

TODAY

マイクロマシン／MEMSの30年を超えて



一般財団法人マイクロマシンセンター
副理事長・専務理事
長谷川 英一

一般財団法人マイクロマシンセンターは工業技術院の大プロとして1991年にスタートしたマイクロマシンプロジェクトの推進のために設立されました。つまり今年センター設立30年に当たる年となります。これまで推進したプロジェクトは図1のように20ほどとなりますが、一貫してMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の基礎、設計・製造、異分野融合、IoT化、高精度化と、我が国MEMSの発展に少なからず貢献できてきたかと思えます。

そのMEMSですが、定義的には、半導体製造技術等の微細加工技術を応用し、微小な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだセンサ、アクチュエータ等のデバイスのこと、となります。その特徴は、電気信号のみならず、物理信号を入出力するという、デバイスの中に動くものが入ります。圧力センサではダイヤフラムがペコペコ動きますし、加速度センサではおもりが慣性力で動き、デジタルミラーデバイスではミクロン単位の多数の鏡が動きます。そのMEMSが、最も多く使われているのがスマホや自動車などで、スマホでは加速度センサ、ジャイロセンサ、マイクなど、1台の中に数十個も入っていますし、自動車ではそれ以上の種類と数の高性能MEMSが使われています。MEMSの市場規模としては、世界で1.5兆円程度と、半導体のわずか1/30ほどですが、日本企業も2割弱のシェアを有していますので、その維持・拡大に努めていかなければなりません。

さて、30年のMEMS研究開発の経験を踏まえ考える

と、今後の発展の方向は3つではないでしょうか。その第1は、今の計測限界を大きく超えるということで、既にNEDOが革新的センシングというプログラムで開始しており、私共もヘルスケア系の2プロジェクト (BaMBIとSNIF) で参加しています。第2は測れないものを測るというもので、例えば感性を簡易に計測しデジタル化できれば、人の安全・安心や快適性、作業効率などを高めることに役立つでしょう。

第3が環境調和型MEMS (EfriM: Environment friendly MEMS) と呼ぶもので、機械システム振興協会からの受託で研究開発戦略を策定したところです。今のIoTに先行して、2011年からGSN、UCoMS、RIMS、LBSSと呼ぶMEMS応用プロジェクトを続け、コンビニ、熱供給施設、鋼橋、工場など多くのIoTシステムを研究してきました。ただそれらは限定空間のシステムであり、フィジカル空間を全てサイバー空間に移すというような広さを意識したものではありません。広大な空間への適用の困難さは、MEMSの使用量が膨大になると期限切れのものを回収できず、大きな環境問題を惹き起こさないかというところにあります。これを解決するには、MEMS自身を自然に還る材料で作ったり、自然の中に無害のまま固定化できるようにすることが必要です。本戦略では、図2のようにインフラ、災害、農業分野で有望なシステムを提案し、そのプロジェクト化を目指しています。

MEMSは未だ30年ほどの歴史しかありませんが、そのフィジカル空間での活用はさらに拡大し、それがサイバー空間の入り口となって、真のCPSを形成できる鍵となります。この先にご期待ください。

(詳細は当センターホームページ (<http://www.mmc.or.jp/>) をご参照下さい。)



図1 マイクロマシンセンターの30年の歩み

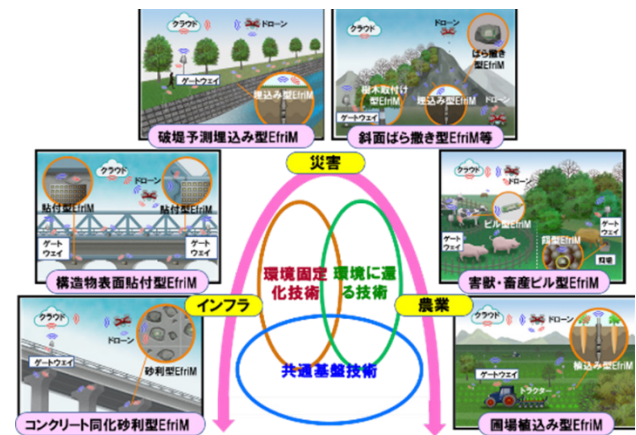


図2 環境調和型MEMSの有望適用事例と研究開発戦略

希土類ならびに将来磁石とその応用に関する国際会議 REPM2021 @ ボルチモアに参加して

高効率モーター用磁性材料技術研究組合 主席研究員 谷川 茂穂
一般財団法人金属系材料研究開発センター 磁性・先進技術研究部長 豊田 俊介

1. はじめに

高効率モーター用磁性材料技術研究組合 MagHEM の技術調査活動の一環として、2021年6月7日～11日に米国ボルチモア（デラウェア大）を拠点としてオンラインで開催された希土類ならびに将来磁石とその応用に関する国際会議 REPM2021 に参加し、高効率モーター用磁性材料を中心に技術動向を調査したので概要を報告する。

