

## 特集

## 産業別エネルギーフロー

## 鉄鋼業におけるエネルギーフロー

## Energy Flow in Iron and Steel Industry

坂田直起\*

Naoki Sakata

## 1. 我が国の鉄鋼生産の推移

鋼の製造法には平炉法、転炉法、電炉法がある。平炉法はスクラップあるいは銑鉄を重油などの燃焼熱で溶かし鋼に精錬するもので、転炉が導入されるまでは平炉法が代表的な製法であった。しかし生産性の高い転炉の導入とともに衰退した。転炉法は溶銑に純酸素を吹きつけて精錬し鋼とするため、高炉を有する製鉄所でのみ生産が可能であり、高炉-転炉を組み合わせで鉄鋼を製造する製鉄所を一貫製鉄所と呼ぶ。電炉法はスクラップを電気のアーク熱で溶かし鋼に精錬するもので銑鉄（高炉）を必要とせず、電炉単独で操業し得るので、一貫製鉄所に対して電炉メーカーとも呼ばれる。電炉鋼は一貫製鉄所内でも一部製造されるが、大部分はこの電炉メーカーによって生産される。一貫製鉄所と電炉メーカーを合わせて鉄鋼業と呼ぶ。

図-1に1946年から近年までの製鋼法別粗鋼生産量の推移を示す<sup>1)</sup>。

転炉が導入された1960年代は年率約15%で粗鋼生産量が伸び、鉄鋼業全体としては1973年に史上最高の1

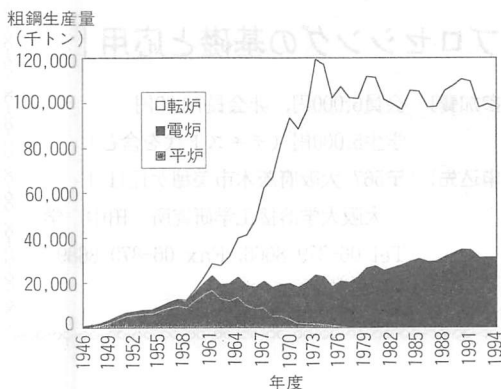


図-1 粗鋼生産量の推移

億2,000万トンを生産した。しかし1974年と1979年の二度の石油危機以降我が国は安定経済成長期に入り、粗鋼生産量は1億トン前後で推移している。

粗鋼生産の内訳は1970年代初めには転炉鋼80%、電炉鋼20%の比率であったが、近年は前者70%、後者30%と電炉鋼の比率が増加している。

一貫製鉄所では基本的に石炭エネルギーのみで成り立つと言われ、電炉鋼は専ら購入電力に依存するので、ここでは一貫製鉄所と電炉メーカーに分けて述べる。

## 2. 一貫製鉄所におけるエネルギーフローの概要

一貫製鉄所の工程は

- 1) 石炭（原料炭）を乾留しコークスを製造するコークス部門
- 2) 鉄鉱石を予め処理する焼結部門
- 3) 鉄鉱石をコークスで還元し銑鉄を製造する高炉部門
- 4) 溶けた銑鉄を酸化精錬し、溶けた鋼を製造する転炉部門
- 5) 溶けた鋼を連続的に鋳造し、圧延用鋳片を製造する連続鋳造(CC)部門
- 6) 鋳片を熱間で圧延して最終製品の鋼材（熱延コイル、厚板、棒鋼など）に圧延加工する一次圧延部門
- 7) 一次圧延製品を基にさらに加工し、最終製品（冷延鋼板、表面処理鋼板、継ぎ目無し鋼管など）とする二次圧延部門

から成る。ここで、1)～3)を製銑部門、4)～5)を製鋼部門とも呼び、粗鋼とは圧延前の鋳片、鋼片を指す。

図-2にエネルギー変換に係わりが深い製銑、製鋼部門を中心にしたエネルギーフローを示す<sup>2)</sup>。これは1991年度上半期における日本の一貫製鉄所の約半数の実績値を平均したものである。各数値は生産される粗鋼1トンあたりに入出力するエネルギー量(Mcal)

