

技術資料

平爐燃焼に關する模型實驗

(その方法と成果)

石部 功*・能勢正元*・橋本英文*

MODEL EXPERIMENTS ON COMBUSTION PROBLEMS IN THE OPEN-HEARTH FURNACE

Isao Ishibe, Masamoto Nose and Hidefumi Hashimoto

Synopsis:

Theoretical conceptions of the small-scale model experiments and summarized results of the experiments mainly performed in England are described.

It is more easy, more efficient and less expensive to study combustion problems in the open-hearth furnace (i. e. gaseous mixing, flow pattern and transfer of heat) by means of small-scale models which preserve the necessary similar conditions such as the Reynolds number, the Froude number and the Thring number, rather than to investigate the problems by operating actual furnaces.

Within a comparatively few years, the construction of a model furnace prior to building of a newly designed furnace will be considered as essential just like now adopted in case of aircraft and ship building.

I. 緒 言

1.1 模型實驗の必要

平爐に於ける燃料と空氣の接觸，混合の如何，焔乃至は燃焼ガスの流れの工合は直に爐の能力，壽命にひびいてくる。その様相はポートの型式や形，噴出速度は勿論爐自體の形狀等によつても大いに異なる。しかし實際の平爐作業によつて之を解明することは容易ではない。第一に爐を作つて使つてみなければ何も判らない上に平爐が作業温度の高い大がりの装置であり而も本來鋼を作るように設計されていいて決して實驗に都合よくはなつていないのであるから，任意に實驗の條件を變え得るものではなく，強いて變えるとすれば生産，品質，壽命を著しく害することになり易く，反對に條件を固定しようとする時は偶然，作業上の原因又は必要等に基く變動の現れる

のを如何ともし難い。更に，この様な状態で行われる實驗である以上成果の把握も充分でないのが當然であり，成績が判つてもその由つて來る原因の委細が掴めないのでは改善の資として甚だ貧弱なものたるを免れず，莫大の時日と經費とを費し然も得る所の少い實驗に了るものである。

之に反し，適確な配慮のもとに行われる模型實驗は

- 1) 實驗に要する費用と勞力が遙に少い
- 2) 廣範に任意に條件を撰んで安定した條件のもとで實驗が出來，はつきりした資料が得られる
- 3) 爐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る
- 4) いろいろの設計のものを同じ條件下で比較できる等の點に於て實爐による實驗に優り，之が模型實驗を必要とする所以である。尙，模型實驗を設計の補助手段とすることは船舶，航空機に於ては早くから行われていることである。

* 小倉製鋼株式會社小倉製鐵所

1.2 模型實驗の歴史

a) その始め——工業爐に對する模型實驗が始めて試みられたのは約 40 年前と見られ、平爐についての報告が始めて行われたのは 30 年前のことである。1922 年に Clements¹⁾ は蓄熱室銅滓室付の平盤模型によつて爐内の流れを研究して報告し Colcough²⁾ も亦同年に同様の報告を行つたと稱しているが、この様な簡単な模型を以つてしても、蓄熱室、銅滓室内の渦や焰と天井の間の割に流れの滯んだ部分が明らかに示されている。Groume-Grjmailo³⁾ は各種の爐の立體模型について常溫實驗を行い爐内のガス流れについて多くの有用なことを明らかにした。この實驗は空氣とガスの代りに水と燈油（比重 0.80）とを用い、この種の實驗の最初の例とされている。この場合浮力に對する考慮が拂われているのであるが亂れのことは考えに入れていない。因みに Reynolds が亂れの研究を行つたのは 1888 年である。1924 年には Norton⁴⁾ が各種爐設計の研究に冷空氣や熱空氣による模型の使用を提案しているが模型の設計に對する流體力學的な検討は殆どとり入れられていない。

日本に於ては 1931 年航研栖原教授の指導を受けて三人の學生（伊木常世・宮下格之助・中山正大）が行つた實驗を依博士⁵⁾ が本誌に發表されたのが最初の様であるが、縮尺を約 1/10、ガス流速 6m/sec. 程度（實爐の 1/5~1/2）までの常溫空氣模型を用い流れの形が高温の實爐のものに相似できるようになつていゝ様であり、又 200 メッシュ以下のアルミ粉を浮遊させて流れが見えるように且つ 30A のアーク燈で照射して撮影する等殆ど完全な手法が用いられたことは特筆すべきであらう。外國に於ても相似律に基いた模型の使用が注目されたのはこの頃であつた。

この間 1929 年には Johanson⁶⁾ がそれまでに行われた研究を總括して模型全般について論じた。この中には空氣力學的な係りのない部分も多いが、模型が船舶、航空機以外の多くの分野でも大いにその發達を促して來たことを明らかにしている。他には今日尙顧みられるような報告は見當らない。只 1925 年に Prandtl⁷⁾ Tollmien⁸⁾ 等の噴流の研究があり、Schleicher と Luth⁹⁾、Neumann¹⁰⁾、Killing¹¹⁾ が夫々各型の平爐、傾注式平爐、新メルツ型平爐について實爐内各部のガス分析によつてガス流れの方向、燃焼状態を調べている。

b) Rummel の研究——1930 年代に於ける發展はドイツの Rummel¹²⁾ の 1937 年の前後に亘る報告が主である。彼は研究用及び半工業用の模型爐によつてガス燃焼に關する混合の影響を研究し、擴散焰の燃焼速度は次

の如くに主にガスと空氣との混合速度に左右されることを示している。

1) 空氣とガスの流速の差が大きいほど、又兩者の流速が共に大きいほど混合と燃焼は促進される。

2) 過剩空氣は焰の先端のみでなく全般的に燃焼を速める。

3) 溫度差に基く浮力は大きくして混合を助けはしないが軽いガス即ち水素分に富むガスの時は確に混合は速くなる。

4) 空氣とガス流の間に厚い隔壁を置けば焰は非常に長くなり、交叉角度を大きくすると焰は非常に短くなり 90° の時は平行の時の 1/6 の空間でよい。

5) 焰が壁に當つたり、狭い屈曲部を通るときは焰の先端の燃焼速度は速められる。

この結果は實爐の觀察とよく一致するのであるが、實驗に用いられたバーナ等が當時の實用のものより遙かに進歩し過ぎていたことや當時の現場の興味は燃焼よりも傳熱にあつたため彼の研究結果は廣く注目され活用されるに至らなかつた。しかしながらこの研究はこの方面の研究史上最も廣範に亘つたものであり今日尙高く評價されている。

c) 最近の進展——Rosin¹³⁾ は 1936 年の論文で燃焼問題の研究に模型を使うことが非常に有効でその結果は實爐によく一致することを述べ、Etherington¹⁴⁾ は 1944 年の著書で Groume-Grjmailo の研究を論じた。G. Grjmailo は主に流れの形を扱つたとされているが實際は主として浮力を研究したに過ぎず今日の流れの研究とは殆ど關りがなく、と言うのは浮力が問題になるのは只爐の中央部だけで流入部は高速で然も密度差は小さく流出部では混合してしまつて浮力は考えられないからである。

第二次大戦中はさすがにこの方面の報告は見當らないが戦後に至つて急激に展開されてきた。戦後の報告の特長は明確な流體力學及び傳熱の基礎に立つて實爐と模型との相似性の確保が實行されていること、戦時中に發達した合成樹脂の使用により實驗と觀測に一步を進めたことである。

1946 年 Chesters と Thring¹⁵⁾ は平爐内の焰に及ぼすポートの影響を實爐について廣範に實驗し報告したが、翌年 Thring¹⁶⁾ は傳熱に關する相似律を示し、Lekie 等¹⁷⁾ はこの相似のもとに 1/5 模型爐で傳熱の實驗を行つた。常溫模型では Newby¹⁸⁾ が空氣を用いてポートに於ける壓力損失を扱い、1949 年には Chesters 等¹⁹⁾ による水を用いた實驗が詳細に報告され、Collins

等²⁰⁾のCO₂を標跡(tracer)とする混合の實驗, 翌1950年には Leys と Leigh²¹⁾の空氣模型による壓力と流れの分布, 水を用いたドイツの Schultz-Grunow²²⁾の流れ, Newby 等²³⁾による火入前の實爐の流れの研究等が行われている。

