

焼結鉍製造における鉍石、焼結鉍等の評価技術

座長 新日本製鉄㈱プロセス技術研究所
肥田行博

製鉄部門における最重要課題は溶銑の安定供給とコスト低減である。さらに近年、問題意識が高まってきたCO₂対策を加味すると、将来の高炉では200kg/tの微粉炭と100kg/t程度の予備還元粉鉍石の羽口吹込みが想定される。

一方この高度な高炉操業が達成できるかは、主要原料である焼結鉍の品質・コストによるところが多い。焼結鉍製造部門においては、鉄鉍石資源の質の変化（高結晶水化）とNO_xなどの環境対策強化という悪化傾向の状況下で技術開発でいかに応えていくかが鍵となる。

このような状況から、技術開発には不可欠な「評価技術」が討論テーマとして取り上げられた。

今回の討論会では基調講演1件、企業5件、大学2件と、計8件の発表が行われ、全講演が終了後、共通テーマを抽出して約1時間かけて深く討論された。最後に東北大学大森教授が講評を述べて締めくくられた。

以下に講演要旨と討論の概要を述べる。

討1（基調講演）焼結鉍製造におけるプロセス及び成品評価の課題

（東北大学素材工学研究所 葛西栄輝ほか）

焼結プロセスの特徴、直近10年間の技術進歩及び評価技術における課題について明解にまとめられた。「材料とプロセス」記事は参考になり、一読の価値がある。

討2 焼結原料、焼結鉍構造評価技術の現状と今後の課題

（新日本製鉄㈱プロセス技術研究所 稲角忠弘ほか）

資源動向からみた鉄鉍石の各種特性の評価法と評価結果からの新焼結プロセス開発例及びX線-CTによる焼結構造評価と新装入装置開発への応用例が報告された。

討3 焼結鉍製造における鉄鉍石銘柄構造評価活用の現状と今後の課題

（住友金属工業㈱鉄鋼技術研究所 川口尊三ほか）

操業に重要な鉍石評価指数（吸水性指数、溶融性指数）と焼結操業への適用例および総合モデルによる操業・品質あるいは原料計画（原料配分・購買）の評価について紹介された。モデルによる評価の有効性が強く認識させられた内容であった。

討4 微粉鉍石多量使用時の造粒特性及び擬似粒子の品質評価

（NKK 福山製鉄所 小松 修ほか）

微粉原料多量使用を目的とした評価法が述べられた。実機ペレタイザー、連続造粒試験機で鉍石銘柄別に造粒し、擬似粒子径、完全乾燥後の調平均粒径及び落下強度によって評価している。

討5 鉍石銘柄が焼結原料の擬似粒化性及び焼結鉍の気孔率に及ぼす影響

（川崎製鉄㈱鉄鋼研究所 小西行雄ほか）

造粒性は-0.5mm粉の+1mm擬似粒子への付着率、Sで定量評価しており、Sは鉍石銘柄、粉/核比、核粒子径にあまり影響されず有効水分率W_s*で決まるとしている。粒化モデルを操業管理に使用して効果を上げている。

討6 新焼結プロセス開発のための最適なベッド内のコークス・ブリーズ分布

（㈱神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 杉山 健ほか）

高生産性あるいは高結晶水鉍石使用を目的としたコークス分布及び低NO_x燃焼のための擬似粒子中コークス賦存状態を述べ、次に総合して次世代プロセスを提示。

討7 焼結鉍の被還元性と還元速度の評価

（大阪大学工学部 碓井建夫ほか）

カルシウムフェライト（CF）の還元性評価とその還元性を考慮した（被還元酸素量の補正と擬平衡線の導入）還元速度式による焼結鉍の評価法が説明された。

討8 焼結鉍の還元性とその評価

（九州大学工学部 村山武昭ほか）

被還元性の影響因子の定量的評価について概説され、実機操業管理に使用中のJIS法被還元性は高炉操業からみた総合評価には不適と提起があった。またBIS炉等シミュレーターあるいは数学モデルによる評価を推奨。

以上の講演後、共通する4項目を抽出して討論した。

①鉄鉍石の評価：褐鉄鉍系鉍石について、結晶水やアルミナ%だけでよいのか、脈石の形態（粘土、ギブサイト）やき裂の発生まで評価が必要か議論された。各社それぞれ異なっていた。大学より、褐鉄鉍の操業悪化因子をまず解明してきちんと評価すべしとの意見が寄せられた。

