

# なぜ、地層処分なのか

2021年2月  
原子力発電環境整備機構

2021年2月 初版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒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 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Science and Technology Department  
Nuclear Waste Management Organization of Japan  
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構  
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2021

# なぜ，地層処分なのか

2021年2月  
原子力発電環境整備機構



## 目次

はじめに .....	1
第1章 放射性廃棄物の特徴と処分の考え方 .....	2
1.1 わが国における原子力発電の利用と放射性廃棄物の発生 .....	2
1.2 高レベル放射性廃棄物の特徴.....	3
1.3 高レベル放射性廃棄物の処分の考え方 .....	6
第2章 地層処分が選択された背景.....	7
2.1 地層処分の技術的な実現性に関する検討.....	7
(1) 地層処分の基本概念の確立 .....	7
(2) 地層処分の実現性に関する科学技術的な進展.....	10
(3) わが国における地層処分の検討.....	13
(4) 地層処分の実現性に関する国際的な合意と事業化への移行.....	15
2.2 地層処分以外の放射性廃棄物対策に関する検討.....	15
(1) 地層処分以外の方法との比較検討.....	15
(2) 長期貯蔵に関する議論.....	17
2.3 社会的な観点からの取り組み.....	18
(1) 将来の選択肢の確保と段階的なアプローチ.....	19
(2) 信頼構築とコミュニケーションにかかわる取り組み .....	20
2.4 最も有望な選択肢としての地層処分 .....	21
第3章 地層処分の安全性を説明するための枠組み.....	22
3.1 セーフティケースの作成.....	22
3.2 セーフティケースによる技術的な信頼性の提示.....	23
3.3 安全性の繰り返しの確認.....	25
第4章 包括的技術報告書の役割.....	27
参考文献.....	38

## 図表目次

図 1-1 再処理に伴い発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の概念図 .....	4
図 1-2 ガラス固化体 1 本が有する放射能の時間的な変化.....	5
図 2-1 スウェーデンの処分概念 KBS-3（経済産業省（2020）[7]より引用） .....	11
図 4-1 事業の進展に伴う段階的なセーフティケースの更新のイメージ.....	27



## はじめに

高レベル放射性廃棄物は、人々の生活環境に影響を与えないよう、安全を確保したうえで、適切に処分しなければなりません。そのような処分を行うために最も有望な方法として、わが国をはじめ原子力発電を利用した各国では地層処分が選択されています。

地層処分事業を実現するためには、事業が社会に受け入れられることが重要です。このため、地層処分の安全性をどのように確保するのかを技術的な根拠をもって説明することは、事業者である NUMO の責務です。この取り組みを示すものとして、NUMO は「わが国における安全な地層処分の実現性 ―サイト選定に向けた準備としてのセーフティケースの構築―」というタイトルの技術報告書を公表しました（以下、本書ではこれを「包括的技術報告書」といいます）（※）。

本書は、包括的技術報告書を理解していただくための基本情報として、地層処分の安全性を説明するための考え方や、それが国際的に確立されてきた経緯、地層処分事業を進めていくなかでの包括的技術報告書の役割などについて、わかりやすく解説することを心がけました。

本書を読んでいただくことで、地層処分の安全確保の考え方や包括的技術報告書について、ご興味を持っていただけると幸いです。

※ 包括的技術報告書は、中立な立場からの評価によって技術的な信頼性を確認するため、2018年11月に包括的技術報告書（レビュー版）を公開し、一般社団法人日本原子力学会によってレビューを行っていただきました。2021年2月に公表した包括的技術報告書は、その結果を受けて改訂を行ったものです。

包括的技術報告書は、NUMO のホームページ（下記 URL）からご覧いただけます。

[https://www.numo.or.jp/technology/technical\\_report/tr180203.html](https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html)

## 第1章 放射性廃棄物の特徴と処分の考え方

### 1.1 わが国における原子力発電の利用と放射性廃棄物の発生

私たちが日々生活し、経済活動を行っていくためには安定した電力供給は欠かせません。資源に乏しいわが国では発電のエネルギー源のほとんどを輸入に頼っているため、世界の情勢などに左右されてエネルギー源の供給が大きく影響を受けるという脆弱性を抱えています。このため、エネルギー源の調達先となる国の地政学的リスク、エネルギー源の備蓄のしやすさ<sup>1</sup>、発電にかかわる安全性、経済効率性、天候に左右されない安定性、環境への影響など、さまざまな点に配慮しながら、再生可能エネルギー（水力、太陽光、風力など）、火力発電の燃料である石油・石炭・天然ガス、原子力発電の燃料となるウランといった特徴が異なるエネルギー源を組み合わせ、発電を行ってきています。

わが国の商業用原子力発電は 1966 年にスタートし、1980 年代から 2000 年代にかけて、全国の電力供給の約 3 割を担うなど、わが国は、原子力を利用してすでに多くの電力を発電し、消費してきました。

しかしながら、福島第一原子力発電所の事故後、原子力発電所の停止などの影響により、2019 年時点で、わが国の発電量に占める原子力発電の比率は約 6% に低下し、水力・太陽光・風力などの再生可能エネルギーが約 18%、残りの約 76% は化石燃料（石油・石炭・天然ガス）に頼っています[1]。国は、2018 年に公表した「エネルギー基本計画」において、徹底した省エネルギーの推進、再生可能エネルギーの最大限の導入、火力発電の高効率化などを進めながら、原子力発電の依存度を可能な限り低減するとの方針のもと、安全性、安定供給、経済効率性および環境への適合を同時に達成するバランスの取れた電源構成とすることを目指す方針を示しています[2]。そして、原子力規制委員会により規制基準に適合すると認められた原子力発電所の再稼働などを通じて、2030 年度の電源構成として、原子力発電を 20~22% 程度、再生可能エネルギーを 22~24% 程度、化石燃料を 56% 程度とすることを見込んでいます[3]。現在、国の審議会では、エネルギー基本計画の改訂に関して、温室効果ガスの排出を 2050 年までに全体としてゼロにする「2050 年カーボンニュートラル」の実現に向けて、実用段階にある脱炭素化の選択肢である原子力を含めた議論がなされています[4]。

原子力発電を利用する際にも、火力発電を利用する際や通常の産業活動を行う際と同様にさまざまな廃棄物が発生し、その中には、放射性物質を含む廃棄物（放射性廃棄物）も存在します。一般に廃棄物は、人間の活動にとって役目を終えたものであり、どこかに「処

<sup>1</sup> 100 万 kW の発電所を 1 年間運転するのに必要な燃料は、石油 155 万トン、石炭 235 万トン、濃縮ウラン 21 トンであり、ウランの使用量はほかの燃料に比べて非常に少ない。2019 年 9 月末現在、わが国では国家備蓄と民間備蓄などで約 230 日分の石油が備蓄されている。これに対し原子力発電所では、ウラン燃料を一度原子炉の中へ入れると 1 年間はその燃料を取り替えずに発電することができ、これに燃料加工中のウランも合わせると約 2 年運転を継続することができるとされている[5]。

分」をしなければなりません。放射性廃棄物の場合、放射能を有することに留意して、私たちの生活環境に影響を及ぼさないよう、放射性物質が移動しないような対策を施し、生活環境から離れた場所に「処分」する必要があります。

## 1.2 高レベル放射性廃棄物の特徴

原子力発電は、ウランの核分裂により発生する膨大な熱エネルギーを使って発電を行います。この際、ウランが核分裂することで、強い放射線を出すさまざまな放射性核種<sup>2</sup>が生成されます。これにより、使用中あるいは使用を終えた燃料（以下、「使用済燃料」といいます）は、非常に高い放射能をもちます。

エネルギー資源の乏しいわが国では、原子力発電を開始した当初から、使用済燃料からまだ使えるウランとプルトニウムを取り出し（これを「再処理」といいます）、これらを燃料として再利用する原子燃料サイクルを基本政策としています。これまで再処理は英国とフランスに委託していましたが、今後は国内で行うべく、日本原燃（株）によって青森県六ヶ所村に使用済燃料再処理工場の建設が進められています。2022年度上期の竣工に向けて、現在、工事と審査が進められています[6]。

再処理の過程で使用済燃料からウランとプルトニウムを取り出した残りは、高い放射能をもつ廃棄物となります。液体で発生する廃棄物は安定した固体の状態にするため、図 1-1 に示すようにガラス原料と融かし合わせてステンレス製の容器（キャニスタ）の中に固め、「ガラス固化体」とします。わが国では通常、このガラス固化体を高レベル放射性廃棄物と呼びます。原子力発電を行っている諸外国の中には再処理を行わない政策の国もあり<sup>3</sup>、こういった国では、使用済燃料がそのまま高レベル放射性廃棄物となります。わが国では、2021年1月末現在、2,492本のガラス固化体が青森県六ヶ所村の日本原燃（株）が運営する貯蔵管理センターなどの国内に、また約19,000トンの使用済燃料が全国の原子力発電所などに保管されています。これらの使用済燃料をすべて再処理し、すでにガラス固化体として貯蔵されているものと合計すると、ガラス固化体で約26,000本相当の高レベル放射性廃棄物がすでに存在しています。

<sup>2</sup> 陽子や中性子の数によって区分される原子・原子核の種類のことを核種といい、このうち放射線を出す核種を放射性核種という。例えば、原子番号6（陽子数6）の炭素は、中性子の数が異なるC-12（中性子数6）、C-13（中性子数7）、C-14（中性子数8）といった炭素があり（このような同じ元素で中性子の数が違う核種を同位体という）、これらは異なる核種である。天然に存在する炭素の99%を占める我々に身近な炭素は放射線を出さないC-12であるが、天然にごくわずかに存在するC-14は放射性核種である。このように同じ元素でも放射線を出す核種とそうではない核種がある。

<sup>3</sup> 再処理を行っている国はフランス、英国、日本など、再処理を行わない国はスウェーデン、フィンランド、カナダ、韓国など、一部を再処理している国は米国、スイス、ドイツなどである[7]。ガラス固化体は再処理によってウランとプルトニウムが回収されているため、使用済燃料に比べて放射能や発熱量がやや低い。

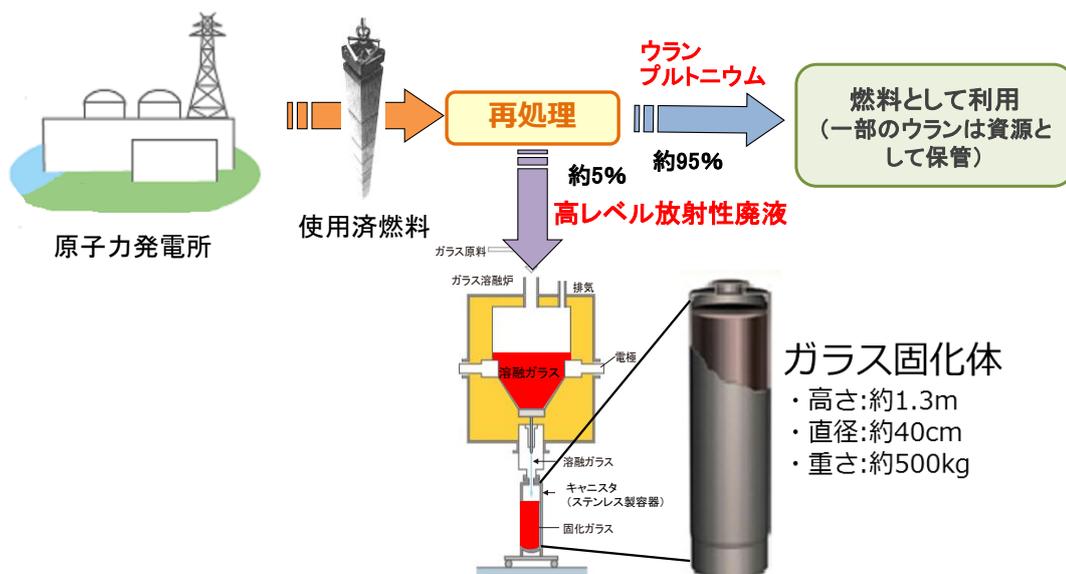


図 1-1 再処理に伴い発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の概念図

ガラス固化体の製造直後の放射能は非常に高く、人が近づくことはできません<sup>4</sup>。この放射能は図 1-2 に示すように時間とともに最初は急激に減衰し、1000 年間で放射能の 99% 以上が減衰します。ただし、ガラス固化体には半減期<sup>5</sup>が長い放射性核種（長寿命核種）が含まれているために、非常に長い期間にわたって放射能が残ります。ガラス固化体から 1m 離れた位置における 1 時間当たりの放射線量を計算すると、図 1-2 のグラフ中に示すように製造直後は 110,000 mSv（ミリシーベルト）であったものが、1000 年後は約 1.4 mSv と大幅に減少するものの、1 万年後でも約 1.1 mSv の放射線量となっています[8]。これは、自然界の放射線と医療目的の放射線を除き、原子力発電などによる一般の人の被ばくは年間 1 mSv 以下とするという法律で定められた線量限度を 1 時間以内に超えてしまうこととなります。およそ 1000 年後以降からはガラス固化体の放射能レベルの下がり方が鈍化することから、10 万年の時間が経過しても、高レベル放射性廃棄物は何の防護処置もなく環境中に放置して良い放射能レベルにはなりません。高レベル放射性廃棄物を処分するにあたっては、このような極めて長期間にわたり放射能が残存する特徴を考慮する必要があります（放射性廃棄物が人に及ぼす危険性について巻末のコラム（1）に、放射性廃棄物の安

<sup>4</sup> ガラス固化体の製造時における放射線量は、ガラス固化体表面において毎時約 1,500,000 mSv（ミリシーベルト）、1m 離れた位置では毎時約 110,000 mSv である[8]。このような大きさの放射線量は、数十秒から数分で死に至るレベルである。

<sup>5</sup> 放射能が半分になるまでの時間を半減期という。半減期は、放射性物質に含まれる放射性核種の種類によって決まっており、例えば、ヨウ素 I-131 は約 8 日、セシウム Cs-137 は約 30 年、ネプツニウム Np-237 は約 214 万年、パラジウム Pd-107 は約 650 万年といったように放射性核種によって半減期は大きく異なる。また、ヨウ素 I-131 の放射性同位体であるヨウ素 I-129 の半減期は 1570 万年であり、同じ元素でも同位体によって半減期や放射線の出方などが異なる。このようなことから、放射性物質は核種によって区別することが一般的である。半減期が短い核種を短寿命核種、半減期が長い核種を長寿命核種という。



図 1-2 ガラス固化体 1 本が有する放射能の時間的な変化

※ Bq (ベクレル) とは、放射能の強さを表す単位 (テラ:  $10^{12}$  倍)

※ Sv (シーベルト) とは、放射線によってどれだけ影響があるかを表す単位 (ミリ: 1/1000 倍)

