

電弧炉の溶解末期自動制御

Automatic Controls at the Last Stage of Melting Term for the Electric Arc Furnace

小 西 務*
Tsutomu Konishi

要 旨

電弧炉操業においては溶解末期になっても許容最大電圧、電流で運転を継続すると、主として電弧熱のふく射により天井、炉壁が過熱され好ましくない。溶解末期検出および自動電圧切換制御は正確な溶解末期を自動的に検出し、変圧器タップ電圧を所望の値に切り換えることにより電弧の過度の露出を防止し、上記の問題を解決し、溶解期操業の自動化を可能にすることを目的としている。

本報はこのような溶解末期検出および自動電圧切換方式について具体的に検討を加え、試作した制御装置の動作原理ならびに実験結果について述べている。

1. 緒 言

近年、製鋼プラントは大形化されるとともに、エレクトロニクス技術の導入により高度の自動化が急速に進められつつあり、特に圧延ラインではカード・プログラム制御をはじめ、デジタル計算機による計算制御などが実施されている⁽¹⁾⁽²⁾。製鋼炉関係ではすでに高炉、転炉が計算制御され、相当の成果をおさめている⁽³⁾⁽⁴⁾。ところが、電弧炉においては限流リアクタに可飽和リアクタを用いることや⁽⁵⁾、電極昇降装置の速応性のよいものが開発される⁽⁶⁾など、一、二の新しい試みが見受けられる以外には最近著しい進歩は見受けられないのが現状のようである。

この進歩をはばむ原因は主として、操業上の問題が単に電氣的なものや冶金的なものに限定されず、両者が密接に結びついていることが多いと推察される。われわれは製鋼関係者との緊密な協力のもとに電弧炉操業の自動化の問題に取り組み、すでに溶解期の主要問題の一つであるリアクタ制御について解決を与え、その成果を報告した⁽⁷⁾。次に操業の自動化のうえで問題となるのは溶解末期の検出ならびに変圧器タップ電圧の自動切換えである。

溶解末期の検出方式で従来知られているものとして、天井温度を常時測定し、その上昇率が所定値以上になったときを溶解末期であると判定するものがある⁽⁹⁾。この方式は天井温度を直接測定している点で利点があるが、1,000℃以上の連続測温を必要とするため、測定精度、速応性、価格などの面に問題が多い。また、炉の初期温度、装入量、装入状態などにより温度上昇率が異なるため補正手段が必要であり、正確な溶解末期を検出するにはかなりの経験を必要とするようである。

これに対し、われわれは温度測定装置を必要としない、溶解末期自動検出方式ならびに装置を考案、開発した。この方式は自動電極昇降装置による電極の昇降状態が溶解中期と末期の間で比較的明確な相違を生ずることに着眼したものである。溶解中期では材料の溶解が進行し電弧長が大幅に変動するので、電極はそれに追従してひん繁に昇降する。ところが溶解末期になると比較的均一な鋼浴面が形成され電弧長が安定するので、電極昇降動作が非常に緩慢になる。考案した装置はこの電極昇降動作の違いにより溶解末期を検出しようとするものである。

ここでは、以上の溶解末期検出および自動電圧切換制御についての検討事項、動作原理、実験結果などをとりまとめ報告する。

表1 電弧炉操業溶解期の電氣的問題点

操業期間	電 氣 的 問 題 点		解 決 方 法	
溶 解 期	初 期	電弧電圧、電流の設定	最適電流制御	電圧、電流、リアクタのプログラム制御
	中 期	電弧電圧、電流の設定 しゃ断器の動作現象 (フリッカ)	リアクタ制御 自動電源再投入	
	末 期	末 期 の 検 出 電 圧、電 流 の 設 定	自動末期検出 電圧切換制御	

2. 溶解末期検出および自動電圧切換制御の必要性

電弧炉操業を自動的に進めようとする場合、電氣的問題点は特に溶解期に多く、それを整理すると表1のようである。このうち、溶解期の大部分を占める溶解中期の問題についてはリアクタ制御装置を試作し、実験して、その結果をすでに報告した⁽⁷⁾。次いで問題になるのは溶解末期で、特に末期検出は自動化の一環として解決しておくことが必要不可欠である。このほかに問題になるのは操業時の電圧、電流をプログラムどおりに進めてゆく一種のシーケンス制御があるが、これはほかで検討済みである⁽¹⁰⁾ので、技術的に問題は少ないと思われる。ここでは、これらの溶解末期検出および自動電圧切換えの必要性について述べる。

2.1 溶解末期検出

電弧により材料を溶解する作業を進める場合、大部分の材料が溶け落ちた時点、すなわち溶解末期の初めは炉中の状態を見られない作業者にとって正確に判断することは非常に困難である。普通、熟練した作業者は溶解期が始ってから時間、電流計の振れ、アークの発生音、電極の位置および昇降動作などの総合判断により溶解末期の検出を行なっている。ところが炉の休止時間、装入量、材料の違いなどにより判断誤りをすることがある。また、作業者の個性により溶解末期の判定基準にかなりの相違も見受けられる。なお作業者の溶解末期判定の時期は溶解末期が始まって少時のちになりがちであることも問題である。この点、溶解末期すなわち材料の大部分が溶け落ちた時点を検出することが、自動運転をしようとする場合に必要不可欠となる。

なお、溶解末期が正確に判定できると次のような問題も解決できる。すなわち、溶解中期では電極周辺に材料が存在するので、炉内の熱分布は電極周辺に集中した形となり、電弧熱が有効に利用されているが、溶解末期にはいっても同一状態で操業が続けられると、電極周辺に材料が存在しないため溶解効率が非常に悪くなる。一方、電弧熱の大部分は天井、炉壁の温度上昇に費やされるようになり、温度上昇が過度になると、これが原因で天井、炉壁の寿命が短縮される傾向を生ずる。また、最近ホット・スポットの問題が広く

* 日立製作所日立研究所 工博

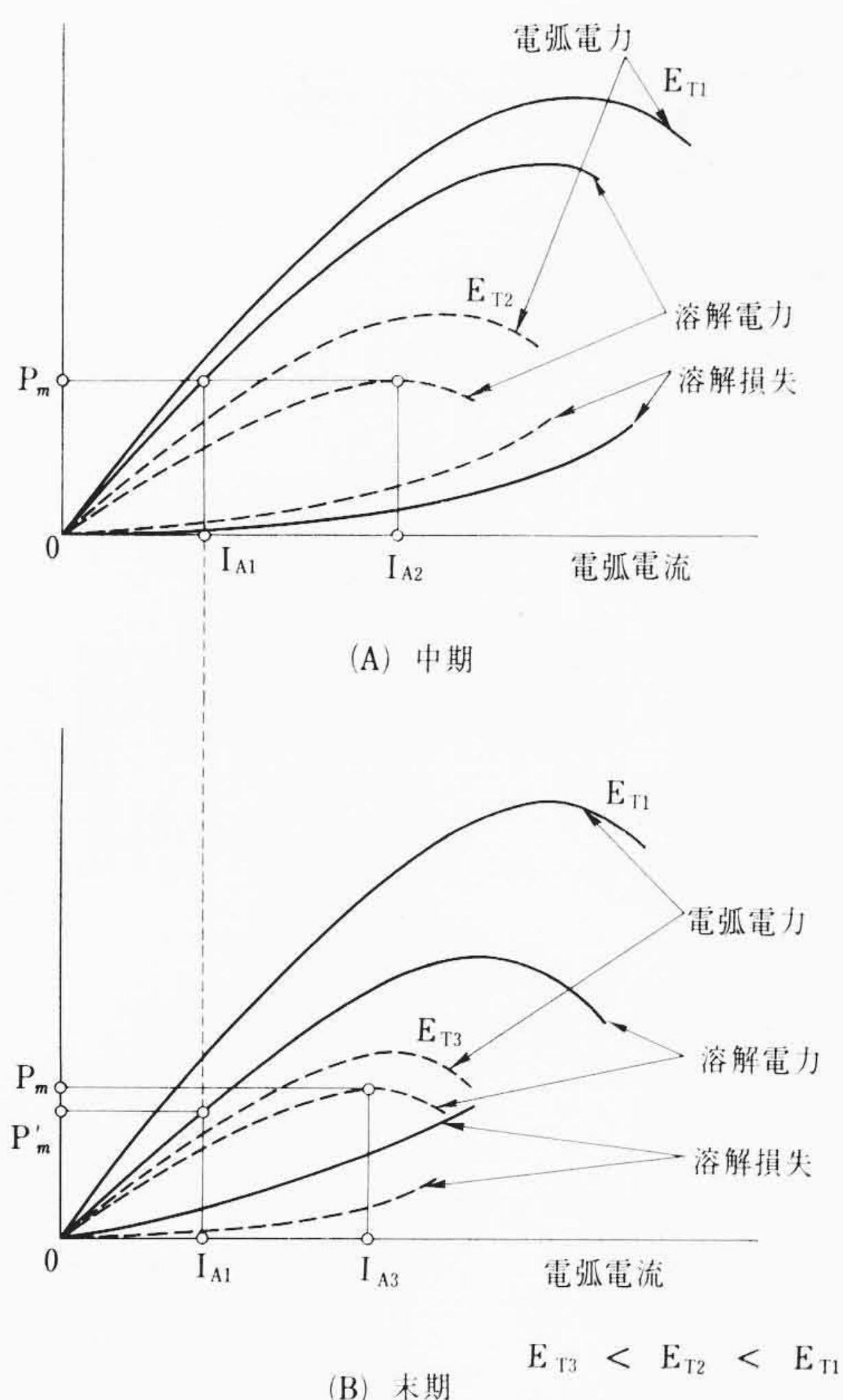


図1 炉内状態と電圧、電流の設定

取り上げられつつあるが⁽¹¹⁾、これも溶解末期の問題の一つであることが明らかにされている。このような問題解決にも溶解末期の正確な検出が効果があると予想される。

2.2 自動電圧切換制御

前節で説明したように、溶解中期のままの電圧、電流設定で溶解末期の操作を行なうと溶解効率が著しく低下するので問題を生ずる。そのため溶解末期にはいれど、適当な電圧、電流に切り換えて操作する必要がある。この場合、どのような値に電圧、電流を設定すればよいかを検討するため、電圧、電流と電弧の状態および電弧炉電力特性について考察する。

普通、電弧炉において一定の変圧器タップ電圧 E_{T1} では電弧電流に対し電弧電力の関係が図1(A)の E_{T1} のように上に凸の曲線になることはよく知られている⁽¹²⁾。変圧器タップ電圧を下げると同図 E_{T2} のような特性となる。これらは電気回路のみによって定まる特性であるが、必ずしもこの電弧電力が材料の溶解に使用されるのではない。したがって、実際の操作上溶解状態に応じて最良の電圧、電流を選ぶにはこのうえに溶解効率あるいは溶解損失を考慮することが必要である。

溶解中期のように電極の周辺に材料がとり巻いている状態では同一電流で電圧を大きくしたほうが溶解損失が小さくなるので、このような状態では電弧電力および溶解損失の特性は図1(A)のようになる。したがって、それらを合成して得られる溶解に有効に使用せられる電力は同図に示すようになり、その最大値を生ずる電弧電流は最大電弧電力を生ずる電弧電流より小さくなる。この場合、溶解に必要な許容し得る最大電力 P_m が与えられると、溶解電力を最大にする電弧電流 I_{A2} よりも、電圧 E_{T1} により決まる電弧電流 I_{A1} で操作するほうが、溶解損失が小さいことが推察できる。

次に溶解末期のように材料がほとんど溶け落ちて電弧が露出するようになると、高電圧操作をすると、かえって熱損失が増加するので、図1(B)に示すように中期と同一電圧 E_{T1} 、同一電流 I_{A1} に対し、溶解電力は $P'_m (< P_m)$ と減少する。したがって、このよう

