平成２５年度

放射性廃棄物共通技術調査等事業

# 放射性廃棄物重要基礎技術高度化調査

# 報　告　書

平成２６年３月

公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託調査として、公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成25年度「放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物重要基礎技術高度化調査)」の成果を取りまとめたものです。

# 【 目 次 】


1．はじめに ..... 1

1.1 調査目的と調査内容 ..... 1

1.1.1 調査目的 ..... 1

1.1.2 調査内容 ..... 1

1.2 調査の計画立案と実施方針 ..... 2

1.2.1 諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理に関する作業計画 2

1.2.2 国内基礎技術情報の収集及び整理に関する作業計画 ..... 4

1.3 調査の成果概要と本成果報告書への取りまとめ ..... 5

1.3.1 第 2 章：諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理 ..... 5

1.3.2 第 3 章：地層処分の研究開発に係る国際共同研究プロジェクトの動向 ..... 6

1.3.3 第 4 章：諸外国の代替処分技術の研究開発動向 ..... 6

1.3.4 第 5 章：国内基礎技術情報の収集及び整理 ..... 6

2．諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理 ..... 8

2.1 スウェーデン ..... 8

2.1.1 処分事業の現状概要 ..... 8

2.1.2 処分システムの概要 ..... 9

2.1.3 研究開発プログラムの概要 ..... 10

2.1.4 研究開発課題とその概要 ..... 10

2.1.5 地下研究施設における研究開発動向 ..... 23

2.2 フィンランド ..... 26

2.2.1 処分事業の現状概要 ..... 26

2.2.2 処分システムの概要 ..... 27

2.2.3 研究開発プログラムの概要 ..... 28

2.2.4 回収可能性に関する研究開発動向 ..... 46

2.2.5 研究開発計画に対するレビュー ..... 48

2.2.6 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向 ..... 52

2.2.7 参考文献 ..... 52

2.3 フランス ..... 54

2.3.1 処分事業の現状概要 ..... 54
2.3.2 処分システムの概要 ..... 54
2.3.3 研究開発プログラムの概要 ..... 56
2.3.4 研究開発課題とその概要 ..... 65
2.3.5 研究開発計画に対するレビュー（枠組み、結果の利用など） ..... 75
2.3.6 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向（枠組み、テーマ、国内の実施主体・規制当局との関係、研究開発プログラム） ..... 79
2.3.7 費用負担の仕組み ..... 80
2.3.8 2013～2015 年の新しい PNGMDR ..... 81
2.4 スイス ..... 124
2.4.1 処分事業の現状概要 ..... 124
2.4.2 処分システムの概要 ..... 124
2.4.3 地層処分場の研究開発実証（RD&D）に関する国の方針 ..... 127
2.4.4 研究開発実証プログラムの種類と予算 ..... 129
2.4.5 主要な研究開発実証プロジェクトの概要とその構成、及び課題項目 ..... 141
2.4.6 研究テーマと同研究を実施する機関についての概要 ..... 156
2.4.7 研究開発実証計画に対するレビュー ..... 167
2.4.8 国内の大学と研究機関によって行われている研究開発実証の実施状況 ..... 169
2.4.9 国内の大学と研究機関によって行われている研究開発実証の資金 ..... 172
2.4.10 付属書 ..... 173
2.5 ドイツ ..... 235
2.5.1 処分事業の現状概要 ..... 235
2.5.2 処分システムの概要 ..... 236
2.5.3 研究開発プログラムの概要 ..... 237
2.5.4 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向 ..... 260
2.5.5 参考文献 ..... 275
2.6 米国 ..... 277
2.6.1 処分事業の現状概要 ..... 277
2.6.2 処分システムの概要 ..... 278
2.6.3 研究開発プログラムの概要 ..... 281

2.6.4 研究開発課題とその概要 ..... 285
2.6.5 地下研究施設における研究開発動向 ..... 287
2.6.6 回収可能性に関する研究開発動向 ..... 291
2.6.7 研究開発計画に対するレビュー ..... 292
2.6.8 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向 ..... 292
2.6.9 参考文献 ..... 294
2.7 英国 ..... 296
2.7.1 処分事業の現状概要 ..... 296
2.7.2 処分システムの概要 ..... 296
2.7.3 研究開発（R&D）プログラムの概要 ..... 298
2.7.4 研究開発課題とその概要 ..... 304
2.7.5 地下研究施設における研究開発動向 ..... 313
2.7.6 回収可能性に関する研究開発動向 ..... 314
2.7.7 研究開発計画に対するレビュー ..... 315
2.7.8 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向 ..... 315
2.7.9 参考文献 ..... 319
2.8 カナダ ..... 322
2.8.1 処分事業の現状概要 ..... 322
2.8.2 処分システムの概要 ..... 324
2.8.3 研究開発（R&D）プログラムの概要 ..... 326
2.8.4 研究開発課題とその概要 ..... 332
2.8.5 地下研究施設における研究開発動向 ..... 336
2.8.6 回収可能性に関する研究開発動向 ..... 336
2.8.7 研究開発計画に対するレビュー ..... 337
2.8.8 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向 ..... 339
2.8.9 参考文献 ..... 340
2.9 スペイン ..... 342
2.9.1 処分事業の現状概要 ..... 342
2.9.2 処分システムの概要 ..... 343
2.9.3 研究開発プログラムの概要 ..... 343

2.9.4 研究開発課題とその概要 ..... 350
2.9.5 研究開発計画に対するレビュー ..... 381
2.9.6 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向 ..... 383
2.10 ベルギー ..... 384
2.10.1 処分事業の現状概要 ..... 384
2.10.2 処分システムの概要 ..... 384
2.10.3 研究開発プログラムの概要 ..... 385
2.10.4 研究開発課題とその概要 ..... 387
2.10.5 地下研究施設における研究開発動向 ..... 394
2.10.6 研究開発計画に対するレビュー ..... 395
2.10.7 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向 ..... 395
3．地層処分の研究開発に係る国際共同研究プロジェクトの動向 ..... 397
3.1 ユーラトムにおける研究開発 ..... 397
3.2 IGD-TP による放射性廃棄物管理に係る研究開発課題の検討 ..... 420
3.3 参考文献 ..... 431
4．諸外国の代替処分技術の研究開発動向 ..... 432
4.1 スウェーデン ..... 432
4.1.1 代替方法の研究に関する背景 ..... 432
4.1.2 地層処分またはその他の処分方法 ..... 435
4.1.3 地層処分に対する代替案 ..... 436
4.1.4 スウェーデンにおける代替策に関する研究の継続 ..... 438
4.2 フィンランド ..... 439
4.2.1 代替処分技術開発の位置づけ ..... 439
4.2.2 実施研究テーマ ..... 440
4.2.3 実施機関、費用負担の仕組 ..... 441
4.2.4 参考文献 ..... 441
4.3 フランス ..... 443
4.3.1 代替処分技術開発の位置づけ ..... 443
4.3.2 実施研究テーマ ..... 443
4.3.3 大学及び研究施設が実施する研究開発のテーマ ..... 455

4.4 スイス ..... 473
4.4.1 代替処分技術開発の位置づけ ..... 473
4.4.2 国内の大学と研究機関によって行われている代替処分技術の研究開発実証の課題項目 ..... 473
4.4.3 国内の大学と研究機関によって行われている代替処分技術の研究開発実証の資金 ..... 474
4.5 ドイツ ..... 475
4.5.1 代替処分技術開発の位置づけ ..... 475
4.5.2 実施研究テーマ ..... 475
4.6 米国 ..... 476
4.6.1 原子力・廃棄物処分に関する基本的なスタンス ..... 476
4.6.2 代替処分技術開発の位置づけ ..... 476
4.6.3 実施研究テーマ ..... 477
4.6.4 実施機関、費用負担の仕組 ..... 490
4.6.5 参考文献 ..... 491
4.7 英国 ..... 494
4.7.1 代替処分技術開発の位置づけ ..... 494
4.7.2 実施研究テーマ ..... 495
4.7.3 実施機関、費用負担の仕組 ..... 503
4.7.4 参考文献 ..... 503
4.8 カナダ ..... 505
4.8.1 廃棄物処分に関する基本的方針 ..... 505
4.8.2 代替処分技術の位置づけ ..... 505
4.8.3 参考文献 ..... 511
4.9 スペイン ..... 512
4.9.1 代替処分技術開発の位置づけ ..... 512
4.9.2 実施研究テーマ ..... 512
4.9.3 実施機関、費用負担の仕組 ..... 513
4.10 ベルギー ..... 514
4.10.1 代替処分技術開発の位置づけ ..... 514

5 . 国内基礎技術情報の収集及び整理. . . . . 515
5.1 地層処分基盤研究開発の研究開発課題整理 ..... 515
5.2 外部有識者委員会 ..... 522
5.2.1 外部有識者委員会の設置 ..... 522
5.2.2 外部有識者委員会の開催 ..... 523
5.2.3 外部有識者委員会で得られた意見の概要 ..... 525
5.2.4 外部有識者委員会を踏まえた研究開発課題整理の改訂 ..... 531
5.3 参考文献 ..... 533

# 1 . はじめに

## 1.1 調査目的と調査内容

### 1.1.1 調査目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分や長半減期低発熱放射性廃棄物（ＴＲＵ廃棄物）をはじめとする低レベル放射性廃棄物の処理処分等に係る政策立案や研究開発について、国や関係機関、処分実施主体等の適切な役割分担のもとで進めていくことが重要である。

これらの背景を踏まえて、本事業では、諸外国における研究開発先行事例等を体系的に把握するとともに、今後の我が国の基盤研究開発の課題を検討することで、技術基盤の整備を図ることを目的として実施する。

### 1.1.2 調査内容

上記の調査目的を踏まえ本事業では、特に高レベル放射性廃棄物等の地層処分を中心として、諸外国における研究機関や大学等における処分技術に関連する最新の研究開発動向を把握した上で、我が国における地層処分の安全性や信頼等の向上に係る基盤的研究課題を抽出する。

具体的には表 1.1-1 に示す作業を実施した。

表 1.1-1　本事業の作業内容

| |
|---|
| **（１）地層処分に関する技術情報の調査と基盤研究課題の抽出**<br>放射性廃棄物処理・処分分野の基盤技術整備に向けた研究開発の実施に資するため、海外における地層処分や代替処分技術等の最新の研究開発動向を分析し、体系的に整理する。具体的には、各国の処分実施主体、研究開発機関や大学等が実施している研究開発を対象として最新の研究開発動向を分析・整理する。特に地下研究施設で実施している研究開発課題、及び回収可能性に関する研究開発状況について重点的に調査を実施する。<br>上記の結果や、これまで実施してきた我が国における基盤研究開発成果を参考にして、今後、我が国において解決すべき地層処分の基盤研究開発課題等の検討を行う。検討に当たっては、原子力発電環境整備機構が公開している「地層処分事業の技術開発計画」を参考に、地質環境調査評価技術分野、処分場の工学技術分野、性能評価技術分野、使用済燃料の直接処分分野に分けて、研究課題を整理する。<br>具体的には、大学等の外部有識者からなる検討委員会（親委員会及び分野別委員会（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分の４分野））を設置し、それぞれ３回程度委員会を行い、基盤研究開発課題等を検討する。検討委員会の委員の選定（各委員会で６～８ |

名を委員として選定することを想定）や実施に当たっては、資源エネルギー庁と調整して実施する。
　アウトプットとして、分野ごとに基盤研究課題を抽出するとともに、経済産業省が策定している技術戦略マップを参考にして、各分野や課題の関連が俯瞰できるようなマップも提示する。

1.2　調査の計画立案と実施方針

　上述した作業内容について、次の作業項目に分類して調査計画の立案を行い、調査及び必要な作業を実施した。

**【地層処分に関する技術情報の調査と基盤研究課題の抽出】**

実施項目①：国外の地層処分や代替処分技術等に関する研究開発動向情報の収集及び整理

実施項目②：国内基礎技術情報の収集及び整理

　以上の調査項目について、調査の実施に先立ち整理した、それぞれの調査計画の立案内容と調査の実施方針を以下に整理する。

1.2.1 諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理に関する作業計画

　本作業では、諸外国の地層処分と代替処分技術に関する研究開発計画として整備・公開されている文献等を対象として、以下の考えのもとで効率的・効果的な情報の収集、整理を行うことを計画した。

1)地層処分及び代替地層処分技術に関する研究開発動向調査の対象国は、研究計画等が具体化され、且つ、有益な情報等が整備・公開されているという点から、スウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、ドイツ、米国、英国、カナダ、スペイン及びベルギーの計 10 カ国とする。なお、地層処分と代替処分技術の研究開発に関しては、以下の組織を対象として情報収集・整理を行う。

・地層処分に関連する研究開発動向：処分実施主体、大学、及び規制機関
・代替処分技術の研究開発動向：関連研究機関や大学等

　また、地層処分の研究開発動向に関しては、欧州委員会の枠組みの下で実施されている国際的な共同研究プロジェクトについても調査の対象とする。

2)実施主体、研究機関や大学等における最新の研究開発動向の情報収集については、効果

的・効率的な情報の収集及び整理を実現するために、(i) インターネットを通じた公開情報等の調査及び (ii) 海外ネットワークなどを活用した調査の２つの方法により行う。

(i) インターネットを通じた公開情報等の調査にあたっては、実施主体や国の研究機関による研究開発及び大学等における研究開発を対象として、これまでに公表された研究開発計画書や研究開発成果報告書などを収集し、重要なものについては翻訳を実施する。また、効率的・効果的な情報収集のため、以下の方針にて調査を行う。

・調査の着手においては、効果的・効率的な実施のため、最初に各国の関連文献等の整備計画・公開動向等や、研究開発計画等の把握を再度行う。
・これらの動向や計画を確認した上で、我が国の国内研究開発等における関心事項などを踏まえつつ、優先度等の検討を行ったうえで関連情報の収集・整理を実施する。

なお、各国の放射性廃棄物処分実施主体などは 3～5 年程度を対象とした研究開発計画を策定している場合もあるため、各国の状況に合わせた柔軟な対応を実施する。

(ii) 海外ネットワークなどを活用した調査では、スウェーデン、フランス、スイス、ドイツ、スペイン及びベルギーの研究開発動向の情報について、各国の地層処分実施主体等の機関を活用し、上記の各国における研究開発動向情報の収集・整理を行う。

3) 以上の２つの方法により収集した海外の地層処分及び代替処分技術に関する研究開発情報に関して、以下の点に留意しながら分析・整理を行う。

- 各国毎に処分計画等における位置づけを明確にしつつ、実施体制や枠組みなどを含め分析を行い、各研究開発課題の重要性や優先度などを把握する。
- 効果的な研究開発動向の分析、体系的整理のためには、各国におけるこれまでの放射性廃棄物管理（地層処分や代替処分方法）の検討経緯などを把握しておくことも重要であるため、これまで当センターにおいて実施してきた調査結果、データベースに蓄積された各種報告書などを有効活用する。
- 分析・体系的整理結果を我が国の基盤研究開発課題の検討における参考情報として活用する。

上記に示した各国の地層処分及び代替地層処分技術の動向等については、海外の最新動向のタイムリーな調査を行い、上記 3)の観点での重要度や優先性の分析を経て、関連情報の収集・整理を効率的に行う計画とした。なお、諸外国の動向はそれぞれの国の進捗動向に応じて適宜見直される可能性があり、更に、当初想定していなかった新たな動きが出てくる可能性もある。調査の実施においては、そのような可能性にも配慮しつつ（調査資源の配分等に配慮しつつ）、当該年度に発生する諸外国での重要動向に関する詳細調査に支障が発生しないよう、柔軟に対処できる計画とした。

1.2.2 国内基礎技術情報の収集及び整理に関する作業計画

国内基礎技術情報の収集及び整理に関しては、関連する国内の研究開発機関等との連携の場を通じて、研究開発動向等に関する情報を収集して体系的な整理等を行うこととする。具体的には、資源エネルギー庁の主導により平成 17 年 7 月に設置された「地層処分基盤研究開発調整会議」（以下、「調整会議」という）の活動支援をとおして、わが国における最新の基礎技術研究開発の概要、実施状況やスケジュール、更には取り組むべき課題等に関する情報を収集する計画とした。

資源エネルギー庁では、平成 18 年 12 月に初版として整備した「高レベル放射性廃棄物及びＴＲＵ廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（平成 21 年 7 月公開版及び平成 22 年 3 月公開版として改定）に続き、平成 24 年度には、平成 25～29 年度における地層処分に関する国の基盤研究開発の方針に関する全体計画を策定した。本年度は平成 24 年度に取りまとめられた全体計画に沿って展開される詳細な研究開発計画（以降「研究開発マップ」と呼ぶ）を策定することが計画されており、調整会議を活用した上記の関連情報の収集に基づく研究開発マップの整備に向けた取組において、事務局として次のような研究開発マップ整備作業の支援を計画した。

① 調整会議を活用した活動における各種会議等の開催に向けた調整
② 研究開発マップのドラフティングにおける関連情報等の取りまとめ支援
③ 外部有識者レビューの実施に向けた委員会の設置、運営
④ 研究開発マップとしての最終版の整備（体裁調整等）

なお、当初は上記のような作業及び段取りを計画したが、地層処分に関する国の基盤研究開発の全体計画を検討するうえでの上位方針となる総合資源エネルギー調査会基本政策分科会や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、及び総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループによる処分政策の見直し等に向けた検討が並行して進められている状況を踏まえ、上記の作業及び段取りを基本としつつも、これらの上位政策の検討動向や政策策定のタイミングにも応じて柔軟な作業ステップで対応することとした。

なお、平成 24 年度に整備された全体計画の例に倣えば、最終的に取りまとめられる研究開発マップは、地層処分基盤研究開発調整会議のクレジットで発行され、資源エネルギー庁が整備している以下の「放射性廃棄物のホームページ」で公開される。

（http://www.enecho.meti.go.jp/rw/index.html）

その様な例に倣い、本事業では成果（研究開発マップ）の情報発信作業として、ホームページ等での公開に即した形態への調整や加工等（例えば PDF 文書としての整備）を行うこととする。

### 1.3 調査の成果概要と本成果報告書への取りまとめ

1.2 節で示した本年度の 3 つの主要な作業について、調査の実施結果と成果（調査結果等）を次の構成で取りまとめる。なお、作業の内「(1) 海外の地層処分や代替処分技術等に関する研究開発動向情報の収集及び整理」については、各国の地層処分関連の研究開発動向、地層処分に関する国際的な共同研究開発動向、及び各国の代替処分技術の研究開発動向とそれぞれ章を設けて（第 2～4 章）取りまとめを行う。

第 1 章：はじめに
第 2 章：諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理
第 3 章：地層処分の研究開発に係る国際共同研究プロジェクトの動向
第 4 章：諸外国の代替処分技術の研究開発動向
第 5 章：国内基礎技術情報の収集及び整理

第 2 章以降に、本年度に章単位で取りまとめる各作業の実施結果と成果の概要について以下に整理する。

なお、「国内基礎技術情報の収集及び整理（成果の情報発信作業を含む）」については、調整会議の事務局としての本年度の支援作業の実施概要を第 5 章において整理するが、成果として取りまとめられた「地層処分基盤研究開発計画書（H25～29）【研究開発マップ】」は、地層処分基盤研究開発調整会議のクレジットで別途発行され、準備が整い次第、資源エネルギー庁のウェブサイト等から同計画が公開される予定となっている。

#### 1.3.1 第 2 章：諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理

スウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、ドイツ、米国、英国、カナダ、スペイン、ベルギーの海外 10 カ国を対象として、各国の処分事業の現状の概要、提案されている処分システムの概要、処分実施主体・国・規制機関が実施している研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要について取りまとめた。また、地下研究施設における研究開発動向、及び回収可能性に関する研究開発動向について整理した。さらに、研究開発

計画に対するレビュー、及び大学・研究機関等による地層処分研究開発動向についても整理を行った。なお、各国の処分方針や検討している処分概念等により、地下研究施設や回収可能性に関する研究開発動向、研究開発に対するレビュー制度の有無が異なるため、各国の状況に合わせ柔軟に取りまとめを行った。

1.3.2 第 3 章：地層処分の研究開発に係る国際共同研究プロジェクトの動向

ユーラトム（欧州原子力共同体）の枠組みで実施されている地層処分に関する国際共同研究プロジェクトに関して、共同研究の制度的枠組みや、各プロジェクトの概要について取りまとめた。また、上記国際共同研究に関連した、IGD-TP の活動動向についても取りまとめを行った。

1.3.3 第 4 章：諸外国の代替処分技術の研究開発動向

スウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、ドイツ、米国、英国、カナダ、スペイン、ベルギーの海外 10 カ国を対象として、各国の代替処分技術開発の位置づけ、実施研究テーマ、実施機関、費用負担の仕組について整理を行った。なお、各国の処分方針等の違いにより、代替処分技術の研究開発の実施状況、枠組みや位置づけが異なるため、地層処分に関する研究開発の一環として行われている場合など、その国の研究開発計画全体を把握する上でより効果的であると考えられる場合には、「第 2 章　諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理」において代替処分技術に係る研究開発課題についても整理している。

1.3.4 第 5 章：国内基礎技術情報の収集及び整理

1.2 節に示した作業計画に沿って調整会議の活動の支援を行った。平成 24 年度に国の基盤研究開発計画の方針部分として取りまとめられた「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度)」を基にして、調整会議において全体計画の詳細な個別課題へ展開した研究開発マップのドラフト版が作成された。研究開発マップは地質環境分野、工学技術分野、性能評価分野、TRU 廃棄物分野、直接処分分野においてそれぞれとりまとめられたが、それぞれの分野において、大学等有識者から構成される外部有識者委員会を設置し、研究開発マップに対する第三者によるレビュー作業を行った。ただし、TRU 廃棄物分野の研究開発マップについては工学技術分野と性能評価分野への将来的な統合を見据えて、工学技術分野及び性能評価分野の外部有識者委員会においてそれぞれレビューを行った。

レビューにおいて外部有識者から示された意見については取りまとめを行った。また、これらの意見について調整会議における研究開発マップの改訂作業の結果を整理した。

なお、研究開発マップの策定作業と並行して、経済産業省の総合資源エネルギー調査会基本政策分科会、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、及び総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループにおいて、地層処分の取組みや地層処分技術に関する議論が行われており、今後これら審議会において取りまとめられる上位方針等も踏まえて、基盤研究開発全体計画についても平成 26 年度に見直しが行われる予定となっている。

## 2 . 諸外国の地層処分に関する研究開発動向情報の収集及び整理

本章ではスウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、ドイツ、米国、英国、カナダ、スペイン、ベルギーの海外 10 カ国を対象として、各国の処分事業の現状概要、提案されている処分システムの概要、処分実施主体・国・規制機関が実施している研究開発プログラムの概要、研究開発課題等の概要について整理する。

### 2.1 スウェーデン

スウェーデンにおける処分事業の現状概要、処分システムの概要、研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、地下研究施設における研究開発動向を調査・整理した。以下はスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）からの情報をもとに取りまとめたものである。

#### 2.1.1 処分事業の現状概要

スウェーデンにおいて原子力施設を所有する許認可の取得者は、その施設から排出される放射性廃棄物及び使用済燃料を安全な方法で管理し、処分する責任を負う。この管理及び最終処分に関する義務は「原子力活動法」、「放射線防護法」及び「原子力活動で生じる残留生成物の管理のための資金確保措置に関する法律」、さらには政府が公布した関連法令、一定の許可及びガイドラインにおいて規制されている。これらの法律などは、放射性物質を使用する全ての組織に適用される。

特に原子力発電事業者、すなわち原子力発電所許認可取得者は、放射性廃棄物を安全な方法で処分する上で必要な全ての方策を実施する責任を負っている。この中には、プラントの操業で生じる放射性廃棄物及び使用済燃料を安全に取り扱い、処分に必要とされる施設を建設し、操業すること、またプラントの耐用年数が終了した時点でプラント廃止措置を実施し、解体することが含まれる。さらに必要な施設を設計・建設する上で要な研究及び開発を進めることや、これらの施設の短期的及び長期的な安全性の分析を行う責任もある。電力会社は、これらの活動に要する全ての費用を負担することになっている。

このタスクを履行するために、スウェーデンの原子力発電事業者 4 社は共同して、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）を設立した。SKB 社は、使用済燃料及び放射性廃棄物の管理に関する責任を、廃棄物が原子力発電所から搬出される時点から担うことになる。したがって SKB 社は、現時点で廃棄物管理に使用されている様々な施設及び設備―輸送船 M/S Sigrid 号、使用済燃料の集中中間貯蔵施設（Clab）、短寿命・低中レベル放射性廃棄物の最終処分場（SFR）―を所有し、それらを操業している。SKB 社はさらに、使用済燃料処分場及び関連する封入施設を開発し、それらの建設及び操業のための許認可申請を 2011 年 3 月に行った。また SKB 社は、将来の段階において、長寿命・低中レベル廃棄物向け処分場を開発することにしている。これにより、スウェーデンの原子力発電所

から取り出されるあらゆる種類の放射性廃棄物の処分が可能となる。SKB 社の処分施設は、その他の廃棄物発生者、例えば放射性物質の医療・産業・研究で生じる放射性廃棄物も引き受けるだけの処分容量を備えることになる。

### 2.1.2 処分システムの概要

使用済燃料の処分場の建設予定地として、エストハンマル自治体のフォルスマルクが決まっている。既存の全ての原子炉が発電操業を終了するまでに発生する使用済燃料量に対応する約 6,000 本のキャニスタ（ウラン換算で約 12,000 トン相当）を、地下約 500m の深さで処分する計画となっている（図 2.1-1）。処分実施主体の SKB 社が検討している処分概念は「KBS-3 概念」と呼ばれており、使用済燃料をキャニスタに封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的及び化学的に安定した岩盤内に定置する方法である（図 2.1-2）。複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物を長期に隔離し、隔離ができなくなった場合でも処分場からの放射性核種の放出を遅延させるという安全哲学に基づいている。キャニスタの定置方法は、縦置き方式を主としつつ、代替案として横置きも検討されている（図 2.1-2）。

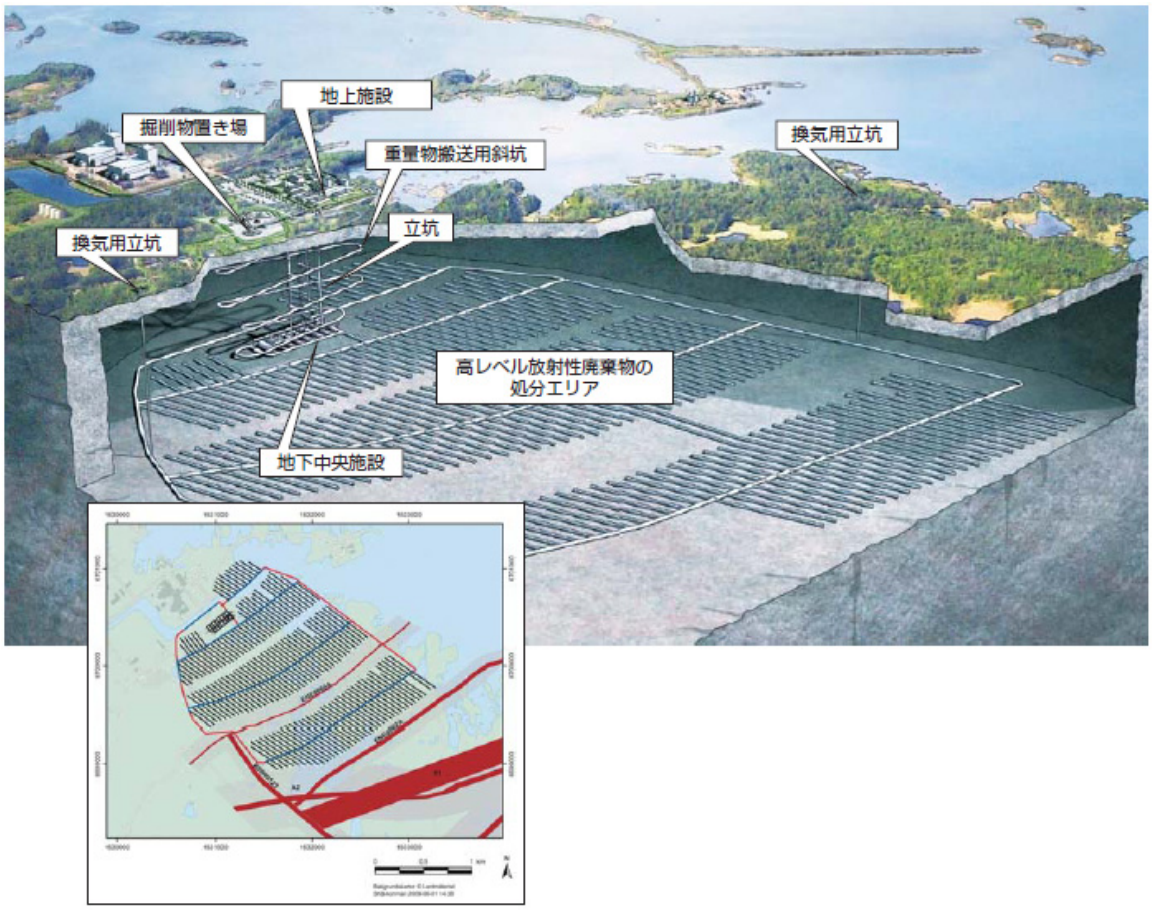



図 2.1-1　使用済燃料処分場の概念

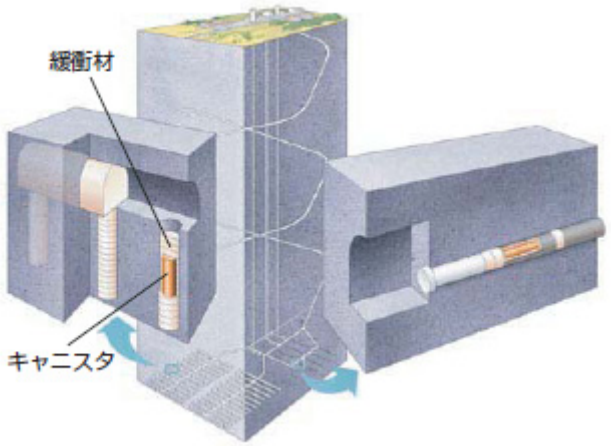



図 2.1-2　KBS-3 処分とキャニスタの縦置きと横置きの概念

2.1.3 研究開発プログラムの概要

SKB 社は、直接または間接的に、必要に応じて様々な施設に関連する研究及び開発作業を実施する。原子力活動法に基づき、原子炉を所有し、操業する許認可を取得した者は、その他の原子炉所有者との協議の上で、使用済燃料及び放射性廃棄物の管理及び処分を安全な方法で実施するために必要とされる、さらには原子力発電所の廃止措置及び解体を実行するために必要とされる研究及び開発活動及びその他の措置に関するプログラムを策定することになっている。この種のプログラム（すなわち「RD&D プログラム」）の報告書は、3 年毎に放射線安全機関（SSM）に提出することになっている。このプログラムは、原子力発電事業者を代表する形で、SKB 社が作成する。またプログラムは、スウェーデン国内の様々な組織及び個人の意見聴取を行った後で、SSM による広範なレビュー及び評価を受けることになる。さらにこのプログラムは国の諮問組織である原子力廃棄物評議会による評価も受けることになっている。SSM 及び評議会は、それぞれの見解を政府に提出し、それを受けて政府が当該プログラムを承認するべきかどうかの決定を行う。広範な全国レベルの意見聴取活動は、科学関係者と公衆が SKB 社の活動を受け入れるようになる上で重要な役割を果たした。最初の R&D 報告書は 1984 年に提出されたものであり、最新の RD&D 報告書は 2013 年 9 月に提出された。同報告書のタイトルは、当初『研究・開発』（R&D）であったが、プログラムの実証部分に対する関心が高まったことを反映して、1992 年から『研究・開発・実証』（RD&D）へと変わった。

2.1.4 研究開発課題とその概要

SKB 社は自然科学分野における研究プログラムを継続しており、放射性廃棄物及び使用済燃料の最終処分に関連する安全評価を行う必要性に対応できるようにすることを目的としている。このことは、こうした研究プログラムが、（2011 年 3 月に原子力活動法に基づく

申請を行った）使用済燃料の処分場だけでなく、1988 年から操業している短寿命・低中レベル放射性廃棄物の処分場（SFR）の両方に関して認められているニーズを、さらに最終的に長寿命放射性廃棄物の処分場（SFL）に関するニーズをカバーするものとして設定されていることを意味する。この研究の狙いとして、次のものが挙げられる。

- 最終処分場の安全性に影響を及ぼすものとして特定された問題に関する解決策を、あるいは処分場の長期安全性の評価に伴う不確実性を低減する方策を見いだすこと。
- 科学面での進歩に関する追跡調査を行うこと。その目的の例として、SKB 社の活動に役立つ新たな成果の結果的影響を明らかにすることが、さらには他の組織が発見した新しい知識から利益を得ることが挙げられる。
- 長期安全性の評価を実施し、規制当局、レビュー担当者及び公衆に対して科学的な方法による情報提供を行う上で必要な能力を維持し開発すること。

こうした研究では、異なる処分場システムが共有する一般的な問題と、ある特定の処分場システムにかかわる問題の両方をカバーしなければならない。またこの研究は、使用済燃料の最終処分場の長期安全性に関してより多くのことを学ぶことを目的に実施されるものであり、近年では SR-Site 安全評価―使用済燃料処分場の許可申請を裏付ける安全評価―の枠組みを中心として進められている。この研究の焦点は、処分場概念に含まれる人工及び天然バリアに影響を及ぼすプロセスに、あるいは起こり得る放射性核種の放出の結果的影響に影響を及ぼすプロセスに、合わせられている。

最終処分場の目的は、人々及び環境を電離放射線から保護することにある。使用済燃料の最終処分場は、廃棄物をその放射能が無害な水準に減衰するまでの期間にわたって閉じ込める役割を果たす。これに対して低中レベル放射性廃棄物の処分場（SFR と SFL）では、人々または環境に悪影響が及ばない水準において放射能を放出することになる。処分場の防護バリアは、それ全体として所期の目的を達成するために相互に作用する。地上における様々な条件も、放射性核種が地表面に到達した場合に人々及び環境に及ぼす効果に影響を与えることになる。

長期安全性にとって関連性の高い問題に関する科学的な理解は、現在ではかなり進んでレベルにある。これは、スウェーデンのプログラムやその他の国々のプログラムにおいて、さらには国際共同プロジェクトにおいて、数十年間にわたり続けられてきた研究の成果である。使用済燃料処分場の変遷及び閉鎖後安全性に関する研究は、鍵となるプロセス（例えば銅の腐食、キャニスタの剪断及びその他のキャニスタ破損の潜在的原因など）に関する理解の、さらには放射性核種遅延に関する重要なプロセスに関する理解の向上につながった。SR-Site において SKB 社は、長期安全性に関する SSM の要件を満たす使用済燃料向け最終処分場の建設が可能であることを示すことができた。

安全性にとって重要なプロセスの研究は、たとえ現在既に得られている知識は長期安全

性を検証する上で十分なものであるという見方が支配的であるとしても、今後も継続されることになっている。継続的な研究の必要性は特に、SR-Site においてリスクに寄与するものと、さらには研究を継続することによって評価の前提条件を改善することが可能だと判断された幾つかの要素に認められる。研究の必要性は安全評価作業において特定されるのが一般的である。したがって、将来の安全評価において新たな研究の必要性が特定されることも十分に見込まれる。長期安全性にとって重要なプロセスに関する研究の継続は、技術を最先端のものに維持するために、さらには能力開発のためにも、必要である。

短寿命・低中レベル放射性廃棄物について SKB 社は現在、既存処分場である SFR の評価フェーズにある。この種の廃棄物に関する計画の継続に関する主な指針となるのが、SFR 施設の操業期間延長に関する長期安全性評価の結果である。長寿命・低中レベル放射性廃棄物に関する作業は現時点では概念段階にとどまっている。特に長寿命廃棄物に関連する活動は、今後次第に具体的なものとしていく計画でおり、SFR におけるプロセスと類似しており、したがってまとめて研究することができるプロセスの数はおそらくきわめて少数であると考えられる。

地球科学的分野における研究の多くは、博士論文プロジェクトとして、主にスウェーデン工科大学（KTH）、チャルマース工科大学、ストックホルム大学、ウプサラ大学、ウーメオ大学及びスウェーデン農業科学大学で実施されている。またストックホルム大学及びチャルマース工科大学の場合、SKB 社から准教授を派遣している。これによって SKB 社に、研究に関する最新の情報に精通するだけでなく、その今後の進展方向に影響を及ぼし合い、重要な分野における人材を確保する機会が与えられている。

2.1.4.1 安全評価

安全評価は、SKB 社と SSM の双方が、放射性廃棄物及び使用済燃料の処分場がこの種の施設に関して設定された規制要件を順守しているかどうかを明らかにするために用いる手段である。その評価の方法論は、KBS-3 システムの開発と並行して長い期間にわたり開発されてきたものである。近年この開発は、安全評価との関連において実施され、報告されるようになっている。その最新の例として、SR-Site が挙げられる。この SR-Site は、フォルスマルクに使用済燃料の最終処分場を建設するための許認可申請の基礎となる評価である。

SKB 社には、長期安全性の評価に使用できる十分に試験された一つの方法が備わっている。この方法は国際協力を通じて開発されたものであり、長期安全性に影響を及ぼし得るデータ、要素、シナリオなどに関する系統的なレビューに基づくものである。またこれは反復的なプロセスであり、その出発点となるのが、サイト、処分場設計、処分場で使用される人工バリア、処分場の状態に影響を及ぼす様々なプロセスに関するその時点における知識である。そしてこれが安全機能（すなわち、処分場の変遷に伴ってバリアが安全要件を満たすためにどのような事柄に耐える必要があるのか）の特定につながる。さらに、処

分場条件が時間の経過とともにどのように変化するのかに関する解析も実施される。これにより、処分場の将来の進展に関するレファレンス状況が示される。この将来の展開に関するレファレンス状況が明らかにされると、一定の要素の変化が処分場の長期安全性にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするために、様々なシナリオが考慮に入れられる。そして最後に、長期安全性要件がこれらの最悪のケースのシナリオにもかかわらず順守されることが確認される。こうして得られた結果及び結論は新しい知識ベースに加えられると、次の反復作業を開始することができる。図 2.1-3 に、安全解析の反復的なプロセスを単純化した図を示した。

また図 2.1-4 に、長期安全性の解析を可能にする方法論の開発が長年にわたって行われてきた状況を示した。それぞれの解析が、どの領域においてより多くの研究または技術開発が必要とされているかに関する SKB 社の知識の充実につながっている。1983 年の『KBS-3 報告書』[SKBF/KBS 1983]において、この方法の原理は理論的に可能だが、実現にはより多くの知識が必要であることが示されている。その後の一連の報告書によってこの開発サイクルは継続された。この種の報告書の例として、『SKB-91』[SKB 1992b]、『SR-97』[SKB 1999]、『SR-Can』[SKB 2006]及び『SR-Site』[SKB 2011]が挙げられる。解析作業は、許認可発給プロセスの期間中も継続されている。したがって使用済燃料の最終処分場の建設が開始前に、さらにもう 1 つの報告書を作成し、規制当局に提出することになっている。

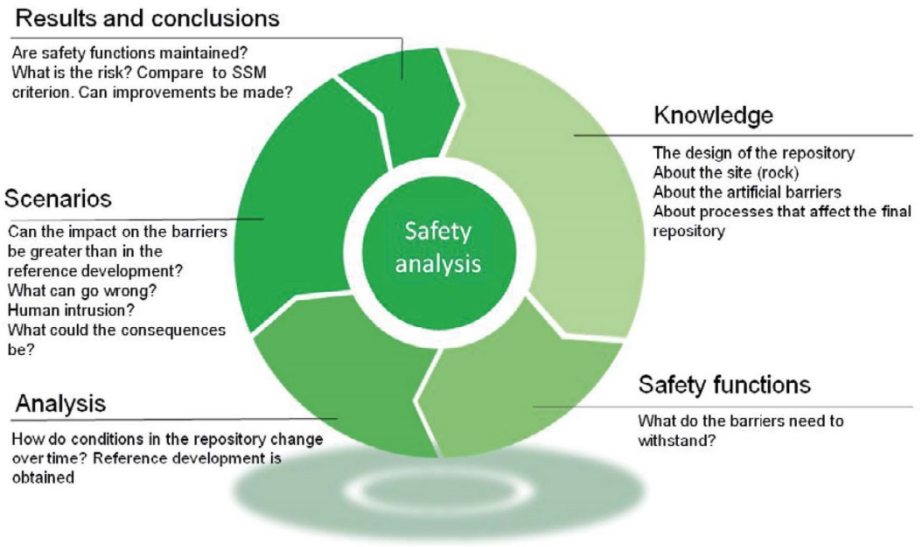



図 2.1-3　SKB 社の内部で安全解析の実施方法を単純化して示したモデル

安全評価の「10 ステップ方法論」が、SR-Can 安全評価において使用された。この方法

論は、サイト調査フェーズにおける SKB 社との協議の枠組みにおいて、当時の規制当局である SKI 及び SSI（原子力発電検査機関と放射線防護機関）の審査を受けた。これらの当局はその時点で、この方法論が、その大部分において、適用される規制要件に適合しているという判断を示したが、それと同時に、改善を要する一定数のポイントも指摘した。これらの見解は、後に SKB 社が実施した『SR-Site 安全評価』に反映された。この報告書は SKB 社が使用済燃料処分場の建設許認可を受けるために行った申請の根拠の一つとして作成されたものである。『SR-Site』は 2013 年秋から放射線安全機関（SSM）の安全審査が開始され、この審査の結果として示される安全評価方法論に関する見解は、使用済燃料処分場の建設を開始するために SKB 社が提出する必要のある『予備安全解析報告書』（PSAR）における閉鎖後安全評価において考慮することになっている。またその代わりに SSM は、既に現在進められている許認可プロセスにおいて方法論に関する補助的な要件を指定できる。その場合に SKB 社は、PSAR に関する作業の開始に先立ち、これらの要件に対処することになる。

次の RD&D 期間における開発面でのニーズは、感度解析の方法及び放射性核種移行に関する補足的な開発に、また SKB 社の安全評価の品質保証のさらなる開発に関連するものである。これに加えて SKB 社は、SSM が現在進めている『SR-Site』の審査との関連で表明される可能性のある方法論に関する何からの見解に対応するための準備を行っている。

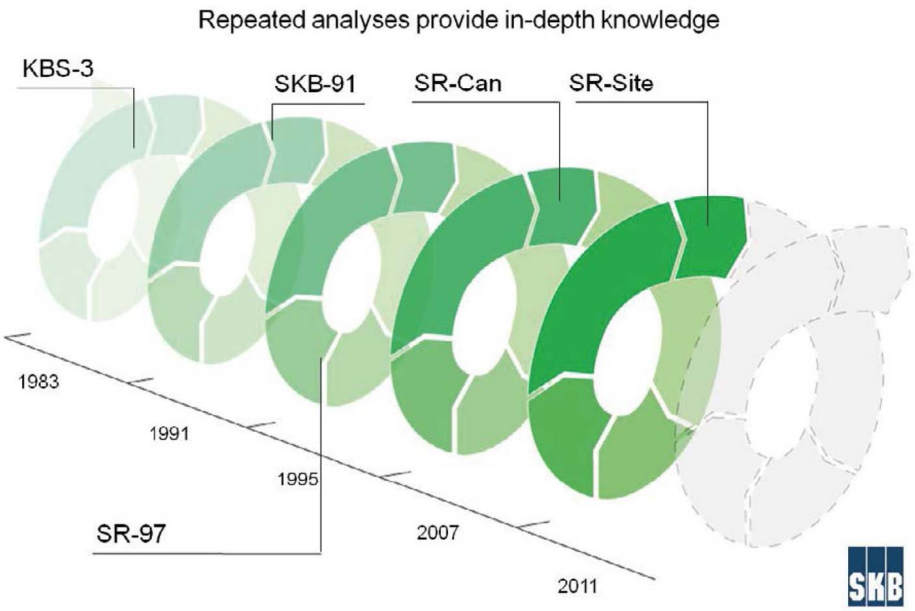



図 2.1-4　SKB 社のプログラムで安全解析の開発に用いられる反復的なサイクル

2.1.4.2 気候変遷に関する研究開発

使用済燃料と低中レベル放射性廃棄物の両方が地下深部の基盤岩で処分されることにな

っている。この種の岩盤は極めて安定した環境を提供するものであり、将来のきわめて長い期間にわたりどのようなことが起こるのかを記述することさえ可能である。それと同時に地上で起こり得る最も極端な状況においてさえも、規制当局が設定する安全要件を処分場が順守できることを SKB 社は示さなければならない。使用済燃料処分場の場合、SKB 社は、気候が最長で 100 万年間の期間にわたり安全性に対してどのような影響を及ぼすかに関する予測を示せなければならない。

気候に関する研究は、SKB 社の研究計画の全てに関連するテーマである。この研究は、他の幾つかの研究領域とかかわりを持つだけでなく、影響を及ぼす。気候関連プロセス（例えば氷床及び永久凍土層の拡大など）は、海水位、地下水の流動、地殻における応力に対し、そして特に地上における生活条件に対し、影響を及ぼす可能性がある。

その他の多くの気候研究とは異なり、SKB 社の研究の焦点は、地球温暖化や次の氷河期が正確にどの時点で生じるかのみに合わせられているわけではない。その代わりにこの研究にとって、これらのきわめて長い時間的展望において気候の変遷に関して存在する様々な不確実性を全体としてカバーする一定数の起こり得る将来の気候の変遷を特定し、記述することの方がより重要である。これらの気候ケースは、起こり得る気候の変遷の例となるだけでなく、処分場の様々な機能の解析に用いられる極端な極限ケースの例となるものである。さらに、異なるタイプの処分場の必要性は、これらの処分場が異なる深度に位置し、異なる物質で構成されるバリアを使用し、異なる解析期間の長さが適用されるという事実により、幾分相違を伴うものとなっている。

使用済燃料処分場の場合、将来の 100 万年までの期間にわたり緩衝材及びキャニスタに影響を及ぼし得るプロセスに焦点が合わせられる。将来の活動は主として氷床の歴史的な変動に関する詳細な情報の入手を目指したものとなる。その目的は、将来の氷床がどの程度まで厚くなる可能性があるのかを明らかにするために、その限度を設定することにある。

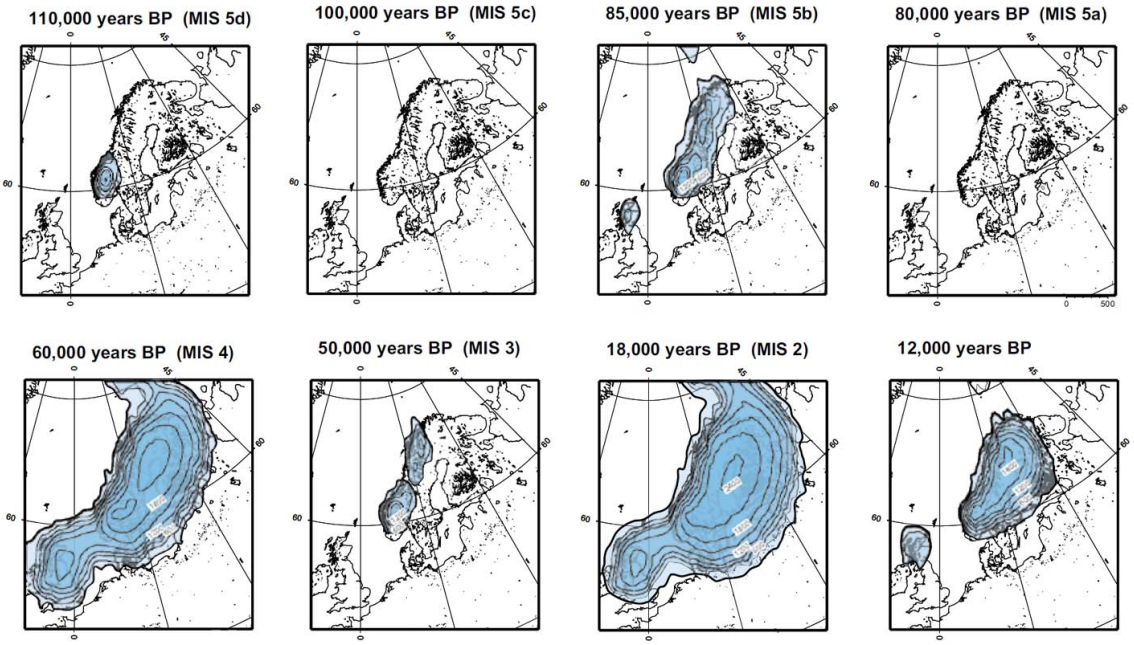



図 2.1-5　SKB 社の安全評価作業で使用されるヴァイクセル氷河作用を再構成することによって示された氷床の構成と氷の表面の高さの例（等高線の間隔は 300 m）。この点において、「海洋同位体ステージ 3」（MIS 3）と呼ばれる長い期間にわたる氷床の範囲がスウェーデン領土上ではきわめて限定的であることに注意する価値がある。その状況は 5 万年前の氷の絵によって図中に例示されている。この図において、フォルスマルク近辺のエリアには氷床が存在しないことが見て取れる。スウェーデン全土が MIS 4（およそ 7 万年前に開始される期間）から MIS 2（1 万 2,000 年前に開始される期間）の終わりまで氷床によって覆われるとされるヴァイクセル氷河作用に関する古典的な解釈とは対照的に、SKB 社の気候プログラム及びその他の研究で得られた情報では、MIS 3 に含まれる幾つかの期間にわたり（すなわち氷期の最中に）氷床を伴わない状況が支配的となることが示されている。

その他の問題も、氷期に処分場においてどのようなことが起こるのか、さらには氷床下の水理地質学的な条件がどのようなものとなるのかに関するものとなる。これらの問題についての知識を向上させるために SKB 社は、フィンランド及びカナダの姉妹組織とともに、「グリーンランド・アナログ・プロジェクト」と呼ばれる大規模な研究プロジェクトをグリーンランドで行っている。このプロジェクトは、2009 年以降続けられており、現在その最終段階にあるが、SKB 社の幾つかの研究領域、特に水理地質学及び水理地球化学において役立つ貴重な知識をもたらすものとなっている。こうした情報はまた、SKB 社が将来最終処分場の上に位置することになる内陸氷床の挙動について検討する際にも役に立つことになろう。

次の 1 万年間の期間において予測される気候変遷は、SFR の長期安全性の評価にとって

重要なものである。ここでは、例えば、永久凍土層が形成され得る最も早い時期に関して、さらには評価対象期間に永久凍土層がどの程度の深度に到達するかに関して、一定の考えを得ることが重要となる。

またこの気候プログラムの範囲においてSKB社は、地球温暖化が支配的な役割を果たす将来の気候に関して記述する複数のシナリオを用いた作業を行っている。その目的は、この種の気候が異なるタイプの処分場の安全性にとってどのような意味を持つのかに関する評価を行えるようにすることにある。この作業には、長期安全性に関する側面と短期安全性に関する側面が含まれている。また後者ケースには、処分場の地質工学的な設計及び構成の基礎の一つとして起こり得る海水位の上昇に関するデータを収集することが含まれている。

2.1.4.3 燃料に関する研究開発

使用済燃料処分場において燃料を収納した銅製キャニスタに損傷が生じない限り、放射性物質が処分場から漏れ出ることはできない。1体のキャニスタに貫通孔が生じた場合に放射性核種が岩盤に漏れ出ることができるかどうか、またはどの時点でそれが起こるのかを判断する上できわめて重要となるのは、燃料の諸特性である。

この点に関して燃料特性のうち最も重要なものの一つとして、それが処分場環境に存在する水中においてきわめてゆっくり溶解するのが一般的だということが挙げられる。この特性により、放射性物質の分散が起きた場合でも、それが遅延されることになる。したがって燃料の溶解はSKB社が継続している燃料関連研究のきわめて重要なトピックの一つのである。例えば、研究活動は、処分場の条件と同様の条件のもとでの燃料の溶解に関するデータを収集し、燃料の溶解に寄与する様々なプロセスのメカニズムを明確にするよう計画される。

放射性核種の一部は、それらが原子炉内にある期間に分離し、燃料ペレットの表面に存在している。したがってこれらの核種の燃料に対する結合は緩やかなものである。キャニスタに貫通孔が生じた場合、これらの物質は燃料マトリクスよりも迅速に溶解し、地表面に移行される可能性のある放射性核種の初期パルスを決定づける。燃焼度の高い燃料の方が、迅速に放出される放射性核種の比率が大きくなることを示す兆候が複数存在する。そしてこのことが、高燃焼度燃料の諸特性に関する追加的な研究が実施されるきっかけとなった。また新しいタイプの燃料（例えば原子炉における燃料の性能を最適化するためにクロムが追加された燃料）について調査する研究も実施されている。これらの新しいタイプの燃料に関する調査は、主として国際的な共同プロジェクトの形で行われている。

2.1.4.4 キャニスタに関する研究開発

銅製キャニスタは、KBS-3 処分場における隔離バリアである。このキャニスタにより、放射性核種が岩盤に漏れ出ることはないものと考えられている。SR-Siteのレファレンス・

シナリオでは、キャニスタは分析対象となる期間全体を通じて損傷を伴わない状態を維持する。キャニスタに開孔を生じさせる可能性のある要素は、力学的な負荷と銅の腐食の 2 点である。したがって力学的負荷に関連する中心的な問題として、キャニスタはどの程度の規模の地殻均衡荷重を許容することができるのかという問題と、キャニスタはどの程度の規模の岩盤剪断移動に耐えることができるのかという問題が挙げられる。この点において重要な研究領域の一つとして、銅の耐クリープ性が挙げられる。

研究面での最大の取り組みは銅の腐食に関するものである。その目的は、どのプロセスがキャニスタに影響を及ぼすことができるかを明らかにすることにある。例えば、その背景となるプロセスに関してより良好な理解を得る必要が認められている現象が複数存在する。実験対象としては特に、熱力学データによって予測される量を大幅に上回る量の水素ガスを生成する無酸素水中における銅の腐食が挙げられる。

同時に、キャニスタの長期的な耐久性に影響を及ぼし得るプロセスに伴う不確実性を低減するための活動が継続されている。一つの例として、硫化物腐食に関する作業が挙げられる。この腐食は『SR-Site』においてリスクに最大限の寄与を行う腐食プロセスと認められており、したがって追加的な研究を実施すべきトピックの一つに含められた。また応力腐食割れも、追加的な研究が必要とされるもう一つの複合的なプロセスとして挙げられる。

2.1.4.5 緩衝材と埋め戻し材に関する研究開発

使用済燃料処分場においてキャニスタは、ベントナイト粘土の保護緩衝材によって取り囲まれる。この粘土の役割は、キャニスタに至る地下水の流動を制限することにある。キャニスタに貫通孔が生じた場合、緩衝材は岩盤内への外向きの放射性粒子の移行を遅らせる役割も果たす。

緩衝材に損傷がない限り、キャニスタで開孔を引き起こし得るプロセスは存在しない。安全評価作業に伴い、緩衝材が一定の条件のもとで崩され、岩盤内の亀裂内に向けて運ばれる可能性があることが明らかになった。この現象は「緩衝材の侵食」として知られている。この現象は、氷床からカルシウム含有量の低い融氷水が大量に処分場にまで浸透した場合に発生する可能性がある。したがって、どのような条件のもとであれば粘土が安定した状態を維持するのかを明確にするために、最大限の研究活動が実施されなければならない。この研究は、SKB 社自体プロジェクトとしてだけでなく、EU 内での大規模共同プロジェクトの形で、広範な実験プログラムとして行われている。

また、粘土の特性評価に関するプログラムの開発活動も実施されている。この点については、エスポ岩盤研究所で行われている代替緩衝材に関する実験のおかげで進展が見られた。また粘土において生じる幾つかの変化（すなわち均質化）の背景にあるメカニズムに関してより良好な理解を得る作業にも進展が見られる。粘土内で生じるこのプロセスに関する記述を改善する目的で幾つの新しいモデルが開発されおり、この領域における開発活動も継続されている。

ベントナイト粘土は、使用済燃料処分場における定置坑道の埋め戻し材としても使用される。緩衝材について実施されている研究は、埋め戻し材に関する開発作業との関連において生じるニーズもカバーするものである。

緩衝材、埋め戻し材及び閉鎖材に関するプロセス報告書［SKB 2010］において、緩衝材に関する記述に一定数の変数が用いられている。初期状態におけるこれらの変数の大部分の値は、表 2.1-1 に示した諸特性によって決定づけられる。

粘土が水の流動を制限し、放射性核種の移行を遅らせることを可能にする粘土の幾つかの特性は、低中レベル放射性廃棄物の処分でも利用されている。したがって使用済燃料処分場における緩衝材に関連する幾つかの問題の研究は、かなりの部分まで SFR にも適用可能なものである。同様に、ベントナイト粘土及びコンクリートがどのような相互作用を引き起こすかに関する理解の向上を目的とする活動が進められている。これは、長寿命廃棄物の最終処分にも適用可能である可能性がある。この種の廃棄物に関するプログラムは依然として概念段階にあり、具体的な研究問題がまだ明確に設定されていない理由もここにある。

表 2.1-1　緩衝材及び埋め戻し材に関する変数

| 変数 | 特性 | 初期状態 | 定義 |
|---|---|---|---|
| 水の含有量 | 物質組成 | | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としての水の含有量。 |
| ガス含有量 | 物質組成 | | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としてのガスの含有量（放射性核種が存在する場合にはそれも含む）。 |
| ベントナイトの組成 | 物質組成 | | 緩衝材における時間及び空間の関数としてのベントナイトの化学的組成（放射性核種が存在する場合にはそれも含む）。またこの中には、モンモリロナイト以外の不純物や鉱物も含まれる。 |
| モンモリロナイトの組成 | 物質組成 | | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としてのモンモリロナイトの化学的組成(放射性核種が存在する場合にはそれも含む)。この変数には、モンモリロナイトの表面に収着される物質も含まれる。 |
| 間隙水の組成 | 物質組成 | | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としての間隙水の組成(放射性核種及び溶存ガスが存在する場合にはそれらも含む)。 |
| 水理学的な変数（圧力及び流動） | 物質組成 | | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としての水及びガスの流動及び圧力。 |
| 応力状態 | 設置密度 | | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としての圧力。 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 間隙の幾何学的形状 | 設置密度 | | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としての間隙の幾何学的形状。しばしば示されるのは、間隙率（すなわち固体物質によって占められていない容積の比率）である。この変数には緩衝材の密度も含まれる。 |
| 緩衝材の幾何学的形状 | 設置密度 | | 緩衝材及び埋め戻し材の幾何学的な寸法。例えば、内向きではキャニスタに向かう、外向きでは地圏に向かう境界面の記述。 |
| 放射線強度 | － | 算出 | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としてのα、β、γ及び中性子放射線の強度。 |
| 温度 | － | 算出 | 緩衝材及び埋め戻し材における時間及び空間の関数としての温度。 |
| 構造及びストレー物質 | － | | 定置孔における何らかの工学物質の組成。 |

2.1.4.6 地圏に関する研究開発

放射性物質の最終処分は地下深部の基盤岩において実施される。その環境は安定したものであり、様々な条件の変化は、地上で起こる現象と比較した場合にはごくわずかなものでしかない。当該岩盤が何百万年もの期間にわたって安定した状態を維持したという知識に基づき、将来の長い期間にわたり岩盤の諸条件に関する予測を立てることができる。地圏の研究には 4 件の専門分野が包含されている。すなわち「地質学」、「水理地質学」、「水理地球化学」及び「岩盤の移行特性」である。

これらの領域における今後の研究は、安全評価の結果にとってきわめて重要な岩盤条件に関する知識ベースの拡充を目的としたものとされる。SR-Site では、どの特性及びプロセスが使用済燃料処分場に関して最も重要であるかが明確に示されている。その目的は、岩体において様々な特性がどのように岩型の関数として変動するのかに関する知識を充実させることにある。SKB 社は、きわめて長期間にわたり当該岩盤で起こるプロセスに関する記述及び予測に使用するモデル化ツールの改善も実現しなければならない。

将来の処分場建設に伴い、岩盤及びそのバリエーションに関するデータが入手される。これにより将来、岩盤特性の空間的な変動に関する全体像をより詳細なものとすることが可能となる。その一方で、エスポ岩盤研究所における調査及びサンプルの採取方法の開発が、主として詳細な特性評価プロジェクトの範囲内で進められている。

地質学分野の研究活動の焦点は、岩盤内の応力によって、また高い温度によって引き起こされるスポーリングに関する良好な理解を得ることに、大型亀裂を特定するための方法論に、氷河によって誘発される断層に関する追加的な調査に、地震モデル化を支援する地震測定に、さらにはスウェーデンの基盤岩における地震活動度に関する全般的な知識の拡充に、合わせられる。不連続亀裂ネットワーク・モデル（この種のモデルは岩盤移動及び亀裂における溶質移行に関する分析の基礎の一つとして役立つ）は、水理地質学的、地質学的及び岩盤力学的な状況に関する研究の主要な手段となるものである。

グリーンランドでの調査で収集されているデータは主として、地上系の水理地質学的状況に関するものである。その目標は、永久凍土層が支配的となる期間に流動がどのように変化し、変動するのかを記述できるようにすることにある。その結果は、例えばSFRの拡張部に関する安全評価で使用されている。地下深部の地下水系の水理地質学的な研究には、データ及びモデルをその他の領域（地球化学、岩石力学、岩盤力学及び移行）に関するものと統合し、流動及び移行計算に使用されるコードを維持し、改善することが含まれる。広範な永久凍土層を伴う氷期の流動条件は、処分場深度における状況にも結果的影響を及ぼす。グリーンランドに関するプロジェクトで入手された調査データは、流動プロセスを理解するだけでなく、モデル化ツールを最適化するためにも使用されている。

地球化学分野の研究の焦点は、今後とも水と岩盤との間の反応並びに亀裂系における水の移動が及ぼす効果に合わせられことになる。様々な活動の重点が、地球化学的条件が岩盤における水理地質学的な条件及び移行特性と統合されるモデルに置かれている。また微生物プロセスも、ますます重要なトピックとして認識されるようになってきた。その例として、酢酸生成菌（酢酸塩を作り出す微生物）の重要性、岩盤内の微生物とウイルスの間の相互作用、亀裂表面上のバイオフィルム、さらには水素、メタン及び硫化物が存在する条件のもとでの微生物プロセスなどが挙げられる。

溶質がどのように地下水によって移行されるかに関して調査するプログラムには、流動関連の移行抵抗、水路形成（水路の幅及び頻度）、さらには停滞域における拡散に関する調査が含まれている。亀裂における水理地球化学的な条件が考慮に入れられる元素固有の分配係数に関する$K_d$概念の改善に向けた計画も複数設定されている。その目的は、将来の安全評価において新たに発見された知識を活用できるようにすることにある。地下水流動及び溶質の移行に関するSKB社のタスクフォースにおいて、国際的な研究が進められている。モデル化作業は、様々な組織の人材で構成される幾つかのグループにより、エスポ岩盤研究所または外国の地下研究所で実施された実験や調査で入手したデータを用いて実施している。

#### 2.1.4.7 地表生態系に関する研究開発

地表生態系の領域における研究及び開発の主な目的として、地上系における放射性核種の移行及び蓄積に影響を及ぼすプロセスに関する理解を改善することが、さらには人間の健康及び環境に対する放射線学的なリスクを計算し、評価する方法論を開発することが挙げられる。この点に関しては、使用済燃料処分場及びSFRの拡張に関する安全評価に関する作業において特定された、さらには使用済燃料処分場に関する許認可申請書のレビューとの関連において特定された問題及び不確実性が特に重視されている。将来の長寿命放射性廃棄物向けの処分場（SFL）の評価の準備作業で特定される問題も調査されることになる。

これまでに実施された調査により、放射性核種が処分場から岩盤に向けて放出され、地表にまで移行した場合であっても、これらの核種は最終的に景観的に低いポイントに向か

うことが示されている。このことが陸地環境で起きた場合、受容エリアはおそらく湿地または農地となる。したがって地表生態系の分野における将来の研究活動の重要な領域の一つは、湿地及び農地における放射性核種の移行及び蓄積を制御するプロセスとなる。同様に、陸地から湖及び水路に至る放射性核種の移行を制御するプロセスに関してより良好な理解を得ることも重要である。調査が計画されているプロセスの例として、保持及び生物学的な取り込みが挙げられる。地上系の生物地球化学的な状況に関するプログラムにおいて、異なる空間スケールにおける保持及び生物学的取り込みに関する理解を深め、その記述を改善するために、収集されたデータのさらなる加工が行われる。

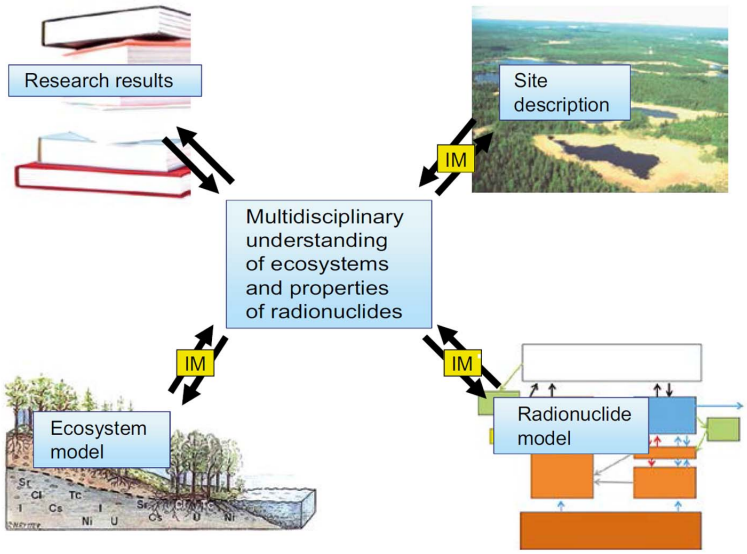



図 2.1-6　地表生態系における重要なプロセスの理解を明確にし、改善するための長期的かつ反復的な作業の説明。相互作用マトリクス（IM）の最初のバージョンは、サイト調査プログラムの設計及び生態系モデル並びに放射性核種移行モデルの設計の重要な基礎の一つとして用いられた。様々な構成要素がそれぞれ、その他の構成要素の開発に用いられる新しい知識及び新しい問題を生成する。蓄積された知識（説明の中央に示した）は、それぞれの生態系について記述する報告書に見いだすことができる（[Andersson 2010]、[Aquilonius 2010] 及び [Lofgren 2010]）。

フォルスマルクの海岸域は、気候の変動及び汀線移動の関数として時の経過とともに変化し、その結果として人間及び環境に起こり得る被ばくに結果的影響を及ぼす。放射性核種が処分場から漏出した場合に生じ得る結果的影響を評価するために、景観の変遷と気候の変動に伴ってこれらのプロセスがどのように変化するのかに関する知識を入手する必要がある。このため、景観とその変遷に関する記述をより高度なものとすることを目的とした活動が、地表生態系に関するプログラムの範囲内で計画されている。さらにフォルスマ

ルクの気候がより低温のものとなった場合にこれらのプロセスがどのように変化するかに関する理解を深めるために、SKB 社は現在進めているグリーンランドにおける周氷河環境に関する記述を今後も継続することになる。

計算の方法論の改良に関しては、不確実性の低減を目的として、不確定な濃度係数を保持及び生物学的取り込みに関する機構的モデルと置き換えるか、この種のモデルによって補完するための活動が計画されている。SKB 社は、生物圏プログラムから、さらには完了したものだけでなく現在も進められている安全評価に対する方法論の適用から新たに得られる知識に基づく線量計算の方法論の開発も、継続することにしている。

SKB 社は、人間及び環境にとっての放射線学的な安全性に関する一定数の国際的な共同フォーラムに積極的に参加することにより、国際的な研究の経過のフォローアップを行っている。その例として、IAEA プログラムや EU プロジェクト、さらには例えば BIOPROTA や環境放射生態学連合（IUR）などの組織が挙げられる。

### 2.1.5 地下研究施設における研究開発動向

地下研究所（URL）の有用性は、スウェーデンのプログラムの初期段階から認識されていた。スウェーデンでは 1976 年には既に、廃棄された鉄鉱石鉱山であるストリーパ鉱山を使用する可能性を確認した。ストリーパ・プロジェクトは、米国エネルギー省（ローレンスバークレイ研究所を通じて）と SKB 社との協力により、迅速に組織された。ストリーパは、結晶質岩（花崗岩）における世界での最初の地下研究所となった。初期の実験の目的は、廃棄物が発する熱によって形成される高い温度場がベントナイト及び岩盤に及ぼす影響について理解すること、岩盤中での地下水移動の研究に置かれていた。

OECD/NEA の後援を受けて 1980 年に開始された拡大版の「国際ストリーパ・プロジェクト」には、次に挙げる 4 つの主要領域区域における多数の実験が含まれていた。

- ストリーパの花崗岩に関する水理地質学的な調査と、単純亀裂及び複合亀裂系における核種の移動試験。
- ストリーパの花崗岩における地下水の化学的な調査。
- 花崗岩内の亀裂系を検出し、その特性評価を行う手法の研究。
- 亀裂性基盤岩における埋め戻し及びシーリング材としてベントナイト粘土の調査。

ストリーパ・プロジェクトで得られた経験に基づき、SKB 社は 1986 年に、それまで何の作業も実施されていないサイトに、より詳細かつ包括的な調査を実行できる新しい地下研究所を建設することを決定した。これがエスポ岩盤研究所（Äspö HRL）の始まりであった。この岩盤研究所の科学的／技術的な目的は『R&D プログラム 86』において、次に示すように記述されていた。

- 詳細サイト調査で使用される詳細な調査方法開発及び試験にとっての基盤を提供す

ること。

- 地下水流動に関する詳細な調査を（ストリーパの場合よりも）大きな規模で実施するとともに、この流動が掘り下げ立坑または坑道建設による影響をどのように受けるのかを調査すること。
- 地球科学的な調査及び実験を実施するサイトとしての機能を果たすこと。
- 特性評価が明瞭な形で実施された代表的な領域において（地下水流動とともに起こる）核種移行の試験の実施を可能にすること。
- 一定の系構成要素または一定の装置を用いたパイロット試験のための場所を提供すること。
- 処分場システムの様々な部分の共同機能に関する研究（比較的長い期間にわたるもの）のための原位置試験を実施する場所を提供すること。
- 大スケール実証活動のための場所を提供すること。
- 最終処分場で使用する土木工事方法及び建設技術の試験を行う場所を提供すること。
- 様々な処分場代替策の調査を行うために、良好な特性評価が実施されたレファレンス・サイトとしての機能を果たすこと。

これらの目的には、岩盤研究所の立地予備調査及び建設段階で実施・達成するものも含まれていることに注意したい。施設が完成する前の調査・建設段階で得られたデータにより、例えば地下水流動に関する数学的モデルの妥当性確認及び改良の糸口がもたらされた。また取得したデータを使って、岩盤研究所の立地で使用する予備調査方法やそれらの改善にとっての基礎に関する妥当性確認が可能になった。したがって、岩盤研究自体所及びその建設に関する調査は、最終処分場の建設の本格的な予行演習と見なすことができる。

研究所深度に到達した時点から（また実際にはそれよりも早い段階から)、多くの一連の実験が実行されている。上述した全ての目的が既に満たされているという結論を導き出すことができ、エスポ岩盤研究所で得られた成果が安全評価に直接供給されている。これに加えてエスポ岩盤研究所は、現実の処分場で使用済燃料キャニスタの取り扱い及び処分を実行し、緩衝材及び埋め戻し材の設置を行うために用いる装置を開発し、試験する上で、きわめて優れたサイトの一つであることが判明している。

これ以外にも、エスポ岩盤研究所の科学／技術分野以外の副次的効果として、最大限の重要性を伴う問題の一つである広報活動にとっての有効な手段の一つとなったことが挙げられる。エスポには毎年数千人もの見学者が訪れ、その範囲は学校の生徒からスウェーデン及び外国の閣僚まで多岐にわたる。同研究所により、実際の処分場がどのようなものとなるのかについてのイメージがもたらされるだけでなく、地層処分に関する知識の研究及び開発に関してどれほど真剣な取り組みがなされているかが示されている。

エスポ岩盤研究所は意図的に、地層処分場の建設にとっては適格ではない岩体に建設している。その理由は、「短期」実験を実施する可能性を高めることに加えて、研究所の立地

と処分場の立地活動が混同される事態を回避することにあった（エスポ岩盤研究所が設置された岩盤には比較的多くの亀裂が存在し、地下水の含有量も大きい)。これは、こうした混同が、世界的に見て、この種の研究所の開発作業が長年にわたって遅延した重要な理由となっていたためである。他の国々（例えばフィンランドやフランス）では、当該岩盤の諸特性が適格であることが判明した場合には、地下研究所は処分場の実現に向けた第一段階と見なされることになっている。こうしたケースでは、地下研究所の重要な目的の一つは、処分場環境内の処分場深度において実際の岩盤の調査を行うことに当たる。

以上をまとめると、地下研究所が処分場システムの開発の重要な構成要素の一つであることは明らかである。スウェーデンで実施されたストリーパ・プロジェクトは主として科学プロジェクトとしての性格を有するのに対し、エスポ岩盤研究所はより広い活動範囲を伴っており、その中には科学的な理解の改善、技術開発及び公衆に対する情報提供も含まれている。例えばエスポ岩盤研究所は、以下の活動のために用いられてきた。

- 調査方法を開発し、その妥当性を確認すること。
- モデル化を行い、その確証を行うこと。
- 特定の単独の現象に関する理解を、または現実の環境におけるその他の現象との組み合わせにおける現象（例えば加熱効果、腐食及び放射性核種の移行など）に関する理解を深めるための科学実験を行うこと。
- 周囲の岩盤にほとんど擾乱がない坑道及びボーリング孔に関する試験方法を開発し、試験すること。
- 掘削及び定置作業中に使用する品質保証及び品質管理の方法を開発し、試験すること。
- 使用済燃料キャニスタ並びに緩衝材及び埋め戻し材の定置に使用する装置を開発し、試験すること。
- 温度が上昇したキャニスタを用いた実規模の統合的な処分試験を実行すること。
- 公衆及びその他のステークホルダに対し、使用済燃料の処分技術に関して、さらにはこの処分を支援するために実施されている研究活動に関して、あらゆるレベルにおける情報を提供すること。

## 2.2 フィンランド

フィンランドにおける処分事業の現状概要、処分システムの概要、研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、地下研究施設における研究開発動向、回収可能性に関する研究開発動向を調査・整理した。

### 2.2.1 処分事業の現状概要

フィンランドでは 1983 年の政府原則決定により、使用済燃料の最終処分地に係る段階的な立地選定プロセスと 2000 年末までにサイト 1 ヵ所を選定するスケジュール目標が示され、これに基づき実施主体（当初はテオリスーデン・ヴォイマ社（TVO 社）、1995 年よりポシヴァ社）がサイト選定のための調査を開始した。1999 年にポシヴァ社は最終処分地としてエウラヨキ自治体のオルキルオトを選定し、政府へ原則決定の申請を行った。ポシヴァ社の申請に対して 2000 年に政府が原則決定し、2001 年に国会が承認したことにより、処分地が決定した。その後処分実施主体のポシヴァ社は 2004 年から地下特性調査施設（ONKALO）の建設を開始し、並行して岩盤や地下水の特性、及び掘削がこれらの特性に及ぼす影響について調査を行ってきた。

ポシヴァ社は 2012 年 12 月に処分場の建設許可の発給に関して政府へ申請し、現在規制機関である放射線・原子力安全センター（STUK）により安全審査が行われている。STUK の安全審査等を踏まえて政府は建設許可の発給について判断する予定であり、政府より建設許可が発給されれば、ポシヴァ社は処分場の建設を開始することとなる。また、処分操業を開始するためには別途操業許可の発給を受ける必要があり、今後ポシヴァ社は操業許可についても申請を行う予定である。ポシヴァ社は、処分の操業開始について 2022 年頃を見込んでいる。フィンランドにおける地層処分事業のこれまでの経緯の概要について図 2.2-1 に示す。

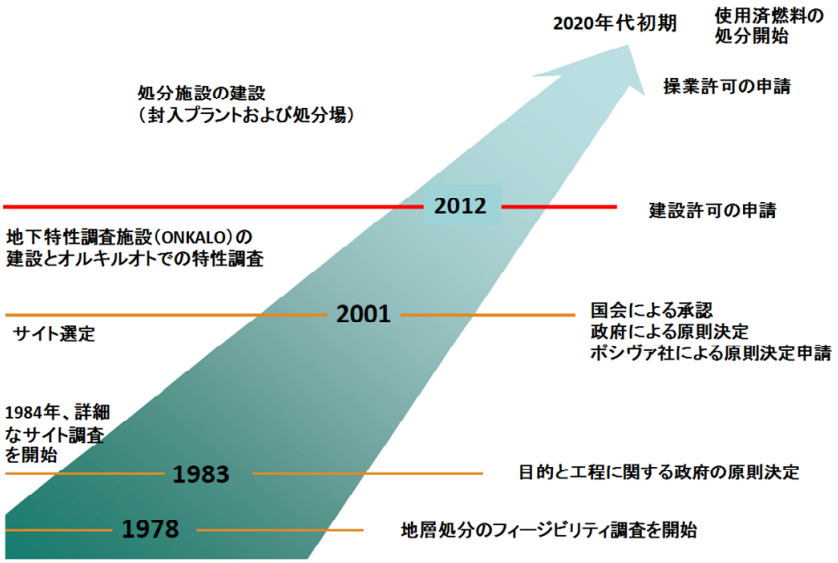
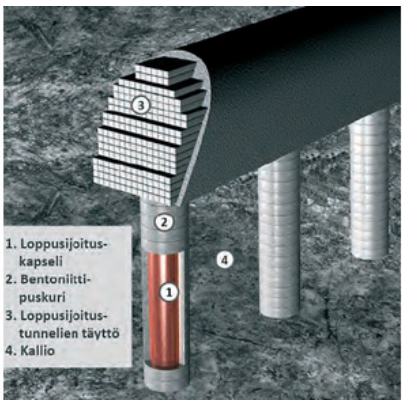



図 2.2-1　フィンランドの使用済燃料処分事業の経緯

2.2.2 処分システムの概要

ポシヴァ社による計画では、オルキルオトに建設される予定の処分場には、稼働中の 4 基、建設中及び計画中のそれぞれ 1 基の合計 6 基の原子炉から発生する使用済燃料 9,000 トン（ウラン換算）が処分される。計画中のオルキルオト 4 号機を除くと、5 基の原子炉は、沸騰水型原子炉（BWR）2 基、ロシア型加圧水型原子炉（VVER）2 基、欧州加圧水型原子炉（EPR）1 基の 3 種類がある。

処分方法は、スウェーデンの SKB 社が 1983 年に提案した KBS-3 処分概念に基づいている。KBS-3 処分概念では、使用済燃料を鋳鉄製インサートと銅製オーバーパックからなるキャニスタに封入することによって核種の閉じ込め性を期待する。キャニスタは、その周囲をベントナイト製の緩衝材で取り囲むようにして、結晶質岩の地下深部（深度は約 400～450m）に掘削した処分孔に縦置きで定置する。また、キャニスタを横方向に定置する代替方法についても研究開発がなされている。図 2.2-2 と図 2.2-3 にそれぞれ KBS-3 処分概念とオルキルオトに建設予定の処分場イメージ図を示す。




①キャニスタ
②緩衝材
③坑道埋戻し材
④母岩

図 2.2-2　KBS-3 処分概念イメージ（ポシヴァ社ウェブサイトより引用）

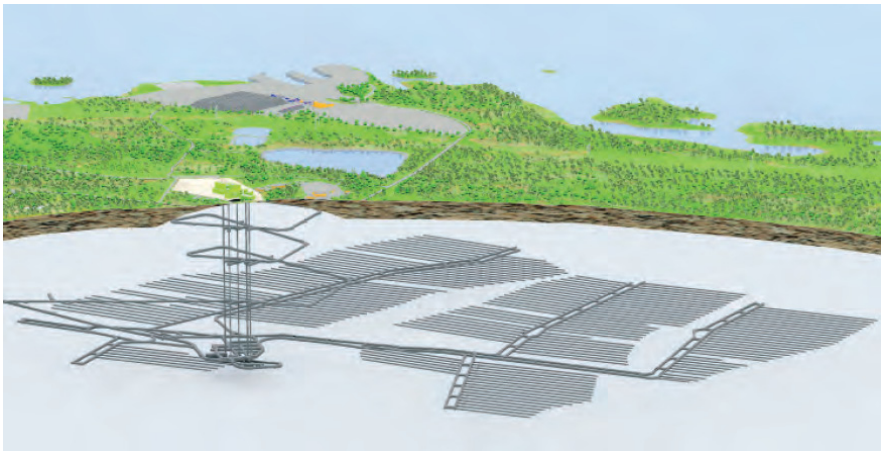


図 2.2-3　オルキルオトに建設予定の処分場レイアウトイメージ（ポシヴァ社ウェブサイトより引用）

2.2.3 研究開発プログラムの概要

雇用経済省は 2012 年にフィンランドにおける原子力能力に関する委員会の報告書[1]を公表しているが、報告書において、原子炉の研究開発等以外にフィンランドにおける原子力廃棄物管理に関する研究プログラムについても記述している。フィンランドにおける原子力廃棄物管理に関する研究開発プログラムとしては上記報告書において以下が記述されている。

- 使用済燃料処分の実施主体ポシヴァ社による研究開発プログラム
- 雇用経済省が運営する原子力廃棄物管理に関する研究プログラム（KYT プログラム）
- フォルツム社による原子力廃棄物管理に関する研究プログラム
- テオリスーデン・ヴォイマ社（TVO 社）による原子力廃棄物管理に関する研究プログラム

なお、上記文献[1]において、STUK が実施している研究プログラムについても記載されているが、STUK の研究プログラムの中に原子力廃棄物管理に関する研究プログラムは含まれていない。

本報告書では、使用済燃料処分に関して主体的に研究開発を実施しているポシヴァ社による研究開発プログラムと、雇用経済省が運営する KYT プログラムについて次節以降その研究開発課題について概要を整理する。

2.2.3.1 ポシヴァ社の研究開発課題の概要

フィンランドでは原子力法第 28 条と原子力令第 74 条において、廃棄物管理義務者が 3 年毎に放射性廃棄物管理計画に関する報告書を提出することを規定している。また、原子力令において、報告書に「研究開発及び計画策定活動の実際の状況の評価ならびに翌 3 年間に講じられる措置に関する詳細計画」、及び「翌 6 年間に実施される予定の措置に関する概略計画」を含むことが規定されている。該当法令について以下の囲みに示す。

**原子力法**　第 28 条　管理義務の履行に関する決定

雇用経済省または放射線・原子力安全センター（後者については、原子力廃棄物を発生させる活動に関する許可を発給した場合に限定される）は、必要に応じて環境省の意見を聴取した上で、第 9 条第 3 項に記載された管理義務が履行されるようにするための原則を決定しなければならない。この目的のために、廃棄物管理義務者は、許可を発給した機関に対し、原子力廃棄物管理計画を提示しなければならない。

この原子力廃棄物管理計画は、許可条件に別段の取り決めがない場合には、許可取得義務が設定されている活動が継続される限り、3 年ごとに定期的に提出されなければならない。この計画には、その後の 6 年間にわたる一般計画が含まれていなければならない。また許可条件に別段の取り決めがない限り、その他にも原子力施設廃止計画を、許可取得義務が設定されている活動が継続される限り、6 年ごとに定期的

に提出しなければならない。

この計画に附帯すべき調査報告書及び文書作成に関する具体的な規定は、政令により定める。

**原子力令** 第 74 条

原子力法第 28 条に記載されている目的を達成するために、廃棄物管理義務を有する者は、3 年ごとの 9 月末までに、原子力廃棄物管理に関する報告書を、同条に記載されている機関に提出しなければならない。

(1) 廃棄物管理義務を有する者が、いかにして原子力廃棄物管理に係わる措置を遂行する予定であるか、ならびにそれらの計画策定に関する報告書。この報告書には少なくとも次の事項が含まれなければならない。

(a) 原子力廃棄物管理の履行に関する全体計画、ならびに必要とされる準備及び研究措置を含む適切な日程表及び仕様書、ならびに管理義務を履行する上で必要な管理体制及びその他の情報

(b) 研究開発及び計画策定活動の実際の状況の評価ならびに翌 3 年間に講じられる措置に関する詳細計画

(c) 翌 6 年間に実施される予定の措置に関する概略計画

ポシヴァ社は法令に基づき、2012 年 9 月に「YJH-2012 オルキルオトとロヴィーサ原子力発電所の原子力廃棄物管理：現状の評価と 2013-2015 年の将来計画」[2]を雇用経済省に提出している。なお、これ以前には、2003 年、2006 年、2009 年にそれぞれ TKS-2003、TKS-2006、TKS-2009 という同様の報告書を提出していた。なお、YJH とはフィンランド語で Nuclear Waste Management の略語としている（また、TKS は研究開発と工学設計を示すとしている：Research (tutkimus), Development (kehitys) and Technical Design (suunnittelu)）。

YJH-2012 プログラム報告書で公表される研究開発事業の重点分野は、図 2.2-4 に示されるように、操業許可申請に必要な資料の作成、認可された事業開始の円滑化、そして最終処分で要求される各機能を果たすための能力の構築となるとしている。具体的には、YJH-2012 プログラムに基づいて実施される作業には、オルキルオトの処分サイトの調査の確認、必要な施設の設計、そして採用される処分技術の処分に必要なレベルまでの開発、並びに操業許可申請書に添付する、長期安全性に関するセーフティケースの作成が含まれるとしている。

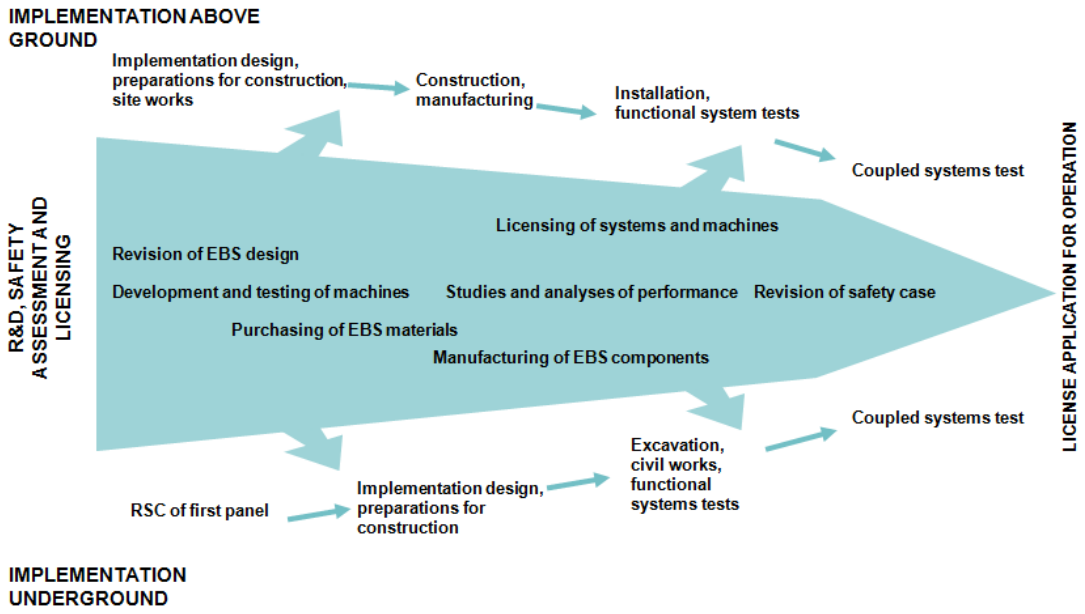



図 2.2-4　研究開発事業、安全評価そして許認可手続きは、操業許認可申請の提出準備を完了するために 2013～2018 年に実施される主要タスクであるとしている

以下において、ポシヴァ社の主要な研究開発課題について整理する。

(1) 処分サイトの特性

処分サイトのキャラクタリゼーションとモデル化

処分サイトのキャラクタリゼーションとモデル化の主目的は、2016 年末までに、最新のサイト記述報告書（オルキルオト・サイト記述報告書 2016）を作成することとしている。同報告書は、処分施設の操業許認可申請に関連する背景資料の一部であり、最終安全解析報告書（FSAR）を作成し、プラント計画を更新するために使用されるとしている。

2013～2015 年の調査では、2011 年のサイト報告書に関連して特定された未解決の課題と、STUK による評価で取り上げられた問題に重点が置かれるとしている。具体的な主な課題は、2011 年のオルキルオトのサイトモデルに関連する以下の不確実性因子であるとしている。

- ✓ 地質及び水理地質学的構造モデルの信頼性向上のため、処分計画地域、特にその東部のキャラクタリゼーション
- ✓ 岩盤の、特に定置深度の条件での応力と強度の状態のより詳細な解明
- ✓ 水文地質学的プロセス（硫化物の形成、メタン及び酸化還元条件の起源など）の説明
- ✓ 処分深度における岩盤のマトリクス特性（間隙率、厚さ、拡散係数）の決定

岩盤適格性分類（RSC)

ポシヴァ社は処分の目的に使用する岩盤の要件の開発と適用に関する岩盤適格性基準（RSC : rock suitability criteria）プログラムの開発を実施している。RSC は、処分場パネルの設置にとって適格な岩体を特定するために、また処分孔を配置する上での処分坑道の適格性を評価するために、さらには処分に使用する処分孔の受け入れの可否の判断を行うために使用される。ここでの目的は、当初の期間または長期間にわたり、安全性にとって有利に働く条件を損なう可能性のある母岩の特徴を回避することとしている。現在は、基準の開発を目指すプログラムが実際の適合性分類プロセスまで進んだことから、RSC 作業の名称は岩盤適格性分類（rock suitability classification）に改められている。

RSC の方法には、処分場の計画立案／設計の一部としての基準に基づく岩盤適格性の評価と、施設の配置に適する岩盤体積の特定を目的とする実施作業が含まれている。適格性分類の 4 段階（処分施設、パネル、処分坑道及び処分孔）は、施設の建設が進み、研究作業で岩盤の特性に関する詳細情報が増えるにつれて、広範囲の一般的スケールからより小さく詳細なスケールへと進んでいくとしている。またこの分類は、処分場の設計及び建設といった様々な段階に（すなわち、まず処分場全体のレイアウト設計から始まり、パネル、坑道、そして最後に処分孔のより詳細な設計及び建設に）適用されるとしている。

様々なスケールにおける分類にかかわる目的は以下としている。

- 処分場スケールでの分類の目的は、処分場配置の計画設定に使用される岩体を定義することにある。「レイアウトを決定づける特性」（LDF ; Layout Determining Features）が特定され、そのそれぞれの容積（すなわち、処分坑道及び処分孔を配置する際に回避すべき容積）が明らかにされる。この LDF としては、大型断層帯（現在または将来の応力場において力学的に不安定となる可能性のあるもの）と主要な流動ルート（将来に溶質の移行及びサイトの化学的安定性にとって重要であるか、重要なものとなる可能性のあるもの）のいずれかが挙げられる。
- パネル・スケールにおける分類の目的は、特定のパネルにおいて坑道建設にとって適格なエリアを定義することに、さらには当該パネルの詳細設計のためにパネル・エリアの「利用率」について評価することにある。パネルは 1 本の中央坑道と一定数の定置坑道によって構成され、これらは一つのブロックとして掘削され、使用に供せられる。分類は、パネルの中心坑道の建設期間中に利用可能となる変形帯及び透水性ゾーンに関するより詳細なデータに基づいて実施される。
- 処分坑道スケール分類の目的は、定置孔にとって適格な坑道区画を定義することにある。これにより、LDF 及びより小型かつ局所的な変形帯やそれらの「尊重容積」、大型の亀裂、そして定置孔への流入量の高い場所が回避される
- 処分孔スケールにおいて、岩盤適格性規準の履行状況が、個別の処分孔が受け入れ可能なものかどうかの判断に使用される手順の一環として点検される。

図 2.2-5 は RSC の方法の適用に関する簡単なフローチャートを示している。

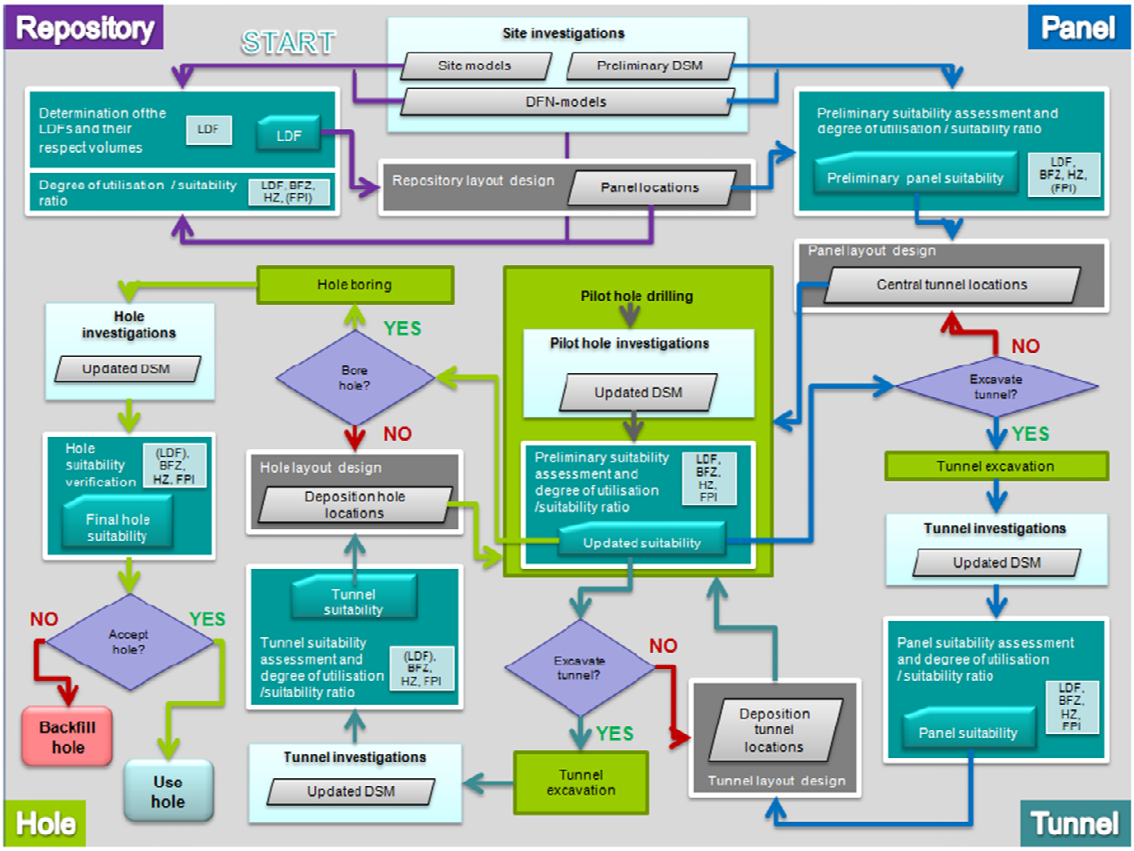



図 2.2-5　KBS-3V 概念の岩盤適格性分類（RSC）に関する一般的流れ図

2013 年以降の岩盤適格性分類（RSC)の実証に関連する作業は、プログラム期間の初期に ONKALO で継続されるとしている。2013 年には、予定されている掘削孔調査の残りが実施され、RSC は完了する予定となっている。過去に作成された小規模モデルは、ONKALO の実証区域、実験室、そして計画されている最初の処分区域全体へと拡張される。作業の進行に伴い、RSC のフィージビリティを評価するとともに、必要に応じて基準を改訂するとしている。また、プログラム期間中に RSC の方法について記載したマニュアルが作成される。地下水系の共同機能についての試験を目的とした RSC は、次のプログラム期間中に開始される予定となっている。最初の処分施設についての作業が始まれば、建設作業の進捗状況にあわせて RSC 手順に従い調査が実施される。RSC の適用から得られた経験や実施された開発作業、RSC 手順の改訂などについて記述した報告書が、操業許認可申請の提出前に発行される予定としている。

オルキルオト・モニタリングプログラム

オルキルオト・モニタリングプログラム（OMO）は、処分サイト及び施設の長期的変化を監視する目的で進められている。このプログラムは 2004 年に始まり、その主な目的は ONKALO の建設作業が岩盤や周辺の地上に与える影響を監視することとしている。それぞれのモニタリング分野（岩盤力学、水文学、水文地球化学、地上の周辺環境、異物）に関して報告書が作成され、その年に実施した調査の説明と前年までの結果との比較が示されている。

・ 岩盤力学

岩盤力学分野のモニタリングでは以下が実施されている。

✓ 岩盤の変化の測定

岩盤の伸縮変化の測定が ONKALO で実施されている。モニタリングは、機器の耐久性と測定結果に応じて 5 年から 10 年間継続される。微小な変化を測定するために機器の変更もなされている。

✓ GPS 測定及び精密水準器

GPS 測定の目的は、オルキルオトの岩盤の大きなブロックの水平及び垂直移動を監視することとしている。精密水準器の測定は、特にオルキルオト島とオルキルオト海峡で測定した最大の移動の変化を監視するために行われている。

✓ 微小地震観測網

地震モニタリングの目的は、オルキルオトとそのニアフィールドの地震事象、さらには大きな岩盤ブロックの移動を観察することである。地震観測所網で毎年 1,000 を超える事象を検知するが、これらの大部分は ONKALO での発破作業に起因するものである。

・ 水文学

水文学分野におけるモニタリングプログラムの対象は以下のとおりである。

✓ 地下水位
✓ 地下水の圧力水頭
✓ 開放孔の流動条件
✓ 横向きの地下水流
✓ 岩盤の透水係数
✓ 地下水の塩分濃度
✓ ONKALO への流入
✓ 地表水の流出

✓ 降雨（降雪を含む）
✓ 浸透
✓ 地表の霜

モニタリングプログラムで行った観察は、地表の水文学的モデルと水文地質構造モデルの背景情報として使用されている。観察結果は、モデル化した構造を裏づけ、それらの特性と連続性に関する追加的情報を提供するとしている。

・ 水文地球化学
地下水モニタリングプログラムは、岩盤の砂質土の最上層の調査と、深部岩盤地下水の調査に分かれる。調査の焦点は、深部岩盤地下水と、特に水文地質構造に関する調査としている。オルキルオト地域では地下水の化学的性質の変化が観察されている。たとえば、岩盤の最上層からの重炭酸塩を含む水は、ONKALO により作り出された動水勾配の結果モニタリング地点まで深く移動していることが観察されていた。ONKALO の建設作業の影響に関する調査は、亀裂と構造の漏洩水から、さらには ONKALO から汲み上げた水の試料で継続されている。

・ 地表の環境
監視している環境の最大の変化は土地利用に関係する。たとえば、廃止されたか、既存の計画では将来の建設作業の範囲外にある区域に対する脅威になるプロットを換える必要があるため新たな試験プロットを確立することによって、土地利用の変更に関する研究活動に規定が設けられる。

・ 異物
掘削後 ONKALO の岩盤表面に残された爆発性残留物を分析するために使用する方法の開発作業は、2 つの方法を用いて 2011 年に始まった。調査の第 1 段階では、ONKALO の岩壁から綿棒標本を採取した。2 番目の方法は、岩石の試料を採取し、破砕した後にそこから水溶性の窒素を含む化合物を抽出し解析した。ONKALO のアクセスルートを舗装するための Densiphalt 外装材の溶解度の調査は、この資材の長期的安全性に影響を及ぼす可能性のある要因に関する情報を得るために 2011 年末に始まっている。

(2) 人工バリアシステムの設計

人工バリアシステムの開発作業は、キャニスタとクレイ（粘土）の開発に分けられる。キャニスタの開発ラインには、キャニスタの設計、製造技術の開発、密封技術の開発、検査技法の開発に関する作業が含まれる。クレイ･ラインとは、緩衝材、処分坑道の埋め戻し材、エンドプラグ、ならびに処分施設の最終密封のための解決策に関連する設計と開発タ

スクの調整である。

・　キャニスタの開発

キャニスタに作用する応力や、キャニスタの強度、最大許容可能欠陥、キャニスタの残留応力について調査するため、また臨界安全性の問題解決のために、キャニスタの設計分析が実施されてきた。キャニスタの設計に関する一部、その機能性の実証、そして製造ラインの仕様については更なる調査が必要で、プログラム期間中も継続して調査が実施される。その中でも最も重要な項目は次のとおりとしている。

✓　リスクレベルと、必要とされる材料の延性及び健全性の基準についてより現実的な理解を得るために、確率論的リスク評価（PRA）としての、キャニスタに関連する岩の定置解析の改訂（これまでの決定論的方法に加えて）
✓　最終処分の安全性にとって重要なキャニスタ構成要素及び密封されたキャニスタの特性に関する合格基準の設定
✓　キャニスタ構成要素の製造ならびにキャニスタの密封及び取り扱いのための品質管理プログラムの策定
✓　キャニスタ内蓋用のガスケットの設計ならびに新しい種類の燃料の長期の臨界安全性の実証における燃焼度クレジットの使用の正当性証明

・キャニスタの密封

電子ビーム溶接（EBW）法を用いたキャニスタの密封プロセスに関する開発作業を継続している。一方、SKB 社が開発した代替方法である摩擦撹拌溶接（FSW）の調査も行われている。

・キャニスタの検査

キャニスタの検査方法に関して、インサートを認定するための超音波及び目視検査の指示書の作成が行われている。また、溶接プロセスと溶接継手の検査の複合的信頼性は、ベイズ法で欠陥の発生と検出の確率を計算することによって調査されている。評価の予備的結果から、たとえば溶接部にいくつかの種類の欠陥が含まれると仮定する場合、最終的に処分場で合計 4,000 本のうち欠陥のあるキャニスタが 4 本発生する確率は約 0.00057 であるという結論が得られたとしている。

➢　緩衝材と関連する生産ライン

・緩衝材の設計

緩衝材の開発作業の焦点は、その設計と、緩衝材の部品の製造及び設置プロセスの開発に置かれている。設計活動の主な作業として、その設計基準で定義づける固有の周囲条件

下で性能要件と基本的技術要件を満たす計画が作成されている。

2011 年には、ONKALO で 1/3 スケールの緩衝材の試験が実施された。試験の目的は、緩衝材の設置、挙動及び耐久性と、モニタリング計器の現実の処分条件の試験に関する情報と経験を蓄積することであったとしている。

・緩衝材の製造

ポシヴァ社は緩衝材ブロックの製造に用いる静水圧圧縮法を開発している。

- 処分坑道の埋戻し材と関係する生産ライン

  ポシヴァ社は処分坑道の埋め戻し材とエンドプラグの長期的安全性に関係する安全機能、性能目標、設計要件及び値（設計仕様）を定義しており、要件は要件管理システム（VAHA）で規定している。処分坑道の埋め戻し材とエンドプラグに関する現在の要件の大部分は 2011 年に VAHA システムで承認され、設計基準報告書、埋め戻しの生産ライン報告書、及び Autio et al. (2012) に記載されている。

・埋め戻し材の設計

2009 年の設計報告書（Hansen et al. 2009）は、トンネルの埋め戻し材の主材料として事前に圧縮したブロックを使用する設計について説明している。さらに、報告書は現場圧縮方法を用いる床のレベル調整（leveling）と吹付によるペレット設置のプロセスを示している。

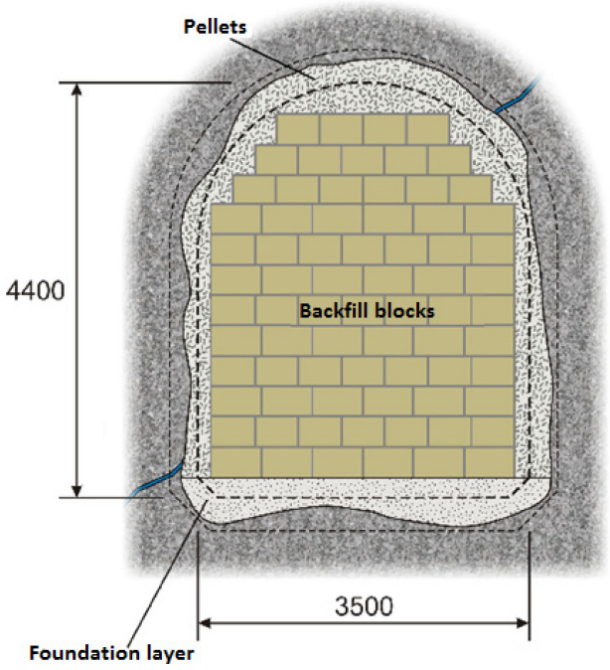



図 2.2-6　処分坑道の埋め戻し材の基本的構成要素は下地層、埋め戻し材ブロック、ペレットで構成される。

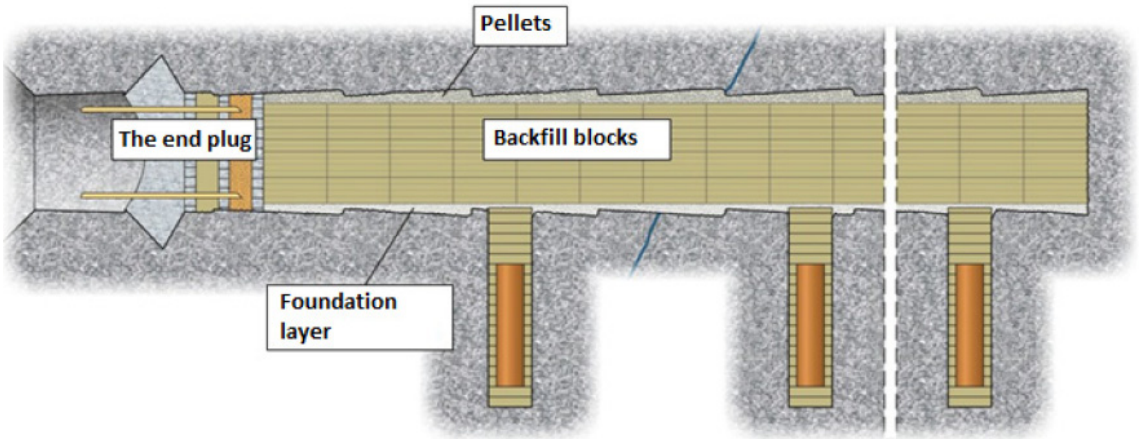



図 2.2-7　処分坑道の埋め戻し材とエンドプラグの基本的構成要素

(3) 長期安全性の立証

ポシヴァ社は、2012 年末にフィンランドの使用済燃料処分に係るセーフティケースとして、TURVA-2012 を公表した（「TURVA」はフィンランド語で安全性という意味である）。TURVA-2012 は、ポシヴァ社が作成したセーフティケースであり、ポシヴァ社が 2012 年末に政府に対して提出した使用済燃料処分場の建設許可申請書、及び同時に提出された予備的安全解析書（PSAR 2012 : Preliminary Safety Assessment Report）を支援するものである。TURVA-2012 は、長期の放射線学的なセーフティケースを示したものであり、使用済燃料定置後の処分システムの変遷、性能、及び安全性に関係している。

TURVA-2012 セーフティケースは、セーフティケース報告書（主要報告書）と関連する一連の技術報告書、及び総括報告書（synthesis）で構成される。（図 2.2-8 参照）

ポシヴァ社によると、2013 年からの 3 年間のセーフティケース関連作業の主目的は、操業許認可申請の必要性についてより多くの情報を得ることであるとしている。セーフティケースに関する主要タスクは以下の通りとしている：

- 次のセーフティケースの計画を立てること
- 初期データの安全評価及び信頼性の検証で用いられる方法を開発すること
- セーフティケースに関する品質管理を開発すること
- KBS-3H 設計に関する安全評価書を 2015 年末までに作成すること

建設許認可申請のセーフティケースにおいて、欠けている箇所（処分場システムのモデル及びデータ）が 2013 年に公表されている。また、全体的なセーフティケース計画書が FSAR に向けて作成され、そこでは各段階の目標が提示され、そのためのスケジュールが定められるとしている。同計画書作成時に考慮すべき事案として、計画立案及び建設に関す

る開発作業、KBS-3 設計に関する実証作業、そして人工バリアシステムの長期挙動に関して得られる新情報並びに岩盤の特性と適合性に関して得られるより詳細な情報などがあるとしている。

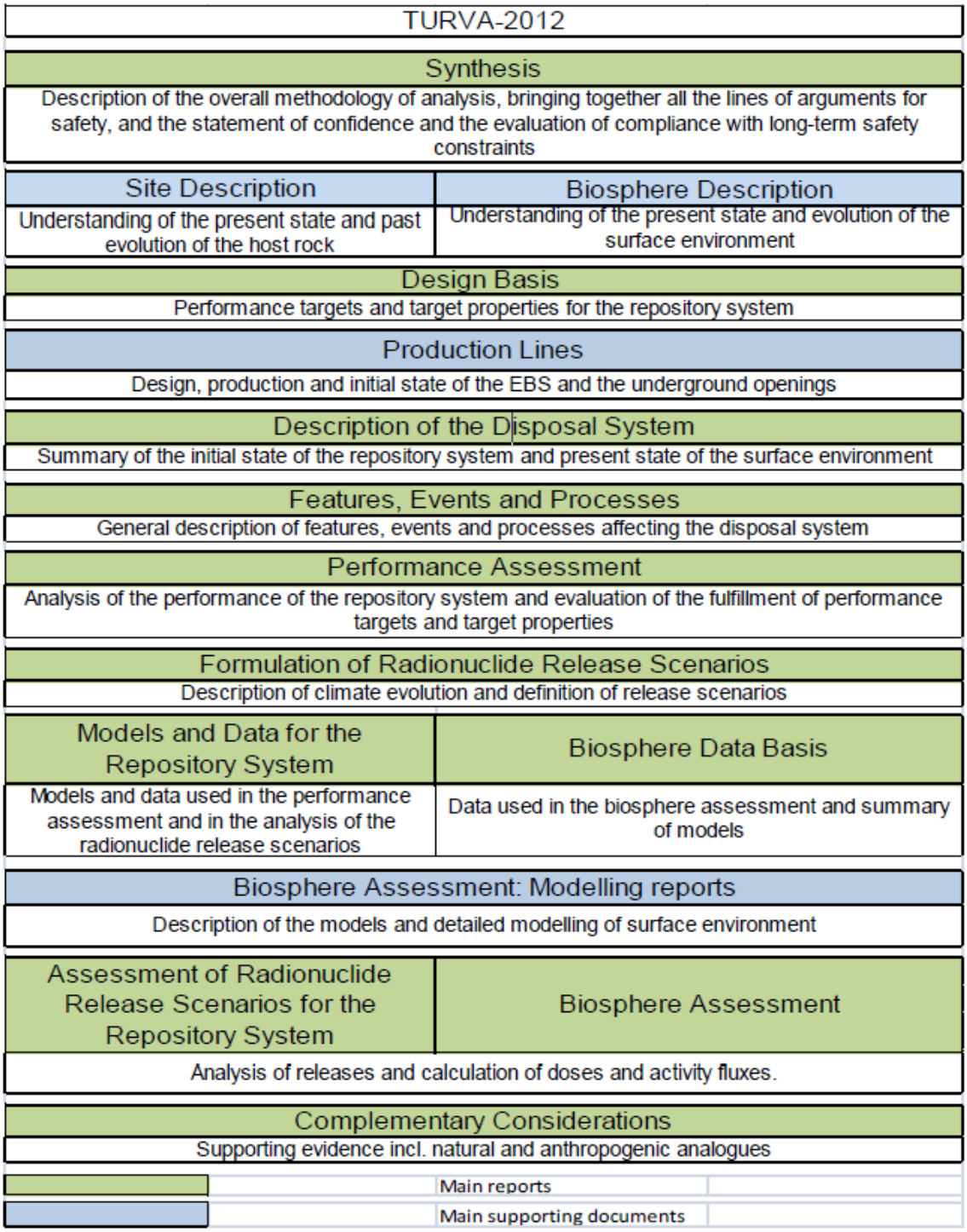



図 2.2-8　セーフティケース TURVA-2012 の報告書ポートフォリオ構造

操業許認可申請を目的に策定されるセーフティケースを支える以下の研究についても、次のプログラム期間も継続されるとしている。

- 燃料の溶解メカニズムに関する実験研究
- 気候シナリオで使用されるモデルの開発
- 氷河期の水理地質学及び地化学的条件に関する研究
- 岩盤の目標特性及び将来的変化に関する調査研究
- 生物圏を評価するための初期データの取得及び部分モデルの開発

また、上述の新しく検証する初期データに加えて、セーフティケースを対象に実施されるモデル化の作業が、特に下記分野に関して、今後数年間に開発されるとしている。

- 処分施設と地表環境との統合促進
- 地下水流モデル化及びプロセスモデル化（緩衝材の侵食／キャニスタの侵食など）と放射性核種モデル化との一層明確な連携
- 氷形成期の地下水流条件のモデル化、及びそれに関連する地下水化学
- 移行計算における確率論的モデル化の拡大使用

また、モデル化の中身とセーフティケースのその他の要素については、2013 年に作成予定のセーフティケース計画書に説明される見通しであるとしている。

さらに、ポシヴァ社によると、建設許認可申請書の提出後において、長期安全性評価の信頼性を大きく損ないかねない欠陥や不確実性を排除することが主要タスクとして設定されたとしている。2013～2015 年の 3 年間のプログラムに対する主要タスクの目標は、不確実性の低減と、リリースバリア（使用済燃料、処分システムの構成要素及びそれらの間のインターフェース）の性能に関連する懸案の課題を解決することであるとし、特に注目すべき課題は次の通りとしている。

- ✓ 高 pH 値の水と緩衝材との相互作用（セメントの影響）
- ✓ モンモリロナイトの変性及びセメント化を含むベントナイト材（モンモリロナイト）の変性プロセス
- ✓ 緩衝材における流路の形成及びエロージョン（力学的、化学的両方）
- ✓ 岩の変位におけるベントナイトの特性
- ✓ 緩衝材ベントナイトにおける微生物活動
- ✓ 材料とそのパフォーマンスを含む閉鎖計画の立案
- ✓ キャニスタ材料のクリープ及びクリープのメカニズム
- ✓ 水中での銅の腐食
- ✓ 電子ビーム溶接後の残留応力
- ✓ 高燃焼度燃料の可溶性

他の重要な解析対象には、以下の項目も含まれるとしている。

- ✓ 地下水の化学組成及び流れ。組成、コロイド、塩分の一般的な変化、硫化物のレベルの確認
- ✓ 岩の応力負荷。特に岩の変位による影響
- ✓ 地下水の流れに対する掘削影響領域（EDZ）の影響

また、現在のプログラム期間中に国際的なグリーンランド・アナログ・プロジェクト（GAP）が完了するとしている。これは、氷床と永久凍土層が使用済燃料の地層処分にどのような影響を及ぼしうるかについて、相互的かつ現実的な見解を得ることとしている。さらにプログラム期間中にはより現実的な気候シナリオも策定される予定としている。

(4) KBS-3H の研究開発

KBS-3H 設計では、キャニスタが長い水平の処分坑道に定置される（図 2.2-9）。KBS-3V 設計（リファレンス設計）とは異なり、KBS-3H は処分前にキャニスタのリロードステーションで工業プロセスにより組み立てたスーパーコンテナと呼ばれるプレハブ設置パッケージを用いる。スーパーコンテナは、チタン製穿孔保護シェルとベントナイト緩衝材及びその中に定置する銅キャニスタで構成される。各処分坑道に数台のスーパーコンテナが定置される。坑道はほぼ水平で、最大長は 300 メートルである。坑道の直径は 1,850 mm で、わずかに上方に傾斜しているため（約 2 度）、定置中水は重力でトンネルから底部に沿って排出される。坑道内のスーパーコンテナとベントナイトブロックは自立し、流入水はその間から坑道外へ流出する。スーパーコンテナと坑道との隙間は 44.5～48 mm である。

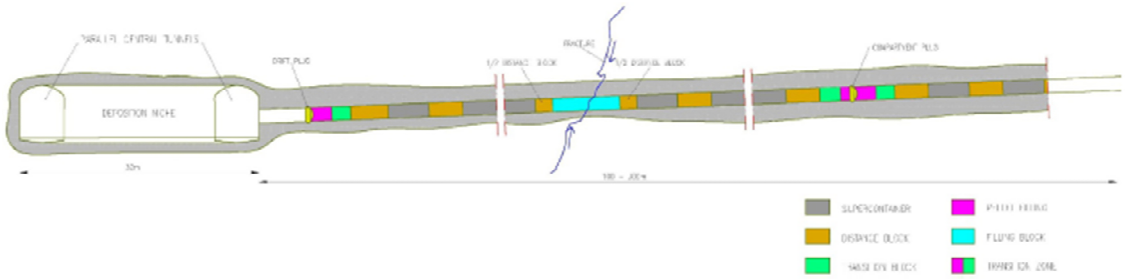



図 2.2-9　KBS-3H の処分坑道と処分ニッチから内部に設置する構成要素

ポシヴァ社によれば、当局から要求されれば 3V と 3H 代替策の比較や PSAR の準備が可能になるよう、2013～2015 年の 3 年間に KBS-3H に関する研究開発が進められる予定であるとしている。設計方法の比較には、環境面、費用、安全上の課題（長期の、運営上の、さらに労働関連の安全性）も含まれる。研究開発は 3H 法の特性に重点を置いて、SKB 社とポシヴァ社の共同プロジェクトとして実施されるとしている。

水平処分策に関して策定された計画に従った操業は、スウェーデン・エスポ岩盤研究所における実規模試験（多目的試験、MPT）において確認、実証される。また、水平処分策の長期安全性に関する調査が、今後数年間かけて実施される。特に 3H の設計に関連する調査上のニーズは、希釈された氷河水によるベントナイトのエロージョンによって引き起こされる複数のキャニスタの損壊やその後の腐食、そして岩石変位によって引き起こされるキャニスタの破損に関連するケースであるとしている。また、KBS-3H に関連した安全性評価のためにより詳細な計画が作成され、KBS-3H に関するオルキルオト固有のセーフティケースが､KBS-3V のセーフティケースと同様の方法で報告書として作成される予定であるとしている。

2.2.3.2 雇用経済省が運営する KYT プログラムの概要

雇用経済省が運営する KYT プログラム（2011 年～2014 年におけるプログラムは「KYT2014」プログラムという）はフィンランドの放射性廃棄物管理に関する研究プログラムであり、その目的は、異なる放射性廃棄物管理の方法や実施方法を比較するときに当局が得られる原子力技術の専門知識や他の能力を十分に広く利用できるようにすることとしている。

フィンランドでは、1970 年代初頭、原子力諮問委員会の主導で、公的資金による放射性廃棄物管理の研究が開始された。1989 年以降、フィンランドの行政機関が放射性廃棄物管理研究プログラムの調整を行っている（表 2.2-1 参照)。

表 2.2-1　行政機関の共同研究プログラム

| 期間 | 研究プログラム |
|---|---|
| 1989-1993 | 公的資金による JYT 放射性廃棄物研究プログラム |
| 1994-1996 | 行政機関の JYT2 放射性廃棄物研究プログラム |
| 1997-2001 | 行政機関の JYT2001 放射性廃棄物研究プログラム |
| 2002-2005 | フィンランドの放射性廃棄物管理に関する研究プログラム KYT |
| 2006-2010 | フィンランドの放射性廃棄物管理に関する研究プログラム KYT2010 |

放射性廃棄物管理を監督する放射線・原子力安全センター（STUK）の技術支援プログラムは、放射性廃棄物の規制管理と直接的な関連がある。当局が使用する専門的技術の構築をめざして、雇用経済省(TEM)は、フィンランドの放射性廃棄物管理に関する研究プログラム(KYT)を担当している。

KYT プログラムの重要な目標はまた、放射性廃棄物管理の分野において、科学的で高レベルの能力を促進し、一般知識を高めながら、重要な国の専門的技術を継続的に利用できるよう援助することとしている。このことは、新しい世代の専門家の訓練を促進すること

などによって達成できるとしている。主たる原則は、現在の重要な研究能力を維持しつつ、重要な分野での能力をさらに高めることであるとしている。

KYT プログラムのために提案されるプロジェクトには、各個の研究プロジェクトや広範囲の共同研究プロジェクトが含まれる場合があるが、実際には、3 種類のプロジェクトが承認されている。

- 1 カ年の研究プロジェクト
- 複数年に及ぶ研究プロジェクト
- 共同プロジェクト

共同プロジェクトについては、いくつかの研究団体が、KYT2014 の研究期間全体に及ぶ一般的な共同プロジェクトに参加している。本質的には、共同プロジェクトは小規模の研究プログラムであり、プロジェクトコーディネータが研究チームの結成とプロジェクト提案のとりまとめに責任を負っている。

KYT2014 に含まれる研究テーマは、(1) 新しい、及び、代替の放射性廃棄物管理技術、(2) 放射性廃棄物管理の安全性に関する研究、(3) 放射性廃棄物管理に関する社会学的研究の 3 つに分類される（図 2.2-10)。研究プログラムの運営グループは、年 1 回、テーマの中から重要視するものを指定できるとしている。

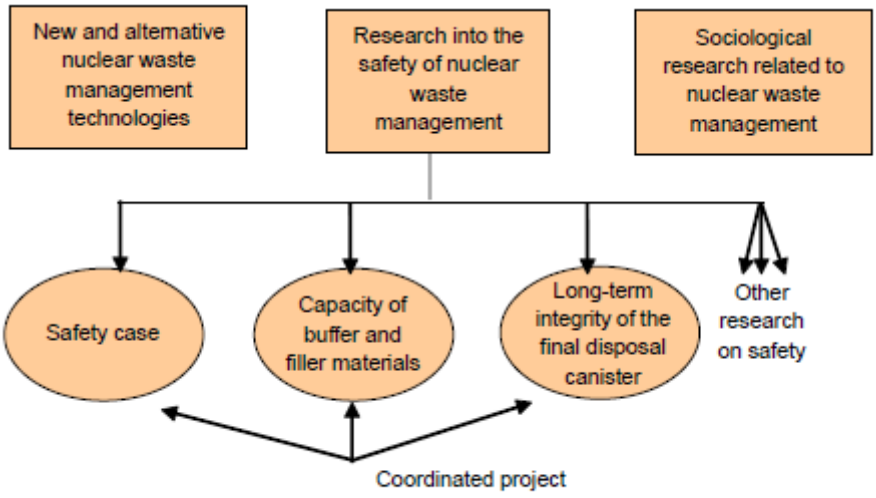



図 2.2-10　KYT2014 研究プログラムの研究分野

「放射性廃棄物管理における新しい技術及び代替技術」についてはフィンランドの代替地層処分技術の研究開発を取り扱う 4.2 節において取り上げる。ここでは KYT2014 プログラムのうち、「放射性廃棄物管理の安全性に関する研究」についての研究開発課題の概要をまとめ、また、「放射性廃棄物管理に関する社会学的研究」についても簡潔に概要を整理

する（5 節）。

KYT2014 プログラムにおける「放射性廃棄物管理の安全性に関する研究」では、主に 3 つの共同プロジェクトがあり、それらは以下としている。
(1)セーフティケース（LS-TUPER）、
(2)緩衝材と埋戻し材（BOA）
(3)最終処分キャニスタの長期健全性（L-TICO）

また、共同プロジェクトとはなっていない以下についても概要を整理する。
(4)その他の安全性に関する研究

(1) セーフティケース（LS-TUPER）

この共同プロジェクトでは、結晶質岩での KBS-3 概念の処分場のためのセーフティケースを統合するための能力を得ることを目的としている。共同プロジェクトでは以下について注意がはらわれているとしている。

- ✓ シナリオの作成
- ✓ 代替の概念モデルと解釈
- ✓ 不確実性解析方法の開発
- ✓ 新しい情報源（放射性廃棄物管理の研究以外で実施される研究や安全解析方法とは接点の少ない研究）、二酸化炭素の地中最終処分など
- ✓ 可能な限り聴衆に広く理解してもらえるようなセーフティケースのプレゼンテーション方法の開発（セーフティケースの原則、方法、制約）

KYT2014 の 2013 年において実施されているセーフティケースに関する具体的研究は以下となっている。

| 研究テーマ | 実施機関 |
|---|---|
| 応力状態の影響が岩盤水理に及ぼす影響：モデルとその場試験 | フィンランド技術研究センター（VTT） |
| コンピュータ解析ツールの開発 | Ludus Mundi、Tmi Pawel Simbierowicz |
| 補足的考察：氷河サイクルと銅キャニスタのナチュラルアナログ研究 | フィンランド地質調査所（GTK）、ヘルシンキ大学放射化学研究室（HYRL） |

(2) 緩衝材と埋戻し材（BOA）

この共同プロジェクトではニアフィールド環境における連成プロセスの解析的及び数値的記述、及びベントナイトの微小構造に関する手法開発を目的としている。プロセスと微小構造の専門技術は、最終処分の安全性に関して重大であるとしており、以下のような課題の定量的研究に対し、科学的に正当化された基盤を示すとしている。

- ✓ 侵食現象（力学的及び化学的）
- ✓ 長期安定性（鉱物学的変化）
- ✓ 高 pH の影響（セメント物質）
- ✓ 鉄との相互作用
- ✓ 高塩分の影響
- ✓ 凍結の影響

KYT2014 の 2013 年における緩衝材と埋戻し材に関する具体的研究は以下となっている。

| 研究テーマ | 実施機関 |
|---|---|
| ベントナイトの特性評価 | VTT、Numerola Oy、ヘルシンキ大学物理学専攻（HYFL） |
| ベントナイトの特性評価：鉱物学的特性評価 | GTK |
| ベントナイトの現象論的連成モデル | ユヴァスキュラ大学物理学専攻（JYFL） |
| 核種移行へのコロイドの影響 | HYFL |
| 剪断応力における緩衝材と埋戻し材ブロック表面の応力挙動 | アールト大学 |

(3) 最終処分キャニスタの長期健全性（L-TICO）

KBS-3 概念のもとでは、最終処分キャニスタが最も重要な個別バリアであると考えられ、キャニスタの長期耐用年数を確保しなければならない。最終処分キャニスタの長期健全性、これに影響を及ぼす重要因子、及び長期耐久性の評価に適用する方法に関与する当局は、十分な量の高レベル専門技術が利用できなければならないとしている。

最終処分条件では、キャニスタの耐用年数は主に以下に依存する。

- ✓ キャニスタの長期耐腐食性
- ✓ キャニスタの長期力学的耐久性

KYT2014 におけるこのキャニスタに関する共同プロジェクトでは、2013 年に以下の研究プログラムが実施されている。

| 研究テーマ | 実施機関 |
|---|---|
| 溶接された銅オーバーパックの完全性 | VTT |

| | |
|---|---|
| 銅キャニスタの力学的特性 | アールト大学 |
| 無酸素銅 CuOFP（oxygen free, phosphorous doped copper）の硫化物誘起脆化 | VTT |
| 銅キャニスタの微生物活動による異なる腐食影響 | VTT |
| 無酸素条件における水による銅腐食 | アールト大学 |

(4) その他の安全性に関する研究

一般的に放射性廃棄物管理の安全性を評価する際には、また、特に地層最終処分の安全性を評価する際には、いくつかの学問分野から、また、前述の共同プロジェクトを超えた情報が必要であるとして、KYT2014 プログラムに含まれる他の安全関連研究のテーマには、以下が含まれている。

- ✓ 最終処分条件におけるコンクリート構造の長期挙動
- ✓ 操業廃棄物の最終処分条件を模擬する試験の結論に関する研究
- ✓ 使用済燃料の特性が最終処分の安全性に及ぼす影響、特に、燃焼度レベルの上昇と MOX などの新型燃料の最終処分が及ぼす影響
- ✓ 最終処分の安全性における C-14 の重要性（使用済燃料、操業廃棄物、廃止措置廃棄物）
- ✓ 最終処分の安全性に関する基礎岩盤の研究
- ✓ 最終処分に関する生物圏の研究
- ✓ 放射性廃棄物管理コストの根拠に関する評価
- ✓ 原子力施設の廃止措置のための技術と方法
- ✓ 最終処分場の操業安全性

KYT2014 の 2013 年におけるその他の安全性に関する研究は以下が実施されている。

| 研究テーマ | 実施機関 |
|---|---|
| グリムゼルにおける長期原位置拡散試験 | HYRL |
| マトリクス拡散モデルと組み合わせたナノトモグラフィを用いた岩盤空隙構造特性 | JYFL |
| 放射性炭素 C-14 の放出 | VTT |
| 地圏における放射性炭素の化学形態と収着 | HYRL |
| 深部地下水における微生物特性（GEOMIKRO） | VTT |
| 結晶質岩盤内での塩水流体、ガス、微生物（SALAMI） | GTK |
| 深部岩盤におけるバイオインフォティクス（GEOBIOINFO） | アールト大学 |
| フィンランドの原子力廃棄物処分場における微生物による腐食影響のリスク | VTT |
| ガス発生試験における微生物群集 | VTT |
| 最終処分環境における工学コンクリートバリアの耐久性 | アールト大学、VTT |

| | |
|---|---|
| 経験的データ使用による放射線学的生態学モデルの改良と放射性廃棄物のリスク評価への応用 | UEF |

GTK：フィンランド地質調査所、HYRL：ヘルシンキ大学放射化学研究所、UEF：東フィンランド大学、JYFL：ユヴァスキュラ（Jyväskylä）大学物理学専攻、VTT：フィンランド技術研究センター

(5) 放射性廃棄物管理に関する社会科学的研究

放射性廃棄物管理に関連する社会科学的研究は、1990 年代以降、多くの研究プログラムに含まれていた。KYT2014 の前身の研究プログラム KYT2010 では、放射性廃棄物管理に関する地元の見解とその変換に対する地元の意見を解析していた。

KYT2014 プログラムのフレームワーク計画書では、KYT プログラムの範囲内で実施される放射性廃棄物管理に関する社会科学的研究の目的は、意思決定及び関連する準備を支援することであるとしている。

放射性廃棄物管理、特に使用済燃料の最終処分に関する様々な関係者やグループの意見も重要な問題であるとし、例えば様々な関係者の独立性や信頼性といった観点から、以下の観点による個別の研究テーマに取りかかることができるとしている。

- 倫理的討論
- 長期間に関わる問題

計画書では、世代間の公平性という問題（放射性廃棄物という形で将来の世代に不当な重荷を課しているのではないか。コストに対する責任を誰が負うのか。）、及び情報の信頼性と長期的な提示方法について提起している。

KYT2014 の 2013 年における社会科学的研究は以下が実施されている。

| 研究テーマ | 実施機関 |
|---|---|
| 使用済燃料の地層処分実施に対する国際的な社会技術と安全性の挑戦：－EU とフィンランド－FInSOTEC-2012-2014 | ユヴァスキュラ大学 |

2.2.4 回収可能性に関する研究開発動向

フィンランドにおいて 2008 年に制定された「原子力廃棄物の処分の安全性に関する政令（736/2008）」では、回収可能性についての規定は含まれていない。同政令は 1999 年の「使用済燃料の最終処分における安全性に関する政府決定(478/1999)（2008 年廃止）」を置き換えたものとなっているが、1999 年の政府決定、及び指針 YVL8.4 では、回収可能性について、放射性物質を完全に閉じ込めることを人工バリアに要求している期間において維持することを求めていた。

一方で、2010 年 12 月にフランス・ランスで開催された OECD/NEA 主催による可逆性と回収可能性に関する国際会議（The REIMS2010 conference）における STUK による発

表資料では、現在の政令では回収可能性についての記述はないが、2000 年にオルキルオトを使用済燃料処分場とすることの原則決定を政府が行った際の原則決定文書中に回収可能性の記述があり、その記述は現在も有効であるとしている。原則決定文書中では、処分の全段階において回収可能性のための技術、安全性、コストの評価を実施することが記述されている。また、原則決定文書中では、回収可能性のオプションのために処分場の安全性がそこなわれることがあってはならないとしている。

ポシヴァ社は 1999 年に、処分プロセスの異なる段階においての、キャニスタの回収可能性について概念的な設計に関する調査を行い、報告書を取りまとめた。

上記報告書では、回収は、技術的に見た場合、処分施設を閉鎖した後でも可能であるとしている。処分場閉鎖後の回収では、処分トンネルを最初に処分場を建設した場合と同様に、掘削する必要があると考えられている。また、キャニスタの周囲にあるベントナイト緩衝材が膨潤し、圧力によりキャニスタが固く固定されている状態は、塩水を用いてベントナイトを分散させることによって、圧力を緩ませていからキャニスタの回収を行うことが考えられている。

1999 年の報告書以降、ポシヴァ社から回収可能性に関する研究開発関連の報告書は公表されていない。なお、ポシヴァ社はスウェーデン SKB 社との共同研究をしていることから、SKB 社が回収の実証試験を行って得られた結果は、フィンランドにおいても使用されうるとしている。

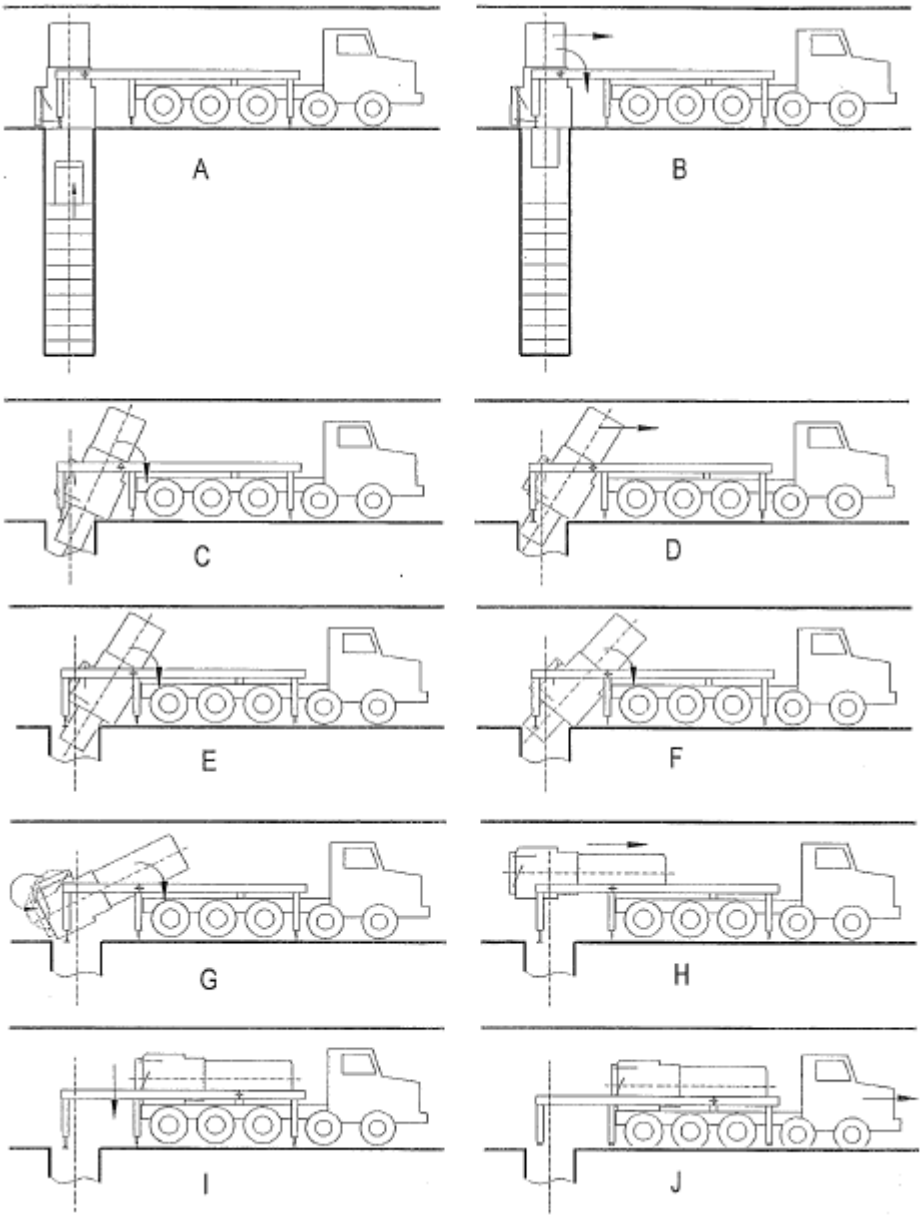



図 2.2-11　キャニスタ回収の机上検討例

2.2.5 研究開発計画に対するレビュー

フィンランドでは、原子力令第 74 条において、廃棄物管理義務を有する者は、3 年ごとの 9 月末までに、研究開発計画を含む原子力廃棄物管理に関する報告書を、当局に提出することが規定されている。以下の囲みに条文を示す。

**原子力令**　第 74 条

原子力法第 28 条に記載されている目的を達成するために、廃棄物管理義務を有する者は、3 年ごとの 9

月末までに、原子力廃棄物管理に関する報告書を、同条に記載されている機関に提出しなければならない。
(1) 廃棄物管理義務を有する者が、いかにして原子力廃棄物管理に係わる措置を遂行する予定であるか、ならびにそれらの計画策定に関する報告書。この報告書には少なくとも次の事項が含まれなければならない。
(a) 原子力廃棄物管理の履行に関する全体計画、ならびに必要とされる準備及び研究措置を含む適切な日程表及び仕様書、ならびに管理義務を履行する上で必要な管理体制及びその他の情報
(b) 研究開発及び計画策定活動の実際の状況の評価ならびに翌 3 年間に講じられる措置に関する詳細計画
(c) 翌 6 年間に実施される予定の措置に関する概略計画

ポシヴァ社は上記文書を 3 年毎に当局に提出している。2003 年には TKS-2003 を、2006 年には TKS-2006 を、2009 年には TKS-2009 を、さらに 2012 年には YJH-2012 を公表している。原子力令第 78 条において、雇用経済省が STUK より上記文書に関する意見書を得ることが規定されている。(なお、TKS-2003 と TKS-2006 は原子力令第 74 条で規定されている文書ではなく、関連する文書としてレビューされてきた。2008 年の原子力令改正により、TKS-2009 がレビューされることが明示的に規定された。)

本節では、STUK が TKS-2009 に対してレビューした内容について概要を以下に示す。STUK は、2010 年 10 月 5 日に TKS-2009 に関する意見書を雇用経済省に提出した。この意見書は、放射性廃棄物の管理義務を負う当事者(TVO 社と FPH 社)と Posiva にも送付された。意見書におけるレビューの概要を以下に示す。

**キャニスタ**

STUK によると、キャニスタの安全機能の実現に関していくつかの未解決の問題がある。建設許認可申請の提出時までにそれらを解決することは、広範囲の研究開発を必要とする難しい作業になると考えられる。STUK は、銅の腐食、溶接部の残留応力と力学的強度に関連する問題など、さまざまな問題を提起している。しかし STUK は声明書の中で、Posiva の TKS-2009 プログラムで示されたキャニスタ関連の研究課題は、未解決の安全問題に関して STUK と Posiva の協議で取り上げられてきたものと大半が同じであると指摘した。

**緩衝材、トンネルの埋戻し及びエンドプラグ**

STUK によると、予備的建設許認可申請には緩衝材とトンネルの埋め戻し材の性能目標や関連する基準及び根拠が示されず、TSK-2009 報告書に上記の根拠をまとめる計画も含まれていない。STUK は、特に緩衝材の侵食、膨張圧、凍結及び安定性の調査を目的とする作業の重要性を強調している。Posiva は代替緩衝材の使用についても調査し、代替材料の研究に関する計画を示す予定である。Posiva が緩衝材を変更することになった場合には、材料の変更とその性能確認の手順を示さなければならない。

**岩盤及び処分サイト**

STUK によると、Posiva の研究プログラムの中で処分サイトの特性調査については主に、処分深度で実施した研究に関連する不備と、もう一方でオルキルオトの東側区域の調査に関する不備があるとする。長期的安全性に関しては、処分施設が地上の環境から十分隔離されていること、岩盤が力学及び化学的に十分安定していること、処分場周辺の地下水流動が十分小規模であると証明できることが最も重要である。

より詳細な岩盤の特性調査のプログラムで重要な問題は、RSC システムの試験・報告や岩盤の全体的緩衝能力の調査のスケジュールが過密であること、岩盤の力学的安定性やその結果として起こる施設のレイアウトに関係する未解決の問題などであり、それらは処分サイトの安定性に大きな影響を及ぼす可能性がある。STUK によると、流動及び閉じ込め特性に関する問題など、岩盤の特性に関して未解決の疑問点がある。さらに、建設作業と空地や有害物質が岩盤の長期的安全性の維持に与える影響を、そこで起こっている変化を監視することより包括的に評価するための明確なプログラムを、Posiva は示していない。

岩盤の適合性の分類は、過去 3 年間焦点が当てられてきた分野の一つである。長期的安全性に対する建設作業の影響は、最終処分のセーフティケースを作成する際に考慮に入れられることになる。

**プラントの設計**

プラントの設計に関して、STUK の評価は、プラントとそのシステムに関する設計作業で過渡変化や事故の防止に集中している。STUK は、Posiva が（予備的建設許認可申請で）深層防護の実施や他の原子力施設の設計基準について十分記述していないと考えている。過渡変化や事故の防止と管理の原則、システムの相互関連性、過渡変化や事故のリスクによる設計要件は、十分詳細なレベルで示されていない。TKS-2009 プログラムは、システム設計の進捗と、Posiva のシステムの記述と主題別報告書の作成スケジュールを詳細に示していない。TKS-2009 には確率論的リスク解析の計画も示されていない。

過渡変化や事故の防止と管理の原則は、STUK に提出する予備的安全解析報告書（PSAR）の第 9 章に述べられる。計画立案段階の PRA は、STUK に提出する文書資料に含められる。プラントの設計作業は進展し、所要の主題別報告書とシステムの記述は STUK に提出される許認可文書に含められる。システムの記述は、申請の提出後にいくつかの点で補足されることになる。

**長期安全性**

STUK が提起している長期的セーフティケースに関連する重大な弱点または開発テーマは以下のとおりである。

- ✓ 実施された安全解析は処分システム全体を網羅せず、主に単一のキャニスタの解析に基づいている。TKS-2009 にはこの問題に対応するための詳細な計画が示されていな

い。

- ✓ 作成したシナリオは、要件に合わせて処分システム全体の解析を取り上げ、必要な場合は安全機能の相互依存性によって起こりうる複合的影響を考慮に入れなければならない。シナリオの作成と解析を行う際に過渡変化の現象を考慮に入れることにも今後の努力が必要になる。
- ✓ 開発作業には確率論的方法の使用を拡大する必要がある。Posiva は、確率論的手法の利用に関する計画や見通しを示さずにこの手法の長所と短所について述べている。Posiva の解析には、可能性の低い事象も含まれていない。
- ✓ 処分すべき廃棄物の全量は、Posiva が前回解析の報告を行ってから増加しており、今後さらに変化する可能性がある。その結果、少なくともキャニスタの製造欠陥の全数に影響が及ぶと考えられる。
- ✓ 特に、緩衝材とトンネルの埋め戻しの性能目標の達成を裏づける根拠が包括的に示されていない。根拠の提示には、気候シナリオと条件モデルの更新も必要になる。
- ✓ 初期データ、専門家の評価、ナチュラルアナログの更新が求められる。オルキルオト固有のデータベースの開発は、特に今後の取組みが必要である。
- ✓ 現在のところ、不確実性について、整理され全面的かつ包括的な様式の解析と報告が行われていない。

Posiva は、TKS-2009 プログラムの発表後、セーフティケースの計画を更新し、更新版で STUK からのフィードバックを考慮に入れている。

**核不拡散管理**

STUK の声明書によると、Posiva は TKS-2009 期間中に、STUK と国際機関（IAEA 及び欧州委員会）による核不拡散管理を促進するための措置を示すことになっていた。STUK が声明書を出した時点では、Posiva の核不拡散マニュアルは正式要件に従うやり方でキャニスタ封入プラントと処分施設全体の核不拡散管理を十分まとめていなかった。

キャニスタ封入プラントと処分施設の建設段階に、STUK が承認した現在の核不拡散マニュアルに基づいて核不拡散管理が実施されることになる。ここから別の予備的核物質マニュアルが抜粋され、建設許認可申請に添付される。それが扱う範囲は、輸送、キャニスタ封入及び処分段階である。操業許認可段階で上記のマニュアルと合わせる計画である。

**その他の放射性廃棄物**

STUK は、TVO とフォルツム社が、TKS-2009 期間に原子力発電所から出る低中レベル放射性廃棄物の管理の十分な計画を示していると考えている。

2.2.6 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向

フィンランドにおける大学・研究機関等による地層処分研究開発動向については、2.2.3.2 節で取りまとめた KYT プログラムによる研究開発と、欧州連合及び原子力工学及び放射線化学に関する博士過程プログラム（Doctoral Programme for Nuclear Engineering and Radiochemistry：YTERA）によって実施されている研究開発がある。KYT プログラムにおける研究開発については 2.2.3.2 節を参照されたい。

YTERA のもとでの研究テーマは以下としている。

| 研究テーマ | 実施機関 |
|---|---|
| 地質サンプルの解析及びその解決策に関する問題 | HYRL |
| 地質サンプルにおけるトレーサの移行－放射性廃棄物貯蔵所の地質バリア中の岩盤への適用 | HYFL |
| 地圏における放射性炭素の分種化と収着 | HYRL |
| 土壌及びピート中での（陰イオン）放射性核種の収着 | HYRL |
| 放射性有機金属錯体の分解及び金属分離への多機能光触媒作用の応用 | HYRL |
| 岩盤品質：結晶質基盤における岩盤品質パラメータの 1-3 次元可視化とモデリング、モデルの信頼性評価 | アールト大学 |
| ベントナイト粘土のミクロ構造 | VTT |
| 西部フィンランド、オルキルオトサイトにおける脆性ミグマタイト質片麻岩及びペグマタイト質花崗岩の力学的挙動 | アールト大学 |
| 土壌中のニオビウム及びセレンの挙動 | HYRL |
| 採鉱残留物に含まれる放射性核種及び重金属の流動化 | HYRL |
| 使用済燃料処分場の硬岩強化を目指したユーロコード基準設計 | アールト大学 |
| 鉱物表面での放射性核種の優位な収着 | HYRL |
| 新核燃料サイクルに対するアクチニド及びランタニドの選択的分離法 | HYRL |
| ギブサイト、γアルミナ、及びカオリナイトへの 3 価アクチニドの収着：鉱物－水の界面における An(III)の相互作用の分光学的調査 | HYRL |

HYRL：ヘルシンキ大学放射化学研究室

2.2.7 参考文献

[1] TEM, Report of the Committee for Nuclear Energy Competence in Finland, Energy and Climate 14/2012

[2] POSIVA, YJH-2012 Nuclear Waste Management at Olkiluoto and Loviisa Power Plants: Review of Current Status and Future Plans for 2013-2015, 2013

[3] Saanio, T. ja Raiko, H., Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituskapseleiden palautettavuus. Working report 99-21. Posiva Oy, 1999.

[4] Autio, et al., Backfill Design 2012. POSIVA 2012-15, 2012.

[5] TEM, Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management KYT2014 -Framework Programme for the Research Programme 2011-2014, Energy and the climate 72/2010, 2010.

