

ミュオン核変換による放射性廃棄物処理を目指す 高効率負ミュオン生成法



森 義治

Mori Yoshiharu

(京都大学複合原子力科学研究所)

1 はじめに

原子炉の使用済み燃料中に含まれる長寿命放射性物質の処理・処分は、原子炉によるエネルギー生成において最も重要で解決すべき課題の1つである。負ミュオンを用いる核変換では、弱い相互作用により原子核中の陽子を中性子に変換する。放射性同位体を多くつukらない比較的穏やかな核変換であることから興味を持たれている。

負ミュオンによる核変換は2段階過程を経る。第一段階はミュオン原子 (Muonic atom) 生成で、低エネルギー (～数 10 MeV/c) の負ミュオンが物質中に入ると、物質を構成する原子中の電子と置換してミュオン原子を形成する。負ミュオンは質量が約 200 倍重いことから、ミュオン原子中の軌道半径は電子のそれに比し約 1/200 と小さい。したがって、原子番号 (Z) が 30 以上の原子ではその軌道が原子核の大きさ程度となり、大きな確率 (95% 以上) で原子核中の陽子に吸収されて (弱相互作用) 中性子とニュートリノに変換する。



こうして核変換された原子核は、ミュオンの静止質量分のエネルギー (～110 MeV) が解放されるので、数個の中性子を放出すると同時に β 崩壊過程を経て安定な原子核に移行する。これが第二段階である。例えば長寿命核分裂物質のなかで、 ^{135}Cs (半減

期: 2.3 百万年) は、ウラン燃料 (^{235}U : 3% 濃縮) 1 t が原子炉で燃えた際に生成する Cs 同位体の 13% を占める。これを毎秒 10^{16} 個の負ミュオンにより核変換すると、図 1 に示すように安定な Xe 同位体 (^{131}Xe , ^{129}Xe , ^{128}Xe , ^{127}Xe) に 5 年以内にほぼ 100% 核変換される。したがって 50 年 (原子炉寿命) で原子炉一基分からの ^{135}Cs を処理するためには、毎秒 10^{17} 個の負ミュオン量があれば可能となる。

負ミュオン生成は、高エネルギー陽子/重陽子等のハドロンビームと中性子を含む標的との核子-核子反応において $N\Delta$ 共鳴 (π 生成) を通じてつくられる。効率良く反応を起こすには、1 次ビームエネルギーは 500-600 MeV/u が必要である。

このエネルギー領域での効率良い負パイオン (負ミュオン) 生成のためには、いくつかの問題がある。ひとつは、陽子あるいは重陽子の 1 次ビームが標的を通過する際に標的原子のイオン化によりエネルギーを失うことである。負パイオン生成の効率は、1 次ビームエネルギーに反比例して反応断面積が低下し、閾値エネルギー (～250 MeV/u) で 0 となる。厚い標的では 1 次ビームが標的を通過する間のエネルギー低下により生成効率は急速に減少する。また、生成された負パイオンは標的原子核に再吸収される反応断面積が大きい。したがって、標的はできるだけ薄いことが望まれるが、一方、標的が薄いと反応数が減少し、負パイオンひいては負ミュオンの生成効率が低下する。

