

プログラム名：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

PM名：藤田 玲子

プロジェクト名：核反応データ取得及び新核反応制御法

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 2 7 年 度

研究開発課題名：

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- (1)

研究開発機関名：

京都大学原子炉実験所

研究開発責任者

森 義治

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

LLFPの安定化のためのミュオン核変換を用いた中性子核変換に必要な負ミュオン生成法として、ビーム加速と貯蔵が両立可能なエネルギー回復型内部標的方式を用いたミュオン生成法:MERIT(Meson production Energy Recovery Internal Target)リングを開発する。目標とするLLFP4核種(Pd-107, Cs-135, Se-79, Zr-93)をミュオン核変換により処理するための負ミュオン源として必要な性能は、以下のとおりである。

負ミュオンエネルギー(運動量)	~200MeV/c
負ミュオン生成コスト	4-7GeV(Zr, Pd, Cs : Seは~500GeV)
負ミュオン強度	>1x10 ¹⁶ μ/sec

エネルギー回復型内部標的方式自体は、本研究代表者が低エネルギー中性子を高効率で発生させる手法として世界で始めて考案した方式であるが、負ミュオン生成のためには1次ビームの加速/貯蔵両立によるエネルギー回復が可能となる必要がある。本研究では、MERIT法による高効率・大強度の負ミュオン生成法と有効性について、そのフィジビリティならびにその最適化について研究し、それらに基づきMERITミュオン生成方式の根幹技術である1次ビームの加速ならびに貯蔵の両立について、その基本原理実証を行う。MERITリングにおけるビーム加速/貯蔵両立を実現するには、零色収差と等時性を満たすビーム光学・力学設計が必須である。平成27年度の研究開発課題の目標として以下の各項目を設定した。

- (1) MERITリングのビーム光学・力学設計(27年4月~27年9月)
- (2) 生成パイオン/ミュオンの捕獲・輸送/核変換の最適化(27年8月~27年12月)
- (3) MERITリング要素開発:電磁石3次元磁場設計及びモデル磁石による磁場測定及び加速・貯蔵用高周波空洞電磁場解析(27年6月~27年12月)

研究開発研究は以下に述べる研究計画に基づき遂行された。

(1) MERITリングのビーム光学・力学設計

LLFP核変換処理のための負ミュオン源としてのMERITリングの基本設計のために、線型モデルによるビーム光学パラメータの評価ならびに3次元ビームシミュレーションによるアクセプタンス評価を行い、負ミュオン源としてのMERITリングの性能を満たすことを確認する。

(2) 生成パイオン/ミュオンの捕獲・輸送/核変換の最適化

生成パイオン/ミュオンの捕獲輸送については、捕獲・輸送方式の検討と捕獲・輸送効率の評価を行い、システムとして要求される負ミュオン生成エネルギーコストの実現性を評価する。核変換の最適化においては、加速器構造材のミュオン核変換における最適化のための発生中性子評価を行う。

(3) MERITリング要素開発

MERITリングの構成要素として、電磁石及び超伝導高周波加速空洞の設計/開発をおこなう。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

MERITリングのビーム光学・力学設計については、線型モデルによるビーム光学パラメータの決定、それに基づく3次元ビームシミュレーションによるアクセプタンス評価を行った。具体的には、ビーム加速・貯蔵を両立させるための蛇行加速(slippage factor~0を加速範囲に含む)を実現する幾何学的磁気係数の決定、

線型近似モデルを用いて、横（水平・垂直）方向について十分なビーム安定性を有する強集束線型ラティス（F/D磁石配位）構造の評価、リング半径、F/D磁石の最大磁場強度評価、ベータトロンチューンの選択とビームパラメーター（ベータ関数、分散）の決定、進行方向（位相・エネルギー位相空間）ハミルトニアンとセパトリックス導出による蛇行ビーム加速の評価を行った。得られた基本ビームパラメーター、磁場強度、進行方向セパトリックスをそれぞれ、表2-1.1、図2-1.1、図2-1.2に示す。