②擬似粒化性・擬似粒化物の評価：伝統的に使用されてきた新日鉄開発のGI指数の有効性に対する質問を契機に活発に討論された。結論的には、各目標（造粒機能力、適正水分、焼結時の通気性、新プロセス等）に合った評価法・指数の選定が重要とされた。また、乾燥後の付着粉率評価を第一とする意見が多く、統一法の検討が必要との雰囲気が高まった。

③ベッド内コークス粉の最適分布と評価：神鋼の提案（上層30mmに1~3mmコークス粉を濃縮）を中心に目標とすべきコークス分布について活発に討論した。本テーマは焼結プロセスを決定する重要なものであり、成分分布も含めて今後の大きな課題であると認識された。

④高炉操業進歩からみた焼結鉍品質評価：時間の都合もあり、高炉側権威者の見解で討論に代えられた。BIS炉は有効だが、簡便法が必要、JIS法被還元性でも各温度の気孔率が判明すれば高炉内の評価も可能であるが、その気孔率の評価法がない、20年間で評価法は種々出てきたが決定打がない、等のコメントがあった。

つぎに、焼結プロセスの評価技術とは幅広いものであり、技術進歩には評価技術の進歩が不可欠であると認識され、今後の課題について以下のように整理された。

①Terminologyの整理（「……性がよい」等の表現の廃止も）

②鉍石基礎特性評価（a、高CW鉍石、b、試験鍋との開き）

③造粒性・粒化物品質評価（a、評価基準、b、評価法の統一）

④ベッド充填構造の迅速評価法（最適分布の解明が先か）

⑤焼結ケーキ構造からの歩留り、強度、還元性状の評価法

⑥シミュレーターの実機対応性の向上（擬似粒子、偏析、熱損失）

⑦焼結鉍品質の評価法（高炉操業進歩からみた新評価）

⑧総合モデル（a、新プロセス開発可能な要素モデル（基礎実験からの精緻モデルなど）、b、配合原料の迅速採取、評価法）

終わりに、本討論会では多くの方々が参加され、活発な討議と今後のプロセス技術進歩への各種の提言をいただきましたことに深く感謝いたします。

連続鑄造における初期凝固現象とその制御

座長 大阪大学工学部 大中逸雄
副座長 川崎製鉄㈱鉄鋼技術本部 桜谷敏和

鉄鋼製品の要求品質レベルの厳格化が進行する中で省エネルギー、省プロセス実現のための主要技術の一つである直送圧延の安定実

施には、連铸鑄片の表面品質の向上が求められる。また、一部で実用化が指向されているストリップ鑄造においては、表面品質の確保がプロセスの根幹にかかわるものとなる。鑄片表面品質が鑄型内メニスカス近傍での初期凝固現象に大きく規定されているとの認識は広く受け入れられている。そこで、今後の初期凝固制御技術開発の方向を考えるベースとなる研究の現状を共通認識として得ることを目的として、本討論会を開催した。

本討論会では、初期凝固殻の形成、変形挙動に関する諸現象を、I 基礎、II ストリップ鑄造、およびIII スラブ・ブルーム連铸の三つの観点から検討し、初期凝固の本質にかかわる共通課題と各プロセスに固有の課題を明らかにすることとした。

以下にこれらの講演要旨と討論の概要を述べる。

I 初期凝固にかかわる基礎的諸現象

討9 液滴落下法による非鉄合金の初期凝固層の変形の観察

(東北大学大学院 董樹新ほか)

水冷銅板上に落下した純金属、および合金液滴から形成される20mmφ×3mmtの小鑄片の反り変形挙動を測定し、初期凝固殻の変形を支配する因子を検討した。凝固殻内の温度勾配による熱弾性変形が支配的であるとの解析式に基づき、線熱膨張係数への依存性と、凝固殻-水冷銅板間の熱移動にかかわる熱伝導率、熱伝達率、金属の凝固温度の影響を明確にした。また一部の合金の共晶組成付近に見られた負変形が、凝固時に生成した過飽和固溶体からの第二相の析出による体積膨張に伴うものであることを示した。初期凝固殻の変形挙動研究の手法として有効な本法を、より大きな試料を用いかつ拘束条件を加味する条件下に拡張することが望まれるとの提言がなされた。

討10 半凝固金属の初期凝固現象

(㈱レオテック 白井善久ほか)

