

光クライストロン用バンチャー電磁石の性能改善に関する検討

CONSIDERATION FOR IMPROVEMENT OF BUNCHER MAGNETS USING FOR OPTICAL KLYSTRON

坂本文人^{*A)}, 全炳俊^{B)}, 平義隆^{C)}, 加藤政博^{C)}, 山川清志^{D)}, 近藤祐治^{D)},
佐々木昭二^{E)}, 細矢潤^{E)}, 今野弘樹^{F)}

Fumito Sakamoto^{*A)}, Heishun Zen^{B)}, Yoshitaka Taira^{C)}, Masahiro Katoh^{C)},
Kiyoshi Yamakawa^{D)}, Yuji Kondo^{D)}, Shoji Sasaki^{E)}, Jun Hosoya^{E)}, Hiroki Konno^{F)}

^{A)} National Institute of Technology, Akita College

^{B)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University

^{C)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences

^{D)} Akita Industrial Technology Center

^{E)} Sanei-Kikai Co., Ltd

^{F)} Konno-Kogyosyo Co., Ltd

Abstract

The optical klystron which consists of two APPLE-II undulators and buncher electromagnet in UVSOR, it is difficult to adjust the precise electron beam trajectory due to the uncertainty of the magnetic field caused by the magnetic hysteresis of the dipole electromagnet. SS400, which is a general steel material, is used as the magnetic material for existing dipole electromagnets, but when high-purity pure iron or silicon steel is used as the magnetic material, their coercive force is smaller than that of SS400. In order to evaluate the contribution of these magnetic materials to the performance of the buncher, we analyzed the magnetic flux density distribution and the electron trajectory in the magnetic field by numerical simulation. In addition, in order to compare the difference in hysteresis characteristics of magnetic materials, an electromagnet was manufactured using pure iron and SS400 as magnetic materials. In this paper, we report the results obtained from these and the possibility of improving the performance as a buncher.

1. はじめに

分子科学研究所極端紫外光研究施設 UVSOR では、電子蓄積リングを周回する電子ビームが放射するテラヘルツから軟 X 線に渡る放射光の利用研究に加え、より高品質な大強度の放射光を発生させるための光源開発研究も積極的に展開されている [1,2]。特に二つの APPLE II アンジュレータとその間にバンチャー電磁石を備えた光クライストロンが設置されている BL1U ビームラインでは、光クライストロンから得られる特徴的な光を利用した原子分子物理実験 [3,4] など先端的な応用実験を行いつつ、エネルギー可変単色ガンマ線の発生とその利用研究 [5] や共振器型自由電子レーザー (FEL) を応用した intracavity コンプトン散乱によるガンマ線発生 [6,7]、外部から大強度超短パルスレーザーを注入することで紫外から軟 X 線に渡り時間コヒーレンスの優れた光を得るコヒーレント高調波発生 (CHG) といった光源開発に関する研究が実施されている。

光クライストロンは 2 台のアンジュレータとその間に置かれる電子ビームの進行方向圧縮を担うバンチャーから構成され、UVSOR では 3 台のダイポール電磁石を用いたバンチャーが採用されている。現状ではこのダイポール電磁石の磁気履歴が起因となる磁場の不確定性により、精密な電子ビーム軌道の調整が難しく実験の妨げとなることが多く、改善が

検討されている。既存のダイポール電磁石の磁性材料には一般的な鋼材である SS400 が用いられているが、磁性材料として高純度の純鉄またはケイ素鋼を採用した場合、これらの保磁力は SS400 と比較して小さいため、磁場の再現性が向上することが期待される。これら磁性材料の違いがバンチャーの性能への寄与を評価するため、磁気特性を考慮した数値シミュレーションによる磁束密度分布と磁場中における電子軌道の解析を行った。また、磁性材料のヒステリシス特性の違いを比較するために、バンチャーを構成するサイドダイポール形状を模擬した SS400、純鉄 (99.9%)、ケイ素鋼 (Si 3% 含有) を磁性材料とした電磁石を製作し、それぞれのヒステリシス特性について測定を計画している。本稿ではこれらから得られた結果と、バンチャーとしての性能改善の可能性について報告する。

