

## 国内および海外における TRU 廃棄物地層処分の状況

・・・高レベル廃棄物とともに極めて重要な地層処分対象 TRU 廃棄物・・・

所属（北大・院・工） 佐藤 正知

**1. 背景と目的** 旧核燃料サイクル機構と電気事業者が 2005 年 9 月に「TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ―」（以下、「第 2 次 TRU レポート」という）を公表しています。燃焼度 45,000MWD/THM までの使用済み燃料を再処理した場合の TRU 廃棄物処分に関して記述しています。再処理によってガラス固化体とともに、ハル・エンドピース圧縮廃棄体をはじめ計 4 種類の地層処分対象 TRU 廃棄物が発生します。この他に、これら TRU 廃棄物に比べて放射性毒性の低い余裕深度処分対象等の TRU 廃棄物が発生します。

欧米諸国では、岩塩（米国、ドイツ）や粘土（フランス、ベルギー、スイス）などの乾燥した地層に絞り処分を考えています。これに対しわが国では、地下水で飽和した岩盤や地層中に処分場が建設される可能性が高く、取り巻く条件が異なっています。我が国の処分では、固化材、工学バリア材に相対的に高い性能が求められます。

わが国の軽水炉燃料は、経済性の向上と使用済み燃料発生量の低減を目的にして段階的に高燃焼度化が図られ、現在ではBWRとPWRいずれも55 GWD/t（集合体最高）に達しています。昨年末からMOX燃料の利用がはじまりました。少し先になりますが、Cs-137やSr-90とは異なる長半減期発熱核種による熱影響に対する配慮が必要になります。

「わが国における高レベル放射性廃棄物処分に関する第 2 次とりまとめ」の作成や、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の施行に向けての対応が急がれたことから、これら地層処分対象 TRU 廃棄物の処分に関する研究開発は遅れてスタートしました。潜在的な放射性毒性が低いこと、廃棄体が多様で複雑なことから、固化体の化学的耐久性について検討が十分進んでいないのが現状です。結局、実験データや確かなモデルやシナリオに基づいた安全性の説明が求められる点では高レベル廃棄物処理処分の場合と変わらないことから、残された課題は少なくありません。そこで、今後、注目が集まる地層処分対象 TRU 廃棄物の処分について国内および海外の状況を整理するとともに、長半減期発熱核種による熱影響の検討結果について紹介し、今後の具体的な課題を探ります。

## 2. 海外の状況

海外では米国、英国、フランス、ベルギー、ドイツ、スイスの 6 カ国が TRU 廃棄物の地層処分について検討しています<sup>(2)</sup>。米国は、軍事用の再処理に伴い発生した TRU 廃棄物が主で、発生者は連邦政府です。実施主体である連邦エネルギー省が、1999 年 3 月からニューメキシコ州カールスバッドの地下 650m の岩塩層に掘削した廃棄物隔離パイロットプラント(WIPP)で、この種の TRU 廃棄物の処分を実施しています。この他に、過去に一時操業されていた、民生用のウエストバリー再処理工場から発生した TRU 廃棄物があり、発生場所にて貯蔵されています。米国は多くの他の諸国と異なり併置処分ではなく、TRU 廃棄物を単独処分しています。

英国では、セラフィールド再処理施設で貯蔵されています。処分実施主体は、原子力廃止措置機関(NDA)です。

フランスでは、原子力発電所から発生する使用済み核燃料は年間 1,150 トン程度です。そのうち 850 トンが再処理され、約 200 トンが使用済み燃料のままで毎年蓄積されています。少なくとも 21 機の軽水炉で、プルサーマル燃料が装荷されており、使用済み MOX 燃料が毎年約 100 トン発生しています。これらの使用済み燃料は、当面は貯蔵されることになっています。カテゴリ C に分類される高レベル放射性廃棄物とカテゴリ B に分類される地層処分対象 TRU 廃棄物は同一サイトの処分が予定されています。地層処分対象 TRU 廃棄物は 7 種類に分類され、この