固相率0~0.5の半凝固スラリー浴に銅製の冷却板を浸漬し、付着する凝固殻の観察から初期凝固時の凝固速度、抜熱速度を検討した。スラリーの凝固潜熱が小さい分凝固速度が大きく、かつ冷却板への熱負荷が小さい特性が認められたが、冷却板-凝固殻間の熱伝達係数は固相率によらずほぼ一定であり、二次デンドライトアーム間隔に反映される凝固殻の冷却速度は通常の場合と同じ関係にある。本講演に対して、凝固殻前面における凝固潜熱放出に伴う熱対流が抑制される結果としての凝固特性改善の可能性に関する質問がなされた。

討11 可動鑄型を用いた溶湯・鑄片の接触の直接観察

(大阪大学工学部 安田秀幸ほか)

ストリップ鑄造時の表面形成に関するシミュレーションとして、水平に保持された溶湯

表面に、鑄型に相当する平板を急速に接触させた際に得られる鑄片表面の形状を調べた。平板の移動に伴い溶湯との接触点から溶湯の表面波動が生じ、ここに付随するガスの界面への取込みにより鑄片表面に凹凸が生じていることを確認した。平板の移動速度が大きいほど、鑄片表面が平滑化する現象も認めた。ガスの存在下では、鑄片と溶湯が完全に接触することは極めて困難であることを示した本研究に対して、溶湯静圧を考慮しうる縦型の実験へ発展することが望まれることが望まれるとの要望が出された。

初期凝固殻の不均一形成に関するコメント

(北海道大学工学部 工藤昌行)

実験室的な冷却板浸漬実験で得られる凝固殻表面の凹凸を、シェル生成後の亜包晶変態により形成されるものと考えることが多い。しかし、凝固殻内の温度不均一の小さな冷却板幅方向にも不均一な表面性状、あるいは割れ生成がみられる事実を検討するべきである。液相から固相が形成される際の不均一核生成過程にさかのぼってこの現象を研究すべきだと思われる。

II ストリップ鑄造における初期凝固

討12 ストリップ鑄造における鑄片表面性状とメニスカス形状の関係

(新日本製鉄㈱プロセス技術研究所 溝口利明ほか)

小型双ロール鑄造装置を用いて、鑄造速度変化に伴う溶湯メニスカス形状変化がストリップ鑄片の表面性状に著しい影響を与えることを示した。回転鑄造ロール/溶湯/雰囲気ガス間の界面張力バランスを考慮する動的メニスカス形状解析モデルにより、高速鑄造下ではロールと溶湯の接触開始位置が低下すること、その位置が溶湯プール面に対して5mm以上降下する0.4m/s以上の鑄造速度では、プール面の湯面振動が初期凝固殻の形成に影響せず、その均一化につながることを指摘した。本講演に対してロール表面粗度、材質などのメニスカス位置に対する影響、プール面波動の抑制技術の可能性に関する討論がなされた。

討13 SUS304双ロール鑄造材のマイクロ偏析

(日新製鋼㈱鉄鋼研究所 森川 広ほか)

双ロール法により鑄造されたSUS304 As-cast ストリップのマイクロ偏析を調査し、通常連铸材に比べ表層部のCr、Niのマイクロ偏析が著しいことを明らかにした。その成因について検討を行い、冷却速度 $\leq 10^5$ K/sの条件下で δ 相を初晶として形成される初期凝固殻が、ロールキス点以降の70K/s以下の比較的遅い冷却速度のもとに δ/γ 固相変態を生ずる際の溶質再分配によってデンドライトコア部のCr濃化及びNi質化が生じる可能性を指摘した。従来工程よりも熱処理時間が短く、加工度の小さいストリップ鑄造品の品質向上に留意すべき点を示す貴重な研究である。

討14 ストリップ鑄片表面形成に及ぼす伝熱・歪みの影響

(新日本製鉄㈱光技術研究部 田中重典ほか)

ツインドラム鑄造法により得たSUS304 ストリップ鑄片の縦割れ発生機構の検討を行った。割れ部の表層下、数100 μ mの部位の冷却速度が周囲の健全部に比べ20~40%小さいことを確認し、この部位に働く鑄片の冷却収縮歪みにもとづく引張応力が割れ発生のトリガーとなることを計算から示した。割れの主因となる凝固遅れがメニスカスの浴面波動に起因することを確認する質問、ロールと溶湯がパウダーなどのバフアーなしに直接接触するがゆえに数10%に及ぶ抜熱変動が幅方向に生ずるなど、ストリップ鑄造特有の問題を解決する方向について議論がなされた。

討15 双ロール式ストリップキャスターにより得られたSUS304鑄片の表面品質

(㈱神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 谷口一幸ほか)

