

極短周期アンジュレータの開発と最初の放射の観測実験

DEVELOPMENT OF A VERY SHORT PERIOD UNDULATOR AND OBSERVATION OF THE FIRST LIGHT

山本 樹^{#, A), B)}, 浜 広幸[○], 柏木 茂[○], 日出 富士雄[○], 武藤 俊哉[○], 南部 健一[○],
Shigeru Yamamoto^{#, A), B)}, Hiroyuki Hama[○], Shigeru Kashiwagi[○], Fujio Hinode[○], Toshiya Muto[○], Kenichi Nanbu[○],

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

^{B)} Department of Materials Structure Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

[○] Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

We are exploring a novel method to fabricate undulator magnets having a very short period. Here, “very short period” means periods one order-of-magnitude shorter than the ordinary period of several cm. Two types of the magnet plates 100mm and 152mm long with 4-mm period length have been successfully fabricated. They produce an undulator field of approximately 3kG at a gap of 1.6mm. A connection method of these magnet plates has also been successfully developed to fabricate longer undulator magnets. Prototype undulators based on these technologies have been constructed. Field measurements and characterization show that the quality of the undulator field of these magnet plates is satisfactory for a very short period undulator, and a spectrum calculation shows that the fundamental radiation emitted from this field is quite satisfactory. Test experiments for light generation using the real electron beam have been being planned and performed at an S-band linac of Tohoku University. A preliminary result of the first light observation is presented.

1. はじめに

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)においてはこれまで、真空封止アンジュレータの発明・研究開発を行い、より短い波長(高いエネルギー)の放射光を生成できる光源の開発を行って来た。放射光光源の進歩において、より短い波長の光源開発が常に要求されてきたためである。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。最初の成功は、6.5GeV PF-AR に設置された周期長 4cm の真空封止アンジュレータによって達成された[1, 2]。このブレイクスルーに基づき、我々は 4 台の真空封止アンジュレータを PF-AR に設置した。このうち 2 台は周期長 4cm のギャップテーパ機構を備えたアンジュレータであり[3]、他の 2 台は周期長 3.6cm および 2cm の通常型真空封止アンジュレータである[4]。上記アンジュレータの開発の後、エネルギーのより低い PF2.5GeV リングにおいて 10keV 以上の放射光を生成するために、より短い周期をより狭いギャップで実現する短周期真空封止アンジュレータ(Short Gap Undulator (SGU)と命名)の開発を行い実用化した。これらの SGU は 1cm から 2cm 領域の周期長を持ち、PF の 2.5GeV の電子エネルギーでは、3 次または 5 次高調波によって 12keV の硬 X 線を生成できるように設計されている[5, 6]。

上記の真空封止アンジュレータ開発の成功を踏まえ

て、近年我々は更に低いエネルギーの光源加速器において、より低次のアンジュレータ放射を用いつつ、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いる [7-12]。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 の周期長とする。本研究では周期長 4mm を目標に設定し、幅 20mm × 厚さ 2mm × 長さ 100mm(25 周期)(または 152mm(38 周期))の板状の NdFeB 製磁性素材に、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きた。着磁後に対向させた一対の磁石板の間の隙間(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。

周期長 4mm については磁石素材の改善によって、より長尺の 152mm の板状磁石の利用が可能になった。しかし、板状素材の製造工程上の制約のために、この長さを大幅に超える素材の製造は困難である。したがって、数 100mm を超える長尺のアンジュレータ磁場を生成するためには、複数の磁石板を長手方向に接続する方法の開発が重要な課題になる。本報告では、アンジュレータ磁石の長尺化に関する最新の成果とその技術を応用した、極短周期アンジュレータ本体の開発について述べる。さらに、東北大学・電子光理学研究センター S-band Linac に導入・設置した、周期長 4mm の極短周期アンジュレータからの最初の放射の観測実験について報告する。

shigeru.yamamoto@kek.jp

2. 極短周期長アンジュレータ磁場の生成

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の全く新しい方法(多極着磁法)を開発してきた[7-13]。この着磁方法を概念的に図 1 に示した(文献[13]より再録)。Nd-Fe-B 系材料でできた磁石素材板をジグザグ型のワイヤでできた一対の電磁石によって挟み込む。これらの電磁石にパルス電流を印加することによって、N-極と S-極が交互に周期的間隔を置いて同時に形成され、磁石素材板への“転写”が行われる(図 1a)。着磁後の一対の磁石板を互いに対向させることによって、磁石間の狭い隙間(ギャップ)に周期的磁場(アンジュレータ磁場)が形成される(図 1b)[7-9]。図 1a 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。