\* 財団法人エネルギー経済研究所 総合研究部第7研究室室長  
〒105 東京都港区虎ノ門4-3-13 秀和神谷町ビル

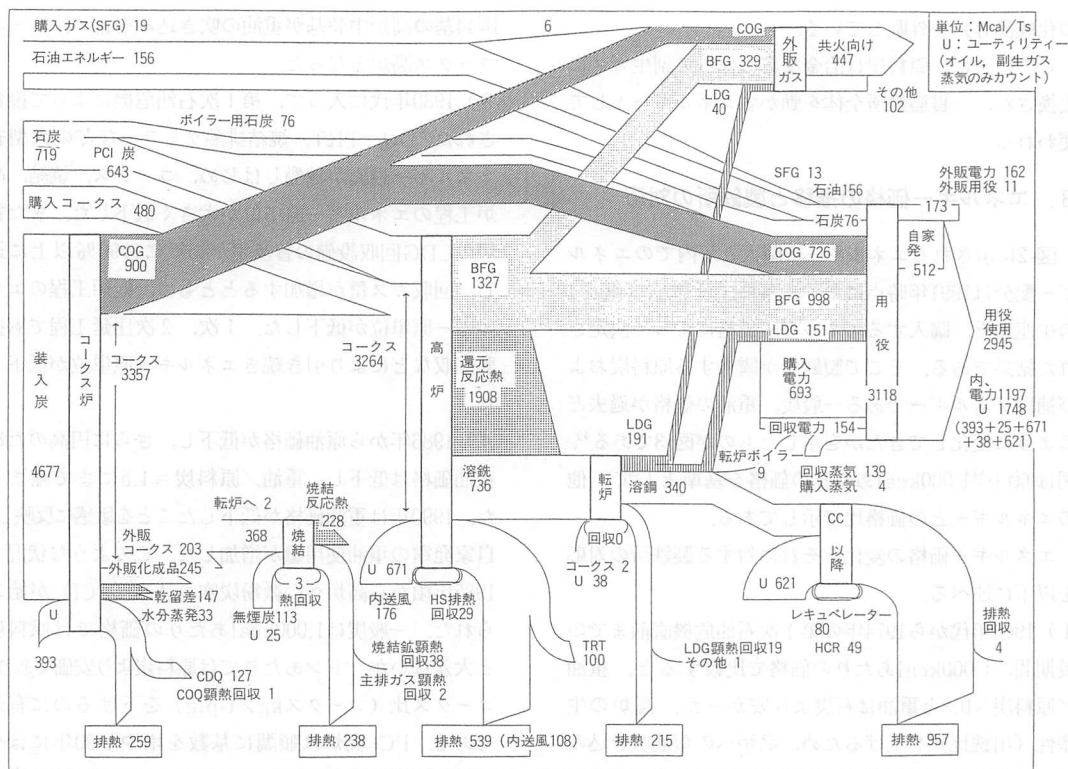


図-2 一貫製鉄所のエネルギーフロー<sup>2)</sup> (粗鋼生産量: 19,378 千トン/半期)

示してある。図に従って、購入したエネルギーが製鉄所の中かでどのように変換され、それが使用されているかを冶金反応と関係づけて説明する。

1) コークス部門: 原料炭はコークス炉に装入され、乾留される。その結果コークスとコークスガス(COG)に変換され、同時に、粗軽油、タールが得られる。原料炭は一般炭のように含熱量のみならず、強粘結性であること、COG発生量に関係する揮発成分含有量(V.M)などによって評価される。なお、図にはコークス炉を持たない製鉄所が購入するコークスも記されている。

コークス炉の操業に投入されるエネルギーはUで表わされ、この工程から出る排熱量も記されている(以下他の工程も同様)。

2) 高炉部門: コークスと鉄鉱石(および粉状の鉄鉱石を前もって焼き固めた焼結鉱)は高炉の炉頂から連続的に交互に装入される。高炉下部の羽口からは高温の空気が吹き込まれ、コークスを燃焼させて鉄鉱石を還元する。高炉での還元反応は吸熱反応であるため、エネルギー消費量が製鉄プロセス中もっとも大きい。図のPCIはコークスの補助燃料として、微粉状の一般炭が羽口から吹き込まれていることを示す。

