

高炉の熱勘定について

川 江 信 治*・茂 地 徹*
金 丸 邦 康**・山 田 昭*

Heat Balance of Blast Furnace

by

Nobuji KAWAE*, Toru SHIGECHI*,
Kuniyasu KANEMARU** and Takashi YAMADA*

Heat balance of blast furnace is actively applied in an iron works to save energy or to operate the blast furnace effectively. The methods used in the heat balance of blast furnace are usually classified into three kinds according to the object of application.

Recently, large-sized blast furnaces are making good use of sinter and are being in operation with all cokes. To meet such situation, it is important to examine the methods employed in the calculation of the heat balance of blast furnace.

In this study, the authors have discussed in parallel three kinds of methods used in the heat balance and developed new ones based on the actual situation by adjusting the items to be examined. The flow of heat in the blast furnace can be easily estimated by applying the present methods. Furthermore, the validity of the present methods has been testified by calculating the heat balance using data obtained in actually operating blast furnaces.

1. まえがき

高炉はコークスを燃焼し、その熱で鉄鉱石を還元溶解する炉である。高炉内の熱は、大部分羽口前のコークス燃焼によって発生し、そこで発生した高温のガスは炉内を上昇し、装入物を還元溶解する。一方、発生した熱のうち、一部は、溶銑、溶渣、炉頂ガスに含まれて炉外に放熱される。高炉操業にあたっては、炉内のどの部分に熱が消費されているか、羽口前の燃焼温度は維持されているかなどの高炉内の熱的状态を把握しておくことが必要である。この熱的状态を把握する手段として熱勘定が用いられている。すなわち、高炉

内での物質収支、熱収支を勘定することにより炉内の反応の状態を知ることができるからである。高炉における熱勘定は、利用する目的によって三つの方法が現在行われている。

第1法：コークスおよび補助燃料の全発熱量を基準とする方法

コークスおよび補助燃料中の炭素(C)、水素(H₂)が、すべてCO₂、H₂Oにまで燃焼する発熱量を入熱とし、炉頂排ガス中のCO、H₂は潜熱として出熱に計算する。この方法は、製鉄所全体の熱の流れを知る場合に用いられるが高炉内部の熱の利用状態を判断する手

平成2年4月28日受理

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

**共通講座・工業物理学 (Applied Physics Laboratory)

法としては適当でない。

第2法：コークスおよび補助燃料の反応熱を基準とする方法

コークスおよび補助燃料中のC、H₂が実際に燃焼して生成するCO、CO₂、H₂Oの反応熱を入熱とし、炉頂排ガス中のCO、H₂の潜熱は出熱として計算しない。この方法は、高炉自体の熱バランスを求め、炉内の反応の状態を大まかに知るのに用いられる。詳細を知るためにはつぎの第3法が用いられる。

第3法：個々の炉内反応を出熱、入熱として計算する方法

コークスおよび補助燃料の炉内における反応を羽口前の燃焼、直接還元反応、間接還元反応に区別して計算する。この方法は炉内で実際に発生し、消費される熱量を考えているので、原燃料の評価も含めて、高炉の炉況を判断するには最も適した方法である。

製鉄所では独自にこれらの方法の計算方法を設定して操業上の参考にしている。これらの3法を記述した文献は少なく、重見¹⁾著書の中で簡単に述べられているが、記述されている物性値、計算方法に不十分な所および誤りがある。以上のことから筆者らは、最近の大型高炉に適用しうる高炉の熱勘定計算方法を最新の物性値および反応状態を採用して作製したので、ここに報告するものである。

記号

t・p	銑鉄 1ton	
C _{co}	CO にガス化する炭素量	kg/t・p
C _{co2}	CO ₂ にガス化する炭素量	kg/t・p
C _{gas}	ガス化する総炭素量	kg/t・p
C _{H2O}	送風中の水分と反応する炭素量	kg/t・p
CO ₂	送風中の酸素と反応する炭素量	kg/t・p
C _{pX}	物質Xの平均定圧比熱	kcal/(kmol・k)
C _{sl}	ソリューション・ロスの炭素量	kg/t・p
C _{smpt}	Si, Mn, P, Ti と反応してガス化する炭素量	kg/t・p
C _{tuy}	羽口前でガス化する炭素量	kg/t・p
Fe ₃₄	Fe ₃ O ₄ から還元される銑鉄中のFe量	kg/t・p
Fe ₂₃	Fe ₂ O ₃ から還元される銑鉄中のFe量	kg/t・p
CR	コークス比	kg/t・p
ΔH _{X-y}	x-y における反応熱量 (標準生成エンタルピ)	kcal/kmol
M	送風湿度	kg/m ³ _N
P _X	銑鉄 1ton 当りの物質Xの重量	kg/t・p

n _X	送風またはガス中の物質Xのモル数	kmol/t・p
Q _{pig}	銑鉄の指定温度における熱容量	kcal/kg
Q _{slag}	スラグ指定温度における熱容量	kcal/kg
SV	スラグ生成量	kg/t・p
T・Fe	トータル Fe 量	kg/t・p
V _b	送風量	m ³ _N /t・p
V _{top}	炉頂ガス量	m ³ _N /t・p
W	コークスの付着水分量	kg/t・p
WQ	冷却水量	kg/t・p
(X)	物質Xのガス中の体積分率	(-)
<X>	物質Xの母体中の質量分率	(-)
[X]	銑鉄 1ton 当りの物質Xの重量	kg/t・p

