

わが国の鉄鋼業とエネルギー

Steel Industry and Its Energy Consumption in Japan.

小 門 純 一*
Jun-ichi Kokado

1. 緒 言

わが国の粗鋼生産高は1958年には僅か1,257万トンにすぎなかったが、それ以来平均年率約17%で増加を続け、1973年には史上最高の11,900万トンに達した後徐々に減少し、昨年は1億トンの大台を割り、9,950万トンとなった^{1), 2)}。一方、熱間圧延鋼材の生産高はこの間、950万トンから10,020万トンへと増加し、1980年に最高の10,057万トンとなったがそれ以降市況の悪化とともに減少し、昨年は9,092万トンであった¹⁾。これらの値から、熱間圧延鋼材の生産高をその年の粗鋼生産高で除した鋼材歩留りを求めると、1958年には75.7%であったものが1973年には85.9%、1980年には92.8%、そして昨年は93.8%と着実に増加している。この原因は各種熱間圧延技術の発達と新鋭設備への切換えによる所も少なくないが、1960年から始った連铸設備の増強による連铸比率の増加に依存する所が大きい。造塊の連铸化は鋼材の歩留向上をもたらすと同時に省エネルギー的効果も大きいので、石油危機の始った1973年以降におけるわが国の連铸設備の新設・増強は目覚ましいものがあり、現在の連铸比率は約82%に達している。

わが国鉄鋼業の戦後の技術的発展を年代毎に大別し、その間における代表的な技術で特長づければ、1950年代は原料の整粒強化と自溶性焼結鉄の開発、1960年代は高炉の大型化とLD転炉の操業技術の確立、1970年代は連続鑄造技術の改善、1980年代は直送圧延および幅大圧下圧延方式の開発の時代といえよう。これらの技術はいずれも、品質、生産性、歩留りの向上と生産システムの合理化を計るためのものであるが、同時にわが国の総消費エネルギー約3,800兆kcal/年の内約14%のエネルギーを使用する鉄鋼業の省エネルギー対

策にも有益なものである。

2. 製鉄工程の省エネルギー

高炉操業に必要なエネルギーは製鉄所全体の所要エネルギーの約63%を占め、その内の81%がコークス、重油、微粉炭などの燃料である。したがって、高炉操業における燃料比低減は、鉄鋼業の省エネルギーを計る場合、常に主要な課題である。図-1は1952年以来の燃料比の推移を示すもので、当時900 kg/t-REであった燃料比が1979年には465kg/t-REにまで低下しているが、その後の石油価格の上昇に伴うオイルレス操業の結果、再び上昇し、昨年度は約490kg/t-REとなっている²⁾。(REはRoheisen, すなわち鉄鉄)

一方、コークス炉および高炉で発生するCガスとBガスは製鉄所内の加熱炉および熱風炉用燃料として使用されているので、燃料比の低下はこれらの発生ガス量の減少をもたらし、所内のエネルギー・バランスを崩すことになる。すなわち、一般的には、燃料化は少ない方が良いが、その適正值は各製鉄所の原料事情に

