

環境対応型ステンレス鋼製造プロセス

Development of Sustainable and Efficient Stainless Steelmaking Process

金子 陽平 KANEKO Yohei JFE スチール 東日本製鉄所千葉地区 製鋼部製鋼技術室 主任部員(係長)
納 雅夫 OSAME Masao JFE スチール 東日本製鉄所千葉地区 製鋼部長

要旨

JFE スチールでは東日本製鉄所千葉地区にステンレス鋼専用製鋼工場を 1994 年 7 月に建設し、至近での生産能力は月産 7 万トンに及ぶ。本製鋼工場はエネルギー原単位の削減と環境負荷を考慮して、Cr 鉱石の溶融還元炉-脱炭炉-VOD プロセスを持つことを特徴としている。これによって FeCr 合金を溶解してステンレス鋼を製造する電気炉-AOD に比較して、30%以上のエネルギー原単位の削減を実現している。最近ではさらなるスクラップ使用量の増加と、その溶解エネルギーのクリーン化を目指して、高効率なスクラップ溶解が可能であるステンレス溶鋼保持炉を導入した。また精錬工程で発生するダストやスラグなどの副産物のリサイクルについては、ダストリサイクル専用炉を建設することで、ダストに含有する Cr や Ni などの有価金属を回収する技術を開発した。また製鋼スラグについては、ダスト精錬炉や焼結工場へのリサイクルを経て、土工用材料として商品化している。

Abstract:

JFE Steel has constructed a stainless steelmaking shop in East Japan Works(Chiba), and started its operation in July, 1994. At present the annual production of this steelmaking shop reaches 700 000 tons. To consider the reduction in the unit energy consumption and the decrease of the negative environmental impact, the unique feature of this steelmaking shop is characterized as following process sequence; Smelting reduction furnace (SRF) with Cr ore-Decarburization furnace (DCF)-VOD process. The above process contributes to more than 30% reduction of energy consumption compared to the conventional EF-AOD process with FeCr alloy smelting. Stainless scrap melting reservoir with high efficiency has been introduced aiming at increasing in a further amount of scrap use and making of the dissolution energy clean recently. From the viewpoint of recycling and reuse of by-products, a recycling system for dust and slag generated in this process has been established. Steelmaking dust containing valuable metals like Cr and Ni, is melted and reduced in a smelting furnace, which is designed especially for dust smelting. Hot metal produced from this furnace can be recycled to SRF as metal resource. Steelmaking slag is also recycled as flux to the dust smelting furnace and sintering plant, or is processed into a commercial product as civil engineering works.

1. はじめに

東日本製鉄所千葉地区第 4 製鋼工場（千葉 4 製鋼）は、単工場での生産量が日本最大規模のステンレス鋼専用製鋼工場であり、1994 年 7 月より現在まで順調に操業を継続している。本製鋼工場を抱える千葉地区は、大規模商業地、公共スポーツ施設を隣接した都市型製鉄所であることから、特に環境問題を意識したりサイクル重視のプロセスを採用している。また、電力多消費型の製品である高炭素 FeCr

合金の利用を削減するため、酸素、コークスが利用でき、転炉排ガスを有効活用できる製鉄所立地の有利さを活かし、石炭エネルギーによる Cr 鉱石の溶融還元プロセスを採用している。

また千葉 4 製鋼は、世界規模のエネルギー原単位の低減に寄与するため現在も意欲的な改善を進めており、2004 年 10 月には高効率なスクラップ溶解機能を持った世界初のステンレス溶鋼保持炉（J-First；JFE Flexible Iron Reservoir for Stainless Steel）を稼働させた。図 1 には千葉 4 製鋼の生産量の推移と、生産鋼種の比率を示す。JFE スチールでのステンレス鋼生産が Cr 系ステンレスに特化することで、これらの製造プロセスはさらに適したものとなっている。

