

内外 BM 技術動向

**JABM 理事
大同特殊鋼(株)
技術開発研究所 理事
入山恭彦**

2023年9月3~7日の間、英国バーミンガム大学において **REPM2023 (27th International Workshop on Rare Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications)** が開催された。REPM は永久磁石関連では世界最大級の会議であり、5年ぶりの対面開催となった今回は約400名が参加する盛会となった。

発表内容の内訳としては、総発表件数166件（口頭：78件、ポスター：88件）のうち、磁石材料の研究に関するものが100件程度（Nd-Fe-B系、Sm-Co系、Sm-Fe-N系やSmFe₁₂などの新材料）と最も多かったが、希土類資源、サプライチェーン、あるいはリサイクル関連についても30数件程度の発表が行われ、この分野への最近の関心度の高さが窺われた。また、AI・DX関連についても20件程度の発表があった。

会議冒頭のプレナリーセッションにおいて**大同特殊鋼顧問の佐川**は、「**History of REPM and my Teachers in Permanent Magnets**」というタイトルで、REPMの歴史について触れながら、佐川氏のNd-Fe-B発明前から現在に至るまでに影響を受けた先生方（C. Strnat, A. Ray, R. Harris, H. Kronmuller）の紹介などを行った。

以下に、いくつかの発表についての内容（要点のみ）を紹介する。なお、REPMは未発表の成果を報告する学術講演会というよりも、最近の研究成果や開発状況をレビュー的に講演する場であるため、以下内容は過去に別の場で発表済みのものが多いことをご承知おきたい。

【資源・サプライチェーン・リサイクル関連】

MP Materials: Restoring the American Rare Earth Materials and Magnet Supply Chain (J. Marte ら, MP Materials, USA)

カリフォルニア州のMountain Pass 鉱山を所有するMP MaterialのMine to Magnet（鉱山から磁石までの一貫製造）計画の概要を説明。希土類の濃縮原料生産（Stage I）、各希土類の分離精製（Stage II）、NdFeB焼結磁石製造（Stage III）の3ステージで開発を進めている。すでに米国内で唯一、希土類原料の生産を実際に行っている。磁石製造工場はFort Worthに建設中で、まもなく竣工の予定。

Development of Rare Earth Permanent Magnet Material in China (J. Yang, 北京大, 中国)

中国のサプライチェーンおよび磁石開発状況について紹介。2022年の中国での希土類磁石生産量は18万トン程度（世界生産量は20万トン程度）。Ceを含有するNdFeB焼結磁石の製造が急増しており、2022年の生産量は10万トン程度。Ceの添加量が増すほどコストパフォーマンスは高まるとのこと。使用済みのモータのリサイクル処理は年間200万個程度行われている。磁石材料の開発例として、ストリップキャストにより作製したSmFe合金を窒化することにより43 MGOeの粉末が得られていることが紹介された。その粉末を微粉砕し、樹脂と混練後、射出成形することにより12 MGOeの異方性射出成形磁石が得られている。

Toward a Sustainable Supply of High-performance Permanent Magnets: An Overview of Efforts Taken in Japan (吉田ら, 大同特殊鋼, 日本)

前半部分で日本における磁石サプライチェーンの最近の状況（原料確保、リサイクリング、磁石研究開発状況など）を紹介後、後半では主に重希土フリー磁石材料（熱間加工NdFeB磁石、SmFeN磁石など）の開発状況について解説した。

An Overview of Magnets Recycling with Focus on HPMS (C. Burkhardt ら, Pforzheim 大, ドイツ)

バーミンガム大学とともにEUのSUSMAGPROコンソーシアムで活動しているBurkhardtがHPMS (Hydrogen-based Processing of Magnet Scrap) について紹介。まず、リサイクルする各種EOL（使用済み）製

品（EV駆動モータ、HDD、産業用ポンプ、スピーカー、風力発電機）についてリサイクリングする場合の各ステップにおけるリサイクルのしやすさ評価一覧表が示されたが、問題はリサイクル技術よりもサプライチェーンの構築、EOL製品の分解のしやすさや回収スキームの方が大きいことがわかる。HPMS法はスクラップ磁石に水素を吸わせて粗粉碎後、ジェットミルにより微粉砕して焼結磁石にする方法である。酸素・炭素不純物の混入が問題のため、これらを多く含むNd-rich粒界相を溶解除去する。GBD (Grain Boundary Diffusion) 処理により減少した粒界相を補充する。HPMS法は環境負荷が少なくエネルギー効率が高いリサイクル方法としている。

