

世界最強のネオジム磁石の発明と工業化 —イノベーションの核は見通せないところにある—

インターメタリックス株式会社 最高技術顧問
NDFEB株式会社 代表取締役

佐川 真人 氏



ネオジム磁石の発明へ

ご紹介してくださったように、ネオジム磁石の発見で多くの賞をいただいています、はじめていただいたのは第2回大阪科学賞(1984年)です。賞ができて間がない頃ですから並いる名門大学から数多くの推薦がありましたが、住友特殊金属の社員時代に受賞でき本当に感激しました。当時、審査委員長は大阪大学総長の金森順次郎氏で、私の最も尊敬する物理学者です。この受賞を通じて多くのことを教えていただきました。

本日は技術革新の核になるものを見つけ、みんなで作っていくことの大切さをお話したいと思います。核というのは見えないところにありますが、これを発見して次世代のイノベーションにつなげていきたいと思うわけです。

私は大学や大学院でも固体表面の構造や性質の基礎研究を行い、それで学位論文を書きました。学究の道に進みたかったのですが、当時、大学に適したポジションがなく、このままで何か役立つことができるのか自信がないまま富士通に入りました。富士通研究所でも私は固体表面の研究を続けたかったのですが、与えられたテーマは磁石の磁性材料の研究・開発でした。これまで磁石や磁性材料の勉強をしたことがなかったですが、会社の命令には従わなくてはなりません。そのため磁性材料の勉強を、一から始め、学会やシンポジウムに積極的に参加、時には発表してきました。

次に与えられた研究テーマはリレーやスイッチに使う磁性材料の開発でした。具体的にはフライングスイッチに用いるサマリウム-コバルト (Sm-Co) 磁石の開発です。市販の Sm-Co 磁石は機械的強度が低すぎて、その部品に使えなかったのです。機械的強度の高い Sm-Co 磁石の開発がテーマで研究はどんどん進み、サンプル作製装置および磁気特性評価装置を整え、だんだん研究にのめり込んでいきました。やるうちに自信が出てきて企業での研究が自分に合っていると思い直しました。目的がはっきりしていることは得意だったからです。

Sm-Co 磁石の研究をしながら、私は鉄 (Fe) がコバルト (Co) より資源が豊富な上に大きい磁気モーメントがあるのになぜ強い磁石ができないのか疑問に思ったのです。Fe と Co の磁性の差は何か、その差は何から来るのか、磁性の教科書で調べましたが、その答えは得られませんでした。永久磁石の歴史は本多光太郎氏が 1916 年に発明した KS 鋼磁石に始まり、当時 Sm-Co 磁石が主流となり、中でも 1977 年に松下電器無線研の俵好夫氏が発明した $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁石が最強磁石で毎年その強さが記録更新されていました。世界中の磁石研究者は Sm-Co 磁石の研究に熱中していて、R-Fe (R はレアアース=希土類の略) 磁石には誰一人として関心を持っていませんでした。

乏しい磁性の基礎知識を駆使して R-Fe 磁石ができない理由を考えていました。強い磁石の主成分は、Fe か Co のどちらかです。希少金属の Co は高価で、しかも産地が政情不安定な国に偏在していました。一方、Fe は資源量が豊富で価格も安いのです。そこで私は、「Co の代わりに Fe とレアアースを組み合わせれば、強い磁石を安く作れるのではないか」と考えました。当時、これは非常識なアイデアでした。Fe が主成分の磁石はフェライト磁石のような弱い磁石しかなく、「強い磁石は Co でしかできない」と研究者たちは固く信じていたからです。

