

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 8 年 度

研究開発課題名：

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

研究開発機関名：

国立大学法人大阪大学

研究開発責任者

福田光宏

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

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)の4核種(107Pd, 135Cs, 79Se, 93Zr)の核変換を目指し、熱中性子束を高強度化し、中性子捕獲反応による核変換量や放射性核種の半減期に応じた化学的な元素分離・抽出法と上手く組み合わせることによってLLFPを短寿命化・安定化するための新しい制御手法の開発を目的とする。具体的には、安価でエネルギー効率に優れた高強度の小型加速器を多数並列化し、中性子源へハイパワービームを多重入射させることによって高強度の中性子束を発生させる新しい核変換用冷・熱中性子源システムの開発を目指す。

高強度サイクロトロン概念検討においては、小型サイクロトロンにおける重陽子ビームの高強度化のための技術的課題の検討を行う。特に、加速空洞のハイパワー化とエネルギー利得増大、ビーム入射部及び中心領域における空間電荷効果対策、ビーム引出法の課題を洗い出す。なお、課題に対する対策は次年度以降検討する。

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

大強度重陽子源として既に開発が進められているIFMIF用D+イオン源の性能を参考に重陽子源から得られる高強度の重陽子ビームについて検討を行うと共に、それをサイクロトロンへ入射させ加速するための課題について検討を行った。また、大強度化と省コスト化を両立させるためのサイクロトロン仕様についても検討した。

2-2 成果

IFMIFのD+イオン源では、加速電圧100kVで約100mAの重陽子ビームを出力可能であり、大強度ビームでありながら規格化エミッタンスは $0.34\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ (非規格化エミッタンスで $34\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$)程度が期待されている。一般的に、サイクロトロンの入射アクセプタンスは数 $10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 程度であり、前述の高強度重陽子ビームと同等の大きさであるが、空間電荷効果等によるビームの広がりを考慮すると、より大きな入射アクセプタンスが求められる。一方で、重陽子源から取り出すビームの強度を減らさずにエミッタンスを小さくするためのイオン源の高輝度化も重要となる。低エミッタンス化のためには、イオン源の引出電極の形状や配置、印加電圧の最適化などの工夫が必要である。

AVFサイクロトロンは、PET用のRI製造サイクロトロンに代表されるようにコンパクトでありながら比較的高強度のビームを供給できるという特徴を持っている。単一の電磁石や共振空洞で複数のビームバンチを同時に加速できることから、エネルギー効率は少なくとも10%程度は達成できおり、他の加速器に比べるとエネルギー効率に置いては優れている。昨今、風力や太陽光などの自然エネルギーでもMW級の発電システムが実用化されていることを考慮すると、原子力や火力などに頼らないクリーンなエネルギー源で運転することも可能である。さらに、固定エネルギーの場合には設計を単一化・規格化することが可能であることから、量産化による低コスト化も大いに期待できる。これにより、小型サイクロトロンを多数並列化した核変換システムの建設コストや運転コストが著しく大きくなることはなく、比較的安価なシステムを構築することが可能となる。

一方で、コンパクトであるが故に空間的な自由度が犠牲になり、入射ビームのアクセプタンスを数 $10\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 以上に拡大しにくいという課題も抱えている。これは、入射ビームの低エミッタンスかだけでなく、AVF サイクロトロンを中心領域における位相空間の入射可能な領域に入射ビームを整合させるビーム輸送も不可欠である。また、低エネルギーの入射ビームの高強度化に伴う空間電荷効果によるビームの発散に対する対策も課題として残されている。進行方向に対して垂直な面内での空間電荷効果による発散に対しては、ソレノイドレンズやグレーザーレンズ、四重極電磁石等の集束要素で押さえ込むことが可能である。また、進行方向の発散については、鋸歯状は電圧などを用いた加減速によるビームバンチングが有効である。

さらに、サイクロトロンにおけるビームの高強度化の大きな課題としてビームの取り出しの問題がある。一般的に、正イオンのビーム引出には静電デフレクターを用いるが、コンパクト性を追求することとは裏腹に、隣り合うビーム軌道間の距離（ターンセパレーション）が小さくなっていくため、引出機器でのビーム損失が増えてしまうという難点がある。それを打開する手法として、H-やD-のような負イオンを加速し、引出領域にカーボンフォイルなどを設置して荷電変換により取り出す方式が採用されている。これにより、ほぼ 100% の引出効率が達成できているものの、ビーム強度が増加することによる荷電変換フォイルでのビームのエネルギー損失や剥ぎ取られた電子が磁束に巻き付いてフォイルへ戻ってくることによるエネルギー損失などがフォイルの温度上昇を招き、フォイルの耐久性が問題となってくる。

ターンセパレーションを大きくしてビームの取り出しを容易にするためには、引出半径や加速電圧を可能な限り大きくすることが求められる。リングサイクロトロンは、引出半径を大きくするために電磁石を分離したものであるが、サイクロトロンを中心部分や電磁石と電磁石の間など、空間的な自由度は大きいことから入射アクセプタンスを大きくし易いという利点がある。また、cm オーダーのターンセパレーションを確保しやすいことから、100% 近いビームの引出効率を達成しうる。

他方、電磁石の大型化に伴って、コストが増大してしまうという難点もあるが、超伝導化あるいは永久磁石化することにより、運転コストは極力小さくすることは可能である。また、入射領域のアクセプタンスの拡大や加速の初期段階の空間電荷効果対策なども課題として残るが、初期加速領域の位相空間でのアクセプタンスに入射ビームを的確に整合させることにより入射効率の改善は十分に見込める。加速空洞もハイパワー化と省電力化を両立させることにより、加速のターン数を減らして空間電荷効果による影響を最小限に留めることも可能である。

2-3 新たな課題など

特に無し

3. アウトリーチ活動報告

特になし