

核燃料サイクルとバックエンドの基礎

坂本義昭*1

原子力発電を行うための一連のプロセス全体を核燃料サイクルと呼ぶが、その各プロセスからは様々な種類の放射性廃棄物が発生する。これらの放射性廃棄物はこれらの一連の施設の操業および廃止措置から発生し、放射能濃度やその性状に応じて適切な処理と処分が行われる。ここでは、基本的な核燃料サイクルの概要およびバックエンドと呼ばれる放射性廃棄物（核燃料サイクル以外の施設での放射性物質の利用による放射性廃棄物も含む）の処理・処分の基礎について概説する。

Keywords: 核燃料サイクル, 放射性廃棄物, バックエンド, 地層処分, 浅地中処分, 安全確保

1 はじめに

2022年7月、産業革命以来の化石燃料中心の経済・社会、産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させ、経済社会システム全体の変革、すなわち、GX（グリーントランスフォーメーション）を実行するべく、必要な施策を検討するGX実行会議が設置された。2022年8月に開催された第2回実行会議では、ロシアによるウクライナ侵攻に起因した世界的な石油・ガス市場攪乱によるエネルギー地政学の抜本的变化、脱炭素に向かうファイナンスと化石依存リスクの増大、2050年カーボンニュートラルに向けた再エネの伸長、原子力発電の見直し、について議論がなされた。原子力発電については、既存原発の最大限活用、次世代革新炉の開発・建設とともに、再処理・廃炉・最終処分のプロセスの加速等の検討が示されたところである[1]。

このような背景を踏まえ、原子力の利用を進めるにあたり、核燃料サイクルの確実な確立とバックエンド対策の着実な実施に向け、発生する放射性廃棄物の合理的かつ安全な処理処分が必要となる。本稿では、核燃料サイクルから発生する様々な放射性廃棄物（核燃料サイクル以外から発生する放射性廃棄物も含め）の処理処分であるバックエンドの基礎について概説する。

2 核燃料サイクルの基礎

核燃料サイクルとは、原子力発電を行うための一連のプロセスであり、図1に示すように、ウランの採鉱、製錬、転換、濃縮、燃料成型加工、原子炉での発電、使用済燃料の再処理、MOX燃料の成型加工、MOX燃料を用いた原子炉での発電に至るプロセス、これらのプロセスで発生する低レベル放射性廃棄物および高レベル放射性廃棄物の処理処分からなるサイクルである。現行の核燃料サイクルは、軽水炉燃料サイクルであるが、高速増殖炉燃料サイクルの実用化により燃料ウランの利用効率が大幅に高まることとができるため、エネルギー資源に乏しく自給率の低い我が国にとっては、安価で質の高い安定したエネルギーの確保となるものである。

核燃料サイクルの主体となる使用済燃料の再処理工程では、原子炉内で燃焼した燃料ウランを硝酸で溶解し、TBP（リン酸トリブチル）によるウランとプルトニウムの抽出および核分裂生成物との分離、抽出されたウランとプルトニウムの分離および精製、脱硝を経て、ウラン酸化物およびウラン・プルトニウム混合酸化物が製品となる。その後、MOX燃料に加工され、再び原子力発電に使用されることにより、一連の核燃料サイクルとなるものである。

各プロセスでは様々な種類の放射性廃棄物が発生し、現在は、それぞれの施設で処理、保管されている。なお、原子力発電所の操業に伴い発生した低レベル放射性廃棄物は、1992年から日本原燃（株）の低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいてコンクリートピット処分がなされている。

