

論 文

焼成および非焼成ペレットを使用した還元鉄
製造プロセスのエクセルギー評価秋山 友宏*・高橋礼二郎*²・八木順一郎*²Exergy Evaluation on the Pellets Production and Direct Reduction
Processes for the Fired and Cement Bonded Pellets

Tomohiro AKIYAMA, Reijiro TAKAHASHI and Jun-ichiro YAGI

Synopsis :

In order to make a clear evaluation of overall energy requirement for the production system of directly reduced iron through pellet from iron ore powders, exergy analysis was applied to the two systems. The first one consists of pelletizing, firing and reduction processes (Fired pellets method) and the second one includes pellets curing process instead of firing process (Cement bonded pellets method).

Being compared with enthalpy balance, exergy analysis has two advantages in that the exergy expresses the quality of energy and evaluates different kinds of energy like chemical, thermal, pressure, mixing energies and so on by a unified measure.

As a result of exergy analysis, fired pellets lose less exergy than cement bonded pellets in the reduction process in a shaft furnace. As the overall system, however, exergy requirement in the cement bonded pellets method is about 50% of that in the fired pellets method. This marked difference is caused by the large exergy loss in the firing process. Furthermore, exergy loss in the production of cement bonded pellets will be decreased by decreasing the amount of cement added as binder.

Key words : energy saving ; direct reduction ; exergy ; enthalpy ; cement-bonded pellets ; fired pellets ; rotary kiln ; shaft furnace ; cement kiln.

1. 緒 言

製鉄原料の主流は焼成型の塊成鉱であるが、最近、省エネルギーの観点から、非焼成型塊成鉱が注目されている¹⁾²⁾。非焼成ペレットは、製造工程において NO_x 、 SO_x の発生がなく、炭材内装の効果が期待できる反面、セメント添加のため、製造価格が高く脈石成分が多くなるという欠点を持つ。非焼成ペレットの被還元性、必要強度等について、いくつかの研究³⁾²²⁾が報告されているが、焼成ペレットと比較し総合的にエネルギー評価を行つた報告は見あたらない。

一方、エネルギー評価は、従来、熱収支（熱精算あるいは熱勘定）に基づき行われてきたが、エネルギーの質的評価の点から、最近、エクセルギーによる解析^{4)~11)}が行われており、1981年には日本規格協会からその計算方法（JIS Z 9204）¹²⁾が示されている。

本報では、焼成および炭材内装非焼成ペレットの製造プロセス、および、シャフト炉によるそれらの還元プロセスにおけるエクセルギー評価を行い、省エネルギーのための基礎的知見を得た。

2. エクセルギー計算法⁸⁾¹²⁾¹³⁾

鉄鋼製錬プロセスの所要エネルギーを計算する場合、従来の熱収支による評価では、次のような欠点を有している。それは、

- 1) エネルギーの質的評価ができない。
- 2) 圧力エネルギーを評価できない。
- 3) 物質の持つエネルギーの絶対値が明確でない。

ことなどである。すなわち、1)は、80°Cと0°Cの水1kgを混合する例⁶⁾からも明らかのように、混合前後で等しい熱量であれば異なる温度レベルでも同一のエネルギーとして扱っており、高温ほど大きいエネルギーを

昭和61年4月本会講演大会にて発表 昭和62年3月16日受付 (Received Mar. 16, 1987)

* 東北大学選鉱製錬研究所 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Sendai 980)

*² 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

もつという通常感覚とは異なる。2) は、たとえば、高炉においては、炉頂の圧力を利用して発電をおこなっているように、近年、圧力のエネルギー評価が重要となっているものの、その直接的な評価ができない。3) は、エネルギーは物質に化学エネルギーの形で蓄えられるが、その評価法は各人により異なり、統一されていない。

本研究では、これらの問題を解決するため、エクセルギーを用いてプロセスのエネルギー評価を行った。エクセルギーの概念¹¹⁾を Fig. 1 に示す。全エネルギーは、標準状態下ではエンタルピー ($H-H_0$) で与えられるが、これは熱量 $T(S-S_0)$ と自由エネルギー ($G-G_0$) の二つに分けることができる。自由エネルギーは、100% 仕事に変えることができるが、熱量はカルノー効率により支配され、その一部しか仕事に変換できない。従って、全エネルギーのうち仕事に変換することのできる有効エネルギー (エクセルギー) は、 $(H-H_0)-T_0(S-S_0)$ であり、残りの部分は仕事をすることができないエネルギーということで無効エネルギー (アネルギー) と呼ばれている。

