

# 低質炭の燃焼とサイクロンファーン

## Firing of Low Grade Coal and Cyclone Furnace

河原 誠二\* 林 安 治\*\*

### 内 容 梗 概

低質炭をボイラ燃料に利用することは最近ますますその重要性を増し真剣な検討が各方面において行われている。とくに火力発電設備の大容量化の傾向は、これに対するより以上の研究の必要を痛感せしめるものがある。発熱量が低く、大量の灰分を伴う低質炭にあつては、本来の燃焼はもとより灰処理においても幾多の困難を予想せしめるものがあるが、近時米、独両国において著しく発達したサイクロンファーン式燃焼法を応用することは有力な解決法であろう。

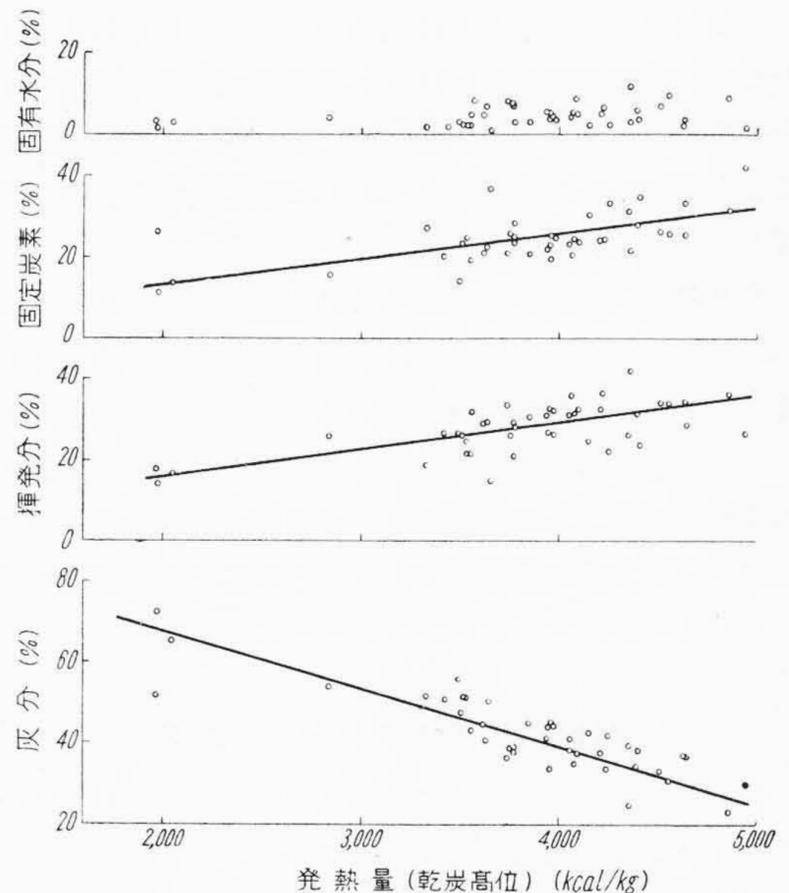
本文には、まずサイクロンファーンの概要を紹介し、その性能を説明した。次に日立製作所におけるこの方面の研究の一端を述べた。各種日本炭をテストファーンによつて実際に燃焼し、低質炭利用に明るい前途が予想されている。さらにサイクロンファーンに適用するに当つて重要な灰ならびにスラグの熔融、流動性の二、三につき説明し、進んでスラグの利用法についても触れた。

### 〔I〕 結 言

最近の火力発電技術の進歩はまことにめざましいものがある。高圧、高温蒸気の使用、大容量化、そして再熱サイクルの採用などはプラント効率を大幅に向上せしめている。しかもなお燃料費の発電原価の中に占める割合は相当なものであり、それだけに従来ボイラ燃料に不適當とされていたもの、あるいは広く一般に使用されていなかつたいわゆる低質炭を利用しようようにすることが、より以上に重要となつて来ている。

低質炭をボイラ燃料として使用する研究は決して今日にはじまつたものではなく、相当な歴史をもつている。そしてそれぞれに成果を挙げていることは充分認められるのであるが、残念ながらまだ決定的なものにはなつていない。なぜならば小単位、小容量の火力設備には成功しても大容量のものには必ずしも適用しえないものが多いからであり、最近の大容量化の傾向に合致するといえないからである。もちろん大容量になつた場合には逆に選炭設備、高品位炭の消化の問題とからみ合つて、必要な大量の低質炭を確保することが各種の採算面から問題となりうるであろう。したがつてどれ位の低質炭までを対象として考えるかは非常に難しいことである。したがつていたづらにごく低質の石炭を利用することのみを考えるべきではないが、その研究の重要であることには変わりはなく、それ故にこそこれがより以上に要求されている状態にある。

ここにその一方法としてサイクロンファーンによる燃焼法がある。最近数年間、とくにアメリカおよびドイツにおいてバブコック社の手により実用化され著しい発達をとげている。これは決して低質炭のみの利用を目標としているものではないが、低質炭に対しても非常な偉



第1図 低質炭の工業分析値  
Fig. 1. Approximate Analysis of Low Grade Coals

力を発揮しうるところが、我国の燃料事情を考え合わせるとき大きな利点となる。バブコック日立社ならびに日立製作所においては、日本の低質炭消化のため本燃焼法の適用を研究している。ここにサイクロンファーンの紹介とともに、研究の一端を述べて御参考に供する次第である。

### 〔II〕 低質炭の意義

いわゆる低質炭の定義は、不適性炭とある程度混同されて必ずしも明確には定めえない。しかしここでは一応発熱量の低いものを対象としよう<sup>(1)</sup>。これらの低質炭の実態を把握することが第一の問題である。日本炭につい

\* 日立製作所日立研究所

\*\* 日立製作所日立工場

て種々の資料もあるが<sup>(2)</sup>、低質炭はあまり含まれていないので、ここには筆者が最近実際にとり扱ったもののみを述べよう。第1図は工業分析値の分布を示したものである。(ただし無煙炭を除きまた亜炭の類はここでは考えてない。)揮発分および固定炭素分は20~40%の範囲にあるものが多く、さして著しい特徴はない。灰分については当然のことながら、低発熱量のものほど多くなっている。3,000 Kcal/kg を目標にするならば50%前後、2,500 Kcal/kg ならば60%前後の灰分を含むことになる。このようにしてわれわれがまず直面するのが灰の処理となることは当然であろう。もちろん灰の問題は、熔融温度あるいはそれに含まれる微小成分などその質が関係することが非常に大きい、これは低質炭に限らないから、まず考えられねばならないことはこのぼう大な灰の量のことであろう。

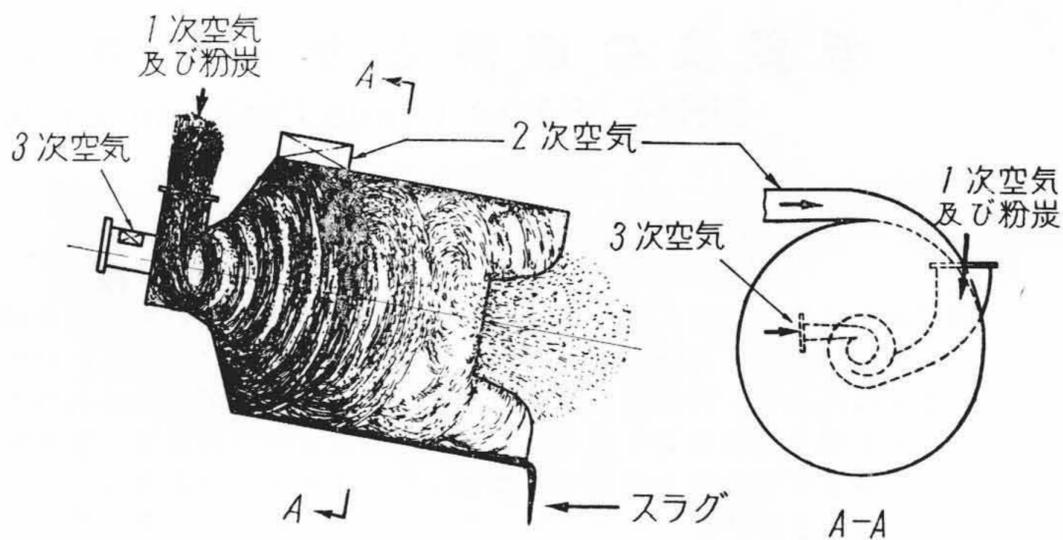
低発熱量、高灰分含有率のものを燃焼せしめること自体は特殊なストーカあるいは混焼方式を採用することによつてある程度解決されてはいるが<sup>(3)</sup>、その伝熱面におよぼす影響、ならびにいわゆる灰処理については問題が残されている。この解決法として考案されたものがスラグタップ方式の燃焼法であり、さらにそれが高度に発達したものが、サイクロンファーンネスである。

〔III〕 サイクロンファーンネス

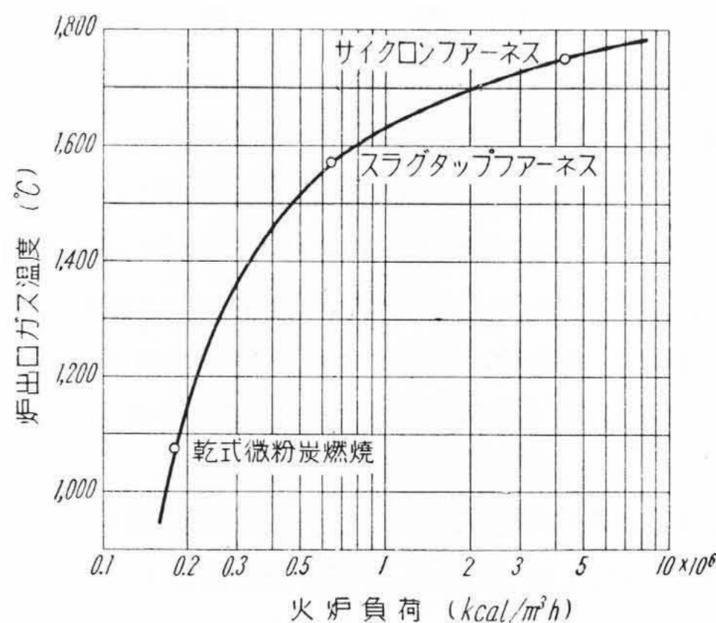
サイクロンファーンネスについてはすでに紹介<sup>(1)(4)-(14)</sup>されているが、要約して述べておこう。

(1) サイクロンファーンネスの原理

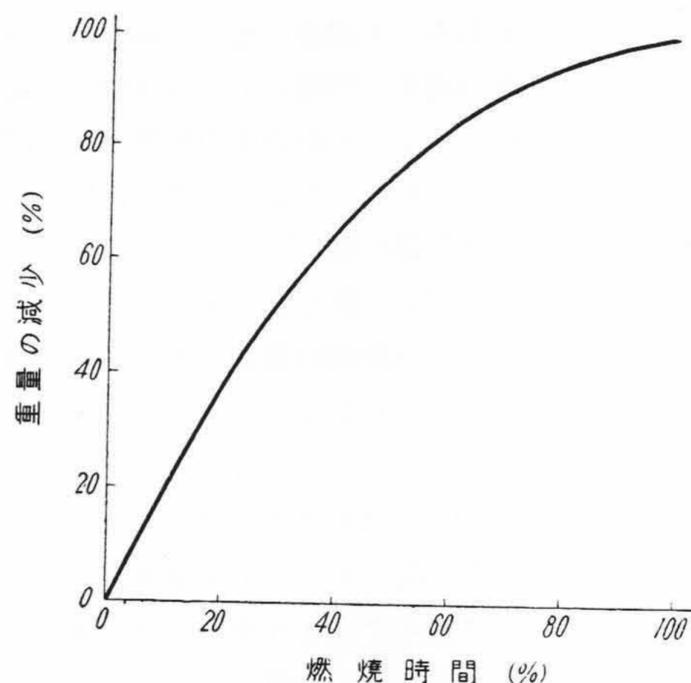
サイクロンファーンネスの構造を簡単に図示すると第2図のごとくである。円筒形の燃焼室が水平よりやや傾けて横に置かれる。これに一次~三次空気が同じ方向の旋回流として切線方向に入ってくる。このうち一次空気は全所要空気量の15~20%を占めて炉頂部の渦巻胴に入り、二次空気は80%前後の量で炉の内壁に開口している。三次空気は残りの数%で一次空気渦巻胴の内部にある渦巻胴から供給される。一次空気に搬送されて旋回しつつ炉内に投入された粉炭は、さらに強力な100 m/s以上の二次空気流により加速され、炉内においてはげしい旋回運動を行い、必然的にその遠心力によつて外方にはね出され炉内壁面に到達する。炉内壁は吸熱量を制限したスタッデッドウォールの構造である上に、第3図のごとく他の燃焼法に比し著しく高い火炉負荷の下において燃焼が行われるので、図のように非常に高温となるため、



