

一般社団法人日本原子力学会

2019 年度

「放射性廃棄物の処理・処分と分離・変換技術」

研究専門委員会

成果報告書

2020 年 3 月

目次

はじめに	1
1. 研究専門委員会について	1
2. 2019 年度活動概要	1
3. 2019 年度調査内容	3
3.1. 上振れ/現状/下振れシナリオに対するマテリアルバランス評価	3
3.2. 高速炉システムに関する技術調査	3
3.3. 加速器駆動システムによる分離・変換技術	4
3.4. 加速器による LLFP 核変換技術	6
3.5. 六ヶ所再処理工場における放射性廃棄物の処理について	6
3.6. 地層処分：国内外の規制の状況等	8
3.7. 包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現	9
3.8. 廃棄物管理における負荷低減：分野横断的な原子力システム研究	11
3.9. マイナーアクチニド分離変換技術の有効性向上のための柔軟な廃棄物管理法の 研究開発	12
4. 2020 年度の計画	13

付録

付録 1	委員会委員
付録 2	委員会開催記録
付録 3.1	上振れ/現状/下振れシナリオに対するマテリアルバランス評価
付録 3.2	高速炉システムに関する技術調査
付録 3.3	加速器駆動システムによる分離・変換技術
付録 3.4	加速器による LLFP 核変換技術
付録 3.5	六ヶ所再処理工場における放射性廃棄物の処理について
付録 3.6	地層処分：国内外の規制の状況等
付録 3.7-1	包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現 セッション 3 処分場の設計と工学技術
付録 3.7-2	包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現 セッション 5 閉鎖後長期の安全性の評価
付録 3.8	廃棄物管理における負荷低減：分野横断的な原子力システム研究
付録 3.9	マイナーアクチニド分離変換技術の有効性向上のための柔軟な廃棄物管理法 の研究開発

はじめに

2019年6月1日～2021年3月31日に実施した「放射性廃棄物の処理・処分と分離・変換技術」研究専門委員会の2019年度活動について報告する。本報告は活動の概要、2019年度調査内容、および、2020年度の計画から成る。

1. 研究専門委員会について

本研究専門委員会は、分離・変換技術を含む先進的な核燃料サイクルについて調査し、二次廃棄物も含めた各種廃棄物の処理・処分に及ぼす影響を定量的、総合的に検討・整理することによって、処分場の長期の放射線安全や処分場閉鎖後の人間侵入事象における安全性向上などに寄与する実現可能な技術オプションとなり得るための分離・変換技術への提言を行う。そのために再処理、処分、核変換などの広範囲の専門家（付録1）を委員とした。

研究専門委員会では、2019年度に現状技術の把握と、分離・変換が処理・処分に及ぼす効果についての既往研究の調査を実施し、2020年度に同効果の検討、分離・変換技術への提言を実施する計画とした。

2. 2019年度活動概要

2019年度の調査項目を表1に一覧する。また、開催記録を付録2に添付する。

分離・変換の効果を議論する際には、将来の原子力発電電力量の想定や、再処理状況、高速炉導入の有無などの前提シナリオが必要となる。そのため、まず、日本原子力学会で現在行われている「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会でのシナリオ検討を紹介し、主に検討対象となるべきシナリオについて議論した。

高速炉、加速器駆動システム（ADS）、加速器を用いた分離・変換技術の現状について、各々調査した。高速炉については、FaCT報告書に基づく紹介がなされ、炉と再処理に研究開発課題が残っているものの、これらに代替技術があること、MAの回収率や回収有無についての検討が行われていることなどが述べられた。ADSについて、技術開発課題、開発段階（TRL）、開発ロードマップなどが紹介された。加速器を用いた核変換は、長寿命核分裂生成物（LLFP）の分離変換を対象としたImPACT藤田プログラムの成果が紹介された。

六ヶ所再処理工場における高レベル廃液濃縮、及び、ガラス固化処理の現状が紹介され、それぞれの技術課題に対して、分離・変換技術が貢献可能か、また、分離された廃棄物の処理・処分研究の必要性などが議論された。

国内外の処分規制の現状として、中深度および地層処分の線量評価基準の考え方、ヨーロッパの処分区分、安全指標等が紹介された。また、CEAにおける分離・変換の効果の研究が示された。我が国における地層処分の現状として、NUMOによる包括的技術報告書から、処分場の設計と安全評価が紹介された。

分離・変換の処理・処分への効果に関する既往研究の調査では、東工大と原環センターが行っている処分場面積低減のための「分野横断的な原子力システム研究」が紹介された。ま

た、九州大学らが文科省原子力システム公募で実施した、高レベル廃液の仮焼・固体化と一時的貯蔵による「マイナーアクチニド分離変換技術の有効性向上のための柔軟な廃棄物管理方法」の研究開発が紹介された。

