

さらに、滴下帯でのスラグ-メタル反応による Si 還元の可能性が提案 (討 2) されたが、これに対しては滴下時のスラグとメタルの接触面積の推定精度がポイントであるとのコメントが出された。滴下帯コークス充填層での温度分布や液滴の径や滞留時間などの液滴の挙動はスラグ、メタル反応のみならず、スラグからの SiO 発生とメタル滴中炭素による SiO 還元の見点からも重要であり、今後さらに検討を加えるべき課題である。

2) 高炉内での銑鉄中 Si 濃度の決定要因 (低 Si 銑を得るための操業上の方法論)

今回行われたすべての討論および質問、コメントに含まれていた内容を銑鉄中 Si 濃度の決定因子に沿つてまとめると、

- (イ) 溶銑温度
- (ロ) スラグ中 SiO₂ 活量 (スラグ塩基度)
- (ハ) コークス中灰分含有量
- (ニ) 羽口前温度
- (ホ) CO 分圧
- (ヘ) 装入鉱石の高温性状
- (ト) 滴下帯高さ

が挙げられる。また、討論内容から抽出された銑鉄中 Si 濃度を低下させる操業法は以下のとおりである。

(イ) 滴下帯高さの低下 (送風温度上昇を前提とした熱流比 (あるいは ore/coke) の増加、焼結鉱配合比増加によるガス利用率上昇と装入鉱石の滴下温度の上昇、焼結鉱還元性向上によるガス利用率上昇、処理鉱中 MgO 上昇による滴下温度の上昇、などが具体策)

(ロ) 反応温度低下による SiO 発生量と銑鉄による Si 吸収量の低下 (溶銑温度低下、羽口前理論燃焼温度の低下、などが具体策)

(ハ) SiO 発生量の低下 (コークス中灰分の低減、処理鉱中 MgO 増加によるスラグとコークスのぬれ面積低減、炉頂圧上昇による CO 分圧増加、スラグ塩基度上昇、などが具体策)

以上のような銑鉄中 Si を低下させるための操業上の手段についてはほぼ共通の認識が得られている。

3) 低 Si 操業に伴つて不可避免的に生ずる向流状態異常への対処方法

銑鉄中 Si を低下させる操業法の中で、滴下帯の高さを低下させる方法は通常 ore/coke を増加させることにつながるが、ore/coke の増加に伴つて融着帯が羽口水準に近づく。このような場合、装入物降下状態の異常は冷え込みなどの大事故につながる可能性があり、特にスリップの発生に対しては注意が払われる。この点で言えば異常事態の発生する操業では低 Si 化が困難であり、安定操業 (σ_{Si} の極小化) が低 Si 操業の目標でもあり、かつ帰結でもあることが明白に提示されている (討 3, 4)。すなわち、向流状態異常防止は操業者の重要課題である。討論に現れた安定な向流状態確保の方法論

としては以下の項目があげられるが、炉下部での装入物の運動状態の解明は今後の重要課題になると考えられる。

(イ) 焼結鉱粒度別装入技術、装入物分布制御による炉熱変動の抑制および炉壁への熱負荷制御による付着物生成の防止 (そのための監視体制の強化)

(ロ) 装入物品質の向上、送風湿分上昇、炉頂圧上昇などによる通気変動の防止

以上、討論会の発表および討論の要点を概括した。今回の討論会は、樋口製鉄部会長の総括にも指摘された如く、高炉内の化学反応や物理現象に対してかなり明快なイメージをもつてモデル化と解析が行われ、それらが実操業に反映されているという点で従来以上に高炉の科学の進歩とそれによる技術の向上を印象づけるものであつたといえよう。今後も低 Si 操業技術の確立に努力すると同時に、さらに将来の鉄源事情によつては高低 Si の吹き分けなどの高度の制御技術への要求にも応じ得る理論と技術の一層の発展を期待したい。

