

## 長半減期低発熱放射性廃棄物地層処分技術検討の現状と今後の取り組み

黒田茂樹\*1 亀井玄人\*2 電気事業連合会 日本原子力研究開発機構

長半減期低発熱放射性廃棄物 (TRU 廃棄物) のうち、核種濃度の高いものについては地層処分することが考えられており、さらに、その合理化方策のひとつとして、高レベル廃棄物との併置処分について検討が進められている。わが国の代表的な地質環境を想定した解析では、一定の離間距離を設けることによって処分場間の相互の影響を避けることが可能との見通しが得られ、原子力委員会においても併置処分の技術的成立性があるものと判断されている。一方、(1)併置処分の評価に係る信頼性向上、(2)ジェネリックな評価基盤の拡充、(3)幅広い地質環境への柔軟な対応という観点から、今後検討すべき課題も残されている。本報告では TRU 廃棄物の処分概念を含め、処分技術検討の現状と、今後の具体的な検討課題について報告する。

**Keywords:** 長半減期低発熱放射性廃棄物, TRU 廃棄物, 併置処分, 放射性廃棄物, 地層処分

Long half-life low heat generating radioactive waste (TRU waste) containing higher amount of radionuclide is considered to be disposed into a geologic formation. As an optimized geologic disposal of the waste, a technical possibility of co-disposal with high-level radioactive waste is being studied. An assessment result shows that a co-disposal is possible in a Japanese representative geologic environment by setting these repositories at a certain distance apart because reciprocal influences can be avoided. Atomic Energy Commission of Japan deliberated on the result and judged that the co-disposal concept described in the 2<sup>nd</sup> progress TRU report has a technical possibility. On the other side, future studies are required from the view points of (1) more reliable assessment of co-disposal, (2) expansion of generic assessment basis, and (3) flexible correspondence for wide geologic environmental conditions.

This article shows a current status of the investigations of TRU waste disposal including an overview of the disposal concept and concrete items for the future studies.

**Keywords:** long half-life low heat generating radioactive waste, TRU waste, co-disposal, radioactive waste, geological disposal

### 1 はじめに

「長半減期低発熱放射性廃棄物」の呼称は、従来の「TRU 廃棄物」に対して原子力委員長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会において使われ始めたもので、再処理施設もしくは MOX 燃料施設の操業及び解体によって発生する廃棄物で、高レベル放射性廃棄物以外のものを指す。従って、再処理施設の操業時に発生する廃銀吸着剤のように TRU 核種ではなく長半減期のよう素が主体となる廃棄物も、この廃棄物の分類に含まれる。

ここでは、原子力委員長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会で検討された地層処分対象長半減期低発熱放射性廃棄物の高レベル放射性廃棄物との併置処分の検討や研究開発の現状と今後の取り組みについて報告する。

### 2 長半減期低発熱放射性廃棄物の処分の概要

これまでの低レベル放射性廃棄物の代表格であった発電所廃棄物に比べ、再処理施設から発生する長半減期低発熱放射性廃棄物の放射性物質濃度は非常に広範囲にわた

るため、その濃度に応じて、浅地中処分から地層処分に至るまで処分することとなる。第 2 次 TRU レポート[1]では、地層処分を行う対象は、一応の区分目安値とされる  $\alpha$  核種濃度 1 GBq/t 以上のものを想定した。

地層処分相当の長半減期低発熱放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と違って低発熱であるため比較的大きな空洞に効率的に廃棄物を定置して処分することとしており、その性状に応じ 4 つのグループに区分し、おのおの専用の処分坑道に処分することが考えられている。グループ 1 はよう素 129 を吸着した廃銀吸着剤である。グループ 2 はハル・エンドピースで、放射化金属を含むために発熱し、かつ放射化生成物の炭素 14 を含む。これらのよう素 129 及び放射化金属の腐食による有機形態の炭素 14 については、核種移行挙動として可溶性で低収着性であり、線量への寄与が大きい。このことから、これらのグループの廃棄物の周囲に拡散場を設けて最大線量を低減させることが考えられており、このためにそれぞれの処分坑道に止水性能を有するベントナイトの緩衝材を設置することとなっている。グループ 3 は、再処理工程の低レベル濃縮廃液等を固化したもので、硝酸塩を含むことを特徴とする。代表例がアスファルト固化体である。グループ 4 はその他の雑固体である。これらは共にベントナイトは用いずセメントで空隙を充填することで十分であるがグループ 3 には硝酸塩が含有するためレイアウト上の工夫を行う場合がある。また、処分施設としてセメント系材料が多用されるのが特徴である。