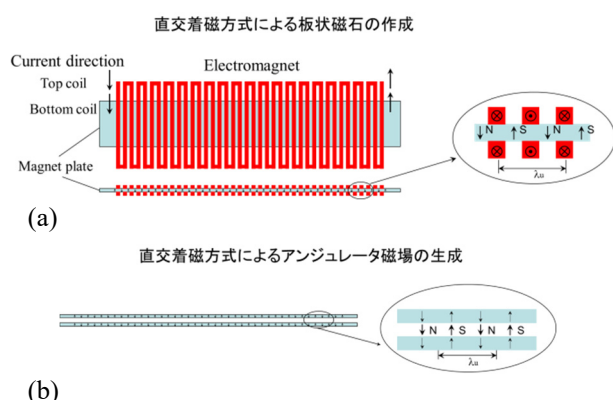


Figure 1: (a) Schematic illustration of perpendicular magnetization of the magnet plate, and (b) Formation of an undulator field in perpendicular magnetization.

現在は、より高精度の磁場周期長を得るために、上一対の着磁用电磁石(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(2mm)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、周期長 4mm のアンジュレータ磁場を生成した。着磁ヘッドの励磁は、約 10kA のパルス電流を 0.1 ミリ秒間送ることにより行った。リニアモータによる磁石板のステップ送り機構は閉回路方式によって制御され、その送り精度は $\pm 0.003\text{mm}$ である。

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-39EH(留磁束密度 $B_r=12\text{kG}$, および保磁力 $iH_c=25\text{kOe}$)採用している。現状で 2 種類の形状の磁石板を製作することができる: 第 1 の形状は、長さ 100mm, 幅 20mm, 厚さ 2mm であり、第 2 のものは、長さ 152mm で幅と厚さは同一である。

着磁終了後の磁石板を図 2 に示した(文献[13]より再録): 100mm 長磁石; A および B[9], 152mm 長磁石; E1

および E2[10-12]。磁石表面は、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 コートされている。図 2 では各磁石の吸着事故防止のために、アクリル樹脂製のケースに収納して示した。磁石 B と E2 については、着磁後の磁場のパターンを磁性流体シートを通して観察できる。図 2 の着磁例は、周期長 4mm のアンジュレータ磁場として 25 から 38 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も利用できるように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。

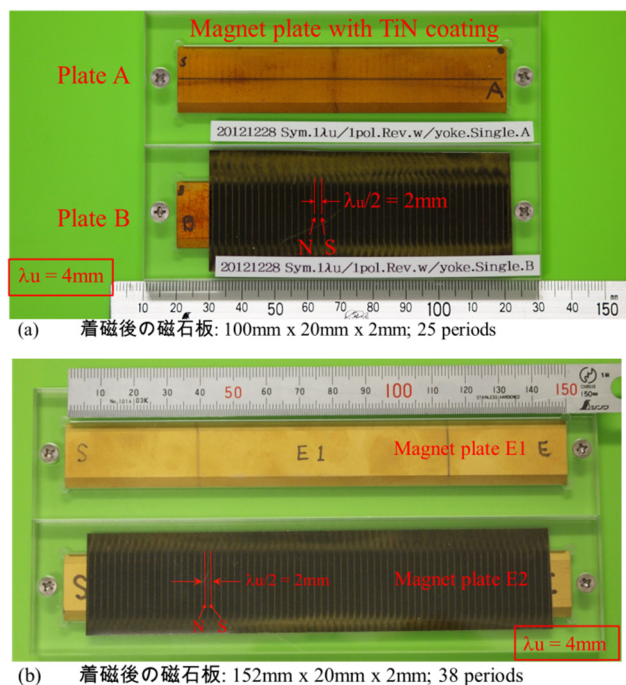


Figure 2: Magnetized plates with a period length of 4mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field; (a) plates A and B 100mm long, and (b) plates E1 and E2 152mm long.

