

本田財団レポート No. 184

第44回本田賞贈呈式 記念講演（2023年11月16日）

「ネオジム磁石の発明 研究者は最高の仕事、最高の喜び」

大同特殊鋼株式会社 顧問
NDFEB株式会社 代表取締役

佐川 真人 博士

「液体急冷法によるネオジム永久磁石の発見」

ジョン・クロートコンサルティング社 元代表取締役

ジョン・J・クロート 博士

公益財団法人 本田財団



佐川 真人 博士

大同特殊鋼株式会社 顧問
NDFEB 株式会社 代表取締役

■ 生まれ

1943年8月3日 徳島県、日本

■ 学 歴

1966年 神戸大学工学部電気工学科卒業
1968年 神戸大学大学院修士課程(電気工学) 修了
1972年 東北大学大学院博士課程(金属材料工学) 修了
学位取得(工学博士)

■ 職 歴

1972年～1982年 富士通株式会社
1982年～1988年 住友特殊金属株式会社 (現 株式会社プロテリアル)
1988年～2012年 インターメタリックス株式会社 設立、代表取締役
2013年～現在 NDFEB 株式会社 設立、代表取締役
2016年～現在 大同特殊鋼株式会社 顧問
2017年～2019年 日本電産株式会社 (現 ニデック株式会社) 顧問
2017年～2019年 京都大学エネルギー理工学研究所 特任教授
2019年～現在 東北大学 特別招聘プロフェッサー
2019年～現在 中国鉄鋼研究総院 客員教授
2022年～現在 名城大学カーボンニュートラル研究推進機構
シニアフェロー

■ 受賞歴

1984年 大阪科学賞
1985年 科学技術庁長官賞
1986年 米国物理学会 新素材賞
(現 ジェームス・C・マックグラディ新材料賞)
1988年 日本金属学会功績賞
1990年 朝日賞
1991年 日本応用磁気学会 学会賞
1993年 大河内記念賞
1998年 Acta Metallurgica J. Hollomon Award
2003年 本多記念賞
2006年 加藤記念賞
2012年 日本国際賞
2016年 永守賞 特別賞
2018年 NIMS Award 2018
2020年 日本金属学会賞
2022年 エリザベス女王工学賞
2022年 IEEE 環境・安全技術メダル

■ 主な出版物

- 「永久磁石：材料科学と応用」
佐川真人, 浜野正昭, 平林真 編
2007年、アグネ技術センター、ISBN 978-4-901496-38-4
- 「ネオジム磁石のすべて：レアアースで地球を守ろう」
佐川真人 監修
2011年、アグネ技術センター、ISBN 978-4-901496-58-2
- 「最強エンジニアの仕事術」
中村修二、佐川真人
2016年、実務教育出版、ISBN 978-4-788911-95-6

ネオジム磁石の発明 ～研究者は最高の仕事、最高の歓び～
佐川 真人

ネオジム磁石の発明

研究者は最高の仕事、最高の歓び

本田賞記念講演

2023.11.16
佐川真人

■ はじめに

本日、本田賞を受賞することができ本当にうれしく、大変光栄に思っております。本当に素晴らしい賞だと思って喜んでおります。どうもありがとうございます。

今日私は、このようなお話をさせていただきます。「ネオジム磁石の発明 研究者は最高の仕事、最高の歓び」ということで、これから私のような研究をどんどんやっていただきたいと思い、若い人たちに訴えるお話です。今日のこの日をスタートにして、これから何回も講演会を予定しておりますが、そこでもこの話題でお話をしていこうと思っております。ちょうど、この2日後には子どもたちにお話しする機会があります。このような磁石をどうやって見つけたか、どんなに研究が素晴らしいかということ子どもたちにお話ししますが、今日のこれがスタートです。これからみんなにこういうことをお話ししていきたいと思っております。

■ 磁石と無関係だった研究テーマ

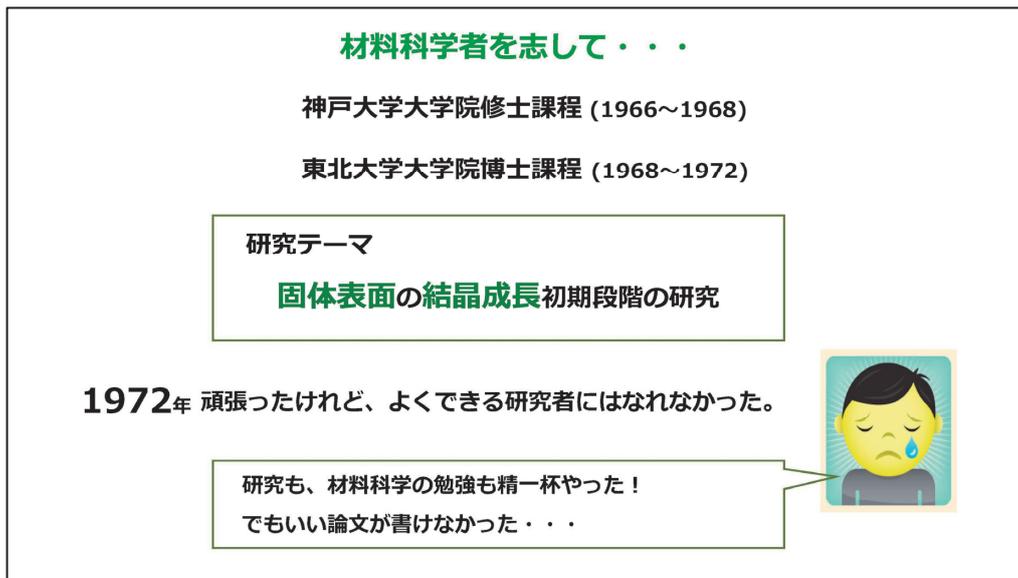


図-1

〈図-1〉まず、私がどうやってこの磁石を発明したかということをお話しします。

私は材料科学者を志し、神戸大学の大学院と東北大学の大学院博士課程に行きました。研究テーマは「固体表面の結晶成長の、初期段階の研究」です。磁石とは全然関係ありません。磁石の研究は大学のとくも大学院でも全くしたことがありません。1972年に博士課程で博士論文を書いて、何とか博士になりました。何とか博士号まではもらったのですが、あまりいい論文は書けず、論文をどこかのジャーナルに出すとか、そういったことはできませんでした。だから全然、自信がなかったわけです。

勉強はものすごく一生懸命やりました。研究も一生懸命やりましたが、届かなかったのですね。私、このスライドで涙を流していますが、卒業するときは本当に悔しかったのです。

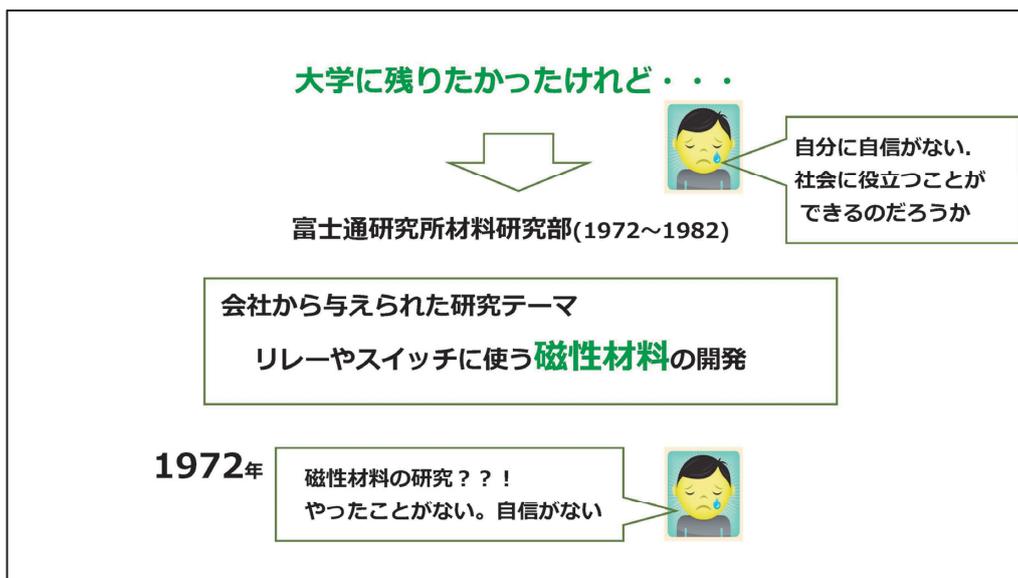


図-2

〈図-2〉私は大学に残って教師になりたいかったのですが、そんなのは全然お話にならない状態でした。どこか会社に行くことにしましたが、会社に行って何ができるのだろうか。社会に役

立つことができないのではないかと本当に自信がなかったのです。

それでも、そのときの東北大学の下平三郎先生に紹介していただき、富士通研究所材料研究部に入りました。会社は何も聞かないで配属するわけです。配属されたところは、リレーやスイッチに使う磁性材料の開発をする部門でした。そうすると、いま言いましたように、磁性材料とか磁石の研究とかの勉強は全然したことがない。基礎的なことはすごくよく勉強していましたが、磁石のことは全然勉強したことがないので、「磁性材料の研究はやったことがない。困ったな」と思い、また涙を流しています。本当に弱かったのですね、私。

■ 磁気研究の面白さを知る

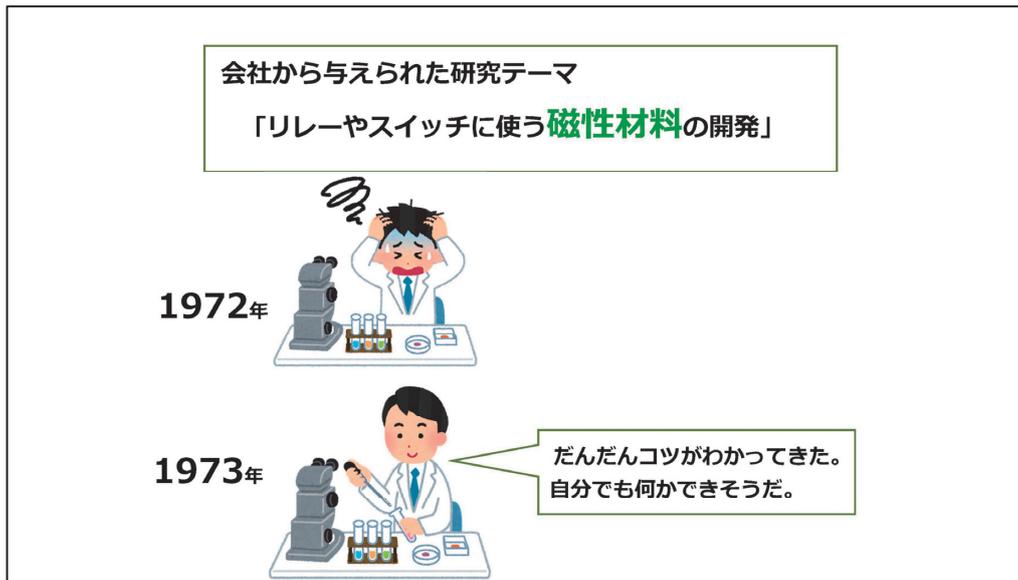


図-3

〈図-3〉会社から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というものでした。最初は自信がなく、「ああ、どうしよう」と思いましたが、勉強はすごくするわけです。私にはそういう特徴がありました。磁気の勉強は、本当に基礎的な磁気物理学の研究から磁性材料の応用的な研究まで、全部自分でやりました。家に帰ってもずっとやっていたから、家庭サービスなどは全然できていませんでしたが、そのときからずっと続いています。

1年ぐらいたったら、だんだんコツが分かってきて、「何とかできるのではないかな。磁気の研究は面白いな」と思うようになりました。

■ 会社で生きた大学院時代の実力養成

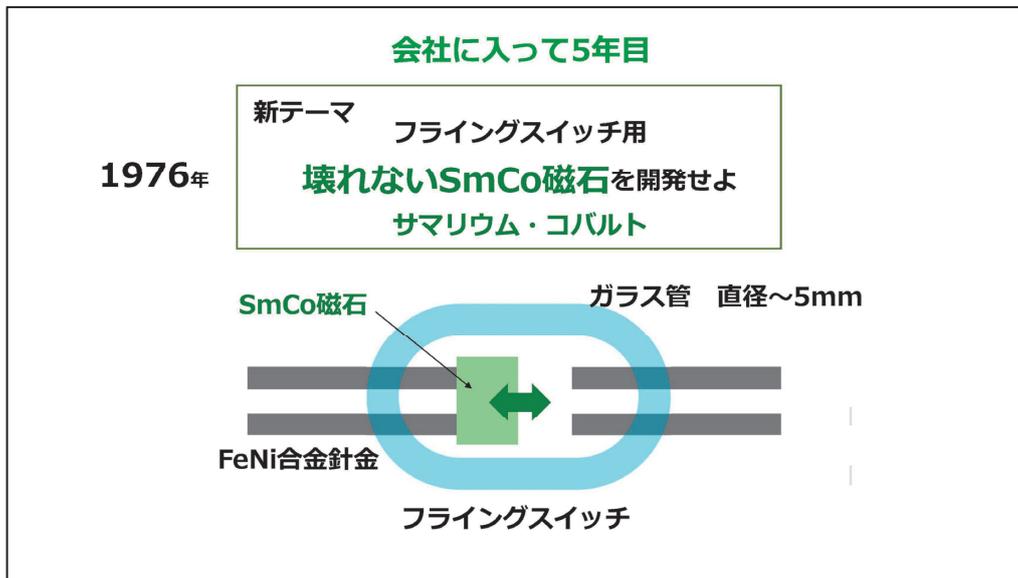


図-4

〈図-4〉磁気の研究は、わりといろいろな分野があります。会社に入っているいろいろなことをやり、入社して5年ぐらいたって、私に独自の研究テーマが与えられました。「フライングスイッチ用の壊れないSm-Co（サマリウムコバルト）磁石を開発しなさい」というテーマです。Sm-Coはその当時の一番強い磁石です。図のように、直径5mmぐらいの細いガラス管に針金が2本ずつ両側から封入されていて、中に磁石が入っています。薄いグリーン色の物体がSm-Co磁石です。外から電気を流してパルス磁界をかけ、このSm-Co磁石が右に行ったり左に行ったりして電気を切り替える。スイッチですね。これは結構小さいスイッチで大きな電流を切ったり入れたりすることができるということで、富士通の部品材料部の人たちが非常に期待していたものでした。

ところが、右に行かしたり左に行かしたりしている間に、ちょっとすると磁石が割れてくる。だから、壊れない磁石を開発してくださいということでありました。

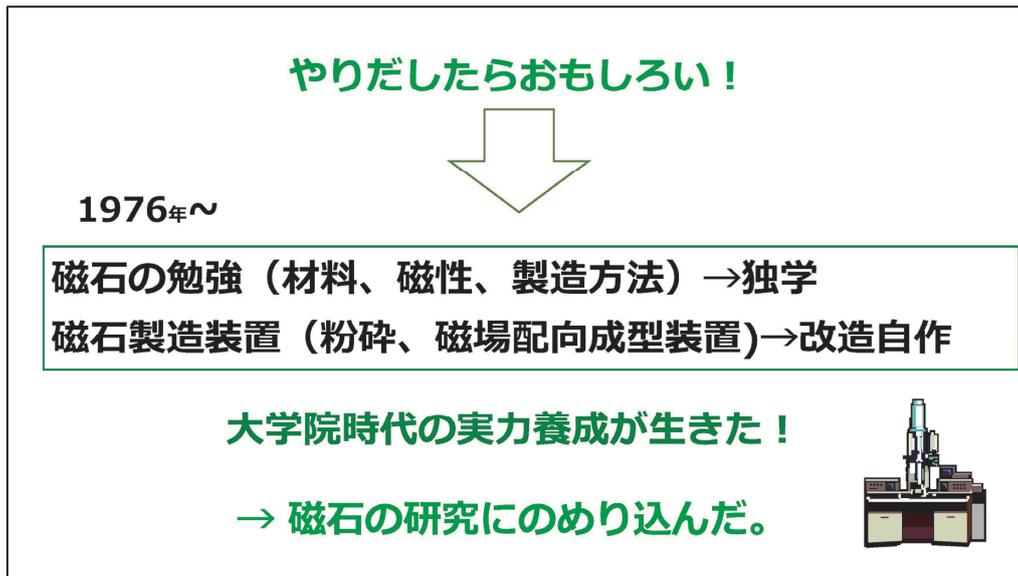


図-5

〈図-5〉「はい、やります」と言ってそれを引き受け、また磁石の勉強をしました。材料の勉強。磁性材料。製造方法。磁性は磁気物理学ということです。磁気物理学の研究を一生懸命やりました。