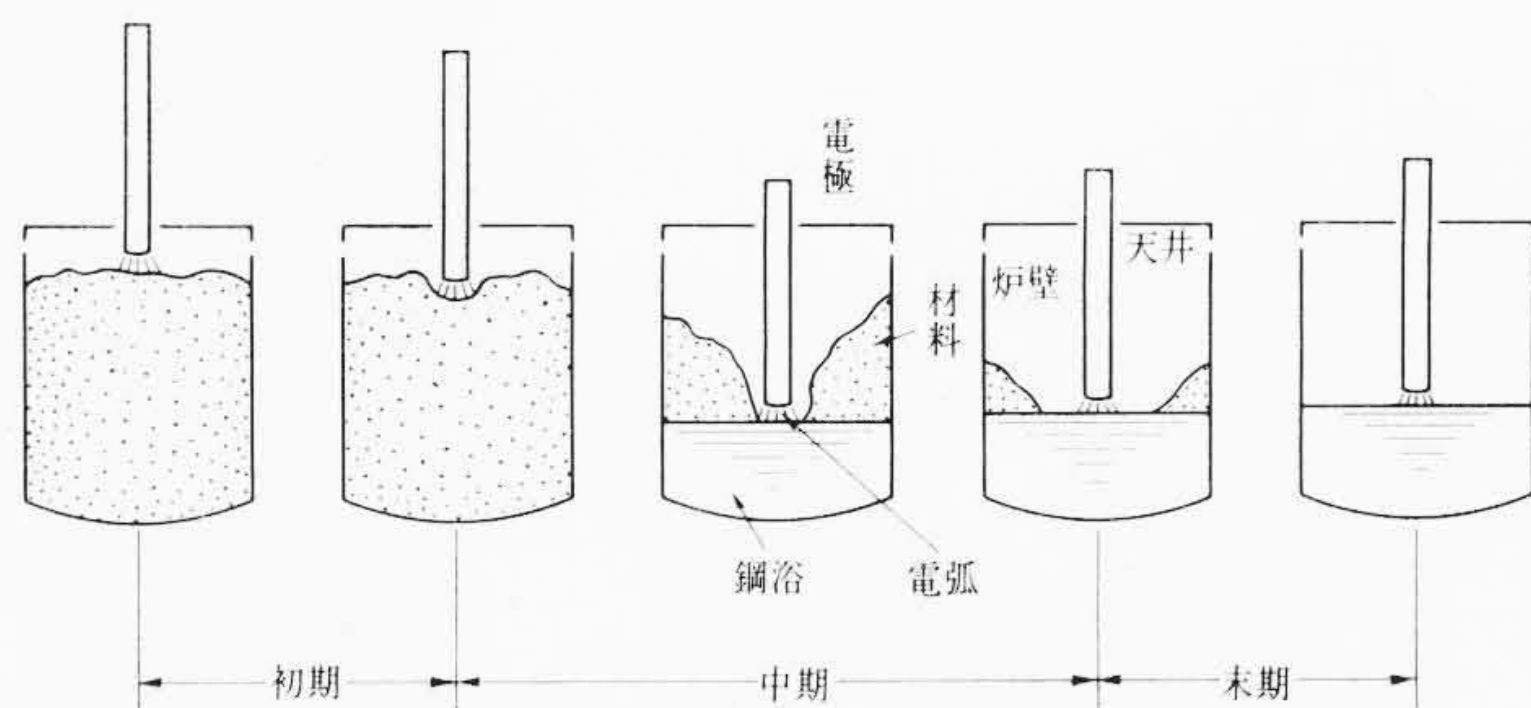


図2 溶解期の炉内状況

な炉内状態では、必要な溶解電力 P_m で最大値を生ずる電圧 E_{T3} ($< E_{T2}$) を用いて操作するほうが有利となり、いわゆる最適電流操作（最大電力を生ずる電流での操作）が望ましいことになる。このような考えは、炉内状態がこれとほぼ同一である精練期全般についてもいえることである。

以上の考察から、溶解末期検出の重要性が明らかになったであろうし、また溶解末期になれば最適電流操作に切り換えて、適当な電圧、電流で操作することにより溶解損失を小さくし、ひいては短時間に溶解期を完了して、天井、炉壁の過熱を防止できることが明らかになった。

3. 溶解末期自動検出の可能性とその実験的検討

前章の検討から溶解末期検出の必要性が明らかとなったが、次にどのようにすれば検出が可能かについて述べる。

3.1 溶解末期検出の可能性

最近の電弧炉には自動電極昇降装置が備えられていて、材料の溶解が進行するにつれて、材料に電極が自動的に追従するようになっているのが普通である。電弧炉操作の溶解期における電極の動きを観察してみる。操作上溶解期は次の3期間に分けることができる。

(1) 溶解初期

装入されたくず鉄に溶解穴を作り、電弧を埋没させる期間。

(2) 溶解中期

許容し得る最大電力を投入し、電極周辺のくず鉄を本格的に溶解する期間。

(3) 溶解末期

炉壁周辺下部に溶け残ったくず鉄を溶解する期間。

以上の各期間の代表的な炉内状況の一例を図2に示す。なお、溶解末期では炉壁下部に残存したくず鉄が、溶解しにくい状態になるので、一度断電して溶け残ったくず鉄を炉中に突き落とす作業をする。その後再送電し、比較的短時間で溶解が完了し、均一な湯面が形成される。

同図から推察できるように、溶解中期では電極周辺の材料の溶解が進行するので電極の上下運動すなわち電極昇降電動機は速度変化が著しい。ところが、溶解末期になると電極下部に比較的均一な湯面ができるので電弧が安定し、電極の動きは減少し、動作が緩慢になる。この電極の動きの変化を捕えることにより、溶解末期を比較的正確に検出することが可能になると考えられる。

3.2 溶解末期検出の実験的検討

前節の考察から、電極昇降電動機の動きをつかまえることによる溶解末期検出の可能性が明らかになったので、ここでは実操作状態における電動機の速度変化状態を定量的に整理してみる。そのため、10 t 電弧炉の実操作状態における三相各相の電極昇降電動機は速度をペン書きオシログラフで記録した。この記録において、正逆一定速度レベル以上の回数を一定時間（これをサンプリング期間という）積算したものを電極昇降ひん度と称する。各相の電極昇降ひ

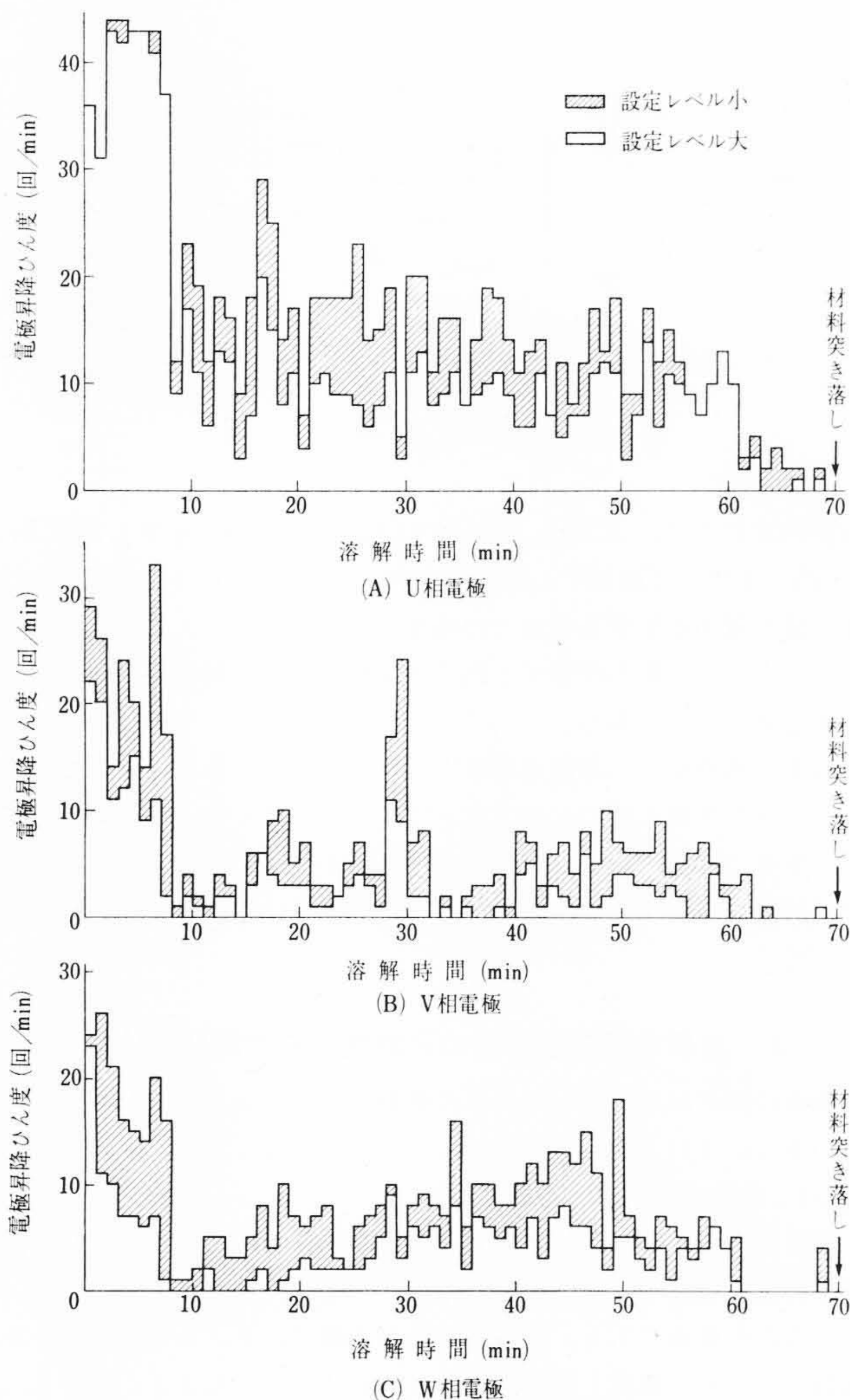


図 3 溶解期各相の電極昇降ひん度

ん度を整理したのが図 3 である。同図において、各相の電極昇降ひん度が一様でない理由の一つは、電極の取り付け位置で、炉窓に最も近い U 相電極が最もひん度が大で、出鋼口に近い V 相電極がこれに次ぎ、炉体の中央部にある W 相電極のひん度が最も小さい。しかしながら、この結果単独では溶解末期に有意性を見いだすことができず、特に最初の 10% 程度経過したときの電極昇降ひん度の急変との区別が困難である。ところがこれら各相のひん度の和をグラフに表わすと図 4 のようになり、溶解末期のひん度の急変と、最初 10% 程度のところに起こる急変の区別がつくようになる。この模様は速度レベルの大小により多少異なることが同図よりわかるが、サンプリング期間を変えても図 5 に示すように変わってくる。

以上の結果を総合すると、各相の電極昇降ひん度を加算した量において、電動機速度レベルおよびサンプリング期間を適当に選定することにより、ひん度が非常に小さくなることに着目することから溶解末期が検出できる予想が立てられる。

4. 制御方式の概要

4.1 溶解末期自動検出方式の概要

検出方式には、原理上種々の方式が考えられるが、ここでは電極の昇降状態を比較的忠実につかむことのできる電極位置変化積算方式を採用している。この方式は各相の電極昇降速度 $v_i(t)$ の絶対値が一定の速度レベル v_0 以上になる場合、その一定値を越えた部分の時間積分値をサンプリング時間 T_s だけ累積し、その累積値がある一定値（これを検出レベルという） E_D 以下になる時点、つまり次式

