放射性廃棄物の埋設処分に係る安全規制支援研究 —地層処分と中深度処分—

塚本 斉^{1*}・伊藤一誠¹・森川徳敏¹・風早康平¹・戸崎裕貴¹・竹田幹郎¹

Research for developing the scientific basis to ensure the safety of the radioactive waste disposal —Geological disposal and intermediate disposal of radioactive waste—

Hitoshi TSUKAMOTO^{1*}, Kazumasa ITO¹, Noritoshi MORIKAWA¹, Kohei KAZAHAYA¹,
Yuki TOSAKI¹ and Mikio TAKEDA¹

I. 地層処分と中深度処分

地層処分という概念・言葉は、近頃では十分に一般化し、市民権を得ているようである。地層処分とは、日本国内では高レベル放射性廃棄物を地下300 m以上（「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、最終処分法という）第2条の2）の深度へ単独で、あるいは放射能レベルの高い超ウラン元素を含む長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）とともに併置して、埋設処分をすることを指す。一方、中深度処分という概念・言葉は、未だそれほど一般化してはいないようである。ここでは、まず中深度処分という概念について簡単に説明する。

中深度処分とは、高経年化した原子力発電所の廃炉（福島第一原子力発電所の事故炉を除く）に伴って発生する炉内構造物や燃料被覆管、制御棒等の放射化金属等（以下、炉内等廃棄物と総称する）の α 線を放出する核種の濃度は低いものの、長半減期核種（ ^{94}Nb や ^{182}Hf 等）を含み、高レベル放射性廃棄物よりは低いものの高い放射能レベルを有する放射性廃棄物を、想定処分深度100 m

程度の深度へ埋設処分しようとするものである。これらの炉内等廃棄物は、従来「余裕深度処分」という処分概念の対象として、想定処分深度50～100 m程度の深度への埋設処分が検討されていたが、埋設処分後300～400年の規制期間終了後の安全確保の観点から、廃棄物埋設地の位置・隔離期間・長半減期核種の濃度制限・閉じ込め機能等について原子力規制委員会により再整理が行われ、中深度処分という処分概念にまとめられつつあるものである。中深度処分の安全規制と地球科学の関係については、著者の一人である伊藤一誠が産業技術総合研究所の学術誌シンセシオロジーに論説を投稿中であるので（伊藤、投稿中）、そちらを参照していただきたい。

II. 放射性廃棄物の埋設処分に係る最近の動向

放射性廃棄物の埋設処分事業に関する最近の最も大きな動きは、2017年7月28日の資源エネルギー庁による高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る「科学的特性マップ」（Fig. 1）の公開であろう。この科学的特性マップでは、地層処分に係

1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology

* 責任著者

Fig. 1 Nationwide map of scientific features for geological disposal (Agency for Natural Resources and Energy, 2017).

る地質環境特性及びその長期安定性の確保に関する検討から、物理的隔離機能の損失の観点において「火山・火成活動」、「隆起・侵食」、「鉱物資源（探査に伴う偶発的な人間侵入）」、閉じ込め機能の損失の観点において「断層活動」、「地熱活動」、「火山性熱水・深部流体」、地下施設・地上施設の建設・操業時の安全性の確保に関する検討から「未固結堆積物」、「火砕流等」、放射性廃棄物の輸送時の安全性に関する検討から「港湾（海岸）からの距離」について、「好ましくない特性があると推定される地域」、「好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域」、「輸送面でも好ましい地域」に分けて、日本全国が1/200万の縮尺で色分けされている。この科学的特性マップは、「我が国の地下深部の科学的特性等について全国マップの形で国民に分かりやすく情報を提供し、地層処分についての国民の関心や理解を深めていく」趣旨で作成されたものとされる。今後この科学的特性マップを基に、地層処分に対する国民的理解が深まり、3段階の調査の最初の段階である文献調査を受け入れる自治体が出てくれば、停滞していた地層処分事業やその安全規制行政が動き始めると考えられる。

一方、中深度処分に関しては、原子力規制委員会の廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チームにおいて、規制の考え方がまとめられ、規制基準・審査ガイド等について案文がまとめられつつある段階である。なお、中深度処分の原型となった余裕深度処分については、後述するように日本原燃株式会社による調査が平成18年に終了しており、中深度処分に対する安全規制要求への対応や将来的な事業化については地層処分よりも先んじるものと考えられている。

Ⅲ. 放射性廃棄物の埋設処分に係る 研究開発体制とその状況

地層処分技術に関する研究開発に関しては、2000年の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）の成立とそれを受けた実

施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）の設立後、資源エネルギー庁の地層処分基盤研究調整会議の構成機関として処分事業や処分計画に係る研究開発を担う機関と、2001年に設置された原子力安全・保安院から2012年に設置された原子力規制庁へと引き継がれた地層処分の安全規制に係る研究開発を担う機関の2系統の研究開発機関が、それぞれに情報交換を行いながらも独立した研究開発を行ってきている。

