

企画セッション | 部会・連絡会セッション：バックエンド部会

■ 2019年9月11日(水) 13:00 ~ 14:30 | ⅢB会場 共通教育棟 1F C12

[1B_PL] 深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待

座長:小崎 完(北大)

[1B_PL01] 原子力機構における深地層の研究施設計画の成果の概要

*仙波 毅¹ (1. JAEA)

[1B_PL02] 原環センターにおける深地層の研究施設を活用した研究開発について

*小林 正人¹ (1. 原環セ)

[1B_PL03] 電中研における深地層の研究施設を活用した研究開発について

*幡谷 竜太¹、田中 靖治²、長谷川 琢磨³ (1. 電中研、2. 電中研、2. 電中研)

[1B_PL04] 海外施設での共同研究例と今後への期待

*藤崎 淳¹ (1. NUMO)

[1B_PL05] 総合討論

バックエンド部会セッション

深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待

Overview of the Results of the Deep Underground Research Laboratories and Expectation for the Future

(1) 原子力機構における深地層の研究施設計画の成果の概要

(1) Overview of the Results of JAEA's Underground Research Laboratory Projects

*仙波 毅¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」）は、地元自治体と協定等を締結し、北海道・幌延町の「幌延深地層研究計画」（以下、「幌延計画」）と岐阜県・瑞浪市の「超深地層研究所計画」（以下、「瑞浪計画」）の2つの深地層の研究施設計画（以下、「URL計画」）を進めている。我が国の地層処分事業とその安全規制の両面を支えるため、幌延深地層研究計画では堆積岩を、超深地層研究所計画では結晶質岩をそれぞれ対象とし、地層処分事業の段階的な進展に先行して、第1段階：地上からの調査研究段階、第2段階：坑道掘削時の調査研究段階、第3段階：地下施設での調査研究段階と段階的に研究開発を進めている。本報告では、URL計画の成果の概要を示す。

2. URL計画の成果の概要

URL計画では、第1段階から第2段階にかけて、地上からの調査・解析・評価手法の妥当性や、研究坑道の施工・維持・管理に関わる工学技術の有効性を確認した^{1),2),3),4),5),6)}。原子力機構は、2013年に「日本原子力研究開発機構の改革計画自己改革―「新生」へのみち―」を策定し、この自己改革の一環として、URL計画で行う研究課題としてそれぞれ3つの必須の課題を設定した⁷⁾。現在、研究開発の第3段階として、これらの課題に取り組んでいる。これまでに得られた成果としては、例えば、幌延計画においては、突発湧水の発生の原因となり得る粘土質せん断帯の事前予測において、鉱物中の包有物に着目した手法が有効であること⁸⁾や、瑞浪計画においては、坑道閉鎖後の物質の閉じ込め能力を実際の坑道を用いて示したこと⁹⁾等があげられる。研究開発を進めるにあたり、原子力環境整備促進・資金管理センターとの地下環境での人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究（幌延計画）や、電力中央研究所との物質移動に関する調査・評価技術の開発（瑞浪計画）等、研究機関や大学等との共同研究を進めている。また、国民との相互理解の促進の活動として、定期的に施設見学会を開催する等、地下研究坑道を積極的に公開している。2019年3月までの入坑者数は、幌延の施設が延べ約11,000人、東濃の施設が延べ約21,000人である。

2-3. おわりに

原子力機構は、地層処分事業や安全規制に具体的に役立つよう、これらの成果を適切に取りまとめ、発信していく。

参考文献

1) 三枝ほか (2007), JAEA-Research 2007-043.; 2) 野原ほか (2016), JAEA-Research 2015-026.; 3) 太田ほか (2007), JAEA-Research 2007-044.; 4) 藤田ほか (2007), JAEA-Research 2007-045.; 5) 佐藤ほか (2017), JAEA-Research 2016-025.; 6) 濱ほか(2015), JAEA-Research 2015-007.; 7) 日本原子力研究開発機構 (2013), “日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書―今後の研究課題について―”; 8) Ishii, E. and Furusawa, A., Engineering (2017), Geology, 228, 158-166.; 9) Iwatsuki, T. et al. (2017), Applied Geochemistry, 82, 134-145.

