

## レアアース量の少ない $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$ 化合物の磁石化の可能性を実証

—ネオジム磁石を超える磁石特性のデモ—

配布日時：2020年6月10日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 (NIMS)

東北学院大学

### 概要

1. NIMS は東北学院大学と共同で、希土類元素の含有量が少ない  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  というサマリウム鉄コバルト化合物にホウ素を添加した薄膜で、自動車用モーターなどの産業応用に十分な 1.2 テスラという高い保磁力<sup>\*1</sup>を実現することに成功しました。厚さ約 3 nm のアモルファス相が  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  粒子を均一に覆うユニークな複相ナノ構造により実現しました。薄膜によるモデル実験ですが、図 1 に示すようにサマリウム鉄系磁石がネオジム磁石を超えるポテンシャルを実証しました。
2.  $\text{CO}_2$  の排出削減にむけてグリーンテクノロジーの需要が拡大し、自動車用モーターや風力発電などに使われる高性能永久磁石の使用量が急激に増加しています。現在使われているネオジム磁石はネオジムだけでなくジスプロシウムといった希土類元素(レアアース)が使われていますが、原料の地政学的リスクが高いため、その使用に頼らない磁石の開発が求められています。そのような磁石の候補としてレアアース比の低い  $\text{SmFe}_{12}$  化合物の磁石化が試みられてきました。2017年にNIMSでは  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  化合物の磁気物性値である磁化・結晶磁気異方性・キュリー温度がネオジム磁石を凌ぐことを確認しましたが、磁石応用のために必要な特性である「保磁力」については、期待されるような高い値は得られていませんでした。
3. そこで本研究グループは、高性能ネオジム磁石では、一方向に配列したマイクロの  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  結晶を約 3 nm の厚さのアモルファス相が覆う複相構造により高い保磁力が得られることを参考に、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  化合物においても結晶粒界に第 2 相が薄く均一に形成する微細組織の開発を目指しました。今回の研究では、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  にホウ素を添加することにより、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  ナノ粒子を 3 nm の厚みのアモルファス相が均一に覆う複相組織を実現しました。その結果、従来よりも 1.4 倍高い 1.2 テスラという高保磁力が得られました。また結晶方位が一方向に配列した異方性構造を持っているため、従来の等方性材料より高い磁化も同時に実現できました。
4. 本研究は薄膜を使ったモデル実験ですが、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  の異方性複相構造で高保磁力が得られることが実証されたことで、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  化合物がネオジム磁石を超える新規磁石となる可能性が示されました。これまで異方性  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  は十分な保磁力が出せませんでしたが、本研究で確立した保磁力発現機構をバルク磁石に応用することにより、実用的な異方性  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  磁石の開発に繋がるのが期待されます。
5. 本研究は、国立研究開発法人物質・材料研究機構の H. Sepheri-Amin 主幹研究員らと東北学院大学の嶋敏之教授らのグループによって、文部科学省委託事業「元素戦略磁性材料研究拠点」において行われました。本研究成果は、Acta Materialia 誌にて 2020 年 6 月 12 日にオンライン掲載される予定です。

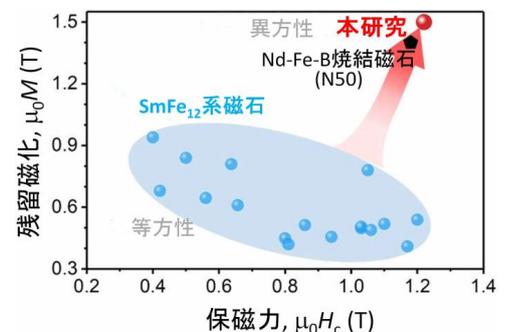


図1 本研究ではこれまでの  $\text{SmFe}_{12}$  系磁石よりもはるかに高い特性を実証しました。

## 研究の背景

ネオジム磁石は、ハードディスクドライブやスマートフォンなどの小型電子機器やエアコンなどの家電製品、医療機器のMRIなど強力な磁力が必要な用途で広く使われています。最近ではハイブリッド自動車や電気自動車の駆動用モーターや、風力発電機などで多用され、その消費量が急速に拡大しています。使用中に温度が上がる電気自動車の駆動用モーター用のネオジム磁石では、耐熱性を高めるためにネオジムだけでなくジスプロシウムという希土類元素（レアアース）が使われていますが、原料の地政学的リスクが高いことからこれらの元素に頼らない磁石の開発が求められています。