2. 光クライストロン

2.1 光クライストロンの動作原理

UVSOR に設置されている光クライストロンは、Fig. 1 に示すように 2 台の Apple-II 型アンジュレータと、その中間に置かれた 3 台のダイポール電磁石から成るバンチャーで構成されている。FEL や CHG における光クライストロンの動作原理を簡単に述べる。アンジュレータ中にアンジュレータの共鳴条件を満たす光電場がある時に電子ビームが光クライストロンを通過する際、前段のアンジュレータでは電子ビームは光電場との相互作用によりアンジュレー

* saka@akita-nct.ac.jp

タと電子ビームの共鳴波長周期のエネルギー変調を受ける。このため前段のアンジュレータはモジュレータと呼ばれる。次に電子ビームがバンチャー電磁石を通過する際、電子ビームの軌道にはエネルギーに応じた経路差が生じるため電子ビームの密度変調が発生し、光の波長間隔毎にマイクロバンチが形成される。後段のアンジュレータではマイクロバンチされた電子ビームにアンジュレータ放射を行わせ、FEL の場合は光共振器内の電磁場の増幅を、CHG の場合はマイクロバンチ間隔を基本波とするコヒーレントな高調波を生じさせる。そのため後段のアンジュレータはラディエータと呼ばれる。電子蓄積リングなど電子ビームのピーク電流値が小さな加速器の場合、効率良く高輝度な放射光を得るため、このような構成を持つ光クライストロンが用いられることが多い [8,9]。FEL や CHG において目的とする光を得るためには、アンジュレータの磁場条件の他、バンチャーの磁場調整による正確な電子ビームの軌道調整が非常に重要である。

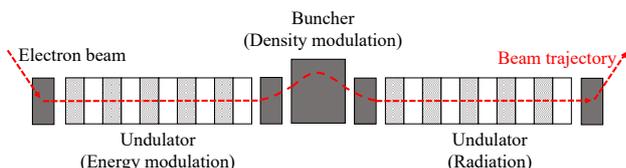


Figure 1: Schematic layout of optical klystron.

2.2 バンチャー電磁石

UVSOR のバンチャー電磁石の外観を Fig. 2 に、主な性能を Table 1 示す。この電磁石は 3 台のダイポールから成るが、上面および下面のヨークを 3 台のダイポール電磁石が共有して磁気回路が構成されている。また 3 台の直流電源により励磁電流を 3 組のコイルに流し、それぞれのダイポール電磁石を独立に制御できるようになっている。バンチャーとしては電子ビームのエネルギー広がりによって生じる経路差の幅、すなわち電子ビーム進行方向の分散を表す転送行列要素の R_{56} 成分を大きく与えられる方が、幅広い光の波長域に対応することができるため、より大きな R_{56} が好ましい。既存のバンチャー電磁石は電子ビームのエネルギー $E = 600$ MeV において $R_{56} = -67 \mu\text{m}$ の設計となっている。ヨークには磁極部



Figure 2: Photograph of buncher magnet.

分を含め全て一般的な鋼材料である SS400 が用いられている。SS400 は流通量も多く比較的安価であり加速器の電磁石として採用されることもあるが、磁気的特性をみると磁気履歴が残りやすいため、頻繁に励磁電流を変更したり電子ビーム軌道の微調整などを行う場合は、励磁電流に対する電子ビーム軌道が一意に定まらないなどの問題が生じる。UVSOR においても光発生実験においてバンチャー磁場の調整を行う際に、励磁電流による電磁石が発生する磁場が要求する電子ビームの軌道をどの程度再現しているかは不確定なところがあり、再現性の良い実験の妨げとなる場面が多々ある。