定常流れ系の場合の基礎式を Table 1 に示す。ここで、 n_i , ϵ_i^0 , P_i , $\bar{C}_{pi}$ はそれぞれ、成分 i のモル数、標準状態 (1 atm, 298.15 K, 組成 $[N_2(75.6\%)-O_2(20.34\%)-H_2O(3.12\%)-CO_2(0.03\%)-Ar(0.91\%)]$) における純成

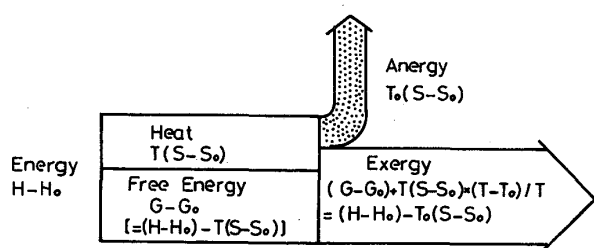


Fig. 1. Concept of exergy.

Table 1. Equation of exergy.

$$\begin{aligned} \epsilon = & \sum n_i \epsilon_i^0 \\ & \text{(Chemical)} \\ & + (\sum n_i \bar{C}_{pi}) \{ T - T_0 - T_0 \ln(T/T_0) \} \\ & \text{(Temperature)} \\ & + (\sum n_i) RT_0 \ln \{ \sum (P_i/P_0) \} \\ & \text{(Pressure)} \\ & + RT_0 \sum [n_i \ln \{ n_i / (\sum n_i) \}] \\ & \text{(Mixture)} \end{aligned}$$

分のエクセルギー (標準エクセルギー), 分圧および平均比熱を示す。データの物質収支を確認したあと、比熱の温度変化を考慮したプログラムを用い、化学、温度、圧力、混合の各エクセルギーを計算する。

標準エクセルギーについて、主なものを Table 2 に示す。標準状態下 (酸化性雰囲気) で安定に存在しうるのは零であり、不安定になるほど大きな値を示している。例えば酸化鉄についてみると、天然に存在する Fe_2O_3 は、標準状態のもとでは組成が変化しないのでそのエクセルギーの値は零である。しかし、製錬工程において還元が進み、 Fe_3O_4 , $Fe_{0.947}O$, Fe となるにつれ、化学エクセルギーが蓄えられ、順次、大きな値を示すようになる。

また、燃料のエクセルギーは、Table 3 に示した RANT の近似式¹⁴⁾を用いて評価した。ここで、 H_h , H_l は、燃料の高発熱量、低発熱量、 r は 1 atm, 298.15 K の水蒸発熱 (2 438 kJ/kg), w は燃料中の全水分量を示す。

3. 還元鉄製造プロセスのエクセルギー評価

エクセルギー評価を行った二つのプロセスを Fig. 2 に示す。表中の各プロセスのうち評価の対象としたプロセスは①粉碎、②セメント製造、③ペレット養生、④ペレット焼成、⑤ペレット還元の五つである。非焼成ペレットに内装した炭材は、コークス乾式消火装置 (CDQ) により発生したものを用いるものとし、製造に要するエクセルギーは考慮しなかつた。また、造粒およびペレットの輸送の動力はわずかのエクセルギーと考え無視した。

計算は、上記の各プロセスごとに閉じた系を想定し、その検査面を通過して流入、流出する物質および熱の収支をとり、次式によりエクセルギー損失を計算した。

$$\epsilon_{loss} = \epsilon_{in} - \epsilon_{out}$$

物質および熱に関しては、保存則が成り立つが、エクセルギーは、エントロピー増大則により不可逆変化があると減少する。この減少量が、エネルギーの質の低下を表している。言い換えれば、そのプロセスを操業するために必要な正味のエクセルギー損失量と考えることができる。そこで、焼成および非焼成の両プロセスについて、まず、鉱石から還元鉄ができるまでの各プロセスのエク

Table 2. Standard exergy.

Gas	N ₂	O ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂	CO	CH ₄		
ε°(kJ/mol)	0.71	3.93	8.63	20.14	235.39	275.55	830.74		
Solid	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	C	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	Fe _{0.947} O	Fe
ε°(kJ/mol)	0.00	0.00	100.36	110.41	410.83	0.00	96.97	118.74	368.41

Table 3. RANT's equation to estimate exergy of fuels.¹⁴⁾

Gas	:	$\epsilon=0.95 H_h$
Liquid	:	$\epsilon=0.975 H_h$
Solid	:	$\epsilon=H_l+rw$

