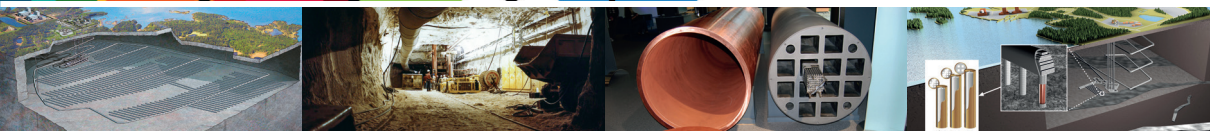


高レベル放射性 廃棄物の管理と処分： 世界の進捗状況と ソリューション



高レベル放射性 廃棄物の管理と処分： 世界の進捗状況と ソリューション

© OECD 2022
NEA No. 7611

原子力機関
経済協力開発機構

経済協力開発機構

OECD (経済協力開発機構) は、37の民主主義国の政府が協力して経済、社会、環境のグローバル化の課題に取り組む、他に類例のないフォーラムである。OECDはまた、コーポレート・ガバナンス、情報経済、高齢化社会の課題など、新たな展開や懸念などを理解し、各国政府の対応を支援するための取り組みの最前線に立っている。OECDは、各国政府が政策の経験を比較し、共通の問題に対する解答を求め、優れた実践を見極め、国内及び国際的な政策の調整に取り組むことのできる場を提供している。

OECD加盟国は、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、チリ、コロンビア、チェコ共和国、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イスラエル、イタリア、日本、ラトビア、リトアニア、ルクセンブルグ、メキシコ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、韓国、スロバキア共和国、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国である。欧州委員会は、OECDの活動に参加している。

OECD出版部門は、経済、社会、環境の課題に関する組織の統計収集と調査の結果、並びに加盟国が合意した条約、ガイドライン、基準を広く普及させている。

本文書はOECDの事務総長の責任の下で発行されるものである。

原子力機関

OECD原子力機関 (NEA) は1958年2月1日に設立された。現在のNEA加盟国は33カ国で構成されており、それらはアルゼンチン、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、チェコ共和国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本、ルクセンブルグ、メキシコ、オランダ、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、韓国、ルーマニア、ロシア、スロバキア共和国、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国である。欧州委員会と国際原子力機関もまた、この機関の活動に参加している。

NEAの使命は以下のとおりである。

- 加盟国が、国際協力を通じて、平和目的の原子力エネルギーの安全で環境に配慮した経済的な利用に必要な科学的、技術的及び法的基盤を維持し、更に発展させることを支援する。
- 原子力エネルギー政策に関する政府の決定や、エネルギーや低炭素経済の持続可能な開発などの分野でのより幅広いOECDの分析へのインプットとして、重要な課題についての権威ある評価を提供し、共通の理解を形成する。

NEAが強みとする特定分野には、原子力活動の安全と規制、放射性廃棄物管理とデコミッションング、放射線防護、核科学、核燃料サイクルの経済的及び技術的分析、原子力に関する法律と責任、及び情報公開が含まれる。NEA Data Bankは、参加国に核データとコンピュータプログラムのサービスを提供している。

本書及び本書に含まれる [統計] データや地図は、いかなる領域の地位や主権、国際的な国境や境界の画定、いかなる領域、都市、地域の名称にも影響を与えない。

OECD出版物の正誤表は、www.oecd.org/publishing/corrigenda からオンラインで入手できる。

© OECD 2020

OECDのコンテンツは私的利用を目的としてコピー、ダウンロードまたは印刷することができ、情報源および著作権者としてOECDを適切に認めた上で、利用者の文書、プレゼンテーション、ブログ、ウェブサイトおよび教材にOECDの出版物、データベースおよびマルチメディア製品からの抜粋を掲載することができる。公共または商業目的での使用および翻訳権に関するすべての要望は neapub@oecd-nea.org に提出する必要があります。この資料の一部を公共または商業目的で複製する許可を求める場合は、著作権情報センター (CCC、info@copyright.com) またはフランス著作権利用センター (CFC、contact@cfcopies.com) まで直接連絡されたい。

表紙の写真：オスカルスハムン (スウェーデン) の深地層最終処分場 (スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社[SKB社]) 。北方向にある2150フィートレベルのステーションを見下ろす主ドリフト坑道 (米国エネルギー省)。核廃棄物のカプセルとオンカク使用済核燃料処分場 (フィンランド、ポシバ社)。

序

原子力機関（NEA）は、あらゆる種類の放射性廃棄物を管理するための社会的に受け入れられる安全で持続可能な戦略の開発において加盟国を支援している。そうした廃棄物には、放射性廃棄物と見なされる使用済み核燃料、原子力施設の廃炉、レガシーサイトと施設、廃棄物の管理が含まれる。NEAは、これらの分野における国家プログラムの開発に関し、政策・戦略・規制面で信頼性の高い権威ある情報を政府やステークホルダーに提供している。本書は、この取り組みにおける最新の刊行物である。

多くのNEA加盟国は、使用済み核燃料と高レベル放射性廃棄物の深地層最終処分場（DGR）の開発に取り組んでいる。DGRは数十年にわたって開発、設置、操業され、何十万年もの間放射線物質を隔離し、封じ込めるように設定・設計されている。DGRは使用済み核燃料と高レベル放射性廃棄物を永久的に処分するための安全で効果的なアプローチであるというのが今日の科学的コンセンサスである。これら最終処分場は、本質的に安全で永続するように設計されており、安全性の維持に人の手による保全・介入を必要としない。本文書は、高レベル放射性廃棄物の管理および処分の課題が今日では適切に対応されていることを確認する、数十年にわたる世界規模の分析を要約するものである。

謝辞

この報告書は、NEAの専門コンサルタントであるTimothy McCartin氏が作成したもので、NEA放射性廃棄物管理・廃止措置課(RWMD)課長Rebecca Tadesse氏が監督と意見を提供した。また、NEA放射性廃棄物管理委員会議長、梅木博之氏（日本NUMO）、国際原子力機関（IAEA）、NEA原子力開発・経済課課長のSama Bilbao y León氏、NEA放射性廃棄物管理・廃止措置課Jinfeng Li氏、NEA政策調整局Gabriella Palos氏の協力を得た。

NEAは、意見や専門家としての見解を提供して本報告書にご協力いただいた多くの個人に謝意を表したい。

目次

エグゼクティブ・サマリー	7
1. はじめに	9
2. 放射線防護基準および安全戦略	11
2.1 放射線防護基準	11
2.2 深層防護安全戦略	12
2.2.1 作業時の安全戦略	13
2.2.2 閉鎖後の安全戦略	14
2.3 放射線基準および安全戦略まとめ	15
3. DGR安全戦略に関する科学的コンセンサス	17
3.1 科学的な協働と調査	17
3.2 安全な廃棄に適したサイト	19
3.3 不確実性の管理	20
3.4 科学的コンセンサスまとめ	22
4. 確立された規制の枠組みと国家政策	23
4.1 明確な役割と責任	23
4.2 可逆的な段階的アプローチ	24
4.3 ステークホルダーからの信頼	25
4.4 規制の枠組みまとめ	26
5. DGRの実施状況 - 長く慎重な道のり	27
5.1 フィンランドでの実施状況 (オルキルオト)	27
5.2 フランスでの実施状況 (Cigéo)	29
5.3 スウェーデンでの実施状況 (フォルスマルク)	31
5.4 実施状況まとめ	33
6. 結論	35
7. 参考文献	37

エグゼクティブ・サマリー

現在、世界中の多くの国が原子力発電所を稼働しているか、またはその建設を検討している。国によっては、経済成長と人類の発展を支えるため、コスト効率がよく安定的なエネルギーへのアクセスを確保しつつ気候変動問題に対応できる原子力はその重要な戦略の一部となっている。しかし、世界の一部では原子力の「持続可能性」について議論が交わされ、特に使用済み核燃料 (SNF) ならびに高レベル放射性廃棄物 (HLW) の長期的な管理ということが持続可能性の面で重要な課題となっている。

約70年前に原子力発電が商業利用され始めた当初より、原子力セクターは、その原料のライフサイクル全体とその影響に責任をもって取り組んできた。これには、厳格な法的枠組みに基づいて運用される廃棄物管理のための先進技術の使用が含まれる。一部の国は、何十年にもわたって、使用済み核燃料 (SNF) を再利用し、最終的な廃棄物量を最小限に抑えることで循環型経済の原則を適用してきた。しかし、どのような場合でも、高レベル放射性廃棄物 (HLW) の最終処分には注意が必要であった。

これまで、国家および国際レベルの政策立案者および科学者たちが、SNF/HLWの安全な廃棄処分を提案、調査、および実施して、現在および将来の世代に対する責任を果たしてきた。安全な中間貯蔵施設を効果的に実装したことで、専門家たちは民主的に透明な意思決定プロセスの中でSNF/HLWの最終管理に向け、堅牢な技術的ソリューションを開発するために必要な時間を得ることができた。

今日の科学的コンセンサスは、SNF/HLWを永久に処分する安全で効果的なアプローチは深地層最終処分場 (DGR) であるというものだ。世界的に認められた放射線防護基準を採用している各国の独立規制当局は、SNF/HLWを人類や環境から隔離するための有効な手段であるとしてDGRを支持している。

SNF/HLWの長期管理の安全原則と技術的ソリューションは今では確立されており、その要件は、資格のある国際機関によって独自に審査の上問題ないと判定されている。これには、さまざまな選択肢とその実装のフィージビリティが考慮されている。

SNF/HLWの深地層最終処分の安全性に関しては、半世紀以上にわたって科学的・技術的なコンセンサスが形成されてきた。また、それに関与する技術に関しては、史上最大級といつていよいよほどの規模で世界中の科学・工学コミュニティが動員されたおかげで入念な分析が行われた。多くの場所で地下研究所 (URL) が建設・運営され、現場での実験が繰り返し実施されている。その結果、今では安全なDGRの設計と建設可能性のための強固な基盤ができあがっている。蓄積された科学的成果、技術的エビデンス、ならびに安全性の実証が世界的に認められた専門家によって公開され、批判的評価を受けることによって現在の成熟レベルに至っている。

その結果、今日では、深地層最終処分場での処分を通じてSNF/HLWを人間環境から除去することが安全かつ環境的に健全であり、科学技術は十分に開発されているという科学に基づいた確信ができあがっている。だが、今日下された深地層最終処分場 (DGR) に関する決定が今後何世紀にもわたって社会に関わり続けることを考えると、すべてのステークホルダーとの十分な対話は不可欠である。

現在、多くの国が低炭素の原子力発電から生じるSNF/HLWを安全に管理・保管しており、現在の廃棄物処理ソリューションは、独立機関が監督する広範かつ厳格な法規制に準拠している。一部の国では、最終処分の産業的展開を推し進めつつある。例えば、フィンランドは2016年に深地層最終処分場（DGR）の建設を決定し、現在建設中のDGRは2023年に稼動開始予定である。スウェーデンでは、DGR建設許可申請が2011年に提出され、政府の決定がまもなく下されるとみられる。フランスでは、長期的なHLW管理のための標準ソリューションとして2006年に深地層最終処分場が選択された。DGRはもはや理論にとどまらず、実証された安全なソリューションであり、現在ではいくつかの国で産業規模で採用されている。この経験が今後、他国が参考とできる確立された土台を提供することになる。

本報告書はDGRの実現可能性を評価するために適用される知識、技術開発、安全基準、規則、および要件の現状を政策レベルで総合的にまとめたもので、SNF/HLWが人間や環境に害を与えることはないという議論に道理とエビデンスを提供するため、いかに科学コミュニティが英知を結集して国際協力してきたかを示している。また、公開コンサルテーションも含め、科学・規制当局やその他のステークホルダーから実現可能性が受け入れられた後の深地層最終処分場プロジェクトの進捗状況についてもいくつかの国について報告する。現在では、科学を根拠にSNF/HLWの安全な管理と処分に向けた人類の能力に確信が高まっている。この確信は、まさに原子力の全体的な持続可能性に資するものといえよう。