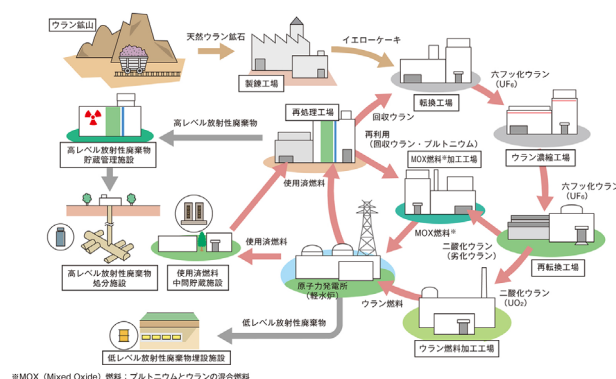


図1 核燃料サイクルの概要（軽水炉サイクル）[2]

3 放射性廃棄物の発生

前述の核燃料サイクル施設から様々な放射性廃棄物が発生するが、我が国においては「高レベル放射性廃棄物」と「低レベル放射性廃棄物」に大別されている。

「高レベル放射性廃棄物」は前述したように使用済燃料の再処理工程において発生する高レベル廃液をガラス固化した放射性廃棄物であり、核分裂生成物（FP: Fission Products）およびアクチニド（Np, Am, Cm等および回収されなかったU, Pu）を高濃度に含む放射性廃棄物である。ガラス固化体1本あたり製造時の放射能量は $\beta \cdot \gamma$ 核種で約 10^7 GBq、 α 核種で約 10^5 GBqのオーダーである[3]。

「低レベル放射性廃棄物」は、「高レベル放射性廃棄物」以外の全ての放射性廃棄物を指しており、その発生源や放射能濃度範囲は様々である。主な廃棄物は、再処理施設から発生するハル・エンドピース（燃料被覆管および燃料集

Fundamental aspects of nuclear fuel cycle and waste management by Yoshiaki SAKAMOTO (sakamoto.yoshiaki@jaea.go.jp)

*1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド統括本部 埋設事業センター

Japan Atomic Energy Agency, Decommissioning and Radioactive Waste Management Head office, Radioactive Wastes Disposal Center
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会 2022年度バックエンド週末基礎講座における講演内容に加筆したものである。

合体端末の廃材), 廃銀吸着剤, 濃縮廃液等および MOX 燃料加工施設から発生する雑固体等の「TRU 廃棄物」, ウラン濃縮および燃料成型加工施設から発生する金属, スラッジ等の「ウラン廃棄物」, 原子炉から発生する廃液, 金属, コンクリート, 炉内構造物等の「原子炉廃棄物」が発生している。

核燃料サイクル以外の施設からも低レベル放射性廃棄物が発生しており, 例えば, 試験研究炉での研究に伴う原子炉廃棄物, 核燃料物質使用施設等での研究等でのウランの使用に伴うウラン廃棄物や使用済燃料の照射後試験に伴う放射性廃棄物等が発生している。さらには放射性同位元素の使用施設等および医療機関等からは「RI 廃棄物」も発生している。

「低レベル放射性廃棄物」に含まれる放射性核種としては, 使用済燃料に起因する核種および原子炉の配管内での腐食生成物 (CP: Corrosion Products) の放射化による核種, 施設の構造物の放射化により生成する核種が主である。また, ウラン廃棄物のようにウランだけを含む廃棄物や放射性同位元素の利用に伴い特定の放射性同位元素のみを含む廃棄物も発生している。発生の形態としては, 施設の操業 (設備更新を含む) とともに, 施設の廃止措置によっても発生している。このため, 図 2 に示すように放射能濃度も幅広く分布しており, TRU 廃棄物の地層処分から, 中深度処分, ピット処分, トレンチ処分対象廃棄物まで含まれる。さらに, より放射能濃度が低い資材等は, いわゆるクリア

ランス対象として再利用等がなされる。

4 放射性廃棄物の処理

放射性廃棄物は, 保管時の安定性, 輸送時の安定性, 処分に適した形態とするために, 廃棄物の性状を踏まえて, 焼却, 圧縮, 固型化, 封入等および液体廃棄物の蒸発濃縮や固型化等の処理がなされる。