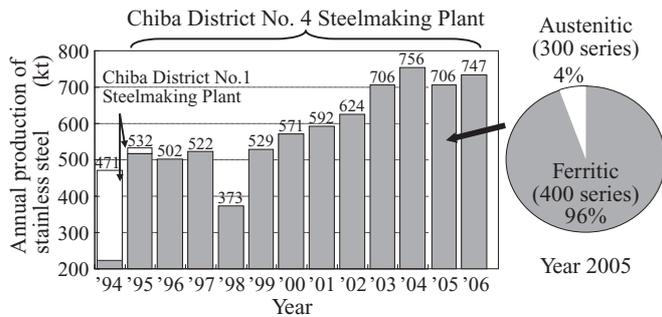


図1 ステンレス鋼の年間生産量の推移

Fig.1 Trend of annual stainless steel production

本論文では、次世代の製鉄所モデルの礎となる千葉4製鋼の環境対応型プロセスについて、その開発内容を以下に紹介する¹⁻³⁾。

2. 基本構想と製造プロセス

千葉4製鋼は環境影響のみならず、生産安定性、品質などさまざまな要求を満たすことを目標としている。製造プロセスの概要を図2に示すが、製造プロセスの決定においては、ステンレス鋼のCr、Niなど主原料の選択に自由度を持たせることで、原料の安定入手を可能とし、高機能の二次精錬および連铸機を組み合わせることを主眼としている。

原料の溶解工程では、低エネルギー消費原料であるCr鉱石を、石炭によって還元が可能な溶融還元炉を採用している。さらに2004年には、この溶融還元炉で精錬された高いCr濃度の粗溶鋼を貯銑するステンレス溶鋼保持炉(J-First)を建設し、この溶鋼保持炉にスクラップ溶解機能を

を持たせることで、溶融還元炉でのCr鉱石溶解量を極限まで高めることが可能となった。

脱炭精錬工程では、強攪拌の上底吹き転炉を採用し、高送酸速度での脱炭精錬においてもCr酸化ロスの低減が可能である⁴⁾。また高Cr濃度を含む極低炭、極低窒素の高純度フェライト鋼のニーズに応えるため、二次精錬設備にはVOD (vacuum oxygen decarburization) タイプの真空脱炭プロセスを採用⁵⁾し、垂直曲げ方式の連続铸造機を導入⁶⁾している。

これらの設備により、JFE443CTに代表される20%以上のCr濃度を持つ極低炭、極低窒素鋼の安定生産が可能となった。

さらに、都市型製鉄所の環境重視の観点から、製鋼工場にて発生するダスト、スラグについてはリサイクル体制を確立している。ダスト中に含有される有価金属であるCrを還元回収するダスト精錬炉(STAR炉)⁷⁾を合わせて建設し、溶融還元炉にメタルとしてリサイクルが可能なプロセスとなっている。スラグに関してはSTAR炉や焼結工場など製鉄部門へのリサイクルと、土工用材料として商品化する処理プロセスを構築している。エネルギーの省力化については、製鋼工場から発生するガスはすべて回収され、製鉄所の燃料ガスとして有効に活用している。