これらの調査を通じて、分離・変換技術の研究開発の現状、処理・処分の現状及び分離・変換技術の効果を期待しうる部分などの知見を委員会メンバー間で共有した。

表 1 調査一覧

分野	タイトル	講演者	付録番号
将来原発シナリオ	上振れ/現状/下振れシナリオに対するマテリアルバランス評価	西原健司 (JAEA)	3.1
分離・変換	高速炉システムに関する技術調査	渡部創 (JAEA)	3.2
	加速器駆動システムによる分離・変換技術	西原健司 (JAEA)	3.3
	加速器による LLFP 核変換技術	西原健司 (JAEA)	3.4
再処理	六ヶ所再処理工場における放射性廃棄物の処理について	長谷川 聡 兼平 憲男 (日本原燃)	3.5
処分	地層処分：国内外の規制の状況等	田辺博三 (日本原子力学会フェロー)	3.6
	包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現	山本陽一 藤崎淳 (NUMO)	3.7
分離・変換の処理・処分への効果	廃棄物管理における負荷低減：分野横断的な原子力システム研究	朝野英一 (原環センター)	3.8
	マイナーアクチニド分離変換技術の有効性向上のための柔軟な廃棄物管理法の研究開発	稲垣 八穂広 (九州大学)	3.9

3. 2019 年度調査内容

3.1. 上振れ/現状/下振れシナリオに対するマテリアルバランス評価

本委員会の検討においては、分離・変換技術が導入される対象として、どのような核燃料サイクルを想定するかによって、その効果は大きく異なることが予測される。そこで、現在の我が国の状況から将来に想定される原子力利用シナリオを幅広く検討した研究を調査した。この研究は、日本原子力学会「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会での議論に基づいて行われているもので、上振れ、現状、下振れの3つの発電容量を仮定し、ワンスルー、プルサーマル利用、高速増殖炉導入、MA核変換導入の4種類の核燃料サイクルをそれぞれ適応したものである。現状シナリオは、現在のエネルギー基本計画で計画されているように、2030年の発電量の20～22%を原子力が賄うものであり、2030年以降もそれを維持する。上振れシナリオでは、その二倍の発電容量を2050年以降維持する。下振れシナリオでは原子力発電所の新設を行わず、寿命に従って原発を終了する。それぞれのシナリオに対して、発電所の新設ペース、プルサーマル割合、天然ウラン需要、使用済み燃料貯蔵量、再処理量、プルトニウム・MA蓄積量、廃棄体量の時間推移が計算されている。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- 上振れシナリオ A については、本委員会の主な検討対象とはしないが、いくつかのケースについては比較検討に含める。
- ウラン使用済み燃料ワンスルー（直接処分）では分離・変換技術を導入することができないが、リファレンスとして検討対象に含める。ただし、国内の直接処分の検討は地層処分より進んでいないことに注意が必要である。
- 主な検討対象はケース B2（現状・プルサーマル）、B3（現状・高速増殖炉）、C1.5（下振れ・部分再処理）と考えられる。B4（現状・高速増殖炉 MA リサイクル）は B3 のオプションとして扱える。
- B2（現状・プルサーマル）における分離変換の役割を考えたとき、プルサーマル使用済み燃料をどのように考えるべきか。プルサーマル使用済み燃料を直接処分するか、あるいは、再処理してプルトニウムを処分するか。
- C1.5（下振れ・部分再処理）における分離変換の役割はあるか。残されるウラン使用済み燃料とプルサーマル使用済み燃料の対処法を想定するべきである。

3.2. 高速炉システムに関する技術調査

高速炉システムの研究開発状況については、2010年まで原子力機構で行われた FaCT 研究および、その後、国によって示された高速炉開発の戦略ロードマップを調査した。

FaCT 研究では炉システム及び再処理システムに対して各々実用炉の概念設計とともに、革新的な要素技術開発とその成立性評価が行われた。炉システムにおいては、安全性・信頼性・経済性を向上したプラント概念が示され、革新的な要素技術の採用により当時の軽水炉以上の経済性を有することが示された。また、再処理システムにおいては、U-Pu-Np 一括

回収などいくつかの革新技术が採用可能であることが示された一方で、抽出クロマト法による MA 回収技術などの革新技术はさらに R&D を進めることと評価された。それを受け、MA 回収については、抽出クロマト法を中心とした基礎研究が進められている。

高速炉開発戦略ロードマップでは、民間のイノベーションを取り込んだ開発の方針とともに、核燃料サイクルの維持、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減実現に向けた再処理技術の必要性が謳われている。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- いくつかの課題（廃液二極化、晶析によるウラン回収、抽出クロマト）が検討継続とされたが、これらには代替技術がある。
- 晶析による回収ウランは低除染を前提としており、ブランケットへの利用が考えられる。
- 軽水炉 MOX を対象とした Co-processing 法の研究も進めている。
- FP の除染係数と MA 回収率はトレードオフの関係にある。MA の回収率目標 99% は高すぎるのではないかと回収性能を追求しており全体最適化の観点が見られない。
- 処分や燃料製造の観点から、MA 回収への要求事項を整理する必要がある。
- フローシートのロバスト性を高め、計装とシミュレーションを用いて製品品質を保つ必要があり、現在原子力機構を中心として研究開発を進めている。
- 抽出クロマト法と溶媒抽出法の比較評価が重要であり、原子力機構で今後行っていきたい。
- 原子力機構ではガラス固化研究を中止したとのことだが、原燃は六ヶ所再処理工場のためのガラス固化研究をやっているだけであり、研究実施主体がなくなる。国内に研究開発基盤が必要である。