## 2.3 フランス

フランスにおける処分事業の現状概要、処分システムの概要、研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、研究開発計画に対するレビュー、費用負担についての動向を調査・整理した。また、フランスにおいて 2006 年に制定された放射性廃棄物管理法に従って、特に放射性廃棄物の管理に関して実施すべき調査・研究について取りまとめ・公表されている「放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画（PNGMDR）」の概要を整理した。以下はフランスの放射性廃棄物管理機関（ANDRA）のからの情報をもとに取りまとめたものである。

### 2.3.1 処分事業の現状概要

フランスにおける放射性廃棄物の処分概念は、極低レベル放射性廃棄物、短寿命低中レベル放射性廃棄物を対象とした浅地中処分、長寿命低レベル放射性廃棄物（黒鉛及びラジウム含有廃棄物）を対象とした中深度処分、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）及び長寿命中レベル放射性廃棄物を対象とした地層処分に分類される。

浅地中処分施設はフランス国内に既に存在しており、2003 年より監視段階にあるラ・マンシュ処分場や、オーブ処分場、モルビリエ処分場が存在している。

中深度処分場に関しては、現在、サイトの選定作業中であり、当初 2013 年操業開始予定であったが、2019 年操業開始と変更された。

地層処分は 2006 年に制定された放射性廃棄物等管理計画法により、処分事業を段階的に実施し、将来世代に選択肢を残すことを目的とした「可逆性のある地層処分」を基本とすることが規定された。また、ANDRA は政府の了承を得て、ムーズ、オート＝マルヌ両県にまたがる放射性廃棄物処分研究を実施しているビュール地下研究所周辺の約 250km$^2$ の区域を対象にサイト選定に向けた調査が進めている。

現在、定められたスケジュールに従い、2015 年までに地層処分場の設置許可が原子力安全機関（ASN）へ申請され、2025 年には操業を開始することが予定されている。

### 2.3.2 処分システムの概要

ビュール地下研究所で調査している粘土層での処分概念では、地下 500ｍの粘土層内に処分坑道を建設し、多重バリアシステムによって放射性廃棄物を隔離する。放射性廃棄物を閉じ込めるために、次の 3 つのバリアからなる多重バリアシステムが検討されている。

- 廃棄物パッケージ（放射性廃棄物自身とそれを収容するキャニスタ等により構成）
- 人工バリア（処分孔及び立坑の密封、横坑の埋戻し等に使用する構成要素）
- 天然バリア（サイトの地質学的環境特性）

処分場の地下施設は、高レベル放射性廃棄物の処分エリア、長寿命中レベル放射性廃棄物の処分エリアに区分されている。さらに各処分エリアは建設作業や廃棄物定置作業の範

囲を分けるために細分化され、処分区域が設けられる予定である。

地層処分場は、規制当局が定めた安全指針に沿う形で、カテゴリーC（高レベル放射性廃棄物）及びカテゴリーB（長寿命中レベル放射性廃棄物）と呼ばれる放射性廃棄物を処分するように設計が進められている。図 2.3-1 にガラス固化体廃棄物パッケージの定置イメージ、図 2.3-2 にフランスにおける処分場の概念図を示す。

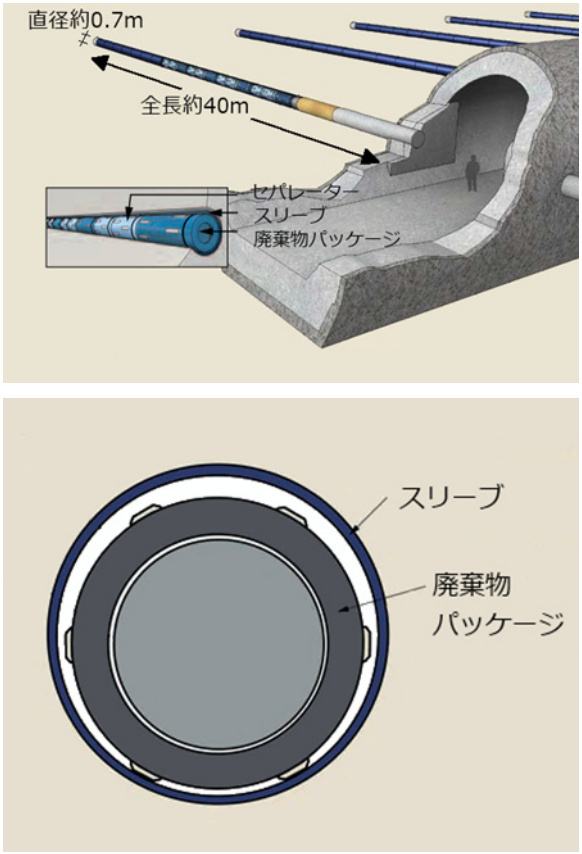



図 2.3-1　ガラス固化体廃棄物パッケージ定置イメージ（ANDRA 説明書より引用）

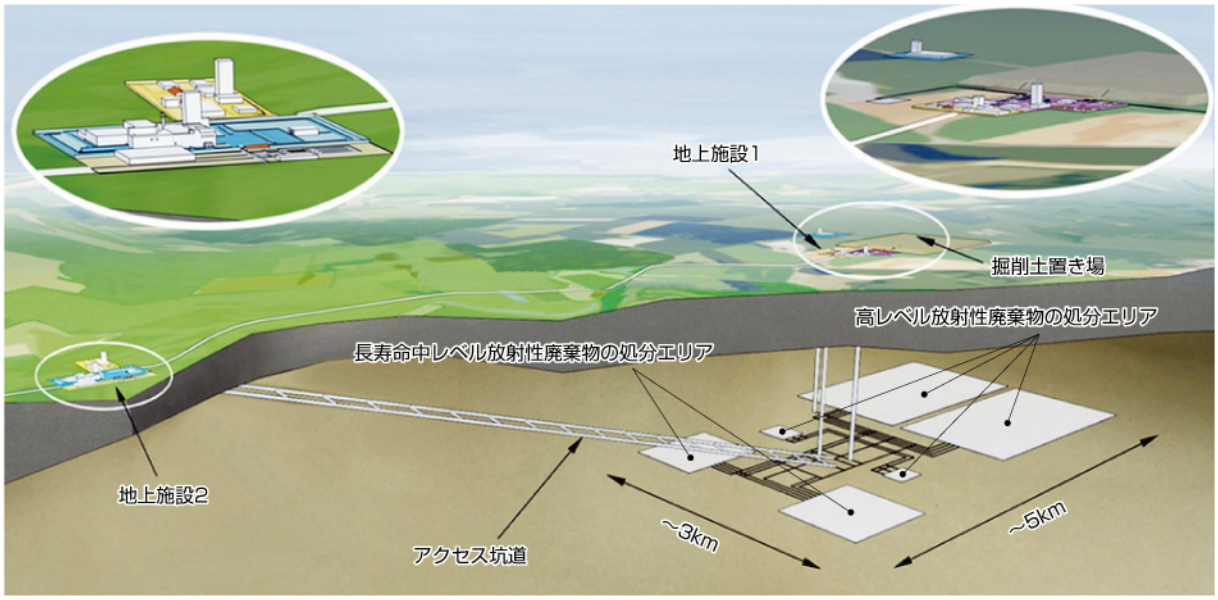



図 2.3-2　フランスにおける処分場の概念図（ANDRA 報告書より引用）

2.3.3 研究開発プログラムの概要

(1) 3 つの補完的研究分野

フランスの地層処分に関する研究開発の国家政策は、2006 年 6 月 28 日の計画法第 2006-739 号に定められている。環境法典の第 L.542-1 条に従って、長寿命高レベル放射性廃棄物（HLW）または中レベル放射性（ILW）廃棄物の健全な管理を確保するために、これらの廃棄物カテゴリーに関するすべての調査・研究は、以下に示す 3 つの補完的分野に従って実施しなければならない。

1. 長寿命放射性元素の群分離・消滅処理
2. 可逆性のある廃棄物の地層処分。適切なサイトを選定し、処分場を設計する目的で、対応する調査・研究を実施しなければならない。これらの調査の結論に基づいて、2015 年にこのような処分場の許可申請を審査し、この許可に従って 2025 年に処分場の操業を開始できるようにする。
3. 中間貯蔵。環境法典の第 L.542-1-2 条に言及される計画が定めているように、とくに容量と時間の点で要件を満たすために、遅くとも 2015 年までに新しい中間貯蔵施設を設置するか、または既存施設を改造することを目指して、対応する調査・研究を実施しなければならない。

放射性廃棄物の地層処分とは、可逆性の原則に従って特別に設計された専用の地下施設においてこれらの物質を処分することである。

(2) 放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画

計画法第 2006-739 号の第 6-I 条（環境法典の第 L.542-1-2 条）は、放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画の策定について定めており、この計画では、放射性物質及び放射性廃棄物の既存の管理方法を評価し、貯蔵施設または処分施設について予見可能な要件を記載し、このような施設の必要容量を対応する貯蔵期間と合わせて詳述し、最終的な管理方法が存在しない放射性廃棄物に関しては、達成すべき目標を決定しなければならない。

放射性物質及び放射性廃棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法第 2006-739 号の第 3 条及び第 4 条に記述されている方針に従って、国家計画では、放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する調査・研究の実施を準備しなければならず、その手段として、上記の第 1 段落に言及される要件と目標を満たすために、新しい管理方法の実施、新しい施設の設置、または既存施設の改造の期限を定める。

国家計画とその要件を定める対応するデクレは、以下に示す指針に準拠しなければならない。

1. 放射性廃棄物の量と毒性の低減は、とくに使用済燃料の処理及び放射性廃棄物の処理とコンディショニングによって目指さなければならない。
2. 処理を待つ放射性物質と処分を待つ最終放射性廃棄物は、特別に設計された専用施設に貯蔵しなければならない。
3. 貯蔵後に、原子力安全に関連する懸念によって地上施設または浅地中施設での処分が不適切である最終放射性廃棄物については、深地層において処分しなければならない。

国家計画は、政府によって策定され、3 年ごとに更新されなければならない。国家計画はまた、議会に提出され、議会は議会科学技術選択評価委員会に評価を求めて付託し、その後に公布される。

(3) 国家評価委員会（CNE）

計画法の第 9-1 条は、国家評価委員会が毎年、第 L.542-1-2 条に言及される国家計画に定める方針に従って、放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する調査・研究の進捗を評価しなければならないと定めている。このような評価は、外国で実施された調査の記述も盛り込んだ報告書の作成につながるものでなければならない。この報告書は議会に提出され、議会は議会科学技術選択評価委員会に提出し、その後に公開される。研究機関は、任務遂行のために要求される文書を国家評価委員会に提供しなければならない。

2013 年の報告書の内容は、セクション 2.3.5(2)に要約されている。

(4) 放射性廃棄物管理機関（ANDRA）の地位と任務

計画法第 2006-739 号の第 14 条（環境法典の第 L.542-12 条）は、放射性廃棄物の長期管理分野での責任について定めている。商工業的な性格を有する公的機関として設立された放射性廃棄物管理機関（ANDRA）は、以下のような放射性廃棄物の長期管理に関するすべての作業の実施について責任を負わなければならない。

1. 第 L.542-2-1 条に言及され、国別に記載されている廃棄物を含めて、フランス国内に存在するすべての放射性物質及び放射性廃棄物のインベントリと場所を証明し、3 年ごとに更新し公開する。
2. 第 L.542-2-1 条に言及される国家計画に従って、貯蔵と地層処分に関する調査・研究を実施し、または実施させるとともに、そのコーディネートを確実に行う。
3. 本条の最後から 2 番目の段落に記述されている条件の範囲内で、関係する放射性廃棄物の性質に応じた高レベル長寿命放射性廃棄物の長期管理の解決策の実施に関連するコストの評価に貢献する。
4. 原子力安全規則に従って放射性廃棄物の処分に関連する仕様書を作成し、所管行政当局に当該廃棄物の処理に関する仕様書について意見を提示する。
5. 当該廃棄物の長期的な発生及び管理の側面を十分に考慮しつつ、放射性廃棄物の貯蔵施設または処分施設を設計し、実施し、実行し、その管理を確保するとともに、これらの目的のために関連する研究を実施する。
6. 放射性廃棄物の回収、輸送及び引き継ぎを確実に行うとともに、要請があり次第、当該廃棄物の責任者の費用負担により、または廃棄物もしくはサイトの責任者が債務不履行の場合は公的請求により、放射能に汚染されたサイトの修復を行う。
7. 放射性廃棄物の管理に関する情報を一般に入手できるようにし、当該分野の科学技術文化の普及に参画する。
8. ノウハウを諸外国に広める。

したがって、ANDRA には、国内レベルでは放射性廃棄物管理分野のあらゆる研究についてコーディネートする責任がある。しかし、規制研究は、原子力安全規制機関である ASN の技術支援機関である放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）によって独立の立場で実施される。IRSN での規制研究の主な目的は、重要な安全問題に関して十分な能力と知識を維持し、実施主体の安全性の実証をレビューできるようにすることである。IRSN が実施する規制研究は自力で資金を調達し、独立の予算となっている。ASN は、IRSN の研究プログラムの方向付けを行う委員会のメンバーとして、IRSN が実施する研究開発プログラムの主な方向付け作業に参加する。

(5) 実施主体（ANDRA）の責任の下での研究開発プログラム

a. 1991～2013 年に実施された研究開発

地質学的環境の好ましい特性（もっと具体的に言えば ILW 及び HLW の処分のための互換区域（ZT）におけるカロボ・オクスフォーディアン層の好ましい特性）は、Dossier 2005 において証明され、今後詳細な地下調査を行う区域（ZIRA）の選択に関する Dossier 2009 において確固たるものとなった。20 年以上にわたる研究開発に基づいた設計作業と安全性評価は、さまざまな科学分野（熱、力学、水力、ガス、化学、放射線、応用数学、数値シミュレーション）と技術のあらゆる処分構成要素（廃棄物、地質環境、材料、放射性核種、及び有害化学物質）に関する重要な知識基盤を構築するのに役立っている。

b. 2015 年の許可申請の準備としての研究開発と許可申請後の研究開発

許可申請ファイル（設置許可申請）（DAC）と、より一般的に言えば Cigéo プロジェクト（1.フランス語の Centre industriel de stockage géologique pour les déchets HA et MA-VL（高レベル及び長寿命中レベル放射性廃棄物の地層処分産業センター）から“Cigéo プロジェクト”と称される。）は、産業レベルの実施に向けた道筋の一部である。2015 年に提出が予定されている DAC ファイルは、産業規模の廃棄物管理プログラム（PIGD）に定められるように Cigéo で処分される廃棄物の全インベントリを取り扱う。DAC には、閉鎖後の処分アーキテクチャと閉鎖後安全性の評価が含まれる。DAC ファイルでは、操業の開始後及び操業の最初の数年間に実施される活動（廃棄物の定置、換気、共活動など）の安全性評価を裏付ける各種要素を提示する。

より遠い将来に計画される作業については（たとえば、2075 年に予定されている AREVA 社のラ・アーグ再処理プラントからの HA1-2 ガラス固化廃棄物の処分）、記述と評価のレベルは必ずしも同じレベルではない。

2013～2016 年の期間に Cigéo を支援する研究開発活動は、以下の事項にバランスの取れた形で対応することを目的としている。

- 2015 年の DAC ファイルには、処分施設全体を対象とする予備設計研究（APS）及び 2025 年の処分場の第 1 区画の操業開始に対応する詳細設計研究（APD）のために、設計、操業及び閉鎖後の安全性評価が不可欠である。現在の設計については図 2.3-3 に示されている。
- 可逆性を含めて、DAC の規制枠組みよりも広い枠組みの中での意思決定者及び利害関係者の予想
- 2030～2100 年の処分場の将来の区画の操業開始について、たとえば技術的・経済的な最適化または能力の継続性という観点から準備する。
- 処分場の閉鎖の準備。たとえば、Cigéo 全体の操業時の挙動を観察するという目的から、処分場の第 1 区画の操業中に実施される坑道シールに関する将来の実証装置を準備す

る。

・　研究の予測的展望

とくに技術的・経済的な最適化という観点から見た産業レベルの実施の道筋は、閉鎖後及び操業中の安全性評価を裏付ける知識強化の要件を超えて、一部の分野よりも詳細な知識を必要とする。

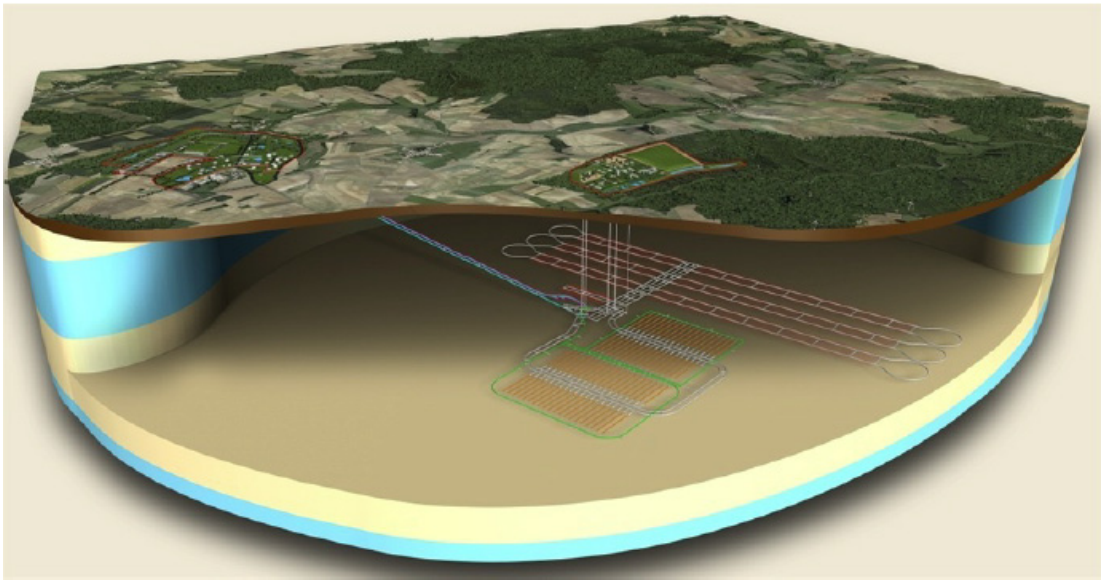


図 2.3-3　Cigéo 施設の概略図（地上及び地下）

科学的視点

2013～2016 年の研究開発プログラムの目的は、研究を運営するための常設構造物を構築することである。したがって、このプログラムは、事業者のためにより明確な視野をもたらし、あらゆるタイプの処分プロジェクトに適応できることを証明し、とくにテーマ間の分離を回避する。しかし、個別プロジェクトの開発段階に応じて、場合によってはそれほどバランスが取れていないように見えることがあるかもしれない。これはとくに、この研究開発プログラムがかかわる 2013～2016 年の期間に当てはまり、活動のかなりの部分は、Cigéo の現在の進捗状況を考慮しながら、「知識の進歩に応じたニーズの明確化の適合（STB)」というテーマに集中している。2016 年以降（おそらくは 2020 年以降）も、その他のテーマに重点を加えながらバランスの再調整を行うべきである。

しかし、採用された計画は、以下に示す 5 つの構造化テーマに関して、堅固な組織的研究方針を述べている。

－　大陸の地表とインターフェース

このラインには、地質環境と環境の問題が含まれる。とくに新規サイト（Cigéo 地上施設を含む）の探査に関連する問題（とくに岩石圏から最初の数十メートルに関する問題)、及び処分によって誘発される潜在的な環境影響の評価が含まれる。

－　測定、データ処理及びデータベース

このラインは、研究開発の完全な連鎖であり、上流の研究（たとえば、革新的センサーと意思決定手法）を統合し、運営目標を表示している。

－　物質及び処分構造物の挙動

このラインでは、処分構成要素の規模決定に関する定式化、知識、特性評価／試験を組み合わせる。基礎研究を通じて、これらの分野を組み合わせるとさまざまな処分構成要素が最適化される。

－　処分セル内の放射性廃棄物

このラインの目的は､放射性廃棄物の特性評価(放射線及び化学の側面)における ANDRA の役割を再確認することと、廃棄物承認手順の上流のモデルとデータベースの堅固なセット及び近接場での放射性核種及び有害化学物質の挙動と移動に関する完全な知識を構築することである。

－　数値モデリング

このラインでは、モデリング・プログラムで事前に記述された数値モデリング活動の統合について取り扱う。これは、それぞれのテーマの範囲内にある科学的プロセス（とくにモデリングと数値シミュレーション）に充当される部分の論理的説明を可能にし、それぞれのテーマに共通のまたは固有の研究開発活動を明らかにする。

－　人文科学と社会科学

人文科学と社会科学は、ANDRA が管理する研究開発の不可欠な部分である。ANDRA は、立証責任、廃棄物処分の長期的な経済性、及び統治という 3 つの問題をめぐる研究開発の 5 つの主要テーマを横断的に開発する。

2013～2016 年の Cigéo に関連する研究開発活動には、DAC ファイルに関連する優先的行動（可逆性に関する議会審議の準備を含む）及び支援行動（準備的または予測的）が含まれる。より具体的に言えば、研究開発の優先的活動は、以下に示す事項に貢献することが望ましい。

・ 一連の運用上の問題（工業生産と技術的・経済的最適化）に対応する。
処分構造物（とくに ILW の坑道及び処分セルのコンクリート製ライニング）の（事前の）サイズ決定
－目標：コンクリートの厚さの最適化
✓ HA-02（HLW）処分ボアホール及び一次廃棄物パッケージ HA0 のオーバーパックの金属ライナーの（事前）設計
－目標：Cigéo の第 1 区画の建設時に HA0 区域を開始する。
✓ 処分セルのシール及びボアホールのプラグの設計
－目標：DAC ファイルにおける産業レベルの建設能力の実証
・ さまざまなタイプの ILW パッケージの同一処分セルにおける共処分の可能性
✓ ILW-LL の管理の合理化という最終目標
・ 最適化、モニタリング、及び Cigéo 管理のための将来の方法を作成する。
✓ いくつかの温度基準（とくに HLW（HA1-2）に関する基準）の緩和
✓ 処分場のモニタリングの技術的手段（センサーなど）
✓ 廃棄物パッケージの第 2 レベル・モニタリングの手段
・ より広範な統治システムによる Cigéo などの「非標準」プロジェクトを支援する。

すべての研究開発活動は、これまでの研究開発プログラムの非常に重要な達成事項に基づいており、これらの研究開発プログラムは、構成要素の特性評価の大まかな特徴、ならびに処分場と操業期間から閉鎖後数百万年までの地質環境に付随する現象学的プロセスの特徴を証明することを可能にした。

(6) 規制当局の技術支援機関（IRSN）の責任の下にある研究開発プログラム

a. 原子力及び放射線のリスクに関する専門知識

原子力安全機関（ASN）を支援するための公的使命を遂行するために、放射線防護・原子力安全研究所（IRSN）は、実施主体から独立した技術的に信頼できる専門的技術に必要な知識と技能を維持し、開発するための研究プログラムを策定、実施する。知識の開発のために多大な努力が必要な分野の 1 つは、深地層処分の安全性分野である。

b. 2015 年の Cigéo の許可申請に関して IRSN が特定した重要な安全問題

2005 年の「可逆性のある粘土層での地層処分のフィージビリティ」についての規制当局の審査から引き出されたフィードバックと主な結論を考慮に入れて、IRSN はいくつかの重要課題を明らかにした。以後はこれらの課題を「主要安全課題」として 1 つにまとめ、2006 年から 2015 年にかけて優先的にこれらの課題に関する研究を実施する必要がある。

・ 堆積母岩の閉じ込め能力と母岩地層及びその周囲の地層で起こり得る破砕の特定

- 掘削またはさまざまな構成要素の相互作用を理由とする擾乱
- 廃棄物の劣化
- とくに過渡的環境条件とその持続時間に関する知識の不足による金属構成要素の腐食速度に関する不確実性
- 合理的に可能な限り有効な封じ込めバリアを構築することを目指して、処分場のさまざまな構成要素のサイズ決定の仮説
- とくに廃棄物セルの放射線分解によって発生する水素に関連する爆発のリスク、パッケージのセルへの落下によって引き起こされる状況を改善する能力、及び廃棄物を回収する可能性に関しての建設面／操業面の安全性（可逆性を説明する）
- 時間の経過に伴う潜在的擾乱の影響または産業規模でシール材を定置することの困難さを考慮して、シールのための工学的構造物の考え得る性能を評価することを目指したシール能力
- 水文地質学モデリング、放射性核種の統合的移動、及び生物圏モデリングに重点を置いた処分場の長期性能。局所的な優先的移動が存在するか否かを判断し、一般的な流量パターンへの影響を評価できるようにすることがとくに重要である。

c. 目標とされる研究プログラム

IRSN の研究開発プログラムを正当化する要素を考慮しながら、4 つのカテゴリーの主要課題（すなわち、実験方法とデータ予測の十分性、複雑な結合現象の知識、構成要素の性能の特定と信頼、及び要求される性能レベルを現場で実際に達成する構成要素の能力）が取り組まれる。これらの課題に取り組むには、以下に示す方針に沿って研究プログラムを策定する必要がある。

- フィードバックが十分でない実験方法の妥当性を調査する。これらの実験方法の有効性を評価することによって、生成されたデータの一貫性と信頼度に対処することができる。
- 処分場の全寿命期間中に生じる複雑な現象と相互作用及びこれらが原子力安全に与える影響をより適切に理解する必要がある分野の基礎科学の知識を開発し、これらの事項に関する独立の評価能力を維持できるようにする。
- 数値モデリング・ツールを開発し、利用して、複雑な現象と相互作用に関する研究を支援し、IRSN が構成要素の性能と物理的・化学的擾乱の大きさを実施主体からの指定と推定ではなく独立の立場で評価できるようにする。
- 処分場のさまざまな構成要素の性能を保証することができる重要パラメータを評価することを目的として、個別の実験試験を実施する。このような実験は、とくに変化した条件での構成要素の挙動をシミュレートするように設計されており、IRSN は、実施主体が提案する建設仕様書について評価を行うことができる。

これらの研究は、IRSN の地上研究所、またはフランス南東部で IRSN が運営するトゥルヌミール実験施設（TES）で行われた実験を用いて実施される。

d. 実験研究

TES は、厚さ 150m の Toarcian 粘土岩地層を交差する旧鉄道トンネルである。TES は、ANDRA がムーズ／オート＝マルヌ県において選定した Cigéo サイトに十分に匹敵する特性を有する地質環境に立地し、いくつかの観測結果をベースに推定を行い、関連する問題を提起することができ、これを IRSN は自らの評価活動のために使用する。TES は、約 20 年にわたり集中的に原位置実験の実施に利用され、以下に示す事項の理解を深めることに専念してきた。

- 硬質粘土の拡張メカニズム（過剰圧力の発生源、及び細孔径が水・岩石の相互作用に及ぼす影響など)。多くの特性評価手法（天然トレーサの動きを特徴付ける作業に専念するもの）が試験された。
- 断層／節理の水理学的役割：粘土の割れ目及びこれら割れ目の水の経路としての可能性を明らかにするために使用される調査方法（地震調査解析を他の手法と併用する）が試験された。
- 粘土の差動的破砕現象とその高いダンピング（制動）の可能性
- EDZ の開発：特性評価手法及びモデリングは、一方ではトンネル建設から 100 年が経過したこと、他方では最近掘削した新しい坑道の観察結果を活用しながら使用され、開発されている。
- 10 年に及ぶ原位置実験の特性評価とモデリングによるセメントー粘土／鉄ー粘土の相互作用による粘土質材料の進展（パリ鉱山学校が開発した複合輸送／化学コード「Hytec」を利用する）
- 過渡的プロセスの過程での化学的条件及び微生物の存在または酸化還元条件（トゥルヌミール・データに基づくプロセスの特性評価）が、廃棄物または工学的構成要素の時間の経過に伴う劣化に及ぼす具体的な影響
- シール材とコンクリート製ライナーの性能を保証するために、原位置で指定し、制御する必要があるパラメータ。専用の原位置モックアップ（実物大模型）が現在開発されているところであり、TES で実施され、シール材の変質進展（altered evolution）について研究する。

2012 年に SEALEX プロジェクトのために 2 つの新しい試験装置が TES に設置された。これらの新しい試験は、劣化した状況における処分場のシール性能を評価するためのデータを IRSN に提供する。このような状況の 1 つは、粘土質シール材のコアが静止するコンクリート支持材が損傷した場合に生じると考えられる。2 つの新しい実験も実施された。最

初の OXITRAN は、処分場の閉鎖後の酸素消費動力学についての定量的研究である。2 番目の CEMTEX の目的は、廃棄物処分セルで予想される代表的な温度（70℃）で粘土岩と接触した場合のセメントの漸進的変化のモデリングを改善することである。最後に、IFSTTAR に付随して実施された地震手法試験プログラムは、新たな地震データ取得活動で継続され、新たな地震発生源とさまざまなセンサーを利用して、軽度の垂直変移断層を検出しようとした。

図 2.3-4　トゥルヌミール実験施設

IRSN はまた、フォントネー＝オー＝ローズ（92）のサイトで、実験・解析専用のプラットフォーム（Lame－研究所の解析・実験施設）を設置した。このプラットフォームは、放射性廃棄物の深地層処分及び放射性核種の及び土壌と下層土中での移動に関する研究を取り扱うことができる。

e. さまざまな規模でのモデリング

トゥルヌミール実験施設または地上研究所での活動に加えて、IRSN は、処分施設で生じる主な現象の数値モデリングも実施する。これらのモデリング活動の目的は、実施主体から独立して、主な物理化学的擾乱の強度と拡張を評価することと、実施主体がセーフティケースの中で提示した結果を批判的にレビューできるようにすることである。

2.3.4 研究開発課題とその概要

(1) 実施主体が作成したそれぞれの研究テーマの要約

それぞれの研究分野について、2015 年に提出される許可申請（DAC）への貢献のために、ANDRA によって 2013～2016 年の重要課題が明らかにされた。

a. 廃棄物の体積を減容し、処分施設の最適密集性を確保するために必要な研究の実施

2013～2015 年の放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画に従って、放射性廃棄物のための処分場の処分能力は、維持しなければならない稀少資源である。したがって、経済性、占有体積及び／または占有面積という恒久的な懸念を抱えながら、放射性廃棄物の適切な

統治と技術的・経済的最適化という双方の論理で、処分施設を管理することが必要である。処分能力という稀少資源の管理は、以下に示す 2 つのレベルで行われる。

- 上流。処分施設のタイプにかかわらず、放射線インベントリ、一次廃棄物形態の体積、及び処理済み廃棄物の体積が、利用可能な処分能力の消費を最小限に抑えるに当たっての重要要素となる。したがって、研究開発の目標は、(i) 潜在的処理と管理経路の適切な選択に関する入力データとしての放射線インベントリの特性評価を改善し、及び（ii）処分施設の減容につながる処理プロセス、パッケージ・プロセス、及び／またはリサイクルの機会を目指す――ことである。
- 下流。処分セルの密集性も、稀少資源の維持に寄与することができる。そこで、研究開発では 2 つのテーマを取り扱う。最初のテーマは、廃棄物タイプの相互の適合性及び／または周囲環境との互換性を評価して、廃棄物の共処分を可能にすることによって ILW のセル間の空間距離またはセルの個数を低減することを目標とするものである。2 番目のテーマは、ガラス固化体にとくに関連するものであり、50℃を超える温度でのガラス基質及び放射性核種の挙動に集中した基礎作業で構成され、この段階で特定の熱基準を修正し、最終的には処分施設の専有面積を低減することを目指すものである。

b. 2013～2016 年の期間の研究開発テーマ

さまざまなタイプの放射性廃棄物の管理に関するスケジュールと上述の分野の研究開発の策定の特性時間について、処分施設の稀少資源の維持というテーマに関連する研究開発活動は、2016 年以降の期間に関係する。

2013～2016 年の期間については、研究開発は主に、フィージビリティの最初の要素と補完的知識を証明することに関係しており、完全性と操作性を目指すものではない。Cigéo の場合、これらの要素によって将来の最適化に寄与し、研究開発の策定を変更することなく運用上の対応を準備することができる。

以下に示す項目に重点が置かれる。

- 廃棄物の処理と廃棄物の処理に関する新しい方法を設定する。
- 処分場の密集性を高めるための知識を向上させる。
- 統治と社会的・経済的側面を評価する。

c. HLW と使用済燃料に関する研究開発の個別テーマ

HLW と使用済燃料（再処理を行わない管理シナリオ）の長期的な放射線学的影響の面での支配的な放射性核種は、主にヨウ素 129 と塩素 36 である。性能指標は、これらの放射性核種のインベントリに大きく左右される。これらのインベントリはこれまでのところ、（HLW の場合の）検知限界から、または（使用済燃料の場合の）境界インベントリの不安

定部分を取り込むことによって、悲観的仮定を利用してきた。これらのインベントリの不確実性の低減は、将来の研究開発に欠かせないステップとして最近の研究の主題となっている。ヨウ素 129 の場合、この物質で処理されたガラスの実現可能性は、測定方法の有効性を確認するための 1 つのステップであり、この実現可能性が確認された。塩素 36 の場合、PRECCI プロジェクトでは、現在利用されている含有量は実際の含有量の約 5 倍の大きさになると推定された。

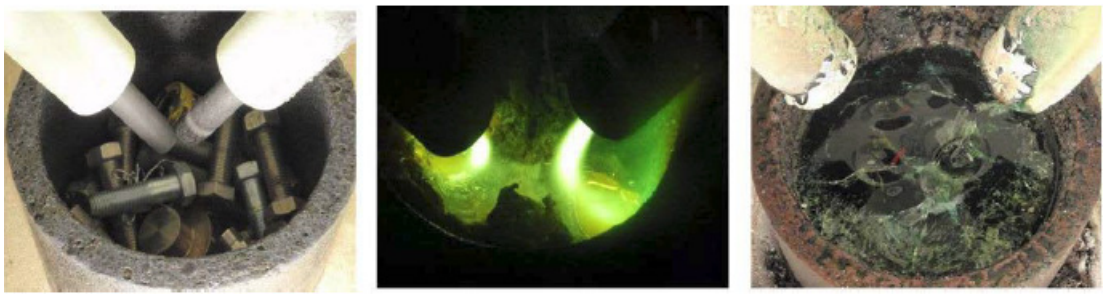


図 2.3-5　プラズマトーチを用いた融合／ガラス固化試験の例

d. 知識の進歩に合わせて適合する必要性に関する要件と技術仕様の定義

過去 20 年間に ANDRA によって実施された科学プログラムの過程において、研究開発に関するかなりの取り組みは、(i) 広義での処分構成要素（廃棄物材料、自然環境）の物理化学的性質、及び (ii) 処分状況でとくに長期間にわたって小規模に、かつ処分構成要素（廃棄物オーバーパック、処分セルのシール材）の規模で作用し始める現象学的プロセス（熱、水－ガス、力学、化学（THMC）、及び放射性核種と有害化学物質の挙動）の特性評価という観点から行われている。Cigéo の場合、この取り組みは、ムーズ／オート＝マルヌ県の地下研究所を大いに活用しており、ここ数年間の進展は、処分施設を代表する規模での統合的実験の件数が増えていることに表れている。同様の取り組みは、処分施設の閉鎖までの操業期間中の現象学的進展の数値シミュレーションに対して行われた。

残存する不確実性の完全な低減を要求することなく、取得された多くの知識は、HLW/ILW の段階的管理（2005 年、2009 年、2012 年）で計画されたさまざまなファイルに貢献し、その結果として Cigéo プロジェクトにつながった。

2013～2016 年の期間には、産業規模の実施に向けた Cigéo プロジェクトの拡大ならびに概念設計と安全性評価からのフィードバックの検討が、安全と設計に関するより具体的な問題もしくは新しい問題の提起につながった。

- 処分構造物の設計の管理及び／または技術的・経済的最適化
- 閉鎖時の特定及び／または安全裕度の拡大
- 短期的・中期的に地表環境に及ぼす処分施設の影響の管理改善

これらの問題に関する研究開発の対応は、3 つのラインを中心に体系化される。

- 知識の拡大、または構成要素とプロセスの知識に関して残存する不確実性の低減
- プロセス（結合）の表現、及びこれらプロセスの挙動の表現（時間、空間）における処分の構成要素の全部または一部の統合に関する能力改善
- モニタリング／監視の条件と技術的手段（センサーなど）の定義のために、10 年以上をかけて開発された地質環境及び他の構成要素の特性評価方法論の実施

2013～2016 年の期間には、これらのラインから廃棄物タイプ、自然環境、材料、プロセス、及びモデリングに応じて、一連の共通のまたは個別の研究開発テーマが生まれることになるだろう。

- 放射線及び非放射線廃棄物インベントリの知識の向上と処分環境の劣化プロセスの特性評価
- 以下のもので構成される材料及び自然環境に固有のデータの取得
  - ✓ 材料の物理的・化学的性質
  - ✓ 地質環境の特性評価
  - ✓ 流体及び固体の熱動力学・動力学モデル
  - ✓ 放射性核種（及びその他の溶質）の化学的挙動と移動

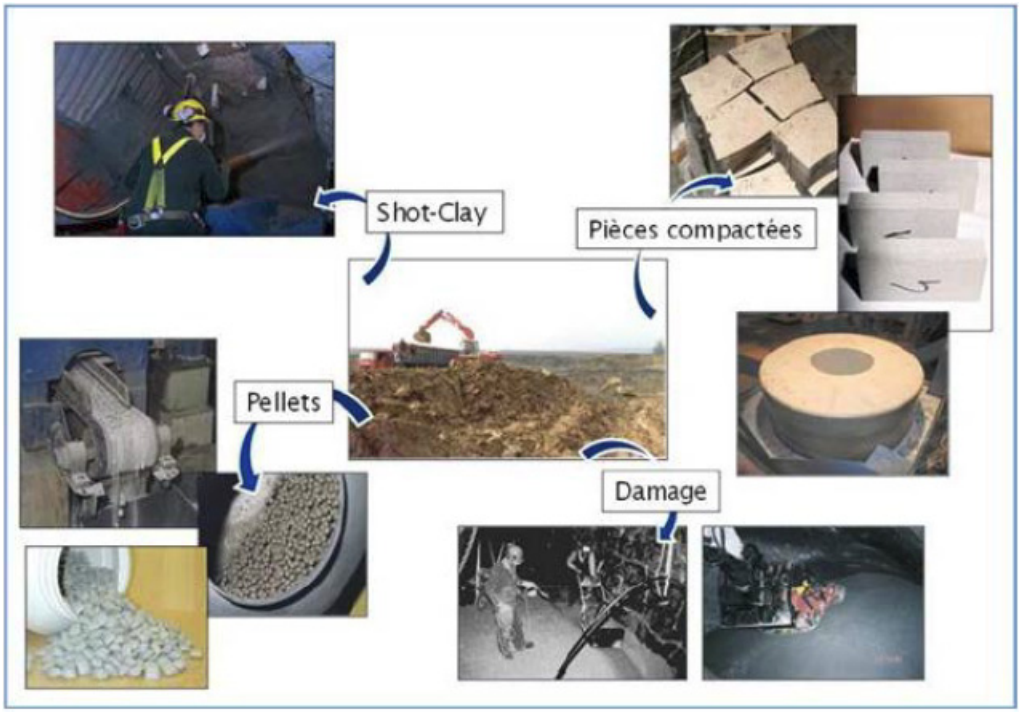



図 2.3-6　処分セルでの膨張粘土材料のさまざまな成形・設置方法についての写真

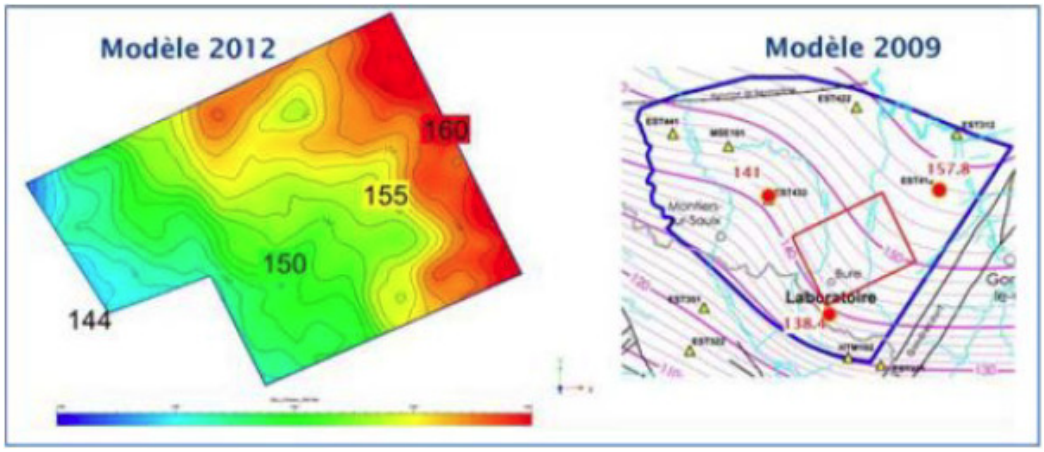



図 2.3-7　カロボーオクスフォーディアン層の深度のモデリングの例（特定領域（Zira）の規模に応じた 2010 年からの三次元地震測定値による 2012 年のモデリング（左側）及び移行帯（ZT）の規模に応じた 2009 年のモデリング（右側））

・　現象学的不確実性を低減するために、以下のもので構成される適正規模での相互作用メカニズムの特性評価とモデリング

✓　小規模なガスーTHMC メカニズムと規模の変化を理解するための手段

✓　処分施設の構成要素とその自然環境の化学的相互作用

✓　処分施設の構成要素／構造物とその自然環境の力学的相互作用

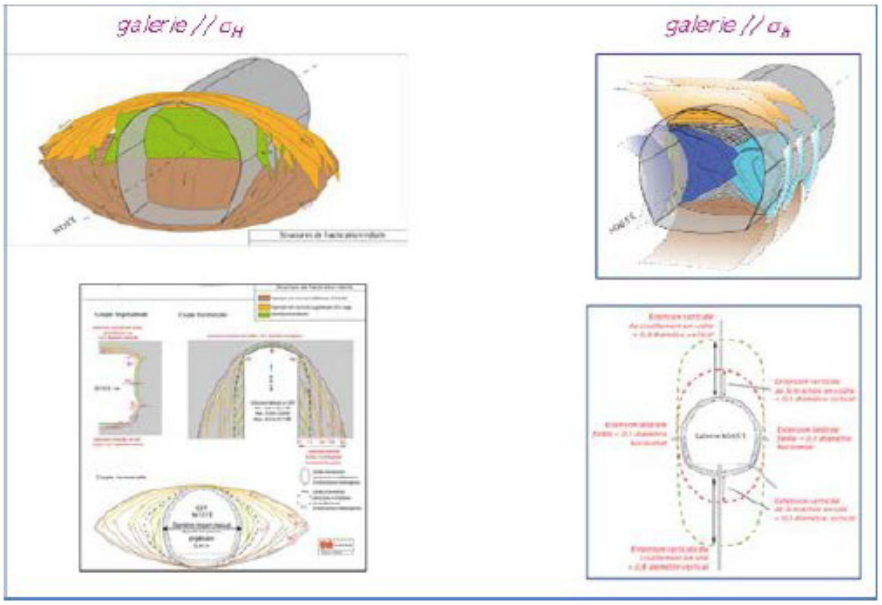



図 2.3-8　大規模な主応力（左側）及び水平応力（右側）に沿って方向付けられるムーズーオートマルヌ地下研究所の 2 つの坑道のための初期環境分布帯（EDZ）の概略レイアウト

✓ マルチプロセスの結合（T）HMC－ガス
✓ 放射性核種及び有害化学物質の構成要素間インターフェースでの挙動
✓ 放射性核種及び有害化学物質の浅地中環境での挙動（生物圏モデル）

・ 処分及びその自然環境の長期的な現象学的操業の概念化とシミュレーションを改善し、数値モデリングのツール開発と現象学的状況の解析及び処分施設の閉鎖後の性能評価／安全性評価を行う。
・ 補完的手法（人文科学と社会科学、数学）を通じて長い時間尺度の問題に対処する。

e. 建設・操業転活動の支援

処分施設の建設と操業は、これまでの研究からのフィードバック、実証試験の結果、及び科学の進歩の統合などから自然に恩恵を受けるはずである。ANDRA は、データの統合を効率的に確保して、最適化する余地のある分野を検出し、可能な安全性向上を提案することによって操業段階を容易にするよう準備しなければならない。

一方で、ANDRA は、処分場の産業活動の全期間にわたり環境保全を保証しなければならない。これは、必要な警告を明確にし、伝達する能力と操業方法の改善余地を特定する能力がベースとなる。

最後に、より広い放射性廃棄物管理という観点から、ANDRA は、フランスのエネルギー政策が変更される可能性、政策変更が廃棄物インベントリに与える潜在的影響、及び処分施設と ANDRA の統治において考慮すべき設計概念への付随的影響（すなわち、再処理を行わない場合、既存の原子力発電所から生じる使用済燃料が直接処分される可能性）を予想し、それに対応しなければならない。

2013～2016 年の期間には、一方では 2015 年の許可申請ファイル（DAC）において（処分施設の第 1 区画の設計、環境モニタリング計画の策定)、他方では可逆性に関する議論において、上記の 3 つの要件を考慮しなければならない。

これらの目標は、以下に示す 4 つの主な軸をめぐる Cigéo の研究開発の必要性に反映された。

・ (i)現象学的プロセスとの関連性の評価、及び（ii）処分施設の実施及び操業中のモニタリングのフォローアップを通じて、ムーズ／オート＝マルヌ県の地下研究所及び別の地上研究所で実施される処分セルのさまざまな実証試験からのフィードバック
・ 処分事業者のための適切な時間枠でのプロセスの予測可能性を改善し、地質学と水文地質学のモデルを含めて、概念モデルの操作性を拡大して、改良モデルと数値シミュレーションを通じて処分施設の建設を支援する。
・ 通常操業からの逸脱の警告として、及び処分施設からの潜在的影響を統合するための手段としての環境モニタリングプログラムの作成

・ 2 つの側面を考慮した上での（すなわち、一方では処分施設の統治の社会・経済的側面の評価（社会科学と人文科学)、他方では予想専用設計概念の研究（科学的・技術的手法）に関連して処分状況における使用済燃料の特性評価と挙動を考慮した上での)、将来のエネルギー政策変更についての評価と予想

より具体的には、研究開発では以下に示すテーマに取り組む。

・ 知識を改善するために処分事業からの継続的フィードバック（REX）を統合しながら（挙動モデリング、すなわち構成要素の地質工学的サイズ決定、現地の三次元地質学モデリング)、処分構造物の設計と建設を最適化する。
・ さまざまな処分構成要素の実規模実証試験を地下研究所で準備し、処分施設で実施する。
・ 数値シミュレーションを通じて、処分施設の短・中期的な挙動とその自然環境の挙動の精度と予測可能性を高める。
・ 処分施設の環境モニタリング計画を作成及び支援し、さまざまなリスクに対する関連マーカーを定義する。
・ 社会経済的評価プロセスと環境評価プロセスを評価し、実施する。
・ 処分施設の適合性と柔軟性を確保する。

構造物の経年劣化と Cigéo の可逆性と閉鎖の条件の管理

処分構造物の確立とその後の廃棄物パッケージのセルへの定置によって THMCR プロセスを開始し、このプロセスは、結合的または独立的に同時もしくは順次進展させ、特性時間と大きさはこの段階で事前選択された設計オプションに左右されることも、されないこともある。

通常は、回収可能性の条件に関して現象学的プロセスが果たす重要性に関しては、2 つのレベルを区別することができる。

・ 一方では、処分パッケージの化学力学的状態（HLW オーバーパック／インサートの腐食、ILW オーバーパックのフレームの腐食とコンクリートの経年劣化）を直接的にまたは間接的に判定するプロセス
・ 他方では、廃棄物パッケージの回収可能性についての環境的制約とみることができるセル内の処分パッケージ周囲のクリアランスを含む処分セルの力学的状態

研究開発についてのこうした 2 つのラインについて、以下に詳述する。

－ 可逆性がある場合の構成要素（廃棄物パッケージ、ライニング）の物理化学的状

態を予測する。

処分ライニング、処分セル、及び ILW 廃棄物パッケージは、鉄筋コンクリートまたはその他の材料に組み込まれる。可逆性のある処分の操業段階では、これらの構造物は、二酸化炭素を含有する雰囲気にさらされ、相対湿度が変化するが一般的には低い。このような構造物の閉鎖と可逆性については、坑道における輸送の維持とともに、操業段階の終了時の可逆性のある操業の制約を考慮しながら、すべてのコンクリート構成要素の物理的状態の評価を必要とする。

鉄筋コンクリートの物理的状態に影響を及ぼし得る主なプロセスは、鋼材腐食の物理条件を変える可能性のある要素の存在に関係する。セメント質環境の鋼材腐食は、コンクリートの飽和状態と廃棄物の存在によって生じる可能性がある変化を合わせて考慮して評価しなければならない。とくに、これらの研究では、腐食速度とこれらを変化させることがあるさまざまなプロセスの進展の結合について取り扱う。これらの研究は、安全性評価の基礎となる概念モデルの正当性を、とくに操業期間中に処分パッケージに影響を及ぼす化学的擾乱の範囲の時空的進展の定義によって証明する。

腐食の動力学に与える放射線の影響に関しては、セメント質材料の放射線分解についてすでに証明されていることに加えて、鉄筋コンクリートの放射線分解による腐食で誘発される変化の定量化を行うことが重要である。この目的は、可逆性のある操業期間中の廃棄物パッケージ（とくに ILW）の物理的状態のモデリングを詳述することである。

－　廃棄物パッケージの回収可能性の条件の特定に寄与する。

廃棄体に残存する隙間（residual play）の進展の評価は、可逆性の期間中の破壊パッケージの回収可能性条件を定める上で重要な要素である。初期の数値モデリングを通じて、残留ボイド（とくに廃棄物取り扱いのための隙間とその進展）が、2009 年の設計概念に記述されるとおりに分析された。IL-LLW セルの場合、これらの隙間の、材料による充填が提案され、許可申請（DAC）に対する最初の回答を得ることを目指して、2013 年の数値モデリング研究の対象となる。

f. センサーによる検査及び情報ネットワークの識別・運用方法

放射性廃棄物の取り扱いと安全性評価という観点から、ANDRA は、処分施設で受け取った廃棄物パッケージの品質を管理し、処分セルでのこれら廃棄物の現象学的挙動を監視（モニタリング）しなければならない。

・　処分施設の操業に関して、廃棄物パッケージについて予想される現象学的挙動をチェックするだけでなく、操業前に取得した知識を統合することも必要である。Cigéo プロ

ジェクトが特異であるために、広義の厳しい物理化学（放射線を含む）環境での将来の利用に適したセンサー技術の開発が必要である。

- 処分サイトでの廃棄物パッケージの受入れに関して、ANDRA は、廃棄物パッケージを受け取る際に事前に定められた要件を利用して品質管理を行う（地上処分施設ですでに実施されているいわゆる第 2 レベルの管理）。ANDRA は、製造された廃棄物パッケージの品質管理と製造後に中間貯蔵施設で廃棄物発生者が実装する、廃棄物の特性に関してすでに入手できる制御装置について早計に判断しない。処分セルでの廃棄物パッケージの挙動については、HLW/ILW パッケージが特異であるために、適切な管理手段が必要になる。

中間貯蔵に関する研究に付随する耐久性向上という目標も、観察及びモニタリングの手段の研究に含まれる。

さらに、管理とモニタリングで集めたデータが大量の知識をもたらし、これは一方では管理と記録のために、他方では長期的な記録保存と情報伝達のために重要である。

最後に、放射性廃棄物の管理に関連する時間規模は、その他の産業活動に比べて不釣り合いである。この独自性は、検討された技術的・政策的・社会的システムの長期的な事象を予測し、世代間の伝達を確実にする能力という点で科学的な問題を提起する。

これらのニーズを予測するために、2008 年にレビュー及び研究作業が開始された。2013～2016 年の期間の目標は、次のような第 1 レベルのフィージビリティを達成することである。すなわち（i）これらの分野で DAC ファイルならびに Cigéo の可逆性のある管理に関する議論を裏付ける、及び（ii）2025 年から始まる Cigéo の建設・操業期間中のモニタリング・システム、センサーによる検査、及び情報処理の運用的実施を予測する――である。

これにより、研究開発活動は以下のような 4 つの主要分野に分けられる。

- 廃棄物パッケージの革新的なモニタリング方法の開発。2008 年以降に明らかにされた最も有望な技術に焦点を置き、これらの技術の科学的・技術的なフィージビリティについて研究し、これにより Cigéo プロジェクトの予備設計段階（APS）と並行して、産業レベルの実施の前に早期試験によって技術の認定を達成する。
- とくに秘密厳守、自治、及び耐久性の分野での堅固で革新的なセンサーの開発。技術、方法及び技術の実施手法の開発と認定、及び 2008 年以降に選定した信号の処理と解釈に焦点を置く。
- データベースと既存知識の拡大と併合ならびに意思決定を容易にするための視覚化ツールの改良
- 技術的観点及び処分施設の統治に関連する社会学的観点からの知識の蓄積と伝達

g. 処分施設での材料の最適化

処分施設での材料の最適化に当たっては、研究開発のさまざまなラインが明らかにされている。

- 材料の組成を最適化するなどして（新しい添加剤、保護層など)、材料の性能と耐久性を高める（コンクリートの力学的性質、耐食性)。
- 材料の劣化が母岩に与える影響（鋼の腐食、水素の発生）を抑制する。または、たとえば、不活性材料の利用（水素の発生またはコンクリートの「低 pH」対ガラス固化廃棄物の化学的劣化に関してセラミック、カーバイド、炭素など）によって、処分施設のその他の材料及び関連する廃棄物との適合性を高める。

最後に、安全機能の遂行と関連情報の伝達という 2 つの能力を有する先進的材料の分野に関連する技術的応用が、材料に関する研究開発の別のテーマとなる。

新しい材料の分野では、ANDRA の研究は、これまでのところ HLW 用のセラミックに限定されており、また、これよりはるかに程度は下がるが高性能コンクリートに限定されている。セラミックについては、鋼オーバーパックでの HLW の基準ソリューションに関する研究と並行して、無機材料の利用に基づいた革新的ソリューションの実現可能性が 2007 年から研究されている。

高性能コンクリートについては、これらの材料はその化学的不活性により、鋼オーバーパックの無酸素腐食による水素の発生を抑制するための解決策となり得る。原子力施設の操業と廃止措置は毎年、金属アルミニウムを含有する廃棄物を発生させる。処分セル内では、アルミニウム金属は水と接触すると腐食し、安定領域が pH3～pH9 である保護層を形成する。しかし、現在のところ、この廃棄物アルミニウムは規則どおりにパックされたマトリックス・セメントである。つまり、保護層を不安定にする高アルカリ環境（pH > 13）にあり、そのために腐食による水素の発生を促進する。ANDRA は、リン酸マグネシウムセメントの開発プロジェクトを支援している。これらのセメントについては、すでに英国と米国で研究されているが、在来型のシリカカルシウム・セメント（通常は pH6～pH8）よりも低い pH の間隙水を形成する。

一方では処分の操業スケジュールに関して、他方では中期及び長期（10 年以上）にわたる材料の開発と産業レベルの認定の期間に関して、将来の材料に関する研究開発は 2016 年以降の動的先行プロセスの一部となる。2013～2016 年の期間には、この研究開発は、ANDRA のこの分野への投資の意思と、将来の機会を維持するための研究開発の原動力に ANDRA が従う必要性を明らかにする。

2.3.5 研究開発計画に対するレビュー（枠組み、結果の利用など）

(1) ASN の見解（2013 年 12 月 6 日）

ASN は、ANDRA から提出されたファイルの審査を公開した。このファイルには、Cigéo プロジェクトの全体的なアーキテクチャ、2009 年以降のプロジェクトの設計変更、及びこれらの変更が安全性評価に及ぼす影響などが記載されていた。ASN は、自らがこれまでの見解で提示してきた意見と勧告を ANDRA がどのように考慮したかについてより具体的に審査した。

ASN は助言の中で、「ANDRA は、操業中のリスクに関して 2011 年に ASN が行った主な勧告を考慮しており、一部の新しい設計要素は施設の操業安全性を高めることができると考えている」と述べた。

この審査は、地層処分プロジェクトをめぐって設定される段階式評価プロセスの一部を構成するものである。1991 年 12 月 31 日の法律によって開始された早期研究以降、ANDRA によって実施されたすべての研究は、科学評価者と原子力安全規制当局の定期審査を受けてきた。これらの意見は、2006 年 6 月 28 日の法律に従って 2015 年に地層処分施設の設置許可申請書を提出する目的で、Cigéo プロジェクトに関して ANDRA が実施した研究を正しい方向に導いた。

公開討論のフォローアップを考慮した後、国が発行するガイドラインに従って、Cigéo に関する設計研究が継続され、許可申請の審査を裏付けるファイルを作成する目的で、前プロジェクト段階が実施される。設置許可の要請書の中で、「ANDRA が選択した一部のオプションに関しては、詳しく正当性を証明する必要があり、これらのオプションが安全性に与える影響を説明する必要がある」と ASN は審査で述べた。

Cigéo の設置許可に関する ASN の最終決定は、ANDRA が提出した設置許可申請書を審査した後に下される予定である。ANDRA はその後、すべての勧告が考慮され、すべての ASN の要件が満たされたことを証明しなければならない。

(2) CNE の意見（2013 年報告書第 7 号）

2006 年法に基づき、長寿命高レベル放射性廃棄物（HLW）の長期管理には 2 つの構成要素がある。すなわち、現在の原子炉施設の高レベル及び長寿命中レベル放射性廃棄物の地層処分と、将来の原子炉施設から生じる使用済燃料中に存在するアクチニドの核種分離・変換である。

a. 群分離・消滅処理

計画法の当事者の科学技術戦略は、高速中性子炉（RNR）の潜在性ならびに加速器駆動未臨界炉の潜在性を検討するための将来への取り組みに適している。

超革新的技術の実証炉プロジェクトである ASTRID を完成させて、ナトリウム RNR の能力をその安全性を含めて完全に評価できるようにしなければならない。ガス冷却高速炉

とトリウム溶融塩を使用する原子炉については、これらの原子炉は興味深い展望を開いたものの、これは遠い将来に限られている。欧州の共同研究機関とともに開始した予備的研究を多くの科学技術的な障害を取り除くことを目標にして継続することが望ましい。

加速器駆動システムの研究は、ベルギーの SCK-CEN の MYRRH プロジェクトと関連付けて、CNRS によって支援される。その後の産業化前のシステムの実現を達成できるように、これらの研究を継続しなければならない。

過去数年間に核種分離の分野で大きな進歩が遂げられている。これらの研究は、リサイクル用の使用済燃料からのウランとプルトニウムの抽出の開発、ならびに将来の最終的な核種変換のためのマイナーアクチニドの選択的分離に焦点を置いている。最適な安全条件で将来の施設を操業する能力のある高いレベルの人員を訓練するためには、エンジニアリング及び分離プロセスの調査・研究を優れたレベルに維持することが不可欠である。

とくにコスト削減のために、アメリシウムの核変換の考え得る進路について検討することを、今後の広範な科学研究の主題にしなければならない。

別の経済的状況では、委員会は、ASTRID 産業実証炉の実現とその燃料製造工場の実証モデルを最優先しなければならないと考えている。第 2 ステップでは、ASTRID で照射された MOX 燃料の再処理に関するワークショップを開催して、使用済燃料からのプルトニウムを使用し、劣化ウランを添加するだけで原子炉を操業する能力を実証しなければならない。これは、少なくとも EPR によって達成されるのと同等の安全レベルで等増殖モードでの操業を立証するものである。その後に不均質モードでアメリシウムの産業レベルの核変換を試験する。プルトニウムの最終在庫量を削減できるようにするために、同等の安全レベルで低増殖モードでの ASTRID の操業も実証することが望ましい。

b. 地層処分 Cigéo

15 年以上にわたるムーズ／オート＝マルヌ県の地質調査から、厚さ 130m の優れた閉じ込め品質の粘土岩層（COx）が深度 500m のところに位置し、PIGD に記載される廃棄物インベントリを有する処分施設を整備するだけの十分な拡がりがあることが実証された。ANDRA この地域の特性について、Cigéo の第 1 段階を達成するために立坑と坑道を掘削して粘土岩に直接アクセスしない限り、より重要な知識を得ることができない。したがって ANDRA は、この段階を実施している時点の科学技術支援プログラムを策定しなければならない。

国際的な研究の枠組みを拡大しながら、ANDRA は、膨潤粘土のコアを岩盤の中に閉じ込めるコンクリートの研究を含めて、シール材の研究のための意欲的なプログラムを開始した。実規模試験の持続期間が長くなることを考えると処分自体でのみ実行可能であるためモデリングが不可欠である。

ANDRA は、流体力学分野よりも物理化学分野でより大きな進歩を遂げた。放射能の冗長閉じ込めを確保するためのシール材の問題は、2014 年の Cigéo の許可申請の範囲内では

包括的に対処することができないだろう。これは、ANDRA が諸外国からのフィードバックを取り込むことによって積極的に研究プログラムを継続すれば、この段階での重大な欠点とはならない。

ガスが存在する場合と存在しない場合の水力及び溶質移動のモデリング・プロセスについて飛躍的な進歩が見られた。ANDRA は現在、COx 内の流体移動によって生じる現象の理解と予測のための強力な手段を得ている。これらのモデルは、処分の性能を評価し、許可申請を裏付ける安全性評価を改善することになる。

Cigéo の概要についてのプロジェクト・レビューが、廃棄物発生者の参加を得て、2013 年初頭に実施された。このレビューでは、とくに火災の点からの安全要件を考慮しながら、ANDRA の選択肢を確認した。また、コスト削減のために、ILLW のボールトの長さを 400m から 500m に延長することが提案された。

ANDRA は今後、Cigéo プロジェクトに関する最適化の道筋を明確にし、掘削中と掘削後の段階で対処する必要がある科学的・技術的問題を指定しなければならない。このプログラムにはスケジュールを添付し、プログラムは許可申請の前に入手可能にならなければならない。Cigéo には、広範な ILW-LL を支援するために、また、エネルギー政策の変更が生じた場合に適応できるように、十分な柔軟性がなければならない。自然発火性金属または有機生成物を含有する廃棄物のパッケージ化と処分を行うために、広範な研究が依然として必要である。ビチューメン（アスファルト）については、ANDRA と廃棄物発生者は、この廃棄物に関して知識の完全な記録を作成し、通常状態及び事故状態での廃棄物の挙動の研究を明確にしなければならない。

委員会は、ANDRA の特権を尊重しながら、プロジェクトが実施の全期間にわたって廃棄物発生者の経験から恩恵を受けるようにすることを繰り返し勧告した。委員会は、プロジェクトのレビューが 2013 年初頭の公開討論開始の数日前に完了したことに不満を述べた。このような状況は満足できるものではない。

委員会は将来、許可申請の提出を含めて何らかの書類を提出する前に、利害関係者の間で望ましい合意が成立すると考えたい。

Cigéo は、受入れ地域に大きな社会経済的影響を与える。Cigéo の建設と操業によって誘発される影響を肯定的なものか否定的なものかを問わず明らかにし、分析し、住民との協議において考慮しなければならない。

Cigéo の推定コストは、DGEC が議長を務め、ANDRA とともに廃棄物発生者が参加する作業グループの調査結果に基づいて、大臣が 2013 年末に提示しなければならない。このコストは、2005 年予測値との比較で上方修正される。ANDRA がプロジェクトの第 1 段階のコストの詳細評価を迅速に提示することが重要である。ベルギー、フィンランド及びスウェーデンを含めて、処分プロジェクトを抱えている国が採用した方法論、コスト、及び資金調達取り決めと比較することが望ましいと考えられる。

(3) AERES の意見

AERES（研究・高等教育評価機構）は、2012 年末に ANDRA とその組織の科学戦略に関して以下のような評価報告書を発表した。

この報告書には、ANDRA の任務における ANDRA の役割を強化する評価と ANDRA が実施するよう努力することになる関連勧告が記載されている。この報告書は、科学分野における ANDRA の科学的リーダーシップを強調し、また、国内外での ANDRA の作業についてより多くの記述と広報を推進する。

ANDRA が 2013～2016 年の 4 年契約に関して国との交渉をまとめ、プロジェクトの展開にとって特別に重要な段階に入ったときに、AERES は、「ANDRA は国内研究の領域における重要な当事者であるという理由で、ANDRA への支援が行き詰まってはならない」と考えている。

a. 認められた科学的手法

AERES によれば、ANDRA は「粘土媒体での地下処分に関しては国際的に認められたリーダー」であり、ANDRA が開発した個別の研究手段（地下研究所、常設環境観測所、及び数値シミュレーションの手段）のおかげで、「特別な科学技術の専門知識」を活用することができるとしている。

評価者はまた、強力なパートナーシップに基づいた研究戦略と研究所グループの設置は、ANDRA の目玉の 1 つであることを認識した。報告書はこの点について、「ANDRA はいわゆる科学及び社会科学における公共、半官、及び民間の構造体のパートナーシップを確立するためのまたとない機会を捉えている」と述べている。したがって、ANDRA は「これらのテーマに関する質の高い科学ネットワークをどうにか創生し、機関同士の協力という独自の形態を全国規模で実施した」としている。

b. 当事者の複雑な体系における適切な統治

最高レベルの研究活動を任されると同時に、地層処分場（Cigéo）の設計を担当する産業事業者でもある ANDRA が進展する状況は複雑であり、とくに社会的要素に関して大きな課題をもたらす。

これらの課題に直面して、報告書は、「ANDRA の統治は研究次元、産業次元、及び社会的受容性という 3 つの重要な次元を統合しているため、適切である。この統合は絶妙かつバランスの取れた手法を必要とする」と述べている。

評価者は ANDRA について、「とくに Cigéo に関する将来の公開討論で浮上する問題をより正確に予測するために、国内レベルで利害関係者との対話を強化する」よう勧告している。

c. 産業的枠組みの中での科学的専門知識のより適切な利用

報告書の主な勧告は、この科学的専門知識の価値を高めることに集中しており、AERES は、ANDRA が国内外の研究パートナーとの間ですでに開始されている連携関係を強化することと科学のリーダーの誕生を育成することを含めて、「フランスの基準専門分野における科学研究の主役」としての立場をより明確にするよう勧告している。

Cigéo プロジェクトの産業レベルでの展開を支援するために、AERES は、「基礎研究活動を維持し、測定手段と数値モデリングに関する科学的・技術的専門知識を確保する」よう勧告した。

2.3.6 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向（枠組み、テーマ、国内の実施主体・規制当局との関係、研究開発プログラム）

ANDRA の科学者は、地層処分の研究開発に関して以下のことを行っている。

- 学術研究所及び産業研究所のグループを通じたものなど最高レベルの専門知識を備え、高等教育機関に所属するパートナーを探しながら、研究のニーズを評価する。
- パートナーの活動をコーディネートする。
- 一部の活動に関して、研究に参加する。

これはすべて、国内研究機関（国立科学研究センター（CNRS）、地質・鉱山研究所（BRGM）、産業環境・リスク国立研究所（INERIS）、原子力・代替エネルギー庁（CEA）など）と歩調を合わせて行われる。

ANDRA は、熱化学、セメント質構造物の進化、地質力学、気体溶質の移動、放射性核種の移動、ガラスー鉄ー粘土、方法と診断方策、人文科学と社会科学という 8 つのグループの研究所（GL）を整備し、コーディネートしている。

これらの組織は、国内研究グループと比較することができ、5～15 年にわたり複数のパートナーと提携する。このシステムを通じて、ANDRA は自らの組織の枠を超え、研究分野の他のメンバーと提携する。

とくに科学問題の独自性について研究機関の間で関心が寄せられているため、ANDRA は、発展させたい科学的主題に関してフランスの最良の研究所と提携している。これまでのところ、ANDRA は、科学パートナーと適切なバランスを見出すよう努力しており、長期的連携を確保するとともに最良の技能を取得すべく開かれている。

GL を通じたこの統合的研究戦略は成功している。研究パートナーシップと内部研究の関連性をより適切に説明するために、この研究戦略において努力を払わなければならない。補完性と相乗効果は、GL の詳細プログラムに記述されているが、ANDRA から十分に重視されているわけではない。

ANDRA は、これらの GL の内部の評価の諸要素を結合して新しい研究チームを結成した。ANDRA は、手段（センサー）と複数の情報源のデータの取得・処理の双方で専門知識を獲得した地下環境の観測など、個別の主題に関する研究のリーダーとして自らを位置付けなければならない。この政策の変化は、GL の概念を駆動チームの概念に変えることになり、ANDRA 内部での強力な科学者の出現を必要とする。

最後に、ANDRA は GL の管理に関して尽力しなければならない。GL の存在、運営方法及び結果が ANDRA の研究の強みの 1 つであるとすると、これらの構造から発生する内部投資と国際投資の連結（予算／スタッフ）は存在しない。

2.3.7 費用負担の仕組み

実施主体（ANDRA）の責任の下での研究開発予算

a. 資金源

実施主体の責任の下での研究開発の予算については、2006 年 6 月 28 日の計画法が以下のような規定を設けている。

計画法第 2006-739 号の第 14 条

ANDRA は、当該廃棄物の責任者から公的徴用によって引き継いだ放射性廃棄物の管理によって発生する費用について、責任者の身元が判明した場合または責任者の財務状況が将来改善された場合は弁済を受けることができる。

ANDRA はエネルギー大臣に対して、当該廃棄物の性質に従って長寿命高レベル放射性廃棄物の長期管理ソリューションの実施に関連する費用の評価を提案しなければならない。1999 年 12 月 30 日の 2000 年財政法第 99-1172 号の第 43 条第 V 節及び原子力安全機関の通告に言及されている付加税が課税される当事者からの所見を集めた後に、エネルギー大臣は最終費用の金額を設定し、これを公表しなければならない。

ANDRA は、関係当事者と連携して、情報公開及び科学技術文化の普及に関連する共同活動を実施することができる。

計画法第 2006-739 号の第 16 条（環境法典の第 L.542-12-2 条）

放射性廃棄物管理機関（ANDRA）の内部に、ANDRA が建設し、操業する長寿命高レベル放射性廃棄物のための貯蔵施設及び処分施設の建設、操業、最終停止、維持、及び監視のための専用基金を創設しなければならない。基金のすべての運用は、資源及び ANDRA の予算内での基金の財源と用途の個別化を目指して、個別会計としなければならない。基金の財源は、原子力基本施設の操業者から支払われ、合意に基づいて設定される拠出金に

由来する。

行政当局は、計画法第 2006-739 号の第 20 条に言及される要件の適用が阻まれる可能性があることを証明した上で、前述の箇条の第 I 節に言及される費用を賄うために、必要であれば日割の違約金付きで、原子力基本施設の操業者に所要金額を基金に支払うよう強制することができる。

b. ANDRA の研究開発予算

ANDRA 内部で行われる研究開発に対応する主な予算は、2014 年については以下に示す数字（単位：100 万ユーロ）に含まれる。

| | | |
|---|---|---|
| 1. | 技術的試験及び試行 | 28 |
| 2. | シミュレーション | 5 |
| 3. | 基礎研究開発 | 21 |
| 4. | 環境観測 | 5 |
| 5. | URL の操業 | 33 |
| 6. | 管理 | 22 |

ANDRA の研究開発活動は、上記の 2 項、3 項及び 4 項として計上され、これより程度は低くなるが 1 項、5 項及び 6 項として計上される。

2.3.8 2013～2015 年の新しい PNGMDR

(1) PNGMDR の概要

a. 放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画（PNGMDR）

2006 年 6 月 28 日の計画法の第 6 条は、放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画（PNGMDR）の目的について以下のように定めている。

- 放射性物質及び放射性廃棄物の既存の管理方法を評価する。
- 貯蔵施設または処分施設の予想されるニーズを報告し、必要な容量と貯蔵期間を指定する。
- 最終管理方法が決まっていない放射性廃棄物に関しては、達成すべき目標を決定する。

この計画では、とくに放射性廃棄物の管理に関して実施すべき調査・研究についてとりまとめ、新しい管理方法の実施及び施設の設置または改造に関する日程を定める。

この計画法では、PNGMDR を 3 年ごとに公布し、デクレが PNGMDR から生じた規定を規制という観点から定めるとしている。この計画には、達成事項の一覧及び諸外国で実

施された研究を付属資料として記載しなければならない。この計画は、議会に提出され、議会はこれを議会科学技術選択評価委員会（OPECST）に提出して審査を受け、その後に公表される。

PNGMDR の初版は、多元的作業グループの作業に基づいて 2007 年に議会に伝達された。この初版は、大部分が 2006 年 6 月 28 日の計画法と同時に作成された。その後、同法の規定を考慮するために、調整と更新を行わなければならなかった。この計画の要約がその後に公表された。

PNGMDR を更新するために、政府は、多元的作業グループの作業に今後も依存することを決定した。作業グループでは DGEC と ASN が共同議長を務めた。作業グループには、とくに廃棄物の発生者と管理者、団体、公選役職代表者、行政、HCTISN、SND 及び IRSN が含まれる。作業グループ内で行われた多くのプレゼンテーションは、計画策定のための非常に貴重な情報源となった。

この更新はまた、今後数十年間の廃棄物発生の見通しについて、及び貯蔵必要量と貯蔵容量に関しては、2012 年に ANDRA によって発表された再利用可能物質及び放射性廃棄物の国内インベントリに基づいている。国内インベントリで明らかにされた廃棄物の系列は数多く存在するため（100 系列）、PNGMDR は系列グループを結合して、管理経路の要約版を提示した。

さらに、新版は、PNGMDR 2010～2012 年に関連する規定を定める 2012 年 4 月 23 日付デクレに従って、開始されたすべての研究の結果を活用する。

したがって、前回の PNGMDR について継続中の作成作業では、PNGMDR の修正のための関連手法は、「環境問題及び持続可能な開発問題に関する公的政策に関するグルネル環境円卓会議」に合わせて、複数の当事者の参加と透明性に依存するところが大きい。

放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画の有用性は、欧州レベルで確認された。2007 年に設立された欧州原子力安全規制者グループ（ENSREG）は、国別管理プログラムを策定する必要性を強調した。欧州理事会もこの問題を確認した。すなわち、使用済燃料及び放射性廃棄物の管理に関する 2008 年 12 月 16 日付決議は以下のように述べている。「各加盟国による使用済燃料及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画の実施は強制的なものである。このような計画は、長期にわたって行われなければならず、あらゆるタイプの放射性廃棄物を取り扱い、すべての実施段階を記述しなければならない。計画には、少なくとも国内に存在する使用済燃料及び放射性廃棄物のインベントリと将来の見通しを盛り込み、既存の解決策を検討し、既存の解決策の改善または新しい解決策の作成のために展開される研究開発戦略を策定し、これらの解決策の実施日程を作成し、その費用と資金調達方法を評価し、新しい解決策を実施するための規制枠組みと意思決定プロセスを記述し、最後に責任の範囲を決定しなければならない。このような計画は一般に公開され、見直され、必要に応じて定期的に修正されなければならない」。

b. 放射性物質及び放射性廃棄物の管理における当事者

放射性物質及び放射性廃棄物の発生者は、原子力発電、国防、研究、原子力発電以外の産業、医療という 5 つの経済部門に分けることができる。世界のインベントリという観点からすると、3 つの主要廃棄物発生者が、2009 年の再利用可能物質及び放射性廃棄物の国内インベントリに表記された者とみることができる。これらの発生者は、アルファベット順に列挙すると AREVA 社、CEA 及びフランス電力（EDF）である。

フランスの放射性廃棄物の管理者は、ANDRA（放射性廃棄物管理機関）という専門公共機関である。2006 年 6 月 28 日の計画法に詳述されている ANDRA の任務は、とくに処分施設の設計と操業、深地層での貯蔵と処分に関する調査・研究の実施、債務不履行となった所有者のための放射性廃棄物の回収、及び情報の一般公開である。

放射性物質及び放射性廃棄物の管理の分野におけるフランスの主な研究機関は、すでに言及した ANDRA のほかに、BRGM、CNRS、PACEN（サイクルの下流と原子力エネルギーに関するプログラム）、INERIS、IRSN、MINES カルノ研究所（カルノ研究所の「企業と社会のための革新的方法」）、及び大学である。とくに 2006 年 6 月 28 日の計画法は、群分離・消滅処理研究の責任を CEA に付与し、貯蔵と処分に関する研究を ANDRA に担当させた。IRSN の研究は、安全当局（ASN と DSND）への技術支援という役割を果たせるように十分なレベルの専門知識を取得することを目指すものである。

これと並行して、多数の研究開発活動が産業界（EDF と AREVA 社）によって実施され、一部は一般契約によって CEA 及び／または ANDRA と連携して行われる。サイクルの下流に関する研究方針・フォローアップ委員会（COSRAC）の目的は、これらの研究プログラムの整合性を確保することである。最後に、2006 年 6 月 26 日の計画法によって役割が確認された国家評価委員会は、放射性物質及び放射性廃棄物の管理の分野の研究について年次評価を行う。

放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する政策の策定、実施及び管理には、複数の省庁が参加している。エコロジー・持続可能な開発・エネルギー省（MEDDE）では、エネルギー・気候総局（DGEC）が政策を策定し、原子力安全と放射線防護に対処する決定を除いて、民生用原子力部門に関連する政府の決定を実施する。同様に MEDDE では、リスク防止総局（DGPR）が、原子力安全機関（ASN）に委託されている任務を除いて（以下を参照）、民生用原子力安全と放射線防護に関する政府の任務を策定し、コーディネートし、実施する。高等教育・研究省（MESR）では、研究・イノベーション総局（DGRI）がフランスの研究活動をコーディネートする。

フランスには、原子力安全と放射線防護を管理する当局が 2 つある。ASN は、民生用原子力施設及び活動に関する原子力安全と放射線防護という任務を遂行する。国防に関連する活動及び施設に関する原子力安全当局は、国防関連の施設及び活動の原子力安全と放射線防護の代理機関（SND）が主導する。SND は国防大臣と産業大臣の管轄下に置かれる。IRSN は、原子力安全当局に技術支援を行うために介在する。

議会では、議会科学技術選択評価委員会（OPECST）が科学技術オプションの評価を行い、その結果について議会に知らせることができる。これらの評価は、とくに原子力分野に関係する。議会の役割とその長期的フォローアップの責任、ならびに放射性物質と放射性廃棄物の管理に関する国内政策の策定の概略を述べなければならない。

透明性を高め、協議を促すために構築された意見交換の枠組みの中で、他の多くの当事者が、放射性物質及び放射性廃棄物の管理政策の策定に参加するよう招請される。これにより、西側放射能管理協会（ACRO）、ロビン・デ・ボワ、原子力情報科学者グループ（GSIEN）、及びエネルギー世界情報サービス（WISE-Paris）など、市民社会と環境保護団体の代表者が PNGMDR 作業グループに参加した。フランス市長協会などの公選役職者の代表者もこの作業に積極的に参加している。さらに、2006 年 6 月 28 日の計画法は、原子力安全情報と透明性に関する高等委員会（HCTISN）がこのテーマに関する討論会・協議を定期的に開催することを定めている。ムーズ／オート＝マルヌ県の地下研究所に設置された地域情報フォローアップ委員会（CLIS）の内部、ならびに原子力基本施設（INB）の周辺に立地し、CLIS 全国協会（ANCLI）に統合された地域情報委員会（CLI）の内部でも意見交換が行われる。

最後に、欧州レベルではユーラトム（欧州原子力共同体）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD）/NEA）、及び国連総会に所属する国際原子力機関（IAEA）などの国際機関が各国間での管理政策の統一化に取り組んでいる。

⑵ 2010～2012 年版からの PNGMDR の構築の主な進展

新版の PNGMDR（放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画）の主な進展は、2010～2012 年版及び 2013～2015 年版の序文を ASN とエコロジー・持続可能な開発・エネルギー省のエネルギー・気候総局（DGEC）がレビューした後の議会科学技術選択評価委員会（OPECST）の見解から推測することができる。

a. PNGMDR の 2010～2012 年版のレビューに関する OPECST 報告書

2006 年 6 月 28 日の計画法が課す義務を PNGMDR が果たしたとしても、OPECST は、次版の PNGMDR では意欲的な新しい目標を設定する必要があると考えた。すなわち、放射性物質及び放射性廃棄物に関する共通基準として現在認知されている文書に関して、市民の期待に応えるという目標である。

OPECST が開催した聴聞会のときに、参加者（とくに団体の代表者）は、この目標を達成するためにいくつかの助言を与えた。そのうちの 2 つは、市民の PNGMDR へのアクセスを促す可能性があると思われた。

最初の助言は、PNGMDR 内での複数の読解レベルの開発に関するものであった。第 1 に、最上位レベルの文書として総括、次いで勧告を統合すること、第 2 に文書の主要部分の対応する進展への必要な言及を総括に組み込むこと、第 3 に文書の本文にインターネッ

ト・リファレンスとのリンクを追加することによって、一部のテーマを分析し、深化させながら、更新を可能にする。

他方で、さまざまな廃棄物経路に対して利用可能なすべての要素に直接アクセスできるようにするために、それぞれの経路ごとに、結果とプロジェクト／計画に関するすべての情報をまとめることが適切である。同様に、主要国で選定されたオプションの簡単な比較をそれぞれの経路に充当された部分で直接提示する一方で、付属資料では、達成事項と進行中の研究についてのより完全な説明を維持することが妥当である。

2 番目の望ましい展開は、歴史的要因を含めて、状況的要素を追加することである。この提示は、物質及び廃棄物管理の過去の次元を想起しながら、一般的な概要の形を取ることができ、読者は主題に対して自らをより正確に位置付けることができ、ある特定の決定の背後にある論拠を理解することができる。

進行中の研究の廃棄物管理経路それぞれの進捗状況と達成事項を評価するための標識の追加などの他の調整は、おそらく次回の PNGMDR の読みやすさをさらに改善するのに寄与すると思われる。OPECST の考えでは、ASN と DGEC は、必要であれば PNGMDR の再編に関するこの考察を、計画の草稿作成プロセスへの貢献のために ASN が編成した特別作業グループに委託することができる。

PNGMDR の内容について、基準文書として要求される完全性を達成するために、範囲の拡大を継続することが望ましい。この問題の進捗が達成されており、これを歓迎する場合でも、たとえば、採鉱サイトの問題と廃液放出の問題など一部の側面に改善の余地が残っている。この点については、取り扱い範囲の拡大を前提として、PNGMDR は、リムーザン鉱山に関する多元的専門家グループ（GEP）または地域情報委員会（CLI）などの他の多元的機関が実施した作業の結論を考慮し、またはこれらの機関の一部に個別テーマの徹底的な掘り下げを委託することが望ましい。

PNGMDR がさまざまな物質と廃棄物の考察において完全性を目指すべきであるのと同様に、討論と国家による選択を経て選択することができる原子力産業の未来に関するあらゆる戦略的オプションをより詳しく予測する必要がある。原子力の発展が滞る可能性など、これらのオプションの一部が現在はあり得ないように見えても、それは起こり得ることである。PNGMDR の中でこれらのオプションを考察しないことは、判断のための批判的要素を国民から奪うことになり、闇討ちを食らうリスクを負うことになる。さらに、これを実行すれば、回収可能な物質の管理など一部の問題に新たな光を当てることになる。

さらに、OPECST は、PNGMDR 2007～2009 年の評価ですでに提言していたように、物質と廃棄物の管理の資金面について、一方では発生費用の評価の提示、他方では対応する資金調達システムによって構成要素を追加することを勧告した。最近の論争では実際に、国民の間で、さらに驚くことには少なくとも直接関与する当事者の 1 人についても、この側面に関する情報不足を実証している。長期原子力コストに関する資金評価国家委員会（CNEF）は確かに、この勧告の実施を促すのに役立つと考えられる。この勧告はまた、使

用済燃料と放射性廃棄物の管理に関する EU 指令案で検討された措置の 1 つに相当する[1]。また、政府はこの委員会の設置を遅滞なく実行する必要がある。

注 1： OPECST による審査は、指令が採択される前に実施された。

b. 2013～2015 年版の PNGMDR の序論

放射性物質と放射性廃棄物は、安全性を確保し、人間と環境を保護するために、持続可能な方法で管理しなければならない。また、将来の世代が負担するコストを抑制することも不可欠である。

放射性物質及び放射性廃棄物管理国家計画（PNGMDR）は、放射性物質と放射性廃棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法に定められる原則の長期にわたる実施を確実にするに当たっての重要な手段である。PNGMDR の主な目的は、放射性物質管理政策の正規の構図を作成すること、新たなニーズを評価すること、及びとくに調査・研究に関して将来達成すべき目標を決定することである。

PNGMDR の強みは、完全性という使命にある。これは、残留廃棄物とリサイクル可能放射性物質、既存の管理経路と開発中の管理経路、高レベルと低レベル放射性廃棄物（発生源にかかわらず、厳密には放射性とはみなされない場合でも）に関係する。その妥当性は、2011 年 7 月 19 日に採択された使用済燃料及び放射性廃棄物の責任ある安全な管理に関する共同体枠組みを設定する指令 2011/70/ユーラトムによって、欧州レベルで確認された。

2007 年以降 3 番目に当たるこの新版の PNGMDR では、前版の PNGMDR の草案からのフィードバックと、議会科学技術選択評価委員会（OPECST－前項を参照）からの意見を合わせて考慮することを目指した。エネルギー・気候総局（DGEC）と原子力安全機関（ASN）は、プレゼンテーションとその内容を通じて、連続するそれぞれの版からの継続的改善のプロセスに PNGMDR を投入し始めた。

また、計画を充実させ、さらに読みやすいものにするための読者からの提言も当然ながら歓迎される。フランスで確立された管理の枠組みがあるにもかかわらず、放射性廃棄物はしばしば不安と過剰反応を生じさせる。信頼を醸成するためには、透明性と情報の質が極めて重要である。同様に、市民社会の代表者との対話を含めて、対話と協議も公共政策の中心になければならない。

国家計画の 2013～2015 年版は第 3 次 PNGMDR である。見解と提案を共有することを目的として、DGEC と ASN は、多元的作業グループの内部のプレゼンテーションと議論に基づいて PNGMDR の草案を再度作成することを決定した。作業グループは、放射性廃棄物の発生者及び管理者のほか、環境保護団体、規制当局及び規制評価機関で構成されている。こうして、この作業グループは 2003 年から 38 回にわたり会合を開いてきた。

透明性を確保するために、また、環境法典の第 L.542-1-2 条に従って、PNGMDR は公開され、ASN と DGEC のウェブサイトに転載される。さらに、最大多数の読者がアクセスできるように、教育と情報提供を目的とした総括も発行される。

PNGMDR は、すべての物質及び放射性廃棄物の管理を改善する方法を提案する。これらの提案は、政府が委託した研究の完了とレビューを含めて、2007～2009 年を対象とする PNGMDR の初版以降に行われたかなりの量の作業の成果である。しかし、大きな進歩が見られる場合は、作業を継続して行わなければならない。汚染者負担原則（polluter-pays principle）の適用によって、この作業はすべて、直接的または間接的に放射性物質及び放射性廃棄物の発生者から今後も資金提供を受けるという点に留意すべきである。

放射性物質及び放射性廃棄物がすでに原子力安全当局の規制の下で安全に管理されている場合は、この PNGMDR に提示される勧告の実施がわれわれにとってどれほど重要であるかを過度に強調することはできない。これは、これらのすべての物質に対して最終的かつ長期的な管理の解決策を定めながら、放射性物質と放射性廃棄物の持続可能な管理の面で次第に進歩していることを意味する。この負担を将来世代にもち越さないことがわれわれの責任である」。

c. 2010～2012 年版の PNGMDR からの目次の進展

主な進展は以下のとおりである。

- 社会的次元及び記憶の伝達という問題が提示された。
- 長期的な原子力コストの資金調達について説明された。
- 既述のとおり、管理経路の説明が変化した。
  - ✓ 2010～2012 年版では、すべての管理経路に関する既存の状況とこれらの経路の管理の計画的改善を分離していた。2013～2015 年版では、改善に重点が置かれた。すなわち、既存の廃棄物管理方法の改善と実施すべき管理経路の必要性である。
  - ✓ OPECST の見解を受けて、さまざまな管理経路のグループ化が選択された。

(3) PNGDR 2013～2015 年の内容

a. 原則と目標

(a) 放射性物質及び放射性廃棄物の定義

法的には、環境法典（L.542-1-1 条）では、「放射性物質とは、その放射能または濃度が放射線防護管理を正当化する自然放射性核種または人工放射性核種を含有する物質である」と定めている。実際には、放射線防護管理が正当化されるかどうかを判断できると考えられるすべての放射性核種に有効な唯一の放射能または濃度の閾値など存在しない。

天然物質の場合、国際勧告と国内規制の大半は、外部世界で観察された平均との比較で質量当たり放射能濃度に基づいた手法を保持している。

人工放射性核種の場合、放射線防護管理は、質量当たり放射能（Bq/g）と全放射能（Bq）が「免除閾値」に満たない限定量（通常は 1 トン未満）で使用される物質には不要とみなされる。さらに、すべて免除される多くの線源の有意な蓄積がある場合、放射能は放射線

防護という観点から許可を必要とするということを保証する蓄積規則と全放射能限度がある。したがって、免除は、必要のないときには放射線防護管理を課すことを回避する初期決定に相当する。

もう 1 つの重要な概念はクリアランスである。すなわち、規制対象分野からの物質の取り消しである。放射能の使用を規制対象分野からクリアランスする方法は、国によってさまざまな手法がある。一部の国は、質量当たり放射能（Bq/g）で表現されるクリアランス・レベルを取り入れている。この値は（物質、発生源、及び目的地とは関係なく）普遍的なものか、あるいは物質、発生源及び目的地に依存する場合もある。これらの値は免除閾値よりも低いことがあるが、論理の問題上、高くなることはない。フランスは別の手法を開発した。これは、放射能の利用に関する規制の対象となる（すなわち、規制という意味で原子力活動の枠組みの中で使用される）物質については、放射能汚染と接触した瞬間または放射線によって活性化した瞬間から放射性を帯びているとみなす必要があると想定されるからである。フランスの原則は、汎用閾値に基づいて極低レベル放射性廃棄物の無条件解放を定めるものではない。これは、この廃棄物の特別管理及び専用処分施設での排出につながる。

放射性物質には、再利用可能物質とみなされるものもあり、また、廃棄物あるいは必要であれば最終廃棄物とみなされるものもある。

広義の意味で取られる廃棄物概念の一般的な範囲については、環境法典（第 L.541-1 条）によって設定されている。廃棄物とは、「生産、変換または利用プロセスから生じる残留物、物質、材料、生成物、またはより一般には放棄され、もしくは保持者が放棄する予定である可動商品」である。さらに、廃棄物は、「(…) 廃棄物の再処理から生じたか否かにかかわらず、とくに再利用可能な部分の抽出または汚染的性質もしくは危険な性質の低減によって、現在の技術的・経済的条件の下で処理する義務がもはやない廃棄物は、最終廃棄物とみなされる」。

放射性物質と放射性廃棄物の場合、環境法典は、放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法の第 5 条に示される以下のような定義によって完成した。「放射性物質とは、必要であれば再処理の後に将来の利用が予測もしくは検討される放射性物質である。放射性廃棄物とは、将来の利用が予測もしくは検討されない放射性物質である。最終放射性廃棄物とは、とくに再利用可能な部分の抽出または汚染的性質もしくは危険な性質の低減によって、現在の技術的・経済的条件の下で処理することがもはやできない放射性廃棄物である」。

(b) 放射性物質及び放射性廃棄物の発生源

放射性物質は、自然に発生するか、または人間の活動の結果として生じることがあるが、この 2 つの発生源の境界を定めることは容易ではない。たとえば、自然放射能を増強した場合、一部の天然物質は人間が使用して放射能の濃縮につながることがあるが、その放射

性特性は利用されない。

われわれの環境中には、自然に存在する放射性核種を含有する鉱石と物質（ウラン同位体、トリウム、トリチウム、ポタシウム 40、炭素 14、またはラジウムとラドンなどの関連元素)、宇宙放射線など数多くの自然電離放射線源が存在する。環境中に存在するこれらの自然放射性核種は、 生物圏のあらゆる区画に分散している。

さらに、放射性核種の濃度は、物質とその由来に応じて極めて変動性が大きい。自然由来の放射性核種への被ばくは、世界のさまざまな地域によって 1 桁以上異なることがある（フランスの平均の 2.4mSv/年から、インドまたはブラジルの一部地域の 50mSv/年以上まで)。

さらに、20 世紀初頭以降、放射性物質の取り扱いを必要とする人間の活動によって、放射性物質と放射性廃棄物が発生した。これらは、以下に示す 5 つの主要経済部門から生じている。

- 原子力発電部門。主に発電用の原子力発電所、及び核燃料の成型加工・再処理の専用プラント（ウラン鉱石の抽出と処理、ウラン濃縮物の化学的変換、燃料の濃縮と成型加工、使用済燃料の再処理、及びリサイクル)
- 研究部門。民生用原子力分野の研究（主に CEA の研究活動)、及び医療研究、粒子物理学、農学、化学などの研究所
- 国防部門。主に核抑止力に関連する活動（船舶または潜水艦の原子力推進を含む）ならびに対応する研究活動
- 原子力発電以外の産業。とくに希土類元素の抽出、密封線源の製造だけでなく、溶接検査、医療機器の滅菌、食品の滅菌と保存などのさまざまな用途
- 医療部門。治療、医療診断及び医学研究活動

フランスにおいて過去に放射性廃棄物を最も多く発生させてきた部門は、原子力発電、研究、及び国防部門である。

(c) 放射性物質及び放射性廃棄物の通常分類

これまでのセクションに定められている定義に従って、以下のような区別を行うことができる。すなわち、将来の利用が予測または検討される放射性物質と、将来の利用が予測または検討されない放射性廃棄物である。

放射性物質は、特定の分類にかけられない。放射性物質は、主にウラン（天然、濃縮、または劣化)、燃料（使用中または使用済み)、使用済燃料の再処理によって分離されるウランとプルトニウム、及び原子力発電産業以外の産業から生じる再利用可能な物質（主にトリウムを含有する物質）である。

放射性廃棄物については、フランスの通常分類は、適切な管理方法を定義する際に 2 つのパラメータを活用する。

- 活性レベル。これは、廃棄物に含まれる放射性元素の時間単位当たり崩壊数に対応する。言い換えると、これは放射能レベルを指す。廃棄物に含まれる放射性物質の量と性質に応じて、放射能のレベルは、極低レベル、低レベル、中レベル、または高レベルに分けられる。
- 廃棄物に含まれる放射性核種の放射性半減期。放射性半減期は、放射性元素の原子の量の半分が崩壊するために必要な時間に相当する。半減期はそれぞれの放射性核種の特性によって異なる。10 回の半減期の後に、元素の放射能レベルは約 1,000 で除される。この 10 回半減期の期間は、一般に放射性核種の寿命を表すものと考えられている。主に半減期が 31 年未満の放射性核種から放射能が生じる廃棄物（短寿命（SL）廃棄物と呼ばれる）と、主に半減期が 31 年超の放射性核種から放射能が生じる廃棄物（長寿命（LL）廃棄物と呼ばれる）が明確に区別される。

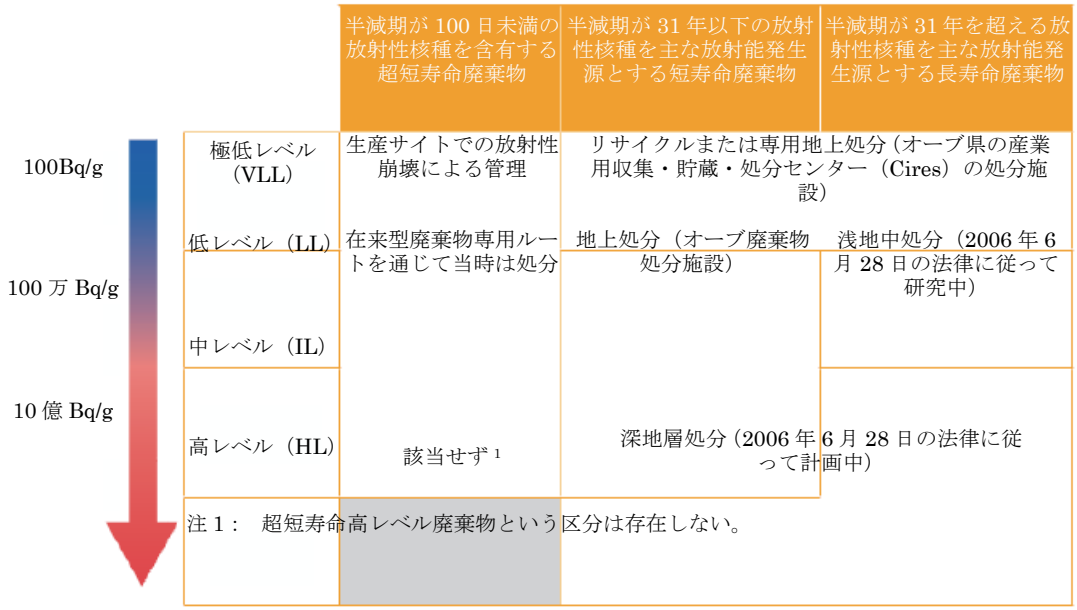
この分類は、以下に示す主要カテゴリーで構成される。

- 高レベル放射性廃棄物（HLW）。主に再処理後の使用済燃料から生じるガラス固化廃棄物パッケージからなる。廃棄物は、ガラス・パッケージ内で処理される。これらの廃棄物パッケージは、放射性核種の最大部分（すなわち、核分裂生成物またはマイナー・アクチニド）を濃縮する。この廃棄物の放射能レベルは、グラム当たり数十億ベクレルほどである。
- 長寿命中レベル放射性廃棄物（ILW-LL）。同様に再処理後の使用済燃料及び燃料再処理プラントの操業・保守活動によって生じる。これは、構造的廃棄物、セメント・カプセル化または圧縮廃棄物パッケージの中で処理された核燃料被覆管を構成するハルとエンドピース、ならびに技術的廃棄物（使用済み工具、機器など）またはアスファルト固化スラッジのような廃液処理で生じる廃棄物からなる。この廃棄物の放射能は、グラム当たり約 100 万～10 億ベクレルである。
- 長寿命低レベル放射性廃棄物（LLW-IL）。主に黒鉛廃棄物とラジウム含有廃棄物である。黒鉛廃棄物は主にガス冷却炉の廃炉時に生じる。放射能はグラム当たり 1 万～10 万ベクレルである。長期的放射能は、主に長寿命ベータ放出放射性核種によるものである。ラジウム含有廃棄物は主に産業界で発生し、発電とは無関係である（希土類元素を含有する鉱石の処理など）。このカテゴリーには、ある種の遺産アスファルト固化パッケージ、マルベジのコミュレックス社プラントからのウラン転換処理残留物など他のタイプの廃棄物も含まれる。これらの廃棄物の放射能は、グラム当たり数十～数千ベクレルである。

・ 短寿命低レベル及び中レベル放射性廃棄物（LL/ILW-SL）。主に原子力発電所、燃料サイクル施設、研究施設の操業・保守・廃止措置によって生じ、それよりはるかに規模は小さいが医療研究活動からも生じる。この廃棄物の放射能は、グラム当たり数百～100 万ベクレルである。
・ 極低レベル放射性廃棄物（VLLW）。主に原子力発電所、燃料サイクル施設、研究施設の操業・保守・廃止措置によって生じる。この廃棄物の放射能は一般に 100Bq/g を下回る。
・ 超短寿命廃棄物。主に医療・研究部門で生じる。この廃棄物は、使用されたサイトに貯蔵され、放射性崩壊の後にその物理学的・化学学的・生物学的特性に対応する通常経路で処分される。

この分類では、以下の表にまとめたように、それぞれの廃棄物カテゴリーを 1 つまたは複数の管理ソリューションと関連付けることができる。この分類は、さまざまな廃棄物カテゴリーを長期管理経路に概念的に関連付けることができる。これについては、以下に示すそれぞれのセクションで詳細に説明する。これらを表 2.3-1 にまとめた。

表 2.3-1　放射性廃棄物の分類




廃棄物カテゴリーを決定するための独自の分類基準は存在しないことに注意する必要がある。すなわち、廃棄物の全放射能に加えて、廃棄物中に存在するそれぞれの放射性核種の放射能について研究する必要がある。

さらに、この分類は、廃棄物に含まれる放射性核種の放射能レベルと半減期のみに基づ

いているため、特定のタイプの廃棄物のための適切な管理方法を正確に決定するには不十分である。発生源だけでなく廃棄物の物理的・化学的特性を考慮しなければならない。

この通常廃棄物分類は、放射性廃棄物の方向付け及び処分ソリューションの特定のための簡素な指針である。しかし、この分類はある種の複雑な要因を考慮していないため、特定カテゴリーの廃棄物とは異なる管理ソリューションが選択されることになる。安定度または有毒化学物質の存在、さらには廃棄物の魅力などの他の基準も考慮しなければならない。

(d) 放射性物質及び放射性廃棄物の国内インベントリの一覧

これらの放射性物質及び放射性廃棄物の国内インベントリは、放射性廃棄物管理機関（ANDRA）によって 3 年ごとに作成されている。2012 年版では、2010 年末現在で存在する物質・廃棄物を明らかにし、2020 年末と 2030 年末に関する予測を行っている。このインベントリでは、再利用までの間にフランス国内で貯蔵されている放射性物質も提示しており、遺産廃棄物と過去の管理方法をレビューしている（廃棄物の浸漬、採鉱サイト、汚染サイトなど)。

表 2.3-2　放射性廃棄物 : 2010 年末現在のインベントリと各区分の 2020 年末及び 2030 年末時点の見通し

| (en m³ équivalent conditionné) | Déchets existants à fin 2010 | Prévisions à fin 2020 | Prévisions à fin 2030 |
|---|---|---|---|
| HA | 2 700 | 4 000 | 5 300 |
| MA-VL | 40 000 | 45 000 | 49 000 |
| FA-VL | 87 000 | 89 000 | 133 000 |
| FMA-VC | 830 000 | 1 000 000 | 1 200 000 |
| TFA | 360 000 | 762 000 | 1 300 000 |
| Déchets sans filière | 3 600 | | |
| Total général | ~ 1 320 000 | ~ 1 900 000 | ~ 2 700 000 |

このインベントリは、ラジウムとトリチウムを含有する HL、IL-LL、LL-LL 廃棄物の貯蔵容量、ならびに深地層処分場に関連する HL 及び IL-LL 廃棄物の貯蔵必要量も提示している。最後に、インベントリでは、放射性物質の在庫量、放射能に汚染されたサイト、及び採鉱残留処分サイト [3] に関する情報を提示する。

放射性廃棄物については、2010 年末現在、及び 2020 年末と 2030 年末までの評価が、管理経路ごとに上記に提示されている。

放射性廃棄物の量は、等価処理済みの量（$m^3$）（処理後の廃棄物体積）で示されている。

これにより、2007 年末現在の放射性廃棄物体積の管理経路ごとの分布を図 2.3.8-1 に示す。

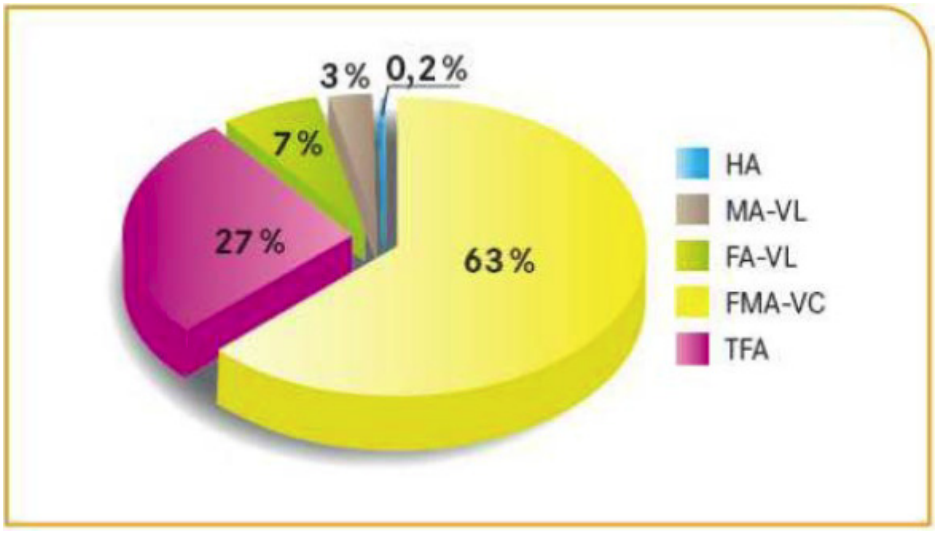



図 2.3-9　管理経路当たりの 2007 年末時点での放射性廃棄物量（等価処理済みの量、$m^3$）

これらの定量的評価では、以下に関しては考慮しない。

- 処理場所で最終的に処分されるウラン鉱石処理残留物
- 23 のサイトに分散した「過去に処分された」廃棄物（採鉱サイトを除く）。これらのサイトは、ANDRA の責任の下に置かれ、廃棄物が最終的に処分される。こうして、通常廃棄物の処分に対応する 12 のサイト、一般に過去に放射性廃棄物がマウンド、埋め戻し、及びラグーンで処分された原子力施設またはプラントの近隣にある 8 つのサイト、ならびに太平洋の核実験で発生した廃棄物が処分されるフランス領ポリネシアの 3 つのサイト（ムルロア、ファンガタウファ及びハオ）が記されている。
- 放射能を利用する活動に対応するサイト、及びもはや問題を生じず「浄化」を必要としないサイトに置かれている放射性物質

(e) フランスの廃棄物管理の法的枠組み及び制度的枠組み

欧州の法的枠組み

欧州レベルでは、2011 年 7 月 19 日付の理事会指令が、使用済燃料及び放射性廃棄物の責任と安全管理に関する共同体枠組みを設定した。この理事会指令は、放射性廃棄物の管理に対する各加盟国の責任を再確認している。この指令はとくに、フランスにおいて PNGMDR と国内インベントリの作成ですでに行われたように、使用済燃料及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画の策定を加盟国に義務付けている。

フランスの法的枠組みと規制枠組み

放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家的枠組みは、放射性物質及び放射性廃

棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法第 2006-739 号によって定められており、同法は、放射性物質・放射性廃棄物の管理政策の策定、透明性の改善、及びこの活動のための資金調達と経済的支援について取り扱っている。この計画法では、放射性物質及び放射性廃棄物の管理は以下に示す基本原則に準拠しなければならないと定めている。

- 人間の健康及び環境の保護
- 放射性廃棄物の量及び毒性の低減
- 将来の世代が負う負担の防止または軽減
- 環境法で優先する汚染者負担の原則

PNGMDR は、計画法に定める 3 つの指針に従って、物質及び廃棄物の管理に関する調査・研究の実施を計画する。

- 使用済燃料の再処理によって生じる廃棄物、処理、及びパッケージ化を含めて、廃棄物の量と毒性を低減すること
- とくに燃料・廃棄物の再処理または廃棄物の処理を考慮した、予備段階としての中間貯蔵
- 中間貯蔵の後に、原子力安全または放射線防護の理由から地上または浅地中で処分できない最終廃棄物の恒久的ソリューションとしての地層処分

透明性の分野では、同法は、国家評価委員会（CNE）に放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する研究の審査の任務を委託した。同法はまた、原子力安全情報と透明性に関する高等委員会（HCTISN）が定期的な情報提供及び協議を開催することを定めている。最後に、同法は、PNGMDR が議会に送られ、議会はこの計画を議会科学技術選択評価委員会（OPECST）に提出して審査を受け、その後に公表することを義務付けている。

さらに、ムーズ／オート＝マルヌ県の地下研究所に関連して地域情報フォローアップ委員会（CLIS）が設置された。2006 年の計画法を受けて、同委員会の運営は変更され、メンバーが増員され、議長職は国または地方の公選役職者に委託された。この計画法はまた、将来の深地層処分場の設置段階と閉鎖段階を許可するための新たな中間目標を定めている。したがって、最初の計画法は、関係自治体との公開討論と協議の後に、2015 年ごろにデクレによって処分場の設置を許可する前に、可逆性の条件が定められなければならない。より長期的には、計画法だけが処分場の最終的な閉鎖を許可することができる。

原子力に関する透明性及び安全性に関する 2006 年 6 月 13 日の法律によって設置された原子力安全情報と透明性に関する高等委員会（HCTISN）は、放射性物質及び放射性廃棄物の持続可能な管理に関する協議と討論を定期的に行う責任も担う。

b. PNGMDR の 2013～2015 年版への新たな追加

セクション 3.2.3 で述べているように、この版の PNGMDR の主な進展は、社会問題とコスト問題に関係するものである。

(a) 社会的次元と記憶の保存

社会的次元／社会科学及び人文科学の研究

さまざまな放射性廃棄物管理プロジェクトの社会的次元は、人文科学と社会科学の分野の研究を含めなければならないことを意味する。大半の高レベル放射性廃棄物の管理は、超長期的な規模で事象を予測し、対応策を準備しておく必要性という点で複雑な問題を提起する。処分場の閉鎖後の記憶の長期的保存と伝達の問題に対処するために、事前の対応策を準備しなければならない。

放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する総合的考察という観点から、また、とくにこれらの管理の全体的な整合性を改善するために、人文科学と社会科学の分野で初期シリーズの研究が開始された。

とくに、CNRS に社会学と人文科学という観点から考察と研究活動の追求を監視する任務を与えた前回の PNGMDR（CNE によって受け継がれた）に応えて、2008 年に CNRS 内部の活動プログラムである原子力に関する社会科学の行動（ACSSON）を PACEN の枠内で開始することが決定された。

記憶の保存と伝達

ANDRA が操業し、または計画するすべての処分場は、記憶保存システムを設定して、処分場の閉鎖後もこれらの処分場の記憶を伝達することを定めている。これらの処分場の閉鎖以後の長期的記憶の保存と伝達の問題は、通常の産業プロジェクトで実施される知識管理システムの問題とは異なる主題である。このような知識管理システムは、ANDRA やその他で使用され、必然的に数十年にわたって進展する。しかし、この進展は、とくに処分場が稼働状態でなくなったときに、知識の伝達と長期にわたる処分場の同じ記憶を保証することはできない。したがって、知識管理システムの進展が十分でない場合には、処分場の記憶を保存するために将来世代が必要とするものを提供する必要がある。

ANDRA が実施した基準ソリューション

処分施設の記憶の問題は、ラ・マンシュ処分施設（CSM）に関して早くも 1980 年代には検討された。これに応えて、永久紙にソリューションを記録保存することが 1995 年に定められた。1996 年にはタービン委員会が ANDRA の利用した方法を確認し、新規の開発者を求めた。ANDRA が処分場の長期的記憶のために使用した基準ソリューションは現在、3 つの「受動的」記憶と 2 つの「能動的」記憶を活用している。

3 つの「受動的」記憶システムとは、以下のようなものである。

・ 「詳細な記憶」。処分場を監視し、理解し、改造するために必要なすべての技術文書からなる。
・ 「記憶の総括」。政策決定者及び公衆のための技術情報と歴史情報からなる統合的な手法による独自文書である。
・ 「公益のための制約」の土地登記は、行政上の詳細事項を通じて、このサイトでの作業に取り組む上での潜在的リスクのサイト警告を提供する。

「能動的」記憶システムとは、以下のようなものである。
・ オープンハウス、会議、展示、及び面接の開催によって公衆とのコミュニケーションを育むこと、ならびに具体的コミュニケーション手段を記憶、フライヤー、及びウェブサイトに普及させること
・ 地域情報委員会（CLI）の役割を強化すること。記憶の問題は、これらの委員会が取り組んだ問題の 1 つであり、記憶の問題が現地で存続できるようにしなければならない。

(b) 放射性廃棄物管理のコストと資金調達

放射性廃棄物管理は、国の管理の下で、発生者負担の原則に従って原子力許可保有者が資金を拠出する。2006 年 6 月 28 日の計画法によって制定され、環境法典によって成文化された長期原子力コストの限定的資金調達取り決めは、操業期間中に原子力許可保有者が専用資産のポートフォリオを作成することを定めている。これを行うために、許可保有者は、廃炉コスト及び使用済燃料・放射性廃棄物の管理に関連するコストを含めて、長期コストを評価することを求められる。許可保有者は、高いレベルの担保で専用資産を創設することによって、現時点で将来コストの範囲を保証できなければならない。

法律により、これらの作業は、経済・エネルギー担当大臣によって設置される行政当局を通じて、国から厳重に監視される。したがって、監視義務を遂行するために、行政当局は長期コスト、専用資産の管理の方法と選択、及びこれらの専用資産の四半期インベントリを評価した 3 カ年報告書を許可保有者から受け取る。さらに、特別議会委員会である原子力基本施設の解体及び使用済燃料・放射性廃棄物の管理の費用手当てに関する資金評価国家委員会（CNEF）が、行政当局の監視任務遂行を評価し、その評価に関する 3 カ年報告書を議会と原子力安全情報と透明性に関する高等委員会（HCTISN）に提出する。

2006 年計画法は、地下研究所及び将来の深地層処分場の地域資金援助システムの近代化（第 13 条及び第 21 条）とともに、資金調達条項を定めている。3 つの研究方針の資金調達方法は、この計画法に定められている（第 15 条、第 16 条及び第 17 条）。とくに、ANDRA が実施した方針 2 及び方針 3 に関する研究は、原子力基本施設に対する税金に割り当てられる追加税が資金源となる。

長期原子力義務（第 20 条）に必要な資金を確保するために、この計画法の定めでは、それぞれの個別廃棄物発生者は 2011 年半ばまでにこれらの義務の範囲に対して準備し、専用

資産を割り当てるとしている。これらのコストには、使用済燃料及び放射性廃棄物の管理コストとともに、原子力基本施設の解体コスト（または放射性廃棄物処分施設の場合は、最終停止、保守及び監視のコスト）が含まれる。この分野の事業者の慣行を制限する制度が設けられ、とくに、評価とコスト範囲方法に関して国の側からの直接管理が行われる。したがって、3 カ年報告書とともに年次更新が規定され、監督当局がこれらを評価する。さらに、計画法は、国が実施する管理を評価するために、長期原子力コストに関する資金評価国家委員会（CNEF）を設置した。

c. 既存の管理方法の改善

このセクションでは、2012 年末現在の既存の管理経路の概要について述べる。ここでは、以下の事柄を取り扱うために、放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する改善の領域と PNGMDR の勧告を強調する。

- 遺産状況
- 放射性物質
- 放射性廃棄物（処理、処分）

(a) 遺産状況の管理

過去に一部の放射性廃棄物は、後に変更された方法で管理されていた可能性がある。たとえば、発生サイトの構内またはその近辺での処分である。場合によっては、放射性廃棄物は埋め戻し材として使用されたこともあり、あるいは、通常廃棄物の管理のための専用経路で処理されることもあった。「遺産処分サイト」という用語は、これらの場所を記述するために使用される（鉱山尾鉱と採鉱残留物の貯蔵所を除く）。このサイトでは放射性廃棄物が処分され、サイトは ANDRA の責任下にはなく、処分の時点で廃棄物の発生者または所有者は放射性廃棄物の管理専用の既存のまたは計画中の外部経路を利用することは検討しなかった。これらは以下のものに関係する。

- 13 の通常廃棄物処分施設。通常の産業または原子力産業から VLL 廃棄物を受け取っていた。
- 民生用または軍事用原子力基本施設の構内または近辺で処分された廃棄物
- TENORM 廃棄物（放射性核種を自然に含有するが、その放射能特性のために使用されたのではない原材料の変質によって発生した廃棄物）の処分。これらの廃棄物は、指定施設規則の対象になっていない。

計画からの勧告

AREVA 社、CEA 及び EDF は 2014 年末までに、原子力施設の構内またはその近辺で遺

産処分サイトを探すための調査を継続し、これらの特定されたサイトに関して検討された管理戦略を提示することを求められる。

さらに、核燃料サイクルの初期事業によって 60 万 $m^3$ の廃棄物がマルベジのコミュレックス社転換プラントのサイトの沈殿池に貯蔵された。これらのスラッジを含有する沈殿池の一部は現在、サイトの一部を基本原子力施設に分類する目的で、行政上の変更の対象となっている。

計画からの勧告

コミュレックス社は 2013 年末までに、すでに発生した廃棄物の処分に関するフィージビリティ・オプション調査を提出しなければならない。今後 2050 年までに発生する廃棄物の管理については、ANDRA とコミュレックス社は、2013 年末までにオプション案と最適化経路を明記した中間報告書を提示しなければならない。

(b) 採掘処理残留物及び鉱山尾鉱の管理

フランスでは、ウラン鉱山は 1948 年から 2001 年まで操業されていた。探鉱、抽出及び処理活動には、フランスの 25 の県の約 250 のサイトが関係していた。鉱石は 8 つのプラントで処理された。ウラン鉱山の探鉱と運営から以下のものが発生した。

- ウラン抽出のための処理の後に残留する生成物から成る処理残留物
- 経済的に有用な鉱石にアクセスするために掘削された土壌と岩石から成る鉱山尾鉱

大量の廃棄物が発生したことを考えると、これらの物質に対して現在採用されている管理方法は、現在及び長期的な影響を合理的に達成可能な限り低いレベルに抑制するために取られた措置の確認を含めて、原位置管理となる。これらの処分サイトは、環境保護指定施設に関する規則の対象となり、AREVA 社の責任の下に置かれている。

AREVA 社が実施した研究は、処理残留物の処分サイトの長期的影響の一部を評価することが今後可能であることを意味する。2010～2012 年 PNGMDR に組み込まれているこれらの研究から、とくに以下のことが実現した。

- 処理残留物の処分サイト周辺の保持盛土の安定度を評価し、新たな関連要件レベルを定めるために必要な基礎知識の取得
- 処分サイトでの住宅の建設を必要とし、より一般的には、評価の結果をモニタリング測定と比較することによって、モデリングの後に行われた評価の適切性を確認するシナリオのためのラドンのモデリングに関する知識の改善

水処理及び旧採鉱サイトからの放出物の影響の場合には、研究によって放出されたさま

ざまな物質に付随する影響を評価することができる。人間及び環境への化学的影響と放射線学的影響の考察から、ウラン及びバリウムの放出を制限する処理対策を模索する必要があることが判明した。

計画からの勧告

AREVA 社は、住民の被ばくリスクと盛土の強度の長期評価を完了するために、すでに進行している研究を実施する必要があり、旧採鉱サイトから回収した水の処理場を改善または閉鎖する可能性について検討し、最後にさまざまなサイトへのリスクと影響を緩和するための確固たる措置を提案する。これらの研究の結果の要約は、11 月 30 日までに発表される予定である。

鉱山尾鉱について、AREVA 社は、鉱山尾鉱が公有地で使用されていたケースを明らかにするという 2009 年に開始した作業を継続しており、これらの鉱山尾鉱の存在と関係サイトの公共利用との不適合性を定義することを目指す。さらに、鉱山尾鉱のチップの長期的な線量影響が再評価され、ラドン濃度をより大きく考慮することになった。

計画からの勧告

AREVA 社は 2014 年 11 月 30 日までに、鉱山尾鉱の存在に関連する放射線学的影響の管理の結果の要約文書を提示する。

(c) 放射性物質の管理

放射性物質は、処理後に必要であれば、その後の利用が計画され、もしくは検討される放射性物質であると定義されている。これらの物質はフランスまたは外国で利用することができる。2013～2015 年 PNGMDR では、燃料サイクルのさまざまな段階で発生した物質とこれらの物質が再利用された場合のフローとストックを提示する。

使用済燃料

フランスの国土に存在する使用済燃料の大半は、再処理されることになっている。（再処理からの）ウランと抽出プルトニウムは、再利用することができる。

ウラン

天然ウラン：濃縮ウランと劣化ウランという 2 つのタイプの物質を生成するために濃縮工場で使用される。

濃縮ウラン：原子力発電用の核燃料を製造するのに使用される。

劣化ウラン：EDF の一部の原子炉に供給される MOX 燃料を製造するのに使用される。

再濃縮が可能であり、天然ウランの価格が上昇した場合または濃縮技術が開発された場

合には、経済的に有利になることがある。
より長期的には、第 4 世代高速中性子炉で大規模な形で再利用することが可能になる。

再処理使用済燃料からのリサイクルウラン（URT）
使用済燃料から抽出され、再濃縮されて、使用済燃料の製造に使用される濃縮リサイクルウラン（URE）を生成する。

プルトニウム
使用済燃料集合体に含まれ、EDF の一部の原子炉で利用される MOX 燃料を製造するために集合体が再処理され、使用されるときに抽出される。

トリウム
トリウム・サイクルにおける核燃料としてさまざまなタイプの原子炉で使用することができるが、研究開発作業の量が引き続き必要であることを考えると、数十年間はまだ無理である。その他の用途は現在開発中であり、とくに一部のガン治療向けがある。

2010～2012 年 PNGMDR で要請されたように、放射性物質の所有者は、その物質が将来のある時点で廃棄物に分類された場合の管理オプションに関する研究文書を提供した。これらの研究で発生者が検討した処分場の深度は、処分場を人間の侵入と長期的に起こり得る自然現象に対して脆弱にする。

計画からの勧告
放射性物質の所有者は、ANDRA と連携して、これらの物質が将来において廃棄物に分類された場合の放射性物質管理オプションに関する詳しい研究を、さまざまな進展シナリオにおける放射性核種の閉じ込めと隔離のためのより好ましい地質学的条件を考慮して、実施しなければならない。

(d) 放射性崩壊による廃棄物管理
放射性崩壊による廃棄物管理は、主に核医学部門と研究所から発生する、放射性核種の半減期が 100 年未満の廃棄物のためのものである。放射性崩壊のために貯蔵された後に、廃棄物は通常廃棄物の専用管理経路に送られる。これは、原子力基本施設で発生した一部の放射性廃棄物（とくにトリチウムを含有する廃棄物）の管理における中間段階でもある。この管理方法は、適切な貯蔵施設の建設を必要とする。

(e) 放射性廃棄物からの再利用可能物質のリサイクル
廃棄物から抽出された再利用可能物質のリサイクルは、環境法典の第 L.541-1 条に定め

られる基本原則に従ってとくに焦点が置かれる領域である。フランスでは、2000 年代に操業を開始した原子力施設における放射性廃棄物のリサイクルには、2 つのリサイクル経路がある。

- セントラコ溶融施設では、放射性廃棄物パッケージの製造のためにコンクリート容器と一体化される放射線遮へい材の形で鉄類廃棄物をリサイクルする。
- 鉛リサイクル経路では、除染の後に鉛を遮へい材として製造することができる。

しかし、これらの施設の将来の操業をめぐっていくつかの問題が存在する。セントラコ融解施設は、2011 年 9 月 12 日の事故以来停止しており、また、鉛リサイクル設備の閉鎖が 2013 年に予定されている。

2010～2012 年 PNGMDR が求める研究では、2 つのリサイクル・オプションが明らかにされた。1 つは産業分類・貯蔵・処分センター（CIRES）の VLLW 処分施設向けの充填材として VLL 廃棄物をリサイクルすることであり、もう 1 つは、放射性廃棄物用の鋳鉄容器を製造するために VLL 鉄類廃棄物をリサイクルすることである。しかし、その産業的な実現可能性は、特に鉄類廃棄物のリサイクルに関して実施された研究では確認されなかった。

計画からの勧告

将来行われる廃炉及び操業後浄化作業によって生じる VLL 廃棄物管理の必要性の増大を考慮して、ANDRA、AREVA 社、CEA 及び EDF は、稀少な処分サイト資源を保全するために、2014 年末までに再利用・リサイクル対策の実施に関する研究の要約文書を提示する。

(f) 放射性廃棄物の焼却

放射性廃棄物の焼却は、広範な VLL 及び LL-SL 放射性廃棄物の管理に対する現実的な答えとなる。たとえば、これは、最終放射性廃棄物の体積を 10 分の 1 から 20 分の 1 にすることによって、処分サイト資源を保全する 1 つの方法である。したがって、1999 年に操業を開始したセントラコの焼却炉は、原子力施設の日常作業または原子力発電部門以外（病院など）の廃棄物の小規模発生者から生じる固体廃棄物（手袋、オーバーシューズ、プラスチックなど）及び水性・有機液体廃棄物（とくにオイルと溶剤）を処理することができる。

焼却は、放射性廃棄物管理の重要な側面である。セントラコ焼却炉が 2011～2012 年の約 1 年間停止したために明らかになったのは、この管理経路の脆弱性であった。

計画からの勧告

原子力施設の許可保有者は、焼却炉の停止に関連する問題に関する操業経験フィードバックをレビューし、可燃性放射性廃棄物の管理オプションを確保するための措置を取らな

ければならない。

(g) 極低レベル（VLL）放射性廃棄物の処分

フランスの原子力施設で発生する VLL 廃棄物の管理に関する政策は、クリアランス・レベルに基づいているわけではない。クリアランス・レベルとは、このレベルを下回ると原子力規制の対象から除外され、通常廃棄物とみなすことができるレベルである。政策は施設内の廃棄物の発生源によって異なる。汚染された廃棄物や活性化した廃棄物またはその傾向があるすべての廃棄物は、放射性廃棄物とみなされ、放射性廃棄物専用の施設での処分を含めて、一定の厳重な管理を受けなければならない。ANDRA が運営する産業分類・貯蔵・処分センター（CIRES）に立地する処分施設は、2003 年からこのタイプの廃棄物を受け入れている。

2011 年末時点で、CIRES に定置された総体積は約 20 万 3,000$m^3$ で、これは認可容量（65 万 $m^3$）の 31%に相当し、最新の発生予測では、この施設で処分されると当初確認された廃棄物インベントリの約 2 倍の容積が必要になることを示している。

処分サイトの稀少資源を保全するために、廃棄物の圧縮またはリサイクルなど最終放射性廃棄物の流れを低減する対策が研究されており、この取り組みを継続しなければならない。しかし、施設は当初予測していた 30 年ではなく 20～25 年以内に全容量に達するはずであり、2025 年ごろには、別の処分施設の建設もしくは現在の施設の認可容量の増設が必要になる。

計画からの勧告

ANDRA は、AREVA 社、CEA 及び EDF とともに、モルヴィリエの産業分類・貯蔵・処分センター（CIRES）の VLL 廃棄物処分場の充填に関する暫定スケジュールを作成し、VLL 廃棄物に関する新たな必要処分容量を満たすための全体的な産業計画を提案する。とくに大量の VLL 廃棄物が発生する廃炉作業に関して、全体的な最適化を求めなければならない。廃棄物発生者は、さまざまな公的利害関係者（とくに ANDRA）と連携して、この廃棄物の管理に関する経験フィードバックを確立することを要求される。

(h) 短寿命低・中レベル放射性廃棄物（LL/ILW-SL）の処分

「短寿命」低・中レベル放射性廃棄物（放射能は主に、半減期が 31 年未満の放射性核種から生じる）は、1969 年以降は専用地上処分場で処分されている。

ラ・マンシュ廃棄物処分施設は、1969～1994 年に合計で 52 万 7,000$m^3$ の廃棄物パッケージを受け入れ、2003 年にモニタリング段階に入った。施設の閉じ込め特性は覆土の定置をベースとしており、その長期安定性は約 50 年にわたり行われる予定の強化（勾配の険しさの低減）を要求する。施設の記録と記憶及び施設に定置された廃棄物が将来世代のために維持されるようにするための措置が取られた。

計画からの勧告

ANDRA は、ラ・マンシュ廃棄物処分施設の記録と記憶が維持されるようにするための措置について説明する。

2011 年末現在で、オーブ廃棄物処分施設（CSA）に定置されたパッケージの総体積は約 25 万 5,000$m^3$ であり、これは認可規制容量（100 万 $m^3$）の 25%に相当する。発生した LL/ILW-SL 廃棄物の量を低減するよう発生源で努力したことと、CIRES での VLL 廃棄物処分場の操業開始と溶融・焼却経路が、処分場の寿命延長を可能にしている。

計画からの勧告

ANDRA は、AREVA 社、CEA 及び EDF とともに、オーブ廃棄物処分施設（CSA）の充填に関する暫定スケジュールを作成し、とくに処分場の放射線容量の消費の予想される推移を説明する。

(i) 高度自然放射能を含有する廃棄物の管理

高度自然放射能を含有する物質（TENORM）は、放射性核種を自然に含有するが、その放射能特性のために使用されたのではない原材料の変質によって発生した廃棄物である。これらは、低レベル放射性または超低レベル放射性の長寿命廃棄物である。

TENORM 廃棄物は原位置で管理され、あるいは通常廃棄物処分施設（フランスでは 4 つの施設が TENORM の受入れを許可されている）で処分されるか、もしくは廃棄物の放射線特性に従って ANDRA の放射性廃棄物管理専用の処分施設に送られる。燃焼灰は、コンクリート中にすでに存在する自然放射能と比較した場合、放射能が非常に低いため、セメントの生産に再利用することができる。

TENORM 廃棄物の管理を改善するには、関係する量についての知識の向上と追跡可能性の改善が必要である。

計画からの勧告

TENORM 廃棄物の管理に適用されるより厳格な規制条項の検討が要求される。

d. 実施すべき管理経路：現在の必要性と将来の概観

このパートでは、まだ解決策が見つかっていない一部の廃棄物カテゴリー（とくにトリチウム含有廃棄物、密封放射線源、長寿命低レベル放射性廃棄物（LLW-LL）、及び長寿命中・高レベル放射性廃棄物（HLW/ILW-LL））のために開発されている長期管理方法を説明する。また、現在は開発中のいずれの長期的ソリューションとも関連付けることができないごく少量の廃棄物の事例についても検討する。PNGMDR は、この廃棄物の管理ソリューションを定義するための研究に関する規定を設けている。

(a) 具体的な研究を必要とする廃棄物管理

その特性を理由に、一部のカテゴリーの放射性廃棄物は特別な管理経路を必要とする。これにはたとえば、トリチウムを含有する廃棄物（トリチウム含有廃棄物)、使用済み密封線源、ならびにごく少量ではあるが原子力発電部門以外の小規模発生者から生じる放射性廃棄物が当てはまる。

トリチウム含有廃棄物の大半は、トリチウムの放射性崩壊を可能にするために、処分前に貯蔵を必要とする。約 40 年間にわたって CEA が新規貯蔵施設を設置したことにより、将来の処分施設への移行までの期間の短中期的安全性という点では、満足できるソリューションが提供された。原子力発電部門以外の小規模発生者から生じる液体及び気体トリチウム含有廃棄物に関する管理ソリューションを特定するために、2010～2012 年 PNGMDR によって開始された作業を継続しなければならない。

計画からの勧告

ANDRA は、AREVA 社、CEA 及び SOCODEI とともに、原子力発電部門以外の小規模発生者から生じる液体及び気体トリチウム含有廃棄物の処理に関する研究の要約文書を提示する。

大半の使用済み密封線源は現在、最終的な管理ソリューションが決定されるまで中間貯蔵施設に置かれており、オーブ廃棄物処分施設では、わずかな使用済み密封線源のみを処分することができる（上記を参照)。

計画からの勧告

エコロジー省を座長とする作業グループを 2014 年末までに設置して、使用済み密封線源の管理システムを定める。

最後に、管理する廃棄物の性質と体積を考慮して、原子力発電部門以外の小規模発生者から生じる廃棄物の処理を最適化する必要がある。

計画からの勧告

ANDRA は 2013 年末までに、原子力発電以外の部門の管理ソリューションの将来を保証するために必要な投資を明らかにする。

(b) 長寿命低レベル放射性廃棄物（LLW-LL）の管理

長寿命低レベル放射性廃棄物（LLW-LL）は、長寿命に適した特定の管理を必要とし、オーブ県の ANDRA の施設での処分は認められない。この廃棄物は、とくに以下のもので構成される。

- EDF の黒鉛減速ガス冷却天然ウラン型原子炉の運転と将来の廃炉によって発生する黒鉛廃棄物
- 主に希土類元素を含有する鉱石の処理によって発生するラジウム含有廃棄物
- マルクール原子力サイトの瀝青パッケージの一部
- マルベジのコミュレックス社プラントから生じるウラン変換残留物

おそらく処理の後に処分を待つ間、LLW-LL 廃棄物パッケージは現在、発生者サイトの構内の施設で貯蔵されている。

2008 年には、LLW-LL 型廃棄物の専用処分のための用地選定プロセスは成功しなかった。したがって、経験フィードバックから恩恵を受けるために、とくに HCTISN 内及びオーフス条約の枠組みの中で作業グループが設置された。作業グループは、将来の LLW-LL 処分場の用地選定に関する準備を改善するための勧告を提出した。

LLW-LL 廃棄物の最終処分については、2 つの概念が検討されている。すなわち、露頭地層を掘削し、その後に埋め戻しを行う修正覆土処分（SCR）と、大深度の粘土層の地下を掘削する無修正覆土処分（SCI）である。それぞれのタイプの LLW-LL 廃棄物に対して、さまざまなシナリオが研究されている。とくに、LLW-LL 廃棄物管理の最適化のために、この廃棄物の一部（黒鉛廃棄物とアスファルト固化パッケージのドラム缶）の処理と選別の可能性が検討されている。

計画からの勧告

ANDRA は 2015 年半ばまでに、修正覆土処分のフィージビリティに関する報告書と用地選定プロセスで行われた作業を利用して、最低レベル黒鉛廃棄物とマルクールのアスファルト固化カプセル化廃棄物ドラム缶の管理戦略及び選別／処理の可能性に関する要約文書を提示する。報告書には処分する廃棄物のタイプを詳細に明示する。

一方で、2012 年に提示された Cigéo 深地層処分場プロジェクトのインベントリは、設置許可申請書の提出を視野に入れて、LLW-LL 型アスファルト固化パッケージと黒鉛の選別／処理によって生じる廃棄物を受け入れる可能性について準備を行う。

(c) 長寿命中・高レベル放射性廃棄物（HLW/ILW-LL）の管理

要約

現在では、環境法典に成文化されている放射性物質及び放射性廃棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法に定める 3 つの補完的研究方法に従って、廃棄物の管理が研究されている。すなわち、可逆性のある地層処分、中間貯蔵、及び長寿命放射性核種の分離・変換である。さらに、廃棄物の処理と処理に関する研究が行われているところ

である。

環境法典では、地層処分を、原子力安全または放射線防護の理由から地上または浅地中で処分できない最終放射性廃棄物の長期管理のソリューションとしている。2006 年 6 月 28 日の計画法は、2025 年に可逆性のある地層処分施設の操業を開始することを義務付けている。Cigéo（産業地層処分施設）と呼ばれる計画中の処分場に設置される地下施設は、約 500m の深度の粘土層に立地する。ANDRA がムーズ／オート＝マルヌ県の地下研究所で実施している研究は、このような処分場のフィージビリティと安全性について重要な結果をもたらした。

中間貯蔵によって、長期管理施設の開設を待つ間の HLW/ILW-LL 廃棄物の安全な管理が可能になる。廃棄物パッケージは、発生者のサイトにある貯蔵施設に定置される。

計画からの勧告

AREVA 社、CEA 及び EDF は、ANDRA とともに計画中の Cigéo 処分場への輸送スケジュールと可逆性の原則を考慮して、HLW 及び ILW-LL パッケージに必要な中間貯蔵容量を分析しなければならない。

CEA がコーディネート役を務めながら分離・変換に関して実施されている研究は、使用済燃料に含まれ、最終廃棄物に現在見られるある種の放射性核種を分離するためのソリューションの産業的実現可能性を評価することを目的としている。研究により、分離・変換は廃棄物管理の潜在的改善手段とみなすことができることがわかったとしても、一定の欠点が存在する（サイクル事業の困難、臨時コストなど）。

さらに、これは地層処分の必要性を排除するものではない。

計画からの勧告

今後の研究は、CEA が 2012 年末に分離・変換オプションに関する見通しを評価する研究文書を提出した後に下される決定に影響を及ぼす。

背景と問題

放射性物質及び放射性廃棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法第 2006-739 号は、高レベル放射性廃棄物（HLW）または長寿命中レベル放射性廃棄物（ILW-LL）の管理について調査・研究の 3 つの補完的軸に従うことを義務付けている。

- 2012 年までにこれらの経路の産業的見通しの評価を取得し、2020 年 12 月 31 日までにプロトタイプ施設の操業を開始することを目指して、新世代の原子炉ならびに廃棄物の核変換専用の加速器駆動原子炉に関して実施される研究に関連する長寿命放射性

核種の分離・変換

- 深地層での可逆性のある貯蔵。許可申請の処理を 2015 年に開始し、2025 年に操業を開始するためのサイト選定及び処分施設の設計を目的とする。
- 貯蔵。PNGMDR によって明らかにされた必要性を満たすために、新規の貯蔵施設の設置または既存施設の改造を目的とする。

CEA が主導する研究の最初のラインでは、将来の原子力発電所で発生する廃棄物に取り組む。研究の他の 2 つのラインは、ANDRA が推進し、すでに発生した廃棄物（MLW-LL 廃棄物は国内インベントリの約 60%、HLW 廃棄物は同 30%）または既存の施設（2010 年 12 月 31 日付の設置許認可デクレを取得した建設中の施設と 2012 年 11 月 9 日付デクレの第 2012-1248 号によって許可された ITER 施設）で引き続き発生する廃棄物及び HLW/MLW-LL に関係する。

環境法典では、地層処分を、原子力安全または放射線防護の理由から地上または浅地中で処分できない最終放射性廃棄物の長期管理のソリューションとしており、中間貯蔵は必要な柔軟性をもたらし、また、このソリューションを段階的に管理された方法で実施するために使用される。2011 年 7 月 19 日の EU 指令 2011/70/は、放射性廃棄物の貯蔵は暫定的な方策であって、処分の代替策ではないこと、及び地層処分は現在、高レベル放射性廃棄物の管理の第 1 段階として最も安全で最も持続可能な解決策であることを確認した。

ANDRA は、可逆性のある地層処分に関する研究を、ムーズ／オート＝マルヌ県の地下研究所と 2010 年に政府によって範囲が承認された今後詳細な地下調査を行う区域（ZIRA）で実施している。この区域は、産業地層処分施設（Cigéo）プロジェクトの枠組みの中で、地下施設の設置につながる。ANDRA は、2013 年に Cigéo の地上施設のレイアウトを提案する。

安全性、可逆性及び設計オプションの評価が 2009 年末にエネルギー、研究及び環境担当の各大臣に送付された後、ANDRA は 2012 年に Cigéo の産業設計段階を開始し、産業概略研究に着手した。

高レベル放射性廃棄物と長寿命中レベル放射性廃棄物

高レベル放射性廃棄物は、主に核分裂生成物と、再処理・ガラス固化の際に使用済燃料のウランとプルトニウムから分離したマイナー・アクチニドで構成される。プルトニウムと再処理ウランは、加圧水型炉（第 2 世代と第 3 世代）で再利用可能な物質であり、より長期的には今世紀中ごろから展開される第 4 世代原子炉でも利用可能である。

予防策として、使用済燃料は、地層処分のフィージビリティ設計研究に系統的に組み込まれてきた。再処理せずに処分される使用済燃料の長期的挙動に関する研究は、CEA-EDF-ANDRA のパートナーシップの枠組みの中で継続された。これは放射性核種の放出モデルを提供するのに役立った。これに基づいて、ANDRA は、処分概念（とくに傾

斜路と立坑の設計）が使用済燃料の直接処分の仮定と適合することを検証する。ANDRA は 2012 年末に、このテーマに関する進捗報告書を発表し、2013～2015 年の調査・研究領域を提案した。

長寿命中レベル放射性廃棄物は、大部分が第 1 世代、第 2 世代及び第 3 世代の原子炉の核燃料サイクルから生じる（使用済燃料の金属構造物、運転廃棄物、及び廃棄物再処理プラントと MOX 燃料の製造で生じる固化廃液）。原子炉の運転廃棄物と廃炉に伴う廃棄物ならびに CEA の活動で生じる廃棄物も、このカテゴリーに分類される。

Cigéo プロジェクトに関する公開討論

2013 年に計画されている公開討論では、ムーズ／オート＝マルヌ県に放射性廃棄物の可逆性のある地層処分場を設置する案（すなわち Cigéo プロジェクト）に焦点を置くことになる。この討論会は、とくに Cigéo プロジェクトの地域統合について議論し、処分の可逆性に関する条件を設定する将来の法律を策定するのに寄与する。

ANDRA は、とくに 2012 年に実施された産業原案設計の研究に依拠して、Cigéo プロジェクトを説明する。その後、ANDRA は討論会の勧告を考慮して、施設の設置許可申請書を作成する。Cigéo に関連する地域の開発のための県間計画は、国が現地当局と連携して策定される。計画原案は公開討論会で発表される予定である。

貯蔵サイトから Cigéo までの廃棄物パッケージの輸送手段は、AREVA 社、CEA 及び EDF によって研究される。その他の利害関係者（評価者、公選公職者、HCTISN、ビュール研究所の CLIS、各種団体など）もこの討論の準備に参加する。

環境法典に従って、公開討論国家委員会（CNDP）は、公開討論会のスケジュールを発表する。Cigéo プロジェクトの所有者である ANDRA は、公開討論特別委員会（CPDP）の委員長に討論のためのフォルダーを提案した。このフォルダーは、公衆に与えるものであるが、CNDP から助言を得た後に原案が作成される。CPDP の委員長の要請があれば、フォルダーは討論に必要な文書で補完される場合がある。公開討論会の終了日から 2 カ月以内に、CPDP 委員長は討論会の報告書を発表する。ANDRA は、公開討論会の結果の発表から 3 カ月以内に、プロジェクト継続の原則と条件の公開報告書によって決定し、該当する場合は、CPDP の討論会報告書に従って、公開討論にかけるプロジェクトの大幅な変更を指定する。

ANDRA は、2012 年 10 月 10 日に公開討論国家委員会（CNDP）に申請し、この討論会の開催を求めた。

Cigéo の設置許可申請を裏付ける書類

公開討論会の後に、ANDRA は 2015 年に原子力基本施設（INB）に関する 2007 年 11 月 2 日付デクレの第 2007-1557 号の第 8 条に定められる書類を添付して、Cigéo の許可申請書を提出する。この許認可に要求される範囲は、プロジェクトのすべての廃棄物インベ

ントリを対象とする。2006 年 6 月 28 日の計画法は、申請に付随する審査プロセスについて記述している。処分施設の可逆性条件は、新しい法律によって決まることになる。許認可デクレは、ASN による ANDRA の書類の審査と CNE による評価、OPECST による声明、現地当局の協議及び公聴会を含めて、具体的な手順の終了後に初めて公布することができる。

この期限に向けて準備するために、ANDRA は許可申請を裏付ける書類に、処分施設の監視と処分作業及び廃棄物パッケージの回収可能性に関連する設計原則など、可逆性に関する提案を提示する。設置許可申請を裏付ける書類は、処分施設の可逆性に関する条件を定める法律が制定された後に更新される。

廃棄物の処理、パッケージ化、貯蔵及び輸送に関する調査・研究

計画法は、「放射性廃棄物の量と毒性の低減は、とくに（…）放射性廃棄物の処理及び処理によって目指す」と定めている。高レベル放射性廃棄物及び長寿命中レベル放射性廃棄物の発生者は、ANDRA と協議した上で廃棄物の知識、処理及び処理に関する研究を実施する。目標は、廃棄物発生量を引き続き低減すること、処分に関して操業中及び長期的に最も物理化学的に不活性の形態を獲得すること、及びパッケージ内の廃棄物の閉じ込めを強化することである。廃棄物管理の連鎖全体の技術的・経済的最適化という観点から、発生者の操業サイトで最良の安全条件で、ならびに地層処分の安全性と可逆性のために、処理と処理の新しい方法を研究しなければならない。新しい処理方法は、現在も処理されていない廃棄物に主に適用する。

貯蔵は、Cigéo 処分施設の操業が開始されるまでの間、その後はオープンかつ漸進的な意思決定プロセスに関連して、段階的に進展する産業的運営を支援するために必要である。廃棄物パッケージの回収可能性は、可逆性のある処分の重要な構成要素であり、これは、処分施設から回収される区画の地上での貯蔵の実現可能性を確保することを意味する。

ANDRA は、廃棄物の定置前に回収可能性を裏付けるものとして、処分と補完関係にある中間貯蔵に関連する調査・研究を主導し、コーディネートする。ANDRA は、AREVA 社、CEA 及び EDF と連携して、国内インベントリの設定の枠組みの中で、これらの組織の通告に基づいて調査・研究を実施する。ANDRA と発生者の連携を継続して、施設の設計、建設及び操業から得られるフィードバックを十分に利用し、発生サイトでの貯蔵施設のプロジェクトと将来の地層処分または処理との補完性を強化する。

2012 年末までに ANDRA によって発表される中間貯蔵に関する調査・研究の成果は、とくに Cigéo に定置される廃棄物パッケージの管理シナリオを提案し、必要な中間貯蔵容量の特定も行われる。ANDRA は 2009 年末に発表された技術的概念を提案した研究を、中間貯蔵と処分の補完性の原則を考慮しながら深化させる。これはつまり、長期的に将来の貯蔵施設の持続可能性を強化し、定置される廃棄物パッケージに対する柔軟性を高めることを意味する。

追加的な貯蔵容量のほかに、高レベル放射性廃棄物及び中レベル放射性廃棄物の長期管理は、長寿命廃棄物を現在の定置場所で処理し、処理し、輸送し、管理するための新しい方法を研究することが必要である。この作業は、自前のサイトで実施された廃棄物管理の手段の所有者兼操業者である ANDRA と廃棄物発生者の連携によって行われる。

群分離・消滅処理に関する調査・研究

群分離・消滅処理の目的は、廃棄物の崩壊期間の経過後の放射能毒性と残留熱負荷の主要寄与要因である最終廃棄物からのマイナー・アクチニドを除去することである。群分離・消滅処理に関する研究（2006 年 6 月 28 日の計画法の第 1 軸）は、CEA によってコーディネートされ、対応する経路（第 4 世代原子炉、加速器駆動システム）の「産業的見通しを評価すること」を目的として、2020 年までにプロトタイプ施設の操業を準備する。

e. 全体的な HLW 管理への焦点

(a) 廃棄物の処理と処理

高レベル放射性廃棄物(及び長寿命中レベル放射性廃棄物のガラス固化

ガラス固化は、マルクールのプラントで「高温るつぼ」技術で数十年にわたり成功裏に実施されており、フランスでは現在、ラ・アーグが使用済燃料（HL-LL 廃棄物）の再処理から生じる核分裂生成物溶液の処理のための産業基準プロセスとなっている（1991 年法に基づいて実施された研究から、長寿命核分裂生成物の核変換は、産業規模では実行可能でないことが判明した)。ガラス固化技術は、20 年以上にわたる経験と 1 万 6,000 体以上のガラス固化廃棄物パッケージの生産でその成熟度と堅ろう性を実証した。

さらに、コールドポットでの誘導溶融炉という革新的方法を利用するガラス固化が CEA によって開発された。この新しい方法によって、より広範な核分裂生成物のガラス固化が可能になり、高温るつぼ法よりも腐食の発生が少ないるつぼで生産ペースが上がった。したがって、AREVA 社は 2010 年に、UP2-400 再処理施設の廃止措置によって生じた中レベル放射性廃液を管理するための標準ガラス固化廃棄物（CSD-B という）の生産にこの方法を実施した。処理済み放射性排出物のタイプを考慮して、CSD-B は ILW-LL として分類される。AREVA 社は、モリブデン中に核分裂生成物を多く含むガラス固化 CSD-U 廃棄物パッケージも生産する予定である。核分裂生成物溶液は、現在は廃炉となっている天然ウラン黒鉛ガス冷却炉（UNGG）で使用された「UMo」（ウランとモリブデンの合金でできている）と呼ばれる使用済燃料の再処理によって得られる。溶液中に高いレベルのモリブデンが含有されていることを考慮すると、低温るつぼ技術の実施は不可欠となった。最後に、低温るつぼ法は 2013 年までに、加圧水型炉から発生する使用済燃料の処理のための核分裂生成物溶液のガラス固化にも適用される。

長期的挙動については、地層処分場での CSD-B 及び CSD-U パッケージの挙動を評価するための研究が実施された。「現在の」ガラスの場合、処分研究のために ANDRA にとって

必要となるガラスの挙動モデルの代表性と堅ろう性を徐々に高めるために、使用済燃料の組成がさらに進展する可能性を考慮して、物理化学的な風化機構メカニズムの詳細知識を取得するための研究が実施されているところである。この研究は、ガラス変質の機構モデルの開発によってガラス固化廃棄物の挙動パターンを確立するのに役立った。知識改善のため、また、とくに処分施設の環境物質とのさまざまな結合を改善するために、これらの研究は継続される。ガラスの組成に関する研究は、核分裂生成物溶液の組成の進展とその他のタイプの廃棄物のプロセス、及びガラス技術の開発（低温るつぼ）を考慮して継続される。

その他の形態の MAVL 廃棄物パッケージ

その他の ILW パッケージの場合、圧縮、セメント固化及びアスファルト固化という 3 つのタイプの処理・プロセスが使用されている。すなわち、1991 年法以降に知識取得作業が行われ、とくに ANDRA に送られた廃棄物パッケージ報告書で正式化された知識が対象となった。発生者はこれらの報告書で、廃棄物及びパッケージの放射線特性と化学的性質を明確にする。さらに、パッケージの挙動の動作モデルに到達するために、廃棄物発生者によって研究開発が推進される。

CEA と AREVA 社の共同研究開発プログラムのおかげでここ数年にわたり徹底して取り組んできた主な問題は、有機物質の放射線分解から生じる水素に関するものである。この水素は、主に処分作業中にパッケージから放出されるガスである。CEA と AREVA 社は 2007 年以降に、汚染ポリマーを含有する廃棄物の放射線分解プロセスについて理解し、定量化するための手段を提供する目的で、科学プログラムを開始した。実際のところ、課題は、安全とセキュリティを管理した状態で廃棄物を貯蔵し、輸送し、処分できるように、発生する放射線分解水素の量を評価することである。

放射線分解の収量を予測するための全体的な科学的手法は、パッケージと廃棄物ドラム缶に対して直接行われる測定作業によって補足された。これらすべての研究は、廃棄物パッケージに付随する水素発生の包括的モデリング手段の実施につながる。EDF はまた、廃棄物中の固定化水の放射線分解に関するプログラムを設定しているが、これは、廃棄物パッケージに見られるソースタームと同等の放射能のソースタームに被ばくさせたセメント固化廃棄物パッケージの照射によって発生する水素生成を定量化するものである。

アルファ核種を多く含む技術廃棄物について、AREVA 社は、検討された処理方法を記述した研究を、とくに PNGMDR 2010～2012 年版で発表した。これらの廃棄物は混合物とは区別される。つまり、可燃性物質（有機廃棄物）と非可燃性物質（金属廃棄物）の双方を含有している。低温圧縮による方法と熱プロセスという 2 つの処理方法が研究されている。

2008 年に定められた圧縮プロセスを利用して製造されたパッケージに関する報告書は、長期貯蔵または深地層処分に対して十分な保証を示さなかったため、ASN は、AREVA 社にこの廃棄物のパッケージ化については別の方法を検討するよう要請した。

ここから、AREVA 社は研究の中で以下のように説明した。

- 低温圧縮プロセスを利用する処理方法の原理は、2009 年以降に取得された研究開発の結果によって充実したものになった。
- 熱プロセスを含む他の処理／処理・プロセス。実際のところ、廃棄物中の有機物質含有量の排除または低減につながる処理は、放射線分解の影響を受けたこれらの物質の変質によって発生する水素を抑制し、微生物との相互作用だけでなく錯体生成的性質を有することがある物質の発生を潜在的に制限する。

プラズマが関与する焼却／融合／ガラス固化技術は、これらの要件に最も適切に応えている。

AREVA 社が 2 年近く実施している研究開発は、核環境におけるこれらの技術の産業的実現可能性に関してまだ結論に達していない。実際のところ、廃棄物（ILW-LL と HLW）に関する最も先進的でこれまで産業レベルで運用されている処理技術に関して、熱的プロセスはいくつかの重要な技術革新を必要とする（核環境でのプラズマトーチの実施、同じプロセス内での溶融とガラス固化の実施、最終廃棄物の最終キャニスタを溶融と焼却のためのるつぼとして利用する、同じキャニスタ内でのガラス／金属という 2 つの個別相を意味する最終処理・プロセス)。

さらに、環境法典の第 L.542-1-3 条は、2015 年以前に発生した IL-LL 廃棄物の所有者については、2030 年までにこれらの廃棄物を処理しなければならないと定めている。

(b) 中間貯蔵施設

中間貯蔵に関する調査・研究

ANDRA が主導し、コーディネートした高レベル放射性廃棄物及び長寿命中レベル放射性廃棄物パッケージの中間貯蔵に関する調査･研究は､2009 年の進捗報告書で発表された。その後、以下に示す理由から地層処分プロジェクトとの補完性を高めるために、革新的技術概念が ANDRA から提案された。

- 処分容器に定置されたか否かにかかわらない、さまざまな特性の廃棄物パッケージに関する多用途性。目的は、処分セルへの定置前に操業管理に対する柔軟性を高めることと、他方では処分の可逆性の枠組みの中で回収される可能性がある廃棄物パッケージの管理を予測することである。
- 貯蔵施設の持続可能性。処分施設の操業期間と可逆性、及び処分前の放射性核種の可能崩壊時間と整合する長期期間を目指す。
- 施設及び貯蔵パッケージの監視。持続可能性の目標に貢献し、貯蔵前のパッケージをより適切に監視することができる。

・　モジュール性。貯蔵容量を変化するニーズに適合させることが容易になる（管理の柔軟性、可逆性）。

ANDRA は、2010～2012 年に将来のすべての貯蔵施設に便益をもたらすことができるこれらの解決策を検討し、地層処分場プロジェクトに関連する可能性がある貯蔵施設を検討することを求められた。調査・研究の包括的審査は 2012 年末に発表される。

処分との補完性の原則を満たす複数の革新的貯蔵概念に基づいて、2010 年から行われている調査・研究の狙いは主に、高レベル放射性廃棄物の許容熱出力を増強すること、取り扱いプロセスを最適化すること、及び廃棄物輸送とのリンクを改善することである。施設監視の統合的手段を研究して、施設の老朽化と貯蔵パッケージの経年劣化を管理し、これらの廃棄物の熱出力をガス放出とともに測定することを目指す。一方で、貯蔵中の物質の挙動に関する研究を継続し、長期的な持続可能性を確保する。モニタリングと経年劣化に関する研究は、処分の可逆性に関連する研究との相乗効果で実施されることを指摘しておく必要がある。これは関与する多くのプロセスがほぼ同等であるためである。

貯蔵概念の研究から、地下に掘削した坑道またはサイロでの貯蔵は、地上に建設した施設またはトレンチでの貯蔵に比べて、とくに取り扱い、モジュール性、及び高レベル放射性廃棄物パッケージの冷却の点で難易度が高いことが判明した。したがって、これらのタイプの概念は、今後検討されることはない。

2010 年から行われてきた ANDRA と Cigéo プロジェクトの利害関係者の対話の後に、ANDRA は、廃棄物発生者の施設の代わりとなることのできる貯蔵施設を組み込まないことが決定された。とくに、高レベル放射性廃棄物の崩壊熱貯蔵のための中間貯蔵施設を Cigéo 処分施設に統合するオプションが 2009 年に提案されたが、もはや検討されていない。ANDRA は 2015 年初頭までに、処分施設の操業の最適化を目指し、発生者のサイトでの中間貯蔵の在庫調整からサプライチェーンを考慮して、Cigéo プロジェクトに基づいて提供される限定的な緩衝貯蔵容量を定める。

新規貯蔵設備のプロジェクトまたは既存設備の増設と処分施設との補完性を高めるために、調査・研究によって、ANDRA は貯蔵施設の操業者に技術的支援を提供することができる。したがって、ANDRA との共同研究の結果として、AREVA 社は現在建設中のラ・アーグの高レベルガラス固化体の貯蔵設備の増設を変更し、貯蔵容量に関する新しい規定を盛り込むことを目指す。このような意見交換は、ラ・アーグ・サイトで計画中の新規貯蔵設備に関して、EDF による ICEDA プロジェクトの枠組みの中で更新することができる。

貯蔵容量と放射性廃棄物の国内インベントリの妥当性

ANDRA と廃棄物発生者が関与する総合的な調整手法は、投資の最適化とさまざまな廃棄物管理施設の投資・操業の最適化を段階的に可能にする。この手法は、貯蔵施設と在庫調整施設だけでなく、処分容器への定置、制御、輸送キャスクの荷役、Cigéo 施設での廃棄

物パッケージの定置の専用技術システムについても取り扱う。必要であれば、対応する条件を定めるときに、処分施設に対して設定された可逆性の側面を考慮することが望ましい。

第 1 段階は 2012 年 1 月に完了し、ANDRA、AREVA 社、CEA 及び EDF によって産業的廃棄物管理プログラム（PIGD）の初版が共同刊行された。このプログラムの目的は、Cigéo プロジェクトの開発のために整合性のある産業的手段を計画し、実施することである。このプログラムでは、このプロジェクトで考慮すべき廃棄物インベントリを記述し、スケジュール作成を定義し、廃棄物パッケージの流れを予測する。このプログラムの目標は、既存の産業設備または発生サイトで廃棄物発生者が輸送用に設置すべき設備に関して報告することと、このプロジェクトの運用状況の中で全体的な構造集合体を示しながら、Cigéo のサイトで ANDRA が実施すべき産業設備を特定することである。

2025 年までは、高レベル放射性廃棄物及び長寿命中レベル放射性廃棄物パッケージの必要貯蔵容量は、新しい廃棄物の発生と旧廃棄物の再処理に関連する。これは、中間貯蔵に定置すべきパッケージの量と旧施設の廃止措置が徐々に増加すると、利用可能な貯蔵容量が減少する。

2025 年以降、必要貯蔵容量は、スケジュール作成と処分施設での廃棄物定置の流れに左右されるだろう。廃棄物の定置は、中間貯蔵のパッケージのインベントリを徐々に減らし、既存の貯蔵施設の場所を解放するか、または更新する必要なしに施設の廃止措置を支援する。

2009 年に ANDRA、AREVA 社、CEA 及び EDF に委託された廃棄物パッケージの中間貯蔵、輸送及び処分シナリオに関する作業と、その結果として生じる貯蔵施設の必要性に関する作業が進行中である。これらの作業は PIGD の初版に基づいている。

この段階では、既存貯蔵の容量と AREVA 社、CEA 及び EDF が提案した施設の設置及び増設によって、2025～2030 年ごろまで高レベル放射性廃棄物及び長寿命中レベル放射性廃棄物パッケージを十分に管理できると思われた。すべての廃棄物パッケージは、処分施設に定置されるまで、発生サイトまたは廃棄物処理施設で貯蔵される。

廃棄物発生者が運営する主な中間貯蔵施設は、AREVA 社が運営するラ・アーグのサイト、CEA が運営するマルクール、カダラッシュ及びヴァルデュックの各サイト、EDF が運営するビュジェイ・サイトである。

