

3GeV 放射光蓄積リング電子ビームサイズモニター用3極ウィグラーの開発 DEVELOPMENT OF A 3-POLE WIGGLER FOR THE ELECTRON BEAM SIZE MONITOR IN THE 3 GEV SYNCHROTRON RADIATION RING

上島考太^{#, A)}, 高野史郎^{B), C), A)}, 前坂比呂和^{C)}, 正木満博^{B), A)}, 藤田貴弘^{B), A)}, 出羽英紀^{B)}, 渡部貴宏^{B), C), A)},
深見健司^{B), C), A)}, 谷内努^{B)}, 西森信行^{A)}

Kota Ueshima^{#, A)}, Shiro Takano^{B), C), A)}, Hirokazu Maesaka^{C)}, Mitsuhiro Masaki^{B), A)}, Takahiro Fujita^{B), A)}, Hideki Dewa^{B)},
Takahiro Watanabe^{B), C), A)}, Kenji Fukami^{B), C), A)}, Tsutomu Taniuchi^{B)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{C)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

The new 3 GeV synchrotron radiation (SR) ring under construction in Sendai will provide the soft through tender X-rays more brilliant than SPring-8. The precise diagnostics for its small natural emittance and x-y coupling ratio is the key to fully take advantage of its X-rays performances. We have designed a compact 3-pole wiggler and an X-ray pinhole camera to measure the small beam size for the emittance diagnostics. The peak magnetic field of the 3-pole wiggler is more than 1.2 T even though the magnetic pole gap is more than 22 mm. The total length of the 3-pole wiggler along the beam axis is within 180 mm including the non-magnetic holder. In this paper, the design and the expected performance of the compact 3-pole wiggler are reported.

1. はじめに

東北大学青葉山新キャンパスで建設が進む次世代放射光施設は、3 GeV 電子蓄積リング[1-3]に低エミッタンスビームを周回させて、軟 X 線から tender X 線領域において、SPring-8 を凌駕する高輝度放射光を利用実験に提供する計画である。光源性能に直結する電子ビームエミッタンスを診断するため、蓄積リングの各セルに 1 箇所ずつ配置された 1.6 m の短直線部の内の 1 本 (セル 16) に、ビーム診断用硬 X 線光源として 3 極ウィグラーを設置して、X 線ピンホールカメラを用いて光源ビームのプロファイルを測定する計画である。3 極ウィグラーは、硬 X 線から可視光までの広帯域の波長スペクトルの光源に用いる事が可能であり、電子ビームプロファイル測定に加え、可視光線を実験ホール側に取り出してストロークカメラを用いたバンチ長測定を行う予定である (Fig. 1) [4]。

3 GeV 電子蓄積リングの水平自然エミッタンスは 1.14 nm rad 及びカップリング比は 1% であり、3 極ウィグラーを設置する短直線部のビームサイズ (標準偏差) は水平 80 μm 、垂直 6 μm となる。X 線ピンホールカメラは、回折の影響を避けて必要な分解能を得るために 50 keV 程度の硬 X 線で測定を行う。このため、3 極ウィグラーのピーク磁場は、1.2 T 以上が要求される。また、同じ短直線部には、蓄積電流測定用 DCCT のセンサーヘッドが隣接して設置されるため、このセンサーヘッドとの磁気的な干渉を避

ける必要がある。

1.2 T 以上のピーク磁場強度が得られるコンパクトな 3 極ウィグラーを、放射線による減磁の影響が少ないサマリウムコバルト ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) 永久磁石と電磁軟鉄とを組み合わせて設計した。同時に、隣接する DCCT センサーヘッド側への漏れ磁場を抑制する磁気遮蔽を設計した。また、短直線部の両端に設置されるステアリング電磁石 (STMg) で十分に補償できるように、3 極ウィグラーの誤差磁場を抑制する設計及びウィグラー製作段階で補正する方法を検討した。これら基本設計を踏まえて、実機製作に向けた機械設計・詳細設計が現在進行中である。

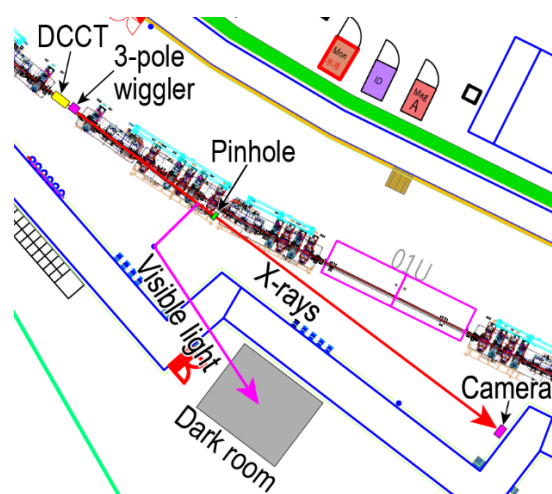


Figure 1: Layout of the beam size monitor line.

