

語彙基盤（地層処分の言葉）

2024年3月

一般社団法人日本原子力学会

「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象
とした理解促進に関する方法の検討」特別専門委員会

本出版物の著作権について

この出版物には著作権が存在します。ご利用になる場合は、下記の条件に従ってください。

出版物に記載されているグラフ・イラスト・テキスト等につきましては、個人での使用をはじめ、教育・広報・報道目的での使用であり、かつ、原作のイメージを損なう改変等をしない限り、出典を明記したうえでご利用いただけます。

商業目的、営利目的等でご使用される場合は、

- ① 利用の目的、転載を予定している申請者の著作物（著编者名、著作物名、出版社、発行年/巻/号、利用目的など）
- ② 転載したい該当項目、該当頁、図表番号など

を明記の上

① ご所属（会社名）、②ご担当者名、③電話番号、④E-mail アドレス、⑤ご住所を明記した「転載・引用許可願」をメールにて下記あてに提出願います。

連絡先：〒108-0014 東京都港区芝 4 丁目 1 番地 23 号 三田 NN ビル 2 階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004（技術部）、FAX 03-6371-410、E-mail gijutsubu@numo.or.jp
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

取得させていただく個人情報は、お申込み及びお問い合わせの回答の目的で利用します。法律に定められている場合を除き、第三者に提供することはありません。

この出版物は、一般社団法人日本原子力学会が原子力発電環境整備機構の依頼を受けて、「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした理解促進に関する方法の検討」特別専門委員会において、専門性、公平性、透明性の観点から選ばれた委員が、公益財団法人原子力安全研究協会に置かれた事務局の補佐のもと、その持ち合わせる知見、経験、学識を活かし、正確性や有用性を期すべく最善を尽くして作成したものです。

しかしながら、一般社団法人日本原子力学会および公益財団法人原子力安全研究協会ならびに原子力発電環境整備機構は、この出版物が含む情報およびその内容に関し、いかなる保証もするものではありません。この文書を用いたことにより生じる損害についても、一切の責を追いかねますのでご了承ください。

まえがき

一般社団法人日本原子力学会は、2021年9月に、原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）の依頼を受けて、「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした理解促進に関する方法の検討」特別専門委員会（以下、委員会）を設置し、以降、2021年2月にNUMOが、サイトが特定されていない段階におけるセーフティケースとして発行した「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－」（以下、包括的技術報告書）の技術的信頼性について、広く社会から理解と納得を得るための方法論を検討してきました。

本委員会では、様々な学術分野の専門家である委員だけでなく、委員の周辺の地層処分に馴染みの薄い専門家や社会問題に関心を持つ研究者のご協力を得て、専門家間で議論のすれ違いや誤解が生じている論点の原因を探り、特に重要な用語についてその言葉の意味する内容を背景情報と併せて取りまとめることにより、コミュニケーションのための知識ベースの構築を目指しました。

その成果として、地層処分に特有の概念や用語に対する認識のずれ、様々なステークホルダーに対して地層処分の安全性を総合的にまとめたセーフティケースの分かりにくさを解消するために、地層処分に特有の用語の代表的なものについて、その理解を助けるための解説を「語彙基盤（地層処分の言葉）」として取りまとめました。

地層処分事業の専門技術者、さらには、セーフティケースに係る様々なステークホルダー、地層処分に興味を持つ皆様は是非本資料をご一読いただき、安全コミュニケーションに際しての一助として頂ければと考えます。さらにご関心のある読者には、ぜひ、NUMO が作成した包括的技術報告書本体もあわせてご覧いただくことで、詳細をご確認いただけるものと思います。

また、本委員会での「語彙基盤（地層処分の言葉）」の取りまとめの過程において、様々なステークホルダーとのコミュニケーションにおいて留意すべきことを広く議論しました。安全コミュニケーションを改善するための工夫などをまとめた附属資料「語彙基盤（地層処分の言葉）」を用いた安全コミュニケーションの提案も併せてお読みいただくことで、「語彙基盤（地層処分の言葉）」については地層処分への理解も深まるものと考えます。

今後、様々な方々の考えや立場に基づく議論や新たに得られる知見にもとづいて適切に改良、拡張が試みられることで、本資料の利用価値がさらに高まるものと期待します。

本委員会において本資料を作成する過程においては、委員会の求めによりNUMOから情報提供を受け、参考にしました。特に、NUMO 技術部の高橋美昭氏と古崎敦也氏には常に適時に必要な情報の提供をいただきました。記して御礼申し上げます。なお、本資料作成の主体はあくまでも本委員会であり、NUMO の関与はあくまでも情報提供にとどまったことを申し添えます。

2024年3月

一般社団法人日本原子力学会

「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした理解促進に関する方法の検討」特別専門委員会

主査 佐々木 隆之

一般社団法人日本原子力学会
「地層処分のセーフティケースに係る様々なステークホルダーを対象とした
理解促進に関する方法の検討」特別専門委員会

委員名簿

2024年3月現在
(50音順・敬称略)

委 員

主査	佐々木 隆之	京都大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻 教授
幹事	若杉 圭一郎	東海大学 工学部 応用化学科 教授
委員	小林 大志	京都大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻 准教授
"	小山 倫史	関西大学 社会安全学部 教授
"	寿楽 浩太	東京電機大学 工学部 人間科学系列 教授
"	田中 牧郎	明治大学 国際日本学部 教授
"	半井 健一郎	広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授
"	廣野 哲朗	大阪公立大学 大学院理学研究科 地球学専攻 教授
"	松島 潤	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 教授
"	安江 健一	富山大学 学術研究部 都市デザイン学系 准教授

事 務 局

石川 博久	(公財)原子力安全研究協会
立川 博一	(公財)原子力安全研究協会
朽山 修	(公財)原子力安全研究協会
花淵 達也	(公財)原子力安全研究協会
原田 亜紀	(公財)原子力安全研究協会 (～2022年11月)

目次

語彙基盤（地層処分の言葉）	1
作成の背景	1
「語彙基盤（地層処分の言葉）」とは	1
「語彙基盤」の想定読者	3
「語彙基盤」の用語の選択	6
閉じ込めと隔離	8
まずこれだけは	9
少し詳しく	11
放射性廃棄物の潜在的危険性	11
潜在的危険性の持続期間	13
環境からの隔離：環境汚染の防止	14
廃棄物の処分	16
長期の閉じ込めと隔離の達成	18
地層処分システムの仕組み	19
人工バリアの閉じ込め機能	21
天然バリアの隔離機能	23
閉じ込めと隔離の確認	25
ここに注意	26
隔離と離隔	26
非放射性廃棄物の管理	27
放射性廃棄物の管理と処分	29
「閉じ込めと隔離」と「希釈と拡散」	32
廃棄物処分における閉じ込めと隔離の重要性	34
放射性廃棄物の潜在的危険性と危険性	35
地層処分の選択	36
国際的な定義	37
参考文献	40
地質環境	41
まずこれだけは	42
少し詳しく	43
地層処分における地質環境という用語の使われ方	43
地質環境特性とは	44
地層処分にとって望ましい地質環境	45

地層処分施設と地質環境	46
ここに注意	48
「環境」と「地質環境」の意味の違い	48
「安定している地質環境」に対する認識のギャップ	49
安定している地質環境の空間的及び時間的範囲の考え方	50
「安定している地質環境」という表現の生み出す誤解	51
付録：歴史的経緯	52
参考文献	54
セーフティケース	55
まずこれだけは	56
少し詳しく	57
セーフティケースとは何か	57
なぜ地層処分にはセーフティケースという用語が使われるか	60
地層処分のセーフティケース	62
セーフティケースと安全評価	65
セーフティケースの作成	68
日本におけるセーフティケース	70
ここに注意	71
潜在的危険性と安全性または危険性との関係	71
利害関係者間の相互理解を得るためには	72
付録：国際的な定義	73
参考文献	75
安全評価	77
まずこれだけは	78
少し詳しく	80
安全評価では何が評価されるのか	80
地層処分の安全評価の概要	81
地層処分の安全評価：残留リスクの評価	82
閉鎖後の安全評価の手順：地層処分システムの記述	85
閉鎖後の安全評価の手順：シナリオの作成	88
閉鎖後安全評価の手順：モデルの定式化と安全解析の実行	90
閉鎖後の安全評価の手順：結果の解釈	91
稀頻度シナリオや人間侵入シナリオ	92
ここに注意	93
安全（性）を評価するという意味	93
予測の意味	95
利害関係者間の相互理解を得るために	96

付録：国際的な定義.....	97
参考文献.....	100
索引.....	101

このページは意図的に空白にしています。

語彙基盤（地層処分の言葉）

作成の背景

「語彙基盤（地層処分の言葉）」とは

20世紀初頭以来、原子力科学技術の研究開発は、研究、医療、産業、そして核分裂による発電に幅広く応用されてきました。しかし、他の人間活動とおなじように、これらの活動によって廃棄物が発生します。この廃棄物は、再利用できないことに加えて強い放射線を出すため、将来の世代に過度な負担を強いることなく、現在及び将来の人間の健康と環境を確実に保護するために、適切な措置が必要です。特に核分裂による発電では、大量のエネルギーが得られる代わりに核分裂生成物などの放射性物質が使用済燃料の中に生み出されます。エネルギー資源に乏しい日本では、使用済燃料の再処理により使用済燃料からウラン・プルトニウムを分離した後に残存する物をガラス材料とともに固化したもの（ガラス固化体、高レベル廃棄物）と再処理や分離したウラン・プルトニウムの燃料加工の工程で発生するTRU等廃棄物の大部分を地下深くの安定した岩盤に閉じ込めて処分するための事業に取り組んでいます。この処分方法を「地層処分」と呼んでいます。

地層処分は、使用済燃料やガラス固化体のように高い濃度で放射性物質を含む放射性廃棄物の最も現実的な処分方法として、その実現に向けた検討が世界的に進められており、建設予定地が選定されている国もあれば、さらに進んで処分計画の実施が許可されている国もあります。しかし、地震・断層活動や火山・火成活動が活発な変動帯に位置するわが国においては、現段階ではまだ実現しておらず、地層処分に適した建設予定地を選定するためには、地下深部について時間をかけて慎重に調査を進める必要があります。また、数万年以上の先までの安全については、文字通りの実証は不可能なので、地層処分の開発過程で得られる情報を用いて、どのような考え方と科学的知識を適用して確かめればよいかという方法論について、社会の理解を得ることも必要です。

地層処分は、五感では感知できない放射線を出す放射性という危険性を持つ物質を、これまであまり詳細に調査されたことのない地下深部を利用して、社会制度の持続期間を超えるほどの長期にわたってその場に閉じ込められた状態に保たれているようにしようとする、今までの経験からは類推しにくい新規で学際的な方法です。地層処分の長期の安全性については、時間的・空間的な予測に対して独特のアプローチを用いているため、その説明や理解は容易ではありません。

このため、地層処分の安全性に関する理解について広く社会で考えていただくためには、一般の方々の認知に大きな影響力を持つ専門家も交えて、社会とのコミュニケーションを継続することが不可欠となります。

す。この際には、関連する専門分野の最新の知見を結集し、関与する専門家どうしが、その安全性や危険性についてしっかり議論して納得した上で、その共通の理解のもとに専門家間あるいは専門家と非専門家の間で、対話を通じて価値観を共有するコミュニケーションがなされることが必須となります。

しかし、一般にメディアによる情報の編集や報道において、不可避的になされる言葉の切り取りと同じように、特定の文脈や背景から一部分や言葉のみを抜き出すと、情報を伝える方法やメッセージの受け取り方に影響を与えることがあり、時には情報の歪曲や誤解を招くこともあります。関与する専門家どうしの間でさえも、専門とする分野の違いにより用語の意味が異なることがあり、それが議論を困難にする原因となっています。例えば、地球科学の専門家が使う用語と、地盤・岩盤工学の専門家が使う用語では、同じ用語でも別の意味を表していたり、同様の概念であっても別の用語で表されていたりすることがあります。さらには、例えば、廃棄物や処分といった言葉も、専門分野の違いにとどまらず、技術的行為や社会的行為としての様々な意味合いを含んだ形で用いられます。理学や工学さらには自然科学や社会科学の専門家に限らず、用語が違くと、専門家であっても、異なる分野の専門家の説明がすぐには理解できなかったり、理解の齟齬が生じたりして、統一的な視点を共有するまでにはある程度の時間と相応の努力を要することも少なくありません。

また、地層処分の専門家が仲間どうしで使っている用語や訳語が、不適切なので改めるべきだというご指摘を受けることも稀ではありません。言葉は相手に意味が通じていればそれでよいのですが、対話しようとしている相手によっては、その言葉を使うことによって誤解が生じ、本来意図しないような議論になっては困ります。

こうした背景をきっかけとして、地層処分における重要概念を表すいくつかの用語に焦点をあて、異なる分野の専門家どうし、さらには地層処分を専門とする人とそれ以外の人々が、共通の基盤に立って議論ができるようにするために、「**語彙基盤（地層処分の言葉）**」を作成することにしました。

ここでは、いくつかの重要な用語は、地層処分の専門家の仲間内ではこういう意味で使っているという説明をしています。地層処分は仲間内で済ます話ではなく、社会における実現を目指す工学技術ですので、様々な方々に用語の意味が伝わる必要があります。まずはこの説明をご一読いただき、その後、用語の適切さや、さらには地層処分概念の適切さについて考えていただき、様々な地層処分に関するコミュニケーションの場においてご意見をお聞かせいただければ幸いです。

「語彙基盤」の想定読者

地層処分は、自然科学に限らず社会科学をも含む様々な分野が関わりっており、これまで地層処分に携わってきた専門家だけで進めることはもはや不可能な状況で、今後さらに多くの地層処分分野以外の専門家の関与が必要とされます。このような状況で、地層処分は、全体像が把握しにくく、多くの人々にとってあまり馴染みのない工学分野となっていますので、地層処分分野以外の分野の専門家に、地層処分に注意を向けってもらうために、この「語彙基盤（地層処分の言葉）」のようなツールを今後活用していくことが必要になってくるのではないかと考えています。

「語彙基盤（地層処分の言葉）」は、当初、地層処分分野に関連する分野の専門家が共通の理解を得るようにするという意図のもとに、いくつかの用語を選び、それらの意味をより明確に定義あるいは記述して、地層処分の専門家が地層処分に馴染みのない他の分野の専門家に対して、地層処分を説明する際のガイドラインとして作成することを考えていました。しかし、作成の過程でいろいろな方々のご意見を伺った結果、地層処分が、専門家はもとより多くの人々の理解が必要となる、多様なステークホルダー（利害関係者）が存在する事業であることを考慮して、「語彙基盤（地層処分の言葉）」は、その用語がどのような地層処分の背景のもとに使われているかを説明することに留意して作成すべきであるとの考えに至りました。

地層処分に馴染みのない他分野の専門家の皆さんは、もちろん、理学や工学の基本理念や、自身が専門とする理学系や工学系の知識を多くお持ちです。ですが、そのような専門家であっても「地層処分という特有の背景や文脈に関する知識」をどの程度有しているかについては広がりがあります（これは地層処分の専門家が、他分野における考え方の知識に乏しいケースがあることと同じです）。地層処分をめぐる議論のすれ違いや理解の齟齬は、この「地層処分の考え方の知識」をどの程度共有できるかに左右されると考えられます。

地層処分は、冒頭に述べたように、放射性廃棄物が、極めて長期に地下深部に閉じ込められて地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔離されている状態にしようとする、これまでにはなかった新規で学際的な工学的試みです。このため地層処分について説明しようとして用いられる言葉は、それが用いられる背景や文脈となる、あるいは言い方を変えれば地層処分の考え方の土台となる枠組みの時間的な側面（出来事の起こる時間軸）、空間的な側面（出来事の起こる場所や環境）、社会的な側面（文化や人間関係）及び歴史的な側面（過去の経緯や影響）が、既存の理学や工学さらには社会科学や社会一般の言葉が用いられてきた背景とだいぶ異なっています。そして皆さんに知ってほしいと考えているのは、この特有の背景や文脈を持つ地層処分の考え方です。

特定の集団や業界内だけで用いられる専門用語、部外者にとってはちんぷんかんぷんで意味がわからない言葉のことをカタカナ語でジャーゴンと呼んだりします。地層処分で用いられている多くの用語は、ちんぷんかんぷんとまではいきませんが、似てはいるが背景が違っているため別の意味を含んで使われていたりします。このような用語が不用意に使われると、話す方も聞く方も、「知っている」と思っているけれど、理解が異なっているため、相互に理解しあうことが困難になり、誤解が生じたりします。

「語彙基盤（地層処分の言葉）」の作成においては、この点に留意して、これから地層処分に関与しようと考えている地層処分に関連する科学分野や工学分野の専門家に読んでいただきたいと考えていますが、できるだけ多くの人々に読んでいただきたいので、今まで地層処分から遠い立場にいるけれども、関心を抱いていてもっと知りたいと思っている様々な方々にも読んで理解してもらえるように、「まずこれだけは」と「少し詳しく」にわけて、少し詳しくでは説明を項目ごとに詳細化しています。

「まずこれだけは」では、地層処分という背景のもとでは、その言葉はどういう意味で用いられているのかを説明しています。詳細に立ち入ることなく、最低限の意味を知っていただきたいための説明です。

「少し詳しく」では、その言葉が、具体的に何を指している、なぜ、どのような意図で用いられているかを説明しています。単に日常生活等で用いられている場合と何がどのように違っているのかをいくつかの項目について説明していますので、その項目のタイトルを見て、興味に応じて読んでいただければと思います。

「ここに注意」では、その用語に対する一般的なイメージや他分野で使用されている場合での意味合いの違い、それによって生じている誤解やより詳細にわたる具体的な内容について解説し、今後、地層処分の専門家や他分野の専門家が、様々なステークホルダー（利害関係者：事業者、国、規制機関、非政府団体、市民等）と地層処分の安全性について対話する際に共通的な理解を得られるようにするための方法や助言をまとめています。

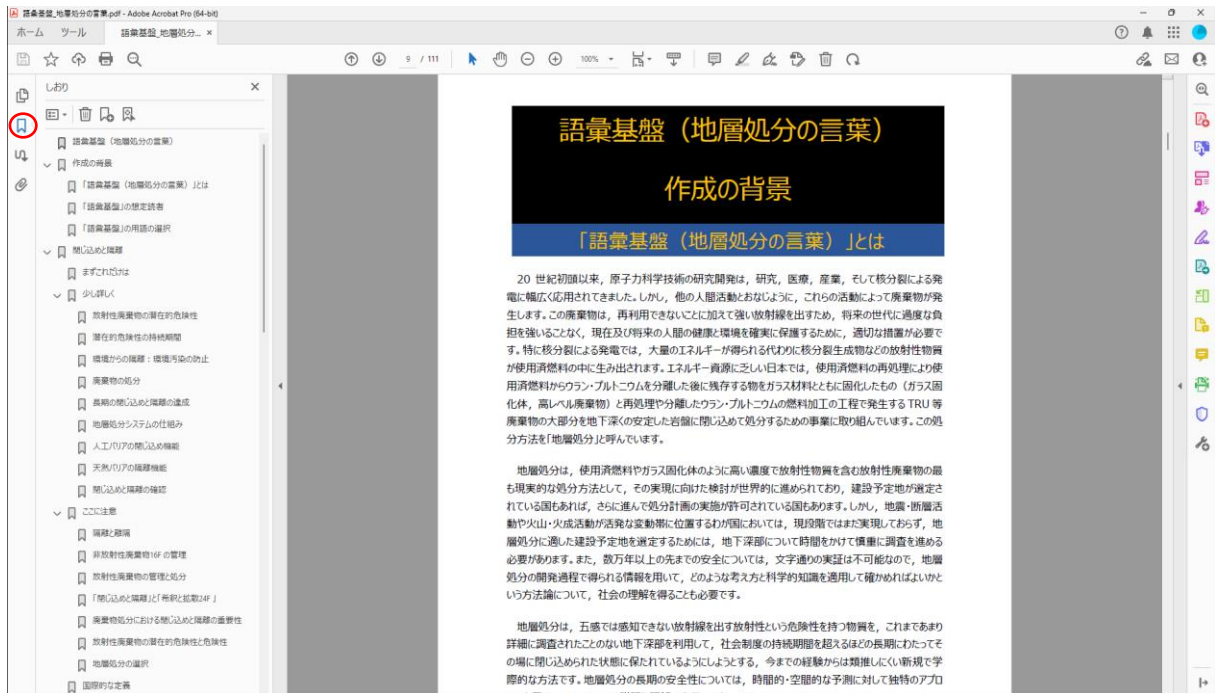
さらにその後「国際的な定義」や「歴史的経緯」では、地層処分の分野で「学術用語」として、その言葉がどのように定義されているかを示しています。

Acrobat Reader などを利用するときには、本書の内容のそれぞれの項目の移動は次のように行うことができます。

- 目次に相当するしよりの表示：

表示 → 表示切替 → ナビゲーションパネル → しおり

ナビゲーションバーからしおりアイコンを選択して、しおりサイドパネルを開く。



- キーとなる項目への移動

下線の付いた項目にジャンプ	項目を選んでクリック
ジャンプ前の項目 (元の場所) に戻る	Alt キーを押しながら←キーを押す
ひとつ次の項目に進む	Alt キーを押しながら→を押す

- ページへの移動

表示 → ページナビゲーション → ページ指定 → ページ番号を入力

「語彙基盤」の用語の選択

「語彙基盤（地層処分の言葉）」で扱う言葉としては、地層処分に関係している特有の概念を担っている用語として、

- (1) 「閉じ込めと隔離」,
- (2) 「地質環境」,
- (3) 「セーフティケース」,
- (4) 「安全評価」

を選びました。

「語彙基盤」では、この語彙という言葉から連想される通り、当初は、私たちは地層処分に関連する様々な多くの用語を網羅することを意図していました。しかし、議論を重ねる中で、むしろ、いくつかの重要な用語に焦点を絞り、それらについてより深く説明することが必要であるとの認識に至りました。その理由は、これらの用語は、単に理学系や工学系の知識を前提として説明される辞書や用語集によって十分に説明されるものではなく、むしろ「地層処分」という特有の背景や文脈の中で使用されているからです。このため、これらの用語を誤解なく理解するためには、その背景や文脈を説明することが重要と考えました。このように考えて、ここではまず、委員会で、ギャップが生じているとしてリストアップされた次のような用語

- ◇ リスク・不確実性
- ◇ 時間・空間スケール
- ◇ 地層処分の基本概念
- ◇ 地質環境
- ◇ 隔離・閉じ込め
- ◇ 要素研究と全体システム
- ◇ 安全評価
- ◇ 安全評価と性能照査
- ◇ セーフティケース

のうち、下記の 4 つの用語を選びました。なぜなら、これらの用語が地層処分の理解においてその理解の入り口となる用語として重要であり、その背景や文脈を説明する手助けとなるからです。多くの地層処分に関する他の言葉も、下記の 4 つの用語の背景や文脈を説明する際に使用されていますので、それらの言葉についても並行して理解してもらえないのではないかと考えています。

(1) 「閉じ込めと隔離」

「閉じ込めと隔離」とは、放射性廃棄物の処分¹において安全を確保するための基本的な考え方です。このような考え方がなぜ選ばれているのか、他の考え方はできないのかということや長期間の「閉じ込めと隔離」の達成方法についても説明します。この用語は地層処分の基本概念を表しているため、他の用語の説明の前にまずこれを理解していただければと思います。

(2) 「地質環境」

地層処分では、「閉じ込めと隔離」を達成するために、好ましい地質環境を選んで、最適で頑健な人工バリアを設計・施工することが必要となります。この「地質環境」では、放射性廃棄物の長期にわたる「閉じ込めと隔離」を達成するためには、具体的にどのような地質環境を選べばよいのかという、サイト選定の条件となる放射性廃棄物を取り巻く周囲の地質の状態を説明します。

(3) 「セーフティケース」

「セーフティケース」とは、安全の確保のための対策とその有効性を示す、多面的で包括的な議論と証拠を集めたもののことです。特に、好ましい「地質環境」を選ぶために、長い時間をかけて候補地を調査・評価しながら段階的に進められる「地層処分のセーフティケース」にはどのような特徴があるのかを説明します。

(4) 「安全評価」

地層処分では、数万年以上の長期にわたる安全について確かめる必要があります。「安全評価」では、選ばれた地質環境と工学的に設計された処分施設が、そのような長期にわたって、どの程度有効に「閉じ込めと隔離」の性能を維持するかを体系的に評価する考え方と方法について説明します。

地層処分に携わっている方にとって、「地層処分」という特有の背景や文脈の中で使用されているため、うまく意図が伝わっていない、議論がすれ違っている、誤解を生んでいると思われる用語は、ほかにもあると思われますが、まずは上記の用語について知っていただき、地層処分の全体像を理解していただければと考えています。

¹ 閉じ込めと隔離は、放射性廃棄物の地層処分に限らず、浅地中処分や中深度処分にも共通の基本的考え方とされています（「閉じ込めと隔離」の国際的な定義をご覧ください）。

閉じ込めと隔離

閉じ込めと隔離	8
まずこれだけは	9
<u>少し詳しく</u>	11
放射性廃棄物の潜在的危険性	11
潜在的危険性の持続期間	13
環境からの隔離：環境汚染の防止	14
廃棄物の処分	16
長期の閉じ込めと隔離の達成	18
地層処分システムの仕組み	19
人工バリアの閉じ込め機能	21
天然バリアの隔離機能	23
閉じ込めと隔離の確認	25
ここに注意	26
隔離と離隔	26
非放射性廃棄物の管理	27
放射性廃棄物の管理と処分	29
「閉じ込めと隔離」と「希釈と拡散」	32
廃棄物処分における閉じ込めと隔離の重要性	34
放射性廃棄物の潜在的危険性と危険性	35
地層処分の選択	36
国際的な定義	37
参考文献	40

まずこれだけは

- 「閉じ込めと隔離」は、地層処分の基本となる考え方です¹。
- 地層処分における「閉じ込め」とは、放射性物質が数万年を超える長期にわたりある限られた領域²にとどまるようにすることです。そのために、放射性物質の移動を妨げる人工的な仕組みを何重にも講じて、地下深部の岩盤中に埋設します。
- 隔離の意味は、隔離されるものと隔離する側の双方での物質やエネルギーの行き来がなくなる³状態、すなわち遮断された状態になるように、両者を隔て離しておくことです。

地層処分における「隔離」とは、

1. 廃棄物とそれに伴う危険性を、地下深部に至る厚い岩盤により、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔て離されている状態にすること、
2. 地下に「閉じ込め」られている廃棄物の状態が、地表の空気や水の運動や自然現象、人や生物の活動などによって乱されることのないように、廃棄物が、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から厚い岩盤によって隔て離されている状態にすること

を意味しています⁴。

- この状態は、人工的な仕組みと地下深部の岩盤によって、放射性物質が「閉じ込め」られているということもできれば、人工的な仕組みと地下深くに至る厚い岩盤によって遮られて、人や生物の活動する地表近傍の環境から、放射性廃棄物が「隔離」されているということもできます。
- 地層処分の説明において、廃棄物から地表の人と生物の生活環境（生物圏）までの領域のうち、どこまでを閉じ込めとみなし、どこまでを隔離とみなすか、あるいは、どこを閉じ込めの境界またはバリア（障壁）⁵とみなし、どこを隔離の境界またはバリア（障壁）とみなすかは、一義的に決まっているわけではありませんし、両者を一致させて考える必要もありません。様々な形で閉じ込めと隔離が重層的になされるようにすることにより、放射性物質ができるだけ長い期間狭い領域に閉じ込められている状態にして、より確実に人の生活環境から隔離されているようにしようとしているということです。

¹ 高い濃度で放射性物質を含む高レベル放射性廃棄物の処分方法については、地層処分のみならず、長期地上管理、核種・分離変換、海洋底下処分、宇宙処分等の多様な処分方法が検討された結果、現時点の最も有望な処分方法として、地層処分が国際的に選択されています（ここに注意の「[地層処分の選択](#)」をご覧ください）。

² 例えば NUMO(原子力発電環境整備機構)では、[人工バリア](#)及び処分坑道とその周辺 100m 程度の岩盤を含む領域の閉じ込め機能を考えています。

³ 「エネルギーの行き来がない」とは、両者が互いに影響を及ぼすことがないことを意味しています。

⁴ 廃棄物が埋設される場所はまた、隆起・侵食や断層活動、地熱活動、火山性熱水・深部流体などの影響を受けないように、それらの起こっているあるいは起こる可能性の高い場所から遠ざけておく必要もあります。これも地層処分における「隔離」です（語彙基盤「[地質環境](#)」をご覧ください）。

⁵ 地層処分では、ものの出入りを阻み、閉じ込めや隔離のはたらきを持つ障壁またはしきりをバリアと呼んでいます。

- この「閉じ込め」と「隔離」のセットにより、人や生物に有害な影響を与える可能性のある放射性物質が、地表の人と生物の生活環境（生物圏）にできる限り入り込むことのないようにします。これにより、放射性物質からの放射線を人が受けることはなくなります。

