

車載モータ用磁石向け工業炉

茂木祥吾*¹

Industrial Furnace for Vehicle Motors' Magnets

Shogo MOTEKI*¹

*¹Industrial Equipment Division, ULVAC, Inc., 2500 Hagisono, Chigasaki, Kanagawa, 253-8543, Japan

Magnets are produced through many processes, such as the alloy production process, hydrogen embrittlement process, sintering process and grain boundary diffusion process. To produce the high performance magnets for the vehicles' motors, ULVAC provides the suitable furnaces for each process. "Magcaster-600" is a melting furnace for the alloy production process to produce magnets with good grinding characteristics. "FHH series" are hydrogen furnaces for the hydrogen embrittlement process without exposure to the air. "FSC series" are inline type heat treatment furnaces for the sintering and aging processes. "Magrise series" are heat treatment furnaces for the grain boundary diffusion process to defuse heavy rare metals into the neodymium. This article introduces the features of the furnaces manufactured by ULVAC to produce the magnets for the vehicles' motors.

1. はじめに

人が自動車を利用するようになってから、現在に至るまで様々な技術が開発されてきた。その技術の発展とともに、自動車の様々な箇所にモータが使用されるようになった。

ハイブリッドカーや電気自動車などは、動力にモータを使用していることから特にモータの占める重要度が高い。

このモータに必要不可欠な部品の一つとして、永久磁石がある。この磁石は、ネオジム (Nd)、鉄 (Fe)、ボロン (B) の合金が主成分でネオジム磁石と一般的に呼ばれており、永久磁石の中では一番強力な磁石とされている。

ネオジム磁石は強力であるが故に、永久磁石を必要とする機器の小型化、薄型化、軽量化を求める際に非常に優秀な磁石であり様々な場所で使用されている。しかし、ネオジム磁石を使用する上で弱点となるのが、高温になると磁石としての力が弱くなるという点である。ネオジム磁石が高温になり磁石としての強さ（磁気特性）が下がることを熱減磁と呼ぶが、これは一般的にネオジム磁石であると、百数十度以上になると発生する可能性がある。

自動車で使用するモータにネオジム磁石を組み込んだ場合、高温下で使用されることになるが、上述の通りそのまま使用すると熱減磁が発生し使用することがで

きない。このような課題を解決するために、車載用モータを製造する工業炉では様々な工夫がされている。

ここで本投稿では、当社で実際にネオジム磁石メーカーに納品した磁石製造用工業炉の特徴の紹介をする。

2. ネオジム磁石の製造工程

Fig.1 に一般的なネオジム磁石の製造工程の中の代表的な工程を抽出した。

当社が製造・販売を行っている炉の担当している工

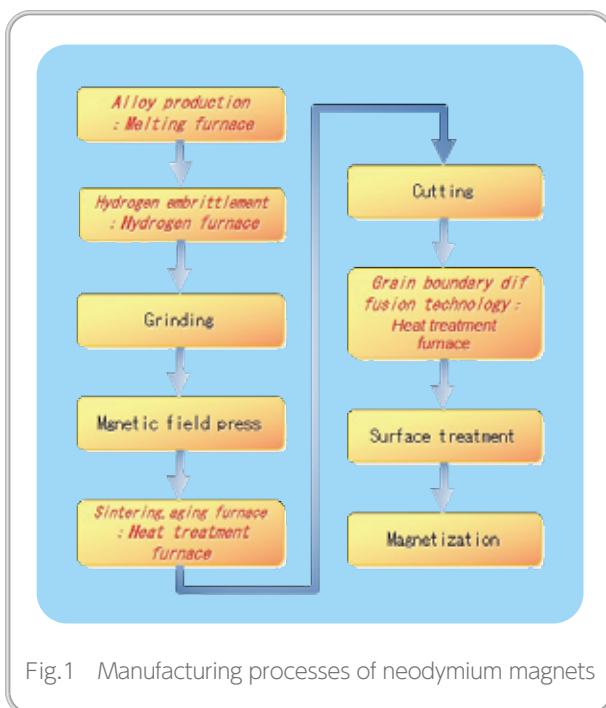


Fig.1 Manufacturing processes of neodymium magnets

*¹(株) アルバック 産業機器事業部(〒253-8543 神奈川県茅ヶ崎市萩園 2500)

