

Laser 加速電子 Beam を用いた XUV-FEL 実証試験のための 極短周期 Undulator 磁石技術に基づく小型・軽量 Undulator の開発

UNDULATOR FABRICATED FOR XUV-FEL CHARACTERIZATION EXPERIMENT USING A LASER-ACCELERATED ELECTRON BEAM WHICH HAS A COMPACT SLENDER AND LIGHTWEIGHT FRAME BASED ON A MAGNET TECHNOLOGY DEVELOPED FOR VERY-SHORT-PERIOD UNDULATORS

山本樹^{#, A, B)}, 宮内洋司^{C)}

Shigeru Yamamoto ^{#, A, B)}, Hiroshi Miyauchi^{C)}

^{A)}Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{C)}Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

We are exploring a novel method to fabricate undulator magnets having a very short period length of a few mm. Plate monolithic magnets (PMM) made of Nd-Fe-B, 100mm long with 4-mm period length have been successfully fabricated. The period length allows us to obtain 12-keV radiation with the first harmonic of this undulator in the 2.5-GeV light source accelerator. A connection of these PMMs has also been successfully developed to fabricate longer undulator magnets. As a next step, we are developing a magnetic cancellation method of an attractive force produced by the undulator main magnets by using repulsion magnets. The attractive force is effectively cancelled out by them placed outward in the magnet gap. We found that the repulsion magnets made of PMM were easily optimized in the present system where the main magnets were also made of PMM. We also develop a compact undulator frame, in which attractive force of the main undulator magnets is effectively cancelled out by the cancellation method using repulsion magnets. This undulator is designed as a light source for an XUV-FEL which has been undertaken in the experimental platform at SPring-8 for the JST-MIRAI project. Target undulator parameters for this experiment are: period length, $\lambda_u=25$ mm, field strength $K=1.4$ at the gap=6 mm or larger, and number of period=80. The magnet array is divided into two segments 1m long each, gap of which can be controlled independently. The undulator system is as light as 500 kg/m.

1. はじめに

我々は近年、通常数 10 mm だったアンジュレータの周期長を約 1/10 に“極短周期化”することを目標にして、板状磁石に極短周期アンジュレータ磁場を書き込む多極着磁方式の研究開発を行って来た[1-5]。これまで周期長数 mm の板状磁石 PMM (Plate Monolithic Magnet) の着磁技術、長尺化のための連結方式を確立した(周期長 4 mm の時 2.5 GeV 加速器で 12 keV の基本波を生成可能)[6-9]。

PMM を用いた極短周期アンジュレータの性能評価を行うために、このアンジュレータの運転に必要な狭小ギャップ(1.6 mm)を許容することの出来る、東北大学・電子光理学研究センター(当時。現先端量子ビーム科学研究センター)S-band Linac において、最初の放射の観測試験を実施した。S-band Linac の電子ビーム(33.5 MeV)からの可視領域放射光(468 nm)の生成と分光計測に成功した[10-12]。

次のステップとして、アンジュレータ主列磁石間に働く磁場吸引力を、反発磁石を用いて相殺する方式を開発している[13]。アンジュレータ駆動軸に働く吸引力は主列磁石の周囲に反発磁石を配置することで効果的に軽減・相殺出来ることを見出した。

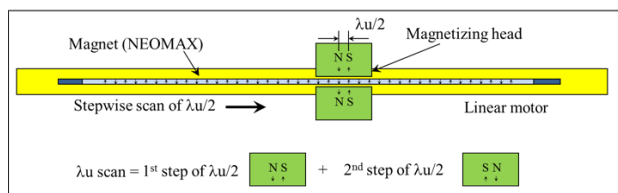
この方式を応用すると、磁場吸引力を抑制して、通常は巨大になるアンジュレータ本体を小型で軽量かつ華奢であるにも拘わらず、精密な機械装置として完成することが可能になる。本研究では、JST-MIRAI プロジェクトにおいて現在 SPring-8 レーザー加速プラットフォームで開発中の XUV-FEL 光源として建設・設置した、小型・軽量アンジュレータについて報告する。主なパラメータは：周期長 25 mm, 磁石長 2 m, K 値 1.4(於 gap=6.4 mm), 重量 500 kg/m である。アンジュレータは 2 分割され 1 m ユニット毎のギャップの独立制御が可能である。

