

石炭性状とボイラ設計

Coal Characteristics and Boiler Design

石炭エネルギーの見直しの中で、今後建設される石炭火力発電所はその燃料を海外に依存せざるを得ず、燃料政策上供給先分散による多種銘柄炭燃焼を考慮した石炭火力発電計画が重要な問題となる。

石炭性状は産炭地ごとに異なり、石炭固有の特性がボイラ設計、環境設備計画などに多大な影響を及ぼすので、多くの海外炭の中から石炭火力発電計画に有利な銘柄を選定することが重要な問題となっている。

そこで、本論文では現在導入が検討されている多くの海外炭とプラント計画及びボイラ設計上の諸問題を論じ、石炭供給先選定及び混炭に対する目安、並びに石炭火力発電計画及び運用に対し参考指針を供したい。

幸田 文夫* Fumio Kôda
三村 哲雄** Tetsuo Mimura

1 緒 言

我が国の電力会社は、エネルギー政策の一環として石炭燃焼火力発電所の建設を具体化するため詳細な検討段階に入っており、数年内には500MW、700MW、更には1,000MWに及ぶ容量のユニットが稼動する予定である。

700MW、1ユニット当たりの石炭消費量は160万tf/年にも達し、今後の電源開発計画によればここ数年間の電力向け石炭需要は約15%/年という急激な伸び率が見込まれている。我が国の石炭供給能力は最大2,000万tf/年(うち一般炭約1,000万tf)にとどまっている上に、コストも割高なことから必然的に海外炭輸入を前提としなければならない。

その多くが電力用として消費される一般炭は、1985年には2,200万tf、1990年には5,350万tfにも上る輸入が予想される。¹⁾

現在検討されている海外炭は、その資源が豊富で安定供給が可能であり輸送条件の良い地域として、図1に示すような中華人民共和国、オーストラリア、カナダ、米国、南アフリカなどが挙げられている。

これらの石炭は、各々異なった特性をもち、プラント計画、

ボイラ設計及び運転、保守に重大な影響を与える。そこで以下に石炭性状とボイラ設計などとの相関性を述べ、最適なプラント計画のために必要な石炭銘柄選定の基本事項を検討し、今後の計画に対する参考資料を供したいと考える。

2 輸入対象石炭の特性

石炭は炭化度の順に、かつ炭、亜歴青炭、歴青炭及び無煙炭に大別されている。ボイラ燃料としてはそのすべてが利用可能で、各々に適した独特のボイラ設計が行なわれている^{2),3)}。

しかし、このうち取扱いが比較的容易でボイラ建設費が最も低くなる歴青炭がボイラ燃料に最適で、古くから最も多く利用されており、海外炭の輸入も当然のことながら歴青炭が対象となる。

石炭はまた産地によってもその特性は大きく異なり、現在までに輸入対象とされた海外炭のプラント計画から判定した特性は図2に示すとおりであるが、一般的に下記のようにまとめることができる。



