

極短周期アンジュレータ磁石技術に基づく、小型・軽量アンジュレータ光源の開発 UNDULATOR LIGHT SOURCE WITH A COMPACT, SLENDER AND LIGHTWEIGHT FRAME BASED ON A MAGNET TECHNOLOGY DEVELOPED FOR VERY-SHORT- PERIOD UNDULATORS

山本 樹[#]

Shigeru Yamamoto [#]

Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

We have been 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 4-mm 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 method of these magnet plates has also been successfully developed to fabricate longer undulator magnets. As a next step of the development, 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 are also developing a compact undulator frame, in which magnetic attractive force between the main undulator magnets is effectively cancelled out by the above cancellation method using repulsion magnets. This undulator is designed as a light source for an XUV-FEL development which has been undertaken in the experimental plat-form at SP-8 for the JST-MIRAI project. Target parameters of the undulator for this experiment are: period length, $\lambda_u=25\text{mm}$, field strength $K=1.4$ at the gap=5mm 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.

1. はじめに

近年我々は通常数 10 mm であ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た、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 2.5 GeV 加速器において基本波で 12 keV 放射を生成できる周期長 4 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[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 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]。磁場吸引力はアンジュレータ主列磁石の周囲に反発磁石を配置することで効果的に相殺することが出来る。

この方式を応用すると、アンジュレータ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華奢かつ軽量であるにも関わらず精密な機械装置として実現す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

フォームで開発中の XUV-FEL の光源として設計した、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、K 値 1.4 (gap=5 mm 以上で)、周期数 80 (磁石長 2 m の磁石列は 1m 列に 2 分割され各部のギャップは独立に制御可能) である。

2. 極短周期アンジュレータ磁場生成のための板状磁石 PMM の開発

通常形式のアンジュレータにおいては、磁場周期長を短縮を試みる場合、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 を下回るようになると、要求される精度を保ちつつ磁石ブロック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。

上述の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]。

ここでは、現時点で最も高精度・高強度の短周期磁場を持つ PMM を製作できる方式として開発した着磁方法を概念的に Fig. 1 に示した。上下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

[#] shigeru.yamamoto@kek.jp

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 $B_r=12$ kG、および保磁力 $iH_c=21$ kOe)を採用している。磁石サイズは $\lambda u=4$ mm の場合、長さ 100 mm、幅 20 mm、厚さ 2 mm が標準的である(後述する $\lambda u=10$ mm の場合には厚さ 5 mm)。また、Fig. 1 では磁化方向は磁石板表面に垂直である(直交着磁型)。この場合の幾何学は磁気記録媒体の垂直磁気記録方式と同様である。

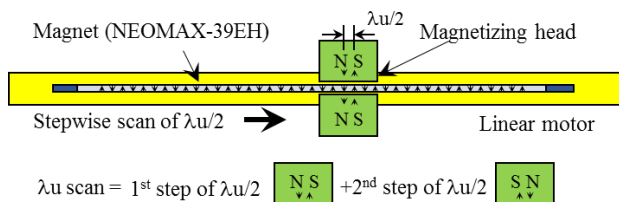
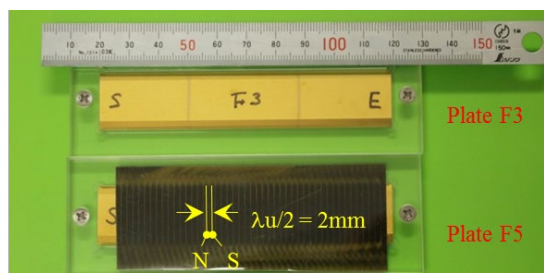


Figure 1: Schematic illustration of multi-pole magnetization employing a linear motor, where perpendicular geometry is adopted [10, 12].

着磁後の磁石板を Fig. 2 に示した:長さ 100 mm、幅 20 mm、厚さ 2 mm ($\lambda u=4$ mm) [10, 12]。磁石表面は、真空封止アンジュレータ磁石として加速器真空中にこの磁石を持ち込む際の真空封止のために 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。



$\lambda u=4$ mm & 25 periods; 100mm long, 20mm wide, 2mm thick

Figure 2: PMM (Plate Monolithic Magnet) 100 mm long, 20 mm wide and 2mm thick with a period length, λu of 4 mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field [10, 12].

