

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2025.4.NO.153

目次

センターの活動状況	①
沿岸海底下での処分事業を進める英国	③
放射性廃棄物埋設における安全確保の考え方 ～世界から学ぶ性能照査の重要性～	⑤

センターの活動状況

運営状況

第 44 回理事会の開催

2025 年 3 月 4 日（火）に対面及び Web 会議システムの併用により開催した第 44 回理事会において、以下の議案を付議し、それぞれ原案のとおり承認可決されました。

1. 2025 年度事業計画及び収支予算並びに資金調達及び設備投資の見込みの承認について
2. 理事長の報酬の変更について
3. 組織の改編について
4. 第 32 回評議員会の招集について

第 32 回評議員会の開催

2025 年 3 月 11 日（火）に対面及び Web 会議システムの併用により開催した第 32 回評議員会において、以下の議題を審議又は報告し、議案については原案のとおり承認可決され、報告については了承されました。

1. 2025 年度事業計画及び収支予算並びに資金調達及び設備投資の見込みの承認について
2. 組織の改編について（報告）
3. 評議員の退任について（報告）

今回退任された方は次ページのとおりで（後任は次回 2025 年 6 月の定時評議員会において選任予定）。

(敬称略)

区 分	退 任 者	新 任 者	新任者所属・役職
評議員	内山 洋司	—	

成果等普及活動の実施状況

2024 年度 第 4 回原環センター講演会の開催

2024 年度第 4 回原環センター講演会「ハル等廃棄体の核種溶出モデルの高度化と炭素化学形態の評価」を対面及びオンラインで開催し、54 名（対面 13 名、オンライン 41 名）の方にご参加いただきました。

ハル等廃棄体（燃料被覆管のせん断片と燃料集合体末端片を圧縮処理したもの）には主に窒素の放射化由来の C-14 が多く含まれ、安全評価での被ばく線量を支配する最も重要な核種であるとされています。安全評価の信頼性向上や、過度な保守性を低減するためには、インベントリ評価や核種溶出モデルの高度化を図るとともに、溶出時の炭素化学種の実データ取得し、その生成プロセスを明らかにする必要があります。

本講演では、原環センターがこれまでに実施してきたハル等廃棄体に関する技術開発について、近年の先端分析や計算科学を活用して得られた難測定核種のインベントリ、核種溶出モデルの高度化、炭素化学形態の生成プロセスに関する成果を中心に紹介しました。

開催日時：2025 年 3 月 28 日（金）14：00～16：00
対面会場：原環センター 第 1、2 会議室
演 題：ハル等廃棄体の核種溶出モデルの高度化と炭素化学形態の評価
講 演 者：FE・BE イノベーション研究部
桜木 智史、田中 真悟



国際交流

フィリピン原子力研究所（PNRI）の研究者の来訪

2025 年 1 月 24 日に、フィリピン原子力研究所（PNRI）の Ray Matthew Alvaro Bunquin 氏、Rico Neil Milan Quierrez 氏、Angelo Absalon Panlaqui 氏、Ronald Edic Piquero 氏を迎え、情報交換会議を開催しました。フィリピンの 4 名とも放射性廃棄物の管理、廃炉、環境修復を専門とする若手研究者です。

今回は、国際原子力機関（IAEA）からの依頼により、一般財団法人 原子力国際協力センター（JICC）の仲介により、原環センターへの訪問が実現しました。

会合では、フィリピンにおける原子力開発の経緯について説明がありました。当初フィリピンでは、1980 年代に原子力発電所の建設が進んでいたものの、チェルノブイリ事故の影響を受けていったん停止しましたが、近年のエネルギー価格の上昇などを背景として、現在はフィリピン政府内で原子力の導入について議論がなされている状況とのことでした。原環センターからは、各研究部門の活動状況についての説明を行い、4 名の研究者からは様々質問があり、廃棄物処分分野での関心の高さを伺うことができました。



沿岸海底下での処分事業を進める英国

情報企画部情報調査室
山田 文香

英国では現在、我が国同様、高レベル放射性廃棄物等の地層処分のため、処分場サイトの選定は進められている。原子力分野になじみのある人になじみのあるドリッグやセラフィールドなどが含まれる、イングランド北西部のカンバーランド市（旧コープランド市）が候補地域の一つとされ、注目される場所となっている。この英国の地層処分計画では、サイト選定において地域の自発的な参加に基づき処分場サイトの選定が進められている。また、地層処分場の地上施設を陸上に設置し、地下施設を沿岸の海底下に設置することを検討している。

現在原子力発電環境整備機構（NUMO）が進めている我が国の地層処分計画においても、地方自治体の自発的な参加に基づくサイト選定を行っている。また、沿岸海底下に処分場の地下施設を設置することも可能性の一つとされている。このように、英国の地層処分場事業には我が国と類似した点があり、今後の進展とともに、我が国の事業に参考となる事例であると考えられる。

本稿では、英国のサイト選定の経緯と手続きにおける地域参加に関して紹介するとともに、現在検討されている沿岸海底下での処分場概念とこの概念の実現に際し考慮すべき事項として考えられている点を示す。そのうえで、英国の地層処分計画から我が国の処分事業に参考となる点を考察する。

現在のサイト選定とパートナーシップ

英国では2008年から地域社会（コミュニティ）の自主的な参加とパートナーシップを重視したサイト選定プロセスを行ってきた。このパートナーシップというものが英国のサイト選定プロセスの特徴的なものである。このパートナーシップは、実施主体のほか、地元自治体、地域住民、地元企業、NPO等の団体などで構成され、実施主体と地域社会の橋渡しをすることがその役割である。2008年当時は、撤退権の法的担保などの制度に関する懸念や各地域への情報提供の不足などが原因となり、処分施設のサイト決定には至らなかった。

その後、英国政府はサイト選定プロセスの見直しを行い、2018年に新たなサイト選定プロセスを開始した。この2018年に開始された新たなサイト選定プロセスにおいても、地域社会における情報共有、地

層処分やサイト選定プロセス当に関する対話と理解促進を促進するためにコミュニティパートナーシップが設立されている。コミュニティパートナーシップは、地域への地層処分に関する情報提供や地層処分に対する意識調査を行うなど、地層処分事業と地域との関係をつなぐ重要な役割を果たしている。パートナーシップは、後述するように、処分場概念など実施主体が地元で進める地層処分計画に対して意見を述べたりすることもあり、地元と実施主体が協働で事業を進めていくための枠組みとすることができる。

2018年に開始されたプロセスでは、これまでに複数のコミュニティがサイト選定プロセスに関心を示し、現在は3つのコミュニティパートナーシップにおいてサイト選定プロセスが進められている（図2参照）。今後、2030年代後半にサイトを決定することを目指している。

沿岸海底下の地下施設

現在サイト選定プロセスに参加している3つのコミュニティパートナーシップは実施主体との話し合いに基づき、地層処分場の地下施設を沿岸海底下に設置し、陸上の地上施設からアクセスするという処分場概念を選択している。現在行われているサイト選定プロセスでは、領海内（陸地から12海里（約22.2km））までを調査対象として地下施設の設置場所のスクリーニングを行っており、地上施設から地下施設までのアクセス坑道の長さが長くなることも想定されている（図1参照）。

英国政府の諮問機関である放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）は、実際に処分場の地下施設を沿岸海底下に設置する場合に考慮しなければならない事項を公表している。

CoRWMが挙げている事項の例を以下に示す。

▶経済的な影響

- ・海上・海域での調査の必要性などからのコスト上昇
- ・地上施設から地下施設までの距離からくる建設や輸送に係る問題からくるコスト上昇

▶社会的な影響

- ・海底下での地下施設の建設に対する理解度が低い
- ・陸域から離れることで施設の受容度の向上
- ・公衆が海洋汚染につながるのではないかと懸念

• 地域の問題ではなく国際的な問題へと認識の変化
 ▶技術的影響

- 設計や調査での新たな課題は存在しない
- 設計や建設に資する十分な情報を得ることができるかという課題が存在
- 建設技術に関しての大きな問題は存在しない。
スウェーデンの短寿命低中レベル放射性廃棄物処分場（SFR）※の例を参考とすることが可能
- 地下施設のモニタリングを行う場合、データ転送などの技術的な課題が存在

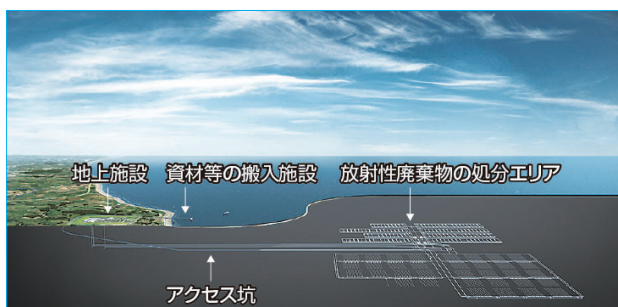


図1 英国の地層処分場の概念図

※ SFR は沿岸海底下 60m に設定されており、地上施設から坑道で地下施設にアクセスする構造となっている。

英国の地層処分事業からの示唆

英国で現在行われているサイト選定では、今後処分場サイトの選定が成功裏に行われるのか現時点で予想することはできない。表面上、軌道に乗ってきたように見えるが、サイト選定プロセスに手を挙げたコミュニティでは、すぐに反対する団体が設立される、また、サイト選定プロセスに関連する法改正時の議会討論においては、地層処分施設の立地に賛成する地元議員もいる一方で、放射性廃棄物を押し付けられていると不満を持つ地元議員もいる。さらにリンカンシャー州においては地元市議会がパート