※ 放射線量の計算値は、核燃料サイクル開発機構の研究報告 (2003) を参照した。

全性を考慮すべき時間の長さについてコラム (2) に、許容される被ばく線量の考え方についてコラム (3) にそれぞれ補足解説をしていますので、ご覧ください。

ガラス固化体以外にも、原子力発電や再処理施設の運転や解体に伴って、作業員が使用した手袋や作業服といった放射能レベルが極めて低いものから、使用済燃料の一部を構成していた金属部品といった放射能レベルが比較的高いものまで、多種多様な低レベル放射性廃棄物が発生します。このような低レベル放射性廃棄物のなかには、高レベル放射性廃棄物と同様に半減期が極めて長い放射性核種を一定量以上含むもの (TRU 等廃棄物)<sup>6</sup>があり、それについても地層処分を実施する方針です。

<sup>6</sup> TRU 等廃棄物とは、ウラン (原子番号 92) より原子番号が大きい超ウラン (TRans-Uranic) 元素を含む廃棄物のことをいう。超ウラン元素は、天然に存在する最も重い元素であるウランに中性子を吸収させることなどによって生成され、ウラン鉱石の自発核分裂により生成される極微量のものを除き、ほとんどが人工的に作られた元素である。使用済燃料の再処理施設や MOX 燃料工場の操業や解体に伴って、超ウラン元素を含む放射性廃棄物 (TRU 等廃棄物) が発生し、これらは半減期が長い放射性核種を含むといった特徴を有するため、低レベル放射性廃棄物のなかでも特に区分して取り扱われている。TRU 等廃棄物には多種多様な廃棄物が含まれており、その処分方法は、放射能濃度などに応じて地下 300m 以深に埋設処分する地層処分、地下 70~300m に埋設処分する中深度処分、地下 70m 以浅に埋設処分する浅地中処分に分けられることになっている。なお、わが国では超ウラン元素を含む放射性廃棄物の略称として「TRU 廃棄物」という表記

### 1.3 高レベル放射性廃棄物の処分の考え方

高い放射能を有する放射性廃棄物であっても、人工の施設に格納して放射線を遮蔽するとともに放射性物質が飛散しないように閉じ込め、人間が近づかないよう管理することで、安全を確保することは十分可能です。実際、青森県六ヶ所村にある日本原燃（株）の高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターでは、20年以上にわたりガラス固化体が安全に貯蔵管理されています（コラム（1）参照）。

しかし高レベル放射性廃棄物を生活環境に影響が及ばないよう万年単位で管理し続けることは現実的に不可能であり、いつかは処分を行う必要があります。そのような処分は、人間が近づけないよう物理的に隔離し、将来にわたって人間の生活環境に有意な影響を与えないようにすることが必要です。そして、このような安全の確保の実現性について、科学的な根拠に基づき、社会の理解を得ていくことが必要です。さらに、高レベル放射性廃棄物の処分を行うことで、将来の世代にできるだけ負担をかけないといった倫理的な面でも社会的な合意が得られるものでなければなりません。

高レベル放射性廃棄物の処分については、原子力発電が開始された1960年代当初から、わが国を含めた原子力を利用する各国でさまざまな検討が進められてきました。その結果、最も望ましい処分方法とされているのが地層処分であり、各国ともその実現に向けた取り組みを進めています。

なぜ、地層処分が最も望ましいと判断されているのか。これについて、第2章で説明します。

---

が定着している。しかし、この廃棄物には、燃料の核分裂により生成するストロンチウム Sr-90（原子番号38）、ヨウ素 I-129（原子番号53）といった核分裂生成物など、超ウラン（TRU）元素以外の放射性核種も含まれる。このため、NUMOでは、より正確な略称として「TRU等廃棄物」を用いることとしている。

## 第2章 地層処分が選択された背景

### 2.1 地層処分の技術的な実現性に関する検討

#### (1) 地層処分の基本概念の確立

米国では、第二次世界大戦中に原子爆弾の開発・製造が進められて以来、核兵器開発に伴い発生した高レベル放射性廃液は、軍事施設内に設置された地上のタンクに貯蔵されていました。しかし、高レベル放射性廃液の漏えい事故がたびたび起こり、深刻な環境汚染が発生しました[9]。これを発端として、高レベル放射性廃棄物を液体のまま長期に貯蔵すること、人間の管理<sup>7</sup>に長期的な信頼を置くことに疑問が投げかけられました。そこで、1950年代に全米科学アカデミー[10]は、当時の米国原子力委員会からの要請により、放射性廃棄物の処分に関する技術的な実現可能性を検討しました。その結果、極めて長い期間に及ぶ高レベル放射性廃棄物の危険性を人間の生活環境から隔離するには、長期間安定した環境が期待できる岩塩層への処分が有望であり、これについて研究に着手することが提起されました。岩塩層は物理化学的に安定で地下水の流れがほとんどないため、放射性廃棄物を長期間閉じ込めておくことに好ましい特徴を有すると考えられました。これが、地層<sup>8</sup>が持つ隔離と閉じ込めの機能に着目した処分、すなわち地層処分が考え始められたきっかけです。

1970年代に入り、国際的な環境問題への認識の高まりに呼応して、原子力の利用には高レベル放射性廃棄物の処分について見通しをつけることが不可欠であるとの世論が高まり、原子力発電を行っていた欧米各国において、高レベル放射性廃棄物処分に関する法律の整備や本格的な研究が開始されました<sup>9</sup>。わが国でも、原子力委員会<sup>10</sup>の提言[11]に基づき、

<sup>7</sup> わが国の放射性廃棄物対策においては、一般に「管理」とは、放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないよう、何かしらの防護処置を行うなどして人間が監視している状態のことをいう。「処分」とは、これらの廃棄物を地下に埋設し、人間の管理が必要ない状態にするという意味で使用しており、「処理」とは、廃棄物をセメントなどで固形化するなど、廃棄物を処分するまで安定な状態にする行為のことをいう。なお、IAEAが発行している用語集[12]では、“radioactive waste management”を“All administrative and operational activities involved in the handling, pretreatment, treatment, conditioning, transport, storage and disposal of radioactive waste.”と定義しており、再処理、廃棄体の製造、輸送、貯蔵、処分など、放射性廃棄物を処分する前および処分の両方を含め、放射性廃棄物の取り扱いにかかわるすべての活動を管理することを意味している。このように、国際的に用いられる“radioactive waste management”とわが国で一般的に用いている「放射性廃棄物の管理」とは、意味が異なることに注意されたい。

<sup>8</sup> 高レベル放射性廃棄物処分では、地質学上の堆積岩を指す「地層」とともに、地質学上は「地層」とみなされない「岩体」を含めて「地層」という言葉を用いている[13]。

<sup>9</sup> スウェーデンでは1977年、新規の原子炉に燃料を装荷する条件として、高レベル放射性廃棄物を安全に処分できる可能性を示すこと、またスイスでは1978年、原子力発電の継続の条件として、高レベル放射性廃棄物対策の技術的な実現可能性を提示することがそれぞれ法律に定められた。これを受け、地層処分の実施主体として、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）、スイス放射性廃棄物管理共同組合（Nagra）がそれぞれ設立された。

<sup>10</sup> 原子力委員会は、原子力の研究、開発および利用に関する国の施策を計画的に遂行し、原子力行政の民主的な運営を図ることを目的として、1956年に総理府（現 内閣府）に設置された。原子力の利用に関する政策や、資料の収集および調査に関することなどについて、企画し、審議し、決定する権限を有しており、内

1976 年から国家レベルでのわが国の地質環境における地層処分の実現可能性について研究が始まりました。

このように各国で地層処分の研究が本格的に動き出したことを受け、国際機関である OECD/NEA<sup>11</sup>は、各国の専門家を集めて知見を集約し、放射性廃棄物の問題を初めて包括的な視点で捉えた「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」という報告書[14]を 1977 年に取りまとめました。この報告書では、「ある種類の廃棄物の放射能は、非常に長期間にわたり残存するものであり、人間による継続的・制度的な管理に頼るとしても、そのような長い期間に及ぶ閉じ込め・隔離に信頼を置くことはできない」とし、地層処分に期待される基本的な性能は、放射能が危険でないレベルに減衰するまで人間の生活環境から放射性物質を隔離し、閉じ込めることであり、地層はそのための重要なバリアであることが述べられています。加えて、放射性廃棄物をガラスなどで固化することで放射性物質の放出を遅らせることが可能であること、安定な物質で製作した容器に封入することで数百年から数千年程度の閉じ込めが可能であることなど、人工的な対策もバリアとなり得ることも指摘しています。さらに、岩盤が有するイオン交換やろ過、表面吸着などの性質は地下水による放射性物質の移動を抑制すること、この抑制の程度は岩盤の組成と廃棄物の種類によって変化すること、このような岩盤の機能は、天然の地層で生成したプルトニウムが約 20 億年間移動していないという自然界で起こっている事実(コラム(4)参照)によっても示されることなどを指摘しています。これらの見解は、今日の地層処分概念の拠り所となるものです。

以上のように、米国において地層処分が考え始められた当初は、岩塩層という特定の地層に着目し、これが放射性廃棄物を長期間安定に人間の環境から隔離し、閉じ込めておくことができるという機能に期待したものでしたが、なぜその方法によって放射性物質を長期間閉じ込められるかについて物理・化学的な観点からは、明確ではありませんでした。しかし 1970 年代後半になり、各国で地層処分の研究が本格化し始めると、岩塩層といった地層の種類に特定することなく、放射性物質の閉じ込めに重要な地質環境の物理・化学的な条件についての検討が行われ始めました。

このような国際的な経緯の中で 1983 年に発表された全米研究評議会による報告書「放射性廃棄物の地層処分による隔離システムに関する調査」[15]は、天然の地質環境が本来備えている隔離機能について、地層処分の観点から初めて科学的に考察したものであり、わが国を含むその後の各国の地層処分研究に大きな影響を与えました。

---

閣総理大臣は、その決定を尊重しなければならない。

<sup>11</sup> OECD/NEA は、経済協力開発機構 OECD に属する原子力の平和利用に関する専門機関である (Nuclear Energy Agency)。安全で環境に調和した、経済的なエネルギー源として、原子力発電の開発利用を加盟諸国政府間の協力によって促進することを目的としている。

まず、地下深部に処分した放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼす可能性は、

- ① 処分場の存在を知らずにボーリングを掘削するといった人間の行為(人間侵入)や、地盤の隆起と侵食といった自然事象によって放射性廃棄物が地表に接近すること
- ② 地下水に放射性物質が溶解して地表まで運搬されること

の二つがあると整理し、特に②の地下水により放射性物質が移行する現象についての丁寧な考察が行われています。具体的には、仮に放射性物質が地下水に溶け出したとしても、それが地表まで運搬される時間は、放射性物質がどの程度地下水に溶けるのか、岩盤がどの程度放射性物質を収着(吸収・吸着)する効果を有しているのか、地下水が岩盤中を移動する速さはどの程度なのかなどの条件によって決まり、この地表に到達するまでの時間が放射性核種の寿命より長いか短いかによって、人間への影響が決まるとしました。そして、地下深部の地質環境は放射性核種の溶解度が小さい(溶けにくい)こと、岩盤は放射性核種に応じて一定の収着効果がある(岩盤にくっつく性質を有する)こと、岩盤の透水性(地下水の流れやすさ)や水を動かす圧力が小さいため地下水の移動速度が極めて小さいことなどの研究成果から、地下深部の地質環境は放射性物質を閉じ込める性質を有していることについて、科学的なデータをもって示しました。

加えて、地下深部が有するこのような閉じ込め性能をさらに確かなものとするために、放射性廃棄物を金属などの人工的な容器に入れて一定期間閉じ込める、また粘土のような地下水を通しにくい材料によりその容器を囲うことで放射性物質の移行を遅らせるなど、人工的な対策を組み合わせることで、地層処分が一つのシステムとして安全性を確保するという概念が提示されました。

全米科学アカデミーの報告書が公表された1983年に、スウェーデンでは、地層処分の事業者として設立されていたスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)が地層処分の実現可能性を評価した報告書(KBS-3) [16]を公表しました。また、スイスでは1985年、放射性廃棄物管理共同組合(NAGRA)が処分の実現可能性を示した報告書(Project Gewähr 1985) [17]を提示しました。1980年代前半に公表されたこれらの報告書では、いずれも、地層処分は放射性廃棄物を人間の生活環境から隔離し、地下水の動きが遅く、ものを溶かしにくいという地下深部の一般的な特徴を利用するものであること、また、将来の不確実性に対処するため、地層による天然のバリアだけに放射性廃棄物の閉じ込めを期待するのではなく、人工的なバリアを組み合わせ、全体的なシステムとして多重的な防護を行うという処分概念を示しています。ここに、今日の地層処分の基本となる考え方が確立されました。

## (2) 地層処分の実現性に関する科学技術的な進展

地層処分の基本概念が成立した 1980 年代から 1990 年代にかけては、各国における地層処分の研究は、それぞれの国の特徴（廃棄物や地質環境の違いなど）を反映して、数万年以上の時間スケールで人間に有意な影響を与えないよう、地層処分が現実的に実施できるのかについて科学的・技術的に立証することに注がれました。大きくは次の三つの課題を解決することでした。

- ① 地層処分にとって適切な条件を有する地質環境か否かを把握する技術を確立すること
- ② 長期間にわたって放射性物質を閉じ込めることが可能な多重バリア（人工バリア＋天然バリア）からなる「地層処分システム」を設計し、これが実用的な技術で構築できることを確かめること
- ③ 地層処分システムが将来にわたって放射性物質が人間の生活環境に有意な影響を与えないといえるか否かを確認する安全性の評価技術を確立すること

①の地層処分に適した地質環境を把握する技術については、一部の国では候補となる場所あるいは岩種を各国固有の地質環境条件を踏まえて比較的早くから特定し<sup>12</sup>、地層処分に適した地質環境の特性を有するか否かの調査が行われました。同時に、資源開発や学術調査などの分野で実績のある地質調査技術をベースに、地下深部における地質環境の調査・評価手法について研究開発が進められました。

②の地層処分システムの開発については、例えばスウェーデンでは、上述した 1983 年の報告書（KBS-3）[16]において、図 2-1 に示すように岩盤に直径 1.5m×深さ 7.5m の孔を垂直方向に掘削し、ここに使用済燃料を収納した銅製キャニスタ<sup>13</sup>と呼ばれる容器を定置し、銅製キャニスタと岩盤の間をベントナイト<sup>14</sup>と呼ばれる低透水の粘土で埋めるという地層処分概念 KBS-3 を具体的に示しました。銅製キャニスタは、少なくとも 10 万年間、放射性物質を閉じ込めるように設計されており、このような高い密封性および長期の健全

