

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 $\lambda_u=4$ 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 $\lambda_u=4$ 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

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]。

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 $\lambda_u=4$ 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”はそれ自身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 $\lambda_u=4$ 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

[#] 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]。

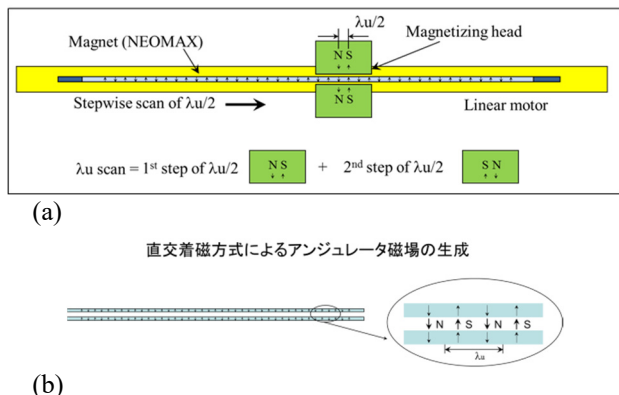


Figure 1: (a) Schematic illustration of multi-pole magnetization employing a linear motor, where perpendicular geometry is adopted, and (b) Formation of an undulator field in perpendicular magnetization[14, 16].

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 $\lambda u=4mm$ の場合、長さ 100mm, 幅 20mm, 厚さ 2mm 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、

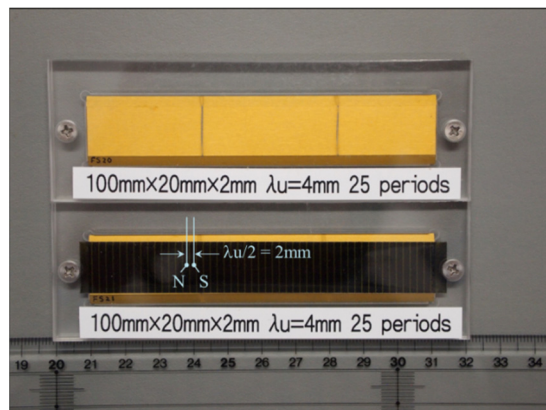


Figure 2: Magnetized plate magnets 100 mm long, 20 mm wide and 2 mm thick with a period length of 4 mm, which are coated with TiN. A pair of these plates is opposed to form the undulator field[14, 16].

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 ($\lambda u=4 mm$) [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ごとともにゼロ)。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, 15]。

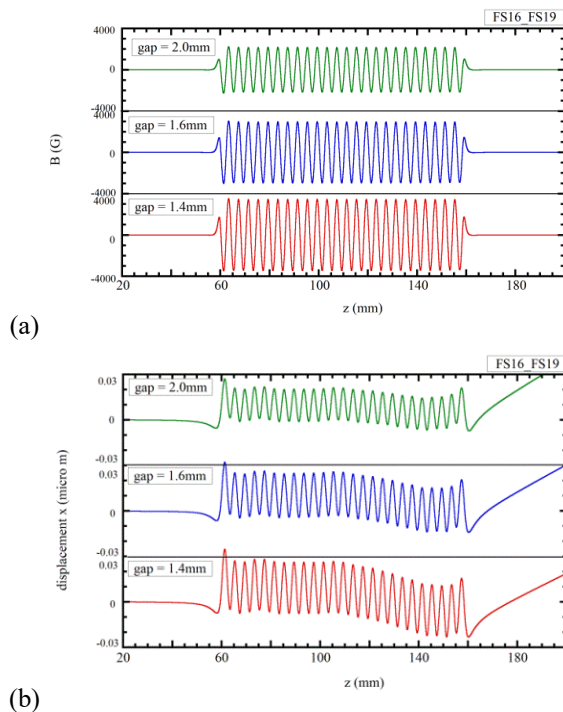


Figure 3: Result of the magnetic measurement for the plate magnet 100 mm long; (a) undulator field with a period length of 4 mm measured at a gap of 1.4, 1.6 and 2.0 mm, and (b) orbit of an electron with energy of 2.5 GeV at the same gaps[14, 16].

