

# スクラップ多量溶解技術の開発

## Development of Steel Scrap Melting Process

大 貫 一 雄<sup>(1)</sup> 梅 沢 一 誠<sup>(2)</sup> 平 岡 照 祥<sup>(3)</sup> 松 本 望<sup>(4)</sup>  
*Kazuo OHNUKI Kazushige UMEZAWA Teruyoshi HIRAOKA Nozomi MATSUMOTO*  
 井 上 隆<sup>(5)</sup>  
*Takashi INOUE*

### 抄 録

スクラップは鉄資源として有用なリソースである。このスクラップの我が国における発生量は増加の一途を辿っている反面、近年の鉄鋼生産量の頭打ち傾向に伴い、スクラップ余剰問題が顕在化しつつある。このような背景を受けて、新日本製鐵ではスクラップ多量溶解技術の開発を進めてきている。特に1993年、広畑製鐵所では高炉を休止し、転炉利用の冷鉄源溶解法という新たな鉄源溶製プロセスを実用化している。本報告では、スクラップ溶解の重要性と新日本製鐵が取り組んできたスクラップ多量溶解技術の解説ならびにスチール缶に代表されるスクラップリサイクル活動の一端を紹介する。

### Abstract

Steel scrap is a valuable source of iron recycling. As the quantity of scrap produced in Japan is steadily increasing, surplus scrap has become a problem in the steel industry. Against this background, Nippon Steel Corporation has continued the development of a process for melting large quantities of steel scrap. At Hirohata Works in particular where the blast furnace was idled in June 1993, the ironmaking process using the cold scrap melting method has been put into practical application. This paper describes the importance of scrap melting and the scrap melting process developed by Nippon Steel and introduces the scrap recycling activities at Nippon Steel.

## 1. 結 言

わが国の鉄鋼蓄積量は年々増加傾向にあり、1992年には10億 t 強に達し、将来もこの鉄鋼蓄積量は更に伸びると予測されている。このような鉄鋼蓄積量の増加傾向を背景にスクラップ（冷鉄源）供給量も増し、1990年には年間5 000万 t 弱に達している。

スクラップは主として電気炉で消費されているが、高炉転炉法でも一部消費してきている。スクラップは鉄鉱石に比べて還元エネルギーが不要な鉄源であり、スクラップ消費量を増大すること、すなわちスクラップリサイクル比率を増すプロセスを開発していくことは、省エネルギーに寄与することはもちろんのこと、資源枯渇の問題や炭酸ガス発生増による地球環境問題を解決するという観点から考えても、今後の鉄鋼業の大きな課題の一つである。

新日本製鐵では、1993年7月から広畑製鐵所において、転炉設備を活用した冷鉄源溶解法を実用化し、スクラップ溶解の新たな形態に先鞭をつけた。一方、リサイクルに使用する品種に関しても、自家発生屑のみならずスチール缶等の市中発生屑を回収し再溶解する活動も積極的に推進している。

本稿では、スクラップ溶解の重要性を解説するとともに、新日本

製鐵が取り組んできたスクラップリサイクル活動の状況とこれを支えるスクラップ多量溶解技術の概要を紹介する。

## 2. スクラップ利用技術の重要性

スクラップは大別すると、製鐵所内で発生する自家発生屑、機械工場等の加工段階で発生する加工屑、鋼材の廃棄に伴い発生する老廃屑の三種に分類されている。自家発生屑は連続鑄造等の歩留り向上の諸対策の結果、最近の発生量はほとんど変化していない。これは加工屑も同様であり、ユーザー側のコスト削減努力が伺われる。一方、老廃屑はスクラップ供給量の半分強を占めるようになり、鉄鋼蓄積の増大傾向を背景に、今後更に増加するものと予測されている。

以上の概観を如実に示したものが、図1に示した鉄鋼蓄積量ならびに市中発生スクラップ（市中屑、すなわち加工屑と老廃屑）量の年次推移である。わが国の鉄鋼蓄積量は年々増加の傾向を辿り1991年には10億 t 弱に達し、将来は更に伸びると予測されている。一般には、各種鉄鋼製品の耐用年数と蓄積量から発生老廃屑量は推測可能であるが、大括りで言うと、老廃屑発生量は鉄鋼蓄積量と比例関係にある。したがって、鉄鋼蓄積量の増大とともに、最近では、老廃屑発生量が増加し、市中屑全体では年間3 000万 t を越すレベルに

