

機が開発され、2~3 mmφ の鋼線に実用されている。これも前処理が簡略化できる。ロールによる加工には種々の利点があるが、工程簡略化の観点からも今後の発展が期待される。

さて、次に伸線加工そのものについて考える。ここでの課題の一つは、伸線性を高めてパス回数を減らしたり減面率を上げて中間熱処理を省略することである。当然素材技術に依存する面も強いが、伸線技術面では直接冷却伸線法がある。これはダイス出口に水冷管を設け、線材がダイスを出た直後水中で直接冷却される方法であり伸線における温度上昇の抑制に強い効果がある。特に高炭素鋼の伸線の場合、伸線時の動的時効が防止され、線材の延性が向上する。従つて製品の特性向上に有効なのは当然として、伸線性が向上するので減面率を高めることができ、細線製造の際中間熱処理を省略できる可能性がある。鋼線の最近の傾向として高強度化と細径化があり、これに対応する技術開発は今後とも重要である。

細線、極細線の分野における技術開発として、焼結ダイヤモンドダイスの普及がまずあげられる。数 μm のダイヤモンド粒子をサーメットで結合した構造で、天然単結晶ダイヤモンドに比べ開性がなく長寿命であり、かつより大型のダイスが作れることが特長である。このほか、回転溶湯紡糸法、ダイレス伸線法などまだ実用化されていないが、工程省略の可能性を秘めた新技術も開発されており、今後期待したい。

以上、本項では省エネルギー、省資源の観点から、特に工程の合理化に関連する話題を取り上げた。ここで紹介できなかった新技術も多いが、最近の伸線技術開発には例えば高速化といった量産志向のものは減つてきており省エネルギー的な性格がみられるようである。

4.4 溶接技術

最近の鋼構造物の高級化、使用性能の過酷な要求を反映し、年々溶接技術の重要性が増しているが、製鉄関連に限つてみても、圧延工程から下流部門の要素技術として注目を浴びており、最近の技術進歩に著しいものがある。鉄鋼分野に係わる溶接技術の問題は、その利用形態から次のごとくに分けられる。

- ① 鉄鋼製品の利用加工技術。(例えば、溶接性良好な鋼材と溶接継手の開発など。)
- ② 鉄鋼製品の生産技術。
- ③ 鋼材生産ラインの連続化、能率化、大単重化に伴う接合技術。
- ④ その他。

この内①に関しては本記念号別項で記述されているので、本項では主として②、③の鉄鋼製造プロセスの溶接

技術に焦点を当て、最近の進歩を述べる。

4.4.1 溶接技術の位置付け

上記の②は UO 造管あるいは電縫造管などの溶接が主だつたものであり、技術的には成熟度のかなり高い分野である。一方③の利用形態は薄板圧延、酸洗処理ラインなどの連続処理を目的にしたコイルビルトアップに代表される。これら鉄鋼プロセス内の溶接は一般のファブリケータ分野と異なり、接合部の形状が比較的単純なのが特徴であるが、前後工程の成形、圧延、酸洗処理などのライン速度に見合った高速性と同時に高品質な性能が要求される点では相当厳しい技術課題がある。②、③の溶接技術すべてを網羅し紹介するには紙面の制約もあるので、今回は最も代表的な UO 造管、電縫造管、およびコイルビルトアップの溶接技術に焦点を絞り展望する。

