

# 石炭燃焼ボイラの設計

## Design of Coal Fired Boiler

近年、エネルギーの有効活用が叫ばれる中であって、化石燃料としては、まだ多量に埋蔵する石炭が再びボイラ燃料として見直され始めてきた。

世界各国の研究機関では、石炭をより幅広く活用するための新たな石炭利用技術の開発に力を注いでいるが、これらの技術は、今すぐ実用化されるに至っていない。

そのため、火力発電用石炭燃焼ボイラは、直接微粉炭燃焼という従来の燃焼技術を使用し検討される。

石炭燃焼ボイラの設計に当たっては、石炭灰の諸性質、石炭の炭化度によって異なる性状を的確に把握しなければならない。したがって、この論文では、石炭燃焼ボイラ設計上の諸問題と最近の設計技術について述べることにしたい。

高山好道\* Takayama Yoshimichi

幸田文夫\* Kōda Fumio

### 1 緒言

我が国の電力事業は、昭和40年以前、比較的容易に入手できた国産石炭を一次エネルギーとして主に利用していたが、急速な経済成長に伴うエネルギー需要の増加、石炭生産コストの上昇、あるいは環境保全に対する意識の変化などによって海外から輸入する石油に依存するようになり、昭和40年以降建設された火力発電所のほとんどすべてが重原油あるいはガス燃料へと転換された。

しかし、昭和48年のいわゆるオイルショックにより、エネルギーの多様化と同時に、化石燃料の有効活用が叫ばれるようになり、多量に埋蔵している石炭を今日再び見直し利用する機運となってきた。

昭和50年12月科学技術庁から発表された「総合エネルギー政策の基本方向」の中で、輸入一般炭を含む石炭利用拡大の方向が打ち出されて以来、我が国の電力会社は、積極的に石炭燃焼火力発電所の建設を具体化するため検討を進めている<sup>1)</sup>。

米国でも、図1に示すように1975年(昭和50年)以降発注された発電用ボイラの燃料は、国策によってほとんど石炭に切り替えられている。

石炭燃焼ボイラは、米国で図2に示すような大容量化が進められ種々の技術開発が行なわれており、表1に示すように1,000MW以上の石炭燃焼ボイラが11缶〔すべて米国バブコック社(Babcock & Wilcox Co.)製〕既に発注され、最大容量も1,300MWに達している。

我が国では重原油に転換されていた約15年の間、石炭燃焼ボイラはほとんど発注されておらず、このため大容量化の面では一歩立ち遅れている。しかし、ここ数年内には700MWボイラ及び1,000MWボイラの建設が予定されており、急速に大容量化も進められようとしている。

大容量石炭燃焼ボイラを建設する上で重要なことは、大容量化の行ないやすいボイラ構造、多種銘柄炭燃焼に適したバーナ燃焼方式及び石炭の諸性質に対する技術力をもっていることである。

米国で発注されている1,000MW以上の石炭燃焼ボイラすべてを製作している米国バブコック社及び英国バブコック社と直接抱括技術提携を結んで、ボイラ設計を行なっているバブコック日立株式会社は、各国で経験した石炭燃焼ボイラに

関するすべての設計資料を保有していると同時に、独自の研究によって信頼性向上のための開発に努めている。

以下、石炭燃焼ボイラに関する設計上の諸問題と開発状況について述べるとともに、今後の計画に対する参考資料に供したいと考える。

### 2 石炭資源の現況と今後の輸入先

世界の石炭埋蔵量は、表2に示すとおりであり、経済的に回収可能とされる採炭量は、6.3～8兆tと推定されている。この量は現在消費されているエネルギーの約250年分にも相当すると言われており、石炭は原子力エネルギーが軌道にのる