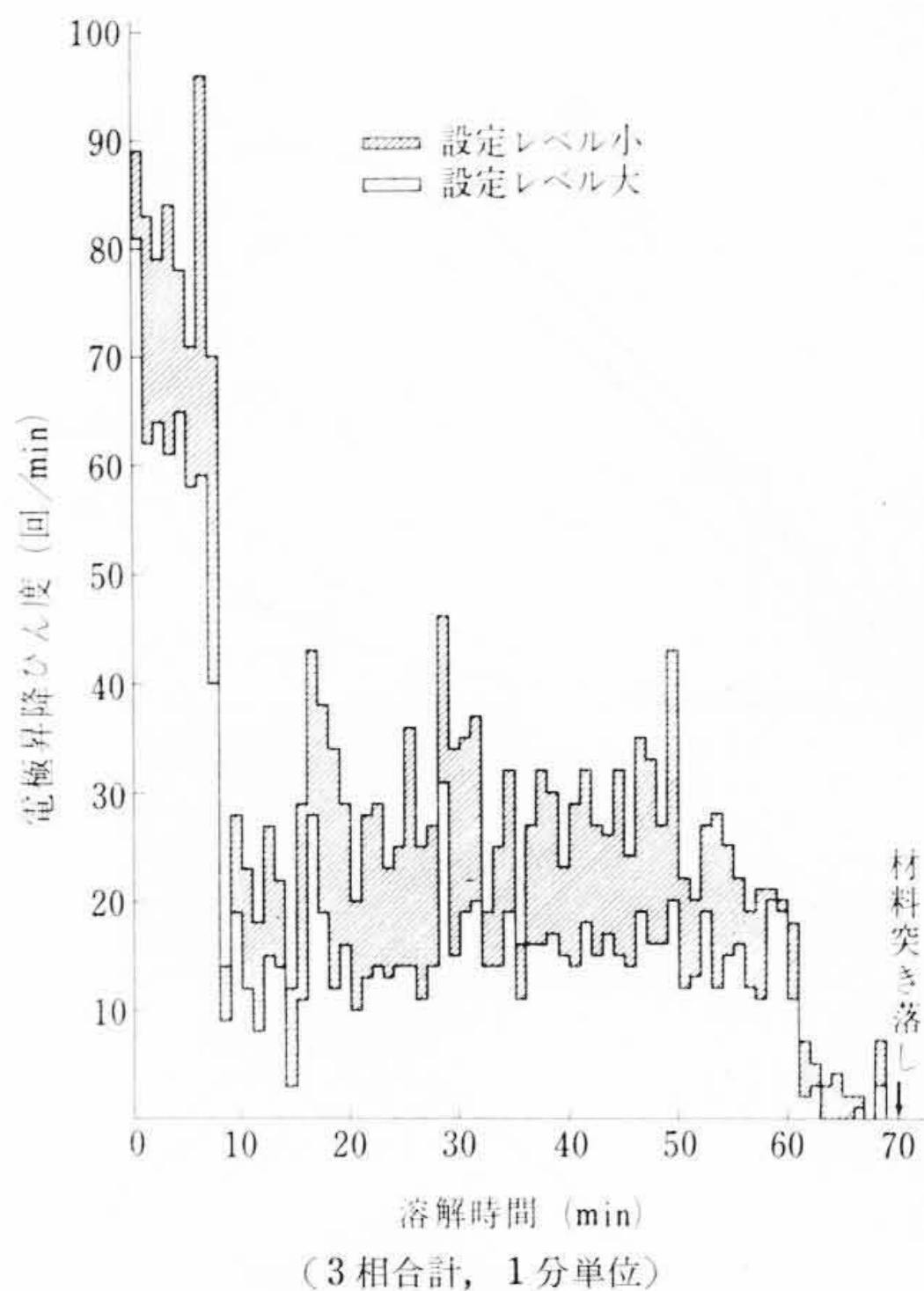


図 4 溶解期の電極昇降ひん度

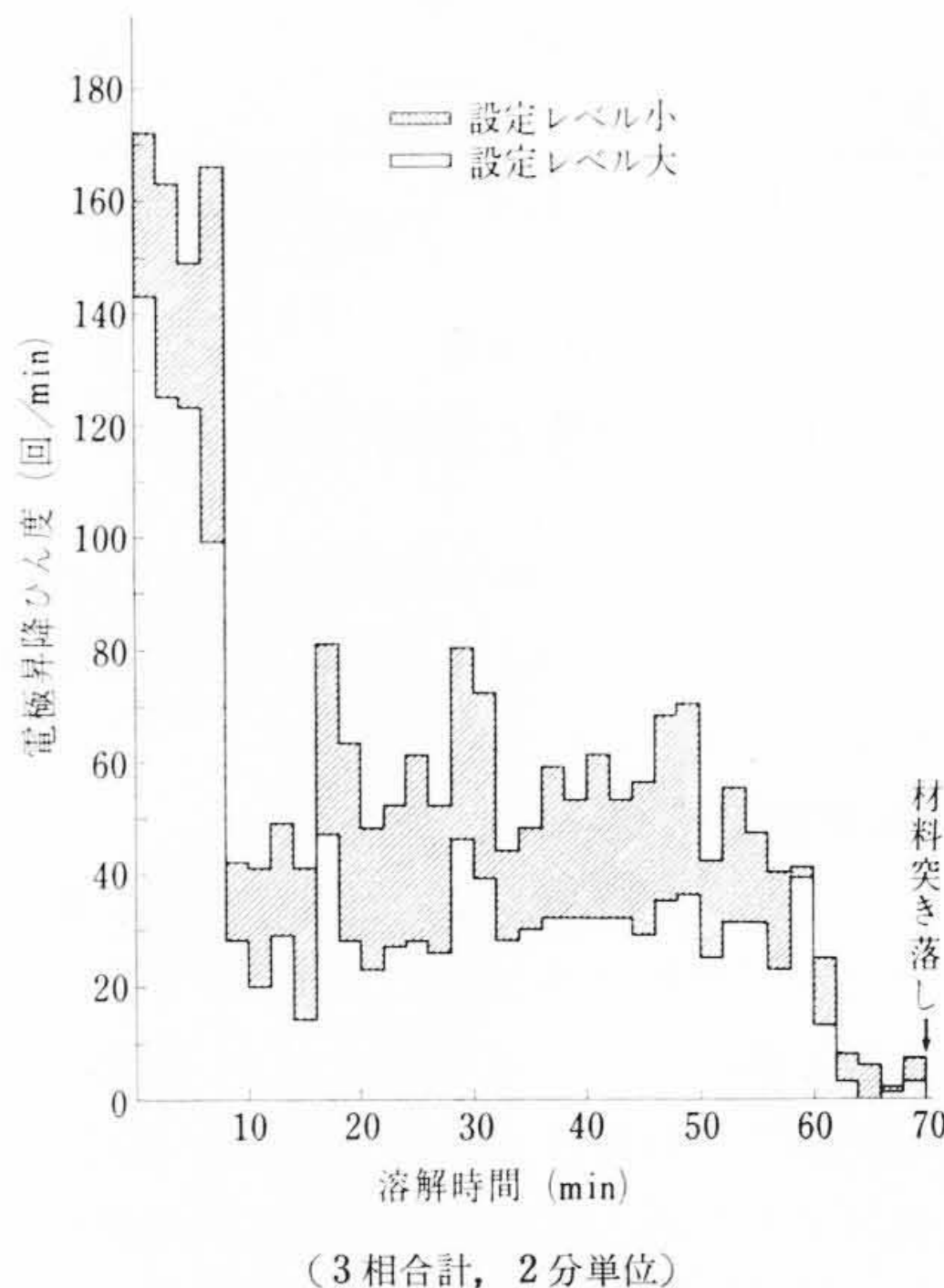


図 5 溶解期の電極昇降ひん度

を満足する時点を検出するものである。

$$E_D \geq k \int_0^{T_s} \sum_{i=1,2,3} \{ |v_i(t)| - v_0 \} dt, \quad \left(\begin{array}{l} |v(t)| \geq v_0 \\ i=1, 2, 3 \end{array} \right) \dots (1)$$

ただし、 k ： 比 例 係 数

4.2 自動電圧切換方式の概要

普通、電弧電圧を変化させようとする場合、主変圧器の 2 次電圧をタップにより切り換える方法がとられる。実際には負荷時あるいは無負荷時タップ切換装置により行なわれるが、いずれの形式のもので装置の動作シーケンスは、あらかじめ決まっている。したがって、このシーケンスを実現するシーケンス制御装置と、切換指令に対し昇降の方向を定める昇降識別回路と切換の大きさを知るタップ位置識別回路を図 6 のように構成することにより、電圧切換を自動的に行なうことができる。すなわち、切換指令が与えられると、切換方向およびタップ位置を示す信号を受け取り、シーケンス制御装置により、断電指令（無負荷時タップ切換の場合）、タップ切換指令、送電指令（同前）などを与え、所望の電圧へ自動的に切り換える。この場合、断電、送電の完了やタップ切換完了の確認などを行ないながらシーケンスを進める考慮が必要である。

