

鉄鋼プロセッシングラインの最新制御技術

Newest Control Technique in Steel Processing Lines

清水五雄* *Itsuo Shimizu*
本田忠宏* *Tadahiro Honda*

近年設置される鉄鋼プロセッシングラインは、ますます大形化、高速化、高品質生産を目的としたものとなっており、電気品に対する顧客ニーズは省エネルギー、省資源形で、かつ高精度プロセスライン制御システムである。

今回、フレキシビリティあふれた制御システムを構成するための危険分散形、バス結合マイクロコンピュータ(HISEC 04-E)システムを中心として、高速化、高品質生産に大幅に寄与する高精度張力制御モデル、システム構成、新カタナリー制御、ループカー制御などの新アルゴリズムを駆使し、従来のラインもの制御システムに比べ飛躍的に性能が向上し、信頼性、保守性に富んだ鉄鋼プロセッシングライン用制御システムの製品化を行なった。

1 緒言

高速、高品質生産を目的とした大形プロセッシングラインでの電気制御に対するニーズは、高度の省人化、自動化、無保守化及び高品質生産にふさわしい高性能制御システムなどがある。このニーズに対応したハードウェア技術としては、総合デジタルレオナード装置、交流可変速制御装置、マイクロコンピュータシステムなどがある。本論文では、このハードウェア技術を駆使したシステム構成、及び製品の品質確保に寄与する制御技術であるループカー、並びに炉内張力制御、カタナリー制御、電気めっき制御を主として述べる。

2 設備構成

2.1 顧客ニーズとハードウェア技術概要

大形プロセッシングラインでの顧客の制御システムに対するニーズは、下記に集約される。

- (1) 省エネルギー、省資源システムの実現
- (2) ラインの大形化、高速化に伴う高信頼システムの実現
- (3) 省人化及び高品質生産への高度の自動化
- (4) 建設期間の短縮

一方、このような背景を踏まえて、ここ2、3年、日本国内に建設された大形プロセッシングラインである連続焼鈍(酸洗)ライン、連続亜鉛めっきラインなどの特徴を電氣的にみると、入側設備、出側設備のハンドリングは高度に自動化され、操作が一人又は二人の、熟練を要しない操作員により操業さ

れることが可能になっており、中央設備でも、高速化、高品質化に対応して、その目的にかなった高度な制御システムが組み入れられている。これら顧客ニーズを実現するための、電気ハードウェア技術の主なものとして、次のものが挙げられる。

- (1) ハンドリング及び各種制御系のロジックのプログラムが容易に組め、かつ運転中のモニタがCRT(Cathode Ray Tube)で簡単にできるプラントコントローラHISEC 04-E(以下、H-04-Eと略称)*¹⁾。
- (2) 電気制御システムをドリフトフリーで、かつ故障診断を可能にさせた総合デジタルレオナード*²⁾(デジタルハイレクトール)。
- (3) 特に中央設備の高速化、高品質化に寄与する交流可変速制御であるベクトル制御^{1)~3)}付PWM(Pulse Width Modulation)インバータ。

