

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651107

研究課題名(和文)極短周期アンジュレータ磁気回路作成のための着磁法の開発

研究課題名(英文)Development of the magnetization method for producing the very short period undulator magnets

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) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：非常に高いエネルギーのアンジュレータ放射光(基本波で10keV以上)を生成することを目的として、長さ約100mmの板状磁石に周期長4mmの極短周期アンジュレータ磁気回路を形成する素開発を行った。本研究期間において着磁ヘッド電磁石の最適化を行い、磁場周期精度の向上、着磁強度の向上、磁場均一度の向上を図った。対向させた1対の上記板状磁石の隙間(1.6mm)において約4100Gの極短周期磁場(周期長=4mm)を作成する方法を確立できた。この磁場を持つ極短周期アンジュレータをエネルギー2.5GeVの電子蓄積リングに設置した場合、基本波で12keV(波長1.0nm)領域の放射を得ることが可能になる。

研究成果の概要(英文)：We have established a method to fabricate very short period undulators, in order to obtain high energy undulator photons (higher than 10keV with the fundamental harmonic), and developed a plate-type magnet some 100mm long with a period length of 4mm in the longitudinal direction. A multi-pole magnetizing method was applied to magnetizing this plate: a periodic undulator field (of 4-mm period in this case) was generated by pulsed electro-magnets, and was transcribed into the plate. The magnetization procedure allows the undulator field to be obtained in a very short gap between the pair of opposing plates. We selected 4-mm period since we can generate 12-keV radiation with the first harmonic of this undulator in the 2.5-GeV electron storage ring.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：放射光 挿入光源

### 1. 研究開始当初の背景

アンジュレータ放射のエネルギーは、磁場周期長に逆比例して/電子ビームエネルギーの自乗に比例して増減する。これまでの放射光施設では数 cm のアンジュレータ周期長に対して、2GeV 程度の電子蓄積リングと組み合わせることで VUV-SX 光源を実現し、6-8GeV 程度のリングと組み合わせることで X 線光源を実現してきた。

近年は、真空封止型アンジュレータの技術を導入して、3-4GeV の高性能リングと周期長 2cm 程度のアンジュレータとを組み合わせることで X 線光源を建設することが計画され、一部実現されつつある。これに先駆けて我々はこの様な研究の重要性に気づいていたので、1998-1999 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2) 課題番号: 10440123, 研究代表者: 山本 樹)により、周期長 2cm の円偏光磁気回路の開発を行った。また、2005 年より行った高エネルギー加速器研究機構(KEK)・放射光研究施設(PF)直線部改造において PF 電子蓄積リングに周期長 1-2cm の真空封止型短周期アンジュレータ(Short Gap Undulator: SGU)を 3 台導入し、これらの SGU が高輝度 X 線光源として有用であることを実証した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、アンジュレータ磁場の周期長を“極短周期化”する方式を開発することである。ここで、極短周期化とはこれまでの周期長を約 1/10 に圧縮することを意味する。このために、多極着磁法を応用して極短周期磁場を作成する。この方法では、極短周期のアンジュレータ磁場をパルス電磁石によって発生させ、これを磁石材料に“転写”する。目標として周期長 4mm の磁気回路作成を試みる。この場合幅 2cm x 厚さ 0.2cm x 長さ 10cm の板状の永久磁石素材を、一対の電磁石によって厚さ方向に挿みこみ電磁石(着磁コイル)をパルスの励起することで、約 25 周期分のアンジュレータ磁石列を同時に作成する方法を検討する。

### 3. 研究の方法

アンジュレータは、光源加速器において周回中の電子に周期磁場を印加することで周期運動を行わせ、干渉効果によって放射の単色度と輝度および空間指向性を著しく高める装置である(図 1 参照)。アンジュレータ放射のエネルギーは電子ビームエネルギーの 2 乗に比例し/磁場周期長に逆比例して増減するので、例えば、周期長 4mm の磁気回路を作成できれば、PF2.5GeV リングにおいて基本波で 12keV(波長 1)領域の放射を生成することができる。

