

鉄鋼製錬基礎研究の変遷と現状

大阪大学工学部 冶金学教室

教授 荻野和巳

I. 緒言

戦後しばらく荒廃の中に呻吟していた日本鉄鋼業は昭和37年頃より世界に例を見ないような飛躍的な発展をとげ昨年ついに粗鋼生産で1億2000万トンに達し、米ソについて世界で3番目の1億トン製鉄国になった。生産量だけでなく鉄鋼生産設備や技術においても現在、超大型高炉群をはじめ高能率の酸素上吹転炉、連続鑄造設備等世界最高の水準を誇り、質、量あわせて世界のトップレベルに成長した。

このような優秀な製鉄技術を支える基礎研究、技術研究も鉄鋼生産技術の発展と相呼応して年々活発になってきた。1970年には我国において鉄鋼科学技術国際会議が開催され、我国からも鉄鋼製造に関する科学、技術について数多くのすぐれた成果が発表され、我国の鉄鋼生産を有形、無形の形で力強く支える鉄鋼の科学、技術の優秀性を世界に示したのである。

筆者の専門である鉄鋼製錬の分野についてみると製錬技術の優秀性と共に基礎研究、応用研究の分野においても多くの研究者を有し、毎年広範かつ優れた研究報告が数多く提出されている。特に基礎研究は質、量ともに欧米、ソ連にくらべて決して遜色が見られないと思われる。本稿においては鉄鋼製錬の基礎研究に焦点を絞ってその推移と現状について眺めてみた。

II. 鉄鋼製錬基礎研究の推移

鉄鋼製錬に関する基礎的研究は先進製鉄国において1920年頃より進歩発展してきた。その当時の研究は固体鉄とガスとの平衡 ($\text{Fe}-\text{O}$ 、 $\text{Fe}-\text{O}-\text{H}$ 系平衡)、酸化鉄の H_2 、 CO による還元平衡や、熔融 $\text{Fe}-\text{C}$ 合金と CO 、 CO_2 混合ガスとの平衡、メタル-スラグ系における $\text{Fe}-\text{Mn}-\text{O}$ 、 $\text{Fe}-\text{Si}-\text{O}$ 、 $\text{Fe}-\text{P}-\text{O}$ 平衡の

ように鉄鋼製錬に關与するガス、スラグ、メタル相互間の平衡論的研究が主力を占めていた。その後この分野の研究は1930年代、 $\text{H. Schenck}^1)$ 、 Körber 、 $\text{Oelsen}^2)$ から $\text{J. Chipman}^3)$ らに引きつがれ、多くの研究者によって製錬基礎反応の平衡定数の測定がなされた。1930年代後半には反応成分の活量、活量係数など熱力学的諸数値が得られ、製錬反応への理解がさらに深まっていった。

一方、鉄鋼製錬プロセスにおいては融体(溶鉄、溶滓)が関連するが、これら融体の性質については1920年代 Desh 、 $\text{Smith} (1929)$ によって密度が、 $\text{Thielman} (1929)$ によって粘度が測定された。鉍滓については $\text{Field} (1918)$ による粘度をはじめ $\text{Wejnarth} (1934)$ による電気伝導度の測定がなされている。しかし、この時代の熱力学的数値のあるものが現在も利用され、参考にされているのにくらべて、これら物性の測定は精度に問題も多く製錬プロセスの現象を説明しうるほど十分なものではなかった。

第二次世界大戦後、世情のおちつくとともに各国における研究は活発さを増してきた。当初の研究は主として熱力学的研究を中心として進展し、さらに実験技術の向上等によって反応速度、融体の物性研究も精度の向上が見られるようになりこの分野の研究も大いに発展してきた。

研究発展を内容的にみると従来の基礎研究の主流であった熱力学的研究に加えて融体の物性研究、反応速度の研究が急増し、さらに冶金プロセスを化学工学的的手法によって解析しようとする試みが新しく加わり、鉄鋼製錬の基礎研究もいちじるしく多岐にわたるようになってきた。現在では鉄鋼製錬プロセスはあらゆる物理化学的手法、化学工学的的手法を酷使して検討を加えようとしている。例えばスラグ-メタル間の