第2図 サイクロンファーンネスの概略構造  
Fig. 2. Skeleton Diagram of Cyclone Furnace



第3図 火炉負荷とガス温度  
Fig. 3. Heat Released and the Furnace Gas Temperatures



第4図 燃焼時間と重量減少の割合 (W. Gumz による)  
Fig. 4. The Rate of Weight Reduction for the Combustion Progress

燃焼後の灰分は直ちに熔融し内壁上に熔融スラグの膜を作る。石炭粒子は炉内に投入されると、この高温のため直ちに揮発分を放出して燃焼し、そのコークスの微粒子は炉内壁に到達するまでに、また粗粒子は熔融スラグ膜上に捕えられ、その表面を擦過する高速の空気によつて燃焼する。

さて粉炭粒子の燃焼速度は、これと周囲の空気との相対速度  $Wr$  に関係する。Gumz<sup>(15)</sup> によれば  $Wr^{0.5}$  ( $Re < 100$ ) または  $Wr^{0.37}$  ( $Re > 100$ ), Ledinegg<sup>(16)</sup> は  $Wr^{0.15}$  と与えている。安定な浮遊状態では相対速度  $Wr$  は粒子の大きさおよび密度と空気またはガスの状態によつて定まるが、 $0.1 \sim 0.2$  m/s 位の範囲である。したがつてたゞ空気速度を高めるだけでは、相対速度は変化せず粒子の絶対速度のみが増して燃焼室内滞留時間をいたずらに短くするだけに終る。そのために火炉設計に当つて二次空気による攪乱などが重視されるわけであるが、通常の微粉炭燃焼では限度がある。また石炭粒子は、その重量の最初の 75% を燃焼するには全所要時間の 50% だけでよいが残りの 25% の燃焼にも 50% の時間を要する (第 4 図)<sup>(15)</sup> から、完全燃焼のために、とくに燃焼の後半に十分な滞留時間と高い相対速度を与える必要がある。サイクロンファーン燃焼法では強力な旋回気流による攪乱があり、しかも粗粒子はスラグ膜上に捕えられて、スラグとともに緩やかに移動するだけであるから、この上をふきはらう空気との相対速度は、ほゞその絶対速度に

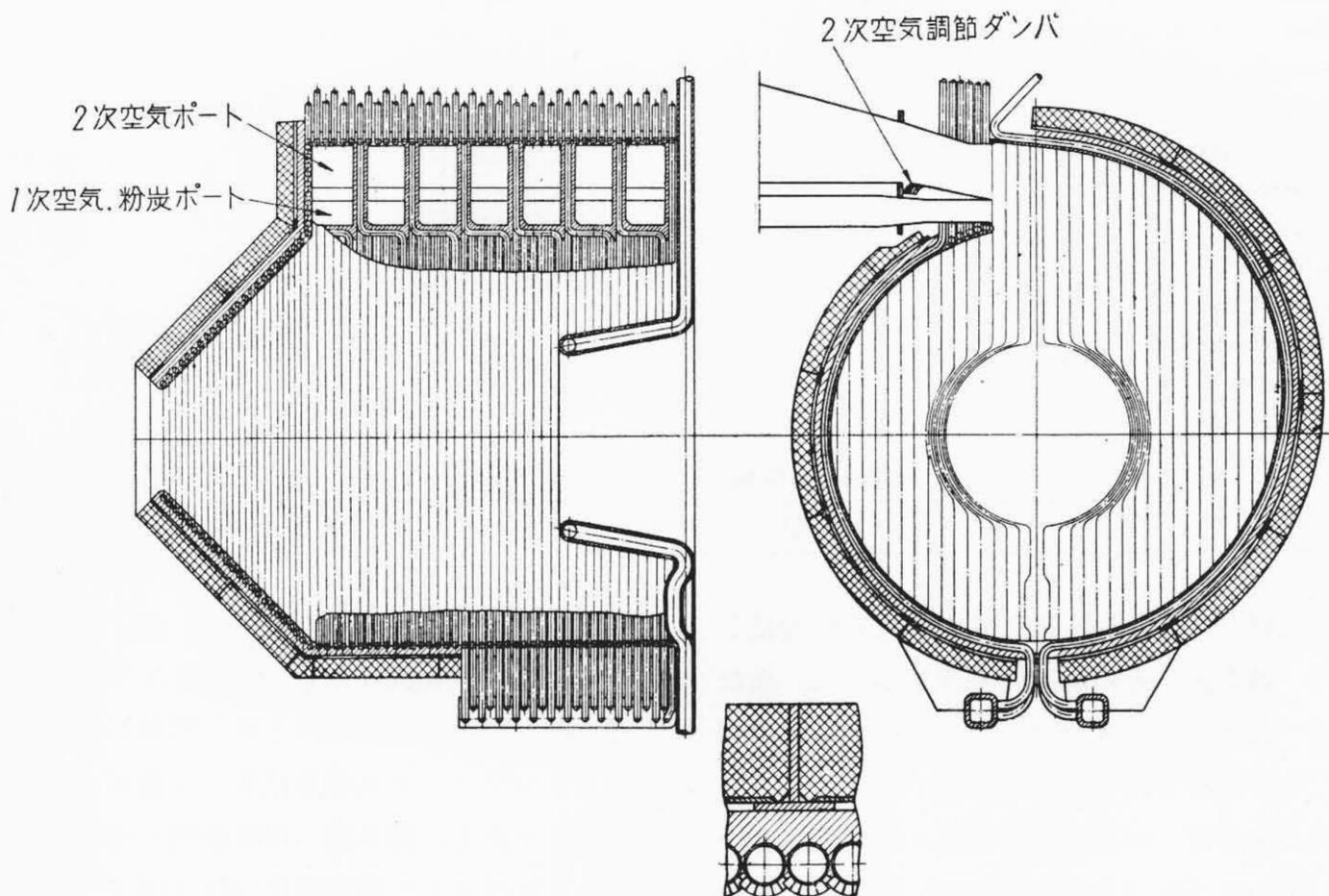
等しく、 $Re$  数でいえば粒子本来の浮遊状態におけるものの  $10^3 \sim 10^4$  倍にも達する<sup>(11)</sup>。したがつて粒子の滞留時間を充分長くつてしかも高い燃焼速度を与えうるわけで、かくして第 3 図に示したごとき著しく高い火炉負荷をとることができるのである。

燃焼したガスはその後も旋回をつづけ出口のスロートを通つて二次燃焼室以後のガス通路に導かれる。一方灰分は上記のごとく大部分は熔融して炉内壁上を膜状になつて流下しスロート下方の口からガスと別箇に流出する。この関係はサイクロンダストコレクタの原理と同様であり、高灰分の石炭を燃焼しても充分清浄な煙道ガスがえられるところに大きな利点をもつている。これらについては後にあらためて述べよう。

### (2) サイクロンファーンを備えたボイラ

サイクロンファーンは最初アメリカバブコック社において研究され、1944年に Commonwealth Edison Co. の Calumet 発電所で古いボイラを改造し蒸発量 80 t/h の最初の実用的なボイラが運転を開始して以来、長足の進歩をとげている。1954年1月においてアメリカですでに運転中のものおよび建設中のものは第 1 表(次頁参照)のごとく 35 箇に達し、これは同期間に同社の販売した微粉炭焚ボイラの約  $1/7$  に当つている。

ドイツにおいてもドイツバブコック社によつて第 2 表(43頁参照)のごとき実績を示している。とくに注目すべき点は、ドイツではアメリカよりも低質炭に適用する



第 5 図 ドイツ式のサイクロンファーン一次炉の構造  
Fig. 5. Construction of Primary Furnace of German Type

第1表 アメリカにおけるサイクロンファーネスの実績 (1954年1月)  
Table 1. Cyclone Furnace Units in Service and under Construction in U. S. A. (Jan. 1954)

所有会社名および発電所名	ボイラの数	サイクロンファーネスの直径および合計筒数	合計蒸発量 (t/h)
Commonwealth Edison			
Calumet	1	8' 1	82
Fisk	2	8' 8	680
Ridgeland	5	8' 22	1822
Public Service Co. of Northern Illinois			
Waukegan	1	8' 2	143
Waukegan	1	9' 4	376
Joliet	2	8' 6	544
Northern Indiana Public Service Co			
Michigan City	3	8' 6	510
Dow Chemical			
West Side Plant	1	8' 2	181
South Side Plant	4	8' 8	725
Wisconsin Power & Light			
Sheboygan	1	8' 3	272
Rock River	1	8' 3	238
Babcock & Wilcox			
Barberton	1	5' 1	35
Jersey Central Power & Light			
South Amboy	1	9' 2	215
Ohio Edison			
Niles, Ohio	1	9' 4	397
運転中のもの小計	25	72	6220
Wisconsin Power & Light			
Rock River	1	8' 3	238
Public Service Co., of Northern Illinois			
Will County	2	9' 10	1088
Jersey Central Power & Light			
Sayreville	1	9' 4	408
Ohio Edison			
Niles	1	9' 4	397
Commonwealth Edison			
Ridgeland	1	8' 6	499
Columbia Southern Chemical Co.			
Barberton	1	8' 2	175
Ohio Power Co.			
Phile, Ohio	1	9' 3	306
Greenwood Mills			
Greenwood, S. C.	1	7' 2	136
American Enka			
Enka, N. C.	1	7' 1	68
建設中のもの小計	10	35	3315
合 計	35	107	9535

ことに積極的な研究が行われ、アメリカの原形を改良していることで、第5図にその構造の要部を示した。異なっている点は一次空気を二次空気と同じく炉壁に直接切線状に入れていることである。

実例を示すと第6図 (44頁参照) はアメリカの Commonwealth Edison Co. の Ridge land 発電所のもので蒸発量 500 t/h, 蒸気圧力 149 at, 蒸気温度 565°C, 再熱温度 538°C のものである。直径 8 ft のサイクロン

ファーネス 6 筒を装備している。第7図 (44頁参照) はドイツの Bremen-Farge 発電所の 225 t/h, 145 at, 525°C, のものを示した。以上は大容量のものであるが、サイクロンファーネスの直径および数によつて任意のものに適用できる。第8図 (45頁参照) は古いセクショナルボイラを改造した例で直径 5ft のもの 1 筒をつけ 35t/h の蒸発量のものである。

第2表 ドイツにおけるサイクロンファーンネスボイラの実績1953年4月現在で運転中および建設中のもの  
Table 2. Cyclone Fired Boiler Plants in Germany; In Operation or under Erection in Apr., 1953