還元反応によって鉄が生成し、これに炭素、珪素などが移行して溶銑となる。炉底部に溜まった溶銑はほぼ連続的に抜き出され次工程の転炉へ運ばれる。またこの反応で生成した高炉ガス(BFG)は炉頂から回収される。

3) 転炉部門: 転炉では溶銑に純酸素を吹きつけて銑鉄中の炭素、珪素などを酸化反応によって除去する。この反応は発熱反応のためエネルギーの投入は殆ど必要としない。銑鉄中の炭素と吹きつけた酸素により転炉ガス(LDG)が発生し回収される。

このように、コークス製造過程、および高炉、転炉での冶金反応によって多量のガスが副生成物として発生する(これらを副生ガスと呼ぶ)。図によれば、製鉄所に投入される石炭系(原料炭、購入コークス、PCI用一般炭)のエネルギー(5800Mcal)の内、33%(1900Mcal)が鉄鉱石の還元反応に用いられ、42%(2400Mcal)が副生ガスとして回収される。一貫製鉄所はこの副生ガスを燃料として、さらには自家発電所で電力に変換して「CC以降」すなわち圧延部門に配分している。そして不足分(図では石油系エネルギー、電力)を補助エネルギーとして外部から購入し、余剰のエネルギー(図では電力、副生ガスおよびコーク炉

の化成品等)を外販している。

このように、原料炭は冶金反応に伴って副生ガスに変換され、一貫製鉄所全体を動かすエネルギーとして使われる。

### 3. エネルギー価格の推移と製鉄所の対応

図-2に示されるエネルギーの購入と所内でのエネルギー配分は1991年時点における各種圧延製品(鋼材)の生産量と、購入するエネルギー価格によって決定された結果である。そこで製鉄所が購入する原料炭および補助エネルギーである一般炭、重油の価格が過去どのように変化してきたかを示したものが図-3である<sup>3)</sup>。図は原料炭1,000kcalあたりの価格を基準として、他のエネルギーとの価格比で示してある。

エネルギー価格の変化とそれに対する製鉄所の対応を以下に述べる。

1) 1960年代から1974年の第1次石油危機直前までの長期間、1,000kcalあたりの価格で比較すると、重油/原料炭 $\approx 0.8$ と重油は石炭より安かった。高炉の生産性(出銑比)を上げるため、高炉への重油吹き込み量が拡大した。重油はまた各加熱炉、ボイラーでの補助燃料としても使われた。

2) 1973年の第1次石油危機で重油価格は2.2倍に急騰し、重油/原料炭 $\approx 1.1\sim 1.2$ とそれまでと逆転した。さらに1979年の第2次石油危機で重油/原料炭価格比は2.3倍まで拡大した。

製鉄所では第1次石油危機直後から、加熱炉などの燃焼管理の強化による石油燃料の節約が始められた。また高炉においては、大型高炉でどこまで吹き込み重油がカットできるかは世界でも前例がなかったため、重油量を削減するテストから始められ、1981年には全

国44基の高炉中43基が重油の吹き込みを止め、オールコークス高炉となった。

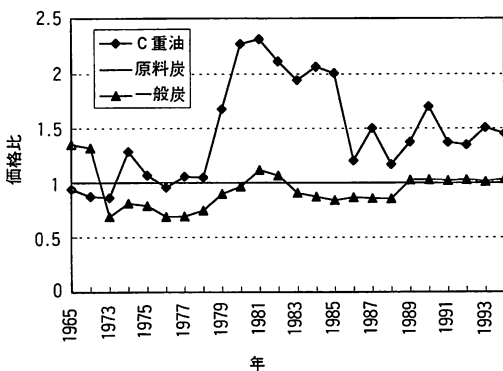
3) 1980年代に入って、第1次石油危機によって投資されたCDQ、TRT、焼結排熱クーラーなどの大型省エネルギー設備が稼働しはじめ、コークス、焼結、高炉工程のエネルギー原単位が大きく低下した。また転炉のLDG回収設備の普及率が85年には90%以上に達し、回収ガス量が増加するとともに、転炉工程のエネルギー原単位が低下した。1次、2次圧延工程でも排熱回収などにより引き続きエネルギー原単位が低下した。

