



鉄の歴史

戦後復興・発展期における我が国鉄鋼製造技術史—技術編

薄鋼板製造技術の発展

—導入技術から世界の先端へ—

佐々木健二 Kenji Sasaki

川崎製鐵(株) 顧問

安森 古 Hisashi Yasumori

Progress of Steel Strip Production Technologies in the Restoration and Development Period after World War II
—Establishment of the world's leading position through introduced technologies—

1 はじめに

わが国鉄鋼業は、戦後の混乱期をへて第1次(1951～1955)、第2次(1956～1960年)、および第3次合理化計画(1961～1965年)の一連の近代化計画の達成によって飛躍的な発展を遂げた。この間の粗鋼生産量をみると、1950年の480万t(戦前最高は1943年の765万t)、1955年の940万t(世界第6位)、1960年の2,210万t、1965年の4,120万tと増大し、1964年には西独を抜いて世界第3位へと躍進した。また、薄鋼板の主要設備であるホットストリップミル(Hot Strip Mill, 以下HSM)およびコールドストリップミル(Cold Strip Mill, 以下CSM)の生産量の推移をみると、1955年の約120万tおよび約60万tから1965年には約1,240万tおよび約570万tへと著しい伸びを示している。

一方、鉄鋼の主要需要分野である自動車工業も鉄鋼業と軌を一にして発展し、単一車種専門工場が稼働し始めた1960年には約50万台であった自動車生産台数は、1965年には約190万台、1967年には西独を抜いて世界第2位の315万台となるなど急速に発展した。

鉄鋼協会鋼板部会は、1965年にストリップ分科会がホット、コールドの2分科会に分かれ、分塊、厚板、ホット、コールド4分科会構成となった。本稿の与えられた技術分野は鋼板となっているが、鋼板となると分塊、厚板、ホット、コールドと言うように広範囲にわたるし、また、ページ数も限られているので、ここでは筆者の独断にもとづいて、主要需要分野である自動車の生産と不可分の関係にある薄鋼板の製造技術について取り上げることにした。

薄鋼板製造における戦後復興期(1945～1955年)は、戦前レベルへの復旧、老朽化設備の近代化、米国鉄鋼メーカーとの技術援助契約に基づく技術導入や新鋭設備の操業の熟練に懸命の努力が払われ、プルオーバーミルから近代的なストリップミル(Strip Mill, 以下SM)への大転換が図られ

た時期である。また、導入した新鋭SMによりわが国の自動車用鋼板が、板幅や板厚ならびに材料特性的にも一応の形態をとり始めた時期でもある。

発展期(1956～1965年)の前半では近代化設備の新設による能力の増大が図られたが、SMはほとんどが輸入であり、その操業技術も導入された。また、この時期、戦後のわが国鉄鋼業が世界の鉄鋼国へ飛躍する道を開いた薄鋼板の製造を中心とした戦後初の近代的臨海鉄鋼一貫製鉄所—千葉製鉄所—で、HSMおよびCSMが稼動した。発展期後半は、大型化、高速化などの技術革新とともに設備、技術、製品面できたるべき飛躍への蓄積が着実に行われた時期である。

1960年代から1970年代初めにかけては、その後の薄鋼板製品の新たな展開につながる世界水準を抜く深絞り用鋼板の開発や将来の薄鋼板製造技術の変革をもたらした連続焼鈍技術、完全連続式圧延機のような世界をリードする大型薄鋼板製造技術が芽生え開花した時代であった。導入技術からスタートしたわが国薄鋼板製造技術がどのように立ち上がり、発展してきたかを振り返るとともに、これらの世界の先端を行く技術がどのようにして誕生したか、その足跡をたどってみた。



2 戦後復興期における薄鋼板製造技術

2.1 戦前の薄板製造技術^{1,2)}

戦前の薄鋼板の大部分はプルオーバーミルとよばれる2重式圧延機によって熱間圧延されたものであった。一方向に回転するロールで繰り返し圧延する必要から、上ロールを越えて板を戻すため、プルオーバー(pull-over)式とよばれ、薄くなった板を折り畳んで重ね圧延することによって0.2mmといった極薄物も圧延できた。

自動車用鋼板の需要が出てくるようになったのは1930年に自動車の国産振興策がとられてからである。川崎造船所

製鉄工場(川崎製鐵葺合工場の前身)では、1931年4月にドイツの3重式冷間薄板圧延機を設置し、自動車・客車・電車などの車体や高級家具に用いる深絞り用鋼板および高級仕上鋼板の需要に対応し始めた。同年5月、八幡製鐵所においても同様な高級仕上鋼板の生産が始まった。1936年には、製鉄工場で、冷間圧下率を調整して深絞り性の優れた製品を開発し、1938年に、製鉄工場に4重式冷間薄板圧延機を設置し、広幅で板厚偏差の少ない深絞り用鋼板の製造を開始した。これらは、新しいストリップ製品にその道を譲る1959年頃まで、大戦の混乱期を除いて生産し続けた。

SMの歴史は1926年にArmco SteelのButler工場稼働した42inHSM(4重式4スタンド、圧延速度400~450m/min)およびCSM(4重式4スタンド、圧延速度70m/min)に始まる。

戦前にわが国にあった最初のSMは、1938年に東洋鋼板で稼働した4重式コールドレバースミルである。1940年八幡製鐵所戸畑製造所で稼働したCSMは4重式5スタンドで、年産能力は10万t、圧延速度は450m/minであった。1941年に同戸畑で稼働したHSMは全連続式で粗圧延機4スタンド、4重式仕上圧延機5スタンド、圧延速度は600m/min、年産能力は45万tで設備はほとんど輸入品であった。これらのSMは、主としてぶりき用鋼板の製造のためであった。

2.2 生産の再開

戦前からあったプルオーバーミルは、終戦直後の1945、1946年はほとんどの設備が遊休の状態であったが、年々と稼働が活発になり、1950年6月に勃発した朝鮮動乱による薄板需要の急増に応じ、増産に励んだ。朝鮮ブームとなる頃には一応の工場は稼働した。第1次合理化計画の進展とともに1953年頃から新鋭のSMが相次いで稼働するようになり、プルオーバーミルによる製品はしだいにSM製品に置き代わっていった。

戸畑のSM²⁾は、1945年8月の北九州爆撃によって、熱延・冷延原動機室その他が被爆・焼失した。熱延は11月より建屋や、電気品の復旧につとめ1946年12月生産を再開した。1948年5月仕上げ5、6号スタンド間に自動ふく射温度計を設置したことにより、品種ごとの最適仕上げ終了温度が判明し、従来の生産量のみの管理から冶金学的品質管理ができるようになった。冷延は1946年6月には終戦後始めて焼鈍、剪断が作業を開始、蒸気がないため各地下室の潤滑油タンクは電熱により加熱することとし、7月初めには調質圧延も作業を開始した。10月には蒸気発生で苦勞しながら酸洗、冷延を再開した。このようにして復旧作業は着実に進み1947年1月正式に作業を開始した。