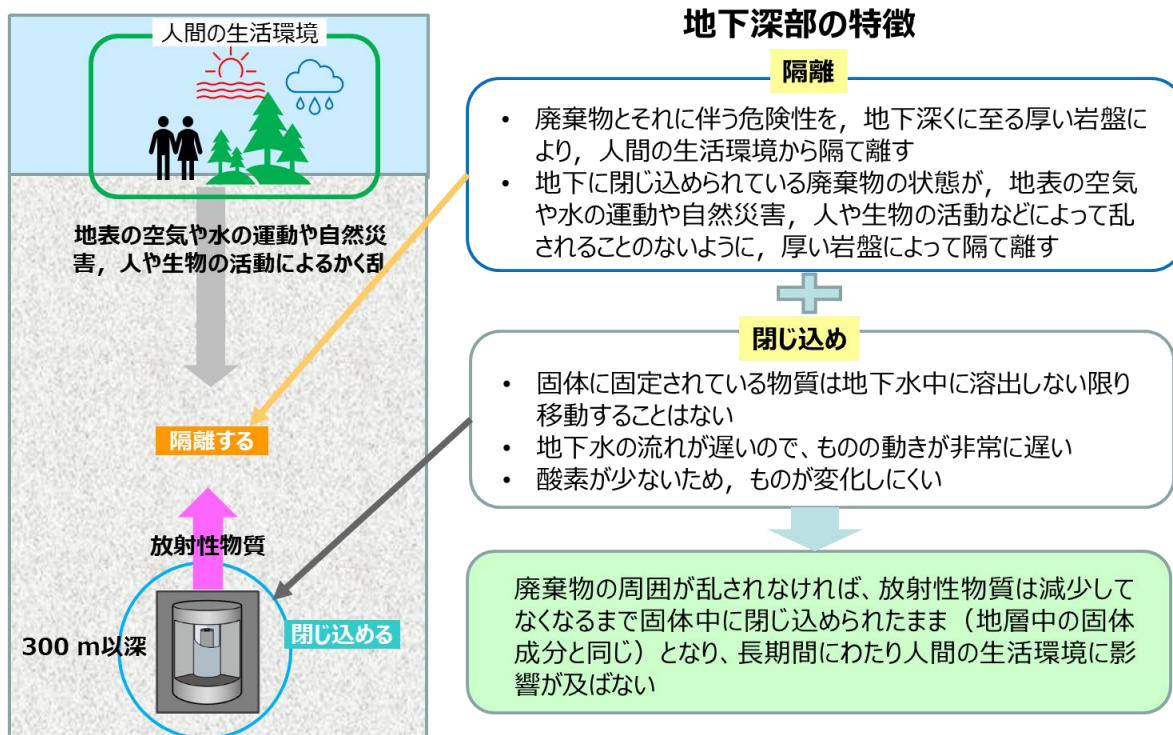


図 1-1 地層処分による放射性廃棄物の「閉じ込めと隔離」の概念図

放射性廃棄物の潜在的危険性

- 潜在的危険性とは、ある物質や状況が本来的に備えている、将来的に危険や害を引き起こす可能性を指します。この概念は、特定の要因が事故や被害を引き起こす可能性を含意していますが、実際の影響が発現するかどうか、どのような形で影響が発現するかは、具体的な状況や条件に依存します。潜在的危険性を持つ物質は危険物あるいは有害物と呼ばれ、一般に物事や状況については総称してハザードと呼ばれます。例えば、毒性のある物質、火災、地震、放射性物質などがその例です。潜在的危険性を理解することは、予防策や安全対策を講じる上で重要です。潜在的な危険性がある場合、適切な措置や管理を行うことで、実際の被害やリスクを最小限に抑えることができます（セーフティケースの「潜在的危険性と安全性または危険性との関係」及び安全評価の「地層処分の安全評価：残留リスクの評価」もご覧ください）。
- 放射性廃棄物には健康にとって有害な影響を与える潜在的危険性を持つ放射性物質が含まれています。放射性物質は原子の中の原子核の状態が不安定になっている物質¹で、余分なエネルギーを放射線として出しながら、別の安定な物質に変わっていくという性質があります（この変化を放射性崩壊と呼びます）。放射性物質と人が接近し、放射性物質が発する放射線を人が被ばくすると、体の組織を構成する分子が放射線のエネルギーを受けて変化し、過度の被ばくでは健康に好ましくない影響が出る危険があります。
- 放射性物質が放射線を出す能力を放射能といい、含まれる放射能が大きいほど、何かが起こって人が被ばくする影響は大きくなるという意味で、含まれる放射能の量は、潜在的危険性の一つのめやすといえます。ただし、実際に起こる影響は、放射能を含む物質が人に接近する経路と可能性、被ばく経路（外部被ばく、摂取被ばく、吸入被ばく）及び放射線の種類とエネルギーの強さにより変わりますので、それに応じた潜在的危険性を考える必要があります。
- 放射能は、原子核の不安定性によって放射線が放出される速さや量を測定するために使用され、単位時間に起こる放射性崩壊の数（単位：ベクレル）により表されます。放射性崩壊は、ある時点で存在する不安定な放射性物質の原子の数に比例して起こります。したがって、放射性物質はだんだん減少して、その放射能も減っていきます。この放射能の減衰は一定の速さで、図 1-2 に示すような形で起こります。放射性物質ごとに減衰の速さが異なりますが、一般的には一定の時間が経過すると、元の放射性物質の半分の量が残る「半減期」と呼ばれる時間があります。半減期は原子

¹ 物質を構成している原子は、中心に位置する正電荷を持つ陽子と中性子の塊である原子核と、周囲を取り囲む負電荷を持つ電子からできており、化学的性質は電子の状態により決まるのに対して、原子核の安定性は陽子と中性子の状態によって決まります。

核の状態のみによって決まるため、潜在的危険性は減少していくことは確かですが、化学反応により放射性物質の放射能をなくして無害化することはできません¹。

- このため、放射性廃棄物からの安全を確保するために、潜在的危険性すなわち放射能が十分小さくなるまで、人や生物に接近することのないように、これが閉じ込められて隔離されているようにします。
- 潜在的危険性（ハザード）の大きさは安全を確保するためにどのような措置を取ればよいかを考えるための情報であって、潜在的危険性を持つ物質や事象自身が安全であるとか危険であるとかを評価するための目安を与えるものではありません。

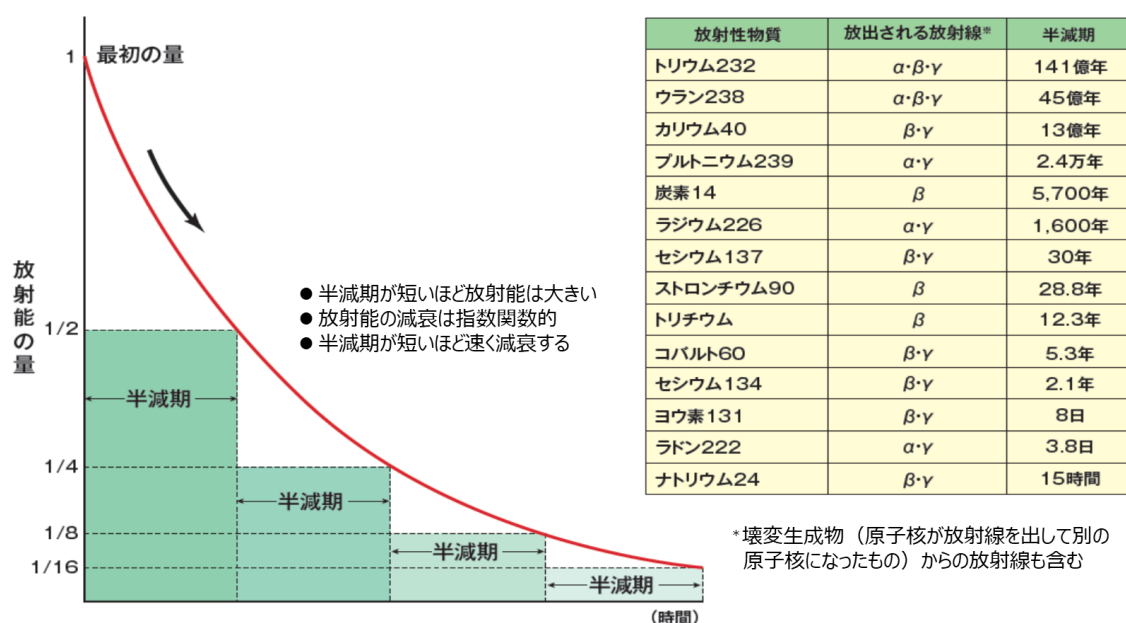


図 1-2 放射性物質の放射能の減衰の仕方といくつかの放射性物質の半減期
 （一般財団法人 日本原子力文化財団 原子力・エネルギー図面集を加筆
<https://www.ene100.jp/zumen/6-1-7>（2024年1月10日閲覧））

¹ 化学反応以外の方法として、原子炉や加速器を利用する核反応により、放射性物質を、半減期がより短い物質に変換しようという技術の研究開発等が進められています。しかし、この方法で「すべての」放射性物質を無害化することは大変難しく、また、将来可能になったとしても、処分の必要な放射性廃棄物は残ります。

潜在的危険性の持続期間

- エネルギー資源に乏しいわが国においては、使用を終えた燃料（使用済燃料）からウランとプルトニウムを回収し（これを再処理といいます）、燃料に加工して再利用を行う原子燃料サイクルを基本政策としています。この再処理の過程で残る高レベルの放射性廃液（使用済燃料中のウランとプルトニウムを除くすべての放射性物質の溶液）をガラス原料とともに高温で溶かし、安定な形態に固化したものを（ガラス固化体）を高レベル放射性廃棄物としています。
- 図 1-3 は高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性物質の放射能を加え合わせた総和の時間変化を表したものです。総放射能は時間とともに減衰するものの、図 1-3 に示すように極めて長い時間スケールで残存し、使用済燃料の元となったウラン鉱石の放射能総量と同等になるまでに数万年以上かかります（図 1-3 では、長期の時間の範囲で何桁も変化する放射能の変化を示すため、横軸（時間軸）も縦軸（放射能を示す軸）も対数目盛となっています）。
- 図 1-3 の縦軸に示す 1 トンに含まれる放射能の量は、潜在的危険性を示しており、その大きさは安全を確保するためにどのような措置を取ればよいかを考えるための情報であって、実際の危険性は、この放射性廃棄物が何らかの措置によりどのような状態に置かれるかによって決まります。
- 図 1-3 に示すように、高レベル放射性廃棄物の放射能が十分減らないで残存する期間は数万年以上になります。この期間は、過去の人類や文明の歴史から見て、人間社会の制度が変化したり、記録や記憶が失われてしまうほどの長期になります。このため、将来の人の管理に頼って安全を確保し続けることはできないというのが、地層処分を処分方法として考える大きな理由になっています（少し詳しくの「廃棄物の処分」「長期の閉じこめと隔離の達成」もご覧下さい）。

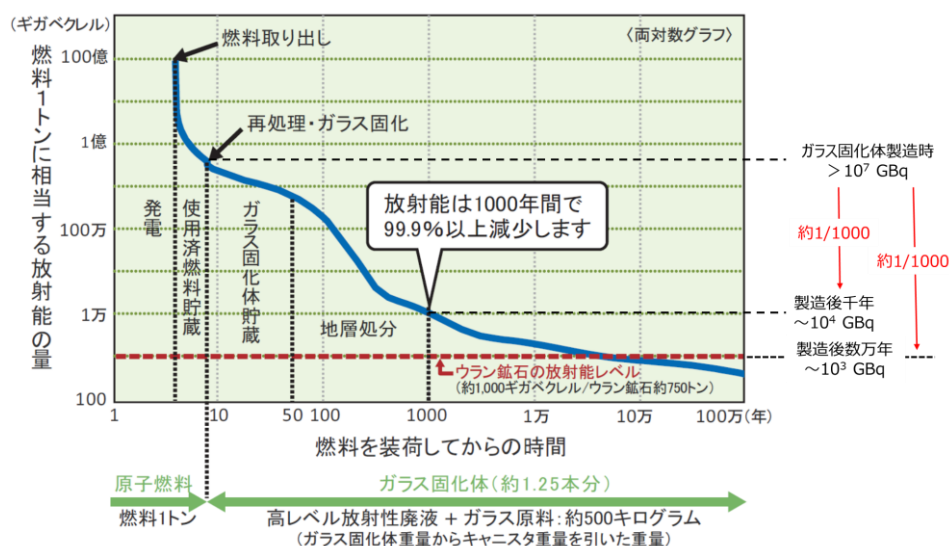
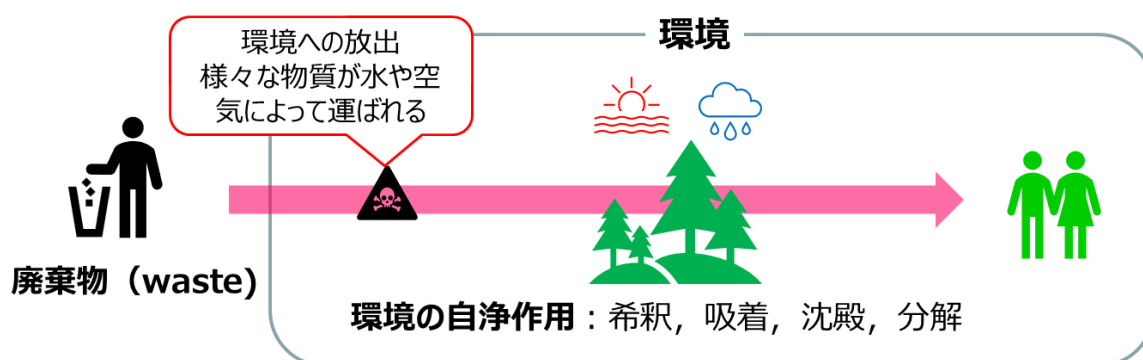


図 1-3 放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特徴（濃縮度 4.5%，1 トンのウランを含む燃料（1MTU）相当）（ギガベクレル = 10^9 ベクレル）（出典：NUMO パンフレット「地層処分，安全確保の考え方」（2018）に加筆）

環境からの隔離：環境汚染の防止

- 人が放射性物質からの放射線を受けるような事態は、大きく分けると、人の側から放射性廃棄物に接近する場合と、放射性物質が人に接近する場合の二通りが考えられます。放射性廃棄物の存在を知らされており、そのことの意味を理解できる知識があれば、人の側から放射性廃棄物に近づくことはありませんが¹、環境中に生活している人が気づかないうちに放射線を受ける可能性として、後者の場合のように、当初、気体、液体、固体の形で、放射性廃棄物に含まれていた放射性物質が、人が生命活動を行っている環境の空気中や水中に放出されて、分子やイオンや微粒子の形で運ばれて人に接近することが考えられます。
- いずれの場合でも、人と放射性物質の接近が起こると、人の体表面から直接に、あるいは人の体内に取り込まれた放射性物質から、体の組織が、放射線を受けることになります。大量の放射性物質が人に接近すれば、大量の放射線を受けることもあり得ます。
- 図1-4に示すように、何らかの有害物質（固体、液体、気体）が、人に接近する以前に、環境の自浄作用（希釈、吸着、沈殿、分解）により無害化されたり、あるいは貯留されるよりも速い速度で、環境に加えられ、よくない変化を引き起こすことを環境汚染といいます。
- 放射性廃棄物を処分するには、放射性物質を適切な場所に閉じ込め、環境から隔離して、できる限り環境に入り込むことのないようにしておくことが大事になります。



環境汚染(pollution)：何らかの有害物質（固体、液体、気体）が、人に接近する以前に、環境の自浄作用（希釈、吸着、沈殿、分解）により無害化されたり、あるいは貯留されるよりも速い速度で、環境に加えられ、よくない変化を引き起こすこと。通常、環境ごとに分類される汚染の主な種類は、大気汚染、水質汚濁、土地汚染である。(Encyclopedia Britannica)

図 1-4 環境の保護（環境汚染の防止）の概念図

¹ 「廃棄物の処分」および「長期の閉じ込めと隔離の達成」の図 1-6 中の制度的管理も併せてご覧下さい。

- 一般用語として用いられる環境（environment）は、広辞苑（第7版）によると「四圍の外界。周囲の事物。特に、人間または生物をとりまき、それと相互作用を及ぼし合うものとして見た外界。自然的環境と社会的環境とがある。」と定義されているように、その意味は多様です。
- これに対して、放射性物質に対する安全を考えている環境とは、国際原子力機関（IAEA）安全用語集 2022年版で定義されている、「人、動物及び植物が生命活動を営み又は生育し、全ての生命活動と生育を維持する状況；特に人の活動によって影響されるような状況」を意味しています。
- 一般に、自然的環境においては、図 1-5 に示すように、水の循環・大気や海水の対流、物理的あるいは化学的風化作用などの非生物的な要因によって起きているゆっくりとした物質循環とともに、光合成・食物連鎖・生体物質の分解などの生物活動によって起きている、より活発な物質循環が太陽エネルギーを元として起きている。
- 地球における物質循環は、もともと無機的に構成されていた地圏、水圏、大気圏で、生物が進化して、活発な捕食や酸化還元などを行うようになり、生物に必須の炭素、酸素、窒素などの栄養元素が、水や空気、さらには生物に運ばれて、過去に比べてより活発に循環して形成されるようになり、現在のような過渡的な準安定状態に至ったと考えられます。
- 大気汚染、水質汚染、土壌汚染などの環境汚染は、主として生物活動により支配されて起こっている物質の循環系に、有害物質が、水や空気によって運ばれて混入することによって起こると考えることができます。
- 放射性廃棄物の処分における隔離とは、このような領域（図 1-5 の赤線で囲った領域）に放射性物質ができる限り入り込むことがないようにすることを意味していると考えられます。

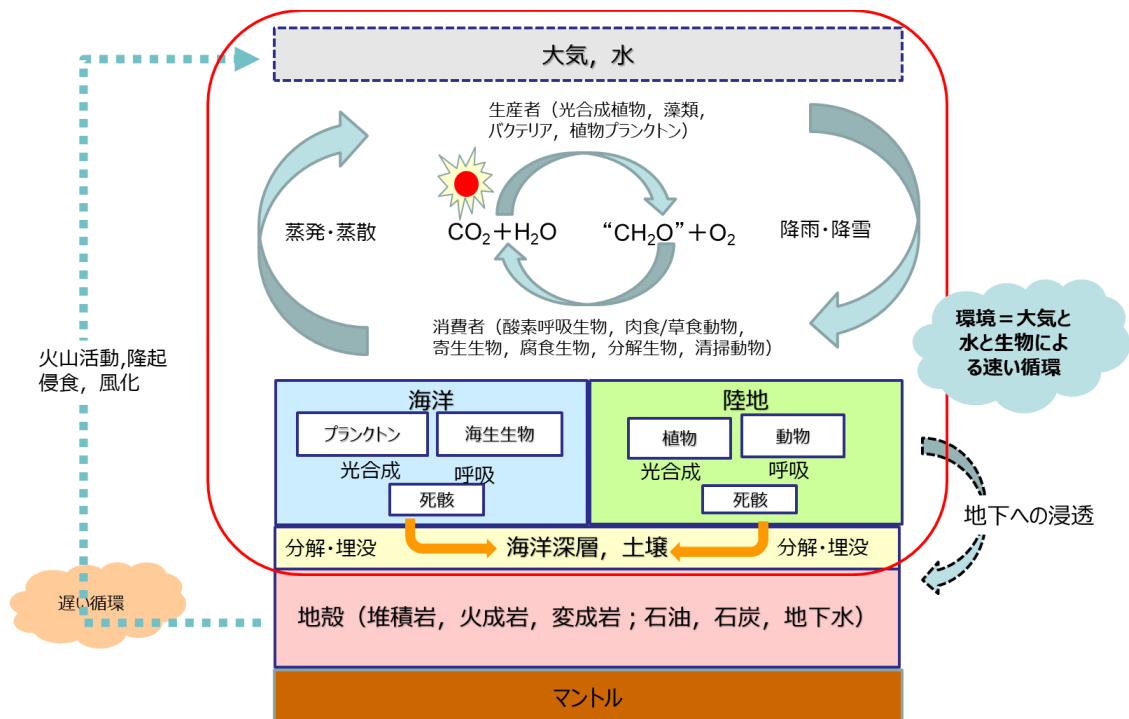


図 1-5 地表の人と生物の生活環境（生物圏）における水循環と炭素循環の概念図

廃棄物の処分

- 廃棄物は、それ以上の利用が見込まれていない物質や材料、製品として、これを利用した人や集団から排出されます。まず最初に重要なことは、廃棄物発生の抑制（reduce）で、廃棄物とされる前に、環境にとって有害でないものや環境の浄化作用により速やかな無害化が期待されるものは、そのまま環境に放出されます。有害性が問題となるものは、人為的に無害化の処理を施して再使用（reuse）、再生利用（recycle）されます。その後に残るものが、「本当の」廃棄物となります。このときどうしても無害化できない有害廃棄物は、環境を汚染することのないように処分する必要があります（「非放射性廃棄物の管理」もご覧下さい）。
- ここで、「廃棄物の処分」とは、有害か否かにかかわらず、既に存在している廃棄物を、その回収を目的とせず、適切な場所に定置することです。すでに存在していて、無害化して再使用や再利用できない廃棄物は、その存在を消してしまうことはできないので、人や環境に悪影響を与えないように適切な場所に定置するしかありません。
- 定置された廃棄物が、人や環境に悪影響を与えないようにするためには、放射性物質が人に接近することがなく、人の側から廃棄物に接近することがないようにする必要があります。このためには、次のような管理¹が必要となります。
 - ① 廃棄物の状態を監視して、必要に応じて修復措置を講ずる（能動的制度的管理）。
 - ② 人の行動を監視して、人が接近しないように立ち入り制限や土地利用（掘削）の制限などの管理措置を講ずる（受動的制度的管理）。
- このような①の形の管理及び②の形の管理が必要となる期間は、この放射性廃棄物の潜在的危険性が持続する期間となります。ここで、「少し詳しく」の「潜在的危険性の持続期間」の図 1-3 を見るとわかるように、高レベル放射性廃棄物の潜在的危険性は最初の数百年から千年程度で当初のおよそ千分の一に減少しますが、それ以下については、数千年、数万年、それ以降も残り続けます。
- すなわち、放射性廃棄物の潜在的危険性は、過去の人類や文明の歴史を見る限り、人または社会により管理し続けることのできる期間、すなわち社会の制度が続くと考えられる期間や情報が伝えられると期待できる期間をはるかに超えて残留します。
- そのため、可能な限り管理を継続することを基本方針とするにしても、放射性廃棄物の潜在的危険性が残る期間にわたって、長期地上保管のような形で、人または社会による管理に依存し続けることは、実現困難であると言わざるを得ず、将来世代に負担を先送りすることになるので好ましくないであろうというのが、放射性廃棄物の地層処分を目指そうとする大きな動機となっています。

¹ 「管理」および「制度的管理」という用語の意味合いについては「長期の閉じ込めと隔離の達成」および「放射性廃棄物の管理と処分」をご覧ください。

- 地下深部に放射性廃棄物を埋設定置する地層処分という方法は、将来にわたり地表の人と生物の生活環境（生物圏）に影響を与えることなく、かつ人間の直接的な管理に頼ることなく実現可能な、技術的及び倫理的に現時点で最も有望な方策であるということが国際的に共通の考え方になっています（「地層処分の選択」参照）。
- ただし、掘削制限などの制度的管理が失われ、記録や記憶が失われたのちに、人が知らないまま処分施設を破壊して放射性廃棄物に遭遇する可能性は完全には除けません。このため、地層処分では、できるだけ長期に制度的管理（受動的制度的管理）を続けること、資源のある場所を処分場としないこと、マーカーやモニュメントなどの記録や記憶の長期の保存方法を工夫することなどが求められています。

長期の閉じ込めと隔離の達成

- 放射性廃棄物の処分では、放射性廃棄物に含まれている放射性物質が、環境を經由して人に近づいたり、人が気づかずに放射性廃棄物に近づいたりすることを避けるために、放射性物質が数万年を超える長期の間、閉じ込められ、隔離されているようにする必要があります。
- 廃棄物が閉じ込められ隔離されているサイトについて、その状態を監視して、必要なら修復措置を講ずるために、図 1-6 に示すような、制度の存在に裏付けられた管理（制度的管理）が必要となります（「放射性廃棄物の管理と処分」参照）。
- また、放射性廃棄物に人が近づかないようにするためには、人の行動を監視して制御する図 1-6 に示すような受動的制度的管理が必要となります。しかし、「廃棄物の処分」で説明したように、制度的管理はいつか途絶えることになると考えざるを得ないため、処分では可能な限り管理に依らない状態にすることが必要となります。
- 人による管理に依らない最終的な処分では、放射性廃棄物に含まれている放射性物質ができるだけ長期に、閉じ込められ、隔離されているように、あらかじめ放射性物質の動きを制御し、人の接近を困難にする機能を備えたバリアをシステムに組み込んでおきます。このようなバリアには、人工的なバリアと、地層のような天然バリアがあります。地層処分では、これらが補完的にかつ重層的に機能することにより長期の閉じ込めと隔離が達成されるだろうと考えています。

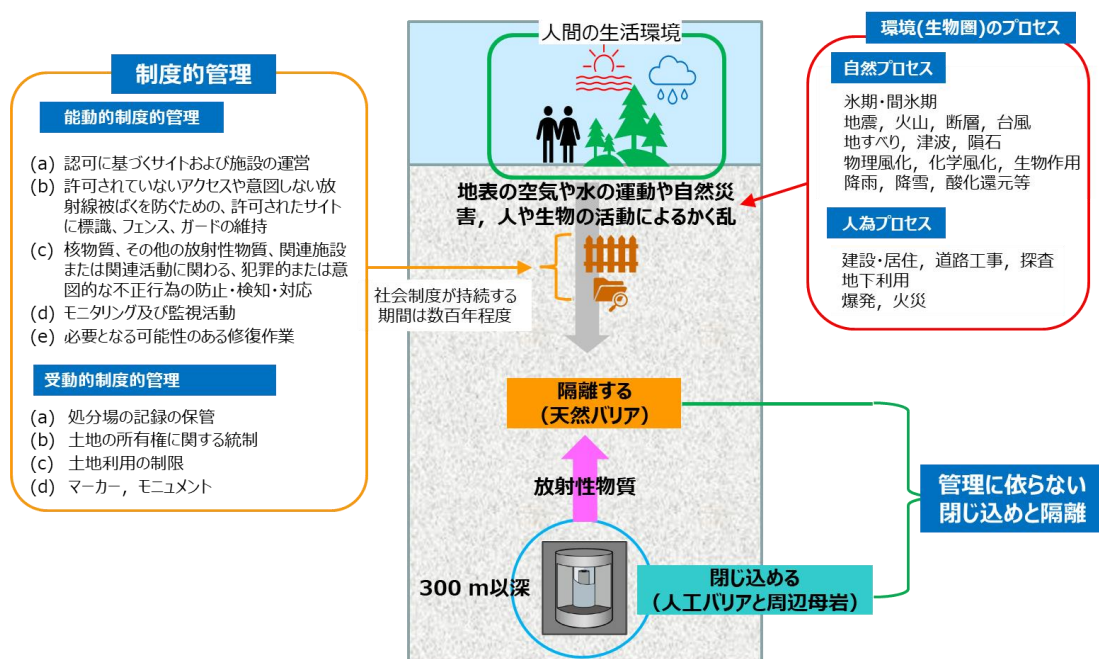


図 1-6 処分における管理に依らない閉じ込めと隔離の概念図

地層処分システムの仕組み

- 放射性物質が人や生物に接近しないようにする基本的な方策と考えられているのが、「閉じ込めと隔離」です。「閉じ込め」のための人工的な仕組みの最も基本となる処理は、放射性物質を固化して固体の塊にすることです。
- 原子力発電からの放射性廃棄物は、当初、使用済燃料が酸に溶かされた高濃度の放射性物質の廃液として発生します（高レベル廃液）。このままでは、放射性物質が気体や液体の形で地表の人と生物の生活環境（生物圏）中に分散する危険性が高いため、この廃液は、直ちに、高温のガラス¹と融かし合わせ、ステンレス容器に流し込んで固めてガラス固化体とされます。
- このガラス固化体（図 1-7 参照）は、燃料のウランから分離された放射性物質そのもの（約 40 kg）をガラスで固めたもの（約 100 kg の容器と合わせて約 500 kg）で、極めて高濃度の放射性物質を含んでおり、放射能レベルも高いため、高レベル放射性廃棄物と呼ばれています²。このガラス固化体には様々な放射性物質が含まれており、その潜在的危険性を表す放射能は、製造直後から 50 年間でその約 80%が、1000 年間で 99.9%以上が失われます。その後、放射能はゆっくりと減少し続けますが、それでも、人間に及ぼす影響を考えると、数万年以上にわたって地表の人と生物の生活環境（生物圏）から遠ざけておく必要があります（「潜在的危険性の持続期間」参照）。

