

# 次世代自動車で期待される 脱レアアースモータ



アキシアルギャップモータを搭載した電気自動車(試作車)と、搭載されているインホイールモータ(右)。



「産業のビタミン」と呼ばれるレアメタルの1つがレアアース(希土類17鉱種)であり、磁性材料、LED、透明電極など現代産業に不可欠な元素になっている。しかし、レアアースは世界的な需要増に加え、産出国に限られているなど、安定供給が難しい場合もあり、「産業の生命線」から「産業のアキレス腱」になることが懸念されている。中でも現在普及しつつある電気自動車では、レアアース磁石を使用したモータが駆動用モータとして不可欠となっている。次世代の電気自動車への搭載が期待される駆動用モータのレアアース対策を紹介する。

## ● 駆動用モータに用いられるレアアース

今後、一層の普及が進むと予想されるハイブリッド車、バッテリーに直接充電できるプラグインハイブリッド車、燃料電池車などの電気自動車では、駆動装置として利用されるモータにネオジウム磁石が不可欠である。

ハイブリッド車の他にも、エアコン、携帯電話やハードディスクドライブなどに使用されるモータの高効率化、小型化は高性能磁石によって実現されてきた。

現在生産されているハイブリッド車や電気自動車には、ロータの内部に永久磁石を使用する永久磁石同期モータ(IPMSM)が用いられている。永久磁石には最も強い永久磁石材料であるネオジウム磁石に耐熱性を向上させるためのDyを添加して使用している。Nd、Dyともレアアース元素で、産出国は限られており、特にDyはほぼ100%が中国からの輸入である。

レアアース対策には、資源の確保、使用量の削減、代替材料の開発、リサイクルなどさまざまなアプローチがあるが、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構では、Dyの使用量削減技術、Dy不使用モータの開発などを行っている。

中でも、次世代自動車用モータの開発では、新方式モータの開発と、永久磁石材料の開発という、相互補完的な2つのアプ

ローチが進められている。新方式モータの開発とは、レアアースを使用しないモータの開発や、さらに一步進んで、磁石を使用しないモータの開発などである。今回は、これらの脱レアアースモータの開発例を紹介する。