Fig. 1 に代表的な処分施設レイアウト例を示す。第 2 次 TRU レポートに示されたように、近年、長半減期低発熱

Current and future technical investigations for geological disposal of long half-life low heat generating radioactive waste, by Shigeki Kuroda, Gento Kamei (kamei.gento@jaea.go.jp), The Federation of Electric Power Companies of Japan, Japan Atomic Energy Agency

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 22 回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

\*1 関西電力株式会社原子力事業本部

The Kansai Electric Power Co. Inc., Nuclear Power Division  
〒919-1141 福井県三方郡美浜町郷市 13 号横田 8 番

\*2 (独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

Japan Atomic Energy Agency, Geological Isolation Research and Development Directorate

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

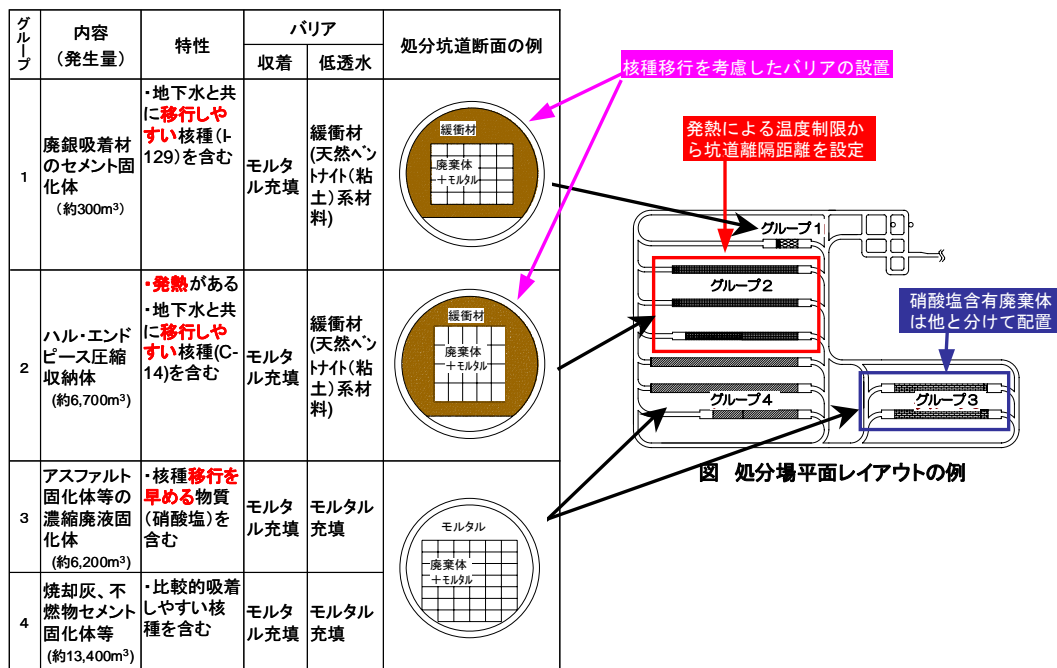


Fig. 1 An example repository layout for long half-life low heat generating radioactive waste

放射性廃棄物の処分に関する知見が増大してきており、このことを踏まえつつ高レベル放射性廃棄物との併置処分の利点(地層処分場を有効活用し処分場数を低減することができる点、一部の施設や処理事業の運用を共用化することができる点、併置処分に経済的な点)を考慮して、併置処分に制度的な検討を行うこととなった。