2.2 米国鉄鋼技術者の来日指導³⁾

米ソ対立をきっかけとして1947年から1948年にかけて米国の対日占領政策が大きく転換し、日本鉄鋼業を育成・助長する方向に変わった。GHQの基本方針に基づき、米国技術者による本格的技術指導が始まった。圧延部門では、まず戸畑のSMが対象となった。このミルは完成した当時、たまたま国際関係の緊迫によって技術指導が受けられなかったため、十分に能力が発揮されていなかったためである。米国側もこれに注目し、米国から2名の技師が来日し、熱延では1948年11月から約3カ月間、酸洗および冷延では1949年3月から5カ月間技術指導を行った。

熱延での作業改善は、(1)ロールカーブの変更、(2)仕上圧延機間の張力の増加、(3)ワークロールのカーブを良好な状態に保つための圧延順序の変更、などであった。このほかロール冷却水をロール全面にかけることなど細かい指導がなされた。その間、生産性は2,000~4,000t/月から6,000t/月へ、圧延歩留りは90%以下から92%に向上し、また、製品も幅広薄手の圧延にも成功するなど円滑な操業ができるようになった。

冷延の設備改善では、(1)全スタンドにガイド取り付け、(2)冷却水の水切り装置の取り付け、(3)パーム油の出を良くするため、蒸気管の中を通して二重管とし、滴下式とする、などであった。操業面では、作業前にワークロールをガスで加熱することや、通板および尻抜き作業、ロール交換作業の指導が行われた。生産性も5~6t/hから8~13t/hに向上した。

2.3 米国鉄鋼調査団の派遣⁴⁾

米国鉄鋼技術者達による、“戦後の日本鉄鋼技術の水準は、米国に比べて10~20年の遅れがある”との指摘は日本鉄鋼技術陣に大きな衝撃を与えた。これをきっかけに、日本鉄鋼協会が努力した結果、1950年2月各鉄鋼メーカーの代表ら12名からなる米国鉄鋼調査団(製鋼・圧延、コークス・製鉄の2班)の派遣が実現するに至った。

薄板圧延関係で見学したのはHSM 6工場、タンデムコールドストリップミル(Tandem Cold Strip Mill, 以下TCSM) 7工場などで、Bethlehem Steelの1947年に稼働したSparrows Pointの68inHSM(年産能力170万t)、Armcoの80inTCSM(年産能力50万t)など、ミルのほとんどが世界に誇る高速・大型の最新鋭圧延機であった。HSMは仕上圧延速度600m/minを超えるものもあった。Sparrows Pointでは仕上厚さの測定にX線厚さ計を使用していた。TCSMの圧延速度は450~600m/minのところが多く、Columbusの新鋭ミルは900m/minであった。コイルの接合は大部分は電気溶接、圧下率は70~75%、仕上厚さの測

定にX線厚さ計を使用しているところもあった。その他、圧延機メーカーのMesta, UEやベアリング工場も見学した。実際に見学して最新の技術を習得できたことは大きな収穫であった。帰朝後、一行の報告会は全国各地で数10回におよび非常な成果を収めた。

2.4 外国技術の導入⁴⁻⁶⁾

技術導入のために締結された薄鋼板の製造に関する技術援助契約の例として、Armco Internationalと締結した富士製鐵広畑製鐵所の「SM方式による鋼板の製造」(締結1951年、期間10年)、八幡製鐵所の「SM方式による鋼板圧延技術」(1952年、10年)、Republic Steelと締結した川崎製鐵千葉製鐵所の「鋼材圧延に関する技術」(1957年、5年)、住友金属工業のJones and Laughlin Steel (以下J & L)とのストリップの製造に関する技術援助契約(1960年、5年)がある。これらの契約内容は、圧延素材の製鋼技術の指導に始まり、SMの設計図面と操作方法の提供・指導、日本人技師の教育に至るまでを含んだものであった。

このような技術援助契約の締結に基づき、技術指導のため多数の技術者が来日した。例えば広畑製鐵所冷延工場は1954年1月に作業を開始したが、これに先立ちArmcoより1952年には冷延技術、また1953年から1954年にかけて冷延、焼鈍、剪断作業について指導をうけた。これによって作業開始当時よりも薄物の厚さ1.3~2.5mmを4,000ft/minの速度で圧延できるように熟達し、しかも表面疵、圧延トラブルも少なく能率を上げる域に漸次到達した。つづいて1954年には0.4mmなどの薄手物の技術訓練を受けて、生産性、歩留り、焼鈍燃比などで新記録をつくり、しかも作業上の不安を解消し安定した技術と自信ある作業を行い得るようになった。このような米人技術者の来日指導と交互して日本からも技術者が渡米し技術の習得に努めた。

3 発展期における薄鋼板圧延技術の進歩

3.1 熱間圧延技術^{7,8)}

戦後から1960年までに稼働した広幅HSMは4機で、形式はすべて半連続式で、仕上圧延機の最高速度は700m/min程度、コイル重量(Pounds per Inch Width, 以下PIW)は600内外、年生産能力は200~250万t規模で、やはりこの時代も主な機械は輸入品であり、操業技術も主としてアメリカから導入した。この頃の圧延材質は普通炭素鋼であった。

1960年前半は単一製鉄所の生産規模の増大にともなってHSMの能力も向上し、次々と新鋭ミルが出現した時代で

ある。図1に示すように仕上圧延機最高圧延速度は約1,000m/min、PIWは800、年産規模は300万t程度にまで拡大した。1963年ワークロール自動交換装置が世界で始めて名古屋製鐵所のミルで実施された。仕上圧延機での加速圧延、自動板厚制御(Automatic Gauge Control, 以下AGC)は1962~1963年頃から始まった。HSMの計算機制御は1960年頃アメリカのMclouth Steelの仕上圧延機で初めて開発され、1964年の英国のRTB Spencer製鉄所で成果が確認された。日本では1966年八幡製鐵の堺製鐵所で始めて成功した。この時代、圧延材質は普通炭素鋼のほかにステンレス鋼が取り入れられるようになった。

1960年後半にさらに一層の設備拡大、増強が行われ、稼働したミルは、大型高炉の出現にともない1,000万t製鉄所構想における中心圧延機となった。最高速度も1,400m/min、PIWは約1,400、年産能力400万tを超えるものも出現した。1969年に稼働した君津、鹿島のミル以降、完全国産化が実現し、設備の大型化、自動化などでわが国独自の技術が採用されるようになった。また、この時代には、ウォーキングビーム式大型加熱炉、粗圧延機のクローズドカップル、SCR(Silicon Controlled Rectifier)を利用したモータ制御、計算機を利用した高度なプロセス制御および生産管理など新しい技術が次々と開発され実用化された。圧延材

