

# 挿入光源用永久磁石 ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) の放射線減磁について

備前輝彦  
北村英男

財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

独立行政法人理化学研究所播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

## 要旨

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  永久磁石は、その優れた磁気特性のため、挿入光源用磁石として多く利用されている。すなわち高保磁力や大きな最大磁気エネルギー積 [(BH)max] が、小さく薄い挿入光源用磁石の製作を可能としている。しかし、この磁石は強い放射線によって磁力を減少させることが知られている。この放射線による「減磁」は色々な要因に左右される。本稿は、我々の実験結果及び他の論文からこれら要因を抽出し紹介することを試みた。

## 1. はじめに

### 1.1 永久磁石の減磁

永久磁石の磁力は不変のものではなく、環境などの原因により変化することが知られている。磁石が磁力を減少させたり、失ったりすることを「減磁」といい、これは「可逆減磁」と「不可逆減磁」に分けられる。加速器の挿入光源によく使われる  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (ネオジウム-鉄-ボロン) 焼結磁石の場合、ある範囲での温度変化に対しては可逆的な磁場変化が起こり、1度の温度上昇で約0.1%磁束が減少する。一方、不可逆減磁のうち「再着磁して元に戻るもの」には、高温、外部磁場、経年変化によるものが、「再着磁しても元に戻らないもの」には腐食、組織変化などによるものがある。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  磁石は強い放射線によっても不可逆減磁が起きるが、再着磁すれば磁束が元に戻ると報告されている<sup>1-5)</sup>。

### 1.2 挿入光源の永久磁石において、なぜ減磁が問題

#### となるか

挿入光源には多数の永久磁石が使用されている。これらの磁石は同じ製造ロットであっても、それぞれわずかに磁場の強度、磁化方向にばらつきがある。このため、挿入光源磁石列は磁場計測を繰り返しながら磁石の配列を入れ替えて、挿入光源部がリングの電子軌道に影響を与えないような最適化が行われている。先に述べたように、温度変化による磁石の磁束変化は約-0.1%/°C程度あるが、室温変化のように温度変化が全ての磁石において均一に起こる場合は、磁場変化も全ての磁石で同程度に起こるため磁石列全体としての電子軌道への影響は少ない。ところが、放射線が引き起こす磁場変化は不均一に起こるので、電子軌道に及ぼす影響は大きくなる。

### 1.3 放射線減磁のトラブル例

稼働している挿入光源の永久磁石が放射線減磁した例を示す。フランスの European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) においては2台の挿入光源で減磁が起こっ

た。これは、missteeringにより電子ビームが真空槽の壁に照射されたためであると報告されている<sup>6)</sup>。また、アメリカの Advanced Photon Source (APS) では2001-2003年の運転期間中、3台の挿入光源が減磁を起こし挿入光源放射光の三次光の強度が変化した。これらの挿入光源部では異常に高い放射線が検出されたが、これは真空槽がビームアパーチャーの狭いものに交換されたことと、新たに開始されたトップアップ運転におけるビーム調整の最適化が不十分であったことが原因であると報告されている<sup>7)</sup>。また、国内においては日本大学のFELにおいて報告がある<sup>8)</sup>。これらの例は事故や異常な放射線発生により減磁が起こったものである。放射光施設の蓄積リングに設置された挿入光源が、通常の運転下で減磁を起こした事例はないようだが、今後、アンジュレータのミニギャップ化、トップアップ運転、あるいはFEL等での使用が進むにつれ、運転の方法、インターロックの仕組みによっては、高エネルギーの電子が連続して直接磁石へ、あるいは、磁石近くの部品、真空槽に誤って照射され、その結果発生したγ線、プロトン、中性子、光子等の放射線に磁石が長期間曝される場合も起こりうると思われる。すなわち、永久磁石の放射線減磁は放射光発生装置の進歩につれ、物性的な興味もさることながら工学的にも切実な問題となってきていると言える。

### 1.4 過去の研究例

過去、永久磁石の放射線減磁については、Table 1に示すように多くの研究が行われてきた。Xavielらは、複数の論文の実験結果のまとめを行っている<sup>28)</sup>。しかし、これらの結果を比較することは困難を伴う。なぜならば、減磁に影響を及ぼす因子には後に述べるように様々なものがあるためである。我々も2000年から2003年にかけて、韓国浦項加速器研究所と共同研究を行い、磁石の放射線減磁に影響を及ぼす因子を調査し多くの知見を得た。本稿では、我々の試験結果や他の論文内容をまじえながら  $\text{Nd}_2$

