

沿岸域プロジェクト

—関係機関における議論の内容と得られた成果の概要—

Project of Coastal Site Characterization
—Summary of Discussions among the Relevant Partners
and the Dominant Results of R&D in the Project—

(編) 笹本 広

(Ed.) Hiroshi SASAMOTO

地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

May 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

沿岸域プロジェクト
－関係機関における議論の内容と得られた成果の概要－

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット

(編) 笹本 広

(2014 年 2 月 21 日 受理)

本報告では、平成 19 年度～平成 24 年度までの 6 年間にわたり実施された沿岸域プロジェクトについて、プロジェクトに関係した各機関による連携・協力の枠組みや各機関が参加する全体会議で議論された内容等を中心に整理した。

また、沿岸域プロジェクトにおける議論も踏まえ、各関係機関により実施された調査・評価により得られた成果の例や、得られた成果の体系化に向けた取り組みの例について、その概要をまとめた。

沿岸域プロジェクトにより、幌延の沿岸域における調査・評価を通じて得られた成果は、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発において、沿岸域を対象とした調査・評価技術の体系化や沿岸域における研究開発要素の研究成果の統合に係る一例として整備された。

Project of Coastal Site Characterization
—Summary of Discussions among
the Relevant Partners and the Dominant Results of R&D in the Project—

(Ed.) Hiroshi SASAMOTO

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received February 21, 2014)

A project of coastal site characterization was performed with the project partners for 6 years from the fiscal year 2007 to 2012. This report summarized a frame-work for cooperation among the project partners and the summary of discussions through the project meetings.

Additionally, the followings were also presented in this report considering the discussions in the project; examples of products obtained through development of investigation and evaluation techniques for coastal site characterization and the current status for integration of R&D products.

A challenge performed through the project of coastal site characterization at Horonobe area could be a representative example for development of methodology to summarize the existing investigation and evaluation techniques, and to integrate the various products obtained in the coastal site investigations, from the view point of R&D for the management of high-level radioactive waste in Japan.

Keywords: Coastal Site, Characterization, Horonobe, R&D, Waste Management

目 次

1. はじめに	1
2. 沿岸域プロジェクトにおける目標と研究開発課題	4
3. 沿岸域プロジェクトの工程	4
4. 各年度における検討項目・検討内容	9
4.1 平成 19 年度における検討項目・検討内容	9
4.2 平成 20 年度における検討項目・検討内容	11
4.3 平成 21 年度における検討項目・検討内容	13
4.4 平成 22 年度における検討項目・検討内容	14
4.5 平成 23 年度における検討項目・検討内容	16
4.6 平成 24 年度における検討項目・検討内容	16
5. 本プロジェクトを通じて得られた成果の例	18
5.1 沿岸域を対象とした調査・評価技術の整備	18
5.2 得られた成果の体系化に関わる取り組み	25
6. おわりに	33
謝辞	33
参考文献	34

Contents

1. Introduction	1
2. Goal and R&D subjects for the project of coastal site characterization.....	4
3. Schedule for the project of coastal site characterization	4
4. Discussion items and contents for each fiscal year	9
4.1 Discussion items and contents for the year 2007	9
4.2 Discussion items and contents for the year 2008	11
4.3 Discussion items and contents for the year 2009	13
4.4 Discussion items and contents for the year 2010	14
4.5 Discussion items and contents for the year 2011	16
4.6 Discussion items and contents for the year 2012	16
5. Examples of R&D products obtained through the project	18
5.1 Development of investigation and evaluation techniques for coastal site characterization	18
5.2 Challenges for integration of R&D products	25
6. Summary	33
Acknowledgements	33
References	34

表リスト

表 1	沿岸域プロジェクトにおける主な調査項目と工程	5
表 2	概要調査段階に求められると考えられる地下水の流動特性に関わる情報の例と それに対する地下水年代測定技術の適用による評価の例	23
表 3	沿岸域を対象とした調査・評価に必要な情報とそれらの情報の取得にあたっての 一般的な技術的課題	27
表 4	幌延の沿岸域を対象とした重要な調査対象および主要な技術的課題	31

図リスト

図 1	沿岸域プロジェクトにおける関係機関の連携・協力に関わる枠組み	3
図 2	幌延の沿岸域において行われた主な調査箇所の概略の位置	6
図 3	浜里地区で行われたボーリング孔の配置図	7
図 4	沿岸域における地質構造・断層や塩淡水境界等を調査するための物理探査手法 の適用概念の例	18
図 5	幌延沿岸域における物理探査測線	19
図 6	幌延沿岸域の MA11 ラインにおける海域接合の比抵抗構造のモデル図	19
図 7	幌延沿岸域におけるボーリング調査結果の一例	20
図 8	幌延の沿岸域における DD-1 孔で得られた地下水に基づく地下水年代の評価結果の一例	21
図 9	地下水の年代測定技術とその適用結果	22
図 10	地下水年代測定技術の適用方法の概念	23
図 11	幌延沿岸域を対象とした地形・地質構造の変遷モデルの例	24
図 12	幌延沿岸域を対象とした海水準・地下水涵養量の変動を考慮した 長期的な地下水流動の解析例	25
図 13	次世代型サイト特性調査情報統合システム（ISIS）の全体構成	26
図 14	沿岸域を対象とした場合の統合化データフローダイヤグラム	29
図 15	幌延の沿岸域を例にした地質環境調査の手順整備の例	33

This is a blank page.

1. はじめに

わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分計画を進めていく上では、地層処分の技術的信頼性を更に高め、実際の処分事業や安全規制の基盤となる技術を確立していくための研究開発を着実に進める必要がある。

このため、経済産業省資源エネルギー庁では、地層処分の研究開発を全体として計画的かつ効率的に進め、処分実施主体や国の安全規制への効果的な成果の反映がなされるよう、地層処分研究開発に係る関係研究機関の連携の強化も念頭に、体系的かつ中長期的な視点で研究開発計画を検討・調整するため、「地層処分基盤研究開発調整会議（以下、調整会議と略す）」を平成 17 年 7 月に設置した¹⁾。調整会議では、平成 16 年度に策定された「研究開発全体マップ」をベースに、大学等有識者からの意見やレビューを踏まえ、「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（以下、全体計画と略す）」を策定した¹⁾。以下、全体計画¹⁾での記述をもとに、本報告である「沿岸域プロジェクト」の実施に至る経緯をまとめる。

全体計画では、地層処分基盤研究開発の進め方として、柔軟性と具体性の確保を念頭に、第 2 次取りまとめ以降、5 年程度を 1 つの節目として捉え、段階的な研究フェーズ（フェーズ 1：平成 17 年頃まで、フェーズ 2：平成 22 年頃まで、フェーズ 3：平成 20 年代後半頃まで）を設定し、研究開発が展開されている。

地層処分研究開発の基盤研究開発は、「地質環境調査評価技術」、「処分場の工学技術」、「性能評価技術」の 3 分野に分けて研究開発が進められている。このうち、「地質環境調査評価技術」については、フェーズ 1 において、「地質環境特性」、「地質環境の長期安定性」および「深地層の工学的技術の基礎の開発」の 3 つの分類で進められた。フェーズ 2 以降は、フェーズ 1 で「地質環境特性」の細目の 1 つであった「総合的な調査評価技術」を新たな分類として位置づけ、「総合的な調査評価技術」、「地質環境特性調査評価技術」、「地質環境の長期安定性調査評価技術」および「深地層における工学技術」の 4 分類の構成とされた。

フェーズ 2 における「総合的な調査評価技術」では、細目として「多様な地質環境を対象とした調査評価技術」と「特定の地質環境を対象とした調査評価技術（結晶質岩、堆積岩、沿岸域）」が設定された。前者は、わが国の多様な地質環境を対象に網羅的・概括的な視点で調査評価技術の体系的整備を目指し、後者は、深地層の研究施設計画など、特定の地質環境を対象とした調査や解析を通じて、地質環境を総合的に理解しつつ、調査評価技術の信頼性確認と体系化を目指すこととなっている。このうち、後者における沿岸域（海岸線付近の陸地から浅海域までを含む）の地質環境については、内陸地域に比べて調査の実績が少なく、また海水の影響や塩淡水境界の分布を考慮する必要があるなど、研究開発の余地が大きいと考えられた。

調整会議では、フェーズ 2 における沿岸域を対象とした研究開発の課題や進め方を整理するにあたり、地質環境ワーキンググループにタスクフォースを設け、「地質環境特性調査評価技術」とあわせて、現状の技術レベルなどを確認するとともに、段階的にサイトの調査評価を進めるための体系的な方法論の確立を目指した今後の研究開発の進め方や具体的な課題を検討した。

その結果、基本的には既存技術の適用により内陸域と同様の調査が可能と考えられるが、沿岸域については調査の実績や経験的な知識が少ないため、現象の理解および技術の体系化の観点から以下のような取り組みが重要であるとの結論に至った。

- 調査評価技術の体系化に向け、フィールド調査における一連の方法論と関係づけて個々の技術の適用性を評価していく。
- 上記の調査結果などを活用しつつ、地下水流動、地下水年代、水質形成メカニズムの総合的な解釈を通じて、沿岸域における地下水環境（場）の理解を進める。
- 地下水流動については、内陸域と同様の水理地質構造（断層などの不連続構造、低透水性構造）や動水勾配などに加えて、塩淡水境界や海底湧水を把握するための調査技術の整備を進める。

以上を踏まえ、フェーズ2においては、幌延深地層研究計画の活用も視野に入れて、海域から陸域までを包含した地質環境を対象に、沿岸域特有の地質環境特性に関する知見を蓄積しつつ、調査評価技術の信頼性向上と体系化を進めていくこととなった。

上述したような全体計画の流れを受け、資源エネルギー庁は、平成 19 年度より、「これまで資源エネルギー庁で実施してきた要素技術開発を発展的に組合せつつ、沿岸域を対象とした地質環境調査評価技術の体系的実証試験を北海道幌延町の沿岸域などをフィールドとして活用し、実施する」との方針を定めた²⁾。

これを受けて、平成 19 年度から、資源エネルギー庁の委託事業のうち、沿岸域を対象とした調査・評価技術に関わる事業の受託機関が相互に連携・協力し、効果的・効率的に事業を進めるための枠組みとして「沿岸域プロジェクト」が開始された。沿岸域プロジェクトは、下記に記した関連する資源エネルギー庁からの委託事業の一部¹⁾が終了する平成 24 年度まで継続して行われた。

- ① 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発：地下水年代測定技術の適用（受託先：電力中央研究所、以下「電中研」と略す）
- ② ボーリング技術高度化開発：コントロールボーリング技術の適用（受託先：電中研）
- ③ 地質環境総合評価技術高度化開発：全体計画の策定、体系的な成果の取りまとめ手法の検討（受託先：日本原子力研究開発機構、以下「原子力機構」と略す）
- ④ 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発：物理探査、ボーリング調査の適用による塩淡水境界・断層などの総合評価手法の構築（受託先：産業技術総合研究所、以下「産総研」と略す；原子力環境整備・資金管理促進センター、以下「原環センター」と略す）

沿岸域プロジェクトにおける関係機関の連携・協力に関わる枠組みを図 1 に示す。沿岸域プロジェクトでは、プロジェクト全体の目標や計画を共有し、各事業の受託機関がプロジェクト内における役割を認識し、プロジェクトへの反映を念頭に実施内容を最適化していくことが必要である。このため、各機関が参加する全体会議において、調査計画や個別技術の開発方針等を議論し、必要に応じて全体計画や受託事業における個別の技術開発の内容の見直し等を進めた²⁾。なお、上述した各委託事業の特徴を勘案し、各事業の受託機関は、概略、以下のような担当を担った。

¹⁾ 地質環境総合評価技術高度化開発および沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発の事業については、平成 24 年度で終了した。

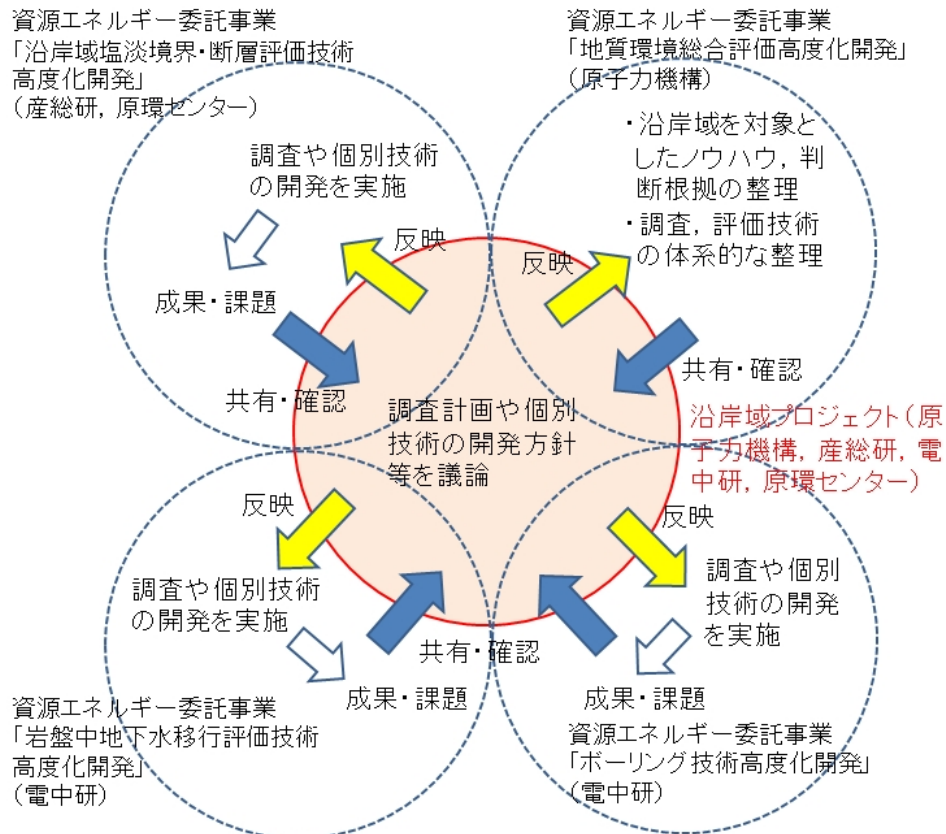


図1 沿岸域プロジェクトにおける関係機関の連携・協力に関わる枠組み

- 地質環境総合評価技術高度化開発²を受託した原子力機構は、沿岸域プロジェクトにおける全体計画の素案検討や全体会議の運営等を担当
- 電中研、産総研および原環センターは、原子力機構との共同研究契約に基づき調査研究を担当