<sup>12</sup> 1980 年代から 1990 年代にかけて、米国ではネバダ州ユッカマウンテンの凝灰岩層、ワシントン州リッチランドの玄武岩層やテキサス州デフスミスの岩塩層、カナダやスウェーデンでは楕状地と呼ばれる長期にわたって安定した岩体、ドイツではゴアレーベンの岩塩層、ベルギーでは粘土層といったように、幾つかの国では地層処分の候補となるサイトや岩種を早くから特定していた。

<sup>13</sup> スウェーデンでキャニスタと呼んでいる金属製の容器は、わが国ではガラス固化体を封入するオーバーパックに相当する。図 1-1 に示したガラス固化体の一部であるステンレス製のキャニスタは、ガラスと融かし合わせた高レベル放射性廃液を充填し、冷やして固化ガラスとする入れ物であって、人工バリアとして長期間にわたり放射性物質を閉じ込める機能は期待していない。スウェーデンのキャニスタとは、名称は同じでも機能が異なることに注意されたい。

<sup>14</sup> ベントナイトは、火山から噴出し、海底や湖底に堆積した火山灰が風化作用や地熱による熱水作用を受けることによって鉱床が生成された粘土の一つである[18]。ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは、水が浸潤すると膨潤する性質があるため、締め固められたベントナイトに地下水が浸透すると、自身が膨潤して粒子間隙を埋めることで、透水性が小さくなる。

性を保つ銅製キャニスタが製作できるのか、その性能を保証できるのかを確認するための研究開発が積み重ねられてきました。その他の国においても、それぞれが想定する地質環境の条件などを踏まえながら、岩盤と工学的なバリアから構成される地層処分システムについて、具体的な提示が行われてきました。

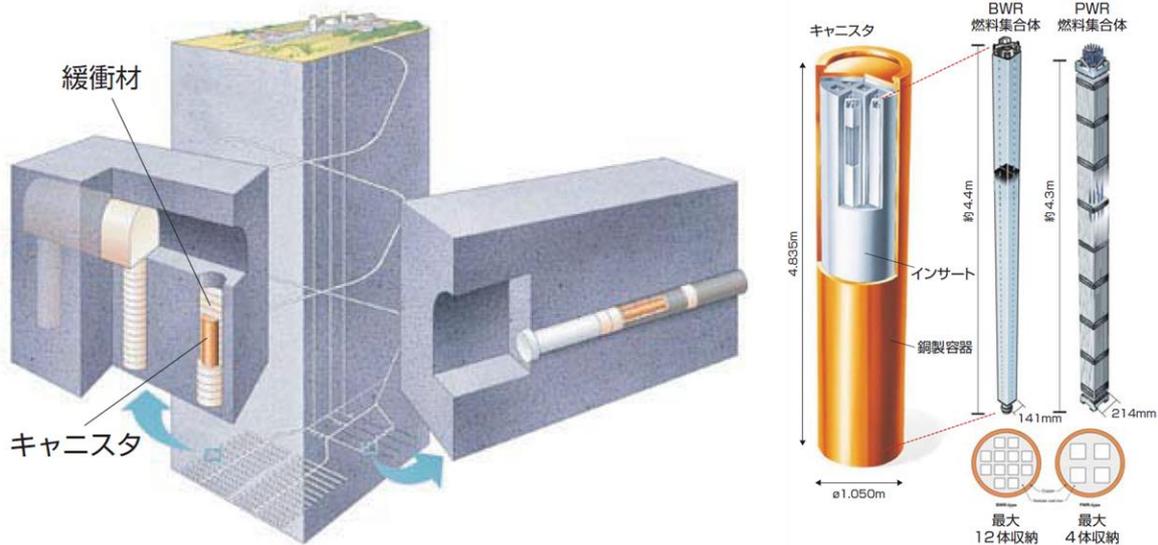


図 2-1 スウェーデンの処分概念 KBS-3（経済産業省（2020）[7]より引用）

③の地層処分システムの将来の安全性をどのように評価するかについては、最も大きな課題でした。数万年以上先の処分場が放射性物質を閉じ込めているかどうかを実際に確かめることはできません。したがって、将来の安全性は、金属製容器から、いつ、どの程度の量の放射性物質が地下水に溶け、これがベントナイトや岩盤を通過していく頃、どの程度の量が地表まで到達する可能性があるか、このような地層処分システムの将来の“振る舞い”をコンピュータによるシミュレーションによって予測的に評価することになります。そこで各国では、金属製容器の長期的な腐食の速さ、ベントナイト中や岩盤中を放射性物質が移行する状況、地下水の広域的な移動状況など、地層処分システムにおいて起こり得る可能性がある現象を把握するための多様な実験を積み重ねるとともに、これらの諸現象を再現するためのシミュレーション技術の開発を進めました。

しかし、数年程度の実験結果を集積したり、シミュレーション技術を進化させたとしても、数万年以上先の評価は不確実性を伴います。そこで、安全性を評価するうえでは将来を「言い当てる」のではなく、不確実なものは不確実なものとして、発生する可能性が非常に低いと考えられる事象も含めてさまざまなことが起こることを想定した「シナリオ」を設定し、そのシナリオが起こった場合でも大丈夫かということを確認する方法が考案されました。例えば、最も典型的なシナリオとして考えられるのは、廃棄物から放射性物質が長い年月をかけて地下水に溶け出し、人工バリアや岩盤に吸着されながら地下水に沿っ

て岩盤中をゆっくり移行し、最終的に地表まで到達した後、人間がその放射性物質を摂取することで被ばくするというシナリオです。これらのシナリオに沿って、時間とともに地下の処分場から地表に向かって放射性物質が移動していく現象を解析し、将来の人間が受ける可能性のある放射線量を評価します。現象を表現する解析モデルが十分に確立していない、解析パラメータの設定根拠となる実験データが少ないといったように不確実性が大きい場合は、考えられる範囲で、放射線量を過小に算定することがないように、あえて安全上厳しい結果が出るようなモデルやパラメータを設定して解析を行います。このように、地層処分では、不確実性が存在することを前提にさまざまなシナリオを設定し、保守的な（厳しい結果となるような）解析によって放射性物質の移行と人間の生活環境への影響について評価を行い、現世代から数万年以上先の将来世代に至るまで、人間が受ける放射線量の評価結果が許容できるレベルを下回るかどうかで、処分場が安全かどうかを判断します。この方法を「安全評価」と呼びます。

各国では、このような安全評価の方法を用いて、地層処分の候補とした岩種の特性と設計した地層処分システムを対象として、処分場から移行した放射性物質によって将来の人間がどの程度の被ばくを受ける可能性があるかを評価しました。その結果、放射性物質が地上に現われるとすれば数万～数十万年後であり<sup>15</sup>、その量は非常に少なく放射能も減衰しているため、人間に与える放射線の影響は十分に小さく、許容できるものであると評価されました。

このような研究開発の過程では、国際的な共同研究プロジェクトが多く実施されました。例えば、OECD/NEA の国際共同研究として 1980 年に開始されたストリパ計画は、スウェーデンの旧鉄鉱山において、地層処分に必要な調査技術や地下深部の基礎的な知見を得ることを目的として、日本を含む 9 カ国が参加し、1992 年に終了するまでさまざまな調査・研究開発が行われました。ストリパ計画以降も、技術テーマに応じてさまざまな国際共同研究プロジェクトが立ち上がり、現在においても技術テーマを変えながら活発に行われています。放射性廃棄物の地層処分は原子力発電を利用してきた各国共通の問題であり、将来の長期間にわたる安全性を論ずる必要があることから、各国がデータや知見を積極的に公開し、これらを国際的に共有して相互に意見交換を行いながら、開かれた研究開発が進められてきました。

---

<sup>15</sup> 処分場から移行した放射性物質が地上にいつ出現するかは、対象とする地質環境や人工バリアの種類に依存するとともに、これらの中で放射性物質が移行する現象をどのようにモデル化し、解析パラメータを設定するかによって結果は異なる。本文に記載のとおり、解析モデルやパラメータ設定の不確実性が大きい場合は、例えばバリア機能を無視したモデル化を行うことや、収着性が低いと見込まれる放射性物質は岩盤にまったく収着しないとした極端なパラメータの値を設定するなど、線量を過小に算定することがないようにあえて安全上厳しい条件で放射性物質の移行を評価する。このような保守的な解析条件の設定によって、計算上、例えば数十年程度で放射性物質が地上に出現する結果になる場合もある。安全評価では、そのような極端な計算上の仮定においても、人間の生活環境に有意な放射線影響を与えないレベルであるかを検討する。

1991年、OECD/NEAとIAEA<sup>16</sup>は、「放射性廃棄物の処分、長期にわたる安全性は評価できるか？」と題する報告書[19]を公表しています。この報告書は、上述したような将来の安全性を科学的に評価する手法について、各国の専門家の意見を集約したものです。この意見集約では、安全評価結果の不確実性を少なくする努力が継続されるべきこと、予測モデルの品質保証や専門家によるレビューなどを行って安全評価結果の信頼性を担保すべきことなど、安全評価を実施する際の留意点を指摘しつつ、地層処分システムが人間および環境に与える長期の放射線影響を評価するための安全評価手法は使用可能であると結論づけました。ここに、地層処分における難問の一つであった数万年以上先の地層処分の安全性をどのように判断するのかについて、手法の基本的構造が確立されたといえます。

### (3) わが国における地層処分の検討

わが国では、原子力発電の商業運転が開始される1966年より前の1962年に、高レベル放射性廃棄物の最終処分について議論が開始され、原子力委員会が取りまとめた当時の報告書[20]では、「深海投棄」ならびに「天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れる」<sup>17</sup>といった方式が挙げられています。しかし、1975年にロンドン条約が発効し、海洋投棄が国際的に禁止されたため、原子力委員会は諸外国の高レベル放射性廃棄物対策を調査し、1976年に「高レベル放射性廃棄物の処分については、当面地層処分に重点をおき、日本の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査研究を進め、今後3～5年のうちに処分方法の方向付けを行うものとし、さらに、昭和60年代から実証試験を行うことを目標とする」とした推進方策を示しました[11]。

以降、当時の動力炉・核燃料開発事業団（現 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA））を中心として、電力会社などの関連機関も含め、わが国における地層処分の研究が各機関で行われました。国際的な共同研究にも参加しつつ、国内の既存の坑道などを利用した地下深部の地質環境に関する基礎的な特性や現象のデータの取得、人工バリアの模擬試験による物質の移行現象の解明やその現象をコンピュータでシミュレーションする技術の開発など、わが国の地質環境の特徴を考慮して、地層処分の実現可能性について調査・研究が進められました[21]。特に、変動帯に位置するわが国の場合、火山活動や地震・断層活動が将来の処分場の安全性に与える影響に関する研究は重要テーマであり、これらの活動に関する科学的知見の集積・分析が進められました。この結果、日本列島の火山活動や断層活動、隆起・侵食の傾向は200万年程度前から大局的には変化しておらず、

<sup>16</sup> IAEA（国際原子力機関；International AtomEnergy Agency）は、原子力の平和利用を促進するために国際連合のもとに1957年に設立された国際的な協力機関である。平和利用に関する技術情報の交換、原子力施設の運転の安全基準作成、軍事目的への転用の防止などを行っている。

<sup>17</sup> 原子力委員会が1962年に取りまとめた「廃棄物処理専門部会中間報告書」[20]には、「岩石層に入れる」という処分方式についての具体的な説明はされていないことから、この方式が地層処分の概念に相当するものかどうかは定かではない。

現在のプレート運動が継続する限り、少なくとも10万年程度はこの傾向が継続するとみなされること、したがって、現在の火山活動や活断層、著しい隆起・侵食の影響が及ぶ場所を避けて、地層処分にとって好ましい地質環境特性を有する処分地を選定すれば、処分場は将来にわたってこれらの自然現象の著しい影響を受けず、地質環境特性の変化は処分場の性能として許容できる範囲に収まる見通しがあることが示されました。

さらに、ガラス固化体を金属製の容器（オーバーパックと呼びます）で包むことでガラス固化体の放射能が高い期間は地下水とガラス固化体の接触を防ぐとともに、ベントナイトを主成分とする緩衝材でこれらを囲むことによって、ガラス固化体からの放射性物質の溶出と周辺岩盤への移動を遅らせる地層処分システムを提示しました。また、わが国の地下深部に広がる岩盤の特性を考慮した地質環境における地層処分システムについて安全評価を行いました。この結果、将来の人間に対する放射線の影響は諸外国の安全基準や自然放射線のレベルより小さく、地層処分システムとして成立するとの検討結果を示しました。

以上のような研究結果の集大成として、1999年、核燃料サイクル開発機構（現 JAEA）は、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ―地層処分研究開発第2次取りまとめ―」[22]（以下、「第2次取りまとめ」といいます）<sup>18</sup>と題する技術報告書を公表し、以下のように結論付けました。

- ・ 地層処分概念の成立に必要な条件をみだす地質環境がわが国に広く存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発された
- ・ 幅広い地質環境条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術が開発された
- ・ 地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発され、それをを用いて安全性が確認された

これにより、「わが国においても地層処分を事業化の段階に進めるための、信頼性のあ  
る技術的基盤が整備された」と総括し、わが国の地層処分はそれまでの研究開発段階から事業の実施段階に移行することとなりました。

そして、「第2次取りまとめ」が公表された翌2000年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、「最終処分法」といいます）が制定され、処分事業の実施に関わる法的な制度が整備されるとともに、地層処分の事業者として原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立されました。

---

<sup>18</sup> 地層処分の研究を進めていた動力炉・核燃料開発事業団（現 JAEA）は、1992年にそれまでの研究開発成果を「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書―平成3年度―」[21]として中間的に取りまとめ、わが国においても地層処分の実現可能性があることを示した。この報告書は、上記の「第2次取りまとめ」に対して「第1次取りまとめ」と呼ばれる。

#### (4) 地層処分の実現性に関する国際的な合意と事業化への移行

ここまで述べたように、1970年代後半から各国で地層処分の実現可能性に関する研究開発が多くの人員と資金を費やして進められました。その結果、地質学、鉱物学、土木工学、原子力工学、放射線医学など広範な分野における科学的知見の分析や収集、膨大な実験や調査、解析の結果などを論拠として、我々が利用できる工学的な方法で地層処分を実施することは可能であり、これによって放射性物質は地下深くにとどまり、数万年以上にわたり人間の生活環境に有意な影響を与えるリスクを極めて小さくできることが示されました。これにより、2000年頃までには、わが国も含めて「地層処分は実現可能」との結論が原子力発電を利用する主要各国で示され、その科学的論拠は、報告書（わが国の場合は「第2次取りまとめ」）としてまとめられ、国際機関によるレビューにより、その信頼性が確認されています。