高レベル放射性廃液は, 蒸発濃縮後にガラス溶融炉の中でホウケイ酸ガラスと混ぜ合わせられ, ステンレス鋼製のキャニスターと呼ばれる容器に注入されて, 固型化される。

低レベル放射性廃棄物には様々な廃棄物があるため, 各性状に応じた分別および処理がなされる。例えば, 可燃物は焼却処理されることにより約 1/100 以下に減容されたり, 金属等の不燃物は圧縮処理されることも多い。また, より減容効果が高く安定性が高い処理方法として溶融処理が用いられることもある。

処分に向けては, 容器内の空隙の低減, 飛散防止, 廃棄物の安定化のためにセメント等の固型化剤による固型化がなされる。また, 廃止措置で発生する放射能濃度が極めて低い金属やコンクリート等は, そのまま容器への封入 (容器内は砂等で充填も想定される) がなされることもある。

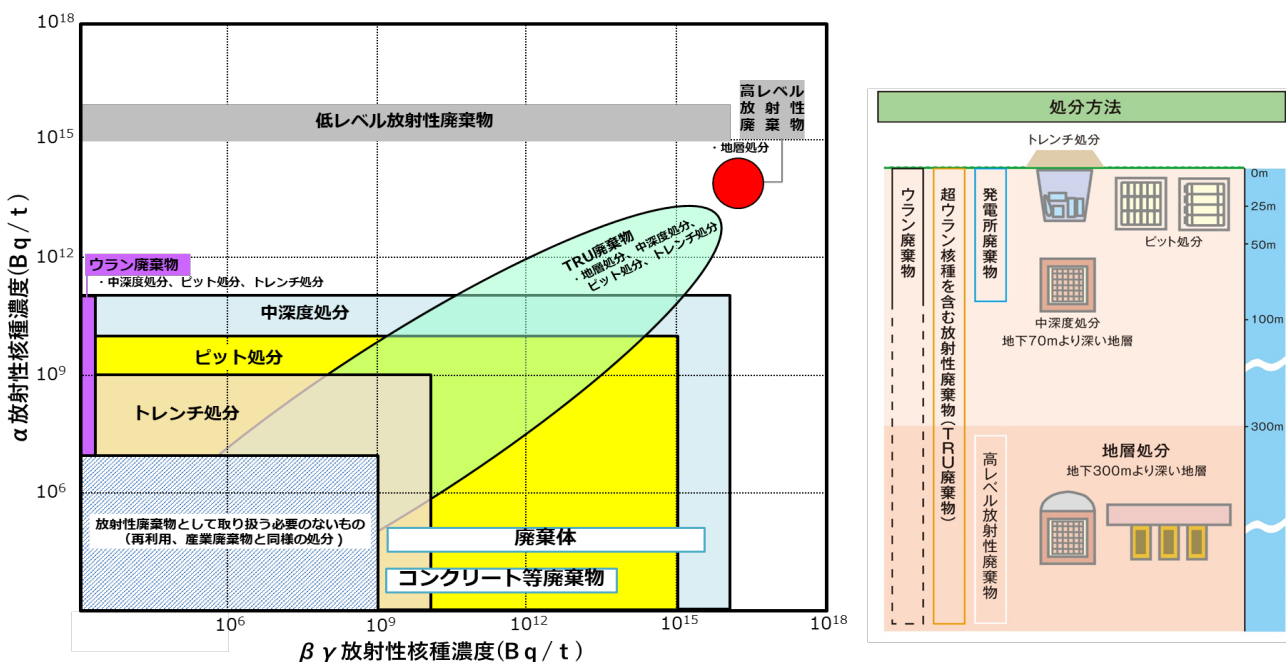


図 2 放射性廃棄物の処分区分と放射能濃度の関係

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会規制制度 WG「規制制度ワーキンググループにおけるこれまでの議論のとりまとめ」(2005 年 3 月(平成 17 年 3 月))の資料 4 に基づき[4], 2021 年 10 月現在の原子炉等規制法の政令濃度区分値, 第二種埋設事業規則の濃度上限値等に従った修正と加筆をした。なお, トレンチ処分の α 核種濃度は, 区分値充足性の評価値[5] (低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値についての p.17 表 4, 平成 19 年 5 月(2007 年 5 月), 原子力安全委員会)を用いた。なお, 右図は原子力委員会の資料を参考とした[6]。