図1 電力用一般炭輸入対象地域 我が国を取り巻く環太平洋地域にある一般炭炭田は、石炭の埋蔵量が豊富である。

* バブコック日立株式会社呉工場 ** バブコック日立株式会社

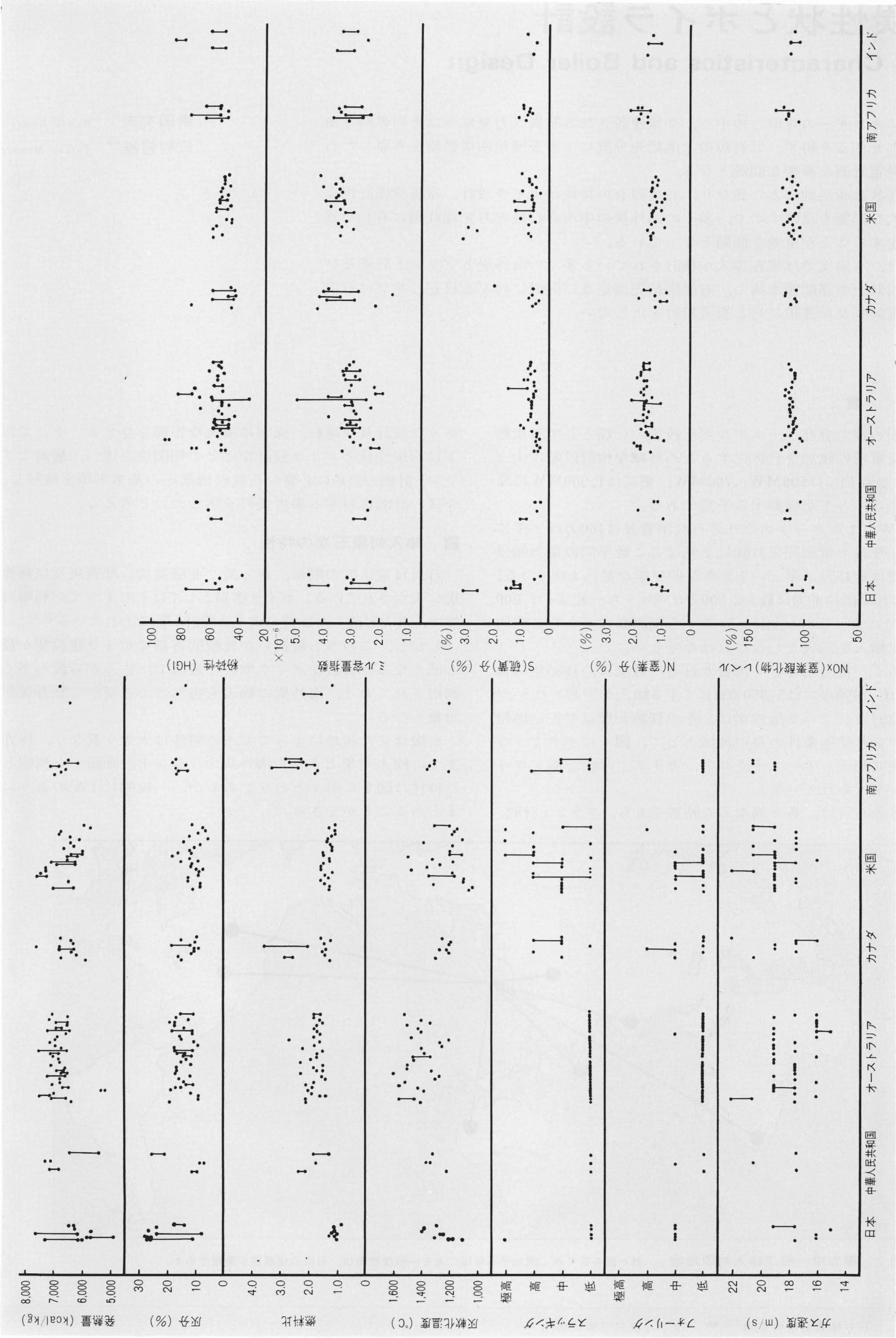


図 2 電力用輸入炭の性状とボイラプラント設計に与える影響 石炭の性状は炭田ごとに異なった特徴をもち、またその結果がボイラ及び環境機器設計に重要な影響を与える。

(1) 中華人民共和国

山西省大同炭，山東省兗州炭，安徽省淮北炭が輸入対象に挙げられているが，大同炭，兗州炭は灰分が少なく灰中未燃分を抑える対策を必要とする。淮北炭は比較的灰分が多く発熱量も低いので，灰分の少ない石炭との混炭に用い，灰中未燃分の調整を行なうことができる。

(2) オーストラリア

歴青炭の産炭地はNSW(ニューサウスウェールズ)州及びQLD(クイーンズランド)州に分布し，我が国にとって最も有望な産炭地といわれており，一般的な特性は次に述べるのとおりである。

- (a) 燃料比が比較的高く，燃焼性がやや悪い。
- (b) 灰軟化温度が高く，スラッキング，フォーリング特性は良好である。
- (c) 灰自体の摩耗性が高く，灰分も一般的に多い。
- (d) N(窒素)分が比較的多く，燃料比もやや高いので，NO_x(窒素酸化物)レベルは比較的高くなる。
- (e) 電気式集塵器による煤塵捕集性が比較的悪く，問題となる石炭もある。

(3) 米 国

ロッキー山脈沿いで炭鉱開発が盛んに行なわれ，ワイオミング，コロラド，ユタ各州の石炭が輸入先として検討されており，一般的な特性は次に述べるのとおりである。

- (a) 地域によっては亜歴青炭を産出する。
- (b) 歴青炭は燃料比が低く，灰分も少ない高品位炭が多い。
- (c) 灰軟化温度低く，スラッキング，フォーリング特性が悪い。
- (d) N分が低くNO_x対策を講じやすい。

(4) カナダ

米国と同様にロッキー山脈沿いのブリティッシュコロンビア州及びアルバータ州で歴青炭を産出し，地理的優位性から我が国への輸入が期待される。

石炭の一般的な特性は，前記の米国中西部炭の特性によく似ているが，一部には燃料比のかなり高い石炭(コールマウンテン炭，ラインクリーク炭など)がある。

(5) 南アフリカ

南アフリカ炭はそのほとんどがトランスバール州，ナタール州で産出され，その特性は一般的に燃料比高く，N分を多く含んでおり，NO_x対策に十分な考慮を払う必要がある。

現在輸入対象となっている石炭の一般的な特性は，以上述べたとおりであり，ボイラ設計での評価として表1に示すようにまとめることができる。

3 石炭性状とボイラ設計

最適なプラント計画及びボイラ設計を行なうには，実際に使用する石炭銘柄について，工業分析，灰組成分析，灰軟化温度，石炭粉碎性などの分析に基づいて詳細検討を行ない，石炭の特性に合わせた設計上の的確な考慮を払わねばならない。

逆にこれらの設計的な検討を事前に行ないながら石炭銘柄の選定をすることが，石炭火力発電の経済性，信頼性を高めることになる。

そこで，以下に石炭性状とプラント計画及びボイラ設計との関連について述べる。

(1) 発熱量

発熱量が高いほど石炭を取り扱う設備(輸送，貯蔵，燃焼の各設備)に関する費用及び運転コストが低減される。

発熱量は灰分割合及び水分割合と密接な関連をもっている

表1 石炭火力発電のプラント計画及びボイラ設計への適応性
輸入対象炭の一般的特性を設計上の適応性として評価して示す。

項目	産地					
	日本	中華人民共和国	オーストラリア	米国	カナダ	南アフリカ
1. 火炉設計 燃焼性(燃料比) スラッキング	◎ ○	△ ○	△ ◎	◎ △	○ △	△ ○
2. 接触伝熱面設計 フォーリング エロージョン	○ △	○ ○	◎ △	△ ○	○ ○	○ ○
3. 燃焼設備設計 燃焼設備容量	△	○	○	△	△	○
4. 環境装置設計 SO _x (硫黄酸化物) NO _x (窒素酸化物) 煤塵	○ ◎ △	○ ○ ○	○ △ △	△ ○ ○	○ ○ ○	○ △ △

注：一般的な特性を示すもので，一部適用できない石炭もある。◎印は総合的に適応性が良く，○印は普通，△印は問題のある石炭も多いと判定する。

が，発熱量だけを一つの設計要素とした場合，特にボイラの信頼性を左右する条件とはならない。

(2) 揮発分と固定炭素

石炭は揮発分を多く含むほど燃焼性が良好となり，特に燃料比(固定炭素／揮発分)として燃焼の良否を容易に判断することができる。

欧米及び我が国での従来の石炭火力発電では，燃料比が1.0～1.6と燃焼性の良好な石炭を使用していたが，石炭火力発電の見直しとともに燃焼性の比較的悪い，すなわち燃料比が2.0を超える石炭が使われ始めている。

図3に燃料比とボイラ設計の関連を示す。

(3) 灰 分

熱的にはなんの価値もない灰分はできる限り少ないほうが灰処理設備及び環境装置設計の面から望ましい。また灰分が少ないことは発熱量が高いことを示し，石炭取扱い設備費の低減も可能となる。