Ring configuration	H_FFAG
Energy range	500MeV-800MeV
Magnetic rigidity	3.633 -4.877Tm
Lattice	FDF
Average radius	5.044-5.5m
Magnetic field(F)	1.96-2.41T
Magnetic field(D)	1.71-2.11T
Number of cell	8
Packing factor	0.7
Magnet opening angles	
Focusing	0.2032
Defocusing	0.1432
gap	0.01732
Geometrical field index	2.4
F/D ratio	1.1
k	2.4
Qh	0.2188
Qv	0.1797
pf	2.0233m(2.411T)
pd	2.3157m(2.106T)

表 2-1.1 パラメーター

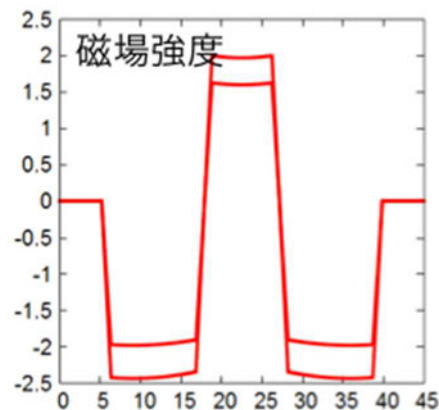


図 2-1.1 磁場強度

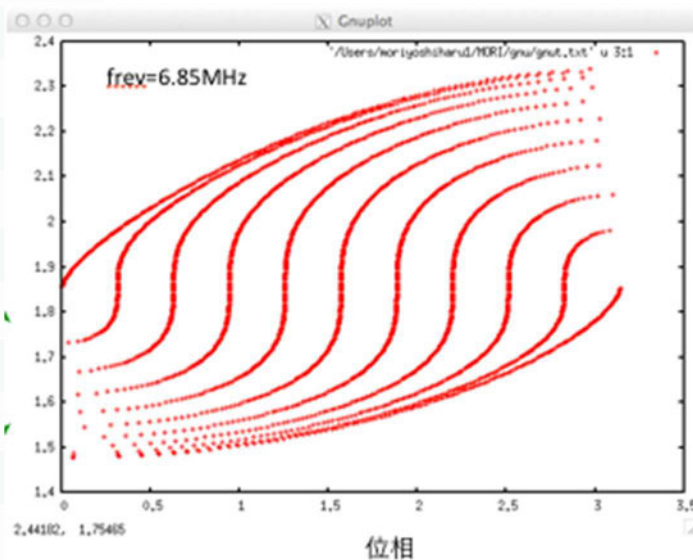


図 2-1.2 進行方向セパトリックス

3次元ビームシミュレーションによるアクセプタンス評価では、横方向ビームエミッタンス増大効果（ラザフォード散乱、イオン化冷却効果）とアクセプタンス評価、縦方向（ビーム進行方向）ビームエミッタンス増大効果（電子散乱・ストラグリッド、イオン化冷却効果）とアクセプタンス評価及び3次元全方向ビームトラッキングシミュレーションによるアクセプタンス評価を行った。

生成パイオン/ミュオンの捕獲・輸送/核変換の最適化については、MERIT 方式による負ミュオン生成効率評価と固定標的方式との比較、生成負パイオン（負ミュオン）の運動量分布評価、MERIT 方式における負パ

イオン捕獲・輸送方式の検討と捕獲・輸送効率の評価、負ミュオン生成エネルギーコスト評価を行い、核変換の最適化については、加速器構造材のミュオン核変換における最適化のための発生中性子評価のためのNiにおけるミュオン捕獲反応実験、ミュオン捕獲反応によりNi核種からCo-58に核変換したと思われる事象観測、Ni板上に入射した総ミュオン数からのCo-58生成評価、中性子多重度の実験値と文献値との比較、PHITS計算との比較を行った。

