

# 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)

## 終了時評価報告書 (平成30年度)

「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」

平成31年1月31日

P M 名 : 藤田 玲子

PM補佐名 : 小澤 正基

: 川島 正俊

: 松崎 禎市郎

: 佐藤 昌喜

: 藤井 恵美

## 研究開発プログラムの全体計画

### (1) 研究開発プログラムの構想

#### i. 社会的課題を解決し、産業や社会のあり方を変革するシナリオ

原子力発電所の使用済み燃料を再処理した際に発生する高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化し、地層深く処分することとされている。この高レベル放射性廃棄物には半減期の長い核種が含まれ、長期間の保管に対する不安が払しょくされておらず、高レベル放射性廃棄物の処分場がなかなか決まらないという社会的問題を惹起する要因の一つになっている。近年の加速器科学の進展により、核物理学では重イオンビームなどを用いて、これまでほとんど手つかずのあらゆる核反応データの取得が可能となった。高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核分裂生成物(LLFP)について核反応断面積などの情報を得られれば合理的な核変換技術が提案でき、短寿命化あるいは資源化が現実的な解法となりうる。

そこでLLFPを分離回収し、短寿命核種もしくは安定核種に核変換するために必要な技術を確認する。白金族核種は核変換した後、自動車用触媒などにリサイクルする。また、アルカリ金属、アルカリ土類金属元素は長期保管と核変換により熱発生を除き、核医薬品などに再利用する。希土類元素も核変換によりレアメタルに再利用する。これらの技術を統合して、高レベル放射性廃棄物を大幅に低減し、微量残存する廃棄物は低レベル放射性廃棄物として扱えるようにするシステムを開発する。

これにより、高レベル放射性廃棄物の隔離期間が短縮され、高レベル放射性廃棄物の処分場が不要となり、その処分を次世代に委ねない社会が実現できる。高レベル放射性廃棄物が資源化できることにより、分離回収に係る新産業を創出し海外市場に左右されない国内市場が創出される。新たな核変換技術が実用化できることで新たな原子力システムの可能性を示すとともに省エネルギー、エコ社会の実現に資する。核変換・分離回収に係る最先端の人材及び開発能力を有することは、我が国の原子力平和利用と世界の核不拡散にも貢献する。

#### ii. 上記 i を実現するための具体的な取り組み

##### ●研究開発プログラムの達成目標と構成

- 高レベル放射性廃棄物を 1/10 程度に低減するシナリオの提示
- 残留廃棄物は低レベル放射性廃棄物化または資源として再利用するシナリオの提示
- これらシナリオに基づきプロセス概念を具体化し、従来どおり高レベル放射性廃棄物をすべて処分する場合に対して経済的な優位性を有する見通しを確認する。

#### ① 解決すべき社会的課題

##### 1) 高レベル放射性廃棄物をめぐる課題

高レベル放射性廃棄物は原発を止めても過去に原子力発電に使用された使用済み燃料は高レベル放射性廃棄物（HLW）として残る。この問題は、原発賛成・反対に拘わらず、後世代への負担を軽減するために取り組むべきものである。現在、日本には既に24,800本のガラス固化体（換算）が発生しており、最終的には40,000本発生すると推定されている。

そこで、この高レベル放射性廃棄物を少しでも減らし、HLWの処分の負担を軽減することは日本の原子力政策にとっては重要と考えた。

・ 高レベル放射性廃棄物

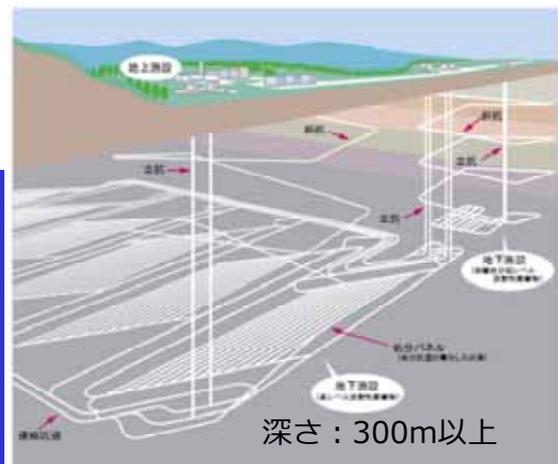
最終処分場の立地

既発電分の発生本数：

約24,800本<sup>注1</sup>

高レベル放射性廃棄物の問題は、原発賛成・反対に拘わらず、後世代への負担を軽減したい。

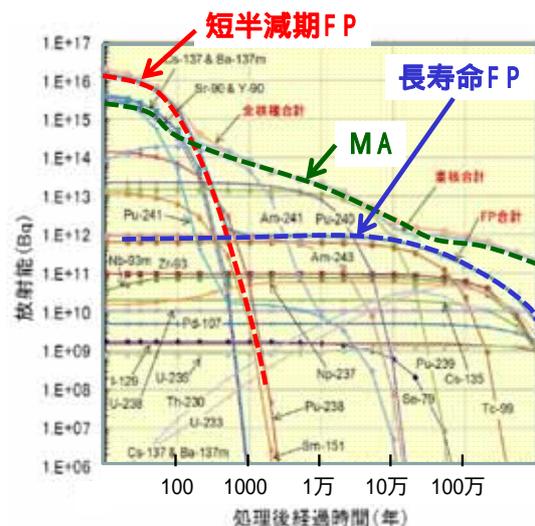
地層処分の例



2) 高レベル放射性廃棄物のゼロ化

高レベル放射性廃棄物にはマイナーアクチニド（MA）と長寿命核分裂生成物（LLFP）が含まれるが、MAについては既に日本原子力研究開発機構（JAEA）がADSプロジェクトで研究開発を進めており、今後、LLFPについても研究を進め、廃棄物の処分について国民に新たな選択肢を提示したいと考えた。

- ・ **マイナーアクチニド(MA\*)と長寿命核分裂生成物(LLFP\*\*)の両者を核変換すれば放射能は1000年程度で大幅低減**
- ・ MAは燃料として活用できるため、**核燃料サイクル研究として進展**(JAEAのADS-PJ)
- ・ LLFPは核のゴミとしてガラス固化され、**地層処分**することが唯一の**選択肢**だが、**立地の問題**がある



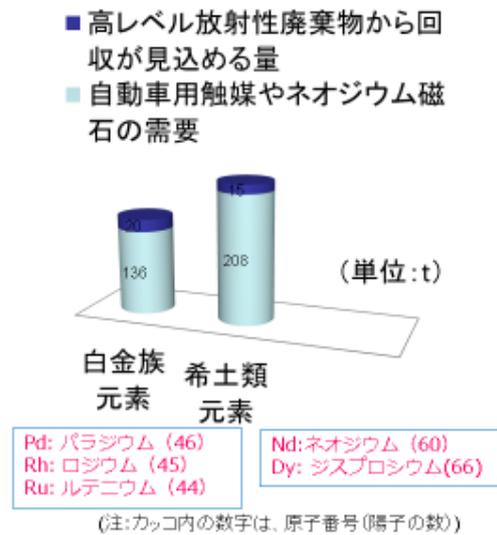
\*MA: Minor Actinides, ウランが核分裂して生成するネプツニウム(Np), アメリシウム(Am), キュリウム(Cm)など。  
 \*\*LLFP: Long Lived Fission Products, ここでは、半減期10万年以上の放射性核分裂生成物7核種と定義する。

② 上記の社会的課題を解決し、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす PM の構想

1) 高レベル放射性廃棄物の資源化

高レベル廃棄物に含まれる LLFP には、白金族元素や希土類元素のような有用なレアメタルが多く含まれるが、分離・回収しても放射性物質が含まれるため、再利用が困難であった。しかしながら、放射性核種を核変換により、安定核種もしくは短半減期核種に変換できれば、放射性核種を資源化（再利用）できる。将来的には放射性廃棄物を資源として使うことが可能な原子力界を巻き込んだ循環型社会が構築できる。

- 高レベル放射性廃棄物に含まれる LLFP には **レアメタルなど有用元素の素 (Pd, Rh, Ru や Nd, Dy)** が多く含まれる
- 有用元素の分離回収を目指したが、**放射性同位元素 (RI)** が含まれるため再利用が困難
- 原子炉による核変換については、1980年代に研究を開始したが、加速器については技術検討に足る **データを取得する手段がなく、進展しなかった**



高レベル放射性廃棄物の処分問題の軽減方法として以下の概念を考えた。



六ヶ所村の再処理工場が運開すると毎年1000本のガラス固化体が発生し、2050年にはトータル40000本になる。

\*LLFP: Long Lived Fission Products、ここでは半減期10年以上の放射性核分裂生成物7核種と定義する。

9

高レベル放射性廃棄物（再処理工場から発生する高レベル廃液と返還ガラス固化体）から回収した LLFP を白金族元素やレアメタルなどを資源として再利用することにより海外市場に左右されない供給源を確保する。ただし、コストのかかる同位体分離はしない。

③ 出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ

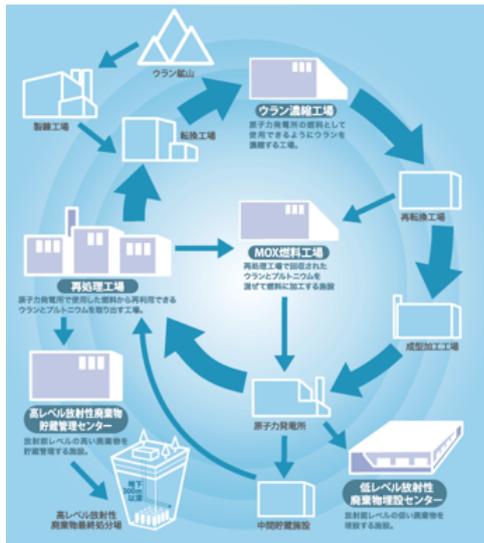
ImPACT の出口イメージは以下である。

- 高レベル放射性廃棄物を低減・資源化する リーズナブルなシナリオ

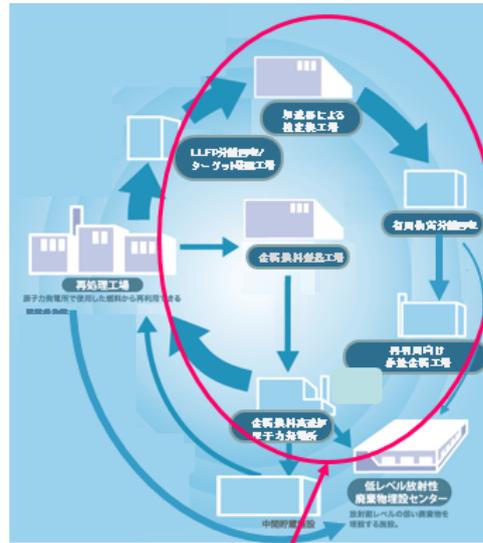
- それを実現する加速器仕様
- それを実現する分離・回収システム
- 代替する偶奇分離システム

出口として目指す原子カシステムは再処理工場から発生する高レベル廃液の中から LLFP を回収し、加速器による核変換工場で安定核種もしくは低レベル放射性廃棄物にする。白金族元素のような有用元素は一般産業用にインゴットに成型加工する。なお、MA の核変換は使用済み燃料中に MA を燃料組成として同伴できる金属燃料高速炉を採用する。

現行の軽水炉システム



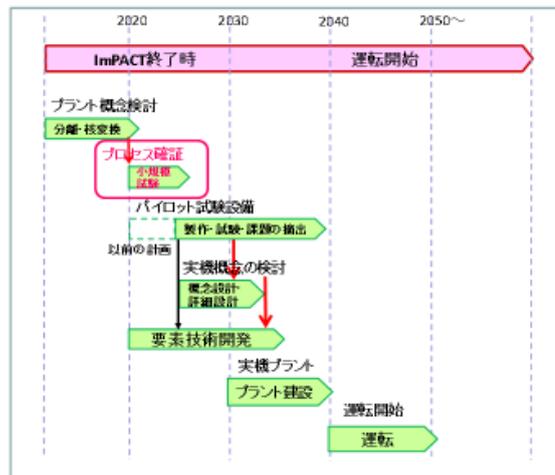
目指す原子カシステム



提案する分離回収核変換システム

本プログラム終了後のスケジュールとしては、以下を考えており、2040 年にはプラントの運転を開始する。

- 2019年3月 ImPACT終了時  
分離回収－核変換－インゴット化のプラント概念の提示  
果たすべき役割：世界で初めてトータルな分離変換システムの提示
- 2019年～2024年  
次期国プロを再度採択し、小規模規模試験装置によりプロセス確証(Csなど)、Cs用核変換装置の開発
- 2024年～2030年  
パイロット試験設備の製作、試験実施、実用化の課題の抽出\*
- 2025年～2035年  
パイロット設備を使った課題解決のための試験  
実機の概念設計－詳細設計\*
- 2030年～2040年  
核変換施設の建設\*
- 2040年～  
運転開始



\*: 加速器の開発: 15～25年間 (5～10年開発, 5年設計, 5～10年建設)  
原子カプラントの建設: 10年間 (5年設計, 5年建設)

プログラム開始時にはプラントの運転開始時期を 2050 年以降と考えていたが、中国など海外の動向を勘案すると、10 年前倒しにする必要があると考えた。

#### ④ 解決のための発想・アイデア及びブレークスルーのポイント

これまで、高レベル放射性廃棄物を低減する研究で核変換を用いるものは MA と LLFP のうち、同位体分離を必要としない Tc-99 と I-129 のみであり、原子炉の中で中性子を用い中性子捕獲 ( $n, \gamma$ ) 反応で核変換するものであった。原子炉の中で核変換する場合は ( $n, \gamma$ ) 反応以外に核変換の反応を制御することは難しい。また、Tc, I 以外の LLFP は同位体分離をして長半減期核種のみを装荷することにより成立する。本プログラムでは同位体分離法を用いないことを目標の 1 つに上げ、重陽子ビームなどを用い、( $n, 2n$ ) などの核反応を加速器でコントロールすることにより、目的とした核変換反応を成立させ、従来ではなし得なかった核変換を成立させるものである。

