

# セメント 廃熱 汽 罐 について

## Waste Heat Boiler

岸 秀 樹\*  
Hideki Kishi

### 内 容 梗 概

最近セメント製造工業の設備が拡張されているが、このセメント廃ガスは多量の熱エネルギーを有するため、このまま大気中へ放出するのは熱経済上きわめて不利である。したがってロータリキルンの増設と同時に廃熱汽罐を建設して発電するのが普通である。しかしながらこの廃熱汽罐は火力発電用微粉炭燃焼汽罐と異なり、その使用熱源の特殊性から種々の難問題に遭遇するものである。

本文ではこの廃熱汽罐の計画上の諸問題と日立製作所のセメント廃熱汽罐について概説せんとするものである。

### 〔I〕 緒 言

セメント製造工業が重要産業の一つであることは今さらいうまでもなく、最近とみに活況を呈して、各製造業者がその設備の拡張を行つている。わが国において行われているセメント製造法は、主として乾式と湿式でその割合は乾式が75%、湿式が20%といわれている。いずれの場合もセメント製造原価に対する燃料費の割合は約35%以上であつて非常に大きな割合を占めているが、この燃料の有するエネルギーは、すべてがセメント製造工程において消費されるわけではなく、キルン出口の廃ガス温度は非常に高く、乾式で850~950°C、湿式で650~750°Cとされており、供給エネルギーの約50%は廃ガス中に含まれるわけである。したがってほとんどの場合にかように多量に有する熱エネルギーを回収するための発電設備を併設して、セメントの製造原価の低下をはかつており、この発生電力はクリンカ生産量 1 t 当り乾式で 150 kWh、湿式で 130 kWh とされており、セメント製造設備における所要電力をほとんどまかない得るものである。

またこの高温の廃ガス中には多量のセメントダストが

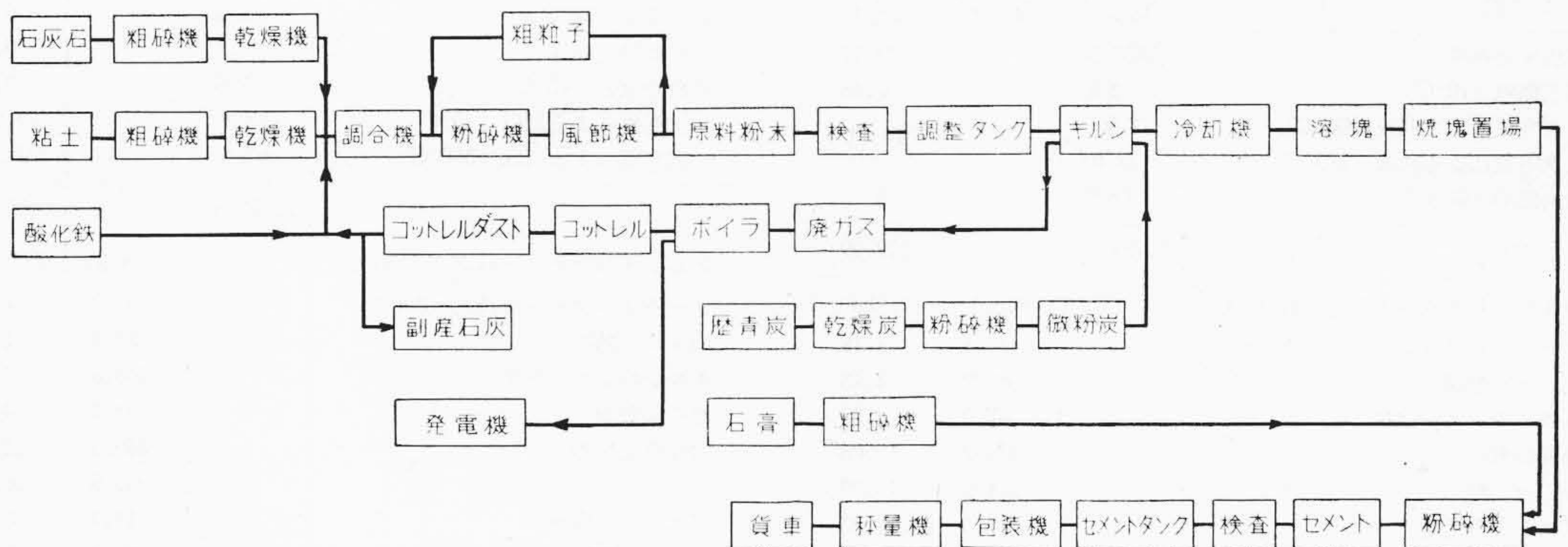
含まれているので、集塵器によつて補集することが必要で、このためにも廃ガス温度を下げる必要がある。この発電設備の併設は一石二鳥というきわめて重要な役割を占めるものである。

### 〔II〕 セメント製造法とヒートバランス

#### (1) セメント製造法

上記のごとく本文の主目的はセメント製造法について述べることではないが、廃熱汽罐を知るうえに必要な予備知識として、わが国でもつとも広く採用されている乾式セメント製造法について簡単に述べることにする。

