

Savard/Lee溶融還元国際シンポジウム報告

片山裕之

新日本製鉄㈱プロセス技術研究所

シンポジウムの概要

本シンポジウムは、1992年10月18日～21日：カナダ モントリオールで酸素ガス底吹き用2重管羽口の発明者であるCanadian Liquid Air社のG. Savard、R. Lee両氏の業績を記念してインジェクション技術に関連する金属製・精錬（鉄、銅、アルミニウムなど）に関連する論文35件が招待されて開かれた。会議の名称にあるBath smeltingは通常『溶融還元』と訳されるが、このシンポジウムではもっと広い意味、インジェクション製・精錬全体を指すものとして使われている。主催はTMS (The Minerals, Metals and Materials Society)、CIM (Canadian Institute of Mining and Metallurgy) およびAIME (American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers) で、本協会も協賛団体の1つである。

シンポジウム参加者、発表者の国別の内訳を表1、2に示す。日本からは、新日鉄不破氏、三菱マテリア後藤氏ほか10名が出席し、佐野氏（名古屋大）、斎藤氏（鉄連）、北川氏（NKK）、岸本氏（川鉄）、林氏（三菱マテリアル）、著者（新日鉄）の6名が論文を発表した。

表1. 国別の参加者

国	参加者
カナダ	53名
アメリカ	48
豪州	15
日本	10
フランス	6
ドイツ	5
その他	81
合計	168

表2. 国別の提出論文

国	論文数	うち鉄鋼関連
カナダ	10件	4件
アメリカ	6	5
日本	6	5
豪州	5	1
ドイツ	5	5
チリー	2	0
スウェーデン	1	1
合計	35	21

このシンポジウムは、酸素底吹き用2重管羽口の発明を、ベッセマー転炉、LD転炉と並ぶ鉄鋼精錬における3大技術開発の1つと位置づけ、酸素底吹きを含むインジェクション技術が鉄溶融還元や非鉄金属精錬にも応用されて今日の種々のプロセス研究の基礎になっているとして、図1に示すような5つの分野から構成されている。以下、各分野ごとに内容を簡単に紹介する。

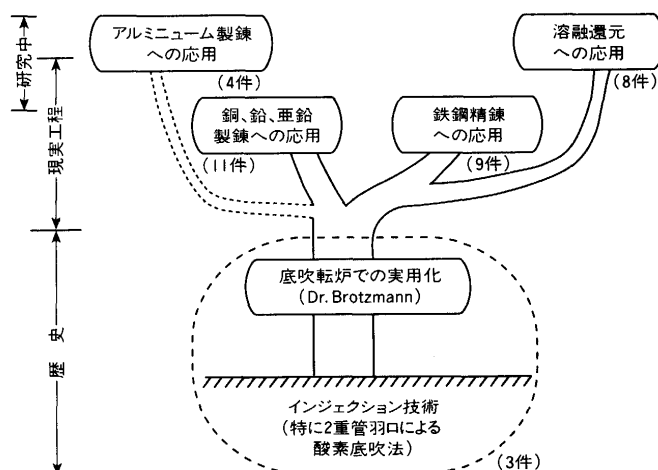


図1. 本シンポジウムの構成 (())の数字は論文数

酸素底吹き羽口の開発と実用化の歴史

会議の冒頭に、組織委員長であるProf. Brimacombe (British Columbia大学)とDr. Mackey (Noranda社)両氏を著者とする酸素底吹き羽口の発明とその意義を述べた論文が出され、最後にSavard、Lee両氏が自分たちの発明の経過をユーモアを交えて語った。さらにDr. Brotzmann (元西独Maxhütte社)が『OBMからHI-Smeltまで』と題して底吹き羽口の転炉への応用の歴史と展望を述べた（著者欠席のためProf. Brimacombeが代読した）。その内容は技術史として価値があると思われるので、概要を以下に述べる。

1940年代にCanadian Liquid Air社はガスの販路拡大をめざして、研究開発部門の中に冶金への応用を対象とした部を設けた。R. Lee (中国系カナダ人)は1947年にMcGill大学を卒業してその部に入り、インジェクションの研究を始めた。1951年からは、Guy Savardがその部長になった。

