© 1988 ISIJ

寄 書

溶鉄中への吹込みによるダストの再利用の可能性

川上 正博*・北島 要春*²・伊藤 公允*

Possibility of Dust Recycling Technique by the Injection into Molten Iron

Masahiro KAWAKAMI, Youharu KITAJIMA and Koin ITO

1. 緒 言

電気炉製鋼では種々のスクラップを用いるため、発生するダスト中には、酸化鉄はもとより、非鉄金属の酸化物が含まれている。これをそのまま電気炉にもどすことは、スラグの粘性が上がる等、作業上、望ましくない。しかし、そのままで投棄することも、環境保全上、望ましくない。この電気炉ダストの処理方法としては、溶滓中に溶かして無害化したのち投棄することや、アーク炉を用いた還元回収法等が試みられている。

本研究では、ダストを溶鉄中に底吹きすることにより、溶鉄中のCやSiで還元することを試みた。更に、その際、廃ガス系への空気の混入を防ぐことにより、非鉄金属成分の金属状での凝集回収を試みた。

2. 実 験 方 法

2.1 実験装置

実験装置の概略は前報¹⁾と同じである。ただし、2次ダストの捕集を行う場合は、高アルミナ質の炉蓋の中央部に石英製の煙突をとりつけ、炉上部と蓋、および、蓋と煙突の間の間隙は、すべて、アルミナセメントで密封した。2次ダストは煙突内で捕集した。捕集器は内径28 mmφの黄銅製の管、および、エルボーから成っており、中央部はフランジにより着脱可能とし、その中に約6 gのガラスウールを詰めた。

2.2 供試材および実験条件

原料鉄は鋳物用鉄1種1号B(4% C, 2% Si, 0.5% Mn)である。原料ダストは電気炉工場ダスト(平均粒径2.5 μm, 標準偏差1.5 μm)で、その組成をTable 1に示す。ダストCは、ダストBにZnOの粉末試薬を添加し、Zn含有量を富化したものである。ダストは吹込み前に十分乾燥した。実験条件の一覧をTable 2に示す。

2.3 実験操作

炉底部のノズルよりN₂を吹き込みながら、約20 kgの原料鉄を溶解し、温度を約1500°Cに安定させた。溶鉄の初期試料を、石英管で吸引採取し、ダストの吹込みを開始した。以後、5 minごとに溶鉄試料を吸引採取した。ダストの吹込み量は、1 minごとに、台秤により測定した。No. 7, 8の実験では、2次ダスト捕集器のエルボー下部の黄銅管を石英製煙突内に挿入し、他端を電気掃除機に接続し、2次ダストを吸引捕集した。

溶鉄試料中のCは燃焼法により、また、Siは二酸化珪素重量法により分析した。2次ダストは、いつたん、塩酸に溶解し、ICP (Induction Coupled Plasma) による発光分光分析法により、分析した。

3. 実験結果および考察

3.1 ダスト量、CとSi含有量の経時変化

ダストAを用いた一例として、No. 4の実験結果を

Table 1. Composition of the injected dusts (wt %).

	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	ZnO	PbO	CdO	H ₂ O
Dust A	27.1	1.93	8.03	5.66	19.31	9.49	1.40	5.29	1.24	0.026	Bal.
Dust B	42.7	6.30	4.68	5.95	7.03	4.72	1.10	6.51	1.39	0.026	Bal.
Dust C	41.0	6.05	4.49	5.71	6.75	4.53	1.06	10.44	1.34	0.025	Bal.

昭和59年10月本会講演大会にて発表 昭和62年11月6日受付 (Received Nov. 6, 1987)

* 豊橋技術科学大学工博 (Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho Toyohashi 440)

*² 豊橋技術科学大学大学院 (現: (株)不二越) (Graduate School, Toyohashi University of Technology, Now Nachi-Fujikoshi Corp.)

Key words: smelting reduction; electric arc furnace dust; dust recycling; injection into molten iron; zinc recovery; cadmium recovery.

Table 2. Experimental conditions.

Run No.	Dust	Dust feeding rate (g/min)	Cas flow rate (Nl/min)	Temperature range (°C)	Initial melt weight (kg)
3	A	16.0	20	1 500±25	20.04
4	A	13.6, 17.4	20	1 450±25	19.97
5	A	27.5	20	1 500±20	19.97
6	—	—	20	1 500±25	20.00
7	B	50.3, 67.3, 35.3	24	1 475±25	19.95
8	C	33.5	24	1 475±25	20.05

Fig. 1. Changes in the amount of injected dust, [%C], [%Si] and temperature with time in Run No. 4 and 6.