ナーシップから脱退する事態となっており、なかなか一筋縄ではいかない状況である。

しかし、英国のサイト選定におけるパートナーシップを設置し地域社会と実施主体が情報共有、意見交換を行いつつ、地域社会の理解促進を図る方法は、我が国のサイト選定でも参考となる事例と考えられる。我が国の地層処分事業においても文献調査実施自治体において「対話の場」が設置され、地元住民等との対話を行っているが、調査エリアや地下施設の設置場所に意思表示ができるなど、英国の場合にはより踏み込んだ役割を担っていると言える。

また、沿岸海底下における地下施設の設置に関して、我が国においても採用された場合に、英国で検討された考慮事項は参考となる事例も含まれている。特に社会的な問題、沿岸海底下への地下施設の設置が海洋汚染につながるなどの住民等の懸念や漁業への風評被害などは我が国でも発生する可能性が高いと考えられる。このような懸念に対して英国の実施主体等が如何に対応し理解を得るのかなど、今後の動向は注目に値する。

英国やその他諸外国の地層処分の状況について知りたい方は、原環センターウェブサイトの「海外情報ニュースフラッシュ」や「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について」をご覧ください。

（本稿の内容は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「放射性廃棄物海外総合情報調査」の成果に基づいています。）

参考文献

- 1) ニュークリアウェイストサービス（NWS）ウェブサイト
- 2) CoRWM, IMPLICATIONS OF INSHORE SITING OF A GDF (Document No.3824), October 2022

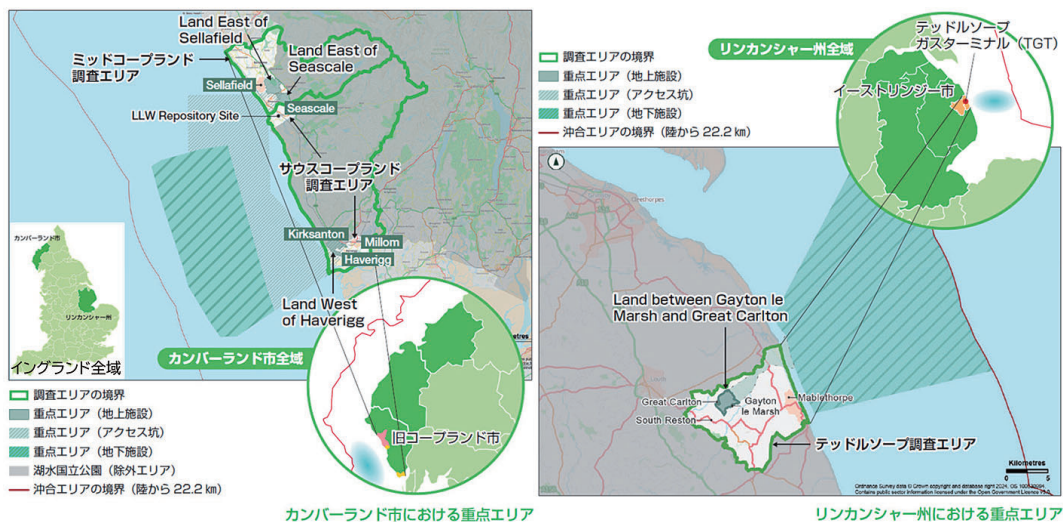


図2 3つのコミュニティパートナーシップにおける地層処分施設の調査エリア

放射性廃棄物埋設における安全確保の考え方 ～世界から学ぶ性能照査の重要性～

東京大学名誉教授
田中 知

私は2024年の9月18日まで原子力規制委員だったのですが、その後自由になりまして、放射性廃棄物のことで少しでも皆さんの役に立てないかなと思って勉強したりしています。本日は、「世界から学ぶ性能照査の重要性」というサブタイトルになっています。これは後で紹介しますが、原子力規制委員会は2025年度からの安全研究で高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する研究を行います。そこでは性能評価に係る研究も含まれていますので、その辺のところも紹介させていただけたらと思います。

以下が全体の構成です。

1. はじめに
2. 諸外国の安全確保の考え方
3. 安全確保に係る機能安全
4. 施設設計における性能（照査）設計の導入について
5. 性能照査の考え方のわが国の課題への反映の例
6. まとめ

1. はじめに

世界から学ぶということで2部では、フィンランドとフランスの安全確保の考え方を紹介します。フィンランド、フランスともに機能安全の考え方を導入し、施設の設計を能動的に行っています。そこで、3部では、安全を確保するための機能安全の考え方について、4部では、設計に対して性能規定方式における性能（照査）設計の導入について説明します。5部では、これらの考え方をわが国の研究開発やサイト選定等に反映できないかということで考えましたので、その辺の話をさせていただきます。

まず、原子力規制委員会の安全研究について初め

少し紹介させていただきます。令和7年度以降の実施方針は以下のようになっています¹⁾。

特定放射性廃棄物の最終処分に係る第一種廃棄物埋設施設（以下「地層処分施設」という。）を対象に、安全確保に必要な各種規制への反映を目的として、**地層処分施設が具備すべき安全機能に着目し処分システムの性能評価及び線量評価に関する研究を行う。**具体的には、性能評価に関する研究として、人工バリアの各部材及び天然バリアの長期的な変化等に着目し、将来の処分システムの性能を判断するための科学的・技術的知見を取得する。また、線量評価に関する研究として、処分システムの安全性の指標として行う被ばく線量の評価の妥当性を確認するための科学的・技術的知見を取得する。

赤字で書いていますが、「地層処分施設が具備すべき安全機能に着目し、処分システムの性能評価及び線量評価に関する研究を行う」とあります。また、図1は「性能評価」と「線量評価」との関係を示したものです。着目すべき点は、従来の安全性の評価の主役であった線量評価に加えて、**安全確保に必要な性能を明確化した上で性能評価を導入すること**です。この2つの方法によって安全確保を行うという考え方です。

2. 諸外国の安全確保の考え方

このように令和7年度以降、安全研究において性能評価に力点を置いて実施するということですが、このような安全研究を考える時に性能評価の考え方

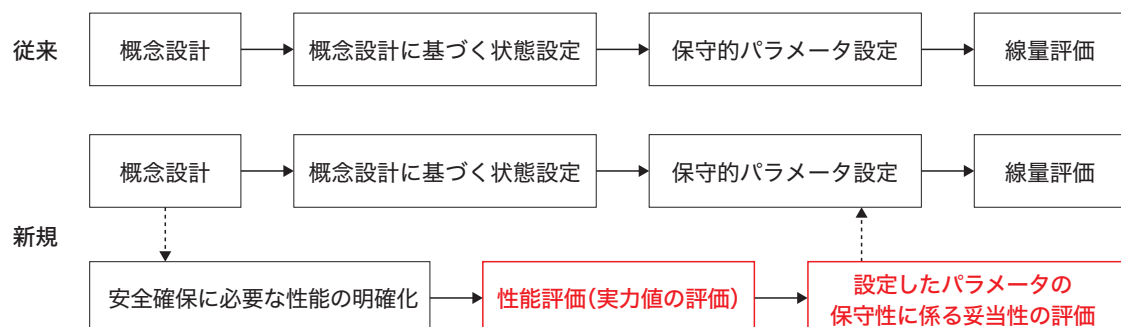


図1 性能評価と線量評価¹⁾

を導入している海外での例を勉強しました。本講演はその時に調べた海外、特にフィンランド、フランスの状況を紹介するとともに、わが国に参考になるものがないかを検討したものです。また、土木建築分野ではかなり前から性能規定型の設計を行っていますので、その状況についてこの分野の専門家の方々とも議論したり教えていただいたりしました。

フィンランドとフランスの安全確保の考え方は、地層処分の事業は法律の制定に加えて、サイト選定、技術開発等の科学技術に基づいて、社会状況も踏まえて進展しています。フィンランド、フランスとも

に処分研究がスタートして40年から50年経過しています。一方、わが国では最終処分法が制定され、原子力発電環境整備機構（NUMO）によるサイト選定及び技術開発が行われているところです。こういった歴史をレビューする時に重要な視点は、結果ではなく、何がトリガーとなったかを踏まえてレビューすることが大事かと思います。図2に示したように、いつ、どういった内容の法令やガイド等が選定されたかを認識することが必要かと思います。以下、フィンランド及びフランスを中心に紹介します。

