

## 還元鉄の溶鉄への溶解



佐藤 彰\*

## Melting of Reduced Iron into Iron Melt

Akira SATO

## 1. はじめに

日本の鉄鋼生産量の約 3/4 は、現在、鉄鉱石からの高炉-転炉法による一貫製鉄法で生産されている。残りはスクラップからの電気炉による<sup>1)</sup>。直接還元法による還元鉄は、現在のところ、高炉-転炉法の代替というよりは直接還元-電気炉のミニミル、あるいは、鋼スクラップ、または、冷鉄の代用として注目されている。

還元鉄の製造法および溶解法には非常に多くの種類があるが、西田<sup>2)</sup> および日本鉄鋼協会共同研究会<sup>3)</sup> によつて極めて良くまとめられている。また、外国でもいくつかのセミナーが開催され<sup>4)~6)</sup>、STEPHENSON<sup>7)</sup> によつてまとめられている。

ここでは、還元鉄の利用法について日本鉄鋼協会のものと重複しない範囲を概観し、これに記載されていない方法を補足する。還元鉄のアーケ炉溶解における電力消費量におよぼす還元鉄品質などの影響についてまとめ、金材技研での研究を紹介する。

## 2. 還元鉄の利用法

## 2.1 アーク炉

還元鉄は鋼スクラップの代替として、大部分がアーク炉で鋼にされる。直接還元-電気炉法のミニミルは、1975年までに十分発展すると予測されたが天然ガス価格の上昇と、鋼スクラップ価格の下降のために発展が遅れている<sup>8)~10)</sup>。還元鉄をアーク炉で使用した報告は非常に多い。天然ガスの価格が安い開発途上国では、鋼スクラップも少ないために直接還元-電気炉法のミニミルが成り立っている<sup>11)~21)</sup>。しかし、天然ガス価格が上昇すると予測されるために、還元剤として石炭を使用する方法が有望である<sup>16)22)</sup>。回転炉による石炭の直接使用がもつとも簡明であるが、石炭に含有される硫黄の除去を考慮すれば、石炭を事前処理(ガス化、液化、コークス化など)してから使用することも検討すべきである。

工業先進国では、鋼スクラップがトランプエレメントを含有するため、鋼スクラップより高価な還元鉄は高級

鋼および特殊鋼の製造に使用されている<sup>23)~31)</sup>。また、工場で発生するダストおよびヒュームから還元鉄を製造することにより、公害対策と資源の再利用を行っている<sup>16)32)~36)</sup>。これは将来さらに発展するものと考えられる。

還元鉄は密度が低く、表面積が大きいために本質的に再酸化されやすい。このため輸送と貯蔵において再酸化は依然として課題であり、この防止策について研究されている<sup>37)~40)</sup>。再酸化防止策としては、高密度化のブリケットングと表面被覆処理がある。熱間ブリケットングでは結合剤は不要であるが、冷間ブリケットングでの結合剤および表面被覆剤は、安価で利用しやすく、かつ、溶解工程において障害とならないものでなければならぬ。

還元鉄をアーク炉で溶解するとき、電力、電極、耐火物等の消費量、鉄歩留りが重要な項目である。

電極消費量は鋼スクラップ操業のとき、5-7.5 kg/t であり、炉の生産性に強く関係している。還元鉄の溶解の際も炉の生産性に強く依存するが、電極消費量の増加は 10% 以下である<sup>29)</sup>。

耐火物消費量は、ショートアーク、泡立ちスラグによるアークの被覆、装入還元鉄によるアークからの保護、スラグ塩基度の調整などによつて、鋼スクラップ操業のときと差がなくなつてきた<sup>29)41)42)</sup>。さらに、還元鉄溶解用アーク炉として、電極間距離が小さく炉殻径が大きい炉、水冷パネル使用などによつて耐火物消費量は減少する。

Fig. 1 は鉄歩留りにおよぼす還元鉄装入割合の影響を示す<sup>15)43)~47)</sup>。鉄歩留りはスクラップおよび還元鉄の品質によつて大きく変動する。全スクラップ操業のときの歩留りの相違は、工場内の清浄なスクラップを用いるときは高く、市販スクラップを使用するときは低いことが示されている。全還元鉄操業のときの歩留りの相違は、主に、脈石成分含有量の違いによる。還元鉄中の未還元酸化鉄は、溶鉄中の炭素濃度、温度、還元鉄中の炭素濃度が高く、スラグの CaO/SiO<sub>2</sub> が 1.5~2.5 のと

昭和 58 年 10 月 17 日受付 (Received Oct. 17, 1983) (依頼技術資料)

\* 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku 153)

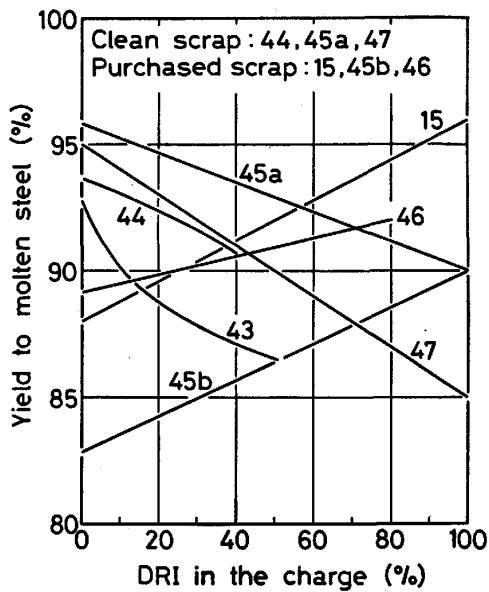


Fig. 1. Direct reduction iron (DRI) in the charge and the yield to molten steel. (Ref. : 15, 43-47)

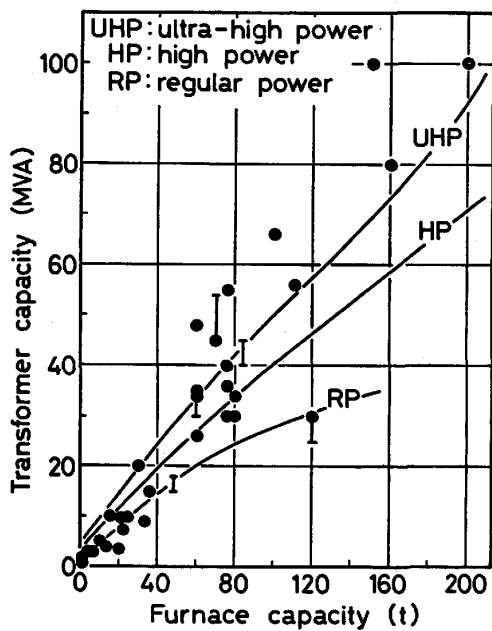


Fig. 2. Furnace capacity and the transformer capacity equipped. (Ref. : 11, 15, 18, 23, 24, 43, 44, 46-66, 166)

きに回収されると報告されている<sup>47)</sup>。還元鉄装入割合を増加したとき、鉄歩留りが増加するか、減少するかは、スクラップおよび還元鉄中の鉄含有量の相対的な数値による。鉄歩留りにおよぼす還元鉄の金属化率の影響については、金属化率変化の範囲が 92~97% と狭いが、金属化率が高いほど鉄歩留りも高いことが示されている<sup>46)47)</sup>。

電力消費量に影響をおよぼす因子は非常に多数ある。電気炉の特性、操業法、還元鉄の特性が複雑に関係して

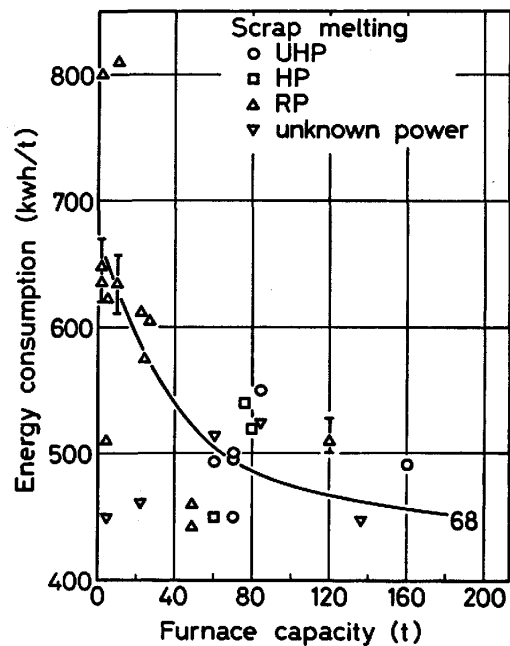


Fig. 3. Furnace capacity and the energy consumption in scrap melting. (Ref. : 11, 24, 43-47, 49-63, 65, 67, 68)

