

DENCHUKEN REVIEW

電中研レビュー

「環境に優しい石炭利用技術」



NO.30 1994.4

電中研レビュー第30号 ● 目次
環境に優しい石炭利用技術
編集担当●研究開発部 環境推進室 次長 田中 隆

巻頭言	電源開発株式会社 常務取締役 中林 恭之	2
はじめに	常務理事 中嶋 隆雄	5
第1章 なぜ石炭か		7
1-1 ●エネルギー資源としての石炭		9
1-2 ●今後の石炭火力の導入の展望		11
1-3 ●当研究所の研究状況		13
1-4 ●今後の石炭利用のあり方		18
第2章 石炭を効率よく使う		19
2-1 ●最新技術		21
2-2 ●将来技術		28
第3章 石炭をクリーンに使う		41
3-1 ●環境対策技術		44
3-2 ●石炭灰の有効利用		56
3-3 ●貯炭管理		63
3-4 ●CO ₂ の抑制対策		67
3-5 ●景観などの環境創造		76
第4章 石炭を使いやすくする		79
4-1 ●石炭の流体化技術		81
4-2 ●石炭からの新燃料製造技術		83
第5章 石炭利用を地球規模で考える		87
5-1 ●21世紀の石炭需給と国際協力		89
5-2 ●石炭利用発電における新技術		91
おわりに	理事 横須賀研究所長 宮岡 貞隆	92
関連する主な研究報告書等		93

ARTS

文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。



文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。文以載道，道以載德，德以載業，業以載名。

かんとうげん



近代文明は、そのエネルギー消費の90%を化石燃料（石炭、石油、天然ガスなど）に頼っている。化石燃料は再生不可能な枯渇資源であり、太陽・地球が数億年かけて貯えたエネルギーを、近代文明は数百年の間に消費しつくそうとしている。

化石燃料の中でも石炭は可採埋蔵量の大きさ、資源の地域分散性、経済性などがその長所であるが、問題は環境特性の悪さである。環境問題は、技術開発によって克服されるべき

であり、既に多くの成果をあげている。

石炭の環境問題は、酸性雨対策と、地球環境問題の一つである炭酸ガス対策とに大別される。

この中、酸性雨対策としての脱硫技術と、窒素酸化物低減技術は実用化のレベルに達しているが、将来は次のような展開をすると考えている。一つの方法は、より経済的で、より高性能な排煙処理技術の開発である。現状の排煙処理技術は、脱じん、脱硫、脱硝効率共に高性能で、最新の施設では、煙突出口でばんじん $10\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ 、 SO_x 、 NO_x は、共に 50ppm 程度であり、これらに要する費用は、新設発電所の場合で新発電原価の二割程度である。将来の高性能化のターゲットは SO_x 、 NO_x 共に排煙出口濃度 $20\sim 10\text{ppm}$ のレベルを費用増なしに達成しようというもので、スーパークリーンコール・テクノロジーと名付けている。

もう一つの方向は、簡易排煙処理技術である。先に述べたように排煙処理技術は実用化済であるが、これを実用化しているのは、日本、旧西独、米国の一部ぐらいで世界的に見ると全く普及していない。これは一重に原価の二割と言うコストが、発展途上国等に耐えられないためと考えられている。技術は存在しても普及しないものでは

問題であって、若干性能は落ちるが、コストの安い所謂、簡易排煙処理装置の開発と普及が望まれる。通産省の主導で、中国の黄島発電所に簡易脱硫装置の設置が進められている。

もう一つの地球環境問題である炭酸ガスの削減は容易なことではない。対策としては、その発生を減らすためのエネルギー生産・消費の両面にわたる高効率化、省エネと、炭酸ガスの回収・貯蔵技術の開発が検討されている。

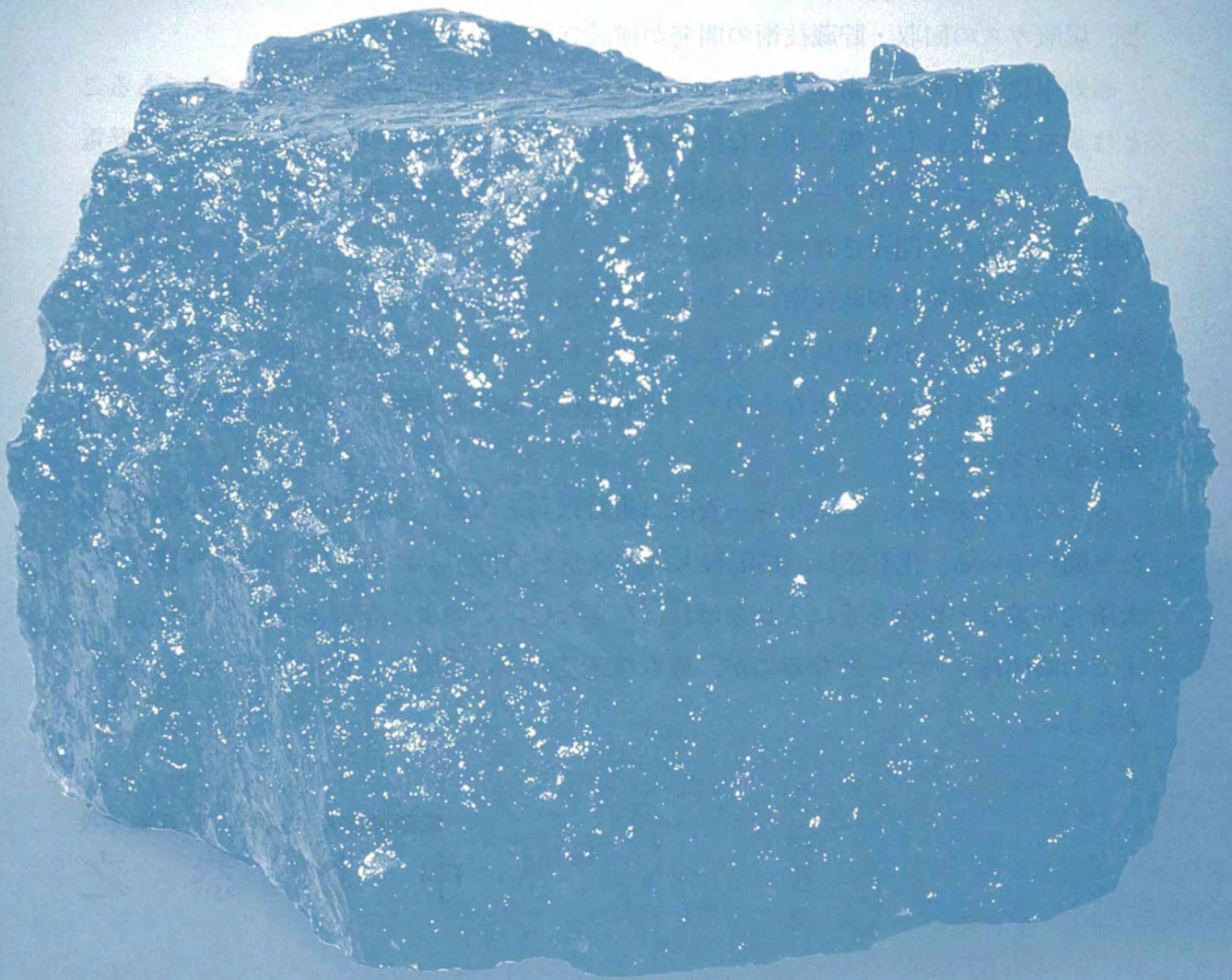
高効率化・省エネ技術については発展途上国を含む全世界で取り組むべきであることは論をまたないし、現に様々な技術が開発され実用化されつつある。石炭火力発電についていえば、蒸気タービンの高温・高圧化、加圧流動床複合発電、石炭ガス化複合発電等が着々と開発されつつある。

炭酸ガスの固定・貯蔵技術についてはどうか。基礎的な調査・研究は進めなければならない。しかし実用化について最も懸念されるのは固定・貯蔵に必要なエネルギー量である。もしそれが莫大なもので、化石燃料の余寿命を縮める程のものであれば問題であろう。

多くの古代文明は、エネルギー資源（当時は薪その他）の枯渇によりその幕を閉じたと聞いている。化石燃料の枯渇後も近代文明を維持するためには、増殖炉・核融合・太陽光発電等の技術を手に入れなければならない。このような未来技術を実用化するまでの時間稼ぎのキーとなるのが、最も埋蔵量の多い石炭だと思ふのは、考え過ぎであらうか。

電源開発株式会社 常務取締役

中 林 恭 之



はじめに

常務理事 中嶋 隆雄



今日の社会は大量のエネルギーを使うことで成り立っているといっても過言ではない。産業革命を契機に、人類は快適さ、豊かさを求め旺盛な経済活動を展開してきたが、これがエネルギー・資源の大量消費につながり、これにより蓄積された環境負荷は、いま温暖化や酸性雨といった地球環境問題となって顕在化してきている。このため、これからの人類の持続的な発展のためには、エネルギー利用のあり方を先進国はもとより発展途上国も含めた地球レベルで考えていかなければならない。

特に技術開発面では、効率向上、環境負荷の低減など高度なエネルギー利用技術の開発が緊要な課題である。とりわけ環境負荷が大きいといわれる化石燃料、なかでも石炭の利用には、大きな制約が課せられているといえよう。しかしながら、賦存量が豊富で経済性に優る石炭は、現在、世界のエネルギー需要の4分の1を賄っており、将来的にも相当の期間、安定的なエネルギー源として果たすべき役割は大きい。

幸いにして、わが国の石炭を含む火力発電では、とりわけその環境対策技術の開発に多くの成果を上げてきているが、今後、石炭の一層の活用を進めるには、開発途上国での利用にも視点を置いて、さらにクリーンかつ効率的な利用技術の開発を進める必要がある。