\*<sup>(1)</sup> 技術開発本部 広畑技術研究所 主任研究員

\*<sup>(2)</sup> 技術開発本部 プロセス技術研究所 製鋼プロセス研究部  
部長 工博

\*<sup>(3)</sup> 広畑製鐵所 生産技術部 部長

\*<sup>(4)</sup> 広畑製鐵所 製鋼部 室長

\*<sup>(5)</sup> 室蘭製鐵所 製鋼部 部長代理

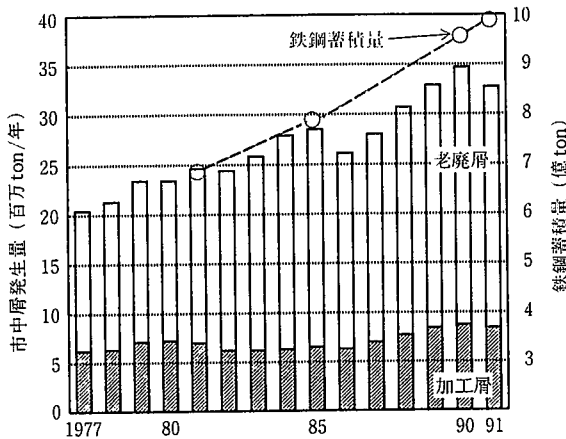


図1 鉄鋼蓄積量ならびに市中屑発生量の年次推移

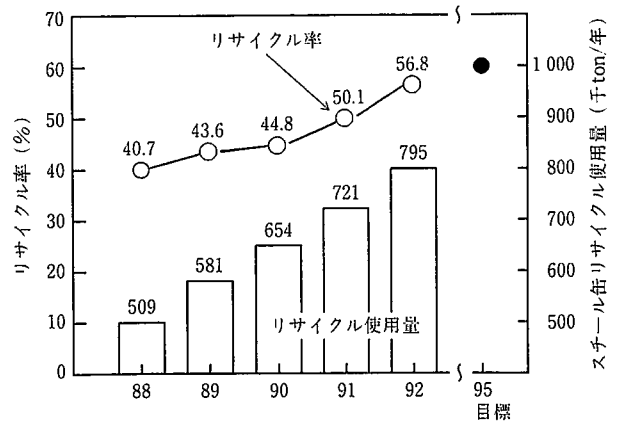


図2 スチール缶リサイクル量とリサイクル率の推移

達している。

このようなスクラップ発生状況と対比して、昨今の我が国の鉄鋼業を取り巻く環境下では鉄鋼需要の伸びが期待できず、鉄資源としてのスクラップ供給量の増大傾向を見逃すわけにはいかない。すなわち、スクラップは鉄鉱石に比べて還元エネルギーが不要な鉄源であり、スクラップ価格にも依存するが、スクラップを効率よく溶解することがトータルコストの削減、資源枯渇の防止並びに炭酸ガス発生量の抑制に寄与すると考えられる。又、需要に対して供給量が増加してくるということは、仮にスクラップ消費量が増加しないと、スクラップ、特に老廃屑が市中に放置され、環境を汚染する廃棄物が増加するという事態につながる。

このような背景を受けて新日本製鐵は鉄リサイクル活動を積極的に推進しており、以下の章では、その一例としてのスチール缶リサイクル活動について紹介し、引き続き、新日本製鐵が進めてきた転炉でのスクラップ溶解量増大技術及び、更に発展させた転炉利用の冷鉄源溶解法について概説する。

### 3. スチール缶リサイクルの実態と今後の目標

あき缶処理対策協会ではスチール缶のリサイクル活動を積極的に推進しており、新日本製鐵もこの活動に参画している。

我が国におけるスチール缶のリサイクル量とリサイクル率の最近の統計値を図2に示す。1992年におけるスチール缶の生産量は140万tであり、その内の57%の80万tがリサイクル使用されている。このスチール缶発生状況と回収リサイクル処理の状況をまとめたものが図3である。

いわゆる飲料缶にはスチール缶とアルミ缶が存在するが、スチール缶には鋼板製造時に必要となるエネルギーがアルミ缶の8分の1に不足すること、磁石などで簡単に選別できること、など種々の特徴がある。したがって、分別収集が今後更に進展すれば、より一層リサイクル比率が向上することになる。