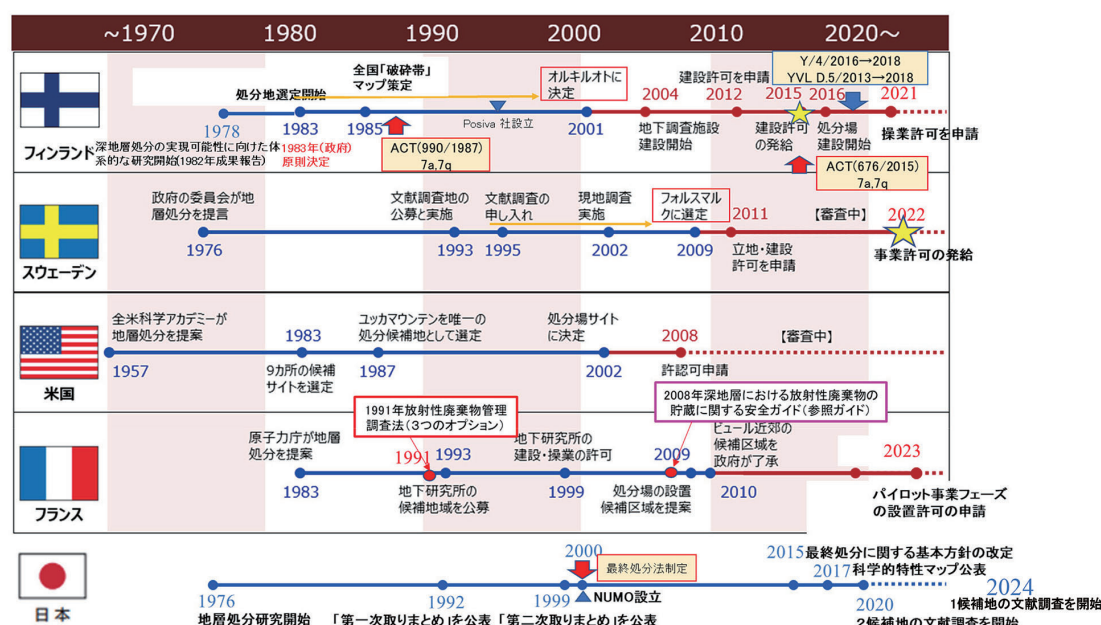


図2 諸外国の地層処分の進展状況²⁾ の一部加筆

フィンランド

図3はフィンランドにおける歴史的背景と事業の進展状況を示したものです。フィンランドの特徴の1つは、緑の枠（Ⅰ、Ⅱ）で示した「2つの安全確保の手法」があるということです。

すなわち、サイト選定プロセスと施設の性能(照査)設計を取り入れたことです。また、特徴の2つ目は黄色の枠（1～4）で示していますが、「4つのライセンス」による段階整備であるということです。

フィンランドの廃棄物埋設の歴史は、1982年成果報告「深地層処分の実現可能性に向けた体系的な研究」に基づいて地層処分を行うことを決定したことです。そして、1987年に関連する法令（Radiation ACT等）を整備し、順次必要なSTUK Regulation等の規則を整備しました。

一方、施設の設計に関しては、北欧では1960年代から性能規定型の考え方が議論されており、1976年にNORDIC「NKBモデル」が提起され性能規定型設計体系が示されました。

フィンランドの特徴は、NORDICによる性能規定型設計体系を受けて、施設の性能設計に関するマネジメント規定（VAHA2012）³⁾を策定したことにあります。このVAHA2012は、性能設計の論証体系について記述しています。これにより安全確保の目標が明確になり、それに伴い母岩や工学バリア等の性能設計が行われています。

こうした背景を受けて2001年に国会承認、2015年に建設許可、2020年にパイロット操業許可申請を行い、2025年にはパイロット操業許可が出る状況であるということです。

図4はNORDIC（デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、スウェーデン）5レベル基準が示した性能規定型設計の階層を模式的に示したものです。このNORDIC基準では、実現されるべき「安全目標」を達成するための方法を定性的要件である「機能的要件事項」、定量的要件である「実際的要件事項」へと詳細化・具現化した上で、構造物に対して「実際的要件事項」への適合を要求するこ

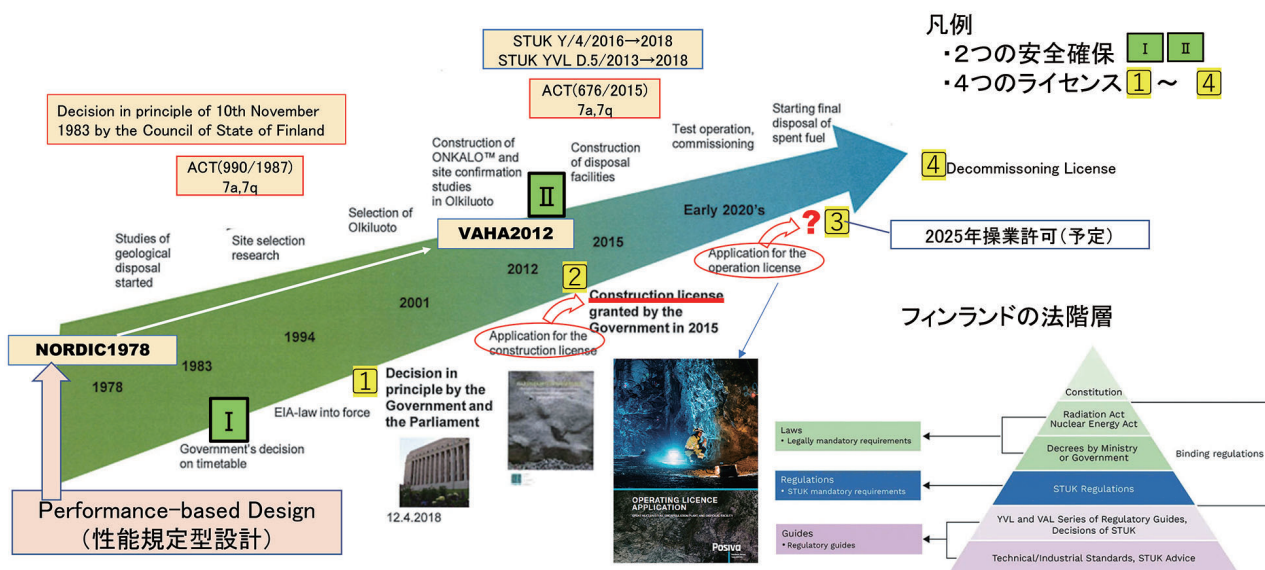


図3 フィンランドにおける法整備の歴史的背景と事業の進展状況

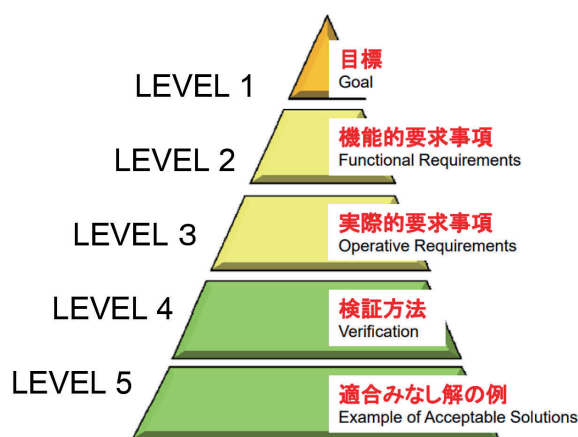


図4 NORDICの5レベル基準の階層⁴⁾

とが提示されています。さらに、「実際の要求事項」に適合することの「検証方法」を示し、また「適合みなし解の例」として従来の仕様規定を位置付けることが示されています。このNORDICの考え方は当初建築物を対象に考えたものでしたが、現在では施設や地盤も対象としており、さらに放射性廃棄物の処分施設へも適用されています。

わが国においては、土木建築分野において下表のように、施設及び地盤にも性能規定方式が広く導入

されているところです。

先ほどの図3の緑(数字)で示しましたように、フィンランドにおける処分の安全確保の考え方はサイト選定プロセスと施設の性能(照査)設計という大きく2つの視点で決定されています(図5参照)。このうちサイト選定は、全国のマッピングからスタートして「サイト選定調査」「概略サイト評価」、そして「詳細サイト調査及びサイト選定」と各段階で調査項目及び判定基準を設けて絞り込みを行っています。

一方、施設の設計では、安全確保の安全機能を設定し、性能規定方式に基づき個別構成要素(地盤、人工バリア等)の性能(照査)設計を行っています。すなわち、NORDIC基準に基づく性能規定方式を導入し、またOECD/NEAのセーフティケースのストラクチャーにも準拠した形で、施設の安全確保のマネジメントシステム(VAHA)を構築して性能(照査)設計を行っています。

ここで施設の性能(照査)設計などやや分かりにくい表現を示していますが、性能(照査)設計とは、バリア等の施設及び地盤設計において、施工実現可能性を考慮した上で、材質・形状等の構造計画が要求性能が満たされているように行う行為であり、本来の設計の定義では、形状等を決める行為と性能を

1995	WTO/TBT 協定施行(トリガーとなった条約批准)
1997	ISO2394「構造物の設計の基本」改訂
2001	国交省道路橋示方書改訂(性能規定化に対応)
2001	地盤工学会 地盤コード21 ドラフト
2002	国交省「土木・建築にかかる設計の基本」
2002	●原子炉建屋に性能規定化を導入(廃棄体設計には試行)
2003	土木学会 Code PLATFORM Ver.1

2004	地盤工学会 JGS4001-2004/ 地盤コード21 基準化
2007	国交省「港湾の施設の技術上の基準」性能規定化
2012	●VAHA (Posiva 社オルキルトの施設及び岩盤設計に導入)
2015	国交省道路土工構造物技術基準制定(要求性能を明確化)
2017	国交省道路橋示方書改訂(性能規定化体系化)