うち、ハル・エンドピース圧縮廃棄物、雑廃棄物のセメント固化体、およびアスファルト固化体については、それぞれ鋼製容器に封入して地層処分する研究開発が進められています。廃棄物は、アレバ社のマルクールおよびラ・アグの再処理工場、メロックス等の燃料加工施設で貯蔵されています。実施主体である放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が、放射性廃棄物管理計画法(2006)に基づき、地層処分に関する研究開発を進めています。

ベルギー、デッセルにおけるベルゴプロセス社の貯蔵施設で貯蔵されています。実施主体は、ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関(ONDRAF/NIRAS)です。地下 240 mに存在するモル・デッセルのブーム粘土層を標準サイトとして、高レベル廃棄物とともに、TRU 廃棄物であるハル・エンドピースをはじめとする雑固体廃棄物等の処分を検討しています。

ドイツは、英国原子力グループ・セラフィールド社とフランスのアレバ社に再処理を委託してきました。2005年7月以降、再処理のための使用済燃料の搬出が禁止されています。放射性廃棄物処分の実施主体は、連邦放射線防護庁(BfS)です。発熱性、非発熱性のすべての種類の放射性廃棄物を地層処分する方向で検討が進められています。発熱性廃棄物については、2030年の操業開始を目標に、深さ840~1,200m地点での岩塩ドームに建設するゴアレーベン処分場が検討されていますが、操業開始は未定です。非発熱性廃棄物については、深さ800から1,300mの乾いた鉄鉱床の廃鉱であるコンラッド処分場への処分に向けて取り組んでいます。処分場の建設から閉鎖までを含めた計画が2002年5月にニーダーザクセン州環境省により許可され、その後の異議申し立て裁判を経て、2007年4月の判決で許可が法的に有効となりました。操業開始時期は未定です。

スイスは、ドイツと同様に英国原子力グループ・セラフィールド社とフランスのアレバ社に再処理を委託してきました。電気事業者の判断で進められてきた再処理は、2006年7月以降凍結されています。現在、大半の廃棄物はこれらの再処理施設で貯蔵されています。実施主体は放射性廃棄物管理共同組合(NAGRA)で、高レベル放射性廃棄物と同一サイトの処分が考えられています。以上が欧米各国の状況です。

### 3. 我が国の状況

我が国では、高燃焼度化の進行に伴い、毎年約1,000トン程度の使用済核燃料が発生しています。また、英国やフランスに再処理を委託していたことから、海外から返還される地層処分対象 TRU 廃棄物があります。わが国におけるこの種の TRU 廃棄物の処分は、高レベル放射性廃棄物の地層処分との併置処分の考え方を基本としています。ただ、上述の欧米の主な国々が岩塩や粘土層といった乾燥した地層に絞って研究開発を進めているのに対し、日本ではこのような地層はほぼ期待できないことから、幅広い地質環境を対象に研究開発を進めています。その場合、地中でのセメント材料の長期健全性対策をはじめ、時間のかかる研究開発課題が付きまといまいます。この点は日本のこの分野の研究開発の特徴と言えます。詳しくは、はじめに紹介した「第2次 TRU レポート」を参照願います。

### 4. 原安協・核燃料サイクル基本問題懇談会の活動から

**4.1 研究の目的** 地層処分対象 TRU 廃棄物はセメントを用いてパッケージ化することが有力な考え方です。高レベル廃棄物に比べて、潜在的な放射性毒性は桁違いに低いものの、科学データに基づいて手順を踏んで社会に安全性を説明することが極めて重要です。そのためには、セメント、コンクリート、セメント・ベントナイト、その他の材料の材料科学的な研究を推し進める必要があります。

セメントペーストの主要な成分である CSH (Calcium silicate hydrate) は水を含むことから、Am-241 等による熱影響はセメントを用いる場合にはアキレス腱となる場合があります。また地下水流に影響を与える場合は、安全評価の不確実性が高まります。熱影響を和らげるには、(1)再処理工場での燃料付着率を下げる、(2)パッケージ化等の処理法を改める、(3)処分坑道直径や離間距離といった処分概念を改めることが考えられます。

本研究はこのような観点から、核燃料サイクルのそれぞれの分野で活躍されている研究者・技術者の方々に加わっていただき、2004年1月以降、バックエンドの視点からサイクル横断的な検討を進めています。核燃料の燃焼計算と発熱特性評価、設定した処分概念における処分後の深地中処分場の熱解析を行い、今後に生じる固化処理の課題とその対策の可能性を検討するための基礎データを集めています<sup>(3)</sup>。