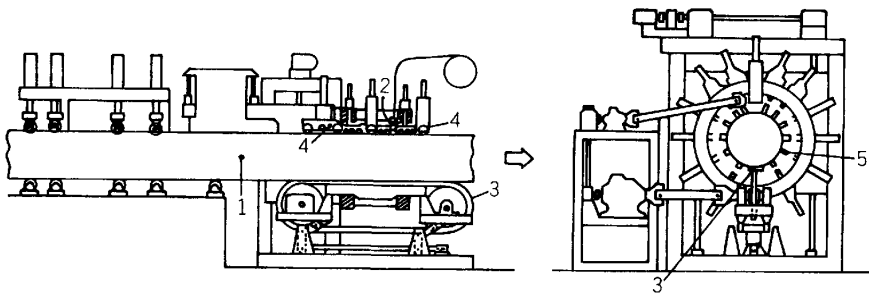
またその他として、鋼製品の二次加工的な溶接技術の利用形態もあり鉄鋼産業としてみればエンジニアリング事業など鉄鋼製品の付加価値を高める点で重要な技術ではあるが、利用される溶接技術が一般の鋼構造物加工分野と類似しているので、今回は省略することとした。

4.4.2 UO 造管溶接技術

天然ガス、原油のパイプライン布設事業の大規模化、極地化を反映して、UO 鋼管の製造技術はこの 10 年間で目覚ましい進歩を遂げているが、その内にあつて、溶接技術は素材開発、成形技術などとともに品質向上、生産性向上に大きな役割を果たしてきた。特にその中心となる SAW 技術は高速高能率化と同時に、溶接部の靱性向上と溶接欠陥低減による継手部の品質安定化に関する技術が定着した点で大きく評価されている。また従来はとかく経験則が支配していた溶接操業技術をより科学的に制御することが原則とされるようになり、現象的に裏付けられた技術開発が芽生えたのもこの 10 年間の大きな収穫であつた。

(1) 仮付溶接技術

従来は一般構造物と同様に被覆アーク溶接あるいは半自動 CO₂ アーク溶接で断続的な仮付溶接が採用されていたため能率および仮付け部の品質に問題があつた。そこで、本溶接の品質を損なわない自動化高速溶接法として CO₂ や CO₂+Ar によるガスシールド・メタルアーク溶接法(GMAW)が開発された。一部にはマルチヘッド方式を採用しているところもあるが、近年設置された UO ミルでは単ヘッド方式で 4~5 m/min の連続仮付溶接が主要技術となつている。このような高速条件下でビード不整、スパッタなどを防ぎながらアーク長の短い埋もれアーク条件を安定に維持させるため、アーク電圧



1. 管 2. 溶接ヘッド 3. 摩擦コンベア (チェーン・コンベア) 4. ピンチローラ 5. ケーブルローラ
 図 4.4.1 UO 造管連続仮付溶接機の構成図
 (杉村ら：製鉄研究 (1981) 307, p. 4)

の変動を $\pm 1V$ 以内に制御できる溶接装置や大粒スパッタが発生しにくい低 Si-低 Mn 系溶接ワイヤなどが開発された。この連続仮付溶接方式の採用によつて、本溶接時の溶落ち、スラグ巻き込み、管端割れなどの溶接欠陥発生が大幅に減少できるようになった。図 4.4.1 は CO_2 アーク溶接を搭載した連続仮付け機の一例を示す。

(2) 多電極 SAW 溶接技術

UO プロセスでは本溶接工程の生産性を向上するためほとんどの工場が多電極の高速 SAW 法を採用しているが、溶接欠陥の発生を抑えつつさらに高速化を図るのは容易ではないため、アンダーカットなどのビード形成不良の発生に関する溶接現象の解明と対応技術に関する研究が続けられ今日に至っている。フラックスで覆われた内部の溶接現象を X 線透視によつて直接観察する手法が一般化し、ビード形成と溶融プール挙動の相関が精力的に追求されており、このような基本的知見に基づいて高速化に有効な方法が開発されつつある。アーク力の分散と各電極の機能分担化を基本にした多電極化は溶融プールの安定制御に対し最も実用的な手段で、かつての 2~3 電極 SAW から現在では 4 電極 SAW 法が実用段階にある。また、このような大電流アークの多電極化に伴つて問題となる電磁力によるアークの偏向を数値計算によつて推定し、AC 4 電極法における溶接電源の最適