このプラットフォームに於いて、XUV-FEL 実証試験のためのビームテストを開始し、上記アンジュレータからの初生光観測に成功した。現在、放射光データの集積と解析を継続中である。

2. PMM (Plate Monolithic Magnet) による極短周期アンジュレータ磁場生成

通常形式のアンジュレータにおいては、磁場周期長短縮を試みる場合、アンジュレータ磁石列を構成する磁石ブロックの寸法をその(相対)精度を保ちつつ縮小することが必要になる。しかし、周期長が、現在の通常の周期長から非常に小さくなって、例えば 10 mm を下回る様になると、要求される精度を保ちつつ磁石部品類を製作することは難しくなり、この方式は成立しなくなる。

shigeru.yamamoto@kek.jp



(a)

直交着磁方式によるアンジュレータ磁場の生成

(b)

Figure 1: (a) Schematic illustration of multi-pole magnetization employing a linear motor, where perpendicular geometry is adopted, and (b) formation of an undulator field in perpendicular magnetization[10, 12].

通常アンジュレータの製作方式とは対照的に、我々は板状磁石素材を用いて極短周期アンジュレータ磁石 PMM を作成するための、多極着磁法を用いた全く新しい着磁方法を開発してきた[1-9]。その方法を概念的に Fig. 1 に示す。上一対の着磁用電磁石（ヘッド）で挟まれた磁石素材板を長手方向に高精度リニアモータによってステップ状に送りながら着磁する方式を採用している。着磁用ヘッドには 1 極（半周期）磁場を生成できる電磁石を製作して用いた。リニアモータによる磁石板のステップ送り幅は周期磁場の半周期分とした。磁石板を送る際のステップ毎に着磁ヘッド電磁石に印加するパルス電流の方向を反転することで、必要な周期長のアンジュレータ磁場を生成した。このようにパルス電流を着磁ヘッド電磁石に印加することで、その各ステップ毎に磁石板中に N 極と S 極を交互に周期的に連続して書き込むことができるようになった。磁石素材板には、日立金属(株)製の NMX-37SH（残留磁束密度 $Br=12$ kG, および保磁力 $iHc=21$ kOe）を採用している。

着磁後の PMM を Fig. 2 に示す:長さ 100 mm, 幅 20 mm, 厚さ 2 mm ($\lambda u=4$ mm)[10, 12]。磁石表面は、真空封止（真空封止アンジュレータ磁石として加速器真空

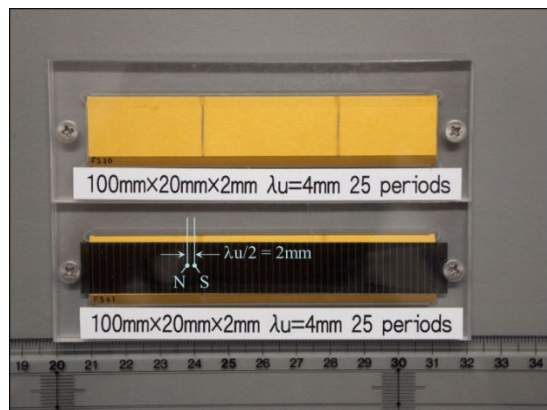


Figure 2: Magnetized plate magnets 100 mm long, 20 mm wide and 2 mm thick with a period length of 4 mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field[10, 12].

