

最新の電動機速度制御システムの発展と シームレスミルへの適用

福島 俊司*・吉田 智和*・後藤 久夫*²・林 千博*³

Recent Development of Motor Speed Control System and It's Application to Seamless Pipe Mill

Shunji FUKUSHIMA, Satokazu YOSHIDA, Hisao GOTO and Chihiro HAYASHI

Synopsis : Recent progress of main motor speed control apparatus using power electronics devices applied for rolling mills especially seamless pipe mills have contributed Recent to the advancement of quality of products. Both quick response and precise control of motor speed are the main advantage of recent motor speed control apparatus.

The overview of this development and its application to seamless pipe mills in Wakayama steel works including new seamless pipe mill are described.

Key words : cycloconverter; GTO inverter; IGBT inverter; NPC inverter.

1. 緒言

熱間継目無鋼管は穿孔圧延にてピレットを中空素管に加工し、延伸圧延（マンドレルミル）にて肉厚を減じ、絞り圧延（ストレッチレデューサおよびサイザ）にて所定の外径に仕上げられる。

この製造プロセスにおいて、高寸法精度、少量・多品種の効率的生産等の課題解決に電気制御設備が決定的役割を果たしている。特に管の圧延は薄板圧延に比べて圧延長が短いため先後端の非常常部の占める割合が大きく、オフゲージ長が歩留りに大きく影響するため圧延主電動機の応答性能が制御能力を支配する。

本稿では和歌山製鉄所の製管設備を例に継目無鋼管圧延主機用可変速電動機設備の変遷を概説し、さらに当社の製管技術の粋を結集した新中径管工場に採用した高応答、高精度の全交流可変速制御装置について紹介する。

2. 和歌山製鉄所におけるマンネスマンマンドレルミルラインの概要

和歌山製鉄所では現在マンネスマンマンドレルミル法による下記3工場が稼働している。

- ①小径製管7インチミル（'67年稼働）
- ②小径製管51/2インチミル（'83年稼働）
- ③新中径管163/4インチミル（'97年稼働）

以下マンネスマンマンドレルミルラインにおける各圧延

設備の主電動機に求められる機能について簡単にまとめる。マンドレルミルラインはFig. 1に示す様に加熱炉→交叉穿孔機→マンドレルミル→ストレッチレデューサあるいはサイザで構成される、世界最新鋭の継目無鋼管製造プロセスである。

2・1 交叉穿孔機

前記3工場は、当社独自開発の交叉穿孔機により回転鍛造効果を抑制しつつ丸ピレットの中心部を延性化させ、そこに押し当てたプラグによって中空素管にするという特徴を有する。穿孔機では多品種の穿孔を行うためにロール傾斜角、回転数設定を細く修正する必要がある。またミスロールとなる圧延詰まりを防止するため、穿孔中にロール開度と共に回転数を変更する必要があり、駆動系としては

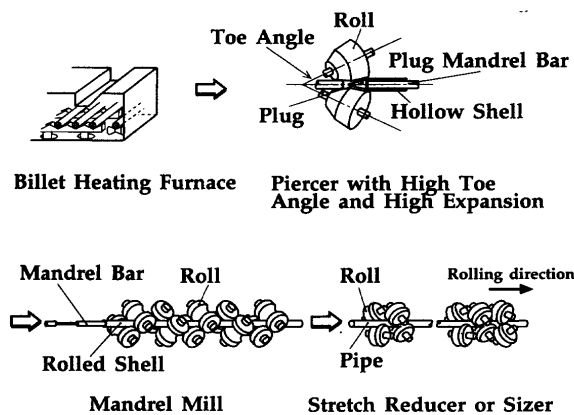


Fig. 1. Mannesmann Mandrel Mill Process.