3.3. 加速器駆動システムによる分離・変換技術

加速器駆動システム (ADS) を用いた分離・変換は、高速炉を用いた場合は発電と核変換を同時に実施する概念であることに对比して、階層型の概念とされる。すなわち、発電を目的とする大規模な軽水炉や高速炉などの商用発電サイクルと、分離・変換を目的とする小規模な核変換サイクルが並立する。調査では、使用済み燃料の潜在的毒性（経口摂取した場合の線量）の長期減衰から、99% の MA を核変換することが目標とされていることが述べられた。

研究開発状況として、加速器の並列化・燃焼反応度調整・受動的崩壊熱システムなどの ADS 設計高度化がなされていること、および、MA や鉛-ビスマス冷却材などを新規に用いることから核データ検証が実施されていることが紹介された。鉛ビスマス液体金属は鋼材に対する腐食性が高く、また強い照射環境下で鋼材を用いることから、材料研究開発が重要であり、現在、イオン照射や鉛ビスマスループを用いた非照射条件の試験が実施されている。今後、鉛ビスマス流動下での大強度陽子ビームによる照射試験が重要な研究開発パスとな

ることから、J-PARCにおいて照射施設を建設することを検討している。ADSのMA使用済み燃料中には核変換されていないMAが含まれているため、それを抽出し再びADSの新燃料とする必要がある。そのための技術開発として、乾式再処理によるMA回収のためのコールド試験や回収物の再燃料化の試験が行われている。

2010年に「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会によって評価されたところによると、ADSおよび関連する再処理・燃料製造技術の技術成熟度(TRL)は3(概念開発段階)が終わったところであった。現在は、4(要素技術の開発)が実施されている状態である。更に、5(要素技術の完成)のためには、各分野で工学規模の施設・設備の建設が必要となるが、そのための投資は行われていない。今後のロードマップとして、計算科学と現存施設における実験を組み合わせたPSi計画に基づいたADS開発が進められていることが示された。

これまでに実施された分離・変換後の廃棄物発生評価の結果、発熱性の廃棄物や低発熱・長寿命の廃棄物体積は減少する一方、低レベル廃棄物が増加していることや、予備的な経済性評価の結果、分離・変換を実施することでADSを中心とするコスト増と処分場のコスト減が起こり、発電単価にして0.12~0.13円/kWhのコスト増となることが紹介された。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- ADSで用いるMA窒化物燃料では炭素-14の発生を避けるために、窒素-15濃縮を行う。酸素-18濃縮と同様の技術が適応できることが明らかになりつつあり、現在プラント設計などを行っている。
- 群分離プロセスから発生する二次廃棄物中の廃溶媒等は、現行のSELECTプロセスの前に開発していた4群分離におけるDIDPAなどの廃溶媒のことである。
- 通常原子炉であれば、実験炉、原型炉(高速炉であれば、もんじゅ)、実証炉、実用炉とステップを踏むが、ADSでは、出力が小さい(800MWt)ため、原型炉と実証炉をまとめて、実証ADSとすることでステップを減らせる。MYRRHAは実験炉~原型炉相当である。
- MAの核変換率は10%/年とのことだが、核変換性能としてどういう意味を持つかについて議論した。核変換率が数%程度の場合、再処理回数が多くなりMAのロスが増える。一方、数十%にすることは、炉心や燃料の制約から難しい。そのため、10%程度でおりあっている。
- プルサーマルや高速炉と組み合わせた場合、MA量が増え、必要となるADS基数が2~3割増える。
- 予算があればTRLを上げられるのかについて議論した。技術開発なので、失敗のリスクはある。また、TRLを上げるためには相当量(kg)のMAが必要なので、予算だけの問題ではない。
- 二次廃棄物の検討が十分ではない。乾式再処理からの廃棄物も、含まれるインベントリをきちんと計算しないと処分概念は作れない。

- ベルギーMYRRHA プロジェクトの背景、EU の協力状況について議論した。ベルギーは分離変換の研究とともに、照射炉 BR2 の後継として考えている。照射事業は SCKCEN の予算の多くを生み出している。MYRRHA は EU のプロジェクトに組み込まれているが、EU からの資金は未定である。日本も 10～15%の資金を求められているが、その規模の投資ができる状況ではない。