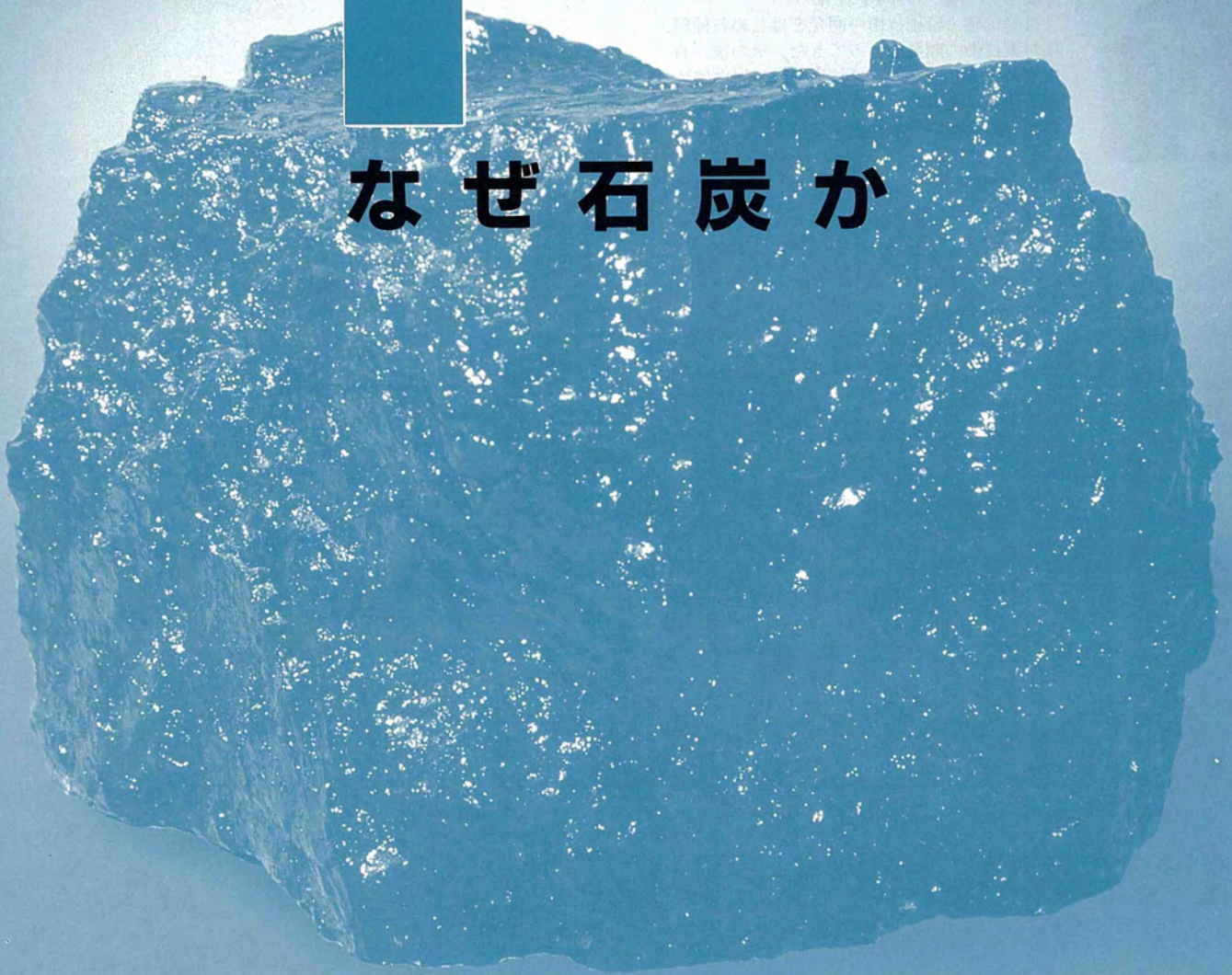
電力中央研究所では、石炭の低NO_x燃焼、低負荷での安定燃焼など微粉炭火力の高度化技術の開発に取り組む一方、石炭ガス化複合発電、熔融炭酸塩型燃料電池など石炭の新しい利用技術の開発を進めている。

このレビューは、このような当研究所の研究開発の現状にとどまらず、石炭の発電利用に係わる技術について、国内外の動向をも合わせ、幅広く紹介したものである。エネルギー問題、とりわけ石炭利用のあり方をお考えいただく上で、いささかなりともお役に立てば幸いである。

第1章

1

なぜ石炭か



第1章 なぜ石炭か ● 目次

研究開発部 環境推進室次長 田中 隆

1-1	エネルギー資源としての石炭	9
1-2	今後の石炭火力の導入と展望	11
1-3	当研究所の研究状況	13
1-4	今後の石炭利用のあり方	18



田中 隆 (1969年入所)

排煙脱硫・脱硝技術の開発をはじめ各種環境対策技術の開発を行ってきた。その後、石炭ガス化クリーンアップ技術や微粉炭燃焼技術の開発に従事し、現在、環境推進室で環境問題全般について取り組んでいる。

1-1 エネルギー資源としての石炭

1-1-1 石炭とは

太古、地球上が現代よりも温暖で雨量も多く、巨大な植物が大量に生い茂っていた時期があった。これらが地中に埋没堆積し、地殻変動や地熱、火山活動の影響を受けて、長い年月をかけて少しずつ分解し炭素分に富むようになったものが石炭である。この変質の過程は泥炭化作用と石炭化作用の二段階からなっている。

まず樹木が倒れ、水底に沈積する。これらがバクテリアの活動によって分解され次第に炭素質に富む物質（泥炭）へと変化する。この過程が泥炭化作用と呼ばれている。一般的に言ってこの過程で泥炭の炭素含有量は45～60%とされている。次に泥炭中の水分や炭酸ガスあるいは揮発しやすいメタンガスなどが脱けていくことによって、さらに炭素含有量の高い物質へと変化する。これらの過程を石炭化作用と呼び、この石炭化作用によって褐炭→亜瀝青炭→瀝青炭を経て無煙炭へと漸次移行していく。よく褐炭だとか瀝青炭という言葉が用いられるが、要するに石炭化作用の途中にあるものが発見されて取り出されれば、それは褐炭であり亜瀝青炭であるが、石炭化作用の末期に近づいたものが発掘されれば瀝青炭ということになる。

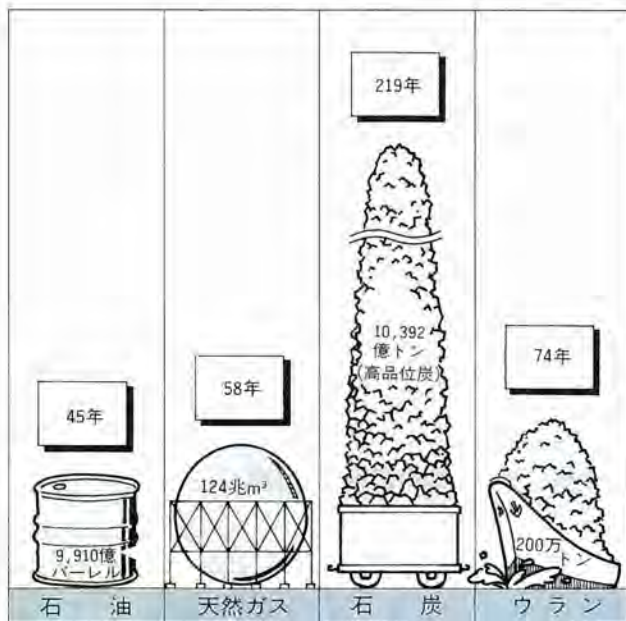
世界的には、古生代の石炭紀（3億5千万～2億8千万年前）の炭層が最も発達している。日本では、もっと新しい新生代古第三紀（6,400万～3,500万年前）の炭層がほとんどである。

1-1-2 化石燃料資源と石炭

地球上のエネルギー資源には、石油、天然ガスおよび石炭などの化石燃料と、原子力発電プラントなどに使われている核燃料、そして太陽エネルギーなどの自然エネルギーがある。化石燃料と核燃料は使うとなくなってしまう「非更新性エネルギー」である。ただし、核燃料は使用済み燃料を再処理して利用すれば、かなりの長期にわたって使える燃料である。一方、自然エネルギーは再生可能な資源である。しかし、自然エネルギーだけで人類のエネルギー消費をまかなうには、今後数世代にわたる努力が必要である。

現在の主要なエネルギー資源のうち90%以上が「非更新性エネルギー」である。この非更新性エネルギーが地球上にどのくらい存在すると見積もられているかをみてみよう。これらの量は「確認可採埋蔵量」^{*1}という数値で表され、石油が9,910億バーレル、天然ガスが124兆m³、石炭が10,392億トン、ウランが200万トンである。

世界全体で1年間に消費されるエネルギーは、それぞれの資源の年生産量にはほぼ等しい。したがって確認可採埋蔵量を年生産量で割った値は、現在の技術で経済的に採取できる年数になり、これは「可採年数」と呼ばれる。たとえば、図1-1-1に示すように、石油の確認可採埋蔵量9,910億バーレルを年生産量220億バーレルで割ると、可採年数は45年ということになる。同じようにして計算すると、天然ガスの可採年数は58年、石炭は219年、ウランは74年になる。ただし、ウランは使用済み燃料を再処理してプルトニウムを取り出して利用すれば、数十倍に利



注1) 年数は可採年数(可採年数=確認可採埋蔵量/年生産量)
 注2) プルトニウム利用によりウランは数倍から数十倍利用年数が増える
 出所:「総合エネルギー統計」ほか

図1-1-1 世界のエネルギー資源量と可採年数

用年数を増やすことができる。

このウランを除けば、石炭は石油、天然ガスに比べて埋蔵量が圧倒的に多いことがわかれると思う。

石炭の持つメリットとしては、石炭は世界に広く賦存しており、地域的に偏在していないことから、供給安定性に優れていることがあげられる。このことは、原油の場合、大部分が中東地域に集中しているため、わが国のように中東依存度の高い国において大きな問題となるこ

とは、過去の二度にわたるオイルショックや先の湾岸危機を見ても明らかである。

もう一つの石炭のメリットは、石油や天然ガスなど他の化石燃料に比べて経済性に優れているという点である。平成2年度にわが国に輸入された石炭、石油およびLNG(液化天然ガス)の日本着価格について、それぞれの燃料の発熱量当たりの単価を求め、比較してみると、石炭の単価を1とした時に石油、LNGは約2倍となり、石炭が最も安い。以上のように、エネルギーの大宗を占める化石エネルギーの中でも石炭は、埋蔵量の豊富さに加えて、供給の安定性、優れた経済性等数多くの利点を有しており、わが国のみならず世界各国においてエネルギー資源として重要な役割を担うものと期待されている。

石炭は、世界の一次エネルギーの約3割を占める重要なエネルギーであり、今後とも、発展途上国を中心にその需要は大幅に拡大することが見込まれている。

わが国においては、一次エネルギーに占める石炭の割合は20%弱であり、OECD諸国の平均(20%強)及び世界平均(30%弱)と比較して石炭の比率がまだまだ低いのが現状であるが、今後、わが国の石炭需要は、2000年までに一般炭を中心に約3,000万トン増加すると見込まれており、石油依存度の低減を図る観点からも石炭の果たす役割はますます重要になるものと考えられている。

*1) 現在の技術により経済的に採算のとれる形で採取できる量。

1-2 今後の石炭火力の導入の展望

1-2-1 石炭火力の変遷

9 電力体制が発足した1951年当時は、発電設備といえ
ば、その多くは水力発電が占め、火力発電は全体の約1/
3にすぎず、しかもそのほとんどは石炭火力であった。

しかし、1950～60年代に安価で取扱いの容易な石油が
大量に国際市場に登場し、わが国においては、高度経済
成長期の大幅な電力需要の増大に対応するため大型の石
油火力の建設が進められた。その結果、60年代後半には
石油火力のシェアが石炭火力を上回り、また、その後の

環境規制の強化もあって、石炭火力は大幅に減少した。

一方、石油火力は一時電源の約6割を占めたが、1973・
1979年の2度にわたる石油危機を契機として、わが国で
は強力な脱石油、原子力開発が推進され、現在では石油
火力のシェアは約3割となっている。また、石炭火力の
シェアは7%となっており、これにLNG火力を加えた火
力全体の電源に占めるシェアは約6割で、残りの4割を
水力と原子力が二分している。