5 放射性廃棄物の処分

放射性廃棄物は、原子力委員会の「原子力利用に関する基本的考え方」(令和 5 年 2 月 2 日)等において、現世代の責任として、処分を確実に進め、将来世代に負担を先送りしないことやリスクに応じて適切な区分ごとに合理的な処理・処分を推進すること等の考え方が示されている[7].

このような考え方の下、高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物のうち放射能濃度の高い放射性廃棄物は、地層処分に向けた取り組みが進められているとともに、低レベル放射性廃棄物は、図 2 に示すように放射能濃度に応じて、トレンチ処分、ピット処分、中深度処分に向けた取り組みが進められている。以下、各処分方法について概説する。

5.1 トレンチ処分

極めて放射能濃度が低い放射性廃棄物（廃棄体およびコンクリート等廃棄物）を対象とし、埋設施設は、地上または地表から深さ 70 メートル未満の地下に設置される。放射性物質の漏出防止機能を有する外周仕切設備は設置されないが、廃棄物埋設地を土砂等で覆い、雨水および地下水の浸入を抑制する機能を有する施設である。埋設終了後は、地下水位、地下水中の放射性物質濃度の監視、10 年ごとの定期レビューおよび埋設地の掘削を制限する等の管理が 50 年程度を目安として行われる。現在、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所内において、動力試験炉の解体コンクリート約 1,670 t のトレンチ処分が行われている。また、日本原電株式会社東海発電所でも事業申請が行われている。

5.2 ピット処分

放射能濃度が低い放射性廃棄物（廃棄体およびコンクリート等廃棄物）を対象としており、埋設施設は、地上または地表から深さ 70 メートル未満の地下に設置される。放射性物質の漏出を防止する外周仕切設備等を設置する施設である。埋設終了後は、地下水位、地下水中の放射性物質濃

度の監視、10 年ごとの定期レビューおよび埋設地の掘削を制限する等の管理が 300～400 年程度を目安として行われる。現在、日本原燃（株）の低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて、原子力発電所の操業で発生した濃縮廃液等および雑固体を固型化した廃棄体のピット処分が行われている。

5.3 中深度処分

放射能濃度が比較的高い放射性廃棄物（廃棄体）を対象としており、埋設施設は、地表から深さ 70 メートル以上の地下に設置される。放射性物質の漏出を防止するために人工バリアを設置する。ピット処分と同様に、埋設地は放射性廃棄物の埋設の終了から、300～400 年程度を目安として管理がなされる。

5.4 地層処分

高レベル放射性廃棄物および放射能濃度の高い TRU 廃棄物を対象としており、埋設施設は、地表から深さ 300 メートル以上の地下に設置される。

ガラス固化体の地層処分を例にとると、ガラス固化体、オーバーパック（金属製の容器）、緩衝材（圧密ベントナイト）からなる人工バリアと長期にわたって物質を閉じ込める能力を持つ安定した深い地層である天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより処分を行うものである。

なお、中深度処分および地層処分については、原子力規制委員会は、埋設事業開始前に、廃棄物埋設施設を含む立体的な区域を指定し、その区域の土地の掘削制限を行うこととされている。

