

省エネ・CO₂削減に
貢献する
エコプロダクツ®



写真2 日本製鉄の無方向性電磁鋼板でつくられた鉄心

日本製鉄の電磁鋼板



写真1 方向性電磁鋼板の結晶粒

「結晶」というと雪の結晶や鉱物の結晶が思い浮かびますが、鉄にも結晶があります。一般的な鉄の結晶粒（一つ一つの結晶の粒）は直径が10～20マイクロメートル（0.01～0.02ミリメートル）で、肉眼では見えません。

電磁鋼板は、この鉄の結晶粒のなかの原子配列（規則正しく並んだ原子の方向）を巧みにコントロールしてつくられています。方向性電磁鋼板の場合、理想的な原子配列を持った結晶粒だけを選択して成長させる技術を駆使し、直径2～3センチメートル程度の肉眼でも見える結晶粒をつくります。

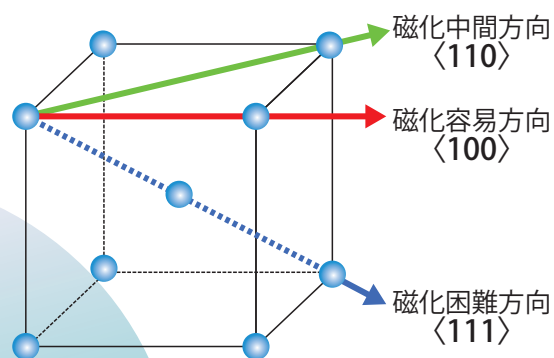
この技術を応用すれば、鉄の結晶粒で文字を書くこともできます（写真1）。「技」の文字の部分は直径数100マイクロメートル程度の結晶粒で、方向性電磁鋼板としては失敗作です。どうすれば理想的な結晶粒をつくるのかはわかっているため、その逆を行えば文字が書けます。無方向性電磁鋼板の場合は、結晶粒のなかの原子配列を方向性電磁鋼板とは違った方向にコントロールします。

このように、用途に応じて結晶粒の原子配列の方向（結晶方位）を精緻にコントロールすることで、日本製鉄はエネルギーロスの少ない電磁鋼板をつくっています。日本製鉄の電磁鋼板は、電気をつくるための発電機、電気を家庭や工場に送るための変圧器、エアコンや冷蔵庫、ハイブリッド車や電気自動車などを動かすためのモーターの鉄心（写真2）に使われ、省エネルギー・CO₂削減に貢献するエコプロダクツ®として高い機能を発揮しています。

結晶方位を 制御して エネルギーロス を減らす

図1 鉄の原子配列と磁気特性

鉄の原子配列は、サイコロのような立方体の角8カ所と真ん中1カ所に原子を持つ構造となっています。〈100〉の方向が最も磁化されやすく、この方向が磁化方向にそろっていると、鉄を磁化したときに生じるエネルギーロス(鉄損)が少なく、エネルギー変換効率が良くなります。



電気が使われているところに 電磁鋼板あり

電気が流れるところには磁界が発生します。例えば鉄心の周りにコイルを巻き、コイルに電気を流すと、磁界が生じ、この磁界によって鉄心は磁気を帯びて自ら磁石になり、磁化されます。このように鉄心の磁化を利用して、電圧を変える装置が変圧器、回転力を発生させる装置がモーターです。変圧器やモーターを使用する際、鉄心で電気エネルギーの一部が熱エネルギーとなって消費され、発熱します。これによって生じるエネルギーロスは「鉄損」と呼ばれ、変圧器やモーターの効率を下げる大きな要因の1つとなっています。

低鉄損を実現する技術的なポイントの1つに、結晶方位制御があります。結晶方位制御とは磁化させようとする方向に応じて結晶方位をコントロールする

技術です。鉄の原子配列はサイコロのような立方体の角8カ所と真ん中1カ所に原子を持つ構造となっています(図1)。鉄が一番磁化されやすい方向は立方体の稜線の〈100〉の方向で、外部から加えられた磁界の方向に〈100〉の方向がそろっていけば、簡単に磁化され、エネルギー効率が良くなります。この〈100〉の方向に着目し、日本製鉄は結晶方位を制御することによって、低鉄損化を追求してきました。変圧器のように一定の方向への特性が重視される機器向けの鉄心には、〈100〉の方向をできるだけ一直線にそろえた方向性電磁鋼板を開発。一方、回転により磁界の向きが常に変化するモーターの鉄心には、〈100〉の方向を鋼板面にできるだけランダムに配し、さまざまな方向に磁化しやすくさせた無方向性電磁鋼板を開発しています。