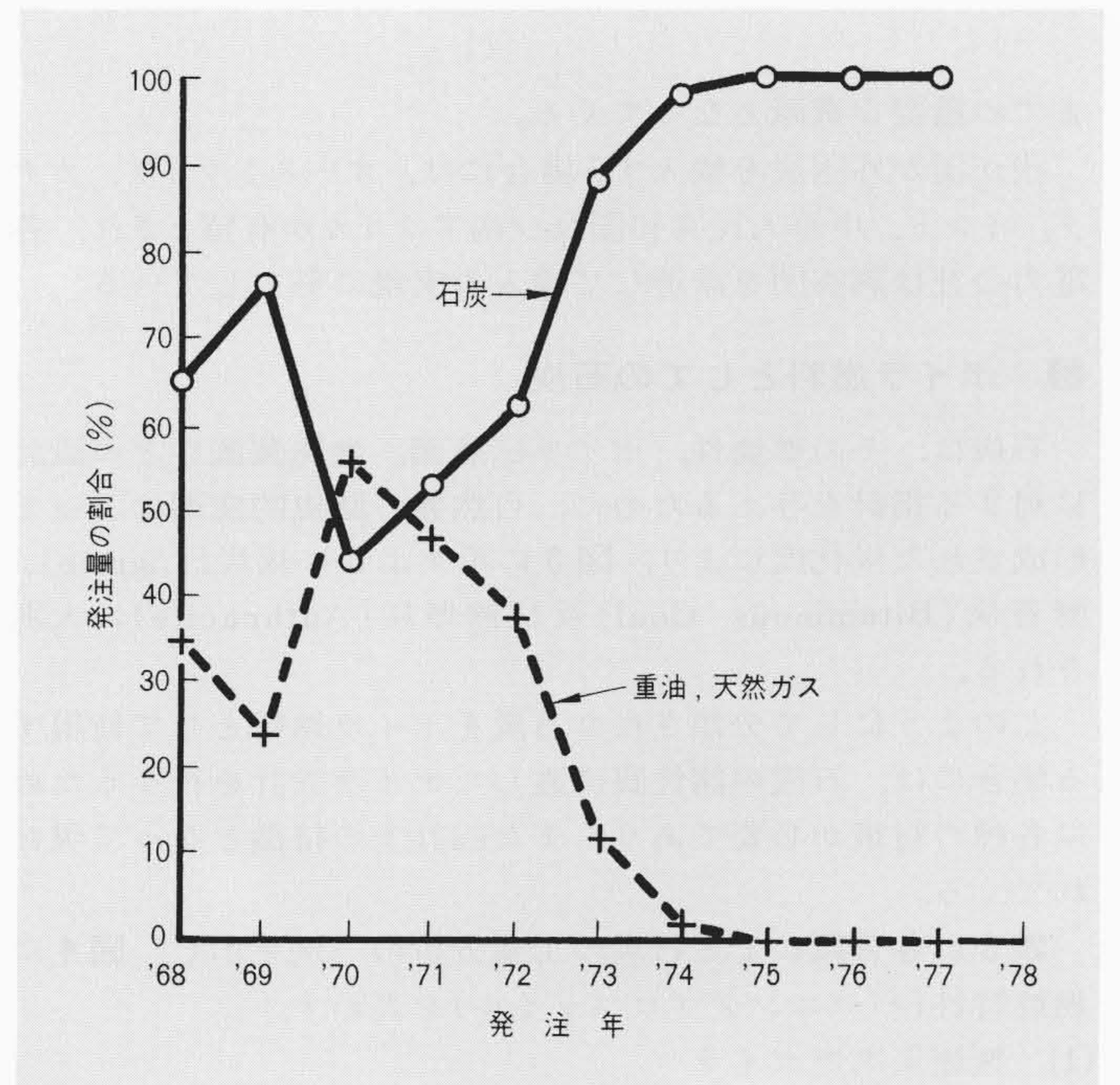


図1 米国での燃料別ボイラ発注割合の変遷 米国では、石炭政策が打ち出された結果、1975年以降のボイラ発注のほとんどが石炭を燃料とするものになった。

\* バブコック日立株式会社



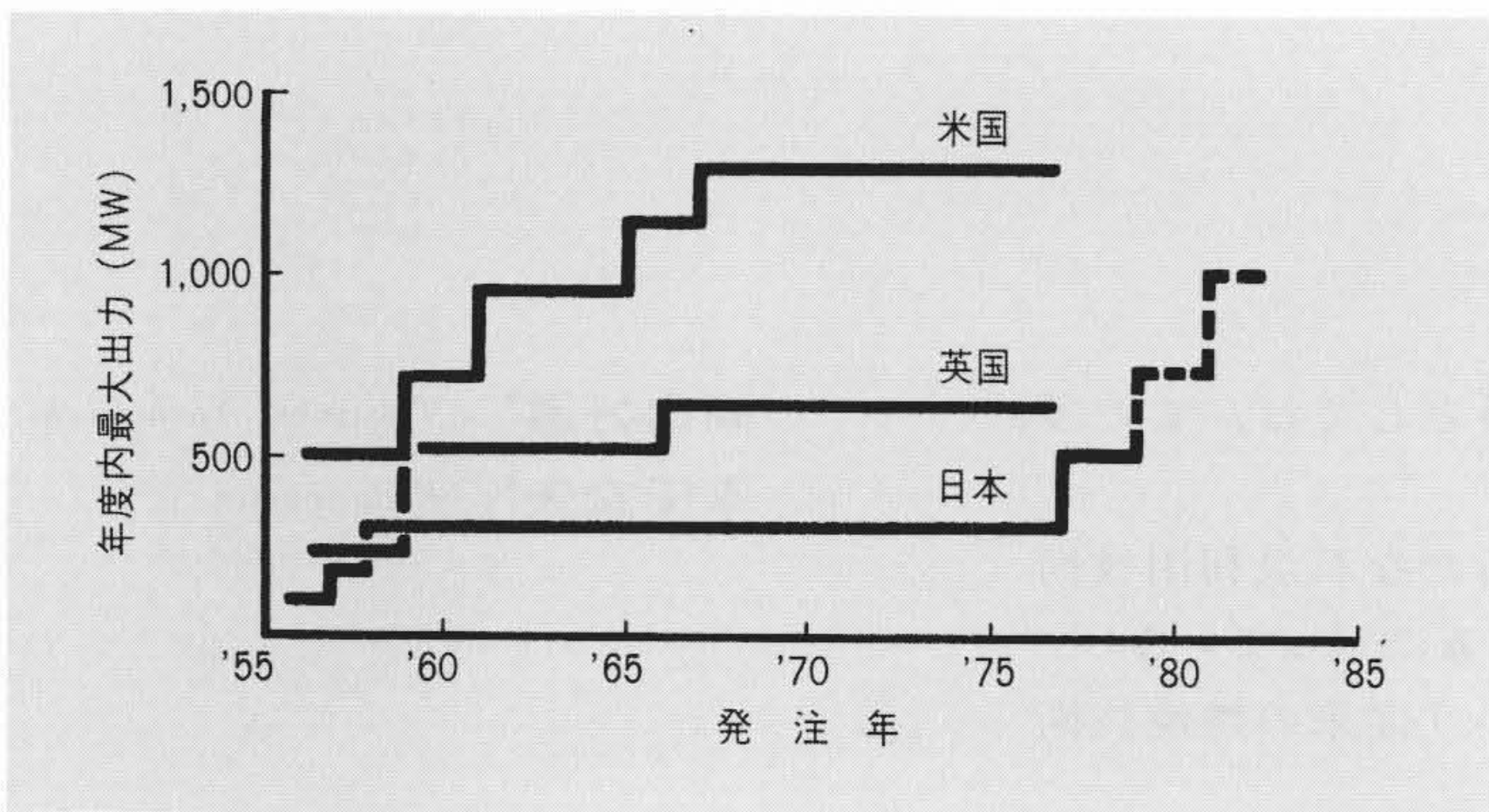


図2 石炭燃焼ボイラ容量の変遷 米国では1967年に出力1,300MWの大容量化を進めている。我が国では約15年間石炭燃焼ボイラの計画がほとんどなく立ち遅れていたが、ここ数年内には1,000MWの出力が出現する予定である。

表1 1,000MW以上の石炭燃焼ボイラ 1,000MW以上の大容量ボイラ11缶は、すべて米国バブコック社によって製作されている。

発電所名	出力(MW)	運転開始年	燃料
TVA Paradise 3	1,150	1969	石炭
TVA Cumberland 1	1,300	1972	"
TVA Cumberland 2	1,300	1973	"
Duke power Belews Creek 1	1,100	1974	"
Duke power Belews Creek 2	1,100	1975	"
Ohio power Amos 3	1,300	1973	"
AEP Gavin 1	1,300	1974	"
AEP Gavin 2	1,300	1975	"
AEP Project 1301	1,300	1980	"
AEP Rockport	1,300	1981	"
AEP Rockport	1,300	1981	"

までの重要な資源となってくる。

我が国が外国炭を輸入する場合には、オーストラリア、カナダ、インド、中華人民共和国及び南アフリカが有望とされ、各電力会社は調査団を派遣して輸入の実現に努力している<sup>2)</sup>。

### 3 ボイラ燃料としての石炭

石炭は、その燃焼性、ボイラ伝熱面、燃焼装置などの設計に対する指針を与えるために、自然界の歴史の変遷によって形成された炭化度により、図3に示すように褐炭(Lignite)、瀝青炭(Bituminous Coal)及び無煙炭(Anthracite)に大別される。

このようにして分類された石炭をボイラ燃料として使用する場合には、石炭の諸性質に適したボイラ設計を行なうために各種の対策が必要であり、また設計上の特徴となって現われてくる。

表3に各分類による石炭の工業分析の一例を示し、図4に燃焼特性(バーニングプロファイル)を表わす。

#### (1) 無煙炭燃焼ボイラ

無煙炭は、石炭の中で最も炭化度の進んだものとして区分されており、固定炭素分と揮発分の比では5.5以上、すなわち揮発分が約15%(無水無灰)以下となっている。

このため、燃焼性が悪いため通常、燃焼炉の形式は徳利形(Wing Furnace)とし、火炎をU又はWを画くような燃焼をさせ、燃焼時間が十分確保されるように配慮される。

表2 世界の石炭埋蔵量<sup>2)</sup> 現在採炭可能な世界の石炭量は、6.3兆tに上り、これは250年分(現在の採炭ベース)のエネルギーに相当する。(単位:100万t・c・e)