Table 1 List of papers classified by materials and radiation

	Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub> or SmCo <sub>5</sub>
$\gamma$	[3], [9], [10], [11], [12], [27]	[3], [9], [10], [11], [27]
proton	[13], [2], [14], [15], [16], [17], [4], [5]	[15], [16], [18], [17]
thermal neutron	[12]	
fast neutron	[19], [1], [12]	[20]
deuteron	[9], [27]	[9], [27]
electron (bremsstrahlung)	[6], [3], [21], [10], [23], [24], [25], [26]	[6], [3], [21], [10], [23], [26]
proton + $\gamma$ + neutron	[22]	

Fe<sub>14</sub>B 焼結磁石の放射線減磁について、挿入光源に使用する立場から紹介する。

## 2. 試験方法

当初、我々の興味は蓄積リングで事故によりビームがダンプし、挿入光源の磁石を直撃した場合のような減磁が起きるかであった。SPring-8の標準型挿入光源は、磁石列が真空槽の中にある真空封止型<sup>29)</sup>である。このタイプにおいては、軌道はずれた電子は磁石端部にある銅製の形状変換部取付ブロックを通して磁石を直撃すると予想された(他の多くの施設の挿入光源ではこれと異なり、まずステンレス製の真空槽の壁を貫通した後、その外にある磁石に放射線が照射される)。よって、電子を厚さ40 mmの銅ブロックを通して磁石中心に照射することとした(磁石全体に照射しているわけではない)。電子線照射は、韓国浦項加速器研究所のライナックを使用して行ったが、ビームエネルギーは2.0 GeVである。照射した電子数は、銅ブロック上流に設置したカレントモニタにより計数した。また、後述するように磁石形状は減磁に大きな影響を与えるので、標準型実機と同じ形状の磁石(46×12×8 mm)を用いた。電子軌道に直接影響を与える磁場の変化は、磁石全体の変化よりも電子軌道に近い場所の磁場変化(すなわち磁石中心の磁場変化)であるので、我々は磁石全体のフラックス変化を計測するのではなく、ホール素子を用いて電子照射点付近の磁場分布の変化を計測した。試験方法の詳細は、文献24)を参照されたい。

## 3. 放射線減磁に影響を与える因子

### 3.1 磁石形状(パーミアンス係数)

放射線減磁も熱減磁や外部磁場による減磁と同じように、磁石の寸法形状つまりパーミアンス係数によって減磁の仕方が大きく異なる。すなわちパーミアンス係数が大きいほど減磁は起こりにくい<sup>4,15,17,19,23)</sup>。また一つの磁石上においても場所によってパーミアンス係数は異なる。磁石

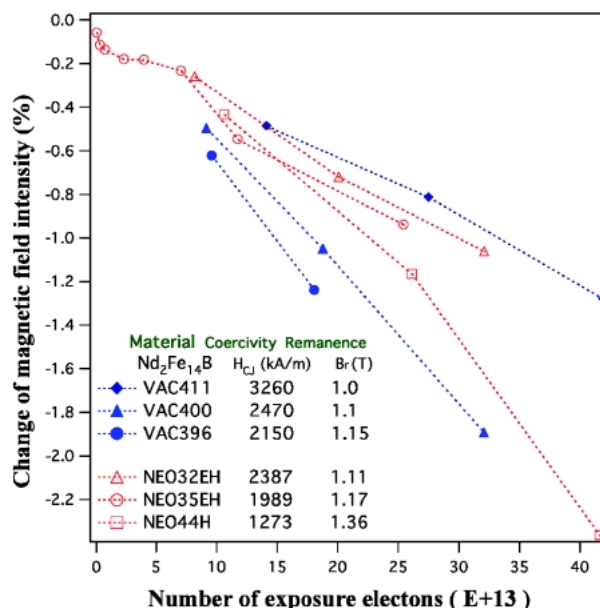


Figure 1. Magnets with high coercivity show high resistance to the radiation.