新日本製鐵も参画しているあき缶処理対策協会では、1995年のスチール缶リサイクル率を60%以上とする目標を掲げて活動を推進しているが、特に高炉での使用量が年間20万t以上を目標に、リサイクル使用量の拡大に努力を傾注している。

次章では、このようなスクラップ多量溶解のための技術開発の経緯について述べる。

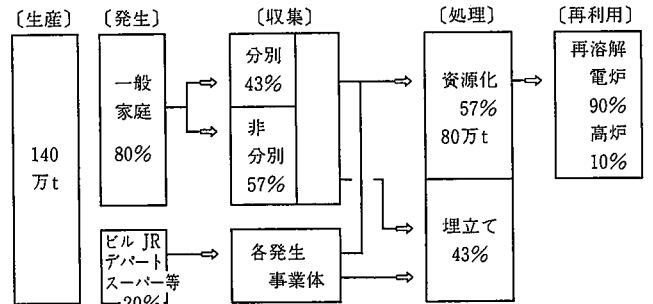
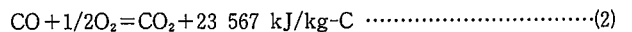
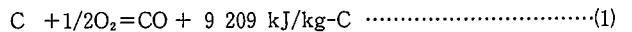


図3 スチール缶回収処理の状況(1992年)

### 4. 高炉-転炉法におけるスクラップ溶解技術の進展

炭素の酸化発熱を利用する転炉製鋼法では、主としてC→COまでの反応熱を利用している。ところが次式に示すようにCO→CO<sub>2</sub>までの反応熱はC→COまでの反応熱に比べてはるかに大きい。そこで、COからCO<sub>2</sub>への二次的な燃焼ステップ(以後、二次燃焼)を活用すれば、製鋼時間を延長することなく、この二次燃焼熱でスクラップ溶解量を増加できる。



通常の転炉操業では、二次燃焼させた割合(以後、二次燃焼率)は5~10%であるが、二次燃焼率を更に増大させれば、スクラップ溶解量を向上できることをこれまでに確認している。例えば、二次燃焼率を10%増加させるとスクラップ使用比率を3.4%増すことが可能である。

このような背景から、転炉精錬中の二次燃焼挙動を把握することが重要となり、二次燃焼機構の解明を進めてきた。以下、図4に示す転炉炉内の酸素ジェットの挙動を用いて二次燃焼のメカニズムを説明する。

図4に示すように、上吹きランスノズルから吐出した酸素ジェットは超音速域、遷移領域を経て自由噴流となる。この自由噴流に巻き込まれるCOガス(脱炭反応生成ガス)と酸素ジェットとの反応によりCO<sub>2</sub>主体の噴流が形成される。CO<sub>2</sub>噴流の表層はある限界流速以下になると、下方の火点で発生するCOガスの流れに伴ってCO<sub>2</sub>噴流から逸散する。したがって、この逸散するCO<sub>2</sub>量と脱炭反応で生

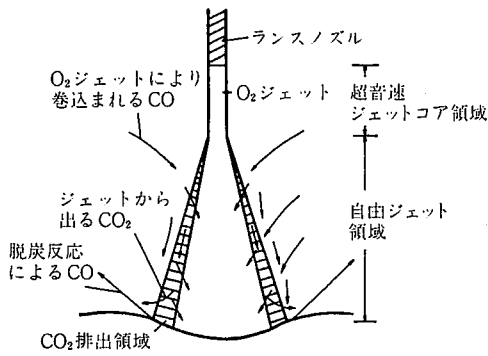


図 4 二次燃焼機構の模式図

成する CO 量の比に依存して二次燃焼率が決まることになる<sup>2)</sup>。このような考え方にに基づき、転炉炉内の二次燃焼率をジェット挙動から制御できることを解明してきた。

更に、転炉内で熱源を積極的に付加する技術として石炭の上吹きプロセス (ALCI) を開発した<sup>3)</sup>。本方法は高速で石炭を溶鉄内に吹き込み、酸素の主孔と副孔とを有して二次燃焼を促進できる点に特徴がある。この ALCI 法の効果を図 5 に示す。一般的な石炭源添加方法であるコークス上方添加法と ALCI 法を比較すると、同一炭素量で溶解量が増大する割合が大きくなるのが図 5 よりも明らかとなった。この理由としては、炭材の添加歩留りが向上すること、二次燃焼率が向上することが考えられる。

