的な方法については、NEAの報告書「安全評価手法のレビュー（1991年）」において簡潔にまとめられている。

一般的なアプローチは次のようなプロセスで行われるとしている。

- ① 選定された処分システムの可能性のある将来の展開の広範な同定。このプロセスはシナリオ開発と呼ばれる。
- ② 適切なモデルの開発と適用
- ③ 総合的な評価による潜在的な放射線学的結果の評価
- ④ 不確実性および感度解析
- ⑤ 評価の全ての構成要素の確証とレビュー
- ⑥ 評価結果の基準との比較評価

(1)シナリオ開発

シナリオ開発のベースは、自然のシステムや人工バリアに関する既存の知識と結びつい

た人間の想像や科学的判断によって形成される。

NEA のワーキング・グループでは、シナリオ開発のためのアプローチについて議論してきており、その結果まとめられたシナリオ開発の手順として次のようにあるべきであるとしている。

- ① 広い視野を持つ
- ② 方法論、モデル、および規制の代替案を包含することのできる論理的で調和のとれたフレームワークを提供する
- ③ あるシナリオを詳細に解析し、その他は解析しない理由を理解しやすく、またトレース可能な方法で文書化する
- ④ より定量的な考察とともに、専門家および有識者の判断と理性的な能力を認める
- ⑤ 幅広い分野の専門家とともに、一般の人々を含める
- ⑥ 潜在的に重要な事象、特性およびプロセスの総括的なリストをまとめる体系的な方法を提供する
- ⑦ 十分検討して定義されたスクリーニングの手順を通じて代表的なシナリオの処理しやすい数にする
- ⑧ 単に知的なフレームワークというよりも実際的な道具としてある
- ⑨ どのような種類の廃棄物処分場あるいはサイトにも適用する
- ⑩ モデル開発、研究、処分場設計およびサイト調査にフィードバックを提供する
- ⑪ 規制者および開発者が利用するようにする、並びに意思決定者と一般公衆にとってコミュニケーション可能なものであるようにする

シナリオ開発の流れを模式的に示すと、一つの典型的なものとして次のようなものがあるとされている。

1. 因子の同定



2. 因子の類型化



3. 因子のスクリーニング



4. シナリオの構築



5. シナリオのスクリーニング



6. 詳細なシナリオの決定



中心のおよび代替シナリオ
定量的評価

その他の因子およびシナリオ
定性的評価

断層、地震、浸食など、安全評価の中で考慮しなければならない事象のリストが検討されている。

(2)適切なモデルの開発と適用

モデルについては、IAEAの放射性廃棄物管理用語集において次のように定義されている。

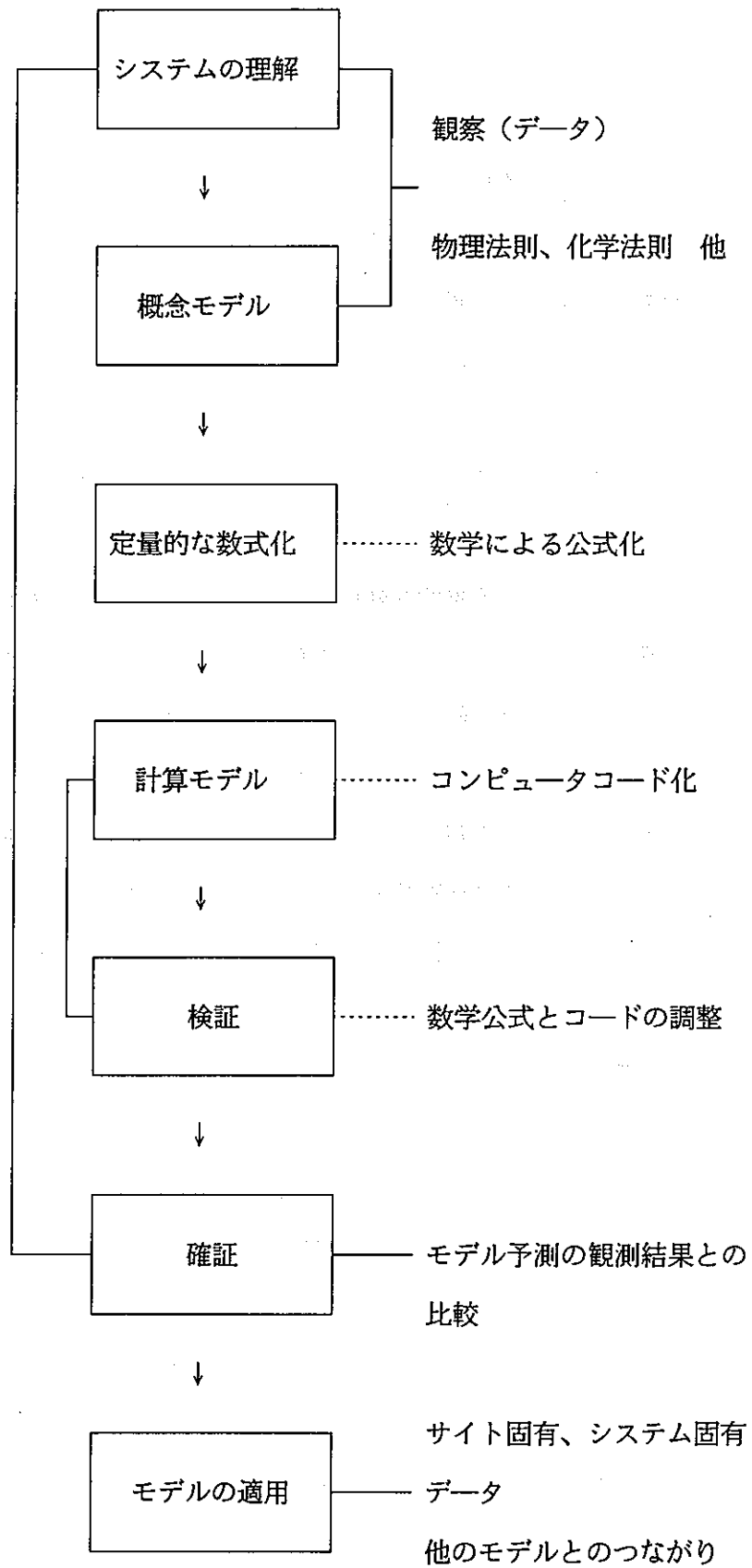
応用数学をもって、現実のシステムとそのシステム内で起こる現象の起こり方を解析的あるいは数学的に表現あるいは定量化すること。システムモデルを提供するために、個々のモデルあるいはサブシステムのモデルが組み合わされる。数学的モデルには、決定論的モデルと確率論的モデルの二つのタイプがある。

すなわち、モデルとは、定量的な解析がしやすいように十分に単純化されかつコンパクトにされた、現実のシステムの数学的な表現のことである。NEA の報告書においては、この予測モデルの開発が安全評価プロセスの中の本質的な部分であると述べている。

システムの状態を変化させる恐れのある潜在的な現象の解析のためにはシナリオ解析モデルが用いられる。シナリオ解析によって定義されたシステム内の放射性核種の放出の割合と移行の評価および人間の被曝線量の評価のためには帰結解析モデルが用いられる。シナリオ解析モデルの例として、処分場を通るあるいは近くを通る断層が、地層の透水性や地下水の流れのパターンを変える可能性や、氷河に関して言えば地層中のフラクチャや地下水の流れに影響を与える程の荷重がかかる場合にはその影響を評価する必要性などに対するモデルが上げられる。

シナリオ解析によって定義されたシステムの中での放射性核種の放出の割合と移行の評価および人間へのそれによる放射線量の評価を行うためのモデルが帰結解析モデルと呼ばれるものである。帰結解析モデルでは、化学的影響、熱影響、および放射性核種の移行と取り込みを含む水文地質システムおよび水文システムの解析を行うことになる。帰結解析モデルの例としては廃棄物からの放射性核種の浸出、地下水を通じての放射性核種の挙動、放射性核種の生物圏から人間への移行にたいするモデルなどが上げられる。

モデルを作成していくプロセスとしては次のようなものが考えられている。



(3)総合評価

(1)と(2)においてシナリオ開発とモデルの開発について簡単に紹介したが、これにデータの収集を加えた一連の作業の最終的な目標は、処分システムの特性を記述し、総合的な放射性廃棄物処分システムの性能を、時間の関数として表される放射線学的な安全性により定量化することによって総合的に評価することである。

その評価から期待されることは次のようなことであるとされている。

- ① 安全性に重大な影響を与えると思われる因子を適切に考慮する科学のおよび規制のプロセスであること、
- ② その方法によれば、提案した廃棄物処分システムが長期にわたり十分安全であると考えられるかどうかを決定するための基礎を提供する。

総合評価は最終的に、放射性廃棄物処分場の立地、建設あるいは操業の段階で、その評価結果と規制規準などの内容に照らして評価されることになる。すなわち、総合評価において得られる情報が明確に提示され、評価結果に関連する不確実性が考察され、さらに規制機関や意思決定者プロセスに含まれる他の機関による批判的なレビューを経た上でのみ、廃棄物処分システムの安全性は判断されることになる。

IAEAの文書（安全シリーズNo.56）においては、評価技術や評価結果の質のレベルは、処分システムの設計や開発の進展と同様に高められていくものであるが、安全評価アプローチは次のような段階に適用されるとしている。

- ・概念評価段階
- ・サイト評価段階
- ・処分場設計評価段階
- ・処分場システム許認可段階

(4)不確実性および感度解析

(1)から(3)で述べた評価、すなわちシナリオ解析と帰結解析に基づく評価から得られる結果の定量値は、個人の放射線被曝線量あるいは集団線量の期待値である。システムが複雑であることや地下処分場の安全評価が対象とする期間が長期になるために、解析に用いられるデータの内のあるものには入手することが困難なものがある。

不確実性および感度解析は、上述した定量値の決定のために関連する、インプットデータや数学モデルを含めてシナリオやその結果を特定することができ、さらに次の二つの事

項を可能にするための基本的な情報を提供する。

- ① 定量値の総合的な不確実性と誤差の範囲を推定する
- ② さらに理論や実験を進めるべきデータやモデルに関して判断を行う

総合安全評価の一部として、感度解析は不確実性を最も減らす必要のある領域に関するガイダンスを提供するとともに、不確実性に関する情報は、それらの処分場に対して処分場の設計、処分場の設計と立地について改良を加える場合にその可能な範囲を提供することができる。

(5) 確証とレビュー

NBA の報告書では確証 (validation) の問題は、検証(verification)の問題とともに評価の信頼性を構築する章で述べている。

安全評価の最終的な目的は、放射性廃棄物処分システムに関する事実に立脚した決定のための基礎を提供することであり、この目的を達成するためには、科学者、安全評価者、規制者および意思決定プロセスに含まれるるいは関係する者は安全評価によって得られる情報、洞察および結果に確信を持つことが必要であるとしている。

意思決定のための基礎として用いられる評価結果や関連する課題を安全評価が示すことを確実にするために行われることとして、

- ① モデルの検証と確証
- ② 品質保証
- ③ 批判的レビュー
- ④ 国際協力

などがあるとしている。

IAEAによれば、確証 (validation) と検証(verification)の定義は次の通りである。

・ 確証 (validation)

確証とは、モデルによる予測値をそれと独立の野外観測値および実験的観測値と比較して実施される過程のことである。モデルは十分な試験が行われて、予測の精度について受け入れられるレベルであることが保証されるまでは、確証されたものであると考えることはできない。(受け入れられる精度のレベルというものは、判断によるものであり、それはそのモデルによりとりあげられることになることとてきの問題、あるいは疑問によって

変わるであろうということに注意すべきである。)

・検証(verification)

数学的モデルあるいはそれに対応するコンピュータコードは、それが意図した通りにはたらくと認められた時、すなわち、そのコードが概念的モデルの適切な数学的表示であり、またその数式が正確にコード化され解かれるものであるということが示された時に、それは検証されたという。

レビューの問題については、専門家の判断とともに十分なレビューが行われることが信頼を築き上げるプロセスの一部をなしており、評価結果の信憑性を高めるのに貢献するために、さらにこの活動が支持される必要があると述べている。

(6)評価結果の規準との比較

国際放射線防護委員会(ICRP)やIAEAなどの国際機関では、個人および集団の放射線防護に関する国際規準が検討されており、放射性廃棄物処分システムに対する長期の安全規準を各国が検討するためのベースとして提供している。米国のように放射性廃棄物処分のための詳細な規準を作成している国がある一方で、一般的な放射線防護目標のみを設定している国など様々である。

高レベル放射性廃棄物の処分システムに特有な長期間の安全性に対する特定な規準を開発する作業は今後の課題であり、検討がさらに続けられている。

処分システムの安全性は、

- ① 総合評価において得られる情報が明確に提示され
- ② 評価結果に関連する不確実性が考察され
- ③ 規制機関や意思決定プロセスに含まれる機関による批判的なレビューを経て始めて最終的に判断されることになる。

安全評価と規準の関係に関しては、安全評価のアプローチ、方法および要求されるデータの詳しさは、適用される詳細な規準に依存しかつ影響される。また逆に、詳細な規準は安全評価に関する研究が進展するのに応じて次第に明らかにされていくという側面もある。

3.4.4 安全評価から期待されること

先にも示したように、放射性廃棄物処分システムは天然の現象を評価の対象として多く含むことから、工学システム異なり、処分システムの安全な状態が絶えず続いていくとい

う絶対的な保証は本質的に不可能である。そうすると、そのような性質を持つ処分システムの安全性を示す際に達成し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と将来の両方の世代に対して十分な安全のレベルを提供することができることを人に確信させることができるようにする間接的な実証を行うことである。そのためには、安全性に重大な影響を与えると思われる因子を適切に考慮する科学的プロセスでありかつ規制のプロセスであることと、その方法によれば提案された廃棄物処分システムが長期にわたり充分安全であると考えられるかどうかを決定するための基礎を提供することである。

人の放射線被曝の予測は通常現在の生活習慣に基づいて行われる。遠い将来の生活条件を予測することは殆ど不可能であるので、被曝線量計算は、遠い将来に生活する人間に対する実際の線量の予測ということよりも、もし今日放射性核種の放出が起こって人が被曝するとすればどのような量になるかという例解というようにみたほうが適切であるとみなされる。

従って、評価した処分システムの長期間の放射線学的影響は、通常、安全規準と比較しうる安全の目安 (indicators) と考えられるとしている。

3.4.5 安全性の判断の問題

安全性を判断することに関連して、まず安全評価について考える際に強調すべきものとして3つの原則的な課題を上げている。

- ① 総合評価の必要性
- ② 評価結果における不確実性の考慮
- ③ 評価結果における信頼性を構築するための方法

処分場の挙動を評価する最終的な目標は、総合したシステムティックなアプローチを通じて人間および環境への可能性のある放射線学的影響を定量的に示すことである。この作業で強調されるべきことは、首尾一貫した解析と安全に関連する全ての要素の統合であるとされている。

安全評価結果に影響を与える不確実性には、定量化できるものと定量化できないものがある。定量化ができない不確実性における境界を決めるためには公式的な形で専門家の判断が求められることも考えられる。一方でサイト特性調査を含めた研究を行うことによって不確実性に関して知見を得ることになるであろうし、場合によっては不確実性を減らすために定量化することになる。

信頼性を築き上げるために行われることとして、

- ・不確実性を計画にする
- ・適切な安全評価実施のプロセス
- ・ナチュラルアナログ研究を含む野外実験データとの比較評価
- ・専門家の判断と十分な評価

などを上げている。

3.5 安全評価研究の実例

すでに見てきたように総合評価は、処分システムの特徴を記述し、全体システムの性能を放射線安全の観点から定量化して示すことである。総合評価は、シナリオ開発、モデル化および影響計算の最終的な目標であり、処分場の許認可のためには不可欠なものである。地層処分に関する研究の初期の段階では総合評価の実施は殆ど行われていないが、研究が第2段階に進むと、処分の実現可能性を実証すること、あるいは将来の研究開発の方向を示すことを目標とした処分システムの総合評価が行われるようになった。

そのような例としてスウェーデン、スイス、カナダ、C E C等の例がある。これらの国で行われた報告書では廃棄物処分施設で起こり得る影響について明確に数値で示した推定値が記載されており、またサイト選定やバリアの設計等に関して異なったオプションの比較を行っている。この段階で行われた総合評価について特に強調しておくことは、

- ① 高レベル放射性廃棄物の処分施設の許認可のために実施された評価ではないこと、
従って、
- ② 処分施設が適正な安全のレベルにあることを実証することが目的であって、最も安全性の可能性の高いオプションを識別することを目的にはしていないこと
- ③ このレベルでのモデル化の正確度は限られていること、
が上げられる。

このようなことから、総合評価には二種類の異なる性格のものがあることが示唆されるが、この点について NEAの報告書では次のように整理して述べている。

一つは、許認可段階で行われるものであって、システムの境界解析を行うことが特徴である。この段階では、シナリオ、モデルおよびパラメータ値は保守的に選択される。従って、評価は簡素化されシステムの安全性に重大では無い不確実性の議論は許認可段階でその重要性が低減される。この段階に至っている国はない。

