

極短周期アンジュレータの開発と光源性能評価試験 II

DEVELOPMENT OF A VERY SHORT PERIOD UNDULATOR AND CHARACTERIZATION OF THE UNDULATOR RADIATION II

山本 樹^{#, A)}, 益田伸一^{B)}, 細貝知直^{C)}, 神門正城^{D)}

Shigeru Yamamoto^{#, A)}, Shinichi Masuda^{B)}, Tomonao Hosokai^{C)}, Masaki Kando^{D)}

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

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute, JASRI,

^{C)} The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,

^{D)} Kansai Photon Science Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

We are exploring a novel method to fabricate undulator magnets having a very short period length. Plate-type magnets 100mm long with 4-mm period length have been successfully fabricated. Undulator field of approximately 3kG is obtained at a gap of 1.6mm. A method connecting these magnet plates has also been successfully developed to fabricate longer undulator magnets. A prototype undulator based on this technology has been constructed. Field measurements and characterization show that the quality of the undulator field of these plate magnets is sufficient for an undulator light source. Beam development based on the laser wake field acceleration scheme and test experiments for light generation have been carried out at an experimental platform at the RIKEN SPring-8 Center. Observation of the undulator radiation in the visible region was accomplished successfully by using an accelerated electron beam up to 100keV and an undulator with period length of 10mm.

1. はじめに

近年我々は、低いエネルギーの光源加速器においても、より低次のアンジュレータ放射によって、より高いエネルギーの放射の実用化を目指して、“極短周期”アンジュレータのための研究開発を行ってきた [1-6]。ここで、“極短周期”とは通常型アンジュレータの周期長(数 cm)の約 1/10 の周期長(=数 mm)とする。この研究では周期

長 $\lambda_u=4\text{mm}$ を目標に設定し、幅 20mm × 厚さ 2mm × 長さ 100mm (25 周期)の板状の NdFeB 製磁石素材に、周期的交番磁気回路を高精度・高強度で書き込む方式の開発を行っている。着磁後に対向させた一対の磁石板 (Plate Monolithic Magnet: PMM) の間の隙間(磁石ギャップ)にアンジュレータ磁場を生成することができる。現在 1.6mm の狭小ギャップに約 3kG の極短周期磁場 (周期長 4mm)を生成することが可能になった。実測磁場に基づく評価は、このアンジュレータ磁場からの放射光が優れた輝度特性を持つことを示している[1-8]。

この“極短周期化”は、高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・放射光研究施設 (KEK-PF) において、これまでに発明され、開発されてきた、真空封止アンジュレータの技術[9-13]に基づいている。真空封止アンジュレータの方式を用いることによって、その時点での永久磁石製作技術によって得られる最新の磁石素材性能を活用して最小の磁石ギャップを実現することによって、最短のアンジュレータ周期長を実現することが可能になるからである。

図 1 には、PF に於けるアンジュレータ周期長の短縮の歴史を示している[14]。PF の運転開始から、通常型アンジュレータ (Out-of-vac) の場合 100mm 程度から 50mm まで、真空封止型 (In-vac) の場合 40mm から 10mm 程度までの周期長短縮化を行ってきた。

一方で、この“極短周期アンジュレータ”はそれ自体が非常にコンパクトなものになる結果として、光源本体のコンパクト化も期待できる。この意味で、レーザー航跡場を利用したコンパクトな光源開発とも非常に相性が良い。SPring-8 旧 SCSS 収納部に建設したレーザー航跡場加速試験施設では、500mm 長磁石を装着した“極短周期”アンジュレータを設置して、レーザー加速電子ビーム

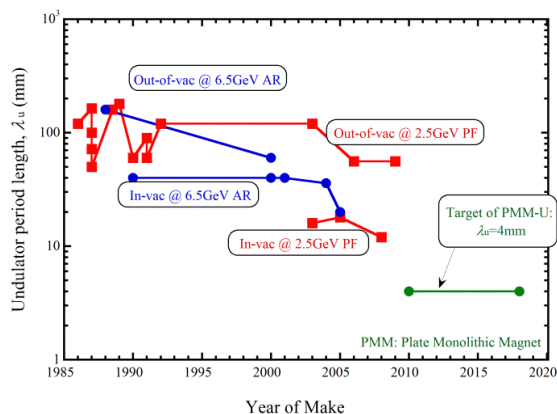
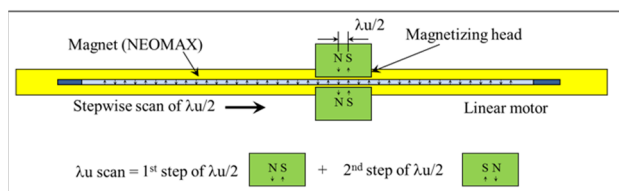