な位相組み合わせを決定する手法も確立されている。図 4.4.2 は 4 電極 SAW 法における各極の溶接機能を示したものであるが、図 4.4.3 のごとく多電極化による溶接速度の向上効果は着実なものとなっている。

このような SAW 法ではフラックスの性能も重要で、寒冷地向高靱性ラインパイプの造管には低酸素系溶融形フラックスの適用が定着し、溶接金属の清浄性向上によつて高靱化が図られている。しかしながら、低温で高靱性溶接金属を得るためには酸素量の低減と同時にマイクロ組織の均一微細化も必要で、最近では Ti, B 添加によるアッシュケラーフェライト組織の生成効果が利用されている。この効果は B (ボロン) による γ 粒界のフェライト抑制作用と Ti 系微細酸化物分散による γ 粒内微細フェライトの核生成作用によるものと考えられている。そして微量 Ti, B の適量を溶接金属に添加させる溶接材料としては、ワイヤ組成による方法よりもより、フラックス中の TiO_2, B_2O_3 の還元によつて安定添加させる高靱性フラックスも開発されている。

(3) MIG+SAW 溶接技術

上記の SAW 法は両面一層盛り溶接であるため、厚肉管では大入熱条件となり、熱影響部を含めた溶接部の低温靱性が損なわれる。この問題に対して入熱分散が容易な多電極 MIG 法あるいは MIG+SAW 法など新しい溶接プロセスが最近開発されている。MIG+SAW 法の

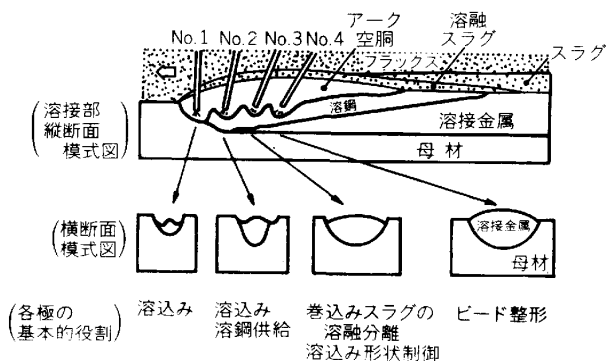


図 4.4.2 4 電極 SAW における各極の溶接機能概念図

(例えば杉村ら：製鉄研究 (1981) 307, p. 8; 日本鉄鋼協会共同研究会：第 36 回鋼管部会資料 (1981 年 6 月) 川崎製鉄(株) (私信))

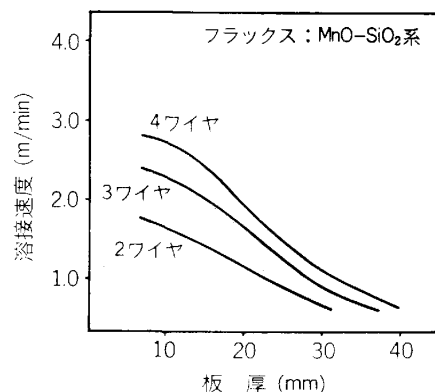
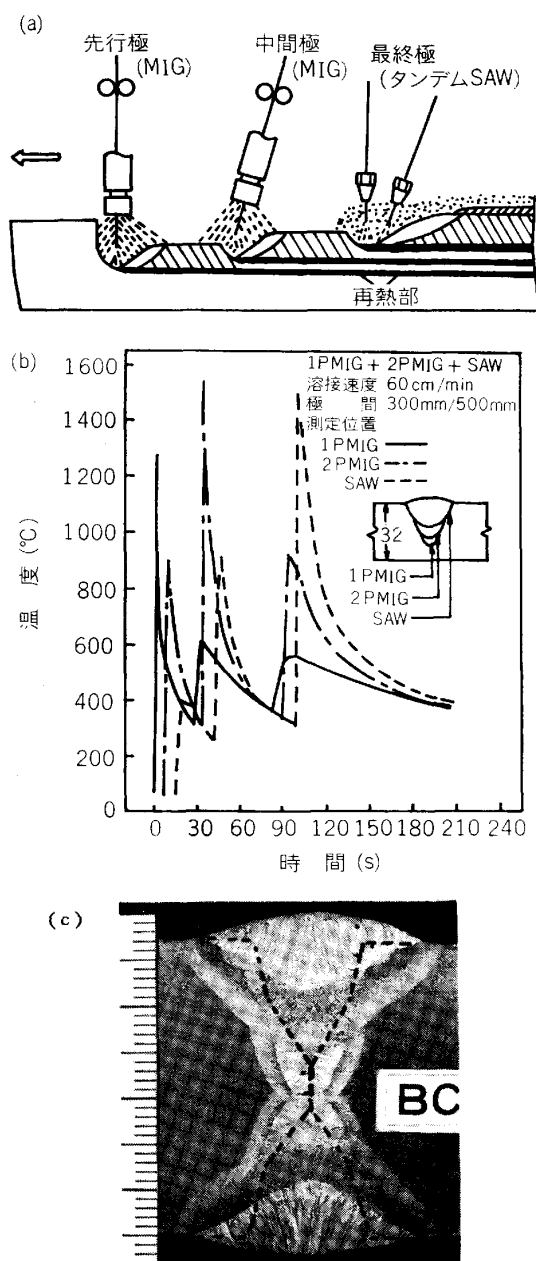