3.4. 加速器による LLFP 核変換技術

高レベル廃棄物中には 3.2、3.3 で述べてきた MA 以外に、長寿命核分裂生成物 (LLFP) が含まれており、処分場閉鎖後の長期被ばくにおいては MA に比べて支配的な因子となる場合が多い。その一方で、原子炉における核変換が難しい核種が多いため、核変換は困難であるとされてきたが、近年の加速器技術の伸長や、逆運動学による LLFP の核データ取得技術の開発により、加速器による LLFP 核変換に注目が集まり、内閣府の革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」(藤田プログラム・マネージャー)において研究開発が行われた。本プログラムでは、LLFP のうち Se-79、Zr-93、Pd-107、Cs-135 を対象として、高レベル廃液およびガラス固化された高レベル廃棄物からの化学分離法の開発、レーザーによる同位体分離、核データ測定および評価、加速器概念設計、処分場影響評価、再資源化のためのクリアランスレベル評価が行われた。処分場影響評価では、MA および LLFP 核変換により高レベル廃棄物の中深度処分が可能になるかを検討するために、濃度制限シナリオなどの安全評価が行われており、今回対象とした Se-79 などの 4 つの LLFP については基準を満たす一方で、研究対象としていない MA、Sn、Tc は制限値を上回った。これらについては、既往研究でも取り組まれているが、今後、一層の低減が必要である。クリアランスレベル評価の結果 Pd-107 を取り除いた後の安定 Pd 同位体に資源化可能性があることが分かった。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- 経済性では、プロセスや加速器より加速器に供給する電力の割合が大きいと考えられるため、原子炉からの発電量の内、どれだけを加速器に送電するか (エネルギー収支) で経済性は決まると考えられる。
- 一般に処分後の線量評価に対して Pd と Zr の寄与は小さい。Se は TRU 廃棄物の 4 番目。Se と Cs は寄与があるが小さい。
- 中深度処分可能性を示しているが、規制基準が厳しく、地層処分より楽になっているとは限らない。社会に対しても、より受け入れられるか不明だ。
- Pd の資源化の方が核変換そのものよりも重要な成果である可能性がある。

3.5. 六ヶ所再処理工場における放射性廃棄物の処理について

六ヶ所再処理工場における高レベル廃液濃縮、及び、ガラス固化処理での課題およびその解決に向けた取り組みが紹介された。濃縮工程においては、英国技術であるケトル型減圧蒸

発方式が用いられている。濃縮過程で硝酸濃度が上がると Ba・Sr 化合物などが析出し、濃縮缶内の下部温度が上昇する課題があった。それを解決するために、洗浄運転と減酸運転を実施するなどの対応方法を検討している。また、ネプツニウムによりステンレス容器の腐食を促進することが明らかになっている（6 価のネプツニウムがステンレス鋼を腐食させたのちに、再び硝酸内で 5 価から 6 価に戻る触媒効果）。

ガラス固化工程においては、炉内での堆積や流下ノズルの閉塞を引き起こした白金族への対策として、ガラス固化炉の上層部に仮焼層を形成し、炉底に落とさないことが重要であるとして、温度計の追加設置ときめ細かい温度制御や洗浄運転を実施している。また、将来の新型ガラス熔融炉を開発しており、加熱方式やノズル形状の改良研究を実施している。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- P.4 に示された事前の見積もりに対し、アクティブ試験の結果ではルテニウム・ロジウムの移行率はばらつき、テクネシウムは全量廃液に移行していた。ただし、FP の挙動については、今後の六ヶ所再処理工場の操業運転において、継続してしっかりとデータを取得していく必要がある。
- ネプツニウムは半分程度がウラン精製工程で 5 価に調整されて回収される。ここで、Np を分離回収できる可能性がある。
- 濃縮工程における高レベル濃縮廃液の濃縮度は、下流工程のガラス固化工程との取合い条件を満足する必要がある。使用済み燃料のスペックが多様であるため、FP のマスバランスを考慮したうえで、高レベル廃液の濃縮度を決定する必要がある。
- 濃縮工程における高レベル廃液濃縮缶（ステンレス鋼）の腐食がネプツニウムによって 3 倍程度加速する可能性がある。これを回避するために、分離変換を実施する考え方はあるが、材質などの設計で対処することも可能と考えられる。
- 固化工程について、現状の設計でも成立しているが、ロバスト性が十分でないため、新型炉の研究開発を実施している。性能向上と寿命延長（5 年→10 年）が見込まれる。
- 新型炉では白金族含有量、Zr・Mo 含有量を増やして、ガラス組成の制限値を緩和できるかかもしれないが、現状では発熱などの制限があるので廃棄物の含有量を増やすことは考えていない。また、白金族等を分離する場合、白金族等の処理・処分を合わせて検討すべき。
- 過去のアクティブ試験でイエローフェーズを出してしまったこともあり、ガラス固化体の制限事項を法令化する情勢となった。それに対応し、録取すべき 25 項目を「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」特別専門委員会で検討した。この委員会では、製造プロセスにおける運転状態の変動による、少量の逸脱固化体・非定常固化体の発生について、特性の振れ幅を検討し、これらの固化体が地層処分場の他のバリアに及ぼす影響についての調査・検討が必要と述べている。