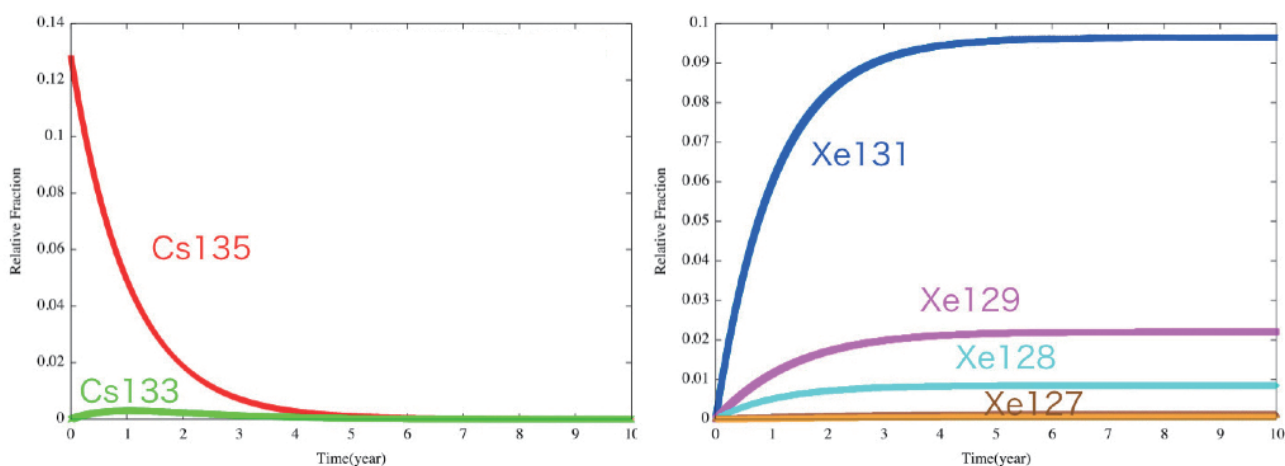


図1 ^{135}Cs のミュオン核変換

^{135}Cs は一部 ^{133}Cs をつくるが、最終的には右図に示すように安定な Xe 各同位体に変換する。負ミュオンフラックス： $10^{16} \mu/\text{sec}$ を仮定

こうした問題を原理的に解決する方法として提案されたのが、エネルギー回復内部標的 (Energy Recovery Internal Target : ERIT) である¹⁾。この方式はもともとは中性子を効率良く生成する手法として考案されたものである。低エネルギー (11 MeV) 陽子ビームを貯蔵するリング中に薄い標的 (Be) を置く。そこをビームが通過する際に中性子を発生させると同時に、標的で損失するビームエネルギーを高周波加速で周回毎に回復させる。京都大学複合原子力科学研究所において 2005 年にその原理実証がなされた²⁾。更に、高エネルギー 1 次ビームによる負パイオン (負ミュオン) 等の 2 次粒子生成一般に拡張したものが、MERIT (Multiplex Energy Recovery Internal Target) である。これは、1 次ビーム加速も同一のリング内で行うように、ビーム加速・貯蔵の両方の機能を持たせる。ImPACT 事業により、この新しい MERIT 方式の原理実証研究が現在進められており、最近ビーム加速に成功した。本稿では、大強度負ミュオン生成方式：MERIT について紹介する。

2 MERIT による負ミュオン生成

エネルギー回復内部標的 (ERIT) 法においては、1 次ビーム貯蔵リングの内部に置かれた薄い標的に何度もビームが通過することにより 2 次粒子 (中性子、パイオン等) を生成する。標的でのエネルギー損失 (イオン化) により失われたエネルギー分は高

周波電場による再加速により回復させる。標的との衝突での多重散乱 (ラザフォード散乱) 及びストレーリングによるビームサイズ・エネルギー分布の増大は、「イオン化ビーム冷却」の効果で抑えられる。

イオン化ビーム冷却では、進行方向の運動量損失を高周波加速で補うことで横方向運動量の増大を相対的に小さくし、かつ、ビーム分散効果 (エネルギー変化に応じて変わるビーム位置の効果) を利用して、標的の厚さを場所により変えることでエネルギー拡がりも低下させる手法である。

ERIT 方式は、低エネルギー陽子 ($E = 11 \text{ MeV}$) と内部標的として薄いベリリウム標的 (厚さ一定 < 数 μm) を利用した中性子発生装置として開発された。ビーム貯蔵とエネルギー回復に用いるリングは、大きなアクセプタンスを有する固定磁場強集束 (FFAG: Fixed Field Alternating Gradient) 方式である。これにより毎秒 10^{12} を超える中性子フラックスが得られることを実証した (図 2: 装置写真)。

負パイオン (負ミュオン) 生成に ERIT 方式を適用するには、更にいくつかの機能の付加が必要である。1 次ビームエネルギーが高い ($E > 500 \text{ MeV/u}$) ことから多重散乱による横方向のビームエミッタンス増大は緩やかであるのに比し、進行方向のストラグリングによるエネルギー拡がりが大きくなる。ストラグリングは主に標的中の電子との散乱から生じ、その効果はビームエネルギー増大と共に増加する。したがって、リングのビーム光学 (分散) を利用してビームエネルギー (ビーム半径方向位置) に