1947年から1967年までの20年間の開発の経過は次の通りである。

①ポーラスプラグからガス吹き込み (1947～1951年)；

鍋内の成分均一化のためにAr、N₂ガスを吹き込む方法(Gazal法)は成功して取鍋精錬法のはしりとなった。しかし、酸素ガス吹き込みではポーラスプラグの損耗が激しいことがわかった。

②酸素ガス浸漬吹き込み (1951年)；

溶銑の脱珪を目的にランスパイプによる吹き込み試験を

実施したが、ダスト発生が激しいことから実用化されなかった。

③底吹き羽口(単管)での溶銑への酸素吹き込み(1952～1962年)；

酸素吹き込みの開発対象を底吹きに変更し、試験は鉄および非鉄金属各社の設備を利用して行われた。酸素圧力を4135kPaに上げると、溶銑では断熱膨張による冷却効果でマッシュルームが生成して羽口が保護されることが見いだされた。また、溶鋼については酸素圧力を8270kPaまで上げると断熱膨張によって必要な冷却効果が得られることがわかった。しかし、実用化については鉄鋼各社は乗ってこなかった。

④酸素-水蒸気混合ガスの底吹き(単管)(1962年)；

フェロクロム溶湯の優先脱炭が試験の対象になり、対象とするメタル温度がさらに高温にすることが必要になった。冷却力アップのために底吹きを高压酸素と水蒸気混合の組み合わせとし370ヒートの試験を行って、羽口損耗速度低減の条件を見いだした。しかし、実用化されなかった。

⑤2重管羽口の発想と試験の成功(1963～1967年)；

K-Vesselと名付けられた高さ1.2m、直径0.6m(メタル容量150kg)の万能型ガス吹き込み試験炉を作って系統的試験を開始した。なお、Kは長年実験に関与し、その炉を設計した技術職、B. Kottmeierの頭文字とのものである。それまでは断熱膨張による冷却効果にこだわったので高压酸素を使用してきたが、この時点で商業的に得られる圧力の酸素を用いることに方針を変更した。羽口損耗防止策として、酸素ガスとメタルの直接接触を抑えることに目的を絞り、最初は不活性ガスで酸素ジェットを包み込むこと、つぎに酸素のゲッターとして炭化水素を利用すると発想が進んで保護ガスとしてメタンとプロパンが選ばれることになった。酸素と炭化水素を同時に用いるので爆発などの諸問題を考慮して種々の羽口デザインを検討した後、図2¹⁾に示す2重管羽口に至った。実際に試験を行ったところ、溶鋼に吹き込まれた時に炭化水素のクラッキングによる吸熱が冷却とマッシュルーム生成に効果的であることがわかった。

この方法が鉄および非鉄金属の各社に対してデモンストラレーション試験によって示されたが1967年秋までは実用化についての反応はなかった。

⑥底吹き羽口の実用化(1967年秋～冬)；

西独MaxhütteのDr. Brotzmannが1967年10月に接触してきて話が急速に進み、その3月後に20tトーマス転炉を改造して試験されすぐに実用化されることになった。

Dr. Brotzmannによれば、1967年当時、高りん銑を用いたトーマス転炉で製鋼を行っていたMaxhütte社は技術的に苦境にあった。従来のトーマス転炉では溶鋼中Nが高いという問題と、おりからの連続 Casting 化に対応するため吹き止め温度を上げる必要から脱りんも難しくなってきたからである。