本研究では、これまで誰も試みてこなかった、極短周期アンジュレータ磁気回路着磁方法の開発を試みる。通常の永久磁石型アンジュレータにおいては、高さ x 厚さ x 幅を精密

に整形した永久磁石ブロックを非磁性金属製のホルダーに収納し、それらを厚さ方向に多数並べた磁石列を上下に対向させることにより、上下磁石列の隙間(ギャップ)に周期磁場を形成する(図 1)。磁場の周期長( $\lambda_u$ )は磁石ブロックの寸法精度によって、磁場強度の精度は磁石ブロックの 3 次元寸法の精度および着磁強度の精度によって決定される。従って通常型で磁場周期を短縮するためには、磁石ブロックおよびホルダーによって構成される磁石ユニットの寸法を、精度を保ちつつ縮小することによって実現される。しかし、精密磁石ユニットを並べるこの方式は、PF における SGU 開発では目標の周期長が 10mm 程度であったために成功したが、 $\lambda_u = 5\text{mm}$  程度以下の周期長を目標にする本研究では、磁石素材の成型精度に限界があること・磁石列を構成する磁石ユニットの組み立てに使用する螺子等の部品が小さくなりすぎること等のために使用不可能となる。

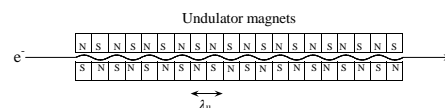


図 1. アンジュレータ磁気回路の概念図。図の磁石配置では電子は紙面に垂直方向に蛇行軌道を描くが、ここでは上下方向に表した。

本研究においては、多極着磁法を応用して極短周期磁場の作成法を確立する。この方法では、極短周期のアンジュレータ磁場をパルス電磁石によって発生させ、これを希土類元素永久磁石材料(NdFeB系)素材に“転写”する。この方式によってこれまでの周期長を約 1/10 に圧縮し、かつ十分な磁場周期の精度と磁場強度の達成を目指す。

### 4. 研究成果

#### (1) 極短周期アンジュレータ磁場の生成

薄板状の磁石を多極着磁法によって着磁する方法を概念的に図 2 に示した。

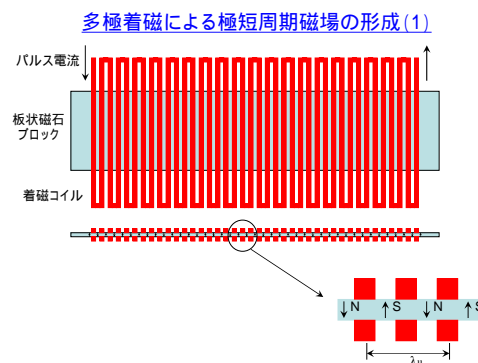


図 2(a). 多極着磁法による磁場の“転写”

Nd-Fe-B 系磁石材料でできた磁石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

互に板状磁石中に周期的間隔を置いて同時に形成され、板状磁石への“転写”が行われる。

多極着磁による極短周期磁場の形成(2)

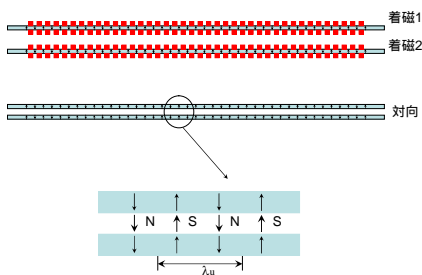


図 2(b). 極短周期磁場の生成

着磁後の一対の磁石板を互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 2(a)には磁化方向が磁石板表面に垂直の場合を示した(垂直着磁型)。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。もう一つ(水平着磁型)の幾何学も可能である。この場合は水平磁気記録方式と同様、着磁は磁石板表面に平行に行われる。水平型の場合の着磁強度は垂直型よりも弱くなるのが予想されるが、この方式は着磁を完全に磁石板表面に沿って行うことができるならば磁極毎の着磁強度に誤差があっても磁場の1次積分値をゼロにできるという利点を持つ。