産業技術総合研究所においては、地図資源環境研究部門が地層処分基盤研究調整会議の構成機関に、著者の属する活断層・火山研究部門が安全規制の支援研究機関に位置づけられており、同一研究所ではあるが、研究部門という仕切りを疑似的な物理的隔壁とみなし、コンプライアンスの保持と研究開発の独立性を担保している。同様な例は日本原子力研究開発機構にも見られ、バックエンド研究開発部門が地層処分基盤研究調整会議の構成機関に、安全研究・防災支援部門（安全研究センター）が安全規制の支援研究機関に位置づけられている。

また、地下施設を用いた地層処分技術研究開発については、日本原子力研究開発機構バックエンド研究開発部門において、東濃地科学センター瑞浪超深地層研究所が花崗岩類を対象とした深度500 m坑道、幌延深地層研究センターが新第三紀堆積岩類を対象とした深度380 m坑道（平成29年10月30日現在）を用いた調査研究を現在も進めている。一方、中深度処分に関しては、従来の「余裕深度処分」概念に対する調査研究として日本原燃株式会社による深度100 m試験空洞の掘削を伴う本格調査（平成14年11月～平成18年3月）が行われている。

Ⅳ. 地層処分・中深度処分の 安全規制支援研究プログラム

放射性廃棄物の埋設処分の安全規制を司る原子力規制委員会では、2012年の設置直後は旧・原子力安全・保安院の立案した地層処分の安全規制

に係る規制支援研究計画を受け継いでいたが、地層処分事業に対する安全規制の長期的な必要性は認めつつも、より喫緊の課題である福島第一原子力発電所事故の安全確保や高経年化した原子力発電所の廃炉に伴って発生する炉内等廃棄物の中深度処分の安全規制に、規制支援研究の軸足を移してきた。実際に、平成29年度から開始された原子力規制庁の委託事業「自然事象等の評価手法に関する調査事業」(産業技術総合研究所活断層・火山研究部門受託)や「廃棄物埋設地の安全評価に関する調査事業」(日本原子力研究開発機構安全研究・防災支援部門安全研究センター受託)に関しては、炉内等廃棄物への規制基準・安全評価ガイド等の整備が前面に据えられており、地層処分関連の研究開発は平成29年度を含めた4年度の研究プロジェクトの中では後年度実施項目として位置づけられている。

地層処分と中深度処分では、規制対象とすべき事象に関しては共通的なもの(例えば、火山活動、断層活動、隆起や海水準変動に伴う侵食作用など)も多く、平成29年度から開始された研究プロジェクトでは従来の地層処分研究開発における成果を中深度処分に適用し、中深度処分の規制の考え方や規制要求、規制基準等の整備に必要な知見として整理することが期待されている。しかし、例えば中深度処分では埋設深度として100 m程度が想定されているため、安全評価期間中に埋設初期の還元的环境から酸化的环境に変化する可能性があるなど、中深度処分に固有の研究課題の設定が必要な事象も存在するため留意が必要である。

中深度処分の安全評価期間としては、許可基準規則骨子案(原子力規制庁、2017)では少なくとも10万年という期間を規定している。地層処分では、取り扱う高レベル放射性廃棄物の α 核種の濃度が高く、長半減期核種の濃度も炉内等廃棄物に比べて数桁高いため、人間環境の安全を確保するための安全評価期間については、炉内等廃棄物を取扱う中深度処分よりもさらに長期にわたることが予測される。これらの放射性廃棄物の安全

規制、特に10万年以上にわたる安全性の評価では、評価シナリオを用いた安全性の評価が行われる。その代表的なものは、放射性廃棄物と人間環境との物理的距離が接近することによって人間環境に影響が及ぶことを想定したシナリオ(接近シナリオ:物理的隔離機能の損失)と、地下水によって放射性物質が処分施設から最終的に人間環境に運ばれることを想定したシナリオ(地下水シナリオ:閉じ込め機能の損失を含む)とに2分される。

活断層・火山研究部門が原子力規制庁から受託している「自然事象等の評価手法に関する調査事業」においては、調査の目的として「立地及び安全評価に関する規則及びガイド等の整備を行うために、隆起・侵食活動、断層活動、地下水流動等の自然事象等に関する評価手法の整備のための科学的知見の収集を行う」ことが掲げられており、平成29年度は具体的には以下の3項目の研究開発が指定されている。

- 1) 隆起速度及び侵食速度に関する評価手法の検討
- 2) 力学的指標による断層活動性評価手法の検討
- 3) 低透水性環境下での地下水流動評価手法の検討

これらは安全評価の観点からは、1)は物理的隔離機能の損失による接近シナリオ、2)は閉じ込め機能の損失を含む地下水シナリオ(変動シナリオ)、3)は地下水シナリオ(基本シナリオ)に該当する。このうち地下水シナリオの評価には、地下水がどのような起源をもち、どのように涵養され、流動し、どこへ流出するかといった地下水学や水文科学の研究者が興味を持ち、研究を行っている分野の知識が必要とされ、水文科学が最も貢献できる研究開発分野の一つである。

IIの地層処分に係る科学的特性マップでは、放射性廃棄物の輸送時の安全性に関する検討から「港湾(海岸)からの距離」について、沿岸から20 km程度を目安とした範囲かつ標高1,500 m以下の地域は、「輸送面でも好ましい地域」とされ

Fig. 2 Sampling locations of deep groundwater, shallow groundwater and spring water in the Hiroshima area, shown on a geological map (Tosaki et al., 2017).