二つめは、研究開発段階で行われるもので、研究開発のガイダンスを示す性格のものである。この段階の評価では、詳細な研究レベルのモデルが用いられて、設計や工学施設のオプションを評価するために行われる。先のスウェーデン、スイス、カナダ、C E C等の例がこの段階である。これらの例に関して特徴と結果について表—2に示す。

表—2 高レベル放射性廃棄物と使用済み燃料の処分の主要な総合安全研究の例

研究	特 徴	結 果
KBS-3 スウェーデン	鋼製容器に封入した使用済み燃料を深さ500mの結晶質岩中へ処分。 決定論的、保守的な評価。	KBS-3の結果、国内および国際的なレビューに基づき、スウェーデン政府はKBSの概念は実現可能でありかつ安全であると判断した。
保証計画 スイス	固化した高レベル放射性廃棄物を鉄製容器に封入し、深さ1200mの結晶質岩中へ処分。	数年にわたる評価の後、スイスの管轄機関は、安全評価の方法論が要求される安全のレベルを実証したことに同意した。しかし、用いられたフィールドデータが十分に代表的であることをさらに検証すること、ならびにある特定のプロセスが処分システムに対して受け入れられない変動を与えないことをさらに検証することを求めた。
AECL カナダ	使用済み燃料を結晶質岩中へ処分。 概念評価。 確率論的システム評価技術の適用。	中間的な結果は、施設設計に適切な制限を加えることによって 10^{-6} が達成できることを示した。包括的な公衆レビュープロセスが進行中である。
PAGIS CEC	高レベル放射性廃棄物の粘土層中(ベルギー)、花崗岩中(フランス)、および岩塩中(ドイツ)への深地層処分。 海洋底下も含まれる。 決定論的手法および確率論的手法の両方が用いられた	総合的な結論は以下の通り： 「適切なサイトが選定され、処分場が適切な工学技術で設計され建設されれば、固化された高レベル放射性廃棄物をどのような地層中へも安全に処分することができることを疑う合理的な理由は無い。」

3.6 安全評価に関する専門家のコンセンサス

放射性廃棄物の安全評価に関しては、様々な国際シンポジウム、セミナー等を通じて専門家間での情報交換や議論が行われてきている。特に、1989年にIAEA、OECD/NEA、CECの共催によりパリで開催された「放射性廃棄物処分場の安全評価に関する国際シンポジウム」は、この問題に係わっている世界の専門家の多くが一堂に会して行われた意義のあるものであった。この国際会議を契機として、放射性廃棄物、特に長期間の安全性を示すことが大きな課題である高レベル放射性廃棄物の安全評価に関して、このシンポジウムでの議論などを通じて得られた技術の現状や専門家のコンセンサスを取りまとめるという作業が行われた。その作業の結果とりまとめられた文書が先に述べたOECD/NEAの「放射性廃棄物の処分：長期の安全性は評価しうるか？」である。

この文書で示された安全評価に関するコンセンサスを紹介する。

3つの局面が以下のように表されている：

- ・ 先ず第一に、たとえ、このふるまいをすべてにわたって詳細に予測する必要（あるいは可能性）は考慮されないとしても、環境への放射性物質の有害な放出は起こり得ないであろうことを確信するために、処分システムの将来のふるまいは充分良く理解されなければならないことが認められている。広い意味での安全評価は、この理解を得るためおよびそれを責任ある当局や関心のある公衆に伝えるための最も重要な方法である。
- ・ 第二に、データを取得するための手順、モデルを開発し利用することおよび安全評価を実施し評価（レビュー）する手順は勿論のこと、安全評価の一般的なアプローチに関しては広く国際的なコンセンサスが存在する。安全評価は、予測モデルによる方法の効果的な利用および処分システムとその可能性のある変動を記述する広い範囲の科学的情報を要求することが明確に理解されている。
- ・ 第三に、研究の初期の段階、および放射性廃棄物処分システムの立地、設計、建設、操業と廃止と最終密閉までの一連の過程を通じて、安全評価は処分場開発プログラムの欠くことのできない部分を形成しなければならない。特定のサイトと処分場の設計の許認可に先立ち、さらに情報が必要で、その場合にはどのようなタイプの情報が必要であるかを定めるために、安全評価は、処分システムの立地と開発につれて繰り返し進めなければならない。安全評価は、処分システムのための許認可文書の作成の極めて重大な

部分を形成する。

この部分の形成は、まず、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の結合から始まる。この結合は、 CaCO_3 の形成を促進する。

次に、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度積が、 K_{sp} を超えると起こる。

このとき、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

したがって、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

このように、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

したがって、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

このように、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

したがって、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

このように、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

したがって、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

このように、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

したがって、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

このように、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

したがって、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

このように、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

したがって、 CaCO_3 の形成は、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} の濃度を減少させる。

4. ハイレベル懇談会における専門家の意見

平成3年12月19日に第3回のハイレベル懇談会を開催し、「群分離・消滅処理と地層処分について」意見交換および議論を行った。

意見交換、議論に入る前に、日本原子力研究所および動力炉・核燃料開発事業団の専門家よりそれぞれの機関における群分離・消滅処理研究の現状および今後の計画等について説明があった。

以下、4.1では、廃棄物対策と群分離・消滅処理との関係について議論される際の論点を予め設定した。4.2で、4.1で示した論点を中心にしてハイレベル懇談会で出された意見を整理して示し、この懇談会の中ではほぼコンセンサスが得られたと考えられる部分を示した。

4.1 群分離・消滅処理と放射性廃棄物対策に関する論点

論点を、・放射性廃棄物対策への寄与、・現在の到達段階と対策として選択する段階、・パブリックアクセプタンスとの関係、および・総合的なシステムとしての評価の4つに分類して以下のように設定した。

(1) 放射性廃棄物対策への寄与

① 群分離、消滅処理の持つメリットが、高レベル放射性廃棄物の処分対策に具体的にどのような寄与をすることが期待できるか。

② 群分離、消滅処理をすることによって、高レベル放射性廃棄物処分に伴う長期間の隔離問題がどのように解決されることになるのか。

高レベル放射性廃棄物の処分が容易になるような方法を提供することができることになるのかどうか。

群分離、消滅処理によって、廃棄物対策がどのような姿になると考えられるか。

③ 群分離によるTRU核種等の分離回収の効率や高速炉等での核種変換の効率の定量的な評価はどの程度まで行われているのか。

④ 二次廃棄物の発生について、どの程度の定量的な評価が行われているのか。

(2) 現在の到達段階と対策として選択する段階（時点）

⑤ 高レベル放射性廃棄物対策の今後の進め方について検討されたフランスのバタイユ報告では、地下研究施設の設置を含む地層処分研究を進めるとともに、群分離、核変換に関する研究も同時に進め、地下研究施設での試験結果等に基づいてその後の処分対策を選択する時点で群分離、核変換に関する研究の成果を評価して対策を選択することができるという進め方をとろうとしている。

技術的、経済的な実現可能性に対する見通しに関して、現時点ではどの程度のことと言える段階にあるのか。どの段階で対策として選択することになるのか。

(3) パブリックアクセプタンスとの関係

⑥ 放射性廃棄物対策におけるPAとみとした場合、そのメリット、デメリットはどのようなことになるか。

(4) 総合的なシステムとしての評価

⑦ 米国のEPRIでは、放射性廃棄物対策に対して持つメリットが、分離したTRUを燃焼させるための高速炉開発の今後の展開を正当化するものかどうかとの視点からTRUの燃焼の概念について評価しているが、このような観点からの評価をどのようにみたらいいのか。わが国でも総合的なシステムとして評価することについてどの程度まで研究が進展しているのか。

4.2 群分離・消滅処理と放射性廃棄物対策に関する専門家の意見

4.2.1 放射性廃棄物対策への寄与

論点①

① 群分離、消滅処理の持つメリットが、高レベル放射性廃棄物の処分対策に具体的にどのような寄与をすることが期待できるか。

高レベル放射性廃棄物の処分対策に寄与が期待できるとする意見

・群分離・消滅処理をしてもその究極的な効果として人類に対し放射線被ばくは変わらない

いのではないかという意見があるが、それは変えられる可能性がある以上可能性を信じて研究開発をするということであろう。

- ・半減期は30年ということで比較的短い、非常に発熱量が多いストロンチウム、セシウムをうまく分離できれば、ガラス固化体の一時貯蔵期間を短くできるとか、貯蔵スペースを減らせる効果が期待できる。(研究者)

- ・例えばいろいろな元素に粉砕できるアルゴン系の溶媒は、非常に後の処分がやりやすい溶媒で、今のピューレックス工程そのものに使える可能性がある。従って、それ自体が将来の処分につながってやりやすくなる。副次的に処理、処分をやりやすくする、あるいは負担を少なくすることができる。このような例のように新しい技術を開発する意味がある。(研究者)

高レベル放射性廃棄物の処分対策への寄与に対する懐疑的な意見

- ・TRU廃棄物をとるだけでは熱の発生は変わらないので、最終処分場の設計が楽になることはないのではないか。要するに、熱のほうから処分場の大ききなりがほぼ決まってくるということから考えると、群分離をしてもそれほど効果はないのではないか。

- ・研究をやるのは非常に結構だと思うが、これが明日にでもできる、いま進めようとしている高レベル廃棄物処分の計画、この前提とするというのには反対である。

- ・素人の立場の立場からすると、要するに核廃棄物で一般の人が一番心配する、あるいは反対派の人が問題にするのは、“長い時間、毒性がある”ということだと思う。その意味では超ウラン元素とストロンチウム、セシウム、長寿命の核種というのが分離できて、何か別に処分できれば、それはたいへん結構なことだと思う。それがはたして本当に実用的な意味で可能かどうかというところが一番問題ではないか。

- ・皆様方のお話を承って、私の考え方とそんなに違わないお考えを皆さんお持ちだという点がはっきりした。そのひとつはこの群分離、消滅処理が決して魔法の技術ではないということ。従って在来進めてきている地層処分とまた別個に、新しい技術開発として群分離、消滅処理の基礎研究をやっていくのだという位置付けで皆様お考えのようだという事。従って群分離、消滅処理が決して今まで進めてきた路線をまったく根底から変えるものではない。技術開発ができればそれだけ結構ではあるが、できなくたって元々なのだという気持ちを持っている。

- ・群分離・消滅処理をやっても放射線の線量率がピークで一桁しか下がらない。日本の地層処分の研究は始まったばかりで、余り研究が進んでいないにも係わらずこれだけのこと

が言えるようになってきている。例えば溶解度にしても、我々非常に乏しい知識の中でやってみると三桁違うわけです。溶解度をもっと研究すればもっと低いに違いない。従って、その研究にお金をかけて一生懸命にやる方が、これを一桁下げる群分離・消滅処理よりもはるかに効果が高いと思っている。そういう意味であまりここで目が移ることによって地層処分の研究がおろそかになることを恐れている。

論点②

② 群分離、消滅処理をすることによって、高レベル放射性廃棄物処分に伴う長期間の隔離の問題がどのように解決されることになるのか。

高レベル放射性廃棄物の処分が容易になるような方法を提供することができることになるのかどうか。

群分離、消滅処理によって、廃棄物対策がどのような姿になると考えられるか。

・群分離をやっても、毒性は下がるが、リスクはあまり下がらない。ピークが下がったということで、この毒性とリスクとの関係の区別を非常に明確に持つべきであろうと思う。毒性の場合には一万年位でグッと下がるが、リスクの方はそうはならない。この点は非常に重要だと思う。

・初めから“リスクがどうだ”ということにして、最後はセシウム135 とテクネチウムがきいてくるが、ピークの差が非常に小さくなっていく程度のところで、このへんを明確にしておかないといけないのではなかろうかと強く感ずる。

・高レベル廃棄物の地層処分について、1万年という評価期間が今までよく言われているが、リスクのピークだけに着目して、10万年、100 万年まで考えた方がよいという話が普通に行われている。これは非常に間違っていると思う。リスクの山が高くなっていても、それが安全に関係することがなければいいのではないか。ただその山を見て、99.99 %の分離をしても、使用済み燃料の場合と比較しても一桁しか下がっていないところに問題がある。一桁しか下がらないのならば、元々非常に安全な値なのだから群分離などしなくても良いという意味にも取れる。地層処分の研究をやっている人がこのことをどのように考えているか聞きたい。

論点③

③ 群分離によるTRU核種等の分離回収の効率や高速炉等での核種変換の効率の定量的な評価はどの程度まで行われているのか。

・45,000とか55,000MWdの燃焼度の高いものを再処理することになると、加速度的にTRU廃棄物が増えて、数倍から十数倍ぐらいになる。そうするとアメリシウム、キュリウム、アクチニウムなどの分離効率をもっと上げなければならない。しかし、99.99%というようなことは必要ないが、99.9%ぐらいはやらなければいけないという感じは持っている。実験室規模では十分できると思うが、問題は実プラントでそれができるのかということである。

・消滅処理は非常に難しいのではないかと。高速増殖炉および粒子加速器の場合に、1回の処理で20~30%ぐらいしかできない。これをまた再処理する。それから燃料を確保してそれでまた燃やそうと何回も繰り返さなければいけない。このようなことが、はたして実用的なものかどうか。

・加速器の場合、エネルギーバランスが取れないのではないかと考える。

論点④

④ 二次廃棄物の発生について、どの程度の定量的な評価が行われているのか。

・群分離の際もそうだが、消滅処理の繰り返しの場合にも化学的分析が入ってくるが、このときTRU廃棄物がかなり大量に出てくるという問題がある。このTRU廃棄物をまたどうするかということが問題になる。結局この二次廃棄物は深地層処分をせざるをえないのではないかとと思う。

・群分離、消滅処理をしても廃棄物の量は減らないのではないかと。むしろボリュームは増えるのではないかと。前々から言う人がたくさんいる。この面に関して研究者が何らかの数字を示して、どうなのだということを示していただく必要があるのではないかと。

・セシウムやストロンチウムの消滅に関して、セシウムをガンマ線を照射して消滅すると

いう考え方がある。セシウム137 というのは、13.5日の半減期でステープルなものに変わっていくが、これがいくつかガンマ線をとると γ -nというリアクションによって半減期が長い(3×10⁸年)セシウム135ができてしまう。そういうことがあるので、ストロンチウム、セシウムの消滅を考える場合には、同位体を分けてから照射しないといけないなどの問題が出てくるのではないか。(研究者)

4.2.2 現在の到達段階と対策として選択する段階(時点)

⑤ 技術的、経済的な実現可能性に対する見通しに関して、現時点ではどの程度のことが言える段階にあるのか。どの段階で対策として選択することになるのか。

・簡単にこれができるとは考えていなくて、そうした意味ではフロンティア研究というか、長期的課題としてじっくり取り組むという考えでいる。(研究者)

・“これは決して明日すぐ動き出す技術ではない”というご認識を皆さんお持ちだと、いう意見が一番特徴的に皆さん共通点としてひとつあると思う。

国際的にも日本は最終的にその点を強調して話をもっていったので、フランス、あるいはアメリカその他が最初は非常に難色を示したのが、基礎的な部分から積み上げるという意味では、それから現在オプションとしてシナリオとして、共通のシナリオとして仕上がるという深地層処分という動きを止めるものではない、止めてはならない、そういう認識で動いている、と感じている。

・消滅処理に関しては、ちょっと乱暴な言い方をすると、加速器というのはいまだに理学者のツールで、本格的に工学機械としては認知されていない。例えば電子線ライナックなんかはすでに工業機械として動いています。量子加速器というのは、プロトンのアクセラータは、従来エネルギーの揃えと位置決め。これを一生懸命になって追い求めて、ピンポイントで高いエネルギー、単一エネルギーに近い状態にしてぶつけるということが高エネルギー研その他で行われている。多少エネルギーに幅があっても、大量のビームインテンシティをうんと上げたものを作り出すということはあまり興味が向けられていなかった。それをとにかくなんとかかしたいということだと思う。

・経験を踏まえながら、工学的システムを作り上げていくにはまだまだ時間が必要だろう

けれども、十分別な波及効果を組み込みながら進んでいける。現在の方向である基礎的な研究という位置付けのもとで、確かな結論が出た部分をいろいろなところに組み込んでいくという態度でいく以上、それほど現在の路線に邪魔にならずに済むのではないかと信じている。

・ある時点以降は、今は技術的な成立性が議論される段階で、経済的な見通しの議論の段階ではないと思うが、非常に高いものでどうしようもないものということであると、採用できるかどうかというのはまた別の問題が出てくる。ある時点であるターゲットを決めて、そういう評価をしていくほうがいいような気もする。

・超ウラン元素の方は原子炉の中で一緒に燃やすということで、サイクルの中に閉じ込めるということだが、その場合に再処理、その他いろいろなことで厄介なというか非常に手間がかかるようなことが起こるのではないか。そのへんのことを分かりやすく説明をして欲しい。

・素人の疑問ですが、ストロンチウム、セシウムの原子核を変換するというのは、例えば中性子をぶつける場合に、狙い撃ちできるわけではなくて、ショットガンみたいな形でやるわけですね。そうするとうまくぶつかるのもあるし、ぶつからないのもある。2発当たるとか3発当たるとかいろんなものがあるわけで、常に短寿命のものに変わるということが保証できるのかどうか。まったく予想外のものができるのではないかなどどの程度ははっきり分かっているのかということの説明してほしい。