Figure 1: Development of reduction of undulator period length of over the years at the Photon Factory (PF), KEK. Red lines indicate the history at the 2.5-GeV PF, and blue lines indicate the history at the 6.5-GeV PF-Accumulation Ring (PF-AR): Green line indicates the target of the present research[14].

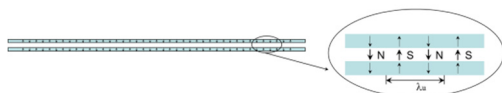
shigeru.yamamoto@kek.jp

の開発と併せて放射光生成試験を進めてきた。最近、この施設において 100MeV 程度のビーム加速に成功し、500mm 長 10mm 周期のアンジュレータから可視領域放射光の生成を確認することができた。ここでは、放射光観測実験の詳細について報告する。



(a)

直交着磁方式によるアンジュレータ磁場の生成



(b)

Figure 2: (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[14].

2. 極短周期長アンジュレータの開発

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を作成するために、多極着磁法を応用した新しい着磁方法の開発を行ってきた[1-8]。この着磁方法を概念的に図 2 に示した[14]。

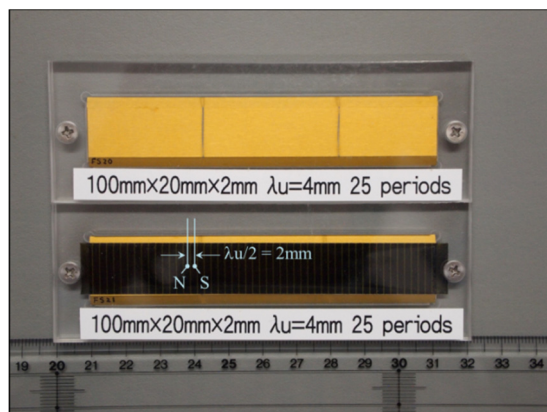


Figure 3: Magnetized plate magnets 100mm long, 20mm wide and 2mm thick with a period length of 4mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field[14].

ここでは、左右一対の着磁用電磁石(ヘッド)の間に、Nd-Fe-B 系材料でできた磁石素材板を設置し、この磁石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、着磁ヘッド電磁石にパルス電流を印加することによって着磁する方式を採用している。リニアモータによる磁石板のステップ送り幅は、磁場周期長の半分である。磁石板を送る際のステップ毎に着磁ヘッドに印加するパルス電流の方向を反転することで、そのス

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。磁石素材板には、日立金属(株)製の NMX-37SH (残留磁束密度 $B_r=12\text{kG}$, および保磁力 $iH_c=21\text{kOe}$)を採用している。本研究では、長さ 100mm, 幅 20mm, 厚さ 2mm ($\lambda_u=4\text{mm}$ の場合。後述する $\lambda_u=10\text{mm}$ の場合には厚さ 5mm)の磁石板を製作して用いた。図 2 には磁化方向が磁石板表面に垂直の場合を示した(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。

着磁終了後の磁石板を図 3 に示した:長さ 100mm, 幅 20mm, 厚さ 2mm($\lambda_u=4\text{mm}$) [14]。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 コートが施されている。図 3 では各磁石は吸着事故防止のために、アクリル樹脂製のケースに収納されている。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。

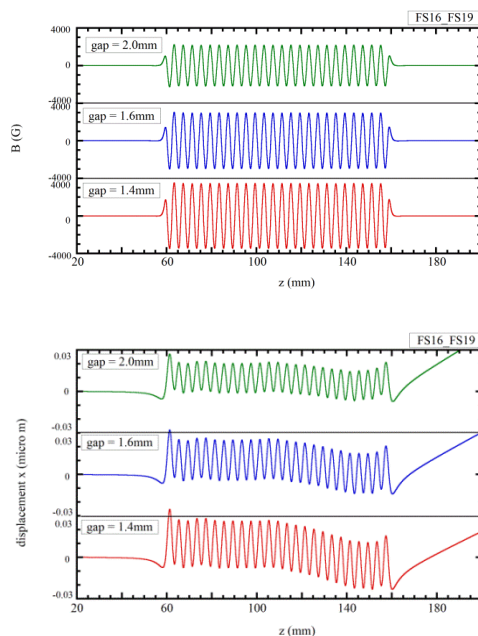


Figure 4: Result of the magnetic measurement for the plate magnet 100mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.4, 1.6 and 2.0mm, and (b) orbit of an electron with energy of 2.5GeV at the same gaps[14].