次章では上記技術開発の経過を背景にした転炉利用の冷鉄源溶解技術について述べる。

## 5. 転炉利用の連続残湯法による冷鉄源溶解

### 5.1 連続残湯法による冷鉄源溶解プロセスの概要

新日本製鐵では、1993年7月から広畑製鐵所において、転炉設備を活用した冷鉄源溶解法を実用化した。既存の高炉転炉法の製鐵所から冷鉄源溶解法へ移行するにあたり、以下の観点からプロセス像を絞り込んだ。

- (1) 設備費の削減並びに溶解原料や燃料の使用自由度の大きさの観点から転炉を活用
- (2) 高生産性の維持と高品質の確保の観点から溶解炉と脱炭炉を分離
- (3) 転炉 O G 設備を用いた発生ガス回収等の有効活用でトータル

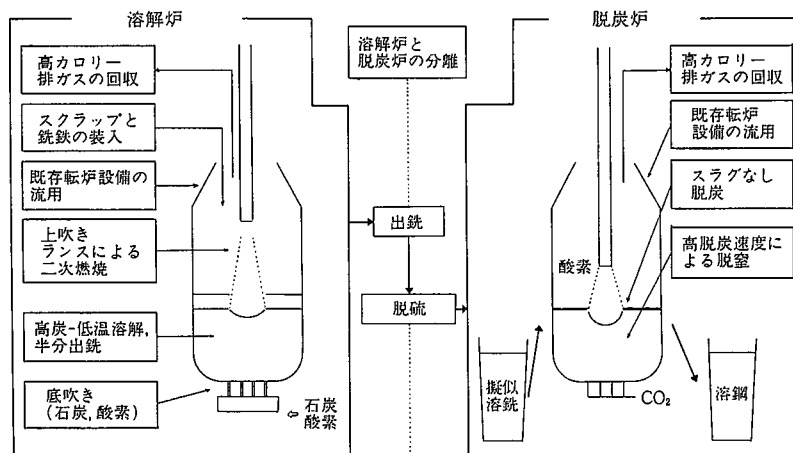


図 6 転炉利用の冷鉄源溶解プロセス

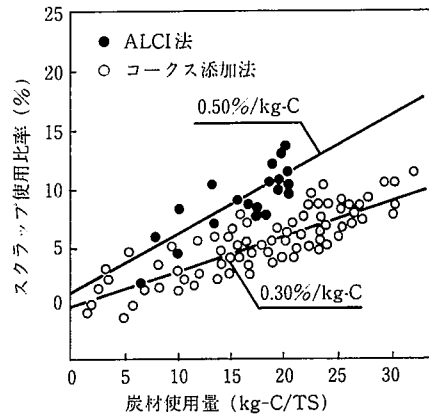


図 5 ALCI 法の効果

コストを低減

上記のような理由から図 6 に示す既存の転炉設備を活用した連続残湯法の冷鉄源溶解プロセスを開発した。

本法における溶解作業フローを図 7 に示す。溶解炉では、冷鉄源をシュート及び炉上から供給するとともに燃料として石炭、酸素を底吹きし、上吹きランスによる二次燃焼熱も利用して溶解を迅速に進行させる。溶解完了後には炉内の半分の溶銜を出銜し脱炭処理等を経て脱炭炉に供給する。本法の特徴は以下の点に要約される。

- (1) 高炭素溶鉄の連続残湯による高速かつ安定した溶解
- (2) 擬似溶銜製造後は従来工程と同等処理を実施することによる高純度鋼の安定製造
- (3) 低温溶解による耐火物寿命の増大
- (4) 二次燃焼率の制御による溶解熱源の確保と回収ガスの利用の両立
- (5) 安価石炭の利用と石炭利用効率向上及びスクラップ溶解近傍の溶鉄の高炭素化の観点から微粉炭の底吹きを採用

以下の節では上記プロセスの特徴を支える要素技術について述べる。

### 5.2 溶解炉内二次燃焼の重要性と制御方法

冷鉄源溶解時の熱バランスの一例を図 8 に示す。CO → CO<sub>2</sub> までの二次燃焼熱が極めて大きく、二次燃焼の増加が溶解の生産性向上につながる事がわかる。一方、回収ガスの品位の観点から、二次燃焼を極度に増大することは好ましくなく、二次燃焼の制御が重要になる。

