

# 45度傾斜磁化によるアンジュレータ磁気回路の放射線耐性向上

備前輝彦

公益財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

金城良太

国立研究開発法人理化学研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

田中隆次

国立研究開発法人理化学研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

## 要旨

加速器収納部内の高放射線環境下で運用されるアンジュレータにおける最大の懸念として、放射線による品質低下、特に永久磁石の劣化（放射線減磁）が挙げられる。放射線減磁はアンジュレータの性能を著しく損なう可能性があるため、放射光施設やX線自由電子レーザー施設ではその軽減のために様々な対策がとられている。我々は、永久磁石の磁化ベクトルを45度傾けるというシンプルな方法により、アンジュレータ磁石列の放射線耐性が大幅に向上することを見出し、SPring-8のシンクロトロンにおける照射実験においてその有効性を検証した。この結果、45度傾斜磁化を適用した磁石列が、従来型磁石列に比べて1桁程度高い放射線耐性を有することが確認された。

## 1. はじめに

シンクロトロン放射光施設やX線自由電子レーザー（XFEL）施設には、極性が一定間隔で反転する磁場（周期磁場）によって高エネルギー電子ビームを蛇行させて、高輝度放射光やX線レーザーを生成する役割を担う、アンジュレータと呼ばれる装置が多数設置されている。通常、加速器施設における磁石（偏向磁石や収束磁石）には電磁石が利用されるが、アンジュレータでは希土類永久磁石が利用されることが多い。これは、アンジュレータへの応用という境界条件下で希土類永久磁石が発生する磁場強度が、同じ体積を持つ電磁石のそれに比べて圧倒的に高いためである。例えば、100 mm 以下という一般的なアンジュレータ周期長の場合、通常電磁石で得られる周期磁場の磁場振幅（ピーク磁場）は、希土類永久磁石の数分の一に過ぎず、電磁石の利用は偏光制御などの一部の特殊な用途を除いて現実的ではない。

希土類永久磁石は、構成する元素の成分によって2種類に大別される。1つはサマリウムコバルト（SmCo）、他方はネオジウム鉄ボロン（NdFeB）である。いずれもアンジュレータとしての利用に実績があるが、NdFeBはSmCoに比べて(1)残留磁束密度、(2)製造コスト、(3)物理的強度、などの点において優位である。物理的強度は、吸引や反発などの相互作用がある大量の磁石ブロックを、（一般的には人間の手で）組み立てる必要があるアンジュレータとして利用するためには重要な要因である。これらの利点により、アンジュレータ用永久磁石には主として

NdFeBが利用されており、今後もその重要性は変わらないと思われる。

一方、NdFeBをアンジュレータ用永久磁石として利用する際には、高エネルギー電子ビームやその二次粒子の照射による損傷が懸念される。高い放射線耐性を持つSmCoと比べて、NdFeBは放射線で容易に損傷を受ける、言い換えると減磁することが知られており、放射線減磁による性能劣化が許容範囲を超えたアンジュレータは交換するか、大規模な改修が必要となる。放射線による減磁進行の割合（以下、減磁率）は、容易には交換できない高価な装置であるアンジュレータの寿命に直結するため、永久磁石の減磁率を定量化するための実験的研究がこれまでに多数実施されてきた<sup>1-9)</sup>。またXFEL施設SACLAでは、真空封止アンジュレータ磁石列の放射線減磁が、永久磁石単体の減磁率を遥かに上回る速度で進行していることが報告されている<sup>10)</sup>。SACLAにおいて観測された減磁は、アンジュレータの電子ビーム入射付近（0.1 m程度）に局在化しており、全長100 m以上のアンジュレータの0.1%程度に過ぎないため、XFELの光源性能に影響を与えるものではないが、その本質的な原因を究明するため、実験的及び理論的調査が行われた。その結果、永久磁石の放射線減磁が、逆磁場（自身の磁化方向と逆の方向に加わる磁場）に対して高度に非線形な過程であること、言い換えると、逆磁場が放射線減磁過程を加速する作用を持つことが明らかとなった。