以下に併置処分の技術的可能性について述べる。

両廃棄物が併置処分されたときの成立性は、それぞれの処分場が単独で成立することを前提に、相互に核種移行上

の影響が無いように隔離距離を確保し配置すれば、両者の安全性や処分概念にかかる既存の検討に影響がなく成立するというものである。したがって、相互影響因子の抽出と、それらの影響範囲の定量的な評価が検討の要点となる。影響範囲の評価は相互に影響がない範囲を求めるため、核種移行解析ではなく、相互影響因子に係る熱又は物質の移動解析を行った。

相互影響因子の抽出結果を Fig. 2 に示す。それぞれの処分場においては、セメントや有機物等のそれぞれで存在す

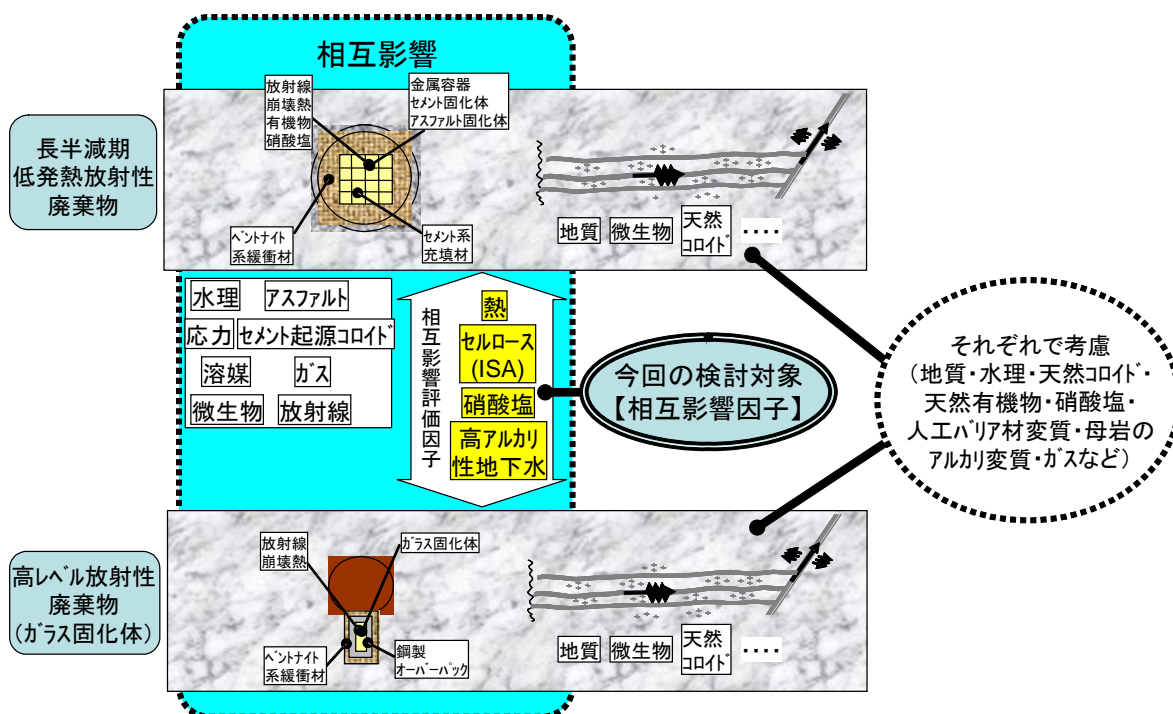


Fig. 2 Reciprocal factors in a co-disposal system

る物質による核種移行への影響が網羅的に検討されており、それぞれで影響を考慮する必要がないか、あるいは影響が限定的であると考えられる場合は相手側の処分場への相互影響は考慮する必要がなく、そうでない場合は相互影響を考慮する必要がある因子として抽出した。抽出された因子は、高レベル放射性廃棄物からの熱と、長半減期低発熱放射性廃棄物からの、有機物に起因するセルロース（イソサッカリン酸）、濃縮廃液に含まれる硝酸塩、セメント系材料に起因する高アルカリ性地下水である。