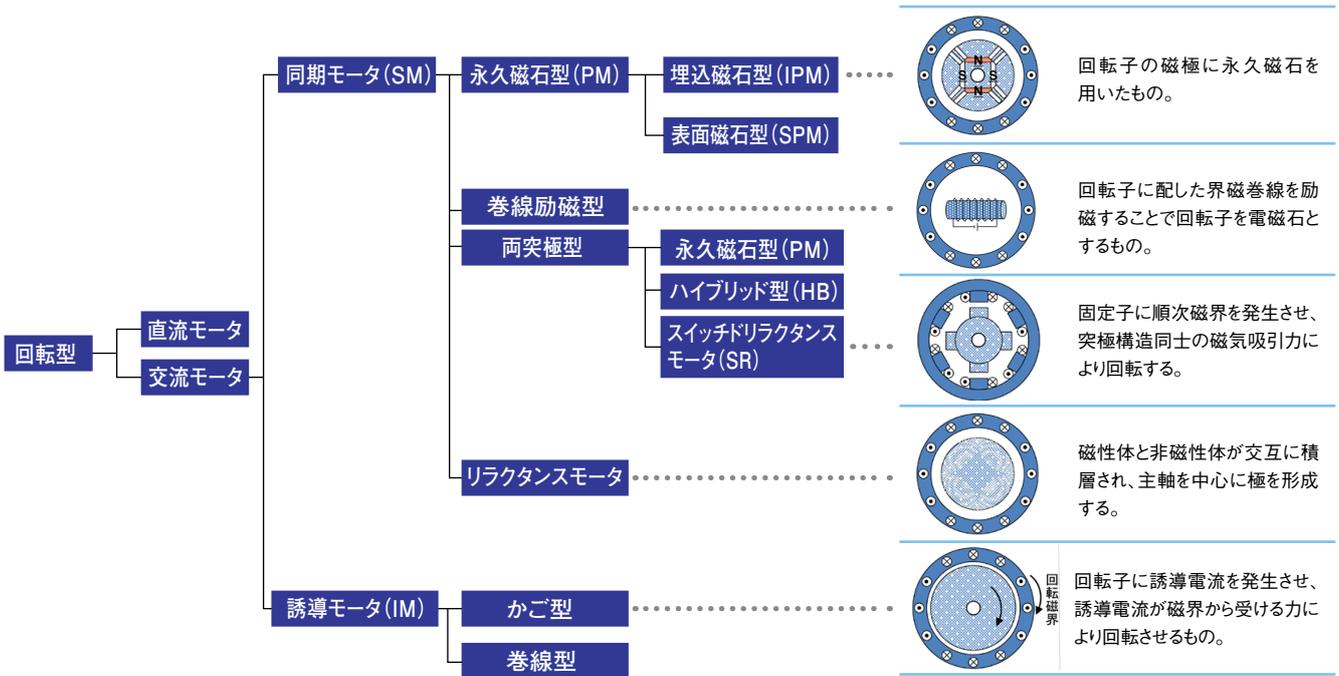
## ● 「脱レアアース磁石」によるモータの開発

新方式モータの開発のアプローチの1つは、レアアースを使用しない永久磁石をモータ用磁石として使用するという試みである。

自動車駆動用モータは、モータの他に発電機やインバータを収容しながらガソリンエンジンと同じスペースに納める必要があるために、小型化、高出力化、軽量化が必須の要件となる。さらに、ガソリンエンジンでは、低速時には大トルク、中高速時には高回転を、ギヤ比を変えることによって実現しているが、駆動用モータにも同様の広い可変運転範囲が求められる。これらの駆動用モータの評価指標には、効率、出力、トルク密度などが一般的に用いられており、既存のレアアースモータと同じサイズで、同じ性能を持ち、かつレアアースを使用しない脱レアアースモータの開発が急がれている。

■モータの種類と動作原理

モータは電源の種類や、駆動原理などにより、さまざまな分類方法がある。交流／直流の電源の相違のほか、磁界では整流子／回転磁界、永久磁石／電磁石の使用の有無、動作原理では回転磁界の速度に同期して回転子が回転する同期型と回転子に誘導電流を発生させて回転させる誘導型などに分類され、それぞれ異なった特徴を持っている。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発事業」では、埋込磁石型、巻線励磁型、ハイブリッド型、歯車状鉄心型、リラクタンスモータ、誘導モータ(かご型)と、制御技術についての開発が行われた。



(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の資料より作成。

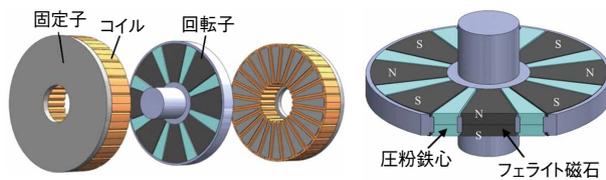
しかし、このような性能を持つモータを安価なフェライト磁石を使用したモータで実現することは難しかった。フェライト磁石は価格がネオジム磁石の10分の1であるが、磁力も10分の1と小さく、強力な磁力を得るためには、大きな磁石が必要になり、車載条件である小型化が難しかったからである。

一般的にモータは、磁石と鉄の吸引により発生する「マグ

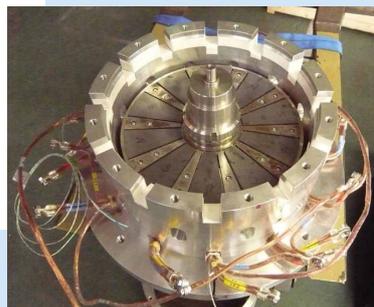
ネットルク」と鉄と鉄が引き合う「リラクタンストルク」の2つを利用してトルクを発生させている。従来タイプのモータでは、主にマグネットルクを利用してトルクを生み出していたために、強力な磁石が求められていた。しかし、現在市販されているハイブリッド車には、ネオジム磁石を使用しているものの、リラクタンストルクを有効に利用する工夫が施されている。

■ネオジム磁石をフェライト磁石で代替する

●アキシアルギャップモータの構造



回転子は、フェライト磁石と圧粉鉄心が非磁性体(ステンレス鋼)の構造体に納められた構造になっている。



アキシアルギャップモータ試作機。出力50kWの試作機では、トルク302Nm(トルク密度:34.3Nm/l)を実現している。

資料提供：(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構が行った「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発事業(2007~2011年度)」では、このリラクタンストルクをさらに有効に利用することで、安価なフェライト磁石を用いても、レアアースモータと同等の性能を有するモータの開発に成功している。開発されたのは、アキシシャルギャップモータと呼ばれる、固定子と回転子が円盤状に配置された、モータの小型化に適した形状となっているモータである。