下添字

COKES	コークス
ORE	鉄鉱石
b	送風
top	炉頂ガス
pig	銑鉄
slag	スラグ
dust	ガス灰
in	冷却水の入口側
out	冷却水の出口側
0	大気の状態

2. 熱勘定に必要なデータ値の算出

高炉の熱勘定は Table 2 に示す高炉の熱勘定法にしたがって行われる。Table 2 中にある諸量は、操業データ・分析値・物性値などから算出しなければならないので以下にその算出方法を述べる。なお、一般に熱収支を計算する場合の熱量の単位としては、銑鉄 1ton 当りの熱量を用いる。操業データは現場の作業日報から採取するが、送風量、炉頂ガス量等は計量が難しく、計算によって求めることにする。これらの値は工業単位が用いられているので、整合性を重んじて本文の単位は工業単位を用いることにする。

2. 1 熱勘定に必要な操業データ

(1) 各種原単位

コークス比 [kg/t・p]、鉄鉱石 [kg/t・p]、補助燃料比 [kg/t・p]、石灰石 [kg/t・p]、鉱滓量 [kg/t・p]、ガス灰 [kg/t・p]

(2) 操業条件

(a) 送風流量 [m³_N/t・p]

- 温度 [°C], 圧力 [atg],
湿度 [g/m³·DA],
酸素富化率 [%]
(b) 銑鉄 出銑温度 [°C]
(c) 鉍滓 出滓温度 [°C]
(d) 炉頂ガス ガス温度 [°C], 圧力 [atg]
(e) ガス灰 ガス灰温度 [°C]
(f) 炉冷却水 流量 [m³/t·p],
出入口温度 [°C]

(3) 分析値

コークス, 鉄鉍石, 石灰石, 補助燃料, 鉍滓, 銑鉄, 炉頂ガス, ガス灰

2. 2 計算によって求める必要データ

(1) 炉頂ガス量 (乾)

炉頂ガス量は装入, 排出のカーボンバランスによりガス化する炭素量を求め, この量が炉頂ガス中の炭素量と等しいという関係を用いて求める。装入物・排出物中に含有される炭素量を下表の記号で表せば,

銘 柄	炭素含有量 [kg/t·p]
装	
コークス	a
補助燃料	b
入	
上記以外の装入物	c
排	
銑鉄	d
ガス灰	e
出	
上記以外の排出物	f

ガス化する炭素量 C_{gas} は

$$C_{\text{gas}} = a + b + c - d - e - f$$

炉頂ガス量 V_{top} [m³·N/t·p] は炉頂ガス中の CO, CO₂ の体積分率をそれぞれ (CO)_{top}, (CO₂)_{top} とすれば,

$$V_{\text{top}} = C_{\text{gas}} \times \frac{22.4}{12.0} \times \frac{1}{(\text{CO})_{\text{top}} + (\text{CO}_2)_{\text{top}}}$$

(2) 送風量

送風量 V_b は窒素バランスにより炉頂ガス量 V_{top} から求める。すなわち, 送風中の窒素量と炉頂ガスの窒素量を等しいと置く。

$$V_b = V_{\text{top}} \times \frac{(N_2)_{\text{top}}}{(N_2)_b}$$

(3) 炉頂ガス中の水分量

炉内で水素還元により発生した水分量を水素バランスによって求める。装入物 (鉄鉍石, コークス) の付着水や結晶水は, 高炉に装入されると間もなく蒸発し, 炉内反応には関与しないものとする。

	名 称	単体水素量 (kg/t·p)	水分量 (kg/t·p)
入 量	送 風		[H ₂ O] _b
	コークス	[H ₂] _{COKEs}	
	重 油	[H ₂] _{oil}	
出 量	炉頂ガス	[H ₂] _{top}	[H ₂ O] _{top}

ここで, Mを送風湿度 [kg/m³·N], CR および OR をコークス比 [kg/t·p], 重油比 [kg/t·p] とすれば,

$$[H_2O]_b = V_b \times M$$

$$[H_2]_{\text{COKEs}} = CR \times \langle H_2 \rangle_{\text{COKEs}}$$

$$[H_2]_{\text{oil}} = OR \times \langle H_2 \rangle_{\text{oil}}$$

$$[H_2]_{\text{top}} = V_{\text{top}} \times (H_2)_{\text{top}} \times \frac{2.0}{22.4}$$

となり, よって炉頂ガス水分量 [kg/t·p] は

$$[H_2O]_{\text{top}} = [H_2O]_b + ([H_2]_{\text{COKEs}} + [H_2]_{\text{oil}} - [H_2]_{\text{top}}) \times \frac{18}{2}$$

(4) CO, CO₂ にガス化する炭素量 C_{CO} , C_{CO_2}

炉頂ガス中の CO, CO₂ の体積分率 (CO), (CO₂) を用いて CO, CO₂ にガス化する炭素量 C_{CO} , C_{CO_2} を求める。

$$C_{\text{CO}} = C_{\text{gas}} \times \frac{(\text{CO})_{\text{top}}}{(\text{CO})_{\text{top}} + (\text{CO}_2)_{\text{top}}}$$

$$C_{\text{CO}_2} = C_{\text{gas}} \times \frac{(\text{CO}_2)_{\text{top}}}{(\text{CO})_{\text{top}} + (\text{CO}_2)_{\text{top}}}$$