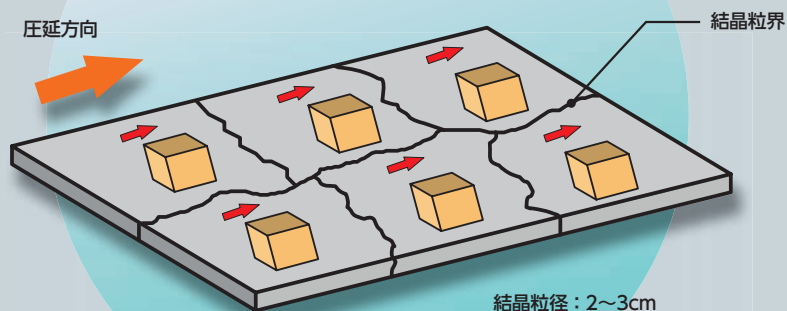
電磁鋼板はこのように結晶方位を制御することによりつくり分けられ、用途

に応じて使い分けられています。方向性電磁鋼板(GO)は、発電所や変電所の電力用大型変圧器、一般家庭や商業施設、工場などへ電気を送る配電用変圧器、ビルや工場などの建物のなかに設置される中小型の変圧器に使用されます。無方向性電磁鋼板(NO)が使用されている電気機器には、発電所の大型発電機、鉄道車両やハイブリッド車、電気自動車の駆動用モーター、エレベーター用モーター、空調のコンプレッサ用モーターなどがあります。さらに私たちの身の回りでは、洗濯機や掃除機のモーター、エアコンや冷蔵庫のコンプレッサ用モーター、テレビの電源トランス、ハードディスクやDVDドライブ内のディスクを回転させるモーターとヘッドを動かすステッピングモーターなどがあります。直接私たちの目に触れることはほとんどありませんが、電気が使われているところに電磁鋼板ありと言われるほど、豊かな暮らしと社会を支えています。



方向性電磁鋼板 ～ 一方向に結晶の向きを制御 ～

変圧器のように一定の方向の磁気特性が重視される電気機器向けの鉄心には、結晶の磁化容易方向〈100〉を、できる限り圧延方向にそろえた方向性電磁鋼板が使われています。



電力システムを支える基盤材料

方向性電磁鋼板

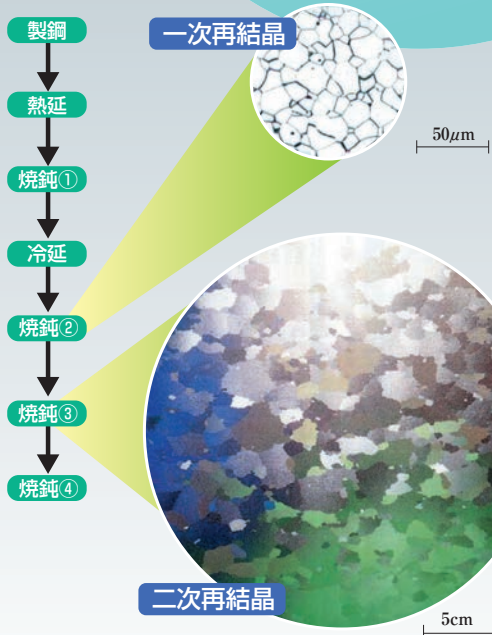
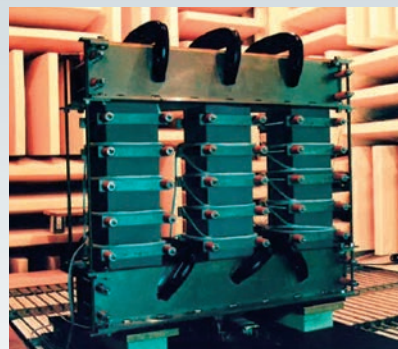


