

## 論 文

## 冶金用充填層の圧損と熱伝達について†

中村信夫\*・一安六夫\*・佐藤 豊\*

## STUDY ON THE PRESSURE LOSS AND HEAT-TRANSFER IN THE PACKED COLUMN FROM THE METALLURGICAL STANDPOINT

Nobuo Nakamura, Rokuo Ichiyasu and Yutaka Sato

## Synopsis:

The pressure loss and heat-transfer in the packed column were studied at elevated temperatures. In spite of many investigations most of their results were based on comparatively low temperature experiments relating chemical industries.

The authors found that their results were hardly available for elevated temperature fluid (more than 300°C mean temperature) and obtained experimental formulas available for the fluid of 300°C, 450°C and room temperature. Air was used as the flowing fluid and magnesia clinker as packed material. The authors' formulas were led from the results of dimensional analysis and could apply 40~500 Reynolds number. Heat-transfer in the packed column at elevated temperature was analysed of Kuzuoka's equation that had already reported.

## I. 緒 言

熔鉱炉，ガス発生炉，ペレット，石灰石，ドロマイト焙焼炉，ペブルヒーター，その他の冶金工学上の装置として充填塔は広く使用されている。もともとこれは化学工業の分野で発達した関係上その性質とくに圧力損失，熱伝達係数等に関する研究は数多く種々の実験式が各研究者によつて提出されている。しかしこれらの実験式はほとんど常温附近かせいぜい 100°C 前後における実験結果を基として得られたものでそれ以上の高温になると実験値は少なく実験式の適用に當つて疑惑を禁じ得ない。著者等はこの点を考慮し高温における充填層の圧力損失について二，三の実験を行つた結果，常温の実験値から得られた実験式を使用して計算される値に比して相当の差異のあることを知つた。そのため小型実験装置により高温での圧力損失を測定し，近似的にはあるが実験式を導き温度によつていかに変化するかを検討した。またあわせて高温における熱伝達についても検討し，すでに報告されている実験式と比較考察した。

## II. 実 験 装 置

内径 205 mm φ，高さ 2,200 mm のガス管を充填管とし，これを内径 430 mm φ，高さ 2,300 mm の炉の中央に設置して充填管外側を加熱する，他方充填管の下

端よりコンプレッサーにより吸引排気して排出空気の色度を測定すると同時に充填管の下端に設けたマンノメーターで各流量に応じて圧力損失を測定した。排出空気の色度測定は吸引式温度計の原理によつてガス流速を大にするよう温度計をガス排出導管中に押込んだ。流量の測定はピトー管によつた。Fig. 1 に装置の概要を示す。充

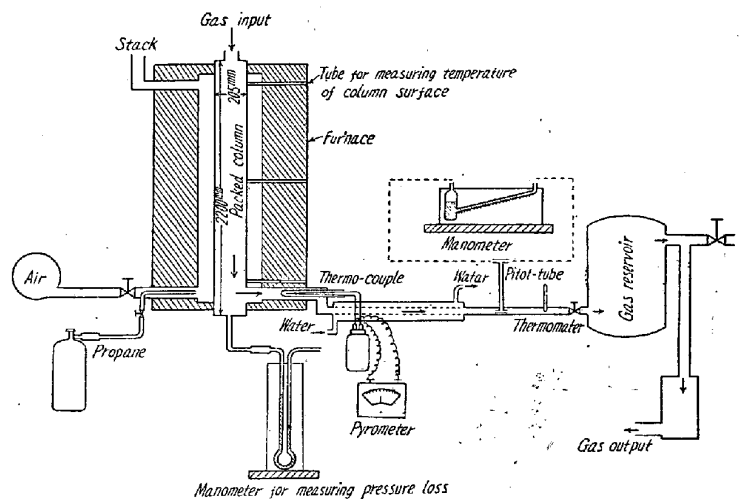


Fig. 1. Apparatus.