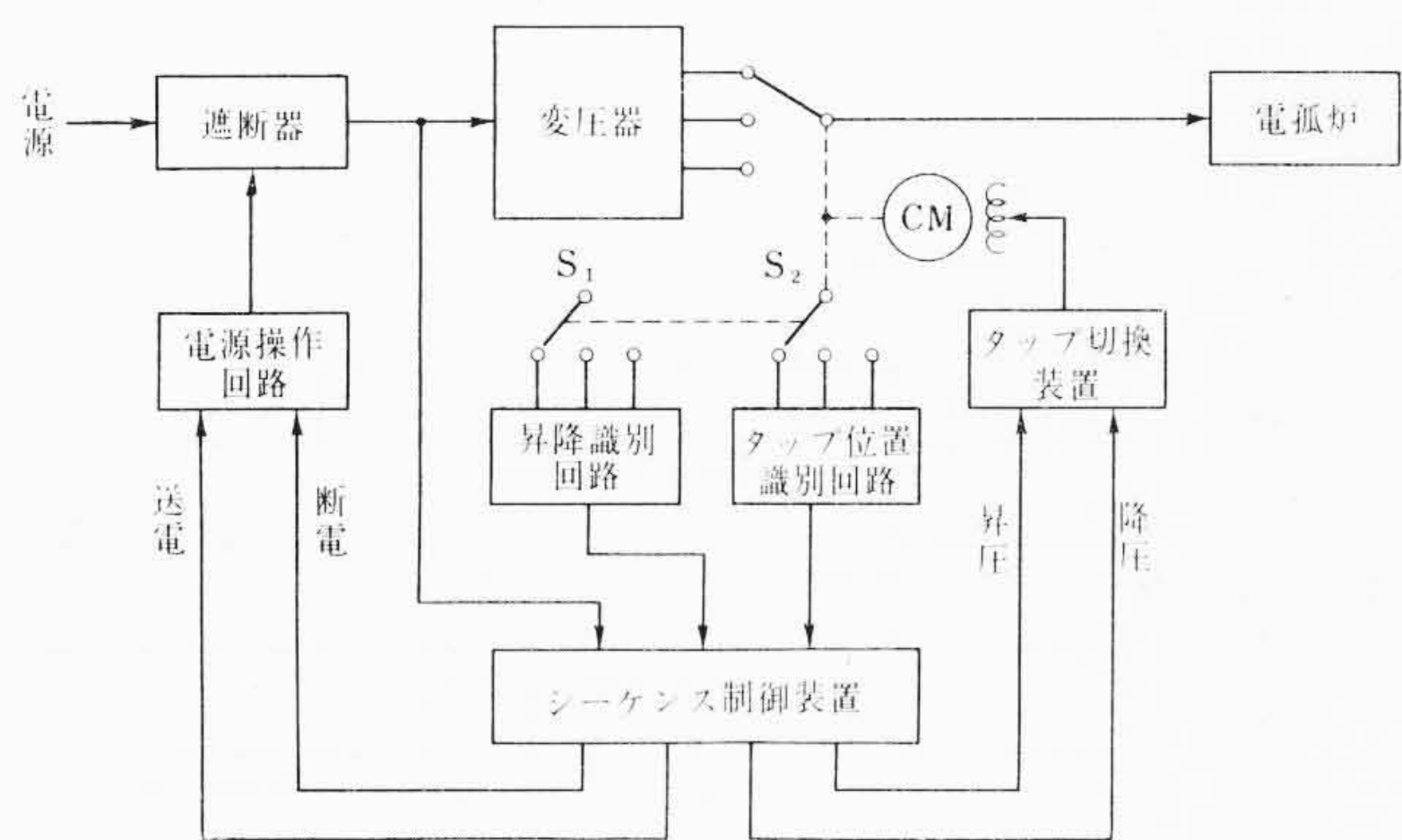


図6 自動電圧切換装置の回路構成

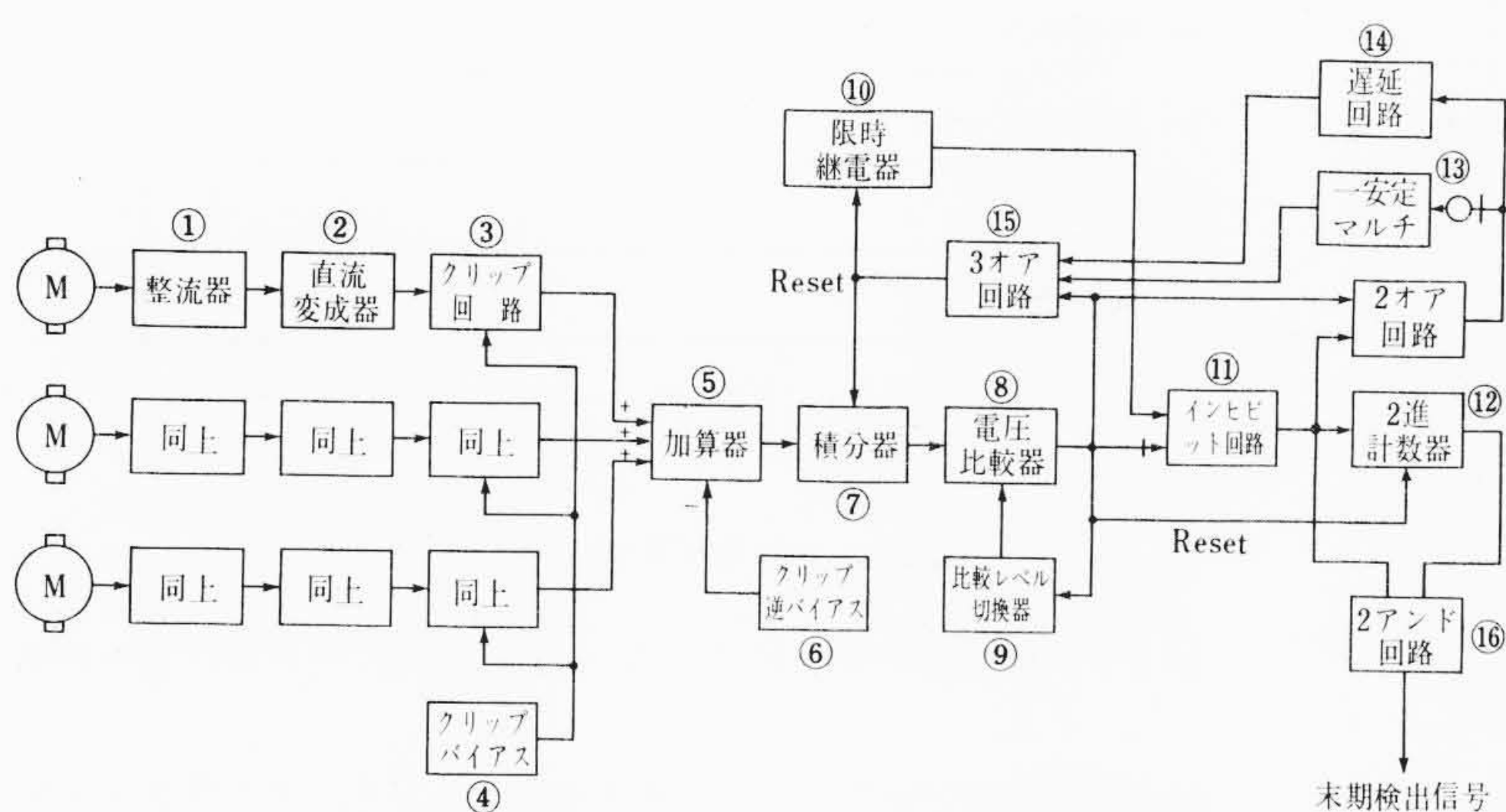


図7 溶解末期自動検出装置の回路構成

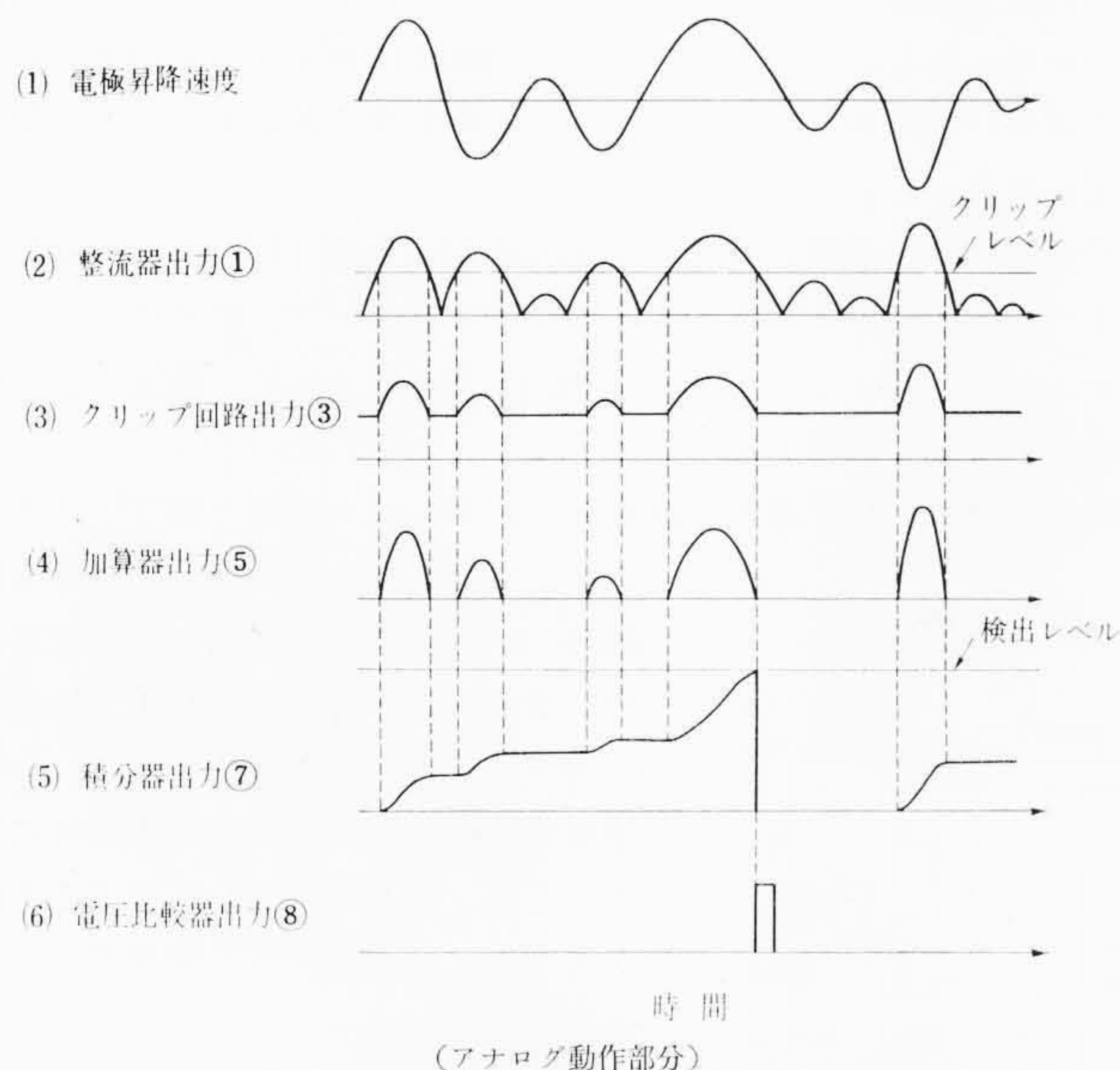


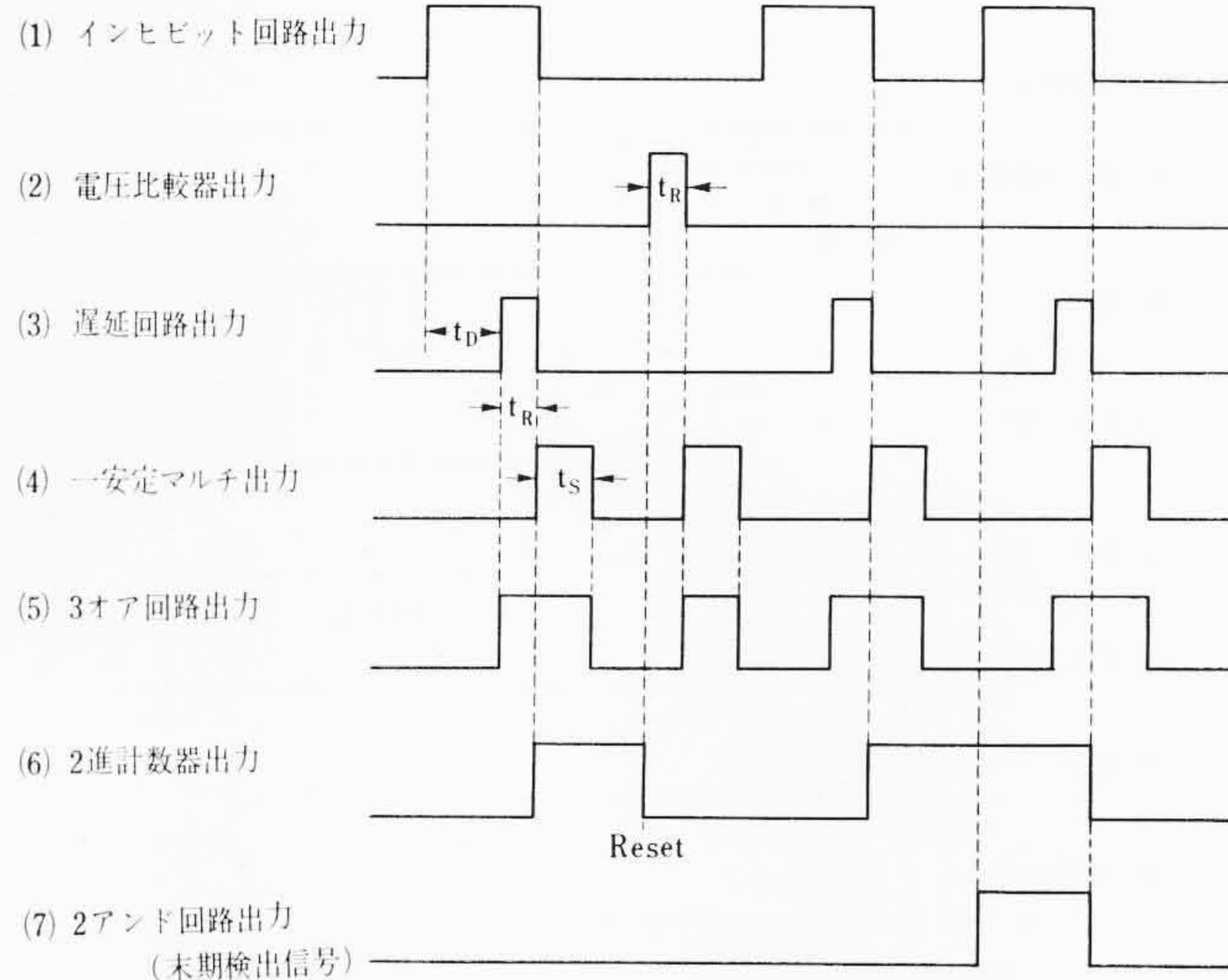
図8 溶解末期自動検出装置の動作波形

5. 制御装置の回路構成および動作原理

5.1 溶解末期自動検出装置

前章で説明した末期検出方式を具現するための回路構成をブロック図で表わすと図7のようになる。同図において整流器①から積分器⑦まではアナログ動作をし、電圧比較器⑧から2アンド回路⑩まではデジタル動作をする。

主としてアナログ動作部分の動作波形を示すと図8のようにな



t_D = 遅延時間
 t_S = 一安定マルチのパルス幅
 t_R = 遅延回路のリセット時間

（デジタル動作部分）

図9 溶解末期自動検出装置の動作波形

る。ただし、同図は電極昇降電動機一相分のみが動作した場合を示している。まず、電動機速度電圧が同図(1)のようであったとすると、これを整流器により整流し、同図(2)に示すように(1)式の $|v_i(t)|$ に相当する量を作る。これを直流電圧変成器(D.C.P.T.)により制御装置に適した電圧に変成し、これをクリップ回路に入れる。クリップ回路では速度レベルに対応したクリップ電圧を適当に選ぶことにより $\{|v_i(t)| - v_0\} + v_0$ ($|v_i(t)| - v_0 \geq 0$)を作る。このようにしてできた三相分の量を加算器に入れる。なお、加算器にはクリップ・レベルのバイアス分をとるため $-i v_0$ なる量を零調バイアス分として入れる。以上の操作により(1)式の $\sum \{|v_i(t)| - v_0\}$ に対応した量が得られる。これを積分器に入れると $k \int \{|v_i(t)| - v_0\} dt$ なる量が得られる。

さて、(1)式において、サンプリング期間 T_s を一定とし、その時点で(1)式が満足されない場合に再びサンプリングを行ない、(1)式を満足する時点になったとき溶解末期であると判定する方法がある。他の方法として、(1)式の右辺が左辺に等しくなる時間 T_s が、ある一定時間 T_s' に対し

$$T_s < T_s' \dots \dots \dots (2)$$

の場合に再びサンプリングを行ない、 $T_s = T_s'$ において(1)式を満足したとき溶解末期であると判定する方法がある。後者は前者に比べ原理上、溶解末期検出時点が少なくとも早くなるという理由から、後者の方法を採用することにする。