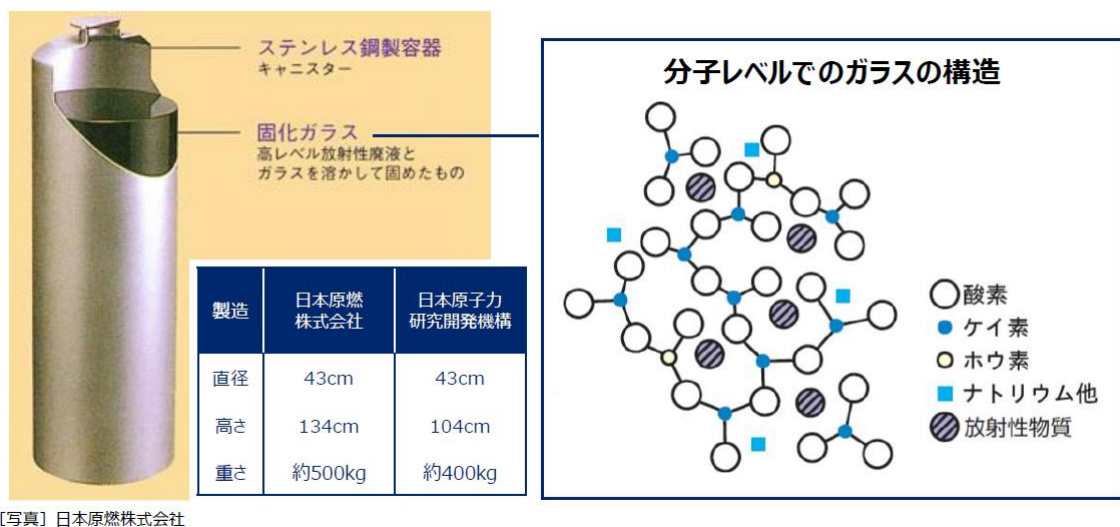


図 1-7 ガラス固化体（放射性物質の閉じ込め）

（高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する対話型全国説明会（2023年）、参考資料より）

¹ 耐熱性・耐薬品性に優れていて、理化学器具や台所用品などに用いられているホウケイ酸ガラスが使われます。

² 地層処分では、この高レベル放射性廃棄物と TRU 等廃棄物と呼ばれる低レベル放射性廃棄物が対象となりますが、ここでは高レベル放射性廃棄物を対象として説明をします。TRU 等廃棄物については、含まれる放射性物質や固化体とするための材料などに違いがありますが、概ね同様の考え方で理解できます。

- ガラス固化体中の放射性物質は、ガラス中に化学結合によりしっかりと固定化されて、閉じ込められています。固体中に閉じ込められた放射性物質は、自分から気体や液体になって出てくる力はありませんが、そのまま地表の人と生物の生活環境（生物圏）中に放置されると、数万年を超えるような長い期間中には、接触する空気や水によって、削り取られたり溶かしたされたりして、分子やイオンや微粒子の形で運ばれる可能性があります。もっと極端な場合には、人や生物の活動や火山や地震等の自然現象によって破壊されたり運ばれたりすることもあり得ます。こうしたことが起こると、人と放射性物質が接近する事態が生じる可能性が出てきてしまいます。
- そこで、ガラス固化体の放射能が高く発熱量¹が大きい初期の間（数十年から数百年の間）を含め、少なくとも 1000 年間（「潜在的危険性の持続期間」をご覧ください）は、水との接触によるガラス固化体に対する悪影響を避けて、放射性物質をしっかりと閉じ込めるために、ガラス固化体をオーバーパックという厚い金属製容器に格納し、さらに容器の外側を覆うベントナイト緩衝材中に「閉じ込め」とともに地下水との接触を防ぎます。
- それとともに、外から作用して、固化体や金属容器、ベントナイト緩衝材の閉じ込め性能を劣化させる可能性のある、人や生物及び空気（酸素）や水などが接近しないように、放射性廃棄物を火山などの影響を受けない地下の 300 メートルより深い岩盤中に埋設して地表の人と生物の生活環境（生物圏）から「隔離」します。
- 地層処分のイメージを図 1-8 に示します。地層処分では、地下深部の岩盤という「天然バリア」とオーバーパックや緩衝材からなる「人工バリア」を組み合わせた多重バリアシステムにより、長期間にわたり放射性物質を、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔離され閉じ込められているようにします。

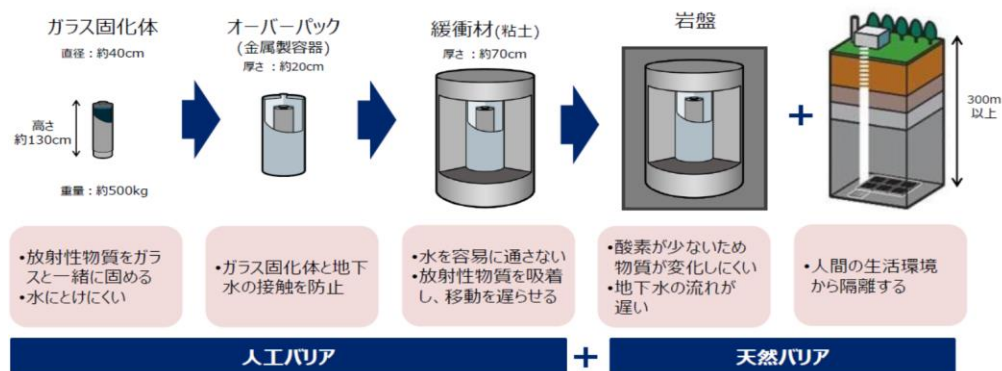


図 1-8 地層処分の仕組み（閉じ込めと隔離）

(高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する対話型全国説明会（2023年）、説明資料より）

¹ 放射性物質は放射線を放出するとき、放射線のエネルギーは周辺の物質に吸収されて、最終的には熱に変わります（崩壊熱）。このため、ガラス固化体では、含まれる放射能におおまかに比例して発熱があり、製造時には 1 本あたり約 2300 W、その後 50 年経った時点で約数百 W の発熱があります。

人工バリアの閉じ込め機能

- ガラス固化体

放射性物質を閉じ込めておく最も有効で重要な方法は、図 1-8 に示すように、物質を固体中に固定化して不動化することです。ガラス固化体は、放射性物質をガラス材料とともに高温で熔融した後、ステンレス容器中で冷却固化したものです。放射性物質はガラスの分子の網目状の結合構造に取り込まれ、ガラス自体が水に非常に溶けにくいので、地下水と接触しても放射性物質は非常にゆっくりとわずかに溶けません。

また、ガラス固化体が割れたからといって、含まれている物質が直ちに流出するようなことはありません。ガラス固化体の中の放射性物質は、例えるなら、ガラス瓶の中に入っている液体ということではなく、瓶のガラスに色を付けている成分と同じ状態だと考えてもよいでしょう。このことは、図 1-9 に示すように色ガラスや天然の火山ガラスである黒曜石の色のもととなる内部の不純物（鉄その他の金属の酸化物）が、ガラスから容易に失われることがないことからわかります。



図 1-9 ガラスによる物質の閉じ込めの例

- (左) 古墳時代に日本に伝来した西アジア製のガラス碗，ササン朝のカットガラス。伝安閑陵古墳（大阪府羽曳野市）出土。国の重要文化財。東京国立博物館展示。（出展：パブリックドメイン，
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ガラス>（2024年1月10日閲覧））
- (右) アメリカ合衆国オレゴン州レイク郡で採取された黒曜石。（出典：パブリックドメイン，
<https://ja.wikipedia.org/wiki/黒曜石>（2024年1月10日閲覧））

また、長い時間が経過してガラス成分（シリカ）が水に溶解したとしても、ガラスに含まれるごく一部を除く多くの放射性物質は、その場で酸素などと結合した固体として地下水中に溶けずに残るという性質を持っています。この固体は、様々な鉱石と同様にガラス成分よりも水に溶けにくく、地下水により運ばれる量はさらに微量に限定されます。このことは、地球ができて以来長い間岩石と接触してきた

海水にも、ナトリウムや塩素などごく限られた元素以外の元素は非常に微量にしか含まれていないことから理解できます。

- オーバーパック

ガラス固化体を完全に封入する厚さ約 20cm の金属製容器のことをオーバーパックといいます（図 1-8 参照）。金属は水を通しません。地下深部の水は酸素をほとんど含まないため、鉄の腐食（さびの形成）は非常に遅いものです。

これにより、ガラス固化体の放射能が高く発熱量¹が大きい初期の間（数十年から数百年の間）を含め、少なくとも 1000 年間（「潜在的危険性の持続期間」をご覧ください）は、ガラス固化体と地下水との接触を防ぎ、放射性物質を閉じ込めます。

- 緩衝材

オーバーパックの外側を包むように取り囲む緩衝材（図 1-8 参照）には、ベントナイトという天然の粘土が用いられます。ベントナイトは乾燥した状態の鉱物の一種です。ベントナイトは、微細な粘土粒子の隙間などに水分子を吸収すると、ベントナイト全体が膨張し、緩衝材自身の微細な隙間が塞がります。この水分子はベントナイトの表面と緩い結合を作っていて非常に動きにくくなっているため、後から来る水を通しにくい性質を持ちます。したがって、膨張した緩衝材は新たな地下水が内側に入るのを遅らせ、ベントナイトが一度吸収した水は緩衝材の外の地下水と入れ替わりにく滞ったままとなります。また、ベントナイトは物質を化学的に吸着する性質があるため、放射性物質が地下水に溶け出したとしても、その移動を遅らせることができます。このようにしてベントナイトは、放射性物質を緩衝材中に閉じ込めることができます。

- このように、多重の人工の構築物からなる人工バリアは、放射性物質を閉じ込める能力を持っています。また、この後で述べるように、天然の岩盤からなる天然バリアも、放射性物質を包含する放射性廃棄物を岩盤中に閉じ込めるとともに、人工バリアの劣化を抑制する機能を備えています。これらの機能が補完的かつ重層的に働くことによって、大部分の放射性物質は放射性廃棄物が埋設された近傍に閉じ込められたままとなります。

¹ 放射性物質は放射線を放出するとき、放射線のエネルギーは周辺の物質に吸収されて、最終的には熱に変わります（崩壊熱）。このため、ガラス固化体では、含まれる放射能におおまかに比例して発熱があり、製造時には 1 本あたり約 2300 W、その後 50 年経った時点で約数百 W の発熱があります。

天然バリアの隔離機能

- 放射性廃棄物以外の廃棄物や放射能レベルの低い廃棄物の、地表または地表近傍（浅地中）の処分における隔離は、処分施設の位置と設計によって、及び地下水漏洩の監視や立ち入りや土地利用の制限などの監視によって可能になります。

これに対して、放射性廃棄物の地層処分に対しては、隔離は、適切に選ばれた場所の地質環境¹における、放射性廃棄物を埋設する深度までの厚い岩盤によって可能になります。

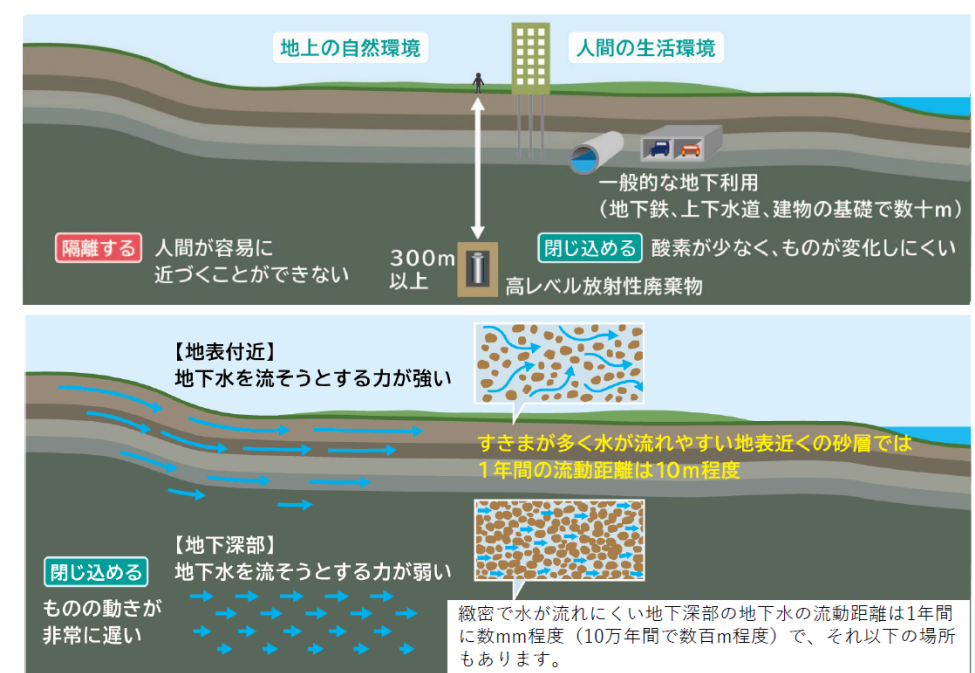


図 1-10 地下深部の特徴（閉じ込めと隔離）

（高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する対話型全国説明会（2023年），参考資料より）

- 地下深部は、図 1-10 に示すように、厚い岩盤によって地上の雨や風その他の自然現象や人間及び生物の活動から隔離されています。岩盤は地下に行くほど、土砂や岩の重みにより押されて、隙間は小さくなり、空気や水の浸透の程度は小さくなります。300メートルを超える深度では、岩盤の割れ目や隙間は動きの遅い地下水が占めるのみとなり、これらに阻まれて空気の浸透はなくなります。この結果、地下深部は、

(1) 酸素が少ないため、錆びるなどの化学反応が発生しにくく、ものが変化しにくいので、埋設物がそのままの状態であり続ける、

¹ 適切に選ばれた場所の地質環境については「地質環境」の「[地層処分にとって望ましい地質環境](#)」および「[地層処分施設と地質環境](#)」をご覧ください。

(2) 地下水の流れが遅いので、ものの動きが非常に遅い、

(3) 地表の人と生物の生活環境（生物圏）の影響を受けにくく、人間が容易に近づくことができない、

という特徴を持っています。

すなわち、埋設深度までの厚い岩盤は、人間や生物とその活動及び空気や水が地上側と地下を行き来しないように隔離する機能があります。

- この結果として、地下深部には、長い期間、ものを閉じ込める性質があり、石炭や鉱石、化石のように、数千万年以上も保存されていたものがあります。これらは、隆起による地表への露出や発掘などがない限り、長期間にわたり安定した環境が保たれる場所では、このような事例が確認されています。
- これらのことから、地下深部に広くみられる閉じ込めと隔離に関する性質が長期間により維持されるような環境では、固体にした放射性廃棄物を、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔離された地下深部の岩盤中に、長期にわたり閉じ込めておくことができると期待できます。
- ただし、地下水については、その動きが地表に比べて極めて遅くなっているとはいえ、完全な隔離がなされているわけではなく、これが放射性廃棄物に接触して、放射性廃棄物から放射性物質が溶けだして地下水により運ばれて、地表の人と生物の生活環境（生物圏）に接近する可能性は残っています。

閉じ込めと隔離の確認

- 放射性廃棄物は、「閉じ込めと隔離により安全を確保する」、すなわち放射性物質が長期にわたり閉じ込められ隔離されているうちに、その放射能を失うというのが放射性廃棄物の処分の基本的な考え方です。ただし、この閉じ込めと隔離は数万年以上の長期にわたり達成される必要があります。
- 地層処分システムでは、放射性物質を閉じこめて隔離しておくために、天然や人工の複数のバリアが組み合わされて使用されています。しかし、当初は閉じ込めと隔離が十分になされているとしても、数万年以上もの長期間のうちには、人工の構築物も天然の岩盤も、まったく変化しないとは言えません。移動の速度が遅くなっているとはいえ、地下水はいずれオーバーパックの表面に到達し、ゆっくりと腐食が進み、ガラス固化体と地下水が直接接することになるかもしれません。その後はガラスの溶解がゆっくりと進み、放射性物質が溶かし出されて、緩衝材の中を非常にゆっくりと移動することも考えられます。
- これらのプロセスはあまりにもゆっくりとしているので、その速度や進行の程度を直接の観察や測定で定量的に精確に測ることは困難です。ある時点まででは動きの度合いがある程度以下だということだけでも、数万年を超える長期間のうちそれを大きく上回るような放射性物質の移動が絶対起こらないと保証することはできません。

数万年以上もの長期間にわたって直接の観察や測定（モニタリング）を続けることができたとしても、その間に何も異常が検出されないことにより、確かに廃棄物の閉じ込めと隔離が「なされている」ことを確認できるのは遠い将来の時点のことであり、今現在や途中の時点での判断には役立ちません。

結局、将来数万年以上の長期間にわたって、閉じ込めと隔離が「ある程度なされる」であろうことを、現在の知識によって、それも十分な確からしさを備えた形で予測、推定するしかありません。

- そこで、地層処分の安全性を確かめるために、閉じ込めと隔離は完全にはなされない¹という仮定を置いて、その仮定の下に最大限、放射性廃棄物から溶かし出された放射性物質が地下の岩盤中を地下水によって地上まで運ばれるとした場合に、運ばれた放射性物質によって生じる影響（地表における被ばく線量等）をシミュレーションによって評価します。
- このような仮定の下に計算されるシミュレーションの結果は、この結果が問題にならないほど低ければ、放射性物質の閉じ込めと隔離が期待通り確実に発揮されると考えることができます。この結果はあえて極端な想定をした場合のもので、その通りのことが将来起こる可能性が高いという意味での「予測」をするものではありません。これ以上悪くなる可能性は「ゼロ」ではないものの、ほとんどないであろうことを示しています。

¹ 例えばオーバーパックはいつか健全性を失うとか、ガラスはいつか地下水に溶かされて保持性能を失う、など。

ここに注意

隔離と離隔

- 放射性廃棄物の処分の目標は、潜在的危険性の持続する期間、有害な放射性物質が、人と生物が生命活動と社会活動を行っている環境にできる限り入り込むことのないように隔離しておくことです。
- 歴史的にみれば、人々は自分から廃棄物を遠ざける、すなわち物理的な距離をとること（離隔）によって「廃棄物を処分」してきました。これは廃棄物がもう一度自分に到達するまでに、希釈分散や環境の浄化作用をうけて安全になるとの考えからなされてきたものと考えられます。
- しかし、文明が発達するにつれて、地球が人間社会にとって無限に広がった時代は去り、ある人が廃棄物を自分から遠ざける行為は、他の人が生活している環境を脅かすものとなり、人々の間に軋轢が生じる状況（公害、地球環境問題など）を生じているのが現代社会です。
- 例えば、1989年にスイスのバーゼルにおいて採択された「バーゼル条約」は、欧米諸国の先進国が排出したゴミによる発展途上国の汚染状況を改善するため、基本的には廃棄物の越境を禁止しようとする条約です。しかし、近年に至ってさえ、資源のリサイクルと称して厄介なごみを越境させ、安易に処分していたのがプラスチックごみです。これにより、実際に海洋汚染・土壌汚染が顕著となり、焼却処分されたものは多くのダイオキシンを発生させていたため、2021年には条約改正が行われ、有害廃棄物としてプラスチックごみが追加され、リサイクルに適したきれいなプラスチックごみの範囲がより明確化されました。
- このため、単に廃棄物を自分から遠ざけるのではなく、すべての人々から、廃棄物をより本質的に隔離することを考えることが必要になっています。
- 隔離の意味は、隔離されるものと隔離する側の双方での物質やエネルギーの行き来がなくなる状態、すなわち遮断された状態になるように、両者を隔て離すことです。この際には、距離（離隔）だけでなく、物質やエネルギーの行き来を阻むバリアの特性が非常に重要です。これは物質やエネルギーの移動を制限して、隔離の効果を高める役割を果たします。
- 地層処分では、廃棄物を、地下深くの岩盤中に、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から遠ざけて定置します。また、この際には、放射性物質が長い時間のうちに移行して地表の人と生物の生活環境（生物圏）に至ることがないように、放射性物質がその場にとどまり続けるように、放射性物質を固体に固定化して、これをオーバーパックや緩衝材で取り囲む人工バリアにより閉じ込めます。地表の人と生物の生活環境（生物圏）と廃棄物を隔てる厚い岩盤は、閉じ込められた廃棄物の状態が、地表からもたらされる水や空気、人や生物により乱されることがないようにして、長期の閉じ込めと隔離に寄与します。地層処分では、これにより、すべての人々から、廃棄物をより本質的に隔離することが可能になるという考えが、地層処分により放射性廃棄物を処分しようという大きな動機になっています（「閉じ込めと隔離」の「地層処分システムの仕組み」をご覧ください）。

非放射性廃棄物¹の管理

- 放射性でない廃棄物、例えばし尿や汚泥、ごみなどについては、歴史的には、人々は、自分から遠ざけて投棄したり、焼却あるいは海や川へ投棄したりすることにより、これを処分してきました。特に生命活動によりもたらされる有機性の廃棄物については、自然界で徐々に起こる希釈・分散と分解・浄化作用が、このような希釈・分散による処分をある程度許容していたといえます。
- ところが、文明の発展とともに、人口が増えて密集して都市が形成され、廃棄物の量が増え、分解による無害化の起こるよりも速い速度と量で廃棄物が環境中に放出されるようになってきました。この結果、処分した廃棄物から病原体や有害物質などが水や空気あるいは生物によって運ばれて、感染症や環境汚染などによる健康被害が顕在化し始めることとなりました。
- 一般に、廃棄物の物量の増加によっておこる環境の負荷の問題は、以下のような二つの側面があると考えられています。
 - (1) 有害物による環境汚染：本来、環境中に問題になるほど存在していなかった廃棄物中の有害物質が、大気や水によって、イオンや分子、エアロゾルなどの形で運ばれて、環境中に分散し、環境の浄化作用によって無害化する前に人と接触して健康影響をもたらす。
 - (2) 地球環境の劣化：水や二酸化炭素、窒素、リンなどの、人間による利用量の増大が、環境中のこれらの生物地球化学的循環による流通量を変化させる。この結果、地球環境を、完新世前期（最終氷期の終了以後産業革命以前）の過渡的平衡状態から逸脱させて、気候変動や生物多様性の損失、資源の枯渇等の地球環境の劣化を招く。
- このうち、(1)の問題に対しては、有害物質で環境を汚染しないこと、(2)の問題に対しては、資源から廃棄物に至る物量を減らし、廃棄物に対しては 3R、すなわち発生抑制（Reduce）、再使用（Reuse）、再生利用（Recycle）に努力し、どうしても処分しなければならない廃棄物のみを最適処分するとされています。その意味で、非放射性廃棄物の管理では処理という用語が一般に用いられています。
- (1)に関して起こる不都合な結果は、公害等の環境汚染でした。これらの結果は、廃棄物の有害性とそれが自然界で受ける分解・浄化作用及びその処分における閉じ込めと隔離の機能が適切に評価されないまま、安易な処分をしたためといえます。このような教訓を踏まえて、現在では、有害廃棄物を人為的に無害化したり、無害化するまで監視したりしておくなどの方法がとられるようになりましたが、それでもどうしても処分しなければならない有害廃棄物は残ります。

¹ ここでは「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（廃棄物処理法）」の下の一般廃棄物と産業廃棄物を総称して、非放射性廃棄物としています。

- 一般に有害な廃棄物の管理では、廃棄物を、希釈・分散や土中埋設により、ある期間、隔離して、その間に自然に起こる化学分解反応による無害化に期待したり、あるいは人為的に分解して無害化したりする方法がとられてきています。
- 「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（廃棄物処理法または廃掃法）」の下では、廃棄物は一般廃棄物と産業廃棄物に分類され、それぞれの処理体系が整備されています。この場合、廃棄物の「処理¹」とは、廃棄物が発生してから最終的に捨てられるまでの行為を指し、分別、保管、収集、運搬、再生、処分等を含んでいます。処理の一部である「処分」には、廃棄物を最終的に自然界に捨てる「最終処分」（埋立処分と海洋投入処分を含む）と、最終処分前の段階で廃棄物を、地表の人と生物の生活環境（生物圏）の保全上問題がない状態に変化させる「中間処理」があります。
- 日本の一般産業廃棄物の最終処分場には、廃棄物の有害性に応じて安定型処分場、管理型処分場、遮断型処分場があります。これらにおいては、公共水域と地下水から、適当な期間あるいは無期限²に遮断を保つようモニタリングをして管理することが法律で義務付けられています。すなわちこれらの処分場における処分は、人による管理によって閉じ込めと隔離が達成される廃棄物処分です。
 - ① 安定型処分場：既に安定化している³か、または埋立後すぐ安定化する無害な廃棄物を片づける処分場。
 - ② 管理型処分場：低濃度の有害物質と生活環境項目の汚濁物質を発生させる、大部分の廃棄物に対し、安定化を図るもので、埋立後、維持管理している間に、次第に分解しいずれは安定化に至ることを目指す処分場。
 - ③ 遮断型処分場：重金属や有害な化学物質などが基準を超えて含まれる有害な産業廃棄物を保管する処分場。廃棄物が無害化する事はないため、公共水域と地下水から遮断を保つよう管理し続ける必要があり、将来の新技术に最終処分を託す、長期・無期限保管場所といえます。

¹ 後述するように、処理や処分の用語は、放射性廃棄物に関する場合と、放射性でない廃棄物に関する場合で異なる使い方がされていますので、混乱しないように注意してください。

² ここで求められている「無期限」は、物理法則によって決まる高レベル放射性廃棄物の「潜在的危険性の持続期間」と比べて、はるかに短い、社会の制度が続く限りの期間を暗黙裡に意味していることに注意してください。

³ ここでは、安定化しているという言葉は、それ以上、毒性または有害性のもととなる化学反応を起こすことがないという意味で使われています。

放射性廃棄物の管理と処分

- 放射性廃棄物については、廃棄物処理法の対象から除外されており、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）」により規制されています。原子炉等規制法の下では、放射性物質は、潜在的危険性として放射能を持っているため、その発生時点から、つまり廃棄物とされる以前から、その使用が規制の対象とされています。廃棄物処理法における処理にあたるのは、国際原子力機関の安全基準では、放射性廃棄物の処分前管理と処分を合わせた廃棄物の管理（management）です。処分の前の処分前管理において、まず放射性廃棄物を分別し、次に、放射性物質を固体中に固定化した物理的及び化学的形態として、これを埋設処分に適したパッケージにするプロセスは処理（processing）と呼ばれており、処理と貯蔵及び輸送は合わせて処分前管理¹と呼ばれています。

放射性廃棄物と一般及び産業廃棄物の場合のように、処理、処分、取り扱い、管理などの用語は、使われる背景などにより使われ方が異なっているので注意が必要です。しかし、いずれの場合でも、廃棄物は、無害化できない限りは、その潜在的危険性のある間、閉じ込めて隔離しておくという基本的考え方に違いはありません²。

- 放射性物質の潜在的危険性である放射能は、半減期によって決まる速さで減るのみで、化学反応によって半減期を短くして、人為的に無害化する技術は今のところありません（「潜在的危険性の持続期間」と「地層処分の選択」の「核種・分離変換」についてもご覧下さい）。
- 比較的はやく放射能レベルが低くなる放射性物質のみを含む放射性廃棄物（低レベル放射性廃棄物³の一部）については、その放射能が減少するまでの期間（数十年～数百年）、放射性物質が空気や水によって運ばれて人間に近づくことのないように、放射性物質をセメントなどの固体中に固定して、この固体廃棄物を数メートルから数十メートルの浅地中に埋設して監視します。この場合の隔離は、処分施設の位置と設計という隔離のためのバリアによって、及び操業上の能動的制度的管理（地下水のモニタリングなど）や受動的制度的管理（立ち入り制限や土地利用制限など）などの監視によってもたらされることとなります。
- 処分においては、特に「管理」という用語が混乱を招いています。この用語は、具体的な方法を用いて何かを経営する、管理する manage という意味で用いられる場合と、何かを制御する control の意味で用いられる場合があります。制御は良い状態を保つように処置することを意味していますが、誰

¹ 原子炉等規制法では、埋設の方法による最終的な処分、および、それ以前の管理または処理（廃棄物管理）と呼びます。

² 希釈と拡散については、「ここに注意」の『「閉じ込めと隔離」と「希釈と拡散」』をご参照ください。

³ 300年を超えて放射能がある程度（ただし限定的に）残る一部の低レベル放射性廃棄物については、70メートル以深への埋設（中深度処分）が考えられており、管理期間終了後に起こる土地利用や自然事象等について慎重な考察が求められています。