ところが研究のヒントが得られるときがきたのです。それは 1978 年 1 月に開催された「希土類磁石の基礎から応用まで」と題するシンポジウム



に出席したときでした。最初の講演者として浜野正昭氏が話され、そのほとんどが R-Co に関する説明でしたが、ほんの数分、 R_2Fe_{17} がなぜ永久磁石にならないかということについて説明がありました。それは R_2Fe_{17} 結晶では、Fe-Fe の原子間距離が短かすぎることが結晶の強磁性状態を不安定にしているという指摘でした。私はふと、原子半径の小さい炭素 (C) やホウ素 (B) を合金化してやれば Fe-Fe 原子間距離を上げられるのではないかと思ったのです。さっそく翌日から非公式に R-Fe-C や R-Fe-B 合金を作り、P (プラン=アイディア)・D (行動=合金作成)・C (チェック=磁石特性の測定、結晶構造の調査) の順で研究を開始しました。アイディアがまとまり、R-Fe-C や R-Fe-B 合金の作製で、R = Sm、La、Ce、Pr、Nd、Gd、Tb 等を何十回も試しました。

この磁石中の B の役割が解明され、比較的早期に永久磁石用化合物ができました。化合物としては①高いキュリー温度②大きい磁化③大きい磁気異方性の三要素を満たす Nd-Fe-B 化合物に到達しました。しかし、それをもとにネオジム磁石を作ることはできませんでした。セル状組織をもたせることをイメージして、合金組成や製造条件を工夫しましたが、磁石の性質をもつ試料を作ることはできませんでした。チェックの段階、つまり磁石特性の測定、結晶構造の調査で R-Fe-B 合金は違った化合物になるのです。わからなくなりましたが、これはおもしろい磁気特性をもっていると思い、研究を続けようと考えました。

一方、正規のテーマである機械的強度の高い Sm_2Co_{17} 磁石の開発については目標を達成しましたので、次のテーマに移ることを要請されました。そこで Nd-Fe-B 磁石の研究を提案しましたが、認められませんでした。私は大きい発見の糸口を掴んでいると思っていたのですが、誰も信じてくれませんでした。会社としては磁石の研究は終了、スイッチの時代は終わったというのです。私に与えられた次のテーマは半導体の先端技術の研究でした。もう磁石の時代ではないというわけです。仕事をこなしながら、平日は Nd-Fe-B 磁石の思考実験、休日に実験をすることによって研究の糸が切れそうになるのを必死にこらえて Nd-Fe-B 磁石の研究を続けました。

そんな時、私は上司に呼び出され、よく理由がわかりませんでしたが大声で怒鳴りつけられました。私は翌日辞表を出し、上司は退職までの3ヶ月間その実験をすることを許可してくれましたので、Nd-Fe-B 磁石の研究は大きく進みました。

辞表を出してから、どこの磁石メーカーに就職するかで迷ったあげく、大阪に本社がある住友特殊金属の社長室に何回も電話をかけたところ、ある日社長につながり、新磁石の構想を述べると「ぜひ、うちにきてほしい」と当時の岡田典重社長が熱烈歓迎してくれました。

工業化への道

岡田社長の支援で社内に Nd-Fe-B 磁石の研究チームが発足しました。そして最初の数ヶ月間で研究は成功、それまで世界最強を誇っていた Sm_2Co_{17} 磁石の記録を抜く Nd-Fe-B 磁石が開発できました。非常に幸運だったのは、アメリカで同じ研究が進められていましたが、我々の特許出願の方が早かったことです。その特許出願日の差は2週間しかなかったのです。岡田社長の支援がなかったらずっと遅れていたと思います。

1982年に発明したネオジム磁石は、史上最強の永久磁石として名を上げました。コンピューターのハードディスクドライブ、医療機器のMRI (磁気共鳴画像装置)、ハイブリッド車など身近なハイテク製品の実用化にはネオジム磁石なしにはあり得ません。ネオジム磁石はレアアース (希土類) のネオジム (Nd)、Fe、B の3元素を組み合わせた磁石です。それまで最強だった Sm-Co 磁石の2倍近い磁力を持ち、計算上は1グラムのネオジム磁石で約1キロの鉄を持ち上げることができました。