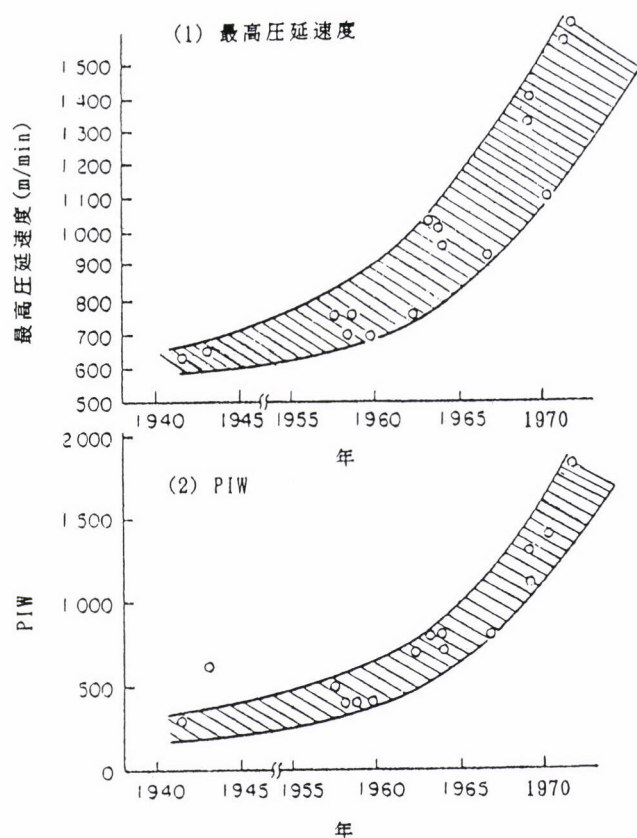


図1 HSM仕上圧延機の最高圧延速度とPIW⁷⁾

質は低合金鋼、パイプ材に使用される高張力鋼などへ拡大した。

3.2 冷間圧延技術^{9,10)}

TCSMでAGCが最初に導入されたのは1955年U.S. SteelのIrvin工場である。わが国で始めてAGCが設置されたのは1960年で、1962年に国産化された。

わが国で戦後から1960年までに稼働した4機のTCSMは全て海外メーカーによるもので5スタンドで圧延速度は1,200~1,400m/minである。1962年に計算機制御が初めて導入されたが初歩的なものであった。1967年以降計算機制御は大幅に進歩した。1962年に6スタンド圧延機が出現し、圧延速度は2,000m/minを突破した。1963年には国産第一号機が日新製鋼堺工場で建設され、以後、国産化が急速に進んだ。

1968年以降、電動圧下装置に代わって油圧圧下装置がTCSMに本格的に採用され始め、圧延速度の高速化、歩留りの向上に大きく貢献するようになった。油圧圧下装置は高速、高応答性という特性をもつばかりでなく、圧延機剛性を制御的に変えるという新しい武器をもつことになった。

1968年以降に稼働したミルは全て国産化され、1968年の君津No. 2の世界最大幅(2,080mm)タンデムミル、1969年に稼働した水島の全スタンド油圧圧下ミル、1971年に稼働した君津の世界最高速タンデムミル(2,500m/min)、世界初の福山の完全連続式冷間圧延機、1972年稼働の加古川の全スタンドローラー軸受のミル(ローラー軸受のミルでは世界最高速)など世界の冷間圧延業界をリードする技術革新が次々と行われた。図2にTCSMの圧延速度の推移を示す⁹⁾。

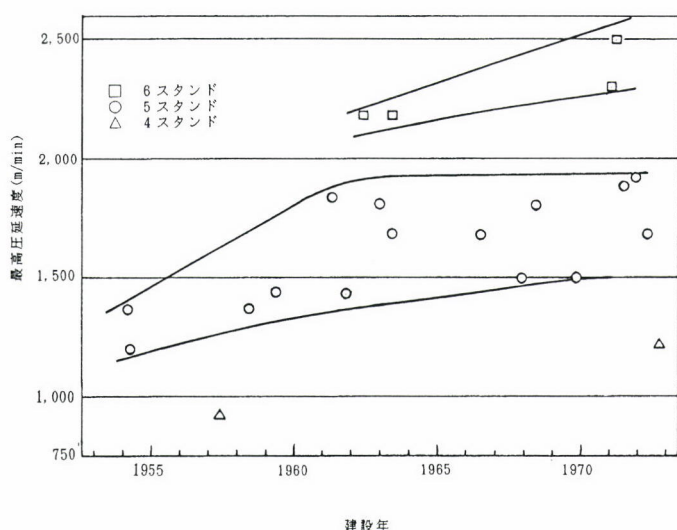


図2 TCSMの最高圧延速度¹⁰⁾

4 リムド鋼による深絞り用鋼板製造技術—自動車用鋼板の夜明け

1949~1950年頃、川崎製鐵葺合工場でスクラップと冷銑を使用して平炉で5t鋼塊を作りそれをシートバーにしてプルオーバーミルで、幅4尺ものに熱間圧延した後バッチの酸洗処理をし、次いで3段または4段の冷間圧延機で磨き板にした後箱焼鈍し、最後に調質圧延をほどこして自動車鋼板を作ったことが今望洋として思い出させる。悠々待ちに待ったHSMとTCSMが1958年4月、6月千葉製鐵所に相次いで完成し、ストリップの量産体制が整った時は、皆、飛躍を抑止されている獲物を狙う鷹のような心境であった。

これらの新鋭設備を駆使するとともに独自の発想を加えて、鉄鋼メーカーの多年にわたる一つの夢であったリムド鋼でAIキルド鋼より優れた深絞り用鋼板KTS(オープンコイル焼鈍による脱炭脱窒鋼板)の開発に成功した。SM導入以来わずか3年数カ月という短期間の間にその大量生産体制を確立し、自動車工業、電気工業をはじめ広い分野で使用されるようになった。

4.1 AIキルド鋼

終戦後、乗用車が日本国内を走りだしたのは1951年からで、そのほとんどは外車であった。日本車では、日産ダットサン(ブルーバードの前身)やルノー(ヒルマン)、コロナなどスタイルはドングリ箱型でフェンダー、ルーフは全て外国からの輸入鋼板で絞りプレス加工され、日本製の鋼板は加工性が悪くて問題にされなかった。そこで米国のArmco Steelの鋼板を入手して調べたところ、当時の単純な確性試験で次のことが判明した。

まず第1はAIキルド鋼であること、第2に結晶粒が伸長粒であること、第3に伸び率はそれほど良くないにもかかわらず、深絞り加工がきくこと、第4に完全に非時効性であること、であった。当時、全てArmco Steelの真似をすることに熱中していたものの、以上の諸特性が、プレス加工にいかなる意味があるのか皆目判らなかった。ずっとあとになって、よく調べてみて始めて判ったのは、AIキルド鋼のスラブを高温加熱してAlとNを完全に固溶させたまま、HSMで一気に圧下したのち、適当な冷間圧下率が選べる厚みのホットストリップに仕上げ、冷間圧延後の焼鈍過程で再結晶の進行とうまく同期させながら微細なAlNを析出させることにより、{111}面が圧延面に平行に並んだ伸長粒がえられ、なおかつ非時効性になる、ということであった。

わが国におけるAIキルド鋼の国産化はArmco Steelの

技術指導を受けて1954年に始まったが、溶鋼の脱ガスおよび連続鋳造が誕生していなかったその当時、Alキルド鋼は脱酸生成物である Al_2O_3 によるスリバーという表面欠陥があり、またキルド鋼なるがゆえに分塊歩留りがリムド鋼より6～8%悪いという本来的な泣きどころが内在していた。

4.2 深絞り性の冶金的要因

1950年にLankfordら¹¹⁾は、Alキルド冷延鋼板の優れた深絞り性が加工の際に板厚方向に薄くなりやすく、平面方向に縮み易いという塑性異方性に起因していることを見いだした。この異方性をr値(=板状試験片に引張変形を与えたときの幅方向の歪と厚さ方向の歪みの比)と名づけて深絞り性を表す指標とした。

