

平成 30 年 9 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26246044

研究課題名(和文)多極着磁法による新しい極短周期アンジュレータ開発と加速器におけるその光源性能評価

研究課題名(英文) Development of novel very-short-period undulators by the multi-pole magnetization method and its characterization as a light source in the existing accelerators.

研究代表者

山本 樹 (Yamamoto, Shigeru)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号：20191405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：比較的低エネルギーの加速器でも、高エネルギーの放射光を生成するために、極短周期アンジュレータを開発した。そのために板状磁石(100mm長2mm厚)を効率的に着磁(周期長4mm)する方式を確立した。この着磁法をさらに発展させ、磁石長尺化のために磁石板を適切に連結する方式を確立した。上記磁石を装着した極短周期アンジュレータの光源性能評価試験を東北大学電子光理学研究センターのS-band線形加速器に於いて行い、青色のアンジュレータ放射の生成を確認することができた。さらに、狭小ギャップの極短周期アンジュレータに適合する蓄積リング設計について検討を進め、新型小型光源として提案することに成功した。

研究成果の概要(英文)：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. 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 magnets is satisfactory for a very short period undulator. Test experiments for light generation using a real electron beam were made at an 50-MeV S-band linac of Tohoku University, and the first blue light was observed successfully. We made design studies of the storage ring which allowed a minimum undulator gap of 1.5mm as a compact and low-cost synchrotron light source facility.

研究分野：放射光科学

キーワード：放射光 挿入光源 アンジュレータ

1. 研究開始当初の背景

アンジュレータからの放射のエネルギーは、磁場周期長に逆比例、電子ビームエネルギーの自乗に比例して増減する。10 keV 領域の放射光生成に対して必要となるアンジュレータ周期長は、6-8 GeV 程度のリングと組み合わせた第3世代施設で数 cm であったものが、いわゆるコンパクト第3世代施設(3-4 GeV)では、真空封止型アンジュレータの技術[1]を導入することで2 cm 程度にまで短縮され、このことによって放射光エネルギー領域の拡大が図られている。研究代表者の所属する高エネルギー加速器研究機構(KEK)放射光研究施設(PF)においても、周期長 1-2 cm の真空封止型 Short Gap Undulator を開発し、これらが PF 2.5 GeV の様な中規模エネルギー施設において高輝度 X 線光源として有用であることを示した[2]。ここで言う真空封止アンジュレータとは、磁石列自身を真空チェンバ内に導入して、電子ビーム近くまで磁石列間ギャップを縮めて磁場強度を高めると同時に電子ビームの蛇行周期を小さくして、高エネルギー、高輝度の放射光を発生させる技術である。

さらに研究を進めてアンジュレータ磁場の周期長の“極短周期化”を図った(JSPS 科研費 24651107, 研究代表者: 山本 樹)。極短周期化とはこれまでの周期長を約 1/10 に短縮することを意味する。このために、目標周期長を 4 mm に設定し、多極着磁法を応用して板状の磁石に周期磁場を“書き込む”ことを可能にした[3, 4]。周期長 4 mm を達成できれば、2.5 GeV 電子蓄積リングにおいて基本波で 12 keV (波長 1 オングストローム) 領域の放射光生成が可能となるからである。

2. 研究の目的

3 点を主要な目標として研究を遂行した。

- ・アンジュレータ磁場極短周期化技術を開発させ、磁場強度/精度の向上と板状磁石の連結による極短周期磁場の長尺化を図る。より着磁強度の高い着磁器開発を行い極短周期アンジュレータの高度化とその光源装置としての実用化を図る。

- ・極短周期アンジュレータの既存の光源加速器における実用化実証のために評価試験を行う。非常に狭いギャップで動作する極短周期アンジュレータの実用性が証明されれば、現在計画中のものも含めて、光源加速器の設計・開発に新たな指針を与えるからである。
- ・上記試験を経て極短周期アンジュレータの導入によって更に高性能の放射光を得ることが出来る放射光源加速器設計を目指す。