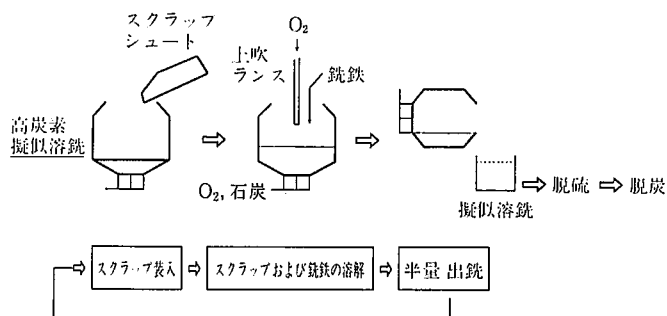


図7 溶解作業フロー

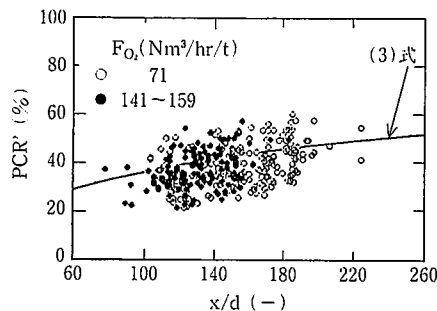


図9 PCR' と x/d との関係

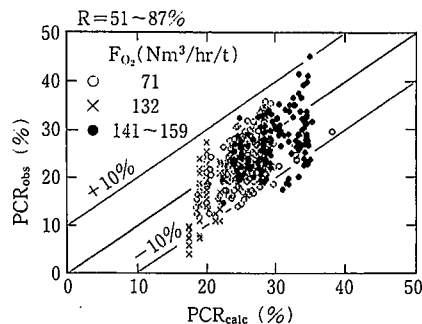


図10 実績と推定二次燃焼率との関係

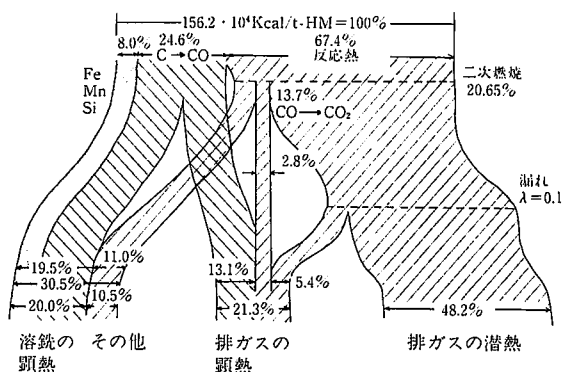


図8 冷鉄源溶解時の熱バランスの一例

転炉の二次燃焼機構については、前章で述べた上吹き酸素ジェット挙動に着目した考え方<sup>2)</sup>が適用されてきた。このモデルは上吹きだけの条件で整理されているため、新たに石炭・酸素底吹きが付加された場合の取扱を検討した。そこで、底吹き酸素から発生するCOや底吹き石炭からもたらされるH<sub>2</sub>等は、上吹きによって発生したガスを希釈するのみと考え、二次燃焼率推定の簡易モデル式(3)(4)を作成した<sup>3)</sup>。

$$PCR' = 10(x/d)^{0.3} - 100(x/d)^{-0.7} + 1 \dots\dots\dots(3)$$

$$PCR = R \cdot PCR' / (1 + PCR' - R \cdot PCR') \dots\dots\dots(4)$$

ここで、PCR'：上吹みの二次燃焼率、PCR：上底吹き時二次燃焼率、x：自由噴流長さ(mm)、d：ランス孔径(mm)、R：上吹き比率である。

溶解中平均二次燃焼率と上吹き比率から逆算したPCR'とx/dとの関係、実績平均二次燃焼率と上記モデル推定二次燃焼率との関係を図9、10にそれぞれ示す。これらの図から新たに提案した簡易モデルは溶解中の二次燃焼率を予測でき、二次燃焼の制御に活用できることが確認できた。