磁石の製造装置は独特な装置が必要になります。会社にあったものをいろいろ改造して磁石が製造できるようにするとか、結構器用なところがあつたわけです。こういったことはみんな大学院時代の実力養成が起きたと思います。実験も大好きで実験をしたり、いろいろな実験装置をつくったりするのも大好きでした。そういう能力が生きてうまく行き始めます。そして、磁石の研究にのめり込み始めました。

■ 「壊れない Sm-Co 磁石」の開発

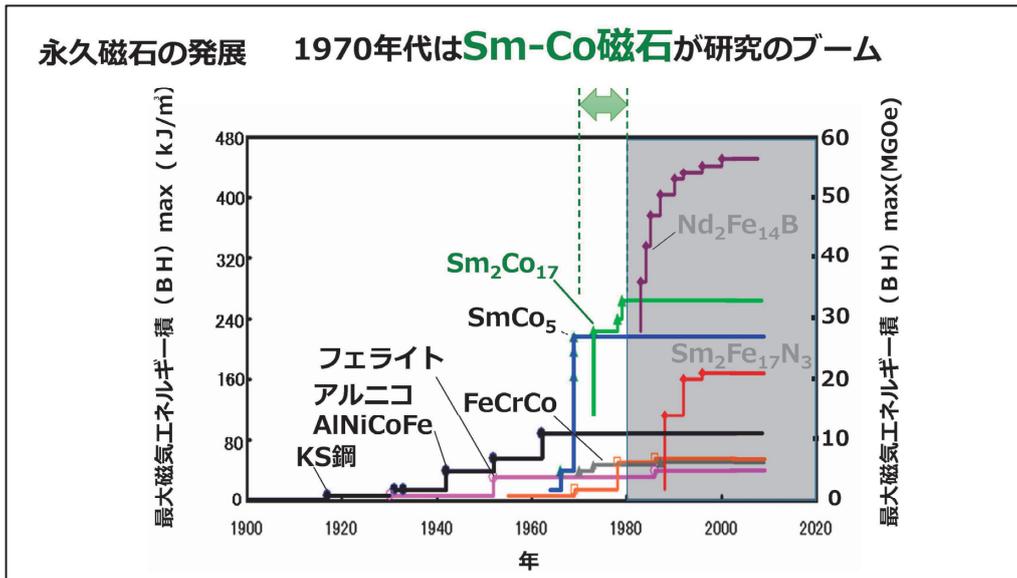


図-6

〈図-6〉この図は永久磁石の発展の歴史を示します。横軸は年代。縦軸は磁石の強さを表すファクターとしての「最大エネルギー積」。磁石の強さは、年代により新しい磁石が発明されるたびに、ステップ状にだんだん磁気特性が上がっていく。その様子が示されています。

私とその磁石の研究をするようにと言われたのは 1970 年代です。ちょうど Sm-Co 磁石の磁気特性がどんどん上がっていくときでした。そのときに、Sm-Co 磁石の機械的強度を改善しなさいというテーマを与えられたのです。

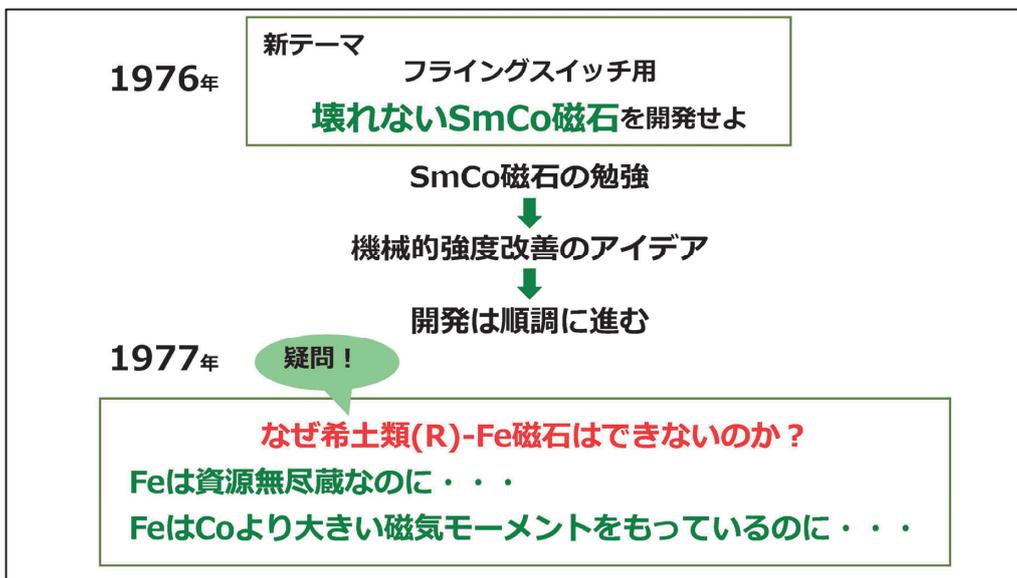


図-7

〈図-7〉「フライングスイッチ用 壊れない Sm-Co 磁石を開発しなさい」ということでしたので、Sm-Co 磁石の勉強を一生懸命しました。それから、機械的強度改善のアイデアもいろいろ練り、実際にサンプルをつくって評価する。そういうことも大好きでしたので、どんどんサンプル（モノ）をつくって評価し、アイデアを出してやってきました。開発は順調に進みました。

ところが、そのような開発に携わりながら、1977年、なぜSm-Fe（鉄）磁石はできないのか不思議に思いました。Sm-Co磁石はサマリウム（希土類）とコバルトとの組み合わせです。CoではなくSm-Fe磁石ができたらいいのになと思いました。なぜなら、鉄は安いです。資源がコバルトに比べたら無尽蔵に近い。また、鉄はコバルトよりも磁気の単位が大きいことが分かっている。だから、希土類と鉄の磁石ができたならSm-Co磁石より強くなることが分かっているわけです。分かっているが誰もやっていない。そんなことがあるのですよね。チャレンジしても全然うまくいかなかったからでしょうけれど、誰もやっていなかった。たまたまやっていたのが今日話したクロートさんですが、本当に発表がなかったのです。希土類に鉄磁石。何とかこれをやろうと思いました。

■ 誰もやっていなかった Sm-Fe 磁石

1978年

学会でブレークスルーのヒントをつかむ

希土類磁石の基礎から応用まで

ヒント!

R-Co系状態図および RCO_5 と R_2Co_{17} の磁性

目次

希土類化合物の物性および保磁力機構

1.	R-Co系状態図および RCO_5 と R_2Co_{17} の磁性	浜野正昭	1
2.	R-Co永久磁石の保磁力について	後藤公美	5
3.	$SmCo_5$ および $GdCo_5$ 単結晶における磁化反転	片山利一	9
4.	RCO_5 系化合物における磁化反転の時間依存性	上原満	13
希土類磁石材料			
5.	($SmCo_5$)系磁石	宮崎健, 原田英樹, 滝本真治	17
6.	$MMCo_5$ 系希土類コバルト磁石	山下信	21
7.	Cu置換型R-Co磁石	依好大, 本島正勝	25
希土類磁石の応用			
8.	使用上の問題点	日口章	30
9.	希土類磁石のスピーカーへの応用	吉村悠, 西村泰武	34
10.	(SmY)($CoFeCu$)系2-17磁石とマイクロモーターへの応用	天田祐治, 今泉伸夫, 若菜和夫	38

1978年1月31日

東京都・科学技術庁金属材料技術研究所大会議室

1978年1月31日
日本金属学会主催シンポジウム
『希土類磁石の基礎から応用まで』
配布資料より

図-8

〈図-8〉 そのアイデアは出なかったのですが、日本で開催されたあるシンポジウムの中でヒントが得られました。このシンポジウムの最初の講演者であった浜野正昭さんがヒントを与えてくださったのです。

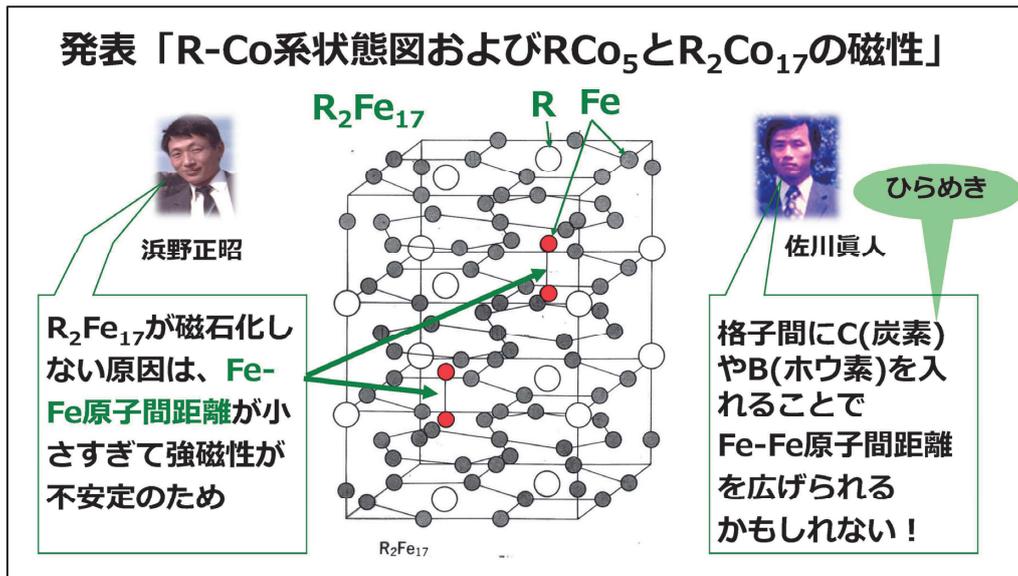


図-9

〈図-9〉それはどんなことかという、浜野さんは希土類と鉄の代表的な化合物を示し、その化合物の中の鉄と鉄の原子間距離が小さすぎる、だから強磁性が不安定なのだと。そこまでしかなかったのですが、その基礎的な研究の結果を示されたわけです。

私はそのとき、「そうしたら原子半径が一番小さい元素として知られている C (炭素) や B (ホウ素) を格子間に入れてやれば、鉄と鉄の原子間距離が広げられるのではないか」と思いました。誰でも思いそうなことですが、あまり思っていなかった。私はそう思った。これは「ひらめき」と言えるかもしれません。

■ 会社の方針を受け入れず Sm-Fe-B の研究へ



図-10

〈図-10〉私の大事な特徴は、すぐ実験することです。ですから、すぐに R（希土類）-Fe-C、R-Fe-B（ホウ素）というものをどんどんつくっていきました。R は 17 種類ありますが、いろいろなところを探してきてどんどん組み合わせて合金をつくり、そして実験をしていったのです。これも、すぐやることが非常によかったのだと思います。

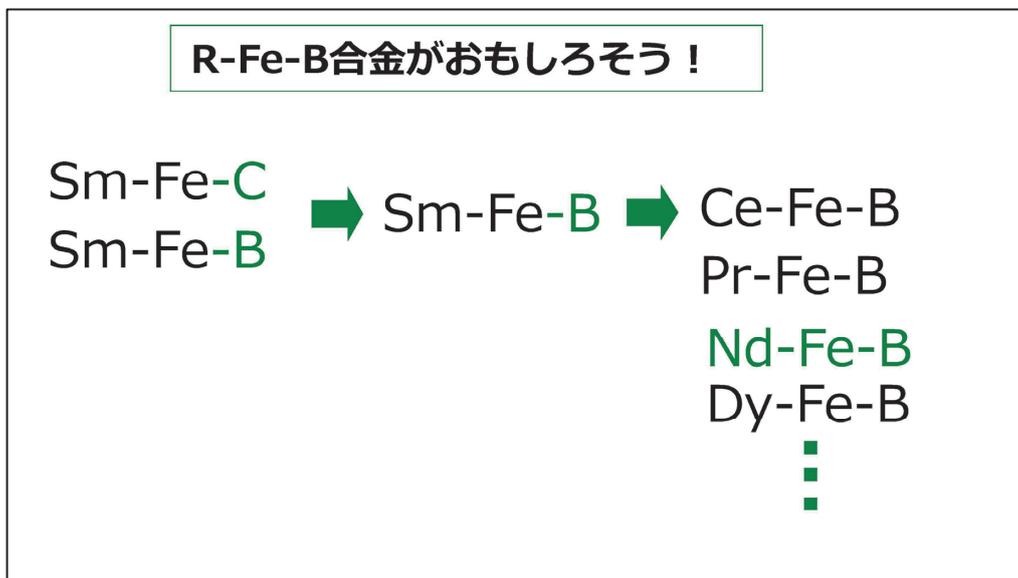


図-11

〈図-11〉このようにしていろいろな Sm-Fe-C、Sm-Fe-B とつくっていき、すぐに、C よりも B がいい、Sm-Fe-B がいいことが分かったわけです。「Sm-Fe-B が磁石の候補として可能性があるな」とすごく思いました。

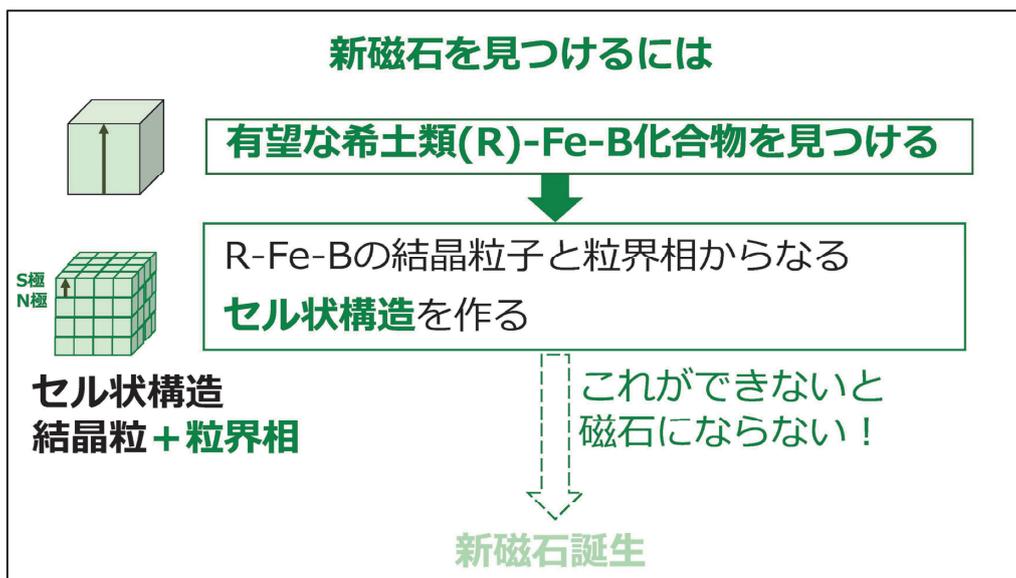


図-12

〈図-12〉磁石を見つけるには、化合物を見つけるというだけではなく、内部構造というものをつくってやらないといけません。セル状の構造というのか。小さな無垢の物質では、化合物をつくっても磁石にはなりません。中に小さく分かれた内部構造をつくってやらないといけません。本当に数ミクロンぐらいに分かれた、小さな粒の組み合わせをつくってやらないといけません。それができないから磁石になりません。

