ボイラにおける燃焼技術，燃料の動向

バブコック日立韓国研究所 寺 田 博

バブコック日立(株)エネルギー本部 立 花 慶太郎

Current Topics on Combustion Technology and Solid Fuel for Boilers

Hiroshi Terada

Babcock Hitachi Kure Research Laboratory

Keitaro Tachibana

Babcock Hitachi Advanced Energy Systems Div.

Fluidized bed boiler (F.B.B.) and highly loaded coal water mixture (CWM) have recieved considerable world wide attention as prospective new coal utilization technologies.

The main advantages of FBB are considered as follows. FBB can burn a variety of fuels such as low grade coal including sedimented waste, and very high degree of desulfurization can be achieved directly in the combuster.

It has already been commercialized in industrial use, and 50 MW demonstration plant for verifing utility use are under construction.

Highly loaded CWM contains 60 to 75% coal suspended in water. It is ground into desirable particle size distribution somewhat finer than the standard pulverized coal grind and a complex chemical additive system gives the preferable CWM properties as liquid fuel.

Furthermore combustion test programmes undergoing show excellent combustion characteristics because CWM include a lot of fine coal particle and water. So it is greatly expected that could be used as a substitute liquid fuel for heavy oil.

Keywords: Coal, Forcil fuel, Fluidized bed, Boiler, Slurry, Combustion

1. はじめに

第1次オイルショック以降，石炭利用の効率化，経済性の向上等を目標にした努力が続けられてきた。燃料としての利用技術には直接燃焼する微粉炭燃焼法，流動層燃焼法など，加工利用法としてスラリー燃料化，褐炭の脱水プロセス及び脱灰技術などがあり，また，転換利用法としてガス化，液化などがある。

この内微粉炭燃焼法を除けば，ここ10年来の研究開発に負う所が多く，漸く実用化の技術段階に入るプ

ロセスが出て来た所である。こうした中で最近流動層ボイラ及び石炭—水スラリー技術が注目を集めている。

流動層ボイラは層内に伝熱管を設置してボイラ化することにより，流動層反応器の特徴を生かしたものである。比較的低温の燃焼であるため灰の熔融トラブルを防止でき，石炭粒子の層内滞留時間を充分とれるため炭種の拡大につながるなど，低品位炭の活用にも適している。また炉内媒体として石灰石等の脱硫剤を使用することによりボイラと排煙処理装置の一体化が可能となり，微粉炭燃焼法に比較すると総合的な経済性

図 1 各種反応装置の形態

において優れていることがわかっている。

現在、流動層ボイラの活かされる道は微粉炭燃焼法に不適当な低品位炭等の固形燃料の活用と、脱硫システムを組み込んだ経済性の高いプラントと考えられている。

一方、最近急速に関心の高まった石炭—水スラリー技術は石炭を固形燃料として取り扱う不便さから解放される為に有効で簡便な流体化技術と言える。石炭を水又は油で流体化する試みはしばしば行われてきたが、ここで対象とする石炭—水スラリーは 200 メッシュ以下の微粉を 70% 以上含む粒子で固体濃度を 70% 以上としたもので CWM 又は CWS 等と呼ばれている。スラリーの粘度は 1,000 cP 程度に調整されるので燃料としては油と同様に噴霧燃焼が可能となる。

このような粒子条件では従来の考え方だけでは低粘度の流体とする事は困難で、粒径分布の調整あるいは界面活性剤の活用などが重要な要件となる。石炭—水スラリーは流体燃料として多くの利点を持っているが、水を含む為のデメリットを有して居り、微粉炭燃料に対抗できる経済性を持たせるためには加工費を出来るだけ低減することが重要で、現在、開発中の各プロジェクトともこの点に腐心している。

以上のような背景のもとに流動層ボイラ及び石炭—水スラリーに関する研究開発は世界的な規模で進められており、米国においても石炭振興策あるいは当面の石炭利用技術開発の本命と見られている。

2. 流動層燃焼

2.1 流動層燃焼の特徴

固体燃料燃焼装置の基本的な形は図 1 に示す各種反応装置に対応している。固体粒子のサイズと粒子層を通る燃焼用空気の流れによって、固体粒子の動かない固定層から濃厚な層を形成して流動する流動層、濃厚層の部分有するが一部分の粒子はどんどん飛散する

のでこれを捕集して再び濃厚層に戻す循環流動層、更に空気流速が大きくなって全粒子が気流に乗る状態になった輸送層などの状態となる。これに対応してボイラの形式もストーク型、流動層型、循環流動層型及びいわゆる微粉炭焚ボイラとなる。