(c) 可逆性のある地層処分

可逆性のある地層処分に関する調査・研究が、用地選定と処分場設計のために実施され、許可申請を 2015 年に審査できるようにした。承認を得た後に、処分施設の操業は 2025 年に開始される予定である。設置許可申請書の具体的な審査プロセスは、2006 年 6 月 28 日の計画法によって定められている。申請書の提出前に、2013 年に公開討論会が開催される。

「Cigéo」施設は、承認を得た後に建設され、100 年にわたり操業される。この長い期間を理由に、貯蔵施設は区画単位で開発され、柔軟性の論理で段階的に操業が開始される。

承認を得た後に最初に建設される区画では、2025 年に廃棄物パッケージの最初の定置が可能になる。

Cigéo プロジェクトでは、安全面、産業面、経済面及び社会面の問題に取り組まなければならない。プロジェクトの外部統治によって、この問題に関連するさまざまな関係者と利害関係者が参加することができる。これは国と評価者の管理の下で行われる。

Cigéo の実施プロセス

Cigéo の設置許可申請は、ANDRA が運営する地下研究所を利用して研究された「カロボ・オクスフォーディアン」粘土層に関するものであり、許可は 2011 年 12 月 20 日付のデクレによって 2030 年まで更新された。ANDRA は、この地下研究所を利用して地下環境での作業の実施を試験し、時間の経過に伴う挙動を監視し、岩石に生じる擾乱を調査し、モニタリング／監視の方法を開発する。取得したデータを利用して、産業段階での処分と操業の安全性評価の準備を行う。

ANDRA は 2009 年に、土地利用に関する地質基準及び地元関係者との意見交換を必要とする地域統合に基づいて、今後詳細な地下調査を行う区域（ZIRA）を提案した。この 30km$^2$ に及ぶ地理的区域は、利害関係者の協議と ASN からの助言を得た後に 2010 年に政府によって有効性が認められ、施設の地下設備の場所に関する今後の研究が可能である。ANDRA は 2010 年に、三次元地震波調査を利用して ZIRA の徹底的な地質調査を実施した。これに基づいて、ANDRA は Cigéo 地下施設の作業場所の正確な定義を目指して、地質環境の分布特性の三次元図を作成した。2011 年 11 月の評価報告書で、国家評価委員会（CNE）は、新しい地震調査から ZIRA の優れた均質性が確認されたことと、地震データの最初の解釈の終了時に、三次元地質モデルは十分に堅固であると思われ、周囲の滞水層への水理的接続を提供できるカロボ・オクスフォーディアンを通じて構造的不連続の存在を除外できることを強調した。CNE はまた、ANDRA は現在、地下研究所で集めた情報から編纂されたデータの ZIRA への置き換えを正当化する概念地層モデルを取得したと考えている。

地上施設に関して、ANDRA は、ムーズ県に隣接するオート＝マルヌ県側の県間地域に傾斜炉の入口を設置する件について調査した。ZIRA の直線上に立坑を設置する複数のシナリオが検討された。ANDRA は、2013 年に選定される場所に基づいて、Cigéo 設置許可申請を裏付ける書類を作成する。

区域の県間プロジェクト開発計画が、地元利害関係者と協議の上で、ムーズ県（コーディネート役を務める県）の県知事の監督の下で策定された。この計画は、Cigéo プロジェクトに関する公開討論会で発表される。この計画の目標は、Cigéo の実施に関連する計画立案・開発問題に対する回答を与えることである。

Cigéo の産業的概念設計研究

ANDRA は 2009 年に、Cigéo 施設の安全性、可逆性及び設計オプションについて記述したファイルを提示した。このファイルは、2010 年に ASN とその技術支援機関である IRSN の審査を受け、施設の設置許可申請の前に重要要素の特定を完了することができる。

この審査の後に、ASN は 2011 年 7 月 26 日付の意見書第 2011-AV-129 号を発表し、ANDRA は、処分作業中のリスクを管理できるように設計、安全及び可逆性に関する主な規定を策定したと述べた。しかし、ASN は、施設の設置許可申請の枠内でこれらの規定を明確にし、深化させる必要があると強調し、プロジェクト開発のさまざまな段階で研究及び実験のコーディネートに引き続き注意を払い、予定の期限までに施設の安全性を実証するために必要なデータの入手可能性を確保できるようにすることを勧告した。

これに基づいて、ANDRA は Cigéo の産業設計の研究段階を開始した。目標は、Cigéo の設置許可申請書を 2015 年に作成し、承認を受けた後に第 1 区画の建設を開始することである。設置許可申請で要求される範囲は、Cigéo 産業プロジェクトのすべての廃棄物インベントリを対象としており、以下に提示する留保が含まれる。

これに関連して、エネルギー大臣は 2011 年初頭に専用産業組織の設立を監視した。この組織には、とくにプロジェクトの外部審査プロセスが含まれる。これに関連して、プロジェクトの初期審査が 2011 年にエネルギー大臣によって委託された。審査は 2011 年上半期に行われた。その目的は、草稿設計段階の開始前に、プロジェクトの技術的・組織的枠組みについて審査することであった。

ANDRA は 2011 年半ばに、草稿設計段階のプロジェクト管理システムに対応する最初の入札を開始した。落札者の選定及び草稿設計段階の元請業者への対応する発注は 2012 年初頭に行われる。草稿設計段階の終了は 2012 年末に予定された。

公開討論の前に、廃棄物管理に関する常設専門家グループは、産業廃棄物管理プログラムとその進展に関して 2010 年以降に ANDRA から提出された文書、2010 年に完了し、サイトの概念モデルに組み込まれた三次元地震調査の結果、ならびに処分条件での使用済燃料の長期的挙動に関する結果（PNGMDR 2010～2012 年で提出された研究）、及び IRSN が実施したと考えられるレビューなどを審査したはずである。ASN はこの審査の後半に意見書を発表した。

Cigéo プロジェクトのインベントリと廃棄物パッケージの引渡しスケジュール

Cigéo 産業プロジェクトで使用する予想インベントリは、2011 年に ANDRA、AREVA 社、CEA 及び EDF によって更新された。スケジュール作成及び廃棄物パッケージの予想される流れに関する初期の仮定も定められた。これらの要素は、Cigéo の産業設計の入力データになる。

インベントリは、2011 年に AREVA 社、CEA 及び EDF によって定められた「産業シナリオ」から引用された。このシナリオは、第 2 世代及び第 3 世代の原子炉から放出される

すべての使用済燃料とフェニックス及びスーパーフェニックスからの原子炉燃料の再処理で発電が継続されることを想定している。フラマンビルの EPR 炉を含めて、すべての加圧水型炉の基準として通常選択された操業時間は 50 年である。この想定は、原子炉の 10 年ごとの安全審査の結果を予断するものではなく、これらの原子炉の 50 年以降の操業寿命期間の関連方法（もしあれば）に関して予断するものでもない。このシナリオは、現在の 58 基の PWR と EPR フラマンビルでリサイクルされない物質（ウランとプルトニウム）が将来の施設でリサイクルされる可能性があると考えている。将来の可能な原子炉群によって生み出される廃棄物は考慮されていない。

産業プロジェクトのインベントリは、不確実性を考慮して余裕を見ている。処理が済んでいない一部の廃棄物については、処理が想定された。

設置許可申請の場合は、産業プロジェクトのインベントリに留保が追加される。留保の目的は、産業戦略に関する不確実性、または長寿命中レベル放射性廃棄物カテゴリーの新しい管理経路の実施に関する不確実性を考慮することである。第 3 世代の第 2 原子炉を設置する場合を取り扱うために考慮される留保は、発電に関する複数年投資プログラム（2009～2020 年の期間）の枠組みの中で検討された。また、予防策として、さまざまな管理シナリオが検討された黒鉛廃棄物と一部のアスファルト固化廃棄物の選別または処理によって生じる廃棄物も、選定される管理シナリオに影響を与えることなく取り扱う。この手法は、環境法典の第 L.542-1-2 条の規定と一致する。この条項は、「貯蔵の後に、原子力安全または放射線防護の理由から地上または浅地中で処分できない最終放射性廃棄物は、地層処分に付すべきである」と定めている。

技術面では、Cigéo 産業プロジェクトは、ブレニリス EL4 炉以外の使用済燃料の受入れを含めて、インベントリの考え得る進展を阻止するような特性を有してはならない。設置許認可に記述される廃棄物の周辺区域を変更する場合は、新しい許認可を受けなければならない。

Cigéo 地下施設の第 1 区画及び後続区画の設計では、さまざまな廃棄物パッケージの引渡し計画を定める必要がある。実際のところ、最初に引き渡されるパッケージの特性によって、2025 年に処分サイトで操業が開始される原子力地上施設及び最初の処分セルの機能性が決まる。

Cigéo への廃棄物パッケージ引渡しの予想スケジュールは、中間貯蔵から処分への流れと物流ニーズという観点から見た適合性を確保しながら、発生者の最良の輸送ニーズを考慮することを目指す。このスケジュールは 2025～2030 年の期間の Cigéo での操業の段階的拡大が可能である。さらに、2025～2029 年の期間におけるマルクールとラ・アーグからのアスファルト固化廃棄物の処分は、オプションとみなされるシナリオである（セクション 3.3.3 を参照）。ラ・アーグからの高発熱性ガラス固化廃棄物の定置は、顕著な熱減少を見越して 2075 年から検討されているが、非発熱性または弱発熱性の廃棄物の処分はこの日付以降も継続される可能性がある。

廃棄物パッケージの引渡しスケジュールは発展的性格を有している。スケジュールは、Cigéo の設計での反復的最適化の過程で ANDRA と発生者によって調整される。

廃棄物受入れ基準

廃棄物パッケージには、処分前に一連の検査が実施される。すなわち、(i) 発生プロセス及び ANDRA から提供された書類の範囲内で、発生者の責任の下で行われる検査、(ii) 発生者による登録及び Cigéo の安全要件に対するパッケージの適合性に関して、ANDRA の責任の下で行われるオンライン検査、及び (iii) 廃棄物パッケージの品質管理の枠組みの中で同様に ANDRA の責任の下で実施されるサンプル採取による第 2 レベル検査――である。廃棄物の発生、処理、及び貯蔵について発生者の責任の下で検査が行われる場合、ANDRA によって実施される検査は、必要に応じて廃棄物発生者のサイトまたは Cigéo サイトで実施することができる。ANDRA は、発生者と協調して、それぞれの責任に従って廃棄物パッケージの一連の検査の全体的な最適化を目指す。ANDRA は、廃棄物パッケージと受入れ基準との適合性を確保するために、設置許可申請書にパッケージ検査の規定を提示する。

可逆性

可逆性概念に関する対話が、ANDRA と地域情報監視委員会（CLIS）を含む利害関係者の間で継続される。OECD の原子力機関（NEA）は、問題の客観的な概要と NEA 加盟 15 カ国の見解を示す目的から、2007～2011 年に可逆性と回収可能性に関する国際プロジェクトを実施した。2010 年 12 月にはランスで国際会議が開催された。プロジェクトの完了時に、NEA は、ANDRA のイニシアチブで利害関係者との対話を容易にするための回収可能性の規模を含めて、決定の可逆性概念と廃棄物パッケージの回収可能性に対する国際的な理解について発表した。公開討論は、ANDRA がすでに開始している可逆性に関する利害関係者との対話を延長する。

ASN は、2011 年 7 月 26 日付の意見書第 2011-AV-129 号で、原則として可逆性は限定的期間になる場合があると指摘した。実際のところ、処分場の閉鎖を長く引き延ばしすぎた場合、処分の概念自体に疑義が生じるおそれがある。ASN はまた、処分の可逆性に関して採用された規定は、処分場の操業中及び閉鎖後の安全性と放射線防護という目標との適合性を損なってはならないことを確認した。

環境及び人間の健康のモニタリング

環境と人間の健康を監視するための方法案が、公開討論を支援する報告書で発表される予定である。Cigéo からの放出の評価は、廃棄物パッケージからのガス放出に関して発生者が提供した知識と中間貯蔵のモニタリングからの発生者のフィードバックから、ANDRA によって証明される。

ANDRA は、2007 年にムーズ／オート＝マルヌ県に常設環境観測所 (OPE) を設置して、

許可申請のために数年間のベースラインを設定し、Cigéo のために実施される環境モニタリングを準備した。OPE によって、複数年にわたる約 250 平方キロメートルの区域におけるさまざまな環境区画の多くの測定可能パラメータのフィードバックが可能になる。OPE は、超長期のモニタリング手段であるだけでなく、環境データを記録する手段でもある。OPE は、2010 年に「環境調査のための観測システム実験と通年期間」というラベルを与えられた。

ANDRA は、遡及的分析を可能にする代表的サンプルの長期保存を確実にするために、2013 年に「エコテック」を就役させる。このフランス初の「エコテック」は現在、ANDRA のニーズのために建設されているところである。公開調査のために公開される可能性もある。

これらの装置は、「環境及び地球の観測と記憶のための構造」に統合することができ、環境と記憶というテーマをめぐる国家科学技術キャンパスをムーズ／オート＝マルヌ県に設置するのに寄与する。

健康モニタリング

地元住民は、プロジェクトの周辺に設定された健康監視装置を見たいという願望を繰り返し表明した。ANDRA は、この健康監視装置に関する技術的条件を提案するが、その統治は公的当局による管理を必要とする。

(d) 群分離・消滅処理に関する研究

群分離・消滅処理に関する前回の PNGMDR で発表された研究から得られた主な教訓として以下のものが挙げられる。

- マイナー・アクチニドの核変換。通常進展シナリオにおいて変化しない場合でも、処分の放射線学的影響によって処分場の減容と長寿命廃棄物の放射能毒性の低減が可能になる。
- 群分離・消滅処理は、この点で将来の原子力システムの進歩の潜在的経路とみなすことができる。ただし、これらの作業に最も適した高速中性子束炉におけるプルトニウムのマルチリサイクルのフィージビリティを確認する必要がある（ガラス中ですでに処理された元素の核変換が可能であるとは思われない)。
- 欠点（サイクル時の廃棄物インベントリの増加、サイクル操業の困難さ、追加コストなど）を有するため、これが今後の研究の目標になり、研究の焦点は主にアメリシウムの群分離・消滅処理に絞られ、この研究では、廃棄物からの熱影響のさらなる低減を提供する。

2013～2015 年の研究開発の主な問題は、6 月 28 日の計画法の第 3 条に提示される 2012

年の中間目標以後に決定が下された場合に関係する。

(e) 展望と勧告

中間貯蔵と輸送

貯蔵に関する調査・研究に関して、ANDRA は、2015 年まで既存施設または 2010～2012 年に開始された開発中の施設の建設と操業からのフィードバックの収集と有効利用を継続する。ANDRA はまた、貯蔵施設の建設及び廃棄物パッケージの処理に使用する材料の挙動、及びモニタリングのための技術に関する研究も継続する。2013～2015 年の期間について、ANDRA はとくに、処分施設から回収されるパッケージの状態を考慮して、可逆性に関連する貯蔵設計を詳述する。

ANDRA は、Cigéo の開発と並行して貯蔵施設の設計に関する勧告の指針を 2015 年までに策定する。2013～2015 年の期間に実施する調査・研究の内容は、2012 年に予定されている報告書に明記される。

貯蔵容量の暫定インベントリとの妥当性に関して、AREVA 社、CEA 及び EDF が ANDRA と連携して実施した作業は、可能であれば全体的なシステムの最適化を目指して 2013～2015 年の期間も継続する。これらの組織は、マルクールのサイトを含めて、発生者のサイトでの施設の設計研究の結果を利用するとともに、Cigéo プロジェクトの草稿研究及び予備設計研究の結果を利用する。これに基づいて、ANDRA は、Cigéo プロジェクトに関する公開討論の初版を発表し、設置許可申請の年までに貯蔵と在庫調整、廃棄物の処理、検査、輸送及び処分を統合した廃棄物パッケージ管理の予測的シナリオを発表する。

AREVA 社、CEA、EDF は、ANDRA と連携して 2015 年半ばまでに将来の廃棄物の発生、パッケージ化、Cigéo への輸送のスケジュール作成、及び処分の可逆性を考慮に入れて、整合性のある方法で高レベル放射性廃棄物及び長寿命中レベル放射性廃棄物パッケージの貯蔵の必要性を分析する。

2013～2015 年の期間の輸送について、Cigéo 処分施設の地上施設の適合性を確保するために、廃棄物発生者は 2015 年半ばまでに、将来の輸送キャスクの製造に関する指針研究を実施する。

マルクールのサイトで、CEA は 2015 年半ばまでに以下のことを立証する。

- ガラス固化廃棄物の回収のためのシナリオに関して ANDRA が作成した日程表を併用して、これらの廃棄物の貯蔵から Cigéo プロジェクトへの輸送までの調査
- マルクールのサイト内とその近辺で行われる、Cigéo 処分プロジェクトへの廃棄物の輸送を可能にするための調整のフィージビリティ調査

廃棄物の処理

処置及び処理のプロセスに関して、今後数年間の重要な問題は、以下のようなものである。

- 除染。液体の場合は、規制の変更と並行して、反応性元素及び有害化学元素の量を低減すること。固体の場合は、発生した廃棄物の量を削減すること
- 技術的廃棄物（ラテックスまたはネオプレンの手袋、その他のポリマーなど）または廃液（有機溶剤、界面活性剤溶液など）を含めて、有機物質を含有する廃棄物の処理方法を開発すること
- コストと実施という観点から見た利点を維持しながらセメント固化、圧縮、またはガラス固化による処理が可能な廃棄物の領域の拡大、液体排出物の処理のためのセメント調合の研究、廃棄物のタイプに応じた専用セメント調合の開発、安全な状態での廃棄物発生の基準に適合するプロセスの開発、体積増加及び閉じ込めの質など

長寿命中レベル放射性廃棄物パッケージの長期的挙動に関する研究は、以下に示す 3 つの主要テーマに焦点を置いて実施される。

- アスファルト固化スラッジのパッケージの挙動
- 金属材料の腐食によるガス発生と放射性ガスの発生
- （アスファルト固化スラッジを除く）有機材料及びセメント材料の放射線分解の研究

放射性または高アルファ放出体を問わず、有機物質を含有する技術廃棄物という特殊な場合に関して、

- AREVA 社は、2014 年 12 月 31 日までに、高アルファ放出体の廃棄物及び関連廃棄物パッケージの熱処理プロセスの開発に関する研究を提出し、選択したプロセスの実施等のフィージビリティに関する結論を引き出す。AREVA 社は、2014 年 12 月 31 日までに採用したプロセスの開発に関する委託スケジュールを送付し、環境法典の第 542-1-3 条により定められる 2030 年という期限を遵守できる開発を達成するための主な中間目標を証明する。
- CEA は、2014 年 12 月 31 日までに、廃棄物中に存在する有機物質、または生産すべき、もしくは生産中のアルファ廃棄物パッケージの内部で発生する可能性がある錯化剤のインベントリを提出する。CEA は、脱ガスの測定作業の結果及びモデリングの結果との比較を同じ期限で提出する。CEA は、廃棄物パッケージのガス放出速度の予測を補完し、コンクリート容器からの間隙水の放射線分解から発生する水素の予測値を追加する。

最後に、2015 年以前に発生し、2030 年以降に処理が予定されている長寿命中レベル放射性廃棄物、または研究中の処分施設への入場許可に潜在的に適合しない条件に従って処理される長寿命中レベル放射性廃棄物に関して、AREVA 社、CEA 及び EDF は、これらの長寿命中レベル放射性廃棄物の廃棄物特性評価の状況及び検討された処分経路に合致する新規廃棄物パッケージのための統合設計オプションを示す研究を提出する。事業者は、2014 年 12 月 31 日までに、環境法典の第 L.542-1-3 条により定められる 2030 年という目標を達成するために採用する戦略を伝達しなければならない。

可逆性のある地層処分

公開討論と設置許可申請

ANDRA は、2013 年に Cigéo 産業プロジェクトの第 1 区画に重点を置いた原案を提示する。これには、とくに多数のパイロットセルとシール実証実験が含まれる。プロジェクトの柔軟性（地下坑道の掘削は必要に応じて行われる）によって、フランスの原子力政策の変更に適応することが可能になる。これらの原案研究は、2013 年に ASN と CVNE から勧告を受けることになっている。ANDRA は、2015 年 9 月の設置許可申請書類の提出を目指して、2013 年 10 月に予備設計研究を開始することを計画した。

Cigéo の設置許可申請には、とくに予備安全報告書（RPrS）が含まれており、この報告書で ANDRA は、処分作業の第 1 段階の一部として実施されるすべての作業の安全性を詳細に実証し、正当性を説明する。設置許可申請は設置許認可デクレによって認可される。さらに、RPrs には、設置許認可デクレに必要とされる範囲に含まれるすべての作業の安全性を評価するために必要なすべての要素を記載する必要がある。最後に、補助ファイル（RPrS 及び閉鎖後安全に関する専用ファイル）には、閉鎖後の処分場のすべての構成要素のアーキテクチャ、フィージビリティ、性能に関する要素も盛り込まなければならない。とくに、補助ファイルには、閉鎖後段階（シール）への移行段階に対して少なくとも 1 つの技術的解決策の実現可能性を評価するための証拠を含める必要がある。

ANDRA は、許可申請の廃棄物パッケージ受入れの予備仕様書を統合する。ANDRA は、処分場での受入れのために不可欠な安全基準との適合の実証が現段階で得られていない発生済み廃棄物パッケージを、関連する詳細な論拠とともに記載する。ANDRA は、処分状態での現象学的挙動の管理または計画された処分設計との適合性に関して問題を生じる廃棄物パッケージと未処理廃棄物、及び代替処理または廃棄物処理方策に関する研究の対象となり得る廃棄物パッケージと未処理廃棄物を特定し、これらの問題について詳細に説明する。

環境法典の第 L.542-12 条に従って、ANDRA は、国に Cigéo プロジェクトのコストについて詳述したファイルを提出する。廃棄物発生者の所見と原子力安全機関の意見を得た後に、エネルギー大臣はコスト推定値を評価し、公開する。

公開討論で、ANDRA は可逆性に関して計画している措置を提示する。これは一方では、

廃棄物パッケージの可能な回収を容易にし、開発時の地下アーキテクチャの柔軟性を強化するために Cigéo の設計で実施される準備と技術的機能に関連し、他方では処分施設の統治に関連する。これには、廃棄物及び処分管理に関するオプションならびに可逆性の条件を定期的に見直すための許可交付後の利害関係者との定期会合が含まれる。そこで可逆性に関する条件を定める法律を考慮して、ANDRA が 2015 年半ばに提案書を作成する前に、構造物と統治体制の実施について議論する。

研究開発

Cigéo プロジェクトの場合、2015 年までの研究開発の目標は以下のようなものである。

- 設置許可申請の裏付けとして、安全性に関するものを含めて評価を完了するための科学技術的要素を提供する。地下施設のシール材の建設と性能のための技術には特別な注意を払う。
- 処分施設の建設・操業のために実施すべき革新的な建設技術、ならびにモニタリングと監視の手段を開発する。
- 地下研究所で実施される実験を補完するものとして、Cigéo プロジェクトの建設のために第 1 区画に組み込まれるシール実証試験を準備する。
- Cigéo の将来の区画の開発を準備する。

使用済燃料の直接処分に関する研究が実施される。ANDRA は、2005 年に行ったフィージビリティ評価を、その後の知識の更新を考慮して、2015 年までに更新することを目指す。これらの知識とは、オーバーパック概念と貯蔵セル、熱的予備設計、アーキテクチャと体積処分区域、処分施設の熱水理学的影響と水理学的挙動、臨界、及び放射線学的影響評価である。特定の力学的プロセスを使用しない燃料集合体の直接処分オプションに加えて、その他の処分オプションを検討し比較する。

より一般的に言うと、廃棄物、その処理、検査及び処分施設への定置に関するさらなる研究開発は、操業が進むにつれて最適化を提案することによって Cigéo の安全性と技術的・経済的な最適化に貢献するとともに、他の考え得る選択肢の可能性を開くことによって可逆性にも寄与する。

補完的方法で技術的分野（地球科学、材料、計装、シミュレーションなど）に取り組み、人文科学及び社会科学の面での開発を継続し、とくに処分施設の統治に関する知見を取得する。ANDRA と CNRS は、利害関係者と連携してこれらの研究を推進する。

## 2.4 スイス

スイスの処分事業の現状概要、処分システムの概要、地層処分場の研究開発実証（RD&D）に関する国の方針、研究開発実証プログラムの種類と予算、研究開発実証計画に対するレビュー、大学と研究機関によって行われている研究開発実証の実施状況について調査・整理した。以下はスイスの放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）のからの情報をもとに取りまとめたものである。

### 2.4.1 処分事業の現状概要

スイスでは、放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物、アルファ廃棄物、低中レベル放射性廃棄物に分類され、全ての放射性廃棄物を地層処分する方針である。サイト選定手続きを主導するのは連邦エネルギー庁（BFE）であり、処分の実施主体は放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）である。

日本の内閣に相当する連邦評議会は特別計画「地層処分場」を 2008 年 4 月に承認し、2008 年 10 月に 3 段階から成るサイト選定プロセスが実施されている。

特別計画に基づきサイト選定第 1 段階では、地層処分場の地下施設が建設される可能性がある地質学的候補エリアが地質学的観点から選定される。NAGRA は 2008 年 10 月に高レベル放射性廃棄物用処分場については 3 つ、低中レベル放射性廃棄物用処分場については 6 つの地質学的候補エリアを提案した。規制機関による審査や州、自治体等の意見聴取を経て、2011 年 11 月に連邦評議会が NAGRA の提案を承認したことで、第 1 段階が終了した。

第 2 段階に入った後の 2012 年 1 月には NAGRA が 20 カ所の地層処分場の地上施設の設置区域案を公表した。設置区域は、安全性及び技術面からの現実性、土地利用に関する適合性及び環境との適合性、地域との調和を考慮して提案された。NAGRA の提案に対しては、BFE が主導で設置し、自治体の代表やステークホルダー、住民等が参加する「地域会議」が独自の提案をすることが可能である。NAGRA は地質学的候補エリアを取り囲む形で設定される計画範囲ごとに、地域会議の提案も踏まえ、地上施設の設置区域を 1 カ所へと絞り込むこととなっている。2013 年 12 月末時点で、NAGRA は 6 つの計画範囲のうち 4 つについて絞り込みを完了している。

### 2.4.2 処分システムの概要

スイスでは、高レベル放射性廃棄物と低中レベル放射性廃棄物のための 2 カ所の処分場の建設が想定されているが、全ての放射性廃棄物を対象とした処分場を 1 カ所に建設することも可能であるとしている。なお、特別計画「地層処分場」では、アルファ廃棄物を、高レベル放射性廃棄物処分場または低中レベル放射性廃棄物処分場のどちらか 1 カ所に割り当てられるか、もしくは両方の処分場に分割して処分することが可能であるとしている。他方、NAGRA が 2008 年に地質学的候補エリアを提案した際は、アルファ廃棄物を高レベ

ル放射性廃棄物処分場に割り当てている。

処分概念としては「監視付き長期地層処分」が提案されており、この概念に基づく処分施設は、主処分施設、パイロット施設、試験施設で構成される（以下図 2.4-1 及び図 2.4-2 を参照）。原子力法令では「監視付き長期地層処分」の概念が取り入れられており、処分場の完全な閉鎖が実施される以前に、また多額の費用をかけずに、廃棄物の回収を可能とすることが規定さている。

高レベル放射性廃棄物処分場についてはオパリナス・クレイを母岩とする地層の存在する、深さ 400～900m で建設することが検討されている。低中レベル放射性廃棄物処分場については、深さ 200～800m での建設が検討されている。

高レベル放射性廃棄物処分場では、ガラス固化体、使用済燃料、長寿命中レベル放射性廃棄物が定置される。高レベル放射性廃棄物処分場に割り当てられる低中レベル放射性廃棄物とアルファ廃棄物は長寿命中レベル放射性廃棄物と分類される。ガラス固化体、使用済燃料収納キャニスタについては、坑道内で、ベントナイトブロック製の台座の上に横置きに定置することとしている。また耐久性の高い処分容器の使用やベントナイトによる処分坑道の埋め戻し等、安全バリアの設計を工夫することにより、ガラス固化体や使用済燃料の回収を容易にするとしている。長寿命中レベル放射性廃棄物は、取り扱いの容易になる適切な処分容器にパッケージングされ（堅牢なコンテナ）、これを処分坑道に定置し、空洞部の埋め戻しには、簡単に取り除くことのできる特別なセメント・モルタルを使用することで、処分坑道からの処分容器の回収を可能にするとしている。

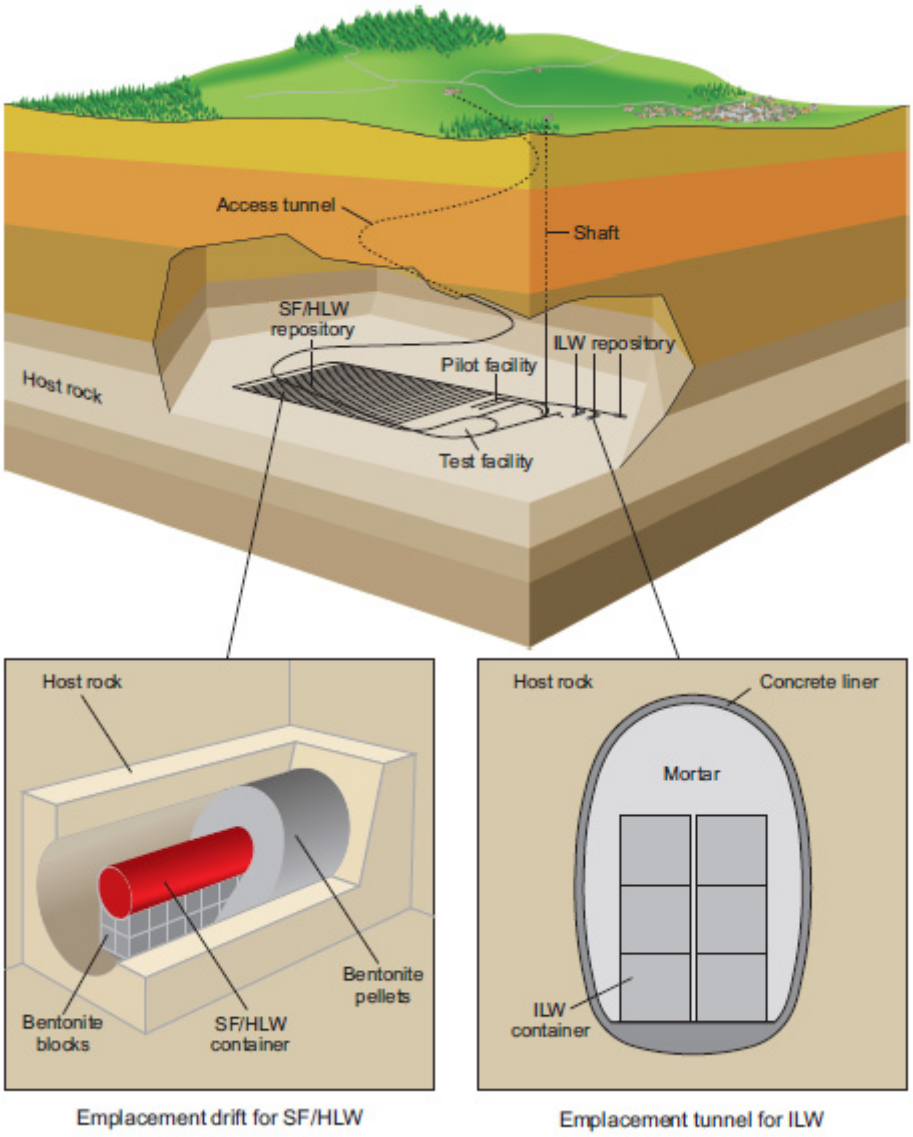



図 2.4-1　高レベル放射性廃棄物（使用済燃料を含む）及び長寿命中レベル放射性廃棄物の処分場概念

低中レベル放射性廃棄物についても、多額の費用をかけずに廃棄物を回収できるよう配慮がなされている。適切な処分容器（重いコンテナ）にパッケージングした上で、処分場の処分空洞に定置される。空洞部の埋め戻しには、すぐに取り除くことができる特別なモルタルを使用する。（以下図 2.4-2 を参照）

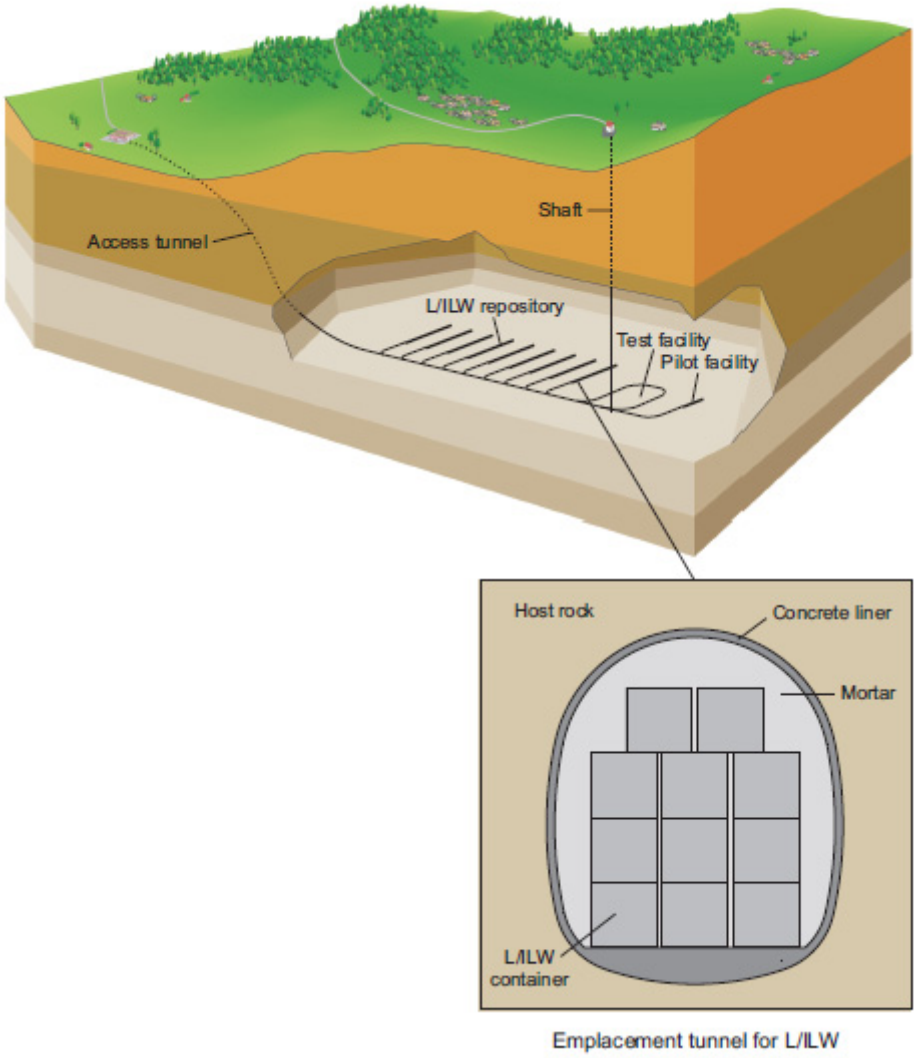



図 2.4-2　低中レベル放射性廃棄物の処分場概念

2.4.3 地層処分場の研究開発実証（RD&D）に関する国の方針

2.4.3.1 規制の枠組み

スイスにおける放射性廃棄物の地層処分に関する国の研究開発実証プログラムの政策は、法的な枠組みに反映されている。2003 年 3 月の原子力法にも、2004 年 12 月の原子力令にも、研究開発活動を実施または段取りする責任のある者と、そのために財源または人的資源の貢献をすべき者についての一般的な規定が含められている。該当部分を以下に引用する。

- 原子力法第 31 条。放射性廃棄物の管理と処分の責任。原子力施設を操業または操業停止する者は全て、施設から発生する全ての放射性廃棄物を、みずからの費用負担で安全に管理する責任を負う。この放射性廃棄物を管理し、処分する責任には、研

究活動や地質学的な調査など、必要とされる予備的な活動と、地層処分場を適時に準備する活動を遂行する責任を含むものとする。

- 原子力法第 83 条。連邦政府が徴収する料金と監督料金。連邦の監督官庁は、許認可の申請者と、原子力施設、放射性物質、放射性廃棄物の所有者から料金を徴収するものとし、特に次に示す費用の払い戻しを請求するものとする：
  [……]
  d. 特定の原子力施設を監督する責務の範囲で連邦政府が実施するか、連邦政府のために実施される研究開発活動。
- 原子力法第 86 条。研究活動と専門スタッフの訓練の促進。連邦政府は原子力の平和利用の分野での応用研究、とくに原子力施設の安全性と放射性廃棄物の管理の分野での応用研究を促進することができる。
- 原子力令第 77 条。「研究、教育、訓練の助成」[1]。監督官庁は原子力施設と原子力廃棄物の管理の安全性とセキュリティの分野における応用研究、ならびにスタッフの教育活動と訓練の分野でのプロジェクトを承認された貸付金の枠内において支援する [2]。この助成は、財政援助か、スイスの連邦原子力検査局（ENSI）の職員の協力の形で実行される。

原子力法の第 31 条と 83 条では、費用の大半は、汚染者負担の原則に従って、廃棄物発生者が負担することを定めている。原子力発電所の操業者は、原子力発電所の操業と、その後の廃止措置及び解体によって発生した使用済燃料と放射性廃棄物を管理する責任を負う。連邦政府は、原子力発電によって発生したものではない廃棄物、すなわち医療、産業、研究分野で発生した廃棄物を管理する責任を負う。1972 年には、原子力発電所の操業者と連邦政府（すなわち廃棄物発生者）によって NAGRA が設立されており、使用済燃料の処分の任務を委ねられた。基礎的な活動を含む NAGRA の（すなわち管理の実施主体の）調査活動の資金は、廃棄物発生者（NAGRA の設立メンバー）がその作業の進展に応じて負担している。原子力発電所の閉鎖の後に発生する廃止措置費用と廃棄物管理費用は、廃棄物発生者が廃止措置基金と廃棄物管理基金に払い込んでいる資金によって賄われる。さらに 2006 年 11 月 22 日付けの命令に基づいて、スイスの連邦エネルギー庁（BFE）は、廃棄物発生者のサイトの選定プロセスと廃棄物管理プログラムに関連して実施される作業の遂行、レビュー、監視のための料金を徴収することができる。

2.4.3.2 連邦政府の当局

連邦レベルでは、放射性廃棄物の地層処分の主要な権限と責任は、BFE、ENSI 及びスイス国土地理院（swisstopo）にある。これらの当局は様々な省庁、委員会、作業グループ、組織から支援を受けている。

ENSI はスイスの原子力施設の原子力安全とセキュリティの責任を負う国の規制組織で

ある。ENSI は NAGRA の処分場の立地調査と、その後の処分場の建設と操業を監督している。地層処分の研究開発実証に関しては、ENSI は次のように行動する。

- 規制で定められた安全研究を促進し、調整する。
- 地層処分の安全性に関連した要件と評価基準を作成する。
- 処分場のレイアウトの安全性に関連した要件を作成する。
- 関連した地球科学的な調査と研究プログラムを評価する。
- 地質学的なプロセスのシナリオ分析の調査を実施する。特に地球化学的なプロセス、地圏と人工バリアの長期的な挙動､処分場から地圏と生物圏への放射性核種の移行に焦点を合わせる。
- 安全計算のために地球科学的な入力データを検討する。

スイス国土地理院（swisstopo）は、地質学に関する情報の監督官庁であり、基本的な地質学的、地球物理学的、地質工学的、測地学的、地形的な情報を管理している。swisstopo はモン・テリ岩盤研究所を運営しており、この研究所では粘土岩を母岩とするスイスの処分システムに直接に関連したプロセスを理解するための実験を実施している。こうした実験には、水理学的な試験、長期的な測地学的なモニタリング、自己シール能力の試験、不均質性のマッピンク、岩盤力学の特性調査などが含まれる。

もっとも重要な支援活動を提供しているのはスイスの放射性廃棄物処分作業グループである AGNEB である。この組織は 1978 年に連邦評議会が設置したもので、放射性廃棄物の管理に関連してスイスで実施される活動を監督し、連邦評議会のために専門的な見解を表明し、連邦政府レベルで許認可プロセスを見守り、国際的な廃棄物管理の問題を担当している。AGNEB は BFE と ENSI の研究プロジェクトを見守っているが、これらのプロジェクトが放射性廃棄物研究プログラムの一部を構成する。

原子力安全委員会（KNS）は、議会外の常設の委員会であり、原子力施設の安全性に関して、連邦評議会、環境・交通・エネルギー・通信省（UVEK)、ENSI に対して助言を提供している。KNS は規制担当者や処分の遂行者に対して、特定の問題について調査を実行するように勧告することができる。

### 2.4.4 研究開発実証プログラムの種類と予算

#### 2.4.4.1 国の研究開発実証プログラム

国家的なレベルでは、エネルギー分野の全ての研究開発実証プログラムは、研究活動を支援するその他の組織、すなわち ETH（連邦工学大学）評議会、国の教育・研究・革新事務局（SERI)、技術革新委員会（KTI)、スイス国立科学財団（SNF)、大学、エネルギー分野のその他の推進機関などの組織と密接に協力して、BFE が調整している。全ての公的な当局は、連邦政府が定めた概念に従っており、全体の支出額は年間 2 億スイスフラン程度（約 218 億円）（1 スイスフラン＝109 円で換算、以下同じ）に達する。

大多数のプロジェクトは、公的な研究機関が実施している。国家的なレベルでは、こうした研究機関としてはチューリッヒの連邦技術研究所（ETHZ)、ローザンヌの連邦技術研究所（EPFL)、パウル・シェラー研究所（PSI)、連邦物質科学技術研究所（EMPA）などがある。州レベルでは様々な大学が研究活動に関与している。一部の公共当局はさらに、産業界、コンサルタント、民間組織と連絡して、公共の研究組織と協力させている。資金調達の目的では、BFE が従っている補助金原則では、公共の資金は民間の資金を補足するためだけに、そしてそのために必要な範囲に限って支出することを定めている。

放射性廃棄物の地層処分は、エネルギーの研究開発実証プログラムという大規模な計画の一部である。関連する全ての研究プロジェクトは、放射性廃棄物研究プログラム（RPRW）のもとにまとめられている。

(1) 放射性廃棄物の研究プログラム

スイスの国家レベルの放射性廃棄物研究プログラム（RPRW）は、2002 年から 2004 年にかけて実施された調査結果に基づいて開始されたものである。放射性廃棄物処分概念専門家グループ（EKRA）は報告書『スイスの放射性廃棄物管理戦略への寄与』を発表し（2002 年 10 月)、そこで初めて社会的な側面を重視した独立の研究を実施する必要があることを指摘した。この報告書に基づき、BFE は放射性廃棄物の研究開発の現状と展望に関する調査を委託する契約を締結した。2004 年に発表された最終報告書において、スイスの廃棄物管理の分野での自然科学と工学の側面の能力は、非常に高いことが指摘された。しかし廃棄物管理の社会的な側面では、関連した研究活動にある程度の欠落があるように思われた。このため、NAGRA が実施し、主導している研究活動の他にも、独立した現状調査を実行することが適切とみなされた。さらに具体的には、PRPW の目的として次の諸点が特定された。

- BFE と ENSI に対して、その許認可と監督作業の任務において直接の支援を提供すること。
- BFE と ENSI が決定するための基盤を強化し、これらの組織の意思決定能力を向上させること。
- 原子力発電所の運転者から独立した研究活動を促進すること。
- スイスにおける放射性廃棄物の管理に関する知識を保持し、増大させるための支援を行うこと。

2006 年から 2007 年にかけて、BFE、原子力施設安全本部（HSK）（2009 年に ENSI が任務を引き継いだ)、放射性廃棄物管理委員会（KNE）〔2011 年に解体され、2012 年に地層処分場専門家グループ（EGT）が引き継いだ〕、原子力施設安全委員会（KSA）（2008 年 1 月に解体され、KNS が引き継いだ)、ならびにチューリッヒ応用科学大学のそれぞれの組織から派遣された 1 名ずつの代表で構成された作業グループが、RPRW の枠組みを決定し

た。2008 年には AGNEB が 2012 年から 2013 年にかけて実施されるプロジェクトの予定を提案し、この組織の独立を決定し、最終的にその研究プログラムを承認した。RPRW の一部として実行されたプロジェクトは、科学的に健全であると同時に、応用を目指したものであることが求められた。研究テーマは開かれたものであり、学際的な形で対処することが定められた。

2012 年には、RPRW の事務局は AGNEB、放射性廃棄物管理諮問委員会、BFE、ENSI、州委員会とサイト地域所在州技術調整グループ（どちらの組織も特別計画プロセスに参加する組織である）、RPRW 実施グループ、様々な大学に対して、2013 年から 2016 年に実施すべき研究要件を確定するように求めた。この要請の結果として、2008 年から 2012 年の期間に決定された 5 項目の中心的なテーマが、次の時期の研究のニーズを基本的に規定するものとされた。

この研究開発活動の社会科学的なプロジェクトは BFE が管理し、安全規制に関連したプロジェクト、すなわち自然科学と工学に関連したプロジェクトは ENSI が管理している。これらの組織はプロジェクトを開始し、作業のために必要な契約を締結し、効率的な資金調達が行われるように配慮している。BFE も ENSI も AGNEB の指揮下にある組織である。RPRW の事務局の運営を担当しているのは BFE である。大多数のプロジェクトは、連邦当局、ETHZ、EPFL の代表、ならびにその他の関連分野の専門家たちから学術面での支援を受けている。ENSI が採用している戦略では、ENSI が管理する全てのプロジェクトは、ENSI の専門家からも詳細に追跡されるようにしており、こうしたプロジェクトで得られたノウハウが、直接に ENSI のものとなるようにしている。

AGNEB は RPRW によるプロジェクトの実施を監督し調整している。ある研究プロジェクトの最終報告書が発表されると、AGNEB はその内容を検討し、結論と勧告についてプロジェクト・チームのメンバーと議論する。複数のプロジェクトがすでに完了しており、最終報告書の内容が検討されている。

AGNEB が 2008 年から 2012 年の期間に設立した RPRW 実施グループは、2006 年から 2007 年に決定された計画の枠組みを確定する責任を負う 5 名のメンバーで構成されていた。2013 年から 2016 年の期間における計画の実施グループのメンバーは 8 名で、BFE、ENSI、KNS、PSI 及び swisstopo の代表者である。実行グループの任務は次のとおりである。

- RPRW 報告書の内容を検討し、報告書を定期的に更新する。
- 計画の現状とプロジェクトの間の調整についての情報を伝達する。
- 将来のプロジェクトの実行の準備を行い、資金調達について明確にする。
- 2013 年から 2016 年の期間の RPRW 報告書を準備する。

**予算**

原子力令の規定に従って（前記参照）、ここに示した費用は BFE による「財政支援の形

式」で提供される。こうした費用には、外部の専門家に支払うコンサルタント料金、訓練コースのための料金、合同国際研究プログラムへの参加料金などが含まれる。BFE や ENSI のスタッフが提供した援助には費用は計上されない（あるいは徴収されない）。

(2) モン・テリ・プロジェクト

モン・テリ・プロジェクトは、モン・テリ岩盤研究所で実施されている国際的な研究プロジェクトである。この地下研究施設はスイスの北西部にあり（図 2.4-3 参照）、処分が検討されている母岩層の一つであるオパリナス粘土の内部にある。このプロジェクトの主要な目的は次のとおりである。

- 粘土層における地質学的、水文地質学的、地球化学的、地質工学的な調査のための方法論を試験し、改良する。
- オパリナス粘土とその挙動の特性調査を実行し、他の鉱物との相互作用を研究する。
- 実証システムによって、地下深くの地層処分場の実現可能性を実証する。

モン・テリ・プロジェクトは 1996 年に開始された。swisstopo がモン・テリ岩盤研究所を運営し、維持しており、モン・テリ・プロジェクトを管理している。この研究所を広範に活用して、放射性廃棄物の地層処分場に関連した研究開発活動が推進されている。現在、このプロジェクトには 15 件の国際的なプロジェクトのパートナーが参加しているが、これらのパートナーは全て、それぞれの国で放射性廃棄物の管理の責任を負っている組織である。合計で約 50 社の民間企業と 50 の研究所が、研究活動に積極的に貢献しながら、プロジェクト・パートナーを支援している。

モン・テリ・プロジェクトは毎年 7 月に始まる 1 年間のプロジェクトとして組織されている。たとえば第 18 段階のプロジェクトは 2012 年 7 月に始まり、2013 年 6 月に終了した。それぞれの毎年のプロジェクトは、ジュラ州から認可を受ける必要があり、これらのプロジェクトは州の鉱山許認可権の発給を受けて実施されている。毎年の研究プログラムは一連の実験で構成されているが、それぞれの実験を実施するには、長年の期間が必要である。

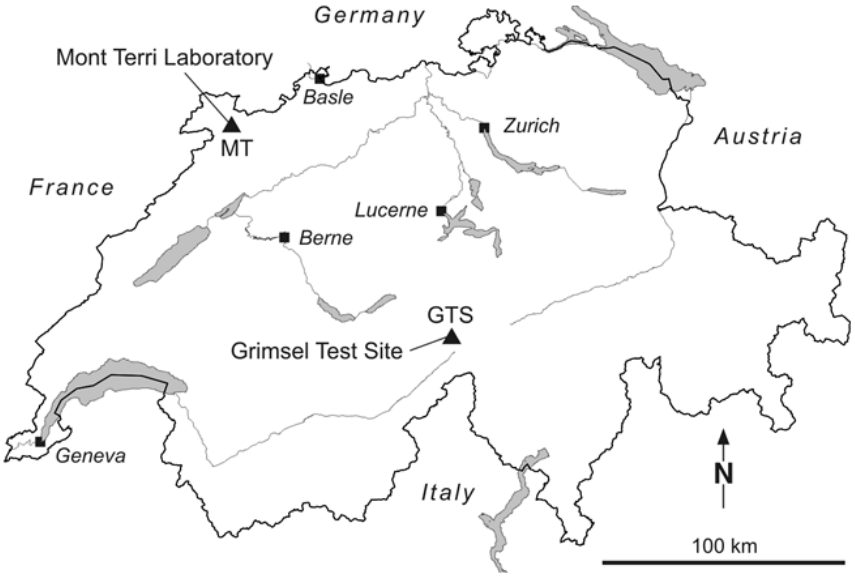



図 2.4-3　スイスの 2 か所の研究所（モン・テリ岩盤研究所とグリムゼル試験サイト）の場所

**予算**

モン・テリ岩盤研究所の運営予算は、年間約 50 万スイスフラン（約 5,500 万円）（1 スイスフラン＝109 円で換算、以下同じ）である。研究所を運営しているのは swisstopo であり、運営の資金を提供しているのは BFE である。

実際の研究プログラムの資金は、プロジェクト・パートナーが負担する。計画の費用は、実験費用と一般費用に分類される。実験費用にはたとえば、計画策定作業、計装の作成、地下研究所や外部の研究所での実際の試験の実施、掘削と設置作業、データの取得、長期的なモニタリング、データ分析と解釈などの費用が含まれる（こうした作業を実際に実施するのは、大学、研究所、専門組織などであることが多い）。

一般費用は現場の管理と保守のスタッフの費用、一部の科学的及び技術的な研究作業、研究プログラムの実施などの費用である。

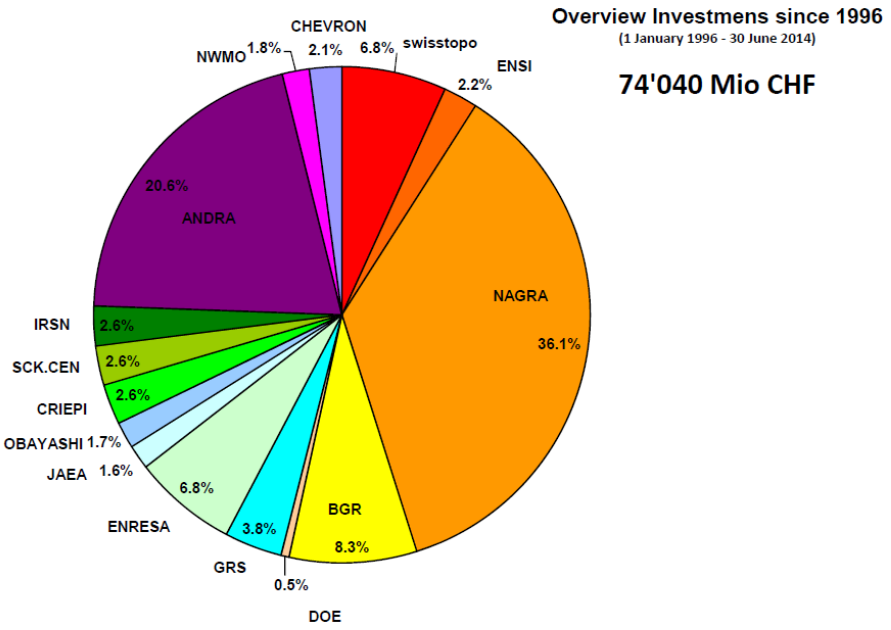



図 2.4-4　1996 年から 2014 年におけるモン･テリ岩盤研究所の投資総額におけるプロジェクト・パートナーの出資比率の概要

プロジェクト・パートナー：ANDRA（フランス、放射性廃棄物管理機関）、BGR（ドイツ、連邦地球科学天然資源庁）、Chevron 社（米国、Chevron Energy Technology ETC 社）、CRIEPI（日本、電力中央研究所）、DOE（米国、エネルギー省、原子力部）、ENRSA（スペイン、放射性廃棄物管理公社）、ENSI（スイス、連邦原子力安全検査局）、GRS（ドイツ、原子力施設・原子炉安全協会）、IRSN（フランス、放射線防護･安全研究所）、JAEA（日本、日本原子力研究開発機構）、NAGRA（スイス、スイス放射性廃棄物管理共同組合）、NWMO（カナダ、核燃料廃棄物管理機関）、Obayashi（日本、大林組）、SCK/CEN（ベルギー、原子力研究センター）、swisstopo（スイス、連邦地形測量庁）

1996 年から 2014 年までの年間の一般費用と、実験費用へのバートナーの寄与についての詳細な情報は、インターネットのサイト（http://www.mont-terri.ch）で入手できる。第 19 段階（2014 年 6 月に終了）の最後までに行われた全体の調査活動の費用は約 7,400 万スイスフラン（約 80 億 6,600 万円）に達した。図 2.4-4 には、それぞれのパートナーがどの程度の費用を負担しているかを示した。年間予算は 100 万から 800 万スイスフランであり、これは研究プログラムの規模と、岩盤研究所を拡張するために新たな坑道を掘削する必要があるかどうかによって決定される。研究と運営のための年間予算は、平均して 300 万スイスフラン程度である。

第 19 段階の終了までの時点で、スイスの研究パートナーは実験費用に次のような貢献を行うことになろう。

- NAGRA、約 2,300 万スイスフラン（約 25 億 700 万円）（NAGRA はプロジェクトの開始の時点から参加している）。
- ENSI、約 150 万スイスフランス（約 1 億 6,400 万円）（ENSI は 2003 年以降から参

加している)。

- swisstopo、約 160 万スイスフラン（約 1 億 7,440 万円）（swisstopo はプロジェクトの開始の時点から参加している)。

実験ごとのスイスの資金提供の状況は、第 18 段階の実験についての概要を示した表（表 1.2）に見られる通りである。

2.4.4.2 実施主体の研究開発実証プログラム

NAGRA は 1972 年に、スイス連邦政府とスイスの原子力発電所の運転者が設立した組織である（連邦政府は医療、産業、研究分野で発生した放射性廃棄物の責任を負う)。NAGRA はスイスで発生する全ての放射性廃棄物の長期的で安全な管理のための技術的及び科学的な基盤を確立する責任を負っている。NAGRA は処分場サイトを選定する特別計画のプロセスの一環として、地質学的候補エリアとサイトを選定し、段階的な手順に従ってこれらの地質学的候補エリアとサイトの範囲を絞り込み、処分場に必要とされる概要承認の申請を提出する任務を負っている。NAGRA はこうした責任を遂行するため、1970 年代半ばから、広範な研究開発計画を実施してきている。こうした研究開発作業は、パウル・シェラー研究所や多数の大学及び研究所との密接な協力のもとで行われている。NAGRA はさらにスイスのその他の研究所や外国のパートナー組織、国際的な組織（たとえば OECD/NEA)、ならびに世界の放射性廃棄物の地層処分の分野のその他の研究所や科学者たちとも協力している。

(1) スイスの処分計画

2008 年に連邦評議会が放射性廃棄物を地層処分する特別計画が承認された時点で、NAGRA による地球科学分野の広範な研究開発実証プログラムの実施開始から 30 年が経過していた。この特別計画では、低中レベル放射性廃棄物（L/ILW）及び高レベル放射性廃棄物（HLW 中レベル放射性廃棄物を含む）の両方の種類の廃棄物の処分に適したサイトを選定するために従うべき枠組みを定めるものである。この特別計画の第 1 段階では、地質学的に適切なサイト地域の選定が行われた。現在はこの計画の第 2 段階が進められており、この段階では L/ILW 処分場と HLW 処分場のために、少なくとも 2 か所のサイトを選択する必要がある。その後の第 3 段階では、それぞれの種類に 1 か所のサイトを選択する必要があり、このサイトが概要承認の基礎となる。

この特別計画の要件は具体的であり、それまで遂行されてきた計画の成果もあって、概要承認の申請にいたるまでの様々な段階における研究開発実証活動と必要とされる主要な報告書がかなり明確な形で定められている。NAGRA は 2009 年 11 月に、NAGRA の技術報告書 NTB 09-06『スイスにおける放射性廃棄物の処分のための NAGRA の研究開発実証プログラム』と題する包括的な概要報告書を提出した。

NAGRA の研究開発実証プログラムの技術的及び科学的な内容とそのスケジュールは、法的、規制的、政策的な要件、廃棄物発生者の側での要件、当局の勧告、公衆の期待、技術及び安全性の要件に従って規定されている。サイト選定プロセスの過程で不確実性が発生することになるが、こうした不確実性は、その後の段階と、地層処分場の許認可手続きの間に実施される補足的な調査によって低減される。

**予算**

NAGRA は、NAGRA に加盟しているメンバーから資金の提供を受けている。以下に NAGRA の研究開発実証プログラムの支出のための資金の調達状況を示したが、これらの資金は原子力発電所の運転者、中間貯蔵施設であるヴュレンリンゲン放射性廃棄物集中中間貯蔵施設（ZZL）、スイス連邦政府が提供している。これらの資金の提供条件は、「廃止措置・廃棄物管理基金令」と、これらの基金の年次報告書で確認することができる。

NAGRA の 2012 年の財務諸表によると、年間の研究開発実証経費について以下の通りであった。

- 地球科学的な調査：地層処分の候補となるサイト地域を確認するための地質学的な調査では、高レベル放射性廃棄物（HLW）用地層処分場のためのスイス北部の調査地域での地質学的な調査と、低中レベル放射性廃棄物（L/ILW）廃棄物用処分場のための地質学的な情報の処理が行われた。L/ILW 計画の予算は 710 万スイスフラン、HLW 計画の予算は 900 万スイスフラン（9 億 8,100 万円）であった。
- 原子力技術と安全性：候補となるサイト地域の安全性に関する評価と、ニアフィールド及び様々な埋め戻し材のための研究所調査。L/ILW 計画の予算は 210 万スイスフラン、HLW 計画の予算は 420 万スイスフラン（約 4 億 5,800 万円）であった。
- 放射性物質：これには、放射性廃棄物のパッケージの処分可能性の評価活動と、放射性廃棄物についての記録及びインベントリ確認作業が含まれる。L/ILW 計画の予算は 210 万スイスフラン（約 2 億 2,900 万円）、HLW 計画の予算は 70 万スイスフラン（約 7,600 万円）であった。
- 施設計画設定：これには、HLW 処分場と I/ILW 処分場の地上施設と地下施設のための概念の開発費用が含まれる。L/ILW 計画の予算は 150 万スイスフラン（約 1 億 6,400 万円）、HLW 計画の予算は 160 万スイスフラン（約 1 億 7,400 万円）であった。
- 一般的な（特定のサイトに限定しない）調査：これには、安全解析で利用する方法論の開発、モデリング、モデルの検証のための作業、岩盤研究所での作業への参加（グリムゼル試験サイトとモン・テリ岩盤研究所）、ならびに欧州連合の研究プログラムへの参加の費用が含まれる。L/ILW 計画の予算は 480 万スイスフラン（約 5 億 2,300 万円）、HLW 計画の予算は 690 万スイスフラン（約 7 億 5,200 万円）であった。

2012 年の研究開発実証プログラムの費用の総額は、両方の廃棄物計画の合計で 4,000 万スイスフラン（43 億 6,000 万円）であった。ここに示した全ての金額は概算である。

2012 年までの累積の経費の額は次のとおりである。

- 地球科学的な調査：
  L/ILW 計画の経費は 1 億 8,000 万スイスフラン（196 億 2,000 万円）、HLW 計画の経費は 3 億 2,200 万スイスフラン（350 億 9,800 万円）。
- 原子力技術と安全性：
  L/ILW 計画の経費は 4400 万スイスフラン（47 億 9,600 万円）、HLW 計画の経費は 6,200 万スイスフラン（67 億 5,800 万円）。
- 放射性物質：
  L/ILW 計画の経費は 3,700 万スイスフラン（40 億 3,300 万円）、HLW 計画の経費は 2,400 万スイスフラン（26 億 1,600 万円）。
- 施設計画設定：
  L/ILW 計画の経費は 2,600 万スイスフラン（28 億 3,400 万円）、HLW 計画の経費は 2,100 万スイスフラン（22 億 8,900 万円）。
- 一般的な（サイトから独立した）調査：
  L/ILW 計画の経費は 9,400 万スイスフラン（102 億 4,600 万円）、HLW 計画の経費は 1 億 200 万スイスフラン（111 億 1,800 万円）。

両方の廃棄物計画の研究開発実証の経費は累積で総額 9 億 1,200 万スイスフラン（994 億 800 万円）に達する。この経費には、料金、補償金ならびに一般的な計画費用、すなわち計画の管理のための経費、費用研究のための経費、広報活動のための経費は含まれない。

(2) EU の枠組みでの計画への参加

NAGRA は現在、EU の第 7 次枠組み計画の 5 件のプロジェクトに参加している。欧州連合（EU）の枠組み計画は、欧州の内部での研究プロジェクトでの協力のための重要な手段となっている。欧州の産業と社会が直面している多くの課題は、一国だけで独自で解決できるようなものではなくなっている。第 6 次と第 7 次枠組み計画は特に、「欧州研究分野」を創設することを目的としている。この計画では、科学的及び技術的な能力を促進し、研究者の間での協力の向上を支援することで、欧州内部での競争と革新を促進することを目的としている。

**予算**

スイスとEUの間の協定に基づき、スイスの研究者たちは2004年から、EUの枠組み計画

に本格的に参加することができるようになっている。その代わりにスイスは全体の研究予算に直接資金の提供を行っている。さらにNAGRAは、モン・テリ岩盤研究所とグリムゼル試験サイトのためのプロジェクトに資金を提供している。

(3) グリムゼル試験サイト

グリムゼル試験サイト（GTS）は、スイス・アルプスにある結晶岩に建設された地下研究所であり、NAGRA が所有し、運営している。GTS の研究プログラムでは、地層処分場において放射性廃棄物を安全に処分するための概念の開発と試験に焦点を合わせている。GTS の独特な特徴として、調査坑道の一つに放射線管理ゾーン（IAEA のレベル B/C のゾーン）が設置されていることが挙げられるが、これによって現実的な条件のもとで、地圏における放射性のトレーサ物質の実験を実行することができる。この環境のもとで、研究所の小規模な実験の結果を現場条件において検証することができ、放射性物質の移行についてのモデルでの計算を直接に試験することができる。

GTS の運営は現在では第 6 段階に入っており（2003 年に開始された)、この段階では処分場の環境にできるだけ類似した水文地質学的な条件のもとで、大規模で長期的な実証実験を行うことに焦点を合わせている。さらに処分場の建設の実現可能性、その操業の側面、閉鎖、モニタリング、ならびに周囲の岩盤層に処分場の建設が及ぼす影響についても調査している。

GTS で実行されている現場実験は一般に、複数のプロジェクト・パートナーが参加した大規模なプロジェクトの一環として実行されている。これらのパートナーは、国内のその他の放射性廃棄物管理組織であることも、スイス国内や国外から参加した研究組織であることもある。現場実験と付随して、NAGRA やその他のプロジェクト・パートナーは他の場所で研究所調査やモデリング調査を実施していることが多い。一般に、一度に実施されるプロジェクトの数はかなり少ないが、物理的な環境、参加するパートナーの数、発生する費用などの観点からみると、大規模なプロジェクトであることが多い。

現在は、11 か国や欧州連合から 17 のパートナー組織と研究所が、様々なプロジェクトに参加している。複数のパートナーは GTS を利用して、固有の実験をしている。さらに GTS は関心をもつ当事者の間の協力、訓練に寄与しており、さらに重要なことに、相互作用のための基盤の役割を果たしている。

**予算**

第 6 段階（2004 – 2013）での GTS の操業に関する NAGRA の年間予算は約 90 万スイスフラン（約 9,800 万円）であり、GTS の研究プロジェクトに関する NAGRA の年間予算は約 200 万スイスフラン（約 2 億 1,800 万円）である。10 年間の合計は、GTS の操業については約 900 万スイスフラン（約 9 億 8,100 万円)、GTS の研究プロジェクトについては

約 2,000 万スイスフラン（約 21 億 8,100 万円）である。

2.4.4.3 規制当局の研究開発実証プログラム

規制に関する全ての安全研究の責任を負っている組織は ENSI である。こうした安全研究では、プラントの監視という現在進行中の問題と、全ての原子力施設で発生すると予測される問題に重点を置いている。ENSI は、科学と技術の最新の成果に基づいて行動することが重要である。このため ENSI は、その規制権限の枠組みにおいて、安全研究を支援し、調整している。この研究活動の成果は、指針や個々の決定及び資源に直接に影響する。さらに一般的なレベルでは、研究プロジェクトは ENSI と ENSI に属する専門家たちの訓練の目的に役立ち、これによってその能力を維持するために役立っている。また、ENSI の研究プログラムは、スイスが独力で実施することのできない国際的なプロジェクトにも貢献している。原子力安全に対しては国際的な専門知識の交換が非常に重要な役割を果たすために、この活動が奨励されている。ENSI の「規制による安全性の研究」計画は、7 つの主要な分野に分割されているが、そのうちで放射性廃棄物の地層処分に関係があるのは、「廃止措置及び処分」の分野だけである。

研究を推進する ENSI の役割の重要な部分として、国際協力が挙げられる。ENSI は国際的な組織や規制機関と協力することで、スイスが原子力安全の分野で最新の水準を維持できるようにしている。これらの新たな水準を ENSI の規制活動に取り込むことができる。地層処分のテーマについて、ENSI は次の計画に参加しているか、あるいはスイスを代表している。

- IAEA の「使用済燃料性能評価研究グループ」
- OECD/NEA の複数の委員会。たとえば放射性廃棄物管理委員会（RWMC）、セーフティケース統合グループ（IGSC）、「地質学的な情報をセーフティケースに統合するためのアプローチと方法」（IGSC/AMIGO）、「粘土媒体を通じた地下水の流動の測定と物理的な理解のための作業グループ」（Clay Club）などである。
- 国際的な条約。たとえば「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する合同条約」。
- 2 国間の組織。たとえば「原子力施設の安全性のためのスイスとドイツの委員会」など（処分に関する作業グループ）。
- 国際機関。たとえば「西欧原子力規制者会議」（WENRA）や「放射性廃棄物及び廃止措置に関するワーキング・グループ」（WGWD）などである。

表 2.4-1　2008 年度から 2016 年度までの放射性廃棄物の研究プログラムの主要な研究テーマ、プロジェクト、概略的なスケジュール

Xの記号が書かれている位置は、その年度の前半か後半かを示したものである。

| | **主要な研究テーマ/研究プロジェクト** | **概略的な期間（月）** | **2008** | **2009** | **2010** | **2011** | **2012** | **2013** | **2014** | **2015** | **2016** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 長期的な側面 | | | | | | | | | | |
| 1.1 | モニタリング段階、規制、資金調達及び組織 | 12 | | | | | XX | | | | |
| 1.2 | ノウハウと特徴的な概念の保存 | 30 [1)] | X | XX | XX | XX | XX | XX | XX | | |
| **2** | 特別計画のプロセス | | | | | | | | | | |
| 2.1 | 社会とのコミュニケーション | 18 | X | XX | | | | | | | |
| 2.2 | 参加に関する付随的な研究 | 18 | | | | | | XX | XX | XX | XX |
| **3** | 認知、世論の形成、受容性 | | | | | | | | | | |
| 3.1 | 放射性廃棄物についての価値判断と意見 | 12 – 18 | | | XX | XX | | | | | |
| **4** | 処分概念 | | | | | | | | | | |
| 4.1 | 廃棄物管理の方法の比較 | 30 | X | XX | XX | XX | X | X | | | |
| 4.2 | 環境保護 | 3 | | | | | X | X | | | |
| 4.3 | パイロット施設の設計とインベントリ | 24 | | | XX | XX | X | XX | | X | XX |
| 4.4 | モニタリングの概念と施設 | 30 | | | X | XX | XX | XX | | X | XX |
| 4.5 | 危機的な状況における処分場の閉鎖の準備 | 6 [2)] | | | | | | | | X | XX |
| 4.6 | 容易な回収可能性 | 4 [2)] | | | | | XX | | | | |
| 4.7 | 物質科学の問題 | 無制限 | | | XX | XX | XX | | | | |
| 4.8 | 長期的な安全基準 | 実施済み [3)] | | | | | | | | | |
| 4.9 | パラメータの不確実性の影 | 無制限 | | | | XX | XX | | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 響 | | | | | | | | | | |
| 4.10 | 処分場のレイアウト | 4 [2)] | | | | XX | XX | | | | |
| 4.11 | 処分場のレイアウト、2 | 4 [2)] | | | | | | | | X | XX |
| **5** | 倫理的／法的な次元 | | | | | | | | | | |
| 5.1 | 環境政策の問題 | 2 [2)] | | | | | X | X | | | |
| 5.2 | 保護の目的 | 2 [2)] | | | | | X | | XX | | |
| 5.3 | 社会的な変化と処分 | 2 [1)] | | | | | XX | | | | |

1）プロジェクトは OECD/RWMC/NEA の枠組みで、2011 年半ばから 2014 年後半まで続けられる。
2）人・月。
3）規制指針 ENSI-G03 を参照。

**予算**

ENSI は提供する役務のための料金を徴収する。ENSI が規制機関としての役割のもとで連邦政府に提供する役務（これには研究活動を含む）に対しては、BFE が費用を払い戻している。申請、専門家の見解、許認可に関連して ENSI が提供した役務は、照会した申請者に請求される。ENSI が委託した研究プロジェクトのための資金は、BFE が提供している。2012 年の財務諸表から、ENSI の徴収する料金が約 6,000 万スイスフラン（約 65 億 4,000 万円）に達し、研究資金が約 600 万スイスフラン（約 6 億 5,400 万円）に達していることが明らかである。しかしこの数字は、全ての原子力施設のための料金と資金を示したもので（新設する原子力発電所のための申請を含む）、放射性廃棄物の管理だけのものではない。

2.4.5 主要な研究開発実証プロジェクトの概要とその構成、及び課題項目

2.4.5.1 国家研究開発実証プログラムやプロジェクトの概要

(1) 放射性廃棄物研究プログラム（RPRW）

国家的な RPRW は、2008 年度から 2012 年度のための計画で開始されたが、この計画には 5 件の主要なテーマと 17 件の研究プロジェクトが含まれていた。2013 年度から 2016 年度までの計画には 12 件の研究プロジェクトが含まれており、以前の計画のテーマ 3「認知、世論の形成、受容性」は、テーマ 2「特別計画のプロセス」に統合された。表 1.1 にこれらの全てのテーマとプロジェクトを列挙し、それぞれの概略的なスケジュールと予定されている期間ならびに人・月（作業時間）のデータを示した。

プロジェクト 5.2 は、プロジェクト 4.2 とプロジェクト 4.8 の基礎として役立つものである。プロジェクト 2.1、プロジェクト 3.1、プロジェクト 5.3 は、同一の諮問委員会が調整している。プロジェクト 1.2、プロジェクト 5.1、プロジェクト 5.3 は、相互作用、活動の

調整、成果の交換を必要とするプロジェクトである。

(2) モン・テリ・プロジェクト

1996 年にモン・テリ・プロジェクトが開始されてから、117 件の実験が開始され、そのうちの 74 件が終了している。第 18 段階（2012 年 7 月から 2013 年 6 月まで）のプロジェクト計画は、43 件の実験で構成されていたが、そのうちの 7 件が新規のプロジェクトで、残りは継続中のプロジェクトであった。表 2.4-2 には、全ての実験を列挙しており、実験が終了する予定の段階を示してある。さらにこの表には、第 18 段階でスイスの 3 つのプロジェクト・パートナーが担当した実験費用も示した（資金の支出は、積極的な参加を示すものである)。

また表 2.4-3 には、1996 年以降にモン・テリ・プロジェクトで実施された主要な実験と、こうした実験のプロセス、特性、実証の目的も示した。「主要な実験」という表現は、こうした実験の多くが一連の同時的または継続的なサブ実験で実施されることを考慮にいれたものである。たとえば表 2.4-3 に示した実験 HG は、表 2.4-2 では、HG-A と HG-D として示されている。

現在進められているプロジェクトは、次の 3 つのグループに分類できる。

- 方法と技術設備の研究開発。たとえば実験 IC、FM-D 及び MD などである
- オパリナス粘土のプロセスの理解とパラメータの特性調査。たとえば実験 HG-A、HG-D、HT、DR 及び MA などである。
- 実証実験。たとえば EB、HG-A 及び FE-B などである。

研究の課題は一般に大学、研究所、独立契約業者が実行している。仕事を発注するのは swisstopo である。研究開発に関与しているスイスの最も重要な大学／研究所は、ETHZ、PSI 及びベルン大学である。

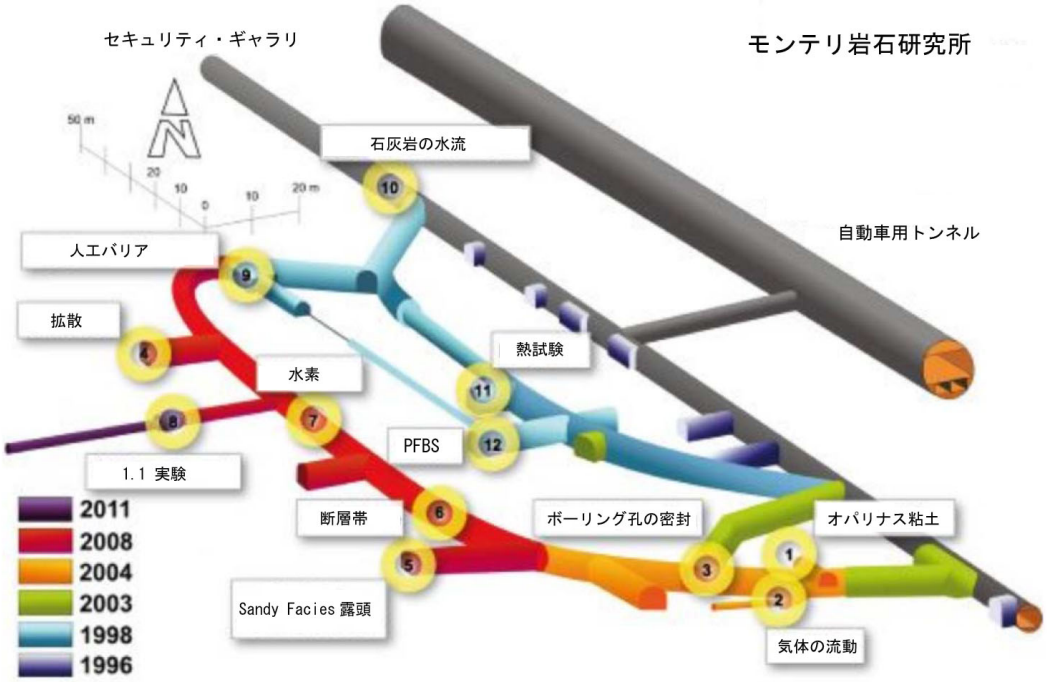



図 2.4-5　モン・テリ岩盤研究所のレイアウトと主要な実験が実施されている場所：行動の色分けコードは、掘削年を示したものである。

表 2.4-2　モン・テリ岩盤研究所プロジェクトの新規の実験と進行中の実験の概要、ならびにスイスの組織の実験費用の負担分。

| 略語 | 実験の名称 | 終了予定段階 | 第 18 段階の出資金（単位スイスフラン） | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ENSI | NAGRA | swisstopo |
| BN | ビチューメン、硝化物、粘土の相互作用 | 20 | | 36,667 | |
| CD | 周期的な変形 | 20 | 6,667 | | 6,667 |
| CI | セメントと粘土の相互作用 | 37 | | 17,833 | |
| CS | $CO_2$ の地質学的な貯蔵に関連した井戸近くのシーリングの健全性 | 20 | | | 20,000 |
| CS-A | 3）井戸漏出のシミュレーションと改善 | 20 | | | |
| DB | 7）オパリナス粘土の内部に傾斜して掘削した深いボーリング孔 | 20 | | 20,000 | 20,000 |
| DM-A | 長期的な変形測定 | 19 | | | |

| 略語 | 実験の名称 | 終了予定段階 | 第 18 段階の出資金（単位スイスフラン） | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ENSI | NAGRA | swisstopo |
| DM-B | 3）長期的な変形測定 | 20 | | | |
| DR-A | 拡散、保持、擾乱 | 22 | | 30,000 | |
| DR-B | 長期的な拡散 | 22 | | 2,500 | |
| DS | 応力の決定 | 18 | | 6’667 | |
| EB | 1）人工バリア | 19 | | 69,825 | |
| EG | 炭素同位体による掘削影響領域（EDZ）の気体拡散 | 19 | | | |
| FE-B | 実規模の定置実験の THM 部分 | 35 | | 605,000 | |
| FE-C | 2）実規模の定置実験の工学的な部分 | 25 | | 50,000 | |
| FI | 3）自然の断層形成と加熱の際のオパリナス粘土の内部での流体と鉱物の相互作用 | 20 | | | 35,000 |
| FM-D | 蒸発検層 | 19 | 15,000 | | 15,000 |
| GD | 地球化学的なデータの分析 | 20 | | 15,000 | |
| GM-A | 1）地球物理学的なモニタリング | 20 | | 19,800 | |
| HA | 水文地質学的な分析 | 20 | | 30,000 | |
| HE-E | 1）RB ミクロ坑道の現場ヒーター実験 | 22 | | 7,500 | |
| HM | 2）オパリナス粘土の HM 組み合わせ特性と挙動についての研究所の実験調査 | 20 | 80,000 | | 7,000 |
| HG-A | 母岩とシールにおける気体の経路 | 20 | | 22,500 | |
| HG-D | オパリナス粘土の内部での反応性の気体の移行 | 19 | | 25,000 | |
| HT | 水素の移行 | 20 | | 36,667 | |
| IC | オパリナス粘土の内部の鉄の腐食 | 19 | | 6,153 | |
| IC-A | ベントナイトの内部の鉄の腐食 | 22 | | 66,810 | |
| LP | 間隙圧力の長期的なモニタリング | 20 | | 1,667 | 1,667 |
| LT-A | 研究所実験での特性分析 | 19 | | 37,000 | |

| 略語 | 実験の名称 | 終了予定段階 | 第 18 段階の出資金（単位スイスフラン） | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ENSI | NAGRA | swisstopo |
| MA | 微生物の活動 | 20 | | 22,500 | |
| MD | 宇宙からのミューオンの密度のＸ線断層写真撮影 | 20 | | | 10,000 |
| MH | 地層の水平傾斜移動の長期的なモニタリング | 25 | | 10,000 | 25,000 |
| MO | モニタリング | 25 | 13,333 | | 13,333 |
| MO-A | 地球物理学的な方式の受動性を利用した長期・大規模モニタリング | 19 | | 2,500 | 2,500 |
| OP-A | 浸透間隙圧力の測定 | 19 | | 20,000 | |
| PC-C | 気体と間隙水の平衡 | 19 | | 10,000 | |
| PS | 岩盤構造と応力の決定 | 19 | | | 35,000 |
| RA | 岩盤力学の分析 | 18 | | 17,500 | |
| RC | 岩体の特性調査 | 18 | 25,000 | | |
| SM-B | 3）高解像度の地震学的なモニタリング | 20 | | 20,000 | 50,000 |
| SO | オパリナス粘土の堆積学 | 19 | | | 15,000 |
| VA | オパリナス粘土の内部の空間的な変動の調査 | 18 | | 94,000 | |
| WS-I | 3）ウエット・スポットの調査 | 18 | | 115,000 | |

1）EC が共同で資金を提供した実験（ユーラトムの PEBS プロジェクト）

2）EC が共同で資金を提供した実験（ユーラトムの LUCOEX プロジェクト）

3）第 18 段階での新規の実験

表 2.4-3　第 18 段階までにモン・テリ・プロジェクトで実施した主要な実験の概要とその主要な重点。

| 略称 | 実験 | 地球化学と微生物 | 拡散 | 水文地質学 | 気体の移行 | 岩盤力学 | EDZ（掘削損傷域） | THMC（熱的・水理学的・力学的・化学的な特性） | 実証 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AS | 異方性と岩盤応力 | | | | | ■ | | | |
| BB | ボーリング孔の変形挙動 | | | | | | ■ | | |
| BF | ボーリング孔の内部の流体の効果 | | | ■ | | | | | |
| BI | ボーリング孔のインベントリ | | | | | | | | |
| BN | ビチューメン・硝化物・粘土の相互作用 | ■ | | | | | | | |
| BW | 短期的なボーリング孔の壁の変化 | | | | | | ■ | | |
| CD | 周期的な変形 | | | ■ | | ■ | | | |
| CI | セメントと粘土の相互作用 | ■ | | | | | | | |
| CP | 化学的及び物理的な風化 | ■ | | | | | | | |
| CW | 高 pH のセメント間隙水 | ■ | | | | | | | |
| DB | 地下深くのボーリング孔のシミュレーション | | | ■ | | | | | |
| DI | 拡散実験 | | ■ | | | | | | |
| DM | 変形のメカニズム | | | | | ■ | | | |
| DR | 拡散、保持、擾乱 | | ■ | | | | | | |
| DS | 応力の決定 | | | | | ■ | | | |
| DT | 掘削技術 | | | | | | | | |
| EB | 人工バリア | | | | | | | | ■ |

| 略称 | 実験 | 地球化学と微生物 | 拡散 | 水文地質学 | 気体の移行 | 岩盤力学 | EDZ（掘削損傷域） | THMC（熱的・水理学的・力学的・化学的な特性） | 実証 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ED | EDZ（掘削影響領域） | | | ■ | | ■ | ■ | | |
| EG | 炭素同位体による EDZ の気体の拡散 | ■ | | | | | ■ | | |
| EH | EDZ の自然治癒 | | | | | | ■ | | |
| EZ | EDZ の亀裂の生成 | | | | | ■ | ■ | | |
| FE | 実規模の定置実証 | | | | | | | | ■ |
| FM | 流動のメカニズムと蒸発検層 | | ■ | ■ | | | | | |
| FP | 亀裂の伝播 | | | | | | ■ | | |
| GD | 地球化学的なデータの分析 | ■ | | | | | | | |
| GM | 地球化学的なモデリングと地球物理的なモデリング | ■ | | | | | | | |
| GP | 水理学的な透過性と気体の透過性 | | | ■ | ■ | | | | |
| GR | 大地貫通レーダー | | | | | | ■ | | |
| GS | 気体亀裂（gasfrac）の自己シール性 | | | | ■ | | | | |
| HA | 水文地質学的な分析 | | | ■ | ■ | | | | |
| HE | ヒーター実験 | | | | | | | ■ | |
| HG | 気体の透過率と移行 | | | | ■ | | | | |
| HT | 水素の移行 | | | ■ | | | | | |
| IC | オパリナス粘土の内部での鉄の腐食 | ■ | | | | | | | |
| IS | 現場応力 | | | | | ■ | | | |
| LP | 間隙圧力の長期的なモニタリング | | | ■ | | | | | |

| 略称 | 実験 | 地球化学と微生物 | 拡散 | 水文地質学 | 気体の移行 | 岩盤力学 | EDZ（掘削損傷域） | THMC（熱的・水理学的・力学的・化学的な特性） | 実証 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LT | 研究所での温度試験 | | | | | ■ | | ■ | |
| MA | 微生物の活動 | ■ | | | | | | | |
| MB | 掘削影響実験（Mine-by test） | | | | | ■ | | | |
| MD | 宇宙からのミューオンの密度のX線断層写真撮影 | | | | | | | | |
| MH | 地層の水平傾斜移動の長期的なモニタリング | | | | | | | | |
| MO | モニタリング | | | | | ■ | | | |
| NT | 自然のトレーサ物質のプロフィール | ■ | | | | | | | ■ |
| OP | 浸透間隙圧力の測定 | | | ■ | | | | | |
| PC | 間隙水の化学的な特性 | ■ | | | | | | | |
| PP | 間隙水の圧力 | | | ■ | | | | | |
| PS | 岩盤構造と応力の決定 | | | | | ■ | | | |
| RA | 岩盤メカニズムの分析 | | | | | ■ | | | |
| RB | 水平のレイズ・ボーリング孔の掘削 | | | | | | | | |
| RC | 岩体の特性調査 | | | | | ■ | ■ | | |
| SB | 粘土と砂の混合物の自己シール性バリア | | | | ■ | | | | ■ |
| SE | Selfrac MT | | | | | | ■ | | |
| SF | 断層の自己シール性 | ■ | | | | | | | |
| SR | 岩盤支持材の低 pH のショットクリート | ■ | | | | | | | |
| TH | 微細な規模の THMC | | | | | | | ■ | |
| UZ | 不飽和ゾーン | | | ■ | | | | | |

| 略称 | 実験 | 地球化学と微生物 | 拡散 | 水文地質学 | 気体の移行 | 岩盤力学 | EDZ（掘削損傷域） | THMC（熱的・水理学的・力学的・化学的な特性） | 実証 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| VE | 換気試験 | | | | | | | | |
| WS | 地下水と間隙水のサンプリング | | | | | | | | |

2.4.5.2 実施主体による研究開発実証プログラム／プロジェクトの概要

(1) スイスの処分計画

NAGRA が遂行している作業の大部分は、研究開発実証プログラムに関連している。たとえば次のような作業が進められている。

- 処分プロジェクト立案の基礎情報として、放射性物質の特性調査とインベントリの確認作業が行われている。廃棄物の正式なクリアランス手順の一環として、さらにNAGRA の会員のための役務として、廃棄物の仕様の確認が行われている。
- 安全性の分析と処分場のプロジェクトのために必要な現場データの取得と評価。
- 処分場施設と人工バリア・システムの設計と構成に関するプロジェクト調査。これは操業手順の策定のためにも必要である。
- 安全評価と、許認可の手続きを見込んだ基礎情報の評価作業としての結果とデータの分析
- データベースの開発、ならびに処分システムの挙動の評価のために使用する方法の微調整。安全分析で使用するデータのモデルの確証と検証
- 国際的な協力プロジェクトへの積極的な参加。これは計画策定作業と開発作業を調整し、最適化することを目的としている。

研究活動の全体的な枠組みを定めるのは、スイスにおける放射性廃棄物の処分に関するNAGRA の研究開発計画案である NTB 09-06 である。以下では計画案で検討している研究テーマの細部を一部だけ紹介する。一般的に、現在進められている研究開発作業が目的としているのは、既存の知識ベースを改善することであり、特別計画プロセスの第 3 段階で行われる概要承認の申請に必要な文書の作成の準備をすることである。NAGRA は第 2 段階に関連したテーマの暫定的な評価を実行している。これまでに実施された安全解析では、不確実性を考慮にいれるために、保守的な想定が行われてきた。現在進められている調査の目的は、こうした保守的な想定の代わりに、さらに正確な情報を利用することにある。これは処分場の安全性についての調査結果の信頼性を向上させる効果を発揮することにな

ろう。

(2) モン・テリ・プロジェクトへの参加

NAGRA はモン・テリ・プロジェクトに参加することによって、放射性廃棄物処分のための母岩の候補であるオパリナス粘土の特性を 1:1 の実規模で詳細に調査することが可能となり、またプロセスの理解を深めることができるようになる。この調査の結果によって、将来の許認可手続きにおける情報を入手できることになる。

モン・テリ・プロジェクトの第 17 段階（2011 年 7 月から 2012 年 6 月）で、NAGRA は合計 43 件の実験のうちの 29 件に参加した。独自の経験と、「処分の実現可能性実証プロジェクト（オパリナス粘土プロジェクト）」に対する当局のレビューにおいて示された勧告に基づき、NAGRA は次のテーマに重点を置いた。

- オパリナス粘土の特性の詳細な調査（VA 実験）。
- オパリナス粘土の内部での放射性核種の拡散（DR-A 実験と DR-B 実験）。
- ガスの移行（HG-A 実験、HG-D 実験、HT 実験）。
- 建設材料とキャニスター材料の腐食（IC 実験と IC-A 実験）。
- 粘土とセメントの相互作用に関する長期的な実験の継続（CI 実験）。セメントは、L/ILW 処分場と ILW 処分場において、固化材、埋め戻し材、建設材料として使用される。

また、試験坑道の掘削と、坑道のニアフィールドの計装の設置の段階で行われる大規模な実規模定置実証実験にも特に強い関心を抱いている。この実験では、使用済燃料の処分坑道の断面をシミュレーションした状況の影響のもとで、坑道の近辺の岩盤の挙動を調査するものである。主として関心が抱かれているのは、温度が母岩の水理学的なプロセスと力学的なプロセスにどのような効果を及ぼすかということである。また、処分坑道の掘削と保持、ならびに廃棄物コンテナと埋め戻し材の定置についても、実際的な経験が獲得できよう。実規模定置実証実験は、LUCOEX プロジェクトの一環として、EU との共同出資で実施されているプロジェクトである。

表 2.4-4　NAGRA が参加している EU の第 7 次フレームワーク計画のプロジェクト。

| 略称とプロジェクト名 | 研究テーマ（ホームページのアドレス） | 調整組織／参加組織 | **プロジェクトの期間** |
|---|---|---|---|
| MoDeRn : 処分場の安全な運営と段階的な閉鎖のためのモニタリングの開発。 | 地層処分場にけるモニタリングの可能性と制約の調査（www.modern-fp7.eu）。 | ANDRA（フランス）が調整／12 か国から 17 の組織が参加 | 2009 – 2013 |
| FORGE：処分場で発生するガスの移動の経緯。 | ガスの生成と放出が、地層処分場の長期的な安全性に及ぼす影響（www.bgs.ac.uk/forge） | BGS（英国）が調整／12 か国から 24 の組織が参加 | 2009 – 2013 |
| PEBS：人工バリアシステム（EBS）の長期的な性能。 | 閉鎖後の初期の段階における HLW のニアフィールドの状況をシミュレーションする熱・水理学・力学モデルの検証（ww.pebs-eu.de） | BGR（ドイツ）が調整／5 か国から 10 の組織が参加 | 2010 – 2014 |
| LUCOEX：地下での大規模な概念実験。 | 地層処分場で利用する定置手法と埋め戻し技術の実証（www.lucoex.et） | SKB 社（スウェーデン）が調整／4 か国から 4 の組織が参加 | 2011 – 2014 |
| DOPAS：プラグとシールの実規模の実証。 | 粘土、岩塩、結晶岩を母岩とする地層処分場のアクセス構造物の密封概念の調査（www.posiva.fi/dopas） | ANDRA（フランス）が調整／8 か国から 14 の組織が参加 | 2012 – 2016 |

(3) EU の枠組み計画への参加

放射性廃棄物の地層処分の分野での EU の枠組み計画によって NAGRA は、技術的な知識を効率的に拡張し、ヨーロッパにおける重要な開発に貢献することができる。2012 年に重視されたのは、第 7 次枠組み計画への参加であり、この計画のプロジェクトを表 2.4.5-3 に列挙した。

DOPAS プロジェクトは、スイスで進められている同様な目的をもつ実験、すなわちグリムゼル試験サイトの GAST 実験や、モン・テリ岩盤研究所での実規模定置実証実験と、その成果をたがいに補強しあうことができる。

EU の枠組み計画は実際にはスイスの研究開発実証プログラムの一部とみなすことはできないために、ここでは表 2.4-4 に示した情報だけを紹介する。プロジェクトの目的、概念、進展状況、パートナーなどについての説明は、この表にアドレスを示したインターネットのウェブ・サイトにおいてオンラインで参照することができる。

(4) グリムゼル試験サイト（GTS）

GTS は 1983/1984 年に建設され、それ以来 NAGRA の後援のもとで、あるいは国のパートナーや国際的なパートナーとの契約のもとで、多数の研究開発実証プロジェクトが実施されてきた。1990 年代の初頭まで、GTS での研究プロジェクトの重点は、サイト特性調査と母岩の特性調査計画の枠組みで、構造地質学、水文地質学、地下水化学の分野での現場テストの計画策定、実施、解釈に必要なノウハウを強化する作業に置かれてきた。1990 年代には、性能評価活動を支援するために、地圏での放射性核種の移行を研究するプロジェクトと、地層処分場の人工バリアや天然バリアを調査するプロジェクトに重点が移動してきた。1990 年代の末以来、次のようなさらに統合された（そしてさらに複雑な）プロジェクトを実行する方向に進んでいる。

- できる限り現実的な処分場の条件に近い環境での現場実験（大規模で長期的で現実的な水文地質学的な条件など）
- 処分場の実現に関連したプロジェクト（工学的な実現可能性、操業の側面、閉鎖、モニタリング、処分場の建設が周囲の岩盤に及ぼす影響の可能性など）

現在 GTS で進められているプロジェクトを、表 2.4-5 に列挙した。ESDRED、FORGE、FUNMIG 及び TEM のプロジェクトは、EU の枠組み計画に含まれるサブプロジェクトである。G-FRS と JGP は、パートナー組織が実施した実験である。GTS のプロジェクトの場所は、図 2.4-6 に示すとおりである。これまでのプロジェクトの詳細は、インターネットのサイト（http://ww.grimsel.com/）で確認できる。

表 2.4-5　グリムゼル試験サイトで現在進められているプロジェクトの概要。

| 略称とプロジェクト名 | 研究テーマ |
|---|---|
| CFM：コロイドの形成と移行 | コロイドの形成と移行、ならびにコロイドが現実的な条件のもとで放射性核種の移動に与える影響 |
| C-FRS：Criepi 亀裂岩盤調査 | 構造地質学的な亀裂システムの水文地質学的及び地質学的な特性調査 |
| ESDRED プラグ実験*)：処分場の設計の工学的な調査と実証 | 低 pH セメントの利用 |
| FEBEXe：実規模の HLW 処分場の人工バリア実験の延長 | 高レベル放射性廃棄物の定置概念の 1:1 の実規模の実証 |
| FORGE*)：処分場のガス挙動 | 人工バリア（ベントナイト／砂）の内部でのガスの移行の実験 |
| FUNMIG*)：放射性核種の移行の基本的なプロセス | 結晶岩の内部での放射性核種の移行の基本的な側面 |
| GAST：ガス透過性のシール試験 | ガスシーリング実験。人工バリアを通じた制御された気体の移行 |
| JGT：JAEA グラウト処理実験 | セメント注入実験 |
| LASMO：大規模なモニタリング | 地圏のモニタリングと特性調査 |
| LCS：長期的なセメント調査 | セメント溶液、間隙水、岩盤の長期的な相互作用 |
| LTD：長期的な拡散 | 岩盤マトリクスの内部での長期的で大規模な現場拡散実験及び間隙空間の視覚化実験 |
| MACOTE：物質腐食試験 | 腐食実験（人工バリアシステムとその構成要素） |
| TEM*)：モニタリング技術の試験と実証 | モニタリング技術の試験 |

*）EU 枠組みプロジェクトのサブプロジェクト。

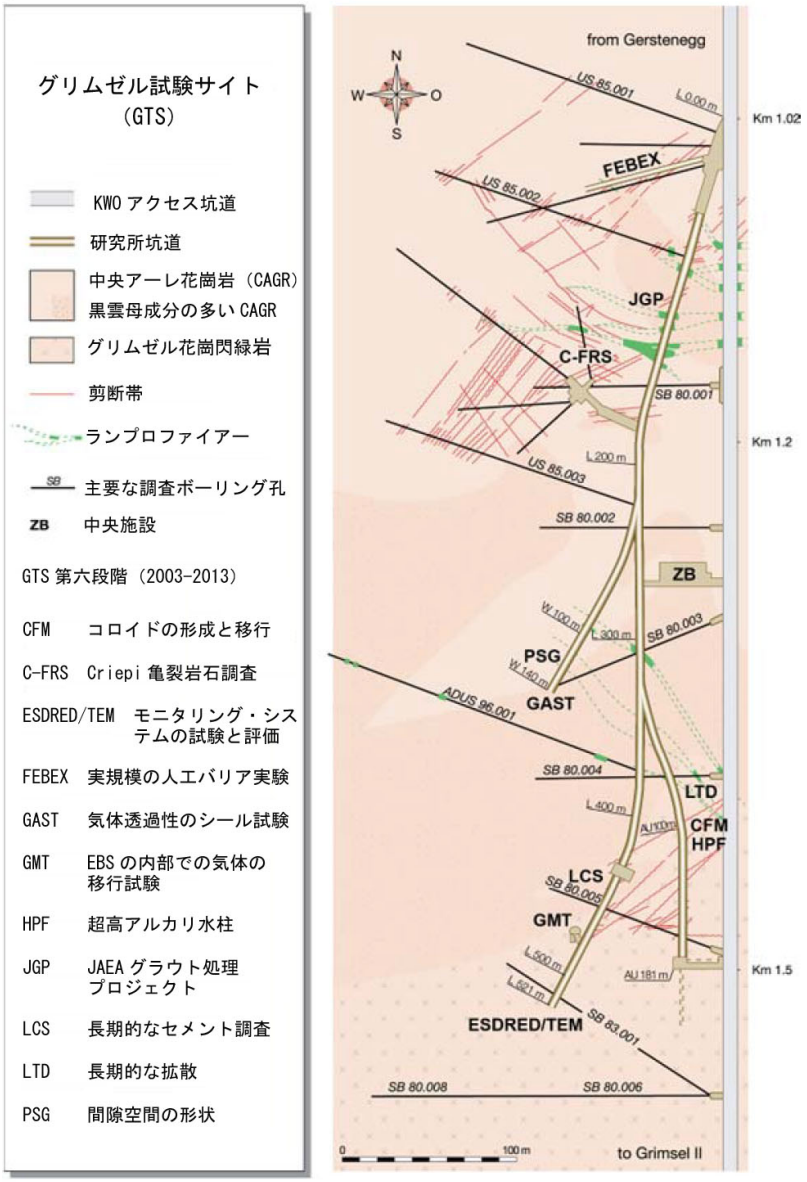



図 2.4-6　グリムゼル試験サイトのレイアウトと主要な実験が行われている場所

2.4.5.3 定期的な研究開発実証プログラム／プロジェクトの概要

ENSI の「規制安全性の研究」計画の 7 つの分野のうちで、プロジェクト数が最も多いのは、廃止措置と処分の分野である。これには、モン・テリ岩盤研究所で実施されている母岩としてのオパリナス粘土の研究プログラムと、地層処分場の設計とモニタリングの計画が含まれる。また、ガスの形成と熱的・水理学的・力学的、化学的なプロセスの組み合わせ（DECOVALEX）についての研究プログラムも重視されている。さらに EU の第 7 次枠組み計画の新しいプロジェクトとして SITEX があり、地層処分場の開発に必要な規制枠組

みを検討し、評価している。将来の氷河による侵食の可能性については、気象のモデリングに関するプロジェクトが 2012 年に終了する予定であり、この計画が氷河期における大気の循環についての理解が深まると考えられる。表 2.4-6 には、2012 年に積極的に推進されたこれらのプロジェクトの概要を示した。

表 2.4-6　2012 年において ENSI が実施したプロジェクトの概要

| プロジェクト／協力活動 | 研究テーマ |
|---|---|
| SITEX：放射性廃棄物の処分のための独立した持続可能な技術的なネットワーク | 地層処分場の実現の全ての段階について、規制要件の骨格を確立することを目指す |
| モン・テリ・プロジェクトへの参加 | 主要な実験：岩盤力学研究所の調査のための岩体の特性調査実験 RC)、オパリナス粘土／EDZ（掘削影響領域）の数値モデリング<br>その他のプロジェクト：CD（周期的な変形実験）と FM-D（蒸発検層実験） |
| OECD/NEA の Clay Club | 粘土の豊富な岩盤層の特性調査に関する国際的な最新の開発状況の追跡 |
| モニタリング、パイロット施設、処分場の設計についての RPRW プロジェクト | 特別計画プロセスにおける技術的な問題点に関連したスイスの放射性廃棄物研究プログラムに含まれるプロジェクト。1）パイロット施設の設計とインベントリ、2）モニタリングの概念と施設、3）処分場のレイアウト |
| FORGE-処分場のガス挙動 | EU の第 7 次枠組み計画の気体の生成の安全性の側面に関する計画 |
| DECOVALEX-2015 プロジェクト | 地質学的な系における熱的・水理学的・力学的・化学的な（THMC）プロセスの組み合わせの理解を深めるための国際的な協力研究活動 |
| バイクセル氷河期の気象モデリング | 将来の侵食シナリオの調査。特別計画で必要。 |
| アルプス北部前土の第四紀の堆積物の時代決定 | スイス北部における過去の侵食事象の調査。特別計画で必要 |
| 「廃棄物管理方法の比較」に関する RPRW プロジェクト | 特別計画プロセスの技術的な問題点に関するスイスの放射性廃棄物研究プログラムに含まれるプロジェクト |

2.4.6 研究テーマと同研究を実施する機関についての概要

2.4.6.1 放射性廃棄物研究プログラム（RPRW）

放射性廃棄物研究プログラム（RPRW）の主要なテーマは、1）長期的な側面、2）特別計画のプロセス、3）認知、世論の形成、受容性、4）処分概念、5）倫理的・法的な次元である。これらのテーマについて実施されているプロジェクトについては、表 2.4.4-1 で紹介した。付属書 B にはこれらのプロジェクトの概要を示したが、そこでも同じ番号付けを採用している。

2.4.6.2 モン・テリ・プロジェクト

表 2.4-7 には、モン・テリ・プロジェクトの第 18 段階（2012 年 7 月から 2013 年 6 月）で実施される実験の概要を示した。この表にはさらに、それぞれの実験分野に参加しているプロジェクト・パートナーの名称も示した。付属書 C には、それぞれの実験について、その主要な目的と概念を簡略に説明してある。一部の長期的な実験については、それ以前の段階で得られた結果の説明も示した。

表 2.4-7　モン・テリ・プロジェクトの第 18 段階で実行される実験の概要と、実験に参加しているプロジェクト・パートナー。

| 略称 | 実験名 | プロジェクト・パートナー |
|---|---|---|
| BN | ビチューメン・硝酸塩・粘土の相互作用 | ANDRA 、 IRSN 、 NAGRA 、 SCK･CEN。 |
| CD | 周期的な変形 | ENSI (HSK)、IRSN、swisstopo。 |
| CI | セメントと粘度の相互作用 | ANDRAANDRA、CRIEPI、IRSN、NAGRA、Obayashi、SCK･CEN。 |
| CS | $CO_2$ を地質学的に貯蔵するための壁近くのシーリングの健全性 | Obayashi、swisstopo。 |
| CS-A | 井戸からの漏出のシミュレーションと是正活動 | Chevron。 |
| DB | オパリナス粘土を通過する地下深くのボーリング孔 | BGR 、 GRS 、 IRSN 、 NAGRA 、 swisstopo、NWMO。 |
| DM-A | 長期的な変形の測定 | GRS。 |
| DM-B | 長期的な変形の測定 | GRS。 |
| DR-A | 拡散、保持、擾乱 | DOE、NAGRA、NWMO。 |
| DR-B | 長期的な拡散 | NAGRA、NWMO。 |

| 略称 | 実験名 | プロジェクト・パートナー |
|---|---|---|
| DS | 応力の決定 | NAGRA、Chevron、NWMO。 |
| EB | 人工バリア | ANDRA、BGR、Enresa、NAGRA。 |
| EG | 炭素同位体による EDZ での気体の拡散 | CRIEPI。 |
| FE-B | 実規模の定置実験の THM の部分 | ANDRA 、 BGR 、 DOE 、 GRS 、 NAGRA、NWMO。 |
| FE-C | 実規模の定位置実験の工学的な部分 | NAGRA。 |
| FI | 自然の断層形成と加熱の際のオパリナス粘土の内部の流体と鉱物の相互作用 | swisstopo。 |
| FM-D | 蒸発検層 | ENSI (HSK)、swisstopo。 |
| GD | 地球化学的なデータの分析 | ANDRA、NAGRA、SCK・CEN。 |
| GM-A | 地球物理学的なモニタリング | NAGRA。 |
| HA | 水文地質学的な分析 | BGR、NAGRA |
| HE-E | RB ミクロ坑道の内部の現場ヒーター試験 | BGR、ENRESA、GRS、NAGRA |
| HM | オパリナス粘土の内部の HM 組み合わせ特性と挙動についての研究所での実験調査 | ENSI (HSK)、swisstopo。 |
| HG-A | ガスの通路、母岩とシール | ANDRA、BGR、NAGRA、NWMO。 |
| HG-D | オパリナス粘土の内部での反応性のガスの移動 | ANDRA、NAGRA。 |
| HT | 水素の移行 | ANDRA、NAGRA、NWMO。 |
| IC | オパリナス粘土の内部での鉄の腐食 | ANDRA、JAEA、NAGRA、NWMO。 |
| IC-A | ベントナイトの内部での鉄の腐食 | ANDRA、NAGRA、NWMO。 |
| LP | 間隙圧力の長期的なモニタリング | ANDRA 、 IRSN 、 NAGRA 、 swisstopo、Chevron、NWMO。 |
| LT-A | 研究所試験の特性分析 | BGR、NAGRA、Chevron。 |
| MA | 微生物の活動 | ANDRA、BGR、NAGRA、NWMO。 |
| MD | 宇宙由来のミューオンの密度のＸ線断層写真撮影 | swisstopo。 |
| MH | 土地の水平傾斜移動の長期的なモニタリング | NAGRA、swisstopo。 |

| 略称 | 実験名 | プロジェクト・パートナー |
|---|---|---|
| MO | モニタリング | ANDRA、ENSI (HSK)、swisstopo |
| MO-A | パッシブな地球物理学的な方法による長期的なモニタリングとマルチスケール・モニタリング | NAGRA、swisstopo。 |
| OP-A | 浸透による間隙圧力の測定 | NAGRA、Chevron。 |
| PC-C | ガスと間隙水の平衡 | ANDRA、NAGRA、SCK･CEN。 |
| PS | 岩盤組織と応力の決定 | swisstopo、Chevron |
| RA | 岩盤力学的な分析 | BGR、NAGRA。 |
| RC | 岩体の特性調査 | BGR、ENSI (HSK) 。 |
| SM-B | 高解像度の地震学的なモニタリング | NAGRA、swisstopo。 |
| SO | オパリナス粘土の堆積学的な考察 | BGR、swisstopo。 |
| VA | オパリナス粘土の内部の空間的な変動可能性の調査 | NAGRA。 |
| WS-I | ウエット・スポットの調査 | BGR、NAGRA。 |

2.4.6.3 スイスの処分計画

NAGRA の技術報告書[NTB 09-06]では、スイスの放射性廃棄物の処分のための NAGRA の研究開発実証（RD&D）計画の概要を説明しており、http://www.nagra.ch/でダウンロードできる。この計画によって、研究開発実証プログラムで実現すべき目的についての背景情報と、この計画がどのように展開されてきたかという背景情報を包括的に知ることができる。この報告書はさらに、この計画で 5 年から 10 年の期間に（すなわち概要承認申請の時期までに）研究する必要のある 4 つの主要なテーマと特定の問題点について、詳細に説明している。表 2.4-8 にこれらのついての概要を示した。様々な分野の目的、現状、計画の重点については、文献[NTB 09-06]に詳細な説明がある。この報告書においては、NAGRA が現在すでに作業を進めている研究開発実証作業について検討しておくべきである（本章の下記の説明を参照）。

表 2.4-8　放射性廃棄物の処分に関連した NAGRA の研究開発実証プログラムの主要なテーマと特定の問題点の概要（報告書[NTB 09-06]）

| | |
|---|---|
| 1 | 地質学的な調査（母岩と封じ込め機能を果たす岩盤の特性と形状についての要件と、長期的な地質学的な変化についての要件に適合。中心となる安全性に関連したパラメータのデータ） |
| 1.1 | 特別計画の第 2 段階のために、候補となるサイト地域とサイトの地質学的なデータベースの補足 |
| 1.2 | 特別計画の第 3 段階における L/ILW 処分場と HLW 処分場のためのそれぞれ 2 か所のサイトの調査 |
| 1.3 | 地質学、構造地質学、水文地質学、長期的な地質学的な変化の分野での地域的な調査 |
| 1.3.1 | 地域的な地質学的な状況 |
| 1.3.2 | 地域的な水文地質学と水理化学の状況 |
| 1.3.3 | 地域的な長期的な地質学的な変化 |
| 1.4 | 候補となる母岩の中心的な現象のプロセスについての理解の向上 |
| 1.4.1 | 母岩の内部での放射性核種の移行プロセス |
| 1.4.2 | 母岩の内部でのガスの移行プロセス |
| 1.4.3 | 母岩の内部での地力学的なプロセス |
| 1.4.4 | 母岩に対する再飽和の効果と熱的な効果 |
| 1.4.5 | 母岩の内部での自己シール性プロセス |
| 1.5 | 特別計画の第 2 段階のためのサイトの地質学的な報告書の作成と、概要承認申請のための報告書の作成 |
| 2 | 安全性に関連した現象の安全評価と解明（操業の安全性と長期的な安全性の要件への適合） |
| 2.1 | 安全解析の方法論の更新と改善 |
| 2.2 | 要件の管理 |
| 2.3 | 地質学的なプロセス、放射性核種の不動化、遅延、移行、ならびに廃棄物の特性に関連した新たな知識を、安全解析のモデルとデータベースに取り込む作業 |
| 2.4 | 放射線学的な影響の計算のための生物圏モデルの開発 |
| 2.5 | 長期的な安全報告書 |
| 2.6 | 操業安全性に関連した報告書 |

| | |
|---|---|
| 3 | 放射性物質と放射性物質（廃棄物の要件への適合） |
| 3.1 | 廃棄物のインベントリ、特性調査、データベース、ロジスティック |
| 3.2 | 廃棄物の処理、ならびに廃棄物発生者への助言 |
| 3.3 | 廃棄物の安全性に関連した特性の理解の向上 |
| 3.3.1 | 使用済燃料の特性 |
| 3.3.2 | 臨界評価 |
| 3.3.3 | 高レベル放射性廃棄物のガラス固化体の腐食 |
| 3.3.4 | ガスの生成 |
| 4 | 処分場の設計概念（廃棄物の回収可能性とモニタリングの概念を含む）と、人工バリア（処分場の設計の要件への適合） |
| 4.1 | 一般的な設計概念と操業方式の開発（廃棄物の回収を含む） |
| 4.2 | 一般的な処分場の概念を特定のサイトに合わせて調整 |
| 4.3 | 人工バリアの概念の開発 |
| 4.3.1 | 使用済燃料キャニスタと高レベル放射性廃棄物キャニスタの開発 |
| 4.3.2 | L/ILW 処分コンテナとコンテナの埋め戻し材の開発 |
| 4.3.3 | 廃棄物の定置坑道と空洞のための埋め戻し材と定置技術 |
| 4.3.3.1 | HLW の定置坑道の緩衝物質の評価 |
| 4.3.3.2 | 緩衝材定置技術。 |
| 4.3.3.3 | SF/HLW 定置坑道の支持材とライニングの素材と技術 |
| 4.3.3.4 | L/ILW 定置空洞のためのセメントをベースとした埋め戻し材 |
| 4.3.3.5 | 処分場の密封と閉鎖 |
| 4.4 | ニアフィールド、人工バリア、凝縮した粘土システムの内部での安全性に関連した特性とプロセスの理解の向上 |
| 4.4.1 | 凝縮した粘土システムとセメント状の物質の内部での放射性核種の不動化、遅延、移行現象 |
| 4.4.2 | ニアフィールドの変化の評価 |
| 4.4.2.1 | ニアフィールドの再飽和をモデリングする能力の開発 |
| 4.4.2.2 | ベントナイトと粘土の豊富な物質の中心的な特性と長期的な変化 |
| 4.4.2.3 | ベントナイト・バリアを通じたガス／水の移行 |

| | |
|---|---|
| 4.4.2.4 | THMC の組み合わせプロセスのモデリング能力の開発 |
| 4.5 | 処分場のモニタリングの概念の開発 |

**地質学／現場作業**

提案されている地質学的候補エリアに関して、NAGRA は特別計画の第 2 段階と第 3 段階でさらに詳細な情報を提供するための調査を実行している。2011/12 年の冬に二次元弾性波探査が終了し、その後は現場データの処理が進められてきており、現在ではサイト地域のジュートランデン、北部レゲレン、ジュラ東部、ジュラ・ジュートフスについて、古い地震と新しい地震のデータ分析が進められている。地震データ画像が期待を満たすものであり、変形が顕著なエリアでも地域的な地質学的な解釈が可能であることが明らかになっている。このため二次元探査側道の地域ネットワークをさらに稠密にする作業は終了した。

NAGRA は地熱ボーリング孔プロジェクト「シュラッティンゲン-1」（トゥールガウ州）と、多数の熱交換ボーリング孔の調査を実行しており、この調査によって、異なる地域の母岩とそれを包むユニットの地球科学的な特性調査のために貴重なデータが得られている。

現在、スイス北部の長期的な地質学的な変化を研究するための 2 件の大規模なプロジェクトが実施されている。これは、GNSS（汎地球航法衛星システム）の受信機を常設したネットワークの設置プロジェクトと、最近の地殻の運動のモニタリングを改善するためことのできる地震測定ステーションの稠密なネットワークを構築するプロジェクトである。2012 年末には、NAGRA の所有する 11 の GNSS ステーションが全て操業していた。NAGRA はさらにスイス地震局と契約を締結し、弱い地震動を検出するネットワークのための新たな測定ステーションを設置する予定である。

様々なサイト地域における構造地質学的な条件の分析、母岩の特性調査、地域的及び局地的な水文地質学的なモデルを利用した地下深部の地下水の移動の記述、サイト地域の長期的な地質学的な変化の調査も順調に進展している。

2012 年下半期には、広範な地球科学的なデータセットの作成と解釈が開始された。この作業の結果は、この分野の最近の技術出版物を考慮にいれた多数の参考文献へと文書化されている。こうした報告作業は、母岩と、様々なサイト地域の構造地学的及び水文地質学的な条件の鉱物学的、水文地質学的、地球化学的、岩盤力学的な特性調査に重点を置いている。これらの報告書は、第 2 段階で実行される予備的安全評価、地下の処分場の周辺地域の定義、サイト地域の評価のための重要な入力情報を提供するものである。こうした情報は特別計画の第 2 段階の最後でのサイト地域の絞り込みに役立つ。

**地球化学的な保持プロセスと移行メカニズム**

PSI では、放射性核種の保持と移行についての長期的な調査を実行している。2012 年に

おけるこれらの調査では、岩盤の鉱物学的な組成と間隙水の化学的な条件に基づいて、粘土岩の鉱物成分への放射性核種の収着の予測を信頼できるものとするために PSI が開発した方法論を検証するための測定作業に重点を置いた。これが重要なのは、この方式を利用して作成された岩盤に固有の収着データが、安全解析にとって中心的な入力データとなるためであり、そのためにも根拠のあるデータでなければならないからである。

岩盤に固有の収着データは、安全解析に必要な地球化学的な入力データの一つにすぎない。さらにニアフィールドにおける放射性核種の収着と溶解度のデータや、地圏の異なった岩盤層の内部での拡散のデータが必要である。これらのデータセットは、第 2 段階の予備的安全評価に利用されるものであり、PSI がこうしたデータセットを作成している。その背後にある概念と、データセットそのものについて、外部の国際的なレビュープロセスが実行されているが、それはまず国際会議（ANDRA の粘土に関する会議）における発表作業においてレビューされ、さらに独立した専門家がこれらについてレビューしている。使用しているモデルは適切なものであり、検討されているシステムに適用できるものであることが確認されており、最新の水準のものであるとみなされている。

アクチノイドは放射性廃棄物の放射能毒性において重要な地位を占める。地層処分場で支配的な条件のもとでは、アクチノイドはほとんど不動であり、これが放射性核種の安全な閉じ込めに大きく貢献する。この不動性は、アクチノイドの溶解度の低さと、ニアフィールドと地圏において、アクチノイドが鉱物に収着される傾向が強いことによるものである。L/ILW 処分場と ILW 処分場のセメント状のニアフィールドで確認されている条件において、酸化還元条件に敏感に作用する元素に関して、収着の測定が行われた。酸化還元条件を制御するのが困難であるために、収着を実験によって決定するのは困難だったためである。重要なアクチノイドの一つであるネプツニウムは、三価と五価の化学的な形態では、セメント相に顕著に収着される。これらの結果は、アクチノイドが顕著に収着され、ほとんど不動であるという現在の想定を確認するものである。

### ベントナイトの挙動と特性の調査

2012 年には、モン・テリ岩盤研究所での長期的な人工バリア（EB）実験がほぼ完了した。この実験は 12 年間にわたって続けられてきたものであり、実験で使用したベントナイトの水理学的な特性の組み合わせについて（膨脹圧力、透水率）、その時間的な変化と空間的な変化を調べるものだった。さらに回収されたベントナイト・サンプルの研究所での広範な分析も実施された。実験の際に入手した水理学的なデータの分析によって得られた最初の結果は、ベントナイトの膨脹圧力は予想されたような変化を示すものであるというものだった。

この実験とは別に、HLW 処分場のニアフィールドでのベントナイトの老化と、安全性に関連した特性（これには温度の上昇を含む）の時間的及び空間的な変化、ならびに鉄とセ

メントの構成要素の影響について、複数の報告書が作成された。この作業によって、安全解析でこれらの効果を定量化するための基礎情報が獲得された。

**ガス圧力の蓄積**

地層処分場でのガスの生成は、安全解析で検討する必要のあるプロセスである。L/ILW 処分場と ILW 処分場での金属の腐食が、ガスの生成に大きく寄与する。処分室が間隙水で再飽和するまでには数千年かかるために、飽和していない条件のもとでの鋼鉄の腐食率も重要である。飽和した条件と飽和していない条件という両方の条件のもとでのセメント・モルタルの内部の鋼鉄の腐食を調査する実験がカナダのトロント大学で実施された。この実験結果は、飽和していない条件のもとでの鋼鉄の腐食率は、セメント間隙水の内部での腐食率を大幅に下回るものであることを確認するものだった。測定された腐食率は、これまで文献で報告されている値も大幅に下回るものだった。この測定結果は、L/ILW 処分場と ILW 処分場での鋼鉄の腐食率に関する不確実性を低減するのに役立つものであり、これらの処分場でのガスの生成率についての不確実性も低減される。

また L/ILW 処分場と ILW 処分場に定置された廃棄物に含まれる有機物が、微生物によって分解の結果として、ガスが発生する。ガスの生成に影響する微生物学的なプロセスの重要な側面を検討するために、国際的な専門家との技術的な協議が実施されている。これによって、有機ポリマーの劣化と、金属の腐食によって発生する水素とメタンが微生物的に分解される条件について、さらに処分場の構成要素を適切に設計することで、こうした条件を実現できる方法について、どのような調査を実施することができるかに関する貴重な指針が得られた。

こうした研究を補足するために、L/ILW 処分システムと SF/HLW 処分システムの内部でのガスの移行をモデリングする調査が実施され、嫌気条件のもとでの腐食に関しては、気体の生成に伴う水の消費は、間隙水の化学的な条件に著しい変化をもたらさないことが確認された。NAGRA はさらに母岩「褐ドッガー統」、オパリナス粘土、エフィンガー層のガスに関連した特性についてのデータベースを補足するために、シュラッティンゲンのボーリング孔から得られたコア・サンプルについて研究所での調査を実施した。

新しい大規模な気体透過シール試験（GAST）実験が、現在グリムゼル試験サイトで実施されている。EU の枠組み計画 FORGE（処分場のガス挙動）の一環として、NAGRA は最終的な総合報告書の作成に大きく貢献した。特に人工バリアに使用される物質（ベントナイト、砂とベントナイトの混合物）の気体移行能力について、研究所で調査結果を文書にまとめた。粘土の内部（健全な岩盤の内部と掘削影響領域の内部）でのガスの移行についてのモデルの作成も、FORGE プロジェクトの一部として開始されており、その結果も文書化され評価された。

**地層処分場と人工バリアの設計**

2010 年には、地層処分場の地上施設の計画策定とこの施設へのアクセスと開発、地下の施設及び関連した建設インフラストラクチュアの構成について、2 件の大規模なプロジェクトが開始された。このプロジェクトの結果として、提案されているサイト地域において施設の計画策定に関わる地質学的及び空間的な境界条件を考慮に入れながら、一般的な施設モジュールと施設全般に関して、概念的な調査が実施されている。地下の施設の作業では、地質学的な条件と潜在的な危険性のシナリオを考慮にいれながら、処分ゾーンにアクセスする様々な方法に関する分析に重点を置いている。

特別計画の第 2 段階の開始時点では、NAGRA は、6 つの地質学的候補エリアに対応する地上施設の設置区域の候補地について評価した。連邦評議会が特別計画の第 1 段階についての決定を下した後に、2011 年末に地上施設の設置区域についての提案が提出され（文献[NTB 11-01]）、2012 年 1 月 20 日に連邦エネルギー庁（BFE）が国民に発表した。これらの提案は、第 2 段階のプロセスの地域参加の枠組みで議論をするための土台となった。NAGRA は、科学技術、安全性、空間的な配置計画、環境保護、地方／地域の問題などの側面を考慮にいれながら、2 つの外部の計画策定チームの支援のもとに、これらの提案を作成した。広範な背景情報がまとめられ、段階的に候補場所を絞り込む作業において、地上施設を建設する候補地が確認された。こうした背景情報には、地上施設についての様々な計画策定調査と現場でのキャンペーンの結果、地上施設へのアクセスと開発の問題、地下施設及び関連する建設インフラストラクチュアの問題、地理情報システム（GIS）から取得したデータセット（空間的な計画設定と地質学の情報）が含まれる。

さらに英国の組織である溶接研究所（TWI）は、NAGRA の委託で人工バリアに関連して、使用済燃料と高レベル放射性廃棄物のガラス固化体のための厚肉の炭素鋼のキャニスタに関する調査を実施した。この調査結果から、提案されたキャニスタの設計であれば、製造、操業の安全性、長期的な安全性についての全ての基本的な要件を満たすことができることが示された。この調査結果を文書化するために、NAGRA の技術報告書（文献[NTB 12-06]）が作成された。現在、その他の候補となるキャニスタ素材と設計オプションについてのプロジェクトが実施されている。カナダの組織 NWMO との間では、銅でコーティングした鋼鉄キャニスタを使用する可能性が調査されている。フランスの ANDRA との別の協力調査では、セラミックをキャニスタの素材として使用する可能性が検討されている。

表 2.4-9　グリムゼル試験サイトでの第 6 段階のパートナー・プロジェクトの概要と、2012/2013 年の参加者。

| 略称とプロジェクト名 | パートナー組織 |
|---|---|
| CFM：コロイドの形成と移行 | BMWi/KIT、JAEA、KAERI、ポシヴァ社、SKB/KTH、US DOE（2012 年以来）、NDA（2013 |

| | |
|---|---|
| | 年以来)、CRIEPI 及び NAGRA。 |
| C-FRS：CRIEPI による亀裂のある岩盤調査 | CRIEPI、NAGRA。 |
| ESDRED プラグ実験:処分場の設計の工学調査と実証 | EU 枠組み計画 ESDRED が終了した後、この実験は EU の枠組み計画 MoDeRn の一部となった（www.modern-fp7.eu)。 |
| FEBEXe：実規模の HLW 人工バリア実験の延長プロジェクト | CIEMAT、ポシヴァ社、SKB 社、KAERI（2013 年から）及び NAGRA。 |
| FORGE：処分場のガス挙動 | EU の枠組み計画（www.bgs.ac.uk/forge)。 |
| FUNMIG：放射性核種の移行の基本的なプロセス | かつての EU の枠組み計画（www.funmig.com)。 |
| GAST：気体透過シール試験 | ANDRA、KONRAD、NWMO（2013 年から）及び NAGRA。 |
| LASMO：大規模モニタリング | 準備中。NDA、SURAO、NAGRA（2013 年 8 月から)。 |
| LCS：長期的なセメント調査 | JAEA、NDA、ポシヴァ社、SKB 社及び NAGRA。 |
| LTD：長期的な拡散 | HYRL、JAEA、RAWRA/NRI 及び NAGRA。 |
| MACOTE：物質腐食試験 | 準備中。NDA、SURAO、NWMO 及び NAGRA（2013 年 8 月から)。 |
| TEM：モニタリング技術の試験と評価 | EU の枠組み計画 MoDeRn の一部（www.modern-fp7.eu)。 |

2.4.6.4 グリムゼル試験サイト

GTS が行った 2012/2013 年のプロジェクトの概要を表 2.4-9 に示した。これには EU 枠組み計画のうちの 4 件のサブプロジェクトが含まれる。以下に、最近の新たな展開の概要を示した。以下の実験の詳しい説明は、付属書 D に示されている。

- 大規模な実証実験：GAST、FEBEXe
- 亀裂のある岩盤内部での放射性核種の移行挙動についての調査：CFM、LTD
- 新規の実験：LASMO 及び MACOTE

FEBEXe プロジェクトは、一定の条件のもとで 15 年間に及ぶ加熱実験を続けてきたが、2012 年 2 月に大きな展開を迎えることになった。GAST 実験では、8 か月に及ぶ設置キャンペーンが終了し、プラグが建設され、飽和が開始された。2012 年 2 月には、地層処分場での気体の形成と放出のテーマで、規制機関向けのセミナーが開催され、その後に GAST プロジェクトに重点を置いて、岩盤研究所の見学が行われた。CFM プロジェクトの一部と

して、現実的な境界条件のもとでの放射性核種の移行挙動に関する調査の一環として、放射性核種トレーサ物質を利用して、初めての移行試験が行われた。また LTD プロジェクトの一環として、放射性のトレーサ物質を利用するための準備作業が行われ、計装や、これに関連した試験に、追加の修正が加えられた。LCS プロジェクトでは集中的な試験段階が実行されて新たなデータが獲得されたが、これらのデータは現在進められている長期的な実験のための予測を行い、水理学的なモデリング活動を開始するための十分な基礎となった。2012 年 11 月には、新規のプロジェクト LASMO と MACOTE を開始するための会合が開催された。

12 か国から次の 18 のパートナーが参加している。

- 独立行政法人産業技術総合研究所（AIST）（深部地質環境研究コア、日本）。
- 放射性廃棄物管理機関（ANDRA、フランス）
- BMWi/KIT/INE（カールスルーエ技術研究所、連邦経済技術省の支援を受けた放射性廃棄物処分研究所、ドイツ）。
- エネルギー・環境・技術研究センター（CIEMAT）、スペイン）。
- 電力中央研究所（CRIEPI、日本）。
- 放射性廃棄物管理公社（ENRESA、スペイン）。
- ヘルシンキ大学：放射化学研究所（HYRL、フィンランド）。
- 日本原子力研究開発機構（JAEA）（旧 JNC、日本）
- 韓国原子力研究所（KAERI、韓国）。
- 韓国原子力環境公団（KORAD、韓国）。
- 放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA、スイス）
- 原子力廃止措置機関（NDA）／放射性廃棄物管理局（RWMD、、英国）。
- 原子力研究所（NRI、チェコ）
- 核燃料廃棄物管理機関（NWMO、カナダ）。
- ポシヴァ社（フィンランド）。
- スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社、スウェーデン）。
- 放射性廃棄物処分庁（SURAO、RAWRA、チェコ）
- 米国エネルギー省（US DOE、米国）。

2.4.6.5 ENSI の研究プロジェクト

放射性廃棄物研究プログラム（RPRW）とモン・テリ・プロジェクト、及び FORGE で実行されているプロジェクトについては、この報告書の別の部分で説明してある。ここでは SITEX、DECOVALEX、気象モデリング・プロジェクト、堆積物年代測定プロジェクトの簡単な概略を示す。

SITEX は、EU の第 7 次枠組み計画（www.sitexproject.eu）に含まれるプロジェクトである。このプロジェクトの目的は、放射性廃棄物の地層処分場に関する技術について、ヨ

ーロッパ全体の専門知識を調和させることのできるネットワークを設立することにある。過去 24 か月間に SITEX には、技術的な安全性を専門とする組織ならびに安全当局、さらに広範な専門家たちを代表する 15 の組織が参加した。このプロジェクトの目的は、操業者とは独立して、独自の技能と分析ツールを有する技術的な安全性の専門家たちの持続可能なネットワークを展開するために必要とされる条件を確立することを促すことにあるが、こうした専門家たちは操業者が実施する研究活動と協力して、独自の研究プログラムを実施することができるのである。

DECOVALEX（組み合わせモデルの開発と、実験を利用したその検証計画）は、ストックホルムの KTH 技術研究所が調整活動を担当している国際協力による研究活動である。このプロジェクトは 1992 年に開始され、地質学的な系における熱的・水理学的・力学的（THM）プロセスと熱的・水理学的・化学的（THC）プロセスの組み合わせの理解と数学的なモデリングを推進させることを目的としている。現在は 2015 年度の段階を進めており、パートナー組織にはドイツ連邦地球科学天然資源研究所（BGR）、中国科学アカデミー（CAS）、US DOE、IRSN、JEAE、KAERI、NDA、原子力規制委員会（NRC 米国）、RAWRA などがある。

ベイクセル氷河期の気象モデリングのプロジェクトは 2012 年に終了した。このプロジェクトでは、氷河期の様々な境界条件が、大気の動力学的な状況とヨーロッパ地域の降雨パターンに及ぼす影響を評価した。氷河期の間の降雨パターンの変化は、氷河の成長を左右し、地下深部への侵食を左右するので、重要な意味をもつ。放射性廃棄物の地層処分場の計画策定においては、この地下深部への侵食を考慮にいれる必要がある。このプロジェクトは、ベルン大学の気象環境物理研究所が、ENSI の委託で実行したものであり、スイスの他のプロジェクトとの協力は行われなかった。

宇宙由来の $^{10}$Be 及び $^{26}$Al を使用して、スイスの古い被覆岩層（第四紀の堆積物）の時代測定の調査が、ENSI の委託でベルン大学の地質科学研究所と ETHZ のイオンビーム物理学研究所によって実行された。これは 2012 年に開始された 3 年がかりのプロジェクトである。このプロジェクトでは、スイス北部のアルプス前地にあるスイスの古い被覆岩層の主要な堆積物の年代を決定するために、現場で取得された宇宙由来の核種によって、埋蔵プロファイル、等時線埋蔵プロファイル、深さプロファイルを確認した。このアルプス前地では、5 か所のサイトが、地層処分場の候補サイトとして検討されている。

### 2.4.7 研究開発実証計画に対するレビュー

#### 2.4.7.1 国の処分計画

NAGRA は、外国の 15 の組織との定期的な情報交換による正式な協力活動を推進している。これは様々な公式の二国間協定の枠組みで実施されているものである。様々な研究所との間では、モデルの開発とデータベースの評価のための合同プロジェクトが推進されている。NAGRA は EU の枠組み計画に参加しており、複数の国際組織に参加しており、さ

らにこうした組織のメンバーであることもある。NAGRA は放射性廃棄物処分の実施主体や広範な科学界の国際的なネットワークに組み込まれている。このネットワークの活動の重要な部分を構成しているのが、研究結果を相互にレビューする作業である。NAGRA の発表する技術報告書は、厳格なピア・レビュー・プロセスの対象となっている。また NAGRA の技術報告書が、スイスの特別計画プロセスで求められている文書作成要件に含まれている場合には、スイスの官公庁とその科学支援グループによってもレビューされている。

官公庁が資金を提供する研究プロジェクトでは、その結果を公開することが求められる。研究作業の複雑さ、国家レベルでの重要性、提供された資金の金額などに応じて、こうしたレビュープロセスは、学生の計画したプロジェクトに関して教授が行う評価程度のものから、最高の科学水準での非常に包括的で徹底した国際的なピアレビューにいたるものまである。

2.4.7.2 地下研究所において実行されたる研究活動

モン・テリ・プロジェクトとグリムゼル試験サイトで実施される研究活動は、国際的にレビューされている。パートナー組織は、放射性廃棄物の処分に関連した自国の計画に研究成果を取り入れる際に、研究成果の進捗状況を監視している。また研究成果が会議や雑誌で科学界に発表される際にも、ピアレビューを受けることになる。

2.4.7.3 放射性廃棄物の研究プログラム

特別に指定された諮問委員会やレビュー・グループが品質保証の責任を負っており、こうした委員会やグループは、関連する連邦官庁、総合大学、工科大学、その他の専門家の代表で構成されている。こうした品質保証は、プロジェクトの進展にともなって継続的に実行されるか、研究結果を最終的にまとめる際に実施される。

認知、世論の形成、受容性に関する 2008 年から 2012 年までの研究結果は、BFE が「サイト地域における見解の形成プロセスのための提案」というパンフレットで発表している。

2.4.7.4 EU の枠組み計画

欧州連合（EU）の枠組み計画の目的は、欧州の産業の科学的及び技術的な基盤を強化し、国際的な競争力を高めながら、EU の政策を支える研究活動を促進することにある。研究プロジェクトは、様々なヨーロッパ諸国からの代表が参加したコンソーシアムが実施している。財政的な援助は、プロポーザルの要請と、きわめて競争の激しいピア・レビュー・プロセスに基づいて決定される。このピア・レビューは、あらかじめ決定された中間目標が達成されるたびに実施されるだけでなく、プロジェクトが終了した後にも行われる。研究成果は、EU がプロジェクトのウェブ・サイトで発表するだけでなく、科学界や規制当局の通常の出版方法を利用して、参加したパートナーが発表している。

2.4.8 国内の大学と研究機関によって行われている研究開発実証の実施状況

2.4.8.1 スイスの処分計画に応用される基礎研究

スイスの地質学的な状況については、過去 200 年以上にわたって集中的な研究が続けられており、大規模な地域的な地質学的な条件については、高水準で理解されている。大学は広範な大規模及び小規模の地質学的なマッピング活動と基礎研究を通じて、そのための知識の獲得に大きく貢献している。現在では、様々な地域の岩盤層の空間的な分布と地質学的な変動についての多量の情報が存在しており、スイス全土の地質学的な条件についても、詳細な知識がえられている。スイスの大学で実行された修士や博士論文の執筆作業を通じて、多量の情報が蓄積されており、これらの作業の結果は公表されている。こうした研究活動はスイスの処分計画によって特に動機づけられたものではないが、処分計画に応用されている。

放射性廃棄物の地層処分を特別な目的として、大部分の研究活動を展開している組織の数は少ない。以下で紹介するのは、PSI の研究活動と、ベルン大学の岩盤・地下水相互作用研究グループの活動である。しかしモン・テリ・プロジェクトに参加している契約者のリストが豊富であることは、多数の大学と研究組織が、スイスの処分計画と国際的な処分計画に、それぞれのノウハウを通じて貢献していることを明らかにしている。モン・テリ・プロジェクトに貢献しているスイスの公的な研究組織としては、EMPA、EPFL、ETHZ、PSI、バーゼル大学、ベルン大学、フリブール大学、ジュネーヴ大学、ノースウエスト・スイス工科大学などがある。モン・テリ・プロジェクトに契約している民間企業は、100 社以上に及ぶ（この貢献には、技術支援を含む）。

2.4.8.2 パウル・シェラー研究所（PSI）、廃棄物管理研究所（LES）

PSI はスイスの廃棄物管理に関する研究活動では中心的な役割を果たしており、特定の技術的な分野で BFE を支援している。この研究所はスイスの自然科学と工学分野で最大の研究センターであり、物質と素材、保健とエネルギー、環境分野において最高水準の研究活動を実行している。PSI は 1988 年以来、基礎研究と応用研究を通じて、社会、産業、科学の分野で発生する中心的な問題に対して持続可能な解決策を提示するために作業を続けている。

原子力に関して PSI はスイスで独特な地位を占めている。PSI は放射性物質の研究作業に必要な遮蔽ゾーン「ホットセル」を含むホットラボ（照射後試験施設）という広範なインフラを有している。さらに原子炉物理の研究のための PROTEUS 施設も装備されている。またこの研究所の原子力安全研究部（NES）は、そこに装備されているシンクロトロン放射線源（SLS）と破砕反応中性子源（SINQ）を活用している。このインフラと協力組織のノウハウに基づいて、NES では次の 3 つの主要な研究テーマで活動している。すなわち現在運転中の軽水炉の安全性、将来の原子炉の概念とこれに関連した燃料サイクルの安全性に関連した特徴、放射性廃棄物の地層処分場の長期的な安全性のテーマである。NES の一

つの部門として廃棄物管理研究所（LES）があり、広範な自然科学の分野の科学者と技術者が 30 名以上勤務している。

LES の使命は、スイスの放射性廃棄物の処分オプションを支援するための包括的な研究開発計画を実行することにある。特に、放射性核種の移動の地球化学的な遅延と不動化を含めた放射性核種の移行メカニズムと、処分システムの地球化学的な条件の分野で、世界を主導する研究所となることを目指している。LES の主要な目的は、放射性廃棄物の処分に関連したメカニズムとプロセスの理解を通じて、放射性廃棄物の処分場の安全評価に特別な貢献をすること、そしてそのために必要なモデルとデータベースを提供することにある。スイスに特有な状況と、広範な科学と技術開発の現状が特に留意されている。LES はスイス国内でも国際的にも、科学界及び廃棄物管理の分野で十分に確立された地位を占めており、スイスの科学的な能力を代表する中枢とみなされている。LES が培った経験と、これらの施設で利用できるノウハウによって、LES はスイス国内の他の施設では実行できない研究活動を実施することができる。これはスイスの国家放射性廃棄物管理計画に不可欠な研究活動である。

LES での研究活動は、非常に多様な空間的規模及び時間的規模で行われているが、それはこうした方式で獲得できる可能性のある全ての情報を活用するためである。これにはたとえばナノ単位（分子モデリング）からミクロのスケール（X線吸収分光学)、センチメートル単位（研究所)、さらに現場規模と地域規模の研究（モン・テリ岩盤研究所）の研究までが含まれる。これらの全ての情報を理解し、まとめあげる作業の中心的な側面となるのが、これらの活動の発展に全ての段階で実験者とモデリング担当者の間で実行される密接な協力と相互作用である。特別計画のプロセスで NAGRA が実施している安全解析への参加が、LES の中心的な機能の一つであり、これには許認可の申請作業が含まれる。

LES が実行している研究活動の主要な分野は次のように分類できる。

- 現位置条件での地球化学的な条件の研究とその時間的な変動。この分野での研究活動には、地下水と間隙水の化学的な条件の初期システムの確定、ニアフィールドとファーフィールドの両方の鉱物学的な条件、放射性核種の溶解度、放射性核種の溶解度の経時的な変化のモデリング（これにはセメントや腐食生成物などの物質が、ニアフィールドのその他の物質や母岩と起こす相互作用や、これらの相互作用を通じてこうした物質の特性がどのような変化するかについての考察を含む）などがある。この作業のためには、GEMS のような種化のコードと、MCOTAC などの反応性の移行コードと、種ごとの熱率学的なデータベースの最新の水準のものが必要とされる。これらのコードは LES の内部でさらに開発され、維持されている。
- 放射性核種の保持と移動の遅延：この作業は主として、現実的な化学的な条件のもとで、安全性に関連する放射性核種が、関連したシステム（粘土岩、ベントナイト、セメント）に取り入れられるプロセス（収着、一体化、固体溶液の形成、表面への沈殿など）について力学的に理解し、予測モデル／コードで、これらのプロセスを

定量化するという課題にかかわるものである。この情報を使用して、性能評価で利用されるデータベースでの収着値が選択される。長期的には、特定の条件のもとでの収着値を計算するための熱力学的な収着データベースを開発することを目的としている。

- 処分場システムの内部での移行：この作業の主要な目的は、粘土成分の豊富な鉱物システムとセメントの内部での拡散メカニズムを理解し、長い時間的なスケールで、長距離にわたって発生する放射性核種の移行を予測するために利用できるようなモデルを開発し、こうしたモデルによってこのプロセスを定量的に記述することにある。この活動には、研究所と現場での実験の解釈とモデリング、拡散パラメータの提示と、放射性核種の移行をさらに現実的にモデリングする能力を開発するために、組み合わせコードの内部に、熱力学的な種化のコード（固体溶液）と収着モデルを統合する試みが含まれる。
- 安全解析：性能評価では、ニアフィールド（セメント状の物質、圧縮されたベントナイト、ベントナイトと石英砂の混合物）についての知識と、ファーフィールドのシステム（粘土状の母岩層）の知識が実用化されることになる。システムの収着の挙動を推定することで、廃棄物の内部でのそれぞれの放射性核種の放出を時間の関数として計算することができる。これによって、人間に対する将来の放射線学的な影響を推定することができる。予測された個人線量の影響の組み合わせの結果を、基準値と比較することで、処分場システムの安全性について考察することができる。

2.4.8.3 ベルン大学、地質学研究所

この研究所に所属する 7 つの研究グループのうちの 1 つのグループは、岩盤と地下水の相互作用を専門としており、放射性廃棄物の地層処分に関心を抱いている。このグループが長期的な地質学的な診断のために適用している方法は、次のようなものである。

- 将来を推定するための基礎として、岩盤層の地質学的な変動の特性を調査する。
- ナチュラルアナログを分析する。
- モデル計算。

研究プロジェクトには次のようなものがある。

- 粘土層の内部での岩盤と地下水の相互作用。
  - オパリナス粘土、スイス北部。
  - オパリナス粘土、モン・テリ岩盤研究所。
  - Palfris 泥灰岩、ヴェレンベルグ、スイス。
  - FEPCAT プロジェクト。
  - 国際的な粘土岩プロジェクトへの参加。
- 結晶岩の内部での岩盤と地下水の相互作用。
  - 花崗岩、グリムゼル試験サイト、スイス。

- 閃緑岩、エスポ岩盤研究所、スウェーデン。
- 花崗岩、瑞浪超深地層研究所、日本。

・ 地上環境における岩盤と地下水の相互作用。
- 臨界負荷。

・ 岩盤と地下水の相互作用の実験。
- 長期的な流動実験。
- 高 pH の流体と岩盤の相互作用。

・ 廃棄物と地下水の相互作用。
- 飛散灰との相互作用。
- 二次資源物質。

・ 流体の包含
- 地圏の内部の流体の物理化学的な特性。
- 岩盤層の内部での流体の形成と移行。
- 熱水鉱石床。

このグループの研究活動がスイスの放射性廃棄物の管理活動にどのような意味を備えているかは、近年のこのグループの科学的な出版物の一部からも明らかである（http://www.geo.unibe.ch/publikationen 参照）。

2.4.9 国内の大学と研究機関によって行われている研究開発実証の資金

連邦政府は、処分の実施主体が資金を拠出する研究活動の成果の可能性を意識している。一部の研究活動が、処分の実施主体から完全に独立した形で行われるようにするため、ENSI と大学が独自で科学技術研究を実施するために十分な資金を与えられるようにされている。しかしこうした研究活動も、NAGRA の研究活動を補足したり、NAGRA との協力で実行されたりすることがある。また規制で要求されていない社会科学的な研究活動は、連邦政府、たとえばスイス国家科学財団（SNF）が全ての資金を提供している。

PSI で実施されている作業の大部分は、連邦政府の委託で行われているものであり、スイスの原子力発電所を運転している電力会社、NAGRA、ENSI との密接な協力のもとで実施されている。こうした研究活動の大部分は、多国籍の国際的なプロジェクトと関連している。これらの活動には連邦政府、NAGRA、その他の団体が資金を提供している。

以下に、2012 年に PSI/LES で実行された作業に NAGRA がどのように貢献しているかを示す実例を示した。一般に NAGRA は LES の予算の約 50%を提供している。

| 2012 年の NAGRA の研究予算の提供（単位は千スイスフラン） | 2012 年<br>合計 R&D | 2012 年合計 | 2012 年<br>合計 R&D | 2012 年詳細 |
|---|---|---|---|---|
| 研究施設 CH | 3,851 | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| PSI | | 4,200 | **2,980** | |
| PSI の研究開発 | | | | 2,083 |
| PSI のセメントの化学的な状況の研究 | | | | 897 |
| PSI のその他の研究活動 | | | | 1,220 |

ベルン大学の岩盤地下水相互作用グループは、プロジェクト・パートナーとして、モン・テリ岩盤研究所で実施行されているプロジェクトに現物給付を行っているか、NAGRA やその他のプロジェクト・パートナーとの契約で、特定の分析作業に貢献している。

2.4.10 付属書

略称と翻訳、及び本文に記載されている各プロジェクトの詳細について以下の付属書に整理する。

・付属書 A　略称と翻訳
・放射性廃棄物研究プログラムにおけるプロジェクト
・モン・テリ・プロジェクトの実験
・グリムゼル試験サイトでの主要なプロジェクト

(1) 付属書 A　略称と翻訳

**表2.4.A-1　組織、計画、研究場所の名前の略称と翻訳**

| 英語 | | ドイツ語 | | 日本語訳 |
|---|---|---|---|---|
| 略称 | 正式名称 | 略称 | 正式名称 | |
| --- | Cantonal Commission | AdK | Ausschuss der Kantone | 州委員会 |
| --- | Technical Coordination Group of Siting Cantons | --- | Fachkoordination Standortkantone | サイト地域所在州技術調整グループ |
| KES | Cantonal Expert Group on Safety | KES | Kantonale Expertengruppe Sicherheit | 州安全専門家グループ |
| KNE | Commission for Nuclear Waste Disposal | KNE | Kommission Nukleare Entsorgung | 放射性廃棄物管理委員会 |
| NSC | Federal Nuclear Safety Commission | KNS | Kommission für Nukleare Sicherheit | 原子力安全委員会 |
| DETEC | Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications | UVEK | Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation | 環境・輸送・エネルギー・通信省 |
| FOEN | Federal Office for the Environment | BAFU | Bundesamt für Umwelt | 連邦環境庁 |
| FOSD | Federal Office of Spatial Development | ARE | Bundesamt für Raumentwicklung | 連邦国土計画庁 |
| FEDRO | Federal Roads Office | ASTRA | Bundesamt für Strassen | 連邦道路庁 |
| SFOE | Federal Office of Energy | BFE | Bundesamt für Energie | 連邦エネルギー庁 |
| FOPH | Federal Office of Public Health | BAG | Bundesamt für Gesundheit | 連邦公共保健庁 |
| --- | Expert Group on Deep Geological Repositories | EGT | Expertengruppe geologische Tiefenlagerung | 地層処分場専門家グループ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| --- | German Expert Group on Swiss Repositories | ESchT | Expertengruppe Schweizer Tiefenlager | スイスの処分場に関するドイツの専門家グループ |
| SGT | Sectoral Plan for Deep Geological Repositories | SGT | Sachplan geologische Tiefenlager | 特別計画「地層処分場」 |
| SES | Swiss Energy Foundation | SES | Schweizerische Energie-Stiftung | スイスエネルギー財団 |
| ENSI | Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate | ENSI | Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat | 連邦原子力安全検査局 |
| FWNW | Swiss Federal Workgroup for Nuclear Waste | AGNEB | Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung | 放射性廃棄物管理ワーキンググループ |
| --- | Technical Forum on Safety | --- | Technisches Forum Sicherheit | 安全技術フォーラム |
| --- | Nuclear Waste Management Advisory Board | --- | Beirat Entsorgung | 放射性廃棄物管理諮問委員 |
| WMP | Waste management program | EP | Entsorgungsprogramm | 廃棄物管理プログラム |
| EKRA | Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste | EKRA | Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle | 放射性廃棄物の処分概念に関する専門家グループ |
| GTS | Grimsel Test Site | FLG | Felslabor Grimsel | グリムゼル試験サイト |
| FMT | Mont Terri Rock Laboratory | FMT | Felslabor Mont Terri | モン・テリ岩盤研究所 |
| PSI | Paul Scherrer Institute | PSI | Paul Scherrer Institut | パウル・シェラー研究所 |
| ETHZ | Swiss Federal Institute of Technology Zurich | ETHZ | Eidgenössische Technische Hochschule Zürich | スイス連邦チューリッヒ技術研究所 |
| --- | ETH Council | --- | ETH Rat | ETH 評議会 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| RPRW | Research Programme Radioactive Waste | --- | Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle | 放射性廃棄物研究計画 |
| LES | Laboratory for Waste Management (PSI) | LES | Labor für Endlagersicherheit | 廃棄物管理研究所（PSI） |
| NES | Nuclear Energy and Safety Research Department (PSI) | NES | Nukleare Energie und Sicherheit | 原子力安全研究部（PSI） |
| SNF | Swiss National Science Foundation | SNF | Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung | スイス国家科学財団 |
| KIT | Commission for Innovation and Technology | KIT | Kommission für Innovation und Technologie | 技術革新委員会 |
| SERI | State Secretariat for Education, Research and Innovation | SBFI | Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation | 国家教育研究革新事務局 |

(2) 付属書 B　放射性廃棄物研究プログラムにおけるプロジェクト

### RPRW 1.1　モニタリング段階：規制、資金調達、組織

背景／問題点：「廃止措置・廃棄物管理基金令」では、モニタリング段階は 50 年間とされているが、地層処分の概念ではモニタリングは数百年間まで可能とされている。このような長期的なモニタリングを実施するためには、特別な保守と資金調達が必要となり、モニタリングの終了時期はおそらく社会的または政治的な決定によって決まることになる。モニタリング段階における社会的な危機の状況においても、処分場を迅速に閉鎖するオプションが維持できるように、準備しておくべきである。

目的：モニタリング段階のための規制と組織の枠組みを明確にする必要がある。そのためには次の質問に答える必要がある。法的な枠組み、組織的及び制度的な構造、安全措置に対して、どのような要件を定めるべきか。数世紀の長さにわたって運営することに成功してきた組織の特別な特徴はどのようなものか、またこの経験から、長期的に安定した運営を実現するためにはどのような組織的な前提条件が必要であると判断されるか。特別な法的な要件はどのようなものか。どのようにすればノウハウを長期的に保存することができるか。特別な安全要件とセキュリティ要件はどのようなものか。そこからどのような社会的な要件が発生するか。モニタリング段階の最初の時点で要件を満たすためには、特別計画に関連して現在どのような行動をする必要があるか、どのような措置が重要となるか。

アプローチ：文献調査。

組織：このプロジェクトは、社会科学、法律、放射性廃棄物管理の専門家で構成されるグループが作業を進めている。

費用：約 100 人・日。すなわち 120,000 スイスフラン（約 1,300 万円）（1 スイスフラン＝109 円で換算、以下同じ）

結果：まだ発表されていない。

### RPRW 1.2　ノウハウの保存と標識の概念

背景／問題点：原子力法では、処分場についてのノウハウを長期的に保存できるように文書を作成することを求めている。処分場を閉鎖した後にも、処分場の場所と処分された廃棄物の内容についての情報を利用できなければならない。時間の経過とともに情報の伝達はますます困難になり、処分場に偶然に侵入するリスクが伴う。処分場の標識の作成は、知識を保存する一つの方法である。

目的：問題点と解決策の可能性について、現在理解されている内容の概要を示すこと。これは国際的な文脈においても実現する必要がある。主要な課題として、長期的な標識の

作成を支持する意見と反対する意見にはどのようなものがあるか。長期的な標識の必要性と実現可能性は、どのように評価されるか。

アプローチ：文献調査。

組織：この調査は独立した地質学者と社会科学者が実施している。諮問委員会には、連邦エネルギー庁（BFE）の 3 名のスタッフと連邦原子力安全検査局（ENSI）の 2 名のスタッフの合計 5 名のスタッフが参加している。

費用：文献調査に 40,000 スイスフラン（436 万円）、OECD のプロジェクトに参加するために毎年 8,000 ユーロ（約 106 万円）（1 ユーロ=133 円で換算、以下同じ）。合計予算は 120,000 スイスフラン（約 1,300 万円）。