高エネルギーの加速器ほど建設に莫大なコストがかかる。本研究の成果を応用すれば中程度のエネルギーの加速器でも硬 X 線領域の放射を得ることが出来、建設費を大幅に圧縮して、新規放射光源計画の実現に新たな可能性をもたらすものと期待できる。さらに永久磁石材料を従来のものに比べて重量比で

1/1000 程度にまで減少させることが可能である。近年の希土類元素の資源枯渇問題に対する解決にも一石を投ずるものである。

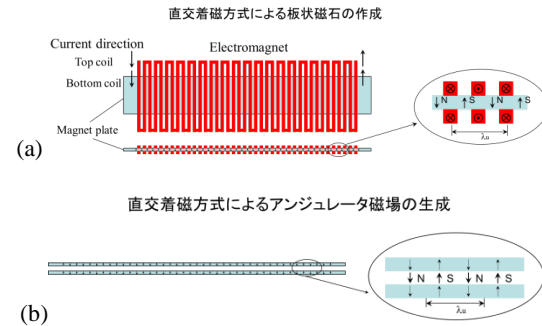


図 1. (a) 多極着磁法による磁場の“転写”, (b) 極短周期磁場の生成

3. 研究の方法

(1) 極短周期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の全く新しい方法(多極着磁法)を開発してきた[3-6]。この着磁方法では、Nd-Fe-B 系材料で出来た磁石素材板を一对の電磁石によって挟み込む。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で同時に形成され、磁石素材板への“転写”が行われる(図 1a)。着磁後の一对の磁石板を互いに対向させることによって、磁石列間の狭いギャップに周期的磁場が生成される(図 1b)。

上述の様に開発した磁石板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によって、極短周期アンジュレータを完成する。

(2) 加速器への極短周期アンジュレータ導入と光源性能評価試験

現在稼働中の高性能光源加速器の中で、極短周期アンジュレータの光源評価に適した環境を有し、加速器の大幅な改造を伴わないで評価試験が可能な施設と協力して、極短周期アンジュレータ導入と光源評価を行う。

(3) 高性能の放射光源加速器設計研究

極短周期アンジュレータに最適化した高性能の放射光源加速器設計を行う。研究会等を開催して検討を進め、その指針を示す。

4. 研究成果

(1) 極短周期アンジュレータ磁石の開発とアンジュレータ本体の完成

図 2 に、本研究で開発した、極短周期アンジュレータ磁石の着磁方式を模式的に示す。

一对の着磁用電磁石(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を行う方式を開発した。磁石板の送り幅は周期磁場の半周期分(2 mm)とした。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させ、磁石板中に N 極と S 極を交互に周期的に(周期長 4 mm)

書き込むことができるようになった[7]。

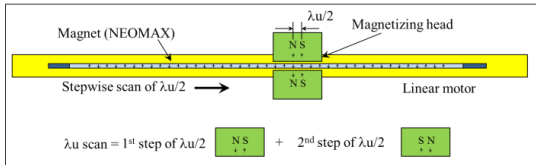
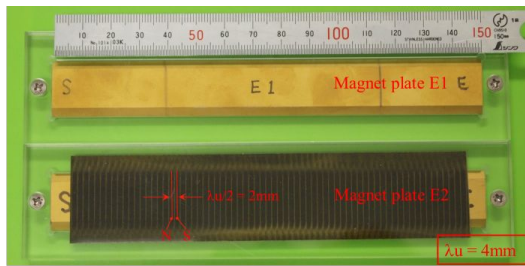


図 2. 極短周期アンジュレータ磁石の着磁方式

上述のようにして作成した板状磁石一对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)。



(b) 着磁後の磁石板: 152mm x 20mm x 2mm; 38 periods

図 3. 着磁後の板状磁石。TiN 表面処理された磁石板 E1 および E2, 152 mm x 20 mm x 2 mm

着磁終了後の磁石板を図 3 に示した: 磁石長 152 mm [7, 8]。この磁石の開発に先立ち 100 mm 長磁石の開発も完了している[6, 7]。磁石表面は、真空封止のために TiN コートされている。図 3 の磁石 E2 では、磁気観察シートによって着磁後の磁場のパターンを観察できる。この着磁例は、周期長 4 mm・38 周期の“モノリシック”アンジュレータが利用できるようになったことを示している。