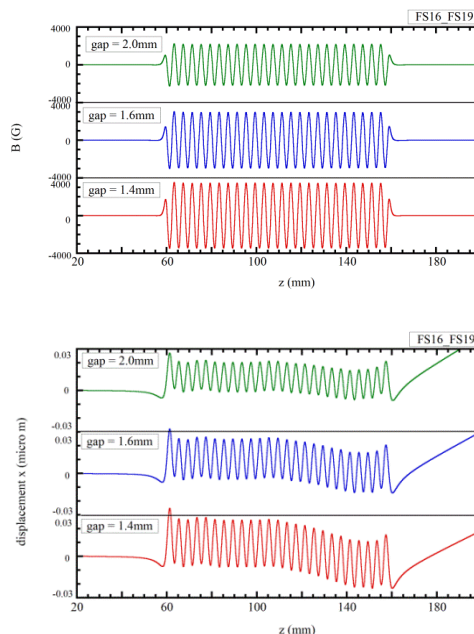


Figure 3: Results of the magnetic measurement for the plate magnet 100 mm long: (a) undulator field with a period length of 4 mm measured at gaps of 1.4, 1.6 and 2.0 mm, and (b) electron orbits with an energy of 2.5 GeV at the same gaps[10, 12].

中にこの PMM を持ち込む)のために TiN コートを施している。図中下段の磁石については、着磁後の磁場のパターンを磁気観察シートを通して観察できる。

Figure 2 に示した板状磁石一対を互いに平行に対向して配置すると、磁石板間の狭いギャップにアンジュレータ磁場が生成される (Fig. 1(b))。この磁石の性能評価のために行った磁場測定の結果 ($\lambda u=4$ mm) を Fig. 3 に示す。Figure 3(a); 磁場 (gap=1.4, 1.6, および 2.0mm), Fig. 3(b); 電子軌道 (エネルギー 2.5 GeV の場合。gap 条件は同じ)。Figure 2 の着磁時には、磁石板と着磁ヘッドとの長手方向の位置関係を最適化することによって、長手 (電子の軌道軸) 方向に対称的な磁場分布が得られるように着磁を行った。Figure 3(b) に示したように、非常に良好なアンジュレータ磁場を得ることができたことが判る。

これらの PMM の採用は、本報告でも以下に見るようにアンジュレータの小型化・重量削減に有用であり、最終的には Nd-Fe-B 磁石の主要成分である希土類元素を含む重要な資源の保全にも役立つ。

上述の実測磁場に基づいて放射光の光束密度スペクトルを求めることでアンジュレータ磁場の評価を行うことができる。このスペクトルが、同強度で誤差のない理想磁場に対して得られるスペクトルと比較して、アンジュレータ基本波の領域では、同等の放射特性を持つことは既に他所で報告した[7, 10, 11]。

上記では、長さ 100 mm の PMM 開発について述べたが、磁石素材板の長さには製作上の限界が存在するので、より長尺のアンジュレータ磁場を生成する場合、PMM を長手方向に連結する方法を開発する必要がある。この磁石板の連結を適切に行い、より良好なアンジュレータ磁場を得るために、連結すべき PMM を一体にし

て連結したまま着磁を行う方式を開発した[7, 14]。Figure 4 に 5 枚の 100 mm 長 PMM を連結した時に得られるアンジュレータ磁場 ($\lambda_u=4$ mm) を示す[15]。Figure 4(a); 磁場 (gap=1.2 mm), Figure 4(b); 電子軌道 (エネルギー 2.5 GeV)。この時は, Fig. 3 の場合とは異なり, 磁場中心に対して長手方向に反対称的な磁場分布が得られるように着磁を行った。緑矢印で示した連結点付近の磁場, 電子軌道ともに不整は見られず, 良好なアンジュレータ磁場が得られたことが判る。

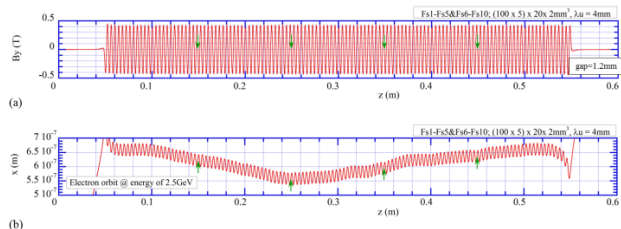


Figure 4: (a) Undulator field 500 mm long with a period length of 4 mm measured at a gap of 1.2 mm. (b) electron orbits of with a 2.5-GeV energy. A series of five PMM is connected longitudinally and magnetized to form a field 500 mm long. It is then opposed to the other series magnetized in the same way[9].