国別	埋蔵量		可採炭量	
	h. c.	b. c.	h. c.	b. c.
アメリカ大陸				
アルゼンチン	—	384	—	100
ブラジル	4,040	6,042	2,510	5,588
カナダ	96,225	19,127	8,708	673
チリ	2,438	2,147	36	126
コロンビア	7,633	685	397	46
メキシコ	5,448	—	875	—
ペルー	3,862	—	105	—
米国	1,190,000	1,380,398	113,230	64,358
ベネズエラ	1,630	—	978	—
その他	55	5	—	—
計	1,311,331	1,408,788	126,839	70,891
ヨーロッパ大陸				
ベルギー	253	—	127	—
ブルガリア	31	2,599	24	2,179
チェコスロバキア	11,573	5,914	2,493	2,322
西ドイツ	230,300	16,500	23,919	10,500
フランス	2,325	42	427	11
東ドイツ	200	9,200	100	7,560
ギリシア	—	895	—	400
ハンガリー	714	2,839	225	725
オランダ	2,900	—	1,430	—
ポーランド	121,000	3,000	20,800	990
ルーマニア	590	1,287	50	363
スペイン	1,786	512	322	215
英国	163,576	—	45,000	—
ユーゴスラビア	104	10,823	35	8,430
その他	309	130	58	57
計	535,664	53,741	95,010	33,752
アフリカ大陸				
モザンビーク	400	—	80	—
ナイジェリア	—	180	—	90
ボツワナ	100,000	—	3,500	—
南アフリカ	57,566	—	26,903	—
ローデシヤ	7,130	—	755	—
スワジランド	5,000	—	1,820	—
ザンビア	228	—	5	—
その他	2,390	10	970	—
計	172,714	190	34,033	90
オーストラリア及び南部太平洋地域				
オーストラリア	213,760	48,374	18,128	9,225
ニュージーランド	130	660	36	108
その他	—	—	—	—
計	213,890	49,034	18,164	9,333
アジア大陸				
バングラデッシュ	1,649	—	517	2
中国	1,424,680	13,365	98,883	n. a.
インド	55,575	1,224	33,345	355
インドネシア	573	3,150	80	1,350
イラン	385	—	193	—
日本	8,583	58	1,000	6
北朝鮮	2,000	—	300	180
韓国	921	—	386	—
トルコ	1,291	1,977	134	624
ソ連	3,993,000	867,000	82,900	27,000
その他	5,368	353	1,488	74
計	5,494,025	887,127	219,226	29,591
合計	7,727,624	2,398,880	493,272	143,657
	10,126,504		636,929	

注:石炭1t・c・e(metric ton coal equivalent)とは、5,700kcal/kg((有水無煙ベース(附着水分0, 固有水分100%))以上の石炭を1t・c・eとし、それ以下の発熱量の石炭(亜瀝青炭・褐炭・亜炭)には、それぞれに、国連統計に定めるある一定の転換率(0.6~0.3)を乗じて、正規の石炭に換算した数値である。

表3 各分類による石炭の工業分析の一例 各分類によって性状は大幅に異なる。

分析値	無煙炭	瀝青炭	亜瀝青炭	褐炭
水分(%)	10.8	7.0	30.0	35.6
揮発分(%)	3.6	37.5	32.6	26.9
固定炭素(%)	44.6	39.3	31.6	26.6
灰分(%)	41.0	16.2	5.8	19.9
高位発熱量(湿炭)(kcal/kg)	3,435	6,120	4,520	3,556
硫黄分(%)	1.0	4.3	0.34	2.4



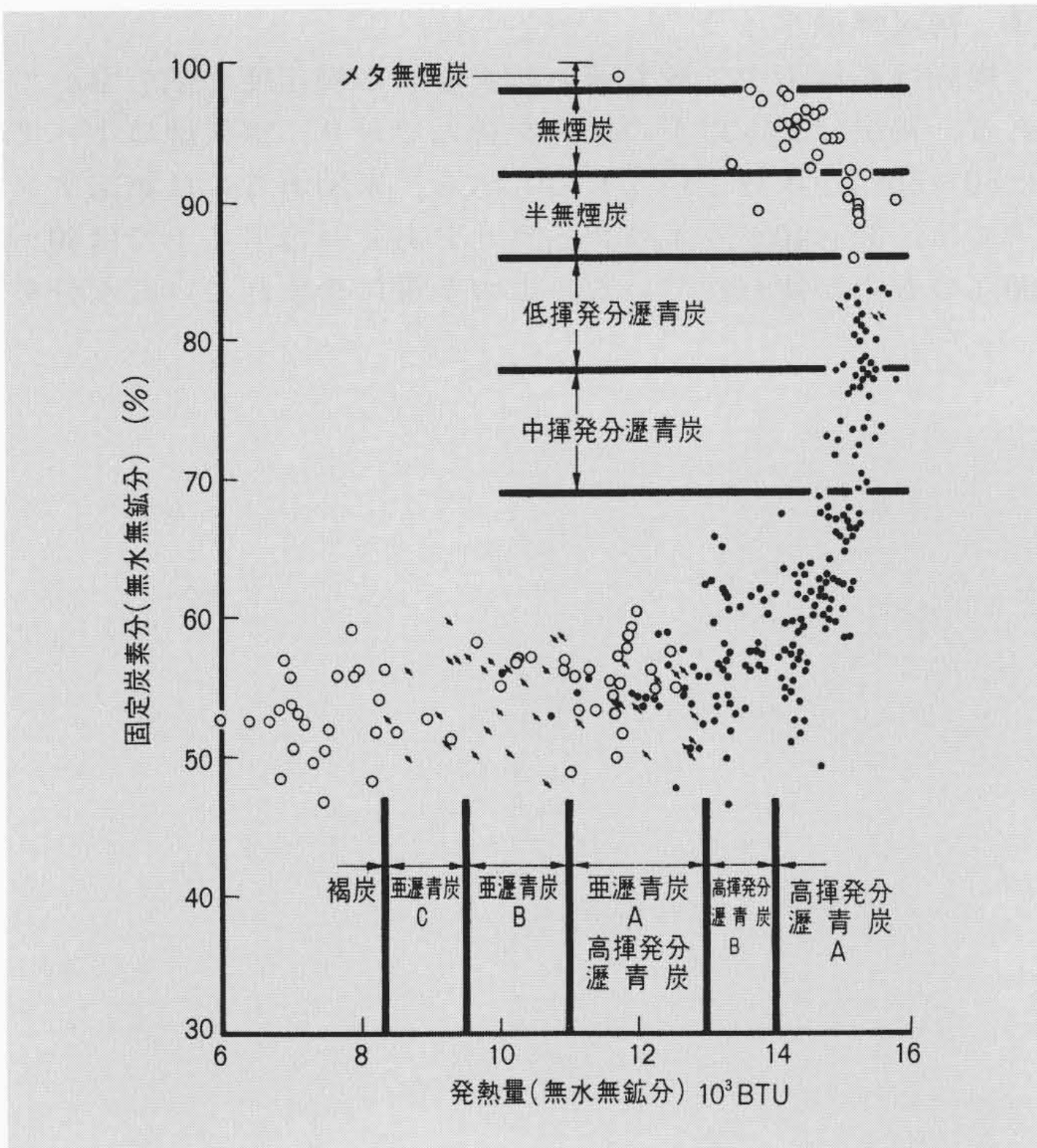


図3 ASTM(American Society of Testing Material)による石炭の分類 石炭は、固定炭素の含有率及び水分によって分類され、無煙炭(Anthracite)、瀝青炭(Bituminous)及び褐炭(Lignite)に大別される。

図5は、韓国電力株式会社 Yong Dong 火力発電所2号機用に納入された出力200MW、蒸発量680 t/h、蒸気圧力176 kg/cm<sup>2</sup>の無煙炭ボイラであり、これと同形式の Yong Dong