(5) 羽口前でガス化する炭素量 C_{tuy}

送風中酸素でガス化する炭素量 C_{O_2} は次式で与えられる。

$$C_{\text{O}_2} = V_b \times (O_2)_b \times \frac{12}{22.4}$$

ここで, (O₂)_b は送風中の酸素の体積分率である。つぎに, 送風中水分でガス化する炭素量 $C_{\text{H}_2\text{O}}$ を求める。

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = V_b \times M \times \frac{12}{18}$$

したがって, 羽口前でガス化する炭素量 C_{tuy} は次式で求められる。

$$C_{\text{tuy}} = C_{\text{O}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}}$$

(6) Si, Mn, P, Ti でガス化する炭素量 C_{smpt}

銑鉄中の Si, Mn, P, Ti の重量 [kg/t·p] を P_{Si} , P_{Mn} , P_{P} , P_{Ti} とすると, 次式によって求められる。

$$C_{\text{smpt}} = P_{\text{Si}} \times \frac{24}{28.09} + P_{\text{Mn}} \times \frac{12}{54.9} + P_{\text{P}} \times \frac{60}{62} + P_{\text{Ti}} \times \frac{24}{47.9} \quad [\text{kg/t·p}]$$

(7) ソリユーション・ロス炭素量 C_{s1}

ソリユーション・ロス反応や直接還元反応による炭素の消費量 C_{s1} は他反応に消費された炭素量の残りとする。

$$C_{s1} = C_{gas} - C_{tuy} - C_{smpt} \text{ [kg/t} \cdot \text{p]}$$

(8) 装入物中の Fe の形態

装入物の分析値からえられた T・Fe 量, FeO 量から Fe_3O_4 , Fe_2O_3 の形態として装入した量のうち, それぞれに含まれている Fe を求める。 Fe_3O_4 の形態で存在する Fe 量は

$$[Fe_{34}] = [FeO] \times \frac{55.9 \times 3}{71.9}$$

Fe_2O_3 の形態で存在する Fe 量は

$$[Fe_{23}] = [T \cdot Fe] - [Fe_{34}]$$

(9) 装入物の付着水分量 W

この場合, 装入物の付着水分 [kg/t・p] はコークス水分だけである。コークス付着水分の質量分率を $\langle H_2O \rangle_{COKES}$ とすれば,

$$\frac{W}{CR+W} = \langle H_2O \rangle_{COKES}$$

(10) 熱勘定に必要な諸熱量表

Table 1 は熱勘定に必要な反応熱および熱容量を示したものである。これらの諸量は, 製鉄ハンブック¹⁾, 鉄鋼熱計算用数値²⁾, 溶鉄・溶渣の物性値便覧³⁾ および JANAF Thermochemical Tables⁴⁾ より採用し, スラグの熱容量は実験値を用いた。

3. 熱勘定の計算方法

Table 2 は高炉の熱勘定の計算方法を第 1, 2, 3 法について表示したものである。これには熱勘定の項目が入熱・出熱に区別して記入しており, 各項目には熱量の算出式が表示してある。

最近の高炉は鉄鉱石として焼結鉱を用い, 高圧操業を行っている。また, 補助燃料として重油を用いていないので, これらを考慮して表中の項目は従来の熱勘定の項目と異なった所がある。下記の理由により項目の加減を行った。

- (1) 焼結鉱の場合, スラグの生成熱, 石灰石の分解熱は微量であるためこれを省略する。
- (2) 高炉内の送風圧力低下のエネルギー損失は熱エネルギーとしては微量であるためこれを省略する。
- (3) 重油は用いられないので補助燃料の項目を省く。
- (4) 水素還元を行うため送風に多くの蒸気を吹き込むようになったので, この項目を加える。

4. 計算例

4. 1 対象高炉設備仕様

項 目	仕 様
炉内容積	4250 m ³
炉 床 径	13.8 m
炉 高	31.5 m
羽 口 数	36 本
出 銑 口	4 本

4. 2 操業記録

(1) 出銑量, 周囲状態

出銑量 8472 ton/day

大 気 25 °C, 1 atm

(2) 送 風

仕 様	測 定 値
流 量	1114.2 m ³ _N /t・p
温 度	1061 °C
圧 力	3.7 kg/cm ² (G)
水 分	33 g/m ³ _N
成 分	N ₂ 79 vol. % O ₂ 21 vol. %
酸素富化	O ₂ 0 %

(3) 装入原料

単位 kg/t・p

	鉄 鉱 石	コークス
Fe ₃ O ₄	183.1	0.0
Fe ₂ O ₃	1172.6	3.6
SiO ₂	90.4	30.0
Al ₂ O ₃	26.2	17.3
CaO	132.2	1.8
MgO	16.9	0.7
TiO ₂	6.0	0.8
Mn	9.4	—
MnO	—	0.0
P ₂ O ₄	1.8	0.5
S	0.2	2.9
C	0.0	438.2
H ₂ O	1.7	0.0
H ₂	—	1.0
AM	1.1	1.2
計	1641.6	498.0
付着水分	—	2.1 %

