
珪素鋼用回転焼鈍炉

Rotary Furnace for Silicon Steel

前山 公夫(Kimio Maeyama) 関谷 武一(Takekazu Sekiya) 出本 晃文(Akifumi Izumoto) 上田 修(Osamu Ueda)

要旨：

方向性珪素鋼帯の製造における最終焼鈍工程での省エネルギー、生産性の向上、品質の安定化を目的として、従来のバッチ型焼鈍炉にかわり、回転炉床式連続焼鈍炉を開発した。約 1200℃という苛酷な温度条件下で、かつ炉内を 100%水素雰囲気とする焼鈍工程の連続炉化は、過去に直線型の例はあるが、本炉はマッフルを用い、炉内を酸化雰囲気としてマッフルからの漏洩 H₂ ガスを燃焼、ないし希釈する方法で処理する新型炉である。昭和 54 年 10 月稼働以来、安定操業を続けており、本炉の完成により省エネ 20%、焼鈍サイクル短縮 30%、電磁特性のバラツキ減少等の効果を挙げた。

Synopsis：

A new type of coil annealing furnace for silicon steel products started operation in October 1979 at Hanshin Works of Kawasaki Steel Corp. It helps save both time and money substantially and contributes significantly to quality improvement. This furnace is a rotary furnace equipped with muffles. The annealing temperature is 1200℃ and a pure hydrogen gas is used to get a good glass film and purification. Hydrogen gas which has leaked from the muffles into the heating zone is burned in the furnace with excess air, and the hydrogen gas which has leaked from the muffles into the cooling zone is diluted with air and made incombustible. The new-type furnace saves 20% energy compared with the conventional batch type furnace and also shortens the cycle time by 30%. Coil annealing is a critically important process in the manufacture of grain-oriented silicon steels. By using this new equipment, the production system and operation technology have been successfully established for producing silicon steels with high productivity at low cost.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

前山 公夫*2 関谷 武一*3 出本 晃文*4 上田 修*5

Rotary Furnace for Silicon Steel

Kimio Maeyama, Takekazu Sekiya, Akifumi Izumoto, Osamu Ueda

要旨

方向性珪素鋼帯の製造における最終焼鈍工程での省エネルギー、生産性の向上、品質の安定化を目的として、従来のバッチ型焼鈍炉にかわり、回転炉床式連続焼鈍炉を開発した。約1200°Cという過酷な温度条件下で、かつ炉内を100%水素雰囲気とする焼鈍工程の連続炉化は、過去に直線型の例はあるが、本炉はマッフルを用い、炉内を酸化雰囲気としてマッフルからの漏洩H₂ガスを燃焼、ないし希釈する方法で処理する新型炉である。

昭和54年10月稼動以来、安定操業を続けており、本炉の完成により省エネ20%、焼鈍サイクル短縮30%、電磁特性のバラツキ減少等の効果を挙げた。

Synopsis:

A new type of coil annealing furnace for silicon steel products started operation in October 1979 at Hanshin Works of Kawasaki Steel Corp. It helps save both time and money substantially and contributes significantly to quality improvement. This furnace is a rotary furnace equipped with muffle. The annealing temperature is 1200°C and a pure hydrogen gas is used to get a good glass film and purification. Hydrogen gas which has leaked from the muffle into the heating zone is burned in the furnace with excess air, and the hydrogen gas which has leaked from the muffle into the cooling zone is diluted with air and made incombustible. The new-type furnace saves 20% energy compared with the conventional batch type furnace and also shortens the cycle time by 30%. Coil annealing is a critically important process in the manufacture of grain-oriented silicon steels. By using this new equipment, the production system and operation technology have been successfully established for producing silicon steels with high productivity at low cost.