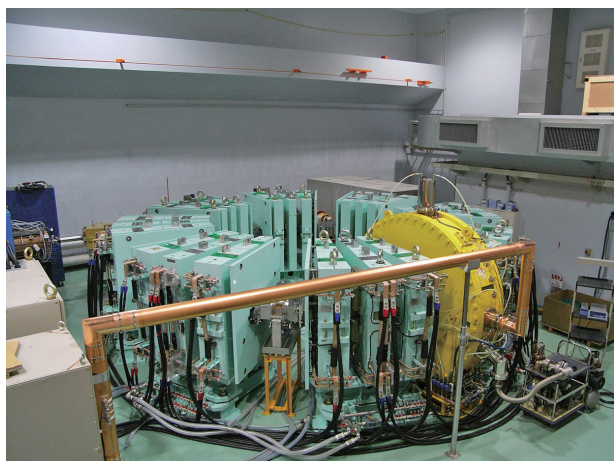


図2 中性子生成 ERIT 方式リング

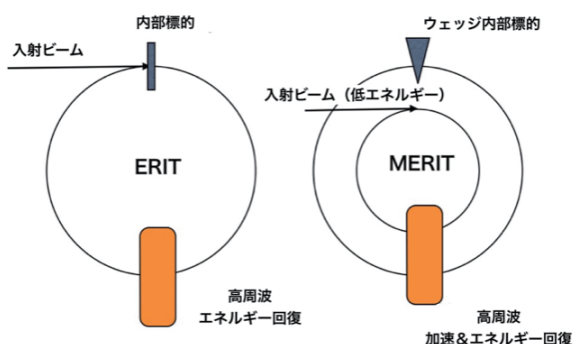


図3 ERIT 並びに MERIT 方式の比較

応じて厚さをかえるウェッジ標的を用いる必要がある。また、リングにおいて単一ビームエネルギーを回復・貯蔵するだけでなく、ビームエネルギーそのものを大きく増加できる加速機能を付与することができるならば、低い入射ビームエネルギーによる入射器コストの大幅な低減が可能となる。

負ミュオン生成のためにビーム貯蔵機能に加速機能が付与された新方式 MERIT (Multiplex Energy Recovery Internal Target) を考案した³⁾。図3に ERIT と MERIT の比較概念図を示す。

MERIT 方式を実現するには解決すべきいくつかの課題がある。ビーム加速と貯蔵の両立には、磁場が一定(静磁場)で強集束であると共に、加速のための高周波周波数も一定でなければならない。そこで、MERIT では FFAG 加速器に「蛇行加速: Serpentine Acceleration」, あるいは「一定 RF パケツ加速: Static Bucket Acceleration」法を応用することによりこれらの課題を克服した³⁾。

図4に MERIT リングの基本構成を示す。リング

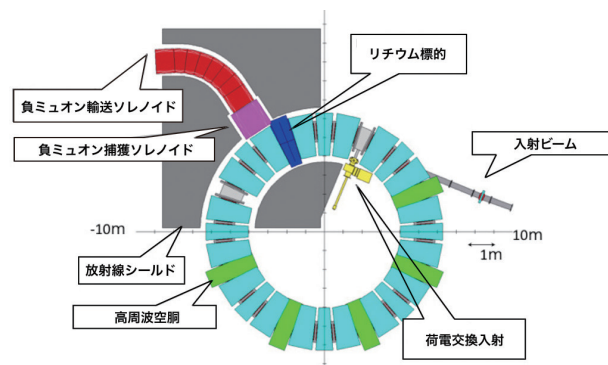


図4 MERIT リングの基本構成

は8回対称性で、1つのセルは FDF (集束-発散-集束) 3重対光学系(トリプレットラティス)からなる。リング直径は約 11 m で、最大磁場強度は約 2.4 T である。標的は液体 Li であり、ビーム半径と共に厚みが増すウェッジ型標的とする。ビームエネルギーの増加と共に標的厚も増え損失エネルギーと加速エネルギーがバランスして一定の軌道半径を保つ。イオン化ビーム冷却効果により、ビームエミッタンス増大が抑えられ、必要な負パイオン生成に十分なビーム周回数が確保される。

