

RADIATION-INDUCED DEMAGNETIZATION MODEL FOR UNDULATOR MAGNETS

Teruhiko Bizen^{1,A)}, Yoshihiro Asano^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} XFEL/RIKEN

SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

We propose new models of the radiation-induced demagnetization by a GeV electron irradiation. First model is named “widespread instability model”. Instability of the magnetic spins caused by the energy transfer from the bremsstrahlung electrons, positrons and γ -ray decreases the coercivity and the anisotropy of the magnet grains. Inverse domain nucleus is formed where the anisotropy is the lowest, and sequentially the domain wall expands. The effect of the thermal stabilization technique against the radiation resistance is well explained by this model. Second model is named “quasi-thermal-spike model”. High-energy photoneutrons interact with the atoms in elastic and inelastic scattering. Knock-on atom interacts with the atom of the magnet and releases its energy in a nano-size area. This energy transfer and heat generation is similar to the thermal-spike mechanism. Intense magnetic properties change in an energy release point leads the nucleation of the inverse domain. These nuclei can be formed both in high coercivity and low coercivity region. This model can well explain the radiation-induced demagnetization of the heat resistant magnets, the low temperature irradiation, and the electron energy and target dependence.

放射光挿入光源用永久磁石の放射線減磁に関するモデル

1. はじめに

放射線による永久磁石の減磁（磁場劣化）は、放射光施設やX線自由電子レーザーで使用される挿入光源用永久磁石の精密に調整された磁場を変化させ、放射光、ビーム軌道、レーザー発振に影響を与える。しかし、放射線減磁のメカニズムを十分に説明するモデルは未だ構築されておらず、防御方法の検討も困難である。本発表では、実験で得られた種々の放射線減磁現象を説明できる新しいモデルを提案する^[1]。

2. 放射線減磁モデル

高エネルギー電子が物質に照射された場合のエネルギー移動には、電磁カスケードにより発生した光子、電子、陽電子などが広い範囲で相互作用を起こす場合と高エネルギー光中性子が物質の原子と相互作用する、はじき出しのように原子サイズでエネルギーの移動が起こる場合がある。そこで、エネルギー移動の違いにより、「広域エネルギー吸収放射線減磁機構 Widespread instability model」（以下、広域機構）と「微小領域エネルギー放出放射線減磁機構 Quasi-thermal-spike model」（以下、微小領域機構）の二つの機構が複合して起こるモデルを提案する。

2.1 広域エネルギー吸収放射線減磁機構

放射線から物質にエネルギーが付与される過程は、

放射線による物質の電離・励起にほかならない。磁石原子の電離・励起、これに伴う温度上昇が起こると、広い範囲で磁石スピンの乱れ、結晶粒全体の磁化や保磁力が低下する。この低下に伴い、磁気異方性の最も小さな粒界や欠陥から磁化反転核が発生し、核の反転磁壁が拡大することで反転領域が粒全体に広がる磁化反転による減磁が起こる。この放射線が起こす磁石スピンの乱れによる一連の減磁現象は、熱エネルギーでスピンの乱れ減磁が起こる熱減磁に類似している。広域機構は、放射線減磁と熱的なスピンの乱れで起こる減磁現象の関係を調べることで確認することができる。Fig. 1に広域機構の模式図を示す。

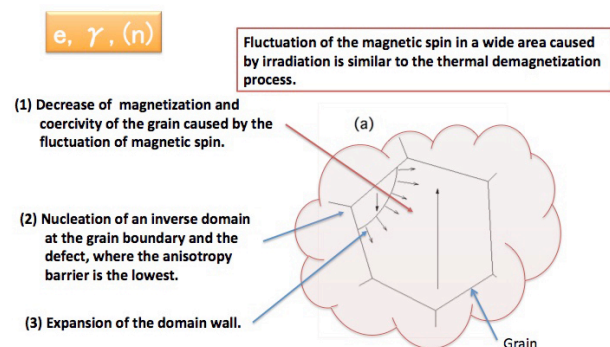


Fig. 1 Widespread instability model. Energy of e-, e+ and γ is transferred to the magnet atoms as ionization, excitation and a temperature rise in a long range. This causes the instability of magnetic spin wider than the grain size.

¹ E-mail: bizen@spring8.or.jp

2.2 微小領域エネルギー放出放射線減磁機構

高エネルギー中性子と相互作用し、エネルギーを得て格子位置からはじき出された原子は熱スパイク^[2]を起こす場合がある (Fig. 2)。はじき出された原子

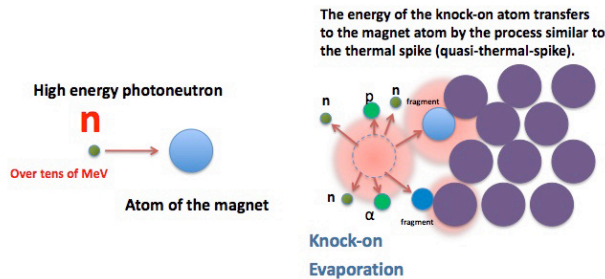


Fig. 2 The high-energy photoneutron interacts with an atom of the magnet in elastic and inelastic scattering. The energy transfer to the atomic size region generates very high temperature.

