

© 1992 ISIJ

解説

転炉におけるスクラップ溶解法の現状と将来

梅 沢 一 誠*

Scrap Melting Process — Current Status and Future Prospect

Kazushige UMEZAWA

1. はじめに

転炉を用いた各種のスクラップ(冷鉄源)溶解技術がこれまでに開発されてきている。その目的とするところは、スクラップを主原料とする製鉄ルートの主流である電気炉の高価な電気エネルギーの代替技術としての意味合いはもとより、これまでの高炉製鉄技術体系の一つの変革の試みとして取り上げられつつある。その背景としては、これまで高炉製鉄所では転炉におけるスクラップ溶解技術は製鋼工程での熱融度の拡大等の補助的手段と考えられてきた面があるが、21世紀に向けての市中スクラップの多量発生により主原料ソースとして考えざるをえなくなってきたこと、また鉄鋼業全体にとって今後のエネルギー、環境問題を解決していく中で、主原料としてのスクラップ利用はその解決の一つの可能性を秘めていることにある。

本稿ではこれまでに開発されたスクラップ溶解技術を整理し、問題点と今後の展開につき述べる。

2. スクラップ溶解法の種類と技術動向

スクラップ溶解のための供給熱源としては、①炭素系燃料の燃焼熱の利用、②2次燃焼熱の利用、③Al¹⁾またはSiの酸化発熱の利用等が採用されてきた。③は特殊なケースと思われるので、前2者につきその技術を概括する。Fig. 1にこれまでに開発された主な転炉型のスクラップ溶解法を示す。

2.1 スクラップ予熱技術

(1) 燃料供給によるスクラップ予熱技術

転炉でのスクラップ比向上手段として採用されてきたが²⁾、最近では多量のスクラップ溶解技術の中の熱供給法の一部として用いられている。電気炉製鋼法で多用されている炉外予熱法も採用可能であるが³⁾、転炉においては炉内予熱法が一般的である。

固体鉄の酸化雰囲気下での予熱では、予熱温度は鉄の

酸化防止の観点から1000°C以下に限定される。溶解に必要な熱量は1381 kJ/kg, scrapであり、1000°Cの固体鉄の熱含量は670 kJ/kg, scrapなので、予熱による装入スクラップの増分は0.48 kg, scrap/kg, scrap inputが最大である。通常の転炉製鋼法では25%の標準スクラップ比操業に対して、34%まで9%のスクラップ比向上に相当する⁴⁾。

予熱のための燃料供給は上部バーナー方式と下部バーナー方式に大別できる。上部バーナー方式の場合の熱効率は高々50%程度であるが、下部バーナー方式では充填層の効果により70%以上の熱効率も可能である³¹⁾。

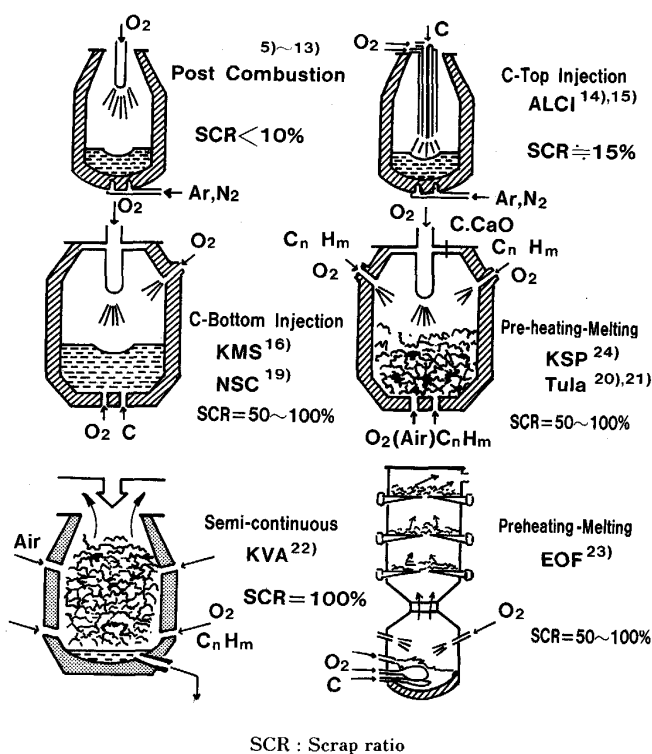


Fig. 1. Typical scrap melting process amended from R. WEBER²³⁾.

平成3年9月27日受付 (Received Sep. 27, 1991)

* 新日本製鉄(株)広畑技術研究部主幹研究員 工博 (Hirohata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1-1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

Key words : steelmaking ; scrap ; converter ; scrap melting ; coal.

