

## 小型放射光源のための複合機能型電磁石の開発

### RESEARCH AND DEVELOPMENT OF COMBINED-FUNCTION MAGNETS FOR A COMPACT SYNCHROTRON LIGHT SOURCE

奈良井隆也<sup>#,A)</sup>, Christian John<sup>B)</sup>, 島田美帆<sup>C,B)</sup>, 宮内洋司<sup>C,B)</sup>, 原田健太郎<sup>C)</sup>, 高嶋圭史<sup>D)</sup>, 加藤政博<sup>B,A,E)</sup>  
Takaya Narai<sup>#,A)</sup>, Christian John<sup>B)</sup>, Miho Shimada<sup>C,B)</sup>, Hiroshi Miyauchi<sup>C,B)</sup>, Kentaro Harada<sup>C)</sup>,  
Yoshifumi Takashima<sup>D)</sup>, Masahiro Katoh<sup>B,A,E)</sup>  
A) Hiroshima University, B) HiSOR, C) KEK, D) NUSR, E) UVSOR

#### Abstract

HiSOR was constructed in the 1990s and has been operating for nearly 30 years as a low-energy synchrotron radiation source specializing in the vacuum ultraviolet and soft X-ray regions. The facility is facing problems such as a decline in the competitiveness and an increase in breakdowns due to aging. We are going to construct a new storage ring HiSOR-II which would have much smaller emittance and more straight sections for undulators. The lattice of the ring is based on a compact and simple double bend achromat cells. The bending magnets produce dipole, quadrupole and sextupole fields. The quadrupoles produce quadrupole and sextupole fields. Both of them would have small apertures. We report the latest results from the design studies.

#### 1. はじめに

HiSOR は 1990 年代に建設され、その後 30 年近くにわたり真空紫外・軟 X 線領域を得意とする低エネルギー放射光源として稼働を続けてきた[1]。しかし、極めてコンパクトで合理的な設計であるため、新しい技術の導入による性能向上の余地がなく、光源性能の競争力の低下や老朽化による故障の増大などの問題に直面している。このため、ストレージリングの全面的な更新を含む将来計画の検討を進めている。大学の施設として適正な規模で高輝度・低エネルギー放射光源を実現するための方策の一つとして、ラティス電磁石は全面的に複合機能型とすることを検討している。磁極面形状による多極磁場発生に補助コイルを組み合わせることで一定範囲での多極磁場強度の可変性を実現することを目指す。またビームパイプの断面も最近の放射光リングの動向に沿って小さくし、これに合わせて電磁石の開口も可能な限り小さくする。これにより省資源化を図る。最終的には永久磁石を活用する省エネルギー化も目指したいと考えている。現在は、最新のラティス設計に合わせて磁極面形状の最適化を進め 2 次元磁場計算を進めている段階である。その状況を報告する。

#### 2. HiSOR-II のラティス設計

HiSOR-II のラティス設計は、これまで様々な案が検討されてきたが、現時点での最新案は、Double Bend Achromat セルを基本構造し、ラティス電磁石を複合機能型とすることで、単純でコンパクトな構造とする方向である。このようなラティス構造は、ASTRID-2[2]、MAX-IV(1.5GeV)[3]、SOLARIS[4]など、最近の比較的低エネルギーで小型の放射光源で採用されている。

最新のラティス設計案と主要パラメータを Fig. 1 及び Table 1 に示す。なお、ビームエネルギーはこれまで 500 MeV で検討を続けていたが、直近の利用側の要請

により最新の案では 600 MeV となっている。非線形効果(ダイナミックアパーチャ)の最適化の検討を継続しており、その結果によりラティス構造は多少変更される可能性もある。

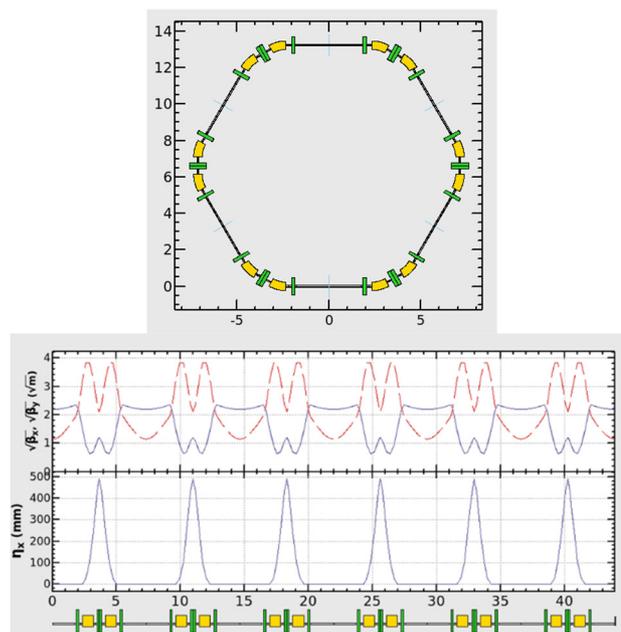


Figure 1: Tentative design of HiSOR-II lattice (upper) and optical functions (lower).