図 3 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(図 2(b))。この磁石の性能評価のために、精密磁場測定の結果を図 4 に示す:図 4(a); 磁場(gap=1.4, 1.6, および 2.0mm 時), 図 4(b); 電子軌道(エネルギー 2.5GeV の場合)。図 3 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。図 4(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判る。

更に、アンジュレータ磁場の評価を行うために、上述

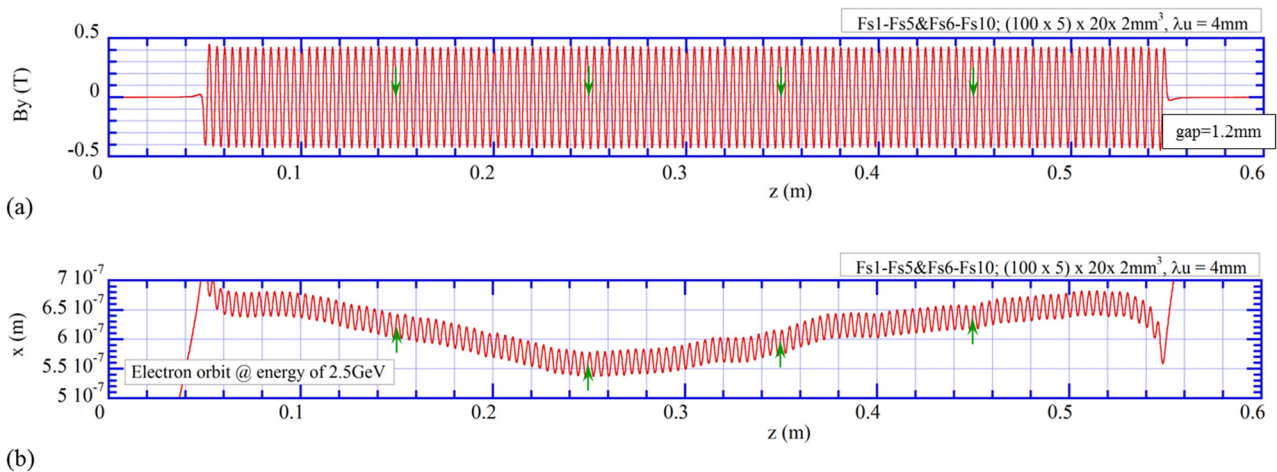


Figure 5: (a) Undulator field 500mm long with a period length of 4mm measured at a gap of 1.2mm. (b) Orbit of an electron with a 2.5-GeV energy. A series of five plates is connected longitudinally and magnetized to form a field 500mm long. It is then opposed to the other series magnetized in the same way[16].

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た(電子ビームエネルギー2.5GeV, エミッタンスおよびエネルギー広がりとともにゼロ)。このスペクトルは、同じ強度の誤差のない理想磁場に対して得られるスペクトルとの比較から、アンジュレータ基本波の領域では理想磁場からの放射と比べて同等の放射特性を持つことを示している[14]。

この着磁例は、周期長 4mm のアンジュレータ磁場として 25 周期が放射光実験の実用上の使用に耐える周期数であるならば、“モノリシック”アンジュレータ磁石 (PMM) も利用できるようなったことを示している。さらに、これらの板状磁石の製作はアンジュレータの小型化・重量削減にも有用であり、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。

しかし、現在開発している薄型磁石板の製作においては、磁石板の長さに限界が存在する。磁石板の厚さが 2mm またはそれ以下の場合、200mm を超える長さの磁石を製作することは容易ではない。したがって、板状磁石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、連結すべき磁石板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, 15]。

