寄 書

UDC 669.184.244.66 : 669.046.5 : 541.124 : 536.7

転炉吹錬プロセスに関する一般的な物質収支式について*

成田 貴一** ・富田 昭津*** ・片桐 望***

On the General Material Balance Equations for the LD Converter Process

Kiichi NARITA, *Akitsu* TOMITA, and *Nozomu* KATAGIRI

Synopsis:

The general and shortened material balance equations for the LD converter process are derived by using linear mathematical expressions. By solving these simultaneous equations properly, we can obtain the reacted weights of metal phase components and some other unknown weights of dissolved raw materials. The solutions thus obtained satisfy the material balance equations for all constituents that are taken into consideration. The solutions can be applied in many theoretical discussions for the LD converter process.

1. 緒言

転炉の吹錬プロセスを解析するに当つて，物質および熱精算を行なうことの重要性はいまさら言うまでもない．しかし，従来行なわれてきたこれらの精算は，いずれも単一または少数の成分に関する物質収支式に基づくもので，それらは①測定値の誤差，②混入高炉滓や噴出スラグなどのような秤量不能な入物質，出物質による誤差などの問題があつた．

ここでは線形代数学的手法を用いて収支関係を表現することによつて簡潔かつ一般的な物質収支式を導出することができた．以下にその一例としてメタル相およびスラグ相（以下m相，s相）中成分に関する収支式を導出する．同様の手法で排ガス中成分（$CO, CO_2, O_2, N_2 \cdots$）および酸素，熱に関する収支式を含んだ式にまで拡張することも可能である．

2. メタル相およびスラグ相に関する物質収支式

いま，時刻 t_0 から t_1 までの間にm相中成分（Fe, C, Si, Mn, P……）の重量およびs相中成分（CaO, SiO_2, MnO, P_2O_5, Fe_tO……）の重量が Fig. 1 に示すように $W_{m,0}$ $W_{s,0}$ (t) から $W_{m,1}$ $W_{s,1}$ (t) に変化した場合を考える．そしてこの間に原料（溶銑，冷銑，スクラップ，スケール，レンガ，生石灰……）が X (t) だけ装入され，さらにm相中成分が R (t) だけ酸化除去されたとする．この時 $W_{m,1}$, $W_{s,1}$ はそれぞれ初期重量と反応による変化と装入原料がもちこむ量の和として次のように与えられる．

$$W_{m,1}=W_{m,0}-R+Z_mX \quad \cdots\cdots(1)$$

$$W_{s,1}=W_{s,0}+BAR+Z_sX \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで W_m, W_s, R, X はそれぞれ次のようなベクトルである．

W_m：m相中成分重量により構成される n_m 次元のベクトル

W_s：s相中成分重量により構成される n_s 次元のベクトル

R：この間に酸化除去されたm相中成分重量により構成される n_m 次元のベクトル

X：この間に装入された原料重量により構成される n_x 次元のベクトル

ただし，n_m, n_s, n_x, はそれぞれ収支計算にとりあげるm相中成分の数，s相中成分の数，原料の数のことである．

$n_m=n_s=5$, $n_x=10$ の場合について各ベクトルの具体的構成例を Fig. 1 中に示した．以下 W_m, W_s, R, X については Fig. 1 のようなベクトルの場合を考える．ま

* 昭和53年4月本会講演大会にて発表 昭和53年4月13日受付 (Received Apr. 13, 1978)

** (株)神戸製鋼所中央研究所 理博 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-chō Fukiai-ku Kobe 651)

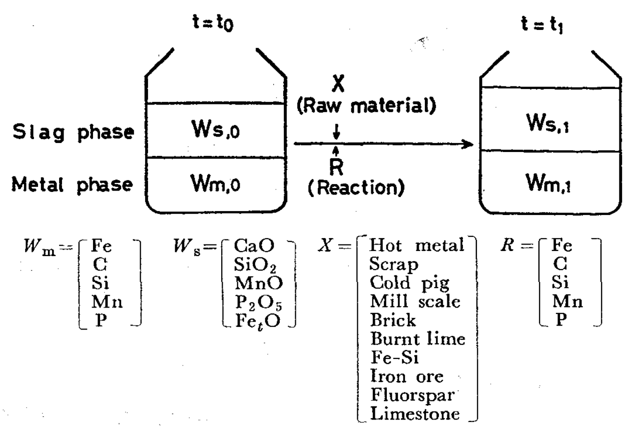

Fig. 1. Weight change between t_0 and t_1 in the LD converter process. Here, $W_{\mathrm{m}}, W_{\mathrm{s}}, X, R$ are the weight vectors. One example of their constitutions are shown here. The symbols and names of the materials in these vectors represent the weight of each constituent in tons.