*Takeshi Semba¹¹Japan Atomic Energy Agency

バックエンド部会セッション

深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待

Overview of the Results of the Deep Underground Research Laboratories and Expectation for the Future

(2) 原環センターにおける深地層の研究施設を活用した研究開発について

(2) Research and Development at Underground Research Laboratories by RWMC

*小林 正人¹¹原子力環境整備促進・資金管理センター

〇はじめに

原環センターでは高レベル放射性廃棄物の地層処分について、特に工学的観点から人工バリアの製作・施工技術の整備、品質管理技術の検討に取り組んできた。人工バリアの製作・施工技術については、要素試験から実規模の装置による実証的な検討まで段階的な技術整備を通して、我が国の地層処分事業に適用可能な技術としての実現性を確認しつつ技術オプションの整備を進めている。人工バリアの品質管理技術の検討例としては、定置後の処分環境における炭素鋼オーバーパック溶接部の腐食挙動、緩衝材の再冠水時の浸潤挙動・流出挙動などを対象とした。これらの検討を実際の地下環境での試験や試験環境が制御できる室内試験によって行うことにより、前述の製作・施工技術として整備した技術が長期の安全性を確保するうえで期待される機能を満足することを示すための知見を拡充してきた。地層処分事業に対する信頼感をさらに高めていくには、実際の地下環境条件における技術的実現性の提示、人工バリア材料等の挙動評価技術の有効性の提示などの工学的な観点からの取組を着実に進めていく必要がある。また、2015年5月に改定された「高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」で示された回収可能性を担保するための技術の整備も事業や施策への信頼感の醸成に向けた重要な課題である。

〇深地層の研究施設における試験の概要

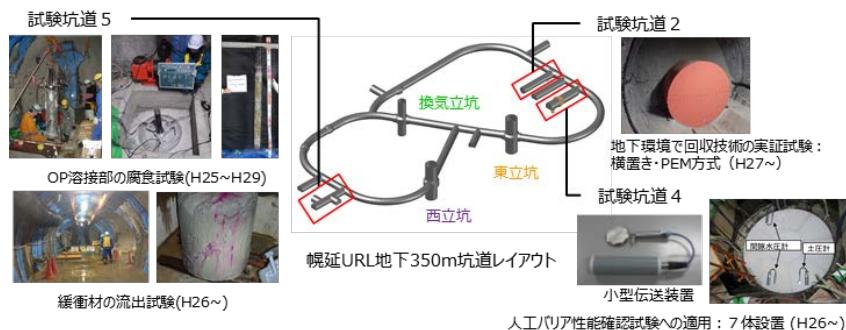
これらの技術開発課題について、原環センターは日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターとの共同研究契約等により、地下350mの試験坑道を活用した調査研究計画を策定し取り組んできた。

人工バリア等の健全性評価及び無線計測技術の適用性に関する研究¹⁾

地下350mの試験坑道5において、原位置の実地下水を使用した炭素鋼オーバーパック溶接部の腐食試験や緩衝材の流出試験を実施し、これまでに室内試験で得られた知見等の妥当性を検証するとともに、実環境で実際に起こる挙動の把握を行った。同深度の試験坑道4で実施中の人工バリア性能確認試験では、ケーブルが不要な無線伝送技術による計測技術の実証試験を実施している。

搬送定置・回収技術の実証的検討に関する研究²⁾

処分坑道横置き・PEM*方式を対象とした回収技術については、地下350mの試験坑道2を活用した実規模の実証試験を実施している。同試験では、一連の定置作業の逆動線による回収作業を念頭に置き、PEM-坑道間ヘスクリー方式／吹付け方式による隙間充填材の施工試験、機械的方式／流体的方式による隙間充填材の除去試験、狭隘な空間にも適用可能なエアベアリング方式の定置装置によるPEMの回収試験を実施中である。*PEM: Prefabricated Engineered barrier system Module



本報告は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「処分システム工学確証技術開発（平成25年度～平成29年度）」、「可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発（平成27年度～平成30年度）」の成果の一部である。

参考文献

1) 原環センター、平成25年度～29年度 処分システム工学確証技術開発 報告書、2014～2018.

2) 原環センター、平成27年度～30年度 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書、2016～2019.