ここで対象としたのは流動層型であるが、循環流動層型にも若干ふれてみたい。流動層ボイラの特徴としてまず挙げられるのは、燃焼反応の大部分が行われる固体粒子の流動層部を有することである。この部分に伝熱管を配置するので、効率の良い伝熱が実現され、燃焼反応を低い温度で行う事ができる。通常 750°C から 850°C 程度の温度に設定される。この温度では燃焼速度が遅くなるが、固体粒子が層内に滞留する時間が長いので燃焼には全く支障がない。一方、微粉炭燃焼法では灰の熔融温度が低い石炭では火焔壁に熔融灰が付着したり（スラッシング）、後部伝熱面に付着した灰が焼結される（ファリング）トラブルが見られるが、流動層ボイラではこの点からも解放される。

図 2 は一定重量の石炭を熱天秤にかけて加熱昇温した時の重量減量率と温度の関係を示したものでバーニ

図 2 石炭のバーニングプロファイル

表 1 各種燃料の物性

燃 料 項 目	石 炭				コークス		そ の 他				
	ズリ 太平洋 30粉	スラッ 炭脱 水ケ ーキ	高灰分 炭 ナマズ 田炭	高水分 炭 チュイ トナ炭	一般炭 エルメ ロ炭	無煙炭 ホンゲ イ炭	石油 コーク ス	電極 コーク ス	汚 泥	パーク	ソーダ スト
発 熱 量 (kcal/kg)											
恒 湿 高 位	3680	2680	4170	4970	6515	6680	8520	7430	2500	1840	2190
工 業 分 析 (%)											
水 分	3.9	1.6	2.7	15.2	3.2	1.7	0.95	0.05	6.9	54.9	52.3
揮 発 分	29.5	19.5	22.4	41.2	29.3	6.6	9.0	0.53	37.1	31.6	40.3
固 定 炭 素	21.4	18.9	32.4	34.4	53.6	71.9	89.7	94.6	5.6	8.5	7.2
灰 分	45.2	60.0	42.5	9.2	13.9	19.8	0.35	4.9	50.4	5.0	0.2
燃 料 比 (—)	0.73	0.97	1.45	0.83	1.83	10.85	9.97	178	0.15	0.27	0.18
元 素 分 析 (%)											
C	35.9	27.6	44.6	62.6	67.6	73.6	89.9	94.2	25.7	20.0	21.6
H	4.1	2.7	3.0	5.3	2.5	4.7	0.6	3.8	3.8	2.4	2.8
N	0.61	0.63	0.61	1.00	1.38	0.86	1.94	0.06	2.77	0.04	0.5
O	12.2	7.2	7.9	20.2	11.5	2.6	1.44	0.20	12.9	20.1	19.6
燃 焼 性 S	0.10	0.49	0.19	0.01	0.64	0.37	1.78	0.03	0.71	0.04	0.05
灰の溶融温度 (°C)											
軟 化 点	1340	1320	—	1210	1390	1385	—	1150	1140	—	—
融 点	1450	1420	—	1253	1430	1450>	—	1190	1230	—	—
溶 流 点	1500	1460	—	1290	1460	1450>	—	1230	1270	—	—
粉 砕 性 (HGI)	—	—	—	36	50	73	—	—	—	—	—

ングプロファイルと呼んでいる。褐炭あるいは高揮発分の石炭は低温で反応が始まり、減量速度も早い。反対に低揮発分歴青炭あるいは無煙炭の反応域は高温部にまで及ぶ。通常、流動層に供給する石炭の粒径は 10 mm 以下としているがスプレッド給炭法の場合には 25 mm 以下とすることもある。この様な場合、石炭粒子の燃焼時間は長くなるが、流動層内での滞留時間は充分長いので、この点から燃焼効率を心配することは不要である。

表 1 には各種燃料の物性を示したが、現在いずれも流動層ボイラの燃料として実用の対象と考えられている。この他、現状放置されているピートモス（泥炭）なども対象として考えられている。

流動層燃焼のもう一つの特徴は流動媒体に石灰石等の脱硫剤が使える事である。適当量の石灰石を燃料と共に流動層に供給して、温度条件を満たせば高率の脱硫効果が得られる。使用済脱硫剤は石灰灰と共に廃棄処理される事になるが、石灰石の硫化反応は粒子の表面から進行するので内部には未反応部が残り、廃棄処理量をふやすことになる。従って脱硫剤の使用量低減が課題となる。一旦使用した脱硫剤を別のプロセスで再生処理を行い、再び使用する事も考えられ検討

されているが、再生時の粉化などが問題となっており、いまだ実用段階に至っていない。

先に石炭粒子の層内滞留時間は充分に長いので燃焼上問題は無いと述べたが、流動中生成する微粉あるいは給炭中の微粉は流動層から飛び出して気流中に飛散する。燃焼効率上からはこの飛散カーボンが問題である。未反応微粉石灰石の回収も兼ねて気流中の微粒子を捕集して流動層にリサイクルすることが考えられるが、この方法によれば、燃焼効率、脱硫効率ともに改善される。