填管外側はプロパンの燃焼によつて加熱し上部に煙突を設けた。充填管の外側温度を測定するために炉体を通して先端を2重にした磁性保護管を押し込み充填管外側に密

† 昭和 31 年秋季講演大会において講演

\* 日立金属工業株式会社，安来工場

着せしめた。

充填物は硬焼マグネシア粒を使用し、粒度は間隙 6 mm, 10 mm, 15 mm, 25 mm の篩によって選別したもので、すなわち平均粒径 8 mm, 12.5 mm, 20 mm, の 3 者である。充填に際しては空隙率をできるだけ一定にするよう一様な操作で充填した。なお本実験方法は吸引式通風実験である関係上押込式との相異は何等かの形で現われるものと予想すべきであろう。

### III. 実験結果

#### (1) 常温における圧力損失

実験に入る前に充填物なしで実験し圧力損失を測定し各測定結果を補正して実際の圧力損失とした。Fig. 2 に常温における実験結果を示す。すなわち流速の増大とともに、また充填粒の微細化とともに圧力損失は増大していることがわかる。充填塔の圧力損失に関する実験式は前述のごとく数多くあるが、一般にデメンション解析により普遍化されている。内田、藤田両氏<sup>1)</sup>の報告によると乾燥充填塔内の流体の圧力損失は流速と、流体の粘性抵抗、および塔壁の性質等に関係し、一般式として空隙率一定の場合には次式が適用されるとされている。

$$\frac{\Delta p}{\rho l} = C \left( \frac{u^2}{2gd} \right)^p \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^q \left( \frac{D}{d} \right)^r \dots\dots (1)$$

ただし  $\Delta p = l$  なる充填層の厚さに対する圧力損失

$l$  = 充填層の厚さ

$u$  = 充填物の存在を無視して計算した流速

$d$  = 充填物の直径、またはこれに代る代表長さ

$g$  = 重力の加速度

$\rho$  = 流体の塔内平均 (温度, 圧力における) 密度

$\mu$  = 流体の塔内平均 (温度, 圧力における) 粘度

$D$  = 充填塔 (管) の内径

$C, p, q, r$ , は充填物の種類ごとに実験によつて決定されるべき常数

(1) 式はデメンション解析の結果得られたものであるから統一せる単位系を使用すれば結果は同一となる。

なお著者等が本式を常温にて適用した結果はかなり信頼性のあるものであつた。

葛岡氏<sup>2)</sup>によれば塔壁の影響を考慮した項  $(D/d)$  は、これが一定になるような条件下で実験した場合、勿論そうでなくても  $(D/d) > 10$  のときは充填物の形状が規則的 (相似的) であれば粒の大きさは異なつても  $(D/d)$  の影響はほとんどなくなり、 $r=0$  とすることができると

されている。したがつて (1) 式はつぎのようになる。

$$\frac{\Delta p}{\rho l} = C \left( \frac{u^2}{2gd} \right)^p \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^q \dots\dots (2)$$

Fig. 2 に示す実験結果が (2) 式の関係を満足するとして両対数ぐらふに  $(\Delta p/\rho l)$  対  $(u^2/2gd)$  および  $(\Delta p/\rho l)$  対  $(du\rho/\mu)$  をプロットすると Fig. 3, Fig. 4,

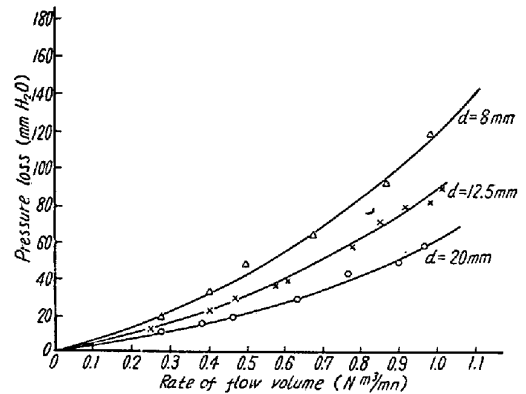


Fig. 2. Relation between pressure loss and rate of flow volume at room temperature.

