
革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)
「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」
全体計画について

プログラム・マネージャー
藤田 玲子

研究開発プログラム構想

解決すべき課題等

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、地層深くに埋めて処分する計画である。しかし、この廃棄物には、半減期の長い放射性核種が含まれ、安全性に対する不安から処分場がなかなか決まらないことが社会的問題となっている。

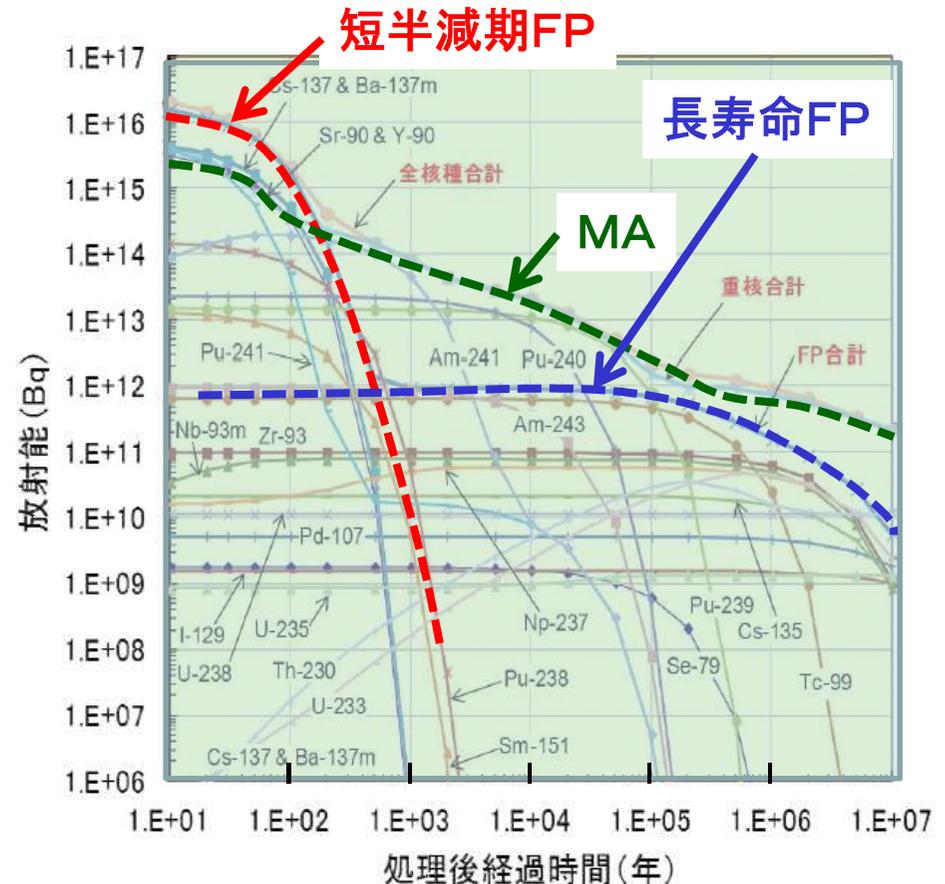
PMの挑戦と実現したときのインパクト

・概要・背景

- ✓ 高レベル放射性廃棄物の問題は、原子力賛成・反対に拘わらず、解決しなければいけない問題であり、それによって後世代への負担を軽減できる。
- ✓ 高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核種には、レアメタルなど有用元素が多く含まれるが、放射性のため再利用が困難である。

・実現したときに産業や社会に与えるインパクトは何か？

- ✓ 長寿命核種である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年以下に大幅低減できる。
- ✓ LLFPについても核変換の研究を進め、本来廃棄物とされていたものを資源として再利用する具体的な道筋を示すことができる。

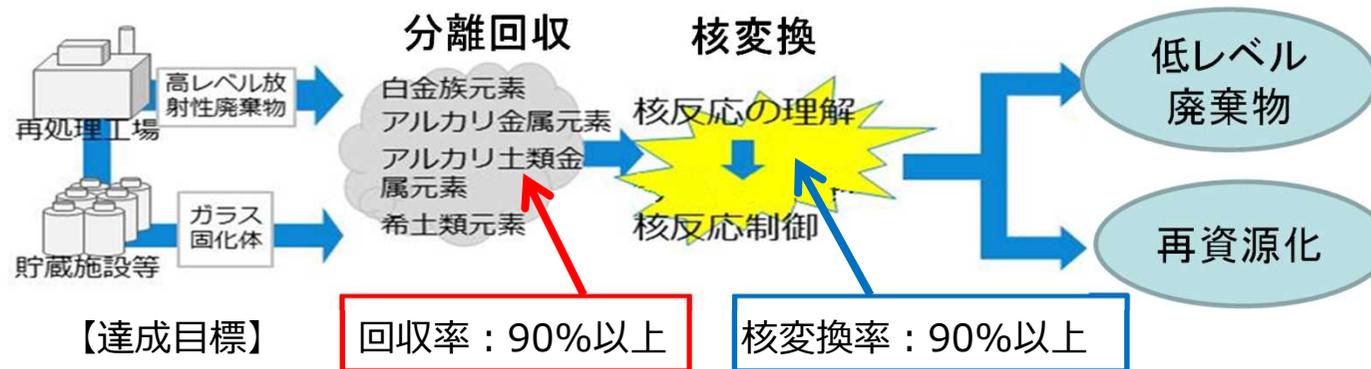


*LLFP: Long Lived Fission Products, ここでは、半減期10万年以上の放射性核分裂生成物7核種と定義する。

研究開発プログラムの出口目標

産業や社会のあり方を変革するシナリオ

- ✓ 高レベル放射性廃棄物に含まれるLLFPを分離回収し、核変換することで低レベル廃棄物化や再資源化を進め、後世代への負担を低減
- ✓ 分離回収したLLFPを白金族やレアメタル等に資源利用することで海外市場に左右されない供給源を確保する。（コストのかかる同位体分離は用いない）



