

磁石の性能と活用のポイント ～入門編～

株式会社 プロテリアル

本資料の目的

本資料は、永久磁石に対しての一般的な幅広い知識の習得と主要な磁石、当社製品の主な特徴の理解を深めてもらうことを目的としています。
特に当社製品について、追加で気になる点や必要な情報がございましたら、資料の最後に問い合わせ先を記載しておりますので、お気軽にご連絡ください。

対象読者

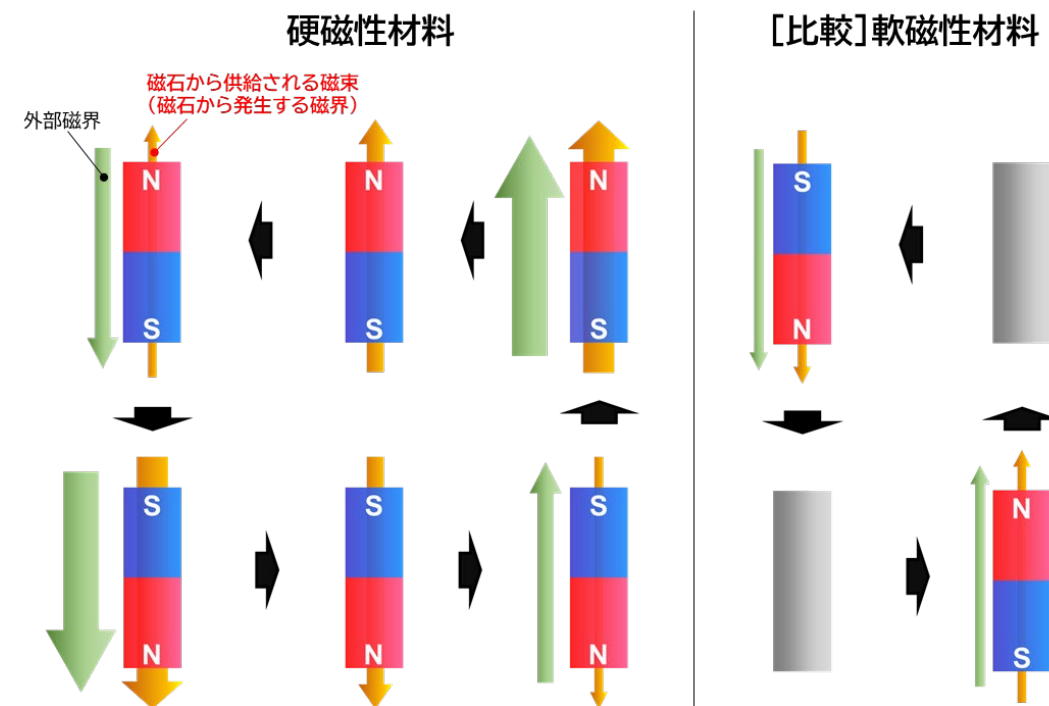
主に、この分野の理解を深めようとしている方々に読んでいただくことを想定して作成しております。

