

特別講演

UDC 669.1.001

将来の製鉄プラントと研究計画に関する一提案*

A Proposal for a Future Steel Plant and Research Program

Sven EKETORP**

今日の製鉄工業の発展は冶金学的研究の成果によるものでもなければ、すべての可能な因子を注意深く検討した結果生じたものでもありません。実のところは資本が投下され、発明家や開発技術者が新しい生産手段を見つけ出し、それから科学者が何年もたつてからどうしてそうなるかの理由付けにやつて来たというのがこれまでのパターンでした。このようなパターンは将来、全く変わってしまうと思います。

この講演では 20~30 年先の製鉄プラントについての一提案について検討を加えてみたいと思います。このプラントの発想は明確な科学的、技術的、人間的、経済的条件に基づくもので、最終的に得られる結果はこれらすべての因子を集大成したものとなります。

次の各章に従って話を進めたいと思います。

1. 決定因子の検討
2. 可能性ある 2 つの冶金プロセスのルート
3. プラントの描写
4. アイディアの実現化
5. 得られる特長の要約

ここでは鉱石から凝固した鋼までの製造冶金についてのみを考えることにします。

1. 決定因子 (判定基準)

この章では我々の理想の未来の製鉄プラントにおいて満たされるべき多くの条件に触れてみたいと思います。判定基準のリストは完全ではありませんが、重要と思われるもののいくつかについて述べます。

1.1 熱力学

よく知られている熱力学的事実は厳密に用いられねばなりません。少し例をあげると、

- 図 1 において予備還元は点 A (ここでは排ガスは約 75% の CO_2 を有している) で単に FeO までとするべきで、点 A' であつてはならない。
- もし高温ガス還元を行なうならば、CO の代わり

に H_2 を還元剤とすべきである (B' ではなく B)。

- 鋼浴からの O, N, S, C などの除去は反応生成物がより低い活量を持たねばならぬという事実を利用すべきである。Si による脱酸に、塩基性スラグ使用、最近のステンレス鋼の製造プロセスで採用されている C の選択酸化のための真空あるいは不活性ガス・パーキングによる低 CO 分圧。

1.2 速度論

$F = A \cdot D \cdot \Delta C / \delta$ という単純な関係において、D は物質定数で変えることが困難なことが判つています。しかし A と ΔC は大幅に増加できるし、 δ はごく小さくすることができます。このことから明らかなことは、

- すべての反応物質は大きくても $50\mu\text{m}$ 以下の径の粉体であること。
- 液相あるいは固相の相内および相間の攪拌を強力に行なうこと。
- 反応相間の接触は最大とすること。

これらすべての要求は、すべての冶金反応プロセスにおける噴射技術の利用ということに直結されます。

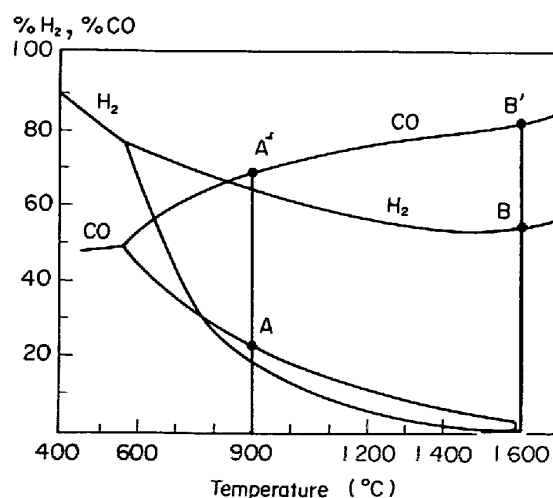


図 1 CO , H_2 還元の熱力学的基礎

* 昭和 49 年 11 月本会講演大会における特別講演
昭和 50 年 7 月 11 日受付 (Received July 11, 1975)

** The Royal Institute of Technology, Sweden

熱の移動は物質移動と同じ原理で行なわれねばなりません。つまり、

- 輻射伝熱のないこと。
- 伝熱は直接的であるべきであり、エネルギーは浴あるいは層自体の中で発生させられねばならない。このことから理想的方法は次のようになる。
- 抵抗または誘導による電氣的加熱（アーク加熱は除く）。
- 鋼浴中での酸素ガスによる Si または C の酸化発熱。
- 過熱プラズマによる加熱ならびにガスの熱分解の利用。

1.3 原料

一般的要望事項として、そのプロセスにおいていかなる種類の鉄鉱石も団塊とせずそのまま利用でき、きびしい物理的、化学的制約のないことがあげられます。もしも、鉄石を物理的に高品位まで富化できるならば、プロセスはこの利点を生かすものでなければなりません。

出て行く物質、今日では廃棄物質と呼ばれていますがこれは量的にみて重要です。図2に示すように、製品鋼1tは1tの固形廃棄物および1tの排ガスを発生します。これらの物質はそのプロセスに直接もどされるか後段の処理の原料として生かされねばなりません。

循環プロセスを見出し、廃棄物質を利用することが要求されている今日、ここでとりあげるプロセスも循環の可能性の観点から選択されねばなりません。例えば製鋼スラグを高炉へ戻すことはPが還元されるため問題となります。この解決策はPが還元されない範囲の酸素ポテンシャルの還元プロセスを用いることです。

エネルギーと原料の保存は次の意味を持っています。

- 排ガス中のすべての顕熱、潜熱が利用されること。
- 温水のようなポテンシャルエネルギーの低いもの

は、周辺の地域社会あるいは工場内の暖房に利用すること。

- 使用済みの耐火物質は煉瓦あるいはモルタルに再生すること。
- Fe, Mn, Crなどの金属はスラグから回収すること。
- すべてのダストはプロセス内で循環すること。
- すべてのスラグは高級な材料の生産に利用されること。

1.4 エネルギー

20~30年先の製鉄プラントでは、石油や天然ガスの利用は不可能と思われます。使えるものは、石炭と、石炭太陽、風力あるいは水力から作られた電気エネルギー（多分 H_2 の形で）となります。原子力エネルギーは複雑な安全性の問題が解決すれば使われるかも知れませんが、鉄原料の場合と同様に石炭には、物理的、化学的制限を加えるべきでなく、団塊化やコークス化せず、粉体のままで使われるべきです。

エネルギー変換は、それによつてエネルギーのロスが生ずるので避けるべきでしょう。そのため石炭もプロセス内で直接利用されねばなりません。またエネルギー循環は損失の原因になるので、プロセスのエネルギーはできるかぎり短絡されて（short-circuited）いなければなりません。

エネルギーの節約のために、さらに次の事項が重要となります。

- 排ガス中の顕熱、潜熱が小さいこと。
- 溶鉄、溶鋼の直接露出しないこと。
- 一連のプロセスにおいて物質の再加熱がないこと。
- 連続または半連続操作であること。