また、同位体分離をしない代わりに、レーザーによる同位体分離法で前処理プロセスとして採用された偶数核種と奇数核種を分離する偶奇分離法を採用した。

このプログラムの技術のポイントは核変換に適した加速器の入射エネルギーとビーム電流であり、LLFP の核変換の処理速度も勘案して加速器仕様を決定する。

##### ④-1 ブレークスルー

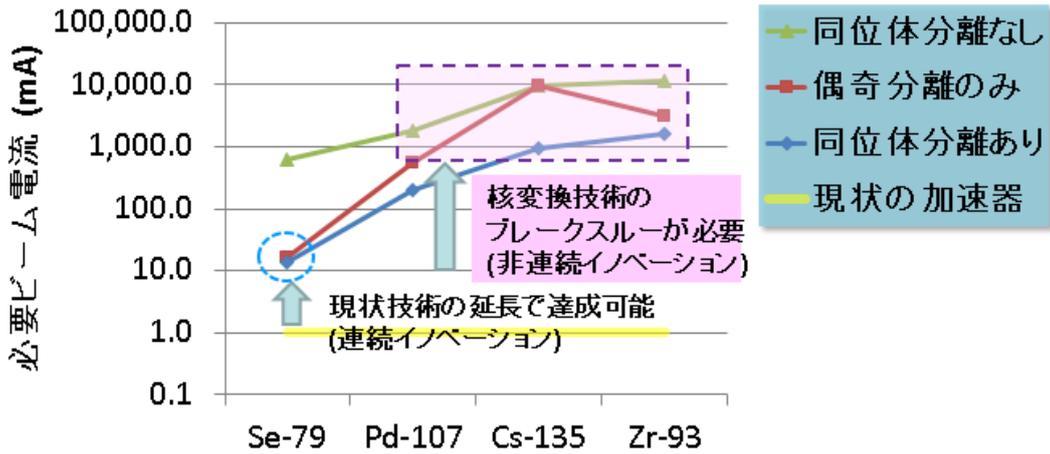
ブレークスルーの考え方は以下である。

- ほとんど開発実績のない放射性核種の効率的な分離回収技術の創造と実証
- 新しい偏光レーザーによる効率的な同位体濃縮技術を実証
- 世界最高性能の加速器を利用した核物理学の革新的手法により核変換データを取得
- 最先端の加速器技術を集大成した大電流核変換装置概念の具体化と実証

##### ④-2 困難なポイント

困難なポイントは以下である。

- 核変換をマクロスケールで実証すること
- エネルギーバランスや経済性を満足させること

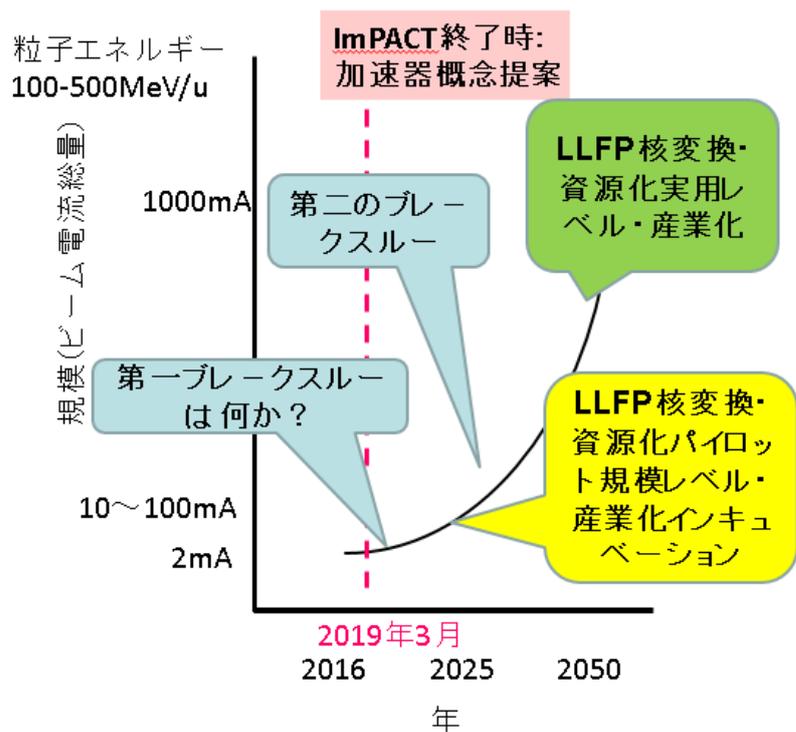


年間発生量(kg/y)	5	250	417	767
-------------	---	-----	-----	-----

注: 入射エネルギー1000MeVの陽子により年間発生量を有効半減期3年で核変換した場合

上記 LLFP の年間処理量から加速器の要求性能を検討すると以下ようになる。

- 目指す加速器候補
- ①汎用型加速器
    - ・ 束流電流 10mA~100mA 以上 (現状 2~3mA)
  - ②エネルギー回収型 (ERIT)
  - ③ミュオン核融合



④-3 ハイリスクハイインパクトな取組のポイント

ハイリスク・ハイインパクトな取組は以下である。

➤ エネルギー資源確保の中で発生したHLWの低減・資源化

1) エネルギー使用後の負の遺産と言われるHLWを資源に!

2) 既存の技術への視点

HLWを資源とみて正の価値を付与する試み (視点の拡大)

➤ HLW減容と資源化可能な物質の検討

再処理高度化WG: 再処理プロセスの改良、不溶性残渣の処理

処分検討 WG：負荷低減と合理的な処分区分の提案

LLFP (Pd-107、Zr-93) の資源化：クリアランスレベル提案

3) 新技術の実証機会の必要性：理学（核物理）と工学（原子力工学の融合の実証

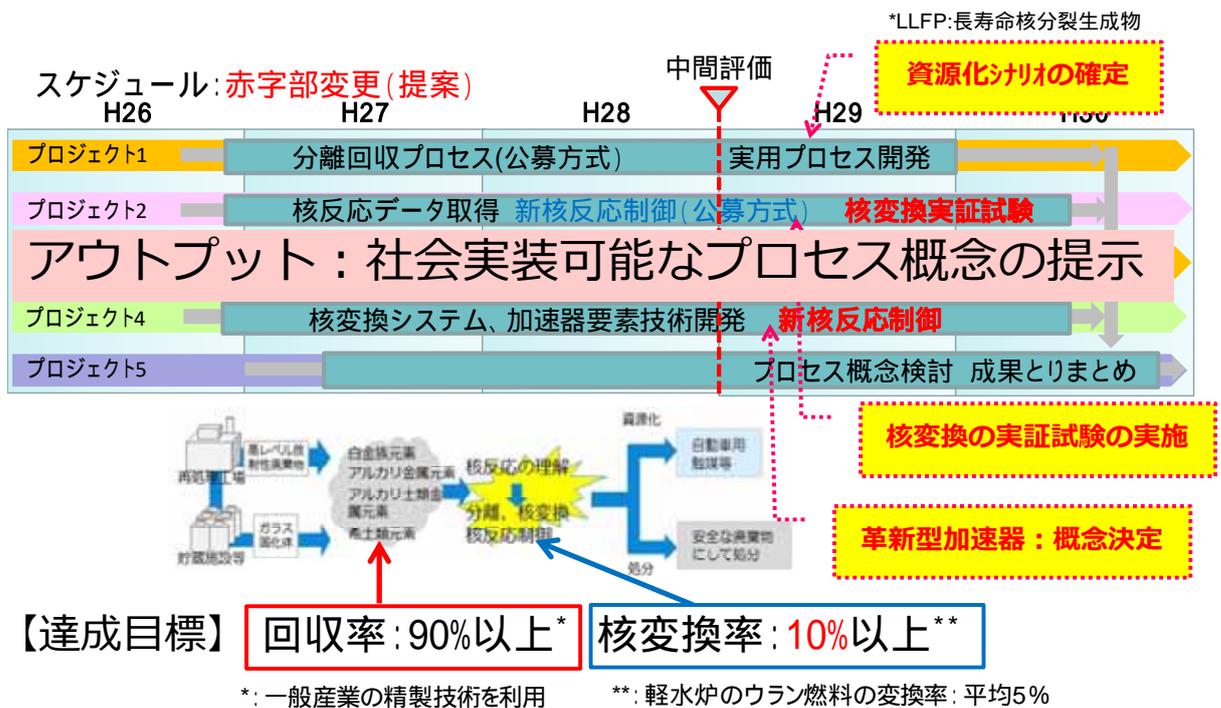
PM 制度を活用して、既存の縦割り分担を打破

全体視点を維持し、部分・要素試験の実施

- 化学プロセスの実廃棄物を用いたホット試験
- 革新型加速器：パイロット試験施設の建設・運転技術
- 偶奇核分離器（同位体分離不要）：スケールアップの検討

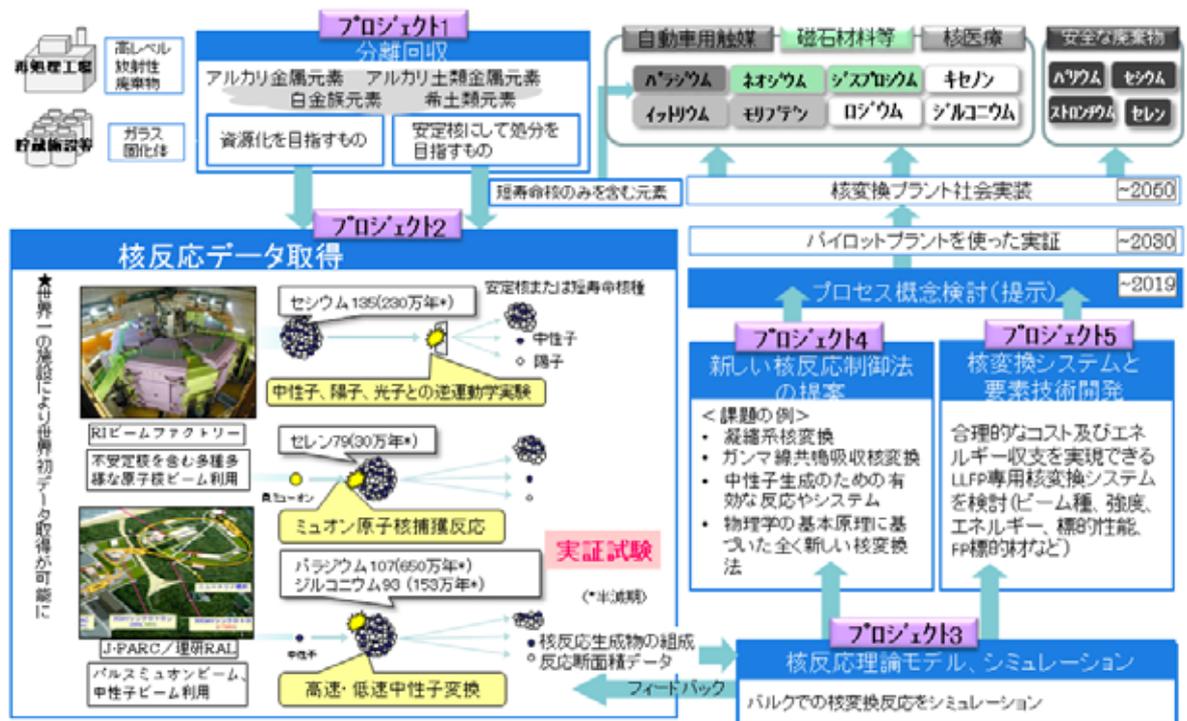
## (2) 研究開発プログラムの達成目標

本プログラムの終了時達成目標（2019年3月）は分離回収プロセス回収率 90%、核変換率 10%と考えている。分離回収プロセスについては、実際の回収プロセスの実現可能性から 90%とした。核変換率については、社会実装時の目標値としては 90%を目指している。



## (3) 研究開発プログラムの全体構成図

研究開発プログラムはプロジェクト1（分離回収）、プロジェクト2（核反応データ取得）、プロジェクト3（核反応理論モデルとシミュレーション）、プロジェクト4（核変換システムと要素技術開発）およびプロジェクト5（プロセス概念検討）から構成される。



(4) 具体的な取組

① プロジェクト1ー分離・回収技術

i) 研究開発の概要

プロジェクト1は、本研究開発プログラムの全体計画の中の「高レベル廃棄物から対象 LLFP (Pd, Cs, Zr, Se) 元素の分離回収」を担う。高レベル廃棄物から Pd, Cs, Zr, Se の4元素の LLFP 回収プロセスを提供すること、同位体分離を必要とせず核変換を効率化するための手段としての偶数核種と奇数核種を分離する偶奇分離技術を提供することである。これまでの再処理、群分離では、本 LLFP (Pd, Cs, Zr, Se) 元素回収に焦点をあてていないため、本 LLFP の回収システムは何処にも存在しない。高レベル廃棄物から本 LLFP を回収するために、これまでの再処理法に囚われない、電解法、溶媒抽出法、イオン液体法に加え、高温冶金法やフッ化物揮発法、沈殿法など、幅広く有望な技術を公募により、分離回収性能や二次廃棄物発生量、経済性を評価して採用し、約3年間試験を実施した後、H28年度末にその成果を評価(C&R)して有望な技術を絞り、H29年度に高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体・高レベル廃液)からLLFPを回収する合理的な(経済性・二次廃棄物発生量の観点から)プロセスを選定する。また、核変換を効率化するための手段として偶数核種と奇数核種を分離できる技術を開発することで、Pd-107 および Zr-93 の偶奇分離プロセス(同位体なし)を確立する。

ii) 成果目標

H29年度中に中間評価で選定した候補プロセスの一貫通貫のプロセス試験を行い、プロセスを確立する。H30年度には選定した候補プロセスのプラント概念設計を実施

する。また、Pd-107 および Zr-93 の偶奇分離装置を完成させ、実際に奇数核種を取り出すプロセスを確立する。H30 年度には偶奇分離プロセスの概念設計を行う。

① 最も合理的かつ経済性の高い分離回収法を特定

高レベル廃棄物を廃棄物対象とし、分離回収性能が高く、二次廃棄物の少ない LLFP 分離回収技術の開発とし、LLFP の分離回収率：90%以上を目標とする。分離回収方法、分離回収率、除染係数、処理速度、反応機構、二次廃棄物量、二次廃棄物の処理方法、処理コスト、対象元素の金属形態として単離するためのプロセスを提案する。また核変換との取り合いにおいて重要となる各 LLFP 製品の物量、化学形態・組成及び純度（不純物、等）を明らかにする。

② レーザーによる偶奇分離法を開発

偏光レーザーに対する核スピンのゼロである偶数核種の励起準位間の遷移における選択性を利用し、偶数核種と奇数核種を分離する技術を開発し、分離速度：0.8mg/日を天然 Pd により達成することを目標とする。

② プロジェクト2－核反応データ取得

i) 研究開発の概要

中性子ノックアウト反応、核破碎反応、光核反応、ミュオン捕獲反応などの新しい核反応データを取得する。低速 RI ビームを開発し核データを取得する。また、核変換実証試験を行う。