また，石炭燃焼ボイラ設計に関しても，エロージョンなど

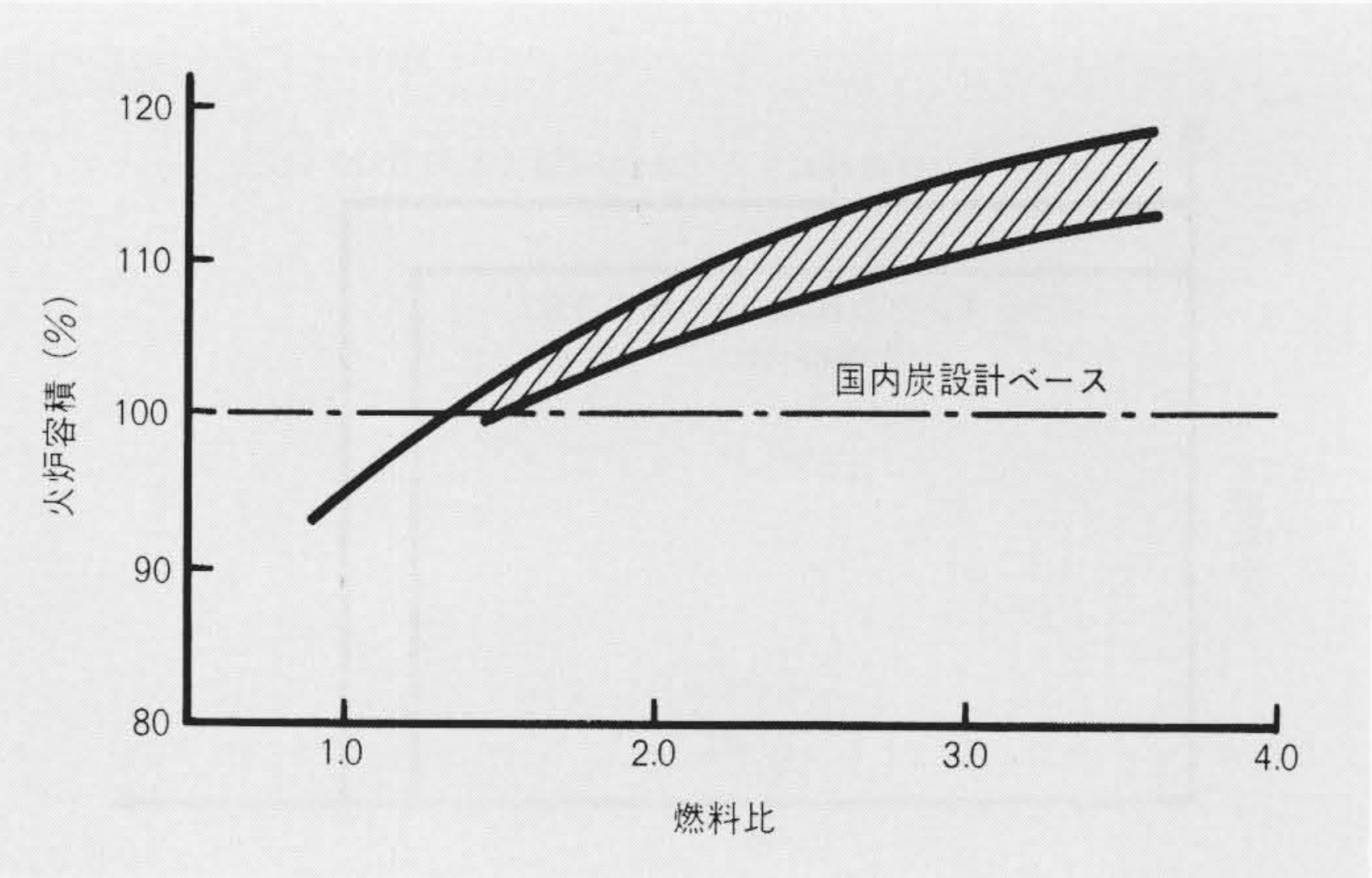


図3 燃料比(固定炭素／揮発分)と火炉容積 海外一般炭は，米国の石炭を除いて比較的燃焼性が悪いので，過剰空気率，微粉粒径などの調整と対策を講ずるほか，ボイラ火炉容積を拡大する必要がある。