が物質の中で減速するとき、短い距離で大きなエネルギーを失い微小領域に高温が発生する。このときの熱的影響範囲は1 nm~10 nm径と考えられている^[3]が、これは磁化反転核とほぼ同じ大きさである。

微小領域での瞬間的なエネルギー放出が起こす熱スパイク的な高温の発生や核変化により、エネルギーが放出された微小領域を中心に急激な磁気的変化が生じ、磁化反転核が生成される (Fig. 3)。

広域機構と異なり、磁化反転核は磁気異方性（保磁力）の小さな粒界だけでなく、通常磁化反転核が

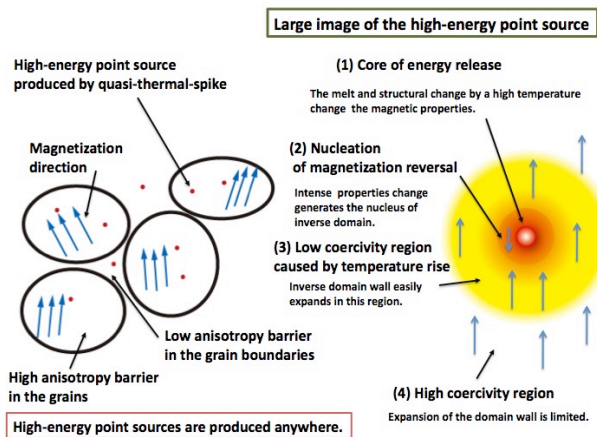


Fig. 3 High-energy release point produced by the quasi-thermal-spike is made anywhere in the magnet independently of the anisotropy. This instantaneous large energy transfer generates the melted core or the structural change. The intense magnetic change in the core causes the instability of the magnetic spin around the core and produces the nucleus of inverse magnetization. Low coercivity region is also generated around the core. The inverse domain wall of the nuclei easily expands in this region, but this expansion is limited when it enters into the high coercivity region.

発生しない保磁力の大きな粒内でも発生する。つまり、微小領域機構では、微小領域に大きなエネルギーが発生することで反転核が生じるため、広域機構で反転核が発生せず放射線減磁が起こらない条件でも、放射線減磁が発生する。しかし、微小領域機構でも磁化反転核周囲の保磁力が十分大きな場合は、反転磁壁が広がりにくいいため磁化反転が進まず、放射線減磁が起こりにくい場合がある (Fig. 4)。

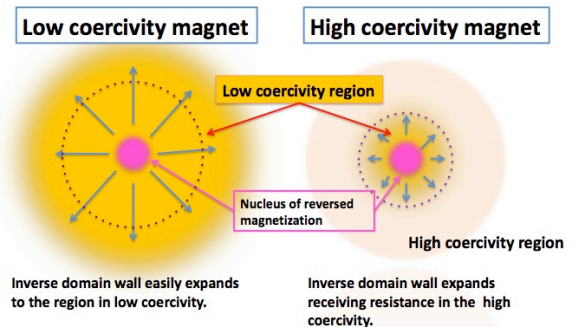


Fig. 4 Temperature generated by the quasi-thermal-spike is extremely high so that the nuclei are produced in any magnet. In contrast, the easiness of the expansion of the inverse domain wall depends on the properties of the magnet. In the low coercivity magnets, the domain wall expands easily and the inverse domain grows to the whole grain, consequently this leads large demagnetization. In the large coercivity magnets, the coercivity around the nucleus is so large that the domain wall can hardly expand therefore the demagnetization is small.

2.3 二つの機構により起こる放射線減磁

広域機構と微小領域機構により起こる放射線減磁過程の比較を Fig. 5 に示す。二つの機構は高エネルギー電子線照射下では同時に起こるが、放射線を受ける磁石の性質により強く影響を受ける機構が異なる。

保磁力が大きな磁石や熱減磁開始温度が高い磁石は、そうでない磁石に比べ、磁化反転を起こすのに必要なスピンの乱れを起こすためのエネルギーが大きいため、スピンの乱れで核が発生する広域機構の影響が小さくなる。このため相対的に、微小領域の磁気的変化で核が発生する微小領域機構の影響が大きくなる。一方、保磁力が小さな磁石や熱減磁開始温度が低い磁石では、磁化反転を起こすのに必要なスピンの乱れを起こすためのエネルギーが小さく、両方の機構の影響を同時に受ける。広域機構と微小領域機構は、それぞれが全くの独立した機構ではなく、お互いに影響を及ぼし合う。微小領域機構で示した微小領域で発生した高温は、やがて、時間とと