がまたは何が、何を制御するのか、どのような手段によって制御するのがあいまいなまま、操業上の管理とか、廃棄物を地下に定置し終えた後の、能動的制度的管理と受動的制度的管理（「長期の閉じ込めと隔離の達成」の図 1-6 をご覧下さい）などのような言い方がされてきました。

- 今日の社会においては、廃棄物の発生者がその「管理責任」を担うべきであるとの考えが一般に受け入れられています（いわゆる「汚染者負担の原則」の考え方）。現在の法制度では、廃棄物を定置して、その定置が無事完了したこと（処分場の閉鎖）を確認するまでは事業者が規制の下に管理を行い、閉鎖後の土地については、ある期間は事業者が規制の下で能動的制度的管理を行い、その後については、国または社会が受動的制度的管理を行うことになっています。

地層処分の場合も、処分場の閉鎖までは同様で、事業者が規制の下で管理を行います。一方、閉鎖後については、その土地の地表については利用が自由となる一方、地下については掘削制限が確実に続けられれば、受動的制度的管理が達成されることになると考えられます（「長期の閉じ込めと隔離の達成」の図 1-6 をご覧下さい）。

このことは、能動的制度的管理については、廃棄物発生者（事業者）により、世代内の他者に対する管理責任が果たされ、受動的制度的管理については、遠い将来世代に対する管理責任が、現世代（国または社会）によって果たされる形となる、と考えることができると考えられます。

- 能動的制度的管理のように、文脈上制御の意味が明らかな場合には、一般に、そのまま「管理」という語が使われています。しかし、地層処分の場合には、社会や人の手による制御ができない遠い将来にわたる「管理」を考える必要があります。このため、何によって、どうやって放射性物質の動きを制御し続けるのかをより明瞭にする必要が出てきました。

そこで、地層処分における管理に対しては、最近では、管理という語の代わりに規制（制度）の有無にかかわらずなされるコントロールとして監視（oversight）という語を使うようになっています[1,2]。ここでは、廃棄物を定置するまで及び定置直後になされる、人により即座に是正をすることのできる直接的制御の実施形態を直接的監視（direct oversight）と呼び、定置後規制当局から認可を受けた事業者がいなくなった期間においてもなされ得る、記憶の保持のような間接的制御の実施形態を間接的監視（indirect oversight）と呼んでいます。

このような言葉が用いられる背景は、「管理」が制度の存在を仮定しているのに対して、制度が失われてしまうかもしれない将来に対して、現在において現世代が、間接的監視としてどのような努力があり得るかをより明示的に考えるためと考えられます。

- 地層処分では、閉じ込め性能の劣化の起こりにくい人工物を構築し、人間が近づきにくく、長期に変化の起こりにくい地下深部の岩盤を選んで、そこに廃棄物を埋設します。このように、廃棄物を定

置した後に、人の手による制御ではなく、地質環境（天然バリア）¹や人工バリアなどが安全を支えている機能については、「ビルトイン・コントロール」という言い方がされています[1, 2]。これは、外部からのエネルギー供給や人による関与を必要とせず、自動的に閉じ込めと隔離の機能を発揮するシステムの要素を意味しており、「内蔵されたコントロール（の機能）」とか「作りこまれたコントロール（の機能）」と呼ぶことのできるものです。機能そのものは将来において受動的に達成されることとなりますが、その機能は事業者が現時点において組み込むという意味合いがこの言葉には含意されています。

- 間接的監視という言葉で意味しようとしているのは、マーカーやモニメントの設置、記録や記憶の長期の保存、鉱物資源のない地質環境の選択などの、直近の将来に対しては受動的制度的管理にあたる方策です。これらの有効性は社会制度の存続やその社会の人々のふるまいにも依存すると思われるので、遠い将来に対して、どの程度有効であるかは言えないため、これらの方策に依存することはできません。しかしそれにもかかわらず、ビルトイン・コントロールとして機能する可能性はあります。地層処分では、遠い将来世代に対する責任を果たすために、これらについても努力すべきであると考えられています。

¹ 地質環境は、放射性物質または放射性廃棄物を、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔離するために機能するバリアであると考えられる場合には、天然バリアと呼ぶことができます（「閉じ込めと隔離」の「まずこれだけは」をご参照ください）。

「閉じ込めと隔離」と「希釈と拡散¹」

- 放射性廃棄物はその潜在的危険性が持続する間は、放射性物質を固体中に固定化して、閉じ込めと隔離により、地表の人と生物の生活環境（生物圏）を汚染することのないようにするというのが放射性廃棄物の処分の基本的な考え方です。しかし、すべての放射性物質を遠い将来にわたって完全に閉じ込めて隔離しておくことはできないため、処分場から放出される放射性物質が移行中の減衰や希釈と分散などの環境の自浄作用によって安全上問題のない範囲かどうかを調べる必要があります。
- ガラス固化体から地下水に溶け出した放射性物質の濃度は、溶け出した場所で最も高くなります。しかし、放射性物質は人工バリアと天然バリアの隙間を地下水を介して運ばれていくため、その間に薄まっていきながら、不都合な場合には、最終的に地上に現れることとなります。したがって、地上に現れる段階では放射性物質の濃度が下がっていることが期待できます。一般に、ある物質が人体や環境に対して及ぼす影響は濃度の高低によりますから、濃度が下がることは安全上望ましいといえます。これを「希釈・拡散」の効果とよびます。
- ただし、生物が活発に活動する環境中では、生物による摂取や土壌等の媒体への沈着等を通じて放射性物質の再濃縮が起こる可能性もあります。十分低い濃度でも、それを大量に環境中に放出し続ける場合には、放出される総量に対して、環境中で起こる再濃縮の影響を慎重に評価しておく必要があります。また、環境における希釈・拡散の効果に期待する有害物質の放出では、自分だけがそのような放出を行うとは限らず、同じような放出を行う者が他にもいる可能性についても、注意が必要です。
- 様々な物質に係る環境基準は、このような希釈・拡散の効果と環境媒体中への分配や環境中での無害化の効果を考慮して定められています。放射性物質を含む様々な施設からの気体や液体としての放出については、その空気や水を吸気したり摂取したりしても問題のない濃度が濃度限度として定められています。
- 放射性廃棄物を固体中に固定化して埋設する処分とは別に、原子力発電所や医療施設から放射性物質を含む液体や気体を排出²（排気や排水）する場合には、計画的で監視された形での、環境中への「濃度と量（排出を続けた場合の積算量）を考慮に入れた排出」が行われます。これは、放射性物質が、環境中で自然に水中や大気中で希釈・拡散される効果に期待するものです。この排出は定められた上記の規準値を超えない範囲で、さらに可能な限りその影響が小さくなるようにして、規制機関との合意に基づいて、実施され、排出物中及び直近の環境中の放射性物質の濃度と排出量がモニタリングされます。

¹ 拡散は物質の移動のメカニズムを表す概念であり、分散は物質や成分の広がり具合の変化を表す概念です。物質が分散する過程において、拡散が働くことがあります。

² 計画され管理された放出を排出と呼んでいます。

- 上述のような、計画的で監視された形での、環境中への排出は、排出する物質の濃度と量に対して「希釈・拡散」の効果を慎重に評価することが必要です。この評価が適切に行われれば、人と環境の安全を脅かすことはありません。しかしながら、過去の非放射性の有害廃棄物の処分においても、安易に希釈・拡散の効果に過大に期待して、公害や環境汚染を招いてしまったという教訓があります。また、一見無害に見える廃棄物を大量に排出することによって、生態系の変化を引き起こしてしまうこともあるため、注意が必要です。有害物質の環境への排出は、可能な限りその濃度と量を低く抑えるように努力し、環境での希釈・拡散によって問題にならない程度に限られていることを確認することが大切です。

廃棄物処分における閉じ込めと隔離の重要性

- 一般廃棄物や産業廃棄物は、歴史的には、人々は、場合によっては液体や気体の形のまま、自分から遠ざけて投棄したり、焼却あるいは海や川へ投棄したりすることにより、これを「処分」してきました。特に生命活動によりもたらされる有機性の廃棄物については、自然界で徐々に起こる分解・浄化作用が、このような希釈・拡散による処分をある程度許容していたといえます。
- この結果として環境汚染が起こってきたことから、「処分」という言葉を使うのは、廃棄物に対する責任を放棄することを意味していると考えられる人もいます。しかし、すべての有害廃棄物を無害化することはできないし、人間の寿命も限られています。この結果、人間社会の制度の存続期間を超えて潜在的危険性が持続するような廃棄物の発生は避けることができません。また、人間の関与すなわち管理による安全確保の確認を長期間続けることも現実的ではありません。
- 過去の廃棄物の処分を振り返ってみると、「処分したこと」そのものが悪いのではなく、処分のためにかかる配慮や手間、費用が今から思えば足りておらず、十分な安全上の配慮がなされなかったことこそが問題だったのです。また、廃棄物を単に自分から遠ざけることによって隔離がなされると期待する考え方も今では好ましくないとされています（ここに注意「隔離と離隔」をご覧ください）。廃棄物の潜在的危険性が持続する間、廃棄物の「閉じ込めと隔離」を達成する方法があるのなら、安全な処分は実現不可能なことではありません。

放射性廃棄物の潜在的危険性と危険性

- 放射性廃棄物の危険性の正体は、含まれる放射性物質と人が接近して、放射性物質からの放射線を人が過度に受ける可能性です。そもそも両者の接近が起こらないように確実な閉じ込めと隔離がなされていれば危険を回避することができ、それは危険性を十分抑えられることを意味します。

放射性廃棄物は高い濃度¹の放射性物質を含んでおり、何の措置も施されなければ被ばくを与える潜在的危険性のあるものです。このため、その存在そのものやそれが距離的に近くにあることが、非常に危険であると誤解する人もいますが、危険かどうかは、放射性物質あるいは放射性廃棄物がどのような状態にあるかによって決まります(「セーフティケース」の「潜在的危険性と安全性または危険性との関係」もご参照ください)。

- 例えば、距離的には近くにあっても、放射性物質の移動や放射性物質からの放射線を十分に防げる障壁（バリア）が人との間にあれば、具体的な危険が生じない場合もあります。あるいは、いかに距離的に遠くに遠ざけても、過去のし尿や汚泥、ごみの処分の例からわかるように、移動を防ぐ障壁が不十分であれば、空気や水によりイオンや微粒子の形での輸送が起こり、人に接近して危害を生じることは十分に起こります。「懸念すべきことは、放射性物質の閉じ込めと隔離が確実になされているかどうかである」という理解が大事になります。

¹ 「原子炉等規制法」では、ある濃度以上の放射能を含む物質、材料を放射性物質として管理しなければならないとして、放射性物質ごとにその濃度を示しています。この濃度は、その物質、材料が社会で全く無制限に使われたり環境中に分布したりしても、有意な影響を与えない濃度として設定されています。それ以上の濃度を含む放射性廃棄物を処分する際には、その廃棄物の潜在的危険性に応じて、どのような方法で処分すれば、人と環境を防護できるかを考えます。

地層処分の選択

- 高レベル放射性廃棄物の処分方法については、地層処分のみならず、長期地上保管、核種・分離変換、海洋底下処分、宇宙処分等の多様な処分方法が検討された結果、現時点の最も有望な処分方法として、地層処分が国際的に選択されています[3]。その他の方法は、下記のように評価されています（「閉じ込めと隔離」の「まずこれだけは」、「ここに注意」の「隔離と離隔」をご覧ください）。

- 長期地上保管（長期貯蔵）

人間による規制管理または監視が維持される限り、環境、安全性及び放射線防護面での要件を順守することができます。またおそらくは、乾式貯蔵でも湿式貯蔵でも、安全性を損なうことなく、少なくとも 100 年間にわたって管理または監視を継続することができると考えられます。しかしこれよりも長い期間については不確実性が大きくなります。数千年、数万年にわたって強固な制度及び能動的な管理能力を維持することは難しいため、この方法でも、最終的には、地層処分のような管理を必要としない処分方法に移行する必要があります。

- 核種・分離変換

先進的な核反応の利用を通じて廃棄物の一部の放射性物質なら核種変換することは、実現可能かもしれません。しかし、それが実現したとしてもすべての問題となる放射性物質を核変換できるわけではなく、核種変換の後に残る長寿命高レベル放射性廃棄物等を管理する必要性がなくなるわけではないと考えられます。

- 海洋底下処分、氷床処分

廃棄物を処分するために海洋や南極を利用することは、ロンドン条約や南極条約といった国際条約により禁じられています。これらの方法は、廃棄物の搬送や定置におけるトラブルへの対処等も含めて、その技術的実現性について様々な議論があります。またそれ以前に、国際社会において共有されている場所を利用することに関して、責任ある慎重なアプローチではないと考えられます。

- 宇宙処分

この方法は、打ち上げや軌道操作やトラブルへの対処等について、技術的実現性に乏しくコストも膨大なものになると考えられます。

国際的な定義

- 国際原子力機関（IAEA）は、IAEA 憲章に基づき、人及び環境を電離放射線の有害な影響から防護することを保証するため、安全基準を策定しており、それは高いレベルの安全を構成する際の基礎となる国際的なコンセンサスを反映しています。IAEA 安全基準の放射性廃棄物の処分に関する安全要件（SSR-5）[4]では、閉じ込め、隔離、また処分についても以下の様に定義しています。

「1.6. 全ての放射性廃棄物の管理のための好ましい戦略は、廃棄物を閉じ込め（すなわち、廃棄物マトリクス、パッケージ及び処分施設の中に放射性核種を封じ込めること）、接近可能な生物圏から隔離することである。この戦略は、廃棄物管理活動から生じる、残留量の放射性核種を含む排出物の放出（すなわち、管理放出）、あるいは関連する規準を満たす物質のクリアランスを排除しない。国際安全基準は、これらの状況の双方を包含して規定されている。

1.8. 「処分」という用語は、放射性廃棄物の回収を意図せずにある施設または場所に廃棄物を定置することを意味する。処分オプションは、関連する危険性によって必要とされる程度に、受動的な人工または天然の特質を用いて廃棄物を閉じ込め、接近可能な生物圏から隔離するために設計される。処分という用語は、回収が意図されていないことを示す；回収が可能ではないということの意味するものではない。」

閉じ込めについては、次のように述べています。

「3.40. 放射性核種を定められた期間にわたり廃棄物形態及びパッケージングへの閉じ込め、比較的短寿命の放射性核種の大部分が原位置で減衰することを確保しなければならない。低レベル廃棄物の場合、そのような期間は数百年程度、高レベル廃棄物の場合は数千年程度になるだろう。高レベル廃棄物の場合は、処分システムの外部への放射性核種のいかなる移行も、放射性崩壊により発生した熱が実質的に減少した後にのみ生じるということも確保されなければならない。」

隔離については、次のように述べています。

「要件9：放射性廃棄物の隔離

処分施設は、人と接近可能な生物圏から、放射性廃棄物の隔離を図る特質をもたらすように、立地され、設計され、操業されなければならない。特質は、短寿命廃棄物に対して数百年程度、中レベル及び高レベル廃棄物に対しては少なくとも数千年程度の隔離をもたらすことを目指さなければならない。その様にする事によって、処分システムの自然の変化と施設の擾乱を引き起こす事象の双方に考慮が払われなければならない。」

「3.43. 浅地中施設の隔離は、処分施設の位置と設計によって、及び操業上の管理と制度的管理によってもたらされなければならない。放射性廃棄物の地層処分に対して、隔離は、処分の深度の結果として主に母岩となる地層によってもたらされることになる。」

さらに、閉鎖後期間と制度的管理については、基本方針として、閉鎖後も可能な限り制度的管理と監視を継続すべきであると述べています。ただし、長期の制度的管理と監視は実現できず、そのような措置が失われて、将来の人が処分施設の存在に気付かずに施設に侵入した結果、計画被ばく状況における基準を超える影響がもたらされることがあったとしても、もたらされる影響は現存被ばく状況（下記文中の介入）の基準を超えないように処分施設を設計すべきであると述べています。

「(要件 22) 閉鎖後期間に、制度的管理と処分施設に関する情報の入手可能性を維持するための措置を扱うため計画が準備されなければならない。これらの計画は、受動的な安全特質に整合したものでなければならず、施設を閉鎖する認可が与えられることに係るセーフティケースの一部を構成するものでなければならない。」

「5.6. 放射性廃棄物の処分施設の長期安全性は、能動的な制度的管理に依存してはならない。受動的な安全特質の違反でさえ、介入の基準を超えることがあってはならない。さらに、処分施設の安全は、専ら制度的管理に依存してはならない。制度的管理は、浅地中処分に対する安全の唯一または主要な構成要素であることができない。セーフティケースで想定される安全への寄与をもたらす制度的管理の能力は、セーフティケースの中で立証され、正当化されなければならない。」

- SSR-5 の安全要件を受けて、放射性廃棄物の地層処分施設の開発と規制上の管理に関与する政策策定者、規制機関及び操業者のためのガイダンスを規定している安全指針 SSG-14[5]では、

「2.2. 廃棄物の閉じ込め及び生物圏からの廃棄物の隔離は、放射性廃棄物について受入れられている管理戦略である。閉じ込めと隔離は、廃棄物形態自体、廃棄物容器、埋め戻し材、母岩などの、各々異なったタイムスケールで有効性を持つ補完的な一連のバリアを通して達成することができる。処分の深さと母岩の地質環境の特性は、生物圏からの隔離をもたらす、人の偶発的または、不法の侵入の可能性を低減する。さらに、安定な地層内の深い位置に埋設することで、気候やその他の自然現象の影響が有意に低減できる。」

「4.7. 放射性廃棄物の地層処分の目的は、廃棄物中の放射性核種を閉じ込め、生物圏から廃棄物中の放射性核種を隔離することにある。地層処分システムの閉じ込めに寄与する安全特性と隔離に寄与する安全特性を区別する、一般に受入れられた方法は存在しない。安全特性を閉じ込めあるいは隔離のいずれかに区別することは決定的に重大ではなく、これらは必ずしも相互に排他的であるわけでもないが、明快さの目的のために、本安全指針では、次の閉じ込め及び隔離の説明を想定する：

(a)地層処分システムの閉じ込め特性には、施設の処分区域内に、放射性核種がとどまるように機能する処分施設と母岩層のプロセス及び特質が含まれる。

(b)地層処分システムの隔離特性には、放射性核種がより広い生物圏から物理的に切り離された地圏の内部にとどまるか（すなわち、廃棄物を人間から隔離する特性）、あるいは放射線学的に有意ではない量しか生物圏へ移行しないように機能する、母岩のプロセス及び特質が含まれる。」

と定義されています。

- また、長寿命放射性固体廃棄物の地層処分に放射線防護体系を適用するにあたっての勧告である ICRP Publication 122 [1]の要約においては、閉じ込めと隔離について、以下の様に述べています。

「(b) 地層処分施設の目標は、地質学的時間尺度に相当する時間的尺度にわたって人間と環境を防護するために、廃棄物を閉じ込め、隔離することにある。地表から遠く離れていれば、変化は非常に緩慢である。地表からの距離と適切なサイト選定を考えると、人間が侵入する可能性は限定的である。一部の核種の放射能は時間とともに増加するが、適切に選択された地層によってその放出は遅延されるし、その上、希釈もされる。地層処分は、長期の閉じ込めと隔離が必要とされる高レベル放射性廃棄物や使用済燃料に特に適していることが国際機関によって認められている。地層処分は、特に長期間の防護が同様に必要となる場合には、他の長寿命廃棄物に使用することも可能である。」

参考文献

- [1] ICRP (2012): Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3).

公益社団法人 日本アイソトープ協会, 「長寿命放射性固体廃棄物の地層処分における放射線防護」, ICRP Publication 122, 2017.

- [2] OECD/NEA (2014): Control, Oversight and Related Terms in the International Guidanc, OECD Publishing, Paris

- [3] 総合資源エネルギー調査会原子力部会放射性廃棄物小委員会第1回会合（平成25年5月28日）, 参考資料 高レベル放射性廃棄物処分について.

https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8220089/www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyoku/houshasei_haikibutsu/pdf/25_01_s01_00.pdf (2024年1月10日閲覧)

- [4] IAEA (2011): Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna.

公益財団法人 原子力安全研究協会 (2012) : 「放射性廃棄物の処分」日本語翻訳版, IAEA 安全基準シリーズ, 個別安全要件 SSR-5, 2012年7月.

- [5] IAEA (2011): IAEA Safety Standard Series, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-14.

地質環境

地質環境	41
<u>まずこれだけは</u>	42
<u>少し詳しく</u>	43
<u>地層処分における地質環境という用語の使われ方</u>	43
<u>地質環境特性とは</u>	44
<u>地層処分にとって望ましい地質環境</u>	45
<u>地層処分施設と地質環境</u>	46
<u>ここに注意</u>	48
<u>「環境」と「地質環境」の意味の違い</u>	48
<u>「安定している地質環境」に対する認識のギャップ</u>	49
<u>安定している地質環境の空間的及び時間的範囲の考え方</u>	50
<u>「安定している地質環境」という表現の生み出す誤解</u>	51
<u>付録：歴史的経緯</u>	52
<u>参考文献</u>	54

まずこれだけは

- 地層処分において「地質環境」とは、放射性廃棄物を地下に埋設するときの、放射性廃棄物を取り巻く周囲の地質の状態のことです。
- 「地質環境」は、地層処分の基本的考え方の「閉じ込めと隔離」のうち、主として「隔離」を担い、放射性廃棄物を地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔離して、放射性物質が閉じ込められている状態が様々な影響により乱されることのないようにします（「閉じ込めと隔離」の「まずこれだけは」をご覧ください）。
- 具体的には、放射性廃棄物が埋設される岩盤を構成する岩石や地層の種類・性質及び割れ目や間隙の状態と、岩盤の割れ目や間隙に存在する地下水の種類とそれらの流動状態に注目した地下の状態、さらに温度と圧力などの力学的な状態を意味しています。
- 地層処分に関して「地質環境」という言葉が用いられるときは、地下の状態を観察した結果を一般的に意味するというのではなく、放射性廃棄物を地下に埋設する上で特に問題になる、周辺の地質の性質、という意味合いで用いられる言葉であることに注意が必要です。このような、放射性廃棄物を取り巻き、放射性廃棄物の長期的な閉じ込めと隔離に関係する周囲の地質の状態の性質のことを、「地質環境特性」と呼んでいます。
- 「地層処分における安定している地質環境」とは「高レベル放射性廃棄物の長期的な閉じ込めと隔離に適している地質環境」であり、「地質環境特性の変動がある範囲に維持されている地質環境」を意味しています。

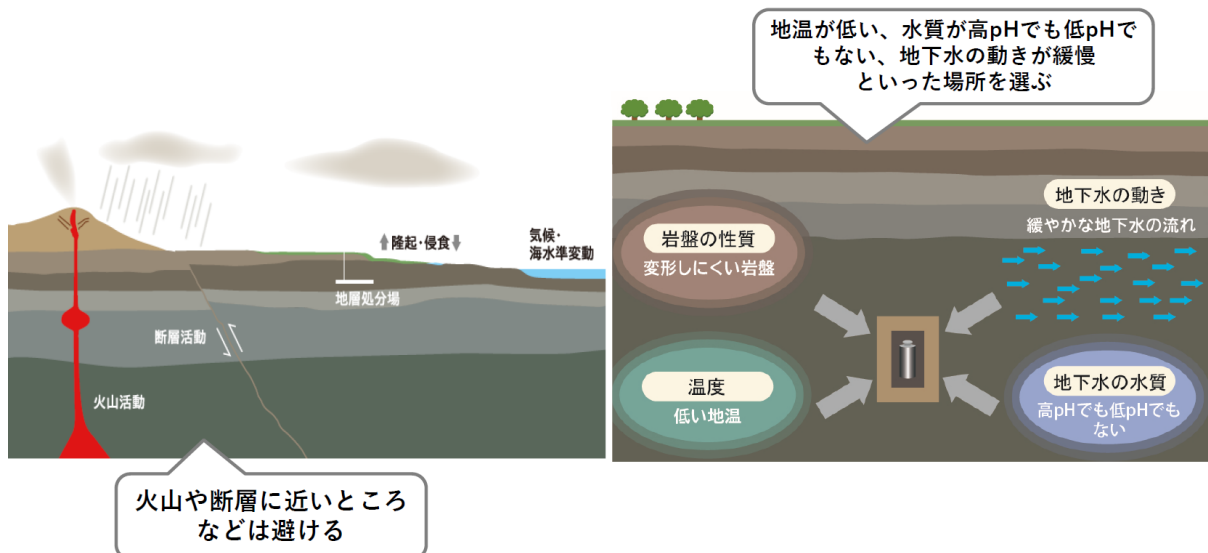


図 2-1 地層処分を行う上で考慮すべき自然現象と「地質環境特性」の概念図

(高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する対話型全国説明会（2023年）、参考資料より)

地層処分における地質環境という用語の使われ方

- 「地質環境」という用語は、「環境地質」という用語とは異なり、地層処分概念を説明する際に、初めて意図的に使われるようになった用語で、一般的な地下の状態ではなく、放射性廃棄物を地下に埋設するときに限定して使われます。
- 地下は深くなるにつれ、土砂や岩石の重みで押されて、地表近くの地質に比べてより強く緊密に固められ、隙間の小さい岩盤からなる構造となっています。このため、地下深部は、自然現象や生物活動が活発に起こっている地表近傍の環境から隔離されていて、地表の人や生物及び水や空気が届きにくい環境になっています。
- このことは、放射性廃棄物を地層処分しようという観点から見ると好ましいと言えます。なぜなら、地下深部では、酸素がほとんどなく生物活動が活発でないため、腐食などのものの変化が極めて緩やかであり、地下水の動きが緩慢であるなど、地下深部自体が閉じ込め機能を持つと同時に、放射性物質を閉じ込めている人工の構築物（人工バリア）に影響を与える可能性のあるものや現象から隔離しておく、「天然バリア」としての環境を提供することができるからです。
- このような地層処分に適した環境条件は、地下深部を構成する岩石や地層の種類・性質によらず、あるいは地下水の水質の違いによらずある程度見られるものです。とはいえ、個々の場所ごとにそれらの要素には違いがあり、すべての場所の地下深部が地層処分に適しているわけではありません。また、当初そういう条件を満足していたとしても、放射性物質を閉じ込めて隔離しておきたい数万年以上という長期的間、その条件が満足され続けるかどうかはそのままではわかりません。
- したがって、地層処分を実施したい場所が、地層処分に適しているかどうかは、放射性物質を閉じ込めて隔離しておく能力という観点から、「放射性廃棄物を取り巻くことになる」地下深部の岩盤と地下水の状態がどうなっているかを示す特性、及び数万年以上の間にそれらがどう変化するかを見る必要があります。このことを表現するために、「地質環境」という語が用いられるのです。

地質環境特性とは

- 放射性廃棄物を処分する地下深部の地質環境，すなわち地下深部の岩盤と地下水の状態が，処分のための閉じ込めと隔離に適しているかどうかは，岩盤と地下水の以下のような性質に，大きく影響されます（「まずこれだけは」図 2- 1 を参照）。
 - 地層や岩体，断層，破碎帯，割れ目などの分布や形状など，
 - 地下水の流れ方や，岩盤の地下水の通しにくさ，
 - 地下水の水質などの化学的な性質，
 - 岩盤中の地温や岩盤の熱の伝えやすさ，
 - 岩盤中の圧力（地圧）や岩盤の変形しにくさなど。
- 断層や破碎帯¹は，地下の地層や岩体のうち特に地下水が流れやすくなっています。また，地下水の化学的性質や熱の伝えやすさは，人工バリアとして用いられている材料の変質や溶解に影響を与える性質です。熱の伝えやすさは，埋設当初の放射性廃棄物が高い放射能を有し強く発熱しているため，この熱を逃がしやすいほど，周囲のベントナイト緩衝材が変質するのを抑えることができることに関係しています。地圧や岩盤の変形しにくさは地下に処分坑道を作るときの空洞の安定性と関係しています。

これらの地層処分における閉じ込めと隔離の機能に影響を与える岩盤と地下水の性質を，地層処分では「地質環境特性」と呼んでいます。

¹ 断層面に沿って岩石が破壊されて脆くなっている部分一帯。

地層処分にとって望ましい地質環境

- 「まずこれだけ」の図 2-1 の概念図で示すように、放射性廃棄物を埋設しようとする地下深部の地質環境特性は、断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食及び海水準変動といった自然現象及びそれらの長期の変遷の影響を受けます。しかし、その影響は常に一様に生じるわけではありません。このような現象が処分場の近くで起これば影響は大きく、遠くで起これば、変動または変化は小さいと推測されます。そのため、地層処分を実施する場所は、上記のような自然現象を、現在から将来にわたって、避けられるように選ぶ必要があります。
- これらの自然現象は、図 2-2 に示すような日本列島を含む周辺のプレートの運動と密接に関係しています。十万年程度においては、プレートの運動の影響が特に大きく現れる場所の空間的な範囲が著しく変動する可能性は小さいと考えられています。さらに、最新の地球科学的知見を常に取り入れて、日本列島のテクトニクスの変化の時間的、空間的特性を把握できます。それらに基づき、こうした自然現象の起こっている位置からある程度の距離を置いておけば、今後十万年程度はその影響を避けることができる可能性が十分に高いと考えられています[1]。

