



特集記事・7

鉄鋼業を取り巻く独創的な発想に基づく
研究・技術開発

エンドレス圧延技術開発における JFEスチール技術者の連綿のねばり

Continuous Efforts for Development of Endless Hot Strip Rolling at JFE Steel

二階堂英幸 JFEスチール（株）
顧問
Hideyuki Nikaido

1 はじめに

JFEスチール東日本製鉄所（千葉地区）第3熱間圧延工場（以下3ホットと呼ぶ）は“薄板に特化した最強の工場”をコンセプトとして建設され、1995年5月に稼働した¹⁾。エンドレス圧延は、それに遅れること約1年で稼働し極薄材を中心とした難圧延材の商品開発が進められた^{2,3)}。この成果により1999年に市村賞、2000年には大河内賞を受賞した。そのエンドレス圧延が一昨年さらに進化した。接合も製造も難しい自動車用高強度ハイテンを、エンドレス圧延により商品化したのである。

本報では、本誌特集の趣旨に鑑み、エンドレス圧延の技術開発が進められた状況や考え方を述べるとともに直近のハイテンエンドレス圧延の開発について触れる。

2 エンドレス圧延の設備概要

図1に、3ホットの設備列を示す。エンドレス圧延の設備はシートバー供給の起点となるコイルボックスから始まり、接合装置とバリ取装置およびコイラー入側のストリップシャーが主なものである。仕上圧延機は全スタンドともペアクロス圧延機で、しかも全スタンドに油圧圧下装置が設置されている。

3 開発の経緯

表1に開発の経緯を示す。1980年にエンドレス圧延の最初の検討と思われる資料が残っている。その後、1984年熱延設備検討班が組織され種々の実験が行われた。1990年には、誘導加熱による接合法が発案され、その直後の1992年に実機大の実験装置が1ホットに設置された。これによりシートバー接合と圧延実験が繰返された。この結果を元に実機が建設され、1995年、世界初の熱間エンドレス圧延に成功した。以降製品開発が進められ、1997年、極薄鋼板の商業生産が開始された。さらに1998年には、ハイテン材やステンレス材の接合

表1 開発の経緯

	検討や開発項目
1980年	企画部の技術検討によりフラッシュバット接合を有力視
1984年	熱延設備検討班により種々の開発が行われる 接合には抵抗加熱法が優位と判断し詳細な実験が行われる
1990年	誘導加熱を適用した接合法の発案
1992年	1ホットに専用の実験機を設置して接合圧延実験
1993年	バリ取装置の開発
1995年	世界初の熱間エンドレス圧延に成功(12月28日)
1997年	極薄鋼板の量産化
1998年	無酸化雰囲気接合装置の開発
2019年	自動車用高強度ハイテンの生産

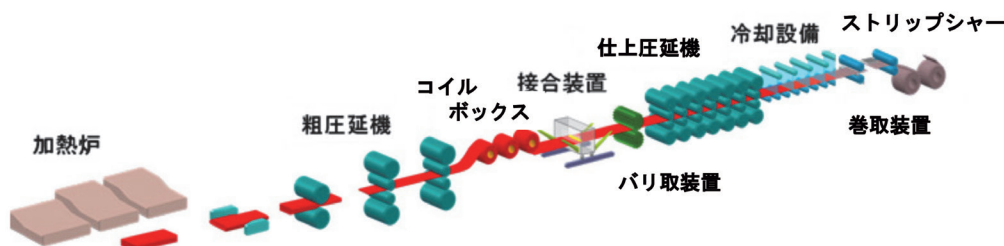


図1 千葉3ホットの設備列

のために無酸化雰囲気接合装置に改造された。その後もハイテンの接合実験が行われ、2019年ついに実用化された。1980年の検討を起点とすれば、実に40年にもわたる技術者のねばりにねばった技術開発である。このような経緯もあり、題名に、“JFEスチール技術者の連綿のねばり”という文言をいれさせていただいた。

4 完全連続圧延の計画

1980年当時、千葉製鉄所の熱延鋼板は1ホット（1958年稼働）と2ホット（1963年稼働）の2つの工場で生産されていた。両工場とも稼働時期が早く、大量生産を担っている倉敷や福山、あるいは君津、大分等より生産性や品質が劣位であった。このままでは将来生き残れないとの危機感は強く、早くからリフレッシュが唱えられていた。