*Masato Kobayashi¹¹Radioactive Waste Management Funding and Research Center

バックエンド部会セッション

深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待

Overview of the Results of the Deep Underground Research Laboratories and Expectation for the Future

(1) 電中研における深地層の研究施設を活用した研究開発について

(1) Research and development at underground research laboratories by CRIEPI

*幡谷 竜太¹, 田中 靖治¹, 長谷川 琢磨¹¹電力中央研究所

1. はじめに

一般財団法人電力中央研究所（以下、「電中研」）では、2002 年度より、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」）との共同研究として、瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究センターおよびそれらの周辺において、地下水流動、物質移行などの研究を展開してきた。本発表では、これらのうちの主なものについて紹介するとともに、深地層の研究施設を活用した研究開発の意義について触れたい。

2. 地下水年代

当所では、瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究センター周辺において地下水年代（滞留時間）の研究を継続的に実施している。

瑞浪超深地層研究所は広域的な地下水流動では流出域に位置しているが、¹⁴C の前処理がうまくいかない（沈殿ができない）、⁴He の原位置生成とフラックスの分離ができないなどの技術的な理由により、地下水年代が推定できていなかった¹⁾。しかし、地下坑道からの採水では、品質の良いサンプルを比較的簡単に採取する事ができ、採取方法や前処理方法²⁾を変更し、地下水年代を繰り返し試行することにより、¹⁴C、⁴He、希ガス温度計などの測定精度向上を図ることができた。この結果、研究所周辺の地下水は氷期（約 2 万年前）に涵養した地下水であると推定できた。現在は、更なる精度向上・確証を目指して、データを蓄積している。

幌延深地層研究センターでは、瑞浪超深地層研究所に比べて地下水の流れが遅く、³H などを含む新しい地下水の流入は確認できていない。立坑周辺では、非常に古い地下水（化石海水）が滞留している可能性が示唆された³⁾。一方、地層境界などの高透水部では、降水の混合が進んでいる傾向がみられた。これらのことと、Cl 濃度や水素・酸素同位体比の分布は非常に緩やかに変化することから、移流ではなく拡散が支配的ではないかと考えられた。この降水の輸送形態や地下水年代を調査するために、現在、拡散により分離する物質（Cl と δD ）や $\delta^{37}\text{Cl}$ の分別に基づく評価⁴⁾や、新しいトレーサーを用いた地下水年代測定を実施している。

3. 物質移行

岩盤の物質移行特性を評価するためには、原位置でのトレーサー試験が極めて有効であると考えられ、当所では、原位置トレーサー試験のための試験装置と、試験結果から岩盤の物質移行特性を推定する手法の開発を進めてきた。そして、それらの装置・手法の有効性を実証するため、瑞浪超深地層研究所において原位置トレーサー試験を実施した⁵⁾。トレーサー試験に先立ち、試験場にボーリング孔を複数本掘削し、従来手法による地質・地下水調査を実施し、孔間距離数 m に広がる単一の水みち割れ目を試験対象として選定した。トレーサー試験では、非収着性物質である重水素とウラン、収着性物質である Rb と Ba をトレーサーとして使用した。トレーサー試験の結果、収着性物質が非収着性物質に比べて遅れて回収されることが確認された。また、非収着性トレーサーの回収濃度からは試験対象割れ目の開口幅と分散長を、収

*Ryuta Hataya¹, Yasuharu Tanaka¹ and Takuma Hasegawa¹¹Central Research Institute of Electric Power Industry.

着性トレーサーの濃度からは割れ目周辺のマトリクスに対する分配係数を、それぞれ推定できた。今年度は、多数の水みち割れ目のネットワークを対象とした、より長い孔間距離での原位置トレーサー試験を実施している。

4. 掘削影響

掘削影響領域では、地圧や岩盤の強度との関係による岩盤の損傷（掘削損傷領域）、間隙水圧の低下や脱ガスの影響などによる水飽和度の低下（不飽和領域）、坑道周辺の地圧分布の変化（応力再配分領域）など、岩盤に様々な変化が生じると考えられている。これらは、放射性核種の移行挙動に影響する可能性がある。そこで、JAEA と共同で、幌延深地層研究センターにおける地下坑道掘削に伴う掘削影響領域の調査を 2008 年より実施している^{6,7)}。