本報告書では、沿岸域プロジェクトにおける各機関が参加する全体会議での議論・調整の内容や、それらを踏まえた方針検討等の内容をもとに、沿岸域を対象とした調査・評価を進める上で留意すべき事項等を整理した。また、各機関が実施した委託事業の成果をもとに、沿岸域プロジェクトにおける全体会議での議論を踏まえ、各事業において得られた成果の具体例の概略をまとめた。

² 原子力機構が受託した「地質環境総合評価技術高度化開発」の事業では、地質環境調査のマネジメントや説明に使用できるコンピュータツールの開発および知識・事例のデータベース化を目標とした次世代型サイト特性調査情報統合システム：ISIS (Information Synthesis and Interpretation System) が開発された²⁾。

2. 沿岸域プロジェクトにおける目標と研究開発課題

沿岸域プロジェクトにおける目標としては、全体計画¹⁾のフェーズ 2 において記された沿岸域を対象とした研究開発の課題や進め方に基づき、「海域から陸域までを包含した地質環境を対象に、沿岸域特有の地質環境特性に関する知見を蓄積し、調査・評価技術の信頼性向上と体系化を進める」ことが設定された²⁾。

上記の目標に対し、沿岸域プロジェクトでは、地上からの調査・評価を含めた研究開発として以下のような課題を列挙し、進められた²⁾。

- 既存の技術や知見、幌延や瑞浪の深地層の研究施設計画で整備された地上からの体系的な調査・評価技術および統合化データフローダイアグラム³⁾等を活用し、一連の調査・評価の考え方を体系的に整理する。
- 沿岸域のフィールドにおいて、地震波および電磁波を用いた物理探査やボーリング調査等を効果的に組合せ、各々の調査・評価技術の適用性を確認するとともに、その高度化を図る。これにより、沿岸域の塩水と淡水の混在する場における地下水流動や水質形成・変化、その時間変遷等に関する理解を深めるとともに、この様な場に対する調査・評価技術を整備する。
- 沿岸域のフィールドにおいて、地下水流動と地下水年代を関連付けて評価する手法や、ボーリング孔内で各種調査を組み合わせたコントロールボーリング技術の開発、海底における地下水湧水の探査技術の適用性確認等を行い、沿岸域に特徴的な現象や地質環境条件に関する知見を拡充するとともに、調査・評価技術の信頼性向上を図る。
- 沿岸域を対象とした一連の調査・評価技術の適用性確認や信頼性向上等の研究開発成果を統合するとともに、設計・性能評価の観点から、沿岸域における体系的な調査・評価技術の方法論を構築する。

3. 沿岸域プロジェクトの工程

沿岸域プロジェクトは、資源エネルギー庁の委託事業をベースとして進められ、平成 19 年度から、全体で 5 年程度の期間を想定し、進められた。その間、平成 23 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生し、その影響により、平成 23 年度の委託事業の一部では、事業規模が縮小される等の影響が生じ、資源エネルギー庁の委託事業が 1 年間延長された。このため、沿岸域プロジェクトも 1 年間延長し、平成 24 年度までの計 6 年間にわたり実施された。表 1 に沿岸域プロジェクトにおける主な調査項目と工程を示す。また、図 2 は、沿岸域プロジェクトに関連して、幌延の沿岸域において行われた主な調査箇所の概略の位置を示し、図 3 は、浜里地区で行われたボーリング孔の配置図を示した。

³⁾ 統合化データフローダイアグラムとは、個別目標と課題を達成するための「調査」から「モデル化・解析」までの合理的な道すじを示したものである。たとえば、地質環境調査による結果を安全評価や設計に反映するための合理的な調査項目の組み合わせ方や、調査から解析、評価までのデータの流れを整理したものである³⁾。

表1 沿岸域プロジェクトにおける主な調査項目と工程

調査項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度
既存情報調査・整理	J					
陸域: 物理探査(電磁探査)	A	R	A			
海域: 海上物理探査		R	A	A	A	
陸域: 物理探査(反射法地震探査)		C	A			
陸域: ボーリング調査(鉛直孔)	A	R	A	A		A
年代測定技術開発		C	C	C	C	C
コントロールボーリング技術開発*	C	C				
地下水流動解析			A, C, J	A, C, J	A, C, J	A, C, J
地質環境調査評価情報の分析・整理	J	J	J	J	J	J

A: AIST(産総研), C: CRIEPI(電中研), J: JAEA(原子力機構), R: RWMC(原環センター)

*幌延沿岸域における候補地選定の検討まで

既存情報調査・整理については、沿岸プロジェクトの初年度（平成19年度）において、原子力機構が中心となり実施された²⁾。

陸域における物理探査（電磁探査）としては、平成19年度は、産総研により、MT/AMT法⁴⁾およびTME⁵⁾法を用いて、陸域における深度数km程度までの比抵抗値による地下水の塩分濃度の分布の概略が推定された⁴⁾（図2の①の箇所）。平成20年度には、原環センターにより、MT/AMT法およびCSEM/CSAMT⁶⁾法を用いて、陸域および海岸線から10km程度の海域を対象に地質構造と比抵抗値による地下水の塩分濃度の分布の推定が行われた⁵⁾（図2の②の箇所）。平成21年度は、産総研により、陸域および海域を対象にMT/CSEM法を用いた探査が行われた。陸域の探査では、これまでに実施された電磁探査の測線の間および周辺に、従来の測線とほぼ平行な測線を配置した二次元探査により、地質構造や比抵抗値の詳細が調査された⁶⁾（図2の③の箇所）。海域での探査では、海域用測定器の現地への適用性確認を目的とした予備調査が行われた。平成22・23年度には、産総研により、海岸線から8km程度の海域を対象に海域での電磁探査が行われた⁷⁾（図2の④の箇所）。探査測線は、平成19年度に実施された陸域での電磁探査用の2本の測線を海域に延長する形に配置され、陸域と海域を接合して解釈できるような調査が試みられた。

⁴⁾ MT/AMT (Magneto Telluric /Audio-frequency Magneto Telluric) 法とは、自然電磁波により誘導された電場と磁場を計測することにより、地下数十mから数十kmまでの比抵抗構造を推定する電磁探査法の1つである。

⁵⁾ TEM (Transient Electro Magnetic) 法とは、地表に設置したループ状のケーブルに直流電流を流し、人工的に電磁場を生成させた後、その電流を急激に遮断することで地下に渦電流を発生させ、その渦電流の拡散する様子を地表に設置した磁力計により測定し、地下の比抵抗構造を推定する電磁探査法の1つである。

⁶⁾ CSEM/CSAMT (Controlled Source Electro Magnetic /Controlled Source Audio-frequency Magneto Telluric) 法とは、自然電磁場を利用したMT法を応用したもので、人工送信源を用いて、浅部における地下の比抵抗構造の探査精度を向上させた電磁探査法の1つである。



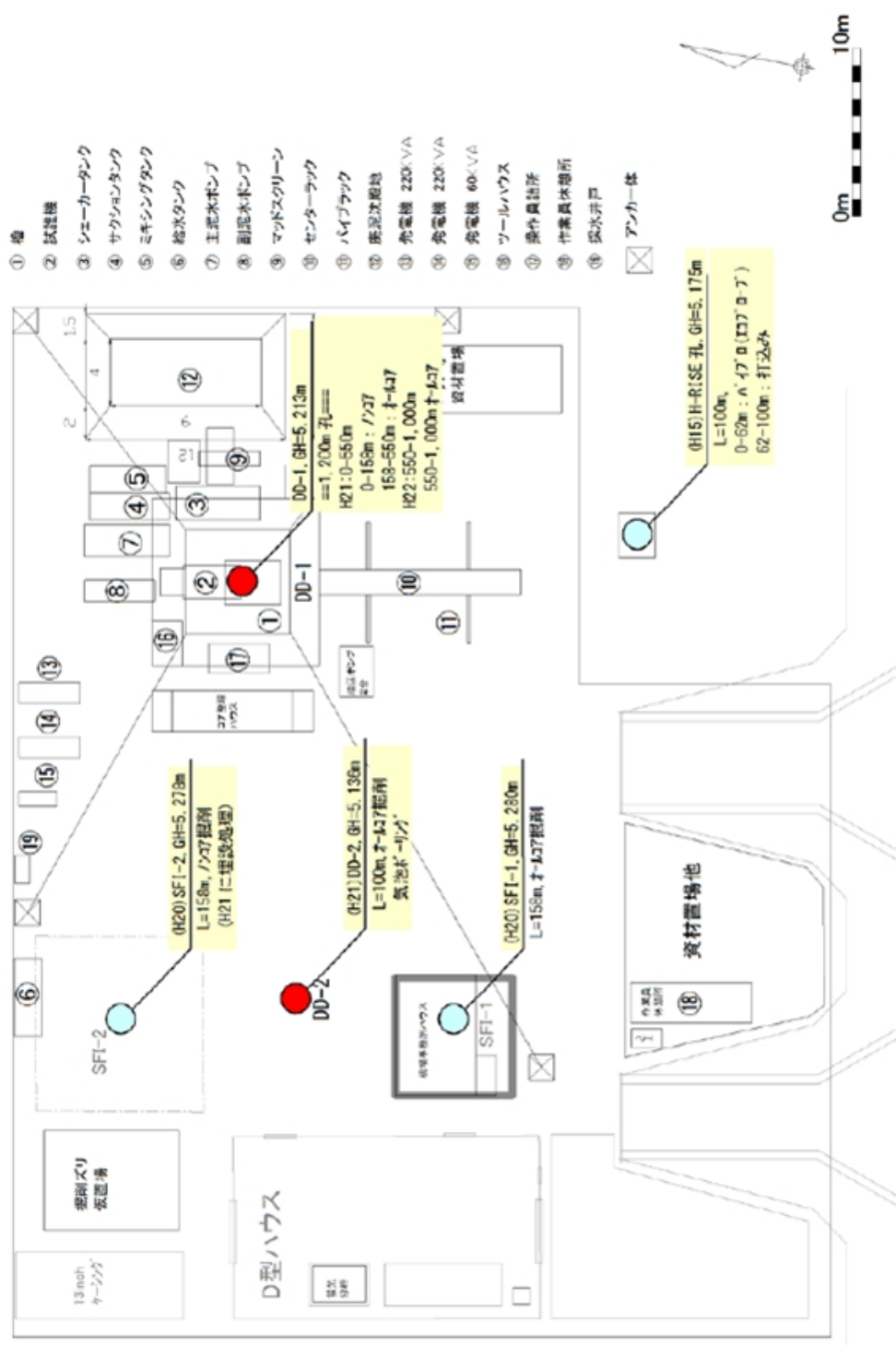


図3 浜里地区で行われたボーリング孔の配置図(産総研⁹⁾の図の一部を改変)

陸域における物理探査（反射法地震探査）としては、平成 20 年度に幌延沿岸域におけるコントロールボーリング孔の掘削計画の検討を目的とし、電中研により、サロベツ背斜付近における深度 1km 程度を対象とした地質構造の推定が行なわれた⁸⁾（図 2 の⑤の箇所）。平成 21 年度は産総研により、浜里地区におけるボーリング調査箇所からサロベツ断層帯までの深度 2km 程度を対象とした反射法地震探査や、深度 100m 程度を対象とした S 波反射法地震探査が行われた⁶⁾（図 2 の⑥の箇所）。

陸域におけるボーリング調査（鉛直孔）としては、幌延町の沿岸域に位置する浜里地区において、平成 19 年度に産総研によるボーリング調査の準備が進められ⁴⁾、平成 20 年度は、原環センターによる浅層ボーリングの掘削（SFI-1 および SFI-2 孔：各々、深度 158m）による調査が行われ⁵⁾（図 3 参照）、平成 21 年度～平成 24 年度にかけては、産総研により、深層ボーリングの掘削（DD-1 孔：深度 1200m）および浅層ボーリングの掘削（DD-2 孔：深度 100m）による調査が行われた^{6), 7), 9), 10)}（図 3 参照）。深層ボーリングの掘削では、平成 21 年度に深度 550m まで掘削⁶⁾、平成 22 年度は深度 1000m まで掘削延伸⁷⁾、平成 24 年度には深度 1200m まで掘削延伸¹⁰⁾された。また、この深層ボーリングを用いて、平成 24 年度には push-pull 試験等の水理試験が行われた¹⁰⁾。

