

サイクロンファーンネスによる低品位炭の燃焼

Firing of Low Grade Coals by Cyclone Furnace

岩 崎 泰 三* 菅 原 三 次**
Taizô Iwasaki Mitsugu Sugawara

内 容 梗 概

最近火力発電の傾向として高温、高圧、大容量化に向っておりこれに伴うエネルギー需要もぼう大な量におよびわが国においてはボイラ燃料に低品位炭を活用しようという機運に至っている。高灰分低発熱量のものを燃料とすれば燃焼法、灰処理が問題となる。最近著しい発展をみせているサイクロンファーンネスを用いればこれらの問題は解決され低品位炭燃焼には好都合となる。

日立製作所では最近 3,000 カロリー以下のものまで燃焼させえたのでその研究結果と低品位炭に対するサイクロンファーンネスの特長を述べ、さらに熔融燃焼上重要な灰の熔融、流動性を説明し、スラグおよびその顕熱の利用法の一端についても紹介した。

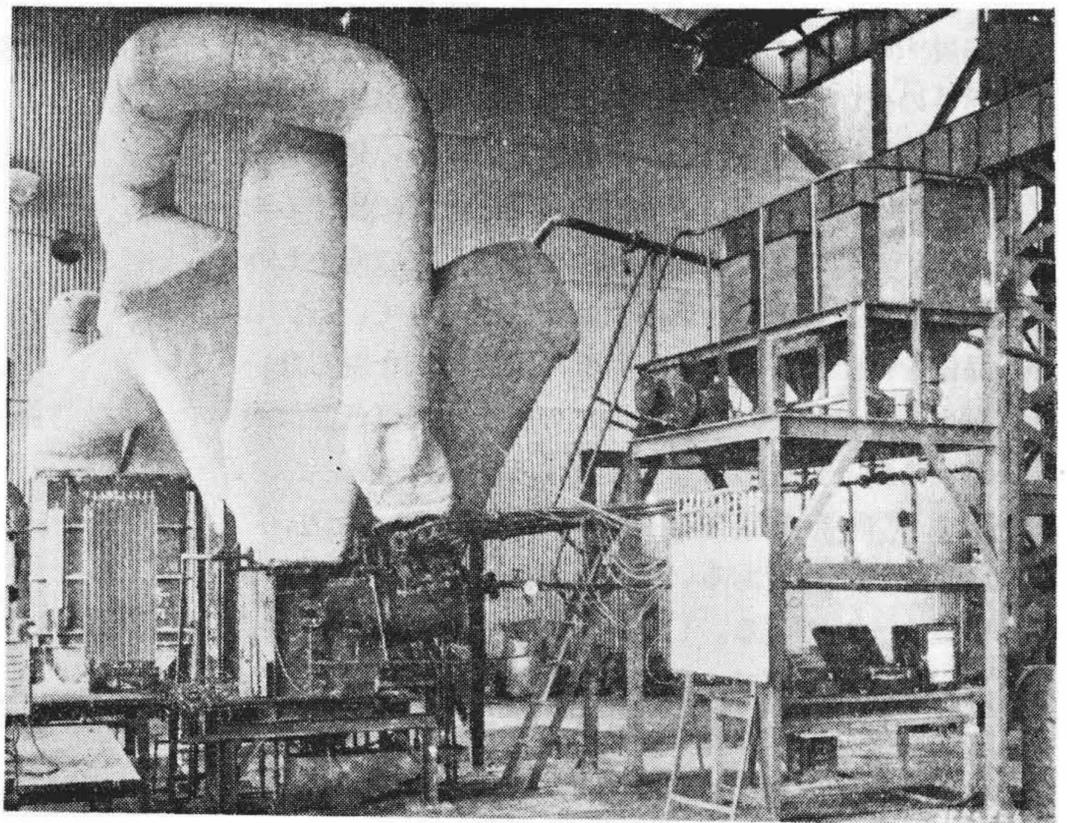
1. 緒 言

火力発電技術の進歩発展には最近特にめざましいものがある。蒸気の高圧高圧化、大容量化、さらに再熱サイクルの採用などでプラント効率が著しく向上している。蒸気の温度圧力に至ってはそのとどまるところを知らずすでに臨界状態に達し、ボイラの最高発展段階と考えられているベンゾン、ズルツァーなどの貫流方式が進歩する状況にある。

同時に発電原価に対して燃料費が相当な割合に達しており、この原価低減については各国ともそれぞれ国情に応じた対策がかなり以前からなされつつあるがエネルギー需要の急速に膨脹する現下、この問題は特に重要で、燃焼方式の改善、低品位炭燃焼の研究が真剣かつ急速に各国で進められているのは当然である。

最高品位の石炭は化学や冶金の需要に当て、動力用には中品位以下の主として褐炭、泥炭、選炭屑など低質燃料を使用し、できるだけ多様なしかも年々品質の低下する燃料を良好かつ安定した燃焼を行わせようということが世界的風潮となってきている。そのためボイラの燃焼は石炭中の可燃物および灰の種々の特性の影響をあまり受けないものでなければならず、石炭としても今日では灰分 50% 以上のものまでたかねばならず、これらの点より種々困難な問題が生じてくる。このような問題に対処するのが灰熔融燃焼であり、これを高度に発達させたのがサイクロンファーンネスによる燃焼法である。

サイクロンファーンネスは有効な新しい燃焼方式として 1940 年アメリカ B & W 社で開発されたもので、アメ



第 1 図 400 mm (16 in) テスト用サイクロン・ファーンネス

リカおよびドイツでいち早く実用化され今日では広く利用されている。サイクロンファーンネスは低品位炭のみを対象とするものではないが、その特性上多種の低品位炭をも有効に処理しうるところに利点があり、わが国のように複雑な燃料事情下に最もふさわしく、その活用に大きい期待がかけられている。

今回、低位発熱量 2,895 kcal/kg という 3,000 kcal/kg 級を下回る低品位炭を第 1 図に示すような試験用サイクロンファーンネスにより燃焼し得たので、ここに研究の一端を紹介し、あわせてサイクロンファーンネスの概要を述べ参考に供する次第である。

2. 低品位炭と低質炭

一概に低品位炭といってもこれを定義づけることはむずかしく、それぞれの国の石炭資源保有量、その質、または需要と供給の均衡上からも異なることになるので明

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立工場

確に定められない。一応の目安としては発熱量の低いものを対象としうるが⁽¹⁾、これとて 4,500 カロリーで低品位炭と考える国もある。わが国の現状では緊迫した石炭事情下にあるため 5,500~4,500 カロリーが十分商業用に供されており 4,000 あるいは 3,500 カロリー以下のものが低品位炭の対象と考えられる。さらに低品位炭燃焼対策で考えねばならぬことは、燃焼技術の促進もさることながら、どの程度までの低品位炭が大量に確保され、経済的に実用化しうるかという問題から低品位炭におのずから利用しうる限界が存在するという点である。

次にいわゆる低品位炭と低質炭について述べよう。乾燥そのほかの処理を加えてもほとんど発熱量の向上がみられない原炭そのものの品質の悪いものを低品位炭と呼んでいる。これに対して西ドイツのザール褐炭とかモスクワ褐炭⁽⁴⁾のように水分を50~60%も含み見掛上きわめて発熱量の低いものがある。わが国でも湿分が20~30%の沈澱微粉炭にも見られるが、乾燥そのほかの処理で含有水分を除けば中品位、高品位の高発熱量炭に属するものがある。このように乾燥処理によって品位の向上しうるものを低質炭と呼び、低品位炭と区別されている。しかし品位を向上し得たとしても低品位炭の域を脱しない低質炭もあるわけで、ここではこのような低質低品位炭といわゆる低品位炭のみを対象とする。

一般に発熱量の低下とともに灰分は多くなり、3,000 kcal/kg 程度あるいはそれ以下の低品位炭では60%前後含まれている。したがってまず直面しなければならないのは灰処理で、大容量化とともにこの問題は大きくなる。低品位炭を燃焼させること自体に主眼をおくならば、微粉炭および特殊なストーカ燃焼方式である程度解決されているが⁽³⁾、灰分をすべてフライアッシュとして処理する乾式燃焼法では、ぼう大な灰量の捕集とともに伝熱面に及ぼす影響について問題が残されている。この解決策として考えられたのがスラグ・タップ方式による湿式燃焼法であり、さらにそれを発展させたのがサイクロンファーンネスである。灰の大部分を熔融スラグの形で処理する湿式燃焼法では、ただ熔融スラグの持ちさる顕熱があり、灰分60%ではこの顕熱による損失熱量は数%になるので、これを回収する方法を考慮する必要がある。この点については後に述べる。

