

特殊鋼用ビレット誘導加熱装置

Billet Heater for Alloy Steels

後 藤 篤* 河 田 浩 章*
Atsushi Gotô Hiroaki Kawata

要 旨

圧延機とともに使用される特殊鋼用ビレット誘導加熱装置（ビレットヒータ）を完成納入し、好調に運転中である。本ヒータは従来の燃焼式加熱炉にくらべて数多くのすぐれた特長を有しており、新しい工業用加熱装置として果たす役割は大きい。本稿はこのビレットヒータの構造および新しく採用した単巻変圧器によるビレット温度調製方法について、その概要を述べたものである。

1. 緒 言

金属に発生するうず電流を熱エネルギーとして利用する誘導加熱方式は、重油炉、ガス炉などの燃焼式加熱方式にくらべてすぐれた特長を有するため、金属の溶解、熱処理あるいは熱間成形など各種の分野に応用されている。特に圧延、押出し、鍛造など熱間成形の分野においては、成形加工に使用される圧延機、押出機などの熱加工機の最近の進歩はめざましく、製品の品質向上、コスト低減の設備合理化に貢献している。これに伴い熱加工のための加熱装置も設備の合理化が要求され、従来の重油炉、ガス炉などの燃焼式加熱炉に代わって、熱間成形用誘導加熱装置が採用されるようになった。そのおもな理由として下記のものがあげられる。

- (1) 短時間加熱のため、被加熱物の酸化が少なく製品の品質が向上する。
- (2) 一定加熱速度のため、熱加工機の連動、自動化が容易である。
- (3) 温度検出、温度制御が容易である。
- (4) 加熱装置の起動、停止が簡単である。
- (5) 据付面積が小さく、工程上熱加工機と合理的な組合せ配置ができる。
- (6) 作業に熟練を要せず、作業人員も節約できる。
- (7) 有害な煙やガスの発生はなく、作業環境が清潔である。

日立製作所においても、さきに銅、銅合金用 800 kW ビレットヒータ、銅用 550 kW ビレットヒータ⁽¹⁾を完成納入したが、このたびその経験を生かして、特殊鋼用 475 kW ビレットヒータを完成納入した。このビレットヒータは線材圧延機と組み合わせて使用するもので、ビレット先端部の温度が任意に調整できるようになっている。

2. 仕 様

ビレットヒータのおもな仕様を表 1 に示す。このビレットヒータは前段の予熱炉で 750℃ に予熱された標準断面 90 mm 角×長さ 1,750 mm の特殊鋼ビレットを 1,200℃ まで加熱することを目的としたものである。ビレットヒータの構成は図 1 に示すように、No. 1, No. 2 のビレットヒータ、ヒータ電流調整用単巻変圧器、力率改善用コンデンサ、整合変圧器、高周波発電機、炉操作盤などから構成される。No. 1, No. 2 ビレットヒータのインダクタは有効長 3,500 mm 材料移送限界 150 mmφ で、加熱されたビレットは 1 本ずつ交互に搬出され、次の加工工程へ送られる。

ビレットを誘導加熱するとき、ビレット中の電流分布は表皮効果によりビレット表面層に集中するため、ビレット表面温度は中心部温度にくらべて高くなる。この表面と中心間の温度差は、加熱電力、加熱周波数、ビレット材質に関連する。したがって 475 kW ビレ

表 1 ビレットヒータのおもな仕様

	475 kW ビ レ ッ ト ヒ ー タ
形 式	HH-1
定 格 入 力	2×475 kW, 1,200 V, 960 Hz
被 加 熱 物 材 質	特 殊 鋼 ビ レ ッ ト
被 加 熱 物 寸 法	90 角×1,750 L
加 熱 温 度	750℃～1,200℃
処 理 能 力	3.7 t/h