図2 二次再結晶のプロセス

左写真は焼鈍②完了後、一次再結晶組織の鋼板断面です。さまざまな方位を持った結晶粒の集合体で、この段階では方向性電磁鋼板の特性は発揮できません。一次再結晶粒のうち優れた特性を持つ結晶粒が、磁気特性の劣る周囲の結晶粒を蚕食しながら、右写真の二次再結晶まで成長し、方向性電磁鋼板の良好な特性を発揮します。一次再結晶で10 μ m程度であった結晶粒は2~3cmまで成長するのです。



変電所



変圧器の鉄心

方向性電磁鋼板が電圧を効率的に変換します。

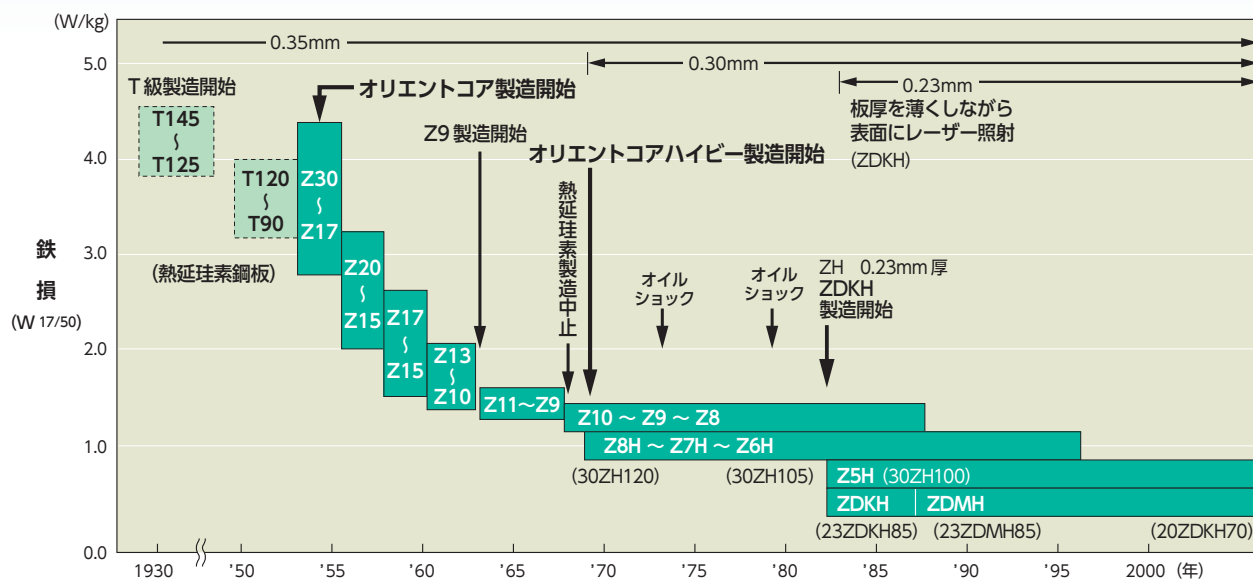


図3 進化する方向性電磁鋼板

方向性電磁鋼板オリエントコアハイビー®は日本製鉄が1961年に開発し、1968年から工業生産を開始している鉄鋼製品です(1973年大河内賞 記念賞を受賞)。絶え間ない技術革新によって、今日までに大幅な電力損失の削減を実現しています。

約1週間かけて結晶方位をつくり込む「匠の技」

電磁鋼板の開発は生産性を高めながら、いかに磁気特性を向上させるかの戦いです。日本製鉄は1953年にアメリカのアーモコ社からの技術導入により、方向性電磁鋼板の日本での工業生産を開始し、1968年にはオリエントコアハイビー®の製造を開始しました。結晶方位制御技術を駆使した結果、磁化されやすい〈100〉の方向と圧延方向のズレを、従来の半分以下まで角度を抑えることに成功し、変圧器の鉄損を大幅に低減しました。10トンの電磁鋼板内の約1億個の鉄の結晶がほぼ一定の方向にそろい、鉄の芸術品とも言われました。