●印：原子力分野での導入

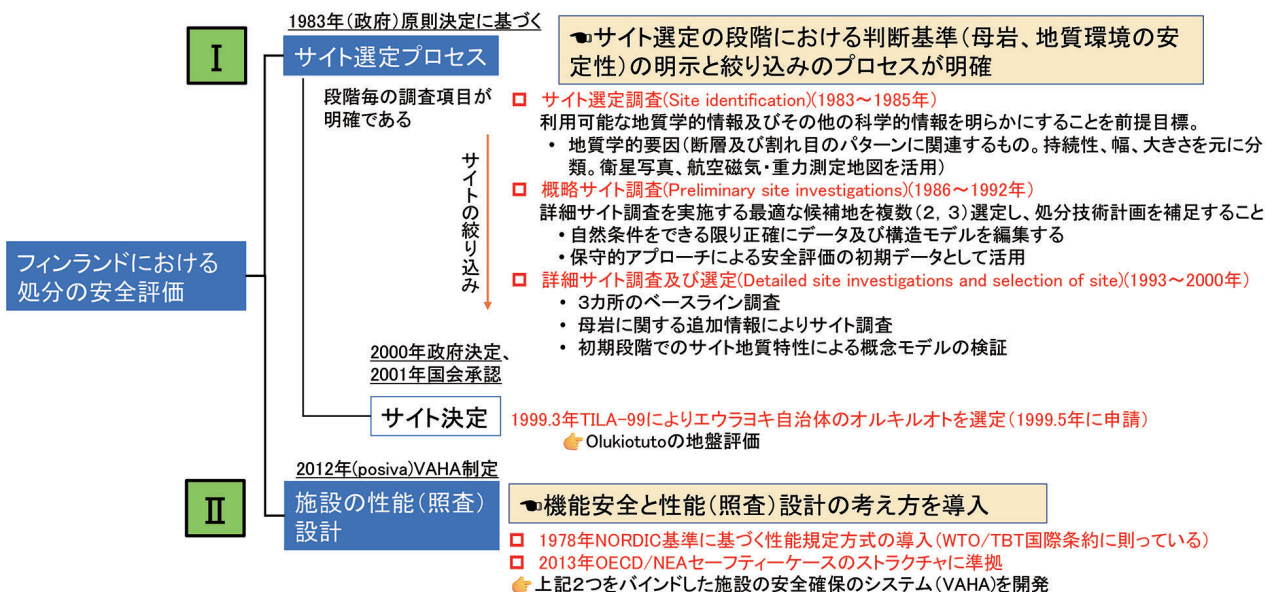


図5 フィンランドのサイト選定プロセスと施設設計

確認する照査が含まれているのですが、ここでは、あえて照査を外出しにして表現して、この言葉を使っています。性能(照査)設計のようになかなか分かってにくい言葉もありますので、語句の説明を最終頁に整理しました。

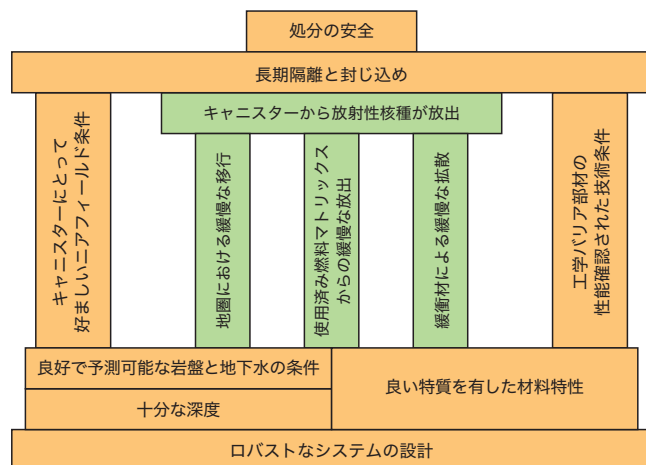
よく性能照査などと使われる照査とは、施設及び地盤設計が要求性能を満たしていることを確認する行為です。また、設計というところで示していますように、施設の立地環境、地盤環境等の地盤情報の設定、要求性能及び評価期間の設定等の基本要件から具体的に寸法、形状を考慮した構造照査の策定、すなわち設計部門と照査部門の2つで構成されていると書いています。このように広い意味の設計では照査を含んだものですが、照査や設計ということをはっきりと分けて使っているところがあります。そのことがあって、設計から照査までの一連の行為を性能設計と呼んでいます。また、性能と照査を含んだ設計、これはなかなか難しい言葉ですが、これを性能(照査)設計としています。性能設計と同じ意味です。

ここからはフィンランドにおける安全確保の考え方と性能規定方式の導入について説明します。ポシヴァ社は、性能規定方式の下で施設を性能(照査)設計した上で、処分システムを線量により評価しています。

性能規定方式とは、地盤及びバリア部材等に求められる要求機能を満足するために、性能評価指標、評価目標値等をあらかじめ設定して、それに見合う性能設計を行う方法です。従来の方式は仕様規定方式であって、これは過去の多くの実績から安全を確保できる指標と評価値を決めておき、そのとおりに設計する方式です。

この方式では多くの実績があること、さらに要求性能を評価する環境要因等が明確な場合にのみ運用できる方式です。

図6は、フィンランドにおける安全確保の関係性を示したものです。安全コンセプトは、オルキオトサイトの現在及び将来の条件下で使用済み核燃料の安全な処分を達成するために安全機能を構成要素に割り当てた図です。その内容、特徴は、使用済み核燃料中の放射性核種の封じ込めは、まず密閉されたキャニスターに燃料を封じ込めることによって行われます。他の工学バリアシステムEBS(Engineering Barrier System)構成要素は、キャニスターが無傷であるために、好ましいニアフィールド条件を提供し、キャニスターが破損した場合にはキャニスターからの放射性核種の放出を低減または防止します。



注) オレンジ色のブロックは、処分システムの主要な安全機能と特性を示す。緑色のブロックは、キャニスターから放射性核種が放出された場合に重要となる二次的な安全機能を示しています。

図6 フィンランドにおける安全確保の考え方^{3) 5)}

放射性核種の封じ込めは EBS の実証された技術的品質によって保証され、安全コンセプトの他の要件としては、処分場の十分な深さ、良好で予測可能な岩盤と地下水の状態などがあります。頑健なシステム設計は、設計やその実施に欠陥があったとしても、また将来の条件の不確実性を考慮しても、処分場システムに要求される安全レベルを提供することを保証するものです。図6のオレンジ色のブロックは、処分システムの主要な安全機能と特性を示しています。緑色のブロックは、キャニスターから放射性核種が放出された場合に重要となる2次的な安全機能を示しています。

ポシヴァ社は、NORDIC 基準を参考に地層処分の安全確保に係る設計の論証体系、性能規定方式を構築しており、それは先ほど示しましたが、2012年に作られた VAHA (VAHA2012)³⁾ に示されています。ポシヴァ社はオルキルトでの使用済み燃料の地層処分について、要求事項マネジメントシステム (VAHA 2012) を通じて頑健な設計を開発しました。これは安全原則と安全コンセプトを一連の安全機能、性能要件、設計要件、さまざまなバリアの設計仕様、すなわちオルキルトサイトにおける処分コンセプト実現のための仕様に変換するための厳密で追跡可能な方法を提供するものです。

また、この VAHA2012 では、図4の NOLDIC の5つのレベル基準に対して、レベル1は法律、原則的決定、規定要件、その他のステークホルダー要件、レベル2は安全コンセプトと安全機能の定義につながる長期的な安全原則、レベル3は安全機能が満た

されるような工学バリアの性能目標と母岩の目標特性からなる性能要件、レベル4は工学バリアと地下開口部の設計要件 (岩盤適性基準を含む)、レベル5は仕様設計を示します。これは設計、建設、製造に使用されている詳細仕様でもあります。

フランス

次に、フランスについて説明します。図7にフランスにおける法整備の歴史的背景を示します。フランスの事業進展の特徴は、ご承知のとおり、1991年のバタイユ議員による放射性廃棄物管理調査法の整備にありまして、そこで3つの選択肢「長寿命放射性核種の分離・変換」、「回収可能」、「長期地上貯蔵」に基づきサイト選定を行ったところです。その後、規制機関と事業者間で十分な意見交換を行って、安全確保に必要な安全ガイド (図の青の1) を2008年に整備して、このガイドに基づいて事業申請がなされていることが特徴です。すなわち、安全確保の着目点をあらかじめ整理して、技術または研究のリソースを集約したことにあります。

このように安全ガイドの制定までには規制機関と事業者間で十分な議論がなされ、具体的には Dossier (ドシエ) を何度も策定しています。こういった技術または研究のリソースの集約こそが安全確保の重要な側面かと思われます。

安全ガイドの目的は、永久貯蔵施設の閉鎖後の安全性を確保するために、立地調査から永久貯蔵施設の設計・建設に至るまでに考慮すべき目標を定めることです。ここではあえて永久貯蔵という言葉を使っ

