

「鉄鋼スラグの基礎と応用研究会」 最終報告会に参加して初心に帰る

野崎 努

川鉄テクノリサーチ(株) 常務取締役

Tsutomu Nozaki

Remembering the Early Days of Organizing "Research Group on Fundamental and Application of Steel Making Slags"

1 スラグ研究会発足前の川鉄の状況

川崎製鉄は戦後、西山初代社長が命運を賭して作り上げた今でも語られる千葉製鉄所の旧工場を閉鎖し、さらに海側を埋め立てた西工場に製鋼と圧延の両工場を新設する計画を1990年に発表した。この西工場リフレッシュ計画が提案された当時、筆者は鉄鋼プロセス研究部長を担当しており、今回上工程に新設採用された種々のプロセス開発に従事していた。開発プロセスでは、溶融還元を応用したダスト処理炉(STAR炉)¹⁾、遠心分離タンディッシュ(Centrifugal Flow Tundish)²⁾、Flow Control Mold (FCモールドと称す)³⁾、Cr鉱石の溶融還元を利用するステンレス鋼精錬法⁴⁾などである。

このような数々の新プロセスの開発研究には力が入っていた。ところが、製鉄プロセスで副生するスラグやれんが屑をどのように処置すればよいか、都市型製鉄所に脱皮するというキャッチ・フレーズを真剣に遂行しようとする、スラグと耐火物の問題は避けては通れない。鉄鋼プロセスの上記開発が順調に進むにつれ、脳裏から離れなくなってきた。

そこで、研究本部長や本社担当部署に上記スラグ等の課題を率直に答申したところ、大多数というよりは全ての人々が賛成と回答した。スラグを真摯に研究する部門を設立することが決まり一安心し、プロセス研究開発の仕上げを立派に完遂しようと鉄鋼の担当研究員に伝えた。

一安心した後、びっくりすることが起こった。発案の通りスラグや耐火物を主体に研究する「耐熱無機材料研究部」を誕生させるので、最初に言い出したものが責任を取り、部長を担当せよとのことであった。言い出しておいて、採用された後で私はやりたくありませんとは言えない。解りましたやりましますと云う返事しか用意されていなかった。

耐熱無機材料研究部長を拝命したのは1992年1月1日で

あった。集まった研究員は6名、殆どがセラミックスの研究者であり、スラグなど知りませんと言う集団で、この難しいスラグの研究の端緒に付いた。

2 スラグ研究会発足の主旨

期せずして耐熱無機材料研究部を担当することになったが、今まで研究してきた製鋼分野とかなり異なる分野を担当することになり、研究のアプローチ方法の模索が始まった。耐火物に関しては、黒崎窯業殿、品川白煉瓦殿、大光炉材殿などのご協力により、研究所を隈無く見学させて頂いたお陰で、耐火物生産の側ではなく、使用する立場からの必要な研究項目や研究機器の設備仕様の準備が出来上がった。

反面、スラグに関しては各製鉄所の置かれた環境、立地条件があり、独自の研究展開が必要であることが認識された。しかし、スラグを販売するためのエージング技術やその基本を構成するフリー・ライムの分析法などまだ確定したとは言えない技術も多数存在し、この分野の統一・統合の重要性を感じた。このような不安を抱いた時期に、「鉄と鋼」のお知らせ欄に特定基礎研究会テーマの公募記事を見て、これに応募するしかないと決断した。公募記事によると研究テーマの性格は、「鉄鋼企業が必要とする重要な基礎研究で、大学・国公立研究機関及び企業の共同推進が適当なテーマ」とあり、スラグの研究は正しくこれだと直感した。

そこで、色々な人達に応募したい旨を述べ、賛成して貰えると思っていたところ、1977年4月から1981年3月までの4年間特定基礎研究会で「スラグの有効利用に関する基礎研究部会」が過去に活動したと否定的な反論を受ける始末であった。活動を完了した10年後に、再び同じ研究会を設立することはおかしいという意見が多かった。筆者はこの意見にスラグ研究の異常さを感じた。製鋼精錬や凝固に

関しては毎年同ようなテーマで研究会を鉄鋼協会や学振で取り上げ実行しているのに、なぜスラグの研究会が10年前に存在したからと言って研究会設立に反対するのか、10年前の研究会と異なった展開をすれば良いし、10年前とは社会情勢がさらに厳しくなっていると反論した。

そのような背景の下ではあったが、特定基礎研究会に応募したところ、8件の応募があり4件に統合したとの報告を受けた。幸運にも筆者提案の「鉄鋼スラグの物理化学と再資源化プロセスの研究」が1993年度実施のテーマとして選ばれた。