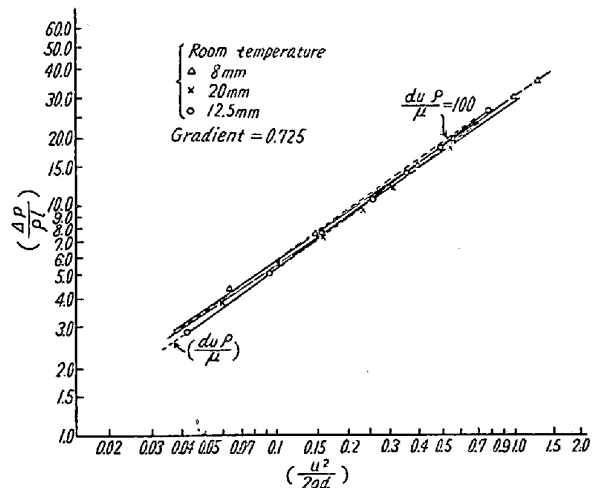


Fig. 3. Relation between  $\left(\frac{\Delta p}{\rho l}\right)$  and  $\left(\frac{u^2}{2gd}\right)$

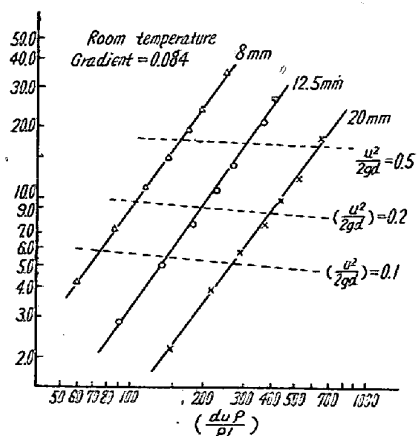


Fig. 4. Relation between  $\left(\frac{\Delta p}{\rho l}\right)$  and  $\left(\frac{du\rho}{\mu}\right)$

のごとく直線となる。Fig. 3の直線上でのおおの  
 $(du\rho/\mu)$  の等しい点を結ぶと直線となりその勾配は指数  $p$  を示す。同様に Fig. 4 において  $(u^2/2gd)$  の等しい点を結ぶ直線の勾配は指数  $q$  を示す。かくして  $p, q$  を求め (2) 式に代入して  $C$  を求めると、常温の場合の圧損失として次式を得る。

$$40 < (Re)_d < 500$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho l}\right) = 46 \left(\frac{u^2}{2gd}\right)^{0.725} \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)^{-0.08}$$

ただし  $(Re)_d = \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)$  レイノルズ数

(2) 高温における圧力損失

前述のように常温における実験結果は高温に適用されないため近似的に圧力損失を測定する実験をおこなった。高温における実験は予想以上の困難をとめない。排出ガスの温度測定、充填管壁の温度測定のみでも厳密には相当の問題がある。

もつとも正確を期するためには高温ガスを、それと同温度に保持されている充填塔に通過させその際生ずる圧力損失を測定するのが望ましいがこれは至難の技である。これ以外の場合には常にガス充填層間には熱の授受があり、両者を平衡状態にするまでには相当の長時間を必要とし予想以上の労力を必要とする。

この点を考慮し、たとへ充填層一ガス間が不平衡状態であろうとも充填層内を通過するガスの平均温度を知ることができれば、その場合の圧力損失をその温度における該当流量の圧力損失と考えて実験した。

充填層の外側を加熱し上部より常温のガスを通過するとガスは加熱され温度勾配を生ずる。その際のガスの温度上昇速度は充填層ガス間の温度差に正比例する。それゆえガスの平均温度は対数平均をとり次式にしたがつてもとめた。

$$t_m = T_m - \Delta t_m \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta t_m = \frac{1}{2.3} (T_1 - t_1) - (T_2 - t_2) \log \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)} \dots (5)$$

ただし  $t_m$  = 充填塔を流れるガスの平均温度

$T_m$  = 充填管外壁の平均温度

$\Delta t_m$  = 外壁とガスとの平均温度差

$T_1, T_2$  = ガスの入口、および出口における外壁温度

$t_1, t_2$  = ガスの入口、出口温度

$T_1, T_2, T_m$  は充填塔外壁温度分布を推定して求めた。われわれの場合  $T_1 = 250 \sim 400^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 650 \sim 1000^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 500 \sim 900^\circ\text{C}$  の程度である。