会社名および発電所名	ボイラの数	サイクロンファーンネスの合計数	サイクロンファーンネスの直径(ft)	ボイラ仕様(1機当り)			使用石炭						
				蒸気量(t/h)	蒸気圧力(kg/cm)	蒸気温度(°C)	揮発分(%)		灰分(%)	水分(%)	固定炭素(%)	発熱量(Kcal/kg)	
							無灰炭に対し	焚込状態				低位	高位
E. W. Düsseldorf Düsseldorf	1	1	6	40	15	350	各種						
Rheinpreussen Homberg	1	2	7	100	84	525	25	17	20	13	50	5100	5350
Henkel Düsseldorf Düsseldorf	1	1	8	64	84	500	53	20	3	61	16	1800	2260
Stadtwerke Kiel Kiel	2	4	6	80	84	525	16~18	13~15	8	10	67~69	6800	7060
Ibbenbüren Ibbenbüren	2	4	7	125	84	525	12	7	30	12	51	4600	4690
Steag Lünen Lünen	1	2	9	200	84	510	15~25	10~17	25	8	50~57	6100	6300
NWK Farge Bremen-Farge	1	3	8	225	145	525 (再熱467)	18~25	6~11	6~11	3~10		6800	7530
Stadtwerke Düsseldorf Düsseldorf	2	4	7	125	88	530	18~19 55	41	8~10 10	6~12 15		6300 4900	6550 5200
Mainz Wiesbaden Mainz	2	4	7	110	84	520		11~35	5~15	8~11		6700	7000
Neue Hoffnung Oberhausen Z. Haniel	1	2	7	125	84	510	30	20	35	10	35	4320 4500	4500 4700
Stadtwerke München Isartalstr.	1	2	7	100	84	525	12~19	9~14	15	10		6200	6450
Ibbenbüren Ibbenbüren	1	2	9	200	84	525	12	7	30	12	51	4500	4700
Kraftwerk Aschaffenburg Aschaffenburg	1	3	8	230	225	535 (再熱508)	8~30		15	14		6000	6250
合計	17	34		2164									

(3) 低質炭燃焼に対するサイクロンファーンネスの利点

サイクロンファーンネス燃焼の利点は数多くあるが、すでに燃焼そのものについては前節にも触れておいたし、ここにはとくに低質炭に関係したことのみにとどめよう。

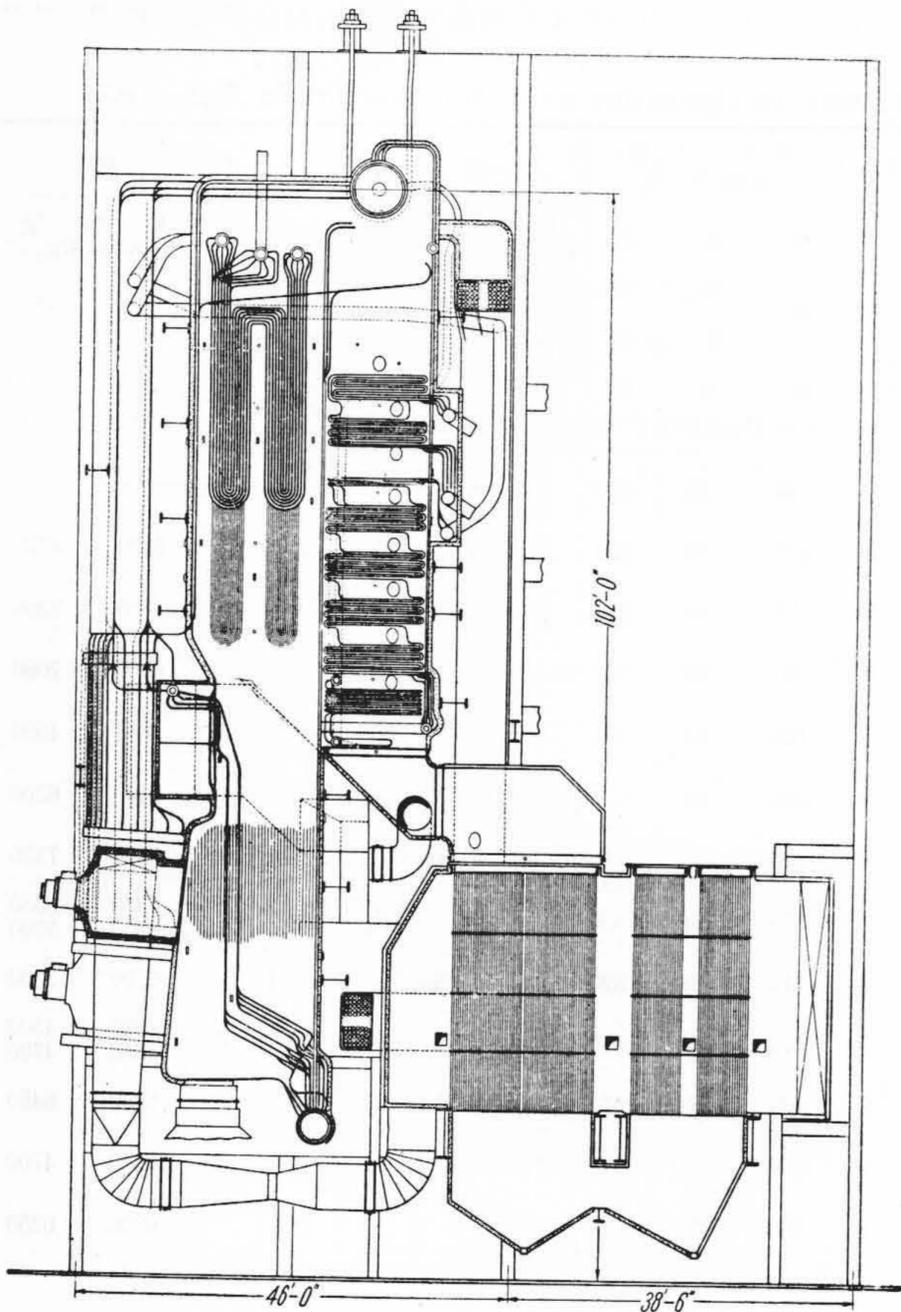
まず低発熱量であることから同一容量のボイラであつても石炭消費量が多くなる。通常の微粉炭燃焼法では、低質炭なるが故により以上に粒度の細かいことを望むから微粉炭機の容量は著しく大きなものを要求されることになる。しかしサイクロンファーンネス方式は粗砕でよくアメリカでは標準として200メッシュ通過10~15%程度であり、ドイツではこれよりも低質炭を消化することを考えて30%位にとつている。より低品位の日本の低質炭としても通常の微粉炭燃焼の標準の70%に比し、はるかに粗い粉砕ですむから粉砕に伴う難点は著しく軽減される。

つぎに大量の灰分に対する灰処理がある。灰の大部分は一次燃焼室で分離されて清浄な煙道ガスが得られることは前に述べたが、第9図(45頁参照)および第10図(46頁参照)に実例を示した。それぞれサイクロンファ

ーンネスボイラの実績と、それとほぼ同出力の乾式微粉炭燃焼および通常のスラグタップ式ボイラとのアッシュフロー線図を比較してある。サイクロンファーンネスでは石炭により持込まれる全灰量のわずか10~15%位しか接触伝熱面を通らず、また煙突から飛散するフライアッシュを制限するためには低効率の集塵器を備えるだけでよいことが示されている。熔融状態で分離された85~90%のスラグは流出口から下方の水槽に落ち急冷されるが、熔融状態の完全さと相まつてそれだけでガラス質の細かい粒状のものとなる。写真では実感が出ないが第11図(46頁参照)はこれを示したものである。使用石炭とその灰の成分によつて黒色、暗緑色など色調を異にするが、第12図(46頁参照)のごとくこれらを通常灰分定量に使用される750°Cはもとより1,500°C近くまで再加熱しても重量減少はほとんどなく、すなわち完全燃焼をして未燃分は残っていない。しかも水中からとり出せば簡単に水が切れ、埃もたゞず取扱いは非常に簡単となり、灰処理の手数を省く効果は著しい。

[IV] 日立におけるサイクロンファーンネスの研究

サイクロンファーンネスは前記のごとくアメリカおよび

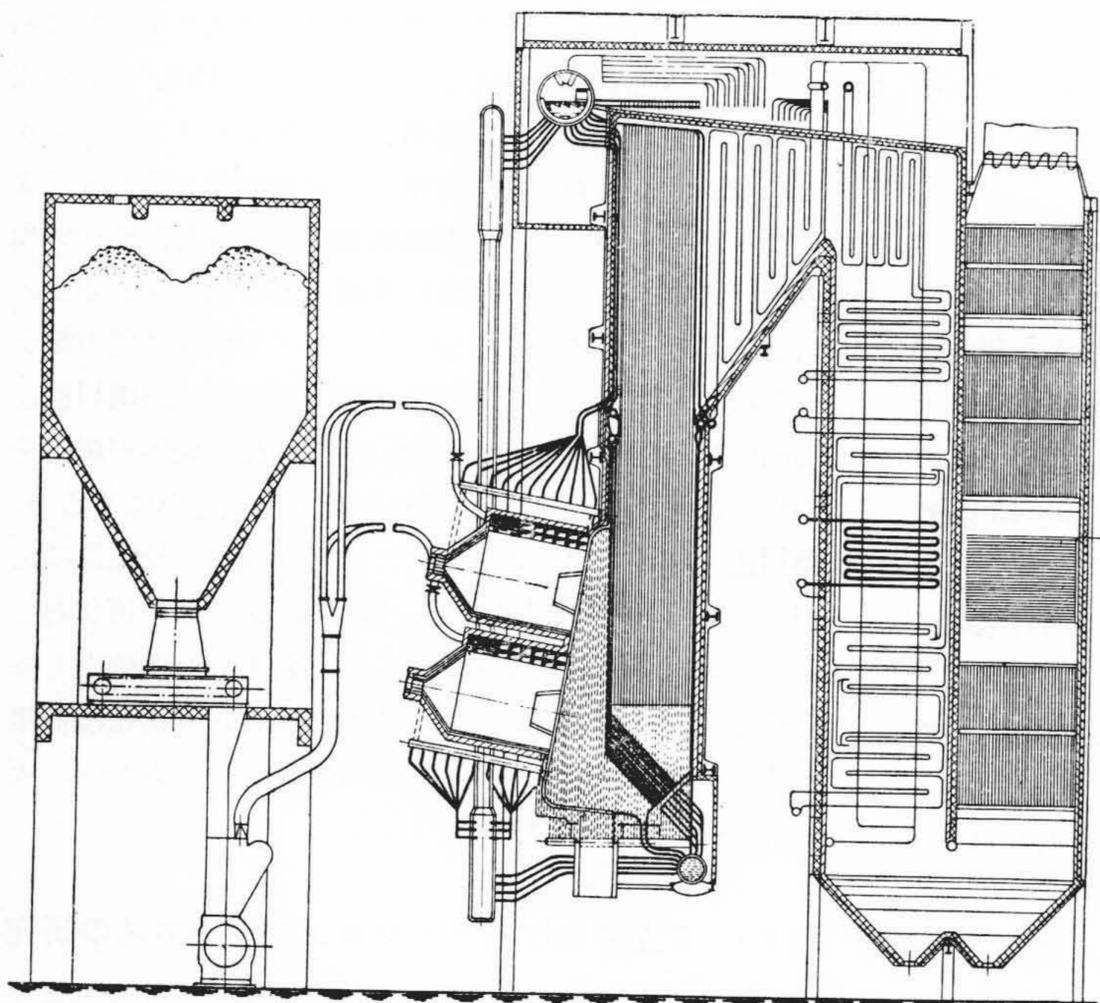


第6図 サイクロンファーンネスボイラの実例  
Fig. 6. Cyclone Furnace Boiler Ridgeland, U. S. A.