AM: その他の微量成分量

Table 1 Heats of formation and heat capacities for substances relevant to heat balance

記号	第1法	第2法	第3法	記号
ΔH_{C-CO_2}	$C(COKES) + O_2(g) = CO_2(g)$ 97000 kcal/kmol(COKES)			
ΔH_{C-CO}		$C(COKES) + 1/2O_2(g) = CO(g)$ 29409 kcal/kmol(COKES)		
ΔH_{CO-CO_2}	$CO(g) + 1/2O_2(g) = CO_2(g)$ 67591 kcal/kmol(CO)			
$\Delta H_{H_2-H_2O}$	$H_2(g) + 1/2O_2(g) = H_2O(g)$ 57798 kcal/kmol(H_2)			
$\Delta H_{Fe_3O_4}$	$3Fe(s) + 2O_2(g) = Fe_3O_4(s)$ 266800 kcal/kmol(Fe_3O_4)		$Fe_3O_4(s) + 4CO(g) = 3Fe(s) + 4CO_2(g)$ 3564 kcal/kmol(Fe_3O_4)	ΔH_{Fe_3}
$\Delta H_{Fe_2O_3}$	$2Fe(s) + 3/2O_2(g) = Fe_2O_3(s)$ 196200 kcal/kmol(Fe_2O_3)		$Fe_2O_3(s) + 3CO(g) = 2Fe(s) + 3CO_2(g)$ 6573 kcal/kmol(Fe_2O_3)	ΔH_{Fe_2}
ΔH_{SiO_2}	$Si(s) + O_2(g) = SiO_2(s)$ 209550 kcal/kmol(SiO_2)		$SiO_2(s) + 2C(COKES) = Si(s) + 2CO(g)$ -150732 kcal/kmol(SiO_2)	ΔH_{Si}
ΔH_{MnO}	$Mn(s) + 1/2O_2(g) = MnO(s)$ 92050 kcal/kmol(MnO)		$MnO(s) + C(COKES) = Mn(s) + CO(g)$ -62641 kcal/kmol(MnO)	ΔH_{Mn}
$\Delta H_{P_2O_5}$	$2P(s) + 5/2O_2(g) = P_2O_5(s)$ 360000 kcal/kmol(P_2O_5)		$P_2O_5(s) + 5C(COKES) = 2P(s) + 5CO(g)$ -212955 kcal/kmol(P_2O_5)	ΔH_{P_2}
ΔH_{TiO_2}	$Ti(s) + O_2(g) = TiO_2(s)$ 225750 kcal/kmol(TiO_2)		$TiO_2(s) + 2C(COKES) = Ti(s) + 2CO(g)$ -166932 kcal/kmol(TiO_2)	ΔH_{Ti}
			$H_2O(g) + C(COKES) = H_2(g) + CO(g)$ -28389 kcal/kmol(H_2O)	ΔH_{H_2O+C}
			$H_2(g) + CO_2(g) = H_2O(g) + CO(g)$ -9793 kcal/kmol(H_2)	$\Delta H_{H_2+CO_2}$
ΔH_{vap}	513 kcal/kg(H_2O) [3.529 ata] 526 kcal/kg(H_2O) [2.000 ata]			
			$CO_2(g) + C(COKES) = 2CO(g)$ -38182 kcal/kmol(COKES)	ΔH_{Si}
Q_{pig}	325.55 kcal/kg(pig) [1535 °C] 329.56 kcal/kg(pig) [1536 °C]			
Q_{slag}	439.60 kcal/kg(slag) [1535 °C] 456.29 kcal/kg(slag) [1576 °C]			

第3法の反応熱量の記号は右枠に書く。

(4) 銑 鉄

単位 wt. %

仕 様	測 定 値	
銑鉄量	1000	kg/t・p
温 度	1535	°C
成 分	Fe	93.95
	C	4.68
	Si	0.61
	S	0.03
	Mn	0.52
	P	0.10
	Ti	0.11

(5) ス ラ グ

単位 wt. %

仕 様	測 定 値	
スラグ量	310	kg/t・p
温 度	1575	°C
成 分	CaO	42.36
	SiO ₂	34.04
	Al ₂ O ₃	14.32
	MgO	5.10
	TiO ₂	1.54
	S	0.85
	MnO	0.56
	FeO	0.48
	AM	0.75

(6) 炉頂ガス

単位 vol. %

仕 様	測 定 値	
温 度	141	°C
圧 力	2.5	kg/cm ² (G)
成 分	CO ₂	22.2
	CO	21.2
	H ₂	2.0
	N ₂	54.6

(7) ガ ス 灰

単位 kg/t・p

仕 様	測 定 値	
ガス灰量	15	kg
温 度	141	°C
成 分	CaO	0.55
	SiO ₂	0.92
	Al ₂ O ₃	0.44
	MgO	0.10
	TiO ₂	0.07
	C	5.52
	MnO	0.07
	Fe ₃ O ₄	1.39
	Fe ₂ O ₃	5.71
	AM	0.23

(8) 冷 却

単位 m³/t・p

項目	仕 様	測 定 値	
ス テ ー プ 冷 却	流量	4.62	
	温度	入口	22 °C
		出口	29 °C
羽 口 冷 却	流量	3.18	
	温度	入口	22 °C
		出口	37 °C