そのような中、企画部が中心となって新ホット建設を前提に新しい技術が検討された⁴⁾。接合技術に関しても種々の方法が調査研究されており、当時の船橋製鋼の実績からフラッシュバット接合が最も有力とされていた。図2に、当時検討されたエンドレス圧延の構想図を示す。実機化されている現状の設備配列とほとんど変わらない。

ただ、この約2年間にわたる調査研究の結論は研究開発を一次中断するものとなった。当時の報告書には、“シートバーの接合による完全連続圧延はソフト上もハード上も著しく困難な開発要素を数多く有しているだけでなく、連鑄工場と熱延工場との結合による完全連続式の生産が将来の主流となりうるかどうかの判断も現在では困難である”という結論が下されていた。

5 接合技術の開発

5.1 接合方法の具体化

1984年、所内に熱延設備検討班が組織された。新ホットに導入すべき最新技術を開発することが目的であった。エンドレス圧延の要である接合技術も、実験主体の研究開発が

始まった。当時は、シートバー厚30mm×幅1900mmの全断面を接合することは不可能と判断されており、5秒程度の短時間で接合する方法に議論が集中された。時間制約の少ないルーパー実験も行われたが、温度降下が大きく、しかもスケールが噛み込むので品質上採用できないという結果も短時間接合に向かった理由である。そして発案されたのが幅端部接合である。理論的根拠となったのは、当時最先端の3次元板圧延の解析結果⁵⁾である。それによれば、ロールバイト内およびその近傍の圧延方向応力はほとんどが圧縮応力で、引張応力は幅端部のみでしか発生しない。このことは、幅端部のみを何らかの方法で接合すれば、中央部は圧延中の圧縮応力で圧接できるのではないかと理解されたのである。図3に示すような実験も行われ、端部が接合されていれば開口を伴わずに圧延が可能であることを確認した。圧延圧接を可能にする限界スケール厚も検討された。当時の技術と実験を通して、接合圧延の可能性を論理的に積み上げていた。

以上の方針のもとに幅端部接合の具体的検討が進められ、接合方法には元々のフラッシュバット法に代えて通電加熱接合法が選定された。実験は、実機で想定されるロール通電で行われ、電流や押込量と接合強度との関係が調べられた。要素実験で行われるべき項目はほぼ網羅されていた。