[#] ueshima.kouta@qst.go.jp

本稿では、3 GeV 電子蓄積リングにおいて電子ビームエミッタンス診断のための硬 X 線光源に用いる 3 極ウィグラーについて、基本設計、積分磁場の補正手法、並びに 3 極ウィグラーの光源性能について報告する。

2. 3 極ウィグラーの設計

2.1 基本仕様

3 極ウィグラーの基本仕様を Table 1 に示す。X 線ピンホールカメラで測定する 50 keV の硬 X 線を発生させるためピーク磁場を 1.2 T 以上とした。設置する短直線部の空間的制限により、ビーム軸方向(z 方向)の長さを 180 mm 以内とした (Fig. 2)。ウィグラー部真空容器の外寸が 20 mm であることを考慮し、磁極ギャップは 22 mm 以上とした。また、ビーム軸から退避できる構造とするために、C 型形状とし架台上でスライドできる機構を設ける。また、永久磁石面はビーム軸から鉛直方向に磁極面よりもさらに 5 mm 遠ざけた位置に配置し、永久磁石を非磁性のホルダーで完全に覆うことができるものとする。

Table 1: 3-Pole Wiggler Required Specification

Peak magnetic field	> 1.2 T
Total length	< 180 mm (z)
Magnetic pole gap	> 22 mm
Integral magnetic field	< 1 T mm

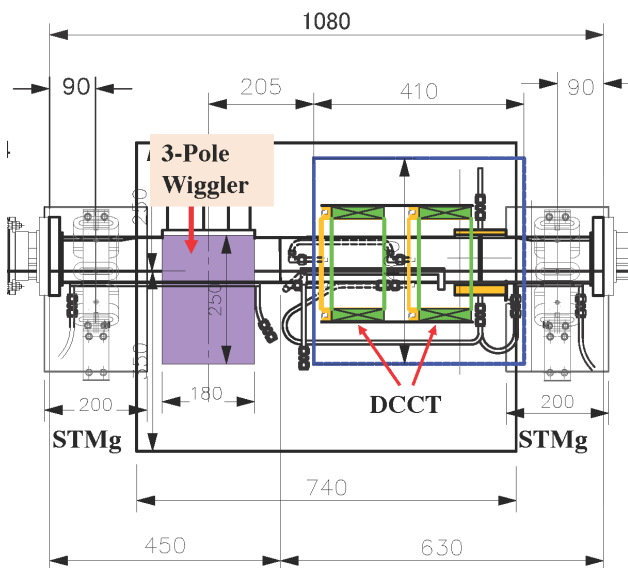


Figure 2: Plane view of the short straight section for 3-pole wiggler and DCCT.

2.2 基本設計

3 極ウィグラーの磁気回路として、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 永久磁石と電磁軟鉄製の磁極を有するハイブリッド型を採用した (Fig. 3)。

DCCT センサーヘッドへの漏れ磁場を地磁気レベ

ル(5×10^{-5} T)以下に低減するため、電磁軟鉄製の磁気シールドとパーマロイ PB 製の磁気シールドを設置する (Fig. 3)。電磁軟鉄製の磁気シールドは、STMg や左右非対称な磁場分布による電子ビームへの影響を考慮して、3 極ウィグラー本体の両側に設置する。また、真空容器を通すために水平方向 150 mm 垂直方向 22 mm の開口を設けて漏れ磁場の影響を見積もった。

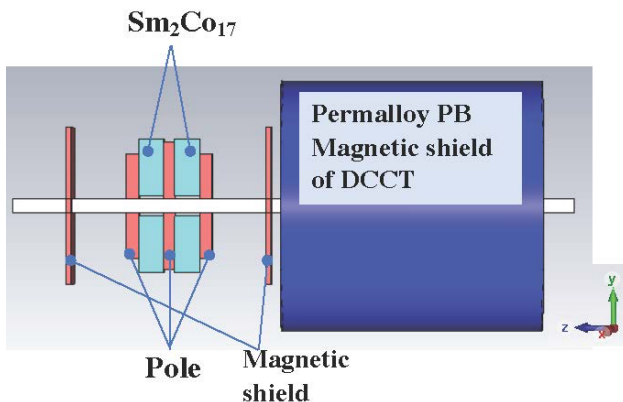


Figure 3: Schematic view of the 3-pole wiggler and magnetic shield.