Table 1: Major Parameters of HiSOR-II

Beam Energy	600 MeV
Lattice	DBA 6 cells
Circumference	44m
Straight Sections	3m x 6
Emittance	12 nm

<sup>#</sup>b216850@hiroshima-u.ac.jp

### 3. HiSOR-II の電磁石

#### 3.1 複合機能型電磁石

第 2 世代の放射光源加速器では複合機能型磁石の使用例は多くない。放射光専用の最初の世代の加速器であり、機能分離型で高精度に磁石を作るという確実性を重視した設計思想であったものと思われる。第 3 世代でも当初はそのような考え方であったが、低エミッタンスリングの運転実績が積みあがるに連れて、次第に複合機能型磁石を採用することで設計を合理化し建設費の抑制を図る例が増えてきた。第 4 世代になると Multi-bend Achromat セル構造という複雑なラティス構造が標準的となり、限られた周長でこれを実現するために複合機能型磁石が多く用いられているようである。

HiSOR-II の設計は基本的には後期の第 3 世代の考え方を踏襲している。その背景には、必要十分な性能の高輝度光源を大学の加速器施設として適正な規模で合理的に実現しようという考え方がある。このために複合機能型磁石を積極的に活用しようとしている。複数の磁場成分を一台の磁石で生成するには、磁極面形状による手法と補助コイルによる手法がある[5, 6]。前者には二次元的な断面形状による手法以外に端部などの三次元的構造によるものがある[7]。追加の電源などは不要であるが、一度形状を決めてしまうと磁場成分の比率は固定となってしまう。後者は磁極面などに補助コイルを設けて必要な磁場成分を生成するものであるが、磁石の構造が複雑となり電源も必要となる。HiSOR-II では上記 2 つの手法を組み合わせることを考えている。これにより一定範囲での磁場成分独立可変性を確保しつつ、補助コイルや電源を簡略化することを目指す。

現状のラティス設計から要請される HiSOR-II のラティス電磁石の主要パラメータを Table 2 に示す。偏向電磁石は二極と四極磁場成分を有する複合機能型とする。さらに六極磁場も生成可能とするが、その生成法はラティスの非線形効果の最適化と関係しており、現在、検討中である。四極磁石は四極と六極磁場成分を有する複合機能型とする。

#### 3.2 偏向磁石の設計の現状

複合機能型偏向磁石の設計例を Fig. 2、3 に示す。磁極面形状は等ポテンシャル面

$$\phi = b_1 y + b_2 xy = \text{const.} \quad (1)$$

により決定している。今回の計算では磁極間隙はビームダクトがギリギリ入る 36 mm としてあるが、機械的な取り合いの余裕に加え、磁極面に補助コイルを設けることなどを考慮し[8]、最終的な磁極間隙を決定する。

今回の設計検討で、必要な二極及び四極磁場の強度が実現できる見通しを得た。想定しているダクトの内部では磁場は理想的な値からのずれとして 0.1% を超えている部分もあり、今後、磁極面のシム調整などで対応していく必要がある。また、この偏向磁石には磁極面に補助コイルを設けることで四極磁場の一定範囲での偏向や必要に応じて六極磁場を出せるようにすることも考えており、今後設計検討を進める予定である。今回の検討ではコイルやヨークなどの設計の最適化は手付かずであり、省資源化を目指した小型化も今後の検討課題である。

Table 2: Parameters of HiSOR-II Magnets

Bending Magnets	
Numbers	12
Length	0.85 m
Dipole Field	1.23 T
Quadrupole Field	3.93 T/m
Sextupole Field	TBD
Quadrupole Magnets (Q1)	
Numbers	12
Length	0.36 m
Quadrupole Field	14.7 T/m
Sextupole Field	93 T/m <sup>2</sup>
Quadrupole Magnets (Q2)	
Numbers	12
Length	0.18 m
Quadrupole Field	13.1 T/m
Sextupole Field	TBD