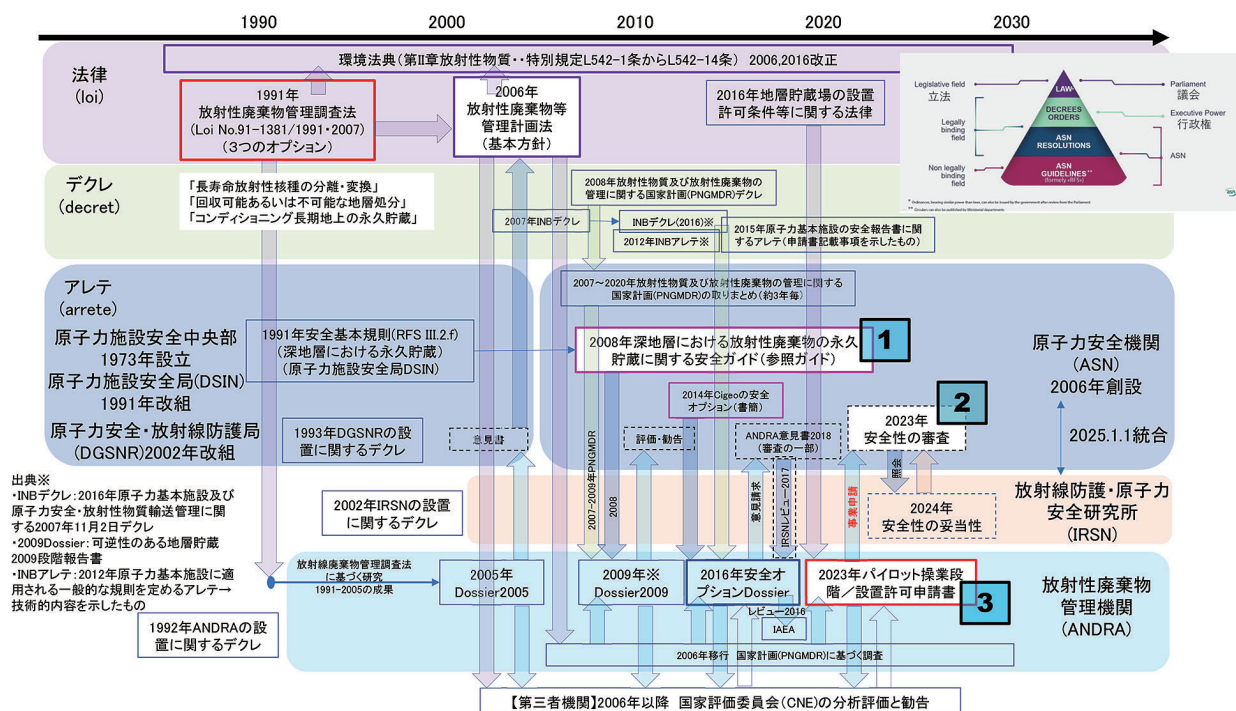


図7 フランスにおける法整備の歴史的背景⁶⁾

ていますが、フランスでは回収可能性あるいは不可逆が議論されていることから、わが国とは少し異なっていることからストレージという言葉が使われていますので、その言葉を使わせていただきました。

貯蔵システムは、廃棄体パッケージ貯蔵施設、地質環境で構成されます。また、ガイドでは地質環境の安定性を要求しています。すなわち、地質環境の安定性は少なくとも1万年間は立証を必要としており、これを超える期間は地質環境の変化に関連する要因を考慮した評価によって推定結果を補足することが必要とされています。

また、安全に関する設計の基本として、機能安全と性能（照査）設計の考え方、すなわち性能規定方式を導入しています。ここでは貯蔵システムに求められる安全機能として人工構造物の移行抑制機能、廃棄体パッケージの閉じ込め機能、そして母岩の隔離機能と移行抑制機能が示されています。このように安全確保の性能目標を明確にして、性能設計して示している点が重要なところと考えます。ANDRA社は、2023年パイロット操業段階の設置許可を申請し、ASNはIRSNに専門的観点から重要な項目の検討を要請しました（図8参照）。

技術的妥当性の検討では、安全ガイドの視点に基づいて設計フェーズ、安全性の評価フェーズごとに検討の視点が明確に示されています。設計フェーズでは地盤調査法及び地盤特性把握、すなわち地盤設計の妥当性と構成要素の設計の妥当性等であり、また安全性の評価フェーズでは放射線評価の妥当性、すなわち、数学モデル計算による線量評価の妥当性であり、そして、横断的課題として処分システムのロバスト性の妥当性があります。

このようなことを要約すると、3つの視点で安全

確保を示していると考えられます。その3つの視点とは、(A) 施設個別（要素）設備の性能設計と性能照査、(B) 処分システムとしての線量評価、そして(C) 処分システムのロバスト性の検証です。これらの考えはフランスにおいて性能規定方式に対応されていることを示すのであると考えます。

フィンランド、フランスの安全確保の考え方のまとめ

フィンランド、フランスでの安全確保の考え方は、安全確保の論証手段として「機能安全の考え方」と「施設を性能（照査）設計する考え方」の2つを導入していることです。すなわち、処分施設の安全確保に対して受動的影響評価に留まらず能動的に設計することを基本としていることです。これらは性能規定方式と呼ばれており、安全確保に係る性能目標の設定とその性能の論証が行われることになり、フィンランド、フランス共に安全確保において考慮すべき項目を構造化した上で論証していることが着目すべき点と考えます。

3. 安全確保に係る機能安全

安全確保の論証手段の1つである機能安全の考え方において、必要な機能をどのように抽出すればいいかを説明し、フィンランドにおける機能抽出の例について説明します。一般に機能安全とは、付加機能によるリスク低減策、安全方策（安全確保するための考え方）であり、特定の危険事象に関して安全な状態を達成または保持すると定義されています。また、「機能安全（functional safety）」に対比して「本質安全（intrinsic safety）」という言葉がありますが、これは原因そのものを低減あるいは除去するものです。ヨーロッパでは安全を侵す原因排除という確定

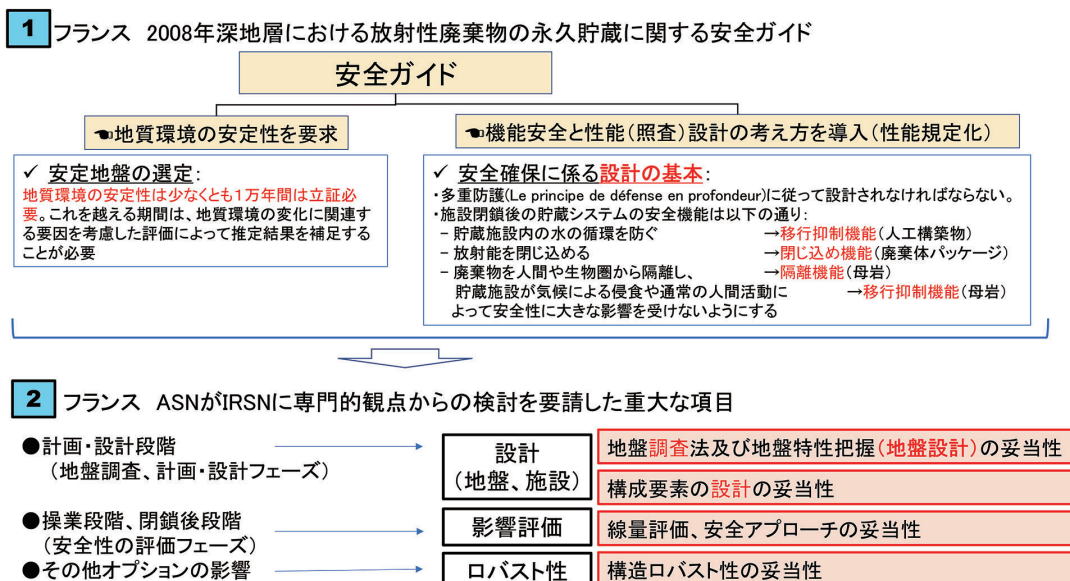


図8 深地層における放射性廃棄物の永久貯蔵に関する安全ガイドの全体像⁷⁾

論的な本質安全よりも、リスクを考慮した機能安全による安全確保の考え方が日常的に施設の設計に用いられております。それは対象とする施設等が複合化・複雑化するため、個別（要素）設備に加えて、施設全体の安全に取り組む必要があるためだと考えます。

廃棄物施設の安全性の評価においては、個別設備による多重化や評価期間ごとに状態変化があること、廃棄物の放射能の減衰があることや作用が自然現象を含むことなど不確実性が高く、さらに長期評価が求められ、原因除去ができないため「本質安全」の考え方の導入は困難です。従って、ヨーロッパでも採用されているように、廃棄物埋設における機能安全の手法の採用が大切かと思います。

そこで欧州を中心に廃棄物処分システムへの機能安全の考え方が採用されており、そこでは要求事項を明確にして、機能安全に関する基準に準拠した施設設計、また、複数の個別（要素）設備を統合した設計手法により許容可能なまでの線量の低減なども行われています。

一方、わが国の安全評価手法では安全確保に対する目標性能や性能評価指標が明確に示されていない。すなわち、それぞれの評価期間に対する要求機能に応じた要求性能、性能評価指標、性能目標値という安全に係るクライテリアが不明確というところがあるのではないかと思います。具体的に示せば、廃棄物埋設の安全確保の論証では、母岩や人工物、考慮されるべき作用としてプレートテクトニック、気候変化、重力等がある。評価されるべき期間として現在から超長期の数十万年、また、放射性核種も様々存在する。さらに、安全を論証する機能も隔離、閉じ込め、移行抑制、遮蔽とあり、これらの組み合わせを含めて所定の性能を満足していることを示すことが求められる。こうした考慮されるべき事項が多岐にわたっている場合の論証の方法として、機能安全の手法が有効であると考えています。

図9は廃棄物埋設施設の安全確保を論証するため機能安全の考え方に基づき網羅性を鑑み必要な機能を抽出したものです。この図は、先に示した図4のNORDICに準拠して構造化を行っており、レベル1である「目的」、すなわち人と環境を護るという目的に対して達成するために必要なレベル2の「安全機能」を全体系的に示したものです。まず廃棄物埋設では、「地盤環境の安定な場所を選定す

る」⁸⁾ことが最重要で、そのために機能を擾乱する事象（自然事象、人為事象等）から影響を排除するため放射性廃棄物を生活環境から隔離するという「回避する」ことが求められます。次に安全性能を満たすように必要となる母岩を含んだ構成部材等の設計を行うことであり、放射性物質を閉じ込める、移行抑制する、放射線を遮蔽するという機能に対して「設計する」ことになります。そして構成部材の性能が適切に機能していることを影響評価するという、また環境中に放出された放射性物質の移行、影響緩和に関する「評価する」の3つを全体系に考える必要があります。このように、この図は安全確保を論証する全体像を必要な機能の観点から示した機能安全の考え方を形にしたものです。

