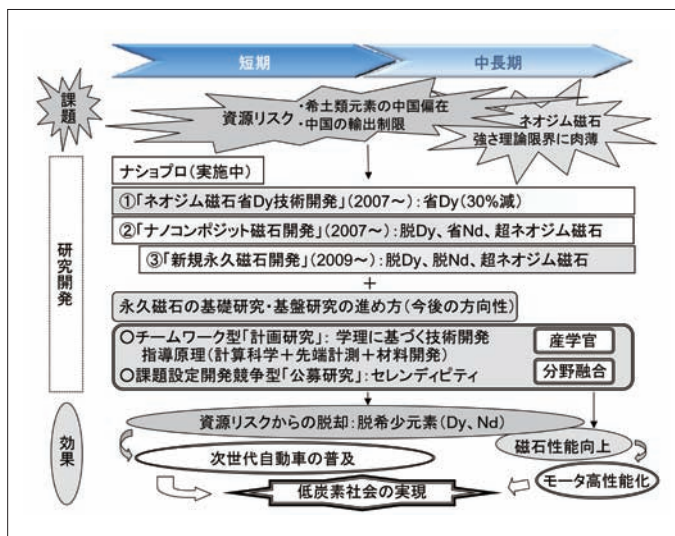


資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題

磁石の強さの向上は、モータの高トルク・小型・軽量化を可能とし、家電等の省エネルギー化を進めることにつながる。結果として、国内総消費電力の約52%を占めるモータ電力の節約、次世代自動車のさらなる低炭素化、風力発電用の発電機の性能向上等をもたらし、グリーン・イノベーションを推進する重要な要素のひとつと期待されている。1983年に今でも世界最強を誇るネオジム磁石が日本で誕生した。モータ用のネオジム磁石は、低炭素社会実現に必要な次世代自動車や省エネルギー家電等を支える重要な材料である。需要が著しく増加しているネオジム磁石の直面している喫緊の課題は資源リスクである。特に、モータが高温環境にさらされる次世代自動車等で用いられる磁石に必要なディスプロシウム (Dy) に資源的な問題があり、使用量を減少させるなどの研究目標が立てられている。

1917年に初めて人工永久磁石が作り出されて以降、発明された磁石の種類は十数種であり、磁石の研究開発は、画期的な発明・発見に約20～30年を要する挑戦的な研究である。新しい永久磁石は大胆な分野融合的発想あるいは情熱と偶然からもたらされてきたが、その歴史をみると日本人研究者や日本発の技術は大きな役割を果たしてきている。永久磁石の研究開発における、画期的な発明・発見のほとんどは実用化につながっており、それらの用途は、今後のグリーン・イノベーションにおいて大きなインパクトが期待されている。そこで、現在すでに、永久磁石の基礎研究・基盤研究として3つの国家的な研究開発プロジェクトが実施されているが、そのような公的資金の投入は今後も継続および拡充すべきであろう。具体的には、先端計測技術による構造・機構解析と計算科学による理論解析を組み合わせ、材料開発の新しい指導原理を獲得し、新化合物の発見や磁石としての合金組織化へとつなげていくチームワーク型の計画研究と、異分野研究者の磁石研究への参画を促し、個々の研究者の自由な発想に基づく研究提案を推進する公募研究を同時並行的に推進していくことが望まれる。

モータ用永久磁石の課題と今後の基礎・基盤研究の進め方



科学技術動向研究センターにて作成

資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題

小澤 純夫
客員研究官

1 はじめに

低炭素社会実現に必要な次世代自動車、省エネ家電等の基盤技術の一つがモータ用のネオジム磁石である。需要が著しく増加しているネオジム磁石の直面している喫緊の課題は、資源リスクである。特に、モータが高温環境下となるハイブリッド自動車、プラグイン・ハイブリッド自動車、電気自動車といった次世代自動車等で必要となる磁石のディスプレイウム(Dy)の資源問題が深刻である。

磁石の強さの向上は、モータの高トルク・小型・軽量化を可能と

し、家電等の省エネルギー化を進め、国内総消費電力の約52%を占めるモータ電力の節約、次世代自動車のさらなる低炭素化、風力発電用の発電機の性能向上等をもたらし、グリーン・イノベーションを推進すると期待されている。1917年の本多光太郎氏によるKS磁石鋼の発明以来、磁石の開発・製造・応用は日本が世界に誇れる技術であり、一貫して世界をリードしてきた。資源リスクへの対応とグリーン・イノベーションの推進が求められる中で、産業界など

の有識者らから、産学官の磁石研究者の総力を結集して磁石イノベーションを推進するために、磁石の研究開発のための人材育成を図るよう期待が寄せられている。

このような課題認識に基づき、2010年6月17日に産学官からなる「東北モータ磁石イノベーション戦略会議」が設立された¹⁾。本稿では、当会議での議論を参考に、モータ用永久磁石の研究動向と課題について述べる。

2 永久磁石の歴史

2-1

永久磁石のエネルギー積の年次変化

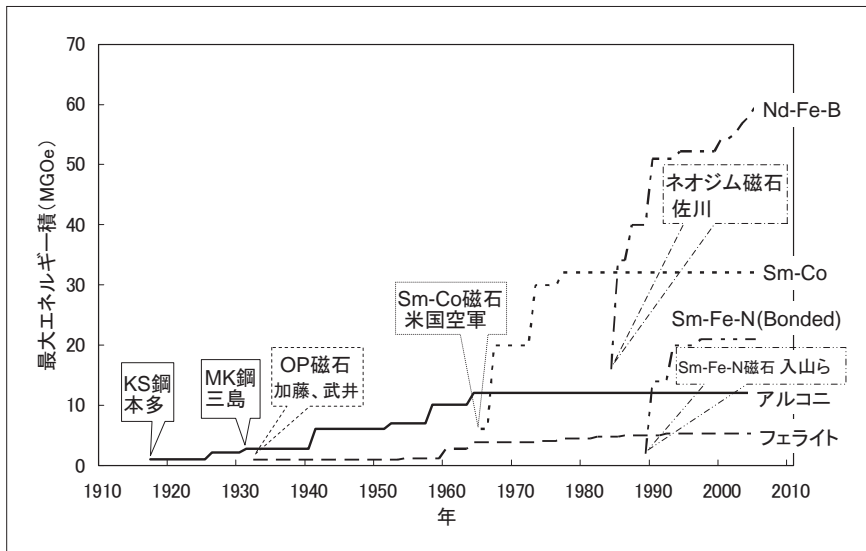
人類が天然の永久磁石を見つけたのは紀元前であり、紀元前600年には、ギリシアのマグネシアと呼ばれる地方で天然に磁化された磁鉄鉱を利用していたと言われていた^{2~4)}。しかし、人類初めての

人工的な永久磁石は、1917年に本多光太郎氏が発明したKS鋼である。本多氏は、可能性のあるすべての組み合わせを試験するという徹底した実験主義と、「人間はねばりだ、努力だ」という精神によって、KS鋼の発明を生んだと言われている。

図表1の永久磁石の開発の歴史を見ると、約90年間で永久磁石の強さは約60倍となっている。20世紀に入り工業的に応用できる強

力な永久磁石が登場したが、永久磁石の発展の歴史では、日本人研究者や日本の技術は常に大きな役割を果たしてきた。KS鋼の発明の後、1930年には、加藤・武井両氏が、フェライト磁石の基礎となるOP磁石を発明した。1932年には三島徳七氏が、アルコニ磁石の原点となるMK鋼を発明した。このMK鋼は保磁力がKS鋼の2~3倍であった。さらに、翌1933年、本多・増本氏らによりMK鋼の約1.5倍