精密磁場測定の結果; 152mm長磁石

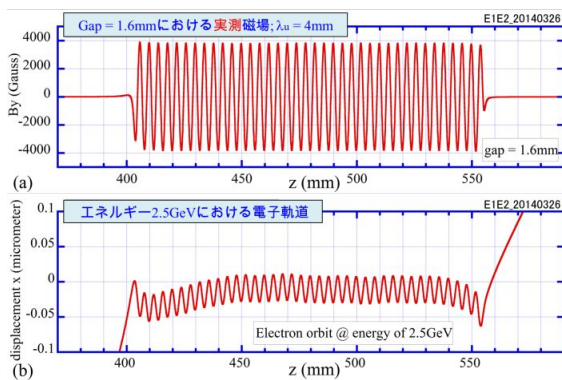


図 4. 長さ 152 mm の磁石に対する磁場測定; (a) ギャップ 1.6 mm における磁場 (周期長 4 mm), (b) 電子軌道 (エネルギー 2.5 GeV)

磁場測定の結果を図 4 に示した[7, 8]。磁石板長 152 mm のペア (E1 と E2: 図 3 参照) に対するものであり、図 4a はギャップ 1.6 mm における磁場 (約 4 kG) を、図 4b はその中を通過するエネルギー 2.5 GeV の電子の軌道を示している。図 4b に示したアンジュ

レータ磁場中の電子軌道からもわかるように、非常に良好な周期磁場を得ることができた。実測磁場に基づいて放射光のスペクトル計算を行った[7, 8]。電子ビームのエネルギーが 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の場合に求めたスペクトルを、同強度の理想磁場に対するスペクトルと比較した (図 5)。図 4a に示した“モノリシック”アンジュレータ磁場に対する放射スペクトルは、アンジュレータ基本波では誤差のない理想磁場 (青線) からのそれと比べて同等の性能を持つことが判る。

実測磁場と理想磁場との比較; 152mm長磁石

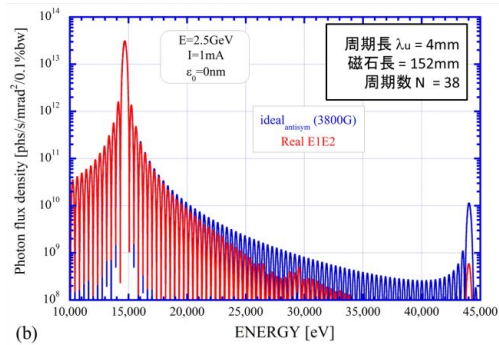


図 5. 実測磁場 (図 4a) に基づく光束角密度スペクトル (2.5 GeV ゼロエミッタンス電子ビーム)

磁石の長尺化は 100 mm 長を越えて 152 mm 長にまで達した。しかし、200 mm を超える長さの板状磁石 (厚さが 2 mm 程度) を製作することは容易ではない。したがって、

精密磁場測定の結果; 100 + 100mm長磁石

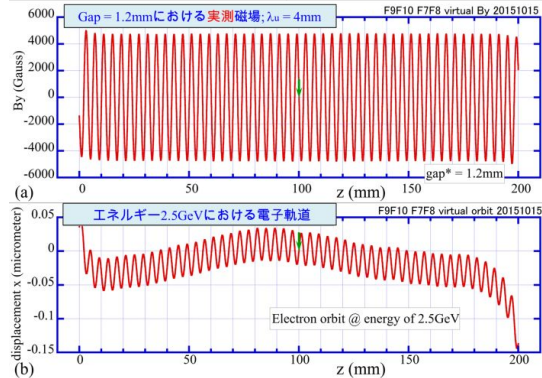


図 6. 連結磁石 (長さ 100 mm+100 mm) に対する磁場 (周期長 4 mm, ギャップ 1.2 mm); (a) 磁場強度, (b) 電子軌道 (エネルギー 2.5 GeV)。2 枚の 100 mm 長磁石を一体として連結後、着磁して 200 mm 長の磁石とした

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。最初に、独立に着磁した磁石板の連結を試みたが、その場合には磁石連結部の磁場に小さな不正が生じることが判明した[7, 8]。この磁場不正はスペクトル解析の結果、連結が一つの場合には問題ないことを確認しているが[7, 8]、連結数を増やしてよ

