

SPring-8-Ⅱにおける再利用を想定した真空封止型アンジュレータの大規模改造 MAJOR REFURBISHMENT OF AN IN-VACUUM UNDULATOR FOR REUSE IN SPRING-8-II

長谷川照晃^{#,A)}, 清家隆光^{B)}, 久間正之^{B)}, 備前輝彦^{B)}, 鏡畑暁裕^{B)}, 金城良太^{A)}, 貴田祐一郎^{A)}, 田中隆次^{A)}
Teruaki Hasegawa^{#,A)}, Takamitsu Seike^{B)}, Masayuki Kuma^{B)},
Teruhiko Bizen^{B)}, Akihiro Kagamihata^{B)}, Ryota Kinjo^{A)}, Yuichiro Kida^{A)}, Takashi Tanaka^{A)}
^{A)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)
^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

We will refurbish a number of insertion devices in the SPring-8 upgrade project. Because the straight section in the upgraded storage ring is shortened (from 5.7 m to 4.2 m), the refurbished device should be shorter than 3.6 m. For purposes of validation of the replace scenario, the components of magnetic, vacuum and others were restructured after cutting the common base by means of a wire-saw cutter. The reason for choosing the wire-saw as the cutting device is that it can be applied to undulators, which have a complicated structure and placed in a narrow space.. The period for reconstruction was about 2 months, and the total cost was about 1/10 of that required for construction of a standard in-vacuum undulator, although the achievable brightness is about 1/3 of that optimized for the upgraded storage ring. The refurbished device was installed in the storage ring in April, 2017.

1. はじめに

1997年に供用を開始から約20年が経過したSPring-8では、蓄積リングを極低エミッタスリングに改造し、1桁以上の高輝度化を図る次期計画(SPring-8-II[1,2])が検討されている。電子ビームエネルギーは6 GeVに低減されるため、挿入光源には、輝度やフラックスといった光源性能を向上させつつ、ユーザーの利便性が悪化しないように波長や偏光制御などの光源特性を維持することが求められる。これに対応して、標準的挿入光源の磁石周期は32 mmから22 mmに短周期化する。また、建設に関連して次の要請がある。①挿入光源を設置する直線部は今より約1.5m縮小 ②建設費用の圧縮 ③シャットダウン期間の短縮である。SPring-8のアップグレードに向けて、これらを考慮した挿入光源の置換シナリオを検討している。一つの方法として、数多くある標準的な真空封止型アンジュレータの既設コンポーネントを可能な限り再利用してダウンサイジングすることで、挿入光源の全体費用や製作スペースを縮小する方法を提案し、大規模な改造を試験的に実施した。本稿では、この大規模な改造内容について述べる。

2. 挿入光源の現状

SPring-8で稼働するビームラインは57本あり、このうち、挿入光源を持つビームラインは34本である。Table 1に挿入光源の種類と利用状況を示す。挿入光源は合計49台で、複数の挿入光源を利用するビームラインもある。真空封止型アンジュレータは大小合わせて35台で、生成する磁場の種類によって水平、垂直、ヘリカル、8の字、テーパーに分けられる。SPring-8では、標準的な真空封止型アンジュレータが27台あり、最も多い。これに対して、大気型アンジュレータは14台である。

Table 1: Insertion Devices List of Each Beam Line

BL 番号	構造 (台数/直線部)	磁場 種類	周期 [mm]
BL03XU	真空封止	水平	32
BL05XU	真空封止	水平	32
BL07LSU	大気 (8)	8の字	100
BL08W	大気	ウィグラー	120
BL09XU	真空封止	水平	32
BL10XU	真空封止	水平	24
BL11XU	真空封止	水平	32
BL12XU	真空封止	水平	32
BL13XU	真空封止	水平	32
BL15XU	大気/リボルバ	水平	44/92
BL16XU	真空封止	水平	32
BL17SU	大気/電磁石	偏光制御	260
BL19LXU	真空封止 (5)	水平	32
BL20XU	真空封止	水平	26
BL22XU	真空封止	水平	38
BL23SU	真空封止 (2)	ヘリカル	75.2
BL24XU	真空封止	8の字	26
BL25SU	大気 (2)	ヘリカル	120
BL27SU	大気	8の字	100
BL28XU	真空封止	テーパー	32
BL29XU	真空封止	水平	32
BL32XU	真空封止	水平	26
BL33XU	真空封止	テーパー	32
BL35XU	真空封止	水平	20
BL36XU	真空封止	テーパー	32
BL37XU	真空封止	水平	32
BL39XU	真空封止	水平	32
BL40XU	真空封止	ヘリカル	36
BL41XU	真空封止	水平	32