しかし、世界の発電用燃料の主流は石炭であり、OECD
全体で見ると発電電力量の40%は石炭によるもので、石
油やガスの9%を大きく上回っている。

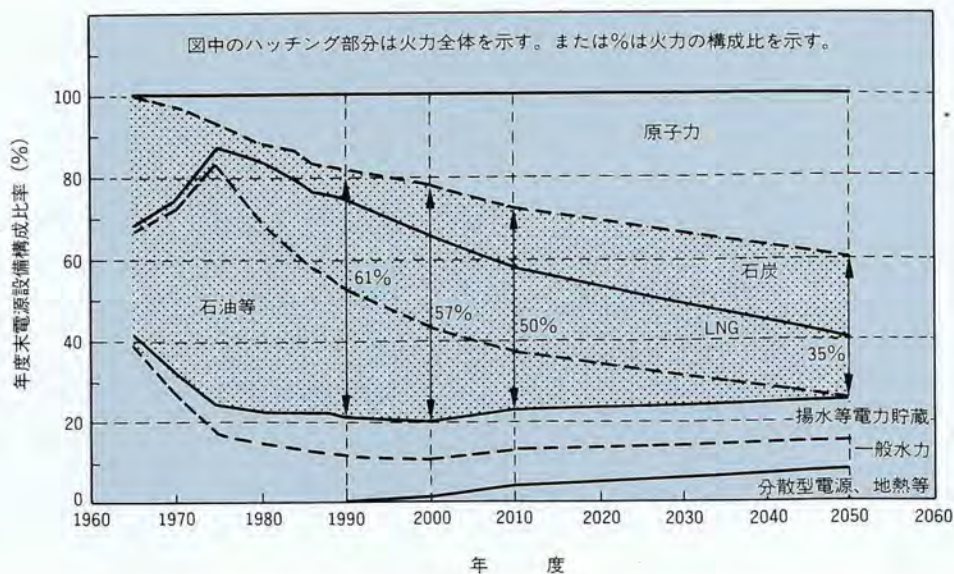


図1-2-1 年度末電源構成比の推移

電力会社が毎年策定する今後10年間の電力長期計画 (1991年度)において、石炭火力は原子力に次ぐベース供給力として、さらに長期的にはミドル供給力として位置づけられている。

1-2-2 今後の石炭火力の位置付け

石炭は、石油や天然ガスに比べて埋蔵量が非常に豊富であるとともに世界的に分布していることから供給安定性が高く、また、経済性にも優れている。

このため、1990年6月に発表された総合エネルギー調査会の「長期エネルギー需給見通し」においても、石炭は中核的な石油代替エネルギーとして位置付けられている。

また、同じく6月に発表された電気事業審議会の「長期電力需給見通し」においては、わが国全体の電源に占める石炭火力のシェアを今後20年間で2倍以上に引き上げることを目標としており、原子力に次ぐベース・ミドル

供給力としてその活用を図ることとしている。

電力会社が毎年策定する今後10年間の電力長期計画（1991年度）においても、石炭火力は、原子力に次ぐベース供給力として、さらに長期的にはミドル供給力として位置付けられている。具体的には、電力長期計画では、電源開発（株）や共同火力等の卸電気事業者から受ける電力を含め9電力全体で、石炭火力を今後10年間に約1,700万kW開発し、約2,900万kWまで増加することとしている。この結果、**図1-2-1**に示すように、石炭火力のシェアは90年時点の7%から2000年度末には12%に増加することとなる。また、これを発電電力量のシェアで見ると、現在の9%が2000年度には16%にまで増加することになり、石炭火力の復活が推進される見通しである。

二度にわたる石油ショックを経験して以降、各国においてエネルギーの石油依存からの脱皮への努力が払われた。特に、先進諸国は“脱石油”および“省エネルギー”の2本柱のエネルギー戦略を打ち出した。

エネルギーの大半を海外に依存しているわが国では、一層積極的にその政策を推進する必要があったことから、石油火力の代替としての石炭火力の推進が重要な課題になった。特に、それまでの石炭火力とは異なり、海外からの輸入炭を使う大容量火力の建設が狙いであったため、新たな環境対策が必要になった。

当研究所では、大容量化に伴って大量に排出される排ガス、ばいじん、石炭灰など環境問題の解明と対策のため、1980年度から「石炭火力環境対策技術」を最重点課題に位置づけ、それまでの研究成果や知見をもとに、鋭意研究を進めてきた。

また、石炭の効率的利用の拡大を図るための当面の課題として、環境性や運用性の向上を狙いとした新燃焼法の研究など、微粉炭火力の高性能化を目指す研究を進めてきた。

さらに、石炭の一層の効率的な利用を拓げるための次世代の技術として、石炭ガス化複合発電、熔融炭酸塩型燃料電池の開発を進め、石炭の流体化、クリーン化など、石炭をより使い易くする技術にも取り組んでいる。また、地球温暖化の防止に向けて、火力発電所から排出されるCO₂の回収・貯留技術の開発なども進めている。

表1-3-1に当研究所の研究状況を示した。

1-3-1 環境対策技術

(1) 発電用炭適正評価

石炭の性状は、石炭の生成年代や産炭地によって大幅に異なる。当研究所では1981年から、発電に利用される可能性のあるさまざまな国内炭、海外炭が、環境面から見て適しているか否かを事前に評価しておくために、「石炭燃焼試験炉」を設置し燃焼試験を行う一方、石炭と石炭灰の性状を分析、これらを総合して、**発電用炭としての適正評価を行った。**

(2) 排煙対策

石炭火力用の窒素酸化物対策として、**炉内脱硝技術の開発**、ばいじん対策としての**静電ろ過集じん技術の実用化研究**などを実施してきた。また、最近では灰中の未燃分を増加させずにNO_xの低減を図る**超低NO_x燃焼技術の開発**を進めている。

(3) 石炭中微量元素の挙動

石炭には数多くの微量元素が含まれている。石炭火力の大容量化、石炭使用量の増加に伴い排出される微量元素が、発電所周辺の大気汚染に影響を与えるのかどうかを評価するために、**石炭燃焼に伴う微量元素の挙動および環境影響評価の研究**を行い、自然環境に存在している微量元素に比べ極めて少ないことを確かめた。

(4) 石炭灰の利用

石炭火力から多量に排出される石炭灰の利用または埋

表1-3-1 当研究所の研究状況

		76	77	78	79	80	81	82	83	84	
石炭火力のクリーン化	ばいじん対策			静電炉過集じん技術の開発					実証テスト		
	窒素酸化物対策						発電用炭適性評価				
	硫黄酸化物対策								乾式脱硫		
	石炭灰対策						石炭火力における微量物質の挙動および環		石炭灰埋立地環境影響予測手法		
	貯炭管理				自然発火予知システム要素技術の開発				自然発火		
				炭じん飛散量予測手法の開発							
					環境アセスメントの実施						
石炭灰の有効利用	セメント分野			高アルミナスラグセメントの開発					ローラーコンパクテ		
	道路・土木										
	肥料		けい酸加里肥料の実用化					土壌改良材としての実証（農地利用）			
石炭火力の高効率化	石炭ガス化複合発電						石炭ガス化技術の開発		石炭ガス 石炭ガス		
	燃料電池発電					MCFC 発電技術の開発					
石炭の流体化	C W M										
	メタノール										
CO ₂ 対策	CO ₂ の回収技術										
	CO ₂ の貯留技術										
	CO ₂ の再資源化 生物的資源化										

85	86	87	88	89	90	91	92	93	94 ~
実火力発電所排出超微小ばいじんの低減化技術の検討									
炉内脱硝技術の開発					低NOxワイドレンジバーナの開発				
技術の検討									
境影響評価							評価システムの開発		
の開発							石炭灰の大量利用方策の開発		
予知システム実証試験									
炭じん飛散アセスメント手法の開発									
						石炭の生物加工（脱硫・脱灰技術）			
ッドコンクリートへの利用									
						路盤材としての適用性実証試験			
石炭埋立地の力学特性									
					埋立地の有効利用検討				
			化成肥料の開発と実用化						
			石炭埋立地の植物による被覆実証						
					石炭灰埋立地の緑化手法の実証調査				
化用乾式クリーンアップ技術の開発									
化用ガスタービン燃焼器の開発									
						SOFCの開発			
			乾式CWM製造法の開発						
					メタノール液相合成法の検討				
						湿式吸収法の開発			
							CO ₂ 回収型発電システム調査		
							CO ₂ 海洋貯留技術の開発		
					CO ₂ の海洋処分技術の開発				
						微生物によるCO ₂ 固定			

め立て処分への見通しをたてることは、石炭火力の推進に必須な条件である。

現在、石炭灰を最も多く有効利用しているのは、セメントやコンクリートの分野で、セメントの原料や混合材として、また、コンクリートの混和材として利用されている。当研究所では、石炭灰を原料として用いる**高アルミナスラグセメントの開発**や、**ローラーコンパクトコンクリートへの利用法**の開発を進めてきた。

また、石炭灰は肥料としても有望な資源である。当研究所でこれまでに、石炭灰を使った**けい酸カリ肥料**や**化成肥料の開発**、**土壌改良材としての利用の有効性**を実証してきた。

その他、**道路の路盤材としての適用性試験**や**石炭灰埋め立て地の有効利用**や、**その緑化手法の検討**なども進めてきた。

(5) 貯炭管理

石炭火力発電所では、揚炭、貯炭の過程で炭じんが発生する可能性があり、その炭じんの一部は風に運ばれて発電所敷地外へ飛散することがある。このため、飛散炭じんの周辺地域に及ぼす影響を評価するために、**炭じん飛散量の予測手法の開発**や**炭じん飛散アセスメント手法の開発**を行ってきた。

また、輸入炭を用いた大型石炭火力では、大量の貯炭が必要になるので、貯炭時における石炭の風化による自然発火を防止するため、**石炭自然発火予知システム**の開発を行った。

1-3-2 石炭高度利用技術

現在の石炭火力には、微粉炭だき燃焼方法が用いられ、その排煙処理は基本的には石油火力と同じである。この現状技術による石炭火力は順調に稼働しており、環境対策面でもすでに石油火力と同様なレベルにあるといえる。しかし今後、原子力を補完する主要な電源として石炭の利用拡大を図っていくためには、石炭利用に関わる輸送、燃焼・発電、環境対策などの全工程を通じ、総合的な技術の改善および新技術の開発が不可欠である。

(1) 運用性の向上技術

原子力を補完する主要電源としての石炭火力に求められる機能の一つは、中間負荷運用が可能な石油火力並みの運用性の向上である。

当研究所では、石油火力と同等の低負荷でも安定な燃焼が可能な**ワイドレンジバーナ**の開発を進めており、実用化に見通しを得ている。

(2) 高効率発電方式の開発

石炭ガス化複合発電は、石炭ガス化による生成ガスを燃料とし、ガスタービン発電とその排熱回収による蒸気タービン発電を組み合わせる方式である。この発電方式は高い総合熱効率と優れた環境適合性が見込まれることから、将来の石炭利用の主流と期待されている。

当所は、石炭ガス化複合発電の要素技術としての**石炭ガス化技術**、**乾式クリーンアップ技術**、**高温・高効率ガスタービン用石炭ガス燃焼技術**の開発を行っている。

燃料電池は水の電気分解とは逆に、燃料中の水素と空気中の酸素を電気化学的に反応させ、燃料のもつ科学的なエネルギーを直接、電気エネルギーに変換する発電方式であるため、高効率で環境に汚染物質を排出させないクリーンな発電が可能である。当所では、将来は石炭ガスも使用できる**溶融炭酸塩型燃料電池**と**固体電解質型燃料電池の基礎および開発研究**を進めている。

(3) 石炭流体化技術の開発

石炭は固体であるため、その取り扱いが石油に比べてやや煩雑であるが、これを流体化して利用できれば輸送や処理が容易になる。石炭の流体化方式として、水で流体化する石炭・水スラリー (CWM) 技術を開発するため、当所では混気ジェットポンプによる**乾式CWM製造技術の開発**を行っている。

これが実用化できれば、湿式法に比べてより低コストなCWMができると期待されている。将来的には、微生物による石炭の脱硫・脱灰技術と組み合わせてクリーン化し、産炭地でCWM化できれば、石炭輸送コストの低減が見込まれるため、海外炭に頼らざるを得ないわが国にとって、魅力的な技術となり得る。そのため、**微生物に**