LLFP 核変換の反応経路提案では、軽水原子炉条件で支配的な熱中性子捕獲反応のみに期待するのではなく、合理的な核変換反応を新たに提示することが全体計画においても重要な要件となる。その有力候補となる反応が、中性子に加え陽子、重陽子ビーム照射による LLFP のノックアウト反応を含む核破碎反応などによる核変換である。その反応データに関しては測定例が極めて乏しい。

中性子、陽子や重陽子による核破碎反応に着目して、世界初となる核反応データや反応後の核種生成データの取得を行う。その手段として、日本が世界に誇る最先端加速器と共に実験装置群(RIBF)を利用する。

取得する核反応データは単一の LLFP 原子核による二体核反応（微視的データ）に関するものである。一方、核変換システム標的内で実際に進行する巨視的な体系内では、反応生成核種が二次的に関与する多重核反応が生じている。まとまった量の LLFP 標的に対する巨視的体系での反応データの取得を核変換実証試験として Pd-107 を対象に実施する。測定データはプロジェクト3と連携し、最新の原子核反応理論や核構造理論を駆使することで測定データを補完し核変換シミュレーションに必要な核反応データベース構築に供される。

更に新たな LLFP 核変換候補として負の電荷をもつ素粒子であるミュオンを用いた核変換に関する理論的な基礎基盤の確立も目指す。

## ii) 成果目標

理研 RIBF で取得済みの反応データを H29 年中に確定する。開発された低速 RI ビームを用いて低エネルギーでの核データを取得する (H29 年度)。安定 Pd に対するミュオン捕獲反応データを取得・解析し、Pd 同位体生成成分岐比を求める (H29 年)。重陽子による核変換実証試験を安定 Pd (H29 年度) および Pd-107 (H30 年) に対して行う。

- ① 理研 RIBF 装置を用い、不安定核種である LLFP (Pd-107, Zr-93, Cs-135, Se-79 とその周辺核) を RI ビームとして陽子、重陽子標的に照射することで LLFP の反応断面積、及び反応生成核種を測定 (「逆運動学法」測定と呼ばれる) すると共に、適切なデータ処理・焼直による系統的データベースを構築
- ② 逆運動学法測定における低エネルギー条件下での技術的課題解決 (粒子識別、従来限界を超えた RI ビーム低エネルギー化) のための実験装置の研究開発—イオンチェンバー開発、RI 減速ビームライン構築
- ③ J-PARC 物質・生命科学実験施設の大強度中性子を利用した LLFP の中性子捕獲反応断面積の測定
- ④ 負ミュオン原子核捕獲反応実験によるデータ取得と解析の実施とその成果に基づくミュオン原子核捕獲反応理論の検証
- ⑤ LLFP の一つ Pd-107 標的を製作、これに重陽子ビームを長期間照射 (約 30 日) する核変換実証試験の実施

## ③ プロジェクト 3—反応理論モデルとシミュレーション

### i) 研究開発の概要

反応理論・構造理論により実験から得られる核反応データを補うと共に、核変換のための核反応標準モデルを整備する。また核反応データベースを整備し、システム開発のためのシミュレーションを行う。

LLFP 核変換に関するシミュレーション精度は、その素過程である個々の核反応の予測精度に委ねられる。そこでプロジェクト 2、3 で得られる新たな測定核データと理論により補完された核反応データベースの構築と共に、これを PHITS に取り込みその計算に反映できるようにする。

### ii) 成果目標

理研で測定されたデータ及び既存の核反応データから、最新の原子核反応理論・構造理論を駆使し、核変換シミュレーションコード PHITS に必要な核反応データベースを構築する。これらのデータベースとともに、巨視的な核反応シミュレーション技術を発展させ、核変換システムの評価、要素技術開発、プロセス概念検討に必要な核変換率、発熱率、放射線損傷等の情報を、巨視的シミュレーションにより求める。

- ① 核反応理論モデルの改良を核構造理論に遡り実施し、その成果を用い核反応モデルの高精度化を実施
- ② 核反応評価データベース構築と汎用評価済み核データライブラリの公開
- ③ 巨視的な核反応シミュレーションによる核変換プロセス概念構築に必要な変換効率や発熱、放射線損傷等データの提供

#### ④ プロジェクト4－核変換システム評価と要素技術開発

##### i) 研究開発の概要

長寿命核分裂生成物用の核変換システムとして、熱中性子以外の核変換誘発粒子を発生する加速器システムを評価し、加速器システムに必要な要素技術の開発を行う。

原子核物理、加速器、原子力の分野連携、理工連携を進め、合理的なコスト及びエネルギー収支を実現できる LLFP 専用核変換システムを検討する。原子炉では得られない高エネルギー中性子（20～数 100MeV）や陽子、重陽子、負ミュオン等を大強度で発生させる加速器システムのビーム種・強度・エネルギー・標的性能・FP 標的材などを俯瞰し、プロジェクト 1, 2, 3, 5 と連携を取りながら、加速器および要素技術の開発を進める。

H29 年度から、革新的加速器システム概念の検討を、PJ4 に集中することにした。

##### ii) 成果目標

高レベル廃棄物低減化の必須条件となる「核変換量」確保および資源化に重要な「反応生成物制御」、の二つの観点を意識した加速器システムの評価および概念検討を行う。特に大強度・省エネルギー・省コスト加速器システムの評価、概念検討を行うとともに超伝導加速空洞や標的開発などの要素技術開発を推進する。

最終年度には、標的システムを含む加速器システムの全体概念像を提案する。

#### ⑤ プロジェクト5－プロセス概念検討

##### i) 研究開発の概要

分離・核変換プロセス間の整合を取るためのインターフェイスを検討し、分離変換全体システム概念を明らかにする。また、廃棄物低減による地層処分への効果を示すとともに、資源化に重要となる核変換対象核種のクリアランスレベルを提示する。

本検討における廃棄物からは核変換対象の LLFP の多くが取り除かれているため、従来のガラス固化体の地層処分の負荷を軽減することが期待される。この新たな分離・回収プロセスおよび核変換システム運用・LLFP リサイクルから発生する廃棄物の特性を検討する。また、高レベル放射性廃棄物以外の新しい廃棄物として処分する方法、課題などを幅広く検討し、地層処分の負荷軽減効果を示す。

長寿命核分裂核種の再利用に伴う放射線被ばく線量の評価とクリアランスレベルの検討では、白金族核種は核変換して自動車用触媒などに、希土類元素なども核変換によりレアメタルとして再利用して行くことを想定した検討を行う。

これを資源利用して行くことは、従来、埋設以外に処理の方法が無かった高レベル放射性廃棄物の処理処分に大きな変革をもたらすものであり、これを資源利用して行くことができれば、循環型社会の形成や資源の少ない我が国の産業発展に大きく貢献するものである。

ii) 成果目標

1. 全体システム概念の構築

分離・核変換プロセスを経て得られる資源化物および廃棄物の組成を検討すると共に、各プロセスをつなぐインターフェイスを構築する。H29年度は、予備的な概念を構築し、H30年度に全体システム概念を構築する。

2. 高レベル放射性廃棄物の処分負荷低減

分離・核変換プロセスで発生する廃棄物を処分した場合の便益を評価する。

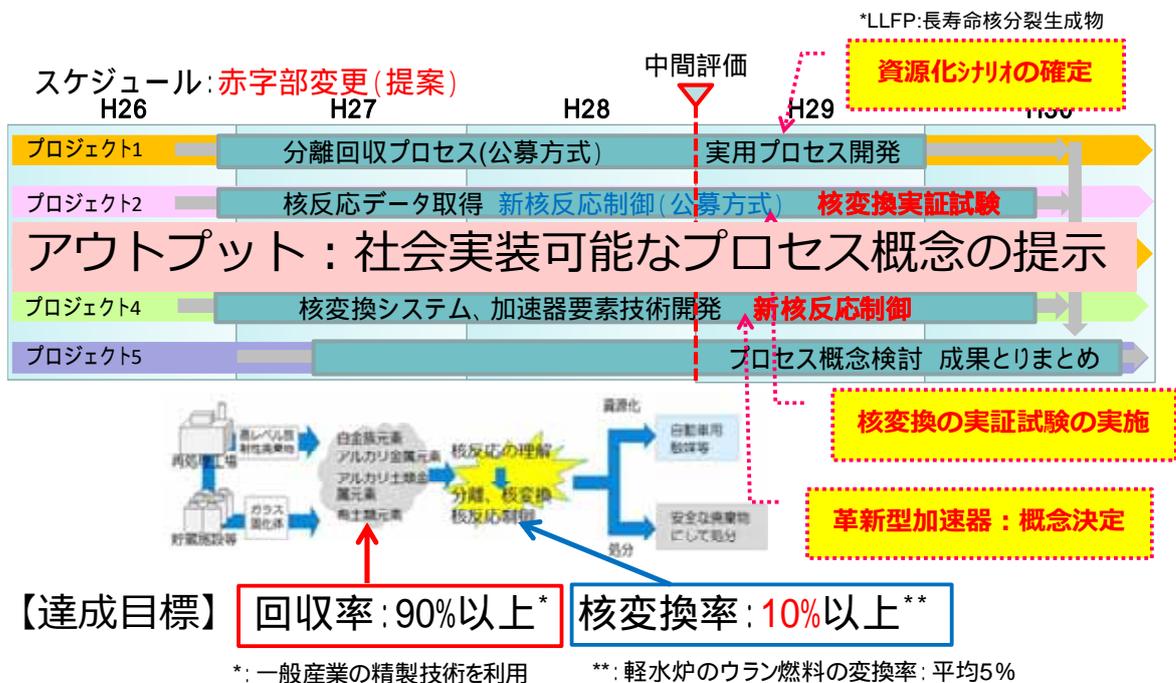
3. クリアランスレベルの検討

クリアランスレベルについては、H29年度に典型的な利用経路等について被ばく線量の評価を行い、H30年度に各核種のクリアランスレベルを設定する。

(5) 研究開発プログラムの全体ロードマップ

プロジェクト1～5までを並行に進める。H28年度末にはプロジェクト1～5まですべてについて中間評価を実施し、研究計画の見直しを実施した。

新たに、実Pd-107を用いた核変換率の測定のために実証試験を行うこととした。実証試験の予算のために、一部計画を変更した。



(6) 研究開発プログラムのマイルストーン

研究開発のマイルストーンとしてはプロジェクト1では高レベル廃液からの LLFP 回収の候補技術を H28 年度末の中間評価で絞り、H29 年度末に候補技術として示す。

プロジェクト1で“ガラス固化体の溶解技術”として5テーマ並行に研究開発したが、H28年度末に評価し、候補技術を3テーマに絞り、H29年度以降、研究開発を続けている。

プロジェクト2の新しい核反応制御は公募を行いH27年度までフィージビリティ研究を実施、候補技術は3テーマに絞り、H29年度以降プロジェクト4で研究開発を続ける。また、新たにPd-107を用いた核変換実証試験をH28年度末から開始した。

プロジェクト3はH28年度末に中間評価を行い、方針を見直した。

プロジェクト4はH29年度から新核反応制御の試験も実施しつつ、加速器開発の技術開発を行うと共に、革新的加速器概念の検討を開始した。

プロジェクト5はプロセス概念検討として廃棄物の負荷軽減と資源化のシナリオも合わせて検討する。

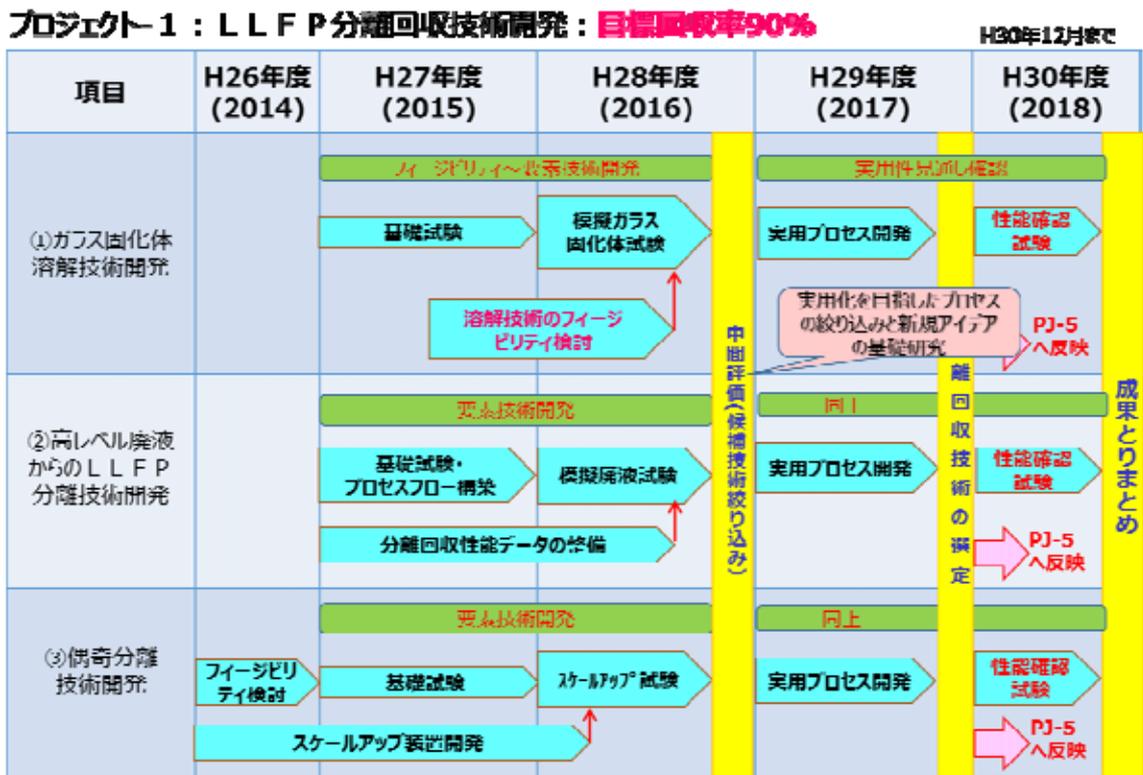
(7) 研究開発プログラム実施期間

平成26年10月2日から平成31年3月31日まで(4.5年間)

2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果

(1) プロジェクト1—分離・回収技術の開発

① プロジェクトの計画



## ② プロジェクトの体制

- ・ ガラス固化体溶解技術：愛媛大、東工大、京大／電中研／東芝、福井大
- ・ 高レベル廃液からの LLFP 分離技術：慶応大、JAEA／東芝、日立
- ・ 偶奇分離技術：理研