図表1 永久磁石のエネルギー積の年次変化



参考文献^{1, 6, 7)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

の保磁力を有する新KS鋼が発明された。

その後、永久磁石の性能は、1960年代の後半から、希土類磁石であるサマリウム・コバルト磁石の登場によって大きく飛躍した。サマリウム・コバルト磁石は米国の空軍研究所により1968年に発明されたが、その性能向上には俵好夫氏等の日本人が貢献してきた。そして1983年に、佐川真人氏の発明により、現在まで世界最強を誇るネオジウム磁石が誕生した。

特許庁が日本の工業所有権制度創設百周年を機に選んだ十大発明家の中に、本多光太郎氏(特許第32234号:KS鋼)と三島徳七氏(特許第96371号:MK磁石鋼)と磁石関係で二人が入っている⁵⁾。20世紀に発明された磁石の種類は十数種であるが、耳目を集める画期的な発見・発明は、約20~30年に一度の長期間を要する挑戦的な研究の成果であったと言える。

2-2

永久磁石の研究開発におけるセレンディピティ^{8, 9)}

永久磁石においては、セレンディ

ピティ(偶然に幸運な予想外の発見をする才能)により画期的新材料が発明されてきたと言える。

1932年に三島氏によって発見されたMK磁石の開発舞台裏は次のとおりである。三島氏は、Fe-(25~26)%Ni合金において、磁気変態点が過熱・冷却によって著しく異なる理由を検討するために、添加元素により、その変態点の差を縮める実験に着手した。その添加元素としてアルミニウム(Al)を選択し、Alを添加した実験試料(Fe-Al-Ni)を所定寸法に削りだそうとした際に、削り屑が落ちてこなくて試料にくっついていることを偶然に発見し、MK磁石(Fe-Al-Ni合金)が生まれた。三島博士は永久磁石分野の専門家ではなかったが、幅広い知識と洞察力により偶然を見過ごさなかった。

1970年に当時の松下電器産業(株)が、1960年にフィリップス社が開発したマンガン・アルミ磁石に炭素を加え、熱間押出加工法および熱間鍛造加工法によるマンガン・アルミ・カーボン磁石を工業化した。この磁石は加工性に優れていることから現在でも一部用途で使われている⁴⁾。当時、マンガン・アルミ磁石は高い結晶磁気異方性を示し、コバルトを含有しない永

久磁石の候補として注目されていたが、実用化までには至っていなかった。松下電器産業(株)の久保氏らのグループは、マンガン・アルミ磁石の実用化研究において、試料を通常のるつぼで溶解し作製していたが、Siなどが不純物が混入してしまうため、カーボンるつぼを用いて溶解することにした。その結果、るつぼからカーボンが混入しインゴットが一晩で粉末化した。これが強力な磁石粉末であることがわかり、マンガン・アルミ・カーボン磁石が誕生した。

1983年の佐川氏によるネオジウム磁石の発明は、間違った仮説によりもたらされたと言える¹⁰⁾。佐川氏は1978年に「希土類磁石の基礎から応用まで」と題された研究会に出席し、磁石の研究開発のヒントを得た。研究会における浜野正昭氏の講演に、希土類元素Rと鉄(Fe)による金属間化合物 R_2Fe_{17} が永久磁石にならない理由は、FeとFeの原子間距離が小さすぎて強磁性状態が安定的でないとの説明があった。佐川氏は、鉄鋼中でCがFeとFeの原子間距離を広げていることから連想し、 R_2Fe_{17} にCやBなどの原子半径が小さい元素を合金化すれば、FeとFeの原子間距離を広げられるのではないかと仮説を立てた。佐川氏は翌日からすぐに実験を開始し、多種類のR-Fe-CやR-Fe-B合金をアーク溶解炉で作り、それらの磁気測定、結晶構造観察等を行い、ついにネオジウム磁石の発明に至った。しかし、後日、ネオジウム磁石の主相の $Nd_2Fe_{14}B$ 中でFeとFeの原子間距離はBを含まない R_2Fe_{17} 中とあまり変わらず、 $Nd_2Fe_{14}B$ 中でのFeのBによる磁氣的性質改善はFeの電子とBの電子の化学的相互作用によるものであることが解明された。佐川氏の研究開始時の仮説は間違っていたものの、結果的には多くの磁石研究者の中でも初めてR-Fe-B系を探索し、粘り強

く研究を続けて、世界最強の磁石を生み出した。

1990年には、サマリウム・鉄・窒素系永久磁石が旭化成(株)の入山氏らによって発見された。入山氏は、高橋実氏が発表したFeを窒化すると飽和磁化が向上するとの報告を聞き、窒化によって新しい磁石ができることを知った。そこで、Fe-30%mass%X合金(Xは周

期律表のうち入手可能な元素)を溶解および窒化し、結果的にサマリウム・鉄・窒素系永久磁石を発見した。入山氏も永久磁石分野の専門家というわけではなかった。もし専門家であれば、鉄・窒素($Fe_{16}N_2$)はソフト相であり、窒化により飽和磁化が上昇しても結晶磁気異方性が大きくならないと考えがちであるため、入山氏のよう

な発想には至らなかったと思われる。これも異分野出身の大胆な発想が新化合物の発見につながった例と言えよう。

このように歴史的に見て、新しい永久磁石は、大胆な分野融合的発想あるいは情熱と偶然からもたらされてきた。

3 モータ用永久磁石の現状

3-1

世界のモータを変えた世界最強のネオジム磁石

モータの回転部分には、以前は電磁石が使われていたが、最近特に小型用モータにおいてネオジム磁石板が使われ、小型軽量化と低騒音化が進んできている。ネオジム磁石を使ったモータが、早くから使われていた機器はエレベーターである。その後、洗濯機のモータにも用いられるようになり、脱水力が向上するとともに駆動音が小さくなった。また、重機でも用いられるようになってきている。従来の油圧方式ではエンジンを回し続けるため駆動音の問題があっ

たが、ネオジム磁石を用いたモータを使用することにより、住宅地や夜間工事でも重機を稼動しやすくなっている。

数量的には情報機器でネオジム磁石が多く用いられている(図表2)。ボイスコイルモータ(VCM)は、永久磁石の磁界中におかれたボイスコイルが流される電流に比例して直進運動をするリニアモータであり、パソコン用のハードディスクのヘッドの位置決め、カメラのズーム・絞り・シャッター、微細加工機のアクチュエータ等として用いられている。また、携帯電話の薄型化にもネオジム磁石は貢献している。携帯電話を薄くする際の課題はスピーカの薄型化であったが、超小型のネオジム磁石の利用により、厚さ1ミリ程

