

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2014.3.NO.109

目次

センターの活動状況	①
地層処分の知識マネジメントに関する考察	②

センターの活動状況

I 運営状況

第12回理事会開催

平成26年3月3日開催の第12回理事会において、平成26年度事業計画及び収支予算等について付議し、それぞれ原案のとおり承認されました。

第9回評議員会開催

平成26年3月13日開催の第9回評議員会において、平成26年度事業計画及び収支予算等について付議し、それぞれ原案のとおり承認されました。

II 成果等普及活動の実施状況

平成25年度 第4回原環センター講演会の開催

当センターの田辺博三技術参事を講演者とする、平成25年度第4回原環センター講演会を開催し、欧州連合における地層処分の実施に向けた国際協力の動きなどを踏まえ、地層処分事業を推進するために必要な知識マネジメントの方策について講演しました。

開催日時：平成26年3月25日(火) 15:15～16:45
会場：日本交通協会 大会議室
演題：地層処分の知識マネジメントに関する考察



地層処分の知識マネジメントに関する考察

技術参事 田辺 博三

1. はじめに

本日は、地層処分の知識マネジメントについて、最近特に感じているところを述べさせていただきます。

放射性廃棄物の管理・処分に従事して40年あまりが経ちました。卒業した当時は日本の商業用原子力発電設備が次々と建設される時期であり、また、再処理工場も操業開始されました。そのような状況に対応して、放射性廃棄物の処理技術開発と実用化が熱心に行われ、一方で地層処分研究も開始されました。それらの活動は、地層処分が制度化され実施主体が設立された2000年までにほぼ終了しましたので、大まかには2000年までを研究段階、2000年以降を事業段階と考えることが出来ます。(図-1)



図-1 わが国の地層処分の流れ

その後計画通りに進んでいますと、地層処分候補サイトの選定・調査と、そのサイトにおける地層処分施設の具体的な設計や安全評価、いわゆるセーフティケース (SC)¹の開発が行われ、そこから抽出された研究開発が行われ、さらに次の段階のSCの開発へと進んでいったと思われませんが、残念ながら、サイト選定が進まない状況が続いたため、ここ十数年はSCの開発が行われていません。一方で、2000年以前の研究に携わった方々がリタイアする状況になり、他方で、新たに研究に携わって来られた方々は2000年以前のような処分システム全体のとりまとめの経験が無く、処分システム全体を学ぶことや、担当している研究開発がどのような位置付けにあるの

¹ セーフティケース (SC) : 「施設または活動の安全を裏付ける論拠及び証拠を収集したものであり、地層処分手業の場合は、所定の開発段階に関連している。このような場合、そのSCは、何らかの未解決の課題の存在を確認し、これらの課題を将来の開発段階において解決するためのガイダンスを提供するものとすべきである。」 (IAEA安全用語集2007年版より)

か、その成果が実際の処分システムにどのように役立つのかについて理解をする機会が少ないという状況が続いています。このような状況を改善するために、今の段階でどのような対策が考えられるかについて、私見を述べさせていただきます。

2. 地層処分の知識マネジメントの必要性

原子力の知識マネジメントの必要性は、国際的にも広く認識されてきました。特に、2000年代に入って欧米で原子力発電の再評価が進み、原子力発電設備の増設や新規導入の機運が高まってきた状況(「原子カルネサンス」と呼ばれています)の中で、2002年の国際原子力機関 (IAEA) のシニアオフィシャル会議で原子力の知識マネジメントの重要性が勧告され、同年の通常総会以降、毎年その重要性が決議されてきました。そして関連する国際会議が開催され、知識マネジメントに関する一連のIAEA文書も作成されてきました。この一環として、2007年にドラフト作業が行われた「放射性廃棄物管理施設における知識マネジメント」に筆者も参加しました。そこで地層処分を念頭にまとめた要点は次にあげる5つのものでした。

①非常に長期間にわたる知識マネジメント

地層処分は非常に長期間にわたる事業だということです。よく日本では100年事業と言うわけですが、100年といいますと世代が何代も代わっていくわけです。すると、必然的にその知識を伝承し、後継者をいかに育成するかということが重要になります。

地層処分に必要な情報というのは、地層処分場だけに限りません。そこで処分される廃棄物、ガラス固化体やTRU廃棄物の固化体は、その廃棄物がどこから発生してどういう性状を持っていて、そして処理をした結果、どういうものになっているかという情報も非常に重要ですので、廃棄物の発生から処分場の閉鎖までという長い期間にわたって、かつ膨大な情報を適切に統合し引き継いでいかなければいけないという特徴を持っています。

知識伝承ですが、残されていくものは報告書なり記録なり、いわゆる情報なわけです。情報はいくら集まっても情報であるわけで、それを理解する能力をその人が持って初めて情報が知識になります。そのためには、情報をまとめて残していくことも必要ですが、それを理解出来る人を同時に育てていくことも必要となります。閉鎖後についても、地層処分の情報を残していこうということになっております。その際は閉鎖後に情報がマネジメントされるという

ことを想定しない形で残していく必要があります。

②限られた経験にもとづく知識マネジメント

もう一つの地層処分の特徴は、限られた経験にもとづく知識マネジメントが必要だということです。原子力発電所は今日本では停止しておりますけれども50基前後ありまして、世界でも400基あまり存在します。したがって、建設、操業、廃止措置の経験など、さまざまな経験が蓄積されています。しかし、地層処分、特に高レベル放射性廃棄物の処分場の経験は世界にありません。しかしながら、サイト特性調査をすでに行っている国もありますし、地下特性調査を行っている国もあります。地下研で研究している国もあります。あるいは、高レベル放射性廃棄物ではありませんけれども、その他の廃棄物を処分する地層処分場も世界にはあります。そういう限られた経験にもとづいて知識マネジメントを行っていかなければならないという特徴があります。

また、技術、科学知識が変化していくことも考えなければなりません。初めての1号機を作ることですから、2000年までに抽出した課題が全てかという、それはやはり先ほど言いましたSCの開発を繰り返し行っていく中で課題の抽出を漏れ落ちのないように検討していく必要があります。その結果として新しい課題が出てくる可能性があります。また、新しい知見が出てきて、今まで課題ではないと思ったことが課題になることもあります。これから先、発生する廃棄物について言えば、今発生している廃棄物とは違った形で処理したのも発生する可能性があります。そういったことへの対応も必要になります。さらに、規制そのものが変わる可能性がありますし、社会の変化ということもあり得ます。そういったことへの対応も必要になります。このように、知識マネジメントは継続的進歩や改善の一環としても行う必要があるということになります。

それから、将来の意志決定者へ知識を伝達する必要があります。可逆性と回収可能性（R&R）の議論の中でも将来世代の意思決定に柔軟性を持たせるといった大きな目標がありますけれども、そのためにはきちんとした情報を伝達することによって、将来の世代自身の判断にもとづいて決定が出来るようにしなければなりません。また、意思決定で行った決定の過程や判断根拠についても文書化して、次世代の意思決定のためにきちんと残す必要があります。