$\text{SmFe}_{12}$  化合物は、鉄に対するレアアース(Sm)の比率が低く、磁化・結晶磁気異方性・キュリー温度という磁気物性値も磁石応用に適した値であることが知られており、その化合物を使った磁石開発は長年にわたり多くの研究者によって試みられてきました。2017年にNIMSでは $\text{SmFe}_{12}$ のFeの20%をCoで置換した $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$ 化合物の磁気物性値がネオジム磁石化合物 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ を凌ぐことを確認していました。しかし、これまでこの化合物からは磁石に必要な「保磁力」という特性がでなかったために、磁石としての実用には至っていません。

## 成果の内容

現在広く使われている高性能なネオジム磁石では、一方向に配列したミクロの $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 結晶を3nm程度の厚さのアモルファス相が覆う異方性複相構造ができるために高い保磁力が得られるということが分かっていました。そこで、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$ 化合物においても結晶粒界に第2相を薄く均一に形成する微細組織を実現することを目指しました。 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$ 薄膜にホウ素(B)を添加して結晶方位をそろえた膜を成長させたところ、図1の電子顕微鏡写真でみられるように $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$ のナノ結晶が3nm程度の厚さのアモルファス相で覆われたような粒子状の組織が形成されました。電子顕微鏡試料の透過像と断面像からこの膜の微細構造は図1(b)に模式的に示されるように、柱状のナノ結晶が全て同じ向きに配向し、各結晶が薄いアモルファス相で囲まれている異方性複相組織であることがわかりました。

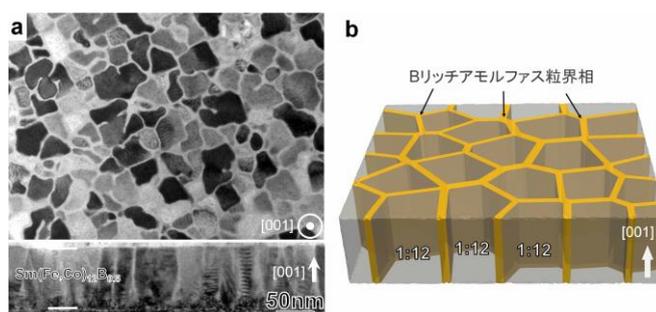


図1.  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}\text{B}_{0.5}$  薄膜の面内と断面の電子顕微鏡像と微細組織の模式図。 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  ナノ粒子を3nmの厚みのアモルファス相が均一に覆うユニークな異方性複相組織が形成されている。

図2はBを添加した $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}\text{B}_{0.5}$ 薄膜の磁化曲線を比較しています。横軸は試料を磁化させるためにかかる外部磁界の強さ、縦軸は磁化の値です。外部磁界がゼロの時の磁化の値を残留磁化<sup>\*2</sup>（磁石としてつかえる磁力の値）、反対向きに外部磁界をかけて磁化がゼロになる磁界の値（磁石が外部磁界により減磁されてしまう磁界）、つまり「保磁力」が読み取れます。優れた磁石は残留磁化、保磁力ともに高い値になります。Bを含まない試料では保磁力の値は0.1テスラ(T)と小さかったのですが、Bを添加した試料では1.2テスラという高い値を示しています。この値は、これまで報告された $\text{SmFe}_{12}$ 系異方性磁石で報告されてきた保磁力の約1.4倍の大きな値です。また $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}\text{B}_{0.5}$ 薄膜の残留

磁化は 1.5 T と、最高性能のネオジウム磁石と同等の値となっています。

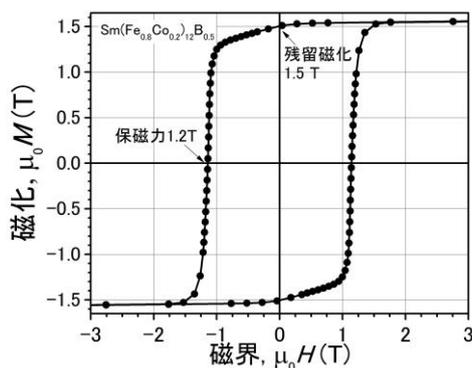


図2.  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}\text{B}_{0.5}$  薄膜の磁化曲線。試料にかけた磁界の向きは膜に対して面直方向。

さらに今回開発した  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}\text{B}_{0.5}$  薄膜の保磁力の温度依存性を測定したところ、 $1^\circ\text{C}$  当たりの減少率が  $-0.22\%$  とネオジウム磁石の  $-0.55\%$  よりも小さいことがわかりました。電気自動車や風力発電機などでは  $180^\circ\text{C}$  の耐熱温度が要求されますが、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}\text{B}_{0.5}$  薄膜はネオジウム磁石よりも優れた耐熱性を示すことも確認されました。図3にこれまで報告されてきた  $\text{SmFe}_{12}$  系磁石粉末、最高磁化をもつネオジウム磁石と本研究による薄膜磁石の残留磁化と保磁力を比較のために示しました。今回、薄膜で得られた磁石特性は従来の  $\text{SmFe}_{12}$  系磁粉の特性を遙かに超える値を示しており、ネオジウム磁石よりも若干高い特性が得られています。勿論、実用磁石とするにはこの特性をバルク試料で実現しなければなりません。これまで  $\text{SmFe}_{12}$  系異方性磁石でどうしても得られなかった高い保磁力が微細構造を適度に制御すれば得られることを示した成果です。