図10は、フィンランドのオンカロの安全性の評価で行われている機能抽出の事例を示したものです。図9で示した処分場が備えるべき3つの機能（臨界防止をいれると4つになりますが）に対して満たすべき性能が構造化され示されています。すなわち、閉じ込めに関する機能に対して部材の性能、影響緩和機能に対して環境への希釈・分散を遅延する性能、発生防止に関する機能に対して自然事象から隔離する性能や関連して処分場及び構成部材に対する性能等が示されています。このように求められる性能を考える場合には、対象となる処分場の部材等の明確化や性能が求められる期間・目標性能などを明確にする必要があります。そうした点でこの図はわが国の安全確保の体系化に非常に役立つと考えています。

4. 施設設計における性能（照査）設計の導入

次に、性能規定方式に基づく施設設計における性能（照査）設計の導入について話します。図11は、国等の法階層の体系を示したものであります。左の三角図の法律、政令等、省令・規則等という「国等

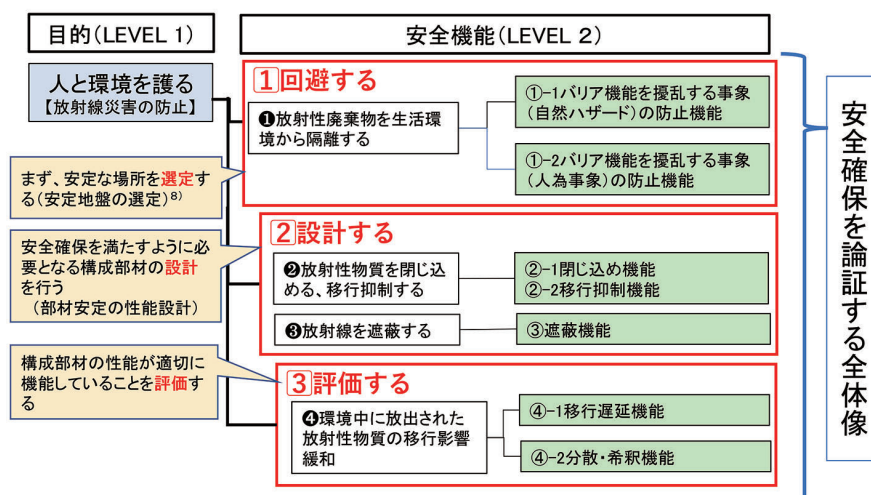


図9 安全確保を論証する全体像

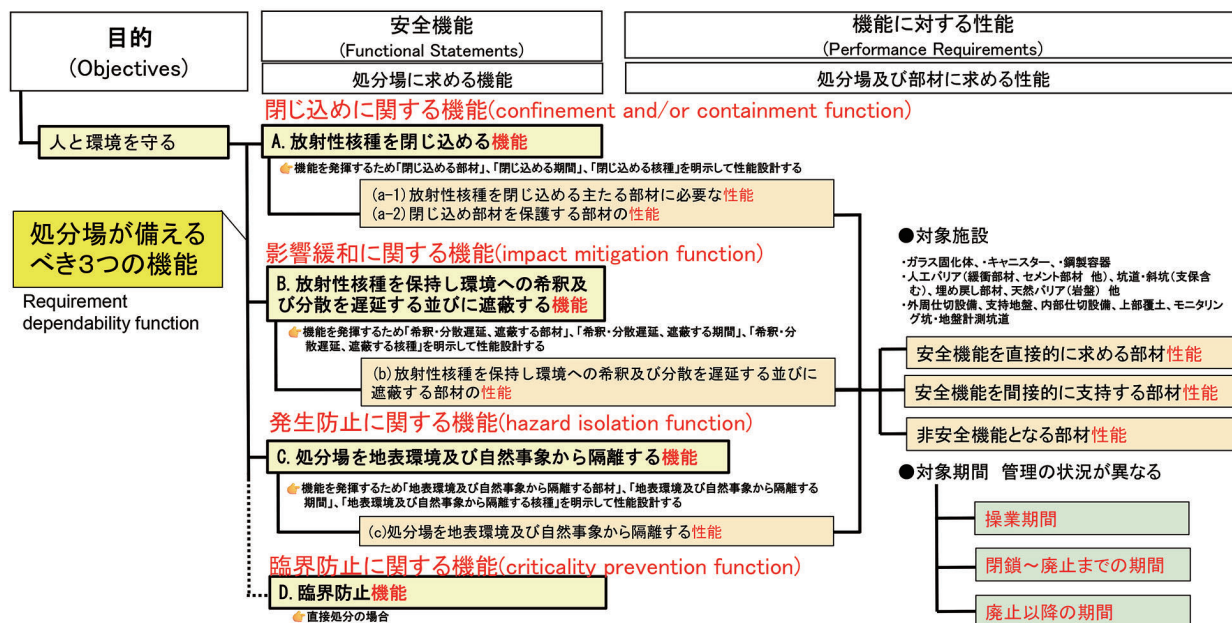


図10 フィンランドの機能の抽出の例⁹⁾

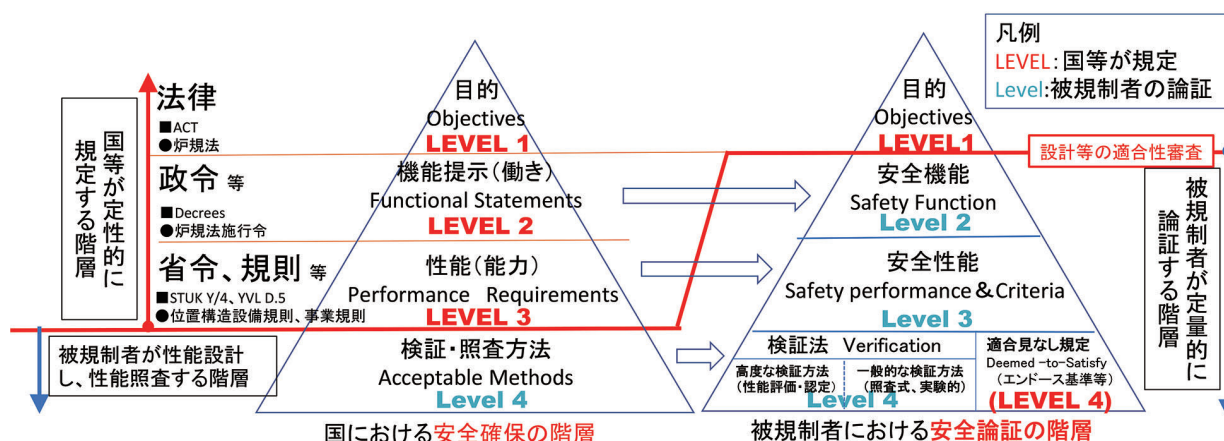


図11 施設設計における法階層について

が定性的に規定する機能提示(働き)、性能(能力)等」に対して、右の三角図は「被規制者が定量的に安全論証する」対比となっており、被規制者が定量的に論証する階層にはレベル2の安全機能、レベル3の安全性能、そしてレベル4としての検証・照査があります。

ここでレベル4は被規制者が性能設計し、性能照査するという階層です。また、検証・照査では性能評価、認定という高度な検証方法や照査式の利用や実験的といった一般的な認証方法があります。また、右下のほうの赤字のレベル4の適合みなし規定とは実績等で明らかに基準に適合している仕様のことであり、エンドースされた学会等の基準も含まれます。

このような性能規定方式の特徴は、機能、性能が法令階層と一致している点を利用した設計方式です。世界の設計法令は1995年のWTO/TBTの協定施行以後この階層構造に整備されており、性能規定方式

は現在では施設設計の潮流であり、設計の申し子とも言われているゆえんです。

図12は、被規制者が示すべき安全論証の具体的な考え方を示したものです。1. 目的を達成する手段の明示としての安全機能の設定から始まり、2. 定量的指標の明示では機能ごとの安全性能の設定と性能評価指標及び性能目標の明示が必要です。そして、それらの安全目標を達成するための設計手法及び判定基準(照査コードと呼ぶ。)の整備をサイト選定前に整備することが望ましいです。その時にそれを定量的に評価するための性能評価指標を構造化して示すことが大切です。3. 設計照査は、明示された性能が目標性能を満たしていることを照査コードに基づいて検証・照査するということです。