Fig. 5 にかくして求めた値を示す。これらのガス平

均温度は各粒度の充填物について一定ではないが大略、 $300^\circ\text{C}$  と  $450^\circ\text{C}$  として前述の方法によつて対数ぐらふより各係数を求めてつぎの両式を得た。Fig. 6, Fig. 7 に  $300^\circ\text{C}$  の場合の解析結果を示す。

$$300^\circ\text{C} \text{ の場合 } 40 < (Re)_d < 500$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho l}\right) = 501 \left(\frac{u^2}{2gd}\right)^{0.844} \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)^{-0.398} \dots\dots (6)$$

$$450^\circ\text{C} \text{ の場合 } 40 < (Re)_d < 500$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho l}\right) = 616 \left(\frac{u^2}{2gd}\right)^{0.964} \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)^{-0.425} \dots (7)$$

これら (3) (6) (7) の結果が示すように、同一レイ

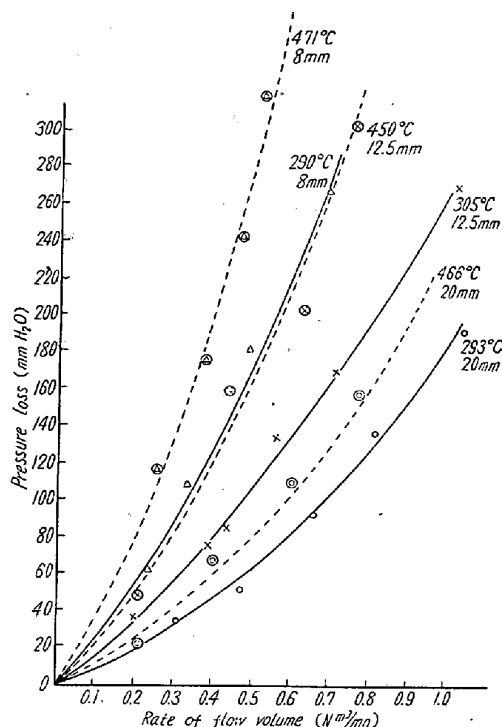


Fig. 5. Relation between pressure loss and rate of flow volume at elevated temperature.

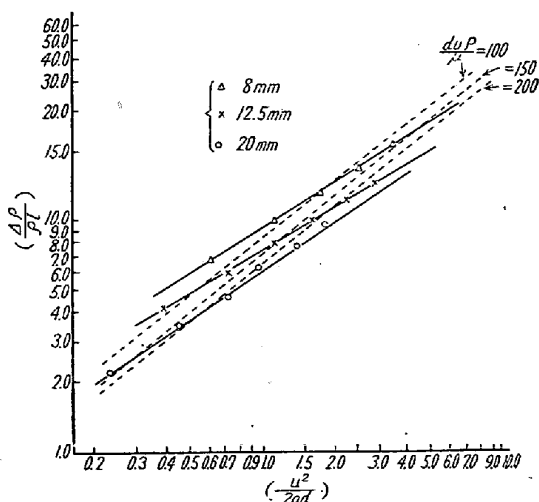


Fig. 6. Relation between  $\left(\frac{u^2}{2gd}\right)$  and  $\left(\frac{\Delta p}{\rho l}\right)$

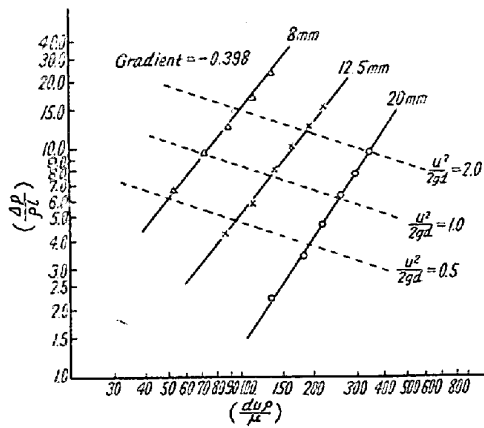


Fig. 7. Relation between  $\left(\frac{du\rho}{\mu}\right)$  and  $\left(\frac{\Delta p}{\rho l}\right)$