1. 緒 言

変圧器、発電機などの鉄芯材料として用いられる方向性珪素鋼帯の製造において、コイル焼鈍を行う最終焼鈍工程は、一連の製造工程の中で重要な工程の一つであり、その目的は次のとおりである。

- (1) ゴス方位集積のすぐれた二次結晶組織の形成。
- (2) 密着性の良いガラス被膜 (2 MgO, SiO₂) の形成。
- (3) 鋼帯中の不純物の除去。

以上の目的を達成するためには雰囲気ガス (H₂, N₂) を用いた高温焼鈍 (1150°C 以上) が必要であり、これらの厳密な管理が要求される。

従来、この工程は焼鈍サイクルが長時間であることからバッチ型焼鈍炉によるコイル焼鈍方法を採用してきたが、この方法ではコイル、マッフルおよび炉体の脱着、移送、昇温、雰囲気ガスの切替などに多くのハンドリングと複雑な操作が必要であった。そのために多くの人手を要し、焼鈍時の操業管理 (焼鈍パターン、雰囲気ガス供給などの管理) が複雑で、品質のバラツキも大きかった。また加熱、冷却の繰返しにより蓄熱損失が多く、焼鈍コストが高いという欠点があった。このようなバッチ焼鈍工程の欠点を解消するため、当社では初めて連続炉による操業を開始した。その効果を要約すれば以下のとおりである。

- (1) 蓄熱損失ならびに放散熱の減少。
- (2) 温度管理ならびに雰囲気ガス管理の自動化による品質の安

定。

- (3) 連続化、自動化による省力。
- (4) 焼鈍サイクルの短縮 (冷却時間の短縮) による生産性の向上。
- (5) 作業環境の改善。

約10年の開発期間を要し、1979年10月稼動以来、順調な操業を続けている。本炉は川鉄式の珪素鋼用回転焼鈍炉という意味で、Kawasaki Silicon Steel Rotary Furnace (略称 KSR 炉) と呼んでいる。

2. KSR 炉の設備仕様

2.1 主仕様

KSR 炉の主仕様を以下に示す。

処理材料 : 方向性珪素鋼帯
 コイル諸元 : 板厚 : 0.2~0.35 mm
 板幅 : 600~1200 mm
 内径 : 510 mm
 外径 : 2000 mm max.
 重量 : 10~20 t
 炉内温度 : 最高 : 1200°C
 雰囲気ガス : H₂, N₂
 処理能力 : 2000~4000 t/月

*1 昭和58年8月3日原稿受付

*2 阪神製造所企画部企画開発室主任 (課長)

*3 阪神製造所製造部製造技術室主任 (課長)

*4 阪神製造所製造部製造技術室主任 (掛長)

*5 阪神製造所企画部企画開発室

2・2 設備構成

KSR 炉の設備以様を Table 1、全体概要図を Fig. 1、加熱帯、冷却帯各部の断面図を Fig. 2～5、全景を Photo. 1 に示す。

3. KSR 炉の特徴

KSR 炉の開発にあたっての基本的な考え方、方式決定の理由、具体的な方策について以下に列挙する。

3・1 炉型式

100 m に満たない建家が隣接している場所に建設するというスペース上の制約の中で、炉長を長くとり生産能力の大きな炉を造ることが必要であったため、直線で折り返す炉型との比較で構造的に容易な円形回転炉床型とした。