全体に放射線を照射した場合、磁石各位置のパーミアンス係数と減磁分布の関係を Zeller らが報告している<sup>27)</sup>。これらのことより、挿入光源の磁石列でも動作点が高くなるようにデザインすることは放射線減磁対策の上からも重要である。挿入光源磁石列のパーミアンス係数分布の解析については Xavier らの報告がある<sup>28)</sup>。

### 3.2 外部磁場

J. R. Cost らは、SmCo(サマリウム-コバルト)磁石について外部に反対磁場が存在した場合、放射線減磁が大きくなると報告している<sup>20)</sup>。これは、先のパーミアンス係数、動作点に関わる問題と同じことであるので Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 磁石についても同様のことが起こると予測される。

### 3.3 保磁力

保磁力とは、飽和まで磁化した磁石に逆方向の磁場をかけていき磁化を0にするのに必要な磁場の値のことである。放射線減磁と保磁力の関係は複雑であるが、保磁力が大きい Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 磁石ほど放射線減磁が起こりにくいことは、多くの一致するところである<sup>2,4,15,17,22,23)</sup>。しかし、同程度の保磁力であっても製造メーカーが異なれば、減磁の仕方も異なってしまうことが知られている<sup>19,21,23)</sup>。Fig. 1に我々の試験結果を示す<sup>23)</sup>。図中 VAC は VACUUMS-CHMELZE 社製、NEO は住友特殊金属社製の磁石を表している。

ところで Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 磁石の保磁力は、実は色々な要因に左右されているのである。例えば、Dy(ジスプロシウム)等の添加物<sup>30)</sup>、析出相、粒径、磁化方向のばらつき<sup>31)</sup>、これらに関係して焼結方法、時効処理などの製造工程での方法、また磁石の酸化<sup>32)</sup>、応力<sup>33,34)</sup>、などによって左右され、おそらく内部の格子欠陥や転位密度によっても影響さ

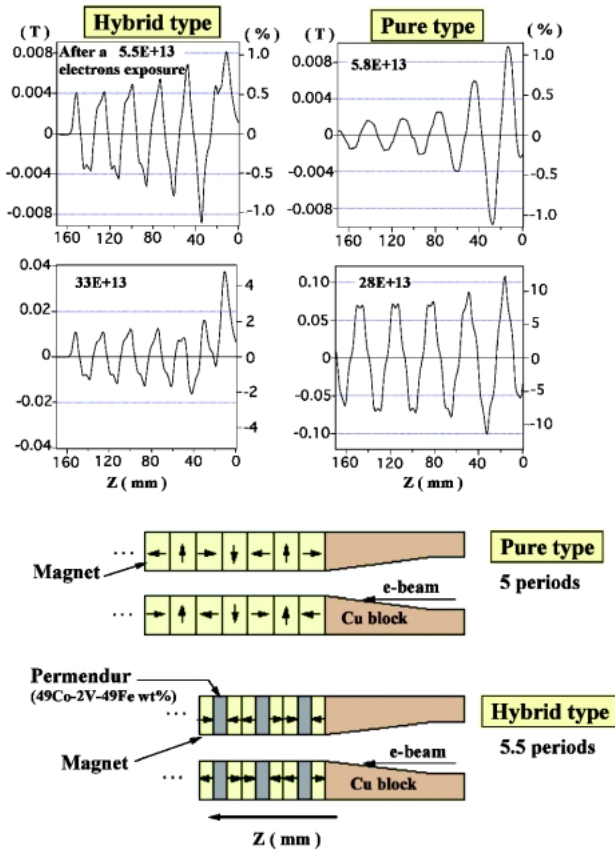


Figure 2. Distribution of the magnetic field change on the undulator model.

れると思われる。このように、保磁力は様々な要因によって影響を受けるため、同程度の保磁力であっても製造メーカーが異なれば保磁力を高めている要因が異なるので、放射線に対する減磁の仕方も異なるのだと考えられる。

### 3.4 磁石列の放射線減磁

複数の磁石を並べて放射線照射を行った場合は、複雑な減磁を起こすことが知られているが<sup>6,19)</sup>、挿入光源における磁石も、磁化方向の異なる磁石を組み合わせた列の形で使用されている。**Fig. 2** にアンジュレータを模擬した磁石列の減磁を示す<sup>23)</sup>。ピュアタイプとハイブリッドタイプでは減磁の仕方が異なっているが、いずれの場合も照射側の減磁が大きいことが分かる。また、単一の磁石よりも磁石列の方が放射線に対する影響は大きくなる。この理由としては、隣の磁石から磁場を受けるため動作点が変わることや、磁石のボリュームが大きくなるので発生する二次粒子が多くなる等の理由が考えられる。