③さまざまなソースからの知識の統合

地層処分に関連する情報については非常に幅広い情報源があるということで、ここではそういうものを統合していく必要性について取り上げています。例えば国際機関、国、規制機関、実施主体、研究機関などのさまざまなところに情報があります。これらの情報をネットワーク化し統合をするとステーク

ホルダーにとっては便益になります。また、この情報は出来るだけ前後の意味が分かるように文脈的に表すとか、あるいは視覚的に理解出来るものとする事が望まれます。

ただ、ネットワーク化することは一義的に便益しかないように見えますが、リスクもあります。機微情報や情報の媒体の寿命の問題、これを維持するためのコストや労力が増加するとか、あるいは意図しない結果が出てくることも考えられますので、そういったことにも注意して行っていく必要があります。

これらの他には、④多くのステークホルダーの関与があるということと、⑤教育訓練がありますが、これらについてはさまざまな論文や発表がありますので、ここでは割愛させていただきます。

今申し上げたドラフトを2007年に作成しました。それ以降7年経って今の状況を見ますと、当時は原子力ルネサンスと言われた状況でしたが、福島事故以降は若干複雑な様相になってきたという感じがあります。ただ、原子力発電所を新設する国、維持する国、あるいは廃止措置する国、いずれであっても放射性廃棄物の管理・処分は必要ですし、それらの知識マネジメントの必要性は変わらないと思います。日本では事故以降の人材確保や、卒業後の就職先などに変化があるのかも気になるところです。

なお、本ドラフトをまとめる際に、地層処分の事業が長期にわたる中での知識マネジメントは取り上げていましたが、サイトを確保することが出来ないという状況が長く続くという中での知識マネジメントということについては十分考慮しておりませんでした。

3. 研究開発（R&D）の課題

はじめにでも述べましたように、地層処分に目を当ててお話しますと、日本では、2000年までの研究段階においては、非常にたくさんの時間、人、お金を掛けて地層処分の研究が行われてまいりました。2000年以降の事業段階では、研究段階で行ったような全体をまとめていこうという、そういう作業はなかなか出来ていません。一方で、2000年までに行われた研究から出てきた課題を粛々と行っている状況が続いています。この大きな理由としては、やはり候補地がなかなか見つからず、本来なら候補地があって、そこで具体的にどのように処分場を作るかという検討がなされ、いわゆるSCを開発する作業がなされる場所がなかなかうまく前に進まないところがあったのではないかと考えています。

この間のR&Dを見ますと、一つの特徴としては、非常に細分化した分野の研究が進んできているということがあると思います。

例えば大学です。2000年までは大学の先生方に相談に上がっても、ほとんど地層処分を専門とされる

方がいらっしやらず、関連した科学技術の分野で研究されている方がいらっしやいました。そういう中で地層処分の説明をして、それを理解していただいて、いろいろと助言や示唆をいただき、あるいは大学の方でも少し研究を行っていただくというような状況でした。それ以降、この十数年の間で大学の方でもかなりの研究室の中で地層処分に関連する研究が行われてきた状況があると思います。特にベントナイトやセメントなどの分野の先生方は、地層処分に特化した研究も幅広く行っていただいて、そういう意味で裾野が広がっていると思います。

一方、研究機関や企業でR&Dを担当している方を見ますと、2000年までのことを経験していて、R&Dを引き続き行っていらっしやる方は非常に少なくなっていました。今担当しておられる方は、R&Dから入ってきた方が非常に多くなってきています。そういう方は自分が担当しているR&Dとそれがそもそも全体のシステムの中でどういうことか出てきたのか、あるいはそれをやることによってどういうふうに役立つのかを理解をしていただくことが、たとえば、レポートで勉強したとしても、不十分になってしまう可能性があると感じています。

そして、先ほど言いましたような世代交代の時期を迎えておられて、処分システム全体を理解している人材が枯渇しようとしているのではないかと感じています。

R&Dの課題を振り返ってみますと、いくつか範疇があると思います。「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—」(以下、2000年レポート)や「TRU廃棄物処分概念検討書」(以下、第1次TRUレポート)で構築された処分概念とそこで抽出されたR&Dです。一つは処分概念が少し変わったとしても、普遍的な課題があります。例えば、熱力学データベースや色々な解析ツールなどであり、現象で言えば、セメントやベントナイトが長期にわたって変遷していく過程の理解などがそうです。これに対して、処分概念オリエンテッドの課題もあるわけです。例えば、人工バリアとしてセメントだけの処分概念もありますし、ベントナイトを使う処分概念もあります。それから、その人工バリアにどういう安全機能、長期の安全性を担保するためにどういう役割を持たせるかということもあります。それによって課題が変わってくるわけです。例えば、余裕深度処分概念とTRU廃棄物地層処分概念を見ますと、前者ではセメントの安全機能として非常に低い拡散係数を求めています。後者では、基本的に物理的バリアとしては期待していません。その場合、前者の場合には期待する安全機能を長期にわたって保証するための課題が設定されます。一方で、TRU廃棄物の場合には安全機能を求めていますから、長期の変遷を評価する課題に

とどまります。このように処分概念、あるいはその中で設けている安全機能によって課題が異なってきます。

もう一つの範疇としてあるのが工学技術に関わるものです。地層処分ではいくつかの工学技術を構築しなければいけないのですが、そこにはさまざまな代替方法があり、そのうちの一つを選んで前述のレポートを書いているわけです。しかし、国によって選択されている工学技術に違いがあります。例えばオーバーパックや緩衝材の設計方法があげられます。オーバーパックでは日本とフランスの厚さの違いが見られます。日本とスウェーデンではオーバーパックの構造の違いや緩衝材の厚さの違いがあげられます。これらは設計の考え方や方法の違いに起因するものと思われます。その結果として溶接方法や検査方法にも違いが出てくる可能性があります。実用化においてはこういったことを比較検討して合理的な方法を選択する必要がありますし、その結果によって違った課題が出てきます。TRU廃棄物はパッケージ化して定置するという設計にしたわけですが、他の国でもパッケージ化はほぼ共通になっています。ただし、そのパッケージの構造については違いがあります。

このようにR&D課題には処分概念や代替法に依存する課題もありますので、地層処分の事業化に当たってどういうふうに具体化していくかによって課題が変わってくる可能性があるわけです。R&Dを担当する方は、これらの課題の背景、特徴についても理解して進めていただく必要があると思います。

各国の進展具合を見ますと、候補地が順調に見つかっている場合は、サイトの調査やその地質環境条件にもとづいて処分概念の検討を進めています。また、その検討結果として課題を抽出していくことがSCの開発の中で行われています。そして課題に取り組み、その成果を踏まえて次のSCを更新・改善する、それを繰り返していくことによってその概念をより具体化し、実現に向けていくという作業が行われています。図-2はSKB(スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)によってこのような作業が繰り返し行われたことを示しています。さらに、SKBの方のお話では、これを繰り返すことによって事業者とそれを支える方々の能力の維持・向上、知識継承、人材育成にも役立っているということです。