3. 製造プロセスにおける環境対応技術

3.1 Cr鉱石溶融還元の概要

Cr鉱石の溶融還元は、鉱石の主成分であるCr酸化物を炭素により還元することで、有価金属であるCrを溶鋼内に回収する技術であり、簡易的に反応式は下記の式で示さ

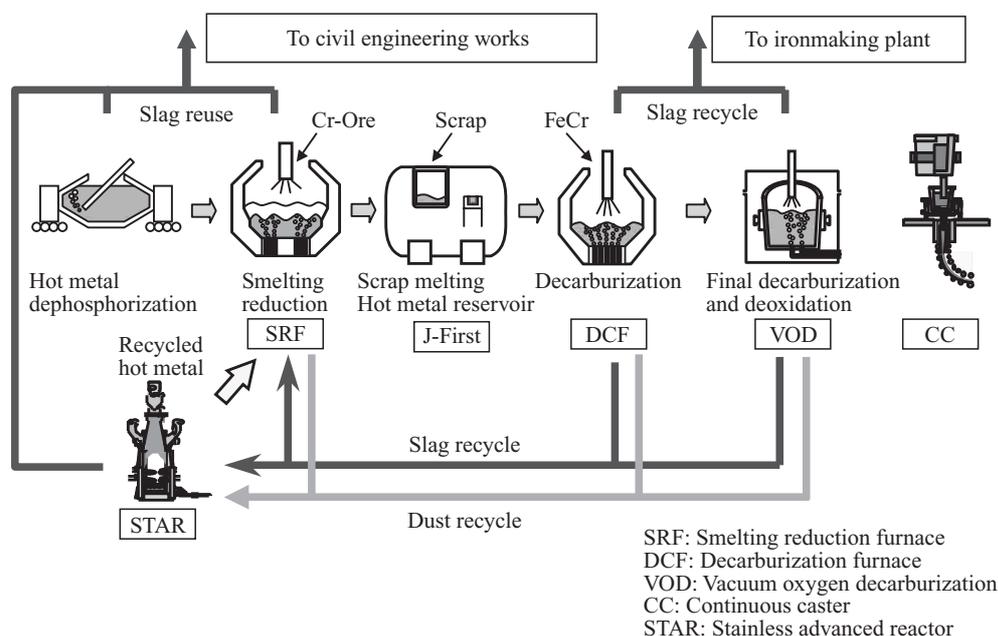


図2 東日本製鉄所千葉地区第4製鋼工場の概要

Fig.2 Outline of East Japan Works (Chiba) Stainless Steelmaking Process

れる。



Cr 鉱石の溶融還元は、多電力消費型の製品である FeCr 合金を中間原料としたステンレス鋼の製造に比較して、エネルギー収支に優れる。しかし、Cr 鉱石はスピネル型鉱物の安定物質であるために、その還元反応速度は図 3 に示すとおり、鉄鋼石に比較して 1/5 程度と低い。このため、Cr 鉱石の還元を促進するためには以下の手段が有効である。

- (1) Cr 鉱石の還元が吸熱反応であるため、高温精錬によって反応を促進する。
- (2) 還元材である炭素と Cr 鉱石をスラグ中に微細分散させることによって、Cr 鉱石との反応界面積を増加させる。

以上の手法に着目し、種々の技術改善を実施している。

また、溶融還元炉は純酸素底吹き二重管羽口を備えた強攪拌型上底吹転炉であり、溶融還元時に生成する多量のスラグに対応した容積を持つ。また、砂状の Cr 鉱石を炉内に添加するにあたっては、水冷式の鉱石投入ランスを介して炉内に投入することで、炉内から発生するガスによって飛散することを抑止しており、ダストの発生量の抑制に寄与している。

3.2 熱付与技術の開発

Cr 鉱石の還元反応が起こる溶鋼の温度まで昇温するにあたっては、通常ではコークスなどの昇熱材を利用する。しかし、千葉 4 製鋼の溶融還元炉では資源エネルギーの削減と、高効率な熱付与を両立する目的から、転炉排ガスの二次燃焼を積極的に利用した昇熱手段を採用している。二次燃焼とは、炉内から発生する CO ガスと、上吹きランスからの O₂ ガスで燃焼を起こす反応である。

従来、転炉型精錬の上吹きガスは、攪拌力の強化を目的として高送酸速度でのハードブローを志向する開発が進められている。しかし、ハードブローでの操業は、ダストの飛散を助長するのみならず、二次燃焼を促進するには不利である。このため効率的に二次燃焼を促進させるには、上吹きランスからの O₂ ガスがソフトブローであることが効果

