
バッチ式焼鈍炉の加熱完了予測システム

Cold Spot Temperature Control System in Batch Annealing Furnace

梅本 純生(Sumio Umemoto) 岩崎 利雄(Toshio Iwasaki) 上野 宏昭(Hiroaki Ueno)
貝原 利一(Toshikazu Kaihara) 白石 典久(Norihisa Shiraishi) 藤井 慎吾(Shingo Fujii)

要旨：

焼鈍における省エネルギー，生産能率の向上，ならびに品質の安定化をめざし，従来不明確であった各段コイルの最冷点温度を正確に推定計算し，それらすべてが材質的に必要とされる目標温度に到達した時点で加熱を終了するという合理的な焼鈍炉制御システム（加熱完了予測システムと称する）を開発した。同システムは，55年の5月にオンライン化されて以降順調に稼動しており，現在までに10%を越える省エネルギー効果と15%の生産効率向上を達成している。

Synopsis：

A cold spot temperature control system for the batch annealing furnace has been established in order to reduce energy consumption, to improve productivity and to stabilize the properties of products. This system is called the "Coil Annealing Prediction System (CAPS)." Through the use of the exact heat transfer model, the CAPS can predict the necessary lowest temperature of each coil in the furnace for producing the coil having the suitable mechanical properties, and stop heating the coils, when the temperature of the coldest point reaches the predicted value. Since its practical use in May 1980, CAPS has been operating smoothly and achieved more than 10% energy cost saving.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

バッチ式焼鈍炉の加熱完了予測システム

Cold Spot Temperature Control System in Batch Annealing Furnace

梅 本 純 生*

Sumio Umemoto

岩 崎 利 雄**

Toshio Iwasaki

上 野 宏 昭***

Hiroaki Ueno

貝 原 利 一****

Toshikazu Kaihara

白 石 典 久*****

Norihisa Shiraishi

藤 井 慎 吾*****

Shingo Fujii

Synopsis:

A cold spot temperature control system for the batch annealing furnace has been established in order to reduce energy consumption, to improve productivity and to stabilize the properties of products. This system is called the "Coil Annealing Prediction System (CAPS)." Through the use of the exact heat transfer model, the CAPS can predict the necessary lowest temperature of each coil in the furnace for producing the coil having the suitable mechanical properties, and stop heating the coils, when the temperature of the coldest point reaches the predicted value.

Since its practical use in May 1980, CAPS has been operating smoothly and achieved more than 10% energy cost saving.

1. 緒 言

近年、鉄鋼業における省エネルギーは、種々の分野で進められている。冷延鋼板製造工程においても焼鈍ラインで消費されるエネルギーは全体の約50%を占め、焼鈍原単位（燃料、電力、雰囲気ガス）削減は冷延工場全体の中でも重要な課題の一つである。

そのため、熱伝達のよいコンベクタープレートの導入、レキュペレータの設置など数多くの省エネルギー対策がとられてきた。もちろん、焼鈍原単位低減のためには焼鈍時間の短縮が最も有効ではあるが、焼鈍工程では、圧延によって歪んだ組

織を再結晶させ、十分な加工性をもった材質を確保するという重要な役割を有しており、むやみに加熱時間を短縮することはできない。

その原因は、焼鈍中のコイルの内部温度を実測することができなかったことに起因している。今回、当社で開発した加熱完了予測システム^{1,2)}は、伝熱シミュレーションモデル³⁾をもとに開発した加熱完了予測式により、各段コイルの最冷点（コイル半径方向 1/3 内側付近）温度を正確に推定計算し、これらが材質的に必要とされる目標温度に到達した時点で加熱を終了するという合理的な焼鈍炉制御システムである。本報では、加熱完了予測の基礎となった伝熱シミュレーションモデル、加熱完了予測モデル、および実炉操業適用後の効

* 水島製鉄所薄板圧延部部長
*** 水島製鉄所管理部薄板管理室主査（課長補）
***** 水島製鉄所動力部動力技術室主査（掛長）
〔昭和57年6月9日原稿受付〕