予備的な着磁試験を垂直着磁方式において行った。この試験では長さ 100mm x 幅 20mm x 厚さ 2mm の板状の磁石素材 (NEOMAX-48BH 製; 日立金属 NEOMAX エンジニアリング(株)) に周期長 4mm のアンジュレータ磁場の“転写”を試みた。しかしながら、アンジュレータ磁場として得られた結果は非常に不満足なものであった。磁場強度と周期長の偏差はそれぞれ $\pm 50\%$  と $\pm 30\%$ にも達した。我々はこの結果は着磁ヘッドとして用いた電磁石およびその製法にあると判断した。しかし、このジグザグワイヤ式着磁ヘッドの改良に拘泥せず、着磁ヘッド製作を単純化し少ない場合の数で良好な結果を得るために、垂直着磁型の別の手法を採用することにした。この方法では、図 3 に示したようにリニアモータでステップ駆動された磁石板(同寸法)が固定着磁ヘッドで着磁される。図 3(a)に着磁方式を 3(b) および (c) に着磁後の板状磁石を示した。

ここで我々は、1 周期(2 極)分の着磁ヘッドを製作した。直径 1.1mm のワイヤを 1 極あたり 2mm の間隔でエポキシ樹脂によって強固に固定した(1 極の精度 0.05mm)。この着磁ヘッドに 9.6kA のパルス電流を送り 0.1 秒間励磁した。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 1/2 の 2mm に調整した。各ステップ毎に着磁ヘッ

ドに供給するパルス電流の向きを反転させることによって、周期長 4mm の極短周期アンジュレータ磁場を磁石素材(TiN 表面処理された NMX-39EH; 同じく日立金属製。形状は 100mm x 20mm x 2mm)に書き込んだ。この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 0.003mm である。板状磁石の磁場周期長の精度は主に、着磁ヘッド中のワイヤ間隔の精度とリニアモータの駆動ステップ幅の精度によって決定される。従って、得られる磁場強度の精度は磁場周期長の精度(を決めるワイヤ間隔精度とステップ送り精度)と各ステップで着磁ヘッドに供給される電気量の精度によって、基本的に決定される。

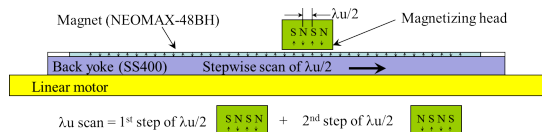


図 3(a). 板状磁石ステップ送りによる鉛直着磁

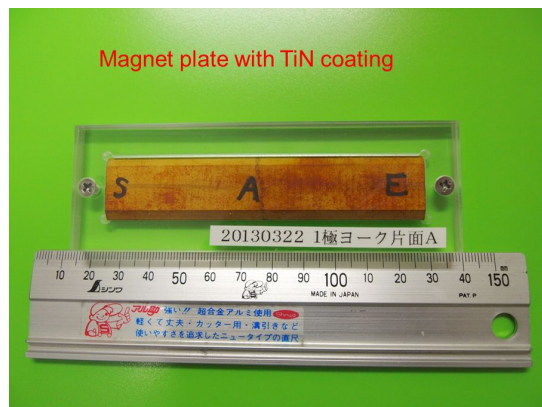


図 3(b). 着磁後の板状磁石 (NMX-39EH): 100mm x 20mm x 2mm, TiN 表面処理

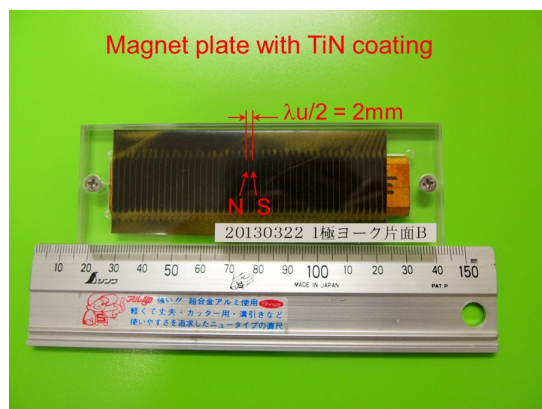


図 3(c). 着磁後の板状磁石: 磁性流体シートを介して周期長 4mm の着磁パターンを観察できる

(2) 磁場測定と極短周期アンジュレータ磁場の評価

上記のように着磁した板状磁石のアンジュレータとしての品質を評価するために磁

場測定を行った。ここでは図 4 に示した方法によって鉛直方向磁場の測定を行った。磁場測定子には、0.05mm x 0.05mm の感受エリアをもつホール素子を厚さ 1.3mm の Cu 製ホルダに収納して使用した。またここでは、ギャップ 1.6mm の固定ギャップ式のアンジュレータとして磁場測定を行った。