3. 反発磁石を用いたアンジュレータ磁場吸引力相殺法の開発

上記の PMM を用いた極短周期アンジュレータでは, その磁石列が非常にコンパクトなものになる結果として, アンジュレータ本体のコンパクト化を期待できる。さらに, PMM を利用した反発磁石による磁力相殺方式を採用すると, アンジュレータのより一層の小型軽量化を図ることが可能になる。この方式を用いなければ強大になるア

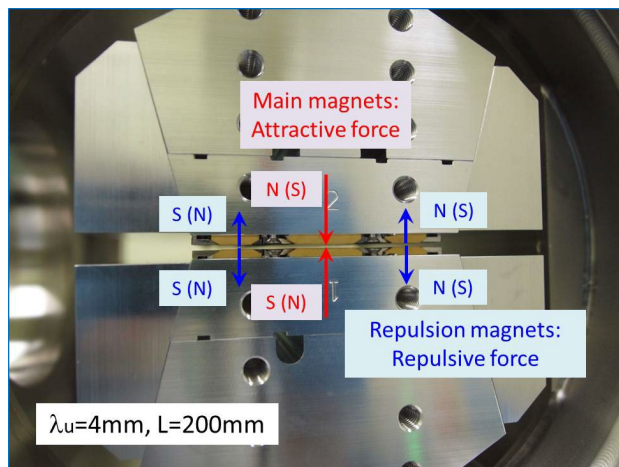


Figure 5: Magnet arrangement to cancel the magnetic attractive force between the main magnet arrays. The attractive force of the main magnets is cancelled by the repulsive force produced by the repulsive magnets arranged at both sides of the main array. A case for 4-mm period length is shown.

ンジュレータ磁場吸引力を適切に軽減・相殺する方法を開発した。

この方法は, 既に SPring-8 の次世代アンジュレータ開発でも (主列磁石に通常の Halbach 磁気回路, 反発磁石に PMM を用いる形で) 検討され, 一部実現しつつあるが[16, 17], 本研究では SPring-8 の方式とは一部異なり, アンジュレータ磁場を生成する主列磁石も反発磁石も共に上で述べた PMM を利用する。

通常のアンジュレータでは, 強大な磁場吸引力に打ち勝つため非常に剛性の高い架台 (通常重厚長大) によって要求される精度を達成しているが, 本研究の方式を採用することにより, 高精度のギャップ駆動を小型・軽量のアンジュレータ架台で実現することが可能になる。

今回開発した磁力相殺方式では, 通常のアンジュレータと異なり, 磁石部分は上下各 3 列の磁石列によって構成される。アンジュレータ磁場生成用の中央主列磁石間に働く磁場吸引力は, その両隣に配置した 2 列の磁力反発用磁石列によって相殺することができる。ここで, 反発用磁石列では NS の位相関係を中央列と反転させることによって反発力を発生させている。この方式を検証するために開発した小型アンジュレータ架台 (駆動軸に装着したロードセルにより磁石列間に働く吸引/反発力を測定できる) の中心部を Fig. 5 に示す。ここでは, 周期長 $\lambda_u=4$ mm の PMM (磁石長 200 mm) を装着して磁場吸引力相殺を実証した。

Figure 6 には, 反発磁石による磁場吸引力相殺の有効性を示す。磁場吸引力を相殺するためには, 主列磁石のサイズに対する反発磁石のサイズの最適化 (周期長, 磁石長および磁石高を同一にしたので磁石幅) が必要になる。今回の $\lambda_u=4$ mm の場合, 磁極面の幅を主列磁石の 1/2 にすることによりこの最適化を行うことが出来る。Figure 6 に示す様に反発磁石を用いた上記方式を用いなければ, 磁石長 200 mm の場合, 最小ギャップ 1 mm において 200 N を超える磁場吸引力を 10 N 以下に抑制