MERITリング要素開発においては、電磁石の要素開発として3次元電磁場解析・シミュレーションによる詳細設計、小型スケールモデル電磁石による磁場測定試験実施と3次元磁場計算との比較を行い、超伝導高周波加速空洞の要素開発では、3次元電磁場解析・シミュレーションによる詳細設計、超伝導冷却システム評価を行った。

2-2 成果

ERIT (Energy Recovery Internal Target) 方式を用いた高効率負ミュオン生成法：MERITの開発研究を行い、検討により目標とする性能が可能であることを示した。その成果について各研究項目についての概要を以下にまとめる。

(1)MERITリングのビーム光学・力学設計：MERITリングのビーム光学・力学設計及び入射・標的設計の最適化を行った。加速ならびにエネルギー回復において必要とされる十分なアクセプタンスを確保するために必要な「零色収差」ビーム光学の実現と、「ビーム冷却」によるエミッタンス低減効果のビーム力学的評価、及びビームの加速・貯蔵において必要条件であるcw高周波加速のための「等時性」ビーム加速を評価した。詳細な評価（3次元ビームトラッキング）により必要な性能を有することを確認した。図2-2.1には検討したMERITリングの横方向アクセプタンスを示す。一方、標的との衝突によるビームエミッタンス増大のシミュレーション結果を図2-2.2に示す。500ターン衝突後の増大したビームエミッタンスは水平・垂直方向で約2,000mm.mradであるのに対し、アクセプタンスは水平/垂直それぞれに対して、100,000mm.mrad、70,000mm.mradと10倍以上であり、設計されたMERITリングが十分なビームアクセプタンスを有することが示された。