** 水島製鉄所薄板圧延部冷間圧延課課長
**** 水島製鉄所薄板圧延部冷間圧延課掛長
***** 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室

果等について報告する。

2. 焼鈍炉概要

冷延鋼板の焼鈍方法⁴⁾の一つである、バッチ式タイトコイル焼鈍炉では、Fig. 1に示すように、コイルへの伝熱は主としてコイル間に配列されたコンベクタープレート内を流れる雰囲気ガスからの対流伝熱によるところが大きい。ところが、コイル積合わせによりこれら各段コイルまわりの雰囲気ガス温度や流速を均一にすることは不可能に近く、各段コイルを一様に加熱、冷却することは困難である。また、焼鈍炉内の現象を知る温度センサーは、通常、最下段コイルのエッジ温度（ベース温度と称する）とアウターカバー内の燃焼ガス温度（ベル温度と称する）のみであり、これらのみから各段のコイル温度を精度よく推定することはきわめて困難である。そのため、実炉の制御においては、均熱温度と均熱時間を規定した加熱パターン（ベース温度制御方式と称す）を採用し、余裕をもった焼鈍を行っていた。

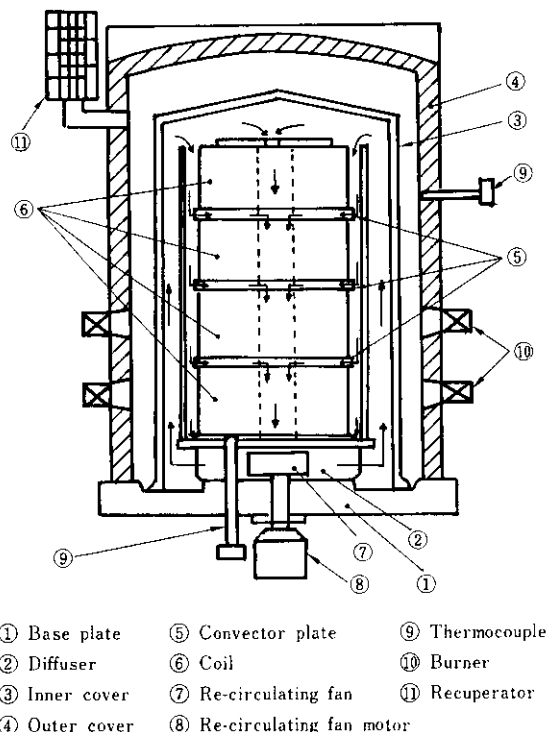


Fig. 1 Schema of single-stack batch-annealing furnace

3. 伝熱シミュレーションモデル

このように、バッチ式焼鈍炉では、外部にとりだされた温度情報のみから炉内の状態を正確に把握することは、困難である。そこで、これらを解明するため、焼鈍炉の伝熱シミュレーションモデルを開発した。

3.1 インナーカバー内における雰囲気ガス流速分布

まず、インナーカバー内の流動現象⁵⁾を解明するため、Fig. 2に示すような実機の1/3縮尺の亚克力製模型を製作した。これにより雰囲気ガスの流れの様子を定量化し雰囲気ガス循環経路における曲り、分岐^{6,7)}、合流等の圧損係数を測定した。とくに、コイル内孔部の旋回を伴った流れに、コンベクタープレートから半径方向に流れ込む支流が追加される合流現象は、バッチ式焼鈍炉特有のものである。

