

## 「放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングに関する国際会議《MoDeRn 国際会議》」 参加報告

田辺博三\*1 鈴木圭\*1 須山泰宏\*2 須賀原慶久\*3

### 1 はじめに

MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure: 安全な処分場の操業と段階的閉鎖のためのモニタリングの開発)は, EU/ EURATOM (欧州連合/ 欧州原子力共同体) の第7次枠組みで実施されている国際共同研究プロジェクトの1つであり, 2009年5月にEU, 米国, スイス, 日本の12ヶ国, 18機関が参加して開始し, 以下の項目について共同研究を進めてきた。

MoDeRn プロジェクトの研究実施項目

- WP1 モニタリングの目的と戦略
- WP2 モニタリングの最新技術と研究開発
- WP3 モニタリング技術の原位置実証試験
- WP4 ケーススタディ (岩塩層, 粘土層, 結晶質岩)
- WP5 成果普及
- WP6 処分場モニタリングの参照フレームワーク

今回の国際会議「Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste (放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリング)」において, これまでの成果を発表し, 会議における意見などを踏まえて2013年10月に最終報告書を取りまとめる予定である。



MoDeRn 国際会議の様子

(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (以下, 原環センター) は, 経済産業省資源エネルギー庁の委託により 2000 年度から地層処分におけるモニタリングの意義や適用技術などについて調査研究を進めており, その一環として本プロジェクトにも参画している。今回参加した標記国際会議の概要を以下に報告する。

Report on “MoDeRn International Conference” by Hiromi TANABE (tanabe.hiromi@rwmc.or.jp), Kei SUZUKI, Yasuhiro SUYAMA, Norihisa SUGAHARA.

- \*1 (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター  
Radioactive Waste Management Funding and Research Center  
〒104-0052 東京都中央区月島 1-15-7
- \*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 岩盤・地下水グループ  
Kajima Corporation  
〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1
- \*3 坂田電機 (株) 技術部  
Sakata Denki Co., Ltd.  
〒202-0022 東京都西東京市柳沢 2-17-20

### 2 国際会議の概要

#### 2.1 開催期間, 参加機関など

- ・開催期間: 2013年3月19日(火)~21日(木)
- ・主催者など: EU/EURATOM の MoDeRn プロジェクトと EC (欧州委員会) が主催, OECD/NEA (経済協力開発機構/原子力機関) が支援
- ・開催場所: EU 会議室 (ルクセンブルグ大公国・ルクセンブルグ市)
- ・参加者: EU, 米国, スイス, 日本, 韓国などの実施主体, 規制機関, 大学, 研究機関, 民間企業, 非営利団体, 国際機関などから約135名参加。主な機関を次に示す。  
Andra (放射性廃棄物管理機関, フランス), Nagra (放射性廃棄物管理共同組合, スイス), SKB (スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社, スウェーデン), NDA (原子力廃止措置機関, 英国), POSIVA (フィンランド), RAWRA (放射性廃棄物処分機関, チェコ), STUK (放射線・原子力安全センター, フィンランド), ENSI (連邦原子力安全検査局, スイス), University of Antwerpen (アントワープ大学, ベルギー), ETH (スイス連邦工科大学, スイス), University of East Anglia (イースト・アングリア大学, 英国), DBE-Technology (ドイツ), NRG (オランダ), 原環センター (日本), SNL (サンディア国立研究所, 米国), AITEMIN (スペイン), Galson (英国), STORA (ベルギー), IAEA (国際原子力機関), European Commission, OECD/NEA など。