ここで照査コードという言葉が示されていますが、これは「設計・照査手法及び判定基準」のことです。この照査コードはフィンランドのVAHA2012やフ

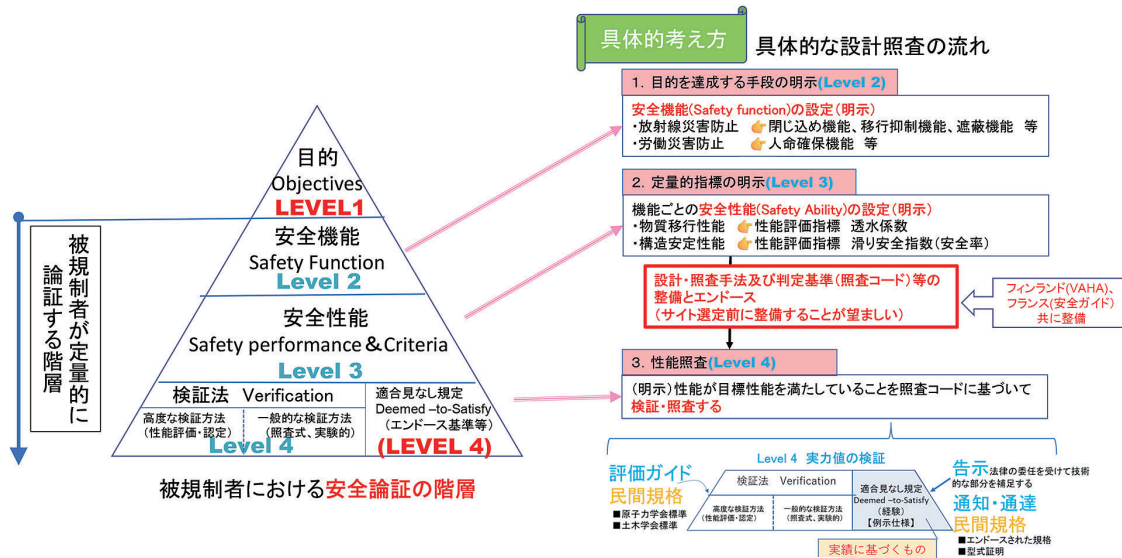


図12 被規制者が論証すべき性能照査の流れ

ランスの安全ガイドに相当するものであります。なお、この照査コードは、地盤調査前から閉鎖後評価まで一連の性能照査段階で利用出来るものであることから、判定が必要となるサイト選定前に整備することが望ましい。なお、サイト選定前では地盤情報調査のデータがない又は少ない恐れがあります。また、坑道掘削中に亀裂が現れたり、想定した地層構造と異なることが判明した場合など、安全確保に関する判定ができることが重要で、こうした場合の照査及び判定をどうするかを事前に照査コードに明示し、こうした照査判定を事前に決めていることが社会からの信頼であり大事なことです。

図13は安全確保のための網羅性を確保するための全体像と構造化の例を示したものです。図の左側半分は、図9ですでに示したのでここでは説明は割愛するが、規制が示す定性的に示すところの目的(レ

ベル1)、安全機能(レベル2)、性能(能力)(レベル3)に対して、被規制者が論証する対象部材と性能評価指標等との関係性を整理しています。また、性能(能力)のところには母岩安定性の中でみなし規定の例も示されています。また、評価部材と性能評価指標等ではさまざまな個別要素や評価指標、評価期間などが示されています。性能評価においては、設計目標値、評価目標値は安全確保上のクライテリアです。被規制者は、性能照査に向けて構造化を行い、安全確保及び論証の全体系を示す必要があります。

図14は従来の安全性評価のメインであった線量評価と本講演で提唱している性能照査の違いを比較したものです。また、図1で原子力規制委員会が行う安全研究の進め方の概念を示しましたが、この図14は具体的作業レベルまで落とし関係性も明確化した

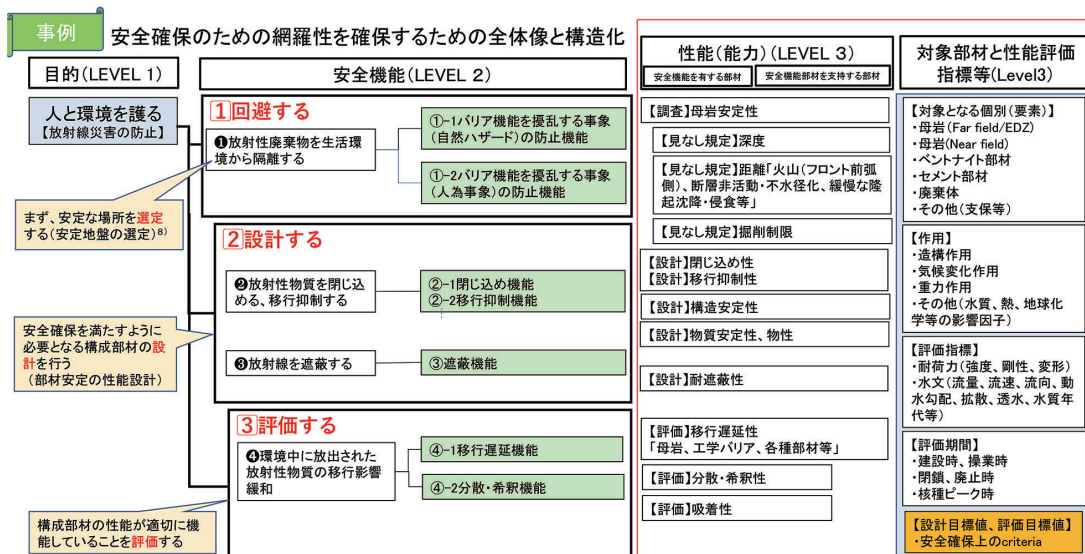


図13 安全確保のための網羅性を確保するための全体像と構造化の例

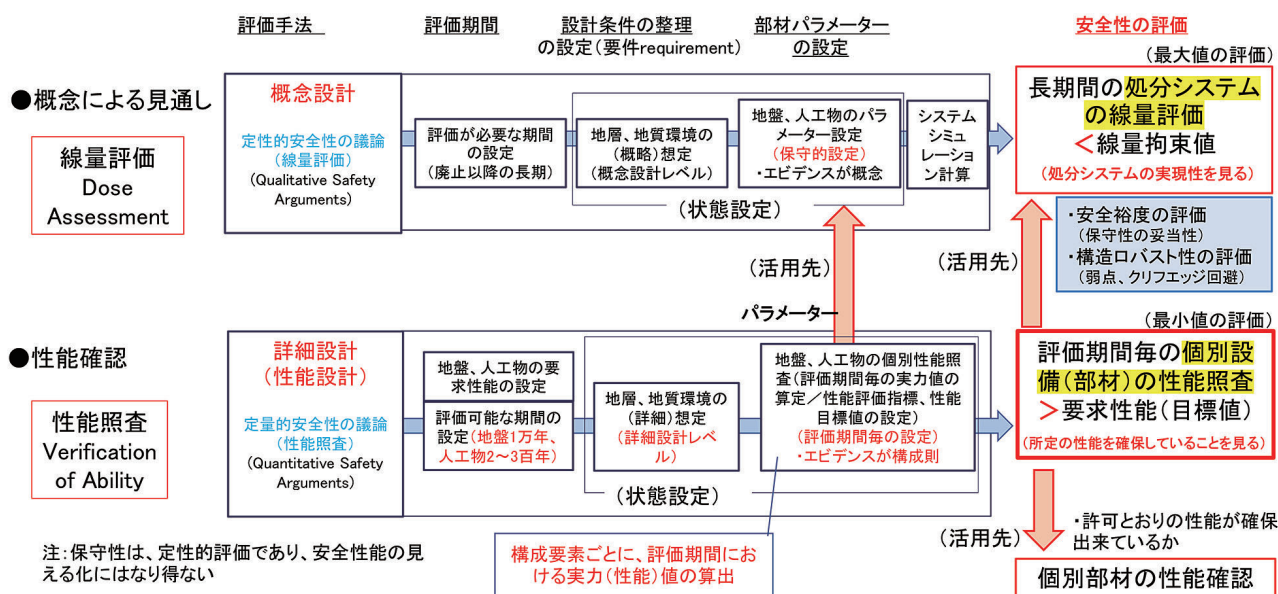


図14 線量評価と性能照査の違いと関係性

ものであります。事業許可段階では概念設計による線量評価は定性的安全性を議論する手法であり、状態設定等について保守的に設定したとしても線量拘束値を下回っていることを示すものです。これは安全評価の必要条件となります。この評価法では、処分システムとしては安全確保の裕度の程度、弱点がないのか、また、クリフエッジはないのか、どこを研究することでさらに安全性の向上ができるのか等の判断ができません。

一方、性能確認は目標性能に対して定量的安全性の論証を行うもので、評価期間、要求性能等を明確にした上で実力値を抽出するものです。これは設計及び工事の認可（設工認）で性能を論証する行為に近いものです。なお、廃止までの期間では、実力値は明確に算定できますが、それ以上の長期間では不確実性が入ります。そのため、性能照査と線量評価の関係性を明確にした上で、処分システムとしての安全性の考え方を明確にしておくことが必要であると考えます。

図15は機能安全に基づく性能照査の長期への適用の考え方を示しています。土木建築物に比べての地層処分の特徴は、天然バリアが広域であることや長期の評価が必要なことです。この図の性能照査について長期評価期間に点線の部分がありますが、性能照査は短い時間だけのものではないということが大切です。

安全評価においては、次でも説明しますが、性能照査評価、線量評価、そして俯瞰（ふかん）的に問題ないかのロバスト性の評価が重要です。実力値で見る性能照査評価については、この図のとおり、長期的には点線部分にはグレーなところがあります。また、一方、線量評価については保守的な状態設定を行うということもあり、点線の部分がありません。ここでは、この緑の枠で示したように、性能照査と線量評価の関係性に係る研究が重要となります。

次に安全評価の基となる工学バリア、天然バリアについては、長期的にはグレーゾーンがありますが、その時期は2つで大きく異なります。このようなことを意識しての長期構造及び物質安定性を意識した工学バリアの技術開発や安定な地盤を意識した母岩の調査技術が必要かと思えます。