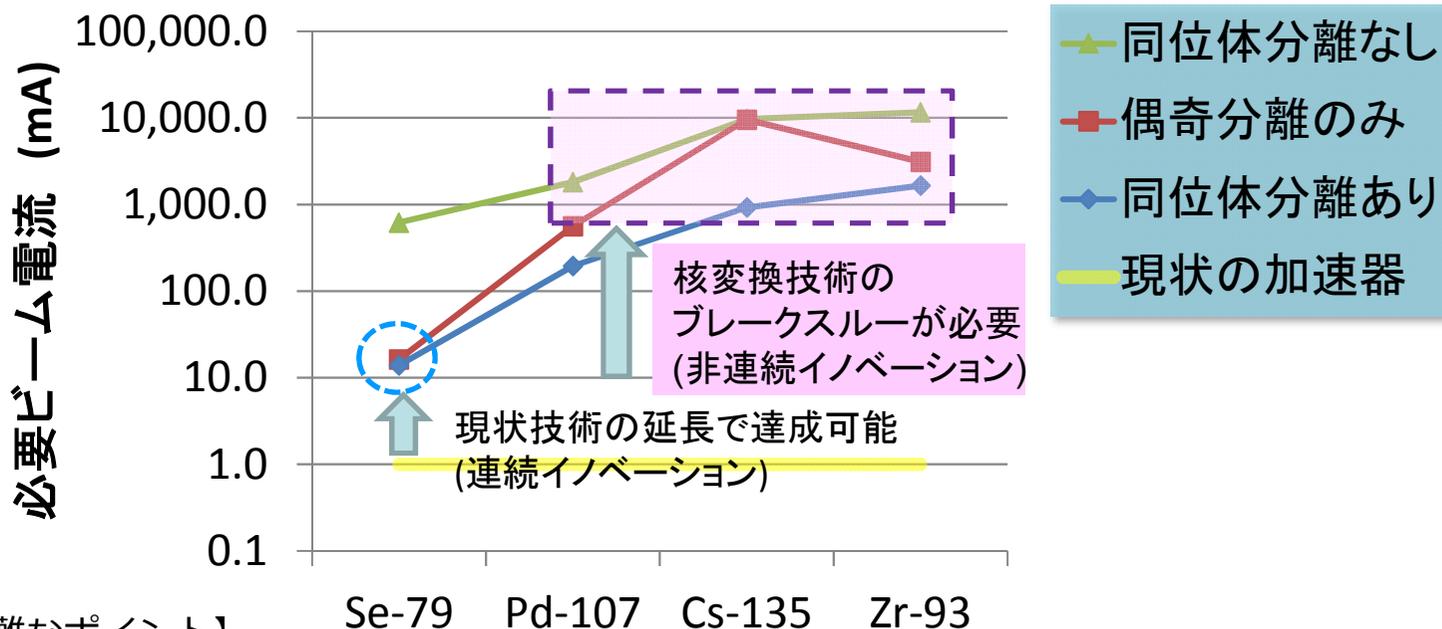
- 2019年3月末：本プログラム終了時には高レベル放射性廃棄物を大幅に低減するシナリオと有用元素を資源化するシナリオおよびそのプロセス概念を示す。
- 2019年～：提案したプロセスが成立することを実廃棄物（ホットサンプル）を用いた小規模の試験で確認する。
- 2025年～：プロセス概念のキー技術についてはパイロット試験装置を製作し、工学規模試験を実施して社会実装の課題を明確にし、その解決手段を示す。
- 2030年～：社会実装の課題を解決すると共にプラント設計および製作に入る。関連する法律の改正や世界的な基準などの整備も合わせて実施する。
- 2050年～：プラントを建設し、コールド試験、アクティブ試験（実使済み燃料を用いた）および試運転を行い、プラントの運転を開始する。



非連続イノベーション、リスクの大きさ

【ブレークスルー】

- ✓ 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 (困難度 中)
- ✓ 新たに開発する偏光レーザーによる効率的な偶数/奇数核種分離技術の実証 (困難度 中)
- ✓ 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 (困難度 小)
- ✓ 最先端の核変換技術を集大成し、実用的処理能力を持つ核変換装置概念を具体化する (困難度 大、下図参照)



【困難なポイント】

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

達成目標

達成目標（プログラム終了時の具体的アウトプット）

- 高レベル放射性廃液とガラス固化体から長半減期のLLFPを取り出し、核変換により半減期の短い核種または安定核種に変換する合理的なプロセス概念を検討する。
- 具体的には、有意な核変換に必要な線源（加速器及びターゲット）の強度を合理的なコスト及びエネルギー収支で実現できることを示す。社会実装を考慮した核変換装置、分離プロセスおよび利用スキームを一貫したプロセス概念として提案する。
- なお、研究進捗を踏まえ、当初計画から外した「核変換の難易度が高い核種のデータ取得」や「プラントを前提としたシステム開発」に段階的に展開する。

具体的達成目標の実現に向けた戦略・シナリオ

- 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、これまで測定が難しかった放射性核種の核反応データ取得が可能となった。高レベル放射性廃棄物に含まれるLLFPについて核反応断面積などの情報を得れば合理的な核変換パスが提案でき、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、世界で群を抜く最先端加速器施設であるRIビームファクトリー等を利用して、基礎核物理の手法を応用し、世界初の核反応データを取得し、これを基に工学的検討まで踏み込む。現在のところ核反応データ取得において我が国は圧倒的優位にあり、高レベル放射性廃棄物からのLLFP分離回収技術や、シミュレーション技術と組み合わせることにより、LLFPのプロセス概念を世界に先駆けて提案する。具体的には、以下の挑戦的課題について、最適な研究機関を選定、また社会実装を念頭に複数の企業の参加を得て実施する。
 - ① 最適な核反応パスの提案・確認（Pd-107、Zr-93、Cs-135、Se-79）
 - ② 取得したデータを基にしたバルク体系における核反応のシミュレーション
 - ③ 既存の処理工程へ導入可能な分離回収技術
 - ④ 同位体分離を伴わない核変換を効率的に行うための核反応を制御する新たな方法の提案
 - ⑤ これらを統合した工学的検討とプロセス概念の提案

