PASJ2022 THOA04

極短周期アンジュレータの開発における磁場増強と装置の小型軽量化 DEVELOPMENT OF A VERY-SHORT-PERIOD UNDULATOR EMPLOYING A NEWLY DEVISED MAGNETIC CIRCUIT

山本 樹#,A)

Shigeru Yamamoto #, A)

^{A)} Photon Factory, 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 type magnets 100mm long with 4-mm period length have been successfully fabricated [1-3]. A connection method of these magnet plates has also been successfully developed to fabricate longer undulator magnets [4-5]. Test experiments for light generation using the real electron beam based on two kinds of sources were performed. One was done at an S-band linac of the Tohoku University [6], and the other was at an experimental platform for a laser wake field acceleration in SPring-8/RIKEN [7]. As a next step of the development, we have been trying to produce higher magnetic field at very-short-period lengths of the undulators. For this purpose we are devising a new type of plate magnets of the undulator, one period of which consists of 4 magnetic domains (or blocks), whereas the plate magnets developed so far for the very-short-period undulators employs 2 domains per one period of the magnetic circuit. Present status of the fabrication of the new magnets and the result of magnetic field measurement will be reported. Also we are developing a compact undulator frame, in which magnetic attractive force produced by the main undulator magnets is effectively cancelled out by repulsion magnets placed outward in the magnet gap. We found that the repulsion magnets made by the 2-domain type plate magnets were very useful for this purpose. Present status of the development will be reported.

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)の領域を考えている。この 研究では周期長λu=4 mm を目標に設定した場合,幅 20 mm× 厚さ2 mm× 長さ100 mm(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。周期長λu=4 mm の場合,現在 1.6 mm の狭小ギャップに約 3kG の極短周期磁場を生 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。KEK-PF に於いては,その運転開 上記のアンジュレータ"極短周期化"によって可能に なった周期長λu=4 mm を KEK-PF の 2.5 GeV 電子蓄 積リングに導入することが出来れば,基本波で 12 keV (波長 1 Å)領域の放射を生成することができるが,現状 では"極短周期" アンジュレータの狭小ギャップの故に 直には許されない。

このアンジュレータの性能評価を行うために,この狭小 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。[14-16]

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,500 mm 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 61 MeV 程度のビーム加速に成 功し,500 mm 長 10 mm 周期(周期長λu=4 mm 磁石と 同様に開発)のアンジュレータから可視領域放射光 (383 nm)の生成を確認することができた。[17]

"極短周期"磁石開発の次のステップとして,複合磁気 回路を用いた磁場強度の増強を試みている。上記の

始から通常型アンジュレータ(Out-of-vac)の場合 100 mm 程度から 50 mm まで,真空封止型(In-vac)の 場合 40 mm から 10 mm 程度までの周期長短縮化が行 われ現在に至っている[14]。

[#] shigeru.yamamoto@kek.jp

PMM 磁石を用いた,磁場吸引力相殺法に基づくアン ジュレータ架台装置の小型軽量化の試みと併せて報告 する。

2. 極短周期アンジュレータの開発

これまでに開発した"極短周期アンジュレータ"磁石連 結着磁方法[1-8]を概念的に図1に示した[14, 16]。



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[14, 16].

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 半周期分である。磁石板を半周期分送るステップ毎に着 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、 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 Br=12kG、および保磁力 iHc=21kOe)を採用している。磁石サイズはλu=4mm の 場合、長さ 100mm、幅 20mm、厚さ 2mm が標準的であ る(後述するλu=10 mm の場合には厚さ 5 mm)。また、



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[14, 16].