これ以外にもスラグの研究会の必要性を提案された諸氏がおられ、以下の応募があった。

- ・横川敏雄（北大理教授）
「スラグ融体の熱力学的測定と評価」
 - ・平沢政宏（名大工講師）
「還元性ガス吹き込みによる溶融スラグ中酸化鉄の還元反応の速度論的研究」
 - ・肥田行博（新日鐵製鉄プロセス研究部主任研究員）
「多成分系高FeOx融体の流動特性」
 - ・山岡洋次郎（日本鋼管第一研究部長）
「製鋼スラグの改質と利用技術の研究」
 - ・大門正機（東工大工教授）
「転炉スラグと高炉スラグを原料とする鉄セメント」
- 1993年実施の研究テーマとして、上記5氏のスラグ関係テーマは応募者/共同研究希望機関の直接協議テーマに分類された。

3 スラグ研究会発足当時

日本国内では、あらゆる産業に於いて都市型を意識した企業活動を行う必要がある。素材製造業である製鉄業も例外ではなく、むしろ先駆的に環境問題に取り組む姿勢が重要な業界である。特に、高級品質の鋼を製造する一方で、製鉄過程で必ず発生する大量のスラグに対し、どのように取り組みを行うかは、今後の日本の鉄鋼業の最重要課題といえる。

一般にスラグを再生利用するには、製品として安定した物性を持たせるための処理が必要である。しかし、製鋼スラグは、金属の中でもっとも安価な鉄（0.07円/g）⁵⁾を製造する際に発生する副生物であることから、鉄よりさらに安い製品である。したがって、スラグを現実的に有効に活用することは、産業的にもコスト的にもきわめて困難が伴う。ただし、近年は産業廃棄物処理技術やリサイクルなどに対する注目度が高まっており、これらの技術を活かして懸案の環境問題に対処しようという機運が各産業にも浸透して

きている。

さらに近年、社会情勢は一段と厳しくなり、地球環境問題が議論され、また省資源と資源の再利用を織り込んだ経済社会への転換を目指した「再生資源の利用の促進に関する法律」が1991年10月に既に施行された。そこで、この法律を意識して、鉄鋼スラグの内、問題の多い製鋼スラグに焦点を当て、(1)スラグのリサイクル、再資源を念頭に置いた精錬プロセスやスラグの基礎物性の見直し、(2)リサイクル技術の開発、(3)再資源としての製品化技術の開発、が求められているとして、これらを本研究会の課題目標として掲げることに決定した。

本研究会の主旨は横川先生（北大理）、幹事長は永田先生（東工大）にお願いし、科学的にスラグを研究する部会が発足した。

4 製鉄スラグの発生状況

4.1 高炉スラグ

日本全国で副生する鉄鋼スラグ（高炉スラグ＋製鋼スラグ）は1995年度で37,100kt発生し、高炉スラグの発生量は約23,000kt（全体の62%）である。生成原単位で見ると1tの鉄生産で310kgの高炉スラグが発生することになる。転炉スラグと電炉スラグを合わせた製鋼スラグは14,000kt（全体の38%）である。高炉スラグの水砕化率は63%に達し、高炉水砕スラグ及び高炉徐冷スラグともに全量が有効利用されている。九州地区では高炉スラグの殆どが水砕スラグとして処理されるが、関東地区では碎石が不足しているために、鉄道用バラスや道路用建材として徐冷スラグの需要も高い。しかし、徐冷スラグを製造するには、広大な土地が不可欠であるために、スラグに要するコストは高価なものになる。

高炉スラグは、非常に安定で利用しやすい特徴を有しており、その活用率は100%である。主な用途としては、(1)高炉セメント（64%）、(2)路盤材（22.5%）、(3)ロックウール、(4)肥料、等が挙げられる。この中で路盤材には徐冷スラグが主に使用されている。高炉スラグは全般的に安い値段で利用されている現状であるが、黄水発生など以前問題となった点が解決されたために、利用率は高い。

4.2 製鋼スラグ

溶銑中のPやSを転炉精錬以前に低下させる、いわゆる溶銑予備処理法は現在では精錬の必須プロセスとなって来た。この溶銑予備処理では脱Si、脱P、脱Sの工程があり、各工程で特有のスラグが発生する。さらに、転炉スラグや鍋スラグも製鋼工程で発生するので、これらを合計すると

156kg/粗鋼tのスラグが発生する。したがって、1tの粗鋼を製造するためには、高炉と転炉の合計として約460kg/tのスラグが副生され、日本で年間約1億tの粗鋼が生産されることから一貫製鉄所と電炉メーカーから産出されるスラグ量は約37,000ktの規模となる。

