



鉄の歴史

戦後復興・発展期における我が国鉄鋼製造技術史—技術編 底吹き転炉から複合転炉に至る攪拌研究の回顧と今後の課題

中西恭二

静岡理工科大学 常務理事

Kyoji Nakanishi

Reminiscences on the R&D of the Bottom Blowing and the Combined Blowing Processes with a Particular Emphasis on Gas Mixing and the Remaining Task in the Future

1 はじめに

日本の一貫製鉄所から平炉が消滅したのは1971年4月(昭和46年)、日本に初めて平炉が建設されてから70年目にあたる。転炉の寿命も70年とすれば2027年に姿を消すことになる。技術発展史の短サイクル化から言えば2027年よりもっと早まるかもしれない。今はその29年前にあたる。平炉消滅の29年前と言えば1942年(昭和17年)である。当時、平炉はあと29年もすると消滅すると誰かが言ったとして、そんな馬鹿な…と言わなかった人がいただろうか。いたとしたら、それはベルリン工科大学のDurrerとアーヘン工科大学のSchwarzだったであろう。Durrerは1922年に純酸素上吹き実験を始めていた。Schwarzは1938年に純酸素ガスの上吹きと底吹き実験を行って特許を申請していた。

日本の鉄鋼産業がサイエンスも含めて世界のリーダーを正しく継承しているとすれば、先の問いかけに、可能性は十分に有ると頷く研究者が大学の片隅か企業の片隅でその機会到来を虎視眈々と狙って、今日も研究や技術開発に切磋琢磨しているに違いない。そうあって欲しいと思うだけで心がわくわくしてくる。その一端を担っていてもおかしくない著者が今語りべの境地に甘んじていることは慚愧に堪えない。が、ここは淡々と原稿を埋めていこう。

2 OBM/Q-BOPの発明者のこと

2.1 SavardとLee

British Columbia大学のBrimacombe教授(故人、本原稿執筆中にカナダ政府の研究企画プロジェクトのリーダーとして頑張っている旨のクリスマスカードをもらったが、その直後に54才の若さで心不全で急逝した)は、底吹き転炉用二重管羽口の発明者SavardとLee氏を記念して開かれたSavard/Lee International Symposium on Bath Smelting

のProceedingsで次のような巻頭言を掲載している¹⁾。「工業の進歩は連続的なものではない。革新的な技術が発明されると、工業は大きくジャンプして進歩する。製鋼分野では、ベッセマー転炉、上吹き転炉およびSavardとLeeが発明した底吹き二重管羽口などが革新的な技術であった。興味深いのは、ベッセマー、上吹き転炉の先駆者DurrerそしてSavardとLeeらがいずれも鉄鋼業に従事していなかった事である。」

著者は1974年2月からの1年間、ニューヨーク州立大学バッファロー分校のSzekely教授(故人)の研究室にPos. Doc. (博士研究員)として留学していた。鉄鋼精錬技術向上のための鋼浴の攪拌が研究テーマであった。当時、純酸素底吹き転炉、Q-BOPを川崎製鉄が導入する可能性は高かったので、留学中、吹き込みガスジェットによるメタルバスの攪拌もテーマの一つとした²⁾。帰国直前の1975年2月にニューヨークで開かれたアメリカ金属学会に出席して、成果の一つを講演発表した。それより数カ月前、川鉄から連絡が入った。川鉄が純酸素底吹き転炉、Q-BOPを導入することを正式に決定したという知らせだった。帰国すれば今までの攪拌研究のポテンシャルが存分に活かせる事に内心小躍りしながら、この学会に参加した。著者の講演が終わると、フランス人かなと思う日本人に近い背丈で小太りの紳士が人懐っこい笑顔で近づいて来た。そして握手を求められた。この紳士が二重管羽口の発明者の1人、G. Savard(図1)であった。当時彼はCanadian Liquid Air社の研究所長をしていた。通常、学会で講演発表の直後に握手を求められるのは「素晴らしい発表だった。おめでとう」が相場なので、謙遜の表情を整えつつ握手を返した。…が彼は発表を褒めに来たのではなかった。「あなたは川崎の技術者か。川崎は素晴らしい」彼は続けた。「実は、カナダの製鉄会社、ステルコでも新しい転炉を増設することになり、LDにするかQ-BOPにするかで、社内の意見が分かれた。結局、



図1 Savard氏（右から2人目）



図2 Lee氏（中央）と同夫人

在来のLD転炉を採用することになったが、その理由はQ-BOPが未知の技術だからというものだった。ところが川崎は全く同じ理由で採用に踏み切った。未知の部分があるから面白いと…、そこが素晴らしい」

