連載
講座

放射性廃棄物概論

施設の運転および廃止措置により
発生する放射性廃棄物の対策

第6回 わが国の地質環境

電力中央研究所 新 孝一 ほか

I. はじめに

放射性廃棄物はその発生元や含まれる放射性核種の半減期などの特徴を踏まえ、適切かつ安全な陸地処分が実施・計画されつつある。うち、高レベル放射性廃棄物や放射性ヨウ素の除去に用いられた銀吸着材などの一部の低レベル放射性廃棄物（TRU 廃棄物）は、「地層処分」の対象とされる。現時点では、地層処分場を設置する場所が定まっていないことから、上記放射性廃棄物を安全に処分するための処分場を作る上では、地層や岩盤の性質や周辺の環境条件をも含めた「地質環境（地層処分の観点から見た地下の環境）」の理解が不可欠である。本稿では、わが国の地質環境の特徴や役割について解説する。

II. 天然現象と放射性廃棄物処分

地層処分において、地下 300m 以深の地層中に土木構造物を設置する処分場候補地（以下、候補地）選定には、地質学を応用することが重要であり、その基本は、どこに何があるか、それが将来どうなるか、である。日本列島には、様々な性質を持つ地層・岩体が複雑に分布する。また、火山活動や地震が活発な変動帯と呼ばれる地帯に属しており、地層・岩体は将来にわたり様々に変化する。

近年、最新の知見に基づいて、日本列島の地質環境の過去の長期的な変化や現在の状態の概要が取りまとめられ¹⁾、さらに、情報の更新が継続されている²⁾。

日本列島の地質環境の特徴は、例えば、安定陸塊と呼ばれるアフリカや南極などの古い岩石が主体となる大陸

Introduction to Radioactive Waste—Management of Radioactive Waste from Operation and Decommissioning of Nuclear and Other Facilities (6) : Geological Environments in Japan. : Kouichi SHIN, Yasuharu TANAKA, Masaki TSUKAMOTO, Ryuta HATAYA, Hidekazu YOSHIDA.

(2014 年 8 月 12 日 受理)

■前回タイトル

第 5 回 放射性廃棄物の処分

などの地域とは異なる。したがって、地層処分では、わが国の地質環境の特徴を理解した上で、天然バリアと、放射性廃棄物を覆うオーバーバック（金属）、ベントナイト（粘土鉱物）、コンクリートなどの人工バリアから成る多重バリアシステムが十分に機能する地域を候補地として選定し、地質環境に即して設計する必要がある。以下に、地層処分で考慮すべき代表的な天然事象として火山・地温（地中の温度）、隆起・侵食、活断層を取り上げ、事業との関係を述べる。なお、非火山性熱水・深部流体、地質断層の再活動や、氷河期の地下水面の低下（酸化性地下水の選択的浸入）などのバリア機能への影響も考えられるが、紙面の都合上、他書に譲りたい。

1. 火山活動・地温

日本列島の火山は、およそ日本列島の中央部に直線的に配列して分布する^{1, 2)}。特に北海道、東北、九州で明瞭である。このような活火山地形の太平洋側の分布境界は、「火山フロント」と呼ばれる。

火山活動と地熱地域は密接に関わっており、深部方向への温度上昇（地温勾配）が大きい場所と火山のある場所とはほぼ一致する。地下で火成活動があると地温勾配が大きくなり、10℃/100 m を超える地域もある。このような地域では温泉が湧いたり、また地熱発電所が建設されたりすることもある。なお、わが国の非火山地帯の地温勾配は概して 40℃/km 以下と考えられている¹⁾。

ここで重要なことは、火山フロントの太平洋側では過去長期にわたり火山活動が起こらなかったこと、つまり、火山の偏在であり、これはプレート運動との関係で説明されている。したがって、処分場の選定では、火山活動の場所や、地温勾配の状態を考慮し、まず、マグマが処分施設を直撃し、放射性廃棄物を含むマグマが地表まで噴出するような場所は回避せねばならない。さらに、高温下では、人工バリアの材料が変質し、機能が低下することが考えられるため、地温勾配を考慮する必要がある。