このような顧客ニーズと技術的課題、及びそれを解決する電気ハードウェア技術の関係を図1に示す。

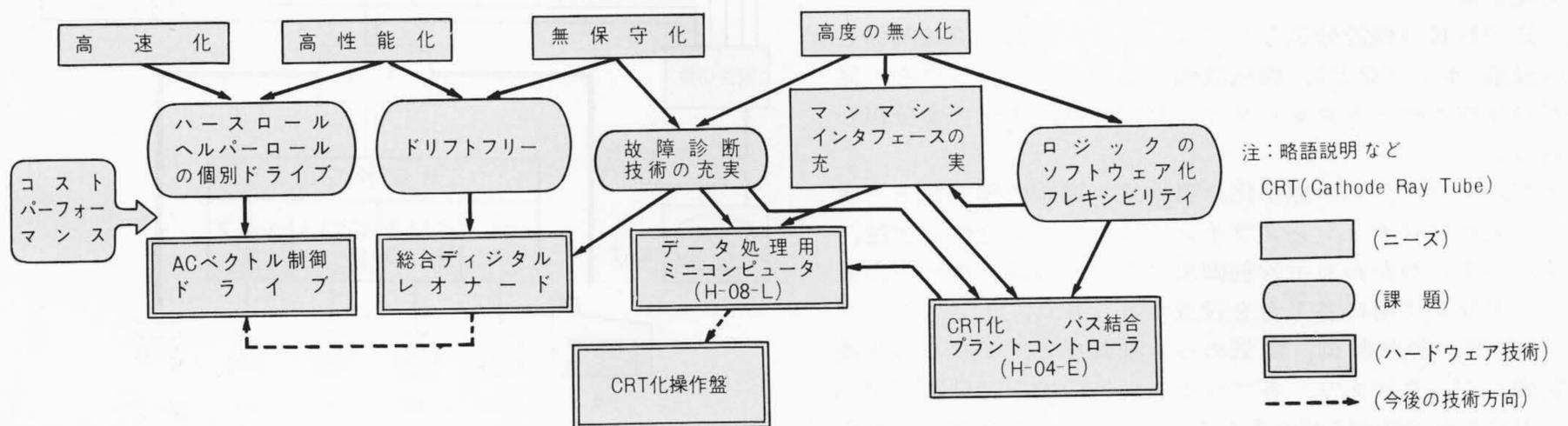


図1 顧客ニーズと技術的課題 顧客ニーズに対する技術的課題と、それを解決する電気ハードウェア技術の関係を示す。

* 日立製作所大みか工場

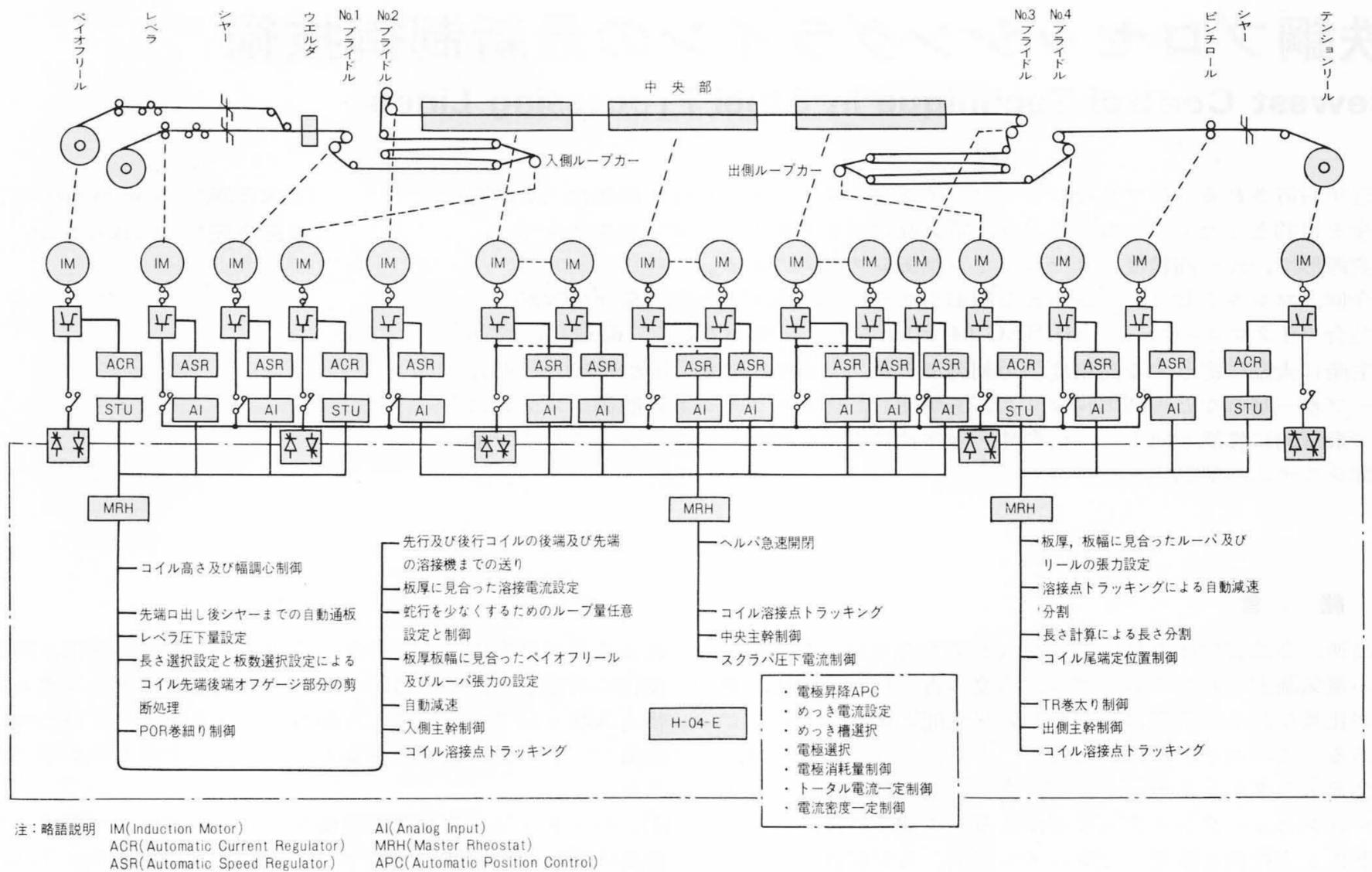


図2 システム構成及び自動運転項目 プロセッシングラインの設備の一例として、機械設備に対応した駆動装置及び入側-中央-出側に適用される主な自動運転項目を示す。

2.2 システム構成

具体的なシステム構成及びH-04-Eの自動運転項目を、図2, 3に示す。これは、電気めっきラインの例であるが入側、出側については、ほぼすべてのプロセッシングラインについて共通であり、中央は、高品質技術との関連が強いため、高品質技術の項で詳細を述べる。

本システム構成上の基本的な考え方を下記に示す。

- (1) 工期の短縮化を図るため、STU(Serial signal Transmission Unit：信号多重伝送装置)を採用する。STUは、32点のビット信号を1ペアの信号線で送受信することができ、外部配線の縮減に大幅に寄与できる。
- (2) H-04-Eとしてバス結合方式を採用し、PI/O(プロセス入出力装置)への共有化を図り、危険分散機能集中形システムを実現した。
- (3) H-04-Eの機能分担としては、ライン制御に直接関係しない設備(ポンプなど)、機械設備保護用インタロックを、従来どおりワイヤードロジックとした以外は、すべてを分担している。

また、プログラムの標準化、現地での調整の独立性を考慮して、大形プロセッシングラインでは、ライン全体の加速、減速、停止にかかわる主幹制御用に1台、入側-中央-出側のハンドリング用に各1台を設置する。また、ディスクレーク⁴⁾制御、形状制御、電気めっき制御など、かなりの複雑な制御ロジックがあり、各プロセスに特徴的な特殊制御用には、更に1台設置する場合もある。また、バス結合方式の採用によりPI/Oの共有化が図れるため、1台の予備用H-04-Eにより、すべてのH-04-Eの予備の役目を果たすことができる。