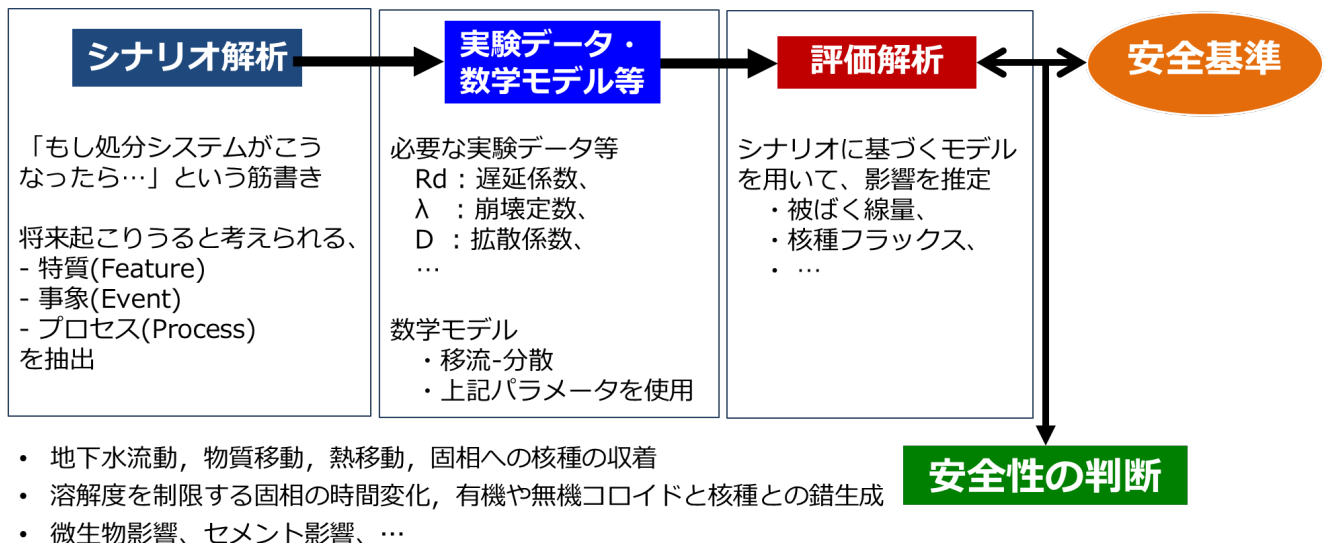


図 3 放射性廃棄物処分の長期安全評価方法
地層処分研究開発第 2 次取りまとめ[8]を参考に作成

6 放射性廃棄物の処分の安全確保

6.1 放射性廃棄物処分の安全評価について

放射性廃棄物の処分では、千年から数万年に及ぶ長期の安全評価を行うことになるが、このような長期の安全性を直接的に評価することは不可能なため、「シナリオ解析」という手法を用いて評価される。これは将来起こり得る可能性のあるシナリオを抽出し、抽出したそれぞれのシナリオに沿って性能を評価、確認する手法である（図3）。このようなシナリオ解析結果に基づいた各シナリオに対して影響解析を行うためのモデルが構築され、放射性核種フラックスや被ばく線量が求められる。これらの計算結果に基づいて安全評価がなされ、最終的には安全基準との比較の上、安全性が判断される。ただし、安全性の判断は単に安全評価の結果が基準線量以下であれば良いということではなく、放射性核種ごとの放射能インベントリ評価、シナリオ選定、評価解析に用いる解析方法や各パラメーター等が適切に評価選定された上で用いられていることが必要となる。このため、例えば、地下水移行シナリオでは、放射性物質の移行のパラメーターとなる遅延係数や拡散係数等が根拠を持って提示できること等が必要であり、これらのパラメーターを支配する種々の現象についての科学的な理解が不可欠である。