ノルズ数範囲にもかわらず、実験式の各係数が大いに異なることは今まで報告されておらず、適用範囲としてレイノルズ数のみを規定するのでは不十分なことを示している。

(3) 充填塔の熱伝達について

充填層を流体が貫流する場合の熱伝達については古くから研究がおこなわれ文献<sup>9)</sup>の数もかなり多く、実験式も種々提出されているが、その間にはかなりの相違があつてかならずしも一致していない。この点に関しては流速分布の測定や、温度の測定が非常に困難であること、さらに充填物の種類や形状の変化に影響されるものを共同的に整理することの困難によるものと解釈される。

充填層の熱伝達を研究する方法として大略3つの考え方がある。すなわち先づ第1には管の内壁面から管内流体に熱が移動することに重点をおいて、普通の空管内をガスが貫流する場合の伝熱と同様な取扱いをし、このとき充填物は単に流体の攪乱混合を助けるものとして働くと考えられるものである。第2の考え方としては管壁表面の熱伝達率を無限大として、伝熱抵抗はもつぱら流体の流れつつある充填層の部分にあると考えるものでこれは物質移動の概念と類似に取扱う方法である。第3に最近八田氏、Coberly 氏の提唱しているこれら両法の考え方を総合して取扱う方法であるが、いずれも一長一短あり目的によつていずれの方法を採用するか決しなければならない。充填層内の温度分布を問題としない単なるガスの加熱の場合は第1の方法が取扱いも容易で計算も簡明であるため過去の実験値も多くそのうえガスの種類による影響も比較的少ないとされている<sup>4)</sup>

しかしこれらの研究結果は主として化学反応装置の設計用として研究されたものである関係上比較的低温の場合における実験結果で、排出ガス温度 800~1000°C 程度の高温になるとほとんど論じられていないようであ

る。けだしこれらを充分満足のいく条件で実験することは仲々容易の技でなく、ために筆者等は前述の圧力損失の場合から検討しすでに報告されている実験式と比較することにした。

一般に流体が加熱空管内を通過することによつて昇温する場合には次式が成立する。

$$A_v h_w \Delta t_m = G' C_p (t_2 - t_1) + H \dots \dots \dots (8)$$

$A_v$  = 加熱空間の表面積

$h_w$  = 熱伝達係数

$\Delta t_m$  = 加熱空管壁と流体との対数平均温度差

$G'$  = 加熱空管よりの流体の総排出質量速度

$C_p$  = ガスの平均温度における比熱

$t_1$  = 流体の入口における温度

$t_2$  = 流体の出口における温度

$H$  = 空管内における反応熱または潜熱

熱の吸収発散のない場合には (8) 式の  $H$  の項は省略される。

(8) 式の各項に筆者等の実験結果を代入し熱伝達係数  $h_w$  を求めると Fig. 8 のようになる。加熱炉に高流速のガスを通せしめると充填層の冷却がいちじるしく、ために高流速の場合には測定不可能であつた。この結果から解るように 0.3~0.7 Nm<sup>3</sup>/mn の流量範囲すなわちレイノルズ数で 1,000~3,000 の範囲で 13~26 kcal/m<sup>2</sup>h 程度でありかつ流量増加にしたがつて近似的に直線的に上昇する。

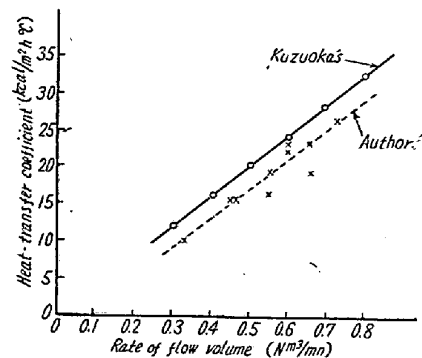


Fig. 8. Relation between heat-transfer coefficient and rate of flow volume.