・消滅処理については、加速器というのは非常におもしろい良い面はたくさんあるが、やはり相当無理ではないか。可能であるとしてもコスト的に行けるのかどうか。それから無理に作っても、波及効果はどうなのだろうかと考えうと首をちょっとひねらざるをえない。研究開発をおおいにやることは結構だが、よほど途中で十分な評価をした上で、これを進めるなり何なりの判断をしなければいけないのではないか。

・別のオプションという形で見るということで、すなわち「非常にボリュームを少なくできるのであるから、別な形を選択もありうるかな」ということで、ある程度群分離という取組を考えているということ。消滅処理についてはどうかとなると、オプションの取り方に、信頼度の問題をどのように評価するかというのが一番問題になるので、今のところはあまり目立たない考えかなということにはなっている。(研究者)

・TRUを核燃料サイクルに閉じ込めていくということで厄介なことがあるのか、分かりやすく説明をして欲しいということに関しては、やはりはっきり言って厄介なことがある。

今まで分離しなくていいものを分離するわけだし、燃料を作る時に放射性のレベルの高い燃料を扱わなければいけないとか、それを1回ではなくて何回もサイクルさせなければいけないということで厄介なことはいくらかもある。それとのバランスで、ひとつはPAの観点からのメリット、それからもうひとつは有用金属を回収したりといった面でのメリット、そういったことを総合的に考えてどちらがいいかということが将来の判断になるのではないかと思う。(研究者)

4.2.3 パブリックアクセプタンスとの関係

⑥ 放射性廃棄物対策におけるPAとみとした場合、そのメリット、デメリットはどのようなことになるか。

・高レベル廃棄物から寿命の長いTRU廃棄物を分離して消滅させることが、技術的、あるいは実際的に可能であれば、これは結局数万年掛かるのが千年になるということで、PR上一般の人々に理解を得る上では非常に望ましいのではないかと考えている。しかし、これが実際的に実用的にできるのかという問題を考えなければいけないのではないか。

・原子力はいま低迷状態であるが、群分離、消滅処理というのは非常に『夢』と言っては実現しないという意味じゃなくて、希望という意味で『夢』ということでは非常に大切であり、国民の理解を得るためには、「いいよ」というようなニュアンスのことはある。

・夢、要するに希望のある手法ということが、先走ると実体とのギャップが現れた時に非常に恐ろしいという感じがする。この事実をもう少しうまくPA上、説明をしていくほうがよいのではないか。

・パブリックの声を、非専門家、非関係者の声も、例えば世論調査なりで聞きながら、研究開発の目標設定をしていくことをしてはどうか。

・今の廃棄物処分の上で多少なりとも一般の国民が、何かより安全ということではなくて、より気持ちがいいというようなことで受け入れるような要素に効くのであれば、それはひとつの効果かもしれない。そういったことについては我々自身も少し懐疑的なところはある。

(研究者)

・PAということ的前提にしてこの会に入れていただいたのだと思うが、まだまだこの段階ではPAということにまでまとまっていないような印象を受ける。

・今は普通の人間がこういうことを聞く前に、まず残念ながらこの間の動燃の燃料棒の不良品なんていうようなニュースを先に受けてしまうので、こことずいぶんギャップがある感じがする。いろいろな意味でPAの方法でなくて、方法も開発しながら人の養成というのは絶対に必要であろうと思う。

4.2.4 総合的なシステムとしての評価

⑦ 米国のBPRIでは、放射性廃棄物対策に対して持つメリットが、分離したTRUを燃焼させるための高速炉開発の今後の展開を正当化するものかどうかとの観点からTRUの燃焼の概念について評価しているが、このような観点からの評価をどのようにみたらいいのか。わが国でも総合的なシステムとして評価することについてどの程度まで研究が進展しているのか。

・説明を聞いていて確かに夢のある研究だなと思うし、放射性物質をいじりだした以上こういうことを基礎としてやるというのは必要なことだなと思う反面、原子力発電所の進捗が非常に足踏み状態だというのは、むしろいいのではないかという感想を持ってしまう。というのは処理の時にFBRの実用炉5基で処理するというお話が出ましたが、そうするとまだ1基も無いという状況であるのに、その辺はどうなのかなという感じがする。

4.2.5 研究開発の意義、目的、必要性など

4.2.1 から4.2.4 まで、群分離・消滅処理と放射性廃棄物対策の関係に関連した意見のまとめをおこなった。このハイレベル懇談会では、放射性廃棄物対策との関係を離れて、群分離・消滅処理の研究開発の意義、目的、必要性などに関する意見が多数出されたのでこれを別にして整理することとした。

・日本でともかくもこれが正規の計画になって、その研究開発が進んでいるということであるし、日本が自分で決めて自分の所で研究をやっているというだけではなく、この研究についてOECD/NEAにわざわざ提案をして国際的な研究計画にしたという計画がある。そしてそれが多くの国が賛成をした研究計画である。それにはそれなりの意味があるのだと考える。

・一番肝心なことは、“では基礎的な研究としてどこに目標をおくか”ということである。そこがやはり国際的にも認知された問題点だろうと思う。少なくとも群分離に関しては、いくつかのオプションがまだまだ存在するということではないか。いまとにかく動いているシステムは、非常に工学的にも世界的に認知された方法であるから、急激に変えろとか、これでは駄目だということは決して言うてはいけないと思う。まさに非常に高くついでくると。しかし極めてゆっくりとハンドルをきると、だんだんにきっていくのだということでもやってみることも考えられる。例えばプルトニウムを最初に直接再処理の工程に組み込むかという問題がある。動燃で考えているTRUEXはまさに一つのオプションであろう。

・基礎研究の段階であるので、おおいにやるべきであるということには変わりはないが、やる時にはっきりした目的を持つべきである。どういう目的のために行うのか、これは元素の有効利用をするためなのか。少なくともリスクと毒性は違うのだというその目的を明確にしないでやると、ちょっと途中で混乱が起きるのではない、その点を強調したい。

・原子力関係の研究者、技術者の“原子力離れ”は世界的な傾向で、このためにも新しい研究テーマを維持する意味でも大切ではないかなと考える。技術の発展性と言いか、群分離、消滅処理は高レベル放射性廃棄物だけではなくて、他にも何か役に立つ産業の何かのアピールできれば、なおよいのではないか。

・2つ今日のことにつけ加えたいと思う。ひとつは原子力の開発は元々核兵器を開発するところから始まった。核兵器を作るためにはプルトニウムを取り出すということに非常に重要なひとつのねらいがあって、そして今の再処理というのはそこから発足した技術である。そしてそれをいろいろ改良を加えて今日に至ったというものであるが、その出発点そのものは平和利用という目で見ると、それでいいのかというのがどうしても残る。

もし核兵器を作るという目標がなくて、一番最初に何もなくて、原子力というエネルギーを平和的に利用する全体の技術体系を作ろうではないかというようなことでもし始めたとして、あのプルトニウムの抽出という段階で他のアイデアは出なかったのだろうか。つまりひとつの今確立されていると考えられる再処理は長い歴史を持っているが、その長い歴史の出発点は核兵器を作るところから出発して、非常に多額のいわば金に糸目をつけない研究開発をやって作り上げた技術である。それをもとにして一つはプルトニウム、ウラン、それからその他は全部高レベル廃棄物だと決めてかかって…、決めてかかってというか、そういう分類をして、その一番安全な処分の仕方というので地層処分を考えた。地層処分というのは将来とも必要である。これはもう明らかに必要である。なぜかという

と、何が出てきても最終的には地層処分しなければいけないのものがたくさんあるわけであるから。しかし、もし最初から一番いい方法を考えろというので、平和利用というのでもし問題を提起したら、科学者あるいは技術者はどんな選択を最初の段階でしたのだろうかということを考えたくなる。

なぜかというと、使えるものが他にもたくさんあるわけですから。そうするとプルトニウムだけ取り出すというふうなやり方から出発した技術とは違った選択をして、研究開発をやったのではないかなという感じを実は持つわけです。だからそれを遅くなっただけでも、今からちょっとやってみようじゃないかと。そして平和利用だけをやろうと決心している国、日本はそうなのですからけれども、そこではもっと野心的にその問題を取り上げる必要があるのではないかと。

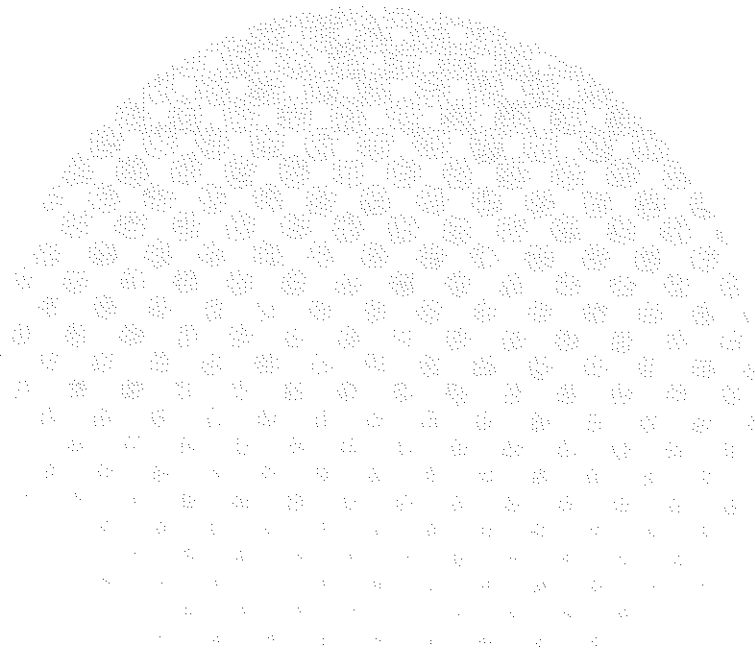
それからもうひとつは全然違う話で、今年の8月2日に原子力委員会が出された『核燃料サイクルについての報告書』がある。あの報告書を非常に興味深く、「ああ原子力の専門家も、ものの考え方は相当離れている、割れているんだな」という感じで極めて興味深く読んだ。あの報告書は相当距離的に大きく分かれた意見をひとつにうまくまとめて作った報告書だと読める。あそこには今日議論されている群分離路線についてのある種の期待がある。とにかくそれが書かれている。それからもうひとつは、あの報告書には高速炉と日本語で書いて、カッコしてFBRと書いてある。これはどういう訳なのか。そこも非常に離れた意見が多分あって、勝手な解釈をすると、相当違う意見があったのを最終的に報告書としてまとめるためにお互いに妥協をした。英語ではFBRを書くけれども日本語では高速炉と書くのじゃないかと思う。つまり増殖を前提にはしていないわけです。高速炉であることは絶対に必要なのだけれども。つまりTRUを燃すということもある程度頭において、「増殖したい高速炉が役に立つ段階がある」というような考え方で書かれているのではないかと。今原子力発電所の建設が多少スローダウンしているようなところで、少し次の原子力開発利用長期計画を作る時に、もうちょっと将来の路線を幅を広げたものにしておきたいというような考え方があるのではないかなというふうに読める。

・技術開発というのは原子力の時代がこれから何年続くことかということに関係があると思う。まだまだ始まったばかりかなという捉え方をするのであれば、その始まったばかりの時点であまり一つの概念にこだわり過ぎるのも良くないのではないかと感じる。多少変わった考え方もそれなりに真面目に評価していく努力をしたほうがいいのではないかと感じる。(研究者)

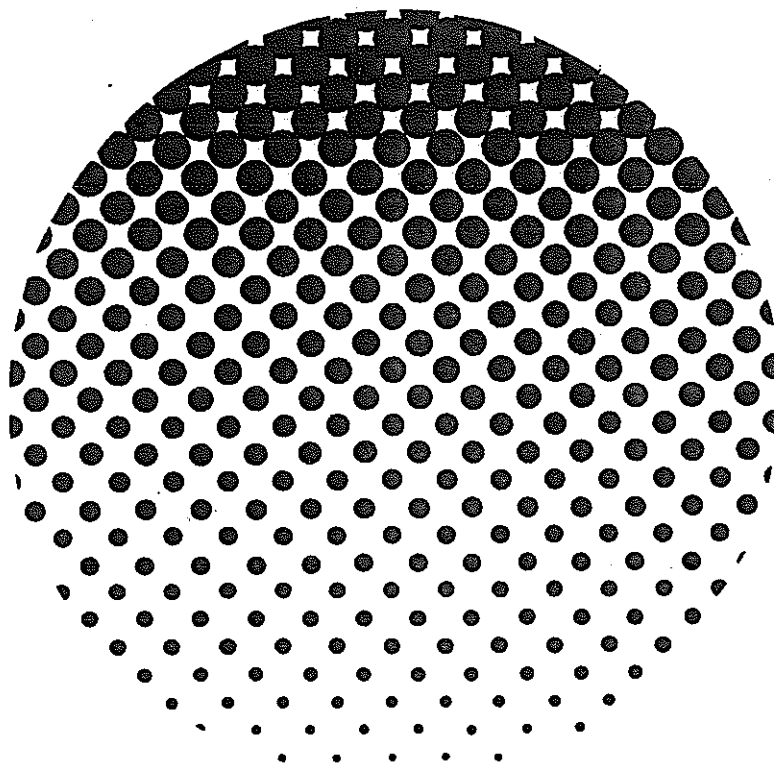
・大衆に対してこれだけ広い裾野の上にこの山はあるのかということで、案外中身が分からなくても受け入れてもらえるという効果は、ひょっとしたら出てくるのではないかと思う。

1999

1999年10月10日



高レベル放射性廃棄物の処分とはどういう問題か



平成4年1月

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〔目次〕

まえがき	1
I 高レベル放射性廃棄物とは	2
① およそどういうものか	2
② 放射能の中身	3
③ 長い時間の問題	5
〔参考〕 様々な放射性核種と半減期	7
II 廃棄物の処分とは	8
① 処分の必要性	8
① 処分は管理の総仕上げ	9
② 投棄から責任ある処分へ	10
III 地層処分とは	11
① 地層処分の基にある発想	11
② 地層処分のドラマと役者達	13
③ 地層処分の役者達の働き	14
〔参考〕 ガラス固化	15
〔参考〕 地層処分場	16
IV 地層処分の安全性	17
① 遠い将来までの安全性	17
② 長期の安全評価はできるか	18
③ ナチュラル・アナログ	19
〔エピソード〕 ローマ人の釘	20
V 関連する話題	21
① 処分の様々な方法	21
② 郡分離－消滅処理	23
③ 地下研究施設	24
④ 地層処分の歩み	28
〔参考〕 岩塩層について	30

我が国における原子力発電は、既に、総発電電力量の26%を占めておりますが、総合エネルギー調査会の報告書（1990年6月）によりますと、原子力は21世紀においても重要なエネルギー源として位置付けられており、我が国の予想されるエネルギー需要の伸びと、エネルギー消費に伴う地球環境影響予測を基に、2000年では、5050万キロワット、2010年では、7250万キロワットの設備規模が必要であると見積もられています。その場合原子力は、2000年および2010年の電力供給について、それぞれ総発電量の約35%、および、約43%を占めることになります。ここには、石油依存からの脱却、地球規模の環境問題の解決への原子力発電の役割についての認識と、原子力への大きな期待が込められています。

一般的に言って、人間の活動には、何らかの廃棄物を伴うのが通常ですが、原子力発電から、私達がエネルギーの供給を受けようとするれば、それに伴う放射性廃棄物の問題を避けることは出来ません。今日、原子力発電についての期待が高まる一方で、その安全性と共に、放射性廃棄物はどのように管理されるのかについての心配が、広く国民の中に存在しています。

そのような放射性廃棄物の中で特に高レベル放射性廃棄物は、管理の難しい廃棄物の代表と考えられ、廃棄物の管理*、とりわけその処分*の問題は、広く人々の注目するところとなりました。しかし、この問題の大摺みの全貌を、平易にかつ簡明に述べた資料はなお少ないと思われまますので、その点を少しでも補うことが出来ればという趣旨で、本資料を作成しました。特に、原子力に関心を持って居られるけれども、しかし、廃棄物を専門としていない方々に何らかの参考になれば幸いです。（用語；管理と処分については11頁をご覧ください）

なお、本資料のまとめ方として次のような構成にいたしました。

(1) 出来るだけ簡明で、読みやすくする意味で、原則として1項目1頁としました。

しかし、図、表等を補足する必要がある場合には、本文の次にさらに1頁を追加してあります。

(2) また用語等の説明で、別の項目を参照して頂きたい場合は、記号*を付しました。

高レベル放射性廃棄物の処分とはどういう問題か

I 高レベル放射性廃棄物とは ーおよそどういうものかー

原子力はクリーンで、環境面からみて好ましいと考えている人々でも、放射性廃棄物が心配と言う方は少なくないと思われます。その放射性廃棄物の中でも、特に管理が難しいとされている高レベル放射性廃棄物とは、およそどんなものなのでしょうか。

