

## SPring-8-II に向けた永久磁石型四極磁石の設計

### DESIGN OF PERMANENT QUADRUPOLE MAGNET FOR SPring-8-II

松原伸一<sup>#,A)</sup>, 谷内努<sup>A)</sup>, 山口博史<sup>A)</sup>, 深見健司<sup>A,B)</sup>, 渡部貴宏<sup>A,B)</sup>

Shinichi Matsubara<sup>#,A)</sup>, Tsutomu Taniuchi<sup>A)</sup>, Hiroshi Yamaguchi<sup>A)</sup>, Kenji Fukami<sup>A,B)</sup>, Takahiro Watanabe<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

<sup>B)</sup> RIKEN SPring-8 Center (RSC)

#### Abstract

Permanent Magnet (PM) technology is becoming increasingly important as a replacement for traditional resistive electro-magnets for particle accelerator facilities. The PMs are possible to save costs for both construction and driving the facility due to the absence of a power supply and cooling system. Furthermore, the PMs have other benefits such as reduced failure frequency and mechanical vibration with cooling water. For the SPring-8-II, a next-generation low-emittance light source, we have proposed and demonstrated PM systems with dipole configurations. There are also required a quadrupole magnet (QM) as combined function bending magnet. The QM must be splittable into upper and lower halves for installation of vacuum chamber. General electro-QMs are able to split in half without the influence of magnetic force by non-excitation. However, permanent magnets invariably have magnetic force and are difficult to split in half due to the attraction. In this paper, we report on the design of PM based quadrupole magnet with a splittable structure for SPring-8-II.

#### 1. はじめに

SPring-8 の次期計画として低エミッタンス高輝度放射光源 SPring-8-II が検討されている[1, 2]。SPring-8-II では、放射光輝度を従来の約 100 倍に上げる光源性能の向上に加え、施設の省エネルギー化も計画されている。具体的には、電磁石に替わり永久磁石の採用を積極的に目指している。永久磁石は、電源や電源ケーブル、冷却系設備が不要なため建設コストが抑制できるうえ、運用でも故障頻度、電力削減・省エネルギー、冷却水に起因する振動がないなど多くのメリットがある。SPring-8-II に向けては、二極形状の永久磁石型偏向磁石の開発を行ってきた[3, 4]。これらにより、長期安定性・信頼性や量産に向けた検討・確認がされ、永久磁石を SPring-8-II で実用する準備ができています。

SPring-8-II では、大きな磁場可変性能が不要な偏向磁石に永久磁石の特徴を利用する計画である。現在検討されている最新の SPring-8-II のラティスでは、四極磁場と二極磁場を同時に発生させる機能複合型偏向磁石が含まれている。この機能複合型偏向磁石は、四極磁場勾配の割合が大きい場合、磁極が今までに開発している二極形状ではなく四極形状の永久磁石を新たに検討した。四極磁石を水平方向にオフセットさせ設置することにより、二極磁場を同時に発生させる。実用的かつ低コストな機器とするためには、製作・組立が容易で、短期間に設置できるシンプルな構造である必要がある。特に、SPring-8-II では1年間の短いシャットダウン期間に機器の撤去・設置を計画している。

今まで SPring-8-II に向けて開発を行ってきた永久磁石型偏向磁石は、二極 C 型形状であり真空チャンバー設置に半分割工程を必要としなかったが、この四極磁石は上下に半分割する必要がある。

永久磁石型四極磁石は、様々な形状がいままでに開発されている[5-10]。高い磁場勾配を発生しやすい Halbach 型[5, 6]、永久磁石型では困難な可変磁場勾配の構造[8-10]が提案されている。しかしながら、これらの形状では真空チャンバーの挿入、設置のためには、磁石の再組み立てに近い工程が必要である。通常電磁石は通電しなければ磁束が発生しないため、吸引がなく磁石を半分割することができる。永久磁石は常に磁束が存在し、吸引により単純な半分割作業は困難である。今回、半分割可能な永久磁石型四極磁石の磁気回路を設計し、詳細を報告する。