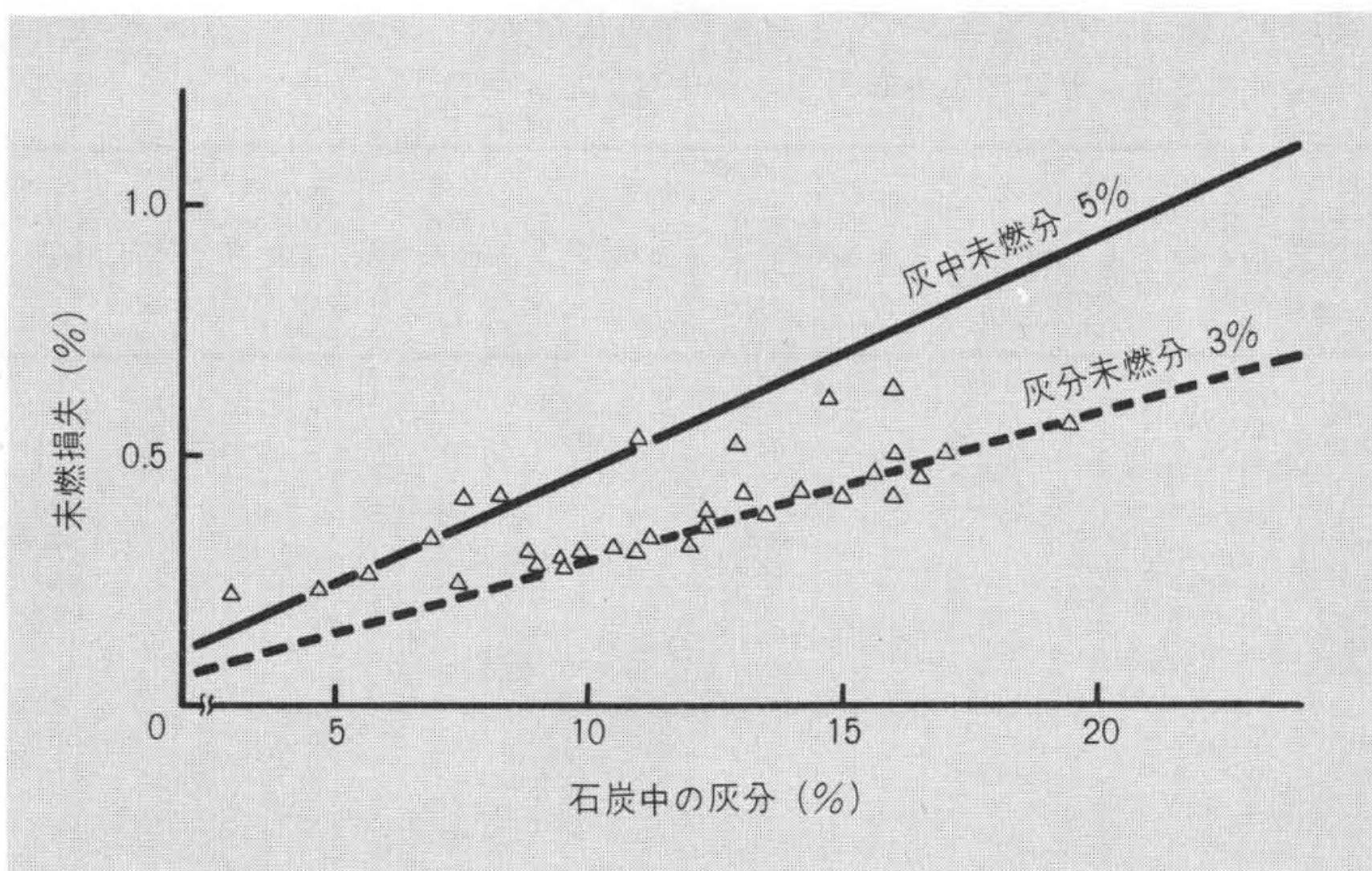


図4 石炭中の灰分と未燃分の関係 微粉度調整による燃焼改善を行なった後のものとして示すが、灰分が7%以下の石炭は未燃損失が低くても灰中未燃分が多くなる。

から灰分が少ないほうが良いといえる。

しかし、灰分の少ない石炭を燃焼した場合、相対的に灰中未燃分割割合が増加するため、セメント混和剤をはじめとするフライアッシュ製品としての処理が困難となることがあり、灰分の多い石炭との混炭運用をするなど、プラント全体計画の中での検討が必要となる。

図4は石炭中の灰分と未燃分の関係を示す。

石炭中の灰分量とは別に、灰自体の性状に起因する様々な現象が、石炭火力の経済性及び信頼性を左右する。特にボイラ設計上の重要な問題は次の三点である。

(a) スラッキング

スラッキングを生じやすいか否かは溶融する石炭灰性状に依存し、スラッキング特性としてのボイラ設計に影響を与える灰組成から判断基準を与えることができる²⁾。

図5はスラッキング特性とボイラ火炉設計の関係を示す。またウォールブロウ(火炉用スートブロウ)配置がスラッキング特性に応じて決定される。

したがって、スラッキング特性が良好な(低い～普通)石炭を使用するほうが設備費は低く、クリンカ除去など、運転、保守面からも好ましく、スラッキング特性の良好な石炭の選定、あるいは混炭による特性改善が望まれる。