その後もう一人の発明者、Robert G. H. Lee氏(図2)ともOBM/Q-BOPファミリー会議で知り合うことが出来た。謙虚でとつとつとした語り口から彼の人柄が伝わってくる。その後Lee氏がSavard氏の後任としてCanadian Liquid Air社の研究所長を継いだ。Lee氏が研究所長になってからもSavard氏は顧問として残り、著者が1985年5月、Montrealの研究所を訪ねた際にもカナダロブスターの昼食を二人からご馳走になった。東洋系のLee氏が、元上司にあたるSavard氏を引退後も尊敬の念をもって遇している日常を垣間見たようで、暖かい心持ちになった。

そもそもCanadian Liquid Air社は、純酸素の需要増大を狙って、純酸素吹き込みに耐えうる新羽口の開発に着手した³⁾。SavardとLeeは1965年二重管羽口を発明しヨーロッパのトーマス炉への売り込みに成功する。すなわち1968年3月、Eisenwerk Gesellschaft Maximilians-Hütte MBH (Sulzbach Rosenberg)において25 t トーマス転炉が、上述の二重管羽口を取り付けた30 t 炉に改造され、OBM(Oxy-

gen Bottom Maxhuütte)と呼ばれる。この30 t OBMは、鋼中N濃度が従来の100ppmから20ppmへと低下し、また炉底寿命が100回から200回以上に伸びるなど、期待どりの成果をあげた。二重管羽口の内管通路は、純酸素が流れるが、内管と外管の環状間隙はプロパンなどの炭化水素ガスが流れ、これが炭素と水素に熱分解する際の吸熱を利用して、羽口先端の高温部を集中的に冷却する。プロパンと云えば燃料であり直感的に発熱剤と考えるのが普通である。クラッキングに伴う吸熱効果に着目して冷却剤として使ったのは実にあざやかな発想であった。さらに分解して析出する炭素が酸化防止剤になり羽口先端にポーラスな凝固鉄が傘状に付着して保護殻の役目を果たすのも炭化水素系ガスの利点である。こうして羽口寿命は純酸素を使用しても飛躍的に伸びる。このOBMプロセスに注目していた米国最大の鉄鋼会社、USスチールは、1971年、OBMプロセスの特許を買い、みずからもSouth Chicagoに30 tの実験炉をつくり、大型化にも十分耐え得ることを確信する。こうして1972年LD転炉の建設予定を覆して、Gary工場に200 tの純酸素底吹き転炉3基を設置し、Q-BOPと呼ぶ。続いて1974年同Fairfield工場の230 t 平炉12基も、2基の180 t Q-BOPにリプレースされる。

川鉄がQ-BOPを導入したのはその直後であり、まだ日本のLD転炉の方が経済性、生産性、鋼の品質などで勝っていた。導入にまつわる話は、当時週刊現代に連載されていた柳田邦男氏のノンフィクション「水の日、炎の日」⁴⁾にインタビューをまじえて掲載された。鉄鋼協会の製鋼問題懇談会において、NKKの川上公成氏(故人)が、「ついに、週刊誌も参考文献になる時代が来た」と挨拶して笑いを誘ったことが懐かしい。同じNKKの研究者、宮下芳雄氏(故人)も著者にとっては良き先輩でありライバルであった。昭和53年春の鉄鋼協会講演大会において、初めて川鉄のQ-BOP操業データを発表した時、宮下氏が即座に質問に立ち上がった。「今回のQ-BOPのデータは、海外から聞く報告より詳細で有益であった。しかしLD転炉導入の頃と比べて進歩の度合いが遅いようであるが、何か意見は？」最初に重心を浮かされてから足払いを掛けられた気分になった。はて、どうやって反論しようかと、会場を見回しながら思案した。何と会場の最前列で風呂敷づつみを机の上に置いて聴講されているのは、製鋼技術の大先輩、新日鐵の武田喜三氏(故人)ではないか。氏は昨日、同じこの会場で渡辺義介賞を受賞され、「わが国における転炉技術の発展」と題して記念講演をおこなった。その内容を思い出し、「宮下さん、LD転炉の草創期には、八幡製鐵と日本鋼管が大同団結して成果を上げたというじゃありませんか。NKKさんも早くQ-BOPを採用して川鉄と共同して成果を上げようじゃないですか」

と切り返した。最前列の武田氏が爆笑されたのはいうまでもない。その後、酒の席でNKKの研究者は以下のように語っていた。「NKKでは戦前から昭和33年までトーマス転炉での操業を経験して来た。その結果今の上層部は羽口のトラブルに辛酸をなめてきた人ばかりである。若手が底吹き転炉の将来性をPRしてもなかなか採用の気運とはならない。川鉄はその点白紙状態で底吹き転炉を技術的に評価出来たと思う」