3.6. 地層処分：国内外の規制の状況等

高レベル放射性廃棄物の減容、有害度低減の視点から、処分システム合理化の可能性を考えるために、放射性廃棄物の処分（埋設の方法）における、同廃棄物の分類と区分値（放射能濃度）に関する国内外の規制の状況を調査した。

IAEAにより放射性廃棄物分類に関するスキームが示されているが、具体的な分類と区分値の設定は各国にて成されている。我が国の処分に関しては、法令で定義する濃度上限値、あるいは区分値、及び処分実施主体が具体的な処分施設において規定する廃棄物受け入れの基準としての濃度上限値（Waste Acceptance Criteria：WAC）の2つがある。濃度上限値は地下水移行シナリオなど、発生頻度が高く一般公衆の被ばく可能性が懸念される事象を評価シナリオとして選定し、代表的な地質環境条件等を用いて行う被ばく線量評価結果に基づいて、基準線量相当濃度や廃棄物中の重要核種の寄与に留意して設定される。中深度処分に関しては、こうして求めた試算濃度がそのまま最終処分法における地層処分対象第二種特定放射性廃棄物の濃度上限値になっているが、炉規法においてβγ核種は100倍、α核種は10倍の値が区分値として示されている。一方、処分実施主体によるWACにおける濃度上限値に関しては、自然事象シナリオの他に人為事象シナリオ（人間侵入シナリオ）を考慮している。

一方諸外国での廃棄物の区分と処分方法に関して、廃棄物名称とカテゴリー、定義（放射能濃度）とその根拠法、処分方法、及び安全評価の視点と評価指標、そして中低レベル廃棄物に関するWACが示された。中でも、法律、研究開発計画、技術評価、研究実施など、多面的な領域を合理的に関連させて原子力利用計画を合理的に進めているフランスに関して、CEAによる分離・変換を導入したPu多重サイクルシステムに関する2012年技術報告書の内容が詳細に示された。廃棄物量、放射性毒性、処分場面積への分離・変換導入の影響評価に加え、サイクル施設、燃料加工、燃料輸送、原子炉利用形態、経済性、原子力エンドポイントなど物量と時間軸に留意した評価が特徴的で有用性が高いことが示された。

そして、以上の知見を踏まえて、分離・変換と廃棄物処分の連携には科学的な根拠に基づく論点整理、定量的評価の方法論づくり、事業化を見据えた実現可能性の視点からのシナリオ評価の実施の必要性が示された。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- 中深度処分の規制の考え方は策定されており、許可基準規則と解釈は今後策定される。地層処分の規制は現状未策定であるが、「中深度処分の規制の考え方は、例えば長期間にわたって公衆と生活環境を防護するための根幹的な対策として、事業者に離隔と閉じ込めといった設計上の対策を要求する考え方などは、共通するものと考えられる。」ことが言及されており、その知見の多くが地層処分にも利用できると思われる。
- 核種の分離・変換により、処分対象廃棄物を地層処分から中深度処分にするとしたら、両処分方法を分ける区分値に関わる核種とその濃度上限値に留意した分離・変換を導入すること。その上で、実際の処分場での廃棄物受け入れ基準（WAC）が法令で定める放

射能濃度上限値を下回る（1～2桁程度）ことを確認する必要がある。

- 上記からすると、高レベル廃棄物から長寿命核種の99%を分離・変換したとしても、濃度上限値からすると現在の地層処分対象 TRU 廃棄物と同等程度になる。従って、地層処分は依然として必要になる。今後は、中深度処分の規制の考え方、特にそこでの WAC の検討方法に留意して、分離・変換の目標を考えていったらどうか。
- 廃棄物区分における濃度上限値、廃棄物埋設事業における安全審査での WAC に基づく核種移行評価による被ばく線量評価からは、分離・変換は地層処分の代替技術ではなく、廃棄物の処理技術のひとつであると捉えるべき。
- フランスの原子力利用計画や研究開発からは、事業化に向けては、時間軸の意識、費用対効果（経済性）の定量化、実現性に留意した技術比較がその特徴や優位性として見えてくる。今後の研究に関して学ぶ必要がある。

3.7. 包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現

地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構(NUMO)が2018年11月21日に公表した包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－（レビュー版）*に基づき、処分場の設計と工学技術（第4章）、及び閉鎖後長期の安全性の評価（第6章）の内容を調査した。