磁石の基礎知識

永久磁石は、硬磁性材料の一種であり、外部磁界に対して磁化方向が変わりにくく、常に材料自身が磁化していることで外部に磁界を供給することができる材料です。

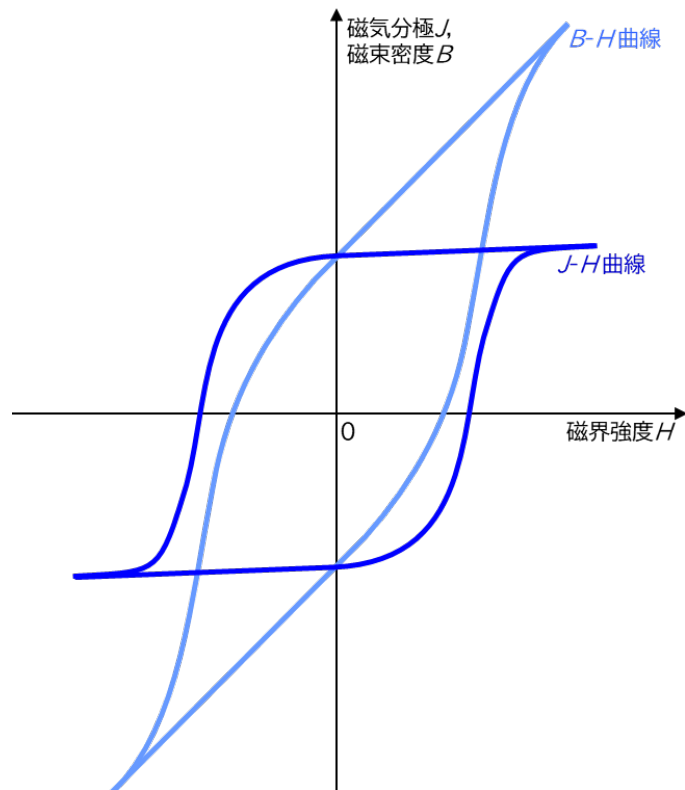
永久磁石とは

- 材料自身が常に磁化されていることで外部に磁界を供給することができる材料で、電磁石と区別するために「永久磁石」とも呼ばれます。紀元前に発見され方位磁石として用いられてきましたが、1910年代に当社が工業化に成功。現在では社会を支える重要なキーマテリアルの一つです。
- 永久磁石は硬磁性材料の一種です。硬磁性材料は、外部磁界に対して磁化方向が変わりにくい材料で、磁石以外では、磁気記録媒体用の材料がよく知られています。



磁石(磁性材料)の性能全体を表現し、機器の設計に活用する曲線のことです。磁気ヒステリシス曲線には、磁気分極(磁化)Jと磁界強度Hの関係を示すJ-H曲線と、磁束密度Bと磁界強度Hの関係を示すB-H曲線の2種類があります。JとBの間には特定の関係式が成立するので、どちらか一方の曲線が決まればもう一方も決まります。

磁気ヒステリシス曲線



解説

J-H曲線

磁石は材料中の電子が作る微小磁石が同じ向きになる(磁化する)ことで機能を発現し、その総和を単位体積あたりに換算したものを磁気分極Jと呼びます。微小磁石は外部磁界を受けて向きを変えることから、J-H曲線は、磁界強度Hに対する磁気分極Jの変化を示します。磁気分極は慣例的に「磁化」と呼ばれることもあります。

B-H曲線

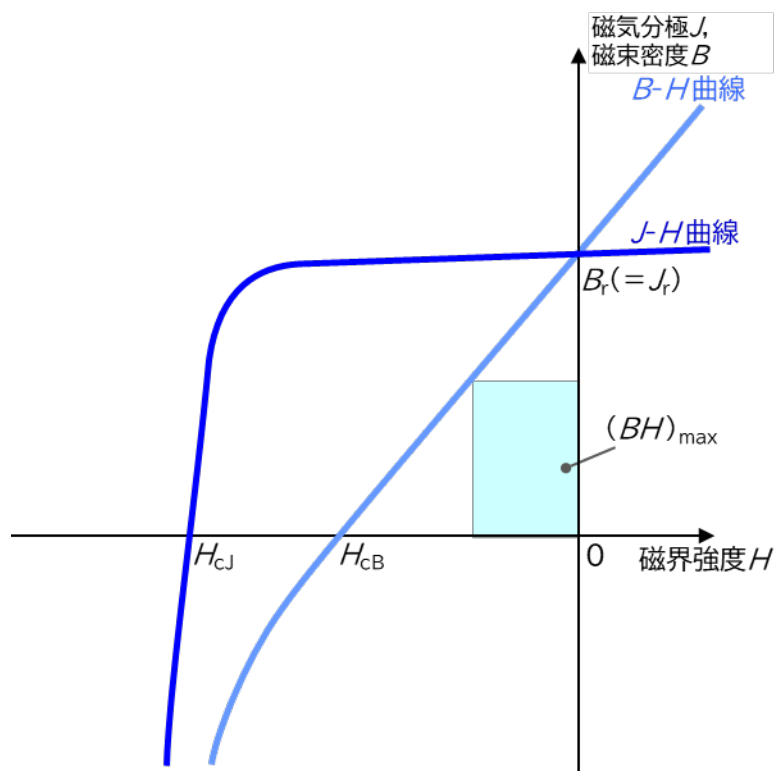
磁石の内部では「外部から供給される磁界が作る磁束(磁力線)」と「磁石が磁化することによって作られる磁束」が通過しています。単位面積あたりの領域を通過する磁束量を磁束密度Bと呼びます。B-H曲線は、磁界強度Hに対する磁束密度Bの変化を示します。Bの値は磁極(N極やS極)を通じて磁石の外部に供給される磁束密度の大きさに関連しています。