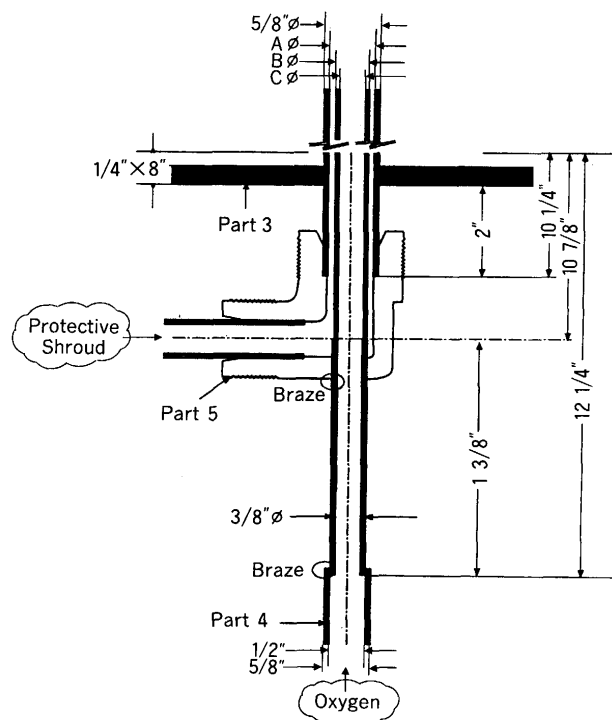


図2. 2重管羽口の設計図(1964年)¹⁾

解決のためには底吹きを酸素ガスにする以外にないと考え、その方法を検討していた所にカナダでの底吹き羽口が成功の情報が入ったわけで、まさに飛び付くという感じてあったようである。

以後のQ-BOPなど普通鉄製鋼法への底吹き酸素転炉法を経て上底吹き転炉に展開し、現在の転炉製鋼法の主流になっていること、さらに転炉での高2次燃焼、炭材底吹き技術からスクラップ溶解、鉍石溶融還元へと展開していることはよく知られている通りである。

このSavard/Leeの2重管底吹き羽口の開発とDr. Brotzmannによる実用プロセスへの展開の歴史は、プロセス研究開発について示唆する所が大きいように思われる。

なお、豪放磊落なSavard氏と、地味で控えめなLee氏は、報告を聞いただけでも絶妙の組み合わせと感じられた。

鉄鋼精錬でインジェクション法の基礎と応用

基礎研究としては5件の報告があった。Prof. Guthrie (McGill大学) がマッシュルームの生成機構について、佐野氏(名古屋大) がガスインジェクションの基礎について、Prof. Szekely (MIT) が、ガス吹き込み時の混合と流動についてのモデル計算について、Prof. Irons (McMaster大学) が浴に吹き込まれた固体粒子の挙動について、また、Prof. Robetson (Missouri-Rolla大学) らが2相の溝型炉でインジェクションを行った場合の流動と混合についてもモデル実験と計算の結果を報告した。

実用製鋼炉への応用は、転炉については岸本氏(川鉄)、電気炉についてはイタリアで実用化されているK-ESについてKlöckner Contracting & Technologie社の報告があっ

た。さらに、数十年前から有名であった、溝型炉の1種であるWORCRA法について発明者のDr. Worner (元CRA) が報告した。この方法は鉄鋼精錬炉としては実用化できなかったが、現在でもダスト処理などへの適用が試験されているようである。

鉄溶融還元法

現在、大型試験が進行している3つの方式、すなわち、HI-Smelt法(豪州)、DIOS法(日本鉄鋼連盟)、AISI法(アメリカ)、およびすでに実用1号機が動いているCOREX法(Voest-Alpine社)について8件の報告がなされた(表3)。これらは、低2次燃焼-高予備還元型(COREX法)と高2次燃焼-低予備還元型(HI-Smelt法、DIOS法、AISI法)に大別され、後者はさらに底吹き攪拌が比較的穏やかなもの(DIOS法、AISI法)と多量の粉体底吹きを行うため非常に攪拌が強いHI-Smelt法に分けられる。

表3. 溶融還元についての提出論文

分類	方式	提出論文
低2次燃焼-高予備還元型	COREX法	・理論から商用生産まで (Deutsche Voest-Alpine Industrien-lagen)
		・燃焼・伝熱基礎 (Prof. Oeters)
		・インジェクションの適用 (HI-Smelt Corp.)
		・反応・伝熱機構 (新日鉄&日本鉄鋼連盟)
	フェロクロム溶融還元	・加圧の効果 (NKK&日本鉄鋼連盟)
高2次燃焼-低予備還元型	DIOS法	・共同研究プロジェクト (日本鉄鋼連盟)
	AISI法	・反応基礎 (Prof. Fruehan)
	AISI法	・プロジェクト紹介 (AISI)

著者がこのシンポジウムでの議論に期待したことは、高2次燃焼型で底吹き攪拌強さが酸化物還元反応が伝熱にどのように影響し、全体としてどの条件での操業することが有利であるかということである。