[#] hasegawa@spring8.or.jp

BL 番号	構造 (台数/直線部)	磁場 種類	周期 [mm]
BL43LXU	真空封止 (3)	水平	19
BL44XU	真空封止	水平	32
BL45XU	真空封止	垂直	37
BL46XU	真空封止	水平	32
BL47XU	真空封止	水平	32

3. 基本条件と置換シナリオ

3.1 基本条件

挿入光源に関する基本条件は、以下の3つである。

- 挿入光源の短尺化
- 新規製作・改造費用の縮小
- 運転停止期間の短縮

まず、ラティス変更に伴い、磁石や BPM などの機器数が増大するため、挿入光源を設置する直線部は現状 5.7 m から 4.2 m へと短くなる。このため、既存の挿入光源をそのまま再利用することは、不可能である。次に、アップグレードでは、必然的に多くの機器を入れ替えなければならない、かかる費用も大きい。機器の再利用を可能な限り進める必要があり、挿入光源もひとつである。最後に、蓄積リングの改造中は放射光が利用できないことから、利用再開までの運転停止期間は短期が望まれる。挿入光源を含む全機器の入れ替えから単体動作試験までを 1 年以内に完了させるべく、マシン収納部での作業は、戦略的に進める必要がある。

3.2 置換シナリオ

挿入光源の置換シナリオとして 3 つの方法を併用することを考えている。ひとつ目は、既存の挿入光源を、新たに製作した挿入光源へと置き換える方法である。ふたつ目は、既存光源の架台や真空チャンバを改造して再利用し、磁石列のみを新規に製作して入れ替える方法である。3 つ目は、既存光源の架台や真空チャンバを改造するとともに磁石列も再利用する方法である。

これらの方法を光源性能、費用、停止期間中の作業量の観点で評価した結果を Table 2 に示す。当然、光源性能は挿入光源の架台や磁石列を新規に製作する場合に最良となる。また、事前に製作できるため、停止期間中のマシン収納部では既存光源の撤去と新光源の設置のみになり、他の方法に比べて作業量は少なくでき

Table 2: Evaluations of Refurbishment Plan

Replace Scenario of Insertion Device	Brilliance	Cost	Work on Shutdown
Frame & Chamber : New Magnetic Array : New	High	High	Low
Frame & Chamber : Reuse Magnetic Array : New	Middle	Middle	High
Frame & Chamber : Reuse Magnetic Array : Reuse	Low	Low	Middle

る。ただし、費用については割高になる。一方、挿入光源の架台や磁石列を再利用する場合は、費用を抑えられても停止期間中の改造作業が多く発生する。

真空封止アンジュレータの新規製作では、多極着磁ブロックを用いた吸引力相殺機構に基づく軽量コンパクトなアンジュレータ(IVU-II) [3]を開発している、これを採用する。BL25SU のヘリカルアンジュレータや BL27SU の 8 の字型アンジュレータを例とする特殊な挿入光源については新規製作が必要である。

既存光源の架台改造を伴う残り 2 つの方法は、新規製作の代替案であるが、改造方法の有効性や実施環境での実現可能性については検証が必要である。そこで、BL35XU で 1999 年 8 月から 2010 年 3 月まで利用した後、組立調整実験棟に保管していた標準的な真空封止型アンジュレータを実際に改造した。

