

レアメタルシリーズ 2010 希土類磁石から見たレアメタルと 磁石応用の今後

信越化学工業株式会社 磁性材料研究所 美濃輪 武久

特集・連載

レアメタルシリーズ 2010 希土類磁石から見たレアメタルと磁石応用の今後

本稿は、2007年6月29日に開催された資源開発基礎講座第5回で講演頂いた内容で、希土類磁石を使っているレアメタル、レアアース、および希土類磁石の近年における応用、今後の見通しについて解説を行ったものである（金属企画調査部）。

1. 永久磁石の分類

永久磁石には大きく分けて3タイプがある（図1）。

フェライトマグネットは鉄の酸化物を主体とするもので、それにストロンチウムやバリウムなどが加えられている。コストが非常に安く、また安定であるが、磁気特性がそれほど高くない。

また、アルニコ磁石は金属磁石という分類に属し、アルミニウム（Al）、ニッケル（Ni）、コバルト（Co）、それに鉄の合金であるところから名称がアルニコ（AlNiCo）となっている。熱安定性に優れ、かつては非常によく用いられていたが、現在はレアアースマグネットにさかんにとって代われ、衰退の一途をたどっている。

レアアースマグネットにはいくつか種類があるが、

大きく分けるとサマリウム磁石とネオジム磁石の2種類である。

2. 特性の比較

図2は、各磁石の特性の比較である。特性の概念については、およそ値が大きいほど特性が高いと考えて差し支えない。フェライト、アルニコ、サマリウム、ネオジムと並んでおり、これは開発された年代の順である。ネオジム磁石は特性が非常に高く、フェライト磁石のおよそ10倍の性能を有していると考えられる。値段もフェライト磁石の10倍か、またはそれ以上である点が問題である。サマリウム磁石も比較的性能がよい。

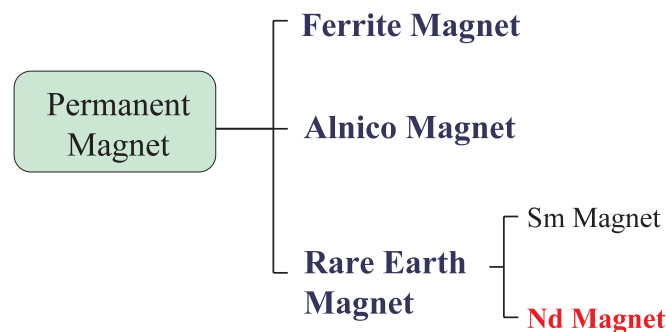


図1. 永久磁石の分類

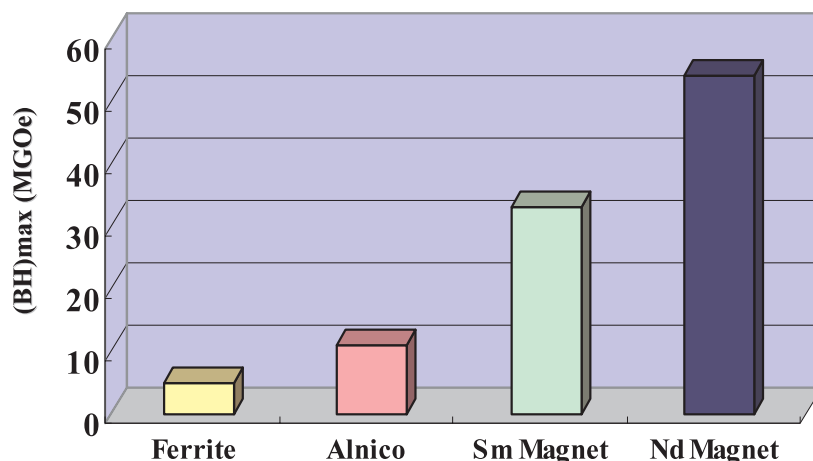


図2. 各磁石の特性

3. 希土類磁石の基本組成

図3は希土類磁石の組成を示している。図3上はネオジム磁石であり、およそ60%が鉄であり、ネオジムがおよそ30%、ほかにジスプロシウムが——磁石の性能によって変わるが——平均で3%程度である。耐熱用途の場合は6～8%を添加している場合がある。

また図3下は、かつてネオジム磁石の登場以前に隆盛であったサマリウム磁石であり、これはコバルトが多い。鉄とコバルトは相当の価格差があり、基本的に現在はコバルトが高価であるため使えないのである。またサマリウム磁石は以前は高価であったが、現在は

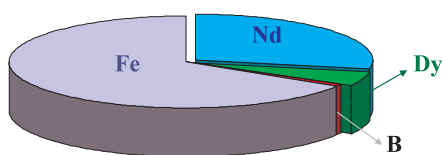
非常に安くなっている。ネオジム磁石よりも安価であるが、コバルトの問題で使われていない。

4. 希土類の存在量

一口に希土類元素といっても、希土類の種類によって存在量が異なる(表1)。たとえばセリウムは亜鉛や銅と同程度の存在量であり、ランタンはネオジムやコバルトと同じぐらいは地殻中に存在する可能性がある。

問題のジスプロシウムとテルビウムはもう一ランク下になり、白金や金よりは多いが、希土類元素の中では比較的少ないのである。

《Nd₂Fe₁₄B磁石》



《Sm₂Co₁₇磁石》

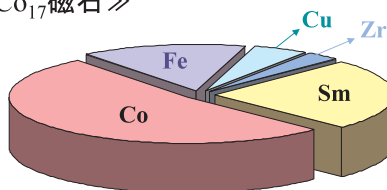


図3. 希土類磁石の基本組成

表1. 各元素の存在量

元素	存在質量比 (ppm)	元素	存在質量比 (ppm)	元素	存在質量比 (ppm)
Ti	4,400	Y	33	Sm	6
Mn	950	La	30	Gd	5.4
Ba	425	Nd	25	Dy	4.8
C	200	Co	25	Sn	2
Zr	165	Nb	20	Mo	1.5
V	135	Li	20	W	1.5
Cr	100	Ga	15	Ta	1.2
Ni	75	Pb	13	Tb	0.8
Zn	70	B	10	In	0.1
Ce	60	Pr	8.2	Pt	0.01
Cu	55	Th	7.2	Au	0.004

5. 希土類元素の用途と輸入量（日本）

希土類元素は国内においてさまざまな用途に使われている。表2は希土類元素の主な用途と2005年における輸入量である。2005年においてはおよそ3万tを使ったと言われており、そのうち7,000tは用途不明となっている。一番多いのは研磨剤としてのセリウムであり、次いで鉄鋼添加剤としてのミッシュメタルとなっている。希土類磁石として4,000tとあるが、これは少々多いように見受けられる。

6. 高性能磁石を用いるメリット

写真1はネオジム磁石の製品の写真である。ネオジム磁石は用途に従って形をすべてオーダーメイドする。100種類の注文があれば形状も100通りである。大きく分ければ、丸いもの、四角いもの、C型のもの、VCM形状のものとなる。いずれにしても高性能磁石であることは間違いない。

表2. 希土類元素の用途と輸入量（日本）

	主な用途	2005年
Y(イットリウム)	赤色蛍光体、光学ガラス、セラミックス	500
Eu(ユーロビウム)	蛍光体	15
La(ランタン)	セラミックコンデンサー、光学ガラス	1,100
Ce(セリウム)	研磨剤、触媒、ガラス添加剤	7,400
MM(ミッシュメタル)	鉄鋼添加剤、水素吸蔵合金	3,300
Nd(ネオジム)	希土類磁石	4,000
その他(Dy,Tb,etc.)	希土類磁石添加剤	500
輸出	各種化合物、メタル	4,800
不明		7,000
合計		約3万t



写真1. ネオジム磁石

高性能の磁石を使うメリットは、要するに小型の磁石で強い磁場が発生するわけであるから、第一に装置が小さくなる。また、使っている銅線も短くなるからモータ全体が小さくなる。たいていの場合はケイ素銅板を使ってコアをつくるが、それによる磁気損失も小さくなる。結局、高価な磁石を使っても、小型、軽量で、さらに効率もよい、すなわち高性能磁石はモータなどの各種機器装置を経済的で、かつ高性能なものにする。そのため生産が非常に伸びているのである。

図4は、国内におけるネオジム磁石の製造重量の推

移である。1990年代中ごろにおいては2,000 t前後であったが、2006年には9,000 tに達しており、2010年には1万4,000 tにおよぶとの予測が立てられている。

7. ネオジム磁石が用いられている機器

図5は、2005年の国内において、どのような用途のネオジム磁石がつくられたかを割合で示したものである。ハードディスクドライブのVCM用、各種の産業用モーター用、自動車用の3つで全体の75%ぐらいを占め、あとはAV機器用やMRI用などである。