炉内予熱法の問題点の一つは予熱工程が製鋼時間の一部と位置付けられることから、それに要する時間を極力短縮するために高熱供給速度とする必要があり、そのための上底吹きノズルバーナーを設置した転炉でなければならない。また高速かつ高温予熱を指向するためには耐火物溶損の面から鉄酸化を極力防止しなければならない。Klöckner 社では 50% スクラップ操業で Fig. 1 の天然ガスによる予熱 (KSP 法) を採用し、燃料原単位の削減と製鋼時間の短縮が可能になったと報告している²⁴⁾。このように熱効率が高くて短時間に高温予熱が達成できれば、炉内予熱は溶解エネルギー供給方法の一部となりうる。

(2) 炉内発生ガスによるスクラップ予熱技術

転炉方式のスクラップ溶解法の中でも、後述する燃料添加を伴う溶解法では高温でかつ高濃度の CO や H₂ ガスを含有する多量の排ガスが発生する。石炭吹込みを行う 100% スクラップ溶解法の熱バランスの一例を Fig. 2 に示す。この場合全インプットエネルギーの 21% が排ガスの顕熱として、48% が潜熱として炉口より発生し、この顕熱は放散されるか必要なら一部スチームとして、また潜熱は燃料ガスとして回収される。ただしこの回収のためには高価な設備を必要とする。

この熱を溶解炉の系内で有効利用する目的で、炉の上部にスクラップ予熱帯を設けたプロセスが開発されており、Fig. 1 に示した EOF 法、KVA 法や大同法³⁵⁾がある。このなかで EOF 法が実用化されブラジルで 1983 年より稼働している。本方式の問題点はトータルのエネルギー効率をどこまで高められるかにある。上部スクラップの予熱温度に限界があると、前述のように 670 kJ/kg, scrap しかスクラップに熱吸収能力がなく、炉口からの発生エネルギーの一部しか回収できないことになる。大同法の熱バランス結果によれば、小型炉であるが発生エネルギーの 17% が予熱に使用されているにすぎない³⁵⁾。一方 EOF 法や KVA 法は鉄酸化を前提とした

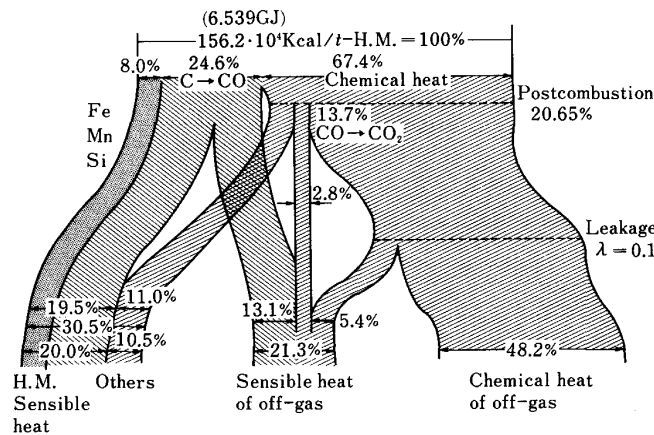
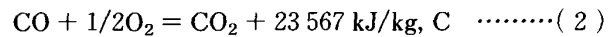
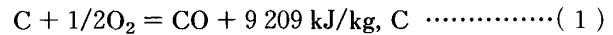


Fig. 2. Example of heat balance in 100% scrap melting furnace¹⁹⁾.

1000°C 以上の予熱が行われているようであり、この場合は熱の利用効率は上げられる。ただし FeO 生成による耐火物対策が必要となる。さらに KVA 法の開発過程で環境問題が発生したと伝えられており²²⁾²⁴⁾、高温予熱採用時には留意しなければならない問題となろう。

2.2 2次燃焼技術

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→CO₂ までの反応熱ははるかに大きく、2次燃焼により製鋼時間を延長することなくこの熱をスクラップ比増に利用できる。ちなみに 4.5% [C] の溶銑を使用し通常 25% のスクラップ比操業の場合、すべての 2次燃焼熱が利用できれば 50% のスクラップ比操業が可能となる熱量に相当する⁴⁾。



通常の転炉操業条件では炉内 2次燃焼率は 5~10% であるが、Fig. 3 のように 2次燃焼率を上げれば 10% 以内ではあるがスクラップ比を向上できる。我が国では昭和 50 年代に溶銑予備処理法が導入された結果スクラップ消化能力が低下し、スクラップ比向上技術が検討されたさい各社で 2次燃焼率向上のための技術開発が行われた^{5)~12)}。また炉内に燃料を供給するタイプの溶解炉においても 2次燃焼率をあげることによって燃料原単位の低減、ひいては溶解時間の短縮が可能となる¹⁶⁾。