【Nd-Fe-B系磁石】

Development of High Anisotropic Nd-Fe-B HDDR Powders (杉本ら, 東北大, 日本)

HDDR法による異方性発現メカニズム解析および最近の高特性粉末開発についてのレビュー（愛知製鋼との共同研究）。微細組織観察結果から、高い異方化度を得るためには、不均化反応段階における α -FeとNdH₂の結晶配向関係が重要で、この際にNdH₂が球状化せずラメラ構造になっている必要がある。ラメラ構造の部分は再結合反応において高配向状態のNd₂Fe₁₄B領域となる一方、 α -Feとの結晶配向関係が失われている球状部分は低配向領域となる。HD反応の際の水素圧、熱処理温度、時間などを適正化し結晶配向関係を確保することによりDR反応後の特性を向上することができた。

Heavy Rare Earth Free Hot-deformed Nd-Fe-B Magnet for Traction Motor in Electric Vehicles (宮脇ら, 大同特殊鋼, 日本)

電動車の駆動モータ向けの熱間加工Nd-Fe-B磁石の最近の開発状況について紹介。熱間加工磁石の最大の特徴は、微結晶からなり重希土フリーで高保磁力が得られやすいことと金型成形のため種々の形状・種々の配向を有する磁石をニアネットシェイプ成形できることである。また、磁石製造工程におけるCO₂排出量が焼結磁石対比少ないと評価している。ニアネットシェイプ成形の事例として、C型（瓦状）およびD型の形状をもつ磁石の熱間加工工程において高寸法精度で製造できることを示した。

磁気特性面では、原料合金の改良および製造条件の適正化を図ることにより、従来よりも均一微細な結晶組織をもつ磁石が製造できた結果、残留磁化、保磁力ともに向上した。最近開発されたこの磁石はまもなく量産開始予定である。

Dual Amorphous-Precursor Deformation Method for High-Performance Nd-Saving Nd-Fe-B Hot-deformed Magnets (G. Y. Kim 5, Korea Institute of Materials Science, 韓国)

Dual Amorphous-Precursor Deformation (DAP) という方法で Ce 添加による磁気特性の劣化を抑えることにより、Ce で Nd を 30 % まで置換しても高特性が得られる低廉磁石を開発。超急冷により得られた $(NdCe)_{13.6}Fe_{ba}B_{5.6}Ga_{0.6}Co_{6.6}$ 合金粉末で、Ce 0 % および 60 % のものを 1:1 混合し、ホットプレス後熱間加工することにより平均 Ce 置換率 30 % の熱間加工磁石を作製した。そして、得られた磁石に対し 700 °C でポストアニールを施した。また、比較のために Ce 30 % を置換した単一合金を用いた熱間加工磁石も作製した (SAP 法)。DAP 法では熱間加工後 (ポストアニール前) の磁気特性は低位だが、ポストアニール後に向上し、 B_r 13.5 kG, H_c 18 kOe の高特性が得られた。この特性は SAP 法 (B_r 13.0 kG, H_c 15 kOe) よりも明らかに高い値であった。この理由を明らかにするためにミクロ組織を観察した結果、DAP 法では熱処理により、まず Ce が粒界相に均一に拡散し、その後主相表面に Nd が富化することがわかった。Ce も主相内に拡散するが主相表面では濃度が低く、Nd が主体となっていて、これが高い保磁力を維持している理由と考えられる。

Special Features of the NdFeB Hot Pressing Process – a Pump Manufacturer as Magnet Producer (M. Kregel, WILO SE, ドイツ)

WILO 社ではダイアアップセットによる Nd-Fe-B 系板磁石の製造を、ロボットを使い自動化して行っている。後方押出しによるラジアル異方性リング磁石は割れが発生しやすいため、金型設計を工夫し新たな製法を開発した。磁石の減磁しやすい部分のみに高保磁力原料粉末を配置する二材成形事例についても紹介。

[Sm-Fe-N 系磁石]

Recyclable Sm-Fe-N Bonded-Magnet Using Environmentally-Friendly CNF Binder (入山ら, 大同特殊鋼, 日本)