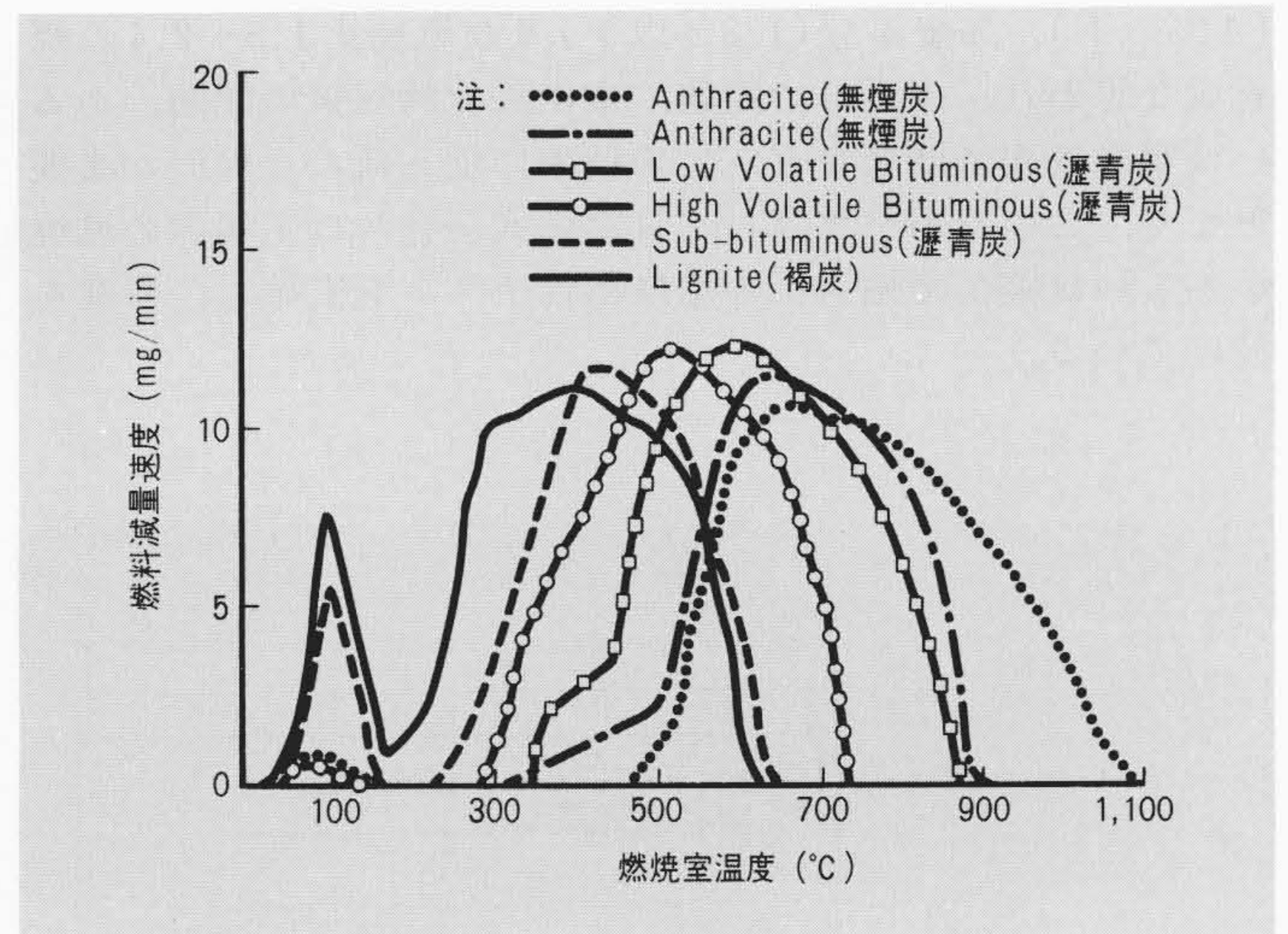


図4 各種石炭の燃焼特性 バーニングプロファイルテストによってこの特性把握を行ない、ボイラ設計に反映させる。

発電所1号機用125MWボイラは約8年間順調に運転を続けている。

(2) 瀝青炭燃焼ボイラ

瀝青炭は、ボイラ燃料として比較的良質な石炭であり、我が国で現在稼動している石炭燃焼ボイラも、また今後の建設予定の700MW、1,000MW大容量石炭燃焼ボイラもこの分類に属する石炭を使用している。瀝青炭によって設計されたボイラとして、北海道電力株式会社向け350MWボイラを図6に、また世界最大容量1,300MWボイラを図7に示す。石炭中の揮発分は20~50%含まれているため燃焼しやすく、これらの図に示すようなボイラ構造としている。

我が国に今後輸入される石炭は表4に示すような低硫黄分

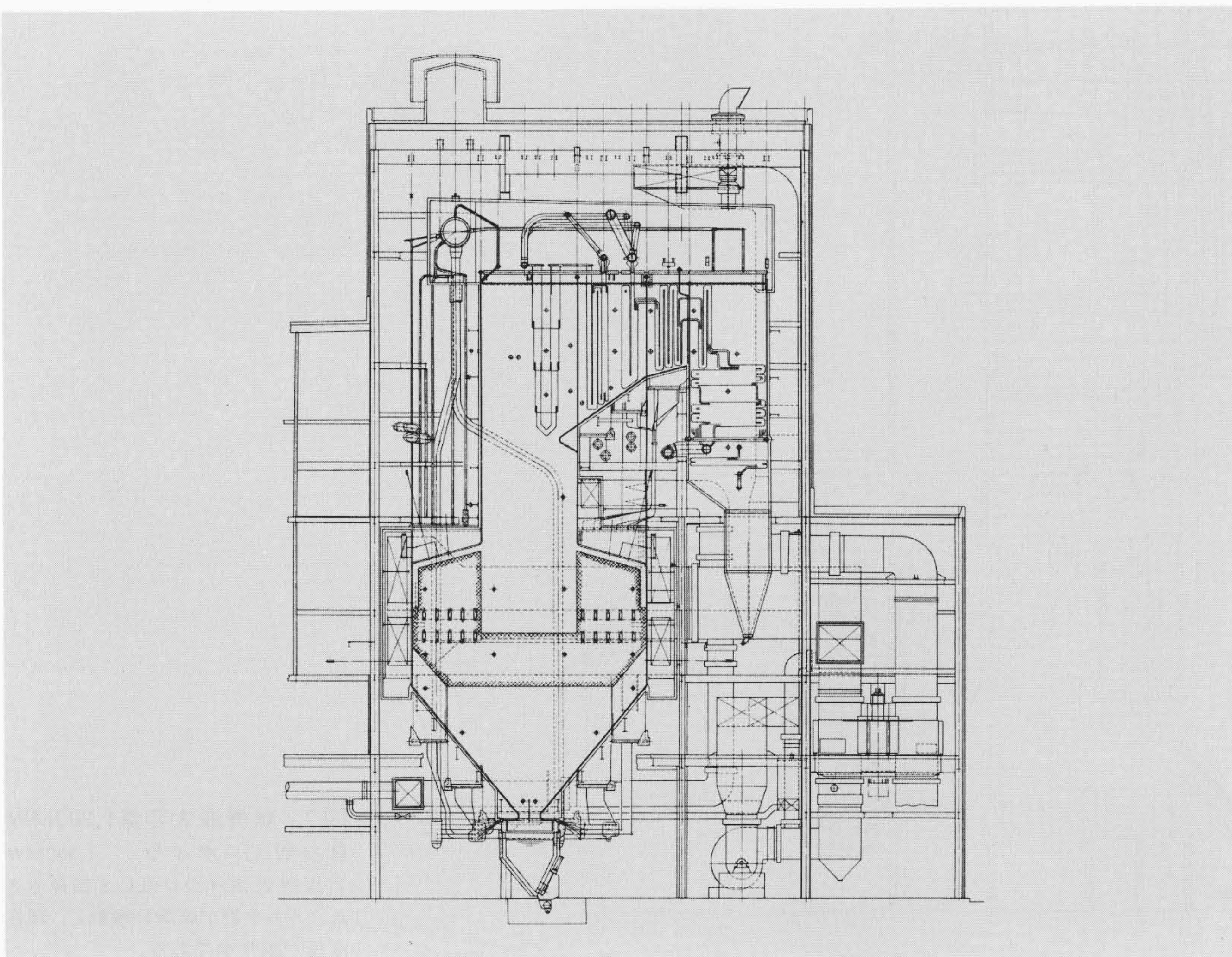


図5 200MW無煙炭燃焼ボイラ 乾炭高位発熱量3,800 kcal/kg灰分45.3%燃料比12.3の低品質炭を燃焼する。



(1%以下), 高窒素分(1.8%以下)及び燃焼比1.5~2.4の瀝青炭と思われ, 未燃分の問題, 窒素酸化物対策の問題, あるいは集塵効率の問題など, 従来技術に加え新たな検討が必要となり, このためバブコック日立株式会社では工場内の燃焼炉あるいは実缶で輸入炭の燃焼特性テストを実施し, 研究を続けている。