Fig. 1 に示す。ダストの吹込み速度は、所定時間内ではほぼ一定に保たれ、53 min までは 13.6 g/min, それ以後 100 min までは 17.4 g/min であった。総吹込み量は 1.5 kg であった。溶鉄中の C は、直線的に減少し、脱炭速度は、ダストの吹込み速度に対応して、増加した。Si も初期の 1.66% から 100 min 後の 0.86% まで、直線的に減少した。なお、図中の一点鎖線で示した C^0 , Si^0 は、ダストは吹き込まず、 N_2 のみを吹き込んだ No. 6 の実験結果である。 C^0 は 180 min で 0.3% 減少したが、 Si^0 は $1.9 \pm 0.05\%$ でほぼ一定であった。No. 3~6 の実験では、炉蓋は耐火レンガを 2 個並べただけであったので、空気が巻き込まれ、脱炭されたと考えられる。

Fig. 2 には、ダスト B を吹き込んだ No. 7 の実験結果を示す。ダストの吹込み速度は 3 段階に変化させた。Si は初期の 1.85% から約 40 min で 0.1% 以下にほぼ直線的に減少した。C も直線的に減少した。脱炭速度はダストの吹込み速度が 50.3 から 67.3 g/min に増加した時、大きくなった。また、後者が 67.3 から 35.3 g/min に減少した時、前者は更に大きくなったが、これは、その時点で Si が還元剤として働かなくなつたためと考えられる。この実験では 2 次ダスト捕集のため、空気の遮断を注意深く行つたので、空気による C, Si の損失はないと考えた。

ダスト C を吹き込んだ No. 8 の実験結果は、ほぼ Fig. 2 と同様であった。

Fig. 2. Changes in the amount of injected dust, [%C], [%Si] and temperature with time in Run No. 7.

3・2 2 次ダストの捕集結果

Fig. 2 中①, ②と印をつけた時点で 2 次ダストの捕集を行つた。各捕集時間は 20 s とした。捕集中、煙突から漏れ出るダストは観察されなかつた。ダストの吹込み速度は、長期的には一定と見なせたが、ごく短時間内では、多少変動していた。そこで、捕集時のダストの吹込み速度を、捕集時の前後 2 min の平均で求め、2 次ダストの発生速度との関係性を求めたところ、両者の間にはほぼ比例関係があつた。その直線の傾きより、2 次ダストの発生速度はダスト吹込み速度の約 1/5 と見積もられた。

Table 3 に、2 次ダスト中の金属成分の分析結果を示す。また、比較のために、吹き込んだダスト中の各成分の分析値（金属分に換算）も示す。2 次ダスト中の Fe 分は吹き込んだダスト中のものと比べ少なく、大部分は鉄浴中に回収されたと考えられる。Mn は分析値としてはほぼ等しい値となつてはいるが、2 次ダストの発生量が吹き込んだ量の 1/5 となつてはいるので、4/5 は鉄浴中に回収されたと考えられる。Zn と Cd は、おのおの、約 5 倍に濃縮されており、ほぼ完全に 2 次ダスト中に回収されたと考えられる。Pb の分析値は、吹き込んだダストと 2 次ダストで、ほぼ等しい値である。Pb の鉄浴への溶解度は小さいので²⁾、おそらくは、Pb は鉄浴の底に別相として存在していたと考えられるが、確認はできなかった。Pb と Zn, Cd との挙動の差は各金属の蒸気圧の差³⁾ によると考えられる。

Table 3. Metallic composition of the collected dust and the injected dust (wt %).