よる石炭の脱硫・脱灰技術の基礎研究を行っている。

(4) CO₂回収・貯留・固定化技術の開発

化石燃料の燃焼によって排出されるCO₂を抑制するために、火力発電所の排ガスからCO₂を低エネルギーで回収する湿式アミン法の開発や、回収したCO₂を深海底に

貯留する技術の開発を行っている。

また、大気中に放出されたCO₂の一部は植物や微生物により、有機物や炭酸カルシウムに変わり固定される。そこで、当研究所では、海洋性植物プランクトンによるCO₂固定化技術の開発も行っている。

1-4 今後の石炭利用のあり方

前述のように、石炭は、石油や天然ガスに比べて埋蔵量が非常に豊富であるとともに、世界的に広く分布していることから供給安定性が高く、また、経済性にも優れているというメリットがある反面、今後石炭利用の拡大を図っていくためには、その利用を制約する幾つかの課題を取り除き、あるいは克服することが求められている。

その第一は、石炭の燃焼によって発生する二酸化炭素である。二酸化炭素の発生は化石燃料に共通の問題ではあるが、天然ガスや石油に比べて、石炭は炭素含有量が高く、そのため発熱量当たりの二酸化炭素発生量が多い。そこで、現在二酸化炭素の排出をできる限り抑制するために、発電効率を上げる等**石炭を効率よく使う**技術の開発が進められている。超々臨界圧や流動床燃焼等の最新技術、将来的には、石炭ガス化複合発電や高温型燃料電池の開発状況について第2章で記述する。

第二は、石炭は5～20%の灰分を持ち、硫黄分や窒素分などの不純物を多く含んでいる。したがって、脱じん、脱硫、脱硝等の公害防止対策を十分に行い、**石炭をクリーンに使う**ことによってきれいな空気を守ることが重要

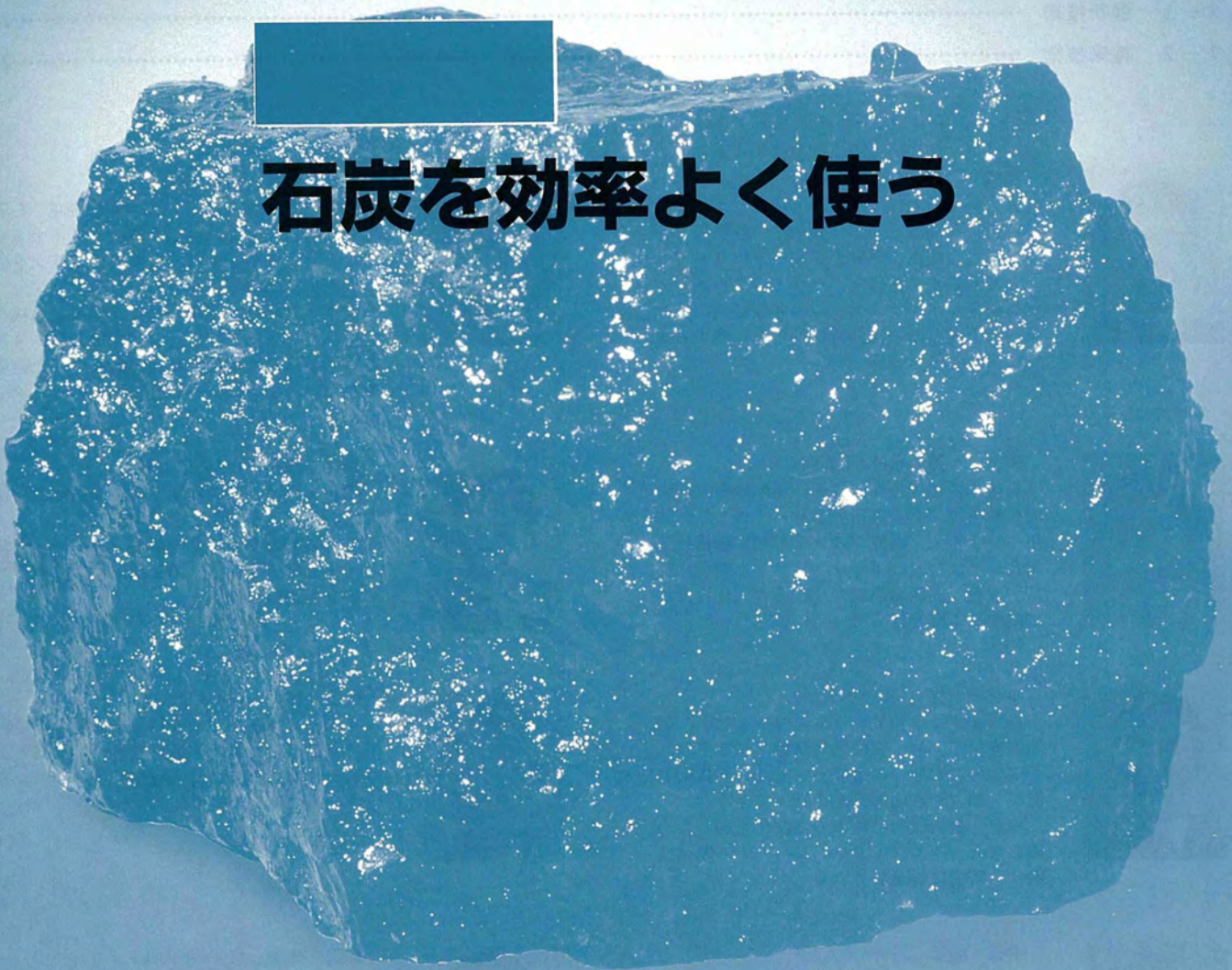
となる。幸いに、わが国ではこれらの公害防止対策は万全に施された結果、石炭火力発電所は石油火力発電所と同程度のクリーン化が進んでおり、他の諸外国と比較して世界のトップレベルにあり、さらにクリーンな石炭を目指すため、技術開発に努めている。これらの内容については、第3章で記述する。

第三は、石炭は固体であるために、採掘、輸送、貯蔵、燃焼等の各段階で石油や天然ガス等の液体燃料に比べて、扱いにくい燃料であることである。そのため、**石炭を使いやすくする方法**として、COMやCWMなどの石炭をスラリー（液体）化して用いることとか、あるいは、石炭を水素やメタノールなどの液体燃料に改質する技術の開発が行われている。これらについては第4章に述べる。

最後に、わが国で蓄積している効率的な石炭エネルギー転換技術、SO_x、NO_x除去技術をはじめとする環境保全技術、さらには今後の技術開発成果を、近隣諸国をはじめとする海外へ積極的に移転していくことも、地球規模での環境問題に対処するための重要な使命と考える。本レビューのむすびとして、第5章に記述する。

第 2 章

石炭を効率よく使う



第2章 石炭を効率よく使う ● 目 次

横須賀研究所 発電システム部 熱動力グループ グループリーダー 高橋 毅
 熱動力グループ 主査研究員 犬丸 淳
 燃焼グループ 主任研究員 小谷田一男
 燃焼グループ 主査研究員 中田 俊彦
 (現 東北大学)

エネルギー変換グループ グループリーダー 三巻 利夫
 エネルギー化学部 燃料化学グループ 主査研究員 伊藤 茂男
 プラント化学グループ 主査研究員 中山 稔夫
 発電化学グループ 主査研究員 渡辺 隆夫

2-1	最新技術	.....21
2-2	将来技術	.....28



高橋 毅 (1974年入所)
 火力発電所の化学洗浄判定技術、ボイラ伝熱解析、超高温での固体熱物性の解明等を行ってきた。現在、熱動力グループのリーダーとして石炭ガス化研究、セラミックガスタービン研究、ボイラスケールの非破壊検出研究、新設火力発電所の伝熱特性解析等に関する研究に従事している。



三巻 利夫 (1978年入所)
 高効率ガスタービン、LNG複合発電、石炭ガス化複合発電等の熱効率解析、ダイナミックシミュレーション等、新型火力プラントのシステム評価研究に従事してきた。
 現在、石炭ガス化複合発電、燃料電池複合発電、ヒートポンプならびに熱電供給システム等のシステム解析、基礎実験を中心に研究を進めているエネルギー変換グループリーダー。



犬丸 淳 (1984年入所)
 石炭ガス化炉の性能評価、運転技術、炉内流動解析等に関する研究を行ってきた。1990年より2年間、石炭ガス化複合発電技術研究組合に出向し、パイロットプラント開発に従事。現在、高灰融点炭の高性能ガス化技術等に関する研究を行っている。



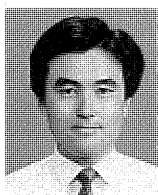
伊藤 茂男 (1983年入所)
 微粉炭燃焼の灰の性状と集じん性能の評価など粉体工学を専門とし、ポーラスフィルタ集じん装置のフィルタの開発、チャーの性状と捕集効率、フィルタの長期信頼性評価などの研究を進めている。



小谷田一男 (1958年入所)
 重原油ボイラのアシッドスマット対策、低温腐食対策、油・石炭燃焼状態の監視手法、石炭の貯炭管理、およびハンドリング技術等、燃料・燃焼管理面の研究を行ってきた。
 現在、微粉炭火力技術の高度化を図るため、微粉炭火力用のワイドレンジバーナの開発に関する研究に従事している。



中山 稔夫 (1978年入所)
 オキシダントなどの大気汚染物質の環境影響評価について研究を進めてきた。1985年より石炭ガス化複合発電、MCFC用クリーンアップ技術の開発に取り組んでいる。



中田 俊彦 (1985年入所)
 ガスタービンに関する研究に従事。おもに石炭ガス化複合発電用1300℃級ガスタービン燃焼器の開発、評価に関する研究を進めてきた。石炭ガス化低カロリー燃料のNOx生成機構の解明や、低NOx燃焼技術に関する研究に取り組む。
 1993年9月より、東北大学工学部助教授。



渡辺 隆夫 (1981年入所)
 MCFCのスタック性能評価、スタック運転技術、電池シミュレーション等に関する研究を行ってきた。現在、MCFCスタックの性能分析、スタック運転技術の開発、電池シミュレーション技術の高度化に関する研究を行っている。

2-1 最新技術

2-1-1 超々臨界圧火力

火力発電では、大容量化と合わせて蒸気の温度・圧力を高めることにより、発電効率の向上が図られてきた。

蒸気条件、すなわちタービンへ供給する蒸気の圧力と温度が高いほど、発電効率を向上させることができる。しかし、これらが高くなればなるほど、蒸気系統の配管などの使用材料の耐圧や熱応力に対する耐久性という課題を克服する必要がある。

技術が先行していた米国では、フィラデルフィア電力で主蒸気圧力352kg/cm²g、蒸気温度649°Cという超々臨界圧(USC)のエディストン1号機が建設された1960年頃までは、主蒸気温度、圧力ともに上昇の一途をたどっていた。その後、電源構成に占める原子力比率の増大や、昼夜間の需要格差の拡大などがあって、火力発電プラントは、急速な負荷変化への対応や頻繁な起動停止を行う、いわゆる中間負荷運用を余儀なくされ、これに適した超臨界圧変圧運転方式が導入されてきた。

わが国においても、1967年にLNG火力で246kg/cm²gの超臨界圧プラントが運転を開始して以来、石炭火力にも同一の蒸気条件が採用されたが、その後20年以上も蒸気条件は変わらなかった。これは、蒸気条件を向上させて熱効率の向上を図るよりも、大容量化によりプラント建設費を抑えることが経済性の面から有利であるとの考え方が支配的であったことによる。

しかし、二度にわたる石油ショックを契機として、石油の供給不安定や燃料価格の高騰を背景に、燃料の多様化や低価格の海外炭だきボイラの導入が進められ、これ

と合わせて省エネルギーの観点から、これまで停滞していた蒸気温度、圧力を上昇させ、プラント熱効率を向上させようという動きが再び注目され、USC火力の技術開発が進められている。