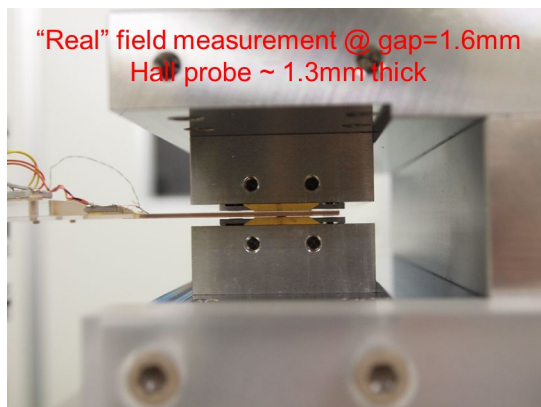


図 4. ギャップ 1.6mm における磁場測定。アンジュレータ架台としてはギャップ固定式を採用

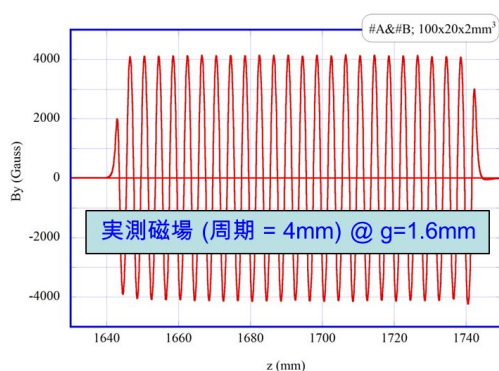


図 5(a). ギャップ 1.6mm における磁場測定結果

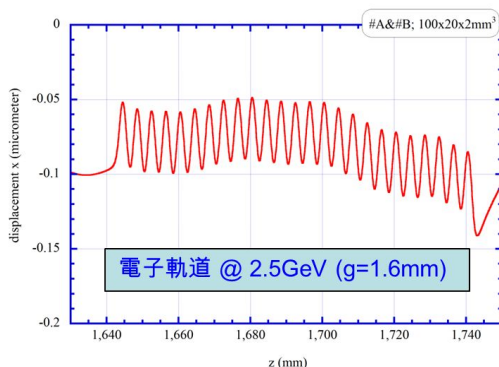


図 5(b). エネルギーが 2.5GeV の場合のアンジュレータ内の電子軌道

図 5 に上記方式を用いて行った磁場測定の結果を示した。図 3 に示した方法で着磁した板状磁石を図 4 の固定ギャップ式アンジュレータ架台に装着してギャップ 1.6mm において行った磁場測定の結果を示したのが図 5(a)

である。ギャップ 1.6mm において約 4100G の極短周期アンジュレータ磁場が得られた。さらに、この測定結果をエネルギー 2.5GeV の電子ビームのアンジュレータ内の軌道として示したのが図 5(b) である。極短周期アンジュレータ着磁技術開発のこの時点では、磁石板両端の着磁も中心に近い他の磁極と同様に行ったため、両端部のアンジュレータ軌道としての補正は不十分である。しかし、この磁場中の軌道はアンジュレータ軌道として十分満足のできるものに見える。

この磁場のアンジュレータとしての性能を評価するために、この磁場を通過する電子からの放射のスペクトル（放射光光束角密度）を求めた（図 6）。図 6 に示したように、電子エネルギーが 2.5GeV の時このアンジュレータ磁場からの放射スペクトル（1 電子の場合）は、アンジュレータ基本波の領域では誤差のない理想磁場（同じ磁場強度の場合）からの放射スペクトル（図 6 中の緑線）と比べて遜色ない性能を持つことが判る（同赤線）。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。