スラッキング対策の前提として、火炉出口ガス温度を灰軟化温度以下にしなければならないので、灰軟化温度が低いほ

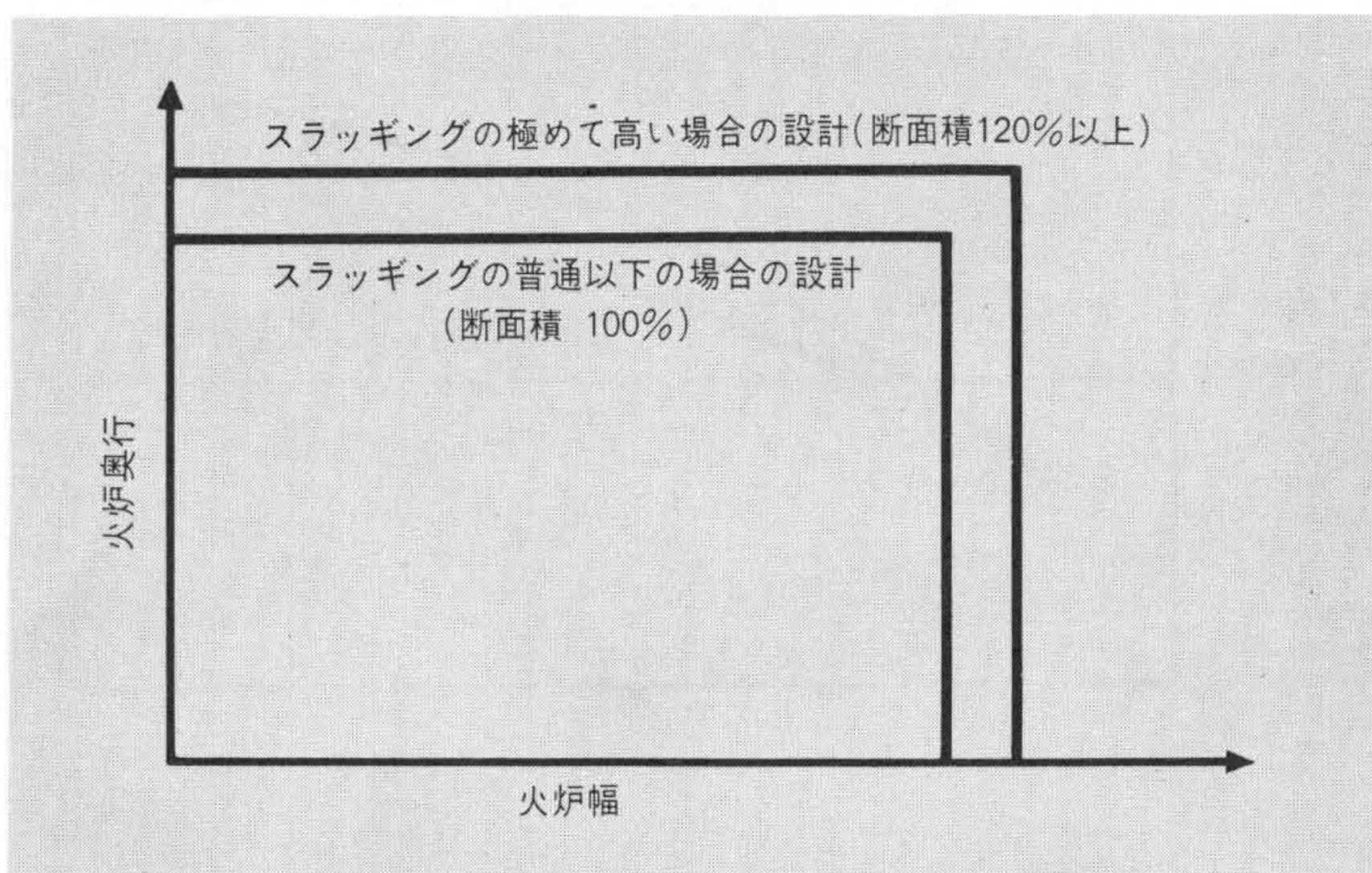


図5 スラッキング特性と火炉寸法 スラッキング特性に応じて火炉寸法を確定し、信頼性の向上を図る必要がある。

ど、火炉内に伝熱面積を多く必要とし、更にガス温度低下により接触伝熱面積も増大する。したがって、灰軟化温度が高いほうがスラッキング領域が限定され、伝熱面積も少なくすることができる。

(b) フォーリング

適切なスートブロウ配置とその効果が発揮できる伝熱面設計により、定期的なスートブロウ運用で対処可能であるが、フォーリング特性の悪い(高い～極めて高い)石炭を燃焼させる場合、これらの考慮が不十分であると、ガス通路の閉塞、蒸気温度及びガス温度特性の変化によるトラブルを引き起こす。フォーリング特性についても灰組成との関連で判定基準を与えることができるが、これにより管群ピッチ、スートブロウ配置を決定する^{2), 4)}。

フォーリング特性により、スートブロウ台数、スートブロウ運用頻度、蒸気又は空気消費量に大幅な差を生じ、フォーリング特性の良好な石炭が望まれる。

(c) エロージョン

エロージョンは燃焼ガス中の灰粒子による著しい伝熱管摩耗現象で、石炭燃焼ボイラの信頼性を大きく左右する。

エロージョンを減少させるために、ガス偏流を抑える諸施策が実施されるが、なによりも十分安全なガス速度にまで低下させることが根本的な対策となる。

図6にガス速度とボイラ接触伝熱面積の関係を示す。

図7は灰分量、灰性状によって選定される接触伝熱部でのガス速度選定基準を示す。

(4) 粉砕性

粉砕性の良好な(ハードグループ指数の高い)石炭のほうが微粉炭機を少なくできるなど、燃焼設備容量を小さくできる。粉砕性は石炭銘柄により大きい差があるが、一般的にはHGI 40以上である。

微粉炭機台数はボイラ設備費の大きい要素であり、発熱量と粉砕性と関連をもつことから、ミル容量指数($1/\text{発熱量} \times \text{HGI}$)を石炭選定の有力な判定指標とすることができる。

(5) 環境対策面からの石炭性状

今後建設される石炭火力発電所は、一段と厳しくなりつつある環境規制[SOx(硫黄酸化物), NOx, 煤塵, 騒音など]に対処するため脱硫装置, 脱硝装置の設置, 集塵装置の効率向上が必然的であり、これらの環境対策なくしては石炭火力発電所の建設はあり得ないと思われる。