おり、種々の炉で様々の還元鉄を溶解したときの電力消費量を比較することは極めて難しい。

Fig. 2 は還元鉄の溶解に使用されたアーク炉の炉容と電気容量との関係を示す<sup>11)15)18)23)24)43)44)46)~66)</sup>。超大電力 (UHP)、大電力 (HP)、普通電力 (RP) 炉の区別は稲垣<sup>166)</sup>にしたがって描いたものであるが、厳密な区別はないようである。また、還元鉄溶解用に特別に設計された炉もまだないようである。還元鉄の溶解に使用された炉は種々様々であることがわかる。

Fig. 3 は全スクラップ溶解の際のアーク炉の炉容と電力消費量との関係を示す<sup>11)24)43)~47)49)~63)65)67)</sup>。図の曲線は BARBI<sup>69)</sup>が述べていることにしたがって描いたものである。全スクラップ溶解の場合でさえ、電力消費量のばらつきが大きく、特に小容量の炉で著しい。また、炉の電気容量が電力消費量におよぼす影響も判然としない。

Fig. 4 は鋼浴温度および電力消費量におよぼす還元鉄供給速度の影響を示す<sup>48)57)59)</sup>。供給速度が増加すると鋼浴温度が低下するため、鋼浴温度が変わらない速度で供給することになるが、炉の熱効率と関係する。鋼浴温度を変化させないで供給速度を変えたとき、電力消費量は供給速度が大きいくほど著しく減少することが示されている。炉の電気容量が供給速度におよぼす影響ははつきりしない。

Fig. 5 は電力消費量におよぼす還元鉄装入割合の影響を示す<sup>24)43)~47)49)55)56)60)61)64)67)69)</sup>。装入割合が増加するにしたがって、電力消費量が単調増加するとき(a)と極小値を示すとき(b)の両方があることがわかる。(a)

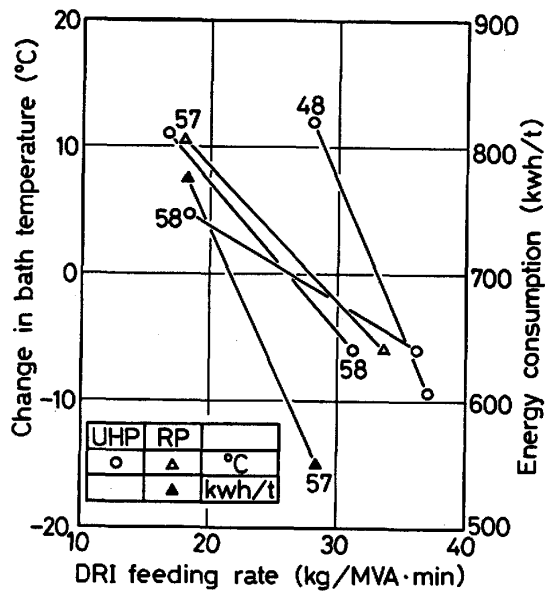


Fig. 4. DRI feeding rate and the change in bath temperature and the energy consumption. (Ref. : 48, 57, 58)

の曲線 61 は脈石成分が 24% と著しく高いダストペレットを使用しているために電力消費量が極端に上昇する。曲線 55 は電気容量の小さい 10t 炉を使用しているため電力消費量が高くなつたものと思われる。極小値は装入割合が約 20% で現れている。

Fig. 6 は炉の生産性におよぼす還元鉄装入割合の影響を示す<sup>(46)(60)(67)</sup>。炉の生産性は炉容と溶解時間とで決定されるが、溶解時間の定義が異なるので直接比較することはできない。しかし、図から、還元鉄装入割合が 50~60% において生産性が極大となることがわかる。

Fig. 7 は電力消費量におよぼす還元鉄の金属化率の影響を示す<sup>(46)(48)(53)(59)(66)</sup>。金属化率が 85~95% の狭い範囲しかないため、金属化率が 73~100% の回分装入のデータも示した。金属化が低下すると、未還元酸化鉄の溶解と還元を必要とするために電力消費量は増大する。他方、カーボンボイリングによる鋼浴攪拌の結果、熱伝達と溶解が促進されて電力消費量が減少することが期待できる。金属化率 100% のときに電力消費量が相違するのは、回分装入のときにコークスを使用すると電力消費量が低下するからであり、連続装入のときは鉄鉱石とコークスを 1.3% 添加するからである。

Fig. 8 は炉の生産性におよぼす還元鉄の金属化率の影響を示す<sup>(46)(51)</sup>。炉容と溶解時間の逆数から求められる生産性が極大となる金属化率があることが示されている。

Fig. 9 は電力消費量におよぼす還元鉄溶解時のスラグ重量の影響を示す<sup>(51)(57)</sup>。スラグ量は還元鉄の脈石成分の量と組成から計算できる。この場合スラグ塩基度調整のために CaO を添加することを考慮する。スラグ塩基度は還元鉄の P, S 含有量と製造鋼種によつて決定され

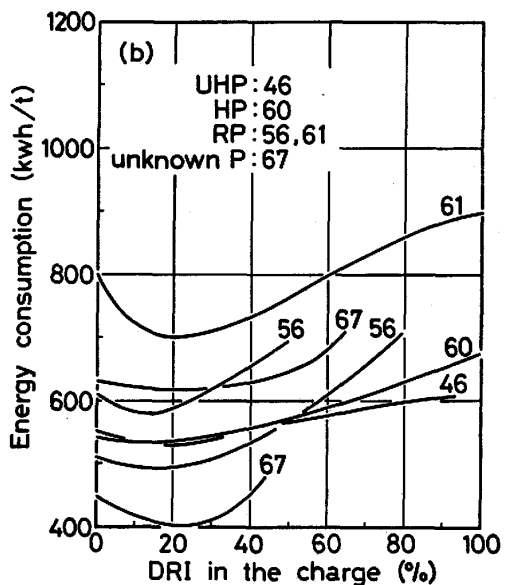
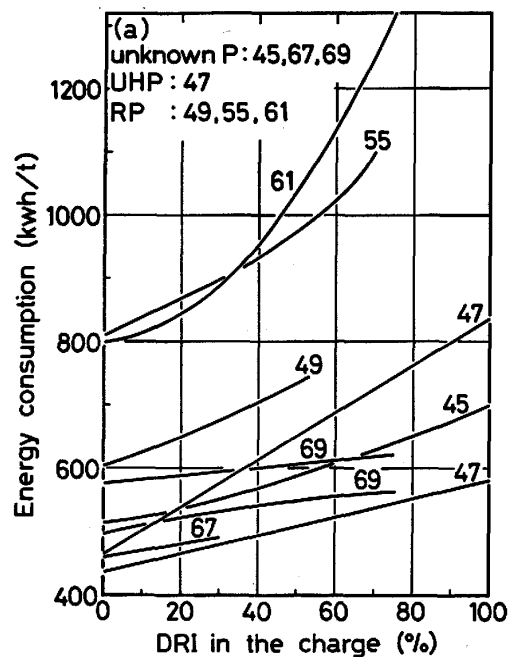


Fig. 5. DRI in the charge and the energy consumption. (Ref. : 45, 46, 47, 49, 55, 56, 60, 61, 67, 69)

る。電力消費量はスラグ量が増加するにしたがつて増大することは当然であるが、スラグ量の増加による顕熱、CaO の溶解熱の増加だけでなく、操業時間が長くなることも原因であると指摘されている<sup>(51)</sup>。

電力消費量におよぼす還元鉄の炭素含有量の影響については、熱源である炭素含有量が高いほど電力消費量は減少する<sup>(59)</sup>。この場合酸素ガスの使用などにより操業法も変化する。QUINTERO<sup>(67)</sup> は、未還元酸化鉄の還元に必要な量の炭素を含有している還元鉄の溶解コストは、金属化率が 82-95% の範囲では同一であり、相当金属化率 [equivalent metallization = 金属化率 + 5(%C)]