1958年にArmco SteelのBurnsとHeyer¹²⁾はr値が材料の結晶集合組織から説明されること、すなわち深絞り性が優れた結晶方位は、{111}面が圧延面に平行あるいはそれに近い方位であることを理論的にも実験的にも始めて明らかにした。これは大きな衝撃だった。ここから、結晶集合組織を制御して{111}面の多い冷延鋼板を目指した開発が始まった。

1960年の国際深絞り研究会(International Deep Drawing Research Group, 以下IDDRG)で、Bethlehem SteelのWhiteleyら¹³⁾は低炭素鋼板のr値に及ぼす圧延条件の影響を集合組織との関連において明らかにした。熱延仕上げ温度が高いほどr値の高い低炭素鋼板を製造しうることを、リムド鋼よりもAlキルド鋼のほうがr値が高く、それはAlキルド鋼の再結晶集合組織には板面に{111}が平行な成分が多く、{100}が平行な成分が少ないためであることを示した。また、r値に及ぼす冷延圧下率の影響を調べたところ、Alキルド鋼は70%の圧下率のとき、リムド鋼は50～70%のときr値が最大となった。これらを契機として高r値を得るための適正製造条件に関する基礎から応用に及ぶ幅広い研究が世界中で精力的に進められた。

4.3 深絞り用リムド鋼板の開発

従来、一般ないし絞り用はリムド鋼板であったが、時効性が問題で、しばしばストレッチャーストレインの発生や破断のトラブルを起こしていた。わが国では1957年頃から純酸素上吹転炉が導入されるようになり平炉に比べて鋼中の不純物の減少やN量の半減により延性や時効性が大幅に改善されるようになったが、深絞り用鋼板の主流は依然としてAlキルド鋼板であった。Alキルド鋼は先に述べたように特性が優れている反面歩留りが低く、 Al_2O_3 に起因する表

面欠陥が多いため本質的に製造原価はリムド鋼に比べてどうしても割り高であった。

1959年に単一車種の量産を目指したわが国最初の乗用車専門工場が誕生し、自動車の量産体制の拡張、整備が始まるとともに自動車メーカーは製造原価の低減を図るため高価なAlキルド鋼板の使用を減らし積極的にリムド鋼板に切り換えるようになった*。また、これと平行して、当初使用していた切り板をやめコイル状での取引を始めるようになり、それに伴って表面品質に対する品質保証も一層厳しくなってきた。この点からも表面欠陥の少ないリムド鋼板の使用が有利であった。

このようにして自動車用鋼板に関する研究開発はリムド鋼板を中心に動くことになり、リムド鋼でありながら非時効でしかもAlキルド鋼以上の深絞り性に有利な{111}集合組織をもつ鋼板をいかにして製造するかという新たな挑戦が始まった。

薄鋼板の集合組織形成に影響をおよぼす因子のなかでは、熱延温度、熱延巻取温度、冷延圧下率および焼鈍条件などが重要であり、特に{111}集合組織を発達させるには高温で熱延して低温で巻取り、70～80%の冷延率で冷延し、そして結晶粒を十分成長させるような焼鈍条件を選ぶのが良いとされた。しかし、これだけではAlキルド鋼を凌駕するような深絞り性は得られなかった。無理にr値を高めようとすれば過酷な高温焼鈍もしくは脱炭焼鈍を行わなければならないが、その場合結晶粒の著しい粗大化や結晶粒界の過酸化をまねき、プレス加工時の肌荒れ、二次加工脆性の障害を引き起こすことになる。

おりしも、千葉製鐵所は、Lee Wilson社が開発したオープンコイル焼鈍(Open Coil Annealing, 以下OCA)炉をわが国で始めて導入し、1961年5月操業を開始した。これは、コイルをルーズに巻き戻して焼鈍する方式であり、焼鈍時雰囲気ガスは隙間を循環するのでタイトコイル焼鈍に比べて加熱、冷却能率が良い。雰囲気ガスを適当に選べば、鋼中のC,Nをそれぞれ0.01%、0.001%以下まで低減できる。また、コイルの焼付がないためより高温焼鈍が可能となり、材質の向上が図れるという利点もあった。これによりリムド鋼を素材として、圧延後、脱炭脱窒焼鈍して極低炭素極低窒素鋼板とし、延性の良いかつ非時効性の鋼板が製造できる道が開かれた。現在では、上工程の製鋼の脱ガス技術により、鋼を過酸化させることなく、Cを約20ppmまで下げることが楽にできるが、当時の通常の製鋼ではCを下げるとOが増えて非金属介在物の増大を招き材質劣化をきたすし、また、リミング不良を起こし表面品質が損なわれる

*ある自動車工場では、このような努力の結果、本格的なプレス加工の始まった1955年に60%を占めていたキルド鋼も1961年には41%に減じ、1968年には95%がリムド鋼に置換された。1964年に90%のコイル化を達成した¹⁵⁾。

ことになるので不可能であった。

OCAでも結晶粒の粗大化や過酸化による脆化の問題は当然起こり、一つの大きな壁であった。脱炭により完全に軟らかくして伸び率を50%以上と非常に高くすることで、自動車の難しい全ての部品が深絞り加工できるものではない。適当な強さがなければならない。微量の第三の元素を添加してその影響をみること、極限まで純度を上げること、同時に微量の第三の元素を添加して飛躍的に特性の向上を図ること、の可能性を矢継ぎ早にテストした。その中で、Pを添加したもののコニカルカップ値(Conical Cup Value, 以下CCV)が優れており、今まで、かつて経験したことのなかった絞り抜け(CCVが無限大)の現象が起こった。皆、欣喜雀躍してその原因追求のため、X線解析による結晶方位を至急調べたところ、圧延面に平行に、綺麗に{111}が配列しているではないか。それはOCA法を導入して数ヶ月経ってのことであった。

P添加材は「脆性」という思わぬトラブルを引き起こした。これは、焼鈍時に脱炭が進みすぎて粒界の過酸化による脆化であろうと考えて脱炭の制御を行った。そこでPと同じ周期律表V族Bの元素に目を付け、類似の効果を持つ元素を探した。SbなどもCと結びつき過剰脱炭反応を抑え結晶粒の粗大化防止にも効果があった。このような添加元素の研究で脱炭速度の調整が可能となり、たとえば、PとSb, Bi, Nb, Pbのうち1種または2種以上添加することによって過剰脱炭による内部酸化や結晶粒の粗大化の問題を解決し、材質の一層安定した深絞り用鋼板KTSを開発した¹⁶⁾。これは微量元素の添加とOCAによる鋼板の脱炭脱窒処理(鋼の高純度化)を組み合わせることによって実現したものである。KTS鋼板の化学成分と機械的性質をAlキルド鋼と比較して表1に示す。KTS鋼板はAlキルド鋼によらずにそれよりも高いr値をもつ材料を製品化した世界最初のものとなった。1961年10月以降KTS鋼板の本格的な大量生産を開始した。千葉製鐵所に続いて各所で相次いでOCAが導入されるとともににはなばなしい新製品、新技術の開発競争が始まった。1964年のIDDRGの会議で吉田、佐々木ら¹⁷⁾は