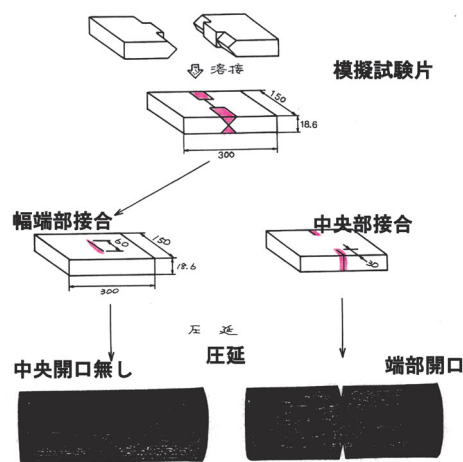


図3 接合を模擬した試験片のモデル圧延実験

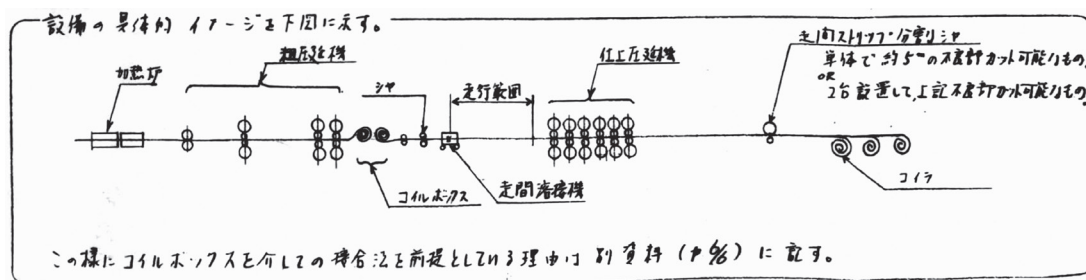


図2 1980年当時のエンドレス圧延の構想図

多くの成果を残したが、新ホットの建設が再び頓挫し検討は一旦打ち切られた。

5.2 誘導加熱法の提案

1990年になると再び新ホットのリフレッシュプランが検討された。当然のことであるが、エンドレス圧延は必須の技術であり、研究開発が再開されることになる。熱延設備検討班時代の開発担当者は、電極ロールからシートバーに電流を供給する際、溶着ロール疵が品質上の致命傷になると懸念していた。何とかそれを克服したいと別の方法を模索していた。そんな時、当時建設が進んでいたエッジヒーターの加熱にヒントを得て、誘導加熱による幅端部接合法を提案したのである。図4にその概念図を示す。先行材と後行材の端部を接触させ、両材料が構成する開口部に交番磁界を印加すると周回電流が流れる。この電流で発熱させ、同時にアップセットして接合させる（以降、接触接合法と呼ぶ）のである。シートバーに非接触で大電流を供給できるという利点があった。直ちに操業用のエッジヒーターで接合実験が行われたが、鉄心形状が接合に適していないため予想通りの発熱が得られず、接合には至らなかった。実験機の必要性を痛切に感じる結果となった。

5.3 接触接合の1ホット実験

1991年初めに、3ホットの建設が公表された。驚いたことに、エンドレス圧延の建設も同時進行とされた。エンドレス圧延は、開発目標から“必達の目標”となった。同時に、研究開発予算が認可され、建設の前段階として“1ホットの実験装置による接合材をそのまま圧延すること”が当面の目標になった。当時の所長の指示であるが、極めて適切な判断であったと思う。

1992年初めに、1ホットの仕上入側に実験装置が設置された。直ちに実験が行われたが、接触接合法は最初から苦労し

た。周回電流による接触部の発熱とアップセットとの同期が非常に難しく、早くアップセットすると加熱不足で酸化スケールが残る接合となり、逆に遅らせるとスパークが発生し溶鋼が飛散するといった具合であった。

誘導加熱の周回電流は左右同じはずである。従って、接触長と面圧を可能な限り均等にすれば発熱も均等になるはずである。この観点から、アップセット方法やクランプ方法、自在クランプの取付などあらゆる方法を試した。そのたびに圧延を行ったが、結果は惨憺たるものであった。端部は仕上第1スタンド (F1) 出側やF2出側で破断した。破断するとルーバーが跳ね上がり、厚さ10mmもある板が圧延機の上まで飛んだ。そのたびにオペレーターに半成処理をさせてしまった。毎回破断するので、技術者としては忸怩たる思いの日々が続いた。ただ、有難いことに、どんな状況でもオペレーターは能動かつ機敏に対応してくれ、しかも常に前向きでいてくれたので大いに助けられた。

ここまでの約1年間の実験回数は41回、鋼材の使用量は既に1000tonを超えていた。結局、初期に描いた端部接合法は全て失敗に終わり、方向転換せざるを得なくなった。

5.4 非接触接合による打開

1992年の末、この状態を打開するため全幅接合に切り替えた。加熱には誘導加熱方式を踏襲した。その概念図を図5に示す。先行材と後行材との間にわずかの隙間をもたせ、厚さ方向に交番磁束を貫通させると、先後端部に集中した幅方向の電流が流れ接合部が加熱される。そして、加熱完了後にアップセットして接合するというものである。