地下水年代測定技術としては、平成 20 年度～平成 24 年度にかけて、電中研により、浜里地区でのボーリング調査で得られた地下水や岩石コアからの抽出水を対象に、³⁶Cl 法や ⁴He 法を適用し、地下水の年代測定が行われた^{11)~15)}。

コントロールボーリング技術については、電中研により、サロベツ断層帯や幌延沿岸域で調査可能な海域も対象に含めたコントロール掘削技術の適用性確認のための候補地選定（図 2 の A の箇所）について検討が行われたが、岩盤強度等の観点から計画は断念された。一方、電中研では、上幌延地区において平成 18 年度より、陸域を対象としたコントロール掘削技術の適用性確認のための掘削（HCD-3 孔）を実施していた¹⁶⁾。このため、コントロールボーリング技術については、HCD-3 孔を用いた継続調査が実施され、深さ 500m・孔長 1000m 程度に対応可能な孔井曲げ掘削技術や各種の孔内測定技術の開発が進められた^{8), 16), 17), 18), 19), 20)}。従って、沿岸域プロジェクトにおいては、コントロールボーリング技術に関しては、上述したように幌延沿岸域での調査候補地選定に関わる議論までに留まった。

地下水流動解析については、平成 21 年度頃から、産総研・電中研・原子力機構において、各々、水理地質構造モデルの構築や水理解析が行われた。その中では、幌延の沿岸域を対象とした海水準変動等を地質環境の長期変遷を考慮した評価解析技術の開発も進められた^{6), 7), 9), 10), 12), 13), 14), 15), 21), 22), 23), 24)}。

地質環境調査評価情報の分析・整理としては、平成 19 年度から平成 24 年度にかけて、原子力機構が中心となり、沿岸域を対象とした地質環境の調査・評価に関して、調査計画の立案から結果の評価に至るまでの一連の作業プロセスにおけるノウハウや判断根拠等を蓄積し、体系的に整理するための作業を進められた^{2), 25), 26), 27), 28), 29)}。

なお、本プロジェクトを通じて得られた成果については、各委託事業における成果報告書として、各々、取りまとめられた。成果の取りまとめの概要については、本報告書の 5 章にまとめた。

4. 各年度における検討項目・検討内容

沿岸域プロジェクトでは、関係機関との間で定期的な会合を持ち、調査計画や個別技術の開発方針等について検討がなされた。以下に、各年度において検討された項目および検討内容について、各会合の後に作成された議事録をもとに整理するとともに、沿岸域を対象とした調査・評価を進める上で留意すべき事項等を抽出した。なお、幌延の沿岸域を対象とした沿岸域プロジェクトを通じて得られた地質環境調査評価に関わるノウハウ・判断根拠等の詳細は、原子力機構が受託した事業である「地質環境総合評価技術高度化開発」の中で取りまとめられている^{21), 25), 26), 27), 28), 29)}ため、本報告書では、それらの中から調査評価を行う上での留意事項も選定し、端的にまとめた。

4. 1 平成 19 年度における検討項目・検討内容

平成 19 年度は、沿岸域プロジェクトの初年度にあたり、国の基盤研究開発の一環として実施する位置づけ、関係する 4 つの資源エネルギー庁委託事業（以下、「委託事業」と略す）の役割や調査研究の計画・進め方等について議論がなされた。その中での主な検討項目・検討内容は、以下の通りである。

① 全体目標および調査研究の進め方について

- ・委託事業を受託した各機関より、各委託事業における全体計画、前提条件（調査研究を行う上での制約条件等）、幌延地域における地質環境特性に関わる既存情報について説明され、沿岸域プロジェクトにおける調査研究のフレームワークについて議論がなされた。
- ・各委託事業における事業の目標を達成するとともに、それらの成果を技術体系として統合することの必要性について議論がなされた。
- ・また、幌延沿岸域を対象とした調査評価技術の統合にあたっては、陸域と海域における各々の調査結果の整合性に留意すべきであり、そのためにも、現状では不足している海域の情報整備の重要性について議論がなされた。
- ・海域を調査対象に含める場合、隆起／沈降、海水準変動等の地質環境の長期的な変遷も考慮することが重要であり、幌延の沿岸域を対象とした場合、どの程度の時間スケールを考慮して検討すべきか議論がなされた。
- ・幌延沿岸域に分布すると考えられているサロベツ断層帯は、沿岸域における地下水流動や地下水水質に影響を与えている可能性があるため、調査対象としての重要性について議論がなされた。

② 産総研による調査について

- ・産総研が計画している幌延沿岸域における地上電磁探査およびボーリング調査について議論がなされた。計画策定にあたっての留意点として、沿岸域における地質構造と塩淡水境界の分布との関連性等の議論がなされた。
- ・また、幌延沿岸域の地下深部における滞留性地下水の分布を評価するために必要なボーリング孔の掘削深度（深さ 1200m 程度）について議論がなされた。
- ・地上電磁探査の結果と 3 次元の解析結果から推定された地質構造を比較するため、地上からの

追加調査（ボーリング調査等）の必要性について議論がなされた。

- ・産総研が計画している幌延沿岸域における反射法弾性波探査について議論がなされた。計画策定にあたっての留意点として、サロベツ断層帯の分布とその周辺の地質構造を網羅できるような探査測線の配置の重要性に着目し、探査測線を設定する上での優先度について議論がなされた。

③ 電中研による調査について

- ・電中研が計画しているコントローリングボーリングの掘削候補地について議論がなされた。候補地選定にあたっては、掘削深度や岩盤の強度等を踏まえたコントローリングボーリング技術の適用可能性について検討するとともに、候補地周辺の地質状況に関わる既往の情報や地上からの物理探査結果を考慮することの必要性について議論がなされた。

④ 原子力機構による地質環境調査評価情報の分析・整理について

- ・沿岸域プロジェクトを進めていく上で得られるノウハウや判断根拠の分析・整理の方法、幌延沿岸域を対象とした統合化データフローダイアグラムの構築について議論がなされた。統合化データフローダイアグラムの構築にあたっての留意点として、幌延沿岸域の一事例に留まらず、他の沿岸域での利用も念頭に汎用性を考慮するため、調査の手順や対象となるスケールの考え方等について議論がなされた。

⑤ その他

- ・幌延沿岸域における調査を進めるにあたって社会的な配慮に係る留意事項として、幌延町や漁業協同組合、農地関係者等の関係箇所との調整が必要である事、また、ボーリング調査の開始前に埋蔵文化材調査が必要になる事等が関係機関の間で共通認識された。

上述したような関係機関での議論を踏まえ、原子力機構が受託した事業である「地質環境総合評価技術高度化開発」の中では、幌延沿岸域の地質環境特性の解釈に係る課題解決案および幌延沿岸域における調査計画に係る提案がなされた²⁾。それらの中から、今後の計画検討にあたり主に留意すべき点として挙げられた事項について、以下にまとめた。

【幌延沿岸域の地質環境特性の解釈に係る技術的課題】

- ・幌延沿岸域における地質／地質構造の解釈にあたっての課題
 - －サロベツ断層帯と稚咲内背斜に関連した断層の分布や形状／広がりに関する情報の取得
 - －背斜構造の軸部付近における地質構造の把握
 - －稚内層上部の背斜構造に伴う割れ目帯が背斜軸部から離れた沿岸域へ連続する可能性の確認
- ・地形および地質／地質構造の時間変化の解釈にあたっての課題
 - －断層と褶曲の成長に伴う割れ目分布の時空間変化の評価
 - －埋没続成作用に伴う地層の層厚、岩質、間隙率の時空間変化の把握
 - －地形の時空間変化の把握

- －隆起／沈降および侵食／堆積に伴う静岩圧の変化の把握
- －広域応力場の変遷に関する情報の整理、将来の変化の把握
- ・幌延沿岸域における地下水の流動特性の解釈にあたっての課題
 - －研究所設置地区周辺（背斜構造に伴う水みちの発達）に対して、沿岸域のような平坦な地層が分布している地域での構造発達の差異に起因する水みち分布の不均質性の把握
 - －サロベツ断層帯や稚咲内背斜に関連した断層の地下水流動への影響把握
 - －沿岸域における陸域から海域への地下水流動と海底湧水との関連性把握
 - －低透水性の海底堆積物の分布による地下水の間隙水圧上昇の影響把握
- ・幌延沿岸域における地下水の地球化学特性の解釈にあたっての課題
 - －声間層や稚内層における比抵抗と水質との相関性について、沿岸域の表層に分布する更別層や勇知層についても同様な相関性の有無の把握
 - －比抵抗と水質の相関性への岩石鉱物学的特性による影響の有無の把握
 - －サロベツ断層帯と稚咲内背斜に関連した断層による水質分布への影響有無の把握
 - －海進・海退による影響を受けていると考えられる沿岸域を対象とした地下水年代の評価
 - －沿岸域における地下水の pH, Eh 等の化学環境の把握

【幌延沿岸域における調査計画の検討にあたっての留意事項】

- ・陸上の反射法地震探査計画
 - －必要に応じてボーリング調査や VSP⁷探査等の補完的な調査も組み合わせて結果を解釈できるような計画立案に留意
- ・陸上の電磁探査計画
 - －複数の電磁探査手法を組み合わせた調査や他の調査結果（塩分濃度分布の調査結果等）との対比を含めた計画立案に留意
- ・沿岸域におけるボーリング調査計画
 - －地質構造や塩分濃度分布等の推定結果を考慮した掘削長の計画立案に留意
 - －掘削水による地下水水質への影響を考慮した掘削水の管理方法に留意
 - －天然ガス胚胎地域での防爆に関わる安全対策に留意
 - －長期にわたるボーリング孔の保護対策の方法に留意

4. 2 平成 20 年度における検討項目・検討内容

平成 20 年度は、沿岸域プロジェクトの 2 年目にあたり、平成 19 年度に計画が検討された調査の一部が具体的に実施された。関係機関との打合せでは、これらの調査に係る内容を中心に議論がなされた。以下に主な検討項目・検討内容をまとめる。

① 電中研による調査について

- ・平成 19 年度に引き続き、電中研が計画しているコントローリングボーリングの掘削候補地について議論がなされた。候補地選定にあたり、サロベツ断層帯が分布すると想定される領域での浅部地質構造について議論がなされた。なお、次年度以降の予算との兼ね合いで、幌延沿岸域

⁷ VSP (Vertical Seismic Profile) 探査とは、ボーリング孔を利用して、地表で発震した地震波を孔内の受振器で受振し、或いは孔内の震源で発した波を地表の受振器で受振し、地下構造を推定する地震探査法の 1 つである。

でのコントローリングボーリングの実施が困難になった場合の対処案についても議論がなされた。

- ・電中研が行った幌延沿岸域を対象とした反射法地震探査の結果について議論がなされた。反射法地震探査の結果では、国道 40 号線付近に褶曲構造の存在が示唆されたものの、サロベツ断層帯の分布については不明確であり、結果の解釈にあたっては、平成 19 年度に産総研が実施した地上電磁探査の結果に留意して行うこと等について議論がなされた。
- ・電中研が実施する地下水年代測定技術調査において、岩石コアから抽出した地下水を利用する計画であり、抽出方法についての議論がなされた。抽出方法としては、遠心分離法と圧縮法があり、抽出方法によっては岩石コア中の間隙水に影響が生じる可能性があるため、抽出方法の選定に留意すべきこと等について議論がなされた。

② 原環センターによる調査について

- ・平成 19 年度に産総研が検討していた幌延沿岸域を対象とした地質構造等を評価するための物理探査やボーリング調査について、平成 20 年度は原環センターが実施することになった⁸。そのため、平成 20 年度の調査計画について、再度、議論がなされた。
- ・平成 19 年度の議論を踏まえ原環センターにより実施された海岸および陸域での電磁探査の結果について議論がなされた。このような調査により、陸域と浅海域を接続する調査・解析手法は概ね構築されたと判断された。なお、電磁探査法による調査結果の解釈にあたっては、抵抗値と水質分布の関連性の妥当性や陸域と浅海域での観測点数の違いによる分解能の違い等にも留意すべきこと等について議論がなされた。
- ・幌延沿岸域における塩水と淡水が混在する場合での地下水流動や水質形成を把握するための調査技術の整備を目的とし、浜里小学校跡地で実施された 2 本のボーリング調査（SF1-1 および SF1-2；掘削長 158m）について議論がなされた。ボーリング調査の計画段階では、掘削に先立ち、防爆対策やトラブルを想定したケーシングプログラム等の留意点について議論がなされた。

③ 原子力機構による地質環境調査評価情報の分析・整理について

- ・沿岸域プロジェクトを通じて、ノウハウや判断根拠の分析・整理を行うにあたり、各機関における調査の計画、進捗状況、成果を適切に共有するための体制や枠組みについて議論がなされた。

上述したような関係機関での議論を踏まえ、幌延沿岸域の特徴を考慮した物理探査の考え方や手法および幌延沿岸域を対象としたボーリング調査についてのノウハウや判断根拠等が抽出・整理された²⁾。それらの中から、調査評価を進める上での主な留意事項について以下にまとめた²⁵⁾。