1985年から量産を始めましたが、こんなに早く量産化したことは初めてのことでした。住友特殊金属の社員の働きもすばらしいものがありました。Nd-Fe-B 焼結磁石の生産量は倍々ゲームで増大し、2000年には世界の生産量が1万トン/年を越えました。その主要な用途はハードディスク装置などの電子機器です。

次にモータへの応用です。エアコンのコンプレッサー用 IPM モータの鉄心に Nd-Fe-B 焼結磁石を板状にして使うのです。さらにハイブリッドカーでは1台に1kg以上使っているのです。現在、Nd-Fe-B 焼結磁石は第二の発展段階にあります。これからはロボット時代です。そこら中ロボットだらけになりそうです。ロボットの頭脳部分はシリコン材料が使われますが、手足の機能は Nd-Fe-B を使ったモータが担うことになります。

これらの用途に使う Nd-Fe-B 焼結磁石には耐熱性が要求されるため、多量のジスロシウム (Dy) が必要です。長年温めていた研究テーマは Dy なしで耐熱性の高い Nd-Fe-B 焼結磁石を製造できるプロセスの開発です。

いまや世界中で R-Fe の研究開発が進められています。従来の Sm-Co 磁石からの発想では Nd-Fe-B 磁石に到達できません。それは Sm-Co 磁石の最先端から研究を始めるので、Nd-Fe-B 磁石につながらないのです。図1にあるように Sm-Co 磁石曲線から Nd-Fe-B 磁石の曲線に移る途中でギャップが生じ、つながっていないのです。ここがポイントです。

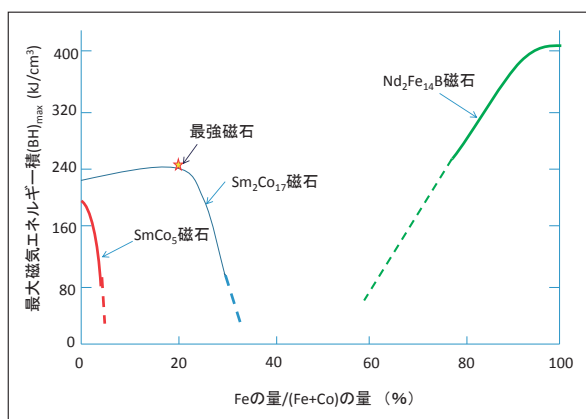


図 1

イノベーションの核を見つける

世界の磁石研究者は R-Fe をなぜ研究しなかったのでしょうか。それは既知の R-Fe 化合物が永久磁石の三要素の条件を満たさず、①低いキュリー温度、②小さい飽和磁化、③小さい磁気異方性—だったからです。ほとんどの研究者は従来技術の SmCo₅ 磁石、Sm₂Co₁₇ 磁石、その他当時知られていた R-Fe 化合物、R-Fe-Co 化合物などから離れようとしませんでした。

Nd-Fe-B 磁石の発明により、R-Fe-X 三元化合物を主相とする磁石の研究という、新しい研究分野が開拓されました。新研究分野の核が発生したのです。新研究分野の核が発生すると、そこから新研究分野が大きく発展して行きます。

新研究分野の核発生 = Nucleation

新研究分野の発展 = Growth

と呼ぶことにします。1982 年の Nd-Fe-B 磁石の発明の後、R-Fe-X 磁石の研究は大きく発展してきました。その研究の発展は今も続いています。Nd-Fe-B 磁石を超える磁石はまだ見つかりません。この研究分野では、核発生時に一番いい化合物が見つかったということです。