処分場の設計と工学技術については、多様なサイト条件や社会的環境変化に柔軟に対応して安全な処分場を成立させ得る設計技術を有していること。多様な地質環境条件として選定した3種類の検討対象母岩の地質環境モデルに基いた、閉鎖前と閉鎖後長期の安全性、及び建設・操業・閉鎖の工学的実現性を満たす処分場の仕様の具体化（人工バリア（オーバーパック、緩衝材）、廃棄体パッケージ、地下施設（坑道、埋め戻し材、止水/力学プラグ、レイアウト、諸設備）、地上施設（廃棄体受入・検査・封入）に関する設計要件と仕様例）。そしてこの処分場仕様が現在及び近い将来に到達可能な技術により実現可能であること、などが示された。地下施設設置深度の設定に関して、緩衝材は、合理的な廃棄体専有面積でその制限温度である100℃を超えないことが要件となり、深度を深くすると地温の上昇に伴い廃棄体専有面積が増加することに留意が必要であること、また地質環境条件である検討対象母岩の種類により、坑道の力学的安定性と構内制限温度（労働安全衛生規則による）の点から同設置深度の下限が設定されることが示された。緩衝材の自己シール性、自己修復性等に着目した仕様の検討では、縦置き・ブロック方式では厚さ40cmでの仕様成立に対して70cmとすることで安全性の余裕を有すること、また横置き・PEM方式では構造上、膨潤による隙間充填を少なくできるため自己シール性の仕様成立範囲をより広範に取れることが示された。

閉鎖後長期の安全性評価については、国際的な指針等を参考にした評価の考え方や基準の設定、地質環境条件や処分場所仕様の多様性に対応可能な核種移行解析手法の整備状況、及び検討対象母岩の地質環境モデルと処分場の設計結果と、発生可能性に応じた安全評価

シナリオの設定に基づいた閉鎖後長期の核種移行解析結果が示された。評価対象は、基本、変動、稀頻度、及び人間侵入の4シナリオで、解析対象となる領域のスケールと構成要素を考慮した三次元粒子追跡解析に基づく簡略化した核種移行解析モデルによるガラス固化体から生活圏までの評価手順が示された。3種類の岩種と2種類の地下水の条件での、高レベル、TRU 廃棄物、及び両廃棄物併置の基本シナリオの最大線量は、めやす値（ $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ ）を下回った。高レベル廃棄物に関しては、深成岩類処分場での線量の支配核種は I-129、堆積岩類処分場では、低 Cl 濃度地下水では I-129、高 Cl 濃度地下水では U-233 が支配核種であることが示された。堆積岩類で高 Cl 濃度地下水の炭酸濃度が高い場合は、熱力学データに基づく平衡計算からは、U はVI価の炭酸錯体を形成することが示唆され、U の溶解度高く設定し、炭酸錯体の母岩への吸着分配係数を小さく設定したことが、同条件で U-233 が最大線量を支配する原因であることが示された。人間侵入シナリオは、処分場の制度的管理の有効性、及び物理的抵抗性を考慮した期間後に、地表からのボーリングを想定して、作業従事者の被ばく、及びボーリング孔を通じての核種移行の2つのケースが評価され、めやす線量を下回ることが示された。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- 処分場の選定において活断層を避けるのは、閉鎖後の人工バリアへの直接的な作用を考えた場合、短時間での変位量を予測することが容易ではないため。ただし、1km 未満の断層は変異が小さいため切断ではなく湧水量への影響を考慮している。操業期間中は、活断層が既に避けられているが、発電設備と同様、耐震設計での対応が考えられる。
- 設計因子として挙げた経済合理性については、安全確保を最優先した上で、処分場の建設・操業・閉鎖の合理化を図って事業費を抑えるという考え方。
- 回収可能性の維持期間は、操業期間中の 50 年間は回収可能性の確保を考える一方、定置後も最長 300 年間は処分場を開けておくという考え方もある。回収対象はオーバーパック、または PEM 容器であるが、開けたままにするとすると、換気の維持などの作業が発生するほか、閉鎖後長期の安全性確保の点から好ましくない影響についても注意する必要がある。
- 高レベル廃棄物の安全評価において、深成岩での Se-79 の影響が比較的大きく出ているのは、Se が人工バリアや岩盤中において鉄と反応して沈殿する一方、緩衝材間隙水や地下水では陰イオンとして存在することから低吸着性核種として扱ったことと、半減期が 10^5 年オーダーと長いことに起因している。
- U-233 が支配的という点に関して、MA の存在との関係からみると、Np-237→U-233 の崩壊ということが言える。
- 高レベル廃棄物での I-129 の存在に関して、再処理工程での高レベル廃液側への移行率を 3% と設定している。基本ケース被ばく線量評価において、I-129 を支配核種として目安の目標値である $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ に近くなる場合（堆積岩類/高 Cl 濃度地下水）があるが、この評価において $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ はあくまでも目標値であること、また評価モデル上処分場

の横方向の拡散を考慮していないことなど、モデルの精度向上に期待できる部分もある。なおこの目標値については、将来の現実の処分場設計と評価においては、最確値がこの値を超えないようにすること、が一つの考え方である。

- 評価における廃棄物インベントリの設定にも不確実性が存在する。使用済燃料の貯蔵期間が長期化し、結果 Am-241、Np-237 が増加することが考えられるが、核種移行による線量評価には大きな影響はないと考えられる。