また、飛散カーボンを捕集して別置の流動層で燃焼して全体の効率を上げることも考えられる。この方式をカーボン再燃焼方式（CBC 方式）と呼んでいる。

2.2 低品位燃料の活用

中国には数千倍の流動層ボイラがあると言われる。大は蒸発量 140 t/h の電力用ボイラ（東北・鶏西）まで稼動中であるが、その多くは産炭地近くの小型ボイラで燃料はほとんどが矸（がん）と呼ばれるような低品位炭である。我が国の 1 号流動層ボイラもまた洗炭廃水スラッジを燃料とするものであった。この事は流動層ボイラの活かされる一つの道を示していたと思う。

洗炭廃水スラッジは洗炭循環水をフィルタにかけた

後の残渣で炭坑によって性状が異なるが我々が最初に手掛けたものはカオリナイトなどの粘土質を含む15 μm 以下の微小粒子から構成され、フィルタプレスキークーキとは言え約30%の水分と30~40%の灰分を含んでいた。これ以上の脱水も難かしく、解砕もならず極めて扱いにくいもので大半は放置されていた。

燃料化に当って最初にぶつかった課題は供給法であり、種々の試行の後押し出し成型を行う事にした。もともと超微粉で構成されているので燃焼時の粉化飛散

が心配されたが、適当な圧力で成型すると大半が流動層内に残留して高い燃焼効率を上げ得る事がわかった。図3は燃焼効率に関する実験結果を示したものである。図中の点は各種のスラッジ炭を成型した燃料を示している。斜線の範囲で示した一般の細粉に比べると燃焼効率の高いことがわかる。

これらの実験結果からスラッジ炭焚ボイラの給炭は押し出し成型法とされた。図4(a)にその概略を示す²⁾。次にぶつかった課題は層内媒体の粒径の問題である。成型炭が100 mm以上の長さになると粘着力の為に互にくっつき合って層内に落ち、加熱によって焼き物のように固まってしまう。成型圧力が弱いと粉化が激しく、全部の灰が飛散してしまうので層内に媒体が残らない。結局、適切な成型圧で適当な長さのものを連続的に製造、供給することによって図4(b)に示すように層内媒体の粒径をコントロールすることが出来た。

炭化度の高い低揮発分の歴青炭や無煙炭あるいはこれに類似している石油コークスなどを微粉炭方式で燃焼するのは困難で、ガス燃料の助燃などを要する。従って現状微粉炭ボイラは燃料比(固定炭素分/揮発分)が3以下位の範囲で設計されている。流動層燃焼の場合でも燃料比の高い石炭になると燃焼効率は低下するが、その低下率は微粉炭燃焼ほど激しいものではない。また、この場合でもリサイクル法あるいはCBCシス

図3 低品位炭の燃焼効率

(a) スラッジ炭ボイラ

(b) 給炭法と媒体粒径

図4 低品位炭利用流動層ボイラ

テムで全体の燃焼効率を上げる事が可能である。また燃料比の高い石炭の場合には燃焼速度が遅い為流動層内のカーボン率が上昇して NOx 低減効果が増加する事、あるいは揮発分が少ない為給炭の均一分散に対する要求が幾分緩和されるなどの利点もある。

以上のように流動層ボイラでは高水分、高灰分あるいは低揮発分、高灰分、難粉碎性等の低品位炭、その他木屑等の雑物も燃料化することが可能である。

2.3 開発の現状及びボイラとしての特徴

我が国における大型流動層ボイラの開発プロジェクトはサンシャイン計画にこそ入らなかったが、資エネ庁の卓見で昭和53年度にスタートした、表2に現在までの概略スケジュールを示す。経済性に関するフィジビリティスタディ、要素研究などを経て、低品位炭焚ボイラ運転開始の翌年には蒸発量 20 t/h のパイロットプラントが電源開発(株)若松火力発電所構内に誕生した(図5)。

米国では 6'×6' ベンチプラントから 20 MW 発電プラントに移ろうとしている時期で、その中間段階を埋めるテストプラントとして注目をあびた、パイロットプラントの運転研究は広範囲にわたって順調に行わ

れ、その成果を基にして現在、50 MW 実証プラントが同じ発電所内に建設されつつあり、来年度には運転が始まる予定である。

パイロットプラントの運転研究に先立つ要素研究ではボイラにおける燃焼効率、脱硫性能に関する検討に始まり、空塔部における反応、カーボン再燃焼及び脱硫剤の再生反応などの検討が行われた。またコールドモデルによる給炭の分散あるいは集塵性能に関する検討も行われた。これらの結果を総合した第1次のフィジビリティスタディにより流動層ボイラは発電単価において排煙脱硫装置付き微粉炭ボイラに優ると評価され、20 t/h パイロットプラントの建設にふみ切ることとなった。