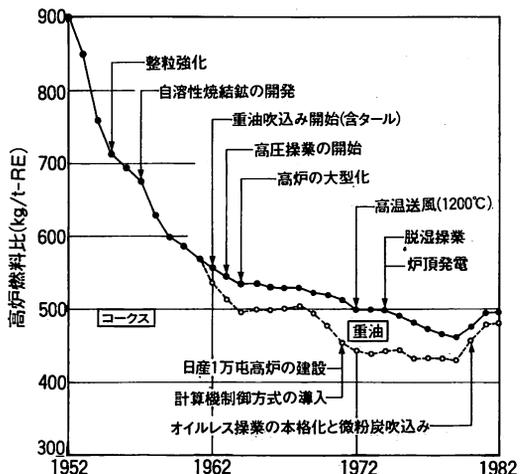


図-1 わが国の高炉燃料比の推移

* 京都大学工学部資源工学科加工設備学講座教授

〒606 京都市左京区吉田本町

よって異なることとなる。わが国で行われてきた燃料比低減の対策とその効果を開発された年度順に述べると大略つぎのようである。

2.1 高炉用原料の整粒強化

鉄鉱石およびコークスの十分な整粒は炉内充填層内の通気性の改善による熱風量の増加、炉内充填物の均一降下および熱風と炉内充填物との間の熱交換性の向上をもたらす。また、鉱石粒径の減少はその被還元性を高め、出銑比の向上と燃料比の低下をもたらす。1955年から1961年の間に140kg/t-REもの燃料比の減少を可能にしたのは、1953年から始まった整粒設備の新設・強化によるところが大きい。現在、わが国の塊鉱石および自溶性焼結鉱の粒度は10～25mmで、その平均粒径は約15mm、コークスのそれらは30～100mmおよび52mmである。なお、この間に行われたコークスの潰裂強度向上による炉内の通気安定性の効果も無視することはできない。

2.2 自溶性焼結鉱の開発

微粒鉄石を焼結して高炉用原料とする焼結法は古くから用いられていた。わが国でも1950年頃から増加し始めた微粒鉄石処理のためこの焼結法の研究が行われ、1957年頃に自溶性焼結法の技術が確立された。この方法の特徴は、微粒鉄石とブリーズとから成る焼結用原料中に、従来高炉内に挿入されていた造滓剤である石灰を混入し、焼結過程で発生する熱量でその分解熱をまかなう点にある。焼結鉱を自溶化することは、従来高炉内で必要であった石灰石の分解熱に相当する分だけ燃料比を低下できること、焼結過程で形成される $n\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ により焼結鉱の高炉内での被還元性を向上させること、塊鉱に比べ、炉内の通気性を改善できることなどを可能とし、高炉の燃料比低減に極めて有効である。

焼結に適さない微粉鉄石はペレットとして使用されるが、このペレットの自溶化に関する研究にも多大の努力が払われ、ペレットの品質は大幅に改善されるようになった。しかし、ペレットの使用割合が増加すると炉内、特に炉腹部からシャフト部にかけての横断面内の温度ピーク位置が炉壁に近づく外部操業となり、棚吊りや炉壁の損傷を招き易くなるので、その使用割合を15～20%以下に保つことが、安定した高炉操業上望ましい。

2.3 送風温度の上昇と重油吹込み

整粒された多量の自溶性焼結鉱の使用により炉内の通気性が確保されるようになった結果、熱風温度の

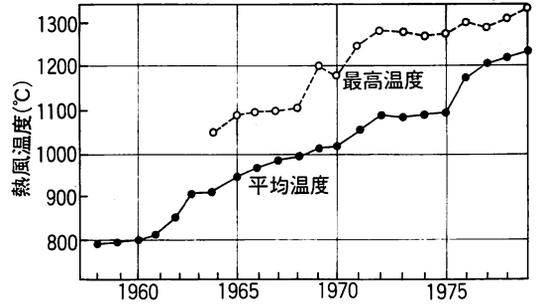


図-2 わが国における熱風温度の推移

上昇が可能となり高炉の作業成績は向上した。すなわち、温度範囲900℃～1,300℃において、熱風温度を100℃増加させることは10～15kg/t-REのコークス比の低下と0.02～0.06 t-RE/m³・dの出銑比の増加をもたらすことが明かになった。図-2はわが国の熱風温度上昇の推移を示すものである³⁾。熱風温度の上昇によってもたらされる羽口先温度の過度の上昇を抑えるため、最初は送風中の水分を増加させていたが、1962年頃からは重油の吹込みによって温度補償が行われるようになった。すなわち送風中水分を10g/Nm³増加さすか、あるいは重油を20kg/t-RE羽口から吹込むことによって熱風温度を80℃高めることが可能であることが明らかとなった。当時の重油価格はコークスのそれより20%程安く、しかも、1kg/t-REの重油吹込みにより、大略1.2kg/t-RE、多い場合には1.5kg/t-REのコークス比減となることが判ったので、重油の吹込み量は急速に増加した。この結果生じた羽口先温度の低下は送風中の酸素富化により補償されたが、過度の重油吹込みは溶融帯の最高温度位置を炉壁に近づけるため、棚吊りを惹起し易くすることになる。最近では、重油価格が上昇したため重油吹込みは殆んど行われなくなり、重油の代りに安価な微粉炭の吹込みが研究され、現在2本の高炉でこれが実現している。この場合にも重油の場合と同様、過度の吹込みは炉壁の損傷を招くおそれがあり、適切な量は45kg/t-RE、あるいは全燃料比の10%程度以下である。