## ③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

### i) ガラス固化体溶解技術

ガラス固化体の溶解技術はヨーロッパで再処理された際に既に返還されてきているガラス固化体が約 2500 本あり、このガラス固化体から LLFP を取り出す技術も将来的には必要になると考え、開発した。

ガラス固化体は本来、長期間安定に処分されるために開発された形態であることからガラスを溶解する技術はこれまで検討されたことがない。従って、世界初のアイデアとなる技術であることからフィージビリティ研究として公募し、複数の候補となるアイデアを約 1 年半、並行して研究し、H28 年度末に中間評価として有望な候補技術を選定した。

その結果、酸を用いる湿式法と溶融塩中で還元する乾式法が候補として選定され、H30 年度には各々、施設のプラント概念を設計した。湿式法としては硝酸と塩酸の混合液を用いて Pd, Se および Cs を溶解した後、硫酸を用いて Zr を溶解する方法を採用した。乾式法としては  $\text{CaCl}_2$ —CaO 系の溶融塩を用いて、ガラスを還元した後、還元剤である Ca を電解法により再生する OS 法を採用した。ガラス固化体の溶解技術を成果公表する際には、現在の高レベル放射性廃棄物をガラス固化体として処分する環境とは全く異なる環境であることを常に明示し、誤解のないように努めた。

### ii) 高レベル廃液 (HLW) からの LLFP 分離技術

前述したように、H29 年度以降は 3 テーマに絞った候補技術のうち、H29 年度からは特に再処理プロセスで処理に課題となる不溶解成分から Zr を回収する方法として有望である「フッ化法による LLFP 回収技術」と高レベル廃液の液性を変えずに Pd, Se, Cs および Zr を回収できる「HLW から電解法と溶媒抽出法を用いた LLFP 回収技術」を選定し、プロセスの最適化とプラント概念設計を実施した。

「電解法と溶媒抽出法を用いた LLFP 回収技術」では模擬高レベル廃液を用いて Pd と Se を電解法で回収した後、Cs をイオン交換樹脂法で回収した。この内容は 2018 年 3 月 23 日にプレスリリースした。また、残りの模擬廃液から Zr を新しい抽出剤で回収する方法についても硝酸濃度を一定にして回収できることを確認し、Se を除いて回収率 90% を達成している。これらのプロセスで回収した Pd, Se および Zr は次プロセスの偶奇分離法により、純度が 90% 程度であっても半減期の長い奇数核種を選択的に分離できることから、問題ないと考えている。

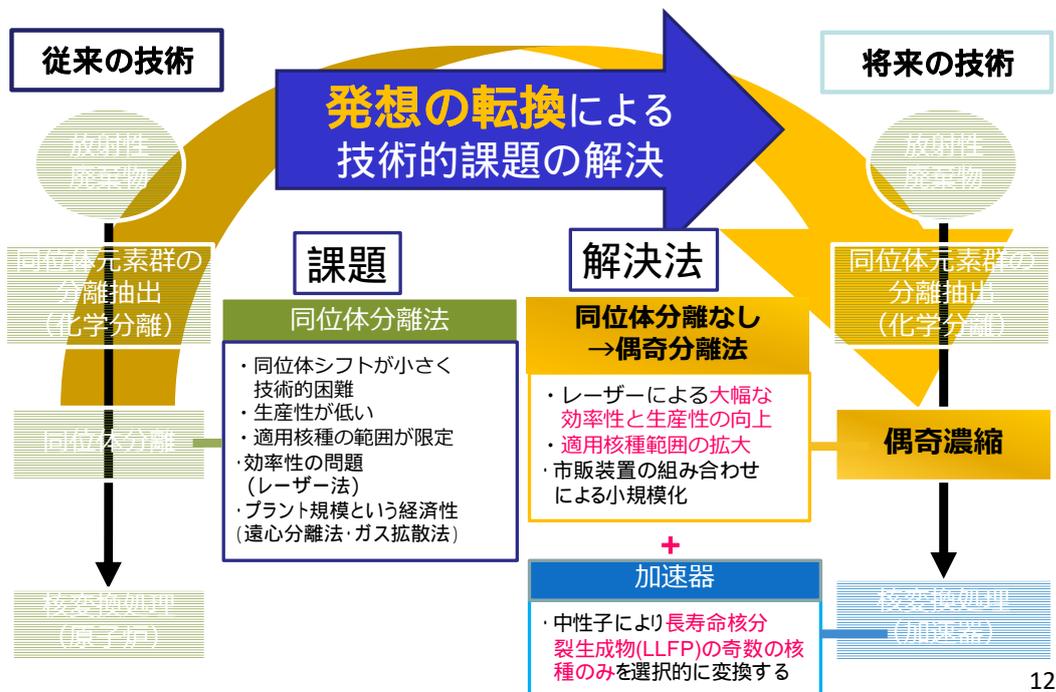
「フッ化法による LLFP 回収技術」では HLW に含まれる不溶解成分を廃液に戻さずに回収し、Zr をフッ素化して回収する技術を開発した。模擬高レベル廃液を用い、

沈殿促進剤を添加することにより、不溶解成分から Zr を分離できることを確認した。この内容を 2018 年 9 月 3 日プレスリリースした。なお、この技術は再処理工場のガラス固化工程で阻害要因となる不溶解残渣の処理にも適用できることから、このプロセスの概念特許を 2018 年 6 月 14 日に出願した。

### iii) レーザー法による偶奇分離技術

上記化学的な方法で回収した Pd、Zr および Se には半減期の長い奇数核種である Pd-107、Zr-93 および Se-79 が含まれている。原子炉で核変換する際にはこれらの核種を同位体分離法により取り出して核変換する必要があったが、加速器による核変換の場合は入射ビームのエネルギーを制御することができることから、同位体分離をせずに、偏光レーザーを用いる奇数核種のみを取り出す偶奇分離技術を開発した。偶奇分離法と入射エネルギーを制御した加速器による新しい核変換の概念を図に示す。この概念は公益社団法人発明協会の H30 年度全国発明表彰において 21 世紀発明賞を受賞した（2018 年 5 月 17 日プレスリリース）。

Pd-107 の偶奇分離技術については円偏光レーザーを用いる従来研究に比べ、直線偏光レーザーを用い、共通イオンコアと自動イオン化順位を採用することにより、目標とした分離速度：0.8 mg/日を達成した。この内容を 2017 年 1 月 10 日にプレスリリースした。さらに、原理的に処理量 10 万倍で実用化の 350 分 1 の装置の開発ができた。Zr-93 については同様に処理量 30 倍の装置を開発した。



### < 研究開発の進展状況 >

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
---------------	---------------

ガラス固化体の溶解技術：0 HLW からの LLFP 溶解技術：1 レーザー法による偶奇分離技術：1	ガラス固化体の溶解技術：4 HLW からの LLFP 溶解技術：4 レーザー法による偶奇分離技術：3
--	--

ガラスの溶解技術は概念が全くない状況：0

TRL に関しては本プログラムが「産業・社会を変える」コンセプト（概念）の絞り込みから開始したため、元々概念が全くないテーマに関しては TRL を「0」と定義した。

#### ④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

前述したように競合する技術は原子炉で核変換する技術であるが、原子炉で核変換する場合は LLFP をすべて同位体分離する必要がある、各々の LLFP に同位体プラントを適用することは経済性が成り立たない。また、レーザー法による同位体分離法は Pd、Zr および Se には同位体シフトが小さく、適用できない。

##### <獲得成果の革新性>

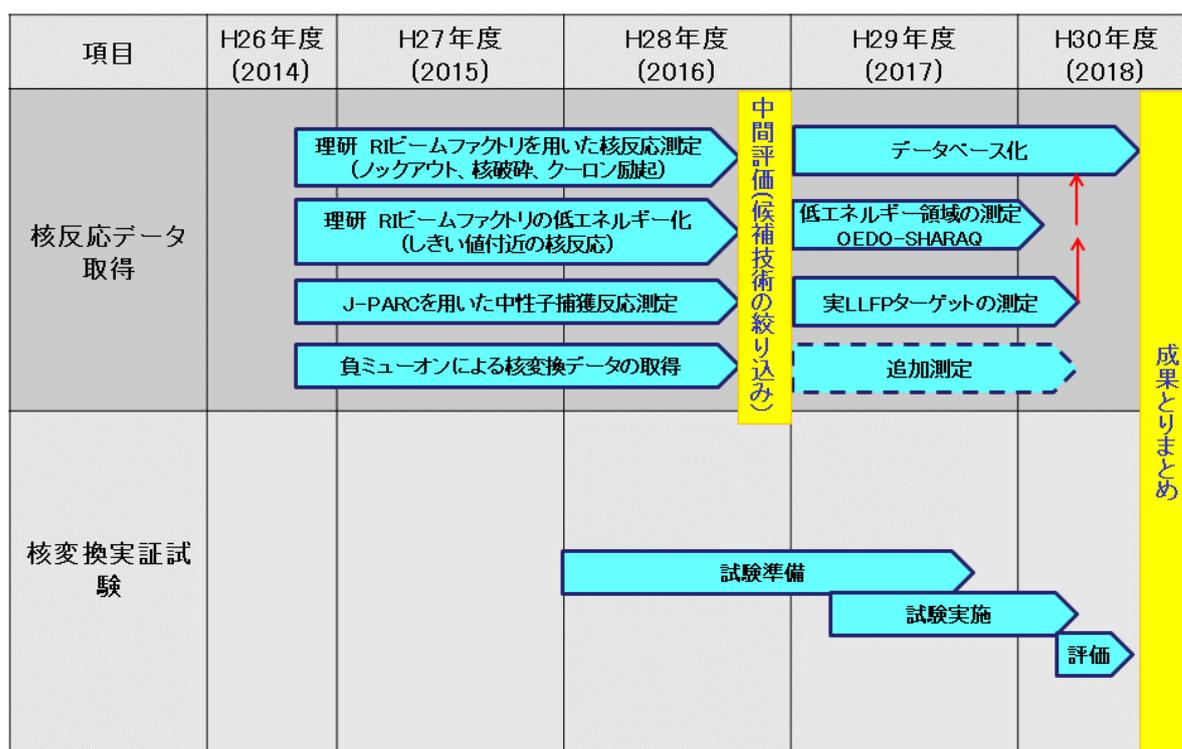
分離回収技術として、回収率や純度を 90% という実現可能性の高い目標値に設定し、従来の化学的分離法のみで処理してきた方法にレーザーを用いた物理的な方法を繋げて実現可能性を高めた点は革新性が高い。

##### <獲得成果の独創性>

化学的分離法に物理的分離法を結びつけることにより、奇数核種のみを取り出し、後段の加速器による核変換法に結びつけた点は公益社団法人発明協会の H30 年度全国発明表彰にて 21 世紀発明賞を受賞したことからも独創性が認められている。

## (2) プロジェクト 2ー核反応データ取得

### ① プロジェクトの計画



## ② プロジェクトの体制

- ・ 中性子ロックアウト (理研)
- ・ 高速中性子核破砕 (九大)
- ・ クーロン分解反応 (東工大)
- ・ 負ミュオン捕獲反応 (理研)
- ・ 中性子捕獲 (JAEA)
- ・ 低速 RI ビーム (東大、理研)
- ・ 新核反応制御のフェージビリティ：阪大、中部大、京大⇒プロジェクト4

## ③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

理研 RIBF 装置を用い、不安定核種である LLFP (Pd-107, Zr-93, Cs-135, Se-79 とその周辺核) を RI ビームとして陽子、重陽子標的に照射することで LLFP の反応断面積、及び反応生成核種を測定(「逆運動学法」測定と呼ばれる)した。取得した反応データを用い、LLFP の核反応断面積を評価した。Pd-107 の核反応断面積のデータについては 2017 年 2 月 13 日にプレスリリースした。Zr-93 の核反応断面積のデータについては 2017 年 9 月 11 日にプレスリリースした。理研 RIBF で取得済みの反応データを確定することができた。

逆運動学法測定における低エネルギー条件下での技術的課題解決(粒子識別、従来限界を超えた RI ビーム低エネルギー化)のための実験装置の研究開発—イオンチェンバー開発を行い、RI 減速ビームラインとして OEDO を構築した。開発された低速 RI ビーム OEDO を用いて低エネルギーでの核データを取得した(2017 年 12 月 15 日プレスリリース)。

また、J-PARC 物質・生命科学実験施設の大強度中性子を利用した LLFP (Cs-135) の中性子捕獲反応断面積を測定した。

負ミュオン原子核捕獲反応実験によるデータ取得を行った。安定 Pd に対するミュオン捕獲反応データを阪大 MuSiC や英国 RAL で取得し、解析することにより Pd 同位体生成成分岐比を求めた。その結果、ミュオン原子核捕獲反応理論を検証することができた。

LLFP の一つ Pd-107 標的をインプラントで製作し、これに重陽子ビームを長期間照射 (約 30 日) する核変換実証試験を実施し、Pd-107 を核変換できることを確認した。

なお、新しい核反応制御法のフィージビリティ調査研究で公募を行い、8 テーマを選定し、1 年半調査研究を実施後、3 テーマを選び、プロジェクト 4 で試験研究を実施した。

さらに、逆運動学法を用いて測定した核反応データが、実際に核変換されることを確認する実証試験を実施した。Pd-107 が約 15% 入った試料を海外から入手し、インプラントで Pd-107 の純度 100% の標的 (ターゲット) を作製し、実際に重陽子ビームを約 1 ヶ月間照射し、Pd-106 などに核変換する割合を測定した。このような核変換の実証試験を世界で初めて行った。