【幌延沿岸域の特徴を考慮した物理探査の考え方や手法に係る留意事項】

- ・海域での電磁探査における探査範囲と社会的な制約条件（たとえば、探査範囲が国立公園の敷地内に含まれないようにする等）

⁸ 資源エネルギー庁からの委託事業は、毎年度公募され、総合評価方式による競争契約で受託先が決定され、平成 20 年度は原環センターが落札した。

- ・海域での探査における地理的な制約条件（海上での風，波浪，海流等による小型船舶の利用不可等）
- ・電磁探査における波浪や海流によるノイズの混入による影響の考慮
- ・反射法地震探査における地質状況を考慮した適切な探査仕様（震源発生方法）の選定，震源パラメータの設定

【幌延沿岸域を対象としたボーリング調査に係る留意事項】

- ・沖積層のような軟弱な地層も考慮したボーリング掘削技術の適用（孔壁の崩壊，逸水，湧水，孔曲り等のトラブル回避のための技術）
- ・安全対策として，防噴装置（BOP ; Blow Out Preventer）の設置
- ・軟弱な地層におけるボーリング孔の保護に用いられる塩化ビニル管の回収方法
- ・複数年にわたるボーリング調査での作業中断中のボーリング孔の保護方法

4. 3 平成 21 年度における検討項目・検討内容

平成 21 年度は，沿岸域プロジェクトの 3 年目にあたり，平成 20 年度に引き続き，海域および陸域での物理探査や沿岸域における深度 550m 程度のボーリング調査等が行われた。関係機関との打合せでは，これらの調査に係る内容を中心に議論がなされた。以下に主な検討項目・検討内容をまとめる。

① 産総研による調査について

- ・平成 21 年度に掘削する 550m 程度のボーリングについて，固結度の低い地層を対象とすることから，分析用のコア試料の処理方法等について議論された。コア試料の処理作業は迅速に行うことが必要であり，地上へのコアの引き上げ後，コア試料の密封までの作業時間を 1 時間以内にする等留意点について議論がなされた。
- ・掘削したボーリング孔を用いた水理試験に関して，地質状況（更別層：シルト層が優勢の礫層，砂層，シルト層の互層）を考慮し，どのような観点での水理試験を実施すべきか（互層全体の評価とするか，相対的に低透水と考えられるシルト層と高透水と考えられる礫層／砂層に分けて評価するか等）について議論がなされた。
- ・現場での水理試験の実施箇所の選定にあたり，コア試料を用いた室内試験で補完可能なケース（たとえば，低透水のシルト層）を考慮し，水理試験箇所を選定するような優先度の検討方法について議論がなされた。

② 電中研による調査について

- ・コントロールボーリングについては，電中研が上幌延で実施している作業を継続して行う方向で対処することについて議論がなされた。
- ・地下水年代測定技術について，比較的年代の新しい地下水に対する測定法や，地下水採水時の脱ガスの抑制方法，古い地下水年代の測定法としての ^{36}Cl による測定の精度向上のための試験等について議論がなされた。
- ・年代測定法として， ^{14}C を用いる場合，ケーシングセメント由来のデッドカーボンの混入について留意する必要性の議論がなされた。
- ・平成 20 年度に実施された反射法地震探査の結果について，結果の解釈にあたり，解析精度を向

上するためのノイズ処理について議論がなされた。

③ 原子力機構による地質環境調査評価情報の分析・整理について

- ・統合化データフローダイヤグラムの更新にあたり、幌延の沿岸域だけでなく、他地域における沿岸域も想定した一般化を目指したものを構築するため、対象とする調査項目や調査手順等について議論がなされた。

上述したような関係機関での議論を踏まえ、平成 20 年度に引き続き、幌延沿岸域の特徴を考慮した物理探査の考え方や手法および幌延沿岸域を対象としたボーリング調査についてのノウハウや判断根拠等が抽出・整理された²⁶⁾。また、瑞浪超深地層研究所や幌延深地層研究センター等での成果をもとに、原子力機構が実施する幌延沿岸域を事例とした地下水流動や地球化学特性の評価のためのモデル化・解析を通じて得られる知見等についても整理された²⁶⁾。それらの中から、調査評価を進める上での主な留意事項について、以下にまとめた。

【幌延沿岸域の特徴を考慮した物理探査手法に係る留意事項】

- ・陸域の電磁探査法（MT 法）の実施にあたり、既往の電磁探査測線の配置を考慮し、相互の比較が行えるような測線の設定に留意
- ・複数の測線で得られる二次元比抵抗断面から三次元構造を推定するための測点配置の考慮
- ・放牧地における放牧柵に流れる電流による測定データへの影響
- ・ノイズ低減のための夜間測定の考慮
- ・獣害による断線被害抑制のための対策考慮

【幌延沿岸域を対象としたボーリング調査に係る留意事項】

幌延沿岸域でのボーリング調査では、平成 20 年度に浜里地区で実施されたボーリング調査により、地盤のゆるみや強度不足が確認され、ボーリング調査の基本計画が平成 21 年度に見直された経緯がある。このような計画変更に至った背景を踏まえて抽出された留意事項を以下に列挙する。

- ・一般に、沿岸域は平野が多く、第四紀層や新第三紀層が広く分布し、未固結の堆積物が分布する可能性が高い事
- ・地盤強度が脆弱なことも想定し、リスクを見込んだ安全側の計画を立案
- ・仮にリスクが顕在化した場合も想定し、予め対策案を検討

【幌延沿岸域を対象とした地下水流動・地球化学特性評価に係る留意事項】

- ・沿岸域を対象に地質環境の長期変遷を評価するにあたり、海水準の変動を考慮
- ・海域を含めた解析では、地下水の密度差による地下水流動への影響を考慮
- ・異なる地下水系の情報の混同を防ぐため、塩分濃度の分布や地史の情報を考慮
- ・塩分濃度分布の評価に、予備的な地下水流動解析や電磁探査等の物理探査結果を適宜活用
- ・溶存ガスの脱ガス等による水質（pH、炭酸濃度等）への影響の可能性についても考慮

4. 4 平成 22 年度における検討項目・検討内容

平成 22 年度は、沿岸域プロジェクトの 4 年目にあたり、平成 21 年度に引き続き幌延沿岸域に位置する浜里地区でのボーリング調査（平成 21 年度に深度 550m 程度まで掘削したボーリング孔を深度 1000m 程度まで掘削延伸；DD-1 孔）および海域での物理探査等が行われた。関係機関との

打合せでは、これらの調査に係る内容を中心に議論がなされた。以下に主な検討項目・検討内容をまとめる。

① 産総研による調査について

- ・各種物理探査による調査結果をもとに、調査結果の相互比較やボーリング調査による地質分布に関する調査結果との比較により、各調査結果との整合性についての議論がなされた。
- ・浜里地区におけるボーリング調査の結果をもとに、深度 300m 付近を境とした地層の固結度や水質の変化に関して議論がなされた。
- ・陸域および海域の電磁探査の結果によれば、幌延の沿岸域では、淡水域が海側に張り出している可能性が示唆されており、これを確認するための海上ボーリングの必要性について議論がなされた。なお、海域での調査では漁業権等の制約が多いこと等の留意点についても議論がなされた。

② 電中研による調査について

- ・浜里地区でのボーリング調査で得られた水質の分析結果をもとに、分析誤差の取り扱い等について議論がなされた。また、現海水と化石海水との区別の仕方についても議論がなされた。

③ 原子力機構による地質環境調査評価情報の分析・整理について

- ・沿岸域プロジェクトを通じて得られた知見やノウハウ等については、原子力機構で整備を進めている次世代型サイト特性調査情報総合システム（ISIS）の中で、エキスパートシステム（ルールベース、事例ベース）として取り込まれる計画であり、これらのシステム作成について各機関の専門家と議論がなされた。

上述したような関係機関での議論を踏まえ、平成 21 年度に引き続き、幌延沿岸域の特徴を考慮した物理探査の考え方や手法および幌延沿岸域を対象としたボーリング調査についてのノウハウや判断根拠等が抽出・整理された²⁷⁾。また、平成 21 年度に引き続き、原子力機構が実施する幌延沿岸域を事例とした地下水流動解析や水理地質モデル構築を通じて得られる知見等についても整理された²⁷⁾。さらに、地質環境の長期変遷評価における地質構造の発達モデルの必要性等についても整理された²⁷⁾。それらの中から、調査評価を進める上での主な留意事項について、以下にまとめた。

【幌延沿岸域の特徴を考慮した物理探査手法に係る留意事項】

- ・物理探査結果の解釈において、解析結果の信頼性に問題がある場合は、信頼性に関わる情報を付記することに留意（たとえば、ノイズの影響により、解析結果の信頼性に問題がある範囲は、調査対象領域のどの部分か等）
- ・陸域から海域にかけての地下の比抵抗分布を解析により求める場合、解析断面において海水に相当する部分は既知情報として適切に設定することに留意

【幌延沿岸域を対象としたボーリング調査に係る留意事項】

- ・地盤強度が脆弱なことを想定した掘削工法の選定、掘削中／掘削後の孔壁保持方法の選定、コア採取後の試料の処理方法（コア試料の品質確保の観点）について留意

【幌延沿岸域を対象とした地下水流動解析・水理地質モデル構築に係る留意事項】

- ・地下水の大局的な流動方向に影響を与える不連続構造とその水理特性との関係に留意
- ・地下水の塩分濃度分布との関連性に考慮し、水理と地球化学を統合した概念モデルの構築や数値モデル化に留意

【幌延沿岸域を対象とした地質発達モデル構築に係る留意事項】

- ・幌延の沿岸域に特徴的に認められる地質構造（衝上断層褶曲）のような事例研究の多いケースでは、室内での地質発達モデルにより、実際に認められる広域の地質構造の発達過程を大まかに模擬することも可能だが、事例研究の少ないケースでは容易ではないことに留意

4. 5 平成 23 年度における検討項目・検討内容

平成 23 年度は、沿岸域プロジェクトの 5 年目にあたり、当初の計画では、資源エネルギー庁の委託事業の終了予定の年であった。しかしながら、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の影響により、各関係機関の事業規模が縮小された。このため、幌延の沿岸域における実質的な作業としては、海域での電磁探査に関わる補足調査および深層ボーリングである DD-1 孔の孔壁確認のための検層作業のみであった。関係機関との打合せの場においても、1 年間、調査が繰り越された場合を想定し、次年度の調査計画や最終的な調査結果の取りまとめ方針等を中心に議論がなされた。以下に主な議論の内容について記す。

① 産総研による調査について

- ・平成 23 年度までの調査結果を踏まえ、物理探査とボーリング調査結果との対比に基づく地下水の塩分濃度分布の評価、地質境界と水理境界の不一致等について議論がなされた。また、次年度、DD-1 孔を深度 1200m 程度まで掘削延伸するボーリング調査計画や海陸接合部～海域を対象とした反射法探査（音波探査）の技術的な実現性についても議論がなされた。

② 電中研による調査について

- ・浜里地区でのボーリング調査で得られた地下水の ^{36}Cl および ^4He による年代測定の結果について議論がなされた。また、これら同位体を用いた年代測定の結果と地下水が胚胎する地層の地史との整合性に関する検討の必要性についても議論がなされた。

③ 原子力機構による地質環境調査評価情報の分析・整理について

- ・沿岸域プロジェクトを通じて得られた成果のとりまとめにあたり、「体系化」に対するイメージが関係者間で差異があることが認識され、原子力機構が開発している ISIS における体系化のイメージをもとに議論がなされた。

なお、原子力機構による ISIS の開発では、上述したような関係機関での議論も参考にしつつ、平成 23 年度までに抽出・整理された幌延の沿岸域を対象とした地質環境調査におけるノウハウや判断根拠等に基づいた調査基本計画立案のエキスパートシステムへの反映が進められた²⁸⁾。

4. 6 平成 24 年度における検討項目・検討内容

平成 24 年度は、沿岸域プロジェクトの最終年度にあたり、各関係機関の受託事業において残さ

れた調査（DD-1 孔の深度 1200m 程度までの掘削延伸、掘削されたコア試料の分析およびコア試料からの抽出水の分析、DD-1 孔での水理試験等）に係る内容や沿岸域プロジェクトを通じて得られた成果の集約方針等を中心に議論がなされた。以下に主な議論の内容について記す。

① 産総研による調査について

- ・現場における水理試験の結果と地下水流動に係る解析結果とでは、両者の結果に相違がある場合が多く、このようなギャップの取り扱いについて議論がなされた。
- ・幌延の沿岸域における鉛直方向での地下水の水文区分（流動域、混合域、拡散域、滞留域）の捉え方について、共通的な認識を得るために議論がなされた。

② 電中研による調査について

- ・浜里地区での地下水に対する ^{36}Cl および ^4He による年代測定の結果について議論された。両手法による年代の推定にあたっては、 ^{36}Cl 年代については $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の原位置平衡値の確認、 ^4He 年代については脱ガスの補正に留意すべきこと等の議論がなされた。
- ・現状の知見に基づけば、勇知層深部（深度 800m 以深）における地下水年代は、 ^{36}Cl 年代で 40 万年程度、 ^4He 年代で 200 万年程度と推定され、これらの推定年代に対する各々の不確実性の幅について議論がなされた（前者は数十万年程度、後者は十数万年程度の幅がある）。
- ・ ^4He 年代測定では、地下水年代の推定に影響を及ぼす要因の 1 つとして、地層の圧密による間隙率の増減（間隙率の変化により、 ^4He の蓄積量に影響を及ぼす地層中の U や Th の密度変化の可能性）も考えられ、そのような影響についても留意すべきこと等の議論がなされた。