### (3) 褐炭燃焼ボイラ

褐炭は石炭の中で最も若い, すなわち炭化度の低いものである。褐炭は35%以上の水分を含んでおり, 採炭地によっては50~60%が水分というものもある。米国あるいは東南アジアでは, 35~40%, オーストラリアあるいはドイツでは50~60%のものが使われている。この多量に含まれている水分を

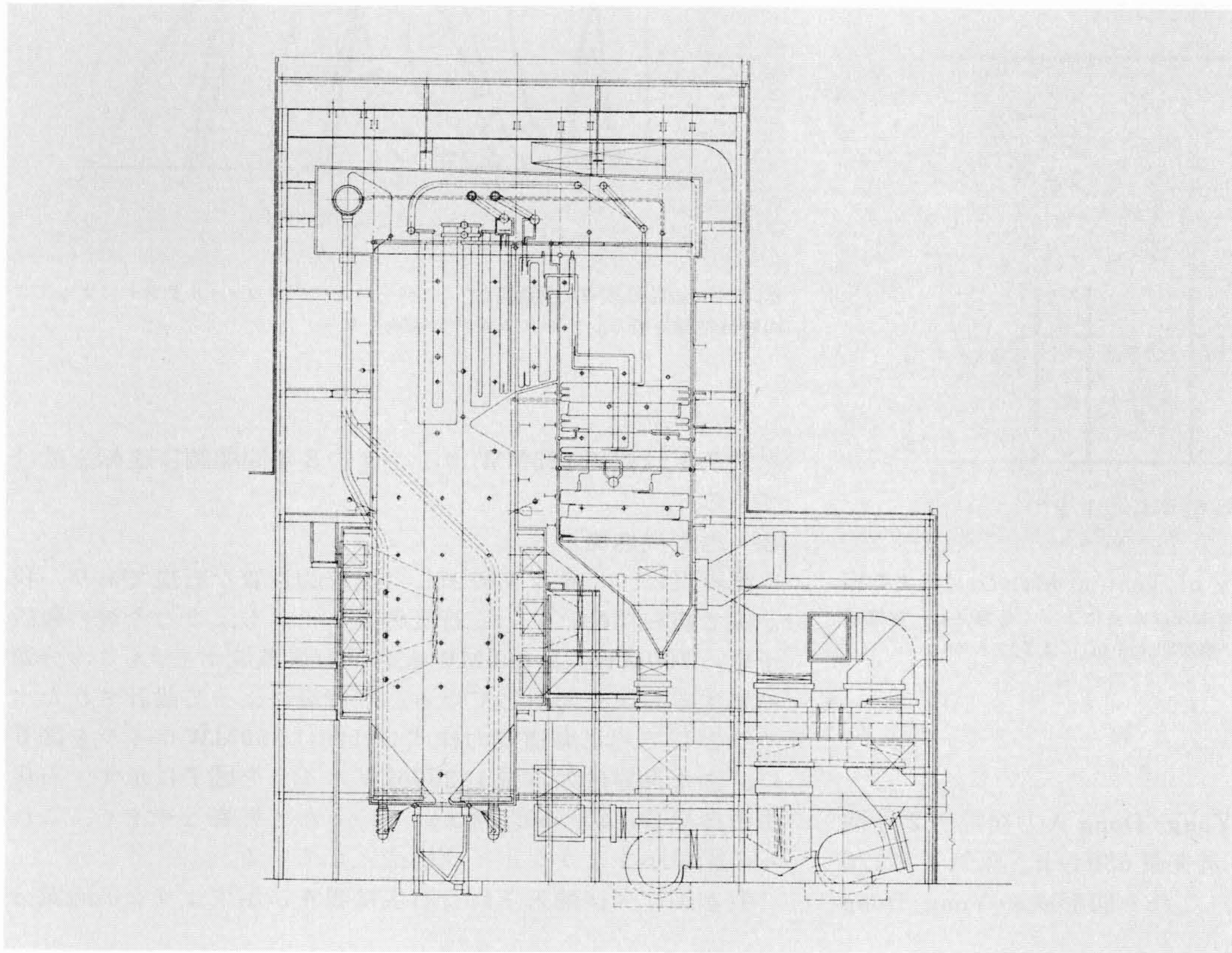


図6 350MW 瀝青炭燃焼ボイラ 国内炭燃焼として設計を進めている。

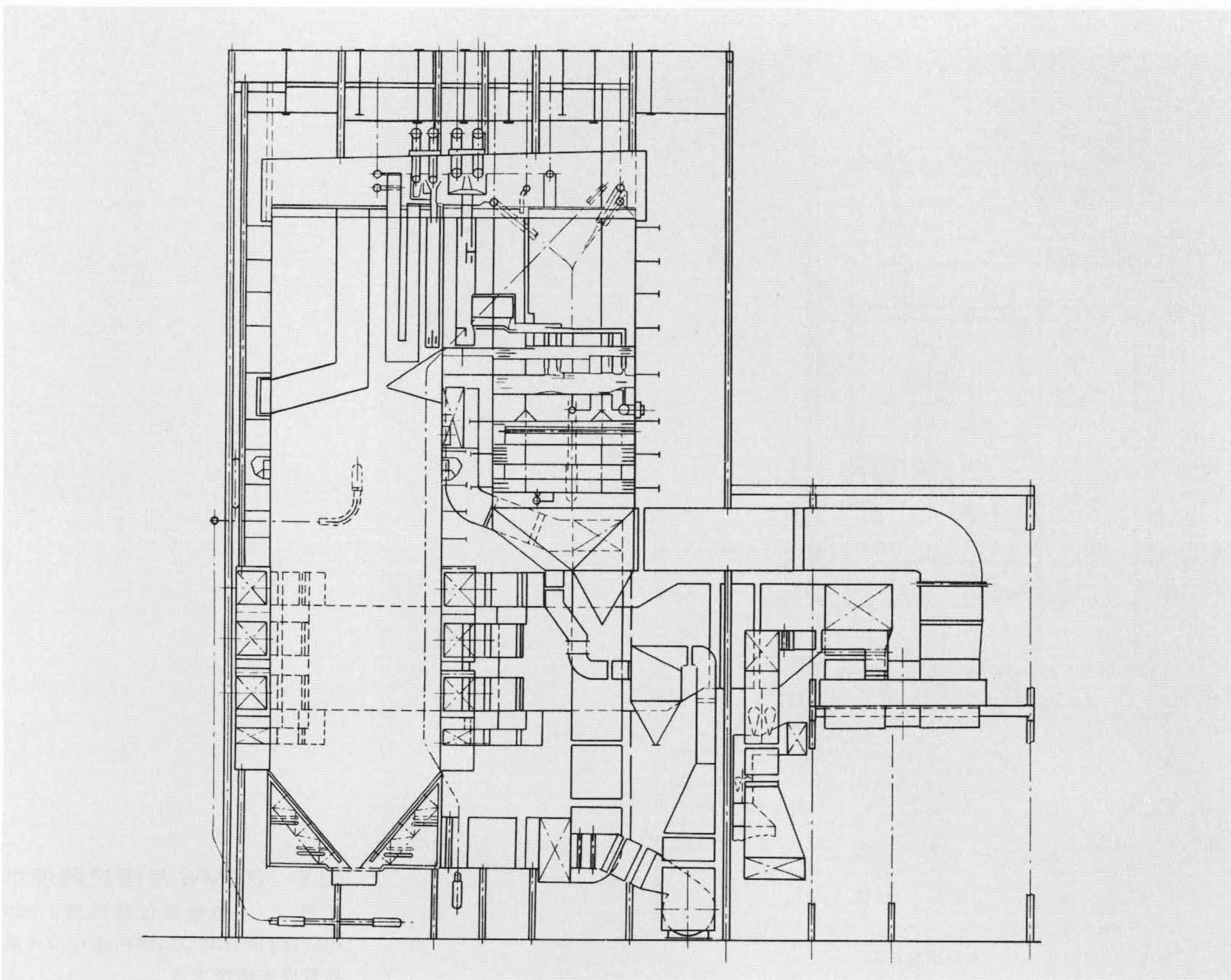


図7 世界最大容量1,300MW B & W UPボイラ 1,300MW 石炭燃焼ボイラは既に8缶発注され, うち5缶が順調に稼動し, 現在3缶が製作中である。



表4 代表的輸入炭の性状 各電力会社で石炭の輸入先を検討しているが、いずれもその特徴は燃料比が高く、低硫黄、高窒素分のものであり、燃焼性が比較的悪い。

石炭銘柄		単 位	輸入 A 炭	輸入 B 炭	輸入 C 炭	輸入 D 炭
項目						
乾炭高位発熱量	(kcal/kg)		6,600	6,400	6,430	7,100
表面水分	(%)		7.0	7.0	7.0	7.0
(工業分析)	固有水分	(%)	2.7	2.5	2.0	2.8
	灰分	(%)	16.6	16.0	19.9	9.9
	固定炭素分	(%)	32.6	55~59	27.5	28.5
	揮発分	(%)	48.1	22~25	50.6	58.8
化学分析	C	(%)	68.8	70.4	67.2	73.8
	H	(%)	4.1	4.2	3.5	4.0
	N	(%)	1.6	1.8	1.1	0.8
	O	(%)	7.8	6.9	7.8	11.0
	S(Total)	(%)	—	1.0	0.3	0.8
	CL	(%)	0.1	0.03	0.1	0.1
	Ash	(%)	17.1	16.0	20.3	10.2
粉碎性	HG		42	50~60	68	51
灰の軟化温度	(°C)		1,330	1,350	1,320	1,210

乾燥させるためには、高温の乾燥媒体が必要となり、50~60%の水分の場合では炉内燃焼ガスを石炭粉碎機に導入して微粉炭の乾燥、バーナ口までの搬送を行ない、35~40%の水分の場合には独立した一次空気予熱器に節炭器入口の高温ガスとの熱交換によって得られた高温空気によって、微粉炭の乾燥、搬送を行なうように設計される。

#### 4 石炭及び石炭灰の組成とボイラ設計

石炭中の灰分の諸性質は、プラント計画上の経済性及び信頼性を左右する重要な要素である。