#### < 研究開発の進展状況 >

プロジェクト開始時の TRL	プロジェクト終了時の TRL
1	4

#### ④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

競合する技術はプロジェクト 1 で前述した原子炉による核変換技術であるが、プロジェクト 4 の加速器開発と合わせて後述する。

#### < 獲得成果の革新性 >

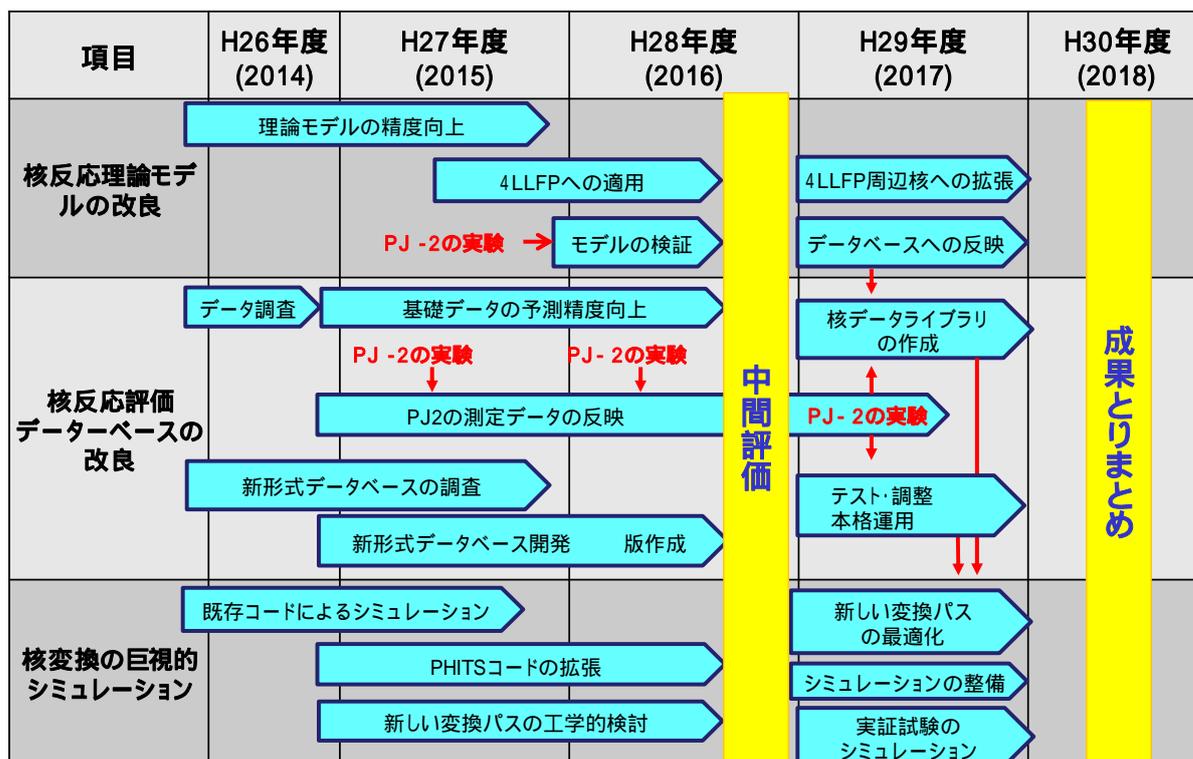
これまで核反応データを新しく測定する方法は限定されていたが、理研 RIBF を用い、逆運動学法という手法により、ありとあらゆる核分裂生成物 (FP) のデータを取得することが世界で唯一できるようになったことは極めて革新性が高い。

#### < 獲得成果の独創性 >

通常、加速器では粒子のビームを用いるが、FP をビームとし、ターゲットに水素や重水を用いる逆運動学法は今までにない方法であり、独創性が高い。

### (3) プロジェクト 3 - 反応理論モデルとシミュレーション

#### ① プロジェクトの計画



## ② プロジェクトの体制

- ・ 理論による標準モデル（阪大）
- ・ 構造計算による高精度化（筑波大）
- ・ 核反応評価データベース（JAEA）
- ・ 核反応シミュレーション（RIST）
- ・ 核反応データコンパイル（北大）

## ③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

プロジェクト2の理研で測定された重陽子を中心としたデータ及び既存の核反応データから、最新の原子核反応理論・構造理論を駆使し、核変換シミュレーションコードPHITSに必要な核反応データベースを構築することを目的として、核反応理論モデルの改良を核構造理論に遡り実施し、その成果を用い核反応モデルの高精度化を実施した。特に重陽子の核反応をシミュレーションするコードDEURACSを改良し、重陽子の反応が正確にシミュレーションできるようになった。この内容を2018年10月12日にプレスリリースした。

また、核変換の変換効率や発熱率、放射線損傷等データを用いて巨視的な核反応シミュレーションによる核変換プロセス概念を新たに構築した。

これらのデータベースに基づき、核反応評価データベースJENDL/ImPACT-2018を構築し、汎用評価済み核データライブラリとして公開することができた。

さらに、構造計算による高精度化を反映したデータベースに基づき、中高生にも使える未知同位体の計算核データ「さわれる核図表」データInPACSを公開して一般への成果の普及に努めている。この内容について2019年1月9日にプレスリリースした。

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1	4

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

競合する技術・アプローチは特になし。

<獲得成果の革新性>

これまで核反応は巨視的シミュレーションにより実施されてきた。原子核反応理論・構造理論を核反応に適用したシミュレーションは例がなく、極めて革新性が高い。

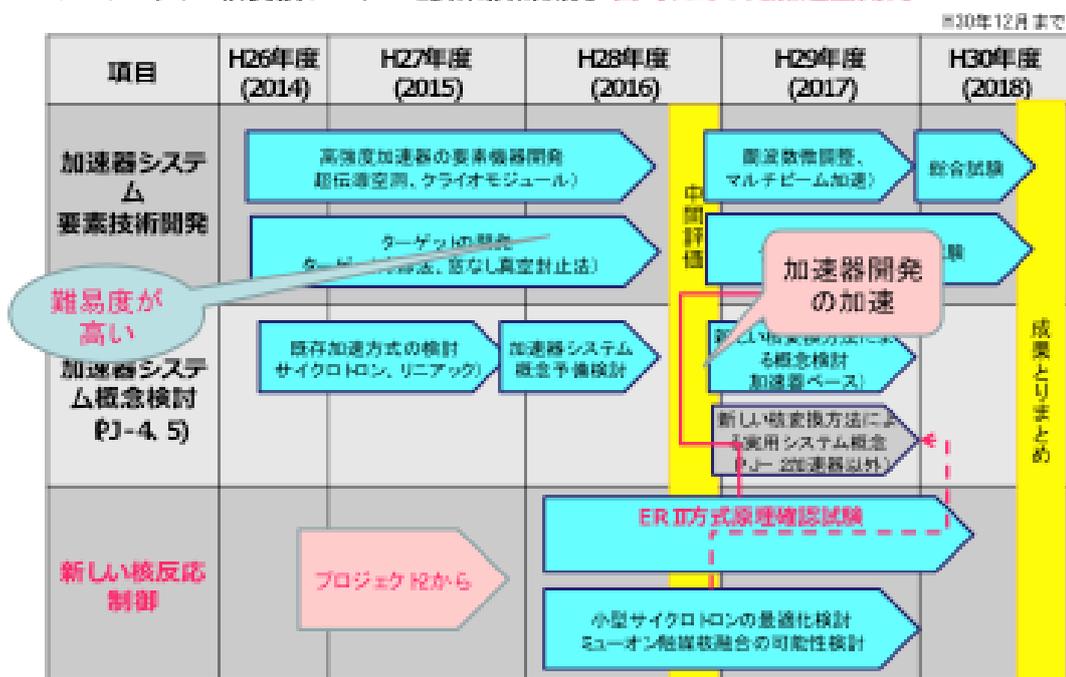
<獲得成果の独創性>

重陽子の核反応を正確にシミュレーションしたコードはなく、独創性も極めて高い。

(4) プロジェクト4ー核変換システム評価と要素技術開発

① プロジェクトの計画

プロジェクト4 核変換システムと要素技術開発 **目的にあった加速器開発**



② プロジェクトの体制

- ・ 加速器及び標的の要素技術開発（理研）⇒理研、日立、三菱電機
- ・ 核変換システム評価（理研）
- ・ 新核反応制御法の加速器ベースの研究開発（大阪大学、中部大学—東北大学、

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

プロジェクト2の新核反応制御法のフィージビリティ調査研究から加速器ベースの高強度小型冷・熱中性子源によるLLFP核種核変換処理法の研究(大阪大学)、核融合中性子のLLFPの分離・核変換への応用(中部大学)ー高温プラズマ中でのミュオン触媒核融合反応の素過程の理論計算(東北大学)、核変換処理のための高効率負ミュオン生成法の研究-加速/貯蔵ERITリングの開発(京都大学)ー核変換処理のための高効率負ミュオン生成法の研究-加速/貯蔵ERITリングの開発(JAEA)の3チームを選定し、有望なものは試験研究を実施した。

長寿命核分裂生成物用の核変換システムとして、熱中性子以外の核変換誘発粒子を発生する加速器システムを評価し、加速器システムに必要な要素技術の開発を行うことを目的とし、原子核物理、加速器、原子力の分野連携、理工連携を進め、合理的なコスト及びエネルギー収支を実現できるLLFP専用核変換システムを検討した。

原子炉では得られない高エネルギー中性子(20~数200MeV)や陽子、重陽子、負ミュオン等を大強度で発生させる加速器システムのビーム種・強度・エネルギー・標的性能・FP標的材などを俯瞰し、プロジェクト1,2,3,5と連携を取りながら、加速器および要素技術の開発を進めた。H29年度から、革新的加速器システム概念の検討を、PJ4に集中した。

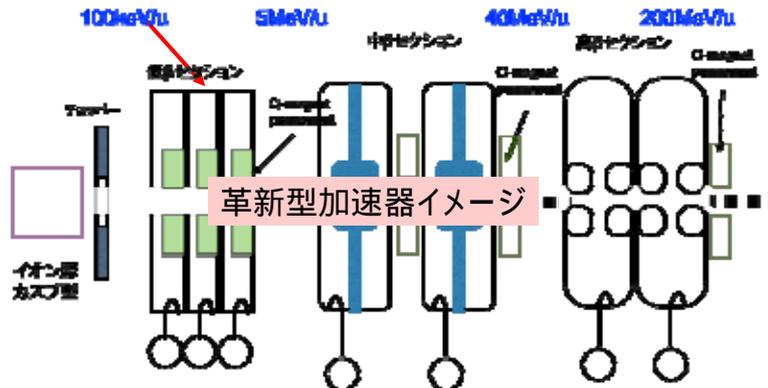
高レベル廃棄物低減化の必須条件となる「核変換量」確保および資源化に重要な「反応生成物制御」、の二つの観点を意識した加速器システムの評価および概念検討を行った。

Pd-107を例として、六ヶ所再処理工場で発生するPd-107を再処理工場の処理速度(年間800トン使用済み燃料)と同等の処理速度を持つ加速器の入射ビーム電流を評価した(前述)。それにより、必要とされる加速器のビーム電流は1アンペア級で現在の加速器の数百倍から千倍の電流が必要であることが分かった。

その結果を踏まえ、Pd-107の核変換用の加速器の仕様として提案したものを図に示す。重陽子ビームを用い、入射ビーム電流1アンペア、入射ビーム径10cm以上、入射ビームエネルギー40~200MeV/uのコンパクトな加速器である。また、その仕様を表に示す。

RFQqの代わりに、シングルギャップ  
キャビティ+Q磁石を置き、大面積の  
ビームを受けることができる

粒子 : 重陽子  
エネルギー : 40-200 MeV/u  
電流値 : 1A  
ビームパワー : 80MW-200MW x 2



$E_d$ (MeV/u)	目標 電流 $I_b$ (A)	低 $\beta$ セク ション#	中 $\beta$ セ クション #	高 $\beta$ セク ション#	主要空洞 部分長さ 合計(見 積もり)	Target 概念 (案)	加速器部 分とtarget 部分の区 切り窓(案)
40	>2.5	10MV ~20m	70MV ~27m	----	~47m	Liq. Li (N. S.)	P. C.*
100	>1	10MV ~20	30MV	160MV	~95m	LLFP (Direct)	P. C.*
200	>0.5	10MV ~20m	30MV ~15m	360MV ~130m	~165m	LLFP (Direct)	P. C.*

**Beam Power = Constant > 200 MW**

- # 4 couplers (1.6 MW/cavity)を想定
- Plasma Curtain (差圧は作らず、ターゲット領域からの飛沫等を除去)
- cf. IFMIF :  $I_d = 0.25 \text{ A} @ E/A = 20 \text{ MeV/u}, P = 10 \text{ MW}$

最終年度には、標的システムを含む革新的加速器システムの全体設計を実施した。

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
0	3

加速器の概念が全くない状況 : 0

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

競合する技術・アプローチは特になし。

<獲得成果の革新性>

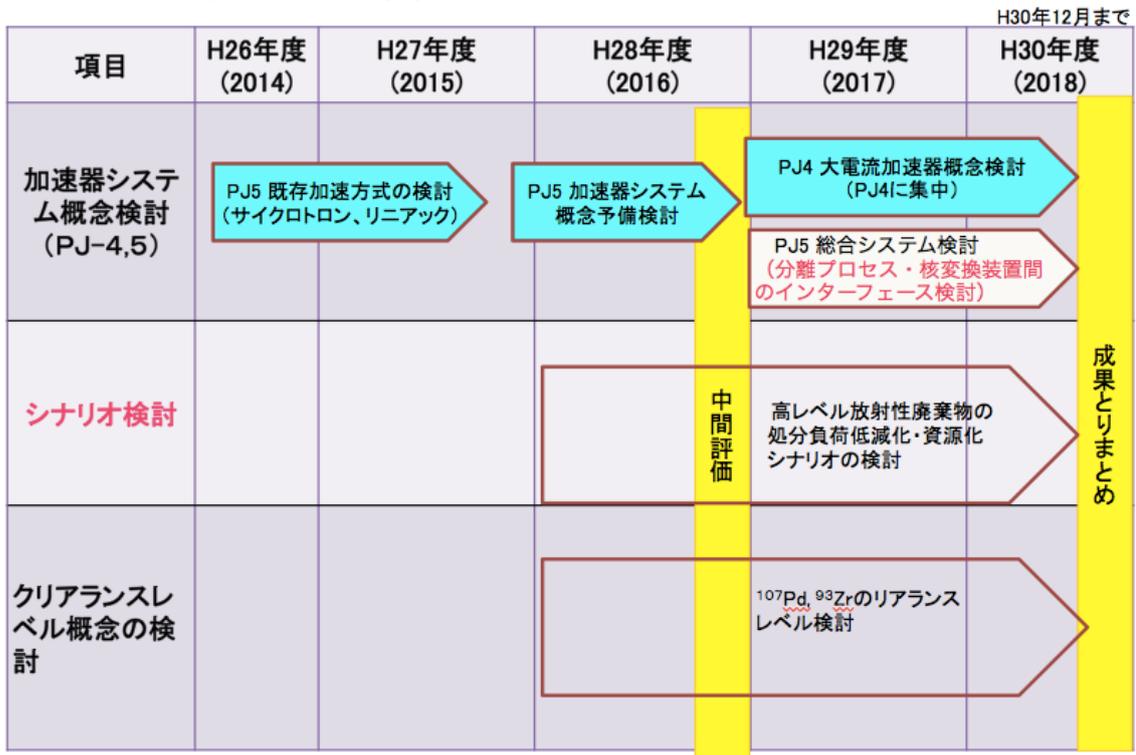
これまでの加速器は研究用の RIBF や J-PARC のような研究用の加速器か BNCT のような電流の極めて低い癌治療用の加速器しかなかったことから、処理装置としてビーム電流値の高い加速器仕様を世界で初めて提案したことは革新性が極めて高い。

