

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：プロセス概念検討

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成28年度

研究開発課題名：

総合システム検討（概念構築と技術課題抽出）

研究開発機関名：

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

研究開発責任者

辻本 和文

# 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

本研究開発プログラムでは、高レベル放射性廃棄物中に含まれる長寿命核分裂生成物(LLFP)を分離回収し、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ために必要な技術基盤を確立することを研究開発目標としている。この開発目標に対して、本研究開発プロジェクト「プロセス概念検討」では、LLFPの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とともに、社会実装を考慮した核変換プロセス概念を提案することを達成目標とする。

平成28年度は、来年度以降の本格的なプロセス概念検討に備えて、既往研究等を参考に、効率的なLLFP核変換システム用の加速器の実現に不可欠な大電流化及びエネルギー効率の向上に必要な技術開発課題を抽出し、LLFP核変換システム用加速器に求められる性能要求を明確化する。また、LLFPターゲットについて、核変換候補として検討されている核種に対して、それぞれの化学形態等を考慮してターゲット候補概念を提示する。

## 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

H27年度の検討作業においては、LLFP核変換用加速器やLLFPターゲットに関する以下の開発課題について既往研究を参考にした技術開発課題の調査を実施する。これらの調査結果を基に、JAEAにおいて平成28年度以降の本格的なプロセス概念の構築に向けてプロセス仕様を明確化し、課題解決に向けた開発計画を検討する。

#### 1) 核変換用加速器

##### (a) 加速器大電流化方法の具体化と技術開発課題抽出

LLFP核変換を実現するための大電流加速器開発には、加速管への高周波を供給する高出力のRF源が必要不可欠である。現在、RF源としてはクライストロンが多く使われているが、半導体方式のRF源(SSA)は、効率はクライストロンより落ちるもののシステム全体が簡易なものとなるメリットがあると考えられる。そこで、仏SOLEIL等で利用されている例を参考に、SSAの性能到達点の調査を行うとともに、超伝導リニアックにおけるSSAの利用可能性を検討した。

また、LLFP核変換を実現するための大電流加速器開発には、大電流イオン源の開発が必要不可欠である。LLFPを効率的に核変換するためには、イオン源に対してはDC100mA以上の性能が要求される。現状では、パルス用低デューティイオン源では最大100mA程度のH<sup>-</sup>ビームが得られた記録があるが、DCでのビーム電流は20~30mAが限度となる。そこで、大電流DCイオン源の開発上の技術開発課題について、それらの解決方を調査するとともに、開発ロードマップを検討した。

LLFP核変換を実現するためにサイクロトロン加速器を用いるために必要な技術開発課題について、特に超伝導技術の観点から先行加速器の検討例等を参考とし、昨年度に問題となる技術課題等を抽出した。これらのサイクロトロンの超伝導化の課題のうち、超伝導コイル形状に関しては、超伝導コイルに通電時に発生した電磁力等を考慮した設計が必要となる。そこで、今年度は、既存の大電流サイクロトロン設計例等を参考に、電磁力を考慮した超伝導コイル形状や巻線構造の検討を行った。

## (b) 加速器のエネルギー効率向上方法の具体化と技術開発課題抽出

LLFP 核変換を実現するための大電流加速器開発には、加速管への高周波を供給するクライストロンの高効率化が不可欠である。そこで、クライストロンの原理的な側面から出力の適用性と高効率化の両面からクライストロンの低周波数化（300MHz 以下）の検討を実施した。さらに、電子管や半導体を利用する他の高周波供給方式と比較して、低周波数化したクライストロンの優位性について、製造設備上の制約についても加味して考察を行った。これらの検討結果をまとめて、70～300 MHz の周波数帯における RF 源として、コスト面も考慮して高効率 RF 源としてメリットのある方策を調査した。

## 2) LLFP 照射ターゲット

核変換候補として検討されている核種（セレン（Se）、パラジウム（Pd）、ジルコニウム（Zr）、セシウム（Cs））のうち、再利用を想定している Pd と水への溶解性が高く廃棄体の地下水への溶解を検討する際の重要核種である Cs について、それぞれ固体ターゲット概念を検討した。

## 2-2 成果

### 1) 核変換用加速器

#### (a) 核変換用加速器の大電流化方法の具体化と技術開発課題抽出

半導体方式の RF 源である SSA については、仏 SOLEI や ESRF、BESSY II 等で CW 加速空洞への電力供給に用いられた複数の実績があり、技術的には採用可能なレベルに達している。SSA は、高電圧電源を必要としないことから、消防管理が必要な絶縁油等も必要なく、X 線も発生しない。また、出力に応じた設計が容易で、モジュラー設計で空洞毎に必要な定格電力の RF 増幅器を製作することが可能である。さらに、所要電力量の小さい空洞を多数駆動する場合に位相調整を LLRF で行えるためシステムを簡素化できるとともに、増幅モジュール自体は共通設計が可能のため予備品の共通化をはかることができる。一方で、クライストロンのもつ特性と比較した場合には、電力効率がクライストロンと比べやや劣るものの、SiC や GaN 半導体の進歩により、電力効率は大幅に改善される見込みがある。その他に、放射線耐性が低いことや大出力の場合には大きなスペースが必要であるといったデメリットもあるが、これらは設計対応可能な課題である。定性的に考えると、陽子加速器の低 $\beta$ 部の空洞は高 $\beta$ 部ほどの加速勾配を必要とせず、必要とする電力レベルも相対的に低いと考えられるため、このような場合に対しては SSA の適用性が高いと考えられる。