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。

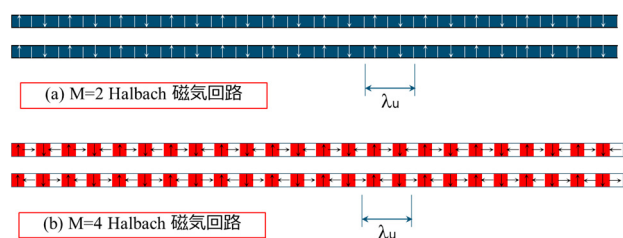


Figure 4: Two important types of Halbach magnetic configuration; (a) M=2 type in which one period consists of two magnetic blocks, and (b) M=4 type in which one period consists of four magnetic blocks. This type is commonly used in ordinary undulators.

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 $\lambda_u=4$ 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($\lambda_u=4$ mm)および図 6($\lambda_u=10$ 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。

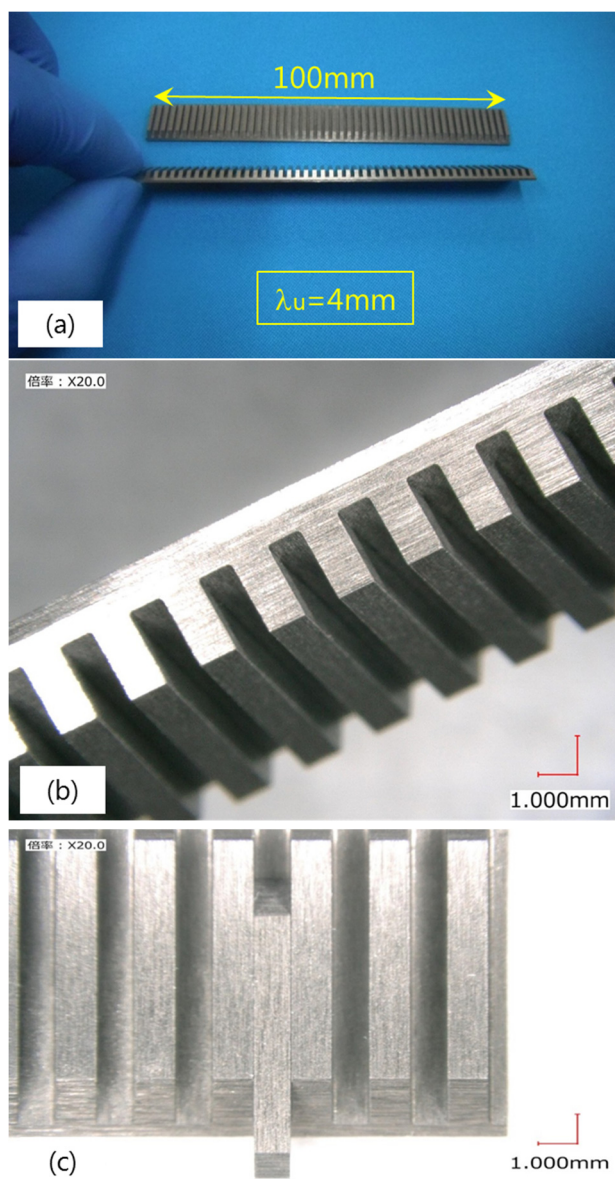


Figure 5: State of the art of the formation of the magnet plates for M=4 type Halbach configuration; (a) comb-shaped magnet plates 100 mm long ($\lambda_u=4$ mm), (b) an expansion of the central part the comb-shaped plate., and (c) the expansion with a magnet piece inserted between the comb tooth.

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 $\lambda_u=10$ 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 $\lambda_u=4$ 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、 $M=2$