2. 隆起・侵食

地面が隆起すれば、程度の差こそあれ、必ず侵食が生じ、地下に埋設した放射性廃棄物は地表に接近する。したがって、放射能の減衰との兼ね合いで、適切な隆起(沈降)速度/侵食(堆積)速度の箇所を候補地として選び、適切な深度に施設を設置する必要がある。

日本国内の隆起(沈降)速度は様々ではない。地層処分では、安全評価の時間尺を考慮し、数万年～数十万年オーダーの隆起速度が議論されるが、この時間尺でも同様である¹⁾。例えば、最も隆起速度の速い地域の一つは中央アルプスであり、10万年間で数百m以上とされている。また、丹沢山地、房総半島～南西諸島にかけて、北海道～越前山地にかけての海岸沿い・島しょなどにも、過去10万年で100m程度かそれ以上の隆起が認められている。

隆起速度が著しく大きい地域は、侵食量も大きく、放射性廃棄物の地表接近防止の観点から、処分場の選定にあたり除外する必要がある。また、隆起速度の地域差は、地質構造発達史と密接に関連し、この把握が候補地を含む地域の長期的な環境変遷の議論に非常に重要である。

3. 活断層

過去に繰り返し活動し、将来活動する可能性がある断層は、活断層と呼ばれる。活断層が処分場へ与えると考えられる影響として、活断層が動くことで起こる揺れ、断層変位に伴う処分施設・廃棄体の破壊と断層周辺の透水性の増加が重要である。揺れに対しては、地下深部では揺れが小さくなる点を考慮して適切な耐震設計を施す、後二者に対しては、活断層の存在が明らかな地域は候補地から除外し、小規模な断層に対しては、施設のレイアウトで回避するなどの工学的対策が取られる。

活動性が高い活断層の分布は概ね把握されているが、火山同様、分布に偏りがある^{1, 2)}。例えば、東北地方脊梁部以西や中部山岳地域～近畿地域中部では活断層が多く分布するが、それら地域に隣接する北上山地や近畿地方南部(紀伊半島)には顕著な活断層は知られていない。しかし、活断層の分布が疎である地域でも、未知の小規模な活断層や、他の活断層の運動に付随して変位するような断層の分布については、よくわからないこともある。そのため、活断層の有無や、近接する場合の影響を考える際に、単に活断層の分布を追うだけでなく、隆起・沈降同様、地域の地質構造発達史の把握が重要となる。

4. 天然事象の将来予測と安全評価

日本列島の地質環境を概観すると、変動帯にある日本列島内に、過去から現在に至るまで相対的に安定であった地域があることがわかる。同時に、将来的な安定が望

まれる地層処分がどこでも実施可能とは言えないことも明らかである。地層処分の安全性確認では、実験では再現できない長期変遷を考慮するため、安全評価により処分場としての適性を検討する。これは、数万～数十万年後の将来に関わる様々な作業仮説を想定し、それらの仮説の下で人間環境への影響を見積もる科学的行為と容認基準との比較という意味決定行為の組合せである。本章では将来予測について簡単に触れる。

一般に、地質環境の将来予測は、地域的な詳細な現状・過去の履歴を明らかにし、過去の現象の法則性に基づいて予測する。しかし、前述の様々な天然現象が重なって起こる地域では、予測も複雑となり、将来予測の不確実性が大きい。また、地層処分で扱う時間スケールでの天然事象の将来予測では、法則性もまた作業仮説であるため何らかの不確実性を有する。不確実性が大きいほど一般的には不安を与え、社会的な受容度は低くなる。そのような地域での処分場の選定においては、今後の科学技術の進歩により不確実性が低減されることが不可欠となる。一方、不確実性の低減は技術的な限界があることを真摯に再認識し、候補地選定後も、将来における‘想定外事象’を可能な限り減らすべく、継続的に実際の事例調査と知見を蓄積しなければならない。

Ⅲ. 岩盤の熱特性と力学特性

放射性廃棄物の地層処分では、多数の坑道が配置される岩盤の力学的な安定性確保が、まず重要となる。また、処分坑内に発熱性の廃棄体を埋設した後に、緩衝材の温度上昇による機能低下を防ぐため、適切な埋設間隔を確保して設計する必要がある。岩盤の熱特性と力学特性は、処分場の設計にとって重要な入力情報であり、加えて、埋設後の処分場の変遷を検討する際にも必要となる。