(1) 開発目標と技術開発の現状

わが国における現在の開発計画のステップを図2-1-1に示す。これから開発しようとするプラントと過去に建設されたものとは、発電容量および運用条件に大きな差異があるものの、最終目標としている蒸気条件は、現在も運転されているエディストン1号機的设计条件と同じ

開発ステップ	現 状	I	II-1	II-2	III-1	III-2
蒸気条件 (圧力・温度)					316kg/cm ² g 620/595 595°C	350kg/cm ² g 650/595 595°C
				316kg/cm ² g 595/595 595°C		
			316kg/cm ² g 595/566 566°C			
			316kg/cm ² g 538/552 566°C			
		246kg/cm ² g 538/552 566°C				
		246kg/cm ² g 538/566				
過熱器管	CrMo、9Cr系	オーステナイト系		高強度オーステナイト系		
管束・主蒸気管	2 1/4 CrMo	9 Cr系		オーステナイト系		
高温高圧バルブ	2 1/4 CrMo	9 Cr系		オーステナイト系		

図2-1-1 超高温高圧発電プラントの開発目標と耐圧部材

352kg/cm²g、649°Cである。

このような超高温・高圧の蒸気条件は、わが国では過去に経験がないので、設計、製作技術の両面に十分な検討が必要とされる。特に、耐圧部に使用される材料の選定は、プラントの信頼性を決定する重要な要素である。耐圧部の重要な部材としては、主蒸気系統配管、管寄せ、バルブなどの大径肉厚部材のほか、ボイラ内に設置される過熱器、再熱器がある。

エディストン1号機は、ベースロード用に計画され、過熱器出口の管寄せや主蒸気管には316系のオーステナイトステンレス鋼が採用されている。この材料は、線膨張係数が高いため、わが国の火力発電に要求されている中間負荷運用を行うと、内外面の温度差による熱応力に対して厳しいだけでなく、材料そのものが高価で、しかも溶接時の高温割れ防止のための予熱、後処理や曲げ加工後の再溶体処理に工数を要するなどの難点がある。

わが国では、すでにStep-Iは、中部電力(株)川越火力1、2号機(LNG各700MW)で実現している。これに対し、Step-IIでは、蒸気温度が593°Cと、これまで経験のない条件となり、ボイラの高圧耐圧部の材料について、高温強度、外面高温腐食および水蒸気酸化に対する十分な配慮が必要とされたが、技術開発はすでに完了している。

現在、主蒸気圧力246kg/cm²gで、中部電力(株)の碧南火力3号(538/593°C)、北陸電力(株)の七尾大田火力(566/593°C)などで建設が進められているが、316kg/cm²gへの高圧化については、経済性と中間負荷火力としての運用性の観点から実機採用にまでは至っていない。

さらに、Step-IIIでは、圧力および温度が一段と高い316~350kg/cm²g、620~650°Cの蒸気条件となり、技術的には、耐高温腐食および耐水蒸気酸化性が課題である。これに対しては、新しいオーステナイト系の高強度高温材料の採用や溶接、加工などの生産技術の確立が必要になってくる。

(2) 将来見通し

現在、649°Cという超高温化に向けた技術開発は、電源開発(株)の若松超高温実証タービンを用いた試験研究を中心に進められている。将来的には、建設時期に応じて、

石炭ガス化複合発電など新型石炭火力の開発進展状況を勘案して総合的な評価を行いつつ、当面は温度、圧力を順次ステップアップしながら実機への導入が進められていくであろう。

2-1-2 流動床ボイラ火力発電

固体粒子を下から吹き上げる流体で浮遊させた状態を流動層と呼び、従来から反応、乾燥、吸収、吸着などの化学工業プロセスで用いられてきた技術である。この技術をボイラに応用したのが、流動床ボイラであり、さまざまな燃料が使える、低温燃焼によって低NO_x化、炉内脱硫による低SO_x化といった環境保全性の向上と高効率化が可能なことから、最近注目されている。

流動床燃焼は、流動床が大きな熱容量を持つため燃えにくい燃料でも高い燃焼効率で利用できることが大きな特徴である。さらに、燃料に石灰石を混入させると燃焼と同時に脱硫を行うことも可能なため、硫黄分の多い石炭を高い環境保全性で利用できる。

流動床ボイラによる発電方法には多くのバリエーションがある。図2-1-2に代表的な流動床発電システムの系統概要を示す。

従来の大気圧下での燃焼を利用した発電方式(AFBC)は、一部実用段階にある。加圧下の燃焼によって得られる高温の燃焼排ガスを利用してガスタービンによる動力回収を併せ行う加圧流動床(PFBC)複合発電方式、また、将来技術として検討され始めたガス化炉を併設しガスタービン入口温度を向上させ発電するトッピングサイクル加圧流動床複合発電方式などが代表的システムである。

欧米では、近年の酸性雨問題に対する効果的な発電システムとしてPFBC複合発電システムの研究開発、導入が活発に行われ、わが国のPFBC導入の大きな動機付けとなった。

わが国では、電気事業用として、超々臨界圧技術と組み合わせたAFBC高効率発電技術が電源開発(株)を中心に進められてきており、現在、350MWプラントの建設が行われている。また、高効率で環境保全性に優れたPFBC複合発電技術の開発・導入を電力各社が進めている。

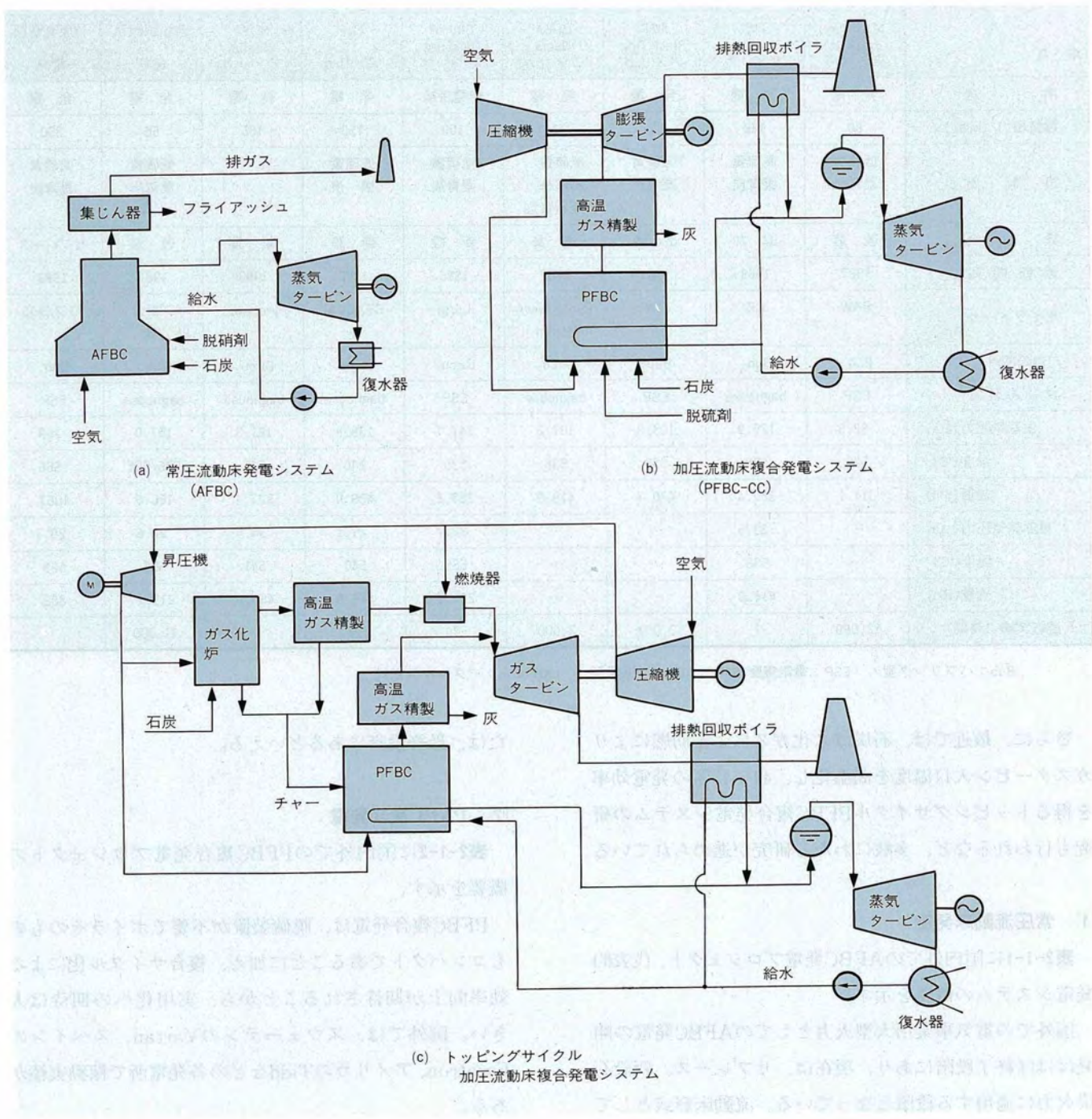


図2-1-2 流動床燃焼発電システムの系統概要

現在利用されている、または注目されているプラントの系統を代表として示している。

表2-1-1 主なAFBCプロジェクト/プラントの状況

項目	国 外							国 内	
	Mon-Dak Heskett アメリカ	TVA Shawnee アメリカ	NSP Black Dog アメリカ	CUEA Nucla アメリカ	City of Duisburg ド イ ツ	TNP アメリカ	NOVA Scotia アメリカ	若松試験所 電発	竹原発電所 電発
用 途	発 電	発 電	発 電	発 電	熱電併給	発 電	発 電	発 電	発 電
電気出力 (MWe)	80	160	125	110	100	150	165	50	350
設 計 炭	低硫黄 瀝青炭	高硫黄 瀝青炭	低硫黄 瀝青炭	低硫黄 高灰分 亜瀝青炭	低硫黄 瀝青炭	低硫黄 褐 炭		低硫黄 瀝青炭	低硫黄 瀝青炭
設 備	改 造	追 加	改 造	追 加	新 設	新 設	新 設	改 造	リプレース
運 転 開 始	1987	1989	1987	1987	1985	1990	1993	1987	1993
ボイラメーカー	B&W	CE	FW	Pyropower/ Ahlstrom	Lurgi	CE/Lurgi	Pyropower	バブ日立/ 川 重	バブ日立
FBCのtype	Bub.	Bub.	Bub.	Circu.	Circu.	Circu.	Circu.	Bub.	Bub.
脱じん装置	ESP	baghouse	ESP	baghouse	ESP	baghouse	baghouse	baghouse	ESP
主蒸気圧力(ata)	92.5	129.9	103.0	107.2	147.7	139.9	131.3	107.0	169
温度(°C)	535	538	538	538	535	540	541	596/652	566
流量(t/h)	317.1	500.4	470.7	419.9	267.1	499.0	527.4	156.0	1067
再熱蒸気圧力(ata)	...	33.5	...	...	32.7	27.1	34.4	26.6	29.7
温度(°C)	...	538	...	...	535	540	541	595	538
流量(t/h)	...	414.0	...	...	229.0	447.8	464.9	119.7	889
運転実績 (時間)	12,000	-?-	2,000	2,000	-?-	...		11,000	