- (4) H-04-Eのロジックメンテナンスを目的とするCRTシステム1セット設置し、回線切換により各H-04-Eのメンテナ

ンスを行なう。

- (5) 大形プロセッシングラインでは、故障監視用としてミニコンピュータHIDIC 08-L(以下、H-08-Lと略称)を設ける場合がある。

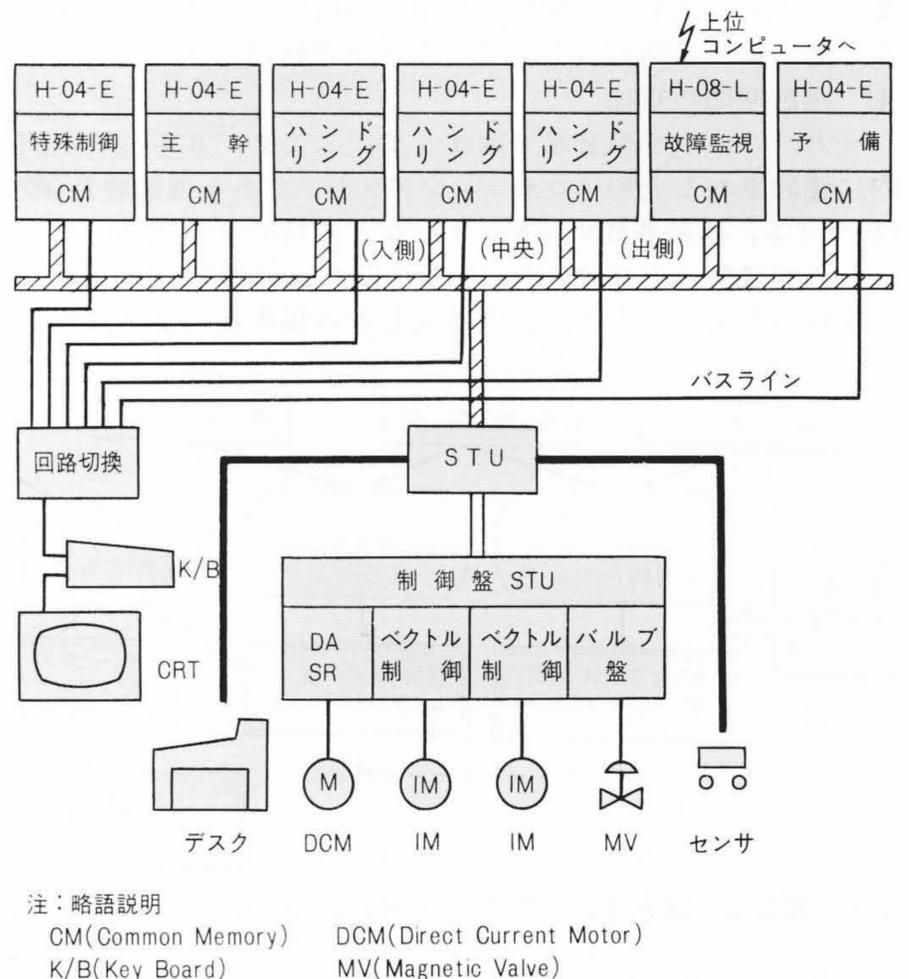


図3 制御システム バス結合形H-04-Eによる制御システム構成例を示す。デスク、主機、補機制御盤、センサ間はSTUリンケージを適用している。

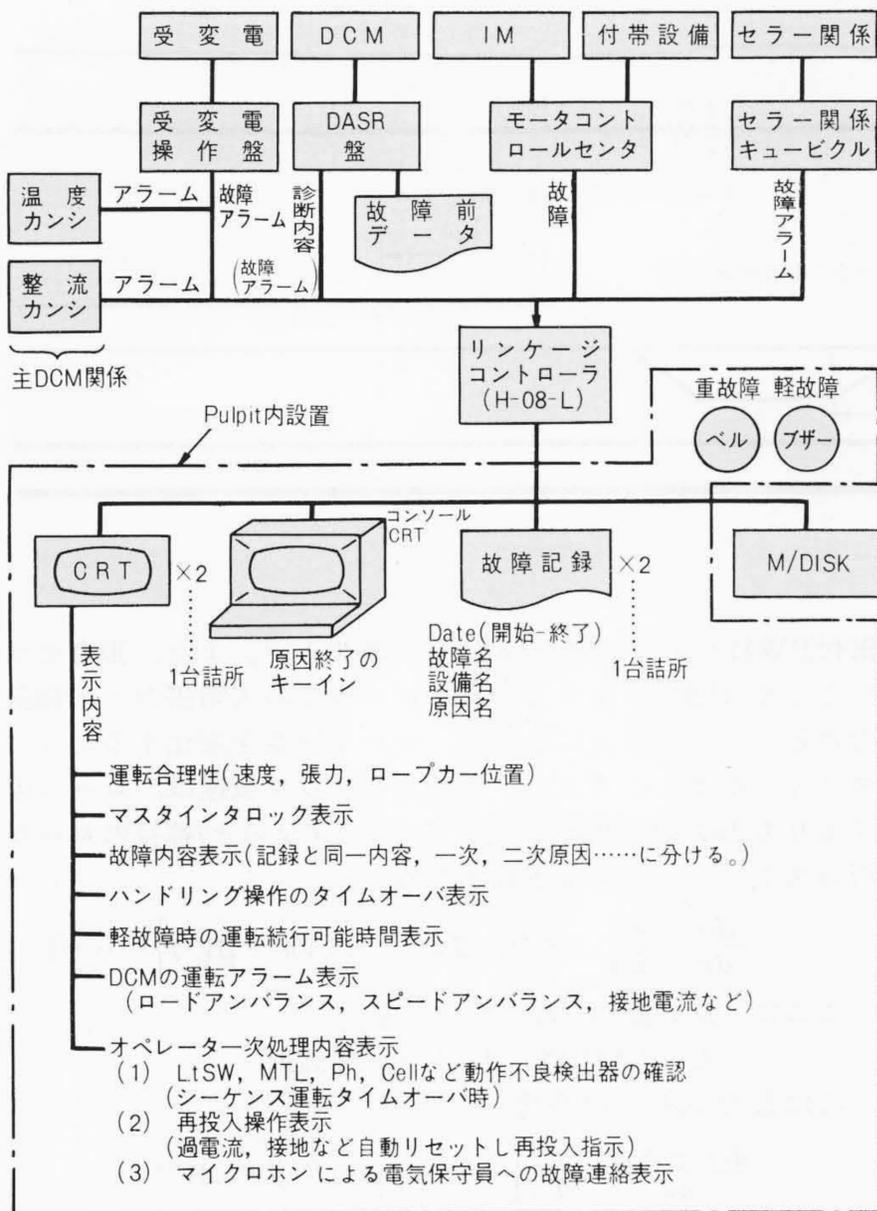


図4 故障監視システム H-08-Lを使用した故障監視システム例であり、Pulpit内に設置されたCRTによりオペレータに対し故障内容表示、再投入操作表示などを行なうことにより大幅なメンテナンス性の向上を図っている。

また、H-04-Eの上位にプロセスコンピュータが設置され、全体の生産管理、品質管理を行なう場合があるが、その場合は本H-08-Lが上位プロセスコンピュータとのリンクを兼ねる。

故障監視システムの概要を図4に示す。本故障監視システムの特徴は、前述のようにPI/Oの共有化により大幅なハードウェア追加が不要であり、故障が発生すると故障内容を操作員に示すと同時に、故障推定原因を追求し、センサ類の交換、再投入指示などの一次処理内容を操作員に示すことができる。また、入側、中央、出側の速度、張力、ループカー位置の合理性をチェックすることにより、ある程度操作員に対し、次の操作を指示する一種のオペレータガイダンス的な機能をもたせることも可能である。

3 高品質技術

前章でも述べたように、プロセスラインはますます大形化、高速化、高付加価値製品の生産へと進んでいるが、その中で最も問題になるのが、入側、出側のループカー(あるいはループタワー)の張力制御、中央部に炉をもつものの炉内の張力制御、カテナリー制御などであり、それぞれの特徴的なことを順次述べる。

3.1 ループカーの張力制御

ループカーの張力制御の従来方式と新方式の比較を表1に示す。ループカーの張力制御の目的は、入側、出側ラインの加減速、停止時にループカーが移動するときに生ずる入、出

表1 ループカー張力制御の比較例 従来方式に比べ新方式が機構の単純化を図り、しかも張力変動が小さいことが分かる。

項目	新方式	従来方式
方式の比較		
実動ラインでの変動値	炉内張力設定値 900kg ± 11kg	炉内張力設定値 900kg ± 54kg
中央速度の変化	炉内張力設定値 900kg ± 11kg	炉内張力設定値 900kg ± 54kg
入側停止	炉内張力設定値 900kg ± 22kg	炉内張力設定値 900kg ± 54kg
入側寸動	炉内張力設定値 900kg ± 22kg	炉内張力設定値 900kg ± 135kg
定常状態	炉内張力設定値 900kg ± 11kg	炉内張力設定値 900kg ± 11kg

側の張力変動を発生源で抑制することによって、中央部に張力変動をもたないことにある。更に、従来は炉入側に空気圧で動くダンサロールを設置し、このダンサロールの位置を変更することによって、炉内への張力変動の波及を抑えていたが、空気の圧縮性及び機械的構造が多いため、十分な性能を得ることができなかった。新方式は、この機械構造を全く排除し、電気的な方式により張力制御を行なったもので、同表に示すように、約2~5倍の性能向上を図ることができた。制御ブロックを図5に、実際の運転チャートを図6に示す。図5では、炉入側に設置のTM(テンションメータ)により2BR(No.2ブライドル)の張力制御も行なっているが、ブロックは省略している。ただし、最近ダンサロール(あるいはテンションデバイスとも称する。)で、空気式でなく電気的に優れたものがあり、縦形炉でのカテナリー吸収及び異常時の