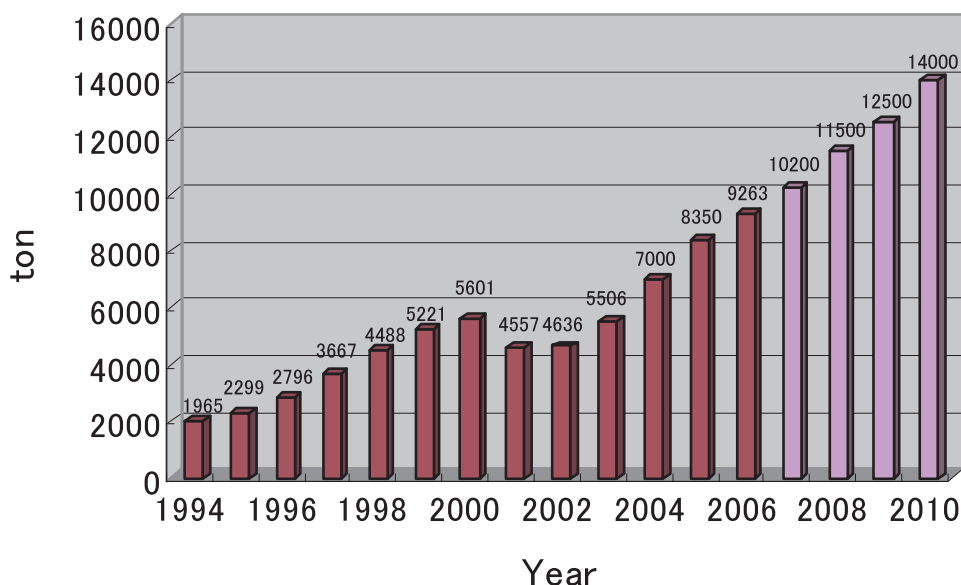


図4. 国内のネオジム磁石の製造重量推移

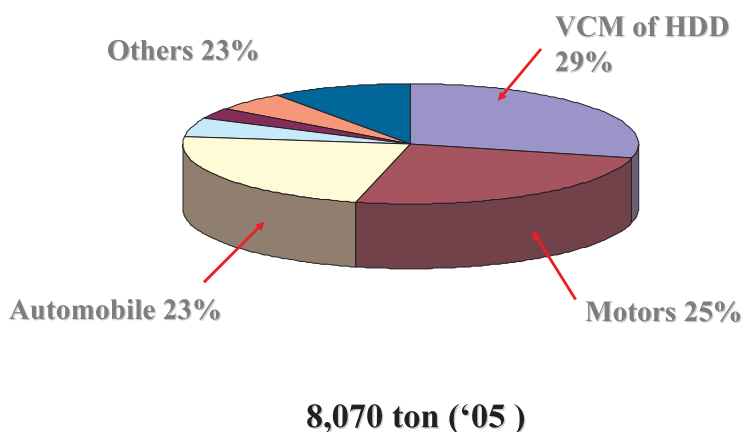


図5. ネオジム磁石の用途

7-1. ハードディスクドライブの VCM

ハードディスクドライブ内のどのようなところに使われているのかを示しているのが図6である。内部にはディスク（円盤）と、そこに読み書きを行うヘッドがあり、ヘッドの根元に VCM と呼ばれる部品がある。VCM はボイスコイルモーターの略であり、実際には、2 枚の鉄の板の間に 2 枚のネオジム磁石をはさんだ構造になっている。一方、アームの根元にはコイルがあり、このコイルに電流を流すことでアームを右左に振り動かすのである。なお、ボイスコイルモーターとはもともとスピーカーの磁気回路を指す言葉であり、かつてはこの部分にスピーカーの磁気回路と似たものが使われていたために、その名称が残っている。

2006 年には、こうしたハードディスクが世界中でおよそ 2 億 5,000 万台つくられており、その中には必ず 2 枚のネオジム磁石が入っているから、およそ 5 億枚のネオジム磁石の板が使われていることになる。実は、この VCM における磁石は 95% 以上、すなわちほとんどが国産である。

7-2. モーター

ネオジム磁石は AC サーボや磁石同期型モーターに使われる。写真 2 には回転ローターのムービングマグネットとして使われているネオジム磁石が見える。この場合はローターの表面に磁石を貼っている SPM という形である。

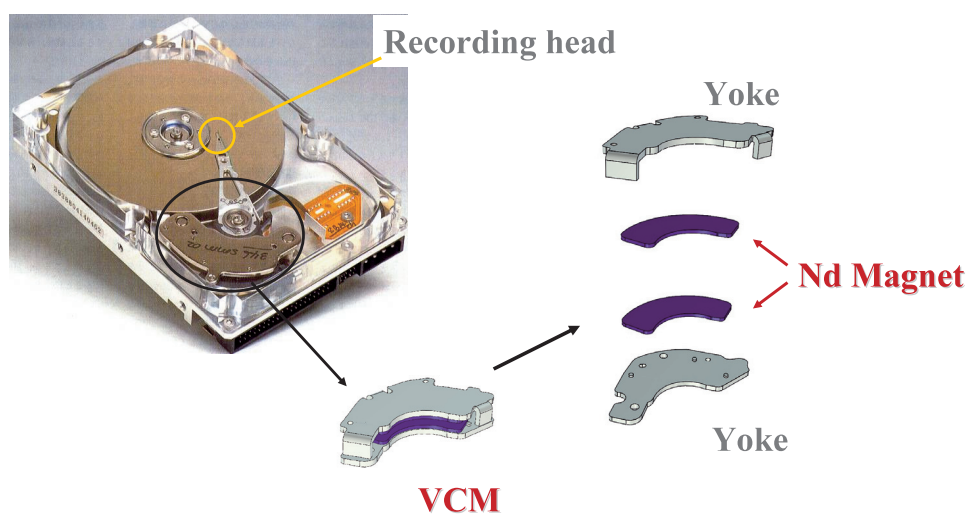


図6. ハードディスクドライブ内のネオジム磁石

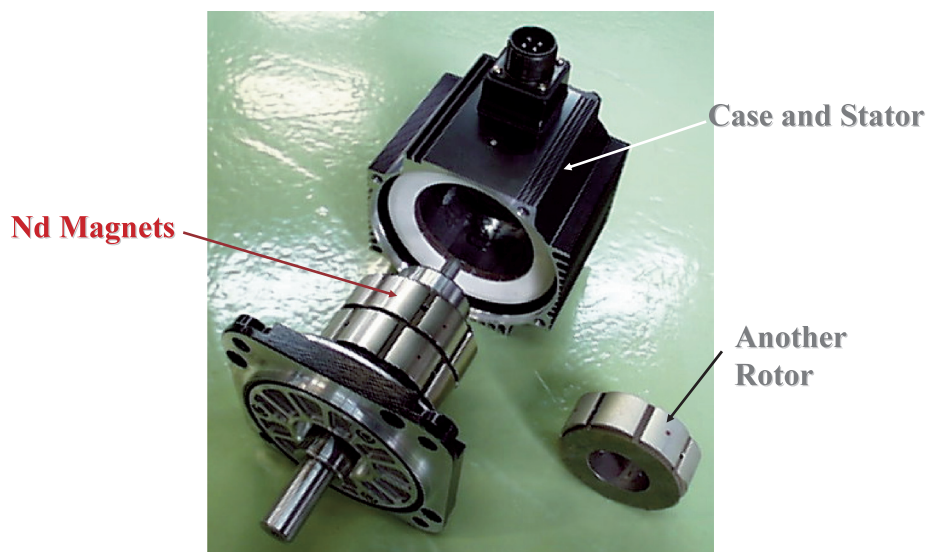


写真2. 回転ローター内のネオジム磁石

また図7は産業用ロボットであり、その関節部分にネオジム磁石が使われている。かつてのロボットにおいては関節部分が非常に大きかったが、最近では高速・高出力のモーターの小型化が進んだために、こうした関節部分も小さくなっている。

ネオジム磁石はほかにも、あらゆるところに使われている。たとえばエレベーターの巻上機やNC加工機である。最近ではプレス機のプレスの精度が向上したと言われるが、これはサーボプレスと呼ばれるモーターの出力でプレスを行う形式の機械を指しており、これにもネオジム磁石が使われている。

最近になって非常に需要が伸びているのは、家庭用エアコンの室外機のコンプレッサーに用いられるDCモーター用である。図8右下のように、モーターのローターはケイ素鋼板の円盤を重ね、そこに穴をあけてネオジム磁石を入れる構造になっている。このIPMと呼ばれる形式のモーターが非常によく使われており、伸びもめざましい。現在、日本の企業が国内でつくる

エアコンの約30%にはネオジム磁石が入っていると推測される。

エアコンの効率については国による厳しい規制が設けられており、毎年、性能を上げていくことが求められている。かつてはこのモーターにはインダクションモーターが使われ、やがてフェライトモーターに代わった。効率を上げるための開発がいろいろと行われてきたが、結局のところエアコンの性能を上げるためにはこのモーターの効率だということになり、目下、一斉にネオジム磁石が使われているのである。

なお、モーターに類するものとして、ネオジム磁石は一部の風力発電機にも使われている。写真3は出力1,000kWの機種の試作機であり、そのジェネレーターにネオジム磁石が使われている。実際のところ、インダクション型ジェネレーターを搭載した一般の機種に比べて、この機種の販売実績は芳しくないが、将来の伸びに期待したいところである。