ドイツバブコック社の手により発展させられ、その成果はこれらと技術提携しているバブコック日立社によつて活用できる態勢になつている。しかしながら石炭そのものの外国炭とのちがいは否定しえず、たとえば数 kg の石炭試料を送附して試験する程度のことでは明確なことはわからない。どうしても相当量の石炭を燃焼実験することが必要となる。この点に鑑みて日立製作所においては日立研究所に第13図 (46頁参照) のごときテストファーンネスを建設した。その構造は第14図 (47頁参照) に示してあるが、これによる実験結果をそのまま比較できるようにイギリスおよびドイツバブコック社のテストファーンネスと要部の構造および寸法を一致させてある。なおこれはあくまでテストファーンネスであつてボイラではない。

われわれは本テストファーンネスによつて日本の各種石炭を試験しているが、その一部を述べよう。第3表 (47頁参照) は試験した石炭の数例である。これにみるように焚込 3,500 Kcal/kg 級の低質炭も完全に燃焼し、良好なスラグの熔融状況を示して成功している。表中の三池炭は低質炭といえないことはもとよりであるが、その灰の熔融温度が低いことから乾式の燃焼法ではむしろ不適性炭の一つと考えてもいいものである。しかしサイクロンファーンネスにおいては非常に良好な特性を示し、ボイラ燃料としては本法によつてはじめて

その真価を発揮するといつてもよい。また例えば No. 3 および 4 の九州炭のごとく灰の熔融温度が逆に高くサイクロンファーンネスに不向きと考えられるものも混炭あるいは媒熔剤の添加によつて成功することが第3表 (47頁参照) 中の No. 7, 8, 9 および 10 によつてわかる。なお No. 9 の場合他の目的(生成した粒状スラグ利用)のために必要以上に石灰石を混入しているが、このような大量混入により見掛けの発熱量を低下し灰分を増大せしめても充分の燃焼が行われている。かくしてサイクロ

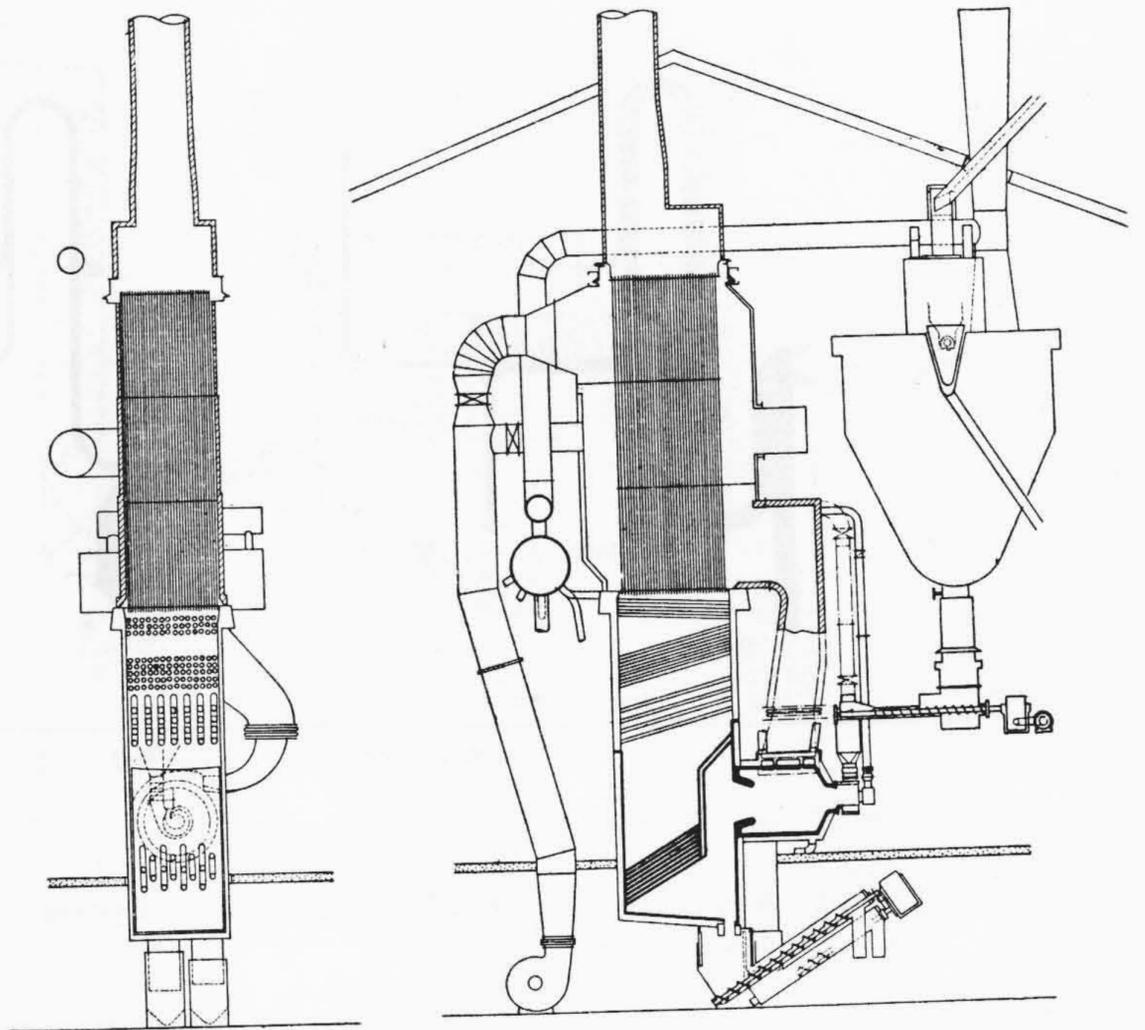


第7図 サイクロンファーンネスボイラの実例  
Fig. 7. Cyclone Furnace Boiler Bremen Farge, Germany

ンファーンネスが低質炭を含めて広い範囲の石炭を消化しうることは注目すべき成果であるといえよう。

これらの結果を整理すると第15図(48頁参照)のごとくなる。あとであらためて述べるが、サイクロンファーンネス適用の限界は石炭灰の熔融温度ならびに熔融スラグの粘度によつて大きく支配される。そこでこの二つをパラメタとして結果を示した。横軸には灰の還元気中の熔融温度  $t_a$  をとり縦軸には粘度の代りに、ある一定粘度(ここでは 250 poise)になるに必要なスラグの温度  $t_s$  をとつてある。アメリカバブコック社では多くの実験から図の破線で限られた  $t_a < 1,370^\circ\text{C}$   $t_s < 1,427^\circ\text{C}$  の範囲のものは適性範囲、その外側の実線に限られた  $t_a < 1,427^\circ\text{C}$ 、 $t_s < 1,480^\circ\text{C}$  の範囲のものは疑問

で特殊な工夫を要し、さらにその外側は不相当としている。しかしわれわれの結果は図中に記入した点が表示ごとく、その疑わしいとしている範囲、すなわち実線で限られた区域内のものは大体成功しておりはなほだ心強い

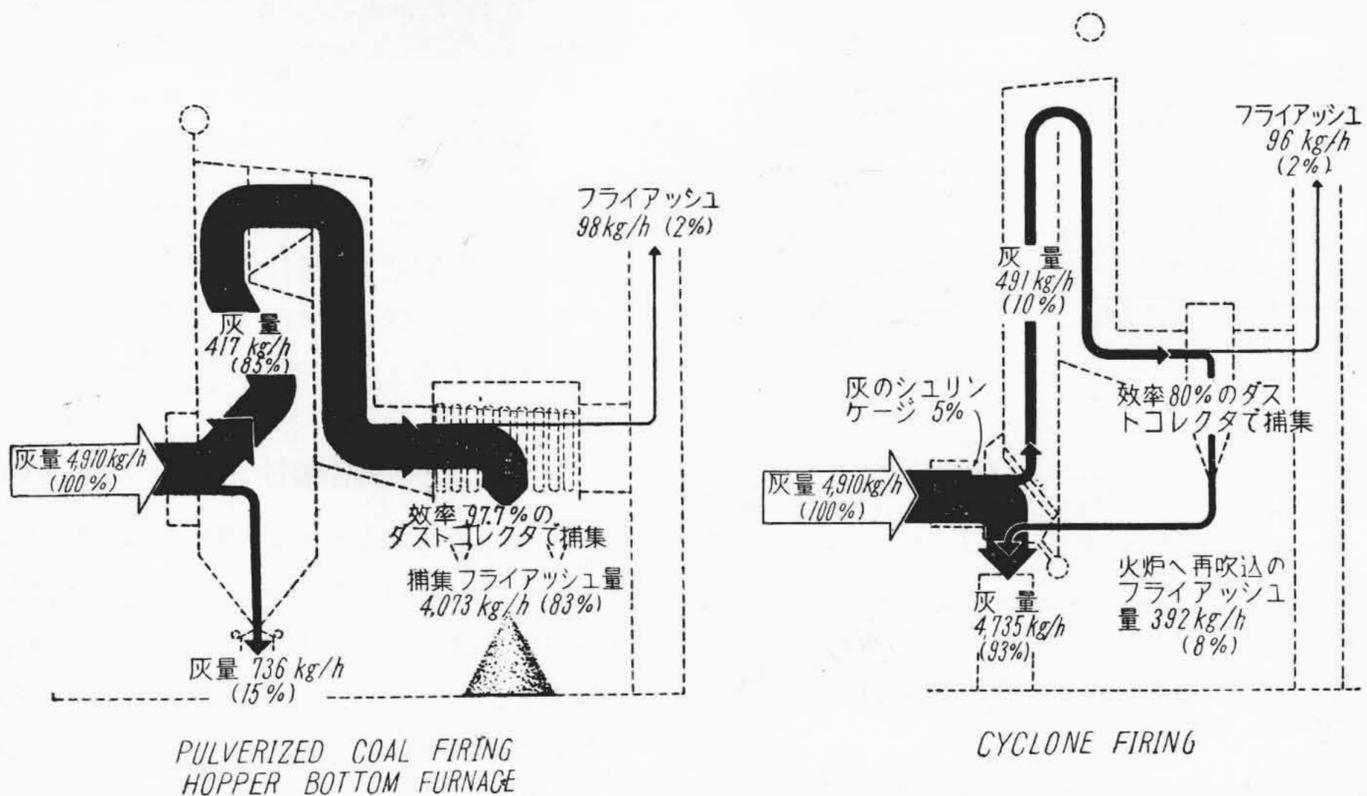


第8図 5 ft のサイクロンファーンネスを備えたボイラ  
Fig. 8. 5-ft Dia. Cyclone Furnace Unit

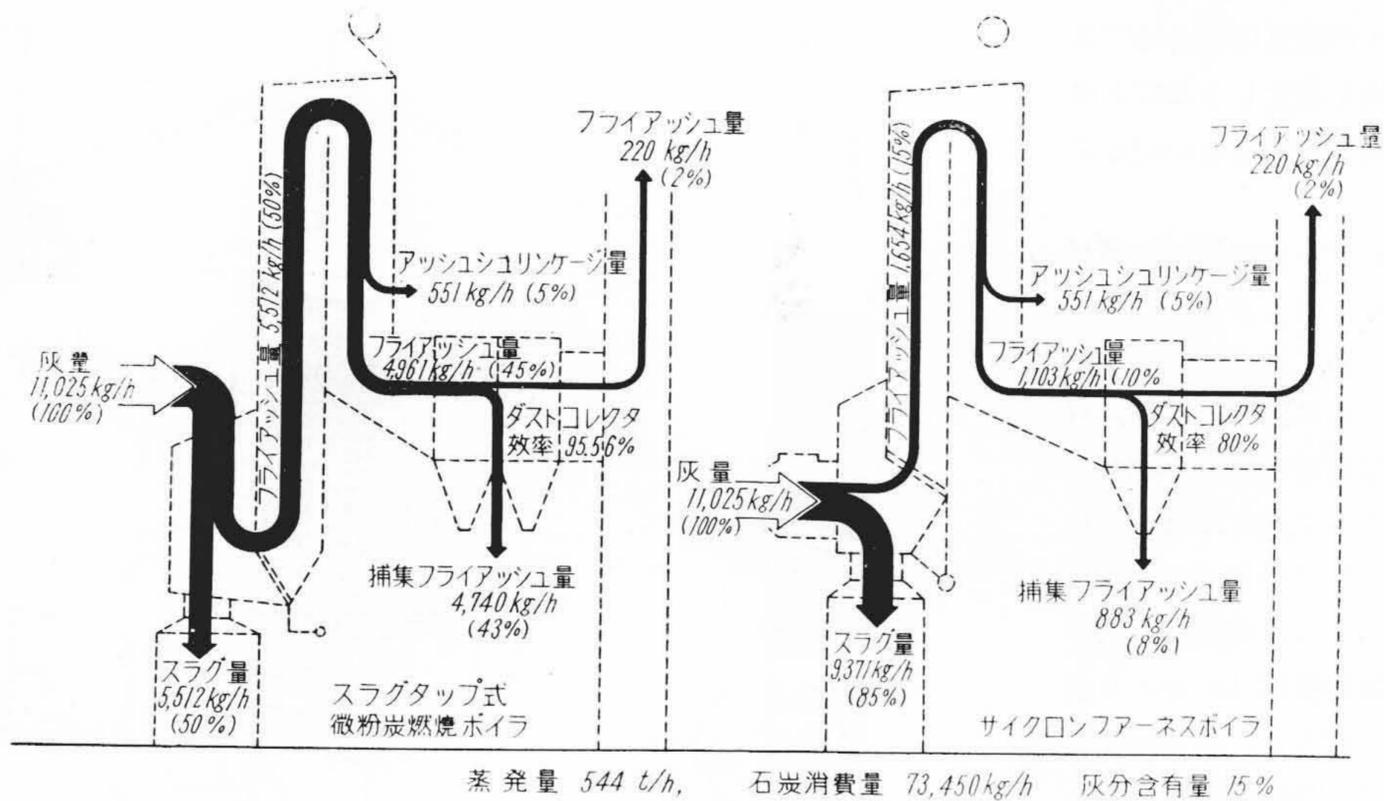
しだいである。この図による判定はもとより一応の基準であつて、アメリカおよびドイツにおいても最後の判定は実際にテストファーンネスによつて燃焼試験した結果においている。われわれも同様であつて、ここにテストフ