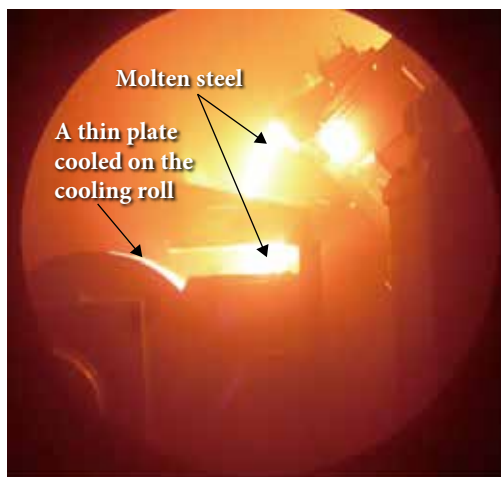


Fig.2 Molten steel and cooling roll in a melting furnace

程は、図中で赤字となっている、「合金製造工程」、「水素脆化工程」、「焼結・時効処理工程」、「粒界拡散工程」である。まずは簡単に各工程の概要を説明する。

2.1 合金製造工程

まずはネオジム磁石となる各材料を任意の重量に調整し、溶解炉の坩堝の中に投入し溶解を行う。材料が全て溶け、所定の温度まで到達したことを確認したのち、水冷銅ロールと呼ばれている内部を冷却水で冷却している銅製の回転体上に溶湯を流す。水冷銅ロールと接触した溶湯は、瞬時に冷却され 300 μ m 程度の薄い帯（以下、薄帯）となって製造される。その後、溶解炉内の付属機構により、薄帯から薄片に破碎される。

2.2 水素脆化工程

上述した合金製造工程で製造された薄片を、水素化処理炉で水素を吸蔵させる。その後、水素吸蔵した薄帯に熱を加え、水素を放出させ薄片を粗粉碎する。これはこの後の工程で微粉碎を行う際、粉碎性を向上させるための処理である。

2.3 粉碎工程

水素脆化工程で製造した粒度分布の悪い粉体をジェットミル等の機械でさらに粉碎し、粒度分布の揃った平均粒径数ミクロンの微粉体にする。この時、材料の表面積が大きくなるので粉碎に時間を要するほど窒化、酸化が起こりやすく、製品の最終特性に影響が出るため、水素脆化処理の条件や粉碎条件を最適化することが非常に重要となってくる。

2.4 磁場プレス工程

粉碎工程により製造された微粉体を金型に入れ、磁場をかけた中でプレス成型する。この工程により、平均粒径数ミクロンの粉体の結晶方向が外部磁場の方向に揃い、異方性配向となり着磁後の磁石としての特性が向上する。

2.5 焼結、時効処理工程

磁場プレス工程で成形した粉体を加熱し焼結することで圧粉体から一つの個体となり、我々が目にする磁石の形となる。その後、時効処理を行い金属組成の調整を行う。

2.6 切削工程

焼結、時効工程で圧粉体から個体に処理したのち、最終製品の形に切削する。

2.7 粒界拡散工程

切削工程で製品の形状に加工した磁石に、ジスプロシウム (Dy)、テルビウム (Tb) などの重希土を使用し、粒界拡散処理を行う。この工程では、磁石の粒界層に重希土を拡散させることによって、ネオジム磁石の耐熱性（ $\equiv$ 保磁力）を向上させる工程となる。

2.8 表面処理

ネオジム磁石は反応しやすいため、表面処理を行わないと錆びやすい。そのため、鍍金処理等を行うことが一般的になっている。

2.9 着磁処理

着磁処理を行う前の時点では、磁力はほとんどない。着磁と呼ばれる、ネオジム磁石素材を強い磁界の中に置いて処理する工程を経ると、初めてネオジム磁石としての磁力を持つこととなる。



Fig.3 Standard table of the neodymium magnet

ネオジム磁石の規格表を Fig.3 に示した。また当社の炉を使用し、実際に製造されている磁石規格帯を赤丸点線で示した。磁束密度と保磁力の両方を備えた規格を製造している。

3. ネオジム磁石製造における 当社の炉とその特徴

3.1 「Magcaster-600」(合金製造工程)