4) 1986年から原油価格が低下し、さらに円高のため重油価格は低下し、重油/原料炭 $\approx 1.5$ にまで縮まった。1990年は重油価格が低下したことを敏感に反映し、自家発電の重油使用量が増加した。このような状況で1985年頃から高炉への微粉炭吹き込み(PCI)が始められた。一般炭は1,000kcalあたりの価格では原料炭と大差ないが、トンあたりでは原料炭より安価であり、コークス比(コークスkg/t-pig)を下げるのに有効である。PCI高炉は順調に基数を増やし90年には全国34高炉中21基にまで普及し、吹き込み量も次第に増加しつつある。

### 4. 総合エネルギー原単位の推移

製鉄所全体のエネルギー消費量を表す指標として粗鋼トンあたりの総合エネルギー原単位が一般に用いられる。これはある期間内に製鉄所全体で消費した一次エネルギー量(電力は1kWh $\approx 2,450$ kcalで換算)をその期間内に生産した粗鋼量で割った値である。この場合、鋼種構成、鉄銑/粗鋼比、稼働率など、製鉄所のエネルギー使用量に係わる要因(生産構成)が製鉄所間で異なるため、直接比較することはできない。しかしエネルギー消費量をマクロ的に扱うには便利でありしばしば使用される指標である。

図-4に日本全体の一貫製鉄所を一つの事業所と見て、粗鋼トンあたりの総合エネルギー原単位の推移を示す<sup>4)</sup>。この値は年度によって生産構成が変化しているため、省エネルギーの効果を直接見るができない。そこで、1973年を基準として、対象とすべき年度(例えば90年度とする)の各工程の生産量に73年度の各工程エネルギー原単位を乗じ、対象年度(90年度)の粗鋼量で割ったものを補正エネルギー原単位とする。この値と実際の総合エネルギー原単位(実績エネルギー原単位と呼ぶ)とを比較することで省エネルギー量を



(原料炭1,000kcalを基準とする)

図-3 エネルギー価格比の推移

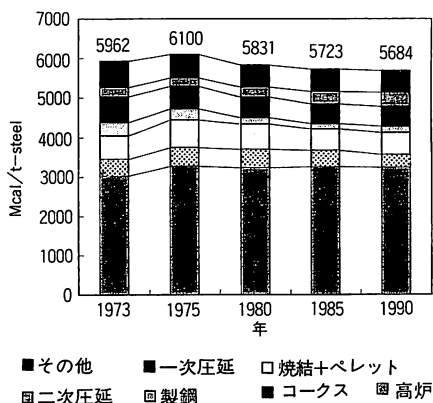


図-4 総合エネルギー原単位の推移<sup>4)</sup>

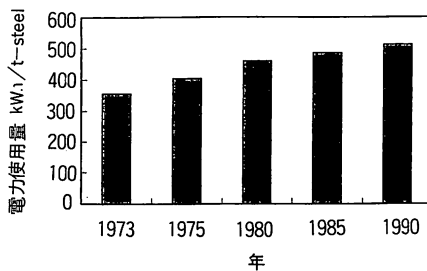


図-5 粗鋼トンあたりの電力使用量の推移<sup>4)</sup>

評価することができる。表1に生産構成差を除いた省エネルギー量の推移を示す<sup>4)</sup>。これによると1990年度では1973年度に比較して18% (1271Mcal/t) の省エネルギーが達成されたことが判る。省エネルギー効果の大きいものから述べると

- ・コークス工程：CDQによる蒸気又は電力回収 (197 Mcal/t-steel)
- ・焼結工程：焼結燃料と添加コークスの低減および排熱回収 (188Mcal/t-steel)
- ・高炉工程：高炉燃料の低減，TRTの設置による電力回収 (216Mcal/t-steel)
- ・製鋼工程：転炉ガス，蒸気回収，連続铸造比率の増加 (70Mcal/t-steel)
- ・一次圧延：加熱燃料の低減 (214Mcal/t-steel)
- ・二次圧延：酸洗蒸気，焼鈍炉燃料の低減 (133Mcal/t-steel)
- ・その他：コークス乾留熱量差の低減，自家発電効率の向上 (251Mcal/t-steel) 等である<sup>4)</sup>。