2.4 高圧操業

上述の種々の方法によって実現したコークス比の低下は必然的に炉内のコークスに対する鉄鉱石比率を増加させ、炉内の通気性を劣化させることとなった。このことを回避するため1962年から高炉の高圧操業が行われるようになった。この方法は第二次世界大戦中に米国で出銑比を高めることを目的として開発されたものである。この発想は、炉内のコークスと反応する酸

素量を増加させること、炉内の熱風の流速を低下させ、流速および温度分布を均一にして炉内ガスと鉱石の接触時間を長くし得ることに基づいたものである。操業実績によれば、1.0気圧の炉頂圧の増加により、0.02~0.05t-RE/m³・dの出銑比の増加と10~15kg/t-REのコークス比の低減が可能となった。しかし、炉内圧の上昇とともに高圧化の効果は低下するので、3気圧以上の昇圧は通常経済的ではない。

2.5 調湿操業

安定した高炉操業の基本は高炉への挿入物の品質のおよび量的変動をできるだけ少なくすることである。しかし、送風中の水分は四季を通じて相当変動する。以前は冬季空気中の水分が減少し、そのため羽口先温度が上昇し、それによってしばしば棚吊り回数が増加した。この棚吊り増加をさけるために冬期には送風中に水分を添加して増湿することが行われていた。この方法は当然燃料比を増加させるので1973年の石油危機以後は送風中の水分を脱湿することによって年間を通じて送風中水分を一定にする方法が研究され、1974年から実行されるようになった。脱湿による羽口先温度の上昇を抑えるには、送風温度の低下や微粉炭の吹込みなどの方法が取られねばならない。また、脱湿のためにもエネルギーが必要となるのでこの方法の省エネルギー効果は余り大きくない場合が多い。

2.6 高炉操業における最低燃料比について

図-1が示すように、わが国の燃料比は年々低下し、

表1 各因子が燃料比、出銑比および羽口先温度に及ぼす影響

因子	燃料比の低下 kg/t-RE	出銑比の増加 t-RE/m ³ d	羽口先温度の上昇 °C	適用範囲
重油および微粉炭吹込み量 10 kg/t-RE	10-14	0.01-0.03	重油 -(40-50) 微粉炭 -(20-25)	(0-50) kg/t-RE
熱風中水分 -10 g/Nm ³	6-10	0.03-0.05	60	(0-30) g/Nm ³
熱風温度 +100°C	10-15	0.02-0.06	84	(900-1,300) °C
酸素富化 1.0%	4-6	0.06-0.1	64	(0-2.5) %
炉頂圧力 1.0kg/cm ²	10-15	0.02-0.05		(1-3) atf.
自溶性焼結鉱 量の増加 +10%	10-15	0.04-0.06		
ペレット使用 量の増加 +10%	5-10	0.03-0.05		(0-20) %
整粒強化 (8-40)→(8-30)mm (8-30)→(10-25)mm	10-13 5-7	0.05-0.07 0.03-0.04		
5mm以下の鉱 石量の減少 -1%	4-7	0.02-0.04		(0-5) %
炉内流速の低下 -0.1m/s	2.5-3	0.01-0.02		(2.5-5.0)m/s

1979年には465kg/t-REになっている。理論的な燃料比は402kg/t-REであるとされているが、現実的には430~440kg/t-REが高炉操業における最低燃料比となるであろう。表1は出銑比、羽口先温度およびコークス比に及ぼす各種因子の影響を一括して示すものである。

2.7 損失エネルギーの再利用

製鉄工程において、投入されたエネルギーの内約25%は鉄鉱石の還元、約9%は溶銑の顕熱として転炉へ供給され、約14%はコークス炉ガス(Cガス)、16%は高炉ガス(Bガス)として有効に利用されている。すなわち、高炉へ投入されたエネルギーの内約64%は従来から有効に利用され、36%が損失エネルギーとなっていた。この損失エネルギーを有効に再利用する方法が、特に石油危機以来熱心に検討され、実行に移されつつある。この代表的なものは高炉炉頂圧発電法である。この方法には使用タービンにより、軸流式と輻流式とがあるが、最初に稼動したのは1968年にソ連で設置された軸流式のものであった。この方式がわが国に導入され、稼動したのは1976年である。一方、輻流式のもは1969年フランスで実用化され、わが国で稼動したのは1974年である。その後、設備の増設が行われ、1982年には総基数32基、総出力は約36万kW、年間発電量は18億kWhとなっている²⁾。この設備の建設費は、その規模により異なるが、通常発電電力費によって2.5~3.0年間で償却できる程度である。