この間平爐以外の爐その他燃焼管に對しても大いに適用され, 加熱爐²⁴⁾ゼットエンジン²⁵⁾高爐²⁶⁾發生爐²⁷⁾轉爐²⁸⁾等について興味と効果豊かな實驗が行われており, 今日ゼットエンジンの急速な進歩も模型實驗に負う所が多い。

これらの研究の大部分がイギリスで生れイギリスで育つてゐるが, ドイツに於ても行われつゝあり, アメリカも Chesters 等に耳を傾けており²⁹⁾模型實驗が工業用爐設計の補助手段として普及される趨勢が見受けられる。

II. 實驗の方法

2.1 相似律

實際の平爐に於ける現象を模型によつて研究するには, 實爐と模型との間に形態的, 流體力學的乃至は熱的な相似が確保されていなければならない。即ち形態上に於ては寸法, 表面の粗さ, 流力上にあつては慣性力, 粘性力, 浮力或は重力, 熱に對しては入熱, 接觸傳熱或は輻射傳熱等の相互の量的關係が問題となり, 價值のある實驗結果を得るためには此等の諸項のうちその實驗に關係するものは實爐と模型とで十分に相似させなければならない。

2.1.1 形態的相似

a) 寸法——實爐と模型とは普通の場合その形が幾何學的に相似でなければならぬ。即ち關連寸法 (l) が完全に一樣に縮尺された模型であつて始めて模型に起つた現象を實爐に對應させることができよう。空氣 (A), ガス (G); 實爐 (f), 模型 (m) に對し括弧内の尾符で夫々の場合を表わせば

$$[l_A/l_G]_m = [l_A/l_G]_f \dots \dots \dots (1)$$

が寸法の相似條件で, AG 何れかを排ガスに流用してもよい。

b) 表面——表面の粗さが相似でないときはガス流れや傳熱に差異を生ずる筈である。しかし表面の粗さを測る尺度はなくその相似を追求することは困難である。しかもその影響は重大とは考えられず³⁰⁾只床面が未溶解のスクラップである時とか激しい沸騰のある場合に考慮する必要があるに過ぎない。

c) 流量——空氣とガスの流量 (Q) の比は夫々の占める空間の割合を決定し模型と實爐と等しかるべきであ

る³¹⁾。流速を v で表わすと $Q=vl^2$ であるから

$$[v_A l^2_A / v_G l^2_G]_m = [v_A l^2_A / v_G l^2_G]_f \dots \dots \dots (2)$$

従つて (1) と (2) から

$$[v_A / v_G]_m = [v_A / v_G]_f \dots \dots \dots (3)$$

2.1.2 流體力學的相似

流れに作用する力は流體自身の慣性力の他に粘性力があり, 組成, 温度を異にする部分の間には浮力が現われる。又流體中に浮遊する微粒子の受ける力は殆ど粘性抵抗のみであるが³²⁾ダストの浮遊等には之を考えねばならぬ。

此等の力の働く割合を實爐と模型とで完全に一致させることは困難であり, 之は實驗の要求するところと之等の影響の實相に照らして取捨考慮されねばならない。

d) レイノルズ數 (R_e)——慣性力と粘性力の比であり, 之が流れの性質を決定する。即ち流速が増して慣性力が大きくなりこの比がある値を越せば層流から亂流に遷移する。亂流にあつては R_e が相當變つても流れの形その他流力的様相に本質的變化は認められず³³⁾³⁴⁾その限界の R_e は約 2,000 とされている³⁴⁾³⁵⁾。實爐の R_e はガスポートで 100,000 エヤーポートで 10,000 のオーダーであるからこの場合模型では之に一致させる要はなく 2,000 以上であればよい。但しガス・エヤー兩ポートに於ける R_e の比はこの場合 10:1 に保たねばならぬ。

所で

$$R_e = \frac{M(\text{慣性力})}{N(\text{粘性力})} = \frac{\rho v^2 l^2}{\mu v l} = \frac{\rho}{\mu} v l = \frac{v l}{\nu} \dots \dots \dots (4)$$

(但し, ρ =密度, μ =粘性係數, $\nu = \mu/\rho$ =動粘性係數)

なる故上の條件は

$$[R_e]_{Am} = [R_e]_{Af}, [R_e]_{Gm} = [R_e]_{Gf} \dots \dots \dots (5)$$

更に (5) は何れの R_e も 2,000 以上である限りに於ては

$$\left[\frac{v_A l_A / \nu_A}{v_G l_G / \nu_G} \right]_m = \left[\frac{v_A l_A / \nu_A}{v_G l_G / \nu_G} \right]_f \dots \dots \dots (6)$$

之に (1), (3) を考え合わせると

$$[v_A / v_G]_m = [v_A / v_G]_f \dots \dots \dots (7)$$

(6) は又

$$\left[\frac{Q_A / (l_A \nu_A)}{Q_G / (l_G \nu_G)} \right]_m = \left[\frac{Q_A / (l_A \nu_A)}{Q_G / (l_G \nu_G)} \right]_f \dots \dots \dots (8)$$

とも表わされ, A と G が同じ流體とすれば

$$\frac{[R_e]_G}{[R_e]_A} = \frac{v_G l_G}{v_A l_A} = \frac{\sqrt{\rho \cdot \rho l_G^2 v_G \cdot v_G}}{\rho v_A l_A} = \frac{\sqrt{\rho \cdot P}}{W / l_A}$$

但, P =運動量, W =流量(重)

従つて實爐と模型の間には(縮尺の逆數を n として)

$$n \left[\frac{\sqrt{\rho P_G}}{W_A} \right]_f = \left[\frac{\sqrt{\rho P_G}}{W_A} \right]_m \dots\dots\dots (9)$$

なる関係が成立し、重油バーナ等に対してはこの式の方が便利である。こゝで尾符 G は燃料たる重油を表わす。

氣體の粘性係数は温度のみの函数であつて壓力には關係せず、温度を TOK で表わすと $\mu \propto T^{0.76}$ である³⁶⁾から

$$\nu \propto T^{1.76} \dots\dots\dots (10)$$

で計算でき、低温の場合の空氣³⁷⁾水³⁸⁾に対する ν の値、ガスの μ の値は明らかにされている値により上の計算方法によればよい。

e) フルード数 (F)—慣性力と浮力との比であるが、流出部では混合が進み流入部では高速であること、豫熱温度と調整 (例えばガス $950^{\circ}C$, 空氣 $1100^{\circ}C$) して密度差を解消できるので問題とはならない。只、焰と未燃焼雰囲気との間で多少問題となるが焰が高速なので甚しい影響はない。なお燃焼に伴う温度上昇、容積膨脹は流れを變えるのではなく流を加速するように働くと言われ³⁹⁾ 焰を撮影して高さを比較した結果水流模型で得たものと數時の差しかなかつた¹⁵⁾。従つて模型實驗では空氣とガスの流れを常温の同一流體で表わすことができる。

平爐の場合は上記の如くであつて殆んど問題とならぬが一般には

$$F = \frac{M(\text{慣性力})}{L(\text{浮力})} = \frac{\rho v^2 l^2}{A \rho g l} \dots\dots\dots (11)$$

であり、相似條件は

$$\left[\frac{\rho v^2 g}{(\rho_A - \rho_G) g l} \right]_m = \left[\frac{\rho v^2 g}{(\rho_A - \rho_G) g l} \right]_f \dots\dots\dots (12)$$

と表わされ、轉爐に於ける溶鋼中の空氣流の研究²³⁾(この場合 A : 溶鋼, G : 空氣である) 等では大事な條件である。

f) 浮遊—流體中の粒子の運動は Stokes の法則に従うものと考えられ、この法則は $Re=1$ までに適用され約 10 までは大した誤差はない。粘性抵抗力 $R = \mu(v_1 - v_2)l_2$ であるがガス流 (流速 v_1) と粒子 (大きさ l_2 速度 v_2) 間の相對速度 ($v_1 - v_2$) は全く不明であり計算も困難である。 l_2 は $1mm$ 以下と考えるのが合理的でありその比重は 4.0 で形狀は球形と假定して不合理ではない³⁹⁾。粒子の大きさを半徑 r とし粒子の標準大氣中の自由落下の場合を考えると

$$\text{抵抗力 } R_0 = 6\pi r \mu_0 v_0 = mg \dots\dots\dots (13)$$

但し $m = 4\pi r^3 \rho / 3$ である。相對速度 ($v_1 - v_2$) の一般の運動では

$$R = 6\pi r \mu (v_1 - v_2) \\ = \frac{v_1 - v_2}{v_0} \cdot \frac{\mu}{\mu_0} \cdot mg = \frac{v_1 - v_2}{v_0} \cdot \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$$

