

ビレット誘導加熱装置

Billet Heater

後 藤 篤*
Atsushi Gotô

要 旨

金属の押出加工のための加熱装置として、重金属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。本装置は従来使用されてきた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、今後新しい工業用加熱装置として金属工業界に果たす役割は大きいものと思われる。本稿はこのビレットヒータの特長、加熱理論および構造について、その概要を述べたものである。

1. 緒 言

最近の押出機、圧延機などの熱加工機の進歩はめざましく、大形化、自動化などによって品質の向上、コスト低減に多大の貢献をしている。これに伴い押出、圧延などの熱加工のための加熱装置も設備の合理化が要求され、従来燃焼式加熱炉にたよっていた加熱部門も、電熱装置とくに誘導加熱装置の工業化により、合理化、自動化が進められている。誘導加熱装置が採用されるおもな理由には次のものがある。

- (1) 短時間で加熱できるので、ビレット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、熱加工機と簡単に組み合わせることにより、自動化が容易となる。
- (3) 温度検出、温度制御が簡単である。
- (4) 加熱装置の起動、停止が簡単にできる。
- (5) 据付面積が小さいため、熱加工機との組合せ配置が合理的にできる。
- (6) 作業は熟練を要せず、作業人員も節約できる。
- (7) 有害な煙やガスの発生がなく、作業環境が清潔である。

日立製作所では国産最大容量の8t るつぼ形低周波誘導炉をはじめ数多くの誘導炉の製作実績や誘導加熱反応釜などの経験を生かして、銅および銅合金ビレットの押出加工用として800kW ビレットヒータおよび550kW ビレットヒータをあいっいで完成納入し、その操業実績の優秀性も立証されている。表1にこれらのビレットヒータのおもな仕様を示す。

2. ビレット中の温度分布

ビレットを誘導加熱する場合、ビレット中の電流分布は次式で与えられる。

$$i = i_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{\mu f}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで

- i : ビレット表面より x の点の電流密度 (A/cm²)
- i_0 : ビレット表面の電流密度 (A/cm²)
- δ : 電流浸透深さ (cm)
- ρ : 固有抵抗 (Ω -cm)
- μ : 透磁率
- f : 周波数 (c/s)
- x : ビレット表面からの距離 (cm)

