

## 次世代リング型光源のための新しい off-axis 入射スキームの開発

### NOVEL OFF-AXIS BEAM INJECTION SCHEME FOR NEXT-GENERATION STORAGE RING LIGHT SOURCES

高野史郎<sup>#A)</sup>, 渡部貴宏<sup>A)</sup>, 深見健司<sup>A)</sup>, 近藤力<sup>A)</sup>, 大石真也<sup>A)</sup>,  
谷内努<sup>B)</sup>, 田村和宏<sup>B)</sup>, 小路正純<sup>B)</sup>, 稲垣隆宏<sup>C)</sup>, 原徹<sup>C)</sup>, 田中均<sup>C)</sup>

Shiro Takano<sup>#A)</sup>, Takahiro Watanabe<sup>A)</sup>, Kenji Fukami<sup>A)</sup>, Chikara Kondo<sup>A)</sup>, Masaya Oishi<sup>A)</sup>,  
Tsutomu Taniuchi<sup>B)</sup>, Kazuhiro Tamura<sup>B)</sup>, Masazumi Shoji<sup>B)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>C)</sup>, Toru Hara<sup>C)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>C)</sup>,

<sup>A)</sup>JASRI/RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup>JASRI

<sup>C)</sup>RIKEN SPring-8 Center

#### Abstract

Ring-based light sources are now competing performance upgrade to pursue photon brilliance. One bottle neck for this upgrade is a beam injection scheme. For the SPring-8 upgrade, renewal plan to inaugurate a next-generation storage ring light source, we are developing a new beam injection system based on renovation of an off-axis beam injection scheme to meet the main requirements for beam injections as follows: a smaller injection beam amplitude, smaller perturbations to stored beam, and topping up functionality. Overview of the new off-axis beam injection system and development status of the following three key components are described: 1) permanent magnet based DC septum magnet, 2) in-vacuum pulse septum magnet, and 3) twin kickers driven by a single solid state pulsed power supply.

#### 1. はじめに

次世代のリング型光源加速器では、更なる高輝度を実現する低エミッタンス化に向け克服すべき大きな課題として、リングの狭小な動的安定領域へのビーム入射の問題がある。我々は、次世代光源として検討を進めている SPring-8-II[1]を含む新しいリング型加速器への適用を視野に入れて、1)ビーム入射振幅の低減(小振幅入射)、2)蓄積ビームの基本性能への影響の抑制(入射の透明性)、3)トップアップ運転(積上げ自在な繰返し入射)を可能とするため、従来の off-axis 入射システムを構成要素から徹底的に見直した新しい off-axis 入射スキーム(真空封止無摂動 off-axis 入射スキーム)を提案する。同時に新しい技術や材料を導入して建設コスト並びに運転コストの圧縮(省エネルギー化)も図る。

新しい off-axis 入射スキームでは、1)永久磁石による DC セプタム磁石、2)真空封止パルスセプタム磁石、3)高精度固体パルス電源駆動ツインキッカー磁石が、それぞれ、省エネルギー化、小振幅入射、入射の透明性の鍵を握る主要開発項目となる。我々は、昨年より次世代リング型光源実現のための共通の要素技術開発として、これら3項目のプロトタイプ機の開発を開始した。

本稿では、新しい off-axis 入射スキームとともに、開発の全体のコンセプト並びに計画を報告する。

#### 2. 真空封止無摂動 off-axis 入射スキーム

更なる高輝度を実現する次世代のリング型光源加速器が目指す高いビーム性能の核心は、低エミッタンスの

追求である。低エミッタンス化を推し進めていくと必然的にリングの動的安定性は低下し、入射ビームのアクセプタンスが狭くなる。リング型光源加速器の性能を飛躍的に向上させるには、リングの基本性能を損なう事無く必要な蓄積電流まで安定にビーム入射を可能とする技術的なブレークスルーが必要である。

次世代リング型光源で必要となるビーム入射の性能は、

- 現状より1桁程度小さい入射振幅: 1~2mm (現状は 10~15mm 程度)
- 入射プロセスの影響を蓄積ビームの利用者に見せない現状より1桁高い入射の透明性: ビーム入射直後の蓄積ビームの振動量として 10 $\mu$ m 以下 (現状は水平に 100  $\mu$ m 程度)
- 蓄積ビーム電流増強のため積上げ自在の繰返し入射が可能なこと

