

(1) 凝固スラッグ塊は緑色を帯びた青藍色であり、溶融スラッグ中のクロム酸化物は、化学量論的に CrO の形がもつとも優勢である。

(2) 本実験系は定常状態に到達しているものと考えられ、スラッグ塩基度の酸性側→塩基性側への推移にともなつて λ_m が増し、クロム酸化物の両性挙動を示唆する。第二に溶解温度の上昇にともない、 λ_m は逆に減少するが、これは雰囲気中の酸素分圧の減少によるものと思われる。

(3) これと類似の方法によつて、溶融スラッグ中における Fe, Mn, Ti, V などの多原子価遷移原子の挙動を調べ、silicate bond に関する知識を深めてゆくことができるであろう。

なお工業的観点に立つて附言すれば、含クロム鉄鉱石の高炉吹製に関しては、幾多の難問が介在していることと思うが、すでに低品位鉄マンガングル鉱石の高炉における低温酸性操業によつて Mn concentrate (高 Mn re-

fining slag) が歩留よく得られている経験的事実^{*)}もあり、その間に原理的な共通性を認めることができる。われわれのスラッグ構造に関する Academic な知識は、高温冶金反応の解釈、推定と相互に diffuse しなければならない。

文 献

- 1) 金森他: 鉄と鋼, **40** (1954) 7, 665; 東京大学生研報告, Vol. 4, No. 4 (1955)
- 2) 新実, 松下及び金森: 鉄と鋼, **41** (1955) 10, 1075
- 3) F. Ogburn, J. Brenner: Trans. Electrochem. Soc., **96** (1949) 347
- 4) H. Lux, E. Rogler: Z. anorg. allg. Chem., **250** (1942/1943) 2, 159
- 5) R. Durrer, G. Volkert: Die Metallurgie der Ferrolegierungen, (1953)

平炉の空気力学的構成 (I)*

(序 説)

橋 本 英 文**

AERODYNAMIC CONSTITUTION OF OPEN-HEARTH FURNACE (I)

-INTRODUCTION-

Hidefumi A. Hashimoto

From the view point of productivity, improvement in open-hearth furnace means shortening the time for each heat and keeping high production rate for a long period. Productive characteristics of open-hearth furnaces are expressed in formulas using the characteristic constants K (the latent production rate at initial state) and a (the decline of production rate per production of unit amount), which make it possible to compare a variety of open-hearth furnaces each other as to their productivities.

Many factors affect K and a , they are mainly related to types and arrangement of the following constituents:

- (1) The checker chamber, the fantail and the slag pocket
- (2) The air-uptake and the end wall
- (3) The furnace head (end roofs, dog houses, side walls and throats)
- (4) The fuel jet
- (5) The furnace chamber (ceilings and walls)

In studying the factors thoroughly and extensively to improve open-hearth furnace rationally, it is more easy, more efficient and less expensive to study them by means of small-scale models. Model experiments under suitable considerations represent phenomena in actual furnaces satisfactorily.

* 昭和27年10月, 昭和28年4月, 昭和31年4月, 日本鉄鋼協会講演大会にて発表

** 住友金属工業, 小倉製鉄所

When an open-hearth furnace or other furnaces are built, they will be designed rationally by the aids of model experiments. The method is not a quite new one, but it has been applied as an indispensable procedure in the case of aircraft or ship building.

I. 結 言

平炉は現在の鉄鋼業において最も普遍的な炉であるとともにまた最も短命な炉である。それは、装入～出鋼を繰返す非連続作業・極めて高い作業温度・侵蝕性浮游物を含む内部雰囲気・燃焼流の歪向という不利な条件を課されており、炉容の大型化・高級耐火物の使用がその負担を幾分軽くするにしても、その能率の維持と向上とは依然として解消ということには至らない。

