銅の連続鑄造圧延

柳田 節郎* 池田 博** 増井 勉***

1. はじめに

棹銅の鑄造，圧延業務に関与する者が感ずることは“溶解から鑄造，圧延まで一貫した連続加工ができないものか”という疑問であろう。この分野に限らずあらゆる業種においてシステムの連続化，あるいは有機的な結合という課題は極めて素朴な発想であり半面非常に遠大な理想でもある。この理想の実現にはシステムを構成する各工程ごとの連続化への対応は当然として使用材料，制御技術その他の周辺関連技術の確立が必要であり，さらにその普及には品質，経済性などの社会的ニーズが必要不可欠である。

連続化の夢にかけた先人の努力は数知れぬものがある。1846年イギリスにおける Bessemer の連続鑄造関連の特許を始め，この分野における特許は3100件を越えるといわれているが⁽¹⁾，商業的に実用化されたものは数少ない。

Junghans によるビレット，ケーキなどの連続鑄造技術はアルミニウム，銅などの非鉄金属の分野に始まり，その後鉄鋼関係において非常な発達を見た。しかしながら，これは現在のところ連続鑄造単独の技術にとどまっており，圧延工程との連続化はなされていない。連続鑄造圧延の技術は比較的単一のサイズで，大量生産型である非鉄荒引線の分野において実現されしかもその普及は著しい。このことを語るとき第1に挙げるべきものは1950年前後にかけてイタリアの Properzi により開発された Properzi 法^{(2)~(4)}であろう。本法は外周に鑄造溝を有するホイールとこれを包むようにして回るベルトからなる鑄造機，および3方ロールのタンデム型連続圧延機を組み合わせている。この技術とても突然現われたわけではなく，18世紀末の Daniel 法，Lyman 法などの類似

の方法に根源をたどることができる。Properzi は1950年代に先ず鉛，次いで亜鉛などの低融点金属の加工で成功を収め，さらにアルミニウムおよび凝固温度範囲が広く困難とされたアルミ合金にもこの技術を拡張し成功した。現在アルミ合金荒引線の製造はほぼ原理を同じくする Spidem 法，SCR 法によるものも一部あるが，大部分 Properzi 法によっているといっても過言ではない。

一方，この後始まった銅の分野における連続化は急速に進展しつつあるが，特に製造方式の多様化は注目に値する。先ず Properzi 法を銅用に改良した SCR 法，つぎに従来の鑄造法と概念を全く異にする Dip Forming 法，そして近年 Hezellet 鑄造機を採用した大量生産型の Contirod 法が出現した。現在これら3種のシステムが銅荒引線の連続鑄造圧延方式として表1に示すように商業規模で世界的に広く採用されている。このほか，長尺荒引線，新しい製造法といった点からすれば Upcast process⁽⁵⁾，Spiral electrodeposition process⁽⁶⁾，Hydrospin⁽⁷⁾ そのほか一部実用化されているものもある

表1 銅荒引線製造装置の設置状況。
(設置予定を含む)

国	名	SCR	DFP	Contirod
日本	本国	4	7	
韓国		1		
インドネシア		1		
フィリピン			1	
台湾		1	1	
オーストラリア		1		
アメリカ		8	5	2
イギリス		2		
スウェーデン			1	
西ドイツ		2	1	
ベルギー				2
フランス		1		1
イタリア		1		1
ポーランド				1
ハンガリー			1	
ユーゴスラビア			1	
ブルガリア		1		
ルーマニア				1
インド		1		
南アフリカ		1		

* 三菱金属株式会社秋田製錬所所長

** 三菱金属株式会社大阪製錬所次長

*** 三菱金属株式会社大阪製錬所線材課課長補佐
Continuous Casting and Rolling of Copper Rod; * Tokio Yanagida, ** Hirooshi Ikeda, *** Tsutomu Masui (*Akita Refinery, Mitsubishi Metal Corp. Akita; ** Osaka Refinery, Mitsubishi Metal Corp. Osaka)
1978年9月1日受理

