

■ 特 集 ■ 新燃焼技術

石炭流動層燃焼技術

Fluidized Combustion of Coal

—新発電技術としての評価—

玉 貫 滋*
Shigeru Tamanuki

まえがき

石油代替エネルギーとしての石炭発電は最も確実な手段と期待されている。しかし、熱効率や、燃焼方式などにおいて改善と向上が強く要望され、これに応えるため、各種の新しい石炭発電技術が研究されている。中でも石炭流動燃焼技術の開発が進展しており、本文で広い観点からこれを考察する。

1 微粉炭燃焼技術の現状

高価な石油燃料から石炭への転換が電気事業を始め各産業において進められている。

石炭発電の技術としては、現在、微粉炭バーナ燃焼ボイラによるタービン発電が主体であり、これと組み合わさる排煙脱硫装置技術も湿式方式については6年来の運転実績がある。ボイラ改善などによる低NO_x燃焼方式とあわせて、現在、石炭による無公害発電が達成され、また地方自治体からも、これが認められるに至っている。

現在、さらに合理的なクリーン化技術開発として残されているのは、乾式脱硫装置、排煙脱硝装置および高精度集塵装置などである。実用中のもの、および開発中の、これらクリーン化装置は公害規制の進展に応じて個別に開発されてきたものであり、各種のクリーン化装置がほぼ出揃った現時点において、これらを総合的に再構成すれば、再検討を含めて、より以上の機能と効率を発揮させることができるであろう。“総合クリーン化システム”が今後のテーマとされている理由がここにある。

ところで各種のクリーン化装置の付加により、石炭発電所は重装備となり、発電プラントの建設費増大、

クリーン化装置の運転用動力の増大による正味の発電熱効率の低下などの影響がある。

発電端効率39.5%という高性能の石炭発電所も、所内動力が10.6%（排煙脱硫装置用の3%を含む）と大きいため、月間送電端効率は35.3%となり、さらに排ガス再加熱用燃料（アフターバーナ）4%相当までを考慮した正味の月間熱効率は33.9%まで低下しているのが現状である。（日米とも同じ状況である。）

石炭への転換に伴う新設発電所の設計においては、種々の工夫を加えて僅かの熱効率の回復は期待されるものの、より熱効率の高い発電所建設が望まれている。

次に使用石炭量は、既に国内生産量を超過し、今後の主力は輸入炭となるが、従来の国内炭に比べてその性状は、必ずしも燃焼好適とは言い難く、石炭ボイラの設計に難かしさが加わっている。従来から発電用に使用の国内炭が“若い石炭”と言われ、揮発分が多く燃焼性が良かったのに対し、一般に外国炭は“古い石炭”と言われ、揮発分が少なく、しかもNO_x発生のもととなる窒素分が、国内炭（N分1%程度）の2倍程度と大きい。

しかも石炭中の灰分が熔融スラッグとしてボイラ伝熱管表面に付着しやすい傾向の炭種が多い。

石炭資源の乏しい我が国としては、輸入先の多様化の必要もあり、石炭ボイラに対して、広い幅の炭種について、スラッキングトラブルがなく、燃焼効率よくしかも低NO_x燃焼のものが望まれる。

外国炭を用いるボイラ設計に当っては、あらかじめ各種のテストにより、炭種ごとに燃焼性、灰のスラッキング性などボイラ主要部設計に必要な項目を確かめ、N分に対しては、燃焼テスト装置により低NO_x燃焼方策を確認しなければならない。

NO_x発生に関しては、図-1の如く、石灰中の灰分が

*財石炭技術研究所理事石炭利用技術部長
〒101 東京都千代田区神田神保町2-10（教育出版ビル）

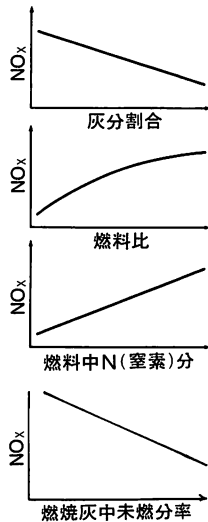


図-1 石炭性状と NO_x レベル

(NO_x レベルは、燃料比、灰分及びN(窒素)分割と密接な関連をもつ。)