II. 連鑄鑄片の品質と鋼の高温における力学的特性

座 長 東京工業大学総合理工学研究科

森 勉

近年、連鑄操業は、直送圧延やホットチャージ圧延の採用とあいまつて、生産性をさらに大きくする可能性を有している。このような実操業の面から言えば、いかにして無欠陥鑄片を製造するかが課題となる。我が国の鉄鋼技術者は、この課題に取り組み、欠陥の少ない鑄片を作る技術をかなり向上させて来ており、誇り得る実績を上げている。一方、この技術をバックアップする基礎研究にも力が注がれており、高温、融点直下の脆化、高温での機械的性質の解明、変形挙動の解析の研究も行われている。本討論会はこのような現状を背景に企画されたものである。すなわち、高温での脆化原因解明の基礎研究、割れ発生の直接観察、鑄片パルジング解析、実操業における欠陥 (割れ) の発生原因とその除去対策に関する研究発表と、それらに対する討論である。本討論会によつて、連鑄技術の現状や今まで行われて来た基礎研究が把握され、技術がさらに向上することを期待している。討論会は研究発表数も多く、討論も時間の足りないくらいであり、目的はかなり達成されたものと考えている。以下に討論会の概要を記す。

討 6 鋼の高温変形特性と鑄片割れ感受性

新日本製鉄 (株) 大分製鉄所 鈴木洋夫 他

鈴木は、高温での脆性破壊は、粒界に沿つて起こることを指摘した後、まず、高温での粒界脆性破壊機構に関する理論的研究を紹介した。次いで、高温での脆化領域を 3 つに分けて、それぞれの特徴を述べた。領域 I は融点直下の液膜の関与する脆化、領域 II は安定 γ 域で粒界

に脆化原因となる元素が偏析または析出するために生じる脆化。領域Ⅲは γ - α 共存域で、粒界上のフィルム状フェライトや析出物による脆化である。そして不純物除去や、冷却条件を制御して脆化域での鑄片の変形をさけることによつて脆化を防止できることを述べた。これに対し、脆化域を実験室的に決めた際の歪み速度と実作業時における歪み速度の相違等についての質問があり、またコメントも多くなされた。

討7 鉄鋼の溶接凝固および凝固割れ現象の直接観察

久留米工業高等専門学校 本田義興 他

アーク溶接中に引張試験を行い、割れの発生と伝播を顕微鏡下で観察した研究である。割れ発生域の温度と歪み、割れ伝播の停止する温度と歪みが、0.08~0.5% C及びP, Sが添加された鋼について明らかにされた。P, SはCの多い鋼では脆化温度域を広くすること、連鑄作業時に割れが発生しやすいとされている包晶組成に近い鋼では、割れ発生はかなり低温で生じる特性を持つこと等が報告された。これに対し、割れ発生位置の組成や割れ伝播経路に関する質問があり、また本田等のデータをプロットし直して、脆化温度域、割れ発生温度を、液相称、固相称と比較した討論がなされた。

討8 連鑄鑄片バルジングの数学的解析法

新日本製鉄(株)基礎研究所 松宮 徹 他

梁の曲げ・剪断理論を応用し、鑄片の移動を考慮した動的バルジング解析の研究である。弾性変形、瞬時的塑性変形、クリープ変形が変形特性として取り入れられており、最大バルジングはロール間中央より引き抜き下流側に生じること、負のバルジングの起きること、剪断変形の効果はロール間距離が小さくなる程大きくなることなどが報告された。これに対し、境界条件の妥当性、変形特性の計算への取り入れ方の問題、バルジング実測と計算結果の比較の問題について詳しい討論が行われた。

討9 連鑄鑄片内部割れの発生原因と防止対策

住友金属工業(株)中央技術研究所 中村正宣 他

まず凝固途中の鑄片を曲げるといふ、未凝固曲げ試験法を開発し、割れ発生の限界歪みを求めた。次いで、連鑄作業時に、固液界面に生じる歪みを矯正、バルジング、ピンチロール圧下、ロール不整、熱応力、鑄片引き抜きによる歪みとして個々の解析を行い、その大きさの評価、実験式を作つた。この結果、バルジング歪み、矯正歪み、ピンチロール圧下歪みが大きく、これらを実作業条件下で詳しく検討した。これらの計算と、限界歪みの大きさを考慮して、ロール間隔や、曲げ曲率の最適化を行う方法が示された。これに対し、割れ発生限界歪みと凝固殻厚さの関係、バルジング歪みと矯正歪みの大きさの大小等について質問、討論がなされた。