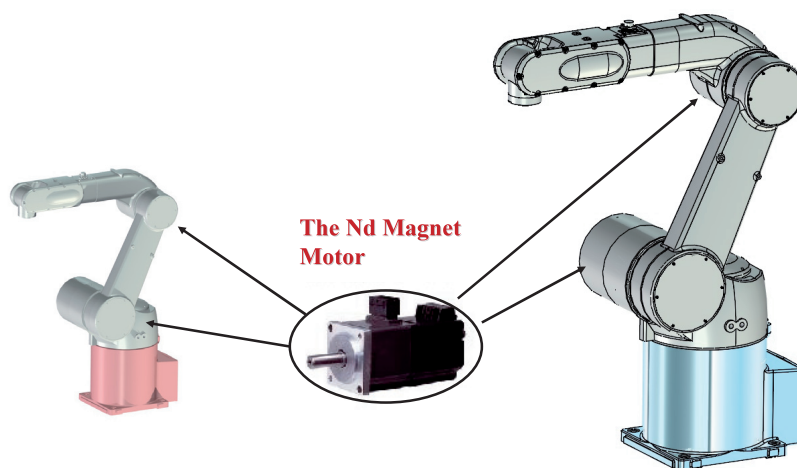


図7. 産業用ロボット内のネオジム磁石

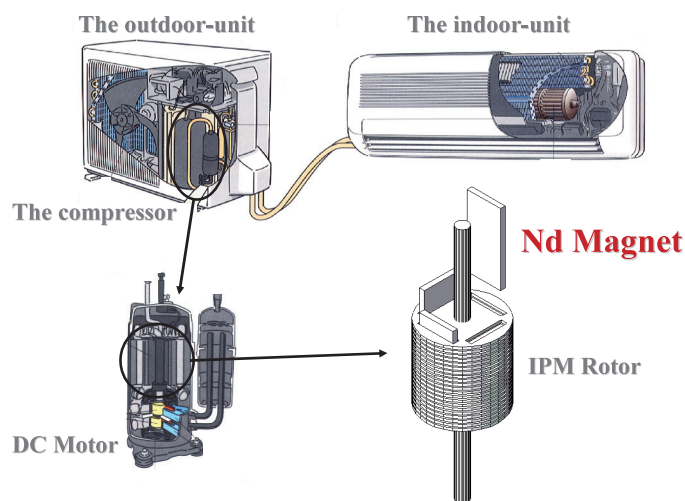


図8. エアコン内のネオジム磁石



写真3. 風力発電機内のネオジム磁石

7-3. 自動車

エアコンとともにネオジム磁石の需要の伸びが著しいのが自動車である。図9に示されているのはネオジム磁石が使われている箇所だけであり、ネオジム以外

の磁石——現在でもフェライトモーターが主であるが、それも徐々にネオジムに代わりつつある——を含め、自動車にはたくさんの磁石が使われており、その数は100を超える。

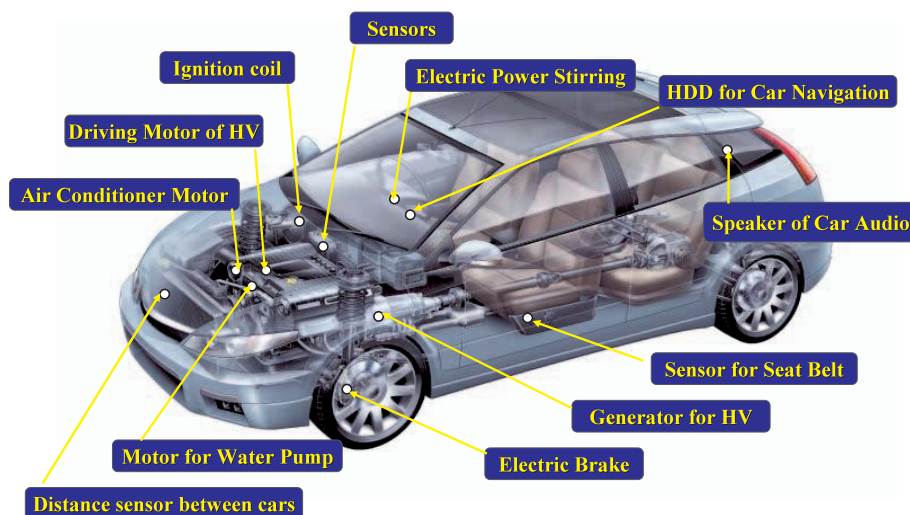


図9. 自動車内のネオジム磁石

最近においてはハイブリッド自動車が話題になっている。図10はトヨタ・ハリアーの動力部分であり、エンジン（ピンク色の部分）につながる発電機（薄紫色の部分）と駆動用モーター（黄色の部分）の中にネオジム磁石が入っている。

ハイブリッド自動車の駆動用モーターに、トヨタは当初から希土類磁石を使ってきたが、一時米国においては誘導モーターが取り沙汰されていた。しかし実際には思う通りの成果が現れず、現在ではネオジム磁石を使ったハイブリッド自動車が予定されているようである。また、今のところハイブリッドの方式はトヨタ、ホンダ、また米国のGM、フォードなど、みなそれぞれ異なっているが、やがて燃料電池の時代となってもモーターは使われるわけであるから、この分野においては引き続きネオジム磁石の需要が高まっていくもの

と思われる。

また、ネオジム磁石の自動車用途としてはあまり知られていないのが、EPS（エレクトリックパワーステアリング 写真4）である。一般に、従来のパワーステアリングは油圧駆動、すなわちエンジンにより絶えず油をポンプで回しているのである。しかし、実際にアシストが必要となるのは低速走行のときだけであるから、高速で走っているときはただ油をかきまぜているだけで、燃料効率を下げていることになる。これは非常に問題で、油圧式を電気式に代えることにより、燃料効率が数%向上するということが注目されている。これにもいろいろな方式があり、ネオジム磁石ではなくてフェライト磁石を使ったEPSもたくさんあるが、いずれにしても数百万台の量で伸びることが予想されているのである。

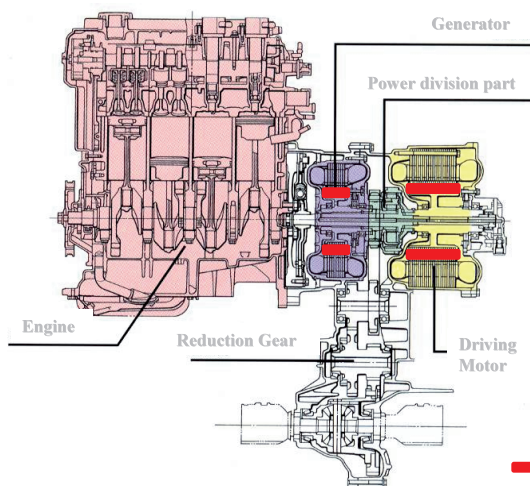


図10. ハイブリッドカー内のネオジム磁石

Nd Magnet Motor

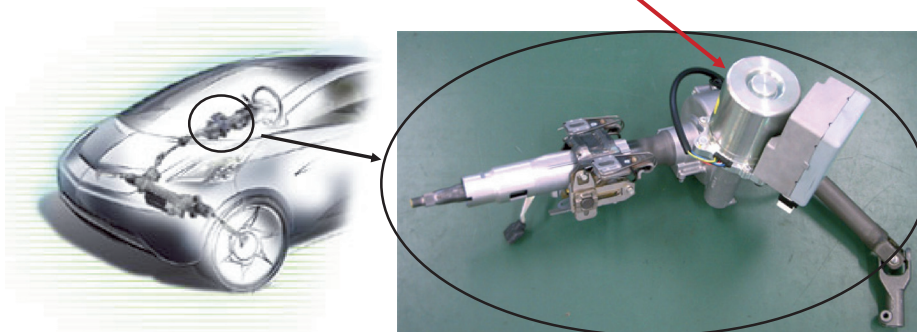


写真4. EPS内のネオジム磁石

図 11 は、各年の左の柱がハイブリッド自動車、右の柱が EPS の生産台数を示している（2007 年以降については予測である）。2010 年を見ると、ハイブリッド自動車は世界で 150 万台であり、一方 EPS の方はその 10 倍が見込まれている。前述のようにそのすべてにネオ

ジム磁石が使われるわけではないが、70～80%には使われる可能性があると言われている。すなわち、ハイブリッド自動車より EPS のほうにおいてネオジム磁石の需要が高まることが予想されているのである。

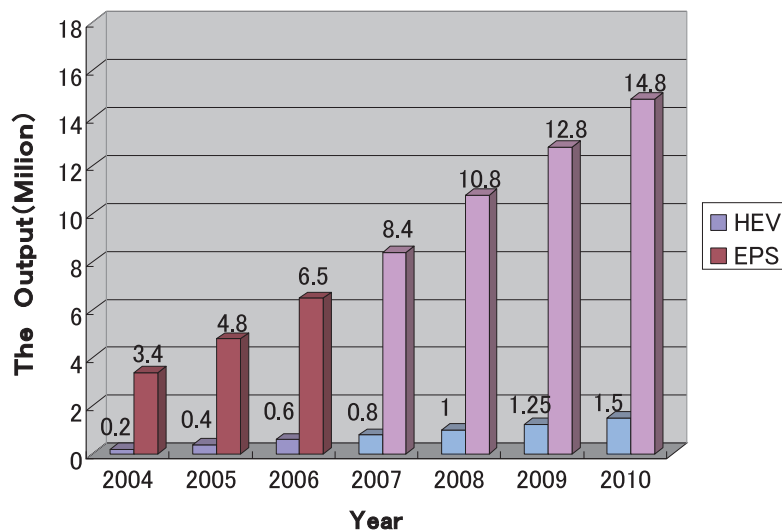


図11. HV/EPSの生産予測

7-4. その他

これらのほか、MRI（磁気断層医療診断装置 写真5）にもネオジム磁石が用いられている。国内において磁石を用いるのは全体の5%程度ようであるが、中国などにおいては非常にたくさん使われている。

また、スピーカー、CD、DVD、モバイルプレーヤー、シェーバーなど、ネオジム磁石は身近なものにもたくさん使われている。新幹線や電気自転車などに用いる研究も行われているようである（表3）。