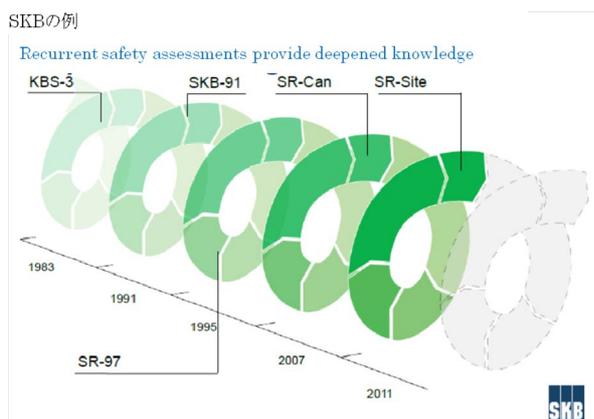


図-2 SKBのSCの繰り返し開発状況

(総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ (第6回) 配布資料1 (平成25年11月20日))

4. 提案したいこと

わが国では、2000年に事業段階に入り、国の基盤研究 (R&D) が始まり、一方で実施主体の原子力発電環境整備機構 (NUMO) は技術開発を始めました。NUMOは2002年に地層処分施設の設置可能性を調査する区域 (文献調査を実施する区域) の公募を始め、それから順調にいけば文献調査、概要調査、精密調査というふうに進み最終処分地の選定に至る計画でした。その間に、例えば概要調査をした後は、その地質の条件に合わせて概念設計や安全評価、いわゆるSCを開発する作業を行っていたものと思われる。そうすると前述のR&Dと技術開発の成果がSCの開発の中で評価されて、次の段階に向けた課題が抽出され、そしてその次のSCがあり、先ほどのスウェーデンの例のように、SCがスパイラルに改善・更新されていくという繰り返し作業が行われたものと思っています。しかし現実には現在も文献調査のサイトは見つかっておらず、最新の知見と概要調査の結果を踏まえたSCが開発されていません。

このような状況を改善するために、今の段階で考えられる対策として、以下の提案をしたいと思います。

一つ目は、候補地が無いわけではありませんが、処分事業の具体化を図るために、最新の知見を踏まえたSCを開発してはどうかということです。その後は、現在国で検討されている申し入れ方式がうまく進み、文献調査、概要調査と進んでいく場合はスウェーデンと同じように節目毎にSCを更新していく、あるいはそうでない場合には定期的な間隔でSCを更新していくということです。事業段階も大事ですが、このSCのサイクルを回すということも今後念頭に考えていったらどうかということです。二つ目としては、先進国のSCを学ぶことによって効率的、効果的なR&Dや技術開発を推進することです。スウ

エーデンでは2011年に立地・建設に関する許可申請を行い、フィンランドでは2012年に建設許可申請を行いました。フランスは2015年に設置許可申請を行う予定です。これらの3ヶ国は非常に進んでおり、もう事業申請を行うという段階ですので、そういうSCを学ぶことにより、日本でこれから進むべきところをより効率的、効果的に推進していけないかということなのです。到達の目標を参考にするとか、あるいはわれわれがまだ気が付いてない、気が付いているけれども出来てない、そういう事業化の課題というものを見越してR&Dに取り組むことも必要ではないかと思っています。もちろんこれらの国々の処分概念や工学的方法はわが国とまったく同じということではありませんが、共通の課題も多くあります。

その際に、これまでももちろん色々な課題について海外に学んできたわけですが、その経験で少し私が感じているのは、継続的、体系的に学んでもらいたいということです。設計や安全評価の考え方、内容を体系的に学ぶことを常に心掛けてもらいたいです。断片的に、スポット的に学ぶことが散見されるような気がします。行って聞いてくるということでは体系的に学ぶことは出来ないわけです。相手機関と協働で作業することを考える必要があります。また、海外の機関と付き合っていて時々言われるのは、日本から多くの方が同じことを聞きに来るがどうしてかと、少しくれームめいて言われることがあります。われわれは学んでいく上で、学んできたことを共有する仕組みを考えなければいけないのではないかと思います。そうすることが、良好な関係で持続的に協力していくための条件だと思っています。例として、われわれが今学んでいることは緩衝材のパイピング・エロージョン現象と施工面の対策があります。2000年まではあまり考えなかったのですが、申請しているSKBやフィンランドのポシヴァ社で問題になっている課題の一つです。このほか、これまで日本ではあまり体系的に行ってきかなかった廃棄物の受け入れ基準、廃棄物インベントリーの予測をどう構築するかということは、再処理をする国に学ぶことが重要だと思っています。

TRU廃棄物の定置方法については、長期安全性に影響しない方法で実際に出来ることをやらなければいけないのですが、地質環境条件があまりはっきりしないところではなかなか具体化が難しいところです。この定置方法についてはまだ手をつけられていません。フランスの方法を参考にすることが考えられます。

エンジニアリング的に言えば、ある現象について学び、その対策技術を学ぶこと、これはハード技術だと思えますが、これを長期の安全性と両立させるためにどういう指標を置くべきという考え方や、そ

れが長期安全性にどう関係するかということ、定置のシーケンスや設計などのソフト技術も合わせて学ばないといけません。先ほどのパイピング・エロージョンでも現象だけを学んでも、それでは事業に結び付いていかないだろうと私は思います。三つ目は国際共同研究に参加して先進国とともに学ぶことです。この点については次章で述べます。

これらのことを進めることによって、事業者とそれを支える方々の能力維持・向上、知識継承、人材育成にも役立てることが出来ていくのではないかと、ということが私の提案したいことです。

5. 国際的な活動への参加の提案

本章では、前章で提案したうち、国際共同研究への参加について、欧州連合（EU）の最近の活動を紹介するとともに、欧州原子力共同体（EURATOM）の共同研究への参加経験として地層処分場のモニタリングおよび廃棄物中の炭素14の課題について述べたいと思います。

5.1 事業申請段階の欧州連合の活動

欧州ではフィンランドは2022年、フランスは2025年までに操業を開始する予定です。スウェーデンについては、最近更新したレポートの中では、2029年に操業開始となっています。おおよそ2025年頃までにこれらの3ヶ国が操業を開始するという状況にあります。

EUの欧州委員会（EC）は、欧州全体の国際競争力・技術力を向上させることを目的に、研究・技術開発のための枠組み計画（FP）を1984年に設立し2013年まで行ってきました。現在は第7次FP（FP7）の枠組みで立案された共同研究が進められています。ECの傘下にあるEURATOMはFPの中で原子力関係の研究開発を推進してきました。その中には放射性廃棄物の管理・処分が含まれており、幅広い課題について共同研究が行われてきました。このFPは、EU加盟国における研究活動を助成していますが、EU外の各国も自費で参加することが可能となっており、米国、日本、スイスなどの国々の実施主体、研究機関なども参加してきました。

これとは別に、EU理事会は理事会決定2006/976/EURATOMにおいて地層処分の実現に向けたR&Dを強化することとし、欧州委員会と関係機関によるIGD-TP²活動を2009年に開始しました。以下にIGD-TPの活動を Strategic Research Agenda（SRA、戦略的研究課題）レポート（2011）より引用して紹介します。