また、コークス炉から出た高温コークスの顕熱を利用した発電法も実用化され、現在14基が稼動していて、この方法による年間発電量は約2億kWhに達している²⁾。

さらに、高温焼結鉱や高温スラグの顕熱利用法も研究されているが、未だ実用化には至っていない。

3. 転炉製鋼工程でのエネルギー

転炉操業に必要なエネルギーは粗鋼屯当り、蒸気が約0.3万kcal、電力が約6万kcal、酸素およびCOガスとして約8.4万kcalで、所要総熱量は約14.7万kcal程度である。一方、転炉においては供給されるO₂と溶銑中のCが反応してCOガスとして排出されるが、その総熱量は、溶銑配合比80%のとき、約22万kcalとなる。このエネルギーを回収する方法の代表的なものがOG法と呼ばれているもので、その回収率は約90%である。

出鋼された溶鋼は約34万kcal/t-RSの顕熱を持つので、粗鋼から製品への歩留りを高めることは省エネルギー対策上極めて重要である。図-3は造塊法と連続鋳

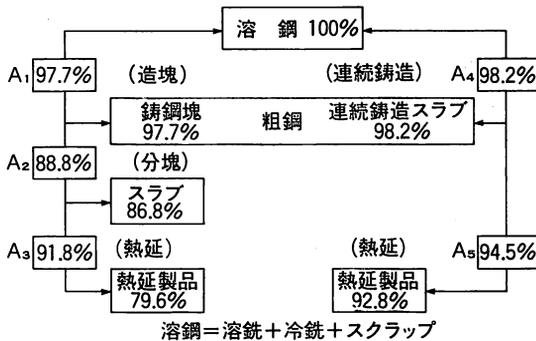


図-3 マテリアルフロと工程間の歩留り

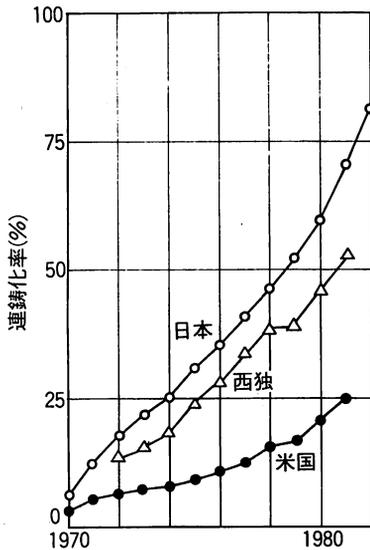


図-4 連続化率の推移

造法における歩留りの一例を各工程毎に示すもので、前者の場合の歩留りは $A_1 \times A_2 \times A_3 = 79.6\%$ であるのに対し、後者の場合には $A_4 \times A_5 = 92.8\%$ となっている。

このように連続铸造法は造塊工程の簡素化と連続性をもたらすばかりでなく、エネルギー対策上にも有効であるので、図-4に示すように、1970年頃からわが国の連続化率は急速に上昇し、1982年には82%となった¹⁾。さらに、従来は高温鑄片を一端冷却し、所要のきず取り後加熱炉に挿入する方法がとられていたので、高温鑄片の顕熱はすべて熱損失となった。この熱損失を緩和するために開発されたのが、加熱炉への高温鑄片挿入 (Hot Charge) であり、これが更に進んで直送圧延技術となった。このように鑄片を冷却することなく加熱炉へ、さらに進んで直接圧延工程へ送るためには表面は勿論のこと内部にも欠陥のない無手入れ鑄片の製造技術が確立されていなければならない。変曲式連続铸造法において最初に行われたのは圧縮铸造法の開