熱的にはなんの価値もない灰分が石炭の中に多量に含まれていることが、他の化石燃料と異なる特異な問題点を火力プラント計画に投げかけている。

信頼性を左右するボイラ燃焼上の問題点は次の3点に代表される。

##### (1) スラッキングトラブル

火炉水壁表面などの高温領域で、溶融、付着した灰が成長し大きな塊となり管の熱膨張の阻害、クリンカ脱落による管損傷などを引き起こす。

##### (2) フォーリングトラブル

各伝熱表面に付着した灰の層が燃焼ガスからの熱伝達を低減させ、蒸気温度、ガス温度の特性を変化させる。

##### (3) エロージョン

燃焼ガス通過部の金属を摩耗させ、性能低下及び管類の過熱事故を引き起こす。

これらの諸問題は、石炭灰の分子形成及びそれらの相互作用が極端な複合反応をする結果と言われている。

したがって、石炭燃焼時の石炭灰の特性を設計段階で把握し、設計に反映することが重要となる。

米国バブコック社では、永年にわたる豊富な石炭ボイラの運転実績と基礎研究によって、灰の組成と灰の特性及び設計上の指針を与える手法を開発している。

#### 4.1 スラッキング

スラッキングは、石炭の燃焼によって得られる高温燃焼ガス領域の伝熱表面に、固形及び融解した石炭灰の粒子が付着する現象であり、このため石炭灰の軟化温度以上のガス温度となる火炉内及び火炉出口部の過熱器で問題となる。付着速度及び成長速度は、溶融した灰の粘性に左右され、その粘性

表5 石炭灰組成とスラッキングの関連 B & W 社で開発したスラッキング特性に対する設計上の指針である。

瀝青炭型石炭灰(Bituminous Ash),  $CaO+MgO > Fe_2O_3$

$$Rs(\text{スラッキング指数}) = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \times S$$

スラッキングの区分	Rs(スラッキング指数)
Low (少ない)	0.6以下
Medium (中程度)	0.6~2.0
High (多い)	2.0~2.6
Severe (非常に多い)	2.6以上

褐炭型石炭灰(Lignitic Ash),  $CaO+MgO > Fe_2O_3$

$$Rs(\text{スラッキング指数}) = \frac{HT(\text{融点}) + 4 \times IT(\text{初期変形温度})}{5}$$

スラッキングの区分	Rs(スラッキング指数)°C
Medium (中程度)	1,340~1,230
High (多い)	1,230~1,150
Severe (非常に多い)	1,150以下

