

# 交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用した 加速器駆動核変換システム用革新的円形加速器の先導研究開発

(受託者) 国立大学法人 京都大学

(研究代表者) 雨宮尚之 大学院工学研究科

(研究期間) 平成 28 年度～31 年度

## 1. 研究の背景とねらい

### [研究の背景]

軽水炉運転後に生じる使用済燃料の処分は、全世界的に取り組まねばならない喫緊の課題である。日本では平成 26 年 4 月時点で約 17,000 トンの使用済燃料が保管中であり、1 GWe の軽水炉を 1 年間稼働すると 20 トンの使用済燃料が発生する。仮に日本の電力需要 (2030 年度予想) の 15% を原子力発電で賄おうとすると、このクラスの軽水炉が 20 基 (20 GWe) 必要となり、年間 400 トンの使用済燃料が発生する。1 トンの使用済燃料の中には 1 kg のマイナーアクチノイド (以下 MA) が含まれる。つまり、20 GWe の軽水炉群を 1 年間稼働すると 400 kg の MA が生じることになる。MA には半減期が 200 万年に及ぶものもあり、使用済燃料から生じる MA を含んだ高レベル放射性廃棄物の経口摂取による潜在的毒性が、天然ウランと同程度まで減衰するのに要する時間は約 1 万年で、高レベル放射性廃棄物の処分を難しくする一因となっている。

加速器駆動核変換システム (以下 ADS: Accelerator Driven System) は、加速器と原子炉を組み合わせたハイブリッドシステムである。加速器によって生成した高エネルギー陽子を鉛ビスマスなどのターゲットに照射し核破砕反応を起こし、核破砕反応によって発生した高エネルギー中性子を未臨界炉心において核分裂反応により増倍させる。炉心に MA を含んだ燃料を装荷しておくことにより、高エネルギー中性子により長寿命核を安定核や短寿命核に変換できる。このように、ADS を用いれば、軽水炉による使用済燃料中の長寿命の MA を安定核や短寿命核に変換し、潜在的毒性の減衰時間を一万年から数百年に短縮できる。もって、使用済燃料の処分に ADS は大きく寄与し得る。

### [本研究のねらい]

核変換により放射性廃棄物の有害度を低減する ADS の実用化に向けて、小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる革新的円形加速器の実現を目指し、そのプロトタイプ開発の見通しを確立することを本研究の目的とする。

すなわち、線形加速器に代わる、交流高温超伝導マグネットと共鳴ビーム取出しを応用した高繰り返し運転シンクロトロンによって、課題解決の見通しを立てることを目的とする。

小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを原子炉に供給できる ADS 用革新的円形加速器のプロトタイプ開発 (製作) の基盤構築という効果により、プロトタイプ・実用加速器、プロトタイプ ADS・実用 ADS の開発を可能にし、プロトタイプ ADS と実用 ADS で、それぞれ年間 2 kg, 40 kg のマイナーアクチノイドの核変換処理による放射性廃棄物減容・有害度低減に寄与する。

## 2. これまでの研究成果

### (1) 交流高磁界を低消費電力で発生可能な高温超伝導マグネットの研究開発

高温超伝導マグネットを高繰り返し運転シンクロトロンに应用する場合、高温超伝導マグネット内で交流損失が発生する。交流損失とは、超伝導体内に侵入した量子化磁束が、ローレンツ力に

よりピン止め力に抗して動くときに発生する損失である。交流高温超伝導マグネットを応用した高繰り返しシンクロトロンを実現するためには、交流損失を抑制した高温超伝導マグネットの実現が鍵となる。