(1)式の等式が満足したことを検出するため電圧比較器⑧が用いられる。積分器の出力に対し、比較するレベルを(1)式の E_D に対応した量に定めておく。したがって、積分器出力が比較レベル（検出レベル）に等しくなったときの積分時間 T_s が、限時継電器⑩に設定した時間 T_s' に対し、(2)式を満足しているならば、比較器の出力により積分器および限時継電器をリセットし、再びサンプリングを開始する。もし、(2)式が満足されないならばすなわち $T_s = T_s'$ ならば(1)式を満足することになり、限時継電器から出力が出る。原理上からはこの出力を溶解末期検出信号としてもよいのであるが、図7の回路では動作の确实性を目的として、多少細工がほどこされている。

すなわち、図4からもわかるように、溶解期の途中においては

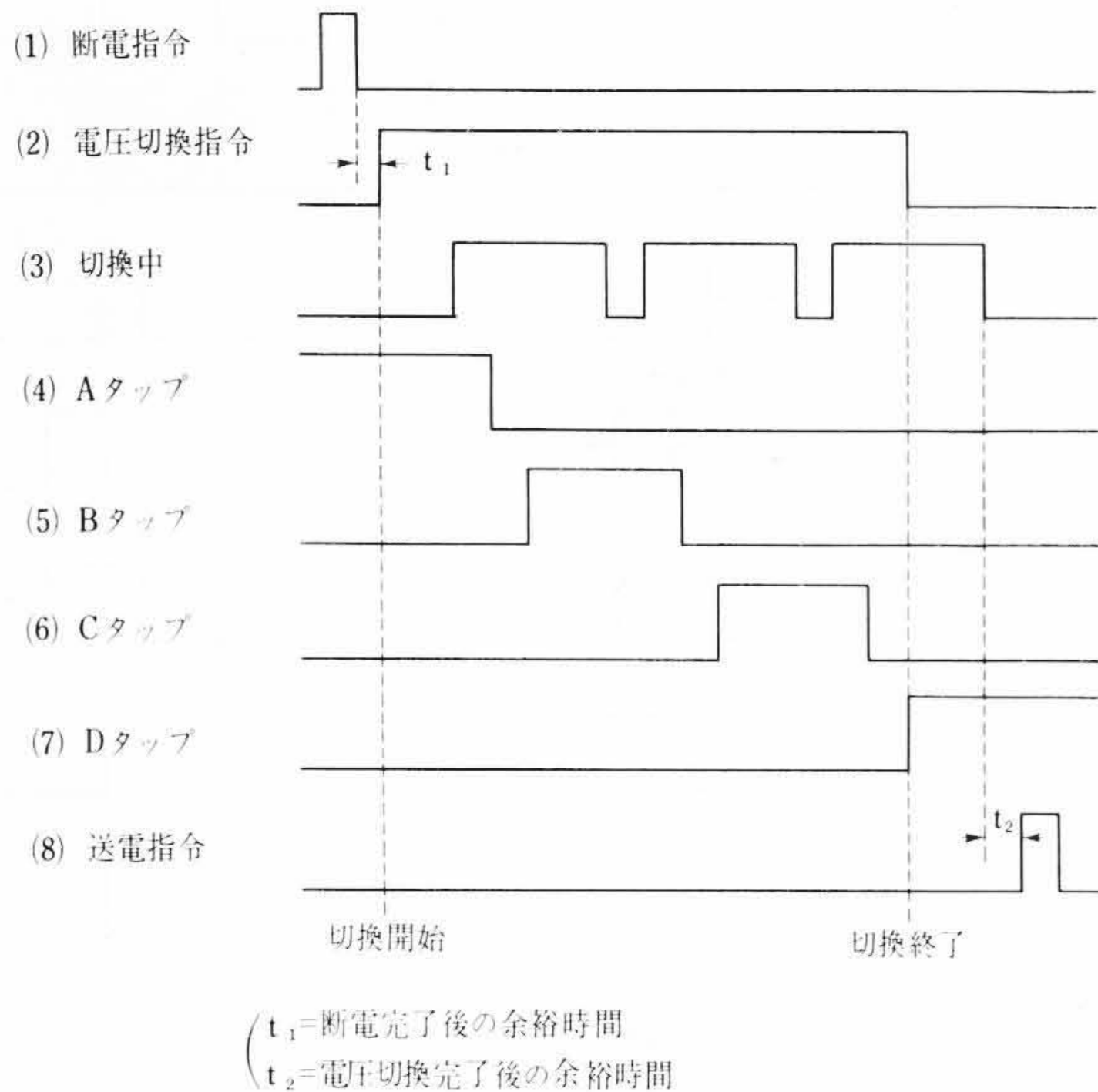


図10 無負荷時タップ電圧切換シーケンス

電極下に局所的な湯だまりができるために、電極の昇降ひん度が一時急減することがある。このような炉内状態を溶解末期と誤認するといけないので、限時継電器の出力が複数回続けて出たときをもって溶解末期信号を出すようにしている。

この判断をインヒビット回路⑪～⑫アンド回路⑬の論理回路により行なっている。その動作波形を図9に示す。同図に示すように本装置では限時継電器出力が2回続けて出たときに溶解末期検出信号を出すようになっているがこの理由の詳細については後述する。

5.2 自動電圧切換装置

自動電圧切換装置は少なくとも溶解末期検出信号を受けて電弧電圧を所望の値に自動的に切り換える機能を有するが、それ以外の時期、たとえば溶解初期や精練期においても溶解プログラムに応じ使用される。ここでは無負荷時電圧切換の場合について検討する。この場合の電圧切換シーケンスは普通次のようである。

- (1) 主回路を断電する。
- (2) 昇圧または降圧方向に電圧切換を開始する。
- (3) 電圧切換が進むと切換中とタップ電圧の信号が交互に表われるので希望するタップ電圧の信号が表われたときに切換を終了する。

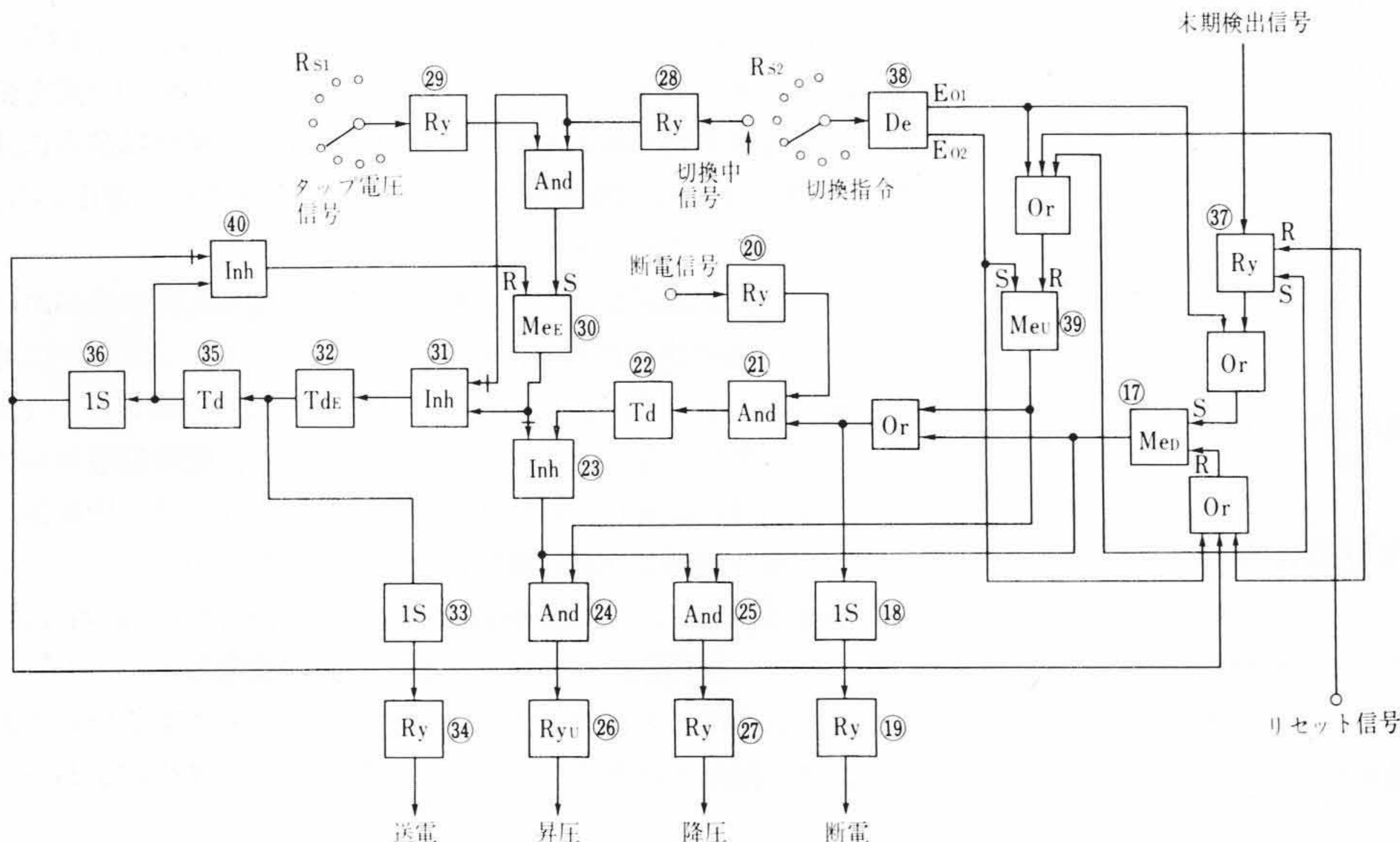


図11 自動電圧切換装置の回路構成

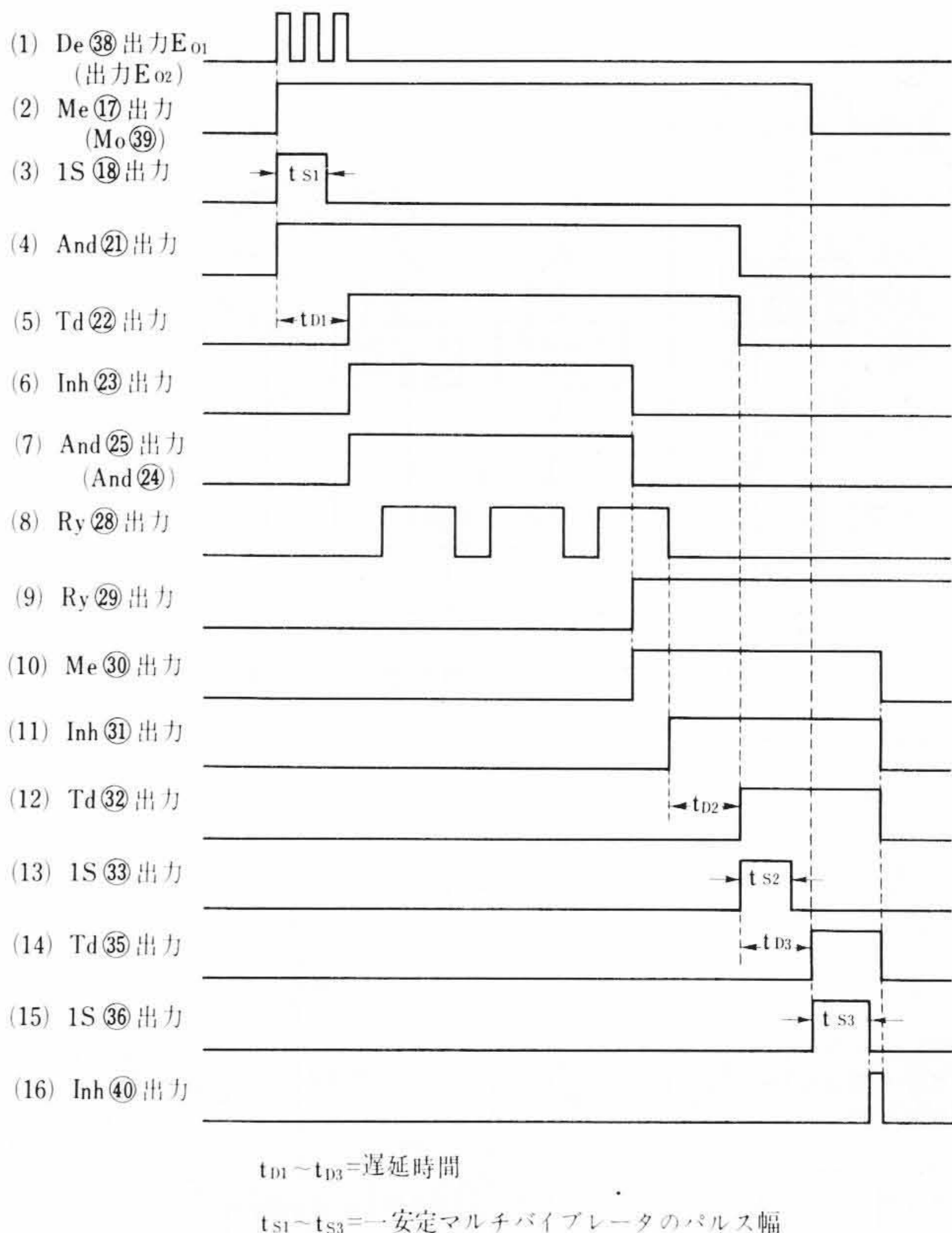


図12 自動電圧切換装置の動作波形

- (4) やがて切換中の信号がなくなるので、その後送電を再開する。

以上のようなシーケンスで、AタップからDタップへ3タップ切り換えた場合の各信号のタイム・チャートを図10に示す。自動電圧切換装置は主として上述のシーケンスどおりにタップ切換装置に指令を与えるものである。ただし、実際にはシーケンスの進行にさらに細かい制限条件があるので、この点も十分満足するように制御装置を構成する必要がある。