PA (ポリアミド) や PPS などの熱可塑性樹脂をバインダとして使用する射出成形ポンド磁石は、製品を粉砕後に再度射出成形することで原理的にはリサイクル可能であるが、エポキシ樹脂のような熱硬化性樹脂をバインダとして使用する圧縮成形ポンド磁石はリサイクルが困難である。ここでは、環境に優しい材料であるセルロースナノファイバー (CNF) をバインダとして使用した等方性 Sm-Fe-N 圧縮成形ポンド磁石についてリサイクル可能かどうかについて検討した。超急冷法により得た Sm-Fe 系合金に窒化処理を施し、等方性の Sm-Fe-N 系粉末を得た。この粉末に対し、80-90 % の水分を含有する CNF を 24 wt% 添加、混合後、プレス成形し、さらに 120~150 °C で脱水、硬化を行うことによりポンド磁石を得ることができた。ポンド磁石の密度はプレス成形時のプレス圧を増すほど高まり、20 ton/cm² での成形で従来のエポキシ系ポンド磁石と同等の密度となった。磁気特性は従来ポンド磁石と同等であった。湿度 95 %、80 °C、300 時間の条件での耐食試験後、錆びは認められなかった。リサイクル性の評価として以下の実験を行った。CNF ポンド磁石を水分に浸漬後、粉砕することにより得た粉末状コンパウンドをそのままプレス成形した結果、初回作製のポンド磁石と同等特性をもつポンド磁石が得られた。本検討結果は、CNF をバインダとして使用する圧縮成形ポンド磁石のリサイクルの可能性を示すものである。

Microstructural Changes at The Sm₂Fe₁₇ and Zn Interface (松浦ら, 東北大, 日本)

メタルポンド Sm₂Fe₁₇N₃ 磁石は高温で使用されるモータへの適用が期待されている。著者のグループは 200 kJ/m³ の高 (BH)_{max} 値をもつ Zn ポンド Sm-Fe-N 磁石を開発したことを報告しているが、さらなる高特性化のためには Zn と Sm-Fe-N の界面拡散を適正に制御することが求められる。しかしながら、界面拡散挙動に関する報告例はない。著者らはこの挙動について調査した結果、Zn は Sm₂Fe₁₇ 相に 320 °C (Zn の融点より 100 °C 低い温度) で拡散することがわかった。Zn リッチ領域は α - および Γ-ZnFe 二元合金相からなり、

ThMn₁₂ 型 Sm(Zn,Fe)₁₂ 三元合金相が初期の拡散段階で生成する。Sm₂Fe₁₇ 相の表面で繊維状微細組織が観察された。この繊維状組織は Γ-ZnFe と ThMn₁₂ 型 Sm(ZnFe) 相からなり、Γ-ZnFe(10-1)[111]//Sm(ZnFe)₁₂(01-1)[011] の結晶方位関係があること、そして相互拡散係数はアニール温度に依存することがわかった。

[1-12 系磁石]

Exploring Coercivity Limit in SmFe₁₂-Based Thin Films (H. Sepehri Amin 5, NIMS, 日本)

Nd₂Fe₁₄B よりも希土類組成が低い RT₁₂ 系化合物は次世代磁石材料候補のひとつであるが、高い保磁力を得ることが難しい材料である。B を少量添加した Sm(Fe_{0.8}Co_{0.2})₁₂ 薄膜では結晶粒界に B リッチ相が形成された結果、保磁力が 1.2 T まで向上したが、それでも異方性磁界の 10 % 程度である。さらに Si や Al の含浸により粒界相の非磁性化を図った結果、保磁力は 1.32 T まで向上した。

[希土類フリー磁石]

Tailoring Magnetic Structures via Passive Magnetic and Strain-field Annealing (L. Lewis 5, Northeastern 大, USA)

非希土類系次世代磁石材料候補のひとつとされる L1₀ 構造の FeNi 規則相は人工的な作製が難しいことで知られている。ここでは、熱処理中に磁界と引張歪をかける (Multi Driver 熱処理) ことで規則相を得ることを図った。この方法は、MnAl の τ 相 (L1₀) 発現にはかなり効果があることがわかっているが、FeNi では効果が少なかった。

Iron Nitride: A Non-rare-earth Containing Permanent Magnet (F. Johnson, Niron magnetics, USA)