1.5 生産性

製品の経済的生産の基本は t/hr , t/m^2 , t/m^3 , $t/man \cdot hr$, $t/unit\ invested\ capital$ などで計られる高い生産性にあります。また生産性で重要なことは、反応器が例えば体積当たり、トン当たりあるいは投下資本当たりの全エネルギー変換量として計られるエネルギー密度の高い状態で作動しているということです。

いくつかの数値をあげてみると、

	MW/t	MW/m ³
高炉	0.7	0.5
アーク炉	0.5	0.4
L D	2.5	3
O B M	3	3.5
トーマス転炉	5	6
H F	1	6.5
溶融還元(推算)	3	3

高生産性を得るためには、迅速な反応と、効果的な熱および物質移動が必要条件です。

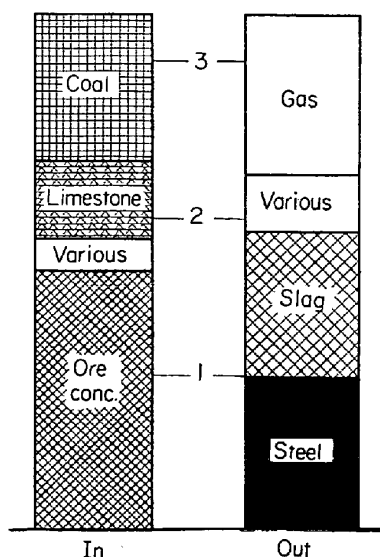


図2 鋼トン当りの必要原料および生成廃棄物

1.6 環境条件

今日の製鉄プラントの環境は、外部の人々には信じられないほど不快です。我々は製鉄業に従事していて他方面の事情にうといのですが、ごく稀なひどい作業場においても、精神的環境は作業者を鼓舞するものであることを知っております。その主な理由はおそらく作業の自由度が比較的多いためでありましょう。

環境の整備と改善に関する第1の原則は、工場で働いている人々に対するすべての危険と障害が完全に除去されなければならないということです。さあ環境の基準は個々の人間のあるレベルの満足感に対応すべきものであり、そのレベルは工場で働いているすべての人々によつて決められねばなりません。

基本的にはすべての環境問題は、その発生源で処理されねばなりません。耳栓と高い煙突は真の解決ではありません。ダスト、騒音、熱が人々から取除かれるべきでその逆ではないのです。

重要な環境問題は騒音、通風、ダスト、熱、危険性ガスに関連したものです。

1.6.1 騒音

騒音の発生源は除去されねばなりません。すなわち、

- アークによる騒音は除去できないので、アーク炉ではないこと。
- 乱流の自由噴流気体でないこと。それゆえ、LD、取鍋のガス加熱、平炉は理想から離れたものといえる。
- Kaldoのような重回転機械は許されるべきではないこと。
- スクラップやインゴットエンドなどを金属上に落下させないこと。

許容騒音基準は大声を出さずに話せる（平均 65 db (A)）程度にすべきです。

1.6.2 通風

高温プロセスであるため、対流による通風を避けることは困難です。解決策としては、

- 導管による高温箇所への直接の空気冷却。
- 排気路
- 広い作業場をより小さく仕切ること。

1.6.3 ダスト

規則と手段

- プロセス自体のダスト発生を最小とすること。
- 乾燥粉体はクローズドシステムで輸送すること。
- 添加はすべて粉体で浴または層内への噴射により行なうこと。
- 炉あるいは取鍋のタップを大気中開放下で行なわないこと。また溶湯やスラグを直接大気にさらさないこと。
- フィルターに貯ったダストはプロセスに直接戻すこと。

1.6.4 熱および有毒ガス

これらの問題もまた、溶湯が直接大気あるいは人間にさらされてはならぬというきびしい規定によつて解決されなければなりません。これは工場周辺への熱放散、Mn, Si, Fe の蒸発を防ぐことを意味します。

高炉は、タップ時の熱、ガス、ダストという困難で未解決の問題をかかえ、さらにその系内で大量の有毒なCOガスを循環していることといった多くの理由で除かれます。

1.6.5 精神的環境

「近代の人間は、彼の日々の仕事の中に意義と満足を求める。彼あるいは彼女は1つのグループに属したいという欲求があり、また彼の周囲とつながりを持ち、作り出したものと一体感を持ちたいという欲求がある。そして自分のやつた仕事に対する評価を得たいと願っている。工業労働は人間に適合させるべきで、機械に人間を合わせるべきではない。」これはスウェーデン第1の自動車メーカー、ボルボの専務の論文から引用したものです。

いわゆる「人間因子 (human factor)」は無視できるようなものではありません。そうではなく、現金よりも、優しさ、自由、知識のよさのわかるこの不合理な生き物を対象として全プラントが建てられるべきです。

詳細に進むのはやめて、公式的にいくつかの規定を挙げると、

- すべての作業は、各メンバーがそのプロセスを理解でき、異常が生じた際調整することができると小グループでなされねばならない。
- 単調な作業は除かれるべきで、少なくともグループの中で順番制とすべきである。
- 人々は作業をマスターできるべきで、作業の一部になつてはならない。
- 仕事とプラントの問題に関する教育は常に継続して行なうこと。

1.6.6 美的環境

- 全ての部門の労働者が、彼らが汚い工場に閉じ込められているのではなく、その作業場が製鉄プラントの中で、また地域社会の中での重要な活動の一部であることを感じるようにすること。窓からの眺めはスクラップや貯蔵場でなく、快適な眺めとすること。
- 清掃と整理整頓は、特別の部門により行ない、また一方作業グループ内でもうまく組織すること。
- 元気づけるような室内外の配色。
- 各人への清潔で機能的な作業着。

1.7 ライニングの損耗

この問題が解決されるべき重要な問題であり、したがってプロセスと反応器を設計する場合の中心課題であることは周知のことです。その解決法は新しいより丈夫な耐火物によるのでなく、侵食の原因を取り除くこ

とにあります。結論として、

- 塩基性スラグのみを使用すること。1次の溶湯はSiを全く含まないため、シリケートの生成は最後段の反応器で、脱酸あるいは合金元素添加のためにSiが添加されるまで不可能である。Pも鉱石還元段階で酸素ポテンシャルが高いためメタル中には導入されない。
- 反応器はヒートショックによるライニングのスポーリングを防ぐため、常時作動温度が少なくとも1000°C以上に保たれるべきこと。
- スラグによる損耗は次のようにして最小化されること。
 - 噴射吹精によりFeO含有量の低いスラグを作ること。
 - 処理の各段階において前段のスラグが次の段階に流入することを完全に防ぐこと。
 - スラグ反応は粉体の吹込みにより行ない、溶鋼上の高温スラグとの接触では行なわないこと。
- ガスでパージされた多孔質ライニングの使用によるライニングの冷却、または水あるいは空気による間接的なライニングの冷却。
- 可能ならば、水冷炉殻上へスラグを凝固させることによるライニングの完全廃止。これは高炉々底部におけるごく厚いグラファイトライニングの使用というかたちでなされている。