すなわち、ランス形状、ランス高さ等を適宜変更することにより、目標とする二次燃焼が実現できる。

### 5.3 冷鉄源の溶解挙動

冷鉄源の溶解機構を把握することは、プロセスの生産性を予測することのみならず、溶鉄の温度制御や[C]制御の観点からも重要となる。これまでの小型炉や5t炉を用いた溶解挙動実験と溶解モデル検討の結果を以下に述べる。

5t炉において溶解前の溶鉄中にCuを添加し、その希釈状況から溶解率を求め、併せて溶解中の温度変化も測定した結果を図11に示す。溶解前半は浴の温度が低下し、溶解も進行しないが、10分以降は溶解

が始まり、浴の温度も上昇している。

溶解中の冷鉄源界面近傍における[C]と温度の分布の想定図を図12に示す。溶解の促進には、以下の3点が有効である。

- (1) 浴[C]の増加による界面C<sub>s</sub>の上昇
- (2) 攪拌力増大による界面C<sub>s</sub>及び界面温度T<sub>s</sub>の上昇

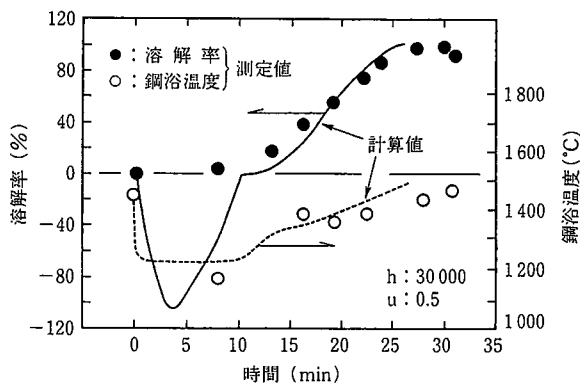
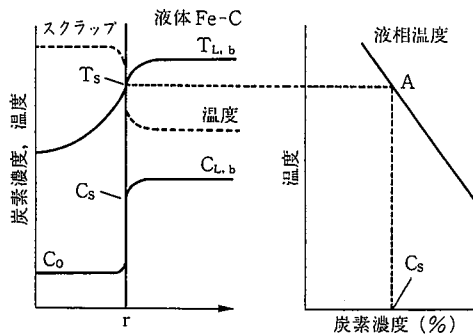


図11 冷鉄源の溶解挙動



(a) 温度と炭素濃度曲線 (b) 炭素濃度-液相温度

図12 冷鉄源界面近傍における[C]と温度

(3) 浴温度の上昇

そこで溶解促進の影響因子定量化のために、熱と物質の同時移動を考慮した溶解挙動モデル<sup>6)</sup>と転炉の熱・物質収支モデル<sup>7)</sup>を組合わせた冷鉄源溶解モデルを作成した<sup>8)</sup>。このモデルは、図11に併記したように実験結果とほぼ一致することを確認しており、プロセスの最適化に活用している。

5.4 石炭溶解が冷鉄源に及ぼす影響

溶解中の浴[C]を適切に制御し、前述の冷鉄源溶解を促進するためには、溶鉄中に吹き込んだ石炭の溶解挙動を把握しておく必要がある。そこで小型炉と5 t 炉を用いて石炭の溶解を解析した。

500kg 炉の溶鉄上に表1に示す種々の炭材を上乘せして、ガス攪拌下で加炭速度を測定した。得られた速度と浴断面積から見掛けの物質移動係数を求め、石炭中のS濃度と比較したのが図13である。S濃度の増加とともに加炭は抑制されることがわかる。この影響は界面活性元素であるSの作用によるものと説明できる。又、揮発分の少ない石炭の方が加炭速度が大きいことも判明した。

石炭溶解速度をメタル側物質移動律速と仮定して、溶解速度の予測モデルを検討した。上吹きなしの時に実測される加炭速度は底吹きされた石炭からの加炭と底吹き酸素による脱炭との差に相当すると考え、次式を用いた。

$$d[C]/dt = k \cdot (A/V) \cdot ([C]_s - [C]) \dots\dots\dots(5)$$

ここで、反応界面積(A)は浮遊中の石炭量と石炭比表面積で定義し、浮遊中の石炭量は溶鉄上昇速度<sup>9)</sup>と石炭吹込み速度から求めた。

このモデルを用いて、表2に示す条件の5 t 炉実験の結果を評価した(図14参照)。浴[C]が高くなり飽和に近づくと底吹きされた石炭の溶解速度は低下してくることで、石炭中Sが高く加炭性の悪い場合には浴[C]がより低い条件でも石炭の溶解速度は遅いことがわかる。