著者は、多量スラグを利用し、かつ比較的穏やかな攪拌で、上吹き酸素ジェットと金属の反応を抑制する方式についてフェロクロム、フェロマンガンおよび鉄の溶融還元の種々の規模の試験結果をまとめて、還元反応と伝熱に機構に述べた。

スラグフォーミング、還元反応速度などについては、Prof. Fruehan (Carnegie Mellon大学) は基礎研究結果と日本の大型試験のデータを用いた解析を報告した。これについて

の考え方は日本のものと大きな差はないように思われた。

一方、伝熱については、底吹き攪拌条件が大幅に異なるDIOS法とHI-Smelt法の双方で、『高2次燃焼-高着熱効率』の結果が報告されており、それぞれの伝熱機構およびそのスケールアップ性が関心を持たれている。Prof. Oeters(Berlin工科大学)が、HI-Smelt法を対象にして燃焼と伝熱に関する長大な論文を提出した。Prof. Oetersの説は、次の3点にまとめられる。

(1) 高2次燃焼雰囲気から溶融物への伝熱を説明するためには燃焼空間に飛散する溶融物の滴として非常に径の小さいものを考える必要があること

(2) しかし、メタル滴として径の小さいもの考えると、計算上は高2次燃焼雰囲気メタル滴の脱炭が進み、結果的に2次燃焼率が低下するという矛盾に至ること、

(3) 伝熱を促進しつつ同時にメタルの脱炭を抑制するためには、酸素ガスでなく空気中で2次燃焼させていることが本質的意味をもっていること。

これに対して、著者が提出した機構は、比較的穏やかな攪拌で1700℃前後の燃焼ガスから溶融物への伝熱量が大型炉でも問題なく確保されているのは、輻射以外に過熱された炭材の循環による伝熱の寄与が大きいとするものである。

酸素ガスを用いたDIOS法でも高2次燃焼-高着熱効率が得られているという現象は、空気燃焼が必須条件であるというProf. Oetersの説では説明できない。なお、これまで得られているHI-Smelt法のデータはメタル量が最大約10tの規模で得られたものであるが、Prof. Oetersは伝熱の説明に壁から輻射伝熱を全く考慮していない。もし、壁の影響が大きければHI-Smelt法ではスケールアップした時に伝熱制約がでてくることになるかも知れない。議論では結論に至らなかったがHI-Smelt法のスケールアップ試験の結果が興味をもたれるところである。

プロセスについての報告は、4方式ともあたかも申し合わせたかのようにステップアップの計画が発表されて注目された。COREX法は現在稼動している南アISCOR社の35万tプラントに続いて、韓国浦項製鉄所に70万tプラントが建設されることが直近に決まった。HI-Smelt法は試験規模をアップしたパイロット設備が完成に近づいており、本年末頃から試験が行われるようである。DIOS法は500t/hのパイロット試験設備がNKK京浜製鉄所内に建設されており来年には試験が始まることになっている。また、AISI法は50t/h規模のデモプラント建設の計画が進んでいるという。

溶融還元法がいつ高炉法にとって代って鉄製造法として実用されるようになるかは興味をもって見られていることである。いずれの方法も一般解として高炉法を凌駕できるようになるためには解決すべき課題を抱えている状況にあると思われるが、それぞれの国におけるニーズ(例えばアメリカではコークス炉の新設がむづかしい状況にある)

に應えるために積極策を打ち出している。この数年間の動きが注目される所である。

非鉄金属製錬

銅、鉛、亜鉛製錬については11件の報告があった。この分野では生産性を上げることなどを目的に1970年代から各種のインジェクション方式を用いた製錬法が開発・実用化されている。羽口による横吹きあるいは底吹き法(Noranda法、EI Teniente法、QSL鉛製錬法)、上吹き法(三菱法)、ランス浸漬吹き込み法(Isasmelt法)などが主なものであるが、製錬所によって異なった方法が使われていることは、原料条件などの立地条件が影響しているためであろうが、鉄鋼関係者の目から見ると興味深く思える。

酸素供給強度という点では、最高のものでLD転炉の半分くらいとのことで、酸素供給強度を上げて生産性向上と環境対応を効率化が今後の方向のようである。

アルミニウム製錬については4件の報告があったが、その中でインジェクションに直接関係するものは浴に塩素ガスを吹き込んでアルカリ金属を除去するというプロセスだけであった。