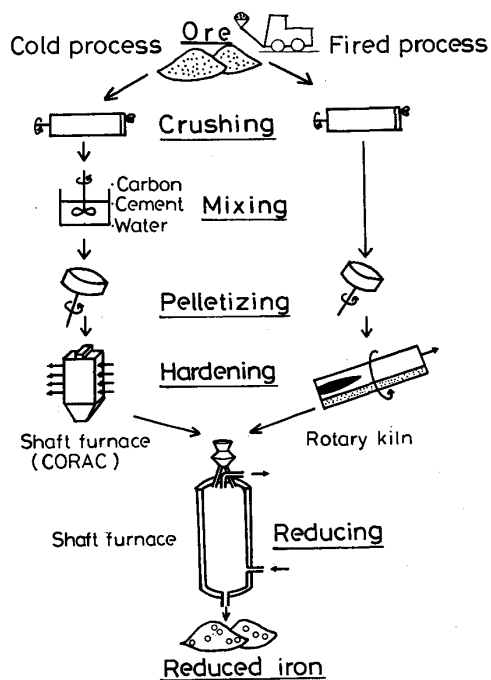


Fig. 2. Two different processes for direct reduced iron.

セルギー損失量を計算し、それらを組み合わせてシステム全体のエクセルギー損失量を評価した。

3.1 非焼成ペレットの製造におけるエクセルギー損失

3.1.1 鉱石の粉碎に要するエクセルギー

粉碎のエクセルギーは BOND の粉碎仕事指数 $W_i^{15)}$ に基づき算出した。 W_i は無限に大きい碎料 1t を、80% 粒径 100 μm まで粉碎するのに要する仕事量を表す。赤鉄鉱の場合は 73 MJ/t-Fe となる。焼成プロセスの場合も同じ値を用いた。

3.1.2 セメント製造に要するエクセルギー

非焼成ペレットは、強度を保つために数パーセントのポルトランドセメントを使用している。セメント製造工程は①原料粉碎、②焼成、③セメントクリンカ粉碎の三つからなる。このうちエクセルギー使用量は②が最も多い。焼成には、Fig. 3 に示したような仮焼炉付サスペンションプレヒーターキルン (New Suspension Preheater, 以下 NSP と略す) が、主に用いられている。これは、キルンの上端にサイクロンを4段直列に設け、キルンの排ガスと原料を熱交換させることにより熱回収させ、さらに、最下段のサイクロンと下から2段目のサ

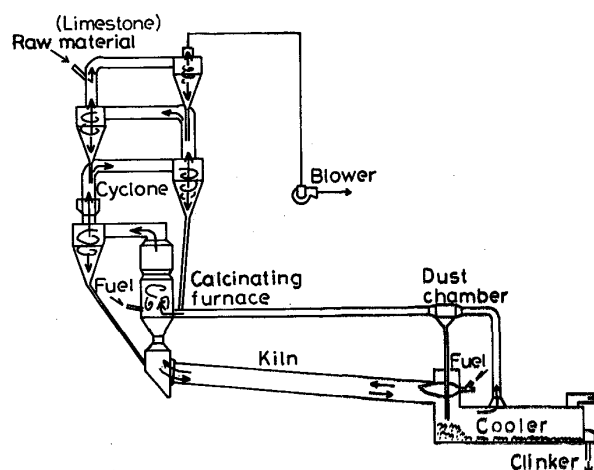


Fig. 3. NSP kiln process for cement.

Table 4. Exergy flow in NSP kiln process.

	Exergy (MJ/t-Clinker)
(Inflow)	
Coal	3 471
Gas	1
Raw material	8
Dust	1
Total	3 481
(Outflow)	
Clinker	1 311
Kiln gas	267
Cooler gas	126
Dust	1
Total	1 705
Loss	1 776
Efficiency(%)	49.0

イクロンとの間に仮焼炉を設け、原料の仮焼 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) を一部行っている。

セメント生産量が 3 700 t/日の NSP キルンプロセスの実操業のデータに基づいて計算を行った。結果を Table 4 に示す。セメントクリンカ 1t 当たり 1 776 MJ のエクセルギー損失があつた。原料、セメントクリンカの粉碎に要するエクセルギーは、それぞれ 42, 64 MJ/t であつたので、このセメント製造プロセスにおけるエクセルギー損失量は、全体として 1 882 MJ/t となつた。