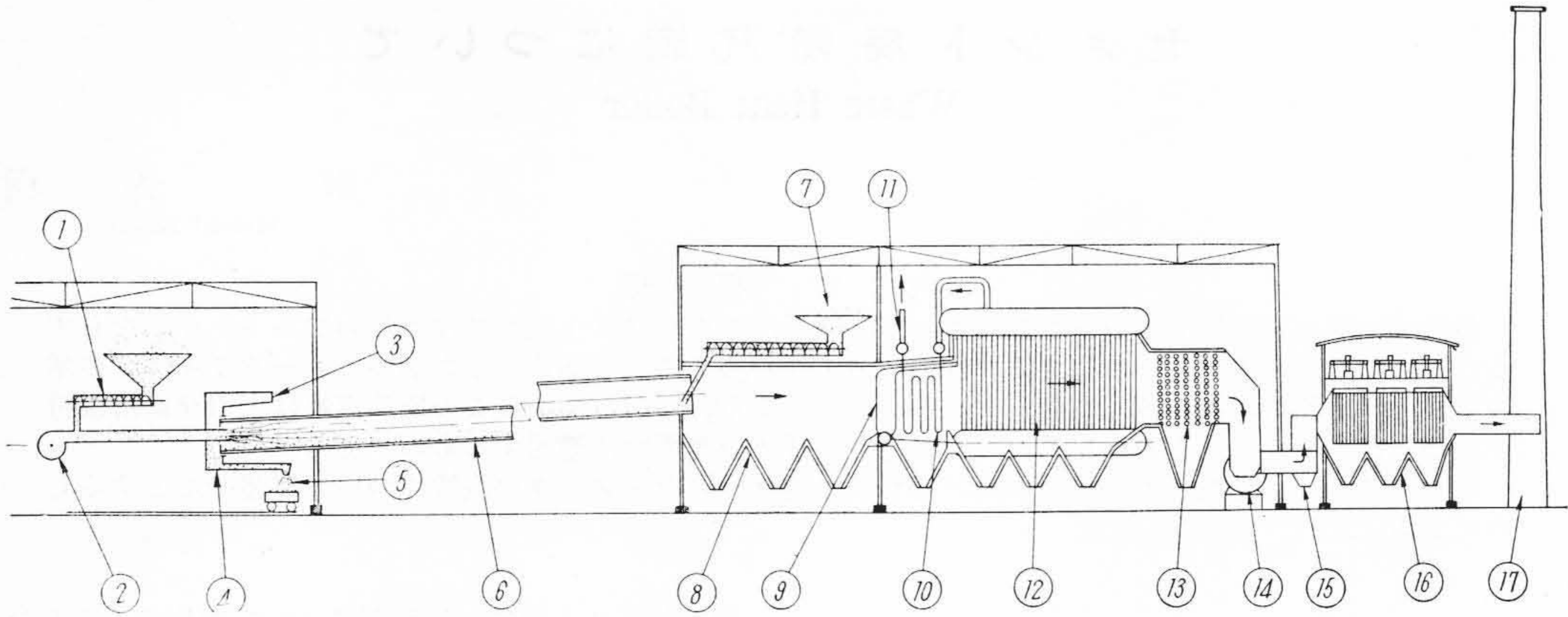
セメントの主成分の61~65%は CaO であり、その原料は CaCO<sub>3</sub> であつて、これに粘土と酸化鉄を混合して粉碎、乾燥し、ロータリキルン中で焼成してクリンカを作り、これに石膏を加えて完成したセメントとするのであるが、これらの工程には種々の中間操作が加えられてきわめて複雑である。第1図はこうした製造工程をその作動順序にしたがつて示したものである。しかしながらこうした製造工程の中でセメントの良否を決定するもつとも重要な要素は、ロータリキルン中の焼成反応である。炉は直径約 3~4 m、長さ約 60~80 m にも及ぶ長大なも



第1図 セメントの製造過程

\* 日立製作所日立工場





- ① 給炭機
- ② 一次送風機
- ③ 二次空気入口
- ④ クーラ
- ⑤ クリンカ
- ⑥ キルン
- ⑦ 原料
- ⑧ 煙道
- ⑨ 前置水管
- ⑩ 過熱器
- ⑪ 過熱蒸気出口
- ⑫ 汽罐本体
- ⑬ 節炭器
- ⑭ 誘引通風機
- ⑮ 煙道
- ⑯ コットレル
- ⑰ 煙突

第2図 ロータリキルンと廃熱汽罐の配置図

ので、鋼板製円筒の内面に耐火煉瓦を内張りして約4度の傾斜を設け、回転しながら一端よりセメント原料を送り、他端より焼成用燃料を送つて最高約1,500°Cで焼成し、クリンカとして取出す。第2図はこの様子をさらに明確に示したロータリキルンと廃熱汽罐の配置図である。

(2) ヒートバランス

キルンのヒートバランスについては吉井氏の燃料協会誌に寄せられた研究報告があるのでこれを参考にする。

(第1, 2表参照)

同報告には計算過程は全然なく結果のみ示されている。これらの表によればキルンから逃げ去る廃ガスおよびダストの持去る熱量は乾式で約55%, 湿式で約45%で、結局入熱の半分は煙道に持ち去られるのであるが、これ

第1表 乾式セメントロータリキルンのヒートバランス (クリンカ1kg当り)

| 費目                    | 受入 (kcal) | 支出 (kcal) | 百分率 (%) |
|-----------------------|-----------|-----------|---------|
| 焼成炭発熱量                | 1765.3    |           | 99.11   |
| 同上顕熱 (70°C)           | 2.9       |           | 0.16    |
| 一次空気による回収 (60°C)      | (7.0)     | }         | (10.11) |
| 二次空気による回収 (395°C)     | (173.0)   |           |         |
| 原料顕熱 (60°C)           | 12.9      |           | 0.73    |
| 合計                    | 1,781.1   |           | 100.00  |
| キルンよりクリンカ持逃 (1,210°C) |           | (316.7)   | (1,778) |
| クーラよりクリンカ持逃 (380°C)   |           | 74.4      | 4.18    |
| 同シエル熱損                |           | 62.2      | 3.48    |
| キルンのシエル熱損             |           | 87.0      | 4.89    |
| 原料加熱用                 |           | 304.2     | 17.08   |
| 生成熱                   |           | 271.2     | 15.23   |
| ダスト中の潜熱               |           | 52.3      | 2.93    |
| 同顕熱 (947.1°C)         |           | 57.1      | 3.21    |
| 廃ガス顕熱 (947.1°C)       |           | 872.7     | 49.00   |
| 合計                    |           | 1781.1    | 100.00  |

らの熱量はボイラにて約その70~75%が回収せられるので、結局キルンの入熱に対して35~37.5%が廃熱汽罐にて吸収せられ、12.5~15%が廃ガスの持ち去るエンタルピとして煙突へ運び去られることになる。

汽罐出口のこの煙道ガス温度は普通200°C位であるから、諸設備の配置を考慮してこの煙道ガスをさらに乾燥機あるいは予熱空気の熱源などとして有効に利用し、熱経済をはかるべきであろう。