(1) 石油、ガス、石炭の場合のように、燃料を空気中で燃焼するのとは違い、原子力の場合は、核燃料の中で原子核を分裂させてエネルギーを取り出します。その際、高い放射能を持った、いわゆる燃え滓の灰が発生し、その大部分が核燃料の中に残ります。このために、燃料としての役割を終わって原子炉の外に取り出された核燃料、すなわち、使用済燃料は飛び抜けて高い放射能を持っています。使用済燃料を再利用しない場合には、この使用済燃料そのものが高レベル放射性廃棄物となります。

(2) 我が国の政策では、使用済燃料を化学的に処理し、燃料をより有効に利用する、すなわち、再処理をする方式をとっていますが、その場合は、化学処理によって、使用済燃料中の大部分の放射性物質を含む、放射能の飛び抜けて高い液状の廃棄物が出てきます。しかし、液体の状態では、長期の貯蔵にも、勿論処分にも不適當ですので、今日では先ずガラスに封じ込める処理をして、固体にするのが普通になりました。従って、再処理をする方式では、先の液体廃棄物とともに、この放射能の高いガラス固化された廃棄物*も、高レベル放射性廃棄物と呼んでいます。

(3) 何れの場合でも、高レベル放射性廃棄物の特徴は、放射能が飛び抜けて高いことと、そのために熱が発生する点にあります。高レベル放射性廃棄物はまた、小さい容積の中に大量の放射性物質が入っているという意味で、コンパクトな廃棄物と言えます。

原子力発電に由来する放射性廃棄物の中で、高レベル放射性廃棄物は、私達に危険をもたらす可能性の最も高い廃棄物の一つであり、適切な安全対策の確立が不可欠であるとされています。

I 高レベル放射性廃棄物とは -放射能の中身-

高レベル放射性廃棄物の際立った特徴の一つは、廃棄物のもつ放射能が極めて高いということですが、その放射能の中身に少し立ち入って見ることにします。

(1) 放射性核種

廃棄物が放射能を持つのは、その廃棄物がなんらかの放射性核種を含むことを意味します。従って、含まれている放射性核種の種類と量を見ると、放射性廃棄物の放射能の中身がよく分かります。ここで放射性核種とは放射能を持つ原子のことを言います。

(2) 原子力発電から発生する放射性核種

原子力発電に伴って、たくさんの種類の放射性核種が発生しますので、個々の放射性核種を個別に取り上げるのは大変面倒です。そのために、適切に分類した放射性核種のグループを基に放射性廃棄物を考えるのが便利で、実際にも広く行われています。その意味から、次の2つのグループは、廃棄物の処分の問題を考えるのに特に重要です。

- ① 核分裂生成物：この分類に入る放射性核種の多くは、寿命が比較的短く、 γ 線、 β 線を出します。この他に一部ですが、寿命の非常に長い放射性核種も含まれています。
- ② アクチニド：この分類に入る放射性核種の多くは、寿命が大変長く α 線を出し、しかも、生物に対する放射線的毒性が高いとされています。

(3) 高レベル放射性廃棄物の中身

上述の2つのグループの放射性核種がどの程度の量含まれるかによって、放射性廃棄物の大体の性質が決まりますが、高レベル放射性廃棄物は、この両者を多量に含む廃棄物であると言えます。この事から高レベル放射性廃棄物については、短期および長期の両面からの安全対策が大変重要になります。

I 高レベル放射性廃棄物とは -放射能の中身- (続き)

使用済燃料と高レベル放射性廃棄物に含まれる
放射能とその時間による変化

原子炉から取り出し 以後の経過年数 (年)	使用済燃料中の アクチニド (GBq)	高レベル放射性廃棄 物中のアクチニド (GBq)	使用済燃料および 高レベル放射性廃棄物 中の核分裂生成物 (GBq)
10	2660000	120000	11500000
100	234000	32700	1270000
1000	57000	8300	800
10000	16300	940	-
100000	1400	-	-
1000000	500	-	-

〔表の説明〕

- (1) この表は、金属に換算してウラン1トンを含む燃料に由来する廃棄物の量を基に、それぞれ対応する放射能を示しています。
- (2) 表に示す数値の単位は GBq で、GBq とは、毎秒 10^9 回壊変する放射能を示します。
- (3) 高レベル放射性廃棄物中のアクチニドが、使用済燃料より少ないのは、再処理によって、ウラン、プルトニウムの大部分が分離されたからです。

I 高レベル放射性廃棄物とは

—長い時間の問題—

長寿命の放射性廃棄物については長期的な安全対策が必要とされていますが、その長期とは、およそどの程度のものと考えたらよいのでしょうか。

(1) 廃棄物の放射能の減少

次頁の図は、高レベル放射性廃棄物の放射能が時間の経過とともに減少する様子を示しています。すなわち、

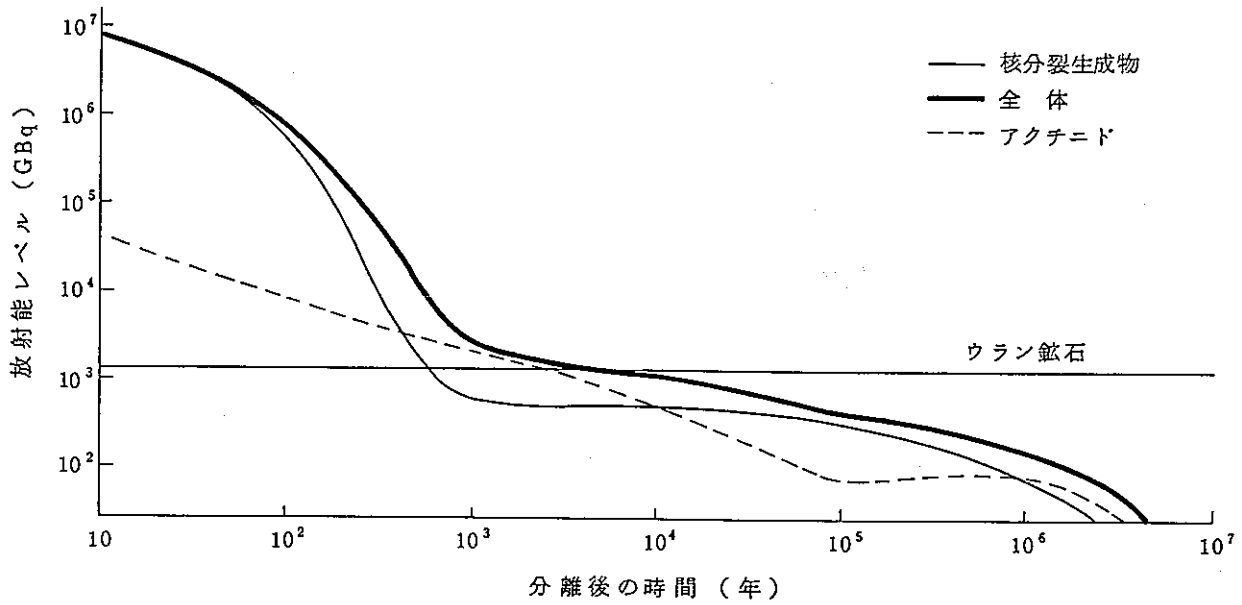
- ① 最初の約千年間は、放射能レベルの非常に高い期間で、この間に比較的寿命の短い核分裂生成物は殆ど壊変してしまいます。
- ② その後数千年を経過しますと、ウラン鉱石の放射能とほぼ同じレベルまで減少し、
- ③ さらに、数100万年以上の期間、最後に残ったアクチニドと非常に寿命の長い核分裂生成物がゆっくりと減少します。

(2) ウラン鉱石との比較

高レベル放射性廃棄物が由来するそもそもの出発点が、核燃料の原料となるウラン鉱石であることと、人類はその誕生以来ウラン鉱床と共存してきたことを考えますと、高レベル放射性廃棄物の放射能が、ウラン鉱石のレベルまで下がるための数千年という期間は、安全上の一区切りと考えることは出来そうです。しかし、事柄はもう少し複雑で、廃棄物とウラン鉱石の実際の危険性を比較するのには、単に放射能レベルだけでなく、その他にいろいろな要因を考慮する必要があります。たとえば、ウラン鉱石が置かれる状態、すなわち、鉱床として地下にある場合は、放射能レベルは同じでも人間に対する危険性は遙に小さくなる筈です。

(3) 長い時間の問題

従って、上述のような時間の数値が、高レベル放射性廃棄物の安全を確保する上で、どの程度の意味を持つかを明らかにするには、さらに検討が必要です。しかし今仮に、放射能レベルが非常に高いか、あるいは、十分に低いとは言えない期間、すなわち、千年、数千年をとったとしても、それらは、私達自身の寿命を遙かに超えた時間であり、私達がまさに長い時間の問題に直面していることを示しています。



この図は、高レベル放射性廃棄物の放射能が時間とともに減少する様子を示しています。横軸は時間（年），縦軸は燃料1トンに由来する廃棄物の放射能レベルです。GBq は、毎秒 10^9 回壊変する放射能を表す単位です。

様々な放射性核種の例とその半減期の値を、参考として以下に示します。半減期とは、放射性核種が壊変して半分になるまでの時間で、長寿命の核種とは、普通、半減期が30年以上の放射性核種を言います。

I 地球が誕生した時から存在する放射性核種の例

	半減期		半減期
ウラン-238	約45億年	トリウム-232	約140億年
カリウム-40	約13億年		
(ウラン-238の娘核種)		(トリウム-232の娘核種)	
トリウム-230	約8万年	ラジウム-228	約7年
ラジウム-226	約1600年	トリウム-228	約2年

II 高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種の例

(核分裂生成物)	半減期	(註) 放射性核種の量	
		(g)	(GBq)
ストロンチウム-90	約29年	4.2×10^2	2.1×10^6
テクネシウム-99	約21万年	0.8×10^3	0.5×10^3
セシウム-135	約300万年	1.1×10^3	1.3×10
セシウム-137	約30年	1.0×10^3	3.0×10^6
ヨウ素-129	約1600万年	1.8×10^{-1}	1.2×10^{-3}
(アクチニド)			
ウラン-238	約45億年	4.7×10^3	0.6×10^{-1}
ネプチニウム-237	約200万年	4.4×10^2	1.1×10
プルトニウム-239	約2.4万年	2.5×10^1	0.6×10^2
アメリシウム-241	約400年	0.6×10^2	0.7×10^1
アメリシウム-243	約7000年	0.9×10^2	0.6×10^3

(註) 放射性核種の量：再処理後10年の廃棄物（金属に換算してウラン1tに相当する核燃料）に含まれる放射性核種の量です。

II 廃棄物の処分とは

— 処分の必要性 —

「高レベル放射性廃棄物の最終的な対策として、安全に処分するのは当然」とする考え方が一方で、「高レベル放射性廃棄物を処分するのは疑問」とする方々も決して少なくありません。ここでは、処分を必要とする理由とともに、処分に対してよく表明される疑問点を紹介します。

(1) 処分の必要性

高レベル放射性廃棄物のように多量の放射性核種を含む場合には、対策の基本は、如何にして廃棄物を閉じ込めるか、あるいは、如何にして廃棄物を人間環境から隔離するかにあります。しかし、高レベル放射性廃棄物の場合には、さらにその長期の問題に如何に対応するかが加えられる必要があります。すなわち、単に隔離ではなく、長期間にわたる隔離を、如何にして確実に継続するかが問題になるわけです。私達は既に、放射性廃棄物を安全に貯蔵する技術も経験も持っています。しかし貯蔵では常に人間の監視を必要とします。従って、貯蔵によって廃棄物を長期的に隔離しようとするれば、監視やモニタリングといった人間の直接的関与が、果して何時まで確実に継続できるかが問題になります。もし人間の直接的関与を非常に長期に継続するという約束が出来ないとすれば、貯蔵は、高レベル放射性廃棄物の最終的な対策としては不十分と考えざるを得ないということになります。ここに、人間の直接の介入に依存せずに長期の安全を確保できる対策として、処分が必要とされる理由があります。

(2) 処分への疑問

しかしその一方で、高レベル放射性廃棄物の処分に対する次のような疑問も広く存在します。すなわち、① 処分は、結局、廃棄物を棄てることと同じであり、責任ある対策とは言えないのではないか、② 長期的に安全で、技術および経済的に実現可能な、高レベル放射性廃棄物の処分方法が本当にあるだろうかという疑問です。

上述の処分の考え方については、既に国際的な合意があります。しかしそれはまだ専門家の間の合意に過ぎません。従って今後は、人々のこのような処分への疑問を解くことが出来るかどうか、大変重要な課題となるものと思われます。

II 廃棄物の処分とは

－処分は管理の総仕上げ－

廃棄物管理の分野では、処分(Disposal)と並んで、処理(Treatment)、管理(Management)が用語としてよく使われますが、相互の関連でいうと、処分とはどういう意味になるのでしょうか。

(1) 廃棄物の処理

放射性廃棄物中の特定の放射性核種を化学的に濃縮したり、廃棄物を圧縮して、容積を小さくしたりするような操作を、広く廃棄物の処理と呼んでいます。高レベル廃棄物の場合、液状の廃棄物をガラスに封じ込める*、ガラス固化という一種の処理を行います。その処理（特に調整と言うこともあります）は、その後に行う貯蔵や処分の安全性を飛躍的に高める働きをします。しかし、ガラス固化*することだけ、すなわち、廃棄物を処理するだけでは、廃棄物管理はまだ途中まで来たに過ぎません。

(2) 廃棄物の管理

実際、廃棄物の管理には、たくさんの段階があります。すなわち、① 廃棄物の発生、② 処理、③ 調整、④ 輸送、⑤ 貯蔵、⑥ 処分です。廃棄物の好ましい対策では、上述の各段階の方策が互いによく関連するように計画され、着実に実施されることが、大変重要です。このような考えが基になって、廃棄物の発生から処分まで、一貫して行われる活動の全てを廃棄物の管理と呼ぶようになりました。もし、廃棄物管理の計画の中に、処分のための対策が欠けているとしますと、尻切れトンボの廃棄物管理ということになってしまいます。

(3) 廃棄物の処分

以上のように見ますと、廃棄物の管理は、発生量を如何に最小にするかというような、廃棄物の発生についての対策から出発し、適切な処理等を経て、最終的に、安全な処分が行われて初めて完結することになります。すなわち、廃棄物の処分とは、廃棄物管理の最終段階で行われる、管理の総仕上げであるということが出来ます。

II 廃棄物の処分とは

—投棄から責任ある処分へ—

私達は廃棄物の処分場のことを、よくゴミ捨て場と言います。外国の新聞の見出しで、高レベル放射性廃棄物の場合でさえも、その処分地のことを、ダンピング・サイトと呼んでいるのに会うことがあります。廃棄物管理の分野では、このゴミ捨ての問題にはどう応えているのでしょうか。

(1) 処分についての国際的合意

放射性廃棄物、特に高レベル放射性廃棄物については、その技術面だけでなく、処分の基本的な考え方、あるいは、処分の原則について、早くから国際的な検討が行われてきました。そのような検討の成果として、1989年には、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全の原則が、国際原子力機関（IAEA）から公表されました。この中で最も基本的な原則は、将来の世代への責任に関するもので、その極く大筋の内容は次のとおりです。

- ① 第1の原則は、将来の世代への負担を最小にするために、私達は高レベル放射性廃棄物を安全に処分しなければならないということであり、
- ② 第2の原則は、処分をする場合、将来の世代の介入に頼って、初めて長期の安全性が確保できるというような他人任せではいけないということを定めています。

(2) 最後まで責任をとる処分へ

従来、私達の社会では、廃棄物は何の疑問もなく私達の周辺の環境に捨ててきました。今日では、廃棄物の再利用の努力もなされるようになりましたが、廃棄物の全てを再利用できないとすれば、処分は避けられません。しかも無責任な投棄は許されなくなるでしょう。今後、廃棄物の処分をどうすべきかは私達の社会の大きな課題になると思われます。

このように考えますと、先に挙げた高レベル放射性廃棄物の処分の安全の原則は、投棄あるいは捨てる処分から、最後まで責任をとる処分への変革を、各国共通の目標として明確に宣言したものと言うことができます。

Ⅲ 地層処分とは

—地層処分の基にある発想—

地層処分がどのような発想を基にしているかを見ることにより、地層処分とはおよそどんなものかについて概略のイメージを持つことが出来ます。最近、米国科学アカデミーが公刊した地層処分に関する報告書の中に、次のような記述がありました。ここで地質隔離 (Geological Isolation) という言葉は、地層処分と全く同義に使われています。

『地質隔離とは、一つの鉱山を作ることに相当します。ただし、その場合は、
鉱石は採るのではなく、地中に後から入れ込むことになります。』

これは、地層処分を一つの比喩で示したのですが、それと同時に、地層処分の考え方を示唆していると言えます。その点について次のように理解することが出来ます。

私達は、地下に有用な地下資源あるいは鉱床が眠っているという表現をすることがよくあります。鉱床には、金、銀、銅、鉛、亜鉛というような金属鉱床、ウラン鉱床*、石油のような液体の鉱床など様々な種類があります。これらの何れの鉱床も、人間が採掘しない限り、殆ど永久に眠り続けるものと考えられています。また、考古学的に貴重な遺物が地下に埋没して、極めて長期にわたり殆ど完全に保存されていることが驚きをもって発見されることがありますが、これは既に、世界各地での共通した経験と言えます。このようなことから、地下には、物を非常に長期にわたり閉じ込める機能があると考えることが出来ます。そのような機能を使って、放射性廃棄物を閉じ込めることは出来ないだろうかという考えは、恐らく、極く自然に生まれたものと思われれます。