現在の平炉の型はこれをベンチュリ (Venturi) 型・メルツ (Maerz) 型・シングル (Single Air-uptake) 型の三つに大別することができる。これらの間にはそれぞれの得失はあるにしても、例えば機械通風・重油焚・200 t 炉というような具体的条件を与えるとき、そこに最適の炉型ないしは部分構成があるはずであり、少くとも現在の炉は自然通風・発生炉ガス焚・30 t 炉とは明らかに違わねばならない。これは燃焼・伝熱・損傷に関することでありいずれも空気力学的な構成の如何にかかるところがはなはだ大きい。

II. 平炉の能力特性

平炉の能力改善の主眼はつぎの2点に統括される。

- (a) 個々のヒートにおける製鋼時間の短縮
- (b) 継続せる作業を通しての炉寿命の延長

この概念はつぎのごとく数式化される。

1. 能力特性式

操業にともなう平炉能率の低下は炉体の損傷・蓄熱機能の低下によるが、これらは耐火物の侵蝕・ダストおよび溶流物の付着堆積を起す物質の量に斐係しており、それはある製鋼条件においては製出鋼量に比例する。

そこで、製鋼能率を製鋼時間当りの製出鋼量で表わし

x : 製鋼時間 (累計), y : 製出鋼量 (累計)

K : 初給能率 (基本), a : 比例常数

とすれば、ある時期 (x) にあつては

製鋼能率: $y' = dy/dx = K - ay$ (1)

この方程式を初期条件を入れて解けば

$$y = \frac{K}{a} (1 - e^{-ax}) \text{ (2)}$$

$$\therefore y' = Ke^{-ax} \text{ (3)}$$

2. 実際作業

炉が本来の能力をそのまま発揮できるときの式が上に

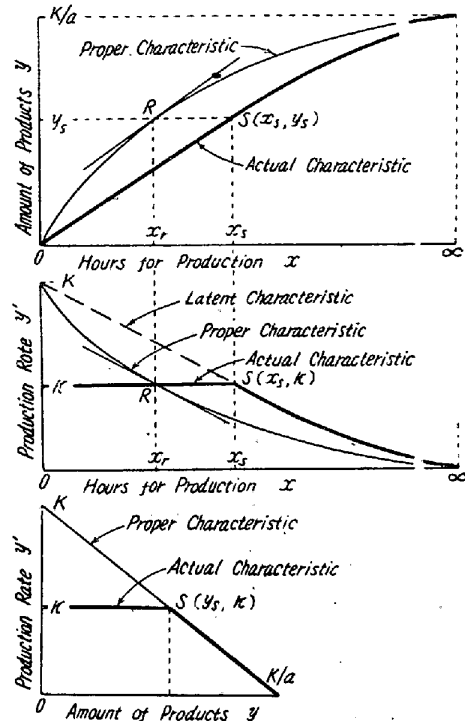


Fig. 1. Characteristic curves of open-hearth furnace.

与えられ Fig. 1 に細い実線で示してある。しかし一般には初期の高い能率は何等かの拘束 (熱供給能力の最高が燃焼・伝熱等の能力で抑えられる) によつて一定限界までしか発揮できない。この能率を κ で表わすと、この期間で

$$\left. \begin{aligned} y_1' &= \kappa \\ y_1 &= \kappa x_1 \end{aligned} \right\} \text{ (4)}$$

しかしながら炉本来の基本 (proper) 特性は必ずこの背後にあつて潜在した (latent) 能力を引いており、時間当りの生産が一定であるから潜在能率は毎時間一定値づつ低下し、これ $(K - a \cdot \kappa x_1)$ となつているが、 $y_s' = \kappa$ に達して後は基本特性と同じ経過をたどる。その時期 (x_s) は

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= K - a \kappa x_s \text{ より} \\ x_s &= \frac{1}{a} \left(\frac{K}{\kappa} - 1 \right) \\ \therefore y_s &= \frac{1}{a} (K - \kappa) \end{aligned} \right\} \text{ (5)}$$

この時期以後においては $(x_s - x_r)$ 時間だけ遅れた基本特性にしたがい

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{K}{a} \left[1 - e^{-a(x-x_s+x_r)} \right] \\ y' &= Ke^{-a(x-x_s+x_r)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 x_r は基本特性で能率が κ になる時期であり
 $y_s' = Ke^{-ax_r} = \kappa$ より

$$x_r = -\frac{1}{a} \log\left(\frac{\kappa}{K}\right) \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 1 の太い実線が実際作業、破線は潜在能力を示す。

これらの式を平炉の能力特性式と名付け、 K と a とをその特性値とよぶ。 K は始めのかくされた能率、 a は生産単位量当りの能率の低下を示す。いずれも炉と操業とによつてきまる常数であり、これをもつて諸種の平炉・操業を比較することができる。

3. 炉の改善

平炉の改善は特性値 K を増すことと、 a を減すことにある。すなわち (3) 式および (6) 式において係数 K を増し、 e のべきの $-a$ を増す；言い換えれば a を減すことが何時の時期においても y' を高くする。これが能率の維持・向上に他ならない。

III. 模型実験の必要

1. 特性をきめる因子

平炉能力の特性値 $K \cdot a$ をきめる因子は数多く、これらが相い関係し合つてはたらいっているが、前者が伝熱に関係し後者は損傷に関係するものといえ、いずれも流れの如何に支配される。すなわち燃料と空気の流れ～混合によつて燃焼が行われ、燃焼の位置・焰の性状・生成ガス流れにより伝熱と損傷は決定づけられる。各炉型を通じこの因子として大きい役割を演ずるとされる炉の構成因子は

(1) 下炉の構成 (換熱機能および上炉への流れの如何)

- a) 蓄熱室の構造・配置
- b) ファンテールの有無・構造
- c) 鉸滓室の構造・配置 (気道との関連)

(2) 気道の構成 (燃焼および排出流の如何)

- a) 個数の単複 (シングルかダブルか)
- b) 配置の集散 (炉頭巾に拡るか中央に集るか)
- c) 形状 (形および面積の広狭)
- d) 端壁の直斜 (突当り壁が鉛直か傾斜せるか)

(3) 炉頭の構成 (燃焼機能)

- a) 小天井の傾斜 (端部に向つて上るか下るか)
- b) 側壁の拡り・絞り

c) 大きさ (巾・長さ)

(4) 噴流の構成 (燃焼機能および炉内流れ)

a) 強さ・大きさ・拡り

b) 位置・方向

c) 個数 (燃料噴流が 1 本か複数か)

(5) 炉腔の構成 (燃焼機能と損傷)

a) 炉壁の位置・傾き・絞り

b) 天井の高低

c) 炉の巾・長さ

であり、これらのものが変向によつて流向が逆になつた時にも適合したものでなければならぬし、またその改善は構造の単純化にも通ずるものであることが望ましい。

2. 作用の究明

実際の平炉操業によつてこれらの因子の作用を解明し改善をはかることは最も直接的であり明瞭であるかのごとく思われるが、これはいうべくして容易なことではない。すなわち、

a) 炉を築造または改造しようとするとき、これを作つて使つてみなければ実験はできない。

b) ところが、実炉による実験から得られる情報は実験が極めて労多に反してあまりにも狭い範囲のしかも不明確なものたるを避け難い。

というのは、平炉が作業温度の高い大がかりの装置でありしかも本来が鋼を作るように設計されているのであつて決して実験に都合よくはできていないのであるから任意に条件を変えて実験を行えるものではなく、反対に条件を一定にして実験を行おうとしても偶然・作業上の原因要求によつて条件の変わるのをいかんともし難い。さらにこのような状況で行われる実験であるため成果の把握も不十分となり、成績が判つてもその由つてくることの委細が究明できないのでは改善の資としてはなほだ貧弱なものたるを免れず、莫大の時日と労力経費をかけてしかも得るところの少ない実験に了る。これが、頻りに改善が行われ改善の機会にも最も恵まれているはずの平炉が大きい変化もなく古い型を踏襲している理由である。

ともあれ、問題は空気力学的なものである。ゆえにこの解明に模型実験が有効に利用されることは、早くから風洞実験・水槽実験によつてその設計を行つている航空機船舶の例にかんがみても明らかである。適確な配慮のもとに行われる模型実験はつぎの点で遙かに実炉実験に優る。

(1) 実験に要する費用と労力が少く

(2) 広範に任意に条件を撰んで、安定した状況で実験ができ、したがつてはつきりした資料が得られ

(3) 炉の築造に先立つて設計の良否の判定・改善改造の資料が速かに得られ

(4) 違つた設計のものを同じ条件下で比較できる。また実炉と対比して観察すれば実炉における諸現象の解釈が容易であり、実炉だけの観察では気付かれないような点をも発見することができる。

IV. 模型実験の基礎

1. 相似律

実炉に起る現象を模型によつて研究するには、両者の間には形態的・空気力学的・熱的な相似がその実験目的を満足させる程度に成立していなければならない。

1) 形態的相似

(a) 寸法: 実験と模型とは普通その形が図形的に相似でなければならない。空気(A), 燃料(B), 実炉(f) 模型(m)に対しそれぞれ括弧内の尾符でそのものを表わせば

$$[l_A/l_B]_m = [l_A/l_B]_f \dots\dots\dots (8)$$

が対応寸法(l)の相似条件である。生成ガス(C)に対しては以下AまたはBをCに代えて適用すればよい。

表面の粗さが対応しないときは表面近傍での条件は異なる(とくに床面が未溶解の屑鉄であるとき等)はずであるが、屑鉄の山の高さは別として粗さは大勢には影響しない。

(b) 流量: 空気と燃料の流量(Q)の比はそれぞれの占める空間の割合を決定する。流速をvで表わすと $Q \propto vl^2$ であるから

$$[(v_A l_A^2)/(v_B l_B^2)]_m = [(v_A l_A^2)/(v_B l_B^2)]_f \dots\dots (9)$$

したがつて(8)と(9)から次式が成立する。

$$[v_A/v_B]_m = [v_A/v_B]_f \dots\dots\dots (10)$$

2) 空気力学的相似

流れに作用する力は流れの慣性力の他に粘性力があり温度・組成を異にする部分の間には浮力がはたらく、また流体中に浮遊する微粒子の受ける力はほとんど粘性力のみであるがこの浮遊・分離等にはこれを考えねばならない。

(c) レイノルズ数(R): 慣性力と粘性力との比を示し、これが流れの性質を決める。すなわち流速が増して慣性力が大きくなりRがある値(約2000)を越せば流れは層流から乱流になる。

$$R \left[\propto \frac{M(\text{慣性力})}{N(\text{粘性力})} \right] = \frac{\rho v^2 l^2}{\mu v l} = \frac{\rho}{\mu} v l = \frac{v l}{\nu} \dots\dots\dots (11)$$

(ただし、 ρ = 密度, μ = 粘性係数, $\nu = \mu/\rho$ = 動粘性係数) この相似条件は

$$[R_A]_m = [R_A]_f, [R_B]_m = [R_B]_f \dots\dots\dots (12)$$

であるが乱流にあつてはRが相当に変つても流れの形その他空気力学的様相に本質的な変化は認められず、いずれのRも2000以上であれば(12)式は一括して比のみで表わされる。

$$\left[\frac{v_A l_A / \nu_A}{v_B l_B / \nu_B} \right]_m = \left[\frac{v_A l_A / \nu_A}{v_B l_B / \nu_B} \right]_f \dots\dots\dots (13)$$

これに(8)(10)を考え合わせるとつぎのごとくなる。

$$[\nu_A/\nu_B]_m = [\nu_A/\nu_B]_f \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} \text{また. } \frac{R_B}{R_A} &= \frac{\mu_A}{\mu_B} \cdot \frac{\rho_B v_B l_B}{\rho_A v_A l_A} \\ &= \frac{\mu_A}{\mu_B} \cdot \frac{\sqrt{\rho_B \cdot \rho_B l^2 v_B v_B} \cdot v_B}{\rho_A v_A l_A^2 / l_A} = \frac{\mu_A}{\mu_B} \cdot \frac{\sqrt{\rho_B P_B}}{W_A / l_A} \end{aligned}$$

(ただし、 P_B = 燃料噴流の運動量, W_A = 空気噴流重量) 模型ではABに同じ流体を用い、また実炉では $\mu_A = \mu_B$ と見られるから上式より重油バーナ等に便利な次式が得られる¹⁾。

$$n \left[\frac{\sqrt{\rho_B P_B}}{W_A} \right]_m = \left[\frac{\sqrt{\rho_B P_B}}{W_A} \right]_f \dots\dots\dots (15)$$

(ただし、 $n = l_m/l_f$ = 縮尺)

(d) 浮力: 慣性力と浮力との比はフルード数(F)の形で示される。すなわち

$$\begin{aligned} F \left[\propto \frac{M(\text{慣性力})}{L(\text{浮力})} \right] &= \frac{\rho v^2 l^2}{\Delta \rho g l^3} \\ &= \frac{v^2}{(1-q) g l} = \frac{F_0}{1-q} \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

ただし、 $\Delta \rho$ = 密度差, q = 密度比, $F_0 = v^2/(g l)$ は $q = 0$ の時のFで普通のフルード数である。流体系が決つておればqが決りFは F_0 に比例する。相似条件は $[F]_m = [F]_f$ であるが、平炉の流入部は高速・流出部は混合が進みともに浮力の影響はほとんどなく、中央部では燃焼による温度上昇と膨脹が流れを加速するように働かし浮力の影響は小で流れの形は大して変らぬ²⁾。したがつて模型実験では空気と燃料ともに常温の同一流体が用いられる。

2. 標跡

1) 流れ

流れの観測には普通常温の水にアルミ粉を標跡として混ぜて使うがこれは極く微細であり流れによくともない流れとの速度差はほとんどない。これに働く力は重力・

浮力と粘性力とでありこの比をもつて標跡が流れによくとまらうかが判定される。

粒子を球 (半径 = r , 密度 = ρ) とし流体 (密度 = ρ_0 , 粘性係数 = μ_0) 中のこの粒子の上下運動速度を v_0 とすれば, この v_0 はストークスの法則の適用範囲にあり,

$$\text{浮力 } [4\pi r^3(\rho - \rho_0)g/3] = \text{粘性抵抗 } [6\pi r\mu_0 v_0]$$

$$\text{したがつて } v_0 = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_0}{\mu_0} r^2 g \dots\dots\dots (17)$$

常温の水 ($\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$, $\mu_0 = 0.015 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$) 中の $r = 0.0025 \text{ cm}$ のアルミ粉 ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$) の例を見ると, 上式より求めた沈下速度は $v_0 = 1.5 \text{ mm/sec}$ となり流れの速さ (100 mm/sec 以上) に比しほとんど影響ない。とくに水を循環して使用するときは微細な粉のみが流れ, それはピーカ内に入れて静置しておいても器内の微かな対流に乗って動きいつまでも沈殿せぬ程度のものである。

2) 分離

ダストの分離状況の適合は損傷実験に必要な相似条件である。実炉内の浮遊ダストと称するものは粒度 1 mm 以上のものから蒸気体に至るまでを含んでおり, 分離付着の標跡としては一定の粒度を決め難く, また損傷は温度にもよるのでこれらの点を考え合せて実験・判定を要する。

今, 曲率半径 D なる円弧に沿つて v なる速さで動く粒子 (半径 = r , 密度 ρ) の運動を考え, 遠心力によつて粒子は等速 (v_r) で円の中心から遠ざかるとすると, 粒子は小さいからその粘性力はストークスの式が適用され

$$\text{遠心力 } [8\pi r^3 \rho v^2 / (3D)] = \text{粘性力 } [6\pi \mu v_r]$$

$$\text{したがつて } \frac{v_r}{v} = \frac{4r^2 \rho v}{9\mu D} \text{ となり分離の相似は } v_r/v$$

の一定なことであるから, その条件は $r^2 \rho \propto \mu D/v$ となる。

$$\text{すなわち } \frac{[r^2 \rho]_m}{[r^2 \rho]_f} = \frac{1}{n} \left(\frac{\mu_m}{\mu_f} \right) \left(\frac{v_f}{v_m} \right) \dots\dots\dots (18)$$

例えば, 横型の縮尺を 1/25 とし空気中にアルミ粉を飛ばせるとするとこの粉の径は上式より炉内ダストの径の約 1/3 と計算される。

3. 混合

燃焼は高温の炉内で起りしかも焰の伝播速度は極めて速いので燃料と空気の接触混合によつて燃焼が規定される。したがつて模型実験では流体の混合度を知れば燃焼の進行度が知られる。すなわち燃料流が空気流のいずれかに標跡となる物質を混入するか双方に異つた標跡を入れる。この標跡は CO_2 ガス等のごとく混合度を定量できる要がある。同じ混合室であつてもそれが新しい空気

との混合であるか逆流した生成ガスとの混合の結果であるかは測定値のみでなく流型の観察等と総合判断されねばならぬ。またどこまでが焰であるかは燃料の性質・炉内の状態等にもよる。

V. 模型実験の方法

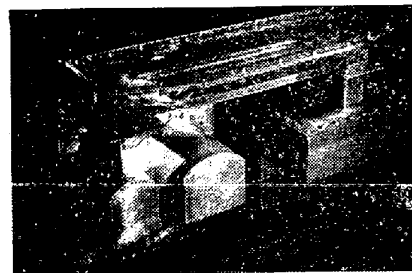
模型は主として透明な有機ガラス (Plexiglas) 板を加工して内部の空間を象つて作り, 流体としては常温の水または空気を用い, その中に標跡を入れて観測量する。流形を知るには光を照射して撮影し, 混合を測るには CO_2 ガスの分析等により, 損傷を見るにはダストの付着状況による。

1. 模型



Fig. 2. Maerz design model (MF-2A)

この実験に用いた模型は炉型別で基本的にはベンチユリ型 2, メルツ型 1, シングル型 3 であり, これらに各種の変型を施して実験を行つたがその主要な例は Fig. 2~4 に示す。縮尺は



(a) Model (MF-2B)



(b) Model (MF-4)

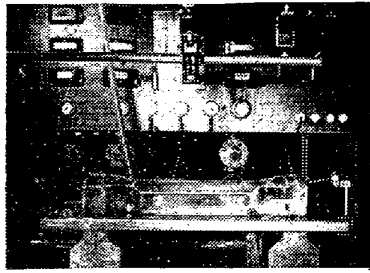
Fig. 3. Single air-uptake design models: (MF-2B) and (MF-4).

1/25 あるいは 1/30 とした。下炉は黄銅板で作る必要部分には有機ガラス張に改めた。上炉は全透明または底部のみ木製とし金属枠組は付けなかつた。なお基礎的な補助実験等に二次元の平盤模型も使用した。

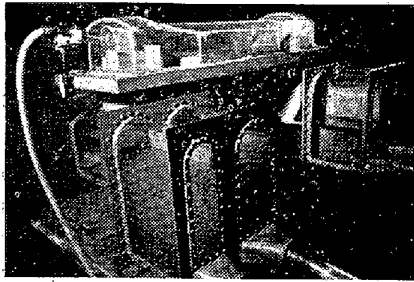
2. 観測

(1) 流れ: 標跡の示す流型を見るには, 全般または局部に光束を当てあるいはスリットを通したプロゼクタからの光を直接または鏡で反射して 3~7 耗厚の光断面⁴⁾を作つて観察し, またこれを直角の方向から撮影して記録し立体流れを描いた。天井アーチに沿う部分は天井内面の全反射を利用してへの字型の光面を作ることができる。

標跡は燃料流空気流ともに同一のものであつても流速の差で判る。気泡は輝度は高いが大きさを調整できず



(a) Model (MF-3)



(b) Model (MF-5)

Fig. 4. Semi-venturi design models: (MF-3) under flow pattern study, and (MF-5) with dog-house.

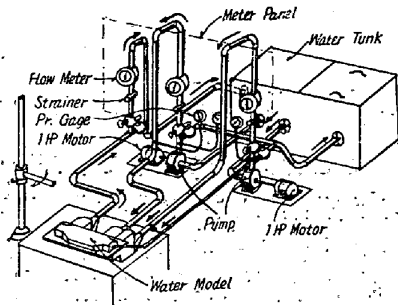


Fig. 5. Hydraulic system.

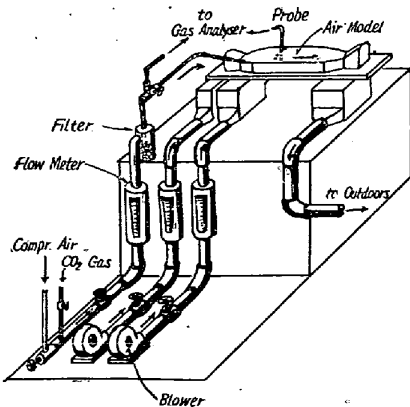


Fig. 6. Air system.

また炉内に蓄積されるので特別のとき以外には用いなか
った。

(2) 混合: 燃料噴流 (空気使用) 中に CO_2 を定量
だけ混入して炉内各断面各点における濃度を分析し⁵⁾
等濃度線図を作り混合の状況を知った。

(3) 損傷: 鋼浴面からアルミ粉⁶⁾ またはペークライ
ト粉を放流し、これが予め油を塗つてある炉内壁に付着
する状況とその程度により侵蝕をうける度合を考察し
た。

VI. 結 言

能率の面からいう現平炉の改善とは、個々のヒートに
おける時間の短縮と長期にわたりこれを維持できること
すなわち寿命の延長である: この能力特性は特性値 K 、
 a を使つて式で示され、この特性値で炉の比較ができ
るが、これらを決める諸構成因子の作用を広く徹底的に追
求し平炉の合理化—それは単純化に通ずることが望まし
い—を進めるには模型実験によるのが迅速かつ経済的だ
である。

適確な配慮のもとに行われる模型実験は実炉における
現象を十分に再現することができる。相似律に基づく炉
の模型実験が行われるようになったのは外国でもここ20
数年來のことであり、日本で俵⁷⁾が 1931 年にほとんど
完全な手法による平炉模型実験を発表していることは特
筆される。

有機ガラスの出現は模型の製作・観測を極めて容易に
した。平炉その他の炉を築造しようとするとき、その設
計は模型実験と並行して合理的に行われるべきである。こ
の手段は決して目新しいものではなく航空機・船舶の建
造においてはすでに古くから行われていて不可欠のもの
となつている。(昭 31~7 月寄稿)

文 献

- 1) J. A. Leys, & E. T. Leigh: J.I.S.I., 1952, vol. 170, Apr., pp. 341.
- 2) M. P. Newby: J.I.S.I., 1949, vol. 162, Aug., pp. 452
- 3) I. M. D. Halliday, & A. R. Philip: J.I.S.I., 1949, vol. 162, Aug., pp. 403.
- 4) R. S. Howes, & A. R. Philip: J.I.S.I., 1949 vol. 162, Aug., pp. 394.
- 5) R. D. Collins, & J. D. Tyler: J.I.S.I., 1949 vol. 162, Aug., pp. 459.
- 6) J. A. Leys, & E. T. Leigh: J.I.S.I., 1952, vol. 170, Apr., pp. 338.
- 7) Kuniichi Tawara: Tetsu to Hagané, 1931, vol. 16, Jul., pp. 724.

[註記] この一連の研究は「平炉の合理化改善に関する実験的研究」の標題のもとに昭和 29 年度通商産業省 鉦工業応用研究補助金を交付された実験研究を根幹とするものです。