陽子エネルギーが 800 MeV の場合の負パイオン生成断面積は約 5 mb であるので、リング中に貯蔵される陽子数が $N_p = 1.2 \times 10^{12}$ の時、毎秒 10^{16} 個の負パイオン(負ミュオン)が生成される。この陽子ビーム数はリングへの入射陽子ビーム電流が 2 mA とするとリング中に約 600 ターン分に相当する。したがって、このターン数分のビーム貯蔵におけるビームエミッタンス増大に対して充分なアクセプタンスが必要となる。

ビーム周回に対するエミッタンス増大は、イオン化冷却効果を入れたビームシミュレーションで評価される。図5(a)には、横方向(垂直方向位相空間)のビームターンに対するエミッタンス増大を評価したものである。横方向のビームエミッタンスは、ターン数が約 400 ターン近くでほぼ一定となる。これから、横方向のアクセプタンスが 7×10^{-4} m.rad 以上であれば十分であることが分かる。基本設計でのリングの横方向アクセプタンスは、水平・垂直共に 7×10^{-2} m.rad 以上で 100 倍の余裕がある。

図5(b)には、ビーム入射から加速され約 600 ターン貯蔵されるまでの進行方向位相空間上のビーム運動を示す。横軸は、高周波位相、縦軸は全エネルギー

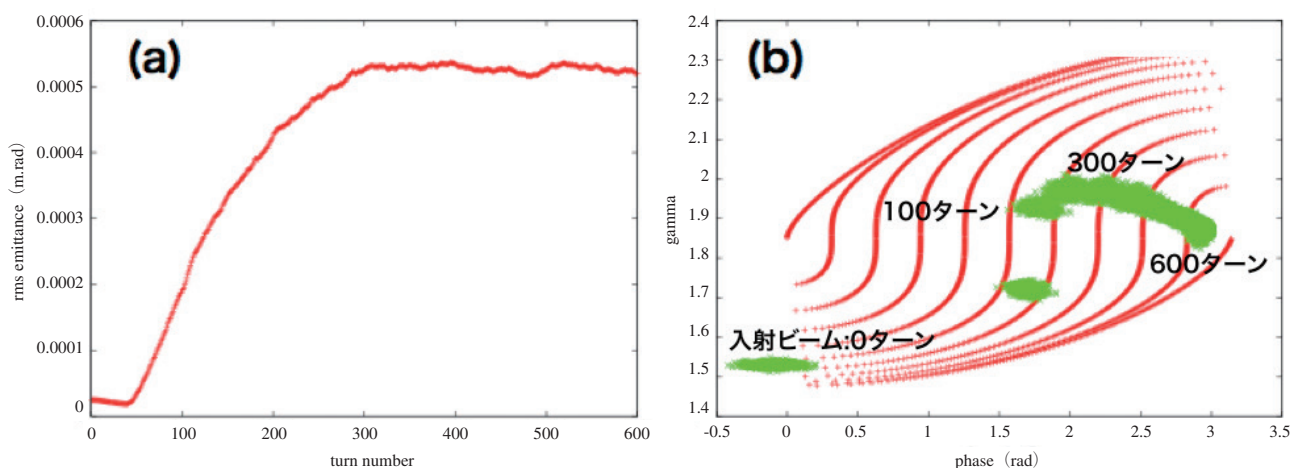


図5 MERIT リングでのビームエミッタンス増大

(相対論パラメータ: γ) を表す。図中赤線は、位相空間上の粒子運動の軌跡を表す。また、緑色はビーム粒子集団の各ターン後の分布を示す。これから分かるように、入射後ビーム粒子が加速され、約 100 ターン後には最大エネルギー (~ 800 MeV) まで達し、その後、ほぼ一定エネルギーで安定に周回する。