これまでに、坑道掘削に伴い、坑壁の周辺において割れ目の形成や弾性波速度、比抵抗の変化等が捉えられた。また、掘削影響の深度による違いも見られた。掘削損傷領域の範囲（坑壁からの距離）は、GL-140 m で最大約 0.45 m、GL-250 m で最大約 1 m と推察され、後者がより割れ目が進展していると推察された。一方、不飽和領域の範囲は、140 m では坑壁から 1 m 以内、250 m 坑道では不飽和領域はほとんど形成されていないと推察された。今後、岩盤の力学特性や化学特性、透水特性に関する深度による違いを詳細に検討することで、両深度の掘削影響領域において生じた物理変化の要因を明らかにしていきたい。

5. おわりに

深地層の研究施設では、ボーリング調査では得られない試料やデータを取得することができる。欧米の楯状地（非常に古い地層）などと比べ割れ目の分布密度が比較的高い岩盤、比較的新しい堆積軟岩、といった我が国に特徴的な地層を地表の影響（風化など）が少ない状態で直接観察できる点は、深地層の研究施設の大きなメリットである。また、封圧採水や掘削水の除去は地表からのボーリング調査では多大な労力を要するが、深地層の研究施設では相対的に容易であり、溶存ガスなどの地化学特性の品質の良いデータを提供してくれている。さらに、掘削影響領域に関する調査では、深部の坑道周りの岩盤の経時変化についても 10 年以上にわたって調べてきたが、地層処分の深度相当の地質環境の経時変化を容易に捉えられるという点でも施設の意義は大きい。これらのメリットは、地質環境特性の調査・評価技術にとって、決定的に重要である。一方で、具体的には坑道間で、あるいは、坑道と地表間でなど、地表とは異なる条件下で、物理探査やトレーサー試験の深化といった調査・評価技術の開発にも期待がかかる。

謝辞

本稿で紹介した地下水年代と物質移行の研究は、経済産業省「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業（岩盤中地下水移行評価確証技術開発）」、同「高レベル放射性廃棄物等の地層処分技術に関する調査等事業（岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）」の一環である。また、掘削影響の研究は、日本原子力研究開発機構と共同で実施したものの一部である。関係者の方々に謝意を表す。

引用文献

- 1) Hasegawa *et al.*, 2016, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192, 279-294.
- 2) Nakata. *et al.*, 2016, *Radiocarbon*, 58, 491-503.
- 3) Nakata. *et al.*, 2018, *Geofluids*, vol. 2018, Article ID 7823195, 21 pages, 2018. doi:10.1155/2018/7823195.
- 4) Hasegawa *et al.*, 2018, *Chemical Geology*, 483, 247-253.
- 5) 田中ほか、2018、日本地下水学会 2018 年秋季講演会講演予稿、150-153.
- 6) 窪田ほか、2017a、電力中央研究所報告、N17005.
- 7) 窪田ほか、2017b、電力中央研究所報告、N17006.

バックエンド部会セッション

深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待

Overview of the Results of the Deep Underground Research Laboratories and Expectation for the Future

(4) 海外施設での共同研究例と今後への期待

(4) Overview of International Cooperation at Foreign URL and Its Future Development

*藤崎 淳¹¹原子力発電環境整備機構

1. はじめに

原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」）は、地層処分の実施主体として、

- ① 技術課題に関わる技術力の獲得
- ② 研究インフラを伴う包括的な人材育成
- ③ プロジェクト管理技術の強化
- ④ 国際貢献

といった様々な目的から国際共同研究を積極的に進めており、表-1にNUMOが参加している国際共同研究およびプロジェクトとその目的を示す。特に地下研究施設を利用したプロジェクトは、地層処分場を設置するような実際の地下深部の条件で現象の理解やモデル・データの開発、工学技術の実証という観点で重要な場と位置づけている。