### 3.5 電子線シールドは有効か

電子線が磁石に当たるのを防ぐため、たとえば磁石の前に原子番号の大きな金属のスリット等を置くことは効果があるだろうか。放射線の種類により減磁の仕方は異なる。例えばγ線<sup>3,12)</sup>、熱中性子<sup>12)</sup>はあまり影響を与えないが、速中性子、プロトン等は影響が大きい。高エネルギー電子

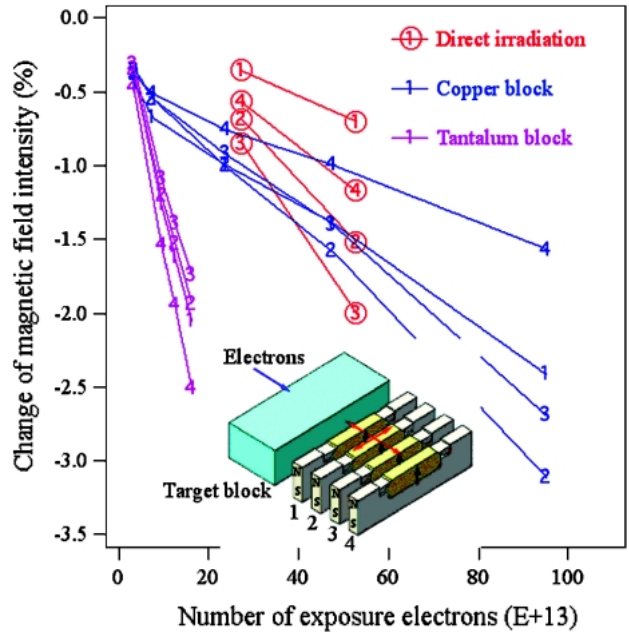


Figure 3. Electrons were injected to the magnet array through the target block. The radiation from the heavy metal target causes large demagnetization.

が金属に入射した場合、電子は様々な二次放射線を発生させる。シールド材金属の原子番号が大きいほど発生する制動放射線量が増加するため、よほどシールド材の厚さが厚くないかぎり、かえって減磁は大きくなってしまふ。**Fig. 3** に照射ブロックの材質による減磁の違いを示す<sup>23)</sup>。

しかし、磁石上の磁場変化分布を調べると減磁は電子の入射軸方向に沿って起こっており、全方向に大きく広がっているわけではない。このことより、スリット等のシールドを設ける場合はスリットを通過した後のビーム軌道を曲げ、スリットと磁石が同一直線上に並ばないような工夫をすることが必要だろう。

## 4. Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 磁石の耐放射線性を向上させる方法はあるか

### 4.1 熱処理効果<sup>24,25)</sup>

高い保磁力の磁石を使うことが、放射線減磁に対して効果があることはすでに述べたが、着磁後の磁石に熱処理を施すことも効果がある (**Fig. 4**)。熱処理を施さない磁石は照射量が増すと、ある時点でなだれを起こしたかのように急激な減磁を起こす。これに対して熱処理したものは、照射量に比例した減少を示している。減磁の起こりにくさは、「ある磁区での磁化反転の起こりにくさ」と、「周囲への連鎖反動的な磁化反転の広がりにくさ」で決まるが、熱処理は、急激な磁化反転の伝播を抑える働きがあるようである。

### 4.2 高保磁力磁石を熱処理するとどうなるか<sup>26)</sup>

極めて保磁力 (Hcj) の大きな Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 磁石 (NE-

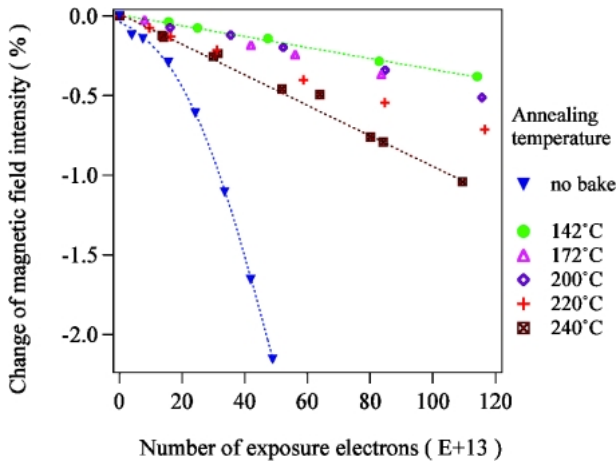


Figure 4. Annealed magnets shows high resistance to the radiation.