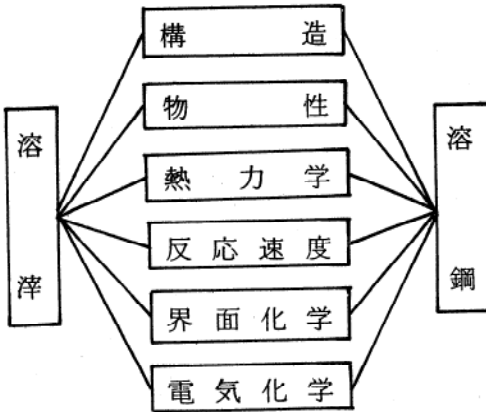


図1. 溶鋼-溶滓間の現象説明の基礎学問の関連

現象説明に例をとると、両相間には図1に示すような基礎学問的関連をみることができ、これら両相間の反応を説明するにあたっては、このように種々な角度により検討せねばならないことを示している。

III. 鉄鋼製錬基礎研究の現状と問題点

今、現象的に鉄鋼製錬プロセスを眺めてみる。例えば我国において鋼生産の80%以上を占める転炉製鋼においては、炉内に吹き込まれた超音速酸素ジェットは鋼浴表面と衝突し、激しく反応して局部的にきわめて高温(～2500℃)の領域(これを火点という)が生じる。火点での鋼浴は図2のように凹みが生じ鋼浴は激しく攪拌されている。一方、高温のために化学反応も激しく鋼中の元素(C、S_i、M_nなど)は酸化反応によって急速にガスや酸化物を形成する。これら酸化物は造滓剤の石灰とでスラグを形成し溶鋼表面の一部を覆う。かくして図2のように転炉内においては酸素ガス、COガスのような気体と、溶鋼、溶滓(スラグ)の液体、耐火材や石灰のごとき固体とが共存することになる。特に火点付近ではこれらが混然となった状態が形成されているといわれている。

このように炉内において高温状態で激しい溶鋼の動きと溶鋼中の元素の酸化反応とが複雑な状態で進行しているといえる。この状態は定常的なものでなく、時々刻々現象が変化しながら進行している。それも約30分というかなり短い時間内で約200トンを超える溶鋼が精錬されるわけである。そのため現場的には時々刻々の炉内変化を把握し、それに対応することが要求さ

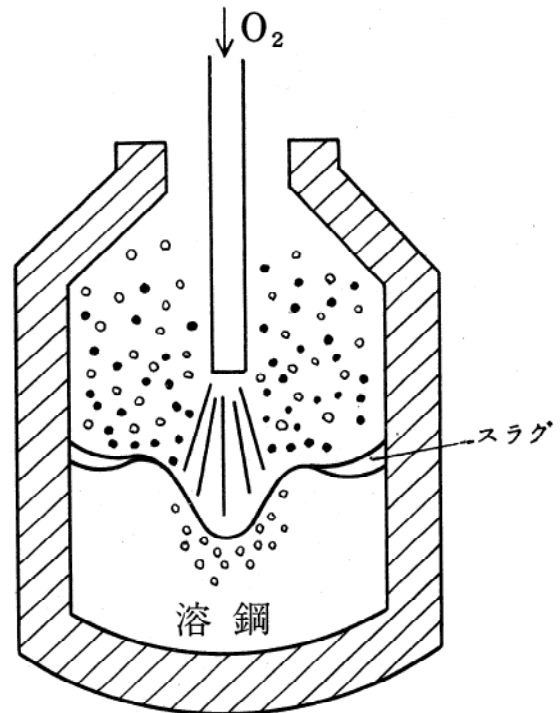


図2. 酸素上吹転炉吹錬モデル
R.D. Walker, D. Anderson⁴⁾ のモデルを参考にした。
白丸はCOガス、黒点は溶鋼

れている。

一方、この複雑な転炉プロセスを基礎的に説明するにはどのようにすれば良いだろうか。これは極めて困難であるが、従来この説明のアプローチとして大きくわけて二つの方法がとられている。一つは先に示したように巨視的な化学工学(冶金工学)的方法であり、他の一つは微視的な物理化学的手段である。これらの二つの方法においては図3に示すような分野に関する情報を組合せて解析される。