2. 希土類ならびに将来磁石とその応用に関する国際会議 REPM2021 の概要

REPM(International Workshop on Rare-Earth and Future Magnets and Their Applications) は2年毎に北米、欧州、アジアで開催される永久磁石材料に関する国際ワークショップである。今回、オーラル+ポスターで約110件の講演発表があり参加者は約200名であった。表1にセッション毎の発表件数を、図1にオーラル発表の国地域別割合を示す。

表1. セッション毎の発表件数

セッション名	オーラル件数	ポスター件数
基調講演	11	-
NdFeB 系磁石	13	9
1-12 系磁石	8	3
希土類フリー磁石とその理論設計	13	5
Sm-Co, Fe 系磁石	4	5
新しいプロセス技術	6	5
磁石の応用	3	1
各地域の磁石材料開発	6	-
希土類資源と市場	3	1
リサイクル	2	7
ミクロ磁性と機械学習	3	1
フェライト磁石	-	4

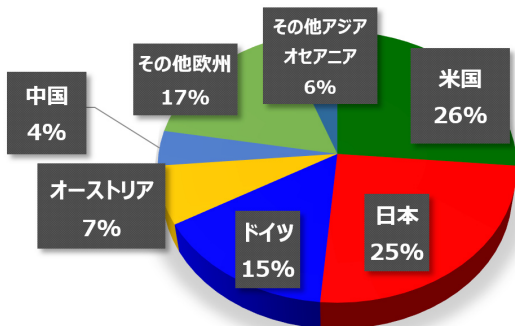


図1. オーラル発表の国地域別割合 (全72件)

2-1. 基調講演の概要

Searching for perfect defects - challenging the Brown's paradox in permanent magnetism

Oliver Gutfleisch 氏 (ダルムシュタット工科大、独)

CO₂ゼロエミッションに向けた希少材料への備えが必要。2050年CO₂ネットゼロに向け、2030年には太陽光発電、風力発電を4倍に、電気自動車を18倍に拡大し、GDP当たりのエネルギー消費量を年率4%削減してゆかなければならない。2050年には、原油供給量は1/4に、希少鉱物の需要は7-8倍に、太陽光と風力発電の割合は8倍に増大する。Ndは電動自動車に1台当たり700g、風力発電機1MW当たり200kg、コンピューター等の冷却装置に1kwあたり1.5kg、ロボット及び産業用モーターにも多くが使われており、その需要総量は年々増大する。

ダルムシュタット工科大では磁石関連テーマに重希土類元素フリー、省レアアース、Ndフリー、非レアアースの視点から取り組んでいる。HoMMageプロジェクトでは電動車、風力発電機、磁気冷凍等での効率的エネルギー変換の観点からヒステリシス設計を行った。異方性磁場に対して保磁力の高い究極の粒界構造、ミクロ組織を探索している。HDDRプロセスを用いた異方性NdFeB/Feナノコンポジット粉末、レーザーパウダーベッド溶融による3Dプリンティング、リサイクル、高温用SmCoピンニング磁石、SmFe₁₁Ti・V磁石、Sm₅Fe₁₇基コンポジット磁石、Li₁₀Mn-Al磁石、CoFeNiTaAl高エントロピー合金などの紹介があった。

Mine to Magnets: The Rare-earths Supply Chain for Permanent Magnets

Joseph Gambogi 氏 (米国地質調査所 USGS、米)