2.2 Brotzmann

二重管羽口を発明したのはSavardとLeeであるが、この特許を素早く買って純酸素底吹き転炉に取り込みOBMプロセスとして総合化したのがKarl Brotzmann氏(図3)である。彼はDH式真空脱ガス処理設備の発明者でもある。昭和53年当時、Sultzbach-Rossenberg Maxhütteの製鋼工場は、Brotzmannらの実験工場の様相を呈していた。OBMの鋼浴流動の水銀モデル実験で減圧設備が必要になると、現場のDH設備を利用するなど、現場でプロセス開発をして飯を食べている印象を強く受けた。例えば当時最先端の技術テーマであった羽口の個別流量制御やスクラップの予熱に重要なside-tuyereなどの試験は実機の60 t OBMに装着して実施していた。付属の研究所には実験室らしきものは見当たらなかった。一方Brotzmann以下の居室と並んで立派な製図室が完備していた。またDr. Brotzmannの隣室にDr. Gollobという法律の専門家がおり、工場見学に際してconfidential contractへの署名とか、種々の法律業務を処理してDr. Brotzmannを補佐していた。技術を開発して世界に販売するスリムですきの無いミッション遂行部隊として強く印象に残った。

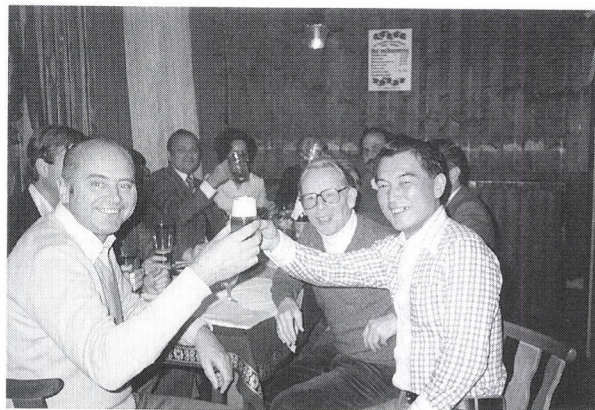


図3 乾杯するBrotzmann氏(左端)と川名氏(右端)

決断させた人物である。

発表された論文は全部で15件、その内それぞれ4件がMaxhütteと川鉄、その他のファミリーはそれぞれ1件ずつであった。会議の主催者にあたるMaxhütteの4件は当然として、新入りの川鉄の4件はファミリーの中でも多く目をひいた。3日間で15件の論文発表といった軽いスケジュールのため午後はフリー・トーキングということであったが、川鉄には質問が集中し、午後はスケジュールのやりくりに苦労した。

ファミリー会議とそれに引き続いてのいくつかの製鉄所訪問により、欧州の複合吹錬の動向を知ることが出来た。具体的には、ARBED(ルクセンブルグ)ではLD転炉のサブランス・サンプリングの代表性のなさを強調し、新しいタイプのサブランス・システムを採用予定であるが、内容は秘密ということであった。この点我々も気になったので川鉄もQ-BOPで得られた同時的中率96.1%の技術をLDへトランスファーしつつあると対抗したところ、彼らのプライオリティを主張するかのようにLDでのガス攪拌をおわせた。またThyssen Ruhrort(ドイツ)はLDを改造したOBMであり、複合吹錬が直ちに可能であることに驚いた。彼らは著者の発表したISCO値に強い関心を示し、休日にも拘らず応対してくれた研究者、H. Litterscheidの家にスライドプロジェクターを持ち込み、製鋼部長のR. A. Weberも加わり討論した。彼らのLD改造OBMでは年産4万tの低炭Fe-Mn合金の吹錬を計画していたし、またステンレス鋼の吹錬をOBMと上吹きランスで考えてもいた。当時すでにKrefeld(ドイツ)ではAODに上吹きランスを付けてステンレス鋼の製造を行っていたので、この点でも複合吹錬の実用化に最短距離にあると感じた。

3 OBM/Q-BOPファミリー会議

1978年10月、永井潤(当時川鉄千葉製鋼部長)と著者は川鉄として初めての論文4件を持ってOBM/Q-BOPファミリー会議に参加した。それらの題目は、

- ①Q-BOPのDynamic Control System, “Smart”, “QDT”の特長と成果(講演者 永井)
- ②Q-BOPのOGガス回収率の向上(永井)
- ③モデル実験によるQ-BOP鋼浴流動の解析(中西)
- ④酸化精錬炉内反応を特徴づけるパラメータ、ISCO(中西)