結果：2010 年に最終報告書が発表されたが、この報告書の結論は、ノウハウの保存についての基本的な問題点が認識されているというものだった。しかし処分場にどのような標識を作成するかという具体的な問題は、公衆の議論とさらなる研究が必要なテーマである。国際的なレベルで標識の問題を研究するために、スイスは経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）の研究、通信、標識作成プロジェクトに参加している。このプロジェクトの目的は、2013 年までに合同文書を作成することであり、この文書で様々なテーマが考察され、それぞれの参加国が適切な行動計画を決定することができる。

### RPRW 2.1　社会とのコミュニケーション

背景／問題点:特別計画の策定が進められていた 2007 年に研究プロジェクトが開始され、広範なコミュニケーションの必要性が確認された。このプロジェクトは現代社会でますます議論されるようになっている問題点、すなわち複雑な問題に対処するために、科学界、インフラの運営者、官公庁、社会利益集団、住民の間の対話をどのようにして改善するかという問題点にかかわるものである。

目的：主要な目的は、特別計画の参加プロセスに加わる人々と連邦当局の情報伝達とコミュニケーションの活動に適用される原則を定めることにある。このプロジェクトは、関連当事者の間で信頼を構築し、対話を実現する方法を確認することが狙いであった。

アプローチ : 文献調査。特にその他の欧州諸国で、その他のインフラの問題に関連して、コミュニケーションプロセスで採用されている評価基準を確認すること、事例研究を基準に基づいて分類評価すること、コミュニケーションと参加プロセスを分析すること、分析結果を総合すること、情報伝達、コミュニケーション、参加について一貫性のある概念を勧告することを目指した。

組織：この調査は、独立した政治科学者と意思疎通を専門とする企業のコンソーシアムが実施した。諮問委員会の 10 名のメンバーは BFE の 2 名、ENSI の 2 名、原子力施設安

全委員会（KSA）の 1 名、連邦国土計画庁（ARE）の 1 名、及び特別計画のプロセスで設立された地域会議の 4 名の代表で構成された。

費用：BFE が 80,000 スイスフラン（872 万円）の予算を立てたが、官公庁と研究組織から追加予算を提供するオプションが定められている。

結果：このプロジェクトは 2009 年に終了し、2 件の最終報告書が作成された。これは科学的な調査結果についての最終報告書と、特別計画のプロセスにおけるサイト地域所在州とのコミュニケーションの原則について最終報告書である。主要な結論は、コミュニケーションは信頼できるものでなければならず、また包括的で、目標とするグループに焦点を合わせ、開かれたものでなければならないというものだった。サイト地域所在州とのコミュニケーションにおいて様々な官庁が採用することのできる実際的なアプローチを示すために、26 ページのパンフレットが作成された。研究成果を伝えるための会議も開催された。

### RPRW 2.2　参加に関連した付随的な研究

背景／問題点：特別計画の枠組みでの地域参加活動によって、サイト地域の利益とニーズが考慮にいれられるべきである。そのために必要な構造は、6 か所の地質学的候補エリアの地方自治体、組織、公衆が一体となって参加することで、作り出されている。地域会議も設立された。

目的：この研究活動の結果は、参加プロセスを改善し、その長所と短所を認識し、地域会議に適切な支援を提供するために、BFE を支援するものであるべきである。回答すべき問いとしては、次のようなものがある。これまでの地域参加によって、どのような経験と結論を引きだすことができるか。期待は実現されたか。実現されなかったとすれば、その理由は何か。短期的及び中期的に、参加プロセスをどのように改善できるか。プロセスを実施するにあたって、どのような枠組み条件が特に貴重な役割を果たしたか。

アプローチ：フェーズ 1：2009 年半ばから 2011 年までの特別計画の第 1 段階における地域参加を構築するプロセスの定性的な分析。理論的な基礎の実現に重点を置く。フェーズ 2：最初の概念的な規定と、実際の実現及びその結果と比較して、プロセスを開始した時点から特別計画の第 2 段階の最後（2016 年に予定されている）までの地域会議を評価する。BFE は、特別計画による将来の大規模プロジェクトに関して、どのような教訓を学ぶことができるか。

組織：公衆に参加を要請する。

費用：フェーズ 1 は 40,000 スイスフラン（436 万円）（2013 年初め）、フェーズ 2 は 300,000 スイスフラン（約 3,300 万円）（2013 年から 2016 年）

結果：これまではまだ発表されていない。

### RPRW 3.1　放射性廃棄物の処分の枠組みでの様々な価値観と見解

背景／問題点：個人が当局を信頼するかどうかは、どのようなメッセージが送られたかだけではなく、誰がそうしたメッセージを送ったかによって左右される。処分場の立地プロセスでは、安全性と経済的な側面の他に、統治能力（すなわち政治と行政を通じた管理と指導）が重要な役割を果たす。そのためにはコミュニケーションと情報伝達が重要な要素となる。地層処分場の枠組みで特に意見が聴取される住民グループは小規模で、明確に確定されている傾向がある。しかしこうした住民グループは住民全体のごく一部にすぎない。公衆の大多数は無関心な反応を示しており、こうした公衆に影響を与える見解やその他の要因は知られていない。プロジェクト 2.1「社会とのコミュニケーション」は、知見の水準にかかわるものである。プロジェクト 3.1 は、スイスにおける地層処分場について支配的な価値と見解についての情報を取得するために利用されている。

目的：主要な目的は、スイスにおける放射性廃棄物の処分の問題に関連した様々な価値観と見解について、最新の情報を得ることにあった。第二の目的は、地層処分場に関連した見解が形成される際に、価値観がどのように影響するかを評価することにあった。

アプローチ：関係する住民の必要とする情報に沿って、目標とするアプローチを採用するための基礎として、調査で確認された事柄を利用することが意図されていた。そのための作業には、価値モデルについての文献調査、世論の形成における価値観のタイプの確認、放射性廃棄物の処分についての価値観と見解についての一連のインタビュー、特別計画と関連する調査結果についての議論などが含まれた。

組織：このプロジェクトは 2010 年春に開始され、ETHZ の環境決定研究所（IED）から派遣された 4 名のチームが実施した。このプロジェクトの諮問委員会は、BFE、放射性廃棄物管理諮問委員会の 9 名のメンバーと、地域会議の 1 名のメンバー、チューリッヒ大学の 2 名のメンバー、チューリッヒ州とベンケン地方自治体のそれぞれ 1 名のメンバーで構成された。

費用：BFE は 100,000 スイスフラン（約 1,100 万円）の予算を立てたが、官公庁や研究所からさらに資金の提供を受けるオプションを保持している。

結果：インタビューを実施した結果、質問した人の半数は、地層処分に対して中立的な姿勢を示していることが確認された。研究担当者たちは、大規模な情報提供イベントを開催するよりも、小規模な対話集会を開催して、これらの中立的な人々に世論の形成プロセスに参加するように促すことを提案した。2011 年 11 月には ETHZ のプロジェクト・チームが、スイスエネルギー研究会議でこの調査結果を発表したが、ほぼ同時に最終報告書も発表された。BFE は 2012 年 7 月には、サイト地域所在州での世論形成を促進する方法について、パンフレットを発表した。

### EPRW 4.1　廃棄物管理方法の比較

背景／問題点：スイスでは非放射性廃棄物の管理は環境保護法によって規制されているが、放射性廃棄物の管理は原子力法と放射線防護法で規制されている。廃棄物管理方法の比較によって、有機物質や金属物質の統合などに関して、大きな違いが確認された。例えば環境保護法は金属物質を資源とみなしており、廃棄物から分離して、リサイクルする必要があることを定めている。

目的：このプロジェクトでは、放射性廃棄物と非放射性廃棄物の現在の管理方法に関して、戦略的及び科学的に検討を加えることに重点を置いている。特に廃棄物の減容化措置、有機物を含む放射性廃棄物の取り扱い、地層処分場における金属物質の処分などが重視されている。関連規制や環境保護法の規定が十分に考慮にいれられていないと判断された場合には、このプロジェクトで、それに応じた行動の必要性に特に注目すべきことが指摘された。

アプローチ：会合や議論のための科学的及び技術的な情報の作成、専門家に対する補足的な情報の追加要請、様々な組織への調査結果の口頭での紹介、最終報告書の作成などが行われた。

組織：ENSI が連邦環境庁（BAFU）、連邦公衆保健局（BAG）、原子力安全委員会（KNS）とともに、調査を準備した。特定の問題については、研究チームは原子力産業の専門家〔（原子力発電所の運転者、ヴュレンリンゲン放射性廃棄物集中中間貯蔵施設（ZZL）、PSI、NAGRA〕の支援を受けた。

費用：最終報告書の発表のための費用は 5000 スイスフラン（約 55 万円）。

結果：この調査によって、原子力発電所の運転及び運転後段階で発生した樹脂、凝縮物、混合廃棄物が、地層処分場において重要な意味をもつことが確認された。これらの廃棄物の組成は十分に知られており、詳しく文書化されている。放射性廃棄物に含まれるこれらの廃棄物と金属構成部品の量を最小限にするための措置が採用されている。最終報告書は 2013 年末に発表される予定である。

### RPRW 4.2　環境保護

背景／問題点：原子力法では、人間と環境の放射線防護を要求している。この要求によって、人間以外の種も自動的に保護されるものと想定されている。国際的な科学界は最近、これが正しいことを示す確証を求めるようになってきた。

目的：処分場の近隣に生息する人間以外の生物が保護されることを示そうとする国際的な活動の概要を示すことが目的である。特に国際放射線防護委員会（ICRP）、IAEA、OSPAR プロジェクト（OSPAR 条約は、北東大西洋の海洋環境の保護のための国際協力を指導する

現行の法的な手段である）についての検討と、人間以外の種の保護基準の作成のために、規制機関と処分場操業者の調査の検討に、焦点が当てられている。

アプローチ：文献調査。

組織：専門家や組織に委託契約。

費用：合計 6 人・週の作業に 36,000 スイスフラン。

結果：これまではまだ結果は示されていない。

### RPRW 4.3　パイロット施設の設計とインベントリ

背景／問題点：原子力令では、地層処分場にはパイロット施設を建設すること、そしてこの施設で全体の廃棄物のインベントリを代表する少量の放射性廃棄物を貯蔵することが定められている。このパイロット施設のモニタリングの結果が、主処分施設の安全性を確証するために役立つことになる。

目的：この研究プロジェクトの目的は、パイロット施設に定める必要のある要件を決定することにある。すなわち、このパイロット施設の場所、装備、モニタリングすべき最も重要なプロセスを確定することである。現在の規制で定めた規定は十分なものだろうか。社会的な期待はどのようなものだろうか。パイロット施設を操業することで、どのような疑問に答える必要があるだろうか。主処分施設のインベントリとの関係で、パイロット施設のインベントリはどのようなものに決定する必要があるだろうか。特定の結論を引き出すためには、どのような特性を、どのような期間にわたってモニタリングする必要があるだろうか。セキュリティ要件はどのようなものだろうか。モニタリング段階において、特別な安全性とセキュリティのための要件はどのようなものになるか。規制と組織面の特別な要件はどのようなものだろうか。

アプローチ：文献調査によって、モニタリング可能なプロセス、パイロット施設の設計とインベントリの概念の作成、そして長期的なモニタリング可能な特性に基づいて、モニタリング段階において機能する処分場システムのプロセスについての初期的な概要が明らかになる。これに基づいて、一般的に適用される勧告が作成される。

組織：プロジェクト「4.4 モニタリングの概念と施設」及びプロジェクト「4.10 処分場のレイアウト」と調和のとれたアプローチが必要である。2013 年末までには中間調査結果が発表されよう。その後、特別計画の第 2 段階のプロセスの評価が行われるまで、休止期間が置かれよう。2016 年にはこのプロジェクトが最終的に仕上げられる予定である。このプロセスは ENSI の内部で実行されるが、ENSI は、ENSI、swisstopo、ETHZ、安全に関する州ワーキング・グループ（AG SiKa）、さらには外部専門家の代表で構成される作業グループを設立することになる。

費用：スイスの国内外からの外部専門家の費用として 60,000 スイスフラン（654 万円）。

結果：2012 年にはベルギーの HADES 岩盤研究所と、モン・テリ岩盤研究所で得られた長期的なモニタリングの経験の評価が行われた。予想外のモニタリング結果や変化にどのように対処するか、モニタリング・システムに対して社会はどのような期待を抱いているかについて議論が行われた。このプロジェクトと RPRW4.10 の中間報告書は、2013 年末に発表される可能性がある。

### RPRW 4.4　モニタリングの概念と施設

背景／問題点：原子力法と原子力令は、廃棄物を定置した後から最終的に閉鎖するまで実施されたモニタリング段階において、処分場をモニタリングすることを求めている。人工バリア・システムのモニタリングのためには、パイロット施設が利用される。その結果をモデルの予測と比較して、長期的な安全性が評価される。

目的：この研究プロジェクトの目的は、パイロット施設に定める必要のある要件を決定すること、すなわちパイロット施設の場所、施設、モニタリングする必要のある最も重要なプロセスについて決定することにある。これには、岩盤研究所を建設する以前の環境モニタリングと、処分場の閉鎖後にもモニタリングを続ける可能性についての評価が含まれる。ENSI は、可能なモニタリング概念と技術について、完全な概観を作成する必要がある。このプロジェクトによってさらに、パイロット施設のモニタリング要件を確定する際に決定すべき事柄の基礎を確立させるべきである。

アプローチ：この調査では、きわめて類似した問題点を取り扱っているプロジェクト「4.3 パイロット施設の設計とインベントリ」ならびに EU のプロジェクト MoDeRn（処分場の安全な操業と段階的な閉鎖のためのモニタリング要件）と調和したアプローチが必要とされる。MoDeRn は 2013 年に終了するが、これはモニタリング概念と施設に関する RPRW プロジェクトが、その主要な作業段階に取りかかっていることを意味する。このプロジェクトは新たに得られたノウハウを統合し、スイスの処分場でどのようなことが実施できるかを評価することになる。ENSI は MoDeRn プロジェクトの会議、作業部会、会合に出席することで、このプロジェクトを詳細に見守っている。

組織：この調査は ENSI が実施している。

費用：スイス国内外の外部専門家のための費用として 60,000 スイスフラン（645 万円）。

結果：2013 年末には中間報告書が発表される予定であり、2016 年には最終報告書が発表される可能性がある。

### RPRW 4.5　危機状況において処分場を閉鎖するための規定

背景／問題点：地層処分場のモニタリング段階において、社会的な動乱が発生した場合には、処分場を迅速に閉鎖するオプションが用意されているべきである。モニタリング段階は数十年間、あるいは場合によっては数世紀もの間、維持されることがあり、その間に社会的または経済的な危機が発生することがある。EKRA は 2000 年と 2002 年の調査において、処分場を迅速に閉鎖するか、場合によっては自己密封性のメカニズムを検討することを提案した。この考え方は ENSI-G03 に取り入れられた。2007 年には、ENSI が委託した企業が、この問題についての初期調査を実施した。この調査では、操業段階とモニタリング段階における危機シナリオを検討し、迅速な閉鎖が可能な措置を考察した。この調査の結論として、迅速な閉鎖の概念は、技術的な措置だけに依拠してはならず、処分場のレイアウトと操業のための計画設定段階から、暫定的な措置が必要であることが示された。

目的：地層処分場の組織的なシナリオとシステム分析に基づいて、操業段階とモニタリング段階における危機状況において、迅速な閉鎖措置を実施する必要性を明確にすることが目指されている。この調査は、以下のような様々な問いによって導かれている。廃棄物が定置される段階のプロセスはどのようなものか。処分場を迅速に閉鎖することが求められる危機状況には、どのような種類のものがあるか。どのような措置が可能であり、こうした措置はどのような要件を満たす必要があるか。長期的な安全性の観点からは、こうした措置はどのように評価しなければならないか。モニタリング段階においては、HLW 処分場のどの部分が開かれたままになっていて、閉鎖する必要があるか。危機状況におけるリスクに対して、どのような計画設定、レイアウト、操業措置で対処することができるか。その際には、IAEA の保障措置要件を遵守する必要がある。

アプローチ：処分場の操業段階とモニタリング段階における操業プロセスとスケジュールについて、まず分析する必要がある。その分析結果が、起こりうる危機状況のための組織的なシナリオとシステム分析の基礎となる。第二のステップとして、処分場を迅速に閉鎖する必要のある出来事を確認する。最後のステップで、機能的な要件のリストを作成する。

組織：ENSI は外部の専門家が実行する調査を準備するための作業グループを主導する。NSC がこのプロジェクトを詳細に見守り、その作業に NSC のニーズが取り入れられるようにする。

費用：外部の専門家の費用として約 40,000 スイスフラン。

結果：これまではまだ結果は発表されていない。

### RPRW 4.6　容易な回収可能性

背景／問題点：処分場から放射性廃棄物を回収することが望まれるか、または必要とされるようになるのは、安全性の理由、社会政治的な理由、経済的な理由によるものである。NEA の 2002 年の報告書では（「放射性廃棄物の地層処分の可逆性と回収可能性。国際的なレベルでの考察」）、処分場の目的は放射性廃棄物を長期的に受動的に安全に隔離することにあり、回収可能性の優先順位は低いことが指摘されている。回収可能性の別の側面として、燃料サイクルの最適化と持続可能性がある。

目的：この調査の目的は、原子力法の枠組みにおいて、容易な回収可能性の問題についての最新の知識をまとめることと、適切な勧告を作成することにある。原子力法に基づいて、地層処分場からの容易な回収可能性はどのように定義することができるか。どのような技術的な措置と工学的な措置が必要になるか。長期的な安全性にどのような影響が生じるか。

アプローチ：文献調査、特定の技術的な問題点を明確にし、現在利用できる解決策を探すこと、容易な回収可能性を促進する可能性のある措置や処分場条件の概要を示すこと、これらの措置を長期的な安全性の観点から評価すること。

組織：地質学及び安全性に関する専門知識を備えた独立した専門家の作業グループを設立し、最大で 8 名で構成される諮問委員会を設置する。

費用：4 人・月または 100,000 スイスフラン（約 1,100 万円）。

結果：これまではまだ結果は発表されていない。

### RPRW 4.7　物質科学の問題

背景／問題点：ベントナイトのように粘土の豊富な物質は（砂と混ぜるかどうかを問わない）、高レベル放射性廃棄物の処分場では、ニアフィールドの重要な構成要素となる。この物質を使用するためには、長期的な安全性評価のために、飽和と高温の過渡段階におけるこの物質の挙動を包括的に理解する必要がある。規制当局はそうした知識を備えていなければならない。廃棄物コンテナの素材は、安全性に関連したプロセスに大きく影響する。鋼鉄コンテナに代わる素材として検討されているのは、銅で被覆した鋼鉄コンテナか、セラミック素材のコンテナである。さらに異なる物質を処分場で組み合わせて利用すると、化学的に相互作用を起こす可能性がある。こうした相互作用で発生する可能性のあるプロセスは、長期的な安全性の観点から理解しなければならない。

目的：このプロジェクトの目的は、物質科学の分野で当局の専門知識を構築することにある。当局は、評価を実施するために、また有能な専門家として廃棄物発生者と議論するために、ノウハウが必要である。重要な問題点は、粘土を豊富に含む物質が、高温、気体

の圧力、地下水の圧力、力学的な圧力、気体の移行と地下水の飽和の影響に同時にさらされた場合にどのような挙動を示すか、地層処分場の多重バリアの素材の間でどのような化学的な反応が発生するか、地下深部の処分場の条件でコンテナ素材に使われる可能性のある物質が腐食するかどうか、こうした物質が腐食生成物にどのように影響するかなどである。

アプローチ：物質科学についての基本的な知識を備えたスタッフや科学者を指名し、彼らを特定のプロジェクト作業で訓練する。こうしたプロジェクト作業には、モン・テリ岩盤研究所で実施されている研究プロジェクトでの物質科学の作業や、スイスの計画に関連性のある国際的なプロジェクトでの物質科学の作業がある。必要な場合には、外部の専門家が実施する契約作業によって、ノウハウの形成を促進することができる。

組織：物質科学の問題点は、ENSI の担当部局の内部での組織的な措置によって処理している。そのためには、職員の指名、訓練計画の作成、国際的なプロジェクト（URL のプロジェクト）や国際的なプロジェクト（EU の枠組み計画）への参加が行われている。ENSI のモデリング・グループを強化することにより、学際的な問題にも（熱・水理学・化学プロセスの組み合わせ)、包括的に取り込むことが可能になる。ENSI は独自の計算結果を、ニアフィールドの変化に関して実験で獲得したデータと比較するために、DECOVALEX プロジェクトに参加している。

費用：担当者は ENSI の職員でなければならない。費用は海外への出張費、場合によっては、EU の枠組み計画などでの付随的なパートナー・プロジェクトへの出資などである。3 年から 4 年間ごとの費用は約 100,000 スイスフラン（約 1,100 万円）である。

結果：まだ報告されていない。

### RPRW 4.8　長期的な安全基準

背景／問題点：一般に地層処分場では、緩慢なプロセスによって、非常に長期間の後に、長寿命の放射性核種が放出されるにいたる条件が発生するものと考えられている。長期的な安全性の評価は一般に、現在の放射線防護の要件によって、仮想的な住民を保護するという目標に基づいている。しかし、生命形態の生理学的な構成とは独立したその他の基準も、関連してくるかもしれない。たとえば処分場の近くの環境の放射線学的な特性で自然に発生する変化などである。

目的：規制を決定する基礎として、スイスの自然の地質学的な背景環境について、放射線学的なデータを作成することが目指されている。中心となる問いは、定量的な防護基準をどのように定義できるか、こうした定義を自然の放射線学的な条件に基づいて、どのように維持できるかということである。

アプローチ：文献調査と基準の提案。

組織：ENSI の内部と外部で実行された研究プロジェクトと諮問委員会。

費用：4 人・月または 100,000 スイスフラン（約 1,100 万円）。

結果：ENSI-G03 を参照されたい。

### RPRW 4.9　パラメータの不確実性の影響

背景／問題点：安全解析を実施する際には、プロセスのパラメータの不確実性を考慮に入れて、それが結果に及ぼす影響を評価する必要がある。その一つの側面として、パラメータの値が変動する際に、数値モデリングの結果がこれによってどのように影響を受けやすいかという問題がある。この状況は、複数の変動するパラメータが、確率分布によって記述される確率論的なリスク評価と類似したものである。規制当局は、不確実性を管理するために使われる技術についての知識を持ち、これを理解しておく必要がある。

目的：規制当局はパラメータの不確実性の管理に関して能力を確立すべきである。規制当局はまた、複雑な感度解析をみずから実施するためのノウハウを取得すべきである。重要な問題点としては、多次元の感度解析と、多次元の確率分布の数値解析のための実際の計算方法の問題がある。その結果は、規制について決定するための土台として役立つことになる。中心的な問いは、感度解析において、複数のパラメータの同時的な変動を評価するために適した方法はどのようなものか、また確率論的なアプローチを採用することを前提とした上で、複数の変数に応じて変化する目標特性を、十分な変動幅の特性のスペクトルとして提示するにはどのようにすればよいか、などである。

アプローチ：当局がすでに雇用している適切な専門家を、外部の訓練コースを利用してさらに訓練する。

組織：職員を指名し、訓練計画を作成する。

費用：なし。

結果：まだ報告されていない。

### RPRW 4.10　処分場のレイアウト

背景／問題点：処分場のレイアウトについての要件は、原子力法、原子力令、規制指針 ENSI-G03 に明記されている。NAGRA は特別計画の第 1 段階において、様々なレイアウトのオプションを提案した。次のステップとしては、粘土の豊富な岩盤層に建設する処分場のレイアウトを安全性の観点から最適化する作業がある。

目的：このプロジェクトは、異なった処分場の構成要素の基本的なレイアウトを検討し、さらに局地的な地質学的な環境と母岩の特性を考慮にいれるものである。たとえば処分場の組み合わせ、2 つの異なる母岩に低中レベル放射性廃棄物（L/ILW）の処分場を分離して配置すること、高レベル放射性廃棄物（HLW）の処分場に掘削した処分坑道を補強すること、傾斜路及び／または立坑を通じた処分場へのアクセスなどについて考慮にいれることなどである。それぞれの処分場の構成要素の安全機能に基づいて、長期的な人間と環境の保護を要求する規制要件の枠組みにおいて、提案された処分場の概念を評価している。ENSI は追加的な規制が必要かどうかを解明しなければならない。そのためには次のような問いに答える必要がある。

- 処分坑道の配置はどのようにすることができるか、またそれぞれの配置の利点と欠点はどのようなものか。重要な影響を及ぼす要因にはどのようなものがあるか。
- 処分場のレイアウトは、地質学的な環境に合わせてどのように最適な形で適応させることができるか（埋め込み形状、応力場など）。地質学的な複雑な状況では、そのような適応方法が可能であるか。
- オパリナス粘土やその他の粘土の豊富な岩盤に建設した処分坑道には、どのような支持方法が適しているか。設計は修正できるか（断面を変えるなど）、またこうした修正は長期的な安全にどのように影響するか。
- 処分場の概念は、地質学的な複雑な状況にどの程度まで適応させるべきか。計画設定プロセスにおいて、どのような複雑な状況を考慮にいれる必要があるか。
- 立坑／傾斜路の掘削中に帯水層または断層帯に孔を開けた場合に、地下水の流入を長期的かつ効率的に防ぐには、どのような技術を適用できるか。
- 安全性の観点からみて、掘削方法の重要性はどのようなものか。
- 提案されている立坑や傾斜路は、処分場の概念に示された安全要件を満たしているか。
- L/ILW 処分場を 2 つの異なる母岩の層に分離して建設することは、安全性の観点からみてどのような重要な意味を備えているか。
- コンテナ素材、埋め戻し材、シール構造、処分に固有の効果は処分場のレイアウトにどのように影響するか。
- 廃棄物を輸送容器や貯蔵容器に収容したままで定置した場合には、安全性の観点からみてどのような問題が発生するか。

アプローチ：専門家が調査票に回答する方法で、安全性に関連して発生す可能性のある問題についての概要を把握する。NAGRA が提案している処分場のレイアウトを評価し、長期的な安全性の観点から、提案された埋め戻し方法を評価する。局地的な地質学的な条件に基づいてサイトを評価する方法を確認する。

組織：このプロジェクトは EU の MoDeRn プロジェクトと密接に関係しており、ENSI が遂行している。このプロジェクトは、プロジェクト「4.3：パイロット施設の設計とインベントリ」及びプロジェクト「4.4：モニタリング概念と施設」と調和のとれたアプローチが必要となる。

この調査は、ENSI の代表、ETHZ の専門家、コンサルタント会社、NAGRA、州の当局の代表が遂行している。主導しているのは ENSI である。

費用：約 4 人・月あるいは 105,000 スイスフラン（約 1,140 万円）。外部専門家の費用として 30,000 スイスフラン（約 327 万円）。

結果：2012 年には、アクセス・インフラの安全性の側面が調査された。立坑と傾斜路は技術的に実現可能であり、100 年の期間にわたって使用するように設計できることが確認された。この結果について、州の当局、KNS、その他の当局の代表の間で開催された 2 回の会合で検討された。立坑も傾斜路も、利点と（許容できる）欠点を備えていることが確認された。

これまでの議論から、処分坑道の掘削の間に予想外の出来事や状況が発生した際に実施すべき措置のリストを作成する必要があることが示された。建設が開始されるまで、まだ約 20 年はあるので、方法論的な制約について確定するのは時期尚早である。廃棄物を輸送容器に収容したままで直接に処分する方法は、安全性の観点から否定された。また処分場に関連した言葉の用語集を作成する作業が開始された。

プロジェクト 4.10 とプロジェクト 4.3 の 2 つのプロジェクトの最初の部分について、最終報告書が 2013 年末までに発表される予定である。

### RPRW 4.11　処分場のレイアウト-2

背景／問題点：RPRW4.10 での議論と評価は必ずしも結論的なものではなかったために、このプロジェクトの第二部として、RPRW4.11 が実施される。これらのプロジェクトはしばらく時期を置いて実施される予定であり、その間に ENSI が特別計画プロセスの第 2 段階の評価を実施する必要がある。

目的：このプロジェクトの一つの目的として、提案されたサイトと母岩を考慮にいれて、特別計画の第 2 段階で NAGRA が提案した処分場概念を再評価することがある。「多大な努力をせずに回収する」方式の定義を作成する必要があり、そのプロセスを技術的に記述すべきである。ENSI は、追加的な規制が必要かどうかを解明する必要がある。第二のステップとして、処分場概念の地上施設の安全性の側面を考慮にいれる形で、評価を拡張すべきである。

答えるべき問いには次のようなものがある。

- 廃棄物のカプセル封入プラントが処分場のサイトに存在しない場合、すなわちカプセルに封入した廃棄物を長距離にわたって輸送する必要がある場合に、どのような安全性に関連した利点と欠点が存在するか。現在の規制枠組みでは、こうした輸送はどのように規制されるか。
- 地上施設の一環として、どのような処理施設が必要であるか。放射性廃棄物の発生量はどの程度か。
- 廃棄物を定置した後に、処分場の構成要素のうちのどの部分を埋め戻す必要があるか。
- NAGRA はどのような埋め戻し材を使用することを提案しているか。すでに掘削したオパリナス粘土を埋め戻し材としてリサイクルできるか。それは安全性にどのような影響を与えるか。
- 特別計画の第 1 段階と第 2 段階で候補サイトを狭めてゆくプロセスにおいて、どのような新しい側面が発生するか。2D 及び 3D 地震学的な調査キャンペーンによって、構造地質学的な条件についてどのようなことが学ばれたか。NAGRA はこうした結果に基づいて、処分場のレイアウトを修正することを計画しているか。
- 廃棄物を多大な努力なしに回収できるようにするためにどのような前提条件が必要となるか。回収を実施するためにどのような技術措置が必要であり、こうした措置が安全性にどのような影響を及ぼすか。
- RPRW4.3、RPRW4.4、RPRW4.10 の結果を考慮にいれると、処分場のレイアウトにどのような修正を加える必要があるか。

アプローチ：前記の問いについて会合で議論する必要がある（また RPRW4.10 の成果が発表された後に、おそらく修正する必要がある）。回収と回収可能性についての文献調査を実施する。

組織：主導するのは ENSI である。外部専門家と NAGRA を会合に招く。外国の専門家を会合に招いて、その国の処分場の概念と、計画実施の際に得られた経験について報告してもらうこともできる。

費用：約 3 人・月または 55,000 スイスフラン（約 600 万円）。外部の専門家に 40,000 スイスフラン（約 436 万円）程度。

結果：まだ結果は提示されていない。

### RPRW 5.1　環境政策の問題点

背景／問題点：放射性廃棄物の処分は、廃棄物管理の特別なケースである。この活動を

その他の廃棄物の管理や、人間と環境を保護するという一般的な目的と一貫性のあるものとするためには､基本的な環境原則たとえば持続可能性と保護は 2 つの重要な原則であり、これらの原則が実施されている多数の実例が存在する。

目的：この調査は、BFE と ENSI の決定の基礎を構築するものである。この調査では、現在の環境原則と一貫性がある部分と、さらに改善が必要な部分を明確に示すことを目的とする。参考になる問いには次の通りである。これまでの環境に関連した政治的及び倫理的な議論のうちで、放射性廃棄物の処分に重要なものはどのようなものか。今後重要なものとなるとみられる新たな議論が起きている兆候はあるか。持続可能性の原則はどのようにして実施されるか。現在の社会は、将来の世代に対してどのような責任を負っているか、またその責任はどのようにして満たされるか。社会を導くメカニズムに対して、どのような要件を定める必要があるか。放射性廃棄物の管理によって、どのような重要な社会的な要件を満たす必要があるか。

アプローチ：放射性廃棄物の処分について、持続可能性、予防、公正さ、世代間倫理、その遂行など、環境に関係のある倫理的及び政治的な議論を組織的に調査し、提示すること。文献調査に、プロジェクト・チームの経験とノウハウを組み合わせること。

組織：独立専門家グループとコンサルタント企業の協力。

費用：約 65 人・日。80,000 スイスフラン（872 万円）。

結果：これまでにまだ結果は示されていない。

### RPRW 5.2　保護の目的

背景／問題点：地層処分場の保護の目的は、人間と環境のために確保すべき安全性の水準を規定することである。最も重要なのは人間であるが、人間以外の種の生命形態と生態系も考慮にいれる必要がある。保護の期間が 100,000 年にも達するために、これには将来の生命形態も含まれる。国際放射線防護委員会（ICRP）の専門家チームが現在、異なった被ばく状況のもとでの環境の保護に関する文書を作成中である。

目的：このプロジェクトでは、遠い将来の生命形態を保護すべきだと主張する理論について、倫理的な観点から概要を示すべきである。処分場に焦点を合わせるとしても、その範囲があまりに狭すぎてはならず、全体的なアプローチにおいて、他の要因も考慮にいれるべきである。このプロジェクトの結果は文書にまとめて、ENSI が保護の目的を定義できるようにすべきである。すなわち、将来の保護の目的を選択するための土台としては、どのような考え方と環境に関連した政治的な原則が適切なものだろうか。長期的には､「保護」とは何を意味するものだろうか（人間と技術の将来の変化が未知のものであることを考慮にいれる)。このような長期的な期間にわたって（すなわち放射線防護に関連して)、人間

と環境への「公正さ」（すなわち世代間の公平さ）とは何を意味するのだろうか。世代間の責任というものが、その意味と価値を失うような時間的な長さというものは存在するのだろうか。

アプローチ：その多くは組織的な文献調査であり、その後は現在のアプローチについて議論し、ENSI の勧告を作成する。

組織：独立専門家／コンサルタント企業のグループの協力。

費用：約 65 人・日。80,000 スイスフラン（872 万円）。

結果：これまでは結果は提示されていない。

### RPRW 5.3　社会的な変化と処分

背景／問題点：放射性廃棄物の処分は長期的な営みである。特別計画のプロセスでは社会的な変化を見込んでいるが、安全性の側面と社会的な柔軟性の側面の間には緊張が発生する。

目的：この研究プロジェクトは、様々な処分場の構成要素の設計とレイアウト、ならびにこれらの構成要素の相互の結びつきに重点を置いている。この目的では、局地的な地質学的な状況と、母岩の特性について考慮にいれる必要がある。このプロジェクトは ENSI が実施する。

アプローチ：将来において可能なシナリオを定義するために、包括的な文献調査を利用する。シナリオ 1 とシナリオ 2 は、処分場の状況を示すものである。シナリオ 1 では処分場がすでに閉鎖されており、シナリオ 2 では処分場はまだ開いていて、モニタリング段階にある。シナリオ 3 とシナリオ 4 では、処分場は存在しない。シナリオ 3 では政治的な理由のため、シナリオ 4 では異なった技術的な解決策が発見されたために、処分場が存在しないとされる。今後のステップは専門家との間で、社会的な変化がそれぞれのシナリオに与える影響について協議する作業である。合計 15 件のリスクと、考えられる社会的な変化の可能性について評価した。

組織：この調査はコンサルタント企業 3 社と、スイスの連邦物質科学技術研究所（EMPA）のグループが実行した。

費用：約 65 人・日。80,000 スイスフラン（872 万円）。

結果：定性的な評価からはたとえば、将来の社会は放射性廃棄物の貯蔵に関する技術的な進歩の利益をこうむる可能性があることが示された。同時に処分場が存在しないシナリオは、内戦、テロリストの攻撃、科学的な知識の喪失など、重要なリスクをはらむものである。遠い将来のシナリオには、かなり大きな不確実性が伴うために、定量的な評価を行うことはできなかった。最終報告書は 2013 年に発表された。

(3) 付属書 C　モン・テリ・プロジェクトでの研究開発

### BN　ビチューメン・硝酸塩・粘土の相互作用

目的 : BN 実験の目的は、硝酸塩とビチューメンの劣化生成物プリュームの反応性と移行の組み合わされた効果と、それがニアフィールドの母岩に及ぼす生物地球科学的な影響について考察することであり、これには酸化還元反応に敏感な放射性核種（たとえば $^{79}Se$, $^{99}Tc$, $^{23x}U$ など）の移行の問題を含む。BN 実験で得られた結果は、モン・テリ・プロジェクトの MA、HT、PC-C、GD プロジェクトにも関連するものとみられる。

概念 : BN 実験は、ビチューメン化されたか、その他の硝酸塩を含む廃棄物セルの周囲に存在する粘土の母岩の内部で支配的な条件をシミュレーションするために考案された。ニアフィールドでのセメントとの複雑な相互作用を考慮から外すために、BN システムでは硝酸塩／ビチューメンの劣化生成物プリューム（有機物、OM）が、粘土質の母岩に与える影響だけを研究する。そのため、セメントと粘土の界面からある程度の距離を置いた掘削影響領域（EDZ）で発生すると予想されている中性の条件、またはわずかにアルカリ性の条件（予想される pH の範囲は 7～9 である）のもとで、硝酸塩／OM プリュームと粘土との生物学的及び地球科学的な相互作用を研究する。この状況では、微生物の活動とアルカリ・プリュームに関連した鉱物学的な変化は、初期のうちは抑止される可能性が高いが、この pH 条件のもとではこれは回避される。後の調査段階ではおそらくもっと高い pH 条件（pH が 9～11）について研究し、セメントが主流となる建設の処分環境で活発になる可能性のある高アルカリ性の微生物の挙動を調査することになろう。この BN 実験は 2 つの部分で構成される。モン・テリ岩盤研究所で実施される現場試験と、地上の研究所で実施される支援実験である。

### CD　周期的な変形

目的 :

- 収縮によって発生するひび割れ変形と、坑道の気象条件（温度と湿度）の間に相関関係が存在するかどうかを検証する。ひび割れの開口部の大きさと、相対湿度やその他の水文地質学的及び気象学的な時系列の経時的な変化の相関関係を調査する。
- 選択した収縮ひび割れ（岩盤マトリクスの内部の擾乱されていない床に平行な面のひび割れ）の開口、閉鎖、及びそれに関連した剪断移動を長期的に定量化する。
- 坑道の表面から、飽和した岩盤マトリクスに向かう乾燥ひび割れに沿った飽和プロフィール測定する。季節的な影響の可能性について調査する。関連した膨脹圧力と間隙水圧力を定量化する。

- 気象の変動と移動の関係を統計的に分析する。
- 膨脹と収縮サイクルのプロセスを特定する。測定データのポスト・モデリング。

概念：

- ひび割れメーターと 3D 接合部メーターを使って、収縮ひび割れの変動を長期的に測定する。
- 変形の測定結果を、坑道の内部の気象条件と比較する。気象ステーション（湿度と温度センサー）を設置し、EZ-B ニッチに風速計を設置する。
- 薄い断面と SEM 分析を利用して、断層粘土物質のミクロな規模の分析を実行する。
- 制御された初期条件と境界条件のもとで、ボーリング・コアの研究所での実験を実行する。
- ボーリング孔にマルチパッカー（5 個のパッカー）システムを設置して、ニッチの表面から飽和した岩盤マトリクスに向かう岩盤マトリクスの飽和圧力、膨脹圧力、間隙水圧力のプロフィールを確認する。

**CI（オパリナス粘土の相互作用）**

目的：セメントがオパリナス粘土に及ぼす影響についての既存の知識を補足するための長期的な実験。モデリングの結果から、オパリナス粘土のコンクリート・ブロックの周囲に、センチメートル単位でアルカリ・プリュームが広がるために、測定できるだけの変性が発生するまでに 20 年近くは経過するものとみられている。このため利用できる時間的な枠組みで何らかの結果を得るために、早期にこうした実験（第 12 段階）を開始することが決定された。同時に、セメントがベントナイトに与える影響についても試験する。通常のポートランド・セメント（OPC）だけでなく、pH の低い二種類のセメントも利用する。

概念：第 12 段階（2007 年春）では、保守の必要性の低い実験が開始されており、この実験は数年間は続けられる。2 か所のボーリング孔に、OPC と pH の低いセメント、そしてベントナイトで製造したコンクリートを取り付けた。アルカリ性のプリュームの広がりとの比較で、地下水の拡散を測定するために、保守的なトレーサ物質として、$^{2}HHO$ が添加された。第 13 段階と第 14 段階では、ベントナイトを人為的に飽和させた。

対数的なタイム・スケールで、すなわち 2、4、8 及び 16 年後にサンプルを採取する予定である。サンプリング・キャンペーンは 2009 年の春／夏と 2012 年の 1 月/2 月に実施されたが、コア安定化技術を利用した高品質のコア採取方式を採用している。2012 年からはボーリング孔を埋め戻すために、新しいセメント／モルタル物質が使用されており、これら

の物質は将来サンプリングするための補足的な物質として役立つことになろう。

付随的な研究所計画も実施されている。

### DB　オパリナス粘土の封じ込め特性を評価するための地下深くの傾斜ボーリング孔

目的：この実験の目的は、オパリナス粘土を実例として使用しながら、厚い粘土層のユニットの封じ込め特性を評価するための方法論を開発し、検証することにある。

この実験での封じ込めとは主として、半帯水層とその周囲の帯水層の間の地下水と溶質の流動を決定することを意味する。この方法は、廃棄物の処分や実験活動のために、サイトのその他の場所でも使用できるアプローチを提供することになる。

この実験によって、封じ込めユニットとしてのオパリナス粘土を定義する特性とプロセスを評価するためのデータが獲得できる。最初のステップとして、データの収集作業には、OPA 全体とその直接の境界部分における P/T/C 勾配のデータを獲得する作業が含まれる。第二のステップとして、対流、拡散、熱・化学的な浸透による移行プロセスの現象パラメータのプロフィールを決定することになる。次に、移行、続成作用、水理学的なプロセスなど、半浸透性のユニットに影響を与える可能性のある全てのプロセスを組み合わせることで、地下水と溶質の流動をモデリングすることになる。質量移行において、拡散の貢献分と対流の貢献分を比較する作業は、オパリナス粘土の実際の封じ込め特性を推定するために役立つ。

概念：この実験では、数値モデリングと水文地質学的な特性調査の両方の作業が行われる。

初期段階では、全体の半帯水層と帯水層にアクセスするために、約 250 m の長さで「パーキング・ニッチ」から床の部分に垂直に掘削されたボーリング孔を使用するが、オパリナス粘土の内部と粘土を横断した水頭に予想される妥当な変動範囲を評価するためには、予備的なモデリング、おそらく 2D モデルを使ったモデリングが必要となる。この作業は、オパリナス粘土と帯水層の内部の P/T 測定セクションの数、場所、寸法を決定し、その直後に製造される水理学的な設備で使用する圧力センサーの測定範囲を決定するために役立つ。

次の段階は掘削作業そのものである。ボーリング孔の全体からコアを採取する。コア・ボーリング作業においては、地下水の流入量に基づいて、帯水層では水をベースとした掘削液を利用し、半帯水層では、エアあるいはオイルをベースとした泥を使用することになる。半帯水層については、地球化学的な目的では、汚染された部分を除去するために、コアの外側部分を取り除くべきである。

ボーリング・コアのサンプルとしては、特に岩盤物理学的、鉱物学的、地球化学的な調

査のためのサンプルを採取することになる。地球化学的なサンプリングでは、間隙水の組成プロフィールを確認することを目的とすることになる。この情報は、粘土層を通じた浸透水の流動を推定するためには非常に重要なデータである。その他のコア・サンプルは、対流、拡散、浸透流動に関連した移行パラメータを取得し、すでに地下研究所の実験で取得されたデータと比較するために利用される。

ボーリング孔の掘削の直後に、ボーリング孔にはマルチパッカー／マルチピエゾメーター・システムを装備することなる。コアのマッピングと拡大図の作成によって、ピエゾメーターを設置すべき最善の位置についての情報が得られる。LP 実験の一部として実施されたレビュー作業から、水理学的な擾乱されたゾーンは、保安坑道の周囲の約 30～40 m の範囲に及ぶことが明らかになっている。この結果は、最初のピエゾメーターの設置範囲の上限が、保安坑道から垂直に約 50 m ほど離れた場所とすべきであることを示している。この設備は、最初のモデリング段階が終了した直後に設置して、センサーの種類、水理学的なライン、パッカーに必要な条件を決定することになる。

水理学的な設備は、オパリナス粘土の内部の十分な数のゾーンを孤立させて、他の場所で観察されているような過剰な水頭の存在を明確に特定すべきである。この目的を実現するために、圧力／温度モニタリングでは、最大 7 個のピエゾメーターを配置すべきである。オパリナス粘土の内部に 1 個、それぞれの帯水層に（黒ジュラ統の泥灰岩とドッガーと炭酸塩）1 個ずつ配置する。ピエゾメーターは、ボーリング孔の内部で測定が不可能な容積の大きさを最小限にするように設計される。またモニタリング・システムは、オパリナス粘土に対する全体の地力学的な応力を与える地球潮汐プロセスと、気圧プロセスなどの効果を区別するのに十分な精度を備えたものとされる。それぞれのピアゾメーターには水理学的なラインを装備し、十分で迅速な再飽和が可能となるようなされ、間隙圧力／温度の長期的なモニタリングに先立って、水理学的なテストを行えるようになる。

最後に、全体のオパリナス粘土を通じた地下水と溶質の流動を推定するために、水文地質学的なモデリングが実施される。対流流動、拡散流動、浸透流動を含めた全ての現象条件を考慮にいれた連続方程式を利用するモデリングの結果と、P、T 及び C 勾配の測定値を比較するための検証作業が実行される。これによって、質量移行に対流がどの程度まで貢献しているかを推定できる。こうした調査によって、観察された地下水頭のプロフィールが根拠づけられない場合には、水理学的なプロセス（全体の応力の変動や、粘土の粘着・塑性挙動）、続成作用による変形、水理学的な境界条件の変動などの過渡的なプロセスをテストすることになる。質量移行に対流と拡散がどの程度まで寄与するかを比較する作業は、オパリナス粘土の実際の封じ込め特性を推定するために役立つ。

## CS　$CO_2$貯蔵のための井戸近くのシーリングの健全性

目的：利用されている井戸や放棄された井戸は、貯蔵容器と地表の直接の接続路になるものであり、そこからは $CO_2$ が浮力によって逃げ出す可能性がある。こうした井戸を密封する長期的な健全性がきわめて重要であり、特に改修された井戸のコンパートメント（地層のキャップロック、セメントシートとケーシング）を通じた経路となったり、こうしたコンパートメントの間の欠陥のある連結境界面となったりすることがある。この実験の主要な目的は次のようなものである。

- $CO_2$ ストリームと接触した井戸のコンパートメントの内部及びその間で発生する流体の岩盤の化学的な成分の相互作用を確認すること。
- 変性し、損傷した井戸のコンパートメントと境界面の移行特性（K、Φ、Kr、Pc）を測定すること。
- $CO_2$ の移行のモニタリング。

概念：モン・テリ岩盤研究所での現場調査

- オパリナス粘土層を利用して、井戸近くのボア・コンパートメント（ケーシング、すなわちセメントシートとプラグ、キャップロック）との境界面を作り出す。ボーリング孔は、伝統的な $CO_2$ 注入井戸の装備を備えたものとする。
- 井戸の接触チャンバに、気圧 40 バール、35℃の温度で、2 年間にわたって $CO_2$ ストリームを注入する（$CO_2$ と不純物）。
- 3 か所の観察チャンバをモニタリングする。
  - 井戸接触チャンバでは、圧力と温度をモニタリングする。定期的に流体のサンプルを採取することによって、化学的な変化の評価を行うことができる。
  - 上部と下部の観察チャンバでは、圧力、温度、漏出を検出するための流体サンプリング、$CO_2$（溶解しているか、気体状になっている二酸化炭素）の侵入を観察する。
- オーバーコア：ケーシング、セメント、キャップロック領域の間の流体と岩盤の相互作用の変化を観察する。

## CS-A　井戸からの漏出のシミュレーションと是正実験

目的：井戸システムの長期的なシーリングの健全性を決定する。その際に、キャップロックを通じた漏出の経路の発生の可能性と、ケーシング、セメント被覆、母岩の間に存在する完成した構成要素の境界と境界面に重点を置く。

概念：井戸近くのボーリング孔のシーリングの健全性を評価するために、実規模の $CO_2$

漏出試験と是正試験のサイトを開発し、運営すること。試験サイトでの封じ込め能力を回復するために、LANL ヒドロゲル・シーラント技術を使用して、$CO_2$ の漏出を是正する能力を開発すること。

モン・テリ岩盤研究所の試験サイトに固有の母岩のキャップロックの密封の健全性を含め、井戸のボアの近くでの $CO_2$ 漏出のプロセスについて、定量化可能な知識を構築すること。この実験の是正実験の部分では、LANL が開発したヒドロゲルを利用しながら、漏出を是正し、封じ込め能力を回復させる。漏出を是正する展開計画を作成する。

### DM-A　長期的な変形測定

目的：長期的な現場条件のもとで、オパリナス粘土の経時的な変形を測定する。粘着挙動を観察し、間隙圧力によって誘発された応力の再分布を観察する。

概念:MB 実験の一環として、2009 年 6 月に、DR ニッチから水平に掘削した直径 110 mm のボーリング孔に、ボーリング孔直径プローブを設置した。その後、ボーリング孔の壁の収斂と、ボーリング孔の内部の温度と相対湿度を記録した。3 か月の過渡段階の後、変形率が安定した。

MB 実験はその後終了したが、独立した実験として、長期的な変形測定を続ける予定である。解釈するデータをまとめるために、第 17 段階でプローブの近くの岩盤に、複数の間隙圧力センサーを設置した。

変形センサーがその測定の最低値に到達したために、2011 年末から、第二の負荷レベルでの実験が開始された。新たな設置した間隙圧力センサーによって、パッカーの圧力か上昇すると間隙圧力がただちに増大することが確認できた。センサーの設置プロセスのために、膨張計のプローブが擾乱されることを防ぐ目的で、間隙圧力センサーの設置に先立って、2D 設計計算を実施した。

### DM-B　長期的な変形測定

目的：長期的な現場条件のもとで、オパリナス粘土の負荷受容挙動を観察し、変形の経時的な測定を行う。粘着挙動に留意し、さらに間隙圧力によって誘発された応力の再分布に留意する。

概念：BB 実験の枠組みで、MI ニッチから 3 本のボーリング孔（直径は 101 mm、長さは 10～14 m）を掘削し、その長期的な負荷受容挙動を観察する。この実験で得られた観察結果と、BB 実験の枠組みで確認されたこれまでの経験に基づいて、MI ニッチから 4 本の新しいコア・ボーリング孔が掘削された。

- 2 本は、BB 実験の枠組みで泥板岩の多い層について確認された結果を組織的に研究し、その結果の再現可能性を調査するためのものである。
- 2 本は、泥板岩の多い層でこれまで確認された結果と比較しながら、砂岩の多い層を研究するためのものである。

解釈するためのデータを仕上げるために、第 18 段階ではボーリング孔 No.1 の近い岩盤で、GRS が複数の間隙圧力センサーを設置する予定である。

### DR-A　拡散、保持、擾乱

目的：設計の試験が成功したため（DI、DI-B、DR 及び DI-A など）、モン・テリ岩盤研究所では新しい現位置拡散実験が計画されている。DR-A 実験の一環として、母岩と平衡状態にある間隙水を人為的に循環させ、これにトレーサ・パルスを追加する予定である。その際に、パルスに含まれる異なったトレーサ物質の拡散と保持を調査する計画である（水、陽イオンと陰イオン、保存剤、吸収剤）。この調査結果によって、陰イオンの排除や陽イオンの収着などのプロセスを詳細に記述できるようになる。この実験の新しい側面として、母岩と平衡状態にない溶液が使用されることが挙げられる。これによって岩盤に鉱物反応が誘発されることになり、異なる溶液の化学的な条件と、変性した粘土の鉱物学的な条件に対するトレーサ物質の反応が調べられる。擾乱を誘発する実験を実行するのは、現在使用されている反応移行モデルの予測能力を試験することのできるデータベースを構築するためである。特に、DR-A 実験の一部として収集されたデータは、これらのモデルで検討されているプロセスとパラメータの妥当性の範囲を調べるために役立つことになる。

段階 15 では、一連の範囲決定計算が実行され、異なった種類の変性、予想された応答、これらの擾乱を実施する技術的な実現可能性が検討された。考えられるシナリオとしては、6 か月の期間にわたって高 pH 溶液（pH>13）を循環させて、変性を誘発するものである。トレーサ試験は、高 pH 溶液の循環の前、間、後に実行することができる。異なったトレーサ物質の反応は、異なった溶液の化学的な条件、陽イオンの交換サイトのこうした物質の収容能力、鉱物学的な条件と相関させることになる。この人為的な擾乱実験によって獲得された新しいデータは、反応移行モデルの制限を明確にするために役立つことになる。

段階 16 では、ダウンホール・パッカー・システムを設計し、開発した。残念なことに、実規模定置実証ニッチの掘削の遅れのために、試験ボーリング孔の掘削は延期された。このため掘削に関連した全ての作業は、段階 17 に延期された。範囲決定実験が最終的にまとめられ、擾乱のためのシナリオが定義された。

段階 17 では、BDR-A3 の掘削が成功し、Solexperts が開発したダウンホール・システムが装備された。合成した間隙水を数か月にわたって循環させて、地層との化学的な平衡を実現させた。予定通りにトレーサ物質を注入したが、この注入手順は放射線防護担当者が

厳格に見守った。注入した後に、トレーサ物質は粘土層に拡散するにまかせられ、トレーサ物質の濃度の減少を記録するために、定期的に地下水サンプルを採取した。モデリング作業が定義され、最初の作業は、実験に関与している異なったモデリング・グループの間で配分された。

概念：結果をよりよく比較するために、DI-A 実験で使用したのと同じダウンホール設備の設計を採用し、同じトレーサ物質を選択することが計画された。

### DR-B　長期的な拡散実験

目的：粘土岩の内部で拡散を研究するこの実験の全体的な目的は、安全性を評価するための計算における実際の移行特性を提示し、確認することにある。現在は、オパリナス粘土、粘土状の岩盤、圧縮された粘土鉱物システム一般の保持特性に関しては、確固とした科学的な土台が構築されている。収着特性が弱いか、収着しないトレーサ物質の拡散プロセスを理解するという目的では、研究所の実験と現場実験では優れた一致が確認されている。そのため、収着特性がさらに高い放射性核種の拡散・保持特性と、酸化還元反応に敏感な放射性核種の拡散の研究に、ますます重点が置かれるようになっている。現場で収着力の強い放射性核種を調査するためには、大きな技術的な課題に直面することになる。それは特に、数年以内の期間では、岩盤の内部での移行距離は、実験設備の設置の際に擾乱された岩盤の厚さを下回るためである。このことは、長期的な実験期間を見込む必要があるということであり、そのために解決すべき技術的な課題を事前に克服しておく必要がある。

長期的な拡散実験によって、安全性の関連した放射性核種の移行に関連した不確実性が小さくなり、安全計算における不確実性もこれに応じて小さくなる。

概念：使用している技術は、X線蛍光（XRF）であり、これによってシンチレーション計数と同様な濃度範囲で、反応性でない同位体を検出することができる。このため、固体のパッシブな線源とミクロな観察ボーリング孔の設計が検討されている。

### DS　応力の決定

目的：数値モデリングと新たな応力測定を組み合わせることで、モン・テリ岩盤研究所の背斜褶曲の応力状態を決定すること。

概念：提案されたプロジェクトの目的は、応力状態の前方数値モデリングと、保安坑道に沿った（これにはさらに上部ユニットと下部ユニットを含む）新たな応力測定を統合することにある。

背斜褶曲層については 20 Ma の応力レベルから始めて、初期のモデリングが行われているが、これによって現在の応力状態だけでなく、異なった岩盤ユニットの間の応力経路についても知識が得られる。このような大規模な変形モデリングは、現在は 2 次元でしか可能でないようである。いずれ背斜褶曲の 3D モデリングが行われるようになれば(段階 13)、局地的な規模での応力分布を予測することができるようになる。しかし変形は限定的なものにとどまる。境界条件（すなわち応力分布と応力率）は、2D モデルから得られる。モデリング作業は、競合するグループが異なった技術を使って実施すべきである。

第 3 段階では、新たな応力測定の結果に照らして、モデルの予測の検査が行われる。これまでの測定結果は、オパリナス粘土が力学的な擾乱の影響を受けやすいために、問題があった。そのため我々は、上部と下部にある適切なユニットからもサンプルを採取して、背斜褶曲の全体での応力状態の分布の範囲をさらに明確に規定し、妥当性を相互検証できるようにすることを提案する。

いずれこれらのモデルを改善または検度し直して、応力測定の結果を再現できるようにすることになろう。

### EB　人工バリアの定置

目的：EB 実験では、適切な粘土層の内部に建設した水平の横坑に、HLW 処分場を建設する新しい概念を実証することを目的としている。この新しい建設方法の原則は、凝縮したベントナイト・ブロックで製造した下部の床の部分と、ベントナイト・ペレットをベースとした物質で埋め戻した上部の部分を組み合わせたものであり、これはかなり離れた場所からも見積もることができる。

概念：ベントナイト・ブロックの床の部分の上に、標準キャニスタと同じ寸法と重量のダミー・キャニスタを設置し、横坑の上部をベントナイト・ブロックで埋め戻す。横坑はコンクリート・プラグで密封し、バリアの内部と岩盤の内部（特に EDZ の内部）の両方の異なった水理学的なパラメータの変化を、2002 年の 4 月からモニタリングしている。この地層の内部に存在する遊離した水分の量がごく少ないので、緩衝物質の飽和を促進するために、人為的な水和化システムが設置された。水の注入は第 13 段階で終了した。第 18 段階（2012 年秋）では、現場試験サイトの部分的な解体が計画されており、集中的なサンプリングが行われ、その後は異なった研究所で試験が実施される。

### EG　炭素同位体によるEDZ気体の分布実験

目的：自然に発生する気体が使用した安定した炭素の同位体を調べることで、EDZ を評価し、気体の発生源の調査のためにサイトでの $\delta$ C のデータを追加すること。

概念：

- EDZ の周囲の $\delta^{13/12}C$ の比率の分布と、$CO_2$ ならびに気体の $C_1$ から $C_4$ までの発生源を調べる。
- EDZ の周囲の炭素の移行を予測する。
- 深部の地域から大気へのメタン／ブタンの放出と逆方向に、飽和状態にないゾーンで OP に大気の $CO_2$ を浸透させる。

### FE-B　実規模の定置実験のTHM部分

目的：

- 処分場の設計の土台が適切なものかどうかを確認するか、それをどのように修正すべきかについて明確に考察する。
- 改善された標準設備（すなわち改善されたロード・ヘッダー）と適切な支持措置（アンカー、ライニング、鋼鉄リップ）を利用して、定置坑道を建設する。
- 実規模の緩衝物質と岩盤内部でのプロセスを理解することに重点を置き、組み合わされた THM モデルの部分的な検証を行う（ならびに THC モデルの理解を深める）。
- 岩盤の HM に $\Delta T$ が与える影響を測定でき､関連したモデルの試験を行えるように、岩盤に十分な加熱を行う。

概念：実規模定置実証実験は（スイスの処分場概念によると）、処分場の寿命の最初の時期（数十年間）をシミュレーションするか、この時期にできるかぎり焦点を当てた実規模のヒーター実験であり、人為的に岩盤を飽和させることはしない。この実験の主要な段階は、坑道の掘削、換気、ヒーターの設置と埋め戻し、コンクリート・プラグの建設、その後の加熱である。これらの段階と、それが埋め戻し材、岩盤支持材、特に岩体に与える影響を、数百個のセンサーで集中的にモニタリングする。特に興味深いのは、温度、飽和あるいは吸収、間隙圧力と総圧力、ならびに変形を評価することである。この実験の工学的な部分は、LUCOEX プロジェクトの枠組みで EC が資金を共同で提供しており、モン・テリ岩盤研究所のいわゆる FE-C 実験の対象となっている。

### FE-C　実規模の定置実験の工学的な部分

目的：

- （改善された）標準設備と適切な支持措置（アンカー、ライニング、鋼鉄リブなど）を利用して、定置坑道を建設し、処分場の設計が健全なものかどうかを点検する。

・　処分場条件のもとで、定置手法を確証する。水平のキャニスタと緩衝物質の定置。

概念：実規模定置実証実験は（スイスの処分場概念によると)、処分場の寿命の最初の時期（数十年間）をできるかぎり現実的にシミュレーションする実験である。

実規模定置実証実験の工学的な部分または確証を目的とした部分は、坑道の掘削、ヒーターの設置、埋め戻し材の設置、コンクリート・プラグの建設などを含むものであり、欧州委員会が資金を共同で提供する（LUCOEX プロジェクト）ものであり、実験の THM の部分（これは FE-B 実験の対象となる）とは分離する必要がある。

## FI　自然の断層の形成と加熱試験の時期におけるオパリナス粘土の内部での流体と鉱物の相互作用

目的：容積と物理化学的な条件がどのようなものであっても、岩盤の内部には間隙液が存在することは一般に認められている。しかしこの一般的な法則がつねに実現されるとは限らず、放射性廃棄物の処分場において特に決定的な意味をもつことがあるが、断層系などの自然の環境でも重要なものとなることがある。

ここでは、流体が枯渇した岩盤と、同様な岩盤でありながら流体が豊富な岩盤における流体と鉱物の相互作用を比較するために、2 つの事例を選択した。第一に、モン・テリ岩盤研究所の中心的な断層から採取したオパリナス粘土を、近くにある BDS-5 ボーリング孔で観察される同じ構成の岩盤と比較した。第二に、加熱実験（HD-E 実験）を実施する前と実施した後のオパリナス粘土の岩盤を比較した。どちらの研究事例でも、このプロジェクトは予備的な結果に基づいている。

第一は、断層系の調査である。粘土鉱物は一般に、活動的な断層帯の構造地質学的及び熱的な条件に非常に敏感に反応する。しかし SF 実験においてモン・テリ岩盤研究所の中心的な断層の 0.2 $\mu$ m を下回る寸法の断片から得られた結果では、K-Ar の年齢について非常に均質的な値が得られている。これらの K-Ar の年齢は母岩の層位学的な年齢よりもはるかに古いものであり、断層が形成された年齢よりも古いものである。この結果は、断層が形成される際には、粘土の自生作用が発生していないことを示している。このことから、この主断層の内部のオパリナス粘土は、ごく限られた容積の流体としか相互作用していないと考えられる。少なくとも調査した寸法の粒子では、粘土の自生作用は検出されていないために、粘土物質は力学的に均質化させられたにすぎないと考えられる。

主要な断層においてはこうした「乾式の」断層形成プロセスが発生したというこの仮説を検証するために、主断層の岩脈から採取した粘土、炭酸塩、硫酸塩物質の調査を続け、南西方向に下降した水平未満の断層と関連して存在する主断層から孤立した岩脈の調査を続ける計画である。さらに現在利用できる結果を、「後部モン・テリ」ゾーンに掘削した BDS-5 ボーリング孔が横切った断層から採取した同様な物質の調査結果と比較する予定で

ある。このゾーンは、モン・テリ岩盤研究所から数キロメートル離れており、ここでは流体と鉱物の相互作用が発生したとみられている。

第二は、オパリナス粘土の長期的な加熱実験である。HE-D 実験の磁気調査では、加熱プローブから 3 m 以上離れた場所では、応力は記録されなかったために、加熱によって誘発された重要な変化は確認されなかった。熱の影響が非常に小さかったので、加熱プローブの近く及びプローブから離れた場所の均質的な化学的な条件に基づくと、母岩からの粘土の内部での重要な化学的な変化も同位体の変化も発生しなかった。しかし加熱の前後の Sr と K-Ar の同位体システムの変化から、加熱による脱水プロセスによって、ごく小さな変化が誘発されたことが示されている。観察されたこの変動はおそらくオパリナス粘土の間隙システムの擾乱に関連したものである。

このようなごく限られた変化は、放射性廃棄物の貯蔵がその周囲の自然の環境に及ぼす潜在的な副作用を示すものである。Sr と K-Ar の同位体調査の予備的な結果から、加熱がオパリナス粘土から 4 m も離れた間隙システムを擾乱していること、鉱物学的、磁気的、化学的な結果に基づいて擾乱の距離はわずか 2 m にすぎないことが示されているからである。この変化は黄鉄鉱が石膏に変性したことに関連したものであり、これはおそらく脱水／再水和化によるものであろうが、$^{87}Sr/^{86}Sr$ の比率と K/Ar の比率などのパラメータについては、こうした明確な説明は行われない（ただし間隙システムの内部での準安定性の酸化物と水酸化物の干渉が発生していることは記述されている）。

概念：この実験は、岩盤研究所の存在場所と BDS-5 のボーリング孔の場所での複数のステップに分割されているが、このプロジェクトは、様々な寸法の粒子に分離されている粘土、炭酸塩、硫酸塩物質の鉱物学的、地球化学的、同位体的な側面に依拠しものである。ここで採用されている科学的なアプローチは次のようなものである。

第一に、ナノメートルからマイクロメートル単位の寸法の粘土の粒子の鉱物学的、地球化学的、同位体的な調査によって、モン・テリ岩盤研究所の中心的な断層と北東スイス（ベンケンやクロイツリンゲン）のボーリング孔ですでに調査されたサンプルを、マイクロメートル単位の寸法に細分化する。さらにモン・テリ岩盤研究所の主断層の内部及びその外部から得られた方解石と天青石の地球化学的及び同位体的な調査も計画されている。

第二に、BDS-5 ボーリング孔が横切った断層の断層粘土から採取した細分化された粘土物質の鉱物学的、地球化学的、同位体的な調査を実行し、特にオパリナス粘土の内部の上盤で発見された「活動していない」断層粘土のサンプリングと、第三紀の低湿地帯に存在する地震による大きな断層粘土のサンプリングに重点を置く。この断層は、最近まで活発に活動していたとみられており、断層運動の際に流体が再び活動するようになったと見られている。

第三に、2005 年に実行された HE-D の加熱プロフィール実験によるオパリナス粘土の岩盤の K-Ar 調査を補足する実験が行われるが、これは情報を補足し、実験が開始された後に

通常の大気圧条件のもとでの貯蔵が、初期の結果を変化させたかどうかを調べるためのものである。また、自然に加熱された岩盤サンプルの K-Ar 系の挙動をモデリングするために、研究所で加熱実験を実施することを計画している。このデータベースを補足するために、$^{87}Sr/^{86}Sr$ の比率と $\delta^{18}O$ と $\delta D$ の調査も予定されている。

使用する技術は、XRD、ICP-AES、ICP-MS、SEM 観察ならびに気体と固体質料の分光学である。

### FM-D　蒸発検層

目的：オパリナス粘土の透水率の非常に低い岩盤マトリクス、断層帯、掘削影響領域（EDZ）の内部で、透水率が高いゾーンを発見すること。気化率と透水率などのパラメータを定量的に評価すること。モン・テリ岩盤研究所で使うための新しいボーリング孔用の気化測定器（BEM）を開発すること。

概念：

- モン・テリ岩盤研究所での実験の経験に基づいて、新しいダウンホール気化測定器（BEM-2）を開発すること。新しい気化測定器の開発の間も同時に測定を続けるために、既存の気化測定器を使い続ける計画である。
- 主要な改善内容は次のようなものである。
  - センサーは最小化して、孔の下部に移動させる。
  - テストの間隔とパッカーを短縮して、高い解像度を目指す。
  - 新しい流動測定器を設置する。これはシュトレックアイゼン・フォース・セルと流動を制御するための調整可能な弁で作動する装置である。
  - 塩からシリカゲルへの湿度制御の変化（腐食の防止）
- 新しい測定キャンペーン（段階 18）。
  - 解像度の高い湿度ストリングを使って、モデリングの結果を検証する。
  - 既存のボーリング孔の内部の安定した条件のもとで長期的な測定を行う（数週間から数か月）。
  - 過渡的な方法と概念を使って、既存のデータと新しいデータのパラメータを推定する（K の値）。

### GD　地球化学的なデータの分析

目的 : GD はモン・テリ岩盤研究所のオパリナス粘土の地球化学的な条件についての知識を協議し、解釈し、深めるためのプラットフォームである。

概念 : GD には直接の現地での活動は含まれない。

### GM-A　地球物理学的なモニタリング

目的 : 非破壊モニタリング技術（地震学的なX線断層写真撮影装置）を使って、HG-A 実験の領域での岩盤物理学的な変化を視覚化する。

概念 : モン・テリ岩盤研究所でのこのモニタリング実験の目的は、ボーリング孔の断面を通じた地震学的な調査によって、ミクロ坑道を埋めている物質の種類と状態が変動した場合の効果を推定することにある。この目的で 2 か所のボーリング孔を掘削しており、これらのボーリング孔によって HG-A のミクロ坑道の経時的な変化をモニタリングすることができる。段階 11 では、ゼロ状態の測定として（空の坑道)、最初のX線断層写真撮影調査が実行された。その後の様々な段階で、繰り返し測定が行われたきた。(a）坑道を埋め戻した後（段階 11)、(b）埋め戻し物質が再飽和した後（段階 12 と 13)。その後の調査では､HG-A ミクロ坑道のテスト間隔に気体を注入した際に起こりうる変化をモニタリングする予定である。そのデータセット（ならびに異なったデータの間に残された隙間）を利用して、テスト場の物理的な特性の変化のモニタリングが行われる予定である。

### HA　水文地質学的な分析と総合

目的 : モン・テリ・プロジェクトで収集した水文地質学的なデータを解釈する。モン・テリ岩盤研究所のサイトに存在するオパリナス粘土について、概念的な水文地質学モデルを開発する。調査する側面としては、関連したプロセス（これには気体の移行と自己シール性を含む)、規模に応じた水理学的な特性と流体力学的な特性、関連した水理学的な特徴（堆積構造と構造地質学的な構造)、サイトの規模での水理学的な境界条件などがある。

概念 : 水文地質学的に興味のあるモン・テリでの実験の結果をレビューする。これには、パッカー・テストの結果、現場の応力と変形の測定、間隙水のサンプリング、現場浸透実験が含まれる。オパリナス粘土の内部での流体の流動と気体の移行の概念モデルを作成するための補足的な証拠として、THM に関連した研究所調査のレビューを実施する。

この調査は、オパリナス粘土の組み合わせた流体力学的なモデルの開発を補足するものであり、専用の研究所試験とモデル開発を含む（異方的で非飽和の男性的な物質法則)。ピアレビューが行われている雑誌に、調査結果を発表する

オパリナス粘土の自己シール性能力と浸透効率を評価するために、異なった層から採取したオパリナス粘土物質の膨脹能力を補足的に測定する。

### HE-E　主要なTHMプロセスとパラメータに関する現場ヒーター実験

目的：処分場で最高温度に達するのは、閉鎖後の初期の段階である。実際にどのような温度に達するかは、初期条件と、緩衝物質の内部での等温的でない飽和段階における熱伝導率の変化に応じて異なるものとなる。また閉鎖後の初期の段階では、母岩に対する熱の影響も最大になる。

HE-E 実験は、新たな長期的な実験であり、等温的でない飽和期間の初期の状態と、この状態が熱・水理学・力学的な挙動に与える影響を解明するものである。この実験の目的は、初期の飽和段階についての既存の熱・水理学的なモデルを検証するために必要な実験データベースを確立すること、モデルの検度のために必要な実験データベースを提供すること、部分的に飽和した緩衝物質（純粋なベントナイトと、ベントナイトと砂の混合物）の熱伝導率の値を、研究所の規模から現場の規模に外挿することにある。

概念：HE-E 実験は VE のミクロ坑道で実行されるので、「実規模に近い」（1:2）規模で、緩衝物質／母岩の初期の変化について調査することができる。ミクロ坑道には完全な計器類が装備されており、その履歴は十分に確定されている。

廃棄物キャニスタにおいて発生すると予想されている熱（最高 140℃まで）を再現することのできるヒーター・システムは、自然の飽和が続いている間、3 年以上の期間を通じて、EBS の温度を次第に実現し、上昇させていく。この実験の間に、キャニスタの表面、緩衝物質の内部、周囲の母岩に設置したシステム・センサーを使って、温度と水の飽和をモニタリングする。プロジェクトの最初の年に（段階 16）、この実験を設計し、その寿命の間に最適な結果を提供できるかどうかという実現可能性を試験し、建設を完了する。その後の 3 年間に永続的なモニタリングが実行される。このモニタリングが実施される間に、データが分析され、飽和と温度のデータが直接に予測と評価のモデリング作業に提供される。

この実験では二種類の緩衝材が利用される。試験の最初の部分ではベントナイト・ペレットがスイスの処分概念の標準物質として利用され、緩衝材の変化についての代表的なデータを取得する。その他の部分では、岩盤に想定した最大設計温度を実現するために、熱伝導率の高い砂／ベントナイトの混合物が利用される。

### HG-A　密封ゾーンに沿って母岩を通過する気体の経路

目的：密封された処分坑道から気体が放出されることの実証。気体の重要な経路としての EDZ の役割の評価。EDZ に沿った密封プロセスの評価。坑道規模での岩盤の透過性の決

定（マクロな透過性)。

概念：

- 1:2.5 の縮尺で、密封された処分坑道を再現する実験環境を構築する。
- 坑道のニアフィールド（開いた坑道）での水理、応力条件、EDZ の規模の特性を調査する。
- 処分坑道を埋め戻し、密封する。埋め戻した坑道の人為的な再飽和。
- 密封した坑道に水理学的なテストを実行し、気体を注入する前の「マクロな透過性」を決定する。ボーリング孔の内部の間隙圧力と変形を観察する。
- 窒素ガスでモデルに予備加圧を行い、密封された処分坑道の内部での圧力の増大をモニタリングする。
- 気体注入段階の後に、密封した坑道の水理学的なテストを実行して、オパリナス粘土のバリア機能に起こりうる変化を確認する。
- 解体／数値モデリングによって結果を検証する（ユーラトム・プロジェクト FORGE)。

### HG-D　粘土状の地層の反応性の気体の移行

目的：オパリナス粘土の内部での気体の移行に関連した流体力学的及び地下水化学的なプロセスの理解を深める。実験の目的は次のとおりである。第一に、研究所実験と現場での調査の規模で、2 相の流動パラメータ（初期圧力、毛細管圧力、相対透過率）に関する既存のデータベースを強化すること、第二に、オパリナス粘土の岩盤／地下水システムと相互作用する（反応性の）気体の種（$CO_2$、$H_2$ 及び貴ガス）の地下水化学的な現象を調査すること。第三に再反応化された亀裂系に沿った気体の移行に関連した流体力学的に組み合わされたプロセスの理解を深めること（気体に誘発された亀裂の再反応化と自己シール性)。

概念：GS サイトでの現位置実験。段階 18 では、GS サイトの 2 か所のボーリング孔の間で、長期的な二極気体実験が計画されている。注入する気体としては窒素と二酸化炭素が使用されており、これらの気体を 2 つのボーリング孔を接続した亀裂を通じて循環させる。この実験の目的は、クリートの鉱物化と亀裂の圧力及び透過率をテストすることにある。気体の注入の後に、注入ボーリング孔と生産ボーリング孔でオーバーコアを採取し、研究所で地下水化学的な相互作用の分析を実行する。実験結果は、FORGE プロジェクトの一環として分析する。

気体注入実験に伴って、岩盤を通じた気体の流動を視覚化することを目的とした地震X線断層写真撮影キャンペーンを実行する。

## HM　オパリナス粘土の挙動と流体力学的な特性の評価

目的：HM プロジェクトの目的は、排水した場合と排水しない場合について、3 軸圧縮強度テストを実行し、これに基づいてオパリナス粘土（頁岩の多い層）の構成モデルを開発することにある。この構成モデルは、数値コードとして実現される。

概念：異なった岩盤力学研究所において P、S、Z サンプルを利用して、排水した場合と排水しない場合の統合的な 3 軸圧縮テストを実行し、排水した場合と排水しない場合の剪断強度、多孔弾性体特性（排水した場合と排水しない場合のバルク係数)、応力と張力の関係、応力カプリング係数（すなわち Biot と Skempton の係数）を確認する。特に、吸引していないサンプルの 3 軸テストを実行するために、飽和手順に配慮する。さらに応力と張力との関係で、透水率がどのように変化するかを調査する。排水した場合と排水しない場合のクリープ・テストで、実験調査を補足する。

これらの実験結果に基づいて、構成モデルを開発し、数値コードで実現する。研究所のテストの数値分析と、既存の鉱山近くのプロジェクトでの背景計算を利用し、構成モデルを検証するか、さらに改善する。

第一段階として、トリプル管コア・バレルと乾燥掘削方式を使って、3 つのボーリング孔から品質の高いコアを採取する。これらのコアは掘削して採取した直後に、モン・テリ岩盤研究所で密封する。研究所で、全てのサンプルは、背圧サイクルを含めた適切な 8 面体の通常応力のもとで飽和させる。飽和したかどうかを確認するために、B 値の検査を組織的に実施する。サンプルに偏差負荷をかけながら、間隙圧力の応答と変形（軸方向、放射状、容積張力変形）の両方を継続的にモニタリングする。排水した圧縮テストのために、付随的なフィードバック信号として、間隙圧力（間隙圧力を一定にする必要がある）を利用する。サンプルを欠陥発生後の強さで剪断して、完全な応力・張力反応を確認する。サンプルを破断する前後に、透水率を測定する。

こうした力学的なテストの他に、全てのサンプルの鉱物学的な組成を XRD（Rietveld 分析）で特性調査し、欠陥プロセスは顕微鏡で分析する（SEM、薄い断面)。

## HT　オパリナス粘土の内部での水素の移動

目的：

- オパリナス粘土の内部での水素の実効拡散係数を評価する。
- ボーリング孔で水素消費プロセスを測定できるかどうかを確認し、微生物の活動がこのプロセスに及ぼす影響を評価する。
- 新しいボーリング孔の掘削の機会を利用して、間隙水の化学的な条件と、自然に溶解している気体についての新しいデータを取得する。

概念：この実験は、PC-C と同じように上向きのボーリング孔での気体循環実験である。循環している気体に水素を添加する。オンラインの測定と気体のサンプルの分析で、水素濃度の低下をモニタリングする。オンラインの測定には、実験の最初での Raman 分光測定（準定量的な測定）と、これに関連したその他のオンラインの測定（質量分光学的な測定と特定のプローブによる測定）が含まれる。少なくとも 2 種類の希ガスを水素と比較する。浸出液もサンプリングして分析する。

### IC　オパリナス粘土の内部での鉄の腐食

目的：この実験は、放射性廃棄物の地層処分場に関連して、鉄の腐食についての既存の知識を補うことを目的としている。無酸素条件のもとでは、粘土と接触する鋼鉄製の物質の腐食は限定的なものであるはずである。しかし原位置試験を実施することで、この研究所実験の結果を確認する必要がある。

この新しい実験の目的は、次の側面について改善することにある。

- 腐食プロセスについての理解を改善する。様々な鋼鉄で、腐食が発生する場所はどこであるか（鋼鉄、インコネル、NAGRA の鋼鉄、ANDRA の鋼鉄など）。反応速度はどのようなものか。生成されるガスの量はどの程度か。硫酸塩還元細菌が存在する場合には、それは腐食にどのような役割を果たしているか。
- 腐食によって誘発された粘土層の擾乱についての知識を深める。擾乱の規模はどのようなものか、鋼鉄と粘土の相互作用の力学はどのようなものか。鋼鉄と粘土の境界面での鉱物学的な変化はどのようなものか。

これは長期的な実験であるが（5 年以上）、こうした条件が非常に緩慢なプロセスとなるはずだからである。

概念：岩盤と鋼鉄サンプルの最適な相互作用が発生するように、実験の構成が特別に設計された。これはボーリング孔のコアの断面に、鋼鉄サンプルを配置するものである。そしてこの部分を、ボーリング孔の設備の外側に配置する。この部分を取り付けた設備をボーリング孔に下に向けて垂直に挿入し、大型のパッカーで密封する。この実験の構成の特徴は、実験部分を 85℃まで加熱できることにある。またこの設備は、数年間の実験の後にボーリング孔から取り出すことができるように製造する必要がある。そして反応した物質（コアと鋼鉄サンプル）にさらに分析を行う。

この腐食のモニタリングは、電気化学インピーダンス分光学（EIS）に基づいたものである。これは腐食プロセスを擾乱するものではない。すなわち電気化学的な測定の際にも、腐食プロセスに変化は発生しない。この方法の主要な欠点は、腐食プロセスが定常状態か準定常状態でなければならないことにある。このため EIS では、時間とともに急速に変化

しない腐食率しか測定できないのである。この方法は、長期的な腐食率がそれほど大きく変化しない長期的な腐食のモニタリングには特に適したものである。EIS 測定を実行するために、地上設備として、マルチ・ポテンショスタット電源 BioLogic WMP3 が設置された。

### IC-A　ベントナイトの内部での鉄の腐食

目的：

- 処分場に関連した環境条件のもとで、圧縮したベントナイトの内部に存在する炭素鋼（C 鋼鉄）の長期的な嫌気性の腐食率を確認する。
- モン・テリ岩盤研究所で現場腐食テストを実施し、キャニスタの寿命についての予測に対する公衆と規制当局の信頼を高める。
- ベントナイト緩衝物質が、微生物の活動と微生物によって影響される腐食に及ぼす影響を確認する。

概念：この実験の設計の主要な側面は次のとおりである。

- ベントナイトのテスト部分の間にある鋼鉄フリットならびにボーリング孔の周囲に配置した鋼鉄管を通じて、ベントナイトを人為的に飽和させる。その際に、テスト部分の頂部に 1 本の鋼鉄管のポートを設置し、底部のフリットに別の 1 本の鋼鉄管のポートを設置する（PTFE または PEEK のいずれかのフリットまたは配管）。
- テスト部分の高さは合計で約 2 m ほどにする。たとえばそれぞれが 50 cm の長さの 4 つの個別のテスト部分で構成する。別の設計として、テスト間隔を複数の閉じた環状のモジュール容器に再分割し、それぞれの容器にサンプルを収容し、オーバーコア処理せずに、一連の時系列のサンプリングを実施できるようにする（評価ポイントは 10 か所）。
- 2 m の長さのパッカーを使用する。2 m の密封の長さが好ましいが、それは密封を改善し、圧力を高くするためである（様々な拡散実験では、2 m の長さのパッカーが利用されている）。ボーリング孔の壁に接触するパッカー・スリーブ層は、天然ゴムではなく、ネオプレンで製造する。
- パッカー・システムを設置する前に、精密なボーリング孔の調査を実行すべきである（これはオーバーコア処理のために重要である）。
- プリホールとパッカーの間に、数メートルの厚さの飽和していない岩盤が存在する。
- ベントナイトの間隙圧力のモニタリング（全体的なテスト部分の頂部及び／または底部）（図には示してない）。底部の鋼鉄フリットに接続した飽和管を利用して、圧力測定を行うことができる。

- ベントナイトが膨脹して 6 mm の環状の隙間に入り込んだ際の密度の低下を最小限にするために、標準的なボーリング孔の直径は 146 mm とする。8.2%の膨脹が発生すると（直径は 146 mm から 158 mm になる)、ベントナイト・ペレットの密度は最初の 1.55 Mg/m$^3$ の値から、1.43 Mg/ m$^3$ に低下する（飽和管の容積をゼロと想定する)。
- 標準的なオーバーコアの直径は 295 mm とする。
- プレホールが、オーバーコア処理の軸を決定する。
- 長さ 50 cm の個々のベントナイトのテスト部分の内部で、4 つのサンプル 10 cm の間隔で配置する（すなわち重量の損失を調べるサンプルを三重にし、一つのサンプルは断面測定に使用する)。これと異なる配置も可能である。サンプルに必要な間隔についてレビューする必要があり（相互作用を防ぐため)、最適な間隔を決定すること（FK 行動。フランスの調査文献 Carlsson et al.と日本の調査からの証拠がある)。
- Solexpert には、パッカー・システムの回収の概念を含めるべきである。オーバーコア処理はそのための一部にすぎない（すなわち、ドーナツ型のベントナイトのサンプリングが実行できるように飽和ラインを設置する方法について)。

**LP　間隙圧力の長期的なモニタリング**

目的：

- 長期的なモニタリングの問題点を確認する。たとえば短期的な効果のモニタリング、長期的な水頭の低下、建設作業の間の組み合わせ効果など。さらにオパリナス粘土の全体的な水理学的な特性を推定する。
- 水理学的な間隙圧力の長期的なモニタリングを最適化する（データ取得の頻度、センサーの種類など)。これには観察ネットワークの拡張の可能性を含める。
- オパリナス粘土とその周囲の帯水層を通じた水理学的な水頭のプロフィールを確認し、過剰圧力の発生を確認し、関連したプロセス（存在する場合）を確定する。さらに坑道の周囲の水理学的に擾乱されたゾーンの規模を推定する。

概念：

- 観察網の空間的な分析によって、既存の観察網を拡張する。さらに既存の放棄されたボーリング孔に圧力センサーを装備し、これを DAS（データ取得システム）に接続する。
- 主調査官が、オンラインの圧力データを通じてサイトのスタッフを定期的に監督し、サイト管理者にフィードバックを与える。

- LP DAS で利用できかる圧力時間系列について、i）時間系列を再構成し、均質化するために予備処理する、ii）地球潮汐、大気圧効果、気象の影響、掘削した坑道の変化など、様々な現象の関係で、定常的な及び/あるいは定常的でない時間プロセスに適用できる方法で分析する。この調査によって、比貯留係数、実効間隙率などの水理学的なパラメータを推定できるようになる。
- 一部のボーリング孔には、ピエゾメーターなどの計器を装備する。とくにオパリナス粘土をサンドイッチのように挟み込んでいる地層や、坑道からの影響から遠い地層などのボーリング孔で、こうした計器を装備する。

### LT-A　研究所の試験による粘土岩の特性と物理的なプロセスの分析

目的：オパリナス粘土の弾性、塑性、クリープ、強度、ダイラタンシーを、その異方性と水理学的な状況を考慮にいれながら記述し、特性を調査する。画像技術を使用したミクロ構造的な分析は、物理的なプロセスの確認に役立つことになる。

概念：様々な境界条件のもとで、オパリナス粘土（砂状の相）の変形、損傷、強度を調査するために、研究所でのテストを実施する。このテストの目的は、力学的な挙動の特性を調査し、物質の異方性を考慮にいれながら、関連した物理的なプロセスを記述することにある。さらに水理学的な状態、特に間隙水のプラスの圧力が、力学的な挙動に及ぼす影響を調査する。画像処理技術を使ったミクロな構造分析は、物理的なプロセスの特定に役立つはずである。

この目的で次の二種類の力学的な実験が計画されている。

- 短期的な力学的な挙動を、軸方向の強度テストと Brasilian テストで分析する。物質の弾性特性と可塑特性、強度、残留パラメータを調査する。現在、間隙圧力の測定設備を設置中であり、この水理学的な影響についてさらに詳細な情報を取得する予定である。
- 様々な負荷条件のもとで、長期的な力学的な挙動の調査に重点を置いた 3 軸マルチステップ・クリープ・テストが計画されている。

これらのテストは、排水した条件と排水しない条件の両方で実行される。利用できるテスト装置を使用して、間隙圧力の測定を実行する可能性を検討する。また、クリープ・プロセスを誘発する偏差応力に下限があるかどうかを調べることも試みられている（しかそのためには、このプロジェクトでは長すぎる期間にわたってクリープ・テストを実行する必要があるかもしれない)。

□MA オパリナス粘土の内部の微生物の活動

目的：第 9 段階以降、複数の擾乱されていないオパリナス粘土（OPA）について、自生的な（土着の）微生物が存在するかどうかの分析か行われてきた。分析結果から、オパリナス粘土は生命が存在するためには厳しい環境であり、生物の存在を検出するのは困難な作業であるという予想が確認された。しかこうした分析から（DNA の抽出、リン脂質を含む脂肪酸の含有量、培養プロセスの分析)、粘土内に生存しうる微生物が存在することが確認された。しかしかなりの規模の代謝活動が行われていることを示す証拠はない。実験計画に関しては（ほぼ殺菌した状態の設備を使用することで、微生物の成長を防ぐことができるか)、土着の微生物に関する問題はたしかに重要な問題であり、これまで獲得されてきた経験によって、実験的に解明することができるものである。

地下深くの地層処分場にとってさらに関連性が強いのは、擾乱されたシステムと、そこに存在する微生物の代謝能力の問題である。これに関連して MA 実験では、まず粘土岩の環境において存在しうる微生物の代謝能力を調査するとともに、さらにシミュレートした処分場条件のもとでの微生物の動物群集の発展を調べることになる。さらにこの MA 実験は IC や EB などの他の実験と併用することもできる。

概念：擾乱されていないオパリナス粘土の内部に自生する微生物が存在するかどうかという問題を解明するために、岩盤サンプル（実規模定置実証実験の掘削によって得られたコア）を、ドレスデン・ホルムホルツ・センターで開発した標準化した手順を使用し、異なった研究所で並行して分析する。

粘土岩の環境で生存できる微生物の代謝能力を調査するために、既存のボーリング孔（たとえば BWS-A1）や岩盤サンプルから得られた間隙水について、メタゲノム分析を実行する。必要な間隙水の量が多いために、サンプリング活動には約 3 年間はかかるものとみられる。

生物反応器（BRC-3）では、添加した水素の微生物による利用について調査する。

IC 実験で得られた水の微生物分析も続けられる。

EB 実験の掘削から得られたベントナイト・サンプルについて微生物の分析を実行し、微生物の成長がベントナイトの圧縮度に依存するものかどうかを調べる。

### MD　ミューオン密度のＸ線断層撮影

目的：宇宙線由来のミューオンを使用する新しい技術で、地下研究所の上部にある地層の密度のＸ線断層撮影分析を実施することを提案している。ミューオンのスペクトルは、1 GeV から数百 GeV にいたる広い範囲のエネルギーにわたっており、ミューオンは分解される前に、数メートルから数キロメートルに及ぶ岩盤の厚さを横断することができる。このため、地下で測定したミューンのフラックスは、ミューオンの移行経路に沿って存在する

物質の量に応じて、多かれ少なかれ減衰している。このフラックスを測定することで、岩盤研究所の上部を覆う岩盤の密度分布を確認する手段が得られる。

MD 実験については、様々な場所でミューオンの密度を測定し、そのデータセットを確立するための測定を実行した。多数の光線経路に沿った岩盤のもつ不透明度を削減するためには、まだこのデータセットを補足しなければならない。これらのデータをさらに処理して、研究所の上部に存在する地層（粘土、石灰岩など）の形状を決定することになろう。段階 15 の際に実施された実現可能性調査から得られた結果が存在しているので、予想された空間的な解像度は数メートル単位となる。

概念：この実験では、保安坑道に沿った複数の場所で、方向を考慮にいれたミューオンのフラックス測定することになろう。測定装置は核物理学の分野では「望遠鏡」と呼ばれているもので、シンチレーター・バーで構成された 2 つの平行な方向の検出アレーを装備したものである。粒子の方向は、このアレー・システムの入口と出口で決定される。アレーの間隔を変更することで、角度についての口径と解像度を調整することができ、アレーを構成するバーの数（すなわちピクセル）が、検出する固体の角度の角度範囲の数を決定する。

保安坑道に沿った測定ポイントは、できるだけ光線を密に捕捉できる狭さで選択し、解像度の高いX線断層分析を再構成できるようにする。

### MH　壁の近くでの$CO_2$の密封の健全さ

目的：

- 処分場、坑道システム、モン・テリ岩盤研究所（たとえば主断層に沿った場所）のための長期的なモニタリング技術を確立する。形状の変化は、その位置と高度をできるだけ正確に分析する必要があり、できれば絶対的な枠組みにおいて分析できる必要がある。
- 地下の坑道システムでの高さと横方向の屈折など、空気の乱流（換気）や大きな温度勾配などによって発生する組織的な誤差の発生源に関する理解を深め、こうした誤差の発生を避けることができようにする。
- たとえば Trivec などの地質工学的なセンサーを、測地ネットワークに統合する。
- 全ての研究所のために、いたるところに十分な長さの数のマークを備えた安定で均質した標準フレームを提供し、空間的な相関関係のある全ての実験と、坑道の安定性のモニタリングの実験に役立てるようにする。

概念：swisstopo では、坑道 08 の掘削に関連して、測地ネットワーク（GNSS 観測、三角法、絶対重力測定、シャイロスコープ測定ならびに高精度の高度測定）を設置した。z 座

標の精度は 1 mm 未満の大きさである。X と y 絶対座標の精度は 1 cm 未満であり、研究所との相対関係は 3 mm 未満である。この測地データのネットワークを使用して、土地の絶対的な隆起など、長期的な移動を測定することができるようになった。こうした土地の隆起は、以前からあるニッチのコンクリートの床の隆起や（たとえば 1996 年に掘削された SHGN ニッチなど)、坑道 98 と 04 の床のひび割れや亀裂など、長期的な定性的な観察から想定されていたものである。高さの測定は重力と結びついているために、精密な絶対重力の測定は、高さの差異と変化の分析と解釈に役立つものである。

「Chaux 作業場」の上部の坑道・システムの入口部分に、MTTI というラベルをつけた GNSS 常設ステーションが設置された。このレシーバーは 1 日 24 時間にわたった位置を測定し続けている。MTTI のおかげで、測地学的な測定を ETRF93 のようなグローバル・フレームに「絶対的に」統合することができる。MTTI はスイスの自動 GNSS ネットワーク AGNES の一部でもあり、特に最近の地殻の運動を検出することを目的としている。

## MO　長期的なモニタリングのための技術の準備

目的：

- モニタリング概念を作成する。
- モン・テリ岩盤研究所で次のような実証実験を行う。
  - 異なる種類の光ファイバー物質ならびにこうした物質が老化に及ぼす効果。
  - エネルギー管理と転換技術の適用。
  - 無線センサー技術の分野でのデータの転送。

概念：第一の目的（モニタリング概念の作成）は、規制のための安全性研究の活動の枠組みで、ENSI の主導で行われたものであり、2010 年にプロジェクトが開始された。特にこのプロジェクトで研究されたのは、どのパラメータを測定するか、測定の頻度はどの程度にするか、どのような期間にわたって測定するかという問題であった。

パイロット施設の建設が開始された時点で、異なった物質、データ転送技術、エネルギー管理技術及び転換技術を利用して、成熟した技術を獲得するための実証実験を開始する必要がある。長期的な老化効果も、異なった物質について実行する必要がある（光ファイバー・ケーブル、圧力センサーと温度センサー、熱・電気の発生機など)。これらの物質を使用した設備を埋め戻したボーリング孔に取り付け、モン・テリ岩盤研究所で、自然の条件のもとで調査することになる。

現在の概念は 5 m の長さのボーリング孔（直径 178 mm）を使用するものであり、このボーリング孔の底部にヒーターを設置する。さらに 4 種類の異なるファイバー・ブラッグ・

グレーティンク（FBG）センサーと、電気通信産業で伝統的に使われている 3 つの光ファイバーをボーリング孔に挿入し、伝統的な温度と間隙圧力を調べるプローブを、ボーリング孔に沿った複数の場所に設置する。システムの飽和を調べるために、ステンレス鋼のフィルター・スクリーンを挿入する。その後、全体のシステムをベントナイトと砂の混合物で埋め戻し、井戸の頂部のところにパッカーを設置し、全体のシステムを坑道から密封する。次にこのシステムを人工の間隙水（APW）で飽和させ、モニタリングする。モニタリング作業としては、FBG の常時モニタリングする作業（分離モニタリング方式）と、リースによる OTDR 装置によって標準の光ファイバーを定期的にモニタリングする作業（継続モニタリング方式）がある。

さらにスイスの連邦物質化学研究所（EMPA）で、3 つの同一のセットのケーブル（ブリルアン散乱式分布型（BOTDA）と FBG）の化学的、力学的、工学的な特性を調べるための研究所テストが実行される。第一の標準セットのケーブルは、実験の最初にテストする。第二の標準セットのケーブルは、実験が続けられる間を通じて熱的に安定したボックスの内部に格納し、5 年のモニタリング期間が終了した後に分析する。第三のセットはボーリング孔の底部に設置したもので、同じく 5 年間のモニタリング期間が終了した後に解体してテストする。この概念で、母岩として利用される可能性のある地層のボーリング孔に埋蔵された光ファイバーの現実的な条件のもとで、ケーブルの被覆に対する現実の経年化の影響を評価することができる。この調査結果が、さらに経年化に抵抗できる物質の構成のための基礎となる。

### MO-A 地球物理学的な方式の受動性を利用した長期・大規模モニタリング

目的：地球物理学的な方法を、堆積岩または結晶岩の岩体の内部の掘削影響領域（EDZ）の伸張と物理的な特性を調査するために使用することで、坑道、ニッチ、ボーリング孔を掘削した周囲の場所について、侵害的でない方法でテストすることができる。

この MO-A 実験は、地下の処分場の長期的なモニタリングという科学的な課題に取り組むための、地球物理学の分野での技術革新を実現したものである。MO-A 実験は、以下のような持続的な自然の信号のモニタリングに基づいたものである。(1) 気圧の信号とラドン-222 の放射能の濃度、(2) 周囲の地震ノイズ、(3) マグネトテルリック信号。最初のステップとしての MO-A 実験の目的の一つは、モン・テリ岩盤研究所で利用できる自然のノイズ源の目録を作成することにある。次に、伝統的な地球物理学的な方法、研究所での測定、数値モデリングなどの方法で、定義された現場の物理的な特性の変動と、測定された数値を関連させる必要がある。実規模定置実証プロジェクトの間に実行される長期的なモニタリングの主要な目的を実現するためには、これらの予備的な調査が必要である。革新的な方法のもつ可能性とその実現について、ボーリング孔の周囲の EDZ から損傷された坑

道まで、さらに処分場全体という大きな規模で、異なった応用規模について分析する必要がある。

概念：ラドン-222 の放射能の測定と、閉鎖したボーリング孔と坑道の間の圧力差を測定する「気圧ポンピング」方式で、異なった EDZ をモニタリングする。EDZ を通じて伝播される気圧信号のタイムラグと減衰も、空気の拡散性によって決定される。ラドン-222（半減期は 3.82 日で、粘土質岩に存在するウラン-238 の崩壊連鎖から発生する）を使用し、一部の数値モデリングとの関連で、この物質を異なった規模での EDZ の移行特性の変動を調べる地球物理学的なトレーサ物質として使用する。

第二の地震ノイズの相関関係は、すでに地震学的な調査が適用されている媒体のグリーン関数についての情報を提供する。坑道 Ga08 において、8 個のジオフォンを設置して、周囲の地震ノイズを記録する予定である。異なった地震のノイズ源のうちで、気象学的な条件が地下の坑道にノイズを伝達するはずであり、こうした条件は外部ステーションが記録することになる（大気圧、気温、風速)。短期的なモニタリング（数日）から長期的なモニタリング（数週間）にわたる連続的な記録で、グリーン関数をモニタリングすることになる。データ取得期間の前と取得中に、ある程度のモデリングを実行して、獲得されたグリーン関数において観察された変化が関係するのがどの分野であり、どの弾性特性であるかを確認する予定である。

第三のEDZ電気特性の変化は、電離圏と電磁圏からやってくる電磁信号を使ってモニタリングすることになろう。24の電極で構成される8カ所の観測地点をジオフォンの近くに配置して、短期的なモニタリングと長期的なモニタリングで、電気場を継続的に記録することになる。研究所の外部に、電磁場の変化を継続的に記録する観測地点が設置される。モン・テリ岩盤研究所がある山岳で、坑道の上部の電気モデルを作成するために、伝統的な電気プロフィールの作成が行われる。一部の数値モデリングは、坑道で記録された信号分析と関連づけられる。

### OP-A　間隙の浸透圧の測定

目的：浸透によって誘発された間隙圧力の変化を直接に測定し、その経時的な応答の特性を調査し、イオン拡散を含む浸透モデルを利用し、これを説明する。

概念：この設備は、浸透効果によってオパリナス粘土の内部で発生した間隙圧の経時的な変化を直接に測定するものである。これによって浸透による擾乱に対する断面の流体力学的な応答の証拠を示す。テスト用のボーリング孔から短い距離にある間隙圧の経時的な応答をモニタリングすることにより（ボーリング孔の液体を適切な液体に切り換えた後)、浸透係数やイオンの拡散度などの浸透に関する核心的なパラメータの値を決定することができる。

DR-A ニッチに、一連のボーリング孔の列を掘削したが、これらは中心部の直径 10 cm のテスト用のボーリング孔と、このテスト用のボーリング孔の末端から 30 cm 離れた場所に設置した 2 個のミニ・ピエゾメーターと 2 個の GEOCON 応力セルで構成される。テスト用のボーリング孔は、たとえば浸透性の膜などでライニングし、ボーリング孔の壁の健全性を維持しながら、液体が浸透できるようにしている。段階 16 ではボーリング孔を飽和させ、平衡状態にして塩水が形成されるようにした。完全に平衡状態が実現された後に、テスト（パルスの取り出し／注入）を実施する。段階 17 では、ボーリング孔の液体を塩度の高い塩水に切り換えて、浸透効果を発生させ、これをミニ・ピエゾメーターで測定する。その後に、追加的な水理学的なテストを実施する。

この原位置実験を、小規模な研究所試験（1 次元の浸透流動を利用するもの）で補う。

### PC-C　間隙水の化学的な条件

目的：OPA 間隙水の組成に関してまだ残されている不確実性を低減する。特に炭酸塩システムと酸化還元状態に関する不確実性を低減する。

概念：ボーリング孔 BPC-C1 では、コア、気体、水のサンプルの地球化学的なデータが取得されている。このボーリング孔ではまだ一日 3〜6 ミリリットルの流量で、地下水が湧きだしている。収集した地下水の組成は、7 年にわたって相対的に安定していた。溶解した気体（アルカン、$N_2$）の濃度は、まだ時間とともに変化している。段階 18 から段階 22 にかけてサンプリングを続け、一年に一〜二回の割合で地下水を分析する計画である。

段階 15 と 16 において、ボーリング孔 BPC-C2 が掘削され、ドッガー統の石灰石のゾーンで湧きだしている地下水に到達した。このボーリング孔は、OPA の間隙水の化学的な状態についての理解を深めるために、ドッガー統と OPA の境界面の特性調査のためだけに利用されている。このボーリング孔はさらに、GD 実験の目的の実現にも役立っている。第 18 段階においては、異なったチームがコア・サンプルについて取得したデータと、地層水の分析結果について研究する計画である。

### PS　オパリナス粘土の岩盤組成と張力

目的：粘土では、移行特性を制御するのは岩盤の微細構造と、鉱物の表面と流体の間の化学反応である。間隙率についての代表的な 3D モデルを作成し、このモデルに基づいて数値的な方法で透過率を計算できるようになれば、粘土内での移行について大きな進歩が実現される。その目的は、変形されていない物質からモン・テリ岩盤研究所の主断層帯への移行を考察するために採取されたオパリナス粘土の BIB-SEM サンプルについて、代表的な

エリアの逐次断面作成を実施することである。この調査ではさらに EDZ サンプルも分析される。断層帯と研究所で変形されたサンプルに基づいて、変形が増大するとともに変動する微細構造と間隙率の 3D モデルを作成する予定である。

概念：3D 間隙スペースと微細構造の BIB-SEM 画像の作成

BIB-FIB のミリング技術、ウッズの金属注入方式、SEM の顕微鏡技術を組み合わせることで、粘土の物質の間隙率の特性を調査するための強力な方式が獲得できる。粘土の間隙率を数 nm の単位にいたるまで調査するためには、電子顕微鏡による画像の作成がもっとも直接的な方式である。最近はイオン・ミリング手段が開発されたために、ナノ規模での画像を作成するために、極度に高品質に研磨された逐次断面が作成できるようになった。

イオンビームのミリング手段としては二種類のものが利用できる。広いイオン・ビーム（BIB、3.5 mA まで）は、数 $mm^2$ の大きな研磨断面積を作りだすのに適しており、焦点を絞ったイオン・ビーム（FIB、1 pA～45 nA）は、さらに小さな断面積のために使われているが、数 $\mu m^2$ の面積のウェーハにも利用されている。地球科学の分野での低温 SEM 技術の新たな開発により、湿潤サンプルの分析が可能となった。低温 SEM 顕微鏡で採用されているイオン・ミリング・ツールは、「薄切りにして見る」手順を使用して、間隙スペースを 3D で直接にアクセスするための独特な手段となっている。ウッズの金属注入方式は、Hg 間隙計に相当する方法であり、間隙スペースに溶融した金属を注入し、圧力をかけて固化させるものであり、特定の毛細管圧力のもとでアクセスできる間隙を確認するために、BIB-SEM を利用できるようにした。

### RA　岩盤力学の分析

目的：全ての岩盤力学について、現場と研究所で地力学的な測定の評価、比較、モデリングを実行すること。粘土状の岩盤のプロセスと相互作用についての理解を深めること。この実験で、実験の詳細な計画設定のために必要な岩盤力学的な専門知識が取得される。

概念：岩盤の挙動についての研究所と現場のデータを分析し、数値モデリングと組み合わせて、処分場の掘削が母岩に及ぼす影響を評価し、予測する。

### RC　岩体の特性調査と岩体の挙動との関係

目的：RC 実験は、不連続性の特徴が、岩体の特性にどのような影響を与えるか、そしてそれによって岩体の挙動にどのような影響が実践するかについての理解を深めることを目的とする。このプロジェクトはさらに、どの亀裂の集合が構造地質学的な原因によって発生した構造なのか、それとも掘削に誘発されたものかを特定することを目的とする。

概念：段階 18 では、移動ベクトルに対してマルチスケールの不連続性（岩盤マトリクスの異方性、小規模及び大規模な断層）がどのような影響を及ぼすかを詳細に理解するために、最終的なデータの解釈に重点を置く。概念的に組み合わせた 3D 数値モデル（FLAC 3D）と張力経路分析を利用して、観察された巨頭と仮説的な影響要因（たとえば多孔弾性特性と脆弱性の欠陥）を分析する。

これまで行われてきた岩盤の力学データの科学的な分析（直接の剪断試験、限定及び非限定の圧縮負荷試験）を補足し、これを岩体の水理学的及び流体力学的なシミュレーションのための入力データとして利用することで、坑道 08 の掘削によってオパリナス粘土において発生した岩盤欠陥挙動を記述する。

### SM-B　高解像度の地震モニタリング

目的：処分場の安全性のためには、地震の危険性に関連したいくつかの問題点が重要である。

- 地表と比較すると地下約 300 m の深さでは地震によって発生する地面の動きが小さくなるという仮説をテストする。
  - 高い周波数では土地の動きは大きくなる（地表の物質による緩衝効果が発生しない）。
  - 低い周波数では、上昇する地震波と下降する地震波による建設的及び破壊的な干渉が発生する。
  - オパリナス粘土は一般に横方向に異方向性を備えている。このため地震波による特別な現象が観察される可能性がある。
- サン=テュルサンヌ地域では発生する地震には、どのような焦点メカニズムの解決策があるか。

応力体制はどのようなものか？

- 構造地質学的な力はまだ働いているか、ジュラの基本的な推力はまだ働いているか
- 地震の危険性を予測するために、地震による断層を確認するための手段を開発すること。

概念：

- モン・テリ地域で高解像度の地震フインガープリントを収集する。最高の感度でもって、全ての周波数で地震活動を地上と地下で同時に観察する。
- 異なった測定技術を利用して、完全なスペクトル範囲を対象とする。

- 最高の感度の計器を使用して、ナノ規模の事象を観察する。
- 一つのステーションを研究所レベルで運営し、別の標準ステーションを地上で運営して、地上と地下で地震の事象を相関させる。
- いずれ常設の設備を設置するための実現可能性調査を実施する。
- 永久変位にいたるまで 10 Hz から下に、全体の記録可能な地震活動をモニタリングする。これには、存在しうる活動的な断層の近くの 1 Hz までのナノ規模の地震活動と、準定常移動や永久変位または傾斜を含む。
- 広範な周波数の範囲で、緩衝効果を分析するために、地上と地下のステーションから、相関データを提供する。
- 事象の特徴を分析し、稀少な事象にまで外挿できるように、特定の観察期間（20 週間）の範囲でも、地震事象（大部分は強度の小さな事象）の大きなデータセットを獲得するために、感度の高い計器を利用する。
- 利用できる最新の設備を利用し、費用を削減するために計器類のリースを利用する。
- 予想される常設設備のために、概念を検証する。
- 妥当な費用で、短い観察期間でも、多数の事象について、全ての周囲数の範囲にわたる地震データのデータセットを獲得する。

20 週間という限られた期間ではあっても、モン・テリ岩盤研究所で観察することができる大地の全ての運動を記録するために、最新の計器セットを構築することを提案されている。提案されている技術を使って、100 Hz までの範囲で、静的及び動的な大地の変形を解像することができる。

### SO　オパリナス粘土の堆積学

目的：モン・テリ岩盤研究所では、過去 15 年間にわたって、地質学的な観点からみて、構造地質学的な条件を理解することに大きな重点が置かれてきた。これがオパリナス粘土のサブゾーンの泥板岩の多い層で観察されるもっとも明確で重要な特徴である。異なる層の岩盤学的な記述は、岩盤分類学的な分析や間隙の種類の特性調査を重点とするものであり、堆積構造は一貫して無視されてきた。オパリナス粘土のような粘土質の地層は、深い深度で坑道を建設する上で利点を備えているために、スイスの HLW 廃棄物処分場の概念では、堆積構造の多面的な集積である砂状の層がますます重要なものとなっている。このためこの情報の欠落を改善する必要があり、この新しい実験で次のような目的が定められた。

- モン・テリ岩盤研究所のオパリナス粘土の堆積構造と層位学的な特徴を記述し、堆積環境のもつ意味を調査する（エネルギー環境、堆積インプットの制約、炭酸塩の

産出場所、受け入れスペースなど)。

- 上に向かって粗くなるサイクル、圧縮された場所など、検出可能なサイクルが存在するかがどうかを検証する。
- こうしたサイクル、その岩盤学的な特徴、固有の堆積構造などを定義し、検出し、記述し、その変動を解釈する。
- 研究所規模で、コア物質や坑道面についての視覚的な観察結果を、既存の地球物理学的なログと相関させる（ガンマ・ログ、地球電場ログ、光学的なログなど)。研究所規模での地質学の診断ツールを作成する（垂直と横方向の相関関係)。
- 観察した堆積構造とその細分した小構造を、研究所のテストが確認された地力学的な値と相関させる。
- 層位学的なカラムの内部の化石や山脚を記述する。それには、モン・テリ岩盤研究所のオパリナス粘土の古生態学的なモデルを作成するために、こうしたものの分布を確認する。

概念：

- サイトやサイト外部について利用できる文献をまとめる。
- 他の実験で掘削した理想的な方向のボーリング孔について、解像度の高いマップを作成し、ハーフ・コアの切断のために、特定の断面をサンプリングする。
- 横方向のディジタル画像分析のために、光学的なコアのスキャンやその断面のスキャン画像をさらに細分化するための方法(注入や着色など)の評価を行うか、開発する。
- 堆積構造を記述し、その断面を分析する
- 利用できる地球物理学的なログをまとめ、解釈する。
- 十分に定義された堆積エリアの外部で採取されたサンプルに、新たな岩盤力学的な研究所テストを実施する。

### VA　オパリナス粘土の内部での空間的な変動可能性の調査

目的：この実験は、モン・テリでのオパリナス粘土の垂直と横方向の変動可能性を考察することを目的としている。第 17 段階において、複数のボーリング孔のログを作成し、これらのボーリング孔のサンプルを分析した。第 17 段階において、赤外線画像の作成などの追加的な測定を実行することで、物質特性の 0～2D の分布の特性調査を実行する予定である。第 18 段階では、こうした測定を 3 次元にまで拡張する。第 17 段階で獲得された物質特性の水平方向と横方向の相関関係は、測定ポイントの数と位置の制約のために、組み合わせて完全な 3D の記述にまとめることはできない。このため第 17 段階の主要な実験サイ

トに近い場所での追加的な測定によって、物質特性を 3D で調査することができる。

概念 : 小規模な 3D の物質特性の調査のために、TT ニッチと BVA ボーリング孔で、追加的な測定をする計画である。複数の（4 本から 5 本の）短く、層に平行なボーリング孔を TT ニッチで掘削する予定である。こうしたボーリング孔の位置決定のための指針として、2D の赤外線画像分析（第 17 段階で実施したもの）が利用される。これによって第一に、研究所の測定結果を使用した赤外線画像の分類が改善され、第二に赤外線によるコアのスキャンを利用し、赤外線画像から得られた情報を 3 次元に拡張することができるようになる。獲得されたコアは、さらに研究所測定でも利用される（鉱物学、地下水の成分、密度、薄い断面の分析など）。

さらに、第 17 段階で得られたログを補足するために、追加的な検層・ツール（NMR）を利用する計画である。

さらに大きな規模では、モン・テリの複数のサイトで、赤外線画像を広範に利用する計画である。特に、今年掘削が計画されている実規模定置実証実験（FE）ニッチへの関心が強い。実規模定置実証実験のスケジュールの都合が合えば、坑道を掘削する際に、複数の（逐次）画像を取得する予定である。

### WS-I　ウエット・スポットの調査

目的 : モン・テリ岩盤研究所の複数のボーリング孔で、遊離した地下水の存在が検出されている。湧出する地下水の量は、一日に数ミリリットルから数百ミリリットルの範囲である。この実験の目的は、WS-H 実験をさらに解明すること、特に湧出する地下水の量の多いボーリング孔の水理学的なプロセスと地下水化学的な変動についての理解を深めることにある。

概念 : WS-I 実験は、WS-H 実験を続行するものであり、特に地下水の流出量の多いボーリング孔に焦点を合わせている。計画されている作業と調査の基礎となる概念は、可能な支配的な流動経路の特定（堆積学的な特徴や構造地質学的な亀裂など）、こうした経路の詳細な水理学的及び地球物理学的な特性調査、さらに流出する地下水の地下水化学の経時的で詳細な調査である。

(4) 付属書 D　グリムゼル試験サイトでの主要なプロジェクト

### ガス透過シールのテスト（GAST）

透水率の極めて低い母岩に建設した L/ILW 地層処分場について、NAGRA やその他の組織は様々な調査で、処分場で発生したガスの放出の問題を考察している。ガスの生成を削減するための措置が調査されているが、処分場で発生したガスが母岩に及ぼす影響を緩和するための設計オプションも評価されている。NAGRA は放射性廃棄物の処分空洞に設置するプラグと、処分場のシールに関するこうした調査に重点を置いているが、これらは母岩や人工バリア・システムの放射性核種の保持能力を損ねることなく、埋め戻された地下の構造物の気体の移行能力を高めることを目的とするものである。この研究によって生まれた設計オプションは、「工学的なガス移行システム」（EGTS）と呼ばれている（図 2.4.A-1）。このシステムは、廃棄物を定置する空洞に特別に設計した埋め戻し材を使用するものであり、その他の地下の構造物を埋め戻し、処分空洞のプラグや処分場のシールとして利用する。こうした物質としては、間隙率の高いモルタルや、ベントナイトの含有量が 20～30%の砂とベントナイト（S/B） の混合物がある。

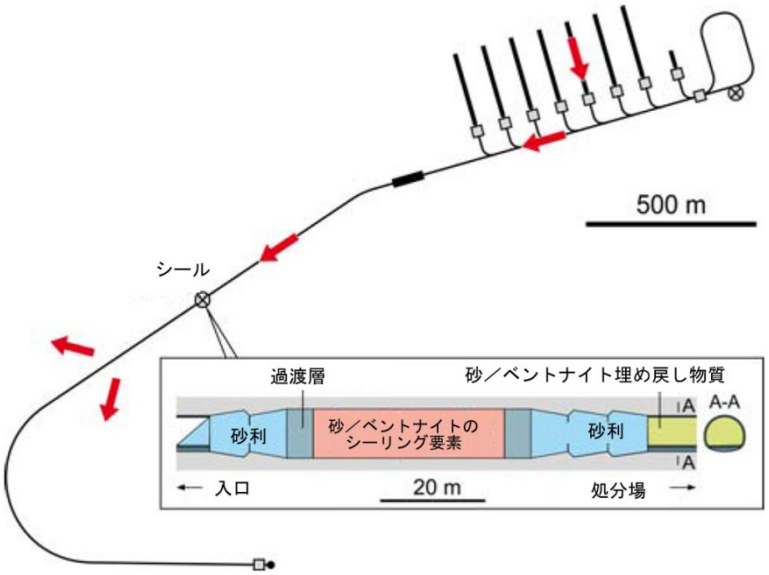



図 2.4.A-1　GAST 実験。工学的なガス移行システム（EGTS）の概念図と、処分場のシールの詳細な設計

数値シミュレーションによって、EGTS は様々な派生型の処分場の配置とパラメータにも適切な性能を示すことが確証されている。この現位置 GAST 実験の目的は、i）現実的なスケールで、現実的な境界条件のもとで、ガスを透過するシールの機能が効果的なものであることを示すこと（これは概念の確証と呼ばれる）、ii）S/B シールの内部で再飽和とガスの侵入プロセスを考察した現在の概念モデルを検証し、必要であれば改善すること、iii）S/B シールに使用するアップスケールした 2 相の流動パラメータを決定することにある。

この実験のレイアウトは、TBM で掘削した花崗岩の坑道の内部に定置した 8 m の長さの S/B シールを使用するものであり、両端に有孔物質を使用して、水と気体を注入できるようにしてある（図 2.4.A-2 参照）。末端に 2 メートルの厚さのコンクリートの橋台／プラグを取り付けて、力学的な支持を行うようにしている。このテストの設計と計器類の要件は、最高 50 バールまでの水圧を基礎としたものである。

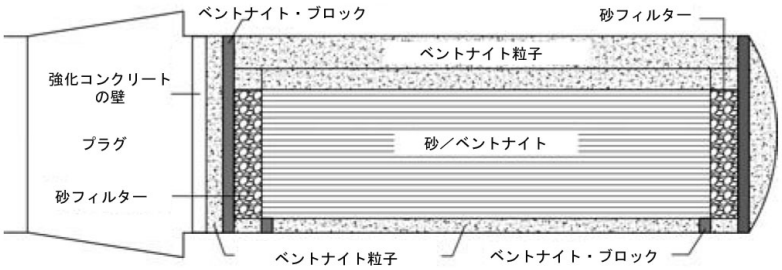



図 2.4.A-2　GAST のレイアウト（坑道の直径は 3.5 m）。それぞれの要素には独自のグフィック・パターンがあり、対応したラベルで指定されていることに留意されたい。

定置作業は 2011 年 10 から 2012 年 5 月にかけて行われた。合計 84 トンの S/B を利用して、S/B の本体と、55 トンのベントナイト粒子を製造したが、これらは境界面と頭部のスペースを密封するためのものである。強力に凝縮したことで、定置後の最終乾燥密度は 1.7 m/cm$^3$ (S/B) と 1.45 g/c m$^3$（ベントナイト粒子）になった。これは最初に定義された要件を満たすものである。

合計 169 個のセンサーとラインを埋め込んであり、これで飽和／吸収、水圧、全体の圧力を測定し、さらにコンクリート・プラグの内部の温度を測定する。これらの装置は 15 の断面に分散して配置されている。またプラグの表面には 4 個の移動センサーが取り付けられており、圧力負荷をかけた際にコンクリート・プラグの物理的な移動が発生するかどうかを監視する。

飽和作業は 2012 年 7 月 11 日に開始され、コンクリート・プラグ側から水を注入した。2012

年 11 月末には、この実験で合計約 2 $m^3$ の水が注入されており、その内の約 1 $m^3$ は砂フィルターに、約 1 $m^3$ はベントナイトと S/B 物質に注入されている。開始した時点の注入率は 6 ml/min であり、その後は 3 ml/min の比率で注入を続けた。モデリング計算から、坑道の両端から水を注入すれば、今後 2 年から 3 年で飽和を達成できることが示されている。

GAST 実験は NAGRA、フランスの ANDRA、韓国の KRMC の共同プロジェクトである。その他の組織も研究所で計画されている活動に参加し、モデリング能力をさらに改善することができる。

**実規模の人工バリアの定置実験（FEBEX/FEBEXe）**

GTS での FEBEX 実験は、自然の条件で実行される発熱性の高レベル放射性廃棄物（HLW）の処分のための現位置の実規模の人工バリア・システム（EBS）テストである。この実験は結晶岩の内部に高レベル放射性廃棄物を処分するスペインの標準設計に基づいたものである。この設計では、廃棄物を収容したキャニスタを横坑に水平に定置し、これを高度に凝縮したベントナイト・ブロックで構成された膨脹性の粘土バリアで囲むことになっている。ほとんど実規模で実行された「模型テスト」が、スペインのマドリッドの CIEMAT の研究所で並行して実施されている。

TBM で掘削した坑道の内部に 2 基のヒーターを設置し、これを凝縮したベントナイト・ブロック（図 2.4.A-3 参照）で囲んだ。これらのヒーターは 1997 年 2 月にスイッチをいれてあり、ヒーターとベントナイトの境界面で、100℃の一定の温度を維持している（この値はスペインの標準概念 AGP Granito で推奨されたものである）。これによってベントナイト緩衝物質は、岩盤から自然に浸出してくる地下水と緩慢に水和している。粘土バリアの内部、岩体、ヒーター、サービス・ゾーンには、様々な種類のセンサーが合計 632 個も設置されており、温度、湿度、全体の圧力、移動、間隙圧力などの変数を測定している。

5 年間の加熱実験の後、2002 年にはヒーターNo.1 が取り外された。回収した物質（ベントナイト、金属、計器類など）を分析して、発生した様々な種類のプロセスを分析している。ヒーターNo.2 はまだ 100℃の温度で作動を続けている。現在の実験チームは、NAGRA、SKB、CIEMAT 及びポシヴァ社で構成されており、2015 年までこの実験を続けることを決定しているが、その後も実験が延長される可能性もある。

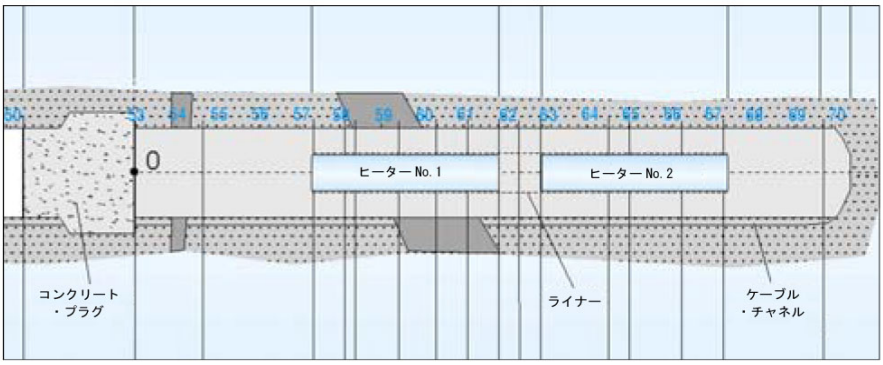



図 2.4.A-3　FEBEX 実験。1997 年から 2002 年までの期間の計器の設置図。その後ヒーター No.1 は取り出された（直径 2.28 m）。

15 年以上にわたって 100℃の温度で加熱を続け、自然の飽和条件が維持されているために、FEBEX 実験はこの種の実験としてはもっとも長期的なものであり、独特なデータセットが提供されてきた。この実験の初期には緩衝物質の熱・水理学的・力学的な（THM）挙動の確証と、THM モデルの検証に重点が置かれていたが、マルチ・モデル作業の一環として、掘削段階によってさらに独特な理解が得られるものと見られている。現在計画されているヒーターの掘り出しが実施される時期には、1996 年に定置した際に緩衝物質の内部に埋め込んだクーポンの腐食プロセス（及び鉄とベントナイトの相互作用）が、約 20 年もの長期にわたって、現場の処分場に関連した条件のもとで維持されていることになる。

現在の計画では、2014 年まで一定の温度での加熱とモニタリングを続ける予定であり、次の 2015 年に、残りのヒーターNo.2 を掘り出す予定である。別の実験シナリオとしては、「冷却」期間を設けて実験を延長し、最終的に現位置での完全な飽和の実現を確証することが考えられている。HLW 処分場で予想される温度の変動条件のもとでは、温度が上昇するとともに完全な飽和が実現されるとみられている。ヒーターの掘り出しが開始されるまで、湿度レベルが上昇するとともに、内部のベントナイト物質がどの程度まで現場で膨脹するかを調べるのは興味深いことである。

### コロイドの形成と移行（CFM）

CFM プロジェクトは、2004 年に放射線制御ゾーンで開始された国際的なプロジェクトであり、処分場に関連した境界条件のもとで、十分に特性が調査された剪断帯の内部で、コロイド

が放射性核種の移行をどの程度まで促進するかを調べるものである（図 2.4.A-4)。

2012 年 12 月の時点で、CFM プロジェクトでは次のような成果があがっている。i）剪断帯での水力勾配を制御するための最新の密封概念（CFM 坑道パッカー・システム）の開発、設置、試験（これは処分場に関連した条件を再現したものである)、ii）剪断帯におけるベントナイトの腐食とコロイドの形成、放射性核種の摂取及びその可逆性を調べるための広範な研究所調査の実行、iii）コロイドの形成と移行を推定するモデルの開発。なお、CFM の最終段階の準備を進めながら、保守的なトレーサ物質、ベントナイト・コロイド、放射性核種を使用して多数の実験が行われている。CFM の最終段階では、剪断帯の制御された流動エリアに現位置で挿入された放射性核種でスパイク処理したベントナイトのソースターム（あらかじめ製造されたベントナイト・ブロック）から発生したベントナイト・コロイドの挙動を評価することに重点を置く予定である。

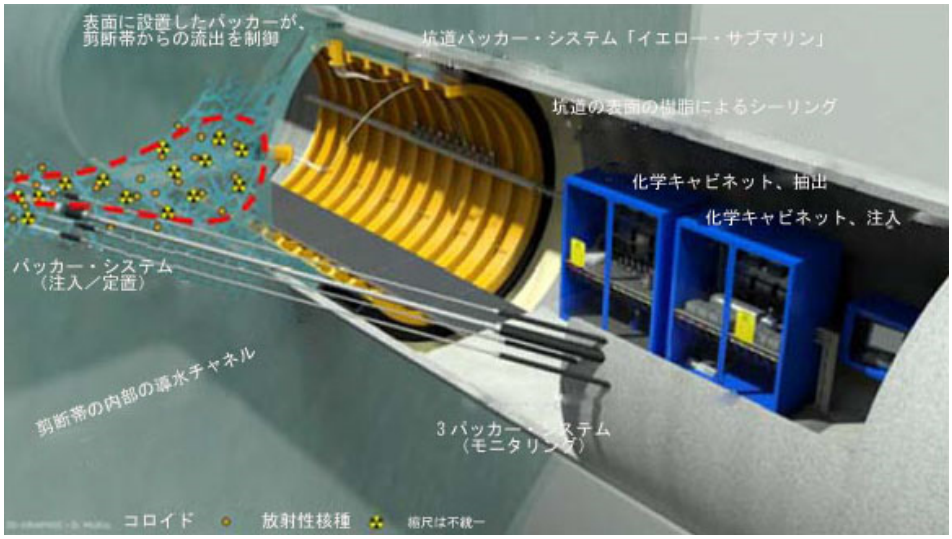



**図2.4.A-4　原位置試験におけるコロイドの形成と移行の実験レイアウト（坑道の直径は3.5 m）**

この実験で利用した最新のシーリング・システムでは「坑道パッカー」を使用しているが、これは剪断帯から坑道への地下水の流出を 600 ml/min（自由流動）から 5 ml/min（サンプリングのための最低の勾配を作りだすために必要な流量)まで制御することができるものである。これによって坑道に近い場所にある剪断帯の内部に、現実的な水理学的な条件を作りだすことができる（図 A.4 参照)。

Amino-G、ベントナイト・コロイド、Na-22、Ba-133、Cs-137、Np-237、Am-242、Pu-242、

Th-232 で製造されたカクテルを使った移行試験は、2012 年 2 月から 4 月にかけて実行され、予定の成果を挙げた。

*展望*: CFM によって独特な試験環境が作りだされており、これによって処分場に関連した条件のもとで､コロイドと放射性核種を使用して､十分に特性が調査された流動条件のもとで、移行実験を実施することができる。放射性核種でスパイク処理したベントナイト・ブロックを使って、長期的な（2 年から 3 年間の）定置及び移行試験が計画されており、2013 年には定置ボーリング孔にこれが設置される予定である。コロイドの形成と移行を統合するモデルを確立するために、モデリング開発作業が続けられる予定であり、長期的な試験によってこのモデルを確証することができる。

**長期的な拡散（LTD）**

LTD プロジェクトは、現場条件のもとで、岩盤のマトリクス拡散に関する定量的な情報を取得することを目的とした一連の実験で構成される。

岩盤のマトリクス拡散は、地層処分では特別な意味があるが、それはこのプロセスは、対流によって移動する放射性核種と接触する岩盤の表面積を、流動経路の表面（及び浸透場所）だけから、岩体のより大きな部分へと大幅に拡大するメカニズムとなるからである。このメカニズムは、I-129 や C-14 など、弱くて収着しない放射性核種からの被ばく線量への寄与分の計算値を考察する際には、特に重要なものとなる。性能評価の計算で利用される拡散係数は、主として研究所で実行した岩盤サンプルについての実験から得られたものである。このため現場で得られた拡散係数との比較は、研究所の試験条件のために（応力条件の制限、サンプルの保存などの条件)、使用した値との差異が発生した場合に、こうした差異を評価するために役立つ。

LTD の第 1 段階では（2004～2009 年)、原位置拡散実験の構成が実現されたが（図 2.4.A-5 参照)、この実験の構成では、放射性核種（H-3、I-131、Na-22 及び Cs-134）と安定した同位体（Na、I）を、擾乱されていない岩盤マトリクスの内部に拡散させた。2 年半にわたって放射性核種の計算を実行した後に、拡散距離に相当する部分をオーバーコア処理してサブサンプリングし、岩盤の内部での放射性核種のプロフィールを測定した。

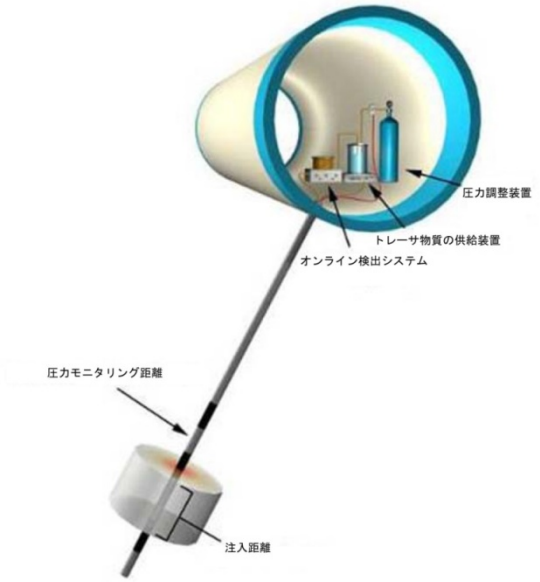



**図2.4.A-5　LTD実験。第1段階の原位置試験の図示（注：実尺に合っていない）**

H-3 は、ボーリング孔から 20 cm までの距離で検出された。事後（ポスト・モルテム）モデリングに基づいて、実効拡散係数は、研究所で分析した岩盤サンプルから確認された最低値よりも、一桁は小さいことが明らかになった（現場では De= $2e^{-13}$ $m^2/s$ の値であり、研究所では De=$1e^{-12}$ $m^2/s$ であった）。Cs-134 の貫通距離は、層の形成に対して拡散が垂直に行われるか、並行に行われるかに応じて、ボーリング孔の壁から 1 センチメートルか 2 センチメートルの範囲となったが、大部分が主として雲母に収着されていることが確認された。Na-22 はボーリング孔の壁から 10 cm まで拡散していた。

LTD プロジェクトの第 2 段階として（2010～2015 年）、第 2 の原位置実験が構成され、水理学的な試験、長期的な圧力モニタリング、pH と Eh のモニタリングが実施された。この第 2 段階の原位置拡散実験では、H-3、Cl-36、Na-22、Cs-134 及び安定した Se を使用することが選択された、2013 年には放射性核種カクテルの注入が計画されており、2 年から 3 年間循環させた後に、オーバーコア処理して分析する計画である。第 2 段階のその他の作業パッケージとしては、Cl-36、H-3 及び Se を調査するための模擬研究所試験、亀裂からの拡散移行の不均質性についての洞察を深めるためのポジトロン断層写真撮影（PET）実験などが含まれているが、これらは実効表面積（安全評価で使用する値である）の定量化のために、実験的な証拠を提供するのに役立つものである。

第 1 段階と第 2 段階で実施された全ての作業パッケージの結果を総括することで、現場の岩盤のマトリクス拡散の規模について現実的な値が決定され、既存の性能評価コードの信頼性が改善されることになろう。

### 大規模モニタリングプロジェクト（LASMO）

地層処分場のレイアウトは、既存の地質学的な構造によって制約を受けるが、こうした構造の一部は、地上からの探査だけでは十分に特性を調査できないかもしれない。坑道やボーリング孔でマッピング作業をしながら、地下で特性調査を実施することは、地上での作業と比較すると容易ではあるが、侵入的な特徴を有する技術の緻密なネットワークを利用するために母岩の地層が損ねられることのないように設計する必要がある。定置坑道を設置する岩盤パネルの位置を明らかにする目的で、母岩の特性調査を実施する別の方法として、処分場エリアに坑道を掘削する方法を利用することができる。この方法は掘削活動をする間に、母岩の地質学的、水理学的、化学的、力学的なパラメータをモニタリングするものである。新たに獲得したデータによって、サイトの記述モデルのもつ制約がさらに明確になり、モデルの不確実性が少なくなる。X線断層写真の撮影などの地球物理学的な技術は、非侵入性の方法で広い面積の岩盤の特性調査を実施するには特に適した方法である。

既存の技術（測定、分析、モデリングの技術）の能力を試験するために、2012 年 11 月に GTS において長期的な（5 年以上）モニタリング計画（LASMO）が作成され、開始された。このプロジェクトは、水力発電会社 KWO で計画している坑道と空洞の掘削活動を利用するものであるが、このプロジェクトは処分場計画における将来の地下の建設計画と多数の類似した要素を備えているのである。特に（i）設計面では、アクセス路に傾斜路を利用すること、坑道と空洞の直径が長いこと、(ii) 掘削方法では、掘削して爆破し、TBM 技術を利用すること、(iii) 候補となる母岩層が結晶岩であること、（iv）作業場所が地表から 550 m ほど地下であることなどが類似している。このため KWO プロジェクトは処分場の実現の様々な段階で（基本、建設、操業）、現実の境界条件において大規模にモニタリング戦略を開発し、試験する独特な機会となるものである。一部の新たな建設作業は、GTS からわずか数百メートルしか離れていない場所で実施されるために、GTS と隣接する岩盤層についての既存の地質学的／水文地質学的なモデルを利用して、新たな坑道が横切る場所の特性を、モニタリング網を通じて予測し、継続的に更新することができるし、さらに新しい坑道の掘削が終了すれば、モデルを検証することができる。

坑道の建設の効果は、水理学的なモニタリングと張力モニタリング・システムを、地球物理学的なモニタリング技術と併用することで、監視される。特にデータの「利用」をさらに最適化すること、すなわち（i）どの種類のデータが擾乱に関して大きな効果を発揮するか、(ii）画像処理にはどの種のデータを使用できるか、(iii）データの最適な空間的及び時間的な解像度はどのようなものかについて、最適化を実施することができる。

### 物質腐食試験（MaCoTe）

地下研究所での作業は次第に、現実的な境界条件をシミュレーションする実証実験に重点を置き始めているが、処分場のオプションを支援し、長期的な性能評価を強化するために、腐食プロセスの調査も続けられている。

MaCoTe は、2012 年 11 月に GTS で新たな長期的な実験として開始された。2013 年の年初には、最終的な実験計画が確定されたが、その目的は次のようなものだった。(i）処分場に関連した環境条件のもとで、炭素鋼及び/あるいは銅の長期的な嫌気性の腐食率を確認し、グリムゼル試験サイトで現場腐食条件を実行することによって、キャニスターの寿命の予測の信頼性を高めること、(ii）ベントナイト緩衝材が、微生物の活動と、微生物に影響された腐食の効果を抑止することを示す実験的な証拠を提示することである。またガラスや照射済みの鋼鉄サンプルなどのその他の物質の試験も検討されている。

図 2.4.A-6　MaCoTe 実験のレイアウト。モジュールを装備したボーリング孔、ステレンス鋼のモジュール。鋼鉄クーポンの分布を示したモジュールの断面

この実験の概念は比較的分かりやすいものである。これはモン・テリ岩盤研究所において、約 15 m の長さの垂直のボーリング孔によって一連の特別に設計されたモジュールを建設し、定置することに成功した経験に基づいたものである。それぞれのモジュールには、特定された密度と物質の種類のベントナイトに埋め込んだ 12 種類の異なるサンプルが含まれる（図 2.4.A-6 参照）。これらのモジュールは、無酸素条件のもとで掘削したボーリング孔の内部に定置される。ボーリング孔の数と、ボーリング孔の内部に設置されるモジュールの数は、実験パートナーの必要性だけによって決定される。

鋼鉄サンプルの腐食率は質量損失方式によって決定され、境界面での鉱物の変性は、利用できる方法を利用して分析する（たとえば SEM-EDX、XRD など）。この実験の第 1 段階は 5 年から 6 年間続けられるが、いくつかの定置したモジュールは現場に残しておいて、後の段階で回収することもできる。

## 2.5 ドイツ

ドイツにおける処分事業の現状概要、処分システムの概要、国による研究開発プログラムの概要、大学・研究機関等による地層処分研究開発動向を調査・整理した。以下は DBE テクノロジー社からの情報をもとに取りまとめたものである。

### 2.5.1 処分事業の現状概要

ドイツでは、放射性廃棄物については、放射能レベルではなく、処分場の設計や評価に影響が大きな発熱量で放射性廃棄物を区分することとしており、発熱性放射性廃棄物と非発熱性放射性廃棄物の 2 種類に区分されている。また、これらの廃棄物すべてを原則として地層処分する方針である。また、処分場の設置、操業に関しては連邦政府が責任を有しており、連邦放射線防護庁（BfS）が実施主体となっている。

なお、2013 年 7 月に発熱性放射性廃棄物処分場のサイト選定に関する法律（サイト選定法）が制定されたが、同法では、33 名の委員からなる委員会を設置し、この委員会がサイト選定手続等を検討することが規定されているが、発熱性放射性廃棄物に関して、地層処分に代わる代替処分の可能性を科学的に調査すべきかについても検討することとなっている。

非発熱性放射性廃棄物については、旧鉄鉱石の鉱山であるニーダーザクセン州のコンラッド処分場において処分される計画となっており、同鉱山では、現在処分場への変換のための工事が行われている。コンラッド処分場は、2019 年ごろから操業を開始することが見込まれている。また、一部の非発熱性放射性廃棄物については、過去にモルスレーベン処分場及びアッセ II 研究鉱山において処分が実施されていた。モルスレーベン処分場については、現在廃止措置のための許認可手続きが行われている。アッセ II 研究鉱山については、処分された廃棄物を回収し、同鉱山は閉鎖される計画となっている。現在、廃棄物の回収に向けた調査等が行われている。なお、アッセ II 研究鉱山から回収される廃棄物は、コンラッド処分場に処分されることとなっている。

発熱性放射性廃棄物に関しては、岩塩層での処分が検討され、ニーダーザクセン州のゴアレーベンの岩塩ドームが処分場候補サイトとされ、1979 年から同サイトでの探査活動が開始された。同サイトにおける探査活動は、政権交代などの影響を受け、2000 年から 10 年間凍結された後、2010 年に再開された。

2011 年に連邦政府と州は、発熱性放射性廃棄物処分のための新たなサイト選定手続きの工程を検討することで合意し、2012 年 11 月に BMU 大臣は、ゴアレーベンで行われている探査活動を再度停止することを発表した。その後、前述のように 2013 年 7 月にサイト選定法が制定され、今後新たにサイト選定が行われ、2031 年までにサイトを決定する予定となっている。

2.5.2 処分システムの概要

ドイツにおける放射性廃棄物処分システムとして、非発熱性放射性廃棄物処分場であるコンラッド処分場の概要及びゴアレーベンにおいて検討されていた発熱性放射性廃棄物処分場の概要を示す。

コンラッド処分場では、鉄鉱石の掘削が行われていた地下 800～1,300m の地層中に設置された処分空洞内に廃棄物パッケージを定置し、空洞の埋め戻しを行う計画となっている。処分容量は、約 30 万 $m^3$ が計画されている。

ゴアレーベンにおいて検討されていた処分場概念では、使用済燃料及びガラス固化体をキャスク等の金属製容器に収納し、深度 840~1,200m の岩塩ドーム内に処分することになっていた。廃棄物の定置方式は、処分坑道横置き方式、または処分孔縦置き方式の 2 通りが検討されていた（図 2.5-2）。

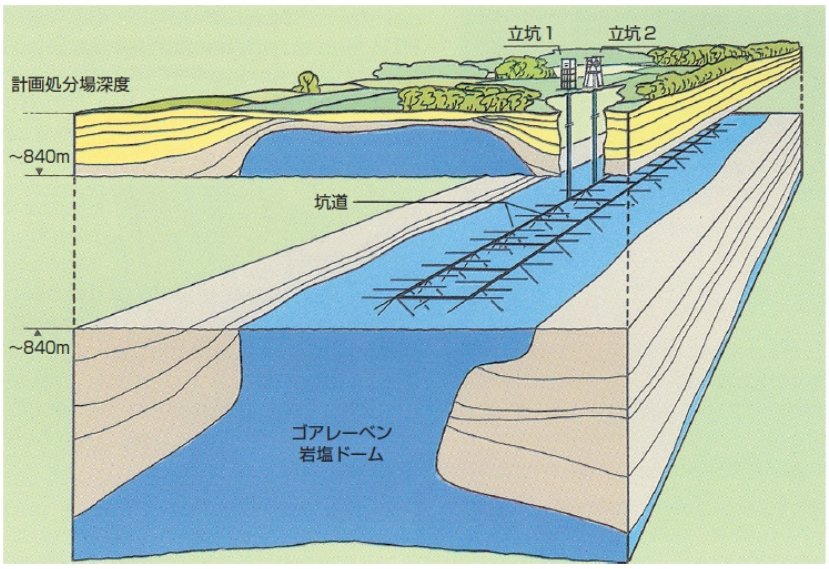



図 2.5-1　ゴアレーベンにおける処分場概念

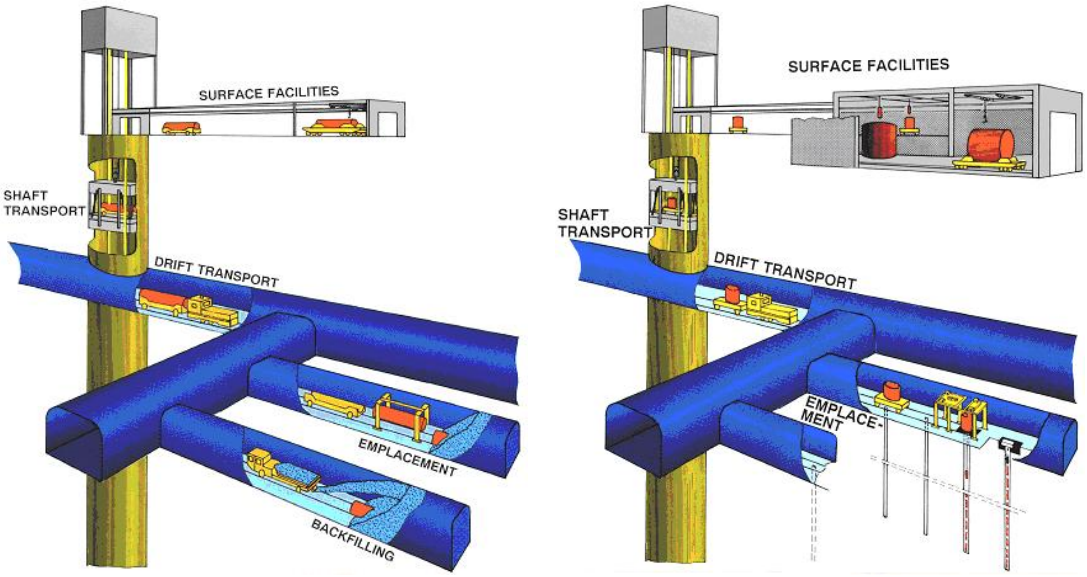



図 2.5-2　ゴアレーベンにおける処分概念図

2.5.3 研究開発プログラムの概要

ドイツでは現在までのところ、放射性廃棄物の処分のための研究開発に関する（R&D）政策は策定されていないが、すでに複数の研究開発計画が進行中であり、これらは定期的に更新され、研究開発活動を国家のニーズにふさわしいものとなっている。

ドイツにおける放射性廃棄物処分のための研究開発活動の調整作業は、二つの主要なカテゴリーに分けて行われている。一つは、連邦環境・自然保護・原子力安全省（BMU）（現在は、名称が変更され、連邦環境・自然保護・建設・原子力安全省（BMUB）となっている）が調整している活動で、これはサイトに固有の研究開発活動である。もう一方は、連邦経済・技術省（BMWi）が調整している活動で、これはサイトに依存しない研究開発活動である。

BMU と BMWi は、放射性廃棄物の処分のための研究開発プロジェクトを支援し、資金を調達している。BMWi は年間約 900 万ユーロの資金をプロジェクトに提供しており、BMU は年間約 300 万ユーロをプロジェクト資金として提供している。

上記の二つのカテゴリにはそれぞれ異なった研究開発計画が含まれており、こうした計画に基づいて研究開発活動の資金が調達されている。これらの計画は、BMU と BMWi がそれぞれ指名した組織によって調整されている。

(1) サイトに固有の研究開発

1976 年の原子力法で定められているように、放射性廃棄物を管理された方法で安全に処分す

る責任を負うのは連邦政府である。さらにこの原子力法では放射性廃棄物の最終処分に関連した連邦政府の活動を実行する責任を、連邦放射線防護庁（BfS）に負わせている。すなわち BfS が、放射性廃棄物の処分場の開発と設立の責任を負う実施主体である。BfS は BMU の下部組織であり、BMU の監督を受ける。

ドイツでは、放射性廃棄物の処分に関して、サイトに固有の研究開発活動のカテゴリに含まれる 2 件の研究開発活動が実行されている。その一つは「2014 年環境研究計画」（Umweltforschungsplan, UFOPLAN 2014）であり、これは BMU の研究開発のニーズを定めている。もう一つは BfS の「2013-2017 放射線防護研究計画」であり、これは第三者に委託する研究及び調査計画を定めており、この計画に従い委託され実施されている。

処分場サイトの安全性の評価、特に長期安全性の評価の分野での知識の獲得に重点が置かれている。これに関して最近明確な成果をあげているサイト固有のプロジェクトは、ゴアレーベンにおける予備的安全評価である。

現在はサイト固有の研究開発活動は推進されていない。すでに指摘したように、2013 年 7 月に制定された新しい法律、発熱性放射性廃棄物処分場のサイト選定に関する法律（サイト選定法、StandAG）の規定との衝突が発生しないよう、ゴアレーベンにおける全ての活動は停止された。さらにアッセ II 研究鉱山とモルスレーベン処分場のサイトも、原子力法（AtG）の規定に従って操業を停止している。アッセ II 研究鉱山での操業停止段階においては、現在までに処分されている放射性廃棄物を回収して、別の場所に移す作業が行われている。またモルスレーベンサイトでの操業停止段階においては、処分場を閉鎖する作業が行われている。最後に 2008 年にはコンラッド処分場サイトに、廃棄物を受け入れる許認可が確定し、現在はそのための建設作業が進められている。

a. 2014 年環境研究計画

BMU が実行する必要のある中期的な研究活動のニーズは、2014 年環境研究計画に記述されている。この計画は毎年更新されており、この計画では個別の研究開発プロジェクトを通じて実行される研究開発活動の枠組みの詳細が定められている。この 2014 年環境研究計画と、BMU の環境政策部の研究活動の目的及び優先事項を調整する作業は、連邦環境庁（UBA）、連邦自然保護庁（BfN）、ならびに BfS の研究活動によって実行されている。こうした活動で獲得された科学的な知識は、現行の政策に継続的に助言を与え、新たに発生する環境面での課題を確認するために役立てられている。

2014 年環境研究計画で検討されている放射性廃棄物処分に関連した研究開発テーマには、次のようなものが含まれる。

- 核燃料サイクルと放射性廃棄物の管理に関連した法的な問題。これには資金の調達、費用の負担、原子力法の修正、料金の規制、放射性物質の中間貯蔵の法的な問題などが含まれる。
- 放射性廃棄物処分に関連した一般的な科学的及び法的な問題ならびに原子力発電所の運転停止のための概念。
- 長期的な安全性の確証のための方法と手段についての研究開発。
- 国の廃棄物管理計画。
- 使用済燃料とプルトニウムの処分、ならびに放射性廃棄物の再処理に関連した予備的な措置についての調査。
- 使用済燃料と再処理した放射性廃棄物の中間貯蔵施設の定期的な安全性の評価。
- 原子力活動と放射性廃棄物の処分施設に関連した国際的な法律と基準を、ドイツの規制に統合する作業。
- 統計学的な方法に基づいて、未使用の核燃料と使用済燃料の臨界安全性の解析のための計算コード・システムの正確さを定量化するための調査。
- 照射済沸騰水型原子炉（BWR）燃料に関連して、臨界と燃焼度の計算のための計算コードの検証の実現可能性についての評価（これはシステムへの実装を目的としたものである）。
- 放射性物質の輸送の際に安全性を評価する目的で行われる事故統計ならびにモデル・システムの発表と開発についての調査。
- ドイツでの輸送規制によって得られた最新のデータに基づいて、規制免除を計算するための方法の確立。
- グロナウのウラン濃縮プラントとリンゲンの核燃料加工プラントにおいて発生した重要な事象についての詳細な工学的分析。
- モルスレーベン処分場の操業停止のための規制プロセスにおける BMU への支援。
- コンラッド処分場の建設のための規制プロセスにおける BMU への支援。
- 原子力発電所の運転停止の際のリスク・プロフィールの開発のための調査。
- EU の新しい基本基準をドイツの法制度に取り入れるための放射線防護令の再検討。

b. BfS の 2013-2017 研究計画

BfS は、放射線防護、予備的な放射線防護、原子力安全、放射性物質と放射性廃棄物の輸送、さらに保障措置と使用済燃料の処分のための連邦政府の施設の設立と操業についての責任を負っている。

原子力法と放射線防護令は、ドイツにおける放射線防護と、原子力施設の建設、操業、運転開始についての意志決定の際には、最新の科学技術を採用するという基本的な要件の適用を受けることを定めている。このため BfS は、この分野での科学技術の水準を評価し、記述し、向上させることを求められている。

この基本的な要件を満たすために、BfS は 2014 年環境研究計画による資金提供のもとで、第三者との研究開発契約を開始し委託している。BfS はさらに、特に放射線防護の分野で独自の研究を進めており、また国内外の大学や研究機関と協力している。欧州連合（EU）の枠組みで、BfS は放射線防護の分野での基盤的、基本的な疑問に答えることを目的として、国際的な協力及び研究協力活動に参加している。

研究プロジェクトのための資金の割り当ては、通常は入札という形で実行される。入札手続きにおける科学的な分野を担当し、プロジェクトが完了するまでの全ての段階において科学的な監視を実行するのは、BfS の科学スタッフの役割である。特に重要な調査結果は、規制要件の準備、改定、その後の作成と施行に関連して、BfS の科学スタッフが概要をまとめて評価しており、調査結果が短期間のうちに、BMU の規制作業において考慮されられるようにしている。

BfS の研究計画では、2013 年から 2017 年までの放射線防護の分野での中期的な研究開発計画を定めている。BfS が担当する研究開発活動は、BfS に割り当てられた課題を最新の科学的な水準のもとで実行するための科学的な基礎を作りだすものである。

そのための戦略的な目的は次のようなものである。

- 変動するか、これまで十分に調査されていない放射線被ばくを分析し、評価すること。
- さらに高いレベルの既存の被ばく（たとえば室内でのラドンへの被ばくなど）による将来の被ばくを防ぎ、管理するための健全な基礎を確立すること。
- 事故による放射線被ばくへの対策を作成すること。

これらの目的を実現するために、原子力安全と放射性廃棄物管理の分野での活動を参照することになる。

この計画の一環として、処分施設での放射線防護に関連して計画されている作業に関連した研究開発テーマが含まれる。このプロジェクトは主として次の二つのテーマを中心とするものである。

- 生物圏における放射性核種の動的な挙動
- 高塩溶液の放射線分析手法の開発。

(2) サイトに依存しない研究開発

BMWi は、放射性廃棄物の処分サイトから独立した形で、処分の実施面を重視して行われる基本的な研究活動、とくに安全性に重点を置いた活動の管轄当局である。過去 40 年近くにわたって BMWi は、放射性廃棄物処分が安全であり、岩塩層がドイツにおいて処分が実現可能な母岩のオプションであることを示す科学的な研究活動を支援し、資金を提供してきた。BMWi はその課題を遂行するために、特に連邦地球科学天然資源研究所（BGR）と、カールスルーエ技術研究所（KIT）に所属するカールスルーエ・プロジェクト管理機関（PTKA）などの下部組織を活用してきた。

