

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の設計 DESIGN STUDY OF RAPID CYCLE SYNCHROTRON FOR ACCELERATOR DRIVEN 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)}Research Reactor Institute, 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 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 plan, we aim to realize miniaturization and high reliability by adopting an alternating high temperature superconducting magnet and a high repetition synchrotron applying resonant beam extraction. In this presentation we report the basic design of the optical system and beam acceleration sequence of this synchrotron.

1. はじめに

原子炉運転後に生ずる使用済み燃料の処分は、全世界的に取り組まなければならない課題である。出力1GWの軽水炉を1年間稼働した場合に発生する使用済み燃料は約20tであり、日本においては現時点で約17,000tの使用済み燃料が保管されている。使用済み燃料1tの中には、1kgのマイナーアクチノイドが含まれている。マイナーアクチノイドには半減期が200万年に及ぶものもあり、使用済み燃料から生じる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には約1万年の時間を必要としていることが、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(ADS: Accelerator Driven transmutation System)を用いれば使用済み燃料中のマイナーアクチノイドを安定核や短寿命核に変換でき、潜在的毒性の減衰時間を1万年から数百年に短縮できる[1]。ADSが放射性廃棄物の有害度低減を目的とした核変換システムとして有効に機能するためには、核変換システム中の未臨界炉の電気出力が核反応駆動用の加速器の消費電力を十分に上回る必要がある。ADSの未臨界炉の熱出力を800MW、電気出力を270MWと想定し、炉内での中性子の実効増倍率を0.97と仮定すると、駆動用加速器のビーム出力として30MWが必要となる。すなわち、加速器は270MWを十分下回る消費電力で、30MWのビーム出力を得る必要がある。また、未臨界炉からの電気出力の一部を商用の電力網に供給することを考慮した場合、加速器消費電力として100MW、すなわち加速ビームのエネルギー効率(30%)が一つの目標として掲げられている。

本研究では、小型・低消費電力で、安定した陽子ビームを供給可能な加速器の実現を目指し、円形加速器を用いた駆動用加速器システムを設計・検討している。

2. 円形加速器を用いた核変換システム

ADS駆動用の加速器はこれまで主に線型加速器の使用が検討されてきたが、線型加速器に高周波電力を供給する電源が多数必要となり、ビーム停止の原因となる各構成要素の故障確率が大きくなるという課題がある。ADSにおけるビーム停止は、原子炉構造物の熱疲労損傷につながるため、その頻度の低減が肝要となる[2]。円形加速器を用いる場合には線型加速器に比べて高周波電源の数が少なくなるため、ビーム停止の可能性の低いシステムの構築が可能となる。一方で、円形加速器を用いる場合、偏向電磁石での電力消費低減やビーム取り出しにおける効率向上が重要な課題となる。そこで本研究では、以下のような機能的特徴を有する高繰り返しシンクロトロンの(RCS: Rapid Cycle Synchrotron)を用いることで高効率・高信頼性を実現することを目指している。

2.1 高温交流超伝導材を用いた偏向磁石

偏向磁石にコイルを通常の導線を用いるとジュール損失のために消費電力が膨大になり、エネルギー効率を制限する。ここで、超伝導線材を用いればジュール損失は基本的にゼロとなるため、電磁石における消費電力が大幅に削減可能になる。ただしRCSの場合、数10から数100Hzという高繰り返しで励磁するため、交流損失と呼ばれるエネルギー損失がコイルにおいて発生する。この損失は超伝導線材が励磁サイクルにおいて経験する磁場の時間変化から推定することが可能であり、交流損失を抑制する磁極・コイル形状の検討を進めている。

2.2 共鳴ビーム取り出し

RCSからのビーム取り出しには、キッカーマグネットを用いる方式が一般的である。しかし、本研究で対象とするRCSでは小型化のために周長を短くする必要性からキッカーに許容される立ち上がり時間が制限されるために、ビーム取り出し時のビームロスが大きくなる懸念がある。そこで、ベータatron振動の共鳴を用いた取り出しを採用することを検討している。

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

3. RCS ラティスの検討

前節で記述したように本研究では ADS 駆動用加速器に高線り返しシンクロトロン (RCS) 方式を採用を検討している。加速粒子は陽子、入射・取り出し時のビームエネルギーはそれぞれ 100 MeV、1.5 GeV として、100 Hz の線り返し周期で、平均ビーム電流は 1 mA を想定し、ラティスを設計した。また、ラティスの設計指針として、以下のような条件を定めた。

- 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、及び、高線り返し運転での加速空洞の電圧を低減することを目的として、シンクロトロンの周長をできるだけ小さくすること。
- 磁極内部の飽和の影響の少ない領域で励磁するために、最大磁束密度を 1.5 T 程度とすること。
- $3\nu_x = 11$ の水平ベータトロン振動の共鳴を用いてビームを取り出すために、水平ベータトロンチューンを共鳴条件に近い 3.70 にすること。