が、連続铸造圧延の本旨からはずれるのでここでは列記するにとどめる。

2. 従 来 の 方 法

荒引線は電線、ケーブルの素材となる比較的長尺の銅棒で直径約 8 mm (5/16") が代表的なサイズである。銅荒引線は 100 年以上に亘って伝統的に棹銅の熱間圧延により製造されてきた。

棹銅は寸法 101 mm × 101 mm × 1370 mm、重量 113 kg の銅インゴットで両端は圧延時の嚙込を考慮してテーパが付けられている。JIS H 2122 にはこのほかにも様々な寸法、重量が定められているが、これらは国際的に慣用されており各国間、各工場間での普遍的な取引が可能としている。事実 LME (London Metal Exchange) での銅取引の多くは棹銅で行なわれていた。棹銅鑄造の原料は電気銅および銅スクラップで、専ら重油を燃料とする反射炉により溶解されてきた。1960 年代にはアメリカの ASACRICO 社により連続溶解炉(シャフト炉)が開発されその使用が銅溶解の分野で急速に広まった。シャフト炉は堅型円筒炉で下部には多数の溶解用のパーナードが放射状に取付けられている。燃料には主として天然ガス、ブタンガスなどの気体燃料が用いられ、厳密な空燃比制御の下で炉内の原料は酸化することなく溶解される。シャフト炉は反射炉操業のゆえに制約を受けてきた従来の棹銅鑄造工程を、1 日をサイクルとする定量、バッチ方式から解放した。さらに随時溶解、停止ができる機動性、カソードを装入する限り溶解を続けられる連続性において後述の SCR, Contirod のシステムを溶解、鑄造、圧延を含めた真の連続システムとならしめた点での貢献度は非常に大きいものがあるといえよう。半面シャフト炉は単なる溶解炉であって反射炉のような酸化、還元、冶金的操作や不純物の混合希釈機能を持たないため原料には高品位でバラツキの少ないものが要求される。したがってスクラップを使用する場合は厳しい制限を受ける。

棹銅の鑄造には一般的に Walker 型の回転鑄造機が用いられる。ターンテーブルの外周に並べられたモールドには、3~5 本の棹銅形状をしたポケットが鑄込まれている。酸素量をコントロールされた溶銅はポケットに注ぎ込まれ外部からのスプレー水で冷却される。溶銅が凝固するとモールドは反転し棹銅を水槽に落下させ常温まで冷却する。この後棹銅は 1 本 1 本表面品質を検査し、選別やチッピングによる欠陥除去などの工程を経て圧延工場に送られる。圧延工場では棹銅は加熱炉で 1123~1173 K に加熱され粗圧延、中間圧延、仕上圧延と 14~18 回の圧延加工を繰り返され 8 mm の荒引線となる。荒引線は熱間圧延の際生じた厚い酸化銅で覆われてお

り、そのままで伸線することはできないので伸線に先立って希硫酸を用いた酸洗処理で溶解除去する必要がある。また連続した伸線作業を行なうために約 110 kg の荒引線コイルを次々と溶接しなければならない。この際荒引線の両端末は圧延時の巻込みなどの欠陥があるため 1~3 m を切断除去する。このほか圧延工程で発生する酸化スケール損失、先端切断損失などを含めると元の棹銅に対し使用できる荒引線重量は 1~2% 減少する。棹銅は前述のように大気中で水平鑄造されるため、上面の空気に露されて部分いるは酸素を吸収し Cu-Cu₂O 共晶組織からなる高酸素領域、いわゆるセット面を形成する。この層は表層下数ミリに達するが他の部分酸素量が 200~250 ppm であるのに対し表層近くでは 4000 ppm にも達する。セット面領域は他の部分に比べ非常に脆く荒引線、細線になった段階でも消失しないで偏在するため、伸線の際表面にチェックマークと呼ばれるき裂やこれに起因する断線および塗装時の不良を発生し易い⁽⁸⁾。したがって高度の伸線性が要求される場合には表面を約 10 mm 面削する必要がある。この量は棹銅重量の 8~10 % になる。