「キートクノロジーとなったのは、二次再結晶という特殊な冶金現象の活用です。鉄の結晶粒は通常数10マイクロメートルです。これらの結晶粒にはいろいろな個性があります。そのなかで原子配列の向きが〈100〉の方向にそろった結晶粒だけを成長させています。向きがそろった結晶粒が向きのそろっていない結晶粒を蚕食し、向きのそろった結晶粒で鋼板内を埋め尽くしていきます。二次再結晶を行う焼鈍工程は、約1週間かけてじっくりと方向性電磁鋼板を熟成させる「匠の技」と言えます(図2)。(電磁鋼板技術室・大畑室長)

高いハードルに挑み続ける

方向性電磁鋼板の鉄損のうち約70%が渦電流(磁界の変化に伴い、電磁誘導の法

則によって、電磁鋼板内に生じる渦状の電流)によるエネルギーロスです。渦電流損を低減させるため、日本製鉄ではさらに3つの技術を駆使して、低鉄損を実現しています。

1つ目はシリコンなどの合金添加です。しかしシリコンを添加し過ぎると、磁束密度※1が低下します。その影響を補完するため、結晶方位制御を緻密に行い、求められる特性に応じています。

2つ目は板厚を薄くすること(薄手化)です。非常に有効ではあるものの、従来まで二次再結晶が不安定になるなどの難しさがありません。その技術課題を克服し、0.20ミリの薄手化を実現しました。渦電流は鉄心の断面に発生するため、鉄心を薄く切って、それぞれの境界を絶縁して抵抗を大きくし、積層鉄心にすることで鉄損を小さくしています。

3つ目は磁区幅※2の細分化です。二次再結晶により結晶の方向をそろえていくと、方向性電磁鋼板は磁区幅が大きくなり、鋼板内に生じる渦電流が増えます。そこで1983年に鋼板の表面にレーザーを照射し、磁区幅を小さくすることで、さらなる鉄損の低減を実現したオリエントコアハイビー・レーザー®を開発(1985年大河内賞技術賞を受賞、1993年全国発明表彰、日本経済団体連合会会長発明賞を受賞)。1988年にはレーザーではなく、鋼板表面に機械的に適度な溝を入れることで磁区幅を狭くするオリエントコアハイビー・パーマネント®を開発しました(1998年市村産業賞貢献賞を受賞)。

大幅な電力損失減、低騒音を実現

近年は低鉄損だけでなく、低騒音のニーズも高まっています。かつて柱上変圧器や鉄道車両用変圧器の近くで耳を澄ますとブーンという音が聞こえることがありました。この音は電磁鋼板が磁化したときに伸び縮みする性質(磁歪)が原因の1つとなっています。変圧器に流れる電流は交流のため、1秒間に50回(東日本)または60回(西日本)のサイクルで電流の流れる向きが変わります。そのため磁界が大きくなったり、小さくなったり、磁化される向きも変わることから、方向性電磁鋼板は伸び縮みを繰り返します。長さ1メートルの方向性電磁鋼板の場合、わずかに約1マイクロメートル(0.001ミリメートル)程度の伸び縮みが、変圧器のうなるような音につながっていたのです。

磁歪は結晶のそろい方に影響され、結晶方位が特定の方向に良くそろった電磁鋼板ほど、小さくなります。日本製鉄はさらに結晶方位制御技術に磨きをかけるとともに、振動騒音測定解析システムを独自に開発し、これらを駆使して、電磁鋼板の利用環境にまで踏み込んで低騒音化に貢献する技術開発を進めています。

この長年にわたる方向性電磁鋼板の技術革新(図3)により、日本製鉄は変圧器の大幅な電力損失減、低騒音を実現しました。また、変圧器の小型化・大容量化に貢献し、超高圧変電所で必要となる1基で10億ボルトアンペアの電力を変圧するような超大型変圧器にも使用され、変電所周辺の環境対策の面でも役割を果たしていま