希土類資源のグローバルなサプライチェーンについて概説。希土類資源は中国、ベトナム、ブラジル、ロシア、インド、オーストラリアなどに約1億2000万トン賦存。希土類鉱石の採鉱量は1960年より年々増大し、2005年から2010年にかけて採鉱はほぼ中国のみとなったが、以降、中国以外での採鉱量が増え、中国の生産量比率は現在約60%となっている。希土類元素の用途は、磁石用(30%)、触媒、研磨剤、電磁材料、合金元素、ガラス材料、セラミック材料、蛍光材料、などでNdFeB磁石には約15万トン/年の需要がある。米国では触媒向けが75%と多い。中国の希土類磁石の輸出量は年々増大しており、向け先はドイツ、米国、韓国、ベトナム、タイ、イタリア、デンマーク、台湾、日本、ロシア。鉱石から磁石製造まで一貫したサプライチェーンを保有しているのは中国のみ。米国では保有する工程を増大させようとしており、ドイツでも希土類磁石を製造するなど、各国で中国依存度を下げるための事業・技術開発が進められている。

Latest major developments on permanent magnets

Satoshi Hirosawa 氏 (NIMS、日本)

ESICMM プロジェクトの 10 年間の研究開発成果を軸に最先端の磁石材料技術をレビュー。“ナノコンポジット化、ギャップ磁石など希土類フリー、省希土類磁石の開発状況”、“粒界拡散技術、コアシェル構造化等による NdFeB 磁石の高性能化と保磁力メカニズムの理論”、“Ce 分布など粒界制御による省 Nd 磁石”、“低酸素プロセスで作製した Sm₂Fe₁₇N₃ によるボンド磁石”など紹介。

Recycling of rare earth magnets

Allan Walton 氏 (バーミンガム大、英)

水素吸蔵解砕プロセスをベースとする Nd-Fe-B 焼結磁石のリサイクル技術を紹介。2000 年代前半から水素吸蔵を利用した磁石リサイクル技術開発に取り組み、スクラップを再利用するためのベース技術を開発した。現在、経済性を含めたエンジニアリングの開発が SUSMAG プロジェクトを中心に行われている。欧州は 2030 年までに域内で使用する希土類磁石の 30~50% をリサイクルで賄う目標を掲げている。HDD、スピーカー、自動車などからの Nd スクラップ源の形態は、分離された磁石、コンポーネント、製品全体スクラップなど様々。リサイクルの障壁は、スクラップ中磁石成分の見極めと相違、製品当たりの使用量の小ささ、皮膜除去、製品時に比した酸素含有量の増大、磁気帯び、リサイクル分離を前提としていない製品設計、経済性、リサイクル材供給網の未整備、など。

Energy Conversion for a Sustainable Future: Revived Role of Power and Energy

Ayman El-Refaie 氏 (IEEE フェロー、マーケット大、米)

エネルギー・産業・運輸部門の電動化の技術動向と用途指向型磁石モーター / 発電機の開発事例を紹介。GE では大型の洋上風力発電機の開発を進めている。地熱発電でも磁石発電機が使われようとしている。いずれも耐障害性が重要。鉱山掘削機、高速鉄道、電動・ハイブリッドの船舶・航空機用でも磁石モーターの適用検討が進んでいる。

Introduction of development of magnetic materials for high-efficiency motors in Japan's national project MagHEM Kimihiro Ozaki 氏 (産総研、日本)

MagHEM プロジェクトの活動内容と研究開発成果を紹介。

The Future of Permanent Magnets in Electrified Aircraft Propulsion

Thomas Jahns 氏 (ウィスコンシン大、米)

航空機推進システムにおける電動機の技術動向と課題を、システムの信頼性に焦点を当て解説。航空機の推進システムには故障が 10¹⁰ 時間に 1 回未満の信頼性が求められ、回路短絡時の対応も必要。冗長性と修復性が重要。NASA は ULI プロジェクトで出力 1 MW、20,000rpm、パワー密度 10kw/kg の SPM モーターを Sm₂Co₁₇ 磁石を使って開発した。

2-2. NdFeB 系磁石に関する講演

オーラルセッションで 13 件の講演があった (欧州 7

件、日本・韓国各 2 件、米国・シンガポール各 1 件)。

Development of high-performance RE-Fe-B anisotropic powders and their bonded magnets (マグネクエンチ社、シンガポール)

ナノ結晶異方性ボンド磁石粉末の紹介。自動車向けの需要が 57% と増えている。メルトスパン→熱間加工→クラッシングで製造。Dy、Co フリーの新しい化学組成の製品を開発。120~150℃の時効処理で長期特性安定性を、120℃のクーラント浸漬により耐食性を評価。