3. SCR 法 (southwire continuous rod system)

アメリカ Southwire 社の開発した連続铸造圧延法である^{(9)~(11)}。1962 年同社は Western Electric 社と共同でその頃すでに実用化されていたアルミ線材用の Properzi システムを用いて銅の連続铸造圧延に関する試験を開始した。1963 年この試みは成功裏に完了し以後 Southwire 社は単独で開発することとなった。そのときの試験機は Western Electric 社の子会社である Nassau 社で現在もお銅荒引線製造装置として生産を続けている。

Southwire 社では鑄造機を Properzi の 2 ホイール型から 5 ホイール型に改良し、圧延機も 3 方ロール型から 2 ロール連続圧延機に切替え高圧下率を掛けられるようにした。さらに工程内での連続酸洗装置を開発し、現在の銅用連続製造システムを完成した。開発経緯からして当初の生産機種は鑄造バー断面積 2580 mm² (4 in²)、生産速度 15 t/時と中規模であったがその後大型化を進め 5160 mm² (8 in²)、40 t/時に大型化された。

一方、最近になって 1290 mm² (2 in²)、6 t/時と小型化への動きも見られる。1965 年 Southwire 社での商用第 1 号機が生産開始以後このシステムは急速に広まった。日本での稼動機 4 基を含め現在までに世界中で 25 基が稼動もしくは建設中である。

図 1 は工程の概略図である。溶解工程にはシャフト炉を用いている。溶銅は適切な温度と酸素量に調節され保

図1 SCR 工 程.

持炉を経由して鋳造機に達する。鋳造機は外周に鋳造溝を有する低炭素鋼または銅合金製のホイールと、これを包むようにして回るスチールベルトからなる。Properzi 方式では 2 ホイール型であるので鋳造バーは多少ひねられて出てくるのに対し、SCR の 5 ホイール型では出口に障害物となるベルトが位置していないため、バーはパスラインに沿って真直ぐに進行する。バーは上側の肩部に発生する鋳張りをカッターで除去され、さらに表面の酸化スケールはロータリーブラシにより研削されて約 1073 K の温度で圧延機に入る。圧延機は片持 2 段ロールのタンデム型圧延であり、圧延スタンドが交互に 90° 交差して配列されているため、ロッドはよじられることなく縦横から交互に圧下される。圧延の終了した 773~873 K のロッドはそのまま酸洗装置に入っていく。

連続法によるコイルは従来法による 110 kg のコイルに比べ 3~10 t と重量が大きく、コイルの状態では十分酸洗できないので巻取前に酸洗処理をすることが必要となる。一般的には酸洗装置内で約 2% の希硫酸を高温のロッドに高圧噴射して 0.5~1 秒の間に酸洗を完了し直ちに常温まで冷却する。引き続いて水洗、防錆処理が連続的に行なわれコイルに巻取られる。最近ではアルコール系溶液を用いて表面の酸化スケールを還元し金属銅とするノンアシッドクリーニング法が広く用いられるようになってきた。

本法の場合水洗処理は不要で廃酸の処理回収などの操作も不要となる利点がある。コイルは重量が大きいほど連続化のメリットがあるが実際にはトラック、クレーンなどの運搬能力や総合的な取扱効率を考慮して 3~10 t のものが多用されている。操業は一般に 2~3 直の連続で行なわれるがこのシステムでは鋳造機に用いられている低炭素鋼のベルトに熱疲労によるクラックを生ずるため 1 回の連続操業時間は 20~40 時間に制限される。