KTS鋼板を発表し、大いに注目を集めた。

当時、3～4人の若い技師達が毎夜遅くまで意欲的に考え試験し、現場立会いし、また考え、討議するということの連続で、研究室も掘っ建て小屋で、皆疲れると机の上に膝を組んで明日何をやるか話し合った。このムードが出てくると大体仕事はうまく行くものであるが、しかしそのあとも経済的な問題、市場性、予想しなかったクレームの発生と、幾度となく壁にぶつかったが、創ってみるものの根底にある原理原則は、絶対に間違っていないという確信は、常に前進への大きな支えとなった。

4.4 リムド鋼から連続鋳造製Alキルド鋼への転換

1963年頃から分塊工程の省略による生産の合理化を図るため薄板素材の造塊法から連続鋳造法への転換が検討され始め、1970年頃に相次いで薄板生産用スラブ連続鋳造機が導入されるようになった。連続鋳造ではリムド鋼の製造が困難で、一時これに変わるものとしてU. S. Steelが開発したSiとAlで調整したリバンド鋼が導入され、過渡的役割を果たしたが、その後の精錬・脱ガス技術の向上により、表面および内面品質に優れたスラブが得られ、深絞り性に最適なAl、N含有量を正確にコントロールできるようになるとともに、従来のリムド鋼やキャップド鋼、1965年頃から深絞り用として本格的に採用されるようになったコアキルド鋼(表層がリムド鋼、内層がAlキルド鋼)は連続鋳造の普及とともに連続鋳造製Alキルド鋼に完全に転換されるようになった。鋼板の焼鈍も1971年に出現した連続焼鈍プロセスの普及とともにOCAから連続焼鈍法へと移行した。

5 冷延鋼板用連続焼鈍技術

冷延鋼板の製造プロセスのなかで合理化の最大のネックとなっていたバッチ焼鈍の連続化は全体の製造プロセスからくる必然的要求であった。従来、それぞれ独立した工程であった冷延以降の電解清浄→バッチ焼鈍→防錆冷却→調質圧延→リコiling→製品コイルの各工程を一つのライ

表1 KTS鋼板の化学成分と機械的性質¹⁶⁾

	化 学 成 分 (%)								機 械 的 性 質					ASTM 粒度 No.
	C	P	Al	Sb	Bi	Nb	Pb	N	$\bar{r}$	El (%)	TS (MPa)	YP (MPa)	YE ** (%)	
商用MF鋼	0.055	0.010	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	0.0025	1.07	45	321.7	259.9	3.0	9.6
OCA・脱炭MF鋼	0.006	0.010	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	0.0008	1.40	51	277.5	176.5	1.0	7.1
Alキルド鋼	0.043	0.008	0.043	tr.	tr.	tr.	tr.	0.0058	1.55	47	299.1	—	0.0	8.2
P, Sb入りKTS鋼板	0.006	0.032	tr.	0.018	tr.	tr.	tr.	0.0010	1.76	47	296.2	—	0.2	7.3
P, Bi入りKTS鋼板	0.008	0.034	tr.	tr.	0.010	tr.	tr.	0.0006	1.70	46	324.6	—	0.0	7.5
P, Nb入りKTS鋼板	0.006	0.035	tr.	tr.	tr.	0.009	tr.	0.0008	1.70	47	313.8	—	0.0	7.0
P, Pb入りKTS鋼板	0.006	0.030	tr.	tr.	tr.	tr.	0.035	0.0006	1.71	47	305.9	—	0.0	7.4

OCA * : オープンコイル焼鈍
 .YE ** : 室温で6ヵ月時効後の降伏点伸び

ンに統合した画期的プロセスが世界にさきがけて日本鋼管 (Nippon Kokan Kabushikikaisha Continuous Annealing Line, 以下NKK-CAL) および新日本製鐵 (Continuous Annealing and Processing Line, 以下CAPL) で相次いで開発された。これにより従来10日かかっていた製造日数がわずか1日 (実質10分) に短縮された。これに伴い冷延～最終工程間のランニングコストも大幅に削減されるとともに、工程管理の単純化をもたらした。また、CAPLの例¹⁸⁾でいうと、従来法に対し要員は27%に、占有面積は40%に、設備建設費用は74%に、歩留りロス¹⁹⁾は52%に、エネルギーコストは81%に、それぞれ低減するなど多大のメリットが得られるようになった。

5.1 連続焼鈍化の試み

従来、ストリップの連続焼鈍はあまり加工性を必要としないふりきまたは亜鉛メッキ鋼板の製造に適用されるに過ぎなかった。冶金技術者にとって、自動車用など加工性の良い冷延鋼板を連続焼鈍によって短時間に製造することは永年の夢であった。自動車用鋼板の連続焼鈍実用化最初の試みは、Braceら¹⁹⁾の実験結果をもとにして1936年に建設されたFord Motorの7.5t/h連続焼鈍ラインであろう。この時のヒートサイクルは高温焼鈍と過時効処理 (シエルフ処理) を組み合わせたもので、トータルサイクルタイムは、従来のバッチ焼鈍に対抗するためには、10min以下でなければならないとしており、その際の目安として最高均熱温度で1min保持、Cを析出するための過時効処理時間を2min、二次冷却時間は2.5min程度としている。

冷延鋼板用連続焼鈍のヒートサイクルの原典とも言える1956年のU. S. Steelの特許²⁰⁾は有名である (図4参照)。1959年にはBethlehem SteelのBlickwedeら²¹⁾は連続焼鈍によって深絞り用鋼板を製造するための冶金的要因、つまり再結晶と結晶粒の成長、焼入れ時効、歪み時効などについて詳細な検討を行い、連続焼鈍で自動車用鋼板を処理するときの主な問題点は、結晶粒を適正な大きさに成長させること、固溶Cをバッチ焼鈍なみに十分析出させること、の2点であることを明らかにした。また、連続焼鈍の場合、バッチ焼鈍と同等の操業コストになるためには40t/hで処理しなければならないこと、連続焼鈍はスキンパスマイル、シャーを組み込むことによって経済的となることも明らかにしている。その後、冷延鋼板用連続焼鈍の開発はこの2つの冶金的問題をいかに解決するかを中心に展開されることになった。なお、焼鈍ラインにスキンパスマイルを組み込んだ設備列については1959年にJ&Lから出された特許²²⁾がある。

1962年にはBISRAのGarber²³⁾は冷延鋼板の急速焼鈍実

験で、熱延板の結晶粒の大きさと冷延圧下率を適当に組み合わせれば、バッチ焼鈍なみの単純成形浅絞り用鋼板が製造できることを明らかにした。この時のヒートサイクルは680～720℃×10secの急速焼鈍後300℃に冷却しコイル状で過時効処理するというものである。以上のように欧米では1950年後半から1960年代初めにかけて冷延鋼板の連続焼鈍法についての研究、検討が精力的に行われてきたが、いずれも冶金的問題を解決する方法を見いだせず、その後の進展はなかった。

5.2 わが国における連続焼鈍技術開発の経緯

NKK-CALの場合は、過時効処理についての基礎調査からスタートした。1964年頃通常の方法で連続焼鈍した後、コイル状に巻き取り、これをさらにバッチ焼鈍などで250～350℃一定時間保持 (過時効処理) して、固溶Cを析出させる方法で工業規模で相当量生産した²⁴⁾。この時の製品の品質はバッチ焼鈍方式に匹敵するものであった。過時効処理時間を目標通り短縮できず基礎調査を一時中断したが、強いニーズを受けて1967年に開発研究を開始し、1969年にはブリキ用の福山製鉄所No. 1連続焼鈍ラインに工業規模の水焼入れ装置を組み込み、工業化に成功、1971年より冷延鋼板の製造を開始した。1976年に冷延鋼板専用ラインを福山に建設した。