Minnesota 大学からスピンアウトした Niron 社が Clean Earth Magnet と名付けてアピールしている Fe₁₆N₂ ベースの希土類フリー磁石の紹介。これまでの最高特性は 10 MGOe 程度。第 1 世代のターゲット特性は B_r 8.6 kG, H_c 3000 Oe, (BH)_{max} 15 MGOe、第 2 世代ターゲットは、 B_r 15 kG, H_c 3750 Oe, (BH)_{max} 36 MGOe。ナノパウダーにつき表面保護が必要

BM インフォメーション

で、保護膜だけでも体積率 10 % 程度になる。2024 年後半にサンプル供給が可能になる予定。

【理論計算】

Exploring Coercivity Limits in Ultrafine-grained Nd-Fe-B magnets with Deep Learning Image Segmentation and Micromagnetic Simulation (N. Kulesh ら, NIMS, 日本)

熱間加工 Nd-Fe-B 磁石の FIB-SEM トモグラフィーのデータと深層学習を使って合成したマイクロマグネティックスのモデルを使って結晶粒径と保磁力の関係を解析。粒界相の磁化が制御されていない状態で結晶粒微細化しても保磁力増大効果は小さい。結晶粒径が 200 nm 以下になると微細化の効果はほとんどなくなってしまふ。

【3D プリンター関連】

Rare Earth Based Permanent Magnets by Laser Powder Bed Fusion (D. Goll ら, Aalen 大, ドイツ)

L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) 法による希土類磁石の 3D プリンティングについての発表。希土類磁石の 3D プリンティングは容易ではないが、球状の MQP-S を原料粉として用い、Grain Boundary Infiltration 処理を施すことにより 1.5 T 程度の保磁力を有する Nd-Fe-B 磁石が作製できた ($J_r(B_r)$ は 0.4T 弱)。また、プロセスパラメータとポストアニーリング条件の適正化により Dy フリーの Nd-Fe-B 磁石で B_r 0.7 T、保磁力 1.27 T、 $(BH)_{\max}$ 68.1 kJ/m³ の特性が得られた。Sm₂(CoCuFeZr)₁₇ 系においては B_r 0.78 T、保磁力 3.05 T、 $(BH)_{\max}$ 109.4 kJ/m³ の特性を得た。FePrCuB 系の磁石では、プロセスパラメータ（レーザーパワー、スキャン速度、体積エネルギー密度）によるが B_r 0.82 T、保磁力 0.85 T、 $(BH)_{\max}$ 85.4 kJ/m³ の特性を示し、鑄造磁石 (B_r 0.53 T、保磁力 1.20 T) よりも高い配向度が得られた。

【永久磁石応用】

An Application of Permanent Magnets in Electrical Machines for Aerospace Full Electric and Hybrid Electric Aircrafts (E. Chong, Rolls-Royce Electrical, イギリス)

気候変動に対する航空機業界の対応としては、現在 SAF（バイオマス合成燃料）や水素燃焼などが検討されているが、近い将来には電動化していかなければならない。2026 年までに 4 人乗り、航続距離 100 マイル以上の垂直離陸着陸機を開発。駆動モータは出力 150 kW, 1462 Nm で 160 kg。効率は 96 % 以上。バッテリーまたは H₂FC（水素燃料電池）駆動。これ以上の長距離用にはハイブリッドで出力 600~1200 kW のターボジェネレータも開発。さらにジェットエンジンの電気スタータージェネレータのデモも行っている。

Considerations in Magnets Selection for Industrial Motors: The Case of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors (E. Perigo ら, ABB US Corporate Research Center, USA)

産業用モータ分野での磁石を使わないシンクロナスリラクタン্সモータ (SynRM) に磁石によるアシストを加えた事例を紹介。VSD (Variable Speed Drive) を使う SynRM は磁石を使わなくても比較的高効率が得られるが、さらに磁石によるアシストを追加すること (PMaSynRM) で力率を向上できる。

【Plenary and Closing Remarks】

最終日最後の Plenary and Closing Remarks として、**NIMS の宝野理事長**が締めくくりの講演を行った。「Permanent Magnet Research at NIMS – ESICMM Succeeded by Permanent Magnet Materials Open Platform and DXMag」と題し、ESICMM の研究終了に伴い、MOP (磁石マテリアルズオープンプラットフォーム) と DXMag (データ創出・活用型磁性材料研究拠点) に引き継がれていること、およびそれらの研究概要について紹介した。最後に、次回 REPM が NIMS 主催で 2025 年 7 月 27~31 日につくばで開催されることが紹介された。