長寿命核分裂生成物（LLFP）の核変換技術の現状と展望

中村　豊

2023 年（令和 5 年）度の NUMO 学習支援事業により東海第二発電所・JAEA 核燃料サイクル工学研究所を見学してきた。今回は残念ながら見学できなかったが、核変換実験施設（J-PARC）で研究されている原発の使用済み核燃料に含まれる長寿命核生成物の核変換技術の研究について核燃料サイクルに関連する研究なので報告する。

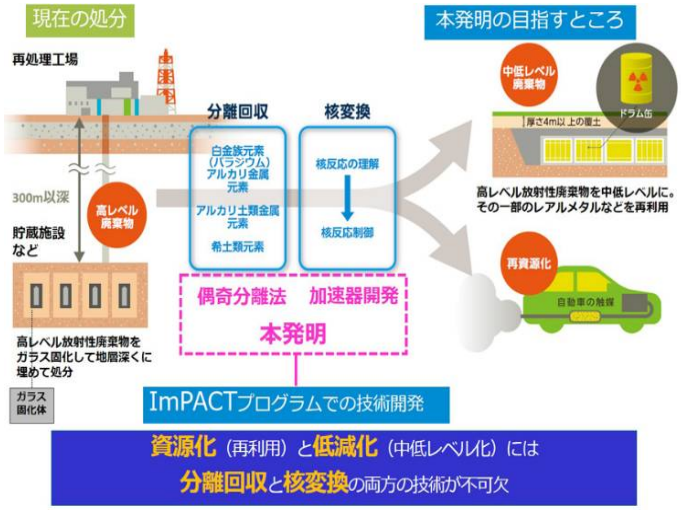
J-PARC の研究施設と核変換技術

J-PARC は核変換実験施設（TEF:Transmutation Experimental Facility）において加速器駆動システム（ADS：Accelerator-driven System)による核変換技術に関する基礎的な研究を進めてきた。TEF は、ADS 独自の構成要素である核破砕ターゲットや陽子ビームの導入部（ビーム窓など）に関するシステム技術の確立を目指す「ADS ターゲット試験施設（TEF-T）」及び、エネルギー発生やそれに伴う放射性物質の生成量を極力抑制し、実験者が容易に実験可能な小型の原子炉（臨界集合体）を用いて核変換技術の成立性に係る物理的特性や ADS の運転・制御に関する研究・開発を行う「核変換物理実験施設（TEF-P）」の二つの施設で構成されている。

核変換技術の発明

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には半減期の長い核分裂生成物（LLFP: Long-lived Fission Products）が含まれ、長期間の深地層保管に対する不安が払しょくされず、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。

この核変換技術は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」（藤田 玲子プログラム・マネージャー）として平成 30 年度の「21 世紀発明賞」（21 世紀の社会を創造するに当たり、実施効果を挙げている、又は今後大きな実施効果を挙げると期待される発明等）を受賞した。（下図）

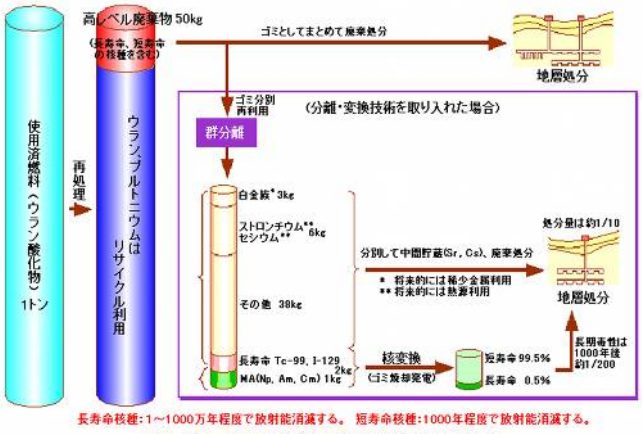


この発明は近年の加速器科学の進展により、重イオンビームなどを用いてあらゆる核反応データの取得を可能とし、高レベル放射性廃棄物に含まれる LLFP を分離回収し、短寿命核種もしくは安定核種に核変換するために必要な技術を確立する。この技術により高レベル放射性廃棄物を大幅に低減し、微量残存する廃棄物は低レベル放射性廃棄物として扱えるようにするシステムを開発する。さらに核変換により資源化を目指すものである。これにより、高レベル放射性廃棄物の隔離期間が短縮され、高レベル放射性廃棄物の処分場が不要となり、その処分を次世代に委ねない社会が実現できる。さらに高レベル放射性廃棄物が資源化できることにより、分離回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し、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、日本の原子力平和利用と世界の核不拡散にも貢献するとしている。

核変換技術による効果

①　高レベル放射性廃棄物の低減化

下図、表に示すように、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、核変換すれば放射能は 1000 年程度で大幅な低減ができる。



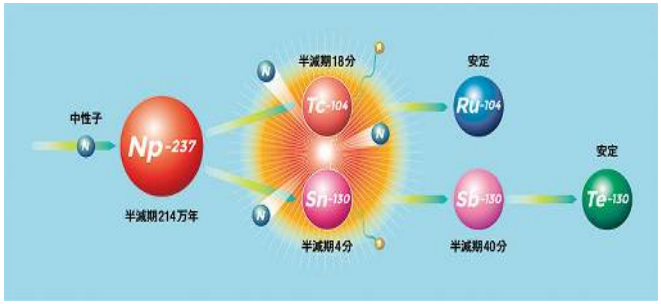
長寿命核種：1～1000万年程度で放射能消滅する。 短寿命核種：1000年程度で放射能消滅する。

図1　高レベル廃棄物の分離核変換技術とは

[出典]高野 秀機：加速器駆動炉核変換における核データ、連載講座 核データ③ 核データの測定と応用、日本原子力学会誌、Vol.43、No.7、p.659(2001).

