

報告：2023 年後期寺子屋 BM 塾  
第 34 期 BM 講座

JABM 理事 兼 寺子屋 BM 塾長  
元・日立金属(株)  
徳永 雅亮

2023 年度後期の BM 塾では、大同特殊鋼(株)、技術開発研究所の入山恭彦理事（JABM 理事）にボンド磁石に関して、3 回の連続講義をお願いした。①「ボンド磁石Ⅰ、歴史と種類」、②「ボンド磁石Ⅱ、NdFeB 系及び SmFeN ボンド磁石」及び③「ボンド磁石Ⅲ、開発状況」の 3 連続講義である。

### 第 1 講

2023 年 9 月 22 日（金）@ふらっとにつぼり及び Zoom

講義：各論講義「ボンド磁石Ⅰ」



講師：入山 恭彦

（大同特殊鋼(株)、技術開発研究所 理事、JABM 理事）

### 概要：

- ・ボンド磁石の歴史、基礎知識
- ・ボンド磁石の種類と製法
- ・ボンド磁石用粉末材料

受講生総数：59 名

**記事：**ボンド磁石は「粉体状の磁石材料と高分子バインダを混合した混練物を種々の方法により成形・固化したもの」を指す。バインダの種類により、プラスチック磁石、ゴム磁石と呼ぶこともある。磁石材料としては、主にはフェライト系と希土類系がある。成形法には圧縮、射出、ロール等がある。JABM の推定によると、2021 年度の日本国内及び日系海外におけるフェライト系の生産額は 209 億円で横ばい傾向、希土類系では 1,062 億円で増加傾向にある。

ボンド磁石は 1950 年代に円筒状 AlNiCo ボンド磁石が小型モータに実用されたのが最初と言われる。希土類系ボンドは微粒子型 SmCo<sub>5</sub>、大粒径 Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>、超急冷等方性 NdFeB、SmFeN と進化する。JABM は 1981 年にアメリカにおけるプラスチックマグネットの実態調査と技術交流団が派遣されたことを受け、18 社による「プラスチック・ゴムマグネット懇話会」を発端とする。1984 年に「プラスチック・ゴムマグネット工業会」が設立され、以降名称変更を続け、2006 年に現在の「日本ボンド磁性材料協会」となった。

フェライトボンド磁石は Ba 系及び Sr 系フェライト焼結磁石の量産化の後、実用化が開始されている。1973 年の初心者マークに等方性圧延磁石が、1975 年の TV センタリングに等方性射出成形磁石が実用化され、磁石成形メーカーとコンパウンドメーカーの分業が始まった。1979 年には磁場射出成形機が上市され、2011 年には (BH)<sub>max</sub> = 2.25MGOe が得られている。1997 年には M 型フェライトの異方性磁場を向上する La-Co 置換の Sr 系焼結磁石が開発されているが、本置換系のボンド磁石用磁粉は未開発である。

フェライトボンド磁石の応用分野は磁場射出成形機の開発による磁気特性の向上によって拡大した。1978 ~ 2000 年の複写機やプリンター用の磁気ロールのボンド磁石化、1980 年からは多極着磁による FG リング、エンコーダとファンモータ用フレキシブル磁石が実用化されている。今後の課題は新材料による高性能化、大口の用途開拓及び新用途による高付加価値化である。

ボンド磁石は形状自由度が高いが、バインダによる B<sub>r</sub> の希釈のため、焼結磁石よりも磁力が低い。ボンド磁石用の磁粉は粉末状態で磁気特性が発現している必要もある。

希土類磁石が強力になる理由をみてみよう。まず希土類元素の 4f 電子は周囲の希土類イオンの結晶場によって結晶磁気異方性を発現する。4f 電子の空間分布及び軌道角運動量は 4f 電子の数によって変化する。希土類元素と遷移元素 (Co や Fe) が作る金属間化合物では Co や Fe の 3d 電子が広がっており、4f 電子との相互作用が大きい。結果として、Co や Fe の強い磁化が希土類元素の磁気異方性に引っ張られて、金属間化合物の高い飽和磁化と高い結晶磁気異方性が得られる。