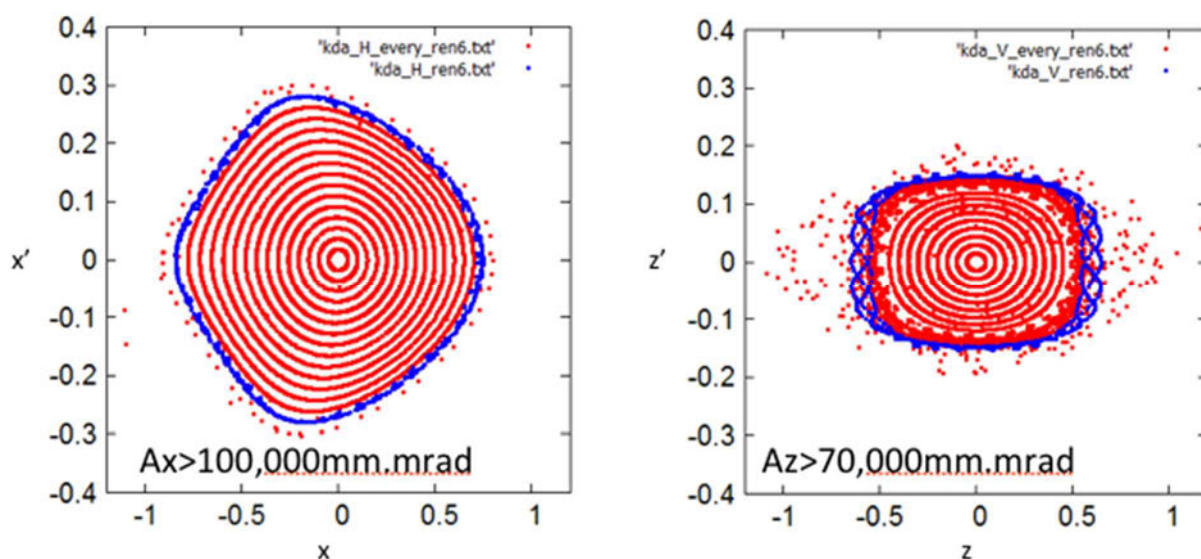


図2-2.1 横方向アクセプタンス（左：水平方向、右：垂直方向）

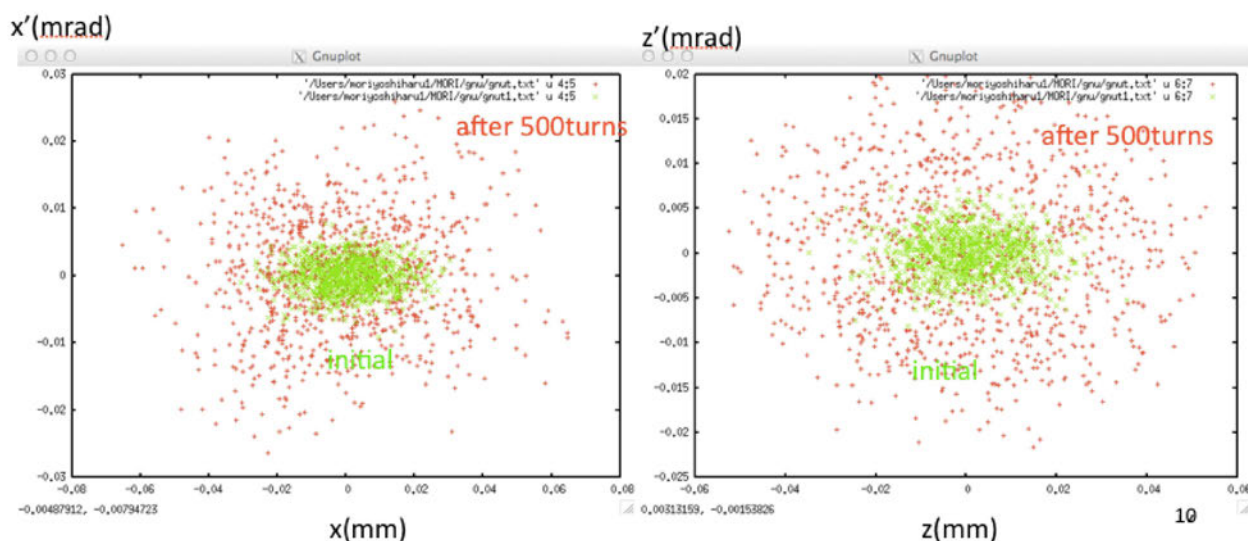


図2-2.2 ビームエミッタンス増大（左：水平方向、右：垂直方向）

(2)生成パイオン/ミュオンの捕獲・輸送/核変換の最適化：生成された低エネルギー負ミュオンをほぼ50%以上捕獲し輸送する手法を確立し、負ミュオン生成のエネルギーコストについては2-3.5GeVが得られることを示した。一方、加速器構造材のミュオン捕獲反応により発生する中性子評価については、Niにおけるミュオン捕獲反応実験を大阪大学核物理研究センターで開発されたMuSICミュオン生成装置を使って行った。ミュオン捕獲反応によりNi核種からCo-58に核変換したと思われる事象が観測され、Ni板上に入射した総ミュオン数の25(6)%がCo-58の生成に寄与したとする結果が得られた。この値は、中性子多重度の文献値とNiの存在比から見積もられたCo-58の生成率22.34%と矛盾しない結果である。またPHITS計算との比較も行い、PHITS計算値は実験値の約1/2であった。図2-2.3には核変換したCo-58の存在を示す γ 線計測結果を示す。