これらの4つの相互影響因子について、影響の方向、相手側施設で想定される影響と影響があると判断される目安値、影響範囲の評価手法、評価結果としての離隔距離の目安について Table 1 に示す。

これらの相互影響因子のうち、もっとも遠方まで拡がると評価された因子は硝酸塩で、離隔距離の目安は約 300m と評価された。ただし、硝酸塩の拡がりの評価は、地下環境中で形態変化が起きないとして拡がりやすい硝酸イオンのままであるとし、また、高レベル放射性廃棄物側の炭素鋼製オーバーパックの局部腐食への影響時期についてはオーバーパックの想定寿命 1000 年を大きく上回る 10 万年後まで経過した時点の拡がり度で評価しており、十分に保守的な距離であると考えられる。地下深部環境における硝酸塩の形態変化などの知見が深まれば、より現実的な距離の評価が可能になると考えられる。

この約 300m の離隔距離は処分場全体の面積（例えば高レベル放射性廃棄物処分場の場合、約 2km×約 3km）からすればわずかな距離であり、併置処分によって処分場面積

の大幅な増加には至らず、併置処分が技術的に成立することが示された。

なお、この約 300m の離隔距離について、原子力委員会長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会では、確保すべき距離として固定的に定める性格のものでなく、今後処分サイトが決まれば、その地質環境に応じた施設的设计及び相互影響評価により設定されるべきものであると考えられると述べている[2]。このことから、地質環境に応じた処分施設の配置やプラグ等の工学的対策など有効な措置を組み合わせることで影響の拡がりを十分小さくする対応も可能と考えられる。併置処分に関しては、同検討会での審議結果等に基づいて、次のようにまとめることができる。すなわち、

- 抽出した相互影響因子に対しての評価結果よりそれぞれの地下施設間が約 300m あればその影響が十分小さい。ただし、この評価結果は前提条件等に保守的な設定を行った結果であり、前提条件に関する知見の拡充を図り、現実的な条件を設定することによって、この距離を短くできる可能性がある。
- 実際の処分サイトにおいては、高レベル放射性廃棄物の場合と同様、その地質環境条件に応じて、適切な離隔距離を考慮した処分地下施設の配置（立体配置、破碎帯を挟んだ別岩盤配置）、プラグ等の工学的対策など有効な措置を組み合わせることで影響の拡がりを十分小さくする対応も可能と考えられる。

また、より合理的な評価のため、次の検討が必要である。

Table 1 Reciprocal factors and required distances between repositories in a co-disposal system

相互影響因子	影響の方向	相手側施設で想定される影響と判断目安		評価手法	離隔距離の目安
熱	HLW ↓ TRU	充填材の核種の吸着性の低下	長半減期低発熱放射性廃棄物処分施設内温度 80℃以下	2次元鉛直領域を熱伝導解析コード <sup>6)</sup> で解析	約50m
有機物	TRU ↓ HLW	・核種の溶解度の増加 ・バリア材の核種の収着分配係数の低下	イソサッカリン酸濃度 $1 \times 10^{-6} \text{mol/dm}^3$ 以下	2次元鉛直領域を2次元物質移行解析コード <sup>6)</sup> で解析	約20m
硝酸塩		・オーバーパックの局部腐食への影響 ・バリア材の核種の収着分配係数の低下	硝酸塩濃度 $1 \times 10^{-4} \text{mol/dm}^3$ 以下 (バリア材の収着分配係数の低下に関しては $0.1 \text{mol/dm}^3$ 以下)	2次元鉛直領域を2次元物質移行解析コード <sup>6)</sup> で解析	約300m
高アルカリ性地下水		・緩衝材のベントナイト成分の溶解促進 ・オーバーパックの不動態化 ・ガラス固化体の溶解の促進	pH11以下	1次元領域を地球化学-物質移行連成解析コード <sup>6)</sup> で解析	約30m