もに広範囲の温度上昇につながり、広域機構に影響を与える。広域機構で示した広範囲の保磁力低下は微小領域機構で示す反転核周囲の保磁力の低下に影響を与える。

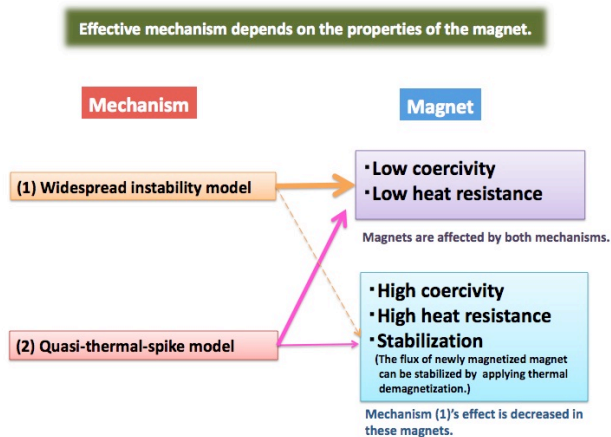


Fig. 5 Two mechanisms work under high-energy electron irradiation but effective mechanism depends on magnet properties. The magnets with low coercivity and heat sensitivity are affected by both mechanisms. In contrast, the effect by the widespread instability model becomes small in the magnets of the high coercivity, the heat resistant, and the stabilizing treatment.

3. 放射線減磁モデルと実験結果

3.1 安定化処理と放射線減磁

高温で使用される磁石は、熱ゆらぎによる経時変化を起こしにくくするために、熱や逆磁場によりあらかじめ減磁させる安定化処理が施される。放射線減磁においても、安定化処理の効果がある^{[4][5]}ことより、熱によるスピンの乱れに類似した、放射線により起こる広い範囲のスピンの乱れ（広域機構）は、放射線減磁の原因の一つと考えられる。大きな効果が見られる安定化熱処理温度と放射線減磁の関係^[6]から、我々の行った2 GeV電子照射実験では、410～470 Kの温度に相当するスピンの乱れが起きていると推定される。

3.2 パーミアンス係数を用いた放射線による熱ゆらぎ温度の評価

放射線減磁はパーミアンス係数(Pc)に依存する^[7]。磁石メーカーのカタログにはPc、減磁曲線、温度の関係が記載されており、あるPcの磁石がその温度で減磁するかどうか（減磁曲線の屈曲点を超えているか）が判断できる。実験で用いた異なるPcの磁石で放射線減磁に大きな差が生じる、つまり屈曲点を挟

んだ配置にPcがくるのは、温度が410～450 Kのときである。

3.3 熱減磁および放射線減磁と保磁力の関係を用いた放射線による熱ゆらぎ温度の評価

熱減磁開始温度と保磁力は比例する。しかし、本実験の条件では、放射線減磁は保磁力に対し非線形に増加する^[8]。槇田の評価方法^[9]を適用すると放射線による温度は440 K付近と推定された。

このようにNd₂Fe₁₄B磁石における同一の照射条件では、3.1～3.3までの異なる方法で、ほぼ等しい温度が推定される。つまり、放射線減磁では熱による減磁に似た現象が起きている。

3.4 耐熱磁石の放射線減磁

SmCo₅、Sm₂Co₁₇希土類磁石は、Nd₂Fe₁₄Bに比べ熱的に安定しており、保磁力の温度依存性が小さく、熱減磁開始温度、キュリー温度も高い耐熱磁石であり、Nd₂Fe₁₄Bが熱減磁する温度でも減磁を起こさないものもある。しかし、放射線減磁においては、熱減磁開始温度の低いNd₂Fe₁₄Bが大きな放射線減磁を起こさない照射条件においても、熱減磁開始温度の高いSmCoの放射線減磁が観察され^[5]、Nd₂Fe₁₄BとSmCoで推定される発生温度に矛盾が起きる。

3.5 低温下で熱ゆらぎの影響が低下したときの放射線減磁

熱減磁が起こらないような低温での照射でもPr₂Fe₁₄B(90 K)、Nd₂Fe₁₄B(145 K)に放射線減磁が観察される^[10]。

3.4、3.5から、熱によるスピンの乱れに類似した、放射線により起こる広い範囲のスピンの乱れ（広域機構）だけではなく、磁石性質や環境に影響されないメカニズム（微小領域機構）による放射線減磁も同時に起きているということが推測される。