まず最初に、今まで接触接合で用いていた幅300mmのイ

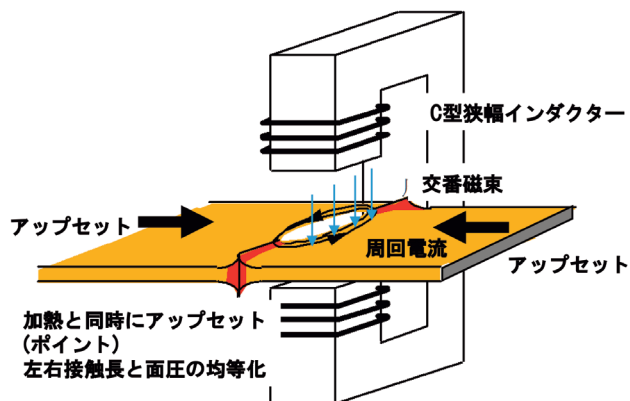


図4 接触加熱接合法の概要

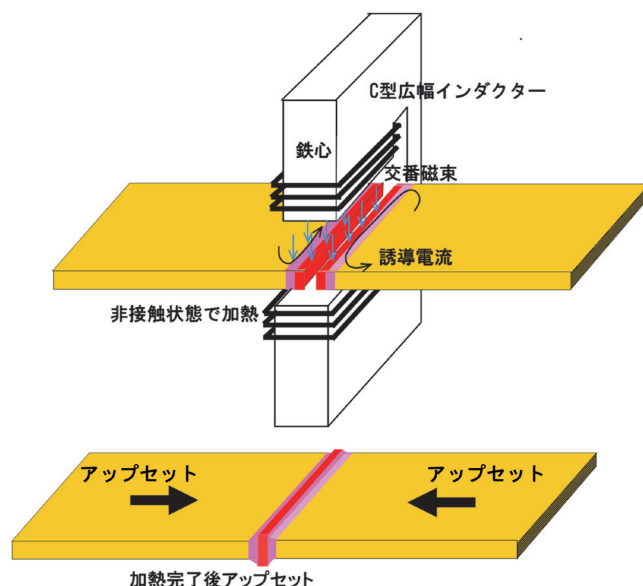


図5 非接触加熱接合法の概要

ンダクターで非接触接合を試みた。接合は問題なくできた。同時にインダクターの広幅化改造も特急で進め、加熱条件を決めて直ちに圧延した。最初の6.0mm圧延は嘘のようにうまくいった。接触接合と非接触接合は天と地ほども違う進捗であった。当社には、“板は真ん中を引っ張れば真っ直ぐ進む”という君島理論（原理）がある。まさにその通りで、幅端部接合は左右の2点を均等に接合することが難しい上に、両端部の2点を引張る圧延としたため板が直進せず左右の片方に力が集中して破断した。一方、中央部接合は板の中心を引っ張るので板は真っ直ぐに進み難なく圧延できたと考えらるべきである。原理原則には抗えないことを証明する結果となった。

元々非接触接合は加熱容量が不足すると予想されたために部分接合の検討に入ったわけであるから、全幅接合を実現するには当然、加熱容量不足が課題となった。この問題は共同研究相手のメーカーが詳細に検討した。接合実験におけるインダクターの電気や磁気データーを徹底的に採取し、磁気回路から電気の等価回路を構築した。さらに追加実験で加熱周波数や加熱時間を適正化することにより、既製のインバーターでも目標の昇温速度が得られるという結論が得られた。詳細なデーターの蓄積と評価により全幅接合できないという当初の結論が覆されたのである。

6 薄物化の課題と解決

6.1 全幅接合の2つの課題

難なく圧延できた1ホット実験も、仕上板厚を薄くすると接合部が破断し始めた。図6に通板できた4.2mmの接合部（上段）と破断した3.0mmの接合部（下段）の写真を示す。最

終の目標板厚は0.8mmであるから、この問題はなんとかして解決しなければならなかった。破断部を調査し2つの問題に行きついた。1つは幅端部に未接合部があり接合幅は全幅の70%しかないこと、もう1つは盛り上がり部の折れ込みで健全な部分が板厚の半分程度しかなかったことである。力を支持できる断面積は全断面の35%程度しかなかった。一方、仕上スタンド間の張力は板厚が薄くなるほど大きくなる。このため破断し始めたのである。

6.2 接合幅の拡大

幅端部の未接合部は、図7に示すように電流が迂回するために昇温が不足していることで生じる。その対策は幅端部の磁束を強くすることである。事実、板幅端部に珪素鋼を置くと、未接合幅は50mm/片側と従来の1/3に低減できた。しかしながら、シートバーの幅端部位置に合わせて珪素鋼を動かす装置を鉄心とシートバーの間に置くことは、どう考えても無理であった。このため、皆で何度もアイデアを出し合った。そのとき、銅の棒を置けば、中央部の磁束を減らし端部の磁束を増やせそうだというのである。銅の棒ならすぐにできるし、銅棒の内部に珪素鋼を置けば銅棒の誘導電流による磁束の減少を相殺して、しかも幅端部位置の銅棒回路をOFFすれば磁束を増やすことができるかもしれないと一気に話が進んだ。アイデアは即刻図面化され、図8に示すようにビニールテープで巻いた銅棒を鉄心保護のステンレス棒の間において、実機を模擬した試験装置を作った。そして、ステンレス板の加熱試験により磁気制御が可能であることが確認された。また、1ホットの接合装置にも設置され、未接合幅は幅端部に珪素鋼を置いたものと同じように大幅に低減された。こ