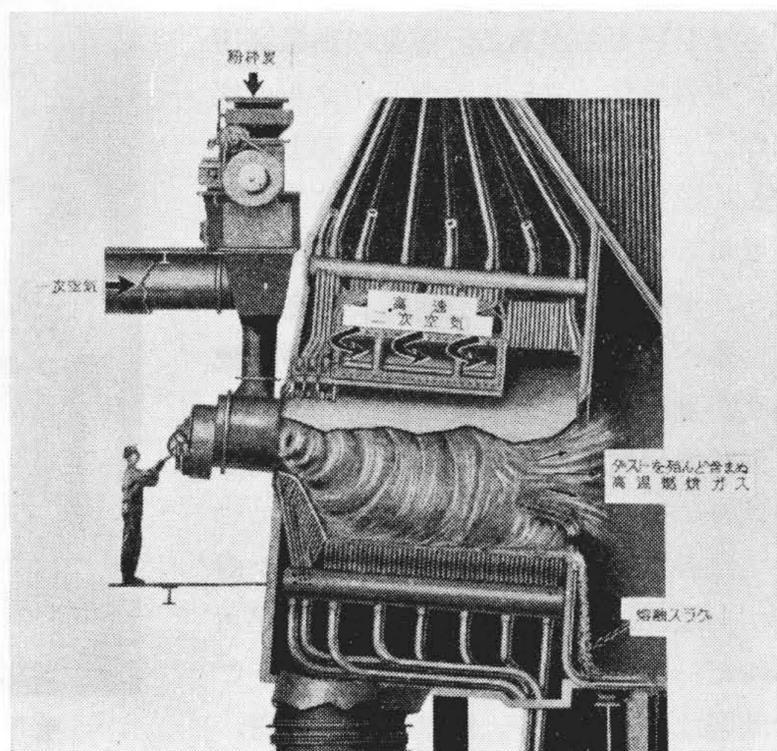
3. サイクロンファーンネス

サイクロンファーンネスについてはすでに紹介されているが^{(1)(2)(5)~(12)}、要

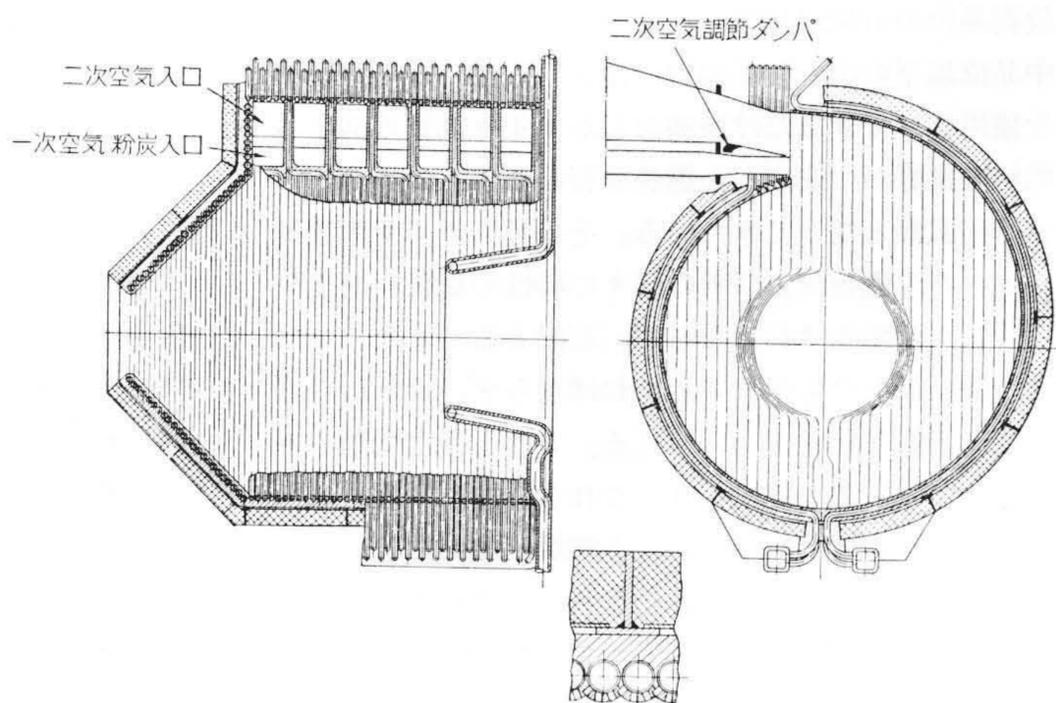
約して簡単に説明しよう。

3.1 サイクロンファーンネスの原理

サイクロンファーンネスはその名の示すようにサイクロンダストコレクタの原理を応用したものでコレクタを燃焼室に置換えたものと考えればよい。簡単に構造を第2、3図に示す。燃焼に必要な燃料粒子と空気はすべて同一の接線方向に送り込み、強い旋回運動を行わせる。これらの送込方法には今までのところ二通りあり、それぞれアメリカ式、ドイツ式と呼ばれている。第2図はアメリカ式の構造を示したもので一次空気と粉碎炭は円錐部の頂点から接線方向に同時に送込される。二次空気は円筒部から高速度で同じく接線方向に送込し、これらがいっしょになって強力な旋回運動ときわめて良好な混合を行いながら燃焼する。この際強い旋回運動によって生ずる遠心力で燃料粒子が内壁面に分離される。壁面に到達し



第2図 アメリカ式サイクロンファーンネスの構造

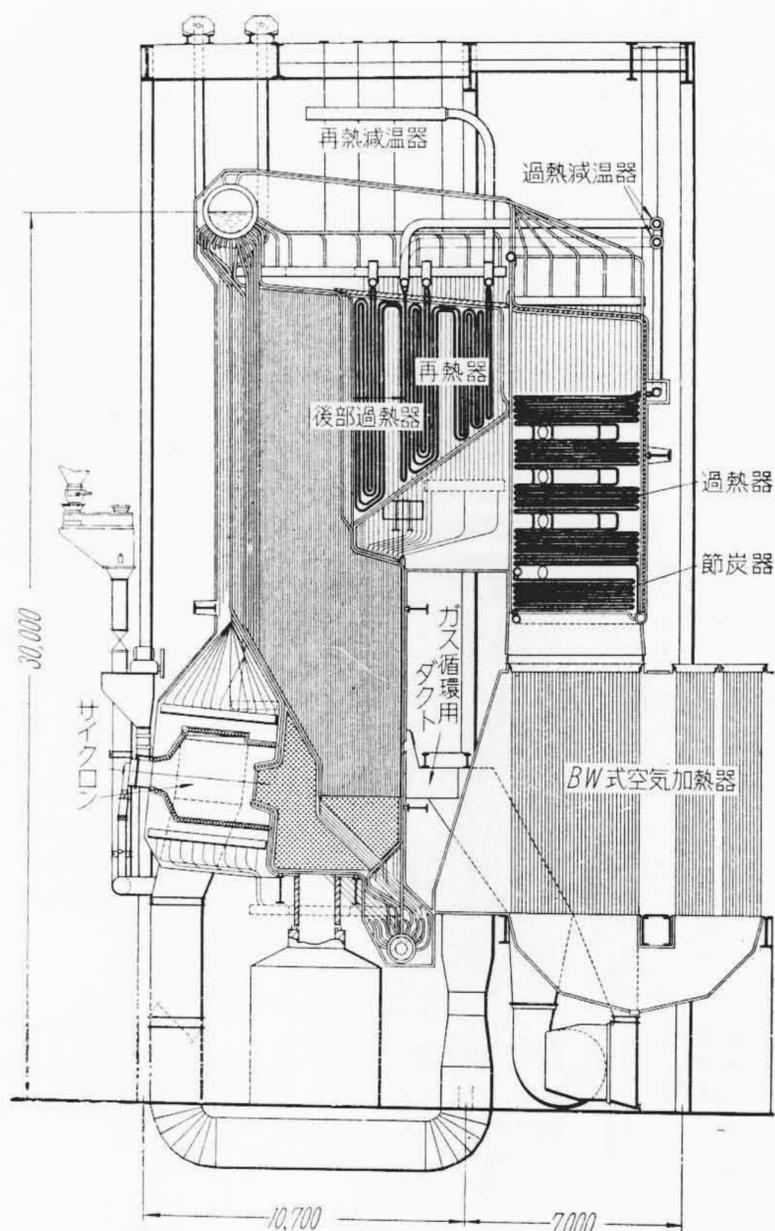


第3図 ドイツ式サイクロンファーンネスの構造

得ない細かい粒子は燃焼室中心部で空気と良く混合されて高温の燃焼を行う。この方式では簡単な燃焼室で強制的に旋回燃焼を行わせる結果、必要な空気量は 1.05～1.10 というきわめて少ない過剰率ですみ、ために燃焼室では理論燃焼温度に近い高温となり灰の大部分は熔融してスラグと化し燃焼室の全内面をおおう形となりゆるやかに流下する。スラグ膜上に捕えられた粒子は、スラグとともにゆるやかに運動するから、高速の旋回気流と接して相対速度が高くとれる。また粒子の滞留時間が長くなることから高温となり、きわめて高い火炉負荷 ($2\sim 6 \times 10^6 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}$) のもとで完全燃焼が行われる。この高い熱負荷のために燃焼室内壁はすべてスタッテッド・ウォール構造とし耐火炉材を保護するが、一方炉材の内表面はたえず固体および流動スラグの膜でおおわれており、このスラグの熱伝導率が小さい ($1 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 程度)⁽¹⁵⁾ ため、この方からも炉材は高温から自動的に保護されることになる。さらに熔融流下したスラグはただちに炉外に取り出される (スラグ捕集量は原炭灰分の 80～90% に達する) ため発生した高温の燃焼ガス中にはほとんどダストを含むことなく清澄なガスが得られるから以後の伝熱面を汚染、磨蝕することもなく、ダストをほとんど含まないため簡単なダスト・コレクタを設置すればよく大きな利点となる。第 3 図はドイツ式サイクロンファーンネスの構造を示したものである。アメリカ式と異なるところは一次、二次空気とも円筒部から同一接線方向に送入する点で、二次空気が一次空気と燃料粒子を抱え込むように送入され、ただちに良好な混合が行われるような構造である。なお送入空気の配分はアメリカ、ドイツ両形式とも同様で一次空気量は 10～15%、二次空気量は 80% 程度となっている。残りの数% は三次空気としてサイクロン円錐部最頂点から一、二次と同一接線方向に送入されるもので、この量を加減することにより、フレーム・フロントおよび燃焼の安定性のある程度調節することができる。三次空気は大部分のドイツ方式で使用されているがアメリカ方式では必ずしも使用していないようである。さらにサイクロン入口での各空気流速は一次が 15～25 m/s、二次空気は 100 m/s 以上を必要とし、200 m/s にしている例⁽¹⁸⁾ もある。燃料粒子はきわめて遅い速度であるからその相対速度はこの絶対速度にほぼ等しい。このことからいかに高い燃焼速度が得られるかがわかり火炉負荷が著しく高くとりうる。