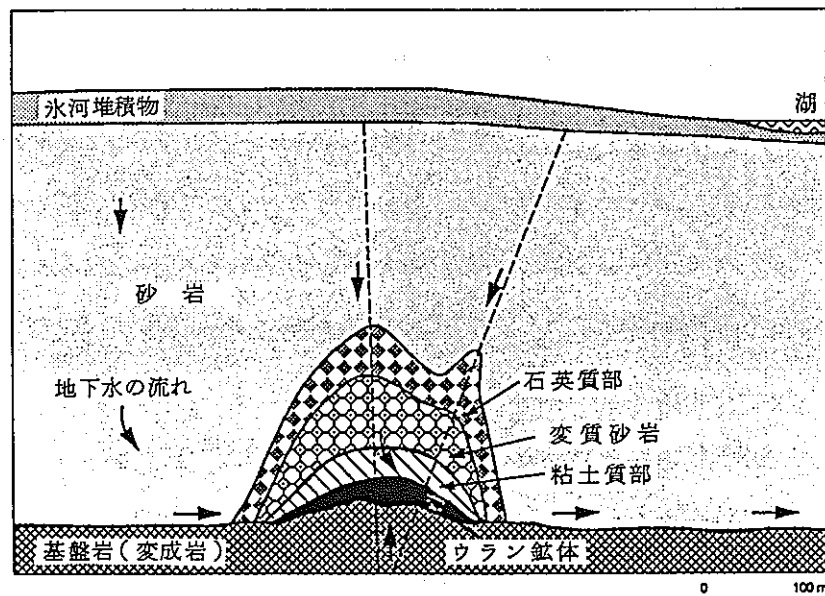
改めて地層処分の基になっている発想とは何かと云えば、地下という空間と、そこに広く存在している、物を長期に閉じ込めるメカニズムを活用して、高レベル廃棄物のように長寿命の放射性廃棄物を安全に処分しようということです。言い換えますと、地層処分とは、地下資源を採掘するのとは逆のやり方で行う、新しい地下利用の一つと云うことが出来ます。

先に「鉱床が地下に眠る」ということを申しましたが、以下、ウラン鉱床でみられた、際立った実例を一つ紹介します。

カナダの西部の州、サスカチュワンに、シガーレイク(Cigar Lake)鉱床という、砂岩の中に、約13億年前に生成した大変古いウラン鉱床があります。鉱体（鉱石の集合部を言います）は、地下430mにあり、鉱石中のウランの含有量は、平均で12wt%、局所的には、最高で55wt%以上あり、鉱床全体に含まれるウランの総量は、 1.5×10^5 tとされています。これは、世界的にみても最大、最高品位クラスのウラン鉱床の一つと言えます。この砂岩はまた、地下水で飽和していることも重要な点です。

このようなウラン鉱床について誰でも次のようなことを考えることと思います。すなわち、これ程の高品位の鉱石が多量にあり、約10億年を経過し、430mの地下において地下水と接触していたとすれば、放射性核種の何らかの地表への漏出が測定されるのではないかという考えです。しかし実際には、地下のウラン鉱床の存在を直接示す兆候は、地表からは全く得られなかったのです。

ウランは一般的に言って地表の環境下では比較的移動し易い元素ですが、我が国のウラン鉱床の場合も含め、地下の環境下では移動し難いという事実が分かっています。



シガーレイク鉱床の模式断面図

(OECD/NEA, 1991を基に作成)

Ⅲ 地層処分とは

—地層処分のドラマと役者達—

地層処分とは、高レベル放射性廃棄物を非常に長い期間にわたって、人間環境から安全に隔離する技術ですが、その長い隔離の過程を一つのドラマに譬えることができます。

(1) 長い長いドラマ

地層処分のドラマの主役の一人は勿論、悪役である放射性核種です。悪役を閉じ込めるため、外界からの執拗な作用に抗して、個性豊かな役者達がチームを組んで大活躍し、悪役である放射性核種が弱ってしまうまで粘り強く、人間と環境を護り通すというのが、地層処分の長い長い物語の大筋です。このドラマには、3グループの役者が登場します。

(2) 第1の役者グループ：廃棄物パッケージ

廃棄物パッケージは、放射性廃棄物に直に接するグループで、悪役を閉じ込める第1の砦の役割を受け持ちます。廃棄物を包み込んでいるガラス固化体やその容器等がこのグループに属する役者達です。

(3) 第2の役者グループ：処分施設（工学施設）

処分施設あるいは工学施設は、廃棄物を受け入れ、地下に輸送し、しっかりと定置する役割を受け持ちます。また、悪役の閉じ込めでは、第2の砦となります。地上から地下深部にわたり特別に設計された土木工学施設の他、廃棄物パッケージを取り囲む粘土材料等が、このグループの役者達です。

(4) 第3の役者グループ：地質環境

最後は、若干異色なグループで、その名を地質環境と言います。悪役の放射性核種を閉じ込めるための最後の砦と言うことができます。このグループには、地上から深部にわたって広範囲に分布する地層や岩石に加えて、深部の地下水の水理的条件や化学的条件のよ

うに、私達が普段余り見掛けることのない役者達が重要な役割を演じます。

Ⅲ 地層処分とは

—地層処分の役者達の働き—

地層処分とは、悪役である放射性核種を長期に閉じ込める、長い長いドラマに譬えられることを申しました。次に、地層処分のドラマでの役者達の働きを一寸見てみましょう。

(1) 廃棄物パッケージ

悪役の放射性核種は、廃棄物パッケージの中で、先ずガラス状の固体の中に密封され、そのガラス固化体は、さらに金属容器に入れられているのが普通です。悪役がこの状態から外に出るには、地下水に頼る必要があります。すなわち、容器を腐食して侵入し、さらに、ガラスを溶かして入ってきた地下水の中に、悪役自身がなんとか溶け込まなければなりません。これは、悪役の立場からすれば、大変時間のかかる大仕事です。

(2) 処分施設（工学施設）

処分施設は、廃棄物パッケージをしっかりと保持しているだけでなく、地下水が外から浸入して、廃棄物パッケージに達するの、また、地下水が放射性核種を溶かし込んで、外へ出てゆくのも妨害します。このような処分施設（工学施設）の働きを、材料として支えている立役者が「粘土」です。

(3) 地質環境

地下水が、やっと悪役を取り込んで処分施設の外に出て来たとしても、地質環境が待っており、地下水がその中で自由に動き回ることを許しません。その上、地下水の通路にいる岩石や鉱物が、やっと脱出して来た悪役の放射性核種を再び捕らえてしまいます。

地層処分場のサイトを決めるためには、その地質環境をよく調査し、このような役割を果たすことの出来る条件を持った場所を選ぶ必要があります。

(4) チームワーク

以上3つの役者グループの働きの一端を紹介しました。しかし、ドラマの本当のハイライトは、役者グループ全体のチームワークです。すなわち、このチームワークを工夫することによって、地層処分は、悪役を極めて長期間、確実に閉じ込める技術に発展しつつあります。廃棄物管理の分野では、このチームワークのとれた役者グループ全体を、特に地層処分システムと呼んでいます。

(1) ガラス固化

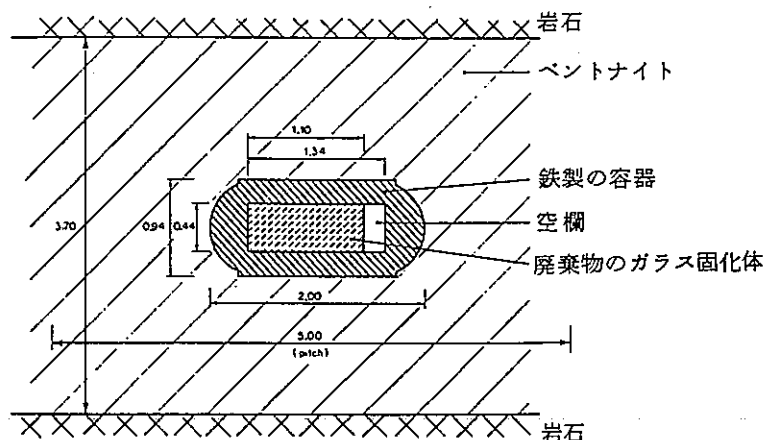
液状の廃棄物を固体に転換することが固化ですが、固化の媒体としてガラスを採用する場合、それをガラス固化と言います。ガラスは、分子のスケールで見ますと、結晶のように規則的な構造を持たないので、様々な放射性核種を余り差別なくガラスの中に受け入れるという、いわば柔軟な性質を持っています。廃棄物を余すところなく固化して長期的に閉じ込めるという目的からすると、廃棄物の固化には、上述の柔軟性と固化体の化学的安定性が特に重要とされています。

(2) ホウケイ酸ガラス

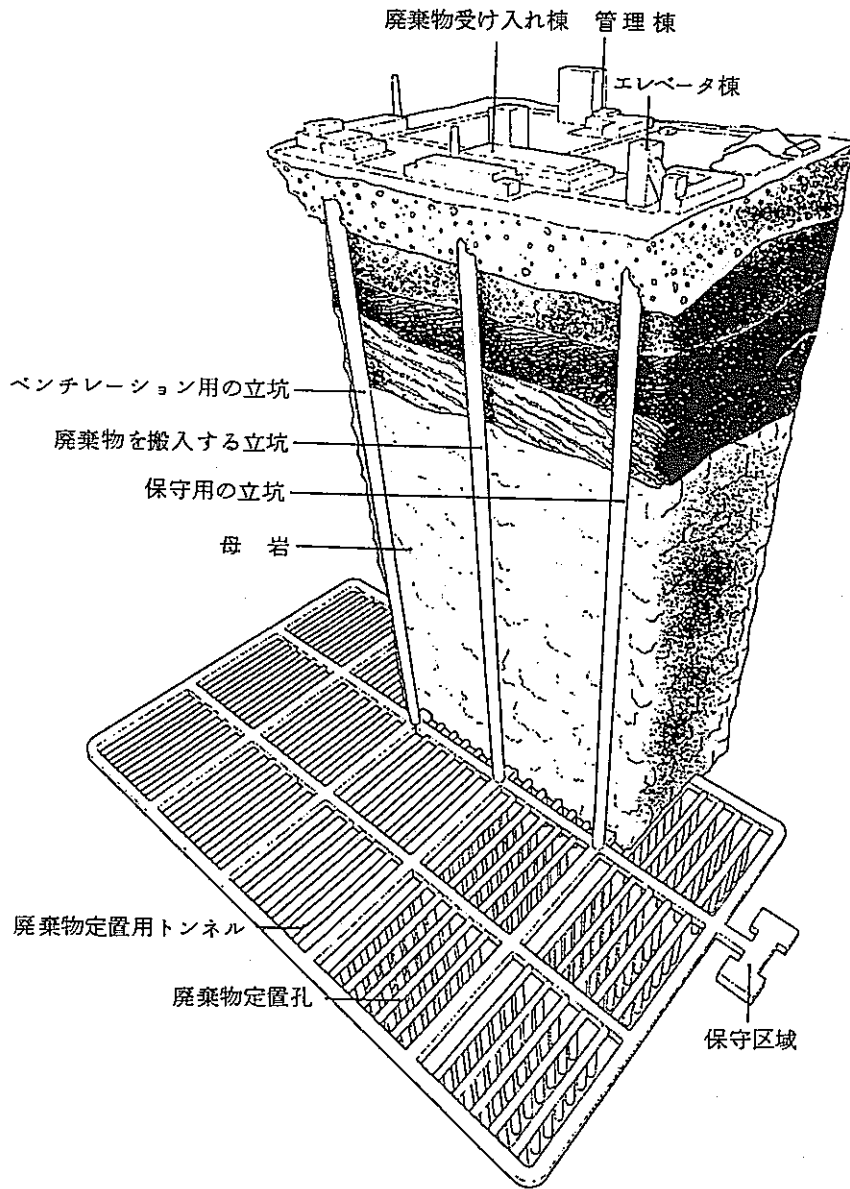
ガラス固化に使うガラスの種類としては、長年にわたる研究の結果、各国とも、今日ではホウケイ酸ガラスを採用しています。ホウ素を含んだガラス、すなわち、ホウケイ酸ガラスが選ばれた理由は：① 上述の意味での柔軟性が大きいこと；② ガラス固化体（廃棄物を含むガラス）が安定で水に対する耐浸出性が高いこと；③ ガラス固化のプロセスが、実用規模で実証されていること等です。

(3) 天然のガラス

自然界にも、天然のガラスが広く分布していますが、その中で玄武岩ガラスは、シリカの含有量がホウケイ酸ガラスに類似しており、ガラス固化体のナチュラル・アナログ*として長期的変質のメカニズムや変質速度の研究が各国で行われています。日本では、火山堆積物に含まれる玄武岩ガラスの研究を行っています。



ガラス固化体の地下定置の一例（スイス，NAGRA，1985 による）
数値の単位はmです。



地層処分場の概念を示す一例

(OECD/NEA, 1988 による)

IV 地層処分の安全性

— 遠い将来までの安全性 —

地層処分では、今日の世代から遠い将来の世代までを含む非常に長期の安全性が問われますが、しかしこの長期的安全はまだ決して自明な事柄とは言えません。以下、この問題に関連してどのような検討がなされているか、その二三の要点を紹介します。

(1) 将来の安全性のレベル

IAEAでは、地層処分の安全原則（1989）の一つとして「将来の世代の安全性のレベルは、私達の世代が今日容認している安全性のレベルを下回らないこと」を決めました。将来の世代の安全性のレベルをどの辺におくかは、長期的対策の根本に来るしかしなかなか難しい問題です。すなわち、将来の社会では安全性についての要求がより厳しくなることも考えられますが、その反対に、放射線の影響についての知識が進み、安全性に対する要求が緩くなることもあり得るからです。一方、私達の活動ではどうしても今日の世代の幸福の追求が主となり、将来の世代の幸福は従になってしまうのが普通です。これらを総合しますと、上述のIAEAの原則は前向きでまず妥当な原則と言えるでしょう。

(2) 長期的安全性の指標

私達の世代を対象としたいわば短期の放射線防護では、有効で実際的な安全の指標が既にあります。その指標とは人々が実際に受ける放射線の被曝線量で、その場合、安全を護る筋道は、「被曝線量が一定の限度を超えないように制御すること」となります。では、非常に長期の安全については何を指標にしたらよいのでしょうか。これが私達の当面している新しい問題です。国際的な討議の末、そのような安全の指標の一つとして、処分に伴って将来起こると予測される個人の被曝線量が決められました。この他に処分に起因して予測される人間の放射線的环境の変化も、指標の一つとして提案されています。有効で実際的な指標は何か、という観点からなお検討が続けられるものと思われます。前者の指標によりますと、長期的な安全を護る筋道は、「予測される線量が一定の限度を超えないように予め適切な処分対策を実施すること」と表現できます。特定の処分対策の長期的安全性を、この筋道に従って事前に評価することを安全評価と言いますが、如何にしてより信頼性の高い安全評価を行うかが、今日なお各国の研究者達の共通の課題となっています。

高レベル放射性廃棄物の処分とはどういう問題か

IV 地層処分の安全性

—長期の安全評価はできるか—

処分により遠い将来までの安全性が確保できるか否かを判断するのに安全評価の役割は大変重要ですが、では、地層処分について長期の安全評価は可能なのでしょうか。

(1) 最近(1991), この分野の、世界の専門家達の意見を集約した報告書が、国際機関(OECD/NEA)から公表されました。その報告書の標題は、まさに、『放射性廃棄物の処分: その長期的な安全は評価できるか?』でした。

(2) 地層処分の重要性は、早くから認識され、過去、約15年間、多くの研究者達がこの分野の研究開発に参加し、安全評価に関する次の課題に応える努力がなされました。それは、『数1000年以上もの長い期間について、地層処分の安全性を、その評価の方法も含めて広く社会に示す』という大変難しい課題です。

(3) 上述の報告書には、この課題について、表現は少々慎重ですが既に明るい見通しが得られていることが述べられています。その主要な結論をまとめると次の通りです。

前提となる条件, 認識	結 論
-対象とする処分システムについて正確で十分な理解をすることが安全評価の基本となること。 -処分サイトのデータの収集と評価が今後さらに進む必要があること。 -安全評価の方法は現行の研究によりさらに開発が進むと考えられること等。	① <u>地層処分の長期的安全評価の方法は既に利用できる段階まで進んでいる。</u> ② 安全評価の方法を適切に活用し、処分サイトの十分な情報が得られれば、 <u>特定の地層処分が長期的に安全であるかどうかを技術的に明らかにすることが出来る。</u>