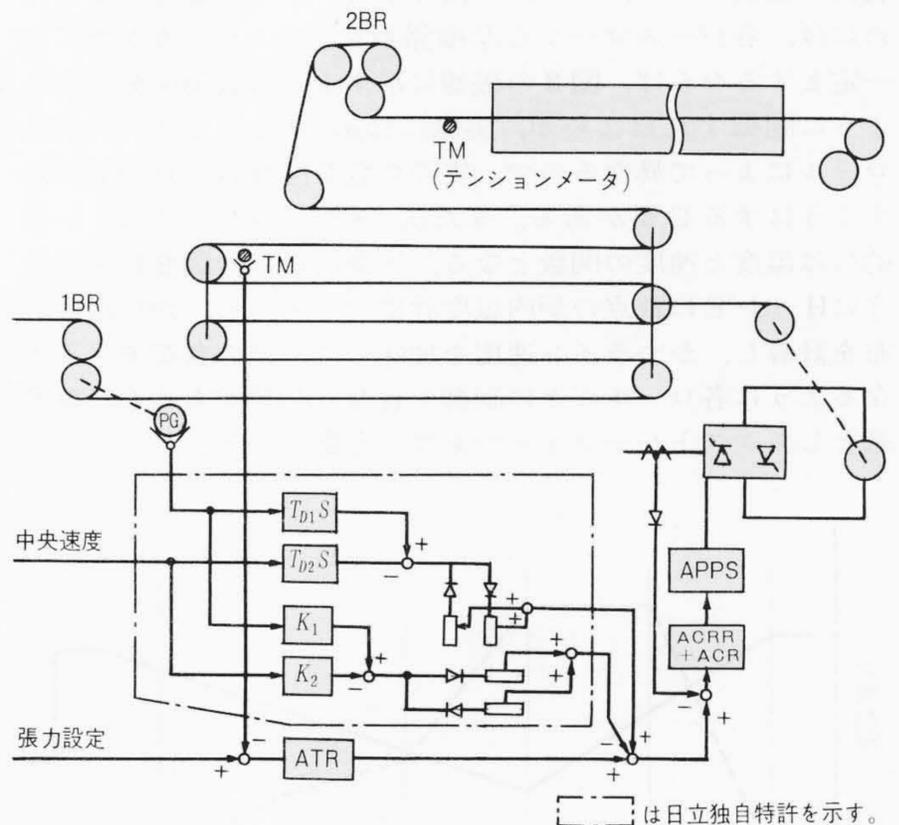


図5 ループカー制御ブロック デジタルハイレクトールへの電流指令として、入側-中央ライン速度を取り込みフォーシングとするほか、ATRにより張力設定値とTMからのフィードバック値の偏差から張力を一定となるような指令を与えている。

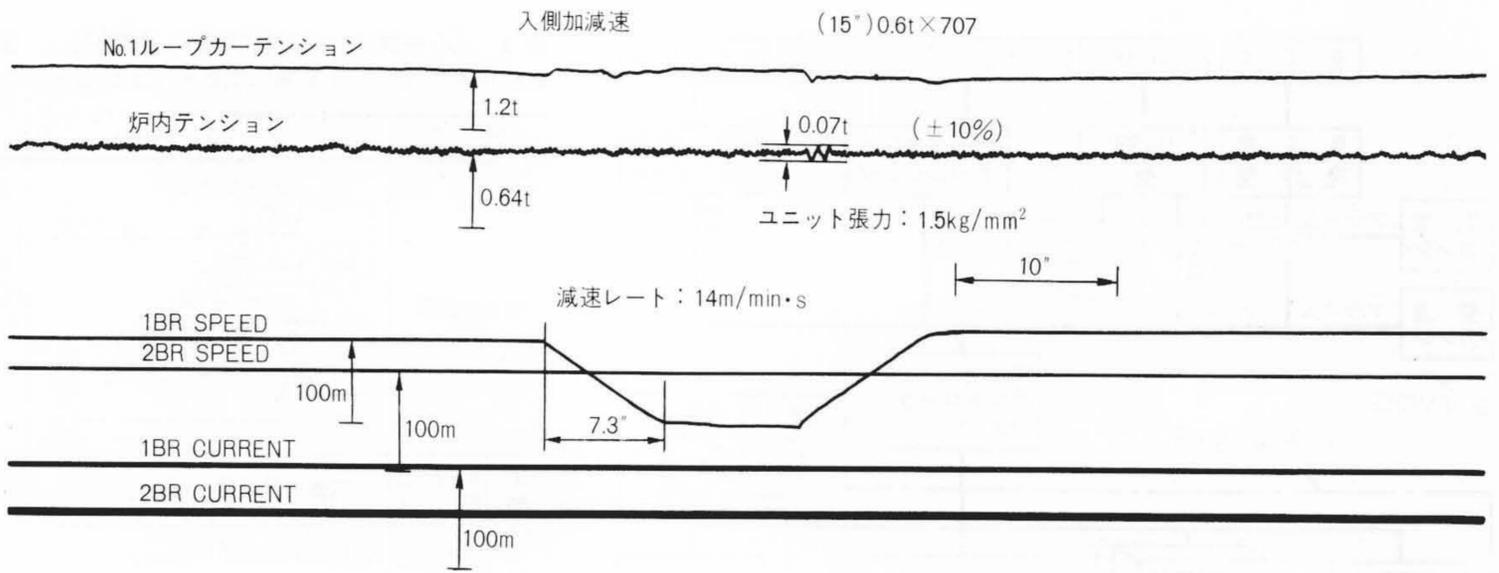


図6 ループカー張力制御運転チャート
1BR(No.1ブライドルロール)すなわち入側の速度基準の定常運転及び加減速時の張力変動を示す。炉内テンションは加減速時でも±10%以内に入っている。

張力制御用として有効であり、新方式との併用が考えられる。

3.2 炉内張力制御

燃焼炉をもつプロセッシングラインでは、一般的に加熱帯、均熱帯でストリップ温度を800~1,000℃まで上げ、一次冷却帯、過時効帯、二次冷却帯で常温まで冷却する。このように温度変化を行なうと、ストリップの弾性係数 E (ヤング率)が温度⁵⁾とともに大幅に変わる(常温で $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 、1,000℃で約 $1.6 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$)。ストリップに塑性変形を起こさせないように、ストリップにかかる張力を図7に示すように、温度の低いところでは張力は高く、温度の高いところでは張力を低くし、最低単位張力として 0.2kg/mm^2 程度にする必要がある。また最近では、ライン速度が300~600m/minのものもあり、高温、高速、低張力で運転することとなる。このような場合、張力変動が生ずると、ストリップが蛇行して運転不能となる。また、蛇行を嫌うあまり張力を高くすると、ヒートバックルによってストリップの形状を悪くすることとなる。低張力下でも形状の良い製品を出すためには、精度の良い炉内の張力制御が必要となる。また、炉内で張力が一定の配分となるためには、各バースロールで摩擦係数 μ 及びメカニカルロスが一定とするならば、図8の破線に示すような負荷配分となるように制御すればよいが、実際には μ 、メカニカルロスが各ロールによって異なるので、実際の負荷配分は一点鎖線に示すようにする必要がある。また μ 、メカニカルロスは、一般的には温度と速度の関数となる。制御的には、図9に示すようにH-04-Eに数点の炉内温度計出力を入力し、炉内温度分布を計算し、かつライン速度を加味して所定の負荷モードとなるように各ロールごとに制御を行なう必要があるが、駆動系としてコストパフォーマンスを考慮すると、ベクトル制