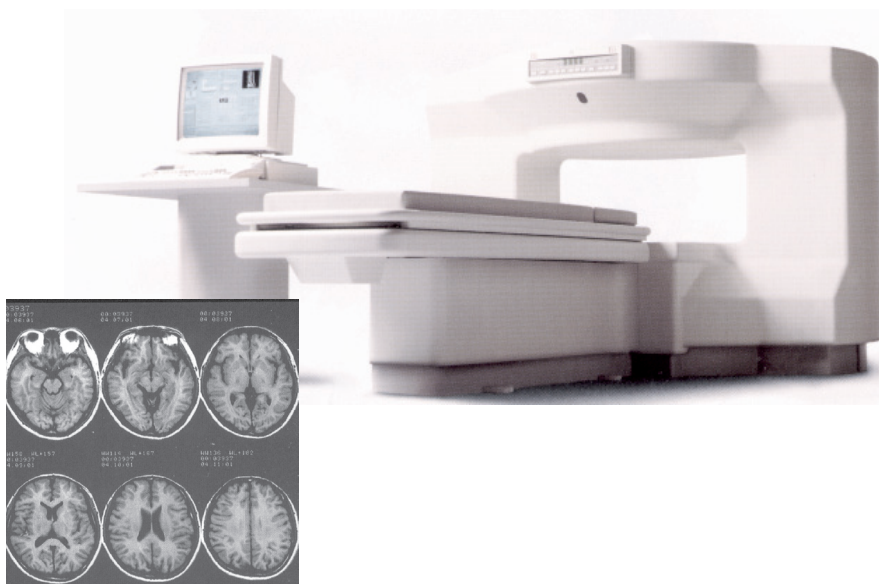


写真5. 永久磁石式 MRI

表3. ネオジム磁石使用製品

Field	Classification of the products
Computer	VCM for HDD
Domestic electric appliance	Air conditioner, refrigerator, washing machine, cleaner, digital camera, electric shaver
AV instrument	Mobile phone, speaker, DVD, CD, mobile music player
Industrial motor	Elevator, industrial robot, injection molding machine, NC processing machine, linear motor
Automobile	Driving motor for HV/fuel cell/electric vehicle, car generator, car air conditioner, electric power steering system, car sensor
Others	MRI, motor for train, wind power generator, electric bicycle

なお、写真6は上記のようにさまざまな分野で使われるネオジム磁石の数々である。ネオジム磁石がこれだけ用いられる理由は何であるかという、省エネに役立ち、地球温暖化の対策として有効であるからであ

る。——ネオジム磁石に限った話ではないが——電気を効率的に使うという意味では、あらゆるものの省エネと効率化、そして地球温暖化の防止にネオジム磁石は役立っていると著者は考えている。

Product Lineup, Categorized by Type



●Ring-type, rectangular



●Rectangular



●Large-sized



●Arc-shaped



●Cylindrical



●VCMs, magnetic circuitry components

写真6. ネオジム磁石の数々

8. ネオジム磁石とジスプロシウム

本節においては、ネオジム磁石にジスプロシウムを添加する理由、またジスプロシウムを他の元素や製造方法と代替することの可否について述べたい。

8-1. 磁石の性質をはかる指標

磁石の性質の指標は大きく分けて2つある。1つは残留磁束密度 (Residual Magnetic Flux Density : B_r)、すなわち磁力であり、要するに磁極の量を表す。残留磁束密度が大きければ大きいほど、磁石として強いという指標である。もう1つは、保磁力 (Coercive force : H_c) である。これは磁力の耐性を表す。磁石は絶えず磁場に対して反対磁場を受けながら仕事をしているが、 H_c はこの反対磁場をどのくらい受けられるかという耐性を表しており、およそ温度が上がると、この耐性は弱くなる。磁石においては、この2つが重要な指標となる。

8-2. 温度依存性

図12は磁石の性能の測定に関するグラフである (ヒステレス曲線)。横軸は外部の磁場であり、縦軸は外部の磁場によって誘導された磁力の強さを表している。磁場をかけると、誘導された磁力の強さは上がっていくが、ある一定の値で横ばいとなる。この値を飽和磁化といい、物質によって決まった値となる。その後、磁場を弱くしていき、ゼロからマイナスにしていくと——磁石は必ずゼロからマイナス側で使われる。他の磁場によってマイナスの磁場をかけられたときにどのくらい磁力を維持できるかが磁石の性能の重要なポイントとなる——しばらくは磁力の影響をまったく受けないが、外部の磁場がある値となったところで、突然磁力を失ってしまう。この値が H_c (保磁力) であり、この2つの値がなるべく大きいことが、磁石には求められる。

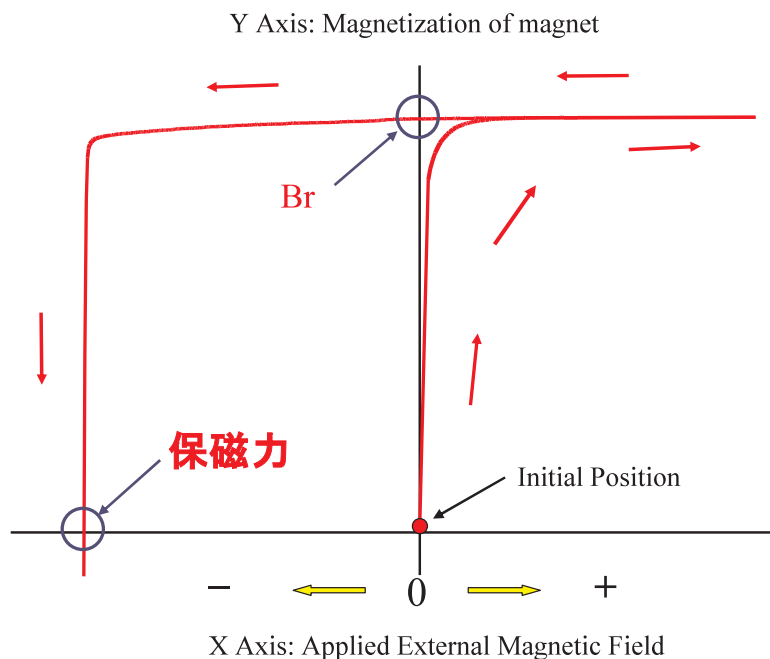


図12. 磁石の性能曲線 (ヒステレス曲線)

図13においては横軸にHc、縦軸にBrをとっている。ネオジウム磁石は発明以来、さまざまな技術開発の継続により特性が著しく向上しているが、図のピンク色の枠によるラインは、現在、最も売値の高い一連の磁石の性能の位置を示している。左方の、保磁力はそれほど大きくない一方で比較的Brが高い領域にあるものは主にVCM用である。VCMにおいては特段温度が上がらないから、それほど大きなHcは必要とならない。また、右方のHcが大きく、Brがそれほど高くない領域にあるものはモーターや自動車に使われる耐熱性の高いものである。

希土類磁石としては以前はサマリウム磁石があり、現在はネオジウム磁石が主流である。実はネオジウム磁石は、温度係数がサマリウム磁石ほど高くない（図14）。

サマリウム磁石は温度を上げていってもBrがそれほど下がらないが、ネオジウム磁石は、250℃を超えると俄然落ちてくるのである。しかし、これはそれほど大きな欠点ではない。なぜかといえば、200℃ぐらいまでBrを保てれば、実際には支障がないからである。問題なのは、Hcの温度係数である（図15）。Hcが、図14においてBrが下がるのと同じように、200℃を超えると急激に下がってくる。この値が使用上、ある値を超えると非常にリスクな状態に陥るのである。これを防ぐためには、最初の室温の保磁力を上げるしかない。耐熱性の高い磁石は、結局、室温のHcだけを大きくしておいて、その製品がさらされる最高温度において所定の耐性を持つように設計するというのが通常行われる手法である。