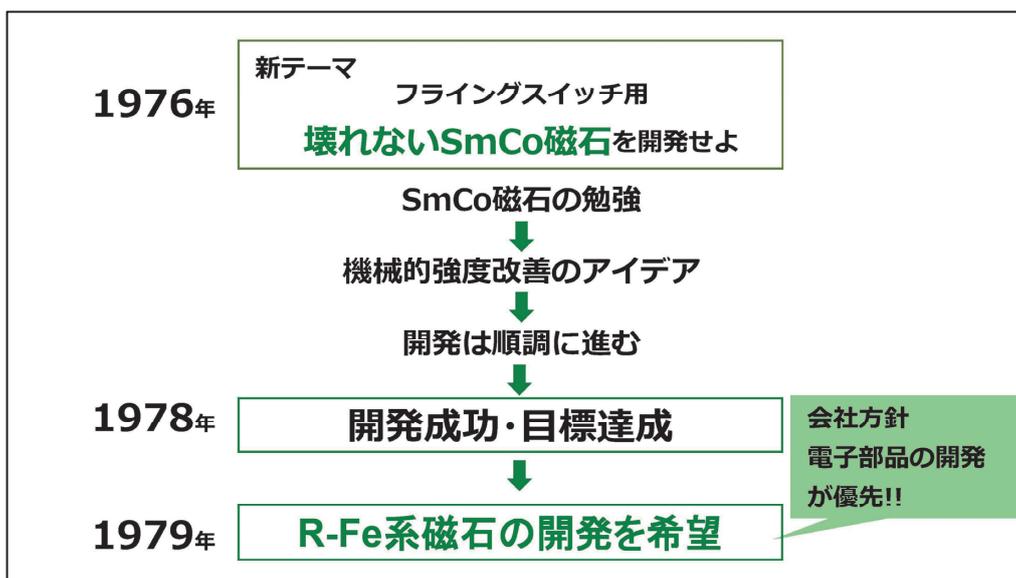


図-13

〈図-13〉それをつくらないといけません。私は「フライングスイッチ用の壊れないSm-Co磁石を開発する」というテーマを持っています。その研究をずっと進めていて、開発は順調に進んで成功するわけです。Sm-Co磁石も結構丈夫なものことができました。そして、いろいろな組成やつくり方を変えたり、それから、こんなこともやりました。ホットアイソスタティックプレスing。HIP処理と言っていました。中にある小さな穴に、温度を上げてアルゴンの噴霧器で周りから高圧をかけてやると穴がなくなり、丈夫になります。そんなこともやりました。そうしたら見違えるようなものができ、これで研究は成功した。それで私は次のテーマを考えないといけなかったわけです。

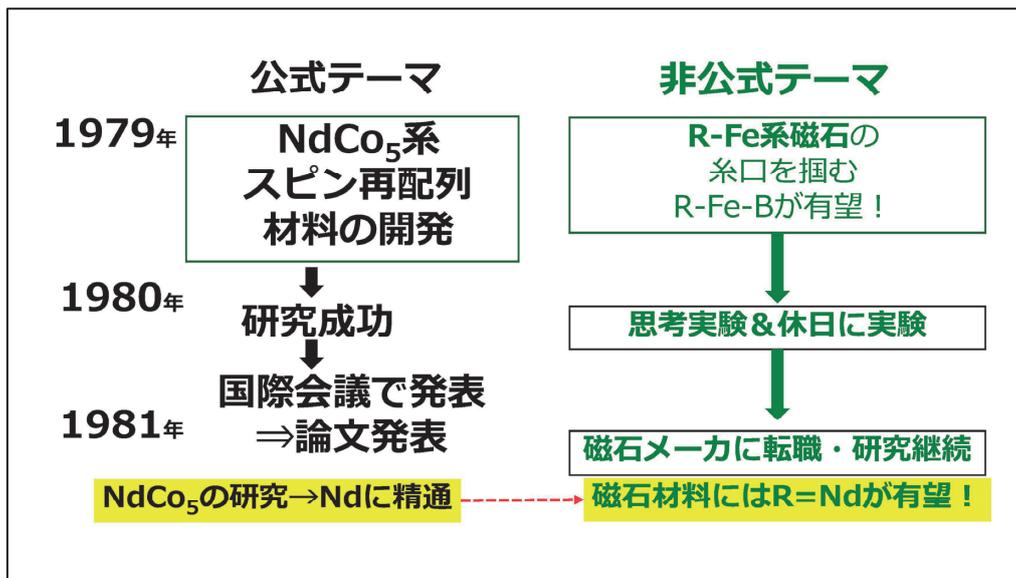


図-14

〈図-14〉私は B も可能性として見つけていたので、Sm-Fe-B 磁石をやりたいと言いました。そうしたら上司は「駄目です。会社の方針では、もっと電子部品とか、エレクトロニクスに直接関わるような研究をしてください」。そう言われたので、私は何かテーマを考えないといけなかったのです。

そこで考えたのが、このテーマです。1979 年、公式のテーマというか、「これをやります」と提案したのが「NdCo₅ 系スピン再配列材料の開発」。とにかく、このときから初めてネオジムをさわるようになっていきます。

「スピン再配列」とは何かというと、例えば磁石の N、S の方向が、ある温度帯で N、S 極に直行する方向に変わってしまう。N、S となっている磁気方向がパッと 90 度変わる。エレクトロニクスの会社にはいろいろ用途があるだろうということで提案したら、認めてくださったのです。それで私、スピン再配列をまた一生懸命研究しました。

磁気方向が変化する温度をいろいろ変える合金系を見つけたり、コバルトにいろいろ入れていくと変化するわけです。鉄を入れるのもやりました。だから Nd-Fe にだいぶ近づいている。そういうスピン再配列という研究をやりました。作り方も会社でつくるものですから単結晶では駄目で、もっと工業的につくる方法なども提案し、粉末冶金法でつくる方法も開発しました。これも Nd-Fe-B の作り方にだんだん近づいていっていますが、そのときは気が付かない。そういうことで、この研究は成功します。

研究が成功して褒めていただき、アメリカのテキサスで開催された国際会議で発表させていただきました。結構評判になり、論文も『Journal of Applied Physics』に出ました。そして立派な論文ができたのです。こんなことで結構、成果は出たわけです。

■ 住友特殊金属社長に電話で直訴

この頃からのテーマを通じて私はネオジムというものに非常に精通するようになり、ネオジムというものとだんだん親しくなりました。それと並行して、私は R-Fe 磁石の開発をやりたいと思い、非公式のテーマとしてやっていました。しかし、会社の勤務の時間帯にはあまりできませんから、家に帰っていろいろ考えたり調べたりしてやっていました。このときもまた私は家に帰っていろいろやっていたから、家ではあまり家庭サービスをしなかった。ずっとそういう状態でした。

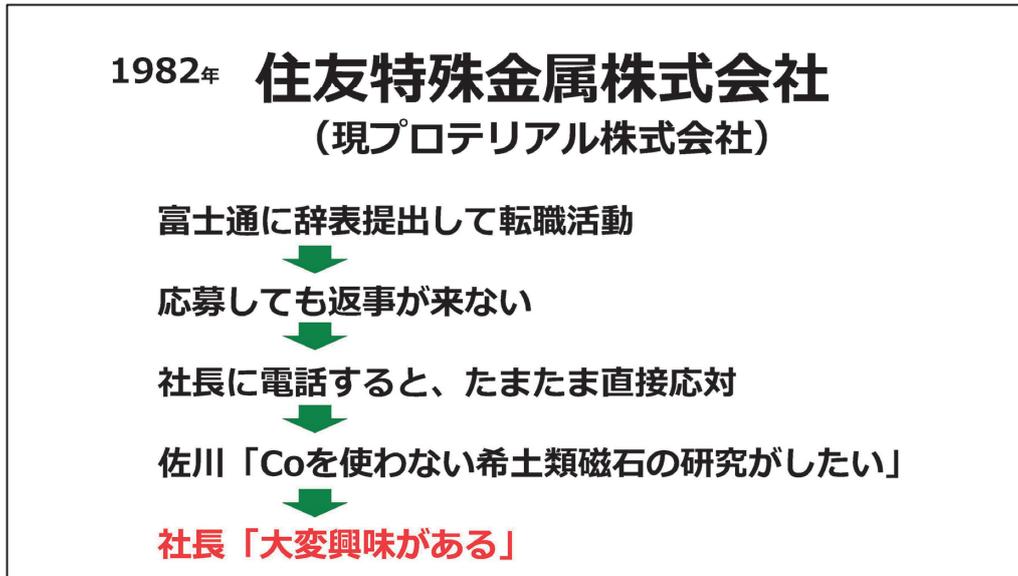


図-15

〈図-15〉Nd-Fe-B というものにだんだん近づいてきて、私は磁石メーカーに転職して研究を続けたいと思うようになりました。それで、ある時期に私は富士通に辞表を出します。会社はあまり反対しませんでした。富士通はすごく立派な会社です。そこで管理職にはなっていましたから、本当は反対するのだそうですが、反対はしなかった。

辞表を出した後でどこに行こうかといろいろ探しているときに住友特殊金属を見つけ、そこに応募しました。そして社長宛てに手紙を書いたのですが、あまり見てくれなかったのですね。辞表を出した後で家にいたのですが、「住友特殊金属に手紙を書いたけど全然返事ないな。どうしようかな」と言っていたら、家内が「電話したら？」と言うので電話したら、たまたま社長が出てこられたわけです。「私はコバルトを使わない希土類磁石の研究がしたい」と言ったら「大変興味がある」と言ってくださり、会社を訪問してお話しする機会ができました。そして、1982年の初めごろに住友特殊金属へ行くことになったのです。

■ 世界最強 Nd-Fe-B 磁石の誕生

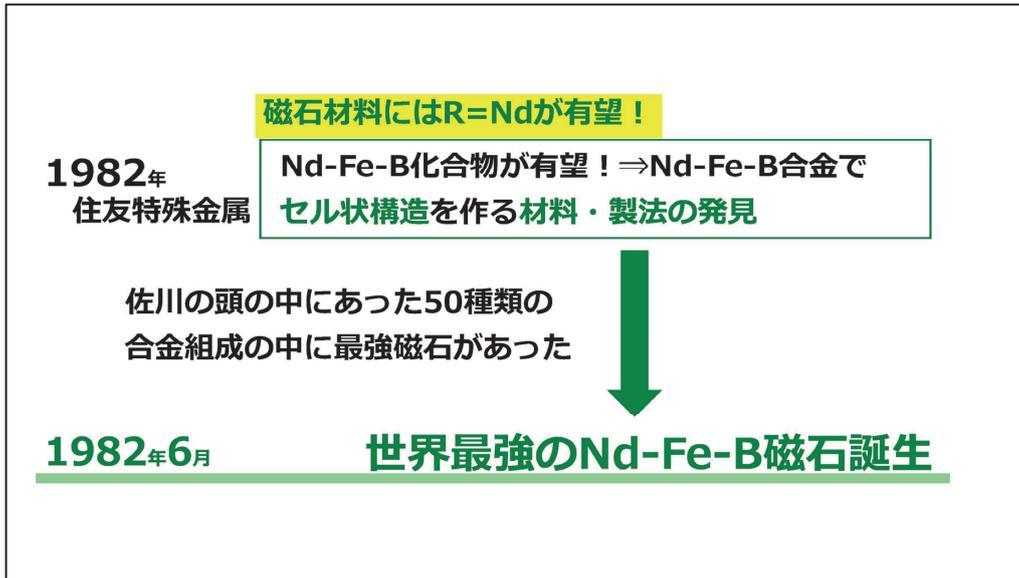


図-16

〈図-16〉このときにはNd-Fe-Bのアイデアもできていました。しかし全部、頭の中です。データとかは全然ない。頭の中では全部できていました。磁石をつくるためにセル状構造にしないといけない。これはできているわけではないですが、チャレンジする組成をいろいろ考えていました。私の頭の中にあった50ぐらいの組成の候補をリストにして、それを住友特殊金属の最初に付き合ってくれた人たちと一緒につくっていったわけです。

そうしたら、その50ぐらいの組成の中で世界最強の磁石があったのです。「万歳！」と叫びました。Nd-Fe-B磁石の誕生です。1982年6月に誕生しました。

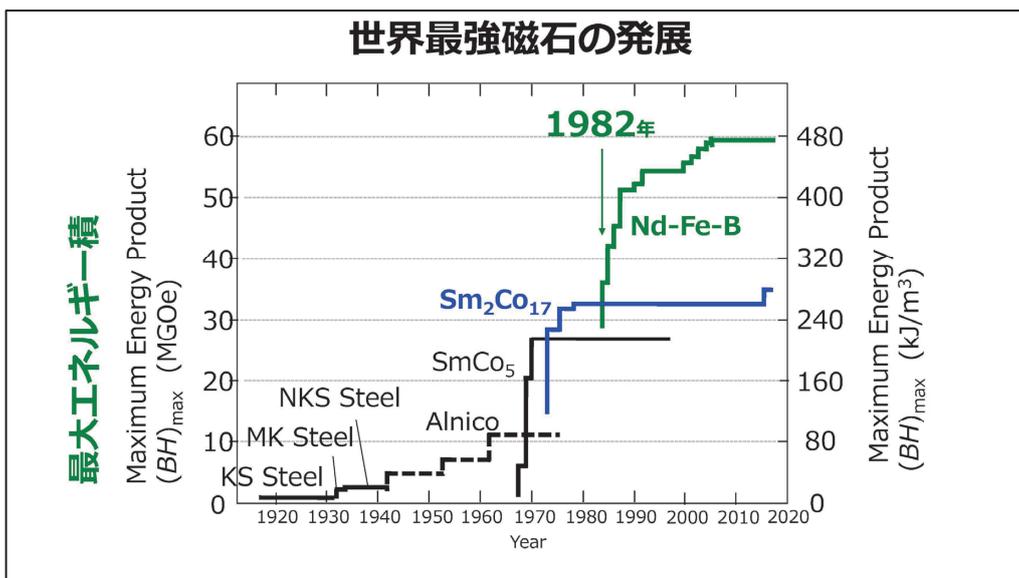


図-17

〈図-17〉そのようにして「世界最強磁石の発展」のグラフにNd-Fe-B磁石が出てきた。世界最強の磁石ができたのです。

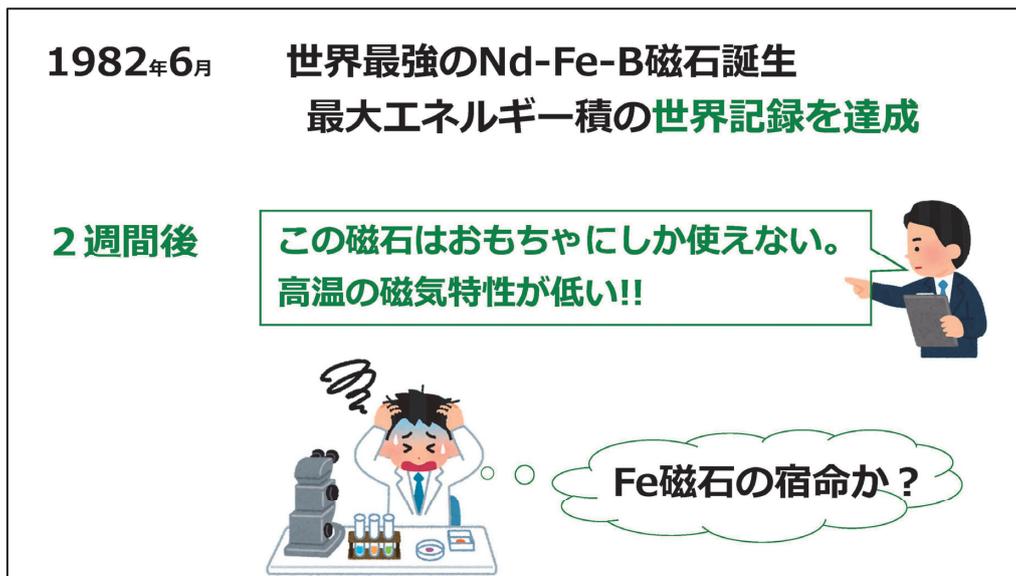


図-18

〈図-18〉ところが、その磁石を評価したグループがいます。その人たちが、「この磁石はおもちゃにしか使えない。モータとかには全然使えません。磁気特性が悪い。温度を上げたらガクッと磁気がなくなってしまうです」。「いやー」と思い、私はまたおかしくなりそうでした。「やはりコバルトでないと駄目なのか。コバルトはそういう耐熱性を与えるためにも必要なのかな」。一瞬そう思いましたが、そのときにはチームができており、私はチームのみんなと一生懸命考えました。そうしていろいろなアイデアを出してやったら、それをクリアする方法が見つかりました。