プログラム構想・全体像の明確化

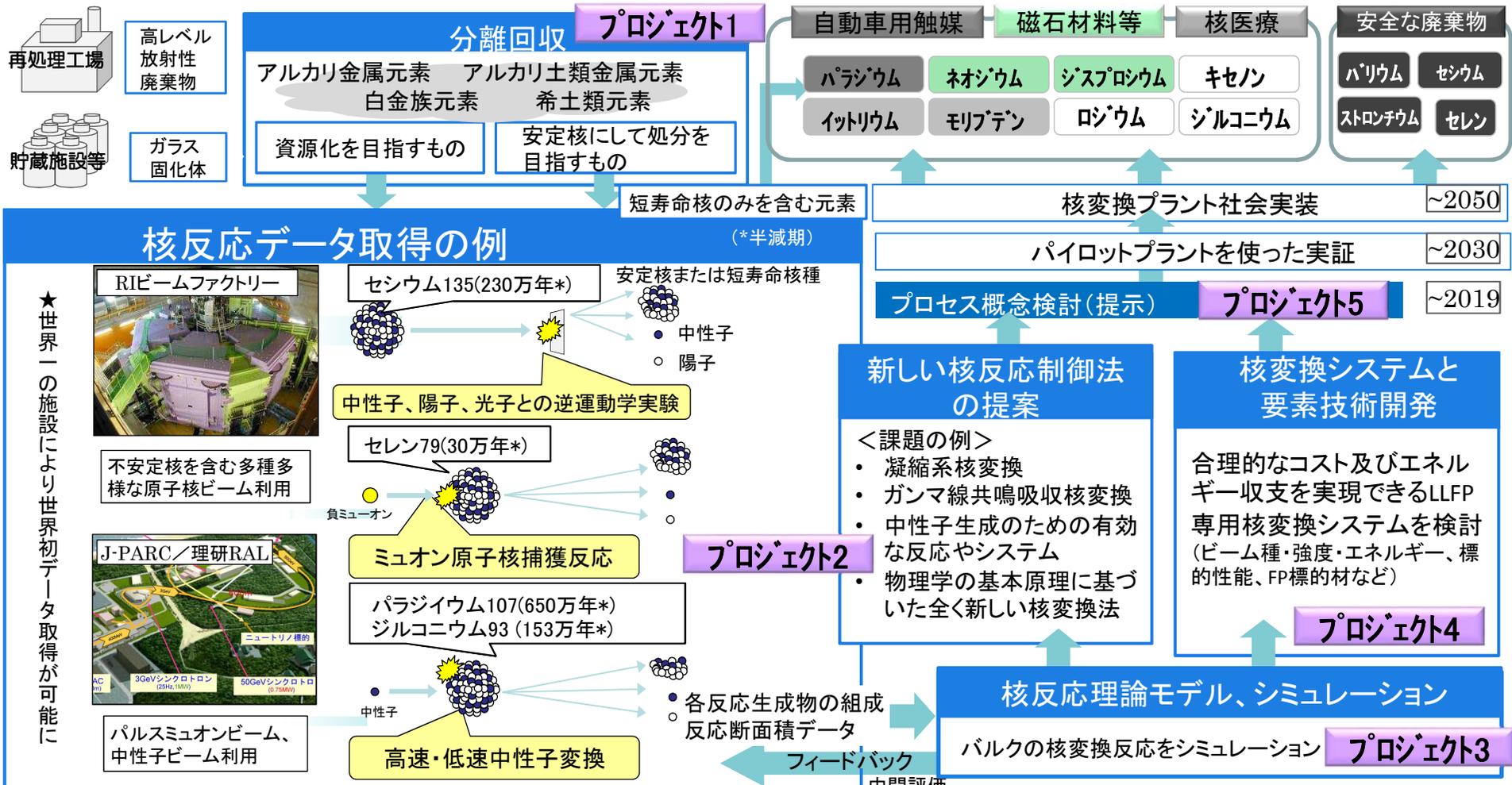
戦略・シナリオを克服すべき課題へブレークダウン

- 最適な核反応パスの提案・確認を行うため、世界最先端施設による大強度ビーム+逆反応学的手法でデータ取得を行う。
- 取得したデータを基にバルクでの核反応のシミュレーションを行うため、バルクでの核破碎の逐次効果をシミュレーションできる世界最高性能のコードを拡張する。
- 現実の処理工程への導入可能なシステムとして、世界水準のレーザー技術を用い、偶数核種と奇数核種を分離する技術を開発する。
- 同位体分離を伴わない核変換法や核反応により生じる中性子反応を制御できる方法を開発するため、超新星爆発時のr-プロセス研究から得られる計算技術を基にした核変換法など、最先端の基礎核物理学の手法・知見を活用する。
- MA核変換実験施設の開発グループ等と連携し、具体的なプロセス概念として取りまとめる。

克服すべき課題目標の達成アプローチ

- LLFPを高レベル廃棄物から回収する有望な技術を分離回収性能や二次廃棄物発生量、経済性を評価して選定し、データをプロジェクト5のプロセス概念検討に提供。（プロジェクト1: 分離回収技術開発）
- RIビームファクトリー(RIBF)を占有し中性子ノックアウト反応や高速中性子核破碎反応等による物理実験を行い、世界初の核反応データを取得。また、得られた核反応データを基に全く新しい核反応制御法の開発に挑戦する。（プロジェクト2: 核反応データ取得及び新核反応制御法）
- 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。（プロジェクト3: 反応理論モデルとシミュレーション）
- 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。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と連携を取り要素技術開発を進める。（プロジェクト4: 核変換システムと要素技術開発）
- 高レベル放射性廃液とガラス固化体から半減期の長い核種を取り出し、核変換により半減期の短い核種または安定核種に変換する合理的なプロセス概念を検討する。（プロジェクト5: プロセス概念検討）

研究開発プログラム全体構成



核反応データ取得の例

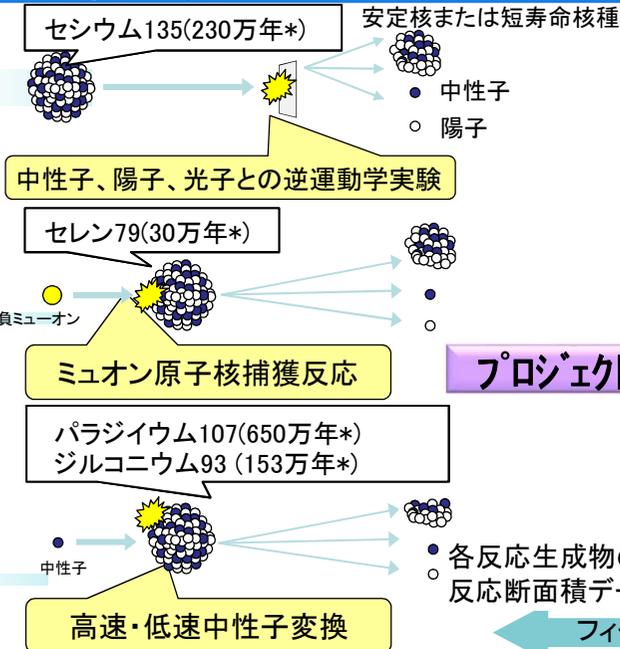
★世界一の施設により世界初データ取得が可能に



不安定核を含む多種多様な原子核ビーム利用



パルスミュオンビーム、中性子ビーム利用



新しい核反応制御法の提案

＜課題の例＞

- 凝縮系核変換 (Condensed system nuclear conversion)
- ガンマ線共鳴吸収核変換 (Gamma-ray resonance absorption nuclear conversion)
- 中性子生成のための有効な反応やシステム (Effective reactions or systems for neutron production)
- 物理学の基本原則に基づいた全く新しい核変換法 (Completely new nuclear conversion method based on basic principles of physics)

核変換システムと要素技術開発

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 (Beam type, intensity, energy, target performance, FP target materials, etc.)

