

UDC 662.614 : 669.1

展 望

製鉄所のエネルギー構造と省エネルギーの総合考察*

片 田 中**

An Overall Study of Energy Consumption and Savings at Steelworks

Tadashi KATADA

1. 緒 言

エネルギー源の選択と安定供給、およびその使用の効率化に関する問題は、鉄鋼業の基本問題の一つである。この問題をめぐって過去、さまざまな技術の改善と開発がなされてきた。したがって、エネルギー利用技術の変遷は鉄鋼技術発展史の一断面である、ということもできるであろう。

日本鉄鋼業の過去 20 年をふり返つてみても、1960年代から 1970 年代の初めにかけて、粗鋼生産高で年率 10%以上の高度成長を続けることができたが、これもエネルギー問題を効果的に解決してきたことが、大きな支えになつている。この期間のエネルギーに関する主要課題は、第一に絶対量の安定供給、第二に石炭系燃料から石油系燃料への転換、第三に環境保全のためのエネルギーのクリーン化であつた。

いわゆる石油危機によつて資源に対する認識と、エネルギーに対する価値観が大きくかわつた 1973 年後半以降、エネルギー問題の主要課題は転じて省エネルギーとなつた。

すでに各製鉄所では、所内のエネルギー流れの実態調査をもとに、エネルギー高価格時代に適合する鉄鋼製造技術の追究が、プロセス、操業、設備の各面から行なわれている。そして各分野で改善、開発が進み実際的な成果が得られ始めてきた。したがって省エネルギーに関しここで改めて問題点を提起し、あるいはまた新規な着眼点を示唆することは、容易なことではない。

ただ一貫製鉄所は大規模なエネルギーの循環系であつて、この系の構成要素である各工程の内部で、また工程相互の間で、エネルギーの消費、変換、再生、移送が複雑に行なわれている。このため各工程の省エネルギー量

の単純な和をもつて、直ちに製鉄所の正味の省エネルギー量とすることができないなど、全体的な立場から考察しなければ正しい評価が得られないことが多い。

また製鉄所の製造工程はいわゆる一貫工程であつて、一つの工程の成品は次工程の原材料になる。それゆえに省エネルギーの検討も、前後工程との関連においてなされなければならない。だが一般には工程別、工場別の個別検討が全体検討に優先しがちである。

そこでここでは製鉄所を一つのシステムとみなして、全体という立場から省エネルギー問題を考察し、その中から将来の省エネルギー技術の方向を模索してみることにした。

2. 製鉄所のエネルギー消費構造

2.1 日本鉄鋼業のエネルギー需要

わが国鉄鋼業のエネルギー需要は図 1 に見られるように、国全体の需要のほぼ 17% に相当する。これをエネルギー種別で見ると全国比で石油系 4.9%、石炭系 87.0%、電力 15.6% である。

大多数の鉄鋼各社は石油危機以来、省エネルギー 10% を目標に掲げて全社活動を展開しているが、この図はまたこの目標が達成された時に、日本全体のエネルギー需要におおよそどのような効果をもたらすかを示している。

2.2 製鉄所のエネルギー需要

製鉄所のエネルギー消費構造は高炉の有無によつて、またその生産規模、品種構成および設備構成などによつて大きく異なる。他面、省エネルギー問題を扱う際に燃料、用役、原材料などのうちエネルギーとして扱う範囲と、その一次エネルギー当量を定めておかなければならないが、実はこれが明確にされていないのである。

* 昭和 53 年 5 月 25 日受付 (May 25, 1978) (依頼展望)

** 新日本製鉄(株)設備技術センター (Plant Enigneering & Technology Center, Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku Tokyo 100)

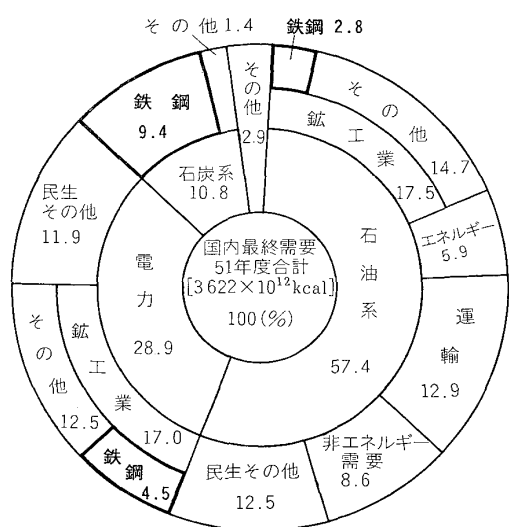


図1 エネルギー種別最終需要比率と鉄鋼業の割合
(昭和 51 年度)
(出所: 総合エネルギー統計 昭和 52 年度版¹⁾)

以下いささか本論からはずれるが、このことに言及しながら、一貫製鉄所のエネルギーの需要、および消費の実績について述べる。

2.2.1 対象エネルギーと一次エネルギー当量

製鉄所で省エネルギー問題を扱う際に、対象とするエネルギーをどう定義づけるか、議論の分れるところである。すなわち、コークス、電力、酸素などは自製の場合と購入の場合で、製鉄所の内部のエネルギー実消費量は同一ではない。またコークス製造時の副生タールは、燃料として使用すればエネルギーの取扱いになり、外販すれば考え方によつて、エネルギーとも製品ともなり得る。合金鉄、レンガ、ロール、鋳型などはいずれもその内部にエネルギーを大量に蓄積した材料とみることもできる。また屑鉄は鉄鉱石を基準におけば、同様にエネルギー含有原料である。

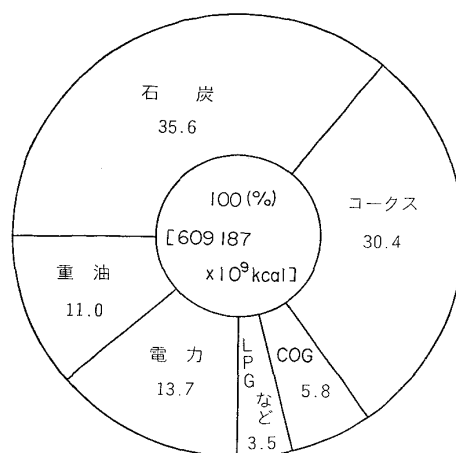


図2 全国一貫製鉄所の購入エネルギー種別比率
(昭和 51 年度)
(出所: 熱経済技術部会資料³⁾)

慣行としては前記の合金鉄や屑鉄はエネルギーとはみなされず、他方、電力や酸素は購入、自製の別を問わずエネルギーとして扱われ一次エネルギーにまで換算される。このように一次エネルギーに換算しておく、エネルギー価格が変動した時の鋼材コストへのはね返りを、容易に計算することのできる便利さがある。

日本鉄鋼協会共同研究会、熱経済技術部会では毎年度加盟各事業所（一貫製鉄所については国内全製鉄所を網羅）についてエネルギー統計をとっているが、この調査で定めているエネルギー種別と、各所で使用しているこれらの一次エネルギー当量を表1に示す。