である。この系の速度・寸法の特性値を夫々 $V_0 \cdot D$ とし、 $v_1 = \alpha V_0$, $v_2 = \beta V_0$; $r = \delta D$ とすると

$$R = \frac{V_0}{v_0} (\alpha - \beta) \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{4}{3} \pi \delta^3 D^3 \rho g$$

又

$$M \propto \rho V_0^2 D^2$$

$$\therefore S = \frac{M}{R} = \frac{3\rho V_0^2 D^2}{4\pi(\alpha - \beta)\delta^3 \rho \frac{V_0}{v_0} \frac{\mu}{\mu_0} D^3 g} \\ = k \frac{V_0^2}{gD} \cdot \frac{V_0}{v_0} \frac{\mu}{\mu_0} = k \frac{F}{H} \dots\dots\dots (14)$$

但し

$$F = \frac{V_0^2}{gD}, \quad H = \frac{\mu}{\mu_0} \frac{V_0}{v_0}, \quad k = \frac{3}{4\pi(\alpha - \beta)\delta^3}$$

従つてこの場合の相似條件は $[F]_m = [F]_f$, $[H]_m = [H]_f$ である。 F を決めれば V_0 が決り従つて H は v_0 によつて決まる。

$$R_0 = 6\pi r \mu_0 v_0 = mg = \rho r^3 g$$

であるから $v_0 \propto \rho r^2$ 従つて相似條件は

$$[\rho r^2]_m = [\rho r^2]_f \dots\dots\dots (15)$$

$[\rho r^2]_f$ は判つているから $[\rho r^2]_m$ が判り、例えば比重 2.7 のアルミ粉を用うるならその半徑は $0.3mm$ 以下なることが決定される。

2.1.3 熱的相似

g) 傳熱—實爐では熱は接觸と輻射によつて浴に傳わるが後者の占める割合が非常に大きい⁴⁰⁾。比較的低温に於て模型による傳熱の實驗を行うには Thring⁴¹⁾ 數 T を一致させねばならぬ。 Q : 時間當り入熱, A : 吸熱面積, σ : Stefan の常數, E : 綜合輻射能, $T_1 T_2$: 發・吸熱面温度 $^{\circ}K$ とすると

$$T = \frac{Q}{A \sigma E (T_1^4 - T_2^4)} \dots\dots\dots (16)$$

で $[T]_m = [T]_f$ が相似條件であり、之によつて操業温度より遙に低い温度に於て少量の燃料を用いて實爐に適用できる實驗結果が得られる。流れの相似を考えて燃料ガスの流速を撰べば燃料ガスの單位容積當りの發熱量を調整して上記の相似に合わせねばならない。

2.2 實 驗 装 置

模型實驗はなるべく常温で單一の流體を用いて行うのが便利であるが、尙部分模型や平盤模型の利用できる時は之によるのが簡単でよい。

2.2.1 平盤模型 (二次元模型)

矩形ガスポートを有するガス上り等の如くどの鉛直面

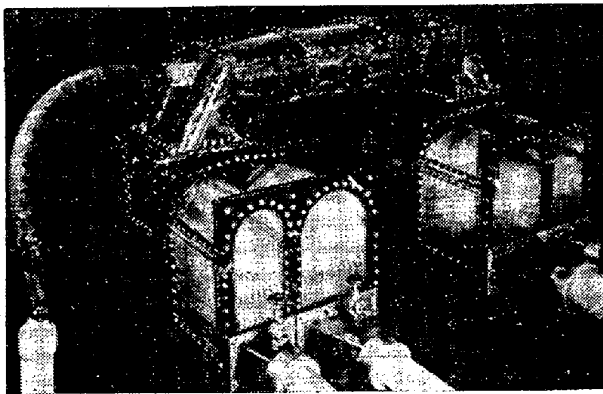
で爐長方向に切つても同じ形と見られるものには厚みの小さい平盤状の模型を使つてその中の流れを研究できる。盤の上面にガラスを張つた通路型のものゝ自由水面とした溝型のものがある。この実験は次の假定に基いている。

- 1) 模型に於て壁面の粘性は流れに大して影響しない。
- 2) 實爐に於て流れは厚みの方向(前後)に一樣である。

第1の假定は亂流に對しては十分成立する、第2の假定は必ずしも妥當でない²¹⁾。しかしながら之は鋼滓室、爐腔の構成によつて異なるもので平均の状態或は主傾向を見るには充分堪えるものであろう。

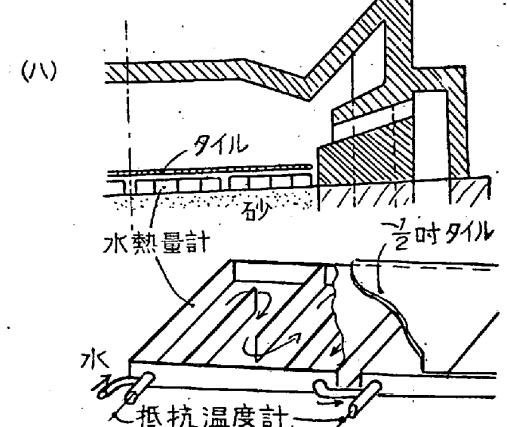
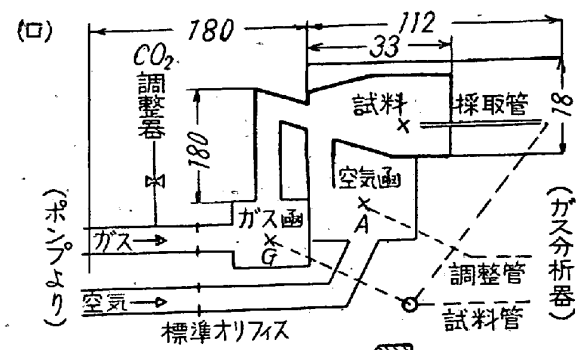
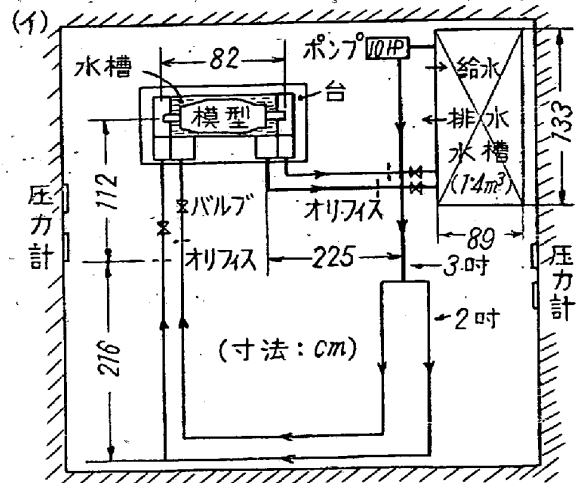
2.2.2 立體模型(3次元模型)

立體的な相似模型は合成樹脂の製造、成型技術の發達によつて容易に透明にして複雑な形をしたものが出来るようになった。普通は部分に分けて作つて組立てるのが經濟的でもあり設計の變更に便である。第1圖はこの例²²⁾である。第2圖(イ)は Philip 等¹⁹⁾の用いた實驗装置を示す、流體としては水が用いられ従つて模型は平面ガラスで圍まれた水槽中に浸して像の歪みを避けている。この實驗では R_e を實爐と全く一致させているが之は1/5程度にすれば色々の點で樂だつたことゝ思われる。



第1圖 立 體 模 型 (Chesters)

a) 流れ——流體としては常溫の水又は空氣を用い、普通の場合浮力は考えなくてよいので R_e の相似のみを考慮すればよい。流れを見える様にするには標跡を入れるが、之には煙、バルサ屑、染料、アルミ粉、牛乳コロイド懸濁液、氣泡、油滴、纖維等が用いられる。空氣流とガス流を分離して觀測するには標跡を何れか一方にだけ入れればよく、之を夫々の流について行えば混合の部分も判る。記録するには撮影すればよいが氣泡は著しく光を減殺し又カメラアングルの撰定に苦勞がある。水流模型での結果ではアルミ粉の形狀は120メッシュ以下の球狀のものが諸點に都合がよい¹⁹⁾。尙照明は狭いスリットを通した帶狀光を當て色々の斷面について撮影を行つ