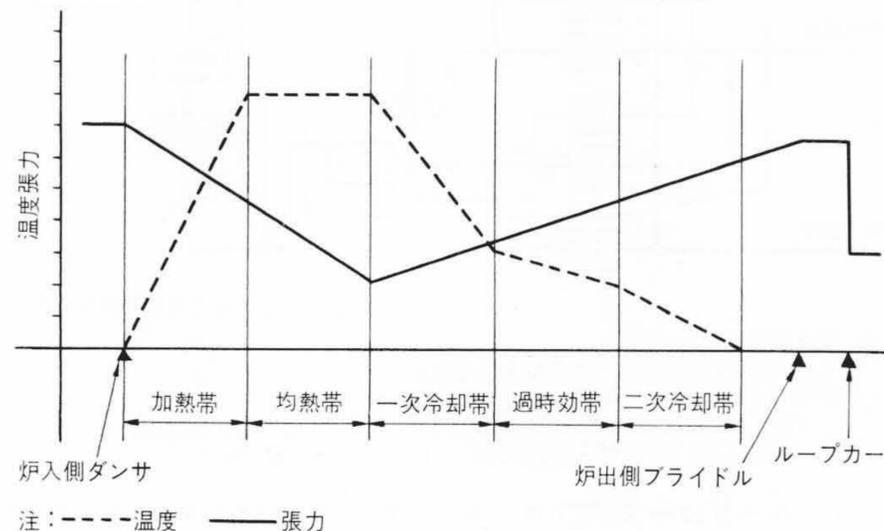


図7 代表的張力温度パターン ストリップの金属学的性質から、均熱帯の温度の高いところでは、張力を下げるといパターンを示している。

御付PWMインバータを採用するのがよい。また、張力モデルとしては図10に示すように、ロールでの入側張力と出側張力の差がある値以上になると、ロール速度を変化するようにスリップが働くと考える。まずストリップ板速は、ロール周速よりも Δv だけ速度が変化していると考えたと i 番目のロール板のストリップ張力は下式となる。

$$\frac{dt_i}{d\tau} = \frac{E}{L} \left\{ (V_R^{i+1} + \Delta V^{i+1}) - (V_R^i + \Delta V^i) \right\} \dots \dots (1)$$

ここに t_i :張力, E :ヤング率
 L :板の長さ, V_R :ロール周速
次に張力が Δt_i だけ変化

$$\frac{d(t_i + \Delta t_i)}{d\tau} = \frac{E}{L} \left\{ (V_R^{i+1} + \Delta V_R^{i+1}) + (\Delta V^{i+1} + \Delta \Delta V^{i+1}) \right\} - \left\{ (V_R^i + \Delta V_R^i) + (\Delta V^i + \Delta \Delta V^i) \right\} \dots \dots (2)$$

(2)式で張力とストリップの関係式を代入して、(3)式が得られる。

$$\frac{d\Delta t_i}{d\tau} = \frac{E}{L} \left\{ \Delta V_R^{i+1} + g(\Delta t^{i+1} - \Delta t^i) \right\} - \left\{ \Delta V_R^i + g(\Delta t^i - \Delta t_{i-1}) \right\} \dots \dots (3)$$

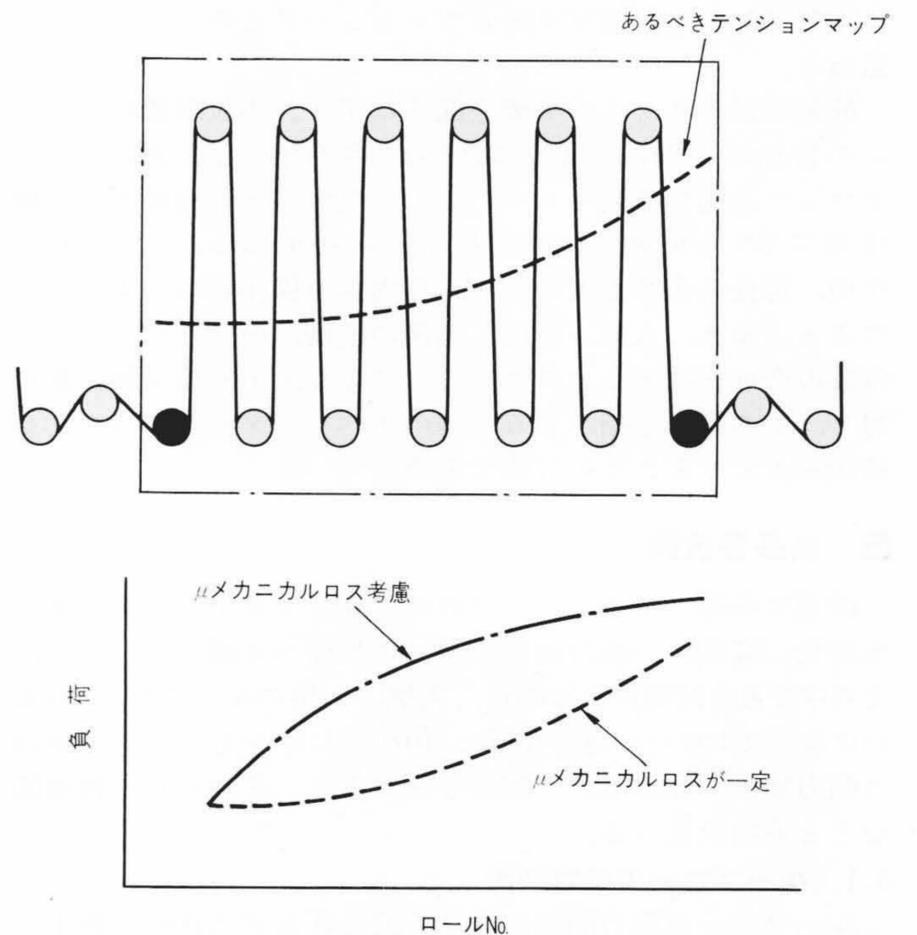
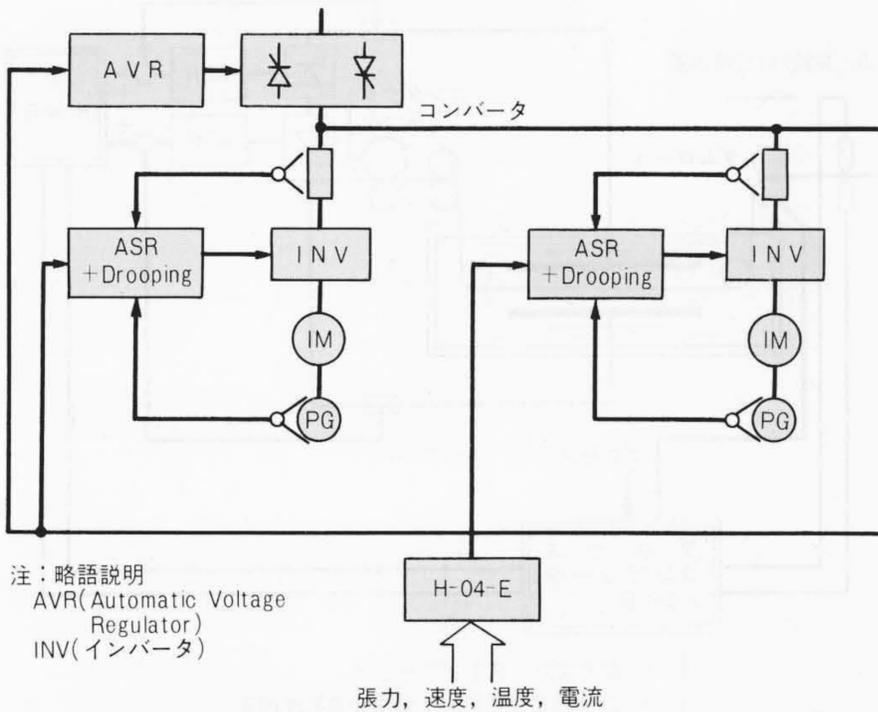