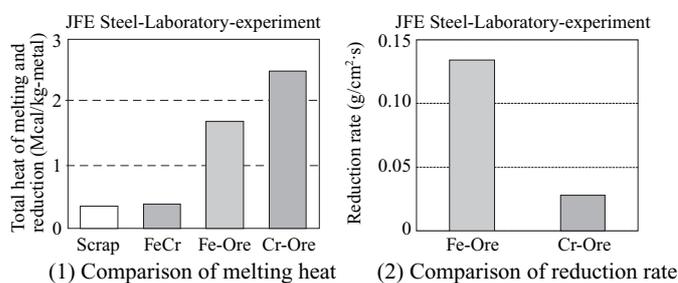


図 3 Cr 鉱石の熱的性質
Fig.3 Heat property of Cr-ore

的である。

一方で、ソフトブローを得るためには、上吹きランスからの送酸速度を下げるのが有効であるが、単位時間あたりに発生する熱量を下げることになるため、Cr 鉱石の投入量が制限されてしまう。そこで、上吹きランスのガス噴出孔の形状開発に取り組み、高送酸速度の状況でもソフトブローを得ることが可能なノズル形状を開発した。これにより、従来マッハ 2~2.5 (約 680~850 m/s 相当) 程度であった上吹きガスのノズル出口流速は、同じ送酸速度においてマッハ 1.5 以下 (500 m/s 以下) のソフトブローとなることが実現し、この時の二次燃焼率は、従来の 7% に対して 25% まで増加した。この結果炉内での発生熱量を、コークスなどの資源材料の消費を増加することなく、36% 向上させることが可能となった。この概要を図 4 に示す。

3.3 還元材との反応界面積の増加

Cr 鉱石の還元は、還元材である炭素との接触部において進行するため、還元材をより微細にスラグ中へ分散させることが還元反応を促進させるためには有効である。従来、転炉でのハンドリングが比較的容易であることからコークスを還元材として用いた溶融還元精錬を実施していたが、コークスから熱崩壊性を有する石炭に変更することにより、

- (1) コークス化の事前処理を必要としない生石炭を直接使用することによる所内エネルギー原単位の削減
- (2) 炉内還元性の著しい向上 (Cr 鉱石投入速度の増加、スラグライン耐火物溶損抑制による炉寿命延命、低硫溶湯の安定溶製)
- (3) 燃料となる排ガス回収エネルギーが向上^{8,9)}

還元材は転炉上に位置するバンカーから炉内への投入を実施するため、投入系設備への固着や、ダスト飛散を抑止するため、投入前にはある程度の粒径と強度を持つ塊状原料であることが必要である。一方で、スラグ中においては、微細に分散しなければ還元性へ悪影響を与える。石炭は内

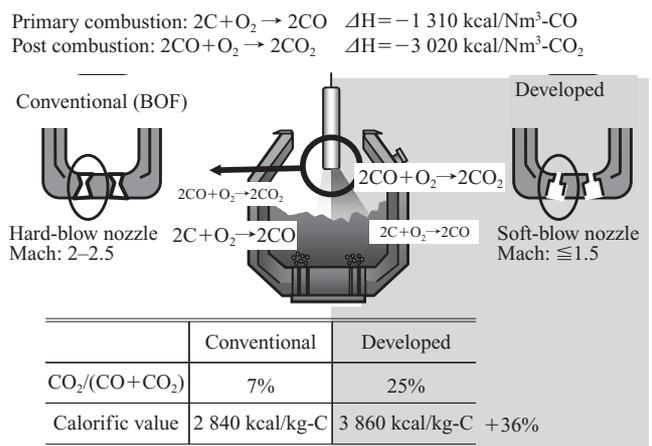


図 4 二次燃焼促進するためのランス形状
Fig.4 New lance design for enhanced post combustion

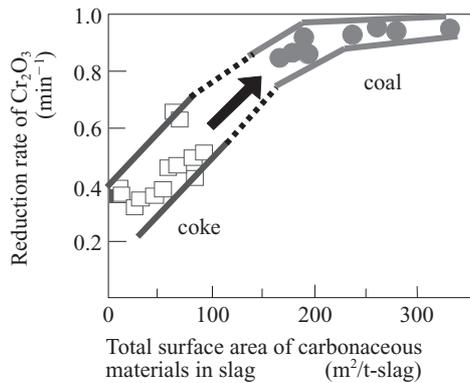


図5 石炭使用による反応界面積の増加と還元速度の向上
Fig.5 Using coal for the increase of reaction interface and reduction rate