日本製鉄(株) 薄板事業部 電磁鋼板営業部
電磁鋼板技術室 大畑 喜史 室長

す。こうした実績が評価され、日本製鉄は2020年2月、一般社団法人電気学会が選定する第13回「でんきの礎」で、方向性電磁鋼板オリエントコアハイビー®が鉄鋼製品として初めて顕彰されました。「でんきの礎」は社会生活に大きく貢献した電気技術の功績を称えるもので、これまで日本語ワードプロセッサ、新幹線鉄道システム、ウォークマンなどが顕彰されてきました。「10年くらいのスパンで大きなブレイクスルーがありました。今後とも考えもしなかった電磁鋼板が生まれると確信しています。理想に向けて日進月歩で進化させていくことが使命だと考えています。従来の電力系統は大型発電所から川の流れのように高電圧で電気を送り、電圧を低くしながら分電して需要家に届ける「一方通行」が主流でした。これからは太陽光発電や風力発電などの分散型電源が伸び、システムが大きく変化する可能性があります。方向性電磁鋼板に求められる性能も変化していくと思いますが、新たなニーズにも柔軟に対応し、電力システムを支える基盤材料として、これからも省エネルギー社会の実現に貢献していきます」(大畑室長)

※1 磁束密度: 電磁鋼板の特性を表す指標の一つ。磁束密度が高い電磁鋼板は、磁化されやすく一般に良い材料とされます。

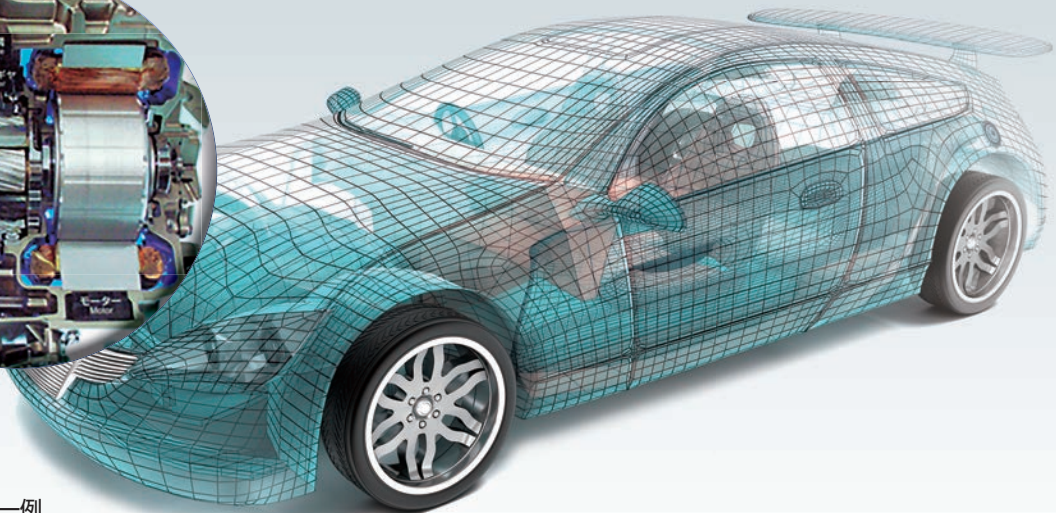
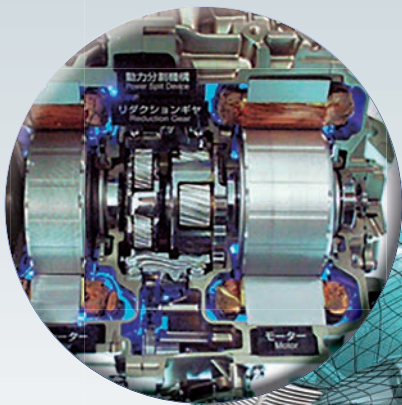
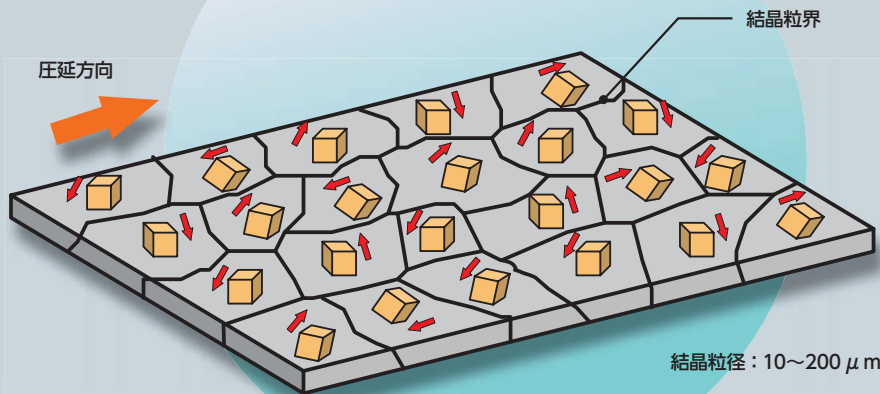
※2 磁区幅: 鉄は小さな磁石(磁気双極子)の集まりです。この小さな磁石の一つ一つは磁区とも呼ばれ、この磁区の幅が磁区幅です。