当ファミリー会議には、当時川鉄が合併事業を進めていたブラジルからツパロン製鉄所の建設班長、川名昌志も参加した。彼は千葉製鋼部長時代に、Q-BOPの導入が失敗に帰した時には自分が責任を取ることを担保に上層部に導入を

4 攪拌研究の回顧

J. Szekelyは1964年放射性同位元素Au¹⁹⁸を用いて平

炉内鋼浴の均一混合時間を測定した⁵⁾。その結果、約500secという値を得ている。多分これが製鋼炉内における混合時間測定のパイオニア的な仕事であろう。炉体形状から当然予想されることであるが、鋼浴の混合は極めて緩慢である。一方LD転炉の均一混合時間はChaterjeeらによって、Szekelyと同様にAu¹⁹⁸を使って6 t LDで測定され、60-120 secと平炉のそれに比べて1/4から1/8と短い値を得ている⁶⁾。このように、平炉に比べて均一混合時間が激減したため、LD転炉の攪拌は十分に強いという固定観念が製鋼の技術者や研究者らに長い間浸透し過ぎたのではないだろうか。したがってOBM/Q-BOPが登場した時、冶金技術者は攪拌強化による冶金効果よりも、炉底羽口から吹き込まれるO₂ガスと微粒のCaO粉末とメタル間の直接反応によるガス/スラグ/メタル反応の促進を期待したきらいがある。

川鉄は230 t Q-BOP導入後、時を同じくして5 tの試験転炉を建設した。この目的は耐火物の開発、羽口配列を含む最適羽口設計法、炉内反応機構の解明、現場で発生したトラブルの再現と防止法など多岐にわたった⁷⁾。LDとQ-BOPの炉内反応を統一的ないし連続的に説明するにはどうしたらよいかも研究者としての興味の焦点であった。結局均一混合時間を含む特性値、ISCOを提唱した。そしてLD転炉においても上吹き酸素の高々10%分を炉底羽口から吹き込めば、Q-BOPとほぼ同等の冶金効果が得られることが明らかとなった。その結果、既存のLD転炉は続々と底から酸素あるいは他の攪拌ガスを吹き込む複合転炉へと改造されていった。Q-BOPがさらに世界中に普及すると期待していた欧州の発明者らは、LD転炉にわずかな改造を施すことによって、ほぼQ-BOP並みの冶金効果が得られる複合転炉の出現で骨抜きにされた観がある。

欧州勢はすでにLD技術の販売において日本で儲け損なっていた。その時の経緯は文献⁸⁾に以下のように記されている。BOT (Brassert Oxygen Technik) 社はオーストリアのVoest社とAlpine社のLD転炉法に関する特許管理会社でありスイスに設立された。昭和30年5月頃八幡製鐵と日本鋼管はそれぞれ別個にBOT社あるいはAlpine社と技術導入交渉を開始した。2社が競い合って価格が上がり上がることを恐れた通産省製鉄課の指導により窓口は日本鋼管一社に絞った。そして日本鋼管が取得する上吹き法に関し、日本鋼管と八幡製鐵は全く同等の権利を享受し、義務を負担することになった。技術導入契約は昭和31年2月に成立した。LD転炉法による鋼の年間生産量を120万tと予想し、当時のレートで約5億円を一括払いすることで日本鋼管は我が国のジェネラル・ライセンシーとなった。昭和40年にはすでに900万tにまで転炉鋼の生産が急増したことを考

えると誠に安価な買い物であった。その分欧州では稼ぎ損なったのである。昭和33年に富士製鐵と住友金属が、昭和34年には川鉄と神戸製鋼が加わりBOTグループとして、LD転炉の技術向上に協力し、利益も応分に享受した。

以上のような背景から、今度こそはと欧州勢が満を持していた観があるだけに、複合吹錬により日本の鉄鋼業はまたしても経済的に有利な迂回路を見いだしたと言える。このためのリスクを川鉄一社で背負い、メリットは共有したとも言える。事実川鉄千葉で230 t Q-BOPが稼働したのが昭和52年2月であったが、53年1月には鉄鋼界に操業データを公表⁹⁾、そして53年春の鉄鋼協会講演大会では5 t試験転炉で得られたパラメータ、ISCO値を含む5連報を公表した¹⁰⁻¹⁴⁾。ISCOの関数形をみればQ-BOPの冶金特性をLDに賦与するためにはどうすればよいかが一目瞭然であり、各社の製鋼技術者には役立ったに違いない¹⁵⁾。昭和30年代川鉄は日本のLD転炉ファミリー、BOTグループに後塵を拝して入れてもらい利益を受けたがそのお返しを果たしたとも言える。