第2圖 模型實驗裝置

て、立體的流れを組立てる¹⁹⁾⁴²⁾。

流向流速は撮影された標跡からも求めている¹⁹⁾がピトー管を用いて直接測れる⁵⁾³⁹⁾。

b) 混合——燃料ガスと空氣との混合は定量的にはガス流中にCO₂ガスを混じて送し爐内各部のCO₂濃度を赤外線ガス分析計で測り、焰の位置(混合40~50%の域)を推定し燃燒狀況を研究できる²⁰⁾。第2圖(ロ)は Collins と Tyler の用いたその實驗装置を示す。ガス函 G 或は爐内 P から採られた試料と空氣函 A からの調整管とのCO₂濃度差は電氣的に讀まれガス流の混合%の目盛を示す。

c) 溶損——浮遊に關する相似律に従つて、近似的に球狀で特殊のサイズのアルミ粉を數本の薄いガラス管で

浴面の少し上に放流し之が天井、壁（油を塗つて粘つくしておく）に付着する量を調べて損傷の問題が研究された¹⁹⁾。

d) 傳熱——今日までのところこの實驗は實爐の 1/5 とゆう比較的大きい實驗爐によつて Thring 數の相似のもとに行われ¹⁷⁾、その結果もつと小さい 1/12 模型で充分であることが判つた。第 2 圖 (ハ) は Lekie 等¹⁷⁾の用いた爐の一端を示し爐床へ傳つた熱量は圖に示す如き水熱量計によつて計られた。

III. 實驗の結果

3.1 流れの研究 (燃焼)

3.1.1 噴出口付近

ポート内及びその近傍に於ける流れが爐内の燃焼、損傷を大きく支配する。従つてこの部分のみの模型でも此等の研究が行われた。二つの流れが交るとき焔の流れの角度は二流體の運動量に比例して決つてくる⁴⁰⁾から空氣速度が遅いときはこの影響は殆ど現れない。

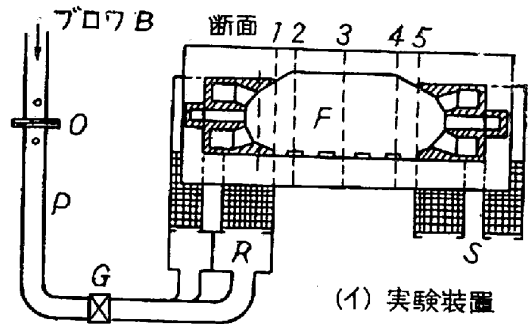
a) 平盤模型——Schultz-Grunow²²⁾はポートの損傷によつて如何に噴流の方向が變るかをゲツチンゲン水槽にアルミ粉を標跡として研究し、古い爐で流れが著しく悪化し上向いていることを示している。Chesters²⁰⁾は第 1 圖の爐の平盤模型で傾斜突當りの研究を行い、更に立體模型、實爐につき調査して何れの場合も傾斜の角度は 55° がよいことを確めた。この様に平盤模型はそれ自體での試験の爲にも立體模型への豫備試験用としても用いられる。

b) 立體模型——ガスと空氣との混合、噴口の断面形が混合域の形に如何に影響するか、ポート付近の設計の差異がどう流れに影響するか等の精しい研究に對して立體模型が使用されている。Schultz-Grunow²²⁾はガス及び空氣流の相互の影響を知るため一方の流れを停めた場合との比較を行つている。彼の用いたものは單純な形のベンチュリ型の半身模型でガスはバーナで突當りから噴出している、この場合空氣流はガス流をポート天井に押し上げガス流は空氣流を前方に曲げるがポート天井は流れを浴に向けることが示された。但し彼の實驗では横方向の傳播は明らかにされていない。横方向への流れについては Leys と Leigh²¹⁾²⁹⁾による流速分布、Collins と Tyler²⁰⁾ による混合の分布、Chesters¹⁹⁾²⁹⁾ 等による流れの形などの研究が行われたが之等については爐内の流れと併せて後述する。

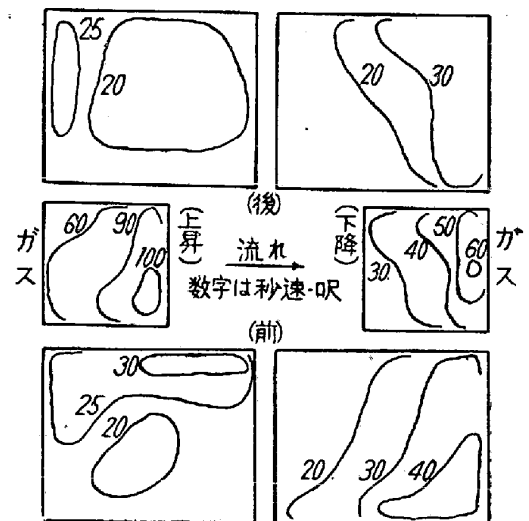
3.1.2 上昇道・下降道

Leys と Leigh²¹⁾ は 120 屯ベンチュリ型平爐の 1/24

冷氣模型 (第 3 圖) により蓄熱室上昇道系の壓力損失、上昇道下降道及び爐内の流速分布、上昇下降道に於ける流量分配の實驗を行つた。相似は (8) 式より實爐に於ける流體を全て 1500°C の空氣とみなせば ρ の比は 1/20 Q の比は 1/480 即ち空氣 3.54m³/min ガス 2.84m³/min (空氣/ガス比=1.25) と計算され鋼滓室は半分滿されて實驗された。



(1) 實驗裝置
(□) 流速分布



第 3 圖 Leys の實驗

a) 流速——上昇下降道に於ける流速の分布は床面のすぐ下の面で第 3 圖 (ロ) の如くなつてゐる。之から計算すると各口の流量は第 1 表の如く分配されている。即ち

第 1 表 流量分配 (m³/min)

	ガ ス	空 氣		計
		前 側	後 側	
流 入	2.72	1.98	1.70	6.40
流 出	1.45	2.32	2.15	5.92

流入側で前後の空氣ポートの流量比は 7:6 で前側の方が多く、流出側では前後空氣ポートとガスポート三者の流量比は 82:76:51 で前側の流量が多いのが一般的事實である。之は皮相的には抵抗の大小で説明付けられ之

が焔を後壁寄りに向けるかに考えられるが、焔の向を變えるには特にベンチュリ型では二つの流量の間に非常な差があることを必要とし、この傾向は流入空氣量の非對稱によるものではないと考えられる。この點質爐に於ける冷間試験⁴⁴⁾がよい示唆を與えている。

b) 壓力——壓力損失係數はその點に於ける平均速度を基にした動壓に對する全壓の損失の比で表わされる。格子積入口、内部、鋼滓室との隔壁、此から上昇道の間・ガスポートに於ける壓力損失は最も合理的な點を撰んで測られ、その係數は第2表に示されている。格子積内

第2表 壓力損失係數

箇 所	基準動壓	空 氣		ガ ス	
		實 驗	計 算	實 驗	計 算
蓄熱室入口	蓄熱室	0.69	0.4+	0.43	0.4+
格子通路		0.28	—	0.26	—
隔壁		1.00	—	1.22	—
上昇道入口	上昇道	2.84	2.9	1.25	1.15
後入口		4.25	4.4		
ポートへの曲	〃	—	—	2.80	2.9

の價は Kistner⁴⁵⁾ のものとよく一致し、入口の價は Bausen⁴⁶⁾⁴⁷⁾ の示したものより少し低いだが彼のものは高目だと言われている。こゝでは急に面積が 25% に縮るので理論値⁴⁸⁾ 0.4 より幾分大きくなると考えられ、この實驗結果によく現れている。理論的計算はこの部分を出口入口の面積の不等の肘型と考え Vazsonyi⁴⁹⁾ の式を用いて行ふ。その他の係數は理論値とよく一致している。