た，添字 0, 1 はそれぞれ時刻 t_0, t_1 の時の値であることを示す．

(2)式中のAはm相中第j成分が酸化された時重量がa_j倍になることを表現する行列である((3)式)．(3)式中 a_j はm相中各成分が単位重量反応した時生成する酸化物重量を意味する．

Bについては次の通りである．W_{m}, W_{s} が Fig. 1 に示すような構成の場合，W_{m} の構成々分が酸化されて W_{s} の構成々分となる場合の“移行関係”は次のようになる．

① W_{s} の第1成分 (CaO) は m 相中成分に由来しない．

② W_{m} の第1成分 (Fe) は W_{s} の第5成分 (Fe_tO) としてS相に移行する．

③ W_{m} の第2成分 (C) は W_{s} の構成々分とはならない．

④ W_{m} の第3成分 (Si) は W_{s} の第2成分 (SiO_2) としてS相に移行する．

⑤ W_{m} の第4成分(Mn) は W_{s} の第3成分(MnO) としてS相に移行する．

⑥ W_{m} の第5成分 (P) は W_{s} の第4成分 (P_2O_5) としてS相に移行する．

行列Bはこのような，W_{m} から W_{s} への“移行の規則”を与える行列でこの場合(4)式のように決る．(4)式中第1行がすべて0になつているのは上記①に対応し，第2列がすべて0になつているのは③に対応する．さらに(2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 1) 成分が1になつているのはそれぞれ上記 ④⑤⑥② に対応する．(2)式の BAR はm相から酸化除去されたRがA倍され，Bによつて行先を指定されてS相中に入ることを示している．

$$A=\begin{bmatrix} a_1 & & 0 \\ & a_2 & \\ & \ddots & \\ 0 & & a_{n\mathrm{m}} \\ \hline & 0 & \end{bmatrix} \quad (n_{\mathrm{s}},\ n_{\mathrm{m}}) \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$B=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (n_{\mathrm{s}},\ n_{\mathrm{m}}) \qquad \cdots\cdots(4)$$

Z_{m}, Z_{s} は(5)および(6)式で示される原料組成行列である．(1), (2)式右辺第3項の $Z_{\mathrm{m}}X$, $Z_{\mathrm{s}}X$ は各原料がもちこむm相およびS相中成分の量を表わす．

$$Z_{\mathrm{m}}=(Z_{\mathrm{m},\ jk}) \qquad \cdots\cdots(5)$$

$$Z_{\mathrm{s}}=(Z_{\mathrm{s},\ jk}) \qquad \cdots\cdots(6)$$

ここで，$Z_{\mathrm{m},\ jk}$：第k番目の原料中の m 相中第j成分の割合 (−) ($j=1, n_{\mathrm{m}}$, $k=1, n_x$)

$Z_{\mathrm{s},\ jk}$：第k番目の原料中のS相中第j成分の割合 (−) ($j=1, n_{\mathrm{s}}$, $k=1, n_x$)

(1) (2) 式で与えられる $W_{\mathrm{m,1}}$, $W_{\mathrm{s,1}}$ は次のような形で時刻 t_1 における m 相およびS相成分組成と関連づけられる (付録A参照)．

$$Q_{\mathrm{m}}W_{\mathrm{m,1}}=0 \qquad \cdots\cdots(7)$$

$$Q_{\mathrm{s}}W_{\mathrm{s,1}}=0 \qquad \cdots\cdots(8)$$

ここで Q_{m}, および Q_{s} は t_1 におけるm相およびS相の組成により付録中 (A·6) 式のように決る行列である．

(7), (8) 式に (1) (2) 式を代入し，一つの式にまとめると(9)式のようになる．

$$\begin{pmatrix} Q_{\mathrm{m}} & 0 & -Q_{\mathrm{m}} & Q_{\mathrm{m}}Z_{\mathrm{m}} \\ 0 & Q_{\mathrm{s}} & Q_{\mathrm{s}}BA & Q_{\mathrm{s}}Z_{\mathrm{s}} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} W_{\mathrm{m,0}} \\ W_{\mathrm{s,0}} \\ R \\ X \end{pmatrix}=0 \quad \cdots\cdots(9)$$

これが求める転炉吹錬における m 相および S 相中成分に関する物質収支式の一般的な表現である．(9)式は $n_{\mathrm{m}}+n_{\mathrm{s}}$ 個の成分に関する収支式で構成されている．