図 4.4.3 多電極 SAW 法の電極数と溶接速度の関係

(例えば安藤ら：鉄と鋼, 68 (1982), S1234)



(a) 概念図, (b) 溶接部熱サイクル, (c) 断面マクロ
 図 4.4.4 MIG+SAW 溶接プロセス
 (例えば斎藤ら: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 83-A67)

原理は図 4.4.4 に示すごとく溶接熱源の分散によつて、単位電極当たりの入熱量は $20\sim 30 \text{ K}\cdot\text{J}/\text{cm}$ の小入熱とし溶接部の熱サイクルを制御するのが特徴で、溶接部の結晶粒相大化が抑えられる。この熱源分散溶接法は特に低温靱性の要求が厳しい厚肉鋼管に対して注目されており、すでに API にも造管溶接法として正式に承認されている。

現状の MIG 溶接法としては、大電流化、高電流密度化あるいは AC の各種高能率溶接法が開発されているが、MIG 溶接特有の融合不良欠陥防止のため速度レベルは $50\sim 60 \text{ cm}/\text{min}$ 程度で、従来の多電極 SAW に比べてかなり低速度であるという欠点がある。したがつ

て、この溶接プロセスが UO 造管溶接法として一般化するに至るには高速化技術の開発が望まれる。

以上述べたごとく、UO 造管溶接技術に関する従来の技術開発は少品種多量生産を高品質に行うことが重点目標とされてきたが、最近はその傾向が徐々に変化しつつある。すなわち、従来の品種に加えて耐食性、耐高温特性などの優れた特殊高級管の開発も要請されており、多品種少量生産にも対応できる新しい造管溶接技術の開発にも関心がもたれつつある。またこれと並行して今後特に重視されているのが溶接の自動制御化であるが、アーク溶接の場合溶接部品質支配要因が複雑かつ多岐にわたるため、現在ではまだその現象解析を主体にした基礎研究の段階であり、溶接機構が比較的単純な抵抗溶接に比べると自動制御化は相当遅れている。なお、レーザー、電子ビームといった高エネルギー密度の熱源利用についても注目されているが、現段階では実用性について展望がえられるまでに至っていない。

4.4.3 電縫造管溶接技術

電縫管の高品質化要請に伴つて、信頼性の高い電縫溶接技術を開発するため溶接機構までさかのぼった基本研究が精力的に行われた。これらはアプローチに若干の違いはあるが、①溶接入熱量をパラメータにした溶接現象の区分と②溶接点温度、スクイズ量による溶接現象の区分に関するものに集約され、衝合部加熱状況の定量化には飛躍的な進歩がみられる。このような現象解析に基づいて溶接品質との相関が解明され、溶接部品質向上の対応技術が開発されてきた。