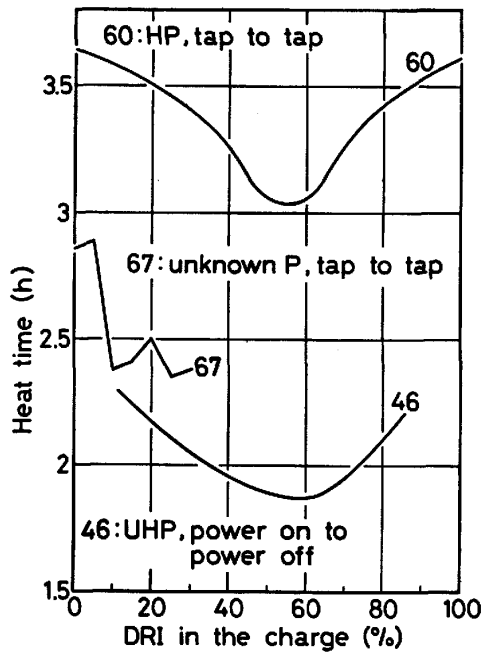


Fig. 6. DRI in the charge and the heat time. (Ref. : 46, 60, 67)

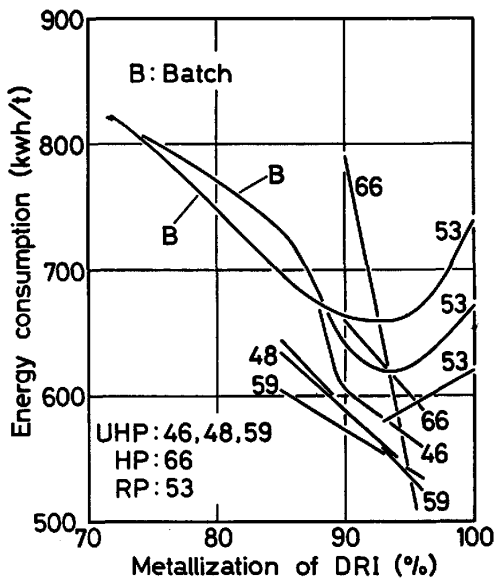


Fig. 7. Metallization of DRI and the energy consumption. (Ref. : 46, 48, 53, 59, 66)

を使用することを提唱している。過飽和の酸素が炭素と急激に反応して起こる爆発的反應 (violent boiling)<sup>58)</sup>も炭素含有量の高い還元鉄を使用することにより防止することができ、未還元酸化鉄の回収率も向上する<sup>44)</sup>。

**2.2 転炉**

連铸率の上昇により工場内スクラップが減少したため、トランプ元素の少ない還元鉄を鋼スクラップの代替として使用することが検討されている<sup>29)70)~75)</sup>。冷却能力は金属化率と SiO<sub>2</sub> 含有量 (スラグの塩基度調整のために石灰を添加するため) によつて変化するが、

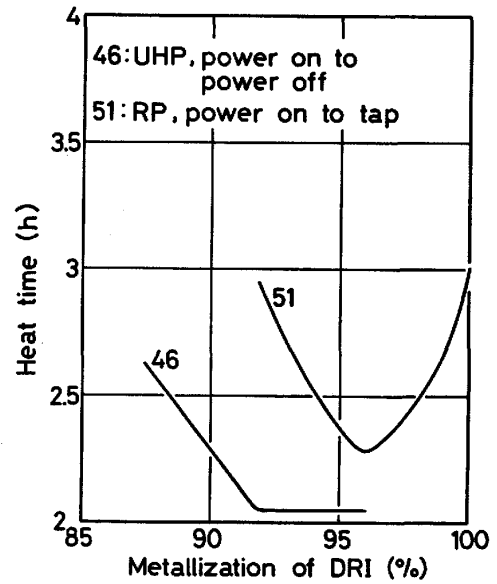


Fig. 8. Metallization of DRI and the heat time. (Ref. : 46, 51)

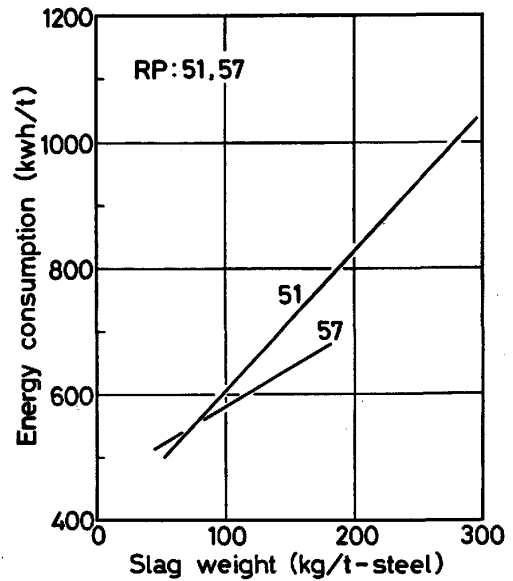


Fig. 9. Slag weight and the energy consumption. (Ref. : 51, 57)

90% 以上の金属化率では、鋼スクラップの約 1.2 倍である。添加方法は吹錬中に連続添加するのが良いという報告が多い。鉄歩留りは鋼スクラップのときと同等であり、鋼中の P, S, Cu, N は低くなるが、Mn の歩留りが低いことが問題となつている。

**2.3 誘導炉およびキューボラ**

還元鉄を誘導炉で溶解し、鋼を製造した報告もある<sup>3)76)</sup>が、铸铁を製造することが多い<sup>77)~79)</sup>。還元鉄はトランプ元素が少ないため、ダクタイル铸铁の製造に適している。あらかじめ溶解した溶鉄上に還元鉄を装入するが、生成されるスラグを除去する必要性から、約 20% だけ出湯し、このとき同時に排滓するなどの方

法が採用されている。

キューボラで還元鉄を溶解する際には、通気性と荷下りの観点から、サイズが大きいことが要求される<sup>79)~81)</sup>。

誘導炉およびキューボラによる還元鉄の溶解では、金属化率が高く、脈石成分含有量が低いことが要求される。

#### 2.4 高炉および電気製鉄炉

高炉に還元鉄を装入すると金属化率に応じて、生産性の増加とコークス比の低下が達成される<sup>82)~85)</sup>。しかし、還元鉄の価格から考えて、特別な場合、たとえば、工場内のダストおよびヒューム処理による還元鉄などの場合にのみ使用すべきであり、可能なかぎり、製鋼で使用する方が有利である。

電気製鉄炉に還元鉄を装入する場合も金属化率に応じて生産性が上昇し、電力消費量が減少する<sup>84)86)87)</sup>。安価な燃料または電力が利用できる場所では十分に成り立つと考えられる。しかし、OSTROWSKI<sup>84)</sup> および片山<sup>88)</sup>が指摘しているように、予熱・予備還元法を鉄合金の生産に適用する方が合理的であると考えられる。

#### 2.5 ESR, ガス炉および直接圧延法

GUDENAU<sup>89)90)</sup>はスラグ抵抗加熱による脈石成分含有量の高いチタン含有還元鉄の溶解を試験し、アーク炉より電力消費量が少なく、スラグの塩基度を調整することによって脱硫、脱りん、脱窒などを効果的に行うことができることを報告している。脈石成分含有量の高い還元鉄を溶解すると、必然的にスラグ生成量が多くなるから、この方法は極めて合目的であり、今後の発展が期待される<sup>91)92)</sup>。

DOBSON<sup>93)</sup>は炭化水素を燃焼させて還元鉄を溶解精錬して鋼を得ている。鉄歩留りは低炭素鋼のときでもほぼ理論値であり、P, S, O, 介在物も低く、熱効率も約90%である。燃料から電気を得る効率が高々30%であることを考えれば、エネルギー的にはアーク炉などより極めて効率の高い溶解精錬法であり興味深い。

KruppではCOINプロセス(Coal/Oxygen Injection Process)を研究している<sup>92)94)~97)</sup>。BOFのスクラップ使用量の増大を目的として、炉底羽口から粉炭と酸素ガスを吹き込むことによってスクラップまたは還元鉄の予熱と鋼浴の加熱を行う。鋼浴に吹き込まれた粉炭はガス化され、鉄鉱石の還元に適する組成のガスを発生する。このガスの除塵と加圧がこれからの課題であるが、鉄鉱石から溶鋼を製造する有力な方法と考えられる。

ESR法(Electroslag Remelting Process)によって還元鉄から最終インゴットを直接製造しようという試みがなされている<sup>98)~101)</sup>。還元鉄中の未還元酸化鉄による酸化反応を適切に制御することにより、高級鋼および合金鋼インゴットを小規模な装置で製造できる可能性が示されている。