3.1.3 ペレットの養生に要するエクセルギー

ヤード養生法¹⁶⁾ は養生エネルギーを必要としないものの、一次、二次養生が必要であり、あわせて 9~11 日間の長期間を要し、養生に広い場所を必要とする欠点がある。そこで、これらの欠点を解消するため、連続急速養生法 (Continuous Rapid Curing 以下 CORAC と略す)¹⁷⁾ が提案されているが、ここでは、このプロセスで養生を行うことを想定してエクセルギー評価を行った。この方法の概略を Fig. 4 に示す。第1シャフト炉では、まず、急激な水分の蒸発による崩壊を回避するために 70~120°C の温風で予備乾燥を行い、つぎに、65~

70°C の炭酸化ガス [CO₂ (30%) -H₂O (25%) -Air (45%)] で炭酸化反応を行う。その後、第2シャフト炉に装入され、上部で 220°C の熱風により乾燥されたあと、下部で空気により冷却され成品となる。ガスと固体の流れが十字流方式の二つのシャフト炉により約 9% の水分が除去され、必要強度が得られる。供給ガスは低温であるため、工場からの排ガスの利用が可能であることや、有害ガスの発生のないことなどが特徴である。

100 t/日の炭材内装シリコマンガペレットの操業データ¹⁸⁾に基づき、エクセルギー損失を算出した。酸化鉄ペレットに関する操業実績はないが、養生プロセスでは水分の除去とセメントの炭酸化反応だけが生じていること、および、比熱に大きな違いがないことから酸化鉄ペレットの場合もほぼ同様の条件になると考えた。計

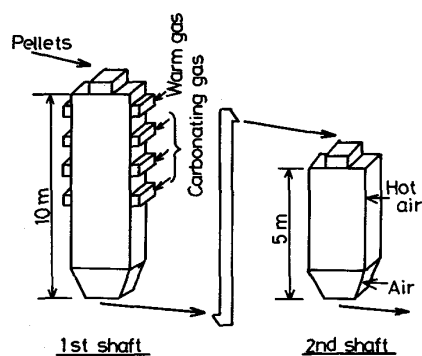


Fig. 4. Continuous rapid curing process¹⁸⁾.

Table 5. Exergy flow in continuous rapid curing process.

	Inflow	Outflow (MJ/t-Fe)
Pellets	2 768	2 772
Preheating gas	55	2
Carbonating gas	69	62
Drying gas	145	49
Cooling gas	0	14
Total	3 037	2 899
Exergy loss	138	—
Efficiency(%)	95.5	—

算結果を Table 5 に示すが、このプロセスのエクセルギー損失は 138 MJ/t-Fe であった。

3.2 焼成ペレット製造におけるエクセルギー損失

グレート式ロータリーキルンによる焼成を想定してエクセルギー評価を行った。評価の対象とした 9 000 t/日規模のプロセスを Fig. 5 に示す。造粒後、ペレットはトラベリンググレートで、付着水の除去、結晶水の除去、および、予熱が行われた後、キルン内に装入される。ペレットは、石炭の燃焼熱により最高 1 300°C まで加熱される。その後、アンニュラクーラーの円環状の移動格子に上層状にならべられ、下部より吹き込まれた冷却空気により、顕熱が回収された後、排出される。計算結果を Table 6 に示す。このプロセスのエクセルギー損失は 1 520 MJ/t-Fe であった。

3.3 ペレット還元プロセスにおけるエクセルギー損失

1 t/日の実験室的規模のシャフト炉を用いて、還元ペレット製造の実験を行った。Fig. 6 に装置の概略を示

Table 6. Exergy flow in grate rotary kiln process.

	Traveling grate	Rotary kiln	Annular cooler (MJ/t-Fe)
(Inflow)			
Pellets	88	699	1 114
Coal	0	1 022	0
Gas	1 026	888	2
Elec. power	—	6	—
Total	1 114	2 615	1 116
(Outflow)			
Pellets	699	1 114	0
Gas	0	1 026	486
Total	699	2 140	486
Loss	415	475	630
Efficiency(%)	62.7	81.8	43.5

Table 7. Chemical composition of the pellets (wt%).

Pellet	T. Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO
N	64.43	0.26	2.62	2.53	0.48	0.06	—
SC*	62.90	0.15	6.43	2.13	0.51	0.04	—
W	64.60	0.26	0.26	3.71	2.18	0.14	0.66

* Except char (5.0 wt%)

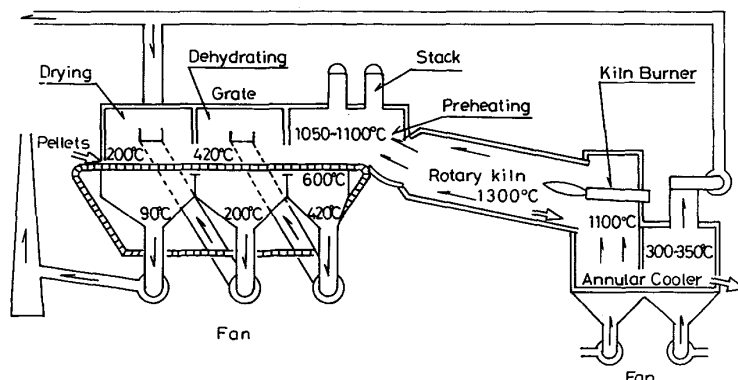


Fig. 5. Grate rotary kiln process for firing pellets.