(9)式中のm相中第1成分に関する収支式を具体的に書くと(10)式のようになる．

$$(p_1-1)w_{1,0}+p_1\sum_{j=2}^{n_{\mathrm{m}}}w_{j,0}-\left\{(p_1-1)r_1+p_1\sum_{j=2}^{n_{\mathrm{m}}}r_j\right\}$$

$$+(p_1-1)\sum_{k=1}^{n_x}z_{\mathrm{m},1k}x_k$$

$$+p_1\sum_{j=2}^{n_m}\sum_{k=1}^{n_x}z_{m,jk}x_k=0 \cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

m 相中第1成分の収支式に第2～第 n_m 成分の反応量 (r_j)，初期重量 ($w_{j,0}$)，装入量 ($\sum_{k=1}^{n_x}z_{m,jk}x_k$; x_k : k 番目の原料装入量）が，第1成分の組成 p_1 を介して関連づけられている．このような関係式が考慮した全成分について成立している．よつて(9)式は成分組成相互間の連関* をすべて考慮した全成分に関する収支式であるということができる．

実際問題としては（9）式を未知および既知部分に分け，それを解いて求める解を得ることになる．いま，装入原料量 X の一部と反応量 R を未知数として(9)式を書きなおすと(11)式のようになる．

$$\begin{pmatrix} -Q_m & Q_m & Z_{m,uk} \\ Q_sBA & Q_s & Z_{s,uk} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} R \\ X_{uk} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} Q_m & 0 & Q_mZ_{m,k} \\ 0 & Q_s & Q_sZ_{s,k} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} W_{m,0} \\ W_{s,0} \\ X_k \end{pmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

ここで，X_k, X_{uk} は X を既知および未知部分に分けたベクトルである．$Z_{m,k}$, $Z_{s,k}$, $Z_{m,uk}$, $Z_{s,uk}$ は，この X の分割に対応して Z_m，および Z_s を分割したものであり，それぞれ装入量既知および未知の原料の組成行列を意味する．

X_{uk} としてたとえば生石灰およびレンガ屑の2つをとると，(11)式はこの場合未知数7個に対して 10 個の式を表わし，最小二乗法を用いて解くことができる．この場合の(11)式の具体的構成については既に報告した[1]．

得られた解は，以下の3つの意味で，各チャージ毎の組成と量に関する最適な解釈であるということができる．

① 考慮した成分の収支式全体を満していること．

② 多成分を同時に考慮しているので個々の成分がもつ分析値の誤差は打消されていること．

③ 未知数の適切な設定によつて，高炉スラグの混入量なども逆に推定することも可能であること．

* 一般に，注目している相内のどの1つの成分重量が変化しても全成分の組成がわかる．

文　献

1) 成田貴一，富田昭津，片桐　望，関　和幸，喜多村実：鉄と鋼，64 (1978)，S 194

付　録

A．重量と組成の関連づけ

一般に，ある時刻におけるある相中の各成分の重量および組成を w_j, p_j ($j=1,n$) とすると，定義により(A.1)式が成立する．

$$p_j=(j\text{ 成分重量})/(\text{全重量})=w_j/\sum_{l=1}^{n}w_l \cdots (A.1)$$

(A.1)より

$$w_j=p_j\sum_{l=1}^{n}w_l=\sum_{l=1}^{n}p_jw_l \cdots\cdots\cdots\cdots (A.2)$$

(A.2)式は，p_j を全成分重量に乗じて和をとると w_j そのものになる事を示している．これは，p_j を横にならべて得られる行列 P を用いて(A.3)式のように表現できる．

$$PW=W \cdots\cdots\cdots\cdots (A.3)$$

(A.3)式より，$(P-E)W=QW=0$ ………… (A.4)

ここで，$W=\begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$ の重量ベクトル；

$$P=\underset{(n,n)}{\begin{pmatrix} p_1 & p_1 & \cdots & p_1 \\ p_2 & \cdots & & p_2 \\ \vdots & & & \vdots \\ p_n & \cdots & & p_n \end{pmatrix}} \cdots\cdots\cdots\cdots (A.5)$$

E : 単位行列

$$Q=P-E \cdots\cdots\cdots\cdots (A.6)$$

(A.4) 式が組成と重量を結びつける関係である．今後，重量ベクトルが与えられれば (A.6) 式で与えられる Q を左から作用させて 0 に等しいとおくことによつてその時の組成と関連づけることができる．