4. DFP (dip forming process)

アメリカの General Electric 社によって開発された方法である^{(12)~(16)}。従来の鋳造法が鋳型の中に溶銅を

流し込み外部から冷却する方式であるのに対し、本法は溶銅浴中に低温の銅棒を瞬時浸漬し周囲の溶銅から熱を奪い銅棒の回りに凝固させる方法、つまり内部から自由面である外部に向けて凝固させる点で独特な技術といえる。凝固は単に熱収支だけの問題であるので融点の差にかかわらずステンレス-銅、鉄-アルミニウムなど異種金属の組み合わせが可能であるとされているが、現在のところ商業規模的には銅荒引線製造の分野だけに実用化されている。しかもこの場合健全な鋳造バーを作るには無酸素銅であることが必要となる。種線と呼ぶ芯材とその周囲に凝固する部分の重量比は顕熱、潜熱からなる簡単な熱平衡式から計算できるが銅の場合理論的には約 1:2 である。実際操業面では溶銅の過熱、種線の伸線、皮剥加工による発熱などの要因があり 1:1.7~1.8 が上限である。

本法の開発に着手したのは 1953 年ころと報ぜられているが、独特の鋳造法のためか実用化にはかなりの期間を費し、1957 年以降の Schenectady 工場でのパイロットプラントを経て、商用第 1 号機が稼動したのはスウェーデンの Elektrokoppar 社における 1968 年のことであった。しかし、その後の普及は目覚ましく毎年 1~2 基が採用されてきており、現在建設予定のものを含めて 18 基を数える。このうち、日本ではすでに 7 基が導入稼動中である。

図 2 は工程の概略図である。原料の電気銅は予熱炉により約 1123 K に予熱される。この際炉内はつねに弱還元性雰囲気中に保たれ原料の酸化を防止している。なお予熱炉は小規模の設備あるいは電力費の安い地方では省略されることもある。溶解炉はドラム型の低周波溝型溶解炉が用いられている。保持炉も同様の誘導炉でありこれに dip forming が行なわれるルツボ炉が直結されている。したがって保持炉内の溶銅レベルが自動的にコントロールされるとルツボ内の溶銅レベルも同じように一定に保たれることとなる。

一方、種線は 2 回の伸線を行ない正確な真円度と適度の加工硬化を生じさせ皮剥ダイスを通して表面を清浄に

図2 DFP 工 程。

図3 Contirod 工 程。

する。さらに真空中中を通り物理的、化学的に表面の清浄さを保ったままルツボ炉に導かれ炉底部の小孔を通り抜け上方に進む。このときルツボ内の溶銅は種線に近い方から熱を奪われ凝固、付着し種線の2.7倍の重量を有する铸造ロッドとなって出てくる。本工程では種線速度、溶銅レベル、溶銅温度を適切にコントロールすることが高い铸造効率を維持するための要点である。ルツボ炉を出た铸造ロッドは融点直下の高温で機械的強度がほとんどないので、直ちに冷却水を噴射して圧延可能な1023 K 前後の温度まで強制冷却する。圧延機はタンデム型連続圧延機で生産規模により4～8基の圧延スタンドが使用される。この後冷却パイプを通り常温まで冷却されデッドブロック型、その他の型式のコイラーにより巻取られる。本法は無酸素銅で行う必然性から予熱炉、溶解炉から圧延機に至るまですべて還元性のガスでシールし銅の高温酸化を防止している。したがって他の連続法で見られる熱間圧延中の表面酸化は起らず当然酸洗処理は不要となり、同時にDFP荒引線が他の連続荒引線に比較して表面品質が優れている理由にもなっている。

コイル重量は通常2～4 tであるが最大10 t程度のもので作られている。DFP設備の生産規模は通常5 t/時前後であり、最大規模のものでも10 t/時と他の2法に比べ単位時間当りの生産能力は小さい。しかしGeneral Electric社の開発目的そのものが“中央大量生産方式でなく各地に散在する伸線工場に付属させ、そこでの必要

量のみを経済的に作れる方法”でありこの点において理解できるものである。この方針はさらに推進され最近では設備を極く簡略化し投資金額を抑えた3 t/時のミニディップも開発されている。本法では連続操業を制限するのは皮剥ダイスの寿命で平均40時間前後であるが、100時間に達する例もある。