このように鉄鋼製錬プロセスの説明にあたっての二つの方法は方法論的にはお互いに異っているが、あくまでもその研究対象は同一の現象であることを忘れてはならない。そのためこれら両者間には相通ずるところが多く、お互いに密接な連続が必要であろう。と同時に、両者に対していえることは現象の実体の正確な把握が重要である。とすれば実体の把握はどのようにすればよいのだろうか？

何しろ鉄鋼製錬プロセスは巨大な炉内においてかつ高温下で進行するため、その実体を正確

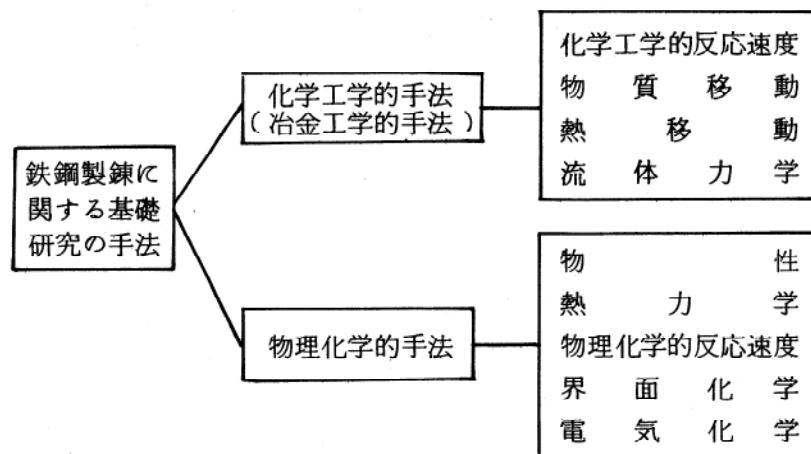


図 3. 鉄鋼製錬基礎研究の研究手法

表 1 製鋼プロセスの物理化学的研究例

融体構造の研究

- 溶鉄、溶鉄合金、溶滓の構造研究

物性研究

- 溶鉄、溶鉄合金の物性（密度、粘度、拡散、電導度、表面張力、磁性）
- 溶滓の物性（密度、粘度、拡散、電導度、表面張力）

熱力学的研究

- F_eO を含むスラグとガス、あるいは溶鋼との平衡
- 溶鋼中の元素間の平衡（脱酸、脱炭、脱硫、脱磷などの各反応の平衡）
- 溶滓、溶鋼中の成分の活量、など熱力学的数値の測定

反応速度論的研究

- 溶鋼中の元素の酸化速度（脱炭速度、脱酸速度、脱磷速度など）
- F_eO を含む溶滓と溶鋼との反応速度
- 溶銑へのスクラップの溶解速度
- 溶滓への石灰の溶解速度（滓化速度）
- 溶滓への耐火材料の溶解速度

界面化学的研究

- 溶鋼-溶滓間の界面エネルギー
- 溶鋼-溶滓、溶鋼-固体酸化物、溶滓-固体酸化物の濡れ性
- 溶滓の泡立ち現象
- 溶鋼-ガス、溶鋼-溶滓エマルジョン

電気化学的研究

- 溶鋼-溶滓反応の電気化学的検討

生産と技術

にとられることは極めて困難である。そのため化学工学（冶金工学）的方法では炉内における装入物質の移動や溶鋼の動きをコールドモデルによってある程度の目安をつけることがなされる。このコールドモデルは実炉と相似形の透明材料で作られた転炉模型内で溶鋼の代わりに水を用い、吹錬用酸素の代わりに空気を吹きつけて模型内の水の動きより溶鋼の動きを類推し、定性的に現象の概略を把握しようとするものである。これによってこの現象の要因間の関係を推論することができるのである。一方ホットモデルにしても実炉を縮尺し、実操業と同様に溶銑を酸素で吹錬するのではあるが、実炉とは寸法だけが相違しているため縮尺による現象の相違をさけることはできない。そのためこの方法によって得られた結果は実炉中の現象を詳細に定量的に検討することには困難である。