3.1.1 「Magcaster-600」の特徴

ネオジム磁石合金製造用溶解炉として、当社より「Magcaster-600」を 2013 年度に開発した。ネオジム磁石用の合金を製造する場合、水冷ロールを使用することが一般的だが、水冷ロールは毎バッチ表面を研磨する作業があり、また水冷ロールに溶湯を注ぐためのタンディッシュと呼ばれる部品の清掃が必要となっている。本溶解炉の前身である「FMI-II-500R」では、溶解後、毎バッチ炉内を冷却し溶解室の大気開放を行う。その後、溶解室に設置されている水冷ロールとタンディッシュのメンテナンスを行い、次バッチの溶解を行っていたため効率的に生産が行えなかった。これを受け「Magcaster-600」では、ロードロック室を設け、水冷ロールとタンディッシュをロードロック室に移動可能な構造とした。これにより溶解室では、炉内冷却、大気開放を行わず次バッチのための真空排気を実施するのと並行して、ロードロック室を使用し水冷ロールとタンディッシュのメンテナンスが可能となった。この改善により、年間の合金製造量が、約 1300 t から、約 2000t まで向上した。



Fig.4 ULVAC melting furnace "Magcaster-600"

「Magcaster-600」は数種類の金属を混ぜて溶解し、水冷ロールにより冷やされ薄帯となった後にもプロセスがある。そのうちのひとつとして、薄帯個々の熱履歴の統一がある。これは薄帯となって回収容器に回収されたとき、約 700 度の温度になっているが、薄帯内の一部の組成は完全に凝固はしていない。この凝固していない状態の時間をコントロールすることで薄帯内の組成が変化することが知られており、その組成次第で磁石性能や歩留まりの良し悪しが左右される一つの要因となっている。

これを受け、「Magcaster-600」では水冷ドラム機構が追加されている。この機構は、ミキサー車のような内部構造になっており、約 700 度まで冷却された薄帯を水冷ドラム機構に投入すると、水冷ドラムが回転することにより薄帯を攪拌しながら冷却する。従来の冷却方法として、水冷された回収容器にて回収、冷却する方法がある。この方式だと、冷却面に接している薄帯は冷却速度が速く、それ以外の箇所では冷却速度が遅く冷却速度が不均一であったが、水冷ドラム機構を導入することで、薄帯が均一に冷却されやすくなり、薄帯個々の熱履歴のばらつきを抑えることが可能となった。

3.1.2 薄帯冷却方法の違いによる薄帯組織の変化

ネオジム磁石用薄帯の組成は、大きく分けて 2 種類ある。主相($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)と呼ばれる鉄が主成分の組成と、Nd リッチ相と呼ばれるネオジムが主成分の組成が存在する。

この主相と Nd リッチ相は、水冷ロール離脱後の時

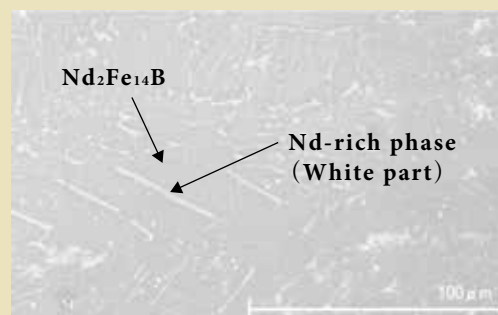


Fig.5 SEM image of slowly cooled strip cast

点である程度の組成の配置が決まる。しかし離脱した時点で Nd リッチ相は完全に凝固はしておらず、この Nd リッチ相が凝固しきっていない時間を水冷ドラム等の機構を用い、統一、コントロールすると、その時間に応じた主相と Nd リッチ相の組成配置を得ることが分かっている。

ここに水冷ロール離脱後の冷却時間が異なる、3種類の薄帯の反射電子線像写真を Fig. 5, 6, 7 に示す。

Fig.5 に示す組成配置は水冷ロール離脱後、徐冷を行ったときに見られる組成配置である。Nd リッチ相が丸みを帯び粒状に切れた状態になっている。

Fig.6 に示す組成配置は、水冷ロール離脱後、急冷したときに見られる組成配置である。一つ一つの Nd リッチ相がシャープで、枝状に分かれているのが特徴的な組成配置となっている。

Fig.7 に示す組成配置は水冷ロール離脱後、離脱した温度前後を保持し、その後急冷した薄帯の組成配置となる。この組成配置は急冷の時の薄帯組成と、徐冷の時の薄帯組成の間にあるような組成配置となっている。これは薄帯が水冷ロール離脱後、主相は凝固するが、Nd リッチ相は凝固しておらず、その状態を維持することで Nd リッチ相の体積が減少し濃度が増加するためである。