Bub : バブリング型 ESP : 電気集塵方式 Circu : 循環型 baghouse : バグハウス方式

さらに、最近では、石炭ガス化ガスによる助燃によりガスタービン入口温度を高温化し、44～45%の発電効率を得るトッピングサイクルPFBC複合発電システムの研究も行われるなど、多岐にわたる研究が進められている。

(1) 常圧流動床発電

表2-1-1に国内外でのAFBC発電プロジェクト、代表的発電システムの概要を示す。

国外での電気事業用大型火力としてのAFBC発電の開発はほぼ終了段階にあり、現在は、リプレース、新設石炭火力に適用する段階となっている。流動床形式としては、大形化が容易な循環型AFBCの導入が中心である。

一方、国内では350MWバブリング型AFBC開発研究が進められており、1994年には運転を開始して95年度までに研究終了の予定である。

このように国内外いずれのプロジェクトも、終了、ま

たは、最終段階にあるといえる。

(2) PFBC複合発電

表2-1-2に国内外でのPFBC複合発電プロジェクトの概要を示す。

PFBC複合発電は、脱硫装置が不要でボイラそのものもコンパクトであることに加え、複合サイクル化による効率向上が期待されることから、実用化への期待は大きい。国外では、スウェーデンのVartan、スペインのEscatron、アメリカのTiddなどの各発電所で稼働実績がある。

PFBC複合発電は、熱利用率の向上も考慮した都市近郊型の熱併給プラントとして位置付けているものも多く、既存設備の敷地内で環境保全設備無しで、効率向上と環境対策が可能なリプレース用プラントとして評価されている。

表2-1-2 主なPFBCプロジェクト/プラントの状況

項目	場 所		国 外			国 内			
	Vartan P/S スウェーデン	Escatran P/S スペイン	Tidd P/S アメリカ	DMEC-1 アメリカ	DEMEC-2 アメリカ	若松試験所 電発	苅田 P/S 九州	苫厚真 P/S 北海道	大崎 P/S 中国
用 途	熱電併給	発 電	発 電	発 電	発 電	発 電	発 電	発 電	発 電
電気/熱出力	135MWe 224MWe	79MWe	72.3MWe	77MWe	160MWe	71MWe	350MWe	103MWe	250MWe
設 計 炭	ポーランド炭 低硫黄 S=1.5%	リグナイト炭 S=6.8%	オハイオ炭 S=3.4%	—	—	海 外 瀝青炭	海 外 瀝青炭	海 外 瀝青炭	海 外 瀝青炭
石炭供給方式	Paste	Dry	Paste			Paste	Pasate	Dry	
運 転 開 始	1989	1990	1990	1995	1999	1994	1997	1996	1998
ボイラメーカー	ABB	ABB	ABB	パイロパワー	パイロパワー	ABB-IHI	ABB-IHI	三菱重工	バブ日立
FBCのtype	Bub.	Bub.	Bub.	Circu.	Circu.	Bub.	Bub.	Bub.	Bub.
主蒸気圧力(ata)	140	95	90			102	246	169	169
温度(°C)	540	510	496			593	566	566	566
流量(t/h)	250×2	216	202			156			515
再熱蒸気圧力(ata)						26.7	40		
温度(°C)						593	566	538	593
流量(t/h)									
そ の 他					トッピング計画	USC	DSS対応		

Paste：ペースト又はスラリー供給 Bub：バブリング型 Dry：乾式供給 Circu：循環型

わが国では、高効率プラントとしての評価が優先しており、現状技術のままで厳しい国内環境基準を満足することは難しいと見る向きもある。電力4社がPFBC複合発電の導入を決めているが、環境保全性能の向上、運転信頼性の向上などの課題に対する開発研究的要素の強い導入計画となっている。

(3) トッピングサイクルPFBC複合発電

この方式は、検討が始ったばかりの技術である。システム形式として幾つかの技術が提案されている。いずれも系統が複雑で、場合によっては石炭ガス化プラントに石炭チャー処理用のPFBCを加えたのみと判断すべきプラントもある。

現在の基礎研究段階から本格開発への構想もあるが、今後、技術的優位性についてより踏込んだ検討、たとえば、発電設備としての運転信頼性、設備信頼性など、具体的な評価が必要であろう。

(4) 主要な検討課題

PFBC複合発電プラント実用化に向けた主要な検討課題としては、

- ①プラント構成機器個々に対する要素開発
- ②低燃料比炭、高硫黄炭などに対する炭種拡大化技術
- ③NO_x・SO_x、ばい塵などを抑制する環境保全技術
- ④単機容量の一層の拡大を計る大容量化技術
- ⑤最低負荷性能、負荷追従性能、起動停止時容易性などのプラント全体の運用協調性を向上させるためのシステム技術

などが挙げられる。

流動床火力を国内事業用として評価するには、まだ多くの開発課題、解明事項を抱えてはいるが、経済性、環境保全性などのメリットも多く、国内外の技術を結集した早期の実用化が期待される。

2-1-3 微粉炭火力の運用性向上策

電源構成に占める原子力比率の増大や、昼夜間の需要格差が拡がりつつあるなかで、火力発電プラントは、急速な負荷変化への対応や頻繁な起動停止を行う、いわゆる中間負荷運用が求められている。

石油代替火力として、原子力につぐ今後の主要な電源に位置づけられている石炭火力は、高効率や環境保全性のみならず、石油火力並みの運用性の改善が必要である。

(1) 運用性向上の現状

これまでの微粉炭火力は、応答の遅いミルで石炭を微粉碎し、それを空気で搬送して直接燃焼させるため、燃焼量をほぼ一定とした定格負荷運用を目的に設計・建設されている。このため、その運用性は、表2-1-3に示すように石油火力より劣っている。このような微粉炭火力の運用性を石油火力並みに向上させ、中間負荷運用が行えるようにするためには、微粉炭の供給、燃焼の両面からの改善技術の開発が必要である。

供給面からの運用性改善技術の開発としては、ミルの起動方式の改善によるユニット起動時間の短縮、高性能ミルの開発による低負荷時の燃焼特性の改善などが実用化の段階にある。しかしながら、運用性を石油火力並みにするためには、こうした微粉炭供給システムの改善に加えて、バーナの低負荷時の燃焼安定性を改善することが重要である。

表2-1-3 石炭火力運用特性の現状と改善目標

項目	単位	石油火力運用値	現状石炭火力運用値	石炭火力運用性の改善目標値
運用負荷帯	—	ミドル・ピーク負荷	ベース負荷	ミドル負荷
最低負荷	%負荷	15~30	35~50	20~30
起動時間 (ホットスタート)	min	100~130	300~360	120~150
負荷変化率	%/min	1~3	0.5~1	2~3
最低負荷~50%	%/min	3~5	1~3	3~5
50%負荷~定格	%/min			

微粉炭火力は、ベースロード用として設計され運用されていた。しかし、電源の多様化の観点から、需給に対応して石油火力並みの運用性能が求められている。

現在の微粉炭バーナは、負荷が低減すると設計容量の40%程度で燃焼が不安定となり、負荷調整時には石油による助燃が必要になる。このため、負荷の調整範囲を広くし、石炭のみで安定燃焼が可能な低負荷バーナの開発が行われ、実用化の段階にある。しかし、これらのバーナは、特定の燃焼方式のボイラにしか適用できなかったり、適用する場合にはバーナ廻りに分級器を付設させるなど、保守・管理が煩雑になることなどが懸念される。

(2) ワイドレンジバーナの開発

当研究所では、石油火力並みの最低負荷20%程度でも石炭だけで燃焼でき、しかも新設だけでなく既設バーナとの交換も可能な、より合理的な微粉炭ワイドレンジバーナの開発を石川島播磨重工業(株)と共同で進めてきた。

このワイドレンジバーナは図2-1-3に示すように、バーナに供給される微粉炭の濃度を検出し、これにもとづいて、濃度の薄い微粉炭流を搬送用空気の旋回力により、バーナ内部で濃縮するもので、旋回力を調整する調整リングや濃縮効果をあげる三重管構造などを凝らしたものである。

このバーナの開発に当たっては、まず、図2-1-4に示す内部の流動様相を可視化したモデルにより、微粉炭の最適な濃縮調整機構を検討した上、これをもとに、石炭燃焼試験炉(燃焼量120kg/h)でベンチスケールの燃焼試験を行い、20%という油バーナ並みの低負荷でも安定な燃焼が確保できることを確かめた。

さらに、実用化に向けた大幅なスケールアップを狙いとして、図2-1-5に示す燃焼量2.35トン/hのパイロットバーナを試作して燃焼試験を行った。その結果、従来のバーナと同等の環境特性を保持しながら、当初目標より低い約16%までの極低負荷でも安定に燃焼し、その負荷調整特性も良いことを確認した。

これらの結果から、このワイドレンジバーナは、実用化の見通しが得られたと考えており、今後は実缶での実証試験でその性能を確認していく予定である。

なお、このバーナの開発に合わせて、供給される微粉炭の濃度や粒度を計測する自動監視装置を三協パイオテック(株)と共同で開発した。濃度は応答性が速く連続的に測

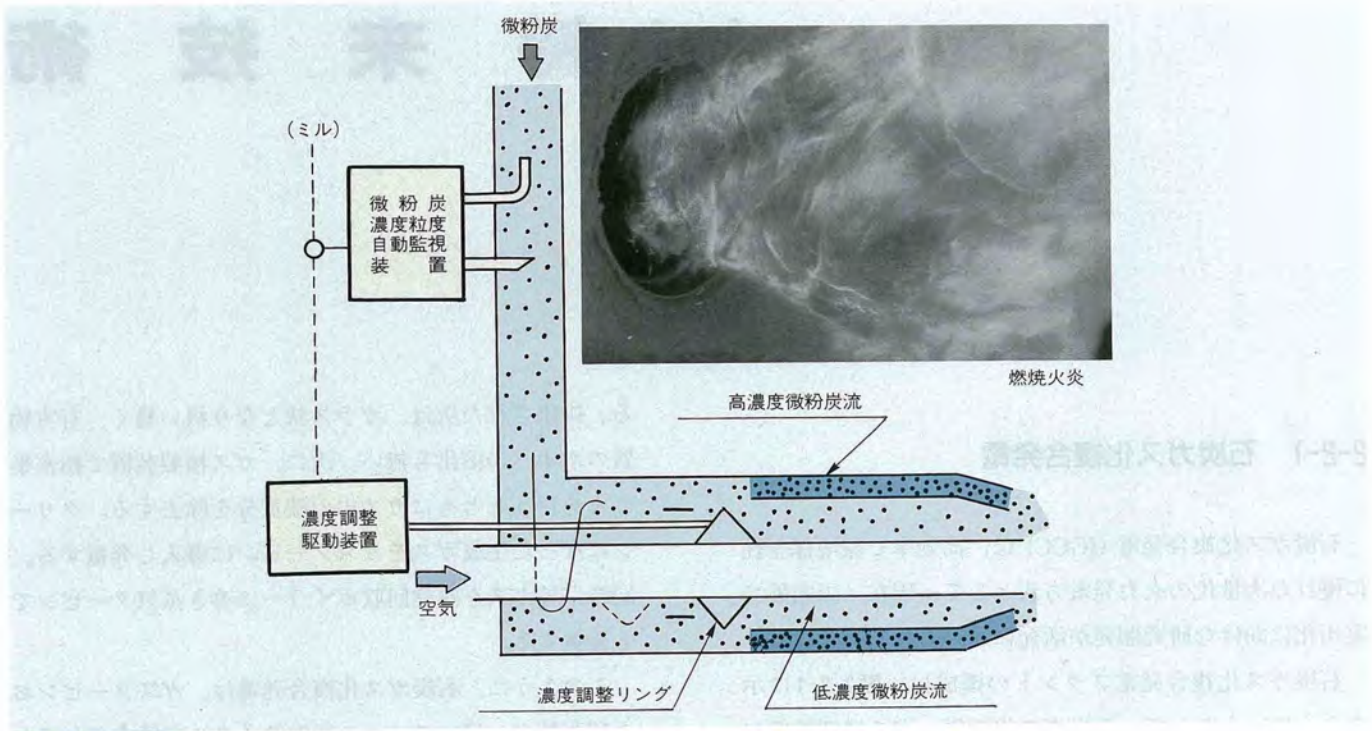


図2-1-3 微粉炭用内部セパレート型ワイドレンジバーナの原理（断面図）

本バーナはノズル内部に発生させた微粉炭旋回流を、内蔵しているリングで調整し、噴出口外周を高濃度微粉炭流とすることにより、写真のように低負荷条件下でも安定燃焼を可能とする。