[III] 廃熱汽罐計画上の諸問題とその対策

(1) 廃ガスの特性

セメント廃ガスの成分は原料、使用燃料、過剰空気率

第2表 湿式セメントロータリキルンのヒートバランス (クリンカ1kg当り)

| 費目                    | 受入 (kcal) | 支出 (kcal) | 百分率 (%) |
|-----------------------|-----------|-----------|---------|
| 焼成炭発熱量                | 1,987.7   |           | 98.27   |
| 同上顕熱 (67°C)           | 3.7       |           | 0.18    |
| 原料顕熱 (40°C)           | 13.8      |           | 0.68    |
| 原料中水分 (40°C)          | 17.6      |           | 0.87    |
| 一次空気による回収 (40°C)      | (4.8)     |           | (0.24)  |
| 二次空気による回収 (380°C)     | (207.6)   |           | (10.26) |
| 合計                    | 2,022.8   |           | 100.00  |
| キルンよりクリンカ持逃 (1,180°C) |           | (308.8)   | (15.27) |
| クーラよりクリンカ持逃 (300°C)   |           | 57.9      | 2.86    |
| 同シエル熱損                |           | 38.4      | 1.90    |
| キルンのシエル熱損             |           | 103.6     | 5.12    |
| 原料加熱用                 |           | 299.4     | 14.80   |
| 水分蒸発用潜熱               |           | 245.2     | 12.12   |
| 生成熱                   |           | 369.6     | 18.27   |
| ダスト中の潜熱               |           | 11.7      | 0.58    |
| 同顕熱 (719.6°C)         |           | 22.4      | 1.11    |
| 廃ガス顕熱 (719.6°C)       |           | 874.6     | 43.24   |
| 合計                    |           | 2,022.8   | 100.00  |



などによつて異なるので一概にはいえないが、汽罐入口における乾式セメント製造法による成分分析値の一例を示せばつぎのごとくである

|                 |       |                  |       |
|-----------------|-------|------------------|-------|
| CO <sub>2</sub> | 20.5% | H <sub>2</sub> O | 7.0%  |
| O <sub>2</sub>  | 4.1%  | N <sub>2</sub>   | 68.4% |

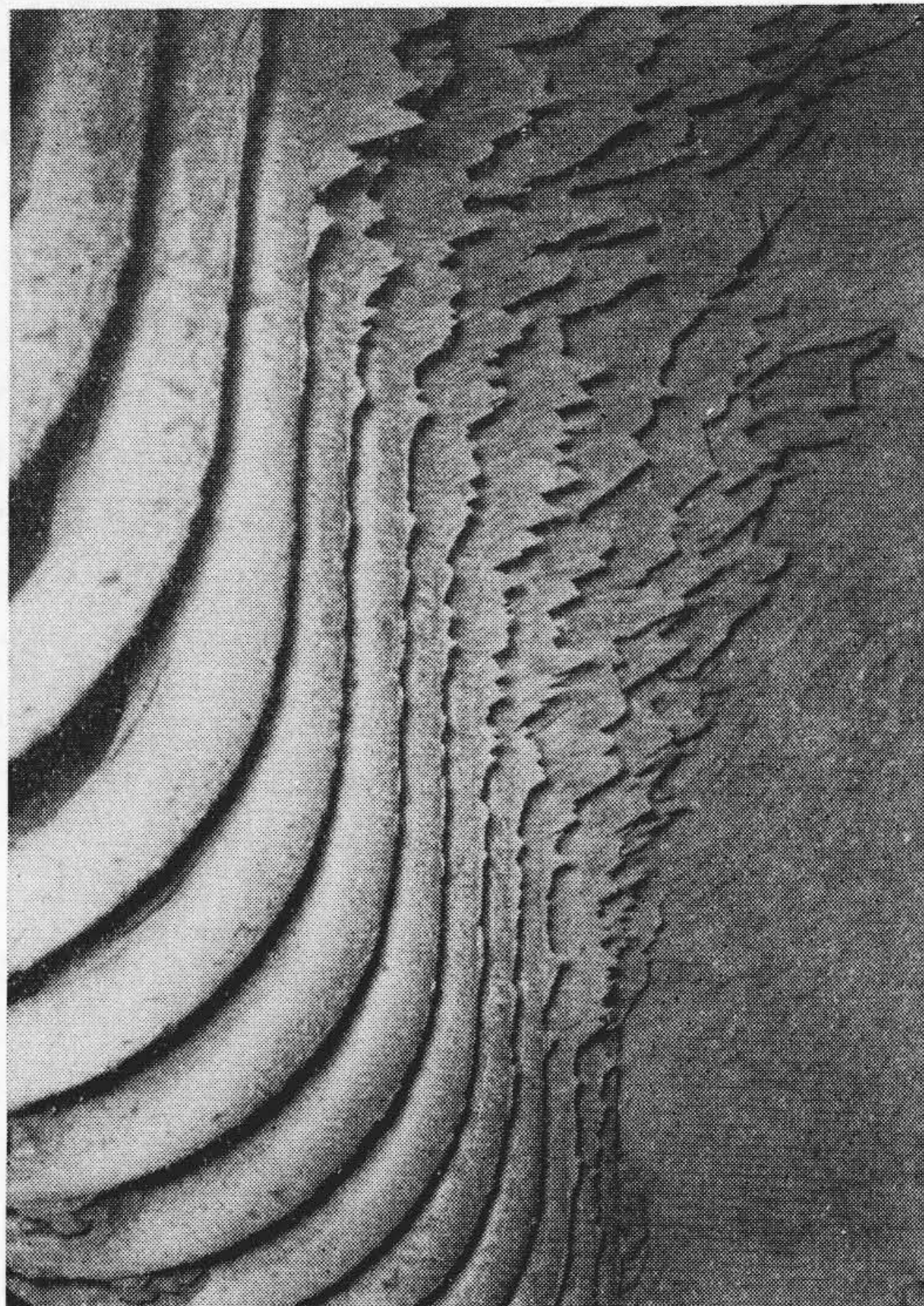
一般にキルン出口から汽罐入口の間は短い煙道で連結されており、この間でかなりの洩れ込み空気量がある場合が多く、はなはだしい場合には全ガス量の20%にも及ぶことがある。したがつてキルン出口のガス組成、ガス温度、およびガス量などはそのまま汽罐入口の条件とは考えることができず、また湿式セメント製造法では原料に約20%の水分が入るので、おのずからその組成も異なってくる。廃ガスの諸特性はその汽罐の予想特性を決定する基礎となるものであるが、これらは各キルンの焼成条件によつてかなり異なることに注意しなければならない。