1.8 操業のコントロール

操業を効率よくコントロールするための重要条件は、原料と反応器の重量、ガス流量、温度、分析値が平均値としてとらえられているだけでなく、一操業サイクルの全部にわたって各状況における的確な数値としてとらえられていることです。これには適当な測定方法のみでなく、連続的あるいは間欠的に種々のパラメーターを測定し、反応器の各部の状況を正確に伝えることのできるシステムを必要とします。例えば高炉のシャフト部と攪拌されている反応器の浴の状況の違いは明らかです。

1.9 製品の品質

今日の製鋼工場における造塊あるいは連铸による铸造製品は、分析値や組織の不均一、ミクロおよびマクロ偏析、気泡、ミクロおよびマクロの非金属介在物といった多くの欠陥を持っています。これらの欠点を完全に除くには、まったく新しいプロセスが導入されなければなりません。今日のインゴット組織と樹枝状成長に関する研究は、新しいプロセスのための基礎と技術に向けられるに違いありません。いくつかの提案があります。

- 溶鋼は酸化反応器を通過した後は、絶対に酸化性雰囲気にはさらされないこと。
- 正確な温度と分析値は、誘導加熱し、ガスと誘導により攪拌が行なわれている反応器内での脱酸と合

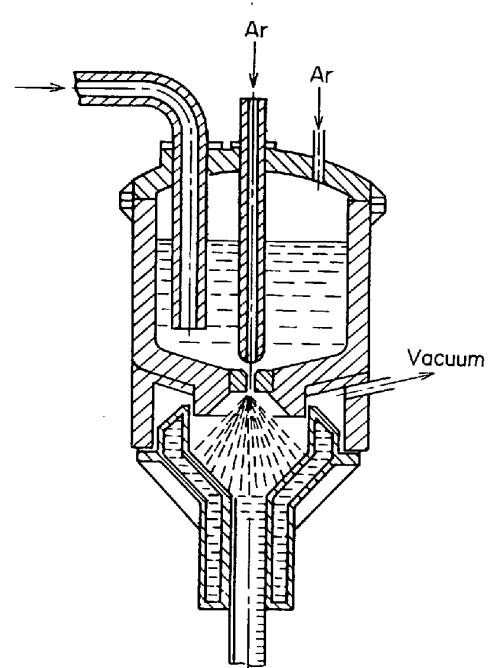


図3 急速凝固・高密度鋼製造装置

金元素添加により得ること。

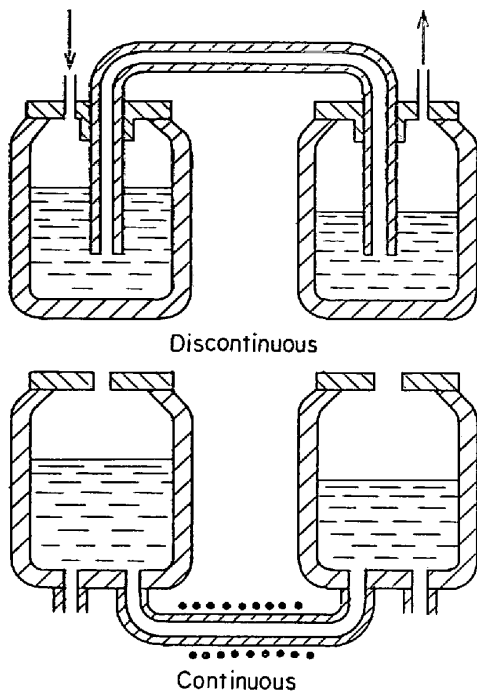
- 合金添加剤と脱酸剤は鋼浴中に吹込むこと。
- 調整炉と铸造用タンディッシュは一定温度に保ち、雰囲気はアルゴンか窒素とする。
- 高合金鋼で特に問題となる偏析は、図3に示す溶鋼流の分散により生じた粒滴の超急速凝固により完全に除去できる。粒滴は集められて、固相線温度付近で緻密なビレットに形成され、等方性の鋼が生産される。

私の意見としては、これらの主な特徴を持つプロセスの技術開発は、研究や開発に携わる人々にとって非常に重要な仕事だと思います。

1.10 設計上の諸特徴

近代的製鉄プラントは、炉や取鍋を運搬するためのクレーンを備えた巨大な建屋から成っていますが、未来のプラントはより化学プラントのようになり、次のような特徴を持ったものとなると思います。

- クレーンを用いず、それにより建設費のかからぬ軽量建屋の使用が可能となる。
- かつては転炉と呼ばれていた反応器はすべて同一の形状となる。
- すべての反応器はしっかりと台車の上に設置される。
- 反応器間の溶鉄、溶鋼の輸送はすべて、回分操作については圧力による間欠輸送、連続操作については電磁輸送(MHD)により、図4に示すようなセラミックチューブを通して行なわれる。
- 吹精用ノズルは最適の流体力学的条件と、最少のライニングの損耗が得られるように、上方から傾け



回分法：圧力輸送，連続法：電磁輸送
図 4 反応器間の溶湯輸送

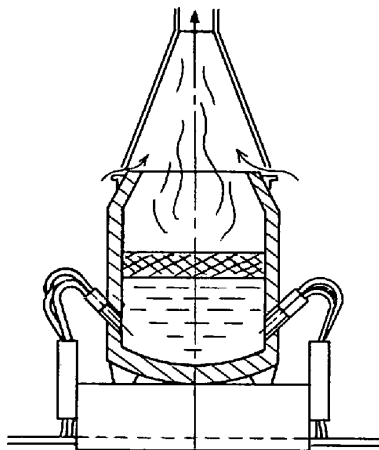


図 5 傾斜ノズルを有する脱炭反応器

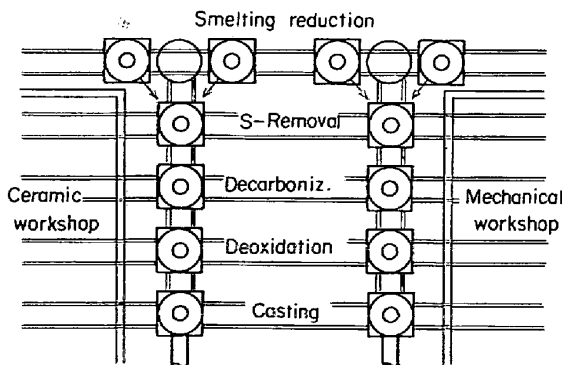
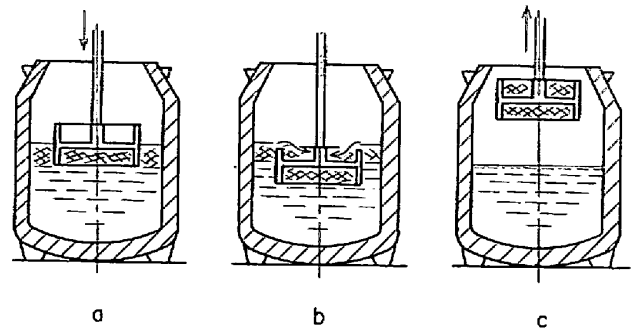


