

第 106 回講演大会討論会報告

I. 高炉内におけるコークスの挙動

座 長 住友金属工業(株)大阪本社

矢 部 茂 慶

最近における高炉操業の多様化傾向の中で、高炉内におけるコークスの挙動解明とその評価はますます重要な意義を帯びてきたため、各社とも炉内コークスの採取を進め、多くの知見が得られつつある。

このような状況下で開かれた今回の討論会では、(i) 炉内コークスの採取による知見と考案、(ii) 高炉操業を前提としたコークス性状の評価を取り上げ、7件の講演者との打合せ・討論者の事前決定・講演発表スライド分のコピー配布等運営上配慮した。

討 1 高炉内でのコークス劣化挙動に関する最近の研究成果について

東京大学名誉教授 館 充

基調講演として、最近の研究動向をその背景にまで遡及して総括し、コークスの炉内劣化挙動に関する現状の知見と問題点を整理したものである。過去3回のコークス関係討論会の内容を要約し、高炉内におけるコークス劣化の実態解明の経緯と、反応後強度(CSR)が熱間性状指標として市民権を得て高炉操業との関連が追求された過程につき総説した。高炉の解体調査および休風中採取試料の情報に基づき、コークスの炉内挙動を解釈する際の問題点を指摘し、レースウェイ近傍での顕著な劣化機構を解明するために、燃焼と熱衝撃の粒度低下に及ぼす影響並びに1100°Cで測定の実反応性との関連性の追求、更には熱的劣化と基質の検討が必要なることを強調した。レースウェイ付近でのコークスの運動やコークス製造工程に由来する性状の不均一分布の影響も今後の課題であると示した。

討 2 高炉操業に及ぼすコークス熱間性状の影響

新日本製鉄(株)君津製鉄所 山ロー良 他

君津3高炉のCSR変更試験時の炉腹・羽口部の採取コークス調査と検出端情報解析をベースに、高炉内におけるコークス粉の発生・蓄積・移動の機構を考察し、次の仮説を立てた。コークスの反応速度が上昇すると、炉腹部でコークス強度が低下して粉が発生し、粉はガス流速の小さな領域に蓄積するためスリップ・ドロップが発生する。蓄積粉はしだいに羽口部へ降下し、ある期間経過後にレースウェイが浅くなり高炉の通気抵抗が増加する。羽口部におけるコークスはCSR・アルカリ等の要因とは無関係に粉化し、スラグ・メタルとの接触により劣化し、コークス基地の反応性が高いものは劣化しやすい。この羽口部の粉は水蒸気添加により消耗させることができる。今後、この仮説検証のためサンプリングの充実により劣化機構を追求し、コークスの最適評価指数を

作る。

この発表に対し、北村(神鋼・中研)は①コークス結晶子からの温度推定代替法、②コークス粉の移動経路と消滅過程、③操業アクションへの適用につき質問し、山口は①ファイバースコープと放射温度計、②炉腹の炉壁部と中間部で粉発生し、蓄積消滅過程は発生部位で異なり、③風温上昇とコークス比上昇が有効だった君津4高炉操業推移を示した。

また、網永(住金・鹿島)は鹿島1高炉CSR変更試験の知見から、①吹き上げを含めた粉コークスの炉内挙動についての総合見解、②CSRと炉内ガス流れ変化、③コークス中SiO₂含有量から区分したレースウェイ深度と物理的なものとの対応と7~22日の遅れ発生の論旨を質問し、山口は①炉腹部での発生粉の蓄積場所はガス流速分布により異なり、名古屋1高炉解体結果で炉壁・中間部の粉はレースウェイから約1m吹き上げられ、中心部の粉はそこで発生したと想定、②ガス流速大な個所の流速は助長され、君津3高炉では周辺流増加、③化学的レースウェイは物理的なそれ(鳥の巣)と必ずしも一致せず、鳥の巣の通気性により両者の差は決まり、吹き上げ・再蓄積・降下の繰り返しが時間遅れの理由と回答した。