等方性ボンド磁石は異方性ボンド磁石と比較すると磁力は低いが、着磁パターンが自由、生産性が高い、形状自由というメリットがある。更に、等方性の Stoner-Wohlfarth モデルによる理論的 B<sub>r</sub> よりも高い B<sub>r</sub> を結晶粒微細化によって獲得できる。Remanent enhancement と呼ばれる現象で、隣接する粒子間の相互作用によって各粒子のモーメントが互いに引張りあうことによって発生する。超急冷によってサブミクロン微細結晶粒の得られる NdFeB 系や SmFeN 系の等方性ボンド磁石で利用されている。

ボンド磁石に用いられるバインダを整理する。フェライト系では射出成形で熱可塑性樹脂（ナイロン、PPS: Polyphenylene Sulfide）、押

出及びカレンダーロール成形で熱可塑性エラストマ（CPE: Chlorinated Polyethylene、NBR: Acrylonitrile Butadiene Rubber）が用いられる。希土類系では圧縮成形で熱硬化性樹脂（エポキシ）、射出成形で熱可塑性樹脂（ナイロン、PPS）、カレンダーロールで熱可塑性エラストマ（CPE、NBR）が用いられる。

ボンド磁石の製法について見てみよう。射出成形磁石ではヨークやシャフト等と一体射出成形が可能である。磁石成形後にアSEMBリーする場合よりもプロセス削減が可能になる。圧縮磁石製造における磁石磁粉とバインダの混合では磁石粉末、添加剤及び熱硬化性樹脂が用いられる。熱硬化性樹脂の量は1～3wt%（7～20vol%）である。添加剤としてはシラン系及びチタン系のカップリング剤とステアリン酸等の滑剤が用いられる。カップリング剤は磁石粉と樹脂を結びつける（カップルする）役目を持つ。圧縮成形用コンパウンドでは「金型への流れ性・充填性が良好で、圧縮密度が高く、樹脂が粉末を良く覆う」という特性が好ましい。

等方性圧縮成形ボンド磁石の成形密度を高めるためには、熱硬化性樹脂の選択と添加量、圧縮成形条件及び粉末粒度の調整がキーになる。異方性圧縮成形ボンドの場合は配向度向上が重要になり、磁界のかけ方、樹脂、樹脂量、滑剤を適正化する必要がある。特に、混合時に凝集させない工夫、磁場配向時に磁場に反応して配向できる金型すべりが重要である。リング磁石のラジアル配向では配向磁束の流れを考察して、ラジアルファクター（ $F_r$ ）を1以下にするよう配慮する。 $F_r$ はリング磁石の形状から $F_r=2D_2 \cdot L/D_1^2$ （ $D_2$ : 外径、 $D_1$ : 内径、 $L$ : 高さ）で表される。

射出成形ボンド磁石製法で最重要プロセスは混練とコンパウンドである。磁石粉末、添加剤（カップリング剤）、熱可塑性樹脂 [ ナイロン、PPS 等、通常7～10wt%、(30～50vol%) ] を2軸混練機等で混練し、ペレット化する。射出成形用として好ましいコンパウンドは流動性がよく、金型摩耗が少なく、磁粉を沢山含むものであり、混練条件がキーになっている。部品との接着行程を兼ねることができ、寸法精度に優れた一体成形射出成形磁石が作製できる。また、PPS樹脂部分とボンド磁石部分やボンドソフト磁性材料部分とボンド磁石部分からなる二材成形射出磁石も可能である。

熱可塑性エラストマを樹脂として用いると、押出成形やカレンダーロール成形が可能となり、押出成形磁石やシート磁石が製造できる。等方性NdFeB系フレキシブルシートでは $(BH)_{max}=16 \sim 64\text{kJ/m}^3$ が得られている。