CAPLの場合は、1960年代前半頃から素材化学成分と連続焼鈍特性の関係を中心に基礎研究を行い、具体化の見通しを得た後、1968年に開発研究を開始した。現場実験や設

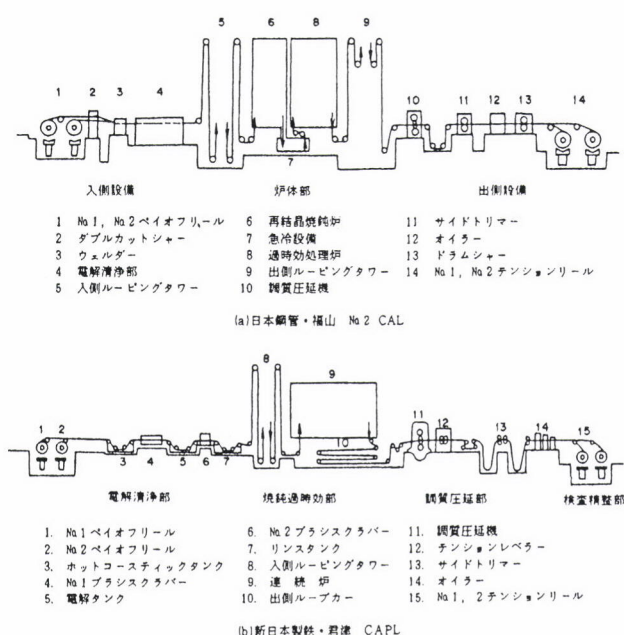


図3 NKK-CALおよびCAPLの設備構成²⁵⁾

備研究を重ねた後、1970年に専用ラインの建設を決定し、1972年に君津で営業運転を開始するに至っている。図3にNKK-CALおよびCAPLの設備構成を示す²⁵⁾。

5.3 連続焼鈍を可能ならしめたメタラジー

冷延鋼板の連続焼鈍は冶金学的な技術開発なしでは実現し得ないものであった。NKK-CALの冶金的特徴¹⁸⁾は、過時効処理を効率良く行わせるため再結晶焼鈍後急冷(水焼入れ)方式を採用したことと急熱短時間焼鈍での結晶粒成長に有害な炭化物をあらかじめ大きくしておこうという考えから熱延後の高温巻取りを採用したことである。水焼入れによる急冷方式を採用したのは、過時効前の固溶Cの過飽和度をできるだけ大きくして、過時効における炭化物析出の駆動力を大きくしようとしたものである。したがって、急冷後の過時効処理の最適温度は350～450℃で、処理時間は1min程度と短い²⁶⁾(図4参照)。鋼板軟質化は、冷延前の結晶粒を大きく、したがって製品結晶粒を大きくできたこと、炭化物を粗大化し、粒成長を促進させたことによるとしている。r値の向上は炭化物の粗大化および固溶Cの少ない条件下で再結晶が進行するからであると説明している。

CAPLの場合¹⁸⁾は、素材化学成分の適正化、熱延高温巻取りの採用、適正なヒートサイクルの採用(図4参照)、応力過時効による材質劣化の防止、を中心とする技術によって問題を解決した。適正素材は、リムド、キャップド鋼に対して、 $K = \text{Mn}(\%) - 55/32 \cdot \text{S}(\%) - 5/16 \cdot \text{O}(\%)$ 、Alキルド鋼に対し $K = \text{Mn}(\%) - 55/32 \cdot \text{S}(\%)$ で規定されるK値を指標とし、 $0 \leq K \leq 0.15$ 、 $\text{Mn} \leq 0.25\%$ とする時最も良好

な特性が得られることを見いだした。K値の調整および670℃以上の熱延高温巻取りによって熱延鋼帯における地鉄の清浄化とMnS粒子の適正分布が得られ連続焼鈍後の特性改善に寄与する。焼鈍後、過時効処理温度までの冷却はガスジェット方式(5～30℃/sec)を採用している。応力過時効による材質劣化は、過時効処理中の鋼帯に加わる曲げ応力を臨界値以下に低減できる大径ハースロールを設置することで解決した。図4にヒートサイクルの例を示す。

5.4 連続焼鈍技術の発展

1980年に川崎製鐵はガスジェット冷却方式(冷却速度30～50℃/sec)による多品種の連続焼鈍ができる多目的連続焼鈍設備KM-CAL (Kawasaki Steel Multipurpose Continuous Annealing Line)を開発実用化²⁷⁾した。その後も1982年に、過時効処理前の再加熱の省略を目的としたロール冷却方式²⁸⁾がNKKで、ヒートサイクルの短縮を狙った気水冷却方式²⁹⁾が新日本製鐵で、それぞれ開発・実用化されるなど、プロセスの改良が進むとともに日本で開発された連続焼鈍技術は広く世界的に普及した。1982年には広畑製鐵所は冷延とCAPLを直結(H-CAPL)させ、冷延工程の2工程化を世界で初めて実現した。

一方、連続焼鈍用の鋼も従来の造塊法から連続鋳造Alキルド鋼への転換が進むとともに鋼中の固溶C、Nを炭窒化物として析出させ、地鉄を高純度化させたIF(Interstitial Free)鋼が開発され、その適用により、連続焼鈍法でr値2.5程度の超深絞り用鋼板や深絞り用高強度鋼板までの製造が可能となった。

IF鋼による高深絞り用鋼板は1965年頃八幡製鐵所で開発されたが、これは脱ガス処理したTi添加極低炭素鋼(造塊法による)を素材としてバッチ焼鈍によって製造されたものであった。連続焼鈍設備の稼働とともにTi添加極低炭素鋼板の連続焼鈍化が検討され、1975年頃にはその連続焼鈍化技術が確立された³⁰⁾。一方、1977年にはこのIF鋼の連続鋳造化が完成し、実用化されるようになった。また、その後、Nb添加極低炭素Alキルド鋼を素材とした高深絞り用鋼板が川崎製鐵によって開発された³¹⁾。このようなIF鋼板は、添加元素によってC、Nが完全に固定されているので連続焼鈍工程での過時効処理が全く不要であり、しかも非時効性で加工性も極めて優れている。このため自動車用鋼板として一躍注目を浴びるようになった。

真空脱ガス技術の進歩により、1980年代半ば以降にはC量20ppm以下の極低炭素鋼が容易に溶製されるようになった。近年では、このような極低炭素鋼にTi、Nbを複合添加したIF鋼を用いて従来以上の材料特性を有する超深絞り用鋼板が製造されるようになっている。1980年頃から、自