20 t/h パイロットプラントでは2年半にわたって運転研究が行われた。初年度には低公害燃焼を目標として基本特性が把握され、昭和57年度には2段燃焼用の空気ポートに関して位置、形状の検討、流動層の分割運転及びスランピング(流動層の一部に仕切りを入れる事なく停止する運転方法)の検討を行った。57年8月には初回定検を利用して層内伝熱管の入替えと高温過熱器(650℃)テストループの設置を行った。

表 2 流動床ボイラ開発プログラム (資源エネルギー庁)

項目 \ 年度	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
ベンチテスト																		
			設計建設															
20 t/h パイロット					運 転													
					設 計 ・ 建 設													
50 MW 実 証											運 転

図 5 20 t/h パイロットプラント (若松発電所)

また、このパイロットプラントには気流搬送給炭システムの他にスプレッド給炭機が備えられ、集塵器はマルチサイクロンの他電気集塵器及びグラニューバッドフィルタを設けこれらの性能テストも平行して行われた。57年度の後半には炭種別の燃焼特性、ボイラ動特性、スプレッド給炭試験、灰のリサイクル運転、カーボン再燃焼炉及び混炭燃焼などに関する検討が行われた。58年度は炭種適用範囲の拡大と言うことで低S炭、中S炭及び高燃料比、低品

表 3 試験炭銘柄および特性

銘柄	発熱量 (kcal/kg)	N 分 (%)	S 分 (%)	燃料比
A 炭(国内炭)	6,510	0.92	0.18	0.85
B 炭(外炭)	6,640	1.68	0.81	1.78
C 炭(")	6,920	1.47	0.85	1.22
D 炭(")	6,800	1.64	0.32	2.14
E 炭(")	6,800	0.82	0.66	1.99
F 炭(")	6,390	1.48	0.78	2.45
G 炭(")	6,920	1.48	0.40	1.89

位炭などの試験が行われた。

試験用に使われた主な石炭の性状は表 3 に示すようなもので、使用量は合計 12,000 t 以上に達する。流動層ボイラの燃焼特性のうち最大の関心事は、燃焼効率をどれ程高められるかであった。すでに述べたように層内における粒子の滞留時間は充分長いので、層内に止まる限り効率上の問題は生じない。所が給炭中の微粉或いは層内で粉砕された微粉カーボンは気流に乗って流動層から飛び出してゆく。流動層、空塔部共に微粉炭炉に比べると低温に制御されているので空塔部に飛散したカーボン粒子の中には未燃のまま後流に持ち去られるものがある。

20t/h パイロットプラントの主燃焼炉における燃焼効率は図 6 に示すような結果となり、燃料比 2.5 位の

図 6 燃料比と燃焼効率

図 7 層内空気比と NOx, SOx 発生量との関係

石炭では 90% 位になる。主燃焼炉の飛散灰をカーボン再燃焼炉 (CBC) で燃焼すると燃料比によらず 90% 近い燃焼効率の得られることがわかる。以上を総合するとカーボン再燃焼システムとする事により、全体で 98% 以上の燃焼効率が得られる見通しを得た。

続いて脱硫性能であるが、脱硫剤の燃料中の S 分に対する使用モル比あるいは脱硫剤の比表面積を上げれば脱硫率は向上する事が出来る。また、図 7 は層内空気比と SOx, NOx 排出量の関係を示したもので、層内空気を減らして燃料リッチの条件にすると NOx は低減できるが、脱硫率は低下する傾向となる。そこで流動層ボイラの基本的な設計方針は流動層温度、層内空気比等は脱硫性能優先で設定し、NOx は空塔部への 2 次空気の吹き込みによるいわゆる 2 段燃焼によって低減する事と結論された。

パイロットプラントの試験結果をもとに第 2 次フィジビリティスタディを行った。その結論を表 4 に示す。固定費が微粉炭ボイラシステムに比べて安くなるため、発電単価においても 6% 強の利益が見込めると試算された。この差は排煙脱硫装置が省略出来る事によるものである。

こうして本プロジェクトは更に実証プラントへ歩を

表 4 流動層ボイラの経済性

	流動層ボイラ	微粉炭焚ボイラ
固 定 費	43.0	50.0
変 動 費	50.5	50.0
合 計	93.5	100.0

注) 微粉炭焚ボイラを 100% とした相対値 (%) を示す。

図 8 50MW流動層ボイラ

進めることになり，現在，設計を終了して製作，建設が急ピッチで進められている。図8には50MW実証プラントのボイラ本体を立体図として示した。

2.4 循環流動層ボイラの特徴

ガス流速を上げてエントレンドベッドに近づけた高速流動層は反応部の高さがバブリングベッドに比較すると数倍以上に高く，断面積当りの熱負荷も3倍近くとられている。従ってガス，固体の接触が良好で，ボイラとする場合には石炭又は脱硫剤の粒径を適当に選定することにより，燃焼効率及び脱硫効率を上げることができる。また，燃料の供給機構も従来型流動層ボイラより簡単にすることが可能である。