5. Contirod

ベルギーのHoboken社により開発された方法である^{(17)～(20)}。1973年に同社のOlen工場で第1号機が稼動を開始しているが開発の歴史は他の2法に比べて浅い。現在までに世界各地で9基が生産をしました建設が予定されている。铸造機にHezellet型のModel 20を用いていることを特徴とするが、システム全体の構成はSCRとほぼ同じである。しかし本システムは棹銅圧延法による大量生産方式の代替を考慮して開発されたもので、第1号機で30 t/時とSCRの最大級に匹敵する能力が最初から得られ、さらに40 t/時またはそれ以上の設備が計画されていることは注目値する。

図3は本法の工程概略図である。溶解炉にはシャフト炉、保持炉には低周波溝型誘導炉が用いられている。保持炉には溶銅の酸化を防止するため還元性のガスが導入されている。溶銅は温度のほか酸素量を160～200 ppmにコントロールされ铸造機に向かう。铸造機は板铸造用として良く知られているHezellet型铸造機で上下2枚の低炭素鋼のエンドレスベルトと左右を塞ぐサイドダム

で構成されている⁽²¹⁾。各々は同期して回転しベルト、ダムで囲まれた空間に溶銅が注ぎ込まれる。本方式の場合铸造機の構造上高温の铸造バーを曲げずに引きだすことができる点はバーの健全性において SCR より有利であろう。50×120 mm の長方形断面をしたバーは4隅に発生した铸張りをロータリーカッターで除去され、一旦均熱炉に入り内外部の温度が均一化される。この後 15 基の連続圧延機で 8 mm の最終サイズまで圧延され引続いて水冷、連続酸洗される。一般的には希硫酸を用いた酸洗であるが SCR 同様にアルコール還元法も行なわれ得る。システムの連続生産時間は約 6.5 時間で 1.5 時間程の休止時間内にロールの取替えを行ない、同時に铸造用ベルトのサンドブラスト処理や取替えを行なうとされている。

6. 従来法と連続法の比較

ここでは今まで述べてきた棹銅の铸造、熱間圧延による従来法と SCR, DFP, Contirod などの新しい連続法について比較してみたが、さらに何故連続法が急速に伸びてきたかを述べる。

(1) 従来法の荒引線コイルが約 110 kg であるのに対し長尺の連続荒引線は最大 10 t にも及ぶ。この場合実に約 90 回もの溶接が省略できることになる。したがって溶接に要する人員などのコスト削減はもとより、従来断線原因の中でかなりのウェイトを占めていた溶接不良に起因する断線も消失することは明らかである。

(2) 従来法荒引線は前述のようにセット面に由来する脆い不均質層を内在しており、細線、塗装線、平角線などの用途には棹銅の面削や荒引線の皮剥などの処理を行なう必要がある。さらに圧延中の温度差による先端と後端の寸法変化、巻込み欠陥などが発生するため各コイルの両端を 1~3 m ほど切り捨てなければならない。連続荒引線では製造の特性上断面、長手方向共に均質なものが得られ上記の問題は全く起らない。

(3) 表 2 は各種荒引線の代表的な特性値を示している。Contirod については試料がなく割愛したが、製造法の類似性から SCR の場合に近いと判断される。これら連続法によったものは一般に表面品質が良好、異物混入が少ない、酸化物粒子が細かく平均的に分散している、などの長所があり伸線性、製品品質を飛躍的に向上させた。酸化物粒子は組織の連続性を阻害し、欠陥生成核となり得るがその影響や表面平滑度の影響を機械的特性値の 1 つである振回破断値に見ることができる。