大電流イオン源については、ビーム電流 100 mA の D-イオン源として、目標とするビーム電流密度を 100 mA/cm<sup>2</sup> と 20 mA/cm<sup>2</sup> の 2 つに分け、(1) 単孔・小口径、(2) 単孔・大口径、(3) 多孔・小口径という 3 種類の電極タイプを開発オプションとした。このうち最も望ましいのは (1) であることが軌道計算と真空計算から分かった。(1) では高アークパワーでの DC 運転というハードルがあるが、後段加速器へのビーム入射を念頭におくと最も望ましい。(2)(3) は、比較的低いアークパワーで 100 mA のビーム電流を達成できる可能性があるが、(2) の軌道計算結果からビームサイズ、エミッタンスの増大が示された。特に重水素ビームの場合、ビームサイズ、エミッタンスが大きくなると LEBT や後段の加速器コンポーネントの放射化に繋がり重大な問題となる。また、孔の開口面積が増すことでチャンバーのガス圧が 1/5 程度に低下してしまうこと、コンダクタンスの増大に伴って

イオン源下流側への Cs の漏れ出しが懸念される。今回、ビーム電流密度を  $100 \text{ mA/cm}^2$  と  $20 \text{ mA/cm}^2$  の二択としたことに合わせて単孔での引出孔径を  $12 \text{ mm}$  または  $26 \text{ mm}$  としたが、高アークパワーの DC 運転を追求した結果、達成することができたビーム電流密度に合わせて孔径を決めれば良いとも考えられる。ただし、孔径はなるべく小さい方が良いから、 $20 \text{ mA/cm}^2$  を最低限クリアすべき第一の目標として、高アークパワー化、大電流化を進めることが必要である。

サイクロトロン加速器の超伝導コイル形状に関しては、先行検討例である DAE  $\delta$  ALUS DSRC のメインコイルの設計を参考に、製作性や構造健全性等を考慮してコイル設計を見直した。さらにコイルの組立手順も考慮して、大幅に工程を短縮可能であることを示した。

#### (b) 核変換用加速器のエネルギー効率向上方法の具体化と技術開発課題抽出

クライストロンの高効率化に関する取り組みを調査した。その結果、低パービアンス化などの従来から知られている手法に加え、最近では、電子の集群過程に着目した COM, BAC 方式といった新たな手法が提案され、その手法を用いたクライストロンの開発も行われていることが分かった。また、周波数  $70\text{-}300 \text{ MHz}$  の CW クライストロンの出力と推定効率について、製造設備の制約を加味して既存クライストロンからスケーリングにより検討した結果、周波数  $280\text{-}300 \text{ MHz}$  のシングルビームクライストロンであれば現有設備で製造できる可能性があることが分かった。長さの制約から低出力ほど効率が高く、パービアンスとの関係から効率は  $59\text{-}73\%$  と推定した。これは、既存技術のクライストロンをもとにしているが、高効率化の手法として挙げた低パービアンス化、COM, BAC 方式、ホロービームなどを組み合わせることで更なる高効率化は可能であると考えられる。この場合特に低周波数のクライストロンでは大きさや重量をいかに抑えるかが課題であることが分かった。

#### 2) LLFP 元素毎の照射ターゲット及び照射後処理の技術開発課題抽出

Pd と Cs を対象とした個体ターゲット概念の検討を実施した。重陽子ビームを照射する個体ターゲットとして、PSI の SINQ 個体ターゲット仕様を参考に、Pd については金属 Pd、Cs については CsCl を被覆管内に封入したピンを格子状に並べたターゲット概念を基に、入射重陽子の加速エネルギー、電流値をパラメータとして、本ターゲット概念の成立性を検討した。成立性の判断基準としては、冷却水の沸騰を抑えるために冷却水温度は  $100^\circ\text{C}$ 、Pd については融点である  $1600^\circ\text{C}$  とした。CsCl については、米国ハンフォードで放射性廃液から分離してカプセル状に保管された CsCl の経験から、CsCl の体積変化を伴う相変化温度である  $300^\circ\text{C}$  を基準とした。その結果、重陽子加速エネルギー  $500 \text{ MeV/u}$ 、加速電流  $10 \text{ mA}$  の入射粒子条件で、ビーム直径を約  $50 \text{ cm}$  程度まで広げること、上記制限温度を満たす固体ターゲット概念の成立可能性があることが分かった。実際に、ターゲットとして利用するためには、ターゲット密度をできるだけ高める必要があることと、照射後のターゲットの放射化を考慮したターゲットの取扱が必要であることも示した。

### 2-3 新たな課題など

LLFP 用加速器に関しては、大電流化およびエネルギー効率向上の観点から技術課題解決策の整理を行った。今年度は、LLFP 用加速器の仕様が決まっていないために、一般的な考察にとどまったために、今後は加速器の仕様を決めた上で、具体的な技術課題解決策を検討することが必要である。

LLFP ターゲットについては、Pd と Cs を対象に水冷却固体ターゲットを想定して、ターゲット概念の検討を行い、熱的条件を満たすターゲット概念を構築した。今後は、ターゲットの詳細な熱水力解析を行ってターゲットの成立性を確認するとともに、照射後の放射線量を考慮したターゲット取扱方法の必要である。

### 3. アウトリーチ活動報告

なし