モーターの
高性能化を支える
最新材料

無方向性 電磁鋼板

無方向性電磁鋼板 ～ さまざまな方向に結晶の向きを制御 ～

回転により磁界の向きが常に変化するモーターの鉄心には、特定の方向に偏った磁気特性を示さないように、鋼板の面内でできるだけランダムに結晶方位をコントロールした無方向性電磁鋼板が使われています。



ハイブリッド車駆動系の一例

無方向性電磁鋼板が電気エネルギーを効率的に運動エネルギー(回転運動)に変換します。

特徴

鉄損

- ・ 鋼板を磁化したときに消費されるエネルギーで、小さいほど良い
- ・ モーターの効率に寄与
- ・ 板厚が薄いほど、低鉄損化(⇔高磁束密度化)

磁束密度

- ・ 鋼板が磁化されたときの単位断面積あたりの磁束の量で、大きいほど良い
- ・ モーターのトルクに寄与
- ・ 板厚が厚いほど、磁束密度が上がる(⇔低鉄損化)

強度

- ・ モーターの高回転速度にも耐え得る強度
- ・ 薄くても強度を担保できれば、軽量化に寄与

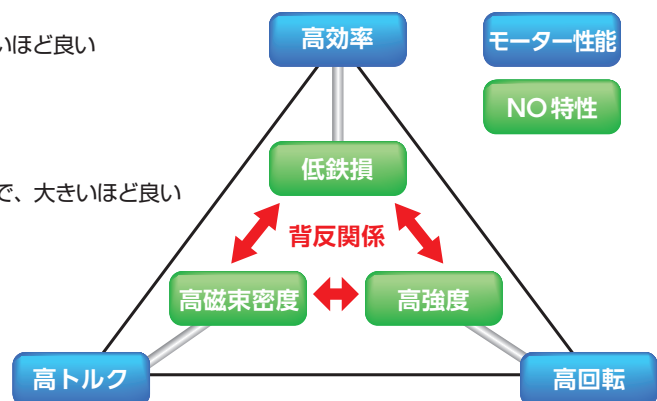


図4 無方向性電磁鋼板の技術課題

ハイブリッド車や電気自動車の駆動モーターには、「高効率」「高トルク」「高回転」が求められます。それらを実現するための素材特性として、「低鉄損」「高磁束密度」「高強度」が求められています。それらは背反関係にあるため、いかにバランス良く成立させるか、これから進めていきます。

背反関係の3特性を 高次元にバランス良く両立

無方向性電磁鋼板は、特定の方向に偏った磁気特性を示さないように、各結晶の方位をできる限りランダムに配置することで、大型発電機から小型精密モーターまで、大小さまざまな回転機の鉄心に用いられています。さらに近年では、地球環境の観点から急速に普及しているハイブリッド車や電気自動車の駆動モーターの鉄心向けにも採用が広がっています。

ハイブリッド車や電気自動車の駆動モーターは、電気エネルギーを磁気エネルギーを介して運動(機械)エネルギーに変換する装置で、ステーター(固定子)とローター(回転子)の2つの部分で構成されています。ステーターは無方向性電磁鋼板の鉄心にコイルを巻いたもので、コイルに電流を流すことで磁界をつくり出します。一方、ローターは無方向性電磁鋼板に永久磁石を埋め込むタイプが主流で、磁界の変化によって回り続けます。モーターは加速時・定速走行時にはローターのシャフトに連結されたタイヤを回して、自動車を動かす動力となります。また減速時には、モーターへ供給する電力を遮断することで電気エネルギーを発生させる発電機の役割を果たし、タイヤの回転を落とすブレーキとなります。