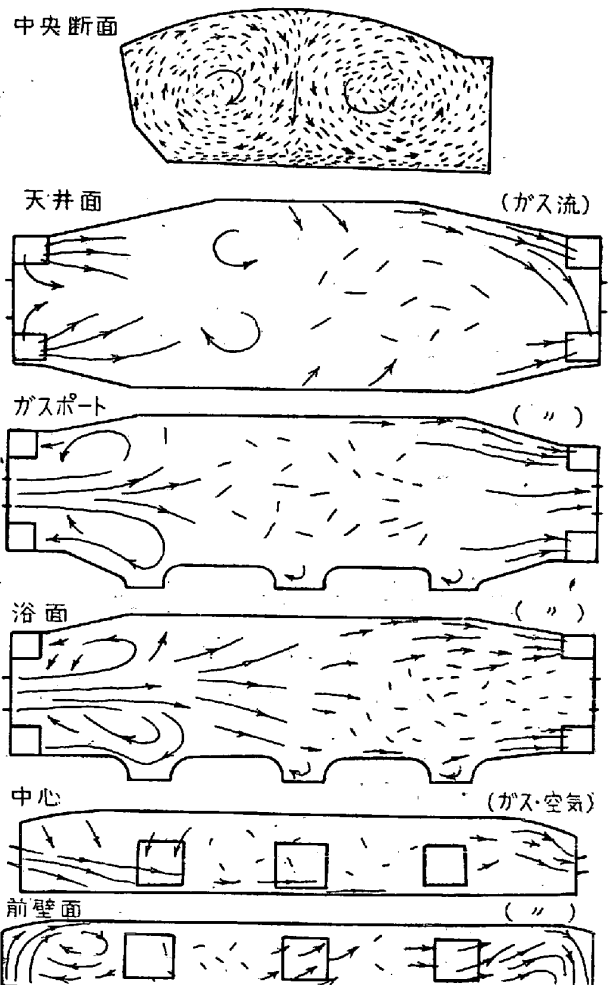
3.1.3 爐 内

爐内の流れを全爐模型で全面に亘つて研究したものに Chesters のグループの水流模型と Leys のグループの氣流模型實驗があり、Collins のグループは流入側のみの簡単な半身模型で混合の研究を行っている。Chesters の實驗¹⁹⁾は最も廣範に亘り數々の良い映像を與えているが撮影一邊倒の感があつて従つて主流に直角な断面の様子が明確でないことは Schultz-Grunow の場合と同様で又流速の分布も僅に標跡の光像から間接的に測つてのみで定量的なものが稀薄である。Leys²¹⁾²⁰⁾ は數は少いが横断面の流速分布を複合ピート管(測點距離 1cm)で求めた他、損傷の問題に直接的な究明を行つた。Collins²⁰⁾ は混合から燃燒の問題を扱つて燃燒帶を數值的に明らかにしているが只焔と燃燒生成物との領域の區分は何れの場合にも困難である。

a) メルツ型

Templeborough Melting Shop of Messrs. Steel, Peech and Tozer の K 爐の 1/24 水流模型について Chesters グループの Halliday と Philip¹⁹⁾ が實驗を行つた。

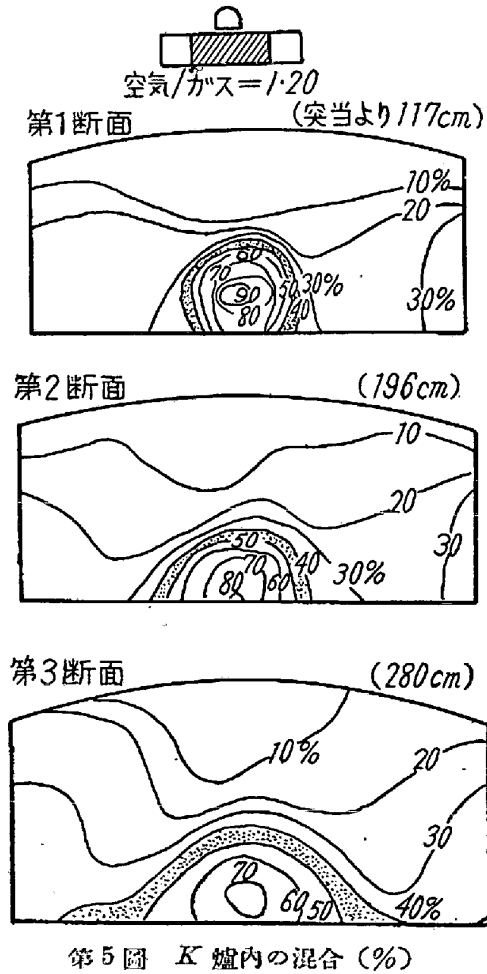
メルツ型の流れは前後一對の水平軸を有する大きい渦によつて焔が浴面中央に押し付けられ溶解力は増す⁵⁰⁾ が燃燒はガス流の上半面のみで行われ浴に接する下面で燃燒が遅れる。流出部の流れは目立つて不安定で、之は爐の設計が全般に亘る定常流れの得られない型であることを示している。天井のすぐ下には不規則な遅く動く渦が見られるが大きい循環渦はない。ガス噴流を動かすと水平面の二つの渦は消滅するが空氣ポートの垂直渦は残る。



第4圖 K 爐内流れ

(1) 流入部——強いガス流は浴面に衝突して横に擴がり緩慢な空氣流は天井まで上つて變向されて水平に爐の中心線に集る如くなつて爐の中央部に押し出される。この有様は Collins と Tyler²⁰⁾ が同じ爐に象つた 1/12

氣流模型で實驗した混合率にも明らかで第5圖に示す如く第一扉の手前(第3断面)で混合40~50%の焔の領域が爐幅の方に裾を引き中央上部には10%の低混合域が垂れている。壁際の30%の線は中心から浴を占めて壁から天井に上る大きい渦のあることによる。燃焼改善の目的で空氣/ガス比を變え或は流量を減じ又ガスポートを狭くなどしたが大して効果はなかつた。



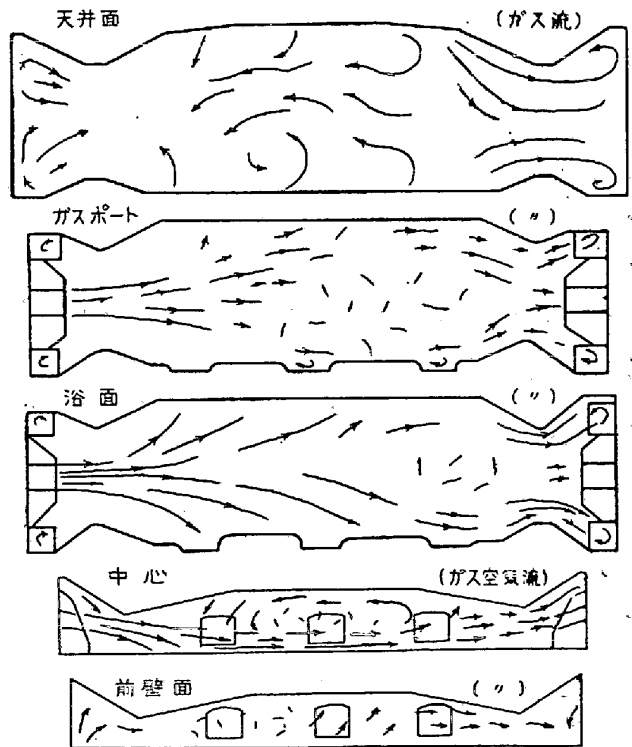
が是に次いで速く爐中心では最も遅い。

流出部の流れは可成り不安定で不規則な間隔をおいて一寸の間前壁に最も速い流れが起る。

壁に沿う高速流は上昇下降道が側壁近くにあるためではないかと考え空氣ポートをガスポートに近く寄せてみたが大した變化はなく只出口近くで流れが急に壁から下降道に鋭く廻るようになったわけであつた。

b) 單噴氣口型

メルツ型の前後の噴氣口を近付けた極限が單噴氣口型である。この時の流れはメルツ型と全く異つてくる。Hallyday と Philip は、前記メルツ模型を改造して Roththerham Melting Shop of Messrs. Steel, Peech and Tozer の L 爐に象つた單氣口模型を作り實驗した。L 爐は全寸法及び形に於て K 爐より幅廣く容量は K 爐の80屯に對し60屯であり小天井を持つているので正確に形を相似させることはできなかつた。その實驗結果は第6圖の如く特に流出部でメルツ型と大いに異つてい