ボンド磁石は磁石粉末材質、バインダ材質及び成形法に多くのバリエーションがあり、且つその組合せによってボンド磁石材質の種類が非常に多い。応用に当たってはボンド磁石の磁気特性、物理特性及び温度特性をしっかりと把握した上で応用に適した材質を選択する必要がある。

不可逆減磁率は温度上昇、放置時間及び磁石の $P_c$ （パーミアンス係数：反磁界の大きさ）で変化する。高保磁力磁石の採用や設計時の $P_c$ 設定を大きくすることによって不可逆減磁は低減できる。

着磁性は磁石粉末の保磁力メカニズムや保磁力の絶対値によって変化するので、あらかじめ着磁に必要な磁界強度を実験的に評価しておく必要がある。

ボンド磁石に用いられる磁石粉末は永久磁石としての磁気特性を有することが最優先課題であるが、耐食性、歪に対する耐性等付帯的な課題もある。材質毎に粉末製造法は異なる。フェライト粉末はフェライト焼結磁石とほぼ同様のプロセスで作製されるが、単磁区粒子径を狙い、

異方性磁粉では微粉碎後に熱処理が必須で扁平状の磁粉に仕上げられる。等方性NdFeB系ボンド磁石の磁粉では、超急冷、熱処理によって20nmの微結晶と粒界相からなる数10 $\mu\text{m}$ の磁粉を作製する。Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bと $\alpha$ -Feからなるナノコンジット型の磁粉では、比較的冷却速度の小さいストリップキャストで得られたフレークを粗粉碎して磁粉が作製される。HDDR法による異方性NdFeB系磁粉では、水素吸蔵と脱水素によって微結晶と粒界相からなる磁粉を作製する。異方性SmFeN磁粉では、Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とFe粉を原料とし、Caによる還元拡散法（CaでSm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を還元し、SmをFe粉に拡散する）でSm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>を得て、窒化によってSm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub>磁粉を作製する。等方性SmFeN磁粉は超急冷、熱処理及び窒化によって作製される。

今回の講義はボンド磁石の歴史、磁性の基礎知識、ボンド磁石の広範な種類と製法及びボンド磁石用磁粉の作製法を包含し、ボンド磁石の全体像を把握可能な纏まったものであった。全体像から個別に展開される次回以降の講義が期待される。

## 第2講

2023年10月31日（火）@ふらっとにつぼり及びZoom

講義：各論講義「ボンド磁石Ⅱ」

講師：入山 恭彦

（大同特殊鋼(株)、技術開発研究所 理事、JABM 理事）

概要：

- ・等方性NdFeB系ボンド磁石
- ・異方性NdFeB系ボンド磁石
- ・等方性SmFeNボンド磁石
- ・異方性SmFeNボンド磁石

受講者数：63名

記事：日本で生産されているバルク及びボンド磁石の特性を $(BH)_{max}$ と $H_{cJ}$ の平面にプロットすると多くの材質が存在することが理解できる。これら多くの材質が日本で開発されている。まず、1916年の本多光太郎によるKS鋼である。タングステン鋼にCoを添加するという発想で絨毯爆撃的に組成検討を行い、30～35%Co、6～8%W、1.5%Cr、0.8%C、残部Fe組成で、 $B_r=1.1\text{T}$ 、 $H_{cJ}=20\text{kA/m}$ を達成した。1922年にはWを使用しないMnCr系磁石を渡邊三郎が開発した。1931年にはAlNiCoの基礎となるMK鋼（FeNi鋼）を三嶋徳七が開発した。Fe-Ni鋼の低熱膨張・高透磁率という性質に興味を持ち、諸元素を添加して、5～40%Ni、1～20%Al、残部Fe組成でKS鋼の3倍の磁力を実現した。MK鋼はその保磁力メカニズムが析出硬化型である所も新しい。1933年増本量・本多光太郎が新KS鋼であるNKS鋼を3～50%Ni、1～50%Ti、残部Fe組成で開発した。同年フェライト磁石の原型であり、FeとCo酸化物固溶体からなるOP磁石が加藤与五郎・武井武によって開発された。