J-H曲線とB-H曲線の関係

SI単位系において、BとJの関係は $B = J + \mu_0 H$ で示されます(μ_0 は真空の透磁率)。右辺第一項は「磁石が磁化することによって作られる磁束」、第二項は「外部から供給される磁界が作る磁束」とそれぞれ関連付けられており、J-H曲線とB-H曲線の一方が決まれば他方も決まります。また、BとJの関係式から、 $H=0$ のとき $B=J$ となります。

多くの製品はヒステリシス曲線の第二象限の領域を用いて設計されることから、この領域のみを表示することも多く、減磁曲線と呼ばれます。減磁曲線の特徴を示すとともに製品に用いる磁石の種類やグレードを選定する際の参考となる指標として、残留磁束密度や保磁力などが用いられます。

減磁曲線



解説

残留磁束密度: B_r

- B-H曲線の横軸(磁界強度)がゼロのときの縦軸(磁束密度)の値を指します。これは、外部の磁界が取り除かれても磁石がどれだけ磁力を保持できるかに対応付けられます。
- BとJの関係式 $B=J+\mu_0H$ から、磁界強度Hがゼロの時の磁気分極を残留磁気分極 J_r とすると、 $B_r=J_r$ になります。

保磁力(J-H曲線): H_{cJ}

- J-H曲線の縦軸(磁気分極)がゼロの時の横軸(磁界強度)の値を指し、この値を超える磁界をかけると磁石のN極とS極が入れ替わります。 H_{cB} と区別するため、「固有保磁力」と呼ばれる場合もあります。

保磁力(B-H曲線): H_{cB}

- B-H曲線の縦軸(磁束密度)がゼロの時の横軸(磁界強度)の値を指し、この値を超える磁界をかけると磁石内を通過する磁束の向きが逆になります。

最大磁気エネルギー: $(BH)_{\max}$

- B-H曲線の各点におけるBとHの積は磁石に蓄えられる磁気エネルギーの大きさと関連しています。 $(BH)_{\max}$ はこれらの最大値を示すもので、磁石のポテンシャルを示す指標として用いられます。
- $(BH)_{\max}$ を高くするには、磁石の B_r を高くするとともに、十分大きな H_{cJ} と良好な減磁曲線の形状(角形性)が重要となります。

永久磁石は「材料」「製法」「容易磁化方向の分布」などの視点で分類することができます。
これらの分類は、特定の用途への適用、物理的な制約への対応、環境への対応など、製品設計時に最適な磁石を選択するうえで有用です。

材料による 分類

- 合金磁石
アルニコ磁石など合金の組織制御によって得られ、多くの場合、材料内で一方向に成長させた鉄コバルト(Fe-Co)合金相などの強磁性相を非磁性相中に分散させることで保磁力を向上させますが、原理的に希土類磁石のような高保磁力を得ることはできません。アルニコ磁石の他に鉄クロムコバルト(Fe-Cr-Co)磁石が知られています。
- フェライト磁石
酸化鉄などの酸化物を主成分とする磁性セラミック材料です。磁力は高くありませんが、コストパフォーマンスに優れた磁石です。
- 希土類磁石
希土類元素と鉄などの遷移金属で作られる金属間化合物を活用した磁石です。実用化されている代表的な材料として、ネオジム鉄ボロン磁石(Nd-Fe-B)、サマリウムコバルト磁石(Sm-Co)、サマリウム鉄窒素磁石(Sm-Fe-N)があり、他の磁石と比較して高い磁気特性を発現します。ネオジム鉄ボロン磁石は単に「ネオジム磁石」と呼ばれることもあります。