$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 永久磁石と電磁軟鉄とを組み合わせピーク磁場 1.2 T 以上を得る 3 極ウィグラー磁気回路の基本設計を CST studio [5] を用いて行った。基本設計の段階では、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ の残留磁束密度としてカタログ値の最低値 1.10 T を使用し、保磁力 (H_{CB}) については 834 kA/m として計算を行った。Table 2 示す形状の 3 極ウィグラーを設計し、Fig. 4 に示すピーク磁場 1.2 T が得られる事を確認した。

Table 2: 3-Pole Wiggler Dimensions

$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	100 mm(x), 90 mm(y), 40 mm(z)
Center Pole	70 mm(x), 90 mm(y), 18 mm(z)
Side Pole	60 mm(x), 72 mm(y), 20 mm(z)

3 極ウィグラーのビーム軸方向長さは 138 mm となり、非磁性のホルダー部を考慮しても全長 180 mm 以内に収まる設計である。水平方向の磁場平坦度も $-10 \text{ mm} < x < 10 \text{ mm}$ の範囲で 1% 以内であることを確認した。

DCCT センサーヘッドへの漏れ磁場については、厚さ 9 mm の電磁軟鉄のシールドおよび厚さ 2 mm のパーマロイ PB のシールドを用いて、ピーク磁場 1.2 T を有する 3 極ウィグラーからの漏れ磁場を地磁気レベルの 5×10^{-5} T 以下に低減できることを確認した (Fig. 4)。

実機製作において、磁極には電磁軟鉄 SUY-1 材相当として BMR2 (JFE スチール株式会社) を用いる。使用する磁極材料と同一ロットの材料の BH 特性を

測定し、この測定値を用いたシミュレーションで磁極の最終形状を調整する。また永久磁石は、R32HS（信越化学工業株式会社）を用いる。永久磁石についても実機に用いる材料と同一ロットの試験片を用いて BH 特性を測定し、残留磁束密度および保磁力（ H_{CB} ）の測定値を用いたシミュレーションを行い永久磁石組み上げ前に最終的な磁石形状の調整を行う予定である。

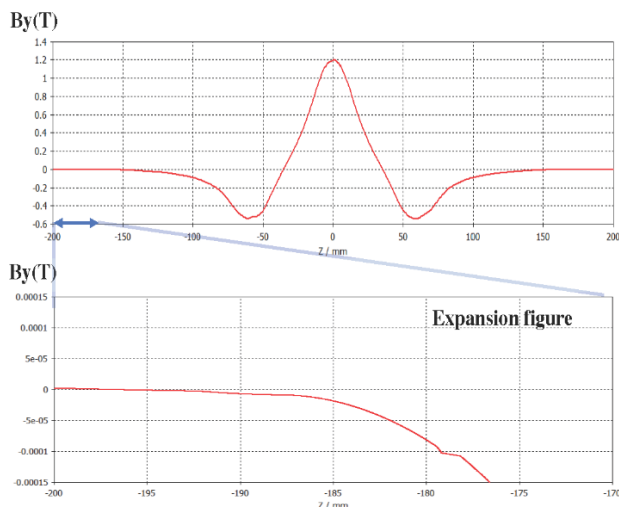


Figure 4: Top figure shows the B_y distribution of the 3-Pole Wiggler. Bottom figure shows the B_y distribution around the magnetic shield of DCCT.

2.3 積分磁場の調整

3 極ウィグラー用短直線部の上下流には最大蹴り角 0.25 mrad の STMg が設置される。この 2 台の STMg を用いて 3 極ウィグラーが電子ビームに与える残留キックの影響を補正する。3 極ウィグラーを組み上げた後、積分磁場を測定し、1 Tmm (0.1 mrad 相当)以下 (目標値 0.1 Tmm 以下) になるように積分磁場の微調整を行う。

シミュレーションにより、3 磁極の両端磁極の鉛直方向の幅 (高さ) を増やすことで積分磁場増、中央磁極の鉛直方向の幅 (高さ) を増やすことで、積分磁場減を確認した (Fig. 5)。そこで、電磁軟鉄の調整シムを磁極に追加挿入して、 ± 1 Tmm の範囲で積分磁場を微調整することにした。