微粉炭燃焼汽罐では煙道ガス中のCO<sub>2</sub>の含有量は普通15%前後であるが、セメント廃ガスでは原料の化学分解によつて生ずるCO<sub>2</sub>が混じるので非常に大きく、普通20~25%とされている。また水蒸気の含有量も微粉炭燃焼汽罐より多く、これらの輻射熱がその汽罐の伝熱効果に大きく影響することはきわめて重要な事柄である。廃ガス中には多量のセメントダストが含まれているが、このダストの影響に関しては次項で述べる。

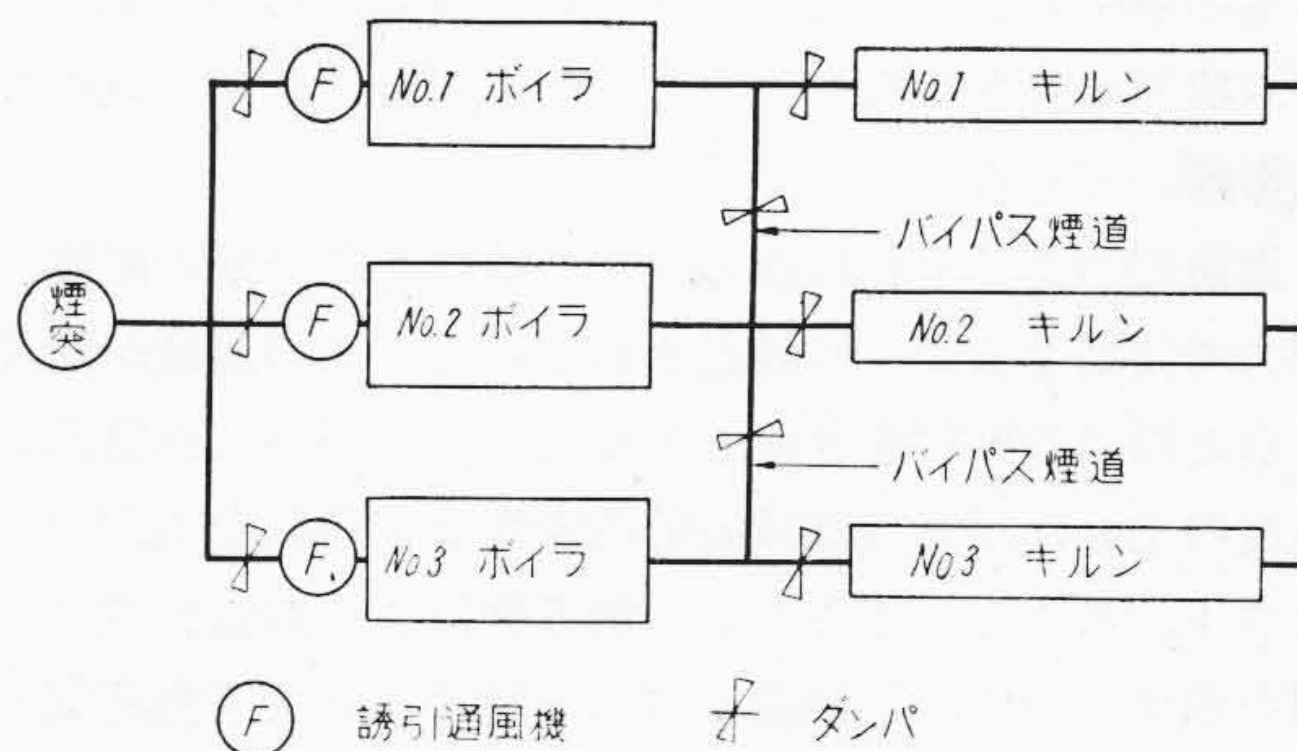
## (2) セメントダスト

廃ガス中に含まれるダストの量は焼成クリンカの25%にも達することがあり、今仮りに25 t/hのセメント製造設備において、その廃ガス量を80,000 Nm<sup>3</sup>/hとし、ダスト含有量を焼成クリンカの20%として燃料中の灰分を無視すれば、廃ガス中のダスト含有量は62.5 g/Nm<sup>3</sup>となり、1日120 tの多きに達する。したがつてこのダストの補集はきわめて厄介な問題であるが、これらのダストは汽罐各部のホップおよび煙道中に設けたマルチサイクロン、電気集塵器などによつてそのほとんどを回収し、ふたたびセメント原料に加えてその資材の節約をはかると同時に、煙突より飛散して附近の諸施設に及ぼす弊害を軽減している。

またダストは高温においては非常に管面に附着し易く、特に過熱器では管壁温度がかなり高温になるので、ダストの附着がもつともはなはだしく半融体の岩石状となつて管面に附着し、はなはだしい場合には管と管の間を密閉してガス通路を閉塞し、通気抵抗を増加し、局部的にガス速度を増加して管の磨耗を大ならしめると同時に、過熱蒸気温度を低下させ、はなはだしい場合には運転休止のやむなきに至らしむ。第3図はこのダストの過熱器管面に附着した状態を示すものである。こうして過熱器管面に附着したダストは冷却すると硬く容易に取除



第3図 過熱器管面のダストの附着状況



第4図 バイパス煙道を設けた場合のキルンと汽罐の配置

きにくなるが、一方ガス温度が比較的低い蒸発水管と節炭器ではダストの堆積も少ないうえ、管面に固着することなくその取除きも容易である。したがつてこのようなダストの附着に関してはできるだけその防止につとめなければならない。

過熱器前部に設置したいわゆる前置水管は、このダストの附着の軽減が一つの目的であつて、過熱器入口のガス温度を低下させ、その防止に役立たせるものである。

## (3) ボイラはキルン任せになる

一般に廃熱汽罐設備においては汽罐1罐に対してキルン1基を組合せる場合が多く、この場合はキルンより発生する廃ガスはすべてその汽罐を通つて煙突へ排出される。したがつて汽罐の起動に際してもその汽罐を通るガ