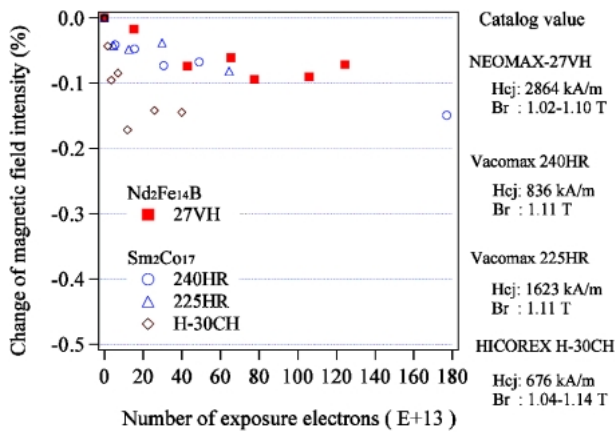


Figure 5. Annealed  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  magnet with high coercivity shows same resistance as  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  magnets.

OMAX27VH)に着磁後熱処理を施した場合の実験結果をFig. 5に示す。放射線に強いことが知られている $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁石の放射線減磁曲線も合わせてグラフに示す。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁石であっても、高保磁力のものを選択し着磁後熱処理を施すと、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁石と同等の耐放射線性を示すことが分かる。

#### 4.3 SPring8の挿入光源磁石について

ところでESRFやAPSの挿入光源とは異なりSPring-8での減磁例は見いだされてはいない。この理由の一つはSPring-8では真空封止型挿入光源の $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 永久磁石に、耐熱性のあるタイプが使用されていることである。真空封止型挿入光源の磁石は超高真空中で使用するため、真空脱ガスを目的として120度でベーキングが行われる。このベーキングによる熱減磁を防ぐため、磁石は挿入光源に取り付け磁場調整が行われる前に、真空炉の中でベーキング温度より高温の140度で24時間保持する処理が行われている。すなわち、高保磁力(耐熱)磁石の選択、着磁後の熱処理が行われ、偶然にも耐放射線磁石としての条件を満

足していたとすることができる。

#### 5. 放射線減磁のメカニズム

O.-P. Kähkönenらは照射点での局所的なキュリー温度以上の温度上昇と逆磁区の核生成が放射線減磁の原因であるとした<sup>14)</sup>。しかし、K. Makitaらは主相のキュリー温度が等しくても保磁力が異なれば減磁の仕方が異なることを示し、局所的な温度上昇はキュリー点を越えないとし、別の要因を示唆した<sup>22)</sup>。このように、放射線減磁のメカニズムについては、いまだ決定的な解釈は定まっていない。

#### 6. 将来に向けて(低温利用)

磁石の保磁力を高めるために、多くの場合Dyの添加量を増やすことが行われるが、Dyの磁気モーメントはFeと逆のため飽和磁化が下がってしまい、残留磁束密度が大きいという $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁石の優れた特質の一つが損なわれてしまう。保磁力、残留磁束密度がともに大きく、しかも耐放射線性も高いという欲張った磁石は手に入らないものだろうか。磁石のカタログをよく見ると $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ は温度依存性の大きい磁石である。保磁力も残留磁束密度も温度が高くなると小さくなるという欠点を持つが、このことは逆に温度を下げると両者とも向上するという長所を持つことである。O.-P. Kähkönenらは、極低温で放射線減磁の試験を行い耐放射線性が著しく向上することを見出した<sup>2,13,14)</sup>。このことは、低温での磁石の利用が耐放射線に関する新しい可能性を開く鍵であるということを示している。

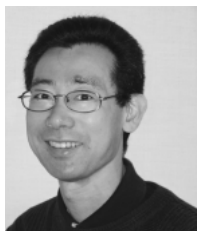
SPring-8では上記のアイデアに基づき、永久磁石列の温度を液体窒素温度付近まで下げて運転する低温アンジュレータの開発が始まった。この低温アンジュレータは現在の標準型真空封止アンジュレータより挿入光源磁場強度が30~50%向上するにもかかわらず、磁石保磁力についても標準型を上回るため耐放射線性も同時に向上することが期待されている<sup>35)</sup>。