3 極ウィグラーを組み上げる前に、同一ロットの電磁軟鉄の BH 特性、 Sm_2Co_{17} の残留磁束密度、比透磁率を測定し、最適な形状をシミュレーションにより求め、3 極ウィグラーの製作組み上げを行う。その上で、組み上げ後の積分磁場の測定結果を踏まえ、磁極の高さをシムで調整することで、積分磁場を 1 Tmm 以下にする予定である。

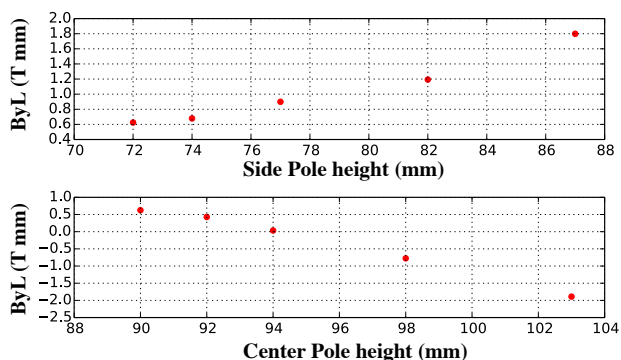


Figure 5: Top figure shows the B_yL distribution depend on side pole height. Bottom figure shows the B_yL distribution depend on center pole height.

3. 3 極ウィグラーの性能評価

設計した 3 極ウィグラーの磁場分布から X 線フラックスを SPECTRA [6]を用いて計算した。Figure 4 に示す 3 極ウィグラーの磁場分布を SPECTRA にインプットし、フラックスの計算を行った。Figure 6 に示すように 50 keV のエネルギー付近で 1.0×10^{12} ph/s/mrad²/0.1% B.W. と十分な光量が得られている。

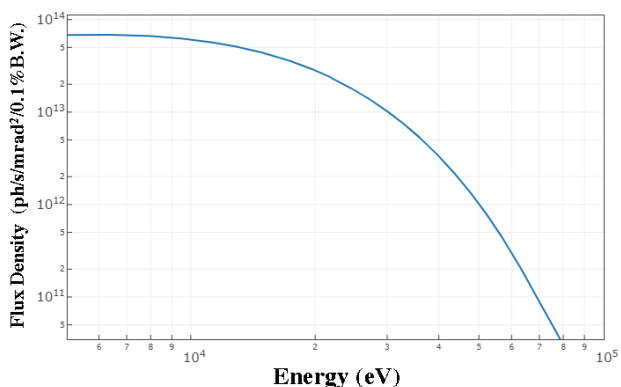


Figure 6: Flux density of hard X-rays at light source point of the 3-pole wiggler.

4. まとめ

3 GeV 電子蓄積リングのビーム診断用光源として、3 極ウィグラーの基本設計を行い、ピーク磁場 1.2 T 以上である事を確認した。ビームサイズ測定に用いる硬 X 線、バンチ長測定等に用いる可視光共に電子ビームの診断に十分なフラックスを持つ光源である事を確認した。適切な磁気シールドを用いて DCCT センサーヘッドへの漏れ磁場を地磁気レベル以下まで低減できる事を確認した。実機製作においては、電磁軟鉄の BH 特性、 Sm_2Co_{17} の残留磁束密度、保磁力のカタログ値からのずれにより、ピーク磁場や積

分磁場が現在の設計値からずれる。このずれを補正するため、実機に実際に使用するロットのサンプルで電磁軟鉄、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ のBH特性を測定し、最終的な電磁軟鉄、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ の形状を決定する予定である。さらに3極ウィグラーが電子ビームに与える残留キックの影響を補正するために、3極ウィグラーを組み立てる段階で、考案した磁極の高さをシムで調整する手法で、積分磁場の微調整を行う予定である。

参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, “A highly brilliant compact 3 GeV light source project in Japan”, in Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp. 1478-1481.
- [2] N. Nishimori *et al.*, “Accelerator system for highly brilliant 3GeV light source project”, Proceedings of the 16th Annual meeting of PASJ, Kyoto, Japan, July 31-August 3, 2019, pp. 153-156.
- [3] 量研: “3GeV 次世代放射光施設加速器デザインレポート”; <https://www.qst.go.jp/site/3gev/41162.html>
- [4] H. Maesaka *et al.*, “Design of the Beam Diagnostic System for the New 3 GeV Light Source in Japan”, Proceedings of the IBIC 2020, Santos, Brazil, Sep. 14-18, 2020, pp. 174-178.
- [5] CST; <https://www.cst.com>
- [6] T. Tanaka *et al.*, “SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code”, J. Synchrotron Rad. **8** (2001) pp.1221-1228.