ス量の調節ができず、キルンの起動および負荷変動は直ちに汽罐の起動および負荷変動を意味することとなる。またキルンの運転初期には原料が入らないため解離熱の吸収がなく、キルンの放熱損失以外はすべて汽罐に入ってくるので、汽罐入口のガス温度が高くなる傾向にある。

キルンと汽罐が1基1罐のみのセメント製造工場は別としても、これらが2組以上設備せられる場合はその配置を第4図のごとくして、汽罐起動時およびそのほか不祥の事態が起つた際はその廃ガスをバイパスさせることが望ましい。かような事柄はごくありふれたごとく考えられるが、実際にはこのバイパス煙道のない場合がかなり多い。しかしこの場合は廃ガス温度が高いため、煙道やガス調整用ダンパの建設が厄介となり、多少建設費のかさむことは免れない。

(4) 過熱器の諸問題

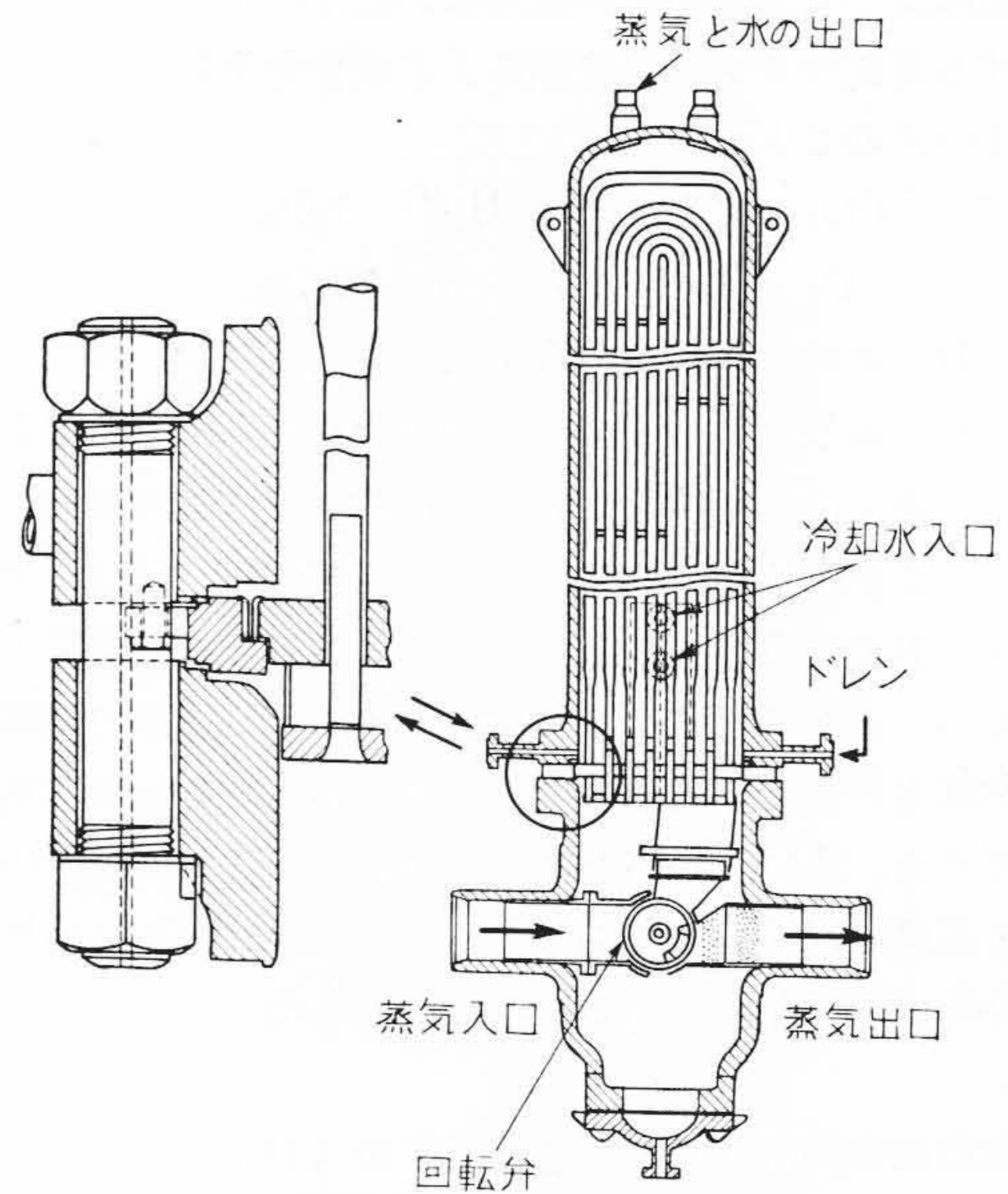
過熱器は汽罐設備中もつとも重要な部分の一つであり、設計上もつとも慎重に計画しなければならない。この過熱器の信頼性は発電容量を直接左右し、ひいてはセメントの製造原価に大きく影響することとなる。

キルンの始動時にはガス温度が高くてガス量が少い。したがって汽罐の蒸発量も少いところへ、最前部の過熱器は強烈な輻射および対流による受熱をなし、過熱蒸気温度の異状上昇をきたす。また正常運転に入ってからでもガス状態の急変が激しく、これらが鋭敏に過熱蒸気温度に影響してくる。

過熱器およびそれ以後の配管系統はある一定の温度、圧力で使用するように設計されるので、この温度が変動すると種々の弊害をきたしてくる。したがって過熱蒸気温度の上昇に対しては減温装置を用いて蒸気を規定温度まで下げることが望ましい。第5図はこの減温装置の一例を示すもので、過熱器出口に取付けられて過熱蒸気の一部あるいは全部が減温器を通つて規定温度まで下げられる。

また過熱器管面には多量のダストが附着して過熱蒸気温度を降下させることも考慮しなければならない。

前置水管は汽罐入口のガス温度が高くなつた場合に、そのガス温度を降下せしめて過熱器表面に附着するダストを減少させ、かつ汽罐起動時の過熱蒸気温度の上昇を防ぐのが目的である。第3表は某セメント会社に納入したセメント廃熱汽罐で、汽罐起動時にガス温度が865°Cおよび1,100°Cの場合にガス量の変化が過熱蒸気温度にいかに影響するかを示したものであり、第4表はガス温度を865°C一定とした場合の前置水管の列数の変化に対する過熱蒸気温度の変化を示したものである。これらの表によれば前置水管の列数が多い程、またガス温度が高い程ガス量の変化に対して過熱蒸気温度の上昇が少く、その効果が顕著となり、過熱器の特性改善に有効に役立つことがわかる。