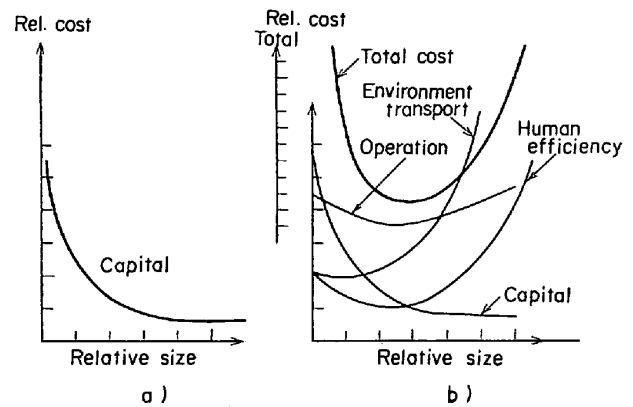
図 6 製鋼工場の計画図

反応器は台車で運搬し，耐火物および機械の補修は特定の作業場で行なう。



a) 下面への凝固，b) 箱内へのスラグ流入，
c) 凝固スラグの取出し

図 7 水冷スラグリフターによるスラグの凝固除去



a) 投資額との関係，b) すべての因子を考慮した場合，あるプラント規模で最小コストになる

図 8 プラント規模と生産コストの関係

て設置する(図 5)。

- 反応器とほかの装置の耐火物の補修は，適切なクレーンがあり，綿密に設計された廃棄系を持つ特別の修理工場で行なわれる(図 6)。
- 還元工程で生ずるスラグはタップし，直接粒状化する。脱硫工程からの粉状スラグは吸い上げにより除去する。製鋼工程からのスラグは，水冷容器に受け凝固させて取除く(図 7)。

1.11 プラントの規模と設置場所

今日の製鉄プラントの規模は，主に装置に対する投資額が，規模を大きくするに従い対数的に減少するという事実に基づくものです(図 8)。しかし，規模と関係のあるほかの多くの因子も決定権を持つべきです。多くの場合，操業費と人間的効率はある規模のところで最小となります(図 8 b)。従つてトータルコスト曲線はある比較的小さな規模のところで，経済的な最小値を示します(図 8 b)。巨大な工業集積の時代は過去のものとすることができでしょう。

プラントの規模は当然その設置場所と密接な関連があります。これは私の信念ですが，将来，プラントは地域社会にさらに依存し，協力しあつていくことと思いま

す。このためには、原則としてプラントの拡張ではなく、しつかりした自然的、人間的基礎資源に基づくプラントが必要になります。より短い通勤距離に近い将来要求されるでしょうし、通勤時間が労働時間に含まれるようになるでしょう。

1.12 資本と製品市場

当然のことながら、これらの因子は全体の計画に巨大な影響を与えます。しかし私の言いたいことは、それらが唯一の決定因子であつてはならないということです。

1.13 全般的意見

以上においては、将来の製鉄プラントを建設する上で考慮されるべきいくつかの因子を個別に論じて来ました。これらのすべての事項の集積がなされねばならず、またそれらの相対的重要度の比較を行なうのは当然のことですが、これからの話を進めるにあたり、この集大成を多かれ少なかれ私の直観で行なうことをお断わりしておきます。実際には、影響因子について客観的な検討がなされねばならないのは当然です。

将来の製鉄プラントでは、人間因子もまた純粋に技術的な事項と同様に重要なものとして取扱われます。人間の満足感、ちょうどラインの寿命、エネルギー源、資本がそうであるのと同様に、絶対的な必要条件です。私が技術的な問題について話しているように思われるかもしれませんが、本当のところは人間にふさわしい作業場と鉄製品について検討を加えているのです。スエーデンではある程度の失業者がいるにもかかわらず、単調で不健康な仕事に人を得るのは困難です。日本ではいかがでしょうか？

これからは人間因子までも定量化する方法を学ばなければなりません。それによつて、資本投下額や製造コス

トと全く同様に、人間因子もまたこれまで進めてきた技術的決定に影響をおよぼすことができると思います。

2. 2つの冶金プロセスのルート

これまでに検討したすべての判定基準に基づいて、鉄あるいは鋼の第1次生産に関して、次の2つの方法を提案したいと思います。

a) 石炭による粗鉄*までの高温還元

b) 水素による粗鋼*までの高温還元

ここでなぜ高炉が使用されないかを明確にしなければなりません。しかし、これは今まで述べてきた判定基準から直接的にもたらされたものです。次の事項も重要です。

1. 操業停止を不可能とする大炉容積

2. シャフト部（それはまったくのブラックボックスです）の各部分の状況のコントロールの不可能性。

3. 使用される酸素ポテンシャルが低すぎる

2.1 石炭による溶融還元

このプロセスでは、溶銑中に微粉炭を酸化物とともに吹込みます。鉍石は固体還元で FeO としておきます。排ガスの持つ全エネルギーは電気エネルギーとして回収します。

図9にこのプロセスの原理を示しましたが、ここで精鉍あるいは粉鉍は流動層内への微粉炭と酸素の直接吹込みにより、 FeO まで予備還元されます。900°C の高温排ガスは 70% CO_2 、30% CO を含んでいます。