R-Fe-X 化合物において、X は化合物のキュリー温度、飽和磁化、磁気異方性の三要素全てを改善する効果をもっていることが分かりました。R-Fe-X における X の役割の発想は、Fe と Fe の距離を抜けることでした。この理論、つまり「X が Fe を Co に変えるコバルト化 (Cobaltization) が起きる」と金森順次郎氏は予言していたのです。私は当初、間違っただけで発想をしたのですが、研究は成功しました。こうしたことから論理的に提案書を書けていなくとも、それを認めてあげることが大事だと思うのです。つまり誰もが思いつかない R-Fe-X 磁石という新天地に飛躍したことが価値あるということなのです。

現在、Nd-Fe-B 焼結磁石の世界の生産量が 10 万トン／年、1 兆円を超えています。磁石だけでなくますます増え、次代の戦略が広がっています。SPRING-8 など Nd-Fe-B 磁石のマイクロストラクチャー（微細構造）の研究が進み、Nd-Fe-B 磁石の中には理想的な微細構造が形成されている

ことがわかっています。いま Nd-Fe-B 磁石の三要素を超える可能性のある新磁石も出てきています。マイクロストラクチャーが大事です。とにかく磁石にすることでマイクロストラクチャーができていればいいのですが、それは難しいと思います。

究極の Nd-Fe-B 焼結磁石の製造装置を開発

私は住友特殊金属に 5 年半在籍して退職し、1988 年の初めにインターメタリックス株式会社を設立しました。退職後も同社は 25 年間も私を社内ベンチャーのような扱いで全面的に支援してくれました。会社設立後、世界中の会社のコンサルタントとして働き、地球を 100 回位回りました。その後、京大キャンパスの桂ベンチャープラザというベンチャーを育成する施設に入り、NDFEB 株式会社を設立しました。ここに入ってから、コンサルタントの仕事は一切やめて、自分の研究に集中することにしたのです。

Nd-Fe-B 磁石の製造プロセス改良に関して、長年温めていた研究テーマをもっていったからです。この段階の主要な用途は、ハイブリッド車、電気自動車、空調機、風力発電機、エレベータなど比較的大型のモータや発電機です。どれも最強磁石を使うことにより、省エネルギー、地球温暖化防止に効果があります。これらの用途に使う Nd-Fe-B 焼結磁石には、耐熱性が要求されるため、多量の Dy が必要です。

インターメタリックスは省 Dy 化の研究テーマを提案して、ベンチャーキャピタル、銀行などの投資家、三菱商事、大同特殊鋼などの大企業から研究資金を獲得し、さらに経済産業省、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）からも研究予算を得て新プロセスの開発を行ってきました。新プロセスの研究は成功し、耐熱性 Nd-Fe-B 焼結磁石の大幅な省 Dy 化が可能になったのです。実証プラントによる量産試作も成功裏に終了し、新プロセスのもとに量産工場を建設、2013 年初めから省 Dy 高耐熱高性能 Nd-Fe-B 焼結磁石の生産を開始しています。

Nd-Fe-B 焼結磁石はプレス (PL) 法といって粉末を磁気配向プレス成形により方向を揃え焼結します。これまでは切断加工してブロックしかできませんでした。これは伝統的な方法です。薄板の磁石がつかれないかということで、PLP 法（プレスレス）を開発しました。これはカーボンモールドに粉末を詰め磁気配向プレス成形、焼結により板状の磁石の直接作製法が確立しました。これだと微粉末が使えるので Dy を使わないで高保磁力を達成できました。ただ、モールドが数千個という膨大な数が必要なのでコスト高になります。また配向の時に、保磁力が若干落ちるので、高保磁力の磁石は均一性がないと使えないのです。

このため図 2 に示した新 PLP 法装置をつくり、この問題を解決しました。それは 50 連のモールド



図2

ドの型組をつくり、粉末を充填、配向した後、型組をばらすのです。そうしますと板状の磁気粉末焼結体が毎分50個できるのです。モールドは4個ですみます。新プロセスをもとに量産できる高均一性、高磁気特性、高生産性のNd-Fe-B装置を世界に売り込んでいます。