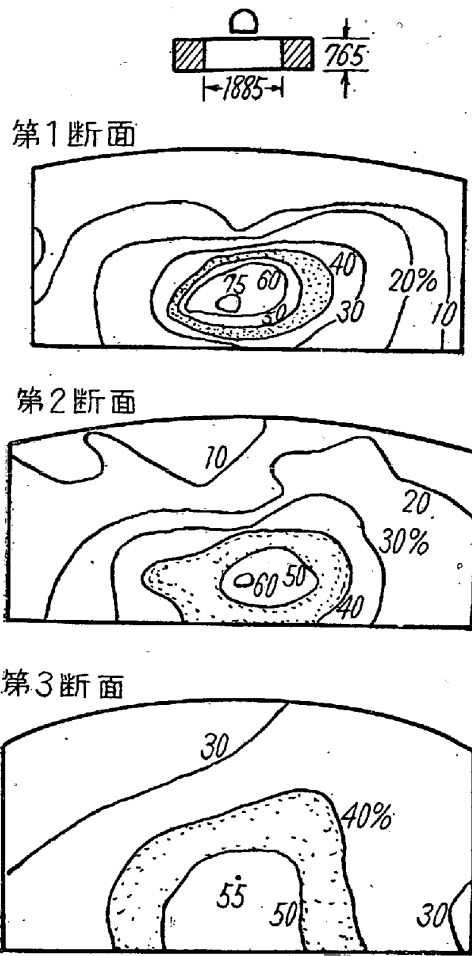


(イ) 流入部——入口では流れは異様な形を示し、メルツ型に於けるほどひどくはないがやはり定常渦がある。混合はガス流の上下兩面に於て起るので著しく向上し、第7圖の Collins と Tyler の實驗結果にも明らかである。

(ロ) 中央部——爐中央部ではメルツ模型の兩噴氣口

(ロ) 中央部——メルツ型の中央部の流れは全般に亘る可成り一様な亂流を特色とし、はつきりした流れは一般に認められない。結局前後壁に沿う流れは天井の近くでも少くとも中央の流れと同速度である。しかしながら浴のすぐ上部では流入ガス流の高速の層があり前後壁に沿う垂直面では之は逐次斜に上に昇る様である。爐長方向の水平軸をもつ前後一對の大きい渦は爐断面一杯に跨る。

(ハ) 流出部——この部分の流れの特色は排出口の方向に流れが整列していることで、どの爐にも普通認められることではあるがこの型に著しい。メルツ型で最も著しいことは最も速い流れが爐の裏側主として後壁沿いと天井に近い部分に集中されていることである。前壁沿い



第7圖 L 爐内の混合 (%)

面積の和よりもこの單噴氣口の方が廣かつた故でもあろうが亂れの程度が低く速い流れは中心部だけに限られ後壁沿いに甚だ遅い流れが認められた。

(ハ) 流出部——出口では空氣、ガスポートへの流れは前壁寄りに少し偏つた爐中央部に結集していることが特色で、壁沿いの流れの速力特に後壁沿いはメルツ型ときの流速(實爐で 7.3m/sec)の半分になつて、更に出口の流れは著しく一様で安定した。

この型での變形——空氣/ガス比を変えた場合の影響を研究したところメルツ型には認められなかつた様相を呈し焔の傾きを保つには空氣/ガス比に限異があることが注目され、例えば空氣流量をそのままにしてガス流量だけを増すとガス流は天井を向く。この角度についての實驗結果は第3表に示す如く、この爐のガスポート俯角は 10.5° であり實作業のとき 2.5° だけ上に向けられる。空氣/ガス比が 1.6:1 になると殆ど水平になる。之は實爐では天井を傷めるので量的な測定は行われぬが實際の作業状態で 5° 持上げられているものと推定される。

噴氣口面積を約半分の細長いものにすると空氣流速が

第3表 ガス噴氣の變向

空氣流量 (m ³ /hr)	ガス流量 (m ³ /hr)	空氣/ガス (比)	上 向 角 (度)
9200	7080	1.3	2.5
	5660	1.6	11
	4250	2.2	17.5
	2830	3.2	43
	1415	6.5	55.5

増して混合はよくなるが焔が上に上り第 1~2 断面の中間で天井に當つている。ガスポートを扁平にすると混合はよくなるが焔が第一扉の手前で天井をなめので空氣ポートを廣くして之を解決すると第一扉で混合は殆ど完結されて甚だ良好で浴面でも焔の直下の外は過剩空氣があり精鍊時間も短くなると思われる。尙混合の實驗で第1.2.3 断面は突當り壁から夫々 117, 196, 280cm の所に當つている。

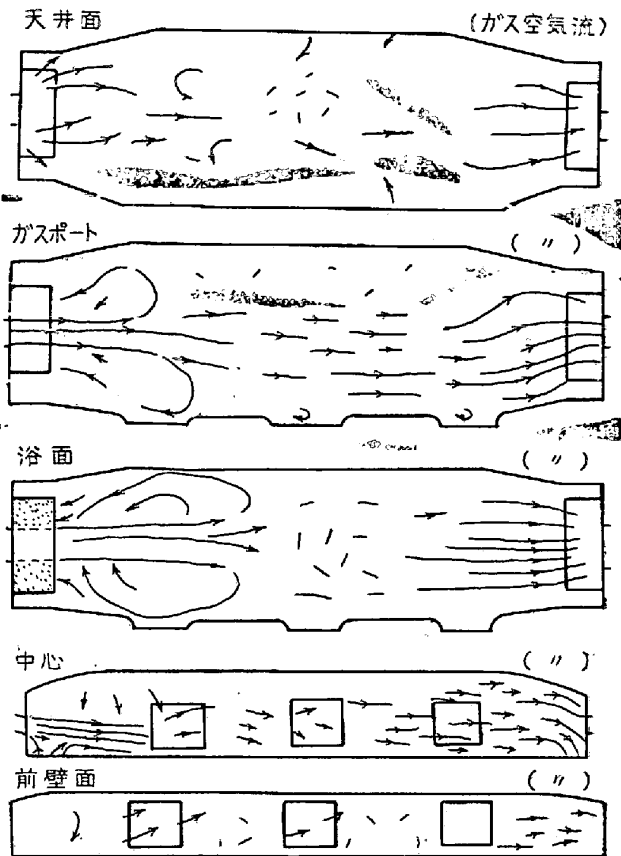
c) ベンチュリ型

Halliday と Philip は Templeborough Melting Shop of Messrs. Steel, Peech and Tozer の S 爐の 1/24 水流模型によつて爐内の流れを、Collins と Tyler は同爐流入部の 1/15 氣流模型によつて混合を、そして Leys と Leigh は 120 屯爐の 1/24 氣流模型²¹⁾によつて流速の分布等を或る重油焚爐の 1/25 氣流模型²²⁾に於てバーナー位置を変えて速度分布や損傷の研究を行つている。

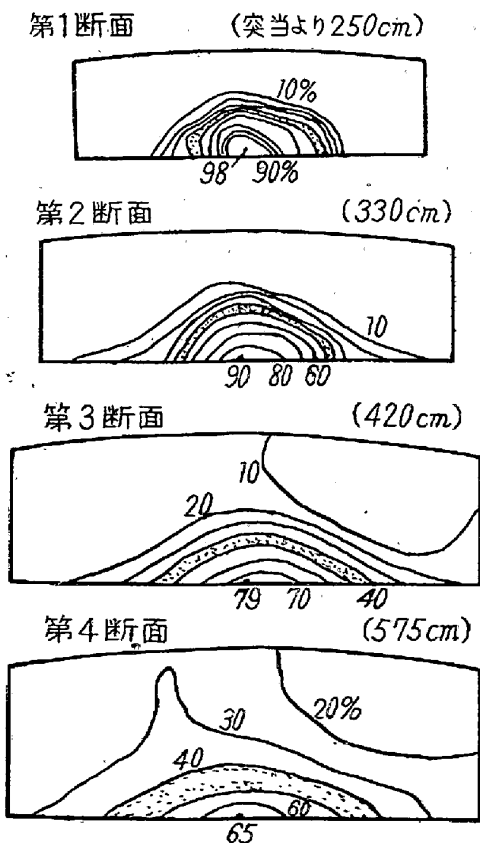
ベンチュリ爐の流れの特色は天井に大きい逆流があり兩空氣ポートに於てはガス噴流の擴り方はメルツ型によく似ているが、流出部の流れが安定して壁沿いの流れが速いが前後の非對稱は一寸少いことである。

(イ) 流入部——上昇道を上つて來た空氣は(流れが左から右に向うとき)何れも著しい右巻の錐揉をしている。ガス噴流の擴る様はメルツ型に似ていて、空氣流も主に上からと横からガス流に交る。喉部(throat)までは空氣流が前向いてガス流に集る形となる。而して流れは爐床から天井の間に層狀をなすガスと空氣の緩漫な混合が特色である。その狀況は第9圖及び第10圖に示す如く判然としている。第9圖は Collins と Tyler²⁰⁾の第10圖は Leys と Leigh²¹⁾の研究した結果である。Collins 等の實驗によつて次のことが知られた。