IGD-TPの目標は2025年までに、ヨーロッパで最初の地層処分施設を安全に操業開始することであり、・地層処分の安全性について、欧州市民と意志決定者間の信頼関係を構築すること、・長寿命・高レベル放射性廃棄物の長期安全管理の選択として、地層処分を統合する廃棄物処分プログラムの設立を促進すること、・メンバー各国の利益のため地層処分分野の専門知識や技術へのアクセス、能力の維持を補助することをコミットしています。その主な活動は、・使用済み燃料、高レベル放射性廃棄物、長寿命放射性廃棄物などの安全な地層処分の段階的な実施を促進するため、欧州の共同活動を開始することを主な目的とし、科学的、技術的、社会的課題の解決によって、メンバー各国の廃棄物処分プログラムをサポートすること、および・問題解決の信頼強化、重複課題の低減、コスト削減、能力や研究インフラの有効活用を行うこととしています。

図-3がIGD-TPの組織構造図です。情報交換の場や技術のプラットフォームを設けています。これには全てのステークホルダーが入ることが出来ます。実務としてはこういう形で進めており、そのための協働活動や、EURATOMで行われてきたFPとの連携、協調、能力維持の問題や共通事項の課題を検討していくという活動をしております。EU以外の国からも参加することが出来ます。

2009年には、2025年までにいかに操業を開始するかというビジョンレポートを作成しました。このビジョンを達成するための戦略的研究課題を特定したのが、2011年のSRAと呼ばれる戦略的研究課題レポートです。この取り上げた課題をどのように展開していくかというのが展開プランレポートというもので、2012年に作成しています。現在これらのレポートにもとづいて活動が行われています。

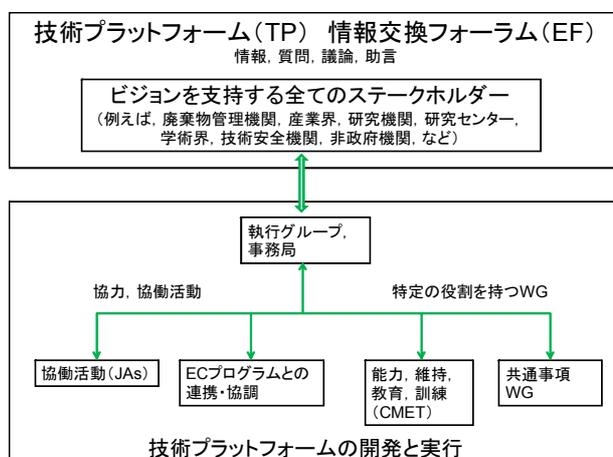


図-3 IGD-TPの組織構造

² IGD-TP（Implementing Geological Disposal of Radioactive waste Technology Platform：放射性廃棄物の地層処分の実施に向けた技術プラットフォーム）

図-4は戦略的研究課題と展開プランの関係を示したもので、処分実施機関（WMO）からのニーズがベースになります。これプラス利害関係者の懸念する研究など、そういったものを取り入れて戦略的研究課題が抽出されたということです。これを協働でどうやって解決するかということが展開プランとしてまとめられています。

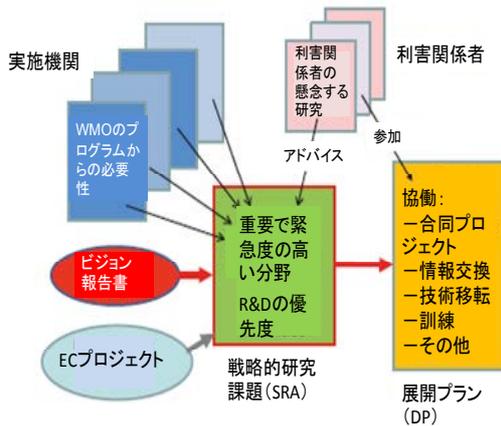


図-4 戦略的研究課題と展開プランの策定

図-5は、SRAでR&Dを抽出したフローです。

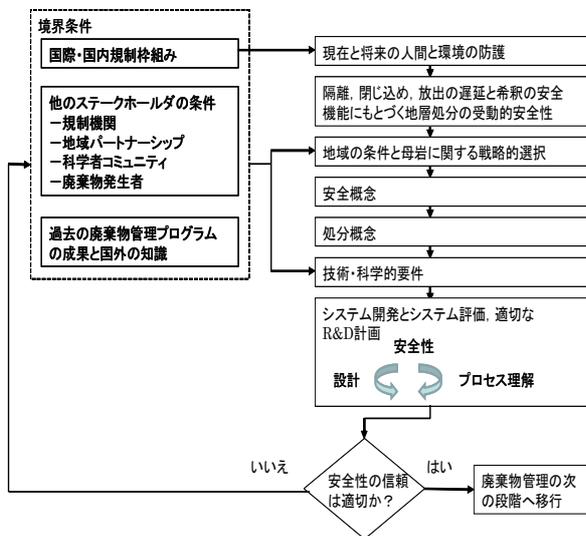


図-5 廃棄物処分プログラムのためのR&Dプランの策定フロー

図-6は、処分場の開発段階ごとにどういうR&Dがあるかということが整理されたものです。縦軸は課題で、安全戦略と方法論、長期安全性に関わる研究、施設と構成要素の設計・建設・操業、およびサイトの特性に関する研究です。横軸は処分事業の段階を表しています。わが国と同じようにサイトを選定しないゼネリックな研究と概念開発の段階があり、その後、母岩とサイトの選定、技術開発と処分場の設計、建設、そして操業という流れの中で、縦軸の4

処分場の開発段階

	一般的研究と概念開発	母岩とサイトの選定	技術開発と処分場設計	技術開発と処分場建設	産業規模の製造と処分場操業
安全戦略と方法論	安全評価手法の開発	手法のセーフティケースへの適用と改善	手法のセーフティケースへの適用と改善	手法のセーフティケースへの適用	手法のセーフティケースへの適用
長期安全性: 科学・技術基盤	幅広い研究	母岩固有および選択したEBS固有の課題に絞り込んだ研究	原位置試験およびデータベースと理解の改善	残った課題に焦点をあてた科学的作業、大規模原位置試験および構成要素の試験	サイト条件での構成要素のモニタリングを含む確認研究
施設と構成要素の設計	概念オプションの研究	母岩固有の処分場概念設計	構成要素の設計とレイアウト設計 操業安全性研究	実規模プロトタイプ建設 工業化計画の開発	実規模の製造と操業
サイト特性	入手可能な情報にもとづく潜在的母岩と特性の調査	母岩特性調査とサイト固有の調査	詳細サイト特性調査 掘削	主地下施設の建設 最終設計のための岩石特性の確定	建設、確認、モニタリング

図-6 処分場の開発段階とR&Dを含む活動

つの課題でどういうことを行っていくかというものの整理です。

図-7はR&Dの中からSRAを策定する際のカテゴリー分類です。

ビジョン目標に到達するための課題として、サイトの特性調査と確定、処分技術と構成要素の実証、長期安全性の実証があげられ、さらに横断的に必要な諸課題があげられています。