平成 11 年 9 月 24 日 受付 平成 11 年 11 月 11 日 受理 (Received on Sep. 24, 1999; Accepted on Nov. 11, 1999)

* 住友金属工業 (株) 和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1850 Minato Wakayama 640-8555)

* 2 住友金属工業 (株) プラントエンジニアリング事業部 (Plant Engineering Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 3 住友金属工業 (株) 社友 (Consultant, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

可変速電動機を採用する場合が多い。

交叉穿孔機では大きな加工度が要求され多大の電力を必要とするため、電動機設備には電源系統への影響を少なくするため、高効率かつ高力率で発生高調波が少ないことが要求される。

2.2 マンドレルミル

マンドレルミルは5~7基のスタンド列からなる連続圧延機で、穿孔機で加工された中空素管に潤滑剤を塗布したマンドレルバーを挿入し、孔型ロールとマンドレルバー間での圧延により、製品肉厚近くに延伸圧延する。高速で大きな肉厚圧下を行うため、マンドレルミルの総消費電力は大きい。

マンドレルミルはタンデム圧延機であり、圧延材に応じてきめ細かく圧下位置および回転数を設定する必要がある。また寸法精度に影響するスタンド間圧縮力や張力の変動を防止するため、圧延材の噛み込み戻抜け時の負荷急変や速度外乱に対しても安定した速度制御ができる可変速電動機が必須である。さらに圧延材先後端の非正常部のオフゲージを修正する管端薄肉圧下制御に伴う速度補正やフルフロートマンドレルミルにおける戻抜け時の『ストマック』と呼ばれる管端部の増肉を防止するためのダイナミック減速制御の速度追従性も要求される。

この様にマンドレルミル用電動機設備では、特に速度制御の高応答、高精度が要求されると共に高電源力率で発生高調波が少ないことも要求される。

2.3 ストレッチレデューサおよびサイザ

ストレッチレデューサおよびサイザはマンドレルミルにて製品肉厚近くまで圧延された素管を製品外径、肉厚に仕上げる圧延機で、管周方向にそれぞれ120度間隔で配置された3個の孔型ロールを有する圧延スタンドを複数タンデムに配置している。

ストレッチレデューサでの圧延は張力圧延が基本であり、管端の張力不足部での増肉を防止するために管端通過時に各スタンドの回転数を減速制御する方式も実用化され

ている。したがってマンドレルミルと同様に高精度、高応答の速度制御が必要となる。

3. 継目無管圧延主機電動機制御の変遷

最近の制御ハードおよび制御理論の進歩により、電動機制御装置、特に交流可変速制御装置は従来実現不可能であった様な応答性能を提供できるようになっている。

本章では圧延主機電動機制御装置の進歩と和歌山製鉄所継目無管製造設備への適用状況をまとめる。

3.1 直流電動機

直流電動機は整流カーボンブラシの取り替えに伴う定期的保全等の短所はあるが、その優れた速度制御性能故に圧延主機駆動に広く使用されてきた。Table 1¹⁾に示す様に直流電動機はTAF（トルク増幅係数）に基づく堅牢設計に始まり、1980年代の耐高温のH種絶縁物の実用化による許容温度上昇限界の拡大および高耐電圧化により、同一体格での電動機容量が増大し、低慣性化小型化が実現され、1960年代のものに比べGD²は半減している。速度制御装置は直流発電機を用いたMGから、サイリスタを用いた可変速装置に代わってきている。

しかし前述の如き保全上の短所や整流限界に起因するdi/dt（電流変化率）の制約上高い電流応答が期待できないこと、および回転子構造上これ以上の低慣性化が難しい等の理由から次項で述べる様に交流可変速電動機が主流となりつつある。

3.2 交流電動機

近年のマイクロプロセッサの高性能化、制御理論の進歩および大容量電力変換素子の進歩により、交流可変速装置は直流電動機以上の性能を発揮することが可能となり、圧延主機への適用が活発である。Table 1にその技術進歩の概要を示す。

主機電動機駆動用パワー素子としてはサイリスタ、GTO（ゲートターンオフサイリスタ）、IGBT（絶縁ゲートバイ

Table 1. Evolution of motor speed control equipment.

Year	'60	'65	'70	'75	'80	'85	'90	'95						
Structure	Design based on TAF (Torque Amplitude Factor)													
Insulation	B		F						H					
Terminal Voltage	DC MOTOR / 750V		1000V		1200V			AC MOTOR / 3.3KV						
Power Device	S C R / 1.6KV / 250A		2.5KV / 400A		4KV / 800A		4KV / 1.5KA		6KV / 3KA					
			G T O / 600V / 50A		2.5KV / 1KA		4.5KV / 2KA		4.5KV / 3KA		6KV / 6KA			
					I G B T / 500V / 50A		600V / 300A		1.2KV / 600A		1.7KV / 400A		3.3KV / 1.2KA	
Drive System	M-G		DC Variable Voltage System				Cycloconverter				GTO Inverter		IGBT	
Control	Analog		Analog & Digital Hybrid			All Digital								
Response ω c rad/s	DC MOTOR / 5 rad/s		1.5 ~ 2.0 rad/s			AC MOTOR / 2.0 rad/s			6.0 rad/s					
Accuracy	DC MOTOR ± 0.25%		AC MOTOR / ± 0.25%			± 0.1%			± 0.01%					