1. はじめに

現在、多くの国が原子力発電所を稼働しているか、原子力の利用を検討している。一部のステークホルダーにとって、原子力エネルギーは、発送可能なゼロ・カーボンのエネルギーを大量に低コストで提供できるため、気候変動対応戦略の重要な一角を成す。一方、原子力技術は、特に発電の結果生じる高レベル放射性廃棄物（HLW）と使用済み核燃料（SNF）の管理に関して、疑問を投げかけている。これらの疑問が未解決であるように見られる限り、温室効果ガスの排出量削減が世界的な優先課題となる中、多くの国で低炭素エネルギーの供給に貢献している原子力エネルギーの長期的な持続可能性について議論が巻き起こる。

この文書の目的は、HLWとSNFの長期管理に関する事実情報を提供することで、将来のエネルギー政策を達成するために各国がどのような戦略を採用すべきか、という観点からではなく、安全な長期的ソリューションが今存在しており、産業規模で展開されていることを示すために書かれている。

原子力は少量の放射性廃棄物を生み出し、人や環境への危険性を安全に管理するためには厳格な管理が必要となる。これらの放射性廃棄物は、放射能のレベルと減衰時間/半減期に応じて分類される。これらの2つの要因を使用して、非常に低レベルの廃棄物から、低レベルの廃棄物、中間レベルの廃棄物、および高レベルの廃棄物まで危険度の「レベル」が決定される。民生用原子力では、すべてのSNF/HLWは、原子力発電所の炉心に使用される金属被覆セラミック燃料の利用から発生する。この燃料は本質的な物理的構成を維持するが、一度原子炉で使用されると、非常に放射能が高くなる。放射能の大半は数百年後に減衰するが、放射性核種によっては数千年間存続するものもある。SNF/HLWは、原子力発電所、中間貯蔵施設、再処理施設など、さまざまな原子力施設で安全に管理されている。より長期的には、数十年にわたる地下研究所（URL）での研究と実証を経て、現在では深地層最終処分場（DGR）での最終処分が最適なソリューションであると認識されている。

DGRがこれらの物質を処分するための最良の技術であるという国際的な科学的コンセンサスは、他の原子力施設の安全アプローチとは異なる安全アプローチに基づいている。アプローチが異なるのは、すべての廃棄物が設置され施設が閉鎖された後（多くの場合、閉鎖後期間と呼ばれる）、操業が終了した後も長期間にわたって安全を確保する必要があるためである。DGRの閉鎖後期間は、数千年にわたって存続する放射性核種に関連する危険性を考慮している。DGRは、生物圏から廃棄物を隔離して人や環境との接触を防止するため、地表から数百メートル以上地下の安定した地層（花崗岩粘土や岩塩など）に核廃棄物を封じ込めるよう設計されている。これらの施設は、安全を維持するために、周知の自然法則と深層防護の層に依拠している。

この文書では、数十年にわたる科学的調査および分析によって慎重に開発され導かれてきたDGRにおけるSNFおよびHLWの安全な処分に関する世界的なコンセンサス・アプローチを説明する。ここで説明するように、DGRの堅牢な安全アプローチは、人と環境に対するリスクが極めて低いことを確実にするものである。

2. 放射線防護および安全戦略

SNF/HLW の保管および処分施設は、次の目的で設計および運営される：(1) 人と環境を保護するための国際的に承認され受け入れられた放射線基準に準拠すること、(2) 現在と未来双方で、予期されるか否かにかかわらずあらゆる状況において安全性を確実に維持するための深層防御アプローチの一環として、複数の安全機能またはバリアを利用する安全戦略を実施すること。

2.1 放射線防護基準

放射線防護の科学を推進するため1928年に設立された独立非政府組織である国際放射線防護委員会 (ICRP) は、規制機関および諮問機関に勧告を提供する諮問機関で、主に、適切な放射線防護の基礎となる基本原則に関するガイダンスを提供している。

ICRPは地層処分に特化した勧告を発表した。地層処分に関する最新のガイダンスは、Publication 122 (ICRP, 2013, "Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste"[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])に記載されている。ICRPのPublication 122には、以下のような長期的な危険に対処するための勧告が含まれている。

- 「将来における個人と集団が、現在の世代が与えられているのと少なくとも同じレベルの防護を供与されるべきである」という基本原則に引き続き依拠すること (ICRP, 1998)。最適化原則の適用にあたって、ICRPが勧告する廃棄物処分施設の設計の放射線学的な判断基準は、深地層最終処分場 (DGR) 近辺の潜在的住民に対して年線量拘束値0.3 mSv/年である (それに対し、自然環境から受ける年間のグローバル平均線量は2.4 mSv/年) (UNSCEAR 2010)。
- 防護の最適化 (つまり、放射線量を削減するために合理的なすべてを行うこと) は、DGRの安全機能を強化するために、利用可能な最良の工学的設計技術を含めた防護対策オプションの反復的、系統的かつ透明性の高い評価として最大限に広義に理解されるべきである。
- 3つの主な時間枠が考慮されるべきである。つまり、直接的監視期間 (処分施設が操作中で能動的な監督下にある) と間接的監視期間 (処分施設が部分的または全面的に密閉され、間接的な規則、行政または社会による監視が継続される可能性がある)、さらには遠い将来、処分施設の記憶も失われてしまう可能性がある無監視期間である。

原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR)、世界保健機関 (WHO)、国際原子力機関 (IAEA)、OECD原子力機関 (NEA)、欧州連合 (EU) などの国際機関ならびに放射線防護を担当する国家機関は、個人および環境を保護するための重要な基盤として、ICRPが発表する勧告と原則を認め、それを利用している。すべてのDGRプログラムは、独立ICRPの自主的な勧告および原則と合致する。

たとえば、EUレベルでは、欧州原子力共同体 (EURATOM) の廃棄物に関する指令 (使用済み燃料と放射性廃棄物の責任ある安全管理のためのコミュニティフレームワークを確立する、理事会指令 2011/70/EURATOM 2011年7月19日) は、EURATOMによる放射線防護のための基本安

全基準（電離放射線からの被ばくによる危険から保護するための基本的な安全基準を定めた2013年12月5日付けの理事会指令2013/59/EURATOM）を明示的に参照している。最初の基本安全基準（BSS）指令は、労働者と一般の人々に対して電離放射線からの被ばくからできる限り最大の保護を提供できるよう、1959年に採択された。この指令はその後も定期的に、最新の科学的発見や勧告を考慮して定期的に改正されている。最新のBSS指令は2014年に採択され、2018年2月までにEU各加盟国の国内法に取り入れられた。この新しい指令は、欧州の放射線防護法を近代化し、単一の指令に統合するもので、EU加盟国すべてに法的拘束力を持つ。

2.2 安全戦略

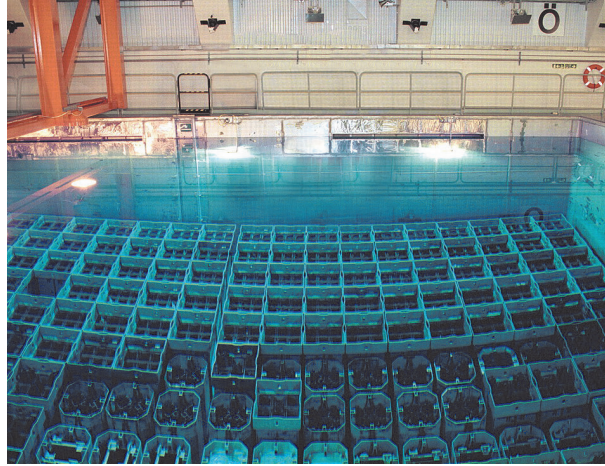
原子力発電で発生する放射性廃棄物を安全に管理する責任は、開発業者、業界、規制当局、国際機関、政府にとって重要な政策課題となっている。放射性廃棄物の処分に関する科学的調査と批判的議論は何十年もの間続いてきた。1970年代から、SNF/HLWの廃棄方法を検討・評価した研究や国際会議が数多く行われている。DGRは世界中のさまざまな母岩で検討されているが、DGRにおけるSNF/HLWの安全な廃棄に関する総合的な戦略は、操業期間即ち閉鎖前期間（廃棄物がDGRで取り扱われおよび配置される期間など）と、閉鎖後期間（すべての廃棄物が配置されDGRを密封後閉鎖した後の期間）の双方についてあまねく受け入れられている。NEA放射性廃棄物管理委員会は1995年に、「The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes（長寿命放射性廃棄物地層処分の環境上および倫理的基準）（NEA, 1995）」と題した集約意見を発表した。

EUレベルでは、EURATOMの廃棄物指令で以下のように述べている。

[...] 現時点では、廃棄物とみなされるSNF/HLWの管理の最終地点として、深地層最終処分が最も安全で持続可能な選択肢であるということがテクニカルなレベルで広く受け入れられている。加盟国は、使用済み核燃料および低レベル、中レベル、または高レベルの放射性廃棄物の管理に関してそれぞれ自国の政策に対する責任を保つ一方で、国家政策に処分方法の選択肢に関する計画と実施を含めるべきである（EU, 2011）。



使用済み燃料の乾式貯蔵施設。
原子力エネルギー協会 (NEI)、米国



湿式貯蔵コンテナ。
Swedish Nuclear Fuel (SKB社)、スウェーデン

2.2.1 操業上の安全 戦略

操業期間（時には閉鎖前期間とも呼ばれる）は、DGRに放射性廃棄物が収納され、作業（取り扱いや配置作業など）による放射線被ばくの可能性が生じた時点から開始する。DGRでの作業は、現在稼働中の他の多くの原子力施設で安全を確保するために使われている、確立された工学設計および操作手順の多くに依存しているが、これら施設は、主にアクティブな安全システム（電動濾過システムの使用、操作手順など）を活用する深層防護アプローチを利用している。このように、原子力施設での放射性物質の取り扱いと使用では、個人が放射性物質にさらされる時間を最小限に抑え、放射性物質の放出を制限し、放射線モニターとアラームを使用してばく露を防止している。また、原子力施設では、放射線物質の放出を防止し、操業中の施設での放射線から人と環境を保護するため、保守プログラム、モニタリングおよび監視計画、などの工学設計と手順はすべて独立した規制当局による点検と監督の対象となっている。

HLWの保管施設には、DGRのために計画されているものとよく似た、あるいは場合によっては同一の活動や機器が含まれる（同様の規模の廃棄物パッケージを運搬するクレーンなど）。DGRにおける操業上の安全は、現在保険施設の安全を維持するために使用されている実証された技術と手順に依拠することができる。IAEA では、世界各国で保管されている使用済み燃料は25万トンあり、12万トンが再処理済みと推定している（IAEA、2018）。この数値は大量に思えるかもしれないが、産業界の基準から言えば実際はかなり小規模といえる。たとえば、米国は1950年代から約8万3000トンの使用済み核燃料を発生させているが、すべてが高さ10ヤード（約9メートル）にも満たない1つのフットボール場面積に収まる量である（DOE、2020）。

保管の選択肢には、プール内で貯蔵する湿式貯蔵とキャスクに貯蔵する乾式貯蔵がある。IAEA では、貯蔵用プールを50年以上の操業実績に基づく成熟技術、乾式キャスク貯蔵システムを30年以上の操業実績を持つパッシブ・システムとしている（IAEA、2013）。乾式キャスクには、劣化メカニズム（熱や放射線へのばく露など）に対する耐性を特に考慮して設計されたキャニスターが含まれている。貯蔵施設は、様々な事故シナリオと、露出燃料の取り扱い作業（キャニスターの搭載時）において安全を維持するよう設計されている。これらは濾過システムを利用して、人と環境を放射線から防護するため、問題となるような量の放射性物質が放出されるのを防いでいる。