とする。

* 日立製作所国分工場

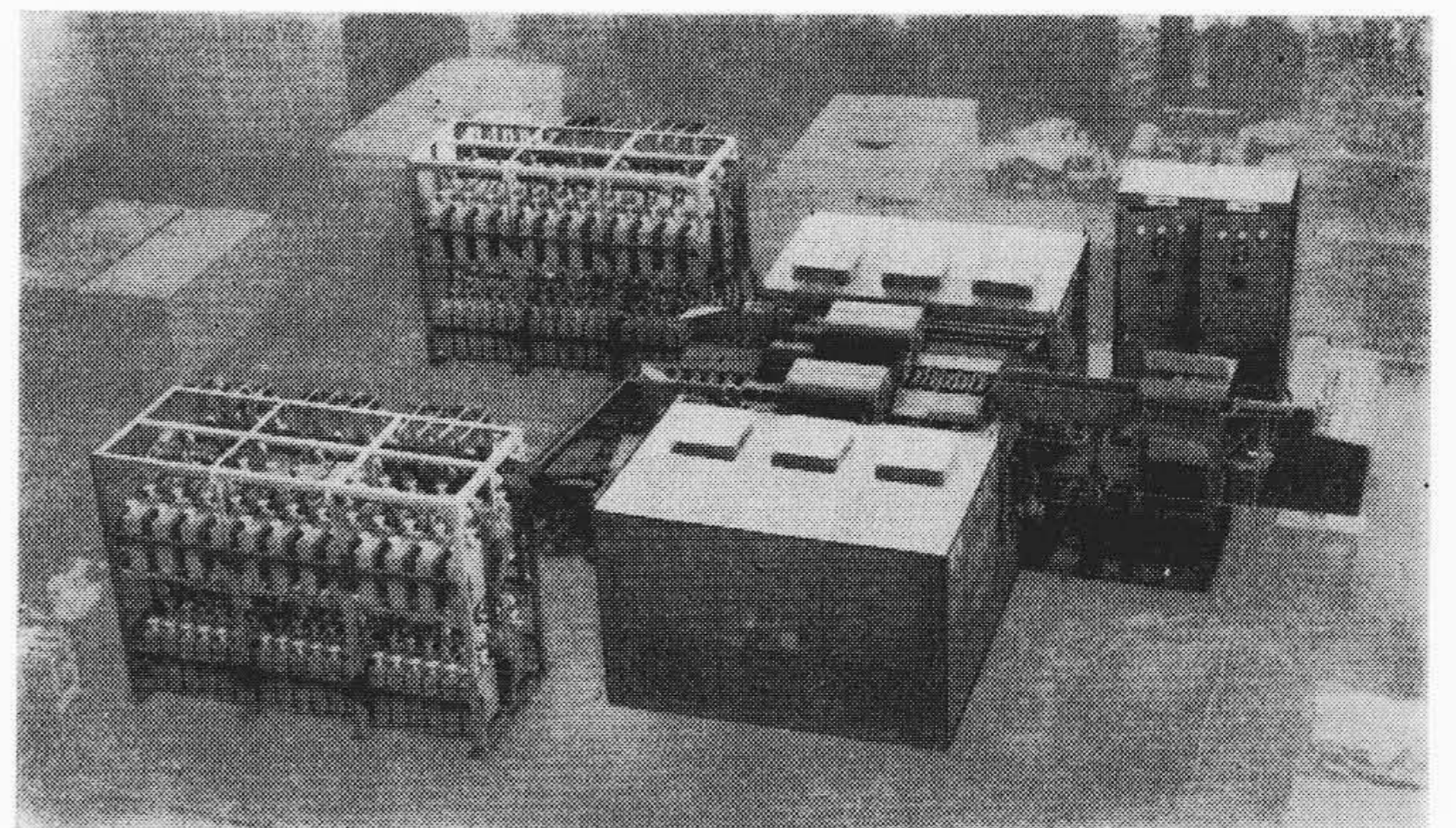


図1 工場にて組合せ試験中の
800kW×2ビレットヒータ設備

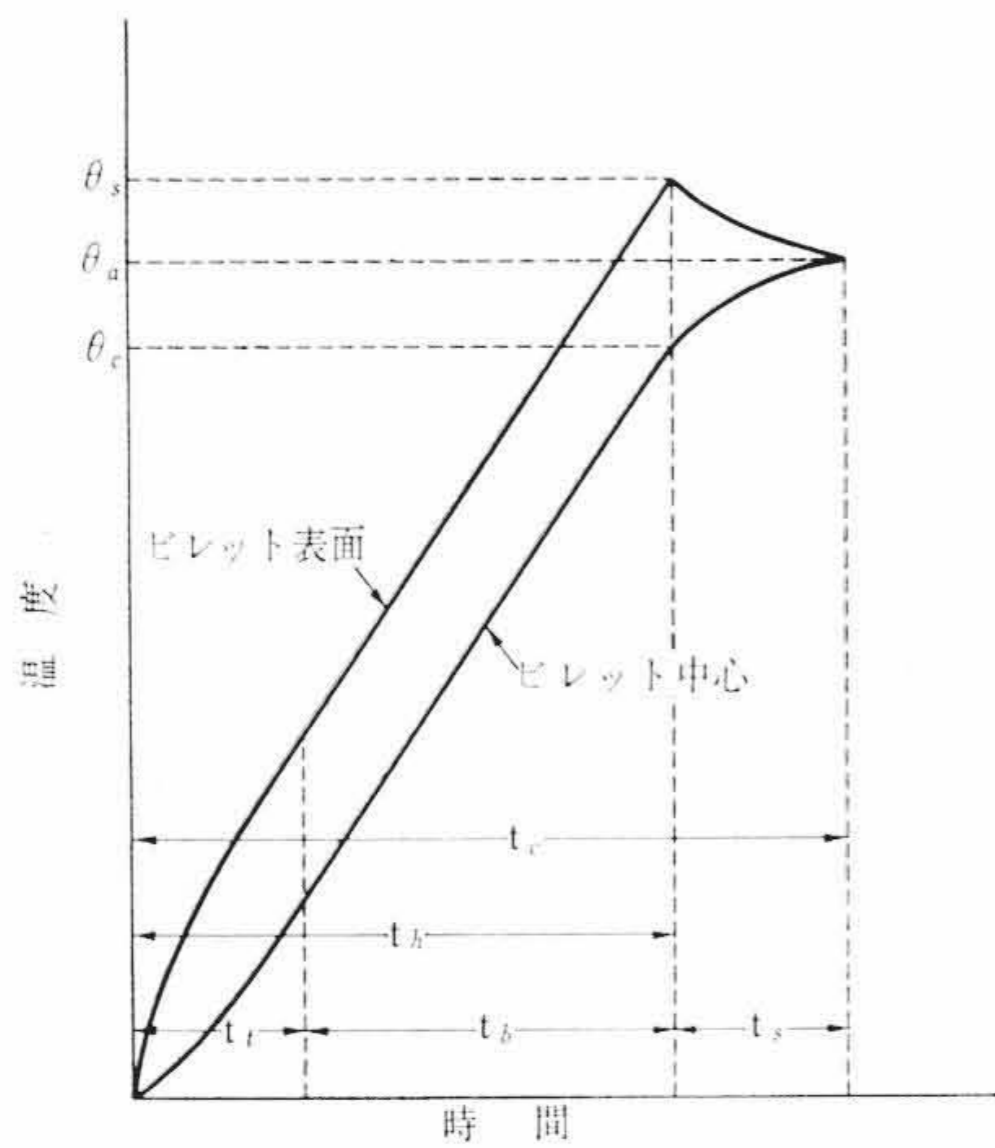
表1 ビレットヒータのおもな仕様

	800 kW ビレットヒータ	550 kW ビレットヒータ
形 式	LH-3	LH-1
定 格 入 力	2×800 kW, 3,300 V, 60 c/s, 3φ	550 kW, 300 V, 50 c/s 1φ
被 加 熱 物	銅および黄銅ビレット	銅 ビレット
被加熱物寸法	212φ×750 L 176φ×750 L	200φ×450 L
加 熱 温 度	銅最高 900℃ 常用 800~850℃ 黄銅最高 800℃ 常用 700~750℃	最 高 900℃ 常 用 850℃
処 理 能 力	銅 36 本/h * 黄銅 45 本/h	22.5 本/h

* 処理能力は、212φ×750 L ビレットの場合を示す。

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。図2は一定加熱表面電力密度で円柱ビレットを加熱するときのビレット表面と中心における温度上昇の模様を示したもので、加熱初期においてはビレット表面は中心にくらべ早く温度上昇する。この過渡温度上昇状態を経て、ビレット表面と中心が同じ温度上昇速度を有する定常温度上昇状態になる。いっぽうビレットが所定温度に達し電源を切ると、ビレット表面温度はしだいに下降し、中心温度は表面からの熱の拡散によりさらに昇温をつづけ、しだいにビレット中の温度分布は均一化される。

図2において過渡温度上昇時間を t_i (s)、電源遮断後ビレット表面と中心の温度差がなくなる均熱時間を t_s (s)、誘導加熱による定常温度上昇状態におけるビレット表面温度を θ_s (°C)、中心温度を θ_c (°C) とすると、 t_i , t_s , および $\theta_s - \theta_c$ は次記で与えられる⁽¹⁾。



t_t : 過渡温度上昇時間
 t_d : 定常温度上昇時間
 t_h : 加熱時間
 t_s : 均熱時間
 t_c : 加熱サイクル

図2 円柱ビレットの加熱特性 (一定表面電力密度の場合)

表2 物理定数

	γ (g/cm ³)*	k_c (cal/cm s°C)*	c (cal/g°C)**	ρ (Ω -cm)**
銅	8.89	0.94	0.100	5×10^{-6}
黄銅	8.43	0.29	0.105	12×10^{-6}

* 20°C における値を示す

** 銅では 20°C より 900°C 黄銅では 20°C より 800°C までの平均値を示す

$$t_t = \frac{\gamma c a^2}{4 k_c} \dots\dots\dots (3)$$

$$t_s = \frac{\gamma c a^2}{4 k_c} \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta_s - \theta_c = \frac{P_n a}{2 k_c} F \cdot (P_n / P_a \cdot a / \delta) \dots\dots\dots (5)$$

$$F(P_n / P_a \cdot a / \delta) = 1 - \frac{1}{P_n / P_a} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 a / \delta}} \cdot \frac{ber^2 \sqrt{2 a / \delta} + bei^2 \sqrt{2 a / \delta} - 1}{ber \sqrt{2 a / \delta} ber' \sqrt{2 a / \delta} + bei \sqrt{2 a / \delta} bei' \sqrt{2 a / \delta}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで

- a : ビレット半径 (cm)
- c : ビレットの比熱 (cal/g°C)
- γ : ビレットの比重 (g/cm³)
- k_c : ビレットの熱伝導率 (cal/cm・s°C)
- P_n : 有効電力密度 (cal/cm² s)
- P_a : 総電力密度 (cal/cm² s)

とする。

押出加工のためのビレット加熱のように均熱加熱を行なうには、(5)式より判断して低い電力密度で加熱することがよい。加熱効率が悪くなるので、普通は加熱時間の短縮、熱効率向上のため、できるかぎり高い電力密度で急速加熱を行ない、適当な均熱時間をとる方法が採用される。もちろん急速加熱の場合でも、(1)式で求められる過渡温度上昇時間以上に加熱時間を設定する必要がある。また急速加熱の場合の均熱方法としては、ビレットヒータから押出機へ至るビレット運搬時間を利用するのが普通であるが、加熱材料により、または均熱化を厳密に行なう必要がある場合には、ビレットヒータの後段に均熱炉をおくことがある。