5 小型試験転炉による研究

昭和29年頃、LD転炉導入の是非を検討するため、試験転炉が設置された。すなわち八幡製鐵所では洞岡工場に5 t試験転炉を昭和29年2月に設置、稼働させた。また富士製鐵室蘭製鐵所では3 t転炉が昭和29年7月に稼働した。その後実機の転炉が順調に稼働して試験転炉の役目は終わった。それから、約20年後に再び試験転炉のブームが訪れた。上述のように、昭和52年、川鉄では5 t試験転炉を設置した。この5 t炉は当初は2年ほどで役目を終わるつもりであったが、今日まで20年間、次々に新しいテーマが生まれて、延べにして1500回の試験操業を行っている。当初は底吹き転炉と複合転炉の技術確立が主たる目的であったが、その他にも昭和50年代に入り、増大するスクラップの新しい溶解方法の開発、あるいは粉鉱石など安価原料の利用技術の開発など転炉機能の拡大が要請されてきたのである。このような事情を背景に、昭和50年代に入って、他社でも試験転炉が建設された(表1)。

表1 昭和50年以降に設置された試験転炉の概要

会社	川鉄	住金	NKK	新日鉄	新日鉄
設置場所	千葉	鹿島	福山	君津	広畑
稼働年・月	昭52・4	昭55・2	昭61・9	昭61・10	昭61・12
炉容(t)	5	15	5	6	3-5
設置目的	Q-BOP対応	ナシヨプロ (石炭ガス化)	鉄鉱石溶融 還元	ナシヨプロ (Fe-Cr溶融 還元)	冷鉄源溶融

6 攪拌研究の今後の課題

ガス吹き込みによる攪拌研究に関しては、かなり膨大なレビューをBrimacombeらとの共著¹⁶⁾で、1990年のElliott Symposium Proceedingsに掲載した。これら一連の研究は、一言で表現すると、攪拌を強化することで如何に早く系を平衡に近づけるかの視点で行われたものであった。高温プロセス分野での攪拌の取り上げかたは平衡到達の一手段としてのものでしかなかった。その点では至極当たり前のことをしこしこやっていたに過ぎない。ところが同じ頃、材料分野の研究者らは、メカニカル・アロイングのように強烈な加工エネルギーを材料に加え、非平衡状態を人工的に創り出していた。そしてそのような材料が実用材料にもなっている。自然現象に逆らって新しいものを創製している点は何とも面白い。

高温プロセスの分野でも、現状の攪拌エネルギーに満足せず、さらに高次元の攪拌エネルギーを投入すれば、系は静的平衡から外れ新しい動的平衡現象のもとで新精錬技術が生まれる可能性はないだろうか。熱力学を最大の武器とする高温プロセス分野の研究者が、静的平衡内にとどまっている間に材料分野の研究者が非平衡の世界を切り開いている。特に固体の世界ではツールとして超高温電子顕微鏡が威力を発揮している¹⁷⁾。高温プロセスの分野では熱力学的に溶解度のない元素は、精錬中にも溶解しないとして扱われている。果たしてそうだろうか。特に溶銅の自由表面では気相原子を吸着した1原子層が存在し、このような異常相が、絶えず溶銅バルク中に攪拌エネルギーと共に織り込まれている。無理やりにでも一度溶解させた元素は、溶解度がないために拡散も出来ない。したがって溶銅中で孤立せざるを得ないのである。

金属材料中には塑性変形中に可動転位や点欠陥などが歪み速度に比例して生成する。これらの格子欠陥は動的条件下で溶質元素と相互作用を起こして変形抵抗の一因となる。これと同じように液の攪拌も塑性変形の一種と見ることが出来る。つまり、静止状態では存在しなかった格子欠陥が動的には存在し、ここには静的な熱力学的測定では溶解度のない元素も溶解し得ると考えることができる。実際、底吹き転炉のようなガス攪拌の際には多量のガス/メタル界面が生成し、ガスバブルの移動と共に、ガスを吸着した1原子層が液バルクの中に取り残される。これはあたかも面心立方金属合金中に見られる積層欠陥のようなものである。このような動的条件下での溶質元素再分配を数式モデル化すれば以下のようなものである¹⁸⁾。