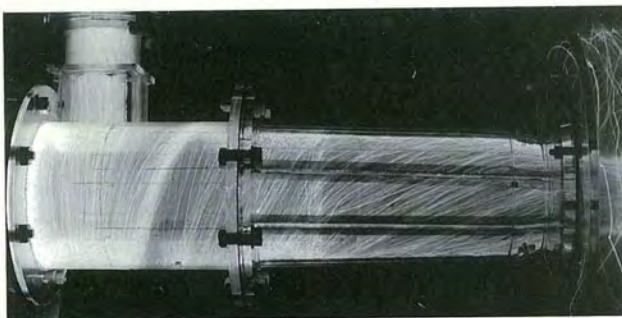


図2-1-4 バーナ内部流動様相

透明のバーナ模型内部に懐炉灰を流入させ、バーナノズル内部の旋回流様相を観察し、バーナの性能向上に役立てた。

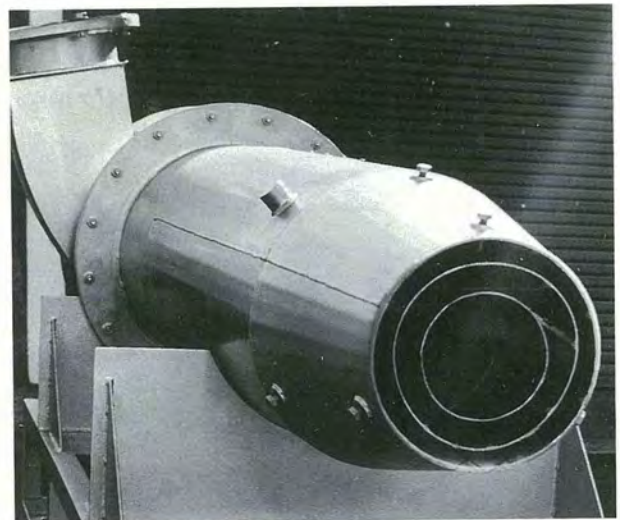


図2-1-5 パイロットバーナノズルの外観

燃焼試験に用いた燃焼量2.35t/hバーナ。三重管ノズルの外側管より濃縮された微粉炭流が噴出し、極低負荷まで安定燃焼をした。

れる差圧検出方式を改良、また、粒度は4段の分級器による方式で計測するもので、石炭試験炉の燃料管で試験した結果、検出性能は良好であり、ボイラの微粉炭管内の計測に十分使用できることを確かめた。

2-2 将来技術

2-2-1 石炭ガス化複合発電

石炭ガス化複合発電 (IGCC) は、高効率で環境保全性に優れた次世代の火力発電方式として、現在、国内外で実用化に向けた研究開発が活発に進められている。

石炭ガス化複合発電プラントの構成は、図2-2-1に示すように、主として、石炭ガス化設備、ガス精製設備およびガスタービン・蒸気タービンの複合サイクル発電設備から構成されている。

まず、微粉碎した石炭をガス化剤（図のシステムでは空気を使用、酸素を使用する場合は酸素プラントが必要）とともにガス化炉に投入して粗生成ガスを作る。ガス中に含まれるチャーと呼ばれる未燃炭素と灰分からなる粒子の大部分は回収され、ガス化炉にリサイクルされ

る。排出された灰は、ガラス状となり扱い易く、有害物質の水中への溶出も無い。次に、ガス精製装置で精密集じんを行うとともにガス中の硫黄分を除去する。クリーンになった生成ガスをガスタービンに導入し発電する。同時に排ガスを廃熱回収ボイラーに導き蒸気タービンでも発電する。

このように、石炭ガス化複合発電は、ガスタービンおよび蒸気タービンの二つの発電サイクルで構成されており、各々の単一サイクルでは到達できない高い熱効率が期待できる。また、蒸気タービンの復水器における放熱量も低減されるため、温排水量が減少するメリットもある。

現在、最新鋭の超臨界圧石炭火力の送電端熱効率は、約38%であり、超々臨界圧プラントが開発されても約41%が限界と考えられている。これに対して、当研究所の

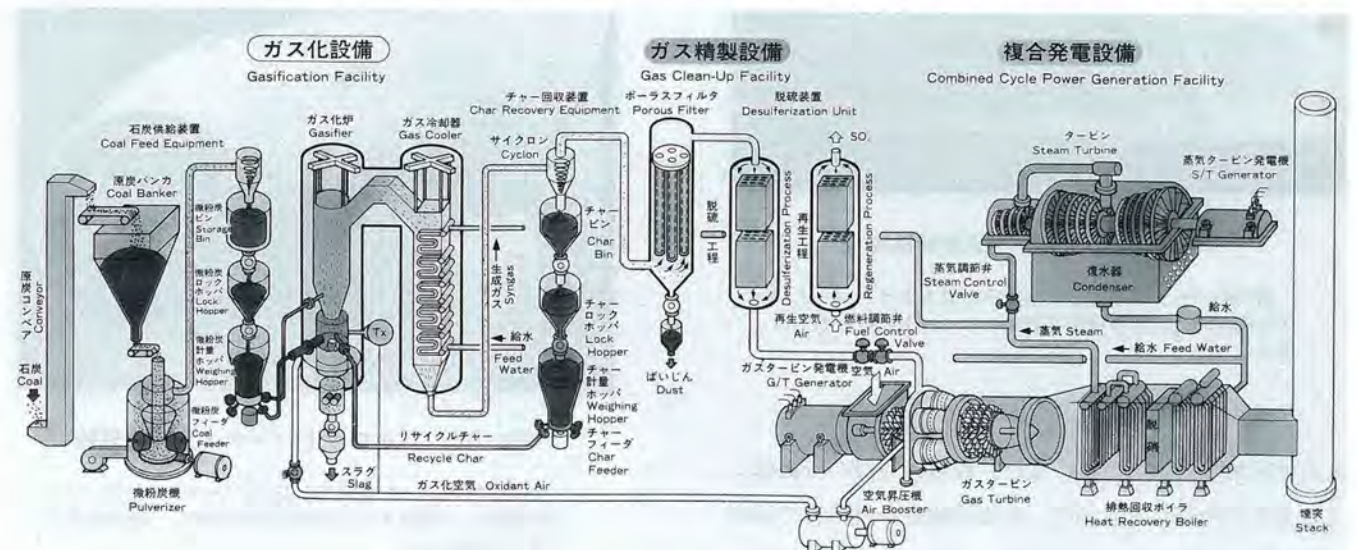


図2-2-1 石炭ガス化複合発電プラント構成図

試算によれば、石炭ガス化複合発電では、石炭乾式供給・空気酸化噴流床ガス化方式、乾式ガス精製、1,300℃級ガスタービンの組み合わせにより約44%、1,500℃級ガスタービンとの組み合わせでは約48%、さらに、将来燃料電池と組み合わせれば約52%という高い熱効率が得られる見込みである。

(1) 石炭ガス化技術

石炭ガス化炉の型式は、固定床方式、流動床方式、噴流床方式に大別されるが、国内外における最近の発電用ガス化炉の研究開発は、噴流床方式が中心となっている。

内外の主要な噴流床ガス化炉の開発状況を表2-2-1に示す。海外で開発中のガス化炉は、ガス化剤として酸素を用いる方式が多く、石炭の供給方式は、乾式と湿式(CWM)の2通りに分かれている。

オランダ電力(SEP)は、プフナムにIGCCプラントとしては、これまで最大の253MWシェル方式IGCCプラントを建設中であり、1994年からガス化運転が開始される

予定である。このように、海外では欧米を中心にすでに実証段階に入っている。

一方、わが国では、1986年から国・電気事業により総額590億円をかけ200トン/日のパイロットプラント計画がスタートしている。このプラントは、乾式石炭供給・空気酸化噴流床ガス化炉、乾式ガス精製装置を採用しており、他に例のない独自の高效率システムの開発を目指している。1991年からプラントの運転が開始され、1992年7月には、空気酸化噴流床ガス化炉と乾式ガス精製によるシステムとしては、世界で初めて石炭ガス化発電に成功した。なお、このガス化炉には、当研究所が三菱重工業㈱と共同で2トン/日ベンチスケールガス化炉を用いて開発した石炭乾式供給・空気酸化による加圧二段噴流床方式が採用されている。

また、1992年から国・電気事業が中心となって実証プラントのフィージビリティスタディが開始されている。

当研究所では、早くからIGCCプラント開発の必要性に着目し、1983年には2トン/日の加圧二段噴流床石炭

表2-2-1 内外の主要噴流床ガス化炉

	200トン/日IGCC パイロットプラント	水素製造プラント	Shell IGCC	Prenflo IGCC	Dow IGCC	Texaco IGCC
石炭処理量(トン/日)	200	20~50	2,000	1,325	2,400	1,000
型 式	加圧2段噴流床	加圧1段噴流床	加圧1段噴流床	加圧1段噴流床	加圧2段噴流床	加圧1段噴流床
概 念 図						
運 開 年 月	'91	'91	'94	'95 (予定)	'87	'95 (予定)
給 炭 方 式	空 気 搬 送	窒 素 搬 送	窒 素 搬 送	窒 素 搬 送	石 炭 水 ス ラ リ ー	石 炭 水 ス ラ リ ー
ガ ス 化 剤	空 気	酸 素 / 蒸 気	酸 素 / 蒸 気	酸 素 / 蒸 気	酸 素	酸 素
送 電 端 出 力	12.5MW	—	253MW	160MW	160MW	440MW
開 発 者	財電中研, 三菱 IGC組合(NEDO)	日立, ハイコール 組合(NEDO)	Shell, Siemens	Krupp Koppers	Dow Chemical, Louisiana GT	Texaco, GE
所 在 地	福島県いわき市	千葉県袖ヶ浦	オランダ	ドイツ	アメリカ	アメリカ