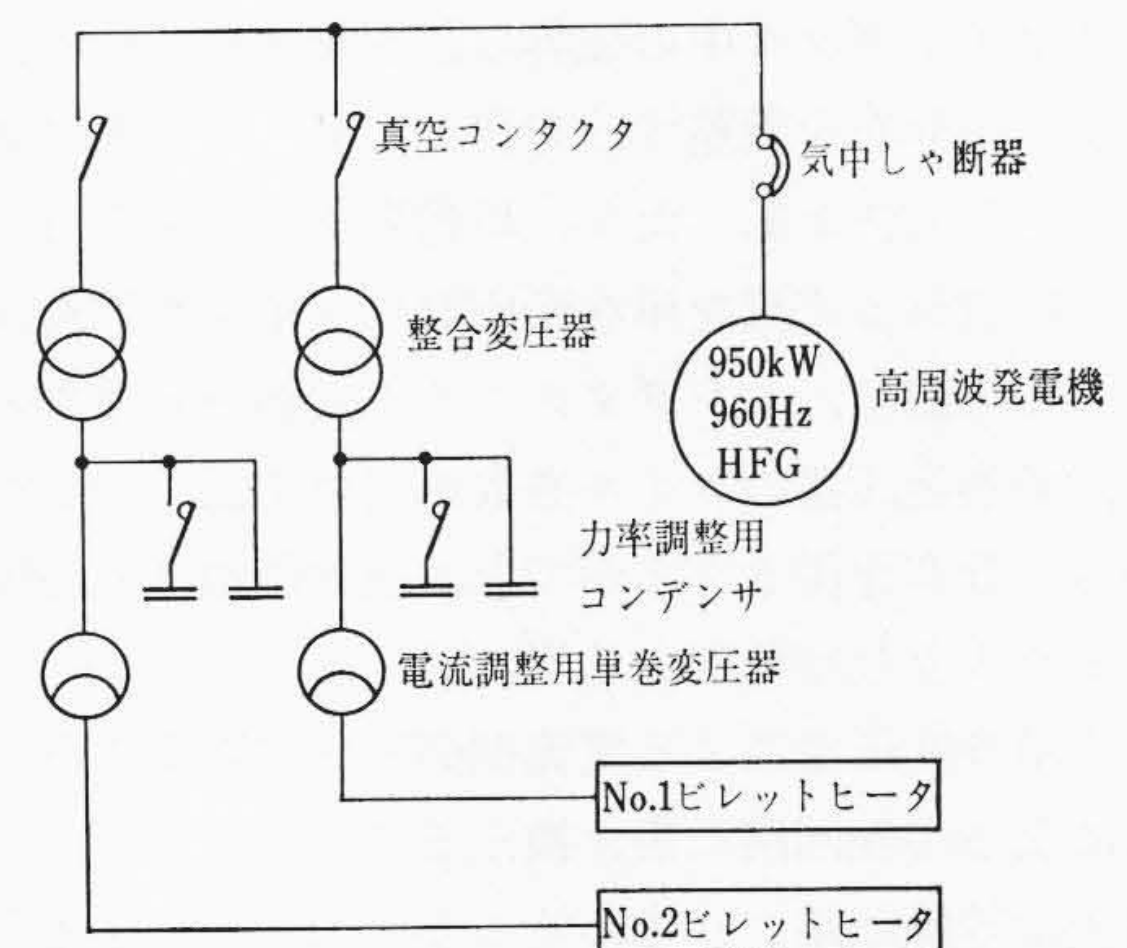


図 1 ビレットヒータの設備構成

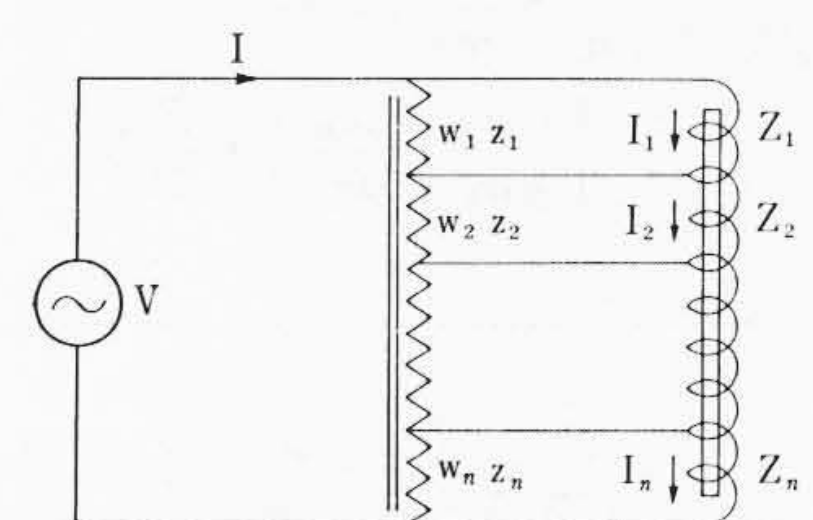


図 2 単巻変圧器による温度分布調整方法

トヒータでは加熱周波数を 960 Hz とし、ビレット断面方向の均一な温度分布を得るため、ビレット表面電力密度が低くなるようにインダクタ中にビレット 2 本をそう入し順次加熱するステージ加熱方式を採用している。またビレット長手方向の任意の温度分布を得るために、インダクタを 3 分割し、各インダクタに単巻変圧器を介して給電することにより、インダクタ端部と中央部の磁界の強さを変え、各インダクタ部におけるビレットと鎖交する磁束量を加減させる方式を採用している。

3. 単巻変圧器によるビレット温度分布調整方法

図 2 は単巻変圧器によるビレット温度分布調整方法の原理を示したものである。誘導加熱される物体の温度分布は物体に発生するう

* 日立製作所国分工場

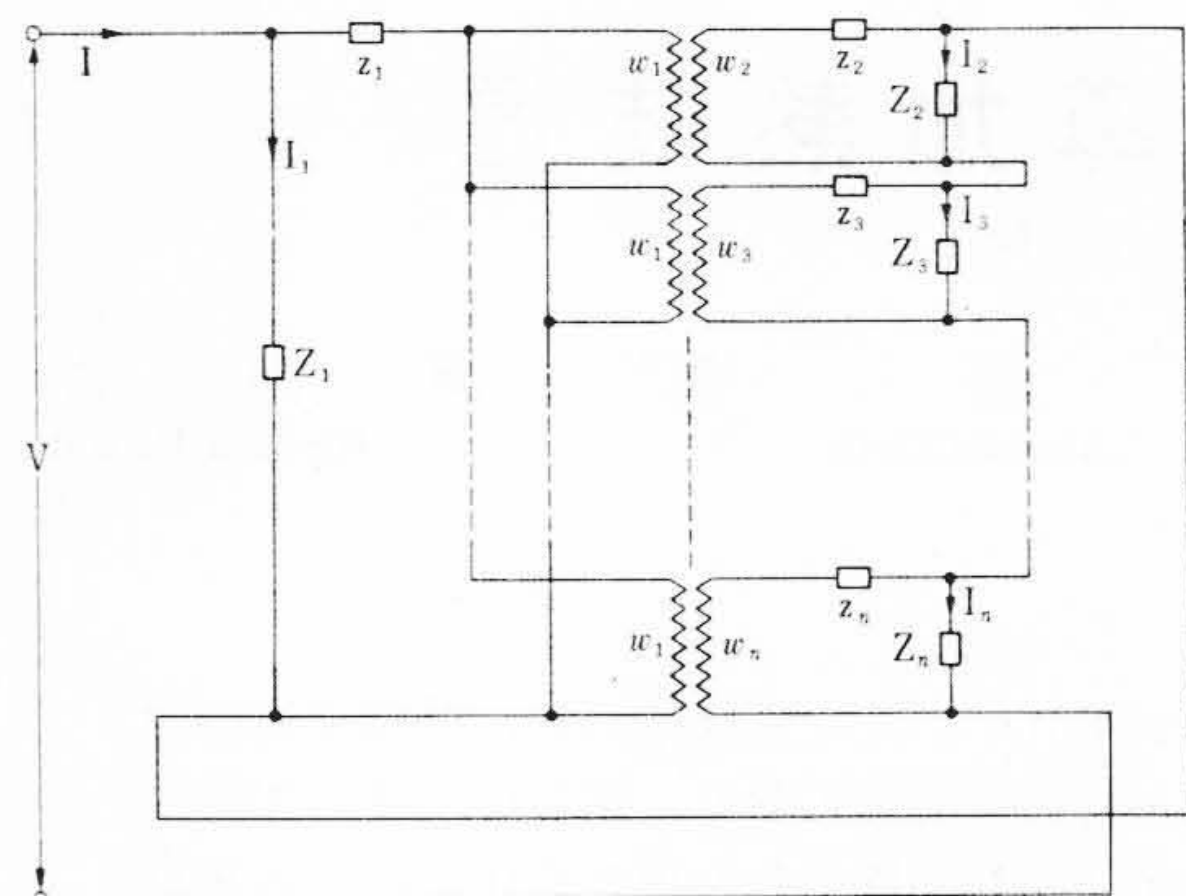
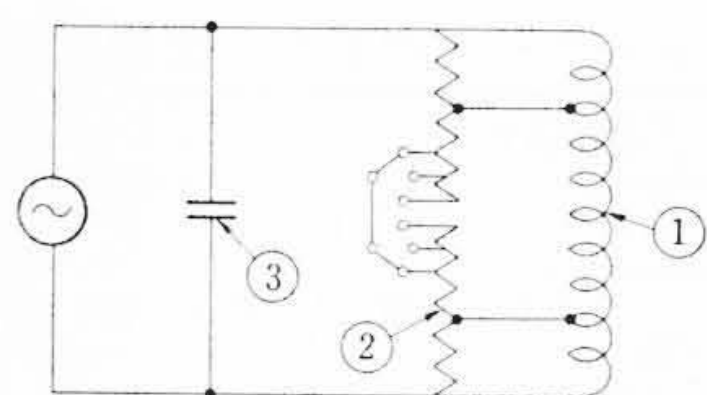


図3 等価回路

図4 ビレットヒータ 接続図
1: インダクタ 2: 単巻変圧器 3: コンデンサ

ず電流損の大きさにより決定される。うず電流損すなわち発熱量は磁束量に関連し、磁束量はインダクタの磁界の強さに関連するので、温度分布はインダクタ中の磁界の強さを調整すればよい。従来この磁界の強さの分布を調整する方法として、インダクタコイルの巻数分布を変える方法があったが、単巻変圧器による方法は、インダクタコイルに流れる電流を単巻変圧器のコイル巻数を変えることにより制御する方法で、インダクタコイルの巻数分布を変える方法とは異なり、単巻変圧器のコイル巻数の変更で任意のインダクタ中の磁界の強さの分布を得ることができ、被加熱物体に各種の温度条件が得られる点大きな特色がある⁽²⁾。

図2に示す単巻変圧器による電流制御方法は図3に示す四端子回路網の合成による等価回路に書き換えることができ、各インダクタに流れる電流は等価回路より求めることができる。 j 番目のインダクタに流れる電流を I_j とすると下記ようになる。

$$\frac{I_j}{I} = 1 + \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{1+\alpha_k} \cdot \frac{w_k}{w_j} \left(1 - \frac{w_k}{w_j} \frac{Z_j}{Z_k}\right)}{\sum_{k=1}^n \frac{1+\alpha_j}{1+\alpha_k} \left(\frac{w_k}{w_j}\right)^2 \cdot \frac{Z_j}{Z_k}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I = \frac{V}{Z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Z = \sum_{j=1}^n Z_j \left\{ 1 + \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{1+\alpha_k} \cdot \frac{w_k}{w_j} \left(1 - \frac{w_k}{w_j} \frac{Z_j}{Z_k}\right)}{\sum_{k=1}^n \frac{1+\alpha_j}{1+\alpha_k} \left(\frac{w_k}{w_j}\right)^2 \cdot \frac{Z_j}{Z_k}} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_j = \frac{Z_j}{Z_j} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで

V : 端子電圧

I : 負荷電流

Z : 電源からみたインピーダンス

Z_j : j 番目のインダクタ部の負荷インピーダンス

z_j : 単巻変圧器 j 番目コイルの内部インピーダンス

w_j : 単巻変圧器 j 番目コイルの巻数

とする。

(1)式の意味を理解するために、単巻変圧器の内部インピーダンスを無視する。すなわち

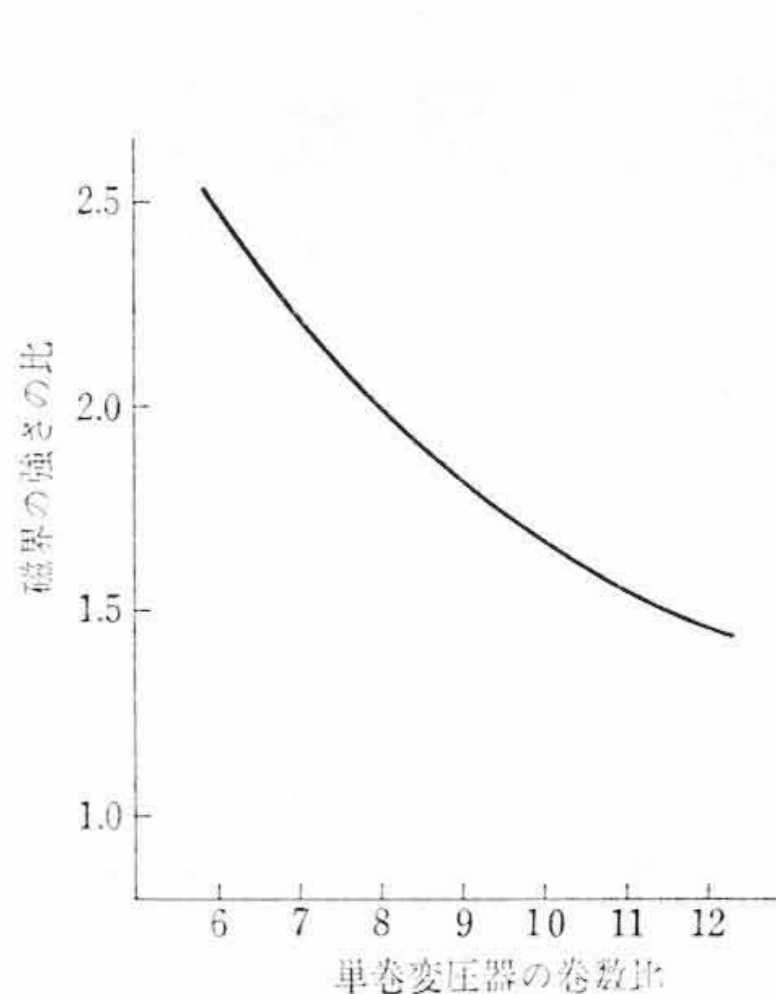


図5 インダクタ中央部と先端部の磁界の強さの比

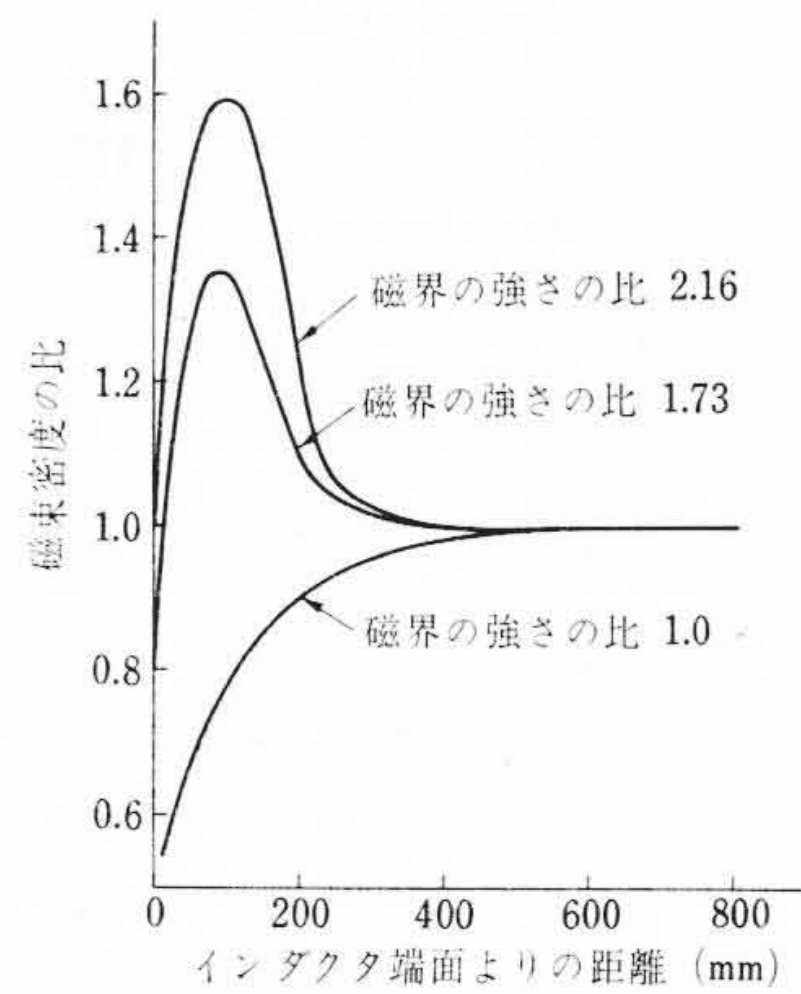


図6 インダクタ中の磁束分布

$$\alpha = 0$$

とおくと、(1)式は下記ようになる。

$$\frac{I_j}{I} = \frac{w_j}{Z_j} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{w_k}{Z_k}}{\sum_{k=1}^n \frac{w_k^2}{Z_k}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式より、インダクタ電流は単巻変圧器のコイル巻数に比例することになり、本方法の有効性が理解される。

圧延機などと組み合わせて使用されるビレットヒータにおいては、ビレットと圧延機とのかみこみ効果を良くするために、ビレット先端部温度は中央部温度にくらべていくぶん高いことが望ましい。ビレットヒータでは、ビレット先端部の存在するインダクタ部における加熱に必要な磁束量は漏れ磁束のためインダクタ中央部にくらべて減少している。しかもインダクタ中のビレット先端部は中央部にくらべて放熱効果が大いいため、誘導加熱中のビレット先端部温度は中央部のそれにくらべて低い。したがって線材圧延用 475 kW ビレットヒータはインダクタを3分割し、ビレット先端の磁束量を増加させるために、図4に示す方法を採用した。インダクタ中の磁界の強さの調整方法としては、インダクタ端部に接続される単巻変圧器のコイル巻数を一定とし、インダクタ中央部に接続される単巻変圧器のコイルにタップを設けて可変とし、タップを変えることによりインダクタ電流を制御することにした。

図5は475 kW ビレットヒータにおけるインダクタ中央部とインダクタ先端部の磁界の強さの比を単巻変圧器の巻数比（インダクタ端部に接続される単巻変圧器の巻数に対するインダクタ中央部に接続される単巻変圧器の巻数比）をパラメータとして計算した結果を示したものである。また図6はインダクタ中の磁界分布状態の計算結果を示したものである。図6より均等コイル巻数分布の場合、磁束量より明らかにビレット先端部温度は中央部温度にくらべて低いことが予想される。

4. ビレットヒータの構造

図7は475 kW ビレットヒータ設備の配置図を示したものである。この設備は2台のビレットヒータと2台のヒータにビレットを供給するビレット装入用テーブルからなり、ビレットヒータにはインダクタとビレット送り機構のビレット押込装置、ビレット位置調整装置、ビレット搬出用ローラテーブルなどが設けてある。

4.1 インダクタ

図8はビレットヒータのインダクタ断面を示したものである。インダクタ用導体には角形銅管コイルを使用し、ビレット表面からライナを通して伝わる熱およびコイル自体で発生する銅損からコイル