4. 大規模改造

4.1 改造方法

SPring-8 で標準的な真空封止型アンジュレータの外形図を Figure 1 に示す。大きな基礎躯体に 3 つの構造体が乗る。構造体はユニット化され、磁石列や真空チャンバ、駆動機構を備える。各ユニットは機械部品で連結され、1 台の挿入光源として機能する。まず、基礎躯体の長手方向 1/3 の位置で切断し、連結部品を取り外して左側の 1/3 サイズ架台を分離する。続いて右側の 2/3 サイズ架台に端部磁石やエンコーダを移設し、電気配線・冷却水配管を再構築する方法で改造した。再利用できる既存コンポーネントは最大限に活用した。アップグレードでは、搬出/搬入にかかる時間、費用および作業スペースを削減するため、マシン収納部内での改造を想定する。

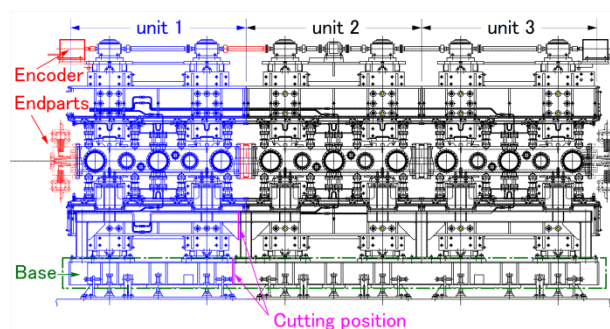


Figure 1: External view of an in-vacuum undulator before refurbishment.

4.2 基礎躯体の切断

マシン収納部は閉所空間で、なおかつ放射線管理区域であることから、切断方法は次の点を考慮した。

- 熱変形を防止するために発熱量を抑制できる
- 発火・発煙が少ない
- 既設位置で施工できる

停止期間中は多くの作業が同時並行的に実施されることから、他の工事に影響を与えないように既設位置での改造が望ましい。これらの条件を満たす切断方法として、ダイヤモンドワイヤーソーを選定した。ダイヤモンドワ

ワイヤーソーとは、凹凸のある硬質ゴム被覆に工業用ダイヤモンドを埋め込んだ金属芯ワイヤーのことである。これを金属やコンクリートなどの被切断体に押し付け、モーター駆動で高速に回転することで切断できる。ガイドプーリーや駆動モーターは自由にレイアウトできることから、挿入光源のように形状が複雑で周辺機器が密集する環境でも使用できる。切断装置の概略を Figure 2 に示す。基礎躯体をダイヤモンドワイヤーでループ状に囲い、上面から下方へと切り進む。切断に伴って生じるワイヤー余長は、駆動モーターの位置調節で吸収する。

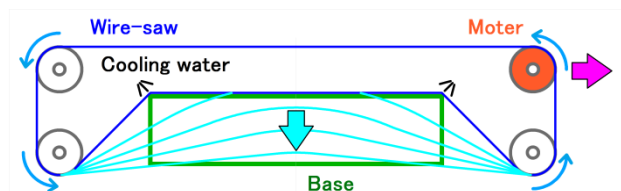


Figure 2: Setup of wire-saw.

安全は、装置周辺を防護ネットやポリカーボネート板で区画して担保した。ダイヤモンドワイヤーソーの外径は $\phi 10$ で、これによる切断幅は約 12 mm である。発熱は、切断スピードの調節と、純水ミストを切削部やダイヤモンドワイヤーソーに噴射することで抑えた。使用した冷却水は 3 L で、基礎躯体の切断部近傍の最高温度は約 70 °C であった。発煙や発火もほとんどない。切断時間は約 240 分で、冷却水噴射位置の調節やダイヤモンドワイヤーソーの接合部交換、温度確認のために作業を一時中断した。切断後にバリ取りや防錆塗装などの後処理を行った。この切断作業のほかに機材搬入やセットアップ、後処理や機材撤去、1/3 サイズ架台の移動などで合計 1 週間の日程が必要であった。