図1に示したように、このシンポジウムはインジェクションについて歴史的展開と各種金属製錬への応用という2つの軸にそって論文を集め、今後の新たな展開を考える場としようとするものである。それぞれの論文の内容が充実していたとともに、全体としてなにか訴えかけるものを持ったいい会議であった。

カナダ的なものとは

このシンポジウムが開かれた時期のカナダでの二大ニュースは、野球のワールドシリーズでトロント・ブルージェイズがカナダチームとして初めて優勝したことと、憲法改正についての国民投票が行われたことである。以下、後者について少し書いてみた。

カナダを理解するためにもう1つの着眼点は、イギリス系カナダ人とフランス系カナダ人の対立関係である。それは同時に連邦と州の対立関係でもある。シンポジウムが開かれたモントリオール市が属するケベック州はカナダ最大の州で、同時にフランス系が強い唯一の州である。ケベック州ではフランス語が公用語であるが、カナダ全体からいえばイギリス系に比べてフランス系に比べて少数派(現在では人口の25%以下)であり、かつ移民がイギリス系の方に同化してゆく傾向にあるので、ケベック州はフランス的なものを維持するのに強い執着を抱いている。そして、事あるごとにケベック独立を唱えて牽制している。カナダにおいては、イギリス系とフランス系、それを反映する連邦と州の利害対立をどのように調整してゆくかが政治最大の課題とされている。

ケベック州を連邦の中に留めるために、連邦は、これまで、ケベックの特殊権益(例えば、英語とフランス語を公

用語として同格に扱うこと(2言語主義)、ケベック州が批准しなかったが連邦が強制的に実施するというほど)を認める妥協を重ねてきた。現在の憲法は、ケベック州が批准しなかったが連邦が強制的に実施するという変則的な状態にあるため、ケベック州にも認めさせようというのが今回の憲法改正について国民投票の狙いである。したがって、現在の憲法よりもケベック州の特殊権益を一層推し進めた内容になっていた所、今度はイギリス系が怒りだし、一方、ケベック州もこれでも不十分と反対することになって、10州のうち6州で連邦政府の提案が否定されたというのが今回の国民投票の顛末である。

日本のある新聞は、『カナダがつまずいた』という表現をしていた。たしかに現政権にとってはつまずきと言えるであろう。しかし、カナダは戦争とか革命とか武力手段に解決を求めず平和的に解決するという伝統に支えられており、経済的にもケベック独立は無理と言われているので、それを前提として考えれば、利害関係の異なる2つの集団の双方が『NO』を表明したことは別の見方をすれば双方が妥協できるギリギリ点が見えてきたとも言える。

カナダは、連邦という統一を保つために、『2言語、多文化主義』を採用している。具体例としては、総ての連邦の公文書は英語とフランス語の2通りが作られ、また総ての商品には英語とフランス語の2通りの記載をすることが法律で義務づけられている。我々からみると効率が悪いような気もするし、また、国としての力強さに欠けているようにも感じられる。しかし、現在、世界の多くの国で民族問題が深刻化し武力衝突も起こっている中で、カナダが民族問題の平和的調整を計ろうという粘り強い努力を続けていることは称賛すべきであると思われる。また、その努力の産物である『2言語、多文化主義』が、まさにカナダがアメリカの1部ではないというアイデンティティの拠り所にもなっている。

1言語、1民族の日本人からはもっとも理解しにくい所であるが、世界的には日本のような状況の所の方が特殊であって、多民族国家の方が多いのであるから、カナダは21世紀の国家の手本とも言える。

そのようなことを考えながらSavard/Leeの2重管底吹き羽口を見直してみると、酸素とプロパンという混りようによっては爆発しかねないものをうまく組み合わせてマッシュルームを作らせ羽口を保護するというのは、まさにカナダ的な発明と言えそうである。

文 献

- 1) G.Savard & R.Lee ; Rroceedings of Savard/Lee International Symposium on Bath Smelting (Edited by J.K.Brimacombe, P. J.Mackey, G.J.W.Kor, C.Bickert & M.G.Ranade), p.657, (1992) [TMS]

(平成4年11月25日受付)