本研究開発では、図 2-1 に示すような高温超伝導コイルと鉄ヨークを組み合わせたマグネットを対象としている。交流損失は、高温超伝導コイルを構成する高温超伝導線の経験する磁界に依存するため、磁化した鉄ヨークにより高温超伝導線がどのような磁界を経験するかを評価する必要がある。我々は鉄ヨークの非線形磁気特性を考慮した静磁界解析を Opera によって実行し、図 2-2 に示すように、磁化した鉄ヨークにより高温超伝導コイルが経験する磁界  $B_{ext}$  を計算した。Opera による静磁界解析では、高温超伝導コイルはコイルブロックとして扱われている。鉄ヨークは非線形磁気特性をもち、 $B_{ext}$  はコイル通電電流に対して非線形であるため、我々はこれを考慮に入れるため、定格コイル電流時に高温超伝導コイル内で  $B_{ext}$  が最大となる位置における  $B_{ext}$  の電流値依存性を計算し、これを図 2-3 に示すように折れ線近似した。この折れ線関数を高温超伝導コイル内の全ての位置における  $B_{ext}$  に適用することで、 $B_{ext}$  の電流値に対する非線形性を考慮した。

得られた磁界分布を専用変換ソフトウェアによって処理し、開発した専用電磁界解析ソフトウェアへのインプットとして使用し、高温超伝導コイルの交流損失を計算した。専用変換ソフトウェアでは、Opera で計算されたコイルブロック内の  $B_{ext}$  分布をもとに、高温超伝導コイル内の高温超伝導線の位置における  $B_{ext}$  を計算した。

専用電磁界解析ソフトウェアでは、Maxwell 方程式に基づいた方程式を離散化し、有限要素法によって求解した。この専用電磁界解析ソフトウェアでは、高温超伝導線の非線形導電特性を、高温超伝導線の等価的な導電率の計算において考慮している。この非線形導電特性は、実験による測定結果に基づいて定式化されている。定式化の際には、式(1)に示す n 値モデルと呼ばれる式を用いた。

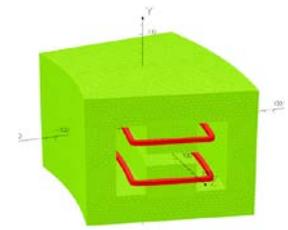


図 2-1 高温超伝導コイルと鉄ヨーク

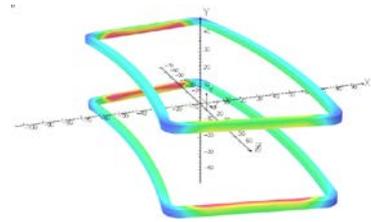


図 2-2 高温超伝導コイル内の  $B_{ext}$  の分布

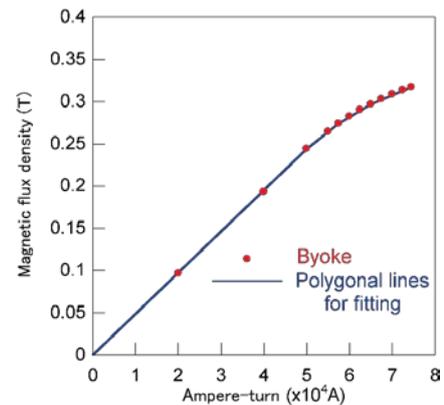


図 2-3  $B_{ext}$  の電流値依存性

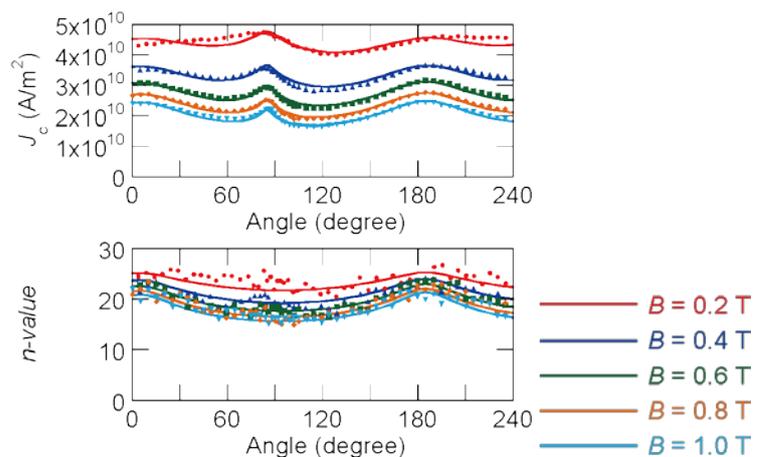


図 2-4  $J_c$ 、n 値の磁界強度・角度依存性

$$\sigma = \frac{J_c(B, \varphi)}{E_0} \left( \frac{J_c(B, \varphi)}{J} \right)^{n(B, \varphi) - 1}$$

n 値モデルのうち、 $J_c$ および  $n$  値は高温超伝導線の経験磁界強度および角度に依存する。図 2-4 に、 $J_c$ および  $n$  値の磁界強度および角度依存性の測定結果と定式化結果を示す。