したがって、環境対策に適した石炭銘柄の選定を行なうこ

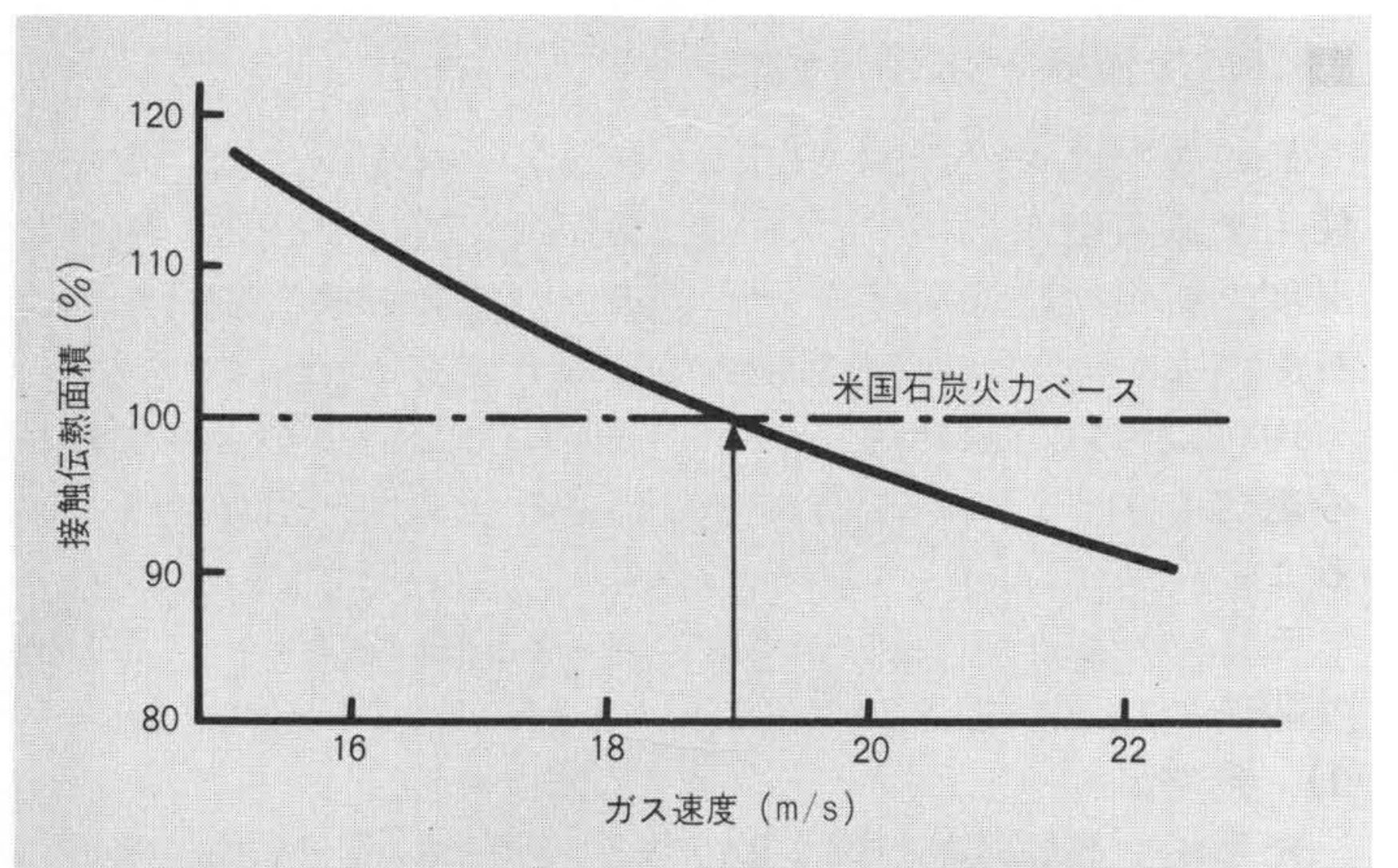


図6 ガス速度と接触伝熱面積の関係 ガス速度は、ボイラの信頼性と経済性を左右する重要な要素である。

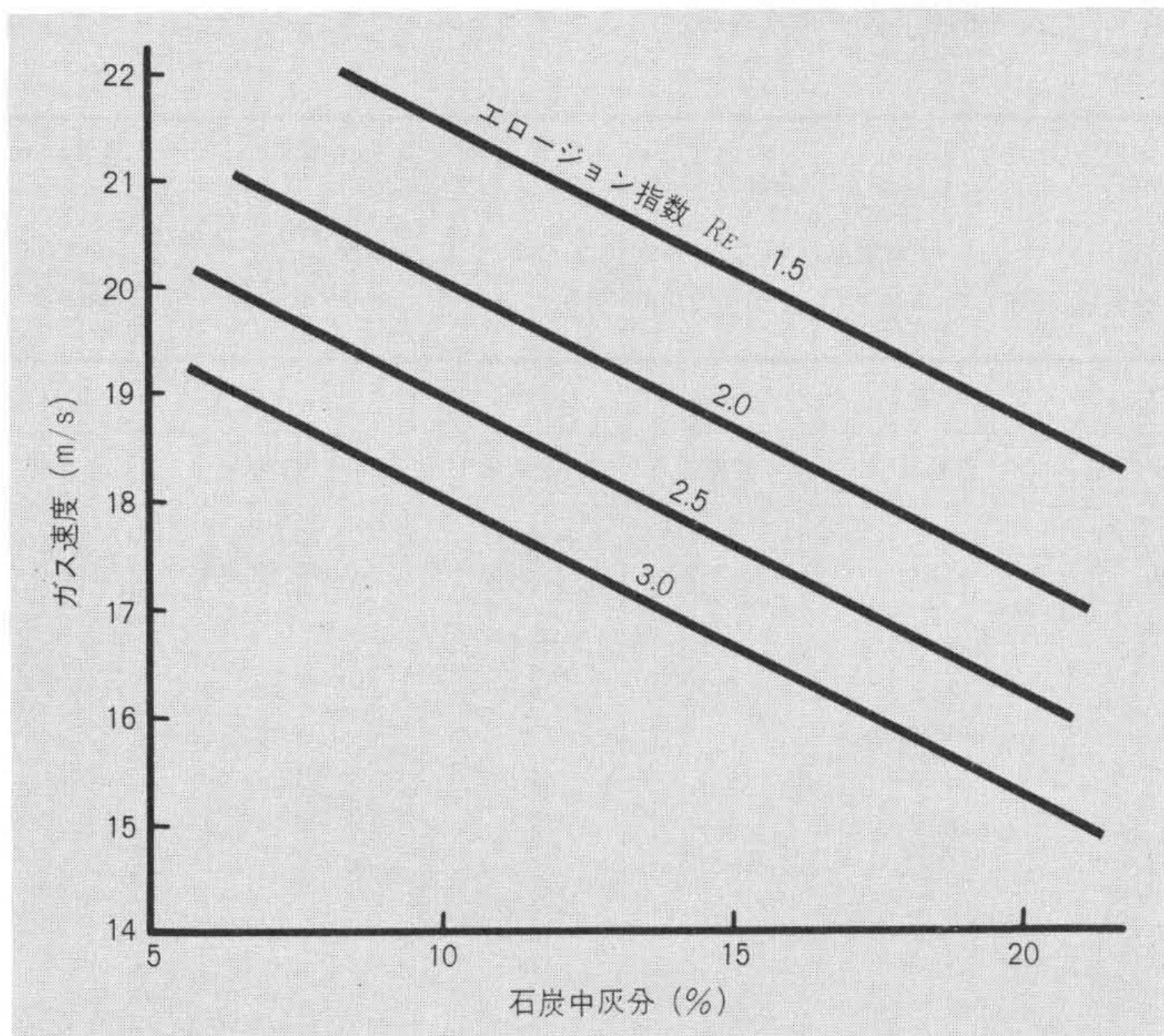


図7 石炭燃焼ボイラ接触伝熱部のガス速度 石炭灰の性状を十分検討し、ガス速度を決定する。

ともプラント計画上重要な問題となる。

以下に環境対策と石炭性状の関連について述べる。

(a) 硫黄分

石炭中の硫黄(全硫黄)分は大部分が燃焼により SO_x に転化するので、硫黄分の少ない石炭が脱硫装置の設備費、運転コスト及び生成する石こう処理の面で好ましいが、硫黄分0.1%以下ではEP(電気式集塵装置)での煤塵捕集性に影響を与えるため、調質などの対策が必要となる。