現在、製鋼スラグは高炉スラグの倍以上の処理費用をかけて製品化もしくは処分している状況にある。製鋼スラグの用途としては、(1)土木用 (35%)、(2)肥料・土木改良材 (20%)、(3)高炉へのリターン (19%)、(4)路盤材 (13%)、(5)埋め立て (9%)、(6)セメント原料 (4%)、である。

埋め立ては、処理業者に委託する場合もあり、製鋼スラグは全てが製品として活用されているとは言えず、高炉スラグに比較して利用及びリサイクルするための課題が多い。

その最大の理由は、高炉スラグの塩基度 (CaO/SiO_2) が約1近傍であるのに比べ、製鋼スラグの塩基度は4ないしそれ以上もあり、未反応のCaOやMgO量が多いため、十分なエージングを要する。エージング処理が不十分な場合には膨張などの変質を起こし、路盤材として使用した道路に亀裂が入ったり、道路が波打ってしまうなどのこともかつてあった。

5 製鉄スラグ発生の抑制

鉄鉱石の還元工程を行う高炉、それに引き続く溶銑中Cの脱炭反応を行う転炉工程に於いて大量のスラグ発生がある。この膨大に発生するスラグに対し、根本的な有効利用、もしくはリサイクルの方策が確立していない現状では、むしろスラグ発生量を抑制する研究が重要である。

より効率的な製鉄プロセスを構築するためには、次の4点に注目した精錬反応の研究が重要と考えられる。(1)溶銑と処理剤との反応効率の向上、(2)溶銑の温度低下防止、(3)銑鋼間の物流の効率化、(4)反応機構の解明。このうち、(2)

は、脱P工程以外の全ての反応が低温になるほど進行が困難なためであるが、次の脱炭工程を順調に行うには温度低下防止は重要と考えられる。脱Pは石灰系フラックス主体で処理しているが、脱Sを確実に実行するためには、ソーダ系あるいはマグネシウム系フラックスを必要とする。このとき、脱P、脱S反応と溶銑中の酸素濃度の関係を解明することで、より反応機構を理解できると考えられる。酸素濃度分布測定の実験により⁶⁾、脱Pは脱P剤吹き込み位置が最も酸素分圧が高く、取鍋上部に向かうほど酸素分圧が低くなり、脱S反応サイトになっていることが判明した。

現在このような反応解析を基にして、脱P・脱Sについては石灰系フラックスを用い、厳しい規格のS値が望まれる場合は、石灰系で脱P・脱S処理した後にソーダ系あるいはマグネシウム系フラックスを用いる脱S工程が行われる。

このように製鉄反応の高効率化を行うことが出来れば、使用する反応剤はそれだけ使用量を抑制できるので、スラグ発生量の抑制に著しい効果をもたらす。スラグの発生が抑制されるようになれば、スラグの利用及びリサイクルも量的に容易になってくるものと期待される。

6 スラグ研究会中間報告会⁷⁾の内容

1995年11月4日、日本鉄鋼協会秋季講演大会に併設で鉄鋼スラグ研究会の中間報告会が開催された。広い教室にもかかわらず立ち席が出るほどの盛況であり、内容及び討議も現在の鉄鋼界が抱える一つの重要課題であるとの認識を強く感じた。プログラム構成は、(1)電気炉・製鋼スラグの現状と研究課題、(2)スラグ発生量の低減とリサイクル使用、(3)電気炉・製鋼スラグの基礎研究、(4)スラグの利用用途と高温改質、が報告及び討論され、セッションはスラグ研究の課題項目に準じ吟味された印象を受けた。

この中で森永と呉は表1に示す転炉スラグ、予備処理スラグ、電気炉スラグ、LFスラグ、高炉スラグを対象に、スラグの組成表示法としてCaO当量塩基度B値を提案した。このB値を用いて各スラグを見ると、ガラスの実験結果からB値が0.6以下では水分との反応が必要ではない。逆に図1のB値が0.6以上のNo. 1, No. 3, No. 4, No. 5, No. 6のスラグはエージングの必要があると推定している。実用的で使用可能な指針を含んだ発表であった。

7 最終報告会⁸⁾の印象

1993年から開始し、1996年度に亘る研究会の最終行事として「製鋼スラグの発生量低減と資源化」と題するシンポ

表1 Composition of Iron- and Steel-making Slags

(wt%)									
No.	Kind of Slags	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	Total
1	BOF Slag	48	13	2	24	6	5	2	100
2	De-Si Slag	49	37	4	4	3	3	-	100
3	De-P Slag	57	13	2	12	2	8	6	100
4	De-PS Slag	58	15	2	8	2	8	7	100
5	EF Slag	29	15	10	31	7	8	-	100
6	LF Slag	54	24	9	-	13	-	-	100
7	BF Slag	44	35	14	-	7	-	-	100