また、熱線風速計と差圧式流量測定法を併用し

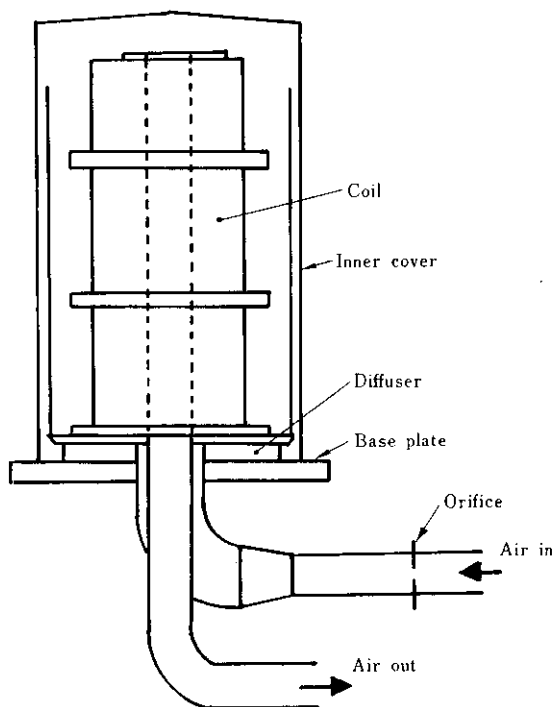


Fig. 2 Model equipment with 1/3 scale of batch-annealing furnace

インナーカバー内の流量分布を測定した。差圧式流量測定法とは、個々のコンベクタープレートを流れる流量とコンベクタープレート内外周の差圧の関係を測定しておき、実際のコイルとコンベクタープレートの積姿で差圧を測定し、通過風量を求める方法である (Fig. 3 参照)。これにより、各種の圧損係数が求まり、インナーカバー内の流動状態を推定できる計算モデルの作成が可能となった。

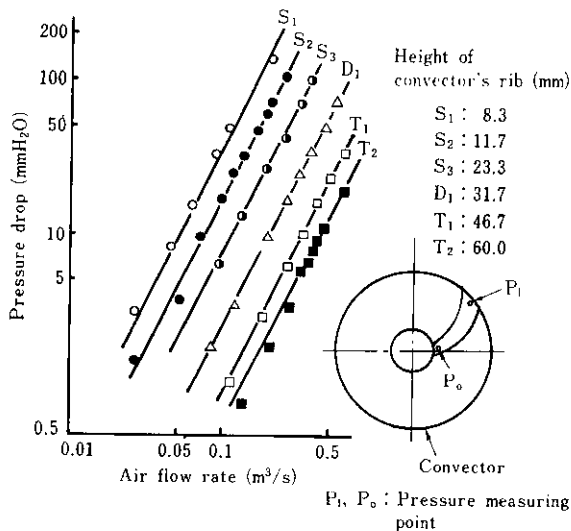


Fig. 3 Relation between air flow rate and pressure drop in convactor

3.2 計算モデルの概要

焼鈍炉内の雰囲気ガスについて、微小体積要素の熱収支より、各部の温度分布を計算し、これにより、コイルまわりの境界条件を決定し、コイル、コンベクタープレート、インナーカバー、およびアウターカバーの温度分布を一括して計算する伝熱シミュレーションモデルを作成した。計算のフローを Fig. 4 に示す。各コンベクタープレートやコイルまわりを流れる雰囲気ガスの流速は各流路の圧損バランスをとり、循環ファンの性能曲線を考慮することによって決定される。各部の流速が求まれば、対流熱伝達率が計算でき、コイルまわりの境界条件が決まる。コイル、コンベクタープレート、インナーカバー、アウターカバーの温度

分布は差分方程式によって計算している。

次に、シミュレーションモデルによる温度の計算値と実測値の比較を Fig. 5 に示す。ベース温度、ベル温度、および各段コイルの最冷点温度 (Fig. 5 にはコイル1段のみ示した) とも、計算値と実測値はきわめてよい一致を示している。また、本モデルでは、コイル等の温度分布の他に燃料流量や、ベースファンモータの電流値も計算でき、さまざまな角度から焼鈍炉に関する最適操業法の検討が可能である。