ている。中深度処分の事業を行う想定実施主体においても、「輸送面でも好ましい地域」に関しては地層処分と同様な判断を下すことが高い蓋然性において想定され、沿岸域の地下水流動系の評価・モデル化、特に海退時の下刻や海進時の海食などの海水準変動の影響を踏まえた評価・モデル化の手法の検討は、喫緊の課題と考えられる。

活断層・火山研究部門では、これらを踏まえて、瀬戸内海沿岸地域の花崗岩類分布地域と、青森県東部の上北平野の新第三紀堆積岩類を対象に、地下水流動系の評価・モデル化の手法の検討を行っている。広島湾沿岸域における深層地下水流動系の評価・モデル化を行った例を以下に示す。広島湾沿岸陸域の低地部には最大で海水の約8割ほどの塩分濃度を示す地下水が面的に分布し、現在の海岸線から6 km程度内陸側の深度1,700 mには海水の1/3ほどの塩分濃度を示す地下水が分布している (Fig. 2)。これらの比較的

高い塩分濃度を示す地下水中に含まれる塩素の放射性塩素年代 (³⁶Cl年代) は最終氷期以降の比較的若い値を示し (Fig. 3)、広島湾沿岸では最終氷期の海退時に天水による淡水化が地下深部まで進行し、その後の後氷期海進に伴い海水が侵入したと考えられる。このような海水準変動に伴う広島湾沿岸域における海退時の淡水化と海進時の塩水侵入について、淡水・塩水の面的な分布とその深度プロファイルを成立させようような塩水の侵入機構・過程について、現在さらに検討を進めている。

また、これら沿岸域における海水準変動の影響の調査研究以外に堆積岩地域、特に泥岩～シルト岩等の細粒堆積岩類が優勢な地域の大深度に認められる異常間隙水圧とその地下水流動・物質移行への影響の評価手法に関する検討も行っている。北海道幌延地域に分布する深度400 m以深の稚内層珪質頁岩層の全水頭は静水圧分布よりも

Fig. 3 ^{36}Cl ages of seawater component in deep groundwater from the Hiroshima area compared with the ages of major marine transgression events in Japan. Data are plotted as the $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratios of seawater component (R_{sw}), which means the effect of the mixing of present meteoric water has been corrected (Tosaki et al., 2017).

20 m 以上高く、海水の 1/4 程度の塩分濃度を示す地下水が存在し、その ^{36}Cl 年代は 100 万年以上の古い年代を示す。このような化石海水が存在する系と天水を起源とする系の混合過程や地下水涵養・流動・流出機構のモデル化、異常間隙水圧が地下水流動や物質移行に与える影響について、さらに検討を進める必要を感じている。

V. 今後の水文科学的課題

地層処分であれ中深度処分であれ、処分施設が沿岸陸域に立地した場合、安全評価期間中に少なくとも 1 回の海水準変動に伴う海退時の下刻や海進時の海食などによる地形変化や流出域の移動の影響を受けることになる。このような長期間の地形変化を予測する地形変化シミュレーションについては、パラメータの適用性の検証や日本国内の沿岸域での地形変化に関する実証的な検証が必要と考えられる。また、長期間の地形変化と流出域の移動に伴う地下水流動の変化に関し、3次元地形変化シミュレーションと3次元地下水流動モデルを組み合わせた高精度な地下水流動モデルの開発が必要となるだろう。

原子力規制庁は、日本原子力研究開発機構安全

研究・防災支援部門安全研究センターに地形変化シミュレーションの高度化に関する研究を委託しており、産業技術総合研究所活断層・火山研究部門は、地質学的知見や水文科学・地下水学的知見やファクト・データを安全研究センターと共有しながら、沿岸域における海水準変動の影響を踏まえた地下水流動系の評価・モデル化の検討を進めていきたい。

文 献

- 原子力規制庁 (2017) 第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案. <http://www.nsr.go.jp/data/000189413.pdf> (2017年10月31日閲覧)
- 伊藤一誠 (投稿中) 放射性廃棄物処分の安全規制と地球科学—処分場の立地基準への研究成果の橋渡し—, シンセシオロジー.
- 資源エネルギー庁 (2017) 科学的特性マップ. http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/kagakutekitokuseimap.pdf (2017年10月31日閲覧)
- Tosaki, Y., Morikawa, N., Kazahaya, K., Tsukamoto, H., Togo, Y. S., Sato, T., Takahashi,

H. A., Takahashi, M. and Inamura, A.
(2017) Deep incursion of seawater into the
Hiroshima Granites during the Holocene

transgression: Evidence from ^{36}Cl age of sa-
line groundwater in the Hiroshima area, Ja-
pan. *Geochemical Journal*, **51** (3), 263–275.