討 3 コークスの熱間性状と高炉操業について

日本鋼管(株)技術研究所 奥山泰男 他

高炉解体調査結果を基に、羽口先コークス性状調査結果を加え、装入コークスの強度・粒径の低下位置を基質強度・塊性状に区別し論じた。高炉操業条件とコークス劣化度との関係では、CO₂反応劣化よりも熱的劣化が大きな比重を占めることを示唆し、羽口先温度とスリップ、シャフト下部温度とスリップの各関係、低燃料比操業時の羽口先コークス粒径増加現象等を報告した。CO₂反応劣化と熱的劣化の分離は解析上困難なため、実験的に各要因の劣化度測定の必要性に触れた。また、2000°C付近のコークス熱的劣化現象を紹介し、熱的劣化度の少ない配合パターン(熔融結合型)を提案した。

この発表に対し、奥原(新日鉄・三研)は①1200~1300°Cまでに20%反応時のコークス強度の低下度合、②熱的劣化の優れたコークス構造のイメージ、③2000°Cでの塑性変化と熱的劣化の関係を質し、奥山は①ガス化率20%ではDI₁₀₀で約1.5(DI₁₀₀で約3.0)程度、②気孔径が小さく、微小き裂の少ない構造、③塑性変形は高炉内で生じているとは思えないが、塑性変形が生じ難いコークスは熱的劣化も少ないと考えていると回答した。

討 4 コークスの高温劣化挙動に関する基礎的検討

住友金属工業(株)中央技術研究所 岩永祐治 他

高炉下部高温域のコークス粉化挙動に焦点を絞り、(i)低温・高温域での反応性の相違有無把握のためのガス化反応実験、(ii)レースウェイ内循環運動中の粉化想

定の巡回摩耗実験、(iii)熱的劣化想定急速加熱劣化実験では机上での基礎的検討結果をまとめ、(iv) CSR 変更高炉操業試験では、休風時採取のコークス性状調査と各種ゾンデを活用した炉内反応解析に基づき、CSR 変更に伴う炉内状況の変化につき考察した。また、コークス品質指標の高炉操業に及ぼす影響につき、実操業の操業解析結果と数学モデルによる解析結果との対比を交えて論じた。

この発表に対し、小幡（川鉄・水島）は①レースウェイ部での基質脆弱化現象の程度、②基質脆弱化による通気・通液性の悪化度、③O/Cの代わりに風温上昇による炉内状況の変化とその優劣を質し、岩永は①モデルによりコークスの粒内反応率分布で脆弱度を推測し、②レースウェイは先端部の通気抵抗が増加し、上方に発達する、③風温上昇よりも炉況安定面では O/C 減少が好ましいと回答した。

討5 羽口コークスの劣化状況とコークスの品質評価 (株)神戸製鋼所中央研究所 北村雅司 他

神鋼全高炉を対象に休風時の羽口コークス採取による性状調査結果を総括・整理した。(i)高炉々容差によるコークス劣化状態の把握：装入前コークスの品質は異なるが、大型高炉ほど羽口コークスの粒度は細かく、粉の存在が少ない傾向がある。(ii)製鋼用銃と鋳物銃吹製時のコークス劣化状態の把握：装入前コークス品質が同一でも、鋳物銃吹製時は羽口コークスの劣化は苛酷であった。(iii)ミクロ性状評価によるコークス劣化状態の把握：組織形態・気孔特性・灰分組成の変化を調査し、微細気孔容積の著増等を認めた。

この発表に対し、稲垣（新日鉄・八幡）は同所の調査結果の一部と問題点を紹介し、①粉発生場所・レースウェイ部での粉発生量、②劣化・粉化関連の重要操業要因・炉間サンプル差異、③熱レベル、④熱劣化の試験法を質し、北村は①移動帯とレースウェイ部・多量の粉発生、②明瞭な関係なし・管径 150A 一定、③融着帯高さ、④多孔質化が I 指標の候補だが、試験法は提案不可と回答。

討6 CO₂ 反応劣化の面よりみた高炉用コークスの熱間性状評価

新日本製鉄(株)第三技術研究所 西 徹 他

熱間性状評価上の CO₂ 反応温度の重要性に鑑み、1600°C までの熱間強度を検討した。1200~1600°C まで反応させた 3 種コークスの反応後強度は、1600°C では余り差がないが、1200~1300°C で異なる。1000°C で 7~9% 反応後のコークスを 1600°C までの昇温下で CO₂ と反応させると、反応後強度が異なる。CO₂ 反応後強度は同一反応量でも温度により異なり、1300°C 以下ではコークスの光学的組織の選択反応により気孔率の拡大・基質劣化で強度が低下する。1300°C 以上では塊表層部から均一に反応し、反応部のガス化消滅・塊内部