<獲得成果の独創性>

処理装置用の加速器という、今までない加速器の概念を提案したことは極めて独創性が高い。

(5) プロジェクト5ープロセス概念検討

① プロジェクトの計画



② プロジェクトの体制

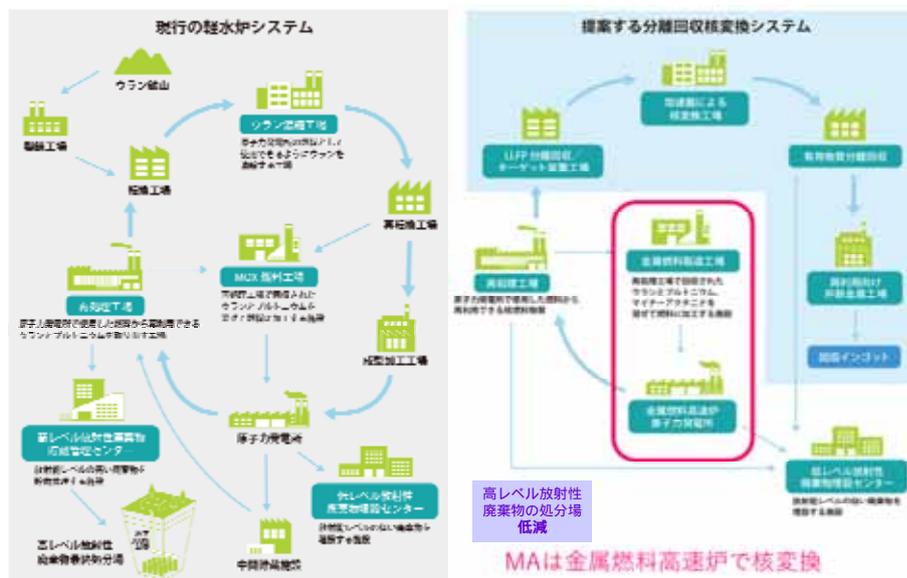
- ・全体システム概念の構築と今後の開発課題の検討 (JAEA)
- ・長寿命核分裂核種の再利用に伴う放射線被ばく線量の評価とクリアランスレベルの検討 (京大)

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

分離・核変換プロセス間の整合を取るためのインターフェースを検討し、分離変換全体システム概念を明らかにした。また、廃棄物低減による地層処分への効果を示すとともに、資源化に重要となる核変換対象核種のクリアランスレベルを提示した。

本検討における廃棄物からは核変換対象の LLFP の多くが取り除かれているため、従来のガラス固化体の地層処分の負荷を軽減することができる。この新たな分離・回収プロセスおよび核変換システム運用・LLFP リサイクルから発生する廃棄物の特性を検討した。また、高レベル放射性廃棄物以外の新しい廃棄物として処分する方法、課題などを幅広く検討し、地層処分の負荷軽減効果を示した。特に MA については本プログラムで研究対象としないことになっていたが、HLW を大幅に低減する

ためには MA の取り扱いを無視できないため、本プログラムでは MA を核変換すると共に、Pu を削減することができる金属燃料高速炉を採用し、MA を核変換することとした（図）。また、既往研究から Cs および Sr を約 130 年間長期保管すれば高レベルの処分場の広さは 1/4 に、同約 300 年間長期保管すれば同 1/100 になると試算される案を採用し、廃棄物を低減する。



長寿命核分裂核種の再利用に伴う放射線被ばく線量の評価とクリアランスレベルの検討では、白金族核種は核変換して自動車用触媒などに再利用して行くことを想定した検討を行った。Pd-107 のクリアランスレベルとしては約 3300Bq/g、Zr-93 のクリアランスレベルは約 90Bq/g と試算され、論文としてアクセプトされた。

Pd-107 のクリアランスレベルについては 2018 年 10 月 3 日にプレスリリースした。

これを資源利用して行くことは、従来、埋設以外に処理の方法が無かった高レベル放射性廃棄物の処理処分に大きな変革をもたらすものであり、これを資源利用していくことができれば、循環型社会の形成や資源の少ない我が国の産業発展に大きく貢献するものである。

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1	3

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

競合する技術・アプローチは特になし。

<獲得成果の革新性>

これまでの LLFP に関する廃棄物評価は I、Tc のみであり他の LLFP は評価されてなかった。また、LLFP のリサイクルは今までにない概念であり、クリアランスレベル

を示したことの革新性は極めて高い。

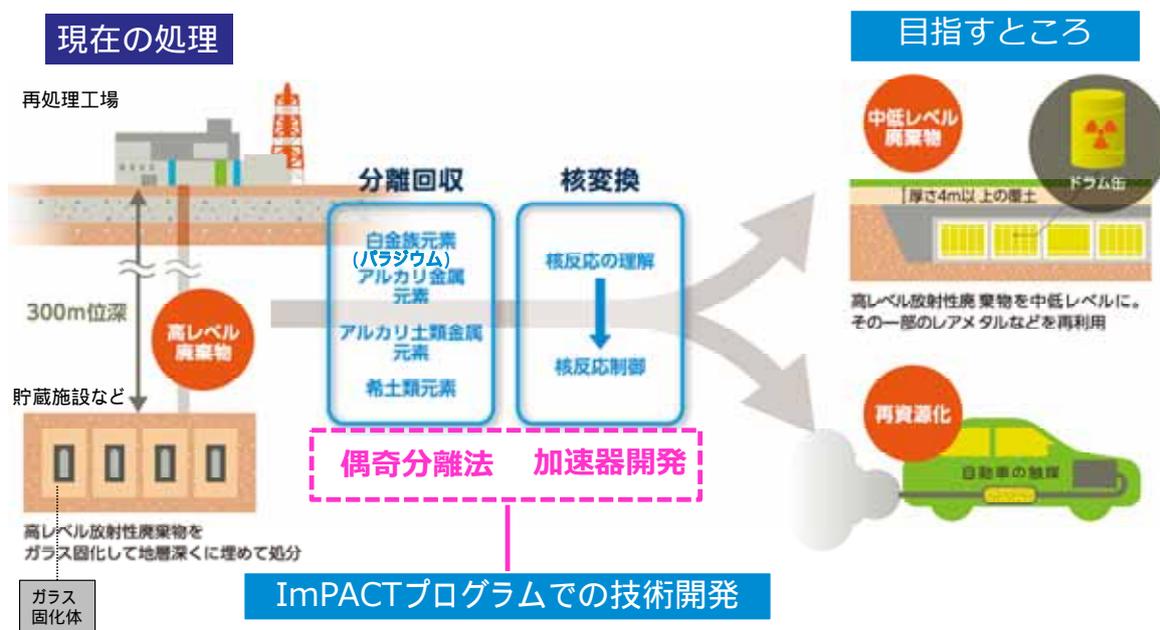
<獲得成果の独創性>

LLFPの核変換により廃棄物を低減すると共に有用な元素をリサイクルし、資源化するシナリオは極めて独創性が高い。

### 3. 研究開発プログラムの全体成果

(1) 目標達成の状況(目標達成できた場合の要因分析、目標達成が困難となった場合の原因分析も記載)

プログラムの目標である“高レベル放射性廃棄物をめぐる課題についての新たな選択肢を示す”としたが、新たな選択肢として、“主な技術として偶奇分離法と革新的加速器による核変換法を組み合わせる方法”によりLLFPを核変換できる可能性を示すことができ、目標を達成できた。その概念を図に示す。



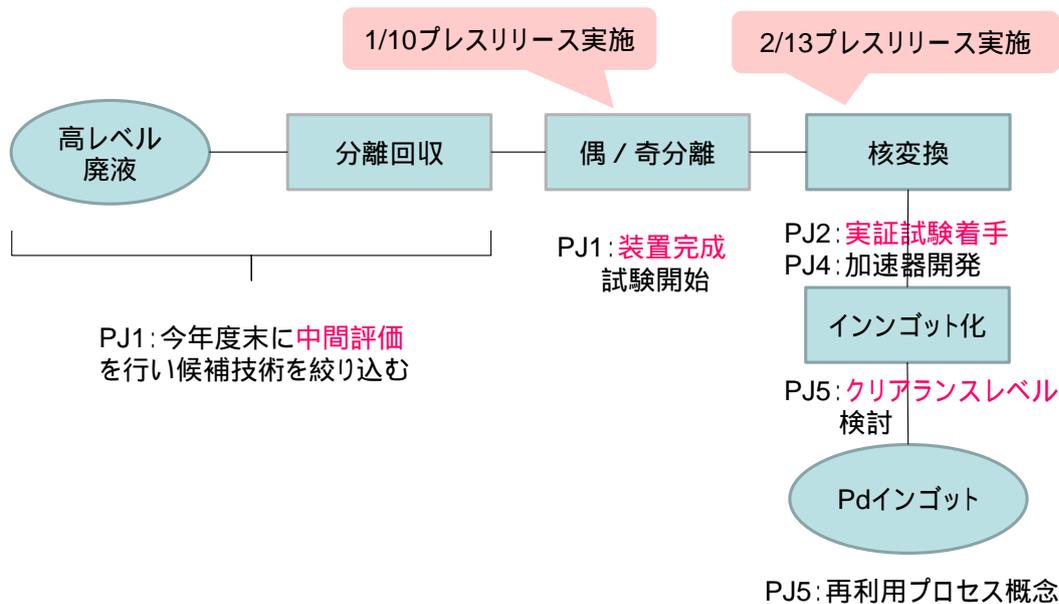
目標達成できた場合の要因分析としては、“核変換による……”という定義を核物理である基礎的研究だけでなく、これまで実績のない“大電流加速器と標的(ターゲット)”に関し、工学的な検討により、社会実装可能な加速器仕様を提案することができたことによる。

また、「核変換による」と明記したが、核変換の前処理工程であるHLWからのLLFPを回収する化学分離法および同位体分離法を採用せずに加速器を用いて核変換するために採用した偶奇分離法に大きな成果が得られたことも目標達成できた要因と言える。

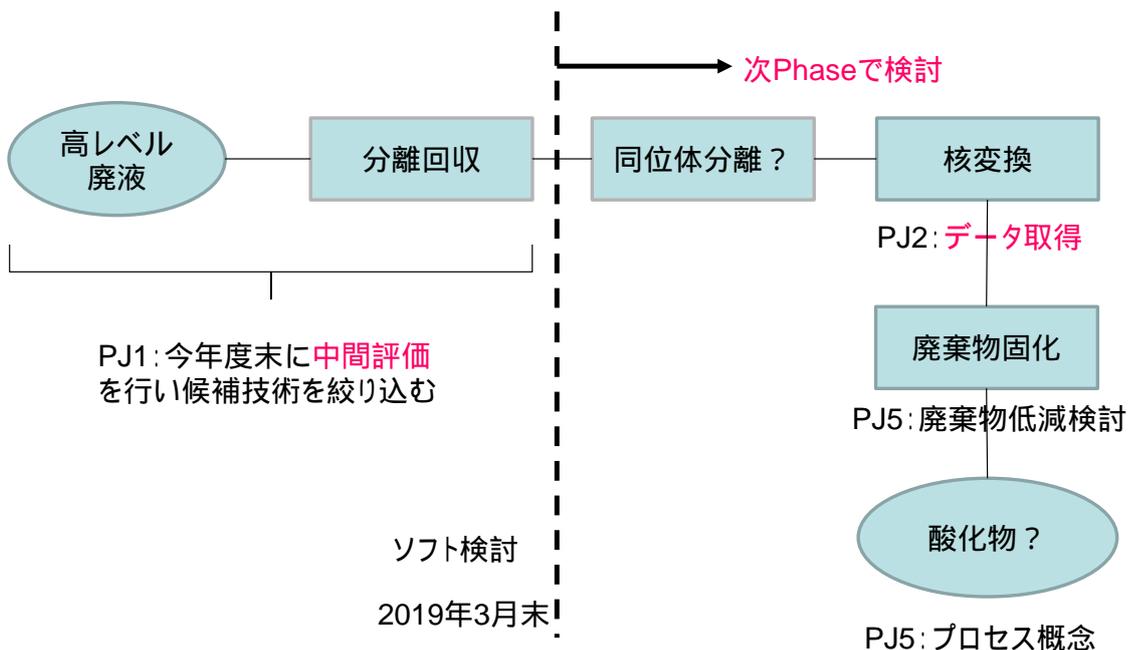
さらに、核変換した後のLLFPの混入する濃度についても放射線管理区域から一般の生活環境(放射性非管理区域)へ取り出すことのできるクリアランスレベルをPd-107およびZr-93についてラットを用いた実験も含めて実施し、試算し、論文が受理されたことも「資源化」という出口に対するアウトプットとして目標達成できた要因と考えられる。

一方、目標達成が困難となった Cs については、全体計画で新たに Pd-107 の標的を作製し、実際に重陽子による加速器を用いた核変換実証試験を追加したことにより予算が逼迫したため、Pd-107、Zr-93、Se-79 および Cs-135 のうち、偶奇分離法採用だけでは核変換が難しく、同位体分離法を採用する必要がある Cs-135 については、このプログラムでプロセス概念を検討する研究は行わず、次のフェーズでレーザー法による Cs-135 の同位体分離法を用い加速器で核変換する技術開発を実施することにした。その変更内容を図に示す。この変更は有識者会議および内閣府にも承認されており、次フェーズの研究を採択し、是非、実施したいと考えている。

## パラジウム (Pd)-107の核変換プロセス



## セシウム (Cs)-135の核変換プロセス(次Phase)



## (2) 参考指標

### ① 民間企業等とのマッチング及び橋渡しの状況

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
企業の研究者数	30~40/年	3	38	42	41	(36)
協力企業数 ※	10~20/年	1	7	14	18	(7)