図-19

〈図-19〉それは次に説明しますが、この人たちと一緒に工業化の研究をずっとやっていきました。

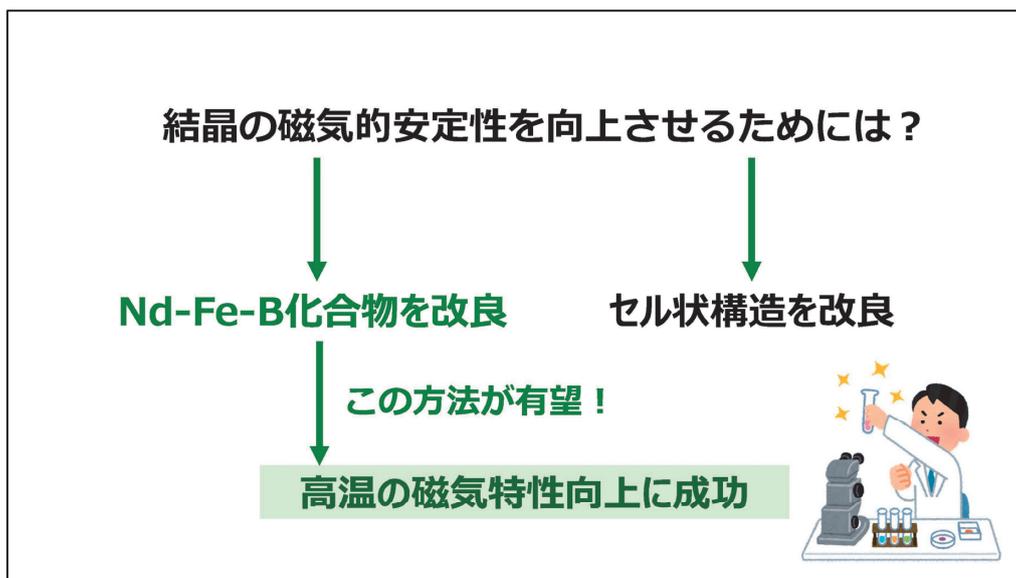


図-20

〈図-20〉 磁気特性を安定化させるためには化合物の改良とセル状の構造の改良と二つのルートがありますが、化合物を改良するところほうまくいきました。

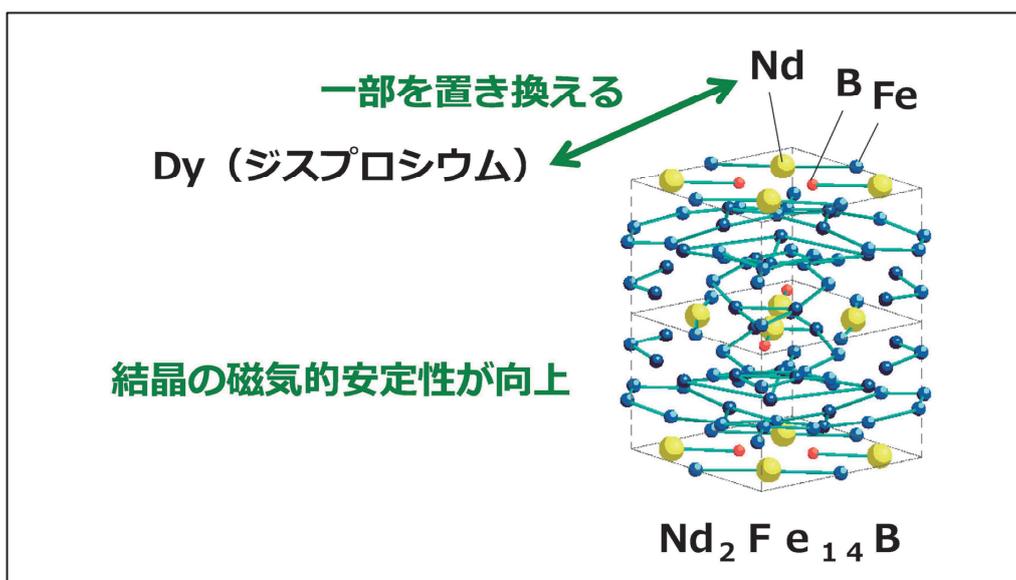


図-21

〈図-21〉 化合物を改良するとはどういうことかということ、Nd-Fe-B の結晶は Nd-Fe-B 磁石が見つかって初めて見つけたのですが、これが正方晶 (tetragonal) という結晶構造です。それは私が結晶の解析で見つけて分かっていました。格子定数といって、それぞれのユニットセルの a 軸、b 軸、c 軸とありますが、それぞれの長さが幾らか。正方晶ですから a と b は一緒です。c 軸は 1.221nm とか、a 軸の単位方が 0.880nm とか、私は覚えていますが、そういうのを見つけたわけです。その結晶の中のネオジムを一部、Dy (ディスプロシウム) に置き換えるといい。そうすると化合物が安定化されることが分かりました。

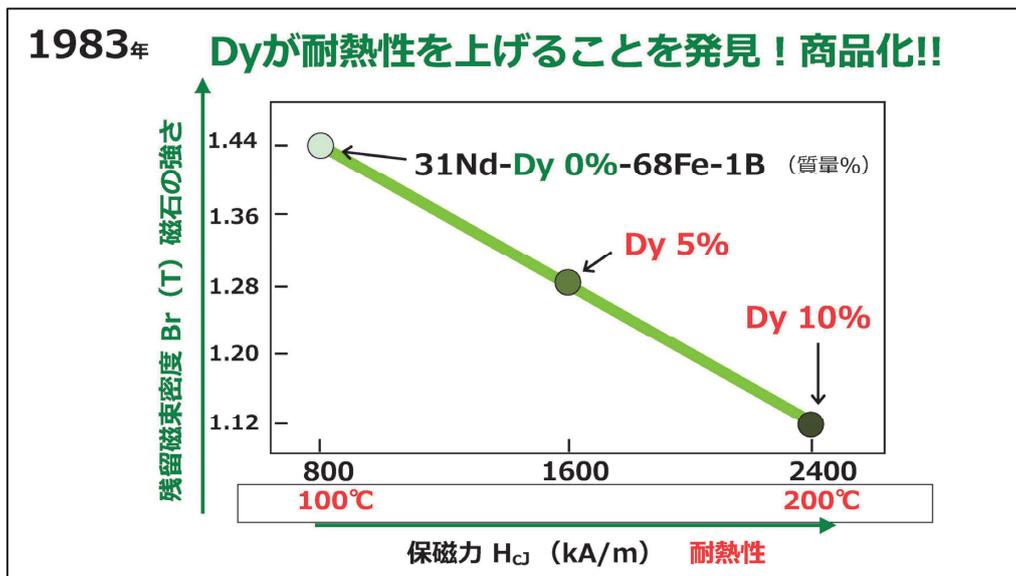


図-22

〈図-22〉このようにして、ネオジムのところに Dy を一部入れてやる。0%のところと 5%、10%とありますが、0%では 100°C しか持たない。耐熱性は 100°C で駄目になるという意味です。100°C まで持つもの。それから、Dy 5% 入れると 150°C まで持つものができた。それから、10% 入れると 300°C まで持つものができた。ただ、Dy を入れていくと、縦軸は磁気の強さですが、磁気の強さを低下させます。しかし、10% 入れてもまだ当時の最強磁石よりは高かった。だから、これでも十分価値があります。そして、何といたってもコバルトを使わないことが非常に大きなメリットでした。



図-23

〈図-23〉この結果を 1983 年 11 月 10 日、アメリカのピッツバーグで行われた MMM (Magnetism and Magnetic Materials) という国際会議で発表しました。私の横にいらっしゃる方は Strnat (ストゥルナット) 先生で、サマリウムコバルト磁石の発明者です。私はこのとき 40 歳です。若いですよ。

■ 3年で量産後、各分野に大きな貢献

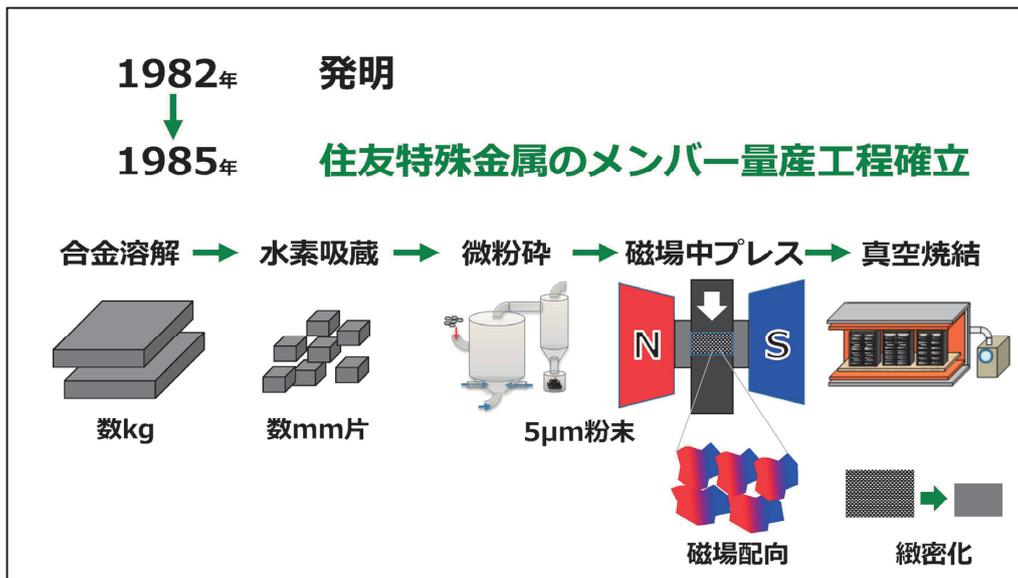


図-24

〈図-24〉Nd-Fe-B を 1982 年に発明し、住友特殊金属のメンバーと量産化を進めました。量産化にはいろいろな工程があります。このような工程を開発して工業化をしていき、工業化は成功しました。それぞれの工程をいろいろ工夫してできるようになったわけです。工程の開発、これも大変なことですが、住友特殊金属のメンバーが非常に一生懸命やってくれました。

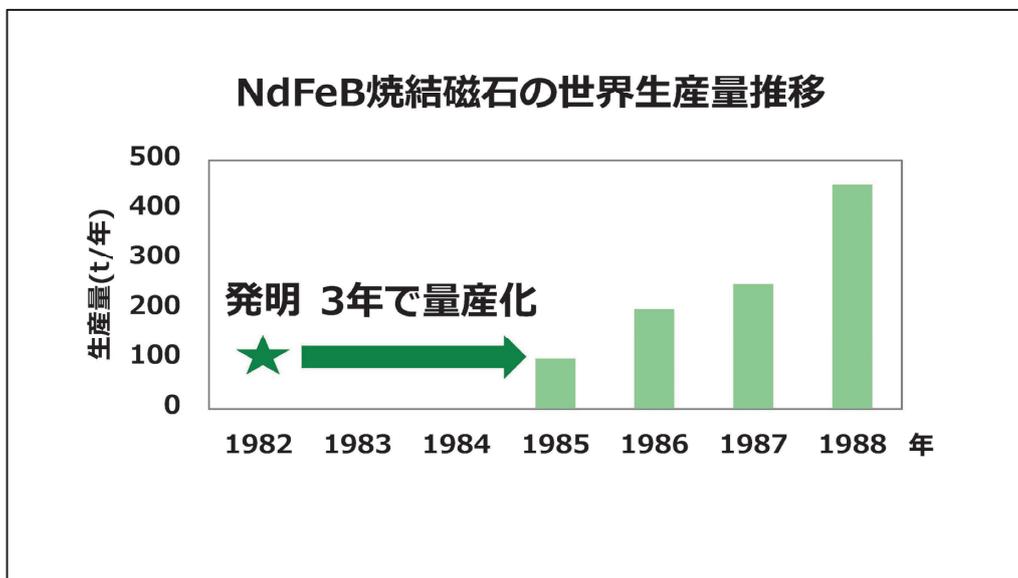


図-25

〈図-25〉年代による生産量の推移を見ると、1982年に発明したものが、1985年からほんの少量ですが量産できるようになっています。これは画期的なことです。新しい材料が3年で量産が始まるのは大変なことですが、そういうことができたわけです。住友特殊金属の人たちがすごく頑張ってくれて、本格的には1988年ぐらいから量産が始まっています。

HDDに使用されるネオジム磁石



TeraWin (テラウィン) 殿ホームページより
https://www.terawin.co.jp/data-recovery/about_data/about_hdd.html

図-26

〈図-26〉ネオジム磁石はたくさんの用途がありますが、一番大事な用途はハードディスクドライブです。パソコンにも入っています。このごろは少なくなりましたが、最初はずごく大事でした。ハードディスクの円盤を回すところのスピンドルモータ。ここにはクロートさんの発明したボンド磁石が使われている。それから、読み書きする磁気ヘッドを動かすモータ、速くパッと行ってパッと止める装置のモータはネオジム焼結磁石という私が発明した磁石が使われ、ハードディスクがものすごく発展したわけです。

この磁石ができる前のハードディスクは、重さが10kgとか20kgとか、一人では持てないくらい重かった。それが、今は手で持てるものになりました。

ネオジム磁石が 情報化社会を開いた



株式会社エヌ・ティ・ティ・ビー・シー
コミュニケーションズ殿
https://www.nttpc.co.jp/column/data_center/data_center.html

図-27

〈図-27〉そのおかげで、パソコンにハードディスクが付けられるようになった。それが今の情報化社会の発端です。パソコンにハードディスクが付けられる。それがあったから情報化社会が開いたわけで、ネオジム磁石はIT社会を開くのに非常に大きな貢献をしたと思っています。

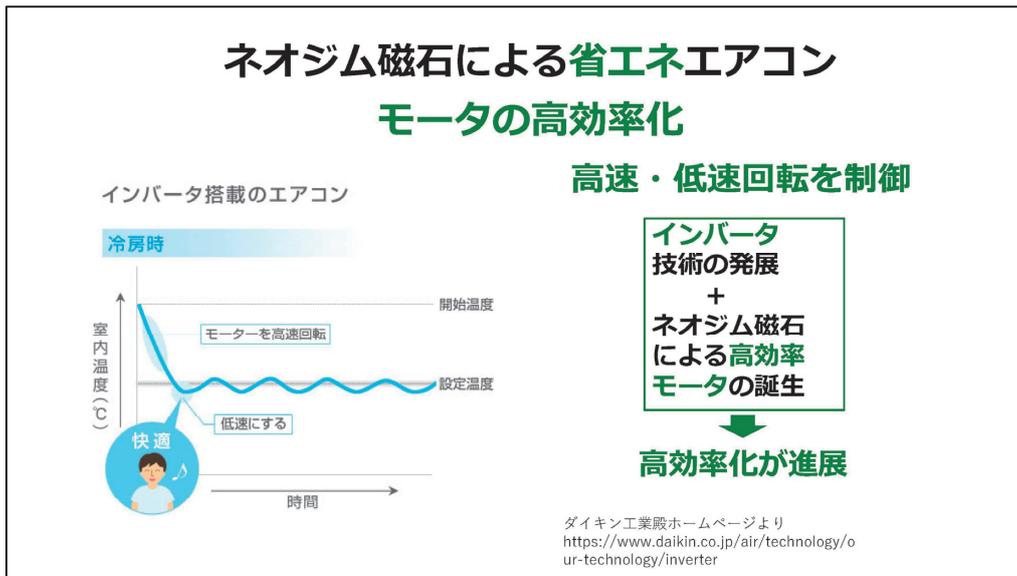


図-28

〈図-28〉また、ネオジム磁石はエアコンに使われました。ネオジム磁石を使ったモータが非常に高効率になったので、その当時から発展していたインバータという電力をうまく調整する装置と高効率のネオジム磁石とが協力して、エアコンがものすごく高効率になりました。エアコンは、これらの装置が出る前と後とでは2倍以上よくなっている。2倍というのは大きいのです。だから、エアコンが非常によく使われるようになったのはインバータと、この磁石のおかげです。