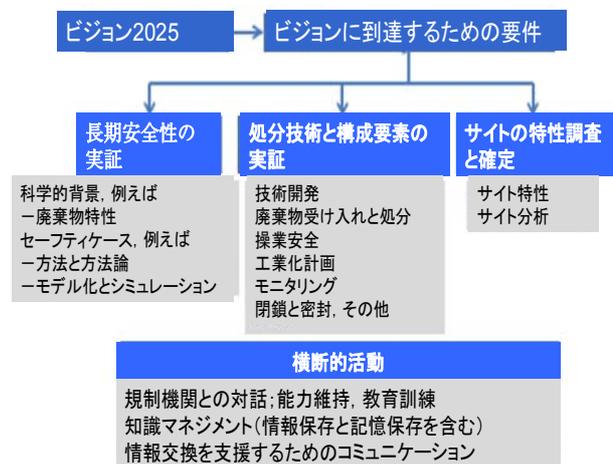


図-7 戦略的研究課題（SRA）の策定で考慮すべき課題とカテゴリー分類

SRAは2025年の操業開始だけを目的としているわけではありません。今のIGD-TPが行っていることは3カ国だけのためではなく、図-8に示していますように、3カ国については非常に緊急度の高いトピックスだということではありますけれども、それ以降に許可申請が予定されているプログラムもあるわけですし、全てのプログラムに共通の課題もあるということで、そういったものを分類しながらバランス良

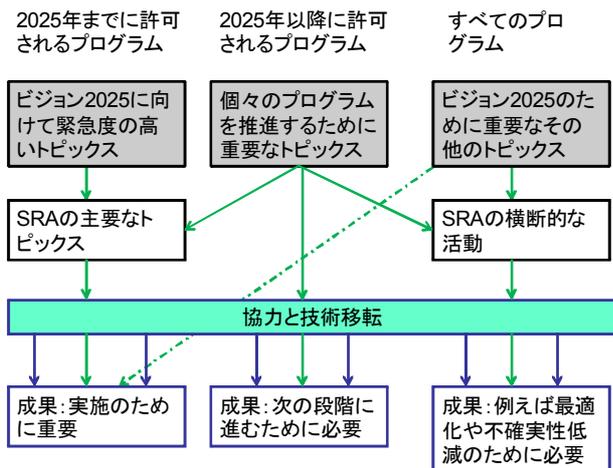


図-8 許可申請目標時期の異なる処分場プログラム間での協力の例

く進めています。また、SRAで抽出された課題は固定したものではなく、必要があれば課題を追加するということです。

SRAが作成された2011年にはまだ申請の前でしたが、2011年にスウェーデンが、2012年にフィンランドが、そして2015年にはフランスが申請をする予定でした。そういう申請間近なこれらのプログラムの中で、どういう活動が中心的に行われているかということについて図-9に整理しています。

	科学基盤	技術的実現可能性	サイト特性	セーフティケース
不確実性	知識の境界は定義されていない。	限定された時間枠の中で工学的基準	地質構造の不均質性 -将来の変遷	不確実性とシナリオの枠組み作り
実施中の活動	仮説検証	大規模原位試験と実証	サイト調査とデータ収集	感度解析
	モデルとアナログの研究		データ統合と評価 サイトのモデル化	性能評価モデル
2025年までの許可に関連する現状	セーフティケースと処分場設計のために十分な基盤が存在する	地下研究施設での試験を実施中	セーフティケースと処分場設計のために十分な知識が存在する	十分な安全性と安全マージン さらなる不確実性の低減
ビジョン関連目標	理論とモデルの頑健性の下支え	工業レベルでの安全な処分技術の確立	長期安全性の信頼性向上	

図-9 地層処分におけるR&Dの主要な分野と許可申請が間近なプログラムで進行中の活動の概観

既にゼネリックな研究とサイト選定のための作業が終了しており、現在は、科学基盤や実現可能性についてどうするかとか、あるいはサイトの詳細な特性調査、SCの改善というものがあります。ビジョン関連では、長期安全性の科学基盤についてはすでに十分な基盤が存在するというですけれども、さらに理論とモデルの頑健性を下支えするというのがビジョンの目標になっています。また、実現可能性についても、すでにそういった国々では地下研究施設

等で試験を実施中でありはありますが、その処分技術を工業レベルで確立することがビジョンの目標になっています。

もう一つ特徴的なのは、いろいろな課題にどうしても残ってしまう不確実性というのがありますが、これを極力低減させていくことが、このSCを改善していく中での一つの大きな目標になります。不確実性については、どんな処分プログラムでも存在しますが、地層処分システムの長期変遷の評価における不確実性については、その長期の変遷が人間と環境にどのような影響を与えるかというシナリオを定義することによって評価をしていくことになります。パラメータやモデルについては、R&Dを積み重ねることによって大部分は低減出来るとしています。しかし、一方で地質環境については長期予測にともなう最後まで残る不確実性があるということで、そういうものは出来る限り縮減しシナリオで評価し許容範囲に納めて行くこととなります。

表-1に示すように、SRAの中では16個の課題が挙げられています。現在、情報交換会等を開催して専門家間で議論を行い、それぞれの課題についてどう対処していくか。必要であればEURATOMのプロジェクトで取り上げるということも含め検討がなされています。

表-1 戦略的研究課題 (SRA) の課題

- ▲ JA1 : Waste forms and behaviour (廃棄物形態と挙動) → 黒鉛、GEN IV 廃棄物
- ▲ JA2 : Full scale demonstration of Plugging & Sealing (プラグ・シールの実規模実証)
- ▲ JA3 : Waste forms and their behaviour: TSWG on C14 (廃棄物挙動: C-14) → CAST
- ▲ JA4 : Monitoring the Environmental Reference state (環境モニタリング)
- ▲ JA5 : Safety of construction and operations (建設・操業安全)
- ▲ JA6 : Confidence increase in safety assessment codes: Material interaction (安全評価コードの信頼性向上: 材料間の相互作用) → セメント, 不確実性の取り扱い
- ▲ JA7 : Monitoring programme (モニタリング計画)
- ▲ JA8 : Safety Case: process model benchmarking (SC: プロセスモデルベンチマーク試験)
- ▲ JA9 : Efficient peer review and related QA processes (効率的なピアレビューとQAプロセス)
- ▲ JA10 : Long-term stability of bentonite in crystalline environments (結晶質岩中のベントナイトの長期安定性) → 結晶質岩
- ▲ JA11 : Various Topics (その他のトピックス) → 微生物
- ▲ JA12 : Adaptation and optimisation of the repository (処分場の適応と最適化)
- ▲ JA13 : Communicating result from RD&D (R&Dのコミュニケーション結果)
- ▲ JA14 : Competence Maintenance, Education and Training: CMET (能力維持, 教育, 訓練)
- ▲ JA15 : Nuclear Knowledge Management: NKM (原子力知識マネジメント(NKM))
- ▲ JA16 : WMOs IEP (WMO 1-6) (事業者の情報交換プラットフォーム)