(1) 2次燃焼機構と着熱効率

Fig. 4 は炉内における酸素ジェットの挙動を模式的に示したものである。ランスノズルから吐き出した酸素ジェットは超音速域、遷移域を経て自由噴流となるが、この自由噴流と雰囲気からの巻き込まれる CO (脱炭反応生成ガス) との反応 (CO + 1/2O₂ → CO₂) によって CO₂ 噴流が形成され、その噴流表層のある限界速度以下の CO₂ が火点から発生する CO 流への同伴によって逸散し、残りの CO₂ または O₂ 噴流は鋼浴 [C] と反

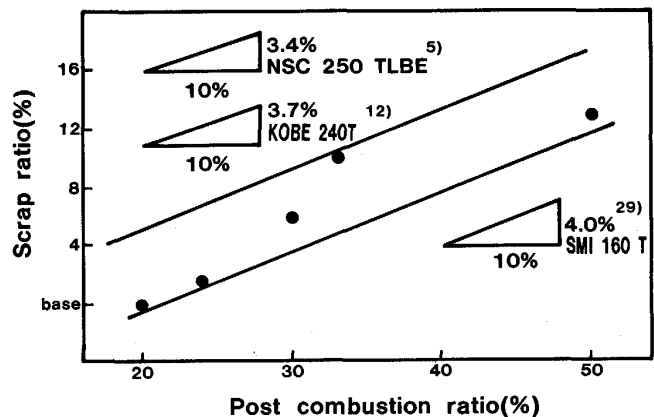


Fig. 3. Influence of post combustion ratio on scrap ratio in converter²⁹⁾.

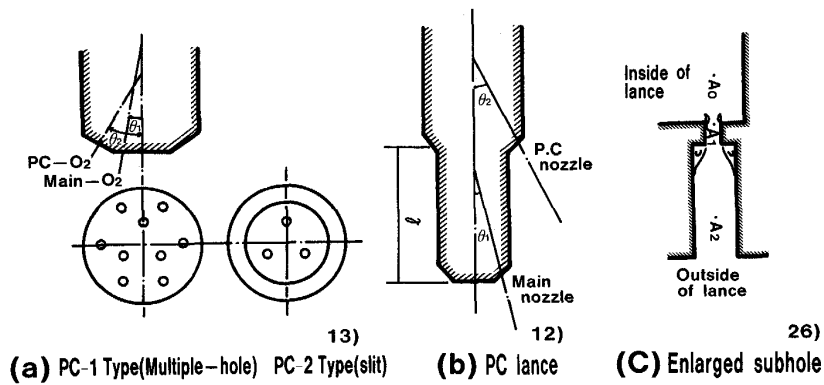


Fig. 5. Typical post combustion lance used in converter process.

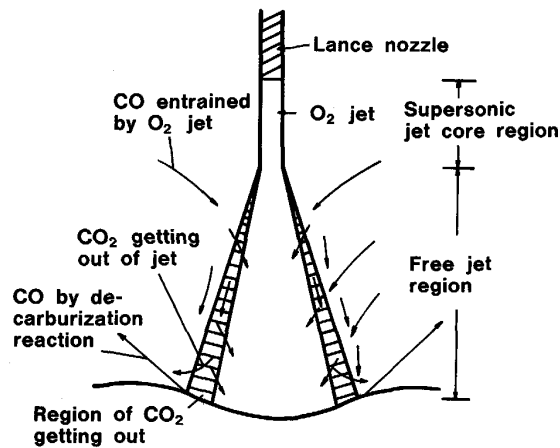


Fig. 4. Schematic diagram of post combustion mechanism³⁰⁾.

応し CO となる。ここで逸散する CO₂ は自由噴流中のある限界速度以下の流量に比例し、2次燃焼率はこの逸散する CO₂ 量と脱炭反応によって発生する CO 量の比に比例して決まると考えられている³⁰⁾。