#### 2.2 発表テーマと概要

##### (1) オープニングキーノートと MoDeRn の概要報告

Nagra の Zuidema 氏よりオープニングキーノートとして以下が述べられた。

- ・MoDeRn プロジェクトではモニタリングの地層処分の段階的な実施への適用について, 技術的・社会的側面から検討してきた。
  - ・モニタリングは地層処分の長期安全性に関する現象について有益な情報をもたらすが, システム全体の性能を長期にわたってモニタリングするには限界もある。
  - ・モニタリング機器については開発段階にある。
  - ・モニタリングは技術と社会を結びつける重要な要素ではあるが, 長期安全性に関わる地層処分の挙動の確認行為については過度な期待をしてはならない, など。
- また, 過去25年間にわたるモニタリングに関する期待や目的の変遷についても言及した。

次に, プロジェクトの幹事機関である Andra の Solente 氏

より、MoDeRn プロジェクトの概要として以下が述べられた。

- ・プロジェクトは広く普及しているモニタリング技術の現状を把握し、目的を定め、地層処分の段階的な実施に近いレベルにモニタリング技術をレベルアップすることを目指してきた。
- ・モニタリングは操業安全と環境影響評価に深く関わり、操業および閉鎖に関わる許認可を判断する根拠を提供する。
- ・モニタリングプロセスに関わる事項、すなわち、何故モニタリングするのか？ どのようにモニタリングプログラムを発展させるのか？ モニタリング結果をどのように使用するのか？ 技術的要求事項・制約事項とは何か？ について検討した。
- ・技術開発の現状および原位置センサーについて検討した。
- ・モニタリングプログラムを立案するためのリファレンスとなる検討方法を完成させた。
- ・この検討方法は3つの岩種、すなわち岩塩層、粘土層、結晶質岩を代表としたケーススタディで検証した。
- ・社会学的研究では、関連するステークホルダーの参加によってモニタリングの理解を促進し、モニタリングが処分プロセスの許認可にいかに関与するのかを明らかにした、など。

## (2) 実施主体の展望: 処分場モニタリングのプログラムとケーススタディ

DBE Technology よりドイツの岩塩における地層処分のモニタリングのケーススタディ結果について、SNL より米国の WIPP (廃棄物隔離パイロットプラント) における性能確認プログラムについて、Andra よりフランスの可逆性のある地層処分場 (Cigeo) のモニタリング戦略について、SKB よりスウェーデンにおける使用済燃料処分場のモニタリングについて、NDA より英国の処分施設モニタリングプログラムの開発について発表があった。

## (3) モニタリングより幅広い展望 規制当局とステークホルダーの観点

ステークホルダーとして、University of Antwerpen より処分場開発と段階的閉鎖のガバナンスおよびモニタリングに関する異なる見解について、STORA (ベルギー) より利害関係者の観点について、Carlsbad Environmental Monitoring & Research Center (米国) より WIPP の環境モニタリングについて、CNRS (フランス国立科学研究センター、フランス) より政治的技術としてのモニタリングとデモンストレーションについて、NEA より深地層処分場の監視とモニタリングの役割—NEA の RK&M (記録, 知識, 記憶) プロジェクトにおける予備的な検討結果について発表があった。

また、規制当局として、IAEA よりドラフト安全指針「処分施設のモニタリングとサーベイランス」について、STUK よりフィンランドにおける使用済燃料地層処分場のモニタリングに関する規制当局の見解について、ENSI よりスイス

の規制枠組みにおけるモニタリングの要件について発表があった。

## (4) モニタリング技術—実現可能性と限界

機器と工学バリアに焦点をあてたデモンストレーションに関して、AITEMIN より処分場のための最新モニタリング技術の長期間の実験から得られた計装性能について、Andra よりビュール地下研究所における大規模原位置モニタリング区画試験の設計と開発について、Nagra より実規模人工バリアシステム/母岩システムにおける THM (熱-水-応力) 影響のモニタリング—モンテリ地下研究所の実規模定置試験の建設、換気段階の最初の経験について、Technische Universität Braunschweig (ブランシュバイク工科大学、ドイツ) よりシールド (密封用構造物) のモニタリング—モルスレーベン処分場 (ERAM) における試験立ち上げから得られた経験について発表があった。