このようにモデル実験は定性的な概略の知識を得るには大きな役割をはたすと言えるが、定量的な正確な数値や関係を知るには困難が多い

ということができる。しかしこれらのモデル実験が実操業に対して大きく貢献していることは否定できないと思う。

一方、製鋼プロセスの基礎研究は実験室的規模において実炉における現象を物理化学的に解析し、出来るだけ単純な条件の下で追求する方式がとられている。それらの例を表1に示す。しかし、表1に示すような多方面からの研究においても実験技術上の問題（例えば製鋼スラグは FeO を多く含有するため反応性が強く、溶鋼-スラグ反応の研究には耐火材の良いものがなく長時間の使用は不可能である）のために良好な、かつ統一的な結果が得られているとはいえない。特に FeO を含むスラグと溶鋼との製錬温度における平衡研究はきわめて困難で従来直接測定がなく、低温でなされたスラグ-固体鉄反応や熱力計算によって推論されていたが、やっと最近、藤田、丸橋両氏⁵⁾によって製錬温度における溶鉄と $FeO-SiO_2$ 系の平衡実験に成功されている。しかし、この研究も実験

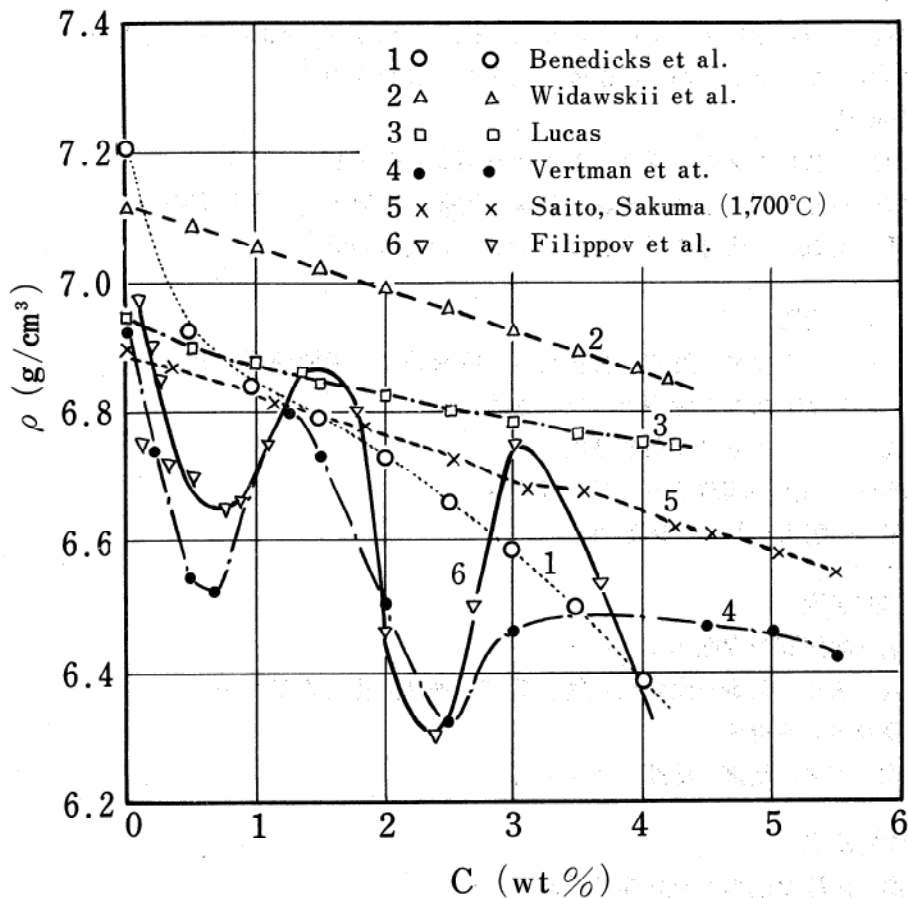


図4. 溶融Fe-C合金の密度(1600°C)⁷⁾

技術上の問題のために限られた条件の下においてのみ得られたものである。これに反して溶鋼中の諸元素間の平衡に関しては数多くの実験データの蓄積があり、我国においても日本学術振興会製鋼第19委員会においてまとめられ製鋼反応に関する推奨平衡値⁶⁾として実操業に大いに役立っている。一方溶鋼、溶滓に関する物性値についても数多くの報告があるが、必ずしも十分といえず、難く鉄鋼基礎共同研究会、溶鋼・溶滓部会においてまとめられた結果⁷⁾をみると図4のように測定値が相違している。

このように部分的にかなり解明された分野もみられるが、対象となる現象そのものが先に示したようにきわめて複雑な状態であり、単純化された基礎研究の精度をあげ、それを基礎として実際の現象解明に努めねばならない。