在する揮発ガス成分によって炉内において熱崩壊し、粒が微細化される特徴を持つために、以上のような還元材に求められる要求を満たすことが可能となった。図5に示すように、Cr 鉱石の還元速度は、スラグ中の残留炭材の表面積で整理でき、炉内に微細に崩壊する石炭によって、還元速度は著しく向上した。この結果、スロッピングや還元不良といった操業不安定化を誘発するスラグ中の金属酸化物濃度の上昇を招くことなく、Cr 鉱石投入使用量を増加することが可能となった。

また、熱崩壊により微細化した石炭の一部は炉外に飛散するが、煙道内にて転炉排ガスの改質に寄与すること (solution loss 反応)、および含有する揮発分が分解することにより、炭材当たりの排ガス回収エネルギーが向上し、エネルギーの有効利用にも寄与している。

3.4 ステンレス溶鋼保持炉の建設

JFE スチール発足後、大型建設となったステンレス溶鋼保持炉は、スクラップ溶解機能を持つCr 銑の貯銑炉として世界初の設備である。ドラム型貯銑炉の炉底に、最大出力2 MWの溝型誘導加熱装置を合計4基備え、その貯銑能力は最大1400トンである。近年の鉄鋼業界の大きな課題であるCO₂排出規制下において生産量を向上させるためには、溶銑比率の低下、つまり冷鉄源の最大利用が不可欠である。この観点からも、スクラップを溶解するためのエネルギー効率の高い加熱装置を貯銑炉等へ応用する技術は、他工場へも展開が期待されている。

図6にはこの設備の外観図を示した。設備の機能としては、溶融還元炉と脱炭炉の間に位置し、従来は溶融還元炉で行っていたスクラップ溶解の一部を溶鋼保持炉が担う。これによって、溶融還元炉でスクラップ溶解に消費していた熱量をCr 鉱石の還元反応に利用できるために、Cr 鉱石の使用量が增加する。また、溶融還元炉と脱炭炉の精錬サイクルタイムの同期化や、溶融還元炉のCr濃度が製品スペックに制限される必要がないために、溶融還元炉では1ヒート当たりのCr 鉱石溶融時間を延長することができる。

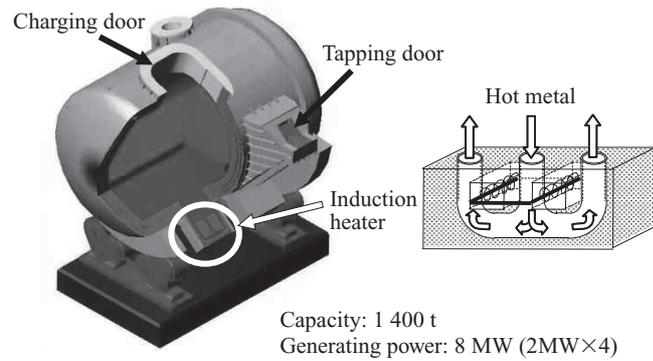


図6 ステンレス溶鋼保持炉外観
Fig.6 Outline of stainless metal reservoir

これによって溶融還元炉の吹錬回数を低減でき、稼働率の向上が可能となる。

3.5 ステンレス溶鋼保持炉によるCr源の変動

ステンレス溶鋼保持炉は、溝型誘導加熱装置により高効率なスクラップ溶解機能を持つ。図7にはそのエネルギー消費状況を示す。鉄皮からの熱放散やヒーター冷却水などによって損失される熱量を除けば、印加エネルギーの78%をスクラップ溶解の熱量として使用することが可能な設備である。

このステンレス溶鋼保持炉によって、千葉4製鋼での主原料使用はさらに自由度が増し、スクラップおよびCr 鉱石の使用量を増加させることが可能となった。この結果、高エネルギー消費原料であるFeCr合金鉄使用量の削減に大きく寄与している。

図8にはSUS430に代表されるフェライト系ステンレス鋼のCr源の内訳を示す。溶融還元炉の種々の改善と安定操業によって、Cr源の70%以上をCr 鉱石とステンレススクラップに代替することが可能となり、FeCr使用量を低減した。