フィンランドでは2015年11月、政府が事業者であるPOSIVA社に対して、オルキルオトに高レベル放射性廃棄物の処分場を建設することを正式に許可しました。2021年1月現在、これが高レベル放射性廃棄物の処分場の建設が進められている世界唯一の事例であり、2020年代に高レベル放射性廃棄物の処分（操業）を開始する計画としています。また、スウェーデンでは、事業者であるSKBが2009年にフォルスマルクを処分場建設地として選定し、2021年1月現在、政府が立地・建設許可に向けて審査しているところです。フランスでは、地下研究所を建設したビュール近傍の区域を処分場の最終候補地として選定し、事業者のANDRAが2021年に建設許可を申請する予定です。カナダやスイスでは精力的に地質調査が進められており、2021年1月現在、カナダは2カ所、スイスは3カ所まで候補地が絞り込まれています。

このように処分場の候補地（以下、「サイト」といいます）を特定し、建設が開始された国がある一方で、英国、米国、ドイツ、日本などでは、技術的な実現可能性は示されながらも、サイトの選定が必ずしも順調には進んでいません。これは、2.3で後述するように社会的な合意という観点で時間を要していることが一つの要因と考えられます。

## 2.2 地層処分以外の放射性廃棄物対策に関する検討

### (1) 地層処分以外の方法との比較検討

前述のOECD/NEA報告書（1977年）[14]では、地層処分を有望な処分方法として取り上げる一方、地層処分以外の方法として、海洋底下処分・海洋底処分、氷床処分、宇宙処分、核種分離変換などの可能性について検討が行われています。また1980年に米国エネルギー省は、これらに加えて超深孔処分、岩石溶融処分、井戸注入処分といった方法も加えて地層処分との比較・検討を行っています[23]。（これらの地層処分以外の方法について、コラム（5）に補足説明をしています）。

海洋底下処分は、放射性廃棄物を海洋底の下に埋設処分する方法です。例えば、尖った容器に入れた廃棄物を船上から放ち、容器の自重を利用して海底の堆積物中に打ち込む、

あるいは、海洋の底をドリルで掘削して廃棄物を埋める、といったアイデアが示されています[24]。しかし、公海はどの国のものでもないため、海洋底下処分や海洋底処分を認めると無秩序に廃棄物が投棄される恐れがあります。1970年代、世界的な環境問題に対する高まりを受けて、「廃棄物その他の投棄に係わる海洋汚染防止に関する条約」（ロンドン条約、1975年発効）において、放射性廃棄物の海洋底および海洋への投棄による処分が禁止されました。これにより海からアクセスすることで海洋底を直接の対象とした処分の研究は実質的に行われていません。

氷床処分は、南極の厚い氷床の下に放射性廃棄物を処分する概念です。南極は500～600万年間も継続して氷に覆われており、住民がおらず、過酷な環境ゆえに大規模に利用される可能性も少ないことから、OECD/NEA 報告書（1977年）[14]は、氷床処分の場所の第一候補としました。しかし、南極大陸はどこの国のものでもなく、1959年に締結された南極条約により、放射性廃棄物の処分は国際的に禁止されています。そのため、海洋底下処分・海洋底処分と同様、氷床処分の技術的な可能性については実質的に検討されていません。

宇宙への処分については、OECD/NEA 報告書（1977年）[14]では、人間環境からの最も完全な隔離であるものの、実現可能性があるのは小容量のものであること、ロケット発射への高い信頼性が不可欠であるとともに、必要な宇宙技術を有する国のみしか実施できないことは不利であるとしています。結論として、将来における利用の可能性については検討が続けられるべきであるとされましたが、その後、放射性廃棄物の処分に利用する動きはありません。

核種分離変換は、使用済燃料を再処理する過程で、半減期の長い核種を分離し、中性子やガンマ線などの放射線を物質に照射すると別の核種に変わる反応を利用して半減期を短くすることで、放射性廃棄物の放射能が安全なレベルまで低下する時間を短くすることを目指した技術です。OECD/NEA 報告書（1977年）[14]では、核種変換は高レベル放射性廃棄物の処分問題に対する理想的な解決方法と考えられるとしました。ただし、長半減期核種などを分離するプロセスにおいて、新たに発生する廃棄物が地層処分に比較して大きなリスクがないことを示さなければならないとともに、現在および近い将来の技術では実現性があるとは考えられないとされました。実際、現在も実用化の目途は立っておらず、実用化されたとしても、長寿命核種をすべて分離し変換することは技術的に不可能とされています。長寿命核種が残るということは、結局、地層処分が必要ということになります。したがって、核種分離変換は地層処分の代替手段にはなり得ないというのが現時点の判断です[25]。

結論として、上記のような代替手法を考察した結果、OECD/NEA 報告書（1977年）[14]は、安定な地層へ閉じ込めることが最も進歩した解決方法であるとしています。また米国エネルギー省（1980年）は、実現が次世代に持ち越されないように妥当な期間内に開発されなければならないこと、操業終了後の長期間の保守やモニタリングをあてにすべきではないことなどを定めて代替概念を比較した結果、やはり地層処分は優先して開発すべき処

分方法であるとしています<sup>19</sup> [23]。

以上のように、放射性廃棄物の処分方法として、まず地層処分が着目され、1980年前後にほかのさまざまな処分方法と比較・検討されましたが、科学技術的な面での実現可能性、および国際的なルールに即した自国での責任ある処分が可能といった倫理的な観点で、地層処分が最も有望と判断されることとなりました。この結論は、現時点でも変わっていません。

## （２）長期貯蔵に関する議論

地層処分は、放射性廃棄物を地下深部の岩盤に隔離し、数万年以上の長い時間にわたって人間の生活環境に影響を与えないように処分するという、人類にとって初めてのプロジェクトです。それゆえ、確固たる技術的な信頼性が得られるまで、放射性廃棄物は人間が地上で管理し続けるべきではないかとの考えがあります。

前述の OECD/NEA 報告書（1977 年）[14]では、人間の管理による「貯蔵」と人間の手から離す「処分」について議論されています。この報告書によれば、「貯蔵」とは、後に廃棄物の回収が可能であり、そうする意図を持った方法で廃棄物を定置することと定義しています。また、貯蔵は暫定的な措置の一つであって、長寿命の放射性廃棄物問題の最終的な解決策にならないとしています。

それから約 30 年経過した 2006 年、OECD/NEA は、「長寿命放射性廃棄物管理における貯蔵の役割」とする報告書[26]をまとめました。この報告書では、OECD 加盟国において、固形化された放射性廃棄物や使用済核燃料の貯蔵は、これまで数十年間にわたり安全および安全保障が確保された方法によって実施されていること、また、貯蔵施設の改修を周期的に実施するなどにより、さらに数十年間にわたって貯蔵を継続することが可能と考えられるとしています。すなわち、数十年程度の一定期間の貯蔵については、人類の実績としてすでに一定の信頼性が確保されていることを述べています。

放射性廃棄物を長期に貯蔵する動機として、将来技術への期待や、将来世代の選択肢を奪うことは必ずしも倫理的とは言えないという配慮に加えて、国際的・多国間での解決策実現への期待<sup>20</sup>などが挙げられています[26]。例えば、原子力の利用規模が小さいオランダ

<sup>19</sup> 米国では、超深孔処分を地層処分のオプションと位置付け、並行して研究が進められている。

<sup>20</sup> IAEA による「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約」[27]では、放射性廃棄物の自国内での処分を原則としているが、欧州連合（EU）で 2011 年に採択された「使用済燃料及び放射性廃棄物の管理に関する指令」[28]では、「複数の EU 加盟国が共同で、それらの国内にある処分場を利用することに関して合意することができる」とされた。放射性廃棄物の発生者が他国に処分を委託することは、倫理的な観点から好ましくなく、自国での処分が原則というのが国際的な共通認識であるが、廃棄物の発生量が少ない国どうしが共同処分を行うことについては否定されていない。例えばオランダでは、原子力発電所を 1 基しか有しておらず、高レベル放射性廃棄物の発生量が多くないため、他国との共同処分の可能性を視野に入れている。スイスや韓国なども、自国内で地層処分を進めることを基本としながらも、法律によって他国との

では、少量の放射性廃棄物のために地層処分の研究から建設・操業までを行うことは経済的に見合わないとの考えから、他国との共同処分も視野に入れつつ、少なくとも 100 年間の貯蔵を行う方針です<sup>21</sup>。

わが国では、原子力委員会の委託を受けて地層処分の取り組みについて検討を行った日本学術会議（2015 年）[29]が、地層処分についての安全確保の研究、ならびに国民の理解と合意形成を図るための期間を確保するため、原則 50 年間の地上での暫定保管を提言しています。

このように、貯蔵は放射性廃棄物の最終的な解決策にはならないものの、放射性廃棄物対策全体としてみれば、一定の役割を果たすことが期待されています。

一方で、地上での貯蔵は、地下に処分した場合に比べ、自然現象や人的事象など外部からのさまざまな影響を受ける可能性が相対的に高いと考えられます。将来の国家や社会がいつまでも現在のように安定している保証はありませんから、もし誰も貯蔵施設の維持管理をしなくなったとしたら、高レベル放射性廃棄物が野ざらしにされてしまう可能性も否定できません。将来の科学技術の発展や未知なる新技術の出現は、安定した社会と継続的に研究開発に投資できる経済的な裏付けがあってこそ実現可能です。

根拠のない先延ばしは慎むべきであり、原子力発電を享受してきた現世代の責任として、少なくとも廃棄物処分の道筋をつけるため、地層処分を前提に最大限取り組むべきとの考えは、国際的に共有されたものとなっています[30][31]<sup>22</sup>。

### 2.3 社会的な観点からの取り組み

地層処分は、高レベル放射性廃棄物を取り扱うこと、地下深部という通常は接する機会がない場所を対象とすること、数十万年という容易には想像しにくい時間スケールで安全を確保しなければならないなどの特徴を有するプロジェクトです。したがって、科学技術面での慎重な検討は当然として、社会がこのプロジェクトを受け入れられるかなど、社会的な観点でも検討が重要と認識されています。

---

共同処分の可能性をオプションとして残している。

<sup>21</sup> オランダは、貯蔵を当面の廃棄物管理戦略として位置付けており、高レベル放射性廃棄物の貯蔵施設 HABOG は、少なくとも 100 年間は高レベル放射性廃棄物を貯蔵できるように設計されている。

<sup>22</sup> OECD/NEA[30]は、社会構造が遠い将来まで変わらないという想定や技術は進展し続けるという想定を置かず、人間の管理によらない放射性廃棄物の対策を目指すべきであること、また「原子力発電などの利用によって恩恵を受けた世代がその結果として生じた廃棄物を安全かつ恒久的に処分する方法を提供すべきであり、これは世代間の公平の原理である」と述べている。また、「世代間の公平性」に加えて、国民全体で享受した原子力発電により生み出された放射性廃棄物の処分を一部の地域が負担することに対する「世代内の公平性」についても、配慮が必要であることを指摘している。

### (1) 将来の選択肢の確保と段階的なアプローチ

地層処分は高レベル放射性廃棄物の有望な処分方法として国際的に認められている一方、OECD/NEA は、科学が進歩する可能性や社会の考え方が変化する可能性なども考慮し、将来世代が一度選択した地層処分を取りやめる、あるいは別の選択肢を選ぶといった、将来世代の選択と意思決定の自由を残しておくことも、世代間の公平性の観点から必要としています[30][31]。

これを担保するための方策として、「可逆性と回収可能性」、および「段階的アプローチ」といわれる考え方が提唱されています。

「可逆性」とは、一度決定したことを元に戻す、あるいは検討し直す能力のことであり、「回収可能性」とは、一度埋めた廃棄物を回収する能力のことです。地層処分の事業は、サイトの適性の調査から始まり、処分場の建設、廃棄物の受け入れから地下深部に定置する操業、最終的に処分場を埋め戻す閉鎖まで、各国とも数十年から 100 年程度も要する計画です。したがって、事業期間中において、新しい技術の出現や社会的・政治的な変化など、事業を取り巻く環境の変化が生じる可能性もあります。これにより、何らかの理由によって次の世代が別の意思決定をする可能性も考慮し、国の制度あるいは事業者の方針として、事業期間中の可逆性や回収可能性を担保しておくことの必要性が国際的に認識されています。

「段階的アプローチ」とは、事業をある期間やステージによって区切り、その都度立ち止まって、最新の科学的知見を踏まえて地層処分の安全性を確認し、次のステージに進むか否か、進め方の修正は必要ないかを判断しながら、段階的に事業を進めていく考え方です。地層処分は数万年以上先までの安全性を確保するというプロジェクトのため、技術的に不確実なことが存在することは避けられません。ゆえに、最初に立案した計画の通りに物事を進めることに固執するのではなく、その時点で得られている最新の知見や技術開発成果を踏まえて安全性を繰り返し確認しながら、計画を柔軟に見直す余地を残しておくことが、安全確保の観点から必要と考えられています<sup>23</sup>。

将来の選択肢を確保したうえで、次に進むかどうかを段階的に意思決定する事業の進め方は、地層処分を社会に受け入れやすくするという点でも有効と考えられます<sup>24</sup>。

<sup>23</sup> カナダでは、地層処分の実現可能性について、1998 年に政府の諮問機関が「技術的には可能だが、社会的受容性が不十分である」との見解を提出した。これを受け、カナダの実施主体として設立された NWMO は、各地で対話集会、専門家との対話・円卓会議などを行い、これらの議論を踏まえて 2005 年に「最終的には地層処分を行うが、当面約 60 年間は、サイト貯蔵、集中貯蔵を実施するという“適応性のある段階的管理”(Adaptive Phased Management) を行う」と提案した。この適応性のある段階的管理とは、①第 1 期の 30 年間において、原子力発電所のサイト内で使用済燃料を貯蔵管理しつつ、地層処分場のサイトを選定する、②第 2 期の 30 年間において、選定されたサイトの適性調査と技術の実証を行い、③第 3 期から地層処分を開始するが、オプションとして、第 2 期の段階で使用済燃料を一カ所に集め、処分場が利用できるようになるまで中間貯蔵を行い続けるという選択肢をあらかじめ計画に組み込んでおくというものである[7]。

<sup>24</sup> 2004 年の OECD/NEA 報告書「長期的な放射性廃棄物管理に関する意思決定の段階的なアプローチ」[32]では、「放射性廃棄物の長期的な解決策を実施するには、一般的に数十年の期間が必要で、段階的な意思決定

## (2) 信頼構築とコミュニケーションにかかわる取り組み

米国では、ユッカマウンテンを候補地としてサイト調査を行うことを 1987 年に法律で定め、米国の事業者である米国エネルギー省 DOE がサイト調査を進めました。その結果として、DOE は「ユッカマウンテンは地層処分場の候補地として実現可能である」との報告書を 1998 年に公表しました。これを受け、2002 年、米国エネルギー長官がユッカマウンテンを候補地とすることを発表し、地元ネバダ州はこれを承認しなかったにもかかわらず、連邦議会で可決され、ユッカマウンテンが処分場候補地として決定されました。しかし、ネバダ州の反対は根強く、地元政治家の活動もあり、2009 年にオバマ政権が誕生するとユッカマウンテンでの処分計画は中止されました。ユッカマウンテンは、法律上は処分場のままになっていますが、その後の政権における政策は未定であり、事業の先行きは不透明な状況です。