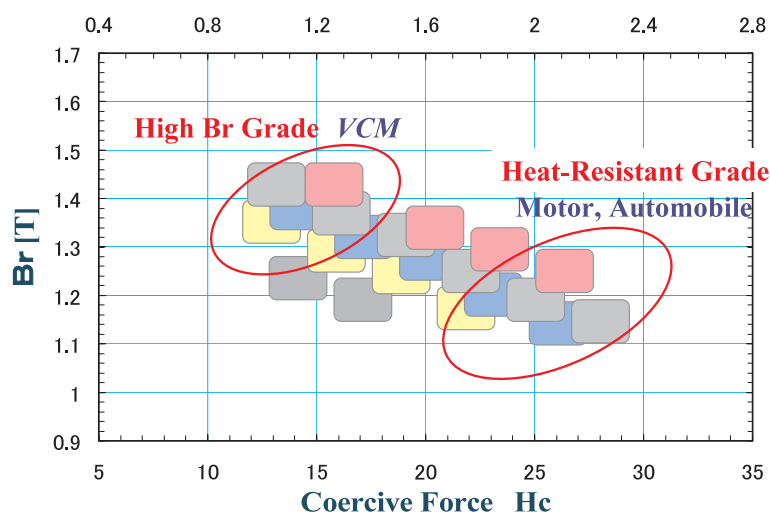


図13. 磁力特性とその応用

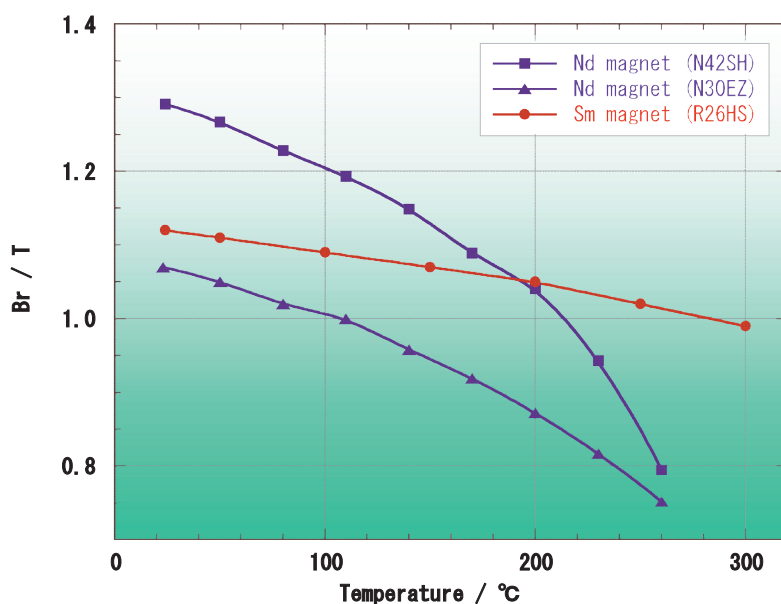


図14. 残留磁束密度 (Br) の温度依存性比較

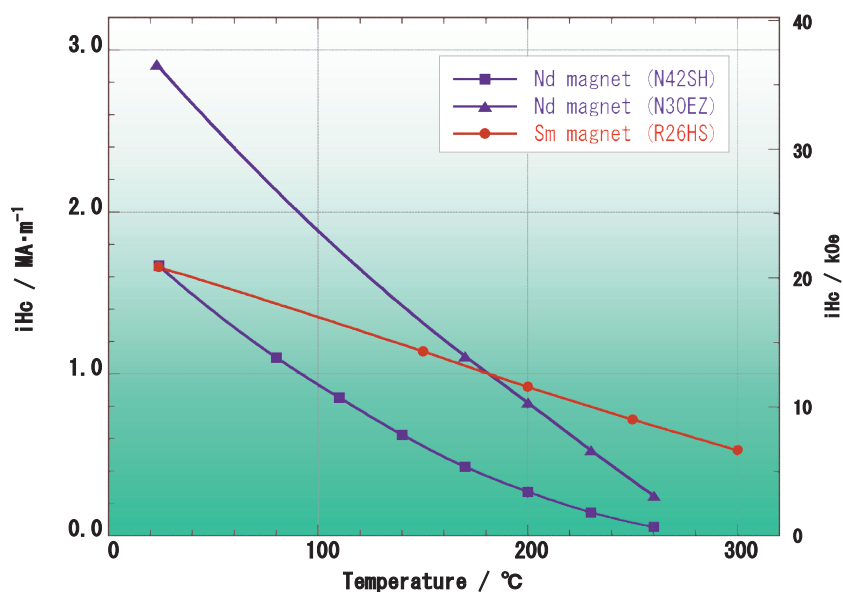


図15. 保磁力 (iHc) の温度依存性比較

8-3. 金属組織

磁石はネオジム・鉄・ボロンという、特殊な金属間化合物から成る (図 16)。磁石の性質は、この金属間化合物が持っている基本的性質である程度決まってくる。ネオジム・鉄・ボロンが2 : 14 : 1という割合で存在する金属間化合物となって初めて磁石としての性能を持つのである。写真 7 はネオジム磁石の焼結体の金属組織を表しており、図 16 は「Nd₂Fe₁₄B₁ Phase」

にある粒子部分に相当する。それ以外のところにはグレインバウンダリーフェーズというものがあり (写真 8)、これは Hc を出すために粉末冶金的に存在させている。実は、構造は簡単ではなく、詳細に見ると、中にはまだまだ微細なさまざまな構造があり (写真 9)、この構造を調整しながら磁石の Hc を上げることに著者らは取り組んできたのである。

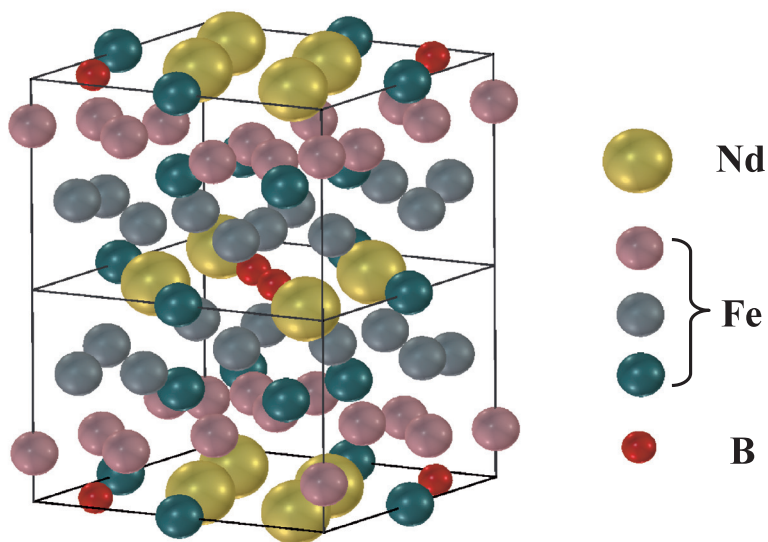


図16. Nd₂Fe₁₄B₁化合物の構造

Kerr microscopy image

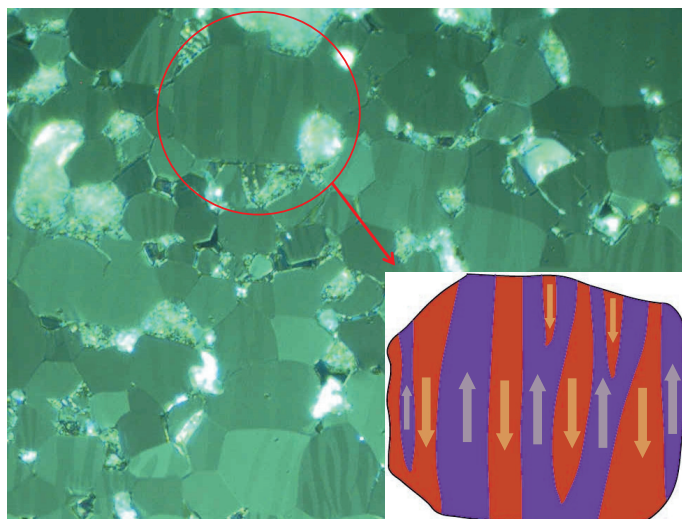


写真7. Nd焼結磁石の金属組織と磁区構造

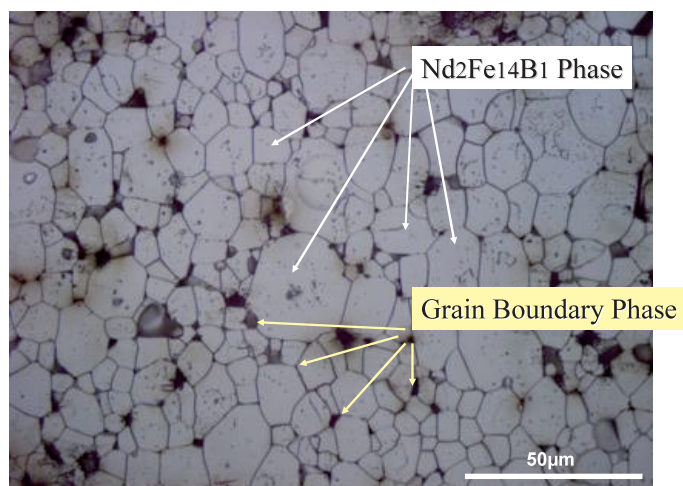


写真8. ネオジム磁石の金属構造

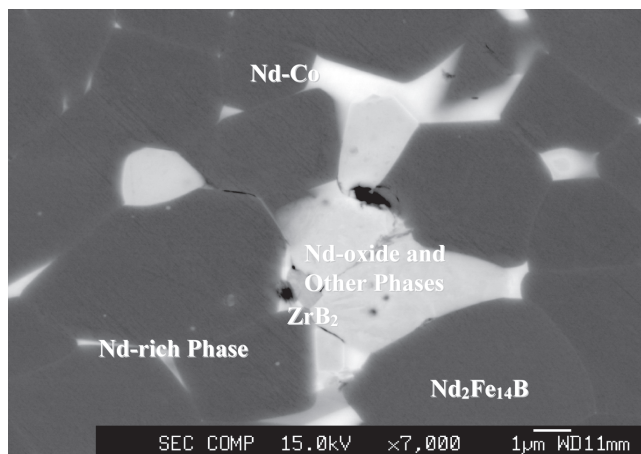


写真9. ネオジム磁石の詳細金属構造

8-4. Hc機構

磁石というものは、さらに小さな磁石から成り立っている。「Nd₂Fe₁₄B₁ Phase」の粒子は、さらに詳細に見ると、中に磁区構造という磁気モーメントの構造が存在しており（写真7）、この磁気モーメントの構造が磁石の性質を表すことになる。