1. 熱特性

岩盤の熱特性は、第一に廃棄体の発熱がニアフィールド(人工バリアおよびその周辺岩盤)に及ぼす影響の評価に必要となる。処分場設計において、廃棄体の周囲に設置する緩衝材が高温になり過ぎないように、廃棄体の埋設間隔と処分坑道の間隔が設定される。緩衝材の温度を100℃以下とすることが基本的な設計の考え方である。

また、岩盤の熱特性は、ニアフィールドの状態変遷の評価、熱-水-力学等が連成する挙動の数値シミュレーションや、気候変動に伴う長期の処分場温度環境の変遷の評価の際にも用いられる。

例えば、スウェーデンの安全評価プロジェクト SR-Site³⁾では、以下の熱物性⁴⁾の項目を評価している。

・岩体ごとの熱伝導率の空間分布、異方性、温度依存性、応力依存性。熱伝導率が低いと緩衝材の温度が高

くなるため、特に値が低い側の分布特性が重要である。

- ・岩体ごとの熱容量の空間分布、温度依存性
- ・処分場位置での温度(物性ではない)
- ・主要な岩種ごとの熱膨張係数

上記に加え、緩衝材温度の予測評価の不確実性の幅が、設計に必要な熱特性パラメータとなる。

さらに、気候変動に伴う処分場温度環境の変遷の長期評価に必要なパラメータとして、次が挙げられている。

- ・岩体ごとの熱拡散率の平均値
- ・岩体ごとの内部発熱量の平均値
- ・対象領域での地温勾配の平均値
- ・対象領域での地殻熱流量の平均値と不確実性の幅

処分場設計の例として、核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構、以下、JNC)が、廃棄体の発熱量および緩衝材と岩盤の熱特性を考慮した有限要素法の熱解析により、緩衝材の制限温度を100℃とした場合の処分坑道間隔と処分孔間隔を評価した⁵⁾。その結果、軟岩系岩盤の場合でそれぞれ、13m、6.66mと評価されている。

2. 力学特性

熱特性と同様、処分場の配置に関わる重要な要素であり、坑道の断面形状や支保の設計、施工、建設・操業時の安定性に関わる。さらに、処分孔内の緩衝材や周辺岩盤との熱-水-力学的相互作用を通じて廃棄体の安定性に影響を与える。力学特性には、次に示すように強度や変形に関する物性と、岩に作用する地圧がある。

強度には、圧縮強度、引張り強度などがあり、これらは拘束圧や荷重を加える速度(載荷速度)などの条件によっても変化する。また、変形は一般的にはヤング率とポアソン比の2つの係数で評価できるが、高応力では内部の微視的な破壊などが加わることで非線形的な挙動を示す。さらに、岩が破壊した後の変形特性も重要である。そして、天然の岩は、硬岩-軟岩、火成岩-堆積岩-変成岩、地質年代、風化の程度などに応じて、多様な強度・変形特性を持つ。このため岩の挙動評価用に様々な力学モデルが提案されており、岩の特性に応じて使い分ける必要がある。モデルにより入力パラメータが異なるため、各パラメータの詳述は避け、以下に例示的に述べる。

硬岩(花崗岩)を対象としたSR-Site³⁾では、変形特性として弾性に関するパラメータ、および不連続面の変形特性としてせん断と直方向の剛性が用いられている。また、スポーリング(処分孔内壁などが地圧の応力集中により剥がれる破壊)強度が用いられていることが特徴的である。ほか不連続面の強度特性として粘着力、内部摩擦角などが用いられている。

一方、地圧は岩体内部に作用している応力である。

SR-Site³⁾では、不連続面の透水性が、間隙幅への影響を介して地圧に依存するという関係を考慮したモデルとパラメータが用いられていることが特徴である。

なお、JNCでは、SR-Site³⁾では用いられていないパラメータとして、有効間隙率、引張り強度(圧裂)、せん断強度、内部摩擦角なども考慮した評価が行われており、岩のクリープ挙動(応力一定で変形が進行し最終的に破壊に至る現象)にも留意している⁵⁾。