総合エネルギー原単位は以上のように低減してきたが，一方，粗鋼トンあたりの電力使用量については図-5に示すように増加してきている。これは環境対策設備の運転動力や電力原単位の高い二次圧延製品の生産量が増加しているためである<sup>4)</sup>。

表1 生産構成差を除いた省エネルギー量の推移<sup>4)</sup>  
単位 (Mcal/t-steel)

年	1973	1975	1980	1985	1990
実績原単位	5926	6100	5831	5723	5684
生産構成補正原単位	5926	6331	6717	6972	6955
省エネルギー量	-	230	885	1247	1271
省エネルギー低減率%	-	3.6	13.2	17.9	18.3

### 5. 購入エネルギーの変化によるエネルギーフローの変化

以上に述べたような省エネルギーの効果と製品構成の変化を反映して，粗鋼トンあたりの純使用エネルギー＝(購入エネルギー)－(外販エネルギー)＝(総合エネルギー原単位)の内訳も図-6のごとく変化してきている<sup>4)</sup>。すなわち1975年以来石油系，電力系の購入は減少を続けており，その減少分を石炭系の増加で補っている。さらに石炭系の内訳を見ると，1985年からPCI用一般炭が増加し，コークス比が低下する分原料炭が減少してきている。

粗鋼トンあたりの電力使用量が上昇しているにも関わらず，電力系の購入が減少しているとする，そのギャップはどのようにして埋められているのであろうか。

所内の電力供給構成を見てみると，図-7に示すように電力会社からの購入電力は減少，共同火力は横ばいであり，供給電力の内，自家発電力の増加が著しいことが判る<sup>4)</sup>。

自家発電の主要燃料は副生ガスであるので，高炉の燃料比(銑鉄1トンあたりの吹き込み燃料とコークスの合計kg)と発生BFGとの関係を見たものが図-8である<sup>5)</sup>。図は1973年から1975年における，ある1高炉における実績値で，燃料比の増加とともにBFG発生量が増加している。一方，文献<sup>4)</sup>に基づき1973年から1990年の全日本の高炉の燃料比と発生BFGとの関係をとまとめたものが表2である。この値を図-8にプロットすると，1973年以降吹き込み重油の減少とともにBFG発生量は低下して1980年(オールコークス操業時期)に最低となり，1985年以降PCIの増加とともにBFG発生量が増加していることが判る。

最近では老朽化したコークス炉の寿命対策からもPCIは増加を続け200kg/t-pigも達成されている<sup>6)</sup>。PCI

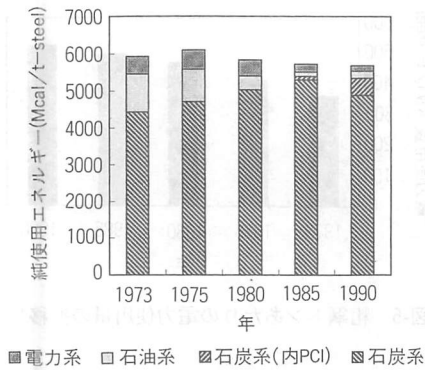


図-6 純使用エネルギー構成の推移<sup>4)</sup>

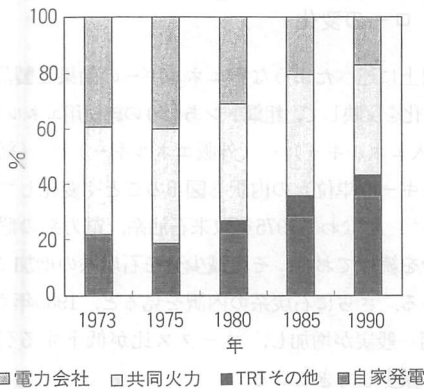


図-7 供給電力量の構成推移<sup>4)</sup>

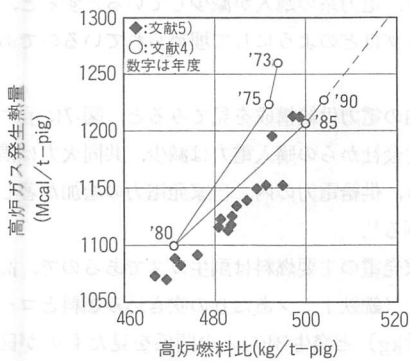


図-8 高炉燃料比とBFG発生量の関係

が増加した場合、コークス比低下によるCOG発生量の低下を差し引いても全副生ガス発生量は増加すると考えられ、この副生ガスの焼き増しによる自家発電力の増加で購入電力はさらに減少し、外販電力が増加することも予想される。