High performance NdFeB micro-magnets: current status and future prospects

(フランス国立科学研究センター、仏)

バイオ、MEMS、マイクロアクチュエーター等用途の Nd-Fe-B 薄膜磁石材料とマイクロサイズ磁石を用いた磁気デバイスの研究開発を紹介。磁石材料をマイクロパターンニングで 50μm の厚さで蒸着。

Improved coercivity and squareness in bulk hot-deformed magnets by two-step grain boundary diffusion process

Xin Tang 氏ら (NIMS、日本)

2 ステップ粒界拡散法により熱間加工磁石を高保磁力化。熱間加工磁石に Cu-Tb を粒界拡散させると保磁力は向上するが、磁石表層部と中央部のミクロ組織形態の違いが角型性を下げてしまう。2 ステップ拡散法を適用することで元素分布が均質化され角型性が向上。

The Effect of Microstructure on the Hydrogen Ductilisation Process (HyDP) for NdFeB Alloys

(バーミンガム大、英)

NdFeB 焼結磁石 NEOMAX® を素材とし、HDDR プロセスを途中で止める HyDP プロセスを検討。室温での変形が可能でニアネットシェープでの磁石製造の可能性がある。

Nd-Fe-Co-B permanent magnets for high temperature application: intrinsic properties, phase formation, microstructure engineering and coercivity mechanism

(ダルムシュタット工科大、独)

Nd-Fe-Co-B システムのレビューと考察。Nd-Fe-磁石に Co を加えても粒界相をうまく形成できないと保磁力は下がる。Co20% では粒界に Nd rich 相が形成され、磁化と高温保磁力の良いバランスが得られる。

On the temperature-dependent coercivities of anisotropic Nd-Fe-B magnets

H.Sepehri-Amin 氏ら (NIMS、日本)

異方性 Nd-Fe-B 磁石の保磁力の温度変化を、理論とミクロ構造解析を組み合わせ考察。粒界の傾角の保磁力への影響は、磁化反転機構がピンニングタイプとニュークリエーションタイプで異なる。Nd₆₀Tb₂₀Cu₂₀ の拡散種を 2 ステップ粒界拡散法で熱間加工磁石に拡散させると、Tb 拡散磁石と比べ優れた特性が得られた。

Influences of Ce or Ce-La substitution on hot-press and hot-deformation behavior of Nd-lean Nd-Fe-B magnets (韓国物質材料研究機構 KIMS、韓国)

(Nd_{1-x}M_x)₃₀Fe₆₃Ga₁Co₆B をベースとした熱間加工磁

石の、Ce、Ce-La 置換の影響を評価。Ce、Ce-La 置換は結晶粒のアスペクト比を下げ、粒界相を減じ磁化と保磁力を徐々に下げる。Nd-Cu6wt%粒界相は特性を上げる。**Rapid consolidation of Nd-Fe-B-type powders as a useful tool for the manufacture of permanent magnets with additional functionalities**

(ヨーゼフ・ステファン研究所、スロベニア)

マグネクエンチ社製のメルトスパンフレーク状 NdFeB 粉末から放電プラズマ焼結法でネットシェーブバルク磁石の製造を試みた。組成の異なるパウダーでマルチコンポーネントマグネットの製造が可能。

2-3. 1-12 系磁石に関する講演

オーラルセッションで日本 4 件、欧州 3 件、米国 1 件の計 8 件の講演があった。日本からの講演はいずれも ESICMM プロジェクトにおける研究成果の報告。

Recent advances in SmFe₁₂-based permanent magnets
Yukiko Takahashi 氏 (NIMS、日本)

Sm(Fe_{0.81}Co_{0.19})₁₂ 磁石の固有特性を薄膜で評価。B の粒界拡散で $\mu_0 H_c = 1.2T$ 、CuGa の粒界拡散で $\mu_0 H_c = 0.84T$ 、MgZn の粒界拡散で $\mu_0 H_c = 0.87T$ の保磁力が得られた。NdFeB との保磁力の差は粒界の磁化にもよる。(SmZr)-(FeCo)-Ti バルク磁石も検討。

Reasons for low coercivities in ThMn₁₂-type SmFe₁₁Ti alloys (ダルムシュタット工科大、独)