4. 加熱完了予測システム

バッチ式焼鈍炉においては、前述のようにその構造上、段積位置によって昇熱速度が異なり、かつ、最冷点位置はコイル内部にあたるため直接温度測定は不可能である。また、同一段積位置であってもコイルの条件 (コイル重量、幅) により昇熱に差が生じる。このため、従来の焼鈍炉制御方法では、経験的にチャージ編成上のばらつきをも考慮して、かなり安全サイドのヒートサイクルが採用されていた。今回開発した加熱完了予測システムは、すでに述べた高精度な伝熱モデルを用い、各段コイル内の最冷点温度を正確に推定し、全段コイルについて、それらすべてが目標温度に到達した時点で加熱を終了するものである。なお、制御に使用しているプロセス・コンピュータでは、伝熱シミュレーションモデルをそのまま適用することは、能力的に困難であり、実操業に適した制御モデルへの簡易化を行っている。

4.1 加熱完了予測基本式

ある温度 T_0 の雰囲気ガス中に物体を放置した場合、物体内の温度差を無視すると、その物体温度 T と時間 t との間には、次の関係が成立する。

$$hA(T_0 - T) = C_p W \cdot \frac{dT}{dt} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\therefore \log(T_0 - T) = -\frac{hA}{C_p W} t + C \quad \dots\dots\dots (2)$$

h : 熱伝達率

A : 物体表面積

C_p : 比熱

W : 物体重量

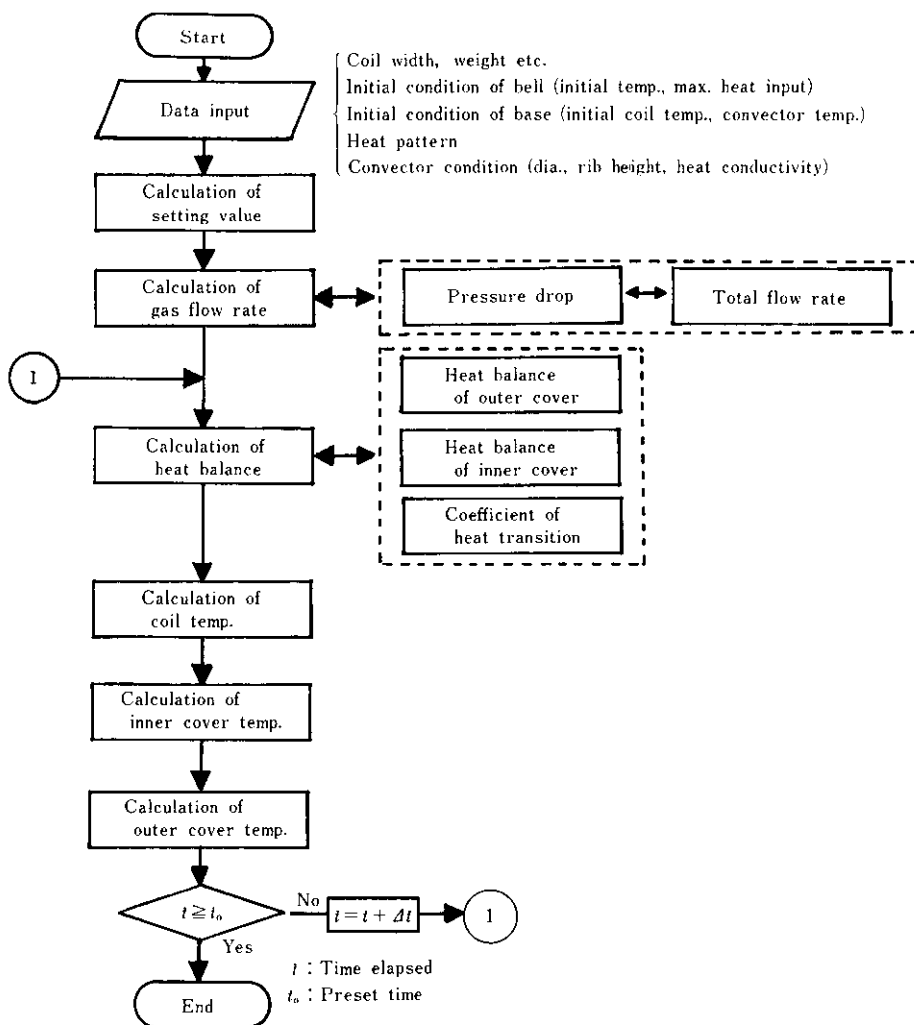
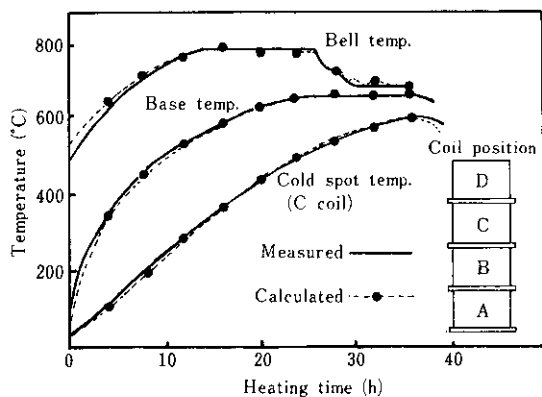