放射線から防護するため、SNFを安全に保管してきた数十年間にわたる記録が、処分を急ぐことなく、科学的情報に導かれた慎重なペースでのDGRプログラムの開発を進めることを可能とした。

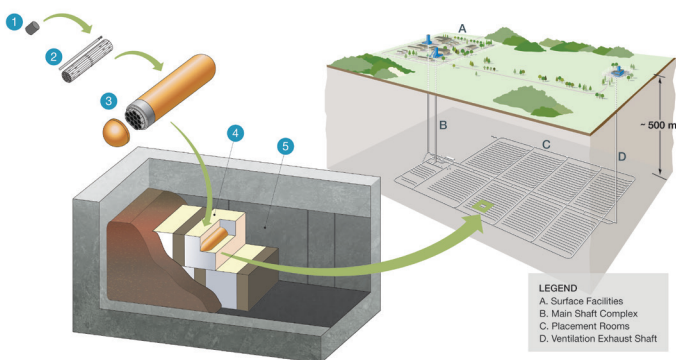
DGRでの操業には、採掘技術や規制も考慮する必要があり、地表施設と比較して地下施設特有の懸念事項がある。しかし、DGRの操業段階は、他の原子力施設（特に貯蔵施設）の現行能力と慣行内で完全に適応可能である。これらのアプローチにより、作業員と放射性物質との間の安全な距離の維持、環境への放射性物質の放出防止、そして操業期間を通じた点検・保守・監視プログラムの実施を確実に行うことができる。大規模な原子力プログラムを有する国は、すでに稼働中の施設を通じて、幅広い実績を積んでいる。多国間協力と場合によっては各国の対等な提携により、他国もこうした経験を活用することができる。

2.2.2 閉鎖後の安全戦略

閉鎖後のDGRの安全戦略には、操業中の施設とは異なる課題がある。操業上の安全戦略は主に、DGR閉鎖前の数十年から1世紀にわたる期間中に存在する施設の作業員によるアクティブな安全システム（操業手順、電力に依存する過システム、点検・保守プログラムなど）に依存する。閉鎖後の安全性では、SNF/HLWに存在する長寿命の放射性核種の高濃度が持続するため、極めて長い期間が考慮されなくてはならない。従ってDGRは、将来の世代のサポートを必要とするアクティブな安全システムに依存するのではなく、パッシブな安全性を具備するよう設計されている（NEA、2013aおよびIAEA、2011）。

パッシブな安全性のための閉鎖後安全戦略は、廃棄物の「隔離と封じ込め」の1つである。環境や人間の活動から離れた場所に廃棄物を隔離するよう、DGRは地中深くにある（例えば、地下数百メートル）。DGRでは、特別に設計された人工バリア（廃棄物パッケージや人工バックフィルなど）を備えた貯蔵施設にSNF/HLWを封入し、この貯蔵施設を放射性物質の移動を抑制して生物圏への放出を抑える特性を有する母岩に設置する。DGRに適した立地の特徴と工学設計を組み合わせることで、放射能がDGRの地下環境内で減衰できる特性が提供される。安定した環境を提供し、よく知られた自然法に従って進化する母岩の特性を通じて、DGRは長期にわたってSNF/HLWを処分場の中に封じ込める。この「パッシブな安全性」によって、DGRは将来の世代による保守や修復作業を必要とせず、非常に長期にわたって人と環境を保護することを可能にしている。さらに、複数の安全機能が存在することでDGRの堅牢性は強化されており、その安全性は（深層防護の原則に定められるように）単一の安全バリアに依存するものではない。

使用済み核燃料に対する
5層のバリア。
カナダ核燃料廃棄物
管理機関 (NWMO)



想定期間が遠い将来まで長期にわたることから、DGRの安全性に関してどれだけ確信がもてるのか、すべてのステークホルダーは疑問を投げかけている。人間の構築物の性能を数百年にわたって保証することは困難だが、DGRにふさわしい地層の中で開発されたDGRは、すでに数百万年かけて形成されてきたこれらの地層で非常に長期にわたって安定した予測可能な環境を提供するという見解に科学者たちは同意している。DGRを埋設するための地層の安定性は、SNF/HLWの長期的な封じ込めと隔離に必要な期間をはるかに超えた地層の安定を裏付ける地球科学の活発な研究から得られたグローバルな地質学的理解に基づくものである。選ばれた母岩には科学的証拠の裏付けがあり、たとえばDGRの記憶が失われたとしても、地質特性と環境の実証済みの安定性によりDGRの完全にパッシブな方法による複数の安全機能が働いてDGRの閉鎖後の安全を示すことが可能となっている。その際、DGRサイトの慎重な選択プロセスが必要であることは言うまでもない。

2.3 放射線防護および安全戦略のまとめ

ICRPが推奨する放射線防護のための勧告とアプローチは、進化する科学的知識を活用して何十年にもわたって開発されてきたものである。これらはEU、IAEA、NEA、および各国の核開発計画によって支持され、適用されている。DGRと一時保管施設の概念の発展に伴い、作業員と住民を確実に保護するため、これらの放射線防護基準が設計に取り入れられてきた。DGRの安全戦略は過去数十年間にわたり、操業活動（保管および取り扱いなど）と閉鎖後数千年の期間の双方を念頭に置いて開発されてきた。DGRは、堅牢な人工バリアと、安定した安全な環境を提供する母岩の特性とを組み合わせることにより、非常に長期間にわたってSNF/HLWを隔離し、封じ込める。DGRの「パッシブな安全性」により、将来の世代による保守や修復措置を必要とすることなく、非常に長期にわたる人と環境の保護が可能となっている。DGRは、安全が単一のバリアに依存しないよう、施設の堅牢性を強化するため複数の安全機能またはバリアを具備しており、これは安全を徹底するための原子力分野における通常の慣行である深層防護の原則に合致するものである。

3. DGR安全戦略に関する科学的コンセンサス

数十年にわたり、SNF/HLWの隔離と封じ込めを目的としたDGRの実現可能性を実証するために、重要な調査と研究が行われてきた。DGRの安全性を調査するため、各国の詳細な取り組みのみならず国際協力イニシアチブも含め、世界中で熟慮された調査が持続的に行われている。今日では、熟慮の結果選ばれたサイトの特性を活用して設計・最適化されたDGRの安全性に関し、科学的なコンセンサスが得られている。数十年にわたる調査の結果、DGRの安全性を実証するために適したさまざまな種類の岩（花崗岩、岩塩、粘土など）の場所が特定されている。

3.1 科学的な協働と調査

DGRの安全戦略は、DGRによるSNF/HLWの長期的な隔離・封じ込めを確実にするため、複数の安全機能またはバリアに依存している。安全バリアとして機能する母岩の特性と人工素材による安全性強化の方法について、地層処分分野で重要な調査が開始したのは1980年代のことである。NEA後援によるストリバ国際プロジェクト（1980-1992年）は、DGRの重要な側面に焦点を当てて、天然バリア（破碎岩内での放射性物質の流れと移動、岩盤の特性評価方法）や人工バリア（緩衝材やグラウトなど）など、さまざまなトピックを検討した。このストリバ国際プロジェクトは、複数国が廃棄物保管用に結晶岩の可能性を検討していたことからストリバ花崗岩鉱山において国際協力することが適切であるとして、現場でのより包括的な研究プログラムの必要性を念頭に立ち上げられたものである（NEA、1993、21ページ）。

研究・共同プロジェクトは1990年代後半から2000年代にかけて拡大し続けた。NEAは欧州委員会と共同で「GEOTRAP」という国際プロジェクトを立ち上げた。このプロジェクトは、フィールドデータの収集ならびに地層における放射線核種のフローと移動のテスト・モデリングに特化してDGRのサイト特性評価と安全性評価を支援するものである。本プロジェクトでは、放射性核種移行予測におけるフィールドトレーサー実験の役割（NEA/EC、1997）、空間的変動の影響のモデリング（NEA/EC、1998）、導水特性の特性評価と表現（NEA/EC、1999）、サイト固有の性能評価のための放射性核種輸送モデルの信頼性（NEA/EC、2001）など、具体的なトピック毎に系統だったワークショップが多数開催された。GEOTRAPプロジェクトには、廃棄物管理機関（開発者）、原子力規制当局（規制当局）、原子力研究機関、大学、科学コンサルティング会社、欧州委員会など40を超える機関が参加した。

今日では、DGRの安全機能とバリアならびにDGRの工学設計と操業に関するアプローチの双方を含むDGRのさまざまな側面が、世界中でURLを利用することによりテスト・評価されている。このような施設は、DGRのサイトとして検討されている母岩の特性や、廃棄物パッケージの性能や放射性核種放出に影響を与える可能性のある潜在的な流入（in-drift）プロセスの詳細な調査を可能にしている（例：バックフィル材質の地球化学的反応、配置、性能に至る結合プロセスの熱効果の評価など）。例えば、URLの調査・研究には、HADES（ベルギー）URLでの放射線核種およびガス移行挙動実験、HADESでの掘削影響領域における粘土母岩の自己密閉挙動の研究、瑞浪と幌延（日本）のURLでのトンネル・ニアフィールド環境における地球化学条件の変化、エスポ（スウェーデン）、東濃（日本）、グリムゼル（スイス）のURLでのトンネル機械掘削と爆破掘削技術の比較、トゥルヌミール（フランス）のURLでの破碎探知の地球物理学的手法の開発、ストリバ（スウ

エーデン)、ユッカマウンテン(米国)、廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)(米国)、アッセ(ドイツ)、モンテリ(スイス)、グリムゼルのURLでのヒーター試験、AECL(カナダ)およびビュール(フランス)のURLでの熱機械油圧試験、グリムゼルのURLでのフルスケールの人工バリア試験、WIPPとビュールのURLでの物質界面における相互作用の試験、グリムゼルのURLでの放射性核種の遅延と移行プロジェクトなどがある(NEA 2013b)。URLはDGRの深度においてDGRの設計と性能の実現可能性を裏付ける必要情報を提供する。また、NEAは、特定の地質媒体を調査している国々が高い関心を示す技術的なトピックを共有しその理解を深めるために、多国籍の共同研究グループを組織し、支援を続けている。具体的には、それぞれ粘土層、岩塩層、結晶質岩を専門とするClay Club、Salt Club、Crystalline Clubなどがある。

研究は、一般的な材料プロセスと、特定の材料、設計、および母岩条件に関連する現場固有の調査の双方で継続している。さまざまな母岩(粘土、花崗岩、岩塩など)に対して、さまざまな廃棄物の形態(ホウケイ酸ガラス、セメントグラウトなど)と、廃棄物パッケージ材料(炭素鋼、ステンレス鋼、銅など)および、バックフィルの材料(ベントナイト、ベントナイトと砂の混合物など)が考慮されている(NEA、2003)。幅広い科学情報によって、安全性の最適化を目的とし、人工バリアの構成要素と母岩の適合性を強化しようとするDGRの開発に利用可能な選択肢が幅広く提供されている(NDA、2016)。例えば、フィンランドのDGRでは、廃棄物パッケージとベントナイトのバッファー設計により、花崗岩母岩での廃棄物パッケージの腐食を100万年以上にわたり最小限に抑え(Posiva 2018)、フランスのDGRでは、粘土母岩での廃棄物パッケージとバックフィル、廃棄セルの設計により、100万年以上にわたり格納場所からの放出を最小限に抑えている(Andra、2016)。