す。この装置および諸設備による研究は、すでにいくつか報告^{19)~22)} されているので詳細な説明は省略する。実験に使用したペレットの化学組成を Table 7 に示す。N, W は焼成ペレット, SC は炭材を内装した非焼成ペレットである。粒径は、すべて 12~14 mm ϕ とした。また、SC ペレットはセメントを 8% 添加しているため、脈石成分が焼成ペレットにくらべ高くなっている。実験条件を Table 8 に示す。ここで T_g , P_i , G , W , Y はそれぞれ入口ガス温度、入口圧力、ガス流量、ペレット降下速度、ガス成分である。F-1, F-2 は焼成した N, W ペレットを、C-1 は非焼成の SC ペレットを使用した場合で、いずれも入口ガスの温度、圧力はほぼ同じ条件と

した。シャフト炉操業においては、通常、天然ガスを水蒸気改質したガスが用いられるが、ここでは比較のために H_2 ガスだけによる実験 (F-2) も行つた。また、ガス製造のエクセルギーは、焼成、非焼成プロセスに共通であるため、評価の対象としなかった。

各条件におけるエクセルギー収支を、Table 9 および Fig. 7 に示す。また、比較のため、エンタルピー収支を Fig. 8 に示したが、アネルギーを評価しているため、各条件ともエクセルギーよりも大きな値となっている。

F-1 の場合のエンタルピー、エクセルギー、アネルギーを Fig. 9 に示した。エンタルピーは不変であるものの、エクセルギーは減少していることがわかる。

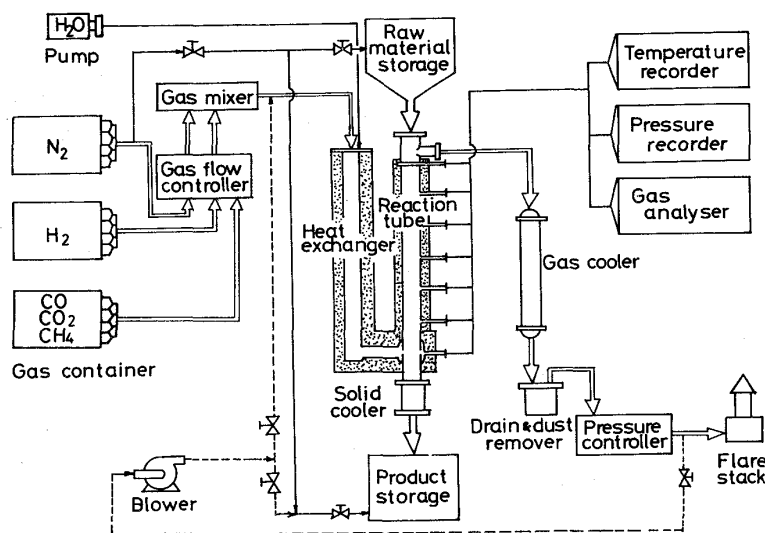


Fig. 6. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 8. Experimental conditions for the shaft furnace operations.

Run No.	T_g (K)	P_i (MPa)	$G \times 10^2$ (m ³ (STP)/s)	$W \times 10^3$ (kg(Fe)/s)	G/W (m ³ (STP)/kg(Fe))	Y_{H_2} (%)	Y_{CO} (%)	Y_{H_2O} (%)	Y_{CO_2} (%)	Y_{CH_4} (%)	Y_{N_2} (%)
F-1	1112	0.142	0.793	3.01	2.63	74.71	14.84	1.684	4.136	1.530	3.38
F-2	1180	0.116	1.44	6.24	2.30	100	—	—	—	—	—
C-1	1133	0.147	0.799	2.58	3.10	79.66	13.10	0.718	4.708	0.226	1.64

Table 9. Enthalpy and exergy in the shaft furnace.