ボイラの構造は種々考えられているが，基本的には燃焼部を高速流動層で構成し，飛散した高温媒体は炉出口でサイクロン等により捕集して伝熱管を配置した流動層に集め，熱交換を行った後再び燃焼部に循環する形がとられている。

図9に米国B&W社が製作している中型容量の循環型流動層ボイラの側断面図を示す。この種のボイラでは飛散粒子の捕集循環が重要な役割を果たすので粒子分離器にも工夫がなされている。

図10に示すのは内部循環型流動層ボイラの基本概念図である。米国ウェスティングハウス社がDOEの委託を受けて設計したもので，内筒と外筒に囲まれた環状部は粒子の下降管となっており，ここに伝熱管が配置されている。内筒が燃焼部となりその下端に給炭するので，給炭の均一分散が簡単である。上部流動層部への2次空気，あるいは空塔部への3次空気吹込に

図 9 B&W社外部循環型流動層ボイラ

図 10 内部循環型流動層ボイラ

より燃焼効率，脱硫効率の改善を考えている。

3. 高濃度石炭—水スラリ

3.1 高濃度化の原理及びスラリ物性

石炭—水スラリが燃料として新たな関心を集めたのは，従来の概念を破って石炭濃度70%以上の高濃度化が可能となったからである。もちろんこの際液体と

図 11 高濃度化のための粒径分布

して 1,500 cP 以下の粘度と、実用上必要な期間静置しても沈降、分離などが起らない事が条件である。

第 1 の条件である石炭濃度を得るためには粒径分布を調整して系の充填密度を上げねばならない。球形粒子であれば、六方稠密格子間に順次その間隙を埋める小球を充填することで最密充填が得られる。石炭粒子の場合もこれに準じて考えることができる。

図 11 は粒径分布とスラリー物性の関係を示したものである。スラリー中の石炭濃度を上げるためには幅の広い粒径分布を必要とする。図 11-A に示すように例えばゴダノーシューマン分布において分布指数を q とすると、この q を適当な値に設定することが重要である。図 11-B は分布指数 q と充填率及び調整スラリーの粘度の関係を示したもので、 q が 0.4 から 0.5 の範囲で系の充填率は最も高くなり、かつスラリーの粘度も最も低くなる。

スラリーの低粘性化あるいは安定化の為に、粒径分布の調整だけでは不十分で、界面活性剤が必要になる。この為スラリー化に適した界面活性剤の探索が続けられ、優れたものが見出されている。例えばアニオン系の活性剤を添加すると石炭粒子のζ電位が大きくなり、炭粒同志の接触・凝集が少なくなって低粘度化、沈降防止をはかることができる。

また、石炭は産地によって物性の差があるので、同一粘度のスラリーを作ろうとすれば可能な濃度に差を生ずる。石炭物性の内、スラリー物性に影響する主要因子は粉碎性と吸水性と見て良い。粉碎性は先に述べた粒径分布の調整に関与し、粉碎性の悪い石炭は最適な分布を得ようとしても必要な微粉の量が不足し勝ちである。また、石炭粒子の細孔構造に吸蔵される水は流動に役立つ自由水を減らしてスラリーの流動性を悪くする。

図 12 ボイラ用一般炭 17 銘柄のスラリー化特性評価

図 12 は標準的な試験法を用いてどの程度のスラリーが得られるかを調べた結果である。ボイラ用燃料として用いられる一般炭 17 炭種の結果でその内の何 % がどれ程の濃度に達するかを示している。試験炭の 75% 近くが濃度 67% から 72% 位のスラリーになることがわかる。

石炭-水スラリーは濃度が 40% を超えると非ニュートン性を示すようになり、高濃度かつ界面活性剤の効果が弱い場合にはダイラタント流動を示すようになる。流体燃料として輸送・貯蔵上望ましいのは図 13 に示すような擬塑性流動（シェードプラスティシティ）である。図中 E で示されるスラリーは静止貯蔵している間は粘度が高く粒子の沈降が防止され、輸送時には必要な所まで粘度が下る。