一方、OSTEC主導でこの磁石の世界標準化に取り組んでいただいております、支援しています。世界標準化は日本の磁石産業（製造、応用）のGrowth分野の研究に大変有効になると思います。

研究者の方向

研究者のみなさまは、所属している研究分野でGrowthできる時は、どんどん研究分野を拡大してください。そこで行き詰ったと感じたらNucleationを狙ってください。Nucleation研究を成功させるための心得は、目指すものは従来技術からは見えないということです。

Nucleation研究テーマをどうやって探すのかということです。研究テーマの源泉としてシーズとニーズがあります。シーズは労多くし成果が少なくうまくいかないことが多いです。ニーズには顕在ニーズと潜在ニーズの二種類があります。顕在ニーズはいま存在している技術、製品の改良、発展でGrowth的です。潜在ニーズはいま存在していない技術、製品の創造でNucleation的です。

潜在ニーズにはAタイプ＝ニーズがあることさえわかっていない、Bタイプ＝ニーズがあることはわかっているが、見放され、忘れられているものです。潜在ニーズとして三例を示します。

iPhone：

- ①システム（ソフト＋組み立て品）としてはNucleation
- ②ほとんどの部品、材料は既知
- ③ニーズがあることが知られていなかった
→Aタイプ

Nd-Fe 磁石：

- ①R-Fe磁石は、もしできればR-Co磁石よりも高特性になるということは知られていた。強いニーズはあった。しかしそれは無理とみなして誰もチャレンジしなかった
→Bタイプ

GaN 青色 LED：

- ①GaNは欠陥が多くてダメで、ほとんどの研究者は断念していた。強いニーズがあったはず
→Bタイプ
Bタイプが大事だと思っています。
Nucleation的テーマのありそうなところは
- ②ニーズがあるのがわかっているのに、手段がなくて断念されている製品、技術→テーマの目標を明確にし、改めて真っ向から取り組む。
- ③社会として大きな期待を寄せているのにいつまでも基礎研究に留まっている→製品に必要な要件を明確にし、それらを満たす大胆な仮説で挑戦する。
- ④会社の製品や技術の範囲では想定できないが、もしできたらお客さんが飛びつきそうな製品、あるいは技術者が喜んで使いそうな製品や技術→既存の製品や技術の向こう側に回って新製品や新技術を次々に想定してインパクトを予想する。

Nucleation的研究を成功させるための心得は、めざすものがあると直観したら、研究対象に飛躍して、その研究対象を実施、その試料をつくって測定、研究対象の計算を行うことです。

Nucleation的研究テーマの研究管理は

- ①合理的に道筋が明確な提案書を書けないことを認める。
- ②成功したら大きい褒賞を与える。
- ③失敗しても再度挑戦する機会を与える。
ことです。

Nucleation的研究が成功したら、会社も大学も発展する、また社会も発展すると考えます。

【受賞者紹介】 佐川 真人 氏

1966年、神戸大学工学部電気工学科を卒業、1972年に東北大学で博士課程を修了後、富士通に入社、永久磁石を研究。1982年、住友特殊金属に移りNd-Fe-B焼結磁石（ネオジム磁石）を開発、工業化。1988年にインターメタリックス株式会社を設立、同社代表取締役社長に就任。2013年にNDFEB株式会社を設立、現在は同社の代表取締役。1984年に大阪科学賞（大阪府、大阪市、大阪科学技術センター共催）の受賞を皮切りに、主なものとして、科学技術長官賞、米国物理学会賞、朝日賞、日本応用物理学会賞、大河内記念賞、本多記念賞、そして日本国際賞を受賞。

【ニューマテリアルセンター（NMC）】

金属系新素材の試験評価方法の確立および標準化の促進、関連する研究開発を行い、その成果を発信、普及することによって産業社会の発展に貢献することを目的として、産官学の熱意、指導、協力により財団法人大阪科学技術センター（OSTEC）の付属機関として1986（昭和61）年9月に設立された。