従来構造では、回転子の表面に磁石が配置されていたが、非磁性材料(ステンレス鋼)の支持部材にフェライト磁石と圧粉鉄心(鉄粉に絶縁皮膜を施し、圧縮成形したもの)を交互に配置するロータセグメント形を採用することで、マグネットトルクとリラクタンストルクを有効利用し、従来のハイブリッド車用レアアースモータと同サイズで、同等の約50kWの出力を実現している。

●「磁石を使用しない」リラクタンスマータ

新方式モータの開発のもう1つのアプローチは、永久磁石を使用しないモータの開発である。その例が、スイッチドリラクタンズ(可変リラクタンズ)モータ(SRM)である。

SRMは、固定子を突起を持つ電磁石とし、回転子に突起を持つ鉄製のロータを用いる。固定子とロータの突起同士が順次引き合うように磁界をコントロールすることでトルクを得るモータである。

SRMには、永久磁石を使用しない脱レアアースである他に、

低コストで耐熱に優れ、堅牢な構造を持つという特徴がある。しかし、その一方で従来のSRMではトルク密度が低く小型化が難しい、効率が低い、インバータなどの制御技術が複雑、騒音や振動を発生するなどの課題が少なくなかった。

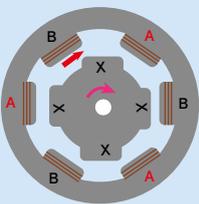
新しいSRMの開発ではまず、トルク密度の向上を実現するために、SRMの構造が検討された。従来、固定子と回転子の数が6/4極であったモータの構造を18/12極に増加させることで、トルク密度を2.5倍まで向上させることに成功している。これにより、従来のSRMでは実現が難しかったトルク密度45Nm/lを実現している。

また、効率の向上には、積層鉄心の材料に、無方向性の電磁鋼板(6.5%ケイ素鋼板)を使用することで克服している。これらの工夫により、販売台数の多い50kW出力のハイブリッド車に搭載されているIPMSMと同等の性能を実現している。

自動車駆動用モータは、このように単独で駆動可能であるものの他に、エンジンをサポートする用途で使用されるモータが存在する。この場合、必要とされるトルクは20Nm程度と、単独で使用されるものと比較して小さくなる。そのため、オルタネータ(車載発電機)の技術を基にしたサポート用の脱レアアースモータなどの開発も行われている。

このように開発の進む脱レアアースモータであるが、高い耐久性と安全性が要求される次世代自動車用モータの開発では、厳しい車載環境に耐えうるかどうかを確認するために、数年の試験期間が必要である。今回紹介したフェライト磁石を用いたアキシシャルギャップモータや永久磁石を用いないSRMの他に

■“永久磁石フリー”のスイッチドリラクタンスマータ



**SRMの動作原理**  
固定子のA群のコイルに磁力を発生させると、回転子の突起(突極)が引きよせられる。突極がA群のコイルに近づくと、A群のコイルの電流を切り、次にB群のコイルに磁力を発生させる。この繰り返しにより、トルクを発生させる。

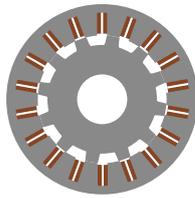
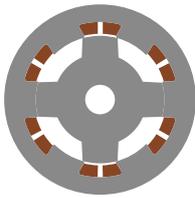


SRMのケイ素鋼板。規定の形状に打ち抜いたケイ素鋼板を積み重ねて、積層鉄心とする。

●極数とトルク密度

6/4極 160Nm

18/12極 400Nm



一般的な6/4極のSRMと比較して、18/12極では2.5倍のトルクを実現できる。



SRMの固定子と回転子。積層したケイ素鋼板にコイルを巻き付けた状態の固定子(左)と、ケースから取り出した回転子(右)。

資料提供：東京工業大学大学院理工学研究科 千葉 明教授

### 磁石材料のレアアース対策

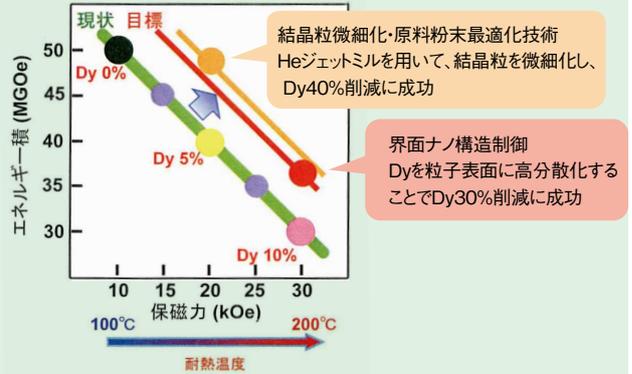
モータのレアアース対策としては、磁石材料のレアアース使用量低減とレアアースを使用しない磁石材料の研究も同時に進められている。