後に説明する通り、従来型アンジュレータの磁気回路では、本質的に強力な逆磁場が発生することが知られてい

る。即ち、アンジュレータ磁石列は永久磁石単体よりも遙かに減磁しやすい。この問題は、必然的に狭いギャップが要求され、より多くの電子に照射される短周期アンジュレータでは深刻である。言い換えると、アンジュレータ周期長の短縮は必然的に寿命の劣化につながる。

我々は、上記の問題に対応するための一つの選択肢として、アンジュレータに利用される永久磁石の放射線耐性を向上させるシンプルな手法を提案し、その有効性を実験的に検証した<sup>11)</sup>。本報告では、当該手法の詳細と実証実験の結果について解説する。

## 2. 従来型アンジュレータにおける逆磁場

初めに、従来型アンジュレータを構成する永久磁石が強力な逆磁場に曝される要因について解説する。Fig. 1(a)及び1(b)に2つの従来型アンジュレータの磁気回路を模式的に示す。白色の長方形と矢印が個々の永久磁石ブロックとその磁化方向、またFig. 1(a)の黒色の長方形は高い飽和磁束密度を有する磁性材料、通常はパーメンジュールと呼ばれる鉄コバルト合金製の磁極であり、周囲の永久磁石の磁場によって灰色で示した矢印の方向に磁化される。それぞれの磁気回路で構成されるアンジュレータは(a)ハイブリッド型、及び、(b)Halbach (ハルバック)型と呼ばれる。後者は提唱者<sup>12,13)</sup>の名前にちなんだものであるが、いずれの磁気回路も広く利用されており、各種境界条件や必要な仕様に従って選択されている。ピーク磁場は、永久磁石や磁極材質の磁場特性と、ギャップ ( $g$ ) 及び周期 ( $\lambda_u$ )

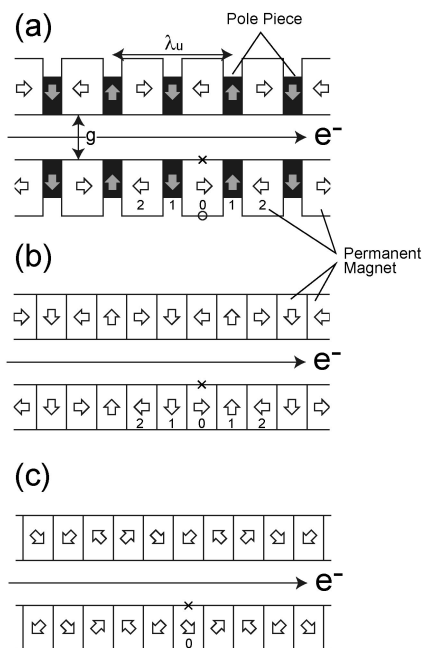


Fig. 1 Cross sections of undulator magnetic circuits: (a) hybrid, (b) normal Halbach, and (c) 45° Halbach types. Reproduced from reference<sup>11)</sup>.

に依存し、一般的には  $g/\lambda_u$  の指数減衰関数で表される。このため、短周期アンジュレータで十分に強い磁場を発生するためには狭いギャップでの運用が必須であり、永久磁石に衝突する電子数は必然的に増加する。

ここで、ハイブリッド型磁気回路(a)では全ての永久磁石が強い逆磁場に曝されることを、それぞれ“0”，“1”，“2”と番号づけた磁石ブロックと磁極に着目して説明する。図から明らかにように、0番磁石ブロックは、自己減磁場（永久磁石の内部で自身が発生する逆磁場で、磁石の形状に依存）に加えて2番ブロックが生成する逆磁場に曝される。さらに重要なことは、×印で示された電子ビーム軸近傍の表面（内部表面）における逆磁場が、両隣の1番磁極によって強化されることである。前述した通り、逆磁場は放射線減磁過程を加速する作用があるため、アンジュレータ磁石列の内部表面における放射線減磁率は、永久磁石単体のそれに比べて遙かに高い。ちなみに、内部表面と逆側の表面（Fig. 1(a)に○で図示）では両隣の磁極が発生する磁場が順方向に作用し、減磁を抑制する方向に働くため、放射線耐性は高い。しかしながら、アンジュレータの性能としては内部表面の寄与の方が遙かに高いため、その減磁はアンジュレータの性能低下に直結する。