図 14 にはあるスラリーを小型容器 (600 mmφ×700 mm) に 50 日間静置貯蔵した後、深さ方向に沿ってス

図 13 製造スラリの粒径分布と粘度特性

図 14 50日静置試験後のCWMの性状

ラリの粘度と石炭濃度を測定した結果を示した。初期の平均濃度が70%，粘度は1,000 cPでこの程度の範囲であれば燃料として充分使用に耐えると評価されている。

3.2 製造プロセス

石炭—水スラリを経済性のある流体燃料にするためには如何に低コストで高濃度化を達成するかが鍵となる。流体として良好な物性を得る為には前述のように微粉砕を必要とするし、また、燃焼の観点からも水を含む燃料であるから粒子が微細な程良い事は容易に想像できる。粒径が小さくなればそれだけ粉砕動力を要することになるので、出来るだけ効率的な粉砕を行って動力費を下げる事が望まれる。また、界面活性剤は燃料単価に比べれば非常に高価なものであるから、出来るだけ安価で少量の添加でもその効果を発揮する

ものが望まれる。

このような期待に応じて多くの製造プロセスの研究開発が進められてきた。これらを粉砕プロセスとしてみると、乾式、乾・湿併用方式、及び湿式に3分類できる。

乾式法は1台もしくは複数台の粉砕機で粉砕したのち分級、混合調整を行うものでコーリキッド(米)、ナイコール(スウェーデン)などが開発している。

乾湿併用方式の基本は低濃度湿式粉砕を行った後これに乾式粉砕炭を混合してスラリ化する方法で、アトランティックリサーチ、オキシデンタル、B & W社(何れも米国)などのプロセスがこれである。

湿式法には1台の湿式粉砕機で調整してしまう方法、2台の湿式粉砕機を用いて段階的に濃度を上げていくもの及び低濃度で粉砕して分級・脱水を行った後スラリ調整を行う方法などがある。スラリテック(米)フルイドカーボン、カーボゲル(スウェーデン)、電源開発、三菱重工、パプコック日立(日本)などが開発を進めている。

一方、界面活性剤の探索、開発も熱心に続けられて居り、アニオン系及びノニオン系の界面活性剤が開発されている。アニオン系の界面活性剤は前述のように粒子表面の電荷に基く電氣的斥力によって粒子の凝集を防ぐもので、ノニオン系の界面活性剤は高分子化合物を石炭粒子間に介在させて粒子の凝集を防ごうとするものである。また、プロセスにおける添加の方法も活性剤の使用量に影響するのでこの点についても種々の検討が行われている。

以下に代表的な製造プロセスとしてパプコック日立が開発している高濃度湿式法について述べる。

図 15 に高濃度湿式粉砕法の特徴を示す。低濃度粉

図 15 粒径分布に及ぼす粉砕濃度の影響

図 16 界面活性剤の多段添加及びその効果

砕法ではミル内にあるスラリの粘度が低いため同図に示すようにボールとスラリのリフトに差を生じ衝撃粉砕が主となる。このため被砕物の粒径分布幅は比較的狭くなる。これに反して高濃度粉砕法ではミル内にあるスラリの粘度が高く、ボールと被砕物は一体となって運動する。従って粉砕は摩擦が主流となり、被砕物は広い粒径分布をもつようになる。

次に界面活性剤の添加法であるが、高濃度粉砕方式では粉砕初期の流動性を良くするため、添加剤を最初

から加えておく必要がある。所が最初に全量を加えると粉砕後の新生界面への吸着が不足となり、多量の添加を必要とする。図 16 は実験室用小型粉砕機の結果であるが、3 段階添加により同一添加量でも低粘度のスラリーが得られることを示している。また同一粘度ではより高濃度化がはかれる。

以上の事から高濃度湿式粉砕法が経済性の良い方法であることが認められたが、ミル内のスラリーは流動可能な限界に近い状態になるので、動力費低減のために

図 17 CWM製造プロセス

2室型構造とするなどの配慮がなされている。図 17 は本プロセスの概略を示したもので、非常にシンプルなプロセスとなっている。

現在までに 5t/h（スラリーベース）のパイロットプラントによる運転研究が行われており、良好な結果が得られている。

3.3 燃焼特性及び燃焼技術

前節で述べたような製造技術により、重油と同様に噴霧燃焼が可能な石炭—水スラリーが得られるようになった。しかしながら出来る限りスラリー濃度を上げようとするので、スラリーの粘度は少なくとも 1,000 cP 程度はあり、同じアトマイザ噴霧でも従来の加熱重油とは条件が異なる。また、30%近い水を含むということで燃焼の機構も異なるので石炭—水スラリー用の燃焼技術が重要である。その為には噴霧燃焼特性の解明が必要でその努力が続けられている。