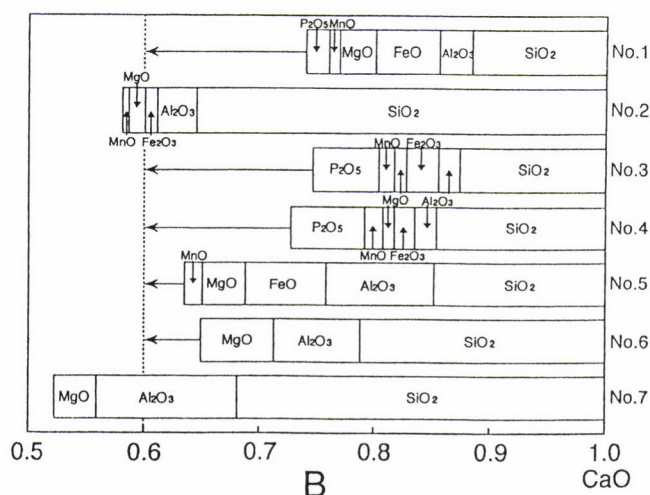


図1 Relation between water vapor aging of steel-making slags and basicity parameter B

ジウムが1997年5月19日、東京工業大学百年記念館フェライト会議室で開催された。シンポジウムには110名ほどの参加登録があり、盛況であった。韓国からも10名ほどの参加者があり、このテーマの今日性を如実に示していた。

第1部の製鋼スラグの発生量では徳田先生（東北大）から「溶鉄脱磷スラグの回生法を中心として」という基調講演に引き続き、スラグのリサイクルによる最終排出量の低減、予備処理の実状、また製鋼スラグによる脱磷の物理化学の基礎的研究の報告があった。

第2部の製鋼スラグの資源化では鉄鋼スラグ協会から「電気炉・製鋼スラグの資源化と課題」と題する全国視野の解説の後、水渡先生（東北大）による「スラグ資源化に関する従来の研究と課題」の特別講演があり、明確にフリー・ライムの定義が提出された。続いて、スラグのエージングに関する基礎研究と技術研究の報告、利用化技術の実例が報告された。佐々木先生（早大）は「Fe-Niスラグの水質浄化剤への利用」と題する特別参加の講演では、スラグの超微粒子のブラウン運動を利用した浮遊液滴の凝結を促進する浄化作用という興味ある研究成果を紹介した。

時間的な制約から、全委員からの発表はなかったが、約300ページの報告書が成果報告として出版された。地域的なスラグ排出の制約の厳しさから小出氏（住金）から転炉スラグの加圧式蒸気エージングが周到な基礎実験を踏まえて、図2に示すように、1回のスラグ処理量が50tで、3時間のサイクル処理で12,000t/月のエージング設備を世界で初めて完成させ、運転開始後2年を経過した状況が報告され、スラグ処理の取り組みの具体例として印象づけた。

もともとスラグの研究は地味であり、この研究会で皆を驚愕させるような成果を期待してはいけないう。しかし、スラグ研究の問題の所在は、スラグのリサイクルを計

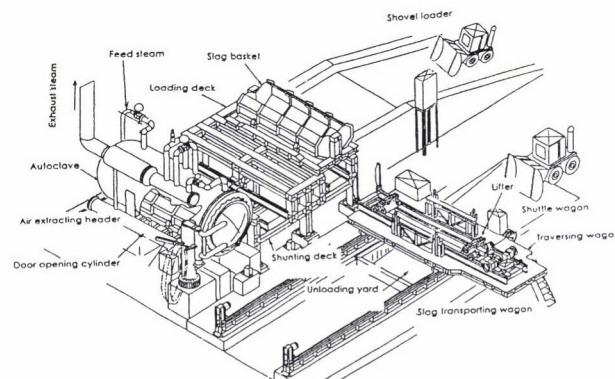


図2 General View of Wakayama SKAP (Sumitomo Kawasaki Aging Process) Plant

ることと、付加価値の高い資源として工場から送り出すことにあることは再確認できた。

さらに、予備処理が通常プロセスとなった今日では、予備処理を含めた製鋼プロセスの徹底的な見直しが次の研究課題であろう。これに加え、スラグを廃棄物としてではなく製品の一部とする素材産業を目指すことなど、来るべき次の研究会の課題が抽出されたと評価できた。

