

加速器駆動核変換システムのための高繰り返しシンクロトロン RAPID CYCLE SYNCHROTRON FOR ACCELERATOR DRIVEN TRANSMUTATION SYSTEM

不破康裕^{*A)}、栗山靖敏^{A)}、上杉智教^{A)}、石禎浩^{A)}、雨宮尚之^{B)}

Yasuhiro Fuwa^{*A)}, Yasutoshi Kuriyama^{A)}, Tomonori Uesugi^{A)}, Yoshihiro Ishi^{A)}, Naoyuki Amemiya^{B)}

^{A)}Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

^{B)}Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract

For the practical application of Accelerator Driven System (ADS) that reduces the harmfulness of radioactive waste by nuclear transmutation, we are studying the development of a compact accelerator using a synchrotron as an accelerator capable of supplying a stable proton beam to a nuclear reactor. In this research, we aim to realize high efficiency and high reliability ring by adopting an alternating current high temperature superconducting magnet and a high repetition synchrotron applying resonant beam extraction. In this paper, we report the fundamental design of the rapid cycling synchrotron.

1. はじめに

原子炉の使用済み燃料に含まれる高レベル放射性廃棄物の毒性の低減方法として、廃棄物からに含まれる長寿命マイナーアクチニド (MA) の分離・変換が提案されている [1]。その方法の1つが陽子加速器を用いた加速器駆動未臨界炉 (ADS; Accelerator Driven Subcritical reactor) を用いる方法である [2]。この方法では、加速器からの大電流陽子ビーム未臨界炉心に入射し、炉心内で冷却材と中性子発生ターゲットを兼ねる液体の鉛・ビスマスと陽子ビームの核破砕反応で中性子を発生する。この中性子を用いて MA の核変換と燃料の核分裂を引き起こし熱エネルギーを得る。その熱エネルギーを用いて発電することで陽子加速器の運転で消費される以上の電力を発生し、余剰電力を送電網に供給することもできる。

このような核変換システムにおいて重要な開発項目の1つが、ビーム停止頻度の抑制である。ADSでは、炉心が未臨界であるため加速器からのビームが停止すると原子炉中の中性子数が減少し核反応が停止する。その場合に炉心内部の温度が変動するため、その構造物に熱的な負荷が生じる。このような熱ストレスが繰り返し発生することは、構造物の劣化につながる。線形加速器を用いた場合のビーム停止頻度の許容回数が、これまでに運転された線形陽子加速器の運転実績から見積もられている [3]。この研究において、停止時間が5分を超えるビーム停止頻度を現状の1/35以下にまで抑制する必要性が示されている。また、ビーム停止の原因の統計において長時間のビーム停止の原因は主に高周波システムのトラブルである。そのため、安定な加速器システムの実現には高周波システムの故障頻度の抑制が最も重要な課題となる。

高周波システムのトラブル低減には個々の構成要素の故障率の低減も重要であるが、根本的な解決法

として高周波システムの少ない加速器の採用、すなわち、円形加速器による陽子ビームの生成が有望である。そこで本研究では、信頼性の高い核変換システムとして高繰り返しシンクロトロンを用いることを提案し、その実現を目指している。

2. 核変換用高繰り返しシンクロトロン

高繰り返しシンクロトロン (RCS; Rapid Cycling Synchrotron) はサイクロトロンと比較して加速可能なビームエネルギーが高く1 GeVを上回るエネルギーのビームを生成可能である。陽子ビームの物質中での単位長さあたりのエネルギー付与量は1 GeVから3 GeVの領域で極小値を取り [4]、このエネルギー領域のビームを用いることでADSシステムのビーム窓の熱負荷を軽減することが可能である。またJ-PARC [5]では、これまでに1 MWのビーム出力での運転を達成しており [6]、大電力ビームの生成可能性も技術的に示されている。

繰り返し周波数の増大を実現できれば、より大きなビーム出力を持った高繰り返しシンクロトロンの実現が可能であり、核変換システムの駆動用加速としての利用が期待できる。本研究では、そのような高繰り返しシンクロトロンのプロトタイプを設計し、その実現可能性を検討している。Table 1に検討しているプロトタイプの基本的なパラメータを示す。ビーム入射エネルギーは線形加速器の短縮のため100 MeVとして、取り出しエネルギーはビーム窓の熱負荷軽減のため1.5 GeVとした。平均ビーム電流は1 mAとし、100 Hzの繰り返し周波数でビーム出力1.5 MWを当初の目標としている。このリングはプロトタイプであるために、その出力が線形加速器の場合に提案されているADSの要求ビーム出力(30 MW)と比較すると小さいが、複数台の高繰り返しシンクロトロンを用いることで要求出力を達成することができる。また、複数のリングを並列化することで1台のリングがビーム停止しても他のリングでその低下した分のビーム出力を補うことも可能で

* fuwa@rri.kyoto-u.ac.jp

Table 1: Fundamental Parameters of the Designed RCS

Injection energy	100 MeV
Extraction Energy	1.5 GeV
Output Beam Power	1.5 MW
Repetition Rate	100 Hz
Acceleration Time	< 5 ms
harmonic number	1