重油の場合には圧力噴霧型あるいは2流体噴霧型のアトマイザが用いられているが、石炭—水スラリーの場合には2流体噴霧型のアトマイザが好ましい。2流体噴霧アトマイザには外部混合型、内部混合型及びその中間に位置するYジェット型などがあるが、噴霧粒径、使用媒体量などからして後の2者が優れている。媒体には空気または蒸気が用いられるが、何れにしてもその使用量の低減が課題である。粘度が高いだけに媒体使用量は重油に比べれば多くなるのは止むを得ない。噴霧粒子の径は燃焼と密接に関連すると考えられるが、同じ2流体アトマイザを用いた場合でも噴霧粒子の粒径分布は油の場合と異なっている。すなわち、平均噴霧粒径が同程度であっても石炭—水スラリーの方が微小粒子ははるかに多くなる。この点はスラリー濃度とも関連して居り濃度が高い程その傾向が見られる。

また、炉内に噴霧された石炭—水スラリーは先ず加熱蒸発を起すため、着火部の熱を保つための工夫を要する。着火に必要な熱量を確保して、火炎の安定を保つためには強い旋回流、あるいはブラフボディによる

高温燃焼ガスの環流もしくはバーナタイルからの輻射熱の利用などが考えられる。噴霧粒子の中に微粉炭燃焼の場合に比べても更に小さい粒子の存在する事は石炭—水スラリーの燃焼にとって非常に好ましい事で、着火の安定さえ良ければ、火炎全体の様子は微粉炭燃焼よりもむしろ油あるいはガス燃焼に近い様子を示す。

図 18 は太平洋炭 CWM の燃焼結果と、同じ炉で太平洋炭の微粉炭燃

図 18 太平洋炭 CWM の燃焼特性

図 19 100メッシュ通過量と燃焼効率 (IFRF)

燃焼を行った結果とを比較したものである。もちろん両者で石炭の粒径分布などには大きな差異がある。両者を比較すると燃焼効率にはほとんど差が見られないが、

図 20 CWM中の石炭粒径と燃焼特性 (MIT)

NOx の生成量は CWM の方が低い事が示されている。

微粉炭燃焼においても最近 NOx 抑制のために燃焼条件の制約が厳しくなり、微粉炭の粒径が問題にされるようになってきている。特に未燃カーボン量を抑えるために供給微粉炭の粗粒部の構成が問題にされ、多くの場合 100 メッシュ (150 μm) 以上の粒子量割合を数%以下にしている。石炭—水スラリの場合にも基本的には同様に考えられると思うが、若干様子の異なる実験結果が示されて居り、燃焼機構の解明が急がれる。

図 19 は IFRF (国際火災財団) の示した実験結果で²⁾, 150 μm 以上の石炭粒子を 0.5% から約 10% 近く含む数種類のスラリを用いている。横軸にそれぞれのスラリの 100 メッシュ通過量 (150 μm 以下) を表わしているが、燃焼効率に傾向的な差は見られない。

図 20 は MIT (マサチューセッツ工科大学) の結果で³⁾, ユニモーダルの標準スラリと、200 メッシュ (74 μm) 以下 98% というファインスラリの燃焼結果を比較している。この結果によれば必ずしもファインスラリの方が燃焼性が良いとは言えず、スラリの濃度、石炭の粒径分布、石炭の物性 (特に炭化度) などを含めた総合的な検討を要する。

最後にアトマイザの摩耗についてであるが、特に 2 流体アトマイザの場合、気液合流部では亜音速流になるので鋼材では摩耗が激しく数時間とたたない事になる。これに対しては SiC などのセラミックス材を部分的に内張りする事で対処できる事が実証されている。

3.4 ボイラ用燃料としての評価

ボイラ用燃料としての石炭—水スラリには次のような特徴が考えられる。

- (1) 長距離輸送、大量貯蔵の場合には液体燃料としてポンプ輸送、沖取りなどが可能となり、港湾設備が簡略化され、貯炭ヤード用地の節減なども期待される。
- (2) ボイラ設備としては石炭バンカが不要になり、関連構築物が軽量化される。
- (3) 粉砕設備費及びその運転補修費が節減される。
- (4) 燃料の供給系及びその制御系が簡素化される。
- (5) 貯蔵に際して自然発火及び粉塵飛散防止の対策が不要となる。
- (6) 低 NOx 燃焼対策が容易である。

反面デメリットとしては燃料中に含まれる水分のため排ガス量が増え、熱損失も増加するが総合的に見れば有効な石炭利用技術の一つと考えられる。

燃料システムとしては山元方式、国内センタ方式などが考えられ、場合によっては長距離、長期間の輸送に耐える事が要求される。当社ではこの様な事態も考えて小量ではあるが 57 年度に図 21 に示す 2 つのルートで輸送試験を行っている。約 100 t のスラリを用いて最短 32 日、最長 74 日の輸送期間であったが到着後のスラリは充分使用に耐えるものであり、何れの燃料システムであっても成り立つ事が示されている。