4. 3 熱勘定計算結果

Table 2の熱勘定計算方法にもとづいて付録に記載してあるプログラムを作製し計算を行った。高炉の熱勘定の計算結果を Table 3 に示す。

4. 4 考 察

第3法は、第1, 2法と異なった思考にもとづいて設定されているので、発熱量・還元熱の項目で相当異なった値がでている。直接還元率は26.6%で適切な値となっている。そのほか「その他の熱損失」が異なった値になっているのは、物質収支が一致しないためである。これは操業記録より測定値を読み取るとき24時間の測定値の平均値を採用したことと測定機器の誤差によって生ずるものである。物質収支を一致させるためには、測定値をどのように修正すればよいか、今後の課題である。

5. 結 び

高炉の熱勘定計算法を最近の大型高炉を対象にして作製した。作製するにあたり、第1, 2, 3法の三方法を並列に並べて全体の熱量の流れが理解しやすい形態を採用し、各計算法には電算機プログラムを組み、容易に計算できるようにした。さらに計算に使用する物性値は最近発表されたデータ値を用いた。以上のことから、熱勘定が容易にでき、高炉の炉況が把握しやすくなると思われる。

参考文献

- 1) 重見彰利；製銑ハンドブック，(昭54)，地人書館
- 2) 日本鉄鋼協会；鉄鋼熱計算用数値，(昭41)，日刊工業
- 3) 鉄鋼基礎共同研究会；溶鉄・溶滓の物性値便覧，(昭47)，日本鉄鋼協会
- 4) M. W. Chase. et al.; JANAF Thermochemical Tables, National Bureau of Standards, 14, (1985)

Table 2 Formulae for heat balance of blast furnace

項 目	第 1 法	第 2 法	第 3 法
1. 鉄鉱石、コースク中のCの発熱量	$(C_{\text{COKE}} + C_{\text{CORE}}) \times \Delta H_{\text{C-CO}_2}$	$C_{\text{CO}} \times \Delta H_{\text{C-CO}} + C_{\text{CO}_2} \times \Delta H_{\text{C-CO}_2}$	$C_{\text{O}_2} \times \Delta H_{\text{C-CO}}$
2. コースク中H ₂ の発熱量	$H_{2\text{COKE}} \times \Delta H_{\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}}$		
3. 送風の顕熱	$(n_{\text{O}_2} \times C_{\text{pO}_2} + n_{\text{N}_2} \times C_{\text{pN}_2}) \times (T_{\text{b}} - T_0)$	第1法と同じ	第1法と同じ
4. 送風中水分の顕熱	$H_2\text{O}_6 \times C_{\text{pH}_2\text{O}} \times (T_{\text{b}} - T_0)$	第1法と同じ	第1法と同じ
5. 間接還元熱			$P_{\text{Fe}_{34}} \times \Delta H_{\text{Fe}_3} + P_{\text{Fe}_{23}} \times \Delta H_{\text{Fe}_2}$
入熱合計	1+2+3+4	(1+3+4)	1+3+4+5
7. Feの還元熱	$P_{\text{Fe}_{34}} \times \Delta H_{\text{Fe}_3\text{O}_4} + P_{\text{Fe}_{23}} \times \Delta H_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	第1法と同じ	$P_{\text{Si}} \times \Delta H_{\text{Si}}$
8. Siの還元熱	$P_{\text{Si}} \times \Delta H_{\text{SiO}_2}$	第1法と同じ	$P_{\text{Mn}} \times \Delta H_{\text{Mn}}$
9. Mnの還元熱	$P_{\text{Mn}} \times \Delta H_{\text{MnO}}$	第1法と同じ	$P_{\text{P}} \times \Delta H_{\text{P}_2}$
10. Pの還元熱	$P_{\text{P}} \times \Delta H_{\text{P}_2\text{O}_5}$	第1法と同じ	$P_{\text{Ti}} \times \Delta H_{\text{Ti}}$
11. Tiの還元熱	$P_{\text{Ti}} \times \Delta H_{\text{TiO}_2}$	第1法と同じ	第1法と同じ
12. 鉄鉄の顕熱	$Q_{\text{pig}} \times 1000$	第1法と同じ	第1法と同じ
13. スラッグの顕熱	$Q_{\text{slag}} \times \text{SV}$	第1法と同じ	第1法と同じ
14. 炉頂ガスの顕熱	$\Sigma \{n_1 \times C_{\text{p}_1} \times (T_{\text{top}} - T_0)\}$	第1法と同じ	第1法と同じ
15. ガス灰の顕熱	$\Sigma \{n_1 \times \Delta H_{\text{dust}}\}$	第1法と同じ	第1法と同じ
16. 炉頂ガス水分が持ち去る熱量	$H_2\text{O}_{\text{top}} + \{\Delta H_{\text{vap}} + C_{\text{pH}_2\text{O}} \times (T_{\text{top}} - T_0)\}$	第1法と同じ	第1法と同じ
17. 送風中水分の分解熱		$(H_{2\text{top}} - H_{2\text{COKE}}) \times \Delta H_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2}$	$H_2\text{O}_6 \times \Delta H_{\text{H}_2\text{O}+\text{C}}$
18. 炉頂ガスの潜熱	$\text{CO}_{\text{top}} \times \Delta H_{\text{CO-CO}_2} + H_{2\text{top}} \times \Delta H_{\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}}$	第1法と同じ	第1法と同じ
19. 装入物付着水分が持ち去る熱量	$H_2\text{O}_{\text{COKE}} \times \{\Delta H_{\text{vap}} + C_{\text{pH}_2\text{O}} \times (T_{\text{top}} - T_0)\}$		
20. ガス灰の潜熱	$C_{\text{dust}} \times \Delta H_{\text{C-CO}_2}$		
21. 鉄鉄中Cの潜熱	$C_{\text{pig}} \times \Delta H_{\text{C-CO}_2}$		$C_{\text{Si}} \times \Delta H_{\text{Si}}$
22. SOLUTION LOSS反応熱		第1法と同じ	第1法と同じ
23. 冷却水が持ち去る熱量	$\Sigma \{WQ \times C_{\text{pm}} \times (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})\}$	第1法と同じ	$H_2\text{O}_{\text{top}} \times \Delta H_{\text{H}_2+\text{CO}_2}$
24. 水素還元熱			$(1+3+4+5) - (8+9+\dots+23+24)$
25. その他の熱損失	$(1+2+3+4) - (7+8+\dots+21+23)$	$(1+3+4) - (7+8+\dots+17+23)$	
出熱合計	7+8+...+23+25	7+8+...+24+25	8+9+...24+25