スウェーデンにおいても、1986 年に事業者である SKB が国内の岩盤に関する情報収集を始めた際には、何も知らされていなかった地域住民が処分場にされてしまうと警戒し、各地で反対運動が起きました。その経験を踏まえて、SKB は地元との対話の在り方を見直し、地元との間で長い年月をかけて対話活動を積み重ねることで、2002 年にエストハンマルとオスカーシャムという二つの自治体がサイト調査を受け入れ、2009 年にエストハンマル自治体のフォルスマルクを処分場建設予定地として選定することができました。

以上の事例のように、各国が地層処分の研究開発を本格化した 1980 年代頃は、専門家が地層処分の技術的な可能性を検討し、この結果を受けた政府と一部の関係者が地層処分の政策や候補地などの意思決定を行い、公衆（国民や地域住民）に宣言し、あとはひたすら理解を求めるというスタイル<sup>25</sup>が各国とも中心でした。しかし、地域住民などにとっては、地層処分という初めて聞くプロジェクトについて、自分たちが十分に関与しない形で意思決定が行われても、それを受け入れることは困難といえます。

このため、地層処分事業を進めるためには、政府機関や処分の事業者、専門家などは、市民や利害関係者との対話などのコミュニケーションを図り、一般市民からの疑問などに対応し、信頼を得ていくことが求められるようになってきました<sup>26</sup>。こうした動きは、各国のサイト選定プロセスにおける取り組みにも如実に現れています。例えば、2012 年の OECD/NEA の集約意見「国の取り組みと地元・地域の関与」[33]では、対話やステークホ

---

だけが、主要な立案と実施に関する決定を下すうえでの実現可能な手段と考えられる」としている。

<sup>25</sup> 従来型の公共事業などで見られるような、行政が「決定し、宣言し、防御する」スタイルは DAD (Decide, Announce and Defend) と言われる。

<sup>26</sup> OECD/NEA に設けられた放射性廃棄物管理委員会 (RWMC) では、1990 年代初頭から信頼構築に関する議論を継続している。RWMC は、ステークホルダーの信頼に関するフォーラム FSC (Forum on Stakeholder Confidence) と称する常設委員会を設置し、各国がこれらの方策を実施するためのサポートを行うことを目的として、各国の経験を共有するとともにコミュニケーションを図る効果的な手段などの検討・提供を行っている。

ルダー<sup>27</sup>の関与は、廃棄物管理プロセスの中心的な部分となっており、地元の政治家や市民が当事者として対話に参加し、また、必要に応じ処分場の立地および実施を含む放射性廃棄物管理に関するさまざまな決定において能動的な役割の一つを果たすようになってきているとしています<sup>28</sup>。

わが国においても、国民や地域住民の皆さまとの丁寧な対話の重要性を認識し、国とNUMOは、高レベル放射性廃棄物の地層処分の必要性と地層処分事業の概要に関する全国各地での説明を通して、地層処分事業に関する理解を醸成する活動を展開しています。

## 2.4 最も有望な選択肢としての地層処分

ここまで述べてきたように、地層処分は安全性について科学的・技術的な説明が可能であること、また、自国内での処分が可能であることに加え、何らかの理由で処分を中断して廃棄物の回収が必要となった場合もそれが可能であり、将来世代の選択肢を奪わないように進めることができるといった倫理的な面でも有効であることから、放射性廃棄物の処分方法として最も有望であるとの国際的な共通認識が得られ、現在に至っています。そして、わが国も含めて、各国において地層処分の信頼性を高めるための研究開発を継続しつつ、地層処分の実施に向けた取り組みが進められています。

ただし、各国とも地層処分を中心に進めながらも、ほかの処分方法への変更や将来より良い方法が出現する可能性に配慮しています。わが国でも、可逆性を確保しながら地層処分を前に進めつつ、あわせて代替オプションの研究<sup>29</sup>も進めることが2015年の国の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」[34]に明記されています。

このように、技術的な側面と社会的・倫理的な側面の両方に配慮しつつ、今日の地層処分が進められています<sup>30</sup>。

<sup>27</sup> ステークホルダーは、日本語では一般に「利害関係者」と訳され、組織やその活動について何らかの関わりや影響があり、利益を得たり損害を被る人や組織などのことをいう。OECD/NEAは、放射性廃棄物処分におけるステークホルダーを「放射性廃棄物管理プロセスに利害または役割を持つあらゆる関係機関、団体、または個人」と定義している[40]。わが国の地層処分事業のステークホルダーとしては、規制機関、国、処分場を受け入れる市町村、国民、地域住民、議員、地域の団体、廃棄物発生者（電力会社など）、関係研究機関、専門家、協力業者などが挙げられるが、事業への関与の程度や関わり方などは各国の状況や事業の段階などによって異なる。

<sup>28</sup> OECD/NEAの集約意見「国の取り組みと地元・地域の関与」[33]では、事業者と自治体やステークホルダーとの間の技術的問題や社会的問題を、信頼の強化につなげる形で取り扱えるような協力関係にしていく方法の一つとして、パートナーシップの設置などがみられるようになってきていることが述べられている。

<sup>29</sup> JAEAをはじめとする関係研究機関およびNUMOが参加する地層処分研究開発調整会議が2020年に取りまとめた「地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）」[35]では、代替処分オプションとして使用済燃料の直接処分に関する研究開発および超深孔処分の調査研究を進めることが示されている。

<sup>30</sup> ここまで述べてきた地層処分が国際的に選択されるに至った経緯などについては、「第2次取りまとめ」分冊[23]、増田ら（2015）による日本原子力学会誌の解説[36][37][38]、日本原子力学会（2014）[39]などの報告書にもわかりやすく述べられており、本書も多くを参考にした。

## 第3章 地層処分の安全性を説明するための枠組み

ここまで、地層処分が選択された背景の一つとして、その実現性について科学的・技術的な説明が可能であることを述べてきました。本章では、放射性物質の危険性から数十万年もの将来にわたる安全が確保できることをどのように説明するのか、その考え方について説明します。

### 3.1 セーフティケースの作成

地層処分は、数万年以上の長期間にわたって、その安全性を天然の岩盤に委ねるといって人類にとって前例のないプロジェクトであり、サイトの調査から処分場の建設、操業、閉鎖するまでも100年程度という長期間にわたります。その間にも科学技術は進歩しますし、地下深部に処分場を建設し始めてから岩盤の状況がより詳しく判明することで、後から新しいことがわかることもあります。処分場は、さまざまな不確実性を考慮したうえで十分に安全性の余裕をもたせた設計を行います。場合によっては、後に判明する新事実により、当初の想定よりも安全性に対する余裕が小さい、といった厳しい評価になる可能性もあり得ます。

そのため、地層処分は事業のステージを区切り、その時点の最新の知見や技術開発成果を踏まえて安全性を確認し、次のステージに進むか否か、進め方の修正は必要ないかを判断しながら段階的に事業を進めることを2.3(1)で述べました。事業者は、その各段階において、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もって社会に提示することが必要です。これをステークホルダーが確認し、信頼に足るものと判断されて初めて事業を次の段階に進めることができるという考え方を各国とも採用しています<sup>31</sup>。このような処分場の安全性を示す論拠を説明した文書を「セーフティケース (Safety case)」<sup>32</sup>といいます。

事業者は、セーフティケースの信頼性を高めるよう論拠を集積します。数万年以上の長

<sup>31</sup> セーフティケースの技術的な信頼性を確認するという観点での主たるステークホルダーは、規制機関や専門家などが考えられる。

<sup>32</sup> セーフティケース (Safety case) という用語の発祥は英国である。“case”の意味は、Oxford 辞典によると「討論や論争あるいは訴訟事件の一方の当事者を支援する一連の事実や論拠」とされており[39]、元々は裁判で使われる証拠を意味する。IAEAの安全用語集[12]によれば、“セーフティケース (Safety case)”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」とされているが、単に安全評価の結果を示すだけでなく、安全を確保するために処分施設にどのような機能が必要と考えているのか、安全をどのように確保しようとしているのか、安全評価の結果は信頼性があるとどうしていえるのか、などを体系的に示すことが必要とされる。Safety caseは、放射性廃棄物処分以外にも、ヨーロッパの航空管制システムや、英国の鉄道に対する安全性の保証など、さまざまな産業分野で提出が義務付けられている[41]。セーフティケース (Safety case) という用語は、わが国では一般社会はもとより科学者・技術者のあいだでもあまり普及しておらず、安全説明書、安全報告書、安全文書といった日本語訳の案が検討されたが[39]、セーフティケースの趣旨を端的かつ的確に表す良い日本語訳がなく、今のところ確定した訳語はない。したがって本書では、セーフティケースという用語をそのまま用いることとする。

期間にわたる安全の確保に向けて、ここまで行えば十分という考え方を持たず、不確実性を低減するために次段階に向けて何をすべきかを各段階のセーフティケースにおいて明確にし、調査研究や技術の開発を継続します。セーフティケースが信頼に足らないと規制機関や専門家（技術的な専門家、社会科学など非技術的な専門家を含む）が判断する場合、事業者はセーフティケースの論拠や次段階に向けた技術開発計画を補強します。それでも社会から受け入れられない場合、事業を前に進めることは困難です。

一方で、2.3（1）で述べたように、国や事業者は、処分場の建設が開始された以降も、科学の進歩や不測の事態の発生などによって将来世代が地層処分以外の別の選択を意思決定することを否定しません。処分場の操業を完了し、閉鎖しても良いと判断されるまで、可逆性・回収可能性を担保します。

### 3.2 セーフティケースによる技術的な信頼性の提示

地層処分の安全確保に向けて、事業者は次のことを行います。

#### ① 地層処分にとって好ましい地質環境を有するサイトの選定

サイトの地質環境が処分場の設置に適したものかどうかを調査・評価します。サイトの過去から現在までの地質学的な現象を正しく観察することにより、現在生じている現象の理解を深め、将来の現象を推測します。わが国の場合、火山活動、断層活動などの自然現象の著しい影響が将来にわたって回避されることが見込まれる場所であることを確認します。そのうえで、将来の地下深部の水理場（地下水の流れ方など）や化学場（地下水の化学組成など）といった変化が、処分場の安全機能を損なわない程度の範囲に収まると見込まれる地質環境であるかを確認します。

#### ② 処分施設（人工バリア、地上施設・地下施設）の設計と工学技術の提示

選定したサイトの将来の地質環境の変化も考慮したうえで、十分に安全裕度を持たせて処分施設（人工バリアや地下施設など）を設計します。また、設計した処分施設を建設・操業・閉鎖するための方法や工学技術が利用できる見込みがあることを確認します。

#### ③ 建設・操業・閉鎖期間中における安全性の評価

処分施設を建設・操業・閉鎖する期間中において、放射性物質に対する周辺住民や作業従事者の安全が確保されるかを評価します。具体的には、設計した処分施設の安全対策が何らかの要因によって機能しなくなるという発生可能性が極めて低い事象が起きたことをあえて想定し、その影響を解析によって評価します。それでも有意な放射線の影響が生じる可能性は十分に低いと考えられる（規制機関が示す安全基準を満たす）ことを確認します。安全対策が十分と考えられるまで、処分場の設計を見直し、解析による評価をやり直します。

#### ④ 処分場閉鎖後長期に対する安全性の評価

処分場を閉鎖した以降の長期間にわたり、放射性物質が将来の人間の生活環境に有意な影響を与えない（規制機関が示す安全基準を満たす）といえるかを評価します。具体的には、数万年以上の将来にわたって処分場の安全性を損なう可能性のあるさまざまな事象が起こることを想定し、処分場から放射性物質が地表に到達とした場合の人間にもたらされる放射線影響を解析によって評価します。数万年以上先の処分場の状態を予測することは、知識やデータの不足などに起因して大きな不確実性を伴いますので、2.1(2)で述べたように、安全評価では、発生可能性が低いものを含めてさまざまなシナリオを設定し、保守的なモデル化やデータ設定を行うことで、不確実性を考慮した解析を行います。このような不確実性をどのように評価しているかを含め、安全評価の結果を総合的にみて、将来の人間への放射線影響（被ばく線量など）が許容できる範囲（コラム(3)参照）とみなせるかを確認します。許容できないと判断される場合、地質環境情報の追加取得や処分場の設計の見直しを行い、それでも安全確保が困難と判断されれば、そのサイトをあきらめ別の場所を探すことになります。

以上のように、安全な処分場であると判断するためには、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、その結果として、人間が受ける放射線影響は許容できると見込まれるか（規制機関が示す安全基準を満たすか）といった総合的な説明が重要となります。

そのような説明を支える知識・情報・データ、判断の根拠などは、将来世代も含めて誰もが明確に確認できること（透明性）と、いつ誰がどのような情報をもとに判断したのかをたどれること（追跡性）が必要です。なぜなら、これらのすべてが「この地点において地層処分が安全に実施できる」と判断した論拠（case）であるからです。

これら一連の調査・設計・安全評価のすべての作業について、「品質」をどのように確保したのかも重要です。例えば、地質調査は信頼性が保証された実績のある方法を組み合わせることで、処分場設計や安全評価で用いるさまざまな解析プログラムは実験データとの比較・検証などによって適切な答えを出すものであることを十分に確認しておくこと、実験や解析の結果は学会発表や第三者機関によるレビューを受けてその妥当性の客観的な確認を受けておくことなどが重要です。また、解析に用いる入力データの設定、調査結果や解析結果の解釈など、人が行う個々のプロセスの妥当性について、専門家の参加などによって最新の科学技術的知見が反映されているか、専門知識を有する複数の者がチェックしているかなど、品質を保証する体制や仕組みが確立していることも必要です。

以上のような技術的な検討以外にも、100年程度にもわたる事業において膨大な知識・情報・データを次世代に確実に継承し、人材の確保・育成を適切に行っていく組織としての体制や仕組みを確立することも、地層処分の安全を確保する上での重要な要素となりま

す。

事業者は、処分場が安全に実現できることを説明するため、安全評価の結果が規制機関が提示する安全基準を満たしていることを示すのみならず、上記のような地層処分の安全性にかかわるありとあらゆる情報をセーフティケースに取りまとめます。規制要件として明示されていない事項であっても、ステークホルダーの懸念に答えるために必要な技術的な検討もセーフティケースに含めていきます。このようなセーフティケースによって、安全な処分場を実現するための技術的な信頼 (confidence) を事業者に認めることができるか、ステークホルダーに判断を委ねます。