図-29

〈図-29〉それから、ロボット。ロボットにはどんどん使われています。既に使われていますが、これからますますロボットが増えてきます。産業用だけではなく、普通に使うロボットが街にたくさん出てくるような時代になると思います。そういうロボットに使われます。それから、風力発電にもネオジム磁石が使われて効率をよくしています。洋上風力発電にはネオジム磁石が必須です。そういうことで貢献しています。

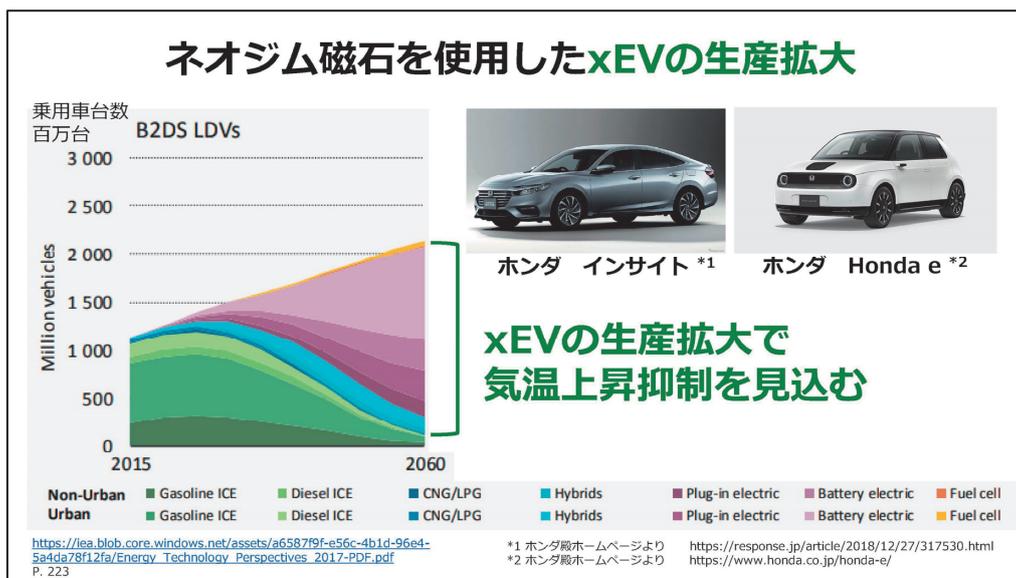


図-30

〈図-30〉自動車。ホンダさんの自動車にも EV 用にたくさんネオジム磁石が使われています。このグラフは、水色がハイブリッド、水色より上の紫色部分がフルの EV。その年代による生産量を示していますが、こんなに増えていきます。2060 年にはほとんどが EV かハイブリッドになることを予想しています。こういうところにもネオジム磁石が大きな貢献をしていることは、先ほどから説明させていただいたとおりです。

■ 科学者、こんな素晴らしい職業はない

**私はよくできる研究者ではなかった
何が私を成功させたか？**

考えて、考えて、考え抜く

一人で部屋にいるとき、一人で歩いているとき、
いつも研究のことを考えている。
頭の中で実験もしてみる。

図-31

〈図-31〉こんなことで私はうまく成功しましたが、私はよくできる研究者ではなかったと申しました。本当に自信がなかった。そんな私が、なぜ成功したのか。それは私の癖というか習慣ですが、よく考える。考えて、考えて、考え抜くことです。一人で部屋にいるとき、一人で歩いているとき、いつも研究のことを考えています。そして、頭の中で実験もしている。いつも頭の中でいろいろ考えていて、実験までできる。そういう癖をつけています。

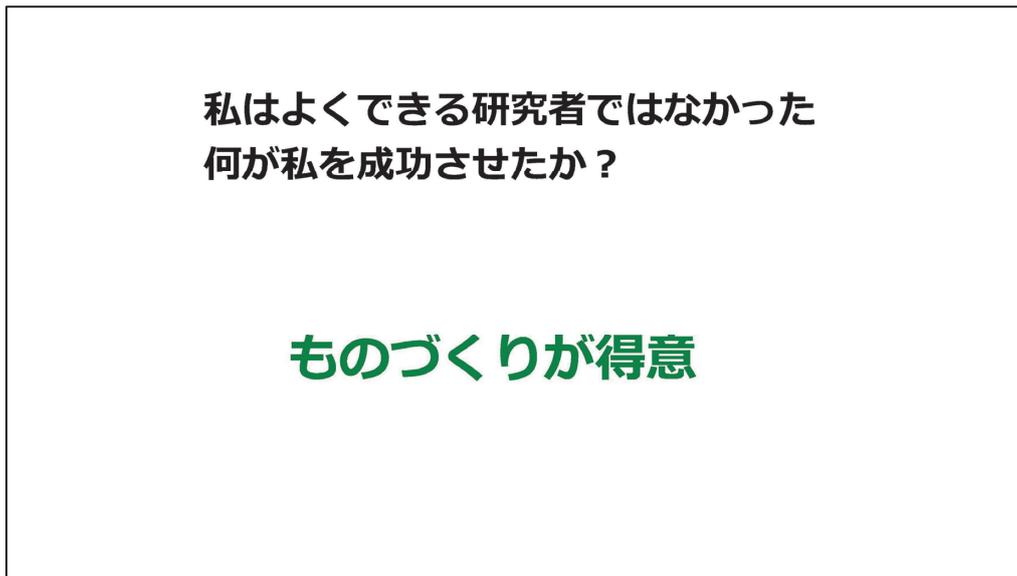


図-32

〈図-32〉そして、私はモノづくりが得意です。実験装置をつくったり、サンプルをつくったり、いろいろな合金を混ぜてつくったりするのが好きですし、得意です。そういうモノづくりが非常に大事だと思います。

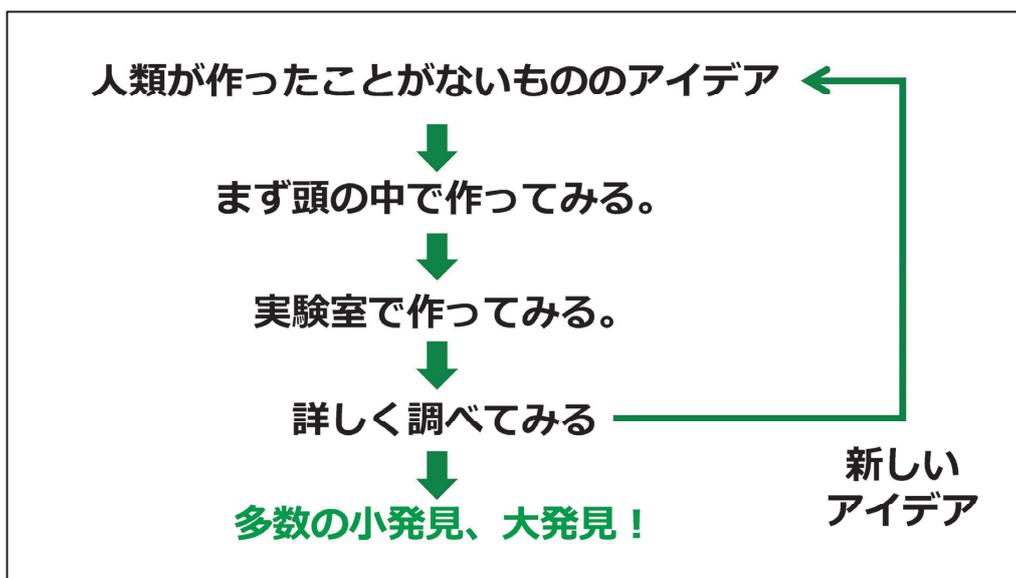


図-33

〈図-33〉人間がつくったことのないもののアイデアを持ち、まず頭の中でつくってみる。実験室でつくってみる。そして、詳しくそれを調べる。いいものができなかつたらアイデアをもう一回練り直す。このサイクルをどんどん回していく。大発見とか大発明は、こういうサイクルから出てきます。

人類で初めてのものを作ってみると、 世の天才、秀才にも全く予想がつかない 未来に繋がる

蒸気機関車 自動車 飛行機 ロボット

図-34

〈図-34〉人類で初めてモノをつくってみると、世の天才、秀才には全く予想がつかない未来が広がります。私は天才でも秀才でもありませんが、こんなに大きなものを見つけることができました。こういうことはモノをつくってみることによってできたのだと思います。大きなことですが、例えば蒸気機関をジェームズ・ワットが発明しました。やはり、つくったからこそ産業革命が起こったわけですが、つくった本人はびっくりしたのではないかと思います。モノをつくってみる。自動車もつくってみる。つくってみるということは非常に大事。特に日本人はつくってみることがすごく得意ですから、これを生かし、そして新しいものを見つけてもらいたいと思います。

研究者は最高の仕事！最高の喜び！

- 人類で初めて新しいものを作った時
- 人類で初めて新しいことを見つけた時
- 人類で初めて人の役に立つものを作った時

図-35

〈図-35〉研究者は最高の仕事、最高の喜びです。人類で初めて新しいものをつくったときは本当にうれしいです。また、人類で初めて新しいことを見つけたとき、人類で初めて人の役に

立つものをつくったとき、本当にうれしいです。こんな素晴らしい職業はない。若い人たちはみんな科学者を目指してもらいたい。こんな素晴らしい職業はないと思います。

ご清聴ありがとうございました。

ご清聴ありがとうございました。

ジョン・J・クロート博士

ジョン・クロートコンサルティング社 元代表取締役



■ 生まれ

1943年5月23日 Iowa, U.S.A.

■ 学歴

1965年 アイオワ州シンプソン大学卒業
1968年 アイオワ州立大学修士課程修了
1972年 アイオワ州立大学博士課程修了

■ 職歴

1972年～1980年 ゼネラルモーターズ研究所 研究冶金学者
1980年～1984年 ゼネラルモーターズ研究所 上級研究冶金学者
1984年～1986年 ゼネラルモーターズ社デルコ・レミー部門
アシスタント・チーフ・プロセス・エンジニア
1986年～1990年 ゼネラルモーターズ社デルコ・レミー部門
マグネクエンチ チーフ・エンジニア
1990年～1996年 ゼネラルモーターズ社デルコ・レミー部門
マグネクエンチ 常務取締役
1996年～2004年 アドバンスト・マグネティック・
マテリアルズ・タイ社 代表取締役
2004年～2017年 ジョン・クロートコンサルティング社
代表取締役

■ 受賞歴

1985年 米国物理学会 物理学応用賞
1985年 アイオワ州立大学 特別功労賞
1986年 米国物理学会 新素材賞
(現 ジェームス・C・マックグラディ新材料賞)
1994年 米国金属学会 最優秀技術賞
2022年 IEEE 環境・安全技術メダル

■ 主な出版物

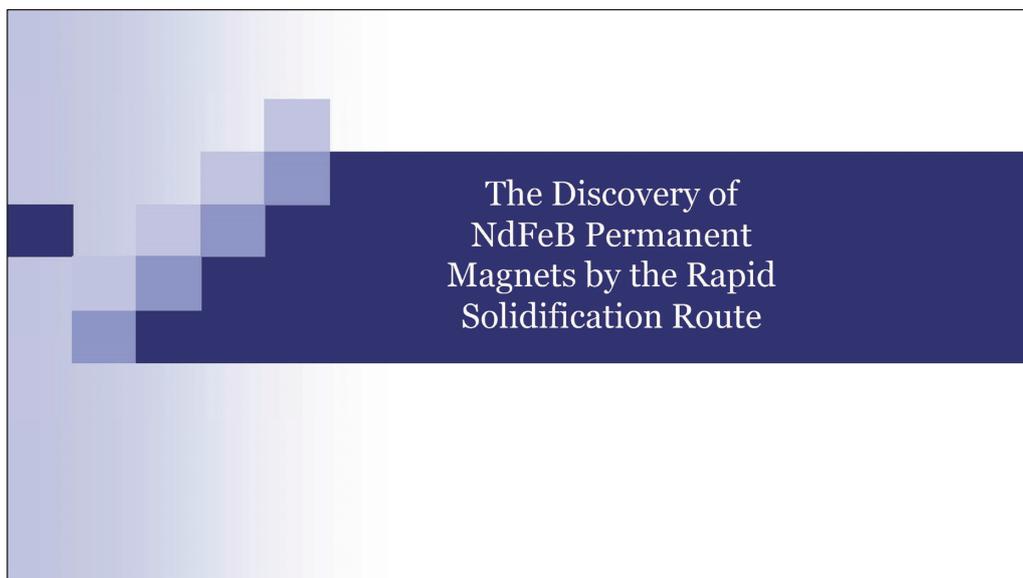
書籍

- Rapidly Solidified NdFeB Permanent Magnets, Elsevier Published, Published 2018.
- Modern Permanent Magnets, Elsevier Publishing, Published 2022. Co-edited with John Ormerod.

ジャーナル出版物

- High Energy Product Nd-Fe-B Permanent Magnets, Appl. Phys. Lett. 44(1), 148 (1984).
- Pr-Fe and Nd-Fe-based Materials: A New Class of High-Performance Magnets, J. Appl. Phys. 55(6), 2078 (1984).
- Relationship Between Crystal Structure and Magnetic Properties in Nd₂Fe₁₄B, Phys. Rev. B, 29(7), 4126 (1984).
- Structural and Magnetic Properties of Nd₂Fe₁₄B, J. Appl. Phys. 57(1), 4086 (1984).
- Manufacture of Nd-Fe-B Permanent Magnets by Rapid Solidification, J. Less Common Metals, 148, 7 (1989)

『液体急冷法』によるネオジム永久磁石の発見 ジョン・J・クロート博士



こんにちは。本日は、本動画を通してではありますが、皆様にプレゼンできることを光栄に思います。テーマは「『液体急冷法』によるネオジム永久磁石の発見」です。

最初に、ネオジム永久磁石の発見に関する本研究の概要を発表する機会を与えてくださった本田財団へ感謝申し上げます。

また、この栄誉ある本田賞を、敬愛する佐川真人博士と受賞できることに、あらためて感謝申し上げます。



図-1

〈図-1〉私の材料科学に関するキャリアは、1965年、アイオワ州エイムズにあるアイオワ州立大学大学院の冶金学科に入学したときから始まりました。アイオワ州立大学のキャンパス内には、政府が、

科学研究を強化し未来の科学者を育成するために設立した国立研究所のひとつである、エイムズ研究所がありました。1960年代半ば、エイムズ研究所はレアアース（希土類元素）の研究において世界の中心となっていました。レアアースを分離するための最初の処理は、1950年代後半にこのエイムズ研究所にて開発されました。当時、研究用試薬の高純度のレアアースをまとまった量で入手できたのは、世界中でエイムズ研究所だけでした。私は、エイムズ研究所所長のフランク・スペディング博士の研究チームに参加し、高純度のレアアースの調製および磁気特性・移動特性の測定に携わりました。この研究を通じて私は、その後の科学者としてのキャリアにおいて重要となるレアアースと出会いました。

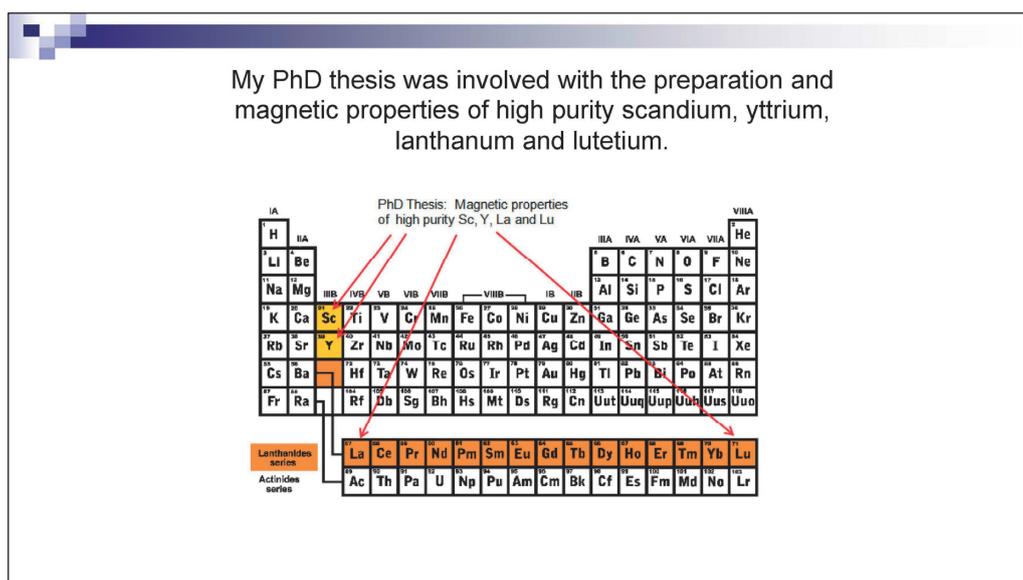


図-2

〈図-2〉レアアースとランタノイド元素は、上記に示した周期表の一番下の列の隣同士に位置しています。すでに示したように、博士論文では、超高純度のスカンジウム (Sc)、イットリウム (Y)、ランタン (La)、ルテチウム (Lu) の調製および磁気特性の測定を行いました。

これらはすべて磁性が弱いため、その磁気特性は、不純物の影響を受けやすいものでした。このため、まず超高純度の試料を用意する必要がありました。スカンジウムおよびイットリウムはランタノイド元素ではないのですが、この2つの元素は化学的な性質が類似しており、レアアースと深く関係しています。したがって、スカンジウム (Sc) およびイットリウム (Y) は一般的には、レアアースの一つと考えられています。

In 1971 I joined the Magnetic Materials Group of the Physics Department at the General Motors Research Laboratories in Warren, Michigan.