これら磁石の発明・発見の事例を見ると、日常の研究開発を徹底的に行い、現れる現象をしっかりと観察し、磁石としての可能性を把握し、磁石組成を絞り込んでいることがわかる。

SmCo系焼結磁石ではK. J. StrnatがYCo<sub>5</sub>の持つ高い異方性磁界( $H_A$ )を発見し、SmCo<sub>5</sub>焼結磁石が開発された。Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>系は多くの日本の磁石メーカーによってFe置換とCu、Zr添加で高保磁力と高 $B_r$ を実現した。中でも依好夫が中心的役割を果たした。

佐川真人による Nd-Fe-B 系焼結磁石は Sm-Co 系焼結磁石の Co を資源豊富な Fe に置換えることを狙い、結晶構造中の Fe-Fe ダンベルが  $R_2Fe_{17}$  の強磁性を不安定化しているという指摘からスタートしている。Fe-Fe 原子間距離を大きくするために C や B を用い、多種の希土類-Fe 系が検討され、新しい NdFeB 化合物が発見された。J. Croat による Nd-Fe-B 系ボンド磁石は Nd-Fe<sub>2</sub> 元系超急冷材の保磁力が 800℃加熱で低下するのを B 添加で回避したことが基本にある。800℃加熱で生成する Nd<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub> を B 添加によって阻止し、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 新金属間化合物を発見した。

等方性 Nd-Fe-B 系ボンド磁石粉末は超急冷と熱処理によって、20nm 程度の微結晶と Nd リッチ粒界相を有する扁平状の粗粉である。非常に多くの磁気特性をもつ超急冷磁粉が量産されている。現状では超急冷技術が進歩し、結晶粒径が微細で粒径分布がシャープな磁粉が実現されており、その結果レマネンスエンハンスメント効果が増大し、保磁力及び角型性が改善されている。新しい急冷技術は Advanced Quenching Technology と呼ばれている。本技術では超急冷時のフリー面に発生する粗大粒の発生を抑え、フレック幅方向の結晶粒の粒径分布巾を低減している。

等方性 Nd-Fe-B 系ボンド磁石は圧縮成形と射出成形で作製されることが多く、圧縮成形磁石の  $(BH)_{max}$  が射出成形磁石のそれよりも高い。等方性 Nd-Fe-B 系ボンド磁石は複雑形状成形可能、肉薄品 (0.5 mm厚) の成形可能、一体成形可能という成形面での特徴を持ち、多くの用途に用いられている。HDD 用スピンドルモータ、自動車用アクチュエータ・センサ、携帯電話用振動モータ等用途は多岐に渡る。最近では資源リスク・低価格対応として Ce を活用する材質が開発されている。 $(BH)_{max}$  は 6 ~ 7MGOe と低下するが、フェライト焼結磁石よりは高性能という位置付けにある。

異方性 Nd-Fe-B 系ボンド磁石の磁粉は HDDR 法によって作製される。水素吸蔵 (Hydrogenation)、不均化 (Disproportionation)、脱水素 (Desorption)、再結合 (Recombination) のプロセスにより、水素を用いた再結晶化によって結晶粒微細化が図られる。原料粉末の結晶方位と微細化された結晶方位の関係が HD 後に観察される。 $[110]Fe//[110]NdH_2$  (方向) と  $(-110)Fe//(-220)NdH_2$  (面) の関係が確認されている。微細結晶粒の配向度を示す異方性 (DOT: Degree of Texture) は焼結磁石のそれよりも小さい。

異方性 HDDR ボンド磁石は現在も進化を続けている。低異方性の原因が原料粉の多結晶とクラックにあることを突き止め、①水素粉碎を 23℃から 500℃に変更してクラック発生の低減、②水素粉碎前に 700℃熱処理を加えて、原料の粒界相を顕在化させ単結晶化、③ 30% の  $Sm_2Fe_{17}N_3$  磁粉を混合して、低圧成形を実現した。上記改善によって、一体圧縮成形ロータを完成し、高速回転可能な小型モータを開発している。異方性 Nd-Fe-B 系熱間加工磁石を粗粉碎して得られる異方性磁粉もあるが、生産量は把握できていない。