(MJ/t-Fe)

	F-1		F-2		C-1		NSC ²³⁾	
	Enthalpy	Exergy	Enthalpy	Exergy	Enthalpy	Exergy	Enthalpy	Exergy
(Inflow)								
Gas	35 271	28 982	31 830	25 436	36 092	29 342	27 605	22 874
Pellets	138	88	50	33	2 751	2 734	59	42
Total	35 409	29 070	31 880	25 469	38 843	32 076	27 664	22 916
(Outflow)								
Gas	27 525	22 706	23 811	19 114	26 763	21 818	19 109	15 965
Pellets	7 055	5 996	6 988	5 937	10 723	9 576	7 767	6 695
Total	34 580	28 702	30 799	25 051	37 486	31 394	26 876	22 660
Loss	829	368	1 081	418	1 357	682	788	256
Efficiency (%)	97.7	98.7	96.6	98.4	96.5	97.9	92.7	98.9

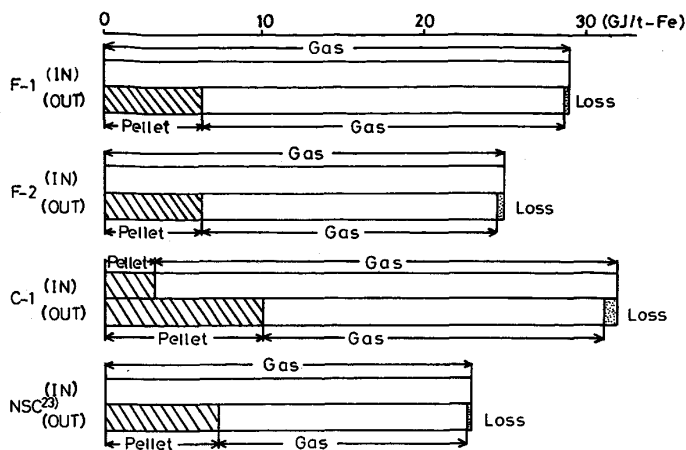


Fig. 7. Exergy balance in the shaft furnace.

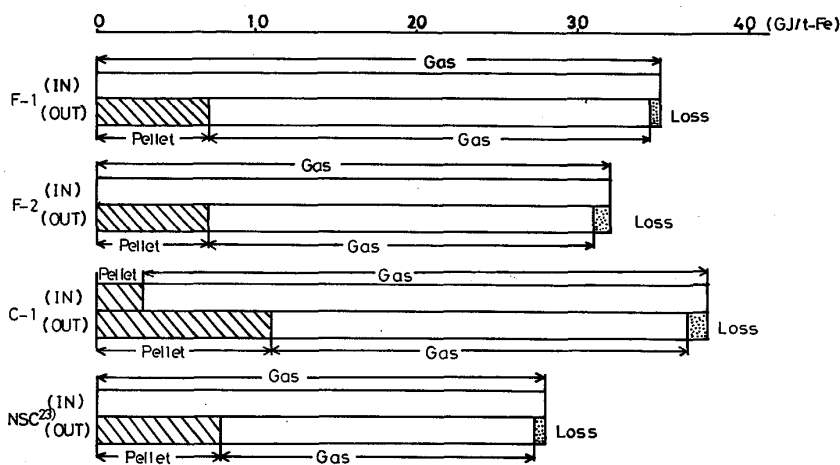


Fig. 8. Enthalpy balance in the shaft furnace.

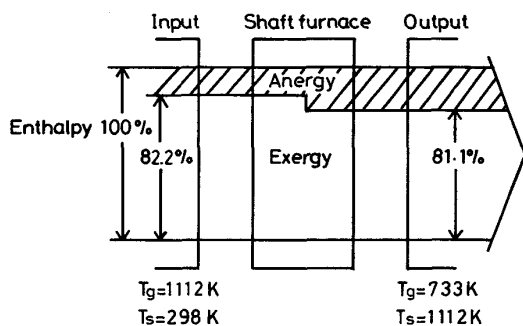


Fig. 9. Enthalpy, exergy and anergy flows in the shaft furnace.

Fig. 7 をみると、焼成ペレットの場合、 H_2 還元にくらべ、混合ガス還元の方がエクセルギー損失量が少ないのは、 CO 還元による発熱反応のためと考えられる。

一方、非焼成ペレットは焼成ペレットにくらべシャフト炉内においてエクセルギー損失量が多い。この主な理由は、セメントを 8% 添加することによりスラグ成分が多くなったこと、結晶水の分解反応が吸熱反応である

こと、および、炭材のガス化反応が吸熱反応であることなどである。しかし、本実験では炭材の減少量のごくわずかであったため、ガス化反応の影響は小さいと考えられる。また、C-1 の場合の流入ペレットのエクセルギーが大きいのは、含有している炭素の化学エクセルギーが大きいためである。装置規模の影響を検討するために、焼成ペレットによる 500 t/日の操業²³⁾ について、エクセルギー収支を計算した結果についても Table 9 に示してある。