#### 2. 永久磁石型四極磁石の構造

SPring-8-II で計画されている機能複合型偏向磁石の仕様は、四極磁場勾配  $-22.8 \text{ T/m}$  と二極磁場  $0.259 \text{ T}$  である。同様な機能複合型偏向磁石は、大別して2形状で提案されている。二極磁場成分が四極磁場成分に比べて大きい仕様では C 型二極磁極形状で設計され、四極磁場成分が大きい場合には四極磁極形状で設計される。SPring-8-II では四極磁場成分が大きく、四極磁極形状の磁石を四極磁場中心から水平方向にオフセットさせ設置することにより、二極磁場を発生させ複合機能とする。具体的には、四極磁場中心から  $11.3 \text{ mm}$  水平にオフセットさせて設置する。この機能複合型偏向磁石では、二極磁場成分を一定のまま四極磁場成分を可変調整するのは複雑になるため、大きな磁場可変性を省くことを前提としている。大きな磁場可変が不要な場合、電磁石よりも永久磁石型四極磁石にメリットが多い。以上の背景から、SPring-8-II に向けた永久磁石型四極磁石の検討を行った。今回検討を行った永久磁石型四極磁石の形状を Fig. 1 へ示す。

永久磁石型四極磁石は、磁極・ヨークを軟磁性体で構成し、左右のヨークで磁場を発生させる永久磁石を挟む形状である。放射光光源に永久磁石を用いる場合、

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

放射線の影響による減磁の問題があり永久磁石をビーム軸から離して配置することが望ましい[7, 11]。SPRING-8-IIでの真空チャンバーとの干渉制限を想定して、四極磁極の最小ギャップを22 mmとした。二極磁場成分を発生させるため水平オフセット設置した際に、±6 mm以上の広い磁場均一度を実現するために、四極磁極形状のボア径をΦ56 mmとした。永久磁石は、Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>を230 x 40 x 350 L mmの形状で上半分、下半分の2分割に配置する。磁石ブロックを2分割と少なくすることにより、磁石ブロックの個体差が与える四極磁場エラーへの影響が小さくなる。

磁極・ヨークは4つの部材から構成される。磁極長は318 mmで、実効長350 mmである。磁束が流れる4つのヨークが直接接触していない。4つの磁極は、非磁性フレームを介して固定する。この非磁性フレームは、ビーム軸の高さで分割しており、永久磁石型四極磁石を半分割できるようにする。磁場調整機構としてΦ16mmの調整ボルトを備える。

また、永久磁石は、温度により起磁力が変化する欠点がある。安定な利用運転を維持するためには、温度に対して磁場が安定であることが求められる。一般的に、整磁合金が用いて、磁場安定化のために温度補償を行う[3, 4]。整磁合金の配置位置は、左右のヨークを渡すように底部、天部に配置した。

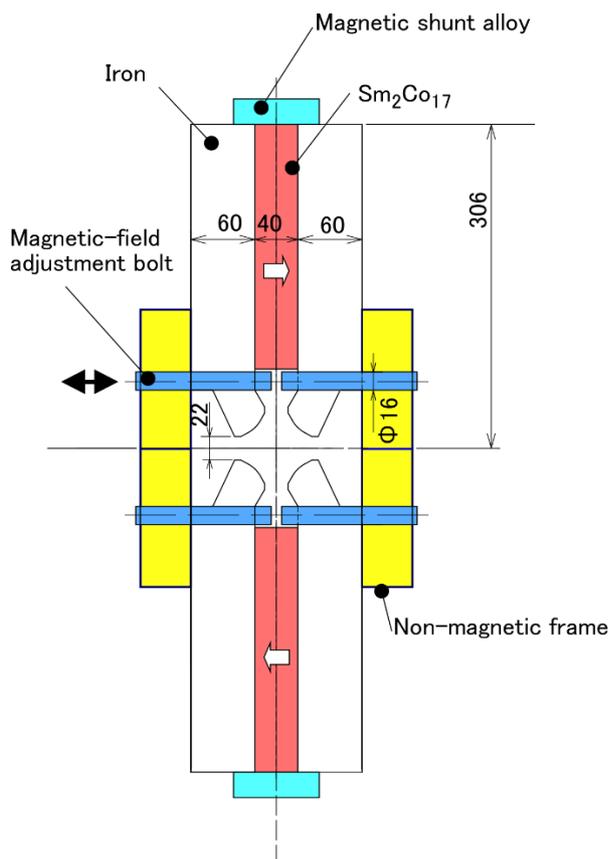


Figure 1: Configuration of permanent quadrupole magnet for SPRING-8-II.