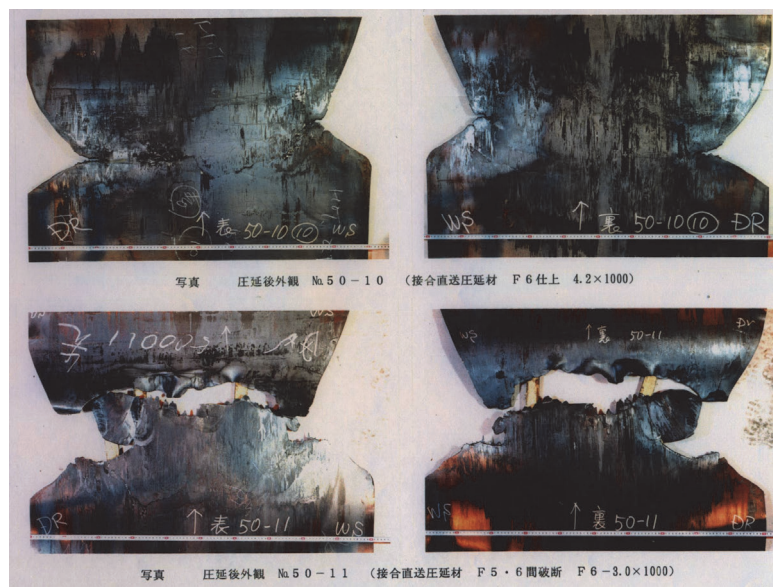
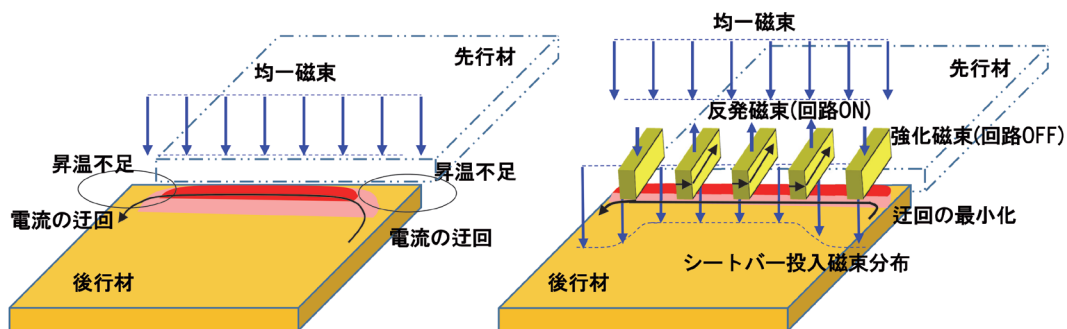


図6 通板した仕上厚4.2mmと破断した仕上厚3.0mmの接合部の写真



(a)均一磁束投入における幅端部電流の迂回 (b)銅棒回路付加による磁束変化と電流迂回の最小化

図7 幅端部における電流の迂回現象と磁気制御の発案



図8 磁気制御の可能性を確認するための手作りの試験装置

の磁気制御技術は極薄圧延に必須の技術として実機に盛り込まれた。失敗に失敗を重ねた経験から文殊の知恵を絞り出した開発項目である。

6.3 バリの除去

接合部破断のもう一つの問題は盛り上がり部 (以降バリとよぶ) の折れ込みである。熱間鋼を工業的に切削する技術が無かったことから、可能な限り切削しないで圧延する方法を検討した。接合でのアップセット量を小さくすることやF1で軽圧下する方法など色々試してみたが、図9の折れ込みをなくすことはできなかった。一方、オフラインでバリを除去し再加熱して圧延すると、接合材は1.0mmまで難なく圧延できた。結局、切削技術の開発へと方向を転換した。

バリ取り実験のために既存設備を回転切削実験機に改造した。幅50mm程度の切削であるが、超硬刃は寿命が無いこと、金属刃も種々の材質や形状に変化させたが、目詰まりが発生してバリの除去は難しいことがわかった。約7ヶ月もの間手を尽したが、またしても解決の糸口すら見えなかった。結局、図10に示すグラインダーのような高速切削領域に手を