LLFP 核種	半減期（年）A	核変換後の実効半減期（年）B	比　B/A
^{79}Se	33 万年	6.3	1/52,000
^{99}Tc	21 万年	8.4	1/25,000
^{107}Pd	650 万年	8.3	1/782,000
^{129}I	1,570 万年	8.9	1/1,770,000

LLFP の核変換による短縮効果の例

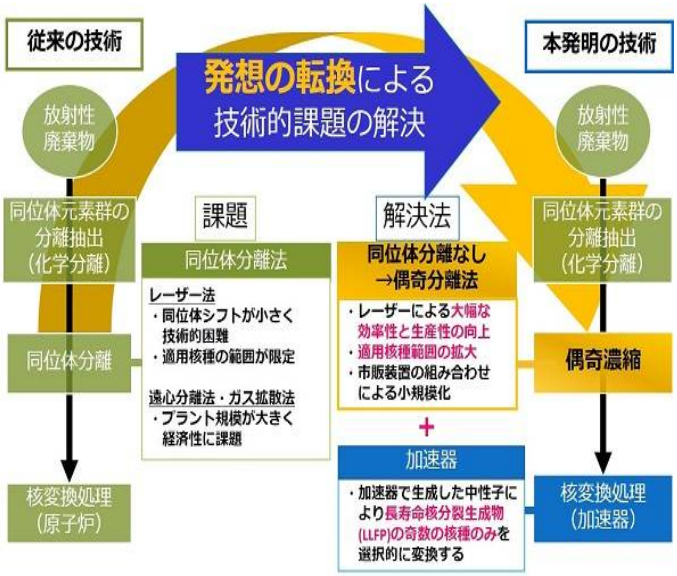


Np-237 の核変換から安定核種

② LLFP の資源化

白金族元素やレアメタルなどを資源として再利用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資源化が提言されている。

核変換技術開発の具体的な取り組み

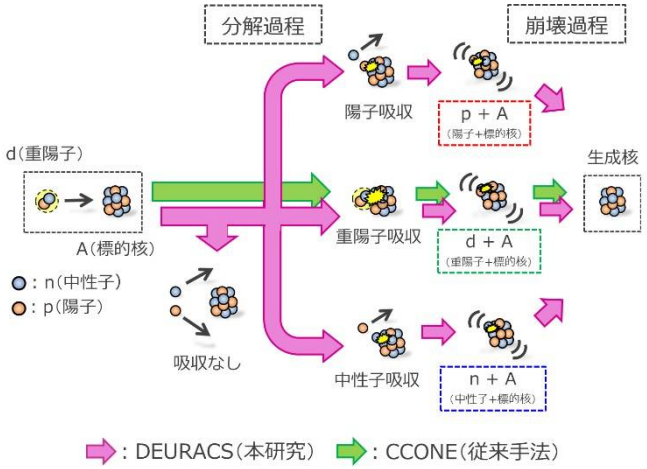


① 偶奇分離技術の開発

偶奇分離技術とは高レベル廃棄物から同位体分離を必要とせず、LLFP回収プロセスを提供し、核変換を効率化するための手段である。偏光レーザーに対する核スピンが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することを目標としている。

② 核反応データ取得

LLFP 核変換の反応では、軽水原子炉条件の熱中性子捕獲反応のみではなく、中性子に加え陽子、重陽子ビーム照射によるLLFPの核破砕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砕反応に着目して、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。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としている。



③ LLFP 専用核変換システムの開発

LLFP 専用核変換システムとして、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。上図に示すように、高エネルギー中性子（20～100MeV）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および要素技術の開発を進めるとしている。

④ J-PARC の核変換に使用する加速器の開発

J-PARC の陽子ビームは、水素ガスから陽子1個と電子2個から成る「負水素イオン」プラズマを直線型の加速器「リニアック」で加速するところから始まる。「クライストロン」装置の電場の力で加速させ、最終的な運動エネルギーは400MeV、速度にして光速の71%になる。リニアックで加速された負水素イオンは 3GeV 日本最大の陽子シンクロトロン加速器(Rapid-Cycling Synchrotron：RCS 直径約 500m、周長 1567.5m)に入射するところで、炭素の薄い膜を通過し、2 個の電子がはぎ取られ、陽子ビームになる。陽子ビームは大きな電磁石約 160 台によって、曲げられ、収束しながら、ドーナツ状のビームダクトの中を1万回以上回転する。最終的に運動エネルギーは3GeV(速度にして光速の97%)にまで達する。この高速陽子ビームを目的とする LLFP ターゲットに照射して核変換に利用する計画である。

J-PARC の加速器の開発