発と、これを実現するためのロール間隔の短縮であった。すなわち、スラブ内に発生する内部割れの大半は曲げ戻し部で発生する引張応力によることが明らかになったので、その応力を打消すだけの圧縮応力をピンチロールによって負荷することにより軽減しようとするのが圧縮铸造法である。この方法により引張応力による内部割れは激減したが、圧縮力の増加は必然的にロール間のバルジング量を増加させ、これによる新たな表面および内部欠陥を招くことになった。したがってバルジングを押えるため、当初500mm程度あったロールピッチが、最近では280mm程度まで短縮され好結果を得ている。また、最近では多点矯正による曲げ戻しが行われているが、この場合でも圧縮铸造法は有効で、特に高速铸造の場合その効果は顕著である。

鑄片の周囲に発生する柱状晶層を減少させるため、および中心偏析を避けるためには電磁攪拌が有効である。また、鑄片の品質を向上するためには铸造速度およびモールド内の湯面を一定にすることが不可欠な条件となる。この湯面制御のためのセンサとしては、以前はモールド壁面に埋込まれた熱電対が用いられ、この場合の制御精度は約 ± 5 mm であった。最近では渦流センサと親鍋およびターンディッシュにスライディングノズルを採用することにより ± 1.5 mm 程度の微調整が可能となっている。その他、連続铸造技術に対しては多くの改善がなされているが、これらは本報に直接的な関連が少ないので省略する。

4. ホットストリップミルにおける省エネルギー

ホットストリップミル、いわゆる熱延工程で消費されるエネルギーは、大部分が所内で発生するガスで賄われるスラブの加熱エネルギーと圧延に使われる電力エネルギーとから成る。従来、前者はスラブ1トン当り約50万kcal、後者は、熱量換算で約12万kcal程度で、製銑、製鋼工程で使用されるエネルギーに比べれば僅かなものである。しかし、1973年以来、省エネルギーにも繋がる多くの技術開発と改善がなされた。すなわち加熱炉の熱効率率は約40%から55~60%にまで向上してきた。その原因は、予熱帯の炉長延長、炉壁の断熱強化とその表面の輻射率の向上、バーナの燃焼効率の改良などによるものであるが、一方、自主管理活動の成果による所も極めて大きい。さらに、熱延工程の改善による所要加熱温度の低下による熱損失の減少の効果も見逃すことはできない。この所要加熱温度は最終圧延温度が、その材料の A_3 変態点温度以上になるよう

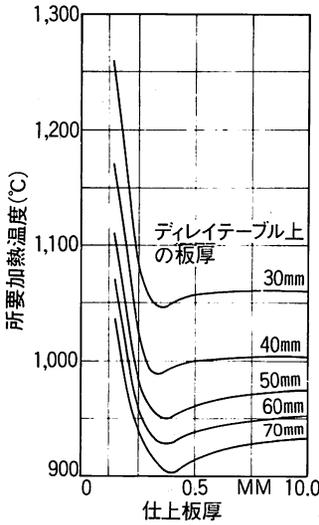


図-5 仕上げ板厚と所要加熱温度との関係 (スラブ単重20 ton/mの場合)

に設定される。鋼のA₃変態点は炭素含有量によって異なるが、一般には、平均的な熱延鋼材の炭素含有量(C) = 0.16%に対する温度830°Cが取られることが多い。この最終圧延温度830°Cを確保するための所要加熱温度は、仕上げ板厚が薄いほど、また、圧延設備の規模が大きく、取扱うスラブ単重の大きいほど、また、ディレイ・テーブル上の板厚の薄いほど大きくなる。図-5は仕上げ板厚およびディレイ・テーブル上の板厚と所要加熱温度の関係の一例を示すもので、図から判るように、仕上げ板厚が2.5mmより薄くなるにつれ、所要加熱温度は急速に上昇す