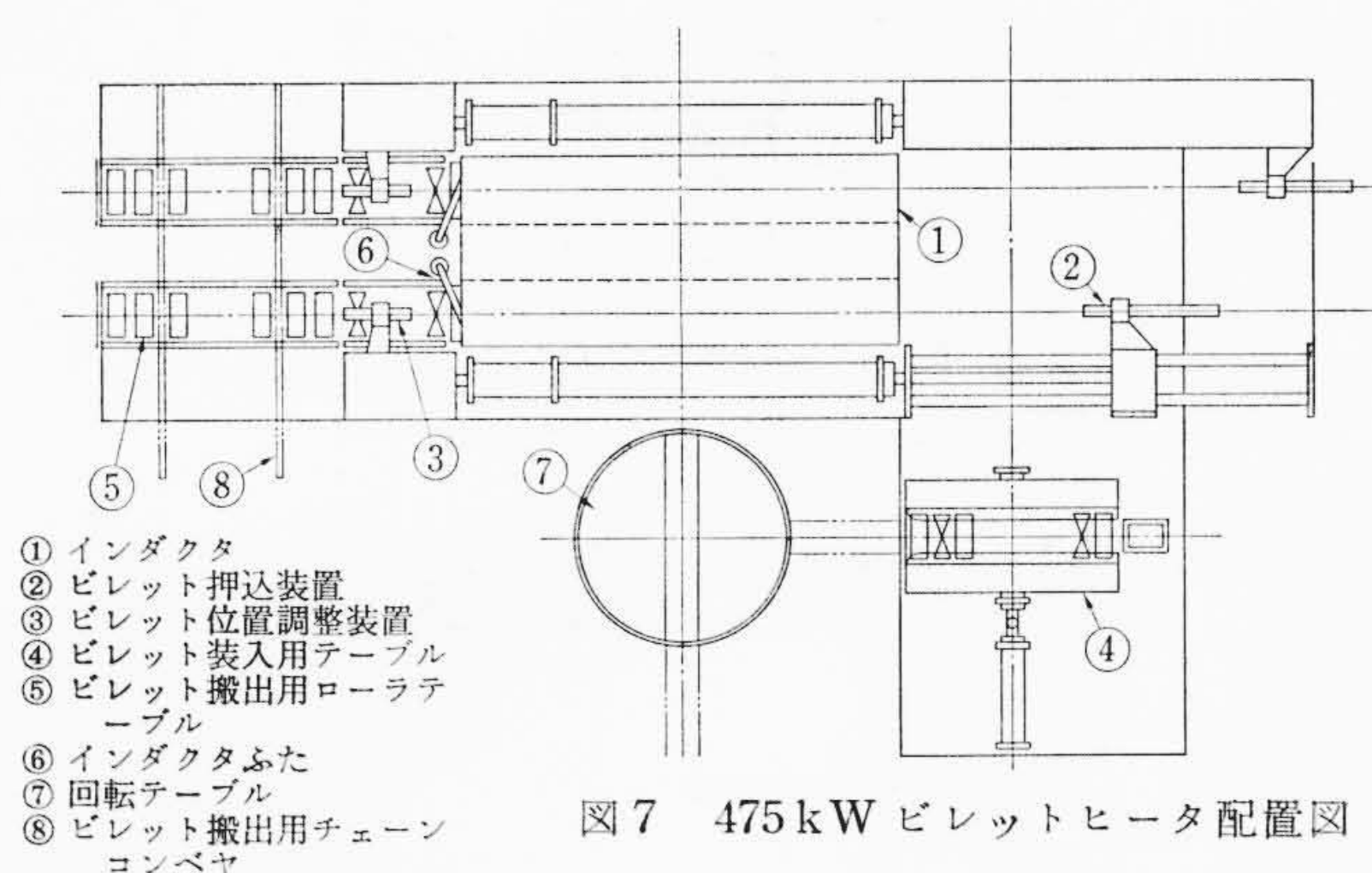


図7 475 kW ビレットヒータ配置図

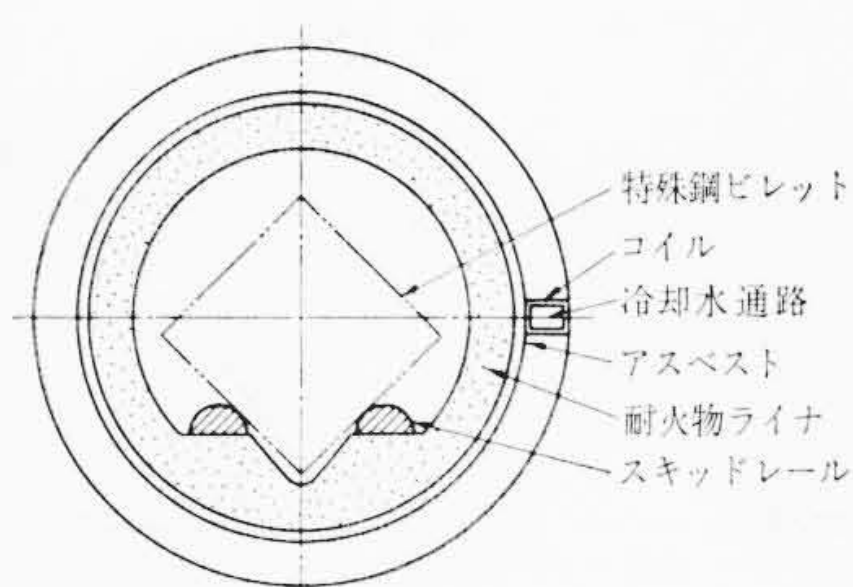


図8 インダクタ断面図

およびコイル絶縁物を保護するために直接水冷構造とし、冷却水断水または減水からコイルの焼損事故を防ぐために、冷却水回路には液流開閉器を設けている。またビレットヒータの使用条件を考慮し導電性異物からコイルを保護するために、インダクタ外周には耐熱性絶縁を施している。

インダクタはビレットの加熱場所であると同時に、ビレット運搬の通路である。ビレット運搬中におこる機械的衝撃から炉コイルを保護するために、インダクタ内周には耐火度と機械強度の高い耐火物ライナを設けている。またビレット運搬はスキッドレール上をすべらせる構造とし、水冷によるスキッドマークがビレット表面につくのを防ぐために、スキッドレールを耐熱合金製とし、インダクタライナ中に埋め込む構造としている。

またインダクタ両端には空気の流通によるビレット端面の酸化、脱炭を防ぐため、インダクタふたを設け、インダクタ入口側ふたをビレット装入用テーブルと連動して開閉し、出口側はエアシリンダによる開閉構造としてある。

4.2 ビレット送り機構

475 kW ビレットヒータのビレット送り機構は下記のものから構成される。

- (1) 前段の予熱炉からビレットヒータまでの送り込み
- (2) ビレットヒータのインダクタへの送り込みおよび搬出
- (3) ビレットヒータからの搬出

前段の予熱炉で750℃に予熱されたビレットを受け、インダクタ入口までビレットを運搬するために、ビレット装入用テーブルを設けている。このテーブルはビレット位置を変換させるためのローラ機構およびテーブル移動機構からなり、テーブル移動機構はインダクタ入口まで正確に迅速にビレットを運搬できるようにエアシリンダ駆動としてある。