これらの条件を元に設計したラティスの特性を Figure 1 に示す。このラティスでは、周長を短くするために機能結合型偏向磁石を採用し、4 つの長直線部を設けた。これらのうち 2 箇所に加速空洞を配置して、残りの 2 箇所にそれぞれビーム入射機器と取り出し機器を配置可能である。水平・垂直のベータトロンチューンはそれぞれ 3.70, 2.74 とした。このラティスの natural chromaticity は水平・垂直方向に対してそれぞれ -9.55, -8.76 程度であるが、機能結合型偏向磁石に 6 極成分を追加することで chromaticity を水平方向は -1.25、垂直方向には 0 に補正する。この水平方向に有限な chromaticity を用いて、取り出し時にビームのエネルギーを変調させ、チューンを制御することで共鳴取り出しが可能になる。

chromaticity 補正後の dynamic aperture の評価のため 6 極成分を含んだ機能結合型ラティスに対してビームトラッキングを行った。アーク中央部の切断面でのポアンカレマップを Figure 2 に示す。この結果から、セパトリクスは -0.23 m から 0.16 m までの領域にあることがわかる。設置するビームダクトの大きさは ±0.1 m を想定しており、十分大きな dynamic aperture を確保可能であると言える。

ここまでに検討しているラティスは機能結合型偏向磁石を採用するものであるが、実際の運転を考えた場合、機能結合型ではパラメータ調整の自由度が少ないという短所がある。そのため、偏向電磁石と集束電磁石の励磁強度を独立に変更可能な機能分離型磁石を用いたラティスを並列に検討している。本研究で検討している機能結合型ラティスと機能分離型のラティスの基本パラメータを Table 1 にまとめる。ここで検討したラティスパラメータを元に偏向・集束電磁石の基本形状を決定し、高温超伝導コイルの配置などを検討することで交流損失や鉄損を最小化可能な電磁石を構成することが今後の課題となる。

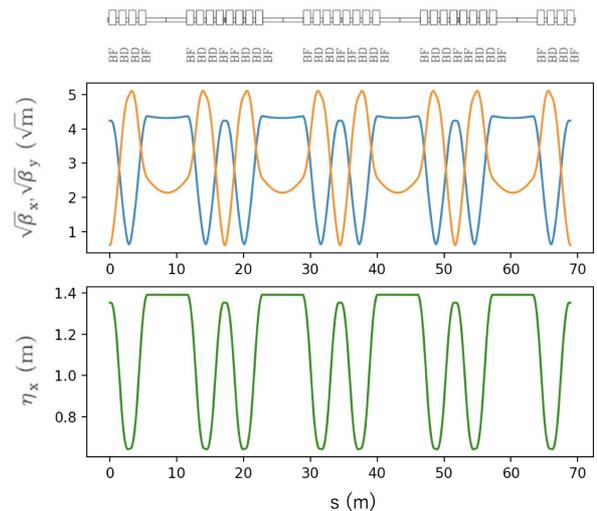


Figure 1: Calculated lattice function with combined function magnets. (Top) schematic view of lattice distribution. (middle) beta-function of horizontal (blue) and vertical (yellow) direction. (bottom) dispersion function of horizontal direction.

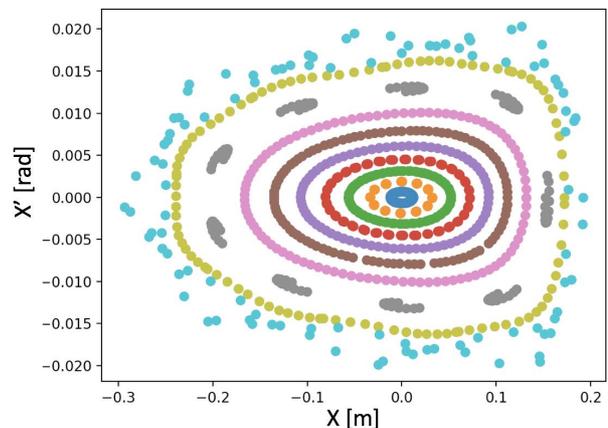


Figure 2: Poincare plot in phase space of the horizontal direction.