#### 参考文献

- 1) J. R. Cost, R. D. Brown, A. L. Giorgi and J. T. Stanley: *IEEE Trans. Magn.* **24**, 2016 (1988).
- 2) M. Talvitie, O.-P. Kähkönen, S. Mäkinen, H. Rajainmäki, M. Manninen and V. Lindroos: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **102**, 323 (1991).
- 3) S. Okuda, K. Ohashi and N. Kobayashi: *Nucl. Instr. and Meth. B* **94**, 227, (1994).
- 4) Y. Ito, K. Yasuda, R. Ishigami, M. Sasase, S. Hatori, K. Ohashi, S. Tanaka and A. Yamamoto: *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **191**, 530 (2002).
- 5) Y. Ito, K. Yasuda, M. Sasase, R. Ishigami, S. Hatori, K. Ohashi and S. Tanaka: *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **209**, 362 (2003).
- 6) P. Colomp, T. Oddolay and P. Ellaeume: ESRF/MACH/93-09, (1993).
- 7) M. Petra, P. K. Den Hartog, E. R. Moog, S. Sasaki, N. Sereno and I. B. Vasserman: *Nucl. Instr. and Meth. A* **507**,

- 422 (2003).
- 8) I. Sato, I. Kawakami, K. Sato, Y. Matsubara, K. Hayakawa, T. Tanaka, Y. Hayakawa, H. Nakazawa, K. Yokoyama, K. Kanno, T. Sakai, K. Nakahara, S. Amani, S. Fukuda, H. Kobayashi, A. Enomoto, S. Ohsawa, T. Shidara, S. Yamaguchi, T. Kamitani, T. Suwada, A. Yagishita, M. Kato, K. Tsuchiya, A. Iwata, M. Kawai, K. Nomaru and H. Oda: The 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako, Japan, 37 (1999)
  - 9) A. F. Zeller and J. A. Nolen: Proceedings of the Ninth International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications, Bad Soden, 157 (1987).
  - 10) T. Ikeda and S. Okuda: *Nucl. Instr and Meth in Phys. Res. A* **407**, 439 (1998).
  - 11) K. Boockmann, M. Liehr, W. Rodewald, E. Salzborn, M. Schlapp and B. Wall: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **101**, 345 (1991).
  - 12) J. Alderman, P. K. Job, R. C. Martin, C. M. Simmons and G. D. Owen: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **481**, 9 (2001).
  - 13) O.-P. Kähkönen, S. Mäkinen, M. Talvitie, H. Rajainmäki and M. Manninen: *Europhys. Lett.* **12**(5), 413 (1990)
  - 14) O.-P. Kähkönen, S. Mäkinen, M. Talvitie and M. Manninen: *J. Phys. Condens. Matter* **4**, 1007 (1992).
  - 15) Y. Ito, K. Yasuda, R. Ishigami, S. Hatori, O. Okada, K. Ohashi and S. Tanaka: *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **183**, 323 (2001).
  - 16) E. W. Blackmore: *IEEE Transaction on Nuclear Science Vol. NS-32, No. 5*, 3669 (1985).
  - 17) Y. Ito, K. Yasuda, R. Ishigami, S. Hatori, O. Okada, K. Ohashi and S. Tanaka: *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **183**, 323 (2001).
  - 18) F. Coninckx, W. Naegele, M. Reinharz, H. Schoenbacher and P. Seraphin: CERN/SPS 83-1 (EBS) TIS-RP/IR/83-07, (1983).
  - 19) R. D. Brown and J. R. Cost: *IEEE Trans. Magn.* **25**, 3117 (1989).
  - 20) J. R. Cost and R. D. Brown: *Metallurgical Transactions A* **21A**, 1817 (1990).
  - 21) H. B. Luna, X. K. Maruyama, N. J. Colella, J. S. Hobbs, R. S. Hornady, B. Kulke and J. V. Palomar: *Nucl. Instr. and Meth. A* **285**, 349 (1989).
  - 22) K. Makita, T. Kawakubo, E. Nakamura, E. Sugiyama and M. Aoki: Proceedings of the Annual Conference of the Magnetism Society of Japan, Osaka, 406 (2003).
  - 23) T. Bizen, T. Tanaka, Y. Asano, D. E. Kim, J. S. Bak, H. S. Lee and H. Kitamura: *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A* **467-468**, 185 (2001).
  - 24) T. Bizen, Y. Asano, T. Hara, X. Marechal, T. Seike, T. Tanaka, H. S. Lee, D. E. Kim, C. W. Chung and H. Kitamura: *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A* **515**, 850 (2003).
  - 25) T. Bizen, Y. Asano, T. Hara, X. Marechal, T. Seike, T. Tanaka, H. Kitamura, H. S. Lee, D. E. Kim and C. W. Chung: "Improvement of radiation resistance of NdFeB magnets by thermal treatment" Proceedings of the Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, San Francisco, (2003).
  - 26) T. Bizen, Y. Asano, T. Hara, X. Marechal, T. Seike, T. Tanaka, H. Kitamura, H. S. Lee, D. E. Kim and C. W. Chung: "Introduction of the high radiation resistance of undulator magnet" Proceedings of the Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, San Francisco, (2003).
  - 27) A. F. Zeller: Proceedings of the Eleventh International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications, Pittsburgh, 157 (1990).
  - 28) X.-M. Maréchal and T. Shintake: "Radiation damages on permanent magnets: challenges for the future light sources" Proceedings of the Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, San Francisco, (2003).
  - 29) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X.-M. Marechal, S. Okada and H. Kitamura: *Journal of Synchrotron Radiation* **5**, 403 (1998).
  - 30) M. Sagawa, S. Fujimura, H. Yamamoto, Y. Matsuura and K. Hiraga: *IEEE Trans. Mag.* **MAG-20**, 1584 (1984).
  - 31) J. Fidler and T. Schrefl: *J. Appl. Phys.* **Vol. 79, No. 8**, 15 April, 5029 (1996).
  - 32) S. Heisz and G. Hilscher: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **67**, 20 (1987).
  - 33) R. Ramesh: *J. Appl. Phys.* **68**(11), 1 December, 5772 (1990).
  - 34) C. H. de Groot and K. de Kort: *J. Appl. Phys.* **Vol. 85**, No. 12, 15 June, 8312 (1990).
  - 35) T. Hara, T. Tanaka, H. Kitamura, T. Bizen, X. Marechal, T. Seike, T. Koda and Y. Matsuura: Presentation on the 2nd Meeting of Information Exchange on Accelerator Science and Technology between Photon Factory and SPring-8, Hyogo, (2004).