AHIER<sup>102)~105)</sup>は鉄鉱石から直接薄板を製造するこ

とを試みている。脈石成分を鉄鉱石の選鉱過程でできるだけ除去すること、または、高純度の鉄鉱石を選択することが第一段階である。薄板の製造は次の三方法である：有機結合剤で精鉱を薄板に成形してから還元、熱間圧延する方法。有機結合剤で精鉱をビレットにしてから還元、熱間圧延する方法。有機結合剤で精鉱をペレットにしてから還元、熱い還元鉄を直接圧延する方法。得られた薄板の諸性質は、精鉱の純度に依存するが、通常のものと同色ないことが示されている。この方法は高純度の精鉱を得ることが根本であり、高純度の鉄鉱石が入手可能ならば、いわば、ミニ・ミニミルとして成り立つと考えられる。

#### 2.6 連続溶解還元法

金材技研では連続製鋼法の研究に引き続き、還元鉄の連続溶解還元技術の研究を行った<sup>106)107)</sup>。この基本的な考え方は、1) 直接還元法、2) アーク炉溶解法、3) 連続製鋼法、4) 連続鑄造法を組み合わせ、連続操作することによって生産性の向上とエネルギー利用率の向上を達成しようというものである。

Fig. 10はこれの一方法を示す。直接還元法で還元鉄を製造する際には、a) 還元率と生産性の均衡、b) 顕熱および潜熱の利用、c) 再酸化の防止が大きな課題である。アーク炉溶解法においては、d) 電力消費量の減少、e) 加炭法の確立、f) 未還元酸化鉄の還元、g) 熔融スラグ組成の制御、h) 熔融スラグ中酸化鉄の還元による鉄歩留りの向上などが重要な課題である。連続製鋼法においては、i) 脱炭反応の制御、j) 温度の制御が主な課題であり、脱硫、脱りんは特に重要な課題ではない。

還元鉄のアーク炉による連続溶解は、連続溶解用に特別な炉を使用し、あらかじめ溶解した溶鉄、または、溶鋼に還元鉄を連続添加することによって行う<sup>108)109)</sup>。精錬も特別な炉を使用して行うもので、溶解と精錬を同時に行う前述の回分法と異なる。連続法では各工程の最適

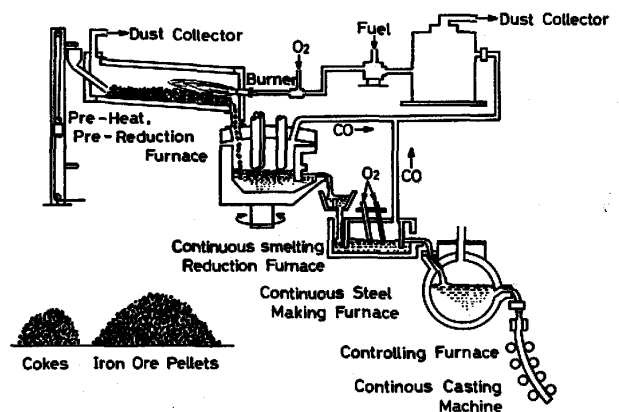


Fig. 10. Schematic diagram of a continuous iron and steel making process based on a direct reduction of iron ore.

化だけではなく、全システムとしての最適化も検討しなければならない。すなわち、還元鉄を製鉄に使用することは、製鋼に使用するよりも不利であるが、全システムとして後者以上のメリットを確保できればよい。

### 3. 還元鉄の溶鉄中への溶解

アーク炉で溶鉄に還元鉄を連続添加するとき、2・1 に記述したように電力消費量におよぼす因子は非常に多数ある。電力消費量におよぼす還元鉄の特性の影響についても、因子が多すぎてまだ判然としない<sup>2)3)25)29)110)~114)</sup>。しかし、還元鉄の供給速度は、Fig. 4 に示したように、電力消費量に大きい影響をおよぼしている。供給速度は溶解速度と緊密な関係にあるという立場から、とくに、還元鉄の溶鉄中への溶解速度について、著者らの検討結果を中心にまとめて紹介する。なお以下の結果はとくに断わらない限り、溶解温度 1520°C とし、炭素飽和溶鉄を用いている。

#### 3.1 高還元率還元鉄ペレット

高還元率還元鉄ペレットの溶鉄中への溶解過程は、溶鉄中への鋼スクラップの溶解と同様であり、1) 溶鉄からペレットへの熱移動、2) 溶鉄中炭素の溶解界面への移動、3) ペレット中铁の溶鉄への移動が主な過程と考えられる。鋼スクラップの溶鉄中への溶解については多くの研究があり、溶解は固液界面の液側の物質移動で律速されると報告されている<sup>115)~128)</sup>。

鋼スクラップと還元鉄ペレットとの相違は、還元鉄が未還元酸化鉄、脈石成分、炭素を含有し、比重が小さくて溶鉄-溶融スラグ境界面に浮かぶことである。還元鉄ペレットの溶解の数式モデルは多数報告されているが、このように複雑な現象を相似できるモデルはまだないようである<sup>129)~137)</sup>。

桜谷<sup>138)</sup>は鋼に 1.14 wt% までの酸素を含有させた試料を炭素飽和溶鉄に溶解する研究を行い、溶解速度が CO ガスによる界面の液の攪拌のために増大することを報告している。また、LLOYL<sup>139)</sup>は金属化率 92.5% の還元鉄ペレットを 1600°C、0.6%C の溶鉄中へ溶解し、溶解速度 (mol FeO/cm<sup>2</sup>・s) は酸化鉄ペレットのものと同様であると報告している。すなわち、還元鉄ペレットの溶解速度 (g/s) は酸化鉄ペレットの約 15 倍であり、著者<sup>140)</sup>が得た結果と一致する。また、1520°C に予熱した鉄ペレットの炭素飽和溶鉄中への溶解速度は、予熱なしのものに比べて著しく大きいことから、熱移動が律速であると考えられる<sup>140)</sup>。

Fig. 11 は鉄ペレットの溶解速度におよぼすペレット中の添加物の影響を示す。酸化物は脈石成分を、炭素は炭材内装ペレットを考慮したものである。溶解速度は塩基性酸化物の CaO が少量のときは無添加のものより大きい、5% 以上になると著しく小さくなる。これに対して、酸性酸化物の SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の添加量の増加と共に

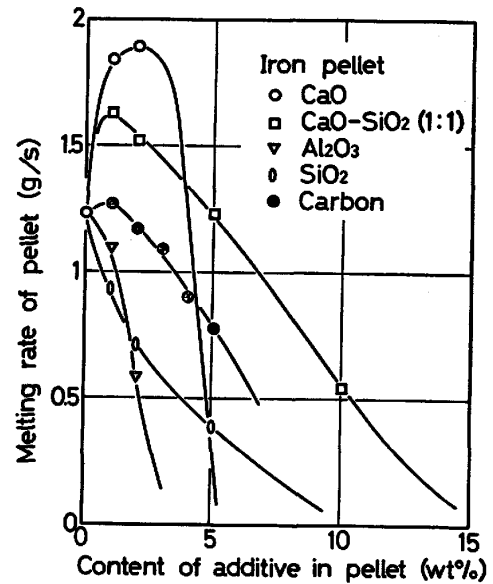


Fig. 11. Melting rate of iron pellet into the carbon saturated iron melt at 1520°C and the additive content in pellet.

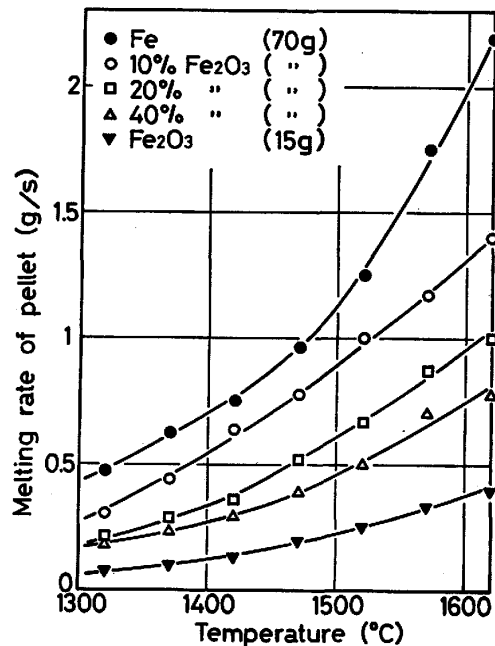


Fig. 12. Dependence of the melting rate of pellet into the carbon saturated iron melt on the temperature and the content of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in pellet.