DGR閉鎖後の期間は不確定要因が多々あるが、ナチュラアナログ研究によって地質学的プロセスに伴う長い期間に関する洞察(ウラン鉱体の挙動など)を得ることができる。研究所や現地実験の時間枠をはるかに超えた自然の長期的なプロセスの挙動を理解するため、ナチュラアナログ研究が実施されてきた。DGRで使用される人工素材と放射性核種の長期移動の双方で、ナチュラアナログが特定されている。アナログ研究は1980年代(Chapman、1984)に始まり、今も貴重な知見を提供し続けている(Milowdowski他、2015)。

アナログ情報は決定的な証拠とはならないが、非常に長い期間にわたり、DGRの安全にとって重要な素材の適合性とプロセスの特定に関する追加情報を提供し、DGRの性能に対する信頼性を高める。例えば、リトルハム・コープのナチュラアナログ研究では、締固め粘土環境に埋設された銅金属は1億7,000年以上にわたって安定性と耐食性を示している。また、広範囲の岩塩鉱床におけるブラインポケットのナチュラアナログ研究からは、母岩の安定性が高いことが示唆される(ドイツの例は、2億5,000万年もの間、度重なる氷河期の到来にもかかわらず、わずかな擾乱しか生じなかったことを示している)。また、玄武岩ガラスの研究は、ガラスの分解プロセスに関する定性的な情報を提供している(Milowdowski他、2015)。

3.2 安全な廃棄に適したサイト

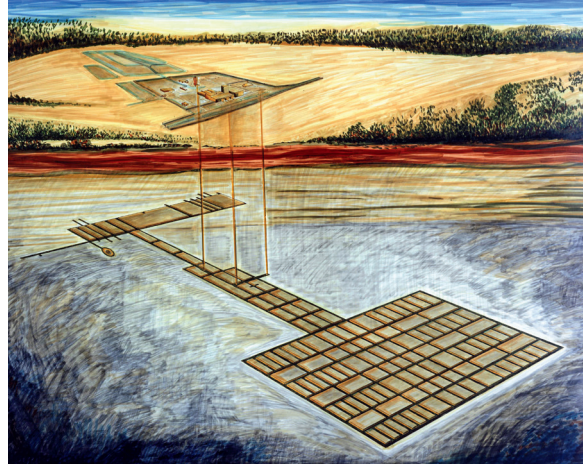
数十年に及ぶ科学的調査の結果、さまざまな母岩におけるサイトがDGRに適した場所として推奨されている。サイト特性調査およびURLに裏付けられ、例えば以下が進行中である。

- 花崗岩母岩(フィンランド)

フィンランドの放射性廃棄物管理組織(Posiva)は、オンカロのURLを含むオルキオトのDGRに関し、20年以上にわたって広範なサイト特性評価プログラムを実施した(Posiva 2012)。2015年12月にはオルキオトDGRの建設が承認されている。



地下で撮影した連続採掘機。
米国エネルギー省



廃棄物隔離パイロットプラント。
米国エネルギー省

- 花崗岩母岩 (スウェーデン)
スウェーデンの岩盤がDGRに適しているかどうかのサイト特性調査は1970年代に開始され、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB) は2000年に優先代替サイトの調査を開始した。エスポのURLでの調査は1990年に開始された。フォルスマルクのサイト特性調査は2002年に開始され、SKBは2011年にライセンス申請を提出した。
- 粘土母岩 (フランス)
フランスの廃棄物管理機関 (ANDRA) は、1990年代からムーズ・オート＝マルヌ地区で広範なサイト特性調査を実施してきた。第1段階では、地球物理学と深層ボーリングを活用した地質調査を地表から行った。ANDRAは2000年からURLを建設・運営しており、2021年には規制当局に対してDGRの建設許可を申請する予定である。
- 粘土母岩研究施設 (ベルギー)
HADESは粘土層における地層処分の可能性を研究するため、深い粘土層に建設された欧州で最も古いURLで、地下225メートルのブームクレイ層に位置し、放射性廃棄物の地層処分の安全性と実現可能性研究における中心的な役割を果たしている。専門家らはこのURLを、深い粘土層で廃棄物処分場を建設・操業・閉鎖するための産業技術を開発・試験するために使用している。科学者たちは、長期間にわたり、深い粘土層において現実的な条件下で大規模な実験を行って、未固結の粘土層における地層処分の安全性を評価している。
- 岩塩母岩 (米国)
米国エネルギー省は1975年、物理検層、岩芯、地球化学的サンプリングと試験、および水理学の試験と分析を含む廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) サイトの特性評価プログラムの一環として、探査掘削を開始した。WIPPサイトは超ウラン元素含有放射性廃棄物の深地層最終処分のためのもので、1999年に操業許可を取得して最初の廃棄物を受け入れた。

今では、的を絞った特性評価プログラムの一環として、さまざまな母岩に適したサイトが提案されている。サイトの選定と規制当局による許可が前進するにつれ、これらのプログラムから得られた情報や教訓が、まだそこまでのプロセスに至っていないDGRプログラムに対する情報提供として活用されることが期待される。

3.3 不確実性の管理

地層処分はその期間が極めて長期であることから、DGRのSNF/HLWを隔離し、封じ込める性能に関して、その信頼レベルとリスクに関して疑問が提起されている。2012年のNEA調査「Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste」では以下のような結論を出している。NEA Mesa Initiative の結論：

懸念される現象の複雑さや考慮されている時間と空間のスケールを考えると、閉鎖後の安全性評価に関する不確実性は不可避であり、処分システムの開発とその安全性の評価においては不確実性の管理が極めて重要となる。これには、関連するすべての機能、事象、およびプロセスが考慮されたかどうかの不確実性、それらの説明および使用するべきモデル化方法の不確実性、および分析に必要なデータの不確実性が含まれる（NEA、2012）。

DGRに関連する不確実性に対処するため多大な努力が行われている。DGRの性能評価における重要な側面の1つは、関連する特徴と事象、プロセスの特定である。NEAは1990年以来、放射性廃棄物管理のための国家プログラムによるこれら要素の特定と分類、選別を支援するために利用可能な電子ツールとして、FEP（特徴、事象、プロセス）データベースを開発し、維持してきた。FEPデータベースは、DGRの安全性評価に関連するシナリオを明確にするために使用するための包括的なFEPのリストを維持して提供している（NEA、2000）。また、各国は、DGRプロセスの挙動を表すために使用されるモデルやパラメータの不確実性を評価してきた。例えば、核廃棄物処分場の安全性評価にとって重要な、さまざまな地球物理学的、水文地質学的、地球化学的プロセスを説明する数学モデルの理解を深めるため、核廃棄物処理の性能評価における地圏移動モデルの検証に関する国際研究（INTRAVAL）が実施された（NEA、1997）。

過去50年間に蓄積された科学的情報は、DGRのセーフティケースにおいて不確実性の検討に役立っている。セーフティケースは、DGRの性能に関する不確実性の影響を、透明かつ包括的に評価するものである：

セーフティケースは、意思決定の土台となるものであり、検討・レビューのために関与する意思決定者に提示されなくてはならない。信頼性の声明では、規制当局、一般の人々、その他のステークホルダーを含む対象読者からの信頼を前提とすることはできない。提示される根拠が適切かつ包括的だと考えるかどうか、また、その確信性について著者に同意できるかどうかを判断するのは読者自身である。しかし、透明性の高い説得力のある方法で主要な論拠を提示し、関連するすべての結果を完全に開示し、それに関するQAおよびレビュー手順を実施することで、セーフティケースの結論に対する読者の信頼を得ることができる。プログラムの後期段階、特にセーフティケースが事業許可申請文書の一部として提出されるまでは、決定すべき事項に関して安全性を損なう可能性のある不確実性や未解決の疑問については、適切な方法で説明されているべきであり、信頼性の声明に反映されていなくてはならない。不確実性が残ることは避けられないが（例えば、母岩の特性評価はプロセス中にその良好な特性に疑問が生じることなく完了することは決してない）、セーフティケースではなぜこれらの不確実性によっても安全性に関する主要な論拠が揺らぐことはないのか、理由を示すべきである（NEA 2013a）。

不確実性のもう1つの原因は、遠い将来、DGRへの偶発的な侵入が発生する（例えば、処分場の深さまで間違っ掘削してしまう）可能性である。セーフティケースの作成においては、偶発的な侵入シナリオの影響が考慮される（NEA、2004および2008a、ICRP、1998）。DGRは天然資源のない地域に位置しているため、探索掘削の可能性は低く、偶発的な侵入の可能性も最小限である。セーフティケースで仮定としての侵入イベントの評価によって、そのような事象に対するDGRの耐障害性を評価するための情報が提供され、侵入の確率をさらに低減して仮定としての侵入の結果生じ得る潜在的な影響を制限するための選択肢を検討できる。

地層処分を支持する科学情報は、すべてのステークホルダーが調査のために利用可能であ

る。DGRプログラムはまた、DGRの不確実性と性能が可能な限り広範に精査されることを保証するために、ピアレビューも可能にしている（例：SKB、2019、NEA、2016、IAEA-OECD-NEA、2002）。不確実性の管理は、DGR設計を構成する複数の安全機能の最適化の重要な部分である。

3.4 科学的コンセンサスのまとめ

科学的コンセンサスは容易に得られるものではない。1980年代以降、SNF/HLWを安全に廃棄するDGRの実現可能性を調査するため、慎重かつ熟慮されたペースで科学的調査が実施されてきた。その結果、地層処分安全性に関しては科学情報やデータの量（および質）が大幅に拡大・改善している。長期的な安全性調査の戦略に沿って、DGRコンセプトの安全バリア（廃棄物パッケージ、バックフィル素材、サイトの特性評価など）を評価するための調査が実施されている。廃棄物を隔離して封じ込め、不確実性を管理するため、DGRを工学面から調査して最適化し、情報を収集して特定の岩石特性の理解を深めることを目的として、多数のURLが建設された。すべての科学情報は、オープンな科学的対話の一環として、誰にでも利用可能であり、この科学的な対話が、DGRが提供する安全性の理解を継続的に深めるための建設的な議論とピアレビューの場を提供している。今日ではDGRがHLWとSNFの処分に最良のソリューションを提供するという科学的なコンセンサスが形成されている。

複雑な取り組みには不確実性が伴う。DGRに適したサイトの選定はもはや問題ではなく、さまざまな岩種で適切なサイトが特定されている。良好なサイトは地層が安定していることからDGRの性能を最適化する安定した環境を提供し、DGRの安全性を実証・保証できるよう、不確実性の評価と責任ある管理を可能にする。URLの実証結果に基づき、DGRは安全な廃棄処分ソリューションを提供するという科学的なコンセンサスができあがっている。

4. 確立された規制の枠組みと 国家政策

DGRの規制の枠組みと国家政策には、委員会、公開討論、市民会議、コンサルテーション・プロセス、法的枠組み、議会セッションなどが含まれる。DGRプロジェクトでは、技術設計と社会的受容を確固とした科学的コンセンサスと平行して改善することで共同構築することが不可欠である。DGRプログラムには、学際科学的、技術的、組織的、社会的、ガバナンス上の問題が関わっている。実施段階全体を通じてDGRプログラムが一貫した安全プログラム内で完了することを確実にするには、強力な規制の枠組みと国家政策を世界各国で整備することが必要である。

4.1 明確な役割と責任

DGRの開発と操業には長期間（100年単位）が必要であるため、DGRを一貫した安全プログラム内で完了するには、関連組織および政府機関すべてに対して明確な役割と責任を規定する必要がある。特に、欧州核廃棄物指令2011/70/EURATOMは、将来の世代に過度の負担をかけないように、使用済み燃料と放射性廃棄物の責任ある安全な管理のための共通の枠組みを確立するもので、EU加盟国は、使用済み燃料および放射性廃棄物管理において高水準の安全性を確保するため、規定を定めなくてはならない。この一連の責任は、人と環境の保護にとって重要なすべての要素に対処するため原子力施設に適用される要件を明確にしかつ管理するとともに、管理手順の役割と要件を明確にしている。この欧州指令では、加盟国が定期的（3年ごと）に欧州委員会に進捗状況を報告するとともに、少なくとも10年ごとに国レベルでの枠組み、管轄権を持つ規制当局、および/または国家計画の国際的なピアレビューを招聘することが義務付けられている。