2.2.2 購入一次エネルギー

前記熱経済技術部会の資料に基づき、昭和 51 年度の全国 21 の一貫製鉄所の購入一次エネルギー種別比率を図2に示す。この統計は表1の前提によつて行なわれている。この図から一貫製鉄所のエネルギー購入種別比率

表1 燃料および用役の一次エネルギー当量

(出所: 熱経済技術部会資料²⁾)

種 類	一次エネルギー当量 (各所評価範囲)	備 考
石 炭	6 500~7 750 kcal/ kg	燃焼発熱量 (低位)
コ ークス	6 800~7 200 "	"
L P G	10 500~12 000 "	"
L N G	12 000 "	"
タ ー ル	8 700~8 900 "	"
重 油	8 600~9 375 kcal/l	"
軽 油	7 920~9 200 "	"
灯 油	8 050~8 900 "	"
コークス炉ガス	4 400~4 800 kcal/Nm ³	" , 主として 4 800 kcal/Nm ³
高 炉 ガス	800~ 828 "	" , 主として 800 "
転 炉 ガス	1 800~2 500 "	" , 主として 2 000 "
蒸 気	780~ 980 kcal/ kg	エンタルピー
電 力	2 450 kcal/kWh	発電効率 35.1%
酸 素	1 700 kcal/Nm ³	製造所要電力量 0.694 kWh/Nm ³

がおおよそ石炭系 70%、石油系 15%、電力 15% であることが知られる。

なお図2は購入エネルギーであつて、実消費エネルギーではない。実はこの統計では購入エネルギーが実消費エネルギーよりも約 17% 大きく計上されているのであるが、これは共同火力への副生ガスの販売や、コークス製造会社への石炭の外販などからんでくる統計処理上の差である。したがって詳細な検討を行なう場合に統計の前提条件を確かめておく必要があることを付記しておく。

2.3 製鉄所の総合エネルギー原単位

製鉄所の総合的なエネルギー原単位は、通常、対象期間内に製鉄所全体で消費した一次エネルギー量を、同期間内に生産した粗鋼量で割った値、すなわち kcal/t-steel をもって表示する。一般にこの値は $6000 \times 10^3 \text{kcal/t-steel}$ 前後である。

定義から明らかなようにこの表示の原単位では品種構成、設備構成、生産量、溶鉄配合率など製鉄所のエネルギー使用量に大きなかわりのある要因は、現状が前提になっている。したがって、この原単位で製鉄所間の単純な比較を行なうことはできないが、エネルギー問題を扱う際のマクロ指標として便利であり、しばしば使用される。以下混同をさけるために、この表示の原単位を「総合エネルギー原単位」と呼ぶことにする。この原単位は対象期間を四半期、あるいは1年など十分に長くと

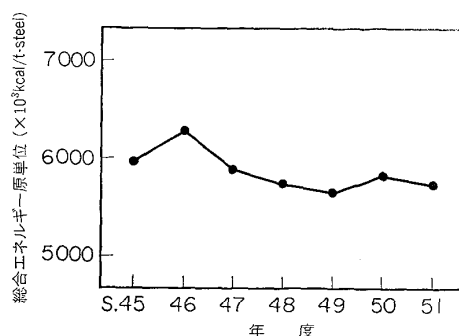


図3 全国一貫製鉄所の総合エネルギー原単位の推移 (純使用量ベース)

(出所：熱経済技術部会資料⁴⁾)

らないと、定期修繕、突発事故などによる工場の休止、品種・サイズ構成の短期的変動などの一種の異常値が入ってきて、マクロ指標としての意味をなさなくなる。

図3に全国一貫製鉄所の総合エネルギー原単位の推移を示す。ここではエネルギー使用量として実消費量（購入エネルギーから外販エネルギーを差引いた値）を用いている。この図でS46年度以降原単位は年を追って改善されているが、S50～51年度で幾分悪化しているのは、石油危機以後の不況減産および環境対策用エネルギーの増加によるものと思われる。

2.4 製鉄所のエネルギー流れ

これらのエネルギーが製鉄所の中でどう流れるか、その一例を図4に示す。この図は新日鉄・名古屋製鉄所のS52年度3/四半期の実績より作成したものである。

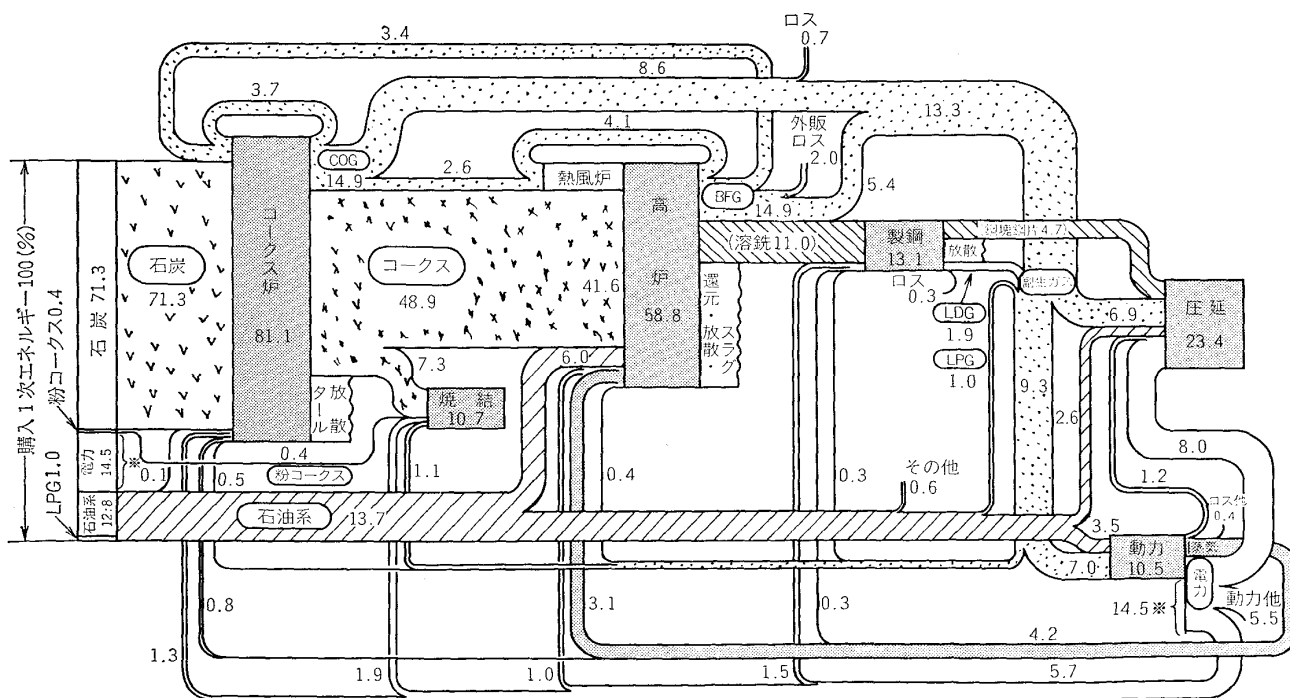


図4 中規模製鉄所のエネルギー流れ図
(新日鉄名古屋製鉄所 S52年度 3/四半期実績)