自由噴流長: X (ランス高さ-ジェットコア長), ランスノズル口径: d , 上吹き酸素比率: R とすると, 2次燃焼率 PCR (上吹き条件), PCR' (上底吹き条件) はジェットの相互干渉の少ない場合次式で表される。

$$PCR = 0.1(X/d)^{0.3} - (X/d)^{-0.7} + 0.01 \dots (3)^{30)}$$

$$PCR' = R \cdot PCR / (1 + PCR - R \cdot PCR) \dots (4)^{36)}$$

このようにして発生した2次燃焼熱は70%程度の高い効率で鋼浴に伝達される⁵⁾¹¹⁾¹²⁾²⁵⁾。熱伝達機構としては, 上記したCO₂の逸散モデルに従えば自由噴流中で発生した反応熱のほとんどは大量に巻き込まれるCOガスを通じてジェットに伝達し, ジェットの衝突伝熱により鋼浴に伝達されると考えられる。一方CO₂の逸散が増えるほど排ガスへの熱ロスが増加することになり, 2次燃焼率が上がるほど着熱効率が低下することを説明できる。この他に高温ガスと溶鉄やスラグの液滴との熱交換が主要な熱伝達の場合とも考えられている²⁴⁾。

(2) 2次燃焼増大技術

2次燃焼率は酸素ジェットの気相中での挙動に関連す

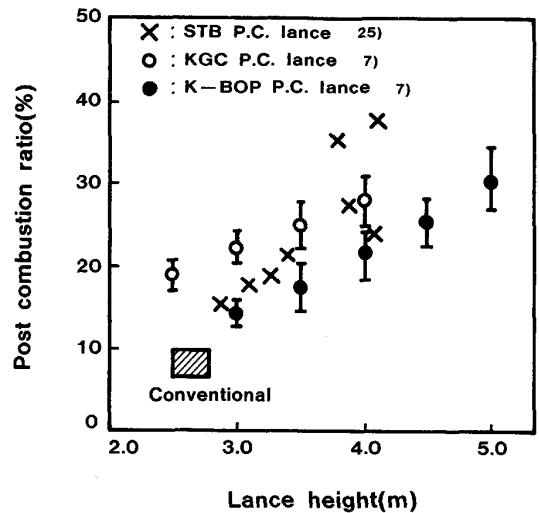


Fig. 6. Dependence of post combustion ratio on lance height.

るので, 通常のランスを用いる場合はランス高さをできるだけ上げて操作することになる。しかしランス高さの上限に制約があるため2次燃焼率で10%が限界であろう¹²⁾。そのためノズルの主孔以外に種々の形状の副孔をもったPCランスと称されているランスの適用が試みられている^{5)~8)10)~12)}。Fig. 5に代表的なランスを示す。副孔の形状は出口の超音速コアを無くしまわりのCOガスを効率的に巻き込み燃焼させるために, 主孔のラバール形状に対してストレート, あるいは急拡大形状のものが主に適用されている。また副孔の噴出角度が大きいほど2次燃焼率が高くなり, 主孔の噴出角度は高々12°程度であるのにたいして20°~30°とされる。また副孔O₂/主孔O₂の比率は0.1~0.3程度である¹²⁾¹³⁾²⁶⁾。ランス高さ2次燃焼率の関係をFig. 6に示すが, これらPCランスの採用により30%を超える2次燃焼率も可能になっている。ただし着熱効率の低下に伴い炉壁への熱負荷が増大するので, 30%が転炉操業での使用限界と考えられる。Fig. 3から2次燃焼率10%あたりのスクラップ比の向上代は3.4~4.0%であり, 通常転炉操業では2次燃焼のみによるスクラップ比

の向上率は 10% 未満である。この技術は後述するようにに燃焼添加を伴う多量スクラップ溶解法にも使用される。

2.3 燃料添加を伴うスクラップ溶解技術

予熱及び2次燃焼による熱付加技術は、その熱供給量の制約からスクラップ比増の補助手段と位置付けられるが、さらに多量のスクラップを消化するあるいは 100% スクラップ溶解のためには、溶解中の燃料添加が必須である。燃料としては天然ガス等の気体燃料²²⁾や液体燃料³⁷⁾をもちいる方式も提案されているが、我が国ではコスト面より石炭系燃料を使用するものが多い。

(1) 炉上部からの燃料供給技術

最も簡便な方法は石炭やコークスを炉上部より投入するかスクラップと共に炉内に装入しておく方式であるが、炉外への飛散等の問題から塊状の燃料を使用しなければならずコストと歩留りの問題がある¹⁵⁾。住友金属ではコークスの初期装入法採用による 100% スクラップ溶解法の試験を行い良好な結果を得た³⁴⁾。燃料コストから言えば微粉炭の使用が好ましい。微粉炭を炉上部から供給する方法としてはランスからの投射に限られる。使用されたランスノズル形状の例を Fig. 7 に示す。(a)タイプは微粉炭-酸素バーナーとして使用されたものであり、この場合は高温の火炎をスクラップ上部へ