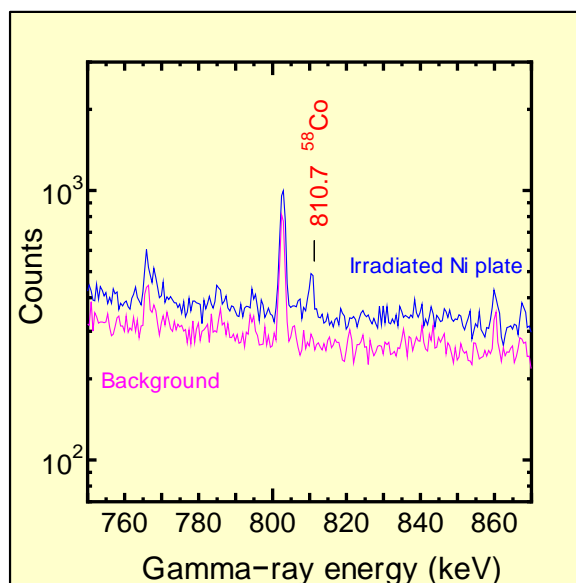
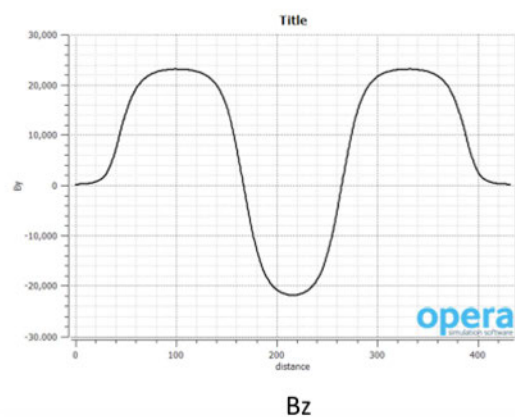


図2-2.3 核変換したCo-58の存在を示す γ 線計測結果

(4) MERIT リング要素開発：構成機器（電磁石、高周波空洞）の3次元電磁場解析・シミュレーションによる詳細設計を行った。図 2-2.4 には電磁石については、3次元磁場計算コード TOSCA_OPERA により必要とされる積分幾何学的磁気係数：local_k+1 の半径方向依存性の最適化を行った。目標とする k+1 値の変動範囲（+5%）に対して、約 2 倍程度までの最適化を実現した。図 2-2.4 には 3次元磁場計算により最適化された磁場分布と積分磁場係数 k+1 の半径方向依存性を示す。実際にはビーム加速が早いのでこの程度の k 値の変動でも問題はないと考えられる。また、小型モデル電磁石を製作し磁場測定を行い、3次元磁場計算との良い一致を確認した。図 2-2.5 には小型モデル電磁石での測定された磁場分布と磁場計算の比較を示す。

・3次元磁場計算(TOSCA



磁場係数:k+1は設計値に対して
 (1)F磁石→(-8%,+10%)
 (2)D磁石→(-2%,+10%)
 ほぼ良い値。目標は+5%以内

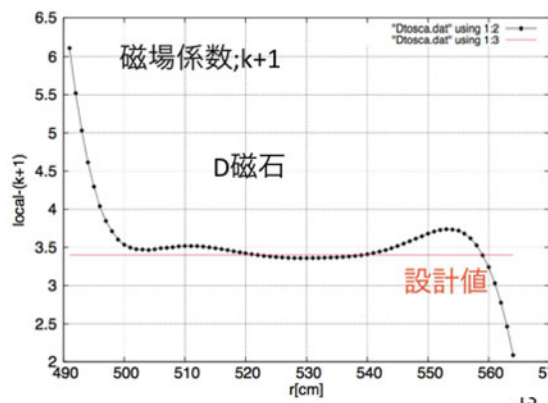
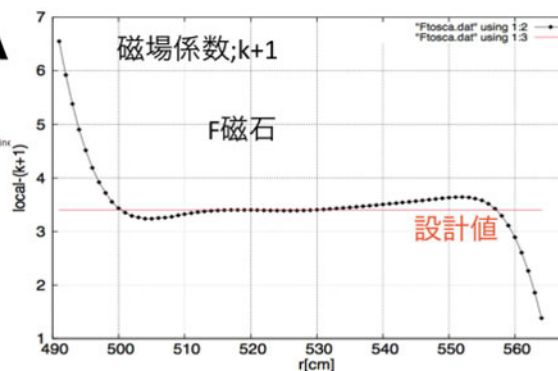