また、専用電磁界解析ソフトウェアでは、有限要素法による電磁界解析の高速化・省メモリ化を実現するために、階層型行列法と呼ばれる手法を適用している。この手法により、電磁界解析に要するメモリは 94%削減され、現実的な計算時間および消費メモリでの電磁界解析が可能となっている。

図 2-5 に、専用電磁界解析ソフトウェアによる交流損失解析の結果例を示す。三次元電磁界解析と詳細な高温超伝導線の非線形導電特性の考慮により、高温超伝導コイル内の三次元交流損失分布計算が可能となった。

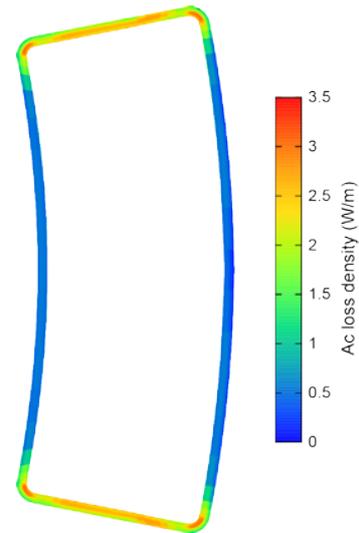


図 2-5 高温超伝導コイル内の交流損失密度分布

## (2) 低加速電力・高ビーム出力加速器システムおよび高繰り返し運転共鳴ビーム取り出し装置の研究開発

本研究における ADS 用加速器には 100 Hz という速い繰り返しで運転するシンクロトロンを採用した。この加速器では、100 MeV から 1.5 GeV まで陽子ビームを加速し、平均ビーム取り出し電流は 1 mA を目標とする。ビーム光学系の設計にあたり、設置面積を小さくしてシステム全体を低コスト化することと、高繰り返し運転の実現と加速空洞の電圧低減による高効率化を両立するために、シンクロトロンの周長をできるだけ短くすることを基本方針とした。周長の短縮には、ビームの偏向に用いる 2 極磁界成分とビームの集束に用いる 4 極磁界成分を 1 つのマグネットで発生する機能結合型マグネットの使用が有効である。ただし、この機能結合型マグネットを用いた場合、建設後の運転に際してパラメータ調整の自由度が減るという短所がある。そのため、本研究では機能結合型マグネットを用いるシンクロトロンと、ビームの偏向と集束に用いる磁界成分を独立のマグネットで発生する機能分離型のマグネットを用いたシンクロトロンの両者を並行して検討対象としている。

本研究ではベータトロン共鳴をビーム取り出しに用いるため、水平方向のベータトロンチューンを共鳴条件  $11/3 = 3.666$  に近い 3.70、垂直方向のベータトロンチューンを 2.74 とした。また、偏向マグネットの最大磁束密度は低消費電力化のためにその値を抑え 1.4 T とした。これらの条件のもとで、100 Hz での加速繰り返しが可能な加速器として機能結合型・機能分離型の両者のマグネットを用いた光学系を検討し、それぞれに対して周長 69 m、107 m 程度のシンクロトロンを設計可能であるという結果が得られた。さらに、これらの線形光学系に対して 6 極磁界成分によるビーム集束の色収差補正を検討した。通常、色収差の補正はチューンの変位を垂直方向・水平方向ともにできるかぎり小さくなるように施すが、本研究ではビーム取り出し時の共鳴条件の制御のために水平方向の色収差の補正目標値を有限の値とした。この色収差と加速装置の高周波周波数変調を用いることで、高速な共鳴条件の制御が可能になる。また、この色収差補正に用いる