吹き付けて溶解するものであり、実用化は熱効率いかに係わっている。(b)タイプは中心の微粉炭を酸素ジェットで包んだ状態で溶鉄表面に吹き込み、衝突面で炭素の加炭と脱炭が進行する。それゆえ衝突面には溶鉄の存在が必須である。またこのランスは2次燃焼促進のための副孔も合わせ持っている。Arbed 社の ALCI 法¹⁴⁾が代表的であり実機稼働している。ただし [S] のピックアップのため無煙炭でも 25 kg coal/t が実用上の使用限界である¹⁵⁾。装入時のスクラップに対する溶鉄の比率も余り小さくできないため 10~20% のスクラップ比増分効果が限界のようであり、多量のスクラップ溶解法への適用には課題が残されている。

(2) 炉底部よりの燃料供給技術

50% 以上あるいは 100% スクラップ溶解法では、炉底に多量の主に微粉炭吹き込み用ノズルを設置した方式が実用化されている。ノズルに要求される特性としては①炉底寿命を損なわないこと、②閉塞防止が図られていること、③石炭の吹抜け防止が図られていることが重要である。Fig. 8 に示すようにこれら条件を満たすように工夫された3種類のノズルが開発されている。これまでに開発あるいは実用化されている主な溶解法を Table 1 に示す。大半のものは燃料吹き込みを主体として、予熱や2次燃焼を組み合わせ構成されている。

3. 転炉型スクラップ溶解法の適用方法と課題

現時点での転炉型スクラップ溶解法の適用方法としては Table 2 の四つのケースが考えられる。ケース A は2次燃焼技術や ALCI 法のような少量の燃料添加により実用化されており、技術的にも完成している。ケース B は粗鋼生産量に対して高炉溶銑が著しく不足している製鉄所で採用されており、KMS (KSP) 法はドイツで¹⁶⁾、EOF 法はブラジルで実機稼働しており²³⁾、スクラップ比は約 50% である。ケース C は膨大な鉄源製造工程の合理化のために、高炉を無くしてスクラップから鉄源を得る方法として我が国やオーストリアで計画されたものである¹⁹⁾²²⁾。また粗鋼生産量の増減に対応する鉄源のバッファー機能としても今後注目される可能性がある。ケース B や C の場合従来の高炉-転炉法に匹

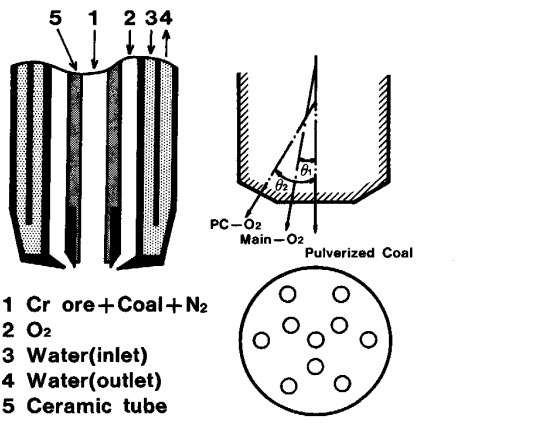


Fig. 7. Examples of top injection lance for coal injection.

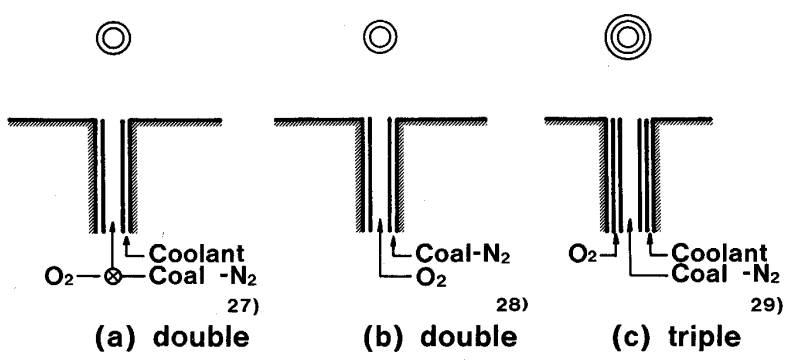


Fig. 8. Classification of bottom injection nozzle for coal-oxygen injection.

Table 1. Scrap melting processes in converter with fuel supply.

Process	K (M)S ¹⁸⁾	KSP ²⁴⁾	Tula ²⁰⁾	KVA ²²⁾	EOF ²³⁾	NSC ¹⁹⁾	Daido ³⁵⁾
Max. capacity (t)	120	120	—	—	60	100	3
Scrap ratio (%)	50/100	50	100	100	50/100	100	100
Fuel	Coal	Coal/N-gas	Coal/N-gas	N-gas	Coal/N-gas	Coal	Coal
Oxidizing gas	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂ /Air	O ₂ /Air	O ₂	O ₂ /Air
Product	Steel	Steel	Steel	Iron	Steel	Iron	Iron
Present state	In operation	In operation	Trial	Trial	In operation	Trial	Trial

Table 2. Application of scrap melting process in converter.