まず、(1)式の反応を考える。ある時刻における反応の進行度は(2)式の活量比、 K で表すことが出来る。平衡に到達

すると活量比、 K は平衡定数、 K_{eq} となり、(3)式で表せる。

(1)式の右向き反応のGibbs自由エネルギーの変化、 ΔG は(4)式で表せる。ここに、 H, S, T はエンタルピー、エントロピー、絶対温度である。標準生成自由エネルギー、 ΔG^0 は(5)式で与えられる。

reaction

$$nA + mB = (AnBm) \dots\dots\dots (1)$$

activity ratios

$$K = a_{(AnBm)} / a_A^n \cdot a_B^m \dots\dots\dots (2)$$

equilibrium constant

$$K_{eq} = \{a_{(AnBm)} / a_A^n \cdot a_B^m\}_{eq} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln(K_{eq}) \dots\dots\dots (5)$$

図4は系が時間とともに平衡に近づく様子を模式的に示している。一方、図5は、系が攪拌エネルギーの増大に連れて平衡から遠ざかる様子を模式的に示している。この際平衡とは静的な状態でのそれを意味しており、動的な状態での平衡には近づいているのである。気相中のArガスの化学ポテンシャルは(6)式で与えられる。ここに、 P は圧力、 k

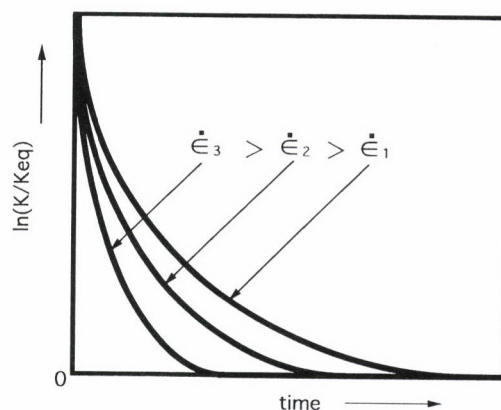


図4 攪拌強化による平衡到達時間の短縮

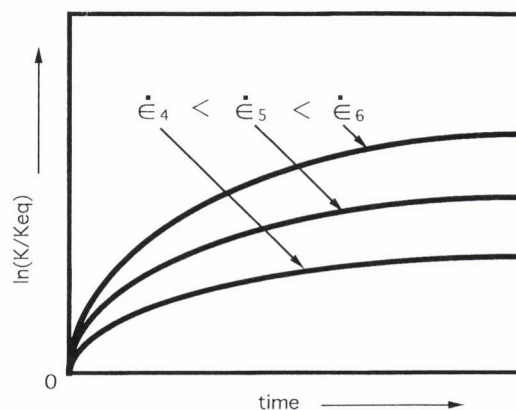


図5 攪拌強化による静的平衡からの乖離

はボルツマン定数、 m はAr原子の質量、 h はプランク定数、 ν は電子基底状態の重なり、 ρ は原子核のスピン重なりである。

chemical potential of Ar gas

$$\mu_{\text{Ar}}^g = kT \ln P - \frac{5}{2} kT \ln T - \ln \left\{ \frac{(2\pi m)^{3/2} k^{5/2}}{h^3} \nu \rho \right\} \dots \dots \dots (6)$$

一方、溶鉄の中には攪拌によってAr原子のトラッピングサイト Nt が生成している。このような格子欠陥に捕捉されたAr原子の数を N_{Ar} とすれば、溶鉄中Ar原子の分配関数は(7)―(9)式で与えられる。これよりAr原子の自由エネルギーは(10)式で与えられ、化学ポテンシャルは(11)式で与えられる。

partition function of Ar in liquid iron, Γ

$$\Gamma = \Omega(J_{\text{Ar}})^{N_{\text{Ar}}} \exp(-W/kT) \dots \dots \dots (7)$$

$$\Omega = \frac{Nt!}{N_{\text{Ar}}! (Nt - N_{\text{Ar}})!} \dots \dots \dots (8)$$

$$W = u_{t\text{Ar}} \cdot N_{\text{Ar}} \dots \dots \dots (9)$$

free energy, F

$$F = -kT \ln \Gamma \dots \dots \dots (10)$$

chemical potential of Ar in liquid iron

$$\mu_{\text{Ar}}^L = \partial F / \partial N_{\text{Ar}} \dots \dots \dots (11)$$