上記の問題はハルバック型(b)においても当てはまり、0番ブロックの内部表面は1番及び2番ブロックが生成する強力な逆磁場に曝される。その一方で、1番磁石ブロックの内部表面に加わる、0番及び2番ブロックが発生する磁場は順方向であるため、減磁耐性を強化する方向に働く。即ち、磁化ベクトルが電子ビーム軸に平行な磁石ブロック（平行磁化磁石）はハイブリッド型の磁石と同様に減磁する一方、着磁方向が電子ビーム軸に垂直な磁石ブロック（垂直磁化磁石）の減磁率は抑制される。この結果、ハルバック型の減磁率はハイブリッド型の半分程度となることが予測されるが、それでもアンジュレータの寿命を大幅に改善することは期待できない。

## 3. 磁化ベクトルの傾斜による逆磁場の緩和

前節で述べた、強力な逆磁場によるアンジュレータ磁石列の放射線耐性の劣化という問題を解決するため、Fig. 1(c)に示す磁気回路について考察する。これは、XFEL施設SACLAのプロトタイプ加速器であるSCSS<sup>14)</sup>用アンジュレータとして開発された磁気回路であり<sup>15)</sup>、ハルバック型磁気回路(b)を構成する磁石ブロックの磁化ベクトルを、上側磁石列では時計方向に、下側磁石列では反時計方向に、いずれも45度傾けることによって得られる。この場合、各磁石ブロックの内部表面に加わる逆磁場は、従来型（ハイブリッドとハルバック）よりも弱いことが容易に理解できる。例えば、Fig. 1(c)に×印で示した場所では、隣接する磁石列による磁場が互いに相殺するため自己減磁場以外の逆磁場は発生しない。内部表面では、この点から

離れるにつれて逆磁場は増加するものの、その最大値は従来型のそれに比べて遥かに小さく、従って放射線耐性が大幅に向上することが期待される。以後、Fig. 1(b)とFig. 1(c)の磁気回路を区別するため、前者を通常ハルバック型、後者を45°ハルバック型と呼ぶことにする。

ちなみに、45°ハルバック型磁気回路による磁場分布は、ギャップと周期長の比が極端に小さくないという実用的条件において、通常ハルバック型のそれと同等であること、また偏向定数（いわゆるK値）は全く同一であることが解析的に示されている<sup>16)</sup>。即ち、2つのハルバック型磁気回路は、アンジュレータとして等価な性能を有する。

## 4. 実験

前節で述べた手法を実験的に検証するため、ハイブリッド、通常ハルバック、及び45°ハルバック磁石列で構成されるアンジュレータサンプルを製作し、高エネルギー電子ビーム照射による減磁率の比較を行った。製作したサンプルの磁気回路の構造と寸法をFig. 2(a)~2(c)に示す。中空の四角及び矢印は磁石ブロックとその磁化ベクトル、また(a)において黒い四角で示されているのが飽和磁束密度2.35 Tのパーマネント製磁極である。永久磁石の材質は、真空封止アンジュレータにおいて一般的に利用される、残留磁束密度1.2 T、保持力2000 kA/mのNdFeBである。全てのサンプルは同じ周期長22 mmを有し、8個の永久磁石ブロックで構成される。ちなみに、ハイブリッド磁気回路における周期あたりの磁石ブロック数は、ハルバック型の半分であるため周期数は倍となっている。また、各磁石列の上流側に設置された長さ40 mmの銅ブロックは、真空封止アンジュレータの端部構造を模擬するためのものである。

Fig. 2(a)下部に座標系を示す。電子ビームの進行方向をz、これに垂直な水平方向をx、鉛直方向をyと定義する。全ての磁石列において、磁石ブロック（及びハイブリッド型における磁極）の長さ（z方向の外寸）は、ピーク磁場が最大となるよう最適化されている。一方、幅（x方