今、表1に示す仕様のビレットヒータにおける加熱特性について調べてみる。計算に使用した物理定数を表2に示す。(1)式を用い

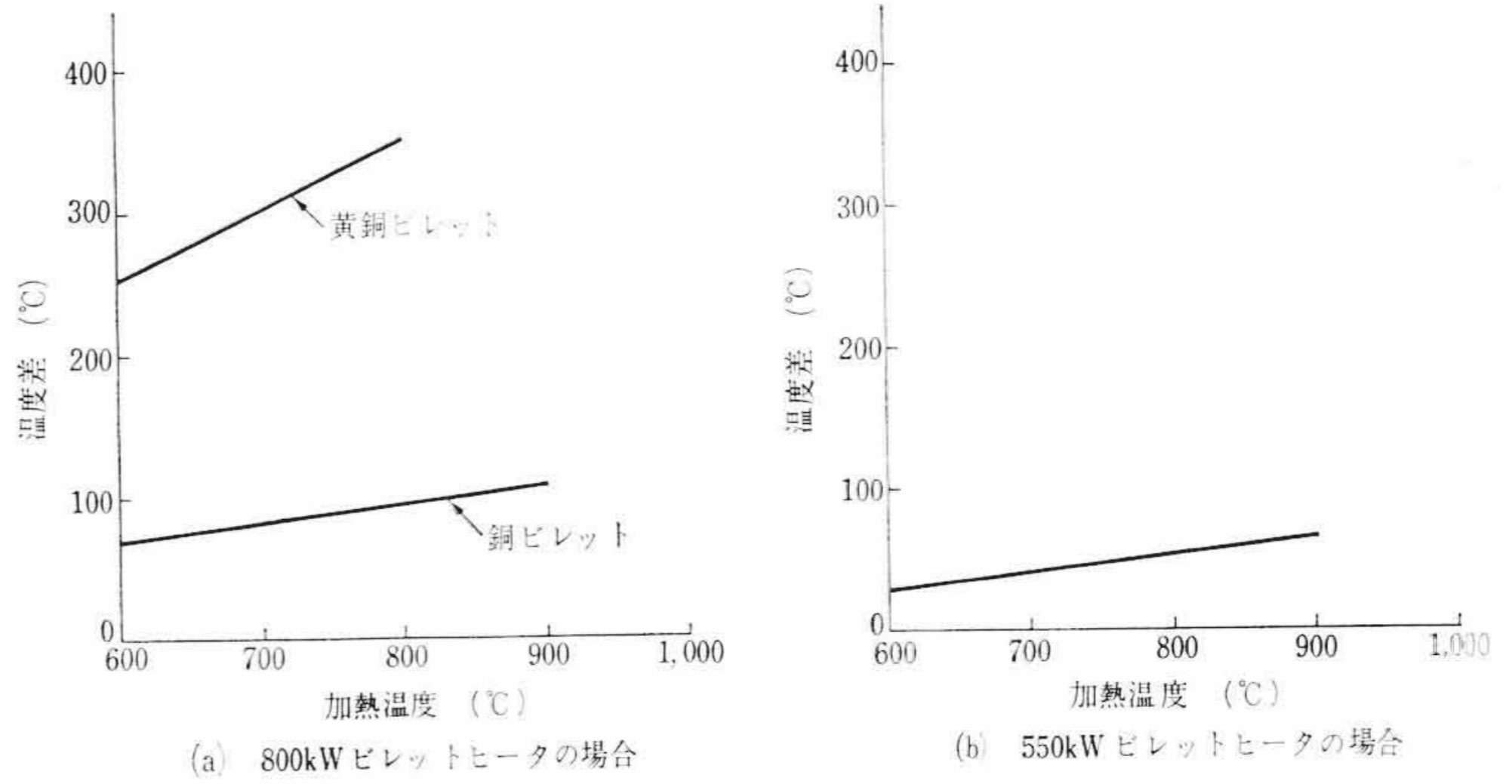


図3 処理能力一定の場合のビレット加熱温度に対するビレット表面—中心間温度差

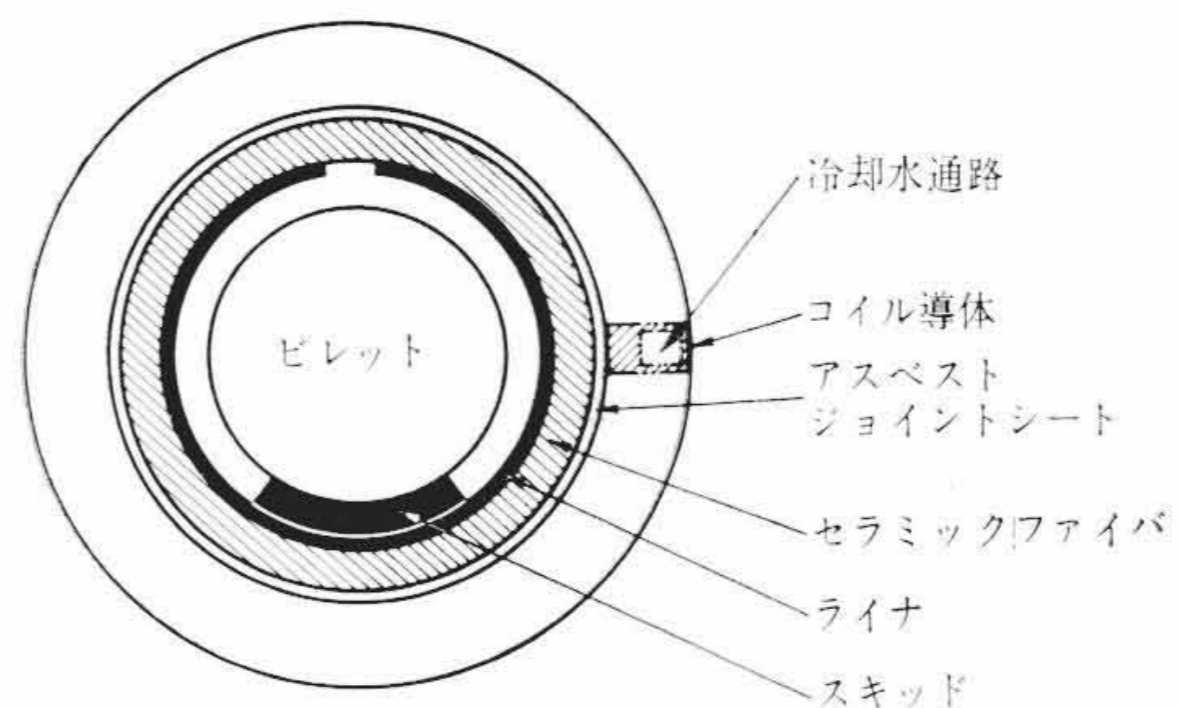


図4 加熱コイル断面図

て求めた過渡温度上昇時間 t_s は、

- (a) 800 kW ビレットヒータ (212φ ビレット) においては、
銅 26.6 s 黄銅 85.6 s
- (b) 550 kW ビレットヒータ (200φ ビレット) においては、
銅 23.6 s となる。

(a) の場合1台のビレットヒータで黄銅ビレットを45本/h加熱することは不可能のため、ビレットヒータを2台設置することにした。また(b)の場合は、加熱時間の面からはビレットヒータ1台で1本ずつ加熱すればよいが、この場合ビレット長が短く、加熱コイルインピーダンスが小さすぎて加熱効率がわるいため、加熱コイル中に2本のビレットをそう入し、順次加熱する Stage heating を採用した。

図3は(3), (4)式から求めた処理能力一定の場合の加熱温度に対するビレット表面—中心の温度差の関係を示したもので、黄銅ビレットは銅ビレットに比べ、熱伝導率が悪いので、表面—中心間に大きな温度差が生ずる。さらに黄銅ビレットは長い均熱時間を必要とするため、800 kW ビレットヒータでは、均熱工程はビレットヒータ後段に設けたビレット均熱用抵抗炉内にて約4分間均熱作業を行なうようにした。このことは装置全体の稼働率を向上させる結果となった。

3. ビレットヒータの構造

3.1 加熱コイル

図4はビレットヒータの加熱コイルの断面を示したものである。加熱コイル用導体は、内周部を肉厚とした特殊断面形状の中空成形導体をまいたもので、ビレット表面からのふく射熱およびコイル自体で発生する銅損によるコイルの過熱を防止するために、水冷式コイルとした。コイル用冷却水の断水または減少はコイル焼損事故をひきおこすため、液流開閉器およびコイル用温度リレーを設けて、コイルの焼損を防止した。コイル内周部には断熱効果の大きいセラ