溶融還元反応器では、高温 FeO 、微粉炭、酸素が 4% C の溶湯に吹込まれます。還元により発生した CO ガス

* 粗鉄 (raw iron) と粗鋼 (raw steel) は精錬前の中間生産物を意味する。

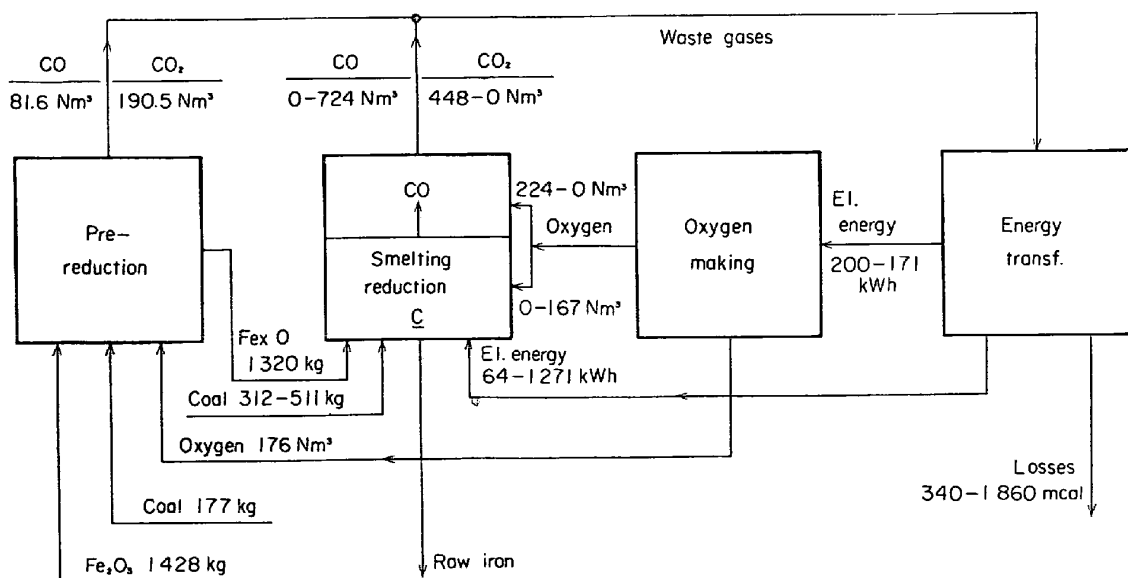


図9 予備還元工程と、一部 CO の直接燃焼および一部排ガスから変換された電気エネルギーによるエネルギー移動を含めた溶融還元プラントのフローシート；数字は CO の燃焼率により変化している。

は、浴上で酸素と完全にまたは部分的に反応して CO_2 となり、その輻射熱により浴の昇温を計ります。CO を含んだあるいは含まない 1800°C の高温排ガスは発電所へ導かれ、電気エネルギーに変換されます。そしてこの電気エネルギーは反応器の誘導加熱用にまわされます。このプロセスのすべてのエネルギーは、石炭から得られることを前提としており、石炭はすべて反応器に吹込まれます。

溶融還元のプロセスの結果は、直接伝熱が重要課題であることを示しています。浴上での CO の O_2 による直接燃焼による伝熱という困難な問題に対する満足な解答が見出されない場合は、電気エネルギーによるエネルギー変換という回り道も十分可能です。480 kg coke/t の近代的高炉と比較し、また焼結およびコークス化に必要な石炭を計算することにより、次のような鋼トン当りの石炭消費量が得られます。高炉については排ガスエネルギーの補正を行い、また溶融還元のプロセスの場合について粗鉄（溶湯）のそれぞれの分析値について修正しました。

石炭消費量 (kg coal/t steel)

高炉		540
溶融還元	0% CO- CO_2	620
〃	100% CO- CO_2	440

図 10 は燃焼状況の違いと石炭消費量の関係を示します。高炉の石炭消費量に達するには、27% CO が反応器内部で燃焼し CO_2 にならないければなりません。電力への変換効率、誘導加熱の効率 90% を含めて 36% とされています。溶融還元プロセスについての現在までの経験からすると、反応器内で CO の 50% を CO_2 にす

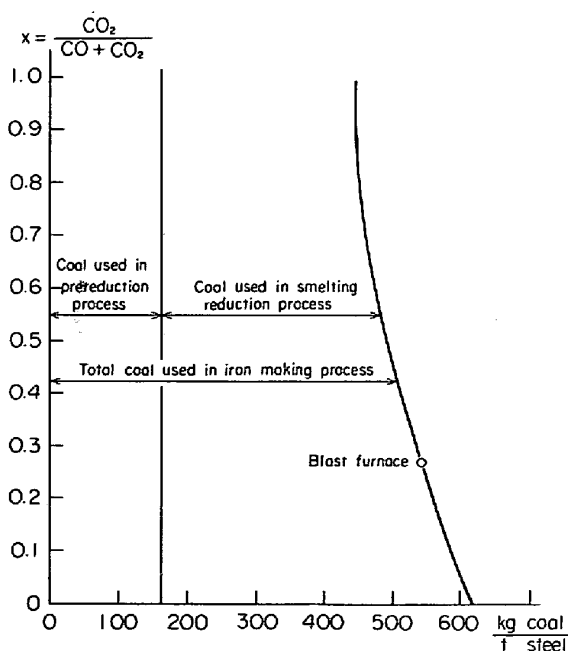


図 10 溶融還元における CO の燃焼率と石炭消費量の関係

ることで、プロセスは技術的にてみ操業上の支障はありません。この場合石炭消費量は 495 kg/t steel となり、高炉と比較して 45 kg, 8% の節約となります。すばらしい値です。

溶融還元はまだ工業的規模で操業されていないので、高炉と比較したコストの成算について推測するのはむずかしいのですが、コークスプラントと焼結プラントを含む全高炉設備への投資額は、溶融還元のプロセスの 2 つの反応器と 1 つの発電設備より高くなることは明らかと思われます。

重要な点は、この種の反応器は 100 000~500 000 t/year という小規模の建設が可能ということです。これは大きな長所となるはずで

溶融還元反応器から出てくる溶湯は約 4% の C を含んでいますが、Si, Mn あるいは P は含んでいません。というのは反応器の酸素ポテンシャルが高いのでこれらの元素は還元されることがないためです。このことは次の処理段階にとつて、C のみを除去すればいいので大きな利点といえます。実際、製鋼工程の問題のほとんどは、Si と P の存在が原因となつて

しかし高酸素ポテンシャルは、原料により 0.1~0.3% という高 S 含有量を結果的にもたらすことになります。従つて脱硫工程が必要です。このことは地域社会の観点からみれば、鉄が S の吸収媒体となるので SO_x が系中のどこからも排ガスとして放出されないという、少なくとも 1 つの長所であると見なすことができます。高硫黄炭の作用はその価格が低いので 1 つの節約といえます。硫黄は後処理で CaO により除去します。そのあと不活性物質である元素状 S にすることができます。

2.2 H_2 による直接製鋼

近い将来、天然ガスと石油は鉄鋼では使われなくなるでしょうし、さらに進むと石炭さえ代えられてしまうに違いありません。しかし水素は今でもすでに新しいエネルギーキャリア となりうる ことが指摘されているので、ここでは水素と電気エネルギーのみを基とした製鋼法の可能性をスケッチしてみたいと思います。

熱力学から言つて、 H_2 は高温で使われるべきです(図 1)。実現性のある組合せの 1 つを示すと図 11 に示さ

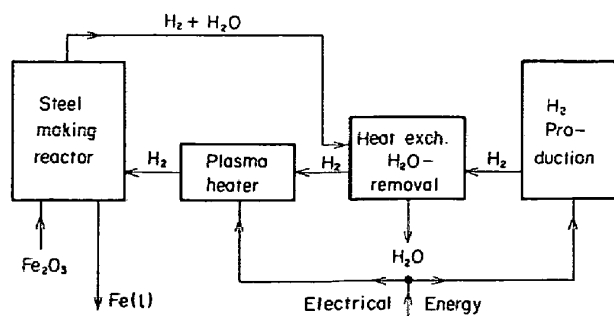


図 11 1600°C の鋼浴中での水素還元法の原理

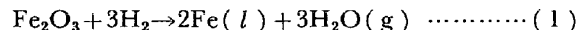
れるようなものとなります。

炭素が存在しない約 1 600°C の高温で作動する反応器中に、高温水素と精鉄が吹込まれます。20~50% H₂O を含む排ガスは熱交換器を通って循環されます。熱交換器では水が除かれ、新しく作られた H₂ を加熱します。炭素が全く存在しないので、C と H₂O の反応が防止されることに注目して下さい。純水素はプラズマアークで反応器内の吸熱反応およびそのほかの必要熱量に見合った温度まで加熱されます。