IV 地層処分の安全性

－ナチュラル・アナログ－

地層処分が、非常に長期にわたって安全かどうかを明らかにするため、安全評価を行います。その安全評価の成果に対する信頼性を高める上で、強力な援軍がもう一つあります。それは、自然が人間には不可能な程十分に長い時間をかけて行った実験であり、ナチュラル・アナログと呼ばれています。

(1) オクロの天然原子炉

アフリカのガボン共和国にある、オクロ鉱床と呼ばれるウランの鉱床の中で、天然原子炉が存在したことが、1972年に発見されました。天然の原子炉が活動したのは、まさに、20億年も前のことです。この発見は、特に、高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究者に対して大きな衝撃を与えました。それは、天然の原子炉で発生した天然の高レベル放射性廃棄物が、地下で極めて長期間どのような挙動をしたかを、研究者が直接観察し、調べることが出来たからです。この研究の成果の一つとして、長期的に危険性の高いアクチニドが、このように長い期間が経過したにも関わらず、発生した場所から殆ど移動しなかったということが分かりました。この事はそれまでの研究によって予測はされていましたが、それを裏付ける重要な事実が発見されたことになります。

(2) ナチュラル・アナログ

オクロの天然原子炉は、高レベル放射性廃棄物の地層処分の全体について、自然が行った総合試験だったという意味で、ナチュラル・アナログの代表とされています。しかし今日では、地層処分に見られる長期的閉じ込め過程の一部に相当するいわば部分試験ではあっても、もし重要な情報が得られる天然の現象があれば、それを広くナチュラル・アナログと呼んでいます。日本でも東濃のウラン鉱床が研究されていますが、ウラン鉱床は、高レベル放射性廃棄物に含まれている放射性核種と化学的性質の似た天然放射性核種を含んでおり、それらの地下深部での長期的挙動を明らかにすることができるという意味で、重要なナチュラル・アナログの一つです。地層処分の信頼性を高めるのに、広くナチュラル・アナログという裏付けを持つということは、地層処分という処分方法の一つの特徴とすることが出来ます。

(1) ローマ人の記録

ローマ人が英国（ブリタニア）を支配していた、西暦1世紀の頃のことです。ローマ人は最も遠隔地にある軍事基地を撤退することになりました。

その際、貴重品は別として、多くの物品を現地に残さざるを得ませんでした。軍事的価値のある物資を、好戦的な原住民に残すのは困ります。それを避けるために、彼等はどのような物資を地下に埋めて隠すことにしました。

一方ローマ人には、物事の記録を克明にとる習性がありました。たとえば彼等の残した記録によりますと、ローマ人は、西暦86年に、約12トンの鉄の釘を、スコットランドの“Inchtuthil”にあったローマ人の砦の地に埋めたことになっています。

(2) 2000年後の釘

それから、約2000年の年月が経過して、考古学者は、875000本の釘を、その場所から発見したのです。一体、鉄の釘はどのような状態で発見されたのでしょうか。約2000年間の埋設の後に発見された、ローマ人が隠した鉄の釘の状態は、およそ次のとおりでした。

『地下に埋設された状態で、埋設体の表面から2～3cmにある釘は、激しく腐食していたのですが、その内側にある釘の多くは、殆ど変化せずに残っていました』

今日、高レベル放射性廃棄物は、ガラスに封じ込める処理をして固体にした後、それをさらに金属製の容器に入れることが考えられています。もしその金属材料として、25cm程度の鉄を使ったとしますと、地下深部の地層処分場に置かれた塊状の鉄の容器の寿命は1000年以上あるものと、実験室の試験データや地質環境の研究から計算し予測されています。「ローマ人の釘」は、このような予測を裏付けるナチュラル・アナログの一つと言えるでしょう。

V 関連する話題

—様々な処分の方法—

高レベル放射性廃棄物の処分の方法としては、世界的にも地層処分が最も有力な方法と考えられています。しかし、その他にも様々な方法が検討されてきました。以下はその2つの例です。

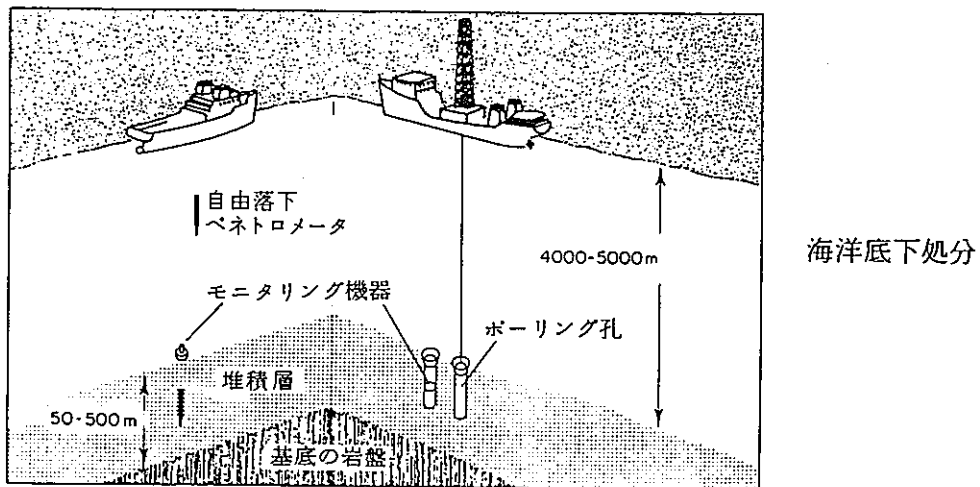
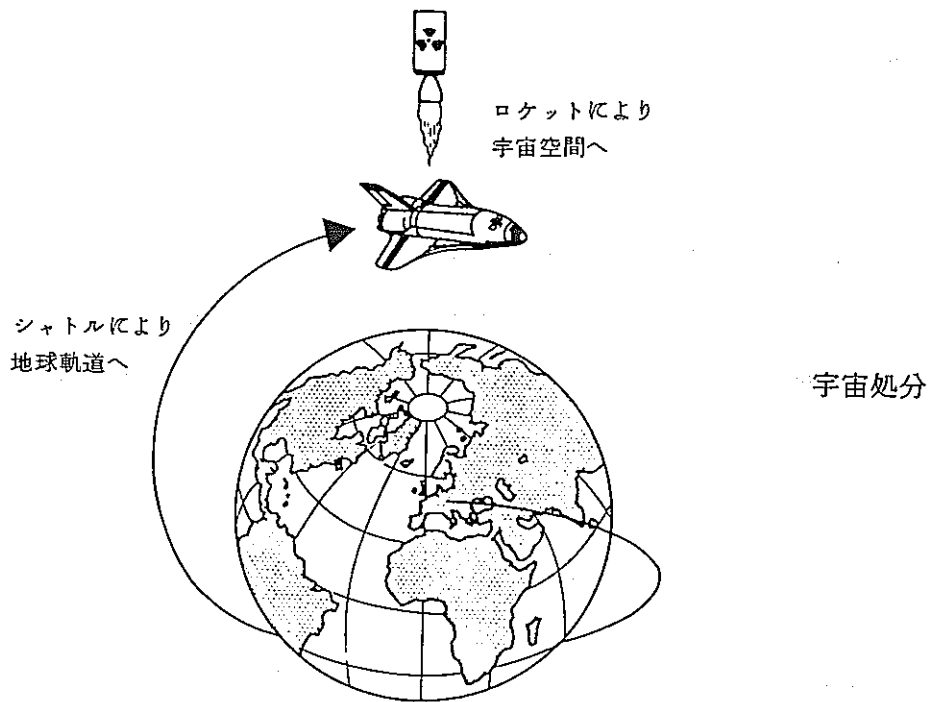
(1) 宇宙処分 (Space Disposal)

宇宙処分とは、廃棄物を宇宙に打ち上げて地球から完全に切り離してしまう方法で、もし成功すれば、大変よい方法と言えるかも知れません。米国のNASA（航空宇宙局）が行った研究によると、宇宙シャトルで廃棄物を先ず地球軌道に打ち上げ、それをさらに宇宙空間に打ち上げることは、技術的には可能であるとのこと。しかし、例えば1986年の米国宇宙船チャレンジャー号の事故などを考えますと、この方法には、打ち上げの失敗による影響をどう考えたらよいかという問題があります。事故によって廃棄物の汚染を受ける可能性のある地域は世界中に広がり、政治的にも難しい問題となりそうです。従って、宇宙処分の実現性にはまだ疑問があると言えます。

(1) 海洋底下処分 (Sub-seabed Disposal)

海洋底下処分は、廃棄物を深海底の堆積層あるいは岩石の中に定置する処分方法で、処分する場所として地層を活用するという意味では、地層処分の一つの変種と見ることも出来ます。この方法の利点は、処分場所が深海のしかも海底の地層の中ですから、物理的にみて人間環境から極めて離れていること、堆積層とその下部にある岩石が、地質的にも化学的にも極めて安定していること等です。最近発表された国際共同研究の結論では、この方法は、安全性、および、経済性の両面から有望であるとのこと。すなわち、海洋底下処分は、技術的にはよい方法である可能性は高いと言えます。しかし、処分場所が公海になるために、この方法の実現には国際社会がそれを容認することが必要となりますがそれには国際政治の問題が絡むでしょう。従って、近い将来に国際社会が海洋底下処分を受け入れる可能性は少ないものと考えられています。

以下は、宇宙処分および海洋底下処分の説明図です。



N. Chapman & I. McKinley, The Geological Disposal of Nuclear Waste, John Wiley & Sons, 1987. から引用。

V 関連する話題

群分離－消滅処理

(1) 群分離－消滅処理とは

高レベル放射性廃棄物の処分に関連して、私達が長い時間の問題に当面していることは既に述べました。この問題のそもそもの発端は、廃棄物がアクチニド等の長半減期の放射性核種を含んでいることにあります。群分離－消滅処理とは、その長半減期の核種を、適切なグループ別に化学的に分離して、原子炉や加速器という装置で半減期が短いあるいは非放射性的の核種に変換する処理方法を言います。地層処分の場合、この問題を解決するための基本となる原理は、廃棄物を人間環境から隔離するということですが、群分離－消滅処理では、問題になる長半減期の放射性核種の大部分を長期的危険性の小さい核種に変えてしまうのですから、ここには問題解決のためのもう一つの根本的な原理があるものと考えられています。

(2) 群分離－消滅処理をどう見るか

この新しい技術について、群分離－消滅処理の専門家や廃棄物管理の専門家は、どう見ているのでしょうか。以下、その主要な意見を挙げてみます。

- ① これは、将来、長期の廃棄物管理を大きく改善する可能性を秘めた夢のある技術であると考えられる。
- ② しかし、これを近い将来実現の可能な、いわゆる明日の技術と考えてはいけません。すなわち、高レベル放射性廃棄物の実際の処分対策を確立しようとする場合、この技術の活用を前提条件として考えてはいけません。
- ③ 群分離－消滅処理がたとえ実現できたとしても、廃棄物の処分対策としての地層処分を省くことは出来ないと考えられる。
- ④ 群分離－消滅処理の研究開発は、より長期的な観点に立ち、かつ、目的を明確にして着実に実施する必要がある。

我が国では、原子力委員会によって、1988年、群分離－消滅処理の研究開発長期計画が作成され、基礎的な研究が既に開始されています。また国際的には、オメガ計画と称するこの分野の国際プロジェクトが、1989年に発足しました。

V 関連する話題

—地下研究施設—

(1) 研究開発の今日の段階

世界的にみて、地層処分の今日の研究開発は、次のような課題に答えることを目標に行われています。すなわち、地層処分が一般的によい処分方法かどうかではなく、一歩進んで、その国の諸条件に適した地層処分の具体的な方法は何か、また、その方法がそれぞれの国で利用できる地質環境下で十分安全かどうかを明らかにするという事です。このような研究開発の段階を、実証段階と呼び、その前の基礎的段階や、その後に来る地層処分の実施段階と区別しています。

(2) 地下研究施設とは

このような意味での地層処分の実証段階で必要とされる野外の研究施設が、ここで取り上げた地下研究施設です。すなわち、地下研究施設 (Underground Research Laboratory) とは、実際の地層処分場サイトの地質環境と出来るだけ同等な地質環境を使って、組織的な試験あるいは調査が出来るように特別に計画したサイトおよび施設を言います。

(3) 地下研究施設のイメージ

地下研究施設のイメージは、以下の記述を一つに合体させたようなものと思われま

- ① それは鉱山に似ているが、これまでにない、新しい形の地下の研究所である。
- ② そこでは、土木工学、地球科学、材料科学、モデリング等の広い分野の研究者達が参加、協力して、上述の目的のもとに、個別的または総合的な研究が出来る。
- ③ 上述の研究の成果は、地層処分の他にも、広く環境問題等の解決に活用される可能性が期待できる。
- ④ 一般の方々も、地下研究施設を訪れ、地下の状況と研究の様子を見学できる。

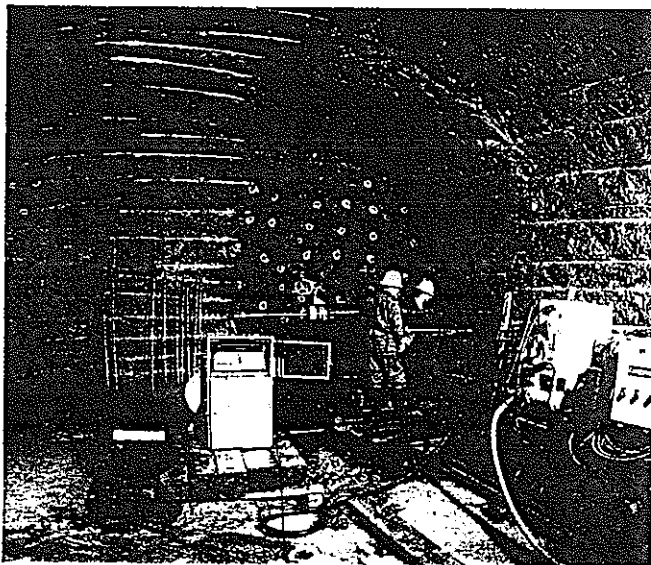
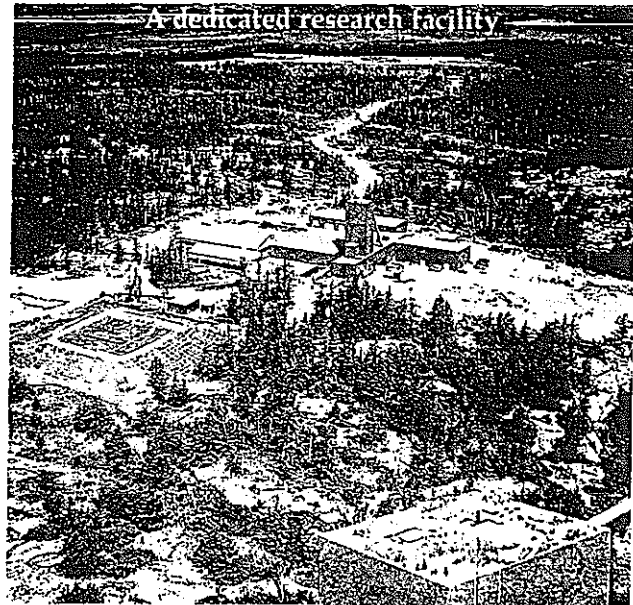
(4) 各国の地下研究施設

地下研究施設のサイトを処分場の候補サイトとして予定する国もありますが、多くは、地下研究施設のサイトと処分場サイトを、はっきり区別しています。何れの場合も、既にある各国の地下研究施設は地層処分の信頼性の向上に大きく貢献しています。

なお、地下研究施設の実例を示す写真を、参考として次に掲載しました。

(1) カナダの地下研究施設

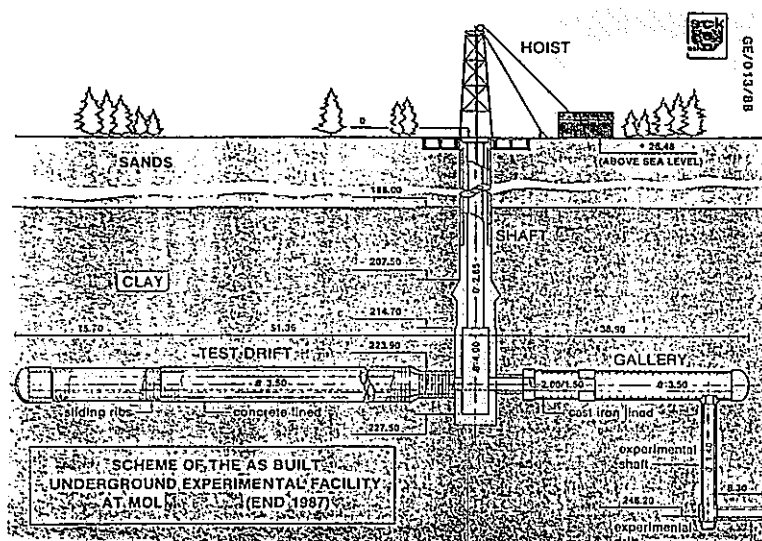
カナダの地下研究施設の →
鳥瞰図です。



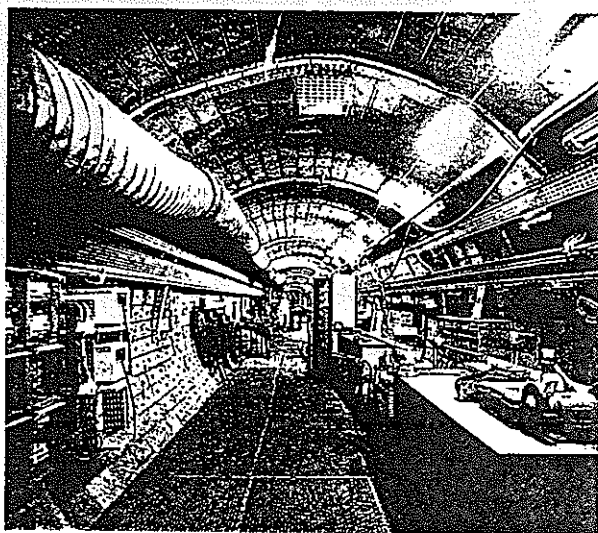
←
地下研究施設の空洞(240mレベル)
で岩盤の力学試験をしているところ
です。