モニタリング技術に関して、ETH より非侵入型地震探査手法による高レベル放射性廃棄物処分場のモニタリングについて、NRG よりベルギーの地下研究所 HADES における地下から地表への無線データ送信について、AITEMIN より高周波を用いた新しい無線データ送信システムの処分場における設計、開発および試験の結果について、IBeW-Ingenieurpartnerschaft (ドイツ) より岩塩における無線データ送信について、Euridice (粘土環境における放射性廃棄物処分のための欧州地下研究基盤) よりベルギーのスーパーコンテナの鋼製オーバーバックの腐食を評価するための小規模試験について、University Weimar (ワイマール大学、ドイツ) より地層処分場における湿度モニタリングのための空間時間領域反射法 (Spatial TDR) について発表があった。

## (5) ポスターセッション

原環センターから低周波電磁波の小型無線送信機とボアホール対応受信機の開発 (Andra との共同研究)、地層処分場の段階的な埋め戻し/シールドのための無線モニタリングシステムの開発、地層処分におけるモニタリングの基本的な要件と無線データ通信の役割について発表し、多くの質問を受けた。その他、参加機関よりモニタリングに関連するポスター発表があった。

各発表に引き続き、会議参加者は3つのグループに分かれてワークショップ1と2を行い、モニタリングに関する個別テーマについて討議を行った。以下に主な意見を示す。

### (6) ワークショップ1

#### ① ワークショップ1-1: いかにしてモニタリングするか? 実現可能性と限界

- ・無線モニタリング技術 (高周波, 低周波) に関して以下の議論があった。
  - ・送信距離や電源寿命などの点で実用化にはまだ課題が多い。
  - ・ネットワークにより地上まで送信できる。
  - ・スイスのようなパイロット施設であれば送信距離は

10メートル程度でよい。

- ・金属部材があると送信に影響する。
- ・送信距離が長ければ処分場のレイアウトやアレンジにフレキシビリティが持てる。
- ・高周波，低周波のいずれの技術も課題が多くさらなる開発が必要である，など。
- ・センサーとして多くの国で実証している光ファイバセンサーについて耐久性が議論され，温度，化学，放射線，水素ガス拡散などの影響が指摘された。また，光ファイバセンサーは1990年代からダムで使われており十分な実績があるとの意見もあった。
- ・その他のシステムとして，非侵入型モニタリング，地球物理的（隆起，地温）モニタリング，深いボーリング孔を用いたトモグラフィ技術などが議論された。
- ・電源寿命を長期化することについて，以下の議論があった。
  - ・高レベル放射性廃棄物（HLW）の熱や放射線の利用，宇宙空間で利用されているプルトニウム電源の利用などの可能性がある。
  - ・放射線源や核分裂利用は処分場のセーフティケースに影響しないかとの意見が出たが，放射線源利用については処分場全体のインベントリからみれば問題がないのではないかと，といった意見も出された。
  - ・バッテリーについては他分野での開発を待てばよいので，課題とは思われないという意見も出た。

## ② ワークショップ 1-2：何故モニタリングするか？原動力は？

- ・主要な目的は「安全性に関するもの」であり，他には「実施における最適化」，「費用の効率化」，「透明性」，「将来世代への責任」および「段階ごとに原動力が異なり，目的は時間軸に依存する」などがあげられた。
- ・すべての目的をカバーするには広義なモニタリングの定義が必要である（長期安全性だけでなく，環境モニタリングや作業安全に関わるモニタリングも含める必要がある）。
- ・モニタリングの計画について，将来のためにも，なぜモニタリングをしないかということも重要となる。また，モニタリングの計画立案においては実践的であることが重要であり，実際に計測できるパラメータのみ抽出すべきである。