ポーラートランジスタ)が実用化され、素子の高電圧化、大電流化も2~3年ピッチで進んでいる²⁾。最近ではGCT(ゲート転流ターンオフサイリスタ)等の新素子も開発されたが、実機適用には至っていない。

交流電動機には同期電動機と誘導電動機の2種類があり、同期電動機は突極型と円筒型、誘導電動機はかご型と巻線型の各々2種に分類できる。圧延主機には主に突極型同期電動機とかご型誘導電動機が用いられる。

同期電動機は固定子に給電すると共に回転子を励磁するための直流電源を供給する必要があるが、直流機の整流子に似たスリップリングとブラシを必要とするが、電動機力率が1にできるため可変速装置の容量を電動機容量と同程度にすることができる。

一方誘導電動機は固定子のみ給電でよく、構造が簡単で、1500rpmを超える高速用途には適している反面、固定子にはトルク電流と励磁電流の合成電流を流すため電動機の力率が低くなる。したがって電動機容量に対して可変速制御装置の容量を大きくする必要がある。

このことから4000kWを超えるクラスの圧延機には同期電動機が、それ以下の容量および5000kW程度でも高速回転用途には誘導電動機が適用される。

3・2・1 サイクロコンバータ

サイクロコンバータはサイリスタを用いた交流可変速装置で商用交流電源から直接可変周波数交流電源に変換するもので1980年頃から圧延主機に適用されており、非循環電流型と循環電流型の2種類がある。

前者は後者に比べてトルクリップルが大きいため穿孔機への適用のみとなっている。Fig. 2に主回路を示す非循環電流型サイクロコンバータは負荷電流の極性によって正側と負側の装置を交互に動作させるが、同時に通電して短絡するのを防止するため、切替え時間を設ける必要があるが、これがトルクリップルの原因となり、また最大出力周波数は電源周波数の約30%に制限される。

サイクロコンバータは電源力率が低く、波形歪みによる高調波、特に出力周波数に応じて変化する側帯波と呼ばれる高調波対策に多大の労力を要する。

使用素子であるサイリスタは高電圧化が進み、大容量の可変速装置の製作が可能で、定格容量15MVA以上にはサイクロコンバータが主に用いられている。

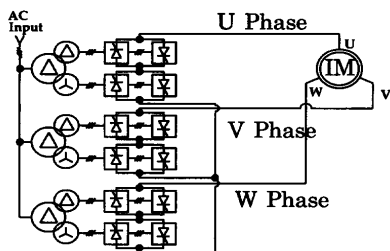


Fig. 2. Single line circuit diagram of cycloconverter.

3・2・2 GTOインバータ

自己消弧型素子(ゲート信号のみで素子の導通、遮断が可能な素子)であるGTOは微細加工された多数のエレメントから成り、各エレメントで1A程度の電流を分担している³⁾。最大クラスである6kV-6kAの素子では、エレメント総数が9千個近くにも及ぶ。

GTOはスイッチング周波数が500Hz程度に制約され、電流波形改善のために並列多重(電流多重)や直列多重(電圧多重)の多重化を行っている。多重化により1990年代になって主機駆動大容量電動機への適用が可能となった。最近ではFig. 3のNPC(中性点クランプ)式3レベルPWM(パルス幅変調方式)インバータに代表される直列多重が主流となっており、出力電圧3.3kV,単機容量13MVA,過負荷耐量150%のものも実用化されている。

3レベルインバータはFig. 4に示す様に素子のオンオフで2E, E, 0, -E, -2Eの5種類の線間電圧を切替えることにより正弦波状の出力を得る。GTOは最大遮断電流に応じた電流をゲートに流すことでターンオフする素子なのでゲート回路が複雑で大規模となり、スイッチング時のロス回収する回路上の工夫が必要となる。コンバータ部にも本装置を用いると、電源力率を1に制御することが可能で、発生高調波も低位に抑制することができるためサイクロコンバータに比べ電源補償対策が格段に軽減できる。