③ 原子力機構による地質環境調査評価情報の分析・整理について

- ・沿岸域プロジェクトにおける議論を通じて得られた成果の集約方針として、ISIS への反映について議論がなされた。ISIS では、幌延や瑞浪の地下研究施設における地質環境調査評価事例に加えて、幌延沿岸域における調査評価事例も含まれている²⁾。沿岸域プロジェクトを通じて得られた成果である a) 沿岸域を対象とした地質環境調査の基本計画立案に関する考え方、b) 個々の調査手法に対する適用事例やノウハウ／判断根拠、c) 調査結果に基づく地質環境モデルの構築・更新やノウハウ／判断根拠、等についても、ISIS における判断支援エキスパートシステム（ルールベース、事例ベース）に集約する形でまとめられること等が説明された。
- ・沿岸域プロジェクトの成果として、これまでに各関係機関が実施した調査評価の内容をダイジェスト版として取りまとめ、ウェブ上で閲覧可能な形式で公開する等の案についても議論がなされた。

上述したような関係機関での議論も踏まえ、沿岸域プロジェクトを通じて得られた成果は、ISIS において、沿岸域を対象とした地質環境調査方法の構築に関わる事例や、地質環境調査の基本計画立案に関わるノウハウ／判断根拠として整理され、判断支援エキスパートシステムに組み込まれた²⁹⁾。

5. 本プロジェクトを通じて得られた成果の例

4章で述べたような沿岸域プロジェクトで議論された項目や内容を踏まえつつ、各関係機関は、各々の受託事業を進めた。ここでは、沿岸域プロジェクトの最終年度である平成24年度までに得られた成果について、各機関の受託事業の成果報告書をもとに、「沿岸域を対象とした調査・評価技術の整備」および「得られた成果の体系化に関わる取り組み」の2つの観点から、成果の一例を整理した。

5. 1 沿岸域を対象とした調査・評価技術の整備

沿岸域を対象とした調査・評価技術の整備として、沿岸域プロジェクトにおいて主に議論された項目としては、地震波・電磁波を用いた物理探査やボーリング調査、地下水年代の測定手法の適用性確認や地下水流動との関連を踏まえた評価等が挙げられる。これらの調査・評価技術について、沿岸域プロジェクトを通じて、産総研、電中研および原子力機構により整備された技術の例とそれらを適用することで得られた成果の概要を以下にまとめる。

① 産総研により整備された主な調査・評価技術の概要

沿岸域を対象とした地質環境概念モデルを構築するためには、地質構造・断層や塩淡境界等を把握することが必要になる。しかしながら、陸域と海域が接する浅海域では、地質構造等を調査するための調査船の航行に支障があり、探査手法の整備が遅れているという課題があった。このため、陸域と海域の連続的な評価を念頭に、沿岸域の地質構造・断層や塩淡境界等を調査・評価する技術の開発が行われた¹⁰⁾。

沿岸域を対象とした地質構造・断層や塩淡境界等を調査する手法として、地震波・電磁波を用いた物理探査やボーリング調査がある。たとえば、図4は、沿岸域における地質構造・断層や塩淡境界等を調査するための物理探査手法の適用概念の例を示している¹⁰⁾。

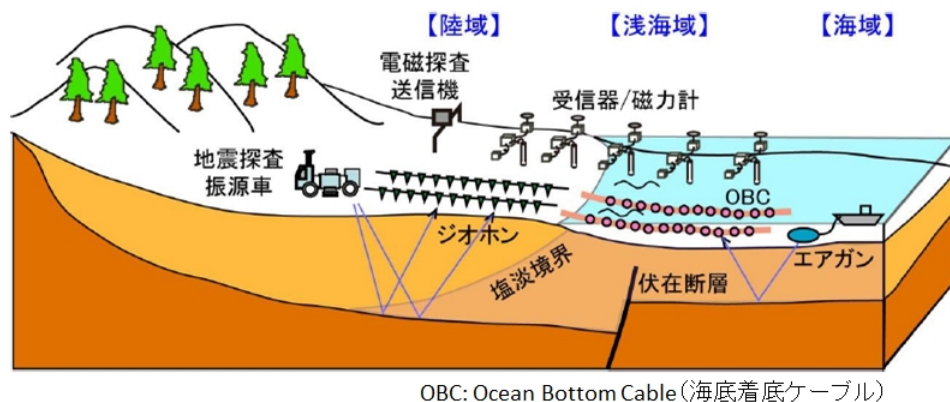


図4 沿岸域における地質構造・断層や塩淡境界等を調査するための物理探査手法の適用概念の例¹⁰⁾

図4で示されたような物理探査手法の適用概念を参考に、幌延の沿岸域における調査に一部適用し、沿岸域の浅海域における環境下で、海底数キロメートルまでを探査可能な電磁探査法の開発が試みられた¹⁰⁾。浅海域における地質構造・断層や塩淡境界等の調査・評価にあたっては、

図 5 に示す幌延沿岸域における物理探査測線に対し、MA11 に相当する陸域と浅海域における電磁探査測線の探査結果を併せて、2 次元の比抵抗構造解析が行われた。図 6 に幌延沿岸域の MA11 ラインにおける海域接合の比抵抗構造のモデル図を示す。

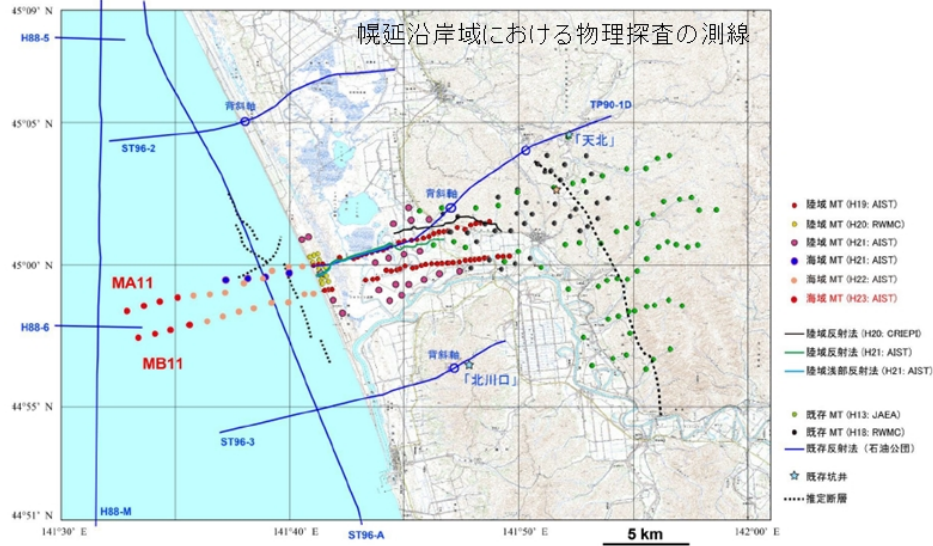


図 5 幌延沿岸域における物理探査測線¹⁰⁾

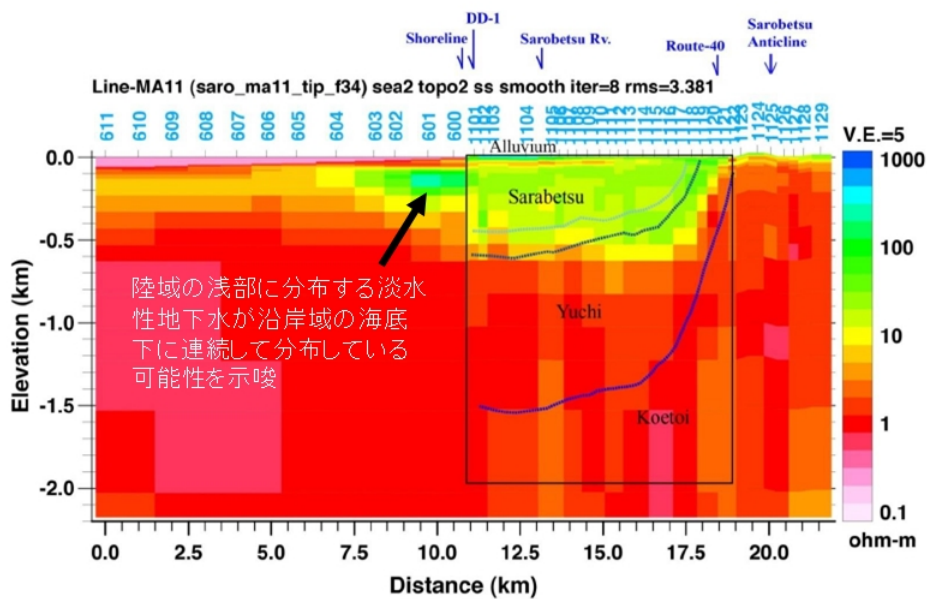


図 6 幌延沿岸域の MA11 ラインにおける海域接合の比抵抗構造のモデル図
(産総研¹⁰⁾に追記)

図 6 に示されるように、幌延の沿岸域における比抵抗構造解析の結果に基づけば、陸域の更別層に胚胎する淡水性地下水（相対的に比抵抗値の大きい部分；図中で黄色～黄緑色の箇所）が沿岸部の沖合に向かって 10km 程度、深度 200m 付近まで、連続して存在している様子が推定された¹⁰⁾。このような調査・評価技術は、地震探査等の物理探査による調査技術と併用することで、沿岸域における塩淡水境界の評価（地下水分布や温度分布等の評価）や地質構造・断層の評価にも適

用可能な技術であると考えられる。

また、幌延の沿岸域に位置する浜里地区で行われたボーリング調査（DD-1 孔）では、たとえば、図 7 に示すような深さ方向での地層の固結度、地下水中の Cl 濃度、地下水の酸素同位体比、地層の有効間隙率の変化が明らかにされている¹⁰⁾。前述の物理探査手法による調査や、図 7 に示されるようなボーリング調査の結果を組み合わせることで、沿岸域における地層の分布や地質構造、塩淡水境界の位置等の推定における信頼度を向上させることが可能であると考えられる。

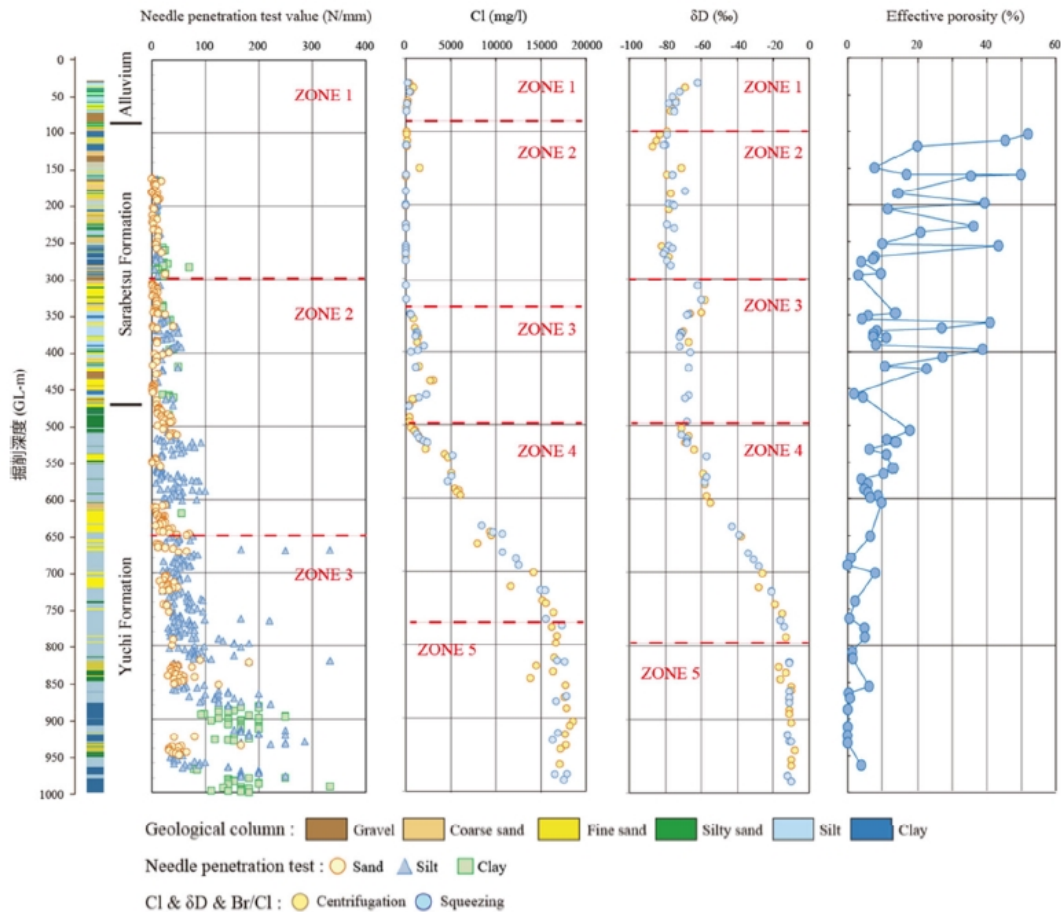


図 7 幌延沿岸域におけるボーリング調査結果の一例¹⁰⁾

さらに、幌延の沿岸域における陸域および海域を含む広域の地下水流動の評価や、地下水の長期的な流動・滞留状況の評価を行うための解析手法の開発も行われた¹⁰⁾。前者の評価では、現在の幌延沿岸域における塩淡水境界の形状について、上述した物理探査やボーリング調査の結果等も踏まえて検討された¹⁰⁾。後者の評価では、地下水水質や地下水流動に影響を及ぼすと考えられる長期的な変動要因の 1 つとして、海水準変動を取り上げ、DD-1 孔のボーリング調査で得られた地下水の塩分濃度分布や年代測定結果を参考に、海水準変動を周期的に複数回設定し、水質や水圧分布への影響について解析的に検討された¹⁰⁾。これらの検討により、沿岸域を対象とした広域地下水流動の評価手法や、地質環境の変動として海水準変動を考慮した場合の評価手法等が例示され、現状での評価技術が提示されている。