である。

我々は、次世代光源として検討を進めている SPring-8-II への適用を視野におき、従来から利用されている off-axis 入射システムを、SPring-8 の top-up 運転の経験を基に各構成要素を徹底的に見直し極限まで改良を実施してインテグレートする事で、次世代リング型光源に求められる性能を満たす新しい入射システムとして構築することを提案する。

現状の入射スキームを次世代リング型光源のビーム入射に用いるためには、解決すべき課題がある。多極パルス磁石を用いる入射は、極端に大きい非線形磁場を持ち込まない限り2mm程度を目指す小振幅入射への適用が原理的に困難である。on-axis での swap-out 入射スキームは、入射振幅をほぼゼロとできる反面継ぎ足し入射ができず、高い蓄積電流を実現するには最終バンチ

<sup>#</sup> takano@spring8.or.jp

電流を入射器側で担保しなければならない。最低でも accumulation ring もしくは蓄積リングと同じ規模の booster ring が必要になり高コストとなる。また、大電流の蓄積ビームを入射毎に毎回廃棄する点が、省エネルギー化の観点で大きな課題を残す。縦方向の off エネルギー入射スキームは、エネルギー分散を利用することで入射ビームの横方向の振動を小さくできる反面、かなり大きな運動量アクセプタンスを必要とするのが原理的な課題である。一方、off-axis 入射スキームは、入射ビーム及び蓄積ビームの水平サイズから下限が決まる入射ビームのコヒーレント振幅を、加速器の性能向上によるビームの低エミッタンス化で低減できるメリットがある。入射時の蓄積ビームへの影響を抑制するため、立上りから立下りまでの期間を通して閉じた入射バンパ軌道を形成することが課題となるが、SPring-8 において安定な top-up 運転を実現した成果に基づき、各構成要素を徹底的に見直し改良することで、次世代光源の入射システムとして実用化が可能と考える。

我々の提案する新しい off-axis 入射スキーム(真空封止無振動 off-axis 入射スキームと呼ぶ)を Figure 1 に示す。この新しい off-axis 入射スキームは、以下の点に特徴がある。

- 真空窓フリーの差動排気真空系： 入射振幅を大幅に低減するために、新しい入射システムでは、高品質低エミッタンスビームを生成する SACLA 線形加速器に代表される高性能線形加速器を入射器として用いる。ビーム輸送路と蓄積リングの真空を仕切る真空窓での散乱により高品質入射ビームのエミッタンスを劣化させないように、輸送路の高真空を蓄積リングの超高真空と接続するために差動排気系を導入し、真空窓を撤廃する。

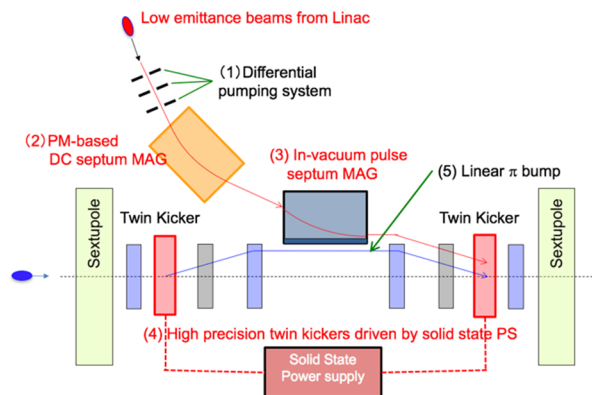


Figure 1: Schematic of the new off-axis beam injection system.