図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。

着磁終了後の磁石板を図2に示した:長さ100 mm, 幅20 mm,厚さ2 mm(λu=4 mm)[14,16]。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。

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 1(b))。この磁石の性能評価のた めに、磁場測定の結果を図 3 に示す:図 3(a);磁場 (gap=1.4, 1.6,および 2.0 mm 時),図 3(b);電子軌道 (エネルギー2.5 GeV の場合)。図 2 の着磁時には、磁 石板と着時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 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。

更に、アンジュレータ磁場の評価を行うために、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た(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がともにゼロ)。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, 15]。



Figure 3: Result of the magnetic measurement for the plate magnet 100 mm long; (a) undulator field with a period length of 4 mm measured at a gap of 1.4, 1.6 and 2.0 mm, and (b) orbit of an electron with energy of 2.5 GeV at the same gaps[14, 16].

Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University)

PASJ2022 THOA04

ここでは、長さ100 mmの磁石開発について説明した。 磁石素材板の長さに限界が存在する(磁石板の厚さが 2 mm またはそれ以下の場合、200 mm を超える長さの 磁石を製作することは容易ではない。)ので、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, 18]。現在、この 方法で、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, 14-17, 19]

3. 複合磁気回路による磁場強度の増強

本稿でこれまで述べたように,板状磁石(PMM)による "極短周期アンジュレータ"磁場の生成は,極短周期長と 高精度磁場の達成による,良好な放射特性の実現という 意味では満足できる結果をもたらした。



Figure 4: Two important types of Halbach magnetic configuration; (a) M=2 type in which one period consists of two magnetic blocks, and (b) M=4 type in which one period consists of four magnetic blocks. This type is commonly used in ordinary undulators.

次のステップとして、生成されるアンジュレータ磁場の 増強を試みている。このために従来の板状磁石を用いた 磁気回路周期構造において 1 周期を構成する磁区の 数 M を 2 から 4 に増加させることによりアンジュレータ磁 場増強を可能にする、新しい磁気回路の開発を行った。 M=2 の場合も M=4 の場合も共に Halbach 型磁気回路 の一種である。[20]定性的には、1 周期を構成する磁区 数を増やすことにより、磁気回路中の磁気抵抗を減少さ せて、アンジュレータ磁場強度を増加させている(図 4 参照)。理想的には、50%程度の磁場増強を期待するこ とができる。例えば、周期長λu=4 mm の場合、gap=1.6 mm 時磁場強度 B=4000 G(M=2)が 6000 G(M=4)まで 増強される。

しかし,極短周期アンジュレータ磁場実現のために M=2型式を選択し、板状磁石を用いた着磁方式を開発 したのは、M=4型式(通常のアンジュレータ用磁気回路 として広く採用されている)では、磁気回路を構成する磁 石素材の精密小型化に於いて大きな困難に直面したか らであった。[1-8]今回、M=4型式で極短周期磁場を実 現するために、図5(λu=4 mm)および図6(λu=10 mm) に示した櫛歯状の板状磁石の開発を行った。ここでは、 磁石板表面に垂直に磁石素材の容易磁化軸を設定し、 周期条件を満たすように櫛歯を残留させることで、櫛歯 状磁石の成形を行った。

この櫛歯状磁石板(M=4)への着磁は、図 1 に示した M=2 型式の磁石板への着磁と同様に行うことが出来る。



Figure 5: State of the art of the formation of the magnet plates for M=4 type Halbach configuration; (a) combshaped magnet plates 100 mm long (λu =4 mm), (b) an expansion of the central part the comb-shaped plate., and (c) the expansion with a magnet piece inserted between the comb tooth.

この方法で N 極または S 極を構成する櫛歯の部分の着 磁を行い, 更にアンジュレータ軸方向に着磁した磁石片 を挿入する(図 5c)ことで M=4 型式の磁気回路を形成 する。

このようにして製作した M=4 型式の磁気回路に対す る磁場測定の結果を,周期長 λ u=10 mm および磁石 ギャップ g=2 mm の場合について図7に示した。表記の 都合上実際の磁場強度の半分の値で示してあるが, M=2 型式で同ギャップ 6400 G であった磁場強度が, M=4 型式では9200 G まで増強(44%)されていることが 判る。また,周期長 λ u=4 mm の M=4 型式についても同 様の磁場測定を行い,g=1.6 mm の場合について, M=2 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University)

PASJ2022 THOA04



Figure 6: State of the art of the formation of the magnet plates for M=4 type Halbach configuration; (a) combshaped magnet plates 100mm long (λu =10mm), (b) an expansion of the central part the comb-shaped plate., and (c) the expansion with magnet pieces inserted between the comb tooth.