表 2 工程別エネルギー原単位の一例

(単位: 10^3 kcal/t-成品)

種 別	工 程		コークス (含ガス精製)		焼 結		高 炉		製 鋼 (含CC)		分塊	熱延	厚板	冷延 鋼管	動 力	
	処理量 ($\times 10^3$ t/月)		171		471		338		361		186	266	54	271	(361)	
	消費	発生	消費	発生	消費	発生	消費	発生	消費	発生	消費	消費	消費	消費	消費	発生
石 炭	10 023				375	2 992			2							
コークス		$\Delta 7 200$				433										
重油	19				90	68			93			233			229	
電 力	488				1	296	$\Delta 1 074$				83	223	234	352	317	$\Delta 285$
B F C	529	$\Delta 2 120$			47	190			22		34	10	1	1	421	
蒸 気	107	$\Delta 32$			3	222			22	$\Delta 11$	113	100	245	197	38	
その他	34	$\Delta 595$			4	58			110	$\Delta 147$	63	38	349	46	492	$\Delta 602$
小 計	11 352	$\Delta 9 947$			520	4 259	$\Delta 1 103$		249	$\Delta 158$	296	626	852	708	1 594	$\Delta 887$
合 計	1 405				520	3 156			91		296	626	852	708	707	

注 1) コークス～製鋼は各成品 t 当り

2) 圧延は装入 t 当り

3) 動力は粗鋼 t 当り

4) その他の項には LDG・LPG・灯油・酸素・窒素・圧空・水および化成品を含む

(新日鉄・名古屋製鉄所 S. 52 年度 3/四半期実績)

この種のエネルギー流れ図も、次の各項のような理由によつて正確さには限度がある。

- (1) 燃料などの払出し時点と実消費時点のずれ
- (2) 実発熱量と統計上の基準発熱量のずれ
- (3) 購入電力、購入酸素を一次エネルギーに換算する場合、製鉄所内でのエネルギーの実消費と見掛け消費の差
- (4) 熱測定を全所同時に行なえないための条件設定誤差

前項でエネルギー原単位の算出期間のことにふれたがエネルギー・バランスについても、大局的な判断を下すためには期間はその使用目的に応じて相応に長い必要がある。一方エネルギー配給という観点からは時々刻々のバランスが欲しい。

このように製鉄所のエネルギー構造を考える場合に、そのモデルをある期間の平均的なものを表わすいわば静的モデルと、刻々の変化に対応するいわば動的モデルとに、目的によつて使いわけの必要がある。

その意味で図 4 は静的な流れ図であるが、この図にみられるように製鉄所のエネルギー流れの大部分を製鉄部門、すなわちコークス炉、高炉および焼結工場が支配している。定量的には購入エネルギーの 80% 以上がここに向けられる。製鉄部門はまたガス発生部門であつて大量のコークス炉ガス (COG) と、高炉ガス (BFG) を副生し、これが気体燃料として各工場に配給される。この分を控除すると、製鉄部門は製鉄所の全エネルギーの約 65% を消費していることになる。なお正確には溶鉄

表 3 ストリップ製品の累積エネルギー原単位 (算定例)

工 程	製鋼	分塊	連熱	冷延	メッキ
	粗鋼	スラブ	ホット コイル	冷 延 コイル	メッキ コイル (亜鉛)
成 品					
生 産 量 比 (歩 留)	100 (0.93)	93 (0.98)	91 (0.95)	86.5 (0.98*)	85
** エ 原 ネ ル 単 位	当該工程	—	310	620	590
	累 積	4 240	4 870	5 590	6 470
					7 080

注) * 内 0.05 は付着メッキ相当分

** 当該工程成品 t 当り, 単位 $\times 10^3$ kcal/t-成品

中の炭素分は高炉の消費コークス量から控除しなければならないが、一般にこの計算はなされていない。また、次工程の転炉工場ではこの炭素分から転炉ガス (LDG) が副生するので、転炉工場全体のエネルギー消費が負になる、という統計がでてくることがある。

2.5 工程別・成品別エネルギー原単位

表 2 に前述の新日鉄・名古屋の例で、工程別エネルギー原単位の実績を示す。注記したように分母はその工程で扱う材料トン (動力については良塊トン) である。

製鋼工程の原単位が他工程に比し著しく低いのは、前項で述べた溶鉄中の炭素の外、シリコン、マンガンなどの酸化熱の統計上の取扱いによるものである。(これらは高炉で還元熱を消費し、転炉で酸化熱を放出するが、通常は炭素同様、転炉の入熱源にされていない。)

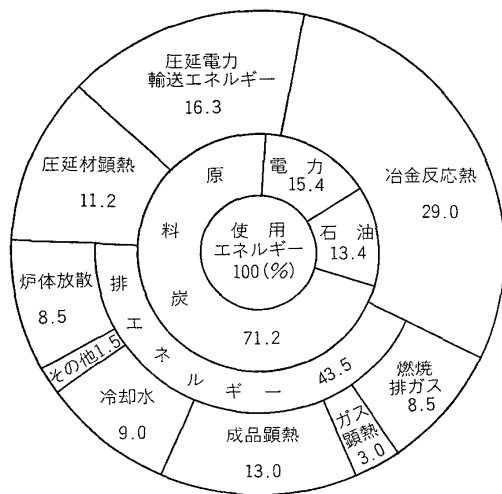


図5 エネルギーの最終消費形態の一例
(新日鉄 S 50年度上期実績⁵⁾)

次に表3にストリップ製品系列をモデルに、各製造工程における成品t当りの累積エネルギー原単位(当該工程の成品1tを製造するために必要な製鉄工程からの累積エネルギー量)の算定例を示す。各成品のエネルギー原単位には当然歩留という工程因子が入ってくる。

2.6 エネルギーの最終消費形態

製鉄所に投入されたエネルギーの最終的な消費の形態の一例を図5に示す。この図は新日鉄のS50年度上期の実績をもとに作成してある。この形式の統計は各消費項目の定義が問題で、作表の目的によつて、また考え方によつて区分や数値が変ってくるが、省エネルギー施策を検討する際の根拠の一つになる。

3. 総合エネルギー原単位を支配する要因

前章で熱経済技術部会の統計と国内の中規模製鉄所を例にして、一貫製鉄所のエネルギー消費構造の実態を述べた。本章では角度を変えて製鉄所を一つのエネルギー・システムとみなし、そのシステム因子の変動の全体に及ぼす影響を調べてみるという方法で、製鉄所のエネルギー構造とその特性を明らかにすることを試みる。

3.1 総合エネルギー原単位を決める基本因子

一つの製鉄所を代表するエネルギー指標は、エネルギー総使用量と、総合エネルギー原単位である。ここでは省エネルギー問題を扱う関係上、後者の原単位を代表指標としてとりあげる。ただしこの指標は2.3で述べた性格を有しているので、定量的な解析にはおのずから限界がある。

さて、製鉄所の総合エネルギー原単位を、平均水準とそのまわりの変動、という二つの部分に分解して考えてみる。前者の平均水準はその製鉄所の品種構成、設備構成、生産規模などによつて基本的に定まる。この部分は個々の製鉄所にとっては、他律的な前提条件である。