3・2 H_2 ガス爆発対策

マッフルを用いた焼鈍において、マッフル内へ供給した雰囲気

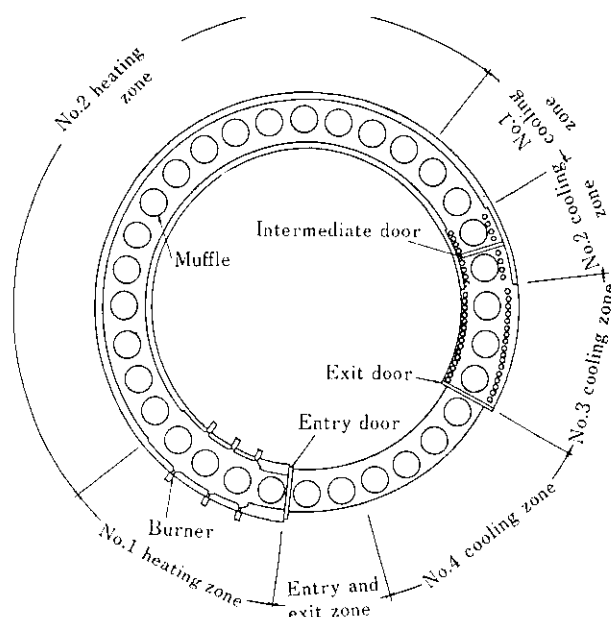


Fig.1 Schematic drawing of KSR furnace

Table 1 Specification of KSR furnace

Equipment	Type of heating or cooling	Capacity	Furnace length	Insulator
No. 1 heating zone	Kerosene direct burner	750 000 kcal/h	4 stacks	Brick
No. 2 heating zone	Electric heater	175 kW/stack	15 stacks	Ceramic fiber
No. 1 cooling zone	Furnace cooling	—	2 stacks	Ceramic fiber
No. 2 cooling zone	Air cooling tube	3 000 m ³ /h (blower)	2 stacks	Ceramic fiber
No. 3 cooling zone	Water cooling tube	60 m ³ /h	3 stacks	Ceramic fiber
No. 4 cooling zone	Top edge cooling fan	200 m ³ /min·stack	4 stacks	—
Entry and exit zone	Top edge cooling fan	200 m ³ /min·stack	2 stacks	—

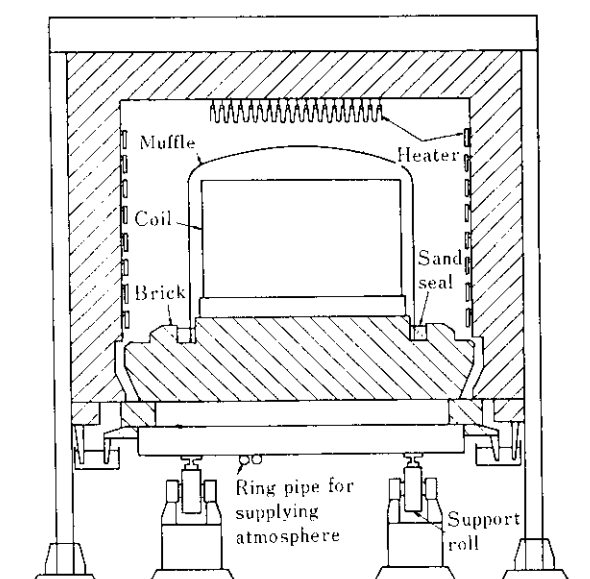


Fig.2 Sectional view of No.2 heating zone of KSR furnace

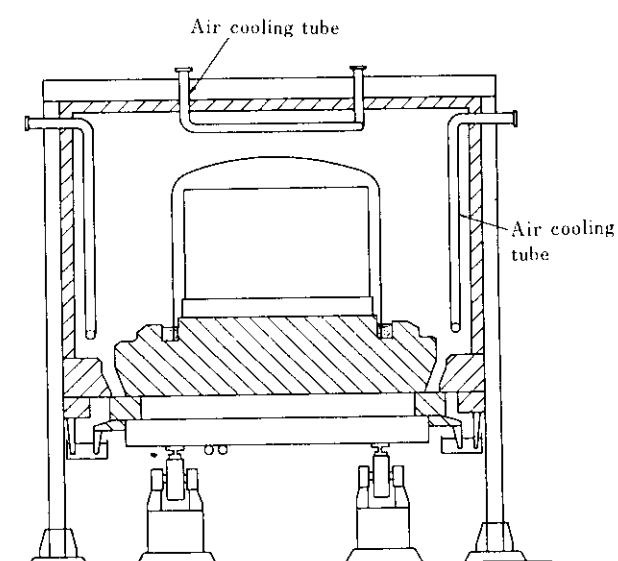


Fig.3 Sectional view of No.2 cooling zone of KSR furnace

気ガスはマッフルのスカート部から漏洩し炉内に充満する。珪素鋼帯製造における本焼鈍工程では、 H_2 : 100%の雰囲気を使用するため、焼鈍中に空気が炉内に浸入した場合あるいはコイルの装入、抽出時に、 H_2 ガスと外気が急激に反応することがあ

り、爆発の危険がある。バッチ炉においてはこの危険を避けるため、コイル装入後、加熱始めに N_2 ガスでマッフル内と、炉内の空気をバージし、昇温途中から H_2 ガスに切替を行う。冷却過程に入りかつ、ある温度に到達した時点で炉内 H_2 ガスを N_2 で