Table 3 Results of heat balance of blast furnace

($\times 10^3$ kcal/t·p)

	第 1 法	第 2 法	第 3 法
1. 鉄鉱石, コークス中Cの発熱量	3542.1	2057.5	632.5
2. コークス中Hの発熱量	28.9		
3. 送風の顕熱	395.9	395.9	395.9
4. 送風中水分の顕熱	20.4	20.4	20.4
5. 間接還元熱			50.5
入熱合計	3987.3	2473.8	1099.3
7. Feの還元熱	1628.0	1628.0	
8. Siの還元熱	45.5	45.5	32.7
9. Mnの還元熱	8.7	8.7	5.9
10. Pの還元熱	5.8	5.8	3.5
11. Tiの還元熱	5.2	5.2	3.8
12. 銑鉄の顕熱	325.6	325.6	325.6
13. スラグの顕熱	145.9	145.9	145.9
14. 炉頂ガスの顕熱	64.7	64.7	64.7
15. ガス灰の顕熱	0.3	0.3	0.3
16. 炉頂ガス中水分が持ち去る熱量	1.7	1.7	1.7
17. 送風中水分の分解熱		56.8	59.7
18. 炉頂ガスの潜熱	1147.4		
19. 装入物付着水分が持ち去る熱量	0.9	0.9	0.9
20. ガス灰中の潜熱	44.6		
21. 銑鉄中Cの潜熱	378.3		
22. SOLUTION LOSS反応熱			301.3
23. 冷却水が持ち去る熱量	80.0	80.0	80.0
24. 水素還元熱			11.0
25. その他の熱損失	104.7	104.7	62.3
出熱合計	3987.3	2473.8	1099.3

付録 熱勘定計算プログラム

```

10 'ネツカンジ ヨウ
20 INPUT "Core (kg/tpig) = ";CORE
30 INPUT "Ccokes (kg/tpig) = ";CCOKES
40 INPUT "H2cokes (kg/tpig) = ";H2COKES
50 INPUT "N2(top)(%) = ";N2(TOP)
60 INPUT "CO(top)(%) = ";CO(TOP)
70 INPUT "CO2(top)(%) = ";CO2(TOP)
80 INPUT "Cpig (kg/tpig) = ";CPIG
90 INPUT "Cg(kg/tpig) = ";CG
100 INPUT "Tblast (K) = ";TBLAST
110 INPUT "Ttop(K) = ";TTOP
120 INPUT "TO(K) = ";TO
130 INPUT "M ソウフウシット (kg/m3n) = ";M
140 INPUT "FeOore (kg/tpig) = ";FEOORE
150 INPUT "FeOcokes (kg/tpig) = ";FEOCOKES
160 INPUT "FeOslag (kg/tpig) = ";FEOSLAG
170 INPUT "FeOg (kg/tpig) = ";FEOG
180 INPUT "TFeore (kg/tpig) = ";TFEORE
190 INPUT "TFecokes (kg/tpig) = ";TFECOKES
200 INPUT "TFeslag (kg/tpig) = ";TFESLAG
210 INPUT "TFeg(kg/tpig) = ";TFEG
220 INPUT "PFe (kg/tpig) = ";PFE
230 INPUT "Sipig (kg/tpig) = ";SIPIG
240 INPUT "Mnpig (kg/tpig) = ";MNPIG
250 INPUT "Ppig (kg/tpig) = ";PPIG