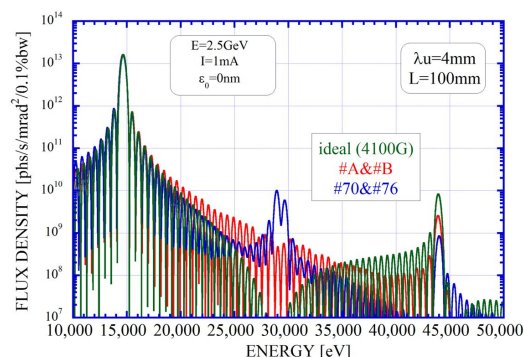


図 6. 実測磁場（図 5(a)）に基づく放射光光束角密度スペクトル（2.5GeV ゼロエミッタ電子ビームの場合）

### (3) まとめ

今回得られた結果は、極短周期アンジュレータを開発する上で我々が正しい方向に進んでいることを示していると考えられる。勿論、実用機の開発にはさらに、着磁強度と精度の向上、アンジュレータ両端部の適切な着磁法の開発、狭小ギャップでの磁場測定法の開発等、多くの事柄を解決しなければならない。さらに非常に狭いギャップを必然的に必要とするこの形式のアンジュレータを設置することのできる高性能光源加速器の検討が非常に重要である。しかし、極短周期アンジュレータはそれが要求する直線部の長さを非常に短くできる点で、このような高性能加速器の追及に大きな自由度を与えるものと考えられる。

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 6 件)

S. Yamamoto, A novel attempt to develop very short period undulators, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 425, 032014 (1-4), 2013, doi:10.1088/1742-6596/425/3/032014.

K. Takahashi, M. Imamura, I. Yamamoto, J. Azuma, K. Ogawa, M. Kamada, H. Ohkuma, and S. Yamamoto, Upgrade of Saga-university beamline in SAGA-LS, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 425, 072007 (1-4), 2013, doi:10.1088/1742-6596/425/7/072007.

K. Amemiya, M. Sakamaki, T. Koide, K. Ito, K. Tsuchiya, K. Harada, T. Aoto, T. Shioya, T. Obina, S. Yamamoto and Y. Kobayashi, Fast polarization switching in the soft X-ray region at PF BL-16A, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 425, 152015 (1-4), 2013, doi: 10.1088/1742-6596/425/15/152015.

K. Kawase, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, S. Kashiwagi, S. Yamamoto, F. Kamitsukasa, H. Osumi, M. Yaguchi, A. Tokuchi, S. Suemine, G. Isoyama, The high-power operation of a terahertz free-electron laser based on a normal conducting RF linac using beam conditioning, Nuclear Instrum. Methods A, 査読有, 726, 96-103, 2013, doi:10.1016/j.nima.2013.05.183.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの ERL への応用, 第 2 回コンパクト ERL サイエンスワークショップ, 査読無, KEK Proceedings 2012-10, 21-24, 2013.

K. Amemiya, M. Sakamaki, S. Nakamoto, M. Yoshida, K. Suzuki, H. Kondoh, T. Koide, K. Ito, K. Tsuchiya, K. Harada, H. Sasaki, T. Aoto, T. Shioya, T. Obina, S. Yamamoto, and Y. Kobayashi, Molecular orientation change during adsorption of NO and N<sub>2</sub>O on Ir(111) observed by real-time wavelength-dispersive x-ray absorption spectroscopy with polarization switching, Appl. Phys. Letters, 査読有, 101, 161601 (1-4), 2012.

〔学会発表〕(計 17 件)

山本 樹, 極短周期アンジュレータ磁気回路の開発 II, 第 69 回日本物理学会年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2014.

山本 樹, アンジュレータ磁場極短周期化の新しい試み III, 第 27 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 広島国際会議場, 広島市, 2014.

S. Yamamoto, Development of very

short period undulators, The 7th Asia Oceania forum for synchrotron radiation, 招待講演, Egret Himeji, 姫路市, 2013.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの開発, 第 10 回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 名古屋市, 2013.