カナダでは、Manitoba州、Lac du Bonnet の近くにある
カナダに特有な大規模の花崗岩体の中に地下研究施設を設置し、
1982年以降、花崗岩を対象とする実証試験を行っています。
地下研究施設 (Underground Research Laboratory) という用語
はカナダの地層処分の研究者が使い始めたものです。

(2) ベルギーの地下研究施設



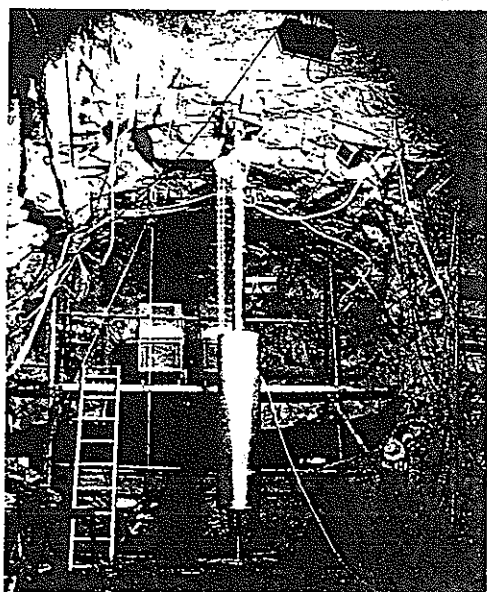
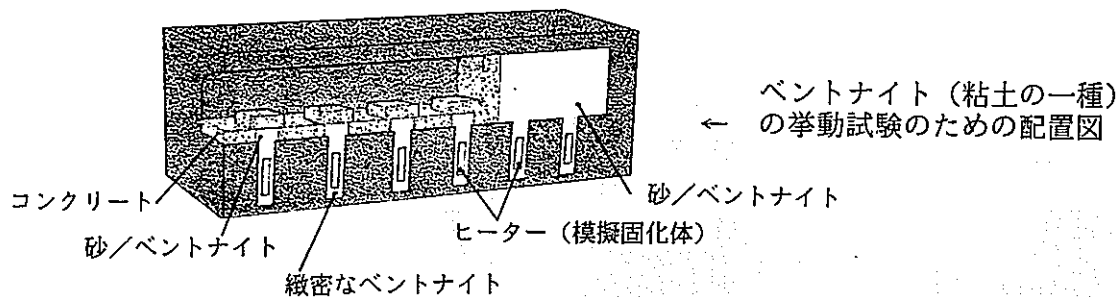
←
地下研究施設の断面図です。



←
地下研究施設の内部を示す図です。

ベルギーでは、Mol の原子力研究所のサイトにある比較的柔らかい粘土層の中に地下研究施設を設置し 1980 年以降、粘土を対象とする地層処分の実証試験を行っています。

(3) スウェーデンの地下研究施設



↑
 上述のベントナイトの挙動試験の準備をしている図です。



↑
 ボーリング孔をベントナイトで充填する試験を行っている図です。

スウェーデンでは、ストリパ鉱山という鉄の鉱山に隣接する花崗岩体を対象とした地下研究施設を設置し、1980年～1991年、花崗岩のような固い結晶質岩を地層処分に活用する場合に遭遇する基礎的な課題を取り上げ、ストリパ・プロジェクトという国際共同研究が行われ、日本もこれに参加しました。スウェーデンでは、より処分場に近い条件下で試験を行うため、この他に新しい地下研究施設を建設中です。

V 関連する話題

—地層処分の歩み—

世界的にみると、高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発が開始されて既に30年余りとなります。その間に、地層処分も進展し、広く廃棄物問題についての理解も進みました。地層処分の極く大筋の歩みを振り返ってみましょう。

(1) 1950年代～1960年代：

この時期は、廃棄物は環境中に捨てるものと誰でも考えた時代ですが、そのような時期に、高レベル放射性廃棄物の処分に適した地層として、岩塩層*が選ばれ、その研究開発が米国によって開始されました。それは、当時としては大変画期的な研究でした。

(2) 1970年代：

この時期には、地層処分の特に技術面からの組織的な研究開発が各国で進展しました。またそのための国際協力も活発に行われました。その結果、広く各国に存在する地質環境を活用でき、工学的手法を組み合わせる、今日の地層処分の骨組みが、この時期に完成しました。

(3) 1980年代：

この時期には、高レベル放射性廃棄物の処分の問題が、単に技術の問題ではないことが明らかになり、例えば法律の制定等、社会的側面からの対応が進められるようになりました。さらに、この時期の後半になりますと、処分対策が進展するためには、社会的な理解が必要であることが各国で共通して強く認識されました。

(4) 1990年代：

この時期には、専門家と一般市民を含む各層の人々との対話がさらに進む必要があるでしょう。その結果、広く社会的な理解の得られる高レベル放射性廃棄物の処分対策が具体化されることが期待されます。

各国の地層処分の実施計画

国名	地層の種類	処分の操業開始の
		暫定スケジュール
ベルギー	粘土	～2025年
カナダ	結晶質岩	>2010年
フィンランド	結晶質岩	～2020年
フランス	未定	～2010年
ドイツ	岩塩	～2008年
スウェーデン	結晶質岩	～2020年
スイス	結晶質岩	～2020年
	または	
	堆積岩	
アメリカ	凝灰岩	～2010年

〔表の説明〕

この表から、地層処分のために多様な地層が活用され、操業開始は、ほぼ2010年以降になることが分かります。従って、日本を含む各国とも、地層処分プログラムはなお研究開発の段階にあります。しかし、今後は、研究開発から一歩進み、高レベル放射性廃棄物の処分を如何にして具体的に実施するかの検討が次第に開始されるものと思われます。

(表は、OECD/NEA, 1991より抜粋して作成しました)

本文にも、岩塩が出て来ますし、地層処分は、よく岩塩層と結びつけて話題にされることが多いように思われます。では、地層処分と岩塩層は一体どのような関係にあるのでしょうか。

米国の科学アカデミーは、1955年、放射性廃棄物の地層処分に関する、世界で殆ど最初の会議を開きました。それは、そもそも廃棄物の処分のための研究が必要であることを、社会に明確に示した記念すべき会議であったと言えます。この会議の結論の一つは、地層処分のためには、第1に、岩塩層を研究すべしということでした。岩塩層は、①殆ど水を含まず、しかも事実上、水を透しません。また、②可塑性が大きく、③熱の伝導性が大変よいという特性があります。これらは全て、高レベル廃棄物の地層処分にぴったりの特性と言えます。これを受けて、地層処分の研究は先ず岩塩層から開始されたわけです。

岩塩層は、地質時代に海水が蒸発してできた堆積岩で、アメリカ、ドイツ等に広く分布しますが、世界的にみると分布の限られた特殊な地層と言えます。従って、日本を含む岩塩層のない国々の地層処分の研究は、世界的により分布の広い地層、たとえば、花崗岩とか粘土質岩等を対象とする方向に進んだのは自然の流れと考えることが出来ます。

岩塩層を主体とした初期の研究開発では、岩塩という地質環境のみに依存する地層処分の考え方が基礎にあったように思われます。これに対応するように、岩塩層以外の地層を対象とする地層処分の研究開発では、天然の地質環境と工学的対策を合わせて活用する考え方が生まれ、今日では、この考え方がむしろ地層処分の一般的な原則として認められています。地層処分はこうして適用性の広い、かつ、信頼性の高い処分方法として発展しつつあります。

(村野 徹)

放射性廃棄物の処分：長期の安全性は評価しうるか？

(OECD/NEA 1991)

要旨の部分の翻訳

文 書 の 目 次

要 旨

長期の安全性を評価する必要性

コンセンサスが得られている点

安全評価から何が期待できるか

安全性の判断

結論：国際的な観点

参 考

I：安全評価方法における現状の要約

- ・一般的なアプローチ
- ・シナリオ開発
- ・モデルの開発と適用
- ・総合評価
- ・不確実性及び感度解析
- ・信頼性の確率
- ・処分のための規制規準
- ・評価の文書化

II：参考文献

III：専門家のリスト

要 旨

放射性廃棄物処分システムは、環境への放射性物質の将来の潜在的な放出が受入れられないリスクとならないことを確実にするために、必要な期間人間及び環境から廃棄物を隔離するように設計される。そのようなシステムは、低レベルで短寿命の廃棄物については地表あるいは地表近くに建設されてきている。また高レベルで長寿命の廃棄物については地質媒体中の深い地下に建設されることが広く考えられている。

どのような有害廃棄物処分システムの長期安全性も、その実施に先立って人を確信させるように示されなければならない。放射性廃棄物については、通常の社会的及び技術的計画の範囲をはるかに超えた時間スケールにわたる安全評価が、多くの国で既に実施されてきている。このような評価は、適切な管轄機関及び一般公衆のために、選定された個々の処分概念とサイトの長期安全性を調査研究し、定量化しかつ記述するための主要な方法を提供する。そのような評価は、4つの主要な因子に基づいている。すなわち、処分システムの定義をその周辺の環境、処分システムの健全性に影響を与えるかもしれない可能性のあるプロセスや事象の同定、予測モデルによる放射線学的影響の定量化、及び付随する不確実性の記述。

NEA の放射性廃棄物管理委員会とIAEAの国際放射性廃棄物管理諮問委員会は、放射性廃棄物処分システムの安全評価のための現在の科学的方法を注意深く評価し、本レポートで簡単な取りまとめを行った。両委員会は、多くの国における、様々な処分概念と形態に対して、一国のあるいは国際的な枠組みの中で実施された研究における安全評価方法を用いて得られる現在分かっている経験の評価も行い、本レポートでは参考として示した。

この評価によって、NEA の放射性廃棄物管理委員会とIAEAの国際放射性廃棄物管理諮問委員会は、

- ・提案する処分システムの正確で十分な理解が、意味のある安全評価の実施のための一つの基本的な事前に必要な条件であることを認め (recognize)
- ・提案する処分サイトから得られるデータの収集と評価が、将来の進展にとって必要な主要な仕事であることに留意し (note)

- ・安全評価を実施する能力において重要な進展が得られてきていることを認識し
(acknowledge)
- ・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であろうことを認識し
(acknowledge)
- ・安全評価手法は研究の進展の結果さらに進歩しうるしまた進歩するであろうことに留意する (note)

このような考察を念頭において、両委員会は、

- ・注意深く設計された放射性廃棄物処分システムの潜在的な人間及び環境への長期放射線影響を適切に評価するための安全評価手法は今日存在することを確認し(confirm)
- ・提案する処分サイトから得られる十分な情報と結びついた安全評価手法の適切な利用は、現在及び将来の両方の世代に対して処分システムが安全の十分なレベルを社会に提供するものか否かを決定するための技術的な基礎を与え得ると考える(consider)

この総意文書は、放射性廃棄物の管理分野における、欧州共同体の活動計画のための欧州共同体委員会の専門家によって支援されている。(endorse)

長期の安全性を評価する必要性

適切に設定された放射性廃棄物処分システムの最初の包括的な長期安全評価が行われてから十年以上が経過した。処分システムの開発、サイト調査研究及び安全評価には膨大な物的・人的資源が投入されている。低レベルで短寿命の廃棄物については、いくつかの国において操業中の処分システムが存在しているし、新しい処分場が計画されていたり、建設中である。高レベルで長寿命の廃棄物については、いくつかの国においては処分場の許認可や実施のプロセスが開始している。しかし、最初の高レベル廃棄物処分場は、今後20年間の間に操業を開始する見込みはない。

放射性廃棄物処分システムの実際的な目標は、放射性物質の環境への将来の潜在的な放出が受け入れられないリスクとならないことを保証するために、必要な期間、人間及び環境

から廃棄物を隔離することである。最終処分のためのプロジェクトの計画及び実施において、二つの基本的な前提が強調されてきている。第一に、放射線学的な潜在的長期毒性は、明白に認められているし、少なくとも、我々が受入れているものと等しいレベルで将来の世代を防護することを保証する責任は、広く受入れられている。第二に、この付託の直接の結果として、提出される解決の長期安全性が処分に先立って人を信用させるように示されなければならない。

これらの課題は、NEA の放射性廃棄物管理委員会によって、1985年の報告書の中で最初に示された。特に、長寿命放射性廃棄物の処分に関しては、委員会は、封じ込めバリアによるパッシブシステムを用いた深い地層中への処分が、適切な安全性を提供する実現の可能性のあるアプローチであること、およびそのような処分が、最終的には社会による継続的なメンテナンスとサーベイランスを要求するような貯蔵にとって替わるべきである、との見解を表明した。

しかし、二番目の課題、安全性を示すとはどういうことなのか？放射性廃棄物の管理においては、通常の社会的および技術的計画の範囲を遙に超えた時間スケールにわたって処分の安全性を解析する試みがなされてきている。しかし、そのような解析の実行可能性についての議論が続けられており、そのような解析の結果の妥当性についての懐疑の声がしばしば聞かれる。特に、3つの重要な疑問が生じている：

- ・処分システムのふるまいや人間および環境への潜在的な放射線学的影響は、（高レベルで長寿命の廃棄物については）数千年を超える範囲にわたって、また、（低レベルで短寿命の廃棄物については）数百年を超える範囲にわたって、十分に良く理解されるであろうか？
- ・専門家および管轄機関は、予測したふるまいが実際に起こることを代表している、ということを確認をもって示しうるであろうか？
- ・潜在的な放射線影響とそれらの影響の見積りの意味が、広く一般の人々に対して分かりやすく説明されうるであろうか？

これらの疑問に応えるための能力を開発する必要性が、過去15年以上にわたる安全評価の知識の発展を促してきた。この文書の目的は、放射性廃棄物処分の安全性を評価するた

めのアプローチと実際的な方法に関して、明らかになったコンセンサスを簡潔にかつ分かり易い形に抽出することである。この目的は以下の3つの方法で達成される：

- ・ 広く国際的にコンセンサスが得られている主要な全般的課題を抽出することにより；
- ・ 長期安全評価の定量的な結果を如何にして一般的に表現するかを述べることにより；
- ・ 評価結果の受容性に影響を与えるいくつかの主要な課題について簡単に議論することにより、達成される。

コンセンサスが得られている点

安全評価は、その評価結果を適切な安全基準と比較することにより、総合的な廃棄物処分システムの将来のふるまいおよび人間と環境へ与えるその潜在的な影響を解析することであると定義されうる。ここ数年間の間に、安全評価の役割とフレームワークに関して国際的なコンセンサスが増してきている。このコンセンサスの特に3つの局面が以下のように表される：

- ・ 先ず第一に、たとえ、このふるまいをすべてにわたって詳細に予測する必要（あるいは可能性）は考慮されないとしても、環境への放射性物質の有害な放出は起こり得ないであろうことを確信するために、処分システムの将来のふるまいは充分良く理解されなければならないことが認められている。広い意味での安全評価は、この理解を得るためおよびそれを責任ある当局や関心のある公衆に伝えるための最も重要な方法である。
- ・ 第二に、データを取得するための手順、モデルを開発し利用することおよび安全評価を実施し評価（レビュー）する手順は勿論のこと、安全評価の一般的なアプローチに関しては広く国際的なコンセンサスが存在する（詳しくは参考1を参照されたい）。安全評価は、予測モデルによる方法の効果的な利用および処分システムとその可能性のある変動を記述する広い範囲の科学的情報を要求することが明確に理解されている。
- ・ 第三に、研究の初期の段階、および放射性廃棄物処分システムの立地、設計、建設、操業と廃止と最終密閉までの一連の過程を通じて、安全評価は処分場開発プログラムの

欠くことのできない部分を形成しなければならない。特定のサイトと処分場の設計の許認可に先立ち、さらに情報が必要で、その場合にはどのようなタイプの情報が必要であるかを定めるために、安全評価は、処分システムの立地と開発につれて繰り返し進めなければならない。安全評価は、処分システムのための許認可文書の作成の極めて重大な部分を形成する。