各克服すべき課題の実施時期

	H26	H27	H28	H29	H30
プロジェクト1	分離回収プロセス(公募方式)			実用プロセス開発	
プロジェクト2	新核反応制御(公募方式)	核反応データ取得			
プロジェクト3	理論モデル、シミュレーション		データベース化・コード検証		
プロジェクト4	核変換システム、加速器要素技術開発				
プロジェクト5	プロセス概念検討			成果とりまとめ	

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト1-1/3)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト1:分離回収技術

- ①ガラス固化体溶解技術:
アイデアの優位性、ガラス溶解率90%以上、提案内容のエビデンス、類似研究の実績、二次廃棄物への配慮、研究計画
- ②高レベル放射性廃液からのLLFP分離回収技術:
アイデアの優位性、分離回収率90%以上、提案内容のエビデンス、類似研究の実績、経済性、二次廃棄物への配慮、研究計画
- ③偶奇分離技術:
技術の優位性、類似研究の実績、研究計画

選定に至る考え方・理由



◆ ①ガラス固化体溶解技術開発機関の選定方法: (公募)

対象元素: Pd, Cs, Zr, Seとし、溶解後のLLFP回収プロセスを考慮した、溶解率90%以上が達成できる見込みのあるプロセスを公募した。本課題についてはH26年度に公募を実施したが、全く新しい技術分野であるので、幅広い分野の研究者にも参画いただく必要があると判断した。そこで、新たなアイデア募集を行い前回よりも広範囲の研究者に参加を要請することで多様な溶解技術のフィージビリティ検討を追加することとした。これらの公募で以下の機関を選定した。

【京都大学、電中研、東芝 : 熔融塩中還元法をベースとしたガラス固化体溶解技術の開発】

- ・京都大学は、本テーマを提案した専門研究者が所属し、太陽光パネル用SiO₂の金属Siへの電解還元法に対して高い技術力とノウハウを保有している国内唯一の機関である。
- ・電中研は、溶解したガラス成分中に含まれるLLFPを回収するために有用となる金属燃料の乾式再処理技術の開発実績を有する機関である。
- ・東芝は、熔融塩中でガラス固化体の成分であるSiO₂を化学還元法により溶解する技術を開発するたに有用となる熔融塩中でのLiやCaによる還元技術の実績があり高いポテンシャルを有する機関[1-4]である。金属燃料および酸化物燃料の両乾式再処理技術に関する高い技術力とノウハウを保有している世界唯一の機関。

[1] "Development of Metallic Uranium Recovery Technology from Uranium Oxide by Li Reduction and Electrorefining", *J. Nucl. Sci. Technol.*, Supplement 3, pp917-920 (2002)

[2] "使用済み酸化物原子燃料の還元装置及びリチウム再生電解装置"
特許第4928917号 (2006)

[3] "使用済み酸化物燃料の還元装置およびその還元方法"
特許第3763980号 (2006)

[4] "ガラス固化体の分解方法"
特許出願番号2014-223555 (2014)

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト1-2/3)

【福井大学: アルカリ融解法によるガラス固化体溶解技術の開発】

当該機関は、本テーマを提案した専門研究者の所属し、フッ素化剤ガス利用技術および相分離を利用した廃ガラスからの金属元素分離に対して高い技術力とノウハウを保有している国内唯一の機関である。従って、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【東京大学: ガラスの分相によるガラス固化体溶解技術のフィージビリティ検討】

当該機関は、本テーマを提案した多様なガラス製造を研究する専門研究者が所属する機関であり、当該研究を委託するのに最適な機関である。

【愛媛大学: 高温化学反応によるガラス固化体溶解技術のフィージビリティ検討】

当該機関は、本テーマを提案したリン酸ガラスの専門研究者が所属する機関であり、当該研究を委託するのに最適な機関である。

【同志社大学: 高温電気化学法等によるガラス固化体溶解技術のフィージビリティ検討】

当該機関は、本テーマを提案した熔融塩処理の専門研究者が所属する機関であり、当該研究を委託するのに最適な機関である。

【東京工業大学: 熔融塩抽出法を利用したガラス固化体溶解技術のフィージビリティ検討(1)】

当該機関は、本テーマを提案した多様な化学処理の専門研究者の属する機関であり、当該研究を委託するのに最適な機関である。

【京都大学: 熔融塩抽出法を利用したガラス固化体溶解技術のフィージビリティ検討(2)】

当該機関は、本テーマを提案した熔融塩処理の専門研究者が所属する機関であり、当該研究を委託するのに最適な機関で合理性がある。

【東京工業大学: イオン交換抽出法によるガラス固化体からの元素分離技術のフィージビリティ検討】

当該機関は、本テーマを提案したガラス中のイオン移動の専門研究者が所属する機関であり、当該研究を委託するのに最適な機関である。

【IHI: 酸浸出法および加圧溶解法とアルカリ溶解法によるガラス固化体の溶解技術のフィージビリティ検討】

当該機関は、本テーマを提案した専門研究者が所属する放射性廃棄物のガラス固化技術を保有する唯一のメーカーであり、当該研究を委託する最適な機関である。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト1-3/3)

◆ ②高レベル放射性廃液からのLLFP回収技術開発機関の選定方法:(公募)

対象元素: Pd, Cs, Zr, Seとし、分離回収後の金属単離プロセスを考慮した分離回収率90%以上が達成できる見込みのあるプロセス提案を公募した。プログラムの当初から、本課題については広く公募により研究開発提案を求めることとしていた。これまで検討されたが開発が進んでいない提案やアイデア段階の提案も含め、平成28年度末に中間評価を行う。約3年間の実現性検討の後、評価を経て、本格的な取組を進める以下の機関を選定した。

【日立 フッ化物揮発法をベースとしたLLFP分離回収技術の開発】

当該機関は、本テーマを提案し、使用済み燃料をフッ化物揮発法により処理する技術に関する高いポテンシャルと有している。従って、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【東芝:電解と溶媒抽出の組合せ法によるLLFP分離回収技術の開発】

当該機関は、本テーマを提案し、高レベル廃液からのマイナーアクチニド、白金族の回収やウラン鉱山のウラン抽出残液からのレアメタル回収に対して高い技術力とノウハウを保有している国内唯一の機関である。従って、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【慶応大学:イオン液体法をベースとしたLLFP分離技術の開発】

当該機関は、本テーマを提案した専門研究者が所属し、イオン液体の電気化学に関する高いポテンシャルと有している。従って、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【長岡技術大学:イオン交換法をベースとしたLLFP分離技術の開発】

当該機関は、本テーマを提案した専門研究者が所属し、イオン交換樹脂法による使用済み燃料の再処理技術や高レベル廃液からFPを回収する技術に関する高いポテンシャルと有している。従って、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【東芝、JAEA:電解と溶媒抽出の組合せ法によるLLFP分離回収技術の開発】