### 3. 永久磁石型四極磁石の磁場計算

Figure 2に、本永久磁石型四極磁石の磁束の流れを示す。磁束は四つのヨークの中を多く流れる。永久磁石により生成する磁場を効率的にビーム軸に配分するため、比透磁率が1に近い永久磁石の厚み(磁束通過方向)は極力薄くした。また、永久磁石とヨークの形状を縦長に配置することにより、上下のヨーク間を回る磁束を減らした。同様に、磁極角度の最適化を行っている。また、永久磁石の下のスペースも小さくすることで、左右のヨークを渡る磁束が減り、磁束を効率的に四極磁場の発生に利用することができる。このスペースは、磁場調整機構を配置することと、左右の磁極先端間隔が磁場の吸引により近づくことを避けるためのスペーサ設置に必要である。

ヨークを流れる磁束の多くが四極磁極間に向かって四極磁場を効率的に発生しているが、左右ヨーク間を底部・天部から回る磁束を無くすことはできない。このヨークの底部・天部を回る磁束を、温度補償に必要な整磁合金の配置箇所に活用した。

本磁気回路構成では、周回する外ヨークを省き構造・機構を簡略化することで製作・組立においてメリットが見込める。しかしながら、4つのヨーク部の外周に磁束が流れる。四極磁石外周の漏れ磁場が強くなる構成のため、本永久磁石型四極磁石周辺では安全への配慮が必要である。実機では、保護フレームを設けて磁石本体への

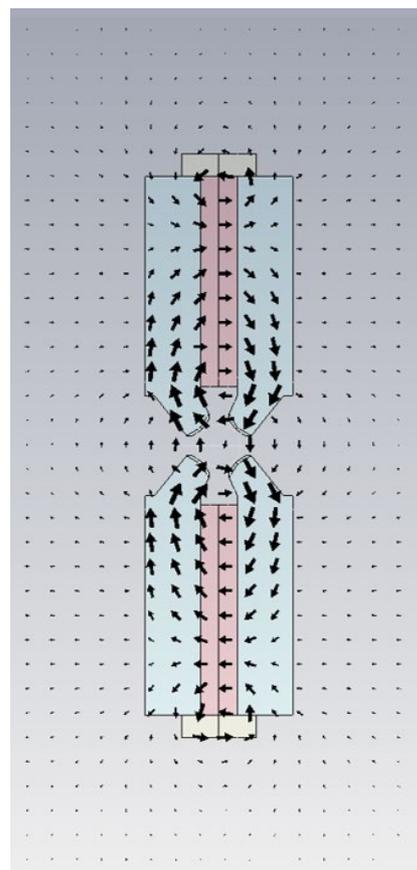


Figure 2: Magnetic field of permanent quadrupole magnet for SPRING-8-II.

人の近接を避ける。

この永久磁石型四極磁石は、広い磁場可変性を前提としていないが、量産の際に製品の磁場特性の個体差が±0.2%以下であることが求められる。製作する際の永久磁石ブロックの量や個体差で、個別に四極磁場特性を調整することは困難であるため、容易に磁場調整を行える機構を設けている。整磁合金の温度補償の最適調整工程も四極磁場特性へ影響するため、最終的な磁場特性の調整が必要である。Φ16mmのボルトの挿入深さを調整して、左右の磁極間の磁束をシャントさせることにより四極磁極先端の磁束量を調整する。調整ボルトは、4つの磁極に長手方向に4本ずつ、合計16本配置する。調整ボルトは、連続的に挿入深さを調整することができ、磁場の調整が容易である。積分磁場で2%程度の磁場調整量が可能である。

永久磁石型四極磁石の半分分割の際に掛かる吸引力と上下半分分割した磁石間隔を Fig. 3 に示す。リターンヨークの上下分割面に磁束が流れず、磁極先端の吸引力のみであるため、現実的な負荷により永久磁石型四極磁石の半分分割が可能である。特に実際の近接時の分割作業では、押しボルトなどを用いて慎重に上下半分の磁石間隔を空けたり、分割した磁石を復旧したりする。押しボルトにより30 mm程度の間隔を空けることにより、磁石上半分の自重に加えて50 kg程度の負荷で、磁石分割工程ができる。この負荷では、クレーンを用いて四極磁石の半分分割作業を簡易に行うことが十分可能である。