度の世界最薄スピーカの実現が可能となった。

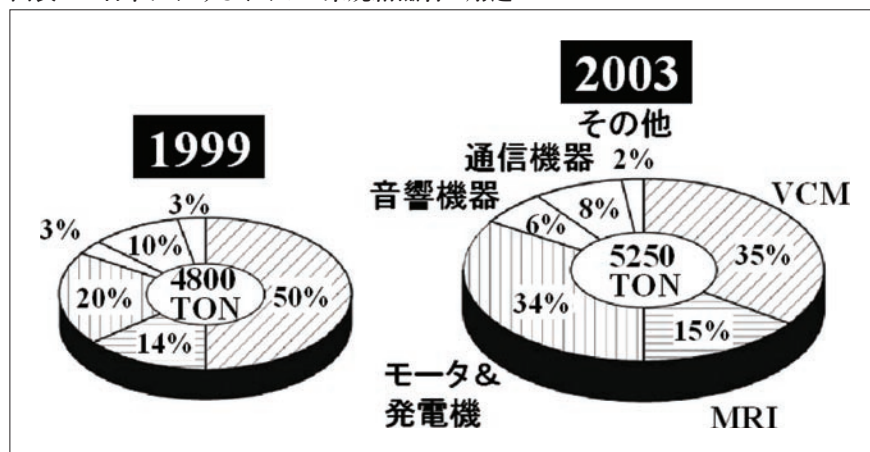
3-2

省エネルギー化の切り札であるネオジム磁石

日本においては、1990年代にパソコンの普及等の情報機器用途を中心としてネオジム磁石の生産が拡大してきたが、最近ではモータ用途の比率が高まっている。ネオジム磁石の生産量も急拡大してきている(図表3、図表4)。この背景には、気候変動枠組条約京都議定書の批准に伴い、CO₂等の温室効果排出量低減のために、電力消費の低減や機器の省エネルギー化が強く求められるようになったことが挙げられる。

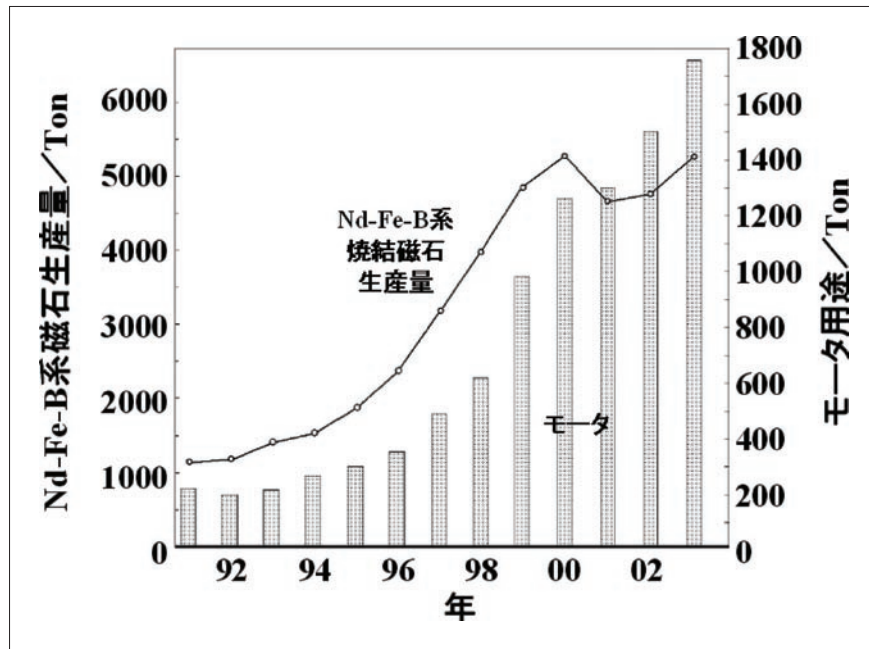
ネオジム磁石により、大きな省エネルギー化が実現された機器として、エアコンが挙げられる。エアコンでは電力の大部分がコンプレッサ用モータの駆動に消費される¹²⁾。以前は交流モータである誘導モータが使われていたが、1981年に初めてインバータ方式エアコンが販売され、1990年代には高効率なブラシレスDCモータが開発された。1999年の改正省エネルギー法の施行および2003年の省エ

図表2 日本におけるネオジム系焼結磁石の用途



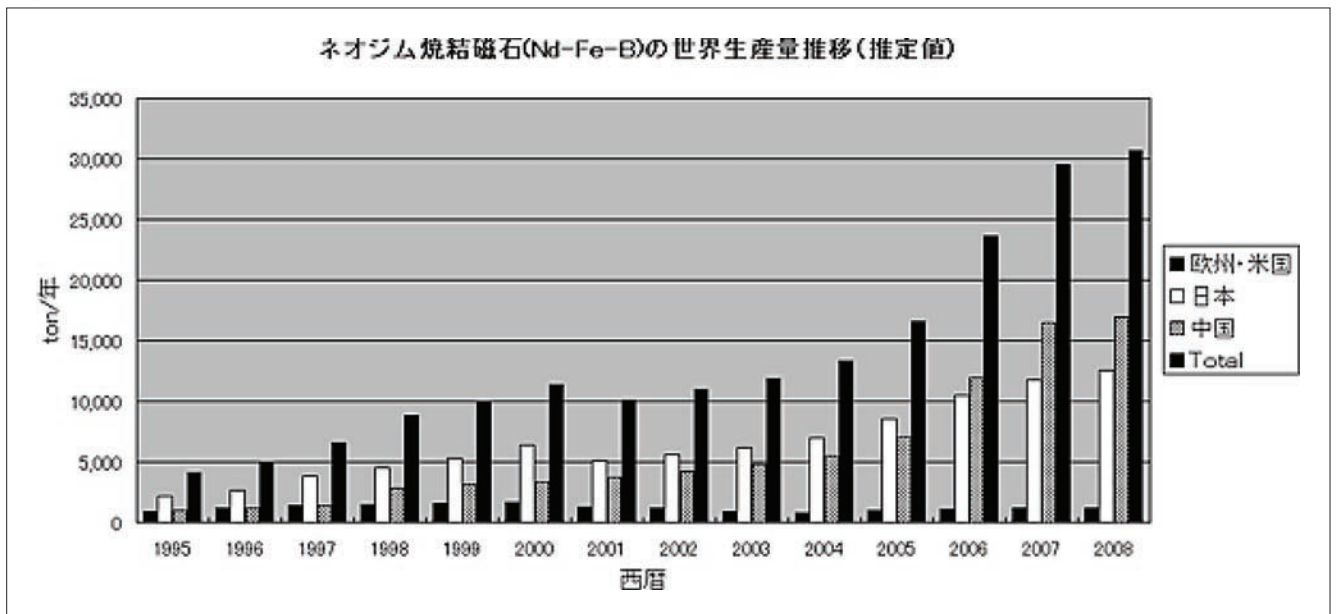
出典：参考文献^{2, 11)}

図表3 日本におけるネオジム系焼結磁石の生産量とモータ用途の関係



出典：参考文献^{2, 11)}

図表4 ネオジム系焼結磁石の世界生産量推移



出典：参考文献⁴⁾

エネルギー法基準導入に伴い、エアコンメーカーは一斉にエアコンの改良に乗り出し、大幅な省エネルギー化の実現のためにモータ性能の向上に取り組んだ。2003年以降、国内のほぼ全てのエアコンメーカーがネオジム磁石を採用し、省エネルギー化が達成されている。ネオジム磁石を利用した新型モータは、旧型モータと比較して特に低回転で効率が高く、約30%改善したとの報告例もある^{13, 14)}。しか

し、世界的に見れば、非インバータエアコンがまだ主流である。

現在、産業分野では永久磁石を使用しない誘電モータが数多く使用されているが、これらの多くをネオジム磁石を使用した永久磁石モータに置き換えれば、使用するエネルギー量を大幅に削減し、CO₂排出を大きく抑制できると期待されている¹⁴⁾。現在、国内総消費電力の約52%がモータで消費されているため、モータ効率を平均1%