処分場システム、システムの挙動、システムの記述、ならびに放射性廃棄物処分に関連したテーマと、放射性廃棄物に関連した学際的な問題点に、研究開発の重点が置かれている。現在実施中の研究計画「放射性廃棄物の最終処分に関連した将来の研究開発の優先事項（2011-2014）」は、放射性廃棄の処分に関連した将来の研究開発活動の主要なテーマの概要を示したものであり、BMWi の資金提供のための基礎となっている。

BMWi が資金を提供した研究プロジェクトは、地層処分場における放射性廃棄物処分を可能にする科学的及び技術的な知識を獲得することを目的としたものである。中でも、地下施設の挙動の長期的な予測のための手段の開発と改良に大きな重点が置かれている。

連邦研究省（BMBF）との協力で設定されているその他の目標として、若い研究者たちを支援する研究プロジェクトへの資金の提供と、「2020 年以降のエネルギーに関連した基本的な研究活動」計画を通じて技術的に優れた能力を維持することが挙げられる。BMBF はさらに、原子力施設の運転停止と解体のための研究活動の責任を負っており、この研究活動では、原子力施設の運転停止と解体に関連した高度な研究活動を経済的な形で可能にし、促進することのできるような革新的な技術的な手段に焦点を合わせている。

a.「放射性廃棄物の最終処分に関連した将来の研究開発活動の優先事項（2011-2014）」

この研究計画は、15 年以上も前から開始されている次の研究計画を継続し、更新するものである。

- 深地層における有害廃棄物の処分のための研究開発計画（1997-2001）。
- 放射性廃棄物の最終処分場に関連した将来の研究開発作業の優先事項（2002-2006）。
- 放射性廃棄物の最終処分場に関連した将来の研究開発作業の優先事項（2007-2010）。

第一段階の「深地層における有害廃棄物の処分のための研究開発計画（1997-2001）」では、母岩として岩塩層において実行された研究開発プロジェクトに重点を置いていた。ただし粘土

と粘土質の岩石と結晶質岩についての予備調査も、それほど集中的にではないものの、実行されている。

連邦政府は 2000 年に、原子力の使用を段階的に撤廃することを決定したため、2002 年から 2006 年までの研究計画では、「代替となる母岩」の研究に焦点を当てた。プロジェクトとその資金の約半分は、粘土層または固化した粘土層に関するものであり、残りの半分程度は、岩塩、結晶質岩、学際的な研究（安全解析など）に関連したものである。

最後に 2007 年から 2010 年にかけては、岩塩層の内部での放射性廃棄物処分に関連して、また解決されていない問題点を解明することに重点が置かれた。この作業と並行して、粘土層での発熱性放射性廃棄物の処分に関する科学的及び技術的な知識が、大幅に増加した。結晶質岩での処分の問題は優先度が低かったが、それはそれまでの科学調査によって、ドイツには適切なサイトが発見されなかったためである。

これまでの研究開発作業の結果から、岩塩層の内部に発熱性放射性廃棄物の処分場を建設する計画は実現可能性が高いことが明らかになった。

研究開発計画の目的は次のとおりである。

- 発熱性放射性廃棄物と使用済燃料の処分場を実現するための科学的及び技術的な基礎を構築すること。
- 放射性廃棄物の処分のための最新の科学と技術の開発を継続すること。
- ドイツにおける放射性廃棄物の管理の分野での科学的及び技術的な専門知識の設計、開発、維持に大きな貢献をすること。

前記の目的を実現するために、研究開発計画では、研究活動で焦点を合わせる必要のある研究開発のテーマを説明している。こうした研究開発のテーマは次の四つの主要な分野に分類される。

- 処分場システム
- システムの挙動とシステムの記述
- 放射性廃棄物の処分に関連した学際的なテーマ
- 放射性物質の管理

第一の「処分場システム」の分野には、処分場システムと処分場のサブシステムについてのテーマや、バリアシステムの概念的及び技術的な側面に焦点を合わせたテーマが含まれる。

第二の「システムの挙動とシステムの記述」の分野では、処分場システムの全体的な記述と評価に重点を置いている。これには、処分場システムの挙動についての知識と、科学的及び技

術的な基礎知識の獲得、処分場システムの挙動とそのさまざまなプロセスをモデル化するための方式（とくにモデルとその不確実性による制約を考慮に入れる）が含まれる。

第三の「放射性廃棄物処分に関連した学際的なテーマ」の分野には、第一と第二の分野に直接に含められないものの、放射性廃棄物の処分活動に影響を及ぼすために重要であるとみなされるテーマが含められる。

第四の「核物質の管理」の分野の研究が必要であるのは、核物質の国際的な管理の研究開発には特別な構造と問題が存在するためである。このテーマは世界的に重要な意味をもつために、これらの研究開発活動は多国籍の協力ネットワーク（ユーラトムや IAEA など）に統合する必要がある。

表 2.5-1 に列挙した研究開発テーマは、岩塩と粘土層における放射性廃棄物処分に関連した問題点に関するものであるが、これはまだ最終的に決定されたものとみなすことはできない。

この問題の複雑性が高まっているために、協力プロジェクトにおいて異なる研究開発施設が合同で作業をしながら、パートナーがそれぞれに独自の知識と経験を持ち寄る必要がある。この方式は効率と資源の割り当ての観点から好ましい成果をあげているために、将来はますますこの方式が採用されることになろう。

岩塩層に関連した科学的な作業は、結果を重視した形で遂行されている。これらの層に関してはすでに多量の知識が存在しているために、関連した研究開発テーマの多くでは、まだ残された作業が必要とされるだけである。

また、粘土層における放射性廃棄物の処分に関連した研究開発活動は、この種の処分場プロジェクトに関して詳細な作業を実現することのできる最新の科学と技術に焦点を合わせている。また結晶質岩に建設する処分場の特定の構成要素（たとえば地質工学的なバリアなど）についての作業は、いくらか優先度を低めて実行されている。

ドイツでは粘土と結晶質岩（花崗岩）の内部には、地下研究所が設置されていないため、現場の活動は国際的な協力協定の枠組みで、国外で実行されている。

- 粘土：スイスのモン・テリ岩盤研究所、フランスのミューズ・オート・マルヌ県のビュール研究所。
- 花崗岩：スイスのグリムゼル試験サイト、スウェーデンのエスポ岩盤研究所、ロシアのクラスノヤルスク研究所。

この計画では、該当する期間に実行する必要のある現行の研究開発活動について説明しているが、処分場の安全性を向上させるために役立つ将来の研究開発活動の目的も定めており、こ

うした研究開発活動では以下の点に重点を置いている。

- 分析の信頼性の向上
- 必要なパラメータの精度の向上
- 全体のシステムの頑健性を高めることを目的とした中心的な問題の処理
- 研究室と現場での実験に基づいて、複雑なシステムの数値シミュレーションを評価すること
- セーフティケースの構築手順の開発と検討
- 実用的な科学水準の構築

表 2.5-1 「放射性廃棄物の最終処分に関連した将来の研究開発計画（2011-2014)」で検討されている研究開発のテーマ

| 分野 | プロジェクト | テーマ |
|---|---|---|
| 処分場システム | 概念、技術、実証 | 岩塩層に建設する発熱性放射性廃棄物処分場の概念の最適化。 |
| | | 粘土層に建設する発熱性放射性廃棄物処分場の典型的な概念の開発。 |
| | | 科学的・技術的な側面、安全解析の側面、社会的な側面に基づいた処分場の典型的な概念の比較。 |
| | | 概念的なセーフティケースの開発。 |
| | | ボーリング孔の内部での燃料棒の処分概念の開発と試験（特に岩塩層に重点を置く） |
| | | 岩塩層の内部での貯蔵、取り扱い、モニタリング技術を、粘土と結晶質岩の内部で利用できるかどうかについての検討。 |
| | | 操業段階におけるモニタリングと処分の手順の開発、最適化、試験。 |
| | 母岩の特性 | 岩塩層と粘土の処分に関連した特性の収集、記述、評価（特に工学的な実現可能性の観点から、損傷に重点を置く)。 |
| | 廃棄物とパッケージング | 母岩の非破壊的な探査のための地球物理学的な方法の開発と改良（特に岩塩層と粘土の不均質なエリアの検出と特性調査に重点を置く)。 |
| | | 岩塩層と粘土での処分に関連した特性の収集、記述、評価（特に微生物影響に重点を置く） |
| | | 不均質なエリアの特性調査と、広いエリアの実際のパラメータの転用可能性についての分析方法の再検討と開発（スケーリングアップ)。 |
| | | 固化材料の開発。 |
| | | 化学毒性のある廃棄物の構成要素が、長期的な安全性に及ぼす影響の評価。 |

| | | |
|---|---|---|
| | 地質工学的なバリア | 岩塩層での処分に関連して、長期的な安全性を維持するための密封構造とその構成要素の設計、建設、試験 |
| | | 粘土での処分に関連して、長期的な安全性を維持するための密封構造とその構成要素の設計、建設、試験。 |
| | | 接触ゾーンと掘削影響領域の内部の密封システムの概念の開発（バリアの効果の実証を伴う）。 |
| | | 地質工学的なバリアの長期的なバリア効果の工学技術的な証明。 |
| | | 岩塩層と粘土に建設する処分場の適切な埋め戻し物質と緩衝材の調査と選択（特に気体と液体の挙動と、これら物質の吸着挙動に関連して）。 |
| | | 隣接した場所での放射性核種の保持に適した吸収性でない物質の選択と調査。 |
| システムの挙動とシステムの記述 | 母岩 | 岩塩層と粘土の地質工学、地球化学、熱水理学的な挙動の調査とモデル化。 |
| | | 地質と技術が原因となって発生する地質学的なバリアの隔離能力の影響の調査（特に気体の発生と伝播を考慮にいれる） |
| | | 放射性核種の保持の調査とモデル化（特に化学的及び微生物学的なプロセスを考慮にいれる）。 |
| | ニアフィールドの地球化学 | ニアフィールドにおける化学的、物理的、微生物学的な影響とプロセスの調査。放射性核種の移動性への影響と、岩塩と粘土の内部のプロセスの記述モデルの開発に重点を置く。 |
| | | アクチノイドと核分裂生成物の熱力学的なデータベース（ニアフィールドの条件）の保護と改善。 |
| | 技術的及び地質工学的なバリアの挙動 | 廃棄物のガラス固化体と粘土ならびに緩衝物質との相互作用の研究と、記述モデルのプロセス開発。 |
| | | 廃棄物製品と使用済燃料（$UO_2$、MOX、MTR、HTR）の腐食挙動に基づいた放射性核種のソースタームのモデル化と定量化。 |

| | | |
|---|---|---|
| | | 気体の形成、放出、輸送、発生源の調査と記述モデルのプロセス開発。 |
| | | 埋め戻し物質、緩衝材、密封構造に対する気体の経時的な変化の影響。 |
| | | 密封構造とその構成要素の長期的な挙動のモデル化。 |
| | シナリオ | 岩塩と粘土に建設する処分場の FEP の作成と評価。 |
| | | 岩塩と粘土に建設する処分場の将来の開発のためのシナリオの組織的な作成、分類、評価。 |
| | 方法、モデル、数値シミュレーション | 長期的な安全解析のための方法と計算プログラムの開発と更新。特に定義されたシナリオ、改善された処分概念、研究開発活動で獲得した新しい知識に基づき、国際的な開発状況を考慮にいれる。 |
| | | モデルの記述プロセスの改善。特に組み合わせモデルの開発による。 |
| | モデルの定量化と不確実性の低減 | 熱プロセス、地質工学的プロセス、水理学的なプロセス、地球化学的なプロセスを記述するモデルの定性化のための新しい方法と手順の開発また既存の方法の適用（THMC 組み合わせ）。 |
| | | 研究所の調査結果を現実のシステムに転用する可能性の検証。 |
| | | 長期的な安全解析の信頼性の向上。 |
| | | 不確実性を低減させるための方法の開発。 |
| | | 自然のシステムまた歴史的及び人類起源のシステムにおける関連したプロセスや、関連した指標で、プロセスの理解の信頼性やシミュレーションの結果の信頼性を向上させるために役立つプロセスの指標に関する調査。 |
| | システム分析 | 岩塩層に建設する発熱性廃棄物処分場のシステム解析の開発。 |
| | | 粘土層に建設する発熱性廃棄物処分場の初期システム解析。 |
| 放射性廃棄物の | 概念的な処分オプション | 処分場概念に核種分離・変換シナリオが及ぼす影響（熱の発生が少ない廃棄物と、追 |

| | | |
|---|---|---|
| 処分に関する学際的なテーマ | | 加的な熱の発生のごく少ない廃棄物)。 |
| | | 核種変換の可能性と安全性。 |
| | | 処分場概念と回収可能性。 |
| | 管理と社会科学の側面 | 知識の保持と知識管理の概念と方法。 |
| | | データの作成とデータ管理。 |
| | | 制御方式。 |
| 核物質の管理 | 概念的な側面 | 付随的なプロトコルの作成。 |
| | | 使用済燃料処分の保障措置。 |
| | | 新しい検査体制。 |
| | | 保障措置方式における監査原則の検討。 |
| | | 核燃料サイクルのための新しい保障措置の概念。 |
| | 技術的及び方法論的な側面 | 遠隔センサー・システムを使用したモニタリング。 |
| | | 環境モニタリング。 |
| | | 地球物理学的な測定方法。 |
| | | 新しいガラス固化技術。 |
| | | 新しい電子モニタリング・システムと遠隔データ転送。 |
| | | デジタル・カメラと密封システム、ならびに遠隔アクセス設備の開発。 |
| | | 保障措置のための情報分析と情報処理。 |

| | | |
|---|---|---|
| | 政治的及び制度的な側面 | 核不拡散。 |
| | | 多国籍の共同処分施設。 |
| | | 核分裂物質生産削減条約（FMCT）。 |

(a) 国際協力

過去数年間に、粘土と結晶質岩を含む候補となる母岩の研究開発の分野では、国際協力が大幅に拡大している。粘土と結晶質岩に建設した地下研究所でのプロジェクトによって、こうした岩盤についての知識を大幅に増やすことができ、こうした岩盤におけるセーフティケースにおいて、獲得した知識を利用することができた。これについては、大規模な実証試験の重要性が高まっているのは明らかである。

放射性廃棄物の処分は、国の責任であることが理解されているが、国際的な知識と研究開発の分野での最新の調査結果を考慮にいれながら、作業を進めねばならない。高レベル放射性廃棄物処分の分野での国際協力が、BMWi と国外の組織との二国間協力の基礎となっており、BMWi は、スウェーデンの SKB 社、スイスの放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA)、フランスの放射性廃棄物管理機関（ANDRA）との間で、こうした二国間協定を締結しているが、さらに外国の研究センターとドイツの研究所の間でも協力が進められている。

国際的な研究計画で実行されている研究開発活動については、ドイツの科学者たちは地下研究所で実施されているプロジェクトに参加している。これらの研究開発活動の主要な目的は、母岩についての知識を深めること、そして全体的なシステムとプロセスについての理解を深めることにある。ドイツの利益に適うように、さまざまに異なる用途で技術と方法が開発され、試験されている。

○エスポ岩盤研究所（スウェーデン）

スウェーデンのエスポ岩盤研究所での国際的な研究計画に、ドイツの研究センターが関与するための条件は、1995 年に BMWi と SKB 社の間で締結された契約によって定められている。ドイツの研究機関はエスポ岩盤研究所での現場調査活動に、国際的な研究グループとともに参加している。

エスポ岩盤研究所計画に参加することで、全体的なシステムとサブシステム、プロセスとその相互作用についての知識が深められる。特に興味深いのは、透水性の高い山地に建設した亀裂の存在する処分場から周囲の環境への放射性核種の移行と分散についての情報である。

さらに人工バリアシステムの特性と挙動の知識も重要である。この計画の調査結果は、プロセスの理解を深めるだけではなく、安全性の問題と要件にも重要な意味をもつ。

この計画に参加しているドイツの研究機関は、BGR、KIT、HZDR 及び GRS である。

○グリムゼル試験サイト（スイス）

ドイツの研究機関が、スイスのグリムゼル試験サイトで Nagra が推進している国際的な研究

計画に参加するための条件は、BMWi と NAGRA が締結した契約で規定されている。

この契約の目的は、岩塩層における研究を補足し、エスポ岩盤研究所での作業を補足し、その他の母岩についての知識を深めることにある。特にドイツの研究機関がグリムゼル試験サイトの活動に参加することによって、関連のある地質学的、地球化学的、物理的なプロセスを調査することができるが、こうした調査は、長期的な安全性に関連したこうしたプロセスのモデル化を行うために重要な意味をもつ。

現在この計画に参加しているドイツの研究機関は、KIT と GRS である。

○モン・テリ岩盤研究所（スイス）

スイスのモン・テリ岩盤研究所における国際的な研究計画に、海外の研究機関が協力するための条件は、コンソーシアム契約で規定されている。

この協力活動の主要な目的は、処分場の母岩として利用する粘土についての知識を深めることにある。特にこの協力によって、粘土層のバリアの健全性と、その水理学的及び力学的な挙動についての知識が深められる。

現在この計画に参加しているドイツの研究機関は、BGR と GRS である。

○フランス

2007 年秋から、高レベル放射性廃棄物処分の分野で、BMWi と ANDRA の協力契約が締結されている。この契約では、処分場の概念、サイトの特性調査とサイトの選定方法、安全解析の適用、EU の枠組み研究計画への参加、地下研究所での実現計画への参加などが定められている。

この契約ではさらに、フランスのビュールの粘土層に建設された地下研究所の活動へのドイツの研究センターの参加が定められている。

現在この計画に参加しているドイツの研究機関は、BGR、GRS 及び DBE テクノロジー社である。

○ロシア

2001 年に BMWi とロスアトム（ROSATOM）の間で締結された契約により、ドイツとロシアの研究所は、放射性廃棄物管理の分野で協力している。

○米国

1998 年に BMBF と米国のエネルギー省（DOE）は、エネルギー分野での協力に関する契約

を締結した。この契約ではサンディア国立研究所やロスアラモス国立研究所などの米国の組織が、ドイツの研究機関のための作業をする規定が定められている。

○欧州連合（EU）

BMWi は欧州の複数の廃棄物管理組織とともに、2009 年 11 月に放射性廃棄物の地層処分を実行する技術プラットフォーム（IGD-TP）を設立した。この IGD-TP は科学技術フォーラムで、IGD-TP の目的を実現するための活動を促進することを目的としている。2025 年までには欧州で、高レベル放射性廃棄物やその他の長寿命の放射性廃棄物の地層処分場が、安全に操業されるようになる予定である。

IGD-TP の主要な成果は、「戦略的な研究課題」が定められたことであり、ここには主要な母岩と学際的なテーマが含められた。これらのテーマは放射性廃棄物処分において重要な役割を果たすものであり、ほとんど全ての国の研究開発計画で研究課題として定められているものである。これらのテーマは将来の研究開発活動の基礎となるものであり、実施のための境界条件も定めている（たとえば二国間協力と多国間協力、欧州の研究計画、各国の研究方式など）。

IGD-TP の主要な要素は次のようなものである。

- セーフティケース
- 放射性廃棄物の形式とその挙動
- 処分場の構成要素の技術的な実現可能性と長期的な挙動
- 操業の安全性
- モニタリング
- 管理と当事者の参加

(a) BMWi が現在資金を提供している研究活動

表 2.5-2 には、現在 BMWi が放射性廃棄物処分の分野で資金を提供している現行の研究活動を示した（これは 2013 年 1 月から 2013 年 6 月までの期間を反映したものである）。

表 2.5-2　BWMi が資金を提供している放射性廃棄物の処分の分野で現行遂行されている研究開発活動

| 機関 | 組織 | 費用 | 分野 | 活動 |
|---|---|---|---|---|
| 08.2004 – 12.2013 | GRS | 529 957 € | システムの挙動とシステムの記述 | エスポ岩盤研究所プロジェクト「プロトタイプ処分場」、第二段階におけるベントナイト・バリアの飽和の地球電気学的な調査 |
| 10.2005 – 06.2013 | GRS | 1 072 091 € | 処分場システム | 最高温度 90℃までの高塩溶液における鉄（II）の熱力学的なデータ。略称は FeT90。 |
| 08.2006 – 08.2014 | DBE TECHNOLOGY 社 | 1 860 958 € | 処分場システム | ドイツの粘土層における温度上昇の影響の調査。特に候補となる母岩の不可逆的な変化と処分場の工学的な実現可能性に焦点を当てる。略称は TemTon。 |
| 04.2007 – 03.2006 | GRS | 3 224 600 € | システムの挙動とシステムの記述 | EMOS プログラム・システムを現代的なソフトウェア要件に適合させる作業 |
| 05.2007 – 06.2015 | GRS | 4 172 565 € | システムの挙動とシステムの記述 | 粘土層に建設した処分場のニアフィールドにおける THM プロセスの調査 |
| 10.2008 – 03.2013 | GRS | 971 750 € | システムの挙動とシステムの記述 | 流動の不均質性のイメージと輸送のモデル化。$d^3f$ と $r^3f$ を使う。略称は A-Dur。 |
| 11.2008 – 12.2013 | GRS | 1 584 843 € | システムの挙動とシステムの記述 | 地球化学的なモデル化の手段とデータ。略称は WeDa。 |
| 01.2009 – 10.2013 | DBE TECHNOLOGY 社 | 283 149 € | システムの挙動とシステムの記述 | 異なる母岩に建設した処分場に処分した高レベル放射性廃棄物と、処分場の開発の際の異なった段階について、処分場をモニタリングするための枠組みと開発の調査。特に実現可能性と不確実性の問題に重点を置く。略称は MonA。 |
| 02.2009 – 03.2013 | IfG | 84 968 € | システムの挙動とシステムの記述 | 処分場のシール構造物の隔離されたエリアでの気体の輸送に関連した研究室での調査。これはベントナイトと岩盤の間の輸送に関するものである。 |
| 09.2009 – 12.2013 | GRS | 1 003 689 € | 処分場システム | 人工バリアシステムの長期的な性能。略称は PEBS。 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 10.2009 – 03.2013 | KIT | 444 095 € | 処分場システム | 放射性廃棄物と非放射性の廃棄物の安全解析のための統一された一貫性のある熱力学的な標準データベースの開発。略称は THEREDA-II。プロジェクトで KIT が担当する部分。放射性核種のための熱力学的なデータベース。 |
| 10.2009 – 03.2013 | TUBAF | 178 770 € | システムの挙動とシステムの記述 | 放射性廃棄物と非放射性の廃棄物の安全解析のための統一された一貫性のある熱力学的な標準データベースの開発。略称は THEREDA-II。プロジェクトで TUBAF が担当する部分。海洋の塩と炭酸塩。 |
| 12.2009 – 08.2013 | GRS | 1 293 390 € | 処分場システム | 岩塩層に建設した高レベル放射性廃棄物の処分場の技術的な実現可能性と安全評価のための計装の作成。略称は KOMTESSA。 |
| 12.2009 – 06.2016 | DBE TECHNOLOGY 社 | 1 283 972 € | 処分場システム | 岩塩層の高レベル放射性廃棄物の処分場の技術的な実現可能性と安全評価のための計装の作成。略称は KOMTESSA。 |
| 05.2010 – 04.2014 | DBE TECHNOLOGY 社 | 463 328 € | 処分場システム | 高レベル放射性廃棄物処分場の圧縮された破砕岩塩物質の残留間隙率と透水率 |
| | GRS | 1 248 460 € | | |
| 07.2010 – 01.2014 | GRS | 323 370 € | 処分場システム | 火成岩に建設された高レベル放射性廃棄物処分場システムの安全性の評価の頑丈さに関連した調査。略称は URSEL。 |
| | DBE TECHNOLOGY 社 | 506 233 € | | |
| 07.2010 – 06.2014 | GRS | 685 975 € | 処分場システム | 処分場のニアフィールドにおける長寿命の核分裂生成物と放射性の生成物の挙動とその保持の可能性。略称は VESPA。 |
| | ユーリッヒ研究センター | 217 340 € | | |
| | ドイツ研究センターヘルムホルツ協会 | 305 803 € | | |
| | KIT | 665 294 € | | |
| 10.2010 – 09.2016 | Andreas Hampel 博士 | 632 854 € | システムの挙動とシステムの記述 | 岩塩の熱力学的な挙動と閉鎖のモデル計算のための現行の物質法則と手順の比較。 |
| 10.2010 – 03.2016 | クラウスタール工科大学 | 791 203 € | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | IfG | 977 150 € | | |
| | KIT | 302 359 € | | |
| | ライプニッツ大学（ハノーバー） | 391 592 € | | |
| | Carolo-Wilhelmina 工科大学（ブラウンシュヴァイク） | 405 066 € | | |
| 12.2010 – 09.2014 | TUBAF | 519 570 € | 処分場システム | MgO を形成する物質の化学的及び力学的特性。 |
| 11.2010 – 10.2013 | GRS | 1 547 015 € | 処分場システム | 仮想的な地下研究所。略称は VIRTUS。 |
| | DBE TECHNOLOGY 社 | 190 969 € | | |
| | BGR | 372 697 € | | |
| 04.2011 – 01.2013 | TUBAF | 123 043 € | 処分場システム | 高レベル放射性廃棄物の処分場の立坑の閉鎖。略称は ELSA。 |
| | DBE TECHNOLOGY 社 | 240 168 € | | |
| 05.2011 – 04.2014 | GRS | 852 100 € | システムの挙動とシステムの記述 | 将来の処分場の安全性の証明に関連した感度解析のための新しい方法の開発と試験。略称は MOSEL。 |
| 06.2011 – 05.2014 | GRS | 588 400 € | システムの挙動とシステムの記述 | 圧縮された破砕岩塩の内部での拡散。略称は DIKOSA。 |
| 07.2011 – 06.2014 | KIT | 674 049 € | システムの挙動とシステムの記述 | 天然の粘土層と塩を含むシステムにおける処分場に関連した放射性核種の保持。 |
| | ドイツ研究センターヘルムホルツ協会 | 1 019 573 € | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ヨハネス・グーテンベルク大学（マインツ） | 498 000 € | | |
| | ザールラント大学 | 583 573 € | | |
| | ミュンヘン工科大学 | 566 966 € | | |
| | ポツダム大学 | 340 296 € | | |
| | ドレスデン工科大学 | 315 249 € | | |
| | Ruprecht-Karls 大学（ハイデルベルク） | 196 296 € | | |
| 10.2011 – 09.2014 | クラウスタール工科大学 | 707 587 € | システムの挙動とシステムの記述 | 処分場条件のもとでの粘土層の内部での熱的・水理学的・力学的に組み合わされた挙動のフィールド調査と数値調査に並行して行われるソフトウェア・コード FLAC3D と TOUGH2 の組み合わせ。 |
| 10.2011 – 09.2014 | クラウスタール工科大学 | 183 075 € | システムの挙動とシステムの記述 | 処分場の長期的な安全性の解析に関連した感度解析の方法の数値的な効率の最適化。 |
| 09.2011 – 08.2014 | GRS | 530 250 € | システムの挙動とシステムの記述 | 粘土層に建設した高レベル放射性廃棄物処分場の安全性の確証の概念のための方法論と適用。 |
| | DBE TECHNOLOGY 社 | 319 866 € | | |
| 03.2012 – 02.2015 | BGR | 386 642 | 処分場システム | 粘土層に建設した典型的な高レベル放射性廃棄物処分場の安全性の確証の概念のための方法と適用の開発。略称は AnSichT。 |
| 03.2012 – 08.2015 | GRS | 1 179 070 € | システムの挙動とシステムの記述 | ハイブリッド・コンピュータのデータの不確実性のモデル化、$d^3f$ と $r^3t$。略称は H-DUR。 |
| 06.2012 - 02.2015 | Friedrich-Schiller 大学（イェナ） | 185 266 € | | |
| 03.2012 – 05.2015 | ヨハン・ヴォルフガング・ゲーテ大学（フラン | 653 031 € | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | クフルト･アム･マイン) | | | |
| 06.2012 – 11.2015 | GRS | 1 189 335 € | システムの挙動とシステムの記述 | 長期的な安全解析のための Smart-KD の値の開発。略称は WEIMAR。 |
| | ドイツ研究センターヘルムホルツ協会 | 598 956 € | | |
| 08.2012 – 01.2015 | DBE TECHNOLOGY 社 | 713 390 € | システムの挙動とシステムの記述 | 岩塩層における掘削影響領域の補償。略称は VerA。<br>第二段階。掘削影響領域ンの亀裂系の生成、その結果を注入プロセスのシミュレーションのためにマクロ・レベルに移転。 |
| 11.2012 – 04.2015 | TUBAF | 307 098 € | 処分場システム | 破砕した岩塩物質の安定させた構造。略称は GESAV。 |
| 08.2012 – 12.2015 | GRS | 1 447 329 € | システムの挙動とシステムの記述 | 処分場の長期的な安全性の証拠のための科学的な土台。 |
| 09.2012 – 08.2013 | DBE TECHNOLOGY 社 | 201 913 € | 処分場システム | 回収可能性の安全要件が既存の処分概念と新しい概念の要件に及ぼす影響。略称は ASTERIX。 |
| 09.2012 – 08.2016 | GRS | 443 525 € | システムの挙動とシステムの記述 | 岩塩層に建設したコンクリートの長期的な挙動の予想のための化学的・水理学的なモデルの開発。略称は LAVA。 |
| 09.2012 – 08.2016 | GRS | 491 350 € | 処分場システム | 岩塩層における安全な長期的立坑閉鎖。略称は LASA。 |
| 09.2012 – 08.2016 | GRS | 216 801 € | 処分場システム | 岩塩層の内部の立坑の長期的で安全な閉鎖。略称は PASS。 |
| 09.2012 – 08.2016 | DBE TECHNOLOGY 社 | 297 778 € | 処分場システム | 立坑の閉鎖のための支持要素と密封要素の設計のプロセス・シミュレーション。略称は ProSiD。 |
| 09.2012 – 10.2013 | DBE TECHNOLOGY 社 | 30 838 € | 処分に関連した学際的な問題点 | 高レベル放射性廃棄物の核種分離・変換の調査。 |
| | GRS | 40 072 € | | |
| 11.2012 – 01.2016 | GRS | 537 700 € | 処分に関連した学際 | 続成作用によって形成された粘土層の内部に建設した放射性廃棄物の |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | DBE TECHNOLOGY 社 | 352 065 € | 的な問題点 | 処分場の操業後の段階における安全解析調査。略称は SAnToS。 |
| 05.2013 – 12.2015 | TUBAF | 1 293 954 € | 処分場システム | 高レベル放射性廃棄物の処分場の立坑の閉鎖。略称は ELSA。<br>第二段階。立坑の閉鎖の概念の開発と、立坑の閉鎖の機能的な要素の試験。 |
| | DBE TECHNOLOGY 社 | 597 233 € | | |
| 03.2013 – 02.2016 | GRS | 266 200 € | 処分に関連した学際的な問題点 | 亀裂系内部での放射性核種の保持のための圧縮したベントナイトの安定性。実験とモデル化。略称は KOLLORADO-e。 |
| | KIT | 1 030 253 € | | |
| 03.2013 – 02.2016 | GRS | 732 700 € | 処分に関連した学際的な問題点 | コンピュータ・プログラム $d^3f$ と $r^3t$ の定性化。略称は Quader。 |

b.「2020 年以降の基本的なエネルギー研究」

エネルギー研究の分野で BMBF が資金を提供する活動の基礎となっているのは、「2020 年以降の基本的なエネルギー研究」である。この目的は、ドイツにおける、さらにヨーロッパ規模における原子力安全の全ての関連分野で、将来において十分に訓練された専門家が確保できるように、若い科学者たちを訓練し、奨励することにある。

この資金の提供は、BMWi と BMU の計画の科学的な優先事項と関連し、これを補うものである。既存組織とその研究者たちに、次の世代の科学者たちを育成し、知識と経験を共有させ、できる限り優れた性能を発揮できるための動機を与えている。

この「2020 年以降の基本的なエネルギー研究」の枠組みでの作業は以下のような少数の分野に焦点を当てており、大学との協力がさらに拡張される予定である。

(a) 原子炉と放射性廃棄物処分の安全性に関する研究開発

原子力安全と放射性廃棄物処分の分野での研究としては、既存の原子炉の安全性の科学的及び技術的な側面、放射性廃棄物管理の安全性、高い放射性を有す物質の管理に関連した研究開発が実行されている。

原子力産業と規制当局がその課題を実現できるためには、最高の科学技術にある原子力工学の専門知識が存在していること、それがさらに拡張されることが必要である。そのためには、大学や工科大学での原子力工学の分野での包括的な学問的な訓練が必要とされる。そのためには若い科学者の訓練と、原子力産業のスタッフの訓練が必要である。大学以外の制度と協力して、この二つの側面への貢献が行われる予定であり、さらに大学や工科大学との協力も予定されている。

放射性廃棄物処分の安全性に関連した研究活動は、次のテーマに焦点を合わせている。

- 放射性廃棄物の特性調査。この活動の目的は、特に放射性物質の特性調査、分別、分離、その後の処理のための方法を開発し、廃棄物の特性調査のための中性子の活性化分析の方法を開発することにある。
- 放射性廃棄物処分の安全性の証明。地球化学に基づいた放射性廃棄物処分の長期的な安全性を確証することのできる計算ツールの開発と検証。
- 放射性廃棄物処分。放射性廃棄物から長寿命の放射性核種を効率的に分離する革新的な方法（分離）、さらに最終処分のための固化または核種変換のための革新的な方法の開発と最適化。これには量子化学に関連した研究を含む。

### 2.5.4 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向

以下では、ドイツにおける大学・研究機関等における地層処分に関連した研究開発動向に関して、研究開発を実施している各大学・研究機関等の概要と行われている研究開発について報告する。

#### (1) ドイツ廃棄物処分研究協会（DAEF）

ドイツ廃棄物処分研究協会（DAEF）は、2013 年 1 月に設立された。

この独立した作業グループの目的は、放射性廃棄物処分の分野での研究開発を促進し、加盟団体間の密接な協力を促進することである。この協会は特に、廃棄物処分場の研究開発に関連した技術的な専門知識を獲得し、開発するために作業を進める。またこの協会は、会議やワークショップの開催などによって、研究者間の技術的な知識の交換を促進し、強化することを望んでいる。

設立後の最初の年である 2013 年には DAEF は主として、処分場サイト選定の科学的、技術的、社会科学的な側面と、国際的なシンポジウムの準備のための文書の作成に重点を置いた。

この研究協会のメンバーには次のような団体が含まれる。

- DBE テクノロジー社。
- ユーリヒ研究センター。
- ドイツ原子炉安全協会（GRS）。
- ドイツ研究センターヘルムホルツ協会、ドレスデン/ローゼンドルフ（HZDR）。
- ドイツ岩盤力学研究所（IfG）
- 安全技術研究所（ISTec）。
- カールスルーエ技術研究所（KIT）。
- 生態学研究所。
- フライブルク技術大学鉱業アカデミー（TUBAF）。
- クラウスタール技術大学の処分研究所。

BMWi、BfS、BGR、ならびにカールスルーエ水技術・廃棄物処分プロジェクト管理機構（PTK-WTE）は、ゲストとして参加している。

#### (2) 連邦地球科学・天然資源研究所（BGR）

連邦地球科学天然資源研究所（BGR）は、連邦政府の傑出した地球科学センターであり、技術的なインフラストラクチュアの一部を構成する。BGR は連邦政府の研究所として BMWi に

所属し、地球科学と天然資源に関連した全ての問題について、中立的で独立した助言と情報を提供している。

BfS は、複雑な地球科学の問題と地質工学の問題を解決するために BGR の科学的な知識を利用しており、放射性廃棄物の最終処分のための連邦政府の施設を建設する際には、BGR と協力する。さらに BGR は、BMWi の部門の研究活動の枠組みで、最終処分について独自の基礎的な研究活動を遂行している。

BGR は処分場プロジェクトに関連した地球科学的及び地質工学的な問題を研究しており、特にサイトの地質学的な探査、母岩の岩石物理学的な特性調査、将来の長期的な安全問題のシナリオの分析に重点を置いている。BGR は、岩石の熱力学的及び水理学的な挙動を専門としており、岩石と土壌の工学的な問題の応用に焦点を合わせている。

これまでは岩塩層を母岩とする作業に重点が置かれていた。しかし科学者たちは岩塩については多量の情報をすでに収集しているため、将来の作業では詳細な問題点の解明、岩塩を構成する法則のさらに詳細な開発、岩塩構造の内部構成の組織学などを重視することになる。

岩塩と比較すると結晶質岩と粘土の母岩としての調査はそれほど進展していない。そのため BGR はこれらの母岩を記述する基本的なデータを収集し、これらの岩盤を構成する法則を進展させることで、この分野での知識を岩塩と同水準にまで高めようとしている。これらの岩石では、岩塩が母岩の場合には発生しないプロセスが存在するために、研究所での試験と現場試験のための新しい方法を開発する必要がある。BRG の科学者たちは、化学的な反応を考慮にいれながら、熱力学的なプロセスと水理学的なプロセスをモデル化するための計装を開発する作業も進めている。

特に BGR の任務には、地質学的なサイトの承認、母岩の岩盤力学の特性調査、最終的な処分場構造の安定性の分析、長期的な安定性のシナリオの分析などが含まれる。BGR が現在進めている研究開発活動は、三つの主要な分野に分類される。

表 2.5-3　BGR が現在遂行している研究開発活動

| 期間 | 場所 | 分野 | 活動 |
|---|---|---|---|
| 01.2003 – 12.2016 | スイス/フランス | 処分研究 | 粘土の内部での岩盤力学と岩石の水理学の現場調査。モン・テリ岩盤研究所（スイス）とビュール地下究所（フランス）。 |
| 01.2009 – 06.2012 | ドイツ | 処分研究 | 粘土の内部のトンネル掘進の水理学的・力学的なモデル化。 |
| 01.2001 – 12.2016 | フランス | 処分研究 | フランスの ANDRA との協力（地下研究所、オートマルヌ県のミューズにある地下研究所）。 |
| 01.2001 – 12.2016 | ロシア | 処分研究 | 放射性廃棄物処分のための研究の分野でのロシアとの協力。 |
| 01.2002 – 04.2015 | 中国 | 処分研究 | 放射性廃棄物処分のための研究の分野での中国との協力。 |
| 01.2002 – 12.2014 | スイス | 処分研究 | モン・テリ岩盤研究所（スイス）での BGR の作業。 |
| 01.1993 – 09.2013 | ドイツ | 処分研究 | 岩塩層の内部に建設した放射性廃棄物の処分場で、破砕岩塩ならびに埋め戻し材のベントナイトと混合した破砕岩塩の圧縮挙動と透水挙動。 |
| 03.2010 – 02.2014 | 欧州 | 処分研究 | 人工バリアシステムの長期的な性能。略称は PEBS。 |
| 06.2004 – 12.2013 | ドイツ | 処分研究 | 大規模な気体注入試験。略称は LASGIT。 |
| 06.2004 – 12.2013 | ドイツ | 処分研究 | 人工バリアシステムに関するタスクフォース。略称は EBS タスクフォース |
| 07.2012 – 12.2016 | ドイツ | 処分場サイト | ゴアレーベンサイトでの地震学的な調査。 |
| 01.2002 – 12.2015 | ドイツ | 処分場サイト | 岩塩に対する臭化物の調査。岩塩層の一般的な解釈と層位学的な分類のための重要なツール。 |
| 01.1979 – 12.2015 | ドイツ | 処分場サイト | ゴアレーベン岩塩ドームの探査。 |
| 01.1998 – 12.2015 | ドイツ | 処分場サイト | ゴアレーベン岩塩バリアの水理学的な特性調査。 |
| 01.1994 – 12.2014 | ドイツ | 処分場サイト | モルスレーベン処分場での長期的なミクロ音響学測定。 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 01.1994 – 12.2013 | ドイツ | 処分場サイト | モルスレーベン処分場での岩塩バリアの健全性と、鉱山の安定性についての地球力学的なモデル計算。 |
| 01.2008 – 12.2016 | ドイツ | 処分場サイト | 長期的な安全解析のための作業モデル。 |

(3) DBE テクノロジー社

ドイツ廃棄物処分施設建設・運転会社（DBE 社）は民間の組織であり、過去 30 年間以上にわたって、連邦政府の放射性廃棄物の処分場の企画、探査、建設作業のための主要な契約業者であり続けてきた。この組織の任務は、処分場開発のエンジニアリングと操業の全ての側面を対象とするものであり、ゴアレーベン、コンラッド、モルスレーベンの 3 件の主要なプロジェクトの業務を含む。DBE 社は作業を進めるにあたって、地球科学技術、鉱山技術、原子力技術の分野と、先進的な工学のさまざまな分野の最新の科学的及び技術的なノウハウを利用している。

DBE テクノロジー社は、親会社である DBE の広範なノウハウを集中させ、さらに開発するという目的で、独立した組織として国内外の市場の顧客にその専門知識を提供している。DBE テクノロジー社は、ドイツ国内外の公的な顧客と民間の顧客に対して、その科学的、技術的、経営的な能力を提供している。この組織の任務としては特に、有害廃棄物の処分、鉱山施設と汚染されたサイトの復旧、原子力施設の運転停止、ならびにドイツ、東欧、西欧、日本における放射性廃棄物の処分と管理などが含まれる。

DBE 社は研究開発活動において、廃棄物製品を地下の処分場に、ならびに処分場の地下施設に輸送するための技術の開発に主要な貢献を行っており、特に発熱性放射性廃棄物を収容した廃棄物体の輸送に重点を置いている。複数の大規模な試験において、すでに開発した処分オプションの実現可能性が確証されている。

表 2.5-4　DBE TECHNOLOGY が現在遂行している研究開発活動

| 期間 | 場所 | 予算 | 活動 |
|---|---|---|---|
| 2012 – 2014 | スウェーデン | 36 000 € | EU の大規模地下概念実験（LUCOEX）の専門家グループへの参加。 |
| 08.2006 – 08.2013 | ドイツ | 1 861 000 € | ドイツでの粘土層の温度の上昇の影響についての調査。候補となる母岩の不可逆的な変化と処分場の工学的な実現可能性の研究（TemTon）。 |
| 01.2009 – 10.2013 | ドイツ | 456 000 € | 処分場の開発の際にさまざまな段階について、異なった岩石層に建設した高レベル放射性廃棄物の処分場のモニタリングの枠組みと開発についての調査、特にその実現可能性と不確実性に重点を置く（MonA/MoDeRn）。 |
| 12.2009 – 06.2016 | ドイツ | 1 284 000 € | 岩塩層での高レベル放射性廃棄物処分場の技術的な実現可能性と安全評価のための計装の完成（KOMTESSA）。 |
| 05.2010 – 04.2014 | ドイツ | 463 000 € | 高レベル放射性廃棄物処分場の内部での破砕岩塩の残留間隙率と透水率（REPOPERM）。 |
| 07.2010 – 09.2015 | ドイツ | 848 000 € | 火成岩の母岩に建設した高レベル放射性廃棄物処分場システムの頑丈さと安全評価に関連した調査（URSEL）。 |
| 11.2010 – 04.2014 | ドイツ | 243 000 € | 仮想的な地下研究所（VIRTUS）。 |
| 05.2013 – 12.2015 | ドイツ | 597 000 € | 高レベル放射性廃棄物の処分場の立坑の閉鎖（ELSA I+II）。 |
| 09.2011 – 08.2016 | ドイツ | 712 000 € | 岩塩層に建設された典型的な高レベル放射性廃棄物処分場の安全性を証明する概念の方法の開発と適用（ANSICHT）。 |
| 08.2012 – 01.2015 | ドイツ | 714 000 € | 岩塩層の内部の掘削影響領域の補正作用（VERA）。第二段階。掘削影響領域での破断システムの生成と、その結果のマクロ・レベルへの転用（注入プロセスのシミュレーションのため）。 |
| 09.2012 – 08.2013 | ドイツ | 202 000 € | 回収可能性の安全要件が既存の処分概念と新しい概念の要件に及ぼす影響（ASTERIX）。 |
| 09.2012 – 10.2013 | ドイツ | 31 000 € | 核種分離・変換の研究。 |
| 09.2012 – 08.2016 | ドイツ | 298 000 € | 立坑の閉鎖のための支持要素と密封要素の設計のプロセス・シミュレーション（ProSiD）。 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 11.2012 – 01.2016 | ドイツ | 352 000 € | 火成岩として形成された粘土層に建設された放射性廃棄物の処分場の閉鎖後の安全性についての分析調査（SANTOS）。 |
| 10.2013 – 03.2015 | ドイツ | 282 000 € | 最大 175 トンの重い荷重を立坑で輸送する際の安全調査（SULa）。 |
| 07.2013 – 12.2014 | ドイツ | 142 000 € | ドイツの高温炉と研究炉で発生した C-14 を含む廃棄物の調査の現状と、こうした廃棄物の将来の処分のための戦略（CarbonForeSt）。 |
| 07.2010 – 03.2013 | ドイツ | 1 962 000 € | ゴアレーベンの予備的安全評価（VSG）。 |

(4) 原子炉安全協会（GRS）

ドイツ原子炉安全協会（GRS）は、技術的及び科学的な研究活動に重点を置いた非営利組織であり、主として BMWi と BMU にその専門知識を提供している。GRS の株式の 46%は連邦政府が所有しており、さらに 46%はドイツ技術検査協会などが所有している。さらに 4%をノルトライン・ヴェストファーレン州、残りの 4%をバイエルン州が所有している。主要な顧客は BMU、BMWi、BfS 及び BMBF である。

GRS は放射性廃棄物処分の分野と、特に安全性に関連した問題の評価に関する専門知識を所有している。安全解析の評価のための必要な計装と方法は、長年にわたる研究活動において開発され、その資格が認定されてきたものである。GRS はさまざまな委員会への参加と協力活動、ならびに国際的な科学フォーラムの作業に参加しており、手順の開発と専門知識の確保に関しては、必要とされる科学と技術の最新の水準を維持している。

GRS が廃棄物処分についての専門知識を備えているのは、主として安全解析と地球科学の分野である。特に安全解析の遂行と、廃棄物処分の概念の調査のための実験研究、ならびに長期的な安全に重要なデータとモデルの獲得に重点を置いている。

a. 現在の GRS の研究開発活動

地下の深い地層に放射性廃棄物と化学的に有害な物質を長期的に安全に閉じ込めるためには、さまざまな研究開発活動が必要とされる。この目的を実現するために、GRS の放射性廃棄物処分研究センターは、地球科学的な調査を主導するだけでなく、モデル、方法論、ツールの開発を進めている。

放射性廃棄物の処分の安全性の分野での GRS の研究開発活動は、次の 7 つの分野に分類される。

○地球化学的なモデル化

地球化学的及び物理化学的なプロセスは、放射性廃棄物の地層処分場の長期的な安全性を確保する上で、重要な役割を果たす。こうしたプロセスを理解するために、そして廃棄物そのものの化学的及び鉱物学的な分析を実行するために、処分場の地層と技術的なバリアの地球化学的な特性調査と、起こりうる相互作用の分析と評価が必要である。GRS の放射性廃棄物処分研究センターでは、廃棄物、母岩、バリア、天然に存在する流体の間の化学的な相互作用によって発生する物質の移動性の増大を、信頼できる形で予測するための

科学的な基礎を確立することを目的とした実験調査を実行している。

○地質工学的なモデル化

処分場システムならびにその一部の熱的・水理学的・力学的な挙動を記述し、予測するために、数値シミュレーション・プログラムが利用されており、こうしたプログラムを継続的に改良すべきである。こうしたプログラムは、実験の解釈と予測のためだけでなく、実験結果を理解するためにも利用されている。

プログラム CODE_BRIGHT は、熱・水理学的な挙動の完全な組み合わせとさまざまな物質法則を提示するものであり、岩塩層と粘土層のために特別に開発されたものである。このプログラム CODE_BRIGHT の他に、純粋に熱力学的な問題を考察するために、商業的なソフトウェアである ANSYS も利用されている。

○ゴアレーベンの予備的安全評価

ドイツ北部に存在するゴアレーベン岩塩ドームは、ドイツで高レベル放射性廃棄物の処分のための候補サイトとして、1979 年から調査が実行されている。

2010 年にはサイトの調査が再開されており、ゴアレーベンのサイトのための予備的安全評価が開始された。この調査の主要な目的は、安全評価に依拠して、ゴアレーベンのサイトが高レベル放射性廃棄物、すなわち使用済燃料、使用済燃料の再処理によって発生した廃棄物であるガラス固化体、再処理によって発生したその他の廃棄物の処分サイトとして適切なものであるかどうかを確認することにある。さらにオプションとして、低中レベル放射性廃棄物を処分する問題と、研究ならびに技術的な開発に関連した未解決の問題を解決する課題ならびにサイトの調査の課題も確認されている。

○ナチュラルアナログ

多数の放射性核種は長寿命であるため、放射性廃棄物の処分場については極めて長期間、すなわち百万年の長さでの長期的な安全性の確証を提示しなければならない。長期にわたって、処分場から生物圏への好ましくない放射性核種の移行が発生しないことを確証しなければならない。

このような長期間にわたって、研究所で長寿命の放射性核種の移行をシミュレーションすることはできないが、天然の地質学的なシステムでは、こうした長期にわたって発生す

る関連したプロセスの効果を観察することができる。天然のシステムで発生するプロセスが、処分場のシステムで発生するプロセスと類似したものである場合には、それをナチュラルアナログと呼ぶ。

チェコの原子力研究所（NRI）や、その他の国内外の研究機関との協力活動において、GRS の処分場研究センターでは NATAN プロジェクト（ナチュラルアナログに関するプロジェクト）において、チェコの Ruprechtov のサイトで、ドイツの処分場で予測される条件と同じような条件のもとで､粘土堆積岩の内部でのウランの移行挙動を調査している。

○シナリオの開発

放射性廃棄物の処分場の建設と操業の承認は、長期的な安全性の検証と結びついた形で実行される。処分場の安全性の評価のための本質的な基礎となるのは、放射性核種の放出につながる関連したシナリオを特定することである。将来において関連するシナリオを特定・選択し、詳細に記述する作業が、シナリオ開発において遂行される。シナリオとは、処分場のシステムとその安全機能についての予測された将来の変遷を記述したものであり、処分場システムの特性を決定する関連した要因の組み合わせによって決定される。

作業グループが集中的に検討している問題の一つとして、たとえば地下深くの地層に建設した放射性廃棄物の処分場に対して、人間の活動が及ぼす影響への対応などがある。

○輸送のモデル化

地下深くの地層に建設した放射性廃棄物の処分場の長期的な安全評価においては、放射性核種が放出された結果として発生する環境への影響は、関連したシナリオの考察によって推定される｡処分場から人間のところまで放射性核種が分散されるプロセスについては、次の三つの独立したサブエリアを考察する必要がある｡すなわちニアフィールド､岩石圏、生物圏である。

岩石圏を通じた核種の輸送をモデル化するためには、地下水の流動エリアについての知識が必要である。核種輸送をモデル化するために、流動エリアの二次元または三次元のシミュレーションである分散的な密度駆動流動（$d^3f$）コンピュータコードと、放射性核種・反応・遅延・輸送（r3t）シミュレーション・プログラムが開発された。

○仮想的な地下研究所

GRS、BGR、DBE テクノロジー社ならびにフラウンホーファー工場操業・自動化研究所（IFF）は現在、世界でも初めての仮想的な地下の研究所（VIRTUS）の開発を進めている。

VIRTUS は、処分場で発生する地質工学的及び地球化学的なプロセスを評価するための手段であるだけではない。このソフトウェア・プラットフォームは、これらのプロセスを 3D でビジュアル化することができ、公衆にさらに包括的で透明性の高い情報伝達を行うことに貢献することを目指している。

さらに VIRTUS は研究者たちにとっては、地層に建設された処分場の詳細なモデルの仮想的な実験を実行するための手段となる。これによって VIRTUS は、プロセスとその複雑な相互作用を詳細に研究できるだけでなく、それをビジュアルに表現することもできる。

この VIRTUS は、地層処分場のサイト選定にも重要な役割を果たす可能性がある。候補となったサイトの適性を調査する必要がある場合には、処分場概念を作成する必要がある。この処分場概念に基づくことで初めて適性を評価し、必要とされる長期間にわたって、問題となるサイトで放射性廃棄物を処分し、その期間を通じて廃棄物を環境から隔離できることを実証できるようになる。VIRTUS は、処分場概念に必要とされる開発作業と、安全解析の作成をさらに効率的で、包括的なものとすることができる。

(5) カールスルーエ技術研究所

a. カールスルーエ・プロジェクト管理機構

放射性廃棄物処分の問題と課題は、多様な施設を利用しないかぎり解決することはできないため、プロジェクト管理機構、特にカールスルーエ技術研究所（KIT）に所属するカールスルーエ・プロジェクト管理機関（PTKA）が研究資金の提供を行っている。このため研究開発活動の全体を全国的に調整することができ、特定のプロジェクトを適切な研究機関に割り当てることができる。そして大規模な組織だけが処理することができる大規模プロジェクトに仕事が集中することを避けることもできる。PTKA は科学的な研究と技術開発計画の資金調達パートナーであり、共同設計者でもある。その主要な任務は、サービス提供者として、さまざまな計画と結び付いたプロジェクトの資金の調達で契約業者を支援し、研究結果を広く伝達することにある。

b. 水資源技術・廃棄物管理部

カールスルーエ・プロジェクト管理機関の水資源技術・廃棄物管理部（PTKA-WTE）は、BMBF と BMWi の代理として、放射性廃棄物の最終処分（2011-2014）と「2020 年以降の基本エネルギー研究」に関連した将来の研究開発作業について、計画で定めた優先事項に基づいて、研究開発プロジェクトを監督し、資金を調達している。

さらに PTKI-WTE はユーラトムの特定の計画のもとで、ドイツの国としての窓口として、「放射性廃棄物管理」の分野における原子力研究と訓練活動の調整を担当している。

PTKA-WTE の活動の重要な部分は、水資源技術と放射性廃棄物の管理の分野での国際的な科学技術の調整にある。

c. 放射性廃棄物処分研究所

カールスルーエ研究所に所属する放射性廃棄物処分研究所（KIT-INE）は、主として処分場サイトの地球化学的な環境における放射性核種の水相での化学的な特性に基づいて、長期的なセーフティケースへの地球化学の側面の影響を検討している。この研究機関の主な作業は、原子力発電で発生した発熱性の高レベル放射性廃棄物（使用済燃料と再処理から発生したガラス固化体）を、岩塩、粘土、硬岩の地層に処分する問題を中心としている。

放射性廃棄物処分の安全性に関連した研究活動において、地球化学的な評価に基づいて、放射性廃棄物の処分場サイトの長期的な安全性を科学的な健全な形で証明するための方法が開発されている。そのための活動では、アクチノイドと長寿命の核分裂生成物に重点が置かれているが、それはこれらの物質が、原子力発電所で発生した高レベル放射性廃棄物の放射線学的な毒性が長期的に維持される原因となっているからである。こうした研究作業には、水相のシステムの内部でのアクチノイドの地球化学的な特性に関連した広範で基本的な実験と理論的な調査が含まれるが、こうした調査では、処分場の多重バリアシステムの内部での放射性核種の輸送と輸送の調査に適用される方式を開発し、適用する作業が含まれる。全てのデータと知識は、既存の地球化学的なモデルのパラメータの設定と、新しいモデルの概念の開発において活用されている。

表 2.5-5　放射性廃棄物の安全性に関連した研究テーマ（KIT-INE）

| 分野 | カテゴリ | テーマ |
|---|---|---|
| 地球化学に基づいた長期的なセーフティケース | 基本研究 | アクチノイドと長期的な核分裂生成物の水相での化学的な特性と熱力学 |
| | | アクチノイドと鉱物の表面の相互作用 |
| | | 二次鉱物相へのアクチノイドの取り込み |
| | | コロイドの生成と安定性ならびにアクチノイドとコロイドの相互作用 |
| | 応用研究 | 多重バリアシステム |
| | | 地球化学に基づいた長期的な安全解析のためのモデルの作成と適用 |
| | | 地下の研究所での活動 |
| | | 種化のモデル化に組み合わされた輸送 |
| | | モデル化（熱力学） |
| | 種化の方法の開発 | レーザー分光方式 |
| | | X線に基づいた分光学（シンクロトロン放射） |
| | | X線に基づいた分光学（シンクロトロン放射） |
| | | 質料分光測定 |
| | | NMR 分光測定 |
| | | コンピュータ化学 |
| 高レベル放射性廃棄物の固化（ガラス固化） | （該当せず） | WAK-HAWC のガラス固化 |
| | | ガラスの化学的な特性/ガラスの開発 |
| 高レベル放射性廃棄物の放射線学的な毒性の削減（核種分離） | （該当せず） | 新規の N ドナー抽出剤の合成 |
| | | 選択性の特定と理解 |
| | | プロセス開発 |

KIT-INE における地球化学に基づいて長期的な安全性についての研究開発活動は主として、処分場サイトの地球化学的な環境における放射性核種の水相の化学的な特性に基づいて、長期的なセーフティケースに地球化学的な側面から貢献することを目指している。

そのための作業では、原子力発電から発生した発熱性の高レベル放射性廃棄物（使用済燃料と再処理で発生したガラス固化体）の岩塩層、粘土層、硬岩層の地層での処分に重点を置いている。その際にアクチノイドと長寿命の核分裂生成物は、高レベル放射性廃棄物の極めて長期的な放射線学的な毒性の主要な原因となるために、中心的な役割を果たす。

KIT-INE における高レベル放射性廃棄物の研究開発活動では、カールスルーエ再処理プラント（WAK）で発生した高レベル放射性廃棄物のためのガラス固化技術を提供する作業と、異なった組成の放射性廃棄物のための技術を適用する作業が中心となっている。

高レベル放射性廃棄物の放射線学的な毒性を低減させるために、液相－液相の抽出方式による微量のアクチノイドの分離のため方法（核種分離と呼ばれる）が開発された。これには、高度に選択的な抽出剤の合成、抽出の動力学の調査、抽出プロセスにおける中空の糸形モジュール（HFM）の応用、プロセスの設計と最適化が含まれる。さらにアクチノイドとリガンドの錯体の配位構成の解明を目的とした基礎的な科学調査も実行された。

(6) ドイツにおける他の研究機関について

a. ユーリッヒ研究センター

エネルギー・気候研究所のユーリッヒ研究センターでは、放射性廃棄物の安全かつ恒久的な管理・貯蔵方法について調査を行っている。使用済燃料の直接処分に関する研究に加え、代替方法として革新的な管理概念についても研究がおこなわれている。これらの研究には、特定の核種の分離、セラミックの廃棄体での処理、短寿命、または安全な核種への変換や原子炉用黒鉛の処理に関するものが含まれている。

b. ドレスデン-ロッセンドルフ・ヘルムホルツ協会（HZDR）

ドレスデン-ロッセンドルフ・ヘルムホルツ協会（HZDR）によって行われている研究は、生物圏及び地圏に侵入する放射能に関連する危険性から人間と環境を保護するためことを目的としている。非常に複雑なプロセスである、環境中及び潜在的な放射性廃棄物処分場サイトにおける放射性核種の拡散を正確に予測するために多くの研究を行う必要がある。HZDRによる研究開発の主要な目的には、以下のものである。

- 深地層における放射性廃棄物処分場の長期安全解析のためのプロセスの理解の改善
- 分子及び細胞レベルでの生物圏や地圏における放射性核種の拡散プロセスのより良い理解のための新たな装置・システムの開発

・　放射性廃棄物処分場の長期安全解析のためのデータの明確化

c. 岩盤力学研究所（IfG）

岩盤力学研究所（IfG）での研究活動は、特に、岩塩及び含塩層における地質工学的手法により、地下坑道の設置や長期利用における岩圧の影響を調査・予測することに関連したものである。ゴアレーベンにおける予備的安全評価プロジェクトでは、IfGは、天然バリアの地質工学的な整合性を評価するため熱-力学シミュレーションを担当した。

d. 安全技術研究所（ISTec）

安全技術研究所（ISTec）は、施設・原子炉安全協会（GRS）が100%所有する研究機関であり、1992年に設立された。ISTecは、分析や安全問題において、各種装置の製造者、発電所操業者、輸送業者や規制機関に対して助言を与えている。ISTecは、研究開発の長年の経験をセキュリティ技術の実践及びテスト活用している。ゴアレーベンの予備的安全評価プロジェクトでは、廃棄物の特性化や定量化に関連した作業を分担した。

e. フライベルク工科大学

フライベルク工科大学の地圏資源学部では、鉱物・エネルギー・基礎的資源の探索から、上部マントルから対流圏に至るまでの以下のような基礎研究を行っている。

・　地殻物理学
・　鉱物合成
・　地震学及び地球電場学
・　鉱山学-露天掘り及び地下
・　深部ボーリング及び地殻流体
・　土壌及び岩盤力学
・　鉱山の調査及び測地学
・　大気及び地域の気候研究
・　古生物学
・　地球情報科学及び数理地球科学
・　土木工学及びコンクリート技術

・　水理及び環境地球科学

f. クラウスタール工科大学処分研究所（IELF）

クラウスタール工科大学処分研究所（IELF）では、以下の分野におけるサイト特性調査、サイト調査、地質工学的バリアシステム及びセーフティケースの研究を行っている。

・　地球科学-鉱物学-塩類鉱床
・　地盤力学
・　水文地質学及び水理地球科学
・　鉱物資源
・　処分場システム

廃棄物処分技術及び地盤力学分野での研究活動のうち特徴的なものには、地下掘削の連成熱水化学挙動に関連したものがある。この中で特に重要なものには、放射性廃棄物処分場、発熱性有害物質の地下処分施設や地下エネルギー貯蔵サイトのためのセーフティケース、完全性や耐荷重性挙動の調査がある。

g. エコ研究所

エコ研究所は、地球、国及び地域レベルで持続可能な開発のための原則や戦略を開発する非営利組織である。エコ研究所の原子力工学及び施設安全部門では、調査研究報告書の作成、助言の提供や専門家との協力により、原子力工学や従来の技術の最先端の問題について研究を行っている。放射性廃棄物の最終処分場を実現するために、透明性の高い手続や適切なマネジメント構成を設計する研究を行っている。また、放射性及び化学毒性を有す廃棄物の輸送・中間・最終処分及び原子力施設の廃止措置・解体の安全性に関わる問題にも取り組んでいる。

2.5.5 参考文献

[1] Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland – Das Endlagerprojekt Gorleben, October 2008.

[2] Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and Project Manager Agency Karlsruhe (PTKA-WTE), Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011 – 2014), July 2012.

[3] Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and Project Manager Agency Karlsruhe (PTKA-WTE), Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007 – 2010), December 2007.

[4] Federal Ministry of Environment (BMU), Forschungrahmen des Bundesumweltminister und Umweltforschungsplan (UFOPLAN) 2014, October 2013.

[5] Federal Ministry of Research (BMBF), Grundlagenforschung Energie 2020+, 2008.

[6] Federal Office for Radiation Protection (BfS), Forschungsprogramm zum Strahlenschutz für den Zeitraum 2013 – 2017.

[7] Project Management Agency Karlsruhe (PTKA-WTE), BMWi feförderte FuE zu "Endlagerung radioaktiver Abfälle" Berichtzeitraum 01. Januar – 30. Juni 2013, August 2013.

## 2.6 米国

米国における処分事業の現状概要、処分システムの概要、研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、地下研究施設における研究開発動向、回収可能性に関する研究開発動向、研究開発計画に対するレビュー、大学・研究機関等による地層処分研究開発動向を調査・整理した。

### 2.6.1 処分事業の現状概要

米国の使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の地層処分については、2009 年に、現政権が安全審査の段階にあったユッカマウンテン計画を中止し、代替案の検討を行うとの方針を示した。使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の管理に関する政策立案に資するため、大統領は、エネルギー長官に対して、「米国の原子力の将来に関するブルーリボン委員会」（以下、「ブルーリボン委員会」という。）を設置するように命じ、「核燃料サイクルのバックエンド政策を管理し、米国の使用済燃料及び放射性廃棄物管理のための安全で長期的な解決策を勧告するため、包括的な検討を行うよう」に指示した。

24 ヶ月という期間内に、ブルーリボン委員会は、公聴会、市民集会、委託研究論文、ステークホルダからの公式・非公式の意見収集などを通じて、2012 年 1 月に最終報告書を公表した。ブルーリボン委員会の最終報告書には、次の 8 つの主要な勧告が含まれている。

1. 適応性があり、段階的で、同意に基づき、透明性があり、基準及び科学に基づいて、放射性廃棄物管理及び処分施設を立地し、開発するためのアプローチ
2. 米国での放射性廃棄物の輸送、貯蔵及び処分のため、集中的で、統合されたプログラムを開発し、実施するための新しい、単一目的の組織
3. 放射性廃棄物管理プログラムによる、放射性廃棄物基金の残高と毎年の放射性廃棄物拠出金の利用の保証
4. 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の安全な処分のための 1 つまたは複数の恒久的な地層処分施設の開発のための、可能な限り迅速な取組
5. 核燃料サイクルのバックエンドの管理のための統合された包括的な計画の一部として、1 つまたは複数の集中中間貯蔵施設の開発のための、可能な限り迅速な取組
6. 現在の利用可能な技術に比較してかなりの利点を提供し、関連した人的ニーズ及びスキル開発の可能性がある、先進的な原子炉及び核燃料サイクル技術に関する研究開発・実証のための安定した長期的なサポート
7. 地球規模の核不拡散に対応し、全世界の原子力施設及び核物質の安全性及びセキュリティを向上させるための国際的なリーダーシップ
8. 安全性、廃棄物管理、核不拡散、安全保障上の懸念に対処するための国際的取組みにおける米国の積極的なリーダーシップ

エネルギー省（DOE）原子力局（NE）による使用済燃料処分等プログラム（UFD プログラム）は、現在及び将来の核燃料サイクルから生じる使用済燃料の貯蔵、輸送、処分を可能にする代替案を明確にし、研究及び技術開発を行う事を目標としている。

この目標の一部として、UFD プログラムでは、地層処分オプションに関連する分析能力及び全般的な実験データを開発している。多数の代替案を検討・評価し、地層処分が望ましい選択肢であるとの指摘がなされている。また、様々な起こり得る地質学的状況を検討しながら、3 つの媒体（岩塩、頁岩／粘土層、花崗岩）における地層処分に関するモデル化及び実験的努力に重点的に取組む論拠を提示したが、凝灰岩での処分も検討するよう指摘している。また、様々な代替処分技術についても検討されている。[1]

また、米国では、実際に地層処分事業が行われており、軍事活動で発生した TRU 廃棄物の地層処分である廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）をエネルギー省（DOE）が 1999 年 3 月 26 日より操業を行っている。

### 2.6.2 処分システムの概要

地層処分場であるユッカマウンテン計画については、処分事業はエネルギー省（DOE）が、安全規制は原子力規制委員会（NRC）が、それぞれ独立した権限を有しながら処分事業を実施することとなっている。

ユッカマウンテンは、帯水層が処分場よりも低いレベルに存在するため、人工バリアをその上下に位置する天然バリアが挟み込む形態をとる。人工バリアとその上下にある天然バリアは、以下のとおりである。

- 上部天然バリア：乾燥気候帯であるため、地表からの水分の浸入は少ない。また、不飽和帯であるため、処分深度まで達する流水経路も少ない。廃棄体からの崩壊熱は、流水経路内の温度を上昇させ、深部への水の流れを抑制する。
- 人工バリア：人工バリアが破損する確率は十分な品質管理により低減できる。地下水が廃棄体に接触する場合であっても、溶質の大部分はパッケージの金属原子であり、放射性核種の溶解量は少ない。放射性核種の流出後であっても、地下水の流路は多方向に及ぶため、放射性核種は拡散する。
- 下部天然バリア：放射性核種が帯水層に浸入したとしても、地下深部では地下水の移動速度は遅く、また、放射性核種が岩盤に吸着することもあり、生活圏に到達する量は極めて少ない。

ユッカマウンテンにおける処分場の概念図を図 2.6-1 に示す。また、廃棄物パッケージの定置イメージを図 2.6-2 に示す[2]。

また、TRU 廃棄物の地層処分場である廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）では、地下に存在する岩塩層に設けた処分室において、壁面の処分孔に「遠隔ハンドリングが必要な TRU 廃棄物」（RH 廃棄物）を挿入してプラグを設置すること、処分室の床面にドラム缶に入れた「直接ハンドリングが可能な TRU 廃棄物」（CH 廃棄物）を 3 段積みする方法が取られている（図 2.6-3 参照）。[3]

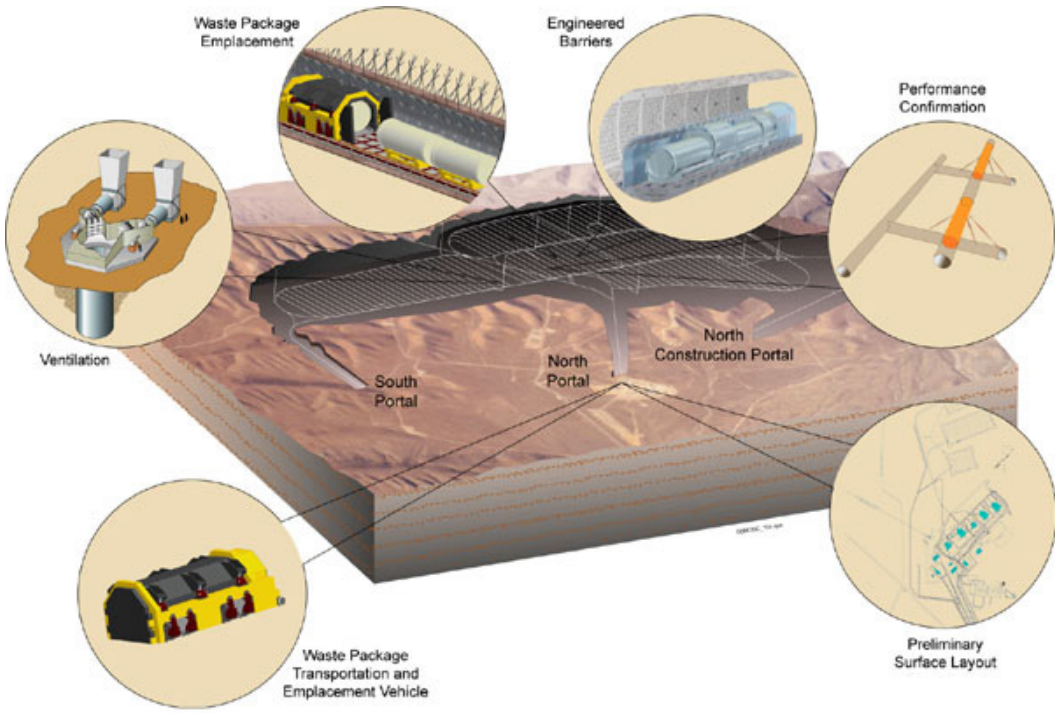



図 2.6-1　ユッカマウンテンにおける処分場の概念図

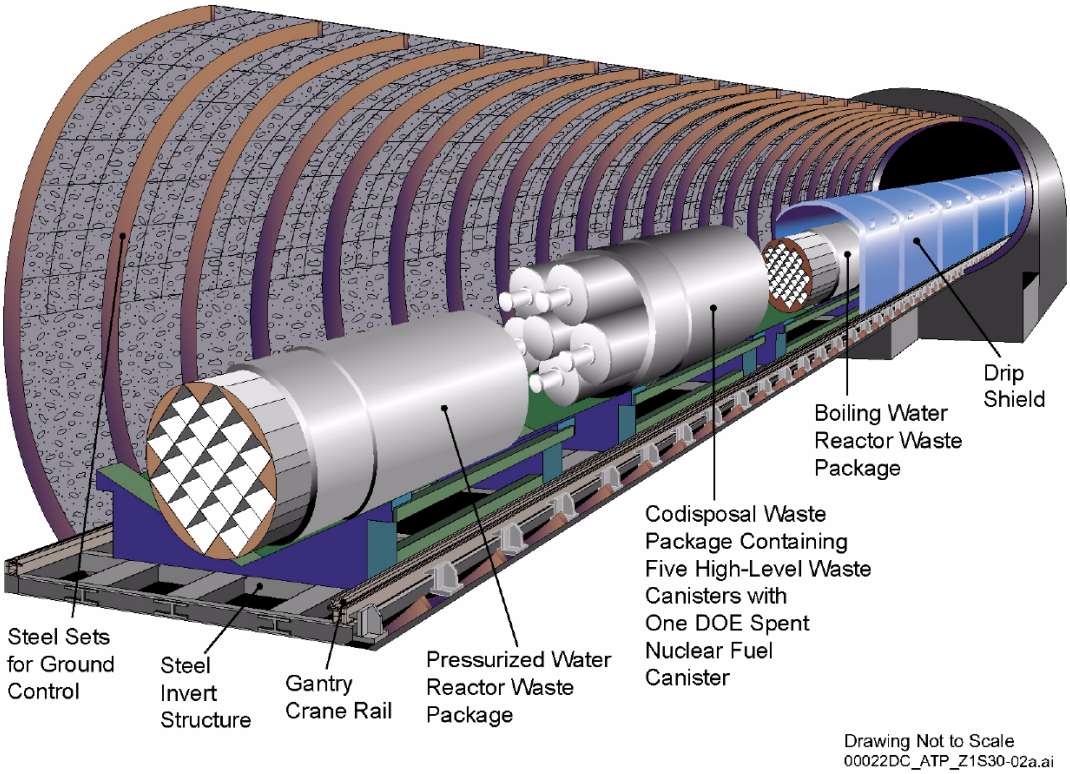



図 2.6-2　廃棄体パッケージの定置イメージ

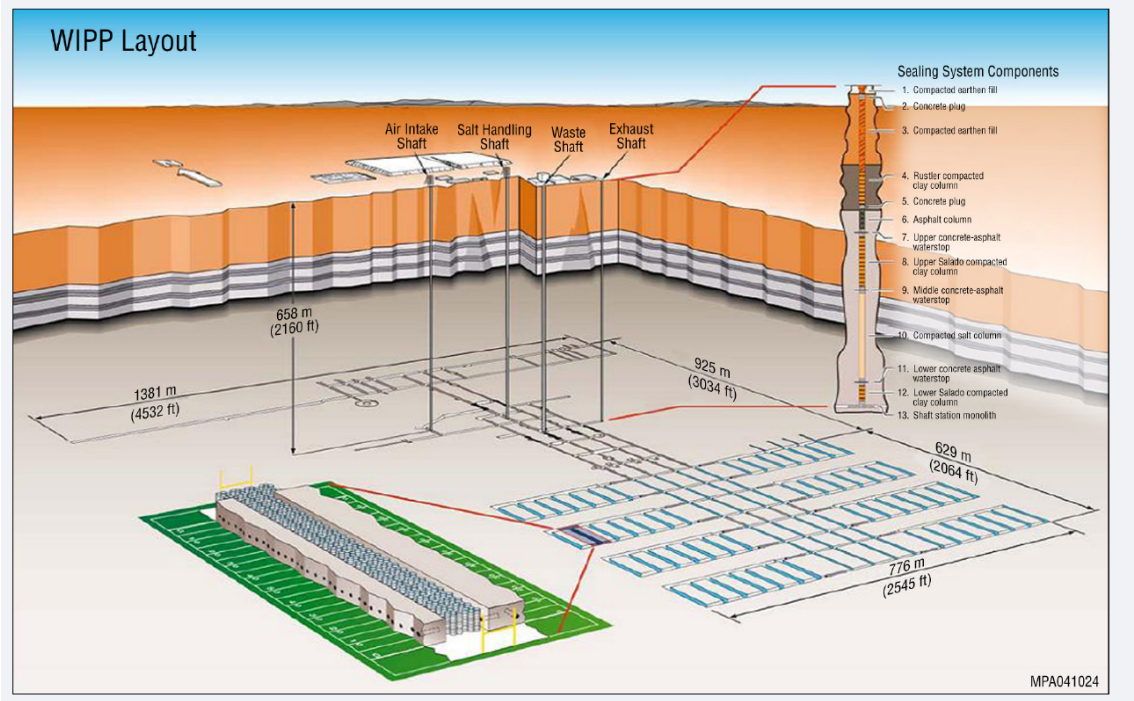



図 2.6-3　廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）の処分概念

### 2.6.3 研究開発プログラムの概要

#### 2.6.3.1 ユッカマウンテンプログラム

ユッカマウンテン計画は、1982 年放射性廃棄物政策法に基づいて、「高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の処分のための処分施設を開発すること、高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の処分に関する研究、開発、立証計画を確立することなど」を目的としている。20 年以上の科学的・技術的調査の後、エネルギー省（DOE）は、ユッカマウンテンでの処分施設の建設認可に係る許認可申請を 2008 年 6 月 3 日に原子力規制委員会（NRC）に提出した。NRC は、受理審査の後、2008 年 9 月に許認可申請を正式に受理した。しかし、2009 年に、現政権によってユッカマウンテン計画は中止の方針が示されている。

ユッカマウンテン計画の利害関係者によって、多数の訴訟が提起され、様々な裁判所で審理が行われている。2013 年 8 月 13 日に、許認可申請の審査を中止するという一方的決定は、連邦控訴裁判所によって破棄され、NRC は、審査を完了するよう命じられた。裁判所は、「現時点で、原子力規制委員会は、連邦議会によって制定された法をただ否定しているだけであり、同委員会は何らの法的根拠無くそれを行っている」と判決した（米国控訴裁判所、コロンビア区巡回裁判所、No.11-1271、2013 年 8 月 13 日）。これは、ユッカマウンテンが処分施設のオプションとして復活する可能性を留めていることを意味する。

#### 2.6.3.2　廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）プログラム

廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）は、ニューメキシコ州カールスバッドの東 26 マイルに位置している（図 2.6-4 参照）。WIPP は、米国での最初の地層処分施設であり、国防関連活動によって発生した超ウラン廃棄物（TRU 廃棄物）の処分が実施されている。TRU 廃棄物は、α 放出体の半減期が 20 年以上である超ウラン放射性核種を 100nCi/g（3,700 Bq/g）以上含有する放射性廃棄物と定義されている。同サイトでの予備的作業は、1974 年に開始された。1979 年に、連邦議会は、エネルギー省に対して、WIPP 建設を許可し、1999 年に最初の TRU 廃棄物が到着した。最初の予備的作業と最初の廃棄物処分との間の 25 年間に、様々な科学的及び工学的分野において、多くの研究開発が実施された。

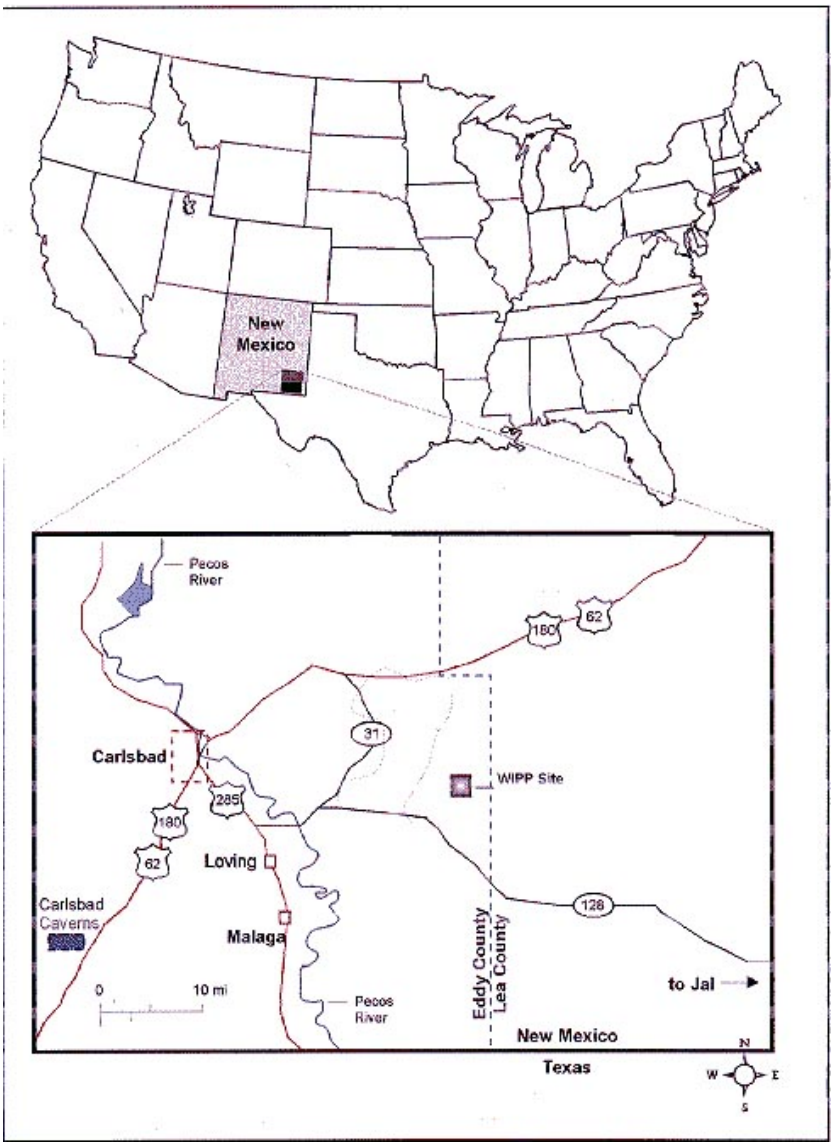



図 2.6-4　WIPP の位置

WIPP 計画では、環境保護庁（EPA）が 40 CFR Part 191 に基づいて、連邦政府の規制・監督機関として活動し、建設、操業、当該施設の規制・監督に関する遵守規則として WIPP 特有の 40 CFR Part 194 を策定している。

2009 年 3 月 24 日に、DOE は、EPA に対して 2 回目の適合性再認定申請（CRA）を提出することで、連邦議会が求めた再認定プロセスを実施している。適合性再認定は、過去 5 年間に当該施設での変化が EPA の処分基準に適合していることを立証するプロセスである。2010 年 11 月 18 日に、EPA は、WIPP に関する 2 度目の適合性再認定の決定を下し、WIPP は引き続き EPA の廃棄物処分規則及び遵守基準に適合していると判断した。

2.6.3.3 規制研究プログラム

ユッカマウンテン処分場は、原子力規制委員会（NRC）が安全規制を行っており、将来的に商業用使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の代替処分場が計画された場合、また、第 2 処分場が計画された場合も、NRC が規制を行うことになる。一方、廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）は、NRC の関与を全く受けず、環境保護庁（EPA）によって安全規制されている。NRC と EPA とは、非常に異なる規制方法を取っており、規制研究に対するアプローチも著しく異なっている。

(1) WIPP に関する EPA の規制研究

廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）を規制する環境保護庁（EPA）のアプローチには、安全に関する独立した解析が含まれない。実際、EPA が使用する手続きは、許認可と呼ばれておらず、連邦規則への適合性認定と呼称されている。この適合性認定及び適合性再認定手続きにおいて、EPA は、DOE が使用するのと同じコンピュータコードをインストール及び実行し、同じ入力パラメーターを使って当該コードを作動させることによって、適合性認定・再認定の申請者である DOE が性能評価を正しく実施した事を確認している。こうした規制アプローチを取る上で、EPA 職員等には、処分科学に関する強力で独自の能力は必要とされない。結果的に、EPA は、重要な処分研究計画を保持していない。

(2) NRC の規制研究

ユッカマウンテン処分場に関する NRC の規制は、性能評価に関する独自の能力を使用して実施されており、これには、高度な能力が持続されることが必要となる。こうしたレベルの努力の一環として、NRC は、優秀な規制研究部門を長い間維持してきた。処分科学との関連で、NRC の研究は、2 つの組織によって実施されている。具体的には、研究を担当する NRC スタッフからなる内部の研究部門、専門の委託先であるサウスウエスト研究所にある放射性廃棄物規制解析センター（CNWRA）の 2 つである。CNWRA 全体の任務は、使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物との関連で、潜在的な地層処分場に関する技術的及び規制上の問題を解決することである。

DOE と同様に、ユッカマウンテンに関する NRC の研究に対する資金供給は、2009 年に停止された。CNWRA での現在の研究は、一般的な処分構想に関するものである。2009 年以前の CNWRA での研究は、NRC に関わる具体的な規制課題に対して重点的に取組ん

でいた。

特別に注目されている分野の一つは、処分に関する火山・火成活動の潜在的影響についてである。CNWRA は、このテーマについて非常に精力的な研究計画を持っている。このテーマに関する最も優れた出版物は、Woods 氏らによるもの[4]であり、ユッカマウンテンでの処分場を横断する火成事象の可能性について、火成活動による放射性核種の火山灰（テフラ）噴出（いわゆる「噴出－放出経路に関するシナリオ」）をもたらす一連の保守的な事例（バウンディングケース）を解説したものである。同様に、Woods 氏らの解析は、ユッカマウンテン計画において招集した火成活動専門家によるピアレビュー委員会（ICPR）で独自の詳細な科学的報告のテーマになっており、一連の報告書にまとめられている（ICPR、2004）[5]。

また、独自の電力研究所（EPRI）チームによっても火山・火成活動は検討されており、ユッカマウンテン処分場に関する火山・火成活動シナリオに内在する様々な仮定及びサブプロセスについて評価が行われた（EPRI, 2003[6]; Aptel et al., 2005[7]; Kozak and Kessler, 2004[8]; Kozak et al., 2005[9]; Morrissey and Kozak, 2006[10]）。EPRI によって評価された具体的な段階には、以下のものが含まれる。

- ユッカマウンテン下部（貫入玄武岩）で将来起こる火成事象の確率
- 処分場の想定サイト近郊での貫入岩の上昇と増大
- マグマ及び坑道の相互作用
- 貫入及び放出経路に関する廃棄物パッケージの閉じ込めに対するマグマの間接的影響
- 噴出及び放出経路に関するマグマ－廃棄物パッケージの相互作用
- 貫入及び放出経路に関する処分システム経路での一層の放出及び核種移行
- 噴出及び放出経路に関する噴火した汚染マグマの分散
- 生物圏経路解析

火成活動専門家によるピアレビュー委員会（ICPR）による報告書の多数の解析及び結論と一致する形で、信頼性のある代替概念モデル、仮定、データの組合せが確認され、EPRI によって報告書シリーズの妥当性が示された。これらは、Woods 氏らの推論解析（2002 年）に含まれる安全にとって不利な結果を排除できない場合でも、それを大幅に軽減できるのである。EPRI は、ユッカマウンテンサイトでの火成活動、噴火から発生する放射線学的に相当量の放射性核種が適合性限界に到達するまでには、事象及びプロセスの長い連鎖が存在することを示した。

2.6.4 研究開発課題とその概要

2.6.4.1 ユッカマウンテンにおける研究開発課題とその概要

1987 年から 2002 年にかけて、エネルギー省（DOE）は、ユッカマウンテンの科学的及び技術的研究に関して 38 億ドルを使用した（SCEPW、2006 年）[11]。この金額の一部は、ユッカマウンテンを横断する 5 マイルに及ぶ探査研究施設（ESF）と呼ばれるトンネル建設に使用され、ESF は 1997 年に完成した（図 2.6-5 を参照）。1998 年に、DOE は、第 2 の横断坑道トンネルを完成させ、これは、潜在的な処分用母岩での試験を行うために使用された。

図 2.6-5　2009 年以前のユッカマウンテンにおける探査研究施設（ESF）

ESF のトンネル及びトンネルから掘られたニッチ及びアルコーブは、世界最大の地下研究所となっている（SCEPW、2006 年）[11]。DOE は、その地域の地質調査のために地表から 180 本以上のボーリング孔を掘削したが、ネバダ州ナイ郡の独立系の科学者も追加のボーリング孔を掘削した（SCEPW、2006 年）[11]。この時点で、DOE 及びその直接の管理・操業契約者（M&O）、5 つの DOE の国立研究所、米国地質調査所、米国の多数の大学などを代表して同計画に関わる科学者の数は、2,500 名以上となった（SCEPW、2006 年）[11]。

処分プロセスでの利害関係者としての原子力等の電気事業者を代表する電力研究所

（EPRI）によって、独立した調査も実施された。1989 年から 2008 年にかけ、EPRI は、ユッカマウンテンに関する独立した評価を行った。この 20 年に亘る期間、EPRI 及びその専門家チームは、米国の地層処分計画の進展を詳しくフォローし、EPRI の経験と独自の電気事業者としての視点を統合しながら、立地の適合性、処分施設の設計、法規制の遵守などの観点からユッカマウンテン地層処分システムに関して独立した技術的分析と評価を行った。その結果、多くの影響力の大きな出版物が出版されている。

EPRI の調査の範囲は、DOE 及び EPRI の双方にとって大掛かりなものであり、多くの科学的専門分野、すなわち地質学、水理学、地球化学、材料科学、腐食科学、火山学、地震学などを含んでいた。これらの調査活動の全ては、2009 年に現政権がユッカマウンテン計画に対する資金提供を打ち切った際に停止した。現在、、ユッカマウンテンでの処分を目指す具体的な調査活動は、全く行われていない。

2.6.4.2 WIPP における研究開発課題とその概要

1970 年代から 1990 年代にかけて廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）において実施された初期の調査計画は、当該サイトの地質及び水理をより良く理解することにつながった。この調査に従事した組織は、主に DOE の国立研究所及び大学であった。

この目的に向けて、ドリフト（横坑）と呼ばれる最初の地下坑道の建設が 1983 年に開始され、一連の試験用の孔が 1985 年までに掘削された。そのうちの多くで、実験室での試験を補完するための原位置試験が実施された。岩塩層、廃棄物、廃棄物容器、輸送オプションに関する膨大な技術的データが収集された。実験室及び地下坑道において、どのように岩塩坑道が元の状態に復帰するか、シミュレーションされた廃棄物キャニスタからの熱に岩塩坑道はどのように反応するか、閉じ込められた塩水は、どのように岩塩壁から処分室内へ入り込むのかなどについて判断するための試験が行われた。廃棄物容器がどのように処分室の化学的環境から影響を受けるか、岩塩の処分室はどのようにして閉じ込められ、廃棄物のドラム缶を覆うのか、また、どのように岩塩と廃棄物間の相互作用でガスを発生させるのか、さらに、どのように迅速に発生したガスが蓄積するのか、もしくは岩塩壁中に消散してしまうかなどに関する試験も行われた。プラグ及びシールは、レンガ状に圧縮された岩塩を基に設計され、縦坑、横坑、ボーリング孔をシールして、汚染されたガスや液体が帯水層や地表に漏れ出る経路とならないようにする手段についても試験された。

しかし、1990 年代初頭には、計画は処分施設完成へ向けて進行していたので、DOE の

検討は、調査のうちのどの程度が直接的に適合性認定の段階で利用可能であるかを判断するために行われた。この点について取りまとめられた情報により、実用化できないも同然であることが分かった。第一の問題点は、品質保証及び管理が欠如していることであり、適合性に関わる問題を念頭に置いていない事であった。

この検討の結果、調査計画は、その着目点及びリーダーシップにおいて変化することになった。その結果で生まれた処分前段階試験計画が、1990 年代に実施された（Matthews、1997 年）[12]。この計画は、WIPP の性能評価プロセスをサポートするための研究基盤を提供しており、同計画の成果は、WIPP が法的要件に適合していることを示すのに役立った。第 2 の計画は、以前の調査からの古いデータを「適格化」するために実施されたが、これは、適切な文書を作成することによって、古い成果に関してトレーサビリティを確立することを意味した。これによって適合性認定段階において、品質保証計画に組込むことが可能となった。このような計画は、WIPP 適合性認定及び操業開始によって終了した。

### 2.6.5 地下研究施設における研究開発動向

#### 2.6.5.1 ユッカマウンテンの地下研究施設における研究開発動向

ユッカマウンテンの探査研究施設（ESF）では、いくつかの国立研究所が、原位置でのヒーター試験を実施した。このようなフィールド試験は、流動システムにおいて廃棄物から発生する熱の影響を評価するためのものである。こうした試験により、許容範囲にある廃棄物からの熱負荷に関して、地層処分施設の設計で使用されるモデルを実験するためのデータが提供された。

地下ヒーター試験計画は、単一ヒーター試験（SHT）及び坑道規模試験（DST）から構成された。9 ヶ月の加熱期間で行われた単一ヒーター試験では、1996 年から 1997 年にかけて全長 5m で出力 4kW のラインヒーターが使用された。坑道規模試験では、9 個のヒーターを格納した模擬廃棄物パッケージでの坑道の加熱及び 50 個のウィングヒーターが使われた。加熱試験は、1997 年 12 月に 187kW で開始され、加熱期間が 4 年間、冷却期間が 4 年間の合計 8 年の期間にわたって実施された。

ESF のアルコーブ（Alcove）5 で行われた地下ヒーター試験の全体的な目標は、モデル化と測定とを密接に統合することであり、ユッカマウンテンでの熱力学、水理学、力学、化学の連成プロセス（THMC）をより詳細に理解することである。THMC 測定には、ボーリング孔に備えられたセンサーによって収集された温度、力学的変位、微小地震事象、

相対湿度に関するパッシブ監視データ、物理探査手段による周期的なアクティブ試験（電気抵抗率断層撮影、坑井間レーダー断層撮影、ボーリング孔中性子検層）、水分再分布を監視するための空気噴射試験、水及びガスのサンプリングなどが含まれている。モデル予測は、加熱前に実施された。試験が進行するに従って、プロセスの概念モデルが明確になり、数値モデルの精度を再評価するため、データは連続的にモデル予測と比較された。

また、ESF からのデータは、不飽和帯における地下水流動時間を評価するためにも利用された。ユッカマウンテンでの初期のサイト特性データでは、ユッカマウンテンの放射性塩素（$^{36}$Cl）の深層への浸透が示された。これは、明らかに水分が不飽和帯を非常に早く流動できることを示している。Cambell 氏ら（2003）[13]は、この問題に対する ESF での研究を解説している。いくつかの地点で、岩盤のサンプルから浸出した塩分に対する $^{36}$Cl/Cl 率の測定値は、1950 年代及び 1960 年代に大気圏内核実験からの副産物である $^{36}$Cl の僅かな成分が、少なくとも測定されたという証拠を提供するのに十分と考えられた。これは、地表から ESF の深さまでの 200～300m の不飽和帯を通して、極少量の水が流動した事を意味する。Cambell 氏ら（2003）は、サンプル中に核実験に由来する $^{36}$Cl が存在した最も重大な決定要因は、サンプルが採取された構造的な状況であることを認識した。地層処分候補地に隣接した断層から影響を受けたサンプルでは、核実験に由来する $^{36}$Cl の流動が示された。断層から離れた所では、流動はより緩慢であることが分かっており、ユッカマウンテンでの流動に関する基本的な性能評価の仮定を裏付けている。

2.6.5.2 WIPP の地下研究施設における研究開発動向

現在、WIPP における地下掘削孔は、様々の研究目的に使用されており、その内のごくわずかのみが処分科学に関連している。WIPP では、廃棄物特性、処分性能、操業の改善、連邦規則が要求する 5 年毎の適合性再認定などに関わる具体的な技術的課題に対応するための試験計画が実施されている。この適合性再認定は、取組む必要のある具体的課題を明らかにするために利用される。これには、研究開発の必要性、または、新規のデータ収集活動が含まれる。このような活動では、EPA によって適合性が認定された運用上、規制上、技術上の基盤を変更することが重点的に取組まれている。したがって、地下研究所での作業の中心は、適合性再認定に関わる技術的基礎に関連するものである。このような活動の例として、連邦官報において EPA が最近示したものがある（2013 年 12 月 3 日連邦官報第 78 巻 No.232., 72612 ページから 72620 ページ）[14]。2011 年 9 月 28 日に、DOE は、

コンクリートパネル及びモルタル製の防護壁に関して、それを鋼製隔壁及び充填した岩塩層から構成される別の設計に替えるよう要望を出した。この変更要望は、EPA が連邦官報において承認した研究機関及び性能評価団体によって支持された。

地下研究所にとっての第二の着目点は、原子力施設に関連する「透明性」に関わるものである。WIPP は、原子力施設の運用を観察・理解するために市民のフリーアクセスを可能にすることを目指すいくつかの情報技術を実施に移している。これは、透明性が増せば、原子力技術に対する一般市民の認知度も向上すると考えられている。

地下研究所にとっての第三の着目点は、基礎物理学研究である。濃縮キセノン観測所（EXO）は、$^{136}$Xe に関するニュートリノの出ない二重 $\beta$ 崩壊を探索するための素粒子物理学の実験場である。EXO での実験には、宇宙線からの遮へいが必要であり、WIPP の備える地中深くの放射線の低い環境は、この実験に適した場所である（図 2.6-6 を参照）。また、WIPP は、マサチューセッツ工科大学（MIT）と協力して、他の物質をほとんど通過する「物質との電磁気的な相互作用がほとんどない重い粒子」（ウィンプ、WIMP）を探索する実験を WIPP で行っている。WIMP は、宇宙の「暗黒物質」に関する有力候補であると見なされている。

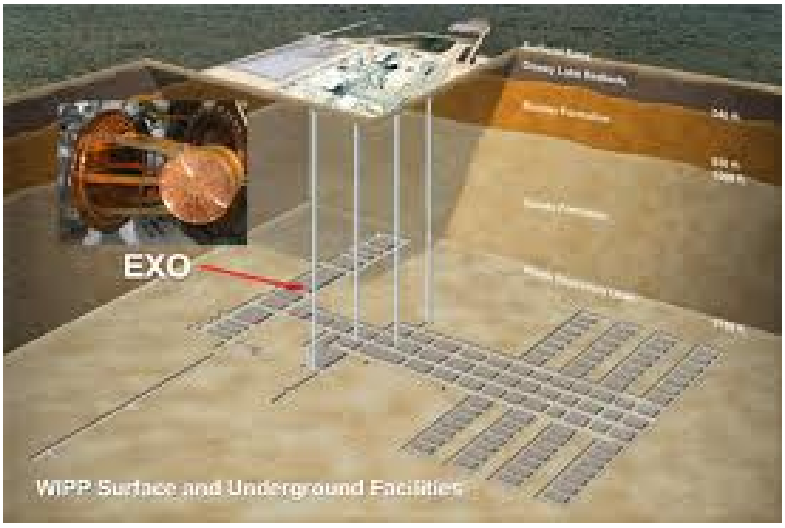



図 2.6-6　WIPP 地下研究所における EXO 実験の場所

地下研究所にとっての第四の着目点は、古生物学に関するものである。いくつかの大学と協力しながら、WIPP は、岩塩層が最初に成立した 2 億 5,000 万年前に存在した生態系の具体的な特徴を明らかにした。古代のバクテリア、セルロース、WIPP のある地下の岩

塩結晶の貫入から DNA の痕跡を発見している（図 2.6-7 を参照)。また、後期二畳紀（2 億 2,000 万年から 2 億 5,000 万年前）末の堆積した岩塩層から、それまで知られていなかった種類の好塩性細菌のコロニーを培養した。これは、生物の蘇生の中で最も長い時間を隔てて行われたものを意味し、WIPP の研究者達は、この細菌を「知られているものの中で最古の生命体」であると評した。

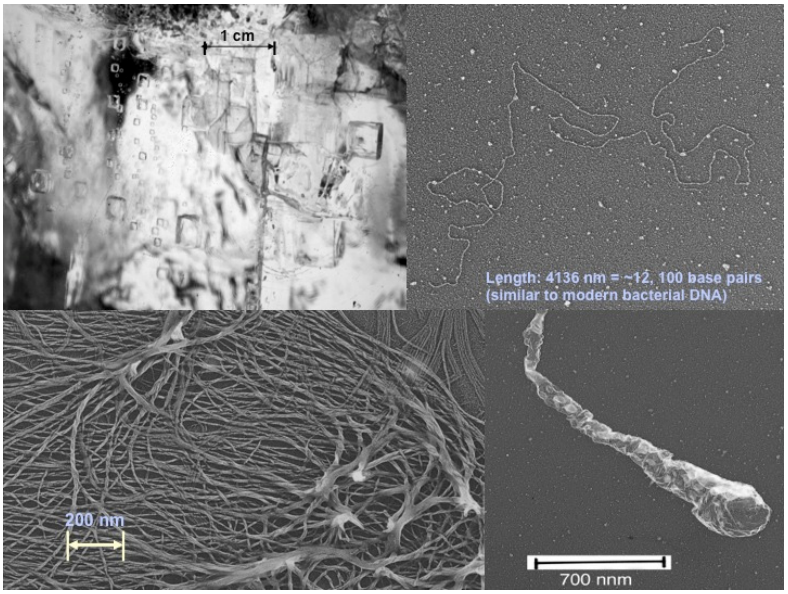



図 2.6-7　WIPP の SALADO FORMATION で沈殿した岩塩に結晶学的に閉じ込められた 2 億 5,000 万年前の二畳紀海水流体含有物に関する電子顕微鏡写真。上部右から時計回りに、古代好塩性細菌の DNA（12,000 塩基対)、閉じ込められた旧細胞壁からの小鈍鋸歯状細菌殻及びセルロース誘導体

地下研究所にとっての第五の着目点は、生態系に対する低線量被ばくの影響である。WIPP での試験には、二つの異なった細菌を使用することが含まれる。この細菌のうちの一方は、放射線感受性が非常に高いものであり、他方は放射線に対して強い耐性を示すものである。この試験目的は、非常に低いバックグラウンド被ばくの影響を評価し、低量バックグラウンド放射線の影響を判断することである。地下の細菌は、何百世代にも亘って、被ばく量はほぼゼロであり、これを地下の処分領域の高放射線環境で維持される同等の細菌、通常のバックグラウンド線量率のもとで保持され、個体数を制御した第三の細菌と対比するのである。低線量の環境は、第二次世界大戦前に作られた鋼鉄製貯蔵庫内での培養によってサポートされており、この貯蔵庫は非常に低い放射性核種含有量を備えている。

2.6.6 回収可能性に関する研究開発動向

ユッカマウンテン処分場に適用される連邦規制（10 CFR Part 63）の策定において、原子力規制委員会（NRC）は、サブシステムの諸要件を、適切な実績評価手法（66 FR55737）へのその現代的な理解と一致した、より柔軟なリスク情報に基づく・パフォーマンスに基づくの諸要件に差し替えた。NRC によれば、この手法では、「DOE が、多重バリア及び多重防護への信頼性、回収への選択肢の維持、性能確認プログラムの実施、意思決定における透明性、及び厳格な品質保証の適用を明示することが必要となっている。」とされている（Kozak & Sowder, 2010）[15]。このような概念は、10 CFR 63.111(e)で、処分場の実績目標としての回収可能性を指定するのに使用された。したがって、可逆性と回収可能性の必要性が、ユッカマウンテン処分場の規制での規制要件に組み込まれている。

こうした要件に対処するためのユッカマウンテン処分場の概念[16]では、地下施設において廃棄物定置の開始後 50 年間までの任意の時点で開始される定置廃棄物のいずれかまたはすべてを回収するという選択肢を保持するように処分場を設計することであった。処分場での支保工、換気、移送レール、及びその他の補助系統は、落石の発生または予想外の異常事象により回収が阻害されないよう、廃棄物の定置開始後 100 年間までの間、効果を持続させるように設計された。

ユッカマウンテン処分場の概念[16]は、廃棄物を回収するための 2 つの仮定に基づく状況について検討を行った。第一の形態では、廃棄物の資源価値を回復させるか、別の方法で処分に取りかかるよう政策決定を行うことができるものである。第 2 の状況では、性能確認プログラムにより、天然バリアや人工バリアの閉鎖の実施後に、処分の後の規制遵守が達成されない場合があるものと判定される可能性に対応するものである。いずれの状況においても、地上の貯蔵施設への廃棄物の回収が、意思決定過程の成果となっている。ユッカマウンテン処分場の概念[16]は、明確に、回収開始時の操業条件は正常であるものと想定しており、したがって、廃棄物輸送物を漏出させるなどの諸問題は、その検討の中では考慮されていなかった。

ユッカマウンテン処分場の概念[16]は、操業の検討の中で回収可能性に関連した技術的な問題に対処したが、廃棄物回収のための具体的な工学的設計を提供したものではなかった。また、ユッカマウンテンにおいて廃棄物定置工程で実施される活動が含まれているようにするための回収工程について検討したが、順序が逆であった。回収工程では、機器の動作に適したレベルまで廃棄体定置坑道用の空気温度を低下させるために十分な容量の周

囲空気で廃棄体定置坑道の冷却が開始されると想定される。次に、廃棄体定置装置により、廃棄物輸送物・廃棄体定置搭載台（パレット）が回収されると考えられる。次に、この装置により、一層の処分のために、それぞれの回収した廃棄物の輸送物を、地上施設または代替中間準備場所に移動させることが想定される。

2.6.7 研究開発計画に対するレビュー

2009 年以降、ユッカマウンテンに係る研究開発計画は止まっている状況である。ユッカマウンテン及び WIPP における調査研究は地層処分研究にとどまらない状況ではあるが、地層処分以外の代替処分概念の研究にも力点が置かれている。

2.6.8 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向

2.6.8.1 2009 年以前の米国地質調査所による地層処分研究開発動向

米国地質調査所（USGS）は、ユッカマウンテン計画に対する主要な組織的貢献者であった。米国地質調査所は、規制実績評価に寄与し、さらに、何年間にもわたる多様な水理学的テーマに関して調査を行った。

Marshall ら[17]は、ユッカマウンテン地域での不飽和帯からの間隙水及びガス、宙水、飽和水に関する地球化学的及び同位体的な特性について包括的なデータベースを開発した。このデータベース開発は、ユッカマウンテン計画の様々なニーズによって、特にプロセスモデル化及び性能評価を含むプロジェクトの特徴によって推進された。このデータベースは、ユッカマウンテンの水理学的システムに関する概念的フロー及び移行モデルの開発及び検証で利用され、自然環境の追跡データをプロセスに組み込む事が含まれていた。化学的及び同位体のデータは、主要な水理学的パラメータに関する範囲を設定するために、また、モデル仮説に関する証拠を提供するために利用された。こうしたデータが取組んだ具体的問題の例としては、ネット流束における空間的及び時間的な可変性、流路コントロールにおける断層の役割、亀裂及び岩石基質部（マトリックス）間の相互作用、宙水の年代及び起源、水流動時間の分配などが含まれている。

2.6.8.2 2009 年以前の大学による地層処分研究開発動向

多数の大学が、少額助成金付きプロジェクトという形で、ユッカマウンテンでの調査に参加した。しかし、ユッカマウンテンに最も近い主要大学であるネバダ州立大学ラスベガ

ス校は DOE によって選抜された結果、共同契約の一部として多額の助成金を受取った。2004 年から 2008 年にかけて助成されたプロジェクトは、以下の通りである。（2014 年 1 月に入手したデータによる、http://hrc.nevada.edu/data/Co-op/tasks.htm）

- ユッカマウンテン地域に関する測地モデル化
- ユッカマウンテン処分場領域における核実験から由来する Cl-36（$^{36}$Cl）
- 処分候補地近郊で選定された掘削孔での地下水レベル測定
- 地震モニタリング
- 降水計監視ネットワーク
- ベースライン・レーザー歪みゲージ
- ユッカマウンテン技術情報センターに対する文書提供
- ユッカマウンテン調査を支援する化学的分析
- アルコーブ 8/ニッチ 3 の追跡調査に関する化学的分析
- ユッカマウンテン気象技術支援代表部
- トポパ・スプリング凝灰岩の力学的特性に対するリソフィーゼ（岩泡）の幾何学及び配列の影響
- Alloy 22 の腐食特性に対する環境的影響
- Alloy 22 ベースの金属及び溶接物における位相安定性及び偏折
- ユッカマウンテンの不飽和帯における放射性核種移行の地球統計学的及び確率論的研究
- ユッカマウンテン飽和帯での C-14（$^{14}$C）プロジェクト
- ユッカマウンテン北部の険しい動水勾配に関する地下水の流れ及び熱的モデル
- ユッカマウンテン処分施設向けロックボルトシステム、有孔 SS シート、鋼鉄セットに関する地下腐食調査
- 地震ハザードに対する不安定な岩石手法
- ユッカマウンテン凝灰岩に関する長期的な力学的挙動とその可変性
- 極限地震動調査

2.6.8.3 カールスバッド環境モニタリング・研究センターによる地層処分研究開発動向

カールスバッド環境モニタリング・研究センター（CEMRC）の目的は、WIPP の近郊に独立した環境に関する研究及びモニタリングを設置・維持することであり、さらに、あらゆる利害関係者がその成果を容易に利用できるようにすることである。このプロジェクトは、WIPP での処分が開始される前の段階で導入が開始され、その運用（処分）段階でも引き続き実施されている。WIPP 環境モニタリングプロジェクト（WIPP-EM）は、エネルギー省（DOE）の直接の監督を受けないで形で組織され、実行されている。本プロジェクトでは、WIPP に適用可能な適合性の実証要件を満たすためのデータに関して、規制機関に対しては何も提供されない。WIPP-EM に関する解析結果及び解説は、一般市民、

特に環境科学界に対して情報を提供するために、CEMRC によって公表される。

DOE は最近、CEMRC 及び環境保護庁（EPA）間での協力計画を作成した。連邦分析管理計画（NAMP）と呼ばれるこの計画によって、参加する DOE の解析研究所及び EPA 緊急対応研究所ネットワーク（ERLN）に加盟する研究所との間で資金調達及び研究交換が簡素化されると考えられる。ERLN は、環境応答及び重大な国家的事件の際に、化学的かつ放射線学的な脅威、限定的な生物学的脅威に対処するための全国的な研究所間ネットワークである。

2.6.9 参考文献


[1] Rechard, R.P., B. Goldstein, L. H. Brush, J. A. Blink, M. Sutton, and F.V. Perry. 2011. Basis for Identification of Disposal Options for Research and Development for Spent Nuclear Fuel and High-Level Waste. DOE Report FCRD-USED-2011-000071, March 2011.

[2] U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, “Yucca Mountain Science and Engineering Report, Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration”, DOE/RW-0539-1, February 2002

[3] U.S. Department of Energy, “Draft Environmental Impact Statement for the Disposal of Greater-Than-Class C (GTCC) Low-Level Radioactive Waste and GTCC-Like Waste”, DOE/EIS-0375-D, February 2011

[4] Woods, A.W, S. Sparks, O. Bokhove, A. LeJeune, C. Connor, and B. Hill (2002). Modeling magma-drift interaction at the proposed high-level radioactive waste repository at Yucca Mountain, Nevada, USA. Geophysical Research Letters 13.

[5] ICRP2004

[6] EPRI (2003). Igneous event scenario – progress report for 2003, EPRI report 1007898, Electric Power Research Institute, Palo Alto CA.

[7] Apted, M., M. Morrissey, M. Bursik, F. King, M.W. Kozak, and J. Kessler, 2005. Potential Igneous Processes Relevant to the Yucca Mountain Repository: Intrusive-Release Scenario. No. 1011165. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

[8] Kozak, M.W., and J. Kessler, 2004. “Potential Igneous Processes Relevant to the Yucca Mountain Repository: Extrusive-Release Scenario Analysis and Implications.” EPRI Technical Report 1008169. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

[9] Kozak, M.W., M. Morrisey, F. King, M. J. Apted, and J. H. Kessler, 2005. “Consequences Of A Potential Igneous Disruption Of A High-Level Nuclear Waste Repository At Yucca Mountain, USA.” Proc. Intl. Conf. on the Safety of Radioactive Waste Disposal, Tokyo, Japan.

[10] Morrissey, M.M, and M. W. Kozak, 2006. “Conceptual Models of Possible Igneous Consequences at Yucca Mountain Repository.” Proc. International High-Level

Waste Management Conference. Las Vegas, NV.
[11] SCEPW (2006). Yucca Mountain, the Most studied Real Estate on the Planet. Report to the Chairman, Senator James M. Inhofe U.S. Senate Committee on Environment and Public Works, Majority Staff March 2006.
[12] Matthews, M.L. (1997). The WIPP Pre-Disposal Phase Experimental Program. MRS Proceedings Volume 465 1996, Materials Research Society 1997.
[13] Cambell
[14] 連邦官報第 78 巻 No.232.
[15] Kozak, M.W., and A. Sowder, 2010. EPRI Review of Geologic Disposal for Used Fuel and High Level Radioactive Waste, Volume II—U.S. Regulations for Geologic Disposal. EPRI Report 1021384. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
[16] USDOE. 2008. Construction License Application for a Geological Repository at Yucca Mountain, Nye County, Nevada. US Department of Energy.
[17] Marshall, B.D., R.J. Moscati, and G.L. Patterson 2012. Fluid geochemistry of Yucca Mountain and vicinity. in Hydrology and Geochemistry of Yucca Mountain and Vicinity, Southern Nevada. J.S. Stuckless, ed. Geological Society of America Memoir 209.

## 2.7 英国

英国における処分事業の現状概要、処分システムの概要、研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、地下研究施設における研究開発動向、回収可能性に関する研究開発動向、研究開発計画に対するレビュー、大学・研究機関等による地層処分研究開発動向を調査・整理した。

### 2.7.1 処分事業の現状概要

英国政府は、2001 年より高レベル放射性廃棄物等の管理方針について検討を開始し、2006 年に高レベル放射性廃棄物等の管理方針として、地層処分することを決定した。2008 年に英国政府は、地層処分施設のサイト選定プロセス方針が記載された白書「放射性廃棄物の安全な管理－地層処分実施の枠組み」を公表し、公募によるサイト選定を開始した。2009 年 2 月までに、カンブリア州、カンブリア州アラデール市及びコープランド市（以下、カンブリア州西部）がサイト選定プロセスに関心表明を行っていたが、カンブリア州西部の地質学的な適性に対する懸念やサイト選定プロセスからの撤退権が法律で担保されていないなどの理由から、2013 年 1 月にカンブリア州西部はサイト選定プロセスから撤退した。

英国政府は 2013 年 5 月に、今までのサイト選定プロセスに関する経験から教訓を見出すために、今まで地層処分施設のサイト選定プロセスに参画した者、関心を持って観察してきた者を対象として、「根拠に基づく情報提供の照会」を実施した。英国政府は 2013 年 9 月に、「根拠に基づく情報提供の照会」で得た情報を踏まえた、地層処分施設のサイト選定プロセスの改善に向けた協議文書「地層処分施設のためのサイト選定プロセスのレビュー」を公表した。この協議文書では、地層処分の政策に関する背景情報、現行のサイト選定プロセスからの変更点の説明、英国政府が提案するサイト選定プロセスの改善案を示すとともに、改善案に関する具体的な質問を提示し、公衆からの見解を求めた。英国では 2014 年に、公衆からの意見を踏まえて改善されるサイト選定プロセスによりサイト選定を開始する予定である。

### 2.7.2 処分システムの概要

英国における地層処分事業の実施主体は、原子力廃止措置機関（NDA）とその内部組織である放射性廃棄物管理局（RWMD：今後独立し、地層処分の実施主体となる予定）であ

る。英国では地層処分場のサイトが決まっていないため、NDA は代表的な 3 種類の地質環境を想定して、処分システムが検討されている（表 2.7-1 参照)。地層処分場の処分概念としては、いずれも地層処分場の設置深度を 200m～1,000m とし、多重バリアシステムを想定している（図 2.7-1 参照)。結晶質岩の場合には深度 650m で処分キャニスタを縦置き、堆積岩の場合には深度 500m で横置き、岩塩層の場合には深度 650m で横置きとしており、様々な技術オプションを検討している段階である。

表 2.7-1　地層処分概念の例（NDA/RWMD/021）

| 母岩 | 例示のために挙げられた地層処分概念 | |
|---|---|---|
| | ILW/LLW | HLW/SF |
| 比較的高強度の岩石 | 英国の ILW/LLW 概念<br>（英国、NDA） | KBS-3V 概念<br>（スウェーデン、SKB 社） |
| 比較的低強度の堆積岩 | オパリナスクレイ処分概念<br>（スイス、NAGRA） | オパリナスクレイ処分概念<br>（スイス、NAGRA） |
| 蒸発残留岩 | WIPP 層状岩塩処分概念<br>（米国、DOE） | ゴアレーベン岩塩ドーム処分概念<br>（ドイツ、DBE テクノロジー社） |

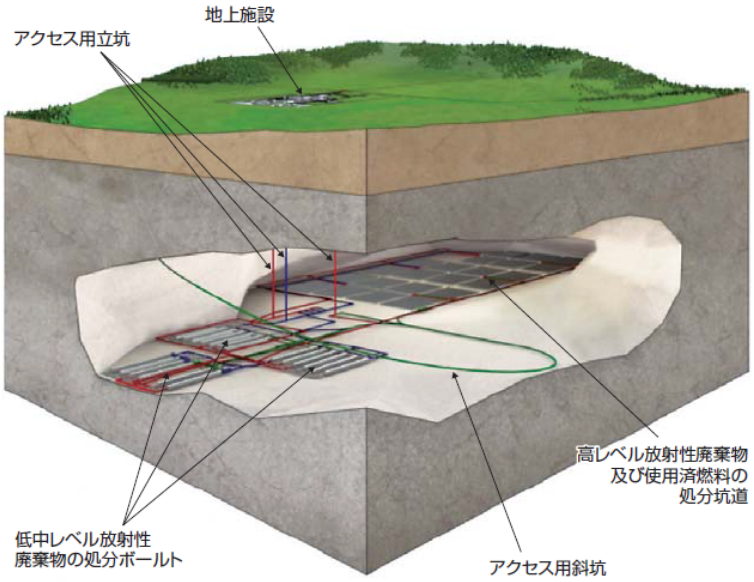



図 2.7-1　地層処分場の処分概念（NDA/RWMD/054）

2.7.3 研究開発（R&D）プログラムの概要

具体的な地層処分場のサイトは未だ特定されていないため、R&D プログラムは全て、包括的なものに留まっている。この状況を考慮すると、処分施設向けに利用可能な地質的環境は、上記プロセスに関わる地域社会との議論を通じて特定される立地場所に左右されるだろう。したがって、計画の初期段階において、NDA は様々な地層環境を検討したが、これには、地層処分施設の母岩を覆う岩石に関する様々な変化も含まれた[3]。

一連のステータスレポートでは、操業時及び閉鎖後のセーフティケースにおいて示された安全の議論を支援するような科学的証拠に関する RWMD の見解が示されており、そこでは、英国及び海外で実施された 20 年以上に及ぶ研究成果が利用されている。地層処分に対する信頼は、現在かなり確立されている[4]が、大幅な研究開発がまだ今後何年にも渡って必要とされている[5]。よって、ステータスレポートの別の重要な役割は、将来の R&D 計画を確立する為に、科学的証拠のベースとなるギャップないし「情報ニーズ」を同定することである。こうしたステータスレポートで確認された情報ニーズは、地層処分の準備段階に関する R&D 計画を解説する文書にまとめられた[6]。この R&D 計画の文書は、「生きた」文書として見なされており、完成した R&D から得られた新たな知見を考慮するために、定期的に更新されている[5]。

RWMD は、独自の R&D を実施していないが、関連分野での専門家を備える組織に対して R&D 業務を委託している。RWMD は、こうした作業の実施能力を備える研究組織を特定する責任があるため、委託した R&D に関して「知的な依頼主」の役割も担う。よって、RWMD 職員は、適切な R&D を特定して、資金援助できるだけの十分な理解力を備える必要があり、さらに R&D の成果が全体の計画に対して及ぼす意義も理解できなければならない。R&D 業務実行の手順は、RWMD の R&D 戦略に解説されており[7]、これは図 2.7-2 でも示されている。

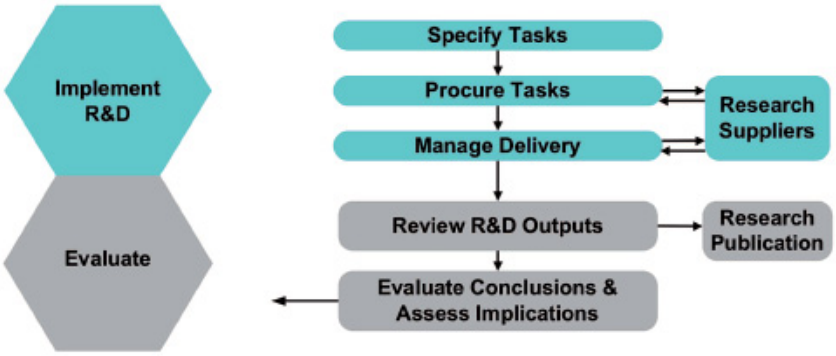



図 2.7-2　RWMD に対する R&D 受け渡しのステップ

このプロセスを通して実施された R&D が高品質であるよう確保するために、実施プロセスにいくつかの段階が組み込まれている。適切な資格を備えた潜在的なサプライヤーは、競争入札を通じて指名されるが、この目的は、R&D を実行するチームが適切な能力と経験を有し、必要な研究所及び解析施設にアクセスできる事を確認するためである。R&D に関する包括契約（「Lots」）は、専門技術コンサルタントに率いられるいくつかのコンソーシアムに与えられる。こうしたコンソーシアムは全て、下請け契約を通じて自由に追加の専門家を採用する事ができる。こうした下請け契約は、包括契約の継続期間中、維持する事もできるし、あるいは、具体的な任務実行において専門家の支援が必要な際にも利用される。したがって、個々の任務の質を確保するために、包括契約を得たコンソーシアムには、具体的な R&D に関して個々の任務の定義及び目的が与えられ、任務仕様書に定められた目的に相応しい作業計画案を提出する事が期待される。研究者は、革新と価値をもたらす請負業者の能力を最大化するために、独自のアプローチ及び提出書類の書式に提案を行うことができる。この提案は、入札審査委員会によって評価されるが、この委員会は、契約の技術仕様で定義された具体的基準に基づいて入札者を評価し、受注契約者を選択するこの評価基準には、提案の質及び当該 R&D チームの技術及び経験に関する検討が含まれる。

このように、R&D プロジェクトに用いられる審査プロセスは、広範な科学的コミュニティーにおいて良い実践例として受入れられて来た審査プロセスと概ね一致している。管理の質及び「知的な依頼主」という資格を実証するため、RWMD は、研究リーダーが関連する学問領域で博士号を持ち、その学問分野での専門的能力開発プログラムに引き続き

関与する事を要求している。

R&D 計画は、適切な規制機関による自主的規制に対象である[5]とされている。そこで、初期段階で重要な問題を議論する手段として、R&D 計画文書の初期草案[7]に関しては、規制機関と共に議論されたのである。したがって、計画の重要な節目においては、英国王立協会もしくは原子力機関（NEA）のような国内的ないし国際的な名声を備えた団体によって、計画全体について独立した審査が行われなければならない。

高レベル放射性廃棄物等（HAW）の長期的管理に関する R&D 研究は、以下の機関によって助成されている。

- ✓ NDA：大部分の英国民間原子力サイトの閉鎖に関して戦略的責任を有し、地層処分実施に関しては具体的責任を持つ
- ✓ 原子力サイトの許可取得者：NDA のサイト許可会社である（EDF 及び Centrica によって所有される）EDF エナジー社及び国防省の請負業者（例えば、核兵器製造保管施設）を含む。
- ✓ 原子力産業の規制機関：HSE、環境庁（EA）、そしてスコットランド環境保護庁（SEPA）、
- ✓ 研究評議会

研究のほとんど全ては、直接ないし間接的に公的助成を受けているが、EDF エナジー社によって助成されるものは例外であり、電力消費者によって助成されている事になる。放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）[8]の推定によれば、HAW 長期管理の R&D に対する英国の年間資金援助額は、現在ほぼ 3,000 万ポンドである。この額の 80%以上が、NDA 及びサイト許可会社に支払われる。研究評議会の支出は、毎年約 225 万ポンドであり、これは主に工学・物理研究評議会（EPSRC）によって支払われている。

研究を実施する組織には、以下のものが含まれる。

- ✓ 大学（研究評議会及び NDA との契約、サイト免許保有者、そして規制機関からの助成）
- ✓ 国立原子力研究所（NNL）：この政府系組織は、請負業者が運営している。
    - ✓ 研究所：例えば、British Geological Survey（BGS）
    - ✓ 原子力サイト許可取得者
    - ✓ NDA のコンサルタント及び請負業者、原子力サイトの許可取得者、規制機関

地層処分に関する研究は、NDA の RWMD によって助成されている。上述したように、R&D のニーズが特定され、個々の専門家及びコンソーシアムに対して出された包括的契約を通して資金援助される。概して、コンソーシアムには、巨大エンジニアリング企業、

小規模のコンサルタント会社、そして大学の研究センターが含まれるが、これらは必ずしも英国に拠点がなくても構わない。個々のケースでの正確な構成は、実施されるべき具体的な任務に左右される。大規模なエンジニアリング企業の例としては、Amec 社、Babcok 社、Jacobs Engineering 社があり、小規模なコンサルタント会社としては、INTERA 社、Quintessa 社、Galson Sciences 社、そして Serco 社などが含まれる。一例として、統合的廃棄物管理と題された Lot（包括契約）は、最近大規模なコンソーシアムに対して与えられたが、これは、Amec 社（主）、Babcock 社、International Group 社、Hyder Consulting 社、UK Ltd. NNL、そして NSG Environmental Ltd.社に率いられた 5 つのコンソーシアムによって構成されていた。これら 5 つのコンソーシアムのそれぞれは、少なくとも 5 つの個別企業を含んでいた。

RWMD 及び NDA の R&D 研究に関与した主要な大学及び研究センターには、以下のものが含まれる。すなわち、

- マンチェスター大学、ダルトン原子力研究所：放射能廃棄物及び廃止措置研究センター、（マンチェスター大学及び NDA によって共同支援されている）英国北西部カンブリア州にあるダルトン研究施設
- ラフバラ大学：環境放射化学研究グループ
- ノッティンガム大学
- 英国北東部にあるウェストレイク研究技術パーク：欧州共同体地域開発基金から部分的に助成

RWMD は研究評議会エネルギープログラム（RCEP：Research Councils Energy Program）の後援を受けて、地層処分実施と関連する共同資金による重要な研究課題に関して、工学・物理研究評議会（EPSRC）と協力している。最初の段階では、学会及び産業界からの専門家による合同ワークショップが開かれ、広範な地層処分の分野に重点的に取組んだ。このワークショップによって、出席者は以下の機会を得た。

- 地層処分に関する問題を共同で調査すること
- 研究の領域を特定すること
- 提言の概要を作成して、「コンソーシアム」がそれと取組む事を可能にすること

このワークショップの結果、総額最大 400 万ポンドが与えられた。こうして、RWMD は、広範な科学的及び技術的基盤に基づいて地層処分に対する信頼を構築しようと目指している。国立環境研究評議会（NERC）との類似の共同イニシアチブによって、2012 年後半に提言を求めることになった。RWMD が具体的な作業に資金援助を行っているのに対し、放射性廃棄物処分に関連する科学・技術における共同奨学金（CASE）の場合、この分野での広範な科学的理解に対して資金援助及び支援を行うという点で異なっている。

最後に、上記の共同助成活動に加えて、RWMD は、学会の研究プロジェクトに対しても、度々「現物」支援（例えば、プロジェクトコンソーシアムの運営理事会に対して技術スタッフの派遣など）を行っている。図 2.7-3 では、英国の地層処分計画の支援に利用される科学的・技術的要素の階層に関する概要が示されている。

広範な科学的基盤の強化に加えて、全体的な R&D 計画は、派生的ではあるが重要な役割を持っている。上述した学術機関との共同イニシアチブは、地層処分のスキルベースを発展させる上で重要な役割を果たしている。既存のスキルとリソースは、地層処分計画の現在の準備段階にとって適切であると見なされているが、NDA は、詳細なサイトに基づいた作業が開始される段階にまで同計画が到達すれば、リソースに関する要件は著しく増加する事を認識している。

RWMD は、放射性廃棄物処分の分野において、多数の国際的イニシアチブに貢献しており、数多くの欧州委員会及び他の共同プロジェクトに姉妹団体と共に参画している。また、RWMD は国際地層処分技術プラットフォーム（IGD-TP）の専務理事であり[9]、原子力機関（NEA）及び国際原子力機関（IAEA）が組織する多くの活動にも積極的に参加している。

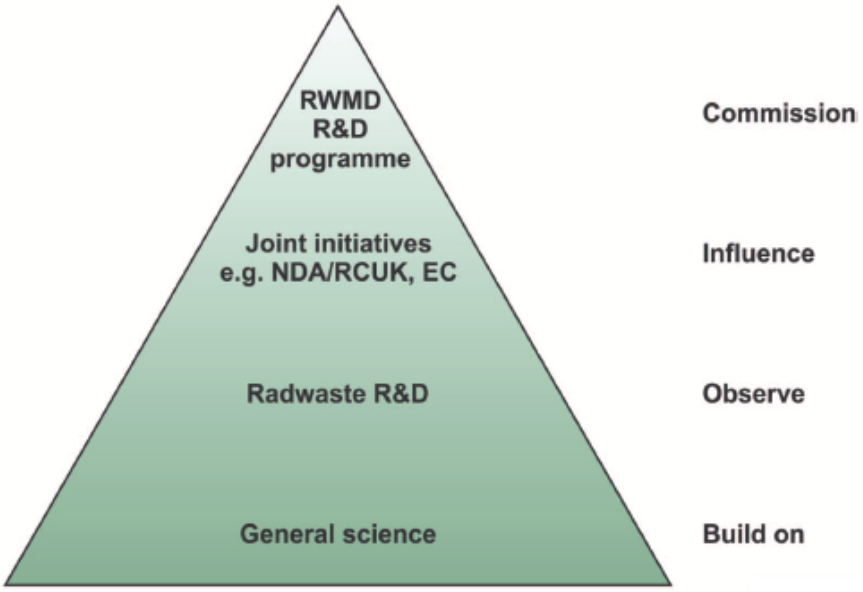



図 2.7-3　英国における地層処分に関する科学的基盤[4]

他の諸国と比較して、英国では、大量の放射性物質を扱う研究施設の数は限定的である。重要な施設は、NNL が運用する施設である。CoRWM[8]で示されているように、英国における HAW 長期管理に関わる R&D との関連で、こうした施設をさらに発展させる事が必要であり、特にこうした施設に対する大学研究者の利用可能性を改善することが不可欠である。

**規制機関によって助成される R&D**

上述したように規制機関に代わって実施される R&D も存在するが、これらは、概してレビュー研究の形式を採り、審査されるべきテーマによって、個人の専門家ないし小規模のコンサルタント会社によって実行される。例えば、HSE の一機関である原子力規制局（ONR）は、英国の様々な原子力サイトでの安全及び保安に責任を持っている。現在、ONR は、原子力サイトでの HAW 管理に関する指針を提供しており、規制機関が一般的な放射性廃棄物管理の事例で要求する一連の技術指針文書を公開している。

HAW 処分に関して、ONR は処分要件に関しては直接の役割を持っていないが、処分される前に廃棄物がどのように貯蔵されるかに関して役割を有している。そのため、例えば、ONR は、処分に先立って、具体的に処分条件と放射性廃棄物管理との間の相互作用を考慮しながら、SEPA と協力して HAW 管理に関する共同指針を作成した。

ONR 及び EA は、RWMD との合意条件及び RWMD の要請に基づき、処分システムセーフティケース（DSSC）について見直しを行った。この見直しでは、ONR からの輸送及び原子力安全に関する専門家の意見と EA からの放射性廃棄物処分に関する専門家の意見とがまとめられた[10]。

この合同の見直しの目的は、個々の規制機関が情報を共有し、地層処分施設設立に関する将来的なセーフティケースを脅かすような根本的問題が存在するかどうかを確認する事であった。この見直しの結論の一つは、一般的にそういう問題は存在しないというものだった[10]。

規制機関はまた、RWMD の R&D 計画に関して規制側の立場から見て、RWMD の将来の R&D 計画を適切にカバーしているかどうかを検討した。EA はまた、将来の地層処分施設の環境性能に関わるテーマに関して RWMD が実施した R&D の技術的審査も行っている。例えば、以下のものが含まれる。

- ✓ 地層処分施設からのガス生成及びガス放出に関連する問題の検討[11]
- ✓ 異なる地質環境における深地層処分場の技術的問題に関する全般的見直し、そして高レベル放射性廃棄物（HLW）及び使用済燃料向け処分場の EBS（人口バリアシステム）の性能管理について理解[12]

地層処分施設のサイト候補を特徴付ける地球物理学的調査を利用するという RWMD の提案を検討する事。EA は、地球物理学的調査はサイト候補地を理解するために最適化されるべきであり、データ管理システム及び解釈ソフトウェアは、サイト特性評価が始まる前に開発・試験されるべきであると指摘した。EA はまた、地球物理学的調査を伴う R&D は監視され、必要に応じて、サイト特性評価作業に組み込まれるべきであるという意見を述べた[13]。

### 2.7.4 研究開発課題とその概要

放射性廃棄物管理及び地層処分を支援する NDA の R&D プログラムについて概要が示されている [14]。このプログラムは、DSSC に関わる多数の主題要素を含んでおり、それぞれが独自の R&D 計画を持つ。

- ✓ 廃棄物形態とその発展：臨界及び格納容器の材質
- ✓ ニアフィールド：人工バリア

- ✓ ファーフィールド：地圏
- ✓ 生物圏及び微生物科学
- ✓ ガス
- ✓ 放射性核種の移行
- ✓ 国際的側面
- ✓ 一般的問題、である。

多数の個別研究プロジェクトから構成される上記の計画に関して、それぞれ R&D が行われるが、通常は大学の研究機関もしくはコンサルタント会社によって実施される。

HAW 地層処分を支援する NDA の R&D 計画に関しては、重要な要素の概要が、上記に列挙したテーマに準拠しながら、以下に示されている。

一般的に、地層処分システムの各要素について深く理解する為に、R&D 研究で得られた多くの知識ないしデータが利用されるが、これには以下の機関によって実施されたプロジェクトも含まれる。

- ✓ 英国内外の学術機関によるもの
- ✓ 25 年の期間に渡って、Nirex（現在の NDA RWMD）によって、もしくは Nirex 向けに行われたもの
- ✓ NDA RWMD の設立以来、同機関によって、もしくは同機関向けに行われたもの
- ✓ 放射性廃棄物の地層処分を調査している他の機関によるもの、これには、海外の廃棄物管理機構によって行われた研究や欧州委員会（EC）を通じて部分的に助成された、もしくは IAEA ないし NEA によって取りまとめた共同研究も含まれる。

#### 2.7.4.1 廃棄物形態の発展や臨界

HAW 貯蔵で予想される広範囲の物質（I/LLW、HLW、使用済燃料、そして潜在的なウラン及びプルトニウムの廃棄物形態）を考慮すると、R&D にとっての着目点は、潜在的な臨界（例えば、[15]）及び長期耐久性に対応する廃棄物パッケージ設計である。廃棄物パッケージの特性は、輸送から中間貯蔵そして最終処分という廃棄物管理のあらゆる時期にとって重要である。RWMD は、廃棄物パッケージに関する様々な安全機能を確認したが、R&D の目指すべき重要な課題はこうした安全機能が何百年にも渡って達成されるのを確保する事である[16]。よって、調査研究では、パッケージの発展（特に、腐食）による発生するプロセスや耐久性を調査する事を目指しており、さらに中間貯蔵期間中の廃棄物パッケージの発展をモニタリングするために適切な技術開発をも目標としている[17]。

より一般的に言えば、採用された技術的アプローチでは、研究所での実験、モデル研究、モニタリングから得られた証拠、そして原子力及び他の関連産業（例えば、建設業）における実際的経験などが利用されており、さらに天然及び人工の類似物から得られた長期的証拠も使用されている。

図 2.7-4 では、廃棄物形態の展開に関する NDA の R&D 計画に関する骨組みが要約されている。

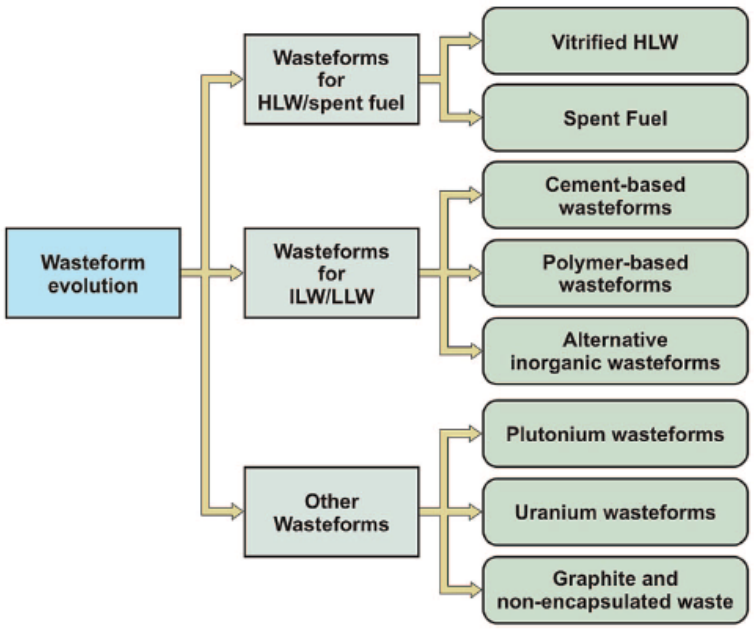



図 2.7-4　NDA RWMD の R&D 計画における廃棄物形態の展開の構造

2.7.4.2　ニアフィールド（EBS）

現在、英国地層処分計画において、三つの包括的な地質環境が検討されている。すなわち、高硬岩層、低硬堆積岩層、そして蒸発残留岩である。これら三つの地質環境は、個別的にも HLW、使用済燃料、そして L/ILW に関する独自の処分地域でもあるが、結果的に、粘土ベース、セメントベース、もしくは岩塩ベースの充填材ないし緩衝材の採用という国際的に開発された構想に基づく 6 つの実例的コンセプトを検討することになる[15][18]。

ニアフィールドの変遷に取組む NDA の R&D 計画には、安全機能に基づく 4 つの主要なサブトピックがある。すなわち、発熱プロセスに関する熱学的モデル化、EBS 再飽和及

び緩衝材ないし充填材の長期的変化プロセスに関する調査、間隙水変遷に関する研究、そしてシステムの相互作用に関する検討である。これらサブトピック間の関係を示す計画骨子は、図 2.7-5 に示されている[19]。

2.7.4.3 ファーフィールド（地圏）

地圏に関わる国際協力の具体的例には、(a) 結合モデルの実証及び実験に対するその検証（DECOVALEX）、(b) アルカリ水の粘土に及ぼす長期的影響の理解と弱アルカリ性の pH 範囲（約 pH10-11）への重点的取組み、そして (c) 実験室での研究を通じた普通ポルトランドセメント（OPC）及び低アルカリセメント石の相互作用を調査する長期的セメント研究プロジェクト[20]、スイスのグリムゼル試験サイトで行われた現場調査、（これらは共にモデル化の支援を伴ったもの）である。

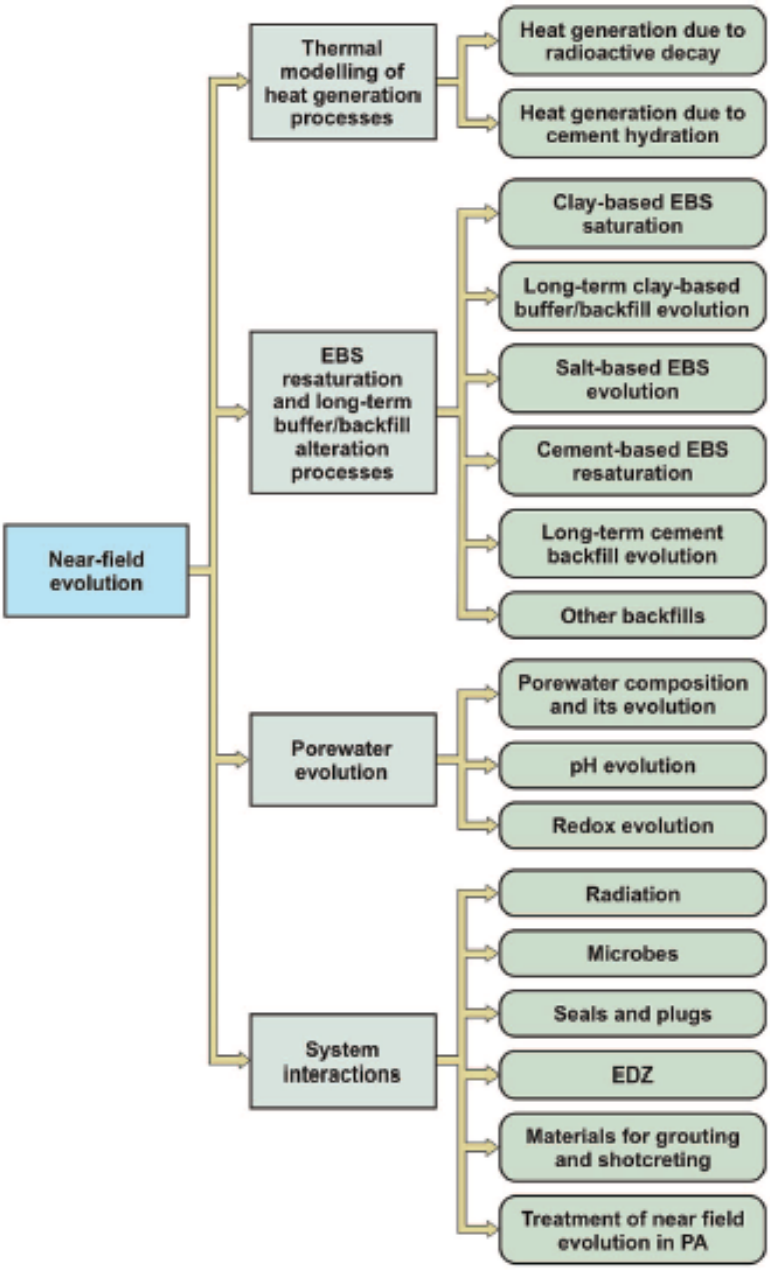



図 2.7-5　NDA RWMD のニアフィールド展開に関する研究計画の構造

現在の準備研究段階における NDA RWMD の地圏に関する R&D 計画では、将来の作業計画が二つのサブトピックに分けられた。すなわち、地圏の自然変遷及び地層処分施設と地圏の相互作用である。各サブトピックは、さらに図 2.7-6 で示される多数の作業領域に分割することが可能である[21]。

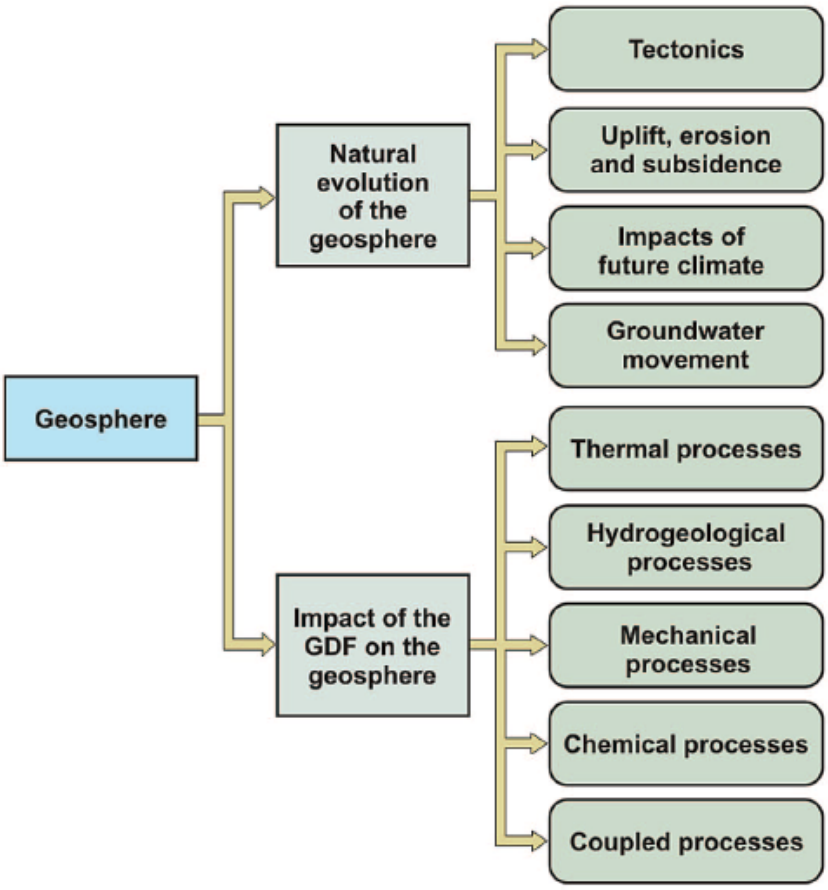



図 2.7-6　地圏に関する NDA RWMD の R&D サブプログラム構造

2.7.4.4　生物圏

閉鎖後の安全評価に関わる何十万年という長い時間的尺度を考慮すれば、NDA 及び RWMD の生物圏に関する R&D プログラムには、気候変動及び地形変化に関わる問題検討が含まれる。同プログラムでは、国際的に承認された方法論である BIOMASS（生物圏モデル化及び評価）[22]を使用して、こうした評価で使用される進化する生物圏システムの定義が導かれた。

BIOMASS に加え、NDA 及び RWMD が国際的に参加したものには、EU 助成が終了済の BIOCLIM プロジェクト[23]及び現在進行中の BIOPROTA 共同プロジェクトなどが含まれる[24]。

図 2.7-7 に示された生物圏に関する NDA RWMD の現行 R&D 計画の骨子は、知識のギャップの同定に対処する事を目的としている。特に留意すべきは、放射性炭素（C-14）の

挙動研究、現在行われている実験室での標識 C-14 ガスの挙動研究、土壌帯の代謝作用を重視した土壌表層からの放出と植物による摂取などである。モデル化に関する現実的なパラメータ値は、適切な現場条件のもとで得られるはずである事を考慮して、C-14 の非放射性代替物としての C-13 を使用した実験が現在行われている。

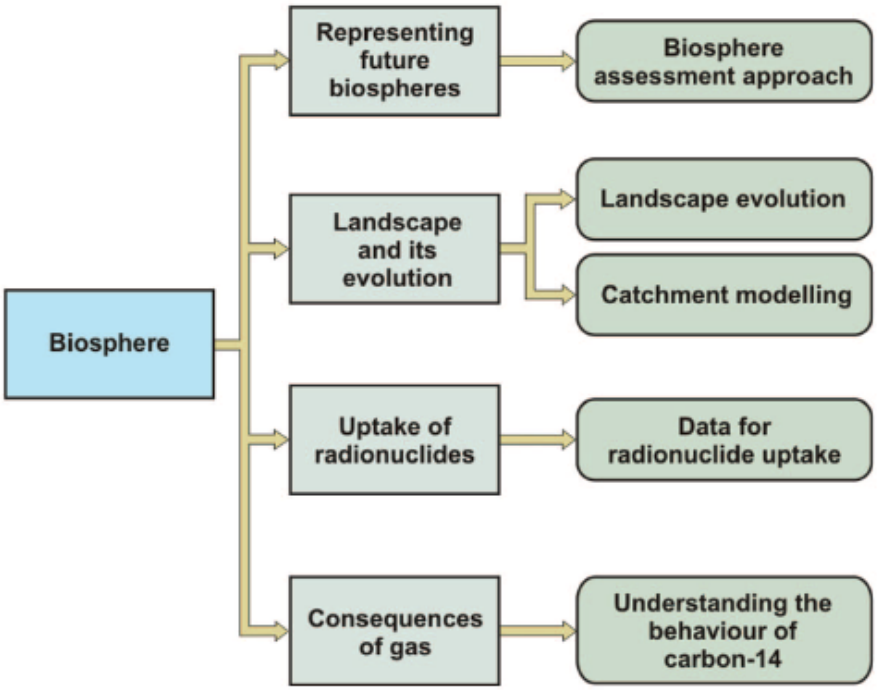



図 2.7-7　地圏を含む NDA RWMD の R&D 計画の構造[25]

2.7.4.5 ガス

ガスは、中間貯蔵及び地層処分施設で発生する。検討されるべき重要な二つのガス問題は、以下の通りである[26]。

- ✓ EBS 及び母岩層に関して、回復不可能な損傷が発生する可能性がある値以下にシステム圧力を抑える必要性
- ✓ 生物圏に対するガス流束（特に、気体の放射性核種）が受入れ難いリスクをもたらさないよう確認する必要性

こうした問題の相対的重要性は、実際の地質及び地層処分構想に左右されるので、潜在的サイトが利用可能になった場合に、詳しく取組むことになる。図 2.7-8 では、R&D のガス関連プログラムでのテーマ骨子が示されている[26]。ガス発生に取組むこうした研究

課題の具体例として、ILW 中の照射物質に関わる最大の C-14 インベントリを提供するものに関して、照射黒鉛が知られている。C-14 が遊離ガスとして生物圏に到達する可能性は、特に生成速度及び放出される形態に左右される。現在まで、処分条件のもとで照射黒鉛から揮発性 C-14 が放出される事に関しては、限られた実験データしか得られていない[27][28]。よって、当面の間、作業計画では、Magnox 炉からの照射黒鉛による C-14 放出を調査しているが、その際、パッケージ化そして処理中に起こり得る条件を反映し、放出されたガス状の C-14 種形成に及ぼす影響を理解するような広範な実験条件に基づいて実施されている。

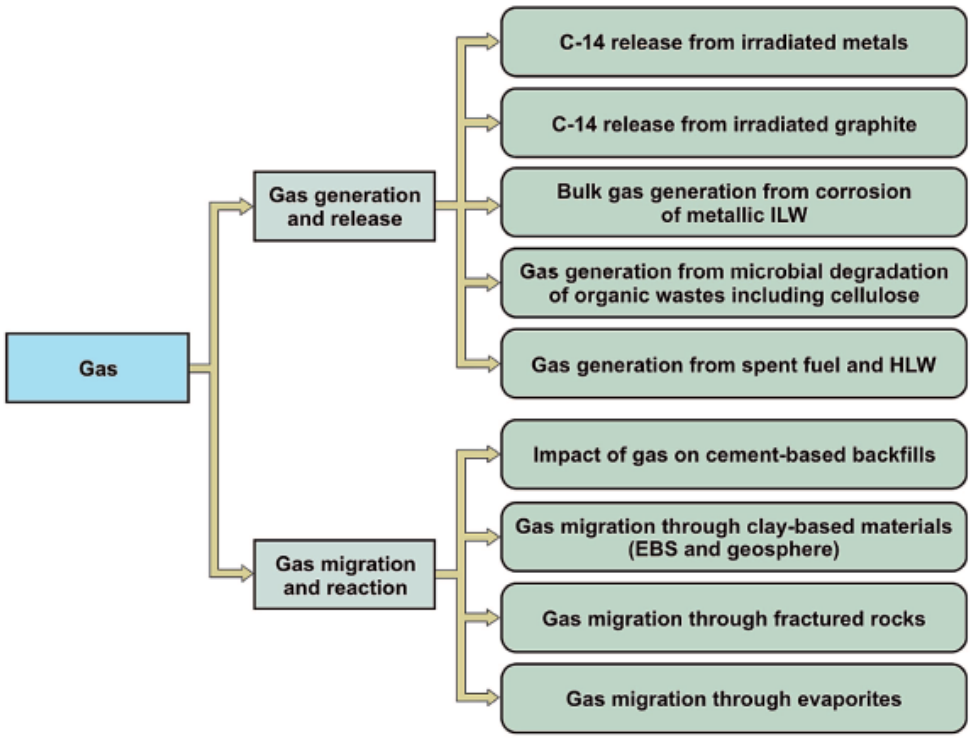



図 2.7-8　ガスに関する NDA RWMD の R&D 計画の構造[26]

2.7.4.6　放射性核種の移行

他の R&D サブプログラムと合わせるように、NDA RWMD によって、もしくは同機関向けに行われている研究は、包括的なものである。地層処分施設（GDF）計画に関する現在の予備研究段階での放射性核種挙動に関わる R&D の具体的目的は、以下の通りである。

✓　地層処分施設の様々なバリアにおいて放射性核種の挙動を管理するプロセスを理

解する事

- ✓ 安全評価において使用する英国独自のデータを提供する事、である。

図 2.7-9 では、上記の目的を達成するための R&D サブプログラムの構造が示されている[29]。

ベントナイト系緩衝材における放射性核種の挙動は、過去には英国の計画では重要な部分を占めて来なかったが、RWMD は、海外の放射性廃棄物計画の一部として実施された大規模な計画を考慮した[30][31]。

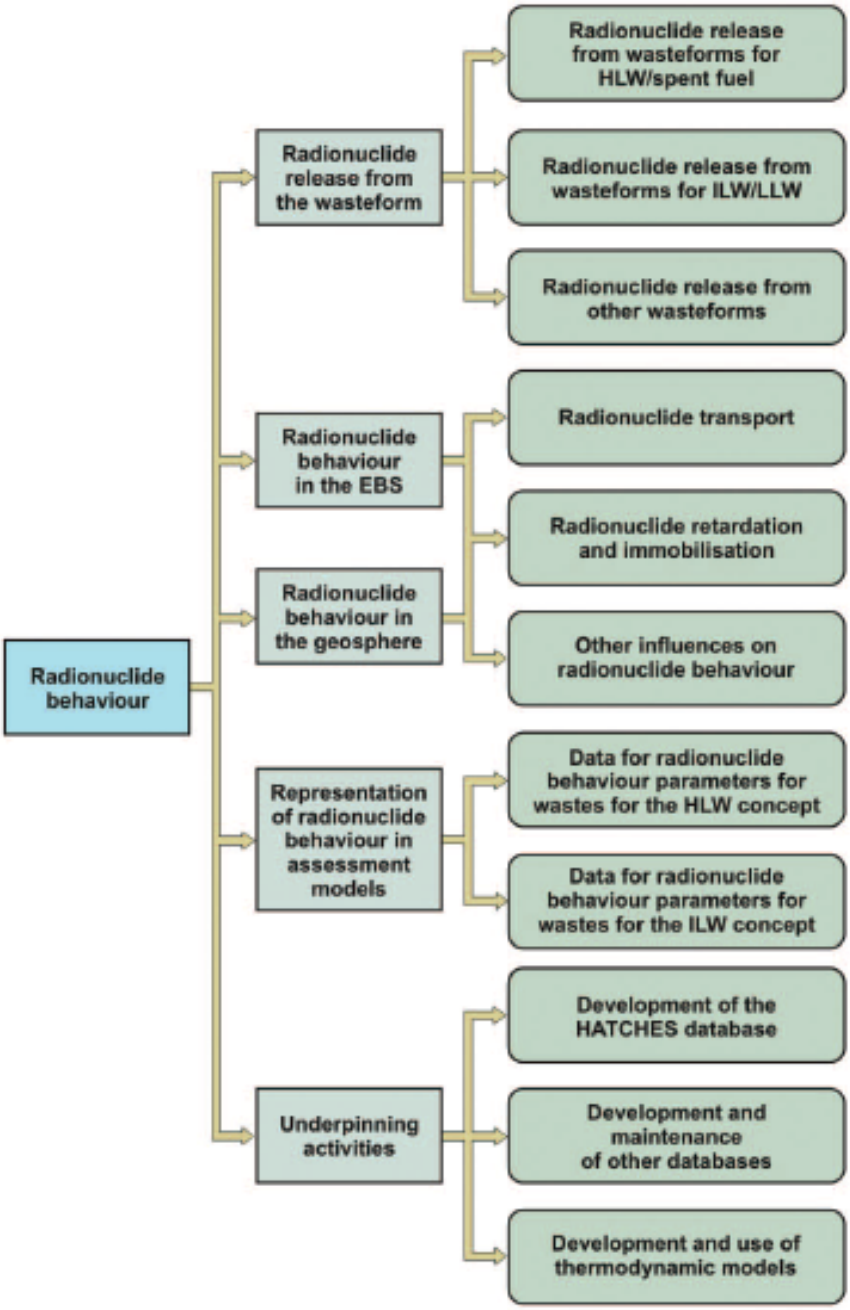



図 2.7-9　放射性核種の挙動に関する NDA RWMD の R&D 計画の個別構成要素[29]

### 2.7.5 地下研究施設における研究開発動向

英国は、地下研究所には直接関わっていない。しかしながら、様々な二国間協定を通して、NDA 及び RWM は、調査研究に参加する事ができる。例えば、エスポ岩盤研究所（スウェーデン）、モン・テリ岩盤研究所（フランス）、グリムゼル試験サイト（スイス）、そし

てモル（ベルギー）などとの協定である。

CoRWM によれば[7]、他国で実施された地下調査は、各国独自の HAW 及び具体的な地質条件を代表しているが、英国が地層処分施設の設計及びセーフティケースを集めるには不十分であると確信している。したがって、CoRWM は、地下研究施設が地層処分施設のサイト候補地にとって必要であるとしている。NDA の現在の戦略では、潜在的な地層処分場での地下調査は、処分施設の建設段階の一部として実施されるべきだと考えられている。CoRWM は、こうしたアプローチが、地層処分施設設計開発及び堅固なセーフティケース収集に関して十分な情報を提供しないため、この戦略には賛同していない。CoRWM によれば、こうした施設は、処分施設の建設前、廃棄物の定置時、そして廃棄物定置後に処分施設が稼働中の期間は常に、運用されるべきであると確信している。

### 2.7.6 回収可能性に関する研究開発動向

旧 Nirex 社（現在は NDA と統合）は、地層処分施設の実現可能性を支援するための文書を作成し、さらに、重要問題及び将来の作業での優先順位に関する利害関係者との対話に重点的に取組むために、一連のコンテキストノートを用意した。こうしたノートの一つでは、モニタリング及び回収可能性が論議されている[32]。

テクニカルノートでは、英国における回収可能性（及びモニタリング）に関する重要な勧告が留意されている。

- ✓ 政府からの勧告[33]、放射性廃棄物管理に関するナショナルコンセンサス会議[34]、そして最近の政府白書[35]

そして国際的なものでは、

- ✓ 欧州 9 カ国からの廃棄物管理機構を含む欧州委員会協調行動研究[36]、
- ✓ NEA からの総合的勧告[37][38]、である。

上記の参考資料は全て、地層処分場が最終的に閉鎖される前に、モニタリング及び回収可能性の時期が必要であると促している。Nirex の見解は、数百年間に渡って地層処分場を回収可能な状態で維持することが可能であるというものであった。この見解は、回収可能性の技術的問題に関する研究に基づいていた。

放射性廃棄物の長期管理に関する見解を見直す上で、CoRWM は、段階的アプローチが将来の意思決定に対してより大きな柔軟性を与えると指摘したが、「廃棄物が定置された後

も何世紀にも渡って施設が運用される事は､利益に対するリスクが不釣り合いに増大する」事も警告した[39]。

NDA は、政府白書及び環境機関の指針で与えられた方針を考慮し[35]、回収可能性を地層処分施設の設計開発にとって不可欠の要素として組み入れた。

NDA が参加した国際的廃棄物管理組織によるフルスケールの回収実証が何度か行われてきた。例えば、英国における埋められた廃棄物パッケージを回収するための遠隔式ウォータージェット切断の利用[40]、スウェーデンにおける縦置きの処分孔に配置され、周りをベントナイト緩衝材で取り囲まれたダミーのキャニスタからの回収、さらに、地下及び地表のモックアップの異なる処分容器を回収する実用的な証明を含んだ EC ESDRED プロジェクト[41]、などである。英国での回収可能性に関わる具体的 R&D プロジェクトに関して、現在進行中のプロジェクトについては情報がない。むしろ、NDA は、国際的な計画に引き続き関わっている。

### 2.7.7 研究開発計画に対するレビュー

2.7.3 で述べたように、研究開発は、入札審査委員会によって、提案の質及び当該 R&D チームの技術及び経験に関する検討を基準として評価される。R&D プロジェクトに使用される審査プロセスは、広範な科学的コミュニティーにおいて受入れられて来た審査プロセスと概ね一致している。

R&D 計画は適切な規制機関による自主的規制に委ねられており、初期段階で重要問題を議論する手段として、R&D 計画文書の初期草案[6]に関しては、規制機関と共に議論されたと指摘されている[4]。計画の重要な節目においては、英国王立協会もしくは原子力機関（NEA）のような国内的ないし国際的な名声を備えた団体によって、計画全体について独立した審査が行われねばならない。

### 2.7.8 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向

英国の現在の R&D 計画の特徴は､英国での HAW 地層処分をめぐる会議で議論され[13]、以下に要約されている。

<u>廃棄物形態、格納容器及び臨界</u>

- ✓ 廃棄物格納容器の耐久性
- ✓ グラウト化された Magnox 炉廃棄物の腐食と膨張

- ✓ 貯蔵条件の下での潜在的プルトニウム廃棄物形態の耐久性
- ✓ ガラス固化した廃棄物形態の化学的耐久性及び pH と溶液組成の影響
- ✓ （西カンブリア州）Borowdale 火山群から掘出したコアの特性評価において、X 線コンピュータ断層撮影を利用した不均一岩質の 3D 画像化
- ✓ 候補廃棄物形態からのウラン放出
- ✓ ILW パッケージに関する臨界安全性管理の開発
- ✓ ILW パッケージの耐食性に対する重合体カプセル化の効果を評価するための実験的研究
- ✓ 多孔質・擬脆性媒体のサイト結合モデル化
- ✓ 廃棄物形態素材の破砕テスト
- ✓ 候補重合体カプセル化材料の安定性及び構造に対する放射線、熱経年劣化、そして水系環境の影響に関する初期研究

ニアフィールド（EBS）

- ✓ 高燃焼度使用済燃料の深孔処分（4.7 にて検討）
- ✓ 低アルカリ性セメント浸出液におけるベントナイトの化学反応
- ✓ 地下の埋め戻し材からの浸出期間における長期的な浸出液の変遷
- ✓ ベントナイトにおける結合プロセスのモデル化
- ✓ ニアフィールドのセメント質における pH 緩衝
- ✓ セメント質の処分場ニアフィールドおける pH 変遷のモデル化
- ✓ セメント質の処分場ニアフィールドにおける亀裂、その流出及び化学的意味
- ✓ ユウロピウムと高 pH 地下埋め戻し材との相互作用
- ✓ Magnox 炉の汚泥物質からのウラン取り込み

ファーフィールド（地圏）

- ✓ 有効応力概念との関連での粘土質材における安定した高圧差の観察
- ✓ 粘土質形成における水力・力学・化学結合プロセスのモデル化
- ✓ 閉鎖後の過渡的臨界モデルとオクロ天然原子炉との比較
- ✓ 仮説的な閉鎖後臨界の結果
- ✓ 処分場構想に適用される限界応力理論：亀裂流出における応力テンソルと応力履歴の重要性
- ✓ 離散型亀裂流路及び同等の二次元亀裂による流路連続シミュレーションとの比較（DECOVALEX-2011 プロジェクト）
- ✓ 未擾乱岩及び変容結晶質岩への放射性核種の拡散
- ✓ 模擬亀裂におけるストロンチウムの吸収及び拡散

微生物学を含む生物圏

- ✓ DSSC を支援する生物圏研究

- ✓ 放射性廃棄物処理に関する生物圏研究における国際協力
- ✓ 気体ないし地下水を媒介経路とする C-14 の穀物への摂取モデルの比較
- ✓ 健全な泥岩及び砂岩の輸送特性に対する微生物学的影響の比較及びそれが持つ放射性廃棄物の地層処分に対する関連性
- ✓ ILW 地層処分中における嫌気性微生物の代謝作用に関する潜在的影響

ガス

- ✓ ガス移行実験及び数値モデル化に関するその意味
- ✓ 照射黒鉛からの揮発性 C-14 及びトリチウム放出の割合及び核種分化
- ✓ Callovo-Oxfordian 粘土層におけるガス流出：研究室及び現場での測定結果
- ✓ 高硬岩層でのガス移行モデル化に対する代替的アプローチの比較
- ✓ ナノ粒子注入技術を利用した粘土質におけるガス誘発経路のエビデンス
- ✓ HAW 用地層処分施設における圧縮粘土緩衝材を通した多成分ガス流出
- ✓ 底土における C-14 の移行と消長：モデル開発に対する情報提供のためのトレーサ試験
- ✓ 長期的かつ大規模な実験向けのデータ解析ツールキット
- ✓ 地層処分施設におけるガス挙動の理解

放射性核種の移行

- ✓ トリウム収着に関してセルロース分解が赤鉄鉱に及ぼす影響（製品三成分系モデル研究を含む）
- ✓ 放射性廃棄物のセメント質地層処分に関わる条件下でのフミン酸に対するウラニル結合
- ✓ ニアフィールド条件の下での放射性核種のセメント質埋め戻し材への収着
- ✓ 経年劣化したセメントの収着特性
- ✓ αイソサッカリン酸、グルコン酸、ピコリン酸によるニッケル錯体形成に対する他の金属からの競合効果
- ✓ 高 pH 値における還元テクネチウムと EDTA（エチレンジアミン四酢酸）及びピコリン酸との錯体形成

国際的側面

- ✓ 欧州において地層処分技術プラットフォームを実施すること
- ✓ 長期的なセメント質研究プロジェクト：モデル開発及び実験に対する英国の寄与

一般的問題

以下の問題は、地層処分に関する環境セーフティケースに対するフレームワーク開発を支援する研究に関わっている[42]。

- ✓ I/LLW 及び地層処分施設の HLW を同じ場所に定置する事に関する相互作用[43]
- ✓ 性能評価及びセーフティケースに関する欧州委員会による PAMINA プロジェクトからの教訓
- ✓ 地層処分施設に対する貫入の潜在的影響
- ✓ 不確定要素に直面した場合の地層処分施設計画の設計及び優先順位：構造化された証拠支援論理テクニックの適用

上記のトピックは、決して包括的なものではなく、英国における NDA の R&D 計画の優先順位を反映したものに過ぎない。プロジェクトの大半は、大学（マンチェスター大学、ラフバラ大学、ノッティンガム大学）もしくは実験・モデル化施設を備えた比較的小規模のコンサルタント会社によって実施された。

<u>大学及び研究組織での R&D 計画に対する資金調達手段</u>

前述の通り（2.7.3）、大学に対する資金提供は、研究評議会から直接的に行われるか、もしくは NDA、原子力サイトの許可取得者、規制機関との契約という形式で行われる。

研究評議会は、工学・物理研究評議会（EPSRC）が調整役である同評議会のエネルギー計画を通じたエネルギー関連プロジェクトに協力している。現在、EPSRC は、HAW 長期管理に関する R&D に対する主要な資金提供者であり、毎年 200 万ポンドの額を助成している。EPSRC は、とりわけ NDA、他の原子力産業組織、そして HSE のメンバーから構成される協定書グループ（Letter of Arrangement Group）によって助言を与えられている。このグループは、研究の優先順位を共有し、協力分野を確認するためのフォーラムを提供している。現在、HAW 長期管理固有の研究に資金援助を行っている他の研究評議会は、国立環境研究評議会（NERC）だけである。NERC の主要な資金援助は、NERC の研究センターである英国地質調査所（BGS）を通じて行われている。BGS は、その収益のほぼ 50%を NERC から得ており、残りは公的及び民間部門との契約からのものである。現在、BGS は、放射性廃棄物処分のために毎年 13 人年ほどの取組みを行っており、これは主に NERC 以外から資金援助されている。すなわち、HAW 関連作業のうち NERC 以外からの収入が 60 万ポンドであり、NERC からのものは 25 万ポンドである。

CoRWM は、HAW の長期管理では、直接応用できない好奇心に基づく研究（curiosity-driven）から具体的な現実目標の達成に沿った的を絞った研究に至るまであらゆる分野の研究が必要であると指摘した[7]。地層処分施設が何万年ないし何百万年にも渡

って安全であるという信頼性を得るために必要と考えられるため、好奇心に基づく研究は、地層処分にとっては重要であると見なされている。

2.7.9 参考文献


[1] NDA (2010), Geological Disposal: Generic Environmental Safety Case main report, NDA Report No. NDA/RWMD/021, Nuclear Decommissioning Authority

[2] NDA (2010), Geological Disposal: Summary of generic desings, NDA Report No. NDA/RWMD/054, Nuclear Decommissioning Authority

[3] NDA (2010b): Geological Disposal: Proposed Approach to Optioneering, NDA Technical Note No. 12860687, Nuclear Decommissioning Authority

[4] Falck, W.E. and Nillson, W.F. (2009), Geological Disposal of Radioactive Waste, Moving towards Implementation. EC Report EUR 23935 EN, European Commission, Luxembourg.