り長尺のアンジュレータを製作する場合には注意が必要である。

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法を開発した[9, 10]。図 6 には、2 枚の 100 mm 長の磁石板を一体として着磁を行い、同様に着磁したもう一組の磁石板と対向させて得られた磁場の状態を示している（図 6a：磁場（ギャップ 1.2 mm 時）、図 6b：（エネルギー 2.5 GeV 時の電子軌道）。図 6 中の緑色矢印は連結点を示す。図 6b の電子軌道には、連結点における磁場不正は全く生じていない。連結した長さ 200 (=100+100) mm のアンジュレータの場合にも良好な磁場および電子軌道が得られたことが判る。

実測磁場と理想磁場との比較; 200 (=100+100)mm長磁石

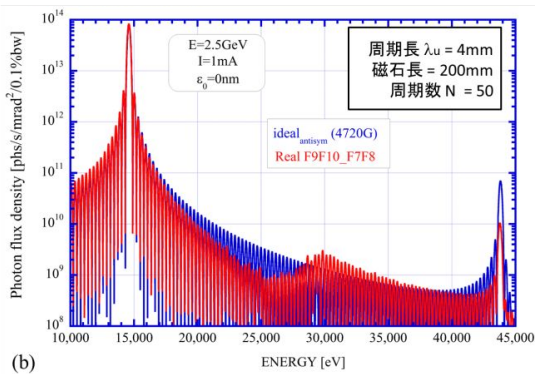


図 7. 実測磁場(図 6a)に基づく光束角密度スペクトル(2.5 GeV ゼロエミッタンス電子ビームの場合)。連結一体着磁を行った場合(磁石長 200 (=100+100) mm, 図 6 参照)

図 7 には連結型 200 mm 長アンジュレータからの放射特性を示した。基本波の領域では理想磁場（青線）からの放射スペクトルと比べて同等の性能を持つ。ここで示した連結着磁法の採用が重要になることが判る。ここでは、磁石板 2 枚の連結例を示したが、この着磁法を採用すれば、任意枚数の磁石を連結した長尺アンジュレータの作成も可能である。長さ 500 mm の精密アンジュレータ磁場(周期長 4 mm)にも成功している[11]。

上記で開発した磁石板を装着し、真空中に収納した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し極短周期真空封止型アンジュレータとして完成させた。このギャップ駆動機構は、全長 200 mm までの磁石板を装着することができる[10, 11]。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（ギャップ分解能：1micron）。

(2) 既存高性能加速器に於ける極短周期アンジュレータの光源性能評価試験

これまでに SPring-8, KEK-cERL, あいちシンクロトロン光センター, および東北大学電子光物理学研究センター S-band 線形加速

器に於ける光源性能評価試験実施について詳細な検討を行った。残念ながら SPring-8, および KEK-cERL については、各施設本来の運転時間確保のために実施不可という結果となったが、あいちシンクロトロン光センターでの実施は可能性が高いという結論を得ることが出来た。本研究終了後も上記検討を深化させ、評価試験の実施を目指す。

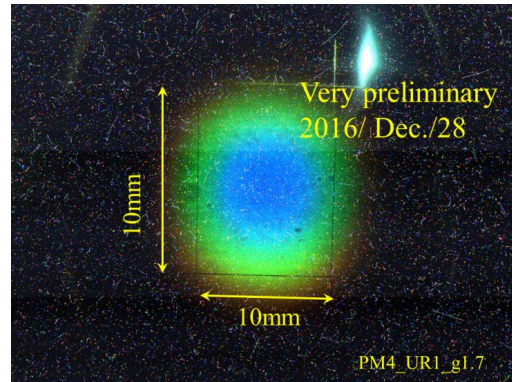


図 8. 極短周期アンジュレータからの最初の放射の観測例

東北大学電子光物理学研究センターの 50 MeV S-band 線形加速器の利用については、詳細検討の後、放射光の観測実験を実施することが出来た[10]。上述の駆動機構に 4 mm 周期・100 mm 長磁石を装着し、上記加速器に設置した。評価試験中は加速器を 2Hz で運転した（1 macropulse は 5700 micro-bunch で構成：3.5 pC/micro-bunch）。規格化エミッタンスは水平 1 mm・mrad, 鉛直 3 mm・mrad であり、放射観測域を可視領域とするために、ビームエネルギーを 35 MeV に設定した。アンジュレータからの放射を水平振り分けミラーにより取出し、加速器のタイミングに同期（2 Hz）させた CCD カメラで撮影した。