本研究では磁性材料を SS400 の代わりにしてケイ素鋼・純鉄とした場合、電磁石の磁気履歴すなわち磁性材料のヒステリシスがどのように変化し、バンチャーとしての性能の向上と改善に寄与するかについて検討を行なった。まず各磁性材料の磁気特性を用いて数値シミュレーションによる 3 次元磁場解析を行い、励磁磁場に対する磁束密度の大きさや磁束密度分布を求め、バンチャーとしての性能がどの程度向上するかを評価した。次に、実際に磁気履歴がどの程度低減されるかを定量的に評価するため、バンチャー電磁石を構成するサイド電磁石モデルを再現し、純鉄および SS400 を磁性材料に使った電磁石の製作を行なった。このサイド電磁石モデルを用いてヒステリシス特性を定量的に評価することで、バンチャー電磁石の性能がどの程度改善されるのかの指標とすることとした。

Table 1: Performance of Buncher Magnet

Material	SS400
Pole gap	Center : 46 mm, Side : 52 mm
Pole length	Center : 129 mm, Side : 71 mm
Maximum coil current	Center : 26.5 A, Side : 34.0 A
Maximum B_y	Center : 0.5 T, Side : 0.35 T
Turn number of coil	Center : 316, Side : 253
Coil cooling	Indirect water
Maximum R_{56}	$-67 \mu\text{m}$ ($E=650$ MeV)

3. 磁場シミュレーション

バンチャー電磁石の静磁場シミュレーションには、3次元静磁場シミュレーションプログラムである Radia [10, 11] を用いた。Radia は磁性材料の磁気特性のうち B-H 特性を外部から指定することができるため、磁性材料メーカーが公開する B-H 特性を使用し、コイルに流す励磁電流に対する磁極間における磁束密度の大きさと分布について計算を行なった。Figure 3 に計算に用いたケイ素鋼、純鉄、SS400 の B-H 特性を示す。ケイ素鋼と純鉄は SS400 に比べ透磁率が高いことから、小さな起磁力（励磁電流）で高い磁束密度が得られる。そのため、低い励磁電流値で磁極間に高い磁束密度が得られることが期待でき、SS400 よりも大きな R_{56} となることが推測される。

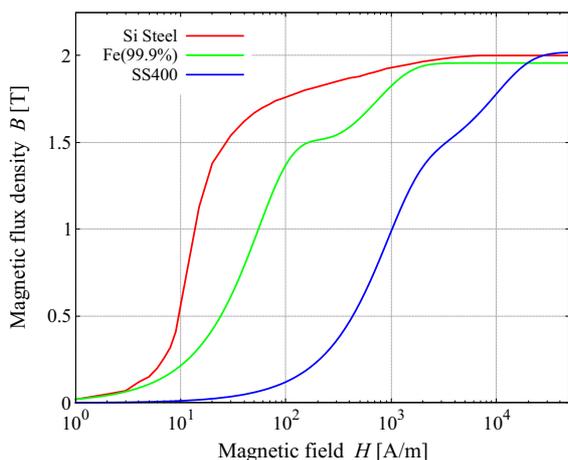


Figure 3: Magnetic property of Si Steel, Fe and SS400.

Figure 4 にシミュレーションに用いたバンチャー電磁石の 3次元モデルを示す。上部と下部は非磁性材料で支持されているため、シミュレーションの際は支持部を省略しコイルや磁性材料部分の寸法は既存バンチャー電磁石の完成図面から寸法を読み取り、シミュレーションモデルに反映させた。

Figure 5 に、磁性材料をケイ素鋼、純鉄、SS400 とした場合の電子ビーム進行方向 (z 方向) における磁束密度分布の励磁電流に伴う変化の様子を示す。ケイ素鋼と純鉄は SS400 に比べて高い磁束密度が得られており、サイドコイルの定格最大電流値に近い 35 A に至っても磁束の飽和は見られない。なお、この時のサイドコイルとセンターコイルに流す電流値は次に示す電子ビームの軌道がバンチャー電磁石の入口と出口において入出角がゼロになる時を示している。

Figure 6 は、Fig. 5 の磁束密度分布における電子ビームの軌道を運動方程式を数値積分することで求めた結果である。この時の電子ビームのエネルギーは UVSOR において FEL や CHG 実験を行う際によく設定される $E = 600$ MeV としている。Figure 6 から、同じ励磁電流値でもケイ素鋼と純鉄の方が大き