Fig. 4 Flow diagram for calculation of furnace temperature by calculation model



Coil width A : 1200, B : 1000, C : 800, D : 900 (mm)

Fig. 5 Comparison between measured and calculated temperature

T_0 : 雰囲気ガス温度

そこで、 T_0 を均熱温度、 T を最冷点温度で近似した場合の実測温度差 $\Delta T = T_0 - T$ の対数と加熱時間との関係を Fig. 6 に示す。インナーカバー内の雰囲気ガス温度がある程度昇温した後は、ほぼ直線上にあるとみなしてよい。そこで、加熱完了予測式の基本式を (3) 式のように表すことにした。

$$t = \frac{\log(T_s - T_{cs}) - \alpha}{\beta} \quad (3)$$

T_s : 均熱温度

T_{cs} : 目標最冷点温度

t : 予測開始時から目標最冷点温度に到達するまでの時間

α, β : 定数

この α, β は、各段コイル幅、重量、炉の加熱能力などの関数として表され、伝熱シミュレーションモデルによる計算結果から回帰して求められる。

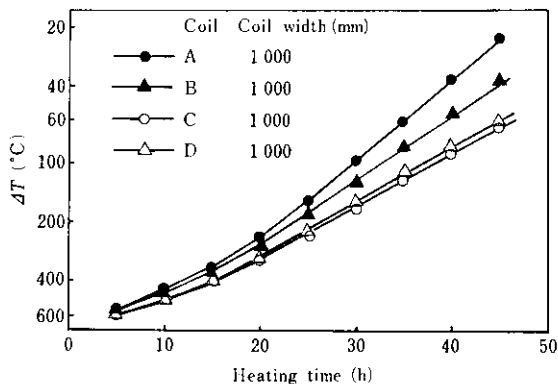


Fig. 6 Relation between $\Delta T (=T_S - T_{CS})$ and heating time for each coil (T_S : Soaking temp., T_{CS} : Cold spot temp.)

4.2 加熱完了予測式

これらの予測式は、焼鈍条件（均熱温度、大型・小型）別に作成されており、以下にその一例として、大型チャージ4段積の加熱完了予測式を示す。

A段:

$$t_A = \{ (2.552 + 0.123X_A - 0.008H_F) - \log(T_S - T_{CS}) \} / \{ (5.891 - 1.361X_A - 0.145X_D + 0.004W_t - 0.092H_F) \times 10^{-2} \} \quad \cdots (4)$$

B段:

$$t_B = \{ (2.618 - 0.035X_A + 0.159X_B - 0.011H_F) - \log(T_S - T_{CS}) \} / \{ (5.753 - 1.981X_B - 0.439X_C - 0.276X_D) \times 10^{-2} \} \quad \cdots (5)$$

C段:

$$t_C = \{ (2.649 - 0.027X_A + 0.155X_C - 0.001H_F) - \log(T_S - T_{CS}) \} / \{ (4.998 + 0.482X_A - 1.839X_C - 0.211X_D - 0.006W_t) \times 10^{-2} \} \quad \cdots (6)$$