後者の変動部分は上記の前提条件のもとで、たとえば生産ロット集約、工程設計、操業および設備改善などによつて製鉄所で管理可能な部分である。(会社単位で考えれば、複数製鉄所への生産配分と品種配分を効果的に行なうことも省エネルギーの施策であるが、製鉄所間にあたる問題はここでは論じない)

結論からいうと総合エネルギー原単位は、主として次

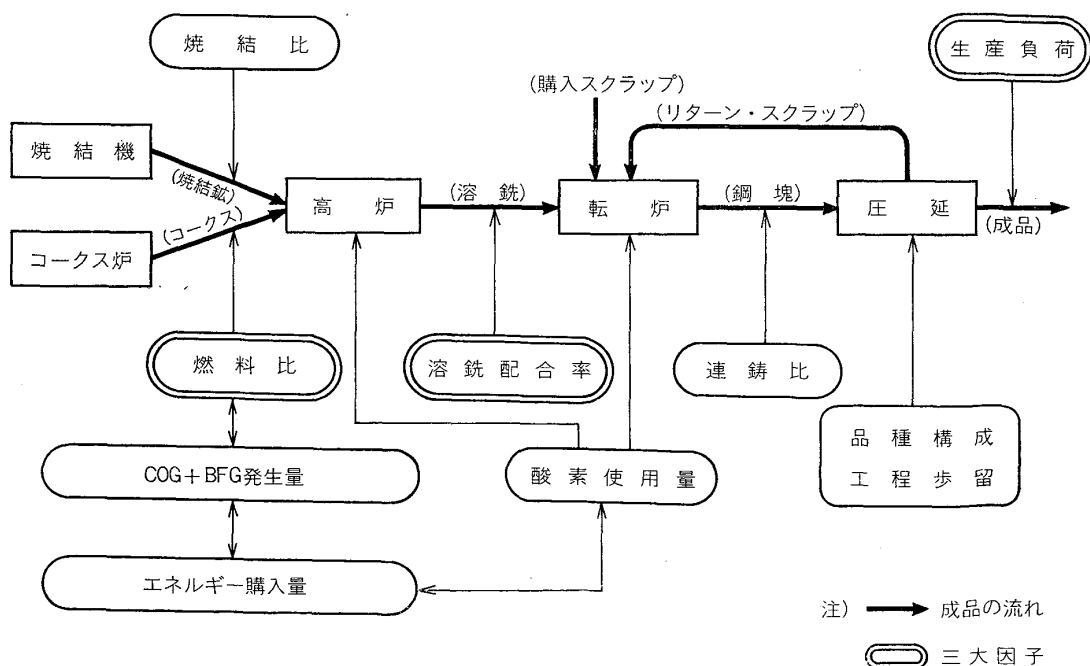


図6 製鉄所の総合エネルギー原単位を決める三大変動因子の位置づけ⁶⁾

の三つの因子によつて支配されると考えられる。図6参照。

- (1) 転炉における溶銑配合率
- (2) 高炉における燃料比
- (3) 生産負荷

これらの因子は前述の平均水準的な意味と、後者の変動部分的な意味の双方をもつていて、いずれで考えるかはそれらを短期的に扱うか、中・長期的に扱うかによつても異なる。以下にそれぞれの項目について説明する。

3.2 溶銑配合率と総合エネルギー原単位

2.2.1 で述べたように、一般には屑鉄はエネルギーとして評価されない。このため同一粗鋼生産量を得るために溶銑をどれだけ使用するか、すなわち溶銑配合率 (HMR : hot metal ratio) をどうとるかは、製鉄所全体のエネルギー消費に決定的な影響を与える。図7に溶銑配合率と溶鋼製造累積エネルギー (溶鋼1tを製造するための総エネルギー) との関係を示す。一般に溶銑配合率の $\pm 1\%$ の変動は、総合エネルギー原単位に $\pm 40 \sim 50 \times 10^3 \text{kcal/t-steel}$ の影響を与える。

実操業における溶銑配合率はリターン・スクラップなどの関係で、通常80~90%である。また増産時には溶銑の不足を購入スクラップで補うので、総合エネルギー原単位は低下する結果になる。

3.3 高炉燃料比と総合エネルギー原単位

前述したとおり製鉄部門は総合エネルギーの約65%を消費する。高炉に限つても、そのエネルギー消費は製鉄所全体の50%に及ぶ。かつ高炉は巨大なガス発生器で

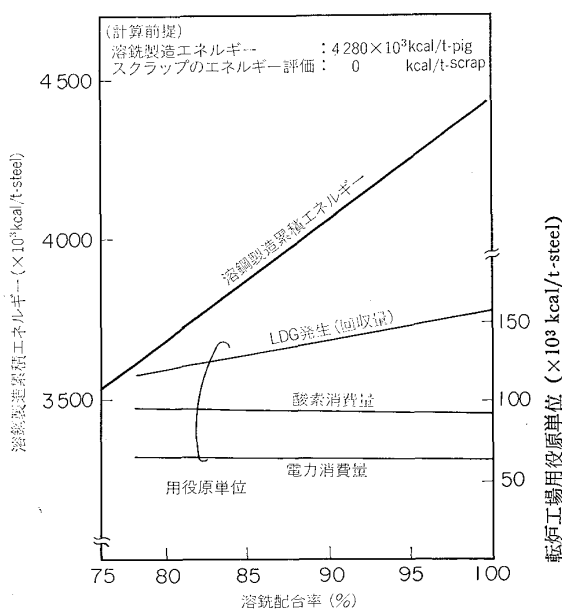


図7 溶銑配合率と溶鋼製造累積エネルギー (広畑第2製鋼工場 昭和49年10月実績より)

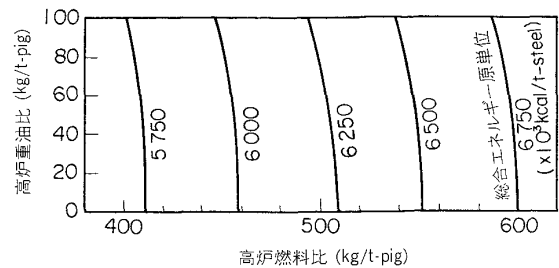


図8 高炉燃料比と総合エネルギー原単位⁷⁾
(中規模製鉄所での試算、出鉄量出鋼量一定、溶銑配合率80%)

もあるから、製鉄所のエネルギー・システムの中で高炉の存在は特別な意味をもっている。

いうまでもなく高炉の燃料比 (FR : fuel rate, kg-fuel/t-pig) はコークス比 (CR : coke rate, kg-coke/t-pig) および重油比 (OR : oil rate, kg-oil/t-pig) の和で示され、高炉操業の基本的な指標とされている。

この燃料比の低減対策には装入原料、複合送風、操業方法、設備改善など種々の手段がある。その省エネルギー的効果は燃料比のレベル、転炉の溶銑配合率などによつて異なるが、一つの試算によると図8に示すように燃料比の $\pm 10 \text{ kg/t-pig}$ の変化は総合エネルギー原単位に、おおよそ $\pm 50 \times 10^3 \text{kcal/t-steel}$ の影響を与える。