3.2 サイクロンファーンネスボイラの実績

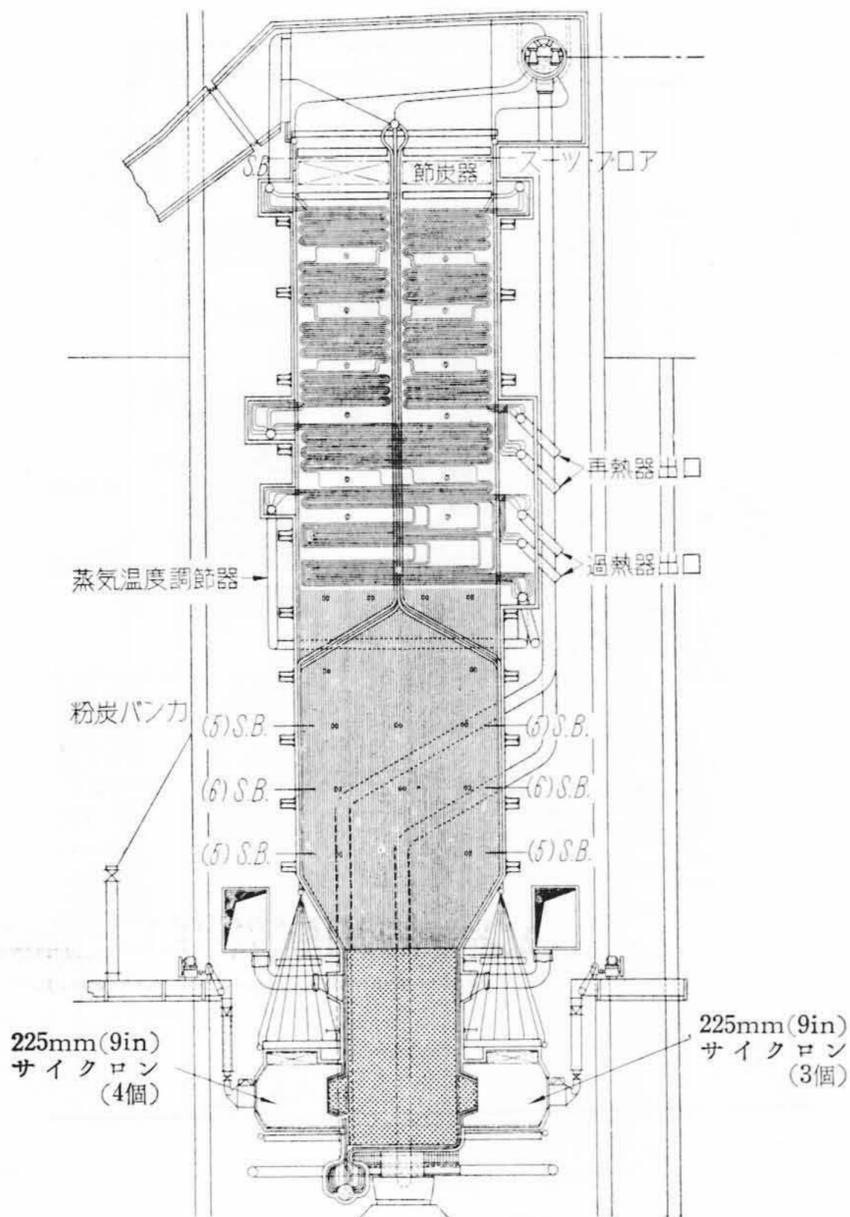
サイクロンファーンネスボイラの実態についてはすでに紹介されているが⁽²⁾、その後各国において急速に増加しつつあり、現在運転中、建設中のものを含めアメリカでは 64 籠、その全蒸発量合計は 23,461 t/h に達しており、ドイツでも 45 籠、全蒸発量 5,133 h/t に達している。高



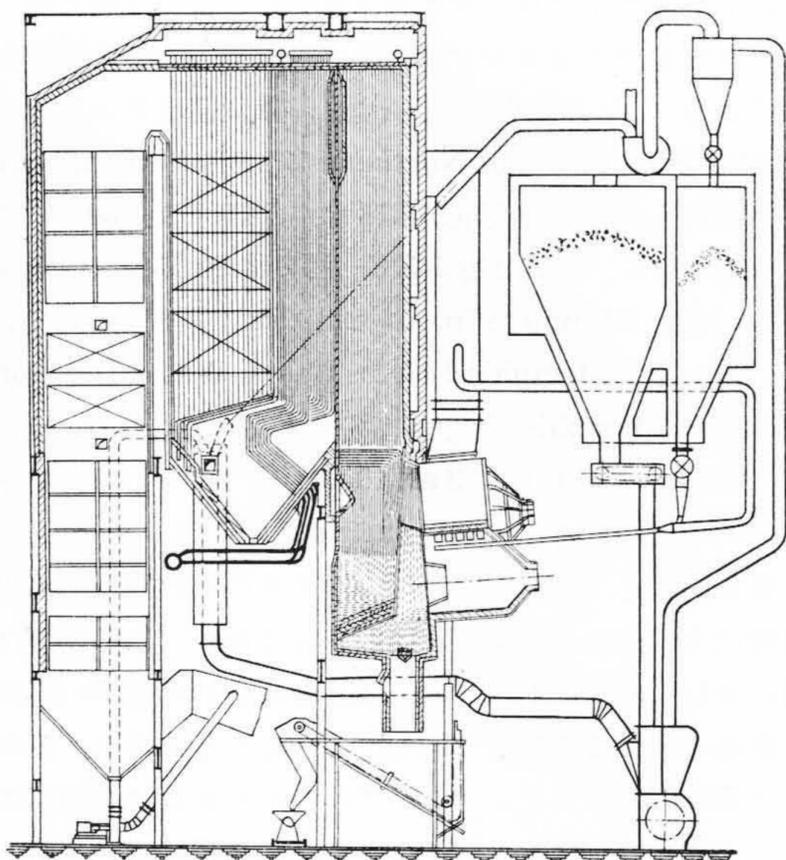
(378 t/h, サイクロン 225 mm (9 in) (径)～4 個)

第 4 図 米国 Waukegan 発電所用ボイラ

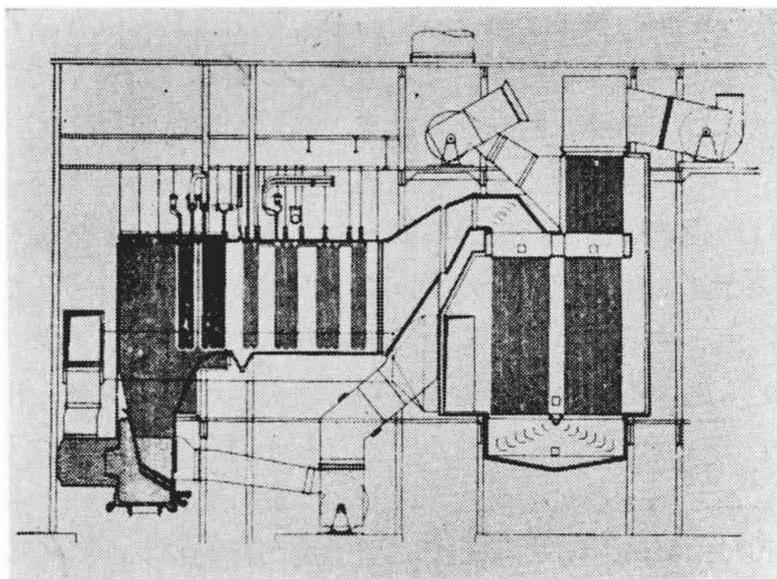
温高圧、大容量化とともに貫流ボイラの進出もめざましく、これとサイクロンファーンネスを組合せる傾向の強いことからサイクロンファーンネスボイラは急激に増加している。二、三の実例を示すと、第 4 図はアメリカの Public Service Co. of Northern Illinois の Waukegan 発電所のもので、蒸発量が 378 t/h、蒸気圧力 130 at、蒸気温度 543°C、再熱温度 543°C、籠効率 88.55% の性能を有し、直径 225 mm (9 in) のサイクロンを 4 個備えている。第 5 図は Memphis Light, Gas & Water Division (米) の Memphis 発電所に現在建設中のもので、蒸発量 910 t/h、蒸気圧力 173 at、蒸気温度 566°C、再熱温度 538°C の仕様を有し、直径 225 mm (9 in) のサイクロンを 7 個備え、これらは大形のボイラのため前壁に 4 個後壁に 3 個それぞれ向合せに取り付けられている。第 6 図に示したのはドイツ Aschaffenburg の発電所の臨界圧貫流ボイラで蒸発量 230 t/h、蒸気圧力 225 at、蒸気温度 535°C のベンゾン・タイプ、サイクロンは直径 200 mm (8 in) のもの 3 個備えている。第 7 図はアメリカの Ohio Power Co. Philo 発電所で最近完成し好調に運転されている超臨界圧ベンゾンボイラで蒸発量 306 t/h、蒸



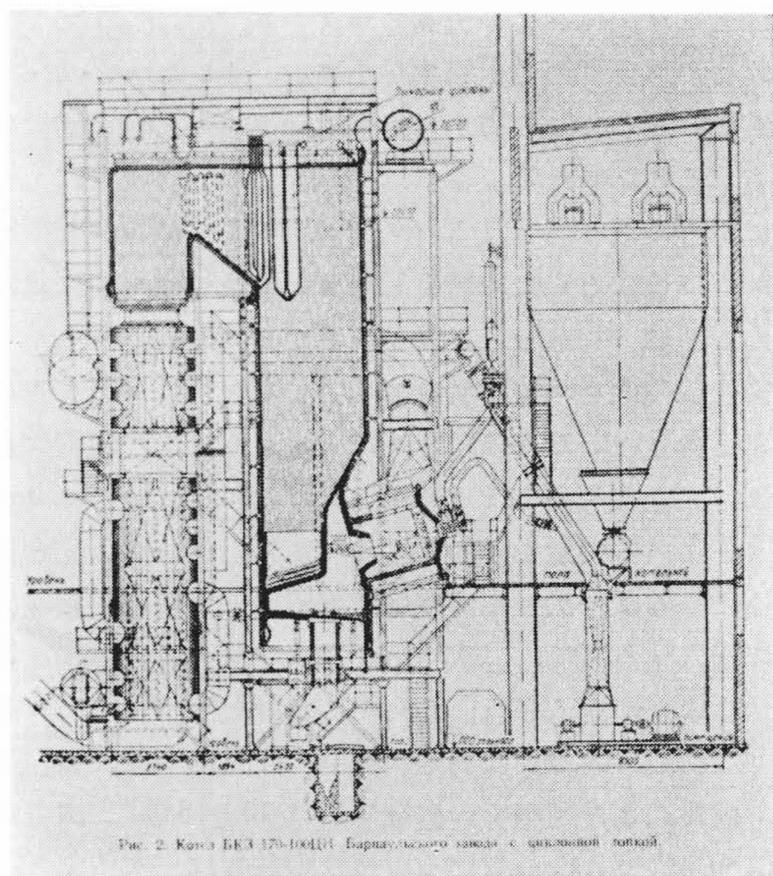
(910 t/h, サイクロン 225 mm (9 in) (径)~7 個)
第 5 図 米国 Memphis 発電所用ボイラ