- ・ 硝酸塩等の影響に関する知見の拡充
- ・ 地質環境及びその不均質性を考慮した影響範囲の時間的・空間的挙動の評価
- ・ 工学的対策（プラグ等）の効果の把握

### 3 今後の検討課題

長半減期低発熱放射性廃棄物処分については、2006年10月の原子力政策大綱の公表以後、原子力委員会処分技術検討会において併置処分の技術的検討が進められる一方、地層処分研究開発調整会議において、当面の重点的研究課題が整理された。これらは第2次TRUレポートの8章に記された今後の課題をもとに、3つの観点から次のように分類された。

#### (1) 併置処分の評価に係る信頼性向上

- ・ 硝酸塩等の影響に係る現象理解とデータ・評価モデルの信頼性向上
- ・ 性能評価技術の体系化・高度化（処分場スケールでの相互影響評価の考慮など）

#### (2) ジェネリックな評価基盤の拡充（HLW評価基盤との平仄）

- ・ 塩水環境下でのデータやモデルの整備など、多様な地質環境を対象とした評価基盤の拡充
- ・ 高アルカリ環境での人工バリア等の長期健全性に関するデータ拡充と評価モデルの信頼性向上

#### (3) 幅広い地質環境に柔軟に対応するための代替技術開発

- ・ よう素固定化・浸出抑制技術の実現性の提示
- ・ 炭素14の放出・移行評価の信頼性向上と閉じ込め容器の開発
- ・ 硝酸塩影響の不確実性低減のための硝酸塩分解  
以下にいくつかの例について研究概要を具体的に紹介する。

併置処分の評価に係る信頼性向上のための、硝酸塩影響評価に関しては、次の項目について検討を進める。

#### (1) 硝酸塩変遷評価モデルの高度化並びに検証

- ・ 鉱物や多様な共存化学種による硝酸塩変遷
- ・ 高pH溶液環境下の微生物活動による硝酸塩変遷

#### (2) 多様な環境における硝酸塩/有機物反応の評価

- ・ 硝酸塩/有機物反応に対する触媒作用物質に関する知見の拡充・整理及び評価

さらにセメント材料の長期挙動に関しては、ジェネリックな評価基盤の拡充の一環として、次の研究を行う。

#### (1) セメントの化学的変質

- ・ 海水系地下水中MgのOPC(普通ポルトランドセメント)への影響、Friedel氏塩生成に伴うpH上昇について
- ・ HFSC(フライアッシュ高含有シリカフェームセメント)の水和反応過程
- ・ セメント系材料(OPC, HFSC)の地下水または廃棄体由来成分による化学的変質

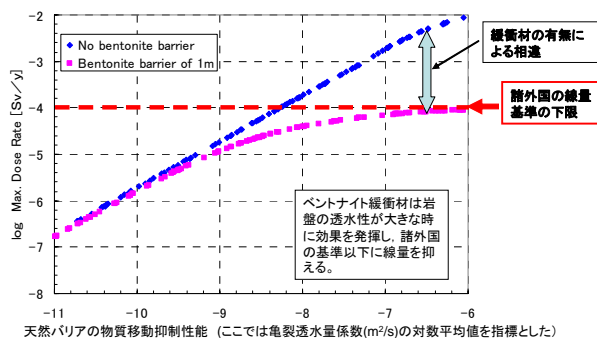


Fig. 3 Maximum dose rate caused by iodine-129 from “Group 1 waste” as a function of transmission coefficient of the natural barrier (Honda and Inagaki, personal communication)

- ・ 熱力学データベース、反応速度データの整備、高イオン強度下、固相影響下での活量補正法の反映、実地質環境に即した化学的変質現象の検討によるモデルの検証・高度化