Case A	For increasing of scrap ratio in conventional BOF process
Case B	For increasing of production when production rate of BF pig iron is extremely lower than that of crude steel
Case C	For rationalization of integrated steel works
Case D	For scrap melting process without electricity

敵する生産性、品質、コスト条件を備える必要がある。そのために溶解炉では従来のように直接溶鋼を製造するのではなく溶解炉と精錬炉の二つの炉を別々にもち、溶解炉で疑似溶銑を製造し、出銑後従来の溶銑処理法により脱硫処理をした上で次の精錬炉で高純度の溶鋼を製造する方式が一般的になってきた¹⁷⁾¹⁹⁾。これにより高炉-転炉法と同様の品質が確保され、生産性も向上している。ケース D は一時期我が国でも精力的に検討された方式である。導入のためには対電炉法とのコスト比較が重要であるが、Fig. 9 のように転炉方式は発生ガスの回収等による有効利用により電炉法に比べてコスト競争力を持つものである。従って高炉製鉄所のようにガス回収とその利用設備が整った所では問題にならないが、一般の電炉メーカーにおいてはこの設備化が本方式の導入を阻んでいる。そのために EOF 法のように系内で全発生エネルギーを使用するプロセスの開発が行われているわけで、トータルの熱効率向上によるエネルギーコストと電力コストの比較で実用化が決められよう。

4. 資源、環境問題におけるスクラップ溶解法の位置付けと今後の展開

ここ数年来、スクラップ溶解法を取り巻く環境に徐々に変化が生じつつある。それは今後 21 世紀に向けてリサイクル運動の高まりに加え、高度成長時代に蓄積された市中スクラップの多量発生とその品質の劣化への今後の対応、および CO₂ 排出削減に対するスクラップ溶解法への期待である。

品質の劣化はスクラップ中の鉄分の低下とめっき製品、高合金鋼の増加にともなうトランプエレメント問題に帰着する。鉄分の低下は回収コストや溶解コストの増大と共に、有害なダストやガスの発生等環境問題にも関係する。スクラップ溶解中に系外に放出されるものとしては Zn や Pb があり、これらの大半はダスト中に固定

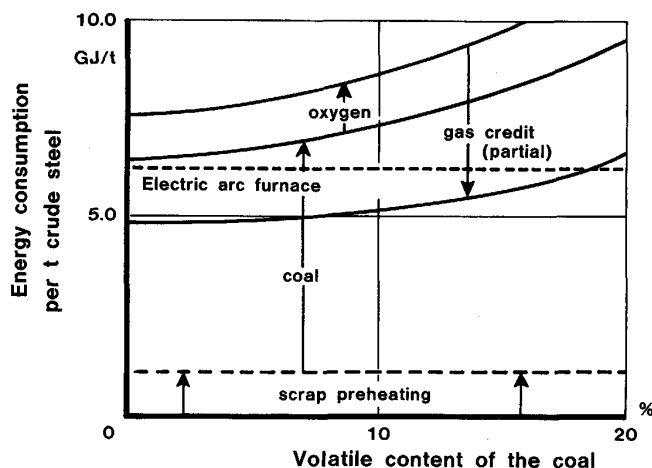


Fig. 9. Energy consumption of scrap melting process as a function of the volatile content of the coal²⁸⁾.

される。電炉ダスト中には今でも 10~30% もの Zn が含有されており、Zn の抽出工程等を利用して処理されているがコスト上の問題を含んでいる。転炉型のスクラップ溶解法においても電炉法に比べダスト発生量は相対的に多いので、今後大きな問題になる可能性がある。一方 Cu, Sn, Cr 等のトランプエレメント成分は溶鉄中に固定され、その含有量が増加すると製品欠陥や材質の劣化を来す。我が国では 1990 年よりこれらの問題を解決するために産・官・学共同の研究組織がスタートしており、その成果が期待されている³²⁾。

次に CO₂ 問題に対する今後のスクラップ溶解法の位置付けにつき述べる。1987 年時点での国内の CO₂ 排出総量に占める鉄鋼業の割合は、発生源別で 12.6%、エネルギー転換部門の発生量を消費側で分担した場合には 17.3% にもなり³³⁾、大きな比重を占めていることから、この低減が 21 世紀に向けての課題となりつつある。現行の高炉製鉄法をベースとした代表的な製鉄所の各工程における 1 次エネルギー使用量を Table 3 に示す。このように製鉄所のエネルギーの大半は製鉄工程に投入され、自家消費されると共に残りは COG や BFG ガスとして他部門に供給されている。このように全エネルギーの 2/3 が製鉄工程で使用されており、言うまでもなく鉍石の還元に要するエネルギーが莫大であるためである。それゆえすでに還元を終えたと思なされるスクラップをスタートとした場合には、理想的には 1/3 のエネ

Table 3. Primary energy consumption at various stages (GJ/t steel).