に溶解速度は著しく減少する。

Fig. 12 は鉄、10-40%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、酸化鉄 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ペレットの溶解速度におよぼす温度の影響を示す。溶解速度は温度が上昇すると共に増大する。

Fig. 13 は鉄、10-40%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、酸化鉄 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ペレットの溶解速度におよぼす溶鉄中の炭素濃度の影響を示す。鉄ペレットの溶解速度は飽和炭素量から約 3%C まではほとんど同じであり、約 3%C 以下になると、炭素濃度の減少と共に著しく減少する。

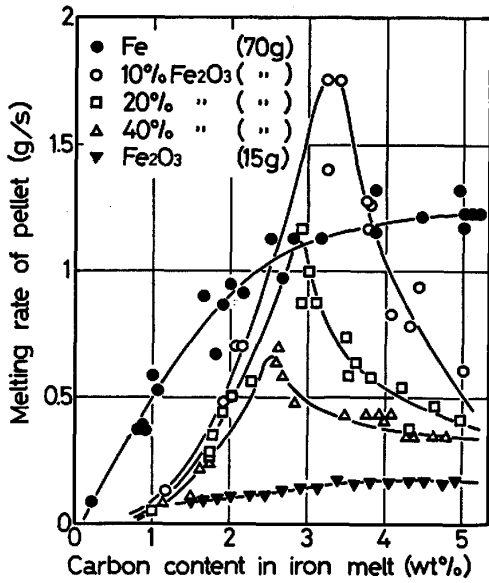


Fig. 13. Dependence of the melting rate of pellet on the carbon content in iron melt at 1520°C and the content of  $Fe_2O_3$  in pellet.

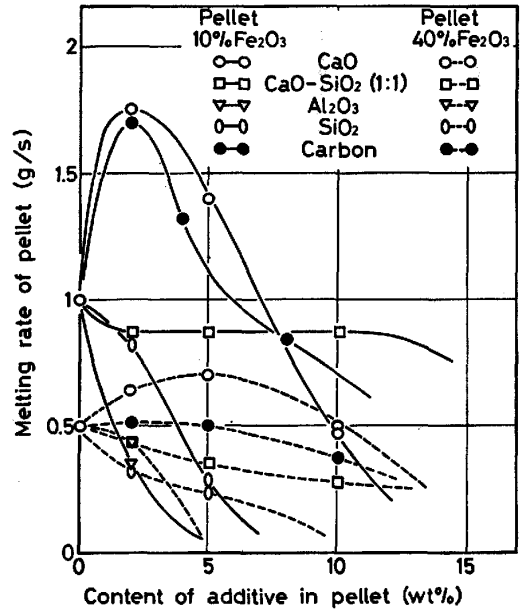


Fig. 15. Melting rate of 10% and 40%  $Fe_2O_3$  pellet into the carbon saturated iron melt at 1520°C and the additive content in pellet.

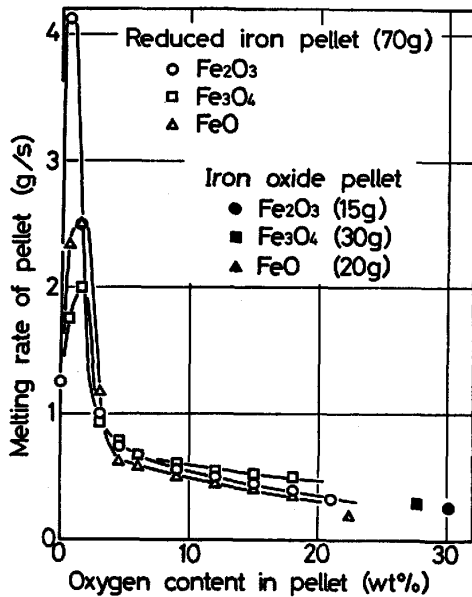


Fig. 14. Melting rate of pellet into the carbon saturated iron melt at 1520°C and the oxygen concentration of pellet.

Fig. 14 は溶解速度におよぼすペレット中の酸素濃度および酸化鉄の種類の影響を示す<sup>14)</sup>。酸素濃度が 1-2 wt% のときに溶解速度は極端に大きくなる。

予熱なしの還元鉄ペレットを溶鉄上に添加したとき、数式モデルではペレットに溶鉄が凝固して殻を形成するとしているが、溶鉄中の炭素濃度が低いときを除いて殻の形成は観察されない。この実験では炭材内装ペレットを用いていないから、ペレット内で CO ガスが発生して凝固殻の形成を妨害したわけではない。凝固殻形成条件を調べておく必要がある。

### 3.2 低還元率還元鉄ペレット

低還元率還元鉄ペレットの溶鉄中への溶解過程は、1) 溶鉄からペレットへの熱移動、2) 溶鉄中炭素の溶解界面への移動、3) ペレット中铁の溶鉄への移動、4) ペレット中未還元酸化鉄の還元反応が主な過程であると考えられる。1)-3) は高還元率還元鉄ペレットの溶鉄中への溶解と同じであり、低還元率還元鉄ペレットの場合には、4) が重要な役割を果たす。

還元鉄中の酸素濃度が 3 wt% 以上では、Fig. 14 に見られるように、酸化鉄の種類によらず、溶解速度は酸素濃度の上昇と共に低下する。予熱した 10, 20, 40%  $Fe_2O_3$  ペレットの溶解速度は、予熱なしのものに比べて高々 10% 上昇するだけであることから、酸化鉄の還元反応が律速であると推定される。

Fig. 15 は 10% および 40%  $Fe_2O_3$  還元鉄ペレットの溶解速度におよぼすペレット中の酸化物と炭素含有量の影響を示す。  $Fe_2O_3$  含有量が増加すると溶解速度が低下することの他に、CaO, C の少量添加のときは溶解速度が増大し、  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  添加のときは溶解速度が著しく減少する。

低還元率還元鉄ペレットの溶鉄中への溶解でもつとも興味深い現象は、Fig. 13 に示されるように、溶解速度が極大になる溶鉄中の炭素濃度が認められることである。鉄および酸化鉄ペレットでは溶解速度が極大となる炭素濃度は認められない。また、ペレット中の酸素濃度が高くなると、極大を示す炭素濃度は低くなる。極大が発生する機構については現在のところ明確でないが、反応界面近傍の溶鉄の粘性と CO ガス発生速度から説明できると考えられる。

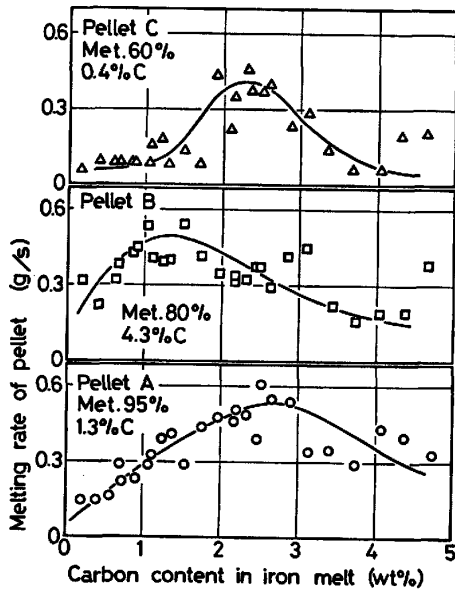


Fig. 16. Melting rate of the commercial reduced iron pellet into the iron melt at 1520°C and the carbon content in iron melt.

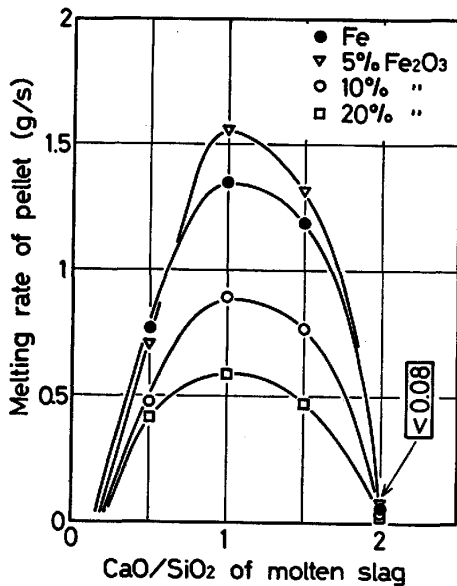


Fig. 17. Dependence of the melting rate of iron and 5-20%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pellet into the carbon saturated iron melt at 1520°C on the CaO/SiO<sub>2</sub> of molten slag weighing 100 g on the iron melt.