Sa. No.	Fe	Zn	Mn	Pb	Cd
7-1	3.83	36.5	5.79	1.16	0.18
7-2	7.73	29.6	4.38	0.62	0.11
Dust B	34.77	5.23	3.66	1.29	0.023
8-1	3.99	38.6	5.93	1.52	0.11
8-2	4.74	43.0	3.93	1.33	0.15
Dust C	33.37	8.39	3.51	1.24	0.022

2次ダスト中のこれら金属成分は、(1)捕集したダストの色が淡い青灰色か淡い褐色であつたこと、(2)煙突の出口で、空気による再酸化を思わせる暗赤色の炎が見えたこと、(3)分析操作で酸溶解する時、多量の水素を発生したこと、などより大部分は金属状であると判断した。

3.3 ダストの還元率の推定

ダストの成分中、CとSiで還元可能な酸化物は Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 、 ZnO 、 CdO 、 PbO である。これらの還元可能な酸化物中の酸素の吹込み速度を $\dot{O}_f$ (mol/min)で表すと次式のようになる。

$$\dot{O}_f = \frac{W_p}{1600} \left[(\% \text{Fe}_2\text{O}_3) \frac{3M_o}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + (\% \text{FeO}) \frac{M_o}{M_{\text{FeO}}} + (\% \text{MnO}) \frac{M_o}{M_{\text{MnO}}} + (\% \text{PbO}) \frac{M_o}{M_{\text{PbO}}} + (\% \text{ZnO}) \frac{M_o}{M_{\text{ZnO}}} + (\% \text{CdO}) \frac{M_o}{M_{\text{CdO}}} \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W_p はg/minで表したダストの吹込み速度、また、 M_i は物質*i*の原子量および1g式量である。

一方、1molのCとSiは、おのおの、1molと2molの酸素と結合するので、脱炭、脱珪速度を $\Delta\dot{C}$ 、 $\Delta\dot{\text{Si}}$ (mol/min)で表せば、還元率*R*(%)は

$$R = \frac{\Delta\dot{C} + 2\Delta\dot{\text{Si}}}{\dot{O}_f} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

で定義できる。 $\Delta\dot{C}$ および $\Delta\dot{\text{Si}}$ は、溶鉄の飛散損失量(2~3kg)、および、前述の空気酸化量の補正を行い、更に吹き込んだ酸化鉄はすべて還元されたと仮定し、脱炭、脱珪の両速度より求めた。Table 4に、各実験での $\dot{O}_f$ 、 $\Delta\dot{C}$ 、 $\Delta\dot{\text{Si}}$ と*R*をまとめて示す。No. 7の3段目を除き、還元率は100%以上となっており、吹き込んだダスト中の還元可能成分はすべて還元されたと考えられる。No. 7の3段目では、Siがなくなつて、Cのみによる還元となつたため、還元率が低下したと考えられる。このように、Siによる還元の方が優先的であり、 $\Delta\dot{C}$ と $\Delta\dot{\text{Si}}$ の比で比べたCとSiの還元寄与率は2:3から

Table 4. Oxide injection rate, oxidation rates of C and Si and the estimated degree of reduction.

Run No.	$\dot{O}_f$ (mol/min)	$\Delta\dot{C}$ (mol/min)	$\Delta\dot{\text{Si}}$ (mol/min)	<i>R</i> (%)
3	0.163	0.090	0.069	140
4	0.127 0.162	0.063 0.069	0.060 0.060	144 117
5	0.257	0.112	0.093	116
7	0.653 0.779 0.459	0.187 0.227 0.302	0.286 0.286 —	116 103 66
8	0.434	0.084	0.237	127

1:2程度であつた。なお、No. 3, 4で還元率が異常に高いのは、溶鉄の飛散量や空気酸化量の見積りに誤差があつたためと考えられる。

スラグの発生量は少なかつた。実験終了後のスラグは流動性に富んだ白滓であり、このことから上記酸化物はすべて還元されたと考えられる。

4. 結 言

電気炉工場から発生するダストを溶鉄中に吹き込み、各種酸化物のC、Siによる還元を試み、以下の結果を得た。

(1)ダスト中の還元可能な酸化物成分である Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 、 PbO 、 ZnO 、 CdO はほぼ100%還元回収された。

(2)還元剤として、C、Si共に働いたが、Siによる還元寄与率の方が大きかつた。

(3)吹き込んだダスト中のZnとCdは2次ダスト中にはほぼ100%回収された。それらはほぼ金属状であり、高含有量であるので、2次ダストはZn製錬用原料として有望である。