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。この時のアンジュレータパラメータ（ギャップ=1.7 mm, $B_0=2740$ G）と軸上放射の波長（青色： $\lambda=433$ nm）から得られるビームエネルギーは $E=34.9$ MeV となり、加速器の設定パラメータと整合している[10]。

(3) 極短周期アンジュレータに最適化した放射光源加速器の設計研究

極短周期アンジュレータを既存の蓄積リングに設置するには様々な障害があり、限られた使用しか出来ない。そこで、設計段階から周期長 2-6 mm の極短周期アンジュレータを 10 台以上設置することを前提としたリングの設計検討を行い、エネルギー 1.5 GeV, 周長 60.12 m, 自然エミッタンス 23.9 nm・rad の蓄積リングを設計した[12]。

図 9 は、3 つの異なる周期長(=6, 4, 2 mm)の極短周期アンジュレータを設置した場合の輝度スペクトルを示している（アンジュレータ長 = 0.7 m）。蓄積電流 300 mA, xy カッ

プリング 0.5%を仮定し，相対エネルギー拡がり 1.18%，水平分散 0.423 m を考慮した。図の様に，周期長 6 mm では 10^{18} phs/s/mm²/mrad²/0.1%bw に達する輝度が，光子エネルギー 3 keV で得られており，周期長 2 mm では 10 keV で 10^{16} (同単位) を超える輝度が得られることが期待される。

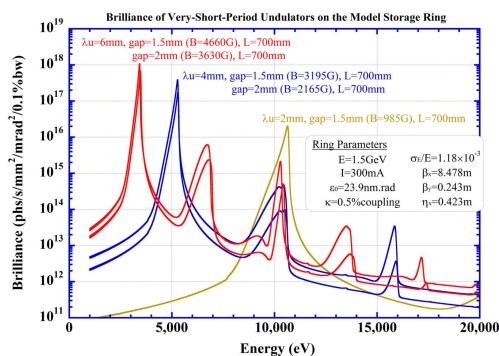


図 9. 極短周期アンジュレータに最適化した光源加速器に設置した極短周期アンジュレータからの放射光スペクトル計算例[12]

本研究において開発を進めてきた極短周期アンジュレータが，直線部のベータatron関数を十分に小さくすることにより，蓄積リングの性能を損ねること無く，そのようなリングと共存可能であり，アンジュレータビームライン主体の小型放射光源として十分な性能を持つことを示すことが出来た[12]。

参考文献

- [1] S.Yamamoto, et al., J. Appl. Phys. 74, 500 (1993).
- [2] S.Yamamoto, et al., AIP Conf. Proc. 1234, 599 (2010).
- [3] S.Yamamoto, J. Phys.: Conf. Ser. 425, 032014 (2013).
- [4] 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 (2013).
- [5] 山本 樹 編集, KEK Proceedings 2013-5 (2013).
- [6] S.Yamamoto, Proc. IPAC2014, WEOAA02, 1845-1857, Dresden, Germany, 2014.
- [7] 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.
- [8] S. Yamamoto, AIP Conf. Proc. 1741, 020029, 2015.
- [9] 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.
- [10] 山本 樹,第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THOL11, 216-220, 2017.
- [11] S.Yamamoto, Proc. IPAC2018 ログノート 180604_0618, WEXGBD1, Vancouver, Canada, 2018.

[12] 大熊春夫, 山本 樹, 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THOL12, 221-225, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

大熊春夫, 山本 樹, 極短周期アンジュレータの設置に最適化した小型電子蓄積リングの設計, 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 査読無, 2017, pp. 221-225, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOL/THOL12.pdf.