SmFe₁₁Ti における双晶の形成過程と保磁力への影響を評価。カー効果顕微鏡による磁区観察により双晶境界を起点に磁化反転が起こることを確認。保磁力の向上には双晶発生を抑制する必要があり微細化が有効。

Development of Rare-Earth-Lean Sm(Fe,Co,Ti)₁₂ Alloys for Permanent Magnets (デラウェア大、米)

最近の Sm(Fe,Co,Ti)₁₂ 型磁石の研究開発動向を包括的にレビュー。還元拡散プロセスによる粉末で高い保磁力が得られている。

Effects of elemental substitutions on the magnetic and microstructure properties of Sm(Fe,V)₁₂ alloys and fully dense magnets (バスク大、スペイン)

保磁力の向上とバルク化を目的に、Sm_{1-x}Zr_xFe₁₁V 合金を作製し構成相と磁気特性を評価。メカニカルミリングでアモルファス→結晶化により合成した Sm-Fe-V 合金を熱処理したナノ結晶粉末を、圧密化した相対密度 92% のバルク磁石で 1 T の保磁力が得られた。V の一部を Cu で置換した粉末を熱間加工で圧密化したバルク磁石 Sm₁₂Fe₇₄V₁₂Cu₂ では、Cu と Sm が濃化した粒界相が得られ、保磁力 0.96T、飽和磁化 0.68T、(BH)_{max} 42kJ/m³ の良好な特性が得られた。

Denitrogenation process in ThMn₁₂ nitride by in situ neutron powder diffraction (デラウェア大、米)

メルトスピニング法により作製した薄帯をベースに窒化処理した 1-12 系 Nd 磁石 (Nd_{0.75}Pr_{0.25})Fe_{10.5}Mo_{1.5} の窒化物粉末で保磁力 0.6 T を超える高磁気特性を確認。この 1-12 系化合物粉末の熱安定性を中性子線回折でその場観察。約 900K まで安定で低温焼結によるバ

ルク化の可能性がある。

2-4. 希土類フリー磁石とその理論設計に関する講演

オーラルセッションで 13 件の講演があった (米国 5 件、欧州 5 件、日本 3 件)。

Theoretical study of CaCu₅-type derived structures
Takashi Miyake 氏 (NIMS)

1-5 構造から派生した R_{m-n}T_{5m+2n} 系を第 1 原理計算で理論検討 (Sm-Co 系、Sm-Fe 系)。Fe のダンベル構造の導入と生成エネルギーの関係を考察。機械学習によるスクリーニングを併用。記述子の選択が難しい。(Nd,Pr,La,Ce)₂(Fe,Co,Ni)₁₄B での組成の影響も検討。

High-throughput search for rare-earth free permanent magnets (ウプサラ大、スウェーデン)

L₁₀ FePt など原子スピン動力学に基づき、結晶磁気異方性を推定。Co₃Mn₂Ge など新しい磁性材料の探索を行っている。データフィルタリング、データマイニングを併用。

Ab Initio Design of New Compounds for Permanent Magnets (ネブラスカ大、米)

第 1 原理に基づく新しい磁石材料の設計の可能性と課題を概説。3d 電子、4f 電子による磁性が重要。MnAl のフェロ磁性、Mn 合金、希土類など。

Novel bulk non-rare-earth Mn-Bi permanent magnets processed by severe plastic deformation
(エーリッヒ・シュミット機構、奥)

高圧ねじり加工による、Mn-Bi 磁石の高機能化の検討。**Recent Progress of α -Fe₁₆N₂ Bulk Rare-earth Permanent Magnet and its Potential Applications** (ミネソタ大、米)

低温窒化により作成した α -Fe₁₆N₂ のバルク、リボン、薄膜材磁石を検討。スピーカー用途がターゲット。

On the Trail to Tetrataenite – Recent Results Concerning Synthesis of L₁₀-type FeNi (ノースウェスタン大、米)

米国独自の磁石材料供給網の構築政策を背景とした窒化プロセスを適用した L₁₀ 型 FeNi の検討。縦型管状のマルチドライバー炉による焼鈍を実施。

Magnetic Properties, Microstructure and Texture of Extruded MnAl-C-Ni Magnets (IFW ドレスデン、独)