これらの薄帯は溶解炉の冷却プロセスが異なることにより組成配置が変わることで、その後の工程に与える影響も異なる。現在、高性能のネオジム磁石を製造する上で求められているのは、Fig.7 にあるような組

成配置である。これは Nd リッチ相の Nd 濃度が高くなることで、その後の水素脆化工程で薄帯に吸蔵できる水素の量が増加する。吸蔵できる水素量が増えることにより薄帯の脆化が進み、結果として粉碎性が向上する。粉碎性が向上すると、数 μm に粉碎された粉体の粒径が揃いやすくなる。これはその後の焼結処理工程の時、焼きしまりが起これ磁石の体積が減少するが、その減少するばらつきが少なくなるので切削工程での歩留まりが良くなる。また、粉碎性が向上することで、粉碎処理にかかる時間が短くなる。粉碎を行うことで数百 μm の厚さの薄帯が、数 μm の粉体になり、表面積が爆発的に大きくなる。その際に、ジェットミルの中に存在している酸素や窒素と反応すると保磁力を下げる原因となってしまうが、粉碎性が向上すると、同程度の粒径を得ようとしたときジェットミルにかかる時間が少なくなるので、酸素や窒素と反応する割合が少なくなり、製品となった際のネオジム磁石の保磁力が向上する。

3.2 水素処理用「FHH シリーズ」(水素脆化工程)

3.2.1 水素処理用「FHH シリーズ」の特徴

当社ではネオジム磁石用薄帯の水素脆化を目的とした水素処理用「FHH シリーズ」を製造している。この装置は上述した「Magcaster-600」で製造した薄片を、水素処理することにより脆化させることを目的としており、その後の工程の粉碎工程における粉碎性の良し悪しを左右する重要な工程となる。

この「FHH シリーズ」で特徴的な機能の一つが、被処理物を水素処理室へ搬送する際、炉外大気側と水素

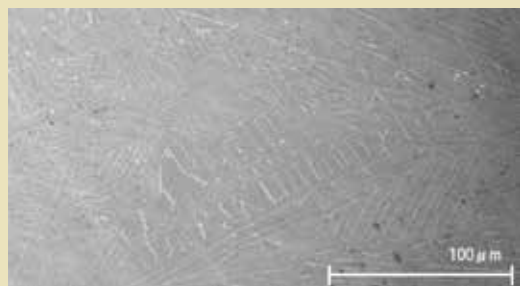


Fig.6 SEM image of rapidly cooled strip cast

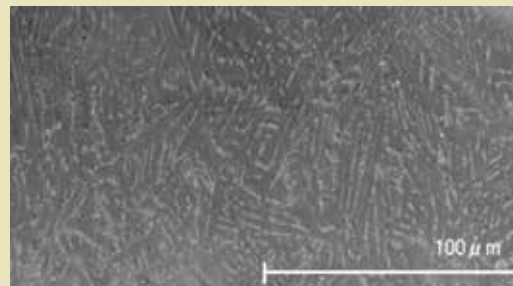


Fig.7 SEM image of ideal strip cast in the future



Fig.8 ULVAC hydrogen furnace " FHH series"

処理室を仕切る挿入扉のパッキンと、そのパッキン溝の間を加圧密閉することで、水素を 290kPa・abs まで加圧が可能な構造となっていることである。水素加圧された空間で薄帯を処理すると、加圧していない空間で薄帯を処理した時と比べ、水素の吸蔵率が向上し粉碎性が向上する。これは上述した通り、その後の工程の効率が上がり、歩留まりが向上し、ネオジム磁石の保磁力の向上につながる。

さらにプロセス上の重要な特徴の一つとして、水素処理用「FHH シリーズ」では、水素脆化から製品の回収まで、大気雰囲気に触れさせず実施できる点があげられる。

本装置は被処理物に対し、水素処理、加熱脱水素処理、冷却処理、回収処理の一連の動作を大気に触れさせず行える炉である。これにより、酸化による保磁力低下を低減できる装置となっている。

水素処理用「FHH シリーズ」のもう一つの特徴が、安全性である。水素脆化工程で使用する装置は、必ず水素を使用することとなる。水素を使用するということは常に爆発の危険性が存在する。これを受け、当社の水素処理用「FHH シリーズ」ではいくつかの安全性向上の機能が装備されている。