インダクタへのビレットの送り込みおよび搬出に採用される機構としては

- (1) ピンチローラ
- (2) プッシャ
- (3) ウォーキングビーム

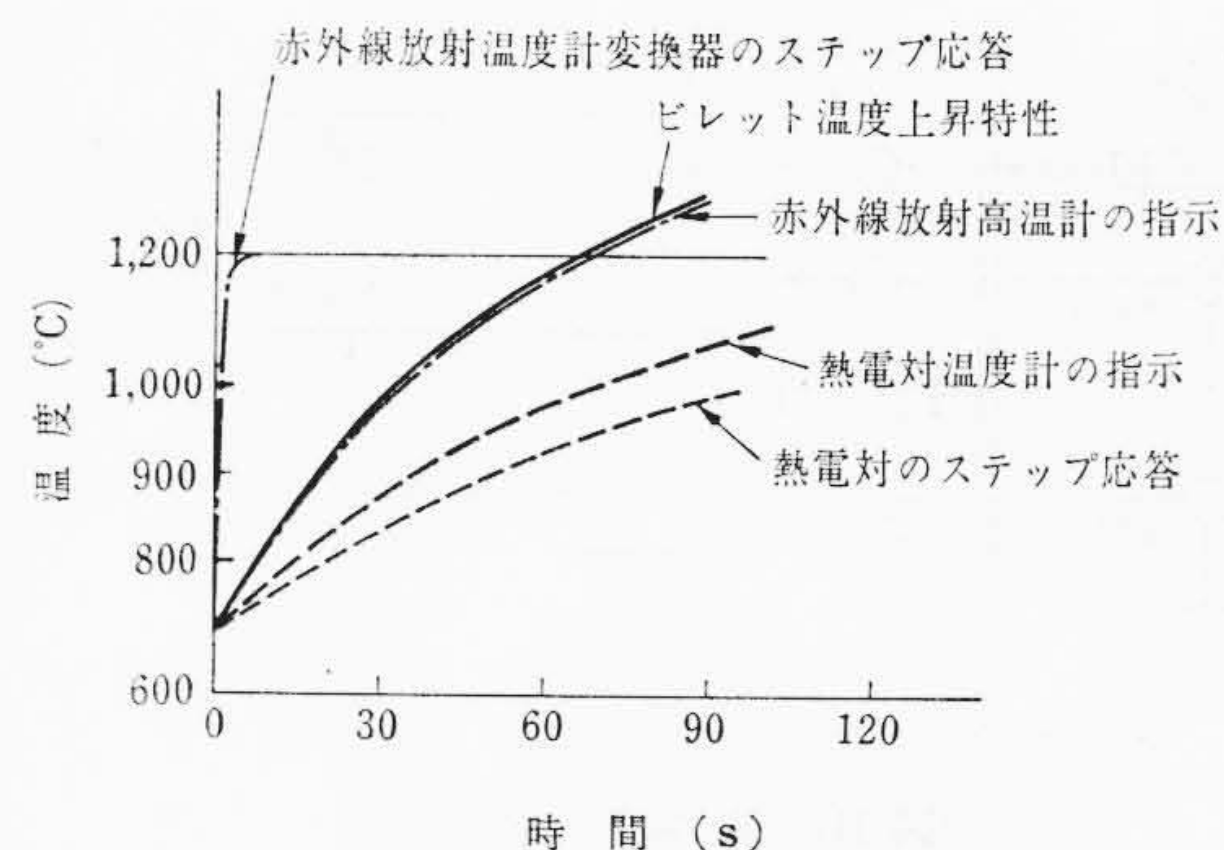


図9 温度計指示特性

の三つの代表的な方式があり、これらは一長一短があるが、加熱方法としてインダクタ中に2本のビレットをそう入し順次加熱するステージ加熱方式を採用したため、それにみあい、機械構造が簡単でかんじょうなプッシャ方式を採用し、インダクタ出口にはバックアップしてモートル駆動ローラコンベヤを併用した。プッシャの動力源としては圧縮空気を用いている。

加熱するビレットをインダクタ内の正しい位置におくことは、ビレット長手方向の温度分布の面から考慮しなければならない。このため475 kW ビレットヒータでは、インダクタ出口側にエアシリンダ駆動によるビレット位置調整装置を設けた。この装置にはビレット押込装置とインターロックを設けビレット押込み完了後、ビレット位置を調整できるようにした。

ビレットヒータから圧延機までの搬出にはチェーンを利用している。

5. 制御方式

ビレットヒータは、圧延機と直接結合して運転されるので、各ビレット加熱サイクルにおいて、高い加熱効率が保たれ、常に圧延に適した温度まで均一に加熱される必要がある。また、圧延機に対して加熱されたビレットの過不足を生ぜず高い加熱生産性が得られるようビレット加熱速度は、圧延速度の可変範囲に完全に追従できなければならない。これらの制御が少数の人員で行なえるよう加熱シーケンス制御は、確実に自動化されている。このため今回開発したビレットヒータ制御装置においては、次の考慮がはらわれている。以下その概要を説明する。

5.1 温度制御

予熱炉で750℃に加熱されたビレットはビレットヒータで1,200℃±10℃に誘導加熱され、圧延機に送られる。この範囲の温度検出端として白金-白金ロジウム熱電対(PR)は常時温度検出用としては適当であるが、ビレットヒータのように加熱サイクルをくりかえすものには、次の点で適当でない。保護管を設けた場合、PR熱電対の時定数は約90秒となるから、図9に示す温度計指示特性からわかるようにビレットが1,200℃に加熱されても熱電対出力による温度指示はなお約980℃であり、ビレット温度に追従できない。これを避けるために保護管を除外すると本体が誘導加熱装置であるから、熱電対に電磁力が加わり、あるいは誘導を生ずるおそれがある。またPR熱電対要素そのものは1,200℃付近のふん囲気中においては約5年程度の寿命が得られるけれども、次々と送られてくるビレットに接触させて温度を測定するには、実用上機械的な信頼性を向上させることがむずかしい。このため図10に示すように、温度検出には赤外線放射高温計を採用した。加熱されたビレットから発生する赤外線を集光レンズにより集光し、その焦点に光電セルが設けられている。レンズと光電セルの間には、有孔回転円板を設