多いと NO_x は低減傾向にあること、燃料比(固定炭素/揮発分)が大きいと、 NO_x は増加すること、また低 NO_x 燃焼を指向して、炎が低温気味となると灰中未燃カーボン率が増大するなどの関係がある。

以上より、外国炭燃焼ボイラの設計傾向は、スラッキング対策として、火炉断面積を大きくし(約20%)、燃焼の滞留時間が長くなるよう炉高を大にする。

また、 NO_x 低減のため第2段空気を主バーナ上部から吹込むなどの諸対策がとられる。

しかし、 NO_x を低減させようとする程、灰中未燃カーボン率は増大する。(カーボン含有率限度は通常5%)

また、 NO_x 低減のために第2段の空気の比率をあまりに大きくすることは、微粉炭の着火を不安定にするおそれがあり、これらの中庸点が選ばれる。

なお、未だ実用されていないが、第一段燃焼と第2段空気吹込の中間に、微粉炭(全量の10~20%)を吹込むと、Cにより、NOが還元される実験成果もある。(三段燃焼ともいう。)

外国炭燃焼ボイラに関しては、今後さらに改善研究が要請されているのが現状である。

以上、微粉炭燃焼ボイラにクリーン化設備の付いた石炭発電所の現況と残された問題点を記した。

問題点を再記すれば、熱効率の低下と燃焼性の悪い外国炭に対するボイラの適応能力の限界および建設費の増大などである。

ここに、さらに合理的な石炭燃焼ボイラ開発への期待がある。

2 流動燃焼の特長

燃焼の分野で流動化技術を活用しようと着手したのは、1950年代に英国においてであるが、その後米国および各国がこの技術開発に参入するようになった。石炭流動燃焼ボイラの特徴は、

ハンドリング・燃焼・熱伝達(スチーム変換)・運転制御・操作など多くの面で極めて合理的であり、かつ性能の良いことが実証(発電)プラントで確認されている。

石炭ボイラにはストーカ式や微粉炭ボイラなど技術の確立されたものが広汎に実用されているのにもかかわらず、流動燃焼ボイラの開発が推進されているのは、最近のエネルギー事情から石炭が見直され、従来の燃焼方法では使用の難しかった炭種等(低品位炭)、非常に幅広い燃料の使用が可能で、省エネルギー、燃料の多様化という世界的な要求に応えられる方式として期待されているからである。

流動燃焼の原理は、炉の底部に設置した空気の分散板(多孔板)の上に石炭燃焼灰又は、珪砂などの流動媒体を置き、分散板下部より押込ファンにより通風すると、風量の増加に伴い、媒体はあたかも沸騰しているかの様に烈しく運動をはじめ、この媒体を起動用燃料で加熱し、その中に燃料を投入すると、熱容量の大きな流動媒体の粒子運動により、投入された石炭等の燃料は、熱的および物理的に解砕されて、瞬時に乾燥着火し、良好な空気との接触によって、効率よく燃焼する。流動燃焼と従来の燃焼方式を較べると次の如くである。

- ① 幅広い燃料、炭種に対応できる。
- ② 低温燃焼による低 NO_x 運転

従来の微粉炭燃焼方式(燃焼温度約1,600°C)に較べ、流動燃焼では層中燃焼温度が800~950°C一定に制御されるため NO_x の発生が少ない。

この層中燃焼温度は灰の融点(一般には1,300°C)以下での燃焼であり、灰の熔融によるスラグやクリンカの生成の懸念もなく、排出される灰がソフトであるために、層中伝熱管等(ボイラチューブ)のボイラ各部の摩耗によるトラブルが大幅に減少する。

- ③ 粗碎炭の使用

微粉炭の燃焼のように石炭をミルによって、微粉砕する必要がなく、約20mm以下で燃焼可能であり、ミル設備を省略または簡略化できる。

- ④ 高い熱伝達率

流動層内に設置される伝熱管は媒体の運動により常に磨かれており、汚れ（ハウリング）による伝熱の低下がなく、然も管全周の直接流動媒体からの熱吸収により、高い熱伝達率（一般ボイラ対流部の5～10倍）が得られるために、伝熱面積の低減がはかれ、ボイラ全体をコンパクトにできる。

⑤ 炉内同時脱硫

脱硫剤として石灰石粉等を石炭と同時に投入することにより、炉内脱硫することも可能である。以上の特長は、発電用大型ボイラにも、中小型ボイラその他の熱交換器など用途に応じて利用できるものである。