あり、システム全体の稼働率を維持する目的でも並列化するメリットは大きい。

これまでに RCS のプロトタイプとして機能結合型・機能分離型のそれぞれの偏向マグネットを採用した2つのラティスを設計している [7]。

3. ラティス非線形要素の設計

3.1 chromaticity 補正

機能結合型・機能分離型それぞれのラティスに対して6極磁場成分を導入することで chromaticity 補正を行なった。補正後の chromaticity は鉛直方向は0と設定したが、水平方向の値は有限値(機能結合型: -1.25、機能分離型: -0.63)に定めた。このような有限の chromaticity に設定することで、ビーム取り出し時に加速空洞の周波数を変調して、チューンをコントロールできる。このチューンの変調で共鳴の強さを制御でき、共鳴取り出しのビーム広がりコントロールすることができる。機能結合型と機能分離型とで、それぞれの特徴に応じて異なる方法で chromaticity 補正用の6極成分を導入した。機能結合型では、ビームの偏向・集束を担う磁場成分にさらに6極成分を重畳した。この方法を採用することで、機能結合型主偏向磁石のみでラティスを構成でき、補正磁石や入射・取り出し以外のマグネットを1系統の電源で励磁可能であるという利点がある。一方で、機能分離型では、アーク部に6極電磁石を配置することで chromaticity を補正した。

また、chromaticity 補正後のラティスに対してビームトラッキングを行い dynamic aperture の行なった結果、機能結合型・機能分離型の両ラティスにおいて十分な dynamic aperture が確保可能であることが確認された。この dynamic aperture の評価において機能結合型のラティスの dynamic aperture が、機能分離型に対して3倍以上大きいことという結果が得られた。この違いは機能結合型偏向マグネットに6極成分を重畳したことで、6極磁場成分のピーク強度が抑制されたことに起因していると考えられる。大きな dynamic aperture が確保可能であるという機能結合型ラティスの特徴は共鳴を用いてビームを取り出す場合に、使用可能な6極成分のパラメータ領域を広く確保でき、運転時の利点となる。一方で、磁極の飽和の影響下でラティスに最適な6極磁場成分を発生するためには入念な磁気回路設計が必要になり、その実現が今後の課題となる。

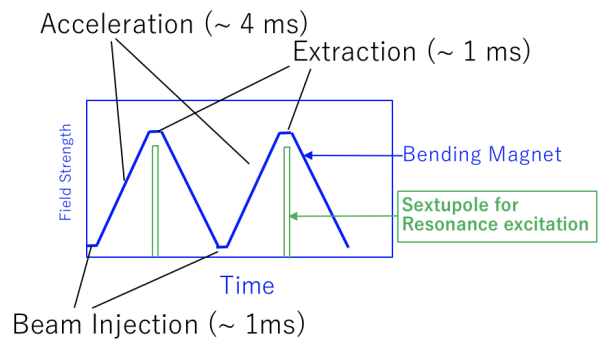


Figure 1: Image of RCS operation in time for high-repetition beam acceleration.

3.2 共鳴ビーム取り出し

本研究で検討している RCS では 100 Hz という高い繰り返し周波数で運転するため (Fig. 1 参照)、ビーム取り出しシステムが重要な開発要素となる。周長の短いラティスにおいて 100 Hz の繰り返しにキッカーを用いたシステムを用いる場合、キック量の確保に必要な電磁石数・高圧スイッチを含む電源回路の数が増大する。それに伴いシステムの故障率が増大する懸念がある。また、キッカーでビームを取り出した場合周回ビームの時間構造に由来する尖塔出力のそのまま炉心に供給される。この時、ビーム窓において衝撃波が発生する懸念がある。そのため、炉心のストレスを軽減するために、取り出しビームのパルス形状を成形しピーク強度を必要とする必要がある。本研究ではキッカーを用いない信頼性の高いビーム取り出しシステムとして、共鳴を用いたビーム取り出しシステムを提案している。

共鳴ビーム取り出しは従来、素粒子・原子核実験のために用いられてきた遅い取り出しと同様のもので、6極磁石などの多極磁石で非線形共鳴を誘起し共鳴によるビームの広がりを用いて複数のターンをかけて (通常は、数秒の時間をかけて) 1つのバンチからビームを取り出す方法である。ただし、Fig. 1 に示したように 100 Hz で繰り返されるビームを取り出すには、ビームを 1 ms 程度 (数 100 turn の周回) の時間で取り出す必要があるため、共鳴を強く励起する必要がある。6極磁石により誘起される3次共鳴の driving term はつぎのように書かれる。

$$G_{3,0,l} = \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \oint \beta_x(s)^{3/2} S(s) e^{i[3\chi_x(s) - (3\nu_x - l)s]} ds \quad (1)$$