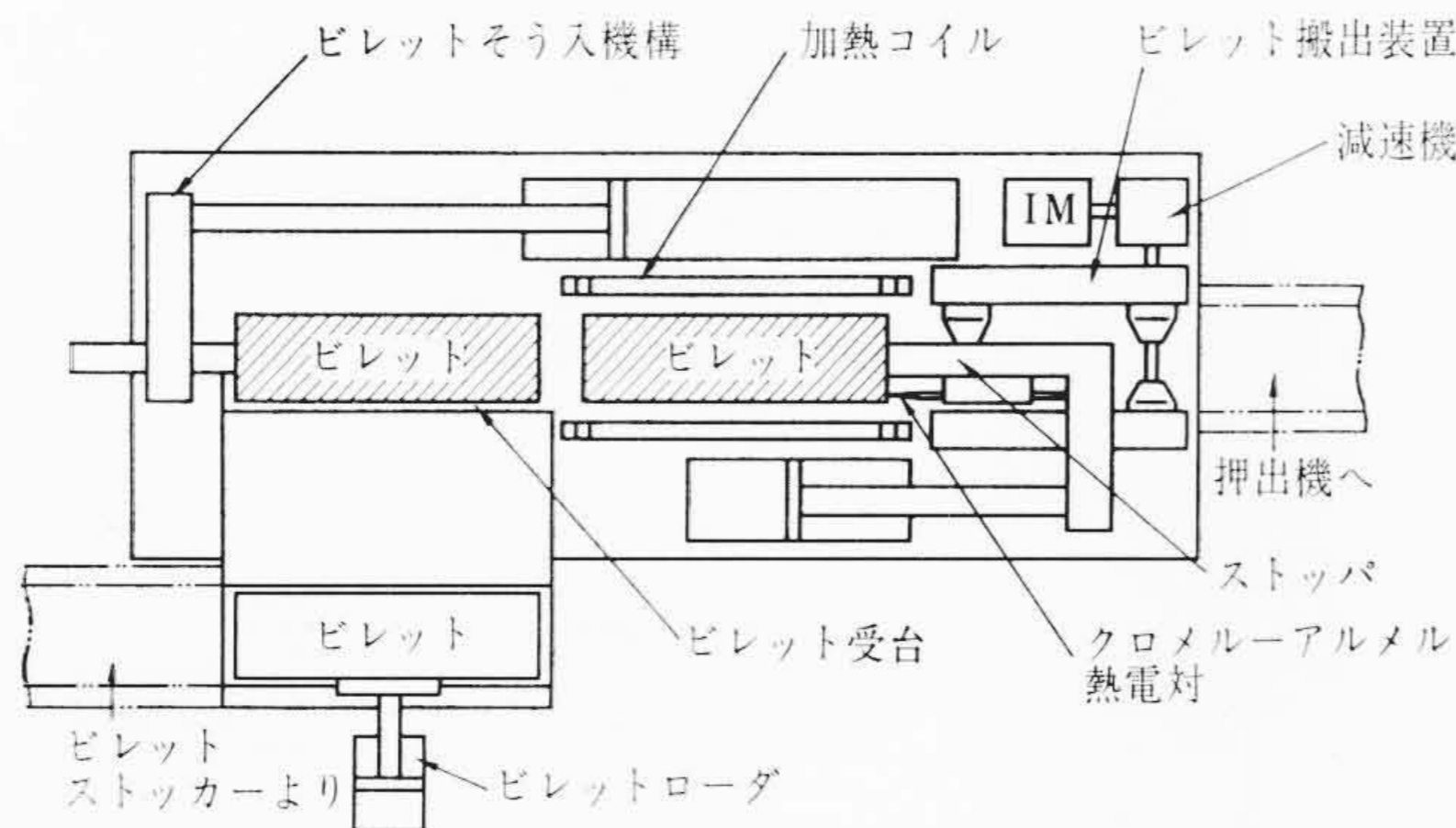


図5 ビレット送り機構原理図

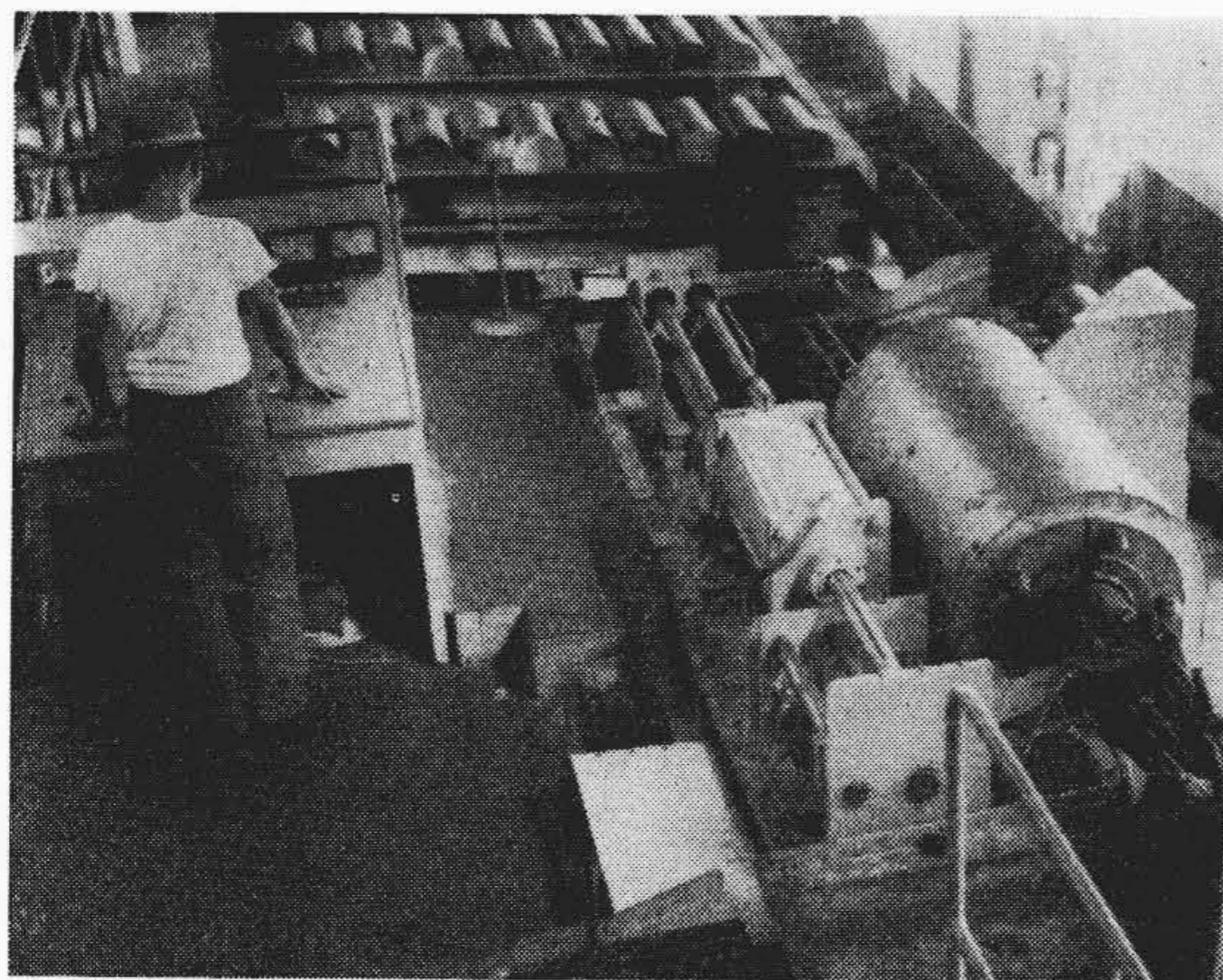


図6 運転中の 550 kW ビレットヒータ

ミックファイバからなる断熱層を設け、ビレット運搬中に働く機械力に対しては、コイル中に耐熱性金属からなるライナ、スキッドを設け、コイルを保護している。

ビレットを効率よく誘導加熱するには、コイルとビレット間の電磁結合を密にすることが必要で、結合が粗になると力率が低下し効率よく電力を投入しにくくなる。そこで 800 kW ビレットヒータでは、212φと 176φの 2 種類のビレットに対しそれぞれ専用の加熱コイルを設け、簡単に交換できる構造にした。