D段:

$$t_D = \{ (2.863 - 0.064X_A + 0.082X_D$$

$$- 0.002W_t) - \log(T_S - T_{CS}) \} / \{ (5.779 + 0.243X_A - 0.163X_C - 1.144X_D + 0.058H_F) \times 10^{-2} \} \quad \cdots (7)$$

X_A : A段（最下段）コイル幅

X_B : B段コイル幅

X_C : C段コイル幅

X_D : D段コイル幅

W_t : チャージ重量

H_F : 炉の加熱能力

T_S : 均熱温度

T_{CS} : 目標最冷点温度

$t_{A \sim D}$: 予測時間

これらの加熱完了予測式で計算した加熱終了時間における最冷点温度の精度は $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内である。

なお、実操業においては、Fig. 6における昇熱勾配が直線傾に入った段階で、(3)式により、全段コイルの最冷点温度が目標温度に達する加熱完了時間を求め、その時点で加熱を終了する方式をとっている。

5. 効率的チャージ編成

加熱完了予測式の作成により、各段コイルの焼き上がり判定が明確になった。さらに炉効率を向上させるには、同一チャージ内の各コイルの過熱を防止する必要がある。そのためには、点火より同一焼鈍時間で各段コイルの最冷点温度がおのこの目標温度に到達する積込みチャージ条件（各段コイル幅、重量、目標温度）を求めればよく、これは前記予測式より可能である。Table 1にその一例を示す。この最適コイル幅の算出により飛躍的に効率的なチャージ編成が可能となった。

6. 実炉操業実施結果

6.1 最冷点到達温度

加熱完了予測システムを適用することにより、焼鈍終了時のチャージ内最冷点到達温度のばらつきを大幅に減少させることができた。Fig. 7に示すように、従来のベース温度制御方式では、標準偏差で 20°C にも及ぶ大きなばらつきをもっていたが、本システムの適用により 5°C 程度に精度よく

Table 1 An example of best stacking order
(T_s : 685°C, 4 coils in a stack)

Coil A (mm)	Coil B (mm)	Coil C (mm)	Coil D (mm)	Heating time (h)	Charging weight (t)	Coil position
1 200	1 048	812	942	33.05	150.2	D
1 225	1 071	837	981	33.86	154.4	C
1 250	1 094	863	1 021	34.70	158.7	B
1 275	1 117	889	1 060	35.57	162.9	A

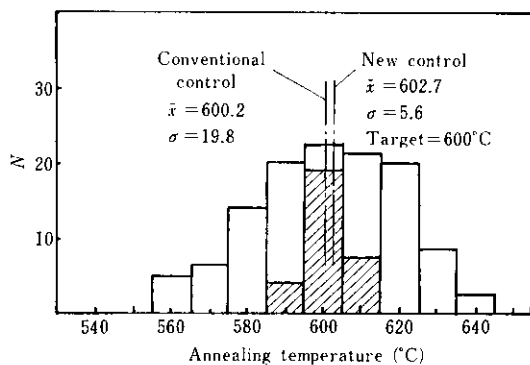


Fig. 7 Comparison of cold spot temperature between new and conventional control method

制御できるようになった。

6・2 材 質

加熱完了予測システムを適用したコイルについて、最冷点の存在した位置での材質調査結果を、

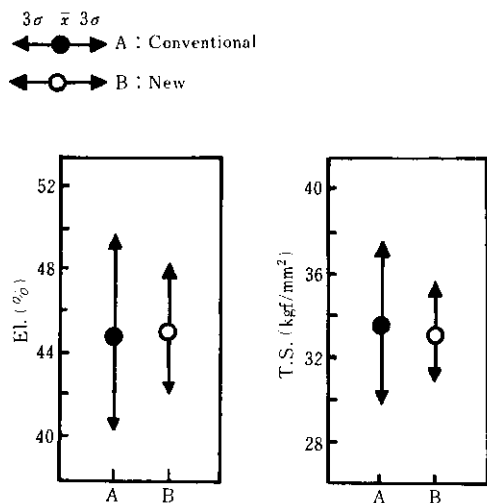


Fig. 8 Comparison of mechanical properties between conventional and new method

Fig. 8に示す。このように材質面でもばらつきをおさえることができた。これは前述したごとくチャージ内最冷点到達温度のばらつきを小さくしたことによるもので、残されたばらつきは、成分系、熱延条件などの変動によるものと考えられる。