また、燃焼温度が低いいため、石炭中の不燃性硫黄が灰中に含まれ、SO_x転換率が少ない。このため、中小型流動燃焼ボイラでは、特別な脱硫が不要となるケースも考えられる。

3 流動燃焼のクリーン性

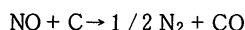
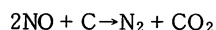
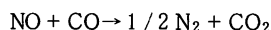
3.1 NO_x抑制の機能

流動燃焼では、本質的に低温燃焼の局部還元ふん囲気が存在するため、NO_x発生量は少ない。欧米では通常の原理的な流動燃焼でも、NO_x環境規制を下まわるため特別なNO_x低減研究は少ない。

わが国は、環境規制も極めて厳しく、海外の流動燃焼技術をそのまま導入することは不適当であり、わが国では独自のNO_x低減法として、燃焼用空気を下部と上部から入れる2段燃焼方式の開発などが進められている。

1次空気は分散板下から入って、まず、石炭の1次燃焼が行なわれる。未燃分（3～10%）は上方に吹き上げられ、フリポート部上部からの2次空気によって燃焼が完結する。2段吹込みは、主としてNO_x抑制のためであり、2段燃焼とするが故の燃焼効率の低下は極めて小さい（図-2）。

ところで、層内下部には燃焼によってNO_xやCOが発生するが、これらは層内からフリーボード上方になるほど減少している。これはCOなどの還元性ガスによって、NOが分解されてN₂になること、また、未燃カーボンによってもNOが分解されるものと推定される。



すなわち、2段燃焼によって一次空気比を0.95程度とし、NO_xの初期発生値を低くし、層内からフリーボー

ドにかけてNO分解を効果的に反応させることがポイントと考えられる。

図-3は上記のごとくしてNO_x抑制の最適化を求めた成果例であり、二段流動燃焼の最適一次空気比はおおよそ0.95程度とされる。

3.2 炉内脱硫

石炭燃焼にともない石炭中の硫黄の一部がSO₂ガスに転換する。流動層内に石炭粒子とともに脱硫剤粒子を装入すれば、脱硫反応が行われる。

脱硫剤としては通常、石灰石（CaCO₃）が一般に利用されている。石灰石も石炭と同様に粗粉碎して2mmφ程度の粒子として層内に装入され、高温で焼成されて、CO₂が抜け、細孔をもったCaOになる。脱硫反応

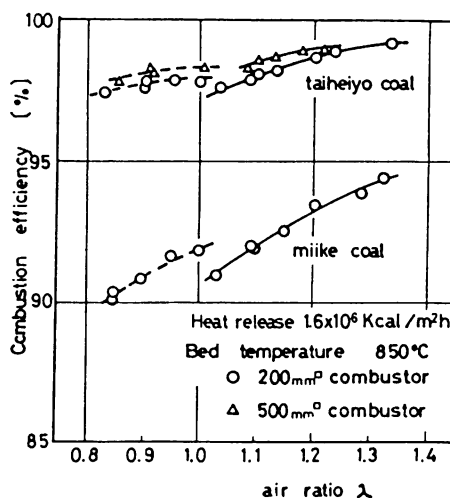


図-2 燃焼効率と空気比の関係（小型炉）

air ratio 1.0以下のデータは第1段燃焼と第2段の合計であり、全空気比は1.2である。

（石炭利用技術研究発表会（石炭技術研究所）の資料より）

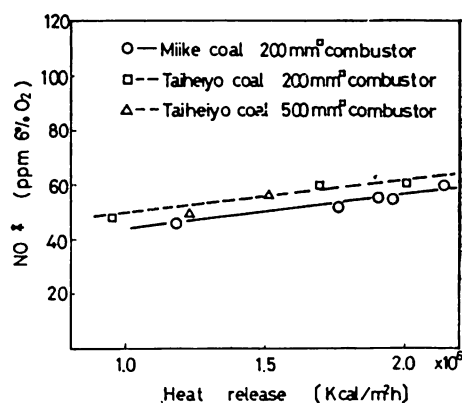
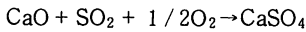