・東芝は、高レベル廃液からマイナーアクチニド、白金族の回収やウラン鉱山の抽出残液から白金族元素やレアメタル回[1]収に高い技術力とノウハウを保有している国内唯一の機関。Pd電解回収技術、Cs吸着技術、Zr回収技術を保有。経済性が高く、実用化の可能性が期待できる。

[1] "Advanced orient cycle-progress on fission product separation and utilization", *proc. ICM2010*, 40053, 2010

・JAEAは、高レベル廃液からのマイナーアクチニド、白金族の溶媒抽出で実廃液による開発実績[1]が豊富な国内唯一の機関である。

[1] "Cumulative study on solvent extraction of elements by *N,N,N,N*-tetraoctyl-3-oxapentanediamide (TODGA) from nitric acid into *n*-dodecane", *Analytica Chimica Acta*, 527(2), pp163-168

◆ ③偶奇分離技術開発機関の選定方法:(指定)

【理研:偏向レーザーを利用した偶奇分離技術の開発】

JAEAにも偶奇分離技術のポテンシャルがあるが、理研の光量子研究領域はパラジウムを対象とした偶奇分離を可能とする大強度固体レーザーを設計・製作できる唯一の機関である。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト2-1/4)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト2: 核反応データ取得及び新核反応制御法

- ①核反応データ取得; プログラムの基礎となるデータの取得
→世界初のLLFPデータ取得のための施設・設備を有するか
→LLFP以外の核反応データ取得に十分な実績があるか
- ②新しい核反応制御法; 斬新な核反応制御のアイデア(H27年度フイージビリティ検討の公募)
→技術的課題と克服の可能性を明確に示しているか

選定に至る考え方・理由



◆ ①核反応データ取得機関の選定方法: (指定)

【理研: RIビームファクトリーを利用した中性子ノックアウト反応実験】

RIビームファクトリー(RIBF)はそのRI生成能力が世界一の施設であり、ここ数年で多くの新同位元素を発見するなどその実力は世界的に証明されている[1]。核反応データを取得するためにはLLFPを秒あたり1000個以上生成する必要があり、この能力を有するのは世界で本施設のみであって、他に同等の能力を有する施設は現在のところ存在しない。2007年にRIBFが始動した後、RIビーム生成技術およびRIビームを利用した核物理実験において豊富な経験と実績があり、多くの研究成果を生み出している[2]。本プログラムではRIビーム利用の実績を活かし、LLFPビームの生成とその実験プログラム全般を主導する。

また、イギリスのRAL研究所に理研-RALミュオン施設[3]を擁し、大強度ミュオンビームを利用した触媒核融合の研究[4]や物質材料研究[5]などで研究成果をあげており、ミュオン実験に関する豊富な経験と実績がある。本プログラムではこの経験と実績、およびRIBFでのガンマ核分光技術を活かして、ミュオン捕獲後の核生成物に関連した系統的なデータを取得する。他にミュオン実験で同等の経験がある機関はない。

[1] http://www.rarf.riken.go.jp/nuclides/new_isotope.html, Journal of the Physical Society of Japan 79 (2010) 073201

[2] <http://www.rarf.riken.go.jp/news/index.html>, Nature, 2013.doi:10.1038/nature12522

[3] <http://nectar.nd.rl.ac.uk/ja.html>

[4] Physics Letters B 632 (2006) 192-196

[5] Nature 471, 612-616 (2011)

【JAEA: J-PARC中性子ビームラインANNRIを利用した核データ取得】

JAEA・核データ研究グループが運営するJ-PARCの中性子ビームラインANNRI[1]は、世界最高の中性子強度を誇り、飛行時間法をもちいた中性子捕獲断面積測定において豊富な経験と実績[2]がある。本プログラムではこの強力なビームラインを活かして、LLFPの中性子捕獲断面積の測定を行う。欧州では、欧州原子核研究機構(CERN)において、核破碎反応によるパルス中性子源(ビーム出力4.5 kW)を用い、中性子飛行時間測定(TOF)法を適用した核データ測定プロジェクトが進捗しており、放射性核種Sm-151(半減期97年)の中性子捕獲断面積の測定が可能となった。米国においても、ロスアラモス国立研究所において核破碎反応による大強度パルス中性子源(ビーム出力80 kW)を用い、TOF法を適用した核データ測定研究が実施され、2008年にはNp-237及びAm-241の中性子捕獲断面積が論文発表されている。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト2-2/4)

J-PARCのANNRIでは、世界最高強度の核破砕反応によるパルス中性子源(現在ビーム出力300 kW)[3]を用い、高い比放射能を有するCm-244(半減期18年)の中性子捕獲断面積の測定に成功し、高い比放射能を有する核種に対する中性子捕獲断面積測定で世界を凌駕している。[4]

[1] http://www.wndc.jaea.go.jp/Labo/ANNRI_JP.html#index1

[2] JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY 50 1880200 (2013)

[3] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 626-627 (2011) 58-66

[4] Journal of Nuclear Science and Technology, 49, No. 7, July (2012) pp. 708-724

【東京大学:RIビームファクトリーを利用した低速LLFPビーム開発・実験】

東京大学・原子核科学研究センター(CNS)は理研・RIBFで東大固有の設備および測定装置を有しており、これらを有効に活用することで低速LLFPビームの開発および実験を実現する。CNSは高運動量分解能磁気分析装置などの設備設計と製作などで十分な実績があり[1]、本プログラムでは低速LLFPビームを実現するための設備を新規に導入し、低速ビームを利用した実験を主導する。他に低速LLFPビームの研究を実施している機関はない。

[1] Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 317 (2013) 305-310

【九州大学:RIビームファクトリーを利用した核破砕反応実験】

九州大学総合理工学府では医療、宇宙利用などに必要な核データを国内外の加速器施設を利用して取得しており、その実績は豊富である。特に、破砕反応、中性子放出反応で多くのすぐれた実績がある[1]。本プログラムではLLFPが破砕された際に放出される中性子エネルギー分布や角度分布を測定と理論モデルの改良などを主導する。他に高速の中性子で核破砕反応実験を実施している機関には大阪大学があるが、中性子エネルギー分布や角度分布測定と理論モデルの改良を合わせて実施できるのは九州大学のみである。

[1] Progress in Nuclear Science and Technology, 4, 569-573, 2014

【東京工業大学:RIビームファクトリーを利用したクーロン分解反応実験】

東京工業大学理工学研究科ではRIビームファクトリーを利用したクーロン分解実験を行い、中性子過剰な原子核のハロー構造や電氣的応答、宇宙天体核反応への応用などで多くの実績をもっている[1]。本プログラムではこれまでの実績を活かし、逆運動学でのクーロン分解反応による中性子捕獲断面積測定などを主導する。クーロン分解反応理論は九州大学が優れているが、逆運動学でのクーロン分解反応モデルを熟知し中性子捕獲断面積測定で最も進んでいるのは東京工業大学である。