## ③ ワークショップ 1-3：いつ，どのくらい長期にわたってモニタリングするか？

- ・閉鎖後のモニタリング期間について，IAEA 文書ではある一定の期間（for certain period of time）というあいまいな表現を使っている。一方，NEA/IGSC（Integration Group for the Safety Case）では閉鎖後モニタリングは可能であろう（It seems possible that a target should be monitored for the post-closure.）と表現しており，しなければならないということではない。
- ・モニタリングの意義について，NEA/IGSC は社会的容認を確実にすること（to assure societal acceptance）であり，常に監視するというコンセプトを“Oversight（監視）”という言葉で表現している。これは記録が保存される限り

継承しなければならないという意味も含んでいる。

- ・モニタリング開始後100年程度は実施すべきという意見もあるが，センサー機器自体が100年間も耐えられず技術の限界もある。
- ・モニタリングは地層処分施設内や岩盤内，地表でも行われる。地表で行う環境モニタリングは閉鎖に関係なく継続できる。問題は，地下施設内，とくに廃棄物の近傍であることを理解すべきである。
- ・モニタリングは閉鎖するまで行うべきで，それ以降は，処分場の環境を維持していくためにいっさいの機器を処分場内に残さないことが望ましい。
- ・次世代が閉鎖後のモニタリングは必要であると判断した場合にはどうするのか？後から孔を掘ってセンサーを配置するのか？
- ・処分施設を建設する場合は，事前に処分施設と同じような環境でモニタリングすることが望ましい。実際の廃棄物ではなく模擬廃棄物を使えば，人間が近づいて確認することもできる。
- ・How long? という質問は，何を，何のために，どこで測定するのかということと密接に関係している。
- ・処分場に人の手が入る前にモニタリングを開始し，ベースライン条件を構築するとともにベースラインモニタリングを継続すべきである。これによって，建設中や操業中のデータと比較することが可能になる。

## (7) ワークショップ 2

### ① ワークショップ 2-1：結果をどのように利用するか？モニタリングとガバナンス

- ・ガバナンスという言葉の認識は専門家によって異なり，以下の意見があった。
  - ・支配や管理を意味し，例えばサッカーチームのルールや審判のようなものである。
  - ・許認可のようなものである。
  - ・フレームワークにもとづいた地域コミュニティの承認である。
  - ・継続的な仕組みであるが定期的な見直しと柔軟性を有しているものである。
  - ・国際的な階層構造であり，IAEA，EU，国などである。
  - ・安全性を確実なものにする規制当局である。
  - ・単に地域自治体ということではなく全体としての社会自体である。
- ・モニタリングによるガバナンスのために必要な事項について以下の議論があった。
  - ・目標と要求事項を定義すること。
  - ・モニタリングの結果を評価し対応を決めること。
  - ・処分プログラムへの影響を検討すること。
  - ・モニタリングの継続，終了を判断すること。
- ・モニタリングプログラムで配慮すべき事項について以下の議論があった。
  - ・ガバナンスを定義すること。
  - ・誰が参加すべきか明らかにすること。
  - ・誰が責任者か明らかにすること。
  - ・独立性をいかに維持するかを明らかにすること。