ここで、 $\beta_x(s)$ 、 $\chi_x(s)$ はそれぞれラティスの水平方向のベータatron振動の振幅関数と位相関数である。また、 $S(s)$ はラティスにおける6極磁場の強度分布、 ν_x は水平方向のチューンである。 l は、共鳴のモードを表す整数である。このことから、 $\beta_x(s)$ の値が大きな領域に6極磁石を設置し、その強度を1msの時間で変調させることで取り出しに必要な共鳴を励起可能である事がわかる。また、3.1に記述したように

chromaticity の値を有限値に設定する事で加速空洞の周波数を変調する事でチューンを変調する事でも、共鳴の強度を制御する事ができる。この共鳴ビーム取り出しに用いるリングの構成要素の概略を Fig. 2 に示す。

この図のように、リング中の4つの長直線部のうちの2つに加速空洞を設置し、残る2つの直線部に共鳴励起用6極磁石を設置する。共鳴により広がったビームはセプタムマグネットを用いる事で周回ビームと取り出しビームに弁別される。この時のビームロスを低減するため、セプタムマグネットにはビーム弁別位置に物理的な構造物を持たないマスレスセプタムマグネットの採用を検討している。この図で示すような位置に厚さ 30 cm の6極磁石を配置したラティスにおいてビームトラッキングを行なった結果、6極磁石が 1 T/m^2 の磁場を 1 ms 以内に励磁可能であれば、共鳴を用いたビーム取り出しが実現可能であるという結果が得られた。このような性能を持ったパルス6極磁石のとマスレスセプタムの設計が今後の課題となる。

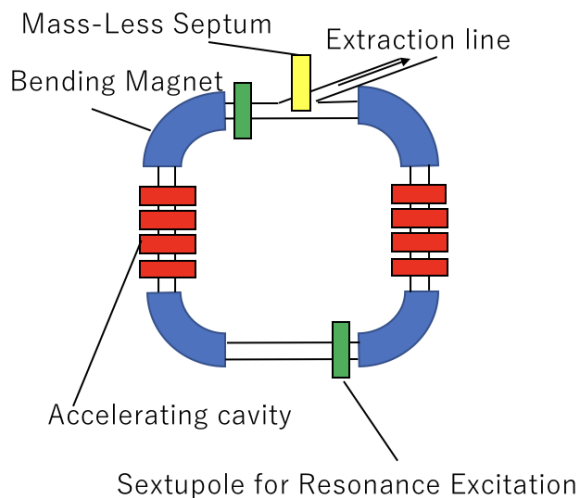


Figure 2: Image of RCS operation in time for high-repetition beam acceleration.

4. 高温交流超伝導技術を用いた偏向磁石の損失低減

100 Hz で励磁する主偏向マグネットにおいて電力損失を低減するため、コイルに高温交流超伝導線材を用いることを検討している。高温交流超伝導コイル内部では、ジュール損失が発生しないためコイル内部での損失を大幅に低減できる。一方で、交流で磁場を励磁する場合、線材内部にピン留めされる磁束が移動するためエネルギー損失が発生する。この損失は交流損失と呼ばれており、その低減が重要となる。交流損失の大きさはコイル部に発生する磁場の強度とコイルと磁場が鎖交する角度に依存することが明らかとなっている [8]。そのため、その損失を低減するための磁極形状、コイル配置、クライオス

タットの設計が今後の重要な開発要素となる。

5. まとめと今後の展望

信頼性が高くかつエネルギー効率の高い加速器駆動核変換システムの実現のため、次世代型高繰返しシンクロトンを設計している。これまでにラティスの基本設計、ビーム取り出しに用いる非線形光学系の設計が終了している。今後は、具体的なマグネットの形状を設計することでシステムの概念設計の確立を目指している。

謝辞

Work supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology under the Innovative Nuclear Research and Development Program. The authors acknowledge Dr. K. Tsujimoto, Dr. K. Nishihara and Dr. T. Sugawara for their fruitful comments for ADS drivers. We are also grateful to Dr. H. Kitaguchi and Dr. A. Matsumoto for their valuable advise on superconducting technology.

参考文献

- [1] T. Takizuka *et al.*, JAERI R&D on accelerator-based transmutation under OMEGA program, AIP Conference Proceedings 346, 64 (1995).
- [2] K. Tsujimoto *et al.*, Neutronics Design for Lead-Bismuth Cooled Accelerator-Driven System for Transmutation of Minor Actinide, J. Nucl. Sci. Technol., 41, 1, 21-36 (2004).
- [3] H. Takei *et al.*, Estimation of acceptable beam-trip frequencies of accelerators for accelerator-driven systems and comparison with existing performance data, J. Nucl. Sci. Technol., 49, 4, pp. 384-397 (2012).
- [4] C. Patrignani *et al.* (Particle Data Group), Chapter 34, Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016) and 2017 update.
- [5] High-Intensity Proton Accelerator Project Team, J-PARC, JAERI Report No. JAERI-Tech 2003-044.
- [6] H. Hotchi *et al.*, Achievement of a low-loss 1-MW beam operation in the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 060402 (2017).
- [7] Y. Fuwa *et al.*, WEP023, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017.
- [8] T. Sogabe *et al.*, AC Loss Characteristics in REBCO Coil Assemblies With Different Geometries and Conductors, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, no. 3, 4700105 (2018).