向上させると50万kW火力発電所の約1基分相当の電力を節約することができる¹⁴⁾と試算されている。

近年、ネオジム磁石の利用が急拡大している製品は自動車用モータである。ハイブリッド自動車はネオジム磁石がなければ実現できなかったものの一つであり、ハイブリッド自動車の生産拡大に伴い、ネオジム磁石の生産も急拡大している。将来的にも、ハイブリッド自動車や電気自動車等の次世代自

自動車は生産増加が見込まれており、ネオジム磁石の生産もこのまま増加していくものと考えられる。

4 モータ用永久磁石の課題と研究プロジェクト

4-1

ネオジム磁石の課題

図表5に、ネオジム磁石の用途と組成の関係を示す。次世代自動車の用途では使用中に磁石の温度が200℃まで上昇する。しかし、ネオジム磁石は熱に弱いという欠点がある。どのような磁石材料でも温度上昇とともに保磁力は減少するが、特にネオジム磁石では主相のNd₂Fe₁₄B化合物のキュリー温度(磁化がほとんどゼロになる温度)が312℃と低い。そのため、次世代自動車やエアコン等の高い温度で用いられるネオジム磁石では、高温での保磁力を上昇させるため希土類元素ディスプロシウム(Dy)が添加されている。図表6にDyの製品別需要割合を示す。

一方、添加されたDyはNd₂Fe₁₄B化合物の結晶構造においてNdサイトに入り、Dyの磁気モーメントはFeと反平行に結合する性質があるため、磁石はDy添加によって磁化が減少し、最大エネルギー積(BH) maxが小さくなるという欠点が生じる。したがって、現在使用されているハイブリッド自動車のネオジム磁石は、Ndの約40%をDyで置換して高保磁力を得ているが、最大エネルギー積が約40%小さくなっている。

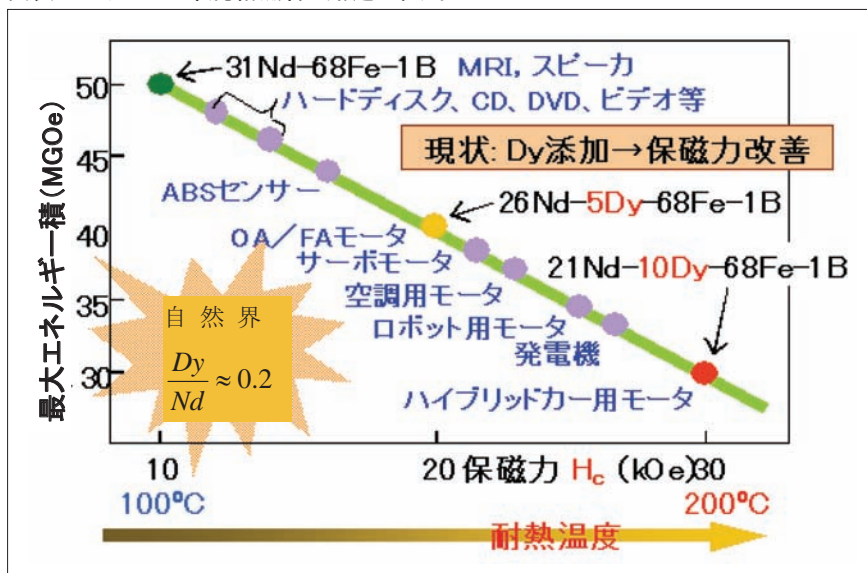
しかし、最大エネルギー積の減少以上に深刻な問題として、資源問題がある。Dyは希土類鉱石中の含有量が少なく、Ndに対するDyの自然存在比は20%程度である。しかも原産地が中国にほぼ限定されている。将来の次世代自動車等の需要拡大に対し、Dyの供給不足

が発生することが懸念されている。例えば、自動車各社の社長クラス等を委員とした次世代自動車戦略研究会は、産学官連携によるDyフリー磁石の研究開発の必要性を強く訴えている¹⁷⁾。

さらには、産業界および有識者からは、さらに性能の高い磁石も要望されている。現在の自動車1台で25~30個のモータが使われ

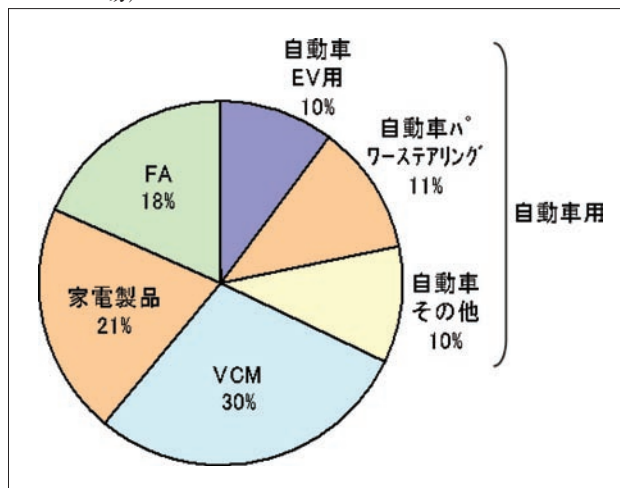
ており、永久磁石を高性能化すると自動車の軽量化を進めることができる^{14, 18)}。また、エアコン等のモータ効率も磁石技術に依存している¹⁹⁾。日本における家電製品のモータ効率はすでにかなり高いと言えるものの、モータはその絶対数が非常に多い。3-2で述べたように、日本の総電力の50%~60%はモータで消費されていることか

図表5 ネオジム系焼結磁石の用途と組成



参考文献¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて加筆作成

図表6 ディスプロシウムの製品別需要割合 (2004年日本市場)



出典: 参考文献¹⁶⁾

ら、1%の効率改善でも大きな省エネルギー効果が期待できる。近年は、次世代自動車に代表されるように、エンジンからモータへ、あるいは油圧ポンプからモータへ、という置き換えにより、様々な分野で電動化が進んでいる。したがって、エネルギー使用量に占めるモータの割合は今後さらに増えることが予想され、永久磁石およびモータのさらなる高性能化が求められるのである。

4-2

日本における3つの国家的な研究開発プロジェクト

以上のようなネオジム磁石が直面する課題の解決を目指して、現在、磁石の研究開発として3つの国家的なプロジェクトが進められている。

○希少金属代替材料開発プロジェクト「希土類磁石向けディスプレイプロシウム低減技術開発」

- ・経済産業省・NEDO 実施事業
- ・2007年に開始
- ・喫緊の課題であるDy資源問題に対応するためのプロジェクト
- ・以降では、これを「ネオジム磁石の省Dy技術開発」と記載する

○元素戦略プロジェクト「低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発」

- ・文部科学省実施事業
- ・2007年に開始
- ・Dy資源問題への対応とともに磁石の高性能化も目的としたプロジェクト
- ・以降では、これを「ナノコンポジット磁石開発」と記載する

○希少金属代替材料開発プロジェクト「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の開発」

- ・経済産業省・NEDO 実施事業
- ・2009年度補正予算(第2号)により開始
- ・Dy資源問題への対応とともに磁石の高性能化も目的としたプロジェクト
- ・以降では、これを「新規永久磁石開発」と記載する