IAEAが取りまとめた「IAEA使用済み燃料管理の安全と放射性廃棄物管理の安全に関する共同条約（IAEA Joint Convention on Spent Fuel and Radioactive Waste Safety and on the Safety of Radioactive Waste Management）」には83カ国が調印した。このプロセスでは、各国が放射性廃棄物の安全な管理義務実施状況を3年ごとに報告しなくてはならない。報告には各国の政策や規制で義務付けられている規制当局や開発業者の活動と義務が含まれ、開発業者、規制当局、政府の活動を含む、使用済み燃料管理分野における最新の動向が示される。安全性に関する意思決定の独立性と、閉鎖後長期にわたる記録の監視と保存の継続、安全性に関する意思決定とステークホルダーの関与の透明性を確保するために、役割と責任が明確にされている。

DGRプログラムには、安全規則および手順への準拠を徹底するために、安全レビューならびに監督を実施する独立した規制枠組みが適用される。高レベル放射性廃棄物の地層処分がどう開発されるのかを説明する文書（規制、ガイダンス文書、政府の発令、政策文書など）の組み合わせは国によってそれぞれ異なるが、DGRプログラムを実施するための基本的なプロセスは本質的に同じである（NEA、2013a、IAEA、2011、ANDRA、2016、SKB、2011b、STUK、2013）。EUレベルではDGRプログラムはEURATOMの廃棄物指令による法的指針に従って全加盟国が実施し、欧州委員会が定期報告義務に基づいてそれを監視している。

4.2 可逆的な段階的アプローチ

DGRは開発期間が長く、地下工事中や廃棄物の埋設中、およびその後処分場を永久に閉鎖するまでの観察期間中、入念に計画された試験プログラムを通して処分場の性能に関する知識を深めるため、より詳細な情報を収集し、調査するための時間がある。従って、各段階でこの情報の評価を行うことにより、次の段階に進む決定の妥当性を裏付けることができる。この点に関して2004年に開催されたNEAワークショップの参加者は、次のような結論を出している。

廃棄システムの進化に関連する不確実性は、処分場の開発プログラム全体を通じて適切に考慮し、管理されなくてはならない。段階的な開発プログラムの各段階では、不確実性分析を通して確立されたその時点での技術的信頼レベルで、長期的な安全性の実現可能性に対する適切なレベルの信頼に基づいて決定する必要がある (NEA, 2005)。

フランスの処分場プログラムではこの段階的なプロセスを、調査とデータ収集を継続するために使用される継続的学習プロセスと的確に言い表している。この審議型のアプローチにより、開発プロセス中における意思決定の逆転、設計や計画の変更なども含め、処分場の開発の進行とともに信頼性を高める機会が提供される (NEA, 1999, NARC, 2003, IAEA, 2011)。

段階的プロセスの一環としての継続学習では、処分プロセスをその実施段階で適宜改善することができ、適宜必要に応じて安全性を高めるための幅広いオプションを検討する柔軟性が提供されて、決定を覆すことができる。可逆性の明確な目標は、地層処分場の開発中も情報が継続的に収集される中で意思決定者に利用可能なあらゆる選択肢を提供することである。

国際原子力機関 (IAEA) による「Specific Safety Requirements for Disposal of Radioactive Waste (放射性廃棄物の処分に関する個別の安全要件)」(IAEA No. SSR-5, 2011) では、以下のよう規定されている。

「放射性廃棄物の処分施設は、一連の段階を通じて、開発、操業および閉鎖されなければならない。これらの各段階は、サイト、設計、建設、操業および管理のオプションならびに、処分システムの性能と安全性の繰り返しの評価によって必要に応じて支えられなければならない。」(要件11: 処分施設の段階的開発と評価 (IAEA, 2011))。

この「継続的学習」の原則は、EURATOM廃棄物指令に記載されている。

処分施設の実施と開発には数十年かかるため、多くのプログラムでは、サイトの状態や処分システムの進化の可能性に関する新しい知識を導入する場合など、柔軟性と適応性を維持する必要性を認識している。放射性廃棄物の地層処分の実施に関する技術プラットフォーム (Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform : IGD-TP) の下で行われる活動により、この点に関する専門知識や技術へのアクセスが容易となるだろう。そのためには、操業・設計基準としての可逆性と回収可能性を処分システムの技術開発の指針として使えるかもしれない。ただし、これらの基準をもって、正当な閉鎖理由を持つ、適切に設計された処分施設の代わりとするべきではない。放射性廃棄物と使用済み核燃料の管理は最先端の科学技術に基づいているため、妥協が必要となる (EU, 2011)。

4.3 ステークホルダーからの信頼

DGRの社会的受容性は国によって、また、個々の国の中でもさまざまなステークホルダーによって大きく異なる。過去20年間にわたり、多くの国際グループがステークホルダーとの対話のアプローチ方法やDGRのセーフティケースの透明性を評価・改善し、ステークホルダーの関与を強化するためのアプローチを探ることに専念しており、多岐にわたるコミュニケーション方法（パンフレットやタウンホールミーティングなど）を活用して、DGR関連情報のステークホルダーへのコミュニケーションを改善し、ステークホルダーが懸念を表明したり質問したりできるようにしてきた。NEA放射性廃棄物管理委員会は2000年に、ステークホルダーとの対話や、共通の信頼感の醸成、情報に基づく同意、放射性廃棄物管理ソリューションの受容について学習を促進するために、「ステークホルダーの信頼に関するフォーラム（FSC）」を設立した。「FSCの経験は、公共の信頼と信任を得るためには、技術要件に加えてリスクと安全に関する社会的な懸念に対処する必要があることを示している」（NEA 2015）。この点に関し、FSCはDGRプロセスにおける信任を高める取り組みの一環として処分施設がコミュニティによる監督とスチュワードシップを可能にすることを推奨しており、各国はステークホルダーの関与と参加を促すための取り組みを行っている（例：環境に関する、情報へのアクセス、意思決定における市民参加、司法へのアクセスに関する条約〔オース条約〕など）。

例えば、2019年6月に放射性廃棄物に関する欧州共同プログラム・プロジェクト（EURAD）が始動した際には、EURATOMの放射性廃棄物管理に関する研究プログラムが大きく変更された。このプロジェクトには、市民代表者に加え、各国の放射性廃棄物管理のための研究開発プログラムで公式な役割を持つすべての関係者が参加している。EURADは、戦略的研究アジェンダとロードマップを作成し、その活動（戦略的研究アジェンダに記載）を放射性廃棄物管理プログラムの段階ごとに典型的なマイルストーンと関連付けた。EURADには、廃棄物管理組織間の協力から始まり、IGD-TPを経て、SITEXプロジェクトの技術安全組織間における同様の協力に至るまでの長い歴史がある。当初はEURATOMが資金面を支援していた双方の活動は今では自律的なフォーラムとして継続している。また、いくつかの研究機関がEURADSCIENCEを立ち上げた。IGD-TP、SITEXも独自の戦略的研究アジェンダを策定し、すべてEURADに提出され、市民団体からも意見が寄せられている。

ステークホルダーの信頼を得るには、科学的な開放性と透明性が重要である。地層処分を支持する科学情報は自由に調査できるよう開放されている。数十年にわたる調査研究とDGRの安全機能の性能に関するオープンな議論を通して、DGRコンセプトの実現可能性と安全性に関する国際的なコンセンサスが形成されてきた。同時に、他の技術分野と同様、コンセンサスは全員の意見が一致していることを示すわけではない。DGRの研究に取り組んでいる科学コミュニティは、コミュニティ全体の知識と理解を継続的に向上させるため、現状に異論を唱えるオープンで建設的な議論やピアレビューを継続している。DGRプログラムの透明性により、委員会、公開討論、市民会議、コンサルテーション・プロセス、法的枠組み、議会なども含め、技術的視点と社会的視点の双方から、プロセスがより堅牢なものとなる。これらの枠組みはすべて、確固とした科学的コンセンサスを形成する一方で技術設計と社会的受容を平行して改善しつつプロジェクトを共同構築するために不可欠である。

4.4 規制の枠組みと国家政策のまとめ

廃棄処分プログラムを前進させるためにはDGRの安全性に対する確固とした科学的裏付けが絶対に必要な基本的要素であるが、それだけではない。DGRプログラムには、学際的な科学、技術、組織、社会、ガバナンスの問題が関わっている。開発と実施を責任をもって適切に進めるためには、明確な規制の枠組みと国家政策が必要である。DGRの開発と操業には長期間（100年単位）が必要であるため、DGRを一貫した安全プログラム内で完了するには、関連組織および政府機関すべてに対して明確な役割と責任を規定する必要がある。数十年にわたるオープンな調査研究とDGRの安全性に関する議論を通して、DGRに関してすべてのステークホルダーがアクセスして調査できる透明な科学的コンセンサスが強化されてきた。

DGRプログラムの実施にはさまざまなアプローチが使用されているが（例：法規制、規制上の要件、ガイダンス、提言など）、安全で責任あるDGRプログラムの一環として使用される原則とアプローチは、本質的にすべての国に共通するものである。現在の規制枠組みと国家政策は、DGRの安全性の実現をさらに促進する確固とした科学的コンセンサスを得る過程で技術設計と社会的受容を並行して改善することによりDGRプロジェクトを共同構築するために不可欠である。

5. DGRの実施-慎重な長い道のり

慎重な長い道のりを経て、科学的コンセンサスを形成しつつ確固とした規制枠組みを作り、政府が政策を示してきたことで、DGRプログラムは現在と将来の世代を保護しつつ事業段階に入っている。別表に、DGRサイトの選定、建設許可申請、建設開始において前進している9カ国のDGRプログラムのスケジュールを示す。

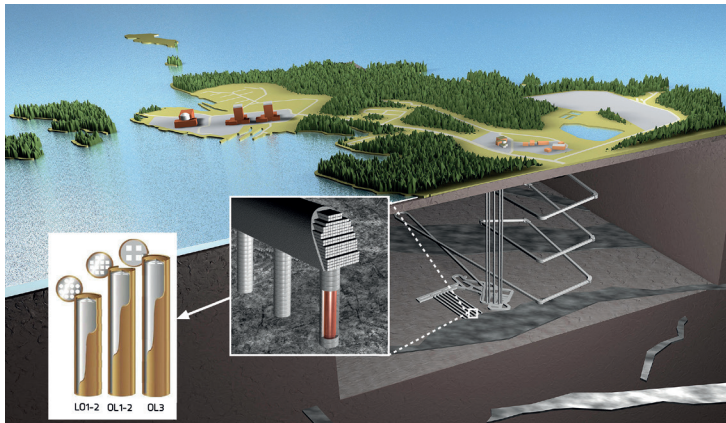
これらDGRプログラムで前進している国々は、建設許可申請を提出する前に、裏付けとなる情報の調査・収集・批判的評価に約30年を費やしている。この期間は、利用可能な科学情報を指針として慎重に進められた審議プロセスだったといえる。各国のDGRのプロセスには、前進するかどうかを決定する重要な意思決定ポイントにおいて、それを支える科学情報の評価と議論が含まれる。以下に、フィンランド、フランス、スウェーデンが従っている慎重で透明性の高い科学プロセスの実施状況について説明する。