(230 t/h, 225 at, サイクロン 200 mm (8 in) (径)~3 個)
第 6 図 ドイツ Aschaffenburg 発電所用貫流ボイラ



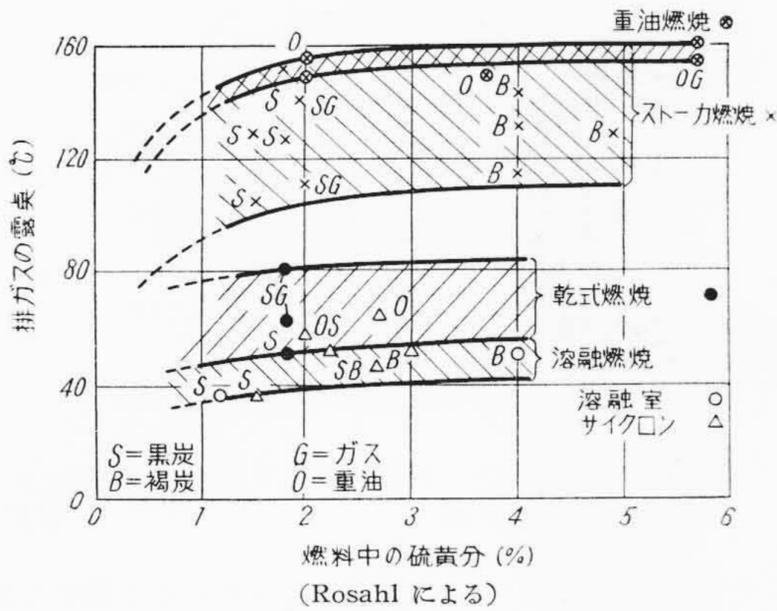
(306 t/h, 385 at, サイクロン 225 mm (9 in) (径)~3 個)
第 7 図 米国 Philo 超臨界圧ベンゾン・ボイラ



(サイクロン径 2,350 mm)

第 8 図 ソ連バルナウリスク BKZ 170-100 ボイラ

気圧力 385 at, 蒸気温度 621°C でさらに再熱を二回行い一次が 566°C, 二次が 538°C の性能を有し, 直径 225 mm (9 in) のサイクロンを 3 個備えている。このほかサイクロンファーンを備えた貫流ボイラの数が多い。ドラムボイラに比べ貫流ボイラでは高温の蒸気および再熱蒸気を得るため大きな伝熱面積を有し, いきおい輻射伝熱面の大部分が火炉に入ってくるため, 燃焼を早く完結させ, しかも発生した燃焼ガスが高温にしてダストを含まない清澄なものであることを必要とする。サイクロンファーンは特質上この要求を全部満たしうるため貫流ボイラにも優位に利用されているように思われる。第 8 図はソ連のバルナウリスク工場で発電に使われている BKZ 170-100 サイクロンファーンボイラで詳細はわからないが直径 2,350 mm のサイクロンを有している⁽¹⁷⁾。大体はドイツ方式を採用していることはうかがわれる。な



第9図 種々の燃焼方式における酸の露点

お同国では極度の低品位炭燃焼に力を注ぎ急速に研究が進められているようである⁽⁴⁾。

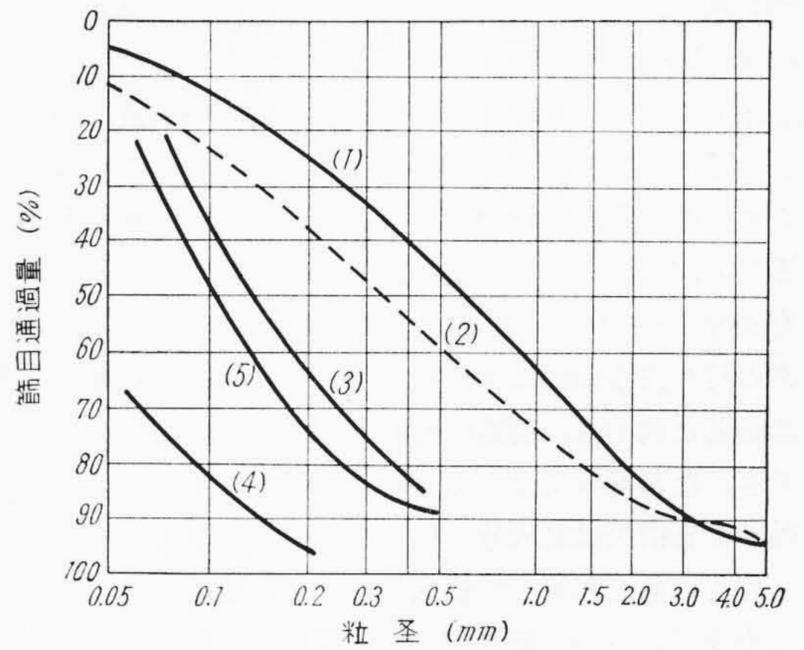
3.3 サイクロンファーンネスの利点

乾式燃焼法のボイラにおいては火焰の温度は灰が熔融しないように低くされるので、火焰の温度を下げる石炭の湿分は少しも障害にならないが火焰温度が低いために灰の一次捕集率が少なく、過剰空気を多くしても完全燃焼を困難にする。さらに硫黄分の多い石炭を燃す場合には燃焼ガス中に SO_3 の生成を増加する傾向があるので、燃焼ガスの露点は熔融燃焼の場合より高くなるから空気予熱器の腐蝕を避けるために排ガス温度を高くする必要があり不経済である。

種々の燃焼方式における排ガスの露点については、すでに Rosahl⁽¹⁹⁾ が求めており第9図に示すようである。同図はガス、重油、黒炭、褐炭の各燃料を種々の方式で燃焼させた場合、燃料中の硫黄分と排ガスの露点の関係を求めたもので、露点が重油燃焼法、ストーカ燃焼法、乾式燃焼法、熔融燃焼法の順で低下することがわかる。したがって湿式灰熔融燃焼法に属するサイクロンファーンネスによる方式では排ガスの露点がほかの燃焼方式に比べて最も低く 40~45°C 程度となる。このことは反対に排ガス温度を下げることができ高いボイラ効率を期待できる利点がある。

また燃焼法の利点として、さきにも述べたように空気と燃料粒子との相対速度がきわめて高くとれ、混合が良好に行われることから 1.05~1.10 という少ない空気過剰率でしかも高温の完全燃焼ができる。

さらにサイクロンファーンネス方式では微粉炭燃焼方式に比べ燃料粒子が粗碎でよい利点がある。低品位炭を使う場合には石炭消費量が増加し、粉砕容量が増すとともに粉砕に要する動力の発電原価に占める割合は大きくなる。微粉炭燃焼方式では 200 メッシュの篩通過量 70~80% の粗粒を必要とし、これには 15.0 kW・h/t 程度の



100 70 50 40 30 20 ドイツ標準篩 (D.I.N)
170 115 100 65 40 タイラー篩

(粒度分布および粉砕所要動力の比較)
(サイクロンファーンネスにおける石炭粒径)

粉砕所要動力 (kW・h/t)

- (1) アメリカのサイクロンファーンネス…………… 1.5
- (2) Diisseldorf サイクロンファーンネス (ドイツ)…………… 3.0
- (3) キール P.S. サイクロンファーンネス (ドイツ)…………… 4.5
- (4) 微粉炭燃焼ボイラ…………… 15.0
- (5) 日立研究所 400 mm (16in) ラストサイクロンファーンネス…………… 5.0

第10図 サイクロンファーンネスにおける石炭粒径

粉砕動力を要するのに対し、ドイツ方式では 200 メッシュ通過量が 20% 前後、アメリカ方式では 10% 程度に押えられており、その粉砕所要動力はそれぞれ 1.5~3.0 kW・h/t 程度で、微粉炭燃焼方式の 10~20% 程度できわめて経済的である。第10図は一例⁽¹⁴⁾ としてこの関係を示したもので、同図に日立製作所日立研究所の 400 mm (16 in) テストサイクロンファーンネスでの実績を付記した。

次に灰処理の点であるが低品位炭ほど大量の灰分を処理する必要上この問題は大きい。乾式微粉炭燃焼ではその全部をフライアッシュとして処理する関係から、その集塵に高効率、大容量の捕集装置を必要とする。一方熔融スラグとして処理することを特長とする湿式燃焼法では、その大部分をスラグ化させ燃焼後ただちに炉外に排出できるため燃焼ガス中に含まれるフライアッシュがきわめて少なくなり、ダストコレクタも小容量、低効率のものでよく灰処理が容易となる。この熔融スラグ捕集量はスラグタップ方式で 50% 程度、サイクロンファーンネスで 80~90% に達する。流出スラグは水で急冷させることにより簡単な粉砕で容易に碎けほぼ均一の粒状となり処理、運搬がきわめて簡略化できる。

また汽罐の占める大きさからみればサイクロンファーンネスの汽罐は燃焼室そのものの大きさが非常に小さくて

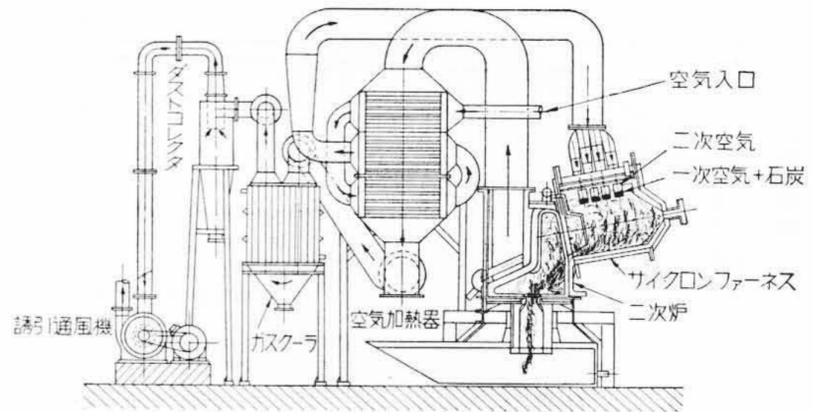
すむゆえ、一般の微粉炭焚汽罐に比して汽罐全体のスペースが非常に節約できる特長がある。