なお、経済産業省・NEDOによる「希少金属代替材料開発プロジェクト」と文部科学省による「元素戦略プロジェクト」とは、プロジェクト間の連携を図るために、産学の有識者からなる合同戦略会議が設置された。毎年2月頃に東京大学において公開合同シンポジウムを開催するなどの方法で成果の共有を行い、連携を強めている。

4-2-1 希土類磁石向けディスプレイプロシウム低減技術開発(ネオジム磁石の省Dy技術開発)

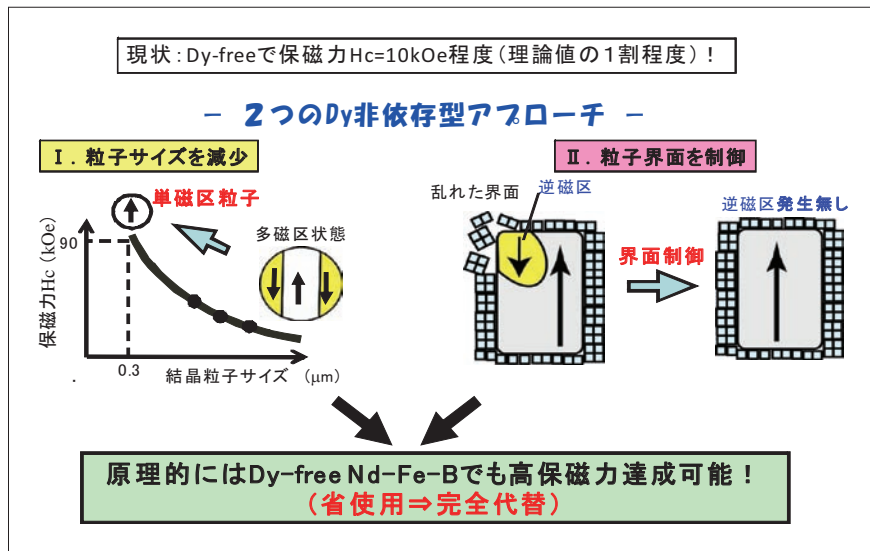
このプロジェクト研究は、高い温度で用いられるネオジム磁石のDy使用量を5年間で30%削減することを数値目標として、省Dyでありながら高保磁力を有するネオジム磁石の開発を目指している。

保持力は、逆磁区の発生確率を減らすことにより、増加させることができることが分かっている。

逆磁区の発生確率を減らす方法としては、磁石粒子のサイズを小さくし単磁区粒子にすること(図表7のI)、および磁石の主相Nd₂Fe₁₄B界面の状態を良好にすること(図表7のII)が考えられている。

Iの方法は、粒径を小さくすることによって相対的に欠陥のサイズを小さくするとともに、一つの磁区(単磁区)からなる結晶粒を増やすことにより保磁力が高くなるという知見に基づいている。インゴット作製方法であるストリップキャストの結晶粒層間隔を減少させること、粉末作製時に用いるジェットミルの高速化により微粉末を得ること、焼結段階での粒成長を抑えるため低温焼結することなどの製造プロセスの研究開発が試みられている²⁾。これらの結晶粒微細化の過程では、粒子の表面積が増えてしまうことから、酸化を抑制する課題と、同時に表面に析出するNd-rich相の均一性を上げる課題に取り組んでいる。IIの方法では、薄膜技術を用いてモデル界面を作製し、保磁力増加にどのような界面が望ましいかを見極め、プロセス改良への指針を得ようとしている。これまでに、粒界に析出するNd-rich相(液相)に溶け込む酸素量によって界面状

図表7 ネオジム磁石保磁力増加の方法



出典: 参考文献¹⁵⁾

態が変化すること、界面にアモルファス相が存在することなどが判明した。また、強磁場を印加しながら熱処理するプロセスで保磁力が増加することも見出された²⁰⁾。

本プロジェクト研究の特色としては、上記のⅠおよびⅡのような製造プロセス技術開発を、新たな指導原理の獲得や自動車用磁石への応用開発と連携させる形で進めていることが挙げられる。新たな指導原理を見出すために、ネオジム磁石の界面ナノ構造や磁化過程の解析を行うことによって、現状の保磁力が異方性磁場の理論値(90kOe)の10%程度の値に留まっていることや結晶粒を小さくしても保磁力がある結晶粒径で急激に低下してしまうこと等の理由を解明しようとしている。さらには計算科学を用いて保磁力向上の指導原理を獲得し、製造プロセス技術開発へ還元することも目指している。一方、自動車用磁石への応用開発では、ユーザーである企業との垂直連携により、製造プロセスの研究開発によって開発された磁石の耐久性評価やモータ適用時の磁石の最適形状設計等を検討し、結果を各製造プロセスの研究開発に還元している。

本プロジェクト研究の成果は、2009年10月に実施された研究評価委員会による中間評価において、「Dy使用量削減を可能にする磁石保磁力発現の原理に基づく結晶粒の微細化と粒子界面制御の両面からのアプローチで、中間目標(2009年度にDy使用量原単位20%削減を達成)をクリアする成果を得ている。日本が独走している超強力磁石分野のリーダーシップを更に強化するものであり、研究発表や論文も多く、新規性が強い世界トップクラスの成果である」等の評価を受けている²¹⁾。

4-2-2 低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発(ナノコンポジット磁石開発)

この文部科学省の元素戦略プロジェクトでは、より長期的に行なう研発開発が対象である²²⁾。

磁石材料の特性を現在よりも向上させるためには、2つのアプローチがあると考えられている¹⁸⁾。一つはNd₂Fe₁₄B化合物を凌駕する全く新しい強磁性化合物を見出すアプローチで、これについては、次節のプロジェクト研究の目標に含まれている。もう一つのアプローチはナノコンポジットの形成であり、この元素戦略プロジェクトで試みられている。

現状のネオジム焼結磁石の最大エネルギー積(BH) maxの世界最強レベルは約60MGOeで、Nd₂Fe₁₄B化合物の理論限界と言われる64MGOeに近づいており、10%程度の特長改善余地しか残っていない。しかし、Nd₂Fe₁₄B化合物のハード磁性材料とそれよりも飽和磁化の高い鉄などのソフト磁性材料をナノコンポジット化し、ハード相(硬質磁性相)とソフト相(軟質磁性相)を磁氣的に結合できるならば、Nd₂Fe₁₄B化合物の理論限界を凌駕することが可能であると考えられている。

ナノコンポジット磁石は液体急冷法により製造される等方性磁石開発の過程で見出された概念である。佐川氏によるネオジム焼結磁石の発明と同時期に、米国GM社のクロートらはボンド磁石材料として液体急冷法によるネオジム磁石を開発した^{18, 23)}。

工業的に用いられている磁石材料は焼結磁石とボンド磁石に大別される。焼結磁石とは、Nd₂Fe₁₄B化合物の結晶粒の結晶磁化容易軸を一方向に配向させた異方性磁石であり、最大エネルギー積が高い。

一方、ボンド磁石は、磁石化合物相のナノ結晶がランダムである原料粉を液体急冷し、樹脂によって固めた磁石であるため、磁氣的には等方性の磁石であり、磁石の強さは焼結磁石の半分である。しかし、フェライト磁石よりは強く、安価で、形状自由度にも優れている。