向）及び高さ（y方向）についてはアンジュレータの性能（ピーク磁場強度とその水平方向への一様性）と、実用的境界条件（製造コストや機械構造）との兼ね合いで決定されており、いずれも標準的な値である。また全てのサンプルについて下側磁石列のみを製作し照射実験に用いた。

組立完了後、各サンプルをSPring-8の入射加速器として利用されているシンクロトロンに設置した。電子ビーム照射前に、Fig. 2(a)に示す通り、表面から6 mm上方においてホール素子をz軸に沿って掃引し、磁場分布の計測を行った。Fig. 3に計測結果を示す。各サンプルにおいて、磁石列の端部をz軸の原点と定義している。周期数が十分に大きくないため、完全に周期的な分布が得られているわけではないが、磁極に相当するいくつかのピークを明確に確認することができる。これらのピークのうち、矢印で示した2番目のピークに着目し、電子照射によるピーク値の変化を各サンプルの減磁量と定義する。

磁場分布計測後、シンクロトロンで8 GeVまで加速された電子ビームをサンプルに照射した。サンプルに入射す

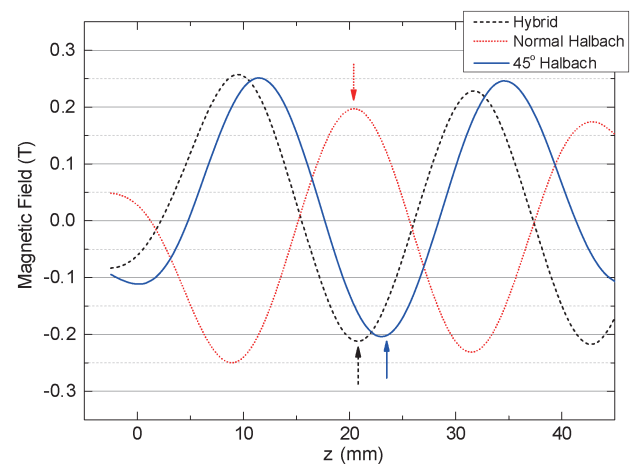


Fig. 3 (Color online) Magnetic distributions of the undulator samples measured by moving a Hall sensor along the z axis before irradiation. Arrows indicate the peak positions to evaluate the demagnetization of respective samples. Reproduced from reference<sup>11)</sup>.

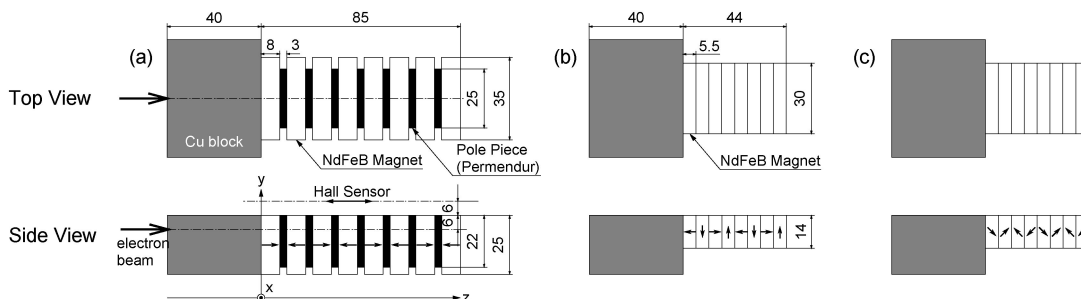


Fig. 2 Structures and dimensions of the undulator samples used for the irradiation experiments: (a) hybrid, (b) normal Halbach, and (c) 45° Halbach arrays. The top and bottom figures correspond to the top and side views. Reprinted from reference<sup>11)</sup>.