IV. 地下水流動と化学特性

1. 地下水流動

処分施設周辺の地下水の流れは、放射性核種の施設からの漏えい量や岩盤中での移行速度、緩衝材の物理的な安定性に大きく影響する。故に、施設周辺の地下水流速は、できるだけ遅いことが望ましい。地下水のダルシー流速(岩盤単位断面あたりの通過流量)は、岩盤の透水係数と動水勾配(地下水の流れ方向の単位距離あたりの水のポテンシャルの差)に比例する。したがって、候補地としては、透水係数や動水勾配が小さい地層・岩体が望まれる。

節理や断層等の割れ目/不連続面は地質構造の発達に伴い形成され、おおむね形成時代が古い岩盤の方が新しい岩盤よりも分布頻度が高い。主に新第三紀鮮新世以降の堆積岩では、粒子間間隙が地下水の主要な流動経路となることが多い。一方、火成岩類や変成岩類、中新世以前の古い堆積岩類は、節理性岩盤とも呼ばれ、岩体中に生じた割れ目が主要な流動経路となる。特に、断層は連続性が高く、角礫や粘土を含む破碎帯を伴う。断層周辺には割れ目が多く、概して断層に平行な方向には水が流れやすく直交方向には流れにくい(異方性)。また、割れ目はネットワークを構成し、個々の割れ目の透水性や幾何特性、分布特性がネットワーク全体の透水性を規定する。

岩盤の透水係数は、深度が大きくなるにつれて、割れ目の開口幅や間隙率が減少し、小さくなる場合が多い⁶⁾。深度依存性は地表面付近で顕著で、地下深くなるにつれて弱くなる傾向が国内外の調査で確認されている^{7,8)}。一方、処分施設を含む地層の透水係数によらず、その上位層の透水係数が小さい場合には、上位層が「キャップロック」の役割を果たし、上方向への地下水流れによる放射性核種の移行を妨げることが期待される。堆積岩地域では、しばしば周りの地層より間隙水圧が高い地層が存在し、原因として上位の難透水層の存在が考えられる。

動水勾配は地形の影響を大きく受け、一般に地形勾配が急であるほど大きい。JNC⁵⁾による文献調査では、動水勾配の平均値は山地で0.061、丘陵で0.035、台地で0.016、低地で0.008であった。ただし、動水勾配は地下

深いほど地形の影響を受けにくい傾向があり、地下深部では上記の値より小さいと推定される。また、海に囲まれたわが国では、動水勾配が非常に小さい沿岸海底下が候補地となる可能性も考えられる。ただし、海水準の低下や隆起により処分場地域が陸化した場合、地形勾配に準じた動水勾配が生じる。さらに、海岸付近では密度の高い海水が淡水の下に楔状に潜り込み、両者の密度が遷移する境界領域(塩淡水境界)に沿って地下水の上昇流が生じる。海岸線の移動により塩淡水境界が処分場を横切るような場合、放射性核種が上昇流により生物圏に運ばれる可能性に留意すべきである。

岩盤内での地下水の実際の移動速度(実流速)は、ダルシー流速を有効間隙率(流体が動くことが可能な間隙が岩盤の体積に占める割合)で除することで得られる。ダルシー流速が同じでも、有効間隙率が小さい岩盤ほど実流速は大きい。有効間隙率は、岩種、形成時期、形成後の応力状態等により異なり、概して深度依存性が認められる。JNC⁵⁾の文献調査では、節理性岩盤ではほとんどのデータが10%以下(ピーク値は2%)であるのに対し、新第三紀堆積岩では数%~60%に幅広く分布する。

2. 化学特性

地下水の化学特性(地化学特性)は、主に地下水が接する土壌や岩盤(岩石)の構成鉱物や、割れ目中の粘土鉱物などの性質により決まる。重要な化学特性として、溶存イオン濃度、pH、酸化還元電位(Eh)、コロイドや有機物、微生物の存在状況が挙げられる。これらは、金属容器の腐食や廃棄体からの放射性核種の溶出の程度、地下水中濃度と溶存状態、土壌や岩石中の鉱物への収着(表面への吸着と内部への吸収が起きる現象)の程度などに影響し、天然バリアおよび人工バリア中の放射性核種の移行遅延や濃度低減効果に関与する。