図-3

〈図-3〉 1972年に博士号を取得し、ミシガン州ウォーレンにあるゼネラルモーターズの研究所にある物理学部磁性材料チームに着任しました。

私は物理学部に在籍する唯一の冶金学者でした。当時、ゼネラルモーターズは世界最大の自動車メーカーであり、同社の自動車に使用されている数千万個のモーターやアクチュエータに使用されていた永久磁石の世界最大のユーザーでもありました。

The many uses for permanent magnets on a modern automobile.

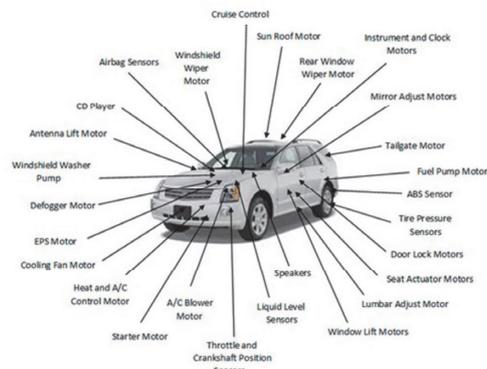


図-4

〈図-4〉 こちらのスライドは、現代の自動車に搭載されている磁石を使用した多種多様なモーターやアクチュエータなどの装置を示していますが、やや古いものとなっております。当時、このような装置のほぼすべてにおいて、磁気特性の低いフェライト磁石やセラミック永久磁石が使用されていました。ゼネラルモーターズの研究開発チームの任務は、このような装置に使用され、その小型軽量化を実現する、低コストで高性能の磁石を開発することでした。本研究の全体目標は、自動車の軽量化によって燃費を向上させることでした。これは偶然なのですが、私がゼネラルモーターズ研究所に着任した1年後の1973年、世界では初めて、OPEC（石油輸出国機構）による石油禁輸措置が打ち出されました。アメリカをはじめ世界各地でガソリンの価格が大幅に高騰し、自動車の燃費向上について急激に重要視されるようになりました。

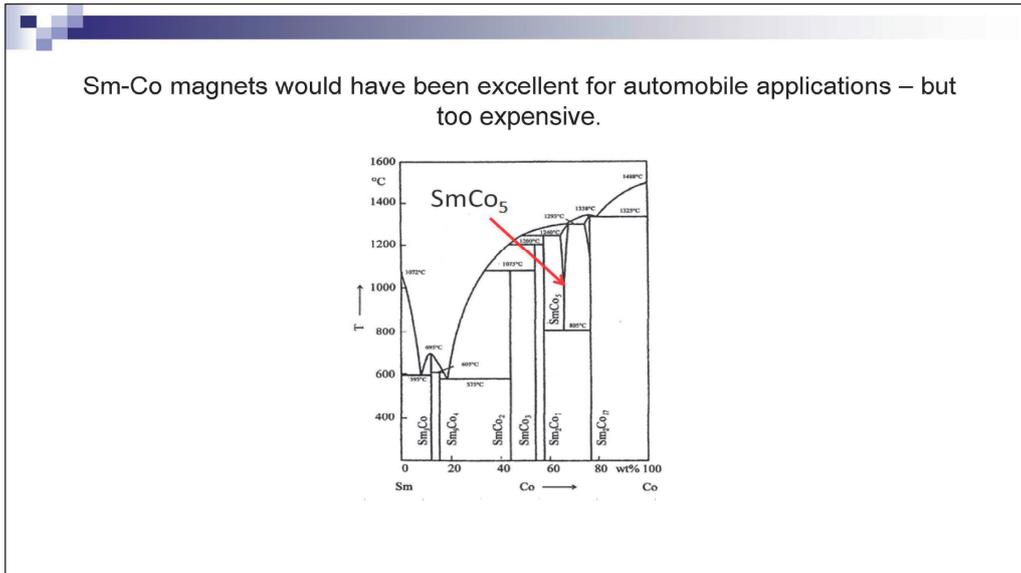


図-5

〈図-5〉 1960年代、サマリウムコバルト (SmCo) 相の図において示されているとおり、サマリウムコバルト磁石の金属間化合物相をベースとしたサマリウムコバルト磁石の発見および開発により大きな進展がありました。ご覧の通り、サマリウムコバルト磁石は、この二元合金系で形成される金属間化合物相のひとつに過ぎません。サマリウムコバルト磁石は、自動車の装置に用いるのに適していましたが、サマリウム (Sm) もコバルト (Co) も高価な元素であるため、自動車に一般的に使用するには本磁石はコストがかかりすぎるという問題がありました。私個人の目標としては、より大量に存在し、かつ安価なレアアースの一種と、コバルト (Co) のコストに比べると実質タダ同然の鉄を組み合わせた磁石を発明することでした。

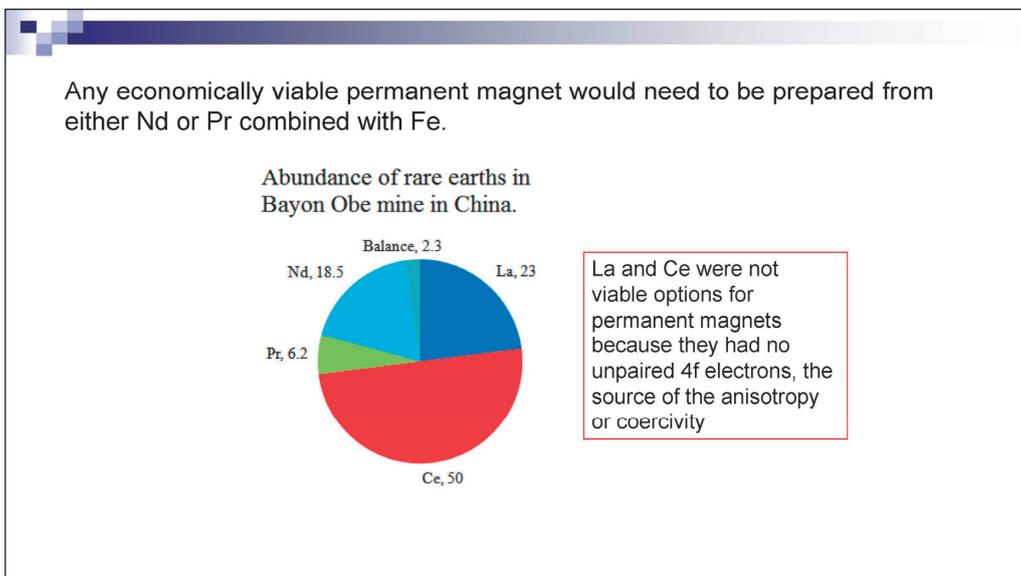


図-6

〈図-6〉 コストを抑えて希土類磁石を製造するには、レアアースであるネオジム (Nd) あるいはプラセオジム (Pr) のいずれかを使用するしかありませんでした。レアアースの相対存在量を示した上

記の円グラフをみると、その理由がわかります。偶然ですが、本データは、世界最大のレアアースの鉱山である中国包頭市にあるバイオンオベ鉱山のものです。ただし、他の鉱山においても相対存在量はほぼ同量です。4種類のレアアースであるランタン (La)、セリウム (Ce)、ネオジム (Nd)、プラセオジム (Pr) がレアアース含有量の 97%以上を占めていることがわかります。この分野の研究者は皆、費用対効果の高い RE-Fe (希土類鉄) 磁石を製造するには、これら 4つの元素のいずれかを使用すべきだと思っていました。ただし、ランタン (La) およびセリウム (Ce) は大量に存在するレアアースである一方で、希土類遷移金属磁石の異方性や保磁力の要因となる 4f 電子がないため、磁石に適していないとも考えられていました。その結果、コストを抑えたいうえで実現可能な磁石を製造するには、ネオジム (Nd) またはプラセオジム (Pr) のいずれかと、唯一実現可能な磁性遷移金属元素である鉄を組み合わせる必要があると考えました。

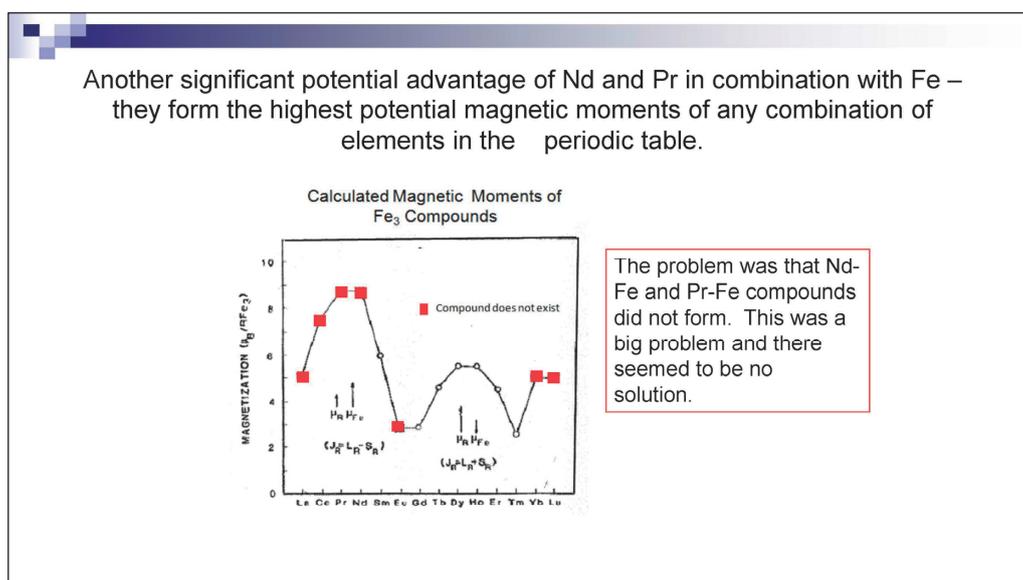


図-7

〈図-7〉ネオジム (Nd) またはプラセオジム (Pr) のいずれかと鉄を組み合わせることに
よる利点は、もう一つありました。理論上は、化合物あるいは金属間化合物はどれも、周期表のあ
らゆる元素の組み合わせよりも、高い磁気モーメントをもつものが製造できるはずでした。これは、
RFe₃ の化合物における磁気モーメントの計算結果を示した上記の図-7 において示されています。

上記で差異が示されているのは、軽希土類は、4f 系列の前半では希土類 (RE) と鉄 (Fe) の磁気
モーメントが平行に並んでいる一方で、重希土類は、4f 系列の後半において反平行になっているか
らです。

上記の図で示されているとおり、問題は、RFe₃ の化合物がないことでした。重希土類には、希土
類鉄 (REFe) 系 金属間化合物の相を生成するものもありますが、ネオジム (Nd) およびプラセオジム
(Pr) にはありませんでした。このとき、SmCo₅ などの適切な金属間化合物の相は、希土類遷移金属
永久磁石に不可欠かつ基本的な要件であり、適切な金属間化合物相がないことは、解決不可能な問
題であり、解決策はないように思われました。

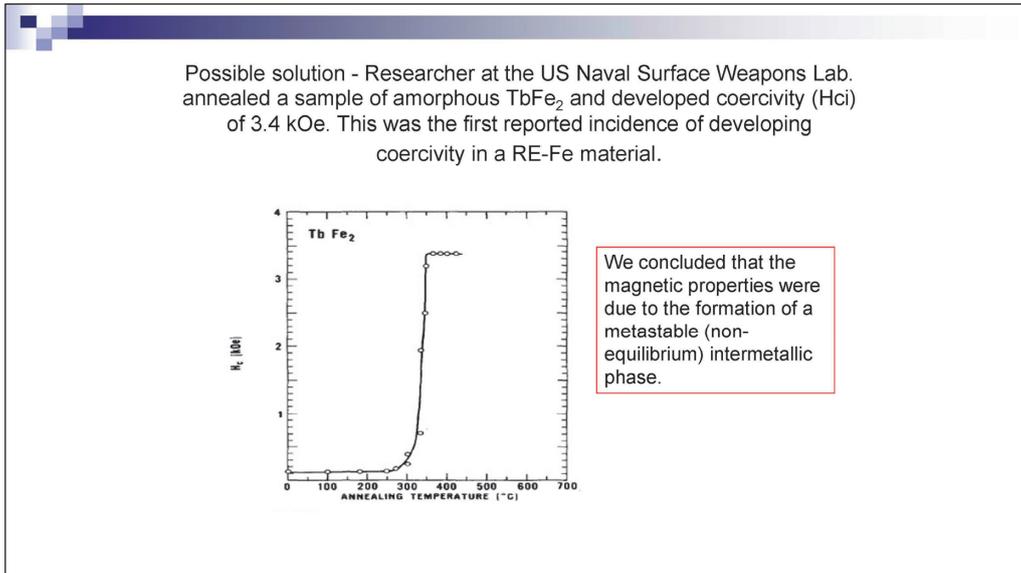


図-8

〈図-8〉適切な金属間化合物の相がないという上記の問題は、解決不可能な問題のように思われましたが、ある日、解決策の糸口となりそうな論文があることに気づきました。海軍海上兵器研究所にてある研究者が、ソ連時代の潜水艦を探知する音響探知器の生成の可能性のあるものとして、アモルファス REFe（希土類鉄）合金を調査していました。研究者は、スパッタ法により作製したアモルファス TbFe₂ 合金をアニールすると、3.4kOe という大きい保磁力が得られるということを発見しました。私の知る限り、アモルファス合金の保磁力を増やすことができたのはこれが初めてでした。この論文について同志のヤン・ハーブストとジョン・キームと話し合った結果、硬質磁性はアモルファスの材料のアニール処理により準安定相または非平衡相に転移したためであろうという意見で全員一致しました。