**4.2 熱影響の評価方法** 「第2次 TRU レポート」では、4種類に区分された地層処分対象の TRU 廃棄物のうち、グループ2のハル・エンドピース圧縮廃棄体の処分に関し、圧縮体を収納するキャニスターを4本一組でパッケージ化した後に隙間をセメントで充填し、水平方向に並んだ坑道の内部に積み重ねる方式での集積型処分が考えられています<sup>(1)</sup>。坑道離間距離や坑道の直径など、処分場の設計を進める上で対処すべき主要な因子の一つは廃棄体の発熱であり、廃棄体パッケージの温度が、充填材として用いられるセメント系材料の上限値として設定した80℃を下回るように処分されるとして検討されています。なお、フランスの処分概念では最高温度は70℃です。本研究では、上限温度については80℃を下回るように処分されることを仮に前提にして議論することに致しました。

燃焼度が45 Gwd/THMを越える高燃焼度UO<sub>2</sub>使用済燃料及びMOX燃料の再処理に伴い発生するTRU廃棄物については、具体的な処理・処分方法はまだ決定していません。現在の拠出金制度にも含まれていません。2010年以降、六ヶ所再処理工場に続く第二再処理工場の設備仕様について検討が進められることになっています。このように従来とは異なる特性を持つTRU廃棄物の合理的な処分方法を検討する上で、まずは「第2次 TRU レポート」に示されている処分方法に対する高燃焼度化およびMOX燃料の導入による影響を明らかにすることが重要と考えます。

図1に解析の手順を示します。はじめにPWR燃料を対象とした燃焼計算を行い、使用済燃料に含まれる核種生成量と熱放出率を評価します。次に、「第2次 TRU レポート」で設定されているハルへの燃料付着率を用いて、ハル・エンドピース圧縮廃棄体（キャニスター1本当たり）の熱放出率を評価しました。さらに、キャニスターをパッケージ化して地層処分した後の坑道と周辺岩盤に対して、有限要素法による二次元熱伝導解析（FEM）を行い、温度分布を求めました。

### 4.3 結果と考察

**1) ハル・エンドピース圧縮廃棄体の発熱特性** UO<sub>2</sub>使用済燃料およびMOX燃料について、燃焼度が45、55、70 Gwd/THMの場合のハル・エンドピース圧縮廃棄体の熱放出率の再処理後からの経過時間依存性を計算しました。MOX使用済燃料の場合のキャニスター1本当たりの熱放出率は、UO<sub>2</sub>使用済燃料の場合よりも非常に緩やかに減衰し、経過時間と共にUO<sub>2</sub>使用済燃料の値との差が拡大します。再処理後25年が経過した時点での値は、燃焼度45 Gwd/THMのUO<sub>2</sub>使用済燃料の場合の3.2~4.5倍に達し、1025年後（処分後1000年経過後）では、9.6~12.9倍に達します。

以上の結果より、MOX使用済燃料の再処理で発生するハル・エンドピース圧縮廃棄体の場合は、地層処分開始時点だけではなく、処分後、長期間が経過した後においても処分坑道やその周辺に及ぼす熱の影響が大きいことが明らかとなりました。従って、従来のハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分のあり方に対して大幅な変更が必要となる可能性があります。この点を明らかにするために、次に処分後の坑道とその周辺岩盤を対象に熱伝導解析を行い、ハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分に対する熱影響を評価しました。

**2) 処分坑道と周辺岩盤の温度分布** 結果を図2に示します。堆積岩の熱物性値を用いると、燃焼度が45 Gwd/THMの場合は、一体の廃棄体パッケージに1.1本のキャニスターしか収納できず、UO<sub>2</sub>使用済燃料の場合に比べて大幅に減少します。坑道中心部A点の温度は、処分後20年で最大に達し、1000年経過した時点でも、63℃と比較的高い温度を示します。さらに、2つの隣接する坑道の中間位置にあたるC地点においても、処分後100年経っても温度は上昇し続け、1000年後においても57℃と高い温度が維持されることがわかりました。この点でもUO<sub>2</sub>使用済燃料の結果とは大きく異なります。燃焼度が70 Gwd/THMの場合は、地層処分をする際のキャニスターの