オーバーフロー注湯方式を採用している双ロールストリップキャスターの鑄片に見られる横割れ、縦割れの成因について検討した。ロールキス点以前で凝固が完了する場合、キス点でのロール圧下がストリップ表面に引張応力を作用し、横割れを引き起こす。また、縦割れに対しては鑄片幅方向の均一凝固がきわめて重要であり、不均一凝固の主因となるメニスカスの湯面変動を抑えることが本質的に重要である。プール重量/注湯量比を大きく、かつ注湯落下流を幅方向に均一化する方策が有効である。これに対して、注湯流の落下位置、浸漬注湯法との優劣について議論された。

コメント

(住友金属工業㈱鉄鋼技術研究所 杉谷泰夫)

ストリップ鑄片凝固の不均一がメニスカス部の抜熱不均一をトリガーとして発生すると考える立場からは、本討論会の講演の主体であったメニスカス波動・浴流動の抑制、メニスカス位置下降の考え方の追求は妥当である。しかし、メニスカス部以降の不均一度発生、拡大についても考慮すべきであり、凝固殻の変形に係る相変態、ロールの変形にも注目すべきである。特にロールの表面性状、冷却構造には検討の余地がある。

III スラブ・ブルーム連铸における初期凝固

討16 炭素鋼およびステンレス鋼の初期不均一凝固の制御

(NKK総合材料技術研究所 鈴木幹雄ほか)

亜包晶鋼、SUS304などの δ/γ 変態に伴う鋼の不均一凝固を抑制する新たな手法として、適正間隔で冷却の不均一を与える方法の有効性について基礎的検討を行った。変態に伴うバックリングピッチよりも小さなピッチで銅鑄型表面に溝、あるいはNiめっきを設け、大

きな伝熱抵抗部に対応する凝固遅れ部に変態収縮応力を集中させる手法がシェル全体の變形防止に有効である。本研究に対して、必要な凝固遅れ量、鑄造方向にも存在する伝熱遅れ部の意味について議論がなされた。本研究は実験室レベルにあるが今後の実用化が期待される。

討17 高速鑄造時の鑄型内伝熱と潤滑挙動

(住友金属工業㈱鉄鋼技術研究所 平城 正ほか)

試験連鑄機を用いた5.0m/minに至る高速鑄造時の鑄片縦割れ発生と鑄型熱流束の関係を定めた。熱流束を一定値以下に抑えたと共に鑄型幅方向の熱流束バランスを取ることも必要である。緩冷却特性を有する高塩基度、含ZrO₂パウダーの使用が有効である。潤滑機能を同時に確保する点から、液相パウダーフィルム厚みを150μm以上にする必要性を考慮したポジティブストリップ時間優先の非サイン鑄型振動法の最適化についても検討した。本講演に対して、流入特性をも同時に考えたパウダー開発の余地に関する議論がなされた。

討18 オシレーションマーク深さに及ぼす鑄造条件の影響

(川崎製鉄㈱鉄鋼研究所 糸山啓司ほか)

鑄片表面のオシレーションマーク及びそれに付随する偏析の軽減を目的として、各種の鑄造要因の影響について検討した。特に、鑄型/鑄片間のパウダーフィルム内に鑄型振動の位相に依存して誘起される圧力による初期凝固殻の變形に着目したモデル解析を示した。ついで、生成圧力を緩和する目的で導入された、鑄型振動に同期して鑄型長片を拡張運動させる水平振動法の試みと、そのオシレーションマーク軽減の効果を示した。凝固殻への圧縮応力を緩和する新しい鑄型振動法を適用した際に、従来のネガティブストリップに期待されていた効果が存在していたか否か、あるいはその存在意義についての議論がなされた。

討19 連続鑄造における初期凝固と電磁場による制御

(新日本製鉄㈱プロセス技術研究所 瀬々昌文ほか)

将来の初期凝固制御法と期待される電磁力利用技術について広くレビューした。鑄型内電磁攪拌による凝固殻への溶鋼からの熱伝達の均一化は既に工業化されている。直流磁界利用によるイメージングノズル吐出量の制動に伴うメニスカス部温度の上昇が初期凝固殻の緩冷却化に有効でありうることを、また、実験室レベルにあるとはいえ、メニスカス部への直流磁界付与による表面波動抑制、交流磁界付与によるメニスカス形状変化あるいはジュール発熱付与による緩冷却化等が将来技術として期待されることを示した。

連続鑄造の現場の観察からのコメント

(新日本製鉄㈱プロセス技術研究所 荻林成章)