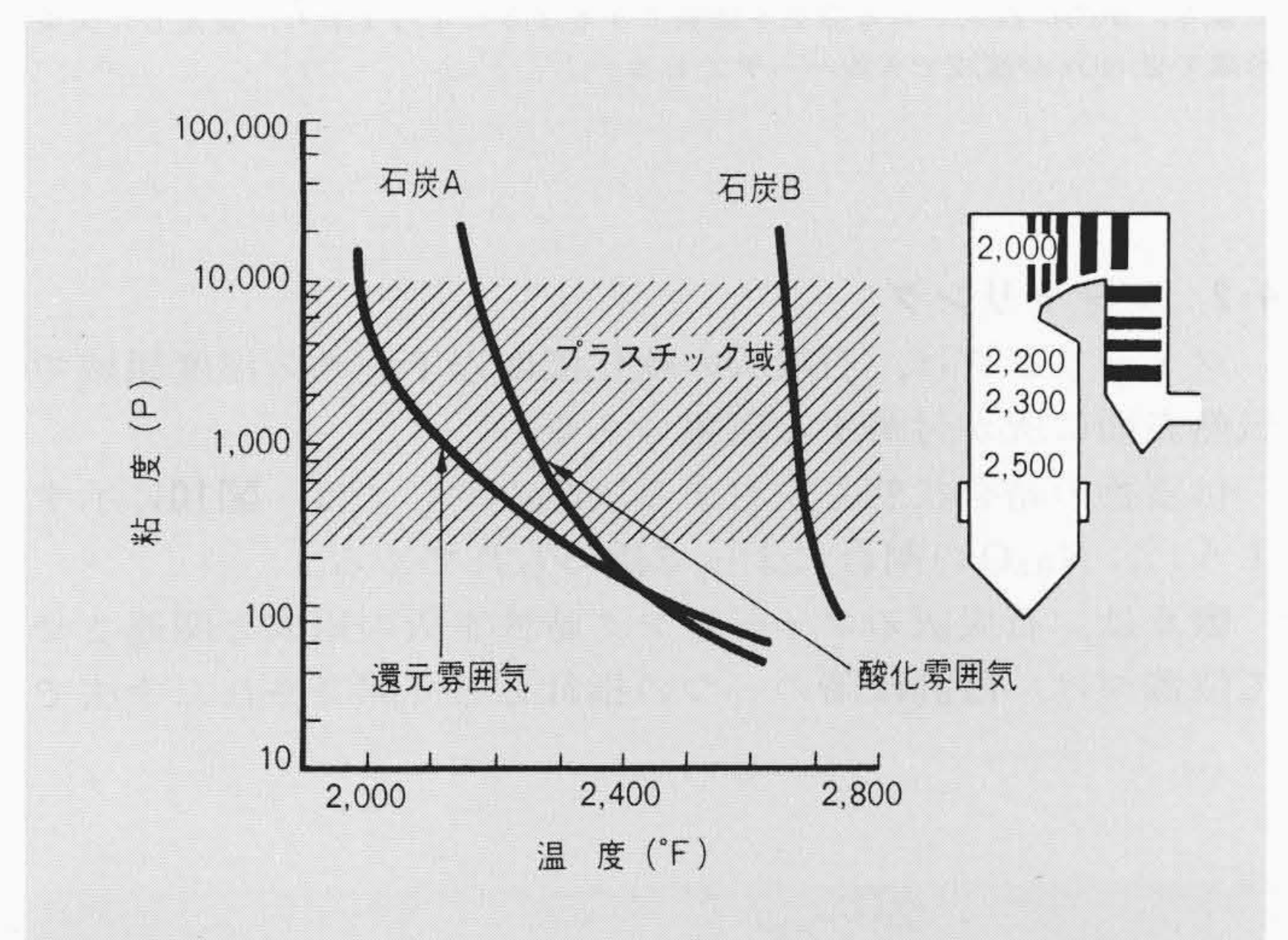


図8 石炭溶融灰の粘性 液体と固体の境界域(プラスチック域)に、低温でしかも幅広い温度域で溶融特性を示す石炭は、スラッキングトラブルを生じさせやすい。

は図8に示すように石炭の種類によって異なっている。

表5は、石炭灰のスラッキング特性を灰の組成と関連させて位置づけ、設計段階の一つの指針として開発された手法である<sup>3)</sup>。

今後我が国で輸入される石炭銘柄は、かなり多種にわたるものと思われる、設計段階の石炭性状と実際に輸入される石炭性状とに相違が生ずることも予想される。

したがって、スラッキング対策としては米国での実績を踏まえ次に述べるような考慮を払っておくことが必要である。

- (1) ボイラ火炉構造は単一炉とする(B & W貫流ボイラは、1,300MW容量に対しても単一炉で設計されている)。
- (2) 炉内熱負荷低減のため、火炉断面熱負荷は $5.0 \times 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>h程度になるような火炉寸法とする。
- (3) 火炉出口ガス温度は、石炭灰の軟化温度以下に設計すると同時に、火炉出口に設置する最初の過熱器は600mm程度の幅方向管群ピッチとし、運転上のガス温度特性の変化に対する余裕をもたせる。
- (4) 還元雰囲気燃焼を防止するバーナ形式(図9)を採用する。



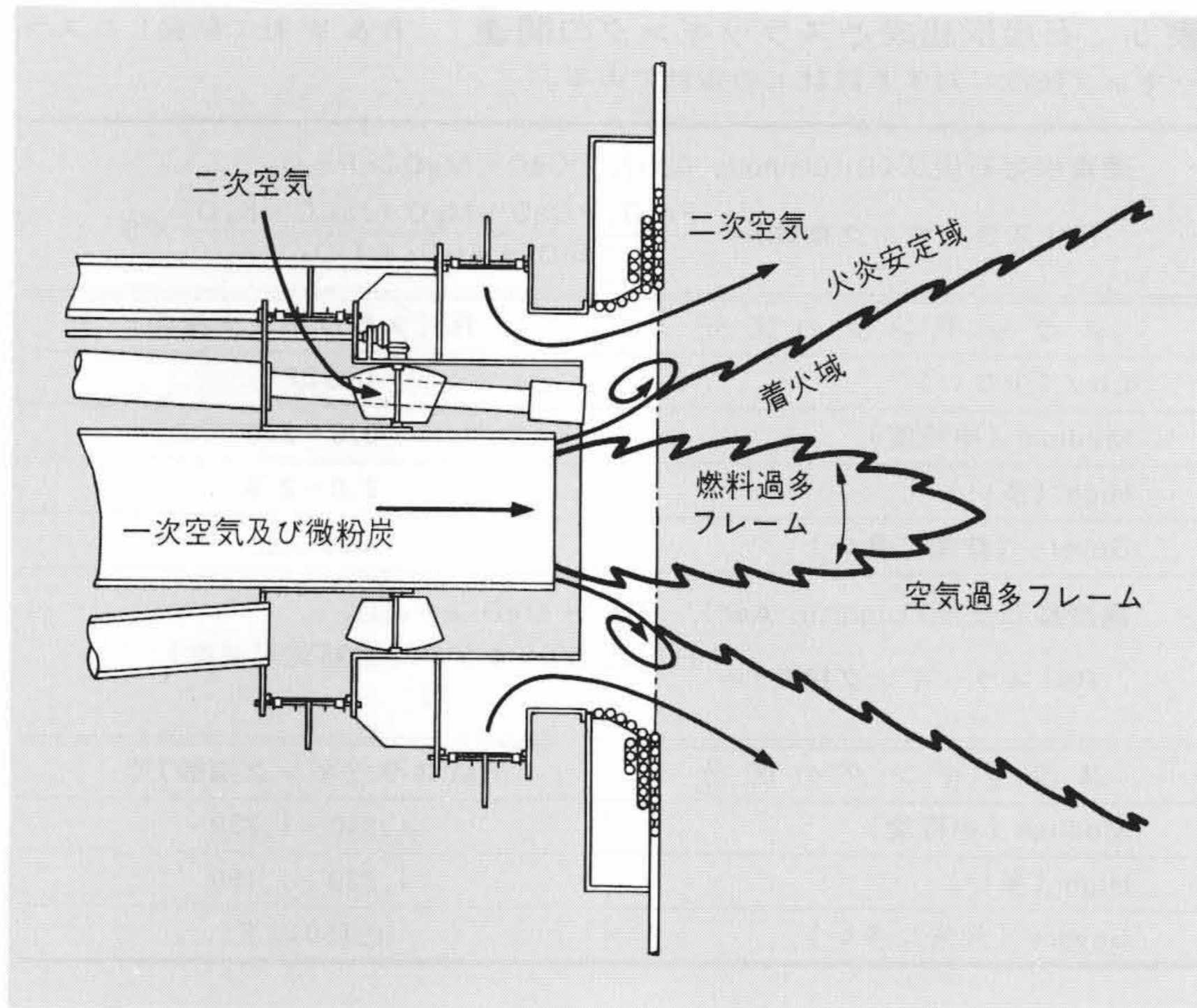


図9 デュアルエアレジスタバーナの構造 2箇所のエアレジスタにより、炉内に投入される空気を調整できるようになっており、安定した火炎形成で低NOxが達成できるバーナである。