シャフト炉におけるペレットの還元プロセスにおいて、焼成ペレット (F-1) の場合、368 MJ/t-Fe、非焼成ペレット (C-1) の場合、682 MJ/t-Fe のエクセルギーを要し、このプロセス単独で見た場合、非焼成ペレットのエクセルギー損失量の方が大きいことがわかる。

3・4 焼成および非焼成プロセスの総合的評価

3・1～3・3 において算出したエクセルギー損失量を加算して Fig. 10 に示す。シャフト炉においては、焼成ペレットのエクセルギー損失量が小さいが、非焼成プロセスでは、ペレット製造過程におけるエクセルギー損失量

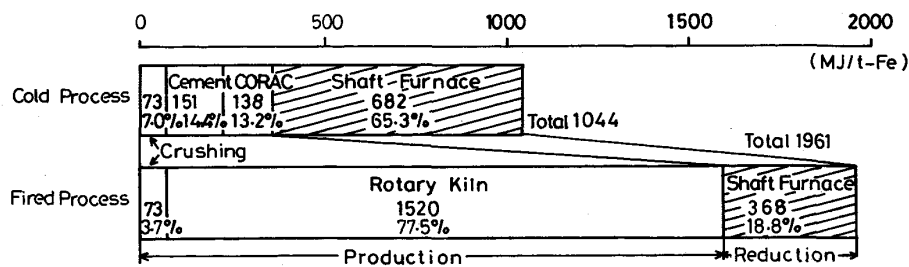


Fig. 10. Overall net exergy consumption for production of directly reduced iron.

が極めて小さいので、プロセス全体としてのエクセルギー損失量は小さくなる。算出したエクセルギー損失量は、プラントの規模、あるいは、操業技術によつて変化し、絶対的な値ではない。しかし、これらのことを考慮しても、焼成、非焼成ペレットのエクセルギー損失量は相当に異なっているといえる。

また、本報で使用した非焼成ペレットには 8% のセメントが添加されているが、最近、強度的に 3~4% のセメント添加で十分であるという報告²⁴⁾がある。それに基づくとセメントに要するエクセルギーは半減する。さらに、ペレットの脈石成分を減少させるため、シャフト炉でのエクセルギー損失も減ることが予想される。また、養生に関しても、ヤード養生法は CORAC 法にくらべると、熱風を必要としない自然乾燥であるため、エクセルギー損失量が少なくなり、エネルギー的見地からみると、さらに非焼成プロセスは有利になると考えられる。

4. 考 察

反応過程におけるエクセルギーの損失には、次に示す五つの要因が考えられる。

- 1) 反応器壁面からの熱損失に基づくもの
- 2) 反応の不可逆性に基づくもの
- 3) 加熱、冷却に基づくもの
- 4) 圧力の損失に基づくもの
- 5) 物質の混合に基づくもの

これらの損失についてはそれぞれを要約すれば以下のようになる。

1) によるエクセルギー損失は、装置の断熱性不良、きれつの発生、炉温および炉圧の変動、不連続な運転、冷却水による熱の運搬などにより起こる。エンタルピー損失は放熱量だけを表しているといえる。装置を大型化し、内容積当たりの壁面割合を減らすことは、この損失を減少させる一つの方法である。シャフト炉において 500 t/日規模と比較した (Fig. 7 参照) が、本研究で使

用した炉の断熱がかなり良好であるため (Fig. 8 参照)、それほど大きな差は見られなかった。

2) によるエクセルギー損失は、代表的なものに燃焼がある。セメント製造、ペレット焼成の損失が大きいことは燃焼管理が重要であることを示唆している。燃焼によるエクセルギーの消滅は理論空気量で最小となるが、工業的に 2200°C という高温はあまり用いられていないので、大量の空気希釈している。このため、その加熱に余分なエクセルギーを要しているといえる。

3) によるエクセルギー損失は、装入された固体の加熱および冷却によつて生ずるので、目的とする物質以外のものを取り除くことにより小さくできる。シャフト炉では、ペレットの脈石成分の加熱に余分なエクセルギーが消費されているといえる。また、最適な炭材添加量の検討が今後の課題である。本実験条件下では添加量の数%の消費であつた。