以上のほかにもサイクロンファーンエスの利点は多くあるが、同時にまた多少の難点が考えられる。それはサイクロン燃焼室入口での二次空気速度を 100 m/s 以上にするため、これにある程度の動力を必要とすることと、含有灰分の 80~90% を熔融スラグとして処理するためスラグの持ち去る顕熱による損失がある。高速空気源をうるに必要な動力は、前述の粉碎動力の軽減により十分相殺でき、なお補って余りあるので好都合である。スラグ顕熱による損失は高灰分の低品位炭ほど大きくなる。そのためこの熱を回収して給水あるいは空気の余熱に利用する方法がいろいろ研究⁽¹⁹⁾ されており、あとでその一方法を紹介する。

4. 日立製作所におけるサイクロンファーンエスの研究

日立製作所においては第 1 図に示すごとき口径 400 mm (16 in) のサイクロンファーンエスを備えた燃焼用テストプラントで研究を行っており、さらに実際に即した研究を計画し 120 mm (5 in) 口径のサイクロンファーンエスを目下建設中である。ここでは最近 400 mm (16 in) テストサイクロン炉により低位発熱量 3,000 k cal/kg 以下の低品位炭を熔融燃焼させ得たので、これを中心に日立製作所におけるサイクロンファーンエスの研究の一端を紹介しよう。

燃焼試験に使ったテストファーンエスの外観は第 1 図に示すもので給炭法はビンシステムをとっている。第 11 図はその系統を説明したものである。図からわかるよう



第 11 図 400 mm (16 in) テスト用サイクロンファーンエス説明図

にサイクロンはドイツ式の形態をとっているが簡単な改造によりアメリカ式にも米、独併用式にもなり、いずれの研究もできる構造となっている。

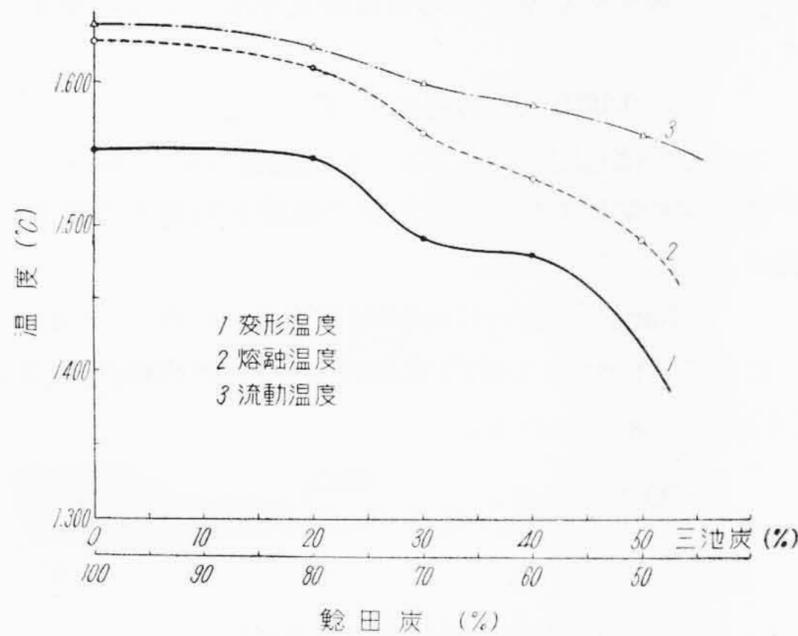
4.1 サイクロンテストプラントによる燃焼試験

燃焼試験に使った低品位炭分析値の一例は第 1 表に示すとおりである。ここに示したのはいずれも九州炭で、鯉田粉炭では低位発熱量 2,895 k cal/kg、灰分 60.10%、灰の熔融温度が 1,630°C という性質をもっている。大君、古賀、吉隅、貝島の各沈澱微粉炭はいずれも低質低品位炭に属し湿分 30% に近いものもあるが、適当な乾燥処理により 4,000 k cal/kg 程度の発熱量を有するものが多い。熔融温度も中には 1,600°C をこえる高いものもあるが、平均して 1,500°C あるいはそれ以下のようなものである。これらの低品位炭、低質低品位炭を含めていずれもサイクロンにより熔融燃焼させることができた。

サイクロンファーンエスによる燃焼方式ではその特性上灰を熔融スラグの形で処理するため灰熔融温度の低いほど好ましく、もしサイクロン燃焼に困難な燃料があれば

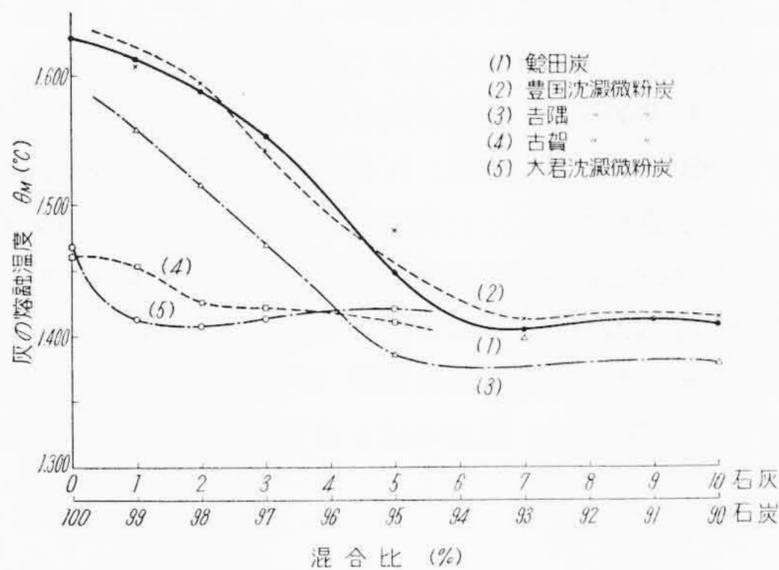
第 1 表 試 験 炭 の 性 質

No.		1	2	3	4	5	6
試 料 炭 の 銘 柄		鯉 田 粉	大 君 沈 澱 粉	古 賀 沈 澱 粉	吉 隅 沈 澱 粉	貝 島 沈 澱 粉	三 池 並 粉
工業分析	低位発熱量 (k cal/kg)	2,895	4,030	4,070	3,400	4,100	6,750
	湿 分 (%)	1.91	25.93	28.84	14.70	22.50	—
	水 分 (%)	3.29	4.25	4.25	4.52	2.61	1.40
	灰 分 (%)	60.10	37.75	38.65	47.54	40.89	20.80
	揮 発 分 (%)	19.51	25.90	25.65	24.03	27.59	28.85
	固 定 炭 素 (%)	17.10	32.10	31.45	23.91	28.91	48.95
灰の分析	Ig. Loss (%)	0.25	0.20	1.85	—	—	1.20
	Si O ₂ (%)	60.50	59.30	58.40	57.20	59.00	46.40
	Fe ₂ O ₃ (%)	4.59	8.14	4.48	5.29	6.78	10.30
	Al ₂ O ₃ (%)	27.51	22.86	26.02	29.31	21.72	19.45
	CaO (%)	3.08	5.14	5.00	4.06	8.51	10.37
	MgO (%)	0.90	0.90	1.31	0.99	0.72	1.68
	SO ₃ (%)	0.34	1.71	1.46	1.37	1.37	7.84
	Na ₂ O+K ₂ O (%)	—	—	—	1.61	1.85	2.99
灰の熔融性 (酸化気中)	変形温度 (°C)	1,553	1,363	1,366	1,573	1,340	1,230
	熔融温度 (°C)	1,630	1,471	1,463	1,620	1,419	1,250
	流動温度 (°C)	1,640	1,516	1,495	1,630	1,425	1,280
1,427°C におけるスラグ粘度 (ポアズ)		—	1,210	2,080	—	860	170
粘度 250 ポアズになる温度 (°C)		1,665	1,542	1,578	1,580	1,520	1,395



(鯨田炭に三池炭を混合させた場合)

第12図 混炭による灰熔融性の変化



第13図 石灰混入による灰熔融性の変化

混炭あるいは融剤として石灰石か酸化鉄を添加することにより適性炭となる。このように熔融温度の低下を考慮すれば低品位炭を含めさらに適用炭の範囲を広めることができ、サイクロンファーンネスが広く活用しうる根拠ともなっている。第12図はその一例として鯨田低品位炭に三池炭を混入させた場合の灰熔融性の変化を示し、第13図は鯨田低品位炭と諸種の低質沈澱微粉炭に石灰石(CaO)を添加した場合の熔融温度の変化を示し、いずれも混炭および融剤添加の影響が強くてい

融燃焼を行わせることを特長とするサイクロンファーンネスでは当然炭灰の熔融温度と熔融したスラグの粘度が著しく影響する。そのためアメリカではサイクロン燃焼における適性炭の限界を決める方法として、この二要素を主体としており、ある一定温度での灰の粘度を基にしている。たとえば適性炭の限界としてスラグ粘度が250ポアズになる温度が $1,427^{\circ}\text{C}$ 以下、高くても $1,480^{\circ}\text{C}$ 以下なることを要し、かつ灰の熔融温度が還元気中にて $1,480^{\circ}\text{C}$ 以下でなければならないとしている。しかしこ