SmFeN ボンド磁石の開発経緯を開発者のお一人である入山先生から伺った。Fe<sub>8</sub>N を磁石化できれば、Fe<sub>8</sub>N の高い飽和磁化から大きな  $(BH)_{max}$  が期待できるが、合成が難しい。そこで、第 3 元素 (X) を加えて Fe-X を窒化し、結晶磁気異方性を付与することを狙った。Fe に替えて Fe-X の 700℃窒化では有望な X は見つからなかった。Fe<sub>8</sub>N が得られず、結晶構造も結晶磁気異方性も期待できないことが分かった。

450℃窒化では X=Sm において有望な磁気特性が得られた。α-Fe の混在はあったが、飽和磁化と結晶磁気異方性が増加した。得られた相は  $Sm_2Fe_{17}N_3$  と同定され、その基本物性が Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B に匹敵することが解明され、永久磁石化が推進された。

Sm-Fe-N ボンド磁石の生産重量は Nd-Fe-B 系ボンド磁石の概略 1/10、800 トン / 年と推定されている。中国及び日本のメーカーが等方性を含め生産している。 $Sm_2Fe_{17}N_3$  磁粉は Ca による還元拡散法又は溶解・鑄造法で製造される。還元拡散法にも 2 種あり、①比較的大きい Fe 粉、 $Sm_2O_3$  を用いて、 $Sm_2Fe_{17}$  を作製後、窒化・微粉碎する手法と、②  $Sm^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  からなる硫酸水溶液の共沈によって得られる Sm/Fe 複合酸化物を水素還元及び Ca 還元を行い、窒化後水洗する 2 つの手法である。還元拡散法は Sm-Fe<sub>2</sub> 元状態図から  $Sm_2Fe_{17}$  に固溶限がないため、溶解・鑄造法よりも還元拡散法の方が α-Fe の出現を制御し易いという側面もある。 $Sm_2Fe_{17}N_3$  磁粉の高性能化は Ti 添加や微粒子化によって推進されている。 $Sm_2Fe_{17}N_3$  微粉末には超急冷法や HDDR 法による Nd-Fe-B 系ボンド磁粉に存在している Nd リッチ相がないため錆びにくいという特徴がある。

等方性 SmFeN ボンド磁粉は超急冷によって作製され、TbCu<sub>7</sub> 型の結晶構造を有する。 $Sm_2Fe_{17}N_3$  は  $Th_2Mn_{17}$  結晶構造を示すが、その Sm を Fe-Fe ダンベルでランダム置換すると TbCu<sub>7</sub> 型に変化する。本結晶構造は超急冷時の Sm 組成や急冷速度の制御によって得られるが、Sm 含有合金の超急冷は Nd-Fe-B 系の場合よりも Sm の蒸気圧が高く制御が難しい。超急冷条件であるロール周速 40m/s で結晶粒径 60nm を有する 20 μm 厚さのフレックが作製される。組成的には Fe の Co 置換や Sm の Zr 置換が行われ、 $Sm_{8.9}Zr_{0.9}Fe_{76.7}Co_{13.5}N_x$  組成で量産化されている。等方性 SmFeN ボンド磁石は等方性ボンド磁石の中で最高磁力、高生産性、高耐食性及び高耐熱性というメリットを持つが、成形し難い、短期不可逆減磁が大きい、着磁性が悪いというデメリットも有する。等方性 SmFeN 磁粉は結晶粒径が小さいために、微粉碎しても (粉碎粒径を 100 μm から 5 μm まで低減しても) 保磁力が低下しない。

第 2 回目の講義は日本発の永久磁石材料の開発の経緯と開発のキーとなったポイントを詳細に説明して頂いた。新磁石開発に携わっている塾生には大変参考になる内容であった。独特の発想を膨大な実験で検証していくプロセスにおいて、わずかに見える現象を見逃さない感度が要求される。等方性ボンド磁粉と異方性ボンド磁粉の差をきちと理解する必要のあることも指摘頂いた。等方性磁粉と異方性磁粉はその微細組織や粉末粒径にも差があり、応用面での配慮が必要なことをきちと理解することが重要である。