表-1 NUMO が参加する国際共同研究／プロジェクトと目的

国際共同研究／プロジェクト		目 的*
NWMO 共同研究（銅コーティングオーバーパック）		①
LBNL 共同研究（断層の水理／力学的挙動）		①, ②, ④
Nagra 共同研究（地下水調査手法整備）		①, ③, ④
グリムゼル試験場（Nagra） における国際共同研究 （GTS Phase VI）	CFM（コロイド生成・核種移行試験）	①, ②
	CIM（長期変質セメント中の移行試験）	①, ②
	LTD（長期拡散試験）	①, ②
	MaCoTe（金属材料腐食試験）	①, ②
エスボ岩盤研究所（SKB） における国際共同研究	横置き定置概念 KBS-3H の実規模実証試験（解体）	①, ②, ③
	人工バリアタスクフォース	①, ④
OECD/NEA 国際プロジェクト	EGOS（操業安全性に関する検討）	①, ④
	Clay Club（堆積岩に関する検討）	④
	Crystalline Club（結晶質岩に関する検討）	③, ④
	FEP Database（国際 FEP データベース整備）	④
国際共同プロジェクト（ボーリング孔閉塞技術）		①, ④
国際共同プロジェクト BIOPROTA（生活圏モデル・データに関する検討）		①, ④
国際共同プロジェクト NAWG（ナチュラアナログに関する検討）		①, ④

※本文中の番号に対応

*Kiyoshi Fujisaki¹¹Nuclear Waste Management Organization of Japan

地層処分場の閉鎖後長期の安全性の評価においては、処分場で生起する現象に関する知識や数理モデルを用いて処分場の状態変遷を考慮してシナリオを記述し、シナリオに対応した核種移行プロセスのモデル数値解析を行う。事業期間を通じて安全性の評価の信頼性を確保し、より高めていくために、現象に関する知識の蓄積や数理モデルの妥当性を絶えず確認していくことが重要である。このことから、室内試験および原位置試験における実測データの取得や、実測データとモデル計算の結果との比較・評価を行うための「場」が必要であり、その一つとして、NUMO はスイス放射性廃棄物管理組合（以下、「Nagra」）のグリムゼル試験場（以下、「GTS」）における国際共同プロジェクト（以下、「GTS Phase VI」）¹⁾に 2016 年度から参加している。GTS Phase VI には、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」）と共同で参加しており、原位置における試験データの取得・評価に協働して取り組むことによって、これまで研究開発機関として GTS Phase VI にも参加していた JAEA に蓄積されている知識や経験を NUMO へ円滑に移転することを併せて志向している。

2. GTS Phase VI の概要と NUMO が参加しているプロジェクト

GTS はスイスアルプスの結晶質岩中に位置し、1984 年から Nagra が運営している。特筆すべき特徴として、試験場内の放射線管理区域（IAEA Level B/C）としている坑道で放射性トレーサーを用いた試験の実施が可能であることがあげられる。GTS Phase VI では、現在 12 ヶ国から 20 を超える機関が参加し、10 件の国際共同研究プロジェクトが進行中である²⁾³⁾。NUMO はこれらの国際共同研究プロジェクトのうち、CFM (Colloid Formation and Migration)、CIM (Carbon Iodine Migration)、LTD (Long Term Diffusion)、MaCoTe (Material Corrosion Test) の 4 件に参加している。以下にこれらのプロジェクトにおける試験の概要を示す。

○**CFM (Colloid Formation and Migration)**：人工バリアからのベントナイトコロイドの生成挙動と母岩の割れ目における移流による核種移行への影響の理解を目的として、坑道から掘削したボーリング孔で放射性トレーサーを用いた試験を行う（図-1 参照）。

○**CIM (Carbon Iodine Migration)**：セメント系材料中の C-14 と I-129 の移行遅延特性の理解を目的とし、セメント系材料で埋め戻した過去の別プロジェクトで用いられたボーリング孔（セメント系材料の材令 14 年）で放射性トレーサーを用いた試験を行う（図-2 参照）。

○**LTD (Long Term Diffusion)**：拡散による母岩中の核種移行挙動の理解を目的とし、坑道から掘削したボーリング孔で放射性トレーサーを用いた試験を行う（図-3 参照）。

○**MaCoTe (Material Corrosion Test)**：嫌気性環境下における圧縮ベントナイト中での炭素鋼、ステンレス鋼および銅の腐食速度の確認、ベントナイト緩衝材による微生物活動の阻害および微生物による腐食への影響に関する情報の取得を目的として、圧縮ベントナイト中に金属片を埋設した試料を坑道から掘削したボーリング孔内に設置し腐食試験を行う（図-4 参照）。