Fig. 16 は市販還元鉄ペレットの溶解速度におよぼす溶鉄中の炭素濃度の影響を示す<sup>142)</sup>。ペレットBは炭材内装ペレットで炭素含有量が高いため、極大値を示す溶鉄の炭素濃度が低いと思われる。すなわち、ペレットの酸化鉄含有量が多いほどCOガス発生速度が大きいのので、粘性の高い低炭素濃度のときに反応界面近傍の溶鉄の攪拌が極大となるからと推定される。

3.3 溶融スラグ

還元鉄の溶解においては、脈石成分がスラグになるた

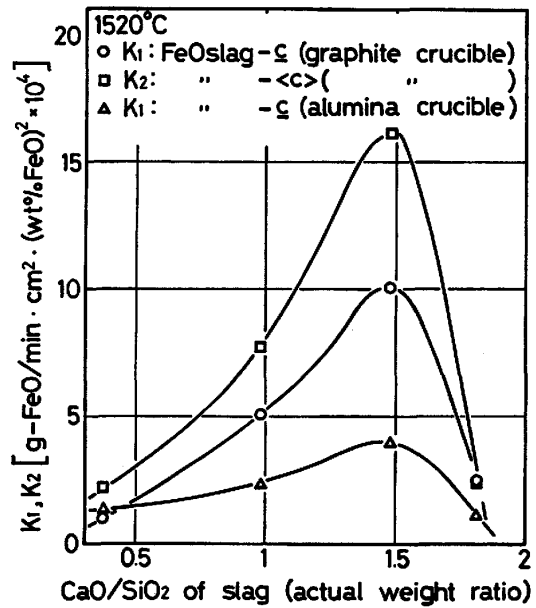


Fig. 18. Dependence of the rate constant of iron oxide reduction in molten slag by the carbon in iron melt ( $K_1$ ) and the solid graphite ( $K_2$ ) on the CaO/SiO<sub>2</sub> of molten slag at 1520°C.

めに必然的に溶融スラグが関係してくる。

Fig. 17 は鉄、5-20%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>還元鉄ペレットの溶解速度におよぼす100gの溶融スラグのCaO/SiO<sub>2</sub>の影響を示す<sup>143)</sup>。溶融スラグのCaO/SiO<sub>2</sub>が約1のときに溶解速度が最大となることは、溶融スラグの粘性が低いことに関係していると考えられる<sup>143)144)</sup>。すなわち、添加されたペレットが容易に溶融スラグ中に沈み込み溶鉄と接触して反応し、COガスの逃散も容易であるためであろう。

ペレット中の酸化鉄の一部は溶融スラグ中に溶け込むことが確認されたので、溶融スラグ中の酸化鉄の還元反応は鉄歩留りの向上のために極めて重要である。溶融スラグ中の酸化鉄の黒鉛による還元反応については報告が多い<sup>145)~159)</sup>。しかし、溶鉄中の炭素による還元反応については報告は少ない<sup>147)151)152)160)~163)</sup>。酸化鉄を含有する溶融スラグの容器としては、現在のところ、黒鉛るつぼだけが使用できる。

Fig. 18 は溶融スラグ中酸化鉄の溶鉄中炭素( $K_1$ )および黒鉛( $K_2$ )による還元反応の速度定数におよぼすスラグのCaO/SiO<sub>2</sub>の影響を示す<sup>164)</sup>。反応速度定数はCaO/SiO<sub>2</sub>が約1.5で最大となることが示され、溶融スラグ中酸化鉄の活量とスラグの粘性から説明できると考えられる。

4. おわりに

鉄鉱石から鋼を製造するルートとして、種々な方法が提案されている。現在のところ、高炉-転炉法のコストがもつとも低く、また、近い将来も変わらないと考えら



れる。鉄鉱石や原料炭の品質が少々低下したくらいでは、この方法の優位性は崩れないであろう。しかしながら、高炉-転炉法は大量生産に適した方法であり、鉄鋼の大量消費地が立地条件である。これに対して、直接還元-電気炉法は小廻りの利くものとして、高炉-転炉法を補足する方法と言える。還元鉄を利用する製鋼法では、還元鉄の価格が安いことが根本である。したがって、還元鉄の製造においては、天然ガスの価格が上昇したために石炭を利用する方法が研究されている。石炭を利用する場合には、還元鉄を経ないで直接溶鉄、溶鋼を製造する方が有利かもしれない。この意味で、溶融還元法、高炉の小型化などのルートが今後研究すべき方向の1つと考えられる。鉄鋼業は自動車産業と並ぶ在来産業であり、発展途上国が工業化に成功すると必然的に先進国の市場を必要とするため、先進国では衰退するとも言われている<sup>165)</sup>。今後の研究のうち1つの方向は、鉄鋼業の自動化、ロボット化、無人工場化などではないかと思う。これらの試験を行うにはミニミルプラントが容易である。本稿が少しでも役立てば幸いである。

## 文 献

- 1) 鉄鋼界, 33 (1983) 12, p. 74
- 2) 西田信直: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 705
- 3) 還元鉄溶解技術の現状と展望 (日本鉄鋼協会共同研究会原子力部会第2小委員会還元鉄溶解技術検討 W. G. 編) (1979) [日本鉄鋼協会]
- 4) Congrès International sur la Production et l'Utilisation des Minerais Réduits, Evian (1967)
- 5) Seminar on Direct Reduction of Iron Ore Technical and Economic Aspects, Bucharest (1972)
- 6) Seminar of the Utilization of Pre-reduced Materials in Iron and Steel Making, Bucharest (1976)
- 7) Direct Reduced Iron-technology and economics of production and use, ed. by R. L. STEPHENSON and R. M. SMAILER (1980) [The Iron and Steel Society of AIME]
- 8) J. H. ROHDE: Steel Times, 208 (1980) 9, p. 46
- 9) J. F. ELLIOTT: Iron and Steelmaker, 8 (1981) 4, p. 32
- 10) T. E. DANCY: Iron and Steelmaker, 10 (1983) 5, p. 36
- 11) H. OTTMAR, A. OERTER, G. SCHMEIDUCH and U. S. BOUS: Stahl Eisen, 96 (1976), p. 106
- 12) F. A. RODRIGUEZ, D. H. CARRILLO and K. A. JACKSON: Iron Steel Eng., 54 (1977) 1, p. 57
- 13) D. M. FACONE: CIM Bull., 71 (1978) 795, p. 160
- 14) A. DACHLAN, M. A. ROCHMAN, F. D. CUYPERE, M. WIBOWO, A. KURNADI, E. SUDARSONO and D. SUPONO: Steel Times, 208 (1980), p. 131
- 15) P. T. HUTCHSON: Steel Times, 208 (1980) 9, p. 40
- 16) W. SCHUNABEL and D. SCHLEBUSCH: Ironmaking Proceedings, 40 (1980), p. 216
- 17) D. YANEZ and E. SANCHEZ: Fachber. Hüttenprax. Metallweiterverarb., 20 (1982) 4, p. 228
- 18) K. J. MILLER: Iron Steel Eng., 59 (1982) 9, p. 25
- 19) G. N. VOSS: Ironmaking Proceedings, 41 (1982), p. 233
- 20) K. J. REID and M. G. HEBUR: Iron and Steelmaker, 10 (1983) 1, p. 34
- 21) 根上卓也: 鉄鋼界, 33 (1983) 5, p. 20
- 22) J. R. GUSEMAN: 前出 7), p. 49
- 23) M. RIGAUD, A. H. MAQUIS and T. E. DANCY: Ironmaking Steelmaking, 3 (1976), p. 366
- 24) D. ENGLEADOW and F. D. WINTER: Ironmaking Steelmaking, 3 (1976), p. 359
- 25) J. W. BROWN and R. L. REDDY: Ironmaking Steelmaking, 6 (1979), p. 24
- 26) V. A. MARDOSEVICH and S. A. PCHELKIN: Stal' (1980) 5, p. 378
- 27) R. PITT: Steel Times, 208 (1980), p. 398
- 28) 藤原達雄: 第71回西山記念技術講座 (1980), p. 269
- 29) R. L. REDDY: 前出 7), p. 104
- 30) W. ROSENBLECK, R. WILLEKE, H. W. KREUTZER, R. STEFFEN and K. SCHÄFER: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 463
- 31) V. N. MARCHENKO, G. A. FILIPPOU and D. A. LITBINENKO: Stal' (1983) 3, p. 73
- 32) G. MEYER, K. H. VOPEL and W. JANSEN: Stahl Eisen, 96 (1976), p. 1228
- 33) K. SUGASAWA, Y. YAMADA, S. WATANABE, K. KATO, K. MASUDA, Y. SATO and T. KAWABATA: Stahl Eisen, 96 (1976), p. 1239
- 34) Y. YAMADA: Stahl Eisen, 100 (1980), p. 1437
- 35) C. P. KEPTON and J. R. WOOD: Ironmaking Steelmaking, 8 (1981), p. 122
- 36) H. EICHBERGER, H. LOMMERT and H. SERBENT: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 645
- 37) H. RIESCHEL: Stahl Eisen, 100 (1980), p. 1442
- 38) H. B. JENSEN and R. M. SMAILER: 前出 7), p. 96
- 39) J. FRERKES, H. A. FRIEDRICHS, H. W. GUDENAU and W. WENZEL: Arch. Eisenhüttenwes., 52 (1981), p. 385
- 40) S. ZELLER and W. PIRKLBAUER: Fachber. Hüttenprax. Metallweiterverarb., 20 (1982), p. 765
- 41) G. SCHMEDUCH and F. OETERS: Stahl Eisen, 100 (1980), p. 1188
- 42) G. UDE and E. BICHLBAUER: Steel Times, 209 (1981), p. 136
- 43) K. SCHERMER: Ironmaking Steelmaking, 2 (1981), p. 188
- 44) 深尾雄四郎, 安田卓司, 伊藤洋平: 電気製鋼, 47 (1976), p. 4
- 45) F. MEININGHAUS: Stahl Eisen, 96 (1976), p. 1245
- 46) D. AMELING, G. RUDOLPH, E. ELSNER and H. KNAPP: 前出 6) R. 5
- 47) 藤田宣治, 中田博也: 電気製鋼, 50 (1979), p. 233

