

随 想

日本の鉄鋼業の新しい地平線*

W-K. Lu**・(訳)佐野 信雄***

1978 年 11 月から 1979 年 6 月までの 6 ヶ月と少々の間、現代の鉄鋼技術の先進国である日本でサバーティカル休暇の一部を過ごした。この間、諸大学、製鉄所、研究所の訪問や東京大学のホストとの日常会話を通じて専門的に得る所が非常に大きかった。非常に忙しい日程にもかかわらず、数百人に上るあらゆるランクの方々が、最近の技術発展を理解するのを助け、時には不当とも思われるぶしつけな質問にも辛抱して下さった。ほとんどの会話は非公式だったので、私の誤解によりそれぞれの方々に御迷惑をかけるのを恐れて、本稿では情報源を明らかにしないことにする。これらすべての興味深い技術発展に貢献された方々と私との対話とその間の私のコメントを書き留めることを本稿の目的とした。

この機会を借りて、財政援助をされた日本学術振興会、National Science and Engineering Research Council of Canada、マクマスター大学に感謝したい。東京大学でのホストであつた松下、館教授、佐野、大蔵助教授には、学内での援助、学外の訪問日程の調整でお世話になったばかりでなく、家族を含む私共の日本滞在を楽しく、また実のあるものにしていただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

1. 研究開発の基本的戦略

日本の鉄鋼業は不安定な原料供給に対応できる柔軟性のある技術を必要としている。国際市場でのシェアを維持するためには、低価格よりは良質な製品を一貫して

供給することに力を置くべきであろう。連铸技術のすばらしい発展と最近の高炉操業の改善を考慮すると、全体の効率を上げかつ鋼質を改善するために今後重点を置くべき領域は、製鋼技術だと思われる。この分野こそ、企業現場や大学の鉄鋼製錬の研究室で重点的に研究開発する対象にすべきである。

2. 新しい製鋼法—二つのアプローチ

二つのアプローチ、すなわち多段反応器を用いる製鋼法(将来の連続製鋼の先駆となろう)と上からも底からも吹錬できる“LD-Q-BOP”とも呼ばれる超反応器が考えられる。ともに一貫して良質な、すなわち硫黄、りん、酸素の極めて低い溶鋼を製造することになる。この後効率のよい連铸とつなぐためには、tap-to-tap 時間を非常に狭い範囲でコントロールする必要がある。品質と予定通り操業する条件を満足するためだけでなく、原料供給の面での日本の鉄鋼業の弱点をカバーするためには、プロセス管理を効果的に利用して溶銑成分の変動に対処することになる。

(A) Q-BOP と LD 転炉

Q-BOP 技術者から詳細な情報は発表されていないが、明確な結論がつけられる。すなわち鋼浴の攪拌とおそらくスラグとメタルの混合も予想通り、Q-BOP のほうが LD よりも優れている。どの反応元素の濃度対時間関係(反応経路)もスラグ/メタル、ガス/メタル反応とも Q-BOP のほうが平衡値に近い。はつきりと定義

* 昭和 54 年 8 月 28 日受付 (Received Aug. 28, 1979)

訳者注：本稿は Lu 教授が日本・カナダ人物交流計画に基づく約 6 カ月の滞日を終えて帰国される折に滞在中の見聞をもとに書かれた印象記である。鉄鋼協会編集課の要望で浅学を顧みず翻訳したが、特に第 6 章は原文のニュアンスが拙訳のために著者の意志通り伝わっているかどうか危惧している。原文は鉄鋼協会に保管されているので、御興味のおありの方は申し出られたい。

** マクマスター大学 Stelco 教授† (McMaster University, Hamilton Ontario Canada)

*** 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo)

† Stelco 教授：カナダの鉄鋼会社である Stelco (Steel Company of Canada) 社が PR のために Stelco 教授という Chair (籍) をマクマスター大学に設けて、給与と研究費の一部を大学に(教授個人ではない)寄付している。この Chair を占める教授は、他の教授と権限、責任がまったく同じで自由に活動でき、Stelco 社のいわゆるひもつきではない。このような企業から大学への Chair の提供は北米ではかなり一般的である。