の焼締まりによる基質向上のため、強度低下は小さくなる。

この発表に対し、谷川（大ガス・本社）は①東田 5 高炉の DI₁₀⁰ 著低の理由、② Fig. 8 の気孔率の 1200~1300°C 極小値は JIS 反応性と同一か等を質し、西は①鋳物銃・融着帯とアルカリ、②同理由・コークス種間差検討中と回答。

討7 乾式消火設備によるコークス品質向上効果

川崎製鉄(株)千葉製鉄所 金子憲一 他

環境・エネルギー問題を契機に導入普及のコークス乾式消化設備(CDQ)のコークス品質への効果についての検討は多いが、強度向上要因は依然不明確な点も多い。原料炭対策の一手段として装入炭品位への遡及も考慮すると、強度向上要因の把握は CDQ 評価上も重要である。そこで、CDQ コークス使用による高炉操業上の諸因子の影響につき検討し、コークスを多孔質脆性材料の一種と見なし材料力学的に CDQ コークスの強度向上要因を論じた。

この発表に対し、里見（鋼管・本社）は京浜の CDQ コークスの品質評価の検討結果を紹介し、①スタビライズと徐冷の効果を等価と考えるがどうかと質し、金子は①分離は困難だが、スタビライズだけでは説明不可で、Weibull の均一性係数 m は 1.88 で、マクロ的な構造欠陥を包含したコークス塊は非常に不均質な多孔体であり、徐冷効果の方が大きいと回答した。

総合コメント

福田（新日鉄・広畑）はコークス部会長の代理として製造側からコメントし、高炉の研究課題は高炉内でのコークス劣化を防止する操業法とした。CSR との関係では、配合炭性状・処理法・乾留条件等の変更によりコークス物性即 CSR も変わるので、制御は可能でも資源の有効利用面からも単に CSR 向上は不可であり、CDQ も含めた製造法の改善・装入炭事前処理技術・省エネの CDQ と石炭調湿と燃焼管理も貢献するので、製造側はこれらの技術向上を図り、劣化防止に寄与したい。劣化機構の解明・コークス試験法の確立・製造側の目標に一体となつた取組みを力説した。

伊沢（鋼管・製鉄部会長）は使用側の総合コメントを高炉情勢変化の背景を含めて行つた。コークスの炉内挙動の鍵は炉下部・レースウェイ部の粉の発生と消耗のバランスにあり、その解明が課題で、望ましいコークスは反応性の小さい基質強度の高いものである。1400°C 以上でのコークス灰分と炭素との反応も一劣化機構として考慮すべきである。既知見を基に、基礎研究と操業解析により炉内コークス挙動を更に明確にし、その成果をコークス品質特性に結びつけ、操業安定と素材費低減が図られるよう切望した。

以上、討論会の発表および討論の要点を概説したが、高炉内におけるコークスの挙動の討論会を終了しての感

想として、(i)劣化機構は反応・熱・熱衝撃等によるものに大別できるが、相互に影響し合い、(ii)炉内でのコークスの細粒化・粉化は約 1100~1300°C 域で開始すること、(iii)今後の課題の粉化機構と粉の移動と消滅のサイクルにメスを入れる直接的検出端(光ファイバー・高速度カメラ・サンプラー等)の開発実用化により、粉化の位置・量や劣化機構の解明可能な日は近いこと、(iv)高炉用コークスをいかに安くするかを製造側にお願いし、使用側は炉内コークスの挙動解明による評価をし、両者相携えて討論会テーマとして再度採用の暁には、今回の課題が全面解決されている局面を期待したい。

II. 連铸々片の偏析 —現状と問題点—

座 長 新日本製鉄(株)第三技術研究所

森 久

副座長 日本鋼管(株)技術研究所

北 川 融

連続铸造では連铸機の保全を含めたプロセスコントロールのいかにが連铸鋼の品質に著しく反映されるため 1970 年代前半の連铸導入期に種々の技術開発が行われ今や連铸鋼の健全性、均質性は造塊材よりも優れていることは周知のこととなった。しかるに近年、鋼管の耐サワーガス特性をはじめ鋼材品質への要求がより厳しくなるにつれ連铸铸片のマクロ的中心偏析のみならずセミマクロ的な偏析の軽減が重要な課題として認識されてきている。このような背景のもとに今回の討論会でセミマクロ的な偏析の操業上の支配因子ならびに製品特性との関係、さらには偏析の凝固理論的解析および新しい評価法について議論を深めることとした。