- 48) E. A. ELSNER and H. VOSS: *Int. Iron Steel Cong.* (1974) 3.1.2.2
- 49) J. L. STAHLHED: *J. Metals*, 9 (1957), p. 246
- 50) W. R. WEAVER: *Iron Age*, 185 (1960) 15, p. 18
- 51) J. G. SIBAKIN, P. H. HOOKINGS and G. A. ROEDER: *Blast Furn. Steel Plant.*, (1967), p. 816
- 52) J. ANTOINE and J. DUMONT-FILLON: 前出 4)
- 53) H. A. TUCKER, F. X. TARTARON, H. L. GOLDSTEIN and J. J. KOCISCIN: *Blast Furn. Steel Plant* (1968), p. 1070
- 54) W. L. HUNTER and G. W. ELGER: *J. Metals*, 20 (1968) 5, p. 101
- 55) M. WAHLSTER, A. HILPERT, W. LANGE and K. GLOMB: *Stahl Eisen*, 88 (1968), p. 621
- 56) N. MCCALLUM and R. J. W. PETERS: *Electric Furnace Proceedings*, 28 (1970), p. 198
- 57) N. J. CAVAGHAN and T. H. HARRIS: *JISI*, 208 (1970), p. 529
- 58) 岸田寿夫, 牛山博美, 下郷寿太郎, 森井 廉: *電気製鋼*, 42 (1971), p. 182
- 59) E. ELSNER, H. KNAPP and H. VOSS: *Stahl Eisen*, 94 (1974), p. 1322
- 60) H. M. WILLARS and R. C. MADDEN: *Iron Steel Int.*, 48 (1975) 4, p. 313
- 61) 吉井正孝, 白石惟光, 広本 健: *鉄と鋼*, 62 (1976), S 533
- 62) H. D. PANTKE and C. QUEENS: *Stahl Eisen*, 96 (1976), p. 652
- 63) S. PCHELKIN and V. KUDRIAVTZEV: 前出 6), R. 46
- 64) H. W. KROPLA and U. POHL: 前出 6), R. 38
- 65) H. D. PANTKE and C. QUEENS: 前出 6), R. 39
- 66) H. OTTMAR, H. SCHENCK and W. DAHL: *Stahl Eisen*, 97 (1977), p. 731
- 67) O. HATARASCU, P. ROZOLIMO, I. NEDEFF and M. COSTA: 前出 6) R. 12
- 68) A. BARBI: *Iron Steel Int.*, 49 (1976) 4, p. 257
- 69) N. M. CHUIKO, Kh. P. ZAITSEV, E. N. VOLKOVA, S. I. BUSHCHENKO, L. A. DROZHILOV, and N. N. LUK'YANCHIKOV: *Steel USSR*, 4 (1974), p. 812
- 70) 栗原健郎, 俵 正憲: *日新製鋼技報* (1977) 37, p. 101
- 71) H. P. HAASTERT, F. WINTERFELD, E. HÖFFKEN, G. BAUER and R. A. WEBER: *Stahl Eisen*, 97 (1977), p. 723
- 72) V. A. ROMENETZ, V. A. PITATELEV, V. I. GALKIN and O. D. DJITNIKOV: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1981) 11, p. 180
- 73) G. POFEL, K. PRIMAS and S. ZELLER: *Fachber. Huttenprax. Metallweiterverarb.*, 18 (1980), p. 840
- 74) G. POFEL, K. PRIMAS and S. ZELLER: *Iron and Steelmaker*, 8 (1981) 3, p. 25
- 75) N. J. CAVAGHAN, D. FORD and A. WOODHEAD: *Ironmaking Steelmaking*, 8 (1981), p. 66
- 76) M. N. KUSCHNIR, E. V. TINKOVA, V. T. TERESTZENKO, B. A. BAUM, G. V. TYAGUNOV and Yu. T. DADESCHKELIANI: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1977) 11, p. 86
- 77) 佐々木忍, 齊藤淳一, 高木宗谷, 浅野幸秀: *日本鑄物協会講演概要*, 92 回 (1977), p. 91, p. 96
- 78) 佐々木忍, 齊藤淳一, 高木宗谷: *日本鑄物協会講演概要*, 93 回 (1978), p. 25, p. 26
- 79) H. E. HENDERSON: 前出 7), p. 119
- 80) 石野 享, 米田博幸, 吉田 豊, 藤井健治, 石井一義: *日本鑄物協会講演概要*, 97 回 (1980), p. 94; 98 回 (1980), p. 77; 99 回 (1981), p. 30; 101 回 (1982), p. 28
- 81) 石野 享, 吉田 豊: *鑄鍛造と熱処理*, 35 (1982) 10, p. 1
- 82) J. CELADA, R. QUINTERO and M. QUIROGA: *Iron Steel Eng.*, 57 (1980) 1, p. 37
- 83) J. BECERRA and D. YANEZ: *Iron Steel Int.*, 53 (1980) 1, p. 43
- 84) E. J. OSTROWSKI and R. L. STEPHENSON: 前出 7), p. 128
- 85) R. QUINTERO and D. YANEZ: *鉄と鋼*, 68 (1982), S 26
- 86) 溶融還元調査報告書 (日本鉄鋼協会共同研究会原子力部会第 2 小委員会溶融還元 W. G. 編) (1978) [日本鉄鋼協会]
- 87) 中村正和, 徳光直樹: *鉄と鋼*, 67 (1981), p. 480
- 88) H. KATAYAMA and H. KAJIOKA: *Jpn-Swed. Jt. Sympo. Ferr. Metall.*, 2 (1978), p. 84
- 89) H. W. GUDENAU, H. A. FRIEDRICKS, W. WENZEL and E. J. WAGENER: *Stahl Eisen*, 103 (1983), p. 23
- 90) H. W. GUDENAU, W. WERNER, T. E. GAMMAL and G. RATH: *Stahl Eisen*, 103 (1983), p. 485
- 91) K. SADRNEZHAAD and J. F. ELLIOTT: *Iron Steel Int.*, 53 (1980), p. 327
- 92) J. HARTWIG, D. NEUSCHUT and H. F. SEELIG: *Iron Steel Eng.*, 59 (1982) 2, p. 36
- 93) R. DOBSON, W. A. MULLETT and I. G. NIXON: *Ironmaking Steelmaking*, 4 (1977), p. 265
- 94) D. RADKE, D. NEUSCHÜTZ and J. HARTWIG: *Stahl Eisen*, 99 (1979), p. 334
- 95) J. HARTWIG, D. NEUSCHUTZ, D. RADKE and SEELIG: *Stahl Eisen*, 100 (1980), p. 535
- 96) W. D. RÖPKE and G. URBAN: *Stahl Eisen*, 102 (1982), p. 132
- 97) J. HARTWIG, D. NEUSCHÜTZ, D. RADKE and W. D. RÖPKE: *Ironmaking Steelmaking*, 10 (1983), p. 124
- 98) R. H. NAFZIGER and R. R. JORDAN: *Ironmaking Steelmaking*, 4 (1977), p. 39
- 99) R. H. NAFZIGER, G. L. HUNDLEY and R. R. JORDAN: *CIM Bull.*, 70 (1977) 785, p. 155
- 100) A. E. VOLKOV, A. G. SHALIMOV, S. E. VOLKOV and A. F. KON'SHIN: *Steel in USSR*, 8 (1978), p. 507
- 101) 山口隆二, 宮沢憲一, 長 隆郎, 井上道雄: *鉄と鋼*, 68 (1982), S 235, S 236
- 102) R. K. DUBE and A. R. E. SINGER: *Met. Technol.*, 5 (1978) 8, p. 270
- 103) A. R. E. SINGER, S. J. AHIER and R. K. DUBE: *Sheet Metal Industries*, 56 (1979), p. 998
- 104) S. J. AHIER and A. R. E. SINGER: *Iron Steel*