MERIT 方式においては、核廃棄物の核変換処理のために生成した負パイオン並びにその崩壊で生ずる負ミュオンを、長寿命放射性物質のところまでいかに効率良く輸送するかが大きな課題である。そのために、Li 標的で生成した負パイオンを、リング構成の F 磁石の磁場によりリング外に曲げて取り出す方法が考案された。

Li 標的で生成される負パイオンの運動量は、約 250 MeV/c を中心として幅広い分布を持っている。一方、リング内を周回する 1 次陽子ビームの運動量は約 1,460 MeV/c である。したがって、リングを構成する電磁石磁場によるビーム曲率は負パイオンの方が陽子に比し 5 倍程度大きく、また電荷の極性も逆であるので、F 磁石により容易にリング外に曲げ出されると期待される。

リング外に取り出された負パイオンは口径の大きな超伝導ソレノイド磁石 (直径 ~ 1 m) により、目的とする核変換処理部に捕獲・輸送する。GEANT4BL によるシミュレーションでは、おおよそ 50% の負パイオンがリング外のソレノイド電磁石に入射できることが分かった。したがって、先に述べた入射陽子ビーム電流 (2 mA) の 2 倍の 4 mA に増やすことで、必要とされる負ミュオン量を得る

ことが可能となる。

以上のように MERIT 方式を用いることで、原理的には核変換処理に必要な負ミュオンの生成量 ($>10^{16} \mu/\text{sec}$) を得ることが可能である。しかしながら、この方式の根幹であるビーム加速と貯蔵についてはこれまで実験的に示されていない。ImPACT プロジェクトではこの原理実証に向けた研究開発を進めている。最近、既設の ERIT リングを MERIT 方式に改造して、一定周波数高周波によるビーム加速についてそれが可能であることを実証した⁴⁾。更に、ウェッジ標的を用いたビーム貯蔵実証実験を現在進めている。

実機実現のためには、いくつかの技術的課題を克服する必要がある。なかでも、数 MW のビームパワーに耐える液体 Li 標的の開発は重要である。平均の厚さで約 ~ 1 cm の液体 Li を真空中で高速 (~ 10 L/sec) で循環・冷却するシステムが必要となる。また、2 次粒子として大量の発生する中性子による放射損傷・放射化の問題等、大強度加速器・標的に特有の多くの技術的問題を克服する必要がある。そこで、負パイオン (負ミュオン) の捕獲・輸送及び標的冷却の困難を原理的に克服する手法として、リング全体に充填したガス標的を用いる方法が提案されている⁵⁾。この方式の魅力的なのは、核変換処理物質をビームダクトの周りを取り囲んで配置することで効率良い処理が可能となることである。更に、標的が気体で体積が飛躍的に大きい (数 m^3) ので冷却が容易であるため、より大強度化 ($>10^{17} \mu/\text{sec}$) が可能となる。

3 まとめ

これまでに無い高強度負ミュオンを生成する新方式 MERIT (Multiplex Energy Recovery Internal Target) について、その原理と特長について述べた。この方式は、従来の固定外部標的による生成法に較べて2桁以上効率が高く、ビームパワー数 MW の陽子 / 重陽子ビームにより毎秒 10^{16} 個以上の負ミュオン生成が可能である。このレベルの負ミュオン強度が得られると、放射性廃棄物特に超長寿命核種をミュオン核変換により現実的な時間で非放射性の安定核種への変換処理が期待される。また、ミュオン触媒核融合、ミュオンコライダー等様々な研究分野への応用も期待されている。

* 本研究は、内閣府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」 (<http://www.jst.go.jp/impact/program/08.html>) により行われた。

参考文献

- 1) Y. Mori, *Nucl. Instr. Meth., PRS*, **A562**, 591-595 (2006)
- 2) Y. Mori, *et al.*, *Proc. PAC09, Vancouver*, 3145-3149 (2009)
- 3) Y. Mori, *et al.*, *JPS Conf. Proc.*, **21**, 011063 (2018)
- 4) http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/171212_1.html
- 5) Y. Mori, *et al.*, *Memoirs Eng. Kyushu Univ.*, Vol. **77**, No1 (2017)