例えばJA1の廃棄物形態については、ガス冷却炉から発生する黒鉛廃棄物や、今後発生が予想される次世代のGEN IV(第4世代原子炉)の燃料サイクルにともない発生する廃棄物も取り上げていこうということになっています。JA3の廃棄物挙動については炭素14の挙動に非常に関心が高くなっています。前述の黒鉛や放射化金属などの中に放射化によって生成しており、その放出挙動調査の取り組みが

EURATOMのFP7の枠組みの中でCAST (Carbon Source Term) プロジェクトとして2013年10月に立ち上がっています。

JA6はセメントの影響です。これも今プロジェクト化しようという動きがあります。

JA8のSCにおいては不確実性の取扱いが課題だということですが、まだこれは具体的なプログラムとしては立ち上がっておりません。微生物の課題については専門家のワーキンググループを開こうということになっています。また、JA14では維持訓練、知識マネジメントの課題が取り上げられています。これらの課題については、現在、順次議論をしてどのように進めるかが検討されているところです。

現在、FP7の枠組みで行っているプロジェクトを表-2にご紹介をします。いろいろなプロジェクトがあります。エンジニアリングスケールの実証試験が行われているのがご覧いただけだと思いますが、この中でさまざまなオプションを実証していますので、こういうものに参加することで自分たちの取り上げている技術オプションだけでなく、色んなオプションを同時に学べるというメリットがあるのでは

表-2 FP7の最近の共同研究プロジェクト

<p>LUCOEX(Large Underground Concept Experiments) 内容: 処分坑道掘削, 緩衝材の製作・設置, 廃棄体設置, 埋め戻し・閉鎖 参加機関: SKB, ANDRA, NAGRA, POSIVA 開始: 2011年1月1日, 終了: 2014年12月31日</p>
<p>REDUPP(Reducing Uncertainty in Performance Prediction) 内容: 地層処分における長期安全性評価において使用済燃料溶解速度を用いる場合の不確実性の低減, 溶解試験, 第一原理計算等 参加機関: SKB, UU, POSIVA, VTT, US 開始: 2011年4月, 終了: 2014年4月</p>
<p>MoDeRn(Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure) 内容: 地層処分におけるモニタリングの開発と可能な実行のためのレファレンスフレームワークと関連する利害関係者エンゲージメント 参加機関: ANDRA, SKB, POSIVA, NAGRA, 原環センター他 18機関 開始: 2009年5月1日, 終了: 2013年10月31日</p>
<p>BELBaR(Bentonite Erosion: effects on the long term performance of the engineered barrier and radionuclide transport) 内容: 粘度コロイドの安定性, 生成, 放射性核種の輸送, ベントナイトのエロージョン, コロイド安定性, コロイドと放射性核種と岩盤の相互作用試験等 参加機関: SKB, NDA, POSIVA, KIT他 14機関 開始: 2012年3月1日, 終了: 2016年2月29日</p>
<p>FIRST-NUCLIDES(Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel) 内容: 地層処分における高燃焼度使用済燃料から早期/瞬時に放出される放射性核種の理解, 試験, モデル化, 実規模燃料への適用 参加機関: KIT, JRC, FZJ, Studsvik他 10機関 開始: 2012年1月1日, 終了: 2014年12月31日</p>
<p>DOPAS(Full Scale Demonstration of Plugs and Seals) 内容: プラグとシールの工業的実現性, 特性測定, 処分場条件下での挙動管理, 安全目標に許容可能な水理特性試験 参加機関: POSIVA, SKB, NAGRA, ANDRA, NRG, GRS, NDA他 14機関 開始: 2011年4月, 終了: 2014年4月</p>
<p>PEBS(Long-term Performance of Engineered Barrier Systems) 内容: EBSのシールとバリアの性能の時間変化, 試験, モデル化, 長期安全機能への影響 参加機関: BGR, GRS, SKB, ANDRA, NAGRA, JAEA他 18機関 開始: 2010年3月1日, 終了: 2014年2月28日</p>
<p>CAST(Carbon Source Term) 内容: 種々の廃棄物からの炭素14のソースタームに関する研究 参加機関: NDA, KIT, PSI, ANDRA, NAGRA, 原環センター他 33機関 開始: 2013年10月1日, 終了: 2018年3月31日</p>

ないかと思います。MoDeRnは2013年10月まで行われていた地層処分のモニタリングのプロジェクトで、地層処分におけるモニタリングの役割、性能確認のためにどのようなモニタリングを考えるべきか、技術的に実現可能か、必要なR&Dなどについて検討されました。

FIRST-NUCLIDESは直接処分の国で使用済み燃料をソースタームとしてどう評価するかということの研究しているプロジェクトです。日本でも直接処分の研究を行うことを原子力委員会で決めたわけです。その際、出来ればこのような国際共同研究に参加して、各国におけるこれまでの知識や研究のやり方など、いろいろなことを学びながら日本の使用済燃料について行っていくことが効果的なのだろうと思います。

5.2 国際共同研究への参加

本章では、国際共同研究への参加経験として、原環センターが参加している地層処分のモニタリングと廃棄物中の炭素14のプロジェクトについて述べます。

◆ 地層処分のモニタリング

2000年頃から、地層処分場のさまざまな状態、特に長期安全性に関わるパラメータの状態についてモニタリングを行い、その情報を得ることで段階的な意思決定に役立つのではないかと、あるいは社会との合意形成ということでも役立つのではないかと期待から、各国の関心が高まっています。

EUではモニタリングに関して次の2つのプロジェクトを行ってきました。

- a. 「放射性廃棄物の地層処分に向けた段階的アプローチにおけるモニタリングの役割に関するテーマ別ネットワーク」

- ・ 期間: 2001年~2002年
- ・ 参加機関: 10カ国12機関 (EU加盟国とスイス)
- ・ 目的:
 - ・ 放射性廃棄物の深地層処分に向けた段階的アプローチにおけるモニタリングの役割とオプションの両方に関する理解を深める。
 - ・ 処分場開発について理解する上で、意思決定、操業中および閉鎖後の安全性と信頼性に、モニタリングがどのように寄与するかを明確にする。
- ・ 報告書: EUR21025、2004

- b. 「安全な処分場の操業と段階的な閉鎖のためのモニタリングの開発 (MoDeRn)」

- ・ 期間: 2009年~2013年
- ・ 参加機関: 12カ国18機関 (EU加盟国とスイス)

ス、米国、日本)

a.のテーマ別ネットワークプロジェクトでは、モニタリングの役割や何が出来るかなど、基本的な整理が行われました。その後、MoDeRnプロジェクトが2009年から2013年まで行われまして、これにEUとスイス、米国、そして日本からは原環センターが参加しました。

IAEAの安全文書によれば、処分場の安全性については、閉鎖前後も含め、モニタリングに依存して安全性が確保されるという考え方は駄目だということを言っています。

では何故モニタリングに関心が高まっているのかといいますと、地層処分場はわれわれが初めて経験するプロジェクトですので、人々の関心も非常に高く懸念もあります。そういう中で各国で考えられてきたことは、処分場を一つのステップから次のステップというふうに段階的に確認しながら進めるという考え方です。次のステップに移るときに処分場の状態に関する情報があることは、そういう意志決定をする上で役立つのではないかと、そういう期待があったのだらうと思います。