動的状態での平衡条件は(6)と(11)式を等置して得られる。すなわち、(12)式が成り立ち、これより、(13)式が導かれる。ここに C は定数である。(14)式は攪拌エネルギー密度、 $\dot{\epsilon}$ と攪拌エネルギーの緩和時間、 τ の積、 $\dot{\epsilon}\tau$ に比例してAr原子の溶解サイト X_t が増加することを示している。(13)、(14)式は攪拌エネルギーが存在する間は静的には溶解度を持たないAr原子が溶鉄中に溶解することを示したものである。

$$\text{at equilibrium, } \mu_{\text{Ar}}^g = \mu_{\text{Ar}}^L \dots \dots \dots (12)$$

$$X_{\text{Ar}} = \frac{CP\sqrt{T}X_t}{CP\sqrt{T} + \exp\left(\frac{u_{t\text{Ar}}}{kT}\right)} \dots \dots \dots (13)$$

$$\text{where } X_t = \alpha \dot{\epsilon} \tau \dots \dots \dots (14)$$

以下に、より具体的に、希ガスArの溶鋼中への溶解量について推論した。平衡実験による限り溶鉄中へのArガスの溶解度は 1.96×10^{-4} ppm と著しく低く¹⁹⁾、実際上溶解しない。しかし、昭和30年代の製鋼現場に比べて、現在では攪拌と雰囲気制御のために桁違いに多量のArガスを吹き込んでいる。激しい攪拌により、仮に間違っても溶鉄中にArが溶解込めば、溶解度の無いことが災いして拡散移動することも出来ない。つまり一度溶解込んだArは系外へ追い出すことも意外と困難になるのではなかろうか。連続铸造鋳片

に認められるブローホールには、このようにして一旦溶解したArが再度気泡として放出され、凝固殻に捕捉されたものもあるに違いない。そこでメカニカルアロイング時の加工エネルギーと製鋼作業での攪拌エネルギーを比較して、Ar非平衡溶解度を推算する。

メカニカルアロイングでは機械的エネルギーを蓄積して非平衡なアモルファス合金を作り出す。その一例として70at%Cu-30at%Ag合金がある。この系はCuとAg原子が微弱ながら互いに反発するため、固相では全率固溶体をつくれず、本来共晶となる。このアモルファス合金をつくるため20回を越える繰返し重ね圧延法が取られている。このための加工エネルギーを推算すると、1500J/gと見積もられる。一方、通常のガス攪拌は10watt/t steel程度のエネルギーで1時間程度の攪拌(転炉—RH—CC)であるので0.036J/gの攪拌エネルギーと見積もられる。攪拌ないし加工エネルギーに比例して非平衡濃度も増加するとすれば、メカニカルアロイングから類推して溶鋼中へのArの非平衡濃度は5ppm(重量分率)となる。以上の推算で得られた攪拌エネルギーと非平衡濃度の関係を図示すれば図6が得られる。

では、このような非平衡濃度のArは溶鋼中にどのようにして溶解するのか。吹き込んだArガスは気泡となり溶鋼中を浮上するが、気液界面では不活性なArといえども物理吸着はしてもよい。そこで1Nm³のArガスを1tの溶鋼に吹き込み、Arガスは直径1cmの気泡となって浴中を浮上するものとし、物理吸着した全Ar原子が溶鋼中に溶解込むとすると、その値は71ppmとなる。先に求めた5ppmは、この7%に相当する。あり得ない話ではないように思える。このような領域が今後の課題として残されている。世界の何処かで、静的な平衡から遠ざかるための攪拌研究が精力的に進められ、それが新しい精錬プロセスに結びついた時、攪拌をあれだけやっていた日本で、何故そのような発想が生まれなかったのかと臍を噛みたくないものである。

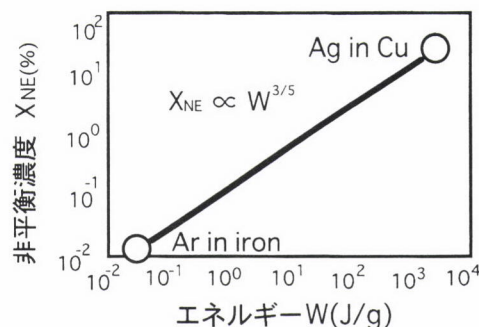


図6 機械的エネルギーと非平衡濃度

7 おわりに

エジソンが直流電気技術を守るため交流電源の電気椅子を創り犬を殺して見せた話は有名である。これほど極端でないにしても、技術の進歩は新技術と旧技術の偏執者の闘いの歴史でもある。上吹き転炉の出現によって平炉は日本から姿を消した。しかし消滅する直前には平炉でも上吹き転炉並みの酸素が吹き込まれ、平炉でありながら、あたかも上吹き転炉のような操業技術が追及され生産性と経済性でかなりの進歩を見た。残念ながらそれでも勝ち目はなく平炉は上吹き転炉に駆逐される。続いて底吹き転炉が登場した。底吹き転炉は鋼浴の攪拌が極めて強くかつ均一の反応が進むため、上吹き転炉には無い数々の利点が多々もたらされた。上吹き転炉を守る技術者たちは上吹き転炉の利点を維持しつつ、底吹き転炉の利点をも取り込むための技術開発を進め、結局複合転炉を完成させた。これは従来の上吹き転炉にマイナーな改造を施すだけで済むので、著しい経済効果を上げた。このように新旧技術の攻守の境界線で次なる技術のエンブリオが形成されていく事が多い。