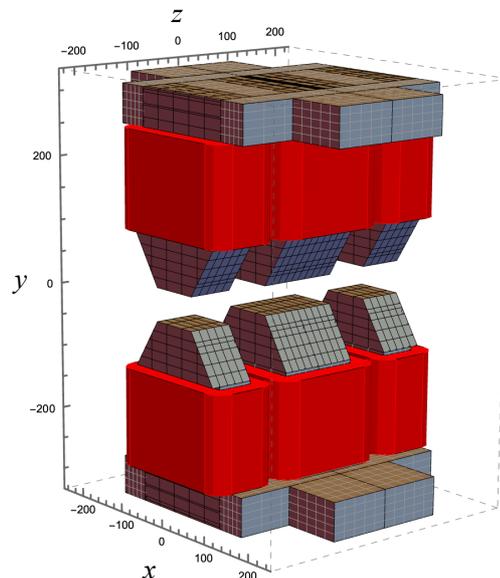


Figure 4: 3D model of buncher magnet for numerical simulation.

な磁束密度が得られているため、電子ビームに大きな軌道変化が与えられていることがわかる。Figure 6 の電子ビーム軌道を用いて、この時の R_{56} を Eq. (1) を用いて算出した。

$$R_{56} = - \int_{z_0}^{z_1} x'^2 dz = -2\Delta L \quad (1)$$

ここで z は電子ビームの進行方向の座標であり、 x' は座標 z における電子ビームの横方向 x に対する傾き、 ΔL は磁場の有無での軌道長の差である。Figure 7 にサイドコイルの励磁電流値と R_{56} の関係について、ケイ素鋼、純鉄、SS400 それぞれの場合のプロットを示す。Figure 7 では R_{56} の値に -1 を掛けて正とした。このプロットより、 R_{56} は励磁電流に対して二次関数的に変化しており、励磁電流が 15 A 程度の低い領域までは R_{56} に大きな違いはないがそれ以上の領域では大きな差が出てきて、コイルの定格電流値に近い 35 A では約 $20 \mu\text{m}$ も大きな値が得られている。 R_{56} が $20 \mu\text{m}$ 大きくなるということは、マイクロバンチの生成過程においてより幅の広い波長域をカバーすることにつながることであり、広帯域な FEL 実験には非常に有利である。このことから、バンチャー電磁石の磁性材料をケイ素鋼や純鉄へ置き換えることで、性能の向上が期待できる。

4. ヒステリシス特性の評価

実際に励磁した際、どの程度の磁気履歴が生じるのかを定量的に評価するため、バンチャー電磁石を構成するサイド電磁石の寸法を採用したダイポール電磁石を製作し、励磁電流を上下してその際の磁束密度を計測し、ヒステリシス特性の評価を実施することとした。Figure 8 に製作したテスト用ダイポー

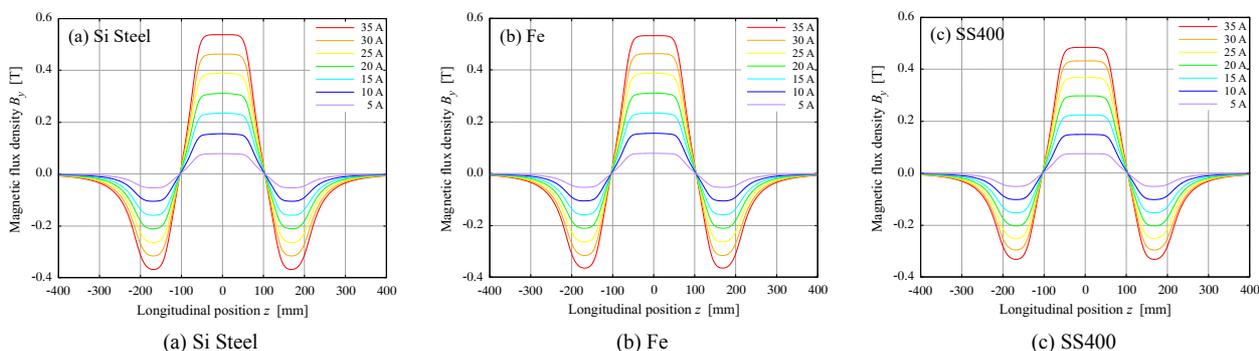


Figure 5: Distribution of magnetic flux density along longitudinal direction for various excitation side coil current. (a) Si Steel, (b) Fe and (c) SS400.