#### 4.2 フォーリング

フォーリングは、石炭灰の軟化温度以下のガス温度領域で伝熱表面に灰が付着する現象である。

付着物の結合状態を左右する灰組成としては、図10に示すように、Na<sub>2</sub>Oの割合によって決められてくる。

表6は、石炭灰のフォーリング時性を灰の組成と関連させて位置づけ、設計段階の一つの指針として開発された手法で

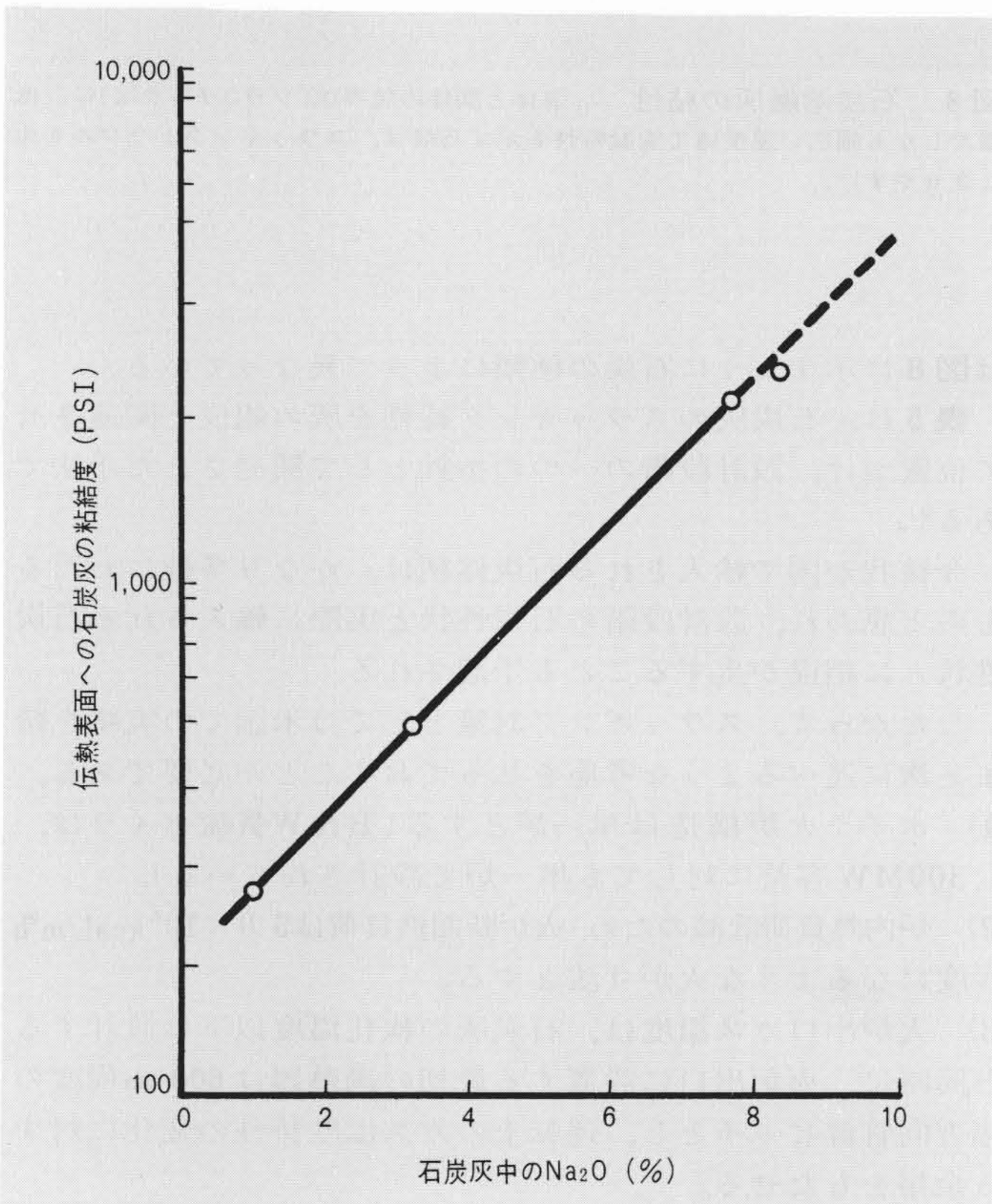


図10 伝熱表面への灰付着に対するNa<sub>2</sub>Oの影響 石炭灰中のNa<sub>2</sub>Oが増加することによって、灰の付着強度が増加し、除去しにくくなる。

表6 石炭灰組成とフォーリングの関連 B & W社で開発したフォーリング特性に対する設計上の指針である。

瀝青炭型石炭灰(Bituminous Ash), CaO+MgO < Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Rf(フォーリング指数) = $\frac{CaO+MgO+Fe_2O_3+Na_2O+K_2O}{SiO_2+Al_2O_3+TiO_2} \times S$	
フォーリングの区分	Rf(フォーリング指数)
Low (少ない)	0.2以下
Medium (中程度)	0.2~0.5
High (多い)	0.5~1.0
Severe (非常に多い)	1.0以上
褐炭型石炭灰(Lignitic Ash), CaO+MgO > Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
フォーリングの区分	Na <sub>2</sub> O, %
Medium (中程度)	3以下
High (多い)	3~6
Severe (非常に多い)	6以上

ある<sup>3)</sup>。

フォーリング対策としては、スートブロワのブローイング効果に合わせた伝熱管群の配列を行なうことである。

#### 4.3 エロージョン

エロージョンは、燃焼ガス中の灰の粉子が管表面に当たり管の摩耗作用を引き起こす現象であり、石炭燃焼ボイラの信頼性を低下させる一つの大きな要因になっている。灰分が多く、かつSiO<sub>2</sub>が多い石炭では、管摩耗が激しくなってくる。

このエロージョンを減少させるには、管群を通過する燃焼ガスの速度を低下させ、かつガス流が偏流しないような構造にすることが必要である。

通常ガス速度は、15~20m/sに選定し、灰分が多い場合、あるいは摩耗性の高い灰組成を含む石炭の場合には、10~15m/sを選定する。

#### 5 結 言

以上、石炭燃焼ボイラ的设计と題し、特に問題となるボイラ本体的设计手法について述べた。

今後、石炭燃焼プラントの計画はますます増加するものと予想され、また火力発電の中に占める役割が高まる機運にある中で、ボイラ本体だけでなく貯炭、粉碎、機器操作の自動化あるいは環境対策についても今日的な新しい問題点が指摘される。

この論文中には、石炭燃焼時の窒素酸化物の問題について述べなかったが、現在バブコック日立株式会社では、国内に輸入されると思われる各種の石炭を工場内の燃焼炉を使用して燃焼し、低NOxバーナの開発に取り組み、従来の燃焼技術では達し得なかった低NOx化へのめどをつけるに至った。

石炭燃焼ボイラの信頼性を確保し、大容量化を進めるため、今後とも各電力会社の関係各位の御指導を仰ぎながら、プラント全体の計画を進めてゆく考えである。

#### 参考文献

- 1) 科学技術庁資源調査会：我が国における石炭エネルギー段階的利用技術の評価に関する報告，報告75（昭和52年6月）
- 2) 田村：第10回世界エネルギー会議報告，動力，142，8~9（昭和52年-IV）
- 3) K. H. Haller：Design of Large Coal Fired Steam Generators, Babcock & Wilcox Co. Technical Paper BR-1082, 1~8（1977）