第5図 冷却器型温度調整装置

第3表 ガス量変動時の過熱蒸気温度の変化(計算値)

| ガス量<br>(Nm <sup>3</sup> /h) | 865        |            | 1,100      |            |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                             | 前置水管<br>なし | 前置水管<br>あり | 前置水管<br>なし | 前置水管<br>あり |
| 20,000                      | 482        | 412        | 550        | 430        |
| 30,000                      | 440        | 405        | 468        | 421        |
| 40,000                      | 412        | 395        | 440        | 410        |
| 50,000                      | 393        | 385        | 418        | 399        |
| 59,400                      | 380        | 380        | 402        | 390        |
| 70,000                      | 369        | 377        | 385        | 384        |

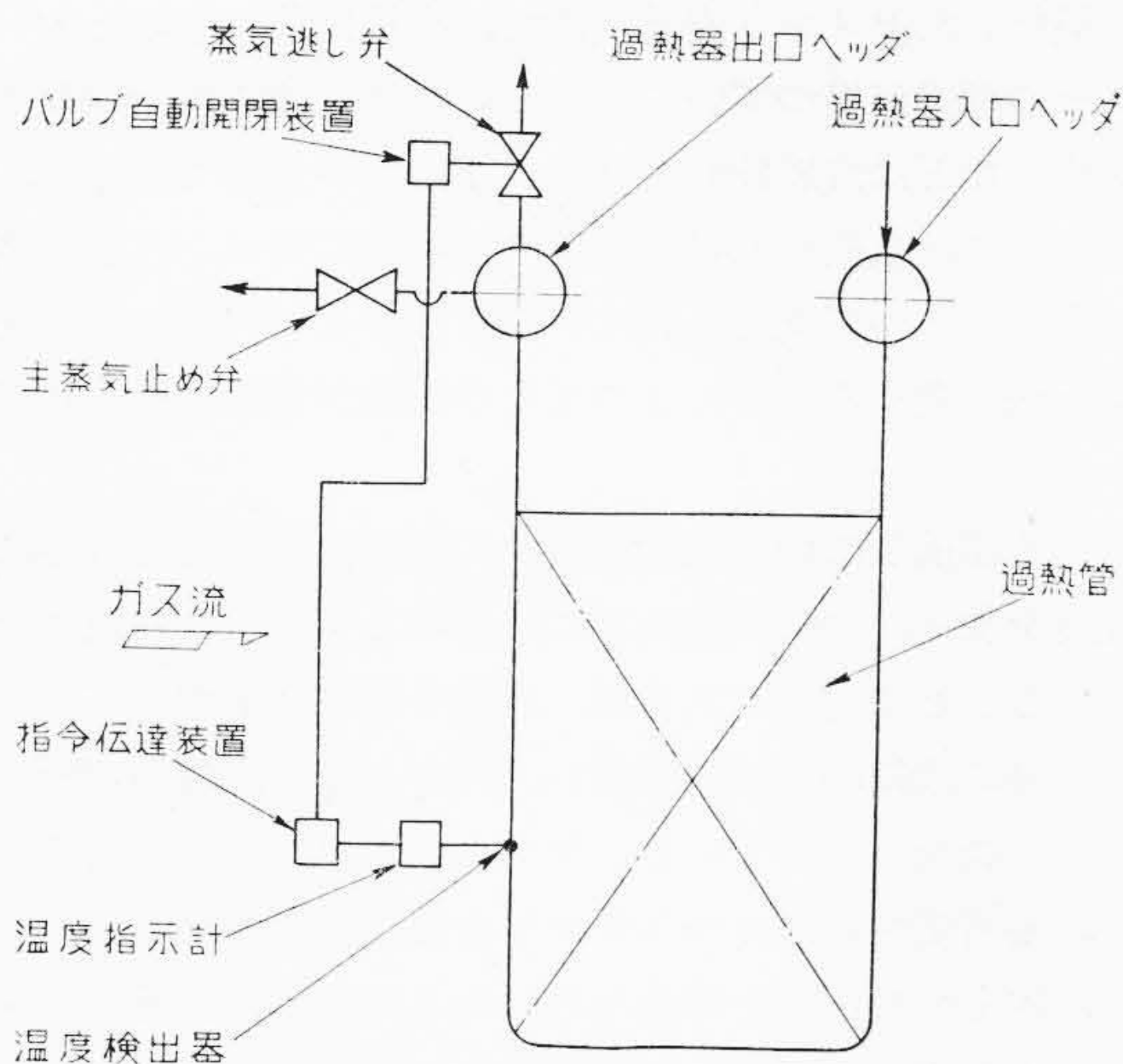
第4表 前置水管面積と過熱蒸気温度の関係(計算値)

| ガス量(Mm <sup>3</sup> /h) | 蒸気温度(°C) |     |     |     |
|-------------------------|----------|-----|-----|-----|
|                         | 前置水管列数   | 3列  | 5列  | 10列 |
| 20,000                  |          | 425 | 412 | 388 |
| 30,000                  |          | 412 | 405 | 390 |
| 40,000                  |          | 398 | 395 | 388 |
| 50,000                  |          | 388 | 385 | 384 |
| 59,400                  |          | 380 | 380 | 380 |
| 70,000                  |          | 375 | 377 | 378 |

つことがわかる。

これらの表を一見すればガス量の減少に対して過熱蒸気温度が上昇するのは不合理のごとく思われるが、これはセメント廃熱汽罐では微粉炭燃焼汽罐のごとく汽罐水壁火炉を有しないため、汽罐起動時に過熱器で吸収する熱量に比して汽罐本体で吸収する熱量が少く、したがって過熱器中を流れる蒸気量が僅少なためである。かような理由で汽罐運転当初は必然的に過熱蒸気温度が上昇するのが常であり、はなはだしい場合には過熱管を焼損せ