また別の試算で定常状態にある高炉に、 ΔFR の燃料比の変化を与え、これを主に送風条件で操作し新たな定常状態に達したとすると、高炉およびコークス炉の全系で、省エネルギー効果は実質、 ΔFR の45~50%になるという結果が得られている。

後述するが高炉は構造がきわめて単純でありながら、その内部で予熱、還元、溶解を複合的に行なうことができ、熱効率の非常に高い装置であり、燃料比も限界に近づきつつある。したがって燃料比を現状よりもさらに大幅に下げるために種々の対策を講じようとするれば、操業的にはかなり困難になるだけでなく、その対策に使用するエネルギー (たとえば送風を一層高温、高圧化するためのエネルギー) が急増し、製鉄所全体の省エネルギー効果は上述の比率よりも低くなつて、設備負担と合わせて経済性にも疑問が生じてくる。

なお参考までに図9に、高炉燃料比と高炉ガス発生量(熱量表示)の関係を2500m³高炉の実績例で示す。

3.4 生産負荷と総合エネルギー原単位

生産負荷と総合エネルギー原単位の関係は、種々の前提条件を定めないと論じられないが、一般的に次のようにいえる。

- (1) 粗鋼減産→溶銑余裕→溶銑配合率上昇(購入スクラップの減少)→原単位の上昇

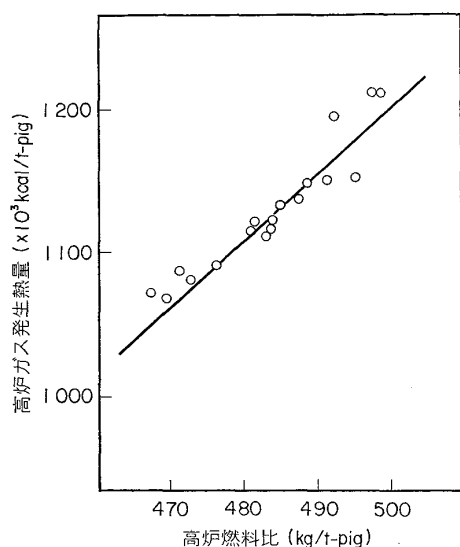


図9 高炉燃料比と高炉ガス発生熱量
(広畑第4高炉(2950m³) 昭和48年10月~50年4月実績)

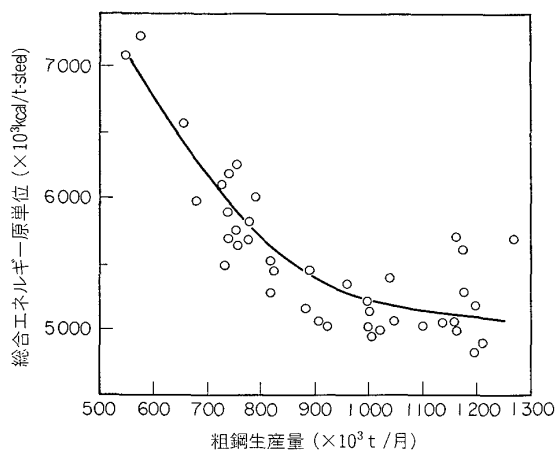


図10 生産負荷と使用エネルギーの関係(大規模製鉄所の例)
(出所: 熱経済技術部会資料⁸⁾)

(2) 減産→設備余裕→保熱, 空運転, 低負荷操業の増加→原単位の上昇
増産の場合はこの逆になる。

しかしながら他方, 各工程に生産余裕があると連铸化比率や直送圧延比率の拡大, 加熱炉操業方式の最適化など省エネルギー施策を強化することもできるので, 一概に減産すなわち総合エネルギー原単位の悪化, というとはできない。

図10に粗鋼年産1200万t級大規模製鉄所の例を示す。図で対象期間中に設備の増強などの生産拡大対策がとられてきていると思われるが, ここでは単に粗鋼生産量と総合エネルギー原単位の関係だけをとりあげて図示している。

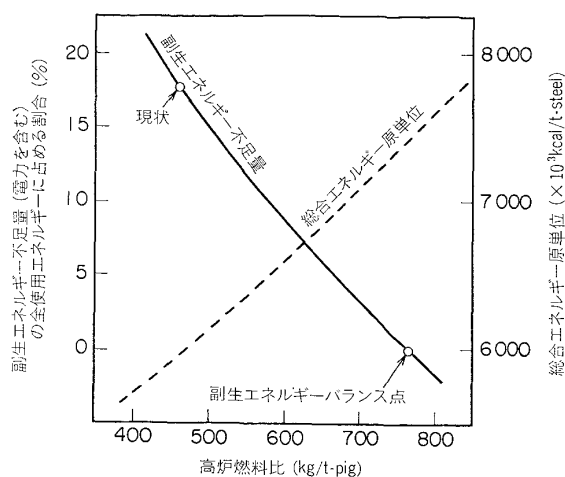


図11 高炉燃料比と全所エネルギー・バランス⁹⁾
(中規模製鉄所の試算例, 重油比 60kg/t-pig)

3.5 高炉燃料比とエネルギー・バランス

高炉の燃料比の低減によつて製鉄所のエネルギー原単位は著しく改善されたが, 一方高炉ガスおよびコークス炉ガスの発生量が減じ, 製鉄所全体としてのエネルギー・バランスが, 過去とは大きく様相を異にしてきたのでここでその問題に言及する。

かつて一貫製鉄所という名称は, 銑鋼一貫製造工場という意味の外に, エネルギーについて自給体制が成立するという意味をもつていた。すなわち副生する高炉ガスおよびコークス炉ガスだけで, 所内の燃料と電力をまかなうことができた。その後, 一方で高炉の燃料比の改善などによつて副生ガス量が次第に減じ, 他方で製品の加工度が高まり, 冷延工程, 表面処理工程が増強され, これらの工程のエネルギー消費が増加した。当初, 副生ガスの不足分はボイラーおよび熱延加熱炉へ重油を供給することで補なつてきたが, 近年の環境規制の強化にともなつて, この不足分は低イオウ重油, あるいはさらにクリーンなLPG, LNGに転換してきている。

図11は中規模製鉄所での試算例で, 高炉吹込み重油量を60kg/t-pigと一定において燃料比を変化させた場合の製鉄所全体の総合エネルギー原単位と副生エネルギー不足量との関係を示す。図にみられるようにこの製鉄所では石炭および高炉吹込み重油以外の購入エネルギー(電力を含む)は, 総エネルギー量の約18%であるが, これを0%にしようとする高炉燃料比は約750kg/t-pig(うち60kg/t-pigは重油), 総合エネルギー原単位は約7500×10³kcal/t-steelとなる。(もちろんこの場合には高炉およびコークス炉などを増設しなければ, 生産バランスは成立しない。)

4. 省エネルギーの総合考察

この章では前述の製鉄所のエネルギー構造と、総合エネルギー原単位のもつ特性を考慮しつつ、製鉄所の省エネルギー施策について、個々のテーマよりも技術の方向に重点をおきながら、考察を試みる。