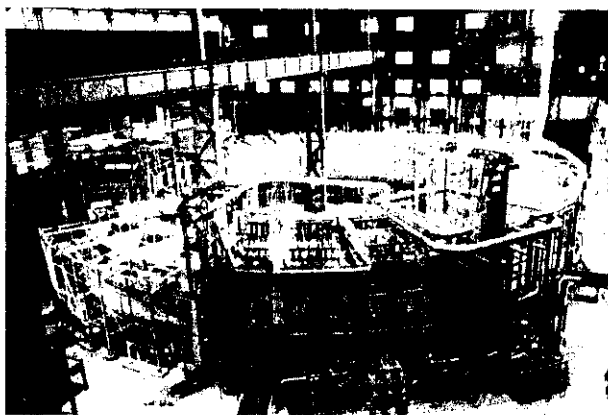


Photo. 1 General view of KSR furnace

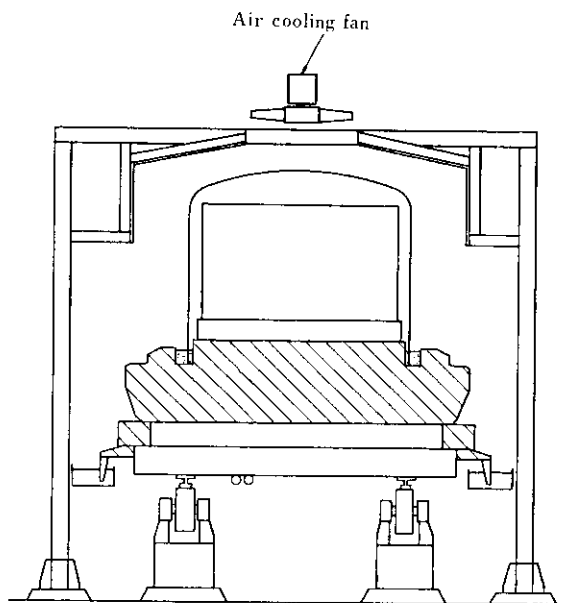


Fig. 4 Sectional view of No.4 cooling zone of KSR furnace

ページし、その後コイルを抽出する方法をとっている。一例としてトンネル炉¹⁾においては、連続炉入口、出口に前室を設け、コイル装入、抽出時まず前室内を N_2 でページし、その後コイルの装入、抽出を行う方法で対処しているものもある。また炉内への空気侵入を防止するため炉構造は完全なガスタイト構造とする必要があり、電源、熱電対、雰囲気ガス供給管等、炉外から炉内へ貫通して設置される装置のガスシールについては特に注意を要し、シール構造も複雑であり、保守にも手間を要する。

このような炉構造の複雑さを避けることが本炉開発の課題の一つであった。各種の検討、実験の結果炉内が高温である加熱帯においては炉内へ強制的に空気を送り込むことにより、マッフルのスカート部から漏洩する H_2 ガスを速やかにマッフルのスカート部で燃焼させてしまう方法と、炉内が低温である冷却帯では多量の空気を送り込むことにより、 H_2 ガス濃度を爆発限界以下に希釈してしまうという方法を採用した。いずれの場合も炉内は安定した酸化雰囲気となり炉内への空気侵入を防止する必要性がなくなり、炉構造がきわめて簡単なものとなった。この点が他の例¹⁾にみる連続炉と全く異った点である。ただし、

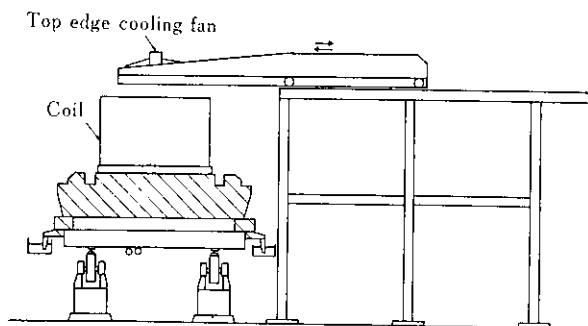


Fig. 5 Entry and exit zone of KSR furnace

炉内にある金属類（マッフル・ヒータなど）は従来と異なり、酸化雰囲気中で高温にさらされることを考慮する必要が生じた。今回、マッフルには SUS 310 等の耐熱ステンレス鋼、ヒータには Fe-Cr-Al 系抵抗発熱帯を用いている。