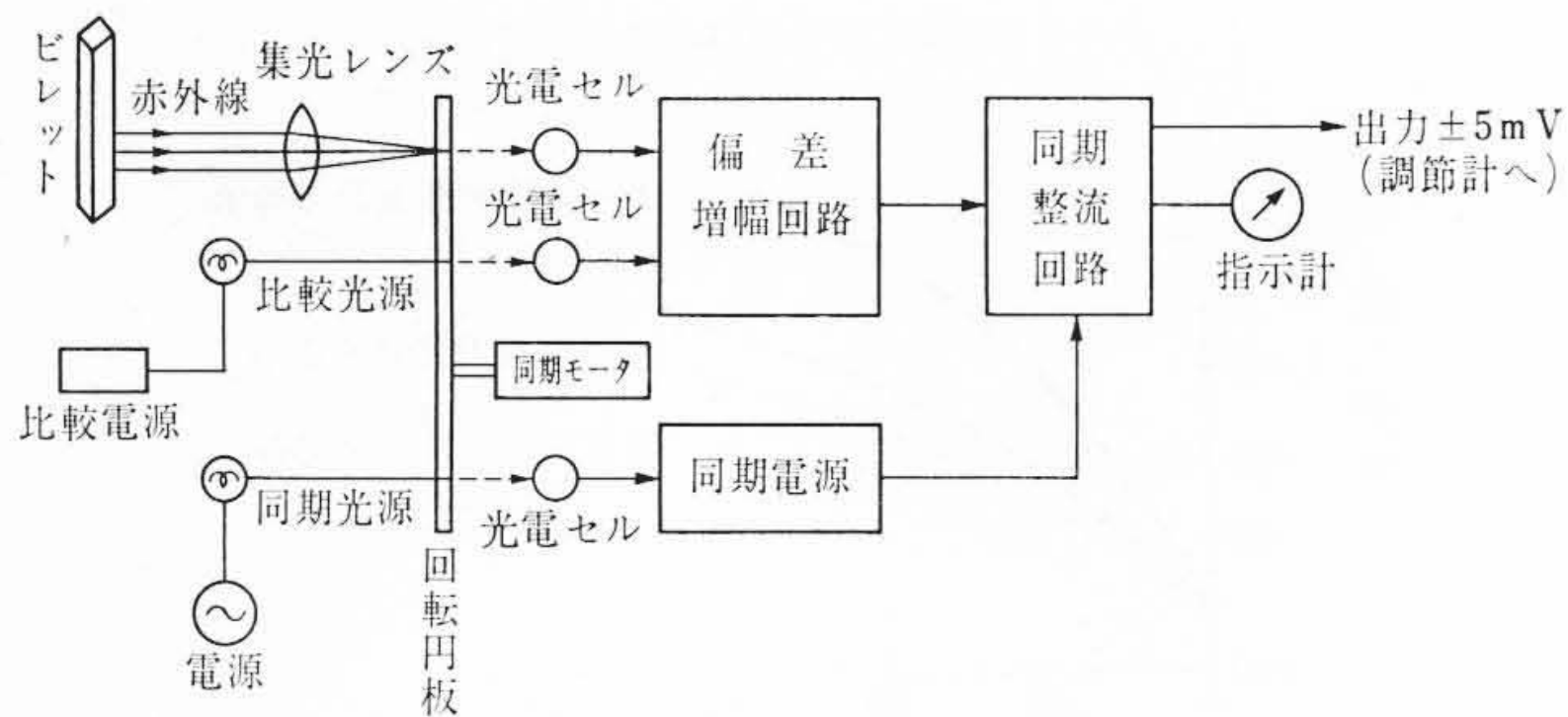


図10 赤外線放射高温計

け測定光および比較光源からの標準光とも400または480 Hzの断続光に変換し、光電セルで同じ周波数の交番電圧に変換される。測定光と標準光は180度位相を異にするように配置して測定光と比較光の偏差を求める。偏差電圧を増幅し同期整流して得た出力信号 $\pm 5\text{mV}$ により計器を指示させるものである。この方式ではビレットに直接触れないため、熱電対の寿命および保守を考慮する必要は全くない。また図9に示すように変換器の時定数は約1秒であり、組合せ使用する記録調節計の平衡速度約3秒を加えても、熱電対に比較して速応性ははるかに高く、温度制御に適している。ただし本方式は測定面のあらさの影響をうける。またビレット表面にスケールが存在して表面温度が低下している場合は直接その影響をうける欠点があるから、本装置では加熱中、ビレット出口にふたを設け、スケールの発生を防止するとともに、温度測定は、ビレット端面から約200mmのところで行なうよう加熱コイルの側面に開口部を設け、ここに赤外線放射高温計検出部を取り付け、ビレット端面のひずみ、表面あらさの影響を極力少なくするようにした。

ビレット温度を制御するには図11に示すように赤外線放射高温計検出部と温度調節計を組合せビレットヒータ入力をON-OFF制御する。ビレットがヒータに搬入され位置補正が完了すると、電源が投入され、加熱を開始する。温度調節計であらかじめ設定した温度に達すると真空コンタクタを開いてビレットを搬出する。以上は単独のヒータにおけるビレットの1加熱サイクルであり、規定温度

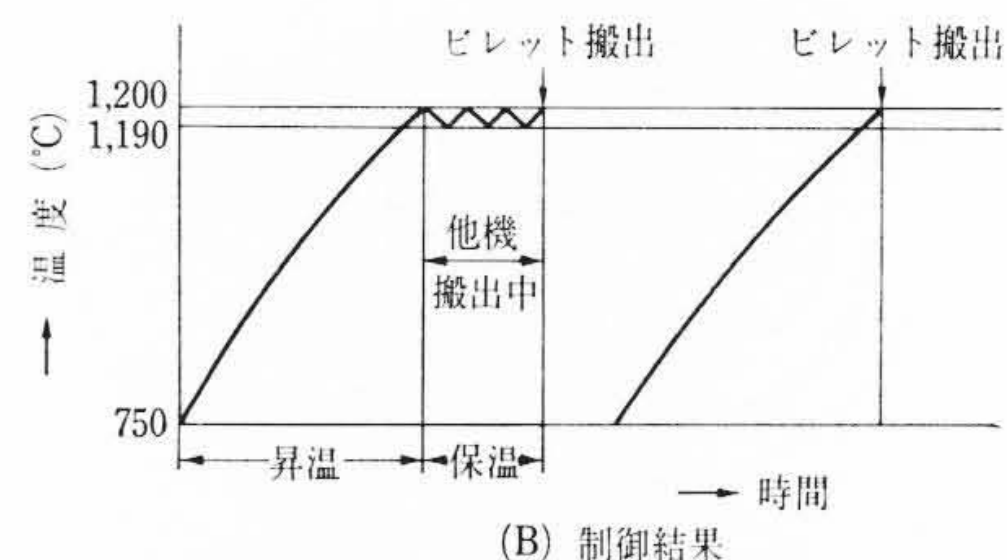
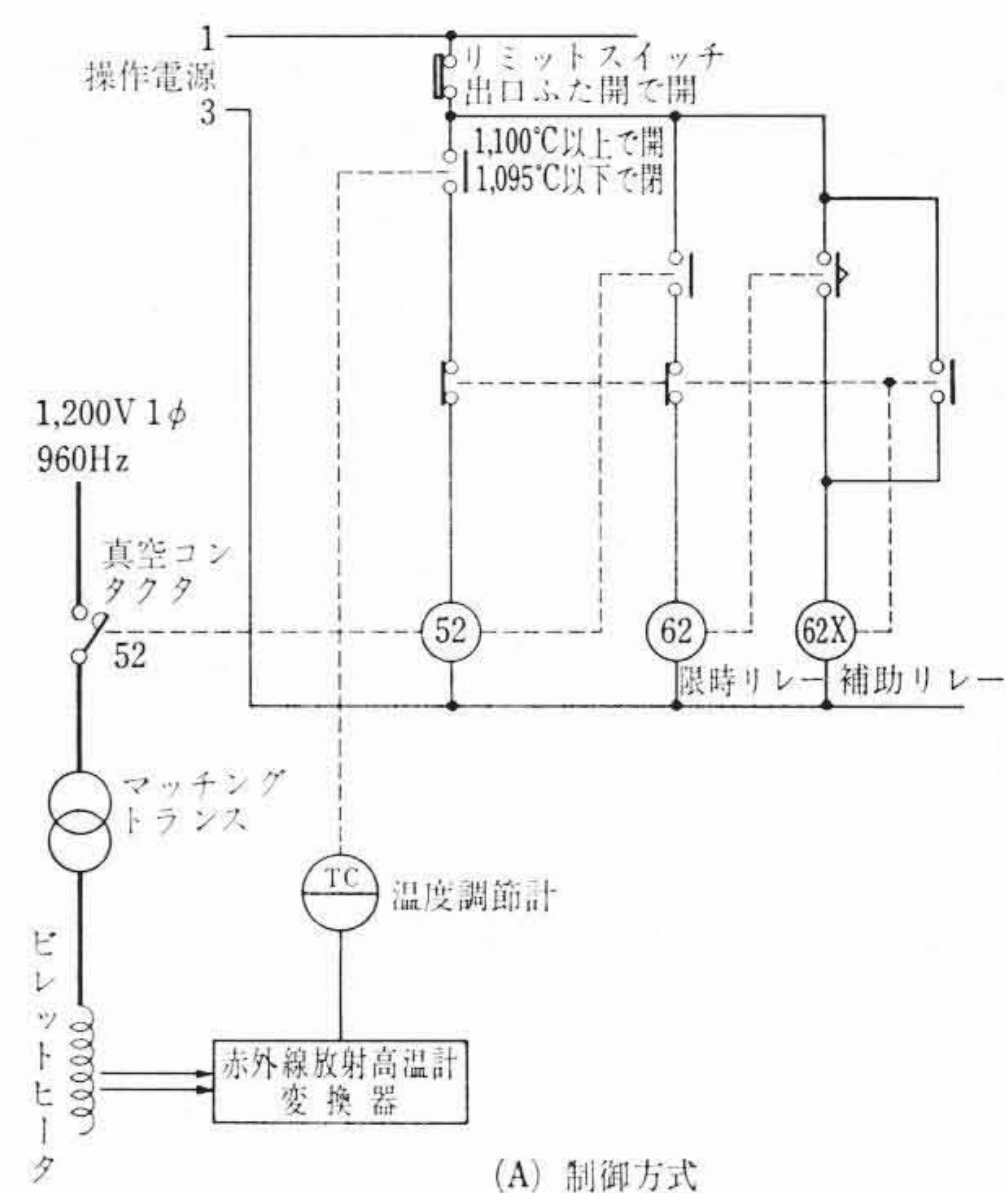