候補地の地下水の化学特性把握には、最終的には地下水採取による情報収集が重要となるため、調査項目や調査方法がまとめられている⁹⁾。しかし、候補地が未定あるいは採取が困難な状況では、水と鉱物間の化学平衡反応を考慮して深部地下水の化学的性質を推定する地下水モデルの重要性が高い。そのため、水質の経時的变化を評価するためのモデルの適用¹⁰⁾や、地下水モデルと地下水流動解析結果との整合性の確認などが行われている¹¹⁾。また、地下水化学特性は、塩淡水境界の深度や形状の推定に利用されている¹²⁾。地下水モデルは地層処分に限らず、候補地や施設を設置する土壌や岩盤が未定な場合に有効な技術である。

なお、地下水がセメント系材料やベントナイトなどの人工バリア材料と反応した結果、人工バリアや天然バリア中の地下水の水質が変化する。この変化がバリアを構成する鉱物の変遷と併せて解析評価されている¹³⁾。

V. ナチュラルアナログ

1. ナチュラルアナログとは

地層処分システムにおける、数万年以上に及ぶ長期のバリア機能を実験等で直接確認することは不可能である。したがって、その長期的な現象の把握とバリア機能の確認のため、天然に存在する類似現象が研究されており、その現象はナチュラルアナログと言われている。

天然のバリア機能のナチュラルアナログは、オクロ鉱床での天然原子炉の発見以降、特に、ウラン鉱床を用いた研究が、国際ナチュラルアナログ研究会(NAWG)等で行われてきた。また、ガラス固化体やオーバーパックの腐食の考古学的研究など、多くの研究事例がある¹⁴⁾。

近年では、地層処分に關して、海外諸国のより具体的あるいはサイト固有の調査研究に対応するよう、ナチュラルアナログ研究も進められている。一例として、岩塩中での核種移行現象研究(ドイツ)や氷河期による地下水流動への影響の研究(スウェーデンやフィンランド)などがある。一方、日本でも、変動帯地質環境の長期的な変化や、地下の地質環境の化学的緩衝作用と処分深度に関する研究や、セメントとベントナイトとの反応など処分技術に関連した現象の研究など、個別の具体的な現象研究が展開されている。本稿では、日本の地質環境のバリア機能に関する近年の研究事例を簡単に紹介する。

2. 研究事例と今後の展望

地層処分では、地質環境が普遍的に有する還元状態や、還元剤としての作用(緩衝機能)による、長期にわたって放射性核種を固定・保持する働きを重要なバリア機能として取り入れている。したがって、酸化した地下水の浸透により酸化雰囲気になることは、できるだけ避ける必要がある。このような機能を活用する地層処分では、長期にわたる安全性の観点から理解すべき酸化還元反応とそのプロセスには、処分場の掘削~操業~閉鎖の時系列において、次の現象が想定されている^{14, 15)}。

【処分場掘削後から操業期間の数十年程度】

- (1) 坑道掘削に伴う周辺岩盤と、透水性割れ目周辺の酸化
- (2) 坑道周辺の地下水位低下に伴う酸化した地下水の侵入

【処分場閉鎖後の数千年~数万年】

- (3) 金属容器の酸化と腐食生成物の周辺岩盤への拡散
 - (4) 隆起に伴う地表からの酸化フロントの接近または貫通
- 長期的なオーバーパックなど金属容器の腐食や鉄を含む鉱物の変質に伴う酸化物の挙動、それらが及ぼすバリア機能への影響の現象的理解には、ナチュラルアナログを活用する必要がある。つまり、時間尺を考えると、長期にわたる地下での現象の適切な理解が求められる。

例えば、地下での酸化還元反応は岩盤のバリア機能に大きく影響する。近年、酸化還元緩衝作用がバリア機能に及ぼす影響について、以下が明らかにされている¹⁵⁾。

- 1) 酸化物はウランなどを吸着し、沈殿は透水性を下げるなど、必ずしもバリア機能にマイナスに働かない。
- 2) 地表からの酸化還元フロントの侵入は、岩盤との酸化還元反応によって浅部で緩衝される。
- 3) 過去に酸化フロントが形成された地下深部においても未だ緩衝作用が残っている。