*本報告書は、高レベル、及び TRU 廃棄物の地層処分に関して、わが国の地質環境を前提とした安全な地層処分の実現方法を提示すると共に、最新の技術的取り組み状況を示したものである。

3.8. 廃棄物管理における負荷低減：分野横断的な原子力システム研究

核燃料の原子炉での燃焼から、放射性廃棄物の地層処分までを俯瞰し、MA 核種の分離を含む燃料サイクルの各プロセスの条件及びそのパラメータの組合せにより、廃棄物処分における負荷低減を研究する分野横断的な原子力システム研究の実施例を調査した。

分野横断的研究事例から、核種分離・変換による放射能インベントリと処分場面積削減の定量評価においては、時間軸を意識した原子力利用シナリオの作成、ケーススタディにおける技術項目の条件設定、及び核種分離・変換の効果を示す評価指標の設定が重要であることが示された。燃料サイクル諸条件の組合せにより発生するガラス固化体の処分場における専有面積を緩衝材の最高温度との関係で評価する指標（包括的検討による廃棄体専有面積削減効果評価指標）の導入、及びこれを用いた使用済燃料冷却期間、ガラス固化体の廃棄物含有率、核種（Cs、Sr、MA、Mo、白金族元素）分離などの影響、効果として、 UO_2 燃料由来ガラス固化体の場合、使用済燃料冷却期間が 50 年以上で、MA、Mo、白金族元素の 70、あるいは 90%の分離とガラス固化体の廃棄物含有率の調整により処分場での廃棄体専有面積が半分以下に削減されることが示された。一方、使用済 MOX 燃料では Am や Cm 含有量が多くなることから UO_2 燃料と比較して、同じ燃焼度においてもその発熱量は約 2 倍と高く、ガラス固化においては、MA 分離の導入と共に、使用済燃料の冷却期間や白金族元素の濃度に注意が必要であることが示された。分野横断的研究においては、地層処分検討においてリファレンスケースとされているガラス固化体条件に対して、炉型、燃料に始まるフロントエンドと処分場の設計、安全評価までのバックエンドに関する多様なプロセス、条件、パラメータ、設計対象項目を包括的に評価して、負荷低減のためのオプション提示、あるいは最適化の道筋を示すべきであることが示された。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- 処分場における緩衝材の上限温度は、地下水のカリウムイオン濃度の影響によってはより厳しい条件になることが考えられるが、 100°C を超える時間に留意した変質の速度論的な評価、あるいは変質を見込んだ緩衝材の機能設定など多様な見方がある。

- 発熱源を除去した廃棄体をより周密に埋設することで、リファレンスケースの廃棄体専有面積 44.4m²を下回ることができると考えられる。一方、岩盤の種類とも関係するが、地下空洞（坑道）の物理的安定性からの制約も考慮する必要がある。
- 核種分離による発熱源の回収、除去やガラス固化体の廃棄物含有率の向上に期待する一方、分離したもの(Cs、Sr、Mo、PGM)の処理処分の方策を検討する必要がある。
- ガラス固化体の廃棄物含有率に関しては、Mo を多く取り込めるガラスの開発、含有率 35wt%程度のガラスの実現性評価など、現在進行形の研究に期待する部分もある。
- PGM に関しては、Pd が最も回収しやすく、Ru は難しい。溶融炉では前者は影響がなく、後者の影響が大きい。
- サイクル横断的な負荷低減の評価においては、再処理前の使用済燃料の冷却期間だけでなく、ガラス固化体の地層処分前の貯蔵期間についてもパラメータとして評価した方がよい。
- 地層処分において最も重要なことは閉鎖後長期の安全性の確保である。ガラス固化体の組成や処分場の温度特性による、ガラスの溶解速度や核種の移行速度の変化の有無とその程度を定量的に把握できるとよい。
- パラメータスタディとしての燃焼度の変化は TRU 廃棄物の放射能、線量への影響が大きくなることにも留意すべきである。LLW も考慮するという点からは本委員会の設立趣旨に沿っていることと考えられる。

3.9. マイナーアクチニド分離変換技術の有効性向上のための柔軟な廃棄物管理法の研究開発

高レベル放射性廃棄物の減容、有害度低減に関する研究事例として、高レベル廃液の仮焼による顆粒化と顆粒体の 50 年程度の貯蔵により将来の MA 分離変換技術の適用効果を向上させ環境負荷低減をはかる柔軟な廃棄物管理法の研究開発を調査した。