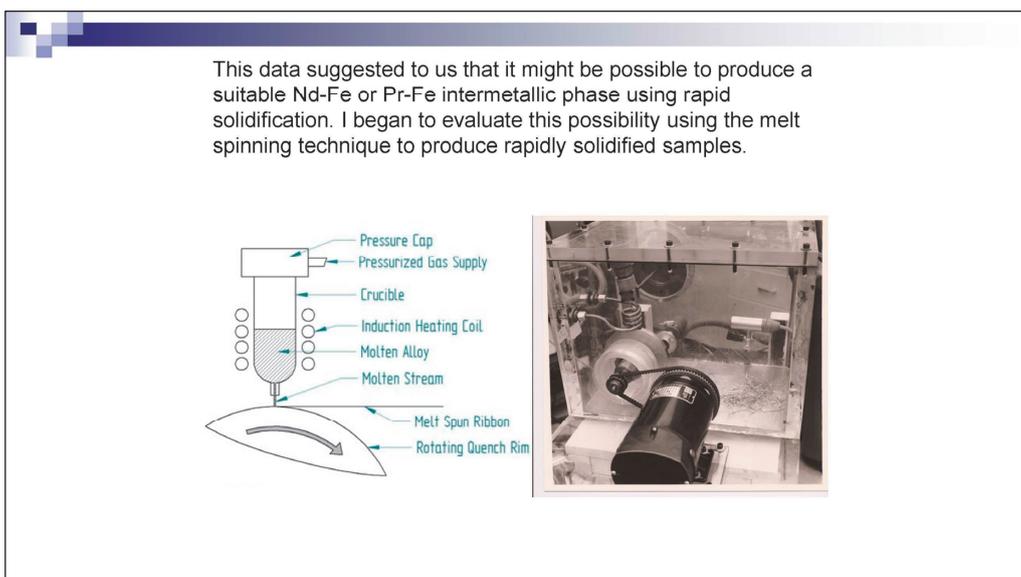


図-9

〈図-9〉本論文をきっかけに、液体急冷した試料をアニールすることによってネオジム鉄（NdFe）永久磁石またはプラセオジム鉄（PrFe）永久磁石が製造可能となるかもしれないと考え研究を始めま

した。スパッタ法により液体急冷した試料を作製するのは現実的でないということがすぐにわかり、代わりに熔融紡糸法を用いることにしました。図-9 に示されている熔融紡糸法は、当時としては比較的新しいもので、冷たい回転円盤の表面に溶融合金の層を当てるというものでした。また図-9 には、私が初めて研究所で作製したラボ用の熔融紡糸装置も示されています。回転速度は、直径 15cm の一体銅製溶解車輪により、正確かつ簡単に制御することができました。使用した試料のサイズが小さかったので、るつぽにキャップをし、純アルゴン吹き付けて溶融合金をるつぽから押し出しました。希土類材料はすべて酸化しやすいため、排気が行われ高純度アルゴンが再充填された真空チャンバーの中で全ての処理を行う必要がありました。本装置を作製し、起動させるまでには 1 年以上かかりました。

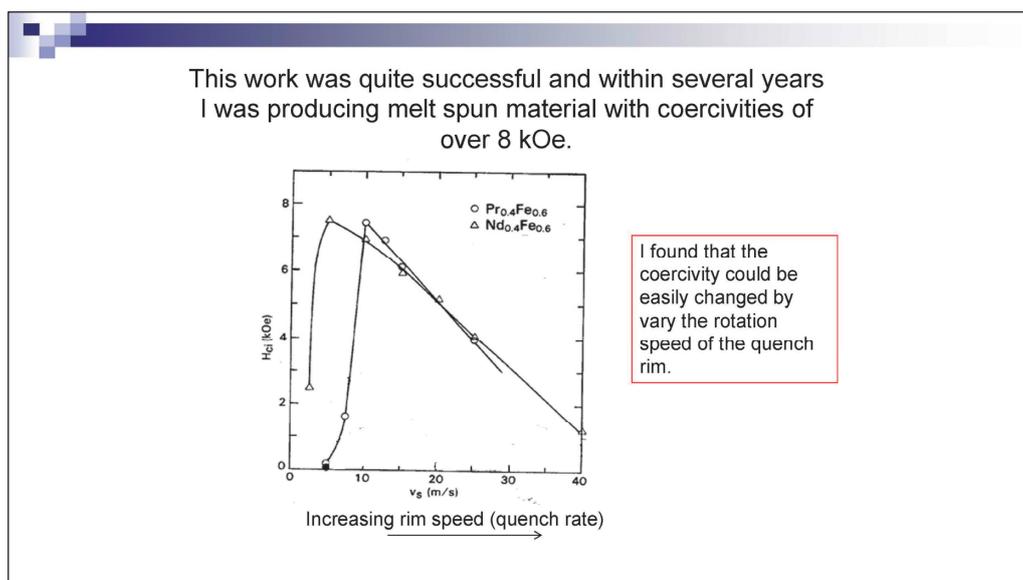


図-10

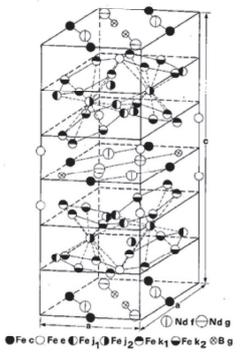
〈図-10〉 熔融紡糸装置を起動させた後、本研究はかなり順調に進み、数年後には保磁力が 8kOe 以上となる熔融紡糸（メルトスピン）法によりネオジウム鉄（NdFe）およびプラセオジウム鉄（PrFe）の材料の製造が可能となりました。溶解車輪の回転速度を変えるだけで、簡単に保磁力の変更が可能となることがわかりました。また、予想した通り、磁気特性は準安定金属間相の生成に起因することもわかりました。問題は、準安定金属間相の熱安定性が高くないため、約 350℃以上に加熱すると平衡相に分解してしまうことであり、この時点で保磁力がなくなってしまうことが考えられました。

多くの材料科学者同様、私も自分の材料にさまざまな元素を加えて、その性質を変えられるかどうか試してみました。

私が調べた元素群のひとつが、シリコン、炭素、ホウ素などの「ガラス形成元素」でした。

なぜなら、これらの元素は液体急冷させた合金の挙動を変化させると言われていたからです。ある日、異常な磁気特性を示す材料が予想に反して生成されていることに気づきました。数週間調査した結果、この材料はまだ明らかにされていないが、安定した 3 元金属間化合物相であるネオジウム鉄ボロン（NdFeB）で構成されていることがわかりました。つまり、準安定相の生成の仕方を試行錯誤する過程で、非常に重要となる安定した 3 元金属間化合物相であるネオジウム鉄ボロン（NdFeB）を発見したということになります。

Discovered Nd₂Fe₁₄B Intermetallic Phase



- Ternary Nd-Fe-B intermetallic phase formed that was mostly Nd and Fe but stabilized by a small amount of boron
- One of the most important intermetallic phases ever discovered.
- Tetragonal crystal structure with unique “c” axis of magnetization.
- High magnetic moment > 16.4 kG.
- High T_c ~ 315°C.
- High magnetocrystalline anisotropy – High H_{ci}.

図-11

〈図-11〉最終的に中性子回折分析に基づき、上記の新しい金属間化合物相は、主にネオジウム (Nd) またはプラセオジウム (Pr) と、微量のホウ素により安定した鉄からなる一軸に伸びた正方晶の結晶構造を持つことがわかりました。上記に示されている通り、本化合物の結晶構造は Nd₂Fe₁₄B 型です。この磁気モーメントは 16.4 kG と、希土類化合物としてはこれまで発見された中で最も高く、キュリー温度も 315°C と許容範囲にあり、磁石に保磁力を与える結晶磁気異方性が比較的高いことがわかりました。つまり、本化合物は希土類永久磁石の作製に必要な重要な特性をすべてもっており、希土類と鉄の比率は低いということになります。鉄 (Fe) は希土類金属よりもかなりコストが低いので、直接材料のコストを低く抑えることができました。本金属間化合物相は、これまで発見された中で最も重要な希土類磁性相であり、今日のネオジウム永久磁石の基礎となっています。



- Rapid solidification produced a magnetically isotropic powder with a highly stable, extremely fine grained (30-40 nm) microstructure.
- Magnetic powder was soon found to be ideal for producing a family of bonded magnets, particularly thin-walled ring magnets.
- These bonded magnets soon found acceptance in the new computer peripheral market.
- Although isotropic nature of powder resulted in lower magnetic strength, bonded magnets could be produced rapidly and at a low cost.
- Cost effective thin-walled ring magnet cannot be produced by the sintering process.

図-12

〈図-12〉溶融紡糸（メルトスピン）法で製造された材料に関する初期の研究によると、等方性の磁化の強さを持つ Nd₂Fe₁₄B の非常に微細な粒からなる微細構造で構成されていることがわかりました。その後すぐに、この磁性粉末は、非常に安定したボンド磁石に簡単に加工できることがわかりました。

特に、薄肉輪形（リング）磁石は非常に簡単に作製でき、小型モーターメーカーが求めていたものであることがわかりました。磁性粉は等方性の磁化の強さを持っており、磁気強度は異方性焼結ネオジム磁石より低いです。ただし、この薄肉輪形（リング）磁石は、焼結処理をして製造するのが困難な製品のひとつでした。本磁性粉を使用して自社のオリジナル磁石を製造した最初の企業は、日本の小型モーターメーカーでした。

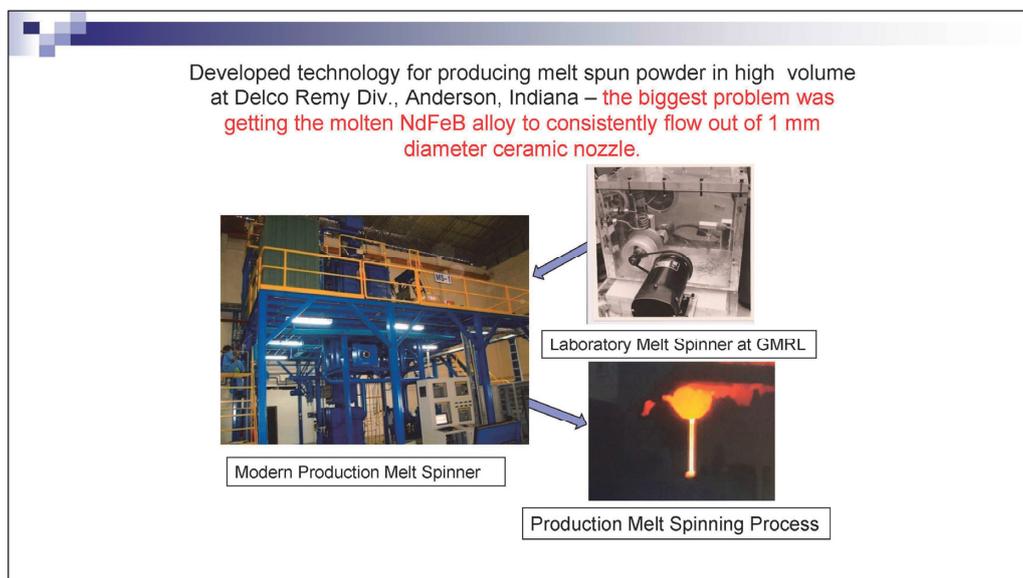


図-13

〈図-13〉 1984 年、私はゼネラルモーターズのデルコ・レミー部門に異動となり、急冷凝固のネオジム磁石の開発に携わりました。溶融紡糸（メルトスピン）法で製造されたネオジム鉄ボロン（NdFeB）粉末を製造するのはかなり困難であることがわかりました。溶融紡糸装置は起動させるのが難しく、起動させたあとも稼働を継続させるのは難しいものでした。溶融合金は、使用していたノズルの小さなオリフィス径 1mm を通過しませんでした。その後、約 2 年におよぶ開発期間を経て、最大 36 時間の連続稼働が可能となり、1 回で 2,000kg の溶融紡糸粉末の製造が可能となる生産用溶融紡糸装置を製作し、試運転することが可能となりました。

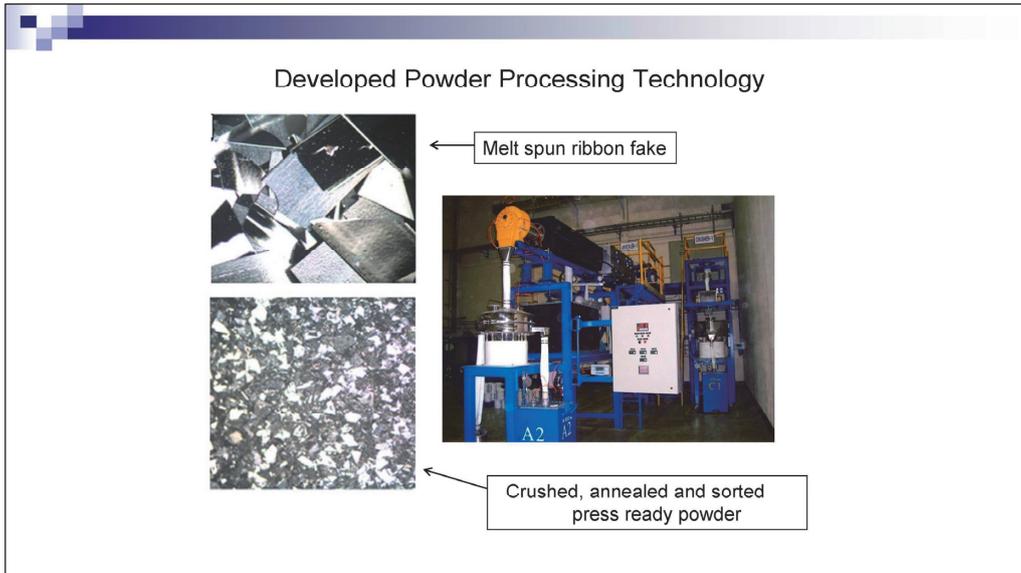


図-14

〈図-14〉また、こちらに示されているようなフレーク状のリボンからなる粉末を、ボンド磁石を製造するのに使いやすい粉末に変換するのに必要な技術を開発する必要もありました。こちらの図は、本粉末処理システムを示しており、初めに熔融紡糸されたリボン状のフレークを粉砕して粉末にする粉砕機で構成されています。本粉末をアニールし、選別してプレス用の粉末を作製し、オリジナルの磁石を製造しようとしている顧客に販売しました。

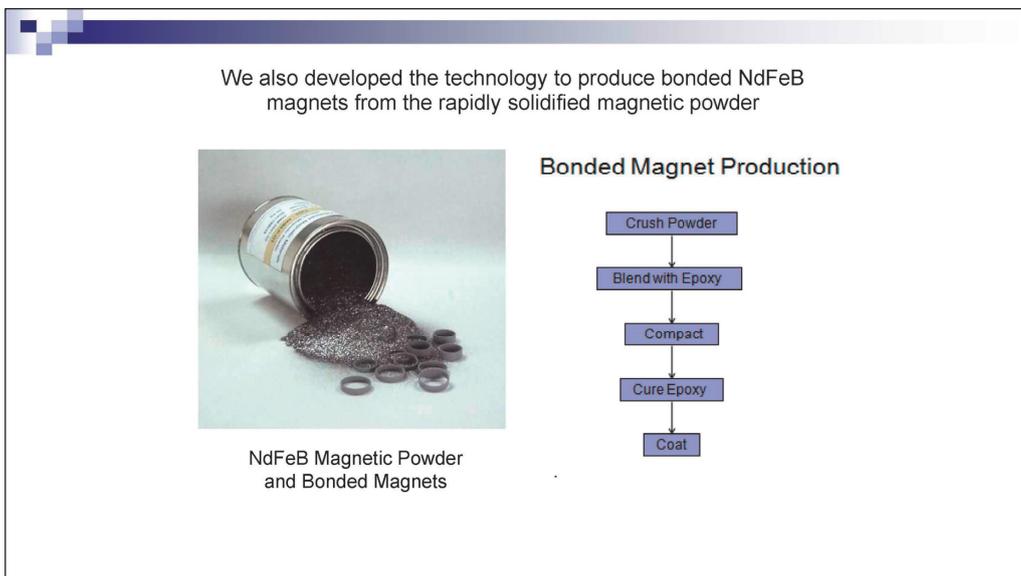


図-15

〈図-15〉最後に、ボンド磁石を大量生産する技術も開発しました。本開発の大半は、小型モーター用の輪形（リング）磁石の製造のためのものでした。本工程はシンプルで、本粉末を熱硬化性のエポキシ樹脂と混ぜ合わせ、油圧または機械式プレスで部品を圧縮し、腐食を防ぐために磁石をコーティングするというものでした。