次に燃料コストであるが、その構成要素は炭価、輸送費、及び製造費 (動力費、添加剤費、固定費等) で

図 21 船舶によるCWMの輸送試験経路

図 22 CWMのコスト試算例 (EPRI)

ある。また、後に述べるように脱灰を行う場合には更に脱灰の費用が加算される。図 22 は '84 年度に EPRI (米国電力研究所) の予測した数値で⁹⁾、CWM に対して約 2.7 ドル、脱灰 CWM に対して 3.6 ドル (何れも 100 万 Btu 当り) としている。事情は異なるが我々の目標としているコストもこれに近いものであり、動力費及び界面活性剤費などの低減では相当の成果を上げている。

表 5 は先に述べた CWM 2 方式を従来の微粉炭及び COM 技術と燃料システムとして比較したものである。このような燃料システムの実現を目指して世界各国でデモンストレーションあるいは商用の大型製造プラントが動いている。表 6 は主な大型プラントの一覧である。昨春秋、日米欧の関係者が集まって各国における市場に関する予想を行ったが、米、英、仏、伊、スウェーデン及び日本とも産業用としての期待が大きい事

表 5 石炭燃料システム一覧

燃料システム	海外				国内			
	山元	輸送	積地	海上	揚地	中継	輸送	PS
1. 微粉炭								
2. COM								
								●圧密・沈降対策
3. CWM-I (センタ方式)								
						●製造・安定化 ●低コスト化	●圧密・沈降対策	●貯蔵技術 ●燃焼技術
4. CWM-II (山元方式)								
	●製造・安定化 ●低コスト	●長距離輸送		●圧密・沈降対策	●沖取技術			●貯蔵技術 ●燃焼技術

表 6 CWM製造プラント

会 社 名	所 在 地	容 量 (トン/年)
アトランティック クリサーチ社	ブレデリックスベル グ (米)	40,000
ケープグレートン 開発公社	シドニン (カナダ)	30,000
ナイ コール 社	ストラバイカ (スウ ェーデン)	30,000
スラリテック社	サウスポイント (米)	120,000
フルイドカーボ ン社	マルモ (スウェーデ ン)	250,000

が述べられた。

現状の石炭—水スラリに関する技術レベルは以上に述べたようであるが、将来的には流体燃料化に加えて脱灰を行う良質化が目論まれている。また、スラリ化技術はプロセスの途中に脱灰組込みの可能性を充分に含んでいる。

脱灰にはマイヤーズプロセスに代表されるような化学のプロセスもあるが、スラリ化と結びついて最短距離にあるのはやはり改良型の浮遊選鉱技術であると考えられる。1部の石炭—水スラリ製造プロセスにはオプションとして脱灰プロセスを組み込んだものもあるが、本格的な開発はこれからであろう。

4. おわりに

現在、燃料としての大口石炭利用技術の中心は微粉炭燃焼であり、付随する環境装置（脱硫、脱硝）における研究開発と相まって経済的にも技術的にも確立された観がある。経済性、信頼性においてこれに打ち勝つ新技術を生み出すには適切な位置づけと多大な努力を要する。大型プラントの効率化を目指すガス化発電技術及び MHD 発電技術の開発研究が着々と積み重

ねられているが、その実現には更に時間を要するものと思われる。

一方、ここに取り上げた流動層ボイラと高濃度石炭—水スラリ技術は比較的短期間の研究開発が実を結びつつある段階で、特に中型ボイラ設備としてはすでに普及の域に達しているものと考えられる。流動層ボイラが中国においてあれだけ普及したのはそれ相当の理由によるもので、低品位炭利用の中、小型ボイラが一つの適正分野を示しているように思える。また、最近の循環流動層型ボイラに対する関心の高さも、流動層ボイラの長所を一層拡大しようとする表われではないだろうか。

高濃度石炭—水スラリ燃料もハンドリング特性、燃焼特性共に微粉炭に見られない特徴を持って居り、製造技術はほぼ確立されたものと見られる。大規模な実証試験によって急速に普及の道が開かれるであろうし、本文中でも若干ふれたように例えば自然発火、爆発の危険性がない安全性等、目に見えない利点に対する定量的な評価が行われれば、燃料としての評価は更に高まるであろう。脱灰プロセスの組み込みなども重要な課題として研究を進めているが、ローカルな利用法としては例えば炭鉱における洗炭排水（この中にはスラリ構成に欠かすことの出来ない微小粒子が大量に含まれている）との組み合わせ利用なども一つの道であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) H. Terada, : 1st China-Japan Fluidization Conference 1982
- 2) Borts et al : 6th Sympo on Slurry Combustion 1984
- 3) Farmayan et. al : Ibid. 1984
- 4) 正路他 : 日立評論 vol. 66, No. 2, 1984