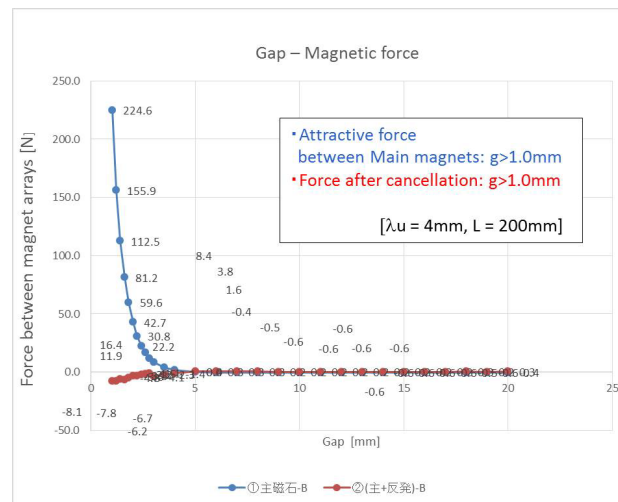


Figure 6: Measurement of the force generated between the undulator magnets 200 mm long. The attractive force without repulsive magnets (blue circle) is well suppressed (orange circle) by the repulsive magnets. The result for the period length of 4 mm is shown.

することができる。

4. レーザー加速電子を用いた XUV-FEL 実証試験のための小型・軽量アンジュレータ実用機の開発

アンジュレータ磁石列間には強い磁場吸引力が働くため、十分な剛性を維持し精密なギャップ軸駆動を行うためには、アンジュレータ本体は、重厚長大な装置となるのが通常である。しかし、第 3 章で述べた方式を適切に応用すると、アンジュレータ磁場吸引力を抑制して、アンジュレータ本体を小型・軽量かつ華奢であるにも関わらず精密な装置として完成させることが可能になる。ここでは、JST-MIRAI プロジェクトにおいて現在 SPring-8 レーザー加速プラットフォームで開発中の XUV-FEL の光源として設計・製作した、真空封止型小型・軽量アンジュレータについて述べる。

このアンジュレータは各々 1 m 長の U#1 と U#2 から構成され、周期長は $\lambda_u=25$ mm、磁石長は 2 m (周期数 80) である。反発磁石を用いた小型化によって、U#1 と U#2 の重量は各々 500 kg 程度にまで抑制することが可能になった。U#1 と U#2 の 1 m 長セグメントは、通常同一ギャップで運転されるが、各部独立のギャップ制御も可能である。SPring-8 レーザー加速プラットフォームに設置導入したアンジュレータ本体写真を Fig. 7 に示す。

このアンジュレータ用磁石として、周期長 $\lambda_u=25$ mm、長さ 100 mm、幅 25 mm (主列磁石用) または 16 mm (反発磁石用)、高さ 12.5 mm の PMM を第 2 章で述べた方法で製作した。XUV-FEL の光源として要求される、Gap=6 mm 以上で 6 kG ($K=1.4$) の条件を上記の磁石仕様で満足できることを確認している[18]。

これらの磁石をアンジュレータ架台に組込んだ状況を Fig. 8 に示す。中央の主列磁石の外側に反発磁石が配置されている。これらの磁石に対して磁場吸引力相殺を確認した結果を Fig. 9 に示す。第 3 章 Fig. 5 で用いた磁場吸引/反発力計測器を用いて測定した。長さ 200 mm のアンジュレータ主列磁石間には、gap=4.6 mm におい



Figure 7: Photograph of the JST-MIRAI XUV-FEL undulator 2 m long. It is composed of 2 segment undulators (U#1 and U#2), 1 m long each. The gap of each segment can be changed independently.