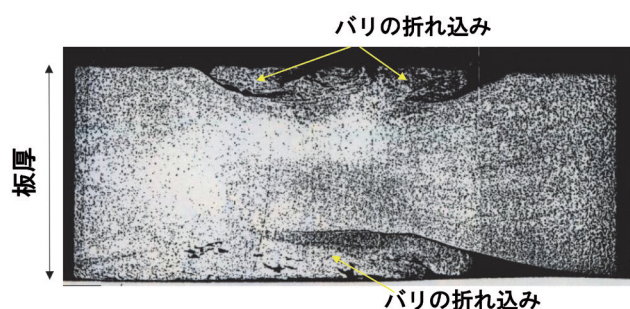


図9 接合後圧延した接合部の断面

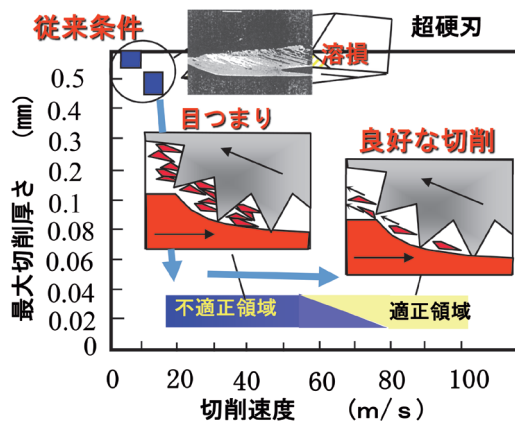


図10 切削条件の変遷

付けざるを得なくなった。それは、タービンの回転軸に切削の横荷重を負荷して振動を起こすようなおぞましい機械の開発を意味するものであった。可能性を見極めるための試し切削に砥石メーカーの実験機をお借りした。結果は極めて良好で、目詰まりや溶損のない切削ができた。初めての高速切削であったが、数日の実験で切削力の予測式まで導かれ定量化の目処までついた。切削の必要性が明らかになってから10ヶ月後のことである。以降、実機を想定して材質や温度毎の切削データを採用し実機化に向けて検討を進めた。

結局ここでも、バリを切削したくないという思いから、切削せざるを得なくなり、最後には最も手を付けたくなかった高速切削に踏み込んで解決した。何とも下手な開発と思う読者も多いかも知れないが、これが実態である。なお、おぞましい機械の実機化は、メーカーとの周到な検討で何とか乗り切ることができた。

2 エンドレス圧延設備の実用化

7.1 実機稼働

1995年5月、3ホットの本体が稼働した。エンドレス圧延の機能は、まだ試運転の途中であったが、何としても年内にという思いから同年12月28日に2本接合の圧延を強行した。F1スタンド出側で接合部の耳が大きくばたつき不安が走ったが、最初の通板で世界初の熱間エンドレス圧延に成功した。建設班長には、“通板しましたが首の皮一枚です”と報告した。全幅接合に万全を期したつもりだったので、幅端部が大きく破断したことは衝撃であった。それでも班長からは、“大きな一歩だ。良くやった”とねぎらいの言葉を頂いた。苦しい時期の印象に残る言葉である。その後、耳破断は接合部の圧延荷重低下による腹伸びが原因とわかり、接合部を耳伸びに設定した。以降、接合本数の増加と薄物化を進めた。1996年3月には1.2mmが、9月には10本接合や1.0mmの極薄鋼板も通板できるようになった。走間板厚変更を接合部で実施するという厳しい条件下であったが、エンドレス圧延において接合部の破断は一度も起きなかった。問題を先送りせず、接合幅の拡大やバリ取りを苦勞して進めた甲斐があった。もちろん、他社に先駆けて仕上全スタンド主機ACモーター⁶⁾および高速油圧圧下装置を導入したこと、併せて新しい張力・ルーパ協調制御技術⁷⁾を開発することにより高精度の張力制御を実現し、接合部の安定通板を達成した効果も非常に大きい。