Fig. 5に示す様に1相分のユニットはGTO素子、フリーホイールダイオード、クランプダイオード、ヒートシンク(冷却銅板)を圧接して構成され、冷却に純水を使っているため、装置外部に純水冷却装置を要する。

3・2・3 IGBTインバータ

回路構成上はGTOインバータと同様であるがIGBTはゲートの電圧信号によってスイッチングを行う素子である

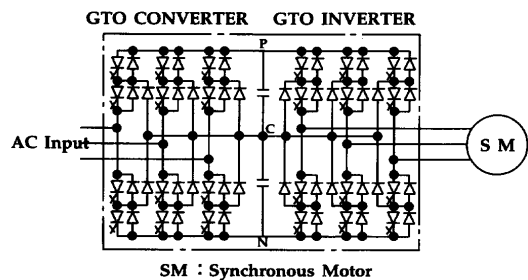


Fig. 3. Circuit diagram of NPC type GTO inverter.

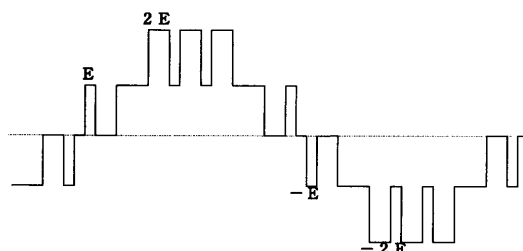


Fig. 4. Output voltage wave form of NPC GTO inverter.

Table 2. Comparison of motor speed control among three mandrel mill lines in Wakayama.

Year		1967	1983	1997
Mill		7 Inch Mill	5 1/2 Inch Mill	16 3/4 Inch Mill
Mill Type		Mandrel Mill		
Piercer	Motor	Synchronous Motor		
	Drive System	Constant Speed	Cycloconverter	GTO Inverter(NPC)
	Control		Digital Vector Control	Digital Vector Control
	Step Response		100 ms	100 ms
Mandrel Mill	Motor	DC Motor		
	Drive System	SCR Common DC Bus	Individual SCR Drive	GTO Inverter(NPC)
	Control	Analog Speed Control	Digital Speed Control	Digital Vector Control
	Step Response	300 ms	150 ms	70 ms
	Impact Recovery	Recovery Time 700 ms	Recovery Time 540 ms	Recovery Time 120 ms
	Accuracy	±0.25% of max. speed	±0.1% of max. speed	±0.01% of max. speed
Stretch Reducer	Motor	DC Motor		
	Drive System	SCR Common DC Bus	SCR Common DC Bus	IGBT Inverter(NPC)
	Control	Analog Speed Control	Digital Speed Control	Digital Vector Control
	Step Response	280 ms	120 ms	70 ms
	Impact Recovery	Recovery Time 500 ms	Recovery Time 340 ms	Recovery Time 140 ms
	Accuracy	±0.25% of max. speed	±0.1% of max. speed	±0.01% of max. speed

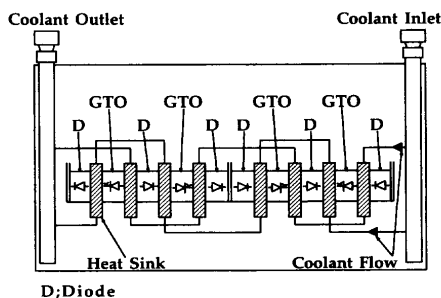


Fig. 5. GTO inverter unit overview.

ためスイッチング周波数が高く、より正弦波に近い出力が得られると共にスイッチングロスも少ないため出力周波数は最大120 Hz程度まで対応可能である。最近では単機容量数MVA過負荷耐量150%のものも実用化されている。ゲート回路も簡素であり、コンパクトな構造となっている。素子冷却は空冷であり、別置き冷却装置は不要である。

4. マンドレルミルライン主機電動機可変速制御

Table 2に和歌山製鉄所継目無管圧延主機電動機の一覧を示す。

4.1 小径製管7インチミル (67年稼働)

小径製管7インチミルでは外径2.5インチから7インチサイズの小径管を製造しており、我が国で最も早い時期に稼働したマンドレルミルであるが、穿孔機には一定速同期電動機を採用しているため穿孔条件に応じた回転数変更ができない。

マンドレルミルおよびストレッチレデュースには直流電動機を使用しているが、Fig. 6に示す様に各スタンドの駆動モータは電圧制御された直流電源に接続された共通直流母線方式を採用しており、ミル全体の速度はこの直流電源電圧により、またスタンドごとの速度は界磁電流によって調整される。