図-3 NO*と炉床負荷の関係

（石炭利用技術研究発表会（石炭技術研究所）の資料より）

は、次のごとく行われる。



脱硫反応の進行により細孔の閉そくが起こって機能を失うこと、および石灰石の未反応細粉が上方に飛散するなどの理由から、通常の装置によると、石炭中のS当量の3~4倍程度の石灰石が必要となる。(図-4)

脱硫性能に及ばず空気比の影響はあまり大きくない。図-5には2段燃焼の場合と単段燃焼の場合を示すが2段燃焼の方が脱硫効率はやや低い。

石灰石は通常石炭灰とともに廃棄(利用)処分されるが、この量が大きくなることは、わが国の実状からは望ましくないので、廃棄脱硫剤の低減化も重要な研究テーマである。細粉脱硫剤は上方に飛散するが、これを回収して再循環利用する。あるいは反応済脱硫剤を再生工程をへて、再びCaOとして利用するなどが研究されている。

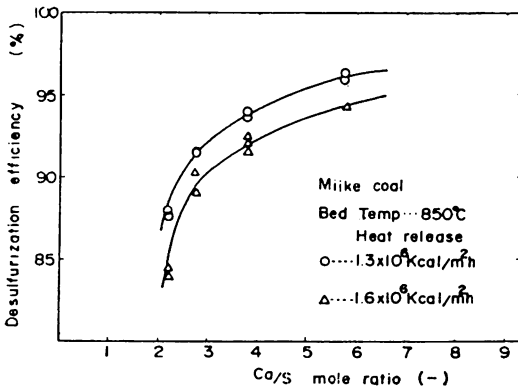


図-4 脱硫率とCa/S比の関係
(石炭利用技術研究発表会(石炭技術研究所)の資料より)

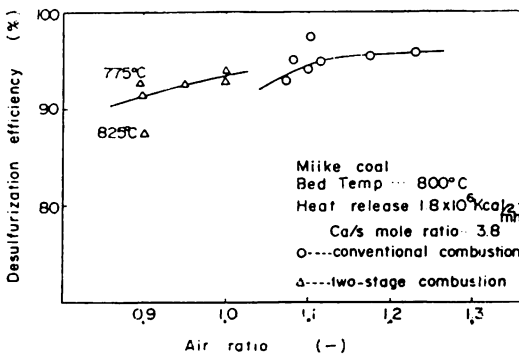


図-5 脱硫率と空気比の関係
(石炭利用技術研究発表会(石炭技術研究所)の資料より)

4 発電への応用

大型石炭発電用として流動燃焼ボイラを使用する場合にはSO_xとNO_xの発生量を極限するよう設計面を考慮すれば、別置の脱硫脱硝装置は不要となると考えられる。

工場用中型ボイラの場合には、さらに、低温燃焼ができ、硫黄分(燃焼性イオウと不燃性イオウ)のSO_x転換が低減されるであろう。今後の測定結果を期待したい。

また大きなターンドアウンレシオ(軽負荷比率)を要求される工場用ボイラの設計に、流動燃焼ボイラは応用することができる。英国の例に、円筒炉を6分し、蒸発量40t/hボイラで1/12の軽負荷運転ができる性能の発電用石炭流動燃焼ボイラが運転に入っている。

また、狭い工場余地へのボイラ設置のために、流動燃焼ボイラが採用される例もある。

なお常圧での流動燃焼の他に、加圧流動燃焼技術も開発されている。

4.1 常圧石炭流動燃焼発電

流動燃焼ボイラの特徴として、単位容量のボイラを数ヶないし10ヶ程度を集合すれば大型化が可能である。

この手法は各国に共通の考え方となっており、5万KW_e程度のボイラの開発運転に成功すれば以後は、これをモジュールとして、必要規模に集合構成することになる。図-6は常圧式での試設計(例)を示したものである。(日本)

次に大容量発電ユニットの問題点は、排ガス規制などの公害防止である。

我が国の微粉炭火力発電の規模なみに、常圧流動燃焼式50万kWボイラ単独で排煙クリーン化目標、SO_x 50 ppm以下、脱硫効率95%以上、NO_x 60 ppm以下を達成すべく、パイロットボイラ開発が進められている。