山本 樹, 浜 広幸, 柏木 茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 南部健一, 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, 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 査読無, 2017, pp. 216-220, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOL/THOL11.pdf.

山本 樹, コンパクト放射光源としての極短周期アンジュレータの開発, レーザ研究, 査読有, Vol.45, No.2, 2017, pp. 82-86.

S.Yamamoto, Development of undulator magnets towards very short period lengths, AIP Conf. Proc., 査読有, Vol. 1741, 020029, 2016, doi: 10.1063/1.4952808.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの開発 III, 第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 査読無, 2016, pp. 1035-1039, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP066.pdf.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの開発 II, 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 査読無, 2015, pp. 187-190, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/FR/OM/FROM04.pdf.

S.Yamamoto, Undulator development towards very short period lengths, Synchrotron Radiation News, 査読無, Vol 28, No. 3, 2015, pp. 9-22, DOI: 10.1080/08940886.2015.1037677.

S.Yamamoto, Development of the very short period undulators, Proc. IPAC2014, 査読無, WEOAA02, pp. 1845- 1857, Dresden, Germany, 2014, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-WEOAA02>.

〔学会発表〕(計 14 件)

山本 樹, 極短周期アンジュレータの開発 II, 第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, つくば, 2018.

S.Yamamoto, Development of a novel undulator with a very short period length, Third European advanced accelerator workshop, Elba Island, Italy, 2017.

大熊春夫, 山本 樹, 極短周期アンジュレータの設置に最適化した小型電子蓄積リングの設計, 第 14 回日本加速器学会年会, 札幌, 2017.

山本 樹, 浜 広幸, 柏木 茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 南部健一, 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, 第 14 回日本加速器学会年会, 札幌, 2017.

S.Yamamoto, Development of a novel undulator having very short period lengths, IPAC17, Copenhagen, Denmark, 2017.

S.Yamamoto, Very-short-period undulator development, ID2017 Undulator Workshop for Multibend Achromat Rings and Free Electron Lasers, Berkley, USA, 2017.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの開発, 第 30 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 神戸, 2017.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの開発 III, 第 13 回日本加速器学会年会, 千葉, 2016.

山本 樹, アンジュレータ磁場極短周期化の新しい試み V, 第 29 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 柏, 2016.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの開発 II, 第 12 回日本加速器学会年会, 敦賀, 2015.

S.Yamamoto, Development of undulator magnets towards very short period lengths, The 12th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, New York City, USA 2015.

山本 樹, アンジュレータ磁場極短周期化の新しい試み IV, 第 28 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 草津, 2015.

S.Yamamoto, New type of short period undulators, Japanese-French Symposium on Advanced Compact FELs, Tokyo, Japan, 2014.

S.Yamamoto, Development of the very short period undulators, Proc. IPAC2014, WEOAA02, 1845-1857, Dresden, Germany, 2014..

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 樹 (YAMAMOTO, Shigeru)
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号：20191405

(2) 研究分担者

大熊春夫 (OHKUMA, Haruo)
高輝度光科学研究センター・その他部局等・その他
研究者番号：60194106

早乙女光一 (SOUTOME, Kouichi)
高輝度光科学研究センター・加速器部門・主幹研究員
研究者番号：20416382

田中隆次 (TANAKA, Takashi)
理化学研究所・放射光科学総合研究センター・主任研究員
研究者番号：30321780

足立伸一 (ADACHI, Shin-ichi)
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授
研究者番号：60260220

足立純一 (ADACHI, Jun-ichi)
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師
研究者番号：10322629

本田 融 (HONDA, Tohru)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授
研究者番号：90181552

帯名 崇 (OBINA, Takashi)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授
研究者番号：60290855

(4) 研究協力者

浜 広幸 (HAMA, Hiroyuki)
東北大学・電子光理学研究センター・教授

柏木 茂 (KASHIWAGI, Shigeru)
東北大学・電子光理学研究センター・准教授

日出富士雄 (HINODE, Fujio)
東北大学・電子光理学研究センター・准教授

武藤俊哉 (MUTO, Toshiya)
東北大学・電子光理学研究センター・助教

南部健一 (NANBU, Ken-ichi)
東北大学・電子光理学研究センター・技術専門職員