	Energy input	Recovered energy	Energy consumption	
Ironmaking	26.66	12.02	14.62	66.7%
Steelmaking	3.60	2.08	1.52	6.9%
CC~Rolling	5.77	0	5.77	26.4%
Total	--	--	21.91	100%

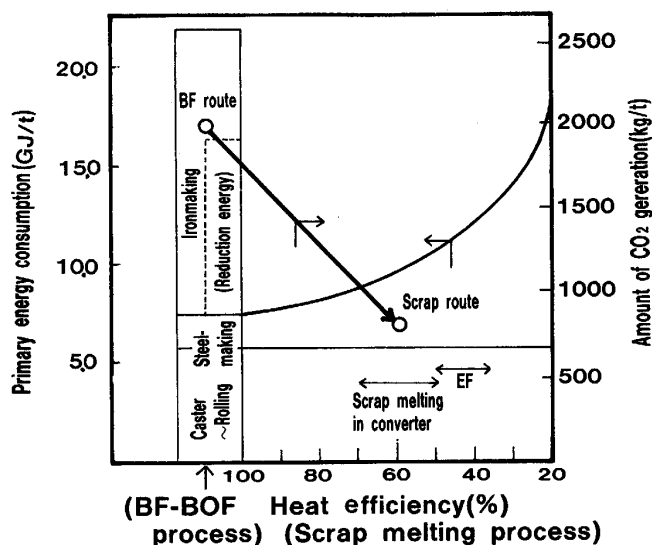


Fig. 10. Primary energy consumption and amount of CO₂ generation as a function of heat efficiency.

ルギーで事足りることになる。実際には製鋼工程の必要エネルギー 1.52 GJ/t は溶解エネルギーにほぼ相当するので、Fig. 10 のように溶解のための熱効率で変わり、熱効率が低いと大きくなる。铸造以降の必要エネルギーが一定とすると、図のように総使用1次エネルギーは高炉法に比べて1/2以下で済むことになる。これをCO₂発生量と比較すると、高炉法の2000~2100 kg/t, crude steel に対して800 kg/t, crude steel と試算できる。しかしながらCO₂問題は製鉄主原料を鉄鉱石からスクラップに転換すれば事足りるほど単純ではない。現在でもスクラップ発生量の増加を受けてそれを主原料とする電炉鋼のシェアが上がりつつあり、それに応じてCO₂排出量は徐々に低下していることになっている。問題は前述したように21世紀に向けスクラップは特に老廃屑を中心に発生量が増加すると予想されているが、品質およびコスト的に再利用不可スクラップが増加することにある。2020年の総スクラップ発生量6000万tの内、1500万tが再利用不可スクラップとなる可能性があるとの試算例もある³²⁾。これではみすみす大幅なCO₂排出削減チャンスを逃すうえに資源の有効利用にも反することになり、老廃屑の有効利用を前提とした効率的なスクラップ溶解技術が要求されよう。

以上述べた課題に対しては電炉も含め、現在までに開発されている転炉型スクラップ溶解法も十分な解を提供しているとは言いがたい。老廃屑の使用の面では転炉型スクラップ溶解法が比較的有利な方法と成りうるので、品質問題の解決策を合わせ持った技術の開発が望まれる。

5. おわりに

以上述べたように転炉におけるスクラップ溶解技術は、これまでに蓄積された各種の要素技術（純酸素吹錬技術、上底吹き技術、インジェクション技術、耐火物技術）を基盤として発展してきたが、いまだいくつかの技術上解決されなければならない問題点や課題が残されている。また将来の製鉄技術体系の中でどのように位置付けすべきかの検討が必要であり、今後の進展が望まれる。