この開発研究は、通産省の石炭利用技術補助金研究の一環として、(財)石炭技術研究所およびボイラ・メーカーによって進められており、昭和56年6月から蒸発量20t/hのボイラが試運転されている。

通産省では、さらに200t/h級のボイラによる常圧式石炭流動燃焼発電の実証プラント建設を予定している。

クリーン性能については、ベンチスケール・テストボイラで検証されているが、20t/hボイラでの実証が今後期待されている。

表1は、50万kW流動燃焼ボイラによる石炭発電所(4案)と既存の微粉炭発電所の諸元を、比較評価したものである。表2は石炭による各種発電方式の比較である。

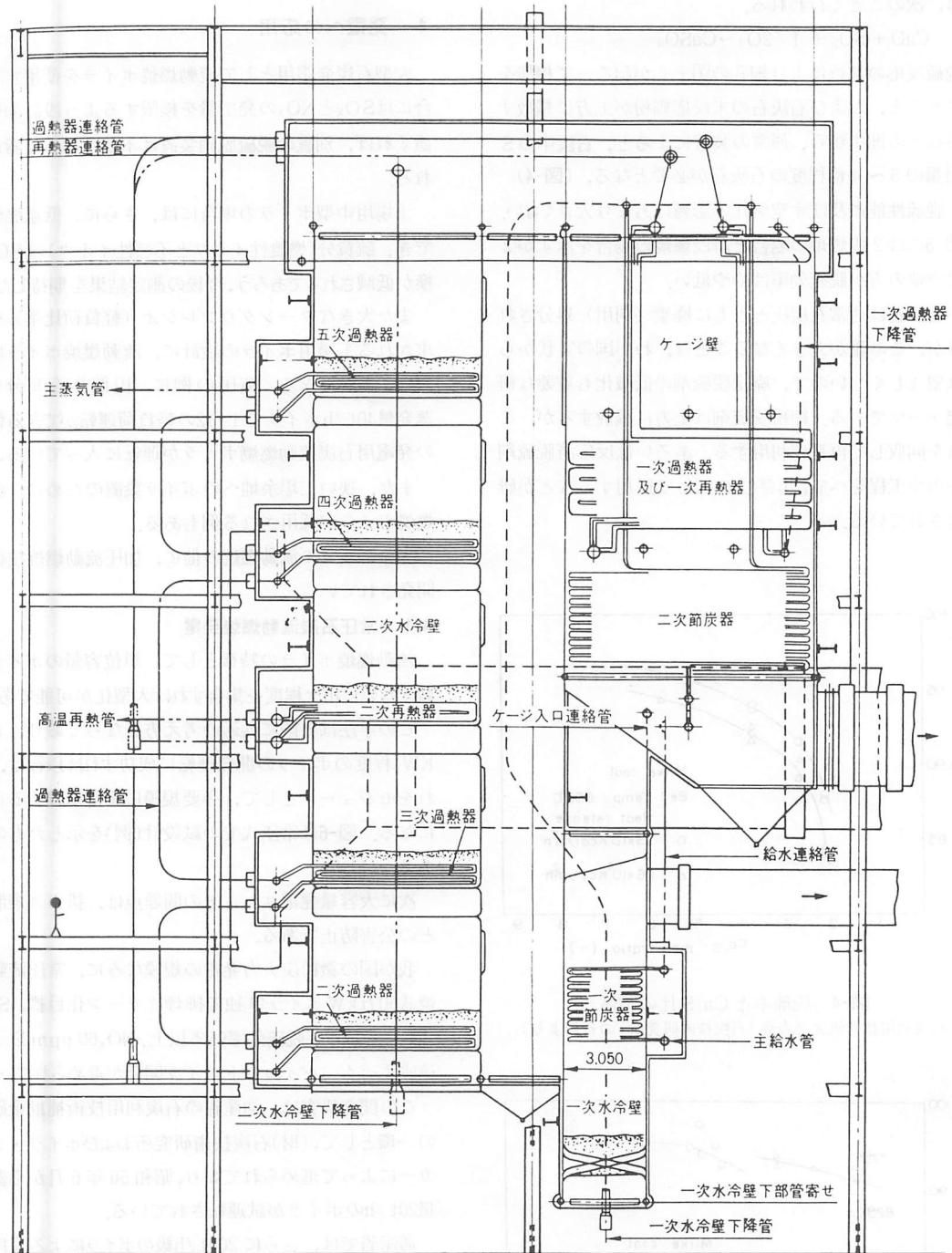


図-6 500 MW 流動層ボイラ概念設計側断面図 (日本)