「駆動モーターに要求される特性は高効率、高トルク※3、高回転です。高効率を求める」と無方向性電磁鋼板の低鉄損

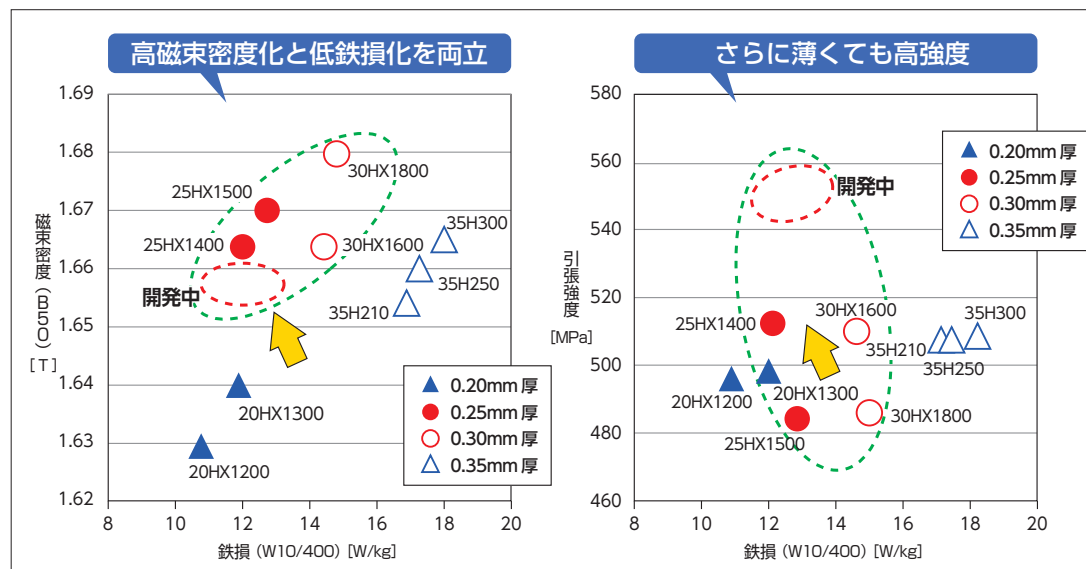


日本製鉄(株) 薄板事業部 電磁鋼板営業部
林 申也 上席主幹

化が欠かせません。鉄損を低くするためにはシリコンなどの添加量を増やすことが有効ですが、磁束密度の低下により、モーターのトルクが低下します。モーターを小型・軽量化しつつトルクを高めるには高磁束密度化が欠かせません。磁束密度を高くするためにはシリコンなどの添加量を減らすことが有効ですが、強度が低下し、モーターの回転数を上げるのが難しくなります。このように全ては背反関係にあります。いかに高いレベルで3つをバランスさせるかが腕の見せ所になります(図4・5)。(電磁鋼板営業部・林上席主幹)

「鉄損を下げるためにシリコンの添加量を増やすと鋼板は硬くなり、圧延しにくくなり生産性が低下します。これを克服するため、操業・設備の技術改善を行っています。また、鉄損が低くなっても磁束密度が低下しないよう、さらなる技術改善が行われています。このように製鉄所における製造技術の改善力を持っているからこそ、お客様の要求に応えられる電磁鋼板を供給できるのです。技術革新に終わりはありません。安定的に競争力ある高い品質の電磁鋼板を生産し続ける技術を、これからも追求していきます」(林上席主幹)

地球温暖化の原因とされるCO₂排出を減らすため、電気機器の省エネやハイブリッド車・電気自動車の普及が加速し、今後も電磁鋼板の利用はますます拡大するものと見込まれています。日本製鉄はモーターや変圧器などの性能を高める電磁鋼板の供給体制を整え、これからも絶え間ない技術革新を通じて、さらなる環境負荷低減への歩みを進めていきます。



※3 トルク：物体を回転する力