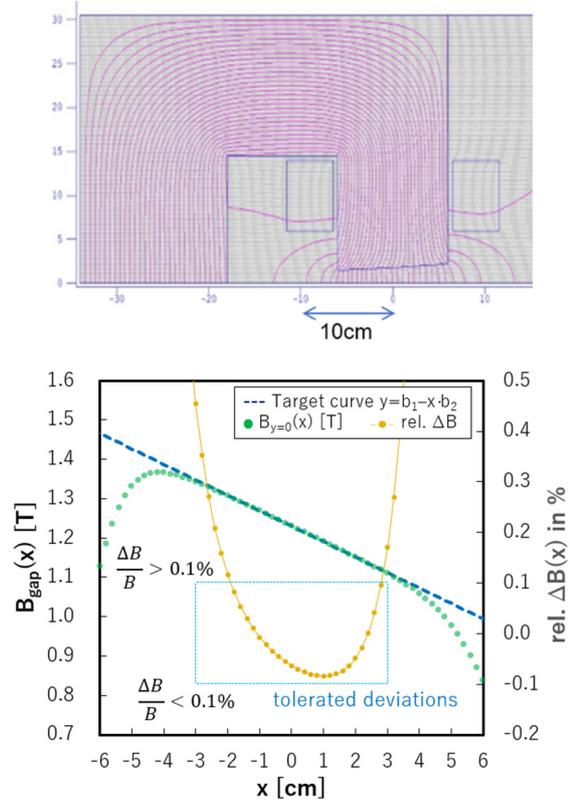


Figure 2: 2D simulation of combined-function dipole magnet. Magnetic field lines (upper) and field strength ( $B_y$ ) on X-axis (lower). The deviation from an ideal field strength is also shown. The horizontal aperture of the beam duct is 6 cm in full width.

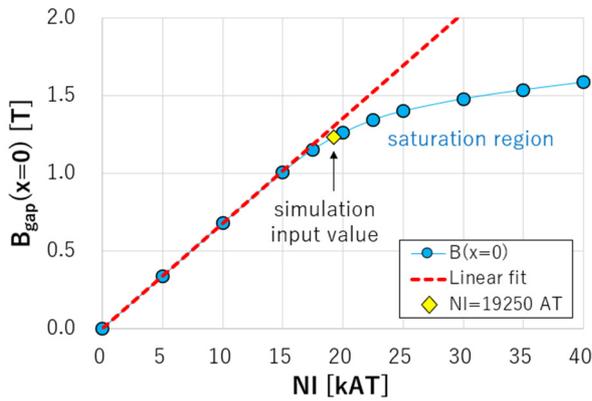


Figure 3: Excitation curve of bending magnet.

### 3.4 四極磁石の設計の現状

複合機能型四極磁石の設計例を Fig. 4 に示す。内径 60 mm x 30 mm で壁厚さ 3 mm の楕円形のビームパイプを想定して下記の等ポテンシャル面で磁極面を決定した。今後磁極面先端部に六極磁場成分制御のための補助コイルを設けることを想定しやや大きめの開口としてある。

$$\phi = b_2xy + b_3 \frac{1}{6}(3x^2y - y^3) = \text{const.} \quad (2)$$

POISSON による二次元の磁場計算結果を Fig. 4 に占

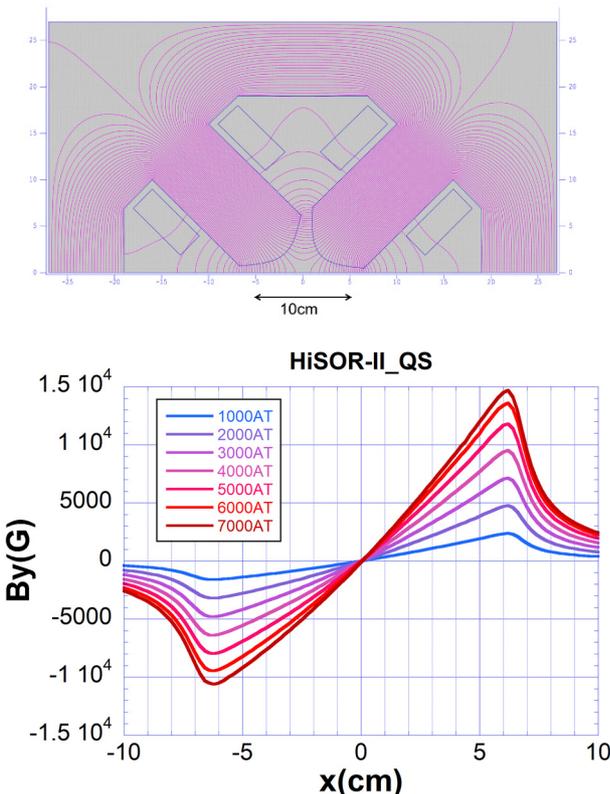


Figure 4: 2D simulation of combined-function quadrupole magnet. Field lines (upper) and Field strength ( $B_y$ ) on X-axis as a function of the excitation current (lower).