3.2 ビレット温度検出機構

誘導加熱によるビレットヒータの大きな特長は、直接ビレットの温度をふん囲気に左右されることなく測定制御できることである。高温度測定法としては、熱電対による方法とふく射温度計による方法がある。銅、黄銅加熱用ビレットヒータのビレット加熱温度は、最高 900°C と比較的低いため、クロメル-アルメル熱電対を利用した。

熱電対を用いて温度を測定するときは、熱電対と被測温物表面間の接触がよく、十分熱の授受が行なわれること、熱電対素線による熱伝導誤差のすくないこと、表面温度が測温のため影響を受けないこと、温度に対する応答速度の速いこと、ビレットに働く機械力に耐えることなどの注意をはらわねばならない。ビレットヒータの温度検出機構ではこの点を十分に配慮して、6.5φのクロメル-アルメル裸熱電対を利用し、大きな接触圧力を得るために、先端を鋭角にしてスプリングで押しつける構造にした。また正確な温度測定を行なうためには温度検出機構は常に保守点検を必要とするので、簡単に取りはずすことのできる構造とし、その取付位置はビレットに働く機械力を防ぐストッパー上とした。

ビレットを誘導加熱する場合、その発熱原理から、発熱層はビレ

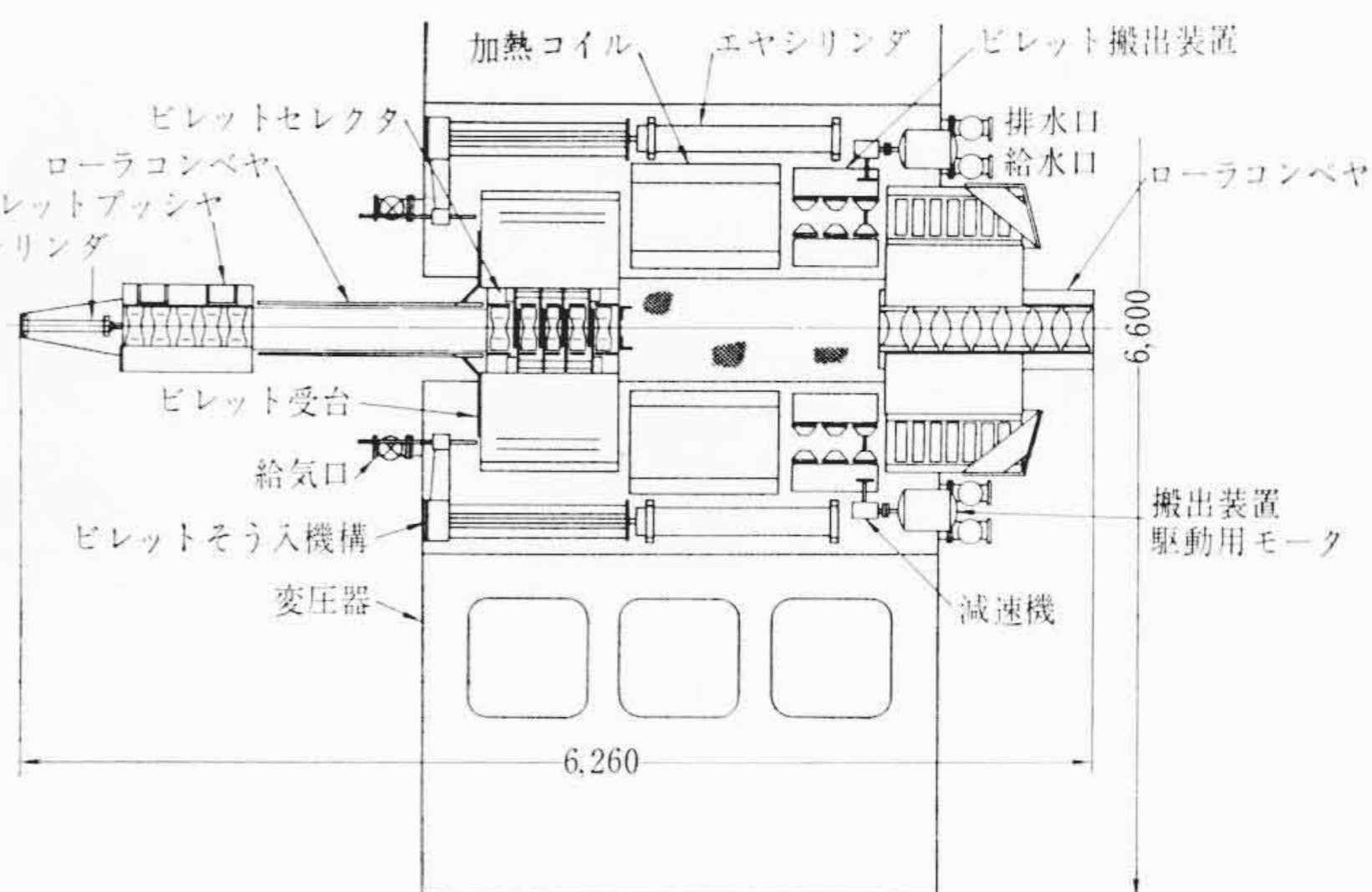


図7 ビレットヒータ 2 台並列運転の場合のビレット送り機構

ット表面層に集中するため、温度測定点としては最高温度になるビレット表面が望ましいが、ビレット端面では、その部分の発生熱量に対して放熱面積の割合が大きくなるため、ビレット中央部に比べかえって温度が低くなる。したがってビレット温度測定点はビレット端面におけるビレット表面より約 10 mm の点とした。

3.3 ビレット送り機構

ビレット加熱に誘導加熱が採用される場合には、高速自動生産設備が多いので、加熱コイルも含めたビレット送り機構は、ビレットヒータ、押出機も含めて有機的に組み合わせ、確実にしかも高速に運転できるものでなければならない。

図5はビレットヒータのビレット送り機構の原理を示した平面図である。ビレットの一連の動きは次のようになる。すなわちローラコンベヤでビレットストックより運ばれて来たビレットはビレットローダによりビレットヒータ上に送りこまれる。ビレットの加熱コイル内への装入および搬出は加熱ビレットの搬出と未加熱ビレットの装入がエアシリンダを用いたそう入機構により同時に行なわれ、加熱ビレットはビレット搬出装置により押出機へ運ばれる。ビレット昇温中はビレットに働く電磁機械力によりコイル外へ飛び出すことを防止するため、ストップによりビレットを固定するが、ビレット運搬中はストップをはずす必要があり、エアシリンダによりストップの運動を行なうようにしてある。これらビレット送り機構の動作はすべてビレットの加熱状態に応じて自動制御され、動力源としては圧縮空気が用いられる。図6は運転中の 550 kW ビレットヒータを示している。

図7は 800 kW ビレットヒータ 2 台並列運転の場合のビレット送り機構の配置図を示したもので、2 台並列運転の場合、ローラコンベヤで送られたビレットを 2 台のビレットヒータに分割することが必要で、これはビレットローダと同一動作原理のエアシリンダを用いたビレットセクタにより行なわれる。