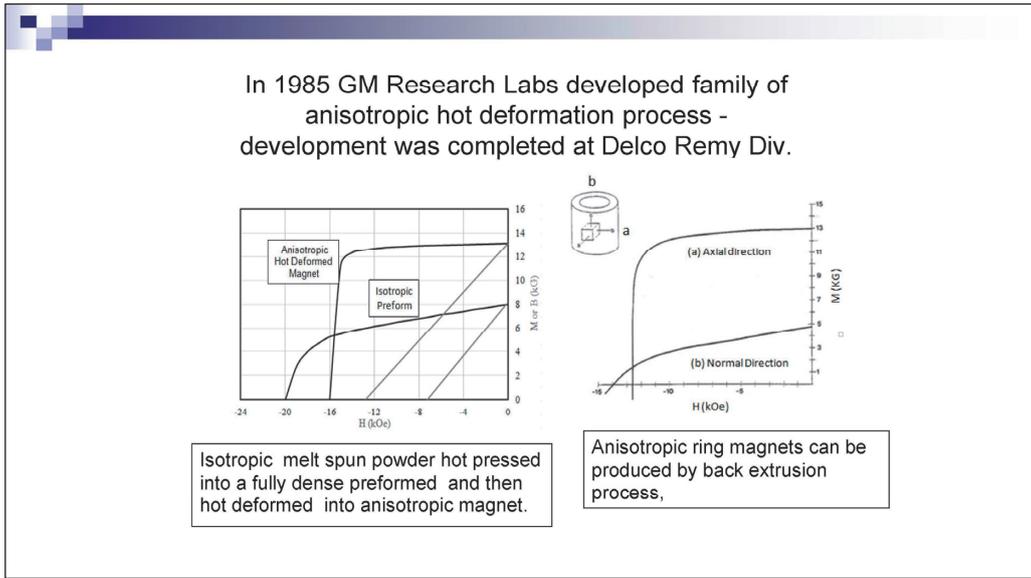


図-16

〈図-16〉また 1985 年には、ゼネラルモーターズの研究所では、熱間変形の工程において液体急冷した粉末から、一連の異方性磁石が製造可能であることも発見しました。本工程では、まず熔融紡糸（メルトスピン）法で製造された粉末をホットプレスして完全に緻密なプリフォームにし、次にプリフォームを熱間変形させて、焼結処理で製造されたものと同様の特性を持つ異方性磁石を作製します。左図-は磁気特性の変化を示しています。本熱間変形の工程において、右図-に示すようなバックエクストルド加工処理によって、ラジアル方向に方向付けられた輪形（リング）磁石の製造が可能となったことは重要なことです。これも焼結処理をして製造するのが困難な製品のひとつです。ゼネラルモーターズのデルコ・レミー部門にて、この熱間加工磁石の開発を行いました。



図-17

〈図-17〉1986 年、ゼネラルモーターズは、ネオジム永久磁石材料を商品化するため、デルコ・レミー部門にマグネクエンチ部門を創設しました。上記は、インディアナ州アンダーソンに建設された工場の写真です。本工場の建設および試運転には、数年かかりました。最初に販売したのは、コンピュータ周辺機器市場向けのものでした。

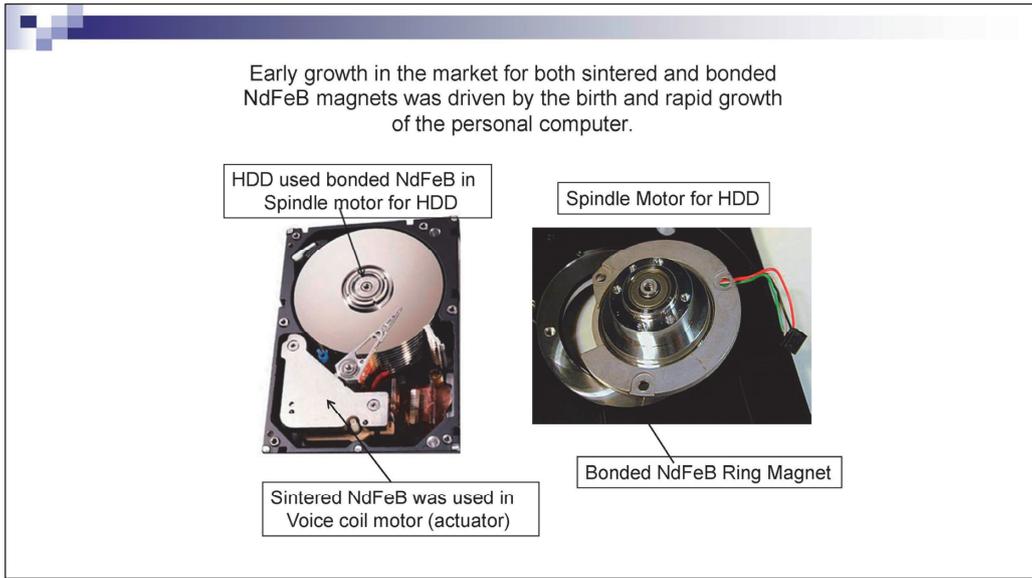


図-18

〈図-18〉マグネクエンチ部門では、1980年代後半に販売を始めました。焼結ネオジム鉄ボロン（NdFeB）の市場の拡大は、黎明期のパソコン市場の発展と拡大とともに大幅に加速しました。これらすべてのコンピュータにおいて、磁気リチウムイオン電池を回転させるスピンドルモーターにネオジムボンド磁石を用いたHDDが使用されていました。左の写真は一般的なHDDであり、スピンドルモーターとボイスコイルアクチュエータの位置を示しています。

右の写真は、本タイプのモーターに使用されているボンド輪形（リング）磁石を観察するために開けられたスピンドルモーターを示しています。

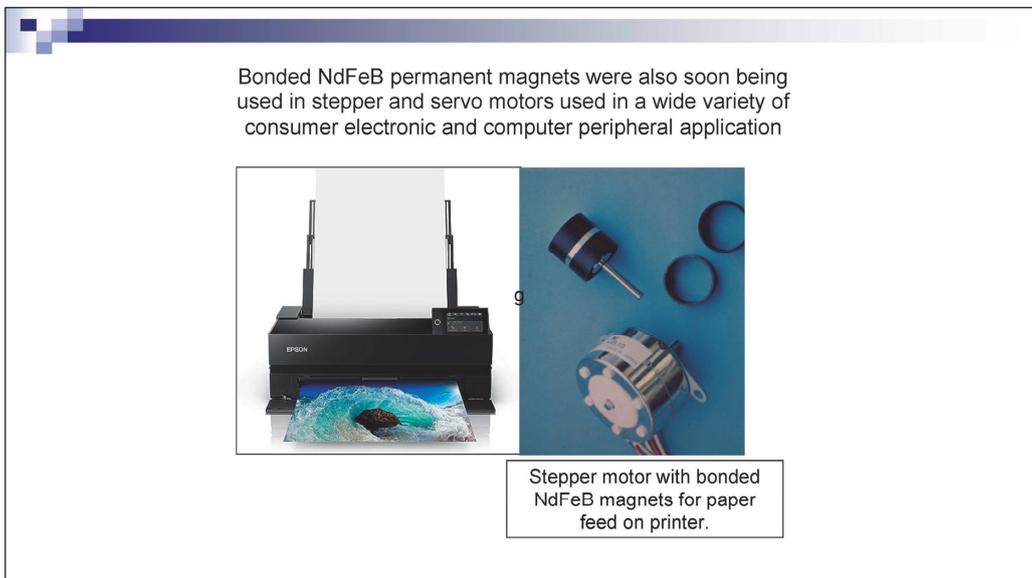


図-19

〈図-19〉やがてネオジムボンド永久磁石は、家電製品やコンピュータ周辺機器に幅広く使用されるステッピングモーターやサーボモータにも使用されるようになりました。こちらは、プリンターの紙送りに使われるステッピングモーターです。ここでも、大半の機器において薄肉輪形（リング）磁石が使われています。

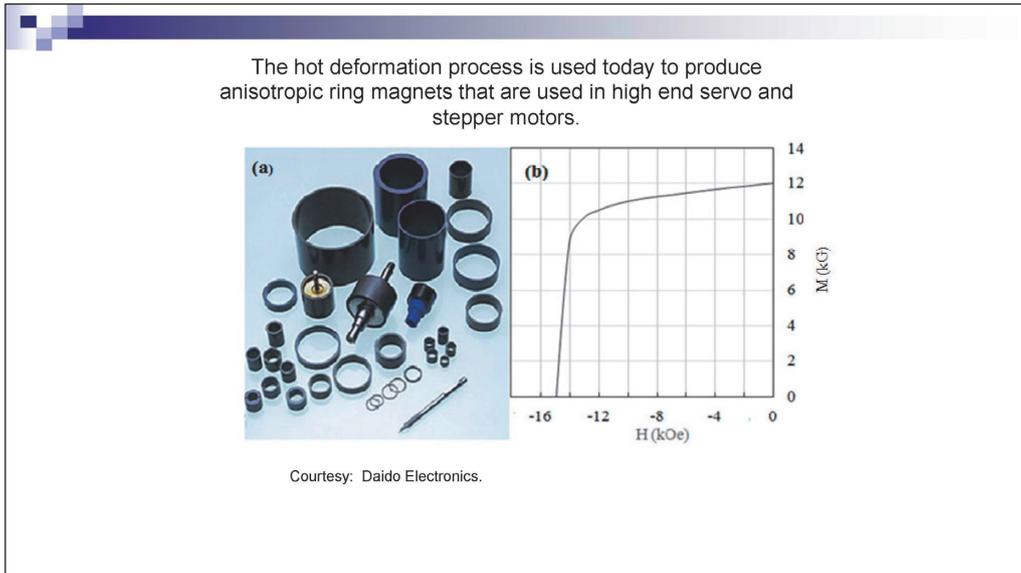


図-20

〈図-20〉ハイエンドのサーボモータやステッピングモータに使われる異方性輪形（リング）磁石の製造において、熱間変形処理が施されるようになりました。上記は、日本の大同特殊鋼が製造しているラジアル配向の小型リング磁石を示しています。本磁石は、バックエクストロード加工により製造されたチューブからカットされています。

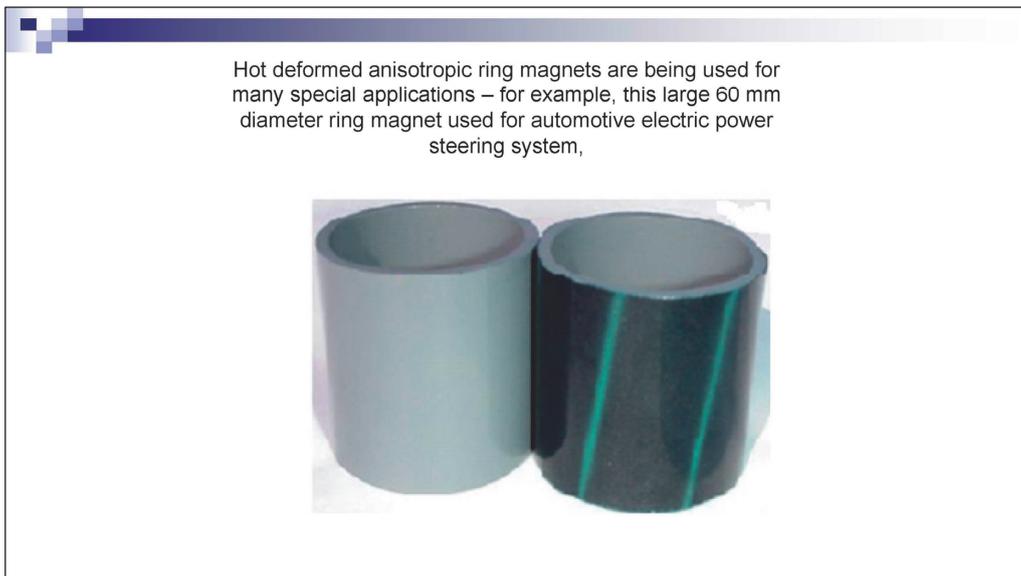


図-21

〈図-21〉大半の熱間加工輪形（リング）磁石は小型モーター用ですが、熱間加工処理は、自動車の電動パワーステアリングシステムに使用される直径 60mm のバックエクストロード加工輪形磁石のような、よりサイズの大きい輪形磁石の製造にも適しています。

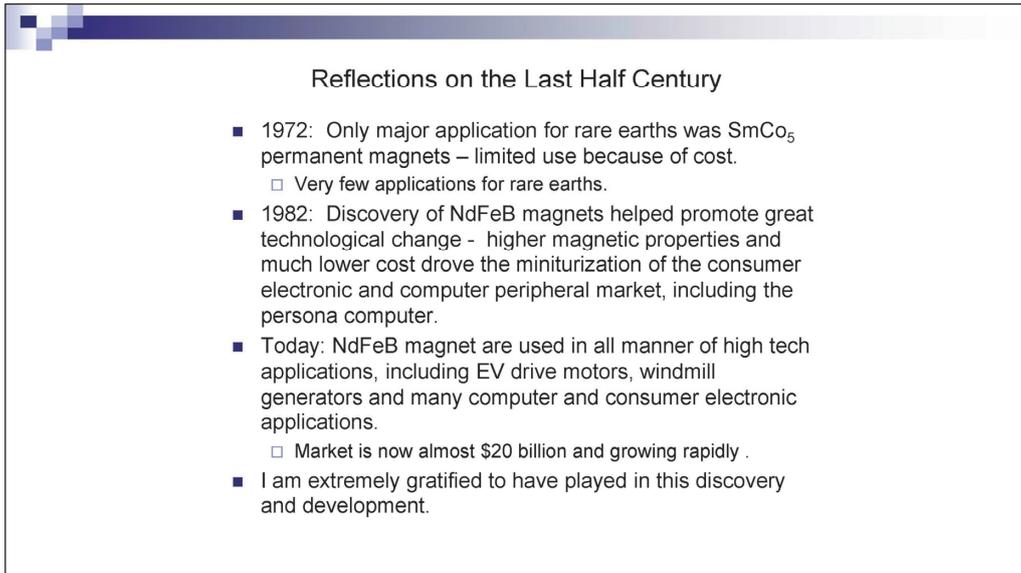


図-22

〈図-22〉 1972 年に大学院を卒業してから半世紀が経ちました。それから今までの間、ほぼ不可能と思われるような技術革新がありました。1982 年のネオジム磁石の発見は、この大きな技術革新の促進に貢献したといっても過言ではありません。

コストが低く、磁気特性が高いため、家電製品およびコンピュータ周辺機器市場における小型化を促進し、パソコン開発のキーとなりました。今日、ネオジム磁石は、電気自動車駆動用モーター、風車発電機、多くのコンピュータや家電製品など、あらゆるハイテク製品に使用されています。

この発見と開発に携わることができたことを非常に光栄に思うとともに、感謝しております。ありがとうございました。

■本資料は本田財団のホームページでご覧いただけます。

本田財団の書面による承諾なしに、私的使用の目的以外で使用することはできません。



発行所 **公益財団法人 本田財団**

104-0028 東京都中央区八重洲 2-1-1 YANMAR TOKYO 6 階

Tel. 03-3274-5125 Fax. 03-3274-5103

www.hondafoundation.jp

発行責任者 角田 正樹