500 MW 超臨界流動層ボイラの概念設計である。流動層は5段に積み上げている。

電気事業者からは、特に炭種適応能力の中広さが評価されている。

50万kW常圧式流動燃焼ボイラによる石炭発電を微粉炭発電方式と比較すると、発電端効率(定格出力時)

でも流動燃焼方式が0.8~0.2%高く、所内動力消費を差引いた送電端効率(年平均)の差では、流動燃焼方式がさらに高い。

建設費については、微粉炭火力に比べて機械装置は

表1 経済比較 (石炭技術研究所資料)

方式		規模		(常圧式) 500 MWX 2基			
		項目	発電所建設費	発電原価		送電端効率(年間)	発電端定格時効率
		(億円)	(%)	(円/kWh)	(%)	(%)	(%)
流動床	湿式排煙脱硫組込み	1,638	93	8.51	88	37.6	40.9
	石灰石廃棄	1,441	82	7.60	78	37.9	40.3
	合成脱硫剤再生	1,531	87	8.02	83	37.6	40.3
	石灰石再生	1,548	88	8.09	83	37.2	40.3
微粉炭燃焼排煙処理装置付		1,752	100	9.71	100	36.9	40.1

表2 石炭を利用した新発電方式の総合効率比較と実用化時期予想 常圧流動層ボイラは至近年の開発目標とされている。No 3, 4, 5は中, 長期目標で, 実用化の時期もほぼ同じとみられる。

No	発電方式	総合効率 (%)	実用化時期予想 (年)
1	従来形微粉炭燃焼ボイラ(排煙脱硫・脱硝付)	33~35	—
2	常圧流動層ボイラ	35~37	昭和55~60
3	加圧流動層ボイラ	38~42	同上60~65
4	石炭ガス化発電	39~43	同上60~65
5	燃料電池	43~47	同上65以降
6	MHD (Magneto hydrodynamic) 発電	45~48	同上70以降

通風, 計測制御装置が高いために, 2~4%アップしている方式もあるが, 4方式とも排煙処理建設費が少ないので, 全体の建設費を比較すれば, 流動燃焼方式が安くなっている。

なお, 国際的な石炭利用拡大と流動燃焼ボイラの開発推進の高まりもあり, IEAの技術開発委員会の中に常圧式石炭流動燃焼ボイラの国際研究協力協定が1980年2月に発足し, 我が国も上記20t/hボイラ開発をもって, 同委員会に参加している。

ボイラユニット(モジュール)を多数組み合わせる大型化する方式は, 新しい技術開発の類型と考えられ, 他の分野でも既に実現されている。また短期に大型化が促進されることも利点である。

4.2 加圧式石炭流動燃焼発電

発電用として, さらに熱効率を向上させるため, 加圧流動燃焼による複合発電システムの技術開発も, 既に英国, 米国および西ドイツの共同研究 (IEA国際協力プロジェクト) として始まっている。