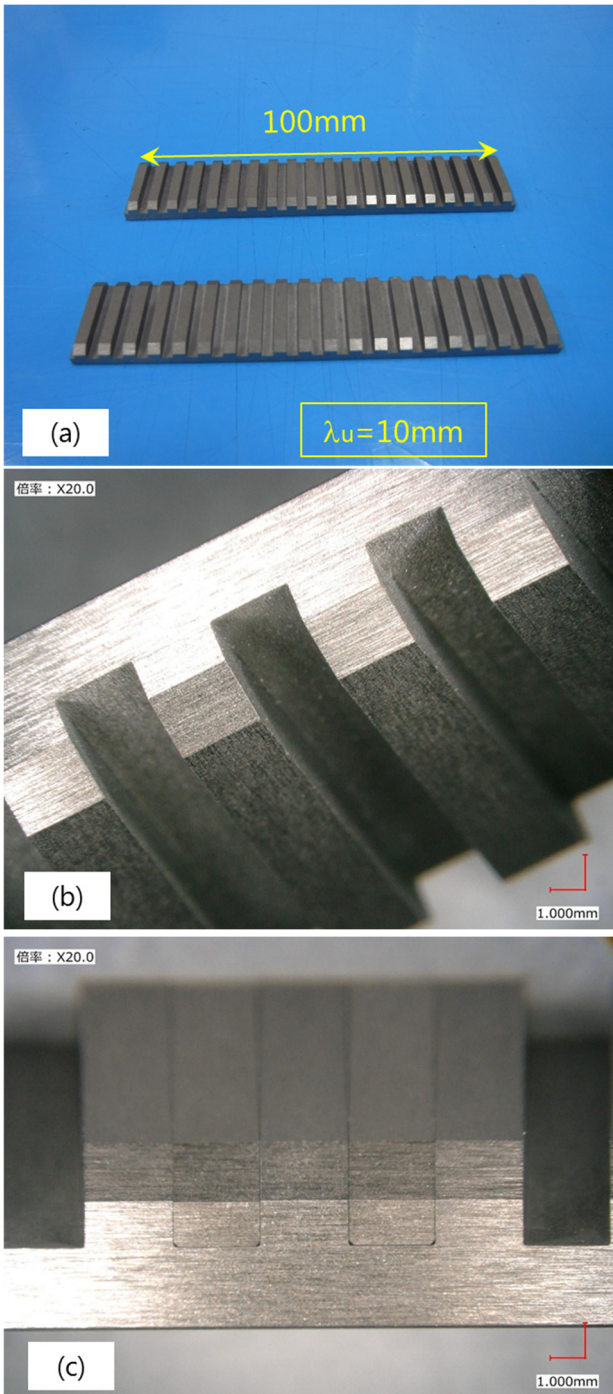


Figure 6: State of the art of the formation of the magnet plates for M=4 type Halbach configuration; (a) comb-shaped magnet plates 100mm long ($\lambda_u=10\text{mm}$), (b) an expansion of the central part the comb-shaped plate., and (c) the expansion with magnet pieces inserted between the comb tooth.

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。

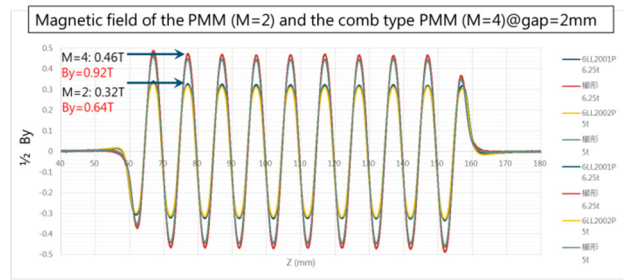


Figure 7: Result of the magnetic measurement for the M=4 and M=2 type magnetic circuits 100mm long ($\lambda_u=10\text{mm}$). The field amplitude is enhanced from 6400G (M=2 type) to 9200G (M=4 type).

現在検討を進めている。

4. 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

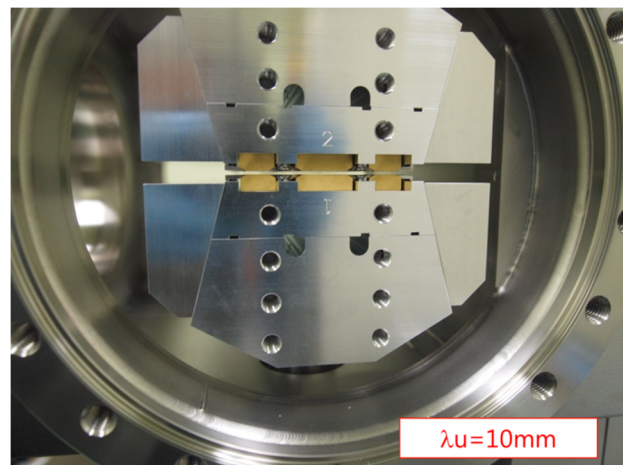


Figure 8: Magnet arrangement to cancel magnetic attractive force between the main magnet arrays. The attractive force is cancelled by the repulsive force produced by the magnets arranged at both sides of the main array. A case for 10-mm period length is shown.