### 第 3 講

2023 年 11 月 21 日 (火) @ふらっとにつぼり及び Zoom

講義：各論講義「ボンド磁石Ⅲ」

講師：入山 恭彦

(大同特殊鋼(株)、技術開発研究所 理事、JABM 理事)

概要：

- ・ボンド磁石に関する最近の開発状況
- ・ボンド磁石の市場について
- ・今後の方向性について

受講者数：65名

**記事**：2023年のNd-Fe-Bボンド磁石とNd-Fe-B焼結磁石の世界の生産量の推定概略はそれぞれ15,000トン、160,000トンで、ボンド磁石は横ばいに対して焼結磁石は増加傾向にある。

永久磁石の市場は(1)吸着、ネックレス、センサ、MRI、(2)スピーカ、(3)モータ、(4)発電機の4種に分類でき、先端分野で多く応用されていることから、磁石は先端技術を支える材料と言える。2022年の磁石の応用内訳(金額)はモータ45%、HDD31%、音響8%、吸着5%、分離(液中分離)5%、MRI5%、発電機4%、センサ4%、その他13%と推定されている。磁石材料の生産割合を金額ベースで見ると、Nd-Fe-B系焼結59%、フェライト31%、Nd-Fe-B系ボンド5%、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 2%、アルニコ2%、その他1%である。Nd-Fe-B系ボンド磁石はモータ出力やモータ外径の小さな小型モータに多く用いられている。例えば、HDD用スピンドルモータ、携帯電話用振動モータ、自動車用アクチュエータ・センサがある。磁石全体では自動車への応用例はモータ、センサ、ファンモータ等があり、希土類磁石のロボット、xEV用駆動モータへの応用は今後の大きな増加が見込まれている。HEVであるプリウスの駆動モータは第4世代まで進化しており、ロータの構造改良でリラクタンストルクの使用割合の増加が図られ、回転数の増大もあって、モータの小型化、高出力密度化が図られている。

ボンド磁石の開発状況を概観する前にボンド磁石と焼結磁石のコストパフォーマンスを確認しておこう。Nd-Fe-B系焼結磁石とNd-Fe-B系ボンド磁石のコストパフォーマンスを平均 $(BH)_{\max}$ 、平均価格(¥/cm<sup>3</sup>)から計算すると、それぞれ12及び58(\$/(BH)<sub>max</sub> × 10<sup>3</sup>)になる。従って、ボンド磁石のコストパフォーマンスは焼結磁石のそれよりも劣る。フェライト焼結磁石やNd-Fe-B焼結磁石で形成されるマス市場と比較するとボンド磁石はニッチ市場に存在するが、コストパフォーマンスを超える商品価値のあることが理解できる。一方で、現状の永久磁石でカバーが困難な12~15MGOeの磁石があれば特性ギャップを埋めることによって、希土類ボンド磁石の存在を主張することが可能になる。

最近の学会(Intermag 2023, REPM 2023, 金属学会 2023 秋期)における発表をREVIEWすると、最近のテーマはNd-Fe-B焼結、資源、新材料、AI/DX/ML関連が多く、ボンド磁石関係は少ない。

ボンド磁石の高性能化・ラインアップ拡大に関する進展は以下の通りである。

- (1) MQ-Iの超急冷技術の進展により、結晶粒径の微細化によるレマネンスエンハンスメントの積極活用
- (2) HDDR粉の700℃熱処理によるNdリッチ相の粒界顕在化による高配向度化
- (3) Ti、La、W添加による $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 磁粉の高性能化
- (4) リン酸コート改良による $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ の高性能化と高耐水化
- (5) 磁石粉末、熱硬化性樹脂及びワックスを含むコンパウンドを用いて成形後、ワックスを除去する成形の追加
- (6) SmFeNボンド磁石の分解を回避した高密度化(SPS、Zn添加、衝撃圧搾、圧縮せん断等)