5.1 フィンランドの実施状況（オルキオト）

フィンランドでは、1983年の政府決定によって定められた目標に従って使用済み燃料の処分準備が進められてきた。それ以来、廃棄物処分に向けた母岩の適合性を確認するためのオンカロ地下岩特性評価施設における処分深度での現場調査を含め、オルキオトでサイト特性調査が実施されてきた。サイトに関する知識は、原則決定（Decision-in-Principle）段階から大幅に増えている。現在の施設設計（KBS-3H）は2002年からSKBとPosivaが共同で開発してきたものである。処分施設の輸送・接続トンネルの建設は、Posivaの地下処分施設建設開始準備ができていたことをフィンランドの放射線・原子力安全庁（STUK）が確認後、2016年12月に開始された。最初の掘削段階には、処分エリアへの最初の中央トンネルも含まれる。段階的な建設アプローチにより、操業中も処分技術の継続的な改善が可能である。このプロジェクトは、2020年末までに操業許可を申請することを目標としている。

STUKは、透明性の高いオープンなプロセスにコミットしており、放射線と原子力安全に関して公衆とメディアとのコミュニケーションに責任を負う。STUKは、積極的でオープン、迅速、明確なコミュニケーションを心がけている。コミュニケーションを成功させるための前提条件として、STUKがメディアと公衆に知られており、STUKが提供する情報は真実であるとみなされる、ということがある。コミュニケーションは、入手可能な最良の情報に基づいて行われ、国民の期待に応えるものでなくてはならない。STUKはウェブサイトとソーシャルメディアのプラットフォームを使用して、国民と双方向のコミュニケーションを行っている。

使用済み燃料の処分コストは、「核廃棄物管理基金」に蓄えられた資金によってカバーされる。フィンランドでは、廃棄物を産出した者が廃棄物管理コストの経済的責任を全面的に負う。たとえ将来、廃棄物の産出者とその義務を履行できなくなったとしてもそのコストを確実に賄うことができるように、廃棄物の管理と処分ならびに廃炉に伴う将来のコストをカバーするための資金調達システムが存在する。



オンカロの使用済み燃料処分場。

Posiva (フィンランド)

この期間における主なマイルストーンは以下の通り。

- 1987年 - 5カ所のサイトで、深部掘削、地質マッピング、水文地質学研究、水力地球化学研究、岩石力学研究などを含む予備的なサイト特性評価が開始。
- 1992年 - 5カ所のうち、4カ所で詳細なサイト特性評価プログラムが開始、1999年まで継続した。
- 1999年 - Posivaは処分施設のサイトとしてオルキルオトを提案。この申請は、STUKにより安全性の観点から審査され、2000年1月にエウラヨキの地方自治体によって受け入れられた。
- 2001年 - 議会は原則決定を承認し、Posivaが計画された処分場プロジェクトを継続し、実際の処分深度で地下岩盤特性評価施設「オンカロ」を建設することを承認。
- 2004年 - オンカロで掘削作業が始まり、定置技術をテストするためのデモ用トンネルを含む、広範なサイト固有の特性評価とテストが建設段階で開始。
- 2005年 - Posivaが閉鎖後のセーフティケースの枠組みを策定（その後、2008年にアップデート）。
- 2012年 - Posivaが建設許可を申請。
- 2015年 - STUKは、建設許可申請に関して、安全性評価で裏付けられた安全性に関する肯定的な声明を発表。さらにSTUKは、建設許可申請とともにSTUKにレビューのため提出された重要な安全書類について、別途決定を下した。これらの決定では、STUKは、Posivaが建設中または操業許可申請文書で満たさなくてはならない要件を設定した。これらの要件は、プロジェクトに関連する不確実性を一部低減するための追加の安全性実証作業に関連するものである。政府は2015年11月にPosivaに建設許可を付与した。
- 2016年 - 何度かの点検を経て、STUKはPosivaに廃棄処分施設の建設開始の申請を承認した。

5.2 フランスの実施状況 (Cigéo)

フランスでは、フランス議会の管理下で地層処分場プロジェクト「Cigéo」が開発されている。これは、長期貯蔵や群分離、核変換などその他の選択肢も含めて1991年にフランスで初めて制定された放射性廃棄物法により開始されたもので、1991年から2005年までの研究段階では、URLの建設も含め、科学・技術的調査が行われた。URL内で次第に規模が拡大していった技術プロセスの調査と開発に向けた研究開発が進む中で、2010年からHLWと中間レベル放射性廃棄物の共同処分施設としてカロポ・オックスフォーディアン粘土質岩層でCigéoの設計が進められている。2016年には安全オプションがフランス原子力安全機関 (ASN) にレビューのため提出された。

1991年法が制定されて以来、プロジェクトの主要な決定における透明性とステークホルダーの関与は大幅に進展している。2013年にはこのプロジェクトに特化した公開討論会が行われ、それに関して「原子力安全情報と透明性に関する高等委員会」が意思決定プロセスの透明性に関する報告書を発表した。サイト選定と設計に対する支持を求めため、ステークホルダーとの間でオープンな協議が定期的実施されたが、これは今後建設承認プロセスの一環となるであろう。Cigéoの段階的な実施と操業を通してステークホルダーが意思決定に継続的に関与できるよう、Cigéoのガバナンス制度が策定されつつある。

DGRプログラムの実行には多大なリソースが必要となる。フランスでは、「汚染者負担」の原則 (ASN 2018) に従い、原子力事業者が国の監督下で放射性物質および廃棄物の管理資金を供出する。環境法の一部となった2006年6月28日法により、こうして長期的な原子力コスト資金のリングフェンス制度が確立された。事業者は、廃炉コストや使用済み燃料および放射性廃棄物の管理コストなど、長期的なコストを評価しなくてはならない。これら将来的なコストに対して、事業者は担保性の高い特定用途の資産を設定することで、今補償する義務を負う。これらの活動は、経済とエネルギーの担当大臣らで構成される行政機関を通じて、国が厳重に監視する。

この期間における主なマイルストーンは以下の通り。

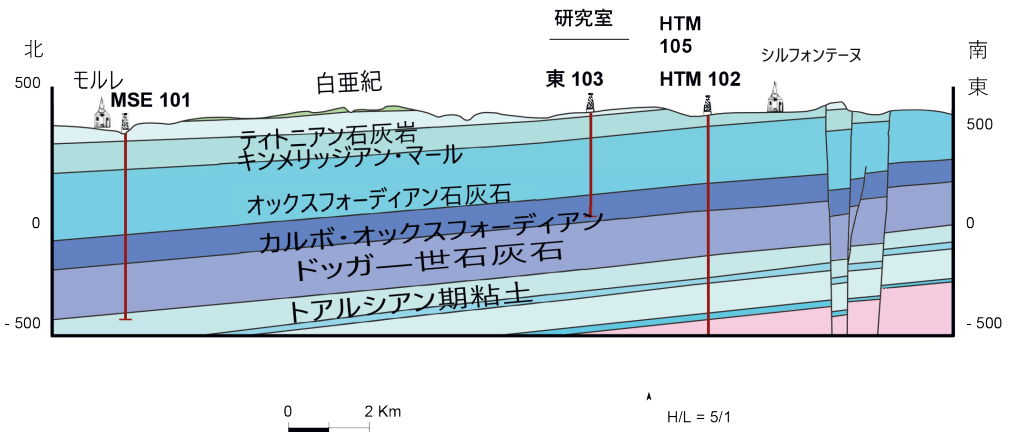
- 1993年 - 地方当局からの自主申請に基づき、4カ所の候補サイトで地質特性評価の誘致活動が開始。
- 1998年 - 政府は、進行中の科学・工学調査を継続して拡大するため、カロポ・オックスフォーディアン粘土層に深部施設を提供するムーズ・オート＝マルヌ地下研究所を開発することを承認。
- 2005年 - 15年間の調査研究を経て、ANDRAは2005年研究報告書を作成した。これは安全な可逆的廃棄処分施設を建設するための技術的なソリューションが存在することを実証する実現可能性調査だったが、さらなる最適化の余地があることを認め、特定のソリューションにコミットするものではなかった。この報告書は科学的・技術的評価プロセスを経て、1991年法の下に設置された国家評価委員会の一般報告書に基づき、ムーズ・オート＝マルヌで調査されたサイトの深地層最終処分施設の実現可能性と安全性に関するANDRAの結論が、ASNの意す見書と国際専門家審議の報告書によって支持された。
- 2010年 - 政府はASNと国家評価委員会 (CNE) の助言に基づき、また、選出公職者と地域情報監督委員会 (CLIS) との協議後、廃棄処分施設が予定されている母岩ゾーンにおけるANDRAの作業案を承認した。このさらなる地質探査により、このゾーンのカロポ・オックスフォーディアン層は、深地層最終処分施設のサイトとして適切な特性を示していることが確認された。
- 2013年 - 5月15日から7月31日まで、および9月1日から12月15日までの期間、Cigéoプロジェクトに関する公開討論がフランスの公開討論国会委員会 (CNDP) によって開催された。Cigéoプロジェクトの実施主体であるANDRAは特に、処分対象の廃棄物の暫定インベントリ、Cigéo施設のサイト候補地、可逆性に関するANDRAの一連の提案、概念設計研究の結果などを発表した。

- 2014年 - 5月5日、ANDRA理事会は、Cigéoプロジェクトに関する公開討論会を経て、「Cigéo建設許可申請審査に向けて準備するため、ANDRAはCigéo操業のためのマスタープラン、安全オプション報告書、および回収可能技術オプション報告書から構成される文書一式を政府に提出する」ことを決定した。
- 2016年 - ANDRAは、通常の操業期間中およびインシデントや事故発生時（操業期間中）に人の健康と環境を保護し、ならびにCigéo閉鎖後の目的、原則、および安全機能を説明する、2つの（操業期間中と閉鎖後の）安全オプション報告書を作成した。閉鎖後の報告書は、これらの目的、原則、および安全機能がプロジェクト設計とサイト選定においてどう考慮されているかを強調している。

5.3 スウェーデンでの実施状況（フォルスマルク）

原子力活動法（1984年）は、原子力活動を許可された事業主体がそれから生じる放射性廃棄物および使用済み核燃料の安全な管理と最終処分の責任を負うと定めている。使用済み核燃料の最終処分のKBS-3方式が1970年代後半から進行している。スウェーデンのDGRプログラムは、広範なフィールド調査、エスポ地下研究所の開発、パブリック・エンゲージメント、国際協力（2002年以降のPosivaとのKBS-3H設計の共同作業を含む）、必要なセーフティケースの開発など、長年にわたり継続的な取り組みを続けてきた。徹底した研究開発プログラムを実施後、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）は2011年に処分場の建設許可を申請し、スウェーデンの放射線安全機関（SSM）は2018年にSKBの最終処分システムに関して肯定的な見解書を発行した。裁判所は2018年にSKBの申請に関し、サイト、岩、緩衝材、環境に関する声明に関して肯定的な見解を示したが、銅製キャニスターに関しては追加文書を求めた。2019年にSKBは銅製キャニスターに関する追加文書を政府に提出した。政府はこの問題に関して決定を下す前に地方自治体と協議することになる。

ビュールセクターの地質断面図。
GNU無料文書ライセンス



現在進行中の使用済み燃料処分場建設許可の審査では、1980年代初頭からステークホルダーが積極的に関与し、透明性の高い予測可能なサイト選定および許可プロセスが役立っている。それに貢献した主な要因としては以下が挙げられる。(1) SKBのRD&Dプログラムおよびコスト計算書に規制に係る審査、公開協議、および政府の承認とともに明示される、廃棄物管理および廃棄処分処理ソリューション開発に対して原子力業界が共有する義務。(2) 地域社会によるサイト選定プロセスへの自主参加と政府による建設許可決定を拒否する地域社会の権利。(3) 地域社会や環境団体が公式協議に積極参加するための地位を築くことを可能にする、原子力廃棄物基金を通じてステークホルダーに提供される資金。