討10 連鑄スラブの縦割れの形成におよぼす鑄型内緩冷却の影響

川崎製鉄(株)技術研究所 木下勝雄 他

0.12% C程度の鋼の連鑄時に多発する傾向にある、鑄型内で発生すると考えられる縦割れの発生機構、防止対策を検討した研究である。すなわち、縦割れ発生位置、形態、偏析との関係を調べ、キャストピンチャー試験で同一機構によつて生じる割れを再現し、緩冷却により割れの発生頻度を小さくできることを明らかにした。これららの研究をもとに、鑄型内冷却水配列を変化させて抜熱特性を変え、緩冷却により縦割れの発生が抑えられることを示した。これに対し、縦割れ発生の時期、キャストピンチャー試験の有効性、0.12% C程度の鋼が割れやすい理由、緩冷却の効果について詳細な質問と討論が行われた。

討11 鑄型内凝固の不均一性に起因する鑄片表面疵の実体とその防止策

日本鋼管(株)福山製鉄所 鈴木幹雄 他

この研究では、特に縦割れについて、発生状況、形態、冶金的特徴、C量の影響、操業条件の影響、抜熱特性の影響、パウダー特性の影響が詳しく検討された。そして凝固おくれ部に応力(変形)が集中して凝固界面に割れが生じることが縦割れの発生原因であること、割れの進行程度に応じて異つた形態、特性をもつようになることが明らかにされた。また短片横割れの発生原因は、縦割れと同一であることも示された。以上の知見に基づきとられた防止対策についても報告された。これに対し、パウダー特性の影響、それと割れの形態、特徴との関係、多段テーバーのつけ方の間割について、詳しい討論が行われた。

討12 連鑄スラブにおける表面割れ疵の改善

新日本製鉄(株)君津製鉄所 萩林成章 他

含Nb鋼に生じやすい表層部の微細な横割れに関する研究である。まず、割れの観察結果及び鑄片表面の温度履歴の測定により、この割れは鈴木分類による領域Ⅲの脆化に原因することを明らかにした。次いでグリーンブル試験により、最冷却温度(T_2)と引張試験温度(T_1)を変えて、脆化域を T_1 - T_2 マップで決め、これに対する保定時間の影響も調べ、脆化の起り易い冷却条件の存在することを明らかにした。次いで小型連鑄機により、上記マップの有効性を明らかにし、実作業にこれを応用して冷却条件、曲げ温度を制御して、割れ発生指数を下げることであったことが報告された。これに対し、割れ発生時の組織、割れ発生に対するC量の影響、 γ 粒界偏析の影響、保安時間の効果、冷却時温度履歴の微細構造の影響、発表者とは異なつた方法による割れ防止対策の可能性について討論が行われた。

討13 ブルーム連鑄鑄片の表層割れ

(株)神戸製鋼所中央研究所 安中弘行 他

まず表層下割れを、割れ部の組織、鑄片の温度履歴、熱応力解析から検討し、この割れは、熱応力により α 粒界上に析出物や初析フェライトが生じて起きる粒界割れ

によることを明らかにした。次いで縦割れの発生原因が Si-Mn 鋼で検証され、不均一凝固、急速冷却による熱応力によることも示され、電極攪拌や緩冷却による防止等の有効性が報告された。矯正歪みで発生しやすい横割れは、小型鋳塊曲げ試験で再現し得ることを示し、脆化温度域と、割れ限界歪みの決定をもとに、矯正温度が脆化域とならないように操業条件が決められることも述べた。これに対し、熱応力解析と実際の割れ発生状況との関連、C量と表層下割れとの関係、不均一凝固に関連する問題、冷却条件の影響について詳しい質問と討論が行われた。

III. 継目無鋼管の製造技術の動向

座 長 住友金属工業(株)鋼管製造所

高 井 岩 男

従来より圧延の塑性解析は、フラットローリングについては詳細に行われてきたが、管の圧延のごときカリバローリングについてはやや遅れた感があった。しかしここ数年は後者に対しても積極的アプローチが行われモデルミルの設置、実機における技術改善等顕著な進歩がみられている。当然ながら、これらの高度な理論解析を支えているのは、エレクトロニクスの発達であり、センサーの進歩である。