図 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(図 1b)。100mm 長磁石板のペア(A と B: 図 2a)と 152mm 長磁石板のペア(E1 と E2: 図 2b)に対する性能評価のために行ったアンジュレータ磁場の精密測定の結果については既に詳細に報告した[13, 14]。どちらのペアについても、非常に良好なアンジュレータ磁場を得ることができた。

3. 磁石板の連結による極短周期長尺アンジュレータ磁場の実現

上述のように、100mm 長磁石に加えて 152mm 長磁石の製作ができるようになったことは、“モノリシック”アンジュレータ磁石を実用化する試みの一つの成功例である。しかし、現在開発している薄型磁石板の製作においては長さの限界が存在する。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、より長いアンジュレータ磁場を生成するためには、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。

磁石を連結する場合の適切な着磁法として、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法を開発した[13]。図 3 には、2 組の 100mm 長の磁石板、F9 および F10 と F7 および F8 を各々一体として着磁を行い、その後対向させて行った磁場測定の結果を示した(図 3a)。F9 および F10(または F7 および F8)に一体着磁を行う際には、各々の組が反対称磁場分布を持つように着磁を行った。磁場測定はギャップ 1.2mm において行った。図 3 中の緑色矢印は連結点を示す。図 3b に示した電子軌道(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全く見ることができない。長さ 200 (=100+100)mm のアンジュレータとして、良好な磁場および電子軌道が得られたことが判る。

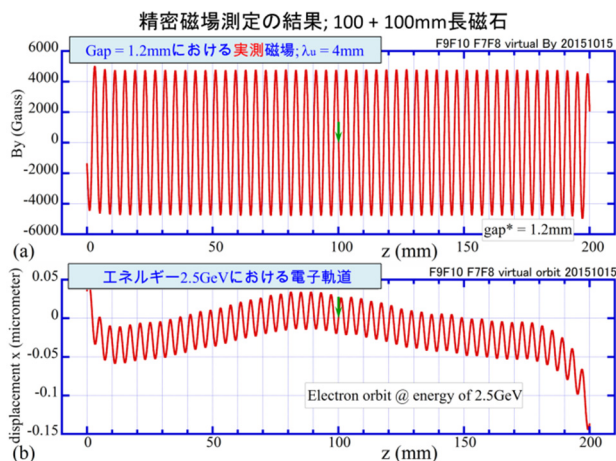


Figure 3: Result of the magnetic measurement for the connected plate magnets 200 (=100+100) mm long; (a) undulator field with a period length of 4mm measured at a gap of 1.2mm, and (b) electron orbit with an energy of 2.5GeV. A couple of the plates (F7 and F8) is connected longitudinally and magnetized, then it is opposed to the other couple (F9 and F10).

ここでは、磁石板 2 枚の連結の例を示したが、この着磁法を採用すれば、任意の枚数の磁石板を連結して良好な磁場分布を持つ長尺の極短周期アンジュレータ磁場を作成することができる。

4. 極短周期長尺アンジュレータ用精密ギャップ駆動機構の開発

上述のように極短周期アンジュレータ磁場(ここでは周期長 4mm)を生成できる磁石の開発については、概ね成功した。次の目標は、この磁石を対向させて装着し、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を開発することである。この目的で、2 種類のギャップ駆動機構の開発・製作を行った。第一のものは、比較的小型の装置で、全長 200mm までの磁石板を装着することができる。また、第二のものは全長 500mm までの磁石板を装着できる。とも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ものである。駆動機構のクロスビーム開閉に伴うギャップ駆動のリニアモーションは、真空ベローズシャフトを介して真空槽内の磁石取付ガードに伝達される。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 4 および 5 にこれらの駆動機構の外観写真を示した。

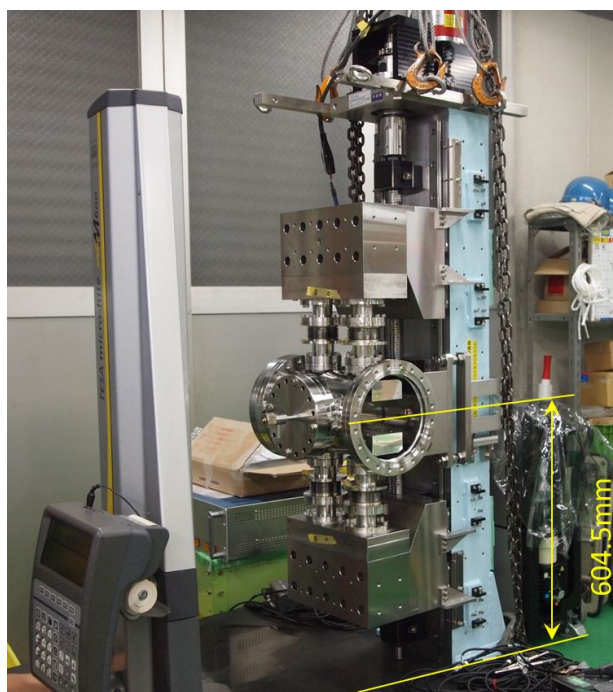


Figure 4: Photograph of a mechanical frame of the very short period undulator which can be equipped with the plate magnets 200 mm long.