(4) 連続法では棹銅再加熱用の燃料節減はもちろんであるが、一般的に電力、水などのエネルギーコストが節約でき、酸化スケールなどの原料損失も少なくてすむ。

(5) 同生産規模の棹銅铸造圧延工場と比べた場合一般

表 2 代表的な諸特性値の比較。

項 目	従来法	SCR	DFP
铸 造 バ ー 密 度 (M/m ³)	8.5	8.8	8.9
φ8mm 荒引線 比 重	8.93	8.94	8.95
結晶粒サイズ (mm)	0.02	0.15	0.15
酸化物粒子サイズ (mm)	0.05	0.01	NIL
引 張 強 さ {MPa	219.5	229.3	223.4
(kg/mm ²)	(22.4)	(23.4)	(22.8)
伸 び (%)	44.6	43.8	40.2
酸素含有量 (ppm)	250	350	7
φ2.6mm 軟銅線 引 張 強 さ {MPa	242.1	242.1	242.1
(kg/mm ²)	(24.7)	(24.7)	(24.7)
伸 び (%)	39.7	40.3	39.7
電気伝導度 (%)	101.3	101.3	102.4
振回破断値(硬線)(回)	80	180	215

に連続法は建設費、生産費、人員などが数十%少なくてすみ、棹銅置場の省略はもとより装置自体もコンパクトなため所要面積も 50% 近く減少する。

(6) 一方、铸塊状態での検査はほとんど不可能となりその分だけ操業条件全体の安定性が要求される。しかし渦流探傷法による全量検査や計装化、自動化が連続法であるがために可能となった効果の方が大である。

以上のように従来法に対する連続法の優位性は疑う余地もないが、連続システム間での優劣を問うのは簡単ではない。

確かに DFP 荒引線はプレミアをつけても従来の無酸素銅荒引線と同等品が安価に供給でき、表面品質が重要視されるエナメルなどの塗装線分野や苛酷な使用用途には強みが有る。世界のある地方では以前より無酸素銅が根強く好まれてきたし、無酸素銅の製造のみを行なってきた工場もある。このようなところでは躊躇なく DFP が採用されるであろう。半面、無酸素銅は SCR, Contirod のようなタフピッチ銅に比べその特性が不純物により大きく左右されるため良質の電気銅が得られなければ逆効果となる。さらに細いサイズでは伸線性において他の連続荒引線に劣るともいわれており各々に長所短所がある。もっともこれらの品質上のギャップは過去のすう勢を見ても技術の向上により徐々に埋められてきており絶対的なものではない。

結局どのシステムを採用するかは各工場で原料事情や、用途における DFP と SCR, Contirod の比較をし生産規模、建設費、生産費などの点から大型設備では Contirod と SCR, 中小型設備では SCR と DFP の比較など個々の条件を検討して決定されよう。

7. 今後の動向

過去一世紀以上に亘って伝統的に行なわれてきた荒引線製造法は 1965 年の SCR 1 号機の出現以来 DFP, Contirod などの連続法によりこの十数年間大きな変革の波に直面している。寡聞にして 1972 年にポーランドで生

産を開始した 226 kg の大型棹銅を用いる圧延工場⁽²²⁾を最後に棹銅圧延工場新設の報を耳にしていない。

一方、連続鋳造圧延システムについては現在までにおよそ 50 基に達し毎年数基のシステムが導入されてきた。連続化への動きはあらゆる観点から見ても否定できない。少なくとも今後従来法による生産は縮小、設備廃棄されても新設されることは無いと思われる。Properzi 方式により始まったアルミ合金荒引線の連続化は銅より一足早くすでに世界中の生産量の 90% 以上が Properzi 連続法による荒引線であると報じられている⁽²³⁾。

連続化への傾向、あるいは衝動はすでに述べた品質、生産面でのメリットを考えれば銅に関しても全く同じであることが理解されよう。過去の導入動機は増大する需要に耐える生産能力増強の趣きが強かったが、連続荒引線のシェアが高まるにつれこれと対抗するためのスクラップアンドビルドの傾向も強まると思われる。連続製造システムの能力選択には非常な柔軟性があり、一部の強力な企業だけでなく現在荒引線を製造しているあらゆる規模の工場が平等に連続システムを導入できる条件にあるという点も今後これらのシステムがますます普及するという観測の根拠の 1 つである。