(b) 窒素分

石炭火力からの NO_x 排出量低減のために脱硝装置を設置するとしても、ボイラでの NO_x レベルを極力低減することが経済的となる。

ボイラでの NO_x 発生レベルは図8に示すとおり窒素分、燃料比、灰分量に関連性をもっているが、Fuel NO_x として NO_x に転換しやすい窒素分はできる限り低いほうがよい。

(c) 煤塵捕集性

多量の煤塵を含有する石炭燃焼ボイラの排ガスは、EPバグフィルタあるいは湿式脱硫装置による脱塵などの対策により、環境規制値内に抑えなければならない。

石炭性状との関連でみれば、特にEPでの捕集性について十分検討を加え、計画を行なう必要がある。

4 輸入炭選定の目安

プラント全体計画及びボイラ設計に最適ともいえる石炭銘柄を選定することによって、設備費、運転及び保守に要する費用は大幅に軽減することが可能となる。表2に石炭性状とボイラ設計の具体的な比較例を示す。

しかし、良質ともいえる石炭に基づいたプラント計画及びボイラ設計を行なうことは、一方で輸入先を制限する結果となり燃料政策上の重大な制約となる。

燃料政策と経済性の比較検討による評価は困難なことが多く、実際には燃料政策を優先させざるを得ないと思われるので、図2に示す輸入対象炭の多くを包括するとともに、信頼性の高いボイラ設計が可能な石炭性状の条件を石炭銘柄選定基準とすべきである。

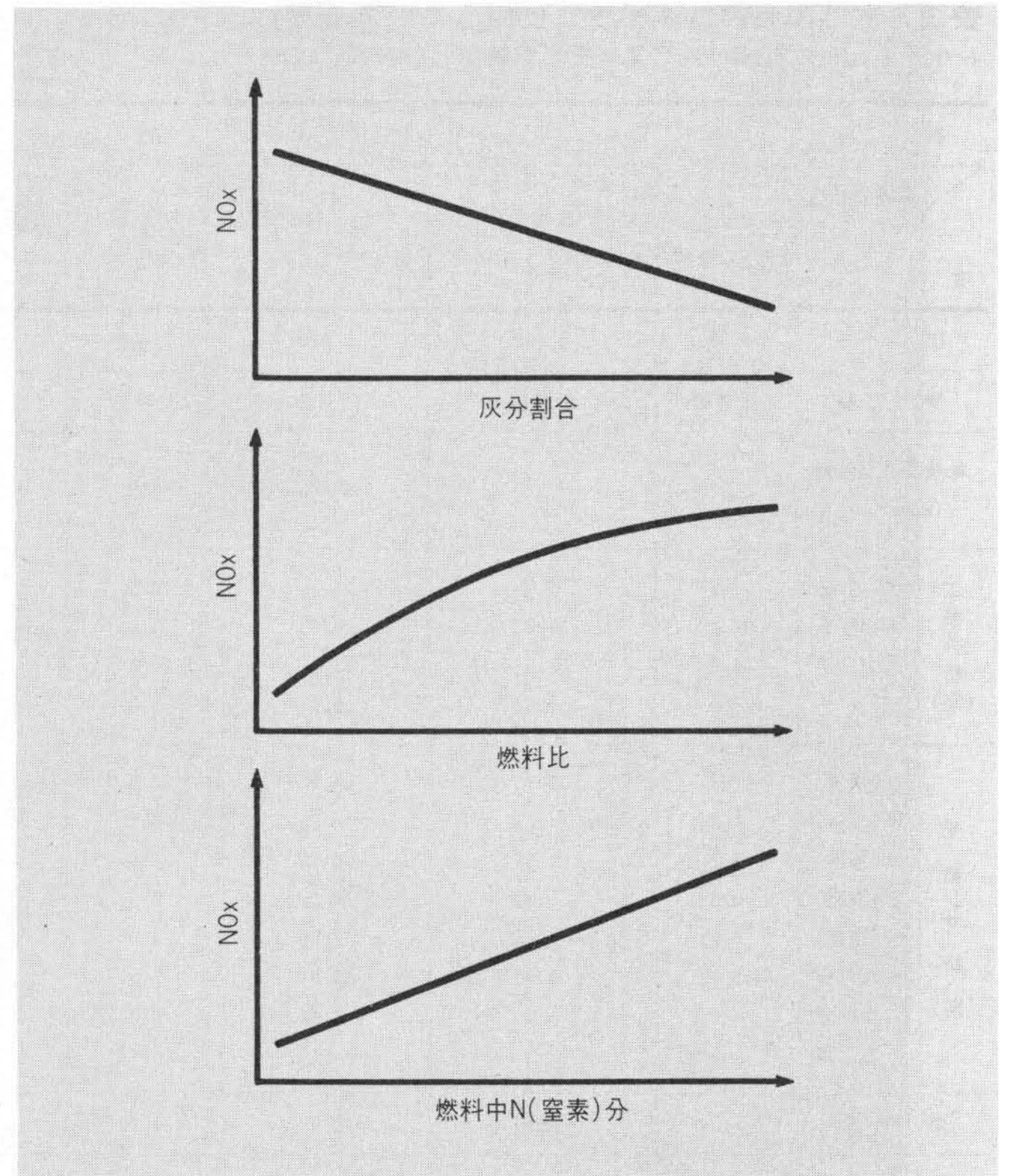


図8 石炭性状と NO_x レベル NO_x レベルは、燃料比、灰分及びN(窒素)分割合と密接な関連をもつ。

表3は石炭火力発電の先進国ともいえる欧米での大容量石炭火力発電所の使用実績炭を示すが、この範囲の石炭であれば大容量火力発電に十分適用可能であることを立証しているといえる。

表4に以上の比較検討及び実績を踏まえて提案する輸入炭銘柄選定の目安、更にはこの範囲を外れる石炭に対する混炭

表2 石炭性状とボイラ設計の比較 石炭のもつ特性しだいでボイラ設備費が大幅に異なる。

項 目		特性の良好な石炭を燃料とするボイラ設計	特性の悪い石炭を燃料とするボイラ設計
1. 石炭の特性	(1) 燃焼性 燃料比	良 い 約1.5以下	悪 い 約2.5
	(2) スラッキング特性 灰軟化温度	良 い 1,250°C	悪 い 1,100°C
	(3) フォーリング特性	良 い	悪 い
	(4) エロージョン特性 ガス流速	良 い 19m/s	悪 い 16m/s
	(5) NO_x N(窒素)分	1.5%以下	1.8%以下
2. ボイラ設計	火炉容積	100%	120%
	ボイラ伝熱面積		
	水壁・ケージ壁	100%	110%
	過熱器	100%	116%
	再熱器	100%	122%
	節炭器	100%	106%
	スートブロワ台数	100%	130%