実験室的に行われた鉄鋼製錬の基礎研究においても実際反応にともなう現象がどのように起っているかは十分に把握されていない。一般に実験炉中の小さなルツボの中においてスラグ・メタル反応を行う場合でもスラグ中にある溶鉄との反応状況を直接見ることはできず反応生成物の挙動(メタル、スラグ、ガスの分析による)から反応の推移を推定するにとどまっているのが現状である。例えばスラグ・メタル反応におけるCOガスの発生反応についてみるとCOガスの発生場所やその形状については従来の方法では何らの情報も得られなかった。

これに対して著者の研究室においては鉄鋼製錬プロセスの実体をX線透視法によってとらえようとする試みを行っている⁸⁾。その概略を以下に簡単に示す。図5に示すように高温炉内におかれた反応容器(ルツボ)に対しX線装置によってX線を照射し、X線フィルムにルツボ内の状況を撮影する。フィルムによっては反応にともなう界面エネルギーの変化や迅速なガス発生などの現象をとらえにくいのでその場合にはイメージングプリファイヤに映し出された像をX線テレビで観察し、16mmシネカメラやビデオテープレコーダーによって記録し、解析することをおこなっている。フィルム上にとらえられたルツボ内におけるスラグ・メタル反応状況を写真1、2に示す。

冶金物質の高温の性質についても従来の研究は解析の効果のため実体とかなり相違した単純状態を対象にしたものが主流であった。もちろん高温研究のため、このような単純系においても測定結果に相違のあることは先に述べた。そのためより一層の精度の高い測定が必要であるが、それ以外にも冶金物質の存在状態により接近した条件下の測定をも考慮せねばならない。例えば電気炉やESR炉においては溶鋼、溶滓は部分的にはかなりの高温に達しているが、温度が高ければやはりその高い温度における測定を考え、さらに実炉中の溶滓は均一状態でなく、固体や気泡の分散した不均一状態であるから、