CAPACITY FOR 150,000 kW UNIT  
石炭量 49,100 kg/h 灰分 10%

CAPACITY FOR 150,000 kW UNIT  
石炭量 49,100 kg/h 灰分 10%

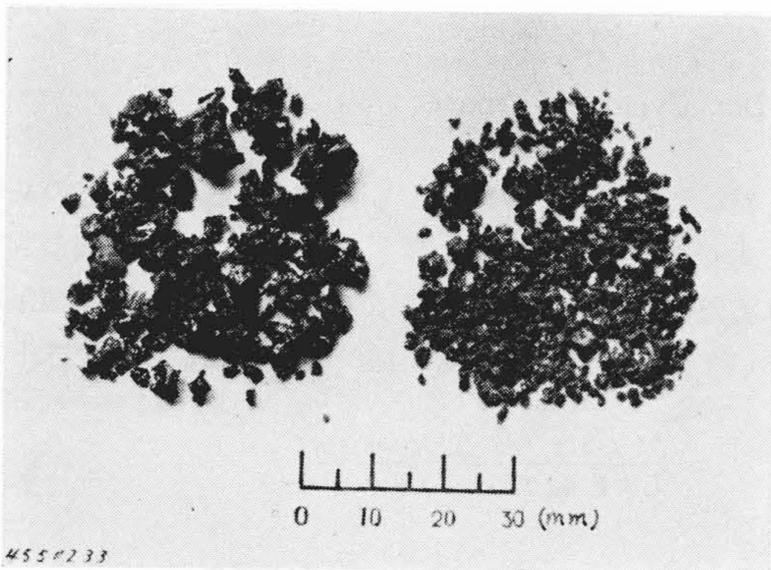


第9図 灰のフロー線図(サイクロンファーンネスボイラと通常の微粉炭燃焼ボイラとの比較)  
Fig. 9. Ash-Flow Diagrams. (Comparison of Cyclone Firing and Dry Hopper Pulverized Coal Firing Boiler)

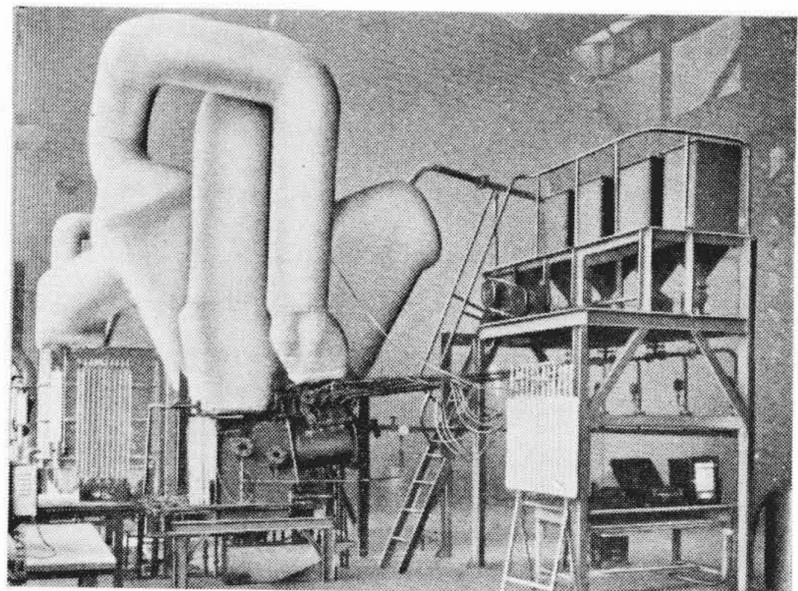


第10図 灰のフロー線図 (サイクロンファーンエスボイラと通常のスラグタップ微粉炭燃焼ボイラとの比較)

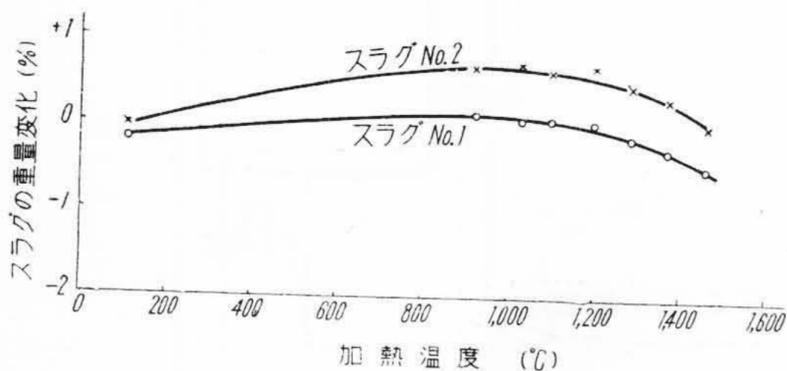
Fig. 10. Ash-Flow Diagrams. (Comparison of Cyclon Firing and Pulverized Coal Firing Slag Tap-Boiler)



第11図 粒状スラグの例  
Fig. 11. Samples of Slag Particles



第13図 テスト用サイクロンファーンエス  
Fig. 13. Cyclone Furnace Test Plant



第12図 生成した熔融スラグを再加熱したときの重量変化  
Fig. 12. Weight Variation of Molten-Slag by Reheating

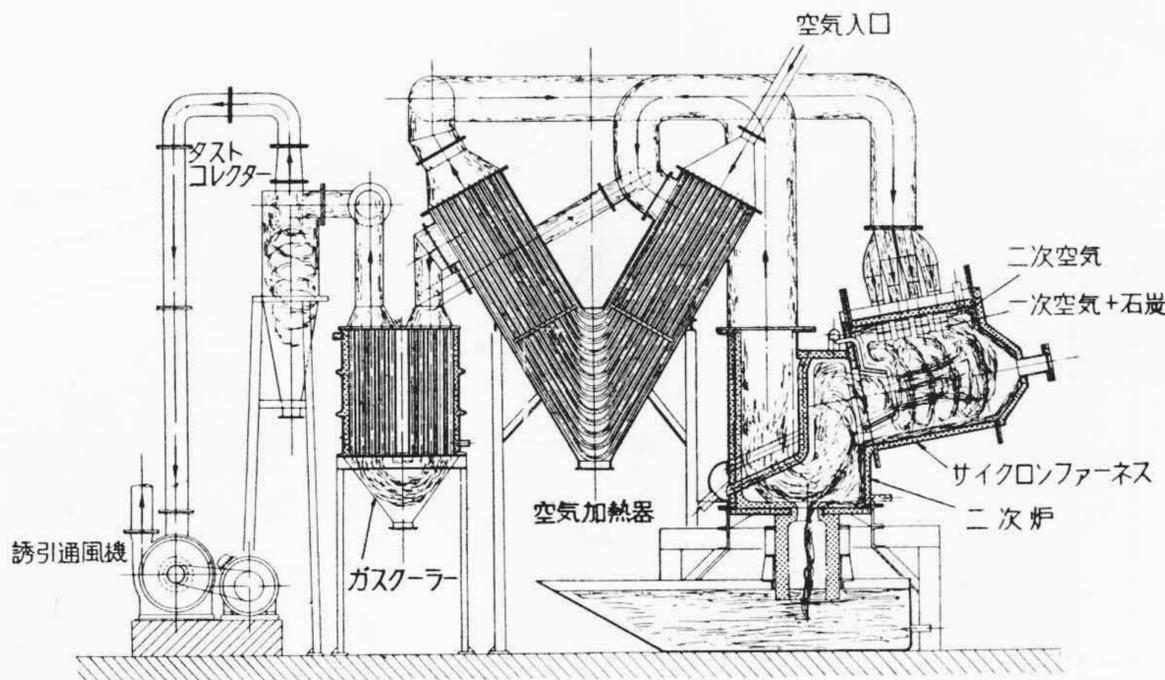
ファーンエスの意義があり、さらに進んでは不適當とされているものも充分使用しうるよう炉の構造に独自の改良を施すべく努力しているが現在においては一応の判定基準

であると考えてよい。前記第3表の No. 3 および 4 の石炭はこの判定基準に照らして単独燃焼は行わなかつたが、これら難溶性のものも混炭および媒熔剤の添加によつて、成功することはすでに述べておいた。

〔V〕 灰の熔融性およびスラグの粘度

灰の質、すなわちその熔融性あるいはアルカリなどの微小成分のもつ重要性はあえて低質炭には限らない。したがつて今はこれをとくに問題とせず、サイクロンファーンエスとして重要な二、三の事項について述べておこう。

サイクロンファーンエスにおいては灰を熔融流動せしめるのであるからその熔融性および粘度が問題となることはいふまでもない。まず灰の熔融性であるが、これについては古くから幾多の人々の貴重な研究がある。たとえば



第14図 テスト用サイクロンファーン  
Fig. 14. Test Cyclone Furnace

第3表 試験した石炭の数例  
Table 3. Properties of Tested Coals

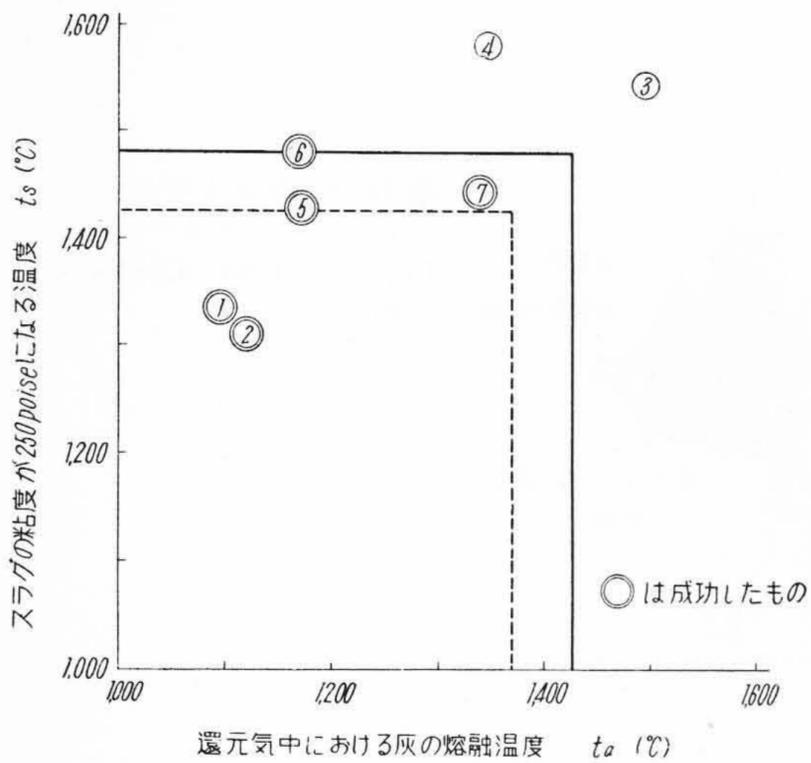
No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
炭名		三池特粉	三池並粉	九州B粉	九州C粉	常磐長倉	常磐綴重洗	2と3等量混炭	2と3等量混炭	九州B粉	九州C粉
石灰石混入の割合 (%) (石炭量に対し)		なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	10	50	20
工業分析 (乾炭)	発熱量 (Kcal/kg)	7,269	7,015	5,180	4,541	5,764	3,956	6,097	5,550	3,450	3,790
	水分 (%)	0.95	0.80	2.30	3.10	9.05	2.70	1.55	1.41	1.53	2.58
	灰分 (%)	11.12	17.90	23.55	34.80	12.05	44.90	23.22	25.87	37.67	38.35
	揮発分 (%)	35.73	33.65	34.05	29.45	39.40	32.75	36.35	37.37	37.40	31.87
	固定炭素 (%)	52.20	42.65	35.10	32.65	39.50	19.65	38.88	35.35	23.40	27.20
	全硫黄 (%)	1.26	3.60	0.63	0.57	0.95	3.02				
灰の分析	SiO <sub>2</sub> (%)	46.50	42.00	59.60	56.90	46.30	52.57	50.80			
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	8.50	11.66	9.26	4.79	5.16	8.66	10.46			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	20.20	18.59	25.03	27.71	23.75	22.22	21.81			
	CaO (%)	14.00	10.47	1.68	2.63	12.27	6.05	6.08			
	MgO (%)	2.17	1.68	0.85	0.80	0.76	1.03	1.26			
	SO <sub>3</sub> (%)	6.72	13.37	1.63	2.16						
灰の熔融温度 (酸元中)	変形 (°C)	1,149	1,200	1,330	1,406	1,250	1,224	1,200			
	熔融 (°C)	1,194	1,220	>1,600	1,448	1,273	1,273	1,440			
	流動 (°C)	1,227	1,250	>1,600	1,468	1,302	1,302	1,485			
スラグの 1,427°C における推定粘度 (Poise)		89	70	1,350	2,300	260	500	220			
粘度 250 Poise になる温度 (°C)		1,335	1,310	1,545	1,580	1,430	1,480	1,445			