文 献

- 1) J. WERNER, D. DUKELOW, J. SPRUELL, T. THOMPSON and W. MACKELLAR: *Steelmaking Conf. Proc.*, **68** (1985), p. 119
- 2) P. KOROS, F. ROTE, J. WALLACE and D. WINTERS: *Steelmaking Conf. Proc.*, **68** (1985), p. 81
- 3) 井口光哉: 第114・115回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編)(1986), p. 33
- 4) D. VENSEL and H. HENEIN: *Steelmaking Conf. Proc.*, **68** (1985), p. 67
- 5) 原田俊哉, 安藤道英, 後藤裕規, 川口勝徳, 大森正直, 辻野良二: *鉄と鋼*, **71** (1985), S187
- 6) 田岡啓造, 山田純夫, 数土文夫, 野村 寛, 香木淳一: *鉄と鋼*, **70** (1984), S1027
- 7) 新良正典, 武 英雄, 高柴信元, 吉川文明: *鉄と鋼*, **72** (1986), S1006
- 8) 石川博章, 丹村洋一, 平野 稔, 寺田 修, 宮脇芳治: *鉄と鋼*, **70** (1984), S1029
- 9) 奥田治志, 武 英雄, 山田隆康, E. FRITZ: *鉄と鋼*, **71** (1985), S186
- 10) 岡村祥三, 末安正信, 古城 栄, 中島英雄, 丸川雄浄, 姉崎正治: *鉄と鋼*, **69** (1983), S1019
- 11) 森 明義, 永幡 勉, 加藤木健, 市原 清, 大喜多義道: *鉄と鋼*, **69** (1983), S1018
- 12) 副島利行, 松本 洋, 松井秀雄, 竹内正明, 源間信行: *鉄と鋼*, **71** (1985), S1042
- 13) 岡村祥三, 中島英雄, 丸川雄浄, 姉崎正治, 戸崎泰之, 森 明義, 加藤木健, 市原 清: *鉄と鋼*, **71** (1985), p. 1787
- 14) J. GOEDERT, H. KLEIN, R. HENRION and J. LIESCH: *Steel Times*, **214** (1986), p. 83
- 15) H. KLEIN, J. LIESCH, H. ISO and K. NAKAMURA: *Steelmaking Conf. Proc.*, **68** (1985), p. 129
- 16) L. BOGDANDY, H. GECK, J. GROSSMANN, K. SCHAFER, H. SELENZ and R. TURNER: *Iron Steelmaker*, **13** (1986), p. 14
- 17) P. PATEL, H. SELENZ and J. GROSSMANN: *Steel Times*, **215** (1987), p. 438
- 18) K. BROTZMANN: *Steelmaking Conf. Proc.*, **70** (1987), p. 3
- 19) K. OZAWA, K. UMEZAWA, K. ISOBE and C. SAITO: *6th IISC Proc.* (1990), p. 33
- 20) *Steel Times*, **215** (1987), p. 346
- 21) K. BLINOV, V. YAKOVLEV and S. KOMAROV: *6th IISC Proc.* (1990), p. 65

- 22) A. PATUZZI, K. ANTLINGER, H. GRABNER and W. KRIEGER: 6th IISC Proc.(1990), p. 49
- 23) R. WEBER, L. MORSOLETTO, H. GUDENAU and F. GRANDIN: Stahl Eisen, **110** (1990), p. 97
- 24) F. HOEFER, F. OETERS, H. GECK, P. PATEL and H. SELENZ: 6th IISC Proc.(1990), p. 1
- 25) 谷奥 俊, 市原 清, 加藤木健, 友野 宏, 永幡 勉: 鉄と鋼, **73** (1987), S921
- 26) 高柴信元, 小島信司, 吉川文明, 新良正典, 武 英雄, 橋 林三: 鉄と鋼, **72** (1986), S1005
- 27) 特開昭 54-109016 (1979)
- 28) J. HARTWIG, D. NEUSCHUTZ, D. RADKE and H. SEELIG: Iron Steel Eng., **59** (1982), p. 36
- 29) 岸本康夫, 高橋幸雄, 竹内秀次, 藤井徹也, 野崎 努: 鉄と鋼, **73** (1987), A35
- 30) 平居正純, 辻野良二, 向井達夫, 原田俊哉, 大森正直: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1117
- 31) E. SCHEMPP: Iron Steel Eng., **56** (1979), p. 43
- 32) 鉄鋼界報, No. 1509 (日本鉄鋼連盟編) (1990)
- 33) 清水 浩: 技術と経済(1990) July, p. 61
- 34) 平田武行, 石田博章, 姉崎正治: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1893
- 35) N. DEMUKAI and S. SUGIURA: 6th IISC Proc.(1990), p. 18
- 36) 大貫一雄, 小沢浩作, 梅沢一誠, 森 幸治: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 276
- 37) H. LANGHAMMER and H. GECK: Stahl Eisen, **92** (1972), p. 501