以上より、本方法による電気炉ダストの再利用処理は極めて有効な方法であると考えられる。

本研究は鉄鋼業環境保全技術開発基金の援助により遂行された。ICP分析では本学物質工学系の神野研究室の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) M. KAWAKAMI, H. YOSHIGA, Y. KITAJIMA, M. NOMA and K. ITO: The Fifth Intern. Iron Steel Congress, Proc., Washington (1986), p. 751
- 2) R. P. ELLIOTT: Constitution of Binary Alloys, First Supplement (1965), p. 425 [McGraw-Hill]
- 3) 講座・現代の金属学, 製鉄編2, 非鉄金属製錬(矢沢彬編)(1980), p. 105 [日本金属学会]

パラ平衡とオルソ平衡

榎 本 正 人*

Paraequilibrium and Orthoequilibrium

Masato ENOMOTO

1. は じ め に

鉄合金のオーステナイト分解では、置換型合金元素の分配の有無や変態モードに関してパラ平衡とオルソ平衡という術語が用いられる。これらの言葉は今からおよそ40年前、HULTGREN¹⁾が当時の分析技術による測定結果をもとに、母相オーステナイトと合金元素の濃度がほとんど差がないような変態生成相に対しては“パラ(Para)”，合金元素の濃度が異なっている生成相には“オルソ(Ortho)”という接頭語(Prefix)を用いて区別したことに始まる。変態生成相としてはフェライト、パーライト、セメンタイト((Fe, X)₃C)，あるいは(Fe, X)₂₃C₆，(Fe, X)₇C₃などの合金炭化物が該当する。もともとパラはギリシャ語で「側」「不正」「不規則」「疑似」，オルソは「真」「正」とかいつた意味である。その後、この分野の研究が進展するにつれ、必ずしも分配の有無しといった単純な2分法では対処しきれない変態モードが考えられるに及んで、研究者の間でこれらの用語の意味が微妙に食い違うことも見られるようになった。そこで、本稿では用語の相違点に留意しながら、パラ平衡とオルソ平衡の意味や性質を改めて考え直して見ることにする。

2. パラ平衡と準安定平衡との関係

HULTGREN のもともとの定義ではフェライトやセメンタイト中の置換型合金元素の濃度が母相のオーステナイトとはほとんど変わらない場合、これをパラフェライト、パラセメンタイト、あるいはパラパーライトと呼ぶ。パラ平衡では拡散速度の大きい炭素原子については生成相と母相の間に化学平衡が成立しているが、鉄や置換型合金元素の拡散はほとんど起こらないと考えられている。従つて、合金元素を平衡量より余分に、あるいはそれ以下しか含んでおらず、無論、準安定相である。ここで、“Meta”ではなくあえて“Para”という接頭語を用いる

のは、準安定が通常、自由エネルギー極小に相当し、小さな濃度ゆらぎ、もしくは反応座標の増分に対して安定であることを連想させるのに対し、パラ平衡は成分元素の拡散が抑制されたための「部分平衡」[†]であり、合金元素の濃度変化に関しては、自由エネルギーの極小には対応していないことを示すためである²⁾。ただし、準安定という用語は最終平衡に相対して広く用いられており、現在準安定と呼ばれているものの中に自由エネルギー極小に対応しない相も含まれていることは大いにあり得る。このようにパラ平衡は合金元素の拡散が全く起こらないと想定した極限状態であつて、パラ平衡境界(Para-boundary²⁾)はパラ変態相(Paratransformation product⁴⁾，あるいは Para-phase²⁾)が熱力学的に生成可能な限界温度を示しているにすぎず、実際にそれらが生成する限界温度と一致するとは限らない。

3. パラ平衡モードと不分配局所平衡モードの相違

パラ平衡モードによる成長とは母相と生成相の界面で合金元素の化学ポテンシャルに段差が生じたまま界面が移動を続けるという意味であり、当初はパラフェライト、パラセメンタイトなどはこのモードによつて生成すると考えられていた。ところが、HILLERT⁵⁾，COATES⁶⁾⁷⁾によりこのような段差が存在しなくても、言葉を代えれば、化学ポテンシャルが界面で連続性を保ちながらでもパラフェライトが生成しうることが示された。このモードは不分配局所平衡(Negligible-Partition Local Equilibrium, 略して NP-LE)モードと名付けられている。界面における化学ポテンシャルの連続性を保つためには、低温では極端に薄い合金元素の拡散層(拡散スパイク)の存在を想定しなければならないが、ともかく、パラフェライトが“界面におけるオルソ平衡”ともいう

† DARKEN³⁾ は部分平衡が多くの冶金学的プロセスに適用できる重要な概念であることを指摘している。

昭和 62 年 10 月 30 日受付 (Received Oct. 30, 1987)

* 金属材料技術研究所 Ph. D. (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

Key words: paraequilibrium; orthoequilibrium; local equilibrium; metastable equilibrium; austenite decomposition.