図17は、図12と同じヒステレス曲線であり、そのヒステレス曲線を磁区構造から考えると、以下のようになる。すなわちゼロにおいては上向きの磁区と下向

きの磁区がこの領域内で等量存在しており、ベクトルの和がゼロになっている状態である。これに外部磁場をかけていくと、磁場の方向に同じ磁区は安定になって成長し、100%かけると安定な磁区だけが存在する。さらに今度は逆に外部磁場をかけていくと、しばらくは何も起こらないが、やがて、逆磁区が発生しはじめ、反転してしまう。Hcの値はこうしたメカニズムで決まるのである。

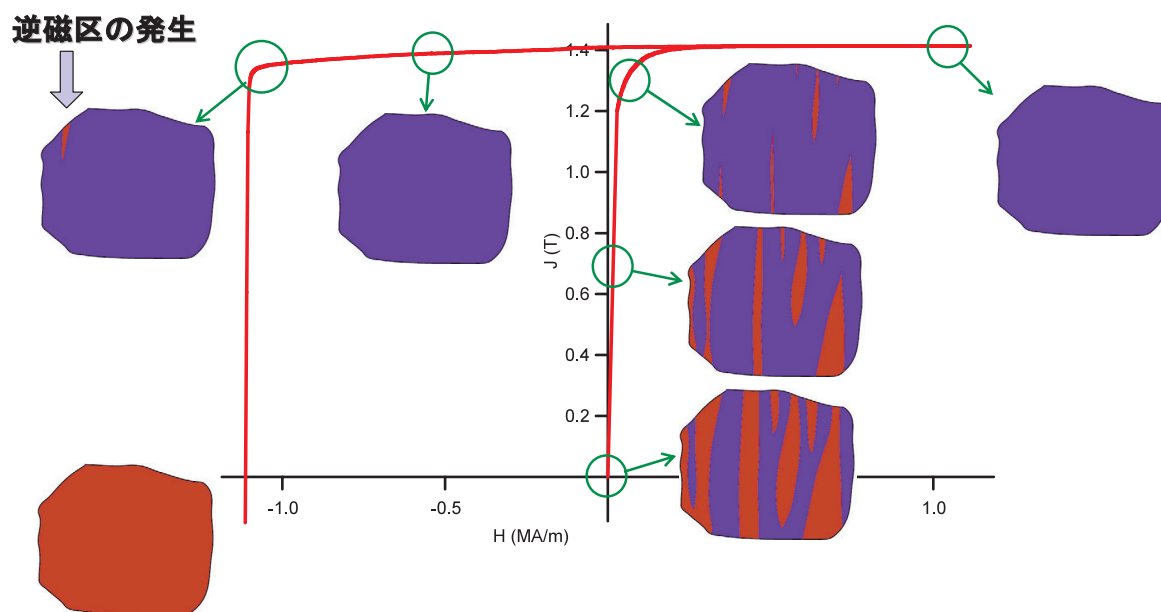


図17. 磁壁のニュークリエーションによる保磁力機構

8-5. Hcを上げる条件

これを数式であらわすと、Hc の定義は図 18 のようになる。すなわち高保磁力を得るための指針としては、Ha の大きな物質を使用し、そして Ms はなるべく低いほうが良いということになる。

2 - 14 - 1 化合物というのは、あらゆる希土類元素とほぼ同様にこの金属化合物をつくる。それらの性質は全て調査済みである（表4）。これを見ると、ネオジムより高いHaを持つのはプラセオジウム、テルビウム、ジスプロシウムさらにホルミウムであるが、プラセオジウムとホルミウムはネオジムとほとんど同程度の Ha

値なので Nd 磁石の保磁力を上げる効果はほとんど無い。一方、テルビウムとジスプロシウムはネオジムより Ha 値がかなり大きく、さらに Ms がネオジムに比べて小さいので上述の保磁力理論計算式のマイナスの項が小さくなり、保磁力増大の効果が大きい。つまり物理的性質から、テルビウムとジスプロシウムの二つだけが、Nd 磁石の保磁力を上げるのに効果的である。また、プラセオジウムはネオジムとほとんど同じ性質を持つので、ネオジム原料に不純物として混入しても排除しないという使われ方で、結果的に Nd 磁石の一成分となっている。

The Coercive Force Strength by Magnetic Domain Nucleation

$$H_{cJ} = \alpha H_A - N_{eff} M_s$$

- H_{cJ} : Coercive force Strength
H_A : Anisotropy magnetic field
M_s : Saturation magnetization
α : Factor which relates to the microstructure
N_{eff} : Effective demagnetization field

図18. Hc（保磁力）の計算式

表4. 希土類元素化合物の物理特性

Compound	Is [T]	Tc[K]	Ku[MJ/M ³]	Ha [MA/m]
Y ₂ Fe ₁₄ B ₁	1.42	571	1.41	1.59
Ce ₂ Fe ₁₄ B ₂	1.17	422	1.76	2.39
Pr ₂ Fe ₁₄ B ₃	1.56	569	6.79	6.93
Nd ₂ Fe ₁₄ B ₄	1.6	586	5.36	5.33
Sm ₂ Fe ₁₄ B ₅	1.52	620	plane	-
Gd ₂ Fe ₁₄ B ₆	0.893	659	1.12	2
Tb ₂ Fe ₁₄ B ₇	0.703	620	7.73	17.51
Dy ₂ Fe ₁₄ B ₈	0.712	598	5.34	11.94
Ho ₂ Fe ₁₄ B ₉	0.807	573	3.03	5.97
Er ₂ Fe ₁₄ B ₁₀	0.899	551	plane	-
Tm ₂ Fe ₁₄ B ₁₁	0.925	549	plane	-
Lu ₂ Fe ₁₄ B ₁₂	1.183	535		-

図19は温度変化である。ジスプロシウムもテルビウムも、高い温度領域で高いHaを持つ様子を示している。

図20において横軸は、ネオジム磁石に対するジスプロシウムの置換量である。緑線がHcであり、ネオジウムをジスプロシウムで置換すると、Haが上がりBrが下がるから、Hcが上がる様子を示している。なお、ジスプロシウムの値段はネオジウムの3倍ぐらいあるため、ジスプロシウムを加えると磁石の値段も上がることになる。

以上、本節の冒頭において提示した視点に対する回答としてまとめると、まず、ネオジム磁石にジスプロシウムを添加するのは、Hcを上げて耐熱性を向上させる必要があるためである。また、ジスプロシウムを他の元素や製造法に代替することについては、基本的物理特性によれば、他の元素で代替することは不可能である。ただし、金属組織の調整によりHcを多少上げることが可能であるから、製造方法による改良の可能性はあるが、画期的な向上を図ることは難しい。

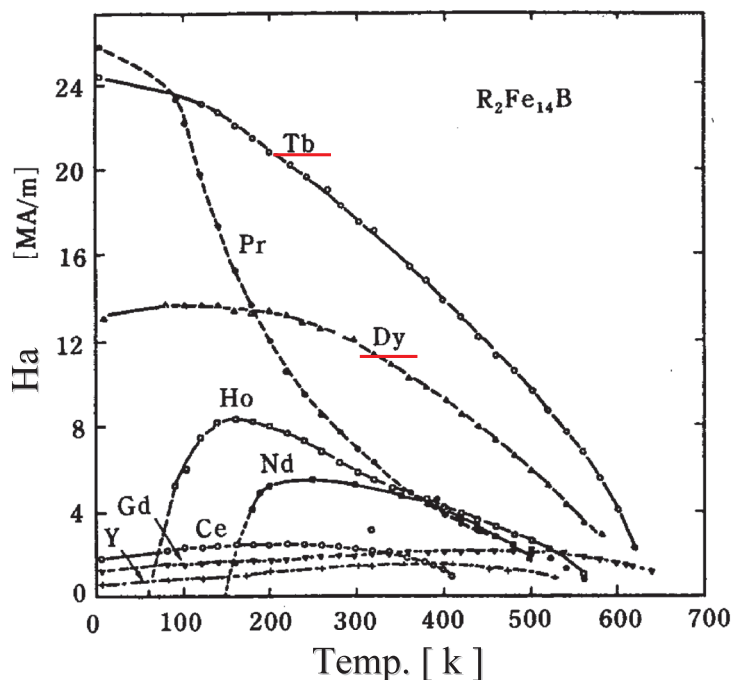


図19. Haの温度依存度

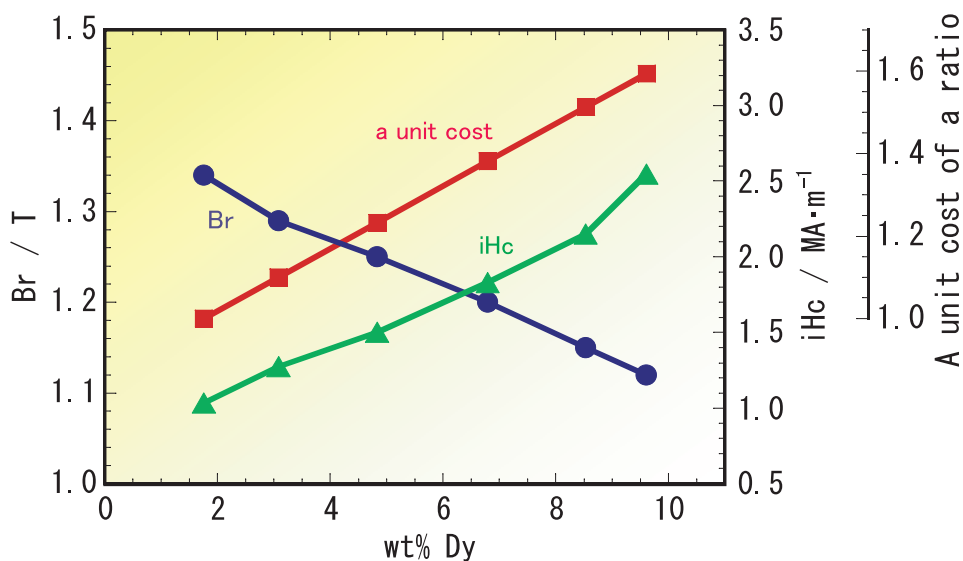


図20. ジスプロシウム濃度と磁気特性及びコスト

9. ネオジム磁石に代わるもの

最後に、ネオジム磁石に代わる新たな磁石の可能性について触れておきたい。

図21は、永久磁石の研究開発の歴史を示している。永久磁石に対して科学的研究が本格的に開始されたのは20世紀の初頭であり、最初に本多光太郎によるKS鋼と呼ばれる金属——アルニコという名称はまだ使われていない——を用いた磁石に関する研究があり、その後、それが改良されて最終的にはアルニコにたどり着く。1950年にフェライト磁石が、また1960年代中ごろにはサマコバ磁石が、そして1980年にネオジム磁