② 電中研により整備された主な調査・評価技術の概要

沿岸域における地下水の流動性の評価にあたり、天然に存在する放射性核種の放射壊変を利用した地下水の年代測定技術は、地下水の滞留時間を評価できるため、流動場と滞留場（拡散場）の区分等において有効な手法である。このような地下水年代測定技術をもとに、幌延の沿岸域で掘削されたボーリング孔（DD-1 孔）で得られた地下水を対象に、地下水年代や流動性についての評価が試みられた¹⁵⁾。図 8 に、幌延の沿岸域における DD-1 孔で得られた地下水に基づく地下水年代の評価結果の一例を示す¹⁵⁾。図 8 では、DD-1 孔のコア試料の観察・測定に基づく地層や水理特性に関する情報と共に、地下水の主要溶存イオン／酸素・水素安定同位体比分析および年代測定結果について深度方向で整理されている。

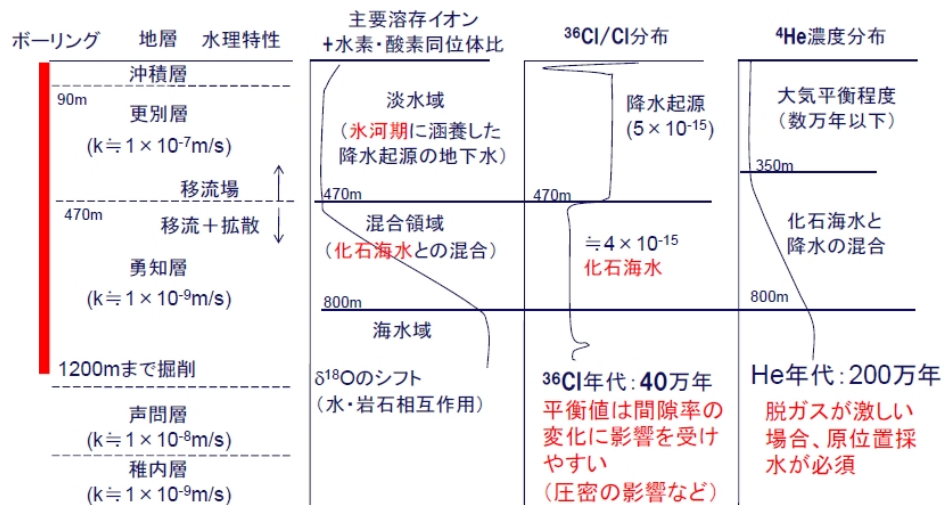


図 8 幌延の沿岸域における DD-1 孔で得られた地下水に基づく
地下水年代の評価結果の一例¹⁵⁾

幌延の沿岸域に位置する浜里地区での例では、地下水の水質分析の結果から、地表～深度 500m 程度が淡水、深度 500～800m 程度が淡水と海水（化石海水）との混合、深度 800m 以深では化石海水であると推定された¹⁵⁾。また、酸素・水素安定同位体比分析の結果でも、水質分析と同様に、深度方向で、淡水域・混合域・海水域の分布が推定されると共に、深度 90～300m 付近の地下水では酸素・水素安定同位体比がやや軽いことから氷期に涵養した地下水であることや、深度 1000m 以深の地下水では幌延深地層研究所付近の稚内層中の地下水で認められるような岩石－水反応の影響による酸素シフトの影響³⁰⁾も示唆された¹⁵⁾。

上述したように、深度方向で地下水の特徴に違いがあることが推察され、これらの各地下水について、³⁶Cl、⁴He および ¹⁴C 年代の測定が行われ、地下水の流動性との関係が評価された¹⁵⁾。³⁶Cl 分析では、地表～深度 500m 程度の地下水は降水起源の ³⁶Cl、深度 500m 程度以深では原位置生成の ³⁶Cl が支配的であると推定され、化石海水の分布が推定される深度 800m 以深の地下水に対する ³⁶Cl 年代は、少なくとも 40 万程度¹⁵⁾と推定された⁹⁾。⁴He 年代では、地表～深度 500m 程度の地下

⁹⁾ ³⁶Cl 年代の評価に用いられた ³⁶Cl/^{Cl} の原位置平衡値は、現在の状態における値であり、地層が圧密される前の状態を考慮すると、より古い年代になる可能性もある。また、勇知層の下位に位置する声問層の ³⁶Cl/^{Cl} の原位置平衡値は低く、このような地下水の流入により年代が若く評価されている可能性も考えられる¹⁵⁾。

水は数万年程度、深度 800m 以深では 200 万年程度となり地層の堆積年代と同程度になる¹⁵⁾と推察された¹⁰⁾。¹⁴C 年代については、地層中に含まれる海成の炭酸塩の溶解による影響が大きく、適切な年代の評価が困難¹⁵⁾であった¹¹⁾。

また、³⁷Cl の分析から、淡水と化石海水の混合域に位置する勇知層の浅部（深度 600m 付近）において、³⁷Cl の分別（より浅部では減少、より深部では増加）が示唆され、このような分別は地層中での Cl の拡散により生じたと推定された¹⁵⁾。このような混合域の形成機構としては、たとえば、海水準変動により勇知層の浅部が淡水で洗われた後、海水が浸入し、勇知層の浅部に Cl が拡散により輸送され、形成されることが考えられる¹⁵⁾。

上記のような結果や考察を踏まえると、幌延の沿岸域においては、浅部に位置する更別層（深度 500m 程度まで）では、淡水が支配的で数万年程度の年代の地下水が分布し、更別層の下位に位置する勇知層の深度 800m 以深では、堆積時からの海水が滞留し、勇知層の浅部（深度 500～800m 程度）では、移流／拡散により地下水の濃度分布が形成されていると評価された¹⁵⁾。

このように、幌延の沿岸域におけるボーリング調査で得られた地下水を対象に地下水年代測定技術を適用することで、流動場と滞留場（拡散場）の区分といった地下水の流動性の評価技術の具体例が提示されている。

電中研では、天然に存在する様々な放射性核種を利用し、上述した幌延の沿岸域に加え、これまでに他の地域（東濃地域やオーストラリアの大鑽井盆地）においても地下水の年代測定技術の適用性検討が行われている¹⁵⁾。また、これらを踏まえ、地下水の年代測定技術とその適用結果が整理されている（図 9）。図 9 に示されているように、対象とする場の流動性に応じて、適用する地下水の年代測定技術やその適用方法を選定することで、流動場～拡散場における各々の地下水の流動性評価が可能である。

滞留時間	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶ (年)	評価方法 (検証方法)
流動性 (mobile)	東濃(花崗岩)		GAB 帯水層		⁴ He(蓄積)、無機 ¹⁴ C、有機 ¹⁴ C、希ガス温度計 ⁴ He(フラックス)、 ³⁶ Cl(減衰)、 ¹⁴ C(減衰：涵養域のみ) ⁴ He(蓄積)、 ¹⁴ C、水素・酸素同位体比
滞留性 (stagnant)	降水との混合	幌延：更別層	幌延：勇知層 幌延：声間層 幌延：稚内		⁴ He(蓄積)、 ³⁶ Cl(平衡)
(拡散場)			GAB 難透水層		⁴ He(拡散) ³⁶ Cl(拡散) ³⁷ Cl(拡散)

*GAB (Great Artesian Basin) : オーストラリア大鑽井盆地、大規模な被圧帯水層

図 9 地下水の年代測定技術とその適用結果¹⁵⁾

¹⁰⁾ ⁴He 年代は、原位置生成による ⁴He の蓄積をもとに年代を評価しており、他からの ⁴He の流入があると、実際にはより若い年代の地下水の可能性も考えられる¹⁵⁾。

¹¹⁾ DD-1 孔における深度 306m 付近（更別層）の地下水については、海成炭酸塩の溶解の影響が小さく、¹⁴C 年代による評価が可能であり、¹⁴C 年代として 1 万年程度と推定されている¹⁵⁾。

さらに、高レベル放射性廃棄物の地層処分における地下水シナリオに基づく性能評価において、概要調査段階に求められると考えられる地下水の流動性に関わる情報と、それに対して地下水年代測定技術をどのように適用すべきかについても整理されている¹⁵⁾（表2）。

表2 概要調査段階に求められると考えられる地下水の流動特性に関わる情報の例とそれに対する地下水年代測定技術の適用による評価の例（電中研¹⁵⁾をもとに作成）

概要調査段階に求められると考えられる地下水の流動性に関わる情報の例	地下水年代測定技術の適用による評価の例
候補対象となる岩盤中の地下水の年代が十分に古いこと（地下水の滞留時間が非常に長いこと）	・ ^4He が十分に蓄積していることを確認 ・ $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が原位置での放射平衡に達していることを確認
候補対象となる岩盤が十分な広がりを持つこと	・複数のボーリング調査により得られた岩石や地下水試料をもとに、 ^4He の蓄積や $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡を調査し、滞留時間の長い地下水が広く分布していることを確認
浅層からの年代の新しい地下水が浸入していないこと	・ ^3H や ^{14}C 等の半減期の短い放射性同位体が検出されていないこと ・CFCsやSF ₆ のような、1950年頃から工業的に使用され大気中に放出された不活性なガスが検出されていないこと ・ ^4He や ^{36}Cl が連続的に分布していないこと
候補対象となる岩盤中における広域的な地下水の流動性が把握できること	・ ^4He の増加傾向および ^{14}C や ^{36}Cl の減衰から、岩盤中の地下水年代を連続的に評価し、涵養域～流出域までの地下水の流動性を評価

*CFCs(クロロフルオロカーボン類): 冷却剤等に用いられるフロン類
SF₆(六フッ化硫黄): 変圧器の絶縁ガス等に用いられる

表2にまとめられた評価の例をもとに、仮想的な地下水の流動場を想定し、地下水の分布箇所に応じた地下水年代測定技術の適用方法の概念をまとめたものを図10に示す¹⁵⁾。

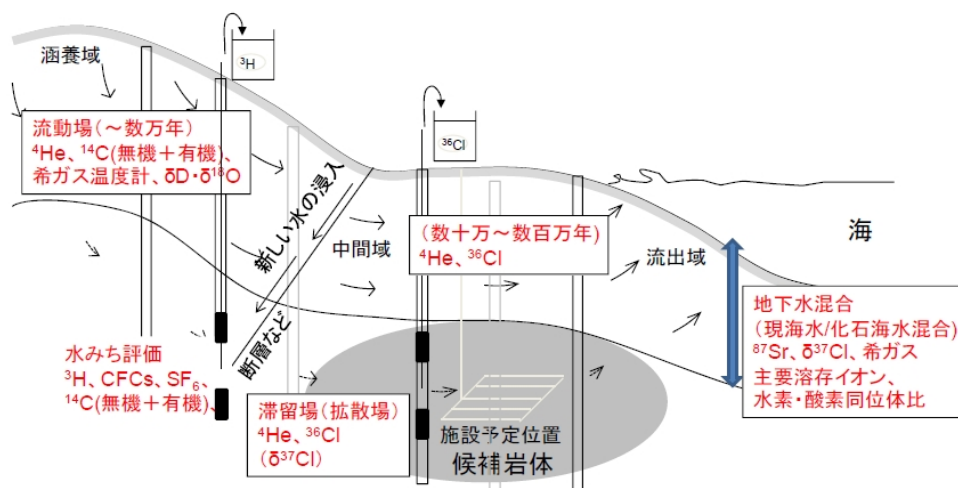


図10 地下水年代測定技術の適用方法の概念¹⁵⁾

図10では、浅部に流動性の帯水層、深部に滞留性の滞水層が分布するような地質環境が想定されており、各々の滞水層において適用すべき地下水年代測定技術が整理されている。なお、同一の評価対象箇所でも複数の地下水年代測定技術が列挙されているが、これは複数の年代測定によるクロスチェックの重要性を示している¹⁵⁾。このように、沿岸域も含めた広域での地下水の流動性

評価における地下水年代測定技術の評価手法例が例示され、現状での評価技術が提示されている。

③ 原子力機構により整備された主な調査・評価技術の概要

沿岸域プロジェクトにおける原子力機構の担当としては、次節（5.2 節）で述べる成果の体系化に関わる取り組みが主であるが、地質環境の長期的変遷を考慮した沿岸域における地下水流動の評価に関しては、産総研や電中研と同様に、評価技術の開発への取り組みがなされた。なお、本件に関わる原子力機構による取り組みは、幌延深地層研究計画における地質環境の長期安定性に関する研究の一環として実施された^{21), 22), 23), 24)}。