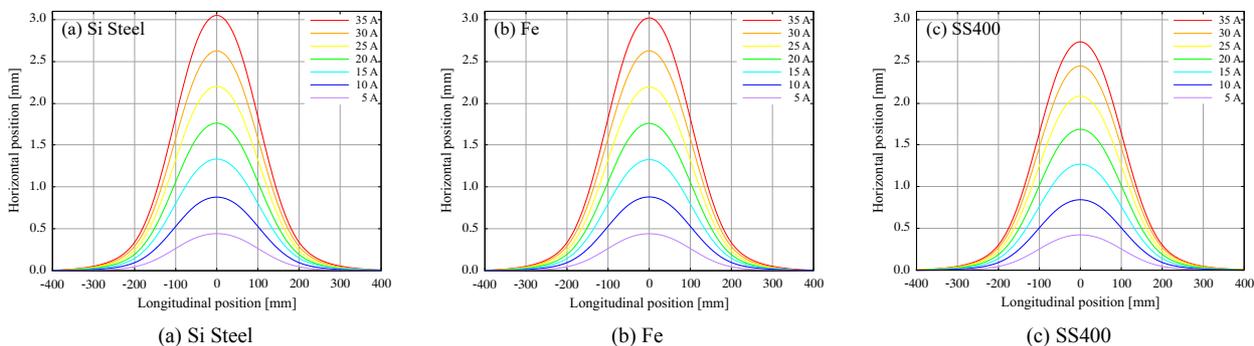


Figure 6: Electron beam trajectory for various excitation side coil current. (a) Si Steel, (b) Fe and (c) SS400.

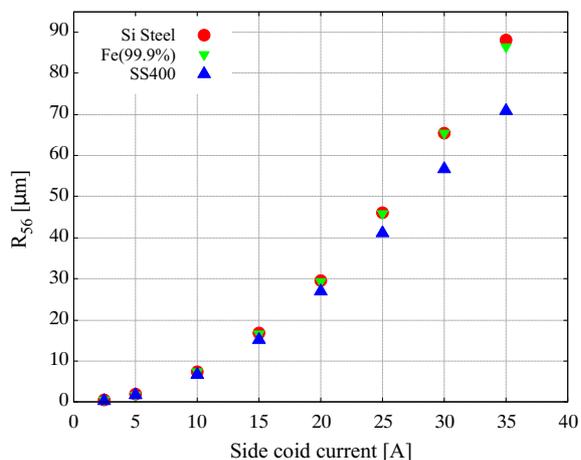


Figure 7: Relation of excitation coil current and R_{56} for the case of Si Steel, Fe and SS400.

ル電磁石の構造を示すが、実際のバンチャー電磁石は3つのダイポールで側面を利用せず磁気回路を形成しているのに対し、このテスト用モデルでは上下面を1つの側面（背面）にてヨークを配置（図中のBack Yoke）して磁気回路が形成されるようにしている。また、上下面に生じる磁束間の引力による歪みを抑えるため、前後面にはSUS製のサポートで

支持する構造としている。コイルもバンチャー電磁石のサイド電磁石のコイルを再現するため、約250ターンとしている。この構造で磁性材料として純鉄とSS400とした二つのダイポール電磁石がこの夏に完成した。Figure 9に完成した電磁石の様子を示す。