IPMモータでは焼結磁石をIPMロータに適用する設計が主役であるが、リラクタンストルクを最大化することで、磁石トルクの負担を下げ、磁石のコストを低減する例が多い。一方、ボンド磁石をIPMロータに適用する試みが活発化している。狙いは回転数増加に伴う渦電流損の増加

をボンド磁石の高抵抗という特性で低減しようとするものが多い。更に、同期リラクタンスマータ(SynRM)の性能をフェライト系ボンド磁石のIPMロータ化、すなわち、磁石トルクの付加で向上しようという試みもある。ボンド磁石の配向には16分割のハルバツハ型の磁気回路を利用して、高配向度を確保している。フェライト焼結磁石の埋込みよりもフェライトボンド磁石の射出埋込み成形の方が優れていることを証明した4極、6スロットのIPMモータもある。

Nd-Fe-B焼結磁石を用いたSPMモータを異方性 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ ボンド磁石によるIPMモータ化した例もある。U字形10極のロータで、焼結磁石を用いた場合と同等のトルクを実現している。Nd-Fe-B系焼結磁石を用いたIPMロータを等方性Nd-Fe-B系ボンド磁石に替えたIPMロータも開発されている。

次世代電動アクスルの開発がモータの軽量化とリサイクル性を考慮してスタートしている。技術課題として、モータの高速回転化と減速機の高減速化がペアで進められている。ロータへの一体圧縮成形のために、低圧成形を可能とする磁粉とコンパウンドが開発されている。今回の開発で、回転数34,000rpmと高減速(21.8)で実用車輪トルクを実証した。

AM(Additive Manufacturing)を用いてモータコアや磁石が成形されている。モータコアでも形状が複雑で電磁鋼板の打ち抜きで対応し難いものが開発対象になっている。等方性SmFeNボンド磁石をAMで作製した例もある。

希土類磁石には希土類資源のリスクが伴う。磁石に用いられている希土類元素はPr、Nd、Sm、Dy、Tbが主であるが、希土類鉱床によってこれら元素の含有量が異なる。世界中に希土類鉱山は存在するが、重希土類を多く含むイオン吸着鉱は中国のみに存在する。現在の希土類資源は中国独占に近い。DyやTbのNd-Fe-B焼結磁石への添加は磁石の保磁力向上によって磁石の耐熱性を向上させる。希土類元素の価格変動は中国政府の希土類資源政策によって大きく変化してきた。但し、余剰元素であるSmの価格は安定している。日本における希土類元素の4大用途は、磁石33%、触媒28%、電池17%、研磨材11%である。一方で、希土類元素の生産重量は酸化物ベースでCe36%、La26%、Nd19%、Pr6%、Y7%、Sm3%、(Dy+Tb+Gd)2%である。希土類生産量と各用途における希土類消費量の間にギャップがある。従って、Ce、La、Y、Smが余剰となる。環境対策応用分野であるxEVにNd-Fe-B焼結磁石が多量に使用されると逆にNd、Pr、Dy、Tbが供給不足となる。

資源問題の解決のために以下の対応がされている。

- (1) 新鉱床の開発(カナダ、オーストラリアでの開発や日本の南鳥島周辺のレアアース泥)
- (2) 重希土類及びNdの削減(粒界拡散技術によるDy/Tb量の低減、La/Ce置換された熱間加工磁石、Ce置換超急冷磁粉)
- (3) 新物質・希土類フリー磁石の実現

(3)に関する状況を述べる。Sm量が少なく、窒化を必要としないSm-Fe-Co-Nb-B組成の等方性 $\text{SmFe}_9$ 系ボンド磁石用磁粉が開発されている。 $\text{ThMn}_{12}$ 型 $\text{Sm}(\text{Fe}, \text{Co})_{12}$ 磁石では薄膜において $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}\text{B}_{0.5}$ で $B_r=15\text{kG}$ 、 $H_{cJ}=12\text{kOe}$ が達成されている。湿式合成による $(\text{Sm}, \text{Zr})(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ti})_{12}$ 微粒子で $B_r=12\text{kG}$ 、 $H_{cJ}=16\text{kOe}$ を得ている。 $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ の微粉では2kOe程度の保磁力が得られているが、微粉粒径が小さいため酸化による磁気特性低下が懸念され