### 6. 副生ガスと電力の需給バランスの考え方

以上に述べたように、購入石炭系は冶金プロセスによって所内汎用性のある副生ガスに変換され、その一

表2 燃料比内訳と発生BFGの関係

年	1973	1975	1980	1985	1990
燃料比(kg/t-pig)	494	492	471	500	504
発生BFG(Mcal/t-pig)	1260	1223	1099	1206	1227
コークス比	436	440	450	484	440
吹き込み燃料比	58	52	21	16	64
吹き込み燃料	重油+タール		主にPCI		

部はさらに電力に変換されて購入電力を減らしている。そこで副生ガスと電力とはどのような考え方で需給バランスが取られているかを以下に述べる。

製鉄所の電力消費規模に比べて自家発電規模が小さいタイプの製鉄所では、地元の電力会社と共同出資して共同火力を設置している。共同火力は製鉄所の副生ガスを受け入れるとともに自前で重油（一部LNG）を購入して発電している<sup>7)</sup>。製鉄所が共同火力から購入できる電力量は基本的には（共同火力の総発電量）×（出資比率）が上限とされているので、電力が不足する場合には電力会社から購入する。製鉄所と共同火力とはこのような関係となっており、彦坂ら<sup>8)</sup>は製鉄所内の副生ガスと電力とのエネルギー・バランスについて次のような考え方を報告している。

- 1) ガス・バランス計画：鉄鋼の生産計画、各工場の操業計画、副生ガスの発生原単位、燃料使用原単位などの情報から、1ヵ月先までのガス発生量および各工場の燃料使用量の需給計画を立てる。
- 2) 自家発電運転計画：自家発電は保安電力、高炉送風、中低圧蒸気を確保すると同時に所内副生ガスの需給調整設備としての役割を持つ。すなわちガスの需給アンバランスは自家発電のボイラーおよび共同火力のボイラーの燃料調整によって吸収される。

ガス・バランス計画で、各工場の使用量および共同火力へ供給する副生ガス契約量を取引し（指定燃料）、残余のガス量を求める。これをベースとして、高炉送風計画から自家発電運転に対する投入燃料を求め、不足分の燃料（調整燃料）の購入計画を立てる。

- 3) 電力需給バランス：製鉄所内の電力需要は自家発電、共同火力、電力会社からの買電によって供給される。その際、以下の制約条件がある。

- ・自家発電は保安電力を確保しなければならない。
- ・共同火力は製鉄所から供給された副生ガスと共火自身が購入する重油とを使用して一定量の電力供給を行っている。
- ・買電は契約値以下でなければならない。

これらの条件のもとで、（総費用）＝（支払い電力

量料金) - (販売副生ガス料金) + (自家発電ボイラー用購入燃料費) が最小となるように、副生ガス (COG, BFG, LDG別)、購入燃料、購入電力の配分が決定される。

以上の計画を年、期、月次レベルで作成し、実際の操業による変更、トラブルなどによる計画とのギャップは数時間前に予測し、契約量を越える場合には自家発電の出力増加、もしくは圧延工場への操業中断の指示が出される。

この考え方と3. で示したエネルギー価格比の変化から購入エネルギーが決定され、その結果として電力系および石油系の購入が減少し、石炭系が増加してきたと説明できる。

## 7. 電炉メーカーのエネルギーフロー

電炉メーカーの工程はスクラップを溶解・精錬する電炉と連続鋳造、および一次圧延からなり (二次圧延を行う工場は少ない) 一貫製鉄所に比べ簡単である。

電炉メーカー全体の、圧延工程まで含めた粗鋼トンあたりの総合エネルギー原単位については公表されたデータがないので、転炉鋼、電炉鋼を合わせた鉄鋼業全体のエネルギー原単位<sup>1)</sup> から試算してみる。