我国において香坂氏の一連の研究<sup>(17)</sup>があり、ドイツにおいては Zinzen の三元状態図の形で表したもの<sup>(18)</sup>などがある。しかしこれらによつて完全に説明しようとは断言できず、やはり実測を尊ばなければならぬことはもちろんである。たゞ傾向として重要なことをあげておく。

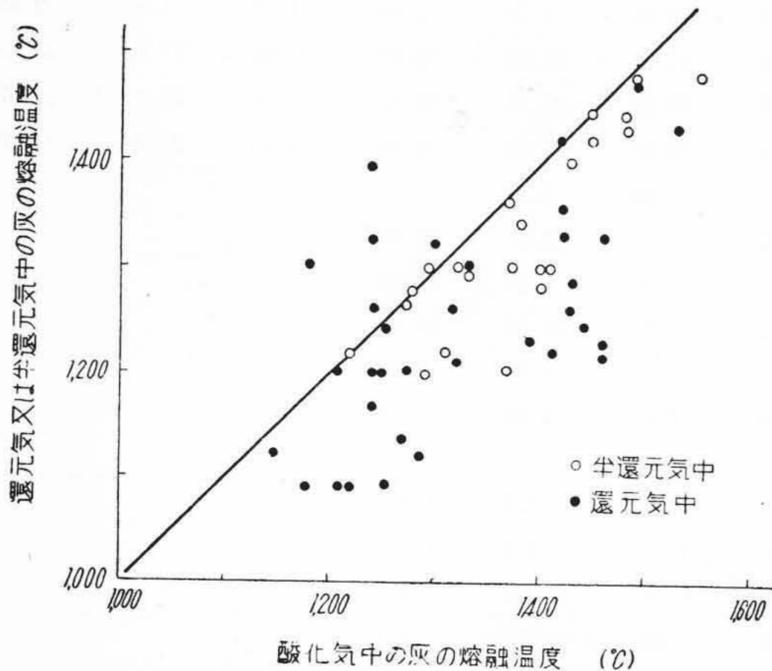
灰の熔融温度はそれが置かれているふんい気の影響をうけることが知られている。ドイツの褐炭 (Brown Coal) では、還元気中で熔融温度が酸化気中よりも高くなることも多いが日本炭では一般には還元気中のものの方が約 100°C 酸化気中よりも低下する。サイクロンファーンにおいては普通よりも過剰空気を少く、10%位で焚きうるからこの種のふんい気になる可能性も強い。し

たがつてこの性質はサイクロンファーンに対し有利であり、逆にいえば過剰空気を少くして焚くことが必要な条件であるともいえよう。もつとも実際の火炉では完全な還元気でなく、半還元気になることが多い。酸化気中のものに対し前者の場合を香坂氏の結果により、半還元気のものとの中間にあることがみられている。

熔融温度の高い石炭は易溶性のものと混炭することが考えられる。この際注意すべきことは混炭後の熔融温度が原炭の混合割合から算術平均によつて求められないことである。第17図 (次頁参照) はその一例である。流動



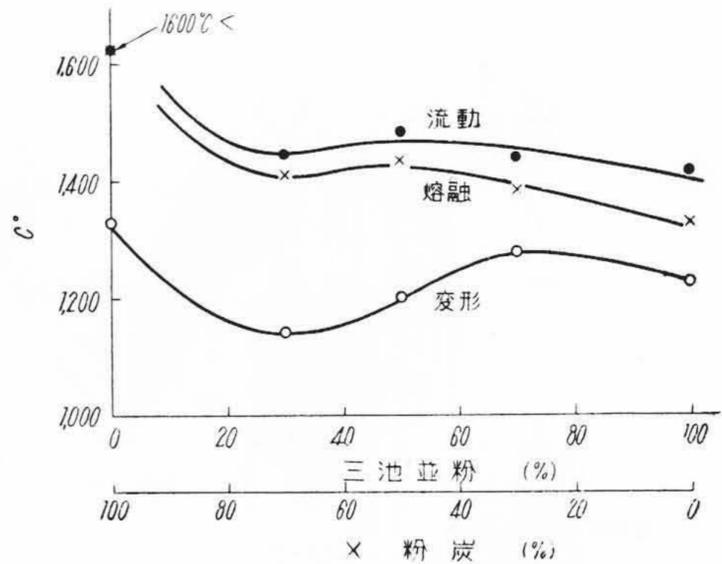
第15図 サイクロンファーンネスに対する石炭の適用性と灰およびスラグの性質  
 Fig. 15. Suitability of Coals for Cyclone Firing as Established by the Characteristics of the Coal Ash and Slag



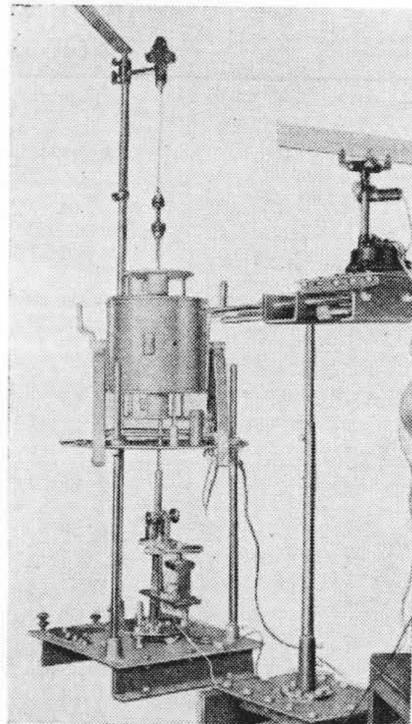
第16図 石炭灰の熔融温度とふんい気の影響  
 Fig. 16. Fusion Temperature of Coal Ashes in Oxidising-, Reducing-, and Semi-Reducing-Atomosphere

温度 1,600°C 以上の某粉炭を易溶性の三池並粉と混炭することによりその流動温度を低下せしめうるが、三池炭の混炭率 30% でほぼその全効果を現わし、これ以上混炭率を増してもほとんど変化がない。混炭操作にあらかじめ検討を要するしだいである。

熔融スラグの粘度は灰の熔融性ととも非常に重要なものである。第18図は日立研究所において使用している回転円筒式高温粘度計の外観図である。われわれは本粘度計を用いて各種石炭の熔融スラグについて実測しているが、非常な高温ではあり一回の測定に多大の時間を要



第17図 混炭による灰の熔融性の変化  
 Fig. 17. Variaton of the Ash Fusibility by the Mixing of Two Coals

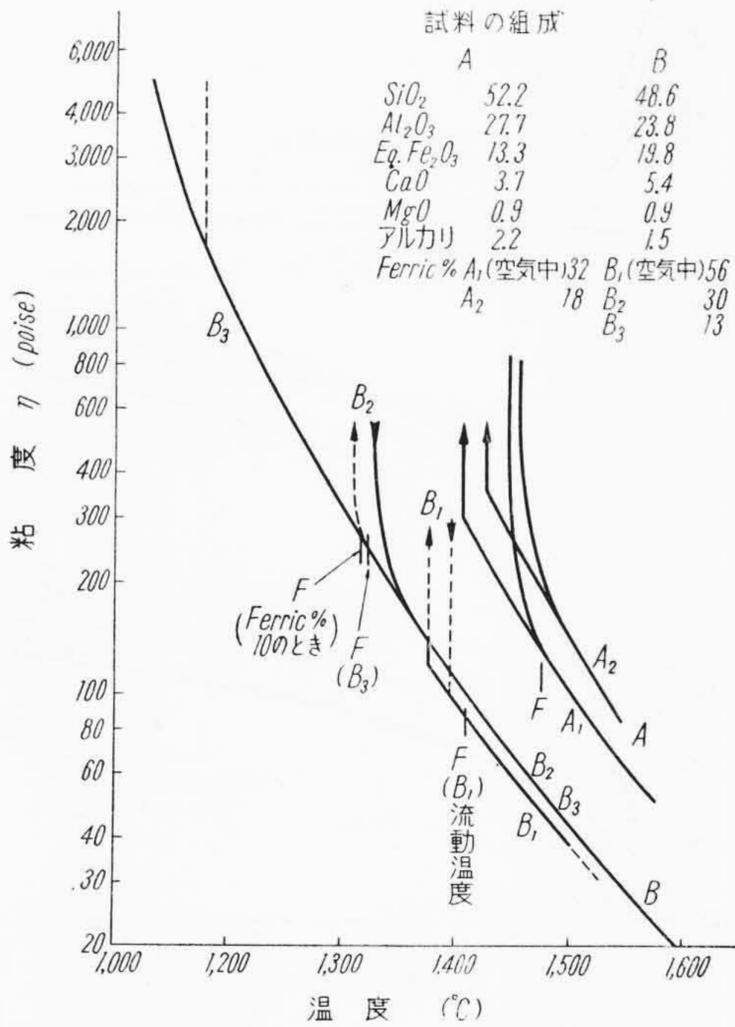


第18図 スラグ粘度計  
 Fig. 18. Slag Viscosimeter

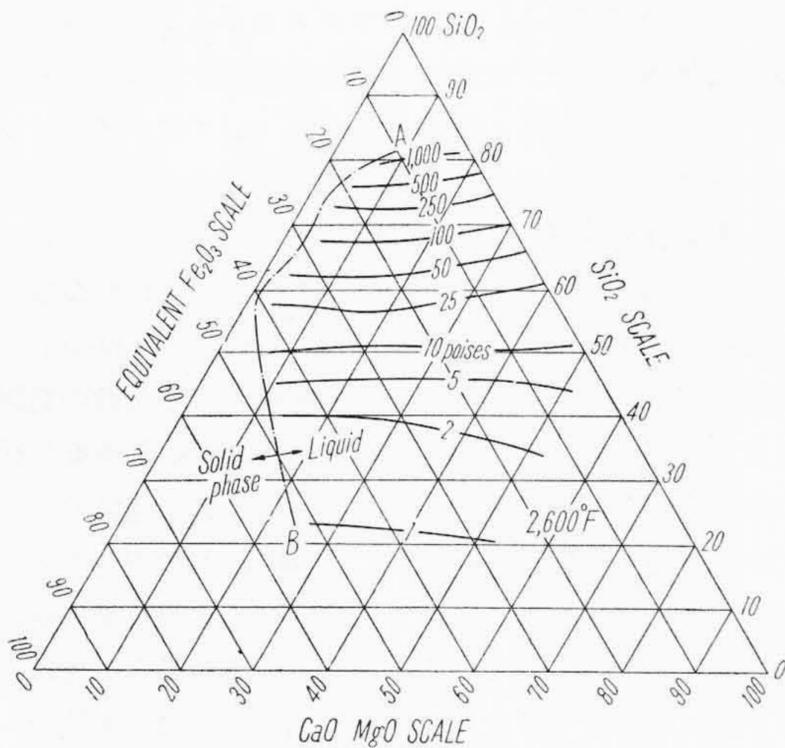
して個々の測定値は求めえても広く一般的な日本炭のスラグの特性をまだ明らかにしえないことを甚だ残念に思っている。ここには外国での研究の概要を紹介しておく。