加藤龍好, 川瀬啓悟, 入澤明典, 藤本正輝, 大角寛樹, 矢口雅貴, 船越壮亮, 堤亮太, 末峰昌二, 磯山悟郎, 柏木 茂, 山本 樹, 阪大産研における FEL スペクトルの時間的振る舞い, 第 10 回日本加速器学会, 名古屋大学, 名古屋市, 2013.

野上杏子, 早川 建, 田中俊成, 早川恭史, 境 武志, 中尾圭佐, 稲垣 学, 佐藤 勇, 榎本収志, 大沢 哲, 福田茂樹, 設楽哲夫, 古川和朗, 道園真一郎, 土屋公央, 吉田光宏, 山本 樹, 日大 LEBRA 電子リニアックの現状と光源利用, 第 10 回日本加速器学会, 名古屋大学, 名古屋市, 2013.

山本 樹, アンジュレータ磁場極短周期化の新しい試み II, 第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 名古屋大学, 名古屋市, 2013.

酒巻真粧子, 雨宮健太, 小出常晴, 伊藤健二, 山本 樹, 土屋公央, 原田健太郎, 青戸智浩, 塩屋達郎, 帯名崇, 小林幸則, 偏光スイッチングを用いた磁性薄膜の円二色性検出と深さ分解法の適用, 第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 名古屋大学, 名古屋市, 2013.

藤本正輝, 沈 傑, 川瀬啓悟, 上司文善, 大角寛樹, 矢口雅貴, 加藤龍好, 入澤明典, 柏木 茂, 磯山悟郎, 山本 樹, 広い強度領域での FEL パワー発展測定による増幅率評価, 第 9 回日本加速器学会, 大阪大学豊中キャンパス, 豊中市, 2012. 加藤龍好, 川瀬啓悟, 入澤明典, 藤本正輝, 上司文善, 大角寛樹, 矢口雅貴, 末峰昌二, 磯山悟郎, 柏木 茂, 山本 樹, 阪大産研 FEL スペクトルの時間発展, 第 9 回日本加速器学会, 大阪大学豊中キャンパス, 豊中市, 2012.

山本 樹, 極短周期アンジュレータの ERL への応用, 第 2 回コンパクト ERL サイエンスワークショップ, 高エネルギー加速器研究機構, つくば市, 2012.

S. Yamamoto, A novel attempt to develop very short period undulators, The 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrum., The Centre de Congres, Lyon, France, 2012..

K. Takahashi, M. Imamura, I. Yamamoto, J. Azuma, K. Ogawa, M. Kamada, H. Ohkuma, and S. Yamamoto, Upgrade of Saga-university beamline in SAGA-LS,

The 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrum., The Centre de Congres, Lyon, France, 2012. K. Amemiya, M. Sakamaki, T. Koide, K. Ito, K. Tsuchiya, K. Harada, T. Aoto, T. Shioya, T. Obina, S. Yamamoto and Y. Kobayashi, Fast polarization switching in the soft X-ray region at PF BL-16A, The 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrum., The Centre de Congres, Lyon, France, 2012. 山本 樹, 極短周期アンジュレータ磁気回路の開発, 第 67 回日本物理学会年次大会, 関西学院大学, 西宮市, 2012. 山本 樹, アンジュレータ磁場極短周期化の新しい試み, 第 25 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 鳥栖市民文化会館, 鳥栖市, 2012. 雨宮健太, 酒巻真粧子, 小出常晴, 伊藤健二, 土屋公央, 原田健太郎, 青戸智浩, 塩屋達郎, 帯名崇, 山本 樹, 小林幸則, 中本秀一, 柳川幸毅, 吉田真明, 近藤寛, PF-BL-16A における左右円偏光および縦横直線偏光スイッチングを用いた X 線吸収スペクトルにおける二色性の測定, 第 25 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 鳥栖市民文化会館, 鳥栖市, 2012.

研究者番号 : 24651107

(2)研究分担者 ( )

研究者番号 :

(3)連携研究者 ( )

研究者番号 :

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況(計 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

## 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