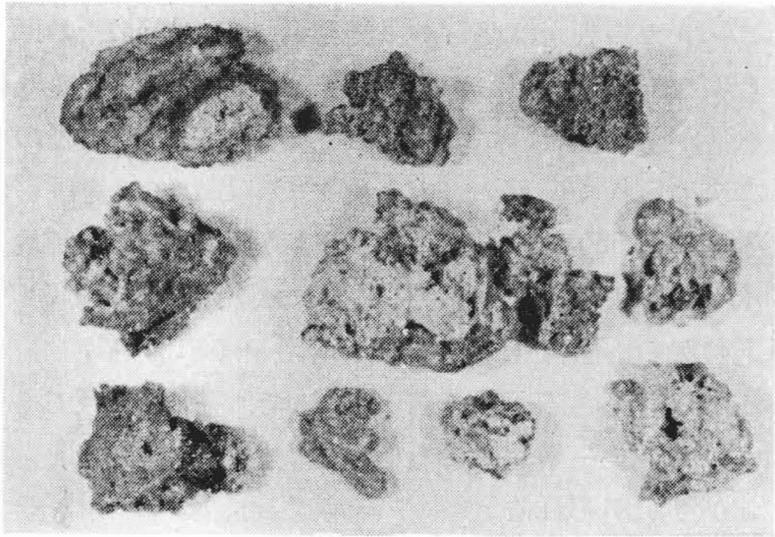
のアメリカの判定は明らかに発熱量 $4,500\text{ kcal/kg}$ 以上のものを対象とし、しかもサイクロン燃焼室壁での輻射吸熱量が全入熱量の10~15%あるものという前提のもとに決められている。一方ドイツでもこれまで炭灰の流動温度が $1,550^{\circ}\text{C}$ 以上は不適當と判定されていたが最近ドイツで発表された文献⁽¹⁹⁾によれば「現在では $1,600^{\circ}\text{C}$ 以上の灰の溶融点をもつ石炭を溶融ボイラで処理し得ているから訂正さるべきである」としており、ドイツでもサイクロンファーンネスによる低品位炭燃焼対策の発展したことがうかがわれる。

アメリカではかなり余裕のある基準をたてているようであり、高灰分、高熔融温度の低品位炭をサイクロンファーンネスで燃焼させるためには次のようなことを考慮しなければならない。

- (1) サイクロン燃焼室壁から外部への熱損失をできるだけ少なくし火炉負荷を増す。
- (2) 空気過剰率をできるだけ少なく、1.0~1.1の範囲に押し燃焼温度を向上させる。
- (3) 一次空気量をできるだけ少なくし、二次空気量を増し、サイクロン燃焼室入口における二次空気流速をできるだけ高めると同時に、二次空気の温度を熱交換器材料の許す最大限まで高める。
- (4) 給炭方法を考慮し、空気との混合を極力良好にすると同時に原炭湿分をできるだけ除き焚込カロリーを向上させる。

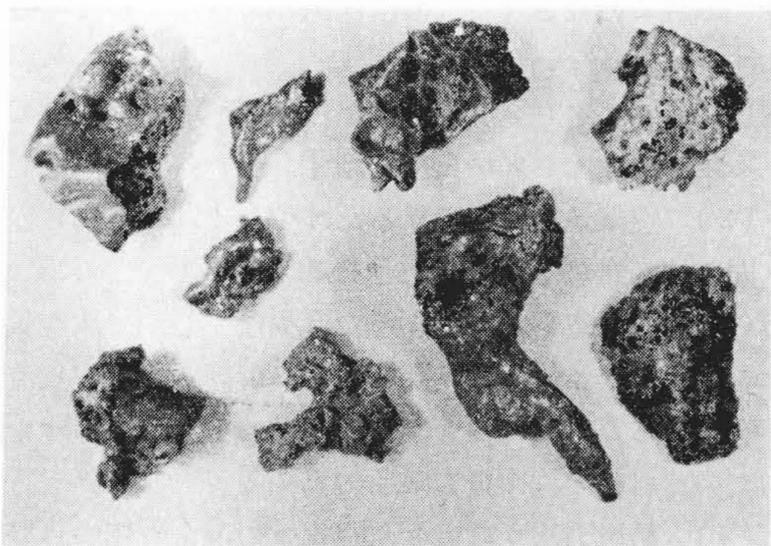
以上のほか、原炭粒度をも考え合わせ、火炉負荷と燃焼温度を向上させながら燃焼の安定性に注意し試験した結果いずれも良好に熔融燃焼させることができた。第14、15、16図は流出した熔融スラグ(水冷したもの)を示したもので、いずれも手で簡単に砕けほぼ均一の粒状となる。ただ発熱量 $2,895\text{ kcal/kg}$ の鯨田炭のみについてはスラグが粘稠でほかの試験炭に比べ炉内流動状態は良好とはいえなかった。しかし石灰石を3%添加した場合は第15図からも推定できるようにスラグの流出は良好であった。

このように一連の試験において火炉負荷と燃焼温度を高めることに注意した結果、サイクロン燃焼室出口での燃焼ガス温度を理論燃焼温度に近づけることができ、所期の目的を達成した。しかし一面において耐火炉材の選択が問題で、サイクロン炉用としては従来クローム系統の炉材が使われていたが、さらに高アルミナ質(Al_2O_3 を75%含有)のコランダム系統、およびシリコンカーバイド系統のものを試験し高負荷を要求される低品位炭燃焼を行い得た次第である。一方において難熔融性のものでも石灰石などの添加で灰熔融温度を下げれば従来のクローム質の炉材を使用できることはいうまでもない。



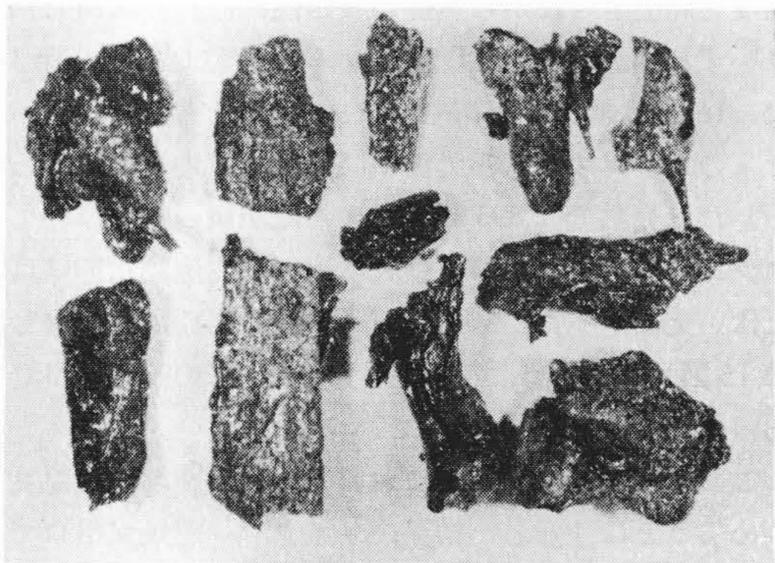
(色: 白灰色)

第14図 九州鯉田低品位炭の流出スラグ (水冷)



(色: 黄色味がかった灰色, 光沢あり)

第15図 九州鯉田低品位炭+石灰 (CaO) 3% 流出スラグ (水冷)



(色: 黒味の勝った灰色, 光沢に富む)

第16図 九州古賀沈澱微粉炭の流出スラグ (水冷)

4.2 スラグ粘度の測定と灰の熔融性

サイクロンファーンネスのように熔融燃焼を行わせるものでは灰の熔融性と熔融スラグの粘度は絶えず問題となり重要な要素であることは前述のとおりである。

スラグ粘度についてはアメリカにおいてはすでに研究されており、たとえば Reid & Nichols⁽¹³⁾ は種々の合成灰を回転振動式粘度計を使って測定した結果、灰の分

析値からスラグ粘度を求める実験式を次のように提案している。

$$\eta - 0.1614 = 0.0008136 t - C \dots\dots\dots(1)$$

ここで η は粘度 (ポアズ), t は温度 ($^{\circ}\text{C}$), C は各スラグ特有の常数である。また灰の組成と粘度との関係を次のように示している。

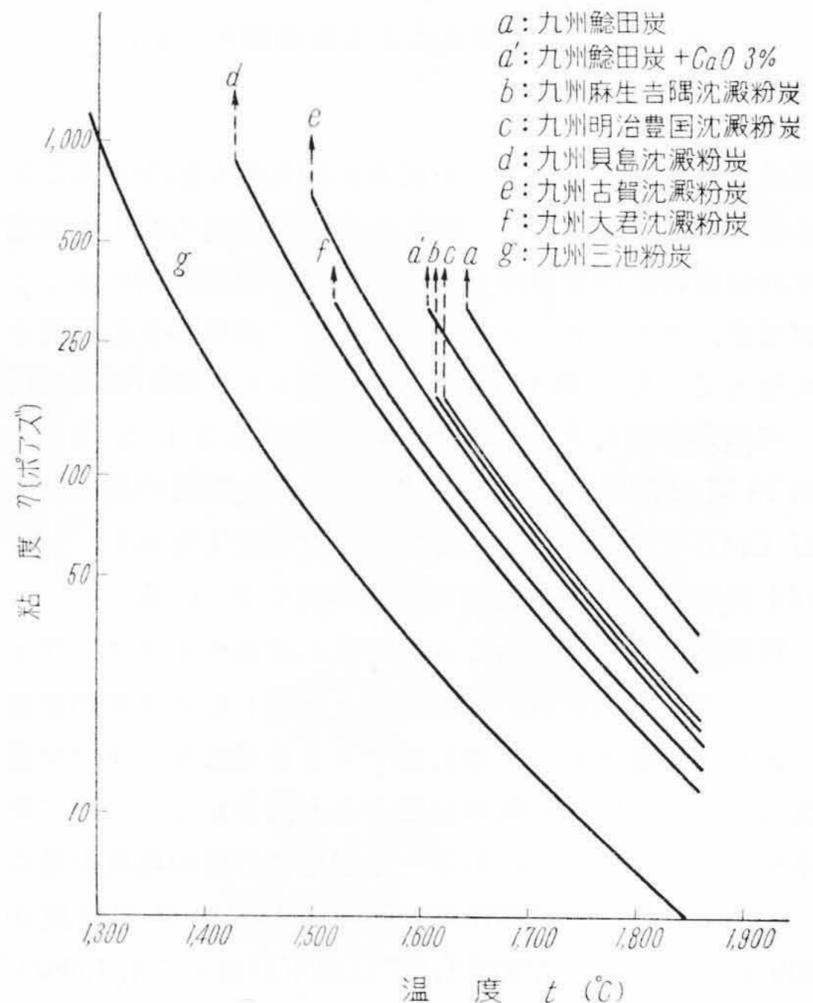
$$\log_{10}(\eta_{1,427} - 1) = 0.066 \text{SiO}_2^* - 2.38 \dots\dots(2)$$