表3 海外の大容量ボイラに使用している石炭性状 バブコック社グループは世界各国で最も多くの石炭燃焼ボイラを納入しており、それらの実績が我が国の石炭燃焼ボイラ計画に反映される。

国 名		米 国					イ ギ リ ス		西ドイツ	南アフリカ	
電力会社名		T.V.A カンパランド1&2	デューク電力 ペルースクリーク1&2	ペンシルベニア電力 ホームシティ3	バックキー電力 カーディナル3	A.E.P ロックポート1&2	ニューヨーク州電力 サマーセット	C.E.G.B ソープマーシュ	C.E.G.B ドラックス1〜6	N.W.K ウイルヘルムスハーヘン	E.S.C マトラ
項 目											
出 力		1,300	1,100	630	650	1,300	930	550	660	720	600
炭 種		歴青炭	歴青炭	歴青炭	歴青炭	歴青炭	歴青炭	歴青炭	歴青炭	歴青炭	歴青炭
乾炭高位発熱量 (kcal/kg)		6,220	7,220	6,110	5,830	6,110	5,720	6,390	5,830	6,000〜6,600	5,150
工業 分析 (%)	全 水 分	7.7	5.0	4.14	10.0	10.0	10.0	15.0	8.0	6〜9	10
	揮 発 分	32.4	33.0	21.89	35.0	35.0	19.48	30.0	28.0	17〜32	25.1
	固定炭素	44.9	52.5	54.06	40.0	40.0	48.78	49.0	44.0	—	43.5
	灰 分	15.0	9.5	19.91	15.0	15.0	21.74	6.0	20.0	7〜15	21.4
元 素 分 析 (%)	C (炭素)	61.8	73.10	64.24	58.9	58.9	59.20	—	—	—	—
	H (水素)	4.3	4.75	4.05	4.1	4.1	3.63	4.0	3.7	—	—
	N (窒素)	1.2	1.52	0.75	1.5	1.5	0.79	—	—	—	—
	O (酸素)	6.0	5.27	4.41	6.5	6.5	2.36	—	—	—	—
	S (硫黄)	4.0	0.86	2.50	4.0	4.0	2.22	1.5	2.0	1.5以下	0.8
	灰 分	15.0	9.50	19.91	15.0	15.0	21.74	6.0	20.0	7〜15	21.4
	水 分	7.0	5.0	4.14	10.0	10.0	10.0	15.0	8.0	6〜9	10
	塩 素	—	—	—	—	—	—	0.50	0.40	—	—
燃 料 比		1.39	1.59	2.47	1.14	1.14	2.50	1.63	1.57	1.5〜3.0	2.0
粉 碎 性(HGI)		50	55	65	50	50	50	50	50	45以上	48
灰軟化温度(℃)		1,065	1,237	—	1,121	1,120	1,182	1,100	1,200	1,100	約1,300
運 開 年		1972	1974	1976	1977	1981	1983	1964	1976	1976	1979

表4 混炭の目安とその判定方法 特異な石炭性状をもつ石炭は、運用上混炭を行ない設計上不利な性状の改善を図ることから、信頼性と経済性追求の面で重要となる。

目 安	判 定 の 方 法	混炭の目安
燃焼性の改善	燃料比(固定炭素/揮発分)を2.0〜2.5以下にする	燃料比の調整
未燃分の低下	灰分7%以上にする。 未燃分5%を超えないように燃焼性改善を図る。	灰分の調整 燃料比の調整
EP(電気式集塵装置)性能の確保 (低温EP)	アッシュ20%以下にする。 Na ₂ O>0.1% CaO+MgO>1	灰分の調整 灰組成の調整
NO _x の低下	環境基準値内に入れるためのNO _x レベル N<(1.8〜2.0)%	N(窒素)分の調整 燃料比の調整
SO _x の低下	環境基準値内に入れるためのSO _x レベル S<(1.0〜2.0)%	S(硫黄)分の調整
スラッキング特性の改善	軟化温度1,200℃以上にする。 スラッキングの極めて高い区分の石炭を避ける。	軟化温度の調整 灰組成の調整
フォーリング特性の改善	フォーリングの極めて高い区分の石炭を避ける。 CaO<15% Na ₂ O<3%	灰組成の調整
エロージョン特性の改善	アッシュ20%以下にする。 摩耗性の改善を図る。	灰分調整 灰組成の調整

の目安を示す。このように混炭は、燃料政策と経済性の妥協点を見いだすための手段とすることができるので、輸入炭銘柄選定基準の切下げによる経済性の追求が可能となる。

5 結 言

現在、輸入対象とされている海外炭の特性について検討するとともに、石炭性状の相違に伴うボイラ設計比較を行ない、輸入炭銘柄選定の重要性について述べ、かつ具体的な輸入炭銘柄選定の目安に対する提案を行なった。
輸入炭は国内炭とかなり異なった特性をもっているが、本検討は輸入炭分析値を中心に行なったものであり、今後、燃焼試験の積み重ね、輸入炭を対象とした石炭火力発電所の運転実績調査などにより、輸入炭の特性を更に追求して、より精度の高い輸入炭選定基準を確立していく考えである。
終わりに、本論文が関係各位の参考になれば幸いである。

参考文献

1) 総合エネルギー調査会需給部会、長期エネルギー需給暫定見通し(中間報告)昭和54年8月
2) 高山、外：石炭燃焼ボイラの設計、日立評論、60、771〜775(昭53-11)
3) J.A.Barsin, Boiler Design Consideration : Babcock and Wilcox Co. Technical Report presented to Coal Combustion Technology and Emission Control Conference (1979)
4) G. F. Moore et al. : Western Coals-Laboratory Characterization and Field Evaluations of Cleaning Requirements, ASME 73-WA/Fu-1 (1973)