以上のように、人工バリア材料との相互作用やバリア機能への影響評価では、長期的な現象の理解が不可欠である。これからのナチュラアナログ研究は、前述の長期的な複合作用も念頭におき、何が自然現象から学べるかという視点を大事に進めることが重要である。

VI. おわりに

本稿で示した日本列島の基本的な地質環境条件は、将来の地層環境の安定性検討のための基礎である。わが国の地層処分では、天然バリアと人工バリアの多重バリアの機能を正しく理解し、地質環境に合致した仕組みとして組み上げることが重要である。そのため、変動帯たる日本の地質環境の特徴・状態、長期的な挙動の理解が必須である。将来の地質環境の変遷の不確実性低減のためには、地形や地質などに記録された地質環境の特徴を自然から学びとり、丁寧に解きほぐし、データを蓄積し、真摯に見直し続けることが不可欠である。なお、一般的な地下利用に対して十分に余裕のある深度への処分(余裕深度処分)については、処分の成立性の確認に向けた地質環境調査の考え方が検討されており¹⁶⁾、地層処分と重なる部分も多い。

— 参考資料 —

- 1) 地質環境長期安定性研究委員会, 「日本列島と地質環境の長期安定性」, 地質学会リーフレット, No.4, 2011.
- 2) 産業総合技術研究所, 「地質情報データベース」.
<https://www.gsj.jp/researches/geodb/index.html>
- 3) Svensk Kärnbränslehantering AB, "Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark", Main report of the SR-Site project, Volume I, II, III, SKB TR-11-01, 2011.
- 4) 同上, "Data report for the safety assessment SR-Site", SKB TR-10-52, 2010.
- 5) 核燃料サイクル開発機構, 「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—, 総論レポート」, JNC TN1400 99-020, pp. VI-81-IV-83, 平成11年11月26日.
- 6) 渡辺邦夫, 小島圭二, 断層・割れ目系岩盤中の地下水流れと関与する地質量の計測と評価, 日本応用地質学会シンポジウム, pp.2-16, 1980.
- 7) Svensk Kärnbränslehantering AB, "SKB 91 - Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety", SKB TR 92-20, 1992.
- 8) 太田久仁雄, 他, 「幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044, p. 70 (2007).
- 9) 原子力発電環境整備機構, 「地層処分事業の安全確保(2010年度版)」, NUMO-TR-11-01, pp. 5-89-5-93 (2011).
- 10) 同上, p. 5-135.
- 11) 原子力発電環境整備機構, 「技術年報2011年度」, NUMO-TR-12-02, p. 19 (2012).
- 12) 丸井敦尚, 楠瀬勤一郎, 林武司, 沿岸域の塩淡水境界面と地下水流動, 物理探査, 57 [4], 351-357 (2004).
- 13) 電気事業連合会, 核燃料サイクル機構, 「TRU廃棄物処分技術検討書」, pp. 4-23-4-65, 2005年9月.
- 14) W. Miller, R. Alexander, N. Chapman, *et. al.*, Geological Disposal of Radioactive Waste & Natural Analogues. *Waste Management Series, 2*, Pergamon, Oxford, 316p., 2000.
- 15) 吉田英一, 「地層処分—脱原発後に残される科学課題」, 近未来社, 168 p., (2012).
- 16) 例えば, 石田裕樹, 他, 余裕深度処分の成立性確認に向けた地質環境調査について, 原子力バックエンド研究, 13 [1], 37-47 (2006).

著者紹介

新 孝一 (しん・こういち)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野) 岩盤工学/地層処分

田中靖治 (たなか・やすはる)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野) 地下水理学/放射性廃棄物の処分

塚本政樹 (つかもと・まさき)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野) 放射化学/放射性廃棄物の処分

幡谷竜太 (はたや・りゅうた)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野) 応用地質学/放射性廃棄物の処分

吉田英一 (よしだ・ひでかず)

名古屋大学

(専門分野/関心分野) 環境地質学/地層処分