6 極磁界成分の印加によるビームの動的口径の評価をビーム軌道解析により実施した。その結果、機能結合型・機能分離型のいずれの光学系に対しても 1 mA のビーム加速に必要な条件から見積もった水平方向 20 cm、垂直方向 10 cm のビームパイプ断面積と比較して十分大きな動的口径の確保が可能であることが実証された。特に、機能結合型マグネットに対してはマグネット主偏向電磁石内部に 6 極磁界成分を広く分布させることが可能であるため、極めて大きな（半径で 70 cm 程度の）動的口径の確保が可能であることが示された(図 2-6)。

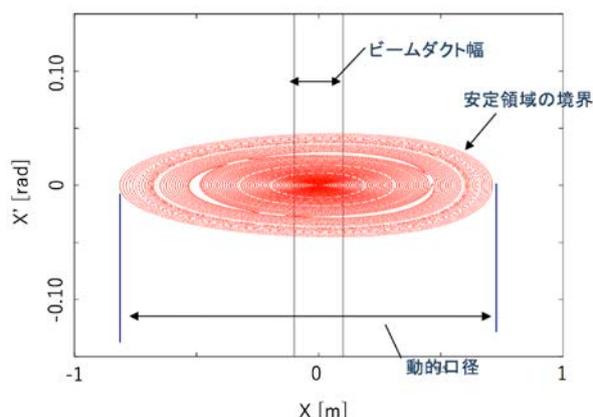


図 2-6 機能結合型マグネットを用いた場合の安定領域の評価結果

また、100 Hz のビーム加速繰り返しのためには加速装置の周波数の高速な変調が必要になる。加速シナリオの検討結果から、従来の 10 倍程度に相当する 0.5 MHz/msec の変調速度が必要であると見積もられた。そこで、この変調速度と十分な加速電圧の発生が両立することを実験的に検証するために、加速装置に装荷する磁性体の高周波特性の測定系を構築した。

上記の項目と並行して高繰り返し運転において安定に動作可能なビーム取り出し装置の研究開発も実施している。この取り出し装置ではビーム加速後のビームに対してベータトロン共鳴を用いてビームの水平方向の運動振幅を増大させて、この振幅が増大したビームをマスレスセプタムマグネットにより分離することでビームを取り出す。この方法では、故障率が大きな高压スイッチや大電力電源が不要であるため、取り出し装置の高信頼化が見込める。このようなビーム取り出し装置の実現のために前述した機能結合型・機能分離型の両者の光学系に対して共鳴励起用の 6 極マグネットを印加した場合のシミュレーションを実施した。このシミュレーション結果より、共鳴を用いた取り出しに必要な 6 極磁界成分の分布・強度を確定した。

### 3. 今後の研究

ビーム工学系から要求される磁界を発生する高温超伝導マグネットを設計し、その交流損失を構築したモデルにより評価する。コイルのインダクタンス抑制のために、高温超伝導線を集合化した大電流容量導体の適用が必要になると考えられるので、各種、大電流用導体でマグネットを設計して比較検討する。超伝導コイル・鉄ヨーク形状によって変化する経験磁界が交流損失に与える影響について検討し、結果をビーム工学系の設計にフィードバックする。交流損失を冷却するのに要する消費電力低減という観点からマグネット設計の最適化を図り、冷却消費電力についての目標値を達成する高温超伝導マグネットを設計する。

ビームシミュレーションの結果をもとに、セプタムマグネットの基本設計を行う。具体的には、マスレスセプタムマグネットの 3 次元磁界設計を行い、ビームシミュレーションにより安定性を評価する。時間的に変化する、メインマグネット、共鳴励起用多極マグネット、および高周波加速装置の周波数及び電圧パターン、さらにセプタムマグネットの磁界を反映させたビームシミュレーションを実施し、最終的な取り出し効率、及び取り出し後のビーム特性の評価を行う。