自動電圧切換装置の構成を論理回路により図11に示す。本装置はすべてデジタル動作をするので、トランジスタ論理要素（シリコン・トランジログ）⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を全面的に採用している。同図により動作原理の概要を説明する。

同図の装置は二通りの使用法がある。一つは切り換えようとする

タップ電圧をあらかじめ切換指令雖 R_{S1} により設定しておき、末期検出信号を受けたときその設定電圧に自動的に切り換える方法である。他は、切換指令器の操作により、操作と同時に希望するタップ電圧に自動切換する方法である。ここでは後者の使用法について説明する。

図12は本装置で3タップ低い電圧に切り換える場合の回路各部の動作波形を示したものである。切換指令器により3タップ低い電圧になる指令を出すと、方向判別回路 D_e の降圧側出力 E_{01} より、図12(1)のような波形を生ずる。これにより降圧側記憶要素 M_{eD} をセットし、電弧炉主回路に断電指令を出す。断電が終了すると、インヒビット要素 Inh およびアンド要素

And ②⑤ のゲートが開くので降圧指令が R_{yd} から出る。これにより、タップ切換が開始され、タップ間の切換中の信号およびタップ電圧信号が戻される。戻されたタップ電圧信号があらかじめ設定した値と等しくなると切換停止記憶要素 M_{eE} がセットされ、降圧ゲート And ②⑤ が閉じて降圧信号がなくなる。降圧動作が終了したことを確認するため遅延要素 T_{dE} で決まる一定時間の後、送電を開始する。同時に本装置をリセットし、次の動作まで待機する。

5.3 サンプルング時間と末期検出

サンプルング時間が長い場合は図 5 に示すように電極昇降動作が平均化して検出されるため、一時的な昇降動作の落ち着きによる誤動作がほとんどなくなるので、比較的溶解末期を正確に検出しやすい。しかしながら、サンプルング時間が長すぎると末期検出の時期が遅れる傾向になるので問題が生ずる。一方、サンプルング時間が短いと電極の昇降動作の状態変化を忠実に検出できるので、溶解末期近くでの電極昇降動作の変化状態を早く検出できる。しかしなが

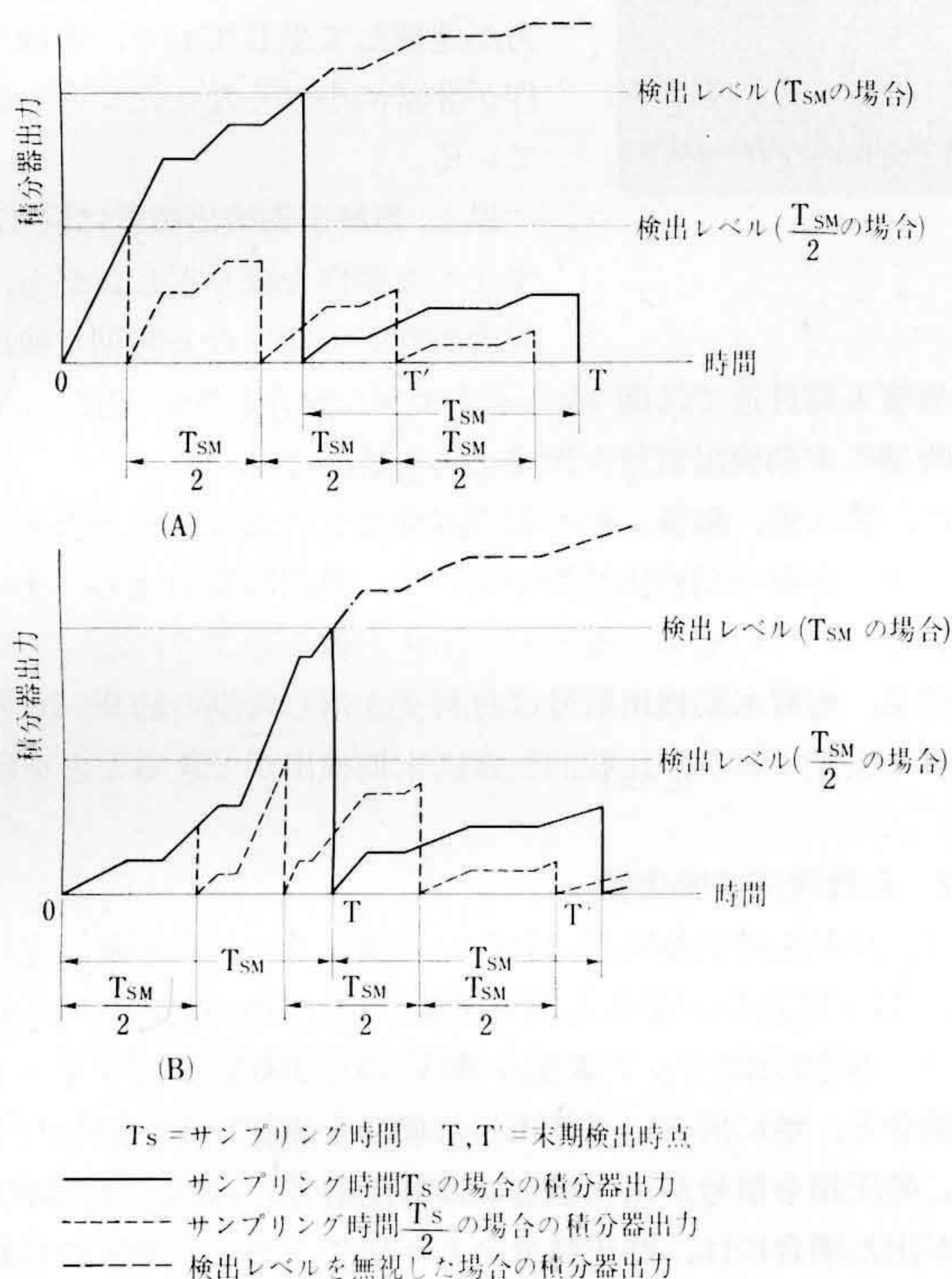


図 13 サンプルング時間と末期検出時点

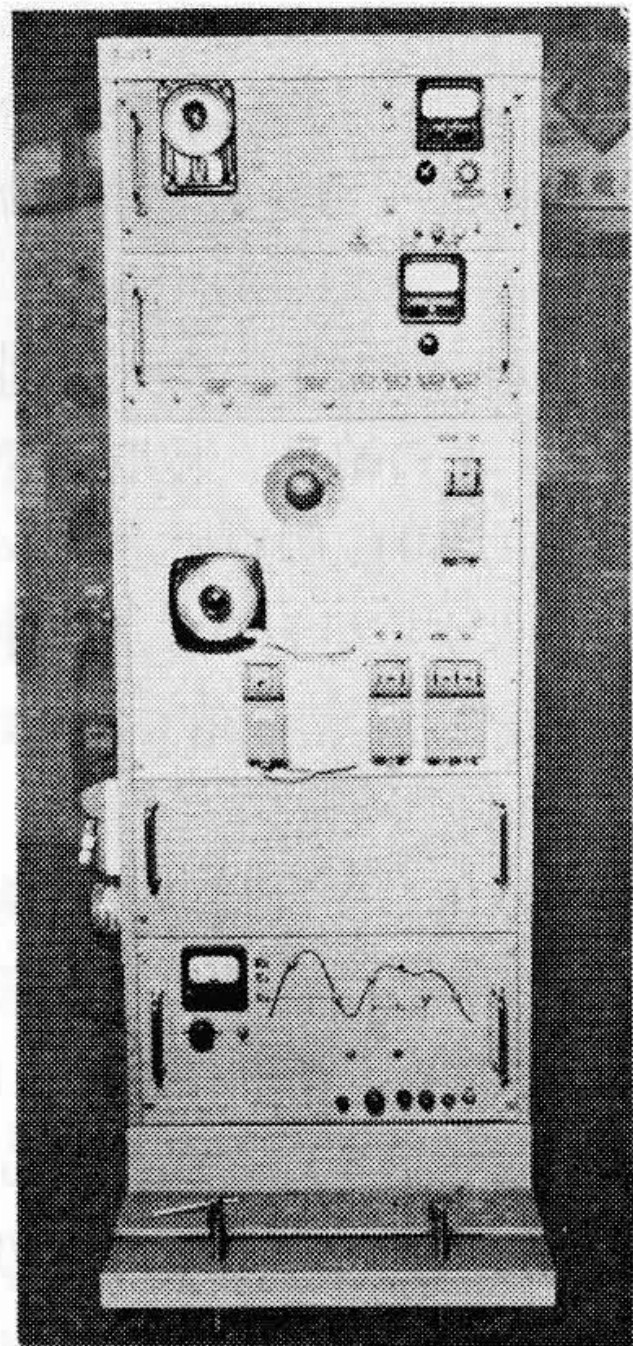


図 14 溶解末期検出、自動電圧切換制御装置

ら、この時間が短すぎると、溶解中期に現われる一時的な電極の安定動作を溶解末期と誤判定するようになる。

以上のように、一つのサンプルング時間で溶解末期を検出しようとする場合に問題が多い。そこで、溶解末期を正確に検出でき、許容できる十分長いサンプルング時間 T_{SM} を適当なだけ n 等分して複サンプルング時間 T_{SM}/n とし、このとき得られる検出信号が n 個連続した場合を末期検出信号とする方法を採用する。このようにすれば、複サンプルング時間を比較的短くできるので電極の昇降動作を速応性よく知ることができ、またその状態が連続するとき末期検出とするので、サンプルング時間の長い場合の利点が活かされ、正確な溶解末期検出が期待できる。

図 13 は複サンプルング時間をサンプルング時間 T_{SM} に等しくとった場合と、 $T_{SM}/2$ にした場合の末期検出時点の違いを示すもので、考えられる動作例の両極端を取り上げて比較している。また、等価的に考察するため $T_{SM}/2$ の場合は比較レベルを T_{SM} の場合に比べ $1/2$ に選んでいる。同図 (A) では最初あばれていた電極がしだいに落ち着いていく場合を示している。サンプルング時間が T_{SM} の場合は、積分器出力の増加が急なためサンプルング時間以内に比較レベルに達し、もう一度サンプルングを再開するので、その後途中で電極昇降が安定しているにもかかわらず、末期検出は T の時点となり遅れる。これに対し $T_{SM}/2$ のサンプルング時間の場合には電極昇降が安定しはじめるところを捕えるので、 T' の時点ですでに連続した二回目の出力つまり末期検出信号が得られる。また、同図 (B) では一時安定していた電極昇降が途中からはなはだしくなり、やがて落ち着く場合を示している。この場合、サンプルング時間が T_{SM} では途中から積分器出力が急上昇してもその出力が T_{SM} 以内に比較レベルに達しないため、 T の時点ですでに末期検出信号を出している。ところがサンプルング時間 $T_{SM}/2$ の場合では一度比較レベルに達するが、それ以後の電極昇降状態を捕えて T' の時点で末期検出信号を生ずる。

以上のように、複サンプルング時間を T_{SM}/n にし、連続して得られる n 回目の出力により末期検出信号とする方法を用いると、電極の昇降動作を速応性よく監視でき、かつ正確な溶解末期の検出をすることができる。