(Mn₅₃Al₄₅C₂)Ni_{0.6} の 20-60 μ m 粉末を熱間押ししプロセス条件の影響を評価。高保磁力、高残留磁化が狙い。

Compaction of Co nanowire assemblies with high energy density (テキサス大、米)

針状 Co ナノワイヤーで、Co の結晶磁気異方性を超える高い保磁力を発現させた。磁場配向させたナノワイヤーを占積率 60% で固めたバルク体で 20MGOe のエネルギー積を実現。ナノワイヤーの長軸方向が c 軸である、単結晶または単磁区粒子で構成されていると想定。

2-5. Sm-Co,Fe 系磁石に関する講演

オーラルセッションにて日本 2 件、中国 1 件、ロシア 1 件、計 4 件の講演があった。

Phase transition in 2:17-type Sm-Co-Fe-Cu-Zr magnets (西安交通大学、中国)

300 °C 以上の用途を念頭に 2-17 系 Sm-Co 磁石

Sm₂₅Co_{50.2}Fe_{16.2}Cu_{5.6}Zr_{3.0}wt%を開発。高速鉄道用モーターに採用された。HCP / FCC 変態に伴い生成する欠陥濃度を下げるには時効温度を上げることが有効で (BH)_{max}、保磁力も向上。

Correlation of hard magnetic properties and microchemistry of Sm-Co-Fe-Cu-Zr magnets with varying Fe concentration Oksana Golovnia 氏ら (ロシア)

レーダーシステムへの適用を念頭に高温耐熱型 Sm 系磁石 Sm(Co,Fe,Cu,Zr)_x を検討。~500℃までの HTPM と、~300℃の HEPM の 2 グレード。保磁力への 400~700℃でのステップクーリングの影響を評価。

2-6. 新しいプロセス技術に関する講演

オーラルセッションで欧州 4 件、日本 2 件の講演があった。

3D printing of locally aligned magnetic anisotropic hard magnetic particles (ウィーン大、奥)

3D プリンティングにより等方性/異方性磁石を製造。まず Magnetic フィラメントを作り、NdFeB、Sm₂Fe₁₇N₃ ボンド磁石化。プレスボンド磁石と比較して質量が 18%低い。選択的レーザー焼結法やレーザー粉末床溶融法によりハルバッハ配列の NdFeB 磁石を 3D プリンティングで作成し特性を評価。

Additive Manufacturing - Perspectives for RE-based magnets (アーレン大、独)

希土類磁石の 3D プリンティング技術への取り組み。レーザー粉末床溶融プロセスにおいて、酸化抑制のためチャンバーを装備し Fe₇₅Nd₁₈B₇ を試作。Nd 相が残存するもポストアニールで保磁力が向上。Sm₂(CoCuFeZr)₁₇ はポストアニールで保磁力と磁化が増大。

Advances in the fabrication of rare earth-free and hybrid permanent magnets: from the nanostructuring of gas-atomized MnAlC and synthesis of tuned composites to additive manufacturing

(IMDEA ナノサイエンス、スペイン)

E-スクーター、E-バイク、E-カーへの適用を狙いとして希土類フリー磁石の 3D プリンティング製造プロセスを検討。Sr フェライト / NdFeB + エチレンエチルアクリレート の複合材料を溶融フィラメント法で作成。ヘガネス社の MnAlC ガスアトマイズパウダーを原料に、溶融鑄造によりフィラメントを作りバルク磁石を製造。

2-7. 磁石の応用に関する講演

Direct bonded magnet injection into a rotor for heavy-rare-earth free 150 kW electric vehicle motor (Modul ED プロジェクト、欧州)

高出力 EV 用重希土類フリーボンド磁石プロセスの開発。ボンド磁石をロータへ直接射出成型するプロセス設備を製作。2.3 万回転のプロトタイプモーターを試作し、NdFeB 焼結磁石モーターと特性を比較した。

2-8. 各地域の磁石材料開発に関する講演

磁石材料の研究開発状況を世界の地域毎にレビュー。

Latest Developments in Permanent Magnets in Europe (VAC、独)