これまでに上記方式によって、全長 500mm までの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(図 5)[16]。図 5 には、5 枚の磁石板(100mm 長)を連結した 500mm 長磁石列を、同様に着磁したもう一組の磁石列と対向させて行った磁場測定の結果を示した(gap=1.2mm)。上記の一体着磁を行う際には、図 4 の例とは異なり反対称磁場分布を持つように着磁を行った。ギャップ 1.2mm における磁場測定の例を示している。図 5 中の緑色矢印は、磁石板の連結点を示す。図 5(b)の電子軌道(電子エネルギー2.5GeV の場合)には、連結点における磁場不正は非常に小さいことが示されている。長さ 500 (=5 × 100)mm のアンジュレータとして、非常に良好な磁場および電子軌道が得られたことが判る。

アンジュレータ磁場の評価を行うために、図 5(a)の実測磁場に基づいて放射光の光束密度スペクトルの計算(電子ビームエネルギー2.5GeV, エミッタンスおよびエネルギー広がりとともにゼロ)を行った。このスペクトルと、同じ強度の誤差のない理想磁場に対して得られるスペクトルとの比較の結果を図 6 に示す。アンジュレータ基本波の領域では、図 5(a)の実測磁場は理想磁場からの放射スペクトルと比べて同等の放射特性を持つことを示している[16]。10-15keV の光子エネルギーの領域では放射光実験の光源として有用である。

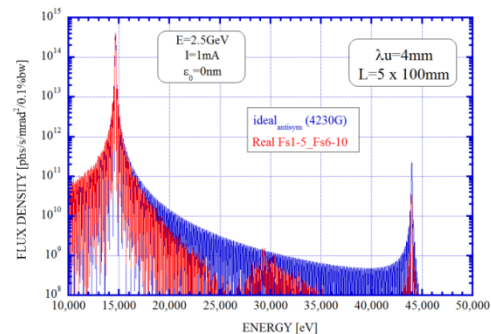


Figure 6: The spectrum calculated on the basis of the measured field (Fig. 5(a)) compared to that of the ideal field for the 2.5-GeV electron beam with zero emittance and zero energy spread for the 500-mm plate magnets [16].

3. 極短周期アンジュレータからの放射観測

3.1 実用機としての極短周期アンジュレータギャップ駆動機構の開発

上述の極短周期アンジュレータ磁石を装着して、放射の生成と評価試験を行うために、磁石間のギャップを精密に制御することのできる駆動機構の開発・製作を行った。この装置は、比較的小型のもので、今回示した全長

100mm の磁石を含む全長 500mm までの磁石板を装着することができる。さらに、真空封止型アンジュレータとしての機能を持つように開発した。アンジュレータ磁石のコンパクト化・軽量化に伴い、駆動機構本体もこれまでの通常型アンジュレータのそれに比べて大幅に小型化することができた。図 7 に、この駆動機構の外観写真を示した。

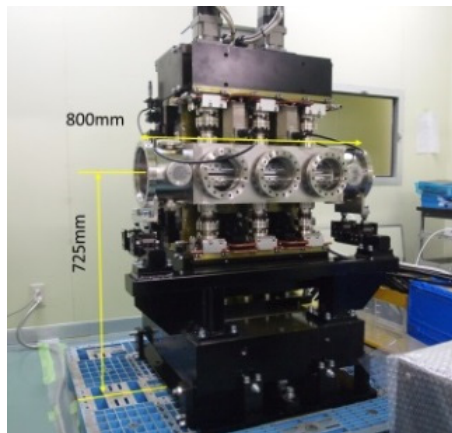


Figure 7: Photograph of a mechanical frame of the very short period undulator which can be equipped with the plate magnets 500 mm long.

この装置のギャップ分解能については、0.1micron を目標とした。これは、周期長数 10mm の通常型アンジュレータの分解能が現時点でおおむね 10micron であり、極短周期アンジュレータとして実現する周期長が通常型の 1/10 であることから、選定した数値である。現状で、概ね 0.1micron 以上の分解能を達成することができた。