安全評価から何が期待できるか

放射性廃棄物処分システムを含む、技術システムの全てについて、安全なふるまいが絶えず続くということの絶対的な保証は不可能である。達成しなければならないことは、提案した処分システムが現在と将来両方の世代に対して十分な安全のレベルを提供する、人を心服させるに足る間接的な実証である。従って、期待されかつ考えられることは、安全性に重大な影響を与えると思われる因子を適切に考慮する科学のおよび規制のプロセスであることと、その方法によれば、提案した廃棄物処分システムが長期にわたり充分安全であると考えられるかどうかを決定するための基礎を提供することである。

この目的のために、廃棄物処分場からの放射性核種の潜在的な放出と、将来のいかなる時点においてもサイトの近傍に人が居住すると仮定し、その個人に対する放射性核種の放出の結果生じる可能性のある放射線被曝線量とを見積もるために計算を実施することである。これらの計算に関して、二つの重要な観察・実験が行われうる：

- 廃棄物処分場からの放射性核種の放出は、システムの安全バリアの漸進的な劣化を含む予見しうる状況下と一連の安全バリアの破壊を含む殆ど起こるとは考えられない状況下で起こることが仮定される。従って、実際のリスクを評価するために、結果は、それがどの位厳しいものかということと、どのくらい起こりうるかということに照らして示されなければならない。
- 今から数千年後あるいはそれ以上経った後、環境中に放出された放射能の結果生じる被曝線量の計算は、通常、現在の生活習慣に基づいて行われる。遠い将来の生活条件の

予測は、それがどのようなものであっても、大いに思索的であろう。従って、そのような計算は通常、遠い将来に生活するある種の人間に対する実際の線量の予測ということよりも、もし放出が今日起こるとすれば線量はどのようになるであろうか、という例解として見なされる。

従って、評価した処分システムの長期間の放射線学的影響は、通常、安全基準と比較しうる安全の目安 (indicators) と考えられる。

安全性の判断

安全評価方法に関する現在の新しい知見は、本レポートの参考1に手短かに要約されている。しかし、ここに強調するのに値する3つの原則的な課題がある：

- ・ 統合した評価に対する必要性
- ・ 評価結果における不確実性の考慮
- ・ 評価結果における信頼性を構築するための方法

処分場のふるまいを評価する最終的な目標は、統合したかつシステムチックなアプローチを通じて、人間及び環境への可能性のある放射線学的影響を決めることである。そのような評価は、ある特定の処分システムの特性を記述し、予測されかつ期待される長期間の変化の重要な局面を論じ、かつ、可能な範囲で総合的なシステムの影響を放射線学的な表現で記述する。安全性に重要な影響を与える全ての因子は、厳密に検討され、明確に文書化される。評価の過程で考慮されるある現象は、感度解析によって示されるように、最終結果に多少重要であることがわかるかもしれない。従って、強調すべきことは、首尾一貫した解析と安全に関連する全ての要素の統合である。

不確実性は、評価結果に関連して常に存在するし、将来もそうであろう。例えば、自然のシステムに本来備わっている変動を反映するような、ある種の不確実性は定量化できるかもしれない。しかし、例えば、処分システムの健全性を阻害するかもしれない将来の事

象を予測するのに固有な、その他の不確実性は、同様な方法によっては定量化できないかもしれない。不確実性、特に後者のタイプの不確実性における境界を決めるために、公式な形の専門家の判断が求められるかもしれない。サイト特性調査と研究の重要なねらいは、不確実性の知見を得ること、および、可能な場合には常に、統合化した評価の結果における総合的な不確実性を減らすことができるように、これらの不確実性を定量化することである。この方法により、決定のための十分な基礎を与えることができるであろう。

しかし、安全評価における不確実性の扱いは、処分システムの安全性において信頼を築き上げる必要性、という広範にわたる課題の一部である。例えば、信頼は、研究やサイト調査を支援するためのみならず、安全評価を実施するための適切な品質保証や品質管理の手順の確立を通して強められる。また、安全評価で用いられる予測モデルが実際のシステムのふるまいを適切に表すことを確実にする（確認する）プロセスを通じて、信頼は築かれる。予測したふるまいを、安全性が示されなければならない長期間にわたり、処分システムの実際のふるまいと直接に比較することは不可能である。そのような保証を間接的に得るためには、ウラン鉱床のような代表的なナチュラル・アナログの研究から得られるデータに対するのと同様に、研究室および野外における実験で得られたデータに対する、モデル化した結果のシステムティックな評価が要求される。最後に、専門家の判断と十分な評価（peer review）がまた、信頼を築き上げるプロセスの一部である。このような活動の全て、これは、しばしば国際的なレベルで実施されるが、評価結果の信憑性を高めるのに貢献するために、さらに支持される必要があるであろう。

従って、統合化された評価で得られる情報が明快に公表され、評価結果に関連する不確実性が正当に考察され、およびプロセスに含まれる管轄規制当局やその他の法的機関による批評的な評価が行われた後に、廃棄物処分システムの安全性は判断される。国の規制システムは、そのような要求事項を含む。

結論：国際的な観点

情報交換や共同プロジェクトを通じた国際協力は、安全評価の手法の開発に実体的な役

割を果たす。特に、国際協力は、この分野における最新の知見を定期的にシステムティックに評価することを促し、専門家間における、見聞が広くかつ目的が明確にされた議論に貢献する。

このような評価によって、NEA の放射性廃棄物管理委員会と IAEA の国際放射性廃棄物管理諮問委員会は、

- ・提案する処分システムの正確で十分な理解が、意味のある安全評価の実施のための一つの基本的な事前に必要な条件であることを認め (recognize)
- ・提案する処分サイトから得られるデータの収集と評価が、将来の進展にとって必要な主要な仕事であることに留意し (note)
- ・安全評価を実施する能力において重要な進展が得られてきていることを認識し (acknowledge)
- ・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であろうことを認識し (acknowledge)
- ・安全評価手法は研究の進展の結果さらに進歩しうるしまた進歩するであろうことに留意する (note)

このような考察を念頭において、両委員会は、

- ・注意深く設計された放射性廃棄物処分システムの潜在的な人間及び環境への長期放射線影響を適切に評価するための安全評価手法は今日存在することを確認し (confirm)
- ・提案する処分サイトから得られる十分な情報と結びついた安全評価手法の適切な利用は、現在及び将来の両方の世代に対して処分システムが安全の十分なレベルを社会に提供するものか否かを決定するための技術的な基礎を与え得ると考える (consider)

この総意文書は、放射性廃棄物の管理分野における、欧州共同体の活動計画のための欧州共同体委員会の専門家によって支援されている。(endorse)

放射性廃棄物の処分：安全評価手法のレビュー

(OECD/NBA 1991)

要旨の翻訳

文書の目次

要旨

- ・ 一般的アプローチ
- ・ シナリオ開発
- ・ モデル開発と適用
- ・ 総合的評価
- ・ 不確実性および感度解析
- ・ 信頼性を構築する
- ・ 処分のための規制規準

1. 序

2. 放射性廃棄物の発生と処分

3. 性能評価の基礎

4. 性能評価の技術

5. 性能評価において信頼性を構築すること

6. 性能評価の改良

さらに詳しく知るための文献

参考

要 旨

人間および環境から放射性廃棄物を隔離するために工学的処分システムが必要である。そのようなシステムは、低レベルで短寿命の廃棄物については地表あるいは地表近くに建設されてきた。また、高レベルで長寿命の廃棄物については、地層中の深い地下に建設されることが広く考えられている。このようなシステムは通常処分場と呼ばれているが、環境への廃棄物の有害な放出のリスクが規制機関および一般公衆に受け入れられる程度に低いことを確実にするように設計される。このレポートは、放射性廃棄物に対する工学的処分システムの安全性を評価するのに有効な手法に関する文書である。この文書の主要な目的は、性能評価手法の簡潔な要約と放射性廃棄物処分計画の中での利用について示すことである。

一般的アプローチ

どのような有害廃棄物の処分システムの長期間の安全性も、その実施に先立って人を心服させるように示されなければならない。放射性廃棄物の場合には、社会的および工学的計画の通常範囲を越える時間スケールにわたって安全評価が幾つかの国で既に実施されてきた。このような評価は、選定された処分概念やサイトの長期間の安全性を調査し、定量化し、かつ記述することの主な意味を提供する。ある一つの安全評価は、多数の互いに関連する要素によって構成される。それぞれの要素は完全に文書化される：

- ・ 選定された処分システムの可能性ある将来の展開の広範な同定。このプロセスはシナリオ開発と呼ばれる；
- ・ 適切なモデルの開発と適用；
- ・ 総合的な評価による潜在的な放射線学的結果の評価；
- ・ 不確実性および感度解析；
- ・ 評価の全ての構成要素の確証と評価；および
- ・ 評価結果の規準との比較評価

これらの要素間のフィードバックと全ての要素を総合したセットを通じての繰り返しは、

安全評価の重要な観点である。

この一般的なアプローチについては広く国際的なコンセンサスがあるわけであるが、評価の目的や適合すべき安全規準のタイプによって、異なる特定の技術が用いられることに留意することが重要である。加えて、安全評価に用いられるモデルやデータは、廃棄物特定の条件、概念に特定の条件およびサイト特定の条件に依存して異なる。最後に、処分される廃棄物、さらに全体としての処分システムの同定や特性の把握は、意味のある安全評価のための必要なベースである。

シナリオ開発

安全評価の出発点としてのシナリオ開発は、その後行われるモデル化や影響計算において考慮されるべき将来の可能性の広い範囲を定義することに関係する。自然のシステムや人工バリアに関する既存の知識と結びついた人間の想像や科学的判断は、シナリオ開発の基礎を形成する。過去数年間にわたり、シナリオ開発の手法は、システムティックでわかりやすいアプローチを用いることによって非常に改善されてきた。安全評価の中でまず第一に考慮されなければならない事象（例えば、断層、地震、浸食）のリストが現在開発されている。最近になって、ごく少数の現象が潜在的に重要なものとして同定されたが、これらは、サイトに特有あるいは概念に特有なベースのものであった。

最近非常に注目を集めた一つの特定な分野は、人間侵入シナリオの評価である。人間侵入の検討に対する基本的なアプローチに関する作業、およびサイトと処分場の内容に関する情報の保存に関する作業が考慮されている。

規制によって要求されたり規制が関与するようになると、詳細な帰結解析のために選定された最終的な一連のシナリオの発生の見込みの評価は、安全評価の特に難しい要素の一つとなりうる。いくつかの異なる技術が用いられているにも係わらず、検討されている将来の事象のタイプやプロセス、および得られるデータに応じて、それらの全ては少なくともある程度までは専門家の判断の活用依存する。

モデル開発と適用

安全評価において潜在的な放射線学的影響を評価するために予測モデルを用いることの必要性は良く認められており、モデル開発のための一般的な手順が良く受け入れられている。予測モデルは、廃棄物隔離システムの更に重要な局面に対して開発されてきた。数年間にわたり、より現実的で詳細にすることを旨として徐々に改良が行われてきている。放射性廃棄物処分システムの性能を決定する鍵となるプロセスの影響を評価し定量化するために、詳細さや現実性のレベルに差はあるものの利用可能なモデルは存在する。より良いモデル化が評価結果に関連する不確実性を明確にするあるいは減らすことができるであろうから、幾つかの領域においては更に開発を進めることが当然であるとされている。そのような開発の推進は、処分システムの設計の改良のためにも役立つことになるであろう。

近年、モデル開発とそれに相当するデータ収集の努力の間の相互依存に特別の注意が払われてきている。加えて、進行している研究のうち一つの主要な領域は、より大きな総合的モデルに特定のプロセスに対するモデルを結合すること、および安全評価のためにそれらを実際的手段とするために必要な単純化である。システムの多要素の関連する物理的、化学的特性の基本的特性およびそれらの推移の正しい基本的な理解は、モデル化を成功させるための一つの主要な必要条件である。

総合的評価

データ収集、シナリオ開発および予測モデルの最終的な目標は、処分システムの特性を記述し、かつ時間の関数としての放射線学的な安全性によって総合的なシステムの性能を定量化する総合的な評価である。種々の岩種における高レベル廃棄物の概念処分場の総合的安全評価が数年にわたりいくつか実施されてきている。低レベル廃棄物の（地表近くおよび深地層の）施設に対する許認可のための評価もすでに行われている。これらの評価の結果、今日および将来の人間環境にたいして安全であると考えられる処分場を立地し建設することは可能であることが示唆された。

安全評価モデルは二つの互いに補い合うタイプになる傾向がある。それは、詳細な研究レベルのモデルと単純化したシステムモデルである。詳細な研究レベルのモデルとその結果は、設計とエンジニアリングのオプションを評価するために必要であるし、単純化したシステムモデルにおいて安全上重要でないプロセスを排除するための防御ベースを提供するのに用いられる。単純化したシステムモデルはより強力な解析あるいは境界解析を実施するのに用いられるであろう。強力な境界アプローチにおいては、シナリオ、モデルおよびパラメータの値は、保守的に（すなわち悲観的に）選定される。従って、評価は単純化され、システムの安全性に重要でないいくつかの不確実性の議論は許認可の手順の中で排除される。

不確実性および感度解析

不確実性は常に評価結果に関係する。不確実性は、さらにモデル開発を進めることによって、またさらに正確なデータを収集することによって部分的に少なくすることができる。しかし、不確実性は、現在および将来におけるシステムの状態の変わりやすさを反映し続けることになるであろう。必要とされるデータの広範囲の測定が実現不可能な場合には、統計学的手法が次第に信頼されるものとなる。いくつかの場合においては、不確実性はコントロールプロセスの限られた理解からも生じうる。

総合的安全評価の一部として、感度研究は不確実性を最も減らす必要のある領域に関するガイダンスを提供する。このガイダンスは処分サイトと概念に関して固有であり、最も研究開発が必要とされる領域へ国の人的および財源的資源を振り向けることに用いられる。加えて、不確実性に関する情報は、それらの処分場に対し処分場の設計、処分場の設計と立地に対する可能な範囲の改良に提供される。

信頼性を構築する

安全評価の最終的な目的は、放射性廃棄物処分システムに関する事実に立脚した決定のための基礎を提供することである。この目的のために、科学者、安全評価者、規制者および意思決定プロセスに含まれているあるいは関係している者は安全評価によって得られる情報、洞察および結果に確信を持つことが必要である。この問題の重要性は本文でふれている。ここではモデルの確証(validation)に関する若干の追加する注意事項についてのみふれている。

モデルの確証は、モデルが実際のシステムの挙動を適切に現すことを確実にするプロセスである。この分野での努力は近年増大してきている。長期間の確証はプロセスのモデル化の適切さに焦点を置かなければならない。プロセスのモデル化は可能性のある将来の合理的な範囲の変化の下で性能評価を定義することになるであろう。長期間にわたるシステム性能予測の確証を行う方法はない。しかし、モデル化のある特定の局面の適切さは、様々な実験室研究、野外研究およびナチュラルアナログ研究を通じて支持されるかもしれない。幾つかの国際共同プロジェクトが、安全評価において用いられるモデルの確証の可能性を調査するために設置されてきている。

確証の必要性は処分概念に依存する。幾つかの概念について、潜在的な処分サイトにおける原位置試験研究の支援のみを受けて確証が成功裏に行われ得る。処分場の設計、処分システムの安全性の評価において用いられるモデルを確証の可能性の研究と関連する工学バリアの間の共同が増していることは明らかである。

処分のための規制規準

最終的な許認可評価においては、安全評価結果は確立された規制スタンダードや規制規準の内容に照らして評価される。個人および集団の放射線防護に対する国際規準が、実質的に全ての国で放射性廃棄物処分システムに対する長期の安全規準の開発のためのベースとして用いられてきている。いくつかの国では、放射性廃棄物処分に適した詳細な規制を有している。それに対してその他の国では、廃棄物の最終処分のための特別な要求事項を設定する必要性はなく一般的な放射線防護目標を指定している。国ベースおよび国際的な

ベースの両方において、とりわけ、高レベル廃棄物処分場の許認可のための当然の順序としてそのような利用可能な規準を設定するために、放射性廃棄物処分システムの長期安全性に対する特定の規準を開発する作業がさらに続けられている。

安全評価のアプローチ、方法および要求されるデータの詳細は、適用される詳細な規準に依存および影響される。特定の安全スタンダードの詳細な記述は、国毎の法的あるいは歴史的な理由により異なるえあろうが、同様な一般的なタイプの安全評価作業が必要なことは明白であり、かつ規制プロセスのある段階で行われている。

統合化した評価において得られる情報の明確な提示をした後、評価結果に関連する不確実性の考察の後、および規制機関や意思決定プロセスに含まれる他の機関による批判的レビューを経た後でのみ、廃棄物処分システムの安全性は判断される。規制機関や他の機関による批判的レビューに対する必要性の観点からみると、安全評価結果の明確な提示に対する必要性は、そのベースとなる仮定、データベースおよびモデル化のアプローチの必要性とともに、明らかである。評価結果を科学的なコンファレンスやシンポジウムにおいて発表したり出版することによって得られる経験や予備的な評価を記述する文書の専門家による詳細なレビューによって得られる経験を通じて、この挑戦的な仕事は精力的に行われる。