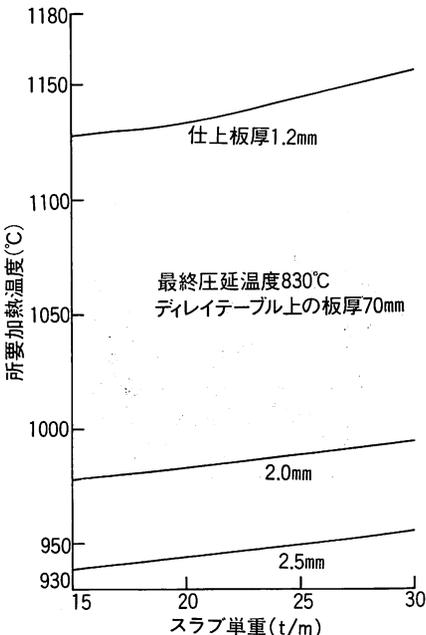


図-6 スラブ単重による所要加熱温度の変化

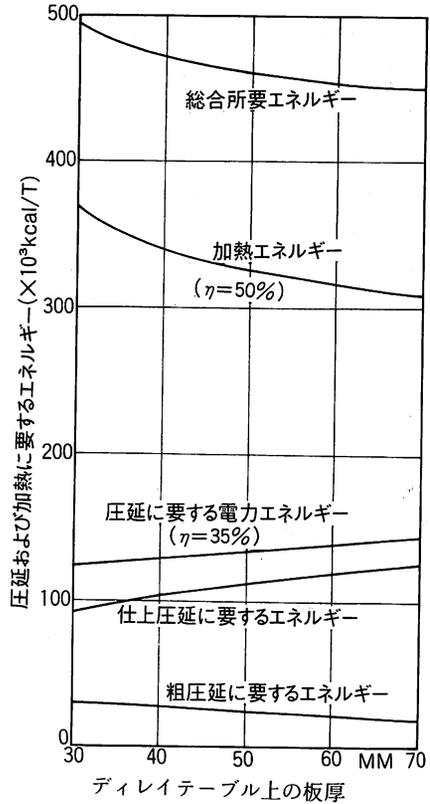


図-7 ディレイ・テーブル上の材料厚さと圧延および加熱エネルギーの関係 (仕上げ板厚2.3mm, 最終圧延温度830°Cの場合)

る。また、ディレイ・テーブル上の板厚が大きくなるにつれて、その効果は低下するが、所要加熱温度は大幅に減少する。図-6は最終圧延温度830°C、ディレイ・テーブル上の板厚を70mmとしたときの、スラブ単重および仕上げ板厚と所要加熱温度の関係の一例を示すものである。このように、ディレイ・テーブル上の板厚を大きくすることにより、例えば、従来の30mmから60mmにすることにより、2.5mm以上の仕上げ板厚の場合の加熱温度を約1,100°Cから950°C迄低下させうることとなった。このことは、単に加熱炉の熱効率を高める上に有効であるばかりではなく、連続製造されたスラブを加熱炉を通すことなく、直接熱間圧延することを可能にするものである。

図-7は230mmの厚さの単重20tのスラブから、仕上げ板厚2.3mmの熱延コイルを圧延する際の必要総エネルギーとディレイ・テーブル上の板厚との関係を示すものである。ただし、加熱炉の熱効率50%、圧延用電力を熱エネルギーに換算する際の変換効率35%と仮定されたものである。図から判るように、ディレイ・テーブル上の板厚が大きくなるにつれ、所要加熱温度は低

下するので、加熱エネルギーは減少する。一方、加熱温度の低下は鋼の変形抵抗の増加をもたらすので、圧延エネルギーは増加する。しかし、加熱エネルギーの減少が圧延エネルギーの上昇を上廻るので、必要総エネルギーは減少することになる。もし直送圧延が行われるならば、例えば、ディレイ・テーブル上の板厚60mmのとき必要であった約32万kcalの加熱エネルギーが、スラブ端部の部分加熱に必要な数万kcalですむことになるので、工程の簡略化のみならず、その省エネルギー効果も大きい。

5. 結 論

わが国鉄鋼業の粗鋼1屯当りの消費エネルギー量は過去10年間、市況の悪化による操業率の低下にも拘らず年々着実に減少し、その減少率は8~10%に、その減少量は、製鉄所の規模、後工程の種類、製造鋼種の

差などにより異なるが、50~65万kcal/t-RSに達した。このような省エネルギーは多くの設備の改良と新設および新しい技術開発によって達成されたもので、その全容を本報告中に盛り込むことは到底不可能である。したがって、本文中には、著者が直接的であれ、間接的であれ、何らかの形でかかわったことが主として述べられているにすぎない。最近、エネルギー事情が幾分緩和されたとはいえ、鉄鋼業における省エネルギー対策は永遠の課題であるので、今後さらに研究が進められることであろう。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼連盟編；鉄鋼統計要覧
- 2) 日本鉄鋼連盟；1982年の内外鉄鋼業
- 3) 鉄と鋼 No.5 vol.61 476頁