ここで $\eta_{1,427}$ は $1,427^{\circ}\text{C}$ における粘度で SiO_2^* は(3)(4)式から求められる。

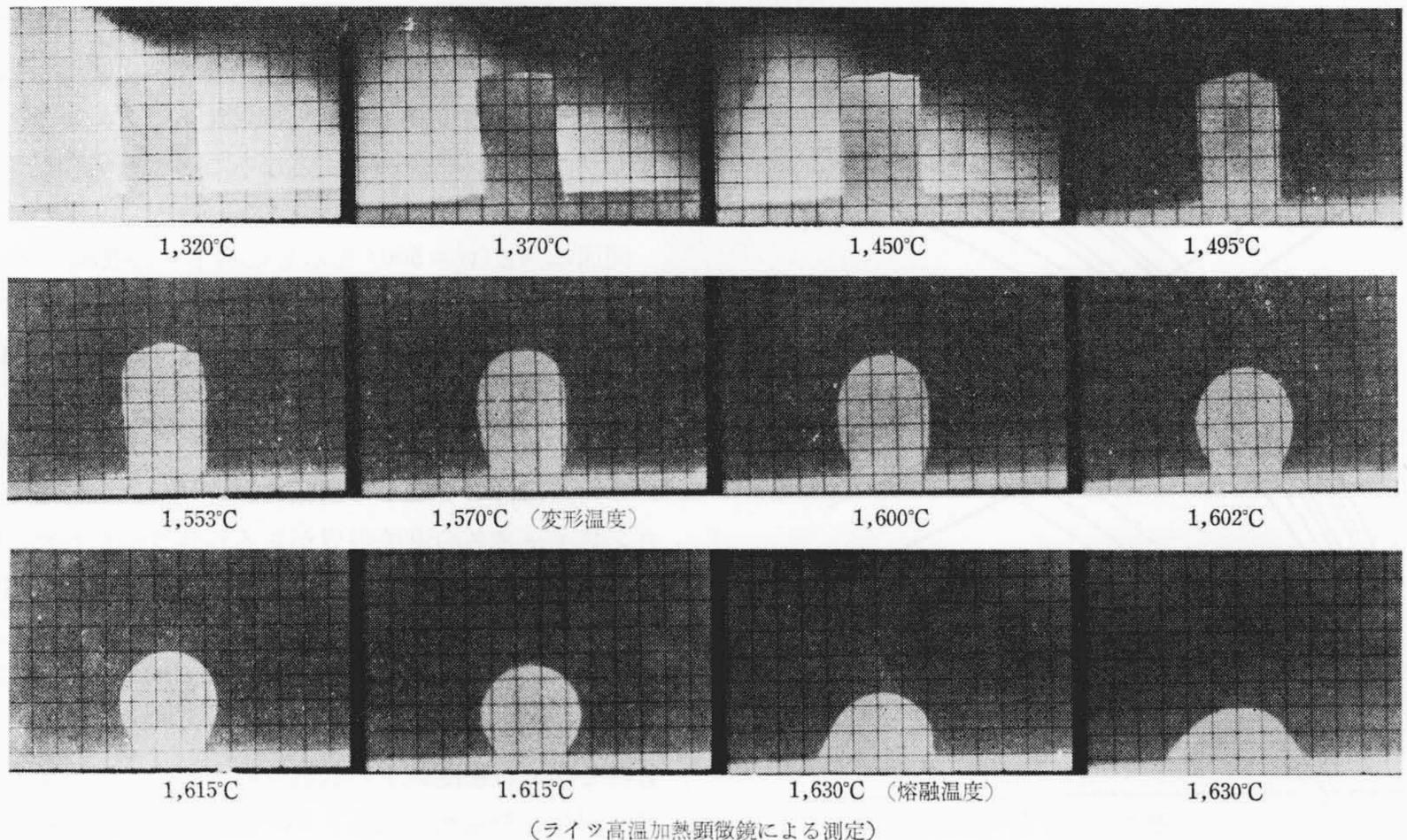
$$\text{SiO}_2^* = \frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Eq} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}} \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Eq} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.11 \text{FeO} \dots\dots\dots(4)$$

ただし(3)式の適用範囲は $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1 \sim 4$, $\text{MgO} \leq 3\%$, $\text{CaO} \leq 10\%$, アルカリ質 $\leq 2.5\%$ としている。この結果はあくまで合成灰によるものであり実際には(3)式の成分以外にも多くの成分が含まれており、石炭の構成条件、夾雑物質にも影響されるであろうし、同じ SiO_2 でもガラス質、石英質ありでNicholsの式をそのまま使用することは問題である。したがって日立研究所においても実際に粘度測定を行い、回転式高温粘度計 (常用 $1,600^{\circ}\text{C}$) により約2年間、北海道、九州、常磐、宇部を初め各地区の日本炭50種につき測定した結果、上記Nichols提案の式を若干補正した数式を求め



第17図 各種熔融スラグの粘度特性



第18図 九州 鯉田低品位炭の灰熔融性

得た。ただし混炭あるいは石灰添加の場合は別に考慮を必要とし、さらに例外的に特種な銘柄炭もあるからこの点注意すべきである。

第17図はこの実験結果に基づき今回試験した低品位炭の粘度を推定し、温度との関係を示したものである。

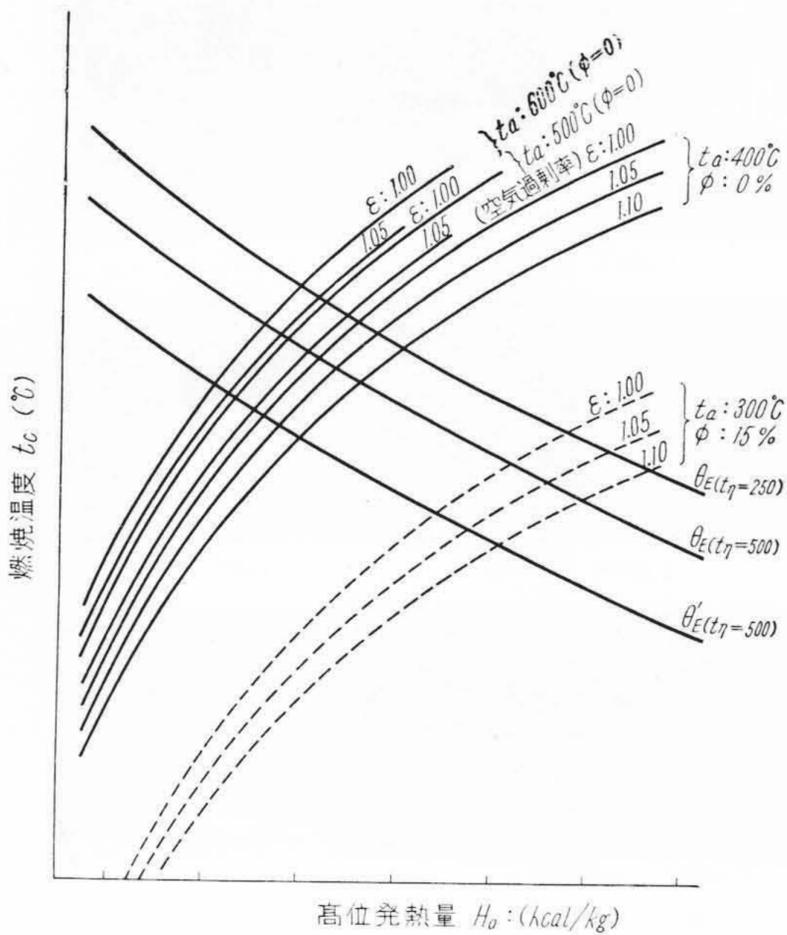
さらに灰の熔融性については雰囲気による影響が強いので、灰熔融温度の測定はすべてライツ高温加熱顕微鏡(最高測定温度 1,800°C)を使用した。これでは雰囲気を自由に換えられる上に写真撮影ができるので測定に個人差がなく精密に観察しうる。第18図は同装置を使って九州鯉田低品位炭の熔融性を測定したものである。なお測定した雰囲気は酸化気中であるが、サイクロン燃焼室では空気過剰率が 1.05~1.10 と少なく、半還元雰囲気となっているためこの雰囲気の熔融温度に及ぼす影響については研究中である。日本炭では一般に酸化気中の方が還元気中より約 100°C 高くなるようであるが、銘柄によりその性状を異にするので一概にはいえない。ドイツなどでは反対に還元気中の方が高くなるものもあるようである。なおアメリカ B & W 社の W. G. Maskell の発表⁽¹⁶⁾によれば、酸化気中の方が高くその差は灰分中の Fe 含有量の増加とともに大きくなるとしている。

灰の熔融性と流動性との関係は複雑で明確に表わし得ない現状であるが、ある程度の傾向はある。つまり温度と粘度との関係は第17図に示したようにはっきりとした傾向をもっている。同図で a, b 曲線のように熔融温度 1,600°C 以上の高いものと、d, e, f 曲線に示した熔融温度が 1,450°C 程度の比較的低いものについてみる

と、曲線が急に立上っている流動温度付近の粘度が a, b では低く、d, e, f では高いことがわかる。したがってサイクロン燃焼で必要とする 250~500 ポアズの粘度となるには、熔融温度の高いものほど、同温度より少し昇温させるだけでよく、かえって熔融温度の低いものではかなり昇温しなければならない。このことは灰熔融性の観察からもわかり、第18図の鯉田炭の場合に例をとれば変形温度から熔融温度になるまでに要した時間に比べ熔融温度から流動温度に移る過程がきわめて早くわずか 2~3 秒にして流下し記録が困難であった。このことは灰流動性が良好なことを示すものである。灰熔融温度の高いほど流動性が良くなる傾向は、サイクロンファーンで低品位炭を燃焼させる場合いっそう有利となり、むやみにガス温度を上げることなく良好な熔融燃焼を期待することができる。

5. サイクロンファーンの特性

熔融燃焼を特長とするサイクロンファーンでは灰の熔融および流動性が重要であることはすでに述べたとおりで、その利点も紹介したが、灰を熔融スラグとして処理する関係からこれに伴う燃焼室の条件が問題となる。サイクロンファーンはその燃焼方式から火炉負荷および燃焼温度をきわめて高くしうると同時にボイラ負荷の広範囲の変動に対しても安定した燃焼を行うことができる。たとえば火炉負荷が増加した場合は当然ながら火炉出口ガス温度が上昇する結果、燃焼室内壁をおおうスラグ層の温度も上り流動性を増すため層の厚さは減少す