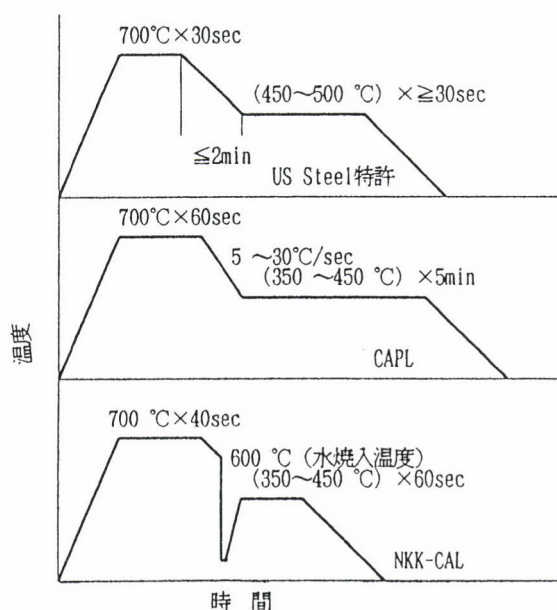


図4 ヒートサイクルの例^{18,20,26)}

自動車用鋼板に対する防錆特性の要請が高まり、冷延鋼板から溶融亜鉛めっき鋼板など表面処理鋼板へと大きくシフトするのに伴い、連続焼鈍ラインや溶融亜鉛めっきラインでの製造に適しているIF鋼は自動車用鋼板の主流となってきた。

6 完全連続式冷間圧延技術

世界で初めての完全連続式冷間圧延機が1971年の春、NKK福山製鉄所において建設³²⁾され、世界の鉄鋼業界に大きなインパクトを与えた。完全連続式は従来方式のミルに比べて、生産性の向上1.5倍、オフゲージ率の減少(1.4%→0.1%)、ミルオペレータの減少(6人→2人)、生産能力を考慮したときの建設費の低減(完全連続式のコスト1に対し従来方式のミル1.3)、ロール疵は約1/6に減少、ロール磨耗も約30%減少など、期待通りの成果をあげた。コイルを溶接して連続的に圧延しながら異なった圧延スケジュールに移行することを可能にしたことは特筆すべき開発と言える。

6.1 完全連続化構想

圧延機の完全連続化構想は欧米でも多年の間検討されてきた。1938年に提案された構想は、ストリップは入り側のコイルボックスから出て溶接機で接合され、ストリップ貯蔵装置を経て圧延機に入り圧延された後、ロータリシェアーで切断されてコイルに巻き取られるというものであった³³⁾。

1966年にWestinghouse Electricで冷延システムを担当していたDeyoungら³⁴⁾はコイルの通板一尻抜の問題点、完全連続化のメリットやその可能性を論じている。タンデムミルのスピード制御の実現、計算機によるセトアップの迅速化、サイリスタ採用による高応答性などの理由で、今日(当時)では、この構想の実現は可能であると示唆しているが、これを実現するためにはスケジュール変更に従従できるデータ処理装置と自動制御技術、機械装置の最適設計、十分な電気システムなどが必要だとしている。また、この中で連続化の構想をさらに発展させ、酸洗ラインとタンデムミルを直結化した完全連続化が提案されている。Lenze³⁵⁾は1967年のStahl und Eisenで完全連続式圧延機の可能性を論じ、その概念設計図を示している。

6.2 開発の背景と経緯^{32,36)}

従来のタンデム圧延機は、基本的にはバッチ式であるため1コイルごとに通板一尻抜のハンドリングに時間がかかり、能率低下やコイル先後端のオフゲージの発生が避けら

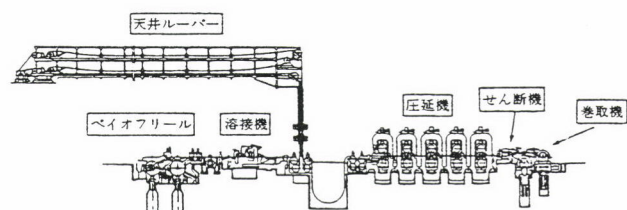
れないし、さらにミルの高速化、コイルの大単重化が進みコイルのハンドリング時間はより大きな損失要因となるなど完全連続圧延化への要求はますます高まっていた。NKKが完全連続化を模索し始めた1960年代の後半は、大型化、高速化、プロセスコンピュータの精度向上、厚み制御の進歩、溶接技術の進歩、ロール材質の向上など圧延技術の集大成が、完成の域に到達しつつあった時期であった。

完全連続式圧延機の開発は、1967年早春のころ、若手技術屋を前にした岡本(1966年当時、NKK福山製鉄所冷延工場長岡本照三氏)の放談会からはじまった。1966年9月に福山製鉄所No.1冷延ミルを立ち上げたばかりの岡本にとっての関心事は、もう次に予定されている冷延ミルのことであった。岡本の、“新しい第2冷延ミルは通板一尻抜のない圧延機にしたい”、というのがその日の話題の中心であった。

岡本が火をつけた夢のプロジェクトはやがて本格的に検討するための組織ができた。当時の選択としては、第1は他社が指向したように、コンピュータを駆使して、通板一尻抜け作業の自動化、オフゲージ補償制御を完全に行う方向であり、第2は従来の連続式圧延機の設備、作業を根本的に完全連続式のような新しい発想に挑戦することであった。それと第2冷延ミルを世界の先端に行くミルにしたい狙いもあって、第2の選択をした。いままで誰もやったことのない圧延方式を採用することについては反対論も多かった。反対論の多くは、単に能率をあげることが目的と

表2 完全連続式圧延機の開発年表³²⁾

年	記 事
1963	・水江製鉄所のコールドタンデムミルで圧延機の動的静的研究開始
1965	・コイルエンドの圧下コントロールによる板厚制御研究
1966	・福山No.1塩酸酸洗設備の水平コイルカー式ストリップ貯蔵装置の安定運転に成功 ・圧延制御システムの研究
1967	・福山No.1コールドタンデムミルでのコンピューターコントロールシステムの稼働に成功 ・走間板厚変更の本格的な研究開始
1968	・走間板厚変更理論の開発に成功 ・福山No.1コールドタンデムミルで走間板厚変更のシミュレーション実験に成功
1969	・プロジェクトチーム結成 ・福山No.2コールドタンデムミルに完全連続式採用決定
1969 ～70	・溶接部検出装置など一連の関連技術開発
1970	・実際に使用するソフトウェア完成
1971	・完全連続式冷間圧延機稼働開始

図5 福山製鉄所完全連続式圧延機³⁶⁾

するならばそんな冒険をする必要はなく、6スタンドにして圧延スピードを上げたらよいとか、コイル単重を大きくすれば良いというものであった。最終的には、当時の技術担当副社長であった野中宏氏の「若い者が頑張っているのだから冒険してみるか」との英断により決定された。

表2の開発年表に示されているように、この完全連続化を実現するに当たり、約10年かけてこれを完成させており、一朝一夕にできたものでないことを物語っている。開発にあたってはタンデムミルのコンピュータコントロールシステム、高水準の圧延理論の研究、ストリップ貯蔵装置の操業経験という3つの重要な技術基盤があった。

6.3 主な技術開発³²⁾

主な技術開発は下記のようなものであり、最も重要な役割を果たしたのは、走間板厚変更制御技術の開発であった。

- ・ 走間板厚変更制御
- ・ 酸洗ライン、圧延機入り側での溶接部を目印として使うストリップ追跡制御
- ・ 溶接機およびその前後設備の自動化
- ・ 溶接部検出機
- ・ 高速ストリップ剪断装置およびストリップ振り分け装置
- ・ 作業ロール組み替え装置(ストリップをスタンドに残したままで組み替える)