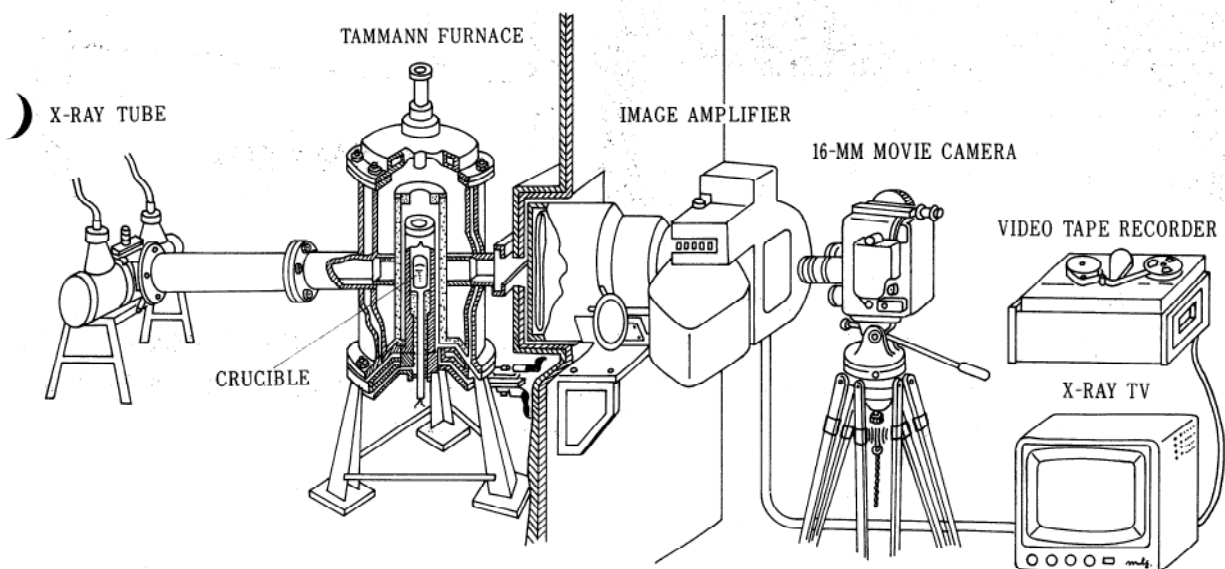


図5. X線透視法による鉄鋼製錬研究装置

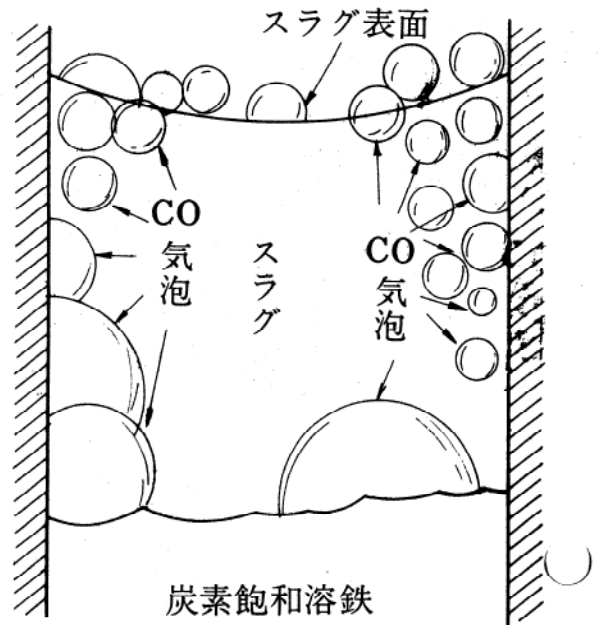
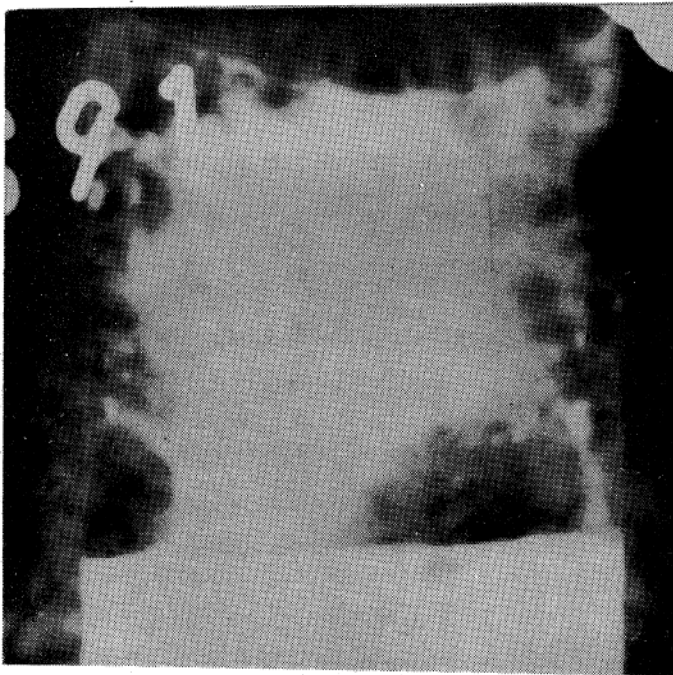
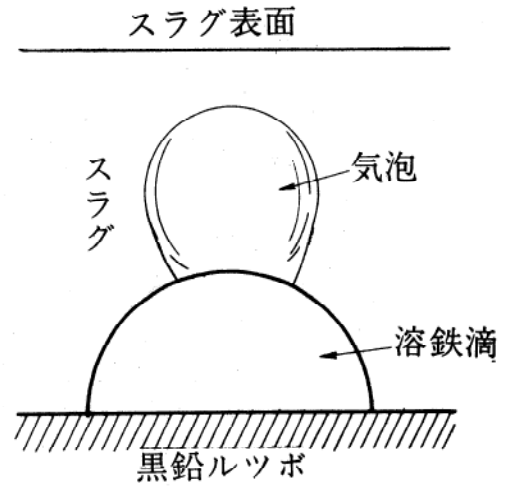
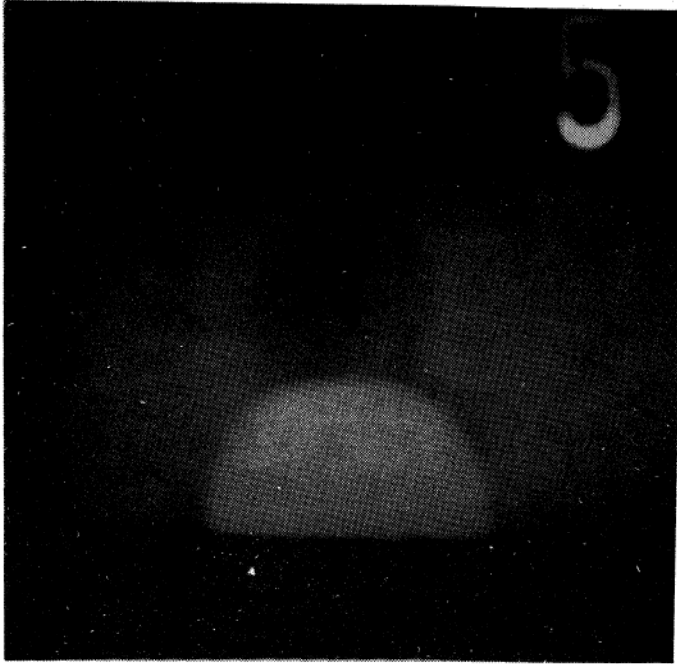


写真1. 溶鉄とスラグとの反応状況のX線透視観察

- a) 塩基性スラグ中の溶鉄滴に $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}\uparrow$ 反応によるCO気泡が付着している。
- b) 黒鉛ルツボ内で酸性スラグが炭素飽和鉄、黒鉛ルツボと反応している。溶鉄とスラグ、黒鉛とスラグの各界面よりCOガスの発生しているのがみられる。