3.3 断熱材とヒータ支持方法

炉体の軽量化を図り、補修を容易にするため炉構部（側壁、天井部）の断熱材としてセラミックファイバを使用した。ただし炉入口に接する第一加熱帯の炉構は灯油バーナを使用したため、バーナフレームの流速によるファイバの損傷を考慮してレンガ積構造とした。炉床はコイルを支持する必要性から従来通りレンガ積とした。

断熱材に、セラミックファイバを使用した部分の熱源は電熱ヒータを用いたため、ヒータをいかに保持するかも重要な研究課題であった。セラミックファイバ自身はヒータを支持するだけの剛性を全く有しないため、ヒータの支持金具は炉殻で保持する必要がある。この際、支持金具の熱伝導により炉殻鉄皮温度が上昇し、放射熱が増大することを防止する必要がある。また、漏電の防止も併せて必要である。その対策として炉内露出部（ヒータ支持部）はセラミックとし、強度メンバとなる金属性ピンは断熱材中に収め、炉殻へ固定するピンを集約する構造とした。

3.4 雰囲気ガス供給装置

間欠的に回転動作を行う炉床上の各マッフルへ、雰囲気ガスを連続的に供給するため、Fig. 6 に示すような雰囲気ガス供給装置を開発した。本装置は、一種類のガスに対して固定式、移動式の 2 式の供給装置により構成され、1 サイクルの動作を示すと次のようになる。

- (1) 炉床が停止中は、ガスは固定側から回転炉床下の共通配管へ供給され、各マッフルへ配分される。
- (2) 炉床が 1 ピッチ回転移動する場合は、起動前に移動側の接管装置のカプラを装着しその後固定側を脱着する。したがってガスは、移動側から共通配管へガスが供給される。
- (3) 1 ピッチ移動完了後固定側を装着し、その後移動側を脱着しオスカップリングのみ待機位置へ戻る。

炉床下の共通配管に設置されているメスカップリングはマッフルピッチと同ピッチ（等間隔）に配置され、固定側のオスカップリングと移動側のオスカップリングの待機位置のピッチをそれに一致させている。

なお、焼鈍中に使用するガスは複数あり、それぞれガス供給装置が設置されている。各マッフルに対するガスは、ストップ

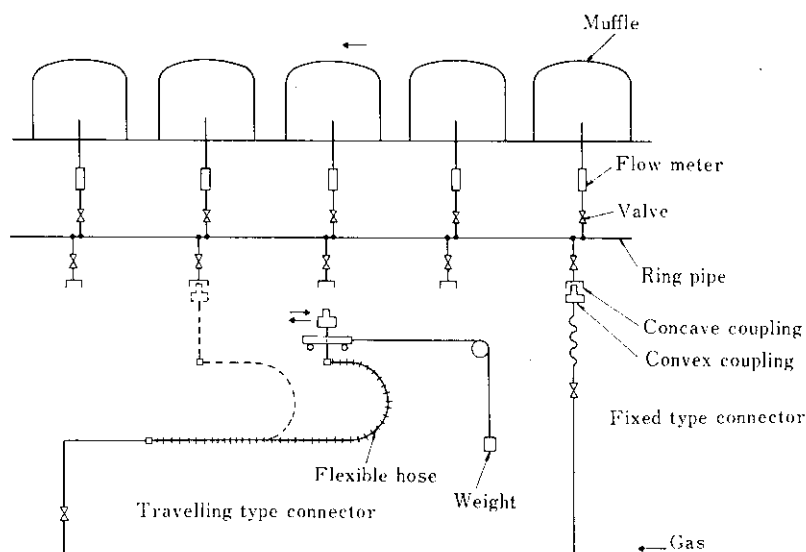


Fig. 6 Atmospheric gas supplying system of KSR furnace

バルブの開閉により選択する。

4. 操業実績

従来著者らの使用していたバッチ炉と比較しながら KSR 炉の設置効果述べる。

4.1 省エネルギー効果

連続化による炉構部の蓄熱損失の解消、灯油焚バーナの排熱回収、断熱の強化、コイルの大型化等によりエネルギー原単位は、従来方法の約80%になった。

4.2 品質の安定化

従来炉の手動による操業では、温度、ガス流量などの変動があり、品質特性が安定しない面があった。今回、機械化、自動化により作業が標準化され、安定した製品が得られるようになった。電磁特性のバラツキの改善例を Fig. 7 に示す。