一般に界磁電流による速度制御応答は低く、圧延材噛み込み時のインパクトドロップの回復応答が悪く、管端非定

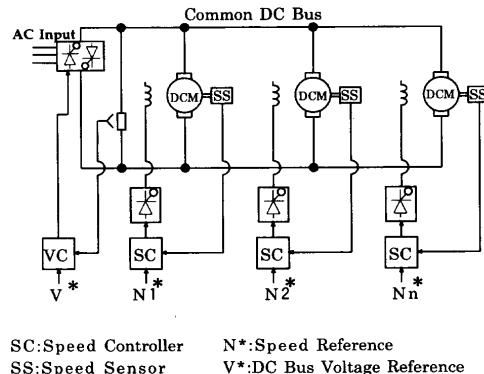


Fig. 6. Configuration of common DC bus type speed control.

常部でのダイナミック速度変更時の速度追従性にも劣る。さらに制御はアナログ式であり、周囲温度によるドリフトの影響を除くための定期的な調整が必要なことや信号の分解能に起因した速度制御精度等の問題がある。

4.2 小径製管51/2インチミル (83年稼働)

小径製管51/2ミルでは外径1インチから51/2インチサイズのの小径管を製造している。

交叉穿孔機にはいち早く非循環電流型サイクロコンバータを用いた同期電動機を採用し、穿孔条件に応じた適切な回転数設定および回転数ダイナミック制御を可能としている。ただし電源力率は低く、高調波発生量も大きいため12MVAの高調波フィルタを設置している。

マンドレルミルではスタンドごとに個別のデジタル速度制御式の可変速制御装置を設けインパクトドロップ応答の改善および速度制御精度の向上を図っている。

ストレッチレデュースでは共通母線方式を採用しているが、デジタル速度制御を採用し、インパクトドロップ回復応答と速度制御精度が改善されている。

4.3 中径製管163/4インチミル (97年稼働)

最新技術を駆使した中径管工場では全モータに高性能交流可変速装置を採用し、ステップ応答、インパクトドロップ応答共既存ミルに比べ大幅に改善している。以下に圧延機ごとの特徴を示す。

4.3.1 穿孔機

穿孔機用電動機制御装置には電圧変動や高調波発生が少ないという利点から6kV-6kAのGTO素子を用いた世界最大規模の13MVA、150%過負荷耐量のNPCコンバータ、NPCインバータを採用した。

Fig. 7, 8は穿孔機、延伸圧延機にサイクロコンバータを採用した場合とGTOインバータを採用した場合の繰返し圧延負荷による電圧変動を示す。Fig. 7, 8に示す様にサイクロコンバータの低力率に起因した大きな無効電力のために電圧変動が許容範囲を大きく超過しているのに対し、GTOを採用した場合は許容範囲に収まっていることが分かる。またサイクロコンバータでは高次の高調波が極端に多く、通産省の『高調波抑制対策ガイドライン』で規定される流出高調波電流に抑制するためには約46MVAの高調波フィルタが必要となることを事前に確認した。

中径製管工場では圧延主機にGTOインバータを採用したことにより、電圧変動補償装置も不要となり、また高調波発生量も抑制できたため、高調波フィルタは7MVAで十分となり、投資抑制に貢献している。

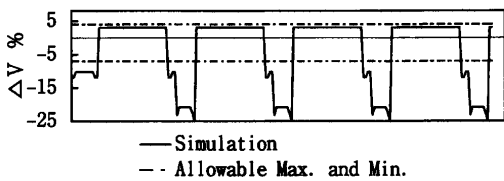


Fig. 7. Voltage deviation of AC power source of cycloconverter application.

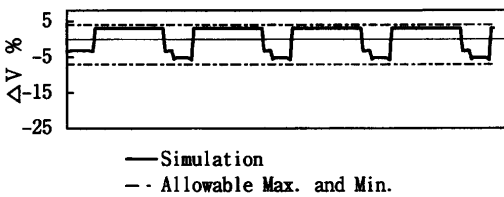
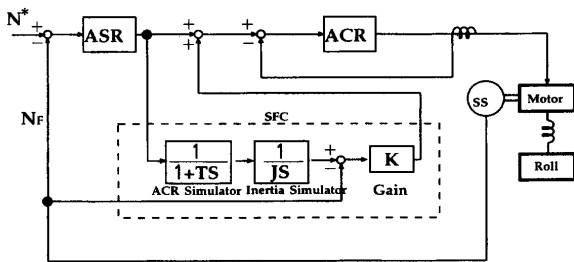


Fig. 8. Voltage deviation of AC power source of GTO inverter application.