#### (2) 化学的変質-物質輸送モデルの構築・高度化

- ・ 施設設計の合理化、安全裕度の向上の観点からの検討  
ジェネリックな評価基盤の拡充の一環として、多様な地質環境における処分システム、とりわけ緩衝材の長期挙動評価は最重要の研究課題のひとつである。地質環境のうち、線量に大きな影響をもつ因子は地層の有する地下水流動特性である。したがって、核種移行の観点から地質環境の多様性について、透水量係数をその指標として採用することができる。Fig. 3は廃棄体グループ1のよう素129に起因する線量と、地層の透水量係数との関係を廃棄体周囲に緩衝材が存在する場合と存在しない場合について表したものである（本田・稲垣、私信）。透水量係数が $10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 程度までは緩衝材の有無によって線量に変化はないが、透水性のより大きな条件では、緩衝材の効果が顕在化してくることがわかる。セメントの存在する高アルカリ性地下水環境にあって、比較的地下水流動の大きな条件であっても、緩衝材が長期にその機能を維持することが、処分システムの成立性の観点から重要である。このような理由から、とくに高アルカリ性環境での緩衝材の長期挙動に関する研究を重要課題として挙げている。

具体的には、

- ・ 地下水組成、廃棄体成分、人工バリア材料の多様性に対応したシナリオ・解析評価モデル
- ・ 熱力学データベース整備及び速度モデルに関する信頼性向上
- ・ ベントナイト圧縮体の狭隙間隙における化学
- ・ 緩衝材・セメント系材料境界遷移層に関する知見の拡充
- ・ ベントナイトのセメンテーションに係る知見の拡充
- ・ 長期の実験事例、超長期の天然事例などの知見の拡充、シナリオ・解析評価モデルの確証及び
- ・ 地下水の多様性による力学変化と物質移動特性変化の評価

に取り組んでいくことにしている。

より信頼性の高い線量評価には天然バリアの有する核種移行遅延機能についてもより正しく評価していく必要がある。処分場近傍の天然バリアに関しては先に述べた緩衝材の評価と同様に、セメントの存在を考慮して天然バリア機能に対する高アルカリ性溶液の影響について評価する必要がある。これについては、海外地下研究施設から採取した岩石標本などを用いて試験を行い、変質過程のシナリオの構築、岩盤中物質移行特性への影響に関する知見の拡充、及び岩盤の不均質性を考慮した影響評価手法の提示を行う予定である。

併置処分の評価に係る信頼性向上及びジェネリックな評価基盤の拡充の両面から、核種移行に関するデータ取得を進めていく必要がある。まず、溶解度に関しては

- ・高アルカリ領域における核種溶解度データの取得及び熱力学データの確証
  - ・海水系地下水や廃棄体成分等の影響を受けた条件での核種溶解度データの取得
  - ・可溶性有機物と核種との錯体生成定数の取得・整備及び
  - ・熱力学データベース（TDB）の拡充
- を進めていく。

収着・拡散については、

- ・化学的類似性にもとづいて設定した核種に対するセメント系材料等への収着データの取得
  - ・海水系地下水や廃棄体成分等の影響下での核種のセメント系材料等への収着データ取得
  - ・硝酸錯体・アンモニア錯体の核種収着に及ぼす影響の知見の拡充及び
  - ・硝酸イオンによる核種の酸化状態変化及び核種収着に及ぼす影響の知見の拡充
- を進めていく。

さて、今回は詳しく述べなかったが、これらの検討と並行して、幅広い地質環境に柔軟に対応するための代替技術開発を進めていく必要があると考えている。これらは不確実性低減のために処理段階において抜本的対策を施そうとするものであって、具体的には

- ・よう素固定化・浸出抑制技術の実現性の提示
  - ・炭素 14 の放出・移行評価の信頼性向上と閉じ込め容器の開発
  - ・硝酸塩影響の不確実性低減のための硝酸塩分解
- が挙げられる。

#### 4 おわりに

以上、併置処分を念頭においた処分事業を円滑に進めるため、精力的に研究活動を展開していく予定であるので、今後とも関係各位のご指導、ご鞭撻をお願い申し上げる次第である。

#### 参考文献

- [1] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-，JNC TY1400 2005-013，FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
- [2] 原子力委員会 長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会，長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方 -高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性- 平成 18 年 4 月 18 日 (2006).