沿岸域を含めた幌延地域を対象に、地形・地質構造の変遷や気候変動等の自然事象に伴う地下水流動の長期的な変化を予測する手を開発するため、隆起・沈降や気候・海水準変動等の自然現象による影響を考慮しつつ、地下水流動を評価するための手法として、SMS (Sequential Modeling System of geological evolution impact on groundwater flow) が開発されている²³⁾。SMS では、地形・地質構造の形状をモデル化し、時間とともに地形・地質構造を変化させつつ、地下水流動の解析を行うことが可能であり、海水準や地下水の涵養量の変化に伴う地下水流動への影響を評価できる。

図 11 および図 12 に、一例として、海域から幌延地域を含む領域を対象に、地形・地質構造の変遷をモデル化した例や海水準・地下水涵養量の変動を考慮した長期的な地下水流動の解析例²³⁾を示す。

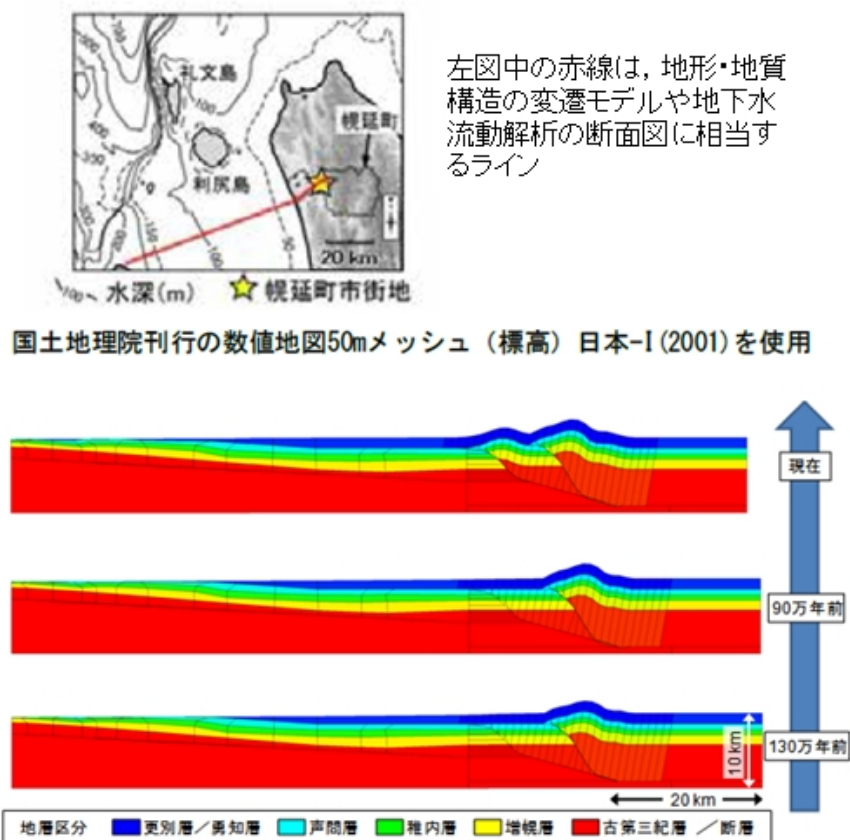


図 11 幌延沿岸域を対象とした地形・地質構造の変遷モデルの例²³⁾

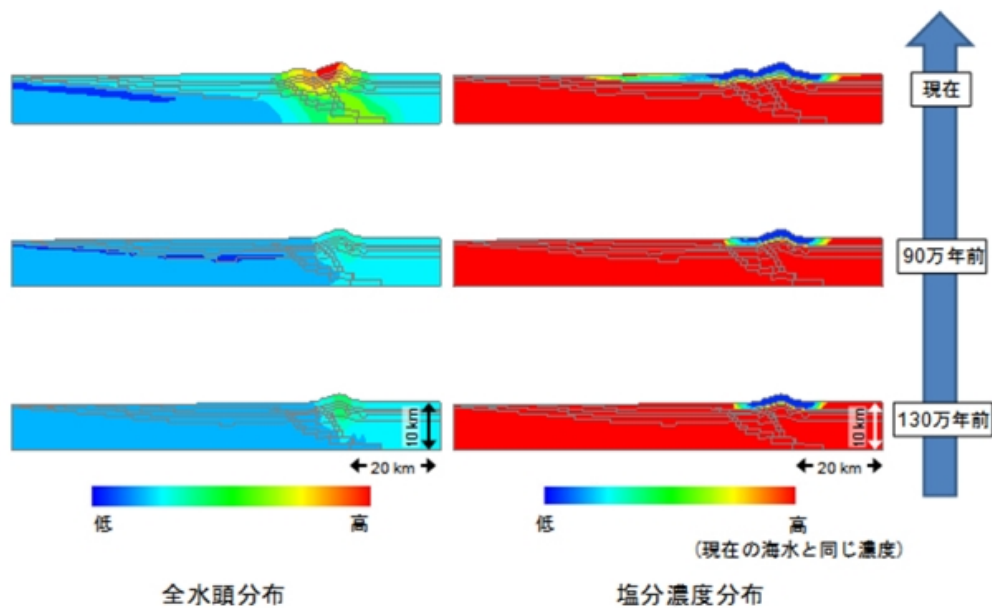


図 12 幌延沿岸域を対象とした海水準・地下水涵養量の変動を考慮した
長期的な地下水流動の解析例²³⁾

この例では、まず、現在の地殻変動の様式になる前（約 220 万年前）の地形・地質構造の形状を復元し、これを初期状態と仮定した地形・地質構造モデルが作成された。次に、幌延沿岸域が陸地化したと推定される約 130 万年前から現在までの期間を対象とし、この期間における地殻変動の様式として現在と同様の東西方向での圧縮状態を考慮し、複数の時間ステップにおける地形・地質構造モデルが作成された（図 11）。その後、各々の時間ステップにおいて地形・地質構造モデルを反映した水理地質構造モデルが作成され、SMS を用いた地下水流動解析が行われた。SMS による解析では、海水準変動（気候変動）と地下水の涵養量の変動を連動させ、温暖期の涵養量は年間 100mm、寒冷期の涵養量は年間 0mm と各々仮定された。図 12 には、幌延沿岸域を含む領域での地下水の全水頭分布と塩分濃度分布の時間変化の様子を推定されている。ちなみに、塩分濃度分布の解析結果において、現在の状態の推定結果を見ると、塩分濃度の低い淡水性地下水が沿岸域の海底下に浸透しており、このような傾向は、前述した産総研による幌延沿岸域での物理探査結果から推定された比抵抗構造のモデル図（図 6）と調和的である。このように、沿岸域も含めた広域での地下水の流動性評価にあたり、地形・地質構造の変遷や海水準・地下水涵養量の変動を考慮した長期的な影響を評価するための手法が例示され、現状での評価技術が提示されている¹²⁾。

5. 2 得られた成果の体系化に関わる取り組み

沿岸域を対象とした調査・評価にあたり、原子力機構では、幌延や瑞浪における深地層の研究施設計画で整備された地上からの体系的な調査・評価技術および統合化データフローダイアグラム等を活用し、沿岸域を対象とした調査・評価で必要な情報とそれらの情報の取得にあたっての一般的な技術的課題を整理（表 3）するとともに、沿岸域を対象とした場合の統合化データフロー

¹²⁾ ちなみに、地質環境の長期的変遷として、堆積岩中の圧密作用と侵食作用の影響を考慮した評価も可能にするため、解析プログラムの改良も進められている²⁴⁾。

ム（専門家の判断等に基づく意思決定過程）を明示的に示し、計画立案・調査実施を支援するシステムとして開発された²⁹⁾。ISIS では、幌延および瑞浪の深地層の研究施設計画で整備された本プロジェクトを通じて得られた調査・評価技術や、幌延の沿岸域を対象とした沿岸域プロジェクトを通じて得られた調査・評価技術に基づきエキスパートシステムの整備が進められ¹³⁾、特定の地質環境を対象とした調査評価技術の体系的な整備に向けた取り組みがなされた²⁹⁾。これらは、将来、地層処分の実施主体が行う調査計画の立案・調査実施・評価を支援する上で活用できると共に、安全規制機関が規制要件や基準類等を整備する際の判断根拠に関わる背景情報としても利用可能なシステムとして提示された²⁹⁾。

ここでは、沿岸域プロジェクトにおける議論を踏まえた成果として、ISIS の中での体系的整備への取り組みの一環として行われた地質環境調査の手順整備の例²⁹⁾について説明する。図 15 に幌延の沿岸域を対象とした地質環境調査の手順の例¹⁴⁾を示す。手順としては、以下に記すような 6 つの段階に分けられる。

① 既存情報の収集

- ・国内外における沿岸域を対象とした調査評価事例に関する知見を網羅的に収集。収集した情報をもとに共通した知見や調査評価方法等を整理
- ・上記の情報の中から国内の情報に着目し、上記と同様な観点で情報を整理
- ・さらに、幌延の沿岸域周辺に関わる情報に着目し、上記と同様な観点に加え、ローカルな視点での固有な情報についても整理
- ・幌延沿岸域という対象地域の特性を踏まえ、統合化フローダイアグラムを作成（幌延の深地層の研究施設計画で作成された統合化フローダイアグラムを参考に適宜修正）

② 既存情報の整理

- ・①で収集した情報や整理された知見等をもとに、対象地域の地質環境調査の計画立案や地質環境モデル構築にあたり必要となる基礎資料を作成（対象領域の設定、既存情報に基づく予察的な地質環境モデルの作成、予察的地質環境モデルの不確実な部分の抽出・整理）

③ 計画立案

- ・対象地域の地質環境調査のための計画を立案。計画は、調査全体を包含するような基本計画と個別の調査についての個別計画を策定
- ・基本計画では、調査項目、調査のための基本レイアウト、調査数量および基本工程等を包含
- ・個別計画では、地質環境調査に係る個別の調査についての詳細な計画を包含

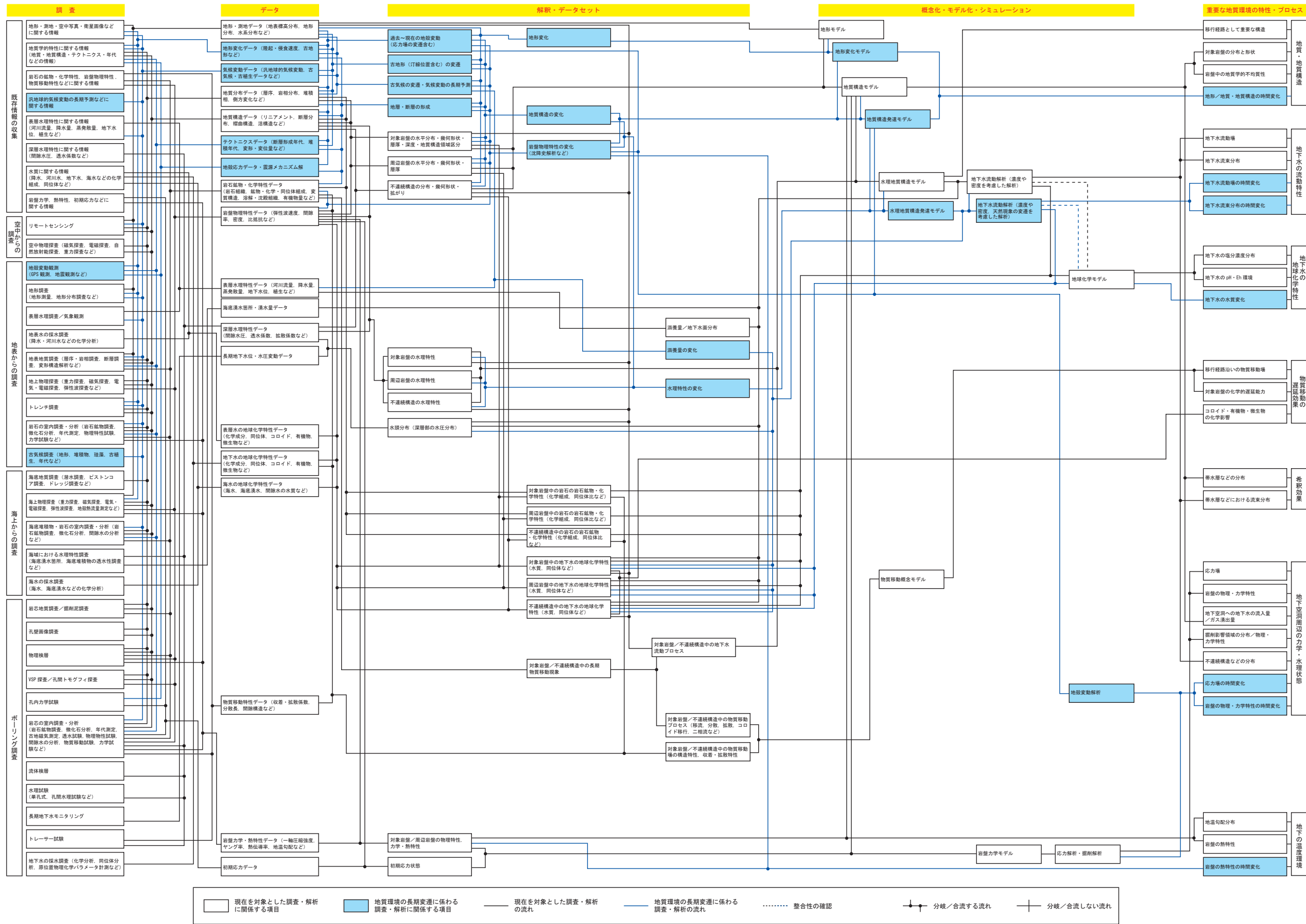
④ 調査の実施

- ・③で策定した個別計画に対応する調査を各々実施すると共に、調査結果について分析し、データの信頼性や個々の調査結果の評価を実施
- ・個別計画による調査結果の比較検討等を通じ、整合性の確認や調査結果の確からしさを評価
- ・地質環境モデルの詳細化（1次元→2次元→3次元）を想定した調査の検討