これには幾つか重要な着眼点がある。すなわち第1は受注鋼材の製鉄所への生産配分である。ここでは製鉄所間の問題にはふれないが、特に減産下にあつては生産集約は、全社的な立場での省エネルギー対策の重点項目である。

第2は鉄歩留、工程歩留および注文歩留の向上である。成品別累積エネルギー原単位は、2.5 および表2に示したが、製鉄所にとって鉄分自体の損失と、製造品の格落ち、屑化ほど大きなエネルギー損失はない。

第3は操業と設備の安定化である。製鉄所は製鉄から圧延・加工まで一貫した製造体制をとり、かつ主要工程は連続操業を行なっているため、一時的にも、また一箇所でも操業の不安定、設備の異常が発生すると、製鉄所全体に影響が波及し、エネルギーを含めあらゆる点で高価な損失となる。

第4は製鉄所の中でエネルギー消費量の最も大きい製鉄部門に、省エネルギー施策の重点をおくことである。ただしこの部門の主要設備である高炉、熱風炉、コークス炉はすでに熱効率が非常に高く、今後の省エネルギーは技術的になかなか困難であり、一そう深い研究が望まれる。

第5は総合エネルギー原単位に大きな影響を及ぼす要因、すなわち溶銑配合率、生産負荷および高炉燃料比からの対策である。このうち前二者は全社的な生産計画でほぼきまり、製鉄所の省エネルギー努力の対象になるのは主として高炉の燃料比ということになる。

第6は材料が前工程から後工程に引き継がれる一貫工程における、工程間の材料受渡し条件の改善である。加熱炉への熱鋼片の装入（ホット・チャージ）などがこれにあたる。

第7は同じく一貫製造工程における工程の省略、結合、連続化である。加熱炉を経由しない直送圧延（ダイレクト・ローリング）は前者に属し、電解清浄-連続焼鈍-調整圧延複合ラインなどは後者に属する。これらは省エネルギー効果はもとより、歩留の向上、処理時間の短縮、運搬量の軽減、などの効果も伴っている。

第8は排エネルギーの回収である。これには、技術開発を要するものと、エネルギー価格と排エネルギー回収費用とから、経済問題として処理されるものとがある。

なお技術の本筋としては、排エネルギーの回収よりもプロセスのエネルギー使用効率を高め、エネルギー・インプットを減らすことに重点がおかれるべきである。

第9は副生ガスの有効利用問題である。高炉ガス、コークス炉ガスなど副生ガスの発生と、加熱炉、ボイラーなどの消費との間で配給管理を適切に行なつて、放散量を最小にする必要がある。

第10は環境対策設備のエネルギー需要の急増である。省エネルギー型の環境対策技術の開発が急がれている。

第11はいささか性格が異なり、製品の標準化（品質、サイズなど）の問題である。定量的に把握しがたいが、工業製品の標準化による省エネルギー効果は、国家的にかなり大きいものと思われる。

以上、省エネルギー施策の着眼点を挙げたが、この中でその主目的が省エネルギーにある技術課題について、概要を説明する。

4.1 高炉燃料比と省エネルギー

すでに3.3で述べたように、高炉の燃料比は製鉄所全体のエネルギー使用量に大きなかわりをもっているため、過去さまざまな燃料比切下げ対策がとられてきた。その成果を図12に示す。ここにみられるように全国高炉の出銑比と燃料比は年ごとに改善され、省エネルギーに顕著な効果をもたらした。

しかしながらこの操業成績の向上も、ようやく実用限界に近づいてきたものと考えられる。すなわち、高炉を

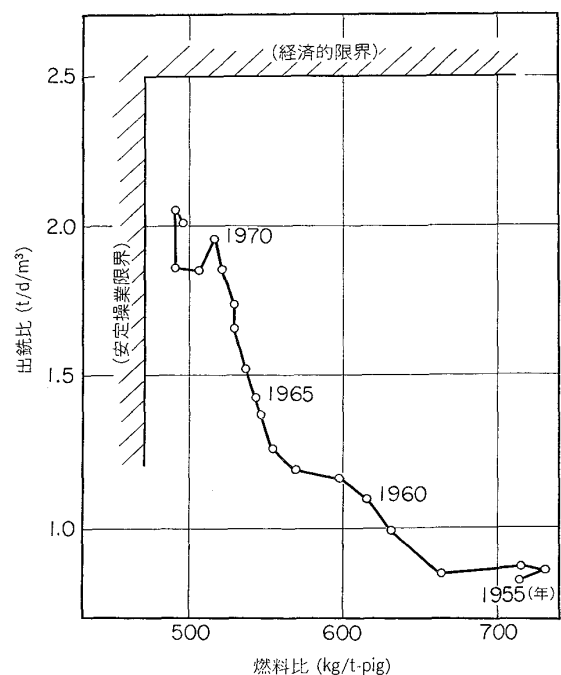


図12 高炉燃料比と出銑比の推移(国内平均)
(出所：新日鉄資料)

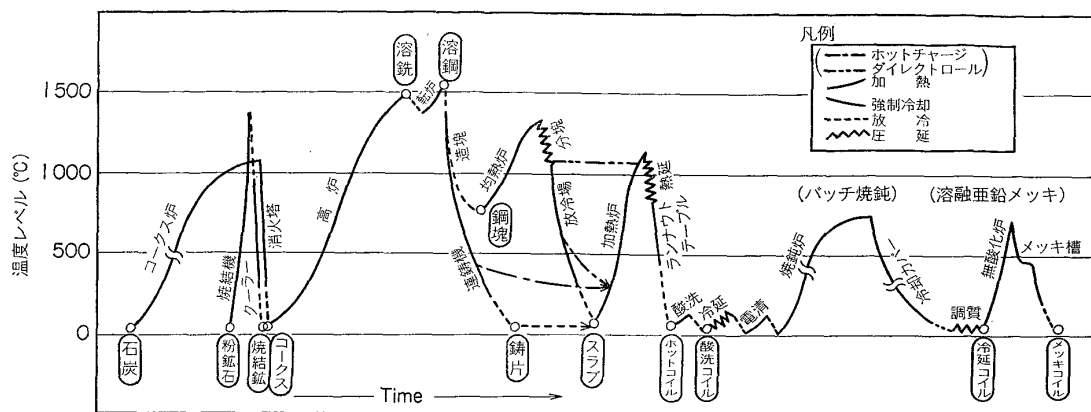


図13 一貫工程における温度変化例（ストリップ系列）

反応を伴う熱交換器とみると、燃料比の低下につれて還元ガス量が減じ、炉内の熱的平衡が不安定になってくる。図12でこれを“安定操業限界”としているが、その値は現状技術では実用上 450~460 kg/t-pig 位であり、下限は 430 kg/t-pig と推定されている。

一方、送風の高圧・高温化も設備的に“経済的限界”に接近しておりかつこれらを実現するための所要エネルギーもばく大で、高炉系だけを考えれば省エネルギーであつても、製鉄所全体では必ずしも得策とはいえないこともでてくる。