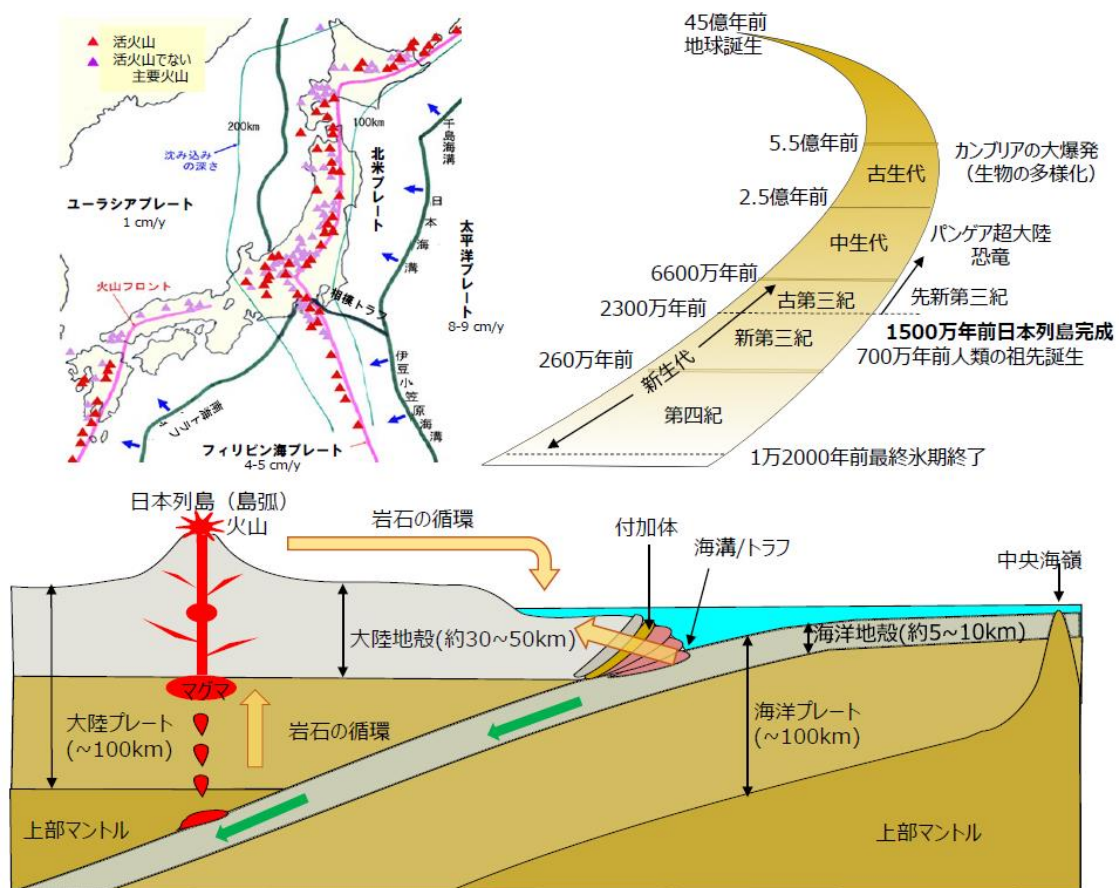


図 2-2 日本列島周辺のプレート運動と地形・地質の形成の概念図
(左上：プレートの配置と火山の分布，右上：地形・地質の形成された時間軸)

地層処分施設と地質環境

- 放射性廃棄物は、図 2-3 に示すように、地下数百メートルの深さ（300メートル以深）の岩盤に坑道をあけて間隔を置いて定置され、定置後、坑道は地下水を通しにくくするような形で埋め戻されます。処分場全体は数キロメートル四方の水平的広がりを持っています。廃棄物を取り囲む地質環境というときは、個々の廃棄物の周囲あるいは処分場全体にわたる地下の岩盤と地下水の様子、廃棄物の閉じ込め機能を担う人工バリアの劣化を抑制する条件となっているかどうかに着目していることとなります。
- 廃棄物を取り囲む地質環境が、当初は地層処分に適したものであったとしても、長い時間のうちに起こる、断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食及び海水準変動といった自然現象の影響を受けて、閉じ込めすなわち人工バリアの劣化抑制に適さない状態になる可能性もないとは言えません。
- このため、処分場は、「まずこれだけは」の図 2-1 の左図に示されるように、これらの自然現象が起こる場所についての長期変動のモデル化による予測を実施した上で、断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食及び海水準変動といった自然現象が起こる場所から十分離れた位置に設置されることが望ましいと言えます。

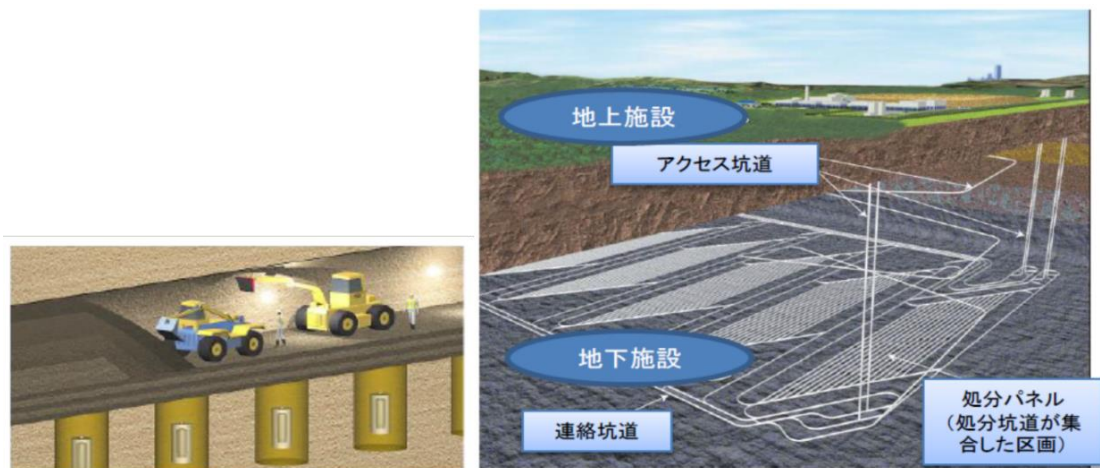


図 2-3 高レベル放射性廃棄物地層処分場の概念図

(左は廃棄体・人工バリアを埋設する処分坑道と処分孔の例（縦置き、埋め戻しの様子）)
(原子力発電環境整備機構，地層処分 安全確保の考え方，2018 年より抜粋)

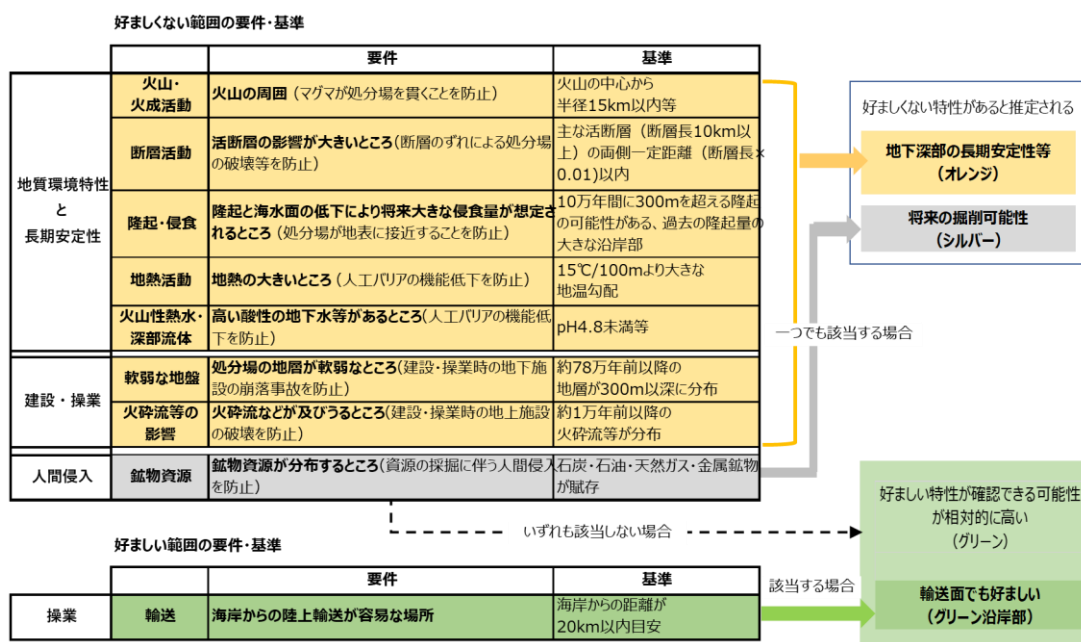
- 放射性廃棄物を処分する地下深部の地質環境の選定においては、閉じ込めと隔離の状態を著しく損なうような自然現象と、建設・操業の遂行を不可能にするような自然現象から隔離されていることが要件として求められます。

表 2-1 は、日本の地層処分について、その実施について監督する立場にある国の審議会が取りまとめた、地下深部の調査がなされる前に、候補地区として避けた方がよいと考えられる地域の要件と基準です[2, 3]。

ここであげられている基準は、合格、不合格を判定する基準ではなく、サイトが特定されていない現状で、大まかに考えて、こういう場所は好ましい地質環境が確保しにくそうなので、避けたほうがよいだろうと考えられる場所を示したものです。

- 地下深部の地質環境には、表 2-1 に示されている他にも、地温が低い、水質が酸性でない、地下水の動きが緩慢といった特性が求められます。これらを含め、対象とする地質環境の特性が地層処分に適しているかどうかは、そのサイトの地質環境を対象に、調査の進展とともに明らかになってくる地層や断層などの形状や分布、岩盤の熱的・力学的な性質、地下水の地球化学的な性質、地下水の流動や物質の移行などの性質の状態を、モデルを用いて可視化して記述して、これに基づきその地質環境の閉じ込めと隔離の性能を評価することによって判断します。言い換えれば、その地質環境特性の分布の記述と人工バリアの記述に基づき、その時点での安全評価がなされ、そのサイトが地層処分を進めるのに適しているかどうか判断されます（「地層処分のセーフティケース」の図 3-1 をご覧ください）。このような地質環境特性を可視化した記述は地質環境モデルと呼ばれ、段階ごとに進められる地層処分において重要な役割を果たします。

表 2-1 科学的特性マップの要件・基準と地域特性の区分[2,3]



ここに注意

「環境」と「地質環境」の意味の違い

- 「地質環境」は放射性廃棄物または処分施設を取り囲み、閉じ込め機能と人工バリアの劣化抑制に影響を与える環境として、地層処分概念を説明する際に多用される用語であり、地層処分分野で初めて意図的に使われるようになった用語です（その歴史的経緯は「付録：歴史的経緯」を参照ください）。「地質環境」として注目している特性は、あくまでも、地層処分の閉じ込めと人工バリアの劣化抑制に影響を与える性質として、空間範囲、時間範囲、注目する特性を限定したものです。前述のとおり、現在日本で計画されている地層処分場の地理的な範囲は水平方向に数 km 四方となっていますから、「地質環境」として検討の対象とするべき範囲も自ずとその周辺のある範囲に限定されることになります。地層処分に関してこの語が用いられる場合は、地層処分において、放射性廃棄物がどのように閉じ込められて隔離されていて、その状態が影響を受けることになるかどうかという観点から使われている用語であることを念頭に置く必要があります。

「安定している地質環境」に対する認識のギャップ

- 地層処分の安全性を説明する中で、「安定している地質環境」という言葉が用いられることがありますが、ここでの「地質環境」は、前述したように、埋設しようとしている放射性廃棄物をとりまく、地下深部の岩盤と地下水からなる環境を、ある限定した意味合いの中で指し示しているものです。放射性廃棄物に隣接する岩盤と地下水の特性は、断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食及び海水準変動の影響を受けて、変動または変化する可能性があります、その変動や変化の幅を考慮に入れても、放射性物質及び廃棄物は、人工バリアの内部と地下深部の岩盤内に閉じ込められたままとなるという状態が、数万年を超える長期にわたって維持されると十分に見込まれる場合も大いにあり得ます。そうした場合について、「その地質環境は安定している」と表現することがあります。
- 繰り返し述べてきたように、地層処分に関して「地質環境」という言葉が用いられる場合には常に、「地層処分における」という限定の意味が込められています。しかし、地層処分に携わっている人以外の、地層処分に馴染みのない人にとっては、「地質」という言葉も「環境」という言葉も、ごく一般的に用いられている言葉です。このため、より一般的な意味合い、時間的・空間的に特別な限定を加えない意味で地質の科学的性質のことを指すと受け取る場合があるとも考えられます。そうした理解のもとで、例えば「安定している地質環境」と聞けば、日本のプレートの配置や地形の変化、断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食が、日本列島が形成されて以来これまで及び今後将来にわたって、一切あるいはほとんど起こらないと説明しているものと受け取り、違和感を覚えるのではないかと思います。実際に、「日本列島は変動帯に位置し火山活動が活発な地域であり、地震の起こらない場所もないので、地層処分に適した安定している地質環境を探し出すのは難しいため、日本で地層処分を行うのは難しい」という批判がたびたびなされています。

これは、地層処分において地質環境に求められる要件を、「安定している」とか「安定していない」などの単純な表現で言おうとしていることから生じている誤解かもしれません。本来の意味に戻れば、「地層処分における安定している地質環境」とは「高レベル放射性廃棄物の長期的な閉じ込めと隔離に適している地質環境」であり、すなわち「地質環境特性の変動がある範囲に維持されている地質環境」です。人工バリアと天然バリアによって閉じ込められ隔離されている放射性廃棄物の状態が、どのようなことになれば悪い影響を受けることになるのか、その度合いがどの程度のものとなるのかについて、科学的特性マップや段階的調査の結果などを参考にして、慎重に判断する必要があります。

安定している地質環境の空間的及び時間的範囲の考え方

- 地層処分に関して「地質環境の安定性」を考える際には、考慮する空間の範囲と時間の範囲に配慮する必要があります。

例えば、固化された廃棄物からの放射性物質の溶出に伴う放射性物質の放出を抑制する閉じ込め機能を考える場合には、オーバーパックに包まれたガラス固化体周囲というスケールがその範囲に相当します。しかし、処分場全体を取り囲む広域の地質の環境が閉じ込めと隔離に適しているかどうかを評価するためには、断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食及び海水準変動の影響を受けるスケールがその範囲に相当します。

また、処分場を立地する場合には、まず日本列島全体の長期の火山や活断層の位置と活動、あるいはこれらに密接に関係している日本列島周辺のプレートの運動に着目する必要があります。その上で、影響を与える自然現象から十分離れた位置に処分場を立地することを考えますが、「地質環境」において地層処分を対象とする時間の範囲の間に起こる火山活動や活断層の位置や活動の変化がどの程度であるかを考えるために、長期変動の予測モデリングの実施も不可欠になります。

- 地震による処分施設への影響としては、ゆれ（地震動）と断層のずれが考えられます。

ゆれについては全国的にどこでもゆれます。廃棄物定置の際の地下の坑道の安定性などに配慮する必要がありますが、埋設後は、岩盤と処分施設が一体となって揺れるため、固体中に固定されている放射性物質の閉じ込めに関する地質環境特性及びその長期安定性の確保に著しい影響を及ぼすことはないと考えられます。

また、断層のずれについては、その地質環境特性に対する影響は、断層のごく近傍に限られ局所的なため、処分場の立地ではなく、廃棄物を定置する位置を、「地層処分施設と地質環境」の表 2-1 に示すように断層の両側一定距離をおいて選ぶ工学設計により避けることが可能であると考えられます。

「安定している地質環境」という表現の生み出す誤解

- 「安定している地質環境」という表現は、範囲や度合いに関する限定がないままに理解し、用いることができってしまう言葉でもあります。そのため、断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食及び海水準変動といった自然現象の起こる位置が、処分場から離れているかどうか、あるいは数万年以上という長い時間のうちにどの程度移動するかといった、地層処分の専門家が、地層処分の成立性を説明するという意味合いではなく、日本に火山活動や地震があるかどうか、これらの現象がいつ、どのくらいの期間、起こるか起こらないかといった、より日々の生活に密接に関連した状況を連想させてしまっている可能性があります。すなわち変動帯にあって「変動している」日本列島に対して一般論として「安定している＝変動していない」あるいはいわゆる「静穏期」にあると説明していると誤解されているのではないかと考えています。
- このため、「安定している地質環境」という言葉は、「地層処分における安定している地質環境」あるいは「高レベル放射性廃棄物の長期的な閉じ込めと隔離に適している地質環境」であり、「地質環境特性の変動がある範囲に維持されている地質環境」であるという意味が伝わるようにして気を付けて使うようにすることが望まれます。同様に、例えば地下水流動特性についていえば、安定とは日本列島の幅広い地下で地下水が流れないことを意味しているのではなく、放射性廃棄物あるいは処分場周辺の地質環境での地下水の流れ方が緩やかで大きく変動または変化しないことを言おうとしているということが明確になるように説明することが重要です。
- その際には、地質環境特性の変化が及ぼす、閉じ込めと隔離の機能に対する影響が、安全上許容できるものかどうかを論じることになります。地質環境特性の変化の程度を論じる際には、現状の観察と外挿等による推論を用いているので、その観察結果が、ある状況に応じた短期的変化（例えば千年から万年の間隔で起こる活動の活発化）を反映したものなのか、より長期の変化の一断面を表しているものを注意深く峻別して、その推論には、最新技術の導入や既存技術の改良に留意しながら信頼できると想定される知識を用いていることを示すことが必要です。

付録：歴史的経緯

「地質環境」という用語は、近年の地層処分を巡る国内の議論から発案されたものではなく、国際的な背景を持った用語です。その歴史的経緯を以下に整理します。

1977年に経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）が、各国の専門家からなるグループの協力により、初めて廃棄物問題を包括的に捉えた「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[4]を公表しました。本報告書では、「安定している地層」に人工バリアを組み合わせた現在考えられている地層処分システム概念の骨格が示され、“Geological Environment”という言葉が、明示的に初めて用いられました。本報告書では、「社会的、倫理的側面を考慮すると制度的管理を必要とせず事後の措置なしに人間環境から隔離できる手段が望ましいとして最終的な措置は処分と提言し、さらに処分オプションのうち安定な地層中へ閉じ込めることが最も進歩した解決方法である」と記載されています。

放射性廃棄物に対して取り組みが早かった米国では、1976年に米国エネルギー開発管理局（Energy Research and Development Administration, 略称：ERDA）がLWR燃料サイクルから発生する廃棄物の処理、中間貯蔵、輸送及び最終処分に関する技術的情報を取りまとめ、報告書“Alternatives for Managing Wastes from Reactors and Post-Fission Operations in the LWR Fuel Cycle, Volume 4.”[5]を公表しました。最終処分については、地層による隔離の概念、地層による貯蔵、海洋底処分（文中では“SEABED DISPOSAL”と記載されている）、氷床処分、宇宙処分（文中では“EXTRATERRESTRIAL DISPOSAL”と記載されている）、核変換について情報が示されており、本報告書では“Geologic Environment”という言葉が使われています。また、1979年にカーター政権において、14の関係省庁からなる検討グループが全放射性廃棄物の管理方針についてパブリックコメントを踏まえた報告書[6]を取りまとめて大統領に対して政策提言を行いました。この報告書には地層処分についての主要な論点が盛り込まれており、ここで“Geological Environment”という言葉が初めて出てきています。米国では、当初は岩塩層という特殊な地層中に埋設しようとしていましたが、この提言による放射性廃棄物対策の大幅な見直しにより、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うるとされました。

日本国内においては、1976年に原子力委員会決定として、地層処分に重点をおいた研究開発方針が公表されており、当時は「可能性のある地層」、「有効な地層」という表現がされ、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した。地層の調査や評価のために必然的に地域社会との接触の機会が増えるにつれ、各地で住民の懸念の声が上がり調査は進まなくなってしまったため、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りました。この状況を受けて、1989年に原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会は報告書「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」[7]を取りまとめ、「地層処分研究開発の対象となる地質環境条件は多岐にわたるので、これ

に対応する多重バリアシステムを幅広く考えて研究開発を進める。」との方針を示し、初めて日本国内で意図を持って「地質環境」という言葉が使用されました。

また、国際原子力機関（IAEA）は、IAEA 憲章に基づき、人及び環境を電離放射線の有害な影響から防護することを保証するため、安全基準を策定しており、それは高いレベルの安全を構成する際の基礎となる国際的なコンセンサスを反映しています。IAEA 安全基準では、「地質環境」を定義していませんが、放射性廃棄物の地層処分施設に関する安全指針（SSG-14）[8]では、例えば、

「2.2. 廃棄物の閉じ込め及び生物圏からの廃棄物の隔離は、放射性廃棄物について受入れられている管理戦略である。閉じ込めと隔離は、廃棄物形態自体、廃棄物容器、埋め戻し材、母岩などの、各々異なったタイムスケールで有効性を持つ補完的な一連のバリアを通して達成することができる。処分の深さと母岩の地質環境の特性は、生物圏からの隔離をもたらし、人の偶発的または、不法の侵入の可能性を低減する。さらに、安定な地層内の深い位置に定置することで、気候やその他の自然現象の影響が有意に低減できる。」

と述べており、「地質環境」という用語を周知のこととして用いています。

参考文献

- [1] 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 (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— (地層処分技術WGとりまとめ) .
- [2] 【科学的特性マップ公表用サイト】
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagaku/tekitokuseimap/ (2024年1月10日閲覧)
- [3] 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 (2017) : 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果 (地層処分技術WGとりまとめ) .
- [4] OECD/NEA (1977) : “Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes”.
- [5] USERDA (1976) : Alternatives for Managing Wastes from Reactors and Post-Fission Operations in the LWR Fuel Cycle, Volume 4, ERDA-76-43, May 1976.
- [6] DOE (1979) : Report to the President by the Interagency Review Group on Nuclear Waste Management, TID-29442.
- [7] 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会 (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.
- [8] IAEA (2011) : Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standard Series, Specific Safety Guide No. SSG-14.

セーフティケース

<u>セーフティケース</u>	55
<u>まずこれだけは</u>	56
<u>少し詳しく</u>	57
<u>セーフティケースとは何か</u>	57
<u>なぜ地層処分にはセーフティケースという用語が使われるか</u>	60
<u>地層処分のセーフティケース</u>	62
<u>セーフティケースと安全評価</u>	65
<u>セーフティケースの作成</u>	68
<u>日本におけるセーフティケース</u>	70
<u>ここに注意</u>	71
<u>潜在的危険性と安全性または危険性との関係</u>	71
<u>利害関係者間の相互理解を得るためには</u>	72
<u>付録：国際的な定義</u>	73
<u>参考文献</u>	75

まずこれだけは

- 地層処分では、制度的管理と監視に頼ることができない数万年以上の長期にわたり「閉じ込めと隔離¹」が達成され安全が保たれることを確かめる必要があります。すなわち、固体中に固定化され閉じ込め²られて、自分からは拡がる力のない放射性物質が、長い時間のうちに、一部が地下水により溶かし出されて、厚い岩盤中の間隙を通じて運ばれて、地表の人と生物の生活環境（生物圏）にまで到達するとしても、深刻な結果をもたらすことにはならないことや、隆起・侵食や断層活動、地熱活動、火山性熱水・深部流体の影響を受けることはないことを確かめる必要があります。

しかし、「閉じ込めと隔離」が将来にわたって達成されるということを、現時点での実験や観察、あるいは過去の実績などの直接的な実証によって確認することは困難です。したがって、地層処分を行おうとするならば、長期にわたって安全が保たれるという説明が十分に信じられるということを、様々な根拠を整理し、筋道立てて様々な面から示す必要があります。

- 地層処分の「セーフティケース」とは、地層処分によって放射性廃棄物を安全に処分することができるという説明の根拠になる、一連の事実や議論を整理統合したものです。

より具体的には、放射性物質の移動を妨げる人工的な仕組みや岩盤を含む処分施設がどのように開発・立地され、それらがどのように一体となって働き、どのように長期にわたる閉じ込めと隔離を達成するかを示す証拠や論拠を統合したものです。

- 地層処分は段階的に事業が進められますが、長期にわたって安全が保たれるという説明の信頼性とその証拠や論拠は、事業の進展の各段階において変化し、それぞれの時点における信頼性が確認されます。事業者は、上記の説明について、段階ごとに「セーフティケース」を整理して改定あるいは作成して、利害関係者³（事業者、国、規制機関、非政府団体、市民等）が「次の段階へ進んでよいか？」を判断するための材料として提示します。また、「セーフティケース」は、安全性の立証のために許認可において利用する場合があります。

¹ 「閉じ込めと隔離」の「長期の閉じ込めと隔離の達成」および「放射性廃棄物の管理と処分」をご覧ください。

² 「閉じ込めと隔離」の「人工バリアの閉じこめ機能」をご覧ください。

³ 「放射性廃棄物の処分」において、想定される利害関係者のリストには、次のようなステークホルダーが含まれると考えられます：近隣の住民、土地・財産・権利の所有者、地域社会の代表者または選挙で選ばれた役員、国・地域の政府省庁、規制当局、国・地域の非政府組織または市民社会組織、地元の利益代表団体、労働組合、メディア、科学的研究コミュニティ、実施機関、原子力産業請負業者、廃棄物生産者、近隣諸国、および国際機関。

セーフティケースとは何か

- 地層処分のセーフティケース (safety case) とは、地層処分によって放射性廃棄物を安全に処分することができるという説明の根拠になる、一連の事実や議論を整理統合したものです。
- ここで用いられているセーフティケースという用語は、そのまま放置すれば危険性のあるものや行為に対して、提案した対策により安全な状態にすることができるということを論証するために、科学的、論理的かつ事実に基づく推論を整理統合したものを指します。
- このような「セーフティケース」という概念は、英国北海油田の爆発事故¹のような深刻な産業事故等による多くの人命損失や危害の経験、あるいは高度な技術を駆使した航空機開発の経験など、工学的な複雑巨大システムの開発や利用の場面で生まれ、発展してきました。こうした場面では、頻度は低いものの、それにより生じる帰結が取り返しのつかない深刻な損失をもたらすような事象（低頻度・巨大損失事象）の存在が常に問題になってきました。しかし、その防止を考えたときに、従来の安全の考え方（例えば安全裕度を備えた設計、それを確実に担保するための安全基準、など）だけでは不十分でした。そこで、安全確保を考えるためには、システムの複雑さがもたらす不確実性を適切に扱った上で、安全をどのように評価し確認したかの根拠が提示されることが重要となるという認識が生じました[1, 2]。
- 一方、放射性廃棄物の地層処分では、人と社会による管理が期待できない遠い将来においても、対策として組み込んだビルトイン・コントロール²が有効に機能して、放射性廃棄物が閉じ込められ、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔離されることにより安全が確保されることが示されなければなりません。ここでは、不均質な空間と極めて長期の人工バリアと天然バリアの状態の推定の不確実性をどのように扱うかの議論が不可欠となるという意味で、セーフティケースの概念が重要になります。
- もちろん、社会の安全に対する意識の高まりもこうした流れと表裏をなしています。一般に、高いリスク（危害がもたらされる可能性）を伴う施設や活動を計画する際には、危害がもたらされる可能性を十分小さくする対策がとられていて安全であることを社会に対して示すことが時代とともにいよいよ必要となりました。数十年前よりもある特定の分野での事故の発生件数や被害の積算が減少したからといって（例：交通事故の件数や死者数の減少）、社会がそれに満足し、それ以上の安全を求め

¹ オクシデンタル・ペトロリウム社によって操業されていた北海の石油生産プラットフォームであるパイパー・アルファは北海における石油・天然ガス生産の約 10%を担っていましたが、1988 年の 7 月 6 日に爆発・火災が発生して 167 人が死亡しました。これは海上油田における史上最悪の事故として知られています。

² ビルトイン・コントロールについては「閉じ込めと隔離」の「[放射性廃棄物の管理と処分](#)」をご覧ください。

なくなるわけではありません。当然ながら、社会は常に、より高い水準の安全を求めるからです。人命や健康、環境のかけがえのなさを考えれば、それはきわめて自然なことでもあります。