て 600 N を超える磁場吸引力(●)が発生するが、反発磁石から生じる反発力(●)によってアンジュレータ架台ギャップ駆動軸にかかる負荷は 10 N 以下に抑制(●)することができるが判る。

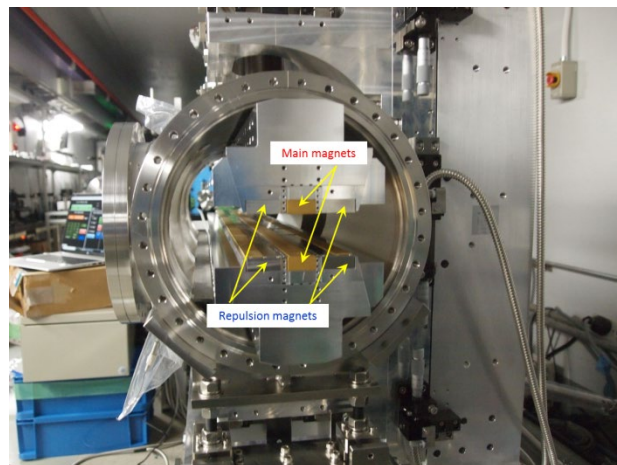


Figure 8: Installation of magnets into the compact, slender and light frame of the JST-MIRAI XUV-FEL undulator.

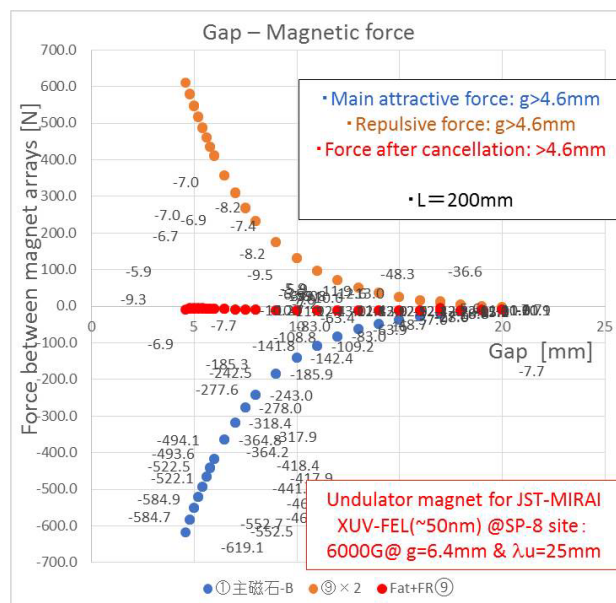


Figure 9: Force before and after magnetic cancellation for the JST-MIRAI XUV-FEL undulator with $\lambda_u=25$ mm. Test measurement was made for the magnet length of 200 mm. The attractive force without repulsive magnets (blue circle) is well suppressed (red circle) by the cancelling magnets (orange circle).

Figure 10 に、このアンジュレータ磁石列に対する磁場測定の実例を示す。Figure 8 の中央主列磁石長 2 m に渡る磁場分布を示している。ギャップ gap=6.4 mm において有効 K 値(半周期毎の磁場 1 次積分値として定義される) $=1.45$ ($B=5870$ G) が達成され、良好なアンジュレータ磁場および軌道が得られたことが判る(位相誤差 $\Delta\phi=10.5$ deg.)。このアンジュレータ磁石の着磁は、Fig. 4 に示したものと同一の方法で行った。また、長手方向磁

場分布は、同じく磁場中心に対して反対称になるように調整されている。

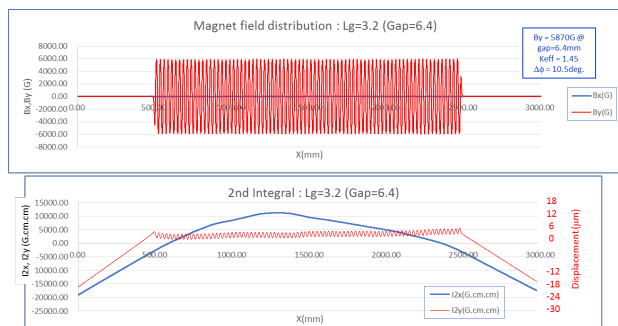


Figure 10: Magnetic measurement for the 2m-long magnet array of the JST-MIRAI XUV-FEL undulator with $\lambda_u=25$ mm. It is composed of 20 PMMs (100 mm long each) connected. Field strength at gap=6.4 mm and orbit for the 2.5-GeV electron beam with zero emittance are shown.