### 3.3 安全性の繰り返しの確認

地層処分事業では段階的に事業を実施する中で安全性を繰り返し確認します。サイトの調査段階では、段階的なサイトの調査で得られた結果に基づいて処分場の設計や安全性の評価を詳細化しながら、処分場の閉鎖前および閉鎖後長期の安全性を確保できると考えられるサイトを処分場の建設地として選定します。処分場の建設後、および操業を開始して以降も、その時点での最新の情報に基づいて安全性を繰り返し確認していきます。このような中でも、処分場建設地の選定後に規制機関によって行われる安全審査は、特に重要な段階です。サイトの調査結果を踏まえて NUMO が事業許可申請書を国に提出し、規制機関が安全性の確認を行い、その結果に応じて処分場の建設・操業の許可を国が事業者に発給します<sup>33</sup>。そのサイトにおいて数万年以上の安全性を確保できると判断するに足る論拠が集積されたとして、国が処分場の建設・操業のゴーサインを出すのがこの段階です。セーフティケースは、事業許可申請書における安全性の裏付けとして重要な役割を果たします。

さらに重要なのは、処分場の閉鎖の認可です。サイト調査から建設・操業を経て閉鎖にいたるまでの事業期間において得られた情報・データを総動員し、今後、人間が廃棄物を監視しなくても、構築した処分場は将来にわたって確かに放射性廃棄物を隔離し、閉じ込め、将来の人間の生活環境に有意な影響を与えるリスクは許容できる範囲であると判断されて初めて、処分場の閉鎖を国が許可します。閉鎖の判断は、「処分の完了」を意味する地層処分事業にとって極めて重要な段階であり、その判断に至るまで安全性を繰り返し確認し、技術的な信頼性を高め続けることが地層処分の基本です。

こうした重要な判断がなされた後に処分場は閉鎖します。それでも、閉鎖した後も処分場周辺の放射能についてしばらくモニタリングを行い、通常の世界の放射能レベルから

<sup>33</sup> 国によっては、いったん処分場建設の許可を出し、処分場の建設開始後、その時点の安全審査を踏まえて操業の許可を与える二段階の審査体系を取っている国もある。フィンランド、スウェーデンはその方式であり、フィンランドでは 2015 年に国が POSIVA に対して建設を許可し、現在処分場の建設が行われているが、操業開始前に操業許可を受ける必要がある。

変化がないかを監視していくことが考えられます。人間の監視を完全に解く段階にどう移行するか、そのプロセスについては、今後、社会の意向なども勘案して決められることとなります。

地層処分の安全確保の基本は、数万年以上にわたる安全性を考え、処分場を閉鎖するまでの期間も100年程度もかかる事業であるからこそ、事業の進展に応じて拡充される知見や情報を踏まえて、繰り返し慎重に安全性を確認しながら「段階的に」事業を進めていくこと、さらに、ゼロリスクはないとの認識の下で安全性向上への不断の努力を続けることであり、この拠り所となるのがセーフティケースです。

## 第4章 包括的技術報告書の役割

市町村からの応募や国の申し入れにより文献調査を受け入れていただければ、地域の意向に配慮しつつ、NUMOは文献調査、概要調査、精密調査と段階的に調査を進め、処分場の設計や安全評価を詳細にしていきます。そして、サイト調査や技術開発で得られた知見を段階的にセーフティケースに反映し、処分場の建設地を選定した後は、前述したように規制機関による事業認可の申請書に活用する予定です。国の事業認可が得られた以降、建設、操業、閉鎖と事業は進みますが、建設、操業段階においても最新の知見を踏まえてセーフティケースを更新していく計画です。最終的には、すべての放射性廃棄物の埋設が完了し、閉鎖の認可を判断するためのセーフティケースに発展していきます（図4-1参照）。

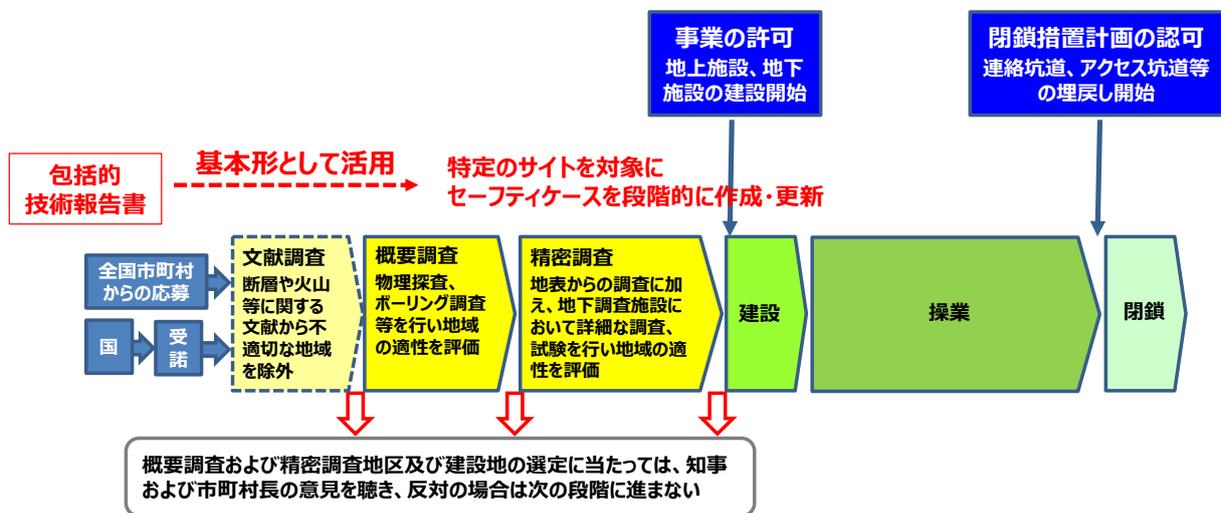


図4-1 事業の進展に伴う段階的なセーフティケースの更新のイメージ

包括的技術報告書は、このようなサイトが特定された以降に更新していくセーフティケースの基本形となることを意図して作成しました。わが国の地下深部に広く分布する岩種の一般的な特徴を表現した地質環境のモデルを作成し、これをいわば仮想のサイトと見立て、これまで蓄積した技術を用いて処分場の設計や安全評価を行うことで、わが国の多様な地質環境に対して地層処分を実現するための技術的な説明を行っています。これらには、JAEAによる幌延深地層研究センターおよび瑞浪超深地層研究所における深地層研究により得られた地下深部における地質環境特性の最新の理解などを含め、「第2次取りまとめ」以降の科学的知見や技術開発成果を反映しています。以上を3.2で示したようなセーフティケースに含めるべき論拠として取りまとめました。包括的技術報告書のサブタイトル「サイト選定に向けた準備としてのセーフティケースの構築」は、このような意図を表しています。

2020年10月、北海道寿都町より文献調査への応募および北海道神恵内村において国が

らの文献調査の申し入れに対する受諾が表明され、NUMO は同年 11 月より両自治体に対する文献調査を開始しました。地域のご了解のもと、調査を先の段階に進めることになれば、上述のように、調査結果やその時点の最新知見を反映して、それぞれの地点で選定したサイトを対象としたセーフティケースを作成していく計画です。包括的技術報告書は、その基盤として活用していくことになります。また、文献調査に関する情報提供を通じて地域の皆さまに事業に対する理解を深めていただくことや、さらに多くの自治体に文献調査を受け入れていただけるよう全国的な理解活動を進めるなかで、包括的技術報告書は、地層処分の技術的信頼性を説明する拠り所として活用していく所存です。

包括的技術報告書は、以下のような内容を取りまとめています。

- ① 安全確保の基本的な考え方
- ② 適切な地質環境の選定技術とわが国の地質環境のモデル化
- ③ 処分場（人工バリア，地上・地下施設）の設計と工学技術の提示
- ④ 閉鎖前の処分場の安全評価
- ⑤ 閉鎖後長期の処分場の安全評価
- ⑥ 技術的な信頼性に関する議論と今後の取り組み

ご興味のある方は、包括的技術報告書をご確認ください（包括的技術報告書は NUMO のホームページ [https://www.numo.or.jp/technology/technical\\_report/tr180203.html](https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html) からダウンロードできます）。

## コラム（1）：「放射性廃棄物が人に及ぼす危険性とは」

もし、何の防護処置もなく、放射性廃棄物が人の身近に存在していたとしたら、どんな危険性があるのでしょうか。

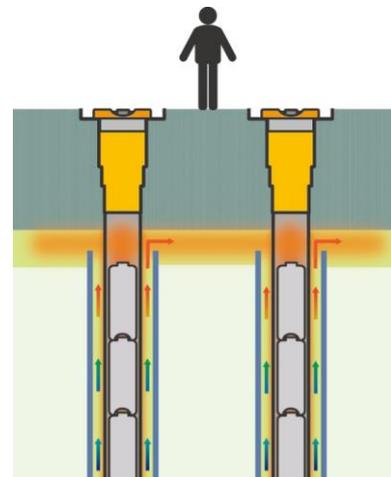
放射性廃棄物によって人が健康被害を受ける可能性としては、次のような状況が考えられます。

- ① 放射性廃棄物に含まれる放射性物質が発する放射線を人間が浴びて、被ばくすること（外部被ばく）
- ② 放射性廃棄物に含まれる放射性物質が何らかの原因で空気中に飛散し、それを人が直接吸い込むことで被ばくすること（内部被ばく）
- ③ 放射性廃棄物に含まれる放射性物質が何らかの原因で周囲の土壌や水に溶け、その水を人が飲料水として摂取したり、土壌や水から放射性物質を取り込んでしまった動植物（肉・魚・野菜など）を人が摂取することで、間接的に被ばくすること（内部被ばく）

したがって、人が放射性廃棄物から影響を受けないようにするためには、放射性廃棄物をコンクリートなどで囲んで放射線を「遮蔽する」対策と、放射性物質が周囲に飛散したり、周囲の土壌や水に溶け出したりしないように「閉じ込める」対策が必要です。強い放射線を出すガラス固化体も、厚さ2m程度のコンクリートによって、参考図-1に示すように人が立っていても問題ないレベルに放射線を遮ることができます。現在、青森県六ヶ所村などに保管されている高レベル放射性廃棄物は、人がしっかり管理した状態で適切に遮蔽と閉じ込めの対策を行うことで、安全を確保しています。



日本原燃(株) 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター（青森県六ヶ所村）  
写真提供：日本原燃(株)



参考図-1 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の貯蔵状況  
（日本原燃（株）高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター）

なお、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）は、ウランやプルトニウムを取り出しており、核分裂を起こす物質はほとんど含まれていないため、自然に臨界反応を起こすといったことはありません。これは、多数のガラス固化体を一カ所に集積しても同様です。また物理・化学的に安定な物質であり、何かに引火して爆発するようなことはありません。

## コラム（２）：「高レベル放射性廃棄物は、どれくらい先の将来までの安全性を考える必要があるのか」

本文 p.5 の図-1.2 に示したように、ガラス固化体の放射能レベルは時間とともに減衰します（図-1.2 の放射能の計算値は、ガラス固化体が 10 万年間破損したりすることなくそのままの状態が維持されると仮定しています）。製造直後のガラス固化体の放射能は半減期 30 年程度の短寿命核種が大部分を占めるため、これらの核種の放射能が減衰していくことにより、およそ 1,000 年後まではガラス固化体の放射能は 99% 以上低下します。しかし、それ以降は長寿命核種の放射能の占める割合が大きくなるため、ガラス固化体の放射能が低下する傾向は鈍化していきます。条件にもよりますが、およそ数万年程度で、ガラス固化体 1 本の放射能は、その元になったウラン燃料の原料となる天然のウラン鉱石（品位（ウランの含有率）1% とすると約 600 トン）の総量をもつ放射能と等しくなります。つまり、自然界に存在していたウランを原料として原子力発電を行うことで、高い放射能をもった放射性廃棄物が発生しますが、この放射能の総量が数万年程度で元となったウラン鉱石が自然界でもっていたレベルまで戻ることを意味します。

これだけ聞くと、数万年程度で自然界に存在する鉱石と同程度になるのだから安全になるという印象をお持ちになるかも知れません。しかし実際には、約 600 トン分のウラン鉱石が有する放射能はかなりの量であり、これと同等の放射能がガラス固化体 1 本に含まれているのですから、人が自由に近づかないように対策をとらなければならないレベルです。

こうした対策として地層処分が考えられているわけですが、では地層処分によって安全性を確保するうえで考えなくてはならない時間の長さは、どのようなものでしょうか。

ガラス固化体を地下数百 m といった深い場所に処分すれば、人間の生活環境から厚い岩盤で隔離されており、放射線は地上まで届きません。また、本文に述べたように、人工バリアを設置して処分しますので、仮にガラス固化体から放射性物質が地下水に溶け出したとしても、それはゆっくりと生じる現象であり、かつガラス固化体に含まれる放射性物質の多くは地下水に溶けきれずに残存するか溶解してもガラス固化体の周りに沈殿してしまいます。また、地下水中に溶けた放射性物質は緩衝材や岩盤に吸着され、将来、放射性物質が地上に現れることを想定しても、少量ずつ、地下水に薄まりながらゆっくりと長い時間をかけて移動するため、その間に放射能は減衰し、地上での放射線影響は非常に小さなものになります。

つまり、地層処分の安全性を検討するために考えるべき時間の長さは、「地下深部に遠ざけたガラス固化体の放射能が安全なレベルまで下がるまで」を考えるのではなく、「将来、ガラス固化体から放射性物質が地下水に溶け出したとした場合の地上での影響がいつ、どの程度になるか」に着目して決める必要があります。

このような考えるべき時間の長さは、放射性廃棄物が有する放射能の時間的な減衰、将来の放射線影響を予測評価することに伴う不確実性、社会的に受け入れることのできる放射線影響のレベルなど、さまざまな観点を考慮しながら、安全規制のなかで決められるのが一般的です。

### コラム(3):「人はどれくらい放射線を受けると危険なのか」

人類は常に自然界(宇宙, 大地, 食物, 空気中のラドン)からの放射線を浴びており, その線量は世界平均で年間 2.4 mSv です。自然放射線量は, 大地(岩石や土壌)に含まれる鉱物などによって地域差があり, 例えばイランのラムサールでは年間 100 mSv を超える値も観測されています[42], 住民の健康への影響は確認されていません[43]。日本の1人当たりの自然放射線量は年間 2.1 mSv (平均) ですが, 国内で最も高い岐阜県と最も低い神奈川県では, 大地から受ける放射線量に年間約 0.4 mSv の差があります[44]。また, 成層圏では宇宙放射線を受けやすいため, 例えば東京~ニューヨークを飛行機で往復するだけで約 0.08~0.11 mSv の放射線を浴びます。しかし, 小さな子供も含めてこれによって健康被害を受けたという報告はなされていません。

では, 放射線はどれくらい受けると「危険」なのでしょう。

広島・長崎の原爆被爆者の疫学調査の結果では, 被ばく線量が 100 mSv を超えるあたりから, 被ばく線量に依存して発がんのリスクが増加することが示されています。100 mSv より低い線量については, 放射線による発がんのリスクはほかの要因による発がんの影響によって隠れてしまうほど小さいため, 放射線による発がんリスクの明らかな増加を証明することは難しいとされています[45]。