N*: Actual Speed of Motor ASR : Speed Controller
 NF : Speed Reference of Motor ACR : Current Controller
 SS : Speed Sensor

Fig. 9. Control configuration of SFC (Simulator following control).

4.3.2 マンドレルミル

マンドレルミルでは高精度、高応答の速度制御を要求されるため高性能のGTOインバータを全面採用している。各スタンド駆動GTOインバータは共用の直流コンバータにより給電されている。

高応答化の実現のためにはスピンドルでの捻り振動を抑制することが必要であり、最近ではロールと電動機の慣性および捻りバネであるスピンドルから成る2マス1軸振動モデルを用いた状態観測器(オブザーバ)で、捻り角およびロール速度を推定し、電動機の電流指令を補正する制御を装備した主機可変速装置も実用化されている。

一方中径管工場では機械系の電動機軸換算慣性が電動機慣性に比べて小さいため、Fig. 9に示す様な電流制御系と電動機慣性のみから成る理想速度シミュレータの出力と実績電動機速度を比較してトルク指令値を補正するSFC(シミュレータ追従制御)を採用した⁴⁾。

Fig.10に中径製管工場にSFCを適用した場合の事前シミュレーション結果を、Fig.11, 12に中径管工場と小径製管51/2インチミルの実負荷での実績速度を示す。中径管工場では回復時間が約20%に短縮されていることが分かる。

4.3.3 サイザ

サイザも高精度、高応答の速度制御を要求されるため、高性能の高圧IGBTインバータを採用している。マンドレルミル同様SFCにより、インパクト速度ドロップ回復時間

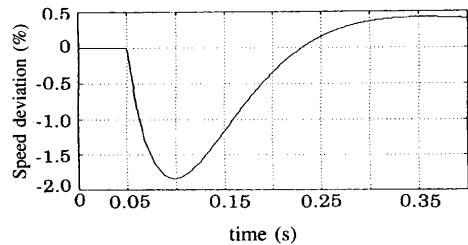


Fig. 10. Impact drop response simulation of the new 163/4 inch mill.

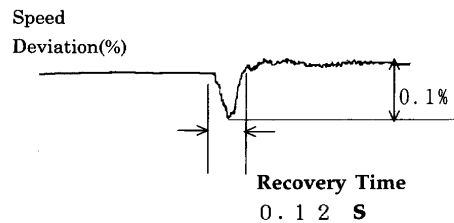


Fig. 11. Actual impact drop response of the new 163/4 inch mill.

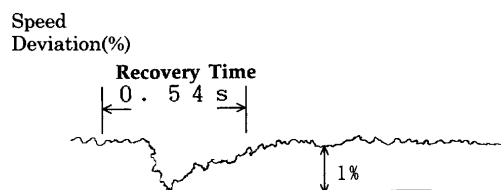


Fig. 12. Actual impact drop response of the 51/2 inch mill.

の短縮を実現している。

5. 結言

住友金属工業和歌山製鉄所における継目無鋼管圧延主機電動機の変遷および、最新の交流可変速装置の粋を結集した中径管工場の主機電動機設備について紹介した。製管圧延主機電動機は直流機から交流機へ、アナログからデジタル制御へ、高応答化へと進化している。

中径管工場では圧延主機の高精度・高応答を実現したことにより、継目無鋼管製造設備として世界に類を見ない高性能なミルとなり、他ミルの追従を許さない寸法精度を実

現できている。ここに適用された圧延主機電動機設備は今後の全世界的な製管設備の動向を先取りするものであり、さらに製管技術の向上をサポートするものとして製管設備の歴史に残るものと確信している。

文 献

- 1) 小坂宏夫：第57・58回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1979)，196.
- 2) 梓沢 昇：平成8年電気学会関西支部講習会講演論文集，No. 7，電気学会関西支部，大阪，(1996)，45.
- 3) K.Mase: *Toshiba Review*, 47 (1992) 8, 626.
- 4) 土井克彦：第150回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1993)，116.