- ・地層処分は長期間にわたっており、異なる段階と時間軸のモニタリングへの影響を考慮すること。
- ・その他、以下の意見があった。
  - ・モニタリング結果の利用については随時新しい情報を使用すること。
  - ・詳細な調査により情報はサポートされる必要がある。
  - ・処理した情報と生データと解釈の関係を明らかにすること。
  - ・モニタリング機器の交換頻度を明らかにすること。
  - ・終了する時期を明らかにすること。
  - ・意思決定へのインプットとして利用できること。
  - ・予期せぬ結果がでた場合の取り扱いに関し、あらかじめ対応するための計画を策定しておくこと（事前にトリガーを設定すべき、1つだけのパラメータで安全性を確保するわけではないので、その取扱いについては事前に合意が必要、など）。
- ② ワークショップ 2-2：誰が関与するのか？役割と責任
  - ・誰がモニタリングするのかに関しては、実施主体がモニタリングし、規制機関は実施主体のモニタリングをモニタするとの意見が出た。また、信頼確保のためにどのような追加のメカニズムが必要かについては、例えば、独立 (independent) 機関によるモニタリング、国際指針 (規制ではなく)、積極的なステークホルダーの関与 (active stakeholder engagement) が重要であるとの意見が出た。
  - ・また、以下のトピックスについてさまざまな意見が出された。
    - ・誰が関与する必要があるか；政府、地方自治体の役割 (記録保存も含む)、規制機関、国際的な役割 (例、記録アーカイブ) が重要である。
    - ・独立性の確保、維持について；真の独立性を定義することの困難さや、政治的・資金的な観点での独立性も考慮されるべきことを認識すべきである。独自の興味を持つさまざまな団体がパートナーとなり得る。独立性は、あなたは誰を信じるかというほど重要ではない。
    - ・時間軸の影響；長期の時間軸における信頼性と、人々が情報を取り扱うノウハウの維持が必要である。しばしば記録が失われてゼロからスタートする必要性があり、これを防ぐために 5 年ごとにレビュー・アップデートすることが必要である。興味や知識が失われるリスクがある。将来社会に対して言語や意味を埋め込むことなどについてさらなる検討が必要である。
    - ・情報の処理；新たな情報はすべてのパーティが理解できるように文脈の中に入れる必要がある。データの可視化が必要である。後で吟味できるように、情報はすべてのデータによって支援されるべきである。データと導かれた結論が説明されるべきである。重要なものとそうでないものを区別すべきである。組織構造のよりよい定義が必要である。
    - ・いつ終了するか；閉鎖の意思決定時にシステムが期待通りに動いていることを全面的に信頼されない限り閉鎖はできない。規制機関および／あるいは政府と終了する意思決定を行う時であり地方自治体が賛成することが必要。意思決定によってモニタリングの内容が変わる可能性を認識すべきである (例えばニアフィールドから地表ベースに)。他のモニタリングが終わっても環境モニタリング (地下水／気相中への放出) は継続する可能性がある。急に終了するというよりも徐々に終了するという観点も重要である。
- ③ ワークショップ 2-3:何をどこでモニタリングするか？
  - ・何をモニタリングするかに関し、以下の意見が出された。
    - ・予期しない事象 (unexpected event) の取り扱い；「予期しない」とは、完全に予期していないことではないか。緊急時対応計画 (contingency planning) が備えられすべてのパーティによって理解されるべきである。トリガレベルの設定とアラームシステムが必要である。セーフティケースに関連する 1つだけのパラメータで判断する困難さを認識すべきである。セーフティケースは保守的になるようにとりまとめたものである。最初のステップは話し合い、分析し、アクション計画に同意するなどが必要になる。対応する時間軸も 1つの要因である (例えば、アッセ山)。自治体の参加や情報の透明性は重要だが、課題は文脈の中で述べるべきである。
  - ・何をモニタリングするかに関し、以下の意見が出された。
    - ・モニタリングはサイトのプロセスを代表する FEP (Feature (特質), Event (事象), Process (プロセス)) のうちキーとなるパラメータに絞ること、性能評価モデルのサポートを受けること、不確実性、感受性をチェックすること。
    - ・ベースライン条件を測定するために建設前に開始すること。
    - ・生物圏への放射能の放出 (あるいはゼロ放出) を確認すること。
    - ・結果に対応する計画や開始するトリガレベルをあらかじめ確認しておくこと。
    - ・安全機能 (セーフティケースのキー要素) に関する工学バリアシステムの性能を確認すること。
    - ・パイロット施設での経験にもとづき柔軟性を持つこと (研究開発のためのモニタリングと実施のモニタリングは分けて考えること)。
    - ・他の産業 (有害廃棄物) から学ぶこと。
    - ・コストに制約されないこと。
  - ・どこで行うかに関しては、以下の意見があった。
    - ・モニタリングは局所のおよび地域的なスケールで行うこと。
    - ・処分場全体ではなく、代表する小規模のエリアで行うこと。
    - ・代表性の定義を行うこと。
    - ・シールの外で行うこと (安全性を損なわないこと)。
  - ・その他の議論で出された意見を以下に示す。
    - ・回収について  
ドイツでは 1960 年代から 1970 年代に掛けて、約 126,000 体の低・中レベル廃棄物処分がアッセ II 研究