◆ ②新しい核反応制御法開発機関の選定方法:(H27年度公募でフィージビリティ検討を実施)

プログラムの当初から、本課題については広く公募により研究開発提案を求めるとしていた。これまで検討されたが開発が進んでいない提案やアイデア段階の提案も含め、約1年のフィージビリティ検討の後、評価を経て、本格的な取組を進める以下の機関を選定した。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト2-3/4)

【東京都市大学:原子炉における冷中性子による核変換技術の検討】

当該機関は、原子炉を用いた核変換技術の研究に長年取り組んできており、核変換特性の解析・評価に関する高いポテンシャルと有している。従って、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【大阪大学:小型加速器中性子源を使った熱中性子による核変換の検討】

当該機関は、小型加速器を活用した中性子源の開発に取り組んできており、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【東北大学:凝縮系中での超低エネルギー核反応技術の検討】

当該機関は、核物理の専門家を擁しており、放射性元素を用いた実験が可能な施設を有している。また、これまで当該研究を進めてきており、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【自然科学研究機構:核融合中性子源による核変換技術の検討】

当該機関は、わが国における核融合科学研究を先導する機関であり、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【JAEA:レーザー駆動多価重イオン加速による核種分離と核変換技術の検討】

当該機関は、世界でも他に類を見ない高強度レーザーを用いた重イオン加速技術の研究開発に取り組んできており、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【京都大学:低エネルギー負ミュオン源の検討】

当該機関は、効率的なミュオン生成に必要な革新的加速器の研究開発を先導してきており、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【大阪大学:ガンマ線計測とインプラント標的の作成】

当該機関は、わが国有数の加速器施設を有しており、長年にわたってガンマ線計測等に関する研究を行ってきた。従って、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。

【兵庫県立大学:レーザーコンプトン散乱ガンマ線による核変換技術の検討】

当該機関は、ニュースバル放射光施設でLCSガンマ線源開発及びガンマ線による核変換について研究を行ってきており、我が国において当該研究を委託するのに最適な機関である。



②新しい核反応制御法については、H27年度末にフィージビリティ検討の結果を評価し、継続テーマの絞込みを実施(次ページ参照)

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト2-4/4)

継続テーマ絞り込みに際して重要視するポイント等

プロジェクト2:新しい核反応制御方法

1. マイルストーンの達成
 - ・フィージビリティを判断するためのマイルストーンを達成しているか。
2. 提案する核反応制御法のエビデンス
 - ・アイデアの根拠となるエビデンス(実験データ等)が示されているか。
3. 核反応制御方法の優位性
 - ・実現可能性
 - ・核変換効率
 - ・設備規模と設備台数
 - ・消費エネルギー
4. イノベーションの創出につながる先駆的な成果
 - ・研究成果が期待できるか、基盤技術の向上に大きく寄与する効果があるか。
 - ・他の技術分野への波及効果の高い研究であるか。



継続テーマ絞り込みに至る考え方・理由(H27年度末)

◆評価方法:1年間フィージビリティ検討を実施し、H27年度末に成果を委員会で評価

1. 核変換処理のための高効率負ミューオン生成法の研究(京大)
継続理由: 研究実績[1,2]があり、マイルストーンの達成度が高く、提案された技術はミューオン触媒核融合や低エネルギー重陽子の利用にも適用できることが期待される。
[1]"Neutron Source with. Emittance Recovery Internal Target. (ERIT)", https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/PAC2009/talks/th4gac04_talk.pdf
[2]"Development of FFAG accelerators and their applications for intense secondary particle production", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 562 (2006) 591-595
2. 核融合中性子のLLFPの分離・核変換への応用(中部大)[1]
継続理由: 研究実績[1]があり、核融合中性子による核変換率の計算は今後の最適化が期待される上、ミューオン触媒核融合を利用したミラー磁場核融合装置の概念は斬新であり継続して妥当性を確認する必要性が高い。
[1]"Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52", J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013)
3. 加速器ベースの高強度小型冷・熱中性子源によるLLFP核種変換処理法の研究(阪大)[1,2]
継続理由: 研究実績[1,2]があり、小型サイクロトロンを多数利用するというアイデアは有望であり、サイクロトロンを含むImPACTの加速器概念検討に加えることが妥当
[1]"Geometric analysis of phase bunching in the central region of cyclotron", Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A, Vol.715, pp.126-131 (2013)
[2]"Conceptual Design of Next Generation HTS Cyclotron", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol..21, p.4100205(2013)

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト3-1/3)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト3:核反応モデルとシミュレーション

- ①理論による標準モデル
→標準モデル開発が可能な核物理における理論研究の実績
- ②構造計算による高精度化
→核構造計算に関する実績
- ③核反応データコンパイル
→核反応データコンパイルの開発実績
- ④核反応評価データベース
→核反応評価データベースを有し高度化できるか
- ⑤核反応シミュレーション
→核反応シミュレーションソフトを有し高度化できるか

選定に至る考え方・理由



◆ ①理論による標準モデル開発機関の選定方法: (指定)

【大阪大学】

大阪大学核物理研究センター理論部の緒方准教授のグループは、世界最先端の直接反応研究を展開している。特に、原子核の分解(破碎)反応を記述する連続状態離散化チャネル結合法(CDCC)は世界的にも広く知られた反応モデルであり、数多くの実験データの定量的再現に成功している[1]。当該グループでは、分解反応のみならず、粒子移行反応、非弾性散乱、ノックアウト反応などの多種多様な反応を研究してきた実績がある。他の大学としては九州大学や東北大学で理論による標準モデルの研究を実施しているが、分解反応のみならず、粒子移行反応、非弾性散乱、ノックアウト反応などの多種多様な反応を入れたモデルは作成できていない。

本プロジェクトで、測定された反応データの定量的解析を行い、その結果に基づいて、直接測定することができない(n,2n)等の反応データを予言するモデルを確立する等、核変換反応に関連するすべての反応に関して理論的なモデルを構築する上で、最適な機関として大阪大学を指名した。

[1] M. Yahiro, K. Ogata, T. Matsumoto, and K. Minomo, Prog. Teor. Exp. Phys. 2012, 01A206 (2012), and references therein.