型式の板状磁石を用いた磁気回路の時,3000G であった磁場強度が,M=4型式では4000G まで増強(33%)されることを確認している。M=4型式の磁気回路については、更に真空封止型アンジュレータ磁石として用いるためのTiNコーティング法の開発,および実用化のための櫛歯成形の加工コストの低減化等の課題が残っている。



Figure 7: Result of the magnetic measurement for the M=4 and M=2 type magnetic circuits 100mm long (λu =10mm). The field amplitude is enhanced from 6400G (M=2 type) to 9200G (M=4 type).

現在検討を進めている。

反発磁石を用いた磁場吸引力相殺法の 開発

"極短周期アンジュレータ"は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 M=2 形式磁石板を利 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検討され,一 部実現しつつあるものであるが[21], 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 M=2 形式磁石板を利用す 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(通常重厚長大)筐体に よって要求される精度を達成しているが,この方式を採 用することにより, 高精度のギャップ駆動を小型・軽量の アンジュレータ筐体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



Figure 8: Magnet arrangement to cancel magnetic attractive force between the main magnet arrays. The attractive force is cancelled by the repulsive force produced by the magnets arranged at both sides of the main array. A case for 10-mm period length is shown.

PASJ2022 THOA04

レータと異なり、磁石部分は3列の磁石列によって構成 される。中央主列はアンジュレータ磁場生成用の磁石列 (吸引)であり、両隣の2列はNSの位相関係を中央列と 反転させた磁力反発用磁石列である。この方式を検証 するために開発した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吸引力を測定できる)の中心部 を図8に示した。



Figure 9: Measurement of the force generated between the undulator magnets 200mm long. The attractive force without repulsive magnets (blue curve) is well suppressed (orange curve) by the cancelling magnets; (a) a case for the period length of 4mm, and (b) for the period length of 10mm.

図 9 では、上記の磁場相殺方式を周期長 λ u=4 mm (図 9a) および 10 mm(図 9b)の板状磁石について適 用し、その有効性を確認した。磁力を相殺するためには、 当然主列磁石のサイズに対する反発磁石のサイズ(長さ が同じなので磁石幅)の最適化が必要になる。今回の周 期長 λ u=4 mm および 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。この方式を用いなければ、最小ギャップ 1 mm に おいて 230N に達する磁場吸引力(磁石長 200 mm)を ほぼ 7N 程度に抑制することができた(λ u=4mm(図 9a) の場合)。周期長 λ u=10 mm の場合、最小ギャップ 1 mm において 700N にも達する磁場吸引力(磁石長 200 mm) を 10 N 程度に抑制することができる(図 9b)。

ここで開発した磁力相殺方式を応用して, SPring-8 旧 SCSS 収納部に於いて現在開発中のレーザー航跡場駆 動による電子ビームを用いた光源開発のための小型軽 量アンジュレータの建設を行っている。

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した委託 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, THOI14, 170-174, 2019.
- [15]山本 樹, J. Plasma Fusion Res. 95, No.10, 508-513, 2019.
- [16] S.Yamamoto *et al.*, J. Synchrotron Rad. 26, pp.1902-1910 (2019). doi:10.1107/S1600577519013031
- [17]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.
- [18]山本 樹および谷口 純, 特許第6393929号.
- [19] S. Yamamoto, WEXGBD1, Proc. IPAC2018, 1735-1739, Vancouver, BC, Canada, 2018.
- [20]K. Halbach, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 187, 109-117.
- [21] R.Kinjo, S.Yamamoto *et al.*, Review Scientific Instrum. 88, 073302 (2017). doi:10.1063/1.4991652