4. 電源設備

800 kW 三相ビレットヒータの主回路接続図を図8に、550 kW 単相ビレットヒータの主回路接続図を図9に示す。商用周波を利用したビレットヒータの加熱コイルは低インピーダンスのため動作電圧が低いので、加熱コイルに必要な無効電力は、変圧器自身で供給する方法が経済的である。したがって変圧器容量はビレットヒータの実効電力より相当大容量になっているのが普通である。

800 kW 三相ビレットヒータの場合、変圧器は 1,050 kVA の単相変圧器 3 台からなり、一次コイルを H 種絶縁の強制風冷式、二次コイルを水冷式として、変圧器の小形化をはかった。変圧器と加熱コイル間に流れる電流は低力率で大電流のため、配線による電圧降下

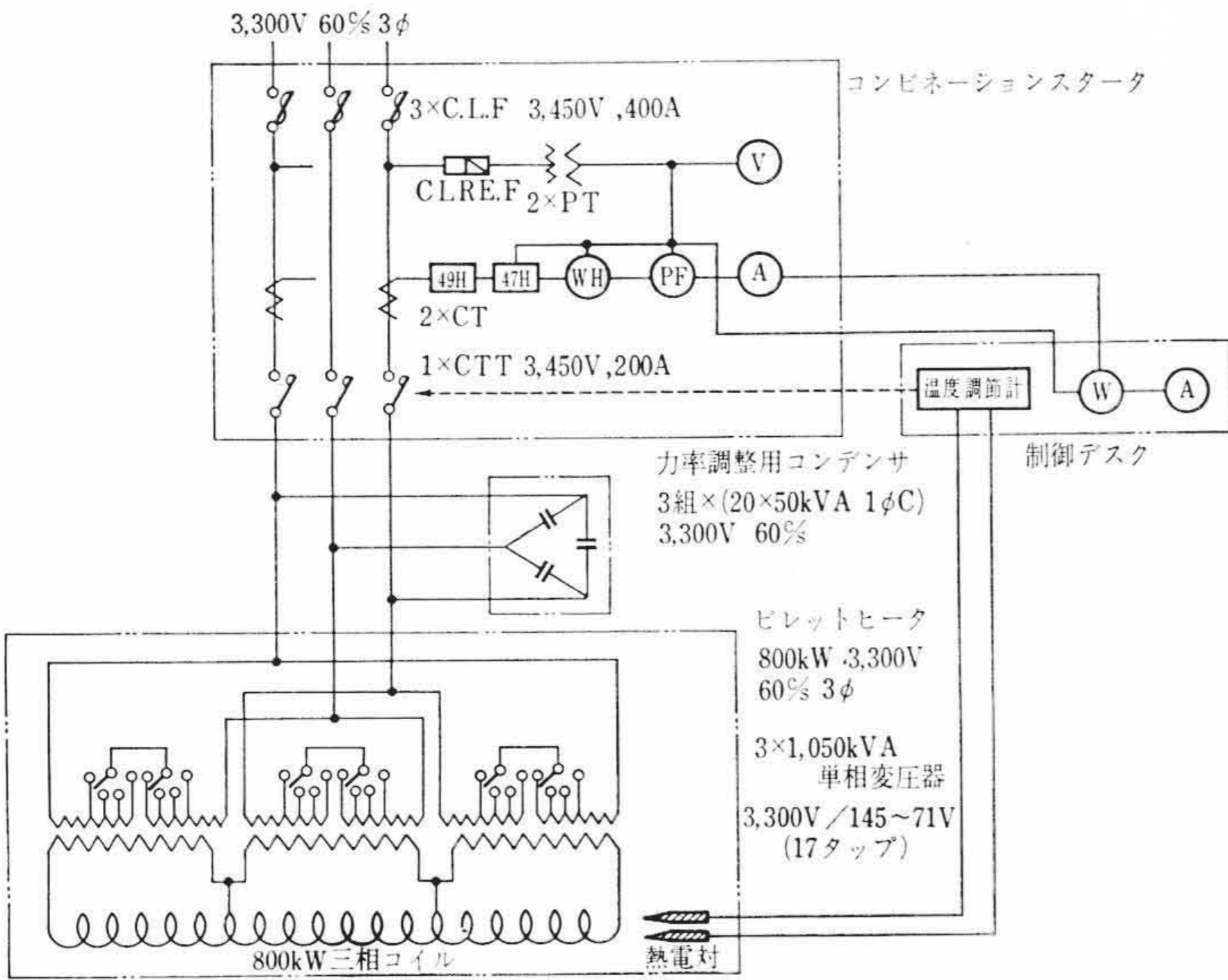


図8 800 kW ビレットヒータ主回路接続図

を極力小さくするため、変圧器をビレットヒータキュービクル内に収めた。コイル入力調整は変圧器一次コイルに設けた粗タップ、密タップの組み合わせにより、145V～71Vと広範な電圧調整が行なわれる。

加熱コイルの力率を改善するコンデンサは全容量3,000kVAで、可変群と固定群に分割され、可変群はコイル力率に応じて着脱できるようにしてある。ビレットヒータは金属の溶解にくらべてコイル力率の変化が小さく、加熱時間も短いため、ビレット加熱中コンデンサの開閉は行なわず、ビレット寸法、ビレット材質の変更の場合のみ行なう方法がとられた。

図9に示す550kW単相ビレットヒータの場合、ビレットヒータの据付面積が小さく、変圧器をビレットヒータキュービクル内におさめることが不可能のため、変圧器は別置された。この変圧器は2,400kVAの油入自冷式変圧器で、力率改善のため2,000kVAのコンデンサを付属させた。単相ビレットヒータは三相平衡装置を必要とするため、400kVAリアクトル、8x50kVAコンデンサからなる三相平衡装置を設けた。なお、ビレットヒータに単相コイルを採用した理由は、ビレットヒータと変圧器は配置上別置となり、その間かなりの距離があり、この間に流れる電流が低力率大電流となり、三相ビレットヒータのように6組のブス配線を行なうことは経済的に不利なためである。なお単相2枚のブス配線をサンドウィッチ状配置として、電圧降下を極力少なくしてある。

5. 操作盤およびビレットヒータの動作

図10にビレットヒータの操作盤を示す。ビレットヒータの運転は普通作業員1人で行なわれるため、ビレットヒータ、操作盤ともに監視のしやすいようデスクタイプとし、盤面上には運転に最小限必要な監視計器、開閉器、信号灯などを設けている。

操作盤はビレットヒータの中核部として、ビレットヒータ、押出機と連動して運転するための自動制御を行なうもので、ビレットの加熱温度の制御と搬出搬入の指令を行なっている。

5.1 ビレットの加熱制御

ビレットの加熱制御は、さきに述べたクロメル-アルメル熱電対とEOI形温度調節計の組み合わせにより行なわれる。加熱開始の条件としては、冷却水が通水していること、ストップが正規の位置に復帰していること、次の未加熱ビレットが加熱コイルの前にあること、ビレット温度の検出が正しく行なわれていることの4条件が