```



```

260 INPUT "Tipig (kg/tpig) = ";TIPIG
270 INPUT "Qpig (kcal/kg) = ";QPIG
280 INPUT "Qslag (kcal/kg) = ";QSLAG
290 INPUT "SV slag/リョウ (kg/tpig) = ";SV
300 INPUT "H2(top)(%) = ";H2(TOP)
310 INPUT "WQ1(レイキクスリョウ)(m^3n/tpig) = ";WQ1
320 INPUT "WQ2(レイキクスリョウ)(m^3n/tpig) = ";WQ2
330 INPUT "Tin1(レイキクオント)(m^3n/tpig) = ";TIN1
340 INPUT "Tout1(レイキクオント)(m^3n/tpig) = ";TOUT1
350 INPUT "Tin2(レイキクオント)(m^3n/tpig) = ";TIN2
360 INPUT "Tout2(レイキクオント)(m^3n/tpig) = ";TOUT2
370 INPUT "GFE3O4(kg/tpig) = ";GFE3O4
380 INPUT "GFe2O3 (kg/tpig) = ";GFE2O3
390 INPUT "GTio2 (kg/tpig) = ";GTIO2
400 INPUT "GC (kg/tpig) = ";GC
410 INPUT "GS (kg/tpig) = ";GS
420 INPUT "GCaO (kg/tpig) = ";GCAO
430 INPUT "GSiO2 (kg/tpig) = ";GSIO2
440 INPUT "GAL2O3 (kg/tpig) = ";GAL2O3
450 INPUT "GMgO (kg/tpig) = ";GMGO
460 INPUT "GMnO (kg/tpig) = ";GMNO
470 INPUT "COKES(kg/tpig) = ";COKES
480 INPUT "H2O(C)%/100 = ";H2O(C)
490 CGAS=CCOKES-CPIG-CG
500 VTOP=CGAS*22.4/12/(CO(TOP)+CO2(TOP))
510 VBLAST=VTOP*N2(TOP)/.79
520 O2BLAST=VBLAST/22.4*.21*32
530 N2TOP=VTOP*N2(TOP)/22.4*28
540 N2BLAST=N2TOP
550 H2OBLAST=VBLAST*M
560 FEO=FEOORE+FEOCOKES-FEOSLAG-FEOG
570 FE1=FEO*55.9/71.9*3
580 TFE=TFEORE+TFECOKES-TFESLAG-TFEG
590 FE2=TFE-FE1
600 PFE1=FE1*PFE/TFE
610 PFE2=PFE-PFE1
620 COTOP=VTOP/22.4*CO(TOP)*28
630 CO2TOP=VTOP/22.4*CO2(TOP)*44
640 H2TOP=VTOP/22.4*2*H2(TOP)
650 H2OTOP=H2OBLAST+(H2COKES-H2TOP)*18/2
660 CCO=CGAS*CO(TOP)/(CO(TOP)+CO2(TOP))
670 CCO2=CGAS*CO2(TOP)/(CO(TOP)+CO2(TOP))
680 CO2=VBLAST*.21*12!/2/22.4
690 CH2O=H2OBLAST*12!/18!
700 CSMPT=(SIPIG*2/28.09+MNPIG/54.9+PPIG*5/31!/2+TIPIG*2/47.9)*12
710 CSL=CGAS-(CO2+CH2O+CSMPT)
720 HFE3O4=(3.881+(8.228-3.881)*(TTOP-400)/100)*1000/231.7
730 HFE2O3=(2.735+(5.75-2.735)*(TTOP-400)/100)*1000/159.8
740 HTIO2=(1.423+(2.928-1.423)*(TTOP-400)/100)*1000/79.9
750 HS=(1.109+(2.047-1.109)*(TTOP-400)/100)*1000/32
760 HC=(.25+(.569-.25)*(TTOP-400)/100)*1000/12
770 CPCA0=(10*(TTOP-T0)+.00242*(TTOP^2-T0^2)+108000!*(1/TTOP-1/T0))/(TTOP-T0)/56
.1
780 CPSIO2=(3.65*(TTOP-T0)+.012*(TTOP^2-T0^2))/(TTOP-T0)/60.09
790 CPAL2O3=(22.08*(TTOP-T0)+.5*.008971*(TTOP^2-T0^2)+522500!*(1/TTOP-1/T0))/(TTOP-T0)/102!
800 CPMGO=(10.86*(TTOP-T0)+.5*.001197*(TTOP^2-T0^2)+208700!*(1/TTOP-1/T0))/(TTOP-T0)/40.3
810 CPMNO=(7.43*(TTOP-T0)+.01038*.5*(TTOP^2-T0^2)+3.62E-06*(1/TTOP-1/T0))/(TTOP-T0)/70.9
820 CPMO2B=(8.27*(TBLAST-T0)+.5*.000258*(TBLAST^2-T0^2)+187700!*(1/TBLAST-1/T0))/(TBLAST-T0)
830 CPMN2B=(6.5*(TBLAST-T0)+.5*.001*(TBLAST^2-T0^2))/(TBLAST-T0)