第 19 図 サイクロン燃焼方式の一般的特性

る。反対にボイラ負荷が減少し火炉負荷が少なくなると当然燃焼ガス温度も低下するが、同時に炉内スラグの温度降下を伴い流動性の減少から層厚を増す。しかし熱伝導率の少ないスラグ層厚の増加とともに熱吸収量が制限され火炉出口ガス温度の低下をおのずから抑制する特性をもっている⁽²⁾。このようにボイラ負荷の変動に対しておのずから熱吸収量を調節し燃焼ガス温度の平衡を保ちうるが、一般に灰熔融温度の高い低品位炭をサイクロンで燃焼させる場合にはガスおよびスラグの温度に制限がある。そのため発熱量の低い灰熔融温度の高い低品位炭を燃焼させるには空気余熱温度を極力上げ、空気過剰率を減少させる一方火炉負荷、燃焼ガス温度を低下させないように火炉での熱吸収量をできるだけ制限することが必要となる。

第 19 図はこれらの燃焼室での条件を考慮してサイクロンファーンでの燃焼特性を説明したもので日本炭に対する一般的傾向を示している。図で右上りの曲線群はサイクロン燃焼室での輻射吸熱量(φ)と、空気余熱温度(ta)、空気過剰率(ε)をパラメタとし、スラグの持ち去り顕熱をも考慮して発熱量(Ho)と燃焼ガス温度(tc)の関係を示し、これから輻射吸熱量を 0 に抑制すれば低発熱量のものでも高い燃焼ガス温度の得られることがわかる。さらに右下りの曲線群は炉内流動スラグの粘度を 250 ポアズ、500 ポアズにするに必要なサイクロン燃焼室出口ガス温度(θE)を示している。スラグ粘度 250 ポアズの場合は吹米の判定からも、また筆者らの実験からも流出状態はきわめて良好でサイクロンによる熔融燃焼は

十分可能となる。さらに 500 ポアズの粘稠さでも二次炉の熱吸収量を制限し、炉外へのスラグ流出経路を短くし流動スラグの温度降下を極力抑制することにより、これまたサイクロン燃焼が可能となることは研究の結果確かめ得たところである。

同図に $\theta_E'(t_\eta=500)$ と示した右下りの曲線は $\theta_E(t=500)$ の曲線と同じく流動スラグの粘度を 500 ポアズにするに要する燃焼室出口ガス温度を示すが同一発熱量の低品位炭でも銘柄により灰の熔融、流動性が異なるのが普通であるから、このばらつきを考慮して幅をもたせた。この両曲線群の交点から諸種の燃焼条件におけるサイクロンファーンの燃焼限界がある程度うかがわれ、輻射吸熱量を 0 におさえ空気温度を上昇させれば燃焼可能の限界を著しく低品位炭まで押広めることができることがわかる。

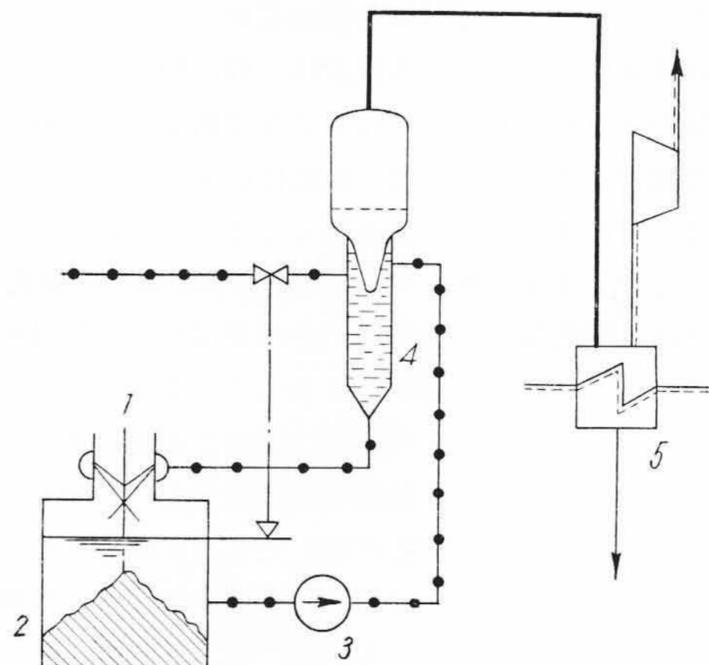
第 19 図に示した一般的特性はすべて単味銘柄によるもので、この程度以下の低品位のものでも混炭あるいは石灰石などの融剤添加により、発熱量の向上、灰熔融温度の低下を考慮すれば、さらに低品位炭の燃焼範囲を拡大させることができる。

6. スラグ顕熱の回収とスラグの利用

サイクロンファーンのような熔融燃焼を行わせる場合原炭灰分の 80~90% を熔融スラグの形で炉外に取り出すためスラグの持ち去る顕熱による損失を加味しなければならない。高灰分の低品位炭を燃焼させる場合、特にこの問題は重要である。

したがって灰分の多い低品位炭を熔融燃焼させる場合スラグの顕熱を回収することを考えることは熱経済よりみて有利である。

スラグ顕熱を回収して給水および空気の予熱に利用しようという研究はチェコスロバキヤ、ドイツなどで行



第 20 図 熔融スラグ顕熱の一回収法

われているが⁽¹⁹⁾、第20図はその系統を示すものである。炉から排出した高温スラグ1はただちにスラグタンク2で水冷されると同時にスラグの顕熱を回収し暖められた水は循環ポンプ3によって蒸発器4に導かれ、ほぼ90°Cで真空蒸発し、蒸気は熱交換器5に送られて給水または燃焼用空気を加熱する。この方法によればスラグ顕熱の50%以上を回収でき熱経済上有効である。

熔融スラグを急激に水冷固化すれば簡単な粉砕で均一な粒状物質が得られることからセメントに混ぜて建築、ダム工事に使用し良好な耐熱、耐振性を得た例もあり、わが国でも適量のCaOを添加した熔融スラグに少量の刺激剤を混合粉砕することにより通常のポルトランドセメントに劣らぬ強度をもつセメントを作る研究がなされ成果をあげている例⁽²⁰⁾もある。

7. 結 言

最近急速に増大しつつあるエネルギー需要とこれに見合う石炭事情から発電などの動力源として低品位炭を活用しようという風潮が世界的に広がっており、種々な燃焼対策が進められている。この情勢はわが国においても例外でなく、むしろさらに緊迫したものがあるようである。

低品位炭燃焼対策の一環として、最近特に目ざましい進展をみせているサイクロンファーンネスによる研究を紹介し、この多くの利点を有する燃焼方式により日立製作所において発熱量 3,000 kcal/kg 以下の低品位炭を燃焼させ得た試験結果を述べた。

さらに低品位炭のものを処理すべく研究を続けているが、この原理的にもすぐれた燃焼方式を有し、灰処理の容易な点、さらに広範囲の燃料を安定した条件で処理するサイクロンファーンネスは、わが国のように燃料事情

の複雑な国においてこそ、この真価を発揮しうるものと考えられる。

終りにサイクロンファーンネスの研究遂行にあたって多大の関心と絶大な御配慮をいただいた日立パブコック株式会社ならびに日立製作所幹部のかたがた、関係各位に厚く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 杉沼, 河原, 林: 電力 39, 10 1166/1168
- (2) 河原, 林: 日立評論 別冊 No. 12, 39/51 (昭31-2)
- (3) たとえば 小田島: 火力発電 6, 1, 20 (昭30-1)
土屋, 若林: 火力発電 5, 4, 251 (昭29-7)
- (4) ペ・エヌ・ケンドイシ, 浜田訳: 動力 8, 41, 67/73 (昭33-1)
- (5) A. E. Grunert: A. S. M. E., 69, 613/621 (1927)
- (6) M. Newirk: A. S. M. E., 73, 215/224 (1951)
- (7) H. C. Schroeder: A. S. M. E., 74, 572/578 (1952)
- (8) K. Schraeff: Mitt. d. V. G. B. 17/18 41/63 (1951)
- (9) W. Cautis: Mitt. d. V. G. B. 17/18 63/70 (1951)
- (10) B. Klöss: Mitt. d. V. G. B. 37, 660/665 (1955)
- (11) H. G. Stoltzung: Mitt. d. V. G. B. 37, 655/659 (1955)
- (12) M. Ledinegg: V. D. I. 94, 921/927 (1952)
- (13) P. Nichols, W. T. Reid: A. S. M. E., 62, 2 141/153 (1940)
- (14) H. Seidle: Proceeding of the Joint Conf. on Comb. A. S. M. E., 92/102 (1955)
- (15) M. Ledinegg: Dampferzeugung, Dampfkessel, Feuerungen (1952)
- (16) W. G. Marskell: Ash & Clinker in Practice, The Inst. of Fuel (Oct. 1952)
- (17) N. V. Iryhin: Energomachinostroenie 11, 15/21 (1957)
- (18) B. M. Milonov: Teploenergetica, No. 5 32/38 (1958)
- (19) R. Dolezal: Mitt. d. V. G. B. 223/233 (Aug. 1957)
- (20) 宗像, 佐川: 燃協誌 34, 340 490/496 (昭30-8)

Vol. 41

日 立 評 論

No. 3

整 流 器 小 特 集

- ◎電力用半導体整流器のPN接合の問題点
- ◎電鉄用シリコン整流器
- ◎ゲルマニウム, シリコン整流器の応用

◎東京電力品川火力発電所用 435t/h (125MW) ボイラ

- ◎最近のタービン潤滑油
- ◎北陸電力神通川第一, 第二発電所納水系制御付自動負荷周波数調整装置

◎八幡製鉄八幡工場納 12,000HP 厚板分塊用電気設備

- ◎ルミパネルを使用した光天井照明
- ◎メータパルスレピータの実用化(第2報)
- ◎ワイヤスプリングリレーの振動特性
- ◎各種エナメル線の耐冷媒性
- ◎鋳鋼押湯に関する研究
- ◎熱用工具用 Si-Cr-W-V 鋼に及ぼす Si および W の影響
- ◎双物鋼の諸性質における S の影響
- ◎配電盤の試運転と保守(その2)

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地 振替口座 東京 71824番

取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振替口座 東京 20018番