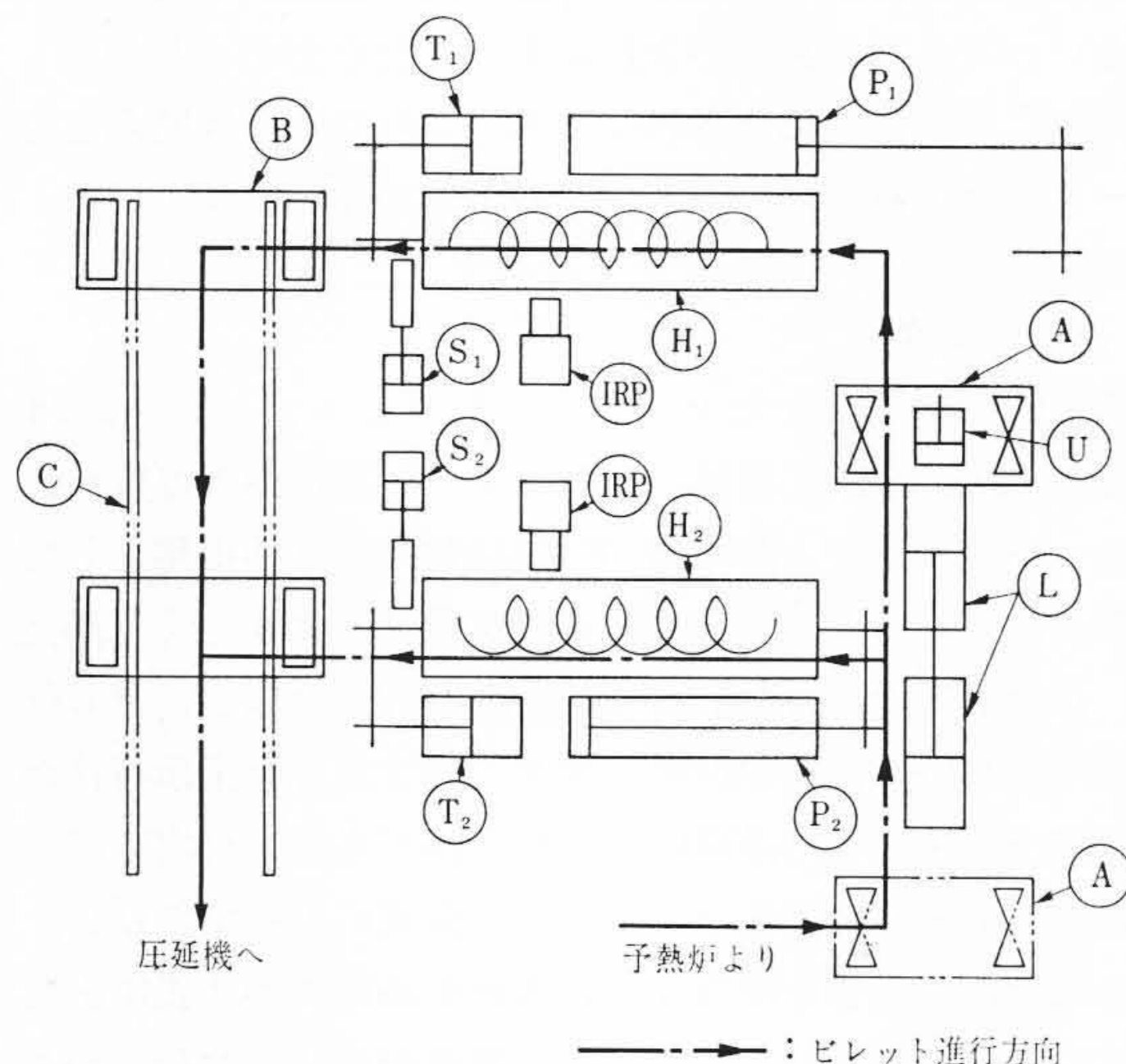
図11 ビレット温度制御方式

まで加熱昇温が完了すればビレットは直ちに圧延機へ送られ温度制御は簡単であるが、実際はヒータ2台が組となって交互に加熱を行なうので、たとえばほかのヒータが搬出中であれば、規定温度まで加熱昇温が終わっても、直ちにビレットを搬出できないから、ほかの側のビレットが搬出完了するまでの間、ビレットをヒータ内にとどめ規定温度を保つよう真空コンタクタでON-OFF制御を行なうのである。ビレット温度は図11-Bに示すように $1,195^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ に保たれる。なお万一赤外線放射高温計が故障した場合、加熱が長時間経続し、ビレットがヒータ内で溶解するような事故に至ることを防止するための限時リレーを設けている。

5.2 シーケンス制御

図12はビレットヒータのシーケンス制御系統図を示したものである。予熱炉で 750°C に予熱されたビレットは、次のシーケンスで自動加熱される。

- (1) 加熱開始時、電源気中しゃ断器を投入し、あらかじめ用意したビレットを手動にてヒータ内に押し込み、真空コンタクタを手動投入すれば、一定時間後に限時リレーが動作し、予熱炉へビレット送り信号が与えられ、予熱炉よりビレットが送られて装入用テーブルAにビレットがのる。
- (2) ビレット走行用エアシリンダLが、装入用テーブルAを移動させ、ビレットを1号または2号ヒータ前面へ運ぶ。
- (3) すでに加熱されているほかのビレットが、規定温度に達し、真空コンタクタを開いて電源がしゃ断されると、押込用エアシリンダP₁またはP₂が復帰し、ビレットは昇降用エアシリンダLによりヒータ入口へ上昇する。
- (4) 次にシリンダS₁またはS₂が動作して、出口のふたを開き、



- H₁, H₂: 加熱コイル
 P₁, P₂: ビレット押込用エアシリンダ
 T₁, T₂: ビレット位置調整用エアシリンダ
 S₁, S₂: 出口ふた開閉用エアシリンダ
 A: ビレット装入用テーブル
 U: ビレット昇降用エアシリンダ
 L: ビレット走行用エアシリンダ
 B: ビレット搬出ローラテーブル
 C: ビレット搬出用チェーンコンベヤ
 IRP: 赤外線放射高温計