8 結言

川鉄千葉では、スラグやダストから有価金属の回収とスラグの有効利用を目的に、図3に示される斬新な溶融還元プロセス（STAR炉）¹⁾を完成させるなど、廃棄物ではなく逆に有価成分の回収に高能率を計る努力をしている。今後、より広範な技術普及とリサイクルなどの啓発により、産業界として副生物の利用に関し方向付けて行くことが肝要である。

さらに、鉄鋼界は製鉄スラグのみならず環境問題としてCO₂、NO_x、SO_x、産業廃棄物に積極的に取組む必要があり、スラグを産業廃棄物の範疇に入れないための研究が必要である。むしろ、高付加価値化のための一つとして減量化を図るなど、真剣な研究の積み重ねが要求される。

1996年の一年間をかけて製鋼部会は各プロセスを見直し、反応効率を高めることで製鋼スラグをミニマムにする研究会の必要性を検討し、1997年度からこの研究会を鉄鋼協会の高温プロセス部会の中に発足させ、活動を開始した。スラグ・ミニマムのためには、溶鉄中に存在する不純物元素とCaOとの反応効率を上げて、スラグ発生量を抑えることが製鋼プロセスに必要であり、これに対する基礎的な研究の進歩を期待したい。

製鉄業が続く限りスラグの副生は避けられず、製鉄・製鋼プロセスの専門家がスラグをミニマムにする精錬を意識したことは大きい。また数年を経過したとき、その時代背

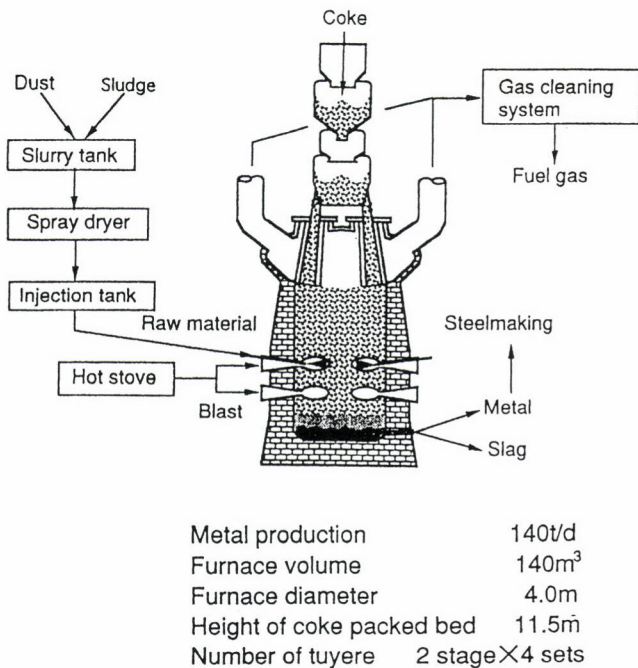


図3 Process flow of commercial plant of smelting reduction furnace in Chiba Works

景を反映したスラグの取組みを行う研究会が新たに発足することを切望したい。

本研究会の実行と成果を上げるため深甚なる努力を傾けられた横川主査、永田幹事長その他幹事と委員の皆様に厚く感謝申し上げます。筆者は研究会発足直後に関連会社に

出向となり、この研究会を提案しただけで実績はなく、研究会諸氏からひんしゅくを買い、最終報告会打上げ式では懺悔させられたことを記し、スラグ研究会発足当時の心境を締括ります。

引用文献

- 1) H. Itaya, Y. Hara, S. Taguchi, S. Hasegawa, M. Nomura and Y. Matsumoto : Rev. de Metall., (1997) 1, 63.
- 2) 三木祐司, 北岡英就, 藤井徹也, 斉藤滋之, 駒村宏一, 桜井美弦: 材料とプロセス, 7 (1994), 1200.
- 3) 井戸川聡, 戸澤宏一, 竹内秀次, 反町健一, 桜谷敏和, 杉澤元達, 森脇三郎: 材料とプロセス, 5(1992), 36.
- 4) 竹内秀次, 仲村秀夫, 桜谷敏和, 藤井徹也, 野崎 努: 鉄と鋼, 76 (1990), 1847.
- 5) 日本興業銀行: 1985年3月現在の調査
- 6) 竹内秀次, 小沢三千晴, 野崎 努, 江見俊彦, 大谷尚史: 鉄と鋼, 69 (1983), 1771.
- 7) 日本鉄鋼協会: 「鉄鋼スラグの基礎と応用研究会」中間報告書, (1995).
- 8) 日本鉄鋼協会: 「鉄鋼スラグの発生量低減と資源化」最終報告書, (1997).

(1997年8月20日受付)