熱放出率が、45 GWd/THM の場合の 1.4 倍であるため、1 体の廃棄体パッケージに収納できるキャニスターの本数は、さらに減少し 0.8 本となってしまいます。

処分後 1000 年の時点での処分坑道とその周辺岩盤温度の二次元分布を求めた。UO<sub>2</sub> 使用済燃料の場合は、坑道とその周辺の温度が 42℃～48℃となりますが、MOX 燃料の場合は、57℃～68℃の高い温度に曝される結果が得られました。MOX 使用済燃料の場合のこうした結果は、500 m の深度に水平方向に平行に処分坑道が並べられる場合には、複数の坑道を含む処分領域全体が、最大で 70℃程度の高い温度に曝されることを意味しています。

「第 2 次 TRU レポート」では、燃焼度 45 GWd/THM の UO<sub>2</sub> 燃料のみを対象としているため、坑道およびその周辺の温度が、10<sup>7</sup> 年までの長期間に渡って初期地温に保たれることを前提として安全評価が行われており、熱による対流の影響も考慮されていません。MOX 使用済燃料の再処理で発生するハル・エンドピース圧縮廃棄体の場合は、こうした前提条件を適用できず、安全評価がより複雑化する可能性があります。

今回の解析では、セメント材料の上限温度を 80℃として、廃棄体パッケージに収納されるキャニスターの本数を設定しています。実際の地層処分では、坑道内部の廃棄物密度の極端な低下を防ぐために、ハル・エンドピース以外の非発熱性の廃棄物と混在させて処分することも考えられます。しかし、この場合も、今回の MOX 使用済燃料の解析結果と同様に、坑道周辺岩盤では、広い範囲で長期間に渡り高い温度が維持される可能性が高いと考えられます。

セメントを用いてパッケージ化する処理を採用する場合、以上に示したように処分場の周辺岩盤の熱伝導率、セメントの上限温度、使用済み燃料の燃焼度、廃棄体への使用済み燃料の付着率といった再処理、廃棄物処分後を十分考慮した上で、はじめて処理処分法について考えることができるようになります。今のような時間的に余裕のある段階で十分に検討を進められることが望まれます。

## 5. まとめ

特に、地層処分対象 TRU 廃棄物に関する各国の取り組みについて触れました。カナダやスウェーデンやフィンランドのような使用済燃料の直接処分を進めている国々を除くと、欧米各国が、対象とする乾燥した地層に絞って高レベル廃棄物とともに TRU 廃棄物を併置処分するケースが多く見られます。この点で、我が国の処分では地下水と接触する環境での種々のセメント材料や、セメントとベントナイト材料の長期健全性について特に注意深く研究開発を進める必要があります。

軽水炉燃料の高燃焼度化および MOX 燃料の利用が進んでいます。少し先の課題ではあるものの、こういった場合、熱影響についても注意深く検討する必要があります。そこで、ハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分への熱影響を評価しました。解析結果から、「第 2 次 TRU レポート」で示されているハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分概念を前提とすると、高燃焼度 UO<sub>2</sub> 燃料の使用による廃棄体の地層処分への影響は無視できないが限定的であり、現在の地層処分の概念をそれほど大きく変更することなく適用できる可能性があります。一方、MOX 使用済燃料の再処理で発生するハル・エンドピース圧縮廃棄体の地層処分に対する熱影響は極めて大きいことが明らかとなりました。

## 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，(2005)。
- (2) 例えば、原子力環境整備促進・資金管理センターホームページ、<http://www.rwmc.or.jp/disposal/tru/>  
「日本における TRU 廃棄物（地層処分対象）にあたる廃棄物の各国での取り扱いについて」

- (3) F. Hirano, S. Sato, T. Kozaki, Y. Inagaki, T. Iwasaki, T. Ohe, K. Kato, K. Kitayama, S. Torikai, Y. Niibori, S. Nagasaki, "Thermal Impact on Geological Disposal of Hull and End Piece Wastes Resulting from High-Burn-up Operation of LWR and Introduction of MOX Fuels into LWR", J. Nucl. Sci. Technol., **46**(2009), pp.443-452.