図8 炉内負荷配分 各バースロール位置での摩擦係数 μ 、メカニカルロス考慮した場合の負荷配分を示す。



注：略語説明
AVR(Automatic Voltage Regulator)
INV(インバータ)

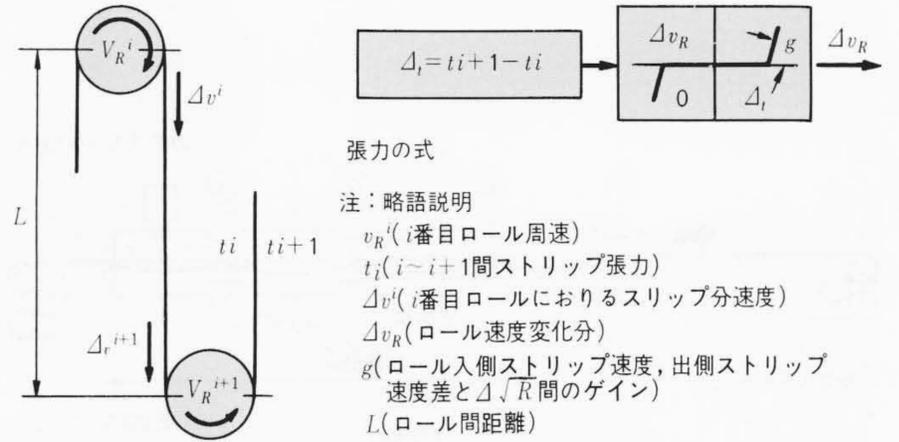
張力, 速度, 温度, 電流

図9 制御回路 張力, 速度などをH-04-Eに入力し, 演算結果により各バースロールの最適指令を与える。

(3)式に示すモデルを用いることにより, ほぼ正確なシミュレーションが可能となり, 複雑な炉内張力が解析でき, 実機での制御系の設計を行なう上で非常に有効となっている。実機適用の制御モデルを図11に示す。同図で分かるように, 第1冷却帯を基準として炉入側, 及び出側に対し, サクセシブ制御も行なっており, 本制御系はライン速度約600m/minのものに適應され±3%以下の安定張力を得ている。

3.3 カテナリー制御

酸洗ラインなどでは, 炉内はほぼフリーテンション(ストリップに張力をかけない。)にする必要があるため, 炉内のカテナリー量を検出して炉全体のカテナリー量を制御する必要がある。カテナリー制御のブロック図を図12に示す。通常はカテナリー量フィードバックと目標値の偏差を, No.1ブライドルの速度指令として与え制御を行なうが, カテナリー検出器



張力の式

注：略語説明

- v_R^i (i番目ロール周速)
- t_i (i~i+1間ストリップ張力)
- Δv^i (i番目ロールにおりるスリップ分速度)
- Δv_R (ロール速度変化分)
- g (ロール入側ストリップ速度, 出側ストリップ速度差と $\Delta\sqrt{R}$ 間のゲイン)
- L (ロール間距離)

図10 張力モデル ロール入側張力と出側張力差がある値以上になると, スリップがロール周速を変化さず関係を示す。

にはレーザ, ITV(工業用テレビジョン)を使用しているため信頼性が問題になる場合がある。そのため, 検出器異常信号によりNo.1ブライドル制御を速度制御から電流制御に切り替えて運転する。カテナリー量 y と張力の関係は下式に示すように相関がとれているため, 容易に電流指令を決定することができる。

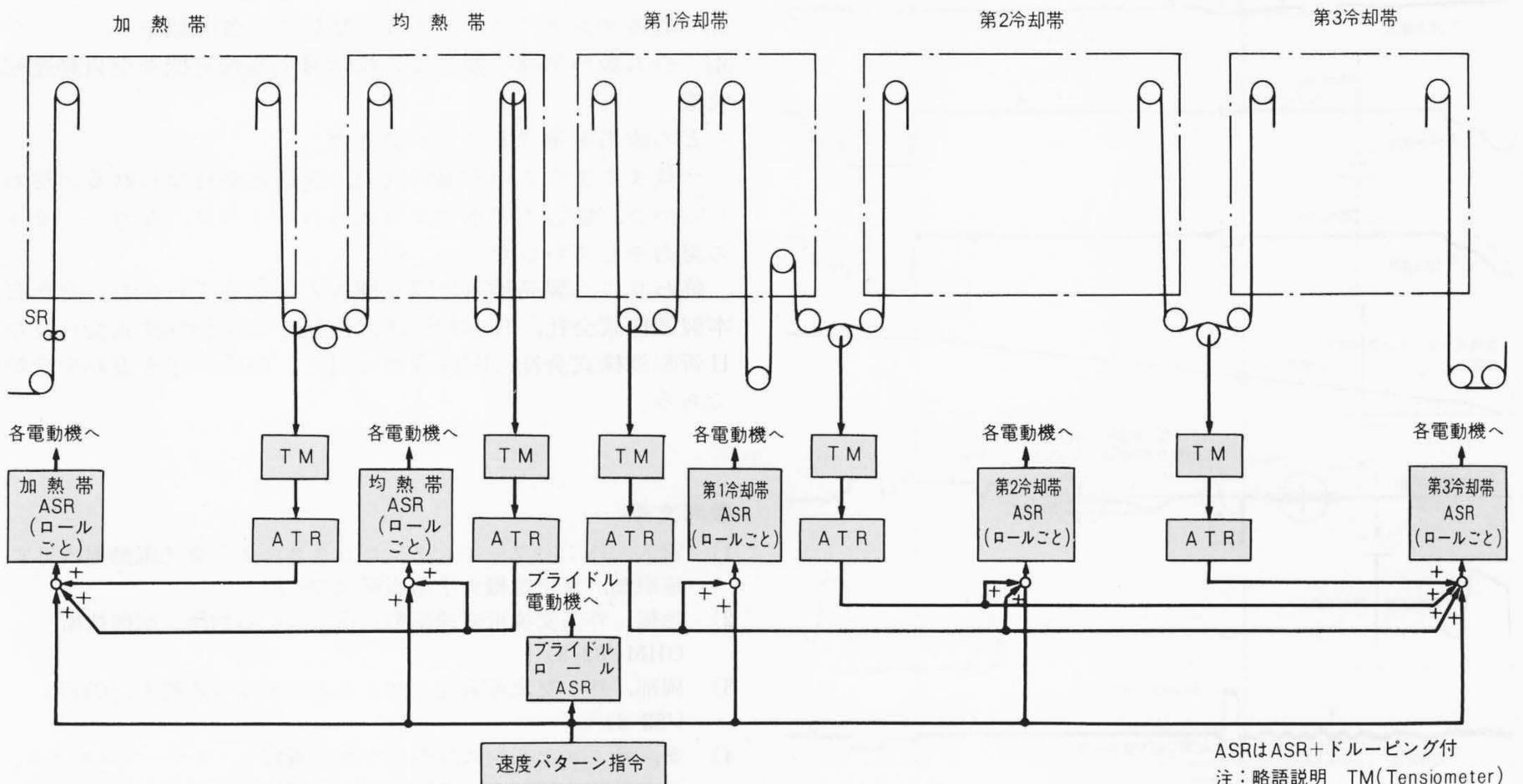
$$y \doteq \frac{\rho l^2}{8u} \dots\dots\dots(4)$$