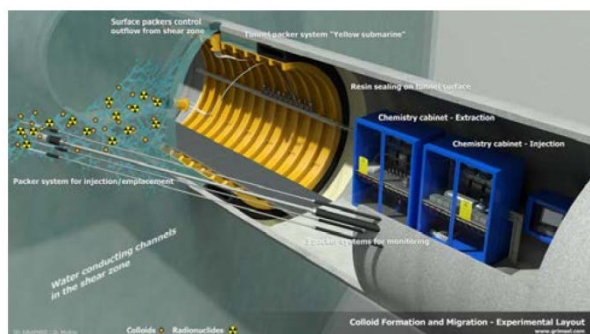
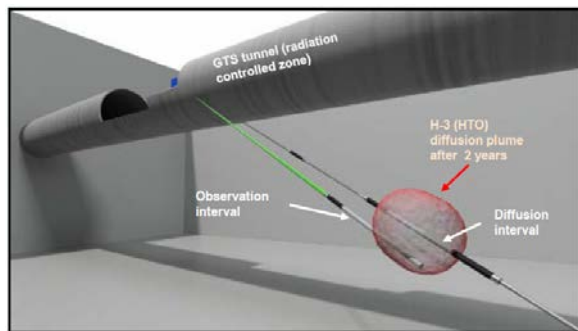


図-1 CFM における原位置試験の概念図（坑道径：3.5 m）¹⁾



図-2 CIM における原位置試験の概念図³⁾

図-3 LTD における原位置試験の概念図¹⁾図-4 MaCoTe における原位置試験の概念図¹⁾

右：モジュール内のベントナイト中に試験片を設置した状態
 左：モジュールをボーリング孔に設置した状態

3. 地下研究施設への期待

NUMO は包括的技術報告書(レビュー版)⁴⁾において、これまでに蓄積されてきた科学的知見や技術を統合し、地層処分の実施主体として、わが国の地質環境に対して安全な地層処分を実現するための方法を説明するとともに、技術的信頼性をさらに高めるために今後取り組むべき課題について示している。地層処分事業に対するステークホルダーの信頼をより強いものとしていくためには、引き続きこうした課題に取り組み、サイトが特定された場合に、深部地質環境条件を含むサイトの環境条件の調査・評価やその条件に適した処分場を設計し、建設・操業・閉鎖を行うための技術の実証を進めるとともに、安全性の評価のための技術的信頼性を向上させていくことが重要である。こうした技術開発への取り組み、また、必要となる人材の育成、プロジェクト管理技術の強化、日本の国際貢献の場として、地下研究施設には地層処分事業を支援する有効なインフラとして機能することが期待される。

参考文献

- 1) Vomvoris et al., 2015, NAGRA'S ACTIVITIES AT THE GRIMSEL TEST SITE AND THE MONT TERRI PROJECT: UPDATE AND OUTLOOK, Proc. IHLRWM 2015.
- 2) Nagra, 2019, Annual report 2018.
- 3) Nagra, 2019, GRIMSEL TEST SITE(GTS) NEWS LETTER, APRIL 2019 YEAR 01, VOL.1.
- 4) 原子力発電環境整備機構, 2018, 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現 ―適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築― レビュー版, NUMO-TR-18-03.

企画セッション | 部会・連絡会セッション | バックエンド部会

[1B_PL] 深地層の研究施設におけるこれまでの成果と今後への期待

座長:小崎 完(北大)

2019年9月11日(水) 13:00 ~ 14:30 B会場 (共通教育棟 1F C12)

[1B_PL05]総合討論

我が国における深地層の研究施設計画は、原子力機構の東濃地科学センター及び幌延深地層研究センターにおいて、それぞれ平成8年、平成13年から開始され、現在、地下の坑道を利用した調査研究が行われている。また、NUMOは海外の施設を利用した国際共同研究に参加しており、その成果も着実にあげてきている。一方で、原子力機構の平成31年度の計画によれば、瑞浪超深地層研究所については、坑道の埋め戻しに着手することとされるなど、今後、地下研究施設を用いた研究開発環境の変化が予想される。

このような状況を踏まえ、現在までに、我が国の深地層の研究施設において得られた成果や果たしてきた役割を改めて確認するとともに、国内外の地下研究施設での研究開発事例なども参照しながら、今後の深地層研究の在り方について、バックエンド部会の立場から幅広く議論を行う。