6.2 その他の方策 ―ウラン廃棄物の例―

上記のような安全評価に基づいて安全性を確認する以外の方策として、ウラン廃棄物への対応が挙げられる。ウランは、放射能減衰に期待できず、数万年経過以降は子孫核種のビルドアップによる放射能の増加の影響が顕著となるため（図4）、不確実性が高い長期の安全評価が必要となる。このため、浅地中処分の場合、埋設段階で埋設地内のウランの放射能濃度を十分低い濃度とすることで、長期的な安全を確保する方策としている。この十分低い濃度としては、ウランが天然に存在する放射性物質であること等から我が国でのウラン濃度が高い場所や世界的なウランの分布から、埋設地平均でのウラン濃度（U-238, U-235, U-234の合計）である1 MBq/t以下とされている（図4）。なお、放射能濃度を規制する観点から、ウラン廃棄物のみの処分の場合、人為事象シナリオでの安全評価が不要とされている。

7 おわりに

バックエンド分野は、核燃料が原子力発電に利用された以降の工程の全てが対象であり、その対象となる学術・技術の分野の幅が広いことに特徴がある。

例えば、再処理の使用済燃料からの核燃料の抽出工程までも金属材料分野から溶液化学、放射化学等の幅広い知見が必要となる。さらには、施設の廃止措置マネジメントから廃棄物の処理、輸送、保管、処分対策までカバーされている。したがって、多様な技術を統合して機能する複合科学であり、多様な分野の技術者、研究者の力を結集するとともに、継続的な技術伝承と人材育成が必要である。

原子力基本法が1956年（昭和31年）1月1日に施行さ

れてから既に67年以上が経過しているが、バックエンド対策に不可欠な放射性廃棄物処分やクリアランスは、一部の施設から発生した物のみの実施に留まっており、未だ実施されていない方が多い状況である。今後、原子力の積極的な利用推進を図るには、バックエンド対策は不可欠な課題であり、関係者の今後の活動に期待したい。

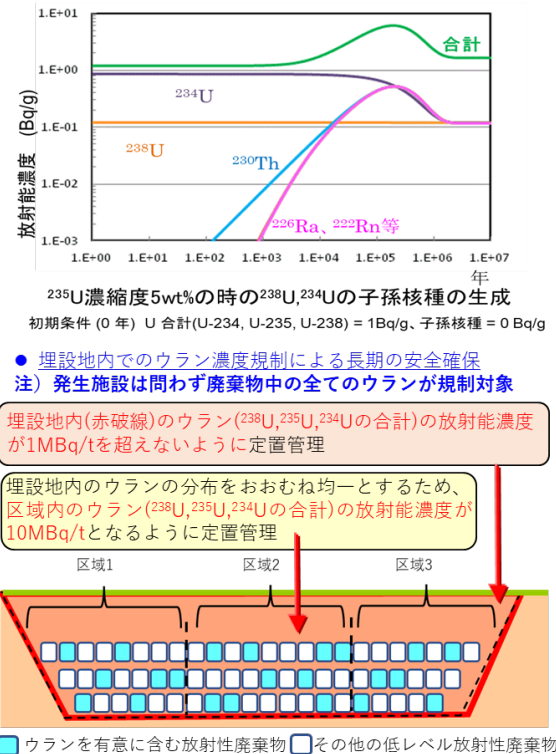


図4 ウラン廃棄物の浅地中処分の安全確保策

参考文献[9]に加筆修正

参考文献

- [1] 第2回 GX 実行会議資料, 資料 5. (2022).
- [2] 日本原子力文化財団: 原子力・エネルギー図面集. (2022).
- [3] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告書. (2021).
- [4] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会規制制度 WG, 資料 4. (2005).
- [5] 原子力安全委員会: 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について. (2007).
- [6] 原子力委員会: 原子力政策大綱, 添付資料. (2005).
- [7] 原子力委員会: 原子力利用に関する基本的考え方. (2023).
- [8] 核燃料サイクル機構: 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-. (2019).
- [9] 坂井章浩: 令和3年度土木学会全国大会 第76回年次学術講演会 研究討論会「1F 事故廃棄物・汚染廃棄物対策及び L3 廃棄物処分方策の調査報告」報告資料. (2021).