1981年には、スウェーデンで使用済み核燃料と放射性廃棄物の管理と廃棄処分にかかる将来のコストを原子力事業者が確保するための資金調達システムが確立された。この目的は、事業者が責任を負うべきコストを国や将来の世代が肩代わりしなくてはならないリスクを最小限に抑えることである。事業者は原子力廃棄物基金に納付金を支払う。SKBは、原子力発電事業者のコスト見積もりをとりまとめ、3年ごとにスウェーデンの債務管理局 (Riksgälden) に提出する。

債務管理局は費用の見積もりを審査し、電力会社ごとに納付金と保証料を算出する。政府は債務管理局の勧告に基づき、最大3年間の期間における放射性廃棄物の納付金と保証料を決定する。

この期間における主なマイルストーンは以下の通り。

- 1973-1985年 - スウェーデン地質調査所が実施した調査により、スウェーデンの地質学的条件は廃棄処分に適していることが示された。
- 1983年 - 現在の設計の基礎となるKBS-3処分場の初期設計文書が作成された。KBS (KärnbränsleSäkerhet = 核燃料の安全性) 。
- 1985年 - SKBがオスカルスハムン自治体のエスポ硬質岩研究所で調査を開始。
- 1993年 - SKBが8つの自治体で実現可能性調査を開始し、2000年に完了。
- 1995年 - SKBが報告したサイト選定要因と基準を今後の継続的なサイト選定作業の出発点とし、サイト固有の実現可能性調査を5~10カ所のサイトで実施、サイト調査は少なくとも2カ所のサイトで実施する必要があるとの政府決定。
- 2001年 - 政府は、SKBが提示した代替案の評価に基づき、KBS-3方式をサイト特性調査継続の計画の前提にすると宣言。
- 2002年 - SKBは最終処分場として検討されている2つの自治体でコンサルテーションを開始。各自治体での公開ミーティングやオスカルスハムンEIAフォーラムとの会合、フォルスマルク・コンサルテーション、EIAグループとの会議などを含めさまざまな形態でコンサルテーションが約60回実施された。公開コンサルテーション会議と併せ、書面によるコンサルテーションも実施されている。すべてのコンサルテーションは、会合が通信かの形態にかかわらず文書化されている。
- 2006年 - SR-Siteプロジェクトの準備段階としてSR-Can報告書が発行された。この安全報告書は今では最終処分場建設・操業許可申請書のベースとなり、それに添付されている。
- 2009年 - サイトの条件を体系的に比較した結果、あらゆる点を考慮するとフォルスマルクが長期的な安全性を実現するために最適の候補地であるとされた。このため、SKBはフォルスマルクでDGRの許可を申請することを決定した。
- 2011年 - 30年間の研究開発の後、SKBはフォルスマルクDGRのKBS-3設計に基づく建設許可を申請した。

- 2012年 - SKBの許可申請に関する広範なコンサルテーションが全国で行われ、さまざまなステークホルダーおよびステークホルダー組織が許可の審査に関する懸念や見解を表明するためのチャンネルが提供された。審査機関には、関係自治体、郡理事会、環境団体、その他の非政府機関、大学、その他当局が含まれていた。NEAはスウェーデン政府の要請に応じてピアレビューを行った。

5.4 実施状況のまとめ

この数十年、規制の枠組みや国家政策の制定および実施とともに、安全なDGRの開発を保証するための科学情報は大幅に増えている。URLの実証段階は、DGRが人と環境を保護しているという必要な信頼感をもたらすものである。DGRは今では、科学界、諸機関、産業界から広く支持された成熟した概念となっている。DGRプロセスはすべてのステークホルダーにとってオープンで透明性が高くなければならず、プログラムの完了に必要なリソースについては、廃棄物の発生者がコストを負担するという政府の政策によって保証されていることが重要である。従って、今では欧州を中心としたいくつかの国々で、2030年末までにDGRが操業を開始するという計画が発表され、それらすべての計画が実現されることが期待されている。フィンランドが世界初のDGRを建設すると予想される。世界中でDGRの実施が成功を収めて前進すれば、経験と知識がさらに向上し、場合によっては、初期の施設が経験したよりも速いペースで他の国々でもDGRの開発が進むと期待される（NEA 2019）。

6. 結論

原子力業界は、利用する放射性物質のライフサイクル全体に取り組んでおり、政府は厳格な法的枠組みを確立している。これには、廃棄物処理やパッケージングにおける先端技術の利用、発生する廃棄物の量の最小化が含まれ、国によっては使用済み燃料を再利用する循環経済も含まれる。深地層最終処分場（DGR）で高レベル放射性廃棄物（HLW）を処分することについては、国家レベルの議会や国際的な枠組み（EU、IAEA、NEA）のみならず、州や省、地方レベル、個人レベル、ピアレビュー文献、さらには科学団体によってその安全と倫理的配慮が協議された結果、今では将来にわたり社会を長期的に保護する方法として幅広く受け入れられている（NEA 2007）。DGRが幅広く受け入れられるまでの道のりは容易ではなく、数十年にわたる慎重かつ重点的な科学的調査を経て次第に受け入れられてきたものである。そして、社会の放射線防護基準が今も将来も確実に守られるようにするため、規制の枠組みと国家政策に沿ったプロセスの中でオープンな協議が行われてきた。とりわけ：

- 科学的コンセンサスは、URLでの重要な調査や実証実験を含め、数十年にわたって精力的かつ持続的に実施されてきた調査に基づいて形成されている。この期間を通して、DGRの研究に従事する科学コミュニティは、現状に満足することなく継続的かつオープンで建設的な議論とピアレビューに積極的に取り組み、コミュニティ全体の知識と理解を継続的に向上させる努力をしてきた。
- 周知の自然の法則に従って変化を重ねた結果として安定した環境を提供する母岩の特性は、将来の世代による保守や修復作業を必要とせず、非常に長期的にわたって維持できるDGRの「パッシブ安全」を保証している。百万年というような地質学的な時間の尺度での自然システムの長期的挙動の理解に資するため、ナチュラルアナログ研究が実施されてきた。
- DGRの安全戦略には、単一のバリアに依存せず、より堅牢なDGR設計を保証する、隔離と封じ込めのための複数の安全機能またはバリア（深層防護）アプローチが含まれている。セーフティケースにおける仮定としての侵入イベントの評価によって、そのような事象に対するDGRの耐障害性を評価するための情報が提供され、さらに侵入の確率をさらに低減し、あるいは仮定としての侵入の結果生じ得る潜在的な影響を制限するための選択肢が検討できる。
- 段階的プロセスの一環としての継続学習によって、処分プロセスを実施段階中に適宜改善する余地と、不確実性管理プログラムの一環として安全を最適化する幅広いオプションを検討する柔軟性を持たせることができる。廃棄物を回収できる余地を含む段階的なアプローチでは、どのような決定でも覆すことができる。すべてのDGRプログラムで段階的アプローチが採用されている。
- DGRプログラムの透明性は、委員会、公開討論、市民会議、コンサルテーションプロセス、法的枠組み、議会セッションを含み、技術面と社会面双方でより強固なプロセスを提供するものである。これらの枠組みはすべて、確固とした科学的コンセンサスを形成する一方で技術設計と社会的受容を平行して改善しつつプロジェクトを共同構築するために不可欠である。

- DGRプロジェクトの共同構築には、今日既に整備されている明確で曖昧さを残さない規制枠組みと国家政策が不可欠である。これには、プログラムを完了させるために必要なリソースのコストを廃棄物の発生者が負担することを保証する政策も含まれる。
- このプロセスで前進している国々は、DGRの建設計画の許可申請をする前に、その支援材料となる情報の調査・収集、批判的評価に数十年を費やしてきた。これらの国々は、DGRの安全性を裏付ける科学的実証実験の重要な一部として地下研究室を使用している。

SNF/HLWを安全に廃棄処分するため、処分場の建設許可申請まで長期間にわたり慎重に進めるのが最良の方法であることが実証されている。現在、いくつかの国が成熟したプロジェクトを通じてこの概念を実践しつつある。そうしたプロジェクトでは、環境と人類の保護に関してDGRの高性能を実証することが可能である。さらにDGRは、国際協力によって規定されている通りに、また担当規制当局によって最先端技術との比較評価が詳細にわたって実施されるということもあり、実証済みの最先端技術を駆使してあらゆる適切な措置を取っていることを強調せねばならない。今では欧州を中心としたいくつかの国々で、2030年末までにDGRが操業を開始するという計画が発表され、それらすべての計画が実現されることが十分に予期される。世界中でDGRの実施が成功を収めて前進すれば、経験と知識がさらに向上し、初期の施設が経験したよりも速いペースで他の国々でもDGRの開発が進むと期待される。

7. 参考文献

Andra (2016), “Cigéo – Safety Options Report – Post-Closure Part” (DOS-AF), Andra, CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062, Châtenay-Malabry.

Andra (2016), Cigéo – “Proposed Operations Master Plan (PDE)”, Andra, CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-15-0063, Châtenay-Malabry.

ASN (2018), “French National Plan”, Autorité de sûreté nucléaire, Paris.

CEPN (2020), “Environmental Impacts Associated with Radioactive Waste Management: A Review of Standards and Practices According to the Do No Significant Harm Approach of the European Taxonomy”, Report No. 326, Fontenay-Aux-Roses.

Chapman, N.A. (1984), “The Potential of Natural Analogues in Assessing Systems for Deep Disposal of High-level Radioactive Waste”, KBS TR-16 (also EIR Bericht Nr. 545), Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) and Swiss Cooperative for the Storage of Radioactive Waste (NAGRA), Stockholm.

DOE (2020), Five Fast Facts about Spent Nuclear Fuel, www.energy.gov/ne/articles/5-fast-factsabout-spent-nuclear-fuel (accessed 22 June, 2020).

EU (2011), Council Directive 2011/70/EURATOM, “Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive Waste”, Official Journal of the European Union. OJL 199, 2.8.2011, Brussels.

IAEA (2019), *Climate Change and the Role of Nuclear Power*, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA (2018), *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*, No. NW-T-1.14. International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA (2017), *Nuclear Power for Sustainable Development*, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA (2013), *Spent Fuel Storage Operation – Lessons Learned*, IAEA TECDOC Series No. 1725, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA (2011), *Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements No. SSR-5*. International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA (2011a), *Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-14*. International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA-OECD/NEA (2002), *An International Peer Review of the Yucca Mountain Project TSPA-SR*, International Atomic Energy Agency, Vienna, and Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

- ICRP (2013), *Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste*, ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3), Elsevier, Oxford.
- ICRP (2007), *2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2–4), Elsevier, Oxford.
- ICRP (1998), *Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste*, ICRP Publication 81. Ann. ICRP 28(4), Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1991), *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1–3), Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1977), *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3), Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1959), *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (adopted September 9, 1958), ICRP Publication 1, Pergamon Press, London.
- Milowdowski, A.E., W.R. Alexander, J.M. West et al. (2015), *A Catalogue of Analogues for Radioactive Waste Management*, Commissioned Report CR/15/106, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham.
- NaRC (2003), *One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste*, National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- NaRC (1957), *Disposal of Radioactive Waste on Land*, National Research Council of the U.S. National Academy of Sciences, The National Academies Press, Washington, D.C., <https://doi.org/10.17226/18527>.
- NDA (2016), *Geological Disposal Engineered Barrier System Status Report*, Nuclear Decommissioning Authority, NDA Report No. DSSC/452/01, Harwell.
- NEA (2019), *International Roundtable on Final Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel: Summary Report Draft (Message for international co-operation from high-level government representatives)*, NEA/RWM (2019)11/PROV, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2016), *Japan's Siting Process for the Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, An International Peer Review*, NEA No. 7331, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2015), “The OECD Nuclear Energy Agency’s Forum on Stakeholder Confidence, radioactive waste management public participation: A synthesis of its learnings and guiding principles”, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2014), “Control, Oversight and Related Terms in the International Guidance on Geological Disposal of Radioactive Waste – Review of Definitions and Use”, NEA/RWM/RF(2014)2, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2013a), “The Nature and Purpose of the Post-Closure Safety Cases for Geological Repositories”, NEA/RWM/R(2013)1, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2013b), “Underground Research Laboratories (URL)”, NEA/RWM/R(2013)2, OECD Publishing, Paris.