討 8 電磁誘導攪拌法によるブルーム連铸の偏析防止

新日本製鉄(株)室蘭技術研究部 前出弘文 他

連铸ブルームの等軸晶率を増加させるため電磁攪拌の強度、コイル位置及び铸造速度の影響を素鋼成分別に記述できる実験式を提案した。電磁攪拌により棒鋼の冷間鍛造時のシュブロンクラックは著しく改善された。

本発表に対し鋼線の伸線時におけるカッピ破断改善効果について質問が出されカッピ破断に対しても満足すべき結果が得られていると回答された。

討 9 電磁攪拌によるブルーム、ビレット連铸のマクロ偏析の改善

(株)神戸製鋼所中央研究所 綾田研三 他

ブルーム、ビレット連铸への電磁攪拌適用の効果を高炭素鋼铸片を中心に示した。铸型内攪拌あるいは二次冷却帯攪拌と凝固末期攪拌との組み合わせにより中心偏析のばらつき、平均値が改善されパネ鋼の伸線性が向上する。

本発表に関し、凝固末期攪拌の時期について質問が行われ、等軸晶域の攪拌であると回答された。

討10 ブルーム連铸機内凝固末端部の電磁攪拌による

中心偏析の改善

川崎製鉄(株)技術研究所 鈴木健一郎 他

0.5%C の小型铸塊を用いた電磁攪拌実験により等軸晶組織を軸心部に得る条件及びV偏析軽減のための条件を求めた。ブルーム連铸機の二次冷却帯、凝固末端部における攪拌試験を行い未凝固径 40~50 mm での強攪拌でV偏析が分散され高炭素鋼線のカッピ破断率が改善された。

討11 大断面連铸ブルームのV状偏析形成機構

住友金属工業(株)和歌山製鉄所 人見康雄 他

連铸ブルーム内のV偏析発生状況の操業条件依存性を明らかにした。この知見にもとづきV偏析線発生機構を等軸晶粒の下方へのサクションにもとづくすべり面の形成と、すべり面に沿った残溶鋼の流動によるものであるとし、V偏析の傾角、発生周期について数式モデルを提案した。

以上の発表に対し次の4件のコメントをいただいた。

大同特殊鋼・大津賀氏：電磁攪拌によるホワイトバンド内負偏析を緩和しつつ等軸晶を得るためストランド上部での弱攪拌を広範囲にわたり行つた。中炭素鋼に対しては十分な効果が得られているが 0.6%C 以上については不十分で多段攪拌を考えている。

日本鋼管・水上氏：等軸晶凝固する小型铸塊内V偏析の形成に及ぼす電磁攪拌の影響を検討した。リニア攪拌の場合、凝固界面上昇流を与えることによりV偏析を消滅させることができた。旋回攪拌の場合、铸造直後に攪拌を一度与えた後、最終凝固時期に交番攪拌を行うとV偏析を消滅させ得る。いずれの場合も攪拌時期は軸心部の固相率が 0.1 となる時期で、流速は 10~20 cm/s が最適であった。

名古屋大学・浅井助教授：塩化アンモニウム水溶液を用いV偏析形成のモデル実験を行つた。等軸晶粒子の移動は粉体のすべり線形状を記述する理論式によく合致する。

V偏析線の形成機構として1) 収縮負圧によるすべり線の発生、2) すべり線への凝固収縮にもとづく濃化液の流入と結晶の再溶解によりV偏析線が周期的に形成されると推定できる。

北海道大学・高橋教授：等軸晶層内の固相率分布は軸心で低くなつており一定量堆積すると上面にV状の空隙を生じ周囲の濃化液が流入しV偏析線が形成される。この繰り返しによりV偏析線の周期性があらわれる。

以上のブルーム、ビレット連铸の偏析に関する討議により得られた見解として(1)中炭素鋼铸片に対し、電磁攪拌による等軸晶化は中心偏析改善に有効であるが %C < 0.1, %C > 0.5 の鋼種では十分な量の等軸晶が得られ難い。(2)複数個の電磁攪拌器による等軸晶増加効果には加算性がある。(3)V偏析線は等軸晶堆積層内の濃化液の流動により生ずる。(4)等軸晶部の攪拌により偏析