3.2 レーザー加速された電子ビームからの放射の観測実験

すでに報告したように、極短周期アンジュレータからの放射光観測実験を東北大学・電子光理学研究センターの光源加速器、test Accelerator as a Coherent Terahertz Source (t-ACTS)において行った[14]。この実験では、t-ACTS を 33.5MeV および 2Hz で運転し、加速ライン下流に設置した極短周期アンジュレータ(4mm 周期・100mm 長磁石を装着)からのアンジュレータ放射を、イメージング分光器に導き高感度 EM(Electron Multiplying)-CCD カメラによって分光解析した。生成された青色($\lambda=468\text{nm}$)の可視領域放射光のスペクトルは、t-ACTS の電子ビーム診断で得られたパラメータセットに基づくスペクトルの計算値と良く一致し[14]、 $\lambda_u=4\text{mm}$ の極短周期アンジュレータが放射光源として高い性能を有することを示している。

この実験と並行して、我々は理化学研究所放射光科学研究センターに、レーザー航跡場加速によるコンパクトな光源建設を目指した実験プラットフォームの構築を行ってきた:ImPACT(内閣府革新的研究開発推進プログラム)による[17]。レーザー加速の原理[18]、およびこの実験プラットフォームの詳細[19-21]については、他所に詳しく報告した。

現在我々は、上記プラットフォームにおいて、レーザー加速電子ビームと極短周期アンジュレータを用いた放射光生成の原理実証と評価試験のためのビーム開発に取り組んでいる:科学技術振興機構・未来社会創造事業による。

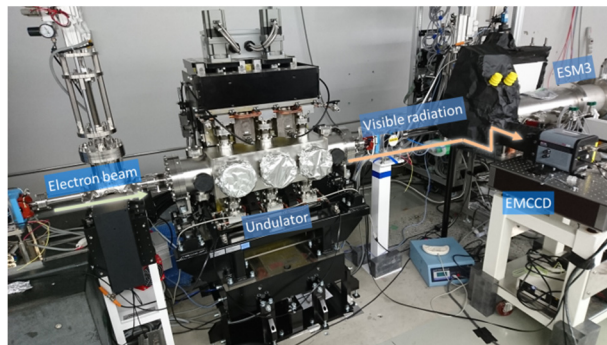


Figure 8: Beam line and optical system for measurement of undulator radiation.

レーザー加速原理実証の第一段階として、最近、100MeV 程度のビーム加速に成功し、可視領域放射光の生成を確認することができた。ビームライン下流側の機器配置を図 8 に示す。レーザー航跡場で加速された電子ビームは、極短周期アンジュレータを通過し放射光を生成する。現状では光量(放射強度)が不足しているため、アンジュレータ出口像を直接高感度 EM(Electron Multiplying)-CCD カメラ上に結像することによって観測を行った。

レーザー加速ビームからの最初のアンジュレータ光の観測
@ LPA platform: Ebeam= 50~75 MeV

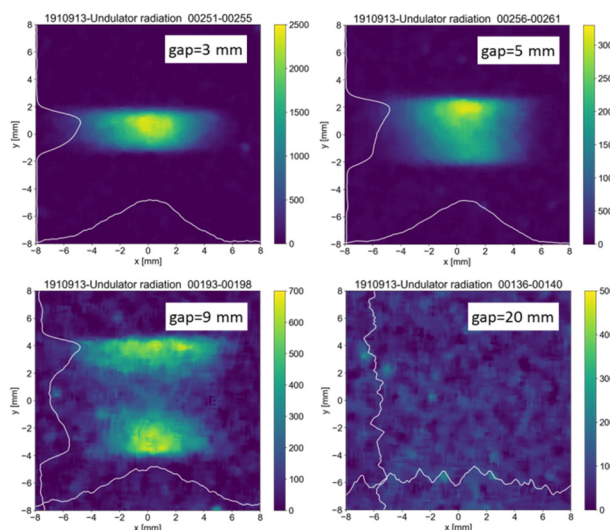


Figure 9: EM-CCD images focused on the exit of the very-short-period undulator at several magnet gaps. This undulator has a 500mm-long magnet with a 10mm-long period length.