ここに u : 単位張力, ρ : ストリップ密度, l : スパン

図13にカテナリー制御の実績チャート, すなわちカテナリー制御使用時と不使用時を示す。制御使用時には±25mm以内に, 不使用時には±70mm以内に入っていることが分かる。

(4) 電気めっき制御

最近, 溶接性, 塗装性及び加工性の優れた片面防食鋼板の生産に優れた電気亜鉛めっきラインの計画, 建設がなされているが, 電気めっき制御のブロックを図14に示す。めっき槽内には, 上面, 下面にそれぞれ電極棒が設置され, それぞれ約20~25kA, 電圧30~40Vのサイリスタ電源によって電流が制御される。等厚めっきの場合のめっき回路で消費される電力は,



ASRはASR+ドルーピング付
注：略語説明 TM(Tensiometer)

図11 炉内張力制御ブロック例 炉内各帯ごとに張力制御を行なっている。また, 第1冷却帯を基準として炉入側及び出側に対しサクセシブ制御のかけ方を示している。

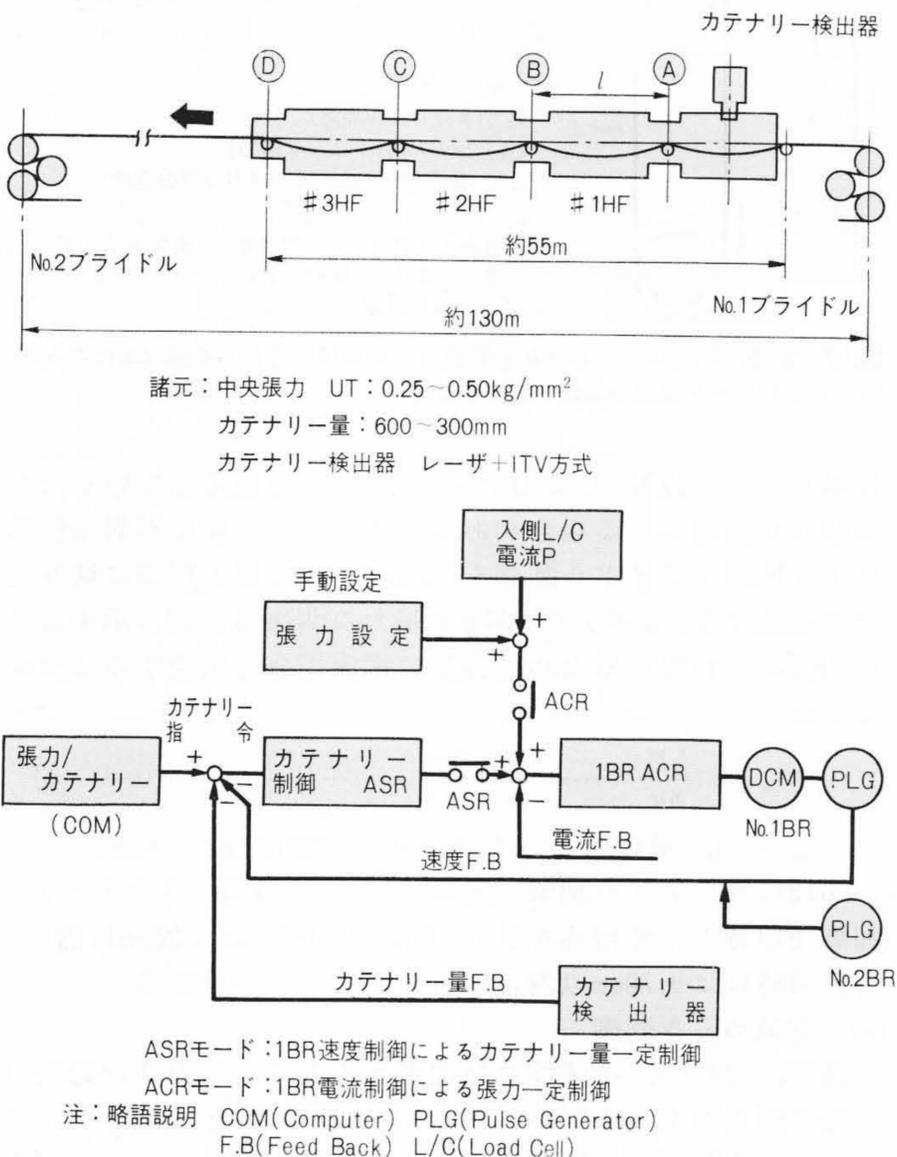


図12 カテナリー制御ブロック図 酸洗炉でのカテナリー制御のブロック図を示す。通常はASRモードとカテナリー検出器で、異常時はACRモードで使用する。

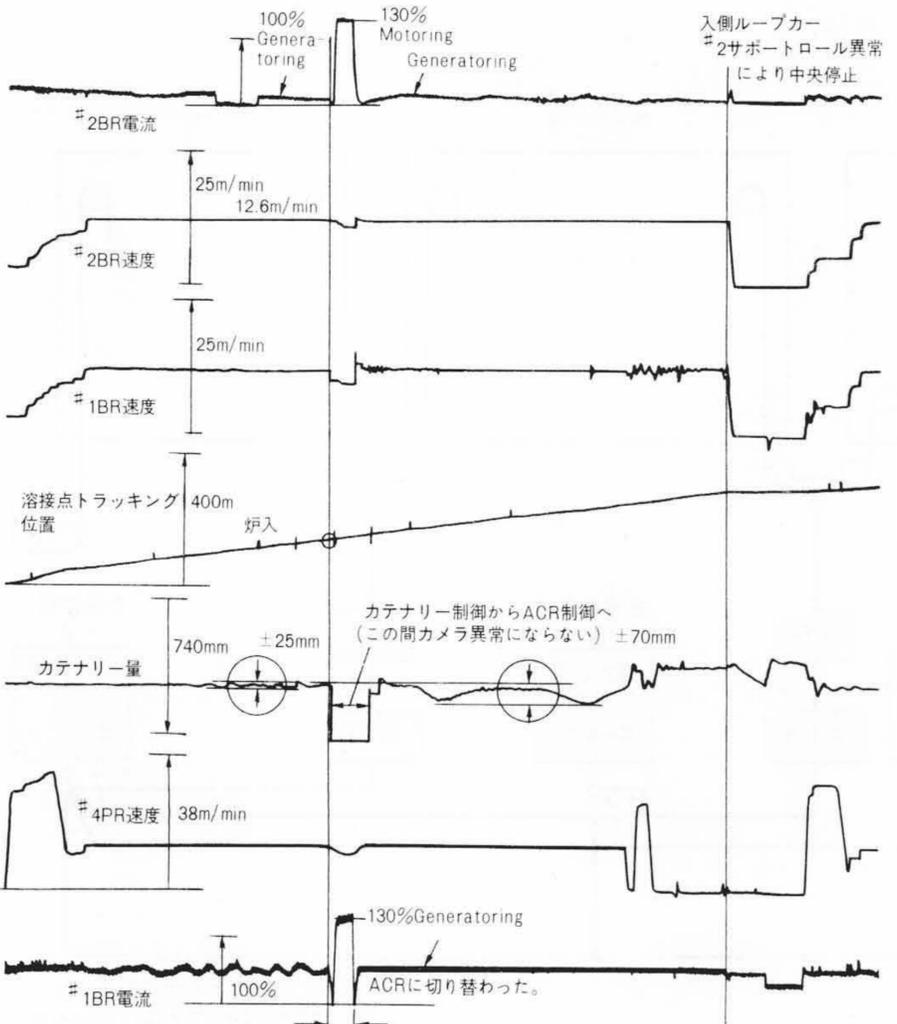


図13 カテナリー制御実績チャート例 カテナリー制御時とACR制御時のカテナリー量の変動を示す。

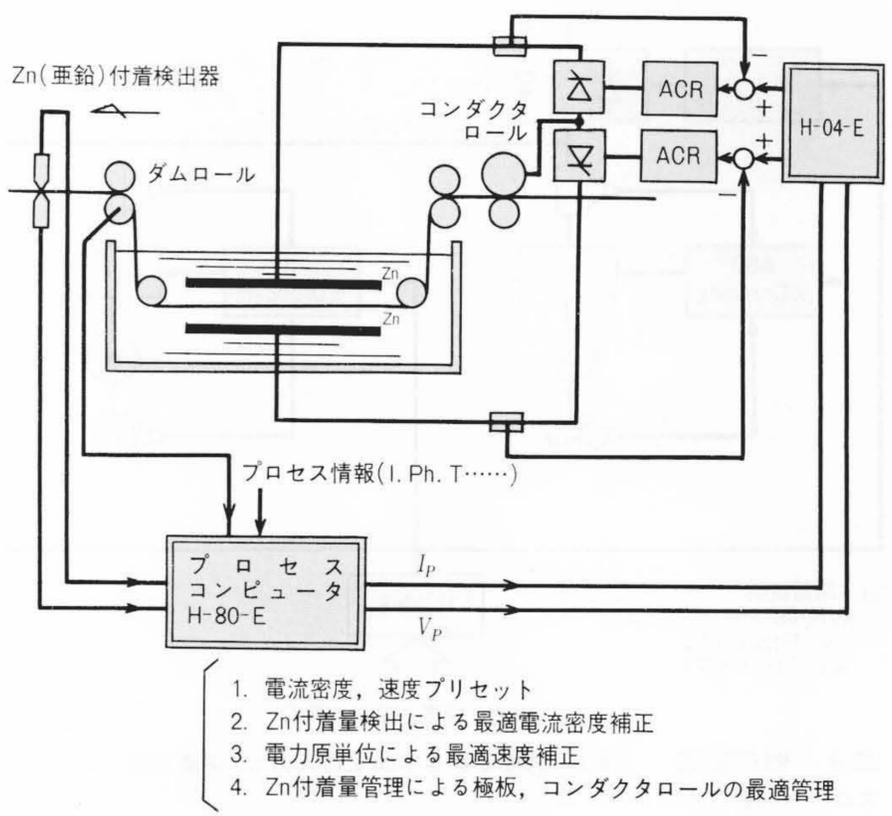


図14 電気めっき制御ブロック図例 一般的な電気亜鉛めっきの制御ブロック例を示す。

$$P = RKV^2 \dots\dots\dots(5)$$