図2-2.4 3次元磁場計算とlocal_k+1の半径方向依存性

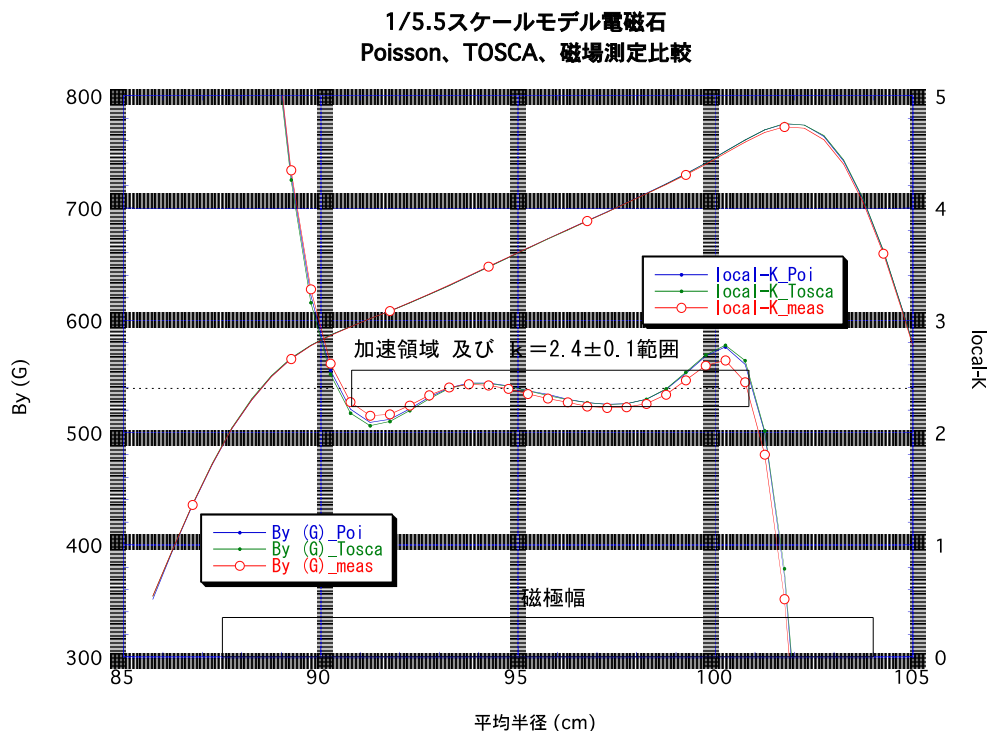


図2-2.5 小型モデルでの測定磁場分布と磁場計算

以上より、本研究が目的とする4種のLLFPの負ミュオン核変換処理に対して、負ミュオン生成のためのMERITリングの装置設計・要素開発試験を行った。その成果として、目標とする性能（負ミュオンエネルギー（運動量）：～200MeV/c、負ミュオン生成エネルギーコスト：4-7GeV、負ミュオン強度： $>1 \times 10^{16} \mu/\text{sec}$ ）を有するMERITリングが可能であることを示した。

2-3 新たな課題など

本年度の研究により、LLFPのミュオン核変換処理に必要とされる性能を有する負ミュオン生成装置：MERITが実現の可能性が十分にあることがわかった。しかしながら、ビーム加速と貯蔵を両立させるMERIT方式は今回初めて提案されたもので、シミュレーションで評価しきれない様々な効果（非線型効果、空間電荷効果等）についても検討する必要がある。そのためにも原理実証試験と実験的研究開発が必要である。

本研究では陽子ビームを前提としていたが、陽子に換わって重陽子ビームを用いたMERITリングは中性子源としても可能性がある。また、ミュオン触媒核融合からの強力な中性子による核変換処理も極めて大きな可能性を秘めている。強力中性子によるLLFP核変換処理のためのこれらMERIT方式の研究開発も次の課題である。

3. アウトリーチ活動報告

特になし。