したがって今後はむしろ低出銑比操業時に、どこまで燃料比を下げ得るかという技術課題がより重要な意味をもつようになる。また突発休風、棚吊りなど操業の異常は高炉にとつても、製鉄所全体にとつてもエネルギーの大きな損失であるから、高炉の安定操業が一層重視されるようになる。

4.2 工程間受渡し条件と省エネルギー

一貫製造工程において前工程から次工程へ受けつがれる際の諸条件、たとえば材料の温度、品質、寸法、形状などは省エネルギーの見地から、全面的に見直しを行なう必要がある。

4.2.1 温度条件の改善

図13に鉄鋼製造の各工程における材料の温度変化を示す。この図は製鉄所の省エネルギーの施策について、重要な示唆を与える。たとえば

- ①工程間の材料温度降下に伴う熱損失の防止
 - ②工程結合による前工程の顕熱の有効利用
- 以下、具体例でこれを説明する。

(1) 溶銑、溶鋼の顕熱

高炉～転炉間の溶銑温度の降下は 50~130°C、また出鋼～造塊注入間の溶鋼温度の降下は 50~80°C 程度である。いずれも 10°C あたり約 2000kcal/t-hot metal の

熱損失である。

この温度降下を防止することができれば、転炉でたとえばその熱量相当分、鉄鉱石の使用量を増加でき、これによつて得られる鉄分のことを考えると、溶銑、溶鋼の温度低下の防止は、単なる顕熱損失相当分の数倍の省エネルギー効果を生ずる。具体的な対策は鍋ぶたの設置、注入流の放熱防止、輸送の迅速化などである。

(2) 鋼塊の顕熱、凝固熱の利用

鋼塊の顕熱と凝固潜熱は、次工程の均熱炉にとつては入熱である。したがつてトラック・タイム（注入終了から均熱炉装入までの時間）を短縮することによつて、省エネルギー効果が得られる。顕熱分だけ考えても温度降下防止 10°C あたり約 1500kcal/t-ingot の省エネルギーとなる。実際には均熱炉の熱効率のはね返りがあるので、鋼種などによつて差はあるが、総合効果はこの数倍に達する。

最近では計算機を利用してトラック・タイムの管理、あるいは均熱炉焼上り判定管理の強化が行なわれている。また凝固潜熱の積極的な利用策として、均熱炉への未凝固装入、未凝固分塊圧延などが実施されている。ただし表面欠陥など品質への影響、未凝固鋼塊圧延の安全性などの検討があわせて進められる必要がある。

(3) 鋼片の顕熱の利用

この典型は分塊圧延または連続铸造後の熱鋼片を次工程の加熱炉に装入する省エネルギー法で、いわゆるホット・チャージ法である。多くの報告があるのでここでは詳細にふれないが、鋼片のキズの減少対策、あるいはキズ検出・手入れの自動化についての配慮、出鋼計画と圧延計画の整合についての配慮がある。また加熱炉では熱片装入によつて炉底温度、すなわち排ガス温度が上がることを念頭におく必要がある。

4.3 工程の省略と結合による省エネルギー

この典型的な実施例は連続鋳造、直送圧延などである。一般に工程の省略と結合は新プロセス、あるいは新設備の開発、導入を要することが多い。

4.3.1 連続鋳造

改めて説明するまでもなく連続鋳造によつて、均熱炉および分塊圧延工程が省略でき、均熱炉の燃料を中心に $150 \sim 200 \times 10^3 \text{ kcal/t-ingot}$ の省エネルギー効果がある。さらに溶鋼～鋼片間の工程歩留の向上によつて、 $50 \sim 100 \times 10^3 \text{ kcal/t-ingot}$ の効果が加算される。

一貫製鉄所の連鋳比率（鋳片生産量／粗鋼生産量）は現在すでに 40% に近くさらに大きくなりつつある。

4.3.2 直送圧延

直送圧延は熱鋼片、あるいは熱鋳片を加熱炉を省略して直接圧延する方法で、魅力のある省エネルギー対策である。その効果は、加熱炉の燃料相当分 $300 \sim 500 \times 10^3 \text{ kcal/t-slab}$ の減と、圧延エネルギーの増（スラブ温度低下のための圧延電力増、および均熱炉焼上り温度を上げる場合にはその燃料増など）の差分が総合効果となり、おおよそ $300 \sim 350 \times 10^3 \text{ kcal/t-slab}$ である。

ホットチャージ同様に直送圧延比率を拡大するためには、熱間のキズ検出と手入れの自動化技術の確立と、出鋼～圧延計画の編成に工夫がいる。

4.3.3 工程の結合と連続化

工程を結合することによつて、省エネルギーのみならず歩留、生産性などで大きな利益をあげられることはすでに述べた。この具体的な例として、電解清浄～バッチ焼鈍～調質圧延～製品検査を一つの連続ラインに組み込んだ設備が開発されており、 $100 \sim 150 \times 10^3 \text{ kcal/t-coil}$ の省エネルギー効果が得られている。

その他ストリップの圧延加工工程には、工程の結合と連続化の技術課題がなおいくつかあり、省エネルギー面からも実現が期待されている。

4.4 損失熱の回収

すでに図 5 で製鉄所に投入されたエネルギーが、最終的にどのような形態で失われるかをみた。これを温度レベルで配列すると図 14 のようになる。この図で横軸は排熱の温度を、縦軸は排熱の種別と、総排熱を 100% としたときのそれぞれの大きさを表わしている。この図から排熱回収の優先順位と、その技術的・経済的可能性を予測することができる。

排熱回収を具体的に検討する場合に、考慮すべき共通事項は次のとおりである。

- ① 排熱源の安定性（時間的変動など）
- ② 回収の形態（蒸気・電力発生、空気予熱など）

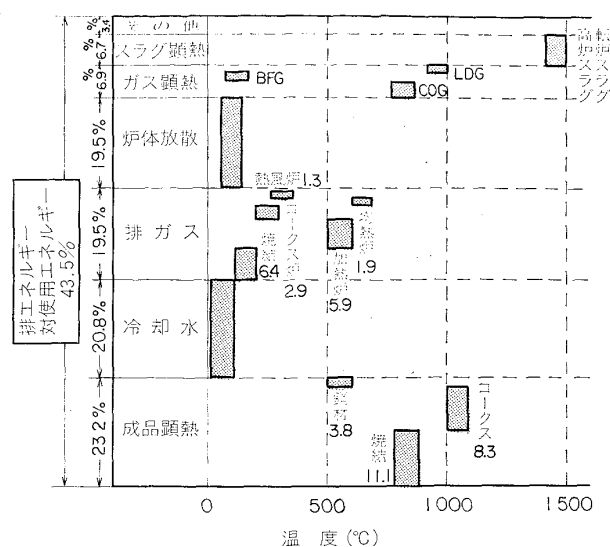


図14 排エネルギーの形態別、温度別割合の一例
(S. 50年度上期新日鉄実績)

③ 回収エネルギーの向け先、およびその輸送方法

④ 回収装置の安定性（休止時の対策など）

一般に排熱は蒸気の形で回収するのが最も容易であるが、発生蒸気の供給先と、回収装置休止時にその分の蒸気をどこから得るかを考えておく必要がある。このことから回収エネルギーはできるだけ自工程で使用するよう計画した方がよい。発生蒸気を電力に変換すると使いやすいエネルギーとなるが、排熱からみた回収効率にはなはだ低いものになる。