(1) 溶接現象の監視技術

電縫溶接プロセスは図 4.4.5 に示すとおり、エッジの溶接点と V 収束点の位置関係から 3 種類の態様に分類されることが高速カメラの解析によつて明らかにされた。ペネトレータや冷接の溶接欠陥発生を抑えるには第 2 種の溶接現象が最適で、V 収束点から比較的短い狭間隙 (l) が形成されるところに溶接点がある場合に相当する。この V 収束点の両エッジが絶えず分離接触を繰り返し溶接点の周期的移動となるのは、通回路の変化によるインピーダンスと電流変化が原因である。この溶接現象の型を決める主要因子は入熱、速度、V 収束角で、他の条件が与えられれば入熱のみで溶接現象は決まることが明らかにされた。さらに 3 種の溶接現象のインピーダンス変動の違いを検出し、溶接現象の監視法に応用することにも成功しているが、この溶接現象監視装置は負荷インピーダンス測定と等価である周波数測定によつている。すなわち、溶接点 (l) の変動幅 (Δl) と発振周期変動幅 ($\Delta(1/f)$) とは非常によい相関があり、マイクロコンピュ

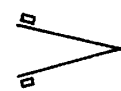
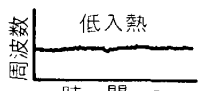

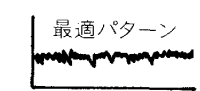
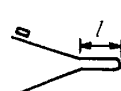

溶接現象	周波数計測	溶接品質の変化
第一種  V 収束点 = 溶接点 高入熱	 低入熱 時間 →	冷接欠陥の発生
第二種  V 収束点 = 溶接点 (l 小)	 最適パターン	適正条件範囲
第三種  V 収束点 = 溶接点 (l 大)	 高入熱	ペネトレータの発生

図 4.4.5 電縫溶接現象の 3 タイプ (芳賀ら：鉄と鋼, 69 (1983), p. 83)

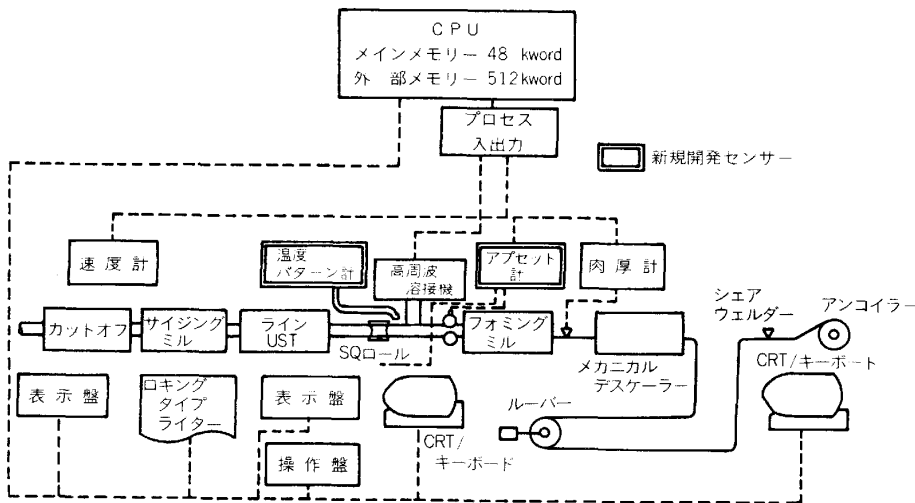


図 4.4.6 加熱温度一定制御方式による電縫溶接自動溶接システム構成 (京極ら：住友金属技報, 35 (1983), p. 196)