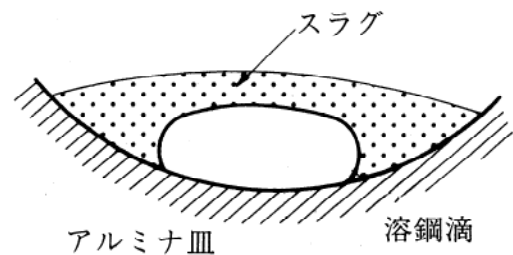
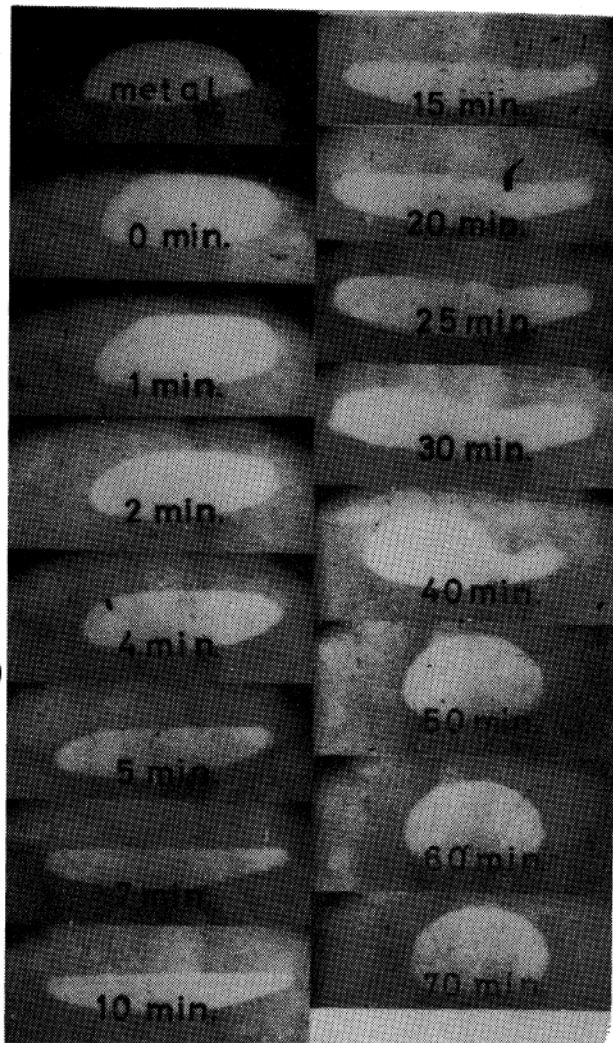


写真2. スラグと溶鋼との反応の進行にともなう溶鋼滴の形状の変化

やはりこのような実体を対象として研究を拡げていくべきであろう。

筆者の研究室においては数年前より 1800°C を越える高温における酸化物融体の物性測定を行っている⁹⁾。このような高温の条件下の研究には 1600°C 程度の温度において使用されている実験材料では困難が多く、高温に適したルツボやシンカーの材料の開発が必要となってくる。すなわちそれらの材料として著者らは M_0 、 W のルツボ、シンカー、電極材を使用して熔融アルミナ(融点 2050°C)の密度の測定をもおこなった。

以上のように製錬プロセスの基礎的研究において、現象の本質を究明するため、その実体を如何に正しく把握するか常に心をくばる必要がある。そのため予想される困難をのりこえ、あらゆる手法を考え、それを勇敢に試みる必要があると考える。

IV. まとめ

鉄鋼製錬に関する基礎的研究が過去どのように発展し、変遷し、現在どのような状況にあり、かつ今後の発展にとってどのような問題点があるかについて簡単にのべた。対象となる鉄鋼製錬プロセスはきわめて複雑な状態であり、その解明には多大の困難が存在する。加えて、最近原料、エネルギー、公害などの問題によって今後一層、量的より質的に重点が移行するであろう日本鉄鋼業にとっては、その技術的、科学的基礎背景として、製錬プロセスの実体の把握とその本質の解明に向って精力的な努力を続けねばならないであろう。

文 献

- 1) H. Schenck : Physikalische Chemie der Eisen hüttenw. (1932)
- 2) K. Körber, W. Oelsen : Mitt. K. W. Inst. Eisenforsch. 14 (1932), 181
- 3) J. Chipman : Basic Open-Hearth Steel-making, AIME (1951).
- 4) R. D. Walker, D. Anderson, Iron and Steel (1972), 403
- 5) 藤田、丸橋：鉄と鋼 55 (1969) 249.
- 6) 日本学術振興会“製鋼反応の推奨平衡値”(1968), 日刊工業新聞社
- 7) 日本鉄鋼協会“溶鉄・溶滓の物性値便覧”
- 8) 荻野、西脇：鉄と鋼、57 (1971) S. I., S. 372, 58 (1972), A5.
- 9) 荻野、西脇、石見、：鉄と鋼 58 (1972) S. 387.