4) によるエクセルギー損失は、装置の気密性などにより生ずる。対象とした装置は圧力損失が小さかつたため、いずれも圧力エクセルギー損失量は少なかった。

5) によるエクセルギー損失は、拡散によるエンタルピーの増加により生じる。本研究では、この混合によるエクセルギー損失量は流入、流出エクセルギーにくらべ無視できる程度であつた。

2) ~5) は、従来、損失として評価されなかつたもので、熱量は全く失っていないにもかかわらず、エネルギーの質的低下が起きていることを示している。また、各プロセスとも流出する未利用のエクセルギーは大きな割合を占めており、今後、効率の良いエクセルギー回収技術の開発が望まれる。

5. 結 言

還元鉄製造における焼成ならびに非焼成プロセスをエクセルギーを用いて評価した。その結果、以下のことが明らかとなつた。

- 1) 鉱石から還元鉄を製造する全工程における非焼成

プロセスのエクセルギー損失は、焼成プロセスの約5割である。この値はセメント添加量の低減等によつてさらに下がる可能性がある。

2) 非焼成プロセスにおいて、セメント製造におけるエクセルギー損失は、非焼成ペレット製造におけるエクセルギーの約4割を占める。養生過程に想定した連続急速養生法は、エクセルギー損失が少なく効率も高い。

3) 焼成プロセスにおいて、燃焼によるエクセルギー損失は大きい。しかし、非焼成ペレットはセメント添加のため脈石成分が高く、加熱および冷却に際しては焼成ペレットにくらべ、多くのエクセルギーを要する。したがつて、シャフト炉による還元プロセスでは焼成ペレットが有利である。

4) 鉄鋼製錬のように、熱のみならず、物質分離、化学反応をともなつたプロセスのエネルギー評価に際しては、本報で示したように、物質のもつエネルギーが明確に表現でき、かつ、熱エネルギーの質的評価ができるエクセルギー評価が有効である。

本研究を行うにあたり(株)神戸製鋼所加古川製鉄所、日本鋼管(株)新潟製造所、東北開発(株)岩手セメント工場より操業データの御提供を賜つた。記して謝意を表する。

文 献

- 1) 高橋愛和, 高橋礼二郎: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 37
- 2) 高橋礼二郎, 高橋愛和: 東北大学選研彙報, **41** (1985), p. 109
- 3) D. Mora NAVARRO, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **72** (1986), S 97
- 4) 石谷清幹: 熱管理士教本 (1977) [共立出版]
- 5) 沼野正博: 熱エネルギー工学入門 (1982) [オーム社]
- 6) 信澤寅男: エネルギー工学のためのエクセルギー入門 (1980) [オーム社]
- 7) 押田勇雄: エクセルギー講義 (1986) [太陽エネルギー研究所]
- 8) ムーンライト計画「エクセルギー評価方式確立調査」((社)燃料協会編) (1981, 1982)
- 9) D. R. MORRIS and F. R. STEWARD: Metall. Trans. B, **15** (1984), p. 645
- 10) 森塚秀人: 日本機械学会論文集 (B編), **52** (1986), p. 4061
- 11) 石田 愈, 西田直矩: 燃料協会誌, **60** (1981), p. 952
- 12) 有効エネルギー評価方法通則, JIS Z 9204 (1980)
- 13) 笛木和雄, 鯉沼秀臣, 城子克夫, 原田 卓: 省エネルギー, **35** (1983) 2, p. 11
- 14) Z. RANT: Wärmetechn., **10** (1961), p. 172
- 15) 粉碎仕事指数の試験方法, JIS M 4002 (1969)
- 16) 孤崎寿夫, 稲角忠弘, 須沢昭和, 水鳥武和, 相田実生, 田中 務: 鉄と鋼, **65** (1979), S 575
- 17) 宮下恒夫, 吉越英之, 松井正治, 田島 治, 福与 寛: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1974
- 18) 山岸一雄, 岸川一男, 竹内 修, 鳥居建二, 斉藤 汎, 福与 寛: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 2024
- 19) 高橋愛和, 高橋礼二郎: 東北大学選研彙報, **35** (1974), p. 147
- 20) 高橋礼二郎, 古藪幸夫, 石井正夫, 石垣政裕, 高橋愛和: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1985
- 21) 八木順一郎, 高橋礼二郎, 秋山友宏: 東北大学選研彙報, **42** (1986), p. 91
- 22) 高橋礼二郎, 石井正夫, 八木順一郎: 東北大学選研彙報, **41** (1985), p. 109
- 23) Y. HARA, T. WAKABAYASHI and N. OTSUKI: The 8th Japan-USSR Joint Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Processes, Tokyo (1981), p. 229
- 24) 石井正夫, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **72** (1986), S 882