- Int., 52 (1979), p. 381
- 105) S. J. AHIER and A. R. E. SINGER: *Ironmaking Steelmaking*, 8 (1981), p. 137
- 106) 中川龍一, 他 11 名: 研究報告集 2 (1981), p. 1 [金属材料技術研究所]
- 107) 吉松史朗, 他 20 名: 研究報告集 5 (1984), p. 58 [金属材料技術研究所]
- 108) F. H. BAKER and H. K. WORNER: *Alternative Route to Steel* (1971) [The Iron and Steel Inst.], p. 99
- 109) J. ANTOINE, J. ASTIER and C. ROEDERER: 前出 6), R. 21
- 110) U. KALLA, G. H. LANGE and H. D. PANTKE: *Stahl Eisen*, 91 (1971), p. 809
- 111) K. MEYER and G. POST: *Stahl Eisen*, 93 (1973), p. 194
- 112) J. W. BROWN and R. L. REDDY: *Iron Steel Eng.*, 53 (1976) 6, p. 37
- 113) F. OETERS: *Stahl Eisen*, 99 (1979), p. 599
- 114) T. KISHIDA, S. FUJITA, Y. FUKUMOTO, K. MOGI and T. KITAGAWA: *Steel Times*, 208 (1980), p. 137
- 115) J. M. LOMMEL and B. CHALMERS: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 215 (1959), p. 499
- 116) R. D. PEHLKE, P. D. GOODELL and R. W. DUNLAP: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 233 (1965), p. 1420
- 117) R. G. OLSSON, V. KOUMP and T. F. PERZAK: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 233 (1965), p. 1654
- 118) R. JESCHAR and E. MILLIES: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 37 (1966), p. 283
- 119) 小坂岑雄, 養輪 晋: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 983
- 120) 森 一美, 野村宏之: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 347
- 121) G. V. BULGAKOV, V. I. YAVOISKII and V. P. GRIGOR'EB: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1969) 11, p. 28
- 122) 野村宏之, 森 一美: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 28
- 123) M. A. GLINKOV, Yu. P. FILIMONOV and V. V. YUREVICH: *Steel in USSR*, 1 (1971), p. 202
- 124) G. M. GLINKOV, V. Ya. BAKSM, M. Ya. MEDDJIDODJISKII and V. I. SEL'SKII: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1972) 3, p. 62
- 125) V. I. BAPTIZMANSKII, E. M. GOL'DFARB and V. I. SHERTOV: *Steel in USSR*, 2 (1972), p. 784
- 126) J. SZEKERLY, Y. K. CHUANG and J. W. HLINKA: *Metall. Trans.*, 3 (1972), p. 2825
- 127) Y. KIM and R. D. PEHLKE: *Metall. Trans.*, 5 (1974), p. 2527
- 128) M. Ya. MEDDJIDODJISKII, S. M. GRIGORENKO, L. I. XIISCH, A. A. LUIKIN and L. V. REBROV: *Izv. VUZ, Chern. Metall.*, 20 (1977) 12, p. 46
- 129) K. BUSCH and R. JESCHAR: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 49 (1978), p. 437
- 130) O. EHRICH, Y. K. CHUANG and K. SCHWERTFEGER: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 50 (1979), p. 329
- 131) K. SADRNEZHAAD and J. F. ELLIOTT: *Iron Steel Int.*, 53 (1980), p. 327
- 132) H. W. GUDENAU, H. A. FRIEDRICHS and P. K. RADEMACHER: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 52 (1981), p. 261
- 133) K. SADRNEZHAAD: *Iron Steel Int.*, 54 (1981), p. 309
- 134) S. G. BRATCHIKOV, B. Sh. STATVIKOV, V. V. VOLKOV, A. S. MIHAILIKOV and O. I. STZERDAKOVA: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1981) 12, p. 92
- 135) S. G. BRATCHIKOV, B. Sh. STATNIKOV, B. G. LISIENKO, V. V. VOLKOV, A. S. MIHAILIKOV and O. I. STZERDAKOVA: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1982) 4, p. 112
- 136) C. E. SEATON, A. A. RODRIGUEZ, M. GONZALEZ and M. MANRIQUE: *Trans. ISIJ*, 23 (1983), p. 14
- 137) P. K. RADEMACHER and H. W. GUDENAU: *Fachber. Hüttenprax. Metallweiterverart.*, 21 (1983) 4, p. 197
- 138) 桜谷敏和, 森 一美: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 60
- 139) G. W. LLOYD, D. R. YOUNG and L. A. BAKER: *Ironmaking Steelmaking*, 2 (1975), p. 49
- 140) 佐藤彰, 中川龍一, 吉松史朗, 福沢 章, 尾崎太, 笠原和男, 福沢安光, 三井達郎: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 385; 65 (1979), p. 195
- 141) 佐藤彰, 中川龍一, 吉松史朗, 福沢 章, 尾崎太: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 545; 67 (1981), p. 303
- 142) 佐藤彰, 荒金吾郎, 佐久間信夫, 中川龍一, 吉松史朗: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1206
- 143) 佐藤彰, 中川龍一, 吉松史朗, 福沢 章, 尾崎太: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1683
- 144) 白石 裕, 齊藤恒三: 日本金属学会誌, 29 (1965), p. 614, p. 622
- 145) 月橋文孝, 天辰正義, 相馬胤和: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1880
- 146) P. M. SCHURUIGIN, V. N. BORONENKOV, V. I. KRUIK and V. V. REVEDTZOV: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1965) 2, p. 23
- 147) W. O. PHILBROOK and L. D. KIRKBRIDE: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 206 (1956), p. 351
- 148) V. V. KONDAKOV and D. I. RUIDJONKOV: *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1963) 1, p. 17
- 149) G. S. ERSHOV and E. A. PONOVA: *Izv. AN, SSSR, Met. Gor. Del.* (1964) 1, p. 32
- 150) S. V. SHAVRIN, I. N. ZAXAROV and G. S. KULIKOV: *Izv. AN, SSSR, Met. Gor. Del.* (1964) 1, p. 26; (1964) 2, p. 31; *Izv. VUZ, Chern. Metall.* (1964) 5, p. 7
- 151) S. K. TARBY and W. O. PHILBROOK: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 239 (1967), p. 1005
- 152) W. OELSEN and H. G. SCHUBERT: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 40 (1969), p. 173
- 153) H. P. BEER, H. J. ENGELL and H. KRAINER: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 41 (1970), p. 805
- 154) F. FUN: *Metall. Trans.*, 1 (1970), p. 2537
- 155) 須賀田正泰, 杉山 喬, 近藤真一: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1363
- 156) 佐々木康, 相馬胤和: 鉄と鋼, 64 (1976), p. 376
- 157) E. SCHÜRMAN and E. BEPLER: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 48 (1977), p. 217
- 158) C. BORGIANI: *Ironmaking Steelmaking*, 5 (1978), p. 61

- 159) 佐々木康, 岡山恭典, 相馬胤和: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 367
- 160) Yu. P. NIKITIN and V. G. KOVALENKO: Izv. VUZ Chern. Metall., 12 (1969) 10, p. 9
- 161) 川合保治, 森 克巳: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 932
- 162) I. D. SOMMERVILLE, P. GRIEVESON and J. TAYLOR: Ironmaking Steelmaking, 7 (1980), p. 25
- 163) K. UPADHYA, I. D. SOMMERVILLE and P. GRIEVESON: Ironmaking Steelmaking, 7 (1980) 1, p. 33
- 164) 佐藤 彰, 荒金吾郎, 広瀬文雄, 中川龍一, 吉松史朗: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 384
- 165) 科学技術の開発と新しい社会(岩波書店編集部編) (1983) [岩波書店]
- 166) 稲垣悦郎: 工業加熱, 18 (1981) 2, p. 25
- 167) R. G. QUINTERO: Iron Steel Int., 48 (1975) 12, p. 437