ータを利用して $d(1/f)$ を連続的に計測する技術が実用化されている。

(2) 溶接自動制御技術

電縫鋼管はその溶接機構上溶接部品質を支配する操業因子として①溶接入熱, ②アプセット量, ③突き合わせ形状があり, 溶接欠陥の発生はこれらの要因が不適正な場合に生じる。突き合わせ形状は成形段階で決定されるので, 溶接時にコントロールされるのは①, ②の条件でこれを適正值に制御し良品質の溶接部を得る自動制御技術が開発されている。この方法はあらかじめ鋼種, サイズなどによる適正加熱温度とアプセット量を求めておき, それを基準にして肉厚, 速度変動を補償しながら溶接温度一定の入熱制御と連続アプセット量監視装置技術をシステム化したもので, 低合金鋼などの最適溶接条件範囲の狭い高級鋼管の安定した造管溶接に成功している。図 4.4.6 はその自動溶接システム構成を示す。

また既述の $d(1/f)$ の計測をもとにした入熱フィードバック制御方式の自動入熱制御システムも開発されている。さらにその他の方式も含めて電縫鋼管の溶接部品質

向上を目的とした自動制御技術はすでに一般化しつつある。

4.4.4 コイルビルトアップ溶接技術

ストリップ圧延工程では酸洗, 焼鈍, 冷延などを連続に行うため, コイル同士, リーダとコイルの接合は溶接時間が短いほど時間当たりの平均生産性は高まり, さらにストリップため込み装置の設備投資も少なくなる。また最近では自動車用鋼材の高強度化に代表されるように鋼材材質の多様化が進みつつあり, 溶接部の品質面でも能力の高い溶接装置が要求されている。

(1) フラッシュバット溶接技術

最近では装置本体のコンパクト化が一段と進みシャーやビードトリマーを溶接機内に内蔵したものが開発され, 溶接前後の時間が大幅に短縮されるに至っている。またフラッシュ送りが案内カム方式からマイクロコンピュータ制御による電気油圧サーボ方式へと進歩し, 最適なフラッシュを連続的に発生させる溶接機が開発されている。図 4.4.7 はこのような溶接装置例の外観図を示す。

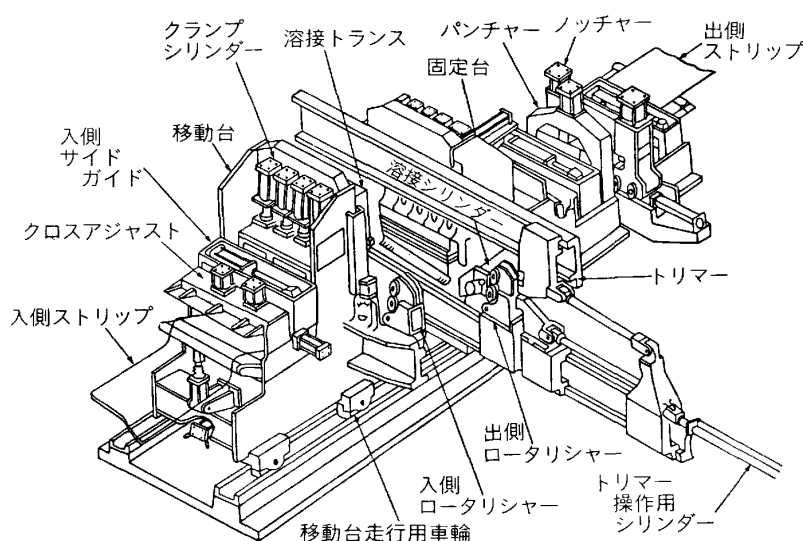
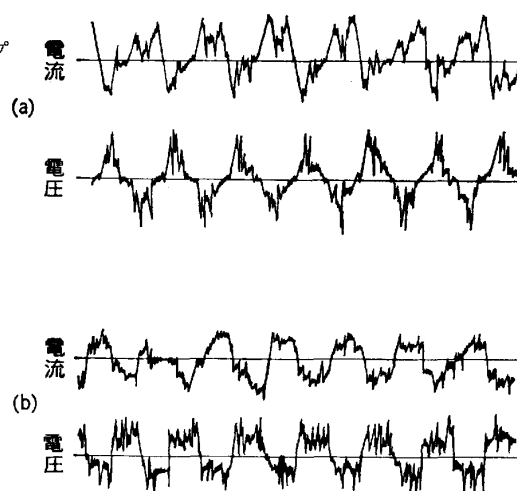