- 安全であるかどうかの評価を行う際には、例えば、この機械の故障率はいくらであるとか、この施設の構造はある大きさの地震の振動に耐えることができるのか、ヒューマンエラーは教育と訓練により避けることができるかというように、装置や施設及び活動の将来挙動の予測がよく行われます。しかし、高度に複雑なシステムにおいては、そうした予測は不確実なものとなることも多く、要素と要素の間の複雑な相互作用によって、思いがけない結果が生じることもあり、これもシステム全体の挙動の予測に関する大きな不確実性をもたらします。セーフティケースでは、これらの不確実性をはっきりと意識した上で、それでもシステムが全体として十分な安全性を備えているということを証拠や論拠に基づいて説明するために用いられます。したがって、不確実性をどのように考慮した上でシステムをつくっているのかを説明することが大きなポイントになります。
- このことは、高度に複雑なシステムをつくらうとする時には、その個別の要素がそれぞれ、安全基準などが定める状態や水準を満たしていることを一つずつ確認して、その全部が適合しているとしても、システム全体が安全であるというには不十分だ、という認識と表裏をなします。したがって、例えば地層処分場の場合には、数万年を超える長期の閉じ込めと隔離が十分になされるかが問題になるため、処分場をつくらうとする事業者自身の説明においても、規制当局などによって行われる安全のチェックにおいても、建設時点で個別の要素を基準などに照らして確かめるだけでは、安全確保としては不十分だということになります。ここでセーフティケースの意義が大きくあらわれます。セーフティケースは、システム全体の安全性を示すために、安全についての多面的で包括的な論証を根拠とともに示すものです。したがって、その内容を世に問うことで、安全上の十分な対策が取られているという事業者の説明を社会に認めてもらうための重要で効果的なツールともなり得るのです。
- もちろん、実際に社会に納得してもらうためには、利害関係者（事業者、国、規制機関、非政府団体、市民等）間で行われる安全に関する問題についての対話において、セーフティケースは、事業者にとって都合の良い説明や説得になることのないように、対立関係ではなく協働して事業を進めるための、客観的な知識として提供されなければなりません。
- こうした認識の下で、安全の確保のための対策とその有効性を示す証拠を集めたものを、海外ではセーフティケース (safety case) と呼ぶようになりました。この場合、ケース (case) とは、a set of facts or arguments supporting one side of a debate or controversy (Concise Oxford English Dictionary) (議論や論争の一方の側を裏付ける一連の事実や議論) を意味しています。この語をことさらに使用しているのは、ケースとは、「説明を信頼に足るものとする」ために、どのような事実と議論を整理し統合して提示すればよいかに心を配ったものであるということをお願いするためであると考えられます。
- Safety case を日本語訳する際には、さまざまな議論がありましたが、片仮名で音訳した「セーフティケース」という用語が使われることになりました。「セーフティ」は日本語でも「安全」と訳すことができると

考えられます¹ので問題ありませんが、「ケース」という言葉は誤解を招きやすいので注意が必要です。日本語の「ケース」の意味は、「入れ物」か「事例・場合」かであって、「事実」や「議論」という意味は表しません。したがって「セーフティケース」という言葉だけだと、安全を守るための入れ物だとか、安全である事例や場合だというように解釈されてしまいます。そこで、「セーフティケース」を説明する際には、次のような言い添えをする配慮が必要です。

「地層処分のセーフティケースとは、地層処分が安全であると客観的事実に基づいて説明する場合の根拠になる、一連の事実や議論のことです。英語の case には説明の根拠になる事実や議論という意味があり、この意味の case が片仮名語の「ケース」としてそのまま取り入れられたものです。」（「セーフティケースと安全評価」もご参照ください）。

¹ もちろん「安全」をどのように考えるかについても、国や立場ごとの違いがありますが、翻訳としてはほぼ対応していると考えられます（「安全（性）を評価するという意味」をご覧ください）。

なぜ地層処分にはセーフティケースという用語が使われるか

- 地層処分以外の多くの分野における様々な運転施設や活動に関するセーフティケースは、低頻度・巨大損失事象について、事故や失敗の確率をどこまで下げていると保証できるかに注目しているものです。
- 一方、地層処分のセーフティケースでは、処分した廃棄物に対して将来何があっても深刻な結果がもたらされることにはならないということと同じように保証できればそれが一番ですが、不均質な天然の地層と人工的な構造物の極めて長期の将来挙動の予測には、結果として起こることを実験や観測によって確かめる（実証する）ことができないという、他の高度複雑技術とは異なる性質の、しかも様々な工夫によっても避けがたい大きな不確実性があります。
- そもそも、地層処分の安全は、そうした特別な性質を持つ不確実性が伴うため、他の工学分野で用いられる通常の安全の論理に従って証明しても人々に納得してもらおうのが非常に困難です。地層処分による安全の確保に対する信頼性を高めるためには、安全評価（語彙基盤「安全評価」をご覧ください）の結果のみによって安全基準への適合性を示すのではなく、どのように考えて、どのような仮定を置いて、何をどのように評価するのかという、安全評価の考え方を含む様々な論拠によって安全性に対する信頼（確信の程度： confidence）を併せて提示することが重要と考えられるようになりました[4,5,6,7]。
- このような認識に基づいて「地層処分のセーフティケース」の概念が現れ、特にヨーロッパの地層処分実施計画を中心として広く採用されることとなりました。国際原子力機関（IAEA）や経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）等でも広く議論が行われてきました。
- 処分施設に関するセーフティケースの概念は、多くの国で用いられています。ただし、一部の国では用いられる用語が異なります。たとえば米国では、セーフティケースのあらゆる側面を包含するものとして「総合システム性能解析（total system performance analysis）」という用語が（個々の処分方法と関連する規則と共に）用いられています。フランスでは、セーフティケースのことをいうために「ファイル（Dossier）」という用語が用いられています。ドイツ及びスイスにおいては、「安全の証明（Sicherheitsnachweis）」という用語が用いられています。スペインにおいては、セーフティケースのことをいうために「安全の研究（Estudio de Seguridad）」という用語が用いられています[8]。
- safety case に対する適切な日本語は何かという議論がされ、「総合的安全説明書」や「安全文書」などの言葉も検討されました[例えば 9,10]。しかし、「セーフティケース」はその元来の性質として、単なる安全説明書ではありません。セーフティケースは、すでに確保された安全を説明しようとするものではなく、どのようにして安全確保をしようとしているかを多面的に論証し、広く世に問おうとする性質を持つ「主張」であるからです。段階的開発の各段階で、その時点での背景や使われる文脈、安全確保のための基本的考え方、予測や評価の不確実性に対する考慮などを丁寧に説明することで、その主張がもっともなものであると人々に認めてもらわなければなりません。それぞれの時点で、このように処分場をつくれれば安全であるという見通しを示すとともに、次段階へ向けた課題を示すことなども扱う

範囲に含まれています。こうした事業者の姿勢も含めて明らかにすることで、利害関係者間の信頼を醸成するためのツールともなるのです。「安全説明書」と訳してしまうとそういった概念が伝え切れないため、そこには新規で独特の意味が含まれているということが分かるように、最終的にはカタカナ書きの「セーフティケース」のままがよいただろうとして使われるようになりました。

地層処分のセーフティケース

- 放射性廃棄物は、放射性でない一般廃棄物や産業廃棄物と同様、それ以上の利用をするつもりがないものです。これを数万年を超える長期にわたって管理し続けることは実現困難で将来世代に負担を先送りすることになります。このため、何らかの形で、回収を目的とせず、適切な場所に定置する必要があります。この行為を処分と呼んでいます（「閉じ込めと隔離」の「放射性廃棄物の管理と処分」をご覧ください）。
- 放射性廃棄物に含まれる放射性物質は健康にとって有害な影響を与える可能性のある潜在的危険性、すなわち放射能（放射性物質が放射線を出す能力）を備えています（「閉じ込めと隔離」の「放射性廃棄物の潜在的危険性」と「潜在的危険性の持続期間」をご覧ください）。
- このため、放射性廃棄物の処分においては、放射性物質の環境への放出を抑制する対策が適切になされていなければ、放射性物質による環境汚染を通じて、人や生物が放射性物質に接触したり体内に取り込んだりして、放射性物質の発する放射線を過度に被ばくし、健康影響がもたらされる可能性があります。
- したがって、放射性廃棄物を処分する際には、人や生物が将来にわたり安全であるように、「閉じ込めと隔離」の対策を講じて処分する必要があります。特に高レベル放射性廃棄物には、放射能が長期にわたって残留する放射性物質が含まれているので、この対策が長期にわたって有効である必要があります。
- 地層処分のセーフティケースとは、地層処分により、高レベル放射性廃棄物を、その放射能が十分減るまで閉じ込めて隔離することができ、その結果、現在から将来にわたって、過度な放射線被ばくがもたらされないようにできるということを、科学的、論理的かつ事実に基づく推論に基づいて、様々な証拠と議論により示そうとするものです。
- 具体的には、地層処分により長期にわたる「閉じ込めと隔離」を達成するために、
 - (1) 地層処分に適した場所（「地質環境」参照）を、どのように段階的に調査・評価して選定するか、
 - (2) どのような対策を施して処分施設（「閉じ込めと隔離」、「地層処分システムの仕組み」、「地層処分施設と地質環境」参照）を設計・建設するか、
 - (3) 地層処分場が将来にわたり安全に機能することをどのように評価・確認するか（「安全評価」参照）、

等の安全性の根幹をなす情報を、安全性の説明を裏付ける証拠あるいは論拠として、総合的に構造化して統合したものです。図 3-1 には、セーフティケースの構成要素の内容について簡単に示しています。

- 図 3-1 のセーフティケースの構成要素の安全評価以外の要素は、安全評価に付随するものと考えれば、セーフティケース全体を安全評価とみることもできますが、地層処分システムの開発では、他の要素、特にシステムの記述で示された天然バリアの立地、人工バリアの設計・施工が非常に大きな比重を占めており、その閉じ込めと隔離の機能の確保は時間をかけて段階的に進められます。このため、図 3-1 で示されている構成要素を統合したものをセーフティケースと呼んでいると考えることができます。

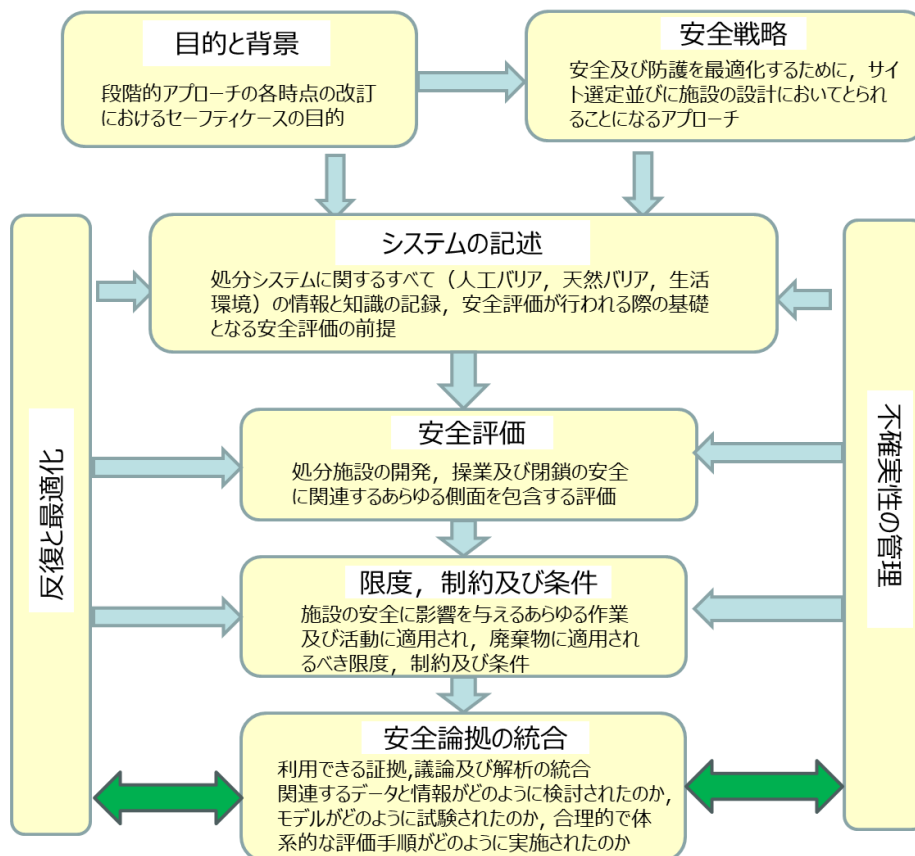


図 3-1 地層処分の閉鎖後のセーフティケースの構成要素 ([8]に加筆)

- 地層処分のセーフティケースでは、地層処分の本来の目的である「処分した放射性廃棄物の確実な閉じ込めと隔離の確保」の議論（閉鎖¹後のセーフティケース）が中心となりますが、「その目的達成のための活動の安全の確保」（閉鎖前のセーフティケース）についても別途取り扱われます。

¹ 廃棄物を地下に埋設した後、埋設坑道、連絡坑道、地表から地下へのアクセス坑道を埋め戻した段階を閉鎖段階と呼んでいます。

- 地層処分事業は、図 3-2 に示すように、段階的に進められます。そのうち、地層処分に適した地質環境を有するサイト¹の選定は、段階的に文献調査²、概要調査³、精密調査⁴を経てなされます。これに対して、事業者は、地層処分の安全性の説明について、セーフティケースとして、段階ごとに根拠を整理して改定あるいは作成して、利害関係者（事業者、国、規制機関、非政府団体、市民等）が「次の段階へ進んでよいか？」を判断するための材料として提示します。また、セーフティケースは、安全性の立証のために許認可において利用する場合があります。

セーフティケースの内容は、地層処分の開発に伴って変化することになり、立地、設計及び操業に関する決定を支援し導くことになるものです。

また、セーフティケースは、利害関係者との対話が行われ地層処分の安全に対する信頼が醸成される主たる基礎ともなります。

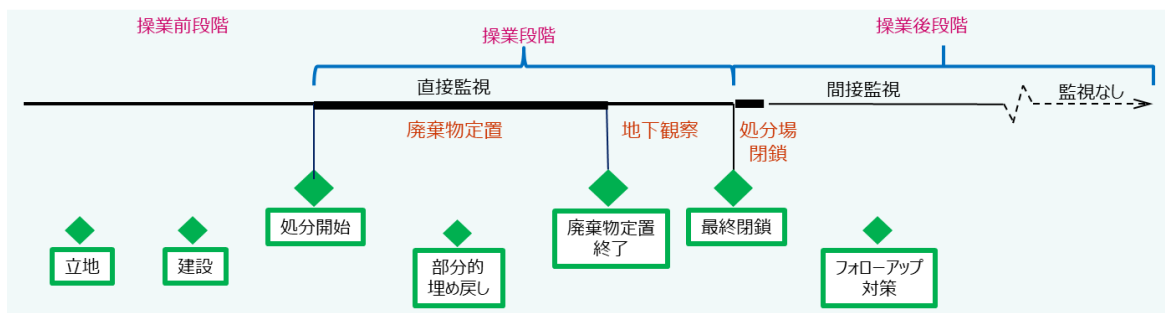


図 3-2 セーフティケースが重要な役割を果たす主な判断ポイント（[3]に加筆修正）

¹ 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）に基づく段階的な調査の対象となる区域、及び調査の結果、処分施設建設地となる区域。

² 既存の文献により、広域にわたる過去の火山活動の履歴等を調査します。

³ 文献調査より範囲を絞って、ボーリング等により地上から地下の状況を調査します。

⁴ さらに範囲を絞り、地下施設を作った上で地下環境を詳細に調査します。

セーフティケースと安全評価

- セーフティケースはその核として安全評価を含んでいます。

地層処分の安全評価では、放射性廃棄物の危険性は、廃棄物から放出された放射性物質が地表の人と生物の生活環境（生物圏）に運ばれ、この放射性物質が人に接近して起こる放射線による被ばくによって生じると考えます。安全確保のためになされる対策が有効であるかどうかは、対策の後にどれだけの被ばくの可能性が残っているか（被ばくの大きさ（被ばく線量）と被ばくする可能性の高さ）を評価することによってなされることとなります（「安全評価」の「まずこれだけは」と「安全評価では何が評価されるのか」をご覧ください）。

- この安全評価において、将来人が受ける可能性がある被ばく量を評価する際には、不均質な天然物である地質環境（天然バリア）と人工的な構造物（人工バリア）の長期にわたる「閉じ込めと隔離」の性能が前提となります。ここでは、初期に十分な閉じ込めと隔離の性能が確認できたとしても、数万年を超える長期の時間経過とともに地質環境や人工バリアの状態が変化して、その性能が劣化するかもしれないという可能性が問題となります。
- 地層処分の開発では、この閉じ込めと隔離をより信頼できるものとするため、評価の前提となる地質環境と人工バリアの状態の変化が、可能な限り長期にわたって小さな範囲にとどまるように、地質環境を選定し、人工バリアを設計・施工します。
- 将来人がどれだけの被ばくを受ける可能性があるかを評価するためには、遠い将来、不均質な天然の地層と人工的な構造物がどうなっていて、そこで放射性物質がどのように挙動するかを予測する必要があります。この時、地層処分に適した地質環境が選ばれていれば、人工的な構造物とその直近の地質環境において起こる変化は、極めて緩慢なものとなるため、比較的長期の予測が可能です（「閉じ込めと隔離」の「人工バリアの閉じ込め機能」をご覧ください）。
- その一方、放射性廃棄物が被ばくを与えることになるかもしれない何千年、何万年も先の地表の様子や人の生活形態は、一体どうなっているか、私達には見当が付きません。

何らかの確からしさを持って将来の人の行動やふるまいを予測することは不可能です。そこで、処分施設による将来の個人への線量を見積もる際には、人が、現在の人々と同じように、その土地に居住し、処分施設の廃棄物に由来する放射性物質を含むかもしれない土地の資源を何らかの形で利用すると仮定して、評価がなされます。これは、現在及び将来の人と環境を等しく放射線リスクから防護しなければならないという考え方に基づいているものといえます。

- したがって、安全評価の議論を支持する証拠と論拠として、処分施設のバリア（人工バリア）と地質環境（天然バリア）がどのように開発・立地され、それらが長期の時間の経過に従って、どのように一体となって働き、どのように期待される「閉じ込めと隔離」の性能を発揮するかの議論がセーフティケースの中でなされることとなります（図 3-3）。

- 図 3-3 に説明しているように、地層処分においては、地下深部に固体状態にされた放射性廃棄物を埋設することだけで得られる閉じ込めと隔離の性能に加えて、適切な条件を持つ地質環境を選定して、多重の人工バリアを構築することによりさらにそれらの性能を確実なものにしています。これらは、地質環境と人工バリアから構成される地層処分システムの頑健性を高め（閉じ込めと隔離をより確実にして）、安全確保の信頼性を高めるための要件となりますが、それぞれの構成要素に対しては、地層処分システム全体の性能が十分に発揮されるように、最も好ましいと考えられる性能が、どのような構成要素の性能の組み合わせになるかを考えて要件を定めることが必要となります。実際に地層処分を計画し実施する事業者は、このような考慮を行い、その結果をセーフティケースで示すことになります。

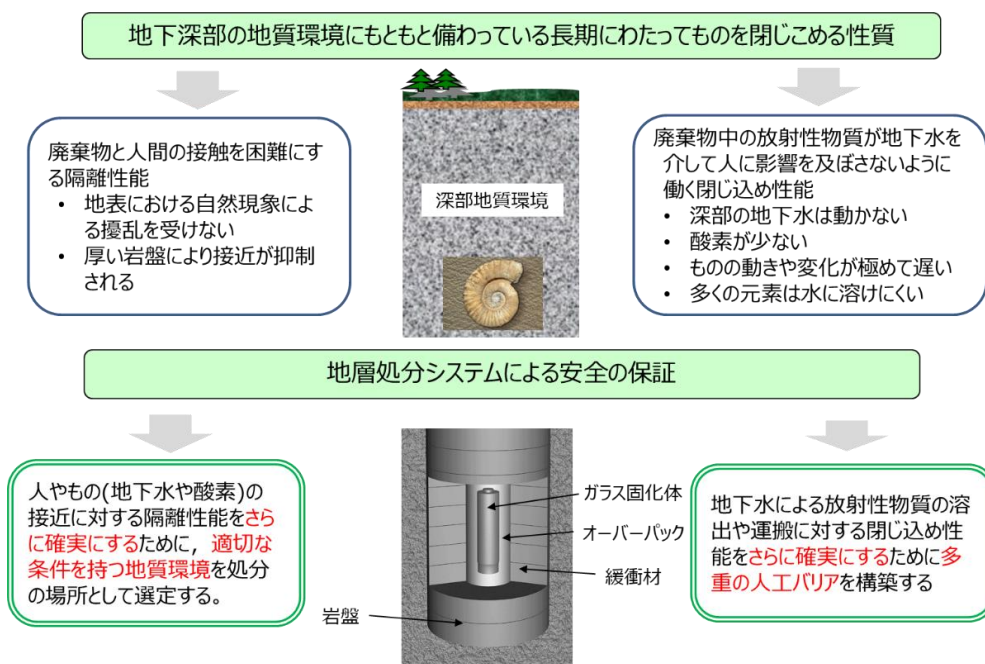


図 3-3 地下深部の地質環境と人工バリアに求められる閉じ込めと隔離の性能[11]

- 放射性廃棄物を処分する地下深部の地質環境の選定においては、閉じ込め状態を著しく損なうような自然現象及び建設・操業の遂行を不可能にするような自然現象から隔離されていることが要件として求められます。「地質環境」の「地層処分施設と地質環境」の表 2-1 には、日本の地層処分について、その実施について監督する立場にある国の審議会が取りまとめた、地下深部の調査がなされる前に、候補地区として避けた方がよいと考えられる地域の要件と基準を示しました。
- 地下深部の地質環境には、「地質環境」の「地層処分施設と地質環境」の表 2-1 に示す要件が満たされていることはもちろんのこと、その他にも、地温が低い、水質が酸性でない、地下水の動きが緩慢といった特性が求められます。これらは、長期の「閉じ込めと隔離」にとってより好ましいといった特性であり、これらの状態の変遷に基づく性能の劣化があれば、人工バリアからの放射性物質の放出量が増えることにつながる可能性があると考えられます。

- 地層処分に適した地下の地質環境を有するサイトの選定は、「地層処分のセーフティケース」で説明したように、段階的に文献調査、概要調査、精密調査を経てなされます。

この段階的な調査の途中でも、セーフティケースと裏付けとなる安全評価が社会に提示されなければなりません。サイトが選定され調査されるまでは、安全評価の前提として用いる地下深部の地質環境の条件は当面の見通しに基づいて設定される仮のものにすぎず、選ばれる地下深部に応じて設計・建設される人工バリアの条件も同様です。

このため、サイト選定と工学的設計・施工の妥当性は、サイトの段階的な調査・評価が進むにつれて、次第に明らかになっていき、その段階ごとに安全が評価され、セーフティケースが改定されます。これにより、計画と事業の遂行の妥当性が評価されるとともに、次の段階のための情報が得られます。

- 不確実性の扱いという観点からいえば、安全評価においては、想定している地層処分システムの長期の挙動を推定する際に、自然の変動による不確実性と知識不足による不確実性が、その推定の確からしさなどの程度寄与しているかを考察します。

このとき、忘れてはならないのは、段階的に進められる地層処分事業において、安定している地質環境を選定することや、頑健な人工バリアを設計することが、安全評価における予測や推定の不確実性を大きく低減する、言い換えれば安全評価の信頼性を大きく向上させることにつながるという意味を持っているということです。サイトが特定され、そこでの地質環境の調査・評価が進められれば、それまで知識不足のため、不確実であった内容がより明らかにされ、地質環境の不均質性の把握もより確かなものになっていきます。その地質環境が安定している¹ものであれば、より長期の予測がより確からしいものとなります。

この意味で、「与えられたシステム」の「安全評価」と呼ばずに、「セーフティケースとその裏付けとなる安全評価²」という用語が用いられているとすることができます。

¹ 「安定している地質環境」という表現については「安定している地質環境」という表現の生み出す誤解」についてもご覧下さい。

² Safety case and supporting safety assessment の訳としての表現です。セーフティケースと安全評価の関係については「地層処分のセーフティケース」の図 3-1 をご覧下さい。

セーフティケースの作成

- 地層処分は事業期間が 100 年程度にわたり、“処分”された後でも、人が関与しなくても、将来の安全を確保できることを示す必要があります。このためには、処分する放射性物質の放射能の持続性から考えて、従来の工学システムでは経験のない数万年以上という長期間の閉じ込めと隔離による安全性の確認が必要とされます。このことから、処分開始などの最終的な判断に至るまでは、将来の科学技術の進歩や様々な不確実性を考慮に入れ、その安全性を、事業を進めていくなかで繰り返し確認していく必要があります。
- 地層処分事業を段階的に進めていく中で（「地層処分のセーフティケース」の図 3-2 参照）、その時点の最新の知見等を踏まえて、どのように処分場の安全性を確保するのか、なぜそれが信頼に足るといえるのかを論拠を持って繰り返し利害関係者（事業者、国、規制機関、非政府団体、市民等）に提示し、合意を得て行くことが重要となります。
- 地層処分のセーフティケースは、事業の節目となる段階ごとに繰り返し改定され、利害関係者が「次の段階に進んでよいか？」を判断するための材料となり、公式的には、安全の立証と許認可の基礎となるものです。
- このようにセーフティケースを拠り所として、事業の各段階で地層処分の安全性と実現可能性を確認し、可逆性を確保しながら段階的に事業を進めるという考え方、手段が国際的にも採用されています。これを「段階的アプローチ」といいます。地層処分の安全性について各段階において最善を尽くして作成されていることが理解されるようなものとなっていることが重要です。
- 事業者は、調査に基づいてどのように適切なサイトを選定し、その場所に対してどのように処分場の設計や安全評価を行うかとともに、その結果として人への放射線被ばくの程度が安全基準を満たすことになること（許容できること）を、総合的に説明する責任があります。このため、その説明・判断の根拠となる情報やデータをセーフティケースとして取りまとめ、それぞれの時点で、どのような不確実性が残されているのかを把握し、その不確実性を低減するためには次の段階で何を行うべきかについてもセーフティケースのなかで明確にしたうえで、その後の調査研究や技術開発を行っていく必要があります（「セーフケースと安全評価」もご覧下さい）。
- 一般にセーフティケースとしては、安全評価を柱として、
 1. 目的と背景：処分の必要性、廃棄物の特性と含まれる放射性物質の量、廃棄物の処理処分の基本的な考え方、
 2. 安全戦略：段階的サイト選定、安全評価の考え方、安全指標と安全基準、
 3. 地層処分システムの記述：サイトの地質環境、工学設計、
 4. 安全評価：システムの記述と起こる可能性のある事象とプロセスの連鎖（シナリオ）を前提とした、もたらされる可能性のある影響の解析的評価、

5. 安全論拠の統合：安全基準の遵守，不確実性の扱いを含む評価の信頼性の議論

が含まれると考えられています。3 では単に地層処分システムの記述と書いていますが，これはサイトの地質環境の調査・選定とその条件に応じた工学設計の開発を含む情報になり，段階ごとに進展するものであるということを忘れないようにすることが大事です。これらをどのような様式で整理統合すればよいかについては，特に決められた形はありません。それぞれの国の実施機関が，国際的指針（例えば [8,9]）を参考にしながら，処分場が安全に実現できることを説明するために，地層処分の安全性に係わる情報をセーフティケースとして取りまとめています。

日本におけるセーフティケース

- 地層処分に関してセーフティケースという語が用いられるようになったのは、1999年に核燃料サイクル開発機構（現日本原子力研究開発機構(JAEA)）が、日本において地層処分は技術的に実現可能であることを示した「第2次取りまとめ」の英語版[12]です。
- また、2004年に原子力発電環境整備機構（NUMO）が作成した報告書“Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments”（NUMO-TR-04-03）[13]では、安全性に関する様々な言葉を定義しており、セーフティケースとは、
 1. 処分場の安全性を支持する論拠を収集して、操業時及び閉鎖後の段階に対して作成される、
 2. 安全評価の結果とそれに対する信頼性の記述を含む、
 3. 未解決の課題については、将来これらを解決するための作業方針を明示する、
 4. 社会的な受容を醸成するため、作成したセーフティケースを鍵となる利害関係者（事業者、国、規制機関、非政府団体、市民等）に説明することが不可欠、

としています。定義では、地層処分場の操業時の安全性も対象としていること、主要な利害関係者の意思決定への参加、が強調されています。これは、応募地域の自治体やその周辺地域のコミュニティを支援することが公募方式による処分地選定を成功させるうえで不可欠な要素であるとの認識によっています。