製法による 分類

- 鑄造磁石
熔融した磁石材料を鑄型に流し込んでそのまま冷却します。
- 焼結磁石
磁石材料の粉末を圧縮した後、高温で焼結します。
- 熱間加工磁石
高温で圧力を付与して磁石材料を塑性変形させます。
- ボンド磁石
バインダーとなる樹脂を用いて磁石粉末を結着させ、形状を付与します。

容易磁化方向の分布 による分類

- 等方性磁石
どの方向でも磁気特性が同じ値を示します。
- 異方性磁石
特定の方向で強い磁気特性を示し、等方性磁石よりも高い磁力を得ることができます。

永久磁石は自身から発生する磁束を利用する材料です。永久磁石の用途を動作原理で整理したものを紹介します。特にモーターへの活用が増えており、省エネ空調機やハイブリッド自動車など新しい製品の普及に貢献してきました。実際の製品設計では、用途や目的に応じて磁石の材質・磁気特性・形状などを選択します。

動作原理

主な製品

磁気的なクーロン力の利用

文房具、磁気カップリング、歯科アタッチメントなど

電気エネルギーから運動エネルギーへの変換

モーター、アクチュエーター、スピーカーなど

運動エネルギーから電気エネルギーへの変換

発電機、マイクロフォンなど

渦電流の利用

渦電流ブレーキ、磁気選別機など

原子・電子との相互作用の利用

磁気共鳴診断装置(MRI)、アンジュレーターなど

主要な磁石の紹介

ネオジム磁石は、1982年には当社(当時の住友特殊金属)が発明し、その後工業化しました。資源的な制約が小さなネオジムと鉄を活用して高い磁力を発現するとともに、大量生産にも適した画期的な磁石です。一方、熱による保磁力の低下や、水分が多い環境下においては腐食が進行しやすくなるといった課題もあります。

歴史

- 当社(当時の住友特殊金属)が1982年に発明、その後工業化しました。それまで最も特性の高かったSm-Co磁石(サマリウムコバルト磁石)よりも高い磁力をサマリウム(希土類の一種)やコバルトよりも資源的な制約が小さなネオジムと鉄で実現することができた画期的な材料です。
- 当社が発明した焼結法の他にも超急冷法などさまざまな製法が開発されていますが、焼結法で作製されたネオジム磁石(ネオジム焼結磁石)は最も高い磁力を発現することができます。

特長

- 強力な磁力
ネオジム焼結磁石は非常に強い磁力を持ち、小さな体積で非常に大きな力を得ることができます。これにより、モーターなどの小型化や高出力化、高効率化などが実現できることから、多くの分野で利用されています。
- 大量生産に適する
ネオジム焼結磁石の磁力の源となる物質($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)は広い温度範囲で安定に存在することや、材料科学的な視点からも粉末冶金のプロセスが容易に適用できることなど、大量生産に適した特長を有します。

課題

- 磁石としての熱安定性
保磁力 H_cJ が高温で急激に低下してしまうことから、磁石が高温にさらされる用途では、磁力が低下して元に戻らなくなってしまう現象(不可逆熱減磁)が起こります。
- 耐腐食性
ネオジム焼結磁石は水分などの存在下で比較的容易に腐食が進行することから、適切なコーティングを行うことが必要です。

前のページで紹介した、ネオジム磁石の課題である「熱による保磁力の低下」を防ぐ手段として、ジスプロシウム(Dy)などの重希土類の活用があります。重希土類の添加により保磁力を向上させることができますが、資源的な制約や残留磁束密度の低下といった課題があります。この課題に対する対策として、少ない重希土類量で保磁力を向上させる取り組みが行われています。

重希土類の役割

- ジスプロシウム(Dy)やテルビウム(Tb)などの重希土類を添加することでネオジム磁石の保磁力 H_c を容易に向上することができ、熱安定性が向上します。これにより、高温環境でも使用することができるようになります。