図 4.4.7 新型フラッシュバット溶接機の構成図
(藤原ら：製鉄研究 (1981) 307, p. 25)



(a) 正弦波電源, (b) 矩形波電源
図 4.4.8 ストリップ用フラッシュバット溶接機電源特性の比較
(藤原ら：製鉄研究 (1981) 307, p. 29)

同時に電源も新しい短形波電源が適用され、接合部品質向上に寄与している。これは従来の正弦波に比べて常に所定の電圧が印加されるためフラッシュ発生頻度が高く溶接入力ゼロクロス前後の過渡期間が短縮され短絡面積が小さくなり、フラッシュ過程での酸化物減少に効果を発揮したものと考えられている。図 4.4.8 はその比較結果を示す。

(2) レーザ溶接技術

一方、高炭素鋼、高級珪素鋼板およびステンレス鋼板などは溶接部の結晶粒粗大化や脆化が起こりやすいので、このような影響のない溶接法としてレーザー溶接に注目が集まり、一部では実用化されるまでに至っている。レーザー溶接の特徴は①溶接入熱が小さく、②余盛りのほとんどない溶接ビードがえられるという点にあり、珪素鋼の溶接、製品コイルのビルトアップに対して有効である。溶接のサイクルタイムでいえば、フラッシュバット溶接にやや劣るが、アーク溶接よりははるかに短く条件によつては利用価値の大きいことが確認されている。とくに珪素鋼製品コイルの長尺化に対しては継手部の品質特性が大幅に向上可能である。

また、高価なレーザー溶接機的能力を最大限に発揮させるため、レーザーエネルギーの有効利用も積極的に検討されている。例えば、レーザーエネルギーの吸収率を向上させるためプラズマの有効利用技術などが開発されている。さらに高級鋼板の接合部品質にはフィラワイヤ供給方式が有効で高精度な添加技術も開発されている。

4.4.5 今後の方向

鉄鋼製造プロセスの溶接技術は圧延工程から下流部門の接合技術として年々重要度が高まっている。今後は現

状溶接法の複雑な溶接現象がさらに明確にされながら、自動化、計装化はよりいつそう進展していくものとみられる。また高速化高生産化は現状溶接熱源による極限技術の追求が期待されているが、画期的な向上は望みえない。したがって、高級薄鋼板などに一部実用化されつつあるレーザー溶接あるいは電子ビーム溶接のような高密度エネルギー源の利用に注目が寄せられる。今後、これらの最新溶接法の応用研究によりいつそう拍車がかかるではあろうが、アーク溶接などに比べてエンジニアリング上解決を要す課題が多く、実用化の展望をえるためには被接合部の精度向上技術、高出力装置の低価格化さらにはメンテナンス面で一段の進歩が要望される。

4.5 熱処理技術

4.5.1 加熱技術

(1) 加熱炉・熱処理炉省エネルギー技術

炉の省エネルギーの基本的考え方は、最適加熱操業、排ガス損失熱の低減、炉体損失熱の低減、排熱回収等である。

(a) 最適加熱操業

連続加熱炉での鋼片加熱は、オイルショック以降の操業度の低下に伴い、低炉床負荷操業となり、炉尻排ガス温度が低くて熱効率の良いヒートパターンが実現できるようになった。その結果、炉尻排ガス温度が 800°C から 600°C に低下することによつて、約 13% の燃料原単位が低減できた。この炉床負荷を低くして熱効率を上げるヒートパターンを採用する考え方は、新設加熱炉の設計にも反映され、適正炉長が選択されるようになった。