第19図は Nichols & Reid 両氏<sup>(19)</sup>による温度と粘度との関係を示す実測例である。粘度の一般的な特性として温度の上昇に対し急激な低下がみられている。粘度に対してもふんい気の影響はあつて図のごとく還元度の高い (Ferric % の低い) 場合には 20% 位高くなつてくる。これは灰の熔融性の現象とは逆であつて、サイクロンファーンネスにおいて好ましいとはいえないが、20%位の粘度の上昇は実は大した影響をもつものではない。粘度の温度による変化はスラグの組成によつて絶対値は異なるが、傾向としては似ておりつぎのような式で表すことが提案されている<sup>(19)</sup>。

$$\eta^{-0.1614} = 0.000,8136 t - C \dots\dots\dots(1)$$

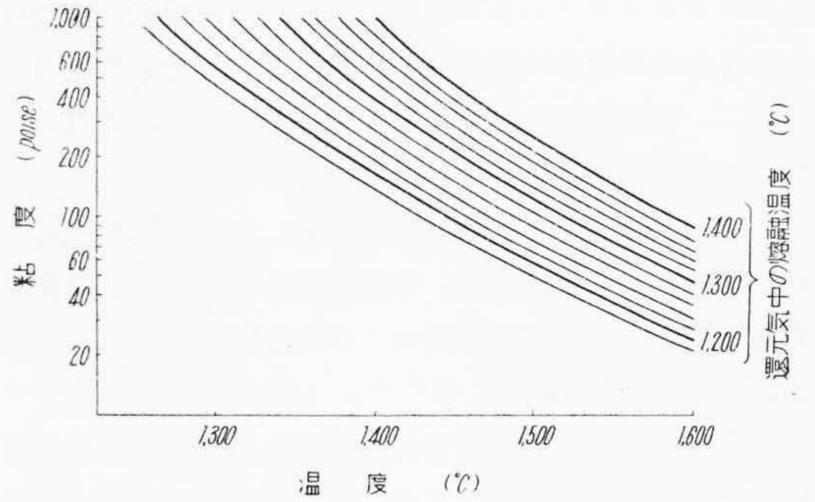


第19図 スラグ粒度の実測例 (Nichols & Reid 氏による)  
Fig. 19. Examples of Slag Viscosity. (By Nichols & Reid)



第20図 2,600°F (1,427°C) におけるスラグの組成と粘度との関係 (空气中)  
Fig. 20. Viscosity-Composition Diagram of Coal Ash Slags Melted in Air. (By Nichols & Reid)

ここに  $\eta$  は粘度 (poise)  $t$  はスラグの温度,  $C$  は組成によつて定まる常数である。またスラグの組成と粘度との関係は次式で説明されている。



第21図 熔融温度をパラメータとした温度—粘度曲線 (Heldt による)  
Fig. 21. Viscosity-Temperature Curves with Ash Melting Point-Parameter. (By K. Heldt)

$\log (\eta_{1427}-1)=0.066 \text{ SiO}_2^*-2.38 \dots\dots(2)$   
たゞし  $\eta_{1427}$  は 1427°C における粘度で  $\text{SiO}_2^*$  は (3) 式による。

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

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

Endell および Zauleck 両氏<sup>(20)</sup>によつても別箇の式が提案されているがここでは省略する。

第20図は Nichols 氏ら<sup>(19)</sup>によつてまとめられた灰の組成と粘度との関係を示す状態図である。たゞし図中にとつた成分はそれぞれ、これらの合計が100%になるとして換算した値をもとにしてあることに注意を要する。またかくして除外された  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の値によつてこの図は異なり、第20図は  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  が 2.15 の場合のものである。

灰の熔融性と流動性とは関係がありそうであるが絶対的な関係はない。しいていへば灰の流動温度においては、そのスラグの粘度は 100 poise 前後が多いこと<sup>(19)</sup>、還元気中の灰の熔融温度と、そのスラグの 1,450°C における粘度との間にかかなりのバラツキはあるにしても一応の関係がある<sup>(21)</sup>こと位であろう。後者の関係から還元気中の灰の熔融温度に対し温度と粘度との関係曲線図が第21図のように与えられているが、一応の参考というべく、日本炭に対してはなお実測によつて確かめねばならぬことが非常に多い。

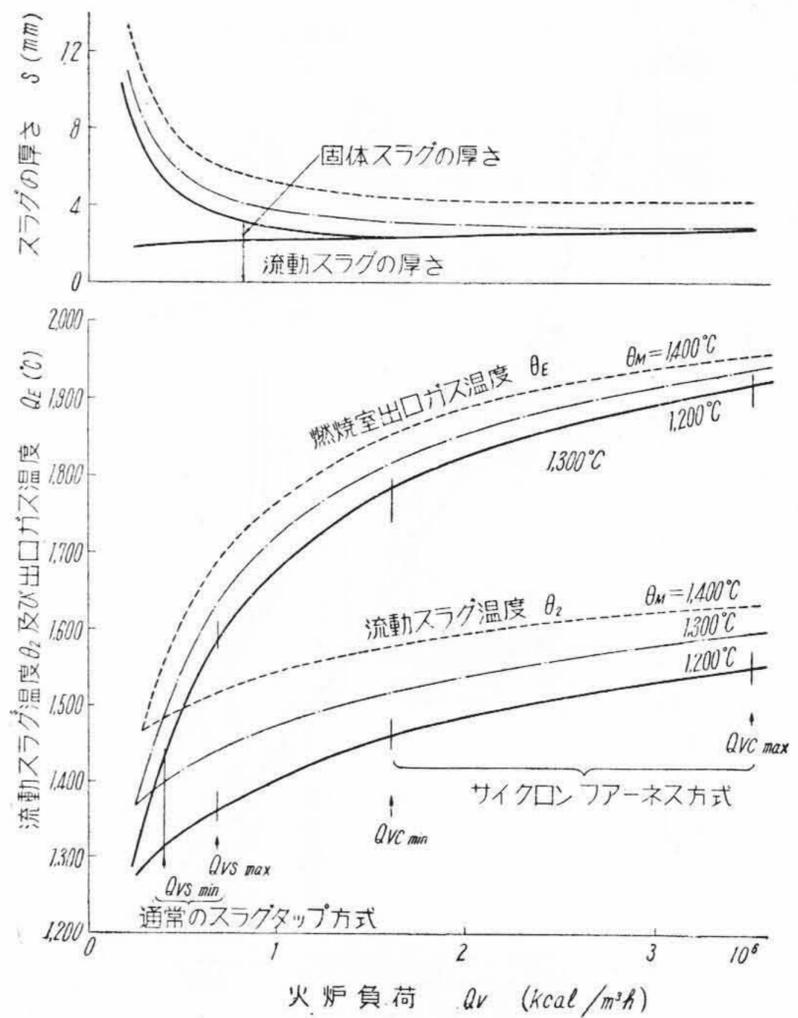
〔VI〕 サイクロンファーン

すべての燃焼法がそうであるように、サイクロンファーンといへどもあらゆる石炭に対して万能ではない。たゞその適用限界がいかに広いかが問題となる。

サイクロンファーンネスに適用するには、熔融、流動せしめるために灰の性質が重要であること、そしてその重要な二、三の事項についてはすでに述べたが、これらの性質に見合う燃焼室の条件が問題となる。

いまある大きさの一つの燃焼室について同じ燃焼条件、すなわち石炭発熱量、空気温度、および空気過剰係数を一定とし石炭灰の熔融および流動特性を異にした場合の熱計算を第22図に示した。石炭燃焼量したがって火炉負荷を変えた場合の出口ガス温度、流動スラグの温度、ならびにスラグの厚さを描いたものである。火炉負荷が増す(すなわち石炭を多く焚く)と当然のことながら火炉出口のガス温度は上昇してゆく。それにつれてスラグの温度も高くなり流動性を増すから一般的にはその層の厚さは減少する。たゞ流動スラグは石炭量の増加に伴って灰の絶対量も増すから温度上昇に伴いスラグの流動性が改善されてもその厚さは多少増加するが、固体のスラグの厚さは急激に減少し、ほぼ一定値あるいは、ほとんど0になる。このような特性から、ある運転条件からボイラ負荷が減少し、したがって火炉負荷が少くなると、スラグの層の厚さが増加し、熱吸収量を制限し、負荷減少に伴う出口ガス温度の低下の割合が、ドライボトムの燃焼方式の場合よりも少い。これはスラグタップ方式のものの“自己平衡性”として知られている性質である。また同じ発熱量、同じ負荷で灰の熔融温度が高くなると、スラグの層の厚さを増大し、これによつてガス温度を高める状態もこの図から知られる。これも自己平衡性の一環と考えられる。

さてスラグタップ方式ではスラグの自由な排出が行われるためには、ガスならびにスラグの温度の制限がある。もちろん燃焼室での必要な熱吸収量とのかね合いその他から許しうるスラグの厚さからも制限される。このような制限から火炉負荷に許容される最低限界が定まる。サイクロンファーンネスでは通常スラグタッピングホールは二次炉に設けられるから、二次炉内をスラグが流動して排出孔から楽に流出するためにはその途中の冷却を考えて、一次炉出口のスラグならびにガスの温度が充分それに耐えるほどの温度でなければならない。通常のスラグタップでは、一次炉中から直接タッピングをするとみなされるから前者に比べて低い温度まで許しえよう。これら最低の温度に対応する火炉負荷を、例えばスラグの熔融温度  $\theta_M = 1,200^\circ\text{C}$  のとき  $QVC_{min}$ ,  $QVS_{min}$  と表す。ここに C および S はそれぞれサイクロンファーンネスおよびスラグタップ方式の場合のものを表す。図の如く  $QVC_{min} > QVS_{min}$  である。一方火炉負荷のとりうる最大値は、限られた容積の燃焼室内で安全に完全燃焼しうるという条件から定まる。これはパーナの構造などの



第22図 スラグタップ方式燃焼室の特性の一例  $\theta_M$  はスラグの熔融温度を示す  
Fig. 22. An Example of Slag-Tap Firing Furnace

燃焼方式その他によりあたえられる石炭粒子の燃焼速度などによつて定まる。またスラグスクリーンチューブ以後の伝熱面のスラグによる汚損を考慮してガスの出口温度からも制限される。これらの点についてはサイクロンファーンネスがいちじるしく高い燃焼速度をもち非常に大きな火炉負荷をとりうることはすでに〔Ⅲ〕章に述べた通りである。かくして最高許容火炉負荷は第22図の  $QVC_{max}$ ,  $QVS_{max}$  のごとくなり、 $QV_{max} \sim QV_{min}$  の範囲が安全にスラグタップしつつ運転しうる負荷の範囲となり、 $\frac{QV_{min}}{QV_{max}}$  の比がその最大負荷に対する軽負荷の許容限界ということになる。実績によれば通常のスラグタップ方式が常用負荷に対して60%前後であるのに対し、サイクロンファーンネスでは同じく常用負荷に対して45%まで行われている。さらに後者の場合1箇にサイクロンファーンネスをたとえば2箇つければ、1箇のみを使用することによつて25%までのスラッキング運転が可能になるわけで非常にその範囲は広い。

もちろん第22図のごとき特性曲線は火炉の大きさ、伝熱面の構造と、石炭発熱量、空気温度、空気過剰係数などの運転条件ならびに灰の熔融性、流動性によつて異なることは当然であるが、広義のスラグタップ燃焼の一般的な特性としては変りはない。また低質炭の場合この特性がかなり不自由なものになることも否めないことで