る直前の電子ビームサイズ (RMS) は水平方向で 6 mm, 垂直方向で 1 mm 以下であり, Fig. 2(a) に示す通り, 磁石表面から 6 mm 下方に照射位置を設定した。これにより, 電子ビームに含まれる全ての電子が確実に磁石に入射することを担保し, 各サンプルにおける減磁量と入射電子数の関係を精度よく評価することが可能となる。

照射実験の結果を Fig. 4 に示す。予測される通り, 通常ハルバック型の減磁率がハイブリッド型の半分程度であること, さらに, 45°ハルバック型の減磁率がそれらよりも遙かに低いことが確認された。これは, 磁化ベクトルの傾斜によって放射線耐性が大幅に向上していることを意味している。より具体的にアンジュレータ寿命の改善について考察するため, 5%の減磁量を引き起こす電子数  $N$  を評価する。各サンプルの実験データを補間することによって,  $N=1.4 \times 10^{13}$  (ハイブリッド),  $2.1 \times 10^{13}$  (通常ハルバック),  $1.1 \times 10^{14}$  (45°ハルバック) が得られる。即ち, 45°ハルバック型磁気回路を利用したアンジュレータの寿

命はハイブリッド型のそれに比べて1桁近く長いと期待される。

## 5. 数値計算による検証

前節で述べた照射実験によって確認された放射線耐性の向上を逆磁場の観点から考察するため, 各サンプルを構成する永久磁石の内部における磁場分布を数値計算により評価した。議論を容易にするため, 永久磁石内部の逆磁場を  $B_{\text{rev}} = -\mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} / |\mathbf{M}|$  で定義する。ここで,  $\mathbf{H}$  は磁場ベクトル,  $\mathbf{M}$  は永久磁石の磁化ベクトル,  $\mu_0$  は真空の透磁率である。このようにして定義された逆磁場  $B_{\text{rev}}$  は, 磁化ベクトルの方向に投影された磁場の大きさを表す。ちなみに  $B_{\text{rev}}$  が負である場所では,  $\mathbf{H}$  と  $\mathbf{M}$  は同じ方向を向いている, 言い換えると, 永久磁石には逆磁場ではなく順磁場が加わるため非常に安定である。

照射実験に利用した各サンプルにおける逆磁場  $B_{\text{rev}}$  を,  $z$  軸座標の関数として半周期分計算した結果を Fig. 5(a)~(c) に示す。計算は有限要素解析コード ANSYS (ANSYS® Electromagnetics Suite, Release 17.1.0, ANSYS, Inc) を用いて行った。ちなみに Fig. 3 とは異なり, 永久磁石の中心を  $z$  軸の原点として定義しているのに注意されたい。また, ハイブリッド型(a)における  $|z| > 4$  mm は磁極の領域であり永久磁石は存在しないので,  $B_{\text{rev}}$  は定義されずデータは示されていない。各グラフに2つのデータ (i), (ii) が示されているが, それぞれ, (i) 照射実験における電子ビームの入射位置 (内部表面から 6 mm 下方), (ii) 内部表面上, での計算結果である。参考のため, 各サンプルにおける永久磁石 (及び磁極) の断面図と磁化ベクトル, 及び条件 (i), (ii) における計算位置を実線及び破線で示す。

まず, 照射実験条件における逆磁場  $B_{\text{rev}}$  を議論するため, 条件 (i) における計算値を比較する。ハイブリッド型では, 全ての永久磁石に様に  $B_{\text{rev}} \sim 1$  T 程度の逆磁場

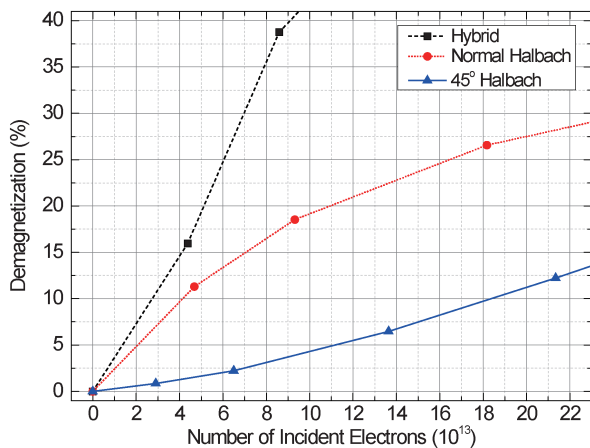


Fig. 4 (Color online) Demagnetization of each undulator sample evaluated as the variation of the peak magnetic field, plotted as a function of the number of incident electrons. Reproduced from reference<sup>11</sup>.