```

```

840 CPMH2OB=(8.22*(TBLAST-T0)+.5*.00015*(TBLAST^2-T0^2)+1/3*1.34E-06*(TBLAST^3-T
0^3))/(TBLAST-T0)
850 CPMCOT=(6.6*(TTOP-T0)+.5*.0012*(TTOP^2-T0^2))/(TTOP-T0)
860 CPMCO2T=(10.34*(TTOP-T0)+.5*.00274*(TTOP^2-T0^2)+195500*(1/TTOP-1/T0))/(TTO
P-T0)
870 CPMN2T=(6.5*(TTOP-T0)+.5*.001*(TTOP^2-T0^2))/(TTOP-T0)
880 CPMH2OT=(8.22*(TTOP-T0)+.5*.00015*(TTOP^2-T0^2)+1/3*1.34E-06*(TTOP^3-T0^3))/
(TTOP-T0)
890 CPMH2T=(6.62*(TTOP-T0)+.5*.00081*(TTOP^2-T0^2))/(TTOP-T0)
900 QFE3O4=GFE3O4*HFE3O4
910 QFE2O3=GFE2O3*HFE2O3
920 QTIO2=GTIO2*HTIO2
930 QC=GC*HC
940 QS=GS*HS
950 QCAO=GCAO*PCAO*(TTOP-T0)
960 QSIO2=GSIO2*CPSIO2*(TTOP-T0)
970 QAL2O3=GAL2O3*CPAL2O3*(TTOP-T0)
980 QMGO=GMGO*CPMGO*(TTOP-T0)
990 QMNO=GMNO*CPMNO*(TTOP-T0)
1000 H2OCOKES=H2O(C)/(1-H2O(C))*COKES
1010 '*****
1020 QA1=(CORE+CCOKES)/12*97
1030 QA2=H2COKES/2!*57.798
1040 QA3=(O2BLAST/32*CPMO2B+N2BLAST/28*CPMN2B)*(TBLAST-T0)/1000
1050 QA4=H2OBLAST/18*CPMH2OB*(TBLAST-T0)/1000
1060 QA7=PFE2/55.9/2*196.2+PFE1/55.9/3*266.8
1070 QA8=SIPIG/28.09*209.55
1080 QA9=MNPIG/54.9*92.05
1090 QA10=PPIG/31!/2*360
1100 QA11=TIPIG/47.9*225.75
1110 QA12=QPIG*1000
1120 QA13=SV*QSLAG
1130 QA14=(COTOP/28*CPMCOT+CO2TOP/44*CPMCO2T+H2TOP/2*CPMH2T+N2TOP/28*CPMN2T)*(TT
OP-T0)/1000
1140 QA15=(QFE3O4+QFE2O3+QTIO2+QC+QS+QCAO+QSIO2+QAL2O3+QMGO+QMNO)/1000
1150 QA16=H2OTOP/18*(513+CPMH2OT*(TTOP-T0))/1000
1160 QA18=COTOP/28*67.591+H2TOP/2!*57.798
1170 QA19=H2OCOKES/18*(513+CPMH2OT*(TTOP-T0))/1000
1180 QA20=CG/12*97
1190 QA21=CPIG/12!*97
1200 QA23=ABS(WQ1*(TIN1-TOUT1)+WQ2*(TIN2-TOUT2))
1210 QA25=QA1+QA2+QA3+QA4-(QA7+QA8+QA9+QA10+QA11+QA12+QA13+QA14+QA15+QA16+QA18+Q
A19+QA20+QA21+QA23)
1220 '*****
1230 QB1=CCO/12!*29.409+CCO2/12!*97
1240 QB17=(H2TOP-H2COKES)/2!*57.798
1250 '*****
1260 QC1=CO2/12!*29.409
1270 QC5=PFE2/55.9/2*6.573+PFE1/55.9/3*3.564
1280 QC8=SIPIG/28.09*150.732
1290 QC9=MNPIG/54.9*62.641
1300 QC10=PPIG/31!/2*212.955
1310 QC11=TIPIG/47.9*166.932
1320 QC17=H2OBLAST/18!*28.389
1330 QC22=CSL/12!*38.182
1340 QC24=H2OTOP/18!*9.793
1350 QC25=(QC1+QA3+QA4+QC5)-(QC8+QC9+QC10+QC11+QA12+QA13+QA14+QA15+QA16+QA19+QC1
7+QC22+QA23+QC24)
1360 '*****
1370 LPRINT "QA1= ";QA1
1380 LPRINT "QA2= ";QA2
1390 LPRINT "QA3= ";QA3
1400 LPRINT "QA4= ";QA4

```

```
1410 LPRINT "QA7= ";QA7
1420 LPRINT "QA8= ";QA8
1430 LPRINT "QA9= ";QA9
1440 LPRINT "QA10= ";QA10
1450 LPRINT "QA11= ";QA11
1460 LPRINT "QA12= ";QA12
1470 LPRINT "QA13= ";QA13
1480 LPRINT "QA14= ";QA14
1490 LPRINT "QA15= ";QA15
1500 LPRINT "QA16= ";QA16
1510 LPRINT "QA18= ";QA18
1520 LPRINT "QA19= ";QA19
1530 LPRINT "QA20= ";QA20
1540 LPRINT "QA21= ";QA21
1550 LPRINT "QA23= ";QA23
1560 LPRINT "QA25= ";QA25
1570 LPRINT "QB1= ";QB1
1580 LPRINT "QB17= ";QB17
1590 LPRINT "QC1= ";QC1
1600 LPRINT "QC5 = ";QC5
1610 LPRINT "QC8 = ";QC8
1620 LPRINT "QC9 = ";QC9
1630 LPRINT "QC10= ";QC10
1640 LPRINT "QC11= ";QC11
1650 LPRINT "QC17= ";QC17
1660 LPRINT "QC22= ";QC22
1670 LPRINT "QC24= ";QC24
1680 LPRINT "QC25= ";QC25
1690 END
```