ている。L1<sub>0</sub>型 FeNi ではあらかじめ Fe-Ni 窒化物を作製し、脱窒素することによって 1.8kOe の保磁力が得られている。薄膜の Fe-Co 系の格子定数の制御によって保磁力を向上する努力が継続している。

リサイクルによって資源対策を実行する例としては超硬からの W、Li イオン電池や工具からの Co が特筆される。希土類磁石からの希土類元素のリサイクルでは実証実験は終了レベルにはあるが、社会的な実績がともなっていない状況にある。手法的には、消磁後のモータ解体によって HEV モータから磁石を取り出す例、ルームエアコンから熱水処理によって磁石を取り出す例、HDD からイオン液体電析法によって希土類回収例等がある。EU では SUSMAGPRO が実働しており、種々の回収ルートが提案され、その実証実験が行われている。

異方性 HDDR 圧縮成形ボンド磁石ではエポキシ樹脂を分解・除去し、磁粉を再利用すると 90% の回収率と磁粉性能 95% が維持できる。異方性 Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub> 射出成形ボンド磁石のリサイクルは通常スプールやランナーが再生材として利用されている。その他に磁石製造工程の各所で 3 つのリサイクルルートが設定されている。等方性 SmFeN 圧縮成形ボンド磁石に用いられるエポキシ樹脂をセルロースナノファイバー (CNF) に変更し、CNF への加水と乾燥が可逆であることを利用して、磁粉の回収を行うことができる。SmFeN は耐食性が優れているために、回収粉によるボンド磁石の磁気特性は従来製法によるボンド磁石と同等の特性を示す。リサイクル過程に粗粉砕を加えても特性は維持される。

永久磁石に関する国プロ DXMag (データ創出・活用型磁性材料研究拠点) の推進が開始されている。材料創製 G、理論計算 G、計測評価 G 及びデータ活用促進 G からなり、「新規機能性磁性物質探索・材料設計」、「AI 駆動型オンデマンド永久磁石開発」、「データ駆動設計に基づく軟磁性材料・デバイス開発」を目指している。

機械学習を活用した効率的な Nd-Fe-B 系熱間加工磁石の作製プロセスを最適化し、高性能化に成功した例もある。

ボンド磁石の焼結磁石に対する位置付け、工業材料として SDGs 等の社会的制約に適合して生き残る手法、避けられない資源動向、将来に向けたボンド磁石の開発動向等ボンド磁石の状況を網羅的に紹介して頂いた。多種多様なボンド磁石の磁気特性・諸特性を理解し、応用していくことも重要であることも再度指摘された。

## 2024 年前期講座予定

第 35 期 BM 塾では Zoom 開催で、広沢 哲先生 (日本金属学会フェロー、日本磁気学会名誉会員) による「永久磁石の基礎研究」関連の 3 講義を計画している。塾生諸君の参加をお願いしたい。

### 第 1 講

2024 年 5 月 31 日 (金) @Zoom

**講義:** 各論「磁化と磁気異方性の温度依存性について」

**講師:** 広沢 哲

(日本金属学会フェロー、日本磁気学会名誉会員)

### 第 2 講

2024 年 6 月 21 日 (金) @Zoom

**講義:** 各論「磁気的特性長および種々の臨界径と保磁力の理論モデルについて」

**講師:** 広沢 哲

(日本金属学会フェロー、日本磁気学会名誉会員)

### 第 3 講

2024 年 7 月 12 日 (金) @Zoom

**講義:** 各論「保磁力の温度依存性について」

**講師:** 広沢 哲

(日本金属学会フェロー、日本磁気学会名誉会員)

以上