重希土類の課題

- 資源的な制約
重希土類はもともと資源量が少ないことに加えて、偏在性が高いことからサプライチェーンの視点で課題を有しています。
- 残留磁束密度の低下
ネオジム磁石に重希土類を添加すると、残留磁束密度 B_r が大きく低下してしまいます。

重希土類の課題への対策

- 重希土類の分布制御
磁石内の個々の結晶粒表面のみに重希土類を存在させることで、少ない重希土類量で保磁力を向上させることができます。特に2000年台に開発された粒界拡散法は高い残留磁束密度を維持しながら保磁力を向上させることができます。
- 重希土類に依存しない保磁力向上
結晶粒の微細化や結晶粒間に存在する粒界相を適正化することで保磁力を向上することができ、重希土類の使用量を削減することができます。

フェライト磁石の特長は、低コスト・化学的安定性・高電気抵抗などの特長がありますが、希土類磁石と比べると磁力が低く、低温側で保磁力が低下してしまう課題があります。

歴史

- ・ フェライト磁石は、1930年代に発明された加藤与五郎、武井武によるOP磁石が源流です。その後、現在も活用されている結晶構造(六方晶)のバリウムフェライトやストロンチウムフェライトが欧米で開発されるとともに、粉末冶金の手法を採用した焼結磁石の技術が確立されました。

特長

- ・ 低コスト
フェライト焼結磁石は大量生産に適していることから製造コストは比較的安く、他の永久磁石と比較して経済的です。
- ・ 化学的安定性
フェライト焼結磁石は化学的に安定な材料で、一般的な使用環境で腐食が進行しません。また、製造工程においても不活性ガスなど特殊な雰囲気を用いる必要がありません。
- ・ 高電気抵抗
フェライト焼結磁石は電気抵抗が高いため、モーター運転時の効率悪化につながる渦電流が発生しません。

課題

- ・ 磁力が低い
希土類磁石などと比べて残留磁束密度 B_r が低いため、高い磁力が必要なアプリケーションには適さない場合があります。
- ・ 低温減磁
保磁力 H_{cJ} が低温側で低下するため、設計上の配慮が必要です。

材料や製造プロセスの最適化に加え、特定の元素を活用することで、高性能化を実現してきました。
また、フェライト磁石の特長を確保するために、各製造工程において、大量生産に適した高性能化技術が開発されています。

技術開発の ポイント

- 高性能化のポイント

材料や製造プロセスの最適化が重要です、特に1990年代後半以降の研究において、特定の元素を活用すると残留磁束密度 B_r や保磁力 H_{cJ} のポテンシャルを向上できることが見出され、さらなる高性能化が実現しました。

- 製造プロセスのポイント

材料組織適正化による性能向上に加えて、コストパフォーマンスに優れるというフェライト磁石の特長を確保するため、各製造工程において大量生産に適した高性能化技術が開発されました。

プロテリアル製品紹介

プロテリアルはネオジム磁石NEOMAX[®]の新材質として、独自技術”M拡散TM”を適用することで従来よりも重希土類使用量をさらに削減した高性能磁石“NMX[®]-G1NHシリーズ”を開発しました。
本製品は高い耐熱性が求められる自動車などの用途において、メリットを提供することができます。

特長

高い残留磁束密度
と保磁力を両立

組成や製造プロセスの最適化を追求し、高い保磁力 H_{cJ} を維持しながら高い残留磁束密度 B_r を実現しました。

重希土類を
大幅に削減

磁石の粒界相に着目した新技術”M拡散TM”を適用することで、従来の粒界拡散法よりも重希土類量を大幅に削減しました。

磁石内の
保磁力差を低減

従来の粒界拡散法で得られる材料よりも磁石表面と内部の保磁力差を低減しました。

期待効果

機器の小型化や
高出力化

高い磁力と耐熱性を両立しており、機器の小型化や高出力化に貢献します。

重希土類元素の
使用量削減

資源的な制約が大きな重希土類の使用量を大幅に削減でき、持続可能な社会の実現に貢献します。

磁気回路設計
自由度の拡大

粒界拡散材の特徴である磁石内部の保磁力低下が抑制されており、減磁を考慮した設計が容易になります。

プロテリアルのNMF[®]-15シリーズは量産フェライト磁石として世界最高レベルの磁気特性を発現します。(2024年2月現在)
高い材料技術と製造技術を適用することによって、さまざまな特長を実現しました。従来からフェライト磁石を採用していた用途に加え、ネオジム磁石を活用していた用途への活用も期待されます。