一方, 自然界の放射線と, X線検査や癌治療など医療目的の放射線を除いて, 人が平常時に被ばくする放射線量は年間 1 mSv 以下にすることが望ましい, との ICRP<sup>註</sup>による国際的な勧告[46]があります。これは「線量限度」と呼ばれています。上記の我々が日常生活する中で浴びている放射線レベルから考えると, 年間 1 mSv という値は健康への影響を心配する必要がないレベルのように思えますが, これは, 健康に影響があるか否かは関係なく, 原子力発電や核実験などによる本来なら人が浴びなくて良い放射線は, できる限り低い値に抑えるべき, との思想から決められています。「線量限度」という用語で年間 1 mSv という数値が示されると, これを超えるとただちに危ない, という印象を持ってしまいがちですが, その意味は, 人に影響を与えることがないように, 産業活動などに向けて厳しく課せられた管理基準と理解できます。ちなみに, 原子力発電所や医療機関などで放射線業務に従事する人の放射線許容線量は年間 50 mSv と定められています。

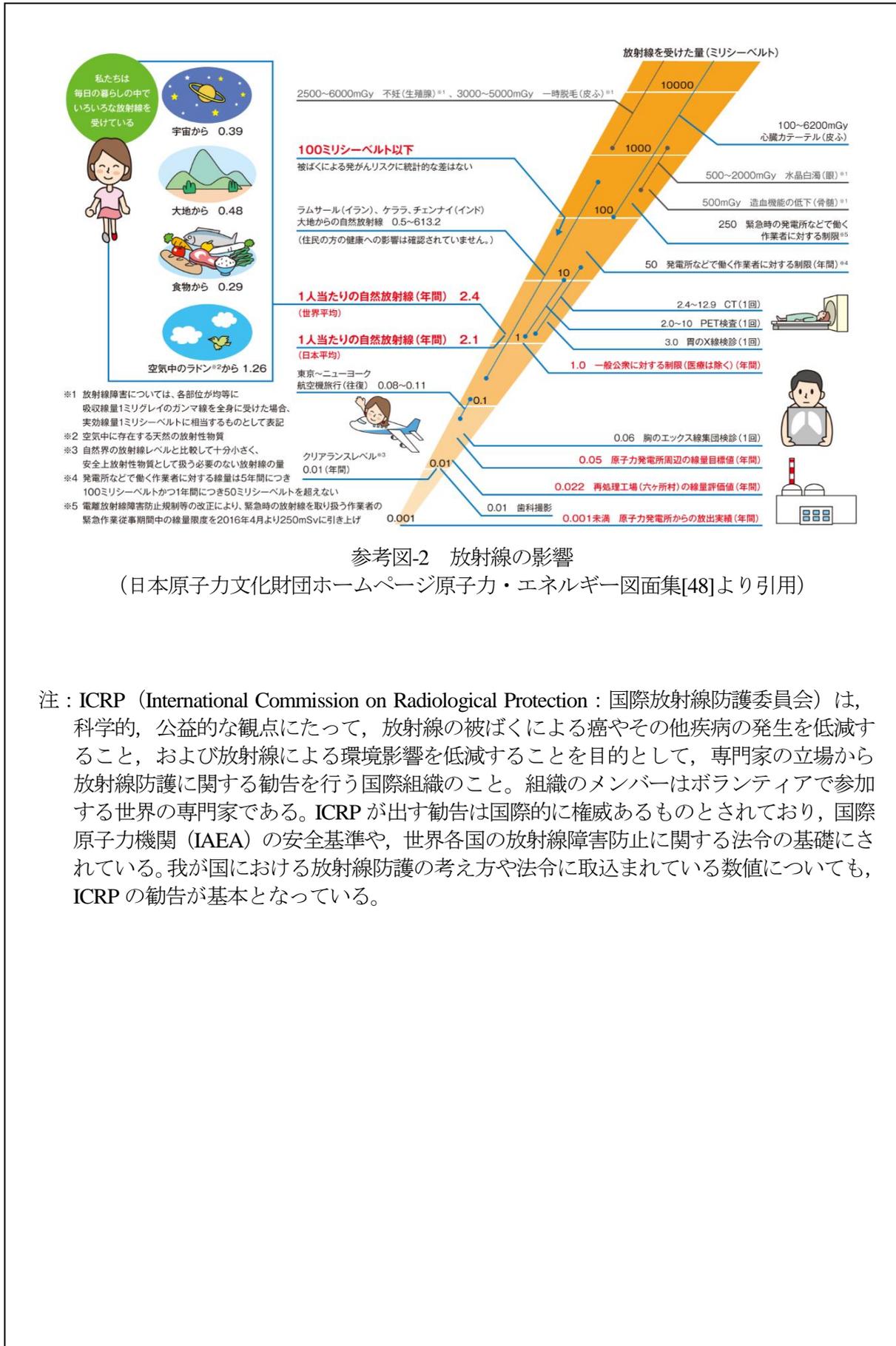
以上のようなことも踏まえながら, 地層処分の放射線基準は決められます。ICRP[46]やIAEA[47]は年間 0.3 mSv を基準とすることを推奨しており, 諸外国の多くもこれを参考に安全基準を定めています。将来数十万年にわたって年間 0.3 mSv 以下に抑えるという基準は, 将来世代も含めて, 放射性廃棄物によって人に影響が生じることがないように, 相当に厳しい基準が定められていると解釈できます。なお, わが国の地層処分に対する安全基準はまだ決まっています。

人に対する放射線の影響については, 学会や団体などから科学的な知見に基づいた正確な情報がわかりやすく説明されています。例えば, 以下のホームページをご参照ください。

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

放射線 Q&A <https://www.qst.go.jp/site/qms/1888.html>

電気事業連合会 放射線 Q&A <https://www.fepc.or.jp/sp/housyasen/qa.html>



参考図-2 放射線の影響  
(日本原子力文化財団ホームページ原子力・エネルギー図面集[48]より引用)

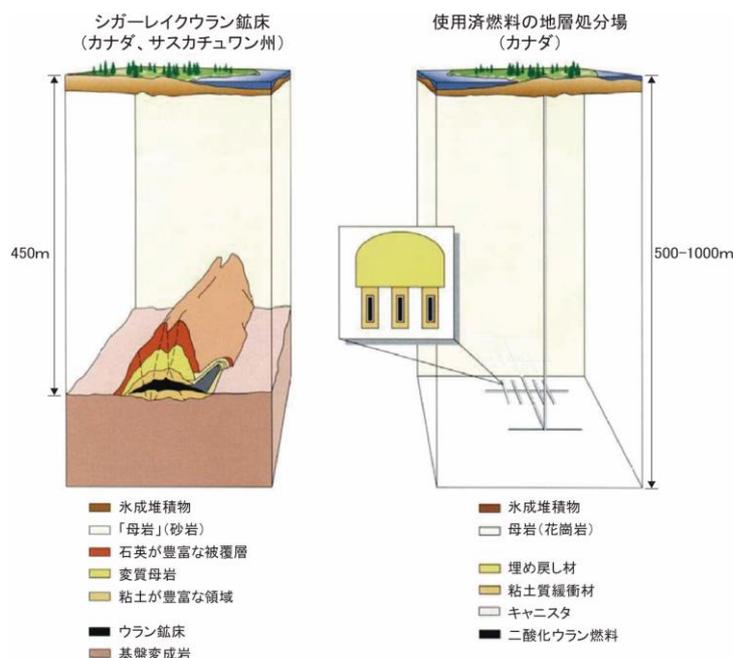
注：ICRP (International Commission on Radiological Protection：国際放射線防護委員会) は、科学的、公益的な観点にたつて、放射線の被ばくによる癌やその他疾病の発生を低減すること、および放射線による環境影響を低減することを目的として、専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行う国際組織のこと。組織のメンバーはボランティアで参加する世界の専門家である。ICRP が出す勧告は国際的に権威あるものとされており、国際原子力機関 (IAEA) の安全基準や、世界各国の放射線障害防止に関する法令の基礎にされている。我が国における放射線防護の考え方や法令に取込まれている数値についても、ICRP の勧告が基本となっている。

## コラム (4) : 「ナチュラルアナログ」

ナチュラルアナログとは、地層処分で想定される現象と類似の天然現象の解明を通して、地層処分の理解を深める考え方です。地層処分では人工バリアや天然バリアが数万年以上の期間にわたって、どのように変遷するか、地下深くに埋設した放射性物質がどのように振る舞うかを、コンピュータシミュレーションによって評価しますが、ナチュラルアナログは、自然界で実際に起こっていた類似の現象を詳しく調査することで、このような評価の信頼性を高めます。

1972年、アフリカのガボン共和国にあるオクロというウラン鉱床で、約20億年前に天然のウランが自然発生的に核分裂反応を起こし臨界状態にあったという証拠が発見されました。20億年前のオクロ鉱床では、核分裂を起こしやすいウラン235というウラン元素が、現在よりも濃度や存在比率が高く、原子力発電所の燃料並みであったこと、またウランの核分裂反応を連鎖的に生じさせる水が存在していたなど、自然に核分裂反応が生じるための幾つかの条件が偶然重なったためと考えられています。この結果、10トン以上の核分裂生成物やプルトニウムが天然の地層で生成されたが、20億年の間、ほとんど逸散せずに残っていることがわかっています(湯佐, 2002[49], Millerら, 2000[50])。

カナダのシガーレイク鉱床は約13億年前に鉱床が形成された後、長期間にわたってウランやウランの壊変によってできた放射性物質が当初の場所から移動しなかったことが知られており、鉱床ができる過程や構造について研究が行われました。その結果、ウランの周りで温度の高い地下水と周りの岩盤が反応して粘土の層が形成され、この粘土層が地下水の流れを遅らせていたことがわかっています。つまり粘土層がウランを取り囲むように存在していたため、ウランが地下水と接触するのを防ぎ、また地下水によってウランが流れ出してしまうことも防いでいたということです。この粘土層はウラン鉱床が形成されたのと同様13億年前に形成されたと考えられています(Millerら, 2000[50])



参考図-3 シガーレイク鉱床 (NUMO (2019) [51]より引用)

このように、放射性廃棄物に含まれる放射性物質と同等の放射性物質が非常に長い期間、地下でとどまっていたという自然の事実は、地層処分の成立性を間接的に示していると考えられます。

ナチュラルアナログは、地層処分で用いる人工バリア材料が長期にわたってどのように変化するかを検討するためにも用いられます。

1995年に、スコットランドで約2000年前にローマ兵によって埋められた数万本以上の大量の釘が発見されました。当時はローマ軍がこの一帯に侵攻していましたが、形勢が不利になったローマ軍が敵に利用されることを恐れて、武器にもなる釘を地中に隠したのではないかと考えられています。発見当時、釘の外側は錆びていたものの、釘の内部はほとんど錆びずに、そのまま使用できる状態だったことがわかっています。釘の内部が錆びなかったのは、釘の外部が浸入してきた地下水中の酸素と結びつくことで表面に錆を生成し、これが保護層となって釘の内部への地下水の浸入を低減したこと、また、錆を生成する際に地下水中の酸素が消費され、錆の内部に地下水が到達しても錆を生成することができなかったことが原因と推測されています[51]。

また、国内においても約750年前の遺跡と考えられている島根県の出雲大社境内遺跡において鉄斧が粘土で覆われた状態で出土しました。出土した鉄斧の錆びの厚さを詳細に調べたところ、錆びの厚さは最大でも2mm程度でした。周囲の地質が堆積層であり、粘土質の場所から出土したこと、接触した地下水がほとんど酸素を含んでいなかったと想定されることが腐食量の少なかった理由と考えられています[52]。

高レベル放射性廃棄物を地下に隔離・閉じ込めるための人工バリアの一つとして鋼鉄製の容器（オーバーパック）を用いることが考えられていますが、ナチュラルアナログの研究により実験室では到底実施できない長期的な鉄の挙動に及ぼす周辺環境の影響を知ることができません。

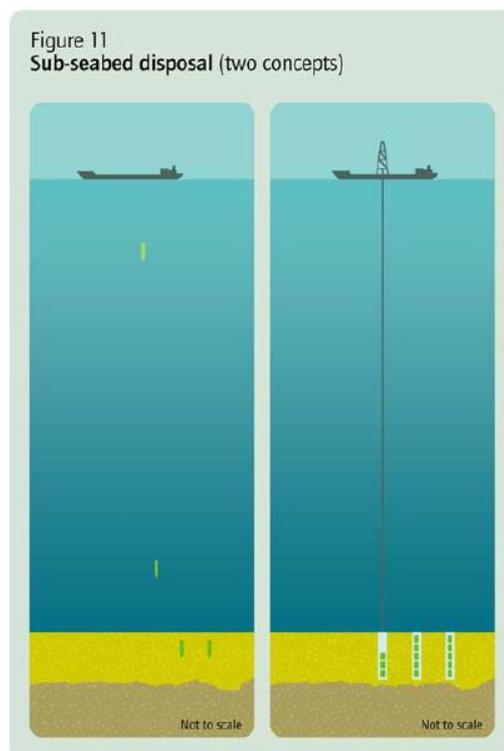
## コラム (5) : 「地層処分以外の処分方法」

地層処分以外の高レベル放射性廃棄物の処分方法について、過去には以下のような方法が検討されています。

### ① 海洋底下処分・海洋底処分（海洋投棄）

海洋への処分については、IAEAの安全用語集（2018）[12]では、(a)海洋底下の深地層（岩盤）に処分する方法、(b)深海部で海洋底上に処分する方法、(c)海底面近くの堆積層の中に処分する方法が記載されています。このうち、(a)は地層処分の一種と位置づけられるため対象外とし、ここでは(b)と(c)をそれぞれ海洋底処分（海洋投棄）、海洋底下処分として本コラムの対象とします。

例えば、海洋底下処分については、参考図4に示すように尖った容器に入れた廃棄物を船上から放ち、容器の自重を利用して海底の堆積物中に打ち込む、あるいは、海洋の底をドリルで掘削して廃棄物を埋める、といったアイデアが示されています（Nirex, 2002）[24]。