[5] Tweed (2012), C.R., Sound science in geological disposal in the United Kingdom, Mineralogical Magazine **76** (8), 2873-2879.

[6] NDA (2011b), Geological Disposal: R&D Programme Overview, Research and Development Needs in the Preparatory Studies Phase. NDA Report NDA/RWMD/073, Nuclear Decommissioning Authority.

[7] NDA (2009): The NDA's Research and Development Strategy to Underpin Geological Disposal on the United Kingdom's Higher-activity Radioactive Wastes. NDA Report NDA/RWMD/011, Nuclear Decommissioning Authority.

[8] CoRWM (2009c): CoRWM Report to Government on Research and Development for Interim Storage and Geological Disposal, Report No. 2543, London, England.

[9] Palmu, M., Eng, T. and Beattie, T.M. (2012), Towards implementing a geological disposal technology platform in Europe, Mineralogical Magazine **76** (8), 3439-3444.

[10] ONR-EA,2011

[11] EA,2008

[12] EA,2009

[13] EA,2011

[14] Evans, N.D.M. (2012): Geological disposal of radioactive waste: underpinning science and technology, Mineralogical Magazine **76** (8), 2865-2871.

[15] Hicks, T.W., Baldwin, T.D., Hooker, P.J., Richardson, P.J., Chapman, N.A., McKinley, I.G. and Neall, F.B. (2008): Concepts for the Geological Disposal of Intermediate-level Radioactive Waste, Galson Sciences Report 0736-1 to NDA RWMD.

[16] Padovani, C., Williams, S.J. and Wood, J. (2012): An introduction to package evolution and criticality research studies relevant to the UK geological disposal programme, Mineralogical Magazine **76** (8), 2881-2890.

[17] Stanley, S.J. (2010): Development of innovative solutions to monitor radioactive waste packages in order to validate long-term behaviour and performance. NNL Report (09) 10 730, Issue 2, National Nuclear Laboratory, Sellafield, Warrington

and Harwell, England.
[18] Baldwin, T.D., Chapman, N.A. and Neall, F. (2008): Geological disposal options for high level waste and spent fuel. Galson Sciences Report to NDA RWMD, Oakham, England.
[19] Beattie, T.M. and Williams, S.J. (2012): An overview of near-field evolution research in support of the UK geological disposal programme, Mineralogical Magazine **76** (8), 2995-3001.
[20] Watson, C.E., Savage, D., Wilson, J., Walker, C. and Benbow, S.J. (2012): The long-term cement studies project: the UK contribution to model development and testing, Mineralogical Magazine **76** (8), 3445-3455.
[21] Norris, S. (2012): An introduction to geosphere research studies for the UK geological disposal programme, Mineralogical Magazine **76** (8), 3105-3114.
[22] IAEA (2003): "Reference Biospheres" for Solid Radioactive Waste Disposal, Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOsphere Modelling and ASSessment (BIOMASS) Programme, IAEA Report IAEA-BIOMASS-6. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
[23] BIOCLIM (2004): Development and Application of a Methodology for Taking Climate-driven Environmental Change into Account in Performance Assessments, Deliverable D10-12. ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
[24] Smith, K., Smith, G.M. and Norris, S. (2012): BIOPROTA: international collaboration in biosphere research for radioactive waste disposal. Mineralogical Magazine, **76**, 3233_3240.
[25] Kowe, R. and Norris, S. (2012): Representation of the biosphere in post-closure assessments for the UK geological disposal programme, Mineralogical Magazine **76** (8), 3217-3223.
[26] Williams, S.J. (2012): An overview of gas research in support of the UK geological disposal programme, Mineralogical Magazine **76** (8), 3271-3278.
[27] Baston, G.M.N., Chambers, A.V., Cowper, M.M., Fairbrother, H.J., Mather, I.D., Myatt, B.J., Otlet, R.L., Walker, A.J. and Williams, S.J. (2004): The Release of Volatile Carbon 14 from Irradiated Graphite in Contact with Alkaline Water, Serco Report SA/ENV 0654, Winfrith, England.
[28] Handy, B.J. (2005): Experimental Study of C-14 and H-3 Release from Irradiated Graphite Spigot Samples in Alkaline Solutions, NNC Report 11996/TR/001, Issue 1, NNC Ltd., Knutsford, England (now part of Amec).
[29] Vines, S. and Beard, R. (2012): An overview of radionuclide behaviour research for the UK geological disposal programme, Mineralogical Magazine **76** (8), 3373-3380.
[30] SKB (2006): Buffer and Backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB Technical Report TR-06-18, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Stockholm, Sweden.
[31] White, M., Baldwin, T., Hicks, T. and Hooker, P. (2008): Engineered Barrier Materials for Geological Disposal Facilities, Galson Sciences Report 0828-1 version 1, Oakham, England.
[32] Nirex (2005): Retrievability, Context Note 4.1, Nirex, Harwell, England.

[33] House of Lords (1999): Management of Nuclear Waste, Select Committee on Science and Technology Session 1998-99 Third Report, London, England.
[34] UK CEED (1999): UK National Consensus Conference Radioactive Waste Management, Citizens Panel Report, May 21-24, 1999, UK Centre for Economic and Environmental Development, Peterborough, England.
[35] Defra et al. (2008): Managing Radioactive Wastes Safely - a Framework for Implementing Geological Disposal, a public consultation by Defra, DTI and the Welsh and Northern Irish devolved administrations.
[36] EC (2000): Concerted Action on the Retrievability of Long-Lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories, European Commission Project Report EUR 19145 EN, Brussels, Belgium.
[37] NEA (2001): Reversibility and Retrievability in Geological Disposal of Radioactive Waste, Reflection at the International Level, Nuclear Energy Agency, Paris, France.
[38] NEA (1995): The Environmental and Ethical Basis of the Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories, Nuclear Energy Agency, Paris, France.
[39] CoRWM (2006): Managing our Radioactive Waste Safely, CoRWM's Recommendations to Government, Report No. 700, Committee on Radioactive Waste Management, London, England.
[40] NNC (1997): Demonstration of Waste Package Retrieval, NNC Report to Nirex PRSU/2524, NNC Ltd., Knutsford, England (now part of Amec).
[41] EC (2005): Review of Measures for Retrievability, Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs, BRW Haverkate, 6th Euratom framework Program, reports at ESDRED Project website at URL: http://www.esdred.info/index.htm
[42] Poole, R.W. and Kowe, R. (2012): Framework for an environmental safety case for geological disposal in the UK, Mineralogical Magazine **76** (8), 3457-3464.
[43] Hicks, T.W., Watson, S., Norris, S., Towler, G., Reedha, D., Paulley, A., Baldwin, T. and Bond, A.E. (2012b): Interactions between the co-located intermediate-level waste / low-level waste and high-level waste / spent fuel components of a geological disposal facility, Mineralogical Magazine **76** (8), 3475-3482.

## 2.8 カナダ

カナダにおける処分事業の現状概要､処分システムの概要､研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、地下研究施設における研究開発動向、回収可能性に関する研究開発動向、研究開発計画に対するレビュー、大学・研究機関等による地層処分研究開発動向を調査・整理した。

### 2.8.1 処分事業の現状概要

放射線廃棄物は､利用する見込みのない放射性核物質を含む何らかの物質（液体､ガス､もしくは固体）として定義される。カナダでは、ウラン鉱山廃棄物及び選鉱廃石、医療用アイソトープ廃棄物、使用済燃料、原子力発電所の廃止措置に伴う廃棄物、産業廃棄物、そして低レベル放射性物質によって汚染された洗浄用具など、様々な放射性廃棄物が原子力施設において発生している。

カナダ原子力安全委員会（CNSC）は、カナダ人及び環境の健康、安全、そして安全保障を保護するために、原子力及び核物質の利用を規制している。CNSC は、原子力安全管理法に基づき 2000 年に設置され、天然資源大臣を通してカナダ議会（国会）に報告している。

CNSC の放射性廃棄物に対する規制アプローチは、原子力安全管理法（NSCA）から由来しており、CNSC 文書 P-299 規制原理、P-290 放射性廃棄物の規制方針、そして G-320 放射性廃棄物管理の長期安全性の評価　規制方針などにはっきりと述べられている。こうした文書を作成する際に、CNSC は、国際原子力機関の勧告及び国際的また国内での最良事例を利用している。

CNSC によって認可されるカナダでのあらゆる活動に関して、廃棄物発生者は、安全で確実な方法で廃棄物を管理し、当該廃棄物に関する長期的管理のために協定を結ばなければならない。

カナダ規格協会（CSA）は、産業界、政府、そして CNSC と協力して、放射性廃棄物に関する 4 つの主要な種類を見分ける規格を開発した。すなわち、

1．高レベル放射性廃棄物：放射線を受けた（使用済）燃料もしくは他の廃棄物でかなりの熱を発し、作業者及び環境から長期に渡って隔離する必要のあるもの。
2．中レベル放射性廃棄物:大量の放射性物質を含むもので､一定の隔離が必要なもの。
3．低レベル放射性廃棄物：原子力施設内で使用される洗浄用具のような低レベルの放

射性物質を含む物質で、有害性がほとんどないもの。

4．ウラン鉱山廃棄物及び選鉱廃石は、ウラン鉱石の採掘及び精錬、そして濃縮ウランの製造の過程で生じる特定種類の放射性廃棄物である。選鉱に加えて、採掘活動においても、ウラン鉱床を取り出すために、掘り出された大量の石灰化及び非石灰化した廃石が発生する。選鉱及び石灰化した廃石にも、かなりの濃度の長寿命放射性元素が含まれている。これは、主として Th-230 及び Ra-226 であり、長期間に渡りあまり減衰しないものである。

現在、カナダにおける使用済燃料（すなわち高レベル放射性廃棄物）は全て、安全かつ頑丈で環境面でも適切なサイト内の中間貯蔵施設に保管されている。原子力施設としての使用済燃料の中間貯蔵施設は、湿式貯蔵及び乾式貯蔵として知られる二つの段階から主として構成される。最初、使用済燃料のバンドル（CANDU 炉の燃料体）は、原子炉から取り出された後、水を入れた仕切り部分もしくはプールに貯蔵される。

湿式貯蔵で 6 年から 10 年が経過した後、使用済燃料は、コンクリート製容器もしくはサイロで乾式貯蔵するために、安全に移送できる。

現在、使用済燃料の長期的管理を行う施設は、世界のどこにも存在しないが、開発中のものはいくつか存在する。使用済燃料の長期的管理について解決策を見出す事は、核燃料廃棄物管理機関（NWMO）の責務である。使用済燃料に対する長期的管理手段を開発するための NWMO 研究開発（R&D）計画は、本章の残りで解説される。

低中レベル放射性廃棄物（L&ILRW）の所有者は、自らが発生した廃棄物の管理に責任がある。原子力発電所から発生する L&ILRW という顕著な例外は別として、これは通常、当該施設の現場で行われる。現在、カナダには、全ての低中レベル放射性廃棄物を受入られるような低中レベル廃棄物向けの長期管理施設は存在しない。現在、カナダの L&ILRW は全て、安全かつ頑丈で環境面でも適切なサイト内の中間貯蔵施設に保管されている。

現在、NWMO は、地層処分場（DGR）の建設案に対する規制認可を求めるオンタリオ州電力公社（OPG）を支援しているが、この DGR では、OPG 社が所有ないし運転する原子炉からの低中レベル放射性廃棄物（L&ILRW）を長期的に管理するのを目指している。DGR は、キンカーディン自治体にあるブルース原子力発電所敷地内のウェスタン廃棄物管理施設（WWMF）に隣接した場所に計画されている。

一般的に、鉱山及び製錬所の隣接地での地表近くの施設における長期管理は、発生する大量の廃棄物を考えると、ウラン鉱山及び製錬の廃棄物にとって唯一の実用的オプション

である。選鉱は、設計された鉱滓池のような装置で監視・管理されるか、もしくは掘出された露天立坑に戻される。

### 2.8.2 処分システムの概要

核燃料廃棄物管理機関（NWMO）は、使用済燃料の長期管理として「適応性のある段階的管理」（APM）を実施している。これは『進むべき道の選択：カナダの使用済燃料の将来の管理』（NWMO, 2005）において勧告され、2007 年 6 月にカナダ政府によって選定されたアプローチである。APM 技術プログラムの焦点は、「使用済燃料地層処分場」（DGR）に関する予備設計、費用見積もり、関連する研究活動及びセーフティケースの開発に合わせられている。その目的は、今後とも継続的な改善だけでなく国際的な最良の実践との一致を確保してゆくことにある。図 2.8-1 に、DGR に関する垂直処分概念設計の例を示し、図 2.8.2-2 に水平処分概念を示す[1][2]。

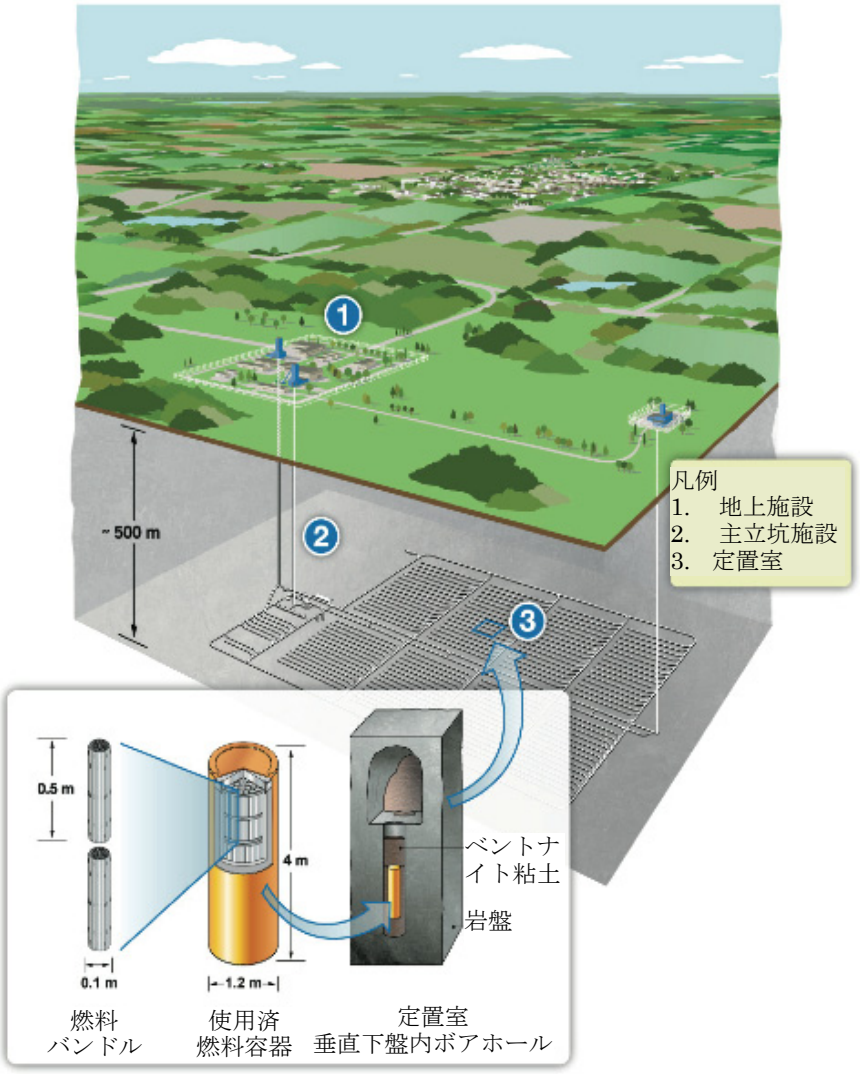



図 2.8-1　地層処分場の説明：坑道床におけるボーリング孔の配置

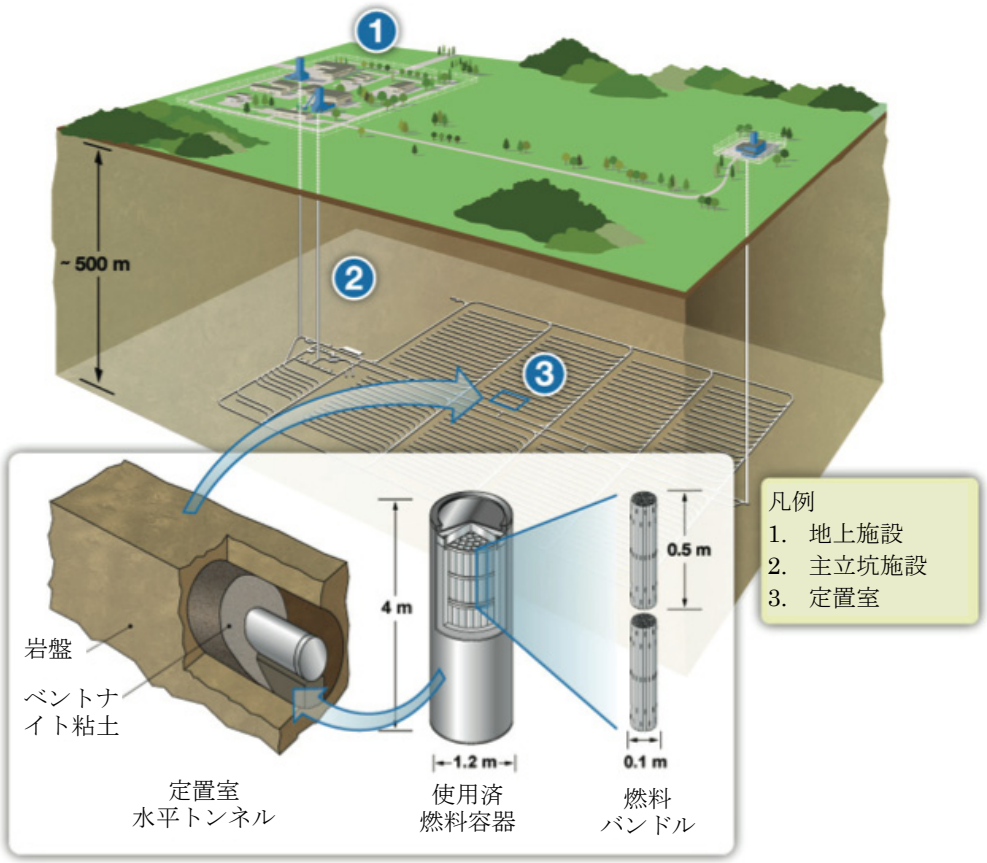



図 2.8-2　深地層処分場における CANDU 使用済燃料の処分のための考えられる水平定置構成の概略図

2.8.3 研究開発（R&D）プログラムの概要

2.8.3.1 CNSC の研究開発プログラムの概要

CNSC は、その規制任務を支援するのに必要な知識と情報を得るために、外部の研究プログラムに対して資金援助している。こうしたプログラムによって、CNSC は、民間部門に投じられる契約、助成金、そして寄付金などを通して、そしてカナダ及び他国の公的機関及び組織と協力して、独立した助言、専門家、経験、情報、そして他のリソースを入手している。このプログラムは、CNSC 全体から送られたプロジェクト案を編集したものである。

2011 年から 2014 年にかけての会計年度で CNSC が資金援助をした R&D プロジェクトは、総計 770 億カナダドルである（カナダ原子力安全委員会 2012 年）。これとの比較で言

えば、地層処分場の建設認可取得までに含まれる NWMO の R&D 助成額は、推定で 19 億カナダドルと言われる。2011 年から 2014 年の会計年度に CNSC が助成したテーマ別 R&D は、以下の通りであり、推定予算額とプロジェクト名が添付されている。R&D プロジェクトのうち直接ないし間接的に処分に関連するものは、イタリック体で表示されている。

- 国際的基準との調和（280 万カナダドル）
  - ○ カナダ規格協会に対する規格リソース支援
- セーフガード（90 万カナダドル）
  - ○ カナダ新技術の同定（5 万カナダドル）
  - ○ 品質管理 － 検査評価
  - ○ Versa モジュールというヨーロッパの広域地表統合燃料モニター（VIFM）の実　　施支援 － 放出される燃料のモニタリング
  - ○ 法医学における輝尽発光
  - ○ 衛星画像訓練プログラム（検査官）
  - ○ 核燃料サイクルに関わるプロセスの特徴（衛星画像／衛星搭載遠隔測定データ）
  - ○ 環境サンプリングに関するコンピュータベースの訓練
  - ○ 画像解析に関する専門家トレーニング
- 安全解析（60 万カナダドル）
  - ○ 確率的安全評価研究に対する人間信頼性評価に関する運用手続きの有効性
  - ○ 重大事故の際に格納容器圧力を緩和するための手段であるフィルタ付き格納容器ベントシステムに関する専門家の助言
  - ○ カナダ型重水炉（CANDU）のエンドシールドに関するコンピュータによる流体力学モデリング
  - ○ 国際的なコンピュータによる流体力学ベンチマーク問題 IBP-2
- 業務の経年劣化及び適切性（60 万カナダドル）
  - ○ 流体励起振動によるU型チューブバンドルの完全性
  - ○ 主蒸気系故障の際の蒸気発生チューブの負荷
  - ○ リスク情報に基づく決定指針プロジェクトに関する規制ツールとしての確率解析への参加

○　既存の原子力建造物に関するコンクリートのアルカリ骨材反応の影響調査

・　外部の事件及び災害（60 万カナダドル）

○　医療分野許認可保有者向けの火災準備予測の確立

○　強振動に関する地震学的解説と地盤 － 建造物の相互作用に関する工学的解析との整合性（24 万カナダドル）

○　地盤 － 建造物の解析向けツール開発

・　健康への影響（60 万カナダドル）

○　トリチウム（H-3）の毒性に関する研究

○　複数の利害関係者によるトリチウム作業グループ

○　オンタリオ州鉱山労働者に関する最新のコホート分析

・　放射線防護（40 万カナダドル）

○　物理的パラメータによるラドン子孫核種作業レベルの範囲評価

○　α線災害の特性評価：CANDU 原子炉噴霧器内での放射線核種のバイオ溶解度及び内部線量に対する関連性

○　ウラン鉱粗製物及びウラン鉱石に関する年摂取限度既定値の再評価

・　環境運命（30 万カナダドル）

○　陸環境におけるトリチウム輸送（30 万カナダドル）

・　民間建造物（30 万カナダドル）

○　鋼板コンクリート構造に関する規制要件の開発及び試験

・　廃棄物管理（20 万カナダドル）

○　カナダにおける鉱山廃棄物管理実践の評価（2 万 5000 カナダドル）

○　地層処分場に関するベントナイト封印の長期的性能（15 万カナダドル）

・　悪意ある行為（20 万カナダドル）

○　鉄筋で予め圧縮応力を加えた複合鋼板・コンクリート圧板に関する衝撃及び衝撃荷重解析向けの簡素化された解析ツールの開発

・　安全解析に対する経年劣化の影響（20 万カナダドル）

○　確率的安全評価アプリケーション（フェーズ 3）に経年劣化の影響を組み込む事

2.8.3.2 NWMO の研究開発プログラムの概要

2002 年、カナダ政府は、2002 年核燃料廃棄物法（NFWA）を可決し、国の使用済燃料の長期管理計画を作成・実施するために核燃料廃棄物管理機関（NWMO）を創設した。NWMO が現在実施している計画、適応性のある段階的管理（APM）は、2002 年から 2005 年にカナダ全土で行われた対話から生じたもので、調査過程に参加した何千人もの専門家、先住民、そして他の関与者、利害関係者そして組織の価値観及び優先順位が反映されている。使用済燃料が安全確実に封印・隔離される深地層処分場がこの計画の終点であるが、これは多くの原子炉を持つ国々が現在追求しているものでもある[3]。

NFWA の所で述べた様に、NWMO の目的は、使用済燃料の管理方法を開発・実施するためである。(1) 研究開発は、NWMO の使命に関する明白な部分であること、(2) 連邦政府は、使用済燃料を適切な地層で最終的に封印・隔離するという NWMO による適応性のある段階的管理アプローチを承認した事、そして (3) NWMO の資金調達は、法律によって保証されていることなどを考慮すると、連邦政府の政策は、地下処分に関する研究開発を支援することである。

「進むべき道の選択:カナダ使用済燃料の将来的管理(最終研究)」でも述べられた様に、適応性のある段階的管理（APM）は、カナダにおける長期的放射性廃棄物管理に関する支配的な枠組みを与えている。APM は、技術的手段及び管理システムの両方から構成される[4]。その主要な特性は、以下の通りである。

- 適切な地層で使用済燃料を集中して最終的に封印及び隔離すること
- 段階的で適応性のある意思決定
- 処分場に定置する前に本部サイトでのオプションの浅地貯蔵
- 継続的なモニタリング
- 回収可能性に関する規定
- 市民の関与

NWMO の APM 技術計画は、カナダの使用済燃料が究極的に安全に封印・隔離される地層処分場に関する設計及び実例的な安全解析を絶えず改善することに焦点を合わせている。

技術計画の一部として、NWMO は、カナダの大学、国際機関、そして他の国々における同等の機関（最も著名なものは、スウェーデン(SKB 社)、スイス（NAGRA)、フィンラ

ンド（ポシヴァ社)、そしてフランス（ANDRA)）との共同研究プロジェクトに取りかかっている。この技術計画は、NWMO 理事会によって設立された独立の技術審査グループ（ITRG）によって毎年点検される。ITRG の作業で重要な部分は、APM 実施要件に適合する計画の充足度を評価することである。この技術計画の作業は、処分工学、地球科学、そして処分安全性という三つの広範なカテゴリに該当する。(報告書、文書、会議、大学との共同研究､そして国際機関との共同プロジェクトなど)様々な方法に関する概要に続き、各カテゴリでの研究開発は以下に述べられるが、技術計画に関する三つの分野全てにおいて、APM の安全な実施に必要な技術能力が維持されている。

核燃料廃棄物法では、核燃料廃棄物の発生者は、核燃料廃棄物の長期的管理を賄うために信託基金を設立せねばならない。法律に従って、オンタリオ州電力公社、ハイドロ＝ケベック社、NP 原子力会社、そしてカナダ原子力公社（AECL）は、2002 年に信託基金を設立し、これらの基金に対して NFWA が定めるように年間の預託を行い始めた。こうして基金に預託金が集められ、原子力安全管理法に基づき建設認可もしくは操業認可がいったん発行されれば、カナダ政府が選んだ管理方法を実践するためにだけ、この基金を利用できる。基金は 2002 年に設立され、それ以来年間の寄付は、各廃棄物所有者が行ってきた。投資収益を含めたこれら信託基金の残高は、2012 年末の時点でほぼ 28 億カナダドルであった。各原子力発電事業者がもつ他のセーフガード基金及び財務保証に加えて、この資金は、核廃棄物管理及び廃炉のためだけに設定されている。

NFWA には、信託基金が安全に維持され、本来の目的にだけ利用されることを確保するための規定が盛り込まれている。NWMO は、政府が選んだ管理方法を実施するためにのみ、これらの基金を利用できる。こうした法で定められた義務は、指定された個々の企業の責任であり、NWMO のそれではない。

NFWA では、使用済燃料の長期管理に関して、NWMO がその費用及び資金調達に対処するよう求められている。APM 計画に対する費用見積りの全面的改訂は、2009 年に NWMO によって開始され、2011 年に終了した。この見積りによって、財政計画及び信託基金に集まった積立金に対する将来的な基盤がもたらされた。

APM 計画にまつわる長期的計画に関する見積り作成において、多数のシステム設計及び原価仮説が、予測指針として採用された。これらは、以下のものである。すなわち、

- 地層処分場及び輸送に関する工学的及び概念的な設計仮説
- 360 万本の燃料に関して、想定される処分場の処分能力

- 2035 年に予定されている地層処分場の操業時期
- 2160 年に予定されている処分場閉鎖時期

APM 費用の各要素は、完全なライフサイクル・コスト評価を開発するために、体系的に取組まれた。APM の費用見積りには、原価リスクとしての引当金及び予備費も、含まれている。

360 万本の使用済燃料を管理するための APM 計画に対する最新費用見積りは、（2010 年の相場で）179 億カナダドル、現在の価値で 70 億カナダドルである。この費用見積りが基準となることで、使用済燃料が 360 万本以上になる場合の費用見積りも抽出することができる。

2013 年 1 月 1 日に更新されて、APM の推定費用は現在価値で 81 億カナダドル（2013 年以降の負債に関して）となった。81 億カナダドルのうち、約 67 億カナダドルは、処分場の開発及び建設、使用済燃料の輸送、そして 2012 年 6 月末の時点で発生した 230 万の燃料バンドルに対する処分場運用に関する推定費用である。原子炉サイトでの中間貯蔵に関する費用及び貯蔵から使用済燃料を回収する費用は、この 81 億カナダドルの費用見積りには含まれておらず、これらは廃棄物所有者の責任となる。

230 万本の使用済燃料を地層処分するための 67 億カナダドルという現在価値での費用見積りには、処分場の建設許可を得るまでの費用 19 億カナダドル、そして建設を完了し、同処分場への燃料の輸送、処分場の操業、閉鎖そして監視までの 47 億カナダドルが含まれる。（現在 47 億カナダドルと推定される）建築許可以降の費用に関して、NFWA は、OPG、HQ、NBPN、そして AECL によって設立された NFWA 信託基金に対する寄付金から賄われなければならないと命じている。2012 年 12 月の時点で、投資収益を含むこれら信託基金の残高は、ほぼ 28 億カナダドルであった。

2.8.3.3 低中レベル廃棄物の地層処分場

環境アセスメント（EA）、環境影響評価書（EIS）、そして予備的安全報告書（PSR）などは完成したが、現在、DGR を支援する原位置での R&D 計画は存在していない。プロジェクトの画期的な出来事については、以下で概要を述べる。

DGR プロジェクトが開始されたのは、キンカーディン自治体が、低中レベル放射性廃棄物の長期的管理に関して予備的議論を開始するよう OPG 社に提案した 2001 年であった。独立した評価研究の完成、立地自治体との協定交渉、そしてプロジェクト推進支持を示す

住民投票の後、2005 年末には、DGR プロジェクト説明書を提出することによって、DGR に関する規制認可手続きが、開始された。

スコーピング公聴会は 2006 年に開催され、環境大臣は、2007 年に合同レビュー小委員会（JRP）に対してプロジェクトの環境アセスメント（EA）を付託した。

2010 年、4 年間に渡った DGR の研究、調査、そして解析計画は完了した。2011 年 4 月、環境影響評価書（EIS)、予備的安全報告書（PSR)、そして付属書類は、JRP に提出された。JRP は、2012 年 2 月 3 日に公衆意見聴取期間の開始を発表した。15 ヶ月に及ぶ文書に関する公開レビューに続き、合同レビュー小委員会は、DGR プロジェクトに関する 4 週間の公聴会を発表し、これは 2013 年 9 月 16 日に開始された。審理中の許認可、サイト準備、そして DGR の建設は、完成まで 5 年から 7 年ほどかかると予想されている。

### 2.8.4 研究開発課題とその概要

NWMO の R&D 計画の主たる目的は、使用済燃料を長期的に閉じ込め隔離するための施設を実現することである。この計画において、NWMO 技術計画の主要な研究分野は、処分工学、地球科学、そして処分安全性である。

さらに、NWMO は、オンタリオ州電力公社（OPG）が所有ないし運用する原子炉からの低中レベル放射性廃棄物（L&ILRW）管理のための地層処分場（DGR）案に対する規制認可を取得する上で、同社を支援している。DGR を支援する R&D 活動の詳細は、以下のとおりである。

#### (1) 処分工学

処分工学的な設計計画の主要な目標は、(1) 処分場プロジェクト及び関連するシステムに関する概念的設計を推進・最適化するために必要な工学的データ、モデル、手段、そしてツールを開発すること、(2) 処分場プロジェクト構想の安全評価に関して必要な工学的データを提供すること、(3) 計画されたサイトでの特性評価及び地表近くでの調査活動を支援すること、そして (4) APM 処分場費用見積りを支援するために必要な工学的設計を提供すること、である。

#### (2) 廃棄物容器

使用済燃料が保存される廃棄物容器は、長期間に渡って腐食に耐えるものでなければな

らない。このため、工学的計画では、廃棄物容器を銅で包み込むための様々なオプションが実験されてきた。中でも注目すべきは、銅コーティング及び銅製シェルである。2012年を通して、NWMO は、スイスの放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）と継続的に協力して、処分容器向けに銅コーティングを開発する作業を行った。これには、カナダ国立研究機構、オタワ大学、ウィンゾール大学、そしてトロント大学が開発したカナダの技術が使用された。

ウェスタンオンタリオ大学での試験では、乾燥好気性から湿式嫌気性へと環境経過の予想される処分場プロジェクトと一致する条件の下でコーティングが行われた。オンタリオ州南部の堆積岩層において高塩濃度環境でのコーティング性能を試験するために、詳細な実験もトロント大学で計画された。すべての試験で、銅コーティングの持つ優れた腐食防止性能が確認された。こうした成果は、チェコ共和国プラハで行われた国際電気化学会の年次総会にて発表された。

他の作業には、処分場環境における錬鋼及び溶接鋼の腐食テストが含まれる。カナダで発生したサンプルは、スイスのモン・テリ岩盤研究所で試験されている。

先進的な溶接技術も、2012 年に調査された。現在、レーザー溶接は、世界で最も先進的なレーザー開発施設であるケベック物理特殊技術センターで研究されている。他方、摩擦撹拌溶接の検討は、米国で進行中である。同様に、処分工学計画では、様々の大きさの廃棄物容器に関する製造可能性が評価された。

(3) 強化シールプロジェクト

アクセス坑を適切にシールすることは、地層処分場の安全な廃止及び閉鎖にとって重要な要素である。2006 年に開始された強化シールプロジェクトは、シールが長期間に渡って力学的に安定した状態で存続するかどうかについての広範な試験である。2012 年を通じて、現在閉鎖されているマニトバ州にあるカナダ原子力公社の地下研究施設へのアクセス坑に設置された坑道シール装置をモニタリングする作業が続けられた。SKB 社及びポシヴァ社と協力して実施されたこの実験的作業では、シールは力学的にも安定した状態が続き、周辺地域での粘土質層で著しい水分吸収が起こった事がこれまで示されている。

(4) 使用済燃料の容器封入

処分工学計画では、使用済燃料を受入れ、これを長寿命耐食性容器に封入した後、処分

場に定置することに関して、引き続き設計作業が行われている。2012 年には、操作、輸送、容器収納、そして容器封入に関する概念設計が準備され、重要な節目となった。

(5) 輸送

処分工学計画では、原子炉サイトから処分施設まで輸送する方法及び関連費用を調査するロジスティック研究が開始された。現在の標準的な輸送パッケージを独自に解析して、放射線量値が規制限度よりも桁違いに少ないことが確認された。被ばくが合理的に達成可能な限り低い（ALARA）事を確認するために、NWMO は、使用済燃料輸送パッケージ設計を再検討し始め、その中性子遮蔽材の性能をさらに向上させようとした。この作業は、これまでの値を半減する線量減少をもたらした。

(6) 地球科学

地球科学技術計画に関連して、4 つの主要な目的があるが、そのいずれも APM 処分場の安全事例開発に関わる地圏進化に対する理解促進に焦点を置いている。これらの目的とは、(1) 安定性、予測可能性及び長期摂動に対する復元力に関して地圏に対する理解を促進すること、(2) NWMO が準備する APM 安全事例に対する地球科学的基盤を提供すること、(3) APM 安全事例を支援する特性化活動をサイトで実施すること、(4) 国内及び国際的な専門家を作業に関与させることで、プログラムの技術的専門知識を維持すること、である。

2012 年、地球科学技術計画は引き続き、深在性結晶遮蔽及び沈殿環境におけるサイト特性評価技術の適用に関する研究・開発活動を支援した。この計画での重要な要素は、低透過性環境におけるサイト特性化活動という特有の側面に焦点を当てている点である。具体的な技術活動には、細孔液の水理地質化学的及び同位体特性化、石油物理学、有効な拡散係数の推定、裂け目充填材の年代測定及び液体包有物の温度測定、収着、堆積岩の熱水理学的特性の誘導、処分場発掘による損傷ゾーン形成、地震活動、そして微生物学などが挙げられる。

サイト特有のナチュラルアナログの利用を探求するために、さらに詳細な作業計画活動が開始された。将来のサイト進化に関する理解は、部分的には、過去のシステム進化に対する理解及び氷河期発現のような外的摂動に対する反応だからである。このため、古水文地質学、古地震活動、そしてサイト特有の類似物研究などが引き続き行われ、地球科学的技術計画において重要な役割を担っている。

この計画での類似物研究は引き続き、予想されるサイト摂動に対する洞察、また地層処分の期限に比例する形で地表近くの大量輸送管理現象に関する地圏の反応と復元力に対する洞察を与えてくれる。過年度と同じように、科学実践の状況を認識し、関連実験で協力するために、カナダ人地球科学者が国際的な地下研究所において参画できるよう地球科学計画によって援助が行われた。

さらに、この計画は、結晶質及び堆積岩の環境において APM 処分場閉鎖後に長期間に渡り調査を行うという実例研究の準備に対しても寄与した。

(7) 処分場の安全性

処分場安全計画の目的は、施設の安全を評価・改善するために、処分場候補地の運用上及び長期的な安全性を評価することである。サイト候補地が提案されるまでの短い期間、重要な特徴及びプロセスを理解するための事例研究及び絶え間ない改善を通じて、安全性の目的と取組むことになる。

事例研究は、地層処分の安全性に関して NWMO に対して貴重なフィードバックを行うという点で重要である。さらに、事例研究は、処分施設の設計を改善し、システムの安全性評価の方法を改良するため、今後の作業に対する指示を与える。2011 年に開始され、2012 年に完了した NWMO の第 4 事例研究は、カナダにおける地層処分場閉鎖後の安全評価に基づいている。この研究も以前の研究も共に、仮説的な結晶質岩サイトに基づいている。2012 年に完了した研究には、処分場に関する最新の概念設計、地球科学的知見、そして安全評価手法などが含まれている。この研究の目的は、処分場の概念設計及び安全評価アプローチがどのようにカナダ原子力安全委員会（CNSC）の全般的予想に対応しているかを示す事であり、これには、CNSC 指針 G-320（放射性廃棄物管理の長期安全性評価）の予想も含まれている。第 4 事例研究では、カナダにおいて結晶質遮蔽環境を示す地質データを使用した仮説的サイトが検討された。また、将来の様々なシナリオに関して、人間及び非人間生物相に対する潜在的な放射線学的及び非放射線学的影響も予測されたが、これには、予想される処分場の正常な進展、処分場の重要な特徴の変化、事件及び過程、そして多数の破壊的出来事が起こるシナリオ、保守的（バウンディング）な予測、そして「what-if」シナリオなどが含まれる。

安全解析も第 5 事例研究で開始されたが、これは、堆積岩環境における使用済燃料という仮説的状況に関する地層処分場の閉鎖後の安全評価を扱っている。

### 2.8.5 地下研究施設における研究開発動向

浅地貯蔵に適した中心的サイト､地下特性評価施設､そして地層処分場などを選ぶ事は、APM 計画のフェーズ 1 に該当する。この中心的サイトは、カナダ楯状地の結晶質岩、もしくはオルドビス紀堆積岩のような岩石層に設置することが可能である。これら二つの岩型によって、いくつかの州及び領域を含む膨大な土地がカバーされている。具体的な立地を特定することが必要であり、当該施設の建設及び運用に関しては、カナダ原子力安全委員会による認可が要求される。これには環境アセスメントも含まれる。現在のところ、そうした場所は確認されておらず、NWMO は、固有の地下研究所を持っていない。

### 2.8.6 回収可能性に関する研究開発動向

NWMO は、回収可能性に関して、使用済燃料容器をいったん処分場に定置した後、原則としてそれを回収する能力として定義しており、回収可能性を APM 計画の重要な要素であると見なしている。回収は、廃棄物容器を撤去するという具体的活動である。回収可能性には、万一必要であると判断された場合に、回収を可能にするような処分場設計に関する具体的規定が含まれている。

NWMO は、その全ての処分場概念設計に回収可能性という原則を取り入れた。結晶質岩における処分場に関する最新の概念設計では、掘削孔容器縦置き方式を採用している[5]。NWMO によって採用された回収システム設計及び回収プロセスによって、処分場の操業期間中及び APM 施設の最終的廃止及び閉鎖に先立つ拡張モニタリング期間中に、処分場の任意の場所から使用済燃料容器を回収する能力がもたらされる。システムの範囲及び関連する容器回収プロセスでは、対象となる掘削孔に入り、容器を撤去し、そしてそれを輸送用容器に収納するために必要な装置及び任務が定義されている。回収プロセスは、原則的に、容器定置操作を逆転して、地表貯蔵施設に回収済容器を搬送するための輸送用容器を利用することに基づいている。

しかしながら、NWMO は現在、回収可能性に関する独自の R&D 計画を続行していない。むしろ、容器回収プロセスと関連する重要な活動は、2000 年から 2008 年にかけてスウェーデン SKB 社のエスポ岩盤研究所で行われたキャニスタ回収試験を通じて、研究・実証された[6]。この国際的なキャニスタ回収試験では、結晶質岩層に作られた掘削孔に実物大の容器を定置した後、使用済燃料容器の回収を実演した。回収するまでの間、廃棄物

容器周辺のベントナイト緩衝材が完全飽和に達するまでの約 5 年間に渡ってモニタリングが行われた。

2.8.7 研究開発計画に対するレビュー

2009 年に設立された独立の技術審査グループ（ITRG）は、地球科学、安全評価、そして工学技術開発の分野において、NWMO によって現在進行中及び将来の R&D 活動について年 1 回のレビューを行っている。このグループのメンバー4 名は、これらの分野で国際的にも認められた専門家であり、各分野での作業が現在の国際的知見と一致しているかどうか、さらに APM 実施のために妥当な科学的、技術的、そしてリソース的な基盤があるかどうか、を判断するのに相応しいメンバーである。

ITRG は、9 月に第 5 技術審査を完了し、11 月には NWMO の理事会及び諮問委員会に対して調査結果を発表した。ITRG の判断は、以下の通りである。すなわち、「現在まで実施されて来た、もしくは今後計画されている科学的研究は、NWMO が野心的であると認めた APM 施設立地に関する計画の前提に対する強力な支援となる。計画の現状に相応しく、処分場における総合的バリアシステムの一部としての使用済燃料の処分場への輸送、処分場容器への封入、そして容器定置などに関する最適の設計解に対して、少なからぬ配慮がなされている。ITRG は、技術計画に関する工学設計分野での活動案は、おそらく設計解の改善をもたらすであろうと考えている。しかしながら、現在の総合的計画の前提が意味する時間的尺度に関して、十分な科学的及び技術的基盤がその解答をもたらすかどうかには疑問が残る。」[7]。

ITRG によって為された具体的見解及び勧告は、以下の通りである。

a. ITRG は、安全評価の役割に関して、それが要求される科学的及び技術的情報要素を統合するプロセスであると強調した。ITRG は、MWMO がこうしたアプローチを採用しようとしていることを確信しており、学際的インプットに依存する目標の時期に関しては、慎重に見直されるべきであると勧告した。
b. ITRG は、規制順守の基礎として最新の処分場概念設計に関して利用可能な具体化レベルで進行させるリスク及びこの設計によってもたらされる利益とを NWMO は比較すべきであると勧告した。
c. ITRG は、低透水性堆積岩層における処分場の定置部分における条件が十分合理的に

シミュレーションされていることに合意するであろうが、これが、結晶質岩層での処分場にも適切かどうかは疑問である。ITRG は、NWMO に対して、公開された情報に基づき、最新の処分場設計及び実験が結晶質岩層での処分場にも適切かどうかを検討するように勧告した。

d. ITRG は、ベントナイト緩衝材の安全に関わる条件は、堆積岩層における処分場の場合には見直されるべきであると勧告したが、これは、現在の緩衝材設計及び保護手段を推進する条件が、この事例に実際に妥当かどうかを確認するためである。もし妥当でなければ、より簡潔で費用効果的な設計が開発されるであろうし、高塩地下水及びベントナイトの相互作用のような一層複雑な問題に関しては、詳しい調査をする必要がなくなる。

e. ITRG は、回収可能性に関してどのような条件が NWMO によって確立されたかを問題にし、NWMO に対して処分場に関する最新の概念設計がこれらの条件にうまく調和しているかどうかを立証するよう勧告している。

f. ITRG は、地球科学作業計画評価を称賛したが、この評価は、この分野における NWMO の作業計画の状況を明確に示し、ギャップを同定可能にするだけでなく、多くの技術的分野における情報の適切性をも確認したからである。ITRG は、この種の評価は、技術計画の他の部分に関しても考慮されるべきであると勧告した。

g. ITRG は、低透水性母岩層に存在するような部分飽和条件にある銅の気相領域での腐食に関する知識のギャップを埋めるため、NWMO が適切に対処したことを信じると表明した。この知識のギャップは、銅製容器が利用される他の廃棄物管理計画でも確認されており、NMWO は既に、この分野での国際的協力の可能性について気付いていた。ITRG は、NWMO に対して、腐食した容器とベントナイト緩衝材との相互作用に関して一層集中的な作業計画が必要であるかどうかを検討すべきであると勧告したが、この分野でも国際的協力が可能かも知れない。

h. ITRG は、堆積岩層における処分場に関して、単一の実例的な安全解析を送付すべきであると勧告した。容器の腐食防止材である鋼鉄及び銅は共に、安全評価の送付時点ではまだ検討中であるため、そこではこれらの材料は代替材として取扱う事が可能である。これによって、あとの段階でこれら二つの腐食防止材間での選択結果を理解することが促進される。

i. NWMO の処分場に関する最新概念設計、特に非成形ベントナイトブロックから加工さ

れたオーバーパックの使用及びオーバーパックされた使用済燃料容器の積み重ね配置は、他の諸国において検討中の設計とは若干異なっている。しかしながら、この分野における国際的研究開発活動に関する相当たくさんの情報、特に大規模な実証実験からの数多くの情報が存在している。ITRG は、NWMO に対して、この情報を十分考慮するよう勧告した。

### 2.8.8 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向

#### 2.8.8.1 大学とのパートナーシップ

大学との研究提携は、NWMO の技術的作業が科学的に厳密であることを確認する上で引き続き重要な役割を果たしている。トロント大学、アルバータ大学、ブリティッシュコロンビア大学、ラヴァル大学、マックギル大学、ニューブルンスウィック大学、オタワ大学、クイーンズ大学、ウォータールー大学、ライアソン大学、サスカチュワン大学、ウィンゾール大学、そしてウェスタンオンタリオ大学などの研究者は全て、ベルン大学、バージニア州立大学、そしてバージニア大学の研究者と同じように、APM 関連プロジェクトに従事した。2012 年における別の重要な進展は、地力学作業グループの設立であった。このグループの特徴の一つは、トロント大学、マックギル大学、そしてクイーンズ大学の研究所間での実験を可能にしたことである。

NWMO の地球科学年次セミナーに参加する研究者のうち 7 人は、産業界大学院奨学金プログラムを通じて自然科学・技術研究審議会と協力する大学院生で、NWMO によって支援される院生であった。NWMO も、原子力工学研究ネットワーク（UNENE）に参加することを通じて、中等教育後の教育及び訓練を支援している。UNENE は、原子力エネルギー専門家の訓練に関するカナダの能力開発を支援し、同分野での研究を行うために、カナダの大学、原子力発電所、そして研究・規制機関をとりまとめる非営利法人である。

#### 2.8.8.2 国際的なパートナーシップ

他の放射性廃棄物管理機構との提携によって、研究、開発、そして技術実証に関する国際協力を促進すること、他の諸国の経験から学ぶ事、さらに処分場設計における開発、及び多様な母岩層に関する安全事例開発で後塵を拝さない事などが、NWMO にとって可能になる。

2011 年に更新された NWMO 及び SKB 社との間でのエスポ岩盤研究所協定によって、

NWMO は、結晶質岩における処分場技術に関する合同地下調査の研究・実証に引き続き積極的に参加することが可能になった。これまでの会計年度と同じく、SKB 社及びポシヴァ社は、グリーランド・アナログ・プロジェクトにおける NWMO のパートナーであるが、このプロジェクトは、氷河期において結晶質岩での処分場周辺で、氷床が地下水流及び水化学に対してどのような影響を及ぼすかを検討する現在進行中の研究プロジェクトである。NWMO は引き続き、人工バリアシステム、緩衝材に関する長期実験、そして大規模なガス透過試験などに関するタスクフォースに参加している。

さらに、NWMO は、スイスのモン・テリ岩盤研究所にも引き続き関与したが、同研究所は、堆積岩層における処分場技術に関する地下研究及び実証に重点的に取組んでいる。NWMO は、欧州委員会ガス移行挙動プロジェクトにも依然として積極的に参画しているが、このプロジェクトは、現場実験及び汎用処分場において、ガス輸送モデルの共同開発及び比較を行うものである。

NWMO は引き続き、原子力機関（NEA）の熱力学データベースプロジェクトを支援しているが、このプロジェクトでは、放射性廃棄物管理システムにおいて重要な要素である品質保証データベースを開発中である。また、NWMO は、安全事例に関する NEA 統合グループに引き続き関与しているが、このグループは、安全評価実施に関する現在の実務に関して報告書を完成させようとしている。NWMO は、放射性廃棄物施設の生物圏モデルに関する国際的フォーラムである BIOPROTA のメンバーである。

これらの組織に加えて、NWMO の研究者は、米国地質研究所、フィンランド地質研究所、そしてスイスの地理情報センターであるスイス国土地理院（Swisstopo）とも協力している。

### 2.8.9 参考文献


[1] NWMO. 2011, APM Conceptual Design and Cost Estimate for a Deep Geological Repository in Crystalline Rock: Summary Report, APM-REP-00440-0011, NWMO.

[2] Villagran, J., 2012, Used fuel container retrieval from a deep geological repository in crystalline rock: Vertical borehole configuration, NWMO TR-2012-03, Nuclear Waste Management Organization, Ontario, Canada.

[3] Kugler, Gary, and Ken Nash (2013): Learning More Together - Annual Report 2012. Toronto: Nuclear Waste Management Organization.

[4] Nash, Ken, and Elizabeth Dowdeswell (2005): Choosing a Way Forward: The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel (Final Study). Nuclear Waste Management Organization.

[5] SNC-Lavalin (2011). APM Conceptual Design and Cost Estimate Update. Deep Geological Repository Design Report Crystalline Rock Environment Copper Used Fuel Container. SNC-Lavalin Nuclear Report APM-REP-00440-0001. Toronto, Canada.
[6] SKB (2010): Spent Nuclear Fuel for Disposal in the KBS-3 Repository, SKB Technical Report TR-10-13, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Stockholm, Sweden.
[7] Olsson, Olle, Alan Hooper, Lawrence Johnson, and Derek Martin (2012): "2012 Report of the NWMO Independent Technical Review Group." Nuclear Waste Management Organization.

## 2.9 スペイン

スペインにおける処分事業の現状概要、処分システムの概要、研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、研究開発計画に対するレビュー、大学・研究機関等による地層処分研究開発動向を調査・整理した。以下はスペイン放射性廃棄物管理公社（ENRESA）からの情報をもとに取りまとめたものである。

### 2.9.1 処分事業の現状概要

スペインでは、放射性廃棄物については、主に低中レベル放射性廃棄物及び高レベル放射性廃棄物の 2 つに区分されている。放射性廃棄物の処分を含む管理は、実施主体として設置されている、国営企業である放射性廃棄物管理公社（ENRESA）が実施されている。

スペインにおける放射性廃棄物の処分方針は、総合放射性廃棄物計画（GRWP）に示される。現在の最新のものは、2006 年に策定された第 6 次総合放射性廃棄物計画である。

短寿命の低中レベル放射性廃棄物に関しては、1992 年から浅地中処分場であるエルカブリル処分場において処分が行われている。同処分場では、2008 年から極低レベル放射性廃棄物の処分も開始されている。

高レベル放射性廃棄物については、1986 年から地層処分のためのサイト選定を段階的に実施してきたが、選定プロセスに対する反対活動のため中止された。第 5 次及び第 6 次総合放射性廃棄物計画では、長期的に取りうる戦略として以下が示されているが、最終的な管理方針の決定は先送りされている。

- 限定的な中間貯蔵（50～100 年の期間）及びその後の最終処分施
- 長期中間貯蔵（100 年を超える期間）及びその後の最終処分
- 中間貯蔵、その後の再処理（S&T のバリエーションが可能）、及びこれに続く中間貯蔵と最終処分

また、地層処分技術及び核種分離・変換に関する研究開発を行っていくことが示されている。

高レベル放射性廃棄物については、当面、集中中間貯蔵施設（ATC）を建設して管理することとしており、貯蔵施設の公募によるサイト選定が 2009 年から開始された。2012 年 1 月にクエンカ県ビジャル・デ・カニャス自治体に建設されることが決定している。その

後、2014 年 1 月に ENRESA が集中中間貯蔵施設（ATC）の立地及び建設許可申請を提出した。

### 2.9.2 処分システムの概要

高レベル放射性廃棄物については、その処分方針の決定は先送りされているが、下図のような地層処分場の概念が考えられている。

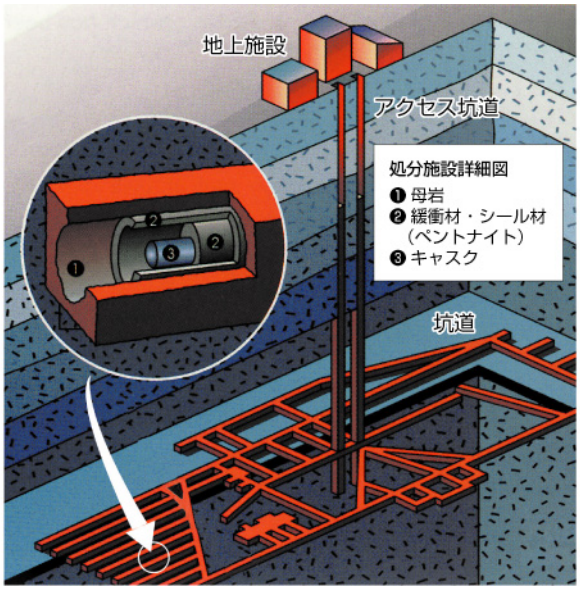



図 2.9-1　スペインのおける地層処分の概念設計

### 2.9.3 研究開発プログラムの概要

スペインでは、放射性廃棄物は、利用される意図がなく放射性核種を産業・エネルギー・観光省（MINETUR）が定めた放射能濃度以上含む、または汚染された物質や廃棄物と定義されている。放射性廃棄物管理の責任は、1984 年以降、ENRESA が担っており、その活動及び資金確保システムは、2003 年 10 月 31 日の王令（1349/2003）及び 2009 年 10 月 26 日の法律（11/2009）によって規定されている。これらの法令では、放射性廃棄物管理は、MINETUR によって提供される本質的な公共サービスであるとしている。このサービスは、ENRESA が提供し、廃棄物発生者の費用負担システムで資金確保されることなどが規定されている。

放射性廃棄物管理は、社会や環境などの権利を侵害することなく、収集、輸送、貯蔵す

ることが必要である。このためには、規制機関が定めた安全要件を常に満たすことを確実にするための、技術、手法、特定かつ正確な、また証明された専門性を必要とする。この点において、研究開発（R&D）は、産業によって提供されることのない、かつ、管理オプションの開発及び安全研究の支援のために欠くことのできない知識や技術に貢献する放射性廃棄物管理の一部とみなされる。R&Dは、放射性廃棄物の特性調査、輸送及び貯蔵、廃止措置活動に関連した放射性廃棄物管理の操業プロセスの最適化にも貢献するものである。

2.9.3.1 地層処分に関する研究開発の国家方針

スペインにおいて放射性廃棄物、原子力施設の解体、それらの経済・財政的分析に関連して行われるべき戦略や活動は、総合放射性廃棄物計画（GRWP）において示される。GRWPは、内閣によって承認され、定期的に更新が行われる。現在、第6次GRWPが最新のものであるが、第7次GRWPが承認過程にある。

原子力発電所の運転からは使用済燃料が発生する。使用済燃料管理オプションについては、大きく分けると次の3つに分類することができる。

- オープンサイクル
- クローズドサイクル
- 先進的クローズドサイクル

これらすべてのオプションでは、長期または短期の貯蔵段階が必要であり、オープンサイクルの場合には使用済燃料自身を廃棄物として、クローズドサイクルの場合には再処理後に再利用不可能な物資について最終的な管理が必要である。国際的には、長寿命放射性廃棄物の最終管理の研究に多くの努力が行われており、これらの廃棄物を地層処分することが、実行可能かつ安全な技術であるとの結論に至っている。ただし、実際の代替案としては見られていないが、長期戦略の確立のため、核種分離・変換のような他の管理オプションが検討に値すると考えられている。

オープンサイクルとクローズドサイクルは、エネルギーオプション、すなわち、戦略的、経済的な面を考慮して選択される。スペインの場合には、オープンサイクルを選択しており、プールでの貯蔵、乾式貯蔵の後、使用済燃料は、最終的には適切な方法でキャニスタに封入され、地層処分される。

スペインのシナリオは、以下のように要約可能である。

- 現在5カ所の原子力発電所（7基の原子炉）が運転中
- オープンサイクル（使用済燃料の再処理は行わない）
- 決定したサイト、許認可手続きの後、集中中間貯蔵施設（ATC）が2017年末に操業開始予定。2016年中ごろに受入施設の操業が開始される計画。ATCは60年間操業予定。
- 原子力発電所は閉鎖3年後に廃止措置を開始し7年間かけて廃止措置を実施。

2.9.3.2 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物に関する状況分析

スペインでは、当初使用済燃料の再処理が選択されていた。しかし、1982 年に再処理の実施は一部を除き中止された（ヴァンデリョス原子力発電所からの使用済燃料はすべて再処理が行われた)。再処理の結果発生した以下の廃棄物は、スペインへ返還される契約となっている。

- ヴァンデリョスI原子力発電所の使用済燃料の再処理によって発生した高レベルガラス固化体、及び関連した長寿命中レベル放射性廃棄物は、2015年末までに返還されることが想定されている（返還開始は2010年）。
- サンタマリア・デ・ガローニャ原子力発電所からの使用済燃料からは、英国において核分裂性物質の一部が回収されている

1982年以降、国内の原子力発電所で発生したすべての使用済燃料は、当該施設のプールにおいて貯蔵されている。1990年代にプールの容量が一杯になることが予期されたため、リラッキングなどが行われた。

高レベル放射性廃棄物及び中レベル放射性廃棄物については、エルカブリル処分場では処分できないため、海外を含むその発生サイトにおいて管理されている。

2.9.3.3 短期的な戦略

基本的な戦略では、使用済燃料及び高レベル・中レベル放射性廃棄物の集中中間貯蔵施設（ATC）の 2017 年の操業開始に力が注がれている。ATC は、この地域での企業の誘致を容易にするために関連テクノロジーセンターやインフラを含むテクノロジーパーク内に設置される。技術的、戦略的、及び経済的観点からの分析により、この方策が、スペインの場合には理想的なものであり、今後数年間に優先される基本的目標である。使用済燃料

及び高レベル放射性廃棄物の貯蔵施設はボールトタイプで、これらの廃棄物の受入・処理のためのホットセルが設置される。

ENRESAでは、一般的なATCの設計を行い、原子力安全審議会（CSN）に提出した。CSNはこの設計をレビューし、肯定的な評価を2006年に下している。

2.9.3.4 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の最終管理

1985 年以降、ENRESA は、次の 4 つの基本的な方向性において最終管理の選択のための作業に従事してきた。

- サイト選定計画（PBE）：1996年に中止を余儀なくされたが、スペインの地下には地層処分施設の設置に適した、花崗岩、粘土や（あまり多くないが）岩塩などの地層が幅広く存在するという十分な情報を収集
- 母岩について最も共通する点を考慮した、それぞれの地層での処分施設の概念的な設計の実施
- 概念的設計に基づく安全評価の開発。これまでに得られた知識を統合し、R&D計画に反映。また、地層処分施設が、このタイプの施設に適用される安全及び質的な基準に適合可能であることを提示。
- R&D計画は、GRWP及び高レベル放射性廃棄物の管理に適合し策定。R&D計画によりKnow-howを獲得し、海外の地下研究施設での国際研究プロジェクトや実証プロジェクトに参加するチームの設置を実現

近年、核種分離・変換技術の研究に多くの努力が払われている。ただし、この研究のためには国際的なプロジェクトへの参加が必須である。ほとんどの研究開発は、基本的データの獲得や実現可能性分析を目的としており、理論的なものである。しかし、産業レベルでの実現可能性を研究するプロジェクトを開始することが次期 EU 枠組み計画において計画されている。

1986 年から 1996 年の間に、地層処分施設のサイトを決定するための地層の調査が行われた。この結果、好ましい地層の分布が明らかにされ、一般的な地層処分場の設計が進められた。また、基本的設計及び概念的な施設に対する、花崗岩及び粘土を母岩とした安全評価が行われた。これらの進展は、今後のサイト選定及び地層処分場の実現のための基礎を構成することとなる。これらの結果から、第 6 次 GRWP で要求された次の報告書が発

行された。

- 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物管理オプション
- 新技術の実現可能性（核種分離・変換）
- 基本プロジェクト
  - ✧ 花崗岩での処分
  - ✧ 粘土層での処分
- 意思決定に関する経験

2.9.3.5 長期管理の関する戦略

第 7 次 GRWP のドラフトとして MINETUR に提案された計画では、望ましいオプションは、中間貯蔵を実施し、その後、最終処分を実施するというもので、経済的な計算及び計画目的で 2063 年から処分施設の操業を開始するとしている。第 6 次 GRWP の採択後、最終管理に関する活動は、以前の計画に示された活動と比べ、大幅に縮小されたものとなっている。基本的に、この分野での国際的な進展を活用し、これまでに得られた知識の統合・更新をすること、及び将来の計画策定の基礎となる GRWP によって要求された報告書の準備に限定されている。

使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物管理の戦略は、既に開発された情報を維持・更新することを指向する必要がある一方で、議会のイニシアチブの分析と策定を指向する必要がある。このことは、意思決定プロセスと参加のための最適な枠組みの定義を設定することに役立つものである。加えて、使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の最終管理のためには、それらの特徴や国際的な動向を考慮に入れた政治上・規制上の枠組みが必要である。以下に使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の開発のためのプログラム素案に関する主要な活動を示す。

- EUの技術的なプラットフォームの枠組みに関連した国際的なR&Dの進展やその他のより進展したプログラム、及び既存情報に基づいた、知識・技術の更新
- ATCのサイト選定過程での経験や国際的な経験を考慮に入れた、サイト選定での意思決定のための手続・プログラムの検討
- 地層処分施設の一般的な設計の実施、基本設計やATCでの長期冷却によるプラスの影響や知識の更新を考慮に入れた性能評価手法の開発
- 国際的な動向に調和した規制及び法的枠組みのためのアプローチ

2.9.3.6 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の最終管理プログラム素案

使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の開発プログラムは、技術要件や安全基準を満たすだけでなく、社会的・政治的な受容性を有すサイトが利用できるかに強く依存している。このため、プロジェクトの実施のため必要な科学的知識や技術が必要とされ、必要とされる時間枠での性能評価において十分な正当化がなされる必要がある。しかし、加えて、社会において必要な議論を可能とする参加のメカニズムを有すサイト選定手続も必要である。

しかし、使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の信頼でき安全な管理システムを策定する目的に基づき ATC が利用可能となることで､安全で柔軟性のある枠組みが提供される。これは、数十年間続き、最終管理計画策定のために十分合理的な時間を提供するものである。

以下に、プログラム素案の各段階を示す。

**第1段階（2013年-2020年）：知識の更新**

ATCの実現のための活動から得られたものを含め、これまでに作成された文書、技術及び社会面で最も進展したプログラムやEUの枠組み計画に関連した国際的なR&Dプログラムの進展から利用可能な技術の収集及び分析を行う。これには次のようなものが含まれる。

- サイト、天然バリア、人工バリア、設計や関連する性能評価に関して今日までに蓄積された情報のレビュー
- このプログラムのすべての段階で行われる、ニーズの評価や関連するR&D計画のレビュー。ATCのテクノロジーセンターは、このための重要な要素の一つである。
- 利用可能な科学的及び技術的能力の評価
- サイト選定プロセスのためのリファレンス文書の検討
- 処分施設の一般的な青写真とこれに基づく国内で利用可能な好ましい地層での安全評価の開発

この段階の最後でENRESAは、開発した情報、利用可能な能力、サイト選定のアプローチ、及びこのアプローチの基礎情報を含む詳細な報告書を提出する。

**第2段階（2020年-2023年）：報告書の評価**

この段階において政府は、ENRESAにより提出された情報を分析し、評価結果次第で、特にサイト選定プロセスについて次の段階に進むことを決定する。

**第3段階（2023年-2027年）：サイト選定プロセス**

政府の評価の後、2023年から2025年に、技術的要件だけでなく、一般公衆への情報提供、市民やステークホルダの参加に必要な活動を考慮した、候補サイトの選定手続の策定を目的とした活動が行われる。2025年から2027年に、この手続きが実施に移され、その結果に基づき、次の段階に進むかについて決定がなされる。この段階の結果は予測することができない。どのような手続に十分な柔軟性があり可逆的なのかにより、必要に応じ、再度プロセスが実施される。このような場合、この段階の最後では、候補サイトのリストが提示され、次の段階で詳細に議論が行われる。

**第4段階（2028年-2035年）：候補サイトの評価**

この段階では、地上からの技術（地球物理学、ボーリング等）を用いた、異なる候補サイトの予備的な特性調査が必要となる。調査結果の評価により、これらのサイトでの実現可能性が分析可能となり、1つまたは複数の候補サイトが提案される。

**第5段階（2036年-2050年）：サイト特性調査及び実現可能性の確認**

この段階において、地下研究施設の建設を含む詳細なサイト特性調査が行われる、地下研究施設には、有効性を確認する必要がある深度に試験機器が設置される。

平行して、施設の建設、操業及び閉鎖システムの主要な構成要素の確認のためのパイロット実証施設が建設される。

サイト特性調査、及び最も重要な構成要素の確認から、施設の詳細な設計、安全や環境影響に関する研究が行われる。

**第6段階（2051年-2063年）：許認可及び建設**

この段階において、必要な許認可手続きが行われる。また、設計の基礎や許認可・操業を支援する長期にわたる調査やデータ収集を継続することが計画されている。

**第7段階（2063年-2068年）：初期操業**

使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の処分が約5年間の試験段階として開始される。

**第8段階（2069年以降）：通常操業**

初期操業が終了した後、通常操業段階へと移る。

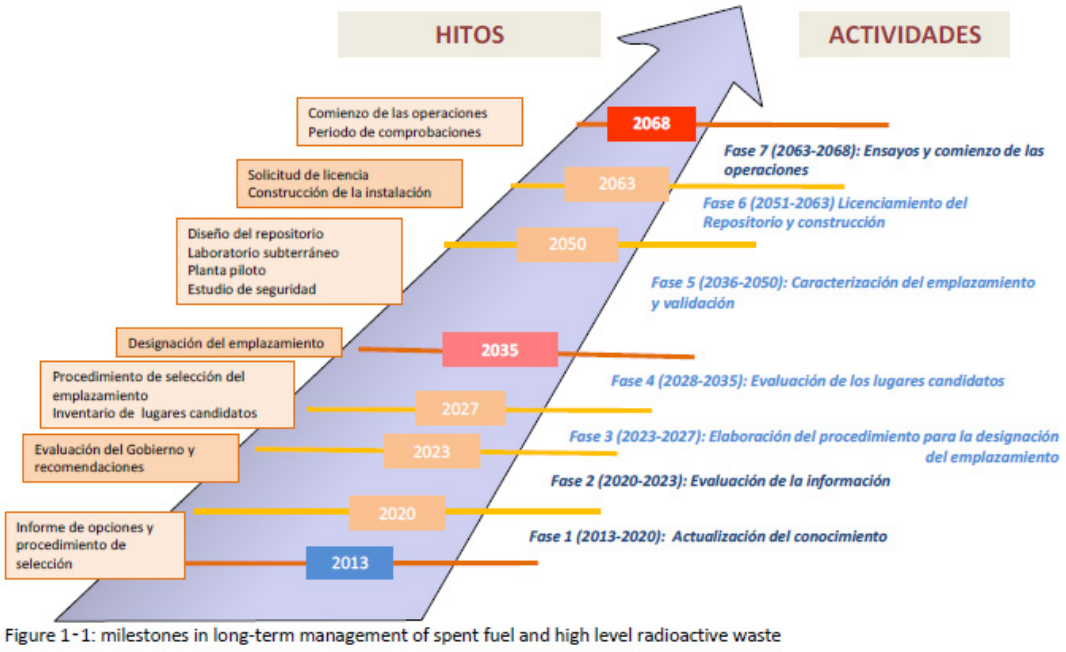


Figure 1-1: milestones in long-term management of spent fuel and high level radioactive waste

図 2.9-2　使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の長期管理のマイルストーン

2.9.4 研究開発課題とその概要

スペインでは、放射性廃棄物に関するR&Dを実施・促進する2つの機関、ENRESA及びCSNが存在している。大学、国立研究センター、民間会社などこの分野でR&Dを行っている組織も存在しているが、一般的にこれらの組織は、ENRESAかCSNのどちらかの支援を行っていると見ることができる。

核分裂エネルギー関連組織のほとんどは、原子力・分裂技術プラットフォーム（CEIDEN）を構成する機関である。CEIDENは、2007年に異なるR&D計画やプログラムを調整すること、国際プログラムに参加することを目的として設置された。このプラットフォームは、R&Dプロジェクトの実現を推進している。

2.9.4.1 ENRESA の R&D 計画の概要

ENRESAは、自身のR&D計画を5年ごとに策定している。第6次計画は、2009年から2013年を対象としており、2013年12月に終了している。第7次計画は、2014年から2018年を対象としており、ドラフトが準備され各機関からのコメントを受けている段階である。これらの計画は、GRWPで示されたガイドラインに基づいたものであり、以前に開発された科学・技術能力を詳細に示し、また、ENRESAが将来対応する必要がある課題を示している。

この計画書は、放射性廃棄物管理におけるR&Dの必要性を提案・正当化している。また、以前の計画を基盤とした技術的なスターティングポイントを示しており、境界条件を考慮し、現在及び中期的な必要性、戦略的な活動を示している。これらの戦略的なガイドラインに従い、活動計画のための分野が設定され、達成された技術レベルなどが仮の予算配分とともに示されている。

2.9.4.2 これまでの研究開発の全体的な結果

ENRESAによって行われるR&Dは、1986年から2013年まで5年ごとに計画が策定されている（図 2.9-3）。

○第1次計画：1987年-1991年

○第2次計画：1991年-1995年

○第3次計画：1995年-1999年

○第4次計画：1999年-2003年

○第5次計画：2004年-2009年

○第6次計画：2009年-2013年

図 2.9-3　ENRESA の研究開発計画

研究開発予算は、年平均600万ユーロであるが、最初の計画では、必要かつ主要なインフラ整備のため多くの投資が必要であった。今日までの投資額の合計は、1億6,550万ユーロである。

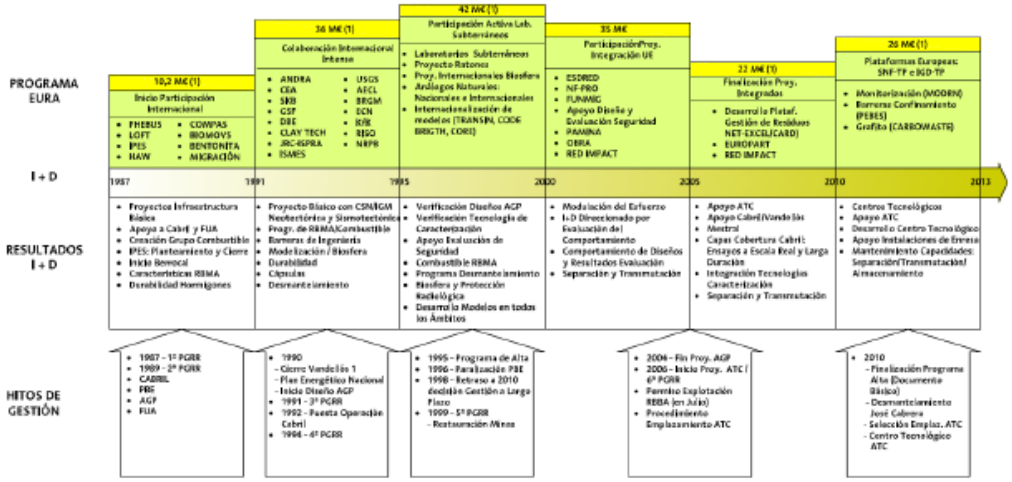



図 2.9-4　各研究開発計画（5ヶ年）の投資額

図 2.9-4に各研究開発計画での投資額を示す。

R&D計画は、ENRESA及び関連する研究センター、企業等が参加して策定される。2009年から2013年の計画の場合には、38の研究機関が参加して策定された。EURATOM枠組み計画への参加は、以前の計画と比べ減少している。これは、ENRESAが操業中の施設の支援やATCプロジェクトの準備に注力しているためであり、EURATOM枠組み計画については、深地層での廃棄物管理分野のプロジェクトが優先的に行われている。

ENRESAは、R&Dの結果をデータベース、発表報告書のテーマによる組織化、重要な場合には内部の参照文書や技術報告書として管理している。結果の共有や提示のためのワークショップやワークミーティングは、体系的に実施されている。

### 2.9.4.3 研究開発の範囲及び結果

第1次計画では、1990年代初期に、研究チームと関連する設備の創設、エルカブリルでの低中レベル放射性廃棄物処分場の許認可及び建設の支援、及び高レベル放射性廃棄物等の

サイト選定計画を支援する目的でEURATOMの枠組み計画への参加が重視されていた。ほぼ2000年まで、R&Dでは、地層処分施設を最終的な解決策とし、かつ減容及びインベントリの複雑さを低減する核種変換を新たな技術とした、使用済燃料管理計画を支援する活動に注力していた。EURATOM枠組み計画のプロジェクト、特に、欧州での地下研究施設でのプロジェクへの参加が非常に活発であった。小規模なプロジェクトとして、低中レベル放射性廃棄物の管理を支援するためのプロジェクトも行われていた。

1996年には、高レベル放射性廃棄物管理のための研究開発等は、使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物のための地上での中間貯蔵施設の建設を目指すことに方向転換が行われた。このため、最新の研究開発計画では、これらの施設を支援するための活動、エルカブリルの極低レベル放射性廃棄物処分用のセルのようなENRESAの操業活動、ATCの開発・建設支援のR&D計画が主となっている。

これまでに行われた活動の結果として、今日の状況は以下のようになっている。

- ENRESAが操業している施設を支援することを可能とするインフラや能力が高度に蓄積された。
- 管理活動のために保存及び移転するために確立されたメカニズムとともに、レビュー等の過程にある多くの重要な情報が存在している。
- ENRESAのR&D及び研究チームは国際的に高く評価されており、最も進展したプログラム（フランス、フィンランド及びスウェーデン）にENRESAの技術を適用可能である。
- 非常に先進的な技術開発を達成したが、スペインの研究所で高レベル放射性廃棄物について取扱う可能性に関連し、まだ大きなギャップが存在している。

過去25年間において、研究チームは成熟し強固なものとなったが、ENRESA自身及び他の研究開発機関において世代の更新も起こっている。このことは、技術や知識の維持の方法にも影響を有すため考慮に入れる必要がある。

#### 2.9.4.4 2014 年から 2018 年を対象とした新たな R&D の課題及び戦略目標

2014年から2018年の暫定的な研究開発計画では、ENRESAは非常に重要な課題に取り組む必要がある。このことから、この計画策定のためのR&Dの戦略には、条件が付くことになる。

- 原子力発電所サイトでの使用済燃料のサイト内貯蔵及びATCの許認可、建設、操業開始
- ATCに関連したテクノロジーセンターの設計、許認可、建設及び操業開始
- エルカブリル処分場の処分容量の拡張のための活動の技術支援、及び原子力施設の解体に伴う新たな廃棄物発生経路への対応
- ホセカブレラ原子力発電所の解体の継続及び完了、発生するすべての廃棄物の管理
- ATCの継続、かつEU廃棄物管理指令に規定された2015年の期限の準拠のための、処分スケジュール
- ENRESAのすべての活動における安全性の継続的な改善
- 知識管理、保存及び伝達

今後数年間の ENRESA の活動は、目的達成のため外部条件と調和し進展していく必要がある。R&D 計画の策定に影響を有す外部条件には次のものがある。

- 経済的要素：多くの企業や研究グループが直面している困難な状況は、品質の高い研究開発及び能力の高い多くの研究グループの参加を得るた上でR&Dプロジェクトを如何に提案し実施するのかという点で検討すべき要素である。
- 原子力発電所：サイトにおける使用済燃料管理のために利用可能な容量は重要な点である。原子力発電所の寿命延長及び高燃焼化による影響を考慮に入れるべきである。これらは、管理に影響を与える可能性があり、専門性及び追加技術の必要性がある。
- 福島第一原子力発電所事故の影響：ストレステストの結果、廃棄物管理は現在、より頑健性を有し証明された技術を用いる必要がある。また、これまでに予見されたシナリオ研究を行うべきであり、これには一部が開発段階にある知識や特定の技術を必要とする。
- EU指令：EU指令（70/2011）は、すべての加盟国が使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の安全かつ最終管理のための検証可能なプログラムを策定しなければならないことを規定している。ENRESAは、この分野で2000年代初頭までに重要な作業を行ってきた。しかし、現在、新たなプログラムを実施する必要がある。
- ホライゾン2020：EUのR&Dの新たな戦略では、プログラムへの積極的な参加の

ため必要な交流を行うことを求めている。長期の廃棄物管理プログラムの枠組み内で、R&Dのプラットフォームに直接加わることでそのような参加が可能となる。

- R&Dに適用される法律 : ENRESAのR&Dプロジェクトは、適用される法令に常に従う必要がある。従って、R&D計画内において、プロジェクトの設立に関連した、また、技術的な活動を補完する管理上の大きな負担を賄う資源を強化する必要がある。

境界条件、技術的な能力及び課題に基づいた、新たな計画の戦略目標を以下に示す。

- ATC及び関連テクノロジーセンターの許認可及び建設の支援
- 2018年に利用可能となるテクノロジーセンターで明確な研究プログラムの実施
- 低中レベル放射性廃棄物、極低レベル放射性廃棄物、解体廃棄物に適用される改善された操業システム
- 長期的な使用済燃料管理プログラム支援のため、既存能力の保存
- R&D管理システムの次の世代への移転及び知識の保存等の確実な実施

(1) ATC の許認可、建設及び操業開始の支援に関連した戦略的 R&D

ATC の許認可及び建設には、非常に厳しい時間的な制約が存在している。この施設は、2017 年末、または 2018 年の初めには操業を開始しなくてはならない。このために、R&D の分野では、この施設の操業開始を容易にする多くの研究活動が計画され、既に実施されている。

R&D 計画では、これらの活動の支援のために以下を行う必要がある。

- 燃料プログラム：貯蔵される燃料の特性及び詳細な状態を知ることを目的としている。ENRESAは、以下に対応するプロジェクトを実施する必要がある。
  - ✧ 発生源及びATCでの照射済燃料の特性調査
  - ✧ ATCのための廃棄物受入基準の設定のための研究及び技術支援
  - ✧ 乾式貯蔵状態での燃料挙動の研究
  - ✧ 損傷燃料の処理、輸送及び検証の技術及び手順の開発（図 2.9-5）

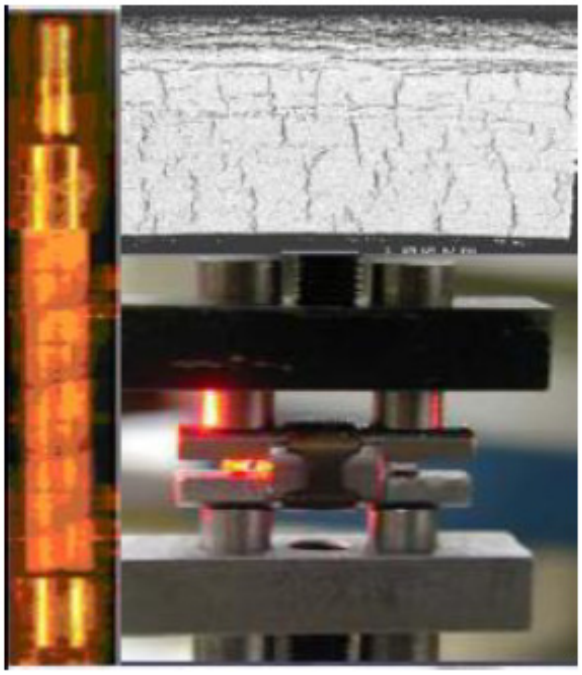


図 2.9-5　損傷燃料に関する研究開発

- キャニスタプログラム：金属製キャニスタは、使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の隔離において基本的な役割を有している。R&Dでは、この分野の技術的要求を満たすために必要な支援を行う必要がある。この点において、次のようなプロジェクトを実施する必要がある。
  - プールで貯蔵されているすべての燃料に関して、輸送、封入及びATCでの貯蔵を可能とするようキャニスタを最適化
  - 水密性及び操業条件下（高温・高線量）で必要な挙動を確保にする耐久性プロジェクト
  - キャニスタの製造及び求められる機能上の要件の確認システムの最適化
  - 処分ためのキャニスタ（ATCの実際の設計段階から最終管理について考慮）
  - ATCの寿命管理。ATCの機器の設計寿命を確実にするため、全てのシステムからのデータの収集。設計寿命の他、R&Dプログラムでは、燃料、キャニスタ、コンクリート及びサイトの4つの主要な部分に対応する。

温度、放射線、力学的負荷及びそれらの相関を考慮する時間の経過とサイトの特徴を考慮に入れ、物理的、力学的及び科学的特性の進展を研究するプログラムが、全ての材料に

対して行われる。これらの研究結果として、非常に正確な長期挙動に関するデータが得られ、どの程度の期間最大の安全性が保証されるのか明らかにされる。

- サイト特性調査プログラム：長期的な寿命管理計画とセーフティケース、許認可及び建設の支援のため、R&D内での通常のサイト特性調査に加え、サイトの力学的、技術的及び科学的影響への反応について調査を行う。このプログラムには、地圏及び生物圏での核種移行を支配する現象、条件及びパラメータや深度の影響解析の研究が含まれる（図 2.9-6）。

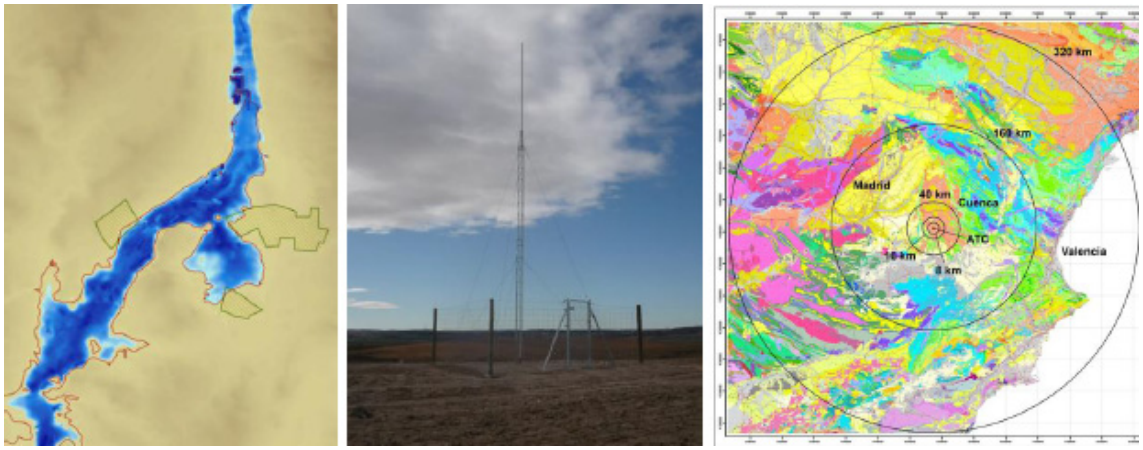



図 2.9-6　ATC のサイト特性調査

- 数的モデリングプログラム：操業期間中の施設の進展について信頼可能な推定が可能なように、すべて及び個々の構成要素（燃料、ジルカロイ、キャニスタ、ボールト、サイト及び環境）の挙動、複合現象及び相互作用を対象とする特定モデルをR&Dにおいて取扱う。この分野において、既存及び新たな開発により、施設の性能及び挙動の総合的なモデリングを行う。
- モニタリング：物理的、化学的、力学的及び放射線学的特性のモニタリングのための先進的技術の開発がATCに関連したR&Dの課題の一つである。不活性ガス（ヘリウム及びアルゴン）の濃度、温度分布、コンクリートの特性の変遷等の正確な計測のための利用可能な技術は、施設の長期的な機能を確実にするために欠かすことのできないものである。既存技術の最適化及び改良がこの計画の基本的課題である。

図 2.9-7　サイトでの水理化学特性調査のための移動式施設

- 計装技術：異なる状況下において、施設の操業では、強い放射線下での作業を必要とする可能性がある。これは特にホットセルの場合に当てはまり、ロボットシステムによってのみ可能である。産業技術が適用可能な場合に加え、既存技術を補完するホットセルの形状や特徴に適応した技術を進歩させることが望ましい。
- 訓練：システムの様々な構成要素に対する操業スタッフの訓練のための試作品を計画の目標内で利用可能とする。

(2) ATC に関連したテクノロジーセンターの開発のための戦略的 R&D

ATC に関連したテクノロジーセンターは、ENRESA の R&D のうち、非常に重要な成果であり、開発において大きな変化を意味している。今日まで ENRESA は幾つかの研究センターにおいて能力開発を推進してきたが、主にはエネルギー・環境・技術研究センター（CIEMAT）で行われてきた。しかし、ENRESA が国外の研究機関で集中して実施する国内では利用不可能な研究能力が多く存在する。これらについては、国内の特定のプロジェクトでの研究者の訓練を継続して行うには多くの困難が存在している。4 つの基本的な研究所（燃料、材料、プロセス・環境及びプロトタイプ）を有すテクノロジーセンターが利用可能となることで、ENRESA の R&D のアプローチに大きな影響を与えることになる。 この施設は ENRESA の施設であり、研究に利用可能である。このことは、センターは施設の機器やインフラの運用のための独自のスタッフを有し、環境モニタリング、受入基準の開発・検証、品質保証のような他の分野の R&D における ENRESA のニーズをカ

バーすることになる。また、このセンターは、協力協定の枠組みに基づき、他の機関との共同プロジェクトを行うことも企図されている。このため、テクノロジーセンターは、既存施設を補完し、協力協定により ENRESA と関連する外部の研究者が機器やインフラを活用することができるよう設計されている。

研究に関連した 2014 年-2018 年を対象とした R&D 計画の目標は、建設、調達、人員の訓練や ATC への直接的な支援である。

このように、テクノロジーセンターに関連した R&D には以下が存在している。

- **燃料、プロセス、材料及び研究所のプロトタイプの作成のための初期プログラムの開発：**作業ミーティングや進行中の主要なR&Dプログラムのレビュー、及び各研究所の目的に関連するENRESAのニーズを通じ、個々の研究所に対する初期プログラムを策定する。これには、必要な機器、短期目標、個々の研究所に対する特定の合意や開発の枠組みが含まれる。
- **ATC支援プログラム：**テクノロジーセンターは、設置当初から材料や機器の検証によりATCを支援しなくてはならない。
- **訓練プログラム：**ATC、テクノロジーセンター、及び他の施設の技術者の訓練は、燃料の管理、コンテナの荷役、構成要素の製造などの操業技術のフルスケールのシミュレータが設置されるトレーニングセンターのプロトタイプを利用して行われる。
- **協力プログラム：**この計画を通じ、テクノロジーセンターの組織・運営体制が確立される。公共の研究機関、企業や国際機関との共同開発プロジェクトのためパートナーシップの合意を初期から確立することが重要である。

このため、新たな核燃料サイクル施設としてのATC及び研究センターとしてのテクノロジーセンターについて、国際的に公表する必要があり、EURATOMの枠組みにおける”中核的研究拠点”としてテクノロジーセンターを含む可能性を検討しなくてはならない。

(3) 低中レベル放射性廃棄物（LILW）及び極低レベル放射性廃棄物（VLLW）管理に関連した戦略的 R&D

低中レベル放射性廃棄物及び極低レベル放射性管理のため、既に近代的かつ最新のシステムを有しているが、解体からの新たな廃棄物、エルカブリル処分場の処分能力の増強の必

要性、操業プロセスの最適化などは重要な課題であり、R&Dが継続して対応していく必要がある。これらの活動を支援するR&Dには、次のようなものがある。

- 先進的技術（粒子加速器）を活用した、特に長寿命核種や極低濃度の廃棄物の特性調査技術の継続的改良。廃棄物の受入基準の設定及び検証のための技術の改良（図 2.9-8）

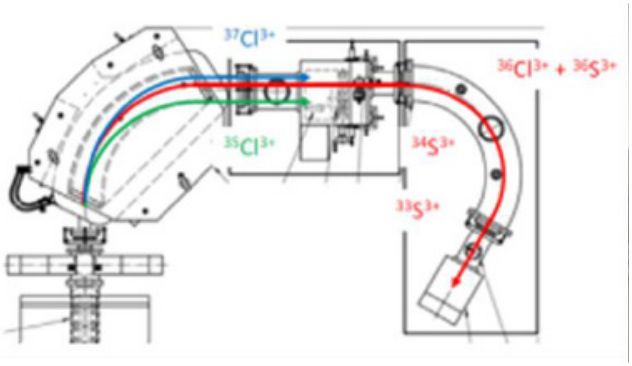



図 2.9-8　S 及び Cl の放射性同位体検出実験計画

- 解体に関連し廃棄物パッケージの分離等技術の改良により、処分容量の最適化のため減容のための研究開発の継続（図 2.9-9）

図 2.9-9　減容のためのプラズマ溶融炉のプロトタイプ

➢ 黒鉛管理のための国内外での研究活動の継続（図 2.9-10）

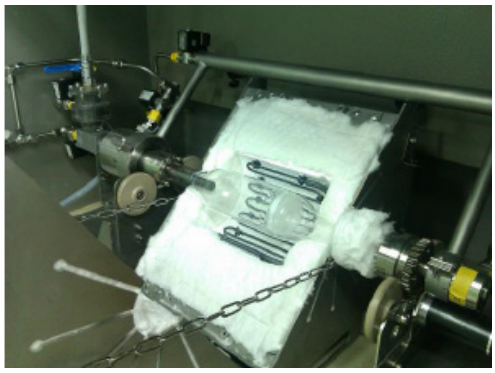


図 2.9-10　黒鉛の加熱処理

➢ 処分施設の構造及び覆土層などの耐久性に関する維持・改良（図 2.9-11）

図 2.9-11　コンクリートの耐久性研究

➢ ·サイトモニタリング、データ取得・伝達、保存、検証及び分析の改良（図 2.9-12）

図 2.9-12　エルカブリル処分場での地下水のモニタリング

➢ モデル、人工バリアシステムの性能モデル等の改良。処分場が拡張される可能性のあるエリアへのモデルの適用範囲の拡大（図 2.9-13）

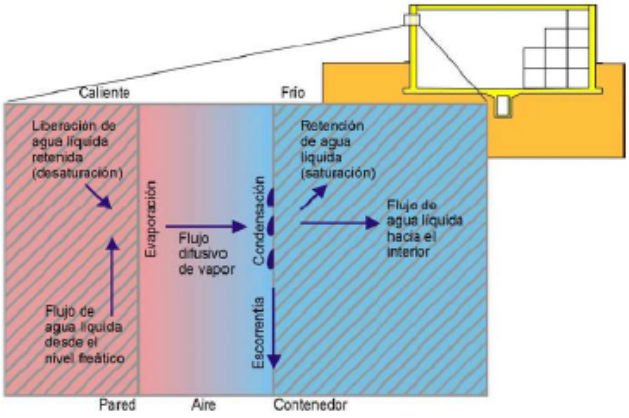



図 2.9-13　LILW ボールトの概念モデル

(4) 原子力施設の解体・廃止措置に関連した戦略的活動

廃止措置及び汚染されたエリアの回復は、ENRESAに与えられた使命の一部である。この分野では解決すべき課題が幾つか存在している。これらの課題は、R&Dが貢献しなくてはならないものであり、次のものが含まれる。

- ヴァンデリョスI原子力発電所のサイトの回復
- 原子炉容器のモニタリング・監視
- ホセカブレラ原子力発電所の解体の完了
- CIEMAT施設の改善ための総合計画（PIMIC）及び鉱山の回復

以下の2つのR&Dが存在している。

- 解体におけるR&D：現在行われている以下の活動支援のためR&Dを継続する必要がある。
  - 廃棄物の減容
  - 解体される施設のインベントリの初期特性調査のための技術・手法の改良
  - 除染技術の改良
  - 規制解除技術の改良
  - 材料管理技術の改良
  - サイト回復のための技術改良
  - 標準的でない大きさの構造物の輸送技術の改良
- 解体プロジェクト中のR&D：解体作業の過程で行うことが可能となるR&D活動には以下がある。
  - 原子力施設の寿命管理等のための高線量・高温下での金属の研究
  - 原子力施設やATCの素材の耐久性研究のため、高線量・高温下のコンクリート素材の研究
  - 非破壊技術の適用及び検証
  - この分野で将来的に行われる活動を見据えた解体プロジェクトからの経験の研究。技術的な教訓や将来のガイドラインの策定

(5) 最終処分に関連した戦略的 R&D

ATC は、使用済燃料管理の最終段階ではない。このことは、テクノロジーセンターが、

使用済燃料管理に関連する研究を行うことが示唆している。EU 指令（70/2011）では、加盟国が活動、マイルストーン、資金確保等を示した最終処分のための現実的なプログラムを策定することを求めている。これらの前提から最終処分プログラムが必要である。この点において ENRESA の戦略は、R&D の枠組み内でこのプログラムに対応するというものである。

最終処分が GRWP において優先課題とされていた際には、ENRESA は最終処分に注力した計画を策定していた。結果として、技術プロジェクトのレベルで、サイト探査計画が策定され、1986 年から 1996 年にかけて使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の地層処分場の建設を目的として国土の調査が行われた。

当初の計画では3種類の地層（花崗岩、粘土及び岩塩）の調査が重視されたが、その後、花崗岩及び粘土に集中して調査が行われた。その結果、おそらく、地球科学分野において過去50年間に行われた活動の中で最も包括的なものとなり、非常に多くの地質学的情報が収集され、ENREESAの地理情報システム（GIS）に保存・維持された。これらの情報は、地下や国土計画の分野での様々な用途のために多くの機関に対して提供が行われてきた。この計画と並行し、ENRESAは、これら2種の母岩（花崗岩及び粘土）に対する一般的な処分場の設計を実施した。また、サイト特性調査、人工バリアの設計・検証、処分場の一般設計を用いた性能評価を含む安全評価手法・モデルなどの多くのR&Dプロジェクトを行った。2004年までの主な結果を集積した設計、安全評価及びサイトデータに関する文書は、それ以降更新はされていない。

2006年以降、高レベル放射性廃棄物処分に関する活動はATCに集中しており、使用済燃料等の最終処分のためのプロセスを開始する政府等からの要請、法的支援などは無い状態である。

科学技術分野においては、急速に進展したが、社会的側面が考慮に入れられていなかったため、最終処分プログラムは非常に衰退した。

しかし、今日の状況は変わっており、一時的な使用済燃料管理が予定されており、近隣国（フランス、フィンランド及びスウェーデン）のように最終処分方策を考え始めなければならない状況である。ATCのサイト選定が、組織化され構造化されプロセスにおいて公衆参加及び透明性を確保した形で行われ、社会の支援が必須であったように、最終処分についてもこのような形で行われる必要がある（図 2.9-14）。

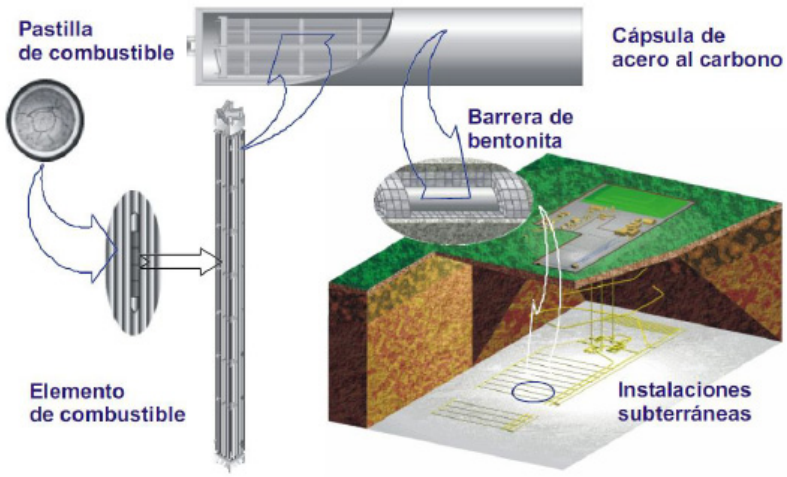



図 2.9-14　粘土層でのリファレンス処分概念

最終処分のために必要な情報を提供するプログラムの開発において、R&Dは重要な要素である。最新のGRWPで反映されたプログラムは、以下の段階を含んでいる（図 2.9-15）。

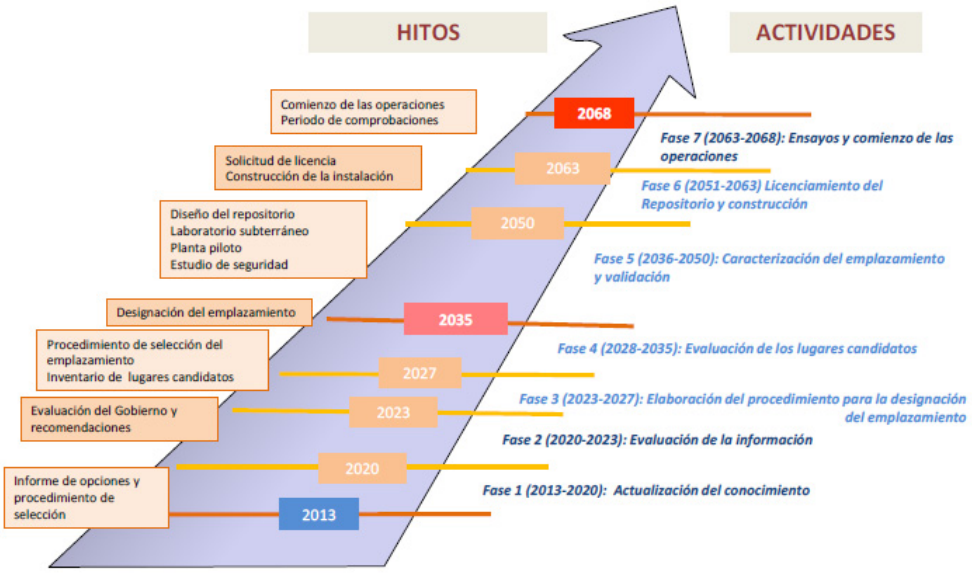



図 2.9-15　使用済燃料及び長半減期放射性廃棄物管理のためのマイルストーン

- 第1段階：安全研究を支援するサイト、設計、データ及びモデルに関する既存知識

の編集（2014年-2020年）。設計、安全解析及び管理手法の更新

- 第2段階：サイト選定のため合意された手続の情報分析及び策定（2021年-2025年）
- 第3段階：手続の実施及び候補サイトの評価（2025年-2035年）
- 第4段階：サイトの選択及び妥当性確認（2036年-2050年）
- 第5段階：処分場の設計、許認可及び建設（2050年-2063年）
- 第6段階：パイロット活動の開始（2063年-2068年）

この計画及び既存情報の収集等行う第1段階に貢献するため、R&Dでは以下の活動を行う必要がある。

○次の情報について**レビュー、統合及び更新**

- 国内外のR&Dプログラムからの新たな結果
- 出発点としてATCの詳細設計を考慮した概念設計
- 新たなデータ及び設計での安全評価の最新化

これらの活動には、二次的な目的として、将来的にこれらの活動に責任を持つ技術グループを創設し、既存知識の継承を確実に行うことがある。

○**新しい原子炉設計の調査：**新型炉の開発により、発生する高レベルの廃棄物の特性が変化する。これは、処分の観点から重要な意味を持つものである。このため、ENRESAのR&Dでは、欧州の共同プロジェクトへの参加を通じ、以下などについて積極的に調査を行う必要がある。

- 核種変換
- 第4世代炉

○**長期燃料プログラム：**乾式貯蔵中の燃料の挙動についての研究に加え、以下のような地層処分環境での使用済燃料挙動に関する研究が必要であり、テクノロジーセンターで行われる（図 2.9-16）。

- 分解プロセス及び核種の放出
- 燃料、キャニスタ及び人工バリアの相互作用
- 個々の構成要素及び複数の構成要素の機能に関連したモデル

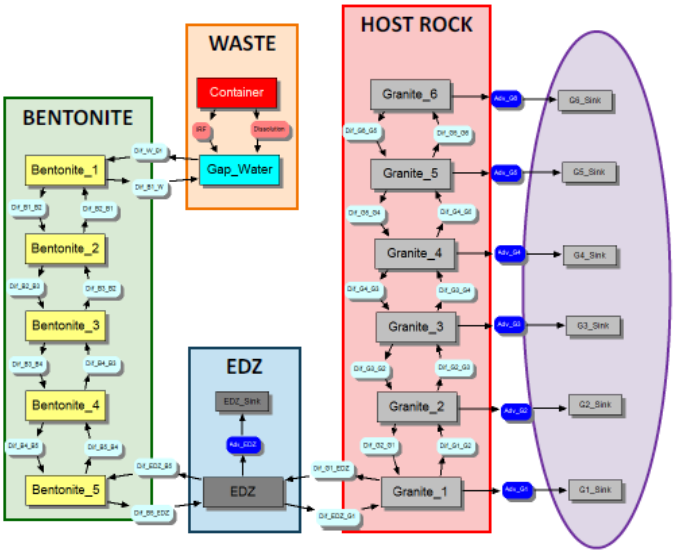



図 2.9-16　長期間の核種放出推定モデル

○**人工バリアプログラム：**処分段階において、設計に従い人工バリアを適応させる必要があり、大きさの変更や適切な挙動解析を行わなくてはならない（図 2.9-17）。

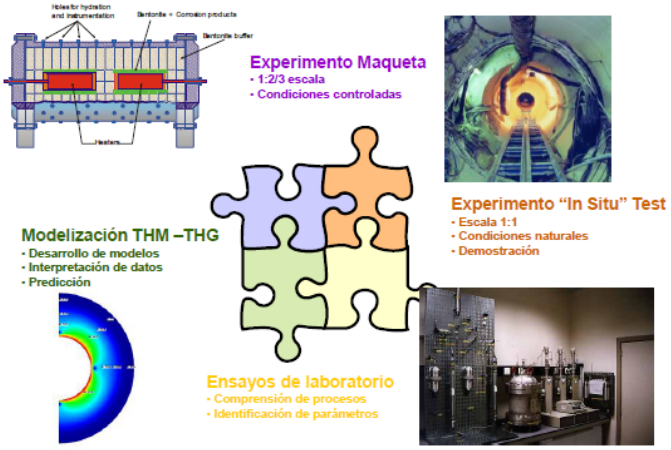



図 2.9-17　FEBEX プロジェクト

○**モニタリング及び安全評価プログラム：**この分野でのEUのプラットフォームであるIGD-TPで推進されている活動に従い、様々なバリアシステム（燃料、キャニスタ、人工及

び天然バリア）のモニタリングのための最先端技術の適用を推進する（図 2.9-18）。

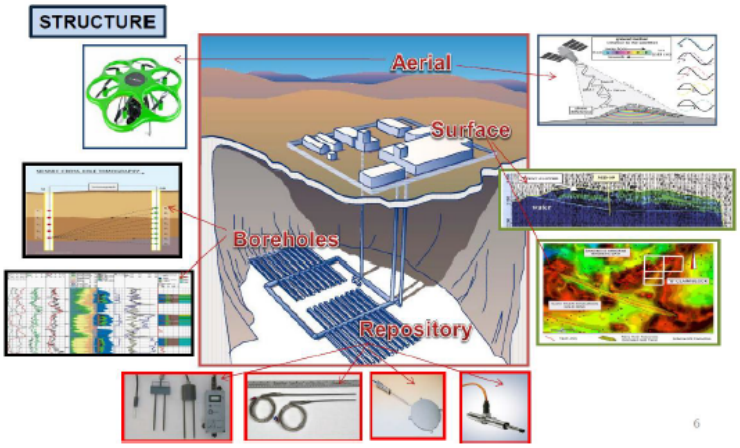



図 2.9-18 モニタリングの最新技術（MODERN プロジェクトなど）

○**知識及び能力の維持**：これまでに得られた結果、2020EURTOM 枠組みプログラムや NEA、IAEA のプロジェクトへの参加を通じて得られた結果に基づき、知識・能力を維持する。

(6) 情報管理及び R&D に関する知識の保存に関連した戦略的 R&D

廃棄物管理に関するR&Dの一つの特徴は、知識及び技術が長期にわたり使われることである。施設の許認可を可能とする安全研究は、継続的なレビューの対象となり、知識の体系的な更新が必要とされる。

R&D計画に従い、ENRESAは非常に多くの情報を蓄積してきた。これらの情報は、文書管理の観点からは良く分類され管理されているが、何が知られていないのかを見つけることは難しいものとなっている。ENRESAのR&Dは、ある段階では非常に細分化されていたため、詳細な結果は直接の管理者のみが知っている状態となっていた。過去数年にわたり、ENRESAでは世代更新が行われており、既存情報に焦点を当てるため、その妥当性の分析のため最初のR&D計画の結果の収集を行っており、将来容易に利用可能となるようにしている（図 2.9-19）。

このレビューやR&D活動の最新化からR&Dの結果の体系的な統合や技術的活動一般で

の経験の反映を容易にするための手法を開発し実施する必要性が生じている。

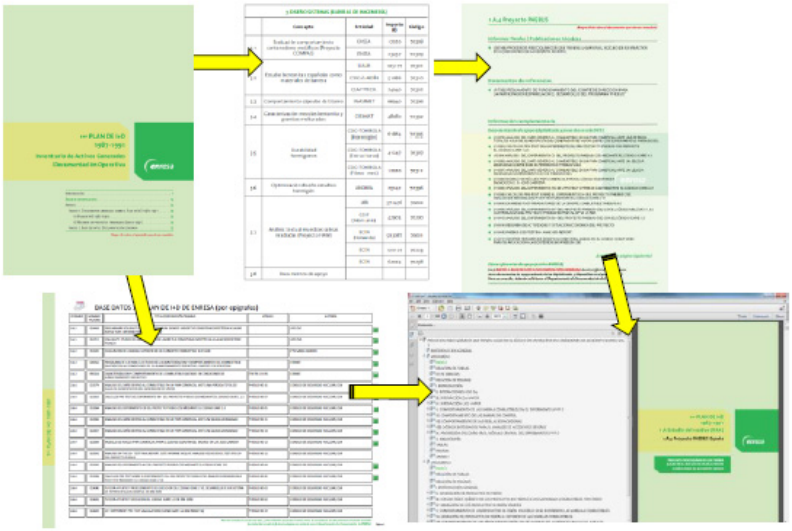


図 2.9-19　過去の R&D 計画の分析

このR&D計画内で、また、テクノロジーセンターが活動を開始した段階で更新されたR&Dによって生ずる全ての情報を利用するため、将来、知識・手法データベースの同定等を可能とする「廃棄物管理のR&Dの知識マップ」を開発することが関連活動として示されている（図 2.9-20）。

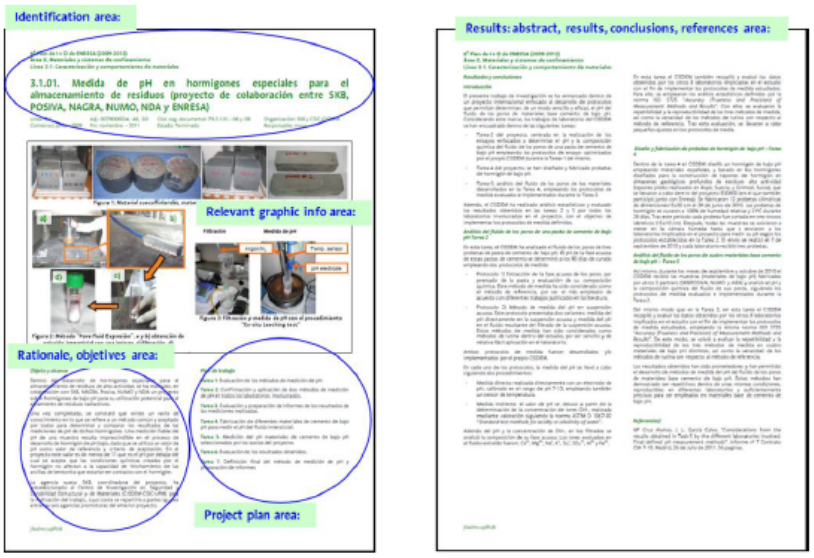



図 2.9-20　R&D 知識マップの概要

ENRESAは、知識管理・保存に関連したIGD-TPやOECD/NEAによって推進されている国際プロジェクトに積極的に参加することとしている。これらのプロジェクトは、何があるのか、どのように、また、どこに廃棄物があるのかが常にわかるように、廃棄物処分の場所、特徴、規模等を将来世代に伝えることを意図したものである。
この計画には、R&Dやその結果の普及に関連したワークショップ、作業ミーティング、文書化に関連した活動も含まれている。

(7) 安全性及び一般的支援の継続的改善に関連した戦略的 R&D

これまでに示した R&D 活動に加え、安全管理に直接影響を与える補完的な活動が存在している。これらの活動は、多くの場合、環境、安全評価及び放射線防護に直接関連するものである。以下にそれらの活動を示す。

- 環境及び放射線モニタリング（放射線、測定及び影響）のための手法の科学的基礎の強化
- 処分施設の安全評価手法及びモデルの改良
- 環境への核種移行に関連した科学、技術及び測定機器の基礎情報の強化。古環境、同位体の現在の挙動、バックグラウンド、人類への影響やモニタリングシステム
- 安全評価や関連するモニタリングに関連した、廃棄物中の核種の基本的特性（主にアクチニドや核分裂性物質）

2.9.4.5 R&D 計画の構成

第6次計画（2009年-2013年）と第7次計画（2014年-2018年）は、研究分野と研究分類に関して同じ構成である。これは、この構成が主要な分野に対して体系的かつ柔軟性を持って対応可能であることが示されたためである。以下は、両計画に示された研究分野及び分類のリストである。

分野1：廃棄物技術

分類1.1：使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物

分類1.2：低中レベル放射性廃棄物及び極低レベル放射性廃棄物

分類1.3：核種の基本的特性

分野2：処理・処理の技術及びプロセス

分類2.1：処理

分類2.2：除染

分類2.3：解体

分類2.4：固化

分類2.5：補助技術

分類2.6：核種分離

分類2.7：核種変換

分野3：閉じ込めシステム及び素材

分類3.1：素材の特性調査及び挙動

分類3.2：閉じ込めシステムの挙動

分類3.3：処分システム及び技術

分類3.4：素材及び閉じ込めシステムのモニタリング

分野4：性能評価、安全性、放射線防護及び関連モニタリング

分類4.1：評価手法及びモデル

分類4.2：システム及びプロセスのモデル化

分類4.3：環境回復

分類4.4：放射線防護

分類4.5：気候及び土壌

分野5：インフラストラクチャ及び調整

分類5.1：支援インフラ

分類5.2：調整

分類5.3：財産管理

以下に分野ごとの概要を示す。

(1) 分野 1：廃棄物技術

この分野でのプロジェクトでは、ENRESA が管理をする必要がある廃棄物の物理的・化学的特性や異なる段階での挙動、廃棄物の時間的な変遷に関する知識を深めることが行われる。

高レベル放射性廃棄物及び低中レベル・極低レベル放射性廃棄物の 2 つの主要なグループ

が、この研究開発において考慮されている。この分野での研究開発は、ENRESA の設置時点から継続して実施されており、管理すべき廃棄物の複雑さ、燃料の燃焼度、安全要件、より強力な分析ツールやモデル化ツールなどに対する要求などを反映している。この分野の R&D に含まれている活動には、廃棄物中に含まれる核種の固有の特性に関する情報の強化も含まれている。

(2) 分野 2：処理・処理の技術及びプロセス

この分野の R&D に含まれている活動は以下の 7 つの分類である。

- 分類2.1：廃棄物の処理。これには幾つかの目的があり、主要な目的は、廃棄物をマトリックス中に閉じ込めること、処分施設の受入基準を満たす特性についての情報を得ることや減容などである。
- 分類2.2：除染。サイトへの影響を与える可能性のある原子力施設が存在している土壌を回復することを目的としている。
- 分類2.3：解体。ヴァンデリョスI原子力発電所の解体中に得られた経験等を活用するため、メストラル技術センター（解体されたヴァンデリョスI原子力発電所に付随する施設）を活用し解体に関するR&Dが展開されてきた。これらの活動は、ホセカブレラ原子力発電所の解体から得られる情報によって補完される。
- 分類2.4：固化。この活動は今日までに標準化されており、R&Dにおいて展開されていない。この分類での研究は、特定の低中レベル放射性廃棄物や原子力発電所の解体からの廃棄物を管理する必要性が予期されるため準備されている。
- 分類2.5：補助技術。この分類ではプロジェクトはまだ設定されていない。
- 分類2.6：核種分離。核種分離は、核種変換のために必要である。湿式精錬や高温冶金法による分離技術に関連したEURATOMプロジェクトに参加している。
- 分類2.7：核種変換。核種変換は、使用済燃料管理オプションではないが、産業的な実行可能性が現行の管理方策と異なる管理の必要性につながる可能性がある。

(3) 分野 3：閉じ込めシステム及び素材

この分野では、異なる素材（コンクリート、粘土、金属、セラミック等）の挙動や利用、それらの相互作用や核種との作用の観点から、処分システムの構成要素に適用される R&D や技術開発を行う。この分野ではまた、高レベル放射性廃棄物、または低中レベル放射性

廃棄物のコンテナのような処分システムの様々な構成要素の設計、特性調査や機能性や安全性の分析に関連したR&Dが含まれている。

- 分類3.1：素材の特性調査及び挙動。ここでの活動は基本的な材料である、セメント、金属や粘土に焦点を当てている。
- 分類3.2：閉じ込めシステムの挙動。処分システムに適用可能な人工・天然バリアの設計及び検証に関するR&Dが含まれる。
- 分類3.3：処分システム及び技術。処分施設の設計及び挙動の検証を目的としたR&Dが含まれる。特に、ATCの燃料貯蔵コンテナでの研究が含まれる。
- 分類3.4：素材及び閉じ込めシステムのモニタリング。管理等への移転の観点でここでのR&Dが非常に重要である。

(4) 分野 4：性能評価、安全性、放射線防護及び関連モニタリング

この分野での活動は、放射線防護及び安全研究に関連したものである。また、解析のためのツールの開発及び改良から、国際レベルでの放射性防護や環境の基準の定義及びこれら基準への適合も含まれている。この分野では放射能で汚染された環境回復のために必要な研究が含まれている。また、開発中の概念的・数的モデルの検証のために必要な実験も含まれる場合もある。サイトや周辺の環境の現状に関する知識、感受性や改善方法に関する研究開発についてもこの分野に含まれる。

- 分類4.1：評価手法及びモデル。ENRESAが責任を有す性能及び安全評価の分野において適用するための数的モデルの開発を行う。
- 分類4.2：システム及びプロセスのモデル化。特定の施設に関連したモデル化に焦点を置いている。
- 分類4.3：環境回復。CIEMATを通じてこの分野での国際的なプロジェクトの動向観察に焦点を置いている。
- 分類4.4：放射線防護。欧州のプロジェクトの動向観察及び参加に焦点を置いている。
- 分類4.5：気候及び土壌。サイト特性調査や環境調査に関連したR&D活動を含んでいる。

(5) 分野 5：インフラストラクチャ及び調整

この分野での活動は、R&D プロジェクトの管理、技術的な財産の管理、教訓の反映や知識保存を目的とした活動が含まれている。

2.9.4.6 R&D の資金確保

スペインにおける放射性廃棄物管理に関する R&D は、放射性廃棄物管理の一部と考えられており、資金確保方法は ENRESA に対するものと同一である。このため、ENRESA は R&D 計画に継続して資金提供を行っている。

表 2.9-1　ENRESA の R&D への資金提供額

| | |
|---|---|
| 第 1 次計画（1987 年～1991 年） | 920 万ユーロ |
| 第 2 次計画（1991 年～1995 年） | 3,700 万ユーロ |
| 第 3 次計画（1995 年～1999 年） | 4,209 万ユーロ |
| 第 4 次計画（1999 年～2003 年） | 3,507 万ユーロ |
| 第 5 次計画（2004 年～2009 年） | 2,240 万ユーロ |
| 第 6 次計画（2009 年～2013 年） | 1,930 万ユーロ※ |

※最終的な確定額ではない。

2014 年から 2018 年を対象とした新計画では、過去の計画での展開において十分な柔軟性を有していたことから、同じ分野の分類を維持している。以下に各分野の年度ごとの予算額を示す。

表 2.9-2　2014 年～2018 年における R&D 分野ごとの予算額（k€）

| | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 |
|---|---|---|---|---|---|
| 廃棄物技術 | 1,145.1 | 1,512.1 | 1,204.1 | 794.1 | 585.0 |
| 処理・及び処理の技術及びプロセス | 1,045.1 | 1,345.1 | 940.2 | 765.1 | 572.0 |
| 閉じ込めシステム及び素材 | 2,633.1 | 3,281.1 | 2,029.2 | 1,504.1 | 3,256.0 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 性能評価、安全性、放射線防護及び関連モニタリング | 606.1 | 743.1 | 650.1 | 650.1 | 610.0 |
| インフラストラクチャ及び調整 | 187.0 | 187.1 | 1,701.1 | 170.1 | 170.1 |
| 合計 | 5,616.4 | 7,068.5 | 6,560.7 | 3,883.5 | 5,193.0 |

2.9.4.7 ENRESA の R&D プログラムにおける主要なプロジェクト（第 6 次計画（2009 年～2013 年））

前述したように、ENRESA の R&D 計画は、一般的に、高レベル、中レベル、低レベル放射性廃棄物や浅地中、または地層処分にも適用可能なものとなっている。以下に第 6 次計画（2009 年～2013 年）における使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の地層処分に役立つプロジェクトの概要を示す。

(1) 分野 1：廃棄物技術

- 分類1.1：使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物
  - 処分環境下での使用済燃料の安定性に関する特性調査。実際の燃料及び同様の化学物質を用いた超ウラン元素研究所での実験（ドイツ）
  - 放射線及び水素の存在下での、短期的な燃料のパッシベーションプロセスの研究
  - 異なる時間軸（100年、1000年、10,000年及び100,000年）での燃料-キャニスタシステムの挙動のモデル化
  - 使用済燃料の核種インベントリの実験的な特性調査及びインベントリ予想モデルの必要条件
- 分類1.2：低中レベル放射性廃棄物及び極低レベル放射性廃棄物

  （地層処分関連プロジェクトはない）
- 分類1.3：核種の基本的特性
  - 主要なプロジェクトは、NEAの熱科学データベース（TDB）プロジェクトやSORPTIONプロジェクトが挙げられる。TDBプロジェクトは、放射線防護問題における重要性によって選定された特定の化学元素のデータベースを開発することを目的としている。国際的に認識され包括的に品質が確保された熱力学及び化学データが収集される。このデータベースは、放射性廃棄物処分

システムの安全評価で求められるモデル化に関する要件に従っている。一方、SORPTIONプロジェクトでは、評価パラメータの吸着モデルの導入を取扱っている。

(2) 分野 2：処理及び処理の技術及びプロセス

地層処分に関連したプロジェクトは含まれていない。

(3) 分野 3：閉じ込めシステム及び素材

- 分類3.1：素材の特性調査及び挙動。
  - この分類での主なプロジェクトでは、コンクリートの耐久性、コンクリート、粘土及び金属中の移行メカニズムに関連した活動を扱う。
    - エルカブリル処分場のための新しいコンクリートの耐久性試験、特殊なコンクリートでのpH測定の検討手続等の研究
    - コンクリート中の拡散メカニズムの研究
    - 粘土中の保持メカニズム等の研究
    - 核種の保持や固定化能力への特定の陽イオンの影響
    - カプセルの製造や貯蔵システムのための金属加工のための金属材料の挙動や特性調査
- 分類3.2：閉じ込めシステムの挙動
  - 第7次EURATOM枠組み計画のPEBS（人工バリアシステムの長期性能）プロジェクトでは、人工バリアシステムの時間に依存した密封能力や挙動を評価することを目的としている。試験及びモデルでは、幅広い条件をカバーしており、廃棄物の定置段階からほとんど定常状態までを対象としている。このプロジェクトは、実規模人工バリア実験（FEBEX）を含んでいる。
- 分類3.3：処分システム及び技術
  - この分類には地層処分に関連したプロジェクトは含まれていない。
- 分類3.4：素材及び閉じ込めシステムのモニタリング
  - ENRESAは、EURATOMの第7次枠組み計画におけるMODERNプロジェクトに積極的に参加している。処分施設の概念的、計測機器面及び実験規模でのモニタリングが含まれている。また、エルカブリル処分場のモニタリング

を目的とした重要なプロジェクトも存在している。3次元の視覚システムの開発が行われてきた。

(4) 性能評価、安全性、放射線防護及び関連モニタリング

- 分類4.1：評価手法及びモデル
  - 2009年～2013年を対象としてR&D計画では、手法の開発やモデル評価に関する活動は、分類4.2で収集されていたため、以下を参照のこと。
- 分類4.2：システム及びプロセスのモデル化
  - コンクリートにおける反応輸送モデル。コンクリートは水化学により影響を受けるため、このプロジェクトでは長期的な変遷を研究することに対応している。水化学の影響をシミュレートするため反応輸送モデルが準備された。反応輸送モデルにおいて用いるためにC-S-Hゲルの溶出速度を決定することが行われ、溶出物のコンクリートを通じての輸送とエルカブリルの寿命を通じて起こる化学反応をモデル化することが行われた。モデル化を支援するためのパイロットキャンペーンが計画に含まれる。
  - 低中レベル放射性廃棄物及び極低レベル放射性廃棄物セルでの地下水流動及び輸送のモデル化。シナリオの研究。この研究の目的は、閉鎖後のボールト内の少量の水の浸出に影響を与える要因を決定することである。幾つかの配置の変更を適用したモデルが分析され、飽和度や透水係数などコンクリートの重要なパラメータに関して詳細に感度解析が行わる。特定核種の輸送のモデル化も行われ、その結果により、サイトのモニタリング活動の参照レベルを決定することができた。プロジェクトの第2段階が開始され、300年間を対象に異なるシナリオによる地下水流動や輸送のモデル化を行っている。
  - 長期的な埋め戻しモデル。ENRESAは低中レベル放射性廃棄物処分場を覆う層について詳細な設計を行うため、2つのモックアップを作成している。このプロジェクトでは、エルカブリル処分場での2つの層の概念及び熱-水モデルが策定された。これにより、それぞれの層の熱-水挙動のモデルで分析が可能となり、重要な設計パラメータを決定することができる。第1段階（2009年-2010年）では、1次元及び2次元の数的モデルが準備され、2つのパイロットシステムで記録されたデータの解釈が行われた。第2段階（2012年-2013年）では、

傾斜と地上に到達する放射線影響を考慮に入れた新たなサブルーティンを1次元モデルに導入し、現在キャリブレーションが行われている。

- ✧ エルカブリルの水理地質学。このプロジェクトは、エルカブリルでの地下水流動モデルの更新を毎年行う必要性に対応したものである。また極低レベル放射性廃棄物処分エリアでの新たなより詳細なモデルの策定・改良も目的としている。この結果、地域モデルが毎年更新され、水理データなどを含めた妥当性の確認が行われた。

➢ 分類4.3：環境回復

- ✧ BIOCHAL：放射線影響評価での生物圏の取り扱いのため必要とされる開発を行う。放射性廃棄物の人間及び環境への影響を推定するために、生物圏評価手法の選定、開発及び利用に関する国際的な慣行の見直しが行われた。9カ国の実施主体によって近年発行された生物圏の選定、評価等のため安全評価で用いられているプロセスや手法についての議論も行われた。最終的に、スペインで行われている活動の国際慣行との適合性や一貫性がレビューされた。主要な結論は、一般的にIAEAのBIOMASSプロジェクトで開発された手法がほとんどの機関で用いられているということであった。
- ✧ TRANSFER：このプロジェクトでは、生物圏における核種挙動についてのデータ収集、パラメータの取得及びモデル化が含まれる。特定の核種の相互作用が評価され、生物圏での安全評価プロセス及び重要なパラメータが同定された。それらは、土壌-植物系の水理的バランスを考慮に入れたSe-79やU-238などの挙動をモデル化するための、土壌-植物系での輸送の数学的モデルのAMBERにおいて展開された。一般的評価シナリオによりSe-79及びU-238のモデルで計算が行われた。また、鉱山サイトでの情報、データや状況を用いた土壌-植物系のシナリオに対するU-238のモデルでの計算も行われた。ENRESAは、国際的なプロジェクトであるBIOROTAやEMRAS II IAEAプロジェクトのワーキンググループやワークショップに参加している。
- ✧ MODAS：このプロジェクトは、安全評価研究の一部である放射線環境影響評価のためにスペインで用いられている手法の詳細な解析及び改良を行うことを目的としている。新たな基準や国際的な慣行を用い、手法の最新化を行う必要があるとともに、環境中の核種の輸送を評価するためのより現実的な数

学的モデルを開発する必要がある、

- 分類4.4：放射線防護
  - APRA：放射性廃棄物管理への適用を強調した放射線学的な安全基準の国内外の進展をフォローすることを目的としている。NORMに関する特別なモニタリング活動が行われている。このプロジェクトは、PRCAUにおける国際的なモニタリングなどに関連し継続される。
  - PROMEDIA：このプロジェクトは、ICRPによって開発されたアプローチをレビューし、関連する放射性物質への暴露からの人間以外の生物層へのリスクに関する異なるツールを用い、シナリオを比較・分析している。ERICA及びRESRAD-BIOTAの2つのツールでエルカブリル処分施設の植物層及び生物層への影響の評価を実施した。
  - NORMIMA：このプロジェクトは、国内外におけるNORMに関連する新たな規制の進展を考慮に入れて開始された。2012年秋に開始され、3年計画で次の3つの目的を有している。
    - 可能な場合に体積及び放射能の低減を行うため産業からの廃棄物管理について異なる可能性の研究を行うこと
    - 国内外のNORMに関する放射線学的評価に適用する基準の統一を推進すること
    - 放射線学的評価のためのモデルの最新化を行うこと
  - PRCAU：このプロジェクトは、放射性物質を除く化学物質による土壌汚染に関する法令に注目が集まっていることから開始されたものである。目的は、非放射性有害物質の影響評価に関する最新情報を得ることを目的としている。これは、スペインで適用可能な方法としての法的枠組みの調査や特定のケーススタディを含んでいる。
  - ERIBIO：このプロジェクトは3年間の計画で2012年10月に開始された。人間以外の生物層に対する影響評価のための方法やツールをレビューすることを一つの目的としている。また、人間への影響評価も含んだリスクアセスメントの手法・ツールの開発も目的としている
- 分類4.4：気候及び土壌
  - エルカブリルサイトでの水力及び水利学的パラメータの特性調査。このプロ

ジェクトの目的は、特にエルカブリルサイトでの地表の水収支に影響を与えるパラメータへの理解を深めることにある。3年間のプロジェクトでは、調査地域の水利学的特徴を得るための手法・手続を決定し、地表植物の挙動に注意を払い、地表での水収支の主要な構成要素を測定することが可能となる。

- ✧ エルカブリルサイト環境の総合的な生態学的研究のレビュー。操業開始後20年以上が経過し、施設の環境の生態学的状態の変遷をレビューすること目的としている。気候変動に関する異なるシナリオに関連し、将来の変遷の予測も行う。

(5) 分野 5：インフラストラクチャ及び調整

この分野では地層処分に関連したプロジェクトは含まれていない。

2.9.4.8 国際的な R&D プロジェクトの概要

ENRESA は、これまでと同様に、第 6 次 R&D 計画（2009-2013 年）においても、EURATOM の枠組み計画内で行われているプロジェクトに参加してきた。しかし、EURATOM のプロジェクトが放射性廃棄物の地層処分の実施に向かっていることから、ENRESA の関与の度合いは低いものとなっている。ENRESA の第 6 次計画における主要な関心は、集中中間貯蔵施設のサイト選定であり、サイト決定後はその建設等に向けた作業を開始することである。その結果、EURATOM プロジェクトでは ENRESA が取りまとめを行っているプロジェクトはない状況である。関与は低いものとなっているが、EURATOM プロジェクトは次の点で重要なものと考えている。

- ➢ 世界で最も動きがあり進んでいる欧州での進展動向について知ること
- ➢ 高い科学技術レベルの研究チームを維持すること
- ➢ 欧州の機関との実りある関係を継続すること
- ➢ 地層処分に向かっているものであるが、プロジェクトの結果は現在ENRESAによって行われている活動に適用可能であること

このため、ENRESAは、照射された黒鉛管理、処分システムのモニタリング、人工バリアの挙動及び訓練に関する研究課題に参加を継続している。

ENRESAの参加は、直接プロジェクトへ参加する場合と、結果のエンドユーザーとして

の参加のみの場合がある。後者の場合にはENRESAは、結果の評価支援を行っている。

ENRESAが研究プロジェクトに直接参加しているものとしては以下がある。

- CARBPWASTE：2013年に終了したプロジェクトで、原子力発電所からの照射された黒鉛の管理研究を実施。
- MoDeRn：2013年に終了。処分場の開始時点から制度的管理に至るまでのモニタリングに関する研究を実施。
- PEBS：人工バリアの挙動研究。2014年に終了予定。
- PETRUS II及びIII：PETRUS IIは2012年に終了し、PETRUS IIIが2013年に開始された。放射性廃棄物の最終処分のための適切な訓練を行うことを目的としている。
- CAST：2013年に開始され、原子炉中の照射された金属（鋼鉄、ジルカロイ）でのC-14の生成や放出の研究を実施。

次の 2 つのプロジェクトについては、エンドユーザーとしての参加のみである。

- FIRST-NUCLIDES:処分場条件下において高燃焼度の使用済燃料からの核種の瞬時放出について理解を深めることを目的としている。
- ReCoSy：放射性廃棄物処分場での核種放出や長期保持を支配する酸化還元現象の理解を深めることを目的としている。また、性能評価やセーフティケースに結果を適用するためのツールの提供も目的としている。2012年に終了。

2.9.5 研究開発計画に対するレビュー

前述のように ENRESA の R&D 計画は、以下に示す境界条件を考慮に入れ準備されている。

- 総合放射性廃棄物計画：放射性廃棄物管理分野においてスペインで採用されている政策及び戦略を含む文書であり、数年ごとにレビューされている。第7次総合放射性廃棄物計画は現在承認過程にある。
- 経済的状況：質の高い研究活動と多くの能力の高い研究グループの参加を得られるよう、R&Dプロジェクトの提案・実施方法を検討する際には、多くの企業や研究グループが直面している経済的状況を考慮する必要がある。
- 原子力発電の状況：使用済燃料の中間貯蔵のような活動については、貯蔵容量の

空きがどの程度利用可能であるかが重要な点である。寿命延長や高燃焼度化による、専門性や技術の必要性を考慮しなくてはならない。

- 安全性の向上：ストレステストにより、廃棄物管理には、より頑健性を有し、証明された技術を用いること、また、知識や特定の技術が必要なこれまで想定外のシナリオ研究を実施する必要がある。
- EU指令：EU指令（70/2011）では、全ての加盟国に対して使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の安全かつ最終管理の検証可能なプログラムを策定することを求めている。ENRESAは2000年代初頭まで最終管理のための重要な活動を行ってきたが、新たなプログラムを開始する必要がある。このためにもR&Dは、必要な要素である。
- ホライゾン2020：EUにおける新たなR&Dの戦略であるホライゾン 2020では、プログラムへの積極的な参加のために必要な交流を持つよう求めている。この点において、長期の放射性廃棄物管理プログラムの枠組み内で、R&Dプロジェクトへの直接の参加は、このような参加が可能となる。
- R&Dに適用される法令：ENRESAのR&Dプロジェクトは、適用される法令に常に従う必要がある。従って、R&D計画内において、プロジェクトの設立に関連した、また、技術的な活動を補完する管理上の大きな負担を賄う資源を確保する必要がある。
- 技術プラットフォーム：EUのプラットフォームであるIGD-TPやSNE-TP、及び国内のプラットフォームを考慮する必要がある。

ENRESA の R&D は、内部で技術部門の協力を得て策定されている。ENRESA の財務部門も R&D 計画の準備に参加している。技術管理レベルで策定された R&D 計画のドラフトは、発行前に ENRESA 内部でのレビュー及び承認手続を経る。

R&D計画内の個々の結果については、2つの方法で公表が行われる。第1の方法は、内部報告書を準備し編集の後、ENRESAの「技術レポート」として公開するものである。通常計画期間の中間段階で、部分的な結果として進捗レポートが準備される。第2の方法は、各プロジェクトの終了時点で2日間の公開セッションを開催し、研究者が結果を提示し議論が行われる。このセッションには、ステークホルダ、メディア、政府関係機関や関連する科学・技術分野から参加者が招待される。

### 2.9.6 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向

スペインにおいて、自身の資金でR&Dプロジェクトを推進する機関は、ENRESA及び規制機関のCSNのみである。ENRESAによるプロジェクトは、放射性廃棄物管理の安全及び技術的観点からのものであり、CSNによるものは、安全及び放射線防護面により注力している。また、CSNによるものは、原子力発電所を含む幅広い施設を対象としている。

ENRESAのプロジェクトを実施する主要な機関は、大学、公的研究機関や他の民間会社である。この場合、ENRESAは、管理組織としての役割を果たす。そのため、これらの機関において行われるプロジェクトは、ENRESAとまったく無関係ということではない。

他の欧州の組織（放射性廃棄物管理機関（ANDRA）、放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）、ポシヴァ社、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB社））からのR&Dプロジェクトに参加しているスペインの研究組織も存在している。

大学や他の研究機関への資金提供額は、前述のENRESAの研究開発予算に含まれている。

## 2.10 ベルギー

ベルギーにおける処分事業の現状概要、処分システムの概要、研究開発プログラムの概要、研究開発課題とその概要、地下研究施設における研究開発動向、及び研究開発計画に対するレビューに関する動向を調査・整理した。以下はベルギー原子力研究センター（SCK・CEN）からの情報をもとに取りまとめたものである。

### 2.10.1 処分事業の現状概要

ベルギーでは、放射性廃棄物をその放射能量と半減期、発熱量で区分されており、カテゴリ A 廃棄物は短寿命低中レベル放射性廃棄物、カテゴリ B 廃棄物は長寿命低中レベル放射性廃棄物、カテゴリ C 廃棄物は高レベル放射性廃棄物となっている。

カテゴリ A 廃棄物に関しては、1998 年より処分概念の検討及びサイト選定が開始され、2006 年の閣僚会議において、デッセル自治体での浅地中処分場の設置が決定した。2013 年に、処分の実施主体であるベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関（ONDRAF/NIRAS）は、原子力安全の規制行政機関である連邦原子力管理庁（FANC）に浅地中処分場の建設許可申請書を提出している。

カテゴリ B 及び C 廃棄物に関しては、長期管理に関する方針が決まっていないが、2011 年に ONDRAF/NIRAS が連邦政府に提出した「高レベル放射性廃棄物及び長寿命・低中レベル放射性廃棄物の長期管理に関する国家廃棄物計画」がこれらの廃棄物の長期管理に関する方針を決定する上での判断材料となる。ONDRAF/NIRAS は、この国家廃棄物計画の中で、国内の粘土層での地層処分を推奨するとの見解を示している。また、この国家廃棄物計画は連邦政府の方針決定に伴い効力を持つこととなるが、2014 年 1 月時点では、連邦政府からのどのような決定もなされていない状態である。

### 2.10.2 処分システムの概要

ONDRAF/NIRAS が国家廃棄物計画の中で検討している地層処分概念を図 2.10-1 に示す。検討している地層処分施設では、粘土層中に水平坑道が建設され、そこから処分坑道に接続されている。また、水平坑道から 3 本のアクセス用立坑が設置されている。処分坑道にはカテゴリ B 及び C 廃棄物が収容されるようになっている。カテゴリ B 廃棄物に関しては、モノリスの使用を基本としている。また、カテゴリ C 廃棄物（ガラス固化体または使用済燃料）に関しては、人工バリアシステムとして、スーパーコンテナの使用が検討

されている。このスーパーコンテナは、炭素鋼オーバーパックの中にガラス固化体のコンテナ 2 体を収容するものである。炭素鋼オーバーパックはコンクリート製の緩衝材で囲まれて保護される。コンクリート製の緩衝材は長期間に渡り、炭素鋼オーバーパックにとって好ましい化学環境を維持するため、炭素鋼オーバーパックの機能を保持するものである。