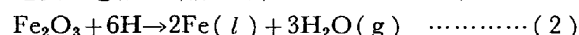
ここに提案した系は、私の知る限り、真の直接製鋼の可能性を与える唯一のものです。現在ある溶鋼までの製鉄プラントのすべての炉と工程は、高温反応器という単一工程に取って代わられることに注目すべきです。現在のプラントと異なり、投資額のほとんどは水素と電気 of 生産設備にあてられます。このようなラディカルな変化により、製鉄プラントは現在のものと非常に違った形のものとなると思います。

私の知る限りでは溶鋼温度での水素還元は、いまだかつて提案されたり、研究されたりしていません。しかしこのアイディアは基礎研究のみならず鋼の生産に対しても、魅力的な可能性を与えるものと思います。

1 600°C での還元はおそらく (1) 式に従つておこると思われます。特に水素と酸化物が浴中に同時に吹込まれる場合はそうでしょう。

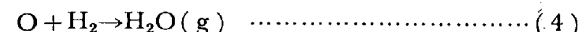
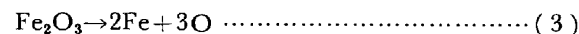


しかし、水素がプラズマアーク中で過熱されるなら、原子状水素が得られるため、反応は (2) 式で表わされ、還元速度の急激な増加を計ることができます。

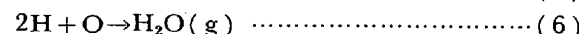


電氣的に高温に加熱した水素中でのヘマタイト粒子の還元実験から還元速度が急激に増大することがわかります。

反応が完全に気相中で、すなわち鋼浴中の気泡内で起こっているのか、あるいはいくらかの酸素が鋼中に溶解して (3)、(4) 式のような反応を生じているかどうかは不明です。



もし、水素も酸素もともに反応の前に浴中に溶解しなければならないならば、(3)、(5)、(6) 式が最も遅い反応過程となるでしょう。



現時点における研究課題としては、正しい還元機構の把握と、原子状水素を得るための水素の過熱速度に影響する因子を見出すことがあげられます。

実際のところ、鋼浴は反応には関与せず、還元を行なわす場所として、また生成した鉄の容器としての役割しかありません。1 600°C の鋼浴の内部の高温のガス気泡

は理想的な反応箇所といえます。作用される鉄鉱石に由来するスラグは排滓しなければなりません。このプロセスは熱交換器と水素製造機を結合して動かさなければならぬので、連続操業の必要があります。この場合、我々の製鋼工程が単一工程なので、連続装置を設計するのは容易のように思われます。

水素還元の次の処理はアルゴンまたは窒素のパージグによる水素の除去と、合金添加によつて生じた高酸素レベル溶鋼の脱酸です。

このプロセスの速度と、プラズマアーク使用の可能性についてより詳しい情報を得る前に、生産コストについて考えるのは余りにも時期尚早といえますが、製品鋼トン当りの全エネルギーの概算は 3 100 Mcal/t Fe met で、これは高炉-LD 転炉法と同じオーダーです。このエネルギー消費量は、もし電気エネルギーが化石燃料からとり出されない(ここでは多分正しいと思われます)と仮定するならば、鋼トン当たり 3 600 kWh に等しくなります。また現行の製鉄プラントとくらべて、この水素還元プラントの建設費がどれぐらいかもほとんどわかりません。しかし、このような高エネルギー密度の装置にかかる出資額は、ちょうど溶融還元プロセスがそうであるように、現行の装置に対するよりもかなり低くなるというのが私の確信するところです。

3. プラントの描写

以上、将来の製鉄プラントを決定する上での基本的因子と、石炭を用いるものと化石燃料を用いないエネルギーによるものの 2 つのプロセスについて述べてきましたが、ここではこれまでにとり上げたすべての可能性を総合した完全な製鉄プラントのスケッチをしてみたいと思います。

私の提案の具体的な解答はおそらくかなりラディカルなものでしょう。この解答がすべての場合に唯一最終的なものとは言えませんが、人々の考え方を新しい道に向けるという意義は持っていると思います。

図 6 に示すように、製鉄プラントの工程は反応器プラント、耐火物工場、機械工場の 3 つから成立っています。特に、耐火物工場は中断なしの生産と環境条件をうまく解決する上で重要なものです。

石炭を使つた溶融還元の全工程を図 12 に示します。これは連続プロセスの例で、個々の反応器は電磁輸送により連結されています。これと、溶鉄を圧力輸送で 1 つの反応器から別の反応器へ移す回分法との差は大したことではありません。回分法はより安全と言えます。連続システムを採用する場合は、回分法の場合保持時間が正確なのと異なり、それぞれある滞留時間分布を持った攪拌槽を直列につなげたもので工程が成立っていることに注意する必要があります。