4.4.1 排ガス顕熱の回収

図 5 でみたように燃焼排ガスがもち去る熱量は、製鉄所に投入される総エネルギー量の 8.5% にあたる。このうち加熱炉、均熱炉の排ガスは温度も高く利用価値が大きいが、燃焼空気の前熱以外にどう利用するかが問題である。

コークス炉、熱風炉の燃焼排熱は低温ながら回収が検討されており、一部で熱風炉の排ガス顕熱が燃焼空気の前熱に使われ始めた。

4.4.2 成品顕熱の回収

成品顕熱は温度レベルも高く、熱回収の対象として比較的とり上げ易い。たとえば焼結鉱の顕熱は点火炉の燃焼空気の前熱などに、またコークス顕熱は乾式消火法（ドライ・クエンチング法）によつて蒸気発生に利用される。鋼材顕熱回収の例ではスラブ・ボイラーがある。

高炉スラグ、転炉スラグの熱回収も指摘されているがこれらは資源化のめどをたてる方が先決であろう。

4.4.3 冷却水顕熱の回収

冷却水の顕熱は量的には多いが温度レベルが低く、現

状の技術とエネルギー価格では、熱回収はほとんど実用にならない。ただ日本では実施例がないようであるが、欧州やソ連では加熱炉のスキッドで蒸発冷却方式を取り蒸気を回収している例が多数みられる。

4.5 エネルギー配給管理と省エネルギー

製鉄所の内部には石炭、重油などの購入一次エネルギー、高炉ガス、コークス炉ガスなど副生二次エネルギー、自家発電電力などの三次エネルギーがあり、さらにこれに排熱回収エネルギーが加わる。

エネルギーの発生量と消費量の時間的変動（設備の突発休止、計画休止などを含む）、および副生ガスホルダーの容量との相互関係の中で、余剰ガスが放散されてエネルギー損失をつくる。したがってこの放散量を最小に抑えることができるような配給管理のシステムが必要である。

またあわせて発熱量の異なる各燃料を、どの工程にどう配分すると排ガスに運ばれる熱損失が最小になるかという面からの検討、あるいは電力の購入・自家発電比率の最適化、さらに SO_x 、 NO_x 排出量の抑制などの諸面からの検討も、省エネルギー問題の一環として大切である。

4.6 環境対策と省エネルギー

鉄鋼業の環境対策設備の運転に要するエネルギー量は、その定義によつても異なるが年々漸増してきており、製鉄所全体で現在すでに $200 \times 10^3 \text{kcal/t-steel}$ にも達し将来 SO_x 、 NO_x などにかかる規制が一層きびしくなるにしたがつて、さらに増加することが予想される。

図 15 は粗鋼年産 650 万 t 規模の製鉄所の環境対策エネルギー消費例である。ただし 1 h あたりの消費量で図示してある。

環境対策設備の所要エネルギーの大部分は電力でありこれは製鉄所の総電力使用量の 10~20% に相当している。

このように環境対策設備のエネルギー消費が急増し、将来さらに大きくなろうとしているので、製鉄所の省エネルギー計画の推進にあたって、省エネルギー型の環境対策技術の早期開発に強い関心がもたれている。

5. 結 言

以上、製鉄所の省エネルギー問題を、製鉄所が一つのエネルギー・システムであるという立場にたつて論述した。緒言でも述べたように、鉄鋼技術の歴史はエネルギー源の選択と、省エネルギー技術の歴史であるということもできるが厳密な意味ではこの種の研究はまだ始まったばかりである。たとえば本文中でもことわつたように、製鉄所においてエネルギーとは何か、という定義す

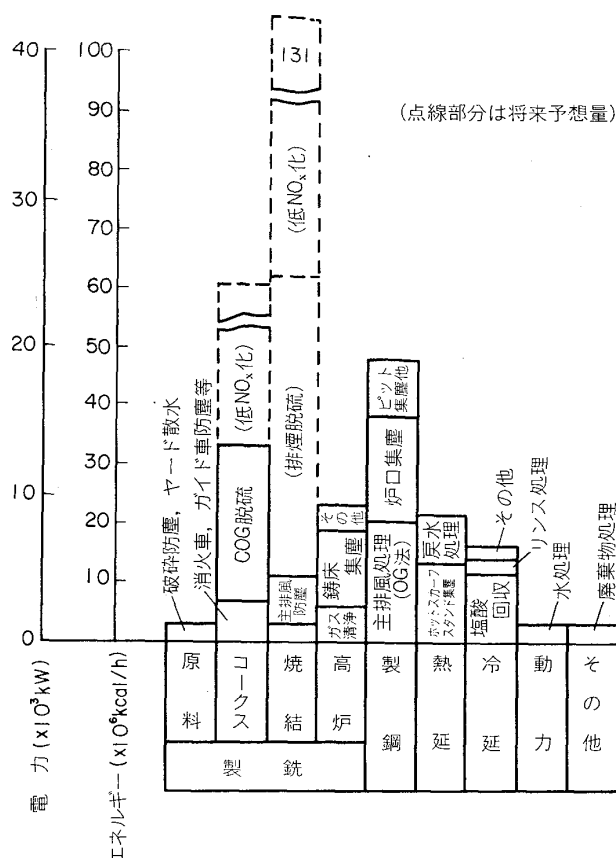


図15 部門別環境対策エネルギー（1時間あたりの消費量）
（粗鋼 650 万 t/年規模換算，出所：熱経済技術部会資料¹⁰⁾）

ら明確ではない。また通常粗鋼 t 当りで表示される製鉄所の総合エネルギー原単位についても、その深い意味と特性をここでも明らかにすることはできなかつた。エネルギー・システムのモデルについても、静的なものと動的なもの両者が必要であることを指摘したにとどまつた。

したがってこの報文でもシステム的な取り扱いを強調しながら、実際は個別の実績によつた部分が多い。その意味でこの報文は製鉄所の省エネルギー問題について、今後さらに厳密かつ理論的な考察を行なうための一つの足掛かりを提供したに過ぎない。なお対象としたテーマが大き過ぎて充分説明できなかつた部分や、問題提示の必要があると思われたものは、検討不足のまま、あえて記載した点がある。

いずれにしてもエネルギー問題は、原料問題、環境問題と並んで日本鉄鋼業の消長を左右する基本問題の一つであるので、今後一層の深い研究が必要である。

文 献

- 1) 資源エネルギー庁編 総合エネルギー統計 昭和52年度版
- 2) 3) 4) 第 61 回熱経済技術部会資料 (1977)

熱 61-1-8

鉄鋼工場におけるエネルギーバランス (一貫工場用)

5) 池田忠治: 鉄と鋼, 63(1977), p. 1909

8) 10) 第 56 回熱経済技術部会資料 (1975)

エネルギー技術小委員会編

熱 56-2-2 鉄鋼業における省エネルギー

6) 7) 9) 片田 中: 製鉄所における省エネルギーの総合的考察 第39回西山記念技術講座 (1976)