- 永久磁石による DC セプタム磁石： 従来の off-axis 入射システムにおいて電力消費の大部分を占める DC セプタム電磁石を永久磁石化し、ビーム入射システムの電力消費を大幅に削減する。
- 真空封止パルスセプタム磁石： パルスセプタム電磁石を蓄積リング側超高真空チェンバー内部に設置可能な真空封止型とする。入射ビームと蓄積ビームの間の真空チェンバー隔壁が不要となり、磁気遮蔽を含むセプタム壁の実効的厚み 1~2mm を

達成する事を目指し、入射振幅を大幅に低減する。

- 高精度固体パルス電源駆動ツインキッカー磁石： 次に述べる線形  $\pi$  バンプ軌道を生成するための 2 台の同一のキッカー磁石 (ツインキッカー磁石) を、高精度の固体パルス電源で並列駆動することにより、2 台のキッカー磁石の磁場パルス波形の同一性を高め、蓄積ビームの振動を誘発させない閉じたバンパ軌道を常に実現させ、ビーム入射の透明性を確保する。
- 線形  $\pi$  バンプ軌道： ビーム入射のために蓄積ビームの周回軌道上に生成させるバンパ軌道が、立上がりから立下りまでの全ての過程で理想的に閉じるよう、バンパ軌道の内側から六極磁石等の非線形磁石を排除する (バンパ軌道の線形化) とともに、位相差  $\pi$  の 2 台のシメトリーなキッカーでバンパ軌道を形成す。

真空封止無振動 off-axis 入射スキームをビーム入射システムとして実現する上で核となる主要開発項目は、1) 永久磁石による DC セプタム磁石、2) 真空封止パルスセプタム磁石、3) 高精度固体パルス電源駆動ツインキッカー磁石の 3 項目である。次章以降では、これらの開発コンセプトと開発の現状を述べる。

### 3. 永久磁石による DC セプタム磁石[2]

ビーム入射システムにおいて電力消費の大半を占める DC セプタム電磁石の永久磁石化は、次世代リング型光源の入射システムの省資源・省エネルギー化に大きく貢献する。また、電源の安定度に左右される電磁石を排除し永久磁石による安定な磁場で入射ビームを偏向することにより、高い蓄積ビーム電流への積み上げのための繰返し入射においても安定な小振幅ビーム入射を可能とする。永久磁石で DC セプタム磁石を開発するためには、蓄積リング入射部の限られたスペースの中で入射ビーム軌道を偏向するための強磁場の実現と、入射を透明化するための蓄積ビームへの漏洩磁場の抑制が課題となる。

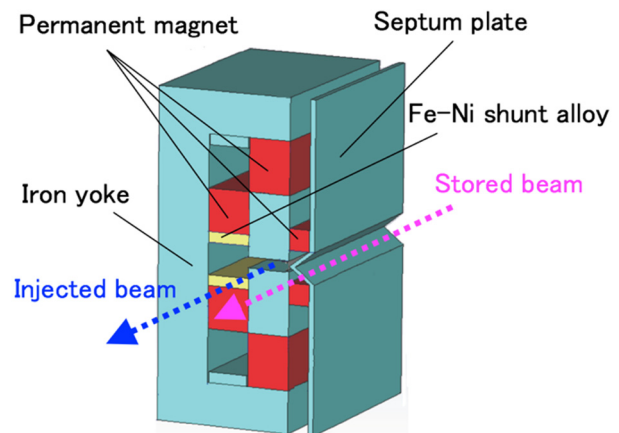


Figure 2: Permanent magnetic based DC septum.

我々は、SPring-8-II に向けた永久磁石による偏向磁石の研究開発[3,4]において得られた知見に基づき、磁場調整機構、磁場の温度変化の補償、放射線による減

磁への対策を取り込んだ、永久磁石による DC セプタム磁石を設計し、試作機を完成させた。設計した磁気回路の構成を Figure 2 に示す。また、完成した試作機を Figure 3 に示す。試作機の基本性能の確認のため、磁



Figure 3: Prototype of the DC septum.