6・3 原単位、能率

Fig. 9に示すように、加熱完了予測システム適用後の燃料原単位は順調に低減されており、従来の10%を超える省エネルギーを達成している。また、焼鈍能率もほぼ15%の改善を達成している。これらはすべて同一チャージ内における各段コイル到達温度のばらつきを減少させ、かつ無駄な加熱を排除することにより可能となったものである。

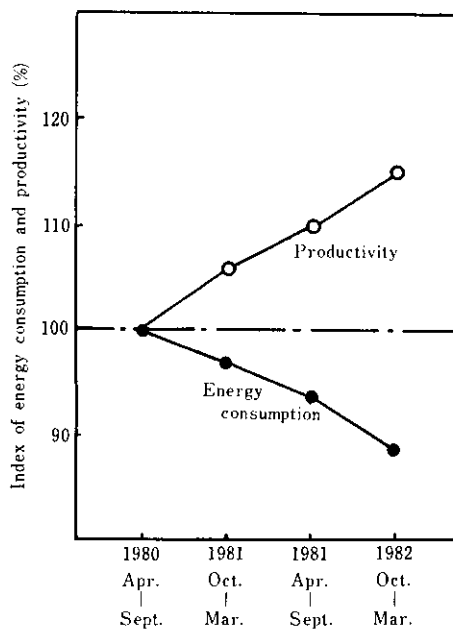


Fig. 9 Yearly change in energy consumption and productivity

7. 結 言

加熱完了予測システムの開発により、従来は困難とされていた各段コイルの最冷点到達温度を精度よく推定することが可能となり、飛躍的に焼鈍技術の向上が達成できた。その効果としては、各段コイルの到達温度のばらつきを減少させ、かつ効率のよい加熱を行うことが可能となり、品質の安定化が図られたのみならず、燃料原単位で10%以上、焼鈍能率で約15%の改善が達成された。その上、従来細分化されていた焼鈍サイクルも目標温度を定めることによりグルーピングが容易とな

り、チャージ編成時の作業性も向上した。

なお、本加熱完了予測システム開発の基礎となった伝熱シミュレーションモデルでは、コイル等の温度分布の他に燃料ガス流量やベースファンモータの電流値も計算でき、さまざまな角度から焼鈍炉に関する最適操業法の検討が可能である。

今後さらに本システムのレベルアップを図るには、成分、熱延条件、冷延圧下率、焼鈍温度などの材質に影響を及ぼす各因子の総合的影響度合を明らかとし冷延鋼板の材質を制御できる最終工程の焼鈍で前工程の冶金的条件を加味し、焼鈍温度をコントロールする冷延鋼板材質制御システムの開発へと結びつけたい。

参 考 文 献

- 1) 藤井、貝原、飯田、鯨島、白石：鉄と鋼，66 (1979) 10, 354
- 2) 貝原、藤井、上野、池田：鉄と鋼，67 (1980) 4, 366
- 3) 平田、白石：鉄と鋼，63 (1977) 4, 170
- 4) 鈴木ほか：「鉄鋼便覧（日本鉄鋼協会編）」，(1980)，〔丸善〕
- 5) 白石、湊、福井：鉄と鋼，66 (1979) 10, 353
- 6) 近江：第3回研究協会部会実績報告書資料，機械学会，(1969)，4
- 7) 佐藤：機械学会誌，66 (1963) 10, 1347—1353