ナノコンポジット磁石は、ナノオーダーの微細なハード相とソフト相からなり、両相間に交換結合作用が働き、あたかも一つの磁石単相のように振る舞う磁石である。粒子間の交換相互作用により、完全に等方的な微細構造から理論的に予測される値よりも高い残留磁化が得られる。等方性ナノコンポジット磁石は従来のボンド磁石よりもNd濃度が低いため、安価で耐食性にも優れており、中特性のボンド磁石用原料粉として商品化されている^{18, 24)}。希少金属が少ないという意味では利点があるが、等方性という特徴から、等方性ナノコンポジット磁石は焼結磁石の強さを超えることはできない。ただし、10年以上も前から、ナノコンポジット磁石の結晶磁化容易軸を一方向に制御して異方性化できれば、焼結磁石の特性を上回る特性が得られるはずとは言われてきた。

しかし、まだ、どの研究者もナノサイズで結晶方位を揃えることに成功していない。また、ナノコンポジット磁石は大きな保磁力を出せないという課題もあり、ネオジム磁石のこれまでの研究では、ソフト相の体積比率を増やすと保磁力が急激に低下するという障害を克服できていない²⁵⁾。これは、材料設計概念において、保磁力発現のための材料内部組織制御という観点が欠如しているためであると解釈されている。Dy削減が求められる中で、磁化を高める以上に保磁力を上げることがより緊急度の高い課題となっている。

そこで、文部科学省元素戦略プロジェクトにおける低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発では、FeとNd₂Fe₁₄B化合物の異方性ナノコンポジットを創製し、Dyを用いず、しかもNdの使用量を削減し、ネオジム焼結磁石以上の強さを実現することを狙いながら、高保磁力基材磁石粉末および高磁化金属ナノ粒子の製法の開発することとともに、その基盤となる組織生成および保磁力発現メカニズムの解明を進めている²⁶⁾。本プロジェクト研究では、ネオジム焼結磁石より結晶粒径を一桁小さくし、Dyを用いなくても保磁力を保てる技術を実現しようとしている。また、酸化されやすいNd₂Fe₁₄B化合物を従来方法で微細化するという方法では限界があるため、異方性集合組織を有しかつ高保磁力を持つ粉末粒子の作製にHDDRプロセスが試みられている。HDDRプロセスとは、単結晶粒子を高温水素中でナノ結晶組織に分解した後に、水素を除去して異方性集合組織を有する多結晶体とするプロセスである。HDDRプロセスは、反応条件の微妙な操作により、再結合した結晶を概ね元の方位に戻すことができる、という興味深いプロセスであり、その結晶粒径は、ネオジム焼結磁石において一般的に得られる結晶粒径の約10分の1の細かさである。

本プロジェクト研究では、さらには、Nd等の希土類の結晶磁気異方性に依存せずに保磁力を高める理論を見出そうとしている。Dyの使用量を減らす目的で結晶粒微細化を行なっても、Nd等の希土類は温度を上げると磁気異方性が急激に下がる、という状況には変わりはない。しかし、もしも、希土類鉄化合物中の鉄の結晶磁気異方性を利用することができれば、鉄の磁気異方性は温度に対して依存性が小さいことから、磁石の保磁力の温度による影響を減少させるこ

とができる。ハード相については、異方性の内部組織をもつ粉末粒子を作製している。これは1980年代に発明された技術だが、実際に取り組んだ研究者の数は少なく、組織生成に関してのいくつかの仮説がある程度で、分かっていることが非常に少ない。一方、ソフト相については粒子サイズを5~10nmにする技術はあるが、複合化プロセスへの適性やハード相との複合化技術が確立しておらず、ナノ粒子を作る過程でどうしても表面が酸化するなど、まだ難易度の高い課題が山積している。

本研究プロジェクトは、組織生成のメカニズム、保磁力の発現原理、異方性磁石粒子の製造技術など、解明あるいは解決されていない課題が多いため、新しい磁区観察手段の研究や微細領域での組織解析等を実施することで、まずはメカニズム解明を試みている。本研究プロジェクトは挑戦的な基礎研究であるため、プロジェクト期間内に実用化に到達することは目指しておらず、プロジェクト終了時点で、将来ナノコンポジット磁石により実用磁石材料を工業的に生産できる可能性があるか否かを見極めることを目的としている。

4-2-3 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の開発(新規永久磁石開発)

2010年3月より経済産業省・NEDO事業として、「希少金属代替材料開発プロジェクト ①Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の開発及び②超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発」が開始された²⁷⁾。本研究テーマは、Dy等の希少金属安定供給確保に資するものとして、緊急経済対策(2009年度補正予算(第2号))の一環で実施開始された。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)・テマリーダー・採択

者の間での協議の上、実施期間において、実現可能な詳細目標を定めるものとされた。

①の採択テーマは、実質的には、鉄-窒素系化合物を活用した新規永久磁石材料の開発である。豊富な資源である鉄と窒素を主原料とし、現行のネオジム磁石の特性を凌駕するポテンシャルを持つ高飽和磁束・高磁気異方性新規磁石の探索が行われている。具体的には、鉄-窒素系化合物として窒化鉄系材料と希土類R-Fe-Nに着目し、ナノレベルの微細構造・形成過程の解析と磁気特性評価を通して所望の相の窒化鉄を合成する技術へ指針を獲得し、R-Fe-Nのバルク化技術を構築する。最終目的として、電気自動車やハイブリッド自動車の駆動用モータに用いられる新規永久磁石を開発し、低炭素社会の実現に貢献することを目指している。

②は永久磁石の研究開発ではなく、将来的に現行のモータ部材に置き換わる可能性のある次世代モータを実現するため、イットリウム(Y)系複合材料の開発を行うものである。

4-3

海外の生産および研究開発状況²⁸⁾

図表4に示したように、現在のネオジム系焼結磁石の生産は主に日本と中国で行われており、欧米の生産量はわずかである。1990年代は、日本の生産量が最も多く、中国と欧米が同程度であった。その後、日本と中国の生産量が伸びたが、2006年には中国の生産量が日本の生産量を追い抜いている。磁石の特性面では現時点でも日本製がトップレベルと言われているものの、コストと資源産出を背景に、量的には中国製が世界一となっ

ている。また、中国・韓国・台湾等のアジア諸国の磁石の研究活動が活性化してきている。

3章で述べたように、日本生産のネオジム焼結磁石はハードディスク等の情報機器用に数は増えているが、機器の小型・軽量化の影響により、ネオジム焼結磁石生産量に占める割合は減少してきており、エアコン用・自動車用の割合が増えている。一方で、現在の生産量が世界一の中国は、2004年の統計によると、電動自転車・VCM・MRI用などが約29%、スピーカ・磁気セパレータ用などが約44%、低グレード品の応用品が20%程度となっている。次世代自動車のモータなどの分野にはまだ中国製は使われておらず、高性能

の磁石を要する用途には今のところ、主に日本のメーカーの製品が使われている。

米国は、1960年代は世界一で世界を牽引していきしたが、現在では磁石産業がほとんど無くなった。米国でのネオジム系焼結磁石の生産は2004年の約100トンを最後に、2005年以降は生産されていない。ただ、ごく最近、軍関係を含めて、電磁変換関係のデバイスを中国と日本からの供給に全面的に依存するという状況を懸念する意見もでてきている。そこで、米国の研究者の中には、米国の磁石研究をもう一度復活させようという動きが見られる。例えば、2009年1月30日には、デラウェア大学のGeorge C. Hadjipanayis教授が中心となっ

て、産学官から44名の研究者が集まり、米国における先端磁石材料研究の復活を目的とした「The Future of High Performance Permanent Magnets in the USA」と題するワークショップが開催された。