4. 加速パターンの検討

前節で設計したラティスの周長は 68.9 m (機能結合型)、107.2 m (機能分離型)であった。加速陽子の運動エネルギーが 100 MeV から 1.5 GeV の場合、ビームの周回周波数は 1.8 - 4.0 MHz (機能結合型)、1.2 - 2.6 MHz (機能分離型)である。harmonic number を 1 とする場合、この周波数が加速空洞の運転周波数となり、金属磁性体装荷型の空洞を用いれば 20 kV/m 程度の加速勾配が十分実現可能である。加速空洞を配置可能な長直線部は、機能結合型において 12 m 程度、機能分離型において 24 m 程度確保可能であるため、一周あたりの加速エネルギーはそれぞれ 200 keV、400 keV 程度の最大加速電圧が仮定できる。この仮定のもとで、粒子を断熱捕獲して加速する運転パターンを検討した結果を

Table 1: Designed Lattice Parameters

	combined function	separated function
symmetry	4	4
maximum flux density in bending magnets [T]	1.40	1.47
curvature radius [m]	5.36	5.09
circumference [m]	68.9	107.2
number of bending magnets	32	16
bending angle per magnet [degree]	11.25	22.5
length of a bending magnet [m]	1.053	2.000
number of long straight section	4	8
length of long straight section [m]	6.00	6.00
momentum compaction factor	0.09	0.08
chromaticity after compensation	(-1.25, 0)	(-0.63, 0)

Figure 3 に示す。この運転パターンでは、1 ms で断熱捕獲し最大加速位相を 56° に設定し、4.8 ms 程度で加速サイクルを終了することができ、加速後の高周波バケツ面積は 2.0 eVs であった (Figure 4)。

機能結合型ラティスに対しても同様の検討を行った結果、1.5 ms で断熱捕獲、最大加速位相 56° に設定した場合に、4.4 ms 程度で加速サイクルを終了可能であることが示された。機能分離型ラティスの場合、高周波加速空洞の数が多く 1 周あたりの加速電圧が大きくとれることから、高周波バケツの面積は 4.0 eVs と比較的大きく加速サイクルも短くすることができる。

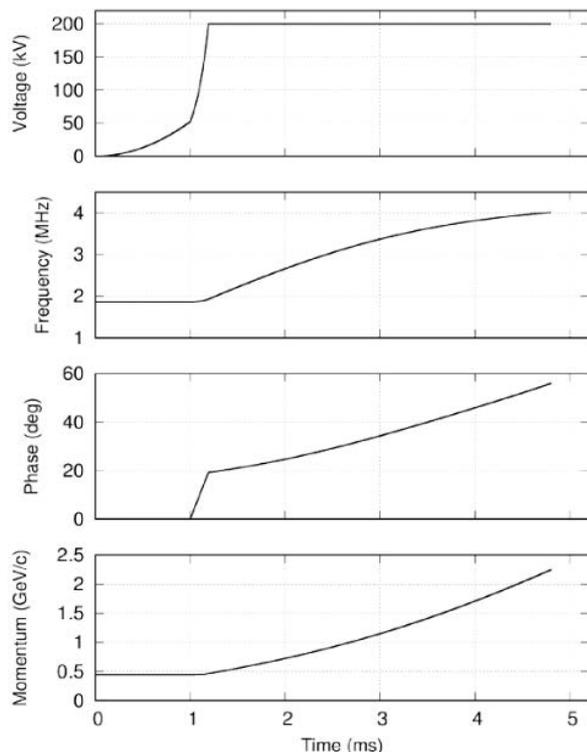


Figure 3: Operation parameter of RF cavities for the combined function lattice.

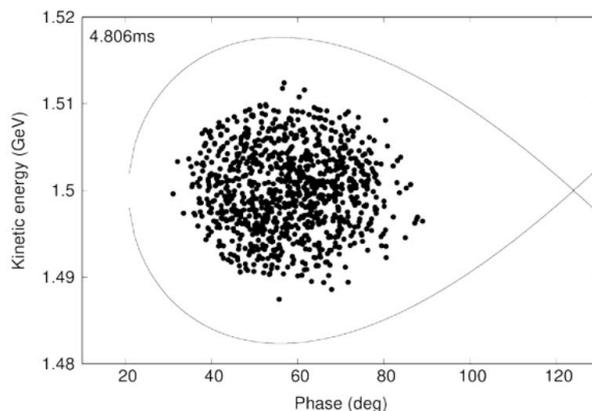


Figure 4: Particle distribution in longitudinal phase space at the end of acceleration.

5. まとめ

ADS 駆動用加速器についての必須条件である高効率・高信頼性を有する加速器を開発するために高温交流超伝導コイルを用いる高繰り返しシンクロトロンを検討している。そのシンクロトロンラティスとして機能結合型・機能分離型の両ラティスを検討し、加速運転パターンを示した。今後はこのラティス検討結果を基礎として、超伝導磁石の形状最適化や取り出し系の構成を確立し、シンクロトロンシステム全体の設計を進める見通しである。

6. 謝辞

本研究は文部科学省の原子力システム研究開発事業の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Oigawa, K. Tsujimoto, K. Nishihara, T. Sugawara, Y. Kurata, H. Takei, S. Saito, T. Sasa and H. Obayashi, Journal of Nuclear Materials 415 (2011) 229-236.
- [2] H. Takei, K. Nishihara, K. Tsujimoto and H. Oigawa, Journal of Nuclear Science and Technology, 49, 4 (2012) pp. 384-397.