¹³⁾ 東濃地域や瑞浪地域における深部地質環境の調査技術開発を通じて得られた知見・経験、国外の地層処分に関わる研究機関で得られた知見等に基づき、地球化学関連のエキスパートシステムの整備内容については、岩月ら³¹⁾により紹介されている。

¹⁴⁾ 沿岸域プロジェクトを通じた地質環境調査手順の例は、実施体制や予算・工程的な制約等もあり、実際の処分事業を想定した場合の理想的な手順とは言えないものの²⁹⁾、調査手順の一連の道筋を理解する上では有効である。

– 28 –



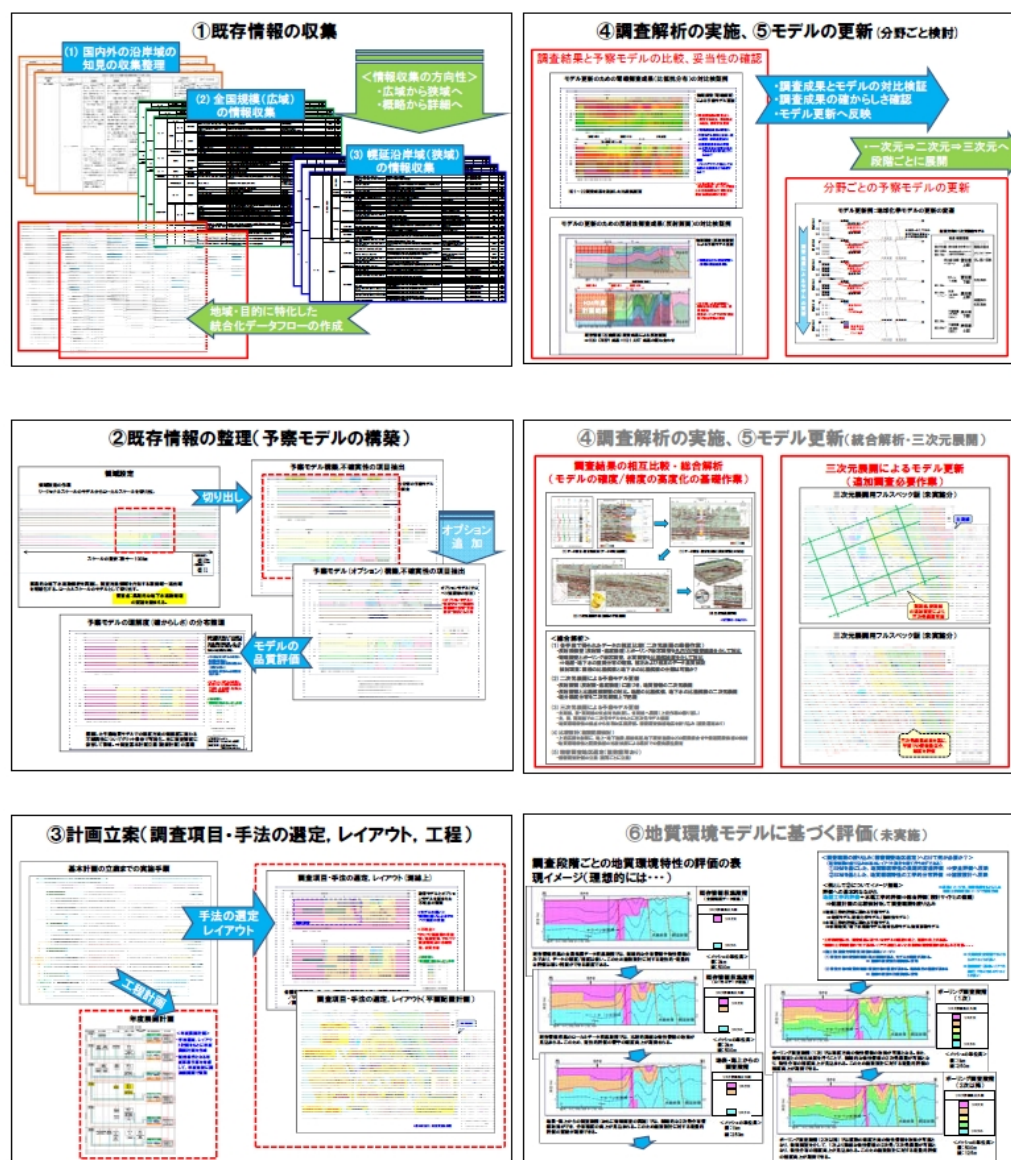
- 31 -

⑤ 地質環境モデルの構築・更新

- ・④の調査の実施に基づき、地質環境モデル（地質モデル、水理地質モデル、地球化学モデル、岩盤力学モデル等）を構築。また、分野毎のモデル間での整合／不整合についても確認
- ・調査の進展に伴い、適宜、地質環境モデルを更新。また、モデルの詳細化に伴う更新も検討

⑥ 地質環境モデルに基づく評価

- ・⑤で構築／更新された地質環境モデルをもとに、不確実性を踏まえて対象地域を評価

図 15 幌延の沿岸域を例にした地質環境調査の手順整備の例²⁹⁾

上述したような調査手順の作成を通じて得られた知見や経験は、ISIS における調査計画策定支援エキスパートシステムに反映され、沿岸域における立案のノウハウとして提示された²⁹⁾。また、4 章で個別に記述した沿岸域を対象とした地質環境調査方法の構築や地質環境基本計画立案にあたっての留意事項等もノウハウ／判断根拠として整理され、判断支援エキスパートシステムに反映されている²⁹⁾。このように、沿岸域プロジェクトを通じて得られた成果についても、幌延およ

び瑞浪の深地層の研究施設計画で整備された調査・評価技術と共に、ISIS の中で体系的に整備するような取り組みが図られている²⁹⁾。

6. おわりに

平成 19 年度～平成 24 年度までの 6 年間にわたり実施された沿岸域プロジェクトについて、プロジェクトに関係した各機関による連携・協力の枠組みや各機関が参加する全体会議で議論された内容等を中心に整理した。また、沿岸域プロジェクトにおける議論も踏まえ、各関係機関により実施された調査・評価により得られた成果の例や、得られた成果の体系化に向けた取り組みの例についても紹介した。このように、沿岸域プロジェクトを通じて実施された沿岸域における物理探査、ボーリング調査等の成果を踏まえ、沿岸域を対象とした調査・評価技術が整備されると共に、それらに基づいた調査方法や手順等が整備され、成果の体系的な整理が進められた。さらに、沿岸域を対象とした地下水流動の評価では、地質・地質構造、水理、地球化学条件等の調査・評価技術で得られた成果をもとに、長期的な変動を予測する手法を開発するため、各分野の成果を統合しつつ評価するような検討も進められた。

沿岸域の地質環境については、内陸地域に比べて調査実績が少なかったが、幌延の沿岸域を対象として進められた沿岸域プロジェクトにより、多くの知見や経験が蓄積され、それらに基づいたノウハウ／判断根拠も整理されつつある。沿岸域を対象とした調査・評価技術の整備については、沿岸域プロジェクトで得られた知見や経験も踏まえ、今後は、他地域の沿岸域や海域を対象として、調査・評価技術の改良や適用性確認を行い、調査・評価技術の精度向上や高度化が必要になると考えられる。また、沿岸域プロジェクトの成果の一部も反映されている次世代型サイト特性調査情報統合システム (ISIS) についても、将来、地層処分の実施主体や安全規制機関が各々の立場で有効に活用できるよう、引き続き、得られた成果の体系化に向けた取り組みが必要であると考えられる。

謝辞

沿岸域プロジェクトにおける全体会議には、以下の方々¹⁵⁾が出席され、議論・調整等が行われた。

- ・産業技術総合研究所：丸井敦尚，楠瀬勤一郎，内田利弘，伊藤成輝，越谷 賢，町田 功，井川怜欧
- ・電力中央研究所：木方建造，長谷川琢磨，須永崇之，柏谷公希，宮川公雄
- ・原子力環境整備・資金管理促進センター：田辺博三，吉村公孝，青木和弘，岡崎幸司
- ・日本原子力研究開発機構：清水和彦，中司 昇，茂田直孝，太田久仁雄，野原 壯，岩月輝希，新里忠史，水野 崇，濱 克宏，竹内真司，天野健二，仙波 毅，三枝博光，松岡稔幸，前川恵輔，國丸貴紀，山中義彰，重廣道子，浅森浩一，柴野一則，平賀正人，宮原重憲，宮本哲雄，豊田岳司，稲垣大介，松崎達二，藪内 聡，大澤英昭，常盤哲也，天野由紀，大山卓也，横田

¹⁵⁾ 全体会議に出席された方々の所属は、会議に出席された当時の所属で記してある。

秀晴，山崎雅則，笹本 広

・資源エネルギー庁：佐藤稔紀，丹羽正和，弥富洋介

また，本報告書の取りまとめにあたり，産業技術総合研究所・電力中央研究所・日本原子力研究開発機構の関係者の方には，種々のご助言を頂いた。なお，本報告書の本文中で引用した資源エネルギー庁の委託事業による報告書からの図表の転載については，資源エネルギー庁の許可を頂いた。ここに記して，感謝致します。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”，2006.
- 2) 日本原子力研究開発機構：“平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2008.
- 3) 濱 克宏，佐藤稔紀，笹尾英嗣，岩月輝希，國丸貴紀，松岡稔幸，竹内竜史，尾上博則，見掛信一郎：“超深地層研究所計画 統合化データフローの構築（研究坑道の掘削を伴う研究段階：第 2 段階）”，JAEA-Data/Code 2013-010，2013.
- 4) 産業技術総合研究所：“沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書”，2008.
- 5) 原子力環境整備・資金管理促進センター：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 報告書”，2009.
- 6) 産業技術総合研究所：“沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書”，2010.
- 7) 産業技術総合研究所：“沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書”，2011.
- 8) 電力中央研究所：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 ボーリング技術高度化開発 報告書”，2009.
- 9) 産業技術総合研究所：“沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書”，2012.
- 10) 産業技術総合研究所：“沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書”，2013.
- 11) 電力中央研究所：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発－地下水年代測定技術調査報告書－”，2009.
- 12) 電力中央研究所：“平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発－地下水年代測定技術調査報告書－”，2010.
- 13) 電力中央研究所：“平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発－地下水年代測定技術調査報告書－”，2011.
- 14) 電力中央研究所：“平成 23 年度 地層処分技術調査等委託費 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発－地下水年代測定技術調査報告書－”，2012.
- 15) 電力中央研究所：“平成 24 年度 地層処分技術調査等委託費 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発－地下水年代測定技術調査報告書－”，2013.
- 16) 電力中央研究所：“平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 ボーリング技術高度化開発 報告書”，2008.
- 17) 電力中央研究所：“平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 ボーリング技術高度化開発 報告書”，2010.

- 18) 電力中央研究所：“平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 ボーリング技術高度化開発 報告書”，2011.
- 19) 電力中央研究所：“平成 23 年度 地層処分技術調査等委託費 ボーリング技術高度化開発 報告書”，2012.
- 20) 電力中央研究所：“平成 24 年度 地層処分技術調査等委託費 ボーリング技術高度化開発 報告書”，2013.
- 21) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター：“幌延深地層研究計画 平成 21 年度調査研究成果報告”，2010.
- 22) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター：“幌延深地層研究計画 平成 22 年度調査研究成果報告”，2011.
- 23) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター：“幌延深地層研究計画 平成 23 年度調査研究成果報告”，2012.
- 24) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター：“幌延深地層研究計画 平成 24 年度調査研究成果報告”，2013.
- 25) 日本原子力研究開発機構：“平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2009.
- 26) 日本原子力研究開発機構：“平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2010.
- 27) 日本原子力研究開発機構：“平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2011.
- 28) 日本原子力研究開発機構：“平成 23 年度 地層処分技術調査等委託費 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2012.
- 29) 日本原子力研究開発機構：“平成 24 年度 地層処分技術調査等委託費 地質環境総合評価技術高度化開発 報告書”，2013.
- 30) Hama, K., Kunimaru, T., Metcalfe R., Martin, A. J. : “The hydrogeochemistry of argillaceous rock formations at the Horonobe URL site, Japan, Phys. Chem. Earth, 32, pp. 170-180.
- 31) 岩月輝希, 水野 崇, 國丸貴紀, 天野由紀, 松崎達二, 仙波 毅：“地層処分事業に関わる地球化学分野の技術者が継承すべき知見のエキスパート化—文献調査から精密調査段階における地球化学解析手順について—”，原子力バックエンド研究, Vol. 19 No. 2, pp. 51-64, 2009.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ，濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	℃		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuchide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表 4．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒 ニュートンメートル	Pa s N m	m ⁻¹ kg s ⁻¹ m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表 7．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8．SIに属さないが³、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベール	dB	

表 9．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガッラル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー）， 4.1868J（「IT」カロリー） 4.184J（「熱化学」カロリー）
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