廃棄物顆粒化技術の開発は、フランス/ラ・アーグのガラス固化プラント(AVM 法)における高レベル廃液のロータリーキルンによる仮焼技術に着目し、模擬廃液を用いた仮焼による顆粒化技術の確認が行われた。顆粒体の貯蔵に関しては、顆粒体の化学的安定性や組成(Na 含有の有無の違いなど)の確認が行われた。顆粒体の貯蔵については、仮焼体の熱分解挙動の測定結果、及び自然循環空冷を利用した徐熱条件での温度解析から、現行のガラス固化体貯蔵設備を共用した場合でも材料の化学的安定性が確保されることが確認された。環境負荷低減効果は、本研究の成果である柔軟な廃棄物管理法の実用化時期を今から 10 年後、MA 分離変換技術の実用化時期を FBR 再処理に適用する 40 年後、使用済燃料冷却期間 30 年、再処理は年間 800 トンで 40 年運転とした場合について、現行の管理法である MA 含有ガラス固化体を処分する場合との比較が行われた。柔軟管理法では、処分対象となるガラス固化体発生量の内、現行管理法と同じ MA 含有ガラス固化体が 20%、MA 分離 (99%) により MA を含有しないガラス固化体が 80%になり、MA 分離後の後者のガラス固化体はそ

の潜在的有害度が炉取出し後 1,000 年時点において MA 含有ガラス固化体の 1/100 になることから、全体として 79%の潜在的有害度低減となることが示された。また、MA 分離により、処分時のガラス固化体 1 本当りの発熱量は 1/2、処分場面積は 1/3 に削減されることから、現行管理法のガラス固化体 20%、MA 分離後ガラス固化体 80%の埋設で構成される柔軟管理法の処分場全体の面積は、現行管理法での処分場面積の 42%、すなわち 58%の処分場面積低減となることが示された。2年間のフィージビリティスタディー（フェーズ I）により、将来の MA 分離技術の実用化を前提とする柔軟な廃棄物管理法の環境負荷低減効果が確認されると共に、顆粒化技術成立の見通しが得られ、現在本研究は顆粒化技術の実用化試験、模擬顆粒体の基礎物性データ取得、廃棄物管理システムの有効性評価を行う実用化開発（フェーズ II）の段階にあることが示された。

委員会においては、以下のような議論が行われた。

- 顆粒体の物性として特に重要なものは、長期貯蔵の観点から、熱伝導率、化学的特性（安定性）、及び収納容器材料との相互反応、特に腐食への影響である。
- 300、600、900℃で仮焼した後の顆粒体の貯蔵に関して、模擬廃液の顆粒化試験により得られた Na を含有するフレーク状析出物に関する γ 線照射試験の結果からは、放射線分解による NOx の発生による顆粒体の化学的安定性の点で、600℃仮焼の顆粒体が優れていた。
- 空冷自然循環方式の現行ガラス固化体貯蔵施設の共用を前提とした顆粒体の長期貯蔵において、顆粒体はガラス固化体より発熱密度が大きく、硝酸塩成分である NaNO_3 が溶融する可能性があるが、細径キャニスタへの高充填により放熱率を上げることで温度を低下させて、顆粒体材料の化学的安定性を確保できることを確認している。
- 顆粒体貯蔵後の再溶解は MA 回収のための必須プロセスであり、再溶解の容易性や各元素の溶解特性は、MA 分離技術の適用性やシステム全体からの MA 回収率の点で重要な特性となる。再溶解は濃度数 mol/l の硝酸の利用を前提としているが、模擬廃液を用いた顆粒体の溶解性に関しては、600℃の顆粒体の優位性が確認されており、後者の再溶解に関する詳細な特性把握は今後の課題である。
- 顆粒体を作成するロータリーキルン技術は、フランスの高レベル廃液ガラス固化施設での AVM 法が、蒸発乾燥と仮焼成の段階を含めて既に豊富な商用実績を有している。これに顆粒化段階を付加し、製造される顆粒体を同キルンの出口にて回収、保管する手法を開発する。

4. 2020 年度の計画

3 章で見てきたように、2019 年度は燃料再処理、廃棄体化処理、分離・変換、処分の各分野の研究開発状況を調査し、本委員会の主旨である分離・変換が処理・処分に及ぼす効果に関連する点について議論を深めてきた。また、東工大などによる同効果に関する既往研究についても調査した。これらの調査と議論により、分離・変換と処理・処分の関連について

更に分析を進める素地を形作ることができた。

2020年度は分離・変換が処理・処分に与える効果さらには核燃料サイクル全体としての性能に与える効果について具体的かつ総合的な検討を行う。分離・変換を実施することで、核燃料サイクルの性能に関する複数の評価項目（経済性、安全性、環境負荷低減性、等）に得失が発生するが、それらを整理するために、技術-評価マトリクスを考えることが有効である。これは、最終的に処分に至る核燃料サイクルの各ステップ（技術）に対して、各々、評価項目を割り当てたもので、分離・変換の効果または影響に関する重複や漏れを排して核燃料サイクル全体の観点からの得失を整理するための仕組みである。2020年度はこの仕組みを構築し、主に定性的な評価を実施する。それに基づき、バックエンドへの分離・変換の組み込みに留意した分離・変換と処理・処分の関係に関する提言を行う。