これらの駆動機構のギャップ分解能については、1micron を目標として開発を行った。これは、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。200mm 長磁石用駆動機構については、概ね 1micron の目標を達成することができた。さらに、500mm 長磁石用駆動機構については、目標を上回って 0.1micron のギャップ分解能を実現することができた。

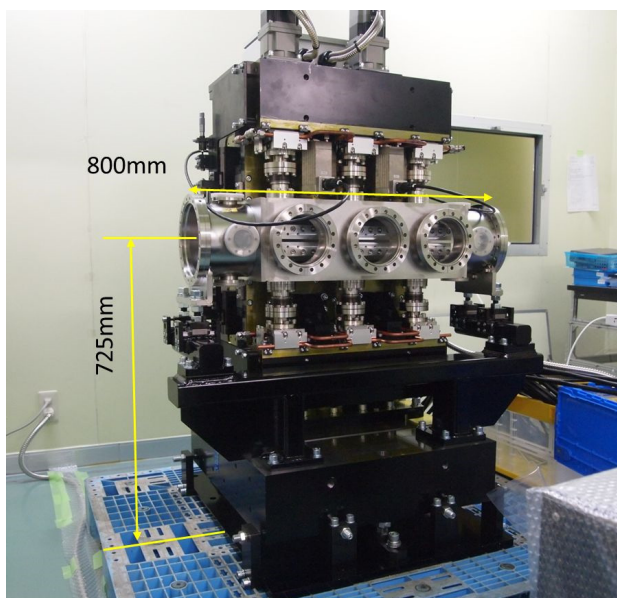


Figure 5: Photograph of a mechanical frame of the very short period undulator which can be equipped with the plate magnets 500 mm long.

5. 極短周期アンジュレータからの最初の放射光観測

極短周期アンジュレータからの最初の放射光の観測実験を東北大学・電子光物理学研究センターの 50MeV S-band linac において行った。このために上述の 200mm 用磁石長駆動機構に一对の 4mm 周期・100mm 長磁石板を装着した。この加速器では主に THz 放射の生成実験が行われている。今回の極短周期アンジュレータからの放射光観測実験のために、THz 放射生成用アンジュ

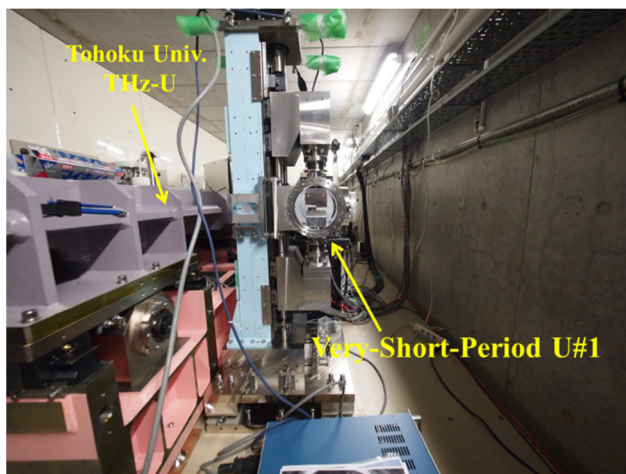


Figure 6: Installation of the very short period undulator into the Tohoku Univ. S-band linac. The undulator for production of THz radiation was retracted to make space for the very short period undulator. For the first light observation this undulator was equipped with the plate magnets 100mm long having a 4mm-period length (see Fig. 4).

レータ(周期数 25, 周期長 10cm)を加速器ラインから後退させ、我々の極短周期アンジュレータを設置した。設置の状況を図 6 に示した。

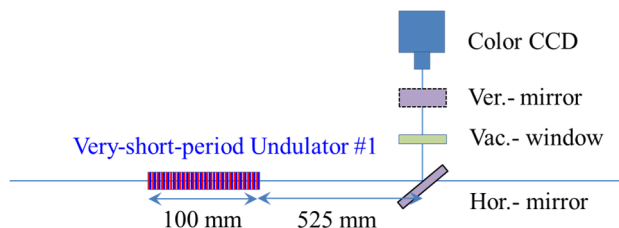


Figure 7: Optical system for observing the first light from the very short period undulator.