完全連続式では、圧延機を停めることなく連続して圧延作業が行われるので、オーダーに合わせて製品板厚を変更する走間板厚変更技術は不可欠である。1968～1969年当時の冷間圧延の常識としては、そのような技術は不可能とされており、また、それに組み込む試みもほとんどなされていなかった。当時NKK技術研究所では、圧延現象を数値計算する手段を確立しつつあり、冷間圧延の動特性解析モデルを開発し、圧延現象の理論的解明に力を入れていた。このような背景のもとに、走間板厚変更制御の開発を目指した研究を1968年頃から開始した。走間板厚変更の難しい点は、板厚変更中にスタンド間張力が大きく変動し、板破断や絞り込みなどが発生し、圧延が不可能になってしまうことである。この点を解決するため、先に述べたタンデム圧延の動特性解析モデルを用いて張力変動のない走間板厚変更制

御方式を理論的に導出した。福山No.1冷延ミルで走間板厚変更の実証実験を繰り返し、改良を重ねた。実機ではなんのトラブルも無く一発で成功した。図5に福山製鉄所完全連続式圧延機を示す。

6.4 完全連続式圧延機の開発

福山の完全連続式に引き続いて、1975年には米National SteelのWeirton冷延ミルが、1980年にはソ連Novolipetsk冷延ミルが完全連続化された。1981年には新日鐵君津で酸洗ラインと直結した完全連続式圧延機CDCM(Continuous Descaling and Cold rolling Mill)が出現した。その後冷延ミル単独あるいは酸洗ラインと直結した完全連続化が国内外で相次いで建設されるなど完全連続式は冷延の主流設備となった。

7 あとがき

企業の存続をかけたコストダウン競争は、省力、省エネルギー、歩留り、品質向上に果敢に挑戦させることになった。たくましい意思、優れた創造力で対決し、その結果として連続焼鈍や完全連続式圧延機のような世界をリードする薄鋼板製造連続化プロセスを海外に先駆けて実現した。その原動力が技術導入をベースに独自に培われてきた冶金理論であり圧延理論であったということは実質的に世界のフロントランナーとなった証左である。

現在の薄鋼板製造プロセスは、すでに1986年広畑製鉄所で酸洗～冷延～CAPLが直結化した完全連続冷延薄鋼板製造設備が完成しているの、1996年に千葉製鉄所で完全連続式HSMが実現したことにより、熱延～冷延工程の直結化を除いて製鋼から冷延最終工程まで全プロセスの連続化はほぼ完成の域に近づいたと言える。このような発展に、わが国鉄鋼メーカー特有の資質である自主技術開発指向と各専門分野の力を結集した総合力が大いに貢献してきたと言えよう。

製鋼工程の革新や薄鋼板製造工程の変革が新製品開発の動機付けとなったし、また、逆に冶金技術の変革がプロセスの変革を促すと言うように好循環を繰り返しながらわが国の薄鋼板製造技術は発展し、需要家の満足のいく製品を提供してきた。これは、今後とも引き継がれていくであろう。

戦後20数年の間にわが国薄鋼板製造技術がどのようにして世界の先端を行くようになったか幾つかの例をあげて述べて来たがその一端でもご理解いただければ幸いである。

最後に本稿をまとめるにあたって、連続焼鈍については新日本製鐵フェロー秋末治氏に、完全連続式圧延機については岡本照三氏に、KTS鋼板については伊藤庸氏に数々の

御教示を頂きました。記して感謝の意を表します。

- 1) 圧延理論部会30周年記念シンポジウム, 圧延技術発展の歴史と最近の進歩, 日本鉄鋼協会, (1985), 1.
- 2) 八幡製鐵所八十年史, (1980), 238.
- 3) 川崎 勉: 日本鉄鋼業—その軌跡—, 鉄鋼新聞社, (1982), 486.
- 4) 戦後復興期におけるわが国鉄鋼技術の発展, 日本鉄鋼協会, (1992), 115, 213.
- 5) 住友金属工業最近10年史, (1967), 36.
- 6) 戦後鉄鋼史, 日本鉄鋼連盟, (1959), 138.
- 7) 里見 繁, 小池千司: 鉄と鋼, 59 (1973), 13, 206.
- 8) 和田浩爾, 乾 和夫, 細見紀幸: 鉄と鋼, 59 (1973), 13, 55.
- 9) 久能一郎: 鉄と鋼, 59 (1973), 13, 125.
- 10) 鉄と鋼, 61 (1975), 5, A180.
- 11) W. T. Lankford, S. C. Snyder and T. A. Bausher : Trans. AIME, 42 (1950), 1197.
- 12) R. S. Burns and R. H. Heyer : Sheet Metal Ind., 35 (1958), 261.
- 13) R. L. Whiteley, D. E. Wise, and D. J. D. J. Blickwede : 2nd IDDRG Colloq., Paris, (1960).
- 15) 日本の塑性加工 I —歴史と進歩—, 日本塑性加工学会, (1986), 239.
- 16) 中里嘉夫, 伊藤 庸, 佐々木徹, 野原清彦: 川崎製鉄技報, 1 (1969) 2, 33.
- 17) H. Yosida, K. Sasaki, F. Kanzaki : IDDRG Colloq., London, (1964).
- 18) 武智 弘: 第29, 30回西山記念技術講座, 139.
- 19) P. H. Brace and Hague : Iron and Steel Eng., (1936) Sept., 47.
- 20) U. S. Steel : 特許公告昭 33-2116
- 21) D. J. Blickwede : Flat Rolled Products, 1 (1959), 91.
- 22) U. S. Patent 2, 897, 698
- 23) S. Garber : JISI, June (1962), 466.
- 24) 栗原孝雄: 鉄鋼界, 昭和48年3月号, p. 22
- 25) わが国における最近のコールドストリップ設備および製造技術の進歩, 日本鉄鋼協会 (1977), 146.
- 26) 久保寺治朗, 中岡一秀, 荒木健治, 渡辺 馨, 西本昭彦, 岩瀬耕二: 鉄と鋼, 62 (1976) 6, 624.
- 27) 柳島章也, 下山雄二, 鈴木康利, 角南秀夫, 芳賀雄彦, 井田幸夫, 入江敏夫: 川崎製鉄技報, 13 (1981) 2, 195.
- 28) 苗村 博, 神馬照正, 福岡嘉和, 多久島重宏, 実川正治, 下村隆良: 日本鋼管技報, No. 96 (1982), 1.
- 29) 堀内弘雄, 飯田 洋, 大原哲夫, 服部正幸, 柳楽紀元: 鉄と鋼, 70 (1984) 5, 345.
- 30) 福田宣雄, 清水峯雄: 鉄と鋼, 61 (1975) 6, 43.
- 31) 橋本 修, 佐藤 進, 田中智夫: 鉄と鋼, 67 (1981) 11, 96.
- 32) 池上平治, 岡本照三: 日本金属学会報, 13 (1974) 6, 417.
- 33) A. J. Petros : Iron and Steel Eng., (1975) August, 35.
- 34) D. R. DeYoung, T. J. Dolphin ; Iron and Steel Eng., (1966) Sept., 119.
- 35) F. R. Lenze : Stahl und Eisen, 87 (1967) 14, 825.
- 36) 鎌田正誠: 塑性と加工, 32 (1991) 366, 837.

(1998年3月31日受付)