4.3 省力効果

連続化、自動化によって設備集約がなされ、40基のバッチ炉を廃止することになり、8人の省力となった。

4.4 生産性の向上

加熱時間、均熱時間は電磁特性を得るうえで固定の条件となっているため短縮は不可能である。したがって冷却時間の短縮で生産性の向上を図った。

最高温度が1200℃まで到達するバッチ炉においては、冷却装置（例えば冷却ファン、水冷パイプ、空冷パイプ等）を加熱中に高温にさらすことは不可能に近く、冷却は炉冷していた。したがって、加熱時の放散熱を小さくしようとすれば冷却を早めることはできなかった。

KSR 炉においては、加熱装置、冷却装置は別装置であるから冷却速度が自由に制御可能となり、大幅に冷却時間を短縮することができた。その結果、冷却所要時間は従来の約50%となり

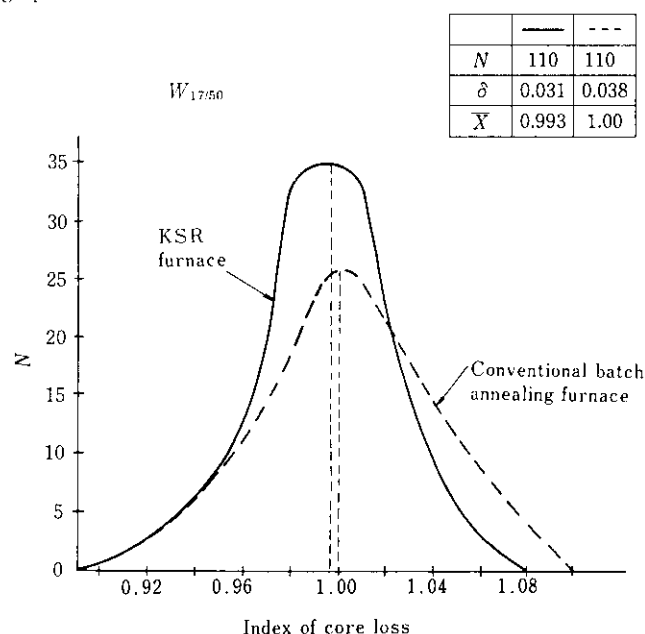


Fig. 7 Magnetic properties of grain oriented silicon steel (Thickness 0.35 mm)

全体の焼鈍サイクルは約70%に短縮できた。

4.5 その他の効果

設備が集約され、場内のスペースを有効に活用でき工程管理が容易になった。

また、炉からの排ガスを集中排気することにより、作業環境を大幅に改善した。

5. 結 言

方向性珪素鋼帯の製造工程における最終焼鈍工程をバッチ炉による操業から連続炉による操業に改善し、

- (1) 省エネルギー 20%
- (2) 焼鈍サイクルの短縮 30%
- (3) 省力 8名

の結果を得た。

この連続炉は

- (1) 100% H_2 雰囲気を用いる焼鈍でありながら、炉内を酸化雰囲気とする方法で安全性が確保できること。したがってガスタイトの必要がないこと。
- (2) 炉床の移動中にもマッフル内に連続的に雰囲気ガスが供給できること。
- (3) 円形炉とし、コイルの装入・抽出作業を同一場所で行う

こと。

という特長を有している。

現在、KSR-1号炉の操業実績をふまえ、さらに大型で経済的なKSR-2号炉を建設中である。

終わりに、KSR炉の開発にあたり、研究段階から多大の御協力をいただいた中外炉工業(株)並びに関係各位に対して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) アレゲニー社：アメリカ特許No.3 606 288, 3 756 868