石が発明されている。

表5がそれぞれの開発者であり、本多の研究した磁石をアルニコとして完成に導いたのはフィリップス社のG.B. ジョナスであった。また、東京工業大学の加藤与五郎、武井武が発明したOP磁石をフェライト磁石として完成させたのは、フィリップス社のJ.J. Wentであった。サマコバ磁石は米国デイトン大学教授のK.J.Strnatが発明し、GEのD. L. MartinやM.G.Benzらがさかんに研究を進めて発展させた。ネオジム・鉄・ボロン磁石については日本の住友特殊金属（当時）の佐川真人による発明である。

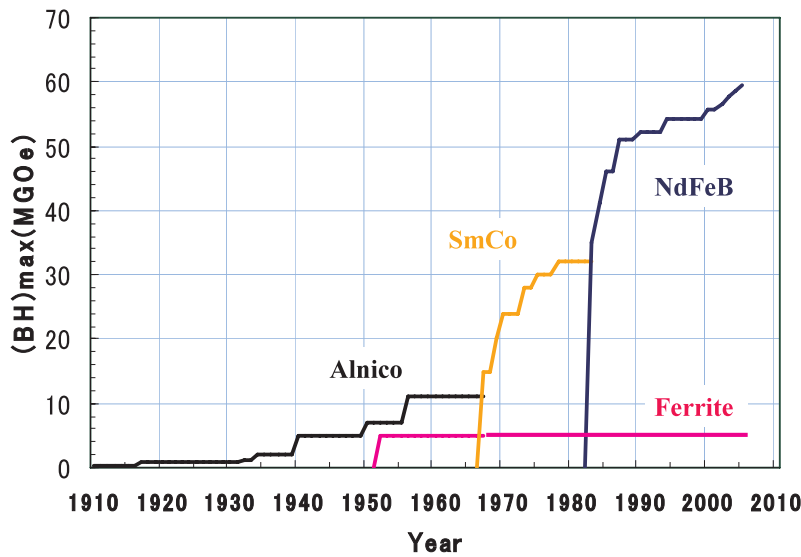


図21. 永久磁石の歴史

表5. 永久磁石の開発者

Alnico	T. Mishima, Tokyo Univ. G.B.Jonas, Philips
Ferrite	Y.Kato, T.Takei, Tokyo Institute of Tech. J.J.Went, Philips
SmCo	K.J.Strnat, Dayton Univ. D.L.Martin, M.G.Benz, GE
NdFeB	M.Sagawa, Sumitomo Special Metal Co.

以上のほか、実は、過去に研究されて結局形にならなかった磁石もたくさんある（表6）。マンガン・ビスマス、マンガン・アルミ・カーボン、鉄・クロム・コバルト、また希土類の化合物 $R_2Fe_{17}N$ や $RFe_{11}Ti$ などにも期待が寄せられた。最近においては Nano Composite 磁石希土類磁石がそこそこの性能を示しているが、ネオジム磁石を超えるようなものとはなっていない。

歴史を振り返ってみると、新たな磁石はおおよそ 20 ～ 30 年間隔で登場しており（図 21）、現在は 1983 年から

すでに 25 年が経過しているが何も現れず、また研究もあまりさかんには行われていない。おそらくネオジム磁石が磁石としては最後の発明になるのではないかとの思いを新たにしている。

写真 10 がネオジム磁石発明者の佐川真人である。本稿において述べたように、ネオジム磁石は世界中で大活躍しており、1つの材料でこれほど世の中を変えたものも珍しく、ノーベル賞受賞にも十二分に値する業績であるといえるのではないだろうか。

表6. 過去に検討された磁石候補

- MnBi
- MnAlC
- FeCrCo
- $R_2Fe_{17}N$
- $RFe_{11}Ti$
- Nano Composite Magnet

生年月日：1943年8月3日

略歴

1966年3月 神戸大学工学部電気工学卒業
 1968年3月 神戸大学大学院修士課程（電気工学）終了
 1972年3月 東北大学大学院修士課程修了（金属材料工学）、学位取得（工学博士）
 1972年4月 富士通(株)入社
 1982年5月 同社 退職
 1982年5月 住友特殊金属(株)入社
 1988年2月 同社 退職
 1988年3月 インターメタリックス(株)設立 同社代表取締役として現在に至る

受賞歴

1984年 大阪科学賞
 1985年 科学技術長官賞
 1986年 米国物理学会 International Prize for New Materials
 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
 本多記念賞
 加藤記念賞
 2006年



写真10. 佐川真人氏略歴

10. 中希土資源の探査と鉱山開発

著者はネオジム磁石の時代はまだ始まっておらず、これからやってくると思っている。また今後は自動車の用途がさらに伸び、現在以上のHcが求められ、ジスプロシウムがますます増えることが予想され、そうした意味において、中希土資源の積極的探査と鉱山開発が必要であると考えている。

10-1. レアアース

レアアース鉱物には表7のようなものがあるが、現在、重希土に関してはイオン吸着鉱が主要な鉱石になっている。ウラン、トリウムが少ないのが特徴である。

レアアース鉱床は北米のマウンテンパス鉱山のバストネサイト、および中国華南地域のイオン吸着鉱が主な鉱床になっている（図22）。

表7. 主な Rare Earth 鉱物

・ バストネサイト RE(CO₃)F 軽希土 (Ce, La, Pr, Nd) (U, Th)を含む
・ モナザイト RE(PO₄) 軽希土 (Ce, La, Pr, Nd) (U, Th)を含む
・ ゼノタイム RE(PO₄) 中重希土 (Sm, Gd, Tb, Dy) (U, Th)を含む
・ イオン吸着鉱 粘土 中重希土 (Sm, Gd, Tb, Dy) 風化花崗岩、(U, Th)が少ない

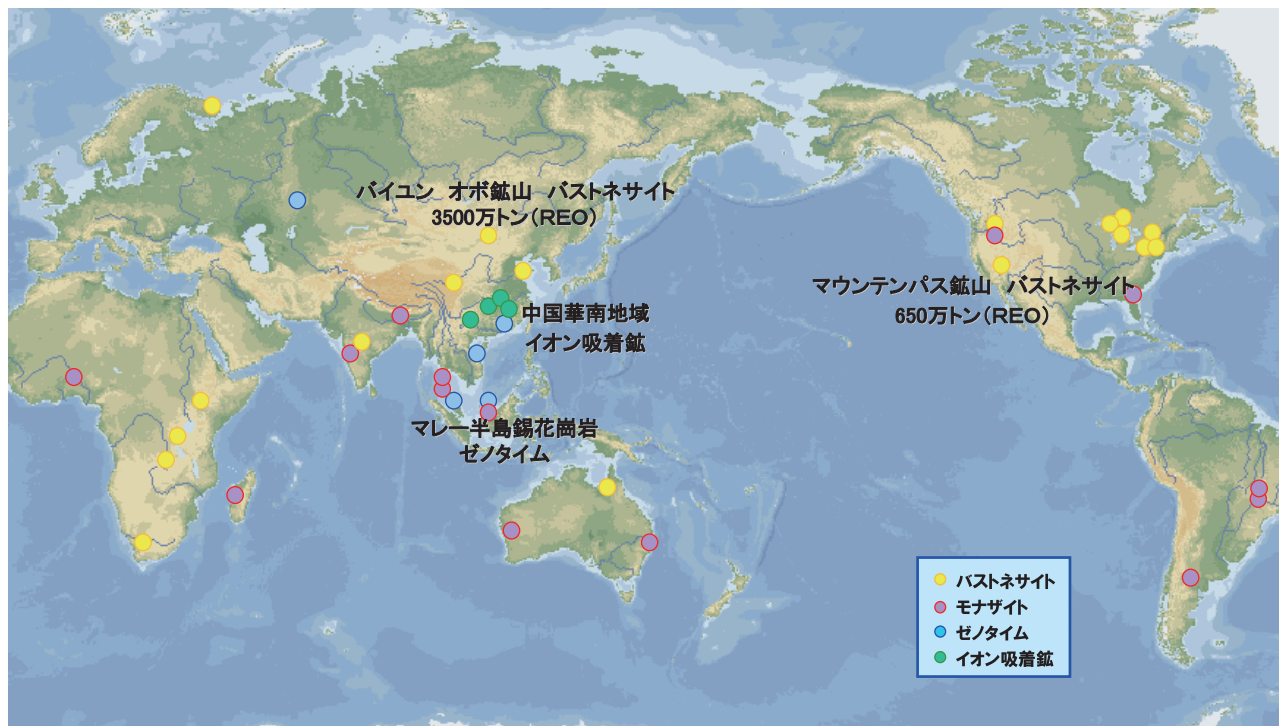


図22. 世界のレアアース鉱床の分布

10-2. イオン吸着鉱

イオン吸着鉱は香港の北方にあり（図23）、もともと重希土を多く含む種類の花崗岩があり、それが隆起する。隆起した後に長い時間をかけて——3億年ぐらいの時間をかけて——雨水がしみて風化していく中で、雨が鉱石を溶かしていく。その溶かしていく過程において希土類を流していき、先に風化した粘土層に上から流れてきた重希土が固定されて鉱床になったと言わ