磁石材料は、通常、磁性粉末材料を磁界中で成形するが、ネオジム磁石は粉末材料の粒径が小さいほど大きな保磁力を示すことが経験的に知られていた。この原理は解明されていないが、ネオジム磁石の平均粒径を1.1 μmまで微細化することで10kOe程度であった保磁力を20kOe程度まで増加させることができる。具体的には、通常、窒素ガスを使用するジェットミル(粉砕器)で、窒素ガスの代わりにヘリウムガスを用いることで平均粒径の微細化を実現した。さらに、Dyの使用量を削減するために、界面ナノ構造制御技術を利用し、従来は原料粒子内に均一に含まれていたDyを粒界近傍のみに分散コーティングを施すことで、Dyの使用量を抑えている。両手法を用いることで、目標である30%以上のDy使用量削減を達成した。

レアアースを使用しない磁石材料というアプローチでは、飽和磁化の大きな強磁性窒化鉄が脱レアアース材料として注目されている。従来、粉末・単相として取り出すことが不可能であった強磁性窒化鉄を合成する手法が開発されたことにより、ネオジム磁石を凌駕する脱レアアース磁石の実用化が期待されている。一層の研究開発を進めるために、強磁性窒化鉄の高保磁力化および量産化手法の確立が待たれるところである。

さらに、保磁力の大きなフェライト磁石の開発も行われている。フェライト磁石には磁鉄鉱( $Fe_3O_4$ )とガンマ型酸化鉄( $\gamma-Fe_2O_3$ )が知られているが、イプシロン型酸化鉄( $\epsilon-Fe_2O_3$ )が従来のフェライト磁石の約3倍の20kOeの保磁力を持つことが見いだされている。単相分離にも成功し、Feの一部をRhで置換したロジウム置換型イプシロン酸化鉄( $\epsilon-Rh_xFe_{2-x}O_3$ )では、室温で27kOe、結晶の向きをそろえた配向試料で31kOeという保磁力を実現している。

### ■ Dy添加ネオジム磁石の保磁力とエネルギー積



エネルギー積は磁石の性能の指標であり、単位体積当たりの静磁エネルギー(GOe:ガウス・エルステッド)で表される。保磁力は磁性体の磁化をゼロにするための外部磁界の強さで、これも磁石の性能の指標である。自動車駆動用モータでは、高温での保磁力が要求される。

資料提供：(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

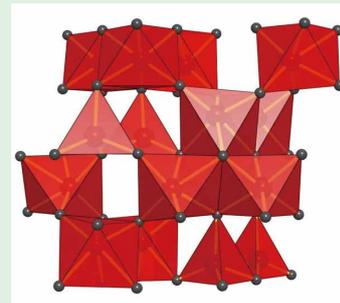
### ■ 窒化鉄系磁石材料



単相、粉体として取り出すことに成功した窒化鉄系磁石材料の直近の課題は、高保磁力化および量産手法の確立である。

資料提供：(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

### ■ イプシロン型酸化鉄磁石の結晶構造



八面体は六配位鉄サイト( $FeO_6$ )、四面体は四配位鉄サイト( $FeO_4$ )を示している。

資料提供：東京大学大学院理学系研究科 大越 慎一教授

も、動作原理の異なるさまざまなモータで脱レアアース対策が進められており、これらの脱レアアースモータは、まずは家電などの分野で先行して普及していくものと予想される。

脱レアアースモータでは、その他にもモータ磁気回路、インバータ制御回路などの制御技術も重要である。これらに加えて、磁石開発、電磁鋼板などのコア技術でわが国はこれまで先進的な位置を占めていた。わが国の優れた自動車技術と、希少資源の需給の影響を受けない脱レアアースモータが結びつ

けば、経済的にも大きな効果が期待される。1日も早い脱レアアースモータの実用化が待たれるところである。

- 取材協力 東京工業大学、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 文 石田 亮一