安全性向上機能の一つが、自動リークチェック機能である。被処理物を水素処理室に搬送し、挿入扉を開めた後、Ar ガスを加圧導入し漏れチェックを行う。その後、真空排気を行った後も減圧側で圧力上昇チェックを行い、水素漏れに対しダブルチェックを実施する。

次の安全性向上機能が、挿入扉の二重パッキンである。水素処理室に被処理物を搬送する挿入扉の外側は大気雰囲気となっている。そのため挿入扉のパッキンの劣化や、異物の挟み込み等の原因でリークを起こすと爆発の危険性がある。そこで通常のパッキンに加え、その外側にもう一重のパッキンを設け、二重パッキン構造となっている。またパッキンとパッキンの間に Ar ガス加圧を行うことで大気側からの酸素混入のリスクを低減させている。

さらに、万が一水素リークが発生し大気側に水素が漏れた場合も、挿入扉の上部に水素捕集用フードが設けられており、水素を検知し安全動作を行う制御システムも標準的に付属している。

3.3 「FSC シリーズ」(焼結処理工程)

3.3.1 焼結処理用「FSC シリーズ」の特徴

当社ではネオジム磁石用圧粉体の焼結を目的とした、焼結処理用「FSC シリーズ」を製造している。この装置の特徴は、バッチ炉と比べた時、装置の個体差が出ないという点があげられる。「FSC シリーズ」は連続炉であるが、この装置一台と同等の生産量をバッチ炉で補おうとすると複数台必要となる。その場合、バッチ炉は同じ図面で製造された装置であっても装置の個体差は必ず存在するため、安定した品質の磁石を製造するという面では連続炉の「FSC シリーズ」の方が非常に優位的である。

また、焼結用熱処理炉は、脱バインダ、脱ガス、焼結、冷却室の処理項目ごとに部屋が分かれているので、バッチ炉と比べバインダ材等による汚染が他の部屋に及ぶ割合が非常に少なく、消耗品の交換頻度が少ないという特徴を持つ。

3.3.2 焼結処理用「FSC シリーズ」の今後

ネオジム磁石を焼結する上で、狙いの均熱温度から実際の物温の差分がいかにかに小さいか、また、被処理物を加熱した時、個々の熱履歴の差をいかにかに小さくできるかが重要である。これらの課題を解決するべく、当社では均熱性と熱履歴の差を小さくするために、新型焼結炉の開発に取り組んでいる。

3.4 粒界拡散処理「Magrise シリーズ」に関して

通常、車載用に使用される磁石には耐熱性が求められる。

耐熱性の低い磁石は磁石の温度が上がった際、磁石としての強さの指標である磁束密度が低くなることが知られている。それを解決するのに生まれた手法が、ジスプロシウム (Dy) やテルビウム (Tb) を使用し



て保磁力を改善する方法である。この方法は合金製造時にジスプロシウム（Dy）やテルビウム（Tb）などの重希土を溶解材料に混ぜ薄帯を製造し、その後、水素脆化、粉碎の工程を経て磁石を製造する一合金法という製法が存在する。しかしこの製法を用いた磁石は、耐熱性が向上する代わりに磁束密度が低下する課題を残していた。この課題を解決するために、重希土を必要とする結晶表面に効率よく重希土を配置する二合金法と呼ばれる製法が発明された。そして現在では、二合金法よりさらに効率よく結晶表面に重希土を配置する、粒界拡散法という製法が知られている。この製法は、ネオジム磁石の他に重希土を用意し、両者を加熱することでネオジム磁石の粒界層に重希土を拡散させる手法である。粒界拡散法で処理した磁石は、上記の方法と同様に保磁力を向上させながらも、磁束密度の低下を低減させることができるというメリットがある。

当社ではこの粒界拡散処理を行うために「Magrise シリーズ」を製造している。本装置では、ネオジム磁石とジスプロシウム等の重希土を専用の容器に入れ加熱する。熱を加え、重希土を蒸発させることによって、ネオジム磁石の粒界層に拡散処理を行う装置である。

4. おわりに

今回は、当社がかかわる車載モータ用磁石向け工業炉とその特徴を紹介した。より高性能な磁石が求められるとともに、それを製造する炉も新しい機能を求められている。今後も市場に合った装置を提供し、磁石製造に貢献していきたいと考える。

文献

- 1) 宇根康裕ほか：日本金属学会誌, 76, 15(2012)