高性能磁石の欧州域内でのサプライチェーン構築を狙いとした磁石開発プロジェクトを紹介。NOVAMAG プロジェクトではフラウンホーファー研究所が Sm-Fe-V 粉末を作成し、VAC で焼結磁石を評価。UPGRADE プロジェクトでは Dy 削減に取り組んでいる。SUSMAGPRO ではリサイクルに取り組み、SecREEs プロジェクトでは 100% 完全リサイクルマグネットの作成を行っている。HOMAG プロジェクトでは自動車用、航空機用回転機の 50% パワー密度向上を目指している。VACODYM802XDTP は非酸化プロセスで製造した欧州製マグネット。VACOMAX262TP は軸方向 / 横断方向の圧縮を用いたニアネットシェイプの Sm₂Co₁₇ 焼結磁石。(BH)_{max} は 280kJ/m³ 程度。

Latest Developments in Rare Earth Permanent Magnets in China (中央鉄鋼研、中国)

希土類磁石は航空宇宙、軍事、輸送、情報、産業、自動化、生活など広く使われている。中国における磁石の種類別シェアは、NdFeB 焼結磁石が 95%、NdFeB ボンド磁石が 4%、SmCo 焼結磁石が 1%。NdFeB 焼結磁石の生産は急速に増大し続けており 2021 年には 20.3 万トンに達する見込み。Nd、Tb、Dy の価格は上昇基調にあり、Ce、La は余剰となっている。磁石メーカーは性能・コストで競っているが競争が厳しく大手メーカーによる寡占化が進むと考えられる。省 Tb の Tb/Al 複合拡散など Tb、Dy 量を下げる様々な粒界拡散技術が広く実生産に適用されている。Pr/Tb/Al 複合拡散を行うと長距離拡散が可能となる。Ce 磁石は生産、研究開発の両面から高く注目されている。2 相合金法などにより Ce 濃化粒と Ce 希薄粒を存在させるなど、La、Ce 添加による磁化・保磁力の低下への対策が施されている。Ce 磁石の生産は急速に伸びており 2021 年には 6.1 万トンに達すると考えられる。中国の伝統的な成形プロセスである配向成形+冷間等方圧加工は、冷間等方圧加工工程の省略に移行しつつある。生産技術においては自動化、AI 化、高効率化が進められている。

New sustainable processing of RE-based magnetic materials (ヨーゼフステファン研究所:スロベニア)

永久磁石に使われる希土類資源の持続的有効活用を狙いとしたプロジェクトの紹介。NdFeB 磁石は風力発電機や電動モビリティなど持続可能グリーンエネルギー社会に不可欠であるが、希少元素が使われている点が課題。NdFeB 磁石は 2035 年にかけてますます需要が増大するが、欧州では、その資源の 97% を中国に負っている。使用済み製品からのリサイクルと、リサイクル NdFeB 磁石の利用に関する研究が重要。欧州では、7FP、H2020、ERA-MIN2、EIT Raw Materials などの電動自動車のプロジェクトの中で省 Dy、Tb 磁石、リサイクルなどに取り組んでいる。Maxcycle プロジェクトでは水素を使い、酸を使わないリサイクル技術が検討されている。コーティングとの分離技術も重要。

Making Strong, Less Critical Magnets - Recent Work from the Critical Materials Institute (AMES 研、米)

米国 CMI では NdFeB、SmCo 代替磁石の研究開発に取り組んでいる。Ce 磁石、La,Ce で置換した Sm₂Fe₁₇N₃ 磁石、CeCo₅、Ce₂Co₁₇ ベースの Fe 置換磁石など。

Latest Developments in Permanent Magnets (Electron Energy 社、米)

米国における磁石の用途と開発状況をレビュー。新しい用途として、陽子線がん治療機、キログラム原器 (Sm-Co)、新世代加速器 (NdFeB) などへの適用例を紹介。
10 years of the Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials K. Hono 氏ら (NIMS、日本)
ESICMM プロジェクトの取組みと成果を紹介。

2-9. 希土類資源と市場に関する講演

What Did We Learn From the Rare Earth Crisis?