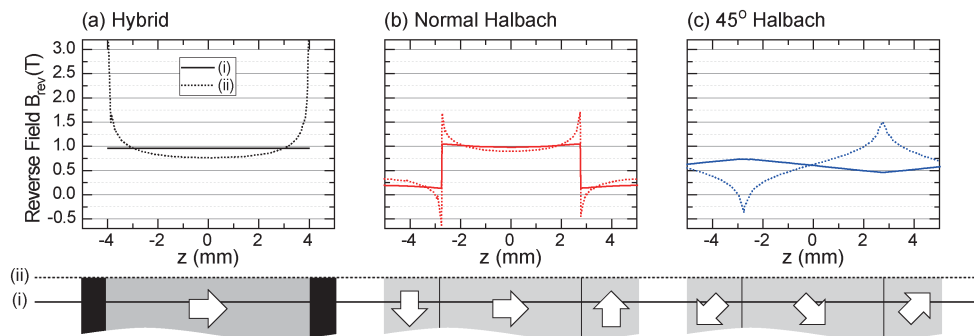


Fig. 5 (Color online) Profiles of  $B_{\text{rev}}$  inside the permanent magnet (PM) blocks of (a) the hybrid, (b) normal Halbach, and (c) 45° Halbach arrays, calculated along the  $z$  axis at the vertical positions (i) 6 mm below the surface and (ii) on the surface of each array. The cross sections of PM blocks are shown at the bottom with the magnetization vectors. Reproduced from reference<sup>11</sup>.

が、また通常ハルバック型では、 $|z| < 2.75 \text{ mm}$  の領域を占める平行磁化磁石に同程度の逆磁場が加わる。一方、 $45^\circ$ ハルバック型では、逆磁場の強度という観点において磁石ブロックは区別されず、全てに同等の逆磁場 $0.5 \text{ T} < B_{\text{rev}} < 0.75 \text{ T}$  が加わる。この逆磁場強度の相違が、照射実験で確認された減磁率の顕著な相違を生む要因であり、放射線減磁が逆磁場に対して高度に非線形な過程であることを裏付けている。

上記は照射実験条件での逆磁場の比較であるが、電子ビームのハローが永久磁石ブロックの内部表面をかすめる、より実際的な状況では、条件(ii)における計算値の比較が重要である。この場合でも $45^\circ$ ハルバック磁気回路の逆磁場は従来型磁気回路のそれよりも低く、放射線耐性に優れることが期待される。

## 6. おわりに

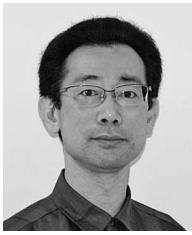
本稿では、アンジュレータ磁気回路の放射線耐性を向上させるための新たな手法を紹介し、その有効性を検証するために行った実験の結果について報告した。放射線による減磁の抑制は、高価な装置であるアンジュレータを長期間にわたって健全に運用するための重要な課題であり、一般的には(1)永久磁石に入射する電子数の軽減、及び(2)放射線耐性の高い永久磁石材料の採用、などの対策が取られる。このため、最小ギャップや磁石材料の選定などに一定の制限が課されることが多く、結果として到達可能なアンジュレータ性能を制限している。本稿で報告した $45^\circ$ ハルバック磁気回路は、これらの手法とは全く異なる、(3)磁気回路の放射線耐性強化、という新たな手法を可能にする。これにより、上記(1)及び(2)に関する制限が緩和され、アンジュレータの高性能化につながることを期待される。