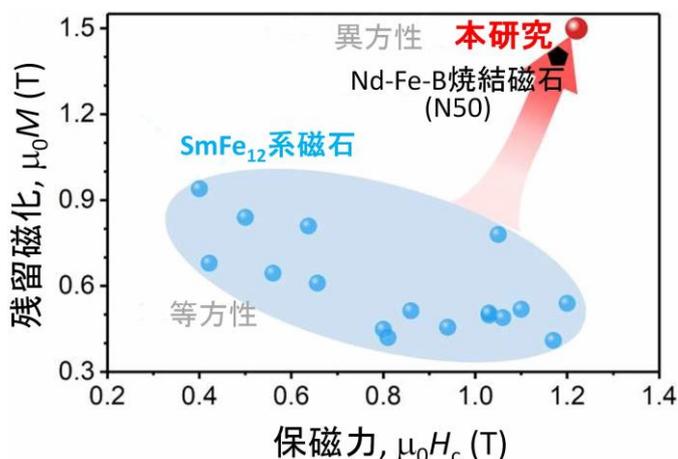


図3 残留磁化と保磁力の関係。目指す磁石性能は高い保磁力と高い残留磁化を満たす右上の部分です。本研究ではこれまでの  $\text{SmFe}_{12}$  系磁石よりもはるかに高い特性を、ネオジウム磁石よりも若干高い特性を示しています。

### 今後の展開

本研究では、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  薄膜に B を添加することで、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  ナノ粒子を B リッチアモルファス相で分離することにより 1.2 テスラという異方性磁石としては最大の保磁力が得られました。今回は薄膜を使ったモデル実験ですが、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  化合物の異方性構造で高保磁力が得られることが実証されたことで、 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  化合物がネオジウム磁石を超える新規磁石になり得ることが実験的

に示されました。また、今後  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  系化合物を磁石として実用化するには、本研究で得られたような微細組織をバルク磁石で実現していく必要があります。この目標に向けて今後さらに研究を進めて行きたいと考えています。

## 掲載論文

題目 : Achievement of High Coercivity in  $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$  Anisotropic Magnetic Thin Film by Boron Doping

著者 H. Sepehri-Amin, Y. Tamazawa, M. Kambayashi, G. Saito, Y.K. Takahashi, D. Ogawa, T. Ohkubo, S. Hirohara, M. Doi, T. Shima, and K. Hono

雑誌 : Acta Materialia (2020)

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.026>

## 用語解説

### (1)保磁力

磁石の磁極の反対方向に外部から磁界を掛けたときに、磁石が磁力を失う外部磁界の強さ。磁石をモーターの磁極に使う場合、保磁力より高い磁界が磁石に加わらないよう設計する必要がある。また、保磁力は温度が上がると下がるので、磁石を使用する温度で磁力を失わないだけの保磁力が必要とされる。

### (2)残留磁化

磁性体に外部磁界をかけた後、外部磁界をゼロにしたときの磁化の値

## 本件に関するお問い合わせ先

### (研究内容に関すること)

国立研究開発法人物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点

高橋 有紀子 (たかはし ゆきこ)

E-mail: [takahashi.yukiko@nims.go.jp](mailto:takahashi.yukiko@nims.go.jp)

TEL: 029-859-2718

URL: [https://www.nims.go.jp/mmu/people/Takahashi\\_j.html](https://www.nims.go.jp/mmu/people/Takahashi_j.html)

東北学院大学工学部教授

嶋 敏之 (しま としゆき)

E-mail: [shima@mail.tohoku-gakuin.ac.jp](mailto:shima@mail.tohoku-gakuin.ac.jp)

TEL: 022-368-1128

### (報道・広報に関すること)

国立研究開発法人物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

E-mail: [pressrelease@ml.nims.go.jp](mailto:pressrelease@ml.nims.go.jp)

TEL: 029-859-2026 FAX: 029-859-2017

学校法人東北学院 法人事務局 広報部広報課

〒980-8511 宮城県仙台市青葉区土樋1-3-1

E-mail: [koho@mail.tohoku-gakuin.ac.jp](mailto:koho@mail.tohoku-gakuin.ac.jp)

TEL: 022-264-6423 FAX:022-264-6478

URL: <https://www.tohoku-gakuin.ac.jp/target/press/>