注：( ) は見込み数

※ 研究開発に参画する企業だけでなく、研究成果の展開に意欲を示し、ImPACT で得た機密情報を開示する秘密保持契約等を具体的に結んだ企業の数

(注) 上記※を踏まえ、研究者数、企業数には課題だけでなく、WG参画者、企業を含む

1人の研究者が複数の課題、WGに参画している場合は複数カウント

1企業が複数の課題、WGに参画している場合は複数カウント

同一WGに同一企業から複数の研究者が参画している場合は、研究者数は複数でカウント、企業数は1でカウント

### ② 論文

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全体数	約80報	0	17	42	53	(40)
うち IP ファクター 10 以上	1 以上	0	0	0	0	(0)

注：( ) は見込み数

### ③ 学会発表

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全体数	150	2	55	123	159	(130)
学会賞等の受賞数		0	1	4	4	(5)

注：( ) は見込み数

### ④ 国際学会における招待講演

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全体数	40	0	8	9	11	(15)

注：( ) は見込み数

### ⑤ 特許出願件数

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
国内	20	1	7	12	7	(3)
海外	10	0	3	7	0	(2)
合計	30	1	10	19	7	(5)

注：（ ）は見込み数

\* 共同出願は1件でカウント。PCT 出願は国内1件、海外1件でカウント。ただし、PCT 出願に先立ち国内出願しその後 PCT 出願した場合は国内出願時に国内1件で、PCT 出願時に海外1件でカウント。

### ⑥ 知財・標準化等の取組状況

これまで世界で全くない概念（コンセプト）を提案するため、知財戦略および世界で認められる標準に準拠する戦略を立てた。

知財戦略に関しては基本となるコンセプトはPCT出願すると共に海外移行することにより日本のImPACTプログラム発の概念であることを明確にすると共に（米国が知財戦略として実施している）コンセプト特許が将来的に最も知財収入を多く得ることを実践を持って示すことを考えた。その結果、前述したように概念特許“放射性廃棄物の処理方法”（第6106892号（2017/3/17）、PCT/JP2016/058949(2016/03/22)は公益社団法人発明協会の平成30年度全国発明表彰の21世紀発明賞を受賞した。

原子力の分野で高レベル放射性廃棄物の処分場の獲得に不自由して来なかった欧米中心のシナリオに対し、処分場の候補地の選定に窮している国々に対する新しいシナリオを提示することを目的とし、世界的にこの概念（コンセプト）を世界標準として認めさせるために、IAEA を巻き込み TECDOC としてまとめることを考えた。IAEA にて Technical Meeting および Consultancy Meeting を計 4 回開催し、TECDOC の発刊準備を行った。

この動きに相応して OECD/NEA は放射性廃棄物のリサイクルの委員会を立ち上げ、討議を開始した。また、OECD/NEA の分離核変換の国際会議で HLW から LLFP を化学的に分離回収するプロセスから偶奇分離法、核変換のデータ測定とシミュレーション、実証試験、加速器開発、処分の負担低減およびクリアランスレベルの試算までをシリーズ発表し、LLFP の核変換の実現性を示した（2018年9月30日-10月3日、マンチェスター）。

### ⑦ アウトリーチ等の状況

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
アウトリーチ回数	約40	2	20	18	34	(30)
新聞、TV等の報道数		3	2	4	13	(25)

注：（ ）は計画数

### ⑧ その他特筆すべき取り組み

高レベル放射性廃棄物の処分に対し、新しい選択肢を提示するという目的には一般の方々に理解をいただくことが重要であると考え、研究者を対象にしたシンポジウムだけでなく、一般向けのリスクコミュニケーションを目的としたシンポジウムを2回開催した。

第1回は2018年3月17日（土）JST 東京本部別館にて“核変換による放射性廃棄物の大幅な低減・資源化—さあ、始まる”資源化“という未来—”を開催した。参加者約80余名で核変換技術に批判的な技術者にも好評であった。

2回目は第1回のシンポジウムの参加者で青森県六ヶ所村在住の女性からの要請で2018年11月11日（日）青森県六ヶ所村スワニーにて“六ヶ所村ワークショップ「高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化—新しい選択肢の可能性を求めて—”を開催した。参加者約50名で、“このような取り組みが高レベル放射性廃棄物の処分には重要である”すなわち、“このような研究を進めることにより、HLW処分の候補地に名乗りを上げる自治体が増える”という地元からの声が多く寄せられて大成功であった。この取り組みから青森県や福井県など原子力施設を有する県からの講演依頼が複数あり、HLWの処分に関する研究の重要性が原子力分野で認められつつある。

#### 4. 研究開発プログラム予算の推移

予算総額：3,414百万円

単位：百万円

年度	H26	H27	H28	H29	H30	計
合計実績*	260	1,037	1,251	627	233	3,408

#### プロジェクト別内訳

P J 1 : 分離回収技術開発						
	45	291	270	147	67	820
P J 2 : 核反応データ取得及び新核反応制御法						
	36	414	458	196	55	1,159
P J 3 : 反応理論モデルとシミュレーション						
	23	32	34	36	17	141
P J 4 : 核変換システム評価と要素技術開発						
	23	81	302	156	79	642
P J 5 : プロセス概念検討						
	0	6	15	10	15	46
最先端研究基盤の利活用・提供						
	134	212	172	82	0	600

注1. 平成26～29年度は執行額（平成29年度は未確定）、平成30年度は契約額。

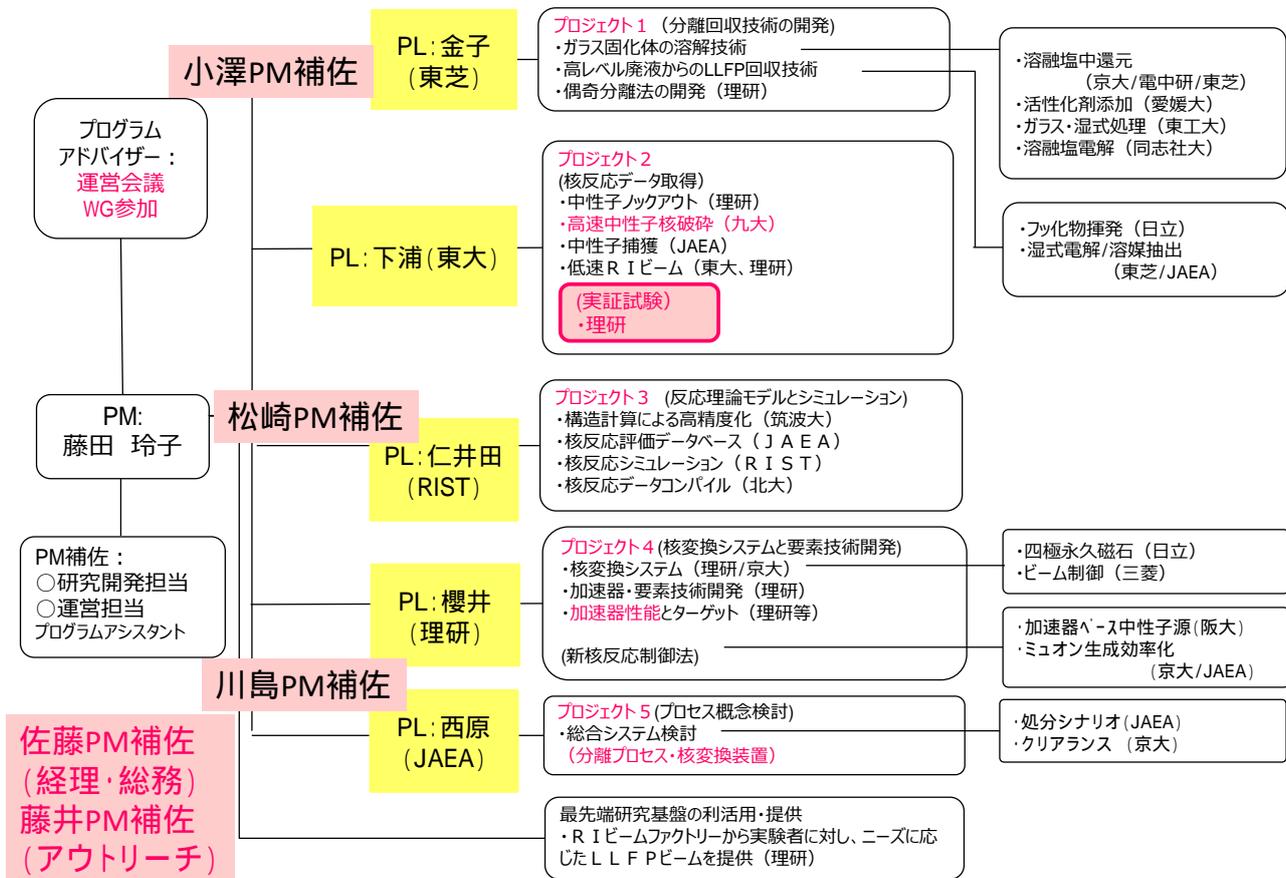
2. 各年度の執行額は、当年度執行額と次年度への繰越執行額の合計額。

なお、次年度からの前倒し執行額は次年度執行額として算定。

3. プロジェクト2のうちの4課題は平成29年度にプロジェクト4に移管。

## 5. 研究開発プログラムの推進体制

本プログラムの推進体制を以下に示す。



PMの下にPJをまとめるPM補佐を分野毎に置いている。PJ1 分離・回収技術は小澤正基PM補佐、PJ2 核反応データ取得とPJ3 理論構造モデル+シミュレーションは新たにPJ2でPIをしていただいていた松崎禎市郎PM補佐、PJ4 核変換システム+要素技術開発とPJ5 プロセス概念検討は川島正俊PM補佐が担当している。最終年度であり、とりまとめの時期であることから、PLを責任もってコントロールするPM補佐体制を強化した。また、経理および総務全般を佐藤昌喜PM補佐が、アウトリーチを藤井恵美PM補佐が担当している。一方、本プログラムは原子力の全般および資源化など幅広い分野から構成されることから各分野の権威の方々にアドバイザーをお願いしている。

## 6. 研究開発プログラムの実施管理状況

### (1) 研究開発プログラムのガバナンス

#### ① 進捗状況の把握及び指導・管理状況

進捗状況を把握するため、各PJは月1回、プロジェクト会議を開催し、各PIは進捗報告を行うと共に、PJメンバー間において相互の情報交換を行う。さらに、PMおよびPM補佐は研究の進め方の指導・管理を実施している。また、分離・回収から核変換およびプロセス概念まで具現化するために年2回（9月と3月）、全体会議を開催し、プログラム参加者が双方の研究開発を理解する機会を設けている。一方、プログラムの進め方については年2回運営会議（6月と12月）を開催し、アドバイザーから意見をいただき、プログラムの進め方の見直しなどを行っている。

なお、H30年度に知財運用会議を1回開催した。

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
運営会議等の開催数	2	2	2	2	3
研究開発機関等の訪問回数	9	23	17	26	(27)

補足：運営会議以外に、全体会議を年2回開催している。研究開発機関等の訪問回数は藤田PMが研究開発機関等を訪問した回数。

#### ② 新たな発想・アイデアの採用（若手・女性人材の育成を含む。）に関する取り組み

研究開始当初は5PJから構成してきたが、このプログラムのアウトプットをより実現させ易くするために、PJ横断のWGを立ち上げている。WGでは研究開始時に予想できなかった課題についてスピード感を持って解決するもので、今までに“処分概念検討”、“再処理プロセス・改良高度化”および“加速器開発”の3WGを開始している。PJ5のシナリオの妥当性やプロセス概念の具体化、PJ4の加速器開発についてはこれまでにないコンセプトを構築するため、徹底的に討議し、論理的な筋道となるように取り組んでいる。

#### ③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
参画研究機関数	17	48	42	39	27
参画研究者数	99	314	354	362	211
うち中止（解任）			11	4	14
追加（新任）	17	31	5	1	2

(注) 研究開発課題実施機関を対象とし、WG参画機関は含まない。

1 企業が複数の課題を実施している場合は複数カウント。

1 人の研究者が複数の課題を実施している場合は複数カウント。

中止・追加は課題数でカウント。中止は前年度の終了課題数、追加は当年度の開始課題数。

#### ④ 「選択と集中」に向けた取り組み

本プログラムはこれまでにない概念（コンセプト）を提示することから、初期は多くのアイデアを並行してフィージビリティ研究を行い、その成果を比較評価し、候補技術を絞る方法を採用してきた。

PJ1 では「ガラス固化体の溶解技術」と「高レベル放射性廃液から LLFP の回収技術」に関し公募を行い、前者で 2 候補、後者で 4 候補を採用し、H28 年度末に中間評価を行い、それぞれ、1 候補ずつを最終候補として採用し、プラント概念を検討した。

PJ2 では「新しい核反応制御法」に関し公募を実施し、8 候補を採択し、1 年半フィージビリティ研究を行い、H27 年度に比較評価し 3 候補に絞り、試験研究を実施した。

### (2) 研究成果の展開に向けた取り組み

#### ① これまでの取り組み

平成 31 年 3 月に実際のパイロットプラントの設計に着手できるようなプロセス概念を提示するため、PJ1 分離・回収技術では HLW から LLFP の回収技術として湿式法を基本とした二次廃棄物の発生量の少ない、経済性の高いプロセスに絞り込み、H30 年度にプラント概念を作成した。

また、PJ4 核変換システムおよび要素技術開発では加速器技術 WG でおおよそ決めた仕様の実現性についてオールジャパンの加速器研究者を集め、討議すると共に加速器仕様を決定し、プラント概念を提示し、次期フェーズに実現できるような方策を常に検討した。

PJ1～PJ5 において多くの研究成果が出てきた。特に PJ1 の偶奇分離は核変換をしなくても放射性核種を分離・回収し、資源化できることを示すことができた。

PJ4 の加速器開発ではこれまでに実現したことのない入射エネルギーおよびビーム電流の加速器であることから、新たな分野へ横展開できるような根本から将来に向けた研究開発に取り組むことができた。

#### ② 今後の方針と具体的な取り組み計画

本プログラムの成果に基づき、次フェーズに再度、応募し、本プログラムで出てきた課題を解決することを目指す。

具体的な課題をまとめると

分離回収 (PJ1) : 前処理工程では

- ・ Cs の具体的な分離・核変換プロセスの開発
- ・ 実使用済み燃料の高レベル廃液を用いた候補プロセスのホット試験

- ・偶奇分離法の回収率を確認する試験

#### 核反応データ (PJ2) とシミュレーション (PJ3)

- ・周辺核データの取得：加速器データベース、ImPACT/LLFP-2018 の完成  
低エネルギー加速器測定系

#### 加速器開発と要素技術 (PJ4)

- ・要素技術開発：パイロット試験装置の開発（部分装置の設計、製作、試験）

#### リサイクルと処分 (PJ5)：後処理工程

- ・資源化のシナリオ完成：ICRP および IAEA における承認（認知されるように働きかける）
- ・リスク受容および社会科学的な評価の完成：科学コミュニケーション