特長

期待効果

高い磁気特性

NMF[®]-15シリーズは量産フェライト磁石として世界最高レベルの磁気特性を有しています。(2024年2月現在)

保磁力の温度変化が小さい

NMF[®]-12,15シリーズは従来のフェライト磁石よりも保磁力 H_c の温度変化が小さく、設計時に考慮が必要な低温減磁が起こりにくい材料です。

高い電気抵抗

フェライト磁石は渦電流発生抑制に重要となる電気抵抗がネオジム磁石よりも3桁以上高い材料です。(焼結磁石どうしの比較)

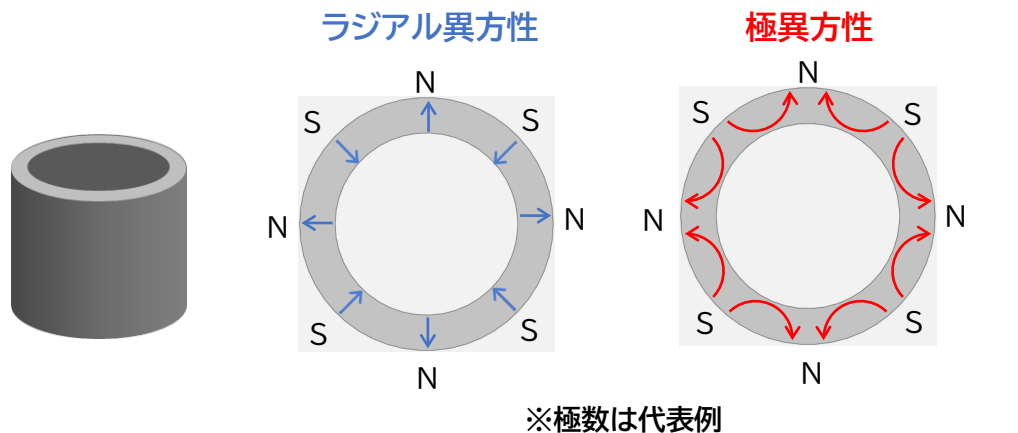
持続可能な社会実現への貢献

従来ネオジム磁石が使われていた用途への適用により、ネオジムなどの特定元素に対する過度な依存を緩和できます。

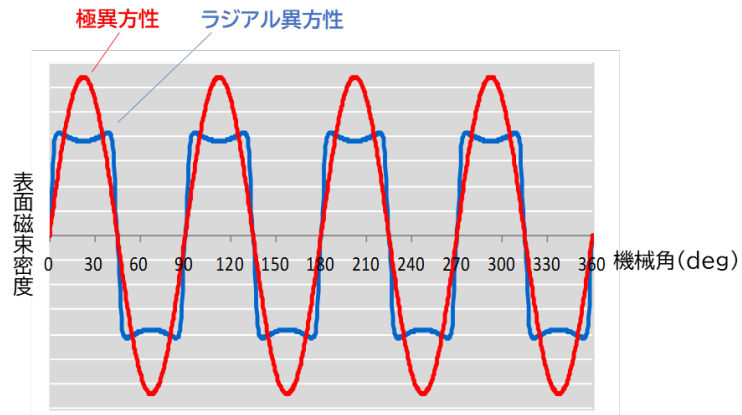
高出力化・小型化

NMF[®]-15シリーズは従来のフェライト磁石を使用した場合よりも機器の高出力化・小型化が可能です。

プロテリアル独自の設計・生産技術を活用したユニークな高性能磁石で、ラジアル異方性磁石（ネオジム磁石）、極異方性磁石（ネオジム磁石・フェライト磁石）をラインナップしています。それぞれの磁石の特長や期待できる効果は次項で説明いたします。



表面磁束密度波形
(計算例)