4.3 再構築

2/3 サイズ架台を挿入光源として機能させるため、構成機器の再構築作業を行った。作業内容と所要時間を Table 3 に示す。基礎躯体を切断した後に電気配線整理や冷却水配管の再構築、続いて端部磁石改造や磁場測定/調整、そして直線部中心への移動やアライメント、最後に、真空確認という順序で逐次的に実施した。再構築に要した期間は約 2 カ月であった。

完成したアンジュレータの外観を Figure 3 に示す。磁石列寸法は 4590 mm から 3060 mm、ビーム軸上の取り付け寸法は、4940 mm から 3410 mm に短縮された。このアンジュレータは SPring-8 BL05 に設置され、2017 年 4 月からのユーザー利用によって、光源性能と改造方法の有効性が確かめられた。

4.4 追加オプション

今回の改造では、基礎躯体の切断と再構築作業の技術的検証が主な目的であったため、磁石列は交換していない。しかし、磁石周期 22 mm の新しい磁石列に交換することで、輝度は最適化した新型挿入光源の 5/6 程度まで大きく改善する。このオプションは、事前に磁石列を製作し、停止期間中に 1 週間ほどかけて交換することで有効になる。

Table 3: Refurbishment Work and Time Span

作業	内容	必要日数 [week]
基礎躯体切断	準備(切断機設置など) 切断 仕上げ/片付け 1/3 サイズ架台 移動	1
再構築	電気配線 整理 冷却水配管 再構築 回転エンコーダ 交換	1
真空作業 (撤去)	IP/NEG/BAG/銅フォイル/ 端部チャンバ/フランジ 取り外し	1
端部磁石改造	既存磁石 部分撤去 端部磁石/補正磁石 設置	0.5
磁場測定/調整	磁場分布/積分 測定 多極磁場 補正	1
真空作業 (設置)	IP/NEG/BAG/銅フォイル/ 端部チャンバ/フランジ 取り付け	1.5
アライメント	ベース工事 直線部中心へ移動 アライメント	0.5
真空確認	リーク試験/ベーキング	1.5



Figure 3: External view of an in-vacuum undulator after refurbishment.

5. 検討事項

アップグレードでは、マシン収納部で多くの作業が予定される。複数台を同時改造した場合には、他工事との干渉が懸念されるため、全体工程に照らし合わせた実施計画を検討する。また、今回の改造で真空チャンバに常設されたベーキングヒータ線の老朽化による断線が多く確認された。ヒータージャケットを準備するなどの対策が必要である。さらに、架台構造が異なるテーパー磁場を生成する真空封止型アンジュレータについても、改造方法を検討する。

6. まとめ

SPring-8 のアップグレードに向けて、標準的な真空封止型アンジュレータの再利用を目的として、大規模な短尺化改造を試験的に実施した。改造は基礎躯体をダイ

PASJ2017 WEP018

ダイヤモンドワイヤーソーで切断し、2/3 にダウンサイズした
架台に端部磁石やエンコーダを移設して、電気配線・冷
却水配管を再構築する方法で、蓄積リングのマシン収納
部でも実施可能である。改造期間は約 2 カ月で、挿入
光源を新規に製作する場合と比較して費用は約 1/10 に
抑えられるメリットがある。一方、磁石周期 22 mm、磁石
列長さ 3.6 m の最適設計に比べて、放射光の輝度は
1/3 まで低下するデメリットもある。

改造を終えたアンジュレータは SPring-8 BL05 に設置
され、2017 年 4 月からのユーザー利用によって、光源性
能と改造方法の有効性が確かめられた。

参考文献

- [1] SPring-8-II Conceptual Design Report, Nov. 2014;
<http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [2] H. Tanaka *et al.*, "SPring-8 Upgrade Project", Proc. of
IPAC2016, Busan, Korea, p.2867.
- [3] R. Kinjo *et al.*, "Lightweight-compact variable-gap
undulator with force cancellation system based on multipole
monolithic magnets", Review of Scientific Instruments 88,
073302 (2017).