(アイオワ州立大、米)

米国エネルギー省は 2011 年に希土類などの希少金属に対し戦略の 3 本柱、①供給ルートの多様化、②持続可能材料の開発、③再利用・リサイクルの推進、を立案し 2013 年に CMI が設立された。世界の希土類磁石の生産量は 1950 年から 2020 年にかけて年率 13% で増大し続けている。希土類磁石の中国のシェアは 2020 年に約 60% まで低下したものの、精錬・精製プロセスなど、バリューチェーン全体における中国への依存度は依然高い。2011 年の希土類高騰の結果、米国では一時的に自動車での希土類磁石の使用をやめた。2012 年以前ではガソリン車で 350g/台使っていたが、2012 年以降はドアスピーカーのみ 40g/台となった。2015 年のテスラモデル X では誘導モーターが使われた。しかしながら、高効率、小型、軽量の観点から 2017 年のテスラモデル 3 では希土類磁石モーターが使われた。高航続距離が必要とされる自動車主機モーターにおいて希土類磁石モーターは不可欠と考えられる。風力発電はこれまで 3MW 程度の陸上が主体であった。希土類高騰の際には、誘導モーター+ギアで対応したが、ギアボックスが壊れ、その後希土類磁石発電機へ回帰した。発電量が大きくメンテナンスフリーが求められる洋上風力では希土類磁石モーターが不可欠。希土類磁石のリサイクルを製品寿命 6 年と仮定し計算したが最大でも需要量の 15% しか賄えない。

U.S. Rare Earth Policy – Continuing Promise for the Future (J.A.Green & Company、米)

米国の政策において、2010 年代は磁石製造に関して力が注がれていた。2017~2018 年にはサプライチェーン全体に焦点が集まり 2019 年に政府のアクションが定められた。重希土プロセスを含め Urban Mining Company、TDA Magnetics、Lynas Corp、Blue Line Corp、MP Materials など関係企業に財政的サポートが行われた。米国国防総省はプライオリティとして、希

土類の分離精製、EV バッテリーを挙げている。

Creating a sustainable Rare Earths supply chain (Lynas 社、豪)

豪州希土類資源採鉱会社 Lynas 社の紹介。持続的な希土類資源の供給を狙いとして 2012 年に稼働を開始したマウントウェルド鉱山は、NdPr の良質な鉱山で採掘可能量も多い。現在、下工程を含めた環境負荷低減、LCA、トレーサビリティに取り組んでいる。

2-10. リサイクルに関する講演

Urban Mining for Sustainable Production, Recovery, Reprocessing and Reuse of Rare-Earth Magnets (Urban Mining 社、米)

テキサス州で NdFeB 焼結磁石のリサイクリングに取り組んでいる。2020 年 4 月に設備を立ち上げた。100% 製品リサイクルからの磁石を使い、省プロセスで 2,000 トン/年の NdFeB 焼結ならびにボンド磁石を製造する計画。モータ、HDD、MRI、風力発電機等からのリサイクルマグネットから、Br=1.4T、Hc=1042kA/m、(BH)_{max}=391kJ/m³ の磁石を製造。量・質を安定的に供給することが課題。

Closing the value chain in electromobility

(フラウンホーファー研究所、独)

電気自動車において、主機補機あわせて 1.5~2.5kg の NdFeB 磁石が、300~500kg の Li-イオンバッテリーがそれぞれ必要であり、これらの循環経済のための研究開発を行っている。元素別では特に重希土類の供給リスクが高く Nd はこれに次ぐ。水素メカニカルリサイクルプロセスによる電動車のリサイクルを検討している。10~50kg のバッチ式磁石製造装置により、焼結、熱間加工、ボンド、Dy、Tb 粒界拡散磁石を製造。スクラップ磁石の安定的な供給が最大の課題。風力発電機には約 500kg/MW の NdFeB 焼結磁石が使われているが、ドイツの風力発電機のスクラップ化は 2040 年頃からとなる。NdFeB 焼結磁石を使った EnWheel という蓄エネルギーのための最大 4 万 5000 回転のフライホイールが検討されている。

3. まとめ

REPM2021 での技術動向調査により、米国・欧州・日本では CO₂ ゼロエミッション化に不可欠な希土類資源リスク回避と持続可能性の観点から高性能・省重希土類磁石材料とその応用開発が継続的に推進されていること、中国では余剰に採掘される Ce で置換した省 Nd 磁石の生産量を増大させていること、将来磁石としての Sm 系 1-12 型バルク磁石の実用化の方向性と見通し、各地域での磁石材料・プロセスの研究開発成果が社会実装に繋がりがつつあること、などを確認した。

The Japan Research and Development Center for Metals
JRMC NEWS / 第 419 号

内容に関するご意見、ご質問は JRMC 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複製・複製・転載することを禁じます。

発行 2021年9月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp