

小形熔鋇炉実験の相似論的考察

Similarity Criteria of the Blast Furnace Pilot Plant Operation

中 村 信 夫*

Nobuo Nakamura

内 容 梗 概

あらゆる工学的問題において、一般にそれが独創的なものであればあるほど、目的基礎研究を離れるとパイロットプラントによる中間研究、さらに工業化試験という段階を経る場合が多い。この場合、相似論はきわめて重要な役割を果すものであって、筆者はボロン（B）の精錬や鉄鋼業の分野で多年この種の問題に当面してきた。今回はその中で小形熔鋇炉についての経験と考察の結果について述べた。特に本報の前半においては、熔鋇炉のみならず、装置工学共通の基礎理論を述べ、後半に、これが熔鋇炉実験への応用について述べた。

1. 緒 言

特殊鋼原鉄として、優良砂鉄を原料とした木炭鉄は、すぐれた遺伝性と処女性を有し、今日その科学的裏付けはほとんど完全に可能である⁽¹⁾。一方、より廉価良質の原鉄をうるために筆者ら⁽²⁾⁽³⁾は机上模型炉や 1 t 小形熔鋇炉を建設し広汎な基礎的研究を行い、これを工業化して今日に至っている。

さて、われわれが、この種模型やパイロットプラントによって各種の実験を行う目的は、いうまでもなく炉型あるいは操業法についての実験の結果をスケールアップするためである。したがって実験の組立（計画および設計）や結果の解析には、つねに相似論的基準に則した考え方が先行すべきものである。しかるに、この方面に関する多くの研究の中には、往々にして、この点の配慮に欠けるものが見出されるのは遺憾であるが、同時に対象はあまりにも複雑多岐であって、実際に則した理論的基準の未確立であるところに根本的な問題がある。

以下、この基準に関する二、三の問題点を提起し、あわせて、より良い原鉄をうるために行った筆者らの研究にも触れたが、乏しきながら、苦心の一端でも御賢察いただき、今後のこの方面に関する研究の資ともなれば幸甚である。

2. 相似律基本的理論の概要

2.1 相似律の種類

まず、相似律の種類、すなわち、相似律を適用すべき項目を示すと、次の 6 項目に集約される。

- (1) 幾何学的相似
- (2) 機械的相似
- (3) 速度論的相似
- (4) 動力学的相似
- (5) 熱的相似

(6) 化学的相似

これらは、すべてが必ずしも独立ではあり得ない場合がありうることは一応注意しておかねばならない。同時に、熔鋇炉実験において、上記のすべてを満足することは不可能であって、ただ 1 項目についてすら、後述のごとく、これを完全に果すことは困難な場合が多い。したがって実験の主目的対象が何であるかということによって支配項目を抽出することは非常に重要になってくる。

以下、(1), (2), (3) は随時論ずることにして、主として (4), (5), (6) について基本概念を述べる。

2.2 動力学的相似基準

粘性流体の等温流動についての Navier-Stokes 氏の方程式⁽⁴⁾を基準にすると、

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ & \quad \text{I} \qquad \qquad \qquad \text{II} \\ & = \rho g \cos \alpha_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ & \quad \text{III} \qquad \text{IV} \qquad \qquad \qquad \text{V} \\ & + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots \text{VI} \quad (1) \end{aligned}$$

これを一般次元方程式で示すと、

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\rho u}{t} \right] + \left[\frac{\rho v^2}{L} \right] = \left[\rho g \right] - \left[\frac{\Delta p}{L} \right] + \left[\frac{\mu v}{L^2} \right] + \left[\frac{\mu v}{L^2} \right] \\ & \quad \text{I} \qquad \text{II} \qquad \text{III} \qquad \text{IV} \qquad \text{V} \qquad \text{VI} \\ & \qquad \qquad \qquad \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 ρ , v = 流体の密度、粘度； u , v , w = 速度成分； $g = \cos \alpha_x$ における x 軸方向の重力加速度、 Δp = 圧力損失、 t = 時間； L = 線次元；をそれぞれ示す。

いま、I と II は $L/t = v$ とおくと次元的に平衡関係にあり、V と VI は同値であるので、結局 4 個の項が残る、これを無次元項に整理すると、

$$\text{II} / \text{V} = \rho v L / \mu ; \text{ Reynolds 数, } (N_{\text{Re}})$$

* 日立金属工業株式会社安来工場

$$\text{II} / \text{III} = v^2 / Lg ; \text{Froude 数}, (N_{\text{Fr}})$$

$$\text{IV} / \text{II} = \Delta p / \rho v^2 ; \text{圧力係数}, (N_{\Delta p})$$

となり、周知の N_{Re} は慣性力/粘性力の比を示し、 N_{Fr} は慣性力/重力比、 $N_{\Delta p}$ は圧力/慣性力比をそれぞれ意味している。そして結局、上記 N. S. 方程式より、次の無次元方程式が導かれる。

$$\Delta p / \rho v^2 = \phi(\rho v L / \mu \cdot v^2 / Lg) \dots\dots\dots (3)$$

この式には、厳密にいうと表面張力、 σ の項が入っていないので、もしこの物性値が大きく影響をもつ系を対象とする場合には不十分である。また、この (3) 式は容易に次元解析の手法から導かれるものである。独立変数に σ も加えて、 π 定理で解くと、無次元項としてさらに Weber 数、 $(\rho v^2 L / \sigma)$ 、 N_{We} が入り、

$$\Delta p / \rho v^2 = \phi(\rho v L / \mu \cdot v^2 / Lg \cdot \rho v^2 L / \sigma) \dots\dots\dots (4)$$

となる。この (3) 式あるいは (4) 式は炉内の圧力損失や通風均一性などを対象とする場合の重要な相似基準となるものである。

2.3 熱的相似基準

熔鋇炉内における伝熱には強制対流が主であって、自然対流、輻射伝熱は比較的無視できる。壁損に關与する固体伝熱は重要であるが、これは幾何相似論的な観点に立って別に論ずることにして、ここでは強制対流に関する境膜の熱伝達係数、 h について無次元方程式を導くとこれも流体の關与するものであるから、前記 N. S. 方程式の速度成分の代りに温度 T を代入して、これから無次元方程式を導くと、容易に次式が得られる。

$$hL/k = \phi(\rho C_p v L / k) \dots\dots\dots (5)$$

左辺は Nusselt 数、 N_{Nu} であり、右辺は Peclet 数、 N_{Pe} であって、 C_p 、 k は気体の比熱、熱伝導度を示す。また、これと同時に、熱的相似のためには、流動する流体の状況が等しくなくてはならず、そのためには動力学あるいは速度論的相似項も必要であり、したがって、既述の N_{Re} 、 N_{Fr} も入り、結局、

$$hL/k = \phi(\rho v L / \mu \cdot v^2 / Lg \cdot \rho C_p v L / k) \dots\dots\dots (6)$$

が総合熱的相似基準の方程式となる。

2.4 化学的相似基準

特定の事象を対象とする模型実験の場合は別であるが小形熔鋇炉 (パイロットプラント) 実験では、銑鉄、鋇滓あるいは炉頂ガスなど、炉内における化学反応の結果を検討の対象とする場合が大部分である。したがって、化学的相似基準はきわめて重要な意味をもっている。

一般に、流動媒体内での化学反応は、その系の平衡恒数、反応速度、滞留時間に強く支配される。これはとりもなおさず、熱および物質移動によって支配されることになる。したがって、一応前述の強制対流に用いた N. S. 方程式が、そのままの形式で適用される、すなわち、前者については、

$$\begin{aligned} & \rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = q_A U \end{aligned} \dots\dots\dots (7)$$

であって、ここに、 U = 化学反応速度 (単位体積、時間における生成物質質量)、 q_A = 単位主成物質質量当りの反応熱、を示す。これから、無次元方程式を導くと

$$\phi \left(\frac{\rho C_p v L}{L}, \frac{q_A U L}{\rho C_p v T} \right) = \text{const.} \dots\dots\dots (8)$$

となる。次に後者の物質移動に関しては、熱伝導率に代ってエンタルピーと拡散率をあてはめればよく、

$$\begin{aligned} & \left(u \frac{\partial a}{\partial x} + v \frac{\partial a}{\partial y} + w \frac{\partial a}{\partial z} \right) \\ & + D \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial a}{\partial t} = U \end{aligned} \dots\dots\dots (9)$$

となり、 a は単位容積当りの拡散物質濃度、 D は拡散係数を示している。これから無次元方程式を導くと、

$$\phi \left(\frac{v L}{D}, \frac{U L}{a v} \right) = \text{const.} \dots\dots\dots (10)$$

となる。また既述のように熔鋇炉内においては輻射は無視でき、かつ動力学相似の中で重力や摩擦に關係する Froude 数や圧力係数は、普通の一般化学反応系では無視できるので、以上これらすべてを総合、整理して、結局つぎの総合無次元方程式にまとめられる。式の変換経路は煩雑になるので省略した。

$$\begin{aligned} & UL/av = \phi(\rho v L / \mu, C_p \mu / k, \mu / \rho D, q_{AA} / \rho C_p T) \\ & \text{I} \qquad \qquad \qquad \text{II} \qquad \qquad \text{III} \qquad \qquad \text{IV} \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、I : 一定時間あるいは通過距離当りの反応系濃度に対する生成系の濃度比、II : Prandtl 数、 N_{Pr} すなわち嵩移動熱/伝導熱比を示す、III : Schmidt 数、 N_{Sc} 、すなわち、嵩移動物質/拡散物質比を示す、IV : 単位容積当りの化学含熱量ポテンシャル/拡散物質比をそれぞれ示すものである。

3. 実験的考察

以上、相似基準としての主な無次元方程式について述べたが、これらのすべてはもとより、個々の式のみについても、式中の各無次元項をそれぞれ一定に押えることはきわめて困難であり、そのため対象に応じて特殊な考察や手法を要する場合が多い。以下、熔鋇炉実験の個々の場合について必要な相似基準を、簡単なスケール方程式の形に集約すべく試みしてみる。

3.1 装入物内の通気度の研究

実験の対象を題記におくと、その相似基準式は (4) 式である。しかし、この式を満足するためには高温相同系

(幾何学的に相似で、かつ各単位物性値も等しい)では、 N_{Re} については $v \propto 1/L$, N_{Fr} については $v \propto \sqrt{L}$, N_{We} については $v \propto 1/\sqrt{L}$ の関係より、3 者共存は不可能である。したがって小形試験設備で装入物の通気性、すなわち、これに関連する圧力損失をみようとする場合は、近似相似手法による。すなわち、この場合、表面張力項 (N_{We}) は無視して差しつかえないのでこれを省略した (3) 式について考察するに、一般にこれらの無次元方程式はべき数の関数で表わされるから、

$$\Delta p / \rho v^2 = C(\rho v L / \mu)^x (v^2 / L g)^y \quad (12)$$

とおける。ここに、 C は常数、 x , y は指数である。このほか充填塔であるから、壁影響 (Wall Effect) 項として無次元項 $(D/d)^r$ を右辺に乘じなければならないが、鉍石、コークスなどの装入物が大形炉のそれと相似で、かつ $D/d > 10$ の場合は無視して差しつかえない⁽⁵⁾ (D : 炉内径, d : 装入物平均径)。上記の各式において Δp は絶対単位にとっているが、これを工学単位にとると、周知の内田、藤田両氏の次元式⁽⁵⁾となり、これを小規模実験によって高温系に拡張した筆者ら⁽⁶⁾の式となる。このほか、充填塔の圧損式としては Chilton, Colburn 氏の式⁽⁷⁾, Carman 氏の式⁽⁸⁾, Ergun 氏の式⁽⁹⁾, Burke, Plummer 氏の式⁽¹⁰⁾ などが有名であるが、これらを用いたスケールダウンまたはアップは、信頼度 50% 程度の場合が大部分であり、この意味からいっても小規模装置で実測し、これをスケール比に応じて相似律によって拡張解釈することの重要なことがわかる。

また、小形熔鉍炉で実測することは、大小両系は相同系であるので、 ρ , μ , それに当然 g も一定であるから、前記べき数関数の (12) 式を、大小両系の比 ($\sim$ で示す)にとると、都合のよいことには常数項 C はなくなり、

$$\Delta \tilde{p} = \tilde{v}^{x+2y} \cdot \tilde{d}^{x-y} \quad (13)$$

となる。これが相似のためのスケール方程式であって、ここに L は d で代表し、 Δp の単位はもとより工学単位でも差しつかえない。

たとえば、筆者⁽¹¹⁾ はペレット焙焼炉実験において、

$$\Delta \tilde{p} = \tilde{v}^{1.78} \cdot \tilde{d}^{-1.21} \quad (14)$$

を得てスケールアップの相似基準とした。すなわち、実験計画や実験値外延の場合に、いちいち公式による面倒な計算をせずとも、簡単な実験式をもって行えるわけである。

比較値をうるための常温模型実験についても多くの研究があり、三本木、西田氏⁽¹²⁾がこれを取りまとめている。理論的にいって、これを高温系に外延することは不可能ではないが、前述のようにその信頼性は非常に低いものが普通である。また、常温実験の利点として実験手法選択の自由がある。すなわち、流動体として気体の代りに水その他の液体を用いると、その動粘性は高温ガスの

130 倍 (水の場合) もあるから、(3) 式を完全に満足することは可能で、有効な実験ができる。すなわち、この場合、流速は実際の場合よりかなり低いものでできる。

気体を用いる場合、常温系のみでスケールアップする場合は簡単で、単一気体では重力関係の Froude 数は省略され、系は粘性支配となる。それで (3) 式は単純化されて

$$\Delta p / \rho v^2 = \phi(\rho v L / \mu) \quad (15)$$

となる。すなわち、Reynolds 数 = const. の関係のみ満足すればよいことになり、これからスケール方程式を導くと、両系の幾何学的相似を前提として、

$$\tilde{v} = \tilde{p} = 1/\tilde{L} \quad (16)$$

$$\tilde{q}_v = \tilde{L} \quad (\because v = q_v/L^2) \quad (17)$$

$$\Delta \tilde{p} = 1/\tilde{L}^2 \quad (18)$$

となる。ここに P は全運動量消費、 q_v は単位流量を示す。ここで、注意すべきは (16) 式を分解すると

$$\tilde{v} = \text{大形炉流速} / \text{模型炉流速} = v'/v = 1/L'/L$$

であるので、 $v = v'(L'/L)$ となり、 $\tilde{L}$ が 20 の場合、すなわち 1/20 の模型を用いた時には、流速は $v = 20v'$ となり、ときにより模型炉内の流速が音速に達する場合すらある。水などの液体を用いることや、(13) 式のごとき実験式を用いる理由は、このような場合には有効な方法である。

3.2 熱風炉の研究

熱交換器などの実験や熔鉍炉内伝熱の実験は、いわゆる部分装置 (前者の場合は一格子または一熱風管) でもできる。相似基準は (6) 式であって、この式の N_{Re} , N_{Pe} とともに vL をもっていることに着目し N_{Pe}/N_{Re} をとり、次式のごとく集約できる。

$$hL/k = \phi'(\rho v L / \mu, v^2/Lg, C_p \mu/k) \quad (6')$$

この式に出てきた Prandtl 数, N_{Pr} , $C_p \mu/k$ は定圧気体の場合約 0.77 で一定であり、 N_{Fr} も温度勾配のさほどはなはだしくない場合は無視しても大きな誤差は生じないので、この場合も相似基準として N_{Re} のみ一定にすればよいことになる。それで、流速 (v), 流量 (q_v) 関係のスケール方程式は (16), (17) 式と同じで、かつ

$$\tilde{h} = 1/\tilde{L} \quad (19)$$

となる。 $\tilde{L}$ が極端に大きいときは外延相似基準として

$$\tilde{h} = \tilde{v}^x / \tilde{L}^{1-x} \quad (20)$$

となり、一般に $x = 0.5 \sim 0.8$ にとればよい。

3.3 羽口よりの固体吹込および旋回帯の研究

羽口よりの石灰粉、炭粉、鉍石粉その他の吹込みは、熔鉍炉に新たに精錬の場を与えるものとして、近年異なった関心が払われている新技術である。同時に、これに関連し、あるいは独立に羽口先に生ずる固体装入物の旋回帯の挙動は炉内における反応性や通気性を支配する重要な因子として、かなり研究が行われている。

このような実験の場合、重力支配であるので原則として動力学系の Froude 数, N_{Fr} 一定ということが基準となる。しかし、固、気両相が介在するため、両者の密度が影響してくる。したがって、

$$\rho/(\rho_s - \rho) = \rho/\rho_e = \text{const.} \quad (21)$$

が必要と考える。ここに ρ , ρ_s はそれぞれ気体、固体の密度で、 $\rho_e (= \rho_s - \rho)$ は有効密度と仮称する。したがって、スケール方程式は

$$\tilde{\rho} = \tilde{\rho}_e \quad (22)$$

であり、相同系では問題なく、模型実験でも筆者⁽³⁾の机上熔鋅炉模型実験によると $\rho' > \rho$, $\rho'_e > \rho_e$ の関係がとれると無視できて、 N_{Fr} 一定のみが満足されればよいことがある。Wagstaff 氏⁽¹³⁾はこの種の実験で、 $\rho v^2 D_j / g \sqrt{S P_j}$ と D/D_j 間に直線関係が成立するといっている。 D_j = 羽口径, S = 羽口前コークスの平均比表面積, P_j = 羽口の絶対圧力, D = 旋回帯の大きさを示しており、前者は変形 Froude 数で両系が幾何相似であると、前記考察と吻合する。

3.4 特殊吹製法の研究

金森氏ら⁽¹⁴⁾は小形熔鋅炉の研究において、湯溜の溶鋅に酸素などの気体を吹きつけているが、これの模型実験をする場合には、ガス、溶液の密度 (ρ_g と ρ_l) の比が、両系で等しくなくてはならない。相似基準はこの比と N_{Fr} の積が一定ということで、次の関係式となる。

$$\rho_g \cdot v^2 / \rho_l \cdot L \cdot g = \text{const.} \quad (23)$$

これはガスの慣性で溶液に作用する重力に対する比率を示しており、(22) 式さえ満足すれば、水でもパラフィンでも、水銀でも使用でき、液面擾乱の程度は常に一定である。

この関係は、上吹転炉 (L. D. 法) の実験の場合にも重要な相似基準となるものである。

3.5 炉頂装入法の研究

ガス流が介在しない場合、すなわちホッパー内のすべり降下の場合ガス流を無視できるとするとか、スキップよりホッパーに至るシュートの模型実験には、微分方程式

$$\rho(d^2x/dt^2) = \rho g \sin \theta - f \rho g \cos \theta \quad (24)$$

が成り立つ。ここに、 f = 固体の摩擦係数, x = すべり面上流動方向の線次元, θ = 垂線とすべり面の角度をそれぞれ示す。そして、これから無次元式を導くと、

$$\phi(v^2/Lg \cdot f) = \text{const.} \quad (25)$$

となる。同一材料を用いると f は一定で、 N_{Fr} のみが相似基準となる。

装入物が空間に落下を開始し、かつガス流が介在するようになると $\rho_s \ddot{h}/g \cdot d$ と $\rho_g \cdot v^2/g \cdot d_s$ が両系で一定であることが必要である。ここに、 $\ddot{h}$ = 固体の落下距離, d = 平均粒径, α_s = 粒子群の空間率/比表面積を示

す。いま、両系で ρ_s , ρ_g がそれぞれ一定の場合は

$$\tilde{h} = \tilde{d} = \tilde{L} \quad (26)$$

となり、マッキータイプ, 1/30 模型で研究した広畑製鉄所⁽¹⁵⁾の実験で、 $\ddot{h}$ をスケール比にしていることは正しい配慮である。また、一般に

$$\tilde{v}_g = \sqrt{\tilde{d}_s / \tilde{\rho}_g} \quad (27)$$

が成り立つ。

3.6 炉内反応の研究

一般に、熔鋅炉内反応には湯溜り部における熔鋅—鋅滓間反応と羽口線上有効炉容内における反応が主なるものであるが、筆者ら⁽³⁾の 1 t 試験炉による研究によれば主反応である鋅石の還元は羽口線上ですでにほとんど完了しているので、両系のこの部分における相似がきわめて重要であると考えられる。

さて、化学反応の相似基準は (11) 式で示したが、このすべてを満足することは不可能であり、科学的知見に当たって可能な限りこれを単純化せねばならない。

まず、 N_{Re} であるが、これは主としてガスの炉内滞留時間に関連し、流れの様相そのものは、それほど影響しないものと考えられるからあまり重要ではない、したがって少なくとも両系がともに層流域か乱流域のいずれかに属しておれば化学反応には無視できる。 N_{Sc} は分子拡散項で、これも渦流拡散などに比しはるかに小さいので無視できよう。最後に、 N_{Pr} であるが、これは発生熱/壁損比ともいえるから、 $q_A UL/H_w$ に集約できる (ここに、 H_w : 単位時間、面積当りの壁損)。この U を UL/av で割って消去すると $q_A av/H_w$ となり、結局 (11) 式は次式に単純化される。

$$UL/av = \phi(q_A a / C_p \rho T, q_A av/H_w) \quad (28)$$

一方、シャフト部内反応を大別すると、鋅石の還元反応と Boudouard 反応が主流であるとみなされ、これらの反応機構が問題である。筆者⁽¹⁶⁾が机上大試料還元実験で立証したところによると、20 mm ϕ 程度の鉄鋅石のガス還元は、それが普通の気孔率の場合は、ガスの空塔速度が約 0.03 m/s 以上にあつては、境膜抵抗は工業的には無視でき擬均一反応とみなしうる。また、 $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ 反応は、主反応帯の温度では $\rightarrow$ 方向の反応が大きく、かつ、その反応速度は CO_2 の拡散に比しかなり小さいものとされている⁽¹⁷⁾。すなわち、この場合も化学反応律速で擬均一反応とみなされる。

以上のごとく仮定できると、均一反応系における次の一般速度式が成り立つ。

$$U = - \frac{da}{dt} K_n(a_1 a_2 \dots a_n) F \quad (29)$$

ここに、 $K_n = n$ 次反応の速度恒数, $a_1, a_2, \dots, a_n$ = 反応成分, $A_1, A_2, \dots, A_n$ のモル濃度, F = 無次元ポテンシャル項を示す。したがって (28) 式の a を a_1 とお

くと,

$$[K_n F(a_2 \dots a_n)]/v = \phi(q_{AA_1}/C_p \rho T, q_{AA_1} v/H_w) \dots (30)$$

をうる。これから相同系における相似のためのスケール方程式を導くと,

$$\tilde{v} = \tilde{L} \dots (31)$$

$$\tilde{H} = \tilde{L} \dots (32)$$

$$\tilde{q}_v = \tilde{L}^3 (\because q_v/L^2 = v) \dots (33)$$

$$\tilde{J} = \tilde{L}^3 = \tilde{V} (\because J = H_w \cdot L^2) \dots (34)$$

ここに, H = 熱移動速度, J = 単位時間当りの全壁損, V = 反応炉内容積をそれぞれ示す。

いま一例として相似基準(33)式をとれば, ガス, 装入物の空間速度は一定となるが, 従来の小形熔鋇炉実験においては, その送風量を大型高炉に比し莫大な比率(対炉内容積)とせねば出銑不可能であったことは事実である。これは, (32), (34) 式を満足するような配慮がなされていないからである。すなわち, 小形炉の全壁損 J は(34)式より, 大型炉の $1/\tilde{L}^3$ でなくてはならないが, 幾何学的に考えた場合炉内温度一定であると全壁損は $1/\tilde{L}^2$ であり, 単位容積当りの壁損は $1/\tilde{L}^2 / 1/\tilde{L}^3 = \tilde{L}$ 倍だけ大きく, $1/10$ の小形炉であると 11 倍になる。しかもこれは両炉の壁厚が等しい場合で, 小形炉の壁厚までスケール比に小さくなっていると, 実に 100 倍にも達する。したがって, 化学的相似を達成するためには, (34) 式を満足さすため小形炉の炉壁は外部あるいは内壁面との中間部(この方が好ましい)において, Ni-Cr 線などを用いて加熱してやらねばならないことになる。かくすることによって, 単位放熱量を大型炉のそれと同一にすることができる。金森氏⁽¹⁴⁾ らの小形炉湯溜部の高周波加熱はよい配慮と考えられる, ただ, シャフト部にはなんらの対策も講じられていないが, これは主実験目的が羽口線以下にあるためにいくぶん犠牲にしたものと考えたい。

やむなく, 過剰送風で燃焼熱を上げ壁損をカバーする場合は一般に $\tilde{q}_v = \tilde{L}^2$ まで送風量を上げてやると安全である。この関係は筆者⁽¹⁸⁾ の小形自燃式ペレット焙焼炉実験の場合にも基準としたものであって, 焼結炉の場合も同様である。すなわちこれは, $C + O_2 = CO_2$ なる燃焼反応(不均一反応)の相似基準として理論的に導かれるものである。筆者は前述において, 炉内反応を二つの擬均一反応に集約して展開してきたが, 厳密にいうと, 実際問題として羽口線における炭素の燃焼反応はもとより, シャフト上部における Solution loss など多くの不均一反応が存在し, これを前述の主反応相似の(33)式と考え合せて,

$$\tilde{q}_v = \tilde{L}^{2+x} \dots (35)$$

となるべきであろう。 $x > 0$ であって, x の値は実験によって経験的に定められる。この指数 x の決定の場

合, 炉頂ガスの CO/CO_2 比が両系で近似していることは重要であり, CO/CO_2 比は炉内反応の状況を端的に表現しているものとして Bishop 氏⁽¹⁹⁾ も指摘している。筆者⁽³⁾ の 1 t 炉 (0.6 m^3) と 10 t 炉 (6.857 m^3) の比較実験によると, $CO/CO_2 = 4.83 \sim 3.67$ の範囲内において, $x = 0.76$ であって, 一般に $x = 0.5 \sim 0.8$ の範囲にくるものと考えられる。

参考までに, ほかの研究を述べると Thring 氏⁽²⁰⁾ は, もし拡散過程が律速だったら, その支配項は動力的であり, したがって相似基準は $N_{Re} = \text{const}$ にあると考えたが, これに限定することの危険性は前述のとおりである。また, Traustel 氏⁽²¹⁾ は, 彼のいういわゆる Guldberg-Waage 数, (G_w) が両系で等しくあらねばならないと考えた。すなわち,

$$G_w = V_1 \cdot n_1 \cdot V_2 \cdot n_2 \dots \frac{U_1 m_1 \cdot U_2 m_2 \dots}{kv} \dots (36)$$

ここに, U_1, U_2 = 反応ガスの容積, m_1, m_2 = 反応ガスの分子数, V_1, V_2 = 生成物の容積, n_1, n_2 = 生成物の分子数, kv = 無次元部分平衡恒数を示す。

4. 結 言

以上, 小形熔鋇実験に際しての相似基準を理論と実際の面より論じた。その要点とするところは, 炉内化学反応相似基準として, 炉頂ガス中 CO/CO_2 比の近似を前提として, 送風量比は, $\tilde{q}_v = \tilde{L}^{2+x} \dots (35)$ なるスケール方程式に集約され, $x = 0.5 \sim 0.8$ であるとした。(～は大小両系の比, L は線次元を示す)。また壁損の殺滅対策は, もっとも重要なものであることを指摘したキューポラ, 加熱炉, ガス発生炉, 転炉そのほかの装置にも前半の理論的考察は適用できる。しかし, これら熔鋇炉を含めた複雑な対象を完全に相似さすためには, なお多くの研究がなされねばならないのは自明であり, 筆者⁽²²⁾ もその一部はとりまとめたが, 機会を得て批判を得たいと考えている。終りに臨み, これら一連の研究に当り日立金属工業株式会社安来工場冶金研究所長小柴博士の御指導に対し厚く感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) S. Kosiba, M. Kikuta: Hitachi Review, Feb. (1954), 107
- (2) 中村, 佐藤: 日立評論, 35, 8, 123, (昭 28)
- (3) 中村: 日立評論, 37, 9, 101 (昭 30)
- (4) C. L. M. H. Navier: Mém. Acad. Sci., 6, 389 (1823)
G. G. Stokes: Trans. Camb. Phil. Sci., 8, 287 (1845)
- (5) 内田, 藤田: 工業化学雑誌, 37, 1578 (昭 9)
- (6) 中村, 一安, 佐藤: 鉄と鋼, 43, 10, 1089 (1958)
- (7) T. H. Chilton, A. P. Colburn: Trans. Am.

- Inst.Chem. Eng., 26, 178 (1931)
- (8) P. C. Carman: Trans. Inst. Chem. Eng., 15, 150(1937)
- (9) E. Ergun: Chem. Eng. Prog., 48, 2, 89 (1952)
- (10) S. P. Burke, W. B. Plummer: Ind. Eng. Chem., 20, 1, 196(1928)
- (11) 中村: 自発研報, M-18, 732 (昭 28), (未公表)
- (12) 三本木, 西田: 学振 54 委資料, 455(昭 32)
- (13) J. B. Wagstaff: AIME, Blast Fur. Coke & Raw Mat., 104(1953)
- (14) 金森, その他: 生産研究, 7, 9, 1 (昭 30): そのほか多数
- (15) 広畑製鉄所: 学振 54 委資料, 456(昭 32)
- (16) 中村: 学振 54 委資料, 350(昭 30)
- (17) 香坂: 発生炉ガスおよび水性ガス 67(昭 27)
- (18) 中村: 特殊製鉄協会にて講演, (昭 27)
- (19) T. Bishop: Ir. Coal Tr. Rev., 155, 835(1947)
- (20) M. W. Thring: Trans. Inst. Chem. Engrs., 26, 91(1948)
- (21) S. Traustel: Ir. Coal Tr. Rev., 158, 1167, 1225 (1949)
- (22) 中村: 「鉄鋼業における小規模実験の理論と実際」, 安来調報, 614(昭 32)

日立製作所社員社外寄稿一覧

(昭和33年9月受付分)

寄稿先	題 目	執筆者所属	執 筆 者
鉄道電化協会 電気公論社 オーム社 森北出版株式会社 建設の機械化協会 日本建設機械化協会 株式会社新潟鉄工所 日本機械学会	最近の水銀整流器〔Ⅳ〕 日立水銀整流器 最近の水車の進歩について C I G R E 報告からみた変圧器の動向 1. 塑性概説 2. 塑性と応力分布 3. 図式解法について 日立 U 1 0 6 ショベルについて 流体継手またはトルクコンバータ付ショベルについて リ ジ ャ ッ ト ミ ル Experiments on Box Type Girders (ボックスガーダーに関する実験)	日立工場 日立工場 国分工場 亀有工場 亀有工場 亀有工場 亀有工場 亀有工場	浅野 弘一 深栖 俊一 谷崎 義一 宮本 博 渋谷 忠勝 阿部 哲義 小此木 越雄 種田 元治
小峰海外資料株式会社 日本機械学会	工作機械のクーラント供給方式とポンプの選び方 軸流圧縮機の入口形状について	川崎工場 川崎工場	兵藤 良博 瀬賀 将久 横山 英二
日本電気協会 The British Hydromecanics Research Association 日本自動制御協会	圧縮機の合理的な使用法 (その1) Research on Characteristics of Regenerative Turbine Pumps 日立気罐自動燃焼制御装置	川崎工場 多賀工場 多賀工場	寺田 勇夫 藤原 正彦 島田 稔晴 松井 伸次
青山書院 日刊工業新聞社 電波新聞社 関西電気協会 株式会社光画荘 電気通信学会 日刊工業新聞社	フロン樹脂の特性とその成型加工法 日立ヒューズフリー遮断器へのマイクロスイッチの活用 “シルビア” FMY-470 型日立テレビのサービスポイント 産業施設へのデューデジタル制御 暗室の温湿度調整装置について H I P A C I の使用経験 日本における原子核実験研究の現状 (5) 日立中央研究所の巻	多賀工場 多賀工場 亀戸工場 戸塚工場 大阪営業所 大阪営業所 中央研究所 中央研究所	横山 亮次 千原 錦吾 河合 辰治 岡本 博 秋田 昭三 高田 昇平 今井 宗丸 大島 裕之助
アグネ出版社 電気公論社 日本化学会 家庭電気文化会 産業機械工業会 東北7県電力使用合理化協議会	2Fe ₂ O ₃ -TiO ₂ 焼結体における折出水車の模型試験について プラスチックと電気 商店照明のあり方 (照明による商店のメイクアップ) 天井 ク レ ン 3,000 ボルト小口電力とコンデンサ	日立研究所 日立研究所 本社 本社 本社 本社	野中 甲蔵 山崎 卓爾 日月 紋次 江川 隣之介 中田 崇郎 平池 幸男
日本電気協会 化学工業社 化学世界新聞社 日本貿易出版社 N T V 編集局 化学世界新聞社 広島通商産業局	住宅におけるカラー照明 凍結乾燥装置とその応用 ポリエチレンパイプとその施工法について 電子工業の頂点を語る T V C M あれやこれや ヒッターライトの特性と施行について 日立製作所における最近の電力機器生産の展望	本社 本社 本社 本社 本社 本社 本社	田中正次 中山喜久 今川智司 三木正一 長尾 厚 原田 豊 吉山 博吉