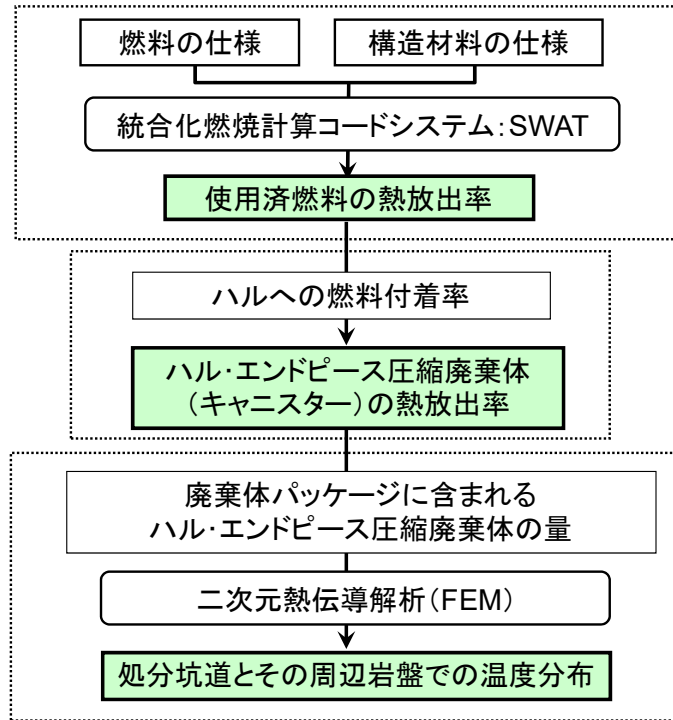


図1. 熱影響評価の解析の手順

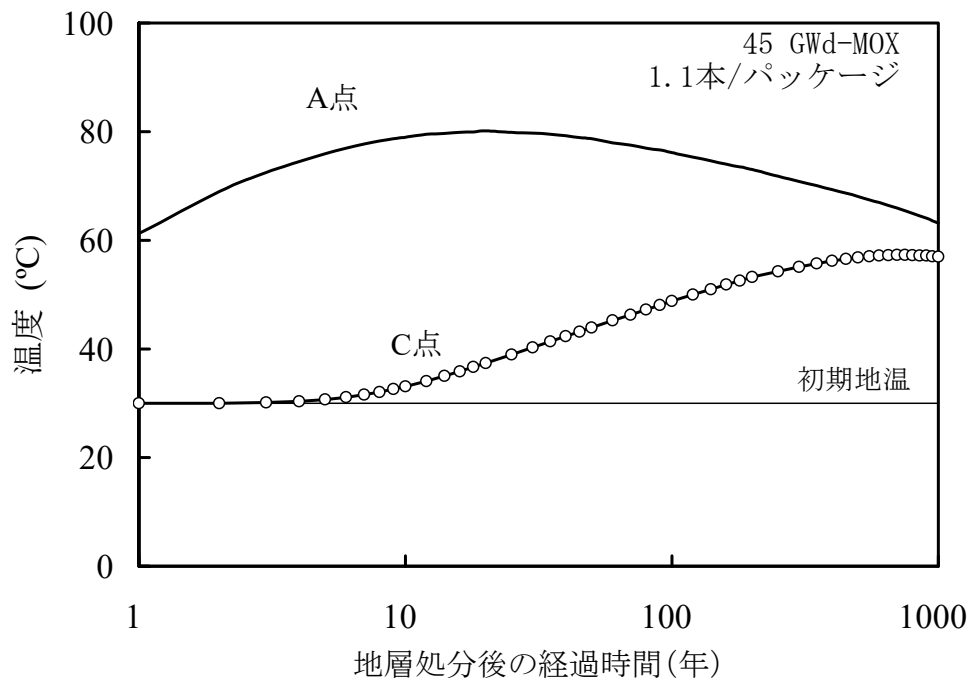


図2. 処分後の坑道と周辺岩盤温度の時間依存性<sup>(3)</sup>  
(MOX燃料、堆積岩の熱物性値を使用)