Fig. 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。この磁石の性能評価のために、磁場測定の結果 ($\lambda u=4$ mm) を Fig. 3 に示す: Fig. 3(a); 磁場 ($gap=1.6$ mm)、Fig. 3(b); 電子軌道 (エネルギー 2.5 GeV の場合)。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)方向に反対称的な磁場分布が得られるように着磁を行った。Fig. 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。

アンジュレータ磁場の評価は、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(電子ビームエネルギー 2.5 GeV、エミッタンスおよびエネルギー広がりごとにもゼロの条件と比較)、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]。

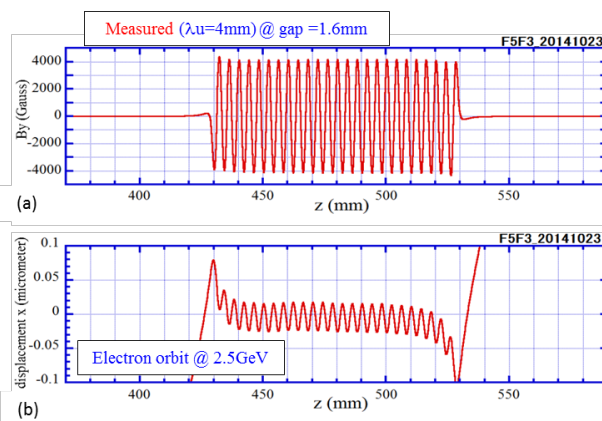


Figure 3: Result of the magnetic measurement for PMM 100 mm long; (a) undulator field with $\lambda u=4$ mm at a gap of 1.6 mm, and (b) an electron orbit with energy of 2.5 GeV [10, 12].

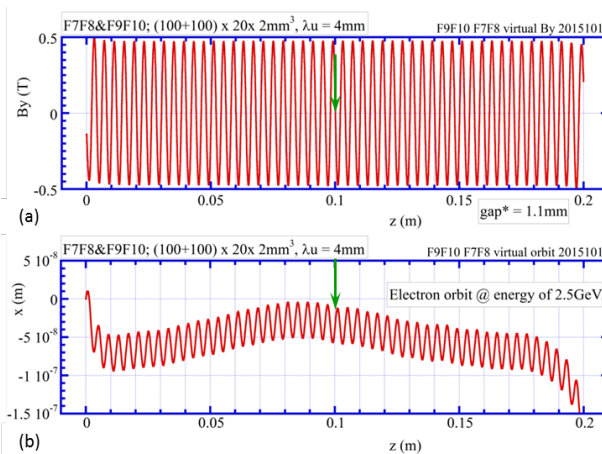


Figure 4: Magnetic measurement for PMM 200 mm long, where 2 PMMs (100 mm long each) are connected; (a) undulator field with $\lambda u=4$ mm at a gap of 1.1 mm, and (b) an electron orbit with energy of 2.5 GeV [10, 12]. Green arrow shows the connection point.

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(例えば、磁石板の厚さが 2 mm 程度の場合、200 mm を

超える長さの磁石板を製作することは容易ではない。)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 2 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 ($\lambda=4$ mm) を示す。Figure 4(a); 磁場 (gap=1.6 mm)、Figure 4(b); 電子軌道 (エネルギー 2.5 GeV)。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ることが判る。

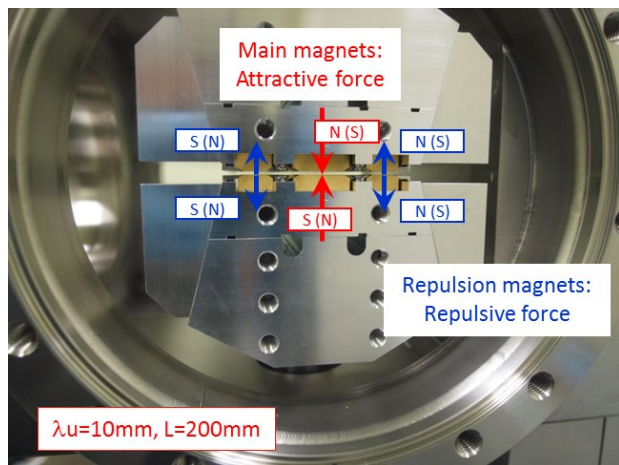


Figure 5: Magnet arrangement to cancel magnetic attractive force between the main magnet arrays. The attractive force of the main magnets is cancelled by the repulsive force produced by the repulsive magnets arranged at both sides of the main array. A case for 10-mm period length is shown.