一方、巻取には苦勞した。板厚0.9～1.0mm、速度が1000m/分の板先端の挙動は、従来の板厚1.2mmで速度800m/分の通板とは世界が違った。コイラーに巻付くまでに突っかけや先端折れが頻発した。巻取機への進入状況を高速度カメラで撮影し各種ロール位置や押力を最適化した。ローラーレベルやエプロンの隙間も見直した。ピンチロールでは、全く予期しなかったハイドロプレーン現象も起きた。当然であるが、巻取に失敗すると半成となり、コイラーや高速切断機等の全ての入側ガイドに芸術的とも言える規則正しいアコーディオンができた。もちろんエンドレスであるから、加熱前から粗圧延機には複数のスラブがあり、コイルボックスから巻取機までは板が一面を覆った。皆が呆然と立ちすくんだものである。皮肉なもので、ライン全体を3人のオペレー

ターで操業するという高度な省力化を実現したが、トラブルは昔よりも人を要する長時間作業となってしまった。

なお、トラブルの原因と対策は、操業・設備・制御の全員が集まって議論した。この際、事実を並べて議論することに徹した。技術者であっても、事実と又聞きした事、推定している事、自分のやりたい事を区別しないで発言することが多いので、これを徹底した。この方法は、原因追及を確実にするだけでなく、客観的なデーターを可能な限り採取しようとするなど皆の仕事に取り組む姿勢まで変えた。今でも当時のメンバーはこの検討会を成功体験と語っている。

7.2 極薄鋼板の圧延

エンドレス圧延に目処がついて以降、その特徴を生かした3ホット独自の製品開発が進められた。主要な目的の一つである極薄鋼板は1997年から本格的に生産が始まり、1999年には1万ton/月を生産した。このような大規模な極薄鋼板の生産は国内では初めてであった。図11に、0.9mm厚の板厚チャートを示す。一本目の途中で1.2mmから0.9mmに走間板厚変更し、その後は $\pm 30\mu\text{m}$ の高精度の板厚を実現している⁸⁾。また幅についても、1.2mm厚では1200mm幅が限界であったが、エンドレス圧延では1700mmの広幅まで圧延可能になった。

7.3 ガスシールド接合技術の開発

エンドレス圧延の対象材には、ハイテン材も含まれていた。しかしながら、材料にMnやSiなどの合金成分が入ると、接合性は今までの低炭素鋼とは全く様相が異なった。合金成分の酸化物が接合強度に悪影響を及ぼし、接合強度が得られないのである。そのため、原点に戻り接合特性を丸棒の接合要素実験で調べた。大気雰囲気や無酸化雰囲気など種々の条件で行った結果、加熱中の酸化を防げば合金鋼も接合の可能性が見いだされた。すぐに、不活性ガスによるシールド法の検討に入った。先後端部は狭い空間であるが密閉されていないので、加熱からアップセットの数秒間パー

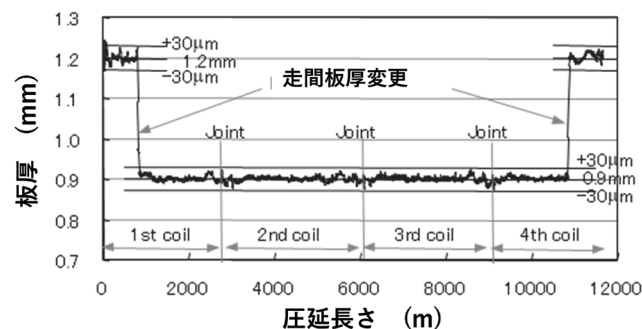


図11 エンドレス極薄鋼板圧延 (1.2→0.9→1.2mm4コイル圧延) の板厚チャート⁸⁾

し続けられる装置に改造した。そして1998年、無酸化雰囲気接合にこぎ着けた。しかしながら、ハイテン材の接合強度は不安定で、特に2011年頃には破断が多発するという状況に陥った。量産化には、もう一段上の技術開発が必要であった。

7.4 ハイテンエンドレスの実用化

ハイテン接合の確実性を高めるため、圧延・加工プロセス研は加熱過程における母材や酸化物の挙動を正確に調べた。種々の実験やシミュレーションを用いて温度条件やアップセット条件を粘り強く検討し、2013年溶融状態で接合をすれば母材の80%の伸びが得られることを突き止めた(図12参照)。その結果は、熱延部により実機実験に移された。そして、溶鋼が飛散する一手前で加熱を完了させるという難しい方法を開発し、ついに実用化された。筆者らの開発段階では、溶融接合は加熱時間制約や設備の損傷が懸念されて、最も手を付けたくない領域であったが、現世代の技術者が種々の工夫でこれを解決した。技術を継承しつつさらに発展させたことは、まさに称賛に値する。