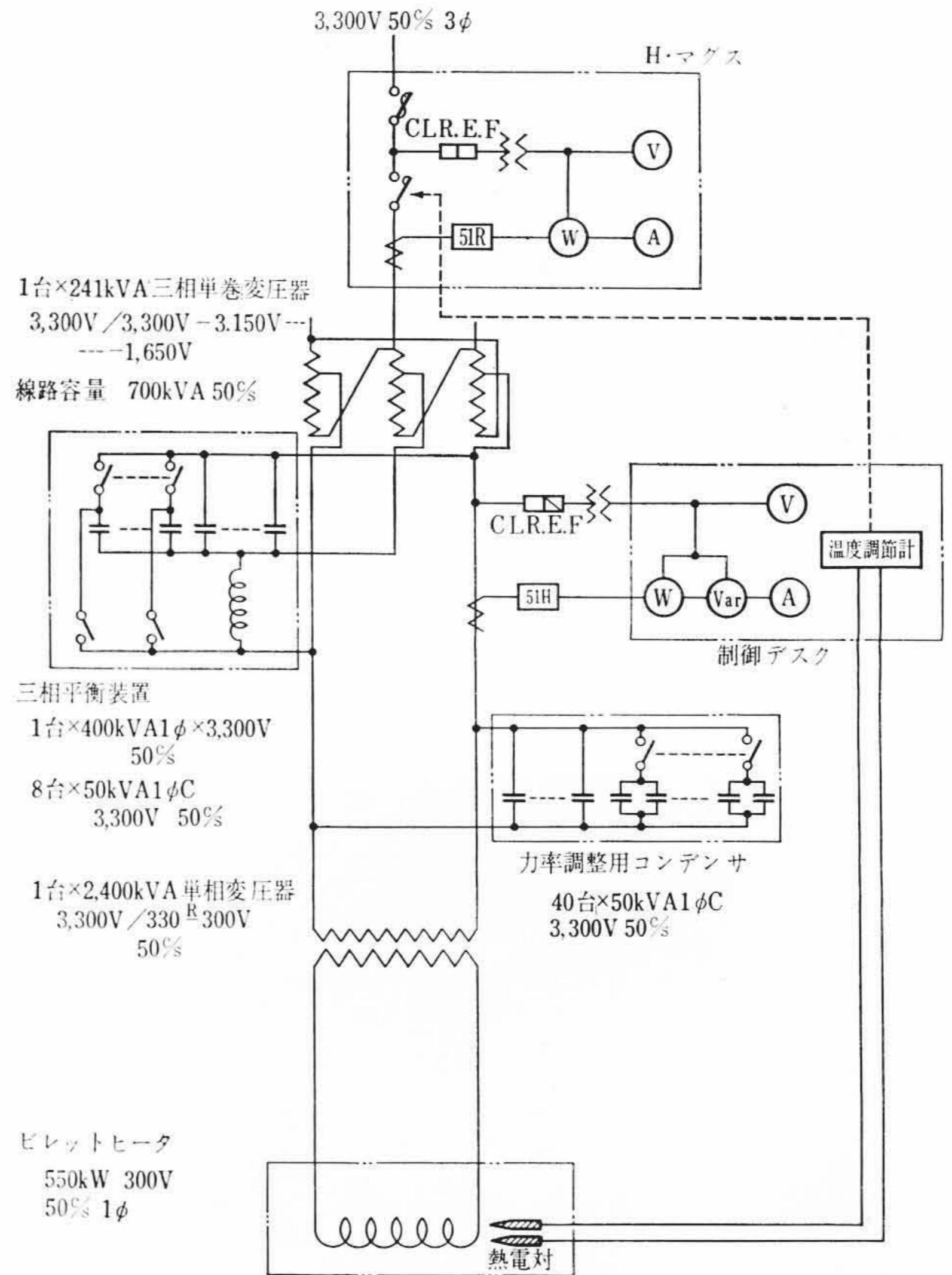


図9 550 kW ビレットヒータ主回路接続図

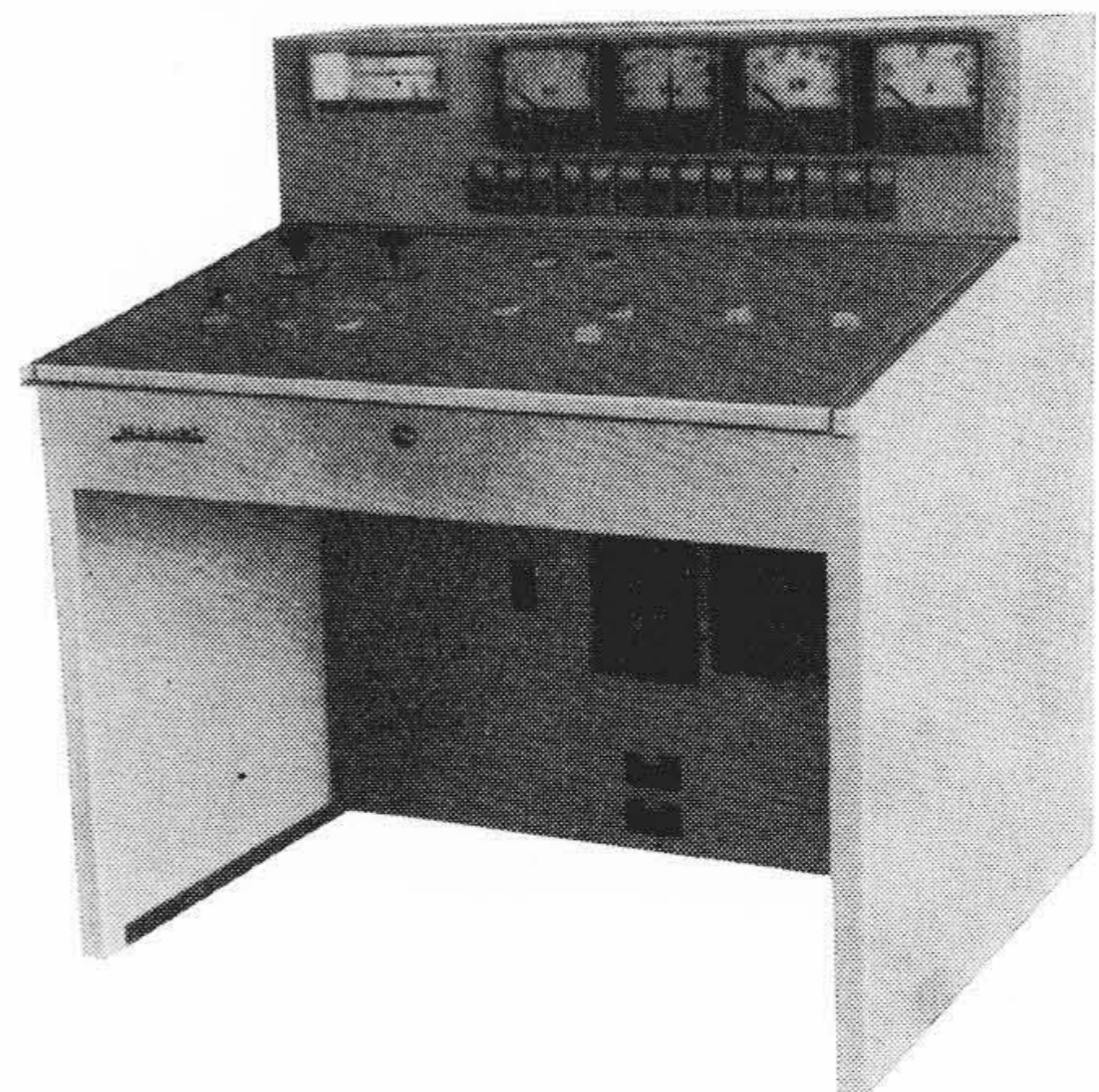


図10 ビレットヒータ操作盤

あり、これらの条件が満足されれば、ビレットの通電加熱が開始される。ビレットヒータの電源遮断はビレットが設置温度に達した場合温度調節計よりの指令により自動的に行なわれる。昇温ビレットはビレットヒータから搬出されるまで、ON-OFF制御により一定温度に保持される。