6. 実験結果

以上述べてきた制御方式を用いて溶解末期検出、自動電圧切換装置を試作した。制御装置はシリコン・トランジスタおよびシリコン・ダイオードを用いた無接点制御で、温度、電源電圧の変動および雑音に対しても安定、確実に動作するようになっている。

試作した制御装置は 2 個のシャシとスイッチ盤からなり、その外観は図 14 のようである。同図において、下方のシャシ 2 個はさきに開発したリアクタ制御装置である。また、図 15 は制御装置の主要部分を示したものである。なお、実験は 10 t 電弧炉を用いて行なった。

6.1 溶解末期検出装置

実験に当たっては溶解末期検出装置が所望の動作をすることを確認し、末期検出信号が適当な時期に集中して得られることを確かめる。

実際の操業状態の 10 t 電弧炉に溶解末期検出装置を取り付け実験した。その結果の一例は図 16 に示すとおりである。同図において、末期検出信号は、電圧切換制御装置の記憶要素からとった。この理由は末期検出信号がほとんど瞬時的にしか出ないため記録が不明確になりやすいので、その信号を記憶要素に記憶させて記録している。同図で積分器出力がリセットされているが、これは電圧比較器出力によるものか、サンプルング用の限時継電器出力によるもの

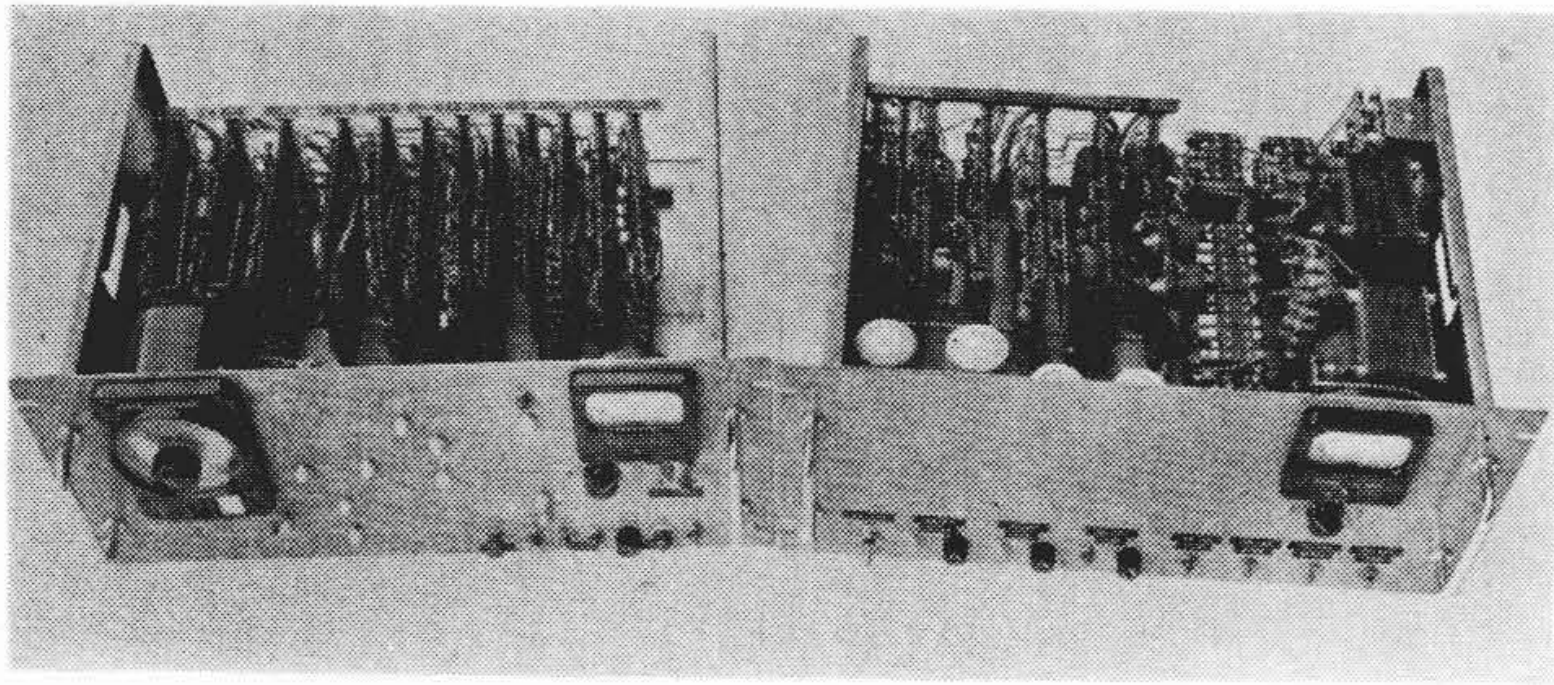


図 15 制 御 装 置

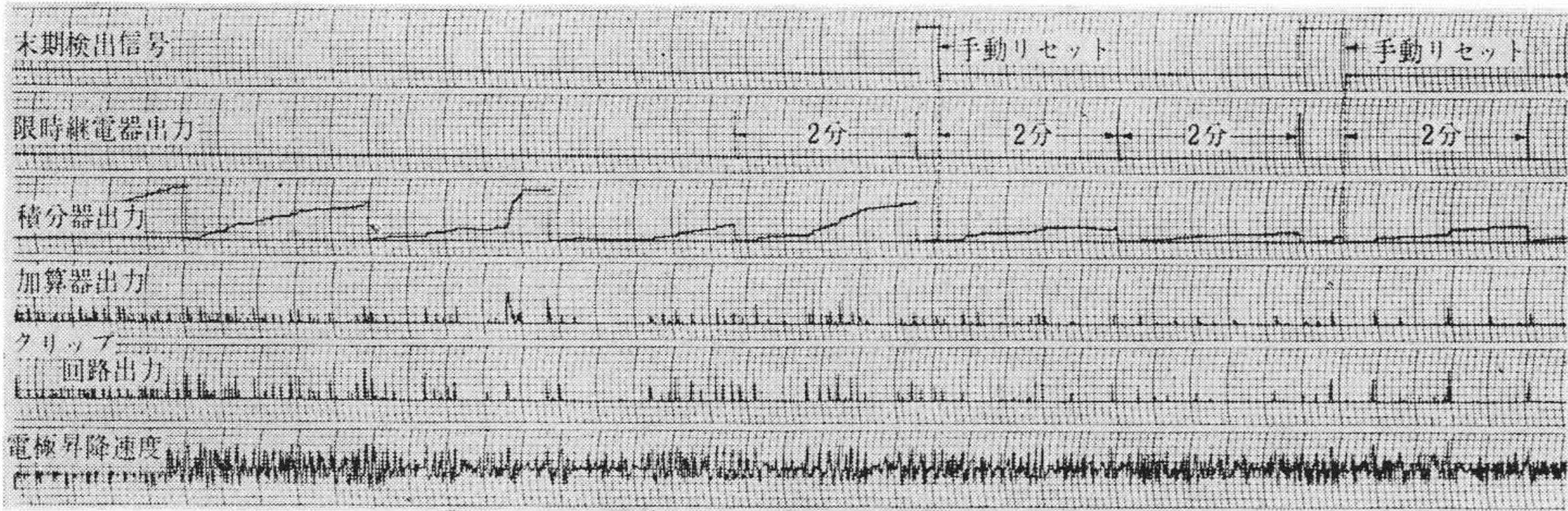


図 16 溶解末期における自動末期検出装置の動作状況

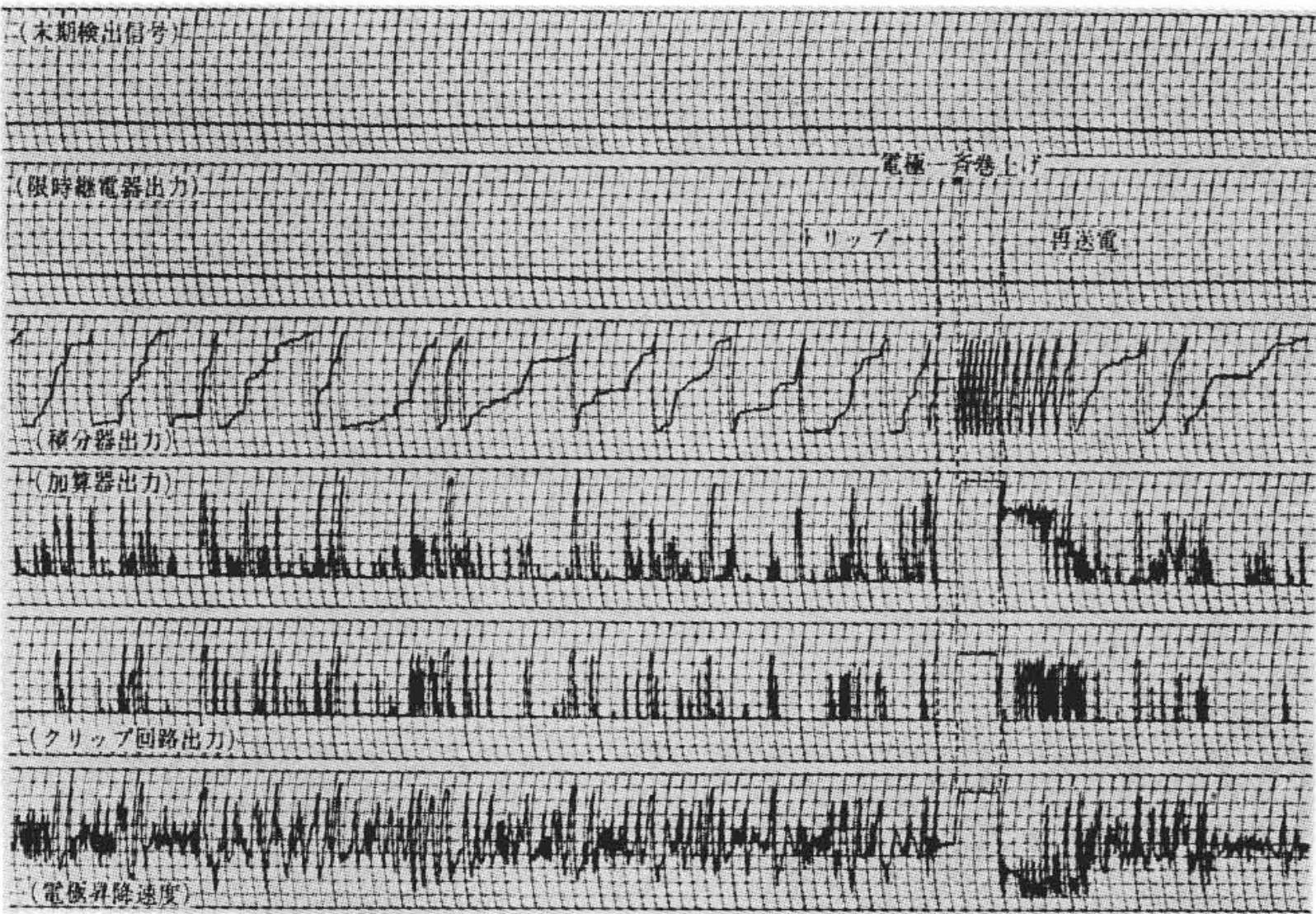


図 17 溶解中期における自動末期検出装置の動作状況

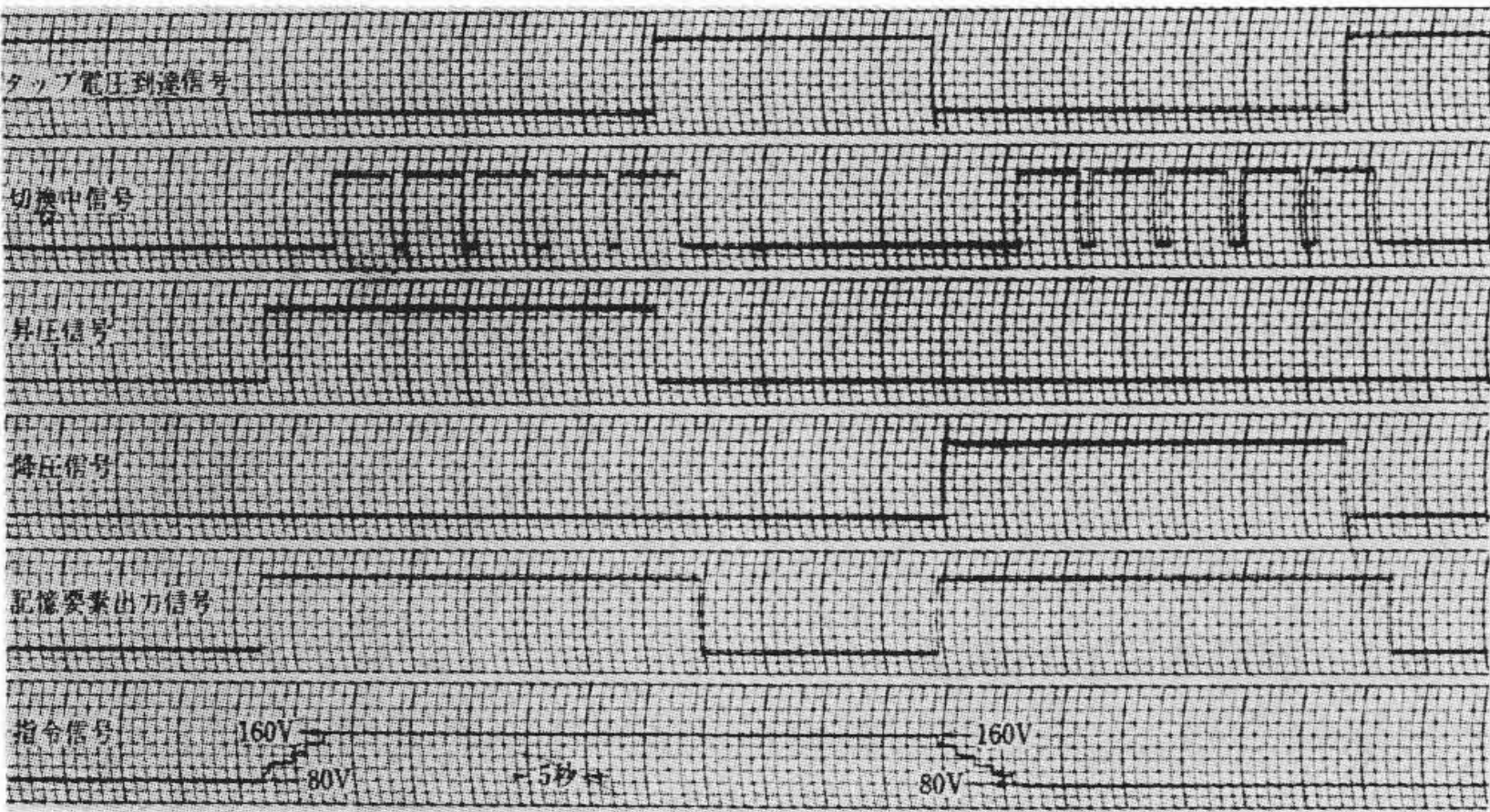


図 18 自動電圧切換装置の実験結果

かのいずれかが原因である。したがって、限時継電器出力がないのに積分器がリセットしているのは電圧比較器出力に基因するものであるといえる。

溶解中期では図 17 に示すように限時継電器出力は全然表われず、比較器出力により積分器がリセットされており、電極昇降動作のはげしいことを示している。ところが図 16 では最初のころに

表 2 溶解末期検出の実験結果

鋼 種	装 入 量 (t)	検 出 時 間 (min)
普 通 鋼	11.1	10
	12.5	9
	12.6	10
	* 14.9	9
	15.7	10
特 殊 鋼	10.5	10
	10.8	10
	12.4	9

(注) 1. 検出時間＝末期検出信号がでて後、材料突き落としまでの時間
2. *＝初溶解のチャージ

限時継電器出力が出はじめ、電極昇降動作が落ち着きだした傾向を示している。その後、限時継電器出力が 2 回続けて出たときに溶解末期検出信号がでている。末期検出信号を手動でリセットしているが、その後、限時継電器出力が連続して生じており、電極昇降動作が非常に小さくなったことを表わしている。

以上、溶解末期検出装置は図 17 に示すような動作を繰り返しながら、電極昇降動作が安定になる時期を検出し続け、溶解末期付近では図 16 に示すような動作状態に変化し、電圧切

換の時期に末期検出信号を出すことが確認された。

次に、装入量、鋼種、炉の初期温度などの異なる種々のチャージについて、溶解末期検出装置を用いて、検出時期のばらつきについて実験した。その結果を整理して示すと表 2 のようになっている。この結果、溶解末期検出信号は材料突き落とし時期の約 9～10 分前に集中して生じており、比較的正確に末期検出ができることを示している。

6.2 自動電圧切換装置

まず、自動電圧切換装置の動作を確認するため、手動設定により実際の 10 t 電弧炉の電圧切換を実験した。その結果の一例を図 18 に示す。同図ではタップ電圧を 80 V から 160 V まで 5 タップ昇圧した場合と、逆に同タップ降圧した場合を連続して記録したものである。昇圧指令信号が出た場合には昇圧信号のみが、また降圧指令信号が出た場合には、降圧信号のみが出て、タップ電圧の切換はいずれの場合も正常に行なわれている。

6.3 総 合 実 験