スラブ・ブルーム連鑄の実際の場合でも凝固殻内の温度分布に起因するシェル變形が重要な問題となる。シェル・モールド間の熱伝達制御因子としてのパウダーの挙動、メニスカス部の溶湯温度の影響の解明はまだ不十分である。また、ストリップ鑄造で指摘された湯面波動の影響も大きいといえ、湯面下凝固の追求が今後あり得ると思える。さらに、固相の核生成過程が表面性状を規定している可能性もあり、よりミクロな現象に踏み込んだ研究が必要である。

以上の講演、討論の後、座長から以下のまとめを行った。

- ①伝熱系として比較的シンプルなストリップ鑄造においては、ロール/溶湯界面のガスの挙動が鑄片表面の形成にCriticalとの認識が得られた。メニスカスの波動制御の重要性もこの観点から理解できそうである。
- ②モールドパウダーを利用する連鑄においてはパウダー流入の均一性確保に困難があり、この点に焦点を絞った検討が望まれる。また緩冷却の有効性の理解は定性的であり、真のメカニズム追求が望まれる。
- ③いずれの鑄造プロセスにあっても、溶湯と鑄型が接触する瞬間の現象を究明することが、新しい初期凝固制御技術開発につながると言えよう。

最後に企業側を代表して 新日本製鉄㈱ 溝口氏より、初期凝固の言葉をより明確かつ定量的に定義しうるレベルへの研究の前進が望まれること、及び、現場的には初期凝固を再現性良く制御しうる技術が望まれるが、その芽は出つつあるとのコメントをいただいた。

本討論会を運営するにあたって、貴重な発表を行っていただいた講演者の方々、ならびに会場からの多くのコメント、質問をいただいた参加者の皆様に深く感謝したい。

鉄鋼計測における最近の信号処理技術

座長 豊橋技術大学 生産システム工学系 北川 孟
座長 NKK 基盤技術研究所 西藤勝之

鉄鋼業における最近の計測技術は、無人化や省プロセス化などの操業面の要請からも、より高度なレベルの止揚による新たな展開が期待されている。これに対して、昨今のデジタル信号処理技術の発展と相まって、多くの新しい方法も実用化されつつあるが、そのキ

ーとなるものは、DSPのような「高速信号処理ハードウェア」の応用によるオンラインでの高度信号処理の具現、多情報の並列処理に基づく「高次認識・評価のソフトウェア」などである。

本討論会では、きず検出に関する高S/N化信号処理について3件、高速画像処理について3件の講演が行われた。これらの直面する事例を通じて、現状の信号処理レベルを踏まえ、新たな試みの今後の拡大のための課題について討論された。以下にその要旨を示す。

討20 超音波探傷における実時間デジタル信号処理技術

(NKK基盤技術研究所 飯塚幸理ほか)

いっそうの高精度化が要請されているオンライン超音波探傷システムの課題となっている探傷信号のS/N向上に、RF信号のデジタル信号処理が効果的である。超音波パルスの繰返し時間内での布線論理DSPの使用により、最適フィルタリング処理によるノイズ除去、同期加算平均の実時間化を達成したとの報告。今後の探傷システムの目指す方向として、RFデジタル処理化が提案された。

従来の処理時間の制約に対するブレイクスルー技術と注目されたが、この種処理の高度化と精度向上のトレードオフについて議論された。

討21 零レンジサイドローブパルス圧縮超音波探傷法

(三菱電機㈱電子システム研究部 和高修三ほか)

従来の超音波探傷におけるインパルス励振のパルスエコー法に対して、幅広い変調パルスの送信と、受信信号の相関処理によってエコーパルス（圧縮パルス）を抽出する高S/N化のためのパルス圧縮法が提示されている。この場合、レンジサイドローブのない圧縮パルスを得るために、従来、送信信号の変調には相補系列が用いられた。この系列の実用上の問題は、限られた系列長しか存在せず、これが送信パルス幅の増大による検査不能域を長くするなどのマイナス要素があること。報告は、新しい系列の組合せを考案、この系列長の限定を除くことにより、S/N向上手段として確立されたことを提示した。オンラインニーズに対する実時間化については、DSPの応用により可能との見解が述べられた。

変調パルスと探触子特性との関係についての質問に見られたごとく、この種位相変調における探傷周波数が実用する上での議論になるまでに至った技術と言える。

討22 鉄鋼計測における高速画像処理技術

(新日本製鉄㈱エレクトロニクス研究所 内藤修治)

人間の視覚や官能を代替する動画像処理に関して、以下の4件の開発事例が報告された。

- 1) 連続焼鈍炉のヒートバックル検出器