◆ ②構造計算による高精度化開発機関の選定方法: (指定)

【筑波大学】

筑波大学の中務孝教授を中心とする原子核理論グループは、質量数の小さい領域から重いアイソトープまで、核図表全体にわたって統一的に原子核構造を計算し、光や粒子との反応を計算できる理論として、時間依存密度汎関数理論を用いた研究を推進し、この分野において、国際的に研究をリードしてきた。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト3-2/3)

最近では、正準基底を用いた実時間計算コードの開発[1,2]、線形応答計算の新しい手法の開発[3-5]、次世代スパコン「京」を用いた大規模並列計算[6,7]等、大きな成果をあげている。原子核構造を計算する研究を実施しているグループには大阪大学や京都大学があるが、質量数の小さい領域から重いアイソトープまで原子核構造を計算しているのは筑波大学のこのグループのみである。

本プロジェクトで、核反応モデルに核構造情報を付け加え核反応モデルの精度向上を加速させる最適な機関として筑波大学を指名した。

[1] S. Ebata et al., Phys. Rev. C 82 (2010) 034306.

[2] S. Ebata, et al., Phys. Rev. C 90 (2014) 024303.

[3] T. Nakatsukasa, et al., Phys. Rev. C 76 (2007) 024318.

[4] P. Avogadro and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 84 (2011) 014314.

[5] P. Avogadro and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C. 87 (2013) 014331.

[6] K. Yoshida and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 88 (2013) 034309.

[7] J. Terasaki, Phys. Rev. C 87 (2013) 024316.

◆ ③核反応データコンパイル開発機関の選定方法: (指定)

【北海道大学】

北海道大学の合川正幸教授を中心とする原子核反応データベース研究開発センター(JCPRG)は、国際原子力機関(IAEA)を中心とした国際核データセンターネットワーク(NRDC)の一員として、日本国内で得られた荷電粒子核反応及び光核反応のデータ入力を担当し、国際的な連携のもとで原子核反応データベース(EXFOR)を構築・維持・管理している[1]。また、JCPRGでは、RIBFで得られた核反応データの公開及び利用促進のため、共同研究「RIBF核反応データの高度利用研究」を実施してきており、その中で、RIBFデータのEXFORへの登録、入力時の問題点の分析と新たな形式の研究開発、データ収集範囲の拡大の検討を行ってきた[2]。

荷電粒子の原子核反応データベースを構築・維持・管理しているのはこのグループだけであり、また、RIBFデータのEXFORへの登録、入力時の問題点の分析と新たな形式の研究開発、データ収集範囲の拡大など実施できるのは北海道大学のJCPRGのみである。本プロジェクトで、逆運動学やミュオン吸収など新しい反応形態にあったデータフォーマットを検討し、国際データベースに格納する上で、RIBFデータのEXFOR入力を実施した経験を持つ国内唯一の機関であるJCPRGを最適な機関として指名する。

[1] N. Otuka et al., Nuclear Data Sheets 120 (2014) 272.

[2] K. Kato et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 43 (2010) 62;

K. Tsubakihara et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 44 (2011) 58;

N. Furutachi et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 45 (2012) 48;

N. Furutachi et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 46 (2013) 56.

◆ ④核反応評価データベース開発機関の選定方法: (指定)

【JAEA】

日本原子力研究開発機構の岩本修をリーダーとする核データ研究グループは、原子力利用のための中性子核反応の評価済データベースを主体的に開発してきた国内唯一の組織であり、当該組織で開発された評価済核データライブラリーJENDL[1,2]は、原子力の開発・研究等へ広く利用されている。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト3-3/3)

本プロジェクトで、核反応モデルおよび核データの評価を行い、標準的な評価済み核反応データベースを作成する上で最適な機関として、JAEAを指名する。

[1] K. Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol. 48 (2011) 1-30.

[2] K. Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol. 39 (2002) 1125.

◆ ⑤核反応シミュレーション開発機関の選定方法: (指定)

【RIST】

高度情報科学技術研究機構(RIST)の仁井田浩二を中心とするグループは、巨視的体系中での粒子・原子核の輸送をシミュレーションする輸送コードPHITSの開発[1]に当初から携わり、またPHITSのなかで重要な核反応モデルQMDを開発[2]した実績がある。

現在PHITSコードはこの分野で世界の5大コードのひとつに数えられ、国内外1000名を超えるユーザーを有し、宇宙、医療、工学、理学と広い分野で使われている。

RISTは現在もPHITSの開発の中心的役割を担い、多くの実績をあげている[3]。RISTの他にPHITSを開発中の機関としてはJAEAや九州大学があるが、核反応評価データベースを利用し、また物質相の条件も新たに付け加えるなど、シミュレーションソフトの高度化を行うことができるのはRISTのみである。本プロジェクトの最適な機関としてRISTを指名する。

[1] K. Niita, et al., Radiat. Meas. 41, (2006) 1080.

[2] K. Niita, et al., Phys. Rev. C52 (1995) 2620.

[3] T. Sato, et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50 (2013) 913.

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト4)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト4:核変換システム評価と要素技術開発

核反応データとその解析結果に基づき、加速器を用いた核変換システムの開発を前提に、その要素技術としてのビーム種、強度、エネルギー、標的性能、FP標的材などの開発が行える実績と展望を有するか

選定に至る考え方・理由



◆ 核変換システム評価と要素技術開発機関の選定方法: (指定)

【理研】

理研は、RIビームファクトリーにおいて、世界最高性能の加速器、分離生成装置、大強度ビーム、大強度ビームに耐えうる標的の開発等の実績を有する。

RIBFの加速器群は、強力なビームを生成するイオン源 (Review of Scientific Instruments, 85, 02A935, 2014、他)、イオン源から生成したイオンを加速収束するRFQ[1]、低速ビームを加速する線形加速器[2]、多価イオンを生成するためのガスストリッパ装置[3]、さらにビームを加速するためのサイクロトロン型円形加速器[4] などから構成されており、これらの構成要素はすべて理研オリジナルの技術で設計・製作・運転・高度化され、加速器コミュニティから多くの賞を受賞している。多くの加速器要素を有機的に連動させ、ビームを効率よく輸送する技術も理研オリジナルである[5]。

2007年の本格稼働後、RIBFでは重陽子からウランに至る多種多様なビームを大強度で加速しており、その強度は世界最高である。大強度重イオンビームに耐えるRIビーム生成用の標的[6] やビームダンプ[7] では、熱密度の非常に高い条件下での熱除去法に様々な工夫が施されている。

以上のように理研には要素開発から有機的運転に至る大強度加速器全般にわたり豊富な開発経験と実績がある。本プログラムでは、加速器を利用した核変換システムの要素技術の選定とその開発を行うことを目的としており、理研は挑戦的な技術課題に対する開発能力がある。イオンビームを加速する加速器施設として、国内には J-PARC や 阪大 RCNP があるが、連続 (CW) ビームを加速する技術を有している点および多種類の重イオンを加速する技術を有している点で理研が優位であり、逆に他施設で要素技術開発から有機的運転に至る大強度加速器全般にわたる研究を実施することは難しい。また、KEK や 原研、東工大などと協力してネットワークを構築し、開発研究を効率よく勧め、本プログラムを主導する。