溶解末期検出装置と自動電圧切換装置を組み合わせ 10 t 電弧炉の実操業状態において実験した。この実験は組合せ動作の確認のほか、溶解末期に電圧を自動的に切り換えた場合、天井温度がどのように変化するかを確かめることが目的である。ところで、溶解末期検出装置を用いない普通操業の場合の天井温度を測定した結果が図 19 (A) のようである。この結果、天井温度は溶解末期に近づくにつれて急に上昇して約 1,340℃ に達する。このとき、壁窓をあけ材料突き落とし後添加剤を装入するがそのとき天井温度は一時下がる。その後、その値がほぼ維持され、溶け落ち時には天井温度が約 1,330℃ となる。

これに対し、溶解末期検出し、自動電圧切換した天井温度の実験結果は同図(B)のようである。この結果、電圧切換後の天井温度は切換時の値約 1,150℃ を維持し、溶け落ち時には約 1,180℃ で、明らかに電圧切換の効果が生じていることがわかる。

このことは適切な溶解末期検出と自動電圧切換により天井の過熱を防止できると同時に、余分な電力の投入をおさえるので、天井の寿命の延長および電力原単位の低下にいくぶんでも寄与していると

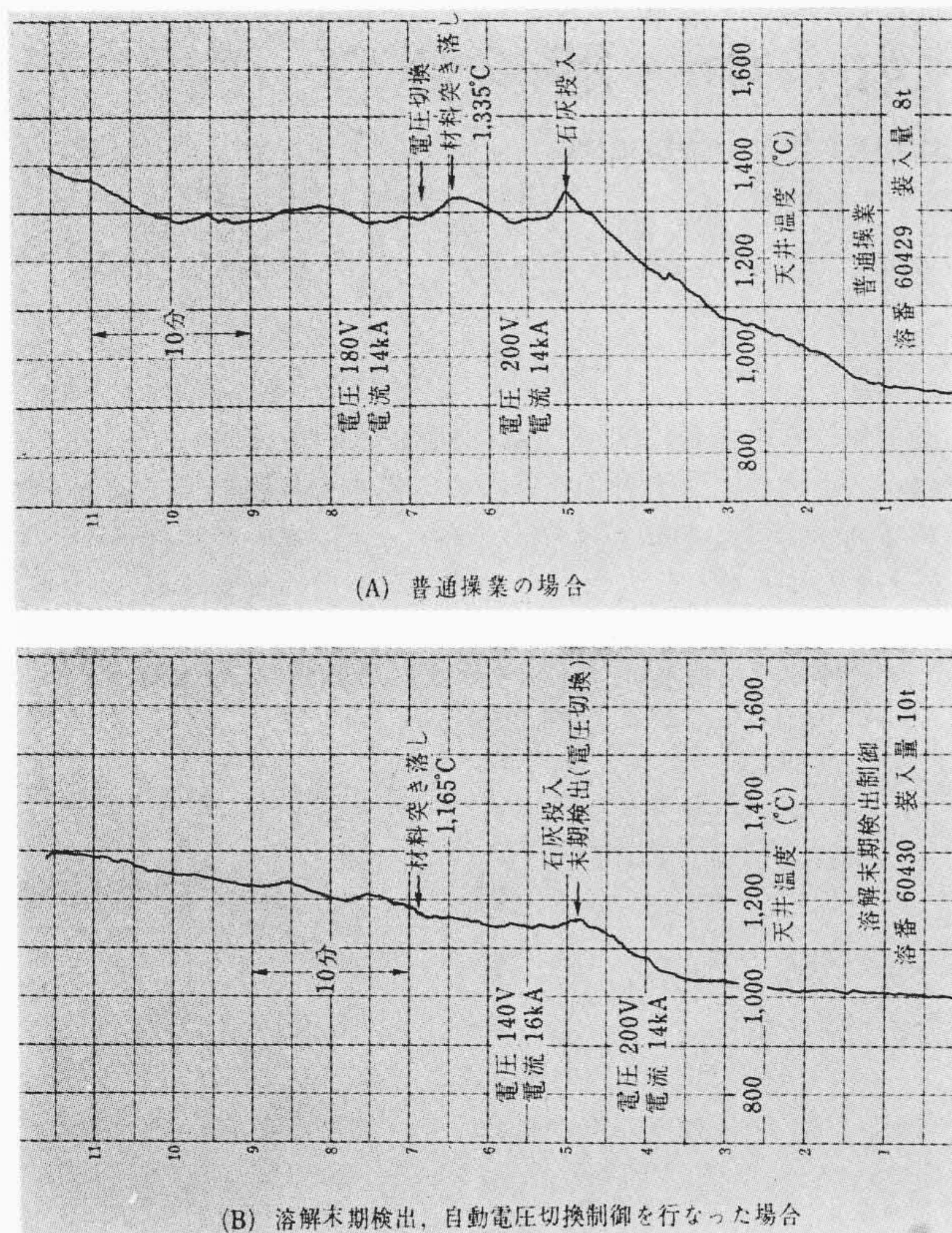


図 19 天 井 温 度 の 相 違

いえよう。

7. 結 言

電弧炉の溶解期操業を自動化する場合、炉内が溶解末期の状態になる時期を検出し、変圧器タップ電圧を切り換える一連の操作を自動化することが最大の問題であった。そこで、電極昇降動作の程度から溶解末期を自動的に検出する溶解末期検出方式と、定められた

シーケンスどおりに自動的に電圧切換を行なう。自動電圧切換方式を考案し、この両者を組み合わせた溶解末期自動検出制御方式を開発した。

制御装置は主として半導体を用いた無接点制御方式で、温度影響を考慮して全シリコン半導体を使用している。試作した制御装置を10t電弧炉に取り付け、すべて実操業状態で実験を行なった。

実験の結果、溶解末期検出装置は所望の動作を行なうことを確認し、装入量、鋼種、炉の初期温度のいかんにかかわらず材料突き落し時点の約8~10分前に集中的に溶解末期検出信号の得られることを確認できた。自動電圧切換装置は溶解末期検出信号を受けて自動的に変圧器タップ電圧の切換を行なうとともに、溶解初期、精練期においても、昇圧あるいは降圧指令により所望の電圧切換を自動的に進め得ることを確認した。また、溶解末期検出と自動電圧切換を併用することにより、天井温度の上昇が従来の操業に比べ相当おさえられることが証明された。

以上の検討結果と、前報のリアクタ制御方式の結果から、すでに実用しているシーケンス無接点制御により電弧炉操業の溶解期を完全に無人運転できることが明らかになった。

参 考 文 献

- (1) 小西：電学誌 82, 567 (昭 37-4)
- (2) D. Bristol & S. Kraft: Cont. Eng. 7, 146 (1960-9)
- (3) J. E. Oram: Iron & Steel 38, 119 (1961-7)
- (4) E. J. Borreback: Iron & Steel 39, 93 (1962-12)
- (5) 吉野：OHM 49, 107 (昭 37-9)
- (6) 岩城, 大浜, 八田：日立評論 44, 1445 (昭 37-9)
- (7) 小西, 堀：日立評論 46, 1275 (昭 39-8)
- (8) 小西, 堀：電気4学会連合大会前刷 No. 527 (昭 40-4)
- (9) J. Ravenscroft & L. Mc Gee: J. of Iron & Steel Institute 197, 34 (1959-5)
- (10) 小西：OHM 50, 37 (昭 38-1)
- (11) 市川：電学誌 84, 693 (昭 39-5)
- (12) U. S. S. Corp: The Making, Shaping and Treating of Steel (1951)
- (13) 小西：制御工学 9, 151 (昭 40-3)
- (14) 小西：日立評論 45, 1943 (昭 38-12)