べき局所平衡モードによって生成する可能性が指摘されたのである¹²。オルソとバラの混乱の一因はここにあり、HILLERT はもともとこの定義を最大限に生かす意味で、NP-LE モードによって生成したフェライトを False para-ferrite, 合金元素の化学ポテンシャルが不連続なまま成長したフェライトを True para-ferrite と呼ぶことを提案している²⁾。

4. 分配の最終段階という意味のオルソ

生成相の合金元素濃度が母相と異なっている場合に、当初これをオルソフェライト、オルソセメンタイト、あるいはオルソパーライトと呼んだのであるが、その後、成分元素の化学ポテンシャルがすべて等しいことを意味する目的で使われることが多い。後者の場合これを界面近傍だけに適用するか、あるいはバルクに適用するかによって大きな違いが生ずる。界面近傍のオルソ平衡については次節で検討を加えるとしてバルクのオルソ平衡については以下の点を指摘しておきたい。

1 章で述べたようにオルソとは「真正」という意味であり、究極的な平衡を連想させる。しかし、細かく言えば、オルソセメンタイトもグラファイトに対して準安定相である。従って、この用法のオルソとは最終平衡相であれ、準安定相であれ、合金元素のバルクの分配の度合いが最終的な平衡に達した状態と解すべきである。核生成理論において臨界核のパラ組成、オルソ組成といった用法⁹⁾ はこれに属する。

5. 局所平衡モードによる生成相を意味するオルソ

界面におけるオルソ平衡としての用法は、

「…… Orthoequilibrium refers to the case of complete local equilibrium at phase interfaces. On the other hand, paraequilibrium ……」⁸⁾

「……この平衡をバラ平衡と名付けた。一方、合金元素 M の分配が生じる場合は γ/α 界面で通常の平衡が成り立っている場合であり、これをオルソ平衡と名付けた。前者の場合には……」¹⁰⁾ (下線は筆者)。

の他、かなり多くの研究者によって行われているが、問題のある用法である。

Fig. 1 は局所平衡 (分配局所平衡モード) による成長の際の界面濃度を定める HILLERT の作図である。この作図ではまず、バルク組成を通るオーステナイト中の C の等活量線を引く。次に、この等活量線がオルソの $\gamma/(\alpha + \gamma)$ 境界と交わる点 (s) を通る Tie-line の他端 (t) がこのモードによって生成するフェライトの組成を与え

Fig. 1. Schematic illustration of the compositions at interphase boundaries during the growth of ferrite under local equilibrium (s and t) and the compositions at final equilibrium (p and q).

る。組成 t のフェライトはこの場合、合金元素を平衡量 (q) 以上に含む準安定相であり、長時間熱処理を続ければ最終的な平衡濃度に達するはずである。

したがって問題としては第一に分配の度合いが中間状態にある相に対して、「オルソ」の語感が必ずしもよくないかもしれないこと、第二にこの用法では 3 章で触れたような低温の不分配局所平衡モードで生成したフェライトもオルソフェライトと呼ばなければならないことである。後者の問題については接頭語を代えて混乱を避けようという提案があることは 3 章で述べた。前者に関しては HILLERT によれば、準安定相であることは十分認識するが、最終平衡の意味に限定すると、そのような状態はほとんど実現しないのでオルソという言葉が用いられなくなるおそれがあるとのことである¹¹⁾。

6. バラ平衡とオルソ平衡の相境界の位置関係

3 元以上の多元系でバラ平衡 (もしくは部分平衡) とオルソ平衡 (最終平衡) の相境界の間に何か一般的な性質があれば、変態や相平衡関係を考察する上で指針として大いに役立つであろう。ここでは Fe-C-X 系の α/γ 平衡について等活量線を使った作図法により、これら 2 種の平衡相境界の位置関係を検討してみよう。類似の考察が以前、HILLERT²⁾ により行われていたが、以下で述べるのは詳細では異なっており、筆者なりの説明を試みたものである。