転炉鋼はすべて一貫製鉄所で生産され、電炉鋼はすべて電炉メーカーで生産されると仮定し (実際には電炉鋼の一部は一貫製鉄所でも生産されているがその比率は小さい)、転炉鋼のエネルギー原単位と粗鋼生産量についてはこれまでに述べた値を用いて鉄鋼業全体のエネルギー消費量から差し引くことで電炉鋼の総合エネルギー原単位を求めた。その結果と電炉普通鋼の溶解電力原単位<sup>9)</sup> とを併せて図-9に示す。

1990年時点で電炉鋼の総合エネルギー原単位はおよそ1500Mcal/t-steelであり、これは転炉鋼のおよそ1/4である。これは原料のスクラップがすでに鋼であるため還元エネルギーが不要であり、鋼を溶解するエネルギーだけで済むためである。ただし電炉の生産性を上げるため、溶解期には超高電力が投入される。公称最大トランス容量はAC炉で7万5千kVA、力率は80~85%の高力率操業が一般的である<sup>9)</sup>。総合エネルギー原単位中に占める溶解電力のエネルギーは1990年時点で約60%を占め、エネルギー・コストに占める割合も高いことから、この溶解電力原単位を下げるのが1974年以来電炉メーカーの最大の課題である。

図に示された溶解電力原単位の低下は石油系燃料 (灯油、重油、LPG) による助燃バーナー、鋼中への

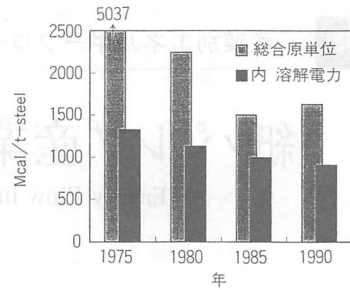


図-9 電炉鋼の総合エネルギー原単位および溶解電力原単位の推移

炭素 (加炭材) および酸素吹き込みによる酸化熱利用、また電炉の排ガスによるスクラップ予熱などによるものである。

このように電力多消費であることから自家発電を持つことが有利と考えられるが、操業上投入電力の変動が大きく、一定レベルの運転が前提となる自家発電方式では逆潮流が発生し、この余剰電力の買い取りの経済性が自家発電普及のネックとなっている (自家発電を有するのは2カ所のみ)。よって電力の供給ソースは電力会社からが殆どである。電力コストは購入電力料金によって左右されるため、電炉メーカーは夜間操業、夏期ピーク時の使用抑制などで対処している。

今後はDCアーク炉が普及し、溶解の電力原単位はさらに低下すると見られるが、他方では付加価値の高い二次圧延製品への進出、それに伴うスクラップ中の不純物除去のための精錬負荷の上昇などによって総合エネルギー原単位が増加する要因もある。

## 引用文献

- 1) 日本鉄鋼連盟; 鉄鋼統計要覧 (各年版)
- 2) 一貫製鉄所の未利用エネルギー (1992年12月), 日本鉄鋼連盟
- 3) 日本エネルギー経済研究所 所内資料をもとに作成
- 4) 一貫製鉄所の省エネルギー対策とその成果 (平成5年4月), 日本鉄鋼連盟 エネルギー対策委員会 省エネルギー実績分析WG
- 5) 片山 中; 製鉄所のエネルギー構造と省エネルギーの総合考察, 鉄と鋼 第64年 (1978) 第13号
- 6) 野間文雄; 高炉への微粉炭吹き込み (PCI) 技術, 鉄鋼界 平成4年10月号
- 7) 鈴木甲子郎; 共同火力史考, 火力原子力発電 1991 vol. 42No.5
- 8) 彦坂利久ら; エネルギーセンターのコンピューターシステム, 鉄と鋼 第64年 (1978) 第13号
- 9) 普通鋼電気炉業のストラテジー (平成6年11月), 日本鉄鋼協会 白石記念講座