極ギャップ内の磁場分布並びに磁場調整機構によるギャップ内磁場の変化を測定し、設計どおりの性能を達成していることを確認した。今後更に、3次元磁場測定システム[2]を用いて、磁極ギャップ内の磁場分布並びに漏れ磁場分布等を詳細に測定し、次世代リング型光源の入射用磁石としての性能検証を行う。

#### 4. 真空封止パルスセプタム磁石

蓄積リングのビーム入射点に設置されるパルスセプタム磁石を真空封止型とする (Figure 4)。これにより、入射

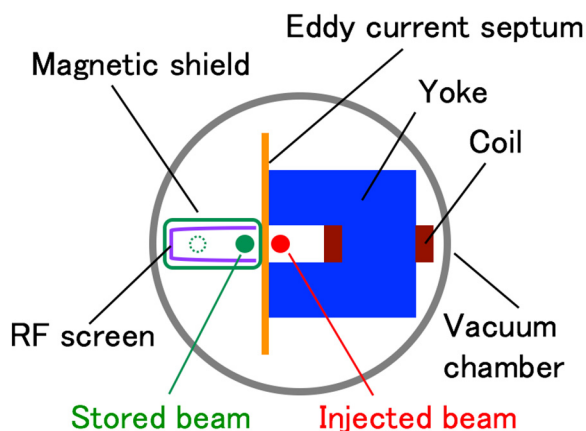


Figure 4: Schematic of an in-vacuum pulse septum.

ビームと蓄積ビームの間の隔壁 (入射ビーム用と蓄積ビーム用に分かれていた二つの真空チャンバーの壁) がなくなり、小振幅でのビーム入射が可能となる。セプタム板と磁気遮蔽についても薄型化を図り、入射振幅 1mm ~ 2mm を目指す。また、蓄積ビームの基本性能に影響を与えない透明なビーム入射を実現するために、蓄積ビーム側への磁場漏洩を抑制する設計を行い、蓄積

ビームの振動量 10 $\mu$ m 以下を目指す。

真空封止パルスセプタム磁石の開発では、超高真空達成のためのヨークやコイルからの脱ガス抑制と入射を透明化するための蓄積ビームへの漏洩磁場抑制の両立が成功の鍵を握る。これまでに、真空設計のための基本データとして、ヨークの素材に用いる珪素鋼板について、絶縁皮膜の組成やガス放出率などの真空特性を評価した。また、珪素鋼板を積層した評価用のヨークモデルを製作し、ガス放出量など真空特性評価を行なった。珪素鋼板並びにヨークの真空特性評価においては、洗浄及びベーキングの効果に関する評価を合わせて実施し良好な効果を得た。

今後は、セプタム壁及び磁気遮蔽の薄型化と蓄積ビーム側への磁場漏洩抑制を両立させる磁気回路の最適化を行い磁石部の詳細設計を進める。並行して、磁石部を収める真空チャンバーの詳細設計を、蓄積ビームへの RF インピーダンス対策、超高真空を効率よくコンパクトな機器で実現する排気系最適化、セプタム板の渦電流発熱や RF シールドの壁電流発熱を効率良く除熱する冷却最適化に留意しながら進め、H30 年度の完成を目指して試作機を製作する。

#### 5. 高精度固体パルス電源駆動ツインキッカー磁石[5]

蓄積ビームの基本性能に影響を与えない透明なビーム入射を実現させるために、2台のキッカー磁石のパルス磁場波形を偏差 0.1%以下で同一にするツインキッカー磁石を開発する (Figure 5)。高い蓄積ビーム電流へ

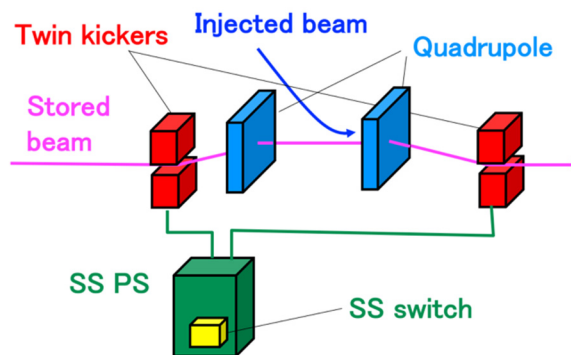


Figure 5: Schematic of twin-kickers driven by a common solid state power supply.