## 著者紹介



### 備前輝彦

財団法人高輝度光科学研究センター

E-mail: bizen@spring8.or.jp

趣味：サンセット・ウォッチング

空が淡い紫色に染まる一瞬，自分の中の時の流れが，はてしなく引き延ばされるような感覚にとらわれます。

### 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にて分光器，加速器真空系の開発設計に従事。1997年退職  
1997年より財団法人高輝度光科学研究センター，光源・基幹チャンネル Gr にて挿入光源に携わる。



### 北村英男

独立行政法人理化学研究所播磨研究所

財団法人高輝度光科学研究センター

E-mail: kitamura@spring8.or.jp

### 略歴：

1975年京都大学大学院理学研究科物理学第一専攻博士課程終了。理学博士。  
1976年東京大学物性研究所助手。  
1980年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助手  
1985年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助教授  
1990年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設教授  
1993年理化学研究所主任研究員（兼務）  
1997年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設退職  
1997年理化学研究所主任研究員，現在に至る。  
1985年加速器科学奨励賞。1991年仁科記念賞。  
日本放射光学会評議員。韓国 Pohang 放射光施設国際諮問委員。上海放射光施設国際諮問委員。

## Radiation-induced Demagnetization of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Magnets for Undulators

Teruhiko BIZEN JASRI/SPring-8 Kouto 1-1-1, Sayogun, Hyogo, 679-5198, JAPAN  
Hideo KITAMURA RIKEN/SPring-8 Kouto 1-1-1, Sayogun, Hyogo, 679-5148, JAPAN  
JASRI/SPring-8 Kouto 1-1-1, Sayogun, Hyogo, 679-5198, JAPAN

### Abstract

The properties of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  permanent magnets are highly desirable for use in insertion devices. High intrinsic coercivity, and high maximum magnetic energy product  $[(\text{BH})_{\text{max}}]$  realize to make a small and thin magnet. However, the radiation sensitivity of the magnets would be concern when they are used in a strong radiation environment. This sensitivity is influenced by many factors. In this report, our experimental results of the radiation-induced demagnetization and outline of other papers are introduced.