加圧式流動燃焼による発電システムには, 2方式が考えられる。流動層内の伝熱管の内側に空気を通すエアヒーター式と蒸気を通すスチーム式とがある。

図-7は, エアヒーター式の場合であるが, 図の如く,

加熱されたエアは, 燃焼ガスと合流して, ガスタービンを駆動し, ガスタービン発電を行う。

ガスの合流で, 粉塵濃度がうすまり好都合である。ガスタービンの高温排気の顕熱は, 廃熱ボイラで回収し, 蒸気発電を行う。

この複合発電により熱効率が高まる。

図-8は, スチーム式の場合であるが, 図の如く流動層内伝熱管のスチームは蒸気発電を, 高圧燃焼ガスはガスタービン発電を行う複合方式である。

図-9は, これら両方式の効率を比較したものであり, 流動燃焼温度(層温度)を高める程, 効率が向上する。

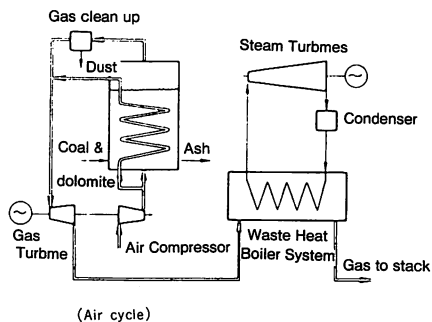


図-7 空気サイクル

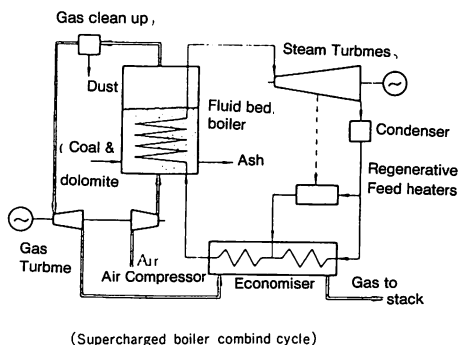


図-8 過給ボイラ・サイクル (加圧)

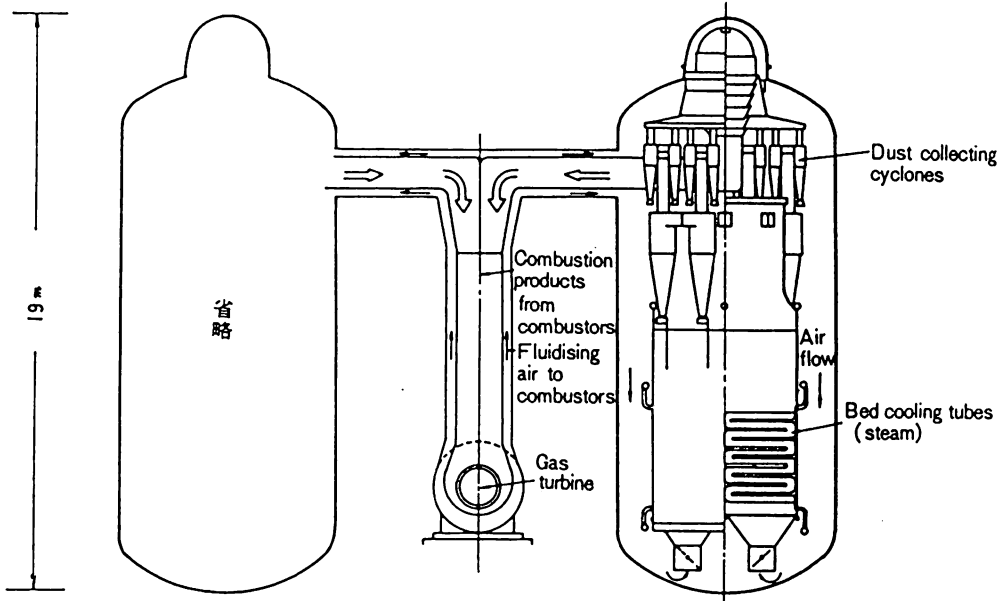


図-9 200 MWe 加圧複合プラントの燃焼炉とガスタービン(炉は2筒, GTは1台)

また、燃焼温度が870°C以上ではエア-ヒーター方式 (Air Cooled Bed Cycle) による効率が、スチーム方式 (Steam Cooled Bed Cycle) よりも高くなることを示している。

熱効率向上のための調整要素 (パラメータ) には、この他に表3の如く、空気過剰率の変更などもあり、今後も、なお模索は続けられるであろう。図-9は加圧式流動燃焼発電プラント機器を示したものである。

加圧式ではNO_x発生量が常圧式に比べて、その数分の1になるとされる。

内外で各種の加圧流動燃焼発電の研究が進められており、IEAの3ヶ国共同プラントは英国のヨークシャー州grimethorpeに熱出力80MW_t相当のボイラ部の建設が完了し、試験運転が行なわれている。3ヶ国から100人の研究・運転関係者が参加しているという。

あとがき

発電用流動燃焼ボイラ (常圧式) の実用化には、米国、西ドイツおよび我が国が特に大型プロジェクトの開発を推進中であり、その成果が期待されている。

表3 加圧複合発電の効率 (英国の資料より)

ガスタービン入口温度	870°C		930°C	
過剰空気率	20%	100%	20%	100%
サイクル効率	40%	41.5%	40.5%	42.5%
全出力中のガスタービン出力比	20%	30%	22%	32%