されている平衡状態に近いということは、ヒートによるばらつきが小さいことを意味している。

Q-BOP に反対する人は次の二点を挙げる人が多い。一つは、酸化度が低く、スラグの酸化鉄分が少ないために、熱力学的な脱りん力が高いという点である。しかし実際の脱りん程度は、熱力学によつて決まる最大脱りん力と反応の進行度（あるいはスラグの能力が発揮されている程度）の両者によることに留意しなければならない。微粒子の石灰を底から吹く時は、エマルジョン化したスラグが浴面に上昇するまではほとんどカルシウムフェライトであり、吹錬のごく当初を除きシリカを含まない。送酸速度を上げるか、浅い浴を使えば、Q-BOP のスラグの酸化鉄分を簡単に上げることも可能である。

第二の点は、羽口で炭化水素系の冷却剤を使うために最終水素値が上がることである。この問題は水素を含まない冷却剤に変えれば解決でき、例えばヨーロッパでは液体炭酸ガスが試験されている。私の個人的な意見では、例えば石灰石の煅焼工場で発生する炭酸ガスを Q-BOP の吹錬末期に酸素と混ぜれば、羽口での熱発生を抑え、酸素の供給を減らしつつ強い攪拌を維持し、さらに浴を脱酸、脱ガスすることもできよう。LD でも同様の効果が得られると思われる。

ボトムの寿命が長く、吹錬時間が短いという点で、Q-BOP 操業が LD 技術者に及ぼした衝撃は非常に大きく、LD 操業を徹底的に改善するための刺激になっている。論理的な帰結として、LD の鋼浴に攪拌ガスを吹き込むことから始めることになる。上からの旋回ランスも興味深い。近い将来、Q-BOP と LD を一緒にした新しくかつ融通性のある製鋼炉が出現する可能性が非常に強い。

(B) 多段製鋼システム

(I) 脱炭に先行する溶銑処理

$\text{CaO}-\text{CaC}_2-\text{CaCO}_3-\text{C}$ 系混合物を吹き込むなりスラグ/メタル系を機械的に攪拌して脱硫する方法は、工業的に確立している。したがって次の段階として脱硫（還元性条件で進みやすい）と脱りん（酸化性条件で進みやすい）を同時に行うことに挑戦することになる。溶鉄の低温脱りん（熱力学的に利点がある）法には、プロセスの化学と酸素ポテンシャルに関する基本原理の相違により、種々の可能性が考えられる。

(i) 塩基性かつ酸化性スラグ

りんは酸化剤により酸化され、スラグ中の塩基性酸化物、例えば CaO または Na_2O により安定化してりん酸塩を生成する。この条件を満足し、約 1300°C で液体スラグを生成するような反応物質は、炭酸ナトリウム分の多い混合物、カルシウムフェライト-アルミナスラグ、カルシウムフェライトと塩化カルシウムの混合物が主なものである。かなり脱炭する以前にこのようなスラグで脱りんすることは、全体の平衡関係とは確かに矛盾

する。スラグ-メタル界面で一酸化炭素の核生成が起こりにくいために、脱炭が相対的に遅れる時に限り、このような脱りんが可能になる。他方、適当な、できれば穏やかな攪拌がスラグ-メタル反応を速やかに進めるのに必要である。

溶銑中のシリコンは酸化剤を消費するばかりでなく、スラグの塩基度を下げ、脱りん、脱硫力を損う。非常に低シリコンの溶銑を除き、脱りん以前に脱けいする必要がある。低シリコン（0.2~0.25%）の溶銑が二三の製鉄所で製造できるようになったので、溶銑シリコンのコントロールについてはほとんど問題がなくなると思われる。炉外脱けいでは、次の処理に必要な約 1300°C という温度を得るために酸素の一部を酸化鉄に置換して供給することになる。脱けい中またはその後にスクラップを加える方法も、温度を低く抑えるために利用できる。