はじめに、X が Mn あるいは Ni のような γ -former である場合を考える。C 濃度がゼロのときバラ平衡境界はその定義から明らかなように Fe-X 2 元系の T_0 組成を与える。一方、X の濃度がゼロのときは、Fe-C 2 元

¹² NP-LE モードに対し、局所平衡を保ちながら合金元素の分配を生ずる変態モードを分配局所平衡 (Partition Local Equilibrium, P-LE) モードと呼ぶ⁸⁾。一般に、高温 (低過冷度) では P-LE、低温 (高過冷度) では NP-LE モードが働き、両モードの間には理論的には明瞭な遷移温度がある。

Fig. 2. Schematic illustration of α/γ ortho- and paraequilibrium phase boundaries in an Fe-C-X system in which X is an austenite former. rstu and rpqu are the carbon isoactivity lines of an identical activity value.

系の平衡相境界になる。従つて、Fig. 2 に示すように、パラ平衡の ($\alpha + \gamma$) 2 相域は Fe-C 軸上に底辺を有する三角形のような形状になり、帯状のオルソ平衡の 2 相域に含まれることが直感的に理解されるが、このことは次のようにしても確かめられる。

いま、C の等活量線 ru を考え、ru がオルソ境界と s, t で交わるとする。等活量線は 2 相域では Tie-line となる。同じ活量値の等活量線を s からパラ相境界まで延長し、それとの交点を p とする。パラ平衡の Tie-line は C-corner から発せられる Fe/X の比が一定の“Component ray”になっており、この Tie-line の他端を q とすると、q を通るフェライト中の等活量線はオルソ平衡で描いた等活量線 tu と一致するはずである。パラ平衡の 2 相域がオルソ平衡の 2 相域の外側にあつてはこのような作図が不可能であることは明らかである。

X が Si や Mo のように α -former である場合にも Fig. 3 に示すように、パラの ($\alpha + \gamma$) 2 相域がオルソより内側にくる場合にだけ、Fig. 2 と同様な等活量線の作図を行うことができる。Fig. 3 はオーステナイト中の C と X の相互作用が反発的であるような X についての作図であるが、吸引相互作用を有する X についても事情は全く同じである。通常、2 元系でもセメンタイトとグラファイトのように準安定相の 2 相域は最終平衡相に比べ縮小しているが、上に述べたパラとオルソの 2 相域の位置関係はこれと同等の事柄と見て差し支えないであろう。従つて、 α -former と γ -former を同時に含むような

Fig. 3. Same figure as Fig. 2 for X of a ferrite former.

高次の多元系でも一般的にパラの 2 相域はオルソより縮小していると考えられる。

HULTGREN が最初にオルソを定義した頃はまだ P-LE, NP-LE モードという認識はなく、単純に分配の有無を区別するほどの意味であつた。従つて、彼の記述に最終平衡を意味する場合と局所平衡を意味する場合とが混在している¹¹⁾。また、相平衡を記述する場合と変態モードに関連して使われる場合とを混同することにより、パラ平衡の 2 相域で生成するのはパラフェライトであるといった早呑込みの危険性も生じてくる。数年来、これらの用語に悩まされ続けてきた一人として頭の整理を行つてみると同時に、読者諸氏に用語の意味をいつそうよく理解していただくために筆をとつたしだいである。

文 献

- 1) A. HULTGREN: Trans. Am. Soc. Met., 39 (1947), p. 915
- 2) M. HILLERT: Internal Report, Swedish institute of Metal Research (1953)
- 3) L. S. DARKEN: Trans. Metall. Soc. AIME, 221 (1961), p. 654
- 4) A. HULTGREN and collaborators: Kungl. Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar., 4 (1953) 3, p. 3
- 5) M. HILLERT: The Mechanism of Phase Transformations in Crystalline Solids (1969), p. 231 [Institute of Metals, London]
- 6) D. E. COATES: Metall. Trans., 3 (1972), p. 1203
- 7) D. E. COATES: Metall. Trans., 4 (1973), p. 1077
- 8) D. E. COATES: Metall. Trans., 4 (1973), p. 2313
- 9) M. ENOMOTO and H. I. AARONSON: Metall. Trans. A, 17 (1986), p. 1381
- 10) 宇都宮武志, 星野和夫, 佐久間健人, 須藤 一: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 1582
- 11) M. HILLERT (私信)