3.6 転炉ガスと蒸気回収システム

溶融還元炉および脱炭炉の排ガス処理系には、フード上部をメンブレン形状の水管ボイラーとしたOG設備を採用するとともに、上部ボイラーの煙道には接触ボイラーを配置することによって、排ガスの顕熱エネルギーの回収効率

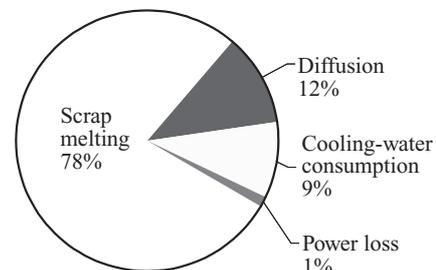


図7 ステンレス溶鋼保持炉での消費エネルギー内訳
Fig.7 Energy consumption in stainless metal reservoir

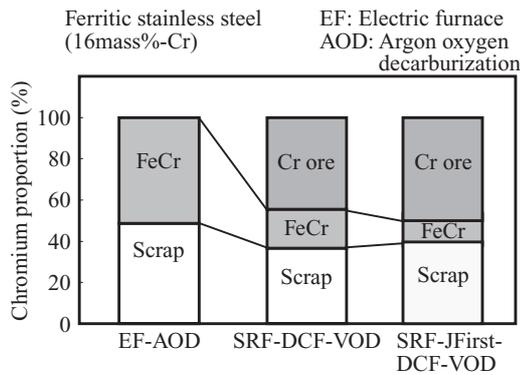


図8 従来プロセスとのCr源の比較

Fig.8 Comparison with conventional process of Cr source

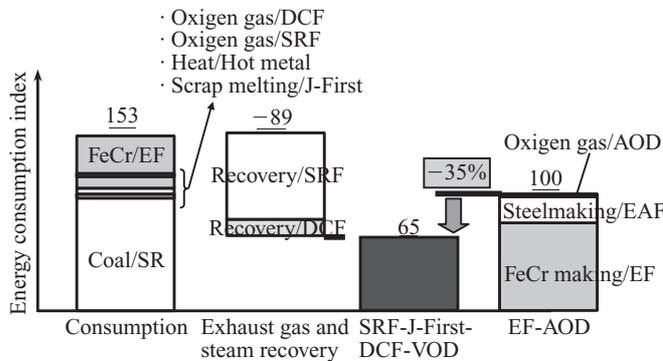


図9 製鋼プロセスでのエネルギー消費

Fig.9 Energy consumption in steelmaking process

を高めた。転炉排ガスはエネルギープラントにて主に発電用の燃料ガスとして利用され、蒸気については製鋼工場内の真空排気設備などプロセス用に利用されている。

3.7 エネルギーバランス

図9には千葉4製鋼のエネルギー消費バランスについて示す。燃料ガスとして回収する転炉排ガスと回収蒸気によって、一般的なステンレス製造プロセスである電気炉-AOD (argon oxygen decarburization) 法での消費エネルギーに対して、エネルギー収支は35%の低減された。

4. スラグ・ダストリサイクル技術

4.1 ダストリサイクル

図10にはダスト精錬炉 (STAR 炉) の概要を示す。千葉4製鋼より排出されるダストは、集塵水よりシックナーにて濃縮されスラリーとなる。スラリーは脱水・乾燥設備に送られ STAR 炉の原料となる。STAR 炉はコークス充填型の二段羽口型溶融還元炉であり、コークスは炉上から供給される。一方、原料となるステンレス鋼ダストは、炉下部に取り付けた二段羽口の上段から粉体上で吹き込まれて溶融還元される。原料としては、製鋼工場からの発生ダストだけでなく、製鉄所から発生する酸洗スラジなども同様に