の積み上げを可能とするためには、2台のキッカー磁石の磁場波形同一性を入射プロセスの繰返しの中で安定に維持する必要がある。このため、固体スイッチング素子を用いる 1 台の高精度パルス電源に 2 台のキッカー磁石を並列に接続して駆動する方式を採用する。キッカー磁石 2 台を並列駆動することにより、駆動電源パルスのタイミングジッターが 2 台の磁石で共通となり磁場波形の偏差要因とならず、ビーム入射の透明性が大幅に改善すると期待される。

キッカー磁石を駆動するパルス電源の開発では、駆動パルス電流波形の最適化とこれを実現する回路方式の最適化、キッカー磁石の負荷に応じた波形整形のた

めの調整機構の最適化、出力パルス波形のジッターの低減並びに長期安定化のための固体化(半導体化)を行う。また、キッカー磁石本体の開発では、駆動パルス電流波形に対して時間遅れなく線形に応答し電流波形と相似の励磁波形を実現するため、磁石ヨークの積層構造の周波数応答の最適化を行う。

これまでに、パルス電源開発のための予備試験として、スイッチング素子に用いる IGBT など基本部品について、特性確認や部品選定のための試験を行った。また、2 台のキッカー磁石を 1 台のパルス電源で並列駆動する方式の原理検証のため、模擬磁石 2 台を並列駆動する試験を実施し、2 台の磁石の電流波形の一致、調整用インダクタンスによる各磁石の電流値調整、電力回生回路の動作に関して良好な結果を得た。

引き続き、パルス電源の試作に向けて、回路の詳細設計、電源の構造設計を進めている。また、キッカー磁石についても、中型リング光源への展開を視野に入れて幅  $2\mu\text{s}$  程度までの短パルス励磁を想定し、周波数応答を考慮した設計を行い、試作機を製作する。H30 年度に、試験用のキッカー磁石と組み合わせた総合動作試験を行い、性能検証まで含めた開発を完了させる予定である。

## 6. まとめと今後の計画

我々は、次世代光源として検討を進めている SPring-8-II を含む、次世代の様々なリング型光源への適用を視野に入れて、1)ビーム入射振幅の低減(小振幅入射)、2)蓄積ビームの基本性能への影響の抑制(入射の透明性)、3) トップアップ運転(積上げ自在な繰り返し入射)を可能とするため、従来の off-axis 入射システムを構成要素から徹底的に見直した新しい off-axis 入射スキーム(真空封止無摂動 off-axis 入射スキーム)の開発を開始した。

この真空封止無摂動 off-axis 入射スキームを入射システムとして実現する上で、1) 永久磁石による DC セプタム磁石、2) 真空封止パルスセプタム磁石、3) 高精度固体パルス電源駆動ツインキッカー磁石が、それぞれ、省エ

ネルギー化、小振幅入射、入射の透明性の鍵を握る主要開発項目となる。我々は、昨年より次世代リング型光源実現のための共通の要素技術開発として、これら3項目のプロトタイプ機の開発に取り組んでいる。

永久磁石による DC セプタムについては、試作機を完成させた。今後、詳細な 3 次元磁場測定を行い、入射磁石としての性能を検証する。真空封止パルスセプタムについては、超高真空を達成する真空設計のための基礎データを取得した。今後、磁石部並びに真空チェンバーと排気系の詳細設計を行い、試作機を製作し、性能を検証する計画である。高精度固体パルス電源駆動ツインキッカー磁石については、パルス電源開発のため 2 台のキッカー磁石の並列駆動に関する予備試験等を実施した。今後、パルス電源の詳細設計及び試作を行い、キッカー磁石の試作機と組合せて入射用磁石としての総合的な性能検証を行う計画である。これら全ての開発を H30 年度で完了させる。

## 謝辞

本研究は、文部科学省の競争的資金「次世代加速器要素技術開発プログラム」からの委託事業として実施している。

## 参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “SPring-8 upgrade project”, WEPOW019 in Proc. of IPAC2016, (2016).
- [2] S. Takano *et al.*, “Development of permanent magnet based DC septum”, TUP070 in these proceedings.
- [3] T. Watanabe *et al.*, “Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams in press.
- [4] T. Taniuchi *et al.*, “Status of permanent dipole magnet development for SPring-8-II”, TUOM04 in these proceedings.
- [5] H. Aikawa *et al.*, “Development of high-precision solid state pulse power supply for the kicker magnet of the next-generation electron storage ring”, WEP069 in these proceedings.