第6図 過熱管焼損防止装置

しめることがある。

第6図は過熱管焼損防止装置の一例で常に管壁温度を測定しながら起動し、管壁温度がある一定値以上になると自動的に蒸気逃し弁が開放して、大気中へ高温蒸気を放出して過熱器中の圧力を降下せしめると、汽胴の水は自己蒸発を起して低圧、低温の蒸気が過熱管を充満し、

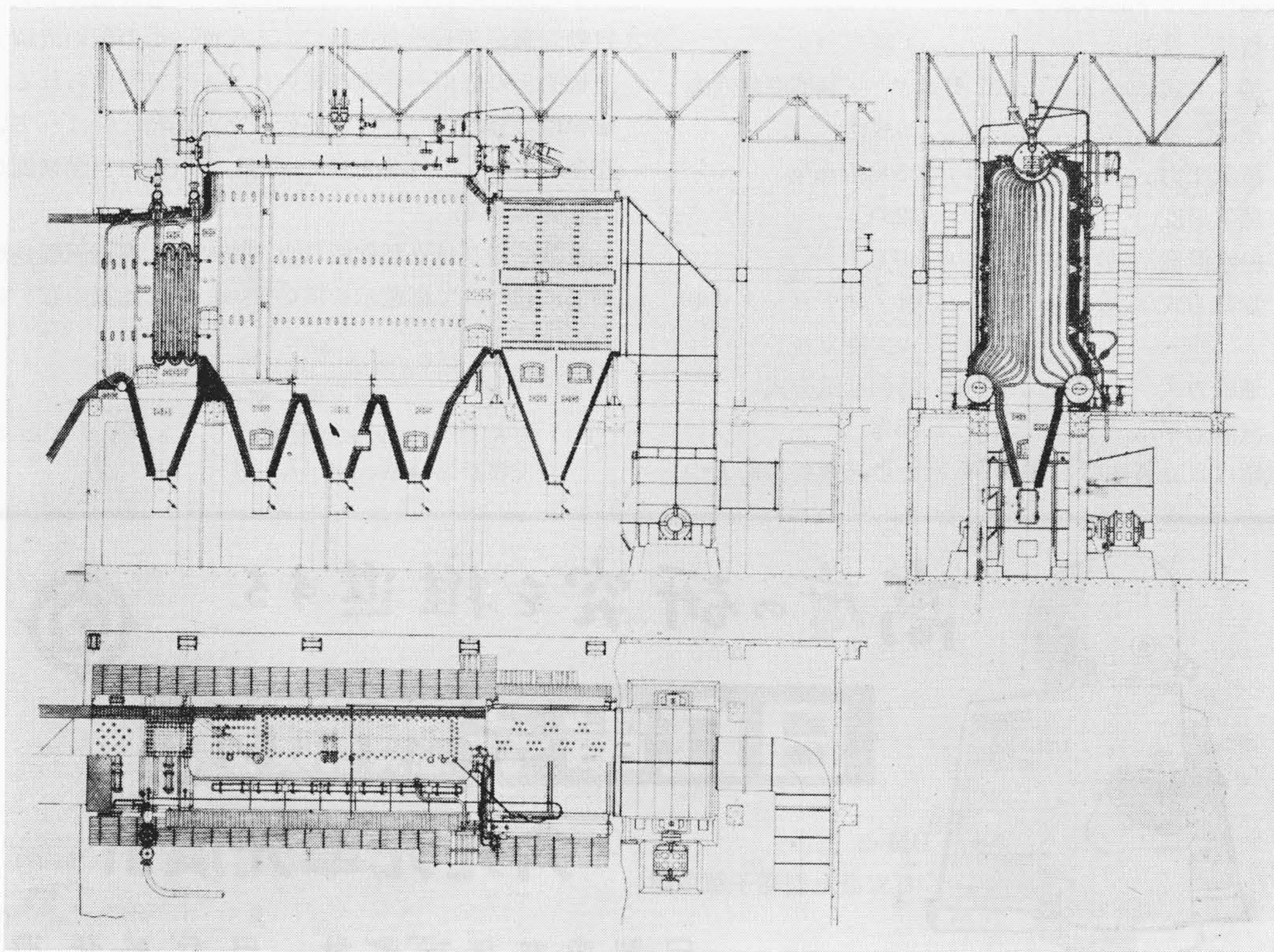
過熱器の異状な温度上昇を防ぐことになる。

(5) 煙道ガスの二次燃焼

燃焼の熱経済は少い過剰空気をもつて完全燃焼さすことにあるが、キルンでは長さ60~80mに及ぶ十分な燃焼距離と高温との二つの好条件に恵まれて、きわめて少量の過剰空気でも燃焼せしめられる。過剰空気は普通10%位であるが往々にして一部不完全燃焼を起し、可燃ガスがキルン出口の洩れ込み空気を得て煙道で再燃焼を起すことがある。その結果汽罐入口のガス温度が急に上昇して、蒸発量が増すと同時に過熱蒸気温度の上昇をきたす。これはキルンの焼成帯でクリンカトラブルを起した場合に特にその傾向が大きい。