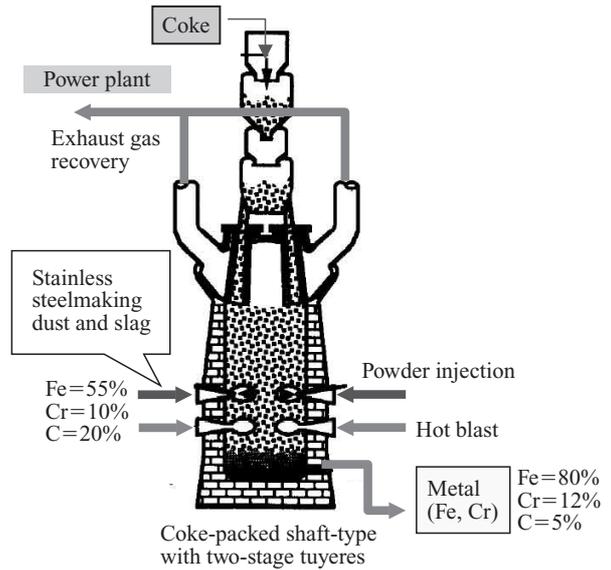


図10 ダスト溶融還元炉 (STAR)

Fig.10 Dust smelting reduction furnace (STAR)

扱うことができる。乾ダストについては前処理を必要とせずに吹き込みが可能であり、水分を含んだダストについてはスラリー状原料をスプレッドライヤーにて乾燥後に吹き込む。

STAR 炉より出銑されたCrを含む溶銑は、転炉装入用の鍋型容器に受銑し、溶融したままの状態溶融還元炉にて再利用することで、熱エネルギーのロスを最低限に抑えることが可能である。

4.2 スラグリサイクル

ステンレス鋼の製鋼工程で発生するスラグについては、主に製鉄所内の高炉へリサイクルするものと、土工用材料として再利用されるものへ大別される。転炉やVODなどの脱炭工程で発生したスラグについては、高炉、または溶融還元炉、STAR 炉などの強還元炉にて石灰代替としてリサイクルされ、これにより強還元されたスラグは土工用材料として外部販売されている。

5. おわりに

ステンレス鋼専用の東日本製鉄所千葉地区第4製鋼工場について、そのプロセス仕様と技術開発例の概要を示した。千葉4製鋼はステンレスの主となるCr原料として、Cr 鉱石の石炭による溶融還元技術と、スクラップの高効率溶解が可能でステンレス溶鋼保持炉を開発し、これらの技術は世界規模のエネルギー削減へ大きく貢献している。これによって、多電力消費型原料であるFeCr合金を溶解してステンレス鋼を製造する電気炉-AOD法に比較して、30%以上のエネルギー原単位の削減を実現している。また都市型製鉄所として環境を意識したりサイクル重視のプロセスを達成しており、次世代のモデルとなる製鋼工場を構築して

いる。

参考文献

- 1) 鍋島祐樹, 田岡啓造, 山田純夫, 浜田俊二, 桜井美弦, 増田康男. CAMP-ISIJ. 1995, vol. 8, no. 4, p.1139.
- 2) 鍋島祐樹, 小倉滋, 山田純夫. 川崎製鉄技報. 1996, vol. 28, no. 4, p. 206.
- 3) 岸本康夫, 田岡啓造, 竹内秀次. 川崎製鉄技報. 1996, vol. 28, no. 4, p. 213.
- 4) 菊池直樹, 山口公治, 岸本康夫, 竹内秀次, 西川廣. 鉄と鋼. 2002, vol. 88, no. 8, p. 450.
- 5) 廣田哲仁, 野村寛, 奥山悟郎. 川崎製鉄技報. 1998, vol. 30, no. 2, p. 78.
- 6) 杉澤元達, 小倉滋, 荒谷誠. 川崎製鉄技報. 1996, vol. 28, vol. 1, p. 14.
- 7) 長谷川伸二, 兒子精裕, 桃川秀行, 野村真, 小林敬二, 板谷宏. CAMP-ISIJ. 1995, vol. 8, no. 4, p. 897.

- 8) 菊池直樹, 岸本康夫, 竹内秀次, 反町健一, 寺島知道, 会田公治. CAMP-ISIJ. 1999, vol. 12, no. 104, p. 198.
- 9) 森岡宏泰, 寺島知道, 鍋島祐樹, 西川廣, 会田公治, 岸本康夫. CAMP-ISIJ. 1999, vol. 12, no. 105, p. 199.



金子 陽平



納 雅夫