このクレーンを用いて四極磁石の上下半分分割する作業の工数は、電磁石の半分分割作業を行うことと同等である。電磁石の半分分割作業には、電気配線・冷却水配管の取り外し、再組み立ての際にはそれらの再接続が必要である。永久磁石型四極磁石は、その作業が不要なためより容易に設置作業ができると考えられる。短期間での磁石設置が必要な SPring-8-II に適用できると見込める。

#### 4. まとめ

低エミッタンス高輝度放射光源 SPring-8-II に向けて、電磁石に替わる永久磁石型四極磁石の設計・検討を行った。永久磁石は、電源や冷却系設備が不要であり建設コストが抑制できるうえ、運用でも故障がなく、省エネルギー、ビーム安定化など多くのメリットがある。実用

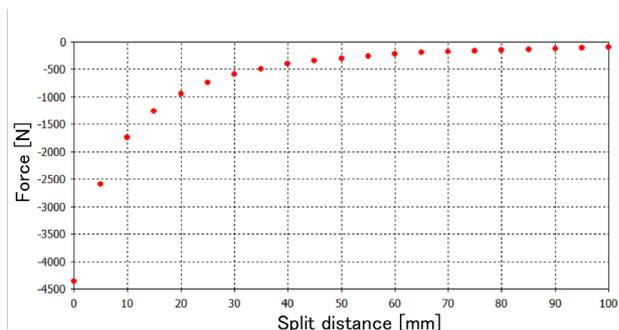


Figure 3: Simulated magnetic force as a function of split distance between upper and lower halves of the permanent quadrupole magnet.

的な機器であるためには、この永久磁石型四極磁石は製作・組立が容易でコストを抑えて、短期間に設置できるシンプルな構造である必要がある。特に、SPring8-IIでは短期間で設置を行う計画であり、この四極磁石は半分分割可能で、真空チャンバーを挿入して設置が容易なことが必要である。

永久磁石型四極磁石を4つの独立したヨークと2つの永久磁石部のシンプルな構成で設計した。また、整磁合金を用いた温度補償と2%程度の磁場調整機構を設けた。設計された永久磁石型四極磁石は、上下方向に周回する外ヨークを持たない四極磁石構造である。この構造により、容易に永久磁石型四極磁石の半分分割作業が可能となる。具体的には、押しボルトなどで30 mm程度の距離の半分分割を行ったあと、クレーンを用いての分割・再組み立て作業を見込む。短期間での磁石設置が必要な SPring-8-II に十分適用できる永久磁石型四極磁石を設計した。

#### 謝辞

本研究は理化学研究所による研究費助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, in Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, 2016, p. 2867, <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2016/papers/wepow019.pdf>
- [2] T. Watanabe *et al.*, “SPring-8 Upgrade Project: Accelerator Redesign and Restarted”, Synchrotron Radiation News, 2023, 36:1, 3-6, <https://doi.org/10.1080/08940886.2023.2186117>
- [3] T. Watanabe *et al.*, “Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams, 2017, 20, 072401, <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.072401>
- [4] Tsutomu Taniuchi *et al.*, “DC septum magnet based on permanent magnet for next-generation light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams, 2020, 23, 012401, <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.012401>
- [5] T. Mihara *et al.*, “Super strong permanent magnet quadrupole for a linear collider”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 2004, 14, 469–472.
- [6] Lou. W *et al.*, “Stability considerations of permanent magnet quadrupoles for cesr phase-iii upgrade”, Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams 1998, 1, 022401.
- [7] N’gotta *et al.*, “Hybrid high gradient permanent magnet quadrupole”, Phys. Rev. Accel. Beams 2016, 19, 122401.
- [8] Shepherd *et al.*, “Construction and measurement of novel adjustable permanent magnet quadrupoles for clic”, In Proceedings of the IPAC2012, New Orleans, LA, USA, 2012, 20–25.
- [9] T. Mihara *et al.*, “Variable permanent magnet quadrupole”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 2006, 16, 224–227.
- [10] F. Marteau, “Variable high gradient permanent magnet quadrupole (QUAPEVA)”, Appl. Phys. Lett. 2017, 111, 253503.
- [11] T. Bizen *et al.*, “Baking effect for NdFeB magnets against demagnetization induced by high-energy electrons”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 2007, 574, 401.