3.6 放射線減磁のエネルギー依存性

安定化処理を施し、広域機構の影響を低減したサンプルについて、放射線減磁と照射電子のエネルギー依存性^[11]、ターゲット依存性を調べ、モンテカルロ粒子輸送計算コードFLUKAの計算結果と比較した。この結果、安定化処理した磁石の放射線減磁は、吸収線量や制動放射光子による影響は小さいが、微小領域機構が仮定する高エネルギー光中性子が起こす相互作用、つまり「弾性衝突+スター密度」では、放射線減磁と良い相関を持つことがわかった^[12]。

4. まとめ

二つの機構が複合して起こる放射線減磁モデルを提案した。

第一の広域機構は以下の過程で起こる。(1) 電子、γ線等により磁石原子の電子系にエネルギーが付与

されることで電離・励起、これに伴う磁石の温度上昇などが起こり、広い範囲で磁石スピンの乱れ、結晶粒全体の磁化や保磁力が低下する。(2) 磁気異方性の小さな粒界や欠陥で磁化反転核が発生し、反転領域が広がる。この広い範囲での磁石スピンの乱れによる一連の減磁現象は、熱エネルギーでスピンの乱れ減磁が起こる熱減磁に似ており、熱減磁対策が放射線減磁に対しても有効である。

第二の微小領域機構は以下の過程で起こる。(1) 高エネルギー光中性子が磁石の原子と弾性的・非弾性的相互作用を起こし、微小領域に高エネルギーを放出する。(2) 微小領域での瞬間的なエネルギー放出が熱スパイク的な高温を発生させ、エネルギーが放出された微小領域を中心に磁気的変化が起きる。このことにより磁化反転が生じ、この領域が十分大きければ磁化反転核が生成される。(3) 磁化反転核は保磁力の小さな粒界でも、保磁力の大きな粒内でも同じように発生する。(4) 磁化反転核周囲の保磁力が十分大きな場合は、反転磁壁が広がらず磁化反転が進まない場合も起こる。(5) 微小領域機構は、高エネルギー光中性子が起こす「弾性衝突＋スター密度」と相関がある。

広域機構と微小領域機構は高エネルギー電子線照射下では複合して起こるが、磁石の性質により強く影響を受ける機構が異なる。保磁力が大きく熱減磁開始温度が高い磁石では、広域機構の影響が小さく、微小領域機構の影響が大きい。一方、保磁力が小さく熱減磁開始温度が低い磁石では、両方の影響を同時に受ける。

参考文献

- [1] T. Bizen, “放射光挿入光源用永久磁石の放射線減磁に関する研究”, Kyoto University Research Information Repository, Thesis or Dissertation, Doctoral Dissertation (Engineering), May-2009, URL: <http://hdl.handle.net/2433/81827>
- [2] F. Seitz, et al., “Displacement of Atoms during Irradiation”, Solid State Physics, 2, p.305-448, 1956
- [3] 関村直人, et al., “講座 核融合材料の照射下挙動に関するマルチスケールモデリング 1.照射損傷過程の材料モデリング”, プラズマ・核融合学会誌, Vol80(No.3), 2004, p.228-235.
- [4] T. Bizen, et al., “Baking effect for NdFeB magnets against demagnetization induced by high-energy electrons.”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 515, 2003, p. 850-852.
- [5] T. Bizen, et al., “Radiation damage in permanent magnets for ID”, Radiation Measurements, Volume 41, 2007, p. S260-S264.
- [6] T. Bizen, et al., “Improvement of radiation resistance of NdFeB magnets by thermal treatment.”, Proceedings of the Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Aug. 2003, San Francisco: American Institute of Physics, p. 171-174.
- [7] T. Bizen, et al., “Demagnetization of undulator magnets irradiated high energy electrons.”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 467-468, 2001, p. 185-189.
- [8] T. Bizen, et al., “Idea of Mechanism and Protection of Radiation Damage on Undulator Permanent Magnet.”, Proceedings of the ninth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, May 2006, Daegu, Korea: American Institute of Physics, 2007, p. 420-423.
- [9] K. Makita, et al., “Flux loss of Nd-Fe-B sintered magnets placed near a proton synchrotron.”, Journal of the Magnetic Society of Japan, 28, 2004, p. 326-329.
- [10] T. Bizen, et al., “Radiation Damage in Magnets for Undulator at Low Temperature.”, Proceedings of the ninth European Particle Accelerator Conference, July 2004, Lucerne, Switzerland. p. 2089-2091.
- [11] T. Bizen, et al., “High-energy electron irradiation of NdFeB permanent magnets: Dependence of radiation damage on the electron energy” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 574, 2007, p. 401-406.
- [12] Y. Asano et al., “Analyses of the factors for the demagnetization of permanent magnets caused by high-energy electron irradiation”, Journal of Synchrotron Radiation, 2009, p. 317-324.