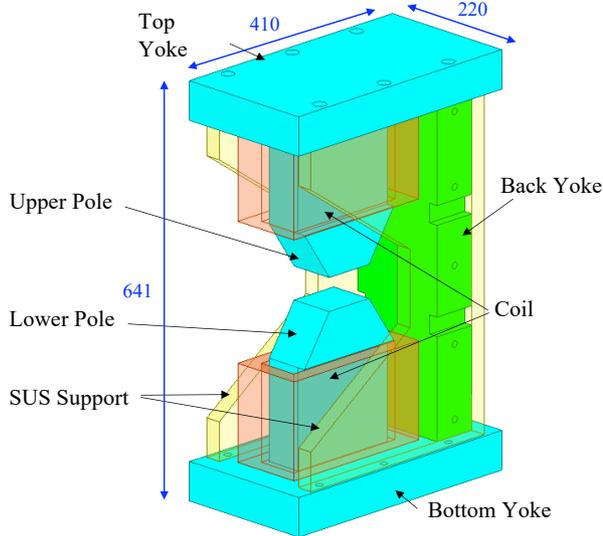


Figure 8: 3D CAD image of test dipole electromagnet.



Figure 9: Photograph of test dipole electromagnet.

ケイ素鋼については、バルク材ではなく板材を積層してヨーク形状に加工することとなる。さらにケイ素鋼は結晶に方向性を有しており、この方向性に対して垂直または水平方向へ加工することで磁気特性が大きく変わってくることが知られている。現在このケイ素鋼の方向性が磁気特性に与える影響などについて調査中である。なお、さらに良い磁性材料と云われるものにパーマロイが挙げられるが、ケイ素鋼や純鉄と比較すると価格が跳ね上がるため、本研究で対象としている電磁石全体の体積を考えると候補に入れ難い。

5. まとめ

バンチャー電磁石の性能向上と改善を検討するため磁場シミュレーションを行い、ヒステリシス特性を評価するためテストモデルの電磁石を設計し製作した。シミュレーションからは磁性材料をケイ素鋼や純鉄に変更することで R_{56} が向上することが示された。また、テストモデルとなる純鉄と SS400 を磁性材料とした電磁石が完成し、今後ヒステリシス特性の評価を実施する。これらの結果を踏まえ、バンチャー全体を再製作する際の磁性材料選定の一案としたいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K12540, JP20H00164 の助成を受けて実施している。

参考文献

- [1] UVSOR Activity Report.; <https://www.uvsor.ims.ac.jp/eng/activity/index.html>
- [2] Hiroshi Ota *et al.*, “UVSOR 光源加速器の現状 2022”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, TFP011.
- [3] T. Kaneyasu *et al.*, “Limitations in photoionization of helium by an extreme ultraviolet optical vortex”, *Phys. Rev. A*, vol. 95 (2017), 023413.
- [4] Y. Hikosaka *et al.*, “Coherent control in the extreme ultraviolet and attosecond regime by synchrotron radiation”, *Nature Communications*, (2019)10:4988.; doi:10.1038/s41467-019-12978-w
- [5] Y. Taira *et al.*, “UVSOR-III におけるガンマ線源開発と利用研究”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, WEOA10.
- [6] H. Zen *et al.*, “UVSOR-FEL の再立上げと Intra-cavity Compton Scattering によるガンマ線発生”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, FRP019.
- [7] 全 炳俊. “移設先直線部における UVSOR-FEL の再立上げと Intra-cavity Laser Compton Scattering によるガンマ線発生”, 第 28 回 FEL と High-Power Radiation 研究会, March, 9-10, 2022.
- [8] R. Coisson, “OPTICAL KLYSTRONS”, *Particle Accelerators*, vol. 11, pp. 245-253 (1981).
- [9] R. Bonifacio *et al.*, “Theory of the high-gain optical klystron”, *Phys. Rev. A*, vol. 45, No. 6, pp. 4091-4096 (1992).
- [10] P. Elleaume, O. Chubar, J. Chavanne, “Computing 3D Magnetic Field from Insertion Devices”, *Proceedings of the PAC97 Conference May 1997*, p.3509-3511.
- [11] <https://www.esrf.fr/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>