れている（図24）。品位としてはおよそ1,000～2,000ppmである。図25には寸法が入っており、表層土壌の下に5～10mぐらいの風化層があり、この中にイオンとして存在しているのをブルドーザーなどで掘り出し（写真11）、コンクリート槽（写真12）の中にあけてその上に酸をかけ、酸に溶かした希土類を回収するのである。



図23. 中国華南イオン吸着粘土鉱床地帯

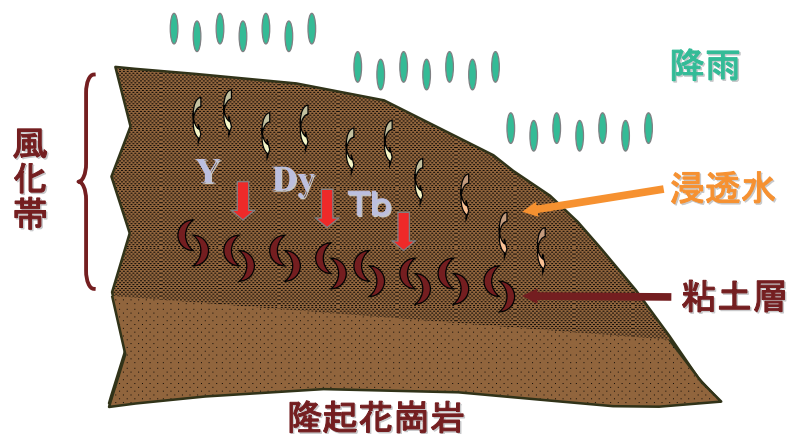
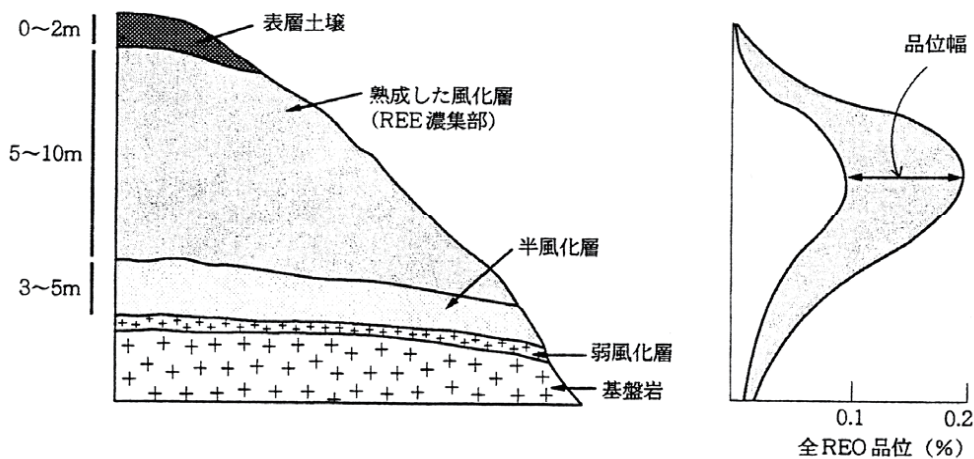


図24. イオン吸着型鉱床の生成過程



金沢康夫、神谷雅晴 平成12年11月 東北大学素材研セミナー 希土類素材の新展開 希土類鉱物と希土類資源

図25. イオン吸着型鉱床の断面モデルと希土類元素の品位分布



写真11. 竜南地区五里停イオン鉱採掘跡地



写真12. 風化粘土を酸リーチングしたコンクリート槽

しかし、採取後の状態を放置すると、やがて雨が降った際に土砂が流れ出すなどの問題も生じる。写真13に見える地域では環境破壊が著しいため、最近では図26のような新たな方法が試みられている。すなわち花崗岩が風化している風化帯の下には硬い花崗岩の岩盤が存在しており、そこで山の上に穴を掘り、硫酸アン

モニウム溶液を投入して風化帯にしみ込ませ、希土類を溶かして岩盤の上から回収するのである。この方法によれば確かに山の表面は緑が保たれるが、一方で飲料水の汚染に対する懸念が持たれるようにも思われる。

表8は現在採掘されているイオン吸着鉱の組成分析例である。



写真13. 採取後の河川侵食

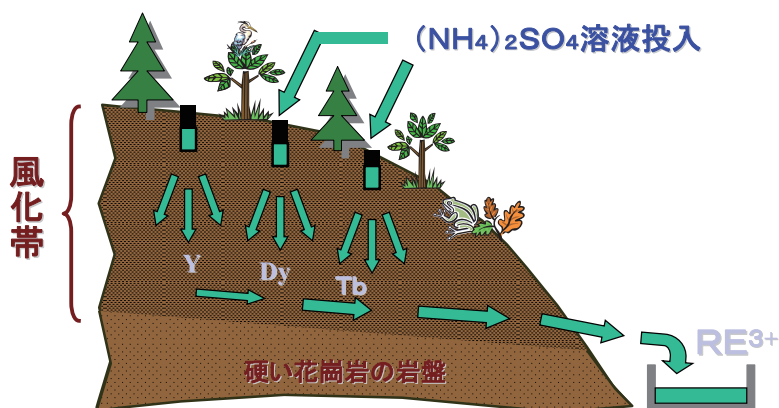


図26. イオン吸着型鉱床のリーチング方法

表8. イオン吸着鉱の組成分析例

	イオン吸着鉱の組成分析例(wt%)		
	竜南鉱	尋烏鉱	信豊鉱
La ₂ O ₃	1.80	31.30	26.50
CeO ₂	0.20	3.40	2.40
Pr ₆ O ₁₁	0.90	8.70	6.00
Nd ₂ O ₃	3.80	28.10	20.00
Sm ₂ O ₃	2.80	5.30	4.00
Eu ₂ O ₃	0.02	0.60	0.80
Gd ₂ O ₃	5.70	4.50	4.00
Tb ₄ O ₇	1.20	0.50	0.60
Dy ₂ O ₃	8.40	1.20	4.00
Ho ₂ O ₃	1.80	0.10	0.80
Er ₂ O ₃	5.10	0.30	1.80
Tm ₂ O ₃	0.80	0.10	0.30
Yb ₂ O ₃	4.60	0.50	1.20
Lu ₂ O ₃	0.60	0.10	0.10
Y ₂ O ₃	62.30	15.40	27.50

11. ネオジム磁石の生産量

図 27 は世界におけるネオジム磁石の生産量の推移である。これを見ると、世界はわが国の 3 倍の生産を行っていることになるが、少し多すぎるように見受ける——せいぜい 2 倍程度ではないだろうか。実はこの図において 2004 年以前の数値は多少信憑性を欠いている。なお、2005 年以降の分は著者による少々以前の予測であり、実績としてはもう少し多いようである。また、

もう 1 つ注意しておきたいのは歩留まりである。会社や製品によって幅はあるが、生産歩留まりをおよそ 65% 程度と推定すると、世界でつくられるネオジム磁石の焼結体の量は 2005 年において 2 万 t であり、毎年 5 % 伸びていき 2010 年には 3 万 t が見込まれる。そこで使用されるネオジムの量は、2010 年には約 9,500t が見込まれる。

(2010.11.20)

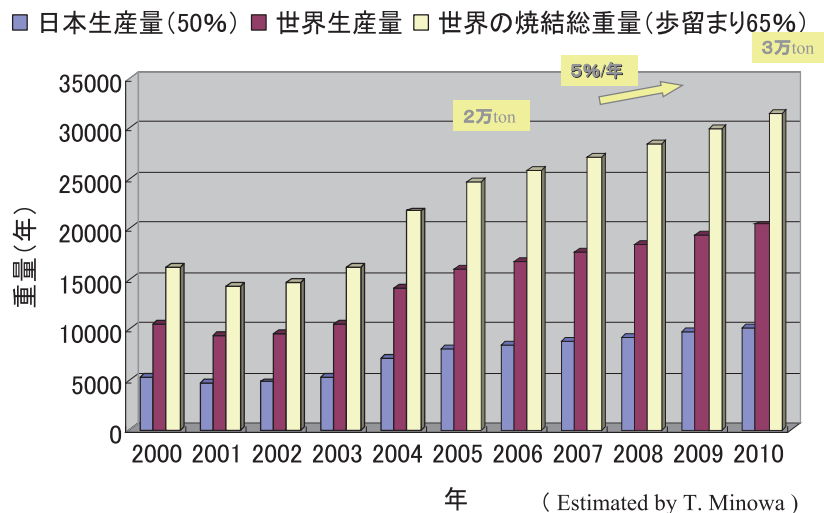


図27. Nd磁石焼結体の生産重量の推測