図16は安全評価の全体像を示したものです。廃棄物埋設の安全確保の考え方を示すとともに、俯瞰的

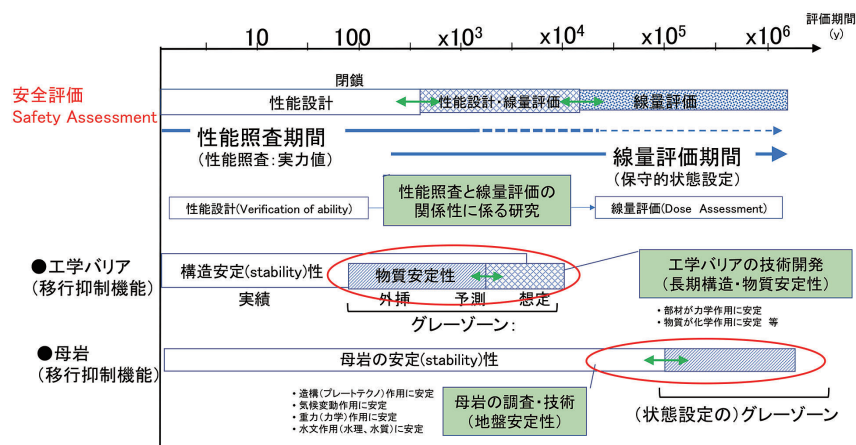


図15 機能安全に基づく性能照査の長期への適用の考え方

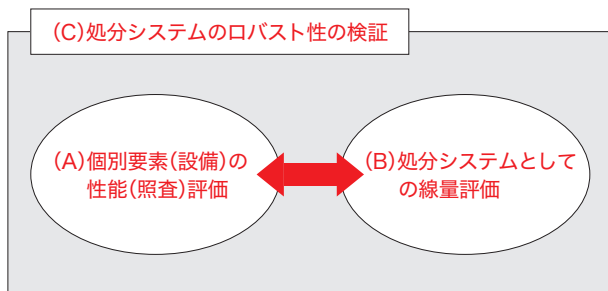


図16 安全評価の全体像

に安全性を評価することが大切だと考えます。安全評価は3つの観点での論証・検証が必要と考えます。

すなわち、1つ目は

- (A) 個別要素（設備）の性能照査評価という埋設施設の機能安全に対する論証です。ここでは安全確保の要件と、それを達成していることを示すことが必要です。そのために施設設計を行い、性能照査、すなわち性能設計を行うという性能規定方式の導入があります。また、要求機能に対する論証の構造化も大切です。2つ目は、
- (B) 処分システムとしての線量評価です。概念設計に基づく処分システムの材料特性及び地質環境の状態設定を保守的パラメータによる線量評価を行うというものです。3つ目は、
- (C) 処分システムの構造健全性に係る検証で、処分システムのロバスト性の検証です。ここでは処分システムが有する潜在的な弱点の回避や、クリフエッジがないことを俯瞰的に評価することになります。

これらの関係性を示したものが図16であります。

5. 性能照査の考え方のわが国の課題への反映の例

次に、ここからは少し性能照査の考え方のわが国の課題への反映の例として、「研究開発、技術開発」「サイト選定」の2つのテーマへの反映について話をしたいと思います。

1つ目は、「研究開発、技術開発」に関連する事項への反映として、以下の3つがあります。

- (i) 処分システム（個別（要素）設備を含む）の安全性の目標の明確化
- (ii) 性能が発揮出来ることの確認（＝性能照査）
- (iii) 地層処分の特徴である天然バリアの存在、長期の評価が必要であることの理解

施設の安全確保を行う上で安全性を明確に示す必要があります。その手法としてフィンランド、フランスでは性能規定方式が導入されていることを紹介しました。これは能動的に施設設計を行い、いわゆる性能設計をすることを意味しています。(i)で示すように施設設計する上で、安全に係る性能目標、判定基準の明確化が必要と言うことです。性能設計は、

目標性能を満たしていることを照査する行為ですから、安全確保の明確化が実現できます。この性能照査は、地盤を含む構成部材全てに対して評価期間ごとに性能目標が示され、現状の実力値から将来の性能まで評価段階に応じて設計し照査することを意味します。これがまさに(ii)で示す性能照査になります。(iii)は、地層処分の特徴である天然バリアの存在や長期の評価が必要であり、そのような必要があることの理解が必要です。このようなことを留意することによって、安全確保を論証する上でも目標が明確になり、必要な研究開発、技術開発がより効果的に進むことに加えて、足りない開発が何かも明確になってくるのではないかと考えます。特に、重要なものは、技術をどの部分にリソースを集中すべきかも明確になるかと考えます。

2つ目は、「サイト選定」への反映です。ここでは(a)地盤が持つべき機能（隔離、閉じ込め等）とその機能を満たすべき性能があることの確認、すなわち性能照査の観点が重要かと考えます。地盤（母岩）に求める機能を満たすためには、安定な地盤の選択が必要であります。しかし、定性的には議論されていますが、現状は具体的ではありません。機能安全の考え方を導入することで、何をもって安定であるかを構造化して、論証することが求められます。そうすることで(b)適切に地盤調査を行い、その結果に基づいて地盤の性能照査を行うことで実力値が明確になります。このような機能安全の導入と(c)性能照査により適切なサイト選定が科学的技術的に行えると考えます。これらの考えは、フランスの例にあるように被規制者のみが論証を行うものではなく、規制側としても地質環境の安定性とは何か、規制すべき項目は何か、設計と影響評価との関係はどこか等を明確に明示することも必要と考えられ、これらの成果は、将来の規則策定の基盤となるものと考えています。

6. まとめ

フィンランドとフランスの考え方を学びました。すなわち、埋設施設の機能安全に対する論証と施設設計において性能照査、性能設計という性能規定方式の導入です。これらは安全確保に重要なポイントであると考えます。このようなフィンランド、フランスで考えられている性能規定方式はわが国の地層処分において参考になると考えます。

また、そこでは土木建築分野と廃棄物埋設分野での考え方の違いを明確化した上での導入が必要で特に、天然バリアが広域であることや長期にわたる性能照査の必要があることを踏まえ、安全性の評価として、性能評価、線量評価及びロバスト性の評価を一体化していく必要があることを認識すべきだと考えます。

フランスやフィンランドの例を見て、機能安全や性能規定方式というものがどうなるかを考えて、そういうものを日本にも適用することによって研究開発、技術開発やサイト選定が少し前向きに進むのではないかということを考えました。

（本稿は、2024年12月13日に開催した2024年度原環センター研究発表会の特別講演「放射性廃棄物埋設における安全確保の考え方～世界から学ぶ性能照査の重要性～」に基づいて作成したものです。）

参考文献

- 1) 原子力規制庁、第6回バックエンド技術評価検討会 令和6年10月16日 資料2-1 研究計画(案) (第一種廃棄物埋設施設の性能評価及び線量評価に関する研究)
- 2) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」に一部加筆、<https://www2.rwmc.or.jp/>
- 3) VAHA:Posiva's requirement management system (in Finnish "Vaatimusten hallintajärjestelmä"), 2012.
- 4) 国土交通省、外国の建築基準の体系（基準の策定等）<https://www.mlit.go.jp/common/000162169.pdf>
- 5) Posiva 2012-22 Underground Openings Production Line (Design, Production and Initial State of the Underground Openings), 2013
- 6) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター、諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」に加筆、<https://www2.rwmc.or.jp/>
- 7) たとえば、Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo, Décembre 2022
- 8) 増田純男、地層処分に適した安定な地質環境についてー地層処分の安全性を担保する地質環境の安定性とはー、日本原子力学会誌、Vol.58, No.2 (2016)
- 9) 東原知広、河原木千恵、入江正明、飯塚敦：北欧の廃棄物埋設施設における緩衝材を事例とした性能設計の考え方、令和5年度土木学会全国大会年次学術講演会 CS-9 放射性廃棄物処分(3)、CS12-20, 2023

語句定義

本稿で用いている語句について、下記に定義を示す。

機能安全 (Functional Safety)

施設等の設計において、複合化・複雑化に伴う対応のために、個別（要素）設備に加えてシステム全体の機能を要求して、それを性能設計することで安全確保を論証する安全方策。

構造化 (Structuring)

構造化とは、(1) 物事の全体を把握（定義）した上でその「構成要素」についても明らかにする。そして、(2) 「構成要素間の関係」をわかりやすく整理する取り組みのこと。この構造化により安全確保に対して論証すべき項目等が明確になり俯瞰性が担保される手法である。

設計 (Performance-Based Design)

施設の立地環境、地盤環境等の地盤情報の設定、要求性能及び評価期間の設定等の基本要件から、具体的に寸法・形状を考慮した構造詳細の算定（設計部分）及び性能評価や性能照査（照査部分）で構成される。設計の対象は施設と地盤である。なお、施設の部材等の形状や厚さ等や、地盤の構成、特性等を決めるだけの行為を設計と呼び、設計と照査を分ける場合がある。

概念設計、基本設計 (Conceptual Design)

材料特性レベルによる処分概念によるものであり、詳細な設計や性能照査をする前の段階の設計であり、例えば、2000年レポートで示した技術的実現性のこと。

照査 (Performance Verification, Verification of Ability)

施設及び地盤設計が要求性能（能力）を満たしていることを確認する行為。材料特性と部材性能は異なる照査である。

性能設計 (Performance-based Design)

設計から照査までの一連の行為。

性能照査 (Performance Verification, Verification of Ability)

＝照査と同義語

性能（照査）設計

バリア等の施設及び地盤設計において、部材及び構造物が施工実現可能性を考慮した上で、材質、寸法・形状等の構造計画が要求性能を満たされるように行う行為（＝性能設計）。

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）
TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>