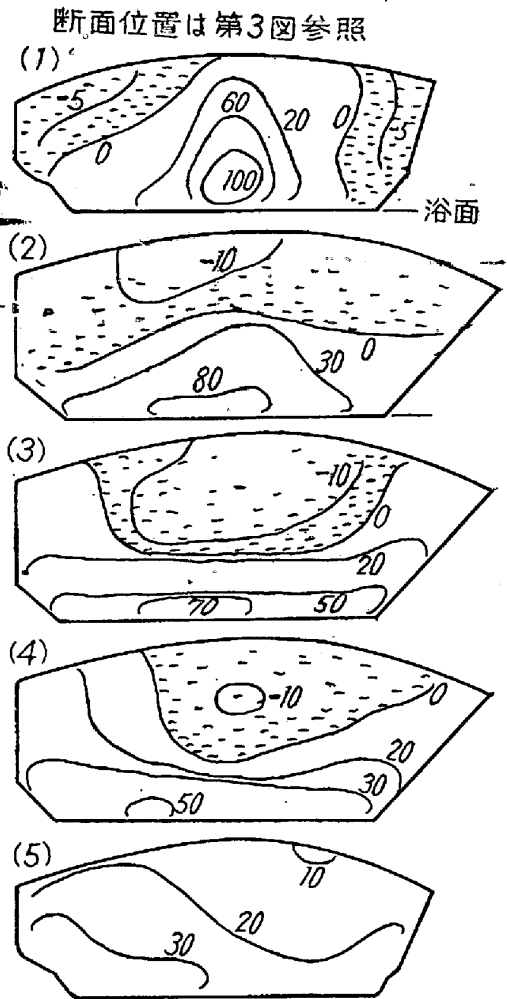
- 1) 流量比一定で流量を半減しても混合の形は不變。
- 2) 流量比を変えた場合を理論式²⁰⁾で計算するとよく合う。
- 3) 空氣速の影響少く、鋼滓室蓄熱等の影響は無視できる。



第 8 圖 S 爐内の流れ



第 9 圖 S 爐内の混合 (%)



第 10 圖 ペンチュリ 爐内の流速 (ft/sec)

- 4) 天井の傾 (高さ一定) を變えても大して影響はない。
- 5) ガスポートを短くすると殆どそれだけ焰が後退する。
- 6) 絞りを低くガスポートを短くすると混合がよくなる。
- 7) ガスポートの傾を小にすると可成りの効果がありメルツ型に似てくるが特に短ポートのときに良い。又空氣が下方から伴われるようになる。
- 8) ガス噴流を n 本に分けると混合の距離は約 $1/\sqrt{n}$ に減る。

(ロ) 中央部——左右の喉の間の流れはメルツ型と異リポート間の中心線上の垂直面には水平軸をもつ大きい長い渦を見せる、この渦の下部には速い主流があり上部天井には逆流がある。

ガス噴流は浴上に積がつて前後壁を上る。この掃き上げ効果は後壁のが盛んである。バーナーの位置方向を少し變えるときは流れが何れかの壁寄りに非對稱になり

方の壁側に逆流域が現れる³⁹⁾。

(ハ) 流出部——流出部ではメルツ型と或る程度似た状態が見られ、前後壁に沿う最も速い流れと中心の遅い流れがある。之は第 10 圖でも明らかに現れている。しかし前後は割に對稱的で流れも比較的安定している。このことは喉が流出の際には單噴氣口と同様の働きをしているものと考えられる。

この型での變形——メルツ型と同様に空氣/ガス比及び流出配分の變化は普通の範圍内では流れに影響しない。空氣が減されても流れの形は大して變らないが、ガスが充分に減されると中央部に著しい變化が起り大きい垂直の渦は消えて全域に前進流が起る。

ベンチュリ型爐に於て側壁と天井の傾きを變えてみたが案外その影響はなかつた。側壁を動かすときは特にメルツ型の場合と同様入口に渦が生じてその廻りに循環が出来るように思われたがその様な現象は起らず死流域となる様であつた。中央部、流出部での分布も殆ど變りなかつた。この結果ベンチュリ型の流れの特色は主に絞り部分の傾きによる縮りで起され側壁の有無は大して關係のないことが判つた。

3.1.4 流れの研究への補足事項

a) 装入口の影響——前壁に於ては扉の内側に凹んだ所ができ柱と柱の間に渦ができてゐる。これは高速、角い柱の場合よりも低速、丸い柱(損傷)の場合に目立つが何れにしても局部的のもので爐内流への影響はない。しかも扉から外氣の侵入のあるときは渦は消滅する。扉からの侵入氣は一般に流れの形には大きい影響はないが流出部に近い扉からの侵入氣は時に中心部の速い流れを後壁近くに擴げる様であり、この影響は單噴氣口型のものでは重要でないが少量の普通の漏洩でも普通のメルツ型爐では可成り重要であろう。

b) スクラップの影響——スクラップが積まれた場合にその各種の形狀、位置についてある制限が定めらるべきであらうが之はまだ明らかにされていない。メルツ型に於いて直方體のブロックを第 1~3 扉の前に置いた實驗では、流れはブロックの面までは可成りの變化をうけたがそれより上方では影響は極めて小であつた。しかしこの結果をスクラップの形の違ふときまで適用することはできないであろう。

c) 實爐との比較——模型實驗では燃焼の影響を無視しているにも拘らず實際の結果¹⁵⁾とよく比較對比できる。之は實爐中に發色煙の標跡を入れて觀測したり²⁹⁾、火焰を撮影したり、ガス分析を行つたりして行われた。標跡として沃素の紫煙(之は 1 呎位しか續かない)木材

又は之にタールを浸したものと煙(之は 4 呎は續く)等を用いた。之等比較の結果は模型實驗で満足すべき洞見の得られたことを證明している。

3.2 損傷の研究

重油焚平爐が使用されるようになって、爐特に天井の損傷が激しくなりこの問題は再び注目され始めた。この研究の歴史は既に數十年⁵¹⁾を経ているにも拘らずその殆どが例外なく珪石煉瓦の品質と損傷の關係に係わり、天井の損傷が多の場合局部的に進行し之が天井乃至は爐の壽命を扼しているにも拘らず之を排除しようとゆう設計上の考慮には向つていない。

Leys と Leigh³⁹⁾は實爐で前側より後壁側の天井の損傷が激しいことから侵蝕の機構に空氣力學的因子が重要な役割を演じていることを示唆され、1/24 ベンチュリ模型について流れの状況と天井に付着する粒子の量を研究した。

1) 前後の空氣流の非對稱は何れか 10% 増しても大して變化しない。

2) 後壁の傾斜を垂直にすると後壁の掃き上げと粒子付着を少くできる。

3) 空氣を突當り中央(單噴氣口)から入れると流れを平にし粒子付着は少くなる。

4) バーナーを後壁から離して少し前に向けると後壁天井への粒子付着は少くなり良い状態を與える。

酸化氣では酸化鐵の吸収は珪石煉瓦の耐火度には殆ど影響を與えず⁵²⁾還元氣で耐火度は著しく低下する^{53)~56)}酸化鐵は爐雰囲気中では固體液體及び氣體⁵⁷⁾の形で存在しよう。氣體としてそれは天井一面に凝結し吸収される。しかし天井の重要部分に逆流する廢ガス或は流入した空氣で常に洗われて吸収は酸化氣内で起り殆ど害を與えない。只後壁の上及び前壁の小部分では天井は常にまだ燃焼の續いてる前進ガス流で洗われ従つて雰囲気は時々還元性になる固體液體の酸化鐵粒子の付着も亦これらの箇所起る。結論として 1) バーナーを爐中心より前に向ける。2) 單噴氣口型の使用。3) 後壁を垂直にする。等の手段によつて局部的侵蝕を防止できることが判つた。

3.3 傳熱の研究

Lekie を中心とする Hall, Cartlidge, Allen, Fenton 等は Shelton Iron, Steel and Coal 社に前記 K. L. S. 爐等の 1/5 實驗爐を設けてその燃焼乃至傳熱について研究を行つた。この實驗は Thring 數の合致(例第 4 表)のもとに行われ第 1 部から第 6 部に亘つて報告された¹⁷⁾。第 1 部は實驗設備と相似につき、第 2 部に一般のポート、第 3 部にメルツ型、第 5 部にベンチュリ、第