溶融還元反応器では、石炭、酸化物、酸素が浴中に吹

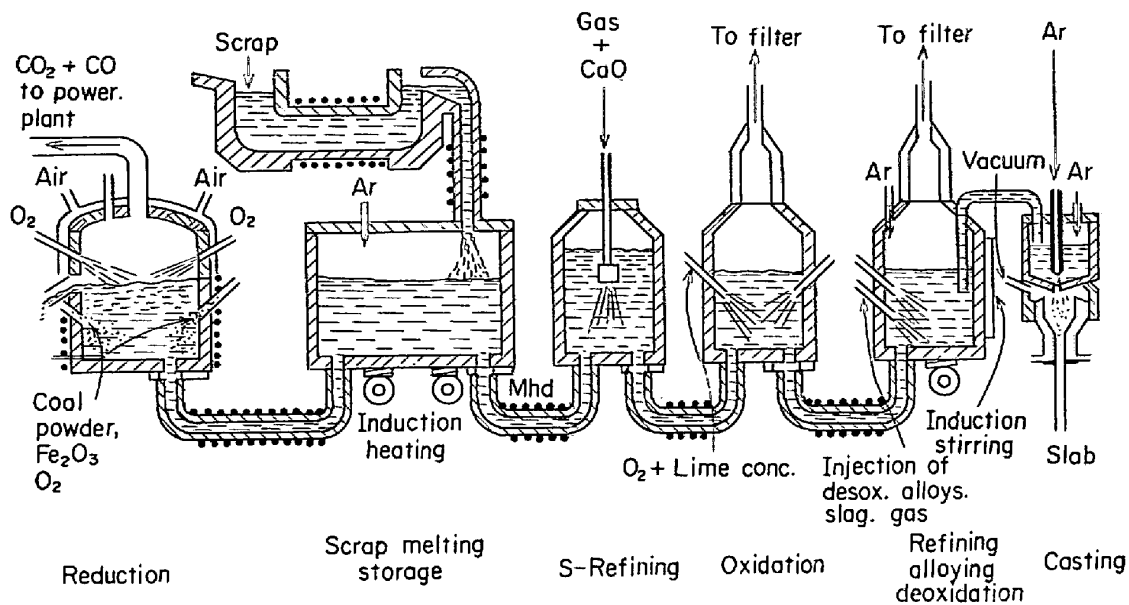


図12 溶融還元を組み入れた連続プロセス

込まれ、COの一部は燃焼してCO₂になります。そして残りのエネルギーは発電所にまわされ、電力として誘導加熱コイルから浴へ伝達されます。

反応器上部のライニングの損耗の問題は、多孔質のライニングを使いそこを通して空気あるいはO₂を送り込むことにより解決できると思います。

約4%のCを含み、S以外のほかの元素は含まない溶湯は、誘導加熱した保持炉へ導かれます。この炉へは、プラントの自家製スクラップを連続誘導溶解したものも入ってきます。日本とアメリカ合衆国²⁾で提案された高周波誘導炉はこの目的には理想的なものです。スクラップの溶解に際して、電気エネルギー消費量を減らし、ライニングの消耗を最小とし、還元により得られた溶銑の分析値と同じにするため炭素を添加します。

高硫黄炭を使用した場合0.3% Sにもなっている溶銑は、還元性ガスと共にCaOを吹き込むことにより0.005% Sまで脱硫されます。CaO粉は接触時間を長くするためにHoesch法に似た方法で機械的に攪拌されます。

酸化反応器では、酸素は上方から傾斜ノズルで浴中に吹込まれます。冷剤としては精銑を用い、CaO、Al₂O₃、MgOと共に酸素で吹込みます。溶銑中にSiが全くないので造滓剤の量は少なくなります。この反応は脱炭反応だけなので、スラグが本当にいるのかという点については検討の必要があります。

溶鋼の温度、成分、スラグ介在物のタイプは精錬炉で最終的に調整されます。温度の調整は誘導加熱により、攪拌はガス吹込みと誘導により行ないます。合金、脱酸剤、スラグは吹込みにより添加し、炉内は常にAr雰囲気保つておきます。

溶鋼は精錬炉から casting 設備へ圧力輸送されます。この

casting 設備で溶鋼の流れはArと真空により (OLSSON と TURKDOGAN³⁾ が提案したように) 分散して鋳型内に入ります。できた鉄粒はそこから何らかの方法で、連続的にビレットかスラブとして引き出されます。

図13は反応器建屋のスケッチで、粗鉄の保持炉から casting までの各段階が見られます。見た通り、反応器はレールの上に置かれていて、修理工場へはこのレールを使って移動します。これらの反応器は簡単に新しい予熱されたものと取り替えることもできます。この建屋は3層になっており、下層には気体、液体、粉体のタンクが置いてあり、吹込みノズルはこれらのタンクと直接つながっています。反応器用台車は床面に置き、上層では作業員が反応器の状況を監視できるようになっており、必要の場合には操業の中断をすることもできます。

サンプリングと測温は液体圧で作動する機器により行ないます。反応器から溶湯が溢出した場合、耐火物でラ

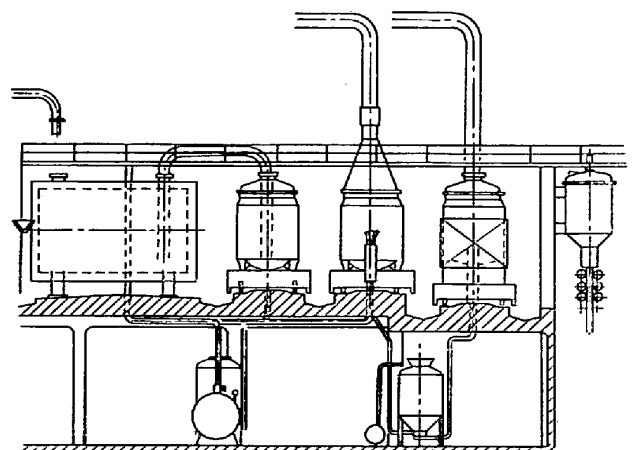


図13 3層から成る反応器建屋

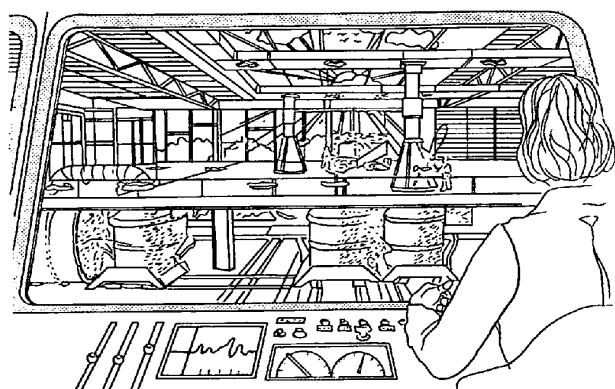


図14 操作室から見た反応器建屋内部

イニングしてあるレールに平行して設けられた溝に導かれ、凝固後除去します。

反応器建屋にはクレーンはなく屋根は軽量構造です。すべての反応器から出てくる排気ダクトは集塵機を備えた中央発電所につながっており、ガスの持つすべての顕熱、潜熱が回収されます。集められたダストは還元反応器に戻されます。

製鉄プラントの外観は多分ビール工場によく似たものとなるでしょう。そうではないと言えるでしょうか。なぜ製鉄プラントと食品プラントの間に真の違いがなければならぬのでしょうか。

プラントの操業は大部分コンピューターによりますが作業者がアクションをとれる可能性をすべて持つことが大切なので、プラントは完全なオンラインではありません。すべてのデータは操作室に集められ、反応器建屋の各作業員はそのデータに精通し、少なくともある程度は操作ができるようにすべきだと思います。

騒音と熱を最小限に押えるためには、作業場を小さく縦割りにすることが考えられますが、その代わりに私は3つの作業床を設けることによりこの分割を行なうことにしました。

4. 将来の理想的製鉄プラントの実現化の方法

現在、製鉄プラントが建設される際の計画時間は非常に短いため、技術的、環境的、人間的問題の解決は全くおざなりなものです。しかしながらその時点で判っている最良の技術はもちろん取入れられています。製鉄プラントの迅速な計画と建設を誇るべきではありません。私達はこうにして古い偏った考え方を踏襲しているのです。