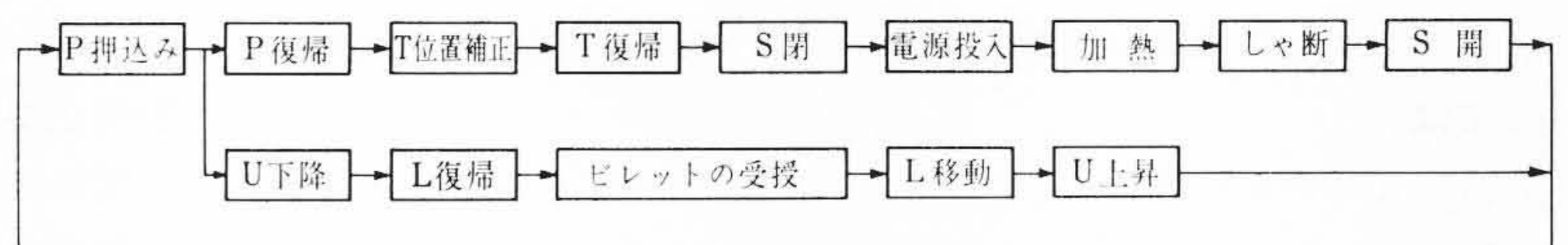


図12 ビレットヒータ自動加熱シーケンス制御

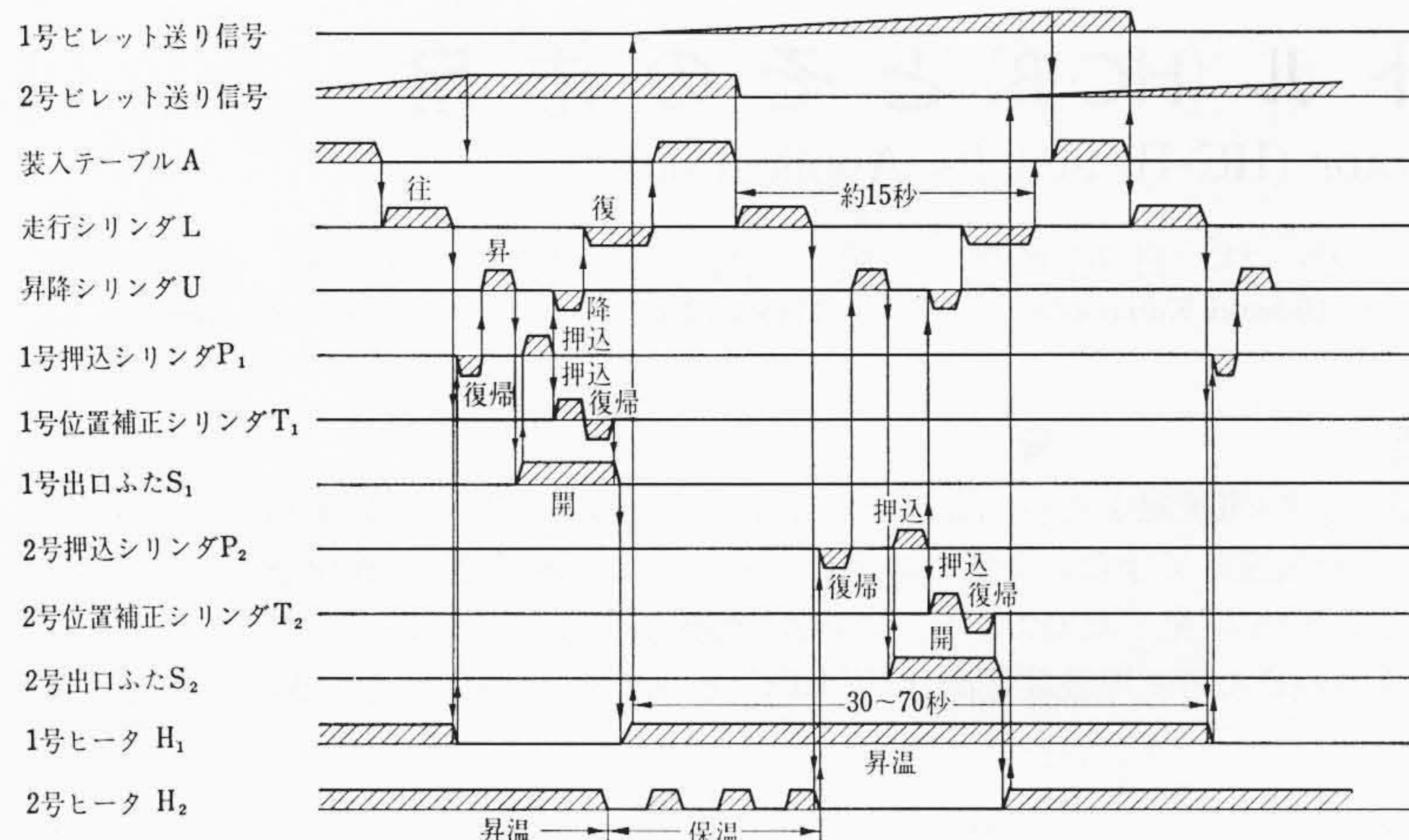


図 13 ビレットヒータ自動加熱シーケンス制御タイムチャート

ビレットは押込用エアシリンダ P_1 または P_2 でヒータ内へ押し込まれる。

(5) 同時にこれまではいっており、加熱を完了したビレットは押し出され、搬出用ローラテーブルBにのり、加熱を完了したビレットがチェーンコンベヤCで圧延機へ運ばれる。

(6) 搬出されたことをリミットスイッチで検知し、位置調節用エアシリンダ T_1 または T_2 でビレットを規定位置まで押し戻す。

(7) 出口開閉用エアシリンダ S_1 または S_2 を駆動してふたをしめる。

(8) 真空コンタクタを閉じ、加熱を開始する。

以上の加熱シーケンスは、大略図 13 のタイムチャートのとおりである。

6. 運 転 結 果

図 14 はインダクタ電流制御用単巻変圧器を設けた場合の、インダクタ中央部と端部における、ビレットに鎖交する磁束密度の比の実測結果を示したものである。加熱試験の結果、ビレット入時、

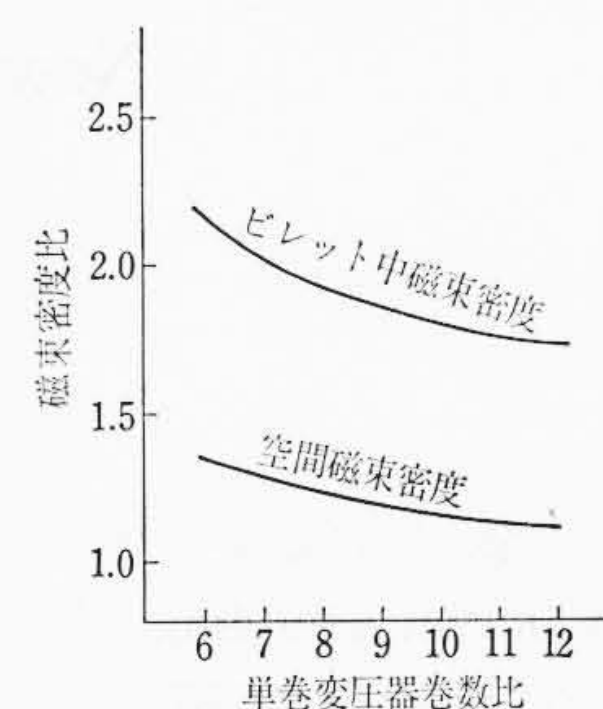


図 14 ビレット中央部に端部の磁束密度

ビレット端部と中央部の磁束密度の比を約 1.8 にすることにより、良好な温度分布を得ることができた。

7. 結 言

ビレットを誘導加熱する場合、ビレット長手方向の温度分布を調整する方法として、単巻変圧器による方法を開発し採用した結果、良好な温度分布が得られた。その概要を紹介するとともに、適用した線材圧延機用 475 kW ビレットヒータ設備の概要を紹介した。誘導加熱装置は数多くのすぐれた特長を有し、高度の性能、高い生産性の要求される金属工業界において果たす役割は大きい。

終わりに本稿を執筆するにあたり終始ご指導とご援助をいただいた関係各位に深く謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- (1) 後藤：日立評論 49, 625 (昭 42-6)
- (2) 特許出願中
- (3) 渡辺, 後藤：482, 昭 43 電気学会東京支部大会予稿

Vol. 31

日 立 造 船 技 報

No. 3

目 次

■ 論 文

- ・重クロム酸ソーダの流動乾燥
- ・噴流層において安定な流動化状態が得られる限界条件
- ・0.55% C 鋼の耐遅れ破壊性に及ぼす焼もどし強度の影響

- ・巨大船の特異振動
- ・バルクキャリアの船体縦曲げに起因するせん断応力
- ・船用自然循環ボイラの圧力および水位の過渡応答
- ・ステンレス鋼の溶液法によるけい光 X 線分析

.....本誌に関する照会は下記に願います.....

日立造船株式会社 技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60 郵便番号 554