欧州では、有名な磁石メーカーも残っているが、ネオジム系焼結磁石の生産量は2007年で約800トンであり、これは日本および中国の生産量より二桁小さい。欧州市場では中国製品輸入量が増えている。しかしながら、持続的社会的構成要素としての永久磁石の研究は重要であるという観点は存続しており、欧州のモータ企業から日本の磁石研究者へのアプローチが活発化してきている。

5 今後の永久磁石の基礎・基盤研究の進め方

以上のモータ用永久磁石の研究動向と課題を踏まえ、今後の永久磁石の基礎・基盤研究の進め方についての提言を筆者の所見として述べたい。

永久磁石の研究は長期間を要する挑戦的な研究である一方、画期的な発明・発見のほとんどが実用化につながっており、またその用途もグリーン・イノベーションにおいて大きなインパクトを有している。したがって、グリーン・イノベーションへの貢献を目的とする基礎研究・基盤研究として、まずは、前述の国家的な研究開発プロジェクトのような公的資金の投入を今後も継続・拡充すべきであろう。

図表8に各学会の最近の参加者数あるいは発表件数を示した。このような数にははっきり表れていないものの、永久磁石の研究開発に関する課題設定型の国家プロジェクトが開始された2007年以降、日本の関連学会での活動には再活性化のきざしが見られると言

われている。この領域が再活性化されてきているとの認識は、2010年6月17日に磁石および地域経済の産学官関係者219人を集めて開催された「東北モータ磁石イノベーション戦略会議」の議論でも共有された。

永久磁石の研究開発のような、グリーン・イノベーションの課題解決としての重要な目的基礎研究に、政策的に光を当て、トップダ

ウン型で推進していくことの意義は大きい。仮に研究開発投資効率が一定だとすれば、研究開発投資額が増額され、参画する研究者数が増加すれば、画期的な発明や発見に要する期間の短縮が期待される。

もちろん研究開発投資額だけでなく、研究開発投資効率を高めるよう努めていくことも必要である。ネオジム磁石は極めて完成度の高

図表8 日本の各学会における磁石関係参加者数および発表件数の推移

日本磁気学会 ハード磁性材料研究会													
年度	1984	1987	1988	1991	1994	1996	1998	2001	2003	2005			2008
	参加者数	192	178	144	118	111	63	96	98	64	第1回	第2回	
										75	38	68	46

日本金属学会										
年	2006		2007		2008		2009		2010	
	春	秋	春	秋	春	秋	春	秋	春	秋
ハード磁性材料の発表件数	12	4	9	5	14	19	33	25	16	

(注)2007年春の9件にはシボジウム1件、2009年春の33件にはシボジウム27件を含む

電気学会 A部門大会「磁性材料他」			
年	2007	2008	2009
セッション発表件数	13	8	17

各学会データを基に科学技術動向研究センターにて作成

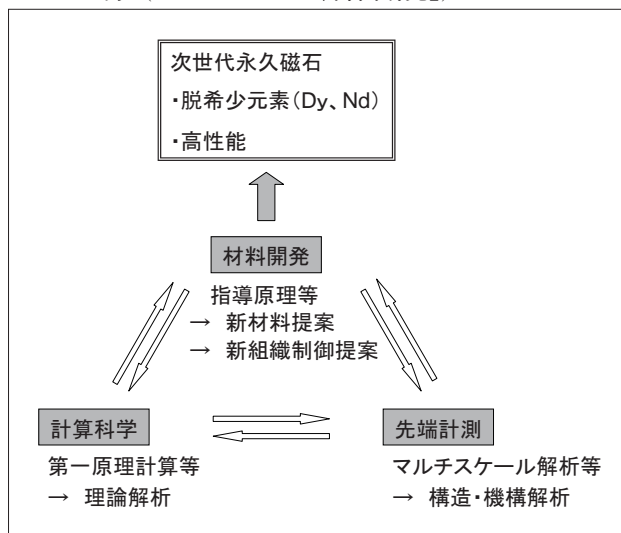
い磁石であり、指導原理なしに組成探索を行ってもブレイクスルーを起こすことは困難と考えられる。これまでの磁石研究は産業界が経験と勘で進めてきた感があるが、もはや限界に達しており、大学に新たな指導原理を求めているテーマの一つであると言えよう。幸い、計測技術には大きな技術革新が起きており、例えば、マルチスケール解析・NMR測定・中性子線回折等を用いて、今まで測定できなかったものが測定できるようになってきている。また、第一原理計算等に基づく計算科学の発展により、新たな理論解析が進み、材料開発に寄与することも期待されている。例えば、前記の「ネオジム磁石の省Dy技術開発」では、粒界の組成・組織と保磁力・内部構造との相互関係の解明、微小粒子集団磁気特性測定による異方性と表面の関係解明などの点で成果が出始めている。このように、先端計測技術による構造・機構解析と計算科学による理論解析を組み合わせ、材料開発に新たな指導原理を獲得し、新化合物の発見、磁石としての合金組織化へとつなげていくべきである(図表9)。このチームワーク型の計画研究は、すでに「ネオジム磁石の省Dy技術開発」のような国家的研究開発プロジェクトでも一部で試みられているが、今後、さらに継続し強化していくことが望ましい。

一方、2-2で述べたように、歴史的に見て、新しい永久磁石は大胆な分野融合的発想あるいは情熱と偶然からもたらされてきた。磁石の研究には、素材としては物理学・金属冶金学、開発においては電磁工学、応用には機械・電子工学というように、多くの専門知識を必要とする。磁石はエネルギーを運動に変換し、あるいは運動をエネルギーに変換するための、電気エネルギーと機械運動をつなぐ重要な材料要素であると言えるが、

4-2で述べたように未だ理論的に解明されていない数多くの現象が存在する。したがって、多様な専門分野の研究者の参画が必要である。例えば、工学部だけでなく理学部の研究者の磁石研究への参画も促進する必要があるだろう。したがって、プロジェクト以外でも、個々の研究者の自由な発想に基づく研究提案を推進する公募研究の必要性もある。異分野の研究者の参加を促進するボトムアップアプローチとしては、課題設定開発競争型補助金²⁹⁾のような制度がよいと思われる。

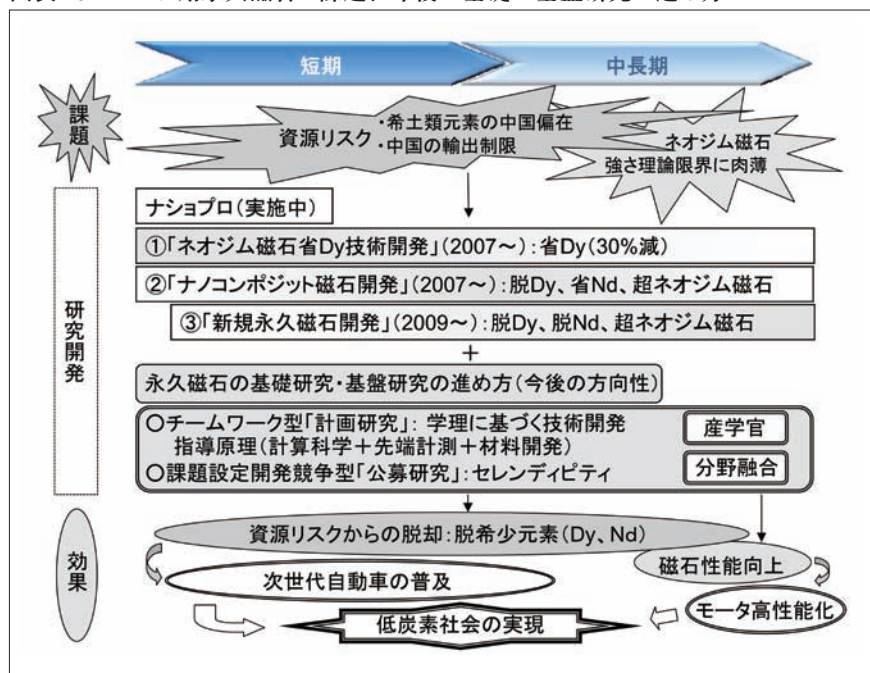
イメージ的には、計画研究および公募研究で構成される科学研究費補助金・特定領域研究を、産学官連携で大規模に集合させたような進め方がよいのではないかと思われる。すなわち、産学官による研究拠点や集中研究室のスタイルによる計画研究と、計画研究のプロジェクトリーダー等を中心に産学官連携体制で設定した課題の公募研究とを、同時に進めていくよ