既発表の文献によれば、ソーダまたはカルシウムフェライト系スラグを利用するプロセスの開発がかなり進んでおり、生産現場に応用することを念頭にその冶金学的、経済的試験結果を評価している所である。比較的多量の溶銑とソーダないしフェライト系の酸化性スラグとを接触して利用する場合、反応と促進するのに次の二つの方法が考えられる。すなわち a) りん酸塩を安定化し、ある程度復硫を伴うのを覚悟して硫化物を不安定化するために、スラグを酸化状態に保持する目的で、酸素を連続的に供給する。b) 酸素を連続的に供給せず、酸化状態が低下して硫化物が安定化するが、復りんする。例えば a) の場合はスラグ層の上に酸素ジェットを吹きつけることにより、b) の場合は粉体吹き込みないし KR 法の採用により達成できる。もちろん両条件とも、一つの反応器でも多段反応器を用いても、あるいはバッチでも連続操業でも実現できる。

予備処理現場で、経済的に反応物質を使用し、かつ排ガスを処理するためには、シリコンないしりんを酸化している間脱炭をなるべく抑えるのが肝要である。ジェットの設計、ランス高さの調整、攪拌条件が界面接触や物質移動ばかりでなく、同時に併発し得る酸化反応の選択性に著しい影響を及ぼすと考えられる。

(ii) 反応性の強い物質

強還元性物質、すなわちカルシウム、ナトリウム、マグネシウム等の強反応性物質はりん化物、硫化物を生成して、適当なスラグ中に回収、保持できる。実験室の結果によれば、りん化カルシウムが生成するが、炭化カルシウムも同時に生成することが報告されている。スラグの生成、シリコンによる妨害や一酸化炭素が存在しないのが魅力である。容器のライニングが侵されるのが確かに問題となろう。このような短所を克服すれば、本方法も一つの選択であるといいたい。この方法は、りん、硫黄、シリコン分が高い溶銑に対して非常に重要である。

(iii) りんの蒸発性物質の生成

(i), (ii) の場合の中間の酸素ポテンシャルでは、低平衡分圧のりんの気体化合物が熱力学的に意味を持つようになる。脱りんするには、適当な酸素ポテンシャルを持つ大量のガスとよく接触することが必要である。この条件は脱炭途中や酸素ガスで薄めた時に実現される。

(II) スラグなしの脱炭

溶銑から Si, S, P を除いた後の脱炭は酸素製鋼炉で行うことになるが、この場合はスラグを要しない。スラグがない時は、脱炭反応と浴の温度上昇は吹酸量によって正確に予測できる。硫黄とりんによる炉ライニングの汚染がなくなり、復硫、復りんの恐れもなく、マンガンの損失も減少する。スロッピングがなくなり、与えられた反応器の生産容量も増加することは明らかである。スピittingが問題にならなくなることも報告されている。終点成分、炭素量、温度のコントロールも全く問題がなくなるので、自動制御が可能になる。

酸化鉄を含むスラグを使わず、終点で酸素からより低酸化性のガスないし中性ガスに切り換えると、浴はある程度脱炭され、特に底吹きすれば脱ガスも可能である。

総括すれば、多段反応器製鋼システムはバッチ式反応器を直列（あるいは連続）に並べて Si, S, C, O を除去するので、ばらつきの小さい品質、予定通りの操業、低い操業コスト、未熟な、あまり熱のない作業員、原料品質の大きな変動に対する適応性を高める目的で、高度に自動化できると考えられる。

3. 高 炉 技 術

高炉技術の発展については、「足固め」というのが現在の活動を表わすのに最も適切な言葉であろう。操業面では装入物分布が現場技術者や研究者の注目を浴びているようである。湿分のないコークス（ドライクエンチによる）、脱湿送風、機器化によつて、安定操業の達成目標が多くの高炉技術者の手に届くところに来ている。一層安定な操業が達成されることは、技術進歩と高炉反応に関する我々の知識をさらに進展させるための次の段階の始まりでもある。操業の安定期を持つことによつて、操業パラメータの変動とそれに対応する炉の応答についてさらに確実な情報が得られることになる。この間に、解体調査に基づく融着帯の挙動を中心とした高炉理論が洗練され、実際の目的にかなった有用なものになる。直接観察と数学モデルが平行して発展すれば、安定した溶銑成分、高いエネルギー効率、ライニングの長寿命、作業員の経験に依存しなくてすむといった種々の事項を目的とした信頼性のある自動化が、重油吹き込みと装入をクローズループで相互につなぐことによつて可能になる。

約 1.8% MgO（従来は 1.5~1.6%）を含む優れた焼結鉱が製造できるようになったために、ある製鉄所では高炉操業が著しく改善され、溶銑温度をあまり下げずに