現在、この方法で、 $\lambda=4$ mm および 10 mm については、長さ 500 mm を超える“極短周期アンジュレータ”磁場の生成が可能になっている[7, 9-11, 15]。さらに以下に見るように、 $\lambda=25$ mm の PMM を用いた 2 m 長アンジュレータ実用機の開発にも成功している。

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

極短周期アンジュレータは PMM を用いた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も期待できる。さらに、アンジュレータのより一層の小型軽量化を図るために、上記の PMM を利用した反発磁石による、磁力相殺方式を検討し、これを用いなければ強大になるア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ものであるが[16]、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場列間に働く吸引/反発力を測定できる) の中心部を Fig. 5 に示した。ここでは、周期長 $\lambda=10$ 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。

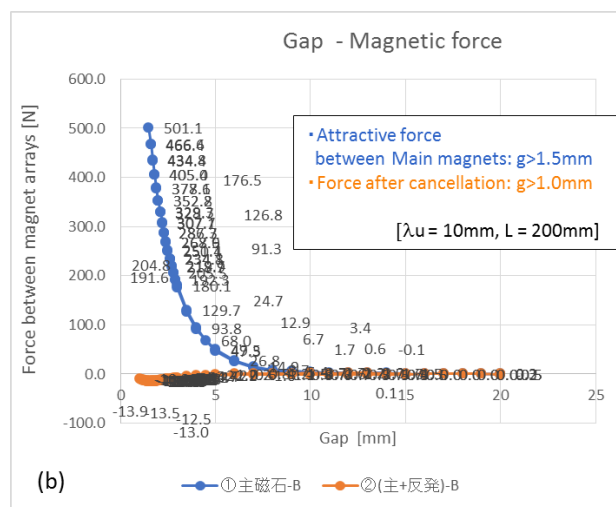


Figure 6: Measurement of the force generated between the undulator magnets 200 mm long. The attractive force without repulsive magnets (blue circle) is well suppressed (orange circle) by the cancelling magnets. Case for the period length of 10mm is shown.

Figure 6 には、反発磁石による磁場吸引力相殺の有効性を示した。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 (磁石長を同一にしたので磁石幅) の最適化が必要になる。今回の $\lambda=10$ mm の場合、磁極面の幅を主列磁石の半分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 700 N にも達する磁場吸引力 (外挿による推定値。上記の磁力測定用アンジュレータ架台保護のため、吸引力計測はギャップ 1.5 mm まで行った) を 10 N 程度に抑制することができる。

4. 磁力相殺方式に基づく、華奢・小型・軽量のアンジュレータ実用機の開発

アンジュレータ架台部は、その磁石列間に働く強い磁

場吸引力下で十分な剛性を維持し精密なギャップ駆動を行うために、通常は重厚長大な装置となる。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で華奢かつ軽量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。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。全体組立図をFig. 7に示した。

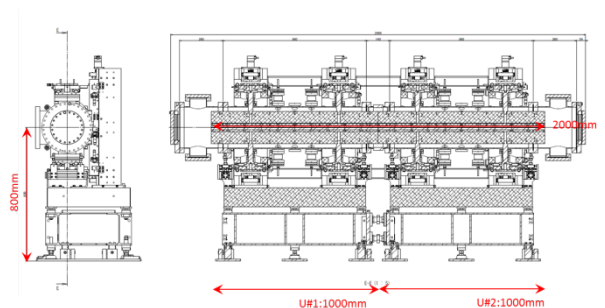


Figure 7: Design drawing of the JST-MIRAI XUV-FEL undulator 2m long. It is composed of 2 segment undulators (U#1 and U#2) 1m long each. The gap of each segment can operate independently.

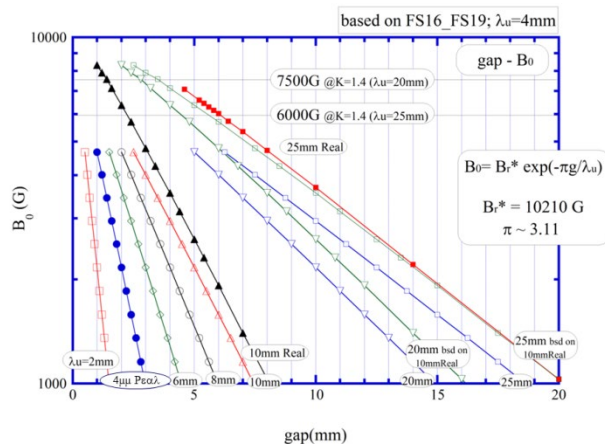


Figure 8: Field strength as a function of the magnet gap for PMM with $\lambda_u=25$ mm: Results for other period lengths ($\lambda_u=4$ mm and 10 mm) are also shown.