図表9 モータ用永久磁石の今後の基礎・基盤研究の進め方(チームワーク型「計画研究」)



科学技術動向研究センターにて作成

図表10 モータ用永久磁石の課題、今後の基礎・基盤研究の進め方



科学技術動向研究センターにて作成

うな仕組みである。図表10には、以上で述べた永久磁石の課題、その解決に向けた研究開発の進め方をまとめて図示する。

謝辞

本稿の執筆にあたり、経済産業省後藤芳一審議官(現大阪大学)、宮城県伊藤克彦副知事、(社)東北経済連合会遠藤芳雄専務理事、トヨタ自動車(株)村松正隆部長、日本ボ

ンド磁性材料協会原田英樹 CEO、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構飯田康夫プログラムマネージャー、日立金属(株)西内武司主任研究員、インターメタリックス(株)佐川真人代表取締役、(独)物質・材料研究機構宝野和博フェロー、経済産業省数井寛東北経済産業局長、東北イノベーションキャピタル(株)熊谷巧代表取締役社長、東京エレクトロン技術研究所(株)川上聡執行

役員、東北大学井上明久総長、杉本諭教授、高橋研教授、岡田益男教授、宮本明未来科学技術共同研究センター長ほかの皆様の東北モータ磁石イノベーション戦略会議でのご挨拶、講演および議論を参考にさせていただいた。改めて謝意を表す。(所属は2010年6月17日時点)

参考文献

- 1) 東北モータ磁石イノベーション戦略会議 <http://tmj.niche.tohoku.ac.jp/groups/tmj/>
- 2) 杉本諭、「永久磁石の高性能化を目指して」、翠巒、2009年1月
- 3) 福田務、「永久磁石の昔と今」、(社)日本電気技術者協会 <http://www.jeea.or.jp/course/contents/01126/>
- 4) NeoMag、「永久磁石の歴史と磁気科学の発展」 http://www.neomag.jp/magnet_history/history_top.html
- 5) 特許庁、「十大発明家」、1985年4月18日 <http://www.jpo.go.jp/seido/rekishi/judai.htm>
- 6) M. Sagawa, Proc. 18th Int'l Workshop on High Performance Magnets and their Applications, Annecy, France, 2004
- 7) 磁石の小部屋、「歴史：近代磁石の歴史」、<http://homepage3.nifty.com/bs3/Magnet/basic2/hst2.html>
- 8) 岡田益男、第一回東北モータ磁石イノベーション戦略会議講演資料「永久磁石におけるセレンディピティ」、2010年6月17日
- 9) 岡田益男、「新永久磁石材料開発におけるセレンディピティ」、セラミックス、33、No.5、1998年
- 10) 佐川真人、「イノベーションの瞬間 世界最強の永久磁石「ネオジム磁石」-たった1gで鉄1kgをもちあげる磁石はこうして生まれた」、化学、Vol.65、No.1、2010
- 11) Y. Kaneko, Proc. 18th Int'l Workshop on High Performance Magnets and their Applications, Annecy, France, 2004
- 12) TDK、「じしゃく忍法帳 第89回「エアコンと磁石」の巻」、TDK Techno Magazine <http://www.tdk.co.jp/techmag/ninja/daa00812.htm>
- 13) 電気学会論文誌 D、Vol.118-D、No.6 pp.813、1998年6月
- 14) 日立、「ネオジム系希土類永久磁石 NEOMAX」 <http://www.hitachi.co.jp/environment/showcase/solution/materials/neomax.html>
- 15) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「研究評価委員会「希少金属代替材料開発プロジェクト」(中間評価)分科会」、資料6-1-3、2009年7月24日 <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/21h/chuukan/9/1/6-1.pdf>
- 16) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「研究評価委員会「希少金属代替材料開発プロジェクト」(中間評価)分科会」、資料5-1、2009年7月24日 <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/21h/chuukan/9/1/5-1.pdf>
- 17) 経済産業省次世代自動車戦略研究会、「次世代自動車戦略2010」、2010年4月12日 <http://www.meti.go.jp/press/20100412002/20100412002-3.pdf>
- 18) 宝野和博、「ナノ組織制御による磁気特性制御 ①省希土類磁石材料」、元素戦略アウトLOOK、物質・材料研究機構、2007年12月31日 http://e-materials.net/outlook/elements/outlook_kinds.html
- 19) 小宮山宏、「「課題先進国」日本」、中央公論新社、2007年9月
- 20) H. Kato, T. Miyazaki, M. Sagawa, and K. Koyama, Appl. Phys. Lett 84, 4230 (2004)
- 21) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会、「希少金属代替材料開発プロジェクト」中間評価報告書、2009年10月 <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/houkoku/21h/chukan/09.pdf>

- 22) 広沢哲、レアメタルニュース、2008年1月16日
- 23) J.J. Croat, J.F. Herbst, R. W. Lee and F.E. Pinkerton, J. Appl. Phys. 55 (1984) , 2078
- 24) 広沢哲、金森裕和、重本恭孝、三次敏夫：粉体および粉末冶金、51、143、(2004)
- 25) 広沢哲、西内武司、大久保忠勝、Li Wanfang、宝野和博、山崎二郎、竹澤昌晃、隅山兼治、山室佐益：日本金属学会誌、73、135、(2009)
- 26) 日立金属、「元素戦略プロジェクト」http://www.hitachi-metals.co.jp/corp/corp06_11_1.htm
- 27) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「[希少金属代替材料開発プロジェクト (Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発)]に係る委託先の決定について」、2010年3月18日
<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/koubo/EF/nedokoubo.2010-03-15.4134338935/>
- 28) 杉本諭：私信
- 29) 経済産業省産業構造審議会産業技術分科会基本問題小委員会、「イノベーション力を強化する産業技術政策の在り方（中間報告）」、2009年8月 <http://www.meti.go.jp/press/20090819002/20090819002.html>

執筆者プロフィール



小澤 純夫

科学技術動向研究センター 客員研究官
 東北大学未来科学技術共同研究センター 教授
<http://www.niche.tohoku.ac.jp/>

欧州連合日本政府代表部、国際エネルギー憲章事務局、石油公団、経済産業省、NEDOを経て、2008年7月より現職。大学のポテンシャルを基に外部と連携して産業・社会の課題解決のために実施するプロジェクト研究の開発企画に携わっている。博士（工学）。