シリコンの非常に低い溶銑が得られている。これは新しい製鋼法の開発につながるという意味で重要であろう。燃料比の新しい目標は 405 kg/t に置かれている。これまでの記録は 428 kg/t である。

4. コークスとその製造

日本の製鉄技術者の間にはコークスの最も重要な性質を一つ選べば、レースウェイ中およびその直前、すなわち炭酸ガスを含む高温部分における熱間強さであるという点で意見が一致している。サンプリングと解体調査により良質な原料炭を起源とする反応性の低い炭素の量と分布が熱間強さに対して最も重要であることがわかつている。この結論自身はもちろん驚くほどのものではないが、良質な原料炭の代替えを見つめようとする時や成形コークスを開発する場合は非常に示唆に富むものである。

重油あるいは石炭から作った高温ピッチや溶剤で精製した石炭は将来の成形コークスのバインダーや通常の良質な原料炭を部分的に置換するために必要な添加物となるだろう。これはピッチや溶剤精製した石炭から得られる炭素が優れた原料炭からの炭素と物理的、化学的性質が似ていて、塑性状態にある温度範囲が広いためである。このような材料の使用経験を工業規模で現在重ねている所であるが、将来の炭化技術に絶大なインパクトを与えることには疑問の余地がない。このピッチ（溶剤精製石炭は除く）の深刻な欠点は有機硫黄分が高いことである。

石炭を部分的にブリケット化して予熱するほかに、コークス化温度の関数としてフリー温度をプログラム制御して、最低のコークス化時間で均質かつ完全に炭化して品質を改善し、さらにエネルギー効率を上げることがコークス炉の操業に対して非常に重要であることが実証されると思われる。反応性の低い製品を作る連続成形コークス製造法も日本の企業と政府の協同研究により 10 年以内に商業規模にまで進展するだろう。

5. 日本とカナダの製鉄製鋼

二国間の現場技術を相違させている最も重要な要因の一つを挙げれば、それはシリコンである。

日本では溶銑 t 当たりの装入物はシリコンがより多く含まれているが、その活量はむしろ低い。鉄鉱石中のシリカは焼結中にフラックス化するので、生成するガングの融点はファヤライトのそれよりも高い。（塩基性焼結鉱、塩基性ペレットの場合ファヤライトは高炉中で現出しない）ガングの軟化温度が高いために、火焰温度を高くでき、そのために焼結炉の燃料効率が高い。ボッシュガスの体積が少なく、溶銑滴の滴下距離が短くなるのが、通常温度での溶銑中シリコンが低い原因である。カナダの操業に比べてスラグ量が多いために、日本の高

炉は硫黄やアルカリの悪影響を受けにくい。ドライコークスを使えば炉頂部での装入物温度がより速やかに上昇する。このため予熱帯が長くなる可能性があるが、鉱石の低温崩壊が少なくなり、炉頂ガス中にカリウムや亜鉛分が増す以外は高炉反応にあまり大きな影響はないであろう。

製鋼については、カナダの転炉ではシリコンの高い溶銑を処理しているが、同時に、シリコンをほとんど含まないスクラップの配合率も日本より高い。溶鋼1当たりのスラグ量はカナダの方が日本よりも2倍も多い。スラグ量が多いために、鉄損失とスロッピングが多く、吹酸速度とライニング寿命が低い。しかしその利点は精錬容量が大きいことである。溶銑中のりんが低く、スラグ量が多いカナダでは、硫黄の規格が満足される限り、りん量は普通要求されているレベルよりも相当低いことが多い。

カナダの鉄鋼業が酸性ペレットから含マグネシアの自溶性ペレット（ペレット工場でのコストが上り、生産性が低下するが）に転換する場合は、日本の技術は非常に魅力がある。

6. 教育と人間関係

超近代的な技術とは対照的に、日本の教育システムは本質的に古い方式をそのまま踏襲している。このため多くの点で、世界中でユニークな存在である。他の先進国とは違い、日本の大学の少なくとも学部レベルでは教育するよりもレッテルを貼つていてと聞いたことがある。このような大学の伝統的な役割は一般大衆や文部省から従来も今もお是認されているばかりでなく、期待もされている。この点に非常に興味を持ったので、外国人としてまた日本の一友人として無知を笑われるのを承知のうえでひとこと述べてみたい。他方私は従来より少数派として発言することに慣れているので、本文が何の役に立たずに終わっても一向に構わないが発言しなければ気がすまないのである。