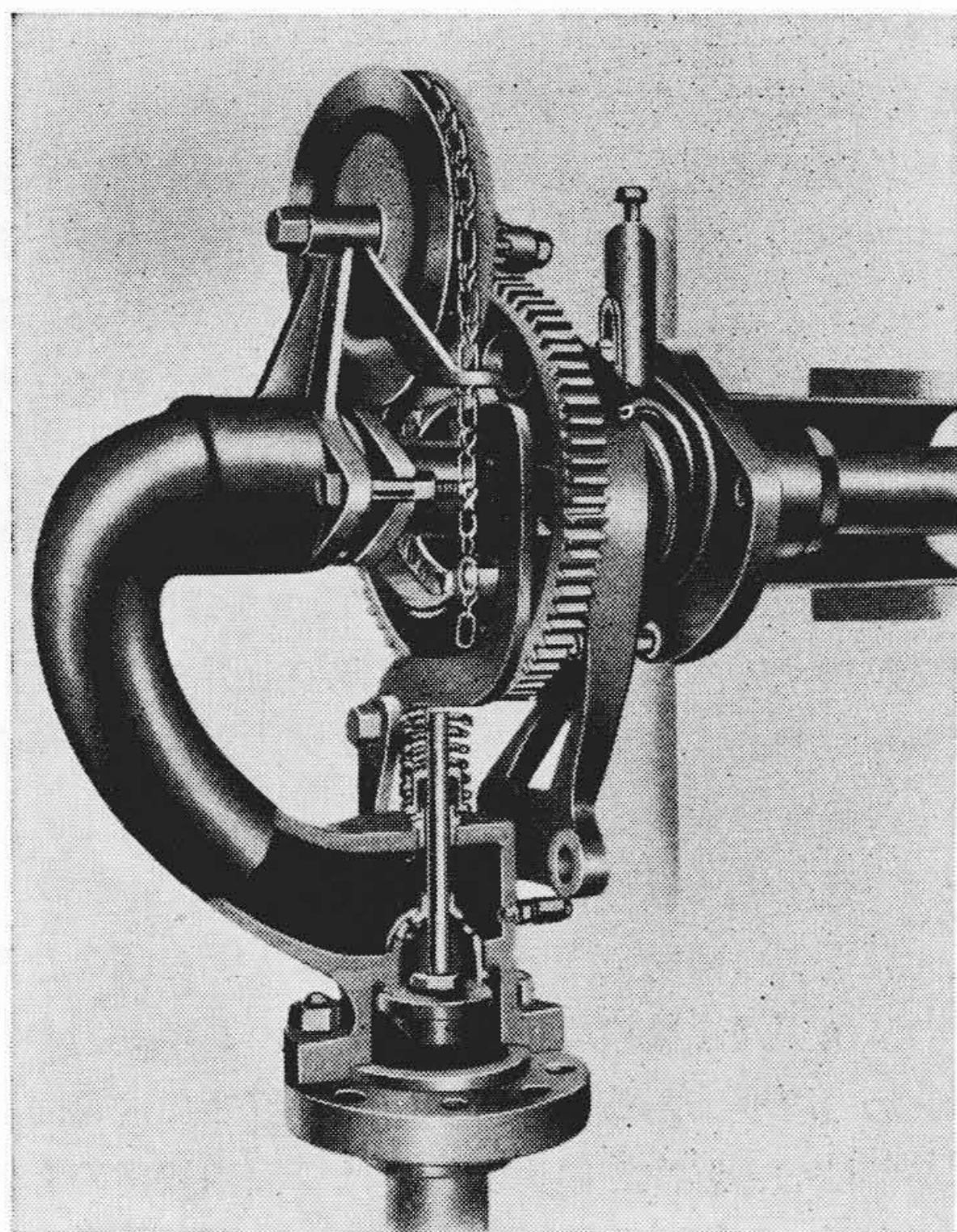
(6) 通 風 抵 抗

汽力発電所の補助動力の中で非常に大きな割合を占めるものに誘引通風機の駆動動力があり、この動力の低減はきわめて肝要である。セメント廃熱汽罐では管面にダストが堆積すると、この通風抵抗は管面清掃後の2倍近くに増加することがあり、誘引通風機の駆動動力をかなり増加させる。したがってダストの附着し易いところでは管のピッチを大きくし、管の配列も可及的通風損失を減じるように考慮し、煙道は極力屈曲部を少くして簡略化することが望ましく、この損失増加は誘引通風機の計画当初から考えねばならない問題である。



第7図 日立セメント株式会社納 25.8 t/h 日立三胴型廃熱汽罐





第 8 図 ダイヤモンド G9A 型 スートブロワ

〔IV〕 セメント廃熱汽罐の一例

第 7 図は最近日立セメント株式会社に納入したセメント廃熱汽罐を例示するもので、本汽罐について説明する。汽罐仕様は下記の通りである。

- 数 量..... 1 罐
- 型 式..... B & W 三胴型廃熱汽罐
- 蒸 発 量..... 25.8 t/h
- 蒸気圧力...(於過熱器出口)... 28 kg/cm<sup>2</sup>g
- 蒸気温度...( " )... 425°C
- 給水温度...(於節炭器入口)... 40°C
- 加熱方式..... セメントロータリキ  
ルン廃ガス
- 通風方式..... 誘引通風方式
- 汽罐効率..... 75%

本汽罐は日立製作所と B & W 社との技術提携によつ

て製作したセメント廃熱汽罐で、提携以前のものより大いにその型式が異つている。すなわち従来は汽胴、水胴、蒸発水管などは汽罐鉄骨より吊り下げていたのであるが、本汽罐では水胴を基礎の上に設けた罐台に乗せ、汽胴は蒸発水管によつて支えられている。こうして汽罐本体の支持方法を変えることによつてその構造が簡略化せられている。

過熱器前部に前置水管を設けて過熱蒸気の温度特性に改良を加え、同時に過熱器に附着するダストを軽減させていることは勿論であるが、汽罐各所に堆積するダストの清掃には細心の注意を払い、いかに汽罐の連続運転を可能ならしめている。ランシングホールを随所に設け、要所要所にはスートブロワを設けるなどがそれである。休罐時の清掃を容易ならしめるためには各所にマンホールを設け、各ホップは特にその勾配を大きくしてダストの排出を容易ならしめ、各部の熱膨脹に対しても細かい考慮をはらつている。第 8 図は本汽罐に使用したスートブロワを示す。

〔V〕 結 言

以上セメント廃熱汽罐について概説したのであるが、この種の汽罐の計画設計に当つては廃ガスの特殊性、特にダストの諸問題を熟知しておかなければならない。

また最近の高温、高圧、大容量の汽罐設備においては自動制御が著しく発達している反面、この種の汽罐では比較的その応用が立遅れているごとく見受けられる。運転管理の合理化、維持費の低減などが特に叫ばれている昨今、キルンの負荷変動に即応した汽罐の自動制御が特に肝要である。

執筆に当り日立製作所日立工場杉沼、高橋両課長から細部にわたつて御教示を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 吉井：セメント回転窯のヒートバランスについて燃料協会誌（昭 17, 11）



HM-2 型  
日立卓上型電子顕微鏡

# 高度の研究を推進する

日立電子顕微鏡

## 分光光電光度計



日 製 産 業 株 式 會 社    日 立 製 作 所