更に上吹き酸素を付加して溶解した際のガスト中のC濃度を測定した。石炭種類が異なっても、ほぼ同一の加炭速度を下回るとガスト中に未溶解の石炭が観測された。

このように、石炭溶解促進の観点からは、S含有量や揮発分から石炭を選定し、微粉炭を吹き込む必要があることが判明した。

表1 使用した炭材の成分

炭材	(wt.%)			
	F.C	VM	S	灰分
A(黒鉛)	98.8	0.8	tr.	0.4
B(コークス)	84.5	3.4	0.50	12.1
C(石炭)	78.9	6.7	0.08	14.4
D(石炭)	79.6	6.0	0.33	14.5
E(石炭)	59.3	32.8	0.50	7.9

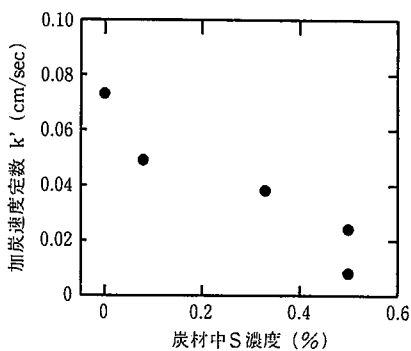


図13 石炭溶解速度と石炭中S含有量との関係

表2 実験条件

溶鉄	5ton, 1300~1500°C
ガス条件	[C] <sub>ini</sub> : 2.0~3.5%
	N <sub>2</sub> : 1.6~5.8Nm <sup>3</sup> /min
	O <sub>2</sub> : 0.0~3.5Nm <sup>3</sup> /min
	LPG: 0.0~0.2Nm <sup>3</sup> /min
石炭吹込速度	9.0~12.5kg/min

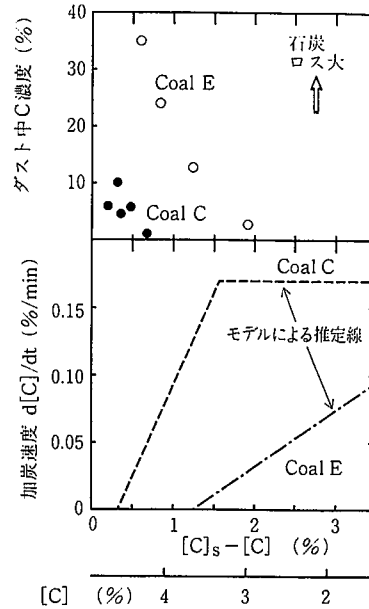


図14 石炭底吹時の加炭速度と石炭飛散の関係

以上のように、転炉利用の冷鉄源溶解法では、ランス条件に着目した二次燃焼率の制御浴[C]と攪拌力に左右される冷鉄源溶解速度並びに浴[C]を維持するための石炭溶解速度の最適化が重要な操業因子となる。

6. 今後の展望

地球環境問題に象徴されるように資源リサイクルは時代の趨勢となりつつある。既存の製鉄所の構造を有効利用して今後の鉄源問題に対応する新たなプロセスとして、転炉利用の冷鉄源溶解法は着目されてこよう。

新日本製鐵では、冷鉄源溶解法に代表されるように、高炉メーカーとしてはスクラップ有用利用プロセスの先鞭を付け、将来の鉄資源構造の変化への対応に踏み出している。今後は低級冷鉄源の有効活用策を研究開発している新製鋼フォーラムでの活動を通じて、新技術の早期実用化を邁進させる所存である。

参照文献

- 1) あき缶処理対策協会資料
- 2) 原田 ほか：鉄と鋼. 71,S187(1985)
- 3) 中村 ほか：鉄と鋼. 73,A47(1987)
- 4) Ozawa, K. et al.:6th IISC Proc. (1990)33
- 5) 大貫 ほか：材料とプロセス. 4,276(1991)
- 6) 磯部 ほか：材料とプロセス. 3,130(1990)
- 7) 石川 ほか：鉄と鋼. 73,653(1987)
- 8) 磯部 ほか：材料とプロセス.3,1139(1990)
- 9) 沢田 ほか：鉄と鋼. 70,S160 (1984)