(A) 安定性—硬直性

少なくとも私が訪問した国立大学では、教授が任命されると毎年決まつて政府から研究費と補助要員が与えられる。経済景気について悩まなくてもよく、経験豊富な技官を持つている日本の教授の方々が羨ましい。日本の大学教授はこのために長期的なテーマで研究でき、また事実そうしている。その成果は多くの国の冶金学者に評価されている。他方日本の教授は自分以外を満足させる必要がないので、好きなように（“easy-going”の意を含む）やれる。大学教授は自分の責任を良心的に果たすものだという社会の信頼は絶大である。政府と大学当局には、教授の行動について管理、助言する力はほとんどない。

修士号を得ようとする大学院学生は入学後2年間で

（それ以上でもなくそれ以内でもなく）卒業する。このことは、教授が個人の努力や成果とは無関係にすべての学生を平等に扱っていることを意味している。

北米では、すべての人の成果は他人によつて評価され、それ相当の賞罰を与えるのが公平だと考えている。これは一つの組織を効率よく運営するための重要なファクターの一つである。

(B) 調和—個人主義

私の感じでは、和というのが現代日本誕生の礎ともなった日本文化の基本である。家庭生活で普通通用する合意と寛容という概念が、日本では家庭よりもずっと大きな組織でも行動の基本的な規範である。秩序正しい社会は、全員一致で決めた目標を達成するには非常に強力である。チームの誰もがボートを揺すらないし、揺すつてはならない。ここでも多くの友人との会話でよく話題になつた「日本人の独創性」について触れたいと思う。一人の人間が本当に独創的である（他人とは違うということ）と同時に他人と調和を保つ（他人と似ているということ）ことは非常にむずかしいと思う。

(C) 問題の解決と問題の発掘

日本の鉄鋼業の成功は、日本人が非常に有能で、技術的問題も解決する優れたシステムを持つていることを示している。他方、その時その時の流行のトピックスに研究が重複して行われる例が多い。この点は大学でも企業でも同じである。創造性の点で問題があるとすれば、それは問題点をどのように見つけるかということだけであろう。政府により管理されている非常に組織化したカリキュラム（初中等教育（訳者））を緩和することも役立つであろう。学部レベルでは選択課目をふやし、大学院には専門外の（専門に近い（訳者））必須課目を設けることにより、いろいろな種類の冶金技術者が育成されると考えられる。日本の大学のカリキュラムを改善するには、学生の想像力をかき立てるという目標に捕われるだけではなく、大学の入試勉強というマイナス経験を和げる努力が必要であることを考慮に入れなければならない。

(D) 企業と大学の関係

多くの協同活動がされてはいるが、研究開発を目標とした協調関係は一般的にいつてあまり親密とは見うけられない。これは二つの組織の一方が他方の助力を必要としないし、期待もしていないことによるらしい。企業側には委任するという考えが不足しており、大学教授には協調する動機が不足している。工学部の教授が工学研究のためには自分の実験室に限度があることを認めれば、また企業が有能な教官から優秀な人材が企業に供給されるという事実を考慮すれば、相互に必要なしあひまた協力しようとする希望が芽生えて来るだろう。

(E) 具体的な奨励方法の提案

数人の最優秀な学生および最近の卒業生を表彰するとともに、自分の専門能力を一層向上しようと努力するた

めの機会を与えることによつて、彼らの創造的な仕事を公にすべきである。これはこの選ばれた人達を創造的な仕事に一層熱中させかつ鼓舞するばかりではなく、すべての学生の心を開くのに役立つであろう。私の個人的意見では、強い指導力と健全な財政力を持ち、全国的な専門家団体である日本鉄鋼協会が、中立機関としてこのよ

うな文化活動を行うのに最もふさわしく、またそれが可能であると考えている。

日本の鉄鋼技術者は企業内での活動を通じて、過去 20 年間日本の画期的な経済発展に指導的役割を果たして来た。日本文化がその誇りとなるよう、同じ人達はその専門家団体を通じて再度貢献されることを信じている。