ここに P ：めっき回路で消費される電力， R ：めっき回路抵抗， V ：ライン速度， K ：定数
 となり，速度の2乗に比例することになり，電力原単位による最適速度の決定及び補正，亜鉛付着量管理による極板，コンダクタロールの最適管理などの制御が必要となる。

4 結 言

以上，ここ2，3年の実績を踏まえ代表的なシステム構成及び張力制御ほかの高品質技術について報告した。特に実ラインでは，

- (1) 高精度ループカー制御：±2%以下
- (2) 焼鈍炉での高精度張力制御：±3%以下
- (3) 酸洗タンクでのカテナリー制御：±25mm以下
- (4) 少人数の熟練を要しない操業員で運転可能な全自動運転装置

などの成果を挙げることができた。

今後ますますこの方面の開発，製品化が行なわれると思われるので，顧客の要求にこたえられるように，なおいっそうの努力をしていきたい。

終わりに，製品納入に際し種々の御指導をいただいた新日本製鉄株式会社，日本鋼管株式会社，川崎製鉄株式会社及び日新製鋼株式会社の関係各位に対し，深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 宮入，外：パワーエレクトロニクスによる交流電動機の可変速駆動，東京電機大学出版局(昭56-8)
- 2) 地福，外：交流可変速駆動技術における回路・制御技術，OHM('82-8)
- 3) 岡部，外：交流可変速システムの鉄鋼業への適用，OHM，('82-8)
- 4) 秦，外：ステンレス鋼帯の中性塩電解デ・スケールシステム，日立評論，58，9，695～700，(昭51-9)
- 5) 佐藤，外：超音波による各種構造機の高周波における弾性係数の測定，日本機械学会誌，69，572，9，1146～1154(昭41-9)