大は 20~40 t/時のシステム、小は 3~10 t/時のシステムとすべての要求が網羅されているが、特に 3~7 t/時クラスのシステムは生産量的にも投資額の点においても開発途上国内の小市場で活動している企業にも導入意欲をわかせる、現に導入の実例もある。したがって先進諸国における高品質連続荒引線、開発途上国における棹銅からの低品質荒引線といった単純な色別けをすべきでなく、世界的な市場における競争という観点から連続荒引線の将来を考えて行かねばならない。

それでは既存の棹銅鋳造圧延設備が残れる途はあるのだろうか。残念ながらほとんどが消極的な理由にしかない。

(1) 償却の終わった設備で徹底した合理化により安価な荒引線を提供する。

(2) 反射炉溶解でスクラップの多用による低コスト化、またはスクラップ処理そのものを目的とした操業。

(3) 連続荒引線が市場に流通していない。自明のことではあるが安価な荒引線というものは基本的に大量生産を行った場合に可能であって、連続荒引線生産量が増大するにつれ圧迫を受けてくる。スクラップについては連続システムでも一部の良質スクラップは処理している例がありそれ以下のものでは伸銅関係での処理、さらに上流の溶錬工程へ戻すこともでき、必ずしも必須条件ではない。

(3) の事情に至っては単なる時間の問題でしかないことは明白である。1976 年 1 月 15 日の American Metal Market⁽²⁴⁾によれば、アメリカのある大手産銅会社は SCR の導入に伴い棹銅の生産を中止し同時に従来行ってきたカソード、棹銅の建値制を廃止してカソード、連続荒引線の建値制に改めることとなった。さらに別の産銅会社も予定している Contirod の稼動に伴いカソード、荒引線の建値方式に変更するとも報じられているが、これは今後の連続荒引線化への動きを具体的に示唆する例として非常に興味深い。

文 献

- (1) J.A.Bell and D.B.Cofer : Wire and Wire Products, **39**(1964), 1031.
- (2) F.R.Nichols : Wire and Wire Products, **31**(1956), 1193.
- (3) J.B.Russell : Wire and Wire Products, **42**(1967), 1295.
- (4) J.B.Russell : Wire and Wire Products, **42**(1967), 1495.
- (5) M.Rantanen : Wire Industry, July (1976), 565.
- (6) J.Edwards and A.J.Wall : British Non-Ferrous Metals Research Association, Feb., (1965), S 221/6.
- (7) D.Green : J.Inst.Metals, **99**(1971), 76.
- (8) R.D.Carter and S.W.Dowin : J.Australian Inst.Metals, **11**(1966), 83.
- (9) J.Cole and H.Moss : Wire and Wire Products, **42**(1967), 1132.
- (10) D.R.James : Wire and Wire Products, **42**(1967), 1752.
- (11) D.B.Cofer : Metals and Materials, Sept., (1972).
- (12) R.P.Carreker Jr. : J.Metals, **15**(1963), 774.
- (13) R.P.Carreker Jr. : Wire and Wire Products, **39**(1964), 1161.
- (14) G.Horray : J.Heat Transfer, Feb., (1965), 1.
- (15) R.P.Carreker Jr., J.E.Byrnes, P.R.Marchant and R.Sterling : Wire and Wire Products, **41**(1966), 1050.
- (16) B.Hansson, K.G.Soderlund and E.Martinson : J.Inst.Metals, **98**(1970), 234.
- (17) 銅と技術, **3**(1973), 33.
- (18) Anon. : Wire Industry, Jan., (1976), 43.
- (19) C.J.Petry : TMS-AIME, A78-19, (1978).
- (20) J.M.Dompas and J.A.Dekeyser : TMS-AIME, A78-20, (1978).
- (21) J.F.B.Wood and P.C.Regan : Iron and Steel Eng., Dec., (1971), 47.
- (22) L.W.Collins Jr., J.G.Dunleavy and O.J.Tassi : Nonferrous Wire Handbook Vol.1-Nonferrous Wire Rod, The Wire Association International, Inc., Guilford, Conn., (1977).
- (23) P.K.Raiford : Light Metal Age, Dec., (1975), 16.
- (24) W.E.Hoffman : American Metal Market, Jan., **15**(1976).