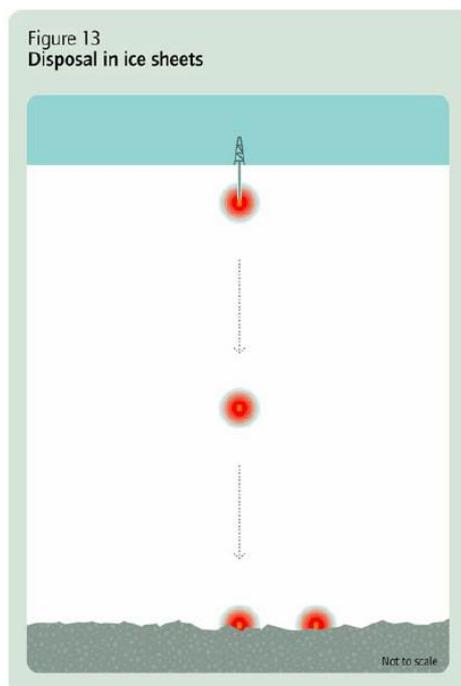
参考図4 海洋底下処分の概念図（Nirex（2005）[53]より引用）

1962年に原子力委員会が高レベル放射性廃棄物の最終処分について議論を開始した際も、当初は深海投棄が挙げられています。しかし、公海はどの国のものでもないため、1970年代の世界的な環境問題に対する関心の高まりを受けて、「廃棄物その他の投棄に係わる海洋汚染防止に関する条約」（ロンドン条約、1975年発効）において、放射性廃棄物を海上から海洋底に処分することが禁止されました。現在、海洋底下処分・海洋底処分（海洋投棄）は、ロンドン条約の存在により実質的に行われていません。

## ② 氷床処分

南極は氷床厚さが最大 4km (平均 2.5km) にも及び、また氷の中は物質が移動しにくいいため、放射性廃棄物を閉じ込めることができる可能性があります。深さ約 3,200m からおよそ 80 万年前にできた氷が採取された例もあり [54]、長期にわたって氷が安定して存在すると考えられます。OECD/NEA 報告書 (1977 年) [14]は、南極は 500~600 万年間も継続して氷に覆われており、住民がおらず、過酷な環境ゆえに大規模に利用される可能性も少ないことから、氷床処分の場所として南極が第一候補であるとしていました。

処分の方法としては、廃棄物の発熱を利用し、氷を溶かしながら廃棄体を氷床の底に沈め、廃棄物の熱が小さくなった後は再氷結されて廃棄物が閉じ込められるという概念が考えられました [53]。しかし、氷床部の物理・化学的な特性はよくわかっておらず、また間氷期・氷期の気候変動サイクル (約 10 万年周期) の間に数百 m の単位で氷の厚さが変わることも、地表 (氷表) との隔離が確実に保たれるかという点で不確定要因となります。何より、南極大陸はどここの国のものでもありません。1959 年に締結された南極条約により、放射性廃棄物の処分は国際的に禁止されました。海洋投棄と同様、氷床処分の技術的な可能性については実質的に検討されていません。



参考図-5 氷床処分の概念図 (Nirex (2005) [53]より引用)

## ③ 宇宙処分

宇宙への処分も検討されました。OECD/NEA 報告書 (1977 年) [14]では、宇宙への処分は人間環境からの最も完全な隔離であるものの、実現可能性があるのは小容量のものであること、ロケット発射への高い信頼性が不可欠であるとともに、必要な宇宙技術を有する少数の国のみしか実施できないことは不利であるとしています。結論として、経済性と安全性には疑問があるが、将来における利用の可能性については検討が続けられるべきであるとされています。しかしその後、放射性廃棄物の処分に利用する動きはありません。

#### ④ 核種分離変換

高レベル放射性廃棄物の中から特に半減期の長い核種を分離し、中性子やガンマ線などの放射線を物質に照射すると別の核種に変わる反応を利用して半減期を短くすることで、放射性廃棄物の放射能が安全なレベルまで低下する時間を短くすることを旨とした技術が研究されています。これは核種分離変換技術と呼ばれ、日本やフランス、米国、欧州連合などで研究が進められています。

OECD/NEA 報告書（1977 年）[14]では、核種変換は、長寿命の放射性廃棄物の処分問題に対する理想的な解決方法と考えられるとされています。ただし、廃棄物を分離するプロセスにおいて新たに廃棄物が発生するリスクなどについても考慮する必要があります。分離変換を適用する意義を見出すためには、通常の地層処分と比べて十分なリスク低減が見込めることが必要であり、結論を出すためにはさらなる研究開発が必要とされました。

当時から 40 年以上が経過した現在も実用化の目途は立っておらず、また実用化されたとしても、すべての長寿命核種を分離することは技術的に不可能とされています。長寿命核種が残るということは、結局、地層処分が必要ということになります。核種分離変換の意義として、高レベル放射性廃棄物の長期的な有害度を小さくできること、地層処分場の面積を小さくできること、廃棄物を処分する前の貯蔵期間を短くできることなどが挙げられています[55]。ただし、地層処分の代替手段にはなり得ないというのが現時点の判断です[24] [56]。

#### ⑤ 超深孔処分

地層処分が地下数 100 m 以深の地下深部に放射性廃棄物を埋設する概念であるのに対し、超深孔処分は地質調査などで用いられるボーリング技術を利用して、より深い例えば 3,000～5,000 m 程度の深度に放射性廃棄物を埋設する概念です。より地下深くに処分することで人間の生活環境からより遠くに隔離し、数千 m の岩盤により放射性物質の移動を遅らせることを意図しています。現状では、3,000～5,000 m といった深い地層の地質環境特性に関する理解やデータの蓄積が不十分であること、ボーリング孔を閉塞する技術や、廃棄物を定置する際にボーリング孔内で何らかのトラブルが生じた場合の対処技術など、実現可能性を示すためにはまだ多くの技術課題が残っています。

#### ⑥ 岩石溶融処分

ボーリング孔などを利用して液体もしくは流動状態にした放射性廃棄物を地下深くに埋め、放射性廃棄物の発熱を利用して周囲の岩石を溶融し、岩石が冷えて結晶化する際に放射性物質と一緒に安定化させる処分概念です。しかし具体的な研究は進んでおらず、実現可能性を検討するまでには至っていません。

#### ⑦ 井戸注入処分

ボーリング孔などを利用して、固化する前の高レベル放射性廃液や、流動状態にした放射性廃棄物を地下深部の地層内に注入して処分する概念です。この場合、注入層は水を通さない層に挟まれていることが必要条件となります。具体的な研究は進んでおらず、実現可能性を検討するまでには至っていません。

## 参考文献

- 1 経済産業省：令和元年度（2019年度）エネルギー需給実績（速報）（令和2年11月18日公表），概要，  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/stte\\_gaiyou2019\\_sokuhou.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_gaiyou2019_sokuhou.pdf).（2021年2月5日閲覧）
- 2 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ：エネルギー基本計画（2018年7月3日閣議決定），[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/180703.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf)（2021年2月5日閲覧）
- 3 経済産業省（2015）：長期エネルギー需給見通し，経済産業省 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会.
- 4 経済産業省（2020）：2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討，  
[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/035/035\\_004.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/035/035_004.pdf)（2021年2月5日鉄欄）.
- 5 日本原子力文化財団ホームページ：原子力総合パンフレット Web版，原子力開発と発電への利用，<https://www.jaero.or.jp/sogo/detail/cat-02-06.html>（2021年2月5日閲覧）.
- 6 日本原燃ホームページ：再処理事業の概要，  
<https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/cycle/summary/>（2020年8月27日閲覧）.
- 7 経済産業省（2020）：諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2020年版）.
- 8 核燃料サイクル開発機構（2003）：ガラス固化体からの放射線量に関する検討（研究報告），JNC TN8400 2003-022.
- 9 日本学術会議（2003）：荒廃した生活環境の先端技術による回復研究連絡委員会，報告 放射性物質による環境汚染の予防と環境の回復.
- 10 National Academy of Sciences（全米科学アカデミー）（1957）：The disposal of radioactive waste on land, Report of the committee on waste disposal of the division of earth sciences.
- 11 原子力委員会（1976）：放射性廃棄物対策について，原子力委員会月報，Vol. 21, No. 10.
- 12 IAEA（2018）：IAEA Safety Glossary, terminology used in nuclear safety and radiation protection（IAEA安全に関する用語集：原子力安全と放射線防護の分野で用いられる専門用語），2018 edition.

- 13 原子力委員会（1997）：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について，原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会.
- 14 OECD/NEA（1977）：Objectives, concepts and strategies for the management of radioactive waste arising from nuclear power programmes（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）.
- 15 National Research Council（全米研究評議会）（1983）：A Study of The Isolation System for Geological Disposal of Radioactive Wastes（放射性廃棄物の地層処分による隔離システムに関する調査），National Academy Press.
- 16 SKB（1983）：Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3, I General, Art 716 1.
- 17 Nagra（1985）：Rapport du Projet, NGB 85-01.
- 18 鬼形正伸（2007）：ベントナイトの特性とその応用，「粘土基礎講座Ⅰ」，粘土科学，第46巻，第2号.
- 19 OECD/NEA, IAEA, CEC（1991）：Disposal of Radioactive Waste, Can Long-term Safety be Evaluated?（放射性廃棄物の処分：長期安全性は評価できるのか）.
- 20 原子力委員会（1962）：廃棄物処理専門部会中間報告書，原子力委員会月報，Vol. 7, No. 5.
- 21 動力炉・核燃料開発事業団（1992）：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—，PNC TN 1410 92—081.
- 22 核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—，JNC TN1400 99-020~99-023.
- 23 U.S.DOE（米国エネルギー省）（1980）：Final Environmental Impact Statement Management of Commercially Generated Radioactive Waste（DOE/EIS-0046F）（商用放射性廃棄物の管理に関する環境影響評価報告書）.
- 24 Nirex（2002）：Description of Long-term Management Options for Radioactive Waste Investigated Internationally（国際的に研究されている放射性廃棄物長期管理オプションの概要），Nirex Report No: N/050.
- 25 原子力委員会（2018）：「エネルギー基本計画（素案）」について（見解）.
- 26 OECD/NEA（2006）：The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste（長寿命放射性廃棄物の管理における貯蔵の役割）.

- 27 IAEA (1997) : 「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約」 .
- 28 Council of the European Union (欧州連合理事会) (2011) : Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste (使用済み燃料及び放射性廃棄物の責任ある安全な管理に関する共同体の枠組みを構築する理事会指令) .
- 29 日本学術会議 (2015) : 提言 高レベル放射性廃棄物の処分に関する政策提言－国民的合意形成に向けた暫定保管.
- 30 OECD/NEA (1995) : The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes (地層処分の環境・倫理的基礎に関する集約意見) .
- 31 OECD/NEA (1999) : Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where do we stand? An International Assessment (放射性廃棄物の地層処分に向けた進展：我々はどこにいるのか／国際的評価) .
- 32 OECD/NEA (2004) : Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management (長期的な放射性廃棄物管理に関する意思決定の段階的なアプローチ), NEA No. 4429.
- 33 OECD/NEA (2012) : Geological Disposal of Radioactive Waste: National Commitment, Local and Regional Involvement (放射性廃棄物の地層処分：国の取り組みと地元及び地域の関与), NEA No. 7082.
- 34 経済産業省 (2015) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針 (平成 27 年 5 月 22 日閣議決定) .
- 35 地層処分研究開発調整会議 (2020) : 地層処分研究開発に関する全体計画 (平成 30 年度～令和 4 年度), 令和 2 年 3 月改訂.
- 36 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之 (2015) : 地層処分概念の変遷, 第 1 回 地層処分黎明期 (1950 年代～1980 年代中頃), 日本原子力学会誌, Vol.57, No.5, pp.19-24.
- 37 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之 (2015) : 地層処分概念の変遷, 第 2 回 地層処分概念の形成と分化 (1980 年代中頃～2000 年頃), 日本原子力学会誌, Vol.57, No.6, pp.34-39.
- 38 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之 (2015) : 地層処分概念の変遷, 第 3 回 地層処分計画の実施段階 (2000 年頃以降), 日本原子力学会誌, Vol.57, No.7, pp.48-53.
- 39 日本原子力学会 (2014) : 「使用済燃料直接処分に関わる社会環境等」研究専門委員会中間報告書, 付録 補足資料 (1) セーフティーケースの日本語訳について.

- 40 OECD/NEA (2013) : Stakeholder confidence in radioactive waste management: An annotated glossary of key terms (放射性廃棄物管理におけるステークホルダーの信頼：主要用語の注釈つき解説), NEA No. 6988.
- 41 田口研治：機能安全とその保証に関する理論的枠組, ZIPC WATCHERS Vol.14, キャッツ株式会社ホームページ, [http://www.zipc.com/instance/watchers\\_top.html](http://www.zipc.com/instance/watchers_top.html) (2020年7月1日閲覧)。
- 42 量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所ホームページ：放射線被ばくの早見表 Ver180516, <https://www.nirs.qst.go.jp/information/news/2013/0729.html> (2020年7月1日閲覧)。
- 43 原子力百科事典 ATOMICA : [https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_09-02-07-02.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-02-07-02.html) (2020年7月1日閲覧)。
- 44 原子力安全研究協会 (2011) : 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定) 。
- 45 内閣官房ホームページ：低線量被ばくのリスク管理に関するワーキンググループ報告書 (平成23年12月22日), [https://www.cas.go.jp/jp/genpatsujiko/info/news\\_111110.html](https://www.cas.go.jp/jp/genpatsujiko/info/news_111110.html) (2020年7月1日閲覧)。
- 46 ICRP (2007) : The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会の2007年勧告) , Publication 103.
- 47 IAEA (2012) : Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-23 “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste”, International Atomic Energy Agency.
- 48 日本原子力文化財団ホームページ：原子力エネルギー図面集, 6-2-1 日常生活と放射線 <https://www.ene100.jp/zumen/6-2-1> (2020年7月1日閲覧)。
- 49 湯佐泰久 (2002) : 自然から学ぶ放射性廃棄物処分の知恵ーナチュラルアナログのおしえー, 資源と素材 Vol.118, p.631-640.
- 50 Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, I. and Smellie, J. (2000) : Geological Disposal of Radioactive Waste & Natural Analogues, Waste management series, volume 2, Pergamon.
- 51 NUMO (2019) : 放射性廃棄物管理のためのアナログカタログ (和訳版), NUMO-TR-19-01.
- 52 核燃料サイクル開発機構 (2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する基礎

知識の構築－平成 17 年取りまとめ－ 分冊 2 工学技術の開発 TN1400 2005-015,  
p.3-87.

- 53 Nirex (2005) : The viability of a phased geological repository concept for the long-term management of the UK's radioactive waste (英国の放射性廃棄物の長期管理のための段階的地層処分場概念の実現), Nirex Report No: N/122.
- 54 情報システム研究機構国立極地研究所ホームページ,  
<https://www.nipr.ac.jp/science-museum/special/ouchi/kikaku2018SMMR/pdf/manabou14.pdf>  
(2021 年 2 月 5 閲覧) .
- 55 原子力委員会 (2009) : 分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方, 原子力委員会 研究開発専門部会 分離変換技術検討会, p.8-9.
- 56 日本原子力学会再処理・リサイクル部会ホームページ: テキスト「核燃料サイクル」  
8-1 「分離・変換の意義」, [http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt\\_8-1.pdf](http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt_8-1.pdf) (2020 年 7 月  
1 日閲覧) .