葛岡氏<sup>8)</sup>は充填管の長さを色々変化させ、充填物として鉛散弾、破碎石灰、レッシングリングの3種を用い、貫流々体として水、空気の2種を使用して実験を行つた結果  $(Re)_D \leq 3,000$  の場合には充填物の種類、大きさ等には無関係であるが長さ  $l$  に大きく影響されることを確かめ次式を与えている。

$$N_u = 0.37 (Re)_D P_r^{1/3} (l/D)^{-0.5} \dots \dots \dots (9)$$

適用範囲として

$$(Re)_D = 400 \sim 3,000$$

$$\epsilon = 0.39 \sim 0.88$$

$$D/d = 3 \sim 25$$

$$l/D = 6 \sim 23$$

$$Nu = h_w D / \lambda g \dots \text{ヌツセルト数}$$

$$h_w = \text{熱伝達係数}$$

$$D = \text{充填管の径}$$

$$\lambda g = \text{流体の熱伝導率 [平均温度における値]}$$

$$(Re)_D = \frac{Du\rho}{\mu} = \frac{DG}{\mu} \dots \text{レイノルズ数}$$

$$u = \text{充填物が存在しないとした場合の流速}$$

$$\mu = \text{流体の粘性係数 [平均温度における値]}$$

$$\rho = \text{流体の密度 [平均温度における値]}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda g} \dots \text{プラントル数}$$

$$\epsilon = \text{空間率}$$

(9) 式は筆者等の条件,  $D=0.205\text{m}$ ,  $l=2.2\text{m}$ ,  $\epsilon=0.45 \sim 0.55$  にすべて適用されるからこれから  $h_w$  を計算すると Fig. 8 のようになる。

この結果からわかるようにわれわれの熱伝達係数は低くあらわれている。これは (8) 式の計算の基礎として管壁温度を管内壁とすべきに外壁温度をもつて代用したこと, および排出ガス温度測定等の不充分さに負うとも考えられるが, 両直線の傾向, 勾配等の近似的に等しいことは (9) 式が成立することを予想させる。一般に熱伝達係数圧力損失等を取り扱う化学工学上の諸式はいつでも 30% 程度の誤差が含まれているといわれている<sup>5)</sup> 点を考慮すると充分 (9) 式は設計基準となりうると考えられる。

#### IV. 結 言

従来ほとんど研究されていないと思われる高温ガスの充填層通過による圧力損失および熱伝達について実験を行い次の結果を得た。

(1) 充填層の圧力損失は一般に次の無次元式で表わされる。

$$\frac{\Delta p}{\rho l} = C \left( \frac{u^2}{2gd} \right)^p \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^q$$

ただし記号本文参照

充填物が焙焼マグネシヤ粒で直径  $d=8 \sim 20\text{mm}$ , 貫流々体として空気, レイノルズ数  $(Re)_d=40 \sim 500$  の場合  
 常温では  $C=46$   $p=0.725$   $q=-0.08$   
 300°C では  $C=501$   $p=0.844$   $q=-0.398$   
 450°C では  $C=616$   $p=0.964$   $q=-0.425$   
 なる結果を得た。

(2) 充填層の熱伝達に関しては葛岡氏の式と比較し類似の傾向を示すことを知り, 同式がガス平均温度 300 ~ 400°C の高温にも適用されることを確めた。

おわりに臨み本実験を行うにあたり種々御配慮頂いた日立金属工業株式会社冶金研究所長小柴博士に深甚な感謝の意を表するものである。

#### 文 献

- 1) 内田, 藤田: 工業化学雑誌 37 (昭9) 1578  
 藤田: 化学機械 12 (昭23) 38  
 矢木, 国井: 工業窯炉 (昭17)  
 内田, 亀井, 八田: 化学工学 (昭15)  
 S. Ergum: Chem. Eng. Progress 48 (1952) 89  
 P. C. Carman: Trans. Institute of Chem. Eng. 15 (1937) 150  
 H. F. Dobsha: Proceeding A.I.M.E. Blast Furnace, Coke & Raw Materials Committee 7 (1948) 49  
 W. O. Philbrook: Trans. A.I.M.E. Jou. of Metals 6 (1954) 1396
- 2) 葛岡: 化学工学実験法 (昭26)
- 3) 栗野, 葛岡: 伝熱工学 (昭29)  
 馬詰: 化学工学 17 (1953) 165  
 W. E. Ranz: Chem. Eng. Progress 48 (1952) 247  
 八田, 前田: 化学機械 18 (1954) 56  
 八田, 前田: 化学機械 13 (1949) 79  
 C. A. Coberly, W. R. Marshall: Chem. Eng. Progress 47 (1951) 141
- 4) 葛岡: 化学機械 8 (1944) 85
- 5) 化学機械協会: 化学工学便覧 (昭30)