この加速器は放射観測実験中 2Hz で運転された。1macropulse は 5700 micro-bunch (パンチ当り 3.5pC) のマイクロバンチによって構成される。実験時のエミッタンス(規格化)は、水平 1mm・mrad, 鉛直 3mm・mrad であった。周期長 4mm に対して観測する放射の波長域を可視領域に設定するために、加速器のビームエネルギーを 35MeV に設定した。今回の実験中極短周期アンジュレータを通過するビーム透過率は 90% 以上 (gap=1.7mm 時) であったが、さらに調整が必要である。

放射光の観測は図 7 に示した光学系により行った。アンジュレータからの放射を下流に置かれた水平振り分けミラーにより真空槽の外に取り出し、カラー CCD カメラで撮影した。この時 CCD カメラの焦点を水平振り分けミラー上に設定した。撮影のタイミングは 2Hz で行われる加速器運転のタイミングに同期させた。

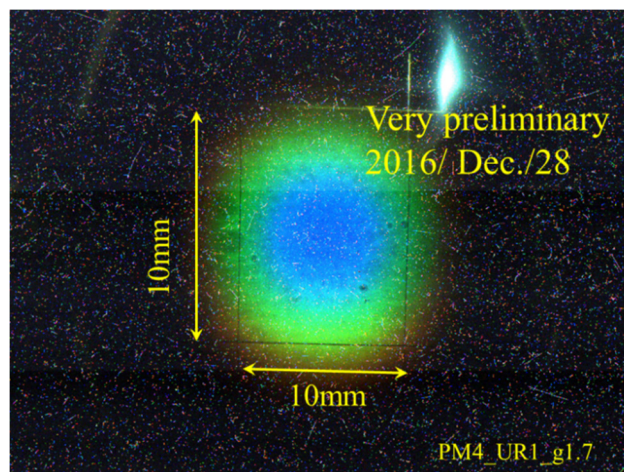


Figure 8: Observation of the first light from the very short period undulator.

数日間にわたる加速器ビーム調整の後、図 8 に示した最初の放射の観測に成功した。軸上の青色の放射を中心とする典型的なアンジュレータ放射を観測した。撮影時の極短周期アンジュレータのギャップは 1.7mm に設定した。この時のアンジュレータパラメータ ($K=0.102$, $B_0=2740G$) と軸上放射(青色)の波長 ($\lambda=433nm$) から得

られるビームエネルギーは $E=34.9\text{MeV}$ となり、加速器の設定パラメータと調和的である。

図 8 右上方に白色の輝点が見られるが、これは本来放射光と同軸にある電子ビームが水平ミラーに入射した際に発する光学遷移放射の輝点である。今回の放射光の観測の妨げになるので、極短周期アンジュレータ下流のステアリング電磁石によって放射光観測時の位置(図 8)に移動させた。

今後、東北大・電子光理学研究センターS-band linacの加速器調整をさらに進めて、極短周期アンジュレータに対する最適パラメータを追求するとともに、放射光の精密分光計測を行い、放射光評価実験を完成させたいと考える。今回の放射光観測の成功は、線形加速器・レーザー航跡場加速器と極短周期アンジュレータの相性の良さを示している。しかし一方で、今回の成功で示された極短周期アンジュレータの放射光源としての有用性は、蓄積リング型加速器へのこのアンジュレータの適用可能性を強く示唆している。この方向への努力も継続したいと考える[15]。

謝辞

本研究は、その遂行の一部において、JSPS 科研費 24651107 および 26246044 の助成を受けています。また、本研究は同じく一部において、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ています。

参考文献

- [1] S. Yamamoto *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **63**, 400-403, 1992.
- [2] S. Yamamoto *et al.*, J. Appl. Phys. **74**, 500-503, 1993.
- [3] S. Yamamoto *et al.*, AIP Conf. Proc. **705**, 235-238, 2004.
- [4] K. Tsuchiya, T. Shioya, and S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. **879**, 380-383, 2007.
- [5] S. Yamamoto *et al.*, AIP Conf. Proc. **879**, 384-387, 2007.
- [6] S. Yamamoto *et al.*, AIP Conf. Proc. **1234**, 599-602, 2010.
- [7] S. Yamamoto, Journal of Phys.: Conf. Ser. **425** 032014, 2013.
- [8] 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.
- [9] S. Yamamoto, WEOAA02, Proc. IPAC2014, 1845-1857, Dresden, Germany, 2014.
- [10] S. Yamamoto, Synchrotron Radiation News Vol. **28** No.3, 19-22, 2015.
- [11] 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.
- [12] S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. **1741**, 020029, 2015.
- [13] 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.
- [14] 山本 樹, レーザー研究, Vol. **45** No.2, 82-86, 2016.
- [15] 大熊春夫, 山本 樹, 本プロシーディングス, THOL12, 2017.