本原稿の執筆依頼を受けた時、著者は川崎製鉄に勤務していた。執筆に際しては当然必要となる製鋼部会資料、学振19委員会資料などが揃っていた。ところが平成9年7月に川崎製鉄を退職して静岡理工科大学へ勤務することになった。当大学には金属工学系の学科が無く、したがって上述の参考資料は皆無で技術の発展史を正確にかつ偏り無く記述することが大変難しくなった。その結果、編集委員会の意図とはかなり乖離した原稿になったことをここにお詫びしたい。

しかし執筆に際して楽しい発見もあった。一貫製鉄所の無い静岡県では、転炉関連の図書など市立図書館でも見つかからないだろうとたかをくくって出かけてみた。アッタ！新日鐵室蘭に永く務めた水木栄夫著「転炉製鋼の歴史と現状」²⁰⁾。著者が故郷静岡に戻らなければ、そして「ふえらむ」編集委員が著者に宿題を課さなければ、未だ誰にも読まれず書架に飾られたままになっていただろう。静岡県は鉄鋼協会会員の過疎地です。このような地域にこそ鉄鋼協会は何かが出来、何かを得ることが出来るのではないのでしょうか。

本原稿を執筆しつつ思ったが、吹錬の研究・技術開発に功績のあった多くの方々がすでに亡くなっている。それも平均寿命からすればまだまだご活躍すべき若さであり、誠に寂しい。ISCOと同種のパラメータ、BOCを提案¹⁵⁾した新

日鐵の大河平氏もその一人である。正しくGONE with the WINDである。この小文とともに彼らを偲びたい。

参考文献

- 1) J. K. Brimacombe : Savard/Lee International Symposium on Bath Smelting, TMS, Montreal, Quebec, Canada, (1992), p. IX
- 2) J. Szekely : Fluid Flow In Metallurgy
- 3) 中西恭二, 三本木貢治 : 鉄と鋼, 65 (1979) 1, 138.
- 4) 柳田邦男 : 日本の逆転した日, 講談社, (1981), 161.
- 5) J. Szekely : J. Iron and Steel Inst., 202, 505 (1964)
- 6) A. Chatterjee, N. O. Lindfors and J. A. Wester : Ironmaking and Steelmaking, (1976) 1, 21.
- 7) K. Nakanishi, K. Saito, T. Nozaki, Y. Kato, K. Suzuki and T. Emi : Steelmaking Conference, Proceedings of AIME, Pittsburgh, USA, (1982) March, 101.
- 8) わが国における酸素製鋼法の歴史, 日本鉄鋼協会, 鉄鋼科学・技術史委員会, (1982), 80.
- 9) 川名昌志 : 鉄鋼界, (1978) 1, 56.
- 10) 川名昌志, 岡崎有登, 永井潤, 香月淳一, 田中貞治, 駒村宏一, 山田純夫 : 鉄と鋼, 64 (1978), S165.
- 11) 川名昌志, 岡崎有登, 永井潤, 数土文夫, 馬田一, 中西恭二 : 鉄と鋼, 64 (1978), S166.
- 12) 川名昌志, 岡崎有登, 永井潤, 数土文夫, 朝穂隆一, 鈴木健一郎 : 鉄と鋼, 64 (1978), S167.
- 13) 中西恭二, 鈴木健一郎, 別所永康, 仲村秀夫, 馬田一 : 鉄と鋼, 64 (1978), S168.
- 14) 中西恭二, 加藤嘉英, 鈴木健一郎, 香月淳一 : 鉄と鋼, 64 (1978), S169.
- 15) 藤井毅彦 : 製鋼脱炭反応の研究の変遷, アグネ技術センター, (1994), 110.
- 16) J. K. Brimacombe, K. Nakanishi, P. E. Anagbo and G. G. Richards : 1990 Elliott Symposium Proceedings, TMS, (1990), 343.
- 17) 藤田広志 : まてりあ, 33 (1994), 589.
- 18) 中西恭二 : 材料とプロセス, 8 (1995), 85.
- 19) 石井邦宜 : 学振19委—11514, 9月(1994), 134.
- 20) 水木栄夫 : 転炉製鋼の歴史と現状, 水星舎, (1985)
(1998年1月14日受付)