我々は、上記 JST-MIRAI XUV-FEL アンジュレータを、SPring-8 旧 SCSS 収納部に展開中のレーザー加速プラットフォームに設置し、ビームテストを含めた XUV-FEL 実証試験を継続している。アンジュレータからの初生光観測に成功し、現在、放射光データの集積と解析を継続中である[19]。Figure 11 には、このアンジュレータからの放射波長の K 値依存性を示す。初期データではあるが、電子ビームエネルギーのバラツキの範囲内で、アンジュレータ放射の特性が明瞭に示されている。

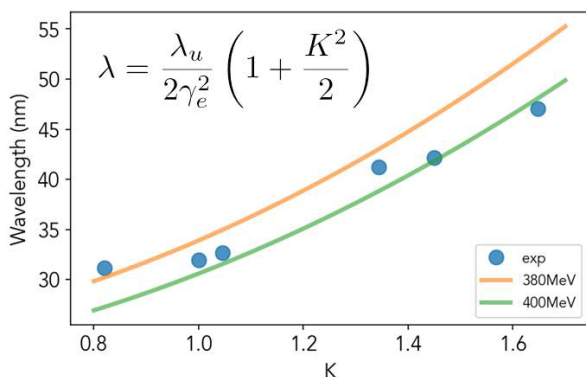


Figure 11: Characteristics of the radiation from the JST-MIRAI XUV-FEL undulator. Present result represents the nature of the undulator radiation for the electron beam energy from 380 to 400 eV.

謝辞

本研究は、一部において JSPS 科研費 24651107, 26246044 および 19H04401 の助成を受けました。本研究は、また一部において、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通じた委託を受けました。また、本研究は同じく一部において、科学技術振興機構・未来社会創造事業, JPMJMI17A1 の支援を受けています。

参考文献

- [1] S. Yamamoto, Journal of Phys.: Conf. Ser. 425 032014, 2013.
- [2] 山本 樹, 第 10 回日本加速器学会年会プロシーディングス, SAOT11, 86-89, 2013.
- [3] S. Yamamoto, WEOAA02, Proc. IPAC2014, 1845-1857, Dresden, Germany, 2014.
- [4] S. Yamamoto, Synchrotron Radiation News Vol. 28 No.3, 19-22, 2015.
- [5] 山本 樹, 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, FROM04, 187-190, 2015.
- [6] S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. 1741, 020029, 2015.
- [7] 山本 樹, 第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス, TUP066, 1035-1039, 2016.
- [8] 山本 樹, レーザー研究, Vol. 45 No.2, 82-86, 2016.
- [9] S. Yamamoto, WEXGBD1, Proc. IPAC2018, 1735-1739, Vancouver, BC, Canada, 2018.
- [10] 山本 樹, 他, 第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THOI14, 170-174, 2019.
- [11] 山本 樹, J. Plasma Fusion Res. 95, No.10, 508-513, 2019.
- [12] S. Yamamoto *et al.*, J. Synchrotron Rad. 26, pp.1902-1910, 2019. <https://doi.org/10.1107/S1600577519013031>
- [13] 山本 樹 他, 第 19 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THOA04, 118-122, 2022.
- [14] 山本 樹および谷口 純, 特許第 6393929 号.
- [15] 山本 樹 他, 第 17 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THOT10, 145-149, 2020.
- [16] R. Kinjo, S. Yamamoto *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 88, 073302, 2017. doi:10.1063/1.4991652
- [17] K. Imamura, S. Yamamoto, T. Tanaka *et al.*, J. Synchrotron Rad., accepted for publication.
- [18] 山本 樹, 第 21 回日本加速器学会年会プロシーディングス, WEP24, 550-554, 2023.
- [19] 神門正城, 山本 樹 他, 第 21 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THOA08, 2024