可視領域の観測を行うために、図 5 に示した $\lambda_u=4\text{mm}$ の磁石とは別に用意した $\lambda_u=10\text{mm}$ 長さ 500mm の磁石

(100mm 長磁石 5 枚 2 組:ここでは磁石素材として NMX-S38EH (残留磁束密度 $B_r=12\text{kG}$, および保磁力 $iH_c=28\text{kOe}$)を採用した)をアンジュレータに装着した。電子ビームエネルギーはレーザーのショット毎にばらつくが、独立に行った電子スペクトロメータによる測定では 60-75MeV に分布する。

このアンジュレータからの放射の観測例を図 9 に、幾つかのギャップに対するアンジュレータ出口の放射強度のプロファイルとして示す。ギャップの開閉に対する明確な強度変化はこの放射がアンジュレータ光であることを示しているが、EM-CCD での観察であるために、放射の色(波長)の特定を行うことは出来ない。

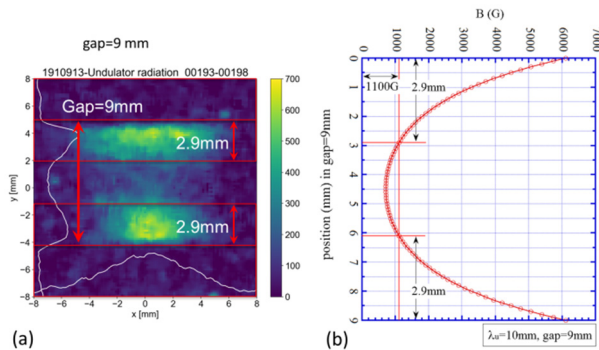


Figure 10: (a) EM-CCD image displaying distribution of radiation intensity at the exit of the very-short-period undulator at the gap=9mm with the period length of 10mm. (b) Distribution of the magnetic field intensity in the gap of this undulator at the gap=9mm.

波長特定を行うために、gap=9mm に於ける特長的な強度分布に注目する。この分布は、ギャップ内の磁場分布のために軸上では放射の波長が可視域をはずれるほど短くなる(弱磁場)のために、上下の磁石面近く(より強磁場)で生成される可視放射のみが観測されることにより、生じると考えられる。図 10 は gap=9mm に於ける磁場分布と放射の強度分布の詳細を、対応させて示している: 図 10(a)はギャップ内の放射強度分布を、図 10(b)はギャップ内の磁場分布を示す。

図 10 は、ギャップの上下面より 2.9mm の位置で放射が消滅し、そこでの磁場強度は 1100G であることを示している。この位置で、放射強度が急激に低下していることから、この位置での放射の波長が EM-CCD の感度限界波長(350nm)に対応すると考えることが出来る。また、この限界波長(350nm)とアンジュレータ周期長(10mm)から、この観測時の電子ビームエネルギーは 61MeV と推定される。より強磁場となるギャップ上下面より 2.9mm の領域では 350nm より長波長の可視光領域の放射が発生していると結論付けられる。61MeV という電子ビームエネルギーは電子スペクトロメータによる測定と調和的である。この推論は、gap=8mm においても同様の放射強度分布が見られ(ギャップの上下面より 3.2mm の位置で放射が消滅)、この放射消滅が、ギャップ内磁場分布に於ける同一の磁場強度(1100G)で生じることからも正当化される。また、例えば gap=3mm では、中心部($B=0.47\text{T}$)に於いて $\lambda=383\text{nm}$ の放射が発生している。

4. 謝辞

本研究は、一部において JSPS 科研費 24651107 および 26246044 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, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **63**, 400-403, 1992.
- [10] S. Yamamoto, *et al.*, J. Appl. Phys. **74**, 500-503, 1993.
- [11] S. Yamamoto, *et al.*, AIP Conf. Proc. **705**, 235-238, 2004.
- [12] S. Yamamoto, *et al.*, AIP Conf. Proc. **879**, 384-387, 2007.
- [13] S. Yamamoto, *et al.*, AIP Conf. Proc. **1234**, 599-602, 2010.
- [14] 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, THO114, 170-174, 2019.
- [15] 山本 樹および谷口 純, 特許第 6393929 号.
- [16] S. Yamamoto, WEXGBD1, Proc. IPAC2018, 1735-1739, Vancouver, BC, Canada, 2018.
- [17] 佐野雄二, J. Plasma Fusion Res. **95**, No.10, 490-492, 2019.
- [18] 益田伸一, J. Plasma Fusion Res. **95**, No.10, 493-497, 2019.
- [19] 酒井泰雄, 他, J. Plasma Fusion Res. **95**, No.10, 498-503, 2019.
- [20] 神門正城, J. Plasma Fusion Res. **95**, No.10, 504-508, 2019.
- [21] 山本 樹, J. Plasma Fusion Res. **95**, No.10, 509-513, 2019.