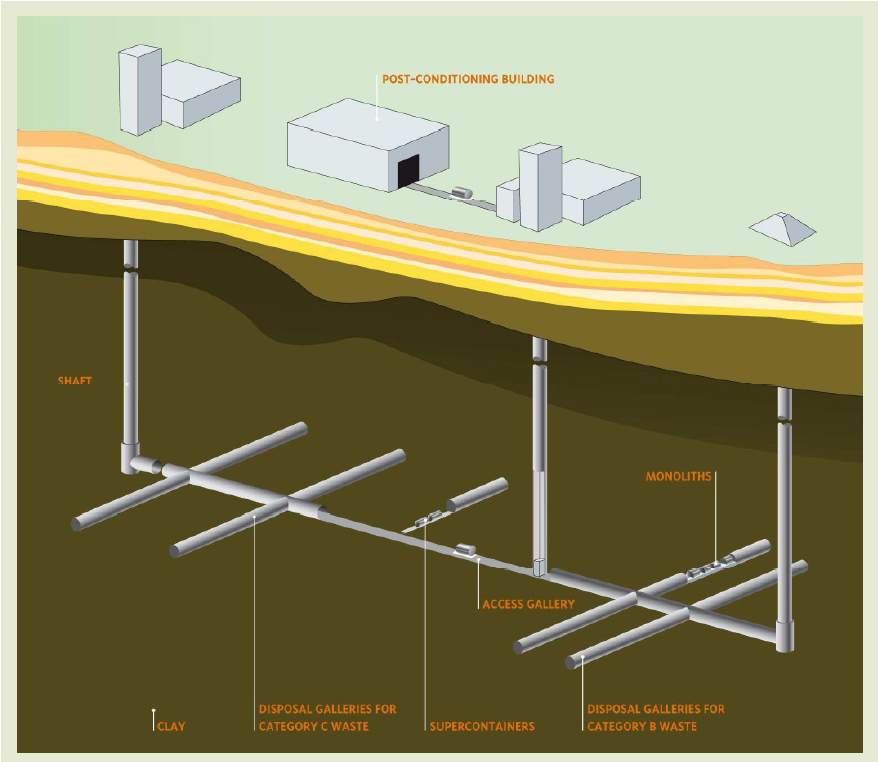



図 2.10-1　カテゴリ B 及び C 廃棄物の処分概念（国家廃棄物計画より）

### 2.10.3 研究開発プログラムの概要

#### 2.10.3.1 実施の枠組

実施の枠組は、2011 年に ONDRAF/NIRAS がベルギー連邦政府に提出した廃棄物計画のままである。現時点（2013 年 12 月）で政府が行った原則決定はないが、次回選挙前（2014 年 5 月）に決定が行われる見込みである。EU 廃棄物指令 2011/70/（廃棄物指令）は、各 EU 加盟国にあらゆる放射性廃棄物の管理に関する方針を明確に要求している。いずれの場合にも、各 EU 加盟国は 2015 年 8 月までに、マイルストーン、インベントリ、技術的解決策に関係する概念と計画、閉鎖後の安全性に関する概念と計画、必要な RD&D、責任、性能指標、費用見積もり、資金計画、透明性に関する方針、協定を含む国家プログラムを

提出する必要がある。

2.10.3.2 研究方針

地層処分に関する ONDRAF/NIRAS の研究方針は、いわゆる「懸案課題」の特定を通して決まる。「懸案課題」とは、実現可能性あるいは長期的安全のどちらかに直接関係する技術的あるいは科学的課題である。R&D 計画のなかでは、それらは現在の知見レベルと進行中の R&D に基づき、依然存在するとされる不確実性をもとに、それぞれの見識ごとに定義され、実現可能性あるいは長期的安全性への潜在的影響に従って優先順位がつけられる。それら懸案課題のそれぞれに対し、R&D 行動、あるいは計画が定義される。それらの「懸案課題」を解決するため、ONDRAF/NIRAS は現在までに、SCK・CEN をはじめとする主要研究パートナーとの多年（5～6 年）枠組協定を結び、懸案課題を個別に研究する詳細な R&D 計画を共に策定することを決めた。

2.10.3.3 R&D プログラムの構成

ベルギーにおける放射性廃棄物の RD&D 活動は ONDRAF/NIRAS が管理している。RD&D のすべての活動は、ディレクターが管理する LT（長期的管理）に該当する。LT ディレクターへの報告は、廃棄物の全カテゴリ（低、中及び高レベル）に関する RD&D を管理する RD&D コーディネータが行う。RD&D 活動の日々の調整は、ONDRAF/NIRAS のタスクマネジャーが行う。

RD&D 活動は、安全性、現象学、技術の 3 つの「柱」に分類される。

- 安全性の柱の目的は、規則の順守、安全戦略と長期的安全性に関する見解の開発、環境影響評価の実施を保証することである。
- 現象学の柱の目的は、地層処分場の長期的変化を決定する物理、化学及びその他のプロセスに関する健全で科学的な知見を構築し、提示することである。
- 技術の柱の目的は、地層処分場の技術的側面、すなわち概念、制約、操業（操業上の安全性を含む）及び費用を調査することである。

現在の RD&D 活動は、安全性・実現可能性研究の結果をまとめることを目的としている（研究計画のポイント(3)を参照）。

2.10.4 研究開発課題とその概要

2.10.4.1 研究計画

(1) ONDRAF/NIRAS の RD&D 計画の現状

ONDRAF/NIRAS は、地層処分に関する安全性・実現可能性研究の開発のための新たな RD&D 計画を準備している。この RD&D 計画は、ONDRAF/NIRAS による内部レビューを実施しているところであり、2013 年 12 月後半に発表されることになる。計画は、実現可能性を証明するために必要な R&D に焦点を当てた文書と、長期的安全性を証明するための文書で構成される。どちらの文書も階層的構造を持つ一連の見解で構成される。実現可能性に関するレベル 1 の見解は、計画する処分システムの建設、操業及び漸次的閉鎖を、長期的安全性の要件と操業上の安全要件を考慮に入れ、利用可能な資金に見合った費用で実施することができるとする説明である。この見解の下に、R&D の実現可能性計画の各章になっている、技術的実施可能性、操業上の安全性、費用及び品質のそれぞれに関係する 4 種類のレベル 2 の見解がある。これらの各見解を支えているのは各章のセクションに相当するレベル 3 の多数の詳細な見解である。長期的安全性に関して、レベル 1 と 2 の見解は以下のように要約することができる。すなわち、処分システムは既知であり、定義づけられている安全機能は信頼でき、性能は要件を満たしているため（＝レベル 2 の見解）、われわれは長期的安全性を確信する（＝レベル 1 の見解）。さらに、報告書の各セクションを構成する多数のレベル 3 の詳細な見解がある。レベル 3 の各見解について、実行中の R&D、解決すべき不確実性、そのために必要な R&D とともに最新の技術が示される。

(2) 地層処分に関する研究計画の中期的改訂

政府はまだ廃棄物計画の結論に関する決定を行っていないため、SFC-1 の作成を可能にする研究と報告は続けられるが、SFC-1 を提出する現実の日程はない。実際、そのことで、解決すべき問題に焦点を当てた地層処分の R&D を説明する研究計画の中期的改訂が行われることになった。これは ONDRAF/NIRAS が策定している RD&D 計画に沿ったものである。以下のセクションでは、各研究計画に関して定義づけた懸案問題を簡単に要約する。

a. 研究計画　地質環境データの統合手法（Geosynthesis）

Geosynthesis プロジェクトの全体目標はブーム粘土層とその地質学的環境に関するあらゆる地層科学的知見をまとめ、統合し、この地層科学的情報を活用して放射性廃棄物処

分のために計画する地層処分場のセーフティケースを裏づけることである。

この目標を達成するために実施しなければならない主な研究/活動は以下のとおりである。

- SFC-1 を裏づけるための地層科学的情報の統合
- 従って、以下の作業が必要である。
- Campine 盆地の全体的な地質及び水文地質学とその長期的変化、ブーム粘土層の地質と特にその特性に関するあらゆる地層科学的知見の集積
- われわれの知見を完成し、知見のギャップを埋め、不確実性を減らすための R&D
- データの統合（GSIS データベース）

2012 年 10 月 19 日の中期契約の会議中に ONDRAF/NIRAS は新たな安全性見解の樹形図を提示した（図 2.10-2）。現在の安全性見解（NIROND note 2012-1390）の構成では、以前のバージョンの主な弱点が解決されている。特に、変化する条件の明確な表現の不備はもはや存在しない。新しい正式な構成では、見解の樹形図の複雑性が大きく減り、システムの概要とその挙動をより適切に示している。

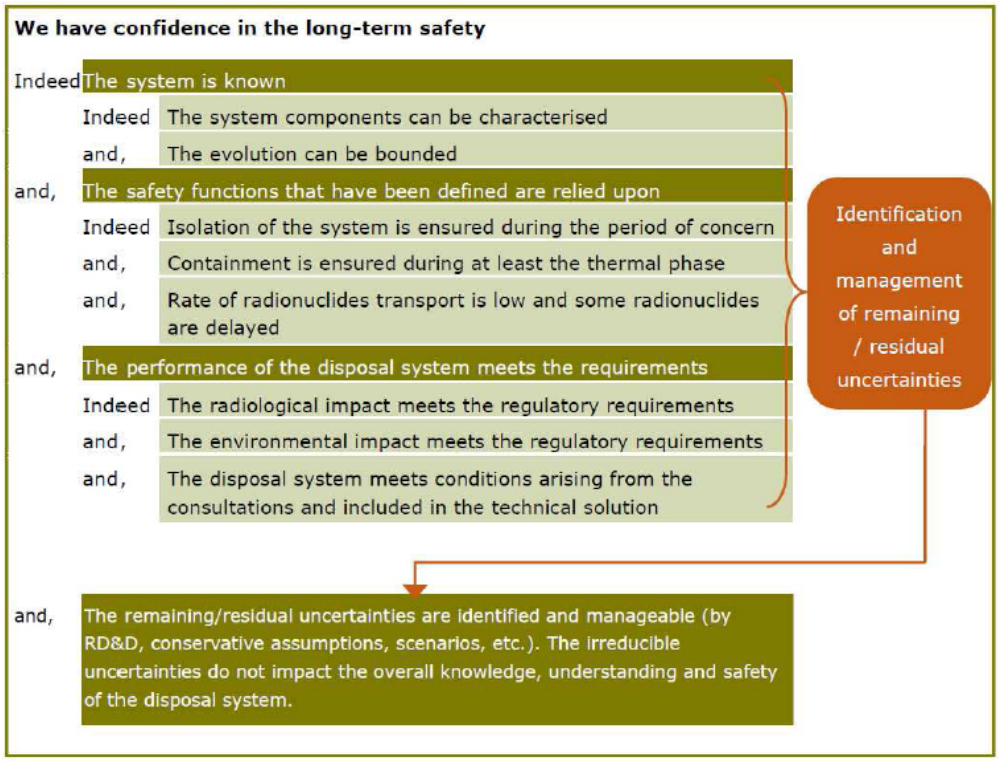



図 2.10-2　安全性見解の樹形図

最初の分岐は、システムの特性評価が適切に行われ、その将来の変化の範囲を示すことができる（一方で安定性と固有の頑健性により、また他方で将来の特性と条件の範囲を示すための健全な科学的根拠による）と述べている。

→「システムは既知である」

システムの知見に関する Pheno の分岐

✓システムの構成要素を特徴づけることができる。

✓変化の範囲を示すことができる。

EBS に関するセクションには、実現可能性見解の樹形図との連結点が含まれる。2 番目の分岐は、安全機能を支援する現象学的知見と安全性見解間の対話を示す。

→「安全機能を信頼できる」

システムの機能に関する Pheno-PA の分岐

✓システムの隔離は保証される。

✓閉じ込めは少なくとも発熱段階中保証される。

✓放射性核種の移行は少なく、遅い。

3 番目の分岐は以前の構造の 2 番目の分岐に代わり、安全性評価の結果に、すなわち、計算した指標が安全性の十分なレベルを示すために入っていなければならない範囲に関係する。

→「性能は要件を満たしている」

システムの性能に関する PA の分岐

改訂後の研究計画 Geosynthesis は、新たな安全性見解の構造に適合させられる。報告書は、新たな安全性見解の樹形図に従って構成する必要がある。

Geosynthesis プロジェクトの成果は、以下のような一連の SFC-1 関連の文書とデータベースになる。

「システムは既知である」（Pheno レポート）

- ブーム粘土層に関する総括報告書：地質学、特性、溶質の移行
- 環境に関する総括報告書（Campine 地域、NE-Belgium）：地質学、自然地理学、水文

地質学

- ブーム粘土層に関する付属文書：鉱物学、天然有機物、間隙水の地質化学的特性、陽イオン交換容量、透水係数
- 環境に関する付属文書：Nete Basin の地形学的変化、ピエゾ測定、水文地質学的モデリング…
- 長期的変化に関する付属文書：地質構造、気候変化…
- 高品質データセット（GSIS）

「安全機能を信頼することができる」（Phenol-PA レポート）

・総括報告書：安全機能を裏づけるための地層科学的証拠

b. 研究計画　ブーム粘土層中の放射性核種の移行及び保持プロセス

この研究計画の主題は、「R-遅延及び減衰」安全機能：「処分システムは、環境への放射性核種と汚染物質の放出を遅らせ、弱める」に当てはまる。この研究計画の焦点は、母岩中の RN の移行を支配するプロセスの現象学的解明である。

SCK-CEN の専門家グループ廃棄物及び処分（Waste & Disposal）が実施する報告及び実験プログラムの目的は、地層処分の安全性を評価し、当局や一般公衆に向けて安全機能を擁護するために粘土質母岩中の放射性核種の移行/保持挙動に関する健全な科学的知見を得ることである。

改訂後の研究計画は、安全性・実現可能性報告書-1（SFC-1）の枠組内の以前の研究計画で特定したブーム粘土層中の放射性廃棄物処分場の安全性に関係する懸案問題（OQ）に従って構成される。

SCK・CEN と ONDRAF /NIRAS の職員間の集中会議で検討された懸案問題は、「知見のギャップ」（すなわち、実験及び/または地質化学的モデリングでさらに裏づける必要がある科学的仮説）、あるいは「複数系統の証拠」（すなわち、異なる出典のデータを安全性に関わる見解に統合すること）のいずれかに識別することができる。

OQ は、（擾乱を受けない）システムの根本にある現象または変化する条件が母岩のバリア機能に与える影響のいずれかに関係する。

安全性に関わる放射性核種のパラメータの選定戦略は、地質化学的移行及び保持特性による放射性核種の**グループ分け**に大きく左右される。しかし、一部の OQ は以下の問題に

関係する。

- 選択したグループはすべての安全性に関わる放射性核種の多様な挙動を適切に反映しているか。
- すべての放射性核種は正しいグループに入っているか。
- 基準の元素はグループ内のすべての放射性核種を十分代表するものであるか。
- 基準の元素に選択したパラメータの範囲は他の放射性核種に直接移すことができるか。

放射性核種の保持プロセスに関する主な OQ は以下のとおりである。

- 固体有機物による錯体形成を、熱力学的収着モデルによって説明することができるか。
- 加水分解を起こす陽イオンのサブグループにとって主要な収着シンクは何か（粘土鉱物と有機物）。
- 加水分解を起こす陽イオンのブーム粘土層での収着は、付加的アプローチによって説明することができるか。
- イオン交換の陽イオンのブーム粘土層での収着は、付加的アプローチによって説明することができるか。
- 陰イオン（少なくとも弱い収着を示すもの）の主要な収着シンクは何か。
- より塩性の条件は、安全性に関わる放射性核種の溶解度、収着及び移行のパラメータにどのような影響を及ぼすと考えられるか。

ブーム粘土層中の放射性核種の移行に関して、以下の OQ が提示された。

- ブーム粘土中の層形成（シルト層と粘土層）を説明するために、別の移行パラメータを考察する必要があるか。
- 新たな数学的概念によって表面拡散を説明することができるか。
- 表面拡散は、イオン交換の陽イオンのみに該当するのか、あるいは他の陽イオンにも適用されるのか（たとえば、加水分解する陽イオンの主に表面錯体形成を通じた収着）。
- 競合するリガンドが拡散パラメータに及ぼす影響は何か。
- DOM が支配する同一の移行メカニズムは、Ni や Zn のような（二価の）遷移金属及び遷移後金属にも当てはまるのか。
- 既存の実験の設計（主に浸透実験）で、付着・放出反応の背後にある動特性を十分把握できるのか。

- コロイドのろ過のメカニズムを伴わない移動性キャリアとしての DOM の扱いは、過度に保守的ではないのか。
- 粘土コアに対する（動水）勾配の強制は、本来なら非移動性の DOM の移動につながるか。
- PA で使用する数学的形式（及び特に単純化）は、実験データに十分裏づけられているのか。
- より塩性の条件は、安全性に関わる放射性核種の溶解度、収着及び移行のパラメータにどのような影響を与えると考えられるか。

c. 研究計画　ブーム粘土層のバリア特性に対する擾乱の影響

地質学的バリアであるブーム粘土層は、人間と地表環境から廃棄物を隔離しなければならない。さらに、人工バリアシステム（EBS）の破損が始まり、廃棄物の閉じ込めが保証されなくなったときに放射性核種の放出を遅らせ、弱めなければならない。処分場の周辺のブーム粘土層は、処分場の建設と存在によって擾乱を受ける。この擾乱域はブーム粘土層の良好な特性に影響を及ぼす可能性があるため、処分概念の性能評価のなかで、影響とその変化を考慮しなければならない。

この研究計画の主題は、「遅延及び減衰」安全機能：「処分システムは環境への放射性核種と汚染物質の放出を遅らせ、弱める」の裏づけに必要な科学的根拠に寄与することである。

この研究計画は、母岩の物理化学的特性に対する擾乱（酸化、アルカリプルーム、熱負荷）の影響の特性調査、ガスの移行及びそれが放射性核種や汚染物質の移行に与える影響に関して行われる研究である。

改訂後の研究計画は、ブーム粘土層中の放射性廃棄物処分場の安全性に関係し、安全性・実現可能性研究の枠組内の研究計画以前に特定された懸案問題（OQ）に従って構成される。

SCK・CEN と ONDRAF /NIRAS の職員間の集中会議で検討された懸案問題は、「知見のギャップ」（すなわち、実験及び／またはモデリングでさらに裏づける必要がある科学的仮説）、あるいは「複数系列の証拠」（すなわち、異なる出典のデータを安全性に関わる見解に統合すること）のいずれかに特定することができる。

これらの OQ は、擾乱を受けた領域（酸化、アルカリフロント）の範囲、熱により発生

した $CO_2$ がもたらす結果、廃棄物や EBS の構成要素の劣化により発生したガスがもたらす結果に関係する。

酸化による地質化学的擾乱に関する懸案問題：

SFC では dZ を保守的に扱うことができるが（溶解性、収着などの保持特性を考慮せず拡散が起こる「不活性域」）、酸化による DOM の増加と酸化還元能力の変化が NF での RN 移行パラメータの有意な変化につながるかどうかを FF での場合と比べて評価することは興味深いだろう。

アルカリプルームによる地質化学的擾乱に関する懸案問題：

ブーム粘土層の地質化学的挙動に対するコンクリートと粘土の相互作用の影響は、粘土の自己シール特性の長期的変化の観点から大いに関連性がある。SFC では dZ を保守的に扱うことができるが（溶解性、収着などの保持特性を考慮せず拡散が起こる「不活性域」）、アルカリ度の上昇がブーム粘土層からの OM の浸出につながるかどうかを評価することは興味深いだろう。OM は多様な RN（遷移金属、アクチニド、ランタニド）の移行挙動に重要な役割を果たすことが知られているため、OM の減少及び/または特性の変化は多くの RN の移動性に重要な影響を与え得る。

温度上昇による地質化学的擾乱に関する懸案問題：

温度に伴う $CO_2$ の増加におけるケロゲン分解と鉱物組成の役割に関する現在の仮説／知見の根拠を示す。

- $CO_2$ 源は何か。鉱物及び/または OM 成分か。
- $CO_2$ の緩衝作用における鉱物組成の役割は何か。
- 動特性

RN の核形成に影響を与える可能性のある地質化学/鉱物学的環境の変化の観点から、「$CO_2$」の擾乱域はどの程度か。

- RN 放出時に起こりうる間隙水の組成（鉱物の溶解/析出反応）
    - （高温での $CO_2$ の移行特性）

処分場のガスによる物理的擾乱に関する懸案問題：

- ブーム粘土層中の $H_2$ の拡散係数（及び異方性）の確認
- ブーム粘土層中の遊離ガスの流れのメカニズムの特定/特性調査
- EBS 材料（ベントナイト及びコンクリート）のガス拡散特性。EBS 材料は廃棄物から出るガスと最初に接触し、これらを通過するガスの移行は、少なくとも部分的には拡散により起こることになる。
- セメント埋め戻し材の不飽和化挙動の確認は、従来の粘性毛細管二相流モデルによって説明することができる。

2.10.5 地下研究施設における研究開発動向

ベルギーでは、SCK・CEN が 1980 年より、モルにおいて地下での研究を開始している。HADES 地下研究所（High-activity Disposal Experimental Site）は、ブーム粘土層が分布している地下 225m に設置され、各種研究が実施されてきた。2000 年からは SCK・CEN と ONDRAF/NIRAS との経済的利益グループ（EIG）である、ESV EURIDICE が管理主体となっている。

HADES の ESV EURIDICE の科学技術ノウハウは、次の 3 分野に焦点が当てられている。

- 粘土母岩の地下処分場のための掘削及び建設技法
- 粘土母岩（すなわちブーム 粘土層）の熱水理学的（THM）挙動
- 計測及びモニタリング

現在、これらのすべての作業は PRACLAY プロジェクトの枠組内で行われている。HADES における現時点での R&D 活動は、PRACLAY 原位置試験、とくにヒーター試験に焦点を当てている。ヒーター試験は、大規模熱負荷がブーム粘土層に及ぼす影響を調査するものである。2012 年、PRACLAY ギャラリーに第 2 次ヒーターシステムが設置され、ヒーターシステムの始動のための最終的コンフィギュレーションを試験的にセットアップしたものの、2013 年に第 2 次ヒーターシステムの設計が変更された。シールの全体的構造を監視できるよう、恒久的監視システムが設置された。ヒーティング段階でのシール貫通部での漏洩口に使用する介入装置の設計が完了した。2013 年 9 月には、PRACLAY 原位置試験の設計及び設置に関する最終報告書が出された。2012 年 12 月、ヒーター試験の

2 回目のワークショップが行われ、そこで、Euridice チームが始動に向け、科学的・技術的に確実な根拠を提示することが決められた。ヒーター試験の始動は 2014 年初頭に予定されている。

2.10.6 研究開発計画に対するレビュー

ONDRAF/NIRAS の研究開発計画については、ONDRAF/NIRAS の理事会による内部レビューが実施される。現在、ONDRAF/NIRAS では地層処分に関する安全性・実現可能性研究の開発のための新たな研究開発計画を作成し、内部レビューを実施している所である。研究開発計画は 2013 年 12 月後半に公表される予定となっている。

2.10.7 大学・研究機関等による地層処分研究開発動向

SCK・CEN は、放射性廃棄物処分の分野に関して、ベルギーの大学及び研究施設と協力して、研究開発を進めている。以下に、特に重要と考える共同研究を示す。

| 大学・研究機関 | 研究内容 |
|---|---|
| ルーヴェン・カトリック大学 | ・理学部、地球環境科学科、地質学グループ　Rudy Swennen 教授：PhD トピック「地層の構造的（間隙率及び移行）特性のプローブとしてのガス拡散」（開始）のプロモータ<br>・理学部、地球環境科学科、地質学グループ　Noel Vandenberghe 教授：N/O 研究プロジェクト「Geosynthesis」での共同研究<br>・生物工学部、微生物及び分子系（M²S）科、界面化学及び触媒作用センター　Christine Kirschhock 教授及び Eric Breynaert 博士：PhD トピック「多価放射性核種の溶解有機物質との結合―多面的アプローチ」のプロモータ（候補者募集）<br>・材料工学部、材料性能及び非破壊検査、Martine Wevers 教授、工学博士：μCT （コンピュータ支援 X 線マイクロトモグラフィ）に関する共同研究 |

| | |
|---|---|
| ブリュッセル自由大学 | ・応用科学部、電気化学及び表面分析科　Annick Hubin 教授、工学博士 :「高レベル放射性廃棄物の地層処分に用いる炭素鋼容器の経年劣化酸化物膜の電気化学的インピーダンス分光法」 |
| ゲント大学 | ・構造工学部、Magnel コンクリート研究所　G. De Schutter 教授及び Ye Guang 博士（デルフト工科大学及びゲント大学客員教授）: 共同研究プロジェクト「コンクリートベースの材料の長期的耐久性に影響を与える主要プロセスの調査に関する総合プロジェクト」 |
| ハッセルト大学 | ・経済学部、Tine Compernolle 博士 : 共同プロジェクト「地下の対立と相乗効果の学際的評価」 |
| ベルギー地質調査所（GSB） | ・Michiel Dusar 博士 : N/O プロジェクト Geosynthesis での共同研究 |
| フレミッシュ政府、環境自然エネルギー部（LNE-ALBON） | ・Katrien De Nil 博士及び Griet Verhaert 博士 : N/O プロジェクト Geosynthesis での共同研究 |

3 . 地層処分の研究開発に係る国際共同研究プロジェクトの動向

本章では地層処分に係る国際共同研究開発の動向について、主に欧州における EU／EURATOM（欧州連合／欧州原子力共同体）の第 7 次枠組み計画における放射性廃棄物管理関連研究と、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）の活動を中心として整理する。

3.1 ユーラトムにおける研究開発

ユーラトム（EURATOM：欧州原子力共同体）は、既存のエネルギー資源不足への対処の有力な手段として原子力産業の発展を目指し、原子力の平和利用を目的とした協力を推進しようとするものとして 1957 年に設立された。欧州連合（EU）は、EU における科学分野の研究開発への財政的支援制度として欧州研究開発枠組み計画を策定しており、その第 7 次枠組み計画（FP7）が 2007 年より開始されているが、これとは別にユーラトムにおいても、2007～2011 年の「原子力の研究・研修活動に関する欧州原子力共同体第 7 次枠組み計画（2007 年～2011 年）」を閣僚理事会において決定している。なお、EU とユーラトムで計画期間が異なるのは研究計画の期間が 5 年を超えることを、ユーラトム設立条約で禁じているためであるとしている[1]。続く 2012 年から 2013 年の枠組み計画については、2011 年 12 月に採択され、2012 年 2 月に施行された[2]。

表 3.1-1 にて、2013 年の EURADWASTE '13 会議において Christophe Davies 氏により発表された資料[3]及び各プロジェクトのウェブサイトを参考にして、ユーラトムの枠内で現在進められている放射性廃棄物管理に関するプロジェクトを整理する。

表 3.1-1　第 7 次枠組み計画（FP7）における放射性廃棄物管理に関する研究・訓練活動

| プロジェクト名 | 期間 | 概要 | 備考 |
|---|---|---|---|
| Sec IGD TP | 2010~2011 | IGD-TP の事務局活動 | IGD-TP における重点課題 |
| Sec IGD2 | 2013~ | | |
| FORGE | 2009~2013 | 放射性廃棄物の処分におけるガスの影響評価 | |
| MoDeRN | 2009~2013 | 処分場の検査及びモニタリング技術の開発と実施 | |
| LUCOEX | 2011~ | 選択した概念の試験と確認を目的とする 3 つの地下研究所での実験 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| DOPAS | 2012~ | 密封構造物の施工と性能の実規模実証試験 | |
| PEBS | 2010~ | 人工バリアシステムの長期性能 | |
| BELBaR | 2012~ | ベントナイトの侵食:人工バリアの長期性能及び放射性核種移行への影響 | |
| FIRST-Nuclides | 2012~ | 重要な放射性核種（I-129、Se-79、Cs-135、C-14）に付随する不確実性を低減するための、高燃焼率の UOX 燃料の IRF（瞬時放出成分）に関するデータの取得 | |
| CAST | 2013~ | C-14 のソースターム | |
| SITEX | 2012~ | 放射性廃棄物処分のための独立した技術的専門知識の持続可能なネットワーク | 技術的規制支援機関（TSO）と新加入国支援 |
| NEWLANCER | 2011~2013 | 新加入国の能力と参加の評価 | |
| SARRAH | 2013~ | 「核分裂、安全性、放射線防護」プログラムの関与の拡大 | |
| CARBOWASTE | ~2012 | 照射済み黒鉛及びその他の炭素含有廃棄物の処理と処分 | 分野横断的課題 |
| ACTINET-I3 | ~2011 | 欧州に存在するアクチノイド化学関連研究施設活用の取組み | |
| TALISMAN | 2013~ | 安全なアクチノイド管理のための欧州における国を超えた施設の利用 | |
| EBSSYN | ~2009 | 欧州委員会と OECD/NEA の共同による人工バリアシステムプロジェクト | |
| CatClay | 2010~2014 | 粘土中の陽イオン移動プロセスの研究 | セーフティケースを支援する基盤研究 |
| SKIN | 2011~2013 | 流体－岩石の相互作用における極めて緩慢な動力学プロセス | |
| CROCK | 2011~2013 | 結晶岩における保持プロセス | |
| ReCOSY | ~2012 | 酸化還元現象が放射性核種の保持と移行に及ぼす影響の研究 | |
| REDUPP | 2011~2014 | 性能予測の不確実性低減 | |
| IPPA | 2011~2013 | 放射性廃棄物処分への国民参加の取り組みの実施 | 社会科学、教育訓練 |
| InSoTec | 2011~2013 | 地層処分を実施するための国際的な社会技術的課題 | |
| PETRUSS II | ~2011 | 欧州レベルでの教育･育成活動の調整 | |
| PETRUSS III | 2013~ | | |

以下では上記の中で主に IGD-TP（3.2 節参照）に関連するプロジェクトを中心に概要を整理する。なお、引用資料として、欧州委員会の「FP7 研究・訓練プロジェクト報告書第 3 巻」[4]、及び各プロジェクトのウェブサイトを参考とした。

## BELBaR

ベントナイトの侵食：工学バリアの長期性能及び放射性核種移行への影響

プロジェクト URL：http://www.skb.se/lagerbladet　　33716.aspx

BELBaR プロジェクトの主な目的は、粘土コロイドが人工バリアの長期性能及び放射性核種の移行に与える影響を説明する際に伴う不確実性を低減することであり、これは、以下により達成されるとしている。

- ベントナイトコロイドの安定性ついて理解を深める。粘土コロイドを長期評価に含める必要があるかどうかを判断することになるため、これは非常に重要な情報である。
- コロイドが安定している場合のベントナイト・バリアの侵食についての定量モデルを改善する。
- 放射性核種自体が粘土コロイドにどのように付着するかについて理解を深める。この情報は、地圏内の放射性核種の移行を評価する改良型移行モデルを構築するために使用される。

プロジェクトの目的を達成するために、数多くの実験活動とモデル化活動がプロジェクトの範囲内で実施されている。図 3.1-1 は代表的なコロイド形成実験の一例を示している。

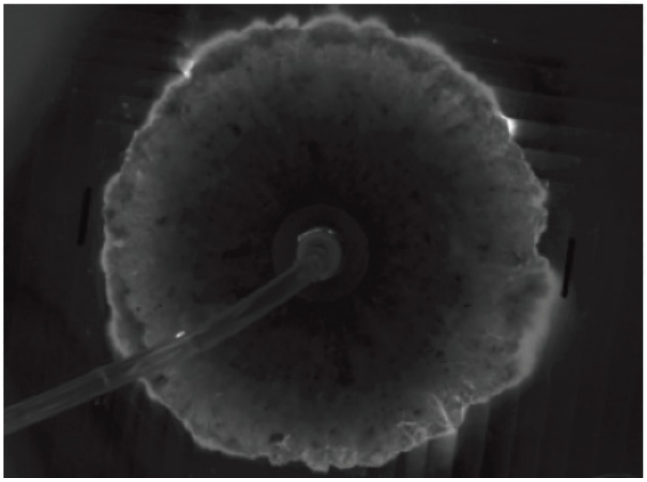


図 3.1-1　2 枚のプレキシガラス板間の細穴内で拡大し、侵食するベントナイトの正面

© Ulf Nilsson、Clay Technology

## CATCLAY

粘板岩でのカチオン移行のプロセス

プロジェクト URL：http://www.catclay.org/index.php

CATCLAY プロジェクトの目的は、放射性廃棄物の地層処分が可能な母岩としての粘板岩内で放射性核種の移行を制御する現象について理解を深めることであるとしている。このプロジェクトの焦点は、粘土鉱物表面にある程度強く収着するカチオン種（$Sr^{2+}$、$Zn^{2+}$及び$Eu^{3+}$）の拡散駆動移行（diffusion-driven transport）に置かれている。

粘土の特性（表面荷電、間隙率など）の影響と拡散駆動移行における溶液組成は、開発されたモデルで十分に再現されるとしている。また、粘板岩構造の影響は、サブミクロンの空間的分解能で粘板岩の鉱物粒子及び穿孔組成をマップする能力について達成された進歩によって主に明らかにされている。

収着性の高い種については、連動した拡散・収着移動は予想よりもはるかに複雑であり、移動性は、水分子と同様の推定拡散特性をもつバッチ・システムで測定された連動収着挙動によって予測したものよりもかなり大きいことが明らかとなっている。解釈によっては、観測されたものよりも大きい移動性は、完全な状態の岩石の中で保持率の低下または拡散の増大のいずれかに帰することができるとしている。移動特性が非常に低いために、実験的な結果は極めて限定的である。CATCLAY 活動の大部分は、このプロセスに関する質の高いデータの取得と説明モデルの開発に焦点が置かれている。

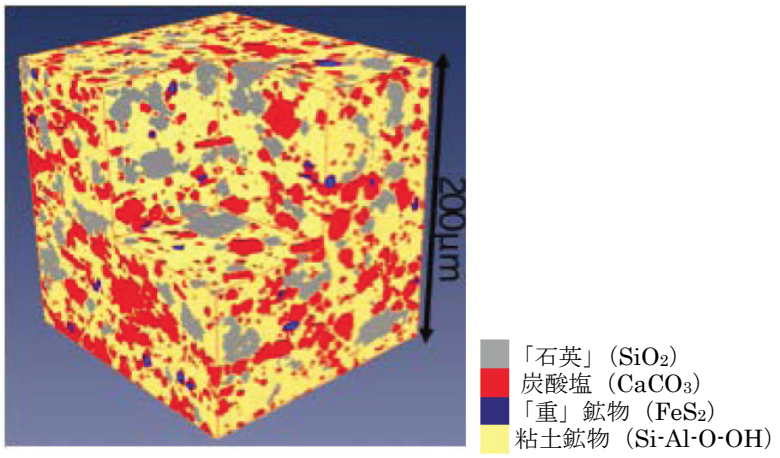



図 3.1-2　粘板岩サンプル中の鉱物の 3D マッピング（シンクロトロンをベースとした X 線トモグラフィから得た画像）　© J.C. Robinet、ANDRA

## CROCK

結晶岩における保持プロセス

プロジェクト URL：http://www.crockproject.eu/Default.aspx

CROCK プロジェクトの全体的な目的は、結晶質岩の処分場のファーフィールドでの放射性核種移行に関する長期予測の不確実性を減らす方法論を開発することであるとしている。具体的に、放射性廃棄物処分の安全性への信頼向上を目的とした性能評価の結論を裏付けるために用いられる移行シミュレーションについての科学的理解とプロセスの理解を高めることとしている。このために、先進的な分析方法が開発され、実験プログラムと、とくに化学的・物理学的保持プロセスに関してサンプルにおける原子スケール、ナノスケール規模及びミクロンスケールの放射性核種の空間的分布と化学的状態の測定で使用される天然サンプルの徹底的な特性評価に適用されている。情報とデータは、抽出段階が異なる一貫した体系的な積み上げによる説明のためにさまざまな実験及び尺度からまとめられている。

結晶母岩ファーフィールドでの放射性核種の保持と関連する安全性評価及びセーフティケースへの適用に関する作業計画の目的は次のとおりとしている。

i. 無酸素状態で取得したエスポ岩盤研究所から一連の新しいサンプルを提供し、実験結果のその後の解釈のためにそのサンプルの特性を徹底的に評価する
ii. 放射性核種の移行実験と収着実験を実施し、ナノメーターの範囲から大きなブロック規模の実験までの範囲で関連するプロセスを確認する
iii. 天然化学種の同族体のインベントリ分析によって収着プロセスを確認する
iv. 既存の拡散データを解釈し、新しいマトリックス拡散データを生成することによって、とくに実系統分析を利用して異なる尺度からの観測結果を組み合わせる
v. 拡大するプロセスでの異なる抽出方法を含めて、実験プログラムと既存データの分析で得た結果を一貫性のあるモデル記述に適用する
vi. 安全性評価に際して不確実性の低減に基づいて結果を構築し、来るべきサイト調査プ

ログラムでの不確実性の低減を達成するツールを生成する

vii. プロジェクトの最初に最先端技術を文書化し、最終報告に向けて作業文書を更新する

viii. 成果の文書化、伝達及び発信を管理する

ix. 全体的なプロジェクト管理について定める

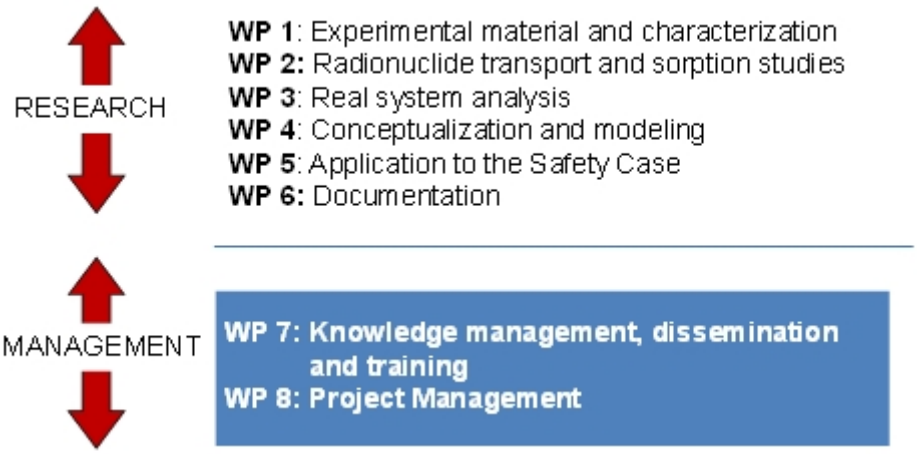



図 3.1-3　CROCK プロジェクトにおける作業計画(WORK PLAN)の構造

（注）文献[4]では i~ix までの 9 つの作業計画となっているが、CROCK プロジェクトのウェブサイトの上記概念図では 8 つのワークパッケージ（WP1~WP8）となっている。説明文における iv と v が上位図では WP4 に抱合されるものと考えられる。

## FIRST-Nuclides

安全性に関連した使用済燃料からの放射性核種の急速／瞬時放出

プロジェクト URL：http://www.firstnuclides.eu/

FIRST-Nuclides プロジェクトにおける最も重要な目的は、地層処分場での処分された高燃焼度使用済燃料中酸化ウラン（$UO_2$）燃料から急速／瞬時放出される放射性核種に関して理解を深めることとしている。この種の廃棄物は、キャニスタの保全性が失われた後に放射性核種の重大な放出源となると考えられている。急速に放出されるフラクションは、地下水中で高い溶解度を有する放射性核種で構成されている。一部の重要な核種は、生物圏への経路上でほんのわずかに保持されるにすぎないと考えられている。安全解析では、これらの放射性核種の移動について定量化する必要があるとしている。

2012 年 1 月に初会合が開かれ、2014 年 12 月まで続くこのプロジェクトは、高燃焼度燃料の処分に関連する許可申請を行うために、放射性核種の急速／瞬時放出について裏付けが不十分な知識に関する疑問に直接答えるものとしている。取得した知識とデータは、不確実性を減らし、予測の信頼性を高めるセーフティケースについて関連する放射性核種放出の現実的なデータを提供することが考えられている。特に、個人に対する計算上のピーク線量の減少に関して科学的根拠の強化が期待されている。したがって、このプロジェクトは、使用済燃料に関する欧州の処分概念全体のセーフティケースに貢献するとしている。

プロジェクトは、以下に示す目的の達成を目標としている。

(i) 材料の選定、特性評価、準備及び高レベル放射性物質を取り扱い、輸送するためのツールの設定
(ii) 核分裂ガスの放出についての実験的な判断
(iii) 周縁及び結晶粒界での拡散の実験的な調査
(iv) 溶解による放射性核種放出の実験的調査と（可能な範囲での）関連する同位体の

化学種同定

（v） 移行／保持プロセス及び使用済燃料の構造、結晶粒界、及びペレット・インターフェースの中の核分裂生成物の化学種同定のモデル化

（vi） セーフティケースに与える潜在的影響の評価と考察

（vii） 定期的な更新による最高水準の技術確立、及び科学技術報告書取りまとめ、その発信、伝達及び訓練の段階別強化

（viii） プロジェクトの調整と管理

（注）文献[4]では i~viii までの 8 つの課題項目となっているが、プロジェクトのウェブサイトの上では 6 つのワークパッケージ（WP1~WP6）の分類となっている。説明文における ii と iii が WP2 に、vi と vii が WP5 に該当されるものと考えられる。

図 3.1-4　プロジェクトにおける有効な分析手法とインフラ© KIT-INE

## LUCOEX

大規模な地下概念実験

プロジェクト URL：http://www.lucoex.eu/

地下研究施設（URL）での実験に関与している放射性廃棄物処分実施者は、高レベル長寿命放射性廃棄物を粘板岩または結晶質岩で処分することを目的とした概念に関する 4 件の本格的な実証試験を実施するための協力関係を構築した。試験の目的は、意図した目的の概念の適格性を確認するとともに、その実施及び長期性能の重要なパラメータの理解を比較し、深めることであるとしている。

このコンソーシアムは、欧州の実施機関である 4 つの機関、SKB 社、ANDRA、NAGRA 及びポシヴァ社で構成されており、これらの機関は URL での実証プロジェクトにおける協力、連携及び経験共有の点で長い歴史をもっている。それぞれの実施者は、URL の所有者兼操業者として、多くの場合は他の実施者との共同プロジェクトの一環として本格的な実証活動を実施した経験をもっている。

プロジェクトの目的は、試験と方法の改良、設備、技術、処分場システムの建設に関連する工程または運用性、操業及び閉鎖などの観点から経験を得ることであるとしている。取り組む重要な技術分野は、坑道の建設、廃棄物キャニスタ周囲の緩衝材の製造と設置、廃棄物パッケージの定置、及び坑道の埋め戻しとシールとなっている。

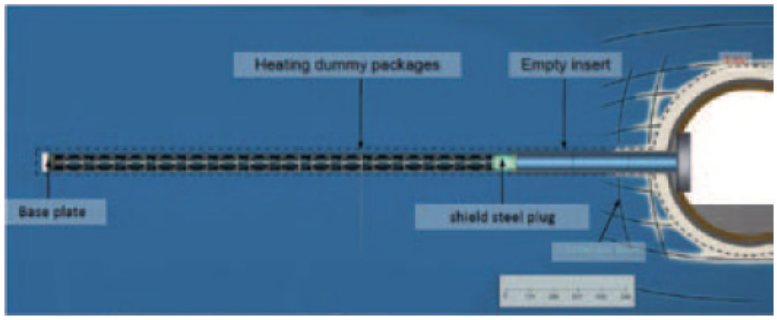



図 3.1-5　Bure URL のカロボ・オクスフォーディアン粘土層での廃棄物パッケージの水平方向処分に関する実証試験の概略図

このプロジェクトの中心は、いわゆる「初期状態」を達成するプロセスに組み込む必要のある最終的な検証段階であるとしている。「初期状態」とは、処分セルが廃棄物パッケージで満たされ、シールされるときに生じる状況であり、その後は人間による性能向上は一切行われない。定義された「初期状態」は、処分場の長期的な変化を分析するための基準であり、これにより、長期安全性予測の精度は「初期状態」での条件の知識に直接依存している。これらの条件は、理想的な条件からの逸脱限界を伴う期間として基本的に定義され、したがって、処分場の工学研究の主要目的は、作業を実施するための方法と機会を獲得するだけでなく、設計からの許容可能な逸脱の範囲内での作業の実施を保証することであるとしている。

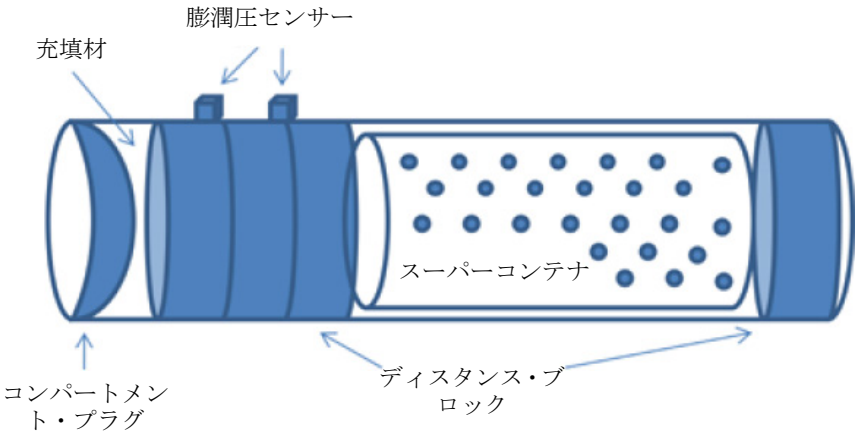



図 3.1-6　エスポ岩盤研究所における緩衝材とスーパーコンテナの水平定置の実証試験の概略図

プロジェクトにおけるワークパッケージ（Work package）の分類は以下としている。

WP1：調整と統合

WP2：スイス（NAGRA）－オパリナス粘土層への廃棄物パッケージの水平方向処分

WP3：フランス（ANDRA）－カロボ・オックスフォーディアン粘土層への廃棄物パッケージの水平方向処分

WP4：スウェーデン（SKB 社）－結晶質岩への廃棄物パッケージの水平方向処分

WP5：フィンランド（ポシヴァ社）－結晶質岩への廃棄物パッケージの鉛直方向処分

WP6：管理と普及

## PEBS

人工バリアシステムの長期性能

プロジェクト URL：http://www.pebs-eu.de/PEBS/EN/Home/PEBS_node_en.html

PEBS プロジェクトでは、地下研究施設で技術的な実験を行うことによって技術的な粘土バリアの施工と分析に集中している。長期予測モデルを開発し、現場での実験及びモデル化から得る結果が比較され、信頼できる情報を得るために段階的に較正される。

PEBS プロジェクトは、実験、モデル開発、長期安全機能への潜在的影響の検討を伴う包括的な手法の開発によって発熱性放射性廃棄物の最終貯蔵のための人工バリアシステム（EBS）のシール性能とバリア性能を評価することを目的としている。実験とモデルは、廃棄物の初期定置から後期の定常状態に近い条件、すなわち完全復旧及び母岩との熱平衡の確立までの全領域を対象にしている（図 3.1-7）。

PEBS ワークパッケージ（Work package）のうちの 5 つは、研究・技術開発（RTD）及び情報発信とプロジェクト管理に関するいくつかの追加 WP に焦点を置いている。RTD の WP は以下が含まれている。

i. 閉鎖後初期のシステム進展及び長期安全性能に与える影響の分析（WP1）
ii. 重要な人工バリアシステム、プロセス及びパラメータの実験作業（WP2）
iii. 長期的な進展に対する短期的な影響と外挿のモデル化（WP3）
iv. 長期安全性への影響分析（WP4）
v. 欧州と中国の取り組みの比較（Work package B）

（※この他に普及（WP5）とプロジェクト管理（WP6）がある。）

地下実験室（図 3.1-7 を参照）と技術実験室でさまざまな試験が行われている。熱（T）、応力（M）、水理（H）、及び化学反応（C）の影響下で、粘土の挙動を分析しなければならないとしている。また、連成された HM、THM 及び THMC の分析も実施される。

PEBS は、バリアの初期の進展と性能評価の処理（とくに EBS の安全機能との関連性）

に際してプロセスに影響を与える現時点での最新動向のレビューを実施している。これは、通常の進展シナリオと変更された進展シナリオの評価の裏付けを目的とした追加の室内実験と屋外実験を行う必要性を明らかにするためとしている。異なる時間尺度と空間尺度を含めて、さまざまなモデル及び統合を対象とした HM、THM 及び THMC のプロセスに関する質の高い信頼できる実験データベースが得られるとしている。処分場 EBS の長期変遷の外挿に向けた実験データと較正プロセスのモデルは、通常のシナリオ及び変更されたシナリオで使用されている。PEBS プロジェクトは最終的に、実験とモデル化の結果及び不確実性を、処分場コンポーネントの長期安全機能と処分場の総合的な長期性能に関連付け、処分場の設計・建設のためのフィードバックと指針を提供するとしている。

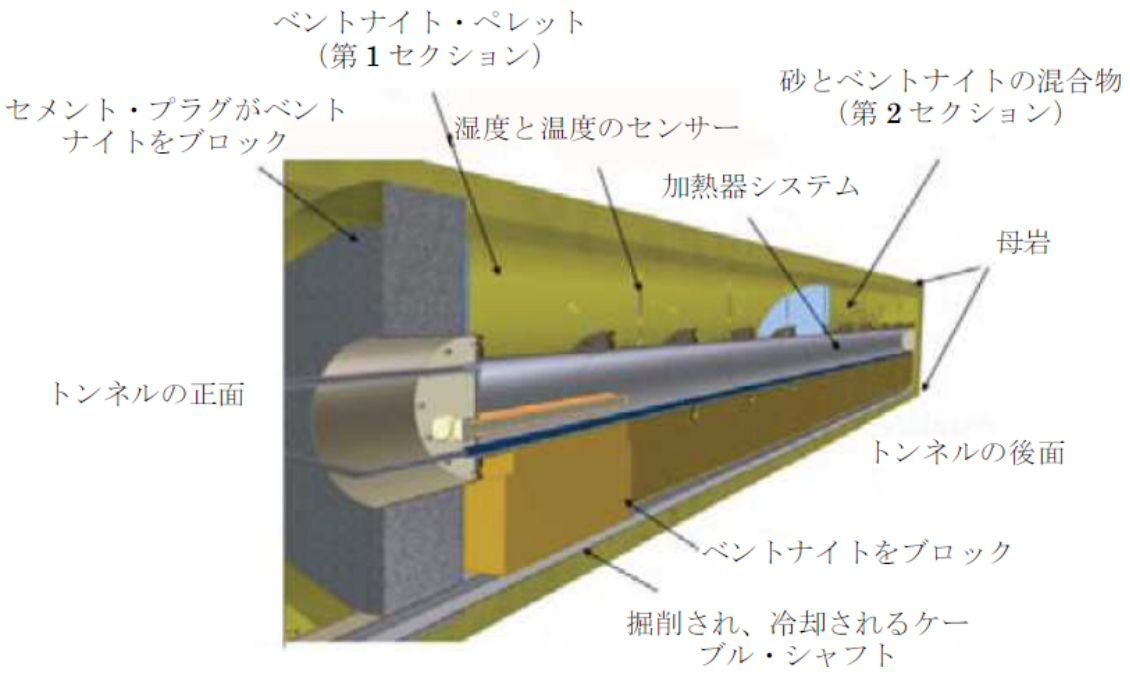



図 3.1-7　モン・テリ岩盤研究所での THM 実験の配置© NAGRA

## REDUPP

性能予測における不確実性低減

プロジェクト URL：http://www.skb.se/lagerbladet　　31780.aspx

計画された使用済燃料処分場の長期安全性は、安全性評価を通じて立証する必要があるが、この評価の核心は使用済燃料の溶解にあると考えられている。この分野での現在の知識は著しいものがあるが、課題も残されているとしている。このプロジェクトの主な目的は、使用済燃料中酸化ウラン（$UO_2$）燃料の溶解速度に関して残されている不確実性を低減することであるとしている。第 2 の目的は、放射性廃棄物管理分野での将来的な研究ニーズに備えて、若い科学者を育成することとしている。

プロジェクト活動では、主に溶解実験及び同じ結晶構造をもつ物質系列（すなわち $CaF_2$、$CeO_2$、$ThO_2$ 及び $UO_2$）の表面特性解析に焦点が置かれている。処分場の条件での使用済燃料の決定論的な溶解速度をベースとした従前の実験は、簡素化され、また制御された組成の $UO_2$ と人工地下水で行われていた。しかしながら、これらの水溶液は、天然地下水中に存在する化学元素のすべてを含んでいるわけではなく、天然水の化学的複雑性が溶解速度に与える影響は現在も不明と考えられている。

実験室での溶解実験では、サンプルが断片化され、鋭いエッジや格子欠陥を含むことがよくあると考えられている。溶解中に物質は滑らかな部分よりも鋭いエッジや格子欠陥の方が速く溶解するため、断片は実験が進むにつれてさらに丸みを帯びるようになると考え ら得ている。このプロジェクトの目標の 1 つは、このサンプル表面の「エイジング」が測定される溶解速度にどのような影響を与えるかを確認することとしている。実験室での結果を基礎理論、計算値及び計算モデルに統合することで、溶解中に表面がどのように進展するかについてモデルを作成することができるとしている。

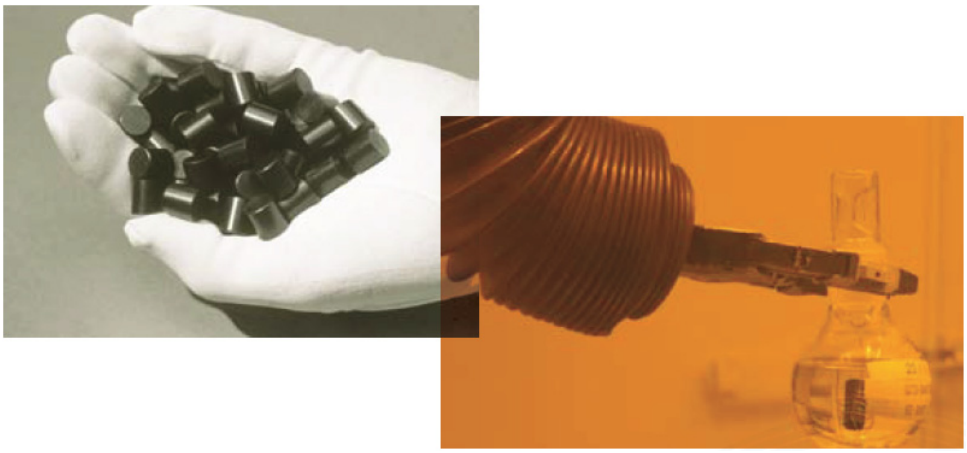


図 3.1-8 使用済燃料の溶解実験　© SKB

管理された実験室での実験を通じて、使用済燃料の部分溶解速度は、年間約 $10^{-7}$ になると測定されており、これは、すべての使用済燃料が完全に溶解するには約 1,000 万年かかることを意味するとしている。これは確かに遅い速度のように思われるが、ウラン鉱石の観察から推定された速度よりも速いことは明らかであるとしている。数億年にわたって持続した酸化ウラン鉱石の例も数多く存在するため、これらの鉱石の溶解速度は、年間 $10^{-7}$ よりもはるかに遅いことを示唆していると考えられている。

実験室と自然界での明らかな速度差は、固液界面でのプロセスを調査することにより、このプロジェクトの中で対処される予定となっている。1 つの予想される結果は、溶解時の表面変化についての理解を深めることによって、溶解過程に関する不確実性が低減されることが期待されている。研究に使用された物質の溶解度は非常に低く、したがって、分析された溶液はごくわずかな量の対象元素しか含まないため、質の高い分析データは、高解像度の ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析）による分析を通じて入手されている。これによって、このプロジェクトは手法開発、人材育成、及びデータベースの向上にも貢献するとしている。この目的は、今後の核燃料溶解研究で適用できる一般的モデルを提示することとしている。

**SKIN**

放射性廃棄物管理に関連する水／固相系での平衡に近い状態での核種の緩慢なプロセス

プロジェクト URL：http://www.emn.fr/z-subatech/skin/index.php/Main_Page

放射性廃棄物の地層処分実施は、性能及び安全性評価の厳格な方法論の開発を考慮して、ニアフィールド（廃棄物形態及び人工バリア）及びファーフィールド（母岩及び生物圏への経路）における関連プロセスの評価を必要とすると考えられている。関連するプロセスとは、放射性核種の移行性に影響を及ぼすすべてのプロセスであるとし、人工バリアシステム及び地質バリアシステムが数十万年にわたって廃棄物の放射性核種を隔離し、保持することができるか否かという疑問に答える必要があるとしている。閉じ込められた深地層での緩慢な地下水の動きを理由に、放射性核種、鉱物、人工バリアの材料、及び水のシステムは化学的平衡に近づくと考えられている。放射性核種の移動性（mobility）を支配するこれらのシステムについては、長年にわたり研究されてきたが、処分期間が長期間に及ぶため、局所的な平衡状態が達成されているにもかかわらず、個々の非常に緩慢なプロセスが放射性核種の移動性に多大な影響を与える可能性があるという事実はほとんど注目されてこなかったとしている。

このプロジェクトでは、原子力廃棄物処分場サイトでの放射性核種の移動性評価に関連するケースについて、表面特性、表面サイト脱離・付着速度、非可逆性収着、及び表面取込み（surface incorporation）に関係する詳細かつ体系的な方法で、平衡に近いシナリオにおける放射性核種の移動性に影響を与える緩慢なプロセスを研究している。鉱物の表面脱離と表面付着速度の経時的変化、及び微量元素の緩慢なバルク相拡散／再結晶プロセス（取込みまたは放出）を伴う表面平衡の連成に重点が置かれている。これは、キネティクス研究、固溶体／水溶液平衡の熱力学評価、微量元素及び主要元素の関係、構造的観察と形態的観察、及び分子のモデル化と関係がある。

提案されている戦略は、実験室での実験及びモデル開発を、安全性の影響分析と組み合わせることとしている。作業は、適切な時間枠を対象に個々の鉱物／水系でのボトムアップ型手法と、地層処分環境での非線形結合交換プロセスの説明のために必要な性能評価の

トップダウン型分析との組み合わせで構成されている。

作業プログラムは、溶解度及び表面取込みと組み合わせた収着平衡に関する多様な実験的事例研究と、それに伴う性能評価の範囲内で適用するための実際に関連性のあるモデル開発を網羅している。

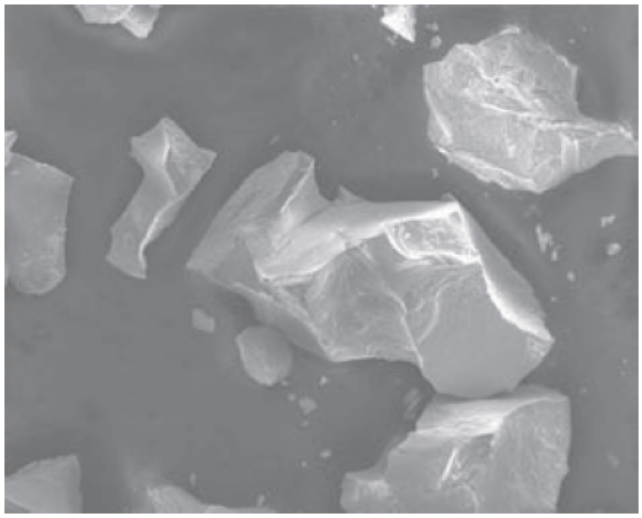


図 3.1-9　溶解実験に使用された二酸化トリウム（$ThO_2$）の断片の走査型電子顕微鏡（SEM）画像© Daqing Cui

研究開発作業プログラムは、実験指向の 2 つの研究・技術開発（RTD）ワークパッケージ（WP）と 1 つのモデル開発作業パッケージに沿って構成されており、安全解析の結果を評価している。さらに、統合に関する RTD のワークパッケージが含まれている。

以下にこのプロジェクトにおける主な重点分野を示す。

- 複雑なセメントに関連した系統での複雑な金属イオン置換の置換スキーム及びイオン結合（沈殿、共沈、表面取込み）の確認
- 粘土との固体／溶液相互作用の可逆性の問題
- 準平衡状態下での四価酸化物の溶解速度と処分場環境に存在する主要系統がマトリックス関連物質の溶解速度及び放射性核種の保持／放出に及ぼす影響の評価

## DOPAS

プロジェクト URL：http://www.posiva.fi/dopas

DOPAS プロジェクトは、プラグ及びシールの工学技術的実現可能性、その特性測定、処分場条件下での経時的挙動の管理、及び安全目的にかなう水理学的性能に関して、妥当性と一貫性を向上させることをその目的としている。そのため DOPAS プロジェクトでは、設計基準、参照設計、及び戦略を取り上げ、実験で採用した参照設計が地層処分施設のプラグ及びシールに対する設計基準に準拠していることを実証する。

このプロジェクトでは以下に焦点を当てており、5 つの異なる実証試験がスウェーデン、フランス、フィンランド、チェコ、ドイツにて行われる予定となっている。

・岩塩層の立坑のシール（ドイツの処分概念）

・粘土層の処分坑道のプラグ（フランスとスイスの処分概念）

・結晶質岩の処分坑道のプラグ（フィンランド、スウェーデン、チェコの処分概念）

プロジェクトにおけるワークパッケージ（Work package）は以下の 7 つとしている。

WP1：調整と管理

WP2：実証されるべきプラグとシールの設計基準の要件の定義

WP3：プラグとシールの設計と技術的建設実現可能性

WP4：プラグとシールのシステム機能評価

WP5：プラグとシールの性能評価

WP6：それぞれの作業のクロスレビューを含む統合解析

WP7：普及

また、5 つの実証試験は以下となっている。

試験 1：FSS（Full Scale Seal）；工学技術実証のための実規模のシール試験（フランス、Saint-Dizier）

試験 2：EPSP（Experimental Pressure and Sealing Plug）（チェコ、Josef 地下研究所）

試験 3：DOMPLU；実規模の処分坑道終端プラグの実証（スウェーデン、エスポ岩盤研究所）

試験 4：POPLU；実規模の処分坑道終端プラグの実証（フィンランド、地下特性調査施設）

試験 5：ELSA；岩塩層の立坑のシール（プロジェクトの後期に検討予定）

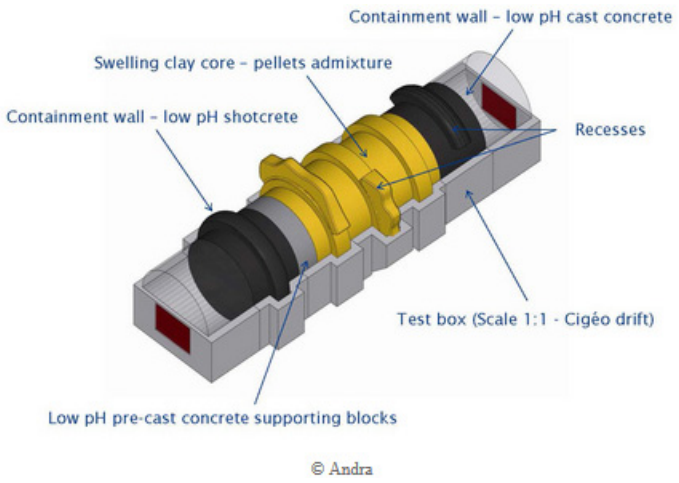



図 3.1-10　FSS におけるシール試験概念図

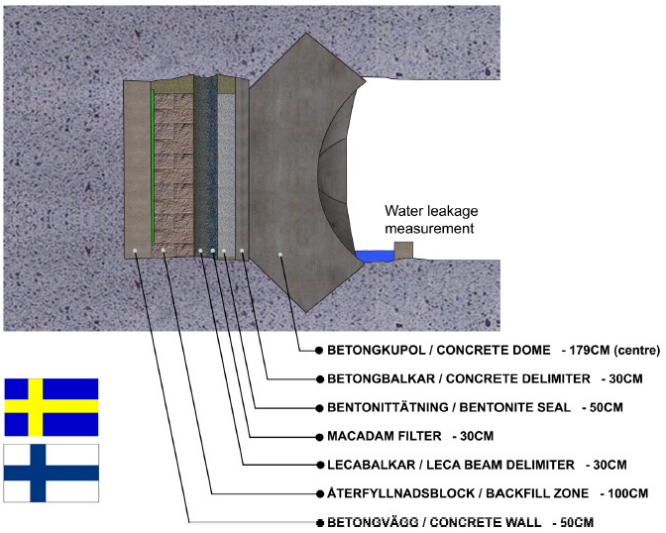



図 3.1-11　DOMPLU における処分坑道終端プラグ概念図

## MoDeRn

安全な処分場操業と段階的閉鎖のためのモニタリング開発

プロジェクト URL：http://www.modern-fp7.eu/

MoDeRn プロジェクトは、地層処分事業の各段階（サイト調査から始まり、建設、操業、閉鎖及び閉鎖後の制度的管理）において，ステークホルダの関与を踏まえたモニタリングに関する検討及びモニタリングの実施に向け参照すべき枠組みの提供を目指し、以下のことを目的としている。

- ✓ 広範に受け入れられる最新のモニタリングの目的を設定すること。
- ✓ 処分の段階的なアプローチ期間内において、より具体性のあるモニタリングイメージを開発すること。
- ✓ 開発するモニタリングが、専門家や非専門家のステークホルダの要望に沿っているかどうかを確認すること。
- ✓ モニタリング活動によって得られる知見並びに処分環境で利用可能な技術について提示すること。
- ✓ 将来のステークホルダとの関わり方についての提言を行うこと。

これらの目的を達成するため、以下に示す 6 つの技術的ワークパッケージ（以下、WP）を構成して検討が実施された。

WP1 目的と戦略：技術的及び社会科学的観点からモニタリングの主要な目的を分析し、有益なモニタリング戦略を提示する。

WP2 先端技術・技術開発：モニタリング技術を整理し、処分システムの要求に応じた技術開発を行う。

WP3 原位置試験：最先端技術を用いたモニタリング技術の実証を原位置で実施する。

WP4 ケーススタディ：処分事業の各段階においてモニタリングのケーススタディを実施する。

WP5 結果の普及：規制機関等ステークホルダとの討議、EU 主催の国際会議等も含め、検

討結果の普及を行う。

WP6 参照すべきの枠組みへの反映：上記全ての WP を統合し、地層処分モニタリングのために参照すべき枠組みの提供を行う。

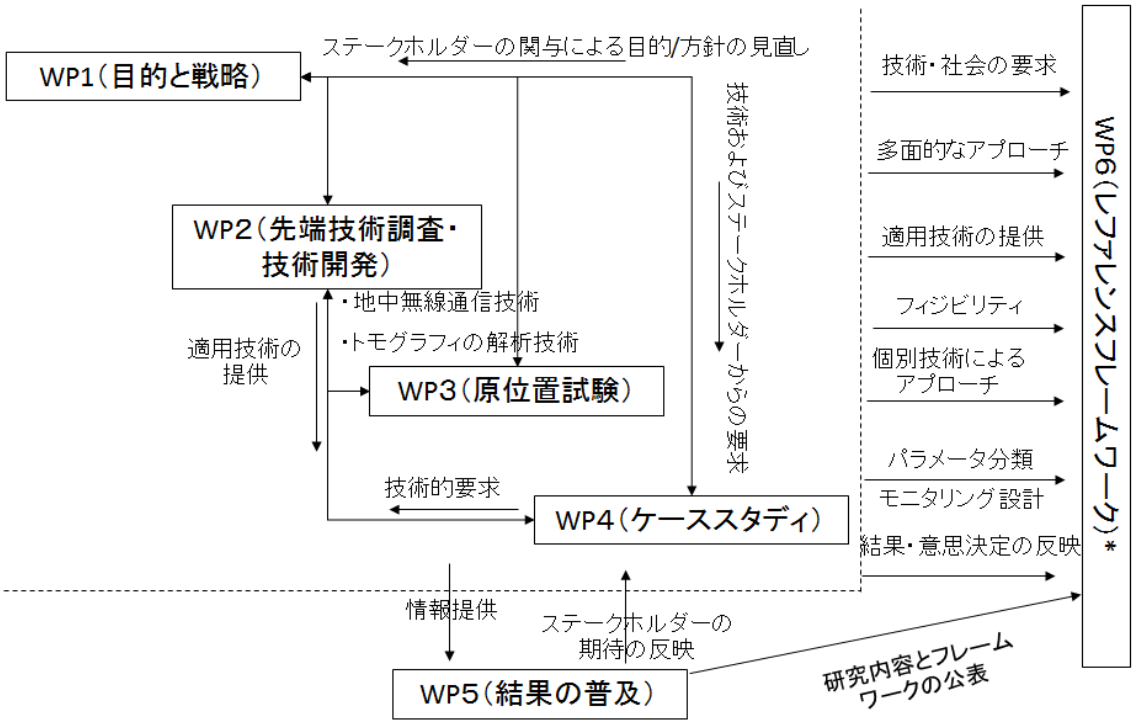



図 3.1-12　MoDeRn の全体構造

なお、MoDeRn プロジェクトは 2013 年に終了したが、後続のプロジェクトが IGD-TP にて 2015 年に検討を開始する予定である（後述の表 3.2-3 の共同活動 7（JA7）：モニタリングプログラム参照)。

## CAST

プロジェクト URL：http://www.projectcast.eu/

CAST プロジェクト(CArbon-14 Source Term)は、廃棄物パッケージと地下の地層処分施設に関連した条件下での可能性のある C-14 放出メカニズムの理解を開発することを目的としている。予想される理解促進は長期安全評価の不確実性の低減とセーフティケースの信頼性を強化することが期待されている。

具体的な CAST プロジェクトの目的は以下としている。

a) 地層処分条件下での、照射されたスチール、ジルカロイの腐食による C-14 の放出、またはイオン交換樹脂や照射された黒鉛からの C-14 浸出のメカニズムと速度の科学的理解を得る。
b) 放出された C-14 の化学種とどのような水溶液の条件であるかの情報を提供する。
c) 各国の安全評価に関連してこの理解を評価する
d) 興味を持つステークホルダにこの理解と安全評価との関連について情報を提供し、若手の研究者の訓練の機会を提供する。

プロジェクトは 7 つのワークパッケージ（WP）により構成され、それぞれの WP は以下としている。

WP1　全体調整
WP2　スチール - 試験とモデル化
WP3　ジルカロイ - 試験とモデル化
WP4　イオン交換樹脂 - 試験とモデル化
WP5　黒鉛 - 情報交換タスク（いくつかの国で行われている最新の作業）
WP6　各国の状況や安全評価における成果の適切さ
WP7　成果の普及

## InSOTEC

地層処分を実施するための国際的な社会技術的課題

プロジェクト URL：http://www.insotec.eu/

InSOTEC は、放射性廃棄物管理と特に地層処分の設計・実施に際しての技術と社会の間での複雑な相互作用について理解を深めることを目的とした社会科学研究プロジェクトである。このプロジェクトでは現在、14 件の国家プログラムにおいて放射性廃棄物の地層処分実施に向けて最も顕著な社会科学的課題の調査と分析を行っている。社会科学的課題の具体的な例としては、サイトの問題、地層処分の概念に可逆性／回収可能性、または信頼醸成のためのモニタリングを導入する問題がある。

InSOTEC の主な研究目的は、地層処分をめぐる社会技術的課題に関する概観と理解を確立し、国内状況及び国際状況を背景としてこれらの課題に取り組む方法を見いだすこととしている。コンソーシアムのパートナーは、社会政治学的課題と技術的課題の相関性に関する国内経験と国際経験を検討し、多くの事例研究を通じて社会的課題と技術的課題の相互作用に注目したメカニズムを評価し、放射性廃棄物管理の知識ネットワークの中で社会技術的問題に関する相互作用を説明するとしている。このプロジェクトの中核は、研究活動の成果を放射性廃棄物管理の実践に結び付け、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（IGD-TP）と他の利害関係者に意見と勧告を示すこととしている。

同時に、InSOTEC のセミナーでは、放射性廃棄物の管理と地層処分に関連した問題に関心をもつさまざまな人びとを対象にした研究活動と普及活動を組み合わせることにしている。

活動は 7 つのワークパッケージ（WP）から成り、最初の 3 つの WP はこのプロジェクトの主要な研究活動であるとしている。

WP1：地層処分実施のために残されている社会技術課題のマッピング

WP2：社会技術のコンビネーションのより良い理解の開発

WP3：放射性廃棄物管理の社会技術的知識の生産者とユーザー間の相互作用への取組み

WP4：社会技術的課題としての地層処分実施取組みへの実践的提言

WP5：ステークホルダのセミナーと科学の普及

WP6：一般的普及

WP7：コンソーティアム管理

また、InSOTEC プロジェクトでは、異なる国における放射性廃棄物の地層処分に関連した最も重要な社会技術的課題を確認することを目的として各国の報告書を作成している。（ベルギー、カナダ、チェコ共和国、フィンランド、フランス、ドイツ、ハンガリー、オランダ、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、英国、米国）

3.2 IGD-TP による放射性廃棄物管理に係る研究開発課題の検討

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（IGD-TP）は、使用済燃料、高レベル放射性廃棄物、及び他の長寿命放射性廃棄物の安全な地層処分の段階的実施を加速し、欧州において共同活動を開始し実行するために、2009 年に欧州委員会の支援の下に設立された。設立は、残されている科学的・技術的・社会的課題を解決し、それによって加盟諸国の廃棄物管理プログラムを支援することを目指しているとしている。なお、欧州委員会は 2002 年以降、欧州の研究開発分野（とくに、より戦略的な分析が必要であり、産業界がより大きな役割を担う必要がある分野）での協力を促進するための協議の場として技術プラットフォーム（TP）を設立することを支援していた。2011 年には、欧州原子力エネルギーフォーラム（ENEF）、欧州原子力安全規制者グループ（ENSREG）、及び技術プラットフォーム（SNETP、IGD-TP 及び MELODI）などの既存の協議の場とともに、使用済燃料及び放射性廃棄物の信頼できる安全な管理に向けた共同体フレームワークの確立に関する欧州理事会指令 2011/70/EURATOM を EU 加盟諸国が採択したことによって、このアプローチの放射性廃棄物管理分野が補完された。

IGD-TP は、欧州諸国の地層処分事業を実施する機関によって運営されるが、同時に研究機関、設計事務所、安全当局の技術支援機関、ならびに研究プログラムに関心があるか、または関与するすべての関係者を集結させている。また、IGD-TP は、最初の施設を実現するのに有用であるだけでなく、期限の制約を受ける廃棄物管理プログラムにも有用としている。原子力保有国の大半は、放射性廃棄物管理プログラムを策定したものの、プログラムの進捗状況、実施の期限、及び争点はそれぞれ異なっている。

IGD-TP の設立文書である 2009 年のビジョン報告書[5]では、IGD-TP のビジョン（**Vision 2025**）を次のように設定している。

*われわれのビジョンは、使用済燃料、高レベル放射性廃棄物、及び他の長寿命放射性廃棄物用の最初の地層処分施設が、2025 年までに欧州で安全に操業されることである。*

*われわれは、以下を行うことを確約する。*

・ *欧州の市民及び意思決定者の間で、地層処分解決策の安全性に対する信頼感を醸成する*

- *長寿命及び／または高レベル放射性廃棄物の安全な長期管理のための受入れ可能な選択肢として地層処分を取り入れる廃棄物管理プログラムの確立を奨励する*
- *加盟諸国の利益のために、専門知識及び技術の入手を促進し、地層処分分野において能力を維持する*

その後、2011 年 7 月に IGD-TP は戦略的研究アジェンダ（Strategic Research Agenda : SRA）[6]を公表し、その中で、Vision 2025 を達成するために必要な、残されている研究開発・実証活動計画に関するロードマップ概略を示し、また、研究開発及び実証の優先順位を示した。なお、これらのプログラムの実施は、第 7 次フレームワーク計画に組み込まれた資金拠出を想定している。

SRA は、IGD-TP の執行グループの会員組織からの代表者で構成されるワーキンググループによって作成されたが、作成に当たり、図 3.2-1 に示された組織的・構造的戦略が採用された。

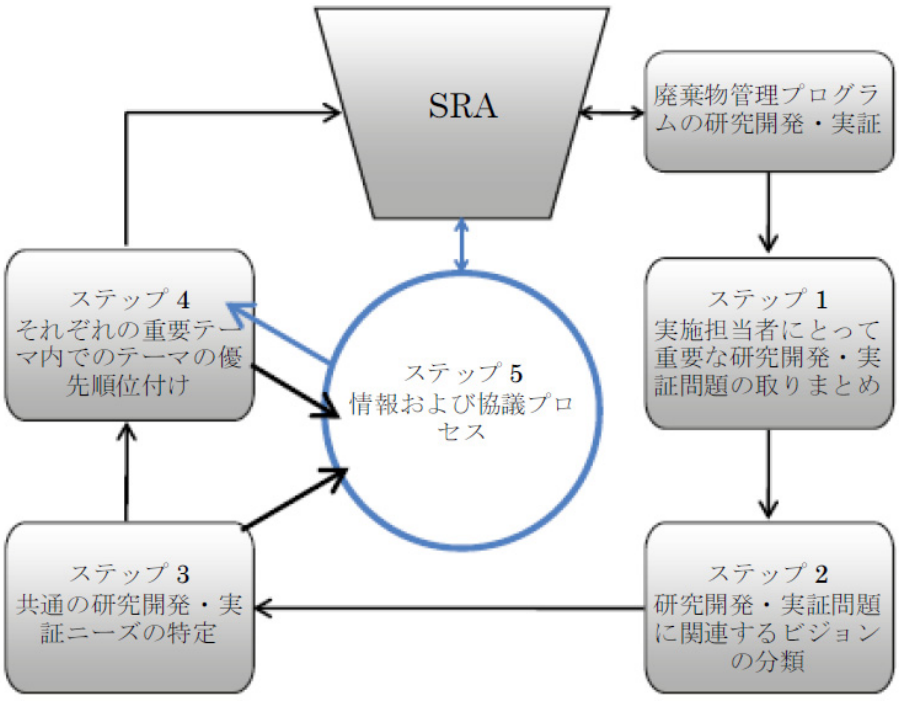



図 3.2-1　IGD-TP の SRA を作成するための組織的・段階的アプローチ

ワーキンググループによって作成された SRA に組み込まれる研究開発・実証課題は以

下のような 7 つの重要なトピックスにまとめられた。なお、7 つの重要なトピックスには合計で 37 の個別のテーマで構成されている（表 3.2-1）。

1. セーフティケース
2. 廃棄物の形状とその挙動
3. 処分場コンポーネントの技術的実現可能性と長期的性能
4. 処分場の開発戦略
5. 建設及び操業の安全性
6. 監視
7. 統治及び利害関係者の関与

また、以下のように、分野横断的活動（CC：Cross-Cutting activities）のための補足的な 4 つの分野が定められた（表 3.2-2）。

- 規制当局との対話
- 能力の維持、教育及び訓練
- 知識管理（記録の保存・維持を含む）
- コミュニケーション及び情報交換を支える他の活動

なお別途、放射性廃棄物管理別活動（WMS）についても定められた。

分野横断的活動は、IGD-TP のビジョンを達成する上で必要であり、こうした活動はまた、地層処分場の受入れ、許認可取得、及び操業にとっても重要であるとしている。

表 3.2-1　重要トピックス及び関連テーマのリスト、予想される開始日と成果も記載－期日とその優先順位を表示している（H：高、M：中、L：低）

| 番号 | 所与の重要トピックス**のテーマのリストと内容 | 開始年 | 終了年 | 重要テーマの優先順位 |
|---|---|---|---|---|
| **1** | **重要トピックス 1：セーフティケース** | | | |
| 1.1 | 安全評価ツール（概念、シナリオの定義及びコンピュータコード）に対する信頼の強化及びツールの試験と改良 | 2012 年 | 2020 年 | H |
| 1.2 | セーフティケースのコミュニケーションの改善。これには、建設・操業の短期安全性、過渡段階、及び長期安全性に関するセーフティケース・コミュニケーションが含まれる。 | 2012 年 | 2025 年 | H |
| 1.3 | 感度解析及び不確定性解析の手法に対する信頼強化と精緻化 | 2015 年 | 2020 年 | M |
| **2** | **重要トピックス 2：廃棄物の形状とその挙動** | | | |
| 2.1 | 高燃焼性燃料：急速放出分及びマトリックス溶解 | 2015 年 | 2020 年 | H |
| 2.2 | ILW からの放出及びその詳細な特性評価 | 2012 年 | 2016 年 | H |
| 2.3 | MOX 燃料：構造と溶解の関係 | 2022 年 | 2028 年 | M |
| 2.4 | 高燃焼性燃料と臨界 | 2015 年 | 2020 年 | M |
| 2.5 | ガラス固化 HLW に関するデータの改善 | 2012 年 | 2015 年 | L |
| **3** | **重要トピックス 3：処分場コンポーネントの技術的実現可能性と長期的性能** | | | |
| 3.1 | HLW 容器の実規模実証（製造から定置まで） | 2015 年 | 2020 年 | H |
| 3.2 | 緩衝材及び埋戻し材の定置 | 2016 年 | 2020 年 | H |
| 3.3 | 地下施設の建設：詳細な処分場設計のための岩石物性の確認 | 2012 年 | 2018 年 | H |
| 3.4 | 操業安全性、可逆性及び回収可能性の問題を含む処分場のレイアウト設計 | 2015 年 | 2020 年 | H |
| 3.5 | 処分場操業の試験的実証 | 2011 年 | 2017 年 | H |
| 3.6 | 実規模の施栓と密封の実験及び実証 | 2012 年 | 2018 年 | H |
| 3.7 | 非破壊試験の情報交換 | 2013 年 | 2019 年 | L |
| 3.8 | 知識の保存 | 2016 年 | 2023 年 | L |
| 3.9 | 結晶質岩環境におけるベントナイトの長期安定性 | 2011 年 | 2017 年 | H |
| 3.10 | 充填材とプラグの長期挙動 | 2011 年 | 2017 年 | H |
| 3.11 | セメント系充填材の進化 | 2015 年 | 2023 年 | M |
| 3.12 | セメントと粘土の相互作用 | 2016 年 | 2024 年 | M |
| 3.13 | 低 pH セメントの最適化 | 2016 年 | 2022 年 | M |
| 3.14 | 岩塩埋戻し材（salt backfill） | 2012 年 | 2018 年 | M |
| 3.15 | 鉄とベントナイトの相互作用 | 2015 年 | 2023 年 | M |
| 3.16 | HLW 容器材料の挙動に関する知識の共有 | 2012 年 | 2023 年 | L |
| 3.17 | 100℃以上でのベントナイト－廃棄物容器の接触性能に関する熱的効果 | 2015 年 | 2023 年 | L |
| **4** | **重要トピックス 4：処分場の開発戦略** | | | |
| 4.1 | 操業段階での適応及び最適化のための方法論 | 2012 年 | 2018 年 | M |
| **5** | **重要トピックス 5：建設及び操業の安全性** | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 5.1 | リスク評価／リスク管理に関する方法論、アプローチ、文書化の改善、操業安全問題の報告のための文書化促進 | 2012 年 | 2018 年 | H |
| 5.2 | 処分システムに対する操業安全問題の影響を評価するための戦略（長期安全性、設計、コスト…） | 2019 年 | 2025 年 | M |
| **6** | **重要トピックス 6：モニタリング** | | | |
| 6.1 | 性能確認のための監視戦略及びプログラム | 2011 年 | 2015 年 | H |
| 6.2 | 監視の技術と技法 | 2011 年 | 2015 年 | H |
| 6.3 | 環境基準状態の監視 | 2011 年 | 2016 年 | H |
| 6.4 | 人工バリア・システムの監視 | 2016 年 | 2020 年 | M |
| 6.5 | 閉鎖後監視の限定要素と手法 | 2023 年 | 2030 年 | M |
| **7** | **重要トピックス 7：統治及び利害関係者の関与** | | | |
| 7.1 | 意思決定プロセスの統治：技術的・社会的・経済的情報の統合方法 | 2011 年 | 2014 年 | H |
| 7.2 | 利害関係者との透明な公開対話のための研究結果の利用（方法、ツール、指針） | 2016 年 | 2025 年 | M |
| 7.3 | 利害関係者の関与、研究者及び意思決定者の作業に与える影響 | 2016 年 | 2025 年 | M |

注* SRA の内容に基づく。

注** トピックスを記述している SRA の文言は、表 4.1 のものとは異なることがある。表の中の内容は、さらに明確にするために変更されている。

表 3.2-2 分野横断的活動（CC）及び廃棄物管理プログラム別活動（WMS）のリスト

| **CC：分野横断的活動** | |
|---|---|
| CC1 | 規制当局との対話 |
| CC2 | 能力の維持、教育及び訓練 |
| CC3 | 知識管理 |
| CC4 | コミュニケーション |

| **WMS－廃棄物管理プログラム別活動** | |
|---|---|
| WMS1 | サイト特性評価 |
| WMS2 | 輸送 |
| WMS3 | 要件管理システム |
| WMS4 | 廃棄物の受入れ |
| WMS5 | 産業スキーム |
| WMS6 | 資金調達と計画立案の経済性 |

続いて、IGD-TP は 2012 年に 2011～2016 年度の展開計画（Deployment Plan；DP）を公表した[7]。DP では、IGD-TP の戦略的研究アジェンダ（SRA）に記載されているテーマの再検討により、SRA のテーマの展開実施に役立てるために、具体的には、所与のテ

ーマ（共同活動（Joint Activities：JA））の管理を任された者に対してその作業を支援するガイドラインを提供するために、利用される共同活動のタイプを特定した。SRA が技術プラットフォーム及びそのメンバーと参加者によって実行される活動と共同活動については、多年度の展開計画によってサポートされるとしている。展開計画（DP）の目標は、SRA を通じて特定されたテーマを、要件に応じてすべて適時に対応できるように整理することとしている。

展開計画では、SRA を展開するための共同活動の種類として以下の 5 種類を特定した。

- 組織的ワーキンググループ（ORWG）
- 技術的／科学的ワーキンググループ（TSWG）
- 情報交換プラットフォーム（IEP）
- 技術プロジェクト（TEP）
- 技術移転（TT）

1 組織的ワーキンググループ（ORWG）：これは、テーマの周辺にある事柄を取りまとめるために個別目的を有するワーキンググループである。その活動は、技術的または科学的なテーマそのものに関連する技術的問題を詳述するだけでなく、個々の SRA テーマ（たとえば、ピアレビューまたはベンチマーキングの組織運営）を中心とした戦略的または具体的な組織的アプローチに重点を置く。

2 技術的／科学的ワーキンググループ（TSWG）：これは、科学的または技術的なテーマの開発という具体的な目的を有するワーキンググループである。つまり、可能性のある技術的プロジェクトを創出するために、準備作業は 1 つのテーマを対象に実行される。この活動の範囲内で、プロジェクト計画の準備及び共同プロジェクトの立上げに、十分なレベルの詳述が行われる。この種の作業には、たとえば科学的または技術的問題のより詳細な範囲設定と枠組み設定、あるいは、技術的プロジェクト計画の作成前に重点を絞った形で行ったニーズの特定に関する最新報告書の作成などが含まれると考えられる。

3 情報交換プラットフォーム（IEP）：この種の活動では、IGD-TP メンバーと他の参加者との交流のために組織的な協議の場を用意する。これは、相違点について議論して浮き彫りにし、他者の経験から学ぶために、行われたプログラムの選択と技術的オプ

ションについて議論できるようにする。

4　技術プロジェクト（TEP）：この種の活動は、個別の SRA テーマに関する技術的または科学的な研究を対象とする。TEP は、直ちに開始されるか、または詳細なプロジェクト計画の前に非常に軽微な説明を必要とするかのいずれかであり、プロジェクト関係者間でのプロジェクトの合意は、技術的または科学的なプロジェクトの立上げ前に形成される。

5　技術移転（TT）：この種の活動には、他者（通常は 1 人）が取得しようとしているいくつか（通常は 1 つ）の知識を所有する者（通常は 2 人）がかかわる。たとえば、商業ベースまたは現物拠出で、従前に取得した成果または知識の移転に関する合意に基づくことがある。

表 3.2-1、表 3.2-2 における分析結果を利用して、SRA のそれぞれのテーマは、この共同活動のスキームに従って分類され（表 3.2-3）、2011～2016 年度の期間に関する最初の「基本展開計画」が策定された（表 3.2-4）。SRA が、「Vision 2025」を実現するための 1 つの戦略ツールとして 2011～2025 年という時間枠で作成されたものである一方、DP は運営管理ツールであり、5 年という期間に限定されている。したがって、基礎となる基本展開計画は、軽微な更新やテーマの追加を行いながら執行グループ（EG）と事務局によって継続的に更新されなければならないものとしている。

表 3.2-3　共同活動一覧

| | 共同活動（Joint Activities；JA） |
|---|---|
| JA1 | Waste forms and behaviour 廃棄物の形状と挙動 |
| JA2 | Full scale demonstration of Plugging & Sealing<br>実規模のプラグ及びシールの実証 |
| JA3 | Waste forms and their behaviour: TSWG on<br>C14 廃棄物の形状と挙動：C-14 に関する TSWG |
| JA4 | Monitoring the Environmental Reference state　環境基準状態の監視 |
| JA5 | Safety of construction and operations 建設と操業の安全性 |
| JA6 | Confidence increase in safety assessment codes：Material interaction<br>安全評価コードに対する信頼の強化、材料の相互作用 |
| JA7 | Monitoring programme モニタリングプログラム |
| JA8 | Safety Case: process model benchmarking<br>セーフティケースのプロセスモデルの「ベンチマーキング」 |
| JA9 | Efficient peer review and related QA processes<br>効率的なピアレビューと関連する QA プロセス |
| JA10 | Long-term stability of bentonite in crystalline environments<br>結晶質岩環境におけるベントナイトの長期安定性 |
| JA11 | Various Topics　異なるカテゴリーに属するさまざまなテーマ |
| KA12 | Adaptation and optimisation of the repository　処分場の適合と最適化 |
| JA13 | Communicating result from RD&D<br>研究開発・実証の結果のコミュニケーション |
| JA14 | Competence Maintenance, Education and Training: CMET<br>能力の維持、教育及び訓練 |
| JA15 | Nuclear Knowledge Management: NKM　原子力知識マネジメント |
| JA16 | WMOs IEP (WMO 1-6)　事業者の情報交換プラットフォーム |

表 3.2-4　SRA 2011 の基本展開計画

| | SRA のテーマとその展開活動 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 継続活動またはフォロー活動* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 廃棄物の形状と挙動：2011 年に TSWG がスタート（テーマ 2.1、2.4、2.5） | | | | | | | 高燃焼度燃料に関する「FIRST-Nuclide」技術プロジェクト。これは、EC FP7 内で 2012 年 1 月 1 日にスタートした。 |
| 2 | 実規模の施栓および密封の実証：最初に 2011 年に TSWG がスタート（テーマ 3.6、3.10 および 3.14） | | | | | | | TSWG の形式で作業がスタート。2012 年 3 月に EC に提出された技術プロジェクト |
| 3 | 廃棄物の形状と挙動：C-14 に関する TSWG（テーマ 2.2） | | | | | | | TEP を定義するために、C-14 に焦点を置いた廃棄物形態 TSWG。他の放射線核種に関するテーマの要件を満たすために、TSWG は後で考慮される。 |
| 4 | 環境基準状態のモニタリング：TSWG（テーマ 6.3） | | | | | | | 2011 年 11 月に TSWG がスタート。WG は、1 年間作業を行い、その上で新たな中間目標が計画される。 |
| 5 | 建設と操業の安全性：ORWG（テーマ 5.1 および 5.2） | | | | | | | ORWG は、予備的なものの後にスタートしなければならない。 |
| 6 | 安全性評価コードに対する信頼の強化（概念、シナリオ定義およびコンピュータコード）。材料の相互作用（とくに、セメント系と粘土系の相互作用）TSWG および TEP（テーマ 1.1－唯一の TSWG、3.11、3.12、3.15、3.17） | | | | | | | EG による決定の前に、このテーマに関してさらに作業が必要である。 |

| | SRA のテーマとその展開活動 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 継続活動またはフォロー活動*<br>（活動概要の詳細については、付属資料 2 に示されている） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 監視プログラム：TSWG（テーマ 6.1、6.2、6.4） | | | | | | | 戦略の改善、利用可能な技術の見直し、および新技術の開発のための新規プログラムを定義するために、利用可能な成果（MoDeRn プロジェクト）を見直す TSWG が 2015 年にスタートする。 |
| 8 | セーフティケースの LT 安全性に対する信頼の「ベンチマーキング」：TSWG（テーマ 1.3） | | | | | | | 2015 年にスタートするプロジェクトの準備のために、ORWG およびその後に TSWG を確立する。 |
| 9 | 効率的なピアレビューと関連する QA プロセス：ORWG（テーマ 1.2） | | | | | | | ORWG が 2011 年 11 月に情報交換フォーラムを開始した（現在の慣行の調査）。 |
| 10 | 結晶質岩環境におけるベントナイトの長期安定性：TEP（テーマ 3.9） | | | | | | | ベントナイトの侵食に関する BELBaR TEP が 2012 年 3 月 1 日にスタートした（工学バリアの長期的性能および放射性核種の輸送に対する影響）。 |
| 11 | 異なるカテゴリに属するさまざまなテーマ。意思決定の統治に関するテーマ、および処分場コンポーネントの技術的実現可能性に関連するさまざまなテーマ（テーマ 7.1、3.1、3.2、3.3、3.4、3.5 および 3.16） | | | | | | | テーマの内容を再定義し、将来の TEP と TT のための情報交換ルールを提案する TSWG のスタートおよびプログラムのスタート |

| | SRA のテーマとその展開活動 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 継続活動またはフォロー活動*（活動概要の詳細については、付属資料 2 に示されている） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 処分場の適合と最適化に関する ORWG（テーマ 4.1） | | | | | | | ロードマップを作成するための ORWG をスタート |
| 13 | 研究開発・実証の結果のコミュニケーションに関する IEP（CC1、CC4） | | | | | | | 2016 年に ORWG をスタートする可能性 |
| 14 | 能力の維持、教育および訓練：ORWG CMET（CC2） | | | | | | | 情報交換フォーラム No. 2 で決定され、論議された ORWG を EG が承認。2012 年 6 月に ToR が完成 |
| 15 | 核知識管理：ORWG NKM（CC3） | | | | | | | EG が下す ORWG に関する決定（2012 年） |
| 16 | WMO IEP（WMO 1-6） | | | | | | | たとえば以下についての IEP 組織<br>・ 許認可取得に関連する問題に関するワークショップ？<br>・ ホットライン？<br>EG が下す ORWG に関する決定（2012 年） |

注*： この展開計画の発行日。

**表 A1-1 の凡例**

EG による決定待ち：

EG による決定済み：

ワーキンググループ：

TEP：

可能性：

3.3 参考文献

[1] 植月献二, “EU における原子力の利用と安全性”, 外国の立法 No.244, 2010.6, pp.39-55.

[2] 植月献二, ”使用済燃料及び放射性廃棄物管理に関する欧州原子力共同体の枠組み指令”, 外国の立法 No.252（2012. 6）, pp.26-49.

[3] Davies, Euratom research programme on radioactive waste management – outline & state of play, 2013.
(http://cordis.europa.eu/fp7/euratom-fission/docs/euradwaste13-davies.pdf)

[4] EUROPEAN COMMISSION, Euratom FP7 Research & Training Projects, Volume 3, 2012.

[5] IGD-TP, Vision Report. EUR 24160 EN, 2009.

[6] IGD-TP, Strategic Research Agenda, 2011.

[7] IGD-TP, Deployment Plan 2011–2016, 2012.

4 . 諸外国の代替処分技術の研究開発動向

以下の各節で、スウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、ドイツ、米国、英国、カナダ、スペイン、ベルギーの海外 10 カ国を対象として、各国の代替処分技術開発の位置づけ、実施研究テーマ、実施機関、費用負担の仕組等について整理する。

4.1 スウェーデン

スウェーデンにおける代替方法の研究に関する背景、地層処分またはその他の処分方法、地層処分に対する代替案、スウェーデンにおける代替策に関する研究の継続についてを調査・整理した。以下はスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）からの情報をもとに取りまとめたものである。

4.1.1 代替方法の研究に関する背景

スウェーデンの使用済燃料の管理計画には、その計画の早い段階から、地層処分が含まれていた。当初は燃料を再処理し、この再処理に伴って生じる高レベル・ガラス固化廃棄物をスウェーデンの地下深くに位置する基盤岩に処分することになっていた。しかしその後、原子力発電事業者が再処理方針を放棄したことにより、鋳鉄製インサートを伴う銅製キャニスタに封入された使用済燃料をスウェーデンの地下深部の基盤岩に処分するという KBS-3 方式が主要オプションとなった。

直接処分（KBS-3 方式による使用済燃料の地層処分）が主要オプションとされる一方で、こうして選択された解決策が、技術及び財政面での見地から最良の解決策であることを確認することを目的とする代替策の調査が実施された。これは、使用済燃料管理に関する責任を負う組織にとって重要な問題の一つである。同様に、その他のオプションに関する研究を実施した上で、当該オプションの採用によって全体的なシステム安全性の大幅な向上は実現しないことを示すことは、法的要件（環境法典に基づく要件）の一つとなっている。

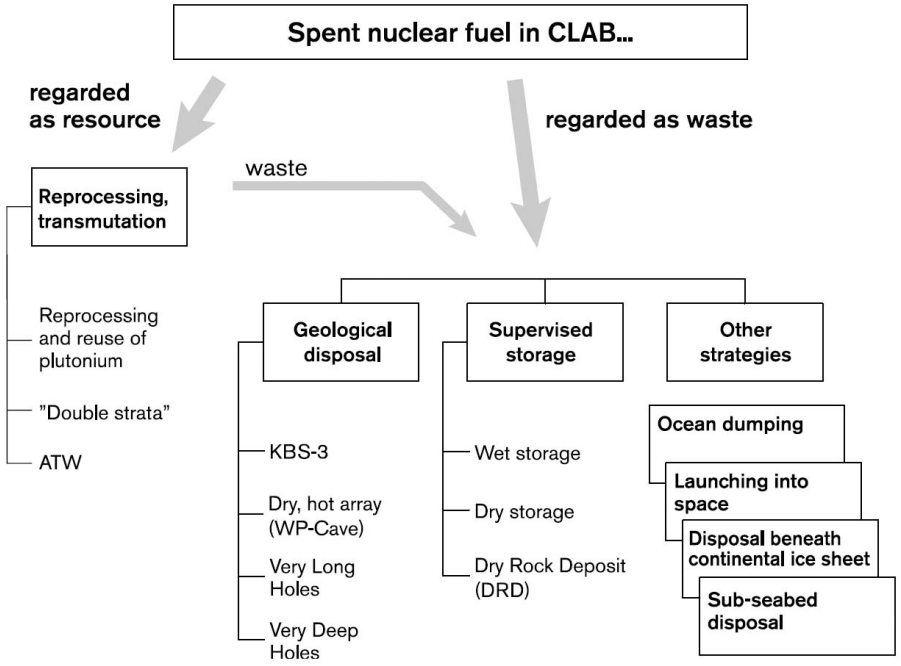



図 4.1-1　SKB 社がこれまでに検討してきた戦略及び代替システム［SKB, 2000］

SKB 社は、KBS-3 システムの開発期間中の様々な機会に、システム解析及び代替方法の比較を取り扱った報告書を作成している。その例として、研究開発プログラム 86、研究開発実証プログラム 92、RD&D98 補足書に相当する『サイト調査段階に先行する手法、サイト選定及びプログラムの補足説明書』（2000 年）や、2011 年 3 月の『許認可申請書』が挙げられる。SKB 社はさらに、一部の処分代替策（例えば「超深孔処分」や「WP-空洞」と呼ばれる概念）に関するより詳細な評価も実行している。しかし後者の方法については本文書では詳しく取り扱っていない。代替方法に関する検討においては、「**実行可能な戦略**」と「**これらの戦略の実現のために採用し得る方法**」を明確に区別しなければならない。スウェーデンにおいては、「鍵となる戦略」（キー・ストラテジー）の選択肢は、次のようになっている。

- 燃料は資源であるのか、廃棄物であるのか。すなわち、我々はリサイクル（再利用）を検討するのか、直接処分を検討するのか。
- 廃棄物と見なされるのであれば（または再処理に伴って生じる廃棄物に関して）、監督下に置かれた貯蔵（supervised storage）、地層処分またはその他の処分方法のい

ずれを戦略として採用すべきなのか。

戦略を選択した後、その次の選択は「戦略を実行する方法」に関するものとなる。スウェーデンにおいて検討されてきた戦略及び方法の選択に関する状況を模式的にに示す。

(1) 使用済燃料は資源なのか、廃棄物なのか？

使用済燃料が資源であるのか廃棄物であるのかの選択は、主として国の原子力発電計画に予定されている展開や、高速炉の開発及び導入の可能性と結びついている。この点に関する主な検討事項は、ウラン資源をより有効に利用する可能性である。資源として再利用した場合、天然ウラン資源から得られるエネルギーは従来の 50 倍から 100 倍となる。この選択はさらに、放射性廃棄物向け処分システムに対しても影響を及ぼす。これは、処分の対象となるのが高レベル長寿命廃棄物だけとなり、ウラン及びプルトニウムを処分する必要はないためである。

しかし、これによって残滓を地層処分する必要性に根本的な変化が生じるわけではない。また一般的に見て、燃料の再処理を行っている国々における高レベル廃棄物の処分戦略では、KBS-3 概念に類似した概念が採用されている。

上述したようなウラン資源の利用の大幅な改善が実現するためには、高速炉における再利用が必要である。しかし高速炉が商業的に利用可能となるのは今世紀の後半になるものと考えられている。また軽水炉で MOX 燃料としてウランを再利用することにより、ウランの利用率の向上を比較的低水準（約 25%）ではあるが実現できる。この方法は現在既に一部の国々で日常的に実施されているが、それに伴って最終処分場での取り扱いがより困難な幾つかの特性を伴う使用済燃料が生じることになる。しかし MOX 燃料の量は比較的小さなものである。

従来型の再処理で廃棄物から抽出されるのはプルトニウムとウランだけであり、その他の高い放射能毒性を伴う長寿命放射性核種は廃棄物内にとどまる。現在、これらを分離し、原子炉で燃焼させることを目的とする作業が進められている（核種変換)。これにより、最終処分における一部の課題がある程度まで軽減される可能性があるものの、地層処分の必要性は依然として残る。核種変換は高速炉において、あるいは加速器によって駆動される未臨界核種変換施設において実現することができる。この種のシステムについても、利用可能になるのは今世紀の後半だろうと考えられている。

スウェーデンが「その使用済燃料の再処理と分離されたウラン及びプルトニウムの再利

用を実施しない」と決定し、「使用済燃料を廃棄物と見なす」と決定した理由としては、幾つかのものが挙げられる（経済、原子力システム及び核不拡散面での理由）。他の国々、特にフランス、ロシア及び日本は、もう一つの選択を行っている。

(2) 処分なのか、監督下に置かれた貯蔵なのか。

使用済燃料は、監督下に置かれた貯蔵施設において長期間にわたり安全に貯蔵することができる。この種の貯蔵は、湿式貯蔵プールにおいて、または様々なタイプの乾式貯蔵施設において実施ができる。この種の貯蔵の技術的に受け入れ可能な期間の長さは、使用済燃料被覆や貯蔵施設の構成機器に起こり得る劣化に左右される。この種の貯蔵は、安全性が脅かされることなく、数百年間にわたって継続できると予想されている。しかしこれよりも長い期間を念頭に置いた場合、特に燃焼度が高い燃料については、不確実性が大きくなる。

監督下に置かれた貯蔵はいずれにせよ一時的な手段でしかあり得ず、長い目で見れば処分を実施する必要がある。しかし監督下に置かれた貯蔵には、当該物質を再処理すべきかどうかに関する決定を先延ばしにする可能性をもたらす効果がある。監督下に置かれた貯蔵の期間の受け入れ可能な長さを決定づけるのは、技術的な問題というよりはむしろ政治的／社会的な問題である。スウェーデンの場合、燃料の熱放出量の低減と、処分場及び関連施設を設計し、立地し、建設する上で必要な期間に対して当然なされるべき配慮を行った上で、技術的及び社会的に受け入れ可能な時間スケールにおいて最も早く処分を開始することが決定されている。

4.1.2 地層処分またはその他の処分方法

使用済燃料を廃棄物と見なす場合に、採用可能な戦略には幾つかのものがある。その中には、海洋及び海洋底下での処分や大陸氷床下での処分などが含まれる。しかしこれらは、スウェーデンが順守する国際協定の違反に当たることから、スウェーデンにとって選択可能な代替策ではない。使用済燃料を宇宙に射出する方法には膨大なロケット燃料が必要であり、多大な費用がかかることになる。またこの代替策は顕著なリスクを伴う。

地層処分は、国際的に見て、使用済燃料または再処理に伴って生じる長寿命高レベル放射性廃棄物の処分にとって最も有力な戦略である。地層処分は、きわめて長い期間にわたって安定しており、今後も安定した状態を維持する地質環境の利用に基づく。また地層処

分の基本原則は、廃棄物が幾つかの受動的なバリアによって、すなわち互いに支援し、補完し合い、きわめて長期間にわたり使用済燃料または高レベル放射性廃棄物の隔離をもたらすバリアによって取り囲まれることである。

その安全性は、天然バリア（岩盤、大きな深度及び処分場深度における環境によって構成される）と工学的な人工バリアの組み合わせに基づくものとなる。また岩盤により、その他のバリアを保護する安定した力学的及び化学的な条件がもたらされる。さらに岩盤は、その他のバリアがその機能を失った場合にも、放射性核種の移行を遅延させるフィルタとして機能する。

様々な国において、その国の地質学的条件に応じて、幾つかの異なった種類の地質媒体の採用が検討されている。しかし全てのケースにおいて、安全性を確保するために同じ多重バリア機能の原則が適用されている。

### 4.1.3 地層処分に対する代替案

スウェーデンでは、以下に挙げる地層処分システムのオプションが検討された。この 4 つのシステムの概略図を図 4.1-2 に示す。

- KBS-3：400～700mの深度における短い坑道で構成されるシステムに定置。
- 長い坑道（VLH：きわめて長い孔）：400～700 mの深度に数本並行して配置される数キロメートルの長さの坑道に定置。
- WP-空洞（WP-Cave）：水の流れが様々な工学的手段によって低減された岩体に定置。
- 超深孔：数千メートルに及ぶ深度に定置。

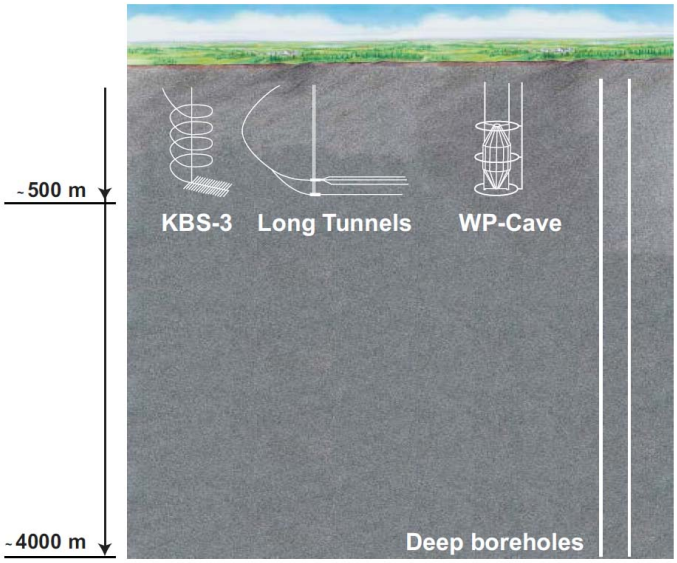



図 4.1-2　使用済燃料の地層処分を目的とする 4 種類のシステムの模式図

これらのシステムオプションは、相互比較する上で共通の特徴と異なる特徴があることに注意する必要がある。最初の 3 つのシステムは、最終処分場は坑道、立抗及びその他の地下空洞によって構成されるシステムである。最初の 2 つの代替案に共通する特徴の一つとして、坑道のレイアウトが、キャニスタの表面温度が 100℃を超過しないという要件に基づいていることが挙げられる。またこの場合、キャニスタの間の間隔を最小限としなければならないことが前提となっている。

WP-空洞システムは、キャニスタを岩盤容量内に高い密度で定置し、これらのキャニスタの周囲を緩衝材によって完全に取り囲むシステムである。このシステムでは処分場は 100 年以上の期間にわたって開かれた状態に維持し、空気冷却する必要がある。

超深孔システムは、原則として他の 3 種類の代替策と次に挙げる 2 つの重要な側面において異なっている。第一に、廃棄物は（数百メートルの深度に設置される坑道システムではなく）深さが数千メートルの数本のボーリング孔内に定置される。第二に（キャニスタの密封性が主要安全機能となるのではなく）、岩盤の遅延特性が主要安全機能をもたらすという点が異なっている。

SKB 社は、地層処分のための様々な仕組みによってもたらされる安全性に関する評価を行った上で、KBS-3 システムを採用することにより安全な処分が成功する可能性が最も良好なものとなるという結論に至った。

同様に、KBS-3 システムの内部でも異なった代替案を検討している。その例として、キ

ャニスタ材料の選択、キャニスタの設計、緩衝材及び埋め戻し材材料の選択、そして鉛直方向と水平方向の定置方法などが挙げられる。これらの一部に関しては既に結論が出ているが、一部についてはまだである。

4.1.4 スウェーデンにおける代替策に関する研究の継続

SKB 社は、活動の重み付けや水準はそれぞれ異なるものの、一部の代替案に関する研究を継続している。

代替策の研究の一部分は、より**後の段階での処分の最適化を可能とすることを目的**に実施されている。その例として、KBS-3 キャニスタの水平方向の定置に関して現在進められている研究が挙げられる。この代替案の場合、重要な経済面での利点を備えるものの、安全面で解決しなければならない幾つかの問題が依然として残っている。

代替策の研究のその他の部分は、国際的に生じている展開への注視を維持することを目的として、さらには許認可プロセス及び公衆との関係において必要となる代替案の検討にとっての基礎の一つをもたらすために続けられている。こうしたより広範な研究は、教育にとっても、さらには SKB 社の社内及び SKB 社ネットワークにおいて知識豊かな人材を育成・維持する上でも重要である。こうしたケースに該当するものとして、核種分離・変換（P&T）に関して継続されている研究が、さらには深層ボーリング孔処分に関して最近実施された広範な調査が挙げられる。SKB 社は随時、外部の大学に委託することにより、これらの問題に関する現況報告書を技術報告書として取りまとめ、公表している。

4.2 フィンランド

フィンランドにおける代替処分技術開発の位置づけ、実施研究テーマについて調査・整理した概要を以下に示す。

4.2.1 代替処分技術開発の位置づけ

フィンランドでは原子力法により、雇用経済省が、廃棄物管理義務者が果たす原子力廃棄物管理の履行に関する決定をすることを規定している。雇用経済省の前身である貿易産業省は 1991 年と 1995 年に決定を行い、オルキルオト原子力発電所とロヴィーサ原子力発電所から発生する使用済燃料については地層処分の準備をすることを定めている。

一方で、ポシヴァ社が 1999 年にオルキルオトを処分地とすることの原則決定を求めたことに対し、政府が 2000 年に原則決定を行ったが、原則決定において技術が開発され適切となった場合には最終処分場所を開くができるように最終処分が設計されることを求めており、また、異なる使用済燃料管理の原則に関する新しい決定の可能性を制限しないとしている。さらに、原子力法第 53b 条において、異なる原子力廃棄物管理の方法や実行手段を比較するときに必要な原子力専門技術及びその他の能力について、当局が十分で包括的な有用性を確保していることを求めている。

| 文書名 | 規定内容 |
|---|---|
| 使用済燃料の最終処分場の建設に関するPosiva社の申請に対する政府による原則決定(2000.12.21) | （中略）<br>政府の上記の決定によれば、長期間の安全性を確保するのに最終処分場所の監督を必要とせず、また技術が開発され適切となった場合には最終処分場所を開くができるように最終処分が設計されなければならない。計画によると、最終処分は、計画の全段階において最終処分されたキャニスタを地表に戻すことが技術的に可能であるように計画されている。建設許可が与えられる前に、プロジェクトの関係者は、最終処分場の掘り起こしとそれに影響を及ぼす要因ならびに掘り起こし技術と掘り起こしの安全性について、具体的で、十分に詳しい説明と計画を提出する必要がある。同様に掘り起こしの費用について最新の評価を示す必要がある。これらの計画において、掘り起こしや回収の可能性の結果、長期間の安全性が損なわれてはならない。<br><br>この原則決定は、いかなる方法でも、貿易産業省の原子力法第28条に基づき放射性廃棄物管理の原則に関わる新しい決定を行う可能性を制限しない。例えば、これにより、申請書に示された解決法と異なる使用済燃料の管理手法の発展を監視し、また、そうした手法の開発が、この原則決定における最終処分の概念の適切性に対して及ぼす影響について同省に報告するよう原子力発電会社を義務付けることができる。<br>（後略） |
| 原子力法（990/1987） | 第7a章　専門知識が利用可能なことの保証〔改正19.12.2003/1131〕<br>第53b条　廃棄物管理義務者から収集される拠出金〔改正19.12.2003/1131〕<br>第5条に規定される一般原則を満たすために、本法第43条第2項に従っ |

| | |
|---|---|
| | て、債務評価額が決定されている如何なる廃棄物管理義務者も、当局が、十分かつ広範囲なかかる原子力工学専門知識と、原子力廃棄物管理を実施する様々な方法を比較するために必要とされる場合、自由に使用することができるその他の施設を有するということを保証することを意図した研究に資金を提供することに参加する義務を有するものとする。<br>（後略） |

雇用経済省がフィンランドの原子力廃棄物に関する研究開発として運営するKYTプログラム（2.2.5節参照）は、上記の原子力法第53b条に基づいており、2011年から2014年までの期間に実施されるKYT2014プログラムに含まれる研究開発には3つの分類があり、その中の一つとして「新しい代替の放射性廃棄物管理技術」が含まれている。

KYT2014プログラムのフレームワーク計画書によれば、当局は、研究開発が進められている地層最終処分の代替形式について、最新の情報や専門技術を入手できなければならないとし、フィンランドにおける放射性廃棄物管理の様々な実施方法を比較するのに必要な能力も利用できなければならないとしている。また、時には、様々な種類の放射性廃棄物について概説されている維持代替策を評価・指定し、新しい技術的解決策を試験する可能性や必要性が生じる可能性があることにも言及している。

また、同計画書において、フィンランドにおいて、現在の第 1 オプションである地層最終処分が計画通り実現しない場合、あるいは、廃棄物の発生量削減といった新しい方法が開発される場合、新しい技術や代替技術を研究することにより、フィンランドにおける放射性廃棄物管理の実施のセキュリティが高まるとしている。また、この種の研究は、国際的協力への参加を通して実施できる可能性が最も高いとしながらも、フィンランドの研究チームが国際的研究プログラムへ参加するには、国家の具体的な専門技術が先行条件となる、としている。

### 4.2.2 実施研究テーマ

KYT2014 プログラムのフレームワーク計画書[1]では、KYT プログラムに適した代替地層処分技術に関する研究テーマとして、以下が考えられるとしている。

- 使用済燃料の再処理に基づく放射性廃棄物管理の解決策
- 核種分離・変換
- 深層ボーリング孔などの地層最終処分代替策
- 回収可能性
- 乾式貯蔵、長期貯蔵などの貯蔵オプション

・ 極低レベル放射性廃棄物の地中処分など、運転廃棄物管理として可能性のある新しい解決策
・ 廃止措置を実施するための新しい解決策

なお、KYT2014 プログラムのウェブサイト[2]によれば、KYT2014 プログラムで 2013 年に実際に実施されている研究は以下となっている。

| 研究テーマ | 実施機関 |
|---|---|
| 先進的核燃料サイクル － 新しい分離技術 | ヘルシンキ大学放射化学研究室（HYRL） |
| 先進的核燃料サイクル － 計算による核燃料サイクル分析 | フィンランド技術研究センター（VTT） |
| 加速器駆動システム（ADS）による原子力廃棄物の核変換 | アールト大学 |

「先進的核燃料サイクル － 新しい分離技術」の課題では、使用済燃料中及び新液体抽出法の二次廃棄物溶液中のアクチニド分離用新ナノ多孔質金属リン酸塩イオン交換材料の調査を実施している。

「先進的核燃料サイクル － 計算による核燃料サイクル分析」の課題では、処分施設の容量に対する分離と核種変換技術の影響に関する調査、及び BWR 上部における高速中性子スペクトル中のマイナーアクチニドの燃焼モデリングを実施している。

「加速器駆動システム（ADS）による原子力廃棄物の核変換のプロジェクト」の課題では、鉛－ビスマス冷却 MYRRHA 実験炉（lead-bismuth cooled Myrrha experimental reactor）の中性子物理及び原子炉内放射性廃棄物の核種変換に関するモンテカルロシミュレーションが実施されている。

### 4.2.3 実施機関、費用負担の仕組

前節の代替処分技術の研究開発は KYT プログラムによって運営されている。KYT プログラムにおける費用負担の仕組みについては 2.2 節参照。

### 4.2.4 参考文献

[1] TEM, Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management KYT2014

-Framework Programme for the Research Programme 2011-2014, Energy and the climate 72/2010, 2010.

[2] http://kyt2014.vtt.fi/eng/projectlist2013.htm

## 4.3 フランス

### 4.3.1 代替処分技術開発の位置づけ

放射性物質及び放射性廃棄物の持続可能な管理に関する 2006 年 6 月 28 日の計画法第 2006-739 号は、長寿命高レベル放射性廃棄物または長寿命中レベル放射性廃棄物に関連するすべての調査・研究ついて、以下に示す 3 つの補完的分野に従って実施することを定めている。

1. 長寿命放射性元素の群分離・消滅処理（P&T）
2. 廃棄物の可逆性のある地層処分
3. 中間貯蔵

同法は、処分の後に、原子力安全と放射線防護を理由として地上または浅地中の処分場で処分できない最終放射性廃棄物については、深地層で処分することも定めている。

同法は、原子力分野の研究開発の主要当事者である原子力・代替エネルギー庁（CEA）には群分離・消滅処理に関する研究をコーディネートする責任を付与し、ANDRA には地層処分プロジェクトに対する責任､及び Cigéo（フランス語の Centre industriel de stockage géologique pour les déchets HA et MA-VL（高レベル及び長寿命中レベル放射性廃棄物の地層処分産業センター））地層処分施設を補完する適切な中間貯蔵施設の開発に関する研究のコーディネートに対する責任を付与した。

ここでは、フランスで実施された P&T や中間貯蔵などの代替的な放射性廃棄物管理方法に関する研究の範囲と状況の概要について述べる。

### 4.3.2 実施研究テーマ

(1) 代替的な放射性廃棄物管理方法に関する研究開発の範囲

a. マイナー・アクチニドの群分離・消滅処理に関する研究

放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画（PNGMDR）を実施する 2008 年 4 月 16 日付及び 2012 年 4 月 23 日付のデクレによって補足された計画法第 2006-739 号は、CEA に「長寿命放射性元素の群分離・消滅処理に関する研究をコーディネートする」よう求めた。

・　（フランスにとって原子力産業の重要性を強調し、将来の原子炉に関する研究を要求した）「2005 年 7 月 13 日付計画法第 2005-781 号の第 5 条に言及される新世代の原子炉に関して実施される研究に関連して」、「ならびに廃棄物の核変換専用の加速器駆動システムに関連して」
・　「2012 年までにこれらの手法の産業的見通しの評価を得るために」
・　「2020 年 12 月 31 日までにプロトタイプ施設の操業を開始する」こと。2012 年に提出された文書によってオプションの「選択」が可能にならなければならない。

(a) マイナー・アクチニドの群分離・消滅処理から享受する利益

ANDRA による研究から、アクチニドは、粘土の処分場サイトでは移動性が非常に低く、大半の長期シナリオでは処分場の放射線学的影響に寄与しないことが判明した。しかしながら、廃棄物中のマイナー・アクチニドの存在は長期的な放射能毒性の主要発生源である（3 世紀後には、現在発生しているガラス固化廃棄物形態の残留放射能毒性のほぼ 99%がアメリシウム、キュリウム、及びその崩壊生成物の存在によるものとなる）。これらのマイナー・アクチニドを廃棄物から除去し、より短寿命の元素に核変換することは、フランスだけでなく複数の欧州諸国のほか米国と日本にとっても、さらなる進歩のために不可欠な課題であり、20 年以上にわたって研究の焦点となっている。

マイナー・アクチニドは、ガラス固化廃棄物パッケージから放出される熱の主要寄与要因でもあり、大方の場合、この熱によって処分場の処分セルの設計が決まる。すなわち、廃棄物の熱負荷が低いほど、処分場の処分密度が高くなる。したがって、マイナー・アクチニドを最終廃棄物から除去し、（短寿命核分裂生成物の放射性崩壊を可能にするために）約 100 年に及ぶ事前中間貯蔵期間を設けることによって、処分場の規模を大幅に縮小することができる。（EDF から金融支援を得て）CEA と ANDRA が共同で実施した研究では、ANDRA が現在構想している粘土層での処分概念における長寿命高レベル放射性廃棄物の処分セルの設置面積に関して 1 桁分の利得が予想されている。これは、中レベル放射性廃棄物の貯蔵とアクセス基盤を含めて、処分場全体の全体的な設置面積を約 3 分の 1 削減することに相当する。

マイナー・アクチニドは、上述の不利な点に全面的に等しく寄与するわけではない。核変換戦略の最初の標的はアメリシウムになるとみられる。この元素の核変換は、廃棄物管理に対して最も大きな利益をもたらし、リサイクル作業に与える影響は最も限定的である。

核変換は、将来設置される高速中性子炉の容量と適切な燃料サイクル施設という状況において最適に考察することができる。したがって、この戦略は、すでに発生した廃棄物または既存の原子力発電所に預託されている廃棄物には適用できない。

これらの CEA 研究は、技術、放射線、経済性、その他の基準を考慮して、さまざまな核変換オプションの長所と短所を評価し、選択するための情報を提供する。

マイナー・アクチニドの核変換は、地層処分場の必要性を排除することはないものの、より長期的な進歩に向けて道を開くことができる。長寿命高レベル放射性廃棄物処分場の規模は、10 分の 1 削減することができ、最初の数世紀が経過した後には、廃棄物の放射性毒インベントリは最大で 100 分の 1 低減することができる。

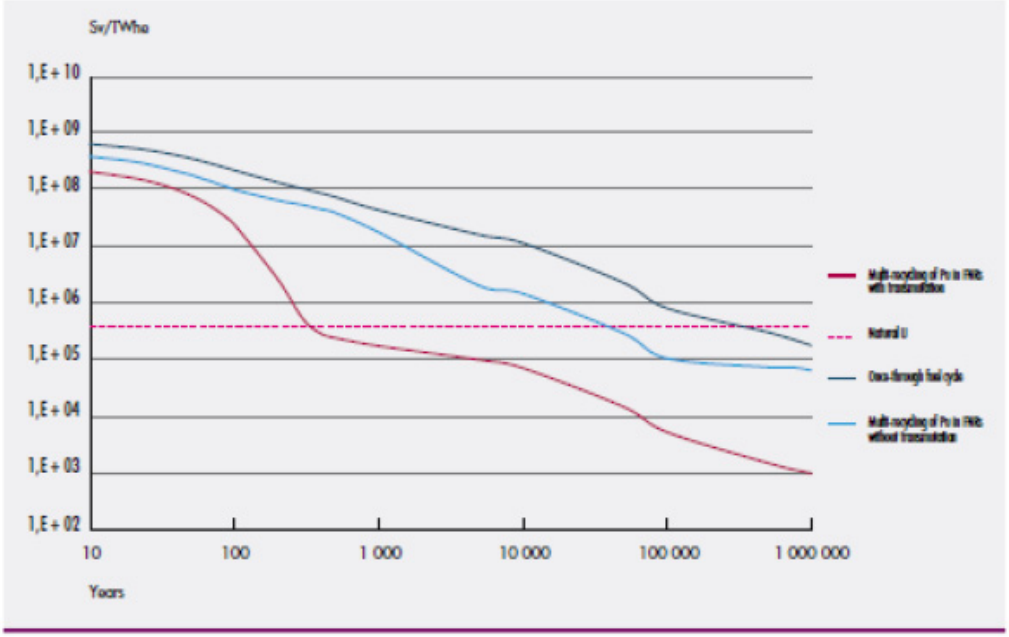



図 4.3-1　マイナー・アクチニドの核変換の有無の別の最終廃棄物の放射毒性

赤色：　PWR のプルトニウムの核変換を伴う複数回のリサイクル

紫色：　PWR のプルトニウムの核変換を伴わない複数回のリサイクル

深青色：　ワンススルーサイクル

破線：　天然ウラン

(b) マイナー・アクチニドの群分離に関する研究開発の範囲

CEA が実験室規模で実施した研究の範囲

実験室規模で実際の使用済燃料サンプル（数キログラム）に対して、CEA は、選択的で

抵抗性ある新しい抽出剤を使用してマイナー・アクチニドを回収するために開発したプロセスを試験した。

考え得るさまざまなリサイクル経路に対応して（均質リサイクルのためのすべてのアクチニドの群分離、炉心ブランケットにおけるマイナー・アクチニドのリサイクルのための逐次分離、アメリシウム単独の分離など）、複数のオプションが検討された。観察された性能は優れており（回収収量は約 99%）、追加試験を実施して、運転条件を産業規模に近付けてみた。結果は非常に勇気付けられるものであり（とくに関与する分子の耐久性に関して）、研究した概念の商業利用の可能性については非常に有望である。

研究は現在も進行中であり、概念をさらに最適化することに加えて、商業規模の実施条件をより正確に定めること（パイロット規模での個別技術の試験、統合試験、プロセス制御モードの詳細仕様など）を目指している。

マイナー・アクチニド分離の実現可能性は、現在検討中のすべてのオプションを対象に研究所で実証された。これらのプロセスを商業規模に当てはめる上での理論的な障害は存在しない。すなわち、これらの概念を最適化し、強固にするために、研究開発が継続される。

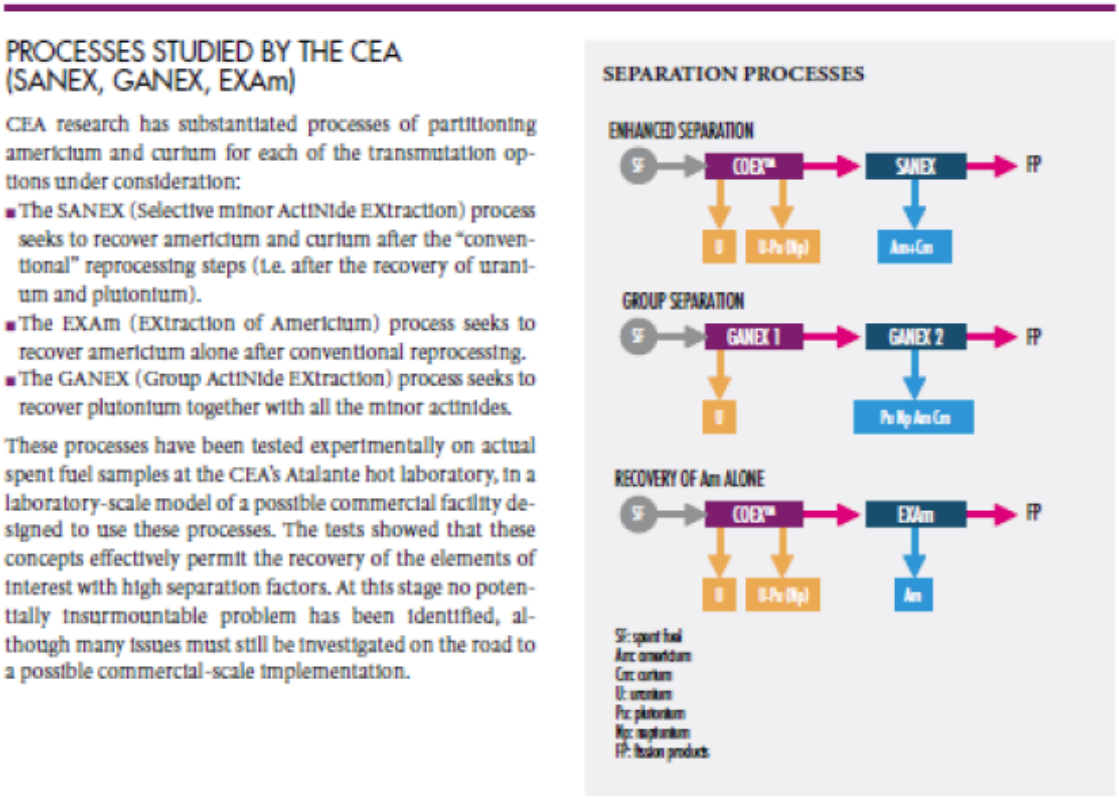
CEA によって研究されたプロセス（SANEX、GANEX、EXAm）

CEA の研究は、検討中のそれぞれの核変換オプションについて、アメリシウムとキュリウムの群分離のプロセスを立証した。

- SANEX（選択的マイナー・アクチニド抽出）プロセスは、「通常」再処理ステップの後（すなわち、ウランとプルトニウムの回収後）に、アメリシウムとキュリウムの回収を目指すものである。
- EXAm（アメリシウムの抽出）プロセスは、通常再処理の後にアメリシウムのみの回収を目指すものである。
- GANEX（アクチニド抽出グループ）プロセスは、プルトニウムとともにすべてのマイナー・アクチニドを回収することを目指すものである。

これらのプロセスは、CEA のアタランテ・ホット研究所で、これらのプロセスを利用することを目的とした商業施設の実験室規模モデルで、実際の使用済燃料サンプルを対象に実験的に試験が行われた。試験から、これらの概念は高分離係数で当該元素の回収を有効

に可能にすることがわかった。この段階では、潜在的に克服できない問題は特定されなかったが、可能な商業規模の実施に向けて今後も多くの問題を研究しなければならない。



PROCESSES STUDIED BY THE CEA
(SANEX, GANEX, EXAm)

CEA research has substantiated processes of partitioning americium and curium for each of the transmutation options under consideration:

- The SANEX (Selective minor ActINide EXtraction) process seeks to recover americium and curium after the "conventional" reprocessing steps (i.e. after the recovery of uranium and plutonium).
- The EXAm (EXtraction of Americium) process seeks to recover americium alone after conventional reprocessing.
- The GANEX (Group ActINide EXtraction) process seeks to recover plutonium together with all the minor actinides.

These processes have been tested experimentally on actual spent fuel samples at the CEA's Atalante hot laboratory, in a laboratory-scale model of a possible commercial facility designed to use these processes. The tests showed that these concepts effectively permit the recovery of the elements of interest with high separation factors. At this stage no potentially insurmountable problem has been identified, although many issues must still be investigated on the road to a possible commercial-scale implementation.



図 4.3-2　分離プロセス

(c) マイナー・アクチニドの核変換に関する研究開発の範囲

核変換のさまざまな手法

放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画（PNGMDR）を実施する 2008 年 4 月 16 日付及び 2012 年 4 月 23 日付のデクレによって補足された計画法第 2006-739 号は、CEA に「長寿命放射性元素の群分離・消滅処理に関する研究をコーディネートする」よう求めた。

・　（フランスにとっての原子力産業の重要性を強調し、将来の原子炉に関する研究を求めた）「2005 年 7 月 13 日付計画法第 2005-781 号の第 5 条に言及される新世代の原子炉に関して実施される研究に関連して」、「ならびに廃棄物の核変換専用の加速器駆動

システムに関連して」

- 「2012 年までにこれらの手法の産業的見通しの評価を得るために」
- 「2020 年 12 月 31 日までにプロトタイプ施設の操業を開始する」こと。2012 年に提出された文書によってオプションの「選択」が可能にならなければならない。

マイナー・アクチニドの核変換とは、マイナー・アクチニドを高速中性子束の中でリサイクルし、核分裂させることである（たとえ非常に控えめであっても、核分裂から生じるエネルギーを活用して発電する)。いくつかの手法を検討することができる。

- サイクルの「専用の層」の中での「専用システム」による核変換。これはとくに、加速器駆動システム（ADS）での核変換であり、マイナー・アクチニドがウラン及びプルトニウムの管理サイクルから切り離されて管理される。
- 均質核変換：マイナー・アクチニドは、発電用高速炉の燃料の中で「希釈」することでリサイクルされる（最大で数パーセントの濃度)。
- 非均質核変換：マイナー・アクチニドは、限定数の専用燃料要素の中では比較的濃度が高く、発電炉でリサイクルされる。 特別に興味深いオプションは、炉心の周辺でマイナー・アクチニドを有するウラン「ブランケット」（約 10%のマイナー・アクチニドを含有する）でリサイクルすることであると思われる。

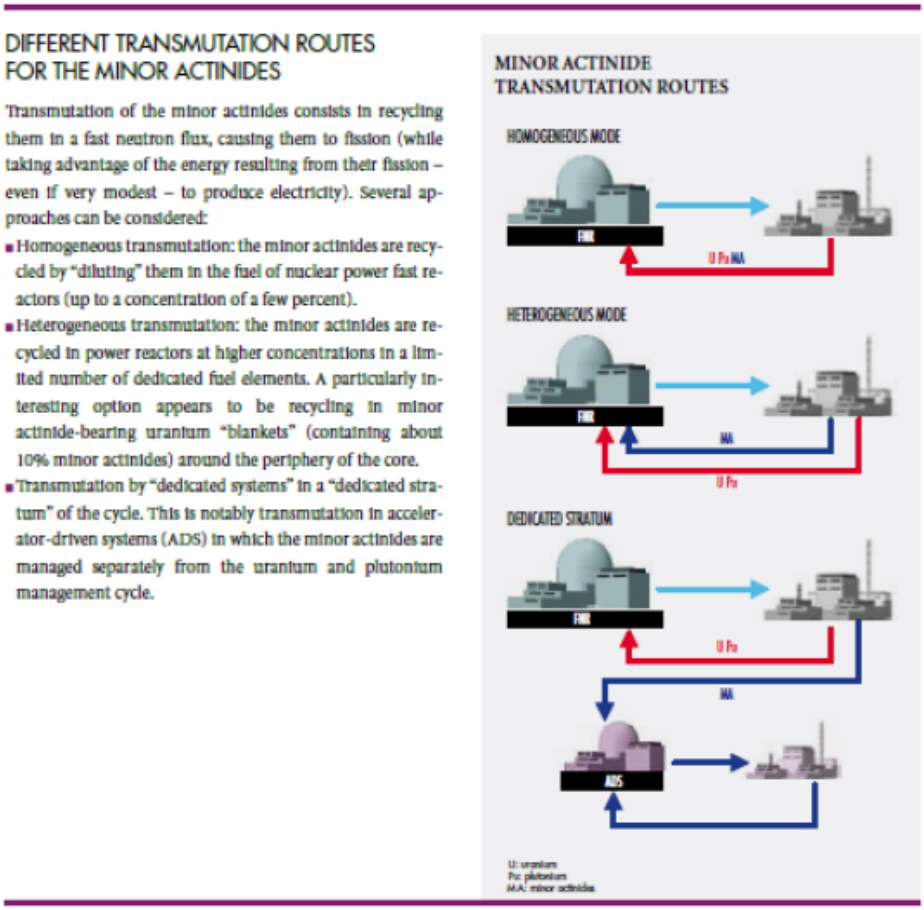



図 4.3-3　マイナー・アクチニドの核変換経路

加速器駆動システム（ADS）での核変換

核変換は、この機能のために特別に専用とされる分離層で行うことができる。これには、高濃度のマイナー・アクチニドを受け入れるように設計された加速器駆動システム（ADS）が含まれる。これらのシステムを産業的な成熟度に引き上げるために必要な研究開発の取り組みは、これまでの進歩があるにしても、臨界システムの場合よりもはるかに大規模になるとみられる。さらに、（現在研究中の装置の場合の）ADS による核変換は、kWh 当たりコストが臨界原子炉の利用と比べて 20%上昇すると推定される。

加速器駆動システム（ADS）は、フランスではベルギーの SCK-CEN によって提案された MYRRH プロジェクト（加速器駆動多目的炉）と関連付けて、CNRS によって研究が進められている。ADS は、重要な大規模実験が利用できず（加速器、核破砕ターゲット、燃料など）、これまで一度も組み込まれたことがないハイテク機器の開発を必要とする複雑な

システムである。これらのシステムの理論的核変換性能は、かなり有望であるが（生産エネルギー単位当たりで臨界原子炉の約 20 倍)、これらのシステムに関して現在検討されている出力レベルが低いために効率的に実施することはできない。

CEA によって実施される技術的・経済的評価は、最大熱出力定格が約 400MWth の EUROTRANS 欧州研究プログラムの産業モデルに基づいている。この研究では、高速中性子炉の 60GWe（40 基の 1,500MWe 級原子炉群）の発電能力に相当する核変換能力を取得するには 18 基の ADS が必要になることが明らかになった。

現時点では、ADS 設計では効率的に管理できないプルトニウムの多重リサイクルを確保するために、高速中性子炉が必要である。このオプションの（kWh 当たり平準化平均コストに対する）推定補足コストは、臨界原子炉での核変換に比べて約 20%である。

MYRRHA プロジェクト

加速器駆動システムは未臨界炉心で構成され、ここでは、連鎖反応は外部中性子源から追加の中性子が供給されたときに限り可能である。外部中性子は、高エネルギー陽子が破砕反応と呼ばれるものによって一部の核種と相互作用することで生成される。未臨界原子炉自体に加えて、ADS には、核破砕ターゲットに連結する陽子加速器が含まれる。未臨界炉心には、一方で連鎖反応を制御しながら、核変換に有利な高濃度のマイナー・アクチニドを装荷することができる。しかしながら、これらのシステムの開発は、以下のような革新的なハイテク機器の設計を必要とする。

- 加速器。高エネルギー陽子の強力ビームを非常に高い信頼性で供給する。
- ターゲット。高エネルギー中性子を生成することによってビームに反応する（腐食問題と材料の挙動について、現在研究が行われているところである)。
- 未臨界炉心
- ウランを含有しないが、高濃度のプルトニウムとマイナー・アクチニドを含有する燃料

GUINEVERE は、2007 年にベルギーのモルで SCK-CEN と CNRS によって構築された超低出力の ADS 実証モデルである。2012 年に操業を開始したこの施設は、研究目的及び大型 ADS のフィージビリティ調査のために鉛冷却高速炉に連結する ADS のレプリカであ

る。ベルギーは 2025 年に、100MWth 規模の ADS で MYRRHA（加速器駆動多目的炉）プロジェクトを提案する。

第 4 世代原子炉におけるマイナー・アクチニドの核変換

第 4 世代システムの開発は、高速中性子炉（FNR）を利用して、使用済燃料に含まれるウランとプルトニウムをリサイクルすることをベースとしており、温室効果ガスを排出せずに、安全かつ経済的に競争できる電力を生産する見通しをもたらし、核物質の持続可能な管理という目的を満たす。

したがって、高速中性子炉でのウランとプルトニウムの多重リサイクルは、機微物質の蓄積を防止し、天然資源を保全し、最終廃棄物の体積を制限することによって、持続可能な原子力に向けた 1 つのカギとなる。これは、再利用可能な物質の多重リサイクル能力を実証するという ASTRID 原子炉の最大の目的である。

これらのシステムの可能性については国際的な合意がある。第 4 世代国際フォーラム（GIF）はほぼ 10 年間、システム開発の主要基準を特定するために、考え得るさまざまなシステムを分析した。原子炉の安全は 1 つの重要な問題であり、安全基準の改善という目標が開発の第 1 目標の 1 つである。

フランスでは、第 4 世代高速中性子炉（FNR）の 2 つの主要システムが研究されているところである。すなわち、ガス冷却高速炉（GFR）とナトリウム冷却高速炉（SFR）である。現時点では、今世紀前半の展開として SFR が最善のソリューションであるように思われる。SFR は、広範なフィードバックに基づいて最高度の産業的な成熟度、及び明確に特定された進歩の手段など（とくに安全性に関して、CEA によって実施された研究の後に、ここ数年で大きな技術的飛躍の見通しが生まれた）、複数の主要な利点を組み合わせている。GFR は、多くの点で有望な代替策であるが、産業的な成熟度は言うまでもなく、技術実証機を建設する前に多くの研究作業が依然として必要である。

SFR は、産業レベルの運転の 100 原子炉年を含めて、ほぼ 400 原子炉年の広範なフィードバックから恩恵を受けており、このタイプの原子炉を運転する作業者が受ける極めて低い集団預託線量をはじめとして、いくつかの興味深い特性が明らかにされた。SFR は現在、その開発に参加しているすべての国で採用されている（ロシア、中国、インド、日本、韓国など）。

その他の高速中性子炉概念にも可能性がある。フランスはとくに、ヘリウムガス冷却高速炉システムに関心を寄せている。このシステムは、より有利な熱力学的特性という潜在的利点をもっており、高温産業加熱用途の展望を開く。CEA は、適切な燃料に関して重要な研究プログラムを実施した。これらのシステムの動作温度が高いために、燃料はとくに苛酷な動作条件に適合しなければならない。

複数の領域での研究を実施することの難しさを考慮して、CEA は、ナトリウム冷却高速炉に焦点を絞った。ガス冷却高速炉の開発作業は、75MWth 規模の実験炉である ALLEGRO プロジェクトを介して欧州レベルで実施されている。このプロジェクトでは、中欧に原子炉を建設するという長期目標を掲げて、コンソーシアムが結成された。

鉛冷却高速炉（LFR）（すなわち鉛合金によって冷却される）が、船舶推進などの特定用途のためにロシアで建設され、作業は GIF の枠内で現在進められている。鉛の高い沸点と低い反応度（とくに水との反応度）は理論的利点であるが、鉛の比較的高い融点ととくに構造材料の加速腐食のリスクは大きな欠点であり、このため CEA は基準技術としてナトリウムを優先させた。最後に、はるかに長期的な観点からすると、溶融塩炉（MSR）も重要である。MSR は、フランスでは CNRS が研究しており、CNRS は数多くの理論的利点があるトリウム燃料（ウランではなく）をフッ化物塩の形で燃料及び冷却材として利用して、溶融塩高速炉（MSFR）プロジェクトを研究している。しかし、このシステムが産業的な成熟に到達する前に、技術面（または概念の面でも）大きな飛躍的進歩が依然として必要であり、今世紀後半までに可能であるとは思われない。

GIF は、持続可能な原子力エネルギー、ウラン資源の節約、第 3 世代軽水炉が到達したレベルと比較した競争力及び安全性の向上、放射性廃棄物発生の最小化、核拡散耐性の強化、発電以外の用途への原子力利用など、第 4 世代原子炉の基準を満たさなければならない原子力システムを支援して、調整のとれた研究開発プログラムを策定し、管理する。

GIF は 6 つの原子炉概念を選択した。すなわち、ナトリウム冷却高速炉（SFR）、ガス冷却高速炉（GFR）、超臨界水冷却炉（SCWR）、超高温炉（VHTR）、鉛冷却高速炉（LFR）、及び溶融塩炉（MSR）である。これらの概念のうちの 4 つ（SFR、GFR、LFR 及び MSR）は、高速中性子炉をベースとしており、持続可能な原子力オプションを構成している。

フランスは、これらのシステムのうちの 3 つの開発に貢献することを決定した。

- SFR（ロシア、日本、米国、中国、韓国、及び欧州連合も関心を示している）
- GFR（フランスの主要な選択肢。日本も関心を寄せており、高温炉の進歩から恩恵を受ける）
- MSR（フランスと欧州連合のみが非常に長期にわたって関心を示している）

LFR 概念は、腐食問題と溶融鉛で冷却回路を操業することが難しいことを理由として、フランスでは選択されなかった。

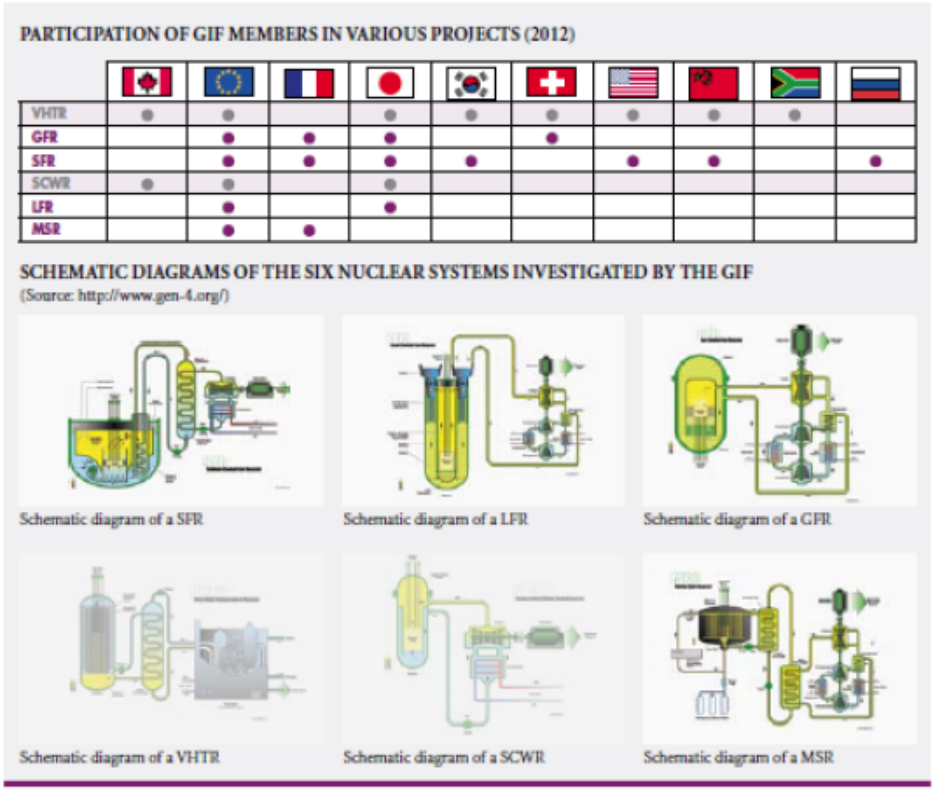



図 4.3-4　さまざまなプロジェクトへの GIF メンバーの参加（2012 年）と GIF が調査した 6 つの原子力システムの概略図

(2) 長寿命中レベル放射性廃棄物（LL-ILW）及び高レベル放射性廃棄物（HLW）の中間貯蔵に関する調査・研究

a. LL-ILW 及び HLW の中間貯蔵の研究の目的と範囲

2006 年 6 月 28 日の計画法は、以下のように定めている。

長寿命高レベル放射性廃棄物または長寿命中レベル放射性廃棄物に関するすべての調査・研究は、以下に示す 3 つの補完的分野に従って実施される。

第 3 条－HLW 及び ILW に関する調査・研究は、3 つの補完的分野で実施される。

1. 長寿命放射性元素の群分離・消滅処理
2. 可逆性のある地層処分
3. 中間貯蔵。「環境法典の第 L.542-1-2 条に言及される計画によって決定されるように、とくに容量と時間の点で要件を満たすために、遅くとも 2015 年までに新しい中間貯蔵施設を設置するか、または既存施設を改造することを目指して、対応する調査・研究を実施しなければならない」。

第 14 条－「ANDRA は、PNGMDR に従って、中間貯蔵及び深地層処分に関する調査・研究を策定し、または策定するよう委託し、これらの調査・研究をコーディネートする任務を負う」。

2008 年 4 月 16 日付デクレの第 2008-357 号は、以下のように定めている。

- 「ANDRA は、2009 年末までに所管大臣に地層処分施設の処分オプションと追加的中間貯蔵のオプションを提出する」（2009 年 12 月の報告書）
- ANDRA は、2012 年末に所管大臣に「委託された研究のレビュー」を提示する（2012 年 12 月の報告書）

革新的貯蔵概念の必要性と設計について、Cigéo 処分施設での補完的作業を考慮して研究された。以下の 2 種類の中間貯蔵が予想される。

- 原子力事業者のサイトでの産業中間貯蔵施設。その役割は、廃棄物パッケージからの発熱の低減と処分施設への輸送の流れのスケジュール作成を可能にすることである。
- 処分施設からのパッケージの回収について取り扱う専用中間貯蔵施設。可逆性オプションの実施を支援し、再処理されたパッケージを受け入れる。

Cigéo には、操業に必要な貯蔵緩衝材を除いて、専用中間貯蔵容量は含まれない。

b. この主題に関する現在の見解

ANDRA がコーディネートした貯蔵に関する調査・研究を踏まえて、新規施設を発生者のサイトに立地させ、発生者がプロジェクト管理を行い、原子力関連作業を監視することが可能になる。しかし、これらの結果は、Cigéo プロジェクトの設計と、重要な多機能性の要件を満たす貯蔵緩衝材容量に関する設計にも役立つだろう。

調査・研究によって、ANDRA は貯蔵事業者に技術支援を行い、これらの事業者のプロジェクトまたは増設と計画中の処分施設との補完性を高めることができる。したがって、ANDRA との共同作業に基づいて、AREVA 社は、ラ・アーグの HLW ガラス固化廃棄物貯蔵施設の建設中にこの施設の建設規定を組み込んだ。このような意見交換は、ラ・アーグの新規貯蔵サイトと EDF が管理する ICEDA プロジェクトに関して繰り返すことができる。

4.3.3 大学及び研究施設が実施する研究開発のテーマ

(1) 核変換に関する研究開発のテーマ

核変換に関するフランスの研究は、主にナトリウム冷却高速炉の開発を目的としたものである。研究には、革新的 SFR の炉心管理の開発、崩壊熱除去の改善、代替エネルギー変換システムの研究のほか、とくに ASTRID 統合技術実証炉の開発が含まれる。

a. 革新的な SFR 炉心

ナトリウムは中性子を減速し、反射し、捕獲する。炉心にナトリウムが局所的に存在しない場合（ナトリウムのボイド）は、反応度の変動につながる。変動は 2 つの拮抗する作用の総和である。

・　中性子の減速及び捕獲の減少による正の反応度効果
・　炉心からの中性子漏洩の増加に関連する負の反応度効果

中性子漏洩速度は炉心の規模に応じて低下するため、ナトリウムのボイドによって生じる反応度効果は、通常の大型の高出力炉心設計では正になる。これは安全上の懸念をもたらし、SFR では管理が難しい。

この問題を克服するために、「低ボイド効果炉心」が現在、基準炉心として設計が進められており、たとえば、ナトリウムの沸騰が生じた場合に負の反応度効果を確保できるようにする。

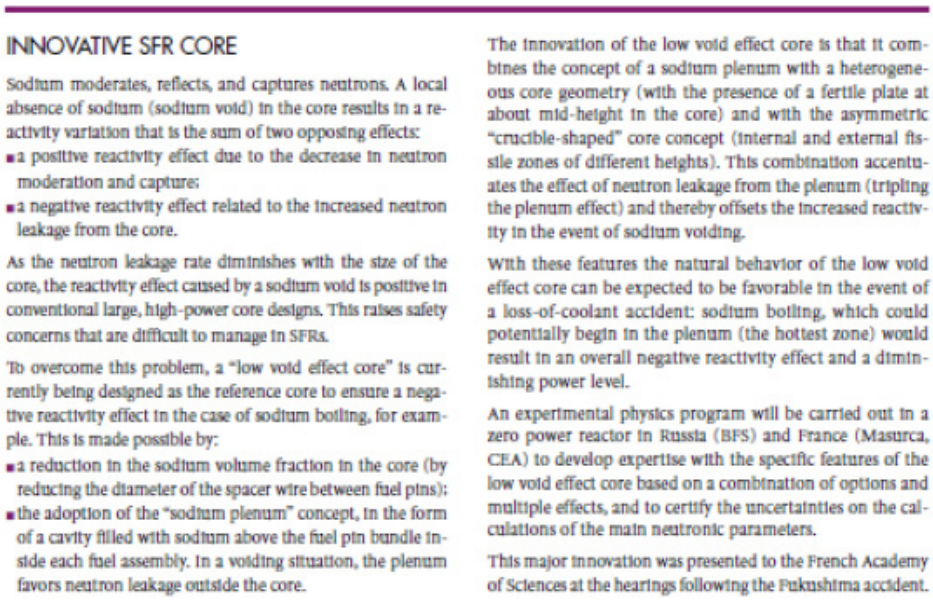
これは、以下に示す措置によって可能になる。

・　（燃料ピン間のスペーサワイヤの直径を小さくすることによって）、炉心のナトリウム体積分率を低減する。
・　それぞれの燃料集合体の内部の燃料ピン束の上方のキャビティにナトリウムを充填する形で、「ナトリウム・プレナム」概念を採用する。ボイドが生じる状況では、プレナムは炉心外部への中性子漏洩に有利に働く。

低ボイド効果炉心の技術革新は、ナトリウム・プレナムの概念を、非均質炉心形状（炉心のほぼ中間の高さにファータイル板を置く）及び非対称「るつぼ形」炉心概念（異なる高さの内部及び外部の核分裂区域）と組み合わせることである。この組み合わせは、プレナムからの中性子漏洩の効果を強調するため、ナトリウムのボイド形成が生じた場合の反応度の増大を相殺することができる。

こうした特徴により、低ボイド効果炉心の自然挙動は、冷却材喪失事故が発生した場合に有利になると予想することができる。すなわち、プレナム（最も高温の領域）で開始される可能性があるナトリウム沸騰によって、全体的な負の反応度効果が生じ、出力レベルが低下することになると考えられる。

オプションと複数の効果の組み合わせに基づいて、低ボイド効果炉心の特徴を利用して専門知識を開発することと、主要中性子パラメータの計算に関する不確実性を証明することを目指して、ロシア（BFS）とフランス（Masurca、CEA）のゼロ出力炉で実験物理学プログラムが実施されることになっている。この重要な技術革新は、福島事故を受けた聞き取りでフランス科学アカデミーに対して説明された。



INNOVATIVE SFR CORE

Sodium moderates, reflects, and captures neutrons. A local absence of sodium (sodium void) in the core results in a reactivity variation that is the sum of two opposing effects:

- a positive reactivity effect due to the decrease in neutron moderation and capture;
- a negative reactivity effect related to the increased neutron leakage from the core.

As the neutron leakage rate diminishes with the size of the core, the reactivity effect caused by a sodium void is positive in conventional large, high-power core designs. This raises safety concerns that are difficult to manage in SFRs.