## 7. PMの自己評価

### (1) PMが実施管理を行った研究開発プログラム（研究成果）に関する評価

- ① 産業や社会のあり方の変革（漸進的でなく、非連続的なイノベーション）をもたらす見通しは得られたか。以下の視点を踏まえて記載すること。
  - ・将来の産業や社会のあり方の変革をもたらすような革新性を有する研究成果が獲得されたか。
  - ・産業や社会のあり方変革に向けた戦略が具体的かつ明確となったか。
  - ・戦略の実現に向けた課題が整理・明確化されたか。
  - ・技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ、技術的なサプライズは存在したか。
  - ・戦略の実現に向けた道行き（ロードマップ）が適切に描けたか。
  - ・戦略の実現に向けた産業界との連携・橋渡し等が行われたか。
  - ・知財・標準化戦略は明確かつ適正か。

これまで放射性廃棄物とされた物（LLFP）を新しい方法である偶奇分離法と入射エネルギーを制御した加速器による核変換法を組み合わせることにより放射能を低減し、リサイクルできるプロセスを提示し、実験により資源化できる見通しが得られた。「放射性廃棄物」を「資源」とすることは一種の錬金術であり、産業や社会のあり方に変革をもたらす成果であると考えている。

この概念を実現するために研究開発した“偶奇分離法”はレーザー法を応用する技術で、レーザーを処理装置として使用する新しい分野を開拓すると共に直線偏光レーザー装置の高度化という産業応用を展開できるもので革新性を有する成果であると考えている。また、核変換用の革新型加速器は従来の研究用の加速器とは異なり、入射ビーム電

流がアンペア級、ビーム径が 10cm 以上の処理用の加速器で、処理装置としての加速器概念を提示したことと合わせて革新性を有する成果である。

産業や社会のあり方変革に向けた戦略としてはロードマップに後述するが、次のフェーズ 5 年間で提示したプラントを設計するための課題を解決する研究、技術開発を行い、パイロットプラントを建設し、2040 年に社会実装する。

次のフェーズの公募研究で今回、抽出され、整理・明確化された課題を解決する研究および技術開発を実施する。以下に課題と解決策を示す。

プロジェクト 1（分離・回収）では、実際の Pd を偶奇分離法により奇数核種のみ分離し、回収率を確認する試験を行う。Cs-135 のレーザー法を用いた同位体分離法の試験を行い、分離できることを確認する。また、Pd-107、Zr-93 および Se-79 については実高レベル廃液を用いて提案する分離回収するプロセスが成立することを示す。

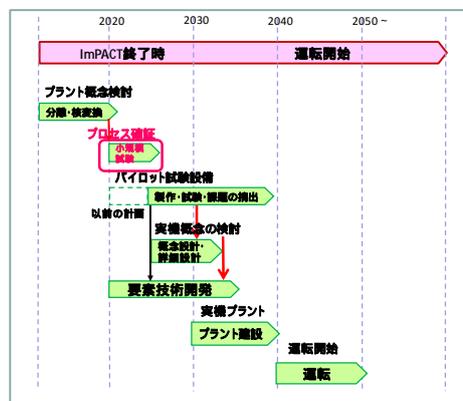
プロジェクト 2（核反応データの取得）では低入射エネルギー領域で対象とする LLFP 廻りの核種で測定が十分でないもののデータを RIBF や J-PARC で測定することによりプロジェクト 3（モデルとシミュレーション）の核反応データベース JENDL/ImPACT-2018 の完成を目指す。

プロジェクト 4（加速器開発とその周辺技術）では本プログラムでメーカーに委託して概念設計した加速器の要素技術を構成する装置を実際に製作し、その性能を確認する。

技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ、技術的サプライズについては前述した“偶奇分離法”と“入射エネルギーを制御した処理用加速器による核変換”である。特に処理用加速器はこれまでにない概念であることからの”技術的サプライズ“と言える。新たな課題が発生する可能性もある。

戦略の実現に向けたロードマップを図に示す。

- > 2019年3月 ImPACT終了時  
分離回収-核変換-インゴット化のプラント概念の提示  
果たすべき役割：世界で初めてトータルな分離変換システムの提示
- > 2019年～2024年  
次期国プロを再度採択し、小規模試験装置によりプロセス確認（Csなど）、Cs用核変換装置の開発  
現フェーズのWG→産業界 布石
- > 2024年～2030年  
パイロット試験設備の製作、試験実施、実用化の課題の抽出\*
- > 2025年～2035年  
パイロット設備を使った課題解決のための試験  
実機のプロトタイプ設計-詳細設計\*
- > 2030年～2040年  
核変換施設の建設\*
- > 2040年～ 運転開始



社会実装の時期を10年前倒し設定  
\*: 加速器の開発: 15～25年間 (5～10年開発, 5年設計, 5～10年建設)  
各要素技術の組み合わせにより可能  
原子カプラントの建設: 10年間 (5年設計, 5年建設)

社会実装は2040年を目標として2024年～30年はパイロット試験設備を製作し、2035年までこの設備を用いた課題解決の試験を進めると共に実機の核変換施設の設計を進め、2035年～建設を開始し、2040年に完成させ、運転を開始する。

産業界との連携については、既にプロジェクト1の分離回収技術ではメーカ3社がプラント概念設計を実施している。プロジェクト4の加速器開発ではメーカ2社が委託契約で3社が理研の下でプラント概念設計を行っている。

知財・標準化については既に述べたが、概念（コンセプト）特許は基本的に海外出願すると共に、委託研究で得られた成果は実施機関が特許を積極的に出願できるようにした。

標準化としては通常とは異なるが、放射性廃棄物の低減の基本的な考え方を世界の原子力発電を実施している国々に認めていただくために、IAEAを巻き込み、LLFPの核変換の位置づけを明確にするTEC-DOCを発刊する作業を実施している。これまでに2015年5月、2016年6月、2017年4月および10月の4回、Technical MeetingおよびConsultancy Meetingを開催し、報告書のドラフトを完成している。

- ② 上記①以外の派生的な効果（派生的に生み出された成果、新たな学術的知見の創出、失敗から得られた知見等）として、どのようなものが得られたか。

プロジェクト1の分離回収では特にレーザー法にこれまでにない偶奇分離技術の開発の分野を提供できた。また、プロジェクト4の加速器開発では入射ビームアンペア級でビーム径10cm以上の処理装置としての革新的加速器という新しい分野を開拓できた。この偶奇分離法と加速器による核変換法はLLFPの核変換だけでなく、今後、老朽原子炉の廃止により需要が高まる医療用の材料製造に横展開できる重要な技術であり、大きな派生的な効果と考えている。

## （2）PM自身の活動（プログラム・マネジメント）に関する評価

- ① <目標設定>産業や社会のあり方変革を目指した研究開発プログラムとして、目標設定の水準は妥当であったか。

現状を考えるとかなり高い目標設定であったと考えているが、「高レベル放射性廃棄物の処分に新たな選択肢を提供する」ことができ、目標設定の水準は妥当であったと考えている。

- ② <作り込み> トップ研究者の採用や異分野研究者との融合、外部専門家からの助言聴取など、国内外から斬新なアイデアや最先端の知見等を結集して研究開発を推進できたか。また、研究開発の実施体制は適切であったか。

原子力のトップ研究者だけでなく、これまで共同で研究したことのない核物理の研究者との融合を図ることができた。また、外部専門家として資源化研究の第一人者や加速器分野の権威の方をアドバイザーに迎え、的確な助言をいただいた。

また、国内外、特に中国から加速器の標的（ターゲット）などに斬新なアイデアを導入すると共に核物理と原子力の最先端の知見を結集して研究開発を推進できた。研究開発の実施体制は途中で組み合わせることにより適切にした。

- ③ <進捗管理> 研究開発の進捗状況や国内外における研究開発動向（ベンチマーク）等に応じ、各プロジェクトの加速、減速、中止、方向転換等を果敢に行うことができたか。

研究開発の進捗状況や国内外における開発動向（ベンチマーク）としては中国が本プログラムの情報を入手した後、直ぐに同様のプロジェクトを立ち上げ、半年遅れで研究開発を進めているという情報を入手している。加速器技術にまだ、隔たりがあるが、将来的には競合となると見込んでいる。加速器開発に関しては開発をかなり加速したが、分離回収ではCsの同位体分離法の開発を次フェーズに遅らせた。加速器の研究開発では中国と協力しながら進めることも1案である。

- ④ <関係者の巻き込み> 研究開発に関連する産業界を巻き込み、それら関係者の自発的な研究開発投資を誘導することはできたか。

プロジェクト1の分離回収技術の開発では、メーカー2社が当初から回収技術の公募に応募し参画している。最終年度ではメーカー3社がプラント概念設計を実施している。また、プロジェクト4では加速器開発に既にメーカー2社が参画しており、他に理研の下でメーカー3社がプラントの概念設計を行っている。プロジェクト1および4共にメーカーは次フェーズの公募研究に積極的であり、準備を進めている。研究開発投資は次のフェーズからである。

- ⑤ <成果の展開> 得られた研究成果の産業界への橋渡しや将来的な実用化・事業化に向けた戦略（知財及び標準化を含む。）及び体制が構築できたか。

本プログラムで得られた成果は次フェーズで実用化研究をメーカーが実施することにより、実用化・事業化できる体制を構築できたと考えている。そのためには次フェーズの公募（ムーンショットプログラム）で採択されるような戦略を構築した。具体的には、プロジェクト1における分離回収技術に関し、提案したプロセス案を実高レベル廃液を用いて試験を行い、成立することを確認する。加速器開発では設計した加速器の要素技術をパイロット試験装置として個々に並行して開発し、その課題を解決する。

- ⑥ <PM 支援機能の活用>PM 補佐や JST、外部支援の活用など PM 支援機能を有効に活用できたか。

PM 支援機能の活用という観点では本プログラムの専門分野が非常に多岐に亘っていることから、複数の専門分野の PM 補佐を配置し、PL と PM 補佐が共同で進める二重体制とし、研究の進め方が偏らないようにアドバイザーの方々をお願いし、PM 支援機能を活用した。

- ⑦ <アウトリーチ>アウトリーチ活動等が積極的に行われ、研究開発の意義・重要性等に関し、関連する産業界や一般の理解が深まったか。

アウトリーチとして、ImPACT の本来の成果報告のシンポジウムだけでなく、本プログラムの特殊な事情である原子力のリスクコミュニケーションという観点のワークショップも開催し、高レベル放射性廃棄物の処分に対する進め方に対する研究開発の意義・重要性を示すことができた。その成果として NUMO が 12 月に OECD/NEA と共同で高レベル廃棄物の処分の進め方のシンポジウムを開催し、地元の意見を聞くようにアドバイスされている。また、原子力委員会は H30 年度の原子力白書に放射性廃棄物の処分を取り上げることを明言しており、これまで、10 年間、全く進捗が見られなかった高レベル廃棄物の処分の進め方に対する国の事業に一定の影響を与えることができた。

- ⑧ <人材育成>若手や女性を含め研究人材の育成にどの程度貢献できたか。また、基礎研究からイノベーションを生み出す取り組みに関する参画研究者の意識改革がどのように進んだか。

人材育成では特にプロジェクト2および3で若手の研究者の参画が多く、学会や研究会でポスター発表を行うと多く賞を受賞することができ、今までに9件、受賞

している。基礎研究を行ってきた研究者たちが自分の研究が世の中の役立つ技術に繋がる研究であることを認識してモチベーションが上がったという感想を多く聞くと共に、イノベーションを生み出す努力を積極的にするようになっていく。

また、若手の研究者を ImPACT 開始時にはポスドクとして採用し、研究成果を上げたが、H30 年度の終了時には任期付きではあるが、ほぼ全員が定職を得ることができた。

特に、プロジェクト 2 では RIBF の核反応データを取得する試験に学部や修士の学生が多く参加し、基礎データがどのようにして実用の加速器の仕様決定に寄与するかを学ぶことができたと考えている。

- ⑨ <全体> 更なる研究開発の発展や、我が国の産業競争力の強化、困難な社会課題の解決に向け、どれほどの貢献ができたか。

これまで、4 年半という短い期間に原子力の課題に解決策を示すと共に、それを裏付ける研究開発を進めた例はなく、その点で ImPACT の制度により、PM に権限を集中できたことが困難な社会課題の解決に向け、今までにない成果を出すことができ貢献できたと考えている。また、レーザーや処理用加速器など幅広い分野に新しい研究分野を提供でき、“放射性廃棄物の処分”という困難な社会課題の解決に関しても新しい研究開発の芽を提供できたことから、研究開発の本来のあり方を見せたという点で大きな貢献ができた。

- ⑩ <全体> 目標通りの成果が得られなかった事例等の原因分析や解析が適切に行われ、そこから得られた知見や教訓を次の挑戦に活かすことができるか。失敗を通して次の挑戦につながる道筋は描けたか。

当初、対象とした Cs-135 は Pd-107 の実証試験の予算が新たに獲得できなかったため、次フェーズに廻すことになった。しかしながら、新たな研究開発が必要な Cs-135 をこのフェーズで実施するより、このフェーズで実施した偶奇分離技術の成果を踏まえて同位体分離法の開発という新たなステップで実施する方がより効果的な成果が得られることも考えられる。

- (3) その他、ImPACT プログラム全体に対する所感・提言（自由記載）

ImPACT プログラムは PM にすべての権限が委ねられる、今までにない研究開発プログラムであったため、4 年半という短期間に目標である“高レベル放射性廃棄物の処分に新しい選択肢”を提示できたと考えている。

しかしながら、民間出身者は 100%JST 出向であったので、JST の職員という位置づけで特許の提案も知財部門の許可が必要という”ねじれ現象”が起こり、そのための業務に多くの時間と作業が必要であった。産業や社会を変えるという ImPACT の PM としての権限は発揮するためには、PM の立場を向上させる必要がある。

特に日本の知財は先進国としての概念特許を重視する土壌が育っておらず、未だにメーカーと同様な製品特許のみ出願を奨励することが多い。今回、国の研究機関のいずれも知財戦略が遅れており、先進国型の“概念特許”に重きを置く知財戦略に変えて行かないと直ぐに中国に追いつかれ、科学技術立国が危ういと感じた。その意味でも、日本の知財における変革を起こせる可能性のある PM の権限強化は重要である。