一方、MoDeRnプロジェクトでも分かったことですけれども、実際に処分場で何がモニタリング出来るかということについては技術的な限界もあることが分かりました。こういう国際的な議論、あるいは国際的に共通認識された限界や出来ること、そういったことを踏まえて日本ではどうするかについて議論をしていくことが効率的だらうと思います。

もう一つ興味深いファインディングとしては、これは2000年のテーマ別ネットワークのレポートの中でまとめられたものですが、処分場のモニタリングをどの程度行おうとしているかは国によって異なっていることです。

実処分場ではほとんどモニタリングをしないという考え方をとっていたのが、北欧のSKBとポシヴァ社です(A型)。その代わりに、地下研や前段階でさまざまな実証を行うということで、処分場を建設、操業しても問題ないことが十分示されることが前提ですが、そういう考えで実処分場の中では極力モニタリングを行わないということです。廃棄物の近傍にモニタリングのための計器やケーブルを設置することが、人工バリアの健全性や長期安全性を損なう可能性があるということを考えてのことでした。

もう一つは、実処分場のさまざまな場所にモニタリング計器を置いてモニタリングするという考えの国がありました(C型)。これはフランスの放射性廃棄物管理機関(ANDRA)と英国のNirex(現在の原子力廃止措置機関(NDA))で、さまざまな計器を設置することを考えていました。

中庸的なのはスイスの放射性廃棄物管理共同組合(NAGRA)の考えですが、実処分場ではモニタリン

グをやらなくて、処分と並行して実廃棄物を置いたパイロット施設においてさまざまなモニタリングを行い、段階的な意志決定を行っていこうという考えです(B型)。

原環センターは、A、B、Cの3つの国の範疇も踏まえて、どういことをして処分場の安全性能を確認していったらよいかということを提案しています。すなわち、日本ではこれまでにさまざまな実験規模や工学規模の試験がなされ、幌延、瑞浪の両地下研で実証的な試験も行われてきましたし、そういうものにもとづいてこれから施設を具体化し仕様を決め、それを満たすような施工手順の設定と技術的根拠を整備し、製作・施工時の品質管理を行い、そして処分場ではパイロットではないにしても、何らかの実証試験がなされるでしょうし、地下水を持ってきて実験室でさまざまな試験がなされるでしょう。そういうことを前提として考えますと、長期安全性への影響を極力少なくするというのも考慮して、実処分場ではあまりモニタリングをすることはなく、安全性を確認していけるのではないかとというのがわれわれの検討結果です。すなわち、A型を基本とし必要であればB型も組み合わせるとい考えです。

図-10は、MoDeRnプロジェクトの中で、どういふうにモニタリングを考えていったらよいかという全体作業フローを考えたものです。処分場の安全性すなわち性能確認に資するモニタリングの目的とモニタリングパラメータの予備選定の段階では、安

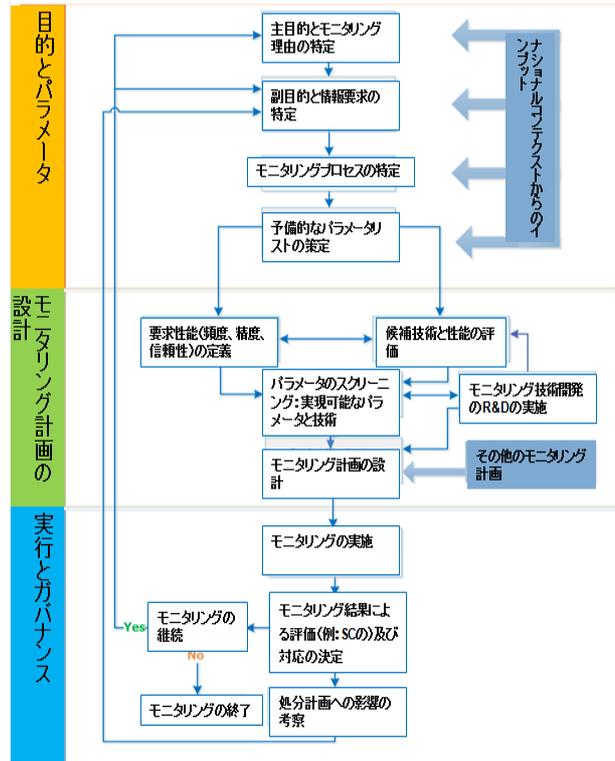


図-10 MoDeRnで開発されたモニタリング作業フロー

全な処分をするために各バリアにどのような安全機能を持たせるかということが出発点になります。その安全機能が決まると、それを達成するのに必要な性能目標というものが決まり、その性能目標には性能に関わるさまざまなFEPがあり、そのFEPをふるい分けて、その挙動が計測可能かどうか、閉鎖までの100年程度の間計測出来るような変化が起こり得るかどうか、長期安全性を損なわないかどうか、そういう制約条件の下でふるい分けをして、パラメータを抽出します。次にモニタリング計画の設計の段階では、選定されたパラメータについて、モニタリングの技術的成立性を考えた上でモニタリング可能かどうかの判断を行い、選定を行ったものについて設計を行います。ここまでの、今回のMoDeRnプロジェクトの中で検討した範囲です。MoDeRnプロジェクトではこの作業フローにもとづいて、ケーススタディを行い、その有効性を検証しています。対象はフィンランドの結晶質岩、フランスの粘土層、ドイツの岩塩層でした。

モニタリング計画の設計は処分場のライフサイクル全体に対して一度に行うのではなく、段階を追って行うことが考えられています。例えばフィンランドの場合では、最初のモニタリング計画は処分場サイトのベースライン条件を確立するためのベースラインモニタリングでした。これはサイトが自然の状態に近い段階から始める必要があり、確立した後も閉鎖までフォローするモニタリングが実施されることが考えられています。次に、サイト特性調査の最終段階である地下特性調査施設（ONKALO）の建設段階のモニタリング計画が設計されました。次の段階として、実処分場の建設段階、操業段階のモニタリング計画が順次設計される予定です。閉鎖後については閉鎖計画とともに提出されることになっています。このような進め方は、処分事業の実施、規制、意思決定を段階的に行うという考え方に関連しているものと思われます。

モニタリング計画が設計された後、モニタリングの実施とその結果のガバナンスが課題となりますが、これについてはMoDeRnの次のプロジェクトにおける課題の一つとして取り上げられる予定であり、現在プロジェクトの計画の検討が始まっており、2014年にもEURATOMの共同研究として開始される予定です。なお、これまでの枠組みであったFPはホライズン2020（HORIZON2020、2014年から2020年までの枠組み）に引き継がれました。

モニタリングに関する国際共同研究に参加することで、以下の事項などを学ぶことを期待しています。

- ・申請段階の国におけるモニタリングの計画、モニタリングで取得したデータの活用方法、判断基準等、実際に則した経験。
- ・特にわが国の処分概念に近いポシヴァ社の工学バ