もし新しい概念で慣習を打ち破ろうとするならば、そのことがらについて徹底的に調べ、できうるかぎりすべての角度から検討を加えなければなりません。問題は全く複雑であり、新しい考え方が熟すには時間を要するもので、短時間に行なうことは不可能です。建設を始める

前に何百人もの人々を要し、5～10年も続く計画期間が必要となることも考えられることです。調査はプラントの技術的な面だけでなく、プラントを運営していく上で支配的な因子である方針、評価、目的に関しても行なわなければなりません。

人間関係に関する新しい考え方や方法が、計画の最終決定に影響をおよぼす可能性のある場合は、調査グループの構成は真に“水平的”であるべきで階級的であつてはなりません。

多くの調査グループを組織し、先に検討したような事項、すなわちプラント設計上の種々の決定因子について検討を加える必要があります。調査グループの対象としては次のようなものがあります。

- 冶金学的基礎の正しい適用
- 原料およびエネルギー事情
- 騒音の緩和
- 精神的労働状態に重要な因子
- 計測方法
- 労働時間、最小交代時間操業 (minimum shift operation)
- 工場と周辺の地域社会
- 高温における水素還元の機構
- ライニングの損耗
- スラグの除去方法

しかしながら、これだけでは十分といえません。最も重要なことは、すべてのグループの結論が統合されることです。このことは結論をまとめることだけを意味しているのではなく、さらに困難なこと、すなわち、各々の調査グループがほかのグループと絶え間なく連絡を取りあうことにより、いずれのグループから生じたものであつても事実はほかのグループの作業に影響をおよぼすことができることを意味します。各グループはグループ内のテーマの最適化に努力すると同時に、全集合体の総合的な最適化にも努力します。調査グループが、特定の問

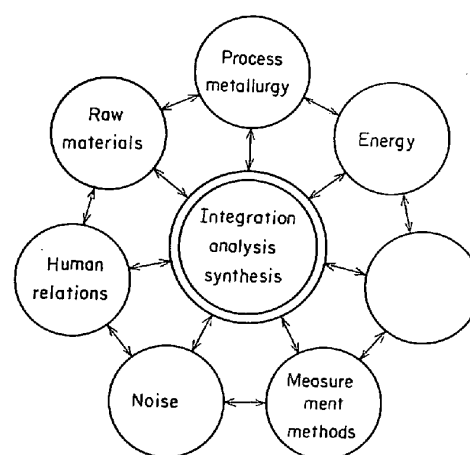


図15 調査グループの構成

題を計画グループ以外の人々に依頼できるのはもちろんです。図 15 はこの調査活動がいかに組織化されるかを図式化したものです。中央のグループは調査結果の調整、分析、統合にのみ従事します。

たとえこの予備的な仕事がすべて成功し、すべての結果が、あらゆる観点と事実が考慮された完全な計画として結実したとしても、プラントがどのように動くかを正確に予見することは不可能です。従つて私は、技術的、人間的、経済的因子のすべてを操業を通して検討し、必要な改造を行なうことのできる実規模の実験用製鉄プラントの建設を提案します。たとえこのような事業が1国にとつて負担がかかりすぎるとしても、なぜ国家間での共同事業としてそれを操業し、その経験を分かち合うことができないのでしょうか。プラントの製鉄部門はおそらく最小生産規模 20 万 t/year として 3000 万ドルの投資で建設できます。

5. 得られる特長の要約

将来の製鉄プラントに関するこの提案を行なつてみて、はじめにたてた規準に完全に従うことは不可能でした。輻射伝熱がいくらかある高温還元プロセスが提案されましたが、それは困難なことが知られています。水素法はごくわずかのエネルギー変換しか必要としません。エネルギー変換はたとえ全エネルギー必要量が低い場合でも、理想的には省かれるべきものです。

また、プラントは自動計測とコンピューターによりうまくコントロールされるはずですが、しかしこのことは作業員にとつては単調な労働状態をもたらすことになります。すべてがうまく制御されている状態では、工場内に“やる気”と冶金学的冒険の気風を保つことはむずかしいといえます。おそらくこの実験工場で必要とされる高度の知識は仕事を面白くすると思います。

ライニングの消耗に対する完璧な解答は得られていません。根本的な解決策としては、ライニングを完全に取り去り、内面を凝固層でライニングした水冷金属容器の反応器の使用があげられます。

調査グループから提出される調査結果と提案は、理想的な製鉄プラントを生み出そうとするときにとりかからねばならない問題のほとんどに対し解答を与えていなければなりません。ここでなされた指摘は、もちろん究極の答のヒント以上のものではありません。

しかし、ここに提案したプラントは、一步前進を意味するに違いない確乎とした特徴を備えています。

a) 吹込み技術は、製造コストに対して最重要因子で

ある速度論の論理的な適用です。

b) 建屋は簡単で、台車上の反応器は完全に制御されています。

c) 熔融還元反応器内での 50% あるいはそれ以上の直接燃焼を含めた必要エネルギーは、従来のものに比べ多少小さくなります。

d) 化石燃料によるエネルギー源としては石炭のみが使用されます。化石燃料によらないエネルギーも使用できます。石炭はコークス化せずに、そのまま使用されます。

e) 騒音、ダスト、熱が直接外部に出ないため、環境条件は今日の製鉄プラントは非常に違ったものとなります。

f) グループ制をとることにより、工場内で人々は技術的、経済的決定を行ない、また責任を負う多くの権限を託されています。これにより精神的状況は大いに改善される見込みがあります。

g) すべて起こりそうな問題は、すでに計画の段階で調査グループ内で討論され、フルスケールのモデルプラントでの生産で試験されているはずなので、全く新しい事態は起こらないでしょう。

短い論文では将来の製鉄プラントの建設に関連するすべての事項を討論すること、あるいは単に触れることさえも不可能なことです。私はこの考え方がすべての部門の製鉄人の間に討論を巻き起こすことを希望します。この提案は現実味に欠け、またあまりにも定性的であるといわれるかもしれません。しかし、ヴィジョンとは当然そういうものです。とはいえ、ヴィジョン、研究、モデルプラント、実用プラントという一連の中で、定性から定量への変化は必要です。

私は、これらの考え方が実行され、プラントが操業されることになれば、私達は、そこで働くことが楽しく興味があるばかりでなく、そこで働く人々にも、その周りの地域社会にも利益をもたらす製鉄プラントを持つことになることを確信します。

文 献

- 1) R. J. TAIT and T. F. WALL: Reduction of hematite particles injected into an electrically augmented flame. Proc. of Conf. Process Engineering in Pyrometallurgy. London (1974)
- 2) R. S. AMALA and J. B. WALKER: Trans. AFS, 78(1970), p. 45
- 3) R. G. OLSSON and E. T. TURKDOGAN: JISI, 211(1973), p. 1