To overcome this problem, a "low void effect core" is currently being designed as the reference core to ensure a negative reactivity effect in the case of sodium boiling, for example. This is made possible by:

- a reduction in the sodium volume fraction in the core (by reducing the diameter of the spacer wire between fuel pins);
- the adoption of the "sodium plenum" concept, in the form of a cavity filled with sodium above the fuel pin bundle inside each fuel assembly. In a voiding situation, the plenum favors neutron leakage outside the core.

The innovation of the low void effect core is that it combines the concept of a sodium plenum with a heterogeneous core geometry (with the presence of a fertile plate at about mid-height in the core) and with the asymmetric "crucible-shaped" core concept (internal and external fissile zones of different heights). This combination accentuates the effect of neutron leakage from the plenum (tripling the plenum effect) and thereby offsets the increased reactivity in the event of sodium voiding.

With these features the natural behavior of the low void effect core can be expected to be favorable in the event of a loss-of-coolant accident: sodium boiling, which could potentially begin in the plenum (the hottest zone) would result in an overall negative reactivity effect and a diminishing power level.

An experimental physics program will be carried out in a zero power reactor in Russia (BFS) and France (Masurca, CEA) to develop expertise with the specific features of the low void effect core based on a combination of options and multiple effects, and to certify the uncertainties on the calculations of the main neutronic parameters.

This major innovation was presented to the French Academy of Sciences at the hearings following the Fukushima accident.

図 4.3-5　従来型の低ボイド効果炉心の比較

b. SFR における崩壊熱除去

連鎖反応の停止後の燃料からの崩壊熱の除去は、福島事故が示しているように、原子炉の安全のもう 1 つの重要な側面である。ナトリウムは、この点に関していくつかの優位性がある。

- 大きな沸騰マージン（動作温度とナトリウム沸点の間に 300℃以上の差）
- 非常に高い熱慣性と冷却材喪失状況ではるかに低い加熱速度

ASTRID プロジェクトは、能動的システムと受動的システムを組み合わせた相乗的な手法を考慮しながら、複数の多様な崩壊熱除去系で設計された。目的は、一次系の自然対流を重要視し、熱交換器を熱源の近くに設置して、電源とポンプが故障した場合でも炉心を

冷却できるようにすることによって、システムをより効果的なものにすることである。

崩壊熱除去の問題は、福島事故から得た教訓の分析の一部として、フランス科学アカデミーに対して説明された。

c. 新しい SFR エネルギー変換システム

ナトリウム・水反応のリスク（前世代のナトリウム冷却高速炉の利用可能性と安全性という観点から見た主要問題の 1 つ）を解消するという目的から、発電のための最終変換用として水の利用に代わる方法の開発（ランキン水蒸気サイクル）につながった。

ASTRID のために検討されたオプションの 1 つとして、高温炉とガスタービンに関する設計研究に基づいて、窒素を使用する（約 180 バールの圧力と 300～500℃の動作温度でのブレイトン・サイクル）第三次熱伝達サイクル（最初の 2 つのナトリウム冷却回路から下流）がある。

これは、現在世界中で展開されている産業システムと比較して大きな技術革新であり、技術の最適化と認定のためにはさらに研究開発が必要になる。実現可能性が確認された場合、この変換システムは、全体熱力学効率の数パーセント削減という犠牲を払って安全性を優先するが、それでも既存の軽水炉よりも高い効率である。

d. ASTRID 統合技術実証炉

ASTRID は、2040 年ごろに操業を開始することが可能になる第 4 世代ナトリウム冷却高速炉のために提案された主な技術革新の妥当性を産業規模で実証するために設計された。その特性は、とくに安全性と操作性に関して、将来の高出力（通常は 1,500MWe）の商業用 SFR に当てはめる上で適切でなければならない。

主な特徴としては、以下のものが含まれる。

・ ASTRID には、1,500MW（約 600MW の電気定格に相当する）の熱出力定格が採用された。これは、通常操業での操作性とエネルギー利用可能性という観点から見て、ま

たシビアアクシデント状況を含めた安全研究に関して、原子炉自体だけでなく、主要コンポーネントの代表性を確保する上で十分な出力である。また、大量の電力を生産することによって、操業コストの相殺にも役立つ。

- ASTRID の安全レベルは、同時に操業が開始される第 3 世代発電プラントの安全レベルと少なくとも同等でなければならない。これまでの SFR 設計よりも堅固な安全実証を行えるように万全が尽くされる。ASTRID は、福島事故で得られた教訓を設計段階から考慮する。
- ASTRID は、フェニックスが過去に行ったように、高速中性子スペクトル照射サービスを提供する。これらの照射は、炉心の性能を徐々に改善し、新しい燃料や炭化物燃料及び酸化物分散強化型（ODS）鋼被覆管などの構造材料の試験を行うことができるようにする。
- 稼働率の点から見て、ASTRID の継続操業は、これらの実験の影響を受けることがある。それ以外の場合、この原子炉の稼働率は 80%を超えることが望ましい。選択されたオプションは、商業用発電プラントに当てはめた場合に 90%の稼働率が可能であることを実証する必要がある。
- 将来の高速中性子発電プラントは増殖炉として操業する可能性があるが、ASTRID は等増殖型であり、必要であれば後のオプションとして増殖炉になる。ASTRID は、プルトニウムの多重リサイクルの産業的フィージビリティを実証し、マイナー・アクチニド核変換実験を実施する。

SFR 技術は、欠くことのできない柔軟性を提供し、核物質インベントリの管理を将来の戦略変更に応じて適合する可能性が生まれる。したがって、ASTRID の統合技術実証炉は、等増殖型（核分裂性物質を消費量と同じだけ生成する）になるように設計される。これは、（主に再処理 MOX 使用済燃料からの）外部プルトニウムで原子炉が起動した後に、この原子炉は外部核分裂性物質をさらに必要とすることなく、天然ウランまたは劣化ウランの供給だけで操業できることを意味する。設備容量を追加する必要が生じた場合は、原子炉を「増殖炉」モードに切り換えて、新規原子炉の起動に必要な追加分の核分裂性物質を生成することができる。

逆に、操業中の高速中性子炉を停止するという決定が下された場合は、原子炉を「バー

ナー」モードに切り替えることができる。これは、残留プルトニウム・インベントリの大幅な削減につながる(最終停止まで発電を維持しながら、60年間で約3分の2削減される)。この操業モードを最適化するために、現在も研究が進められている。

ASTRID は、少なくともマイナー・アクチニドを含有する個別ピンの規模で、またはできれば完全な集合体の規模で、革新的燃料と核変換で実験ができるように設計された。設計研究によって、とくに安全性に関して（低ボイド効果炉心に関する補足記事を参照)、非常に興味深い特性をもつ奇抜な設計のペレットで、酸化物炉心（プルトニウムの平均含有量が約 25%の $UPuO_2$）が採用されることになった。

ASTRID の原子力蒸気発生設備は、円筒形の容器に炉心キャッチャー、一次・二次ナトリウム回路（一次系は容器内にシールされている)、改良崩壊熱除去系を収容しており、(ナトリウム／水反応のリスクを排除するために）蒸気ではなく窒素を利用するエネルギー変換システムの可能性を有する。後者のオプションは、重要技術の飛躍的進歩の 1 つであり、そのフィージビリティを確認するために現在も研究が進められているところである。

ASTRID プロジェクトには、燃料の成型加工、ウラン／プルトニウムのリサイクル、または核変換の実証準備のための燃料管理施設も含まれる。既存の産業施設は現在、これらの 3 つの分野のニーズに対処できておらず、CEA は現在いくつかのオプションを検討している。

- $UPuO_2$ 燃料集合体の製造設備の設計：炉心製造施設（AFC）
- ASTRID 燃料再処理のための特別施設の設計（炉心処理施設：ATC)、または場合により ASTRID 燃料をラ・アーグの施設で処理することができる条件の検討
- 検討した規模に応じて（個別ピン対全サブアセンブリ)、核変換実験を実行するために必要になる可能性のある施設の設計

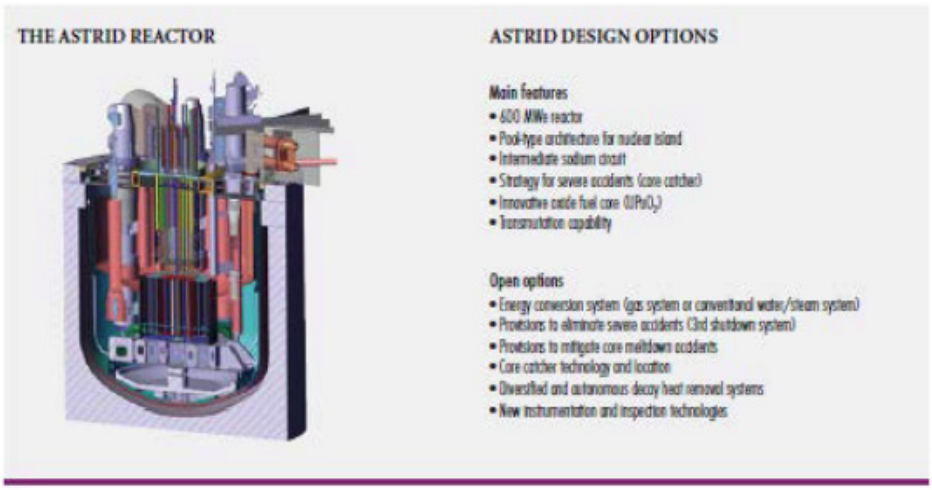



図 4.3-6　ASTRID 炉と設計オプション

(2) 中間貯蔵に関する研究開発のテーマ

将来の HLW 及び ILW の中間貯蔵に関連する改善に向けた進路は、以下のとおりである。

・　持続可能性

材料及びシステムの寿命を 100 年程度まで延長することを、システムの構成要素の簡素なモニタリングとともに目指す。

・　多機能性と操業の柔軟性

性質が大きく異なる廃棄物パッケージを受け入れることが予測される（熱出力、寸法、重量、線量率など）。

・　モジュール性

施設に新規の貯蔵区画を迅速かつ容易に追加することができるようにすることを目指す。

・　パッケージのモニタリング

測定及びモニタリング・システムのための廃棄物パッケージへの容易なアクセスと不適合廃棄物パッケージの容易な回収を目指す。

a. 革新的中間貯蔵概念の研究

2010～2012 年の PNGMDR は、以下のように述べている。

- 「中間貯蔵施設の設計、建設及び操業からのフィードバックを十分に利用するために、中間貯蔵事業者及び ANDRA との協力を拡大する」。
- 「将来のすべての中間貯蔵施設プロジェクトの利益のために、処分施設と中間貯蔵施設の補完性を高める革新的なソリューションを改善する目的で、ANDRA は廃棄物発生者と連携して、2012 年までに技術的概念の研究を成し遂げる」。

研究は主に、廃棄物発生者のサイトに立地する産業中間貯蔵施設を対象とする。

b. HLW 及び ILW の中間貯蔵の必要性の特定

中間貯蔵施設の必要性は、HLW 及び ILW パッケージの将来の発生と既存中間貯蔵の容量がベースとなる。

2009 年には、その時点で評価された国内インベントリに基づいた必要性の最初の見極めは、ラ・アーグ、マルクール、カダラッシュ、ビュジェイ、及びヴァルデュックの各原子力施設の中間貯蔵施設の操業開始日と操業停止日（CDE）に基づいて貯蔵施設への引渡しシナリオを設定する ANDRA の演習によって支援された。

2012 年には、同年の国内インベントリに基づいた 2 回目の必要性の見極めは、産業廃棄物発生者によって設定されたシナリオ、及び Cigéo 処分施設の規模を決定するために使用された想定事項から導出されたインベントリとそれぞれ一致する。

Cigéo への廃棄物パッケージ引渡しのシナリオは、HLW 及び ILW 管理の産業プログラム（PIGD）の枠組みの中で廃棄物発生者との協力で導出された。

マルクールとラ・アーグ 1 号機から生じるアスファルト固化スラッジのドラム缶を考慮して、ベースライン・シナリオと代替シナリオが選択された。

ラ・アーグ処理プラントに関連する必要性の特定

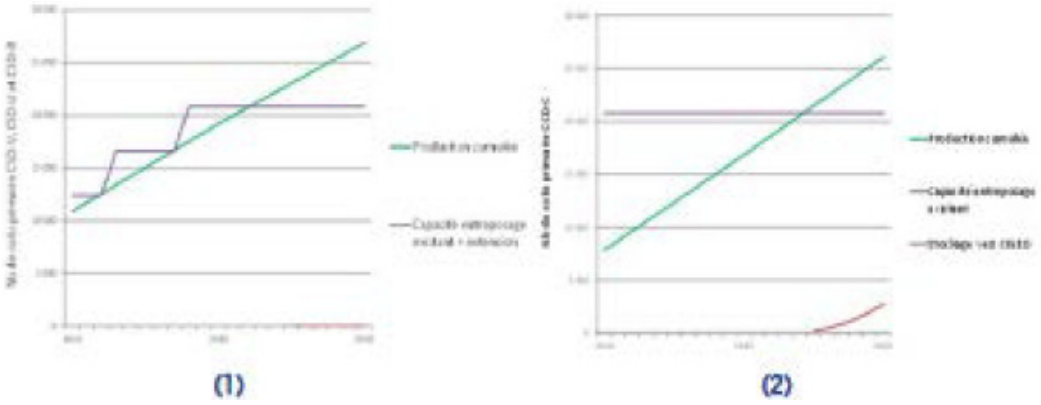



図 4.3-7　ガラス固化廃棄物パッケージのラ・アーグ貯蔵施設の E-EV-SE（及びその拡大 EEVLH）と ECC 圧縮ハルエンドピースの貯蔵施設（新しいモジュールが 2030 年までに創設される）での廃棄物量の推移

緑色：累積生成量

紫色：既存容量

赤色：Cigéo での処分

生成が完了し、または既知のゆっくりと拡大する体積に対応する廃棄物パッケージが貯蔵される古い貯蔵施設の操業寿命

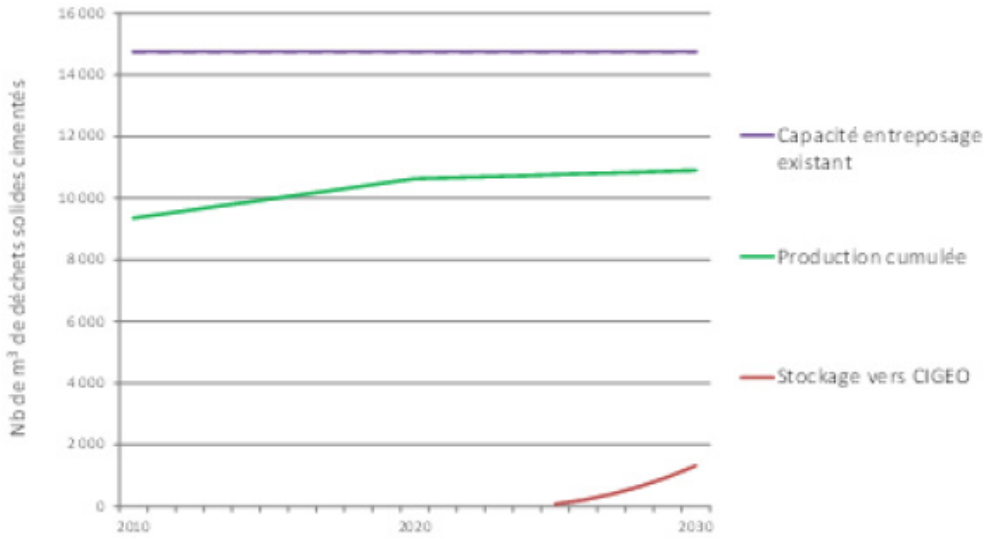



図 4.3-8　UP1 からのガラス固化廃棄物が保管されるマルクール・ガラス固化プラントの中間貯蔵施設の廃棄物量の推移

セメント化固体廃棄物（$m^3$）／年

緑色：累積生成量

紫色：既存容量

赤色：Cigéo での処分

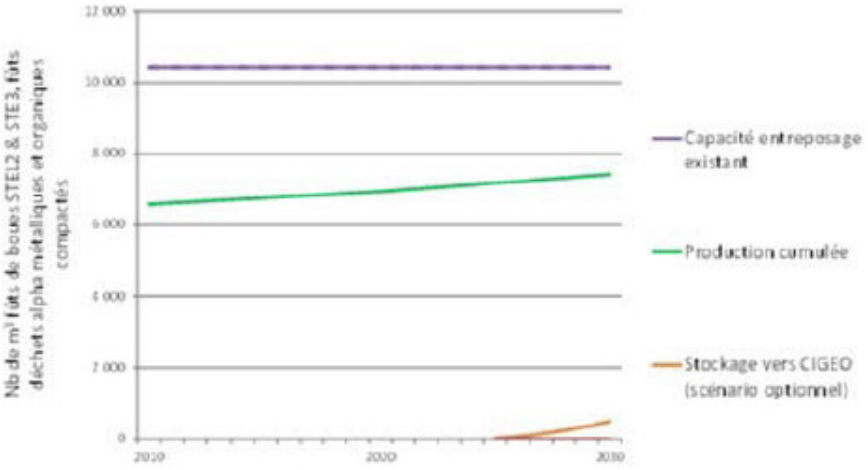



図 4.3-9　スラッジとアルファ放出体で汚染された技術廃棄物で満たされたドラム缶を受け入れるラ・アーグの再処理プラント STE3 の中間貯蔵施設 S 及び ES での廃棄物量の推移

STE2 及び STE3 の廃棄物ドラム缶（$m^3$）／年

緑色：累積生成量

紫色：既存容量

赤色：Cigéo での処分

処分傾斜路を通過する HLW 及び ILW パッケージの流量は、ラ・アーグの中間貯蔵施設の操業停止日（CDE）の影響を受ける。

図 4.3-10　2040 年のラ・アーグにおけるすべての ILW 中間貯蔵施設の CDE により定置される廃棄物パッケージの 1 日当たりの数（2009 年のインベントリ）

2030 年までに生成される廃棄物について

赤色：年間平均流量

灰色：それぞれの廃棄物系列の年間平均流量

すべての廃棄物について

紫色の点線：年間平均流量

黄色：それぞれの廃棄物系列の年間平均流量

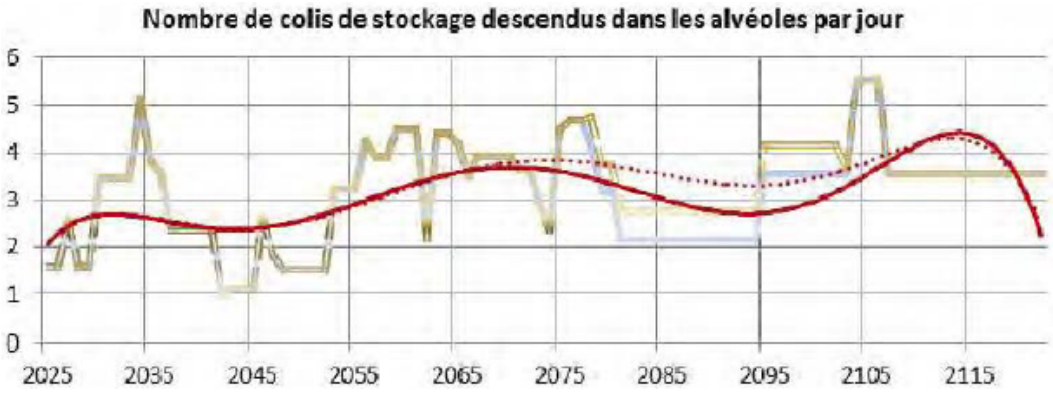



図 4.3-11　2050 年まで延期されるラ・アーグのすべての ILW 中間貯蔵施設の CDE により定置される廃棄物パッケージの 1 日当たりの数（2009 年のインベントリ）

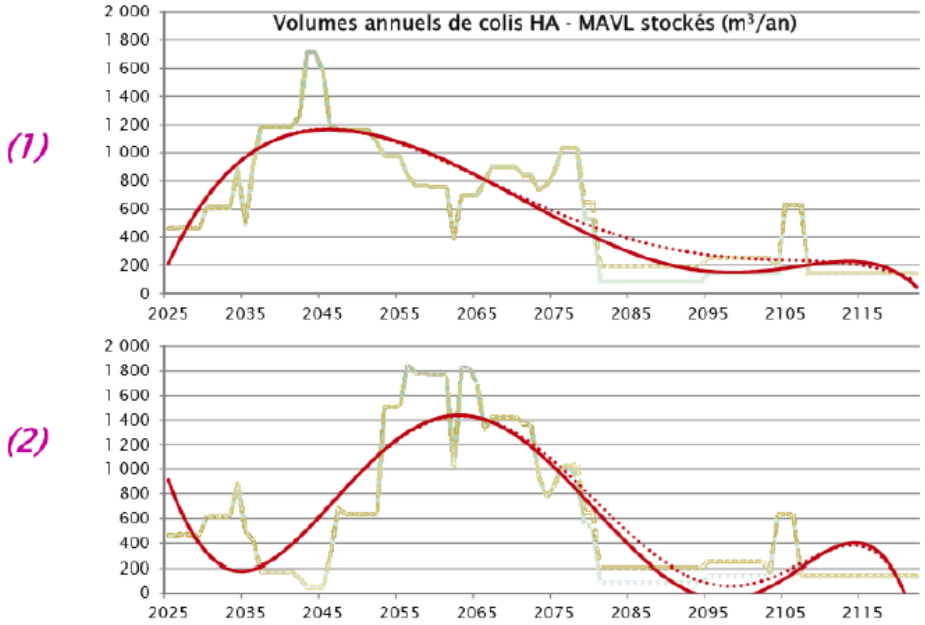



図 4.3-12　年間定置廃棄物パッケージの量（$m^3$）。ラ・アーグの MLW 中間貯蔵施設の CDE 日の影響

1　　ラ・アーグのすべての MLW 貯蔵施設の CDE は、2040 年に設けられている（2009 年のインベントリ）。

2　　ラ・アーグのすべての MLW 貯蔵施設の CRC は、2050 年まで延期される。

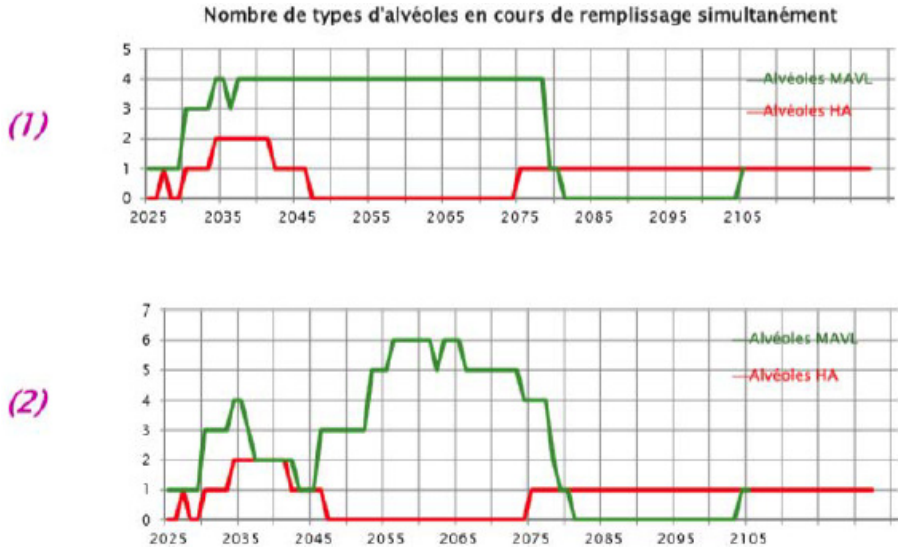



図 4.3-13　時間の関数として Cigéo で運用されるさまざまなタイプの HLW 及び ILW の数の推移。ラ・アーグの ILW 中間貯蔵施設の CDE 日の影響

1　　ラ・アーグのすべての MLW 貯蔵施設の CDE は、2040 年に設けられている（2009 年のインベントリ）。

2　　ラ・アーグのすべての MLW 貯蔵施設の CRC は、2050 年まで延期される。

赤色：HLW 処分

緑色：ILW 処分

c. HLW 及び ILW の中間貯蔵の最適化

必要性の見極めに関連する機能解析を実施した。これに基づいて、中間貯蔵に関する広範な技術的オプションが、複数の技術グループ（AREVA 社とトラクテベル社）の支援を得てレビューされた。2 つのタイプの施設が研究された。

- 地上施設（HLW 用に 3 つの設計概念、MLW 用に 2 つの設計概念）
- 深度 50m の施設（HLW 用に 2 つの設計概念、MLW 用に 1 つの設計概念）

以下のような理由から、地上中間貯蔵の方が浅地中貯蔵よりも適切であるという結論に達した。

既存施設から派生した地上設計概念（E-EV-SE、ECC）は、安全性と堅ろう性の点だけでなく、構造物・系統の耐久性及びモニタリング（監視と保守が容易である）の観点からも非常に効率的であることが認められた。

今後さらに研究を継続し、以下に示す観点から利益をもたらすことを目指す。

- 操業の多機能性と柔軟性（熱出力、規模、重量、線量率が異なるパッケージを受け入れる能力）
- 廃棄物パッケージの監視が容易であること（保守のためのアクセス及び取り扱いの能力）
- モジュール性（既存の施設に新しい区画を追加する能力）

これまでに 4 つの概念が最適化された。

- 概念 1：ラ・アーグの E-EV-SE から HLW/ILW に当てはめる

この概念では、廃棄物パッケージは、CSD-V などの標準的な MLW パッケージを最大で 6 体収容するバスケットで定置される。バスケットはくぼみに積み重ねられ、自然換気からの熱対流によって冷却される。最大熱負荷は 1,500W である。

図 4.3-14　概念 1

HLW パッケージタイプ CSD-V 用のアルミ製バスケット

貯蔵バスケット

・　概念 2：ラ・アーグの ECC 施設から HLW/ILW に当てはめる

この概念では、廃棄物パッケージはスラブに積み重ねられ、コンクリートモジュールでグループ化される。力学的換気は水平で、空気の部分的な再循環が行われる。荷役は自家推進産業用トラックで行われる。最大熱負荷はパッケージ当たり 500W である。

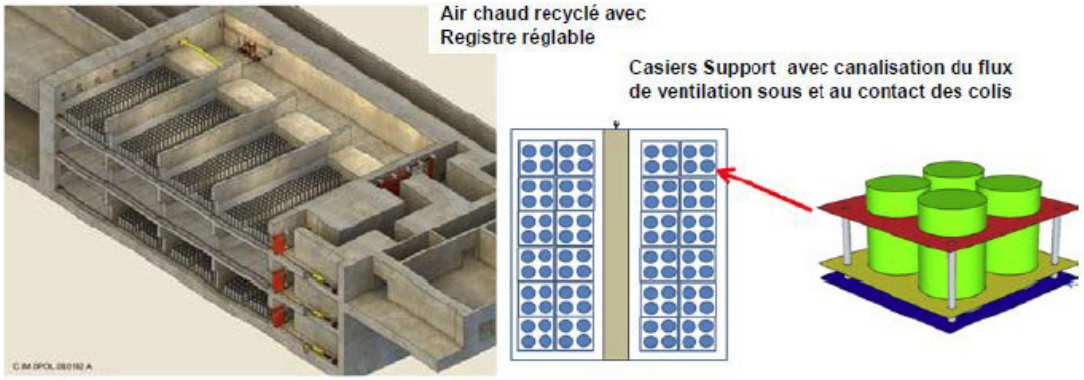



図 4.3-15　概念 2

・　概念 3：NUHOMS から HLW/ILW に当てはめる

この概念では、コンクリート製バンカーが放射線防護を確保し、冷却は自然換気によって行われる。廃棄物パッケージの閉じ込めは、気密キャスクによって確保される。キャスクは、道路または鉄道による輸送キャスクと互換性がある。

キャスクには、24 体の標準的な CSD パッケージまたは 15 体の処分パッケージを収容することができる。最大熱負荷は 500W である。

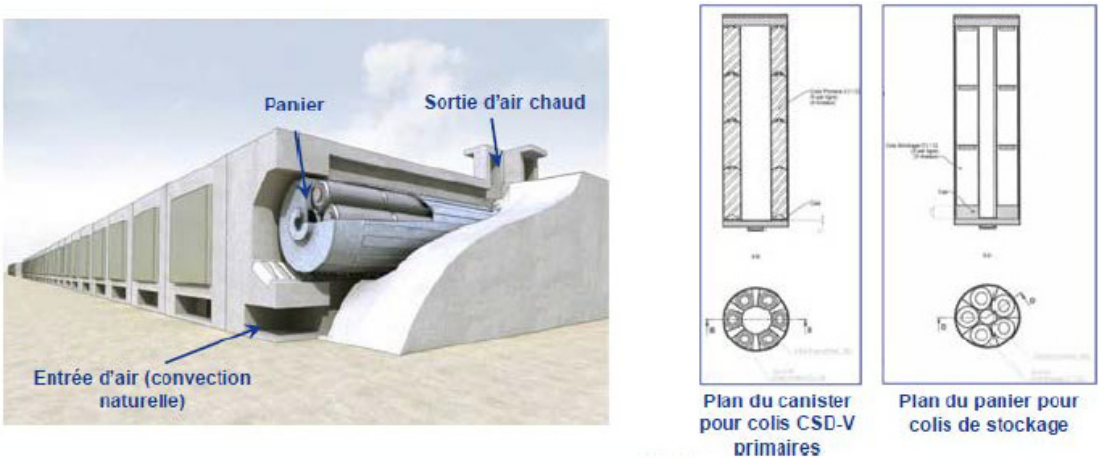



図 4.3-16　概念 3

バスケット、ホットエア出口、空気取入口（自然換気）、CSD-V 一次廃棄物パッケージのキャニスタ計画、処分廃棄物パッケージのバスケット計画

・　ILW 概念：遠隔制御方式の並置モジュール

この概念は多目的であり、異なる寸法の廃棄物パッケージを受け入れることができる。一次パッケージは貯蔵バスケットでグループ化される。荷役は、遠隔制御方式のトラックとフォークリフトで行われる。

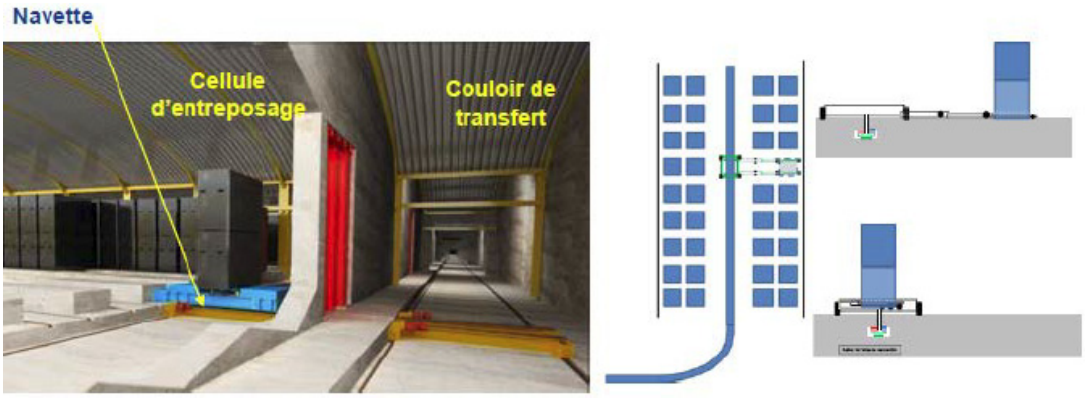



図 4.3-17　概念 MLW

貯蔵セル、移動回廊、シャトル

・　貯蔵概念と Cigéo の補完性

概念 1（E-EV-SE）：発熱性廃棄物パッケージがクールダウンするまで対処する。可逆性のあるオプションを適用する場合に使用することができる。

概念 2（ECC）：Cigéo サイトでの緩衝材の中間貯蔵施設になり得る。可逆性のあるオプションを適用する場合に使用することができる。

概念 3（NUHOMS）：Cigéo の可逆性のあるオプションを支援する高速展開のソリューションになり得る。

MLW 概念：Cigéo に輸送する前に発生サイトで追加的な中間貯蔵施設として、または Cigéo サイトで小型／中型容積の緩衝材の貯蔵施設として利用することができる。

d. 中間貯蔵におけるモニタリング・システム

個別の中間貯蔵設計概念に適合すべきシステム

これらのシステムは、中間貯蔵施設の安全性にとって重要な機器を監視するために、検討されたそれぞれの処分概念に適合させることが望ましい。

中間貯蔵のモニタリングに関連する研究開発は、Cigéo 施設のモニタリングに関連する研究開発と結びつけられる。これは原位置センサーに基づいている。

中間貯蔵の材料の耐久性に関連する研究開発は、Cigéo の対応する研究開発と結びつけられる。材料のサンプルを中間貯蔵施設に配置し、分析のため取り出した。分析では、鉄筋の腐食につながるコンクリートの炭酸化と微小ひび割れ、スチール製コンポーネントの乾食、及び材料の化学的風化と照射の相互作用について取り扱う。

各系列のパッケージに適合すべきシステム

目的は、Cigéo 施設での受入れを考慮して情報を裏付けるために、一連の廃棄物パッケージまたは特定の廃棄物パッケージの検出レベルを、（可能であれば、パッケージを移動させずに）下げることである。情報は、廃棄物パッケージの熱負荷／温度、放射性ガスの潜在的放出（トリチウム、炭素 14、塩素 36、アルゴン 39、クリプトン 85、ヨウ素 129、ラドン 222)、放射線分解生成からの爆発性ガスの潜在的放出（二水素、炭化水素)、瀝青基質の膨潤に関連する。

e. 展望

中間貯蔵に関する今後の調査･研究は、2013～2015 年の PNGMDR によって定められる。以下に示す行動が 2014 年末までに計画される。

- ILW-HLW の中間貯蔵の概念設計者に対して、Cigéo との補完的作業を推進する旨の勧告を作成する。
- ILW-HLW のための新規貯蔵施設プロジェクトの増設または設置を支援する。
- 大域的最適化を求めて（最新の貯蔵容量の特定に基づく）中間貯蔵－輸送－処分シナリオの分析に従う。
- Cigéo 施設の可逆性を裏付けるために、貯蔵概念に関する詳細研究を実施する。

## 4.4 スイス

スイスの代替処分技術の研究開発動向に関して、放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）によって得られた情報を以下に示す。

### 4.4.1 代替処分技術開発の位置づけ

原子力法では放射性廃棄物の管理とは、放射性廃棄物を処理・中間貯蔵し、地層処分場へ処分することを意味する。代替方式についての特別な言及はない。現在の理解に基づくと、長期的な安全性の要件を満たす放射性廃棄物の管理方法は地層処分だけである。人間が制度的に継続的にモニタリングすることに基づいた概念は規制要件を満たさない。そのためスイスでは地層処分の概念を採用した。特別計画では、地層処分に代わる代替案は検討しておらず、研究開発実証プログラムもそれに応じて決定されている。この方式の利点は、利用できる資金が効率的に活用できることにあるが、確定された目的とは直接に関連しない研究分野が見過ごされるというリスクがある。

### 4.4.2 国内の大学と研究機関によって行われている代替処分技術の研究開発実証の課題項目

原則としてスイスの大学と研究組織は、代替処分方式についての研究を自由に実施することができる。しかし既に指摘したように、法令では地層処分に代わる代替案を見込んでいないために、代替処分方式に関連した重要な研究は実施されていない。スイスでこうした研究開発実証活動を実施するにあったては、大きなインセンティブは存在せず、外国の顧客のためにプロジェクトを実施するための資金も割り当てられていない。

他の主要な目的で実施された研究開発実証活動で副産物が生まれたり、代替方式の主要でない技術的な構成要素に関連した小規模なプロジェクトが実施されたりすることはある。たとえば国際的な MEGAPIE プロジェクトでは、PSI のスイス物質破砕中性子源（SINQ）が利用されているが、このプロジェクトでは原子炉による核種変換の概念が調査されている。しかしこうした原子炉による核種変換のためには燃料を再処理する必要があるが、スイスではこれはモラトリアムの対象となっている。

4.4.3 国内の大学と研究機関によって行われている代替処分技術の研究開発実証の資金

こうした理由から、廃棄物発生者やその他の組織が、代替処分方式のための研究開発実証活動に多額の資金や人材を投資する可能性は少ない。

## 4.5 ドイツ

### 4.5.1 代替処分技術開発の位置づけ

ドイツでは、全ての放射性廃棄物を地層処分する以外の方策は原則として考えられていない。そのため、地層処分以外の代替処分方法に関する研究開発はほとんど行われていない。

ただし、2013 年 7 月に制定された発熱性放射性廃棄物処分のサイト選定に関する法律（サイト選定法）では、33 名の委員からなる放射性廃棄物処分委員会を設置し、地層処分以外の方策の可能性について科学的な調査を実施すべきか検討することになっている。

### 4.5.2 実施研究テーマ

ドイツで行われている代替処分に関連した研究開発には、異なる母岩（岩塩、粘土や花崗岩）や地層処分場での異なる定置概念（水平坑道、垂直ボーリング孔や水平坑道での輸送キャスクの定置）などが挙げられる。この他に分離・変換に関する研究開発プログラムも一部行われている。これらについては、2.5 において地層処分に関する研究開発計画の中で整理している。

## 4.6 米国

### 4.6.1 原子力・廃棄物処分に関する基本的なスタンス

エネルギー省（DOE）は、原子力発電という電力源に対し、「原子力発電は重要な役割を果たすが、増加する使用済燃料と高レベル放射性廃棄物の貯蔵量、核拡散の可能性等の大きな課題をともなう」と評している[1]。

また、高レベル放射性廃棄物の処分については、1987 年放射性廃棄物政策修正法で DOE に対し、ネバダ州のユッカマウンテンでの地層処分場としての可能性を調査するよう指示したが、2009 年に、現政権は、ユッカマウンテン処分場の開発は有効な選択ではないと決定し、新たな高レベル放射性廃棄物管理政策の検討が必要とした。エネルギー省は、大統領の指示により、「米国の原子力の将来に関するブルーリボン委員会」（以下、「ブルーリボン委員会」という。）を 2010 年 1 月に設置し、使用済燃料と高レベル放射性廃棄物の管理について代替案を検討、評価するとした[2]。

2013 年 1 月に、DOE が公表した、「使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の管理・処分戦略」（以下、「DOE 戦略」という。）は、原子力発電所、防衛、国家安全保障、その他の活動により発生した使用済燃料と高レベル放射性廃棄物の輸送、貯蔵、処分を可能にする統合システムを展開するため、維持可能なプログラムに向かって進む枠組みである。DOE 戦略では、下記のマイルストーンを含むプログラムの実施を計画している[3]。

- 2021 年まで：閉鎖された原子炉に残る使用済燃料の受け入れを目的とする、パイロット規模の中間貯蔵施設の立地の決定、設計、認可、建設、操業の開始。
- 2025 年まで：政府の負担を軽減するために十分な使用済燃料の受け入れができ、廃棄物管理システムを柔軟化するために満足な収容能力のある、さらに大規模な中間貯蔵施設の立地の決定と許認可。
- 2048 年まで：地層処分の有効性を促進するため、処分場の立地決定と調査における明らかな進歩を実現する。

### 4.6.2 代替処分技術開発の位置づけ

米国の代替処分技術については、エネルギー省（DOE）が「課題の将来的な解決のためには、資源活用と安全性を高めると同時に廃棄量を減少させる維持可能なシステムの開発を必要とする。可能性のある解決法を明確化するために、核燃料サイクル技術（FCT）プログラムは結果重視の、科学に基づく研究開発の取り組みを導入する」と述べている[4]。

処分における研究開発プログラムについては、一般的な地質媒体（岩塩、粘土層、結晶質岩）への地層処分の実行可能性の評価を行う一方、地層処分に加えて、結晶質岩への超深孔処分（deep borehole disposal）について研究開発が実施されている[5]。

超深孔処分（deep borehole disposal）については、別の形態での地層処分方法、特に特定の廃棄物の処分方法として利益をもたらすと示されている。しかし、超深孔処分は、地層処分に比べて十分に理解されておらず、さらなる調査が必須であるとされている[6]。

また、燃料サイクルの代替策として、核種分離・変換、使用済燃料の処分（長期間の貯蔵における核燃料の変化の影響の評価）、核燃料サイクルシステム（オープン、改良オープン、クローズド核燃料サイクルのオプションへの取り組み）の要素において研究されている[7]。

代替処分技術開発の核種分離・変換技術については、エネルギー省（DOE）において、核燃料サイクル技術プログラム（FCT program）の中で必要な研究開発項目として位置づけている。核種分離や廃棄物の研究は、核拡散抵抗性を強め、廃棄物ロスを減らし、廃棄物を最小限に抑えることに加えて、ウランやその他の物質を使用済燃料から回収するための革新的なプロセスの開発であるとしている。また、DOE は、他の科学分野（ナノサイエンス等）における研究を参考として、地層処分に適切な廃棄物への変換技術における突破口を研究するため、他分野の専門家との連携を強めるとしている。

なお、これまでには、海洋底下処分、溶融処分、液体廃棄物の地下空洞処分、宇宙処分等の処分方法について検討が実施されてきたが、ブルーリボン委員会では「実用性、国民と国際社会の受容性、必要費用を理由に、これらのオプションは地層処分に比べて注目を受けなかった。その結果、今日における科学的証拠を踏まえ、委員会は地層処分の開発に集中する米国の姿勢を変更する理由はないと考える。」と述べている[6]。

### 4.6.3 実施研究テーマ

ここでは、代替処分技術として有力視されている超深孔処分及び分離変換技術について詳述するともとに、現在は研究されていないものの、これまでに検討された実績のある研究テーマについても概観する。

#### 超深孔処分

1957 年に、全米科学アカデミー（NAS）は、放射性廃棄物の液体での超深孔処分につい

て前向きに検討した[8]。1974 年及び 1976 年のパシフィックノースウェスト国立研究所（PNNL）の研究では、深さ 2km 以深の超深孔処分が検討されており、これは、10km から 20km の深さの超深孔処分ではなかったものの、机上検討には値するものであったとされている[9]。1980 年の Generic EIS では、地層処分として坑道掘削型処分概念が選ばれたが、DOE は、超深孔処分がさらなる検討に値するものであると指摘した。この指摘は、以下のように述べられている[10]。

「1 万 m（6mile）の深度の地層の処分孔に高レベル放射性廃棄物を定置するという超深孔処分概念が提示された。可能性のある岩種には、地殻部分にあって地震安定性のある結晶質岩及び堆積岩が含まれる。使用済燃料もしくは高レベル放射性廃棄物のキャニスタは、非常に深い処分孔に処分することが可能である。しかし、こうした方法では大量の廃棄物（例えば、TRU 廃棄物）を処分するには、経済的に実現不可能である。したがって、使用済燃料が再処理される場合には、地層処分のような別の代替案が必要となる。最深部にまで掘削できるかどうか、必要な寸法が得られるかどうかについては、若干の懸念がある。一方、超深孔処分概念の主要な利点は、一定の廃棄物を生物圏から遠く離れた場所、つまり循環する地下水が生物圏と関わりをもたないような場所に定置することができる点である。」

米国及び他の諸国において過去 54 年間取組まれてきた高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の処分の検討では、坑道掘削型処分概念に焦点が当てられてきたが、同じ時期、超深孔処分の潜在的な技術優位性及び最終的なコスト削減についても明らかにされてきた。

しかし、超深孔処分が高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の処分に関して最も一般的で実現可能な代替案であると指摘されたにも関わらず、その選択肢は解析も実証もされなかった。ごく最近完成した研究[11]において、Brady らは、超深孔処分について現在の考えを以下のように要約している。

「高レベル放射性廃棄物及び使用済燃料の深孔処分に関する予備的評価では、優れた長期的安全性能を備えつつ、コスト面でも坑道掘削型処分概念に負けない可能性が示されている。核種移行は、低透水性、移行経路との弱い繋がり、過度なまでのシールによって部分的には抑制される。大深度における移行も、濃度が階層状になっているため、垂直方向の動きが抑制される。熱水理学的計算によれば、定置された廃棄物からの熱パルスは小さく（数百年間にわたって掘削孔 10m の深度で 20℃以下）、結果的に最大の垂直方向の流体運動は 100m 以下になると推定されている。深部における重要な放射性核種の大部分に関

して、その溶解度が著しく制限されるようになり、高いイオン強度によって、コロイド搬送が阻害される。」

超深孔処分について実施されている研究のうち、研究機関、大学、研究開発課題項目、資金（費用負担の仕組み）に係る情報で収集できたものを表 4.6-1 に示す。また、図 4.6-1 に超深孔処分の概念図を示す。

表 4.6-1　超深孔処分に係る研究開発課題項目と費用負担

| 研究機関 | 大学 | 研究開発課題項目 | 資金（費用負担の仕組） |
|---|---|---|---|
| サンディア国立研究所 | ー | 超深孔処分技術を進歩させるためには、立地場所を決定し、本格的な実証プロジェクトを実施する必要がある[12]。<br>・ 超深孔処分技術の実証プロジェクトのための立地選定ガイドラインの評価<br>・ 深孔のシールと廃棄物定置の評価<br>・ 超深孔処分技術の安全に係る枠組みの開発。 | 連邦政府による資金支援のプロジェクトであるため、国家環境政策法（NEPA）に従うことが必須であるとされている。<br><br>超深孔処分技術の実証のための支援は米国施設、政府から得る。支援は協会の参加者、外部の供給源より現金と物品の両方で支払われる可能性があるとされている。 |
| | | サンディア国立研究所での 2009 年～2012 年にわたる研究開発により、高レベル放射性廃棄物の超深孔処分における挙動の技術的ベースラインが築かれた。初期の研究においては、熱－水理－力学－化学（HTMC）の連成が深孔での放射性核種の動きをコントロールするとされた。このレポートでは下記の最近の深孔に関する科学と工学の研究活動が示されている[13]。<br>・ 深孔のリファレンス設計の確立。<br>・ 深孔ディール（シール）設計。<br>・ 超深孔処分の立地決定のために必要な立地の特性調査の本質と程度の明確化。 | この研究は Laboratory Directed Research and Development program の資金によりサポートされた、との記載がなされている。 |

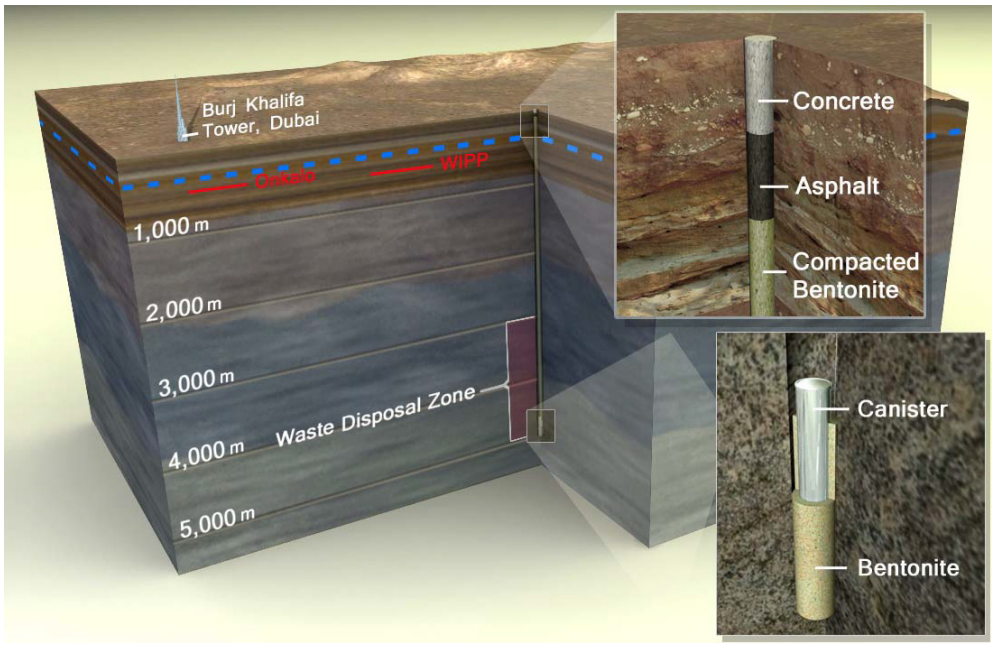



図 4.6-1　超深孔処分の概念図[13]

DOE の超深孔処分ロードマップ[14]では、以下に示す 4 つの目標が掲げられている。

- 深層ボーリング孔の特性調査及びエンジニアリングの実現可能性を実証すること
- ボーリング孔深部での廃棄物定置を安全に実現するプロセス及び作業の実証を行うこと
- 廃棄物の安定性の面で地質が及ぼす制御機能を確認すること
- 安全性及び許認可発給の現実的な可能性を実証すること

さらに、下記に係る研究開発課題項目が言及されている。

- 実証サイトの選定：このタスクでは、将来、超深孔処分が実施された場合に遭遇することが予想される地質学的状況及びその他の特性を代表するサイトにおける実証ボーリング孔の立地が行われることになる。また、このタスクによってサイト選定指針が設定されるだけでなく、ボーリング孔の建設及び実証に関する規制当局による許可が、超深孔処分の実証プロジェクトを実行に向けて確実に取得されるようにされる。
- ボーリング孔掘削及び建設：このタスクは、ボーリング孔の設計を開発し、ボーリング孔に関する要件を設定し、ボーリング孔建設のために契約を履行し、掘削され、完成されたボーリング孔が確実に諸要件を満たすようにするためのものである。
- 科学面で意図されている要点：このタスクにより、システムの閉鎖後安全性、使用される材料の地下深部における性能、処分システムの建設にとって重要な深層ボーリング孔の地質学的、水理学的、化学的及び地球物理学的な環境などに関して存在するデータ・ギャップが特定され、それらが解消される。このタスクでは、

これらのデータ・ギャップとそれらを解消する方法の優先順位を設定するために、体系的なアプローチが使用される。この活動ではさらに、使用済燃料や高レベル放射性廃棄物の処分に使用される超深孔処分概念の安全性の実証を目的とする安全解析も行われる。

・ 工学面での実証：このタスクでは、超深孔処分概念の能力及び実現可能性が確認される。またその中には、キャニスタ定置作業（ボーリング孔内での作業）、キャニスタの移動、キャニスタ吊り下ろし及び操業時の回収などが含まれる。さらに、このタスクには、試験用キャニスタならびに実証に用いられるその他の他に類のない装置の設計及び製作も含まれている。その上で、このタスクにおいて、深孔処分概念の安全性、能力及び実現可能性を確認する全ての文書化が実施される。

核種分離・変換

エネルギー省（DOE）の原子力局（NE）は、原子力に関する研究、開発、実証活動を議論するため、原子力研究開発ロードマップを公表した。DOE-NE のロードマップで述べられた重要な目標の一つは、持続可能な核燃料サイクルの開発であり、これによって、天然資源の活用を改善し、核燃料サイクルで生じた放射性廃棄物管理に関する適切な能力と処理容量を得る事ができるとされている。DOE-NE によってサポートされた研究は、単一質量、熱、エネルギーバランスに概ね分類され、関連費用見積りを伴っている。

核種分離・変換技術は、これらのオプションを検討した一部であり、以下の目的に基づき「変換ライブラリー」を定義している[8]。

・ システム解析のために過去及び将来の変換事例を集めること
・ 各事例について、その事例がどこで記録されたか、計算の目的、使用されたコード、供給材料源、変換パラメータ、未加工データ・ソースデータを含むファイル名などの記述的情報を集めること
・ 動的シミュレーションもしくは表計算ソフトで算定された分離プロセス及び廃棄物処理での質量が、こうしたプロセスに関する現在の考えを反映するように、化学元素を分類する事。例えば、Cs・Sr（セシウム・ストロンチウム）廃棄物形態のオプションは、実際すべてのアルカリ金属（第 I 族）とアルカリ土類金属（第Ⅱ族）を含んでいる。
・ 各事例について、インプット及びアウトプットの質量分率を提供すること
・ 他の同位体固有の情報を一つの場所に分類する事。例えば、個々の同位体に関する発熱及び線量変換係数など
・ インプット及びアウトプットの組成が、UOX 燃焼、もしくは各 FR 金属ないし FR 酸化物に対する高速炉（FR）超ウラン（TRU）の転換率（CR）に応じて、どのように変化するかを記述すること

Nutt ら[15]は、理論的に完全にクローズドの核燃料サイクルが処分場に関わる不確実性に

及ぼす影響について定性的評価を行ったが、その際、OECD/NEA の FEP データベースから由来する FEP の包括リストを考慮して評価を行っている。アクチニドの分離変換を含む完全に閉じたサイクルは、インベントリ、溶解度、収着に関して必要な特性評価に関する不確実性をある程度減少させると判断したが、これはアクチニドのパラメータが存在しないためである。しかし、核分裂生成物がなお存在するため、こうしたモデリング要素としてのアクチニドに対する必要性は排除できない。同様に、廃棄物形態の分解に対する熱的効果は小さいが、初期段階における熱的効果を考慮する上で、モデリング要素としては依然として必要であるとしている。さらに、次のように判断を行っている。

「アクチニドを除去した分離変換と組み合わせた先進的燃料サイクルは、性能、線量結果の平均当たりでの拡散、性能評価に重要な FEP を含めようというモデル化努力、または米国の規制環境で地層処分システムに関わる不確実性の特性評価などを実質的には変化させないであろう。」

また、以下のような指摘も行っている。

「オープンの核燃料サイクルからの現在の核燃料が全て処分され、将来的に閉じたサイクルが完全に実現して、全てのオープンの核燃料サイクルの燃料が再処理されるようになって、はじめて恩恵が得られるであろう。」

エネルギー省（DOE）では、核種分離・変換技術における主要な実施研究テーマとして、「マイナーアクチニドの分離」、「オフガスの捕捉と固定化技術」、「先進的な廃棄物」、「基礎的な手法の開発」を挙げている[16]。

表 4.6-2 に、近年行われている研究テーマについての詳細を記載する。研究を実施している大学が明示されているものはその旨記載している。

表 4.6-2　米国で行われている核種分離・変換技術における主要な実施研究テーマ

| 研究機関 | 大学 | 研究開発課題項目 |
|---|---|---|
| アルゴンヌ国立研究所 | － | (1) ランタノイドからの、アメリシウムまたはアメリシウムとキュリウムの分離[16 |
| | | (2) 処理中の燃料、加工中の燃料、リサイクル燃料を利用する原子炉における廃棄物と分離技術の開発の相互関係[16] |
| | | (3) 燃料サイクルにおける一連の流れ（採鉱から廃棄まで）を考慮するような、分離技術においての拡散リスクの評価[16] |

| | | |
|---|---|---|
| | | (4) 液液接触装置のCFDモデリング[16] |
| | | (5) マイクロ流体溶媒抽出動力学（Microfluidic Solvent Extraction Kinetics）[16] |
| オークリッジ国立研究所 | ― | (6) Off-gas sigma teamによる、揮発性・半揮発性物質の捕捉と分離[16]<br>揮発性物質（$^{129}$I、$^{14}$C、$^{85}$Kr、$^{3}$H）と準揮発性物質である放射性核種の捕獲と隔離。 |
| | テネシー大学 | (7) アクチノイドの変換においてのフラックス・スペクトル摂動の影響、超キュリウム（TRANSCURIUM）元素同位体生成の最適化[17] |
| | ― | (8) Sigma teamによるマイナーアクチニドの分離[18]<br>燃料サイクルの総合的な利益を大いに向上させるため、アメリシウムとその他のマイナーアクチニドのより効率的な分離方法の実現。 |
| | ― | (9) サーメット高レベル放射性廃棄物の開発[19]<br>次世代の核燃料サイクルで生成される、高レベル放射性廃棄物の貯蔵を最適化するためのサーメット廃棄物のための概念開発 |
| | ― | (10) 使用済燃料からのアメリシウム分離のための溶媒抽出を促進する液膜[20] |
| パシフィック・ノースウエスト国立研究所 | ― | (11) 使用済燃料からアクチノイドを湿式分離するための総合的な熱力学モデルの開発[19]<br><br>使用済燃料の再処理過程で放出された放射性ヨウ素129を捕獲し、安全に保管する効果的な方法を研究する。 |
| | ― | (12) Sigma teamによるマイナーアクチニドの分離[21] |
| アイダホ国立研究所 | ― | (13)使用済燃料からアクチノイドを湿式分離するための総合的な熱力学モデル[22] |
| | ― | (14) 再処理過程のキュリウムからアメリシウム分離のための酸化状態のアメリシウムの化学種の生成挙動[22]<br><br>超ウラン元素(TRU)（特にアメリシウムとキュリウム）のランタノイド核分裂生成物からの分離。 |
| | ― | (15) Ⅲ価のランタノイド・アクチノイド分離のための簡易ソフトドナー技術の開発[22]<br><br>Ⅲ価ランタノイド、アクチノイドの複雑な分離について、アミノ酸バッファー及び短鎖ペプチドを使い、従来の技術よりシンプルな新しい抽出システム |
| | ― | (16) 先進湿式分離プロセスのためのアクチノイド濃度のオンラインモニタリング[22]<br><br>室温に近い状態でアクチノイド濃度モニタリングについて、オン |

| | | |
|---|---|---|
| | | ライン、センサーベースの技術を開発する。 |
| | ― | (17) 核分裂生成物からのアクチノイドの分離と回収のための溶融臭化物塩系の研究[22] |
| | ― | (18) アクチノイドにおけるハード及びソフトドナー配位子の結合について（Combination of Hard and Soft Donor Ligands for Actinide）[19] |
| | カリフォルニア州立大学ロングビーチ校、カリフォルニア大学アーヴァイン校 | (19) Ⅲ価アクチノイド及びⅢ価ランタノイドの分離に用いられる核溶媒抽出配位子のα放射線分解[19] |
| | ― | (20) 乾式再処理のためのオンラインモニタリングとウラン／超ウランの共沈着[19] |
| サバンナリバー国立研究所 | ― | (21) イオン交換体またはイオン液体を用いたマイナーアクチニドの分離[23] |

海洋底下処分

エネルギー省（DOE）の海洋底下処分計画（SDP）では、深海堆積層での使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物処分の実現可能性について、1974 年から 1988 年まで研究が行われたが、これが、地層処分に対する代替案として最も網羅的な研究である。SDP は、OECD/NEA が後援する海洋底下作業グループ（SWG）によって実施された国際協力プログラムの一部である。カナダ、フランス、ドイツ、イタリア、日本、オランダ、英国、欧州委員会共同研究センターISPRA 機構が、SWG に参加した。

この作業の終わりに、SWG は、深海堆積層での使用済燃料ないし高レベル放射性廃棄物処分の実現可能性に関する共同研究について、一連の最終報告書を公表した。これらの報告書には、研究に関する優れた概要、さらに公開されたレポート及び出版物に対するより詳細な言及が含まれていた。

関係者の多くは、このアプローチが実行可能であり、陸地での処分方法よりも勝っていると考えていたのに対し、このコンセプトは、大部分の環境グループ、特に海洋問題に関わるグループには、きわめて評判が悪かった。海洋底下処分計画のへの捉え方は、海洋投棄という過去の実例によっても不利であり、この方法に反対する人々は、海洋底下処分を海洋投棄と同一視した。SDP も SWG も共に 1980 年代末に終了したが、この理由は、参加国が、陸地ベースの処分場候補地の研究に重点的に取組む事を決定したこと、さらに、海

洋底下処分が国連海洋法条約及び2006年ロンドン議定書によって禁止されたためでもある。しかし、現在、状況は変化しており、ロンドン議定書は 2006 年に改正され、海底における二酸化炭素隔離が可能になっている。

沖積層における浅い地層中への処分

厚さ数百 m 以上の沖積盆地堆積物は、グレート・ベイスンの至る所で、また米国西部のベイスン・アンド・レンジ地帯の一部で存在する。歴史的に見れば、グレート・ベイスンは、沖積層に覆われた盆地、酸性地帯、低い人口密度、連邦保留地の利用可能性などの理由によって、米国の沖積層で高レベル放射性廃棄物処分向けに検討された唯一の地域である。

沖積層が高レベル放射性廃棄物の潜在的処分媒体として最初に言及されたのは、放射性廃棄物の地層処分に関する 1957 年の全米科学アカデミー(NAS)の報告書においてであり、以下の様な記載が見られる。

「グレート・ベイスン地帯には、深い礫に覆われた盆地に加えて、変形堆積岩層での構造上の盆地も、多くの潜在的処分サイトの候補地が含まれている。」[1]

沖積層で高レベル放射性廃棄物を処分する最も広く知られた提案は、米国地質調査所（USGS）の Winograd によって示された[24]。Winograd は、グレート・ベイスン地帯全体に広く存在する厚い不飽和帯に深さ 15m から 100m の浅い地層中での処分を行う事を提唱した。ネバダ核実験場（NTS）におけるユッカ平地の不飽和帯での浅い地層中での処分に固有のものであったが、Winograd は、類似の水理・地殻条件を持つ南西部乾燥地帯の堆積盆地ではどこでもこの概念を適用できると強調した。Winograd は、不飽和帯での高レベル放射性廃棄物処分にとって有利ないくつかの特徴を指摘したが、これには、極めて低い水流動、ゼオライト及び粘土鉱物の存在による高い収着能力、比較的低い浅い地層中での処分の費用などが含まれる。

浅い地層中への処分は、発掘や人間侵入の可能性が潜在的な弱点であると見なされていたが、これらの要因は概念固有のものであり、より深い坑道掘削型処分場にとっては、それほど重要なものではないと考えられる。浅い地層中への処分について言えば、Winograd は、盆地での堆積層に継続的に処分することは、時間の経過とともに、さらに深い地層中への処分をもたらし、発掘の可能性は極小化されると判断した。

沖積層での高レベル放射性廃棄物定置に関する主たる懸念は、他の潜在的候補となる

地層に比べて、低い熱伝導率と密度に起因する発熱に対する反応である。熱的モデルでは、発熱は沖積層における温度上昇がほぼ最大 100℃から 200℃、ないしはそれ以上に達する可能性があるが、これは廃棄物の種類と重量、そして堆積層の飽和状態に左右される事が示されている。この発熱・温度は、廃棄物の健全性を危険にさらす可能性を持つ。Smyth らは[25]、過度な温度上昇を緩和するための戦略をいくつか提案したが、これには、使用済燃料の貯蔵延長（100 年程度）、アクティブないしパッシブな冷却システムの利用、発熱しない廃棄物のみの定置、廃棄物定置密度の制限及び処分部分の拡大などが含まれる。

沖積層は、米国において低レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の処分母岩として順調に利用されてきたが、現在、高レベル放射性廃棄物処分への沖積層の利用について研究や検討をしている国は存在しない。高レベル放射性廃棄物処分の潜在的媒体としての沖積層に対する関心は、1980 年代初頭以降、米国では徐々に弱まったが、これは、低い熱伝導率及び浅い埋設深度のためである。

井戸注入処分

高レベル放射性液体廃棄物を深い地層へ注入するという処分方法は、1957 年に、全米科学アカデミー（NAS）によって研究された。パシフィックノースウェスト国立研究所（PNNL）の研究（1974 年及び 1976 年）では、この概念が徹底的に解析された[9]。ここでは、以下の 2 つの構想が検討された。

- 頁岩のような不透水性の岩盤を水圧破砕して、高レベル放射性液体廃棄物を注入する方法
- 間隙性の高い組成によって上部と下部を閉じ込められ、水平方向には不透水性の岩盤を持つ透水層へ高レベル放射性液体廃棄物を直接注入する方法

深い井戸への注入は、1970 年代に検討された高レベル放射性液体廃棄物処分に関して産業界が認めた方法であった。この方法は、廃棄物注入前に亀裂は生じないという点で、水圧破砕とは異なっており、むしろ、廃棄物は、透水性で多孔質地層にある深い（1～5km）井戸へ直接ポンプで注入される。

ロシアでは、深い井戸への注入処分を実施している。300 年ほどの隔離が必要な中レベル放射性廃棄物（欧州諸国において中レベル放射性廃棄物に、米国でクラス C を超える（GTCC）低レベル放射性廃棄物になるもの）に関する一例には、1966 年から 1973 年にかけて 7 年間にわたって行われたものがあり、1990 年に詳しく解説された[26]。

井戸注入処分は、米国では有望視されておらず、現在では、環境保護庁（EPA）は如何

なる種類の廃棄物に対しても、井戸注入を禁止している。

岩盤溶融処分

岩盤溶融処分は、ニアフィールド岩盤を融解させるため、廃棄物からの熱を利用する事に依拠している。高レベル放射性廃棄物は、地下の空洞ないしボーリング孔に定置される。放射性核種の熱容量が十分高い場合、廃棄物からの熱は水分を蒸発させ、周囲の岩盤を溶融させる。溶融岩と廃棄物の化学反応によって複合廃棄物が形成されるが、これは、比較的不溶性の母岩を約 1,000 年程度で最終的に凝固させることになる[10]。

このような概念プロセスは開発されたが、多数の技術的問題を解決するには、広範な研究開発が必要であることが確認されている[10]。

地上貯蔵施設

地上貯蔵に関する当初の構想では、かなり長い貯蔵期間を予測していたため、貯蔵の構想に着手した。1972 年 5 月に、DOE の前身である原子力委員会（AEC）は、連邦議会において、貯蔵施設に関する計画を公表したが、これは後に回収可能地上貯蔵施設（RSSF）と呼ばれるようになった。RSSF では、廃棄物は「最低 100 年間」貯蔵され、恒久的処分に向けて「徐々に前進する」ことが可能になるとされている。

想定された貯蔵概念は、①壁の厚い空冷式貯蔵施設、②水冷式貯蔵施設、③空冷式の遮へい式キャスクであった。貯蔵概念は、結局、オプション③から、現在利用されている乾式キャスク貯蔵システムへと変化した。乾式キャスクは、1986 年に米国で最初に認可された。それ以降、乾式貯蔵システムは、原子炉サイトで追加のオンサイト貯蔵を行う際に選ばれる技術となっている。原子炉のあるサイトにおける分散型で非集中型貯蔵は、現在、米国で採用されている既定の廃棄物管理オプションである。

より永続的な砂漠の地上貯蔵施設の概念は、廃棄物管理に関する初期の理論的報告書で言及された。しかし、1970 年代半ばまでにこの概念は放棄された[9]。最近、ユッカマウンテンを貯蔵施設として使用する可能性が論議されてきた。しかし、概念設計も費用見積りも作成されてこなかった。

氷床処分

氷床処分は、1957 年の全米科学アカデミー（NAS）の報告書から間もなく、地層処分の

代替案として提案された。氷床処分の考えは、1976 年に文書化され[9]、1980 年の包括的環境影響評価書[10]において評価された。

1970 年代に、南極大陸は 2 億年以上も氷河で覆われており、暖かくなる間氷期でさえ氷で覆われていると信じていた。しかし、こうした有利な条件を信じていたとしても、国際的な科学者の小委員会は、科学の知識が及ばないため、南極の氷床が、定置された放射性廃棄物から何百年にもわたって生物圏を保護するのには適していないと判断した。最新の証拠では、南極は 3,400 万年前までは氷結せず、植物に覆われていたことが示されている。

氷床ないし永久凍土に放射性廃棄物を処分するという考えは、地球の気象変動に対しても悪影響を与える。極地は生態学的にますます脆弱と考えられているため、放射性廃棄物の処分がこうした地域で提案ないし受入れられる可能性は消滅している。さらに、48 カ国によって調印された多国間南極条約では、放射性廃棄物の処分が禁止されている[27]。

宇宙処分

放射性廃棄物の宇宙処分は、主として 1970 年代及び 1980 年代に研究されたテーマであった。この考えは、米国航空宇宙局（NASA）及びボーイング社の研究者によって広く調査され、その結論は文書で発表された[9]。

1986 年のチャレンジャー号、2003 年のコロンビア号のようなスペースシャトルの事故は、宇宙処分のリスクを際立たせた。しかし、もし軌道が正確に選ばれ、維持されるならば、長期的リスクは、他のどのような地球上の処分方法よりも大幅に低い。サーメットのような廃棄物形態を利用すれば、万一、廃棄物が目的地に到達する前に事故が発生したとしても、放射性核種の飛散を防ぐ事ができる可能性がある。

NAS は、この処分オプションを現在実現不可能であると要約したが、その理由は、科学的、技術的、経済的な課題が残っているとされている。さらに、NAS は、「宇宙空間での処分は、今のところ実用的で安全な技術とは想定されない」と指摘した[28]。

多層処分

地層処分の代替処分技術として位置付けられるレベルであるかは不明ではあるものの、多層処分（Multi-tiered Repository）に関しては、表 4.6-3 に示す研究が実施されている。

表 4.6-3　多層処分に係る研究開発課題項目と費用負担

| 研究機関 | 大学 | 研究開発課題項目 | 資金<br>（費用負担の仕組） |
|---|---|---|---|
| Monitor Scientific LLC, Electric Power Research Institute, | Department Of Civil Engineering, ミネソタ大学 | 廃棄物の収容能力を拡大するひとつの可能性として、元々の横坑（ドリフト）の上、または下に更に1つもしくは2つの横坑を掘ることである。それぞれの層は垂直に30m離れている。<br>多層処分に関して、下記の3点を検討する[29]。<br>・　増加する熱負担密度に対する換気の必要条件。<br>・　すでに存在する廃棄物で満たされたドリフトにごく接近したドリフトを掘削する実行可能性について。<br>・　熱的、力学的限界について。 | |

4.6.4 実施機関、費用負担の仕組

超深孔処分（Deep Borehole Disposal）に係る研究開発の実施機関及び費用負担の仕組みに関する情報は、表 4.6-1 にまとめたとおりである。また、DOE の超深孔処分ロードマップでは、予備的な費用見積りとして、5 年間にわたる包括的な研究開発実証活動と 7,500 万ドルのコストが必要としている（表 4.6-4 参照）。

表 4.6-4　超深孔処分の予備的な費用見積り

| 活動 | 見積られた費用<br>（単位：百万ドル） |
|---|---|
| I.　サイト特性調査 | $3.0 |
| II.　サイトの選定 | $2.0 |
| III. 規制要件/許可<br>（NEPA、空気の品質、ボーリング掘削、NPDES など） | $3.5 |
| IV.　ボーリング掘削及び建設 | $45.0 |
| V.　科学分野の研究開発 | $10.0 |
| VI.　工学分野の実証 | $8.0 |
| VII.　プロジェクト・マネジメント | $3.5 |
| 合計 | $75.0 |

また、核種分離・変換技術については、エネルギー省（DOE）が「核種分離、廃棄物形

態及び燃料資源キャンペーン（Separation, Waste Forms and Fuel Resources Campaign）」の中で、研究所等の機関に資金を提供して研究を実施していることがわかる。2012 年度の予算内訳は以下に示す表 4.6-5 の通りである。

表 4.6-5　2012 年度の核種分離・変換技術に係る DOE の予算

| Separations, Waste Forms and Fuel Resources Campaign | |
|---|---|
| 主要な研究テーマ | 2012 年度　予算 |
| Campaign Management | $815,000 |
| Domestic Echem Technology | $1,188,000 |
| Advanced Aqueous Technology | $1,050,000 |
| Sigma Team for Minor Actinides | $3,135,000 |
| Sigma Team for Off-Gas | $3,715,000 |
| Fundamental Methods Development | $2,580,000 |
| Advanced Separation Alternatives | $2,345,000 |
| Advanced Waste Forms | $2,005,000 |
| Waste Forms Characterization | $1,878,000 |
| Waste Form Processing | $600,000 |
| Modeling and Simulation | $935,000 |
| Fuel Resources | $3,747,000 |
| 計 | $23,993,000 |

4.6.5 参考文献


[1] http://energy.gov/ne/fuel-cycle-technologies under: Facing Challenges
[2] 2011_Sep_4th_US _Nat _Report
[3] http://energy.gov/ne/fuel-cycle-technologies/
nuclear-fuels-storage-transportation-planning-project
under: Nuclear Fuels Storage & Transportation Planning Project
[4] http://energy.gov/ne/fuel-cycle-technologies　under: Finding Solutions
[5] http://energy.gov/ne/fuel-cycle-technologies/
used-fuel-disposition-research-development
under: Disposal
[6] 2012_Jan_BRC Report
[7] 2011_Sep_4th_US _Nat _Report
[8] NAS (National Academy of Sciences-National Research Council). 1957. The Disposal of Radioactive Waste on Land, Publication 519, Washington DC: National Academy Press
[9] ERDA (Energy Research and Development Administration). 1976. Alternatives for Managing Wastes from Reactors and Post-Fission Operations in the LWR Fuel

Cycle. ERDA-76-43. Richland, WA: Battelle Pacific Northwest Laboratories (May 1976)

[10] DOE (Department of Energy).1980."Final Environmental Impact Statement, Management of Commercially Generated Radioactive Waste, Volume 1".DOE/EIS-0046F-V.1.Washington, DC: US Department of Energy.

[11] Brady, P.V, B.W. Arnold, G.A. Freeze, P.N. Swift, S.J. Bauer, J.L. Kanney, R.P. Rechard, and J.S. Stein. 2009. Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. SAND2009-4401. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.

[12] 2013_Oct_SNL_Borehole Disposal

[13] 2012_Sep_Deep_Borehole_Disposal_Final_Report

[14] Sandia National Laboratories, "Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal" ,SAND2012-8527P, August 31, 2012

[15] Piet, S.J., S.E. Bays, D.W. Gerts, E.A. Hoffman (2011), Description of Transmutation Library for Fuel Cycle System Analyses (FY2011 update), FCRD-SYSA-2010-000116, Rev1, INL/EXT-10-19545, Rev1, September 2011.

[16] Nutt, M., R.P. Rechard, M. Sutton, J.A. Blink, H.R. Greenberg, M. Sharma, B.A. Robinson. 2013. Influence of alternative fuel cycles on uncertainty associated with geologic disposal Twelfth Information Exchange Meeting On Partitioning And Transmutation, NEA/OECD 2013.

[17] ANL/2012 FCT Annual Review Meeting Transactions Report

[18] ORNL/The Effects of Flux Spectrum Perturbation on Transmutation of Actinides

[19] ANL/2011 FCT Annual Review Meeting Transactions Report

[20] ORNL/Laboratory Directed R&D program FY2010 Annual Report

[21] PNNL/Sigma Team for Minor Actinide Separation FY2011 Status Report

[22] INL/Annual Report FY2012 Project Summaries

[23] SRNL 2011 Minor Actinide Separations

[24] Winograd, I.J. 1981. "Radioactive Waste Disposal in Thick Unsaturated Zones." Science, 212 (4502): 1457-1464.

[25] Smyth, J.R., B.M. Crowe, P.M. Halleck, and A.W. Reed. 1979. A Preliminary Evaluation of the Radioactive Waste Isolation Potential of the Alluvium-Filled Valleys of the Great Basin. LA-7962-MS. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory.

[26] Kedrovskii, O.L., A.I. Rybal'chenko, M.K. Pimenov, P.P. Kostin, V.M. Kurochkin, N.N. Egorov, A.A. Samarkin, A.V. Nosukhin, A.V. Mitryushin, A.S. Ladzin, and I.M. Kosareva. 1990. "Deep Burial of Liquid Radioactive Waste in Porous Geologic Formations," Atomnaya Energiya, 70(5):298-303.

[27] ATS 1959. The Antarctic Treaty. Washington, DC (December 1959).

[28] NAS (National Academy of Sciences- National Research Council). 2001. Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges. Washington, DC: National Academy Press

[29] 2008_Jun_Multi tier_U of M

## 4.7 英国

英国では放射性廃棄物は 20 を超えるサイトに存在する貯蔵施設において貯蔵されている。英国政府は、数十年単位の貯蔵は放射性廃棄物管理において地層処分を実施するまでの時間をかせぐための必要な段階であるとしており、長期的な放射性廃棄物の管理・処分として地層処分施設は最終的な解決方法としている。また、地層処分がもたらす利点として以下を挙げている[1]。

- 有害な物質を管理するという責任の重荷を将来の世代から排除
- 長期間毒性を有する物質を保管する貯蔵施設を無期限に管理し、保護するための安全性リスクと継続的費用の排除
- 廃棄物の環境への影響の軽減
- 社会の変化、気候の変化、また悪意ある攻撃というリスクの軽減。ソビエト連邦の崩壊のように、これらは廃棄物管理機能に障害をもたらす可能性

2006 年 10 月、政府は放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）による、高レベル放射性廃棄物の長期的管理方法としてアプローチ可能な最善策は地層処分であるという提案を受け入れた。また、英国政府は放射性廃棄物の地層処分施設への最初の定置を 2040 年とする目標を掲げている[2]。

### 4.7.1 代替処分技術開発の位置づけ

放射性廃棄物管理委員会が 2006 年に政府へ提案をした際、その他のオプションも明記されていた。放射性廃棄物の安全な管理（MRWS : Managing Radioactive Waste Safely）の報告書では代替策の検討も継続するとされている。もし代替処分オプションが十分に開発され、地層処分の再検討が必要と判断した場合には、政府にそれを通知し、必要であれば政策を変更することが政府の責任であるとされている[3]。

政府においては、地層処分施設の開発は高レベル放射性廃棄物の管理政策において重要な項目であるとされており、中間貯蔵施設の安全な計画は地層処分施設の使用開始時期の変化に対応することが可能であるが、地層処分施設の利用開始は処分スケジュールに大きな影響を及ぼすとされている。一部の高レベル放射性廃棄物は浅地中処分（near surface disposal）等の代替策が検討されている[2]。

その他、言及されている代替処分技術としては、核種分離・変換、超深孔処分（Deep Borehole Disposal）がある[2]。

英国の実施主体である原子力廃止措置機関（NDA）では、核種分離・変換技術は、処分を必要とする長寿命放射性廃棄物の量を減らすために推奨されている手段であり、これを達成できる望みはあるものの、現在はまだ研究段階にすぎず、実際にこの技術を活用できるのは数十年後だろうと位置づけている。また、核種変換には様々な方法が用いられているが、特に注目されているのは、新型高速炉と加速器駆動システム（ADS）であるとしている。

4.7.2 実施研究テーマ

超深孔処分

超深孔処分（DBD）では、人工バリアシステム（EBS）よりも、地質学的バリアをより重視している。地質学的バリアの範囲は、少なくとも坑道掘削型処分場よりも 10 倍大きく、透水係数がずっと低くなる深さまでとなる。この安全性は、低い透水係数を備える深い地層のバリア、濃度が段階的に変化する塩分を含む地下水、そして地下水の長い残留時間との組み合わせに基づいている。

NDA によって資金援助を受けた解析もいくつかある[4] [5] [6]。例えば、複数の深い処分用坑道を深さ 4 キロの平均的な地熱流量を持つ安定した結晶質岩盤に掘削する事を想定した解析を実施した[4]。

Nirex[7]の代わりに実施された検討では、スウェーデンの SKB 社が 1980 年代及び 1990 年代に実施した検討を活用したが、その出発点は、相当深い地点での地質学的、水理地質学的、そして水理化学的条件を検討するだけでなく、廃棄物キャニスタを定置するために利用可能な手段を調査する事も含まれていた。この報告で指摘された所見の一つは、この概念を適用した現実的な例が存在してこなかったという点であった。さらに、DBD 構想が坑道掘削型処分場と同じレベルの理解を得るまでには、かなりの額の資金援助が必要であると予測された。

Nirex のレビュー[7]では、DBD 構想に関して以下の様な解決すべき一連の問題点が確認された。

- 深孔の処分領域が、非常に深い部分で素掘りであるべきか（もしくは、素掘りでも可能か）どうか。漏水防止処理した掘削孔の場合、分解したライナーの存在は、流体移動の潜在的経路となるかも知れない。
- 掘削孔の流体が廃棄物定置手順に及ぼす影響
- 定置中及び定置後に円柱状となった廃棄物キャニスタに対する力学的負荷の影響。例えば、巨大な円柱状になった廃棄物キャニスタの重量は、掘削孔底部にある単一ないし複数の廃棄物パッケージに対し不具合をもたらし、廃棄物回収を行わなければならなくなるかもしれない。
- 掘削孔が垂直方向であるべきかどうか。これは、廃棄物定置が比較的容易な垂直方向及び同一地表施設から複数の角度で掘削可能なことによるコスト削減との間での妥協案となる。

こうしたレビューの結果、評価用の R&D 作業として、次の二つが確認された。

- 処分システムの性能、特に、処分領域周辺での熱的、水理学的、地熱環境及びそのシール、そしてそれがどのように進化するか。DBD 概念の性能の大半は、掘削孔シールの挙動に左右される。
- 掘削孔建設及びパッケージ取扱いに関する工学的側面には、運用段階での徹底した安全評価が必要とされる。この側面は、SKB 社によって認識され、その R&D 計画において詳細に調査された[8]。SKB 社は、将来的にはこれまでの研究よりも、より綿密な解析、現実的な関心が与えられるべきであると判断した。特に、まだ実験されていない方法は回避して、単純で現実的な手続きに注目すべきである。

広範な代替的廃棄物管理オプションが、CoRWM によって検討されたが、これには、地層処分、深孔、長期貯蔵及び海洋投棄などが含まれる。多基準意思決定解析（MCDA）、全体論的な検討及び公衆協議に続いて、委員会は、安全確実な中間貯蔵と組み合わせた地質学的貯蔵が、HAW 向け管理戦略として望ましいと勧告した[9]。歴史的経験及び深掘削の状況、そして様々なソースの総合的経験による大口径の掘削孔建設などに基づいて DBD の状況を精査された[10]が、これには、石油、ガス、ガス貯蔵、地熱及び地球科学的掘削産業、掘削された竪坑、放射性廃棄物調査及び軍事目的の大口径掘削孔などのソースが含まれる。この精査作業では、掘削孔での地層処分構想に関わる様々な深井戸の工学的な問題が議論されているが、これには、廃棄物定置ゾーン上部及びそのゾーン内部でのケーシング及びセメント注入、もしくはシールケーシングなどが含まれている。

NDA のレビュー姿勢は、他の国家廃棄物管理計画に関する進展を検討し、掘削孔技術で

の重要な発展及び著しい進歩を考慮することで、定期的に遂行されるであろう。重要な事は、問題を調査する必要が確認される場合、詳しい調査によってのみ発展がもたらされる点である。

核種分離・変換

旧 Nirex 社（現在は NDA と統合）は、文献レビューの委託や欧州 RED-IMPACT プロジェクト及び NEA が行っていた先進燃料サイクル研究への参加を通じて、英国の HAW 処理のために分離変換の可能性を検討した。Nirex は、この分野での国際的進展を評価するテクニカルノート[11]を公表して、同分野での国際的進展に関して、引き続き「情報収集の指示」を維持する必要性を勧告した。

上記の双務協定を通じて、英国は、分離変換に関するフランスが行っている R&D にもアクセスできる。

NDA はまた、2005 年から 2010 年における進展を記録し、廃棄物管理に関連する最先端の国際的な検討と研究を収集するために、核種分離・変換（P&T）に関する文献レビューを委託した。この文献レビューのうち、放射性廃棄物管理に関わる重要な成果は、以下の通りである[12]。

- P&T に関する研究のうち、克服出来ない問題を示したものは全く存在せず、2008 年に NEA 議長が、P&T は「放射性廃棄物管理の実行可能なオプション」として検討するよう勧告した事が指摘された。
- ユーラトム第 6 次枠組み計画のもとでの重要な欧州の研究である RED-IMPACT プロジェクト（2008 年）は、P&T の地層処分構想に及ぼす影響評価のために多くの事を行って来た。
- 長期間にわたる地層処分の自然進化から（主に、地下水経路を通じた）一般市民への線量は小さく、相対的に影響を受けないと予想されるが、これは P&T が全線量に寄与するアクチニドを減少させるからである。P&T の主要な恩恵は、人間の侵入（人為的過程）という状況から生じる線量を大幅に減少させる事である。
- P&T の結果、HLW の熱負荷は著しく減少する可能性があるので、HLW 向け処分施設地域のフットプリントも減少する。
- P&T 開発のための欧州の戦略は、2045 年に産業用 P&T 計画を開始するという目標で作成された。
- 水及び高温化学変化による分類プロセス双方に関わる分離技術については、内容の充実した国際的な研究が開始され、現在も行われているが、こうした研究は英国内では実施されていない。むしろ、中心的な研究は、フランス（GANEX）及び米国（UREX+）で実施されている。
- 変換達成のために研究されている中心的な技術は、加速器駆動システム（ADS）及

び高速炉である。

文献レビューでは、ある実験的 ADS（日本の京都大学臨界集合体実験装置（KUCA））が既に稼動していると指摘された。英国は、EUROTRANS（加速器システムにおける高レベル放射性廃棄物変換のための欧州研究計画）、ユートラム第 6 次枠組み計画のそれぞれ参加国である。このプロジェクトは、臨界前の ADS を通じて変換のあらゆる側面をカバーしている。

ユートラム第 7 次枠組み計画の下で実施された最新の欧州 P&T プロジェクトは、ACSEPT（分離変換によるアクチニドリサイクル）として知られているが、これには、英国を含む欧州だけでなく、オーストラリア及び日本も含む 34 のパートナーから成るコンソーシアムが含まれている。2008 年から 2012 年まで実施されたこのプロジェクトの目的は、将来予想される様々な燃料サイクルのオプション、特に先進的な閉鎖系サイクル技術と両立できる分離プロセスの枠組みを開発する事である。

このプロジェクトは、次の三つの技術分野から構成される。

- アクチニド分離、またはアクチニド群分離に特化した最も有望な技術を最適化するという観点における水分離技術に基づく湿式プロセス
- 電気精錬及び溶融フッ化物における液・液抽出という二つの具体的プロセスの精緻化に焦点を合わせた乾式化学分離。
- 上記二つの領域でのすべての実験結果を統合して、将来のパイロット実証試験のための勧告を目指す事。

変換に適した高速炉設計に関して、Serco 社は、既存の高速炉を利用して得られた成果だけでなく、将来のためにいわゆる Generation IV という高速炉設計の情勢についても、見直しを行った。こうした原子炉は、2040 年頃に建設される予定である。P&T のロードマップは、他のユーラトム計画[13]の下で開発されたが、英国もこれに参加していた。このロードマップでは、以下の一連のマイルストーンが示されている。

- 2012 年：最も有望な R&D オプションの選択と大規模インフラの建設開始
- 2020 年：技術実証試験プログラム
- 2025 年：変換実験施設の利用可能性
- 2035 年：変換実験製法 － 実際の成果
- 2045 年：産業用 R&D 計画の重要な構成要素の利用可能性

Serco 社（2011）もまた、英国廃棄物に対する P&T の有効性を検証した。出発点として、

地層処分されることになる放射性廃棄物全てを特定し、これに関わる分量及びその放射性核種の放射能量を決定するために、英国放射性廃棄物インベントリが利用された。HLW 及び使用済燃料の主要な放射性核種が、放射能含有量の観点から短寿命の β 線及び γ 線放出体であるのに対し、何千年以上という時間的尺度での最も重要な放射性核種（例えば、アメリシウム 241）は、他の諸国で生成された PWR 廃棄物に見られるものと同じようなものである。これとの関連で、Serco 社[12]は、P&T が他の諸国と同様の方法で適用可能であると指摘している。他方、英国の HLW インベントリの大部分は、既にガラス固化されており、P&T は産業規模では実行する事ができない。

Serco 社[12]は、第 4 世代高速炉（Generation IV）に着手するという英国の決定は、P&T テクノロジーに対する同国のコミットメントを示すという見解を述べている。しかしながら、この段階では、新規の P&T テクノロジーが実現される以前に、重要な技術的障害が克服される必要がある。こうして、英国の P&T に対する将来戦略及び先進燃料サイクルに関して代替的研究を行う事は、恐らく英国の立場にとって最も役立つであろう。こうした選択肢には、欧州の地域的戦略に関わる検討も含まれる[14]。

英国で検討されている超深孔処分（Deep Borehole Disposal）と空洞処分（cavern disposal）に係る研究項目について、得られた情報を表 4.7-1 にまとめる。

表 4.7-1　超深孔処分及び空洞処分に係る研究開発課題項目と費用負担

| 研究機関 | 大学 | 研究開発課題項目 | 資金<br>（費用負担の仕組） |
|---|---|---|---|
| 原子力廃止措置機関(NDA) | ー | 密封されている中レベル放射性廃棄物の浅地中処分と、高レベル放射性廃棄物の超深孔処分は MRWS による報告書における地層処分の定義とは一致していないが、報告書には貯蔵と処分のその他のオプションについて開発を検討するとも書かれている。NDA は特定の廃棄物の超深孔処分を調査・検討の対象とする[15]。 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Robert Chaplow Associates Limited | ― | 深孔（Deep borehole）のシーリングの必要条件を決定する。<br>様々な施設で現在行われているボーリング孔のシーリングに係る検討事項を明確にする。<br>（放射性廃棄物管理、石油・ガス、地熱、ガス貯蔵や水資源開発などの分野）<br><br>この先の封印プログラムへ影響を及ぼす可能性のある、ボーリング孔の設計の特徴を議論する。サイトの特性評価のための封印技術の必要条件の開発と、更なる調査のためのサイト固有の要素を定義する[16]。 | NDA: RWMD [16] |
| | シェフィールド大学 | “岩盤溶接”による超深孔処分のボーリング孔のシーリング<br><br>電熱器を使い、800℃で花こう岩埋め戻し材と隣接した壁岩を 1 ヶ月かけて溶かし、0.1℃/hr で 560℃まで冷やす（～100 日かける）。これは埋め戻し材と壁岩をほぼ元々の状態に戻し、完璧な封印（シール）をつくる。<br>さらなる研究が必要だが、高密度の固体を使用済燃料コンテナのシールとして使う方法は大いに期待ができる[17]。 | |
| Galson Sciences | ― | 空洞処分は、地層処分の代替技術としての可能性を有する。 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Ltd, UK<br>Chapman & Co Consulting, Switzerland<br>Neall Consulting, UK | | 超深孔概念は廃棄すると決定された場合のプルトニウムを含むことができる可能性がある。<br><br>超深孔処分はプルトニウムの処分において回収可能性を有さないが、空洞（cavern）概念はプルトニウムを最長期間維持することができる。<br><br>cavern/cask コンセプトは高レベル廃棄物を別に管理することを実現する。発熱期間を少し短くでき、発熱量も少し減少できる[18]。 | |

また、英国のエネルギー・気候変動省（DECC）の下に置かれている国立原子力研究所（NNL）は、核種分離・変換技術をサポートするためには、以下の項目の広範囲に及ぶ研究開発が必要だと記載している[19]。

- 地層処分施設において放射性廃棄物の放射能毒性と崩壊熱を弱めるという点で効果があるのかを判断するための、核種分離・変換シナリオの動的モデリングを用いた、核種分離・変換技術を用いた核燃料サイクルの全体的な様相の詳細な理解
- 全ての設計と安全要件を満たす、マイナーアクチニド照射のコアデザイン戦略の開発
- 先進的なリサイクル及び処分のための、マイナーアクチニドのターゲット燃料の保管と処置に関する戦略の開発
- マイナーアクチニドの核種分離・変換とその取扱により生成する廃棄物についての詳細な理解、特に、放射性廃棄物の流れと地層処分への影響について
- マイナーアクチニドの分離に加え、ウランとプルトニウムの分離を行う再処理プラントのフローシートの開発
- マイナーアクチニド燃料の製造、材料試験炉におけるターゲット燃料照射、照射後試験を含む実験研究

さらに、マイナーアクチニドの変換については、次のように述べている[19]。

- マイナーアクチニドの変換技術の実用化には、大規模かつ持続的な研究開発と努力が必須であり、この先少なくとも 20 年を要する見込みである。

- いくつかの国（特にフランス、ドイツ、日本）はマイナーアクチニドの変換技術を重要視し、研究開発を行っている。英国の将来の核燃料管理において、マイナーアクチニドの変換は技術的・経済的に妥当であるか、そして英国はどの程度の関与が適当であるかを考慮する。
- 経済状況は、核種分離・変換技術の研究における重大な障害の一つである。これは現在行われている研究から確認でき、例えば、フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）は、経済的な不利益を理由に実施中の核種分離・変換技術の研究を最小限にするとした。
- 英国では、放射性廃棄物はアルカリ性の埋め戻し材の中に収められると考えられており、これによりマイナーアクチニドの化学種は比較的変化しやすい。それゆえ格納された核分裂生成物は最大放出率に支配的されるため、マイナーアクチニドの核種分離・変換から得られる利益は非常に限られている。
- 国立原子力研究所は、英国において、現存のガラス固化体に核種分離・変換技術を適用することは困難だと考える。ガラス固化した廃棄物の処理、及びマイナーアクチニドの分離には新しい技術の開発が必要であるが、膨大な費用を要する割に利益が少ない。このため、現存の廃棄物の放射能毒性を減少させることは現実的ではない。
- 長期的には、もしかするとマイナーアクチニドの核種分離・変換技術は世界において一番妥当な策となるかもしれない。そうであっても、英国は必要な支援インフラストラクチャーを単独で開発し、維持することは期待できない。必要となるインフラストラクチャーを確立するには全ヨーロッパの協力が必要不可欠である。マイナーアクチニドの変換技術に関しては、国際的に研究が継続されると認識しており、英国は、現在の知識を保持し、研究の方向性に影響を及ぼすために、低いレベルの関与を保つことが必要である。

また、詳細な研究項目として、表 4.7-2 に示すような項目を挙げている。研究を実施している大学が明示されているものはその旨を記載している。

表 4.7-2　英国で行われている核種分離・変換技術における主要な実施研究テーマ

| 研究機関 | 大学 | 研究開発項目 |
|---|---|---|
| 国立原子力研究所 | ー | (1)ピューレックス法（プルトニウムとウランの抽出による回収）の実証と、先進ピューレックス法の開発[20] |
| | マンチェスター大学 | (2) 先進的な核燃料分離の分子基盤プロジェクト（MBASE Project）[20]<br><br>確立された溶媒抽出技術や革新的なイオン選択膜に基づく核燃料分離への2つのアプローチを研究。 |
| | レディング大学 | (3) マイナーアクチニドの分離[20] |
| | | (4) 核燃料サイクルにおける、ランタノイドからアクチノイドの分離のための高度な選択的配位子の開発[21] |
| | | (5)三価ユウロピウムからの三価アメリシウムの分離[22] |
| | エディンバラ大学<br>ケンブリッジ大学<br>マンチェスター大学<br>ノッティンガム大学<br>ロンドン大学 | (6)軽水炉(LWR)燃料における、乾式再処理の革新的な利用方法(REFINEプログラム：継続可能な核燃料再処理技術の研究) [20] |

4.7.3 実施機関、費用負担の仕組

超深孔処分（Deep Borehole Disposal）及び空洞処分（cavern disposal）に係る研究開発の実施機関及び費用負担の仕組みに関する情報は、前項の表にまとめたとおりである。

4.7.4 参考文献


[1] https://www.gov.uk/managing-radioactive-waste-safely-a-guide-for-communities#why-do-we-need-a-gdf

[2] DECC, 2011, The United Kingdom's Fourth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

[3] http://www.nda.gov.uk/rwmd/options/index.cfm

[4] Chapman, N.A. and Gibb, F.G.F., 2003, A truly final waste management solution,

Radwaste Solutions 10, 26-37.
[5] Gibb, F.G.F., McTaggart, N.A., Travis, K.P., Burley, D. and Hesketh, D.W., 2008, High-density support matrices: key to deep borehole disposal of spent fuel, J. Nuclear Materials 374, 370-377.
[6] Gibb, F.G.F., Reavis, K.P. and Hesketh, K.W., 2012, Deep borehole disposal of higher burn up spent nuclear fuels, Mineralogical Magazine 76 (8), 3003-3017.
[7] Nirex, 2004, A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste, Nirex Report N/108, United Kingdom Nirex Ltd., Harwell, England.
[8] SKB, 2000, Waste disposal alternative: Very Deep Boreholes. Contents and scope of the research, development and demonstration (RD&D) programmes required for a comparison with the KBS-3 method, SKB Report R-00-28, Swedish Spent Fuel ANDRAdioactive Waste Management Company, Stockholm, Sweden.
[9] CoRWM, 2006, Managing our Radioactive Waste Safely, CoRWM's Recommendations to Government, Report No. 700, Committee on Radioactive Waste Management, London, England.
[10] Beswick, J., 2008, Status of Technology for Deep Borehole Disposal, Report to NDA, Edeco Petroleum Services International, Contract No. NP 01185, Great Yarmouth, England.
[11] Nirex, 2002, Applicability of Partitioning and Transmutation to UK Wastes, Nirex Technical Note, United Kingdom Nirex Ltd., Harwell, England.
[12] Serco, 2011, Literature Review of Partitioning and Transmutation, Serco Report to NDA/RWMD No SERCO/7772/001 Issue 2, Serco Technical Services, Winfrith, England.
[13] Martinez-Val, J. (2008): P&T Roadmap Proposal for Advanced Fuel Cycles Leading to Sustainable Nuclear Energy - Synthesis Report, Euratom's Sixth Framework Program Deliverable D6.2.
[14] Salvatores, M., Meyer, M., Romanello, V., Boucher, L. and Schwenk-Ferrero, A. (2009): Nuclear fuel cycle synergies and regional scenarios for Europe, OECD/NEA Report No. 6857, Nuclear Energy Agency, Paris, France.
[15] NDA, 2011, Geological Disposal: Review of Options for Accelerating Implementation of the Geological Disposal Programme
[16] NDA and RWMD, 2011, Site Characterisation Project: Review of Requirements for Sealing Investigation Boreholes.
[17] Patrick, V. Brady and Bill, W. Arnold, 2011, Pilot Testing Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: October 26, 2011 Albuquerque, NM Workshop Report.
[18] Baldwin, T., Chapman, N. and Neall, F., 2008, Geological Disposal Options for High-Level Waste and Spent Fuel, Report for the UK NDA.
[19] NNL, 2013, Minor Actinide Transmutation, Positon Paper.
[20] OECD/NEA, 2013 Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation.
[21] Lewis, F., Hudson, M. J. and Harwood, L., 2011, Development of Highly Selective Ligands for Separations of Actinides from Lanthanides in the nulcear Fuel Cycle
[22] Laurence, M. Harwood, Frank W, Lewis, Michael, J. Hudson, Jan, John and Petr, Distler, The Separation of Americium(III) from Europium(III) by Two New 6, 6'-Bistriazinyl-2,2'-Bipyridines in Different Diluents.

## 4.8 カナダ

カナダの放射性廃棄物処分に関する基本方針、代替処分技術の位置づけについて調査・整理した。

### 4.8.1 廃棄物処分に関する基本的方針

2007 年 6 月、カナダ政府は核燃料廃棄物管理機関（NWMO）により推奨された“適応性のある段階的管理”（APM）を核燃料廃棄物の長期的管理方法として選択した。NWMO はこの計画を実行する責任がある。2010 年 5 月、NWMO は使用済燃料の地層処分のためのサイト選択プロセスを開始した[1]。

すべての核燃料廃棄物は現在、長期的管理における課題のとりあえずの対処法として、“一時保管”されている。使用済燃料が原子炉から取り出された際、初めに水で満たされたプールに設置され、熱と放射性が減少するまで保管される。おおよそ 7 年～10 年後、原子炉サイトの乾式貯蔵所に移すことができる。乾式貯蔵容器は通常 50 年の寿命として設計されている[2]。

### 4.8.2 代替処分技術の位置づけ

NWMO は、「（核燃料廃棄物の）管理プログラムは今後複数の世代にわたって続くため、あり得ないとしても、新たな科学的・技術的な情報と能力、社会的観点と要求の変化がプログラムの計画と実行に有益な変化を提案する可能性がある。様々な分野における新しい情報と機能によって、プログラムの実行または目標の修正に良い影響がもたらされる可能性がある。その分野は、高度な原子力発電所の継続的な開発、新たな廃棄物サイクルプロセスと施設、多国籍所有権または精密な施設のコントロールを促す国際的または地域の機関の変化の可能性、国際的政策と条約の変化、そして超深孔管理技術、使用済燃料の分離・核種変換技術の進展を含む。」としている[3]。

NWMO は現在、代替的な処理技術開発における独立した R&D 計画を続行していない。しかしながら、NWMO は、年次報告書（「情報収集の指示」）を審査・公表する権限を持っており、そこで、使用済燃料に関する再処理及び核種分離・変換（RP&T）の国際的な展開、そして核燃料廃棄物の長期的管理のための代替的技術を以下の通り解説している。

・　再処理とは、今日の原子炉からの使用済燃料に対して適用される化学的・物理的プロ

セスに関する一般的用語であり、使用済燃料の成分を大きく分けて 5 つのグループを分離するためのものである。

①燃料ペレットを支える金属燃料被膜材

②燃料質量の大部分を占めるウラン 238

③新しい原子炉燃料として再利用可能なプルトニウム 239 のような核分裂性物質

④中性子放射によって形成される核分裂性生成物（FP）及び他の放射性同位体で、一般的に深地層処分場での定置に相応しいもの

⑤半減期が長く、使用済燃料の長寿命放射線の原因であるマイナーアクチニド（MA）

・ 核変換には、ある構成物もしくは同位体を他の核プロセスに変換する事が含まれる。高速炉（FR）もしくは加速器駆動システム（ADS）によって強力な中性子フラックスを与える事でマイナーアクチニド及び一定の核分裂性生成物を変換することが含まれる。これらの核種は、使用済燃料の極めて長期的な放射能毒性に関する主たる原因であるためである。中性子によって引き起こされた核分裂及び核捕獲によって、標的核種を、地層処分場へ持ち込まずに破壊できる。こうした活動を、RP&T という略語で、一つのグループにまとめる。

分離においては、さらに詳しい区別が可能である。現在の商用再処理計画では、通常、使用済燃料を上記のような 5 つのグループ（①～⑤）に分割する。核分裂生成物及び MA グループ内で分離を行い、変換に適した同位体をより分けるには、先進的な分離技術が必要である。これが現在、いくつかの国々で集中的な R&D のテーマとなっている。

最初の年次報告書[4]は、2008 年原子力機関の水戸（日本）での会合[5]に基づく RP&T 分野における最新動向に関する広範な調査である。

第 2 年次報告書[6]では、RP&T において厳選されたテーマに重点的に取組んでいる。すなわち、ユッカマウンテン計画の中止から生じる米国の現状、原子力に関する EU の新政策、トリウム燃料に対する明らかな関心の復活、再処理費用に関する最新情報及び代替的な廃棄物管理技術に関するいくつかの新情報、などである。Global 2009 会議で報告された重要な進展についても、第 2 年次報告書で言及されている。

第 3 年次報告書[7]では、2010 年 11 月サンフランシスコでの原子力機関会議で発表されたように、水戸会議以降の RP&T の現状と進展に関して再検討が行われ、CANDU 燃料の再処理可能性評価に関する 7 つの重要な問題点が、これら三つの年次報告書の結論に基づいて、議論された。

再処理、核種分離・変換、及び代替処分技術の動向分析に係る NWMO による報告書[7]では、CANDU 炉の再処理の可能性に関する以下の 7 つの分析が行われている。

①使用済 CANDU 燃料の再処理に対する論理的根拠は何か。
②再処理によって、放射性核種の量はどの程度減少するか。
③使用済燃料ないしその副産物における放射性核種量を大幅に減らすためのテクノロジーは出現しつつあるか。もしそうなら、これらが商業的に利用可能になるのはいつ頃か。
④再処理に関する決定で検討されるべき問題は何か。そして、誰がその意思決定を行うのか。
⑤今後 30 年間に CANDU 燃料を再処理する見込みはあるか。
⑥カナダにおける使用済み CANDU 燃料再処理を支援する為には、DGR に加え、どのような施設（例えば、高レベル放射性廃棄物のガラス固化及び第 2 の中間貯蔵施設）が必要とされるか。 こうした施設の推定予算はいくら位か。
⑦NWMO が DGR に対する方針を変更すべきシナリオは、現在ないし近い将来存在しているか。

上記分析の内、以下では代替処分技術に関連する③と⑦の分析結果について示す。

<u>③使用済燃料ないしその副産物に含まれる放射性核種量を大幅に減らす技術は出現しつつあるか。もしそうなら、これらが商業的に利用可能になるのはいつ頃か。</u>

これまでの質問が現時点を考慮しているのに対し、この問題は、未来に目を向けている。使用済燃料の廃棄物管理面を改善するという①の論理的根拠 B は、核廃棄物管理問題を緩和する上での「RP&T」の分離変換面の潜在的役割に関わるもので、以下の様な問題点を含んでいる。

- DGR での異常加熱を引き起こす核分裂生成物の分離
- DGR の予想外の崩壊の際に、放射能「ソースターム」を減らすこと
- DGR からの放射性核種移行を抑制する為に、その挙動物質を調節すること
- 高速炉での燃料サイクルを含む先進的な燃料サイクルを通じてマイナーアクチニドを破壊すること

・　加速器駆動システム（ADS）におけるマイナーアクチニドの変換

最初の三つの技術は、利用可能であり、現在も使用されている。現在、高速炉での MA 燃焼及び ADS システムでの変換を開発しようという相当な国際的 R&D の取組みが存在するが、これらは、使用済燃料から長寿命放射性核種を減らすのが目的である。こうしたプログラムは、先進的分離に関する集中的な R&D によって支援されている。こうした分野での開発に関するモニタリング及び報告は、三つの年次報告書で記録された NWMO の情報収集の指示の大部分を占めている。

これまでの年次報告書及び上記でも示されたように、放射性核種量が、先進的分離及び変換によって減少する範囲は、使用される燃料サイクルに左右される。燃料サイクルの選択肢の大部分は国際的に検討中であり、これらが機能するには、それに関連する高度な分離テクノロジーが必要である。こうした燃料サイクルは、持続可能性（ウラン保存及び長寿命放射性核種の削減の両方）の観点から、最適化されつつある。しかしながら、現行の原子炉設計を利用する限り、完全に実施することはできず、高速炉ないし加速器駆動システムに対するかなりの投資が必要となる。

ランド研究所の調査では、以下のような結論を出している。

「いくつかの先進的燃料サイクルの構成は、地層処分場の処分能力の必要性を大幅に減らす可能性を持っているが、（だが、この利益は、放射能処理での廃棄物増加によって部分的に減少する。）貯蔵所の長期的安全性及び環境リスクを減らすという観点からは、ほとんど利益をもたらさない。」

こうして、最初の MIT 報告書（MIT 2003）で述べられた事及びその更新で変更されなかった事（MIT 2009）も、理解出来る。

「廃棄物管理の検討に基づき、核種分離・変換の利益が、それに伴う安全性、環境及び安全保障上の考慮及び経済的コストを上回るような説得力のある主張は為されていないと信じる。」

これは、ワンススルー燃料サイクルに集中するよう主張する同じ研究からの引用と一致している。この戦略を称賛する点は多くあるが、この視点が見落としている重要な側面、つまり特に欧州及び日本の人々にとって持続可能性という重要性も存在する。こうした国々における先進的核種分離・変換に関する大規模な R&D の取組みは、ほぼ数億ドル程度の規模であり、エネルギー自給自足及び環境管理の観点から原子力を持続可能にするという暗黙の約束を果たす努力を前提としている。

質問③に対する解答：確かに、使用済燃料に起因する長寿命放射性核種量を著しく減少させる事を目指すR&D計画から、燃料サイクル技術が今現れつつある。こうした技術の基本的コンセプトは、今後20年間のプロトタイプを通じて実証されるはずである。しかしながら、これら技術の商用実現には、高速炉及びADS装置という大規模かつ高価なインフラの確立が必要であり、完全に持続可能な原子力経済を達成するには、1世紀以上かかるかも知れない。こうしたシステムが、大規模な政府資金援助もしくはエネルギー価格の大幅な上昇なしに、廃棄物管理の為だけに実現可能かは不透明である。

⑦NWMOがDGRに対する方針を変更すべきシナリオは、現在ないし近い将来存在しているか

NWMOの適応性のある段階的管理（APM）アプローチは、DGRからの使用済燃料の回収可能性を考慮している。これによって、貯蔵所の充塡が開始された後の時点でも再処理を開始することが可能となる。先進的な核種分離・変換技術を持ってしても、DGRの必要性は再処理にとって排除できないが、再処理なしの使用済燃料向けDGRの場合に比べれば、DGRの特性は変化するであろう。

NWMOの現行路線からさらに根本的に離反するのは、非常に深い掘削孔を備えた処分場の設計を採用する事であろう。これには、原則的に回収可能性を放棄するということが含まれる。この技術に対する関心は増えており、米国のブルーリボン委員会の勧告でもこの構想が支持された事で、カナダでの関心も増える可能性がある。超深孔処分を現行のDGR計画に比べた場合の経済的調査を行うことが、カナダにとって求められている。

比較原価調査がない限り、原価見積り向けの現行APM概念設計から逸脱するはっきりとした論拠が今のところ見つからない事になる。DGR構想は、フィンランド、スウェーデン、そしてフランスにおける先進的使用済燃料及びHLW処分場計画と一致しており、これらの計画ではDGR構想が採用されている。VDH（垂直孔深層処分）定置作業の実証が行われていないため、考察された利点が実際に実現されるかは明らかでない。また、カナダにとって、DGRの場合よりもVDHシステムのための立地を見つけるのが一層容易かどうかも、はっきりとはしていない。

質問⑦に対する解答：実現可能性、コスト効率、そして長期的安全の確立における優位性などが実証されれば、非常に深い掘削孔概念は、NWMOの地層処分計画を変更させるか

も知れない。しかしながら、APM アプローチは十分柔軟であるため、使用済燃料処分場認可に先立つ将来の意思決定時点でこの事を考慮する事も可能である。

また、上記分析の他、NWMO による代替処分技術に関する分析について、表 4.8-1 にまとめる。

表 4.8-1　NWMO における代替処分技術に関する分析

| 年代 | 分析 |
|---|---|
| 2003[2] | (1)地層処分（Deep Geological Disposal）について<br>効果的な処分方法における主要な課題は、放射性物質と汚染物質の移動（マイグレーション）の可能性を使用済燃料から制限することである。一番の懸念は、地下水フローシステムにおける移動（マイグレーション）プロセスである。<br><br>(2)集中貯蔵（Centralized Storage）について<br>貯蔵は、使用済燃料の制御された状態を保つことと、回復、または将来の活動作業のアクセスを可能とすることを維持できる方法である。中心サイトでの長期的貯蔵には、原子炉サイトからの燃料の移送を必要とする。貯蔵施設は地上、もしくは地下に設置されることができる。<br><br>(3)原子炉サイトでの長期貯蔵（Reactor-Site Extended Storage）について<br>地上と地下両方の代替貯蔵が現在使用されている。拡大版の主要施設における設計と費用を減らすことで、さらなる可能性が考案される。<br><br>(4)超深孔内への定置（Emplacement in Deep Boreholes）について<br>少量の高レベル放射性廃棄物の処分を必要とするいくつかの国は、超深孔処分を検討している。この方法では、固体に詰められた廃棄物は、通常直径 1m 以下、数 km 地下まで掘られた深孔に配置される。提案者たちは、人々と環境に対する長期的なリスクは非常に低いと議論するが、重要な技術的疑問に対するさらなる研究が必要とされる。 |
| 2005[3] | 超深孔処分は現在、少量の高レベル廃棄物の可能性ある処分方法として検討されているが、大量の使用済燃料の管理として適応するのは難しい。 |
| 2011[10] | 超深孔処分概念に関する課題は、以下のとおりである。<br>・　垂直に積み重なるために、様々な設計において、廃棄物の塊は高いストレスの影響を受ける。<br>・　再回収が可能であるかは疑問である。<br>・　長期的なモニタリングは難しい。<br>超深孔処分システムは、二酸化炭素の捕獲技術の開発の知識を組み込み提案されてきており、これは廃棄物へのストレスの軽減、再回収とモニタリングを可能とすることが期待されている。 |

4.8.3 参考文献

[1] Govemment of Canada 2011, Canadian National Report for the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

[2] NWMO, 2003, Asking the Right Questions? The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel.

[3] NWMO, 2005, Choosing a Way Forward The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel.

[4] Jackson, D. and Dormuth, K, 2008, Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation (RP&T) and Alternative Waste Management Technology, Annual Report 2008. NWMO Report TR-2008-22. Nuclear Waste Management Organization, Toronto, Ontario.

[5] NEA, 2008, Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation 10th Information Exchange Meeting, Mito, Japan (6-10 October 2008). Nuclear Energy Agency, Paris, France.

[6] Jackson, D. and Dormuth, K., 2009, Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation (RP&T) and Alternative Waste Management Technology, Annual Report 2009. NWMO Report TR-2009-32. Nuclear Waste Management Organization, Toronto, Ontario.

[7] Jackson, D. and Dormuth, K., 2010, Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation (RP&T) and Alternative Waste Management Technology, Annual Report 2010. NWMO Report TR-2010-24. Nuclear Waste Management Organization, Toronto, Ontario.

[8] MIT, 2003, The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study. ISBN 0-615-12420-8. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

[9] MIT, 2009, Update of: The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

[10] NWMO, 2011, RD&D Program 2011-NWMO's Program for Research, Development and Demonstration for Long-Term Management of Used Nuclear Fuel.

4.9 スペイン

スペインにおける代替処分技術開発について、研究開発の位置づけ、実施研究テーマの概要について調査・整理する。以下はスペイン放射性廃棄物管理公社（ENRESA）からの情報をもとに取りまとめたものである。

4.9.1 代替処分技術開発の位置づけ

第7次総合放射性廃棄物計画のドラフトでは、オープンサイクル戦略をスペインの核燃料サイクル政策として採用しており、使用済燃料については、中間貯蔵の後、封入施設に送られ、地層処分する方針とされている。核種変換は最終処分の代替方策とは考えられておらず、R&Dのレベルで考慮すべきものとされている。

この分野でのR&Dの目的は、この技術において発生する廃棄物管理のためにENRESAへの支援を提供することである。

スペインの核燃料サイクル政策では、オープンサイクルを採用しているが、ENRESAは、長寿命核種の核種分離に関連したプロジェクトをR&D計画の中に含めている。これらの研究は、技術的・経済的な実現可能性に基づき、使用済燃料管理オプションに関する将来の意思決定に係る議論に貢献することを目的としている。

高レベル放射性廃棄物処分に関する他のオプションはスペインでは考慮されていない。

4.9.2 実施研究テーマ

ENRESAのR&D計画における核種分離・変換に関する分類での実施内容等の概要を示す。

- 分類2.6：核種分離

  長寿命核種の分離プロセスに関するプロジェクト。このプロジェクトでは、主に実験の側面で、マイナーアクチニドに関する先進的な分離に関する実現性に関する研究を行っている。EURATOMの第7次枠組み計画のACSEPTに関連したものである。プロジェクトにおいて実施された研究は以下の2つに大別される。マドリッド自治大学及びCIEMATがこのプロジェクトに参加しており、ENRESAは資金提供を行っている。

✧ 湿式精錬による分離。アクチニドや長寿命核種の分離のために溶剤による抽出が行われる。

- ✧ 高温冶金法による分離。溶解された塩及び電気化学的なプロセスが、分離のために用いられる。
  - ➢ 分類2.7：核種変換

    この分野でのR&Dでは、CIEMATによって以下のテーマが行われている。
- ✧ 長寿命核種の核種分離・変換に注目した先進的核燃料サイクルの評価及び最適化
- ✧ 核種変換を含む先進的サイクルの燃料等システムのシュミレーションコードの改良及び妥当性確認
- ✧ 核種変換システム及び燃料サイクルの双方のデータの測定・評価実験への参加
- ✧ 物理的及び特定の核種変換に関するシステム工学的な研究のための実験への参加
- ✧ 核種分離・変換に関する取りうる戦略を議論するIAEA、OECD/NEA、EUの枠組み計画などの国際フォーラムへの参加
- ✧ 相互合意によって選定された、他の国内の研究グループとの協力の調整

これらの活動は、材料試験炉の設計及び建設での協力により補完される。これは、CSN、CIEMAT などの参加する CEIDEN と呼ばれる技術プラットフォームを通じて行われている。

4.9.3 実施機関、費用負担の仕組

放射性廃棄物管理に関連した研究開発の費用負担の仕組み、ENRESA が提供する資金額等については、第 2 章に示した通りである。

## 4.10 ベルギー

ベルギーにおける代替処分技術開発に関する動向を調査した。以下はベルギー原子力研究センター（SCK・CEN）からの情報をもとに取りまとめたものである。

### 4.10.1 代替処分技術開発の位置づけ

MYRRHA 設計（ハイテクを応用した多目的ハイブリッド研究炉）に代表されるような、ベルギーの先進的原子力システムの発達の中で、廃棄物管理は重要な部分を占める。現在のところ、MYRRHA 研究グループの内部で放射性廃棄物管理に特化した研究はなされていない。現在の焦点としては、地層処分の利点や不都合と、放射性廃棄物管理のための先進的原子力システム（たとえば分離・核変換）の適用という二つの概念の比較に当てられている。2012 年 6 月 25 日から 2013 年 3 月にかけ、SCK・CEN において 3 つの内部意見交換会議が開催された。そこでは、放射性廃棄物管理のテーマをめぐり、地層処分、先進的原子力システム、原子力研究の社会的側面などが協議された。それらの会議で提起された最も示唆的なテーマ、課題、あるいは疑問は、ICEM2013 での J. Schroder よる発表に代表される（J. Schroder,　放射性廃棄物管理：地層処分と原子力先進技術の関係、*ASME 第 15 回環境改善及び放射性廃棄物管理に関する国際会議議事録*、ICEM2013、2013 年 9 月 8～12 日、ベルギー、ブリュッセル）。

5 . 国内基礎技術情報の収集及び整理

平成 17 年 7 月に設置された「地層処分基盤研究開発調整会議」（以下、「調整会議」という）の活動をとおして、わが国における地層処分に関する国の基盤研究開発全体計画の初版が平成 18 年 12 月に公表された[1][2]（平成 21 年 7 月に改訂版公開）。また、平成 22 年 3 月には地層処分と TRU 廃棄物の地層処分に関する全体計画が統合された改訂版の全体計画が公表された[3]。

その後、平成 24 年度には、平成 25～29 年度における地層処分に関する国の基盤研究開発の方針に関する全体計画（以下、全体計画という）[4]が策定された。さらに本年度において、平成 24 年度に取りまとめられた全体計画に沿って展開される詳細な研究開発計画（以降「研究開発マップ」という）の策定作業が進められた[5]。以下では調整会議を活用した関連情報の収集に基づく研究開発マップの策定に向けた取組において、事務局として運営・支援した外部有識者委員会の活動と外部有識者委員会によって寄せられた意見、及び寄せられた意見に対する調整会議による研究開発マップへの反映作業を通じての国内基礎技術情報の収集及び整理の概要について報告する。

5.1 地層処分基盤研究開発の研究開発課題整理

前述したように、平成 25～29 年度を対象とした全体計画において示された調整会議の 4 分野（地質環境調査評価技術分野、処分場の工学技術分野、性能評価技術分野、使用済燃料の直接処分分野）の研究開発計画に関して、各分野のワーキンググループによって、詳細な課題の設定、進め方等の検討を進め、それらを示した研究開発マップの策定を進めた。

平成 25～29 年度における地層処分に関する国の基盤研究開発では、これまでの研究成果、東日本大震災の発生や原子力発電所事故での教訓と原子力委員会の見解等を踏まえ、下記の 3 つの研究開発課題を設定した（図 5.1-1）。

**①精密調査の前半（地上からの地質環境調査等）に必要となる技術基盤の整備・強化（フェーズ２）**

- 海域における地質環境評価技術開発、廃棄体の回収技術開発等
- 東日本大震災や東京電力（株）福島第一原子力発電所の事故等を教訓とした技術開発

**②精密調査の後半（地下調査施設での調査）に必要となる技術基盤の整備・強化（フェー**

ズ３）

・ 主に深地層の研究施設を活用した地下施設での調査に係わる個別技術（地質環境の各分野毎）の改良・高度化、人工バリアの定置実証試験等

**③使用済燃料の直接処分に向けた研究開発**

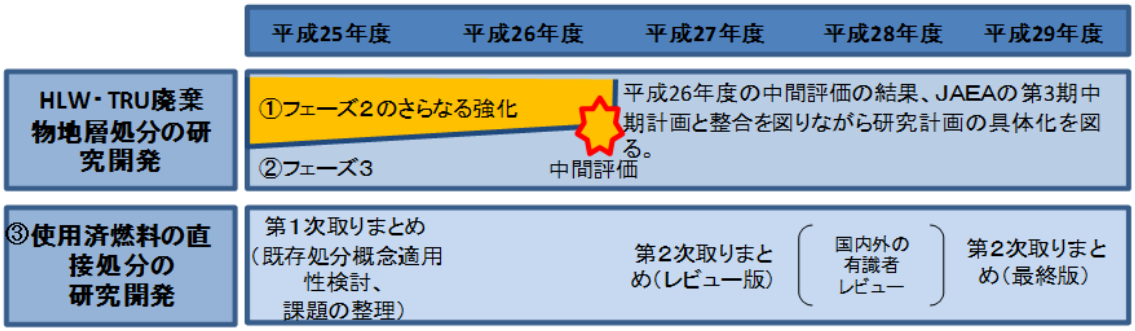



図 5.1-1　平成 25～29 年度を対象とした研究開発計画の概要

上述の研究開発計画では H25~29 年度の期間において、以下のような H26 年度における中間評価や中間評価を受けての計画の見直し、あるいは使用済燃料処分の直接処分の研究開発に関しては成果の取りまとめを行うこととしている。

・ 調整会議構成機関である日本原子力研究開発機構（JAEA）の第 2 期中期計画終了（H26 年度）を節目として、2 年目に中間評価を実施
・ フェーズ 2 強化の技術開発成果が実施主体に円滑に技術移転できるように成果を取りまとめ
・ 平成 7 年度以降は、JAEA の第 3 期中期計画と整合性を図りつつフェーズ 3 の研究計画を具体化
・ 直接処分の研究開発は、第 1 次取りまとめ（処分概念検討）、第 2 次取りまとめ（処分技術検討）と成果を段階的に取りまとめ、わが国の地質環境を考慮した直接処分の概念を提示

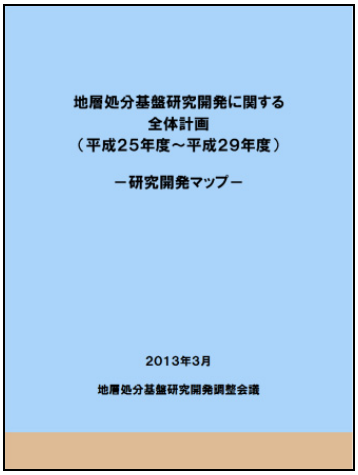
○研究開発マップの策定

平成 24 年度に策定された全体計画[4]では、計画期間における研究開発計画の基本方針を中心にとりまとめており、具体的には国の基盤研究開発の位置づけ、実施主体や規制機関による研究開発との関係などを解説し、各分野の研究開発計画について概要を紹介している。

本年度策定される研究開発マップでは、全体計画の基本方針に基づき、研究開発計画として展開される詳細計画を中心に取りまとめ、分野別の研究開発計画の課題については、マップ等により各研究開発課題について詳細に展開している。

研究開発マップの構成を図 5.1-2 に示す。研究開発マップは研究開発マップ本文と別添資料の研究開発マップから構成される。

地層処分基盤研究開発に関する全体計画【研究開発マップ】（平成２５年度～平成２９年度）




１．はじめに

２．地質環境調査評価技術分野の研究開発計画

３．処分場の工学技術分野の研究開発計画

４．性能評価技術分野の研究開発計画

５．ＴＲＵ廃棄物処分技術分野の研究開発計画

６．使用済燃料の直接処分に関する研究開発計画

別 添 資 料

研究開発マップ

地質環境

処分場の工学技術

性能評価

TRU 廃棄物処分技術

使用済燃料の直接処分

図 5.1-2　研究開発マップの構成

マップフォーマットによる研究開発課題の具体化は、以下に示した 5 つの分野構成よって展開される。

（A）地質環境調査評価技術分野

（B）処分場の工学技術分野

（C）性能評価技術分野（安全評価分野）

（D）ＴＲＵ廃棄物処分技術分野

（E）使用済燃料の直接処分研究開発分野

このうち、高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物処分分野（上記（A）から（D）の分野）については、国の基盤研究開発では、地層処分が技術的に十分信頼性をもって行えることを示した「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–.」（核燃料サイクル機構、平成１１年)以降の研究開発について、以下の 3 つの段階的なフェーズを定義し、各フェーズにおける研究開発の目標等を設定している。

フェーズ 1 : 概要調査の段階に必要となる技術基盤の整備・強化

フェーズ 2 : 精密調査の前半段階（地上からの調査）に必要となる技術基盤の整備・強化

フェーズ 3 : 精密調査の後半段階（地下調査施設での調査）に必要となる技術基盤の整備・強化

このような段階的なフェーズ設定のもと、国の基盤研究開発の研究開発マップは、基盤研究開発の全体目標を最上位に位置付けた階層的構造として図 5.1-3 のような概念として整理・展開して具体化されている。全体目標の下に各フェーズの段階目標を設定し、段階目標を達成するための研究開発を分類、細目、課題の順に詳細化して示している。

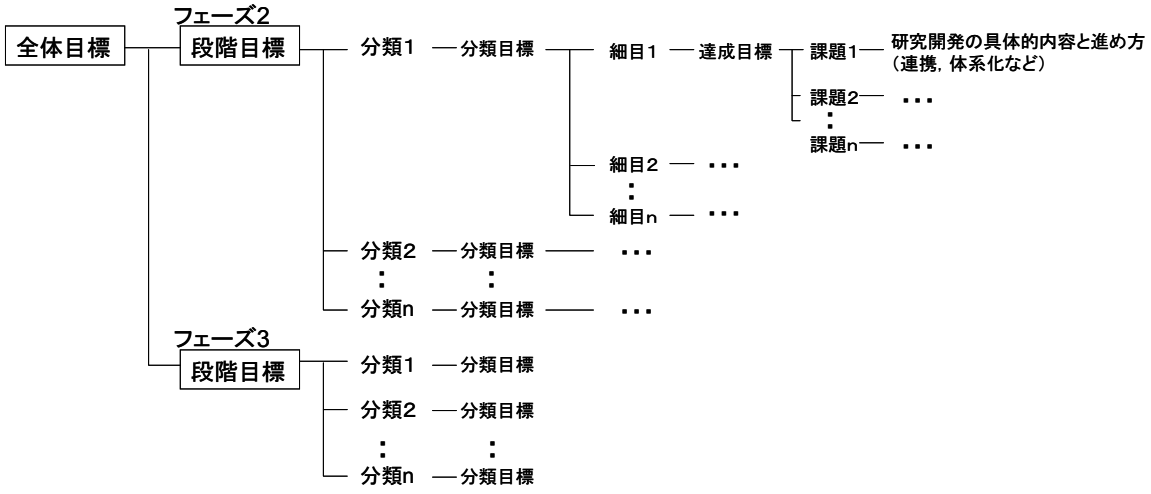



図 5.1-3　研究開発マップでの研究開発計画の具体的な展開の構造

H25~29 年度を対象とした研究開発マップは、前述した研究開発計画の個別目標と課題への展開方法に沿って、研究開発マップとして整理・展開されている。HLW／TRU 廃棄物処分分野に関しては、当該研究開発計画がフェーズ 2 及びフェーズ 3 の双方を扱うことから、研究開発マップへの整理・展開に当たっては、それぞれの研究開発フェーズに対応する研究開発課題の展開を、次に示すような対応する 2 種のマップフォーマットで整備が行われている（図 5.1-4）。

マップフォーマット①

従来の国の基盤研究開発計画におけるフェーズ 2 までに関して、更なる重点化等が必要とされる課題（フェーズ 2 の課題として設定）を展開。

- ✓ 平成 21 年度版全体計画までのフェーズ 2 からの課題の連続性や整合性を表現
- ✓ 課題構成（分野、細目構成）は、従前の研究開発計画で設定したフェーズ 2 の課題構成を踏襲することを基本

マップフォーマット②

精密調査地区選定後に必要となる（実施主体による精密調査［後半の地下施設での調査］に資する）、従来のフェーズ 3 の位置付けに対応する課題（フェーズ 3 の課題として設定）を展開。

- ✓ 長期的な目標（事業許可申請段階をその目標達成時期と位置付ける）を明示したうえで，平成 29 年度迄の中間目標を提示
- ✓ 課題構成（分野，細目構成）は、下記の検討のポイントも参照しつつ、新たな構成について分野で検討して設定

また、課題構成に関する検討のポイントとして、研究開発課題の個々について、『国の基盤研究開発として当該課題を設定する意味・位置付け』が意識して設定されている。例えば、次のような視点で個々の課題の成果の反映先や、国の基盤研究開発として実施する意味・位置付けについて、NUMO の技術開発計画（ニーズ）との相互補完性やわが国の地層処分研究開発全体での抜け落ちや重複の排除が意識され設定されている。

1) NUMO の技術開発計画等で示された NUMO のニーズに対応
2)現段階で上記に直結しないが，長期事業の信頼性向上や国民・関係者からの信頼感醸成等に資する，国の基盤研究開発としての課題

**マップフォーマット①**：フェーズ2迄に関して更なる重点化等が必要とされる課題（平成26年度までに成果提示）

| 研究開発要素 | | | 平成24年度迄の計画と成果 | | 平成25年度～平成29年度迄の各研究開発要素の研究開発目標と課題<br>精密調査地区選定を見据えた研究開発課題（平成26年度迄の成果提示） | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 分野 | 分類 | 細目 | 達成目標と達成レベル | 課題の設定，進め方，成果 | 達成目標 | 課題の設定，進め方 |
| | | | | | | |

**マップフォーマット②**：フェーズ3に相当する研究開発課題（NUMOによる精密調査［地下施設での調査］への反映）

| 研究開発要素 | | | 平成25年度～平成29年度迄の各研究開発要素の研究開発目標と課題<br>実施主体による精密調査［後半の地下施設での調査］に資する研究開発課題 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 分野 | 分類 | 細目 | 長期達成目標（事業許可申請段階における目標） | 長期達成目標を踏まえた，平成29年度迄の中間目標 | 課題の設定，進め方 |
| | | | | | |

図 5.1-4　研究開発マップの２つのフォーマット

また、使用済燃料の直接処分分野に関しては、本研究開発期間を対象とした 5 ヵ年の研究開発及びその取りまとめを行うための目標及び課題設定が行われており、他の分野の研究開発段階と異なっている。このため、使用済燃料の直接処分分野に関しては図 5.1-5 に

示す以下を実現するようフォーマットによって策定されている。

- ✓ 計画期間における個別要素課題を具体的に提示
- ✓ 各細目に対応した平成 29 年度までの中間目標、中間目標達成のために必要な課題設定
- ✓ 当該研究開発計画における 3 つの段階(当面の 1 ヵ年､3 ヵ年及び 5 ヵ年)について、各研究開発課題に関する研究開発計画を具体化して展開

| 研究開発要素 | | | 平成25年度～平成29年度迄の使用済燃料の直接処分に関する各研究開発要素の研究開発目標と課題 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 分野 | 分類 | 細目 | 平成29年度までの中間目標 | 課題の設定 | 課題の進め方 | | |
| | | | | | 当面の1ヶ年(平成25年度迄を目途):<br>実現可能性を示す第1次取りまとめへの成果の反映 | 当面の3ヶ年(平成27年度迄を目途):<br>技術的信頼性の見通しを示す第2次取りまとめ(ドラフト)への成果の反映 | 当面の5ヶ年(平成29年度迄を目途):<br>第2次取りまとめ(最終版)への成果の反映 |
| | | | | | | | |

図 5.1-5　使用済燃料の直接処分分野の研究開発マップのフォーマット

## 5.2 外部有識者委員会

### 5.2.1 外部有識者委員会の設置

H24 年度に公開された、国の基盤研究開発の基本方針などを中心として取りまとめた全体計画については、平成 24 年度に 2 度の外部有識者委員会を開催し、その方針部分等を中心に外部有識者から意見を得て、全体計画への反映が行われた。

本事業においても、策定された研究開発マップについて技術的な観点から詳細なレビューを実施するために、平成 24 年度設置した外部有識者委員会の下に、各分野に関する専門性を有する大学の外部有識者で構成される分野別委員会を設置した。図 5.2-1 に外部有識者委員会と分野別委員会の体制を示す。

分野別委員会は、以下の方針に基づき設置した。

- ✓ 各分野別員会主査は、外部有識者委員会の委員とする
- ✓ 使用済燃料の直接処分に関する分野別委員会委員は、同分野の研究開発が各分野にまたがること、技術的取りまとめの進め方と密接に関連することなどから、外部有

識者委員会委員と同一とする

✓ TRU 分野の研究開発課題については、H26 年度の中間評価時期において工学技術分野と性能評価分野への統合を予定しているため、工学技術及び性能評価技術分野の分野別委員会においてレビューを行う

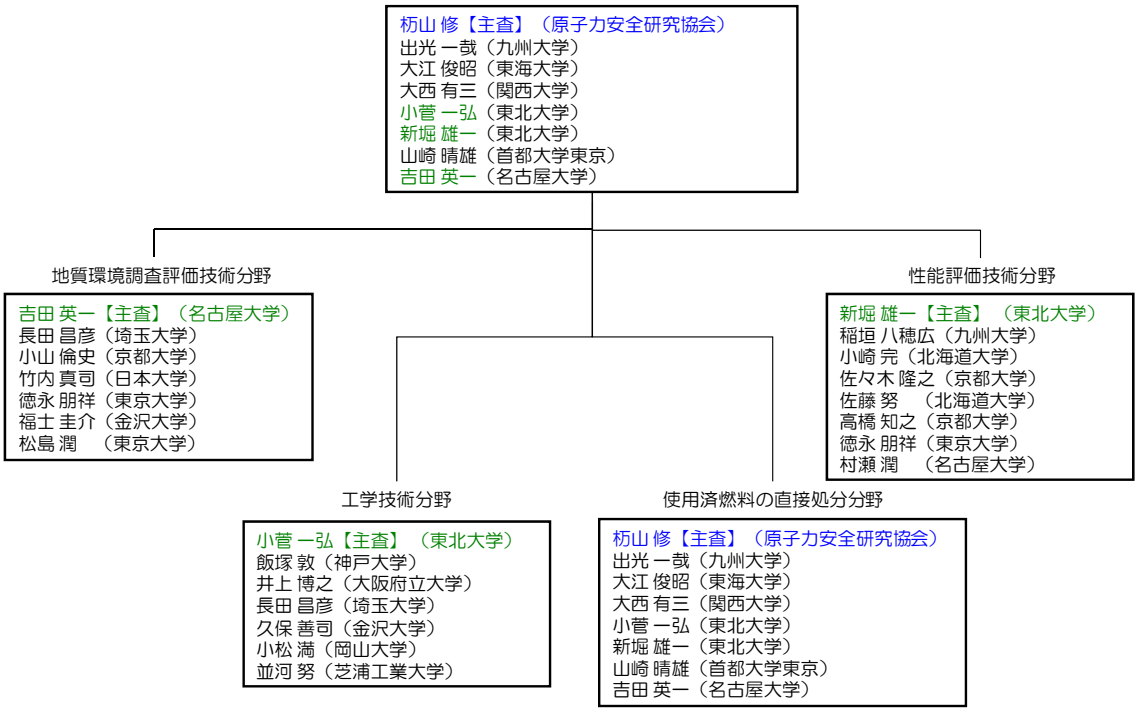



図 5.2-1　外部有識者委員会と分野別委員会の体制

### 5.2.2 外部有識者委員会の開催

設置した委員会の体制において、研究開発マップの詳細なレビューを、主に以下の基本方針に基づき、各分野の分野別委員会を開催した。

研究開発マップ策定に係る外部有識者委員会の基本方針

・ 委員会は、[1]親委員会、[2]分野別委員会で構成する。それぞれの役割は次のとおりとする。

[1] 親委員会：調整会議の取組全般や基本戦略といった基本方針部分について、地層処分事業全般を俯瞰する立場からレビューする。

[2] 分野別委員会：研究開発マップの具体的な計画部分について、専門とする技術的観点から詳細なレビューを行う（課題の抜け落ちがないか、国の基盤研究開発計画と NUMO の技術開発計画の相互補完性､地層処分技術のシステム統合を念頭に置いた分野間の連携等について)。なお、分野別委員会の主査は親委員会委員が兼務し、相互の意思疎通を図る。

・ 各分野別委員会を原則として 3 回程度開催する。

第 1 回委員会：調整会議・全体計画の概要、全体計画（H25-29）の策定方針、各分野の課題等の概要説明

第 2 回委員会：各分野の個別研究開発課題等のレビュー

第 3 回委員会：第 2 回委員会での指摘等の反映確認、分野をまたぐ問題等の確認、親委員会への諮問事項も確認等

・ 分野別委員会後、コメントを踏まえ研究開発マップへの反映・改訂を実施する。その後、親委員会を開催し、分野をまたぐ問題等の諮問事項の検討等実施し、研究開発マップを最終化する。

上記の方針の下､分野別委員会と親委員会については表 5.2-1 のような日程で開催した。

表 5.2-1　委員会開催実績

| 分野 | 開催日時 |
|---|---|
| 地質環境 | 第 1 回分野別委員会（地質環境）：平成 25 年 10 月 22 日 |
| | 第 2 回分野別委員会（地質環境）：平成 25 年 11 月 8 日 |
| 工学技術 | 第 1 回分野別委員会（工学技術）：平成 25 年 10 月 17 日 |
| | 第 2 回分野別委員会（工学技術）：平成 25 年 11 月 14 日 |
| | 第 3 回分野別委員会（工学技術）：平成 26 年 1 月 31 日 |
| 性能評価 | 第 1 回分野別委員会（性能評価）：平成 25 年 10 月 31 日 |
| | 第 2 回分野別委員会（性能評価）：平成 25 年 11 月 14 日 |
| | 第 3 回分野別委員会（性能評価）：平成 25 年 12 月 27 日 |
| 直接処分 | 第 1 回分野別委員会（直接処分）：平成 25 年 10 月 31 日 |
| | 第 2 回分野別委員会（直接処分）：平成 25 年 12 月 5 日 |
| 親委員会 | 第 1 回外部有識者委員会（親委員会）：平成 26 年 3 月 3 日 |

また、特に各分野の個別研究開発課題等のレビューを実施した第 2 回委員会を欠席した委員に対しては、個別に研究開発マップへの意見を伺った。

5.2.3 外部有識者委員会で得られた意見の概要

前述した委員会の開催により、また、欠席委員との個別意見聴取により得られた研究開発マップの策定に係る主な意見の概要について、①各分野の研究開発計画に関する意見と、②各部分野に共通する指摘、研究開発の方針・方向性に関する意見に大別して以下に整理する。なお、使用済燃料の直接処分分野については、研究成果取りまとめに関する意見についても主な意見を整理した。

**○地質環境調査評価技術分野**

研究開発計画に関する主な意見

- 天然バリアと人工バリアの相互作用といった地質環境と工学技術の両者に関わる課題については、例えば具体的な課題に特化した合同委員会の開催等の連携をすることが

必要と考える。

- 今後は、日本の地質環境を指向した研究開発が重要と考える。
- 地層処分という観点から、あるいは技術開発の信頼性を得るためにも、課題の優先順位を議論することも必要と考える。
- 断層の再活動に関する評価技術において、ある断層を対象として研究開発をしたとしても、その断層を対象とした研究開発を実施する意義について、サイト選定調査への適用を踏まえて明確にする必要がある。
- 段階的なサイト選定調査を見据えた、全体としてストーリーを設定した研究開発を計画し、その一環として例えば地下水の水みちの把握等の研究開発をするという位置づけをするのが良いのではないか。
- 音響透水トモグラフィのような研究は挑戦的な印象を受けるが、データからいかに情報を引き出すかが重要。このような挑戦的な課題についてもっと取り組むべきではないか。

各部分野に共通する指摘、研究開発の方針・方向性に関する主な意見

- 今後、放射性廃棄物ワーキンググループの議論で技術的課題が出てきた場合に、それを基盤研究開発計画にフィードバックさせる仕組みはあるのか。基盤研究開発からの情報発信だけでなく、放射性廃棄物ワーキンググループでの議論を踏まえ基盤研究開発で対応するといった、双方向の仕組みがあるべきではないか。
- 地層処分という観点から、あるいは技術開発の信頼性を得るためにも、課題の優先順位を議論することも必要と考える。
- 研究開発をシステム統合として捉えて、性能評価の観点から、例えば、このような亀裂の評価が必要であり、そのために地質調査の手法にまで性能評価側からコメントするような仕組みが必要ではないか。
- 各分野間との相関を意識した課題の抽出と問題設定についての検討を親委員会で行うべきである。

**○工学技術分野**

研究開発計画に関する主な意見

- 回収技術とモニタリングに関連して、計測機器だけで耐久性を持続させるのではなく

システムとしてのセンシングの研究開発をするという考え方が妥当ではないか。

- 想定外をなくすためには、科学的な論拠に基づいた複数のシナリオを用意しておく必要がある。
- TRU 廃棄物分野における力学的影響に関する検討は、処分施設の施工法に大きく影響するため、その検討の１つとして化学的影響に関する検討にも重点をおくべきである。
- 地下研究施設での実規模で実施する研究開発の場合も重要であるが、併せて、課題を多く見出す場合には、室内で実施する実験室スケールの試験も有効である。

各部分野に共通する指摘、研究開発の方針・方向性に関する主な意見

- 信頼性向上のための研究開発は継続する一方で、どこに優先順位を置くかについては議論しながら進めていく必要がある。
- フェーズ2強化の課題で終了するものがあるが､2年間で終わるとは考えにくいものや、重要な課題もあるため、これらについては継続する必要がある。
- 全般的に実施目的を明確にしたほうがよい。具体的に何をやるのか、読み取りづらい記載があるので、わかりやすく記載すべきである（第 3 回委員会において修正対応を確認)。
- 課題間の繋がりがある場合（例えば、この先は別の課題で扱うなど）には、記述をするなどしてわかりやすくする必要がある（第 3 回委員会で各分野のマップにおいて、課題番号を付し関連する課題を引用することで対応することを説明)。
- 各フェーズの関連が分かりにくいものがある。成果として分かっていること、課題として残っていることなどを明確にしないと実施することの新規性が分からないものがある。
- 分野の分け方は現状のままで良いのか。他の分野で実施している技術開発であっても、関連する分野の中にも記述されているとわかりやすいのではないか。
- 実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）への技術移転に関して、NUMO としては、この方法しか適用できないといった提示ではなく、設計・製作・施工時の留意点などを示すような形にして欲しい。
- 地層処分事業の長期安全性の担保を提示するための研究開発を今後検討していく必要がある。また、この点に関する次世代への技術継承についても全体計画等の個別の文書において記載する必要がある。

○性能評価技術分野

研究開発計画に関する主な意見

- フェーズ 3 の段階目標として、実際の地質環境を対象とした評価手法の適用性確認としているが、社会的事情もあり線量評価までは難しいとしても、方法論までの研究開発に留まらず、いくつかの地質環境を想定した総合的な評価を行うことを検討して欲しい。総合的な評価を試行することによって研究開発計画へフィードバックすることにも役立つ。
- 先進的シナリオ技術開発の地質環境の長期的変動の評価技術整備の課題は、地層処分事業の社会的受容性にとっても非常に重要な課題である。地質環境の変動事象について地質環境分野と連携し、稀頻度事象を全体評価においてどのように位置付けるのかなど、シナリオの考え方の整理・評価の方法論の検討を進めてほしい。
- 個々の研究開発について部分的に最適化されているとしても、最終的にどのように全体的なシステムの統合が図られるのかが明確でない。全体の整合を誰がどのような基準で図るかの考え方を記載することが必要である

各部分野に共通する指摘、研究開発の方針・方向性に関する主な意見

- 国の基盤研究開発で基礎的な研究(ex.ガラスの溶解メカニズム)をもっと鍛える必要があるということを議論していく必要がある。研究戦略の考え方を明確にすることも必要である。
- 国の基盤研究開発のフェーズ設定の理由が明確ではなく、今後も現在の枠組み・フェーズ設定を継続して検討する必要がある。
- 地質環境分野や工学技術分野との分野をまたがる課題の研究開発に関して、性能評価分野が俯瞰しやすい立場にあるため、性能評価分野からニーズを示すなどでリードすることにより、各分野との連携を図ることができる。
- 放射性廃棄物管理オプションの社会との共有に関する課題も重要な研究開発要素であり、最近の取り巻く状況を考慮すると基盤研究開発での実施を検討すべきである。
- 国の基盤研究開発が原子力発電環境整備機構（NUMO）の技術開発の補完的な役割のみと見なされないように、成果報告会でも基盤研究開発の位置づけ、及び規制研究と社会の理解促進にも資することをアピールすべきである。

- 放射性炭素の閉じ込め等の代替技術の開発については、今後も国が継続して研究開発をすべきではないか。この分野については材料系等の外部の専門家も加えて日本の叡智を集めるような取組みをするのが望ましい。

**○使用済燃料の直接処分分野**

研究開発計画に関する主な意見

- 研究開発課題のリストが網羅的であるが、全ての課題について研究開発に取り組まないと直接処分の実現可能性が示せないということではないのではないか。研究開発課題の設定においては、研究課題に優先度を付けて記述することが必要ではないか。処分の安全性に大きな影響を与える可能性のある、より重要な研究開発に資金を投入すべきである。
- ガラス固化体や TRU 廃棄物は処分することを考慮した廃棄物であるが、使用済燃料は処分の観点で品質管理がされているわけではないため、特性・性状をしっかりと把握する事が重要である。また、研究開発を進めるにあたっては、従来の処分分野の専門家のみならず、照射燃料の特性等についての専門家ともコミュニケーションを取り、彼らの有する知識や情報を有効に利用しながら検討を進めることが重要である。
- 隆起・侵食等の長期変動事象を考慮した地質環境の設定に係る検討を行うとしているが、このような長期の変動については、その不確実性の及ぼす影響と評価期間の考え方について整理が必要である。議論の前提として、海外事例や最新の科学的知見を引用しつつ隆起・侵食の不確実性を認識しながら議論をしているという説明をするのが良いのではないか。
- シナリオの開発については、国内の規制の動向に加え、国際原子力機関（IAEA）や国際放射線防護委員会（ICRP)における国際的な議論を適切に引用し、リスク論的考え方に基づいて検討するということを明記すべきである。
- 全体計画の記載には、「中間貯蔵期間との関係」や、「HLW 及び TRU との併置処分」といった記載もある。長期的には、地層処分の最適化といったことも視野に入れて研究開発を進めてほしい。
- これまでに開発された既存の知識ベースに関するツール等については、今回の直接処分に係る研究開発及び取りまとめ作成において有効に活用されることが期待される。

直接処分の取りまとめの方針などへの意見

- 直接処分の取りまとめにおいては、ガラス固化体との違いのみならず、H12 レポート以降の技術や理解の進展を適切に取り込むことが重要である。
- 第 1 次取りまとめにおいて実施する設計・安全評価については、その位置づけを明確にするとともに、第 2 次取りまとめについては、そこでの様々な設定や判断について、その背景、論拠をしっかりと説明することが重要である。
- 取りまとめにおいては、セーフティケースの構築を意識して、研究の背景、目的等を記載する必要がある。
- セーフティケースは様々な内容を如何に統合して主張をするかという性格のものであると考えられるが、直接処分研究開発の第 1 次取りまとめの実施時点から第 2 次取りまとめの形を意識して取り組むことが重要である。
- 直接処分研究開発の第 2 次取りまとめ報告書は、フレキシビリティを考えた上で、直接処分の処分概念の選択肢を提示し、何故その選択肢を選んだかのメッセージが見えるようにすることが重要である。
- 回収可能性の考え方は社会との関係で決まってくる部分がある。取りまとめにおいては国際的な動向を紹介しつつ、記述すべきであると考えられる。
- 使用済燃料の直接処分の場合、ガラス固化体の処分と比較して処分場エリアが広くなると考えられるため、広さのイメージを社会に提示することも必要ではないか。

各部分野に共通する指摘、研究開発の方針・方向性に関する主な意見

- 直接処分の取りまとめにおいては、HLW 及び TRU の研究開発の最新の成果を適切に取り込むことが重要である。

**・外部有識者委員会（親委員会）における分野をまたぐ問題等の諮問事項の検討**

表 5.2-1 のスケジュールで開催された分野別委員会については総括のまとめが行われた。分野別委員会の後に開催された外部有識者委員会（親委員会）では、これら分野別委員会の総括を基に報告が行われ、その上で分野をまたぐ問題等について議論された。主な意見は以下の通りであった。

- 現状ではリーダーシップが見えない状況であり、誰かが強いリーダーシップを取る必

要があるのではないか。設定したストーリーに従って、何年後には地層処分が安全に出来るという見通しの下に、そのためにはこのような技術が必要であり、危なそうな部分については代替としてこのような技術があるというような強いリーダーシップが欲しい。

- 人というよりは、統合においてどういうものを中心に据えるのかということが重要なのではないか。例えばJAEAの地層処分知識マネジメントシステム（KMS）の枠組みを活用して知識基盤を統合することは重要である。
- 個々の技術と信頼性を上げようとして基盤研究開発を実施しているが、統合的な作業をやらないと全体としてどのように効いているのかが分かりにくい面があった。今回、使用済燃料の直接処分の研究開発に関連して、基盤研究開発側で総合的な取りまとめをすることになっており、この機会に研究成果のレビューをすることが期待できる。

5.2.4 外部有識者委員会を踏まえた研究開発課題整理の改訂

前節に示されたような委員からの意見に対して、基盤研究開発調整会議において、指摘に対応するための研究開発マップの改訂が適宜実施された。なお、特に、各部分野に共通する指摘、研究開発の方針・方向性に関する意見については、5.1節で示したような、研究開発スケジュールの平成26年度の中間評価とそれに伴う全体計画の見直しのタイミングにおいて研究開発計画に対応・反映する予定となっている。

また、研究開発マップのレビューにおいて、特に各分野間の連携に関する議論の一環として、マップにおける課題の設定・進め方の表記方法について、以下のような指摘を受けた。

〇課題間の繋がりがある場合には明確にする必要がある
〇課題が設定される背景情報についても必要に応じてマップ中に記載する必要がある

これらの指摘に対応するため、研究開発マップに対して以下の対応が行われた。

①課題番号の設定及び関連する課題について課題番号の明示

課題間の連携を研究開発マップ内において効果的・効率的に示すために、以下の方法

により、すべての課題に固有の課題番号を設定し、関連する課題がある場合には課題名の後に矢印（⇒）を付し、関連する課題番号を記入

②課題設定の背景の明示

原則として、各課題が設定された背景情報を各課題の実施内容とともに記述

以上の対応が行われた研究開発マップの記入例を図 5.2-2 に示す。この例では、「(工学３-２)」が課題番号に相当し、この課題が処分場の工学技術分野のフェーズ３の２番目の課題であることを示している。また、矢印（⇒）の後に示されている「(ＴＲＵ３-４)」は、この課題が、ＴＲＵ廃棄物処分技術分野のフェーズ３の４番目の課題と関連があることを示している。

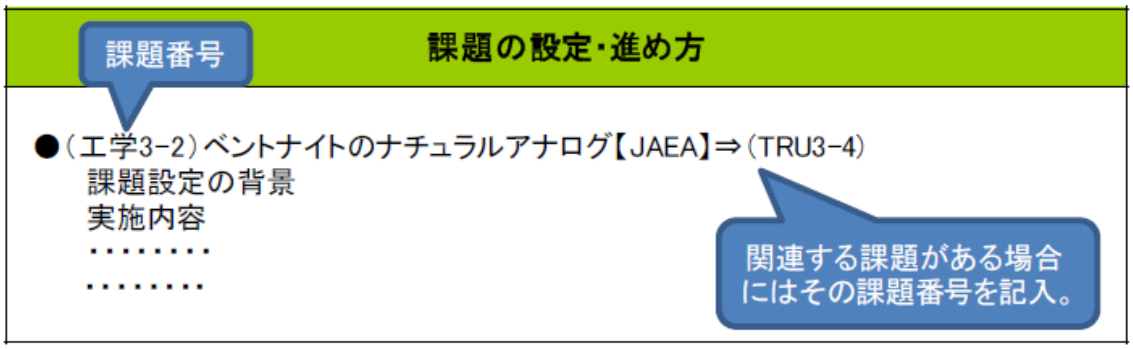



図 5.2-2　研究開発マップにおける関連する課題等の記入例。【】内はこの課題の実施機関を示す（この例では、JAEA が実施機関）。

・全体計画と研究開発マップの印刷製本と関係者への配布

本年度の事業において、上記の経緯で取りまとめられた研究開発マップ[5]、及び H24 年度に策定され、資源エネルギー庁のウェブサイトにおいてすでに公開されている全体計画[4]については印刷製本を実施し、関係機関等に配布を行った。

5.3 参考文献

[1] 資源エネルギー庁,（独）日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物及びＴＲＵ廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2006（2009 改訂版）

[2] 資源エネルギー庁,（独）日本原子力研究開発機構, TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画, 2006（2009 改訂版）

[3] 資源エネルギー庁,（独）日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2010

[4] 地層処分基盤研究開発調整会議, 地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度）, 2013

[5] 地層処分基盤研究開発調整会議, 地層処分基盤研究開発に関する全体計画【研究開発マップ】（平成 25 年度～平成 29 年度）, 2014