第4表 スリング数の一致

項 目	實 爐		實 驗 爐	
	高	低	高	低
Q 10 ⁵ Kcal/hr	150	100	4	1.5
A m ²	28	47	1.7	1.7
T ₁ (焔) °K	2110	2110	1500	1500
T ₂ (浴) °K	1770	1770	500	500
ス リ ン グ 數	2.22	0.88	1.93	0.72

4部に天井温度に対する設計上及び操作上の因子の影響、第6部に実験結果の總括と實際への適用を述べている。

1) 如何なる爐でも爐内壓が高く理論給氣のとき一定入熱に対する爐床への傳熱量は増す。或る場合には幾分過剰空氣のとき天井温度一定の最高爐床傳熱が得られる

2) ガスと空氣の混合が主として亂流擴散による型の場合、低速空氣流ならガスポートを小さくするが有利である。

3) 亂流擴散が空氣とガスの直接突入で助けられる型の時は爐床への傳熱は高くなりガスポートの寸法は大して重要でない。

4) ガス、空氣の直接突入によつて混合を起す様な設計はまだ使用されていないが單噴氣口型はその簡単な一例で特に重油爐に使用されて來ている。

5) どんな型でも、効果的なものでは特に定められた作業條件を保つために適正な計測によることが大切である。

IV. 結 言

平爐に於ける燃焼(流れ・混合)、傳熱、損傷等の問題を解明してその能率を改善し壽命を延長することは現在の平爐に対する一大課題である。平爐は非能率、不經濟な装置であることは今や世界の常識となつてゐるが、この設計に關しては1938年にかのBrunoが當時の實存の爐型についての標準を示してこのかた、これとゆう大きい歩みは認められない。之は實爐による把握が困難であつたこと、模型實驗が充分の配慮に缺けて實際に合わなかつたためであらうが、現在では各種の相似律に従つて模型實驗が行われる様になり之が實に鮮かな成果を示している。

近い將來に於て平爐その他の爐の築造に先立ち模型實驗によつてその性能をテストし十分の改善を行つて實爐の設計が進められることが常識となるであらう。そのような手順は決して目新しいものではなく航空機、船舶で

は早くから行われ十分の効果をあげているものであり、特に現在のゼットエンジンの急速な發達は燃焼筒についてのこの種模型實驗の結果に負う所が多く、平爐模型實驗の育つた英國に於てゼットエンジンが世界の先端を行つている事實は眞に故あることがある。

(昭和28年3月寄稿)

文 献

- 1) F. H. Clements: Journal of I. and S. Inst., 1922, Vol. 105.
- 2) T. P. Colcough: 同, 1950, Vol. 166, p. 187.
- 3) W. E. Groume-Grijmailo: "The Flow of Gases in Furnaces". 1923.
- 4) F. H. Norton: Jour. of the Amer. Ceram. Soci., 1924, Vol. 7.
- 5) 依 國一: 鐵と鋼, 1931, No. 7, p. 724.
- 6) F. C. Johansen: Proceedings of the Inst. of Mech. Eng., 1929, No. 2.
- 7) L. Prandtl: Zeitschrift für Angewandte Mathe. und Mecha., 1925, Vol. 5.
- 8) W. T. Tollmien: 同, 1926, Vol. 6.
- 9) Schleicher und Luth: Stahlwerksausschuss, Bericht Nr. 124.
- 10) Neumann: 同, Nr. 127.
- 11) Killing: Stahl und Eisen, 1929, Aug. 1.
- 12) K. Rummel: Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1937~38, Vol. 10~11.
- 13) P. O. Rosin: Fuel in Science and Practice, 1933, Vol. 15.
- 14) H. Etherington: "Modern Furnace Technology", 1944.
- 15) J. H. Chesters and M. W. Thring: The I. and S. Inst., 1946, Sp. Rep. No. 37.
- 16) M. W. Thring: Nature, 1947, Vol. 159, Feb. 8.
- 17) A. H. Lekie, J. R. Hall, C. Cartlidge, J. F. Allen, and G. Fenton: Jour. of the I. and S. Inst., 1947, Vol. 155 (Part I, II); 1948, Vol. 160 (Part III, IV); 1952, Vol. 170 (Part V, VI).
- 18) M. P. Newby: 同, 1947, Vol. 157, p. 601.
- 19) J. H. Chesters, A. R. Philip, R. S. Howes, and I. M. D. Halliday: 同, 1949, Vol. 162.
- 20) R. D. Collins and J. D. Tyler: 同, 1949, Vol.

- 162, 1950, vol. 166
- 21) J. A. Leys and E. T. Leigh: 同, 1950, Vol. 165.
- 22) F. Schultz-Grunow: Stahl und Eisen, 1950, Dez. 21.
- 23) M. P. Newby, R. D. Collins and J. A. Lekie: BISRA Rep. No. SM/A/134/50.
- 24) F. Stanek: Zeitschrift des V. d. I., 1936, Vol. 80, p. 1355.
- 25) E. A. Watson and J. S. Clarke: Jour. of the Inst. of Fuel 1947, Vol. 21.
- 26) H. L. Saunders and others: Jour. of the I. and S. Inst., 1945, No. 11; 1946, No. 11.
- 27) M. L. Hughes: 同, 1947, Vol. 156, May; July.
- 28) M. P. Newby: 同, 1949, Vol. 162, p. 452~456.
- 29) J. H. Chesters: Open-Hearth Proceedings, 1951, A. I. M. E., p. 282.
- 30) I. M. D. Halliday and A. R. Philip: Jour. of the I. and S. Inst., Vol. 162, p. 411.
- 31) J. A. Leys and E. T. Leigh: 同, Vol. 165, p. 301.
- 32) 糸川英夫: “航空力學の基礎と應用” 1942, p. 11.
- 33) J. A. Leys and E. T. Leigh: Jour. of the I. and S. Inst., 1950, Vol. 165, p. 302.
- 34) J. H. Chesters: Open-Hearth Proceedings, 1951, A. I. M. E., p. 285.
- 35) L. E. Prosser: Jour. of the I. and S. Inst. 1950, Vol. 166, p. 186.
- 36) 藤本武助: “應用流體力學” 1942, p. 310.
- 37) 航空研究所彙報, No. 165.
- 38) S. Goldstein: “Modern Developements in Fluid Dynamics”, 1938.
- 39) J. A. Leys and E. T. Leigh: Jour. of the I. and S. Inst., 1952, Vol. 170, p. 342.
- 40) W. Heiligeustaedt: Stahl und Eisen, 1928, Okt. 18.
- 41) M. W. Thring: Nature, 1947, Vol. 159, p. 203.
- 42) A. Fage and J. H. Preston: Jour. of the Royal Aero. Soci., 1941, Vol. 45, p. 124.
- 43) L. E. Prosser: Jour. of the I. and S. Inst., 1950, Vol. 166, p. 186.
- 44) M. P. Newby, R. D. Collins and J. A. Leys: BISRA Rep. No. SM/A/126, 1949.
- 45) H. Kistner: Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1929~30, Vol. 3.
- 46) H. Bausen: Berichte der Fachausschüsse des V. d. E., Stahlwerk., Nr. 111, 1926.
- 47) H. Bausen: Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1927~28, Vol. 1.
- 48) J. A. Leys: Iron and Steel, 1949, Vol. 22; No. 3.
- 49) A. Vazsonyi: Trans. of Amer. Soci. of Mech. Eng., 1924, Apr.
- 50) M. Hausen: Stahl und Eisen, 1950, Dez. 21.
- 51) K. Endell: 同, 1912, p. 392~397.
- 52) First Rep. on Refractory Materials, Iron Steel Inst., Sp. Rep. No. 26, 1939.
- 53) N. L. Bowen and J. F. Schairer: Amer. J. Sci., 1932, Vol. 24, pp. 177~213.
- 54) A. E. J. Vickers and L. S. Theobald: Trans. Brit. Cer. Soc., 1924~25, Vol. 24, p. 86~97.
- 55) L. F. Sheerar: J. Amer. Cer. Soc. 1926, Vol. 4, p. 279~286.
- 56) E. Smith: 同, 1937, Vol. 20, p. 33.
- 57) R. B. Sosman: 同, 1938, Vol. 21, p. 40.