鉱山において試験的に行われたが、地下水浸入により岩塩坑道の安定性が確保できないという理由で、現在回収計画が進められている。取り出すのがいいことなのか？何がリスクなのかを考える必要がある。

・信頼性について

モニタリングは、市民に対するコンフィデンスビルディング（信頼感の醸成）に貢献する。

（市民代表）社会の責任も明確にすべきである。閉鎖後は納税者が対応するという事を明確に述べるべきである。

### (8) 国際会議の結論

会議全体のラポータである英国の Hooper 氏より、会議のとりまとめとして以下が述べられた。

- ・今回の国際会議は MoDeRn プロジェクトの成果を実際に理解する格好の機会であった。
- ・口頭発表やポスターを通じてモニタリング技術の現状を把握することができ、モニタリングやセンサー技術が日々進歩している状況であることを理解できた。
- ・各国によってサイトが決まっている場合、岩種が異なるケースなどさまざまであるが、モニタリング戦略を事前に策定しておくことは重要であり、MoDeRn がそれを先取りして、それぞれの国の状況に応じたモニタリング計画の進め方を提示した意義は大きい。
- ・何を？いつ？どのように？モニタリングするかということは、モニタリング戦略を立てる場合の基本であり、これを規制機関、実施機関のみならず、市民が理解することが重要であり、技術と社会学を融合させた意義は評価できる。
- ・特に、閉鎖後モニタリングについてはさまざまな意見があり、何を測定するのかということをお問わなければならないが、現在のモニタリング技術には、限界があることも分かった。
- ・今後、このような限界を一步步克服していくためには、技術者、科学者の更なる研究・開発が必要であり、それらを市民にも理解できるように公開していく必要があるなど。

最後に、この成果に貢献した 8 実施主体を含む 12 ヶ国から参加した 18 名のパートナーに、賛辞が送られた。

### 3 おわりに

地層処分は長期にわたるプロジェクトであるため、各国において、いかに公衆から信頼を得るか？ そのためには何をすべきか？ という観点で活発な議論が行われている。その中で、モニタリングは地層処分システムの性能確認の役割を担っているため、ステークホルダーの安心感の醸成に不可欠な“ツール”であると考えられている。

原環センターでは MoDeRn プロジェクトにおける各国の検討成果を踏まえ、我が国の地層処分におけるモニタリングのあり方を検討し、規制側と実施側のモニタリングに関する検討の基礎となる情報・知識を整備していきたいと考えている。また、本国際会議においても、原環センターで開発を進めている地中無線によるモニタリング技術は、地

層処分における重要課題の1つと認識されている。MoDeRn プロジェクトは本国際会議の結果を反映した報告書を取りまとめ 2013 年 10 月で終了する予定である。現在、EU では地層処分の実施に向けた R&D を強化することを目的として 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）を設立し議論を進めている。その中で、モニタリングも戦略的研究課題の1つに取り上げられており、MoDeRn の成果を受けて、今後の取り組みが協議される予定である。原環センターでは、引き続き国内外の機関と連携して開発を推進し、わが国の地層処分に役立てていきたいと考えている。

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託による平成 24 年度「高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発」の成果の一部である。

### 参考資料

MoDeRn プロジェクトと IGD-TP については次の HP を参照されたい。

MoDeRn ; <http://www.modern-fp7.eu/>

IGD-TP ; <http://www.igdt.eu/>

また、MoDeRn 国際会議の発表資料は次の HP からダウンロードできる。

<http://www.modern-fp7.eu/monitoring-gdrw-2013/download-section/presentations-and-abstracts/>