### 参考文献

- 1) T. Bizen, T. Tanaka, Y. Asano *et al.*: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **467-468**, Part 1, 185 (2001).
- 2) T. Bizen, Y. Asano, T. Hara *et al.*: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **515**, 850 (2003).
- 3) M. Petra, P. D. Hartog, E. Moog *et al.*: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **507**, 422 (2003).
- 4) J. Pflueger, B. Faatz, M. Tischer *et al.*: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **507**, 186 (2003).
- 5) S. Sasaki, M. Petra, I. B. Vasserman *et al.*: Proceedings of PAC2005, Knoxville, Tennessee, May 16-20, 2005, 4126-4128 (Geneva, Switzerland: JACoW).
- 6) T. Bizen, Y. Asano, X.-M. Marechal *et al.*: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **574**, 401 (2007).
- 7) J. Skupin, Y. Li, J. P. Ueffer *et al.*: Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008, 2308-2310 (Geneva, Switzerland: JACoW).
- 8) P. Vagin, O. Bilani, A. Schops *et al.*: Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 2019-2021 (Geneva, Switzerland: JACoW).
- 9) R. Qiu, H.-S. Lee, J. Li *et al.*: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **594**, 111 (2008).
- 10) T. Bizen, R. Kinjo, T. Hasegawa *et al.*: Scientific Reports **6**, 37937 (2016).
- 11) T. Bizen, R. Kinjo and T. Tanaka: Phys. Rev. Lett. **121**, 124801 (2018).
- 12) K. Halbach: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **187**, 109 (1981).
- 13) K. Halbach: J. Phys. Colloques **44**, C1-211 (1983).
- 14) T. Shintake, H. Tanaka, T. Hara *et al.*: Nature Photonics **2**, 555 (2008).
- 15) T. Tanaka, K. Shirasawa, T. Seike *et al.*: AIP Conference Proceedings **705**, 227 (2004).
- 16) M. Smolyakov: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **467-468**, 206 (2001).

1) T. Bizen, T. Tanaka, Y. Asano *et al.*: Nuclear Instruments

## 著者紹介

**備前輝彦**

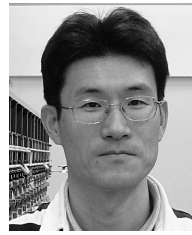
公益財団法人高輝度光科学研究センター  
主幹研究員

E-mail: bizen@spring8.or.jp

専門：加速器真空工学

**【略歴】**

1986年京都大学大学院工学研究科修士課程冶金学科修了。1986年石川島播磨重工業。1997年より高輝度光科学研究センター。2009年京都大学より博士（工学）取得。現在に至る。

**田中隆次**

国立研究開発法人理化学研究所 グループ  
ディレクター

E-mail: ztanaka@spring8.or.jp

専門：挿入光源，ビーム物理

**【略歴】**

1996年9月京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻博士課程修了。博士（工学）。1996年10月高輝度光科学研究センター研究員，1999年4月理化学研究所研究員，2012年同チームリーダー，2013年同主任研究員，2018年より現職。

**金城良太**

国立研究開発法人理化学研究所 研究員

E-mail: r-kinjo@spring8.or.jp

専門：挿入光源，ビーム物理

**【略歴】**

2013年4月京都大学大学院エネルギー科学研究科博士課程退学。博士（エネルギー科学）（京都大学）。2014年4月理化学研究所特別研究員。2015年より現職。

## Undulator magnetic circuit with magnetization vectors tilted at 45 degrees to enhance the radiation resistance

**Teruhiko BIZEN**

Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Koto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan

**Ryota KINJO**

RIKEN SPring-8 Center, Koto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

**Takashi TANAKA**

RIKEN SPring-8 Center, Koto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

**Abstract** The demagnetization of undulator magnets is always a concern in synchrotron radiation and x-ray free electron laser facilities. We present a simple scheme to enhance the radiation resistance of permanent magnets in undulators, which is based on tilting the magnetization vectors of individual magnets at 45 degrees. We also report the results of demonstration experiments performed at the SPring-8 booster synchrotron to reveal its effectiveness, in which the radiation resistance with the proposed scheme has been found to be better than those of the conventional undulators by nearly one order of magnitude.