NEA (2012), “Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: Outcomes of the NEA MeSA Initiative”, NEA No. 6923, OECD Publishing, Paris.

NEA (2011), “Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel; Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011)”, NEA/RWM/R(2011)4, OECD Publishing, Paris.

NEA (2008a), “Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste: A Collective Statement by the NEA Radioactive Waste Management Committee”, OECD Publishing, Paris.

NEA (2008b), “Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? Symposium Proceedings, 23-25 January 2007”, OECD Publishing, Paris.

NEA (2007), *Regulating the Long-term Safety of Geological Disposal: Towards a Common Understanding and the Main Objectives and Bases of Safety Criteria*, OECD Publishing, Paris.

NEA (2005), “Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk: Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden 2-4 February 2004”, OECD Publishing, Paris.

NEA (2004), *Post-Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose*, OECD Publishing, Paris.

NEA/EC (2003), *Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories: State-of-the Art Report*, OECD Publishing, Paris.

NEA/EC (2001), “Confidence in Models of Radionuclide Transport for Site-Specific Performance Assessment: Proceedings of the 4th GEOTRAP Workshop, Carlsbad, New Mexico, 14-18 June 1999”, OECD Publishing, Paris.

NEA (2000), *Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Wastes (An International Database)*, OECD Publishing, Paris.

NEA/EC (1999), “Water-Conducting Features in Radionuclide Migration: Proceedings of the 3rd GEOTRAP Workshop, Barcelona, Spain, 10-12 June 1998”, OECD Publishing, Paris.

NEA (1999), “Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories, Its Development and Communication”, OECD Publishing, Paris.

NEA/EC (1998), “Modelling the Effects of Spatial Variability on Radionuclide Migration: Proceedings of the 2nd GEOTRAP Workshop”, OECD Publishing, Paris.

NEA/EC (1997), “Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration, Proceedings of the 1st GEOTRAP Workshop, Cologne, Germany, 28-30 August 1996”, OECD Publishing, Paris.

NEA (1997), “The International INTRAVAL Project, Phase 2, Summary Report”, Swedish Nuclear Power Inspectorate and OECD Nuclear Energy Agency, OECD Publishing, Paris.

NEA (1995), “The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal; A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee”, OECD Publishing, Paris.

POSIVA (2018), “Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto – Performance Assessment”, POSIVA 2016-02, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

POSIVA (2012), “Olkiluoto Site Description 2011”, POSIVA 2011-02, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

POSIVA (2007), “Safety Assessment for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto”, POSIVA 2007-09, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.

SKB (1993), “OECD/NEA International Stripa Project 1980-1992 – Overview Volume 1 – Executive Summary”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm.

SKB (2019), “RD&D Programme 2019” (Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste), TR-19-24. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden.

SKB 2011(a), “Environmental Impact Statement (Interim Storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel)”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Stockholm, Sweden.

SKB 2011(b), “Application for Licence under the Nuclear Activities Act”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB). Stockholm, Sweden.

STUK (2013), “Disposal of Nuclear Waste: Guide YVL D.5”, Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Helsinki, Finland.

UNSCEAR (2010), “Sources and Effects of Ionizing Radiation - Volume 1: Sources”, UNSCEAR Report, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

別表

DGRプロセスが前進している各国のタイムライン

国名	実現可能性とサイト特性評価開始	サイト選定	URLの建設開始	申請提出	建設許可取得	建設開始	申請までの年数	推定操業期間
フィンランド	1983 [1]	2000 [1]	2004 [1]	2012 [1]	2015 [1]	2016 [1]	29	100年 [2]
フランス	1991 [3]	1998 [3]	2000 [3]	2021 (推定)		2022 [3] (推定)	30	100年 [3]
スウェーデン	1976 [4]	2009 [4]	1990 (エスポ) [5]	2011 [4]		2020年代初頭 (推定)	34	45年 [4] (定常操業)
米国 (ユッカ)	1982 [6]	1987 [6]	1993 (調査研究施設) [7]	2008 [6]		2048 [8] (推定)	28	100年以上 [9]
米国 (WIPP)	1955 [10]	1974 [10]			1979 [10]	1981 [10]	24	35年 [10]
中国	1985 [11]	2018 [11]	2020 [11]			2041 [11] (推定)		
カナダ	1978 [12]	2023 [13] (推定)	1982 (AECL) [12]	2028 [13] (推定)	2032 [13] (推定)		50	40年以上 [14]
ドイツ	1965 [15]	2031 [16] (推定)	1986年 (ゴルレーベン) [16]					
スイス	1978 [17]	2022 [18] (推定)	1984 (グリムセル) [17] 1996年 (モン・テリ) [17]	2024 [18] (推定)	2031 [18] (推定)		46	約30年 [18]
日本	1976 [19]	2027 [15] (推定)	2002年 (瑞浪 URL) [20] 2005年 (幌延 URL) [20]					約50年 [19]

国別参考文献

フィンランド

- [1] Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK). Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management: 6th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention (2017). https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_finland_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf
- [2] Pirjo Hellä, Margit Snellman, Nuria Marcos, Barbara Pastina, Paul Smith, Kari Koskinen. TURVA-2012: Performance assessment. // The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. NEA/RWM/R(2013)9. <https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-r2013-9.pdf>

フランス

- [3] French national radioactive waste management agency (Andra). Andra in Meuse & Haute-Marne. (2017). https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/CMHM_2015_Version2017_EN_relu_planche_1.pdf

スウェーデン

- [4] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Environmental Impact Statement. Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel. March 2011. <http://www.skb.com/wp-content/uploads/2016/03/21014-MKB-ENG-webb-150dpi.pdf>
- [5] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2018. Technical Report TR-19-10. November 2019. <https://www.skb.com/publication/2494274/TR-19-10.pdf>

米国 (ユッカマウンテン) (Yucca Mountain)

- [6] United States of America, Sixth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, U.S. Department of Energy, In Cooperation with the U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of State. (2017). <https://www.iaea.org/sites/default/files/10-20-176thusnationalreportfinal.pdf>
An application for a construction authorization for a geologic repository at Yucca Mountain, Nevada, for the disposal for spent fuel and HLW was filed before NRC by DOE in 2008; however, the adjudication on the application is suspended.
- [7] Hemendra N. Kalia, James M. Repogle. Constructing the Exploratory Studies Facility at Yucca Mountain. 1996 Annual Conference of the Institute of Shaft Drilling Technology, May 1-3, 1996 in Las Vegas, NV. (1996) https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/059/27059371.pdf?r=1



核廃棄物の深地層最終処分場として適切な場所かどうかを判断するためエネルギー省が建設したネバダ州ユッカマウンテンの地下探査研究所。

写真：米国エネルギー省提供

- [8] International Atomic Energy Agency, Status and trends in spent fuel and radioactive waste management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14, IAEA, Vienna (2018). Supplementary files: National Profiles. United States of America. <https://www.iaea.org/publications/11173/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management?supplementary=44578>
- [9] U.S. Department of Energy. Yucca Mountain Repository License Application. General Information. DOE/RW-0573, Update No. 1 Docket No. 63-001. November 2008. <https://www.nrc.gov/docs/ML0907/ML090700843.pdf>

ネバダ州ユッカマウンテンの高レベル放射性廃棄物最終処分候補地を訪れた原子力規制委員会（NRC）職員。

Creative Commons、
米国原子力規制委員会



米国 (WIPP)

- [10] DGR Joint Review Panel International Visit Report Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) – Carlsbad, New Mexico, November 14, 15, 2012. <https://iaac-aeic.gc.ca/050/documents/p17520/88554E.pdf>

中国

- [11] Ju Wang, Liang Chen, Rui Su, Xingguang Zhao. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 10 (3): 411-435, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.002>

カナダ

- [12] N.A. Chandler. Twenty years of Underground Research at Canada's URL. WM'03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson AZ. (2003) <https://xcdsystem.com/wmsym/archives//2003/pdfs/118.pdf>
- [13] Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Implementing Adaptive Phased Management 2019 to 2023. March 2019. <https://www.nwmo.ca/~media/Site/Reports/2019/03/19/14/45/NWMO-201923-Implementation-Plan--EN.ashx?la=en>
- [14] Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Description of a Deep Geological Repository and Centre of Expertise for Canada's Used Nuclear Fuel. (2015). https://www.nwmo.ca/~media/Site/Files/PDFs/2015/11/12/08/10/2798_description_of_a_deep_geological_repository_and_ce.ashx?la=en

ドイツ

- [15] Nuclear Energy Agency. Timing of High-level Waste Disposal. NEA No. 6244. (2008). <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2008/6244-timing-waste-disposal.pdf>
- [16] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Report of the Federal Republic of Germany for the Sixth Review Meeting in May 2018. (2017). <https://www.iaea.org/sites/default/files/jc6berichtdeutschlandebf.pdf>

スイス

- [17] National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Project Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report 02-05. December 2002. [https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%202001-2010/e_ntb02-05.pdf](https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%202001-2010/e_ntb02-05.pdf)
- [18] National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Annual Report 2018. (2019). [https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/Geschaeftsberichte/e_GB2018.pdf](https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/Geschaeftsberichte/e_GB2018.pdf)

日本

- [19] Nuclear Waste Management Organization of Japan(NUMO). Safety of the Geological Disposal Project 2010. Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies, English Summary. NUMO-TR-13-05. July 2013. https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/pdf/TR-13-05.pdf
- [15] Nuclear Energy Agency. Timing of High-level Waste Disposal. NEA No. 6244. (2008). <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2008/6244-timing-waste-disposal.pdf>
- [20] Nuclear Energy Agency. Underground Research Laboratories (URL). NEA No. 78122. (2013). <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2013/78122-rwm-url-brochure.pdf>

NEAの刊行物と情報

刊行物を網羅した一覧はwww.oecd-nea.org/pubをご覧ください。

NEAのホームページでは、当機関に関する基本情報や事業プログラムの情報が記載されているほか、数多くの技術報告書や政策関連報告書を無料でダウンロードできます。最新の原子力問題に関する記事を掲載した当機関の専門誌NEA Newsは、www.oecd-nea.org/nea-newsをご覧ください。

新たな調査結果やイベント、刊行物に関する最新情報を提供するNEA電子月報も購読者に無料で配信されます。配信ご希望の方はwww.oecd-nea.org/bulletinからご登録ください。

Facebookではwww.facebook.com/OECDNEAで、Twitterでは@OECD_NEAでフォローしてください。

高レベル放射性廃棄物の管理と処分： 世界の進捗状況とソリューション

放射性廃棄物は、医療・産業・研究・発電など幅広い活動から発生する。このような廃棄物はすべて、人の健康と環境の保護を最優先して安全に管理しなくてはならない。何十年にも及ぶ研究活動を経て、国際科学界は今では、高レベル放射性廃棄物を深地層最終処分場（DGR）に定置することが安全かつ効果的であると確信するに至っている。

各国政府は、それぞれが最良であると信じるエネルギー・環境政策を実施する絶対的な権利と責任を有している。放射性廃棄物の処分に関しては、客観的な事実に基づいて議論されることが最も重要である。この報告書は、DGRにおける高レベル放射性廃棄物の管理に関して現在わかっている知識を一般読者に提供することを目的としている。