リア実証試験におけるモニタリング計画、取得データにもとづく判断。

- ・処分場の中での、モニタリング機器配置(代表性)の検討。
- ・モニタリングデータの性能評価へのフィードバック、利用に関する検討。特に測定データが想定範囲外の場合の対処の方法。
- ・国内のモニタリング計画検討へのフィードバック。以上述べましたように、モニタリング計画には唯一最適解はないことを念頭に、各国の対応方法を学び、わが国に適したモニタリング計画を策定することに役立てたいと考えています。

なお、地層処分のモニタリングについては、原環センタートピックスNo.95(2010年9月)とNo.97(2011年3月)にも報告していますので、そちらも参照してください。

◆ 炭素14

欧州では廃棄物中に含まれる炭素14（C-14）の処分場での挙動に高い関心が払われています。その一つの理由は、英国、フランス、ドイツなどで多くのガス冷却炉が運転されてきており、減速材として使用した黒鉛が廃止措置にともない放射性廃棄物として大量に発生していることがあります。黒鉛中には放射化によりC-14が生成しており、処分場ではこのC-14が地下水中に溶出した際に有機形態やガス状である場合には、人工バリアや天然バリア中で移行が早く、生物圏への影響が懸念されるからです。そのため、処分の長期安全評価の観点から、生成量、溶出速度、溶出時の化学形態（特に有機形態について）などの安全評価に影響のある特性に関して関心が高いわけです。既に照射済黒鉛等廃棄物の処理・処分（CARBOWASTE）プロジェクトが2008年から2013年にかけて実施されました。

黒鉛以外の廃棄物としては、炉内構造物等の放射化金属、再処理で発生するハル廃棄物（ジルカロイ、ステンレス鋼など）、直接処分の場合の使用済燃料や被覆管などの燃料集合体構成部材、イオン交換樹脂などがあります。わが国ではイオン交換樹脂を燃焼処理すると聞いていますので問題となる有機のC-14は出てこないと思うのですが、欧州ではそのまま固化処理しますので、ここから出てくるC-14も課題として考えられています。

そこで、2013年10月よりFP7の枠組みで、炭素のソースターム（CAST）プロジェクトが始まりました。CASTプロジェクトの目的は金属、イオン交換樹脂、黒鉛からのC-14放出、C-14化学形態の試験とモデル化と理解であり、7つのワークパッケージ（WP）で構成されています。期間は2013年10月から2018年3月までとなっており、EU加盟国、スイス、日本からの実施主体、研究機関、大学など33機関が参加して

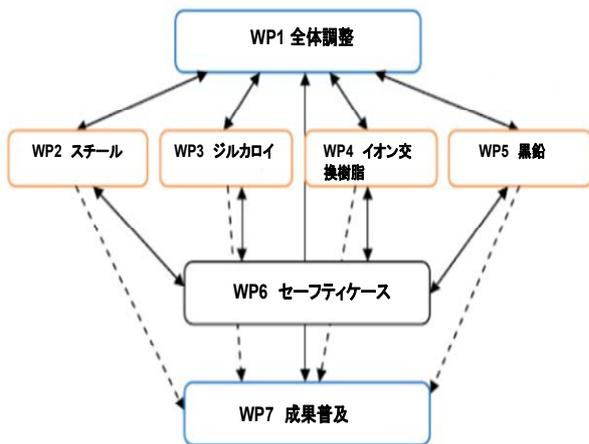


図-11 CASTプロジェクトの全体構成

います。図-11はCASTプロジェクトの全体構成を示しています。

原環センターはWP2、WP3、WP6に参加しています。ジルカロイについては、これまで日本が進んでおり、原環センターでは照射済ジルカロイを使ったホット試験も含めて行ってきました。しかし、ホット試験は非常にコストが掛かるため多くの点数が取れませんし、浸出したC-14の量が少ないため、個々の化学種の定量分析は困難です。また、非照射のジルカロイを使った腐食試験においても非常に腐食速度が小さいため、数年程度の腐食データだけでは長期腐食モデルを予測することも困難です。そういう意味で、全く同じ材料とは言えないですけども、これからこのプロジェクトの中でホット試験をやるという国もあるので、そういった点数が増えてくるというのは非常に魅力を感じているところです。また、腐食モデルや化学種などについて科学的な理解をする上では、日本の専門家だけで考えることに対して、各国にも非常に優秀な専門家がたくさんいますので、そういう方々の知見も踏まえ、国際的な議論が出来ると思います。

モニタリングとは違い、C-14については科学的な統一解が求められますし、求めることが出来るものと思っています。日本だけでなく欧州各国とこれまでの知見や成果を共有し、これから新たに得る知見も共有し、統一的な見解を出して共通的な認識にしていくことについて大変期待しているところです。

◆ 国際共同研究への参加

EUの国際共同研究への参加ですが、われわれがこ

うやって参加してみようと思うことは、決してこの参加のハードルは高いものではなく、EU加盟国以外の国でも参加出来ますし、貢献の大きさに関わらず平等に扱われるということです。非常に小さいプログラムしか持ってない研究機関もありますが、そこに参加した以上、そこで得られる情報は全て共有出来るわけです。参加するには自分たちは大きな情報や試験計画を持ってないので貢献出来ないで参加が出来ないという話を時々聞きますが、決してそうではなく、どんなに小さくてもいいので貢献していくということで平等に扱われます。

ただし、参加して不便に感じる場合があります。EUの機関の場合、共同研究プロジェクトの4~5年間の期間にわたって予算的にコミットされております。日本の国の研究委託についても複数年度にわたってコミットしていただけることが望ましいと思います。

また、EUでは2025年に向けてみんなで頑張ろうという機運であり、この研究の成果を受け取る機関は実施主体です。是非日本でも実施主体から参加していただければ処分事業に役立つものと思われま

6. おわりに

最後に、地層処分の研究に従事されている方々に是非こういうことを念頭に進めていただきたいということを述べて終わりにしたいと思います。一つは、担当される以上はその分野で第一人者になっていただきたい。また、研究のための研究にならないように、研究成果が実処分場にどのように役立つかを常に考えていただきたい。そのためには国際的な動向や情報を常にウォッチし、学んでいく姿勢を持つ必要があります。研究を日本だけで行っていく時代ではありませんので、国際的な人的なネットワークを自分自身で構築しながら取り組んでいただきたい。ただし、研究成果に対する謙虚さや地層という自然に対する畏敬の念は忘れてはいけません。

また、地層処分の研究は長期にわたりますので、研究をしていく上では常に自分の後継者、自分の後を引き継いでいただける方を育てる意識を持って行っていただきけることを期待しています。

ご清聴ありがとうございました。

(本稿は、平成26年3月25日に開催した平成25年度第4回原環センター講演会での講演内容を再構成して作成しました。)

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

〒104-0052 東京都中央区月島1丁目15番7号 (パシフィックマークス月島8階)

TEL 03-3534-4511 (代表) FAX 03-3534-4567

ホームページ <http://www.rwmc.or.jp/>