- 「第2次取りまとめ」から約20年が経過し、地層処分にかかわる新たな科学的知見や、関係研究機関（JAEAなど）及びNUMOによる技術開発成果が蓄積されたこと、またNUMOがどのようにして安全な地層処分を実現していくのかを社会に示し、地層処分事業に対する信任を得るよう努めることが重要との背景から、NUMOは、サイトが特定されていない段階での、安全な地層処分の実現に向けた技術や、それを支える科学的知見を包括的に示した報告書「包括的技術報告書」（NUMO-TR-20-03）[14]をセーフティケースとして作成しました。この報告書の表題は、「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－」とされています。
- 一般に、セーフティケースにおける説明が受け入れられるものであるかどうかの最終的な判断は、規制機関が国民を代表して行うこととされていますが、主要な利害関係者もその判断に影響を与えることとなります。規制機関は、セーフティケースの記述と説明が全体的に論理的、科学的に妥当なものであることを確認するとともに、安全評価の前提とされているサイトの地質環境と工学設計の品質が、セーフティケースの記述どおり実現されているかあるいは実現される保証があることを確認します。また、途中段階の判断においては、説明の実現の見通しが十分で、次の段階に進んでよいかどうか判断されます。

ここに注意

潜在的危険性と安全性または危険性との関係

- 放射性物質あるいはこれを含む放射性廃棄物は、「そのまま放置すれば」受け入れられないほどの被ばくをもたらす可能性のあるものであり、潜在的危険性がある危険物であるといえますが、危険物が危険かどうかは、それが置かれた状態に依存し、適切な対策が施されれば受け入れられないほどの被ばくをもたらす可能性はなくなり、危険でなくなる、すなわち安全な状態になります。
- 地層処分では、放射性廃棄物が潜在的危険性を有している期間について、安全評価を行います。これを誤解して、この期間、地層処分された放射性廃棄物は人々にとって危険であり続けると思う人がいます。また、放射性廃棄物の有する潜在的危険性の大きさや安全評価の期間の長期性と不確実性の大きさによって地層処分は大変大きな危険の付随する事業だと思う人もいます。しかし、これは、地層処分され、適切に対策がなされた状態の廃棄物が将来にわたって安全な状態であり続けるかどうかを確かめているのであって、廃棄物の存在がその期間にわたって人々に直接的な危険であり続けるわけではありません。放射性廃棄物が地層処分によって閉じ込められ隔離されていることが確かめられれば、放射性廃棄物の存在は、これから先、将来にわたって危険ではなくなります。
- 地層処分事業で作成しているセーフティケースについては、対象とする期間が長期にわたり、不均質な地層を対象とするという特徴があります。特に、閉じ込めと隔離を目指す数万年を超える期間は、人の社会と制度が過去の歴史から考えて継続すると信じることのできる期間をはるかに超えているため、一般の工学分野において扱う予測の不確実性とは異なる性質の不確実性が存在する中で意思決定をするためのものであるということが大きな違いです。このために段階的に意思決定を進めることが大事になってきます。

利害関係者間の相互理解を得るためには

- セーフティケースは、放射性廃棄物によってもたらされる可能性のある放射線被ばくは、現在から遠い将来にわたって許容可能な程度に小さいという説明が信頼に足るものであるということを、科学的な推論によって示すものであるため、利害関係者の中でも技術系の専門家ではない方にとっては膨大かつ理解困難なものである可能性が高いと考えられます。このため、対象となる利害関係者の技術的知見に関する知識レベルに応じて、セーフティケースの提示の仕方を工夫する必要があります。以下の点に留意しつつ、それぞれの専門性に合わせた説明・資料に基づくコミュニケーションが重要です [15]。
 1. 特に、技術的情報に触れる機会の少ない人とのコミュニケーションにおいては、情報の量は多くも少なくもなく、適切な分量である必要があります。
 2. 膨大な文書による過大な情報は、自分たちを圧倒する試みのように受け取られる可能性があります。プロセスが不透明で入り込めないものだと取られかねません。逆に情報が少ないと、情報が故意に隠されていると感じる可能性があります。
 3. 情報は翻訳され、平易な言葉で伝えられるべきです。
 4. 安全の概念、セーフティケースと安全評価は、対象や目的に合わせた詳細度で伝えられる必要があります。
 5. そのために、これらを専門的でない言葉あるいは内容に「翻訳する」ことが必要です。
- 安全な処分場と判断するために、調査に基づいてどのように適切なサイトを選定し、その場所に対してどのように処分場の設計や安全評価を行い、その結果として人間が受ける放射線影響が安全基準を満たしていること（許容できること）を総合的に説明し、かつ、その説明・判断の根拠となる情報やデータまで追跡可能なように「セーフティケース」として示すことが必要です。
- さらには、数万年以上という長期間に起こる事象の不確実性をより低減するために、事業者は「ここまで検討を行えば十分」というような考え方を持たず、どのような不確実性が残っているのかを把握し、その不確実性を低減するためには次の段階で何を行うべきかについても明確にしたうえで、その後の調査研究や技術開発についても、セーフティケースの中で示すことが必要です。
- セーフティケースが意思決定・判断に係わる利害関係者にとって理解しやすいものとなるためには、文書化において「透明性」、「追跡性」、「公開性」が必須です。また、これらをどのように確保しているかを示す必要もあります。このうち、「透明性」は、社会的背景のもとでは「制度の運営や組織の活動状況が、第三者にははっきりとわかるようになっていくこと」という解釈で用いられますが、セーフティケースの観点からは、「セーフティケースのわかりやすさ」という意味も含まれています。

付録：国際的な定義

- IAEA の放射性廃棄物の処分に関する安全基準文書 (IAEA, SSR-5) [16]では、セーフティケースを「論拠と証拠を統合したもの」としています。また、SSR-5 の下位文書 (IAEA, No.SSG-23[7]) では、「セーフティケースは、処分施設の安全を裏付ける科学的、技術的、経営管理上の論拠並びに証拠を集めたものであり、サイトの適合性並びに施設の設計、建設及び操業、放射線リスクの評価、そして処分施設と関連するあらゆる安全関連作業の適切性と品質の保証を包含するものである。セーフティケースの不可欠な部分である安全評価は放射線の危険の体系的な評価を目的として行われるもので、セーフティケースの重要な構成要素である。セーフティケース及びその裏付けとなる安全評価は、安全の立証と許認可の基礎となるものである。それらは、処分施設の開発に伴って変化することになり、立地、設計及び操業に関する決定を支援し導くことになる。セーフティケースはまた、利害関係者（事業者、国、規制機関、非政府団体、市民、消費者等）との対話が行われる、及び処分施設の安全に対する信頼が醸成される主たる基礎ともなる。」として、その開発にあたってのガイダンスを示しています。
- IAEA の安全用語集[17] によれば、「セーフティケース」とは「ある施設または活動の安全を裏付ける論拠及び証拠を収集したもの」であり、「これには、通常、安全評価の結果及びこれらの結果に対する信頼性に関する表明が含まれることになる」とあります。原子力施設全体に通じる説明ですが、実際には放射性廃棄物の処分関連分野で用いられており、「放射性廃棄物処分場の場合、セーフティケースは所与の開発段階に関係している。このような場合セーフティケースは、未解決のいかなる問題の所在も認めると共に、これらの問題を将来の開発段階において解決する作業のためのガイダンスを提供すべきである。」と書かれています。
- NEA Confidence Report (1999)[5]では、「セーフティケースは、処分場開発計画のある段階において、処分場の長期安全性を支持するための論拠を収集したものである。セーフティケースは安全評価の結果とそれに対する信頼性の記述を含む。また、未解決の課題に言及し、将来の段階でこれらを解決するための作業方針を明示することが必要である。」という定義がなされています。この時は、セーフティケースを地層処分後の長期安全性に焦点を当てて論じていますが、2013 年の“The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories” [7]では、IAEA の上記文書の定義と同じ表現となり、操業時をも含んだものとなっています。
- ICRP の Publication. 122 [16]では、「セーフティケースは、システムの安全性を実証する体系化された一組の論拠と証拠である。より具体的に言えば、セーフティケースは、特定の目標と判断基準に合致していることを示すことを目的とする。」とし、さらに「処分施設の開発者が提供するセーフティケースは、操業段階及び操業後段階、特に管理（監視）と介入に依拠することができない遠い将来について取り扱わなければならない。作成されるセーフティケースの目的は、システムの防護能力に関する証拠を提供することにある。セーフティケースは、処分施設のバリアとそれに関連する母岩のバリア（処分システム）がどのように一体となって働き、時間の経過とともにそれらがどのように期待される機能を達成するかを示す。セーフティケースは、知識ベースを開発するために従った原則と戦略を文書化

する。セーフティケースにより、処分システムの性能に影響を及ぼす可能性のある長期的プロセスと将来起こりうる事象の両方の残る不確実性が認識され、なぜそれが極度に防護を低めることにならないと考えられているかの理由が認識される。」と書かれています。

参考文献

- [1] NASA (2013) : System Failure Case Study, The Case for Safety - The North Sea Piper Alpha Disaster -, May 2013, Volume 7, Issue 4.
- [2] Safety case : https://en.wikipedia.org/wiki/Safety_case (2024年1月10日閲覧)
- [3] ICRP (2012): Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3).
- [4] OECD/NEA (1997): Lessons Learn from Ten Performance Assessment Studies, Working group on Integrated Performance Assessments of Deep Repositories.
- [5] OECD/NEA (1999): Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories, Its Development and Communication.
- [6] OECD/NEA (2004): Post-closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose, NEA No.3679.
- [7] OECD/NEA (2013): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories, NEA/RWM/R (2013)1.
- [8] IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for Radioactive Waste, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standard Series, No.SSG-23.
- [9] 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会 (2006) : 放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度の在り方について(案), 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会 (第23回) 配布資料, 平成18年6月14日.
- [10] 日本原子力学会「使用済燃料直接処分に関わる社会環境等」研究専門委員会 (2017) : 「使用済燃料直接処分に関わる社会環境等」研究専門委員会 最終報告書, 平成29年3月.
- [11] 増田純男 (2016): 高レベル放射性廃棄物を地下深く終う地層処分, 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター.
- [12] JNC (1999): H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan (H12 report).
- [13] NUMO (2004): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03.
- [14] NUMO (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現 – 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築 –, NUMO-TR-20-03.

[15] OECD/NEA (2017) : Communication on the Safety Case for a Deep Geological Repository, NEA No.7336.

[16] IAEA (2011): Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna.

公益財団法人 原子力安全研究協会（2012）：「放射性廃棄物の処分」日本語翻訳版, IAEA 安全基準シリーズ, 個別安全要件 SSR-5, 2012 年 7 月.

[17] IAEA (2022): IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, Non-serial Publications, IAEA, Vienna.

安全評価

安全評価	77
<u>まずこれだけは</u>	78
<u>少し詳しく</u>	80
<u>安全評価では何が評価されるのか</u>	80
<u>地層処分の安全評価の概要</u>	81
<u>地層処分の安全評価：残留リスクの評価</u>	82
<u>閉鎖後の安全評価の手順：地層処分システムの記述</u>	85
<u>閉鎖後の安全評価の手順：シナリオの作成</u>	88
<u>閉鎖後安全評価の手順：モデルの定式化と安全解析の実行</u>	90
<u>閉鎖後の安全評価の手順：結果の解釈</u>	91
<u>稀頻度シナリオや人間侵入シナリオ</u>	92
<u>ここに注意</u>	93
<u>安全（性）を評価するという意味</u>	93
<u>予測の意味</u>	95
<u>利害関係者間の相互理解を得るために</u>	96
<u>付録：国際的な定義</u>	97
<u>参考文献</u>	100

まずこれだけは

- 「安全評価」は「セーフティケース¹」の中心的な部分を占めており、「セーフティケース」は、「安全評価」の分析と結果の信頼性を高める証拠を提供し、「安全評価」は、図 4-1 に示すような形で、「セーフティケース」の説明を裏付ける証拠となります（図 4-1 は「地層処分のセーフティケース」の図 3-1 を再掲したものです）。

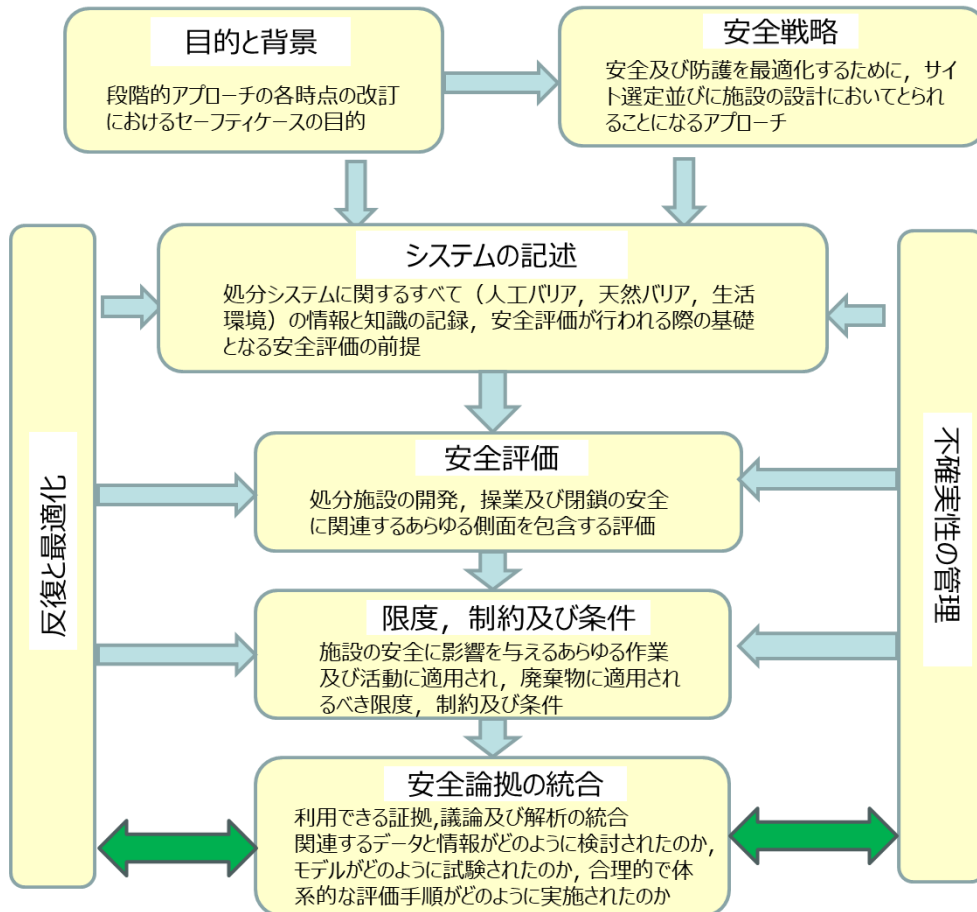


図 4-1 地層処分の閉鎖後の「セーフティケース」における「安全評価」の占める位置（[6]に加筆）

- 「セーフティケース」と裏付けとなる「安全評価」は、処分施設の開発、操業及び閉鎖²後の各段階において、必要に応じて、事業者によって準備され、更新されます。
- 地層処分の「安全評価」とは、放射性廃棄物の地層処分における、「地質環境」と工学設計の「閉じ込めと隔離」の能力の系統的な解析と評価です。放射性廃棄物の主な危険性は放射性物質

¹ セーフティケースについては、語彙基盤「セーフティケース」をご覧ください。

² 閉鎖とは連絡坑道及びアクセス坑道を埋め戻して廃棄物の埋設を完了する作業のことを言います。放射性廃棄物を処分場へ運び、定置し、埋め戻すまでの期間を閉鎖前期間、その後の期間を閉鎖後期間と呼びます。

による放射線被ばくですので、その度合いを見積もることが特に重要な作業になります。ここで、図4-1におけるシステムの記述とは地質環境と工学設計の閉じ込めと隔離の能力がどのようになっているかを解析的にモデルとパラメータを用いて記述することを意味していて、この記述を前提にして「安全評価」がなされます。（「閉じ込めと隔離」の「まずこれだけは」をご参照ください）。

- 「安全評価」は、地層処分によって放射性廃棄物を安全に処分できることを示すための重要な根拠であり、事業の節目となる段階ごとに繰り返し改定されます。そこでは、「安全評価」の手法や結果を裏付ける証拠を提供することが、「安全評価」の計算そのものと同様に重要となります。
- 地層処分は非常に長い期間にわたって、天然の地下深部を利用して、人間の監視によらずに安全を確保し続けようとするものです。このため、安全確保が求められる他の多くの場合とは異なり、実験や観察などによって直接的にそのことを確かめたり、状況を見ながら必要に応じて安全が損なわれないうちに措置を講じたりすることができません。
- このため、様々な科学的知識や工夫を組み合わせ、長い期間にわたって危険性が十分に小さい状況が続くことを、誰が見てももともと納得する考え方により、見きわめることが必要になります。
- なお、地層処分の安全評価は、地層処分の本来の目的である「処分した放射性廃棄物の安全の確保」に関してなされますが、「その目的達成のための活動（閉鎖前の活動）の安全の確保」についても別途取り扱われます。ここでは前者の、処分した放射性廃棄物の安全の確保に関する地層処分の閉鎖後の「安全評価」について説明します。

安全評価では何が評価されるのか

- 地層処分の安全評価では、放射性廃棄物の危険性は、含まれる放射性物質が、地表の人と生物の生活環境（生物圏）中に放出され人に接近してもたらされる、放射性物質からの放射線による被ばくによって生じると考えます。安全確保のためになされる対策が有効であるかどうかは、対策の後にどれだけの被ばくの可能性が残っているか（被ばくの大きさ（被ばく線量）¹と被ばくする可能性の高さ）を評価することによってなされることになります。
- 被ばく線量の大きさと被ばくする可能性の高さの組み合わせを放射線による好ましくない健康影響のリスクとして定義すると、危険性を、客観的かつ定量的に表すことができるようになります²。これにより、閉じ込めと隔離の対策により低減された後になお残る被ばくのリスク（以下、「残留リスク」と記します）を解析的に求めて、対策の有効性を評価することができます。
- 安全かどうかの「判断」は、評価された被ばく線量が受け入れ可能かどうか、及びそのような被ばくが起る可能性（確率）が高いかどうかを判断することによりなされます。「安全」は安全かどうかの定性的判断を表す言葉であり、「安全性」はその判断のために被ばく線量を物差しとして測った定量的な「程度」を表す言葉です。すなわち、安全であるかどうかの判断をするために求める残留リスクが、安全性（どのくらい安全であるか）の尺度であり、「残留リスクが小さいほどより安全である」と考えれば、残留リスクを解析的に求める評価は「安全性の評価」と呼ぶことができます。一方、安全とは、物事が損傷したり、危害を受けたりするおそれのないことという世間的解釈を受け入れるならば、安全かどうかの判断は残留リスクがある値より小さく受け入れ可能である状態のことを意味することになります。こう考えれば、この評価は、結局のところ、最後の判断（安全かどうかの判断）のために残留リスク（被ばく線量）を求めている「安全の評価」と呼ぶことができます（「安全（性）を評価するという意味」をご覧ください）。
- 同じことを、なされる対策の有効性の評価とみれば、これは、放射性物質の閉じ込めと隔離の性能の評価と考えることもできます。性能評価は、残留リスクをどれだけ低減することができるかを見積もることによってもできますし、閉じ込めと隔離の性能に関する他の尺度を用いて行うこともできます。

¹ 被ばくの大きさは被ばく線量とよばれ、ミリシーベルトを単位として表されます。およそ 100 ミリシーベルト以下では、すぐに疫学的に観測できる影響はありませんが、それでも、がんになり死亡する確率が、被ばく線量に比例して（ミリシーベルトあたり 5.5×10^{-5} (0.0055%)）増加する可能性があるとして、被ばくの生じる可能性、被ばくする人の数及び彼らの個人線量の大きさは、すべての経済的及び社会的要因を考慮に入れながら、合理的に達成できる限り低く保つべきであるとされています。

² ここでは安全を危険のないことと考えて、「危険性」をリスクとして定量的に表すことにより、「安全性」を間接的に表すことができると考えています。

地層処分の安全評価の概要

- 地層処分の安全評価では、放射性廃棄物を原因として、「将来人が被ばくするかどうか、どれだけの被ばくをする可能性があるか」を予測するのではなく、「あり得ることとして、最大限、放射性物質が、地表の人と生物の生活環境（生物圏）にもたらされたとして、それが受け入れられないほどの被ばくを与えることなるかどうか」を評価しようとしています。
 1. もしも廃棄物中の放射性物質を原因として、人が放射線被ばくを受けるとしたら、どのような事象とプロセス（閉じ込めと隔離の性能の劣化）があり得るかを考えます。
 2. そのようなプロセスとして、地下水により放射性物質が運ばれることが起こると仮定して、放射性物質が人工バリアから放出されて地質環境を經由して地表の人と生物の生活環境（生物圏）に至り、人に放射線被ばくを与えるまでのプロセスを、できるだけ現実の条件に合わせて、しかしそのプロセスで最大の被ばくが与えられるように、仮想的に単純化してモデル化して、シミュレーションを行います（保守的アプローチ）。
 3. 地表に到達する放射性物質の量から人の被ばく量を計算する際には、将来の人も現在と全く同じ生活形態であると仮定して計算します。
 4. その他の可能性として、
 - 処分場に関する記憶が失われたときに、人が放射性廃棄物に接近すること、
 - 長期の将来に、火山のマグマや活断層が処分場を直撃することや隆起侵食により廃棄物が地表に露出すること、などの、低頻度の事象についても同様にモデル化して、シミュレーションを行います。
 5. 計算結果として与えられる仮想的な放射線被ばくの程度が受け入れられないほどの放射線被ばくとはならないことを示すことにより、安全を確認します。
- このような安全評価の考え方は、運転中の事故や失敗の確率すなわち危害をもたらす結果を導くことになると考えられる事象やプロセスの起こる確率を推定してそれが十分低くなっていることを確認しようとする通常の動的システムの安全評価とは少し見方が異なります。
- 地層処分の安全評価では、「被ばく」をもたらす可能性のある事象やプロセス（状態の変化）をまず考えて、あり得ないと考えられる事象とプロセスを除いて、それ以外のプロセスは、因果論的にかつ自然の変動による不確実性を伴って、起こるものと考えて、それらが起こったとしてその結果をシミュレーションにより求めて、受け入れられないほどの被ばくをもたらすことにはならないことを確認するものです。

地層処分の安全評価：残留リスクの評価

- 工学の分野では一般に、リスクは「危害の発生確率」と「その危害の程度」の組み合わせとして表されます。そして、リスクについての見積もりを具体化するためには、
 - どのような望ましくないことが起こるか（シナリオ）
 - その発生可能性はどれくらいか（発生確率）
 - その結果・損失はどれくらいか（影響）

という3つの項目を考えるのがよいとされています。

地層処分の安全評価では、望ましくないことは受け入れられない程度の放射線被ばくが生じることで、したがって、放射線被ばくが起こるシナリオを考え、それが起こる確率や、それが起こった場合に結果としてもたらされる被ばく線量を求めることができれば、放射線被ばくのリスクを定量的に考えることができることになります。そうすれば、そのリスクが受け入れられるものなのかどうかを判断することができます。

- まず、シナリオについてです。地層処分の場合、シナリオとは、閉じ込められていた放射性物質が放出されて、人に到達して放射線被ばくを与えるまでの、因果の鎖で結ばれた一連の事象とプロセスのネットワーク（つながり、連鎖）を時系列的に表したものです。実際に起こることがそのような因果の連鎖を辿るかどうかは別としても、そのようなシナリオを設定することができれば、その発生可能性（確率）を推定することができます。そして、仮にそのようなシナリオどおりの事象とプロセスの連鎖を辿るとすれば、どの程度のことが起こるかを見積もることができるようになるわけです。つまり、その事象とプロセスをモデル化して、数式として表し、結果としてもたらされる被ばく線量を計算して求めることができます。
- 次に、発生確率についてですが、これは地層処分の場合には特に注意が必要な事柄です。原子力発電所などのように、放射性物質の置かれている状態が動的に変化するシステムでは、運転状態において、人は誤り、機械は故障する可能性があるため、起こってほしくない（影響の大きい結果をもたらす）シナリオの発生確率の評価に注意が当てられます。
- しかし、地層処分のように、放射性物質の置かれている状態が、変化の少ない静的なシステムでは、人間の不注意による接近や火山のマグマの貫入などの場合を除いて、人工的な構造物は緩慢に劣化し、地質環境の状態も緩慢に変化します。したがって、実際に起こる望ましくないことは、事故や操作ミスあるいは機器の故障のようにとびとびに起こる「出来事」というよりは、緩慢に連続的に起こる「状態の変化」であると考えられます。このような状態の変化は数えることにより確率を与えることが難しいので、発生確率を割り当てることはせず、問題となる状態の変化の可能性が否定できない場合について、シナリオが発生する（発生確率は1である）と考えます。そして、その状態の変化が因果律

に従って決定論的に進行するとした時の、結果の影響の大きさを残留リスクと考えて、その評価に注意が当てられます。

一方、人間の不注意による接近や火山のマグマの貫入などについては、その発生確率が非常に小さいことから、そのようなことが起きたとしたら結果の影響はどの程度であるかと、その発生確率がどの程度であるかを別々に推定して、その積がリスクであると考えて、参考とすることになっています。

- このように、地層処分の安全評価では、システムが将来どうなるか、何かが起こるかどうかを予測しようとはしていません。もし望ましくないこと（放射線被ばく）が起こるとしたらどのようなシナリオがあり得るかを考えて、そのようなシナリオが発生する可能性が合理的に考えて否定できない場合については、そのようなシナリオが発生するとして、その場合にどのような結果（被ばく線量）がもたらされるかを評価する（シミュレーションする）ことにしています。このようにして放射線被ばくをもたらす可能性のあるシナリオを考えることができ、そのようなシナリオのセットが定性的に十分網羅的なものであり、地層処分システムの状態の変化の幅（限度）を示すという意味で包括的であるならば、その発生可能性と結果の影響の評価を行うことにより、システムが将来にわたって十分に安全だと見なせるかどうかを見極めることができます。
- 地層処分の閉鎖後の安全評価では、ガラス固化体中の放射性物質を出発点として人への被ばくという最終点に至る、事象とプロセスの連鎖をシナリオとして考えます。そこでは、放射性物質について起こるそれぞれの事象やプロセスは、そこでの状況に応じて起こる、確からしく科学法則に従うものとして想定され、モデル化され、このモデルに現実を反映したデータが入力されて、被ばく線量が計算により求められます。
- しかし、いうまでもなく、放射性物質が人への被ばくという最終点に至る、事象とプロセスの連鎖は、その放射性物質が移行する環境あるいは場、すなわち地質環境と人工バリアの状態によって変わります。現実の地質環境と人工バリアにおいて長期に起こるプロセスの連鎖が、そのシナリオとモデルどおりになるかどうかは不確実です。現実の不均質な地質環境と人工バリアが、現在どうなっているか及び将来どうなるかを正しく把握することはできません（自然の変動性による不確実性）。またシナリオやモデルが実際に起こるであろうことを正しく表しているかどうかを確かめることもできません（知識不足による不確実性）。

- 知識不足による不確実性と自然の変動性による不確実性の取り扱い：

そこで、もともと安全評価の目的はシステムが将来安全であるかどうかを判断することであることを考慮して、被ばくが最大の側になるようにシナリオとモデルを作成したり、データを設定したりするように注意します（保守的アプローチ）¹。

こうして設定したシナリオとモデル及びデータから科学法則に従って因果論的に求められる結果には、用いるシナリオとモデルの記述の不完全性とデータの自然の変動性による不確実性が含まれます。その変動の度合いによっては結果が悪い方に大きく異なってくる可能性にも注意を払わなければなりません。このため、シナリオやモデル及びデータが変化すると結果（線量）がどのように変化するかとの関係を把握し、影響の高いデータについては、あえて危険側の設定を行う、あるいは研究を重ねることで不確実性を低減する、などの対応を行います。これによって、結果を大きく左右する要素について重大な見落としをしてしまう可能性をさらに下げることができます。

- したがって、安全評価の結果（残留リスクとしての被ばく線量の推定結果）に基づいて、地層処分
の安全を説明する場合には、単にその結果が十分に受け入れられるものになっていることだけを示す
のでは不十分だということになります。どのようなシナリオとモデル及びデータを「仮定」として用いているか、
そこでは不確実性に対して、どのように必要な注意が払われているかを説明して、見積もりが十分信
じるに足るものであることを示し、人々の納得を得ることが重要となります。
- 実際に安全評価は、少し詳細にわたりますが、次の様な手順で行われます。
 1. 閉鎖後の安全評価の手順：地層処分システムの記述
 2. 閉鎖後の安全評価の手順：シナリオの作成
 3. 閉鎖後の安全評価の手順：モデルの定式化と安全解析の実行
 4. 閉鎖後の安全評価の手順：結果の解釈
 5. 稀頻度シナリオや人間侵入シナリオ

¹ 例えば固体中に閉じ込められている放射性物質が、どのような速度で非常に動きの遅い地下水中に溶解して溶け出すかはわかりません。安全評価では固体が析出する速度と放射性物質が溶解する速度が釣り合った平衡状態まで、すぐに放射性物質は溶解すると仮定して安全評価を行います。