めす。目標の四極・六極成分とも目標の磁場強度は達成できている。Figure 4 の磁場分布の  $\pm 3$  cm の領域に二次の多項式で最小二乗法によりフィッティングし求めた各磁場成分の励磁電流依存性を Fig. 5 に示す。設計電流値付近までは概ね線形性が保たれているが、飽和領域に入ると六極磁場成分がより強くその影響を受けることが分かった。

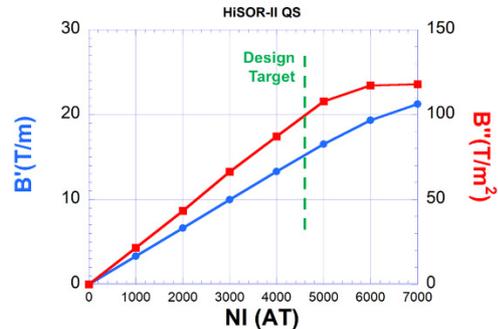


Figure 5: Excitation curves of field components. Quadrupole (blue) and sextupole (red). The design target parameters are indicated by a green dashed line.

## 4. まとめと展望

HiSOR-II へ向けた複合機能型偏向磁石及び四極磁石の設計を進めており、その現状を報告した。磁極面形状を複合磁場の等ポテンシャル面とすることで複数磁場成分に要求される磁場強度を実現できた。次の段階では補助コイルの導入による多極磁場成分の制御の可能性を探る[5, 8]。また、磁極形状のシム補正による磁場性能の向上を図る。偏向磁石については 3 次元的な端部の成型による局所的な六極磁場生成の検討も行う。六極磁場については非設計ダイナミクスの検討も見ながら進めていく。水平 60 mm、垂直 30 mm 程度の小さなビームパイプの採用を想定しており、磁石の小型・省資源化も設計目標の一つである。今回はヨーク部の厚みや形状などの最適化は行っておらず、今後検討を行っていききたい。また、永久磁石の採用によるハイブリッド電磁石の可能性も引き続き検討していきたい[9, 10]。

## 参考文献

- [1] C. John *et al.*, “Present Status of HISOR”, in these proceedings.
- [2] N. Hertel *et al.*, “ASTRID2 – the UV and soft x-ray synchrotron light source with the ultimate brilliance”, (2012), <https://www.isa.au.dk/facilities/astrid2/docs/ASTRID2-PreliminaryDesignReport-November2012.pdf>
- [3] “MAX-IV Detailed Design Report on the MAX-IV Facility”, [https://www.maxiv.lu.se/wp-content/plugins/sharepoint-plugin/ajax/downloadFile.php?site\\_id=MAXIV&version\\_series\\_id=38&repository\\_id=0fbdb5b5-c377-4ff8-9350-6889fdf4c076](https://www.maxiv.lu.se/wp-content/plugins/sharepoint-plugin/ajax/downloadFile.php?site_id=MAXIV&version_series_id=38&repository_id=0fbdb5b5-c377-4ff8-9350-6889fdf4c076)
- [4] Szlachetko, J., Szade, J., Beyer, E. *et al.* SOLARIS National Synchrotron Radiation Centre in Krakow, Poland. Eur. Phys. J. Plus 138, 10 (2023).
- [5] J. Yamazaki *et al.*, “Lattice Components for Upgrading UVSOR”, in 13th Symposium on Accelerator Science and

- Technology, Suita, Osaka, Japan, October 2001, pp. 280-282.
- [6] A. Anderson *et al.*, “The MAX II synchrotron radiation storage ring”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 343 (1994) 644-649.
- [7] M Adachi *et al.*, “Design and Construction of UVSOR-III”, J. Phys.: Conf. Ser. 425 042013 (2013).
- [8] Y. Morimoto *et al.*, “Design of Bending magnet for HiSOR-II”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan), pp. 808-810.
- [9] Y. Lu *et al.*, “Research and development of an electric/permanent hybrid magnet”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29- September 1, Funabashi, Japan, 2023, pp. 316-318.
- [10] Y. Lu *et al.*, “Design of a combined-function quadrupole-sextupole magnet For HiSOR-II”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2024, Yamagata, pp. 356-360.