一方鋼管需要は、2回のオイルショック以降、世界的な石油掘削ブームに伴い、油井管を中心に飛躍的に伸びてきた。現在は一時停滞してはいるものの、エネルギー関連需要の多い鋼管は、波こそあれ今後も着実に伸びることが予想される。従って、鋼管製造技術もより高度な開発が要求され続けるのは当然のことと言える。

今回の討論会では、汎用性のあるプラグミル製管法に関して、工具も含めた圧延技術の解析への CAD/CAM の導入 (討 14)、および全ラインの自動システム (討 17) の紹介がなされた。また、従来は比較的小径管を高効率、高品質、高歩留りで製造する設備として導入されたマンドレルミルも、マンドレルバーの速度を積極的に制御することにより適用寸法範囲がますます拡大され、継目無鋼管製造設備の主力になりつつあり、これらの解析 (討 15) と制御 (討 16) が紹介された。

討14 継目無鋼管用ロール・工具のための対話型計算機援助設計加工システム

新日本製鉄(株)八幡製鉄所 田中 俊雄

継目無鋼管製造の死命を制するとまで言われる圧延用ロール、プラグ、ガイドシューの設計には従来から多くの労力が費やされてきたが、図形処理機能を有する対話型コンピュータシステムを導入することにより、正確かつ効率的な設計が行われるようになったことが報告された。これによると、圧延ロールやプラグミルプラグ、リラープラグの設計は計算プログラムと図形処理ソフト

を用いて行われ、従来精度の低い近似解法を用いざるをえなかつた傾斜ロール圧延の Geometrical Pass Design も高精度で行われる。このシステムにおける工具設計の特徴は、対話型の CAD/CAM スタイルを用いることにより、圧延諸データの算出、CRT 上での形状変更を経て、自動製図機による出図や自動加工用データの出力がほぼリアルタイムに行える点にある。さらに本システムには三次元座標測定機が直結されており、圧延後のパイプやロール、工具類の自動形状測定が可能である。これらに図形処理ソフトを組み合わせることにより、使用工具の圧延状態の再現や圧延解析、設計モデルへのフィードバックも可能である。

以上の発表に対し、本システムへの投資便益について質問があり、これには工具の最適設計に関する省力化以外に、八幡新鋭工場の立ち上がり時の問題解決を早めたこと等多大の効果を発揮した点で評価されたと回答がなされた。さらに、傾斜ロール圧延では同一外径でもパイプの肉厚によつて変形状態が異なるので、そのことへの応用について質問がなされたが、これに対しては、圧延材および使用後の工具を三次元座標測定機で形状解析することによりパイプの変形に応じた工具形状を求め、設計に反映しているとの回答があった。

討15 マンドレル圧延の塑性理論解析

日本鋼管(株)技術研究所 平川 智之

変形状態の解析、特にロールともバーとも接触しない自由変形部の解析を重要視した系統的なマンドレル圧延の理論解析が紹介された。これは、Levy-Mises の塑性流れ、Mises の降伏条件、クーロン摩擦あるいは付着摩擦の仮定のもとに、釣合方程式、ひずみ-変位増分式を差分化し、圧延荷重、トルク、先進率ばかりでなく、圧延方向・周方向の面圧分布、中立線分布、塑性変形量等を求めるために、三次元異周速解析モデルを作成して解析を行ったものである。計算の途中では、パイプがバーとロールの両方に接触する圧延部、ロールのみに接触する外圧部、ロールともバーとも接触しないフランジ部 (自由変形部) の3領域を考え、各領域で解析方法を変えている。

これに対して、素管が真円でないため計算プロセス中メッシュによつて各領域の境界が変わることが考えられるので、その場合の対応方法について質問があったが、各領域の境界は計算の初期で行われるロールギャップ解析によりあらかじめ判断されるので問題ない、との回答があった。また、この解析におけるメッシュの大きさの影響、出側形状の計算値の妥当性、計算所要時間について質問があり、メッシュの大きさの影響は非常に小さいこと、出側形状の計算値は実測値に極めて近いこと、計算所要時間は IBM 370/158 3 型 AP 4 MB を用いて 40s 以内であることが示された。さらに、応力の円周方向分布について活発な討論がなされたが、軸方向圧縮力が最