[1] Review of Scientific Instruments, 70, 4523, 1999、他

[2] NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A, 722, 55-64, 2013、他

[3] JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY, 299, 941-944, 2014、他

[4] IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 17, 1063, 2007、他

[5] (PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS, 1, 03C002, 2012、他

[6] NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A, 590, 204-212, 2008、他

[7] NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B, 317, 373-380, 2013、他

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方(プロジェクト5)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト5:プロセス概念検討

H26-27: プロセス概念の初期検討を実施するために必要な知見・経験を有するか

H28以降: プロセス概念の本格検討を実施するために必要な実績を有するか

選定に至る考え方・理由



◆ ① プロセス基礎概念検討機関の選定方法: (指定)

【JAEA 辻本PL】

JAEAは、J-PARCにおいてマイナーアクチノイドの核変換実験施設設計画を有するとともに、核変換プロセス全般を通じて、検討・設計・開発の実績[1]を有するため、全期間を通して本プロジェクトを統括する。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発[2]に関する深い知見を有する。

[1]「原研における長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方」 JAERI-Review 2005-043

[2]「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次とりまとめ-」 JNC TN1400 00-020

【京都大学】

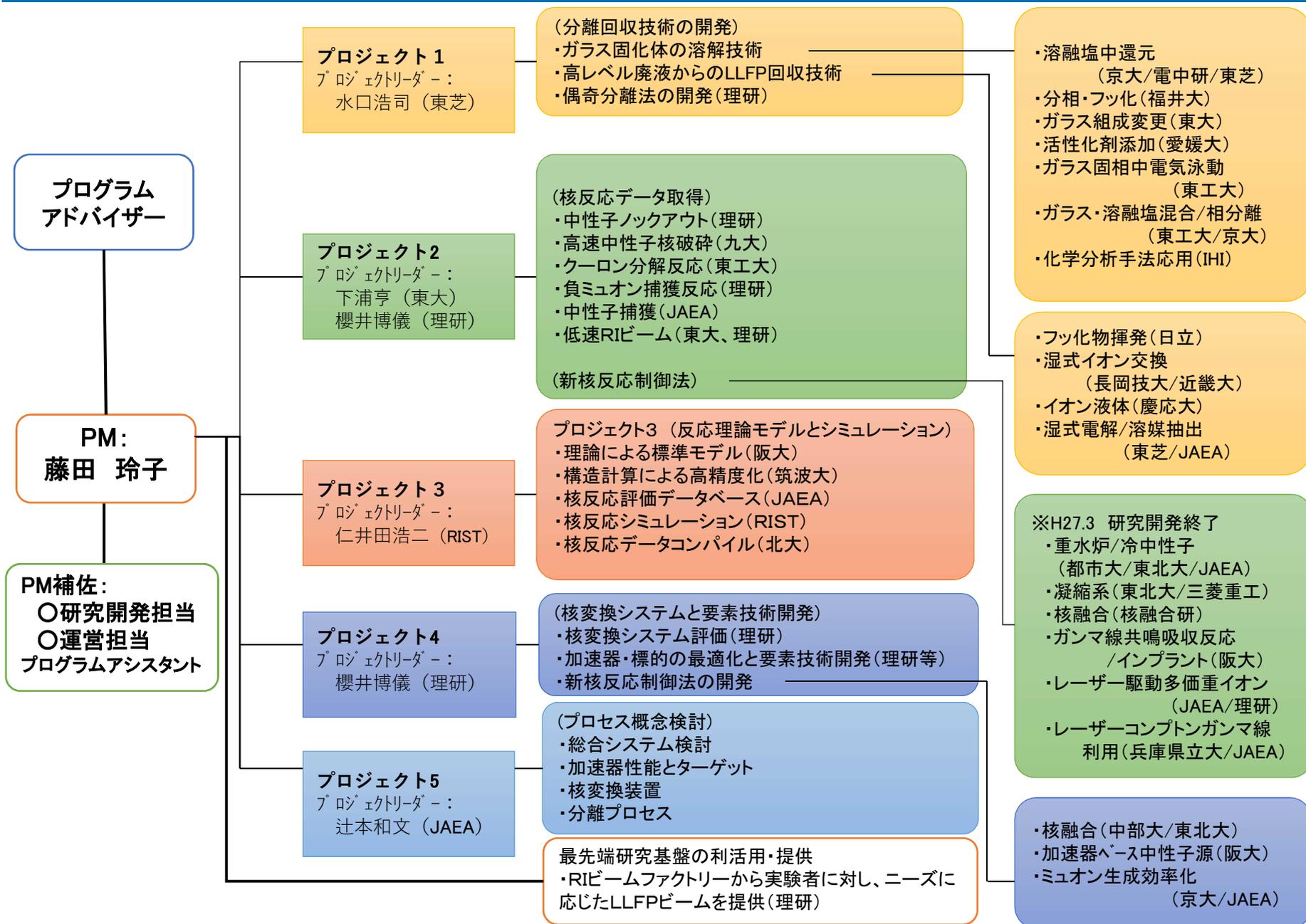
高レベル放射性廃液やガラス固化体に含まれる長寿命核分裂生成物である白金族核種やレアメタル核種を核変換し、これを資源利用して行くことは、従来、埋設以外に処理の方法が無かった高レベル放射性廃棄物の処理処分に大きな変革をもたらすものであり、これを資源利用して行くことができれば、循環型社会の形成や資源の少ない我が国の産業発展に大きく貢献するものである。その様な観点から、本プロジェクトでは、白金族核種は核変換して自動車用触媒などに、希土類元素なども核変換によりレアメタルとして再利用して行くことを開発の目標としている。このため、一般の放射性核種に対して同様の検討実績が豊富な京都大学原子炉実験所の関連する研究者によりチームを編成し、研究開発項目を相互に関連付けながら検討を実施することで、長寿命核分裂核種の資源利用の観点からプロセス性能目標の検討に反映する必要がある。

◆ ② プロセス概念検討機関の選定方法: (公募予定)

→H26-27(初期検討): 幅広い企業の知見・経験を活かすため、これまでの実績を考慮した複数社を選定中(加速器:三菱重工、三菱電機、日立、住友重機、液体金属ターゲット:三菱重工、FP利用スキーム:東芝)

→H28以降(本格検討): 基本的に公募。初期検討から絞り込んだ概念について、将来的な社会実装を念頭に、実績を有するかを基準として、公募する予定。

研究開発プログラム全体の体制図



研究開発プログラム予算の想定