一般に、熱延では仕上出側の冷却における板面上の水のりが、品質のばらつきを増大させる。ハイテン製造ではこの管理精度がより一層厳しいので、エンドレス圧延として仕上出側を平坦に維持できる特徴を生かした外乱の少ない冷却により品質を改善している。ハイテンエンドレス圧延の実用化は、まさに建設当初のコンセプトを実現させたものといえる。元々の開発から見ると、よくもねばりにねばって成功に繋がったものと改めて感じている。

8 おわりに

エンドレス圧延の技術開発について以下に総括する。

- (1) 千葉製鉄所存続の危機感を持ち続けた代々の経営層、実現必達の重圧の中で理屈立てと検証を繰り返してエンドレス圧延を完成させた技術者層、難しいハイテン接合を実現した現世代に至るまで、苦戦しながらも全員が各自の使命を果たした。
- (2) 接合法やバリ取法は多くの失敗の元に進められ、最終的には最も手を付けたくない技術領域に進むことで解決策を見出すことができた。奇しくも今回のハイテン接合も、元々の開発から見れば最も手を付けなかった領域の溶融接合で成功した。これは技術開発がたどる道のように感じる。
- (3) 失敗の連続でありながら完成にこぎ着けられた要因は、当社ならびに共研相手の担当者全員が前向きな問題解決型の人間であったことである。人も開発の重要な要素である。

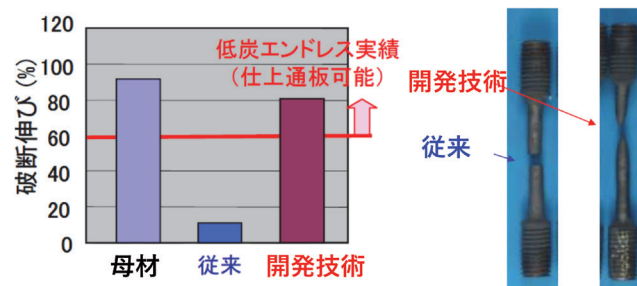


図12 ハイテン材接合後の引張試験(温度1000℃)

最後に、日本の鉄鋼業は現在非常に厳しい状況にあると言っても過言ではない。それは人件費の高さを技術や品質あるいは仕組みでカバーできていないことが主因と考えている。この流れを変えることは容易ではないが、基本は全ての分野で“生産性×良品率×稼働率”を最大化する開発や改善を続けることしか道はないであろう。その道筋毎に課題が出てくるはずで、解決策は決して手を付けたくないところにある可能性が高い。今回執筆させていただいたエンドレス圧延開発のレビューが、開発や改善に関わっている方々の新たな気付きや動機付け、望むらくは日本鉄鋼業の発展につながればと願うばかりである。

なお、今回の執筆にあたり千葉熱延部海野貴徳氏、圧延・加工プロセス研究部植野雅康氏にはハイテン接合に関し多くの情報を提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小川靖夫, 中村武尚, 北尾齊治: 川崎製鉄技報, 27 (1995) 3, 131.
- 2) 二階堂英幸, 磯山茂, 野村信彰, 林寛治, 森本和夫, 坂本秀夫: 川崎製鉄技報, 28 (1996) 4, 224.
- 3) 二階堂英幸: ふえらむ, 11 (2006) 1, 23.
- 4) 二階堂英幸: 平成11年度千葉県工業歴史資料調査報告書, 8 (1999), 1.
- 5) 戸澤康壽, 石川孝司, 岩田徳利: 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1181.
- 6) 潮海弘資, 加地孝行, 北浜正法: 川崎製鉄技報, 31 (1999) 3, 150.
- 7) 浅野一哉, 山本和宏, 市井康雄, 野村信彰: 計測自動制御学会論文集, 35 (1999) 1, 113.
- 8) 山田信夫, 北浜正法, 二階堂英幸: 川崎製鉄技報, 31 (1999) 3, 155.

(2021年8月12日受付)