閉鎖後の安全評価の手順：地層処分システムの記述

- 閉鎖後の安全性の評価は、国際的に用いられている安全評価の一般的方法論[1, 2]に沿って行います。これは、「少し詳しく」の節で述べたような考え方に基づいて世界中の専門家が議論や検討を積み重ねて作り上げてきたものですので、考え落とし、見落としがない、十分に練り上げられたものとなっていると考えられるからです。
- シナリオを用いる安全評価では、まずシナリオを作成するために、対象とする処分システム（放射性廃棄物、人工バリア、地質環境）の状態が、処分を行った時点でどのような状態になっていて、そして将来どのような状態になるかを記述します。すなわち図 4-2 のように、
 - 廃棄物としてどれだけの放射性物質がありどのような状態になっているか、
 - これを閉じ込めている人工バリアと処分場内にある周辺の地質環境はどのような状態になっていて、どうなっているか、
 - 処分場の外から地表までの地質環境の状態はどうなっているか、
 - 地地表の人と生物の生活環境（生物圏）はどうなっているか、

に関するデータを取得して、配置図や設計図のような形に整理して、そこで起こる可能性のある事象やプロセスの連鎖（シナリオ）を考えます。その際には、図 4-3 に示すように、人工バリアや地質環境及び地表の人と生物の生活環境（生物圏）における変化がどのような時間スケールで進行するかを考慮して、どの程度の時間範囲で予測が可能で確実にモデル化できるかを考えます。

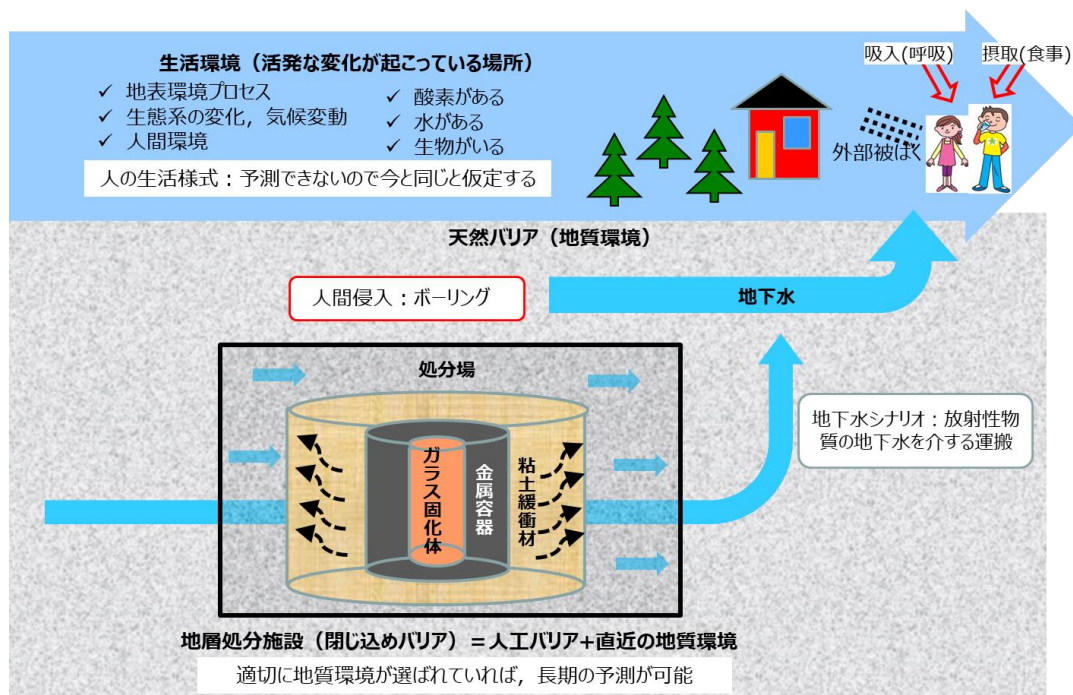


図 4-2 シナリオ作成のための地層処分システムの記述（概念図）

- 放射能インベントリ（放射性物質の崩壊）：ほぼ永遠に正しく予測でき、時間とともに減少する
- 処分システムから生活圏に移行する放射線量：不確実ながら予測でき、時間とともに不確実性が增大する
- 生活環境における人の生活様式：数十～数百年以降は予測できない

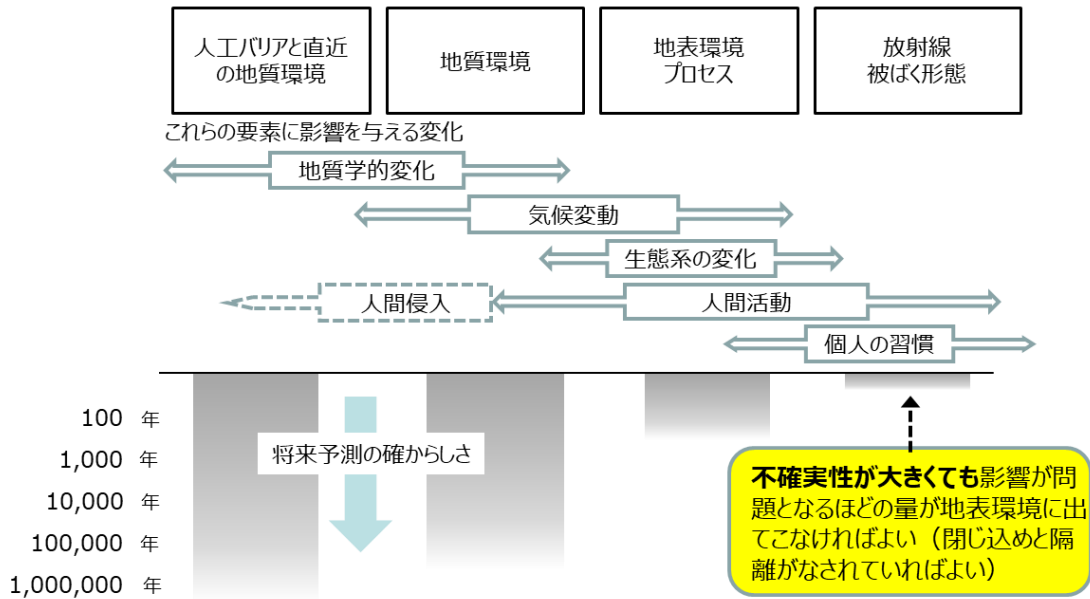


図 4-3 地層処分システムの時間に伴う変遷と将来予測の確からしさ（[3]に加筆修正）

- まず図 4-2 の灰色で描かれた部分（薄い灰色と濃い灰色を合わせた部分）である地下深部の地質環境は、日本では数万年以上、数億年にも及ぶ非常に長い期間の過去のプレートの動きを反映しています。図 4-3 に示すように、この動きは非常に緩やかなものであり、その傾向は今後 数万年程度では大きく変わらないと考えられていることから、比較的長期にわたる将来の地下の環境がどのくらいの範囲内で変化するかを外挿により予測することが可能だと考えられます。
- 次に図 4-2 の少し濃い灰色の部分の中の処分場として描かれた部分である、地層処分施設の置かれる地下深部では、図 4-3 に示すように、人工バリア（ガラス固化体、オーバーパック、ベントナイト緩衝材）を取り巻く地質環境は、地表の人と生物の生活環境（生物圏）から隔離されており、その地質環境での様々な変化がきわめて緩やかであることから、人工バリアで生じる現象も非常に緩やかであると考えられます。このため、地下の環境を想定した基礎的な実験を行うことで、人工バリアで生じる現象を理解してある程度の将来予測が可能となります。
- 次に図 4-2 の少し薄い灰色の部分の隔離機能を担う天然バリア（地質環境）（「隔離」については語彙基盤「閉じ込めと隔離」を参照ください）として描かれた部分です。ここは、地表の人と生物の生活環境（生物圏）からの隔離を担い、放射性物質の移動の場となる地下深部の地質環境ですが、図 4-3 に示すように、火山や活断層を避ければ、長期まで大きく変化することはないと考えられます。ただし、地下水の移動を支配する岩盤の隙間や割れ目については、広い空間スケールの中で大きなものから小さなものまで不均質に分布しているため、詳細をモデル化することは難しいものの、

放出された放射性物質がいずれ地表まで運ばれる場として大きく単純化して評価できるだろうと考えられます。

- 最後に図 4-2 の青色で生活環境として描かれた部分は、遠い将来に地表まで運ばれた放射性物質が、環境を循環する水により希釈され、水、空気、動物、植物、土壌、川、海等に分配し、人に被ばくをもたらすことになる、シナリオの終着点になると考えられます。ただし、図 4-3 に示すように、遠い将来の時点での地表の人と生物の生活環境（生物圏）の様子や人の振る舞いがどうなっているかを予測してモデル化することは不可能なので、これを評価するためにどうするかを考える必要があります。これについては、「閉鎖後の安全評価の手順：シナリオの作成」の中の人の生活の様式化に関する記述をご覧ください。

閉鎖後の安全評価の手順：シナリオの作成

- このように記述された地層処分システムにおいて、ガラス固化体中の放射性物質を出発点として、人への被ばくという最終点に至る事象とプロセスの連鎖として、最も可能性の高いのは、長期間のうちにガラス固化体に含まれる放射性核種が地下水によって地表の人と生物の生活環境（生物圏）に運ばれることを想定した地下水シナリオです。その他に考えられる事象とプロセスとしては、火山活動や活断層あるいは人間のボーリング等による処分施設の破壊があり得ますが、サイトの選定において火山活動や断層活動の発生しやすい場所や鉱物資源等のある場所を避けておけば、ある程度の将来まで処分施設の破壊を避けることができると予測できるので、念のためにその影響を評価する、発生確率の低いシナリオとして考えることができます。
- 地下水シナリオでは以下のような事象とプロセスが進行すると考えます。
 1. 金属容器が破損して開口部から地下水が侵入してガラス固化体との接触が開始する。
 2. 地下水等によりガラス固化体から放射性物質が溶け出す。
 3. ベントナイト緩衝材中を拡散により移行する。
 4. 廃棄物を定置している地質環境に流出し、さらに処分場の外の地質環境に移行する。ここでは、地質環境の間隙中の地下水により放射性物質が運ばれる。
 5. 地表の人と生物の生活環境（生物圏）に入り込んで希釈されて大気、水、土壌、動植物に分布する。
 6. 人へ接近（呼吸、食事、外部）による被ばくが起る。
- これらの事象とプロセスのうち、1 から 3 は、限定された状況のもとでの長期の反応なので、実験室の実験等の知識をもとにある程度確からしい予測ができます。しかし、反応の進む速さは極めて遅く、その速さを確からしい形で測定できないのが普通です。例えば、固体から地下水への溶解反応は極めて遅く、自然界でも岩石等の固体が溶解している様子はあまり見られず、実験室においても溶けていく速さを確からしい形で測定できないことが多いのですが、その場合は、保守的に反応が速く起こるものと仮定することとします。
- 上記の 3 では、地下水が動いていないため、放射性物質は拡散により、図 4-2 の黒色の破線矢印のようなイメージで、四方八方へ広がります。しかし、その後の 4 に記した地質環境では、溶けだした放射性物質は地質環境中にネットワーク状に分布している割れ目や間隙中の遅い流れの地下水によって、図の黒色の矢印から青色の矢印のようなイメージで、運搬されます。この際に、どれだけが四方八方に失われていき、どれだけが地表の人と生物の生活環境（生物圏）に運ばれるかは、正しく見積もることができません。そこで、これらの放射性物質はどこかに失われることなく、すべてが地下水の流れの下流方向に運ばれて地表の人と生物の生活環境（生物圏）に至るものと仮定します。これは、割れ目や間隙が前後左右上下につながりを持っていることを考えると、極めて非現実的な仮

定ですが、地表の人と生物の生活環境（生物圏）に至る放射性物質の量を過小評価してしまわないためにこのような保守的な仮定をします。

- 上記の 5 と 6 では、長期の将来における地表の人と生物の生活環境（生物圏）の様子と人の生活様式は全く予測できません。しかし、この安全評価の目的は、地層処分システムの閉じ込めと隔離は将来においても十分機能しており、地表に運ばれる放射性物質の量は極めて少量で、問題となるような被ばくをもたらさないことを示すことです。このため、実際に将来の人の体の作りや生活習慣も変化しているかもしれませんが、将来の人も現在の人と同じ体で同じ生活習慣だと仮定し、現世代と同じレベルで放射線から守られるべきと考えて、今の人たちに対して問題とならないほどの被ばく線量しかもたらさないのであれば、将来の人に対しても同様の考え方が当てはまると考えます。このように考えて、将来の人と環境は現在の人と環境と同じと考えて、最も高い被ばくを受ける生活様式を持っている人の被ばく線量を評価することとします（このような評価の方法を、人の生活の様式化をする、といいます）。

閉鎖後安全評価の手順：モデルの定式化と安全解析の実行

- シナリオが作成できれば、この概念に添って、放射性物質が置かれた状態に対して、ガラス固化体からの溶出や、ベントナイト緩衝材中の移行、地質媒体中の移行、地表の人と生物の生活環境（生物圏）での人の生活様式（食習慣など）などが、現実の複雑さを単純化した数理モデルとして記述されます。このモデルには、地層処分システムの記述においてシステムの初期条件として取得された、人工バリアのサイズや性状、地下水への放射性物質の溶解度、地下水の移動速度、水質、地質環境の間隙や割れ目の構造と大きさ等々のデータが、結果を支配するパラメータ（変数）として入力されます。
- この数理モデルを用いた計算は、シナリオを仮定としたコンピュータを用いて行われるシミュレーションとしてなされるものです。

用いるモデルが実際に起こると考えられる事象やモデルを正しく表しているかどうかについては、人の知識の限界があり不確実なものにならざるを得ません。また、地質環境や人工バリアで観測されたり、実験的に求められたりするデータが、現実を正しく反映しているかどうかについても、自然の時間的、空間的変動等に由来して不確実なものになります。

このため、仮定として用いるシナリオとモデルは、知識不足による不確実性のあることを考慮して、これ以上の被ばくは起こりそうもないという値が求められるように設定します。また、パラメータとして入力するデータに対しては、自然の変動性による不確実性または観測や実験により得られたデータの信頼性を考慮して、このパラメータをその信頼性の範囲で変動させて結果がどのように分布するかを確かめます。

閉鎖後の安全評価の手順：安全評価の結果の解釈

- 計算結果として与えられる仮想的な放射線被ばくの程度が「受け入れられない程度の」放射線被ばくとはならないことを示すことにより、安全を確認します。すなわち、地層処分の安全評価では、放射性廃棄物を原因として、「将来人が被ばくするかどうか、どれだけの被ばくする可能性があるか」を予測するのではなく、「仮に、最大限の量の放射性物質が地表の人と生物の生活環境（生物圏）にもたらされたとしても、その量は受け入れられない程度の被ばくを与えることにはならない」かどうかを評価します。
- このようにして得られる数値は単に計算上求められる値にすぎず、「閉鎖後受け入れられない危険がもたらされる」ことがあるかどうかを判断するための証拠として示される以上の意味を持たないということに注意が必要です。結果として何らかの被ばく線量が得られたからといって、そのような線量の被ばくが起ることを予測しているわけではありません。
- シナリオを用いた安全評価では、システムの記述、シナリオの作成、モデル化、シミュレーション計算という、複雑な手順を踏んで、複雑なモデルや解析計算を行います。これは、最終段階では、「放射性物質は、その放射能が持続する期間にわたって、地層処分によって閉じ込められ隔離されたままとなる」という理解の、科学的推論による「安全の証明」をするための手続きになります。その一方、事業の段階的開発途上では、選ばれようとしているサイトの地質環境と工学設計の閉じ込めと隔離の能力がどの程度十分であるかどうかを系統的に解析し評価して、次の段階のための情報として考えることができます。

稀頻度シナリオや人間侵入シナリオ

- 新たに火山が発生してマグマが処分場に貫入することや、断層が新たに形成して処分場に地下水の通りやすい水みちができること、さらには人が気づかずにボーリングをしてその掘削孔が廃棄物を貫通するなどの事象は、ほとんど想定する必要がないほど発生可能性が低いと考えられます。しかしそうはいつでも、サイト選定による完全な回避や、発生の可能性を科学的に完全に否定することは現状では困難です。

このような事象についても、発生した場合に処分システムの閉じ込めと隔離の状態に重大な影響を与える可能性のある事象について、念のため、閉鎖後ある期間を経た後に発生するとして、事象発生直後（1年目）、及び長期間（2年目以降）に、周辺に生活する人がどのくらいの被ばくを受けるかを評価します。

- 一般に、火山活動や活断層、地震動、津波等は、事象自身が地表に生活している人々に大きな影響を与えます。このため、放射性廃棄物を地下深部に埋設して処分する地層処分についても、これらの事象が、大きな危害をもたらすのではないかといった懸念を持つ人もいるかもしれません。これらについては、それらの事象の及ぼす影響と、放射性物質による影響を混同しないことが大切です。固体内に閉じ込められて地下深部に隔離されている放射性物質に対して、これらの事象がどのような影響を及ぼすかを具体的に考えることが大切です。

ここに注意

安全（性）を評価するという意味

- 安全とは、物事が損傷したり、危害を受けたりするおそれのないこと[広辞苑 第七版]、すなわち危険のないことを意味します。工学の分野では、安全とは「受け入れられないリスクが存在しないこと」（国際安全規格（ISO/IEC Guide 51:1999）であると考え、安全の程度（安全性）を、問題となる活動や施設に対して存在しているリスクの大きさによってあらし、判断することになっています。
- 放射性廃棄物の処分においては、危害として「受け入れられない程度の」放射線被ばくを与える可能性のある放射性物質が危険物として存在しています。このとき、危険物とはその存在に対して「何の安全措置も施されなければ、危害を与える可能性のあるもの」、すなわち潜在的危険性のあるものです。

しかし、危険物あるいは潜在的危険性のあるものがそのまま「危険である」わけではありません。危険かどうかは、それが置かれている状態によって異なってきます。これを考えるための概念がリスクであるといえます。すなわち、放射性物質の置かれて置かれている状態に応じて、ある大きさの危害のもたらされる可能性（リスク）が大きいかどうかを考えるのです。この放射線被ばくのリスクを具体化して客観的に測れる量とするために、これを被ばく線量と被ばくする可能性（確率）の組み合わせと考えます。

- ただし、このリスクの定義の被ばく線量は非常に小さい量まで含むもので、その高低に応じて、それが受け入れ可能かどうか、あるいは危険か安全かを判断することになる量です。もともとのリスク概念は、危害として「受け入れられない程度の被ばく」すなわち「受け入れられないリスク」を避けたいことから出発しています。これは被ばくの可能性（リスク）があるかどうかとは意味が違います。世間でリスクについて語られる際には、リスクが「あるかないか」という表現で、「受け入れられないリスク」があるかないか（安全かどうか）という判断を込めて用語が使われることがあります。この結果、すべてのリスク（被ばく）は危険であるとか、リスクはゼロでなければならないなどの解釈がなされたり、安全評価の結果のピークを見て危険が検出されているなどの解釈がなされたりします。混乱しないように注意が必要です。

本来のリスクの定義は、リスクを危険の程度や安全の程度として定量化するものです。すなわち、リスクがより大きければ「より危険」であり、リスクがより小さければ「より安全」として、安全かどうかの問題になるのではなく、より安全か、より危険かが問題になるのであると考えることができます。

- 安全評価では、安全かどうかを判断するために、すなわち「受け入れられないリスクが存在しないこと」を確かめるために、リスクを「見える化」して定量的に表すという手続きを踏んでいます。ただし、リスクは実際に測定できるものではなく、シナリオ、モデル、パラメータを用いたリスク解析モデルという科学

的推論により推定されるものです。その評価結果が将来を考えるためにどれくらいの意味を持っているかは、前提とする処分施設や地質環境、地表の人と生物の生活環境（生物圏）の状態や物理・化学的相互作用の予測と記述がどれだけ現実的にかかっています。

しかし、私たちはすべてを知ることができないので、私たちの解析モデルも不完全です。このため不完全な知識に対応するため、「もし～ならばこうなる」という仮定と結果の組を与える一連のシナリオとモデル及びパラメータに保守的アプローチを適用しています。

予測の意味

- 私たちの身の回りには、比較的短期的なものではありますが、気象や景気などの変動の予測が行われています。これらの予測は、現在の状態を出発点として、将来における現象そのものの発生場所や時間あるいは規模などを、因果論に基づく決定論に関する科学法則や統計に基づく確率論を外挿の形で適用して、その予測が将来実現することを直接言い当てようというものです。
- 一方、地層処分における予測は、処分システムが将来どのようになるかを考えたものではありません。予測の対象とする時間スケールと空間スケールを考えれば、実証性のある予測は不可能です。そこで地層処分では、もし放射線被ばくが起こればどのようなシナリオがあり得るかを考えて、そのシナリオに基づき、事象やプロセスが科学法則による決定論に従って進行し、その結果は自然変動に基づく不確実性を伴って与えられるとして被ばく線量を求めます。これは、そのシナリオが発生すると仮定したときの、結果としての線量の推定（シミュレーション）です。
- これはシステムの将来挙動の予測とは異なり、地層処分の安全性を検討するうえでの判断材料を提供するために行うものです。将来の人間が放射性物質によって被ばくする状況を予測しようとする（言い当てようとする）ものではありません。

利害関係者間の相互理解を得るために

- 安全評価は、セーフティケース（「セーフティケース」の「まずこれだけは」をご覧ください）において中心的な役割を果たしますが、地層処分に馴染みのない方にとって、システムの記述を土台として作成したシナリオ、モデル、パラメータを用いたリスク解析モデルの詳細の理解は容易ではありません。このため、往々にして人は、安全評価の評価結果だけを見て、地層処分が安全であることが判断されていると誤解してしまいます。
- 安全評価の結果を紹介する場合には、評価結果が何らかの基準以下だと説明することよりも、与えられたサイトに対してどのような調査を行い、どのように処分場を設計し、これらを踏まえてどのように安全評価のシナリオ、モデル、データを設定したのかという情報とその信頼性に関するありとあらゆる情報を一緒に提示することが重要です。これらの情報すべてがセーフティケースに含まれます。安全評価の結果だけが独り歩きしないように、安全評価の目的を丁寧に説明する必要があります。
- 安全評価では、用いる解析モデルやシミュレーションについて、専門家は最新の知見や技術を駆使して解析の「精度」を上げるように日々努力し、その結果を丁寧に説明すれば理解してもらえらると思っ
てしまいがちです。これは、安全評価に用いるシナリオとモデルやデータをより現実を反映したものにする
という意味で、安全評価において必要かつ重要な努力ではあるのですが、しばしば内容が専門的で
あり、詳細に関するものであるため、難しい話でごまかしていると逆の効果を生み出してしまふこと考
えられます。むしろ、知識不足によるシナリオとモデルの不確実性、自然の変動（不均質性）による
記述の不確実性のもとで、どのように考えて安全であるとの判断に辿り着こうとしているのかを、透明
性を持って示し、判断に対する人々の信頼性を深めることに努力を傾注すべきです。

付録：国際的な定義

- 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[3]として取りまとめました。
- 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及び実施に際しては、次の二つの前提、すなわち、
 - 第一に、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。
 - 第二に、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ます。

- そのうえで、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ます。
 - 処分システムのふるまい及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ます。

- 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す。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及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、間接的な実証です。

- 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って、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ます。これらの計算に関して、二つの重要な観察がなされます。
 - 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します。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ことになります。
 - 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いています。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ものです。
- 以上に基づき、OECD/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専門家のコンセンサスとして、以下の共同声明を発表しました。
 - 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更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、
 - 現在及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、CEC（欧州共同体委員会）の専門家によって承認されました。

- IAEA の安全用語集（2022 年）[4]では、次の様に書かれています。

安全評価

1. 防護と安全に関連する行為のあらゆる側面の評価。認可された施設に対しては、その施設の立地、設計及び操業が含まれる。

（注）これには通常、リスク評価が含まれることになろう。

2. システム全体の性能とその影響を予測するための解析。ここで、性能の尺度は、放射線学的な影響あるいは、安全に対する影響の他の何らかの包括的な尺度である。
3. 関連するあらゆる安全要件が計画された（あるいは実際の）設計によって満たされることを確保するために設計プロセスを通じて（及び施設または活動の存続期間を通して）実施される体系的なプロセス。

- また、2012 年に公表された IAEA の安全基準シリーズの中の個別安全指針 No. SSG-23「放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価」[5]では、以下のように書かれています。

4.41. 安全評価という用語は、本安全指針の中では、セーフティケースの一部として実施されるあらゆる評価のことをいうために用いられている。これは、処分施設の開発、操業及び閉鎖の安全に関連するあらゆる側面を包含するものである。したがって、安全評価では、定性的な側面、非放射線学的な課題及び組織的及び管理上の側面も扱われる。

この定義には、関連情報が記載されており、「安全評価が実施及び更新され、その結果が設計者、事業組織、及び規制機関によって使用される施設または活動の存続期間の段階には、次のものが含まれる」として、放射性廃棄物の処分施設の閉鎖及び閉鎖後段階を含めています。

参考文献

- [1] OECD/NEA (1991): Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee.
- [2] OECD/NEA (2012): "Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative", OECD Nuclear Energy Agency, NEA No. 6923.
- [3] OECD/NEA(2009): Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste.
- [4] OECD/NEA (1991): Can Long Term Safety be evaluated? An International Collective Opinion.
- [5] IAEA (2022): IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, Non-serial Publications , IAEA, Vienna.
- [6] IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for Radioactive Waste, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standard Series, No.SSG-23.

索引

あ	
安全-----	93
安全性の評価-----	80
安全評価-----	65, 78, 80
安全評価の結果の解釈-----	91
安定型処分場-----	28
安定している地質環境-----	49
い	
一般廃棄物-----	28
う	
宇宙処分-----	36
お	
オーバーバック-----	20, 22
か	
海水準変動-----	45
概要調査-----	64
海洋底下処分, 氷床処分-----	36
科学的特性マップ-----	47
核原料物質, 核燃料物質及び原子炉の規制に関する法 律-----	29
拡散-----	32
核種・分離変換-----	36
隔離-----	9, 26
確率論-----	95
火山・火成活動-----	45
ガラス固化体-----	13, 19, 21
環境汚染-----	14
環境地質-----	43
環境の自浄作用-----	14
監視 (oversight)-----	30
緩衝材-----	22
間接的監視-----	31
管理 (management)-----	29
管理型処分場-----	28
き	
希釈・分散による処分-----	27
希釈と拡散-----	32
稀頻度シナリオ-----	92
け	
決定論-----	95
原子炉等規制法-----	29
こ	
坑道-----	46
高レベル放射性廃棄物-----	13, 19
固形化-----	19
さ	
再使用-----	16
再処理-----	13
再生利用-----	16
サイトの選定-----	64
産業廃棄物-----	28
残留リスク-----	80, 82
し	
システムの記述-----	85
自然の変動性による不確実性-----	84
シナリオ-----	82
シナリオの作成-----	88
シナリオの発生確率-----	82
遮断型処分場-----	28

受動的制度的管理	17, 29
使用済燃料	13
将来の人の行動やふるまい	65
処分	16
処分場	46
処分前管理	29
処理 (processing)	29
人工バリア	20
信頼	60

す

ステークホルダー	56
----------	----

せ

制度的管理	18
性能評価	80
精密調査	64
セーフティケース	56, 57
セーフティケースと安全評価	65
潜在的危険性	11
潜在的危険性と安全性または危険性	71
潜在的危険性と危険性	35
潜在的危険性の持続期間	13

た

段階的アプローチ	68
断層	44
断層のずれ	50
炭素循環	15

ち

地下深部	23
知識不足による不確実性	84
地質環境	42
地質環境特性	44
地質環境モデル	47
地層処分施設	46
地層処分の選択	36
長期地上保管	36
直接的監視	30

て

低頻度・巨大損失事象	57
天然バリア	20, 23

と

投棄	27
透明性	72
閉じ込め	9
閉じ込めと隔離	9

に

日本におけるセーフティケース	70
人間侵入シナリオ	92

の

能動的制度的管理	29
----------	----

は

廃棄物の処理及び清掃に関する法律	28
ハザード	11
破砕帯	44
バリア	18
半減期	11

ひ

人の生活の様式化	89
非放射性廃棄物の管理	27
ビルトイン・コントロール	31

ふ

プレートの運動	45
文献調査	64
分散	32

へ

閉鎖	63
バクレル	11

ベントナイト-----	22
ベントナイト緩衝材-----	20

ほ

放射性物質-----	11
放射性崩壊-----	11
放射線-----	11
放射能-----	11
放射能の減衰-----	11
放出-----	32
保守的アプローチ-----	84, 90

み

水循環-----	15
----------	----

む

無害化-----	12
----------	----

も

モデルの定式化と安全解析の実行-----	90
----------------------	----

ゆ

ゆれ（地震動）-----	50
--------------	----

よ

予測-----	95
---------	----

り

利害関係者-----	56
離隔-----	26
リスク-----	82, 93
リスク概念-----	93
隆起・侵食-----	45