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。この PMM のギャップ・磁場の関係を Fig. 8 に示した(■)。Gap=6 mm 以上において 6000 G ($K=1.4$)を達成しているが、これは XUV-FEL の光源とし

て求められた条件を満たしている。Figure 8 には、この他に、 $\lambda_u=4$ mm (●)および $\lambda_u=10$ mm (▲)の PMM に対するギャップ・磁場関係も示している。この他の、白抜き記号(○、○、□等)で示したギャップ・磁場関係は、最終的に $\lambda_u=25$ mmとした、今回の周期長最適化のために用いた推定値である。

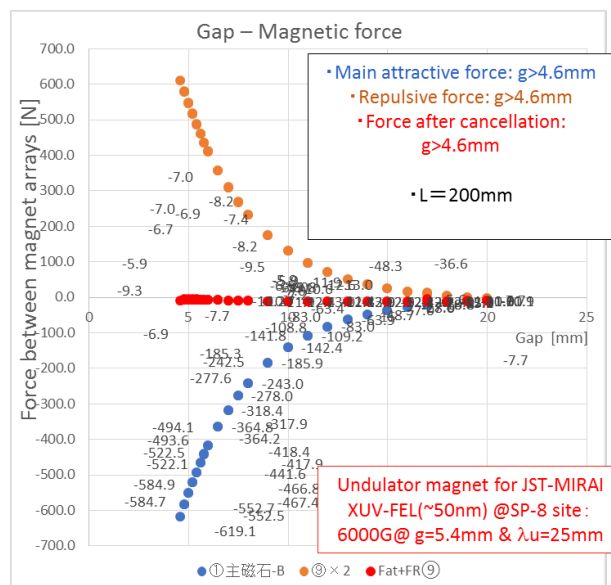


Figure 9: Force before and after magnetic cancellation for the JST-MIRAI XUV-FEL undulator with $\lambda_u=25$ mm. Test measurement was made in case of the magnet length of 200 mm. The attractive force without repulsive magnets (blue circle) is well suppressed (red circle) by the cancelling magnets (orange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

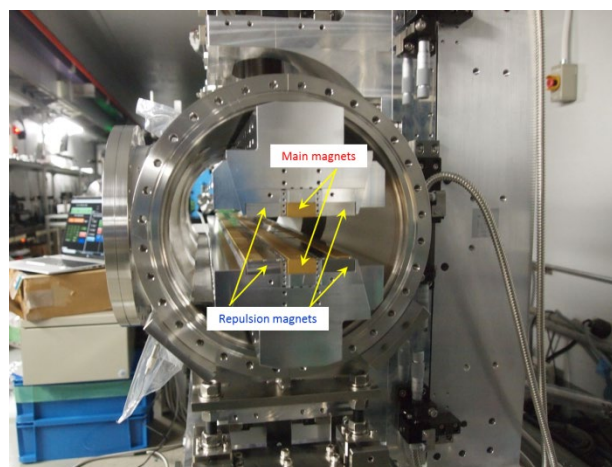


Figure 10: Installation of magnets to the compact slender and light-weight frame of the JST-MIRAI XUV-FEL undulator.

上記の磁石を用いて磁場吸引力相殺を確認した測定結果を Fig. 9 に示した。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。

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. 10 に示した。中央の主要磁石列の外側に反発磁石が配置されている。

Figure 11 に、このアンジュレータ磁石列に対する磁場測定例を示した。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.)。

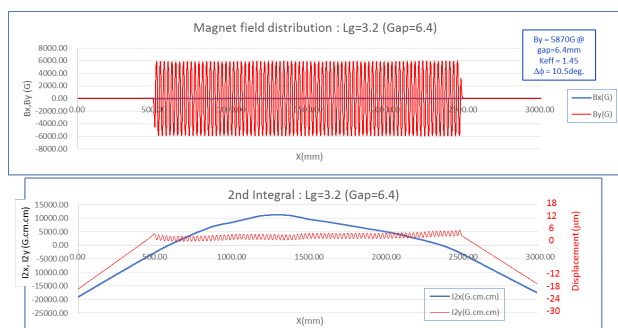


Figure 11: Magnetic measurement for the 2m-long magnet array of the JST-MIRAI XUV-FEL undulator with $\lambda_u=25$ mm. It is composed of 20 PMMs (100 mm long each) connected. Field strength at gap=6.4 mm and orbit for the 2.5-GeV electron beam with zero emittance are shown.

本研究で開発した、JST-MIRAI XUV-FEL アンジュレータは、最終調整を終了して、本年会開催直前に SPring-8 旧 SCSS 収納部で展開中のレーザー加速ビームラインへの設置・据付を完了したところである。今秋より開始される、電子ビーム開発および XUV-FEL 実証試験への利用が待たれる。

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