5.2 ビレットの送り制御

加熱ビレットは押出機の搬出指令によりビレットヒータから押出機に送り込まれる。この場合、搬出指令によりまずストップが除去され、リミットスイッチにてストップが完全に除去されたことを確認して、ビレットそう入機構により、次の未加熱ビレットが加熱コイル中に押込まれることによって搬出される。加熱ビレットはビレット搬出装置により押出機へ送られ、ストップ、ビレットそう入機構は加熱開始前の位置に戻る。この動作の完了後、加熱条件が満足されれば、加熱が開始され、次に加熱すべきビレットは、ロードによりビレット受台に送り込まれる。

2台並列運転の場合も上記とほとんど同じであるが、同時昇温完了時は同時にビレットが押出機に送り出される危険があるため、1号ヒータを優先するインターロックが設けられている。

5.3 保護装置

ビレットヒータを運転するには各種の保護装置が必要であり、下記のものが設けられている。

- (a) 冷却水量の減少時の保護
- (b) コイル温度上昇過大時の保護
- (c) ビレット溶融検出装置
- (d) 圧縮空気圧力低下時の保護

6. 結 言

押出、圧延などの熱加工のための加熱装置の一つとして、押出機と併用されるビレットヒータの設備の概要を紹介した。本設備は数多くのすぐれた特長を有し、高度の性能と高い生産性が要求される金属工業界において、この問題を解決するもっともすぐれた工業的加熱装置としてその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) P. G. Simpson: Induction Heating (1960, Mc Graw Hill)



特 許 の 紹 介



特許第467279号(特公昭40-19427号)

高 林 乍 人

瞬 時 動 作 付 過 電 流 継 電 器

一般に過電流継電器には誘導円板形が採用されるものであるが、誘導円板形は慣性が大きいため、その動作特性は電流が小さいときは反限時特性、電流が大きくなると定限時特性となり瞬時動作をなし得ない。

この発明はこの点を改良するもので、図1において故障電流が端子1, 2に流入すると、主コイル3を付勢し、2次コイル5、極コイル8との作用により円板11に回転力を与える。この回転力が円板11に与えられている機械的な抑制力に打勝ってこの円板11が回転すると、ある限時で接点12が閉路し、前記故障電流の一部は補助コイル14を付勢し、接点13を閉路して自己保持回路を形成するとともに、補助コイル14は引はずし接点16を閉路し、遮断器のトリップコイル15を駆動し所期の保護動作を行なわせる。

したがって上記構成によれば、小さい電流では反限時特性、大きい電流では定限時特性となり、この故障電流が任意の大きになると瞬時動作をなすものである。すなわち瞬時コイル18は補助コイル14の巻かれた同一鉄心17に巻かれ、かつ、主コイル3、補助コイル14の並列回路に直列となるように継電器の入力回路に接続されているため前記のようにある任意の電流になれば瞬時動作をするのである。

この発明は以上のように反限時、定限時特性を有する継電器に瞬時動作を付加したことによりこの発明になる継電器の使用範囲はきわめて拡大されることになり、各方面に有効に使用できるという効果がある。(西宮)

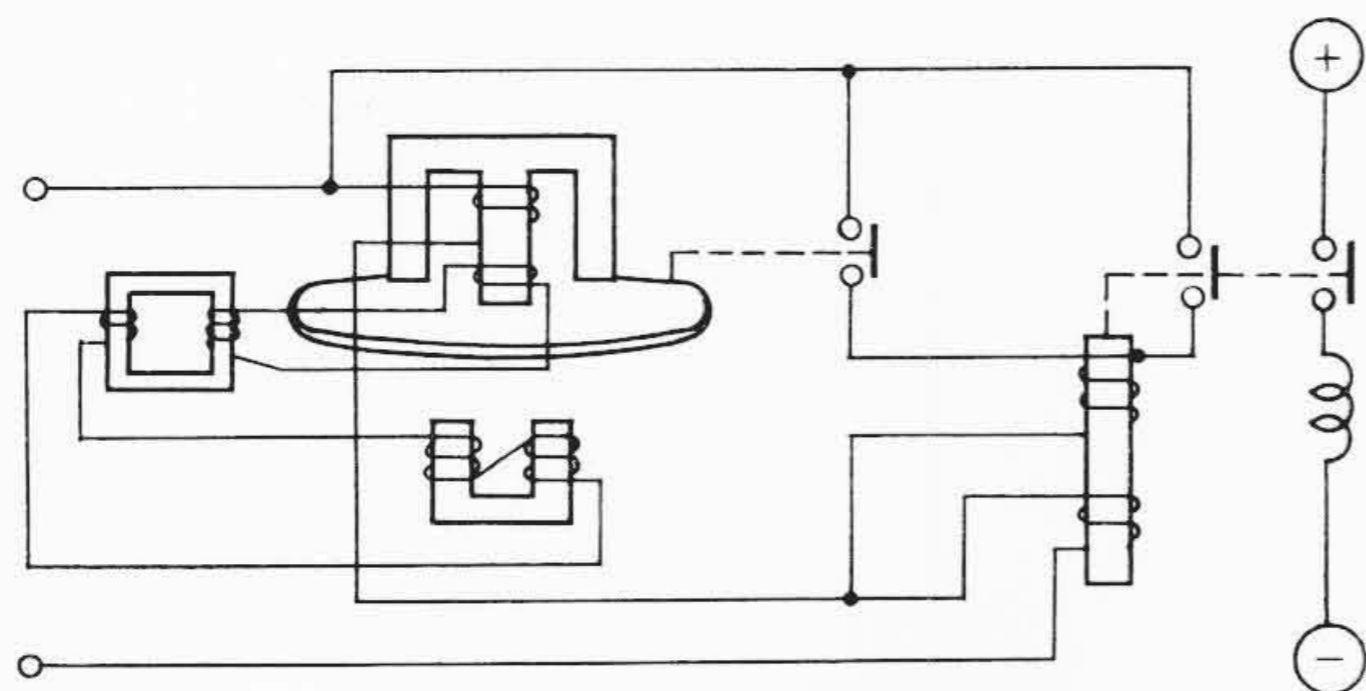


図1

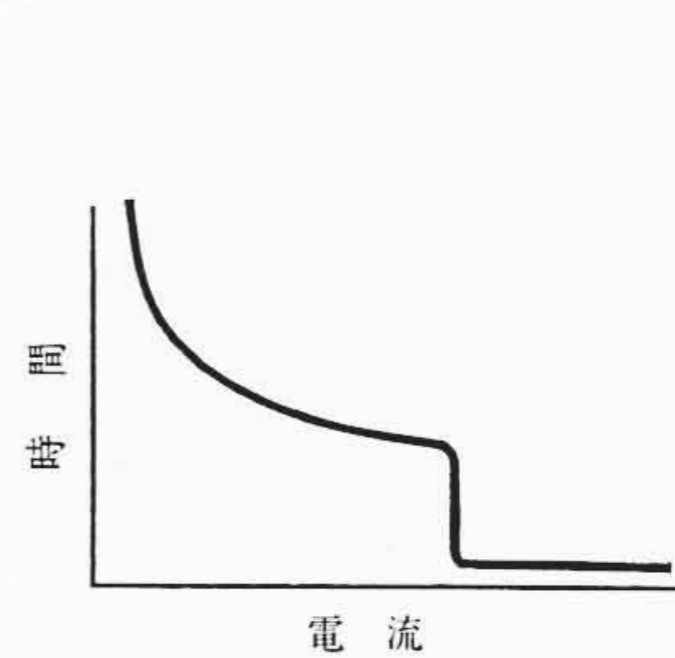


図2