プロテリアルの異方性リング磁石

磁石内の配向分布により、ラジアル異方性磁石と極異方性磁石に分類でき、着磁後に特徴的な磁束密度分布が得られます。

ラジアル異方性

磁石の容易磁化方向をリング断面の中心から放射状に分布させた磁石で、ネオジム磁石で採用されています。

極異方性

製品の極数に応じた磁束の流れが磁石の内部に形成されるよう、容易磁化方向を特殊な分布に制御した磁石で、正弦波に近い表面磁束密度分布が得られます。ネオジム磁石とフェライト磁石で採用されています。

ラジアル異方性磁石や極異方性磁石は一般的な単純形状・配向の磁石にはない多くの特長を有しており、組立て工数低減など表面磁石(SPM)モーターなどの用途で高い効果が期待できます。

特長

共通	モーター組み立て時の磁石固定が容易	磁石固定が容易であり、組立て作業工数低減や樹脂モールドによる一体成形に貢献できます。
	寸法精度の確保	円筒形状のため、固定子に面する外径側の寸法精度を容易に確保します。
	磁束密度分布のばらつき低減	回転子が単一磁石で構成できるため、磁極間の磁束密度分布のばらつきを容易に低減します。
	高速回転時の信頼性	回転子が単一磁石で構成できるため、高速回転などにおける信頼性が高いです。
ラジアル異方性	高い着磁自由度	磁極数を任意に設定したり、スキュー着磁することが可能です。
極異方性	磁束密度分布の極大値が高い	磁束密度分布の極大値をラジアル異方性磁石よりも高くすることができます。
	表面磁束密度分布が正弦波に近い	モーターの滑らかな回転に対して理想とされる、正弦波に近い表面磁束密度分布が得られます。
	内径側からの漏れ磁束量が十分小さい	内径側からの漏れ磁束量が十分小さいことから、磁石以外の回転子部材に樹脂などの非磁性材料を活用できます。

期待効果

円筒形状の特長を活かすことで、組立て作業工数低減や樹脂モールドによる一体成形に貢献できます。	
組立て作業工数の低減	磁石の組付けが容易であり、作業工数の低減が可能です。特に極異方性リング磁石は、内径側からの漏れ磁束量が十分小さいことから、樹脂を射出成形することによるシャフトとの一体化も可能です。
高出力化・小型化	外径側の寸法精度が高いことから、固定子-回転子間のエアギャップを狭くでき、磁束を有効に活用することができます。特に極異方性リング磁石は、磁束密度のピーク値が高く、モーターの小型・高出力化に貢献します。
高速回転用途への適用	回転子を単一磁石で構成できるため、高速回転における信頼性を高めることができます。

PROTERIAL

私たちの約束

PROTERIALは、モビリティ、産業インフラ、エレクトロニクス関連分野を中心に、世界トップクラスの高機能材料を提供しています。1910年の創業以来、多様な仲間が集い、知恵と技術が融合、発展を繰り返してきました。

私たちがこだわり続けているのは、すべてにおける質の高さです。お客さまのイノベーションを実現するために、持続可能な社会の実現に貢献するために、技術と製品のみならず、それを生み出すプロセス、人材をも磨き続け、新たな価値を創造していきます。あらゆる活動と誠実に向き合い、社会の信頼と期待に応えることを約束します。

Professionalとしての決意と、Progressiveな意志、Proactiveな姿勢で、私たちにしか生み出せないMATERIALを提供し続ける。

PROTERIALは、明るい未来へ続く道を拓いていきます。

商号	株式会社プロテリアル Proterial, Ltd.
設立	1956年(昭和31年)4月10日
資本金	310百万円 (2023年3月31日現在)
代表者	代表取締役 会長執行役員 兼 社長執行役員 CEO(最高経営責任者) Sean M. Stack(ショーン・スタック)
社員数	プロテリアルグループ連結 26,496名(2023年3月末現在)
売上収益	プロテリアルグループ連結 11,189億円(2023年3月期)
事業内容	特殊鋼、ロール、自動車鋳物、配管機器、 磁性材料、パワーエレクトロニクス、 電線、自動車部品の製造と販売
お問い合わせ	東京都江東区豊洲5-6-36 豊洲プライムスクエア Tel:0120-603-303