ある。これに対しては従来のサイクロンファーンを改良し二次炉に対する一次炉の配置、タッピングホールの位置などの変更、炉壁の構造などによつて許容最低負荷を下げる事が考慮されている。なお灰の熔融、流動性については非常に複雑であつて、簡単に数式で表して計算によつて燃焼室の特性を求めることはかなりむづかしい。それだけに実際に燃焼試験することが必要となり、日立研究所で実施しているテストファーンによる試験もここにその意義を有している。

### 〔VII〕 スラグの利用

サイクロンファーンの特長については前章までに述べたが、とくにスラグタップ方式のもの全部に共通することながら、低質炭に伴う多量の灰が、取扱いやすい粒状のスラグとして処理しうることは、その大きな特長である。単にこれを廃棄するにしてもその手間が著しく軽減されるであろうし、さらに進んでこれが何らかの方面に利用されることになれば、大きな価値を生ずることになる。この場合未燃炭素がほとんどなく灼熱減量がほとんどない安定な性質のものであることは大きな特点である。これらスラグを利用することは日本においてはまだまだあまり開発されていないが、低質炭の燃焼がとり上げられる限り十分な考慮が払われるべきである。ドイツおよびアメリカにおいては Flyash はわざわざ炉内に還元し再熔融してメロンの種子と表現されている粒状スラグを作ることが要求され、このためには Melting-in Cyclone と称する小型サイクロンファーンを通常の微粉炭ボイラに設置することも行われている。

最近数年間にわたつて旭化成工業の宗像英二博士、佐川治男両氏は石炭に石灰を添加し、適当量の CaO の含有量とした熔融スラグに少量の刺戟剤を混合粉碎することによつて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を進め注目すべき成果を上げている<sup>(22)</sup>。CaO の適正量は 45% 前後といわれかなり大量の石灰の添加を要するが、すでに第 3 表の実験結果に示したごとく、サイクロンファーンにおいてはこの程度の添加の場合にも充分燃焼、熔融に成功している。生じたスラグの粉碎度 (Grindability) の実測値もほゞ石炭程度のもので、粉碎に困難はあまりないと予想され、今後の大きな発展が期待される。これについては宗像、佐川両氏の発表にゆずるが、機会をみて日立研究所における関連した研究も発表したい。

### 〔VIII〕 結 言

低質炭を消化しうるボイラ燃焼方式にはそれぞれの特長をもつ各種のものがあるが、最近とくに目覚ましい発達

をしているサイクロンファーンの紹介と、日立研究所における研究成果の一端を述べた。本燃焼方式は決して低質炭専用のものでなく、むしろ原理的に最もすぐれた燃焼方式でありその適用性の広いこと、灰処理の能力のすぐれていること、完全燃焼の行われることが、低質炭の場合にも非常な偉力を発揮するということである。この燃焼方式の数々の利点は本文中に詳説したが、たゞこれらの利点を発揮するには、日本の低質炭ではなおかなりの困難が予想され、われわれの研究はこれらの困難を解決し広範囲の本邦炭をボイラ燃料として処理しうるサイクロンファーンを完成すべく続けられている訳である。

終りにサイクロンファーンについて多大の関心をよせられ、御激励を賜つた燃料協会、低品位炭利用委員会の方々、貴重な御助言をいただいた旭化成宗像英二、佐川治男の両氏に深く敬意を表す。また研究遂行に当つてバブ日立、ならびに日立製作所幹部の方々、関係各位から絶大な御配慮をいただいたことに厚く感謝する次第である。

### 参 考 文 献

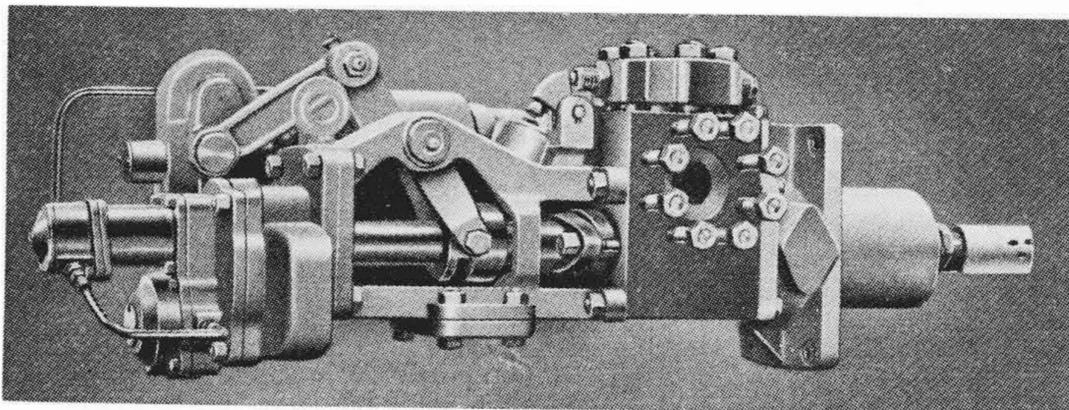
- (1) 杉沼, 河原, 林: 電力, 39, 10 1166/1168 (昭 30-9)
- (2) たとえば石炭技術協会: 石炭分析試験集成, (昭25)
- (3) たとえば最近のものでは  
小田島: 火力発電, 6, 1, 20 (昭 30-1)  
土屋, 若林: 火力発電, 5, 4 251 (昭 29-7)
- (4) 福田: 機学誌, 57, 422, 172 (昭 29-3)
- (5) A. E. Grunert その他: A.S.M.E., 69, 613/627 (1947)
- (6) Merle Newirk: A.S.M.E., 73, 215/224 (1951)
- (7) H.C. Schroeder その他: A.S.M.E., 74, 572/578 (1952)
- (8) V.L. Stone その他: Mech. Fngng., 74 359/368 (1952)
- (9) K. Schraeff: Mitt. d. Ver. Grosskesselbesit., 17/18 41/63 (1951)
- (10) W. Cautis: Mitt d. V.G.B. 17/18 63/70 (1951)
- (11) M. Ledinegg: VDI 94 921/927 (1952)
- (12) W. Cautis: Mitt. d. V.G.B. 27 (1954)
- (13) H. G. Stoltzing: Mitt. d. V. G. B. 37 655/659 (1955)
- (14) B. Klöss: Mitt. d. V.G.B. 37 660/665 (1955)
- (15) W. Gumz: Theorie und Berechnung der Kohlenstaubfeuerungen Springer-Verlag
- (16) M. Ledinegg: Dampferzeugung Springer-Verlag Wien. (1952)
- (17) 香坂, 戸田: 工化誌, 37, 10 1354/1364 (1934) 39, 1 62/66 (1936), 40, 5 361/365 (1937), 42, 10 704/70, 42, 10, 708/711 (1939)
- (18) A. Zinzen: Dampfkessel und Feurungen Springer-Verlag Berlin (1950)
- (19) P. Nichols, W.T. Reid.: A.S.M.E., 62 2 141/153 (1940)
- (20) K. Endell, D. Zauleck: Bergbau und Energie 3 (1950)
- (21) K. Heldt: BWK 7, 7 321/324 (1955)
- (22) 宗像, 佐川: 燃協誌, 34, 340 490/496 (昭 30-8)

ユニディレクショナル短抜差  
スートブロワ  
Unidirectional Soot Blower

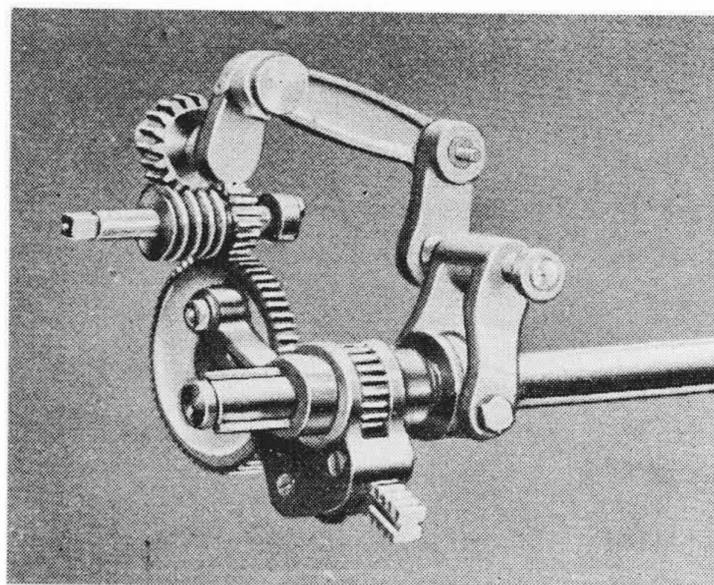
本機はモータを逆転することなく運転できる新しい設計のもので、大容量汽罐において多数のスートブロワの連続自動操作を必要とする場合、その調節を簡便ならしめることが最大の特徴である。

炉内にノズルを突出し予め決められた角度に、ある決った回数だけ揺動回転を行つて元の位置に戻るがクラッチを使用しない機構になつており、モータはその間連続的に回転する。したがつてたゞ ON-OFF のみの簡単な操作で済むので、逆転用コンダクタや、オーバラップタイミングの必要もなく、電気的な操作が非常に簡単になる。

噴射作用としては、ノズルの回転は軸方向の出入の作動と同様に、クランクの回転で調整されているので規程の行程を越えることはなく、ノズルの噴射角は必要な角度に限定され、より広範囲に噴射することがないようになつている。特にノズルはクランク作用によつて単弦運動をするから、ブロワがある幅のチューブバンクを対称的に清掃する必要があるところでは、ノズルとチューブの種々の距離に対して自動的に補整され清掃効果を一樣にする。すなわちノズルとチューブの距離が最も少いバンクの中心ではノズルの回転速度は最大であり、噴射角の終りに向つて遅くなりその距離の最大のところでは回転速度は最小になる。このことは蒸気消費量が少くて、離れたチューブを効果的に清掃することができ、またノズ



第1図 ユニディレクショナル短抜差スートブロワ  
Fig. 1. General Arrangement of "Unidirectional" Soot Blower Unit



第2図 機構の基本  
Fig. 2. The Basic Mechanism

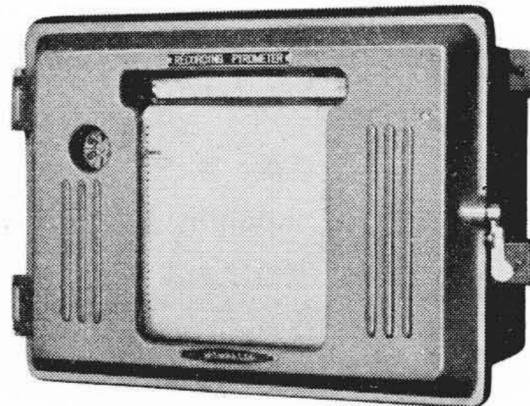
ルに近いチューブの腐蝕や磨耗をなくすることになる。  
機械構造設計としては、モータが一方向の回転のみで逆転の応力を繰返して受けないから不時の故障の起る可能性がほとんどなく、回転範囲は80°~210°の間を10°毎に調節できる。

第1図はその外観を示し、第2図は機構の基本を示す。

TMK 型熱電温度記録計  
TCK 型抵抗温度記録計

Type TMK Recording Pyrometers and  
Type TCK Recording Thermometers

戦前から熱管理の合理化に多数愛用されてきた Q<sub>3</sub> 型温度記録計の長所を生かし、さらに構造上、取扱上一段と改良を加えた新型記録計に第1図の TMK 型熱電温度記録計および TCK 型抵抗温度記録計がある。これらはいずれも従来から定評のある日立製作所独特の内部磁石を採用しており、測定要素、切換スイッチなどは透明なアクリルカバーを採用しているので外部からでも点検できる。150 mm 幅の記録紙上には6箇所の温度が明瞭に



第1図 TMK 型熱電温度記録計  
Fig. 1. Type TMK Recording Pyrometer

打点記録され、内部の機構は扉式に引出すことができるなど計器の取扱い、保守上の観点からも十分な考慮が払われている。