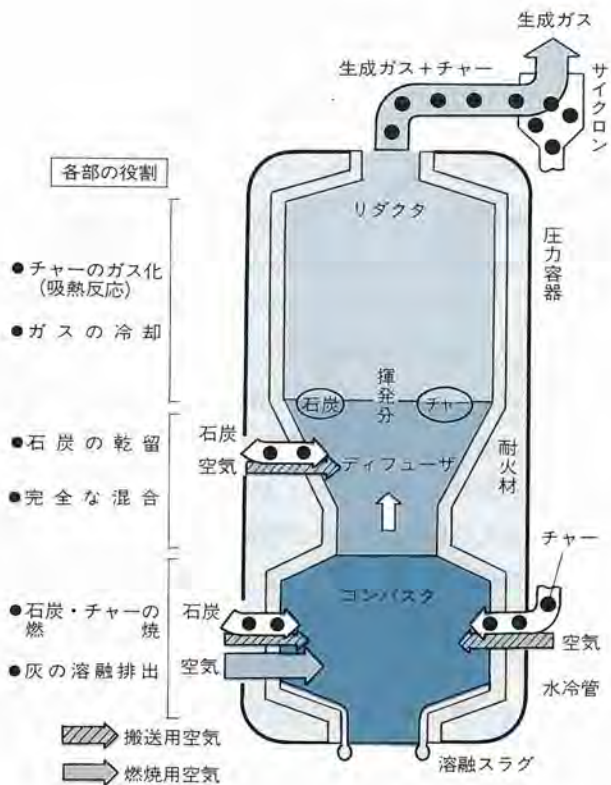


図2-2-2 加圧2段噴流床ガス化炉の原理

ガス化炉は、灰を溶融・排出させるとともに、ガス化に必要な熱を発生させるコンバスタ部とガス化反応を行わせるリダクタ部の上下2室に区分されている。

ガス化用の基礎実験装置を設置し、現在までに海外炭を中心に20種類の石炭について累積約2,000時間のガス化試験を実施してきた。

図2-2-2にこのガス化方式の原理を示す。ガス化炉は、灰を溶融・排出させるとともにガス化に必要な熱を発生させるコンバスタ部と、ガス化反応を行わせるリダクタ部の上下2室に区分されている。これにより、それぞれの石炭量および空気量を独立に調整することができるので、炉全体を低い空気量に抑えた運転をしながらコンバスタを比較的高温に維持することができる。このため、ガス化剤として酸素を用いなくても空気酸化による灰の溶融・排出が可能であり、排出スラグ中の未燃分がほとんどないなど優れた特徴を有している。

このガス化炉は、耐火材内張り構造（コンバスタのみ水冷壁構造）で、炉内圧力は20ataである。ガス温度は、

コンバスタで1,500~1,800℃、ガス化炉出口で約1,000℃である。生成ガス中に含まれるチャーは、サイクロンで捕集されコンバスタに再投入される。また、コンバスタ内の溶融スラグは、炉底部の排出口から落下し急冷され炉外に排出される。

これまでに、この炉を使って

- ①基本運転技術の確立
- ②ガス化基本性能の把握と性能評価手法の確立
- ③炭種適合性の把握
- ④排出スラグの環境特性、微量ガス成分の生成特性の把握

などの研究を実施し、その成果を200トン/日パイロットプラントの設計・運転に反映してきた。

ところで、わが国が輸入している発電用海外炭の約6割が灰の融点が1,500℃を越える高灰融点炭である。灰融点が高くなると、灰を安定に溶融排出させるために炉内を高温にして運転しなければならない。このため、ガス化炉への供給空気量（空気比）を増加させる必要があり、図2-2-3に示すように生成ガスの発熱量の減少など、発電効率の低下を余儀なくされる。そこで、現在、高灰融点炭の融点を降下させる高性能なガス化法として、石炭に融点降下剤を混ぜるフラックス添加法と、低融点炭を混ぜる混炭法の研究を進めている。

これまでに、約1700℃の融点をもつ高灰融点炭（豪州BL炭）にフラックスとして酸化カルシウム（CaO）を石炭の約3%添加することによって、灰融点が約400℃降下すること、低灰融点炭（中国S炭、灰融点1,275℃）を20%混合するだけで灰融点が約300℃降下することなどが分かった。さらに、実際に2トン/日炉を用いてガス化試験では、空気比を低くできることから、高灰融点炭の場合より生成ガス発熱量は大幅に増大することを確認した（図2-2-3）。今後も、両手法の幅広い炭種への適用性を検討していく予定である。

(2) ガス精製技術

ガス精製技術（クリーンアップ技術）には、大別して湿式と乾式の2方式がある。湿式は、アメリカクールウォータープログラムの1,000トン/日石炭ガス化実証プラン

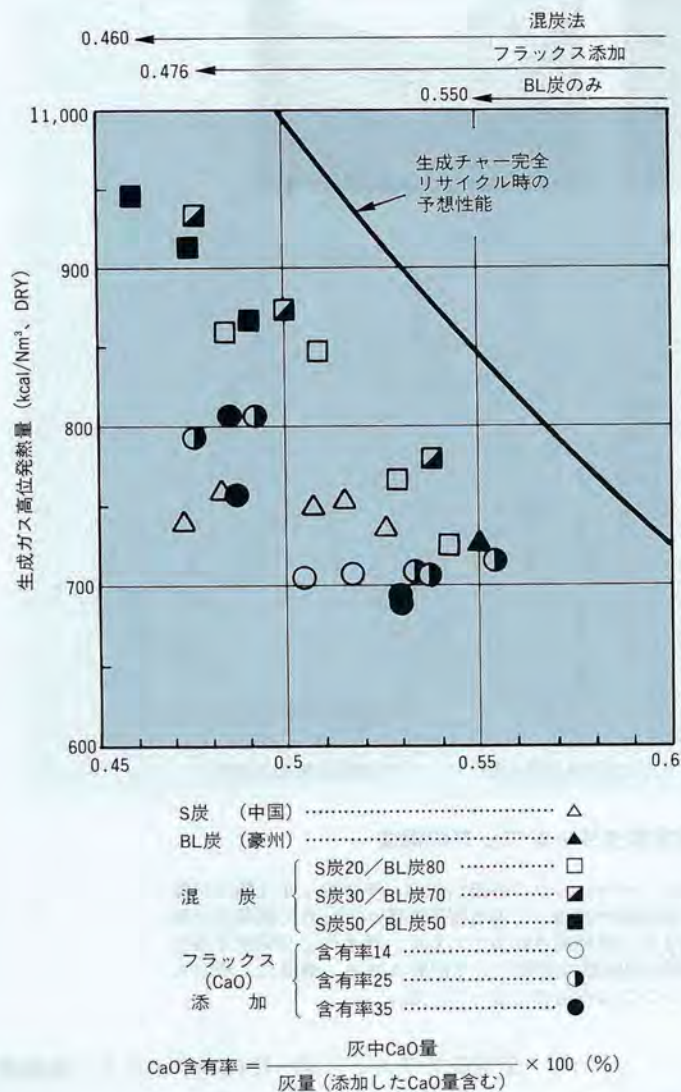


図2-2-3 生成ガス高位発熱量と空気比の関係

混炭およびフラックスの添加により、空気比を低く設定できるので、生成ガスの発熱量を高めることができる。

トに組み込まれ、すでに技術がほぼ確立されている。乾式は、石炭ガスを400℃程度の高温のまままで処理するので、ガスの熱損失が少なく、湿式に比べて送電端効率で2ポイント程度向上する。そのため、200トン/日パイロットプラントのクリーンアップシステムでは、乾式流動床方式が採用されている。

当研究所では、乾式法の一つで、装置が簡素で実現性の高い固定床方式の開発を進めている。この方式は図2-

2-4に示すように、石炭ガス中のチャー(ダスト)を高性能で除去するポーラスフィルタ集じん装置、硫黄分を安定して吸収・除去するハニカム固定床脱硫装置、さらに吸収・除去した硫黄分を回収するためのガス還元法硫黄回収装置で構成されている。

この方式を、実際の発電システムに適用した場合、

- ①フィルタおよび脱硫剤が固定式であるため、運転操作が容易である
- ②負荷変動に対しての操作項目が少ないため、追従・応答性に優れている
- ③コンパクトで経済性に優れている

などの特長がある。当研究所は、ベンチスケールの2トン/日の乾式集じん脱硫基礎実験装置を1985年に建設し、三菱重工業㈱と共同で研究を進めてきた。

これまでに、2トン/日ガス化炉で作った実際の石炭ガスを用いた試験などを行い、この方式の諸性能を把握するとともに、ポーラスフィルタおよび脱硫剤の開発・改良を加え、長期間使用した時の特性を把握した。その結果、この方式は、集じん、脱硫性能が長期間にわたって高く、かつ運転性、経済性に優れていることを確かめた。

また、ポーラスフィルタ集じん装置および固定床脱硫装置の運転特性シミュレーションプログラムを開発し、パイロットプラント規模でのシステムの適性化、運転条件の最適化を図ってきた。

これらの研究から、性能および耐久性など、初期の成果を達成するとともに、パイロットプラント規模以上の大型装置設計に不可欠な各種の基礎データを取得して、ベンチスケール装置での研究は終了した段階にある。

この方式の実用化を図るためには、次の開発ステップとして、パイロットプラントで性能・動作を確認して、実証プラントに向けたスケールアップのデータを取得するとともに、運転特性のシミュレーション技術をさらに

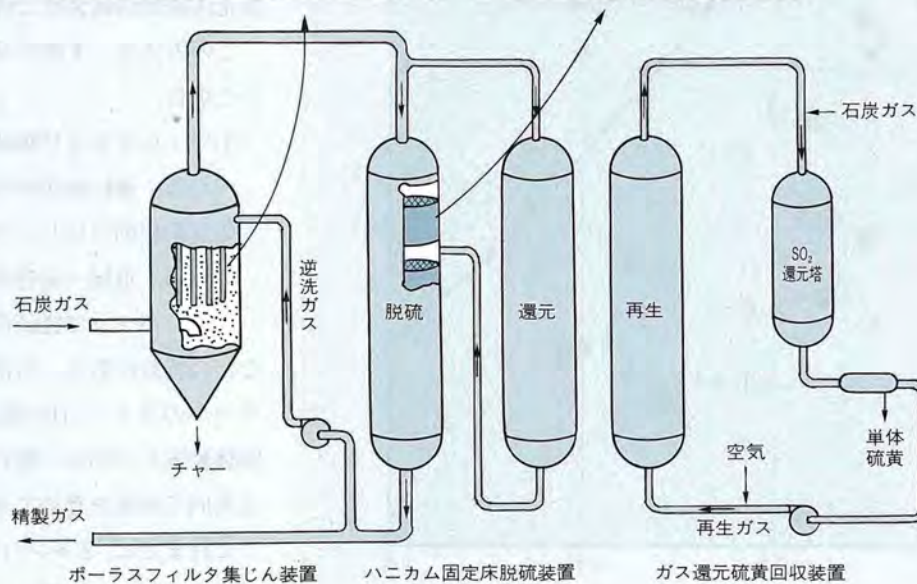
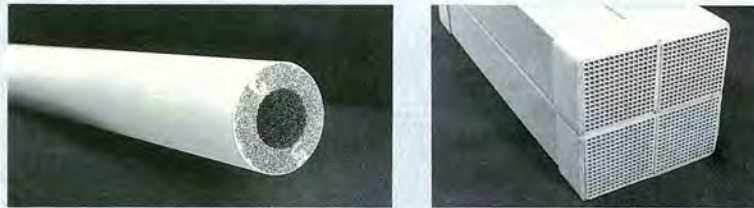


図2-2-4 固定床クリーンアップの構成

石炭ガス化炉で発生した燃料ガスは、セラミックスを用いたポーラスフィルタ集じん装置でチャーが除去され、ハニカム型脱硫剤が装填してある脱硫装置へ送られて硫黄分が取り除かれる。使用後の脱硫剤は再生されて再使用されるとともに、再生により発生する二酸化硫黄 (SO₂) は、ガス還元法硫黄回収装置で硫黄として回収される。構成は、集じん機、反応塔、熱交換器類からなり、シンプルなものとなっている。

高度化する必要がある。

電気事業は、乾式クリーンアップ技術について、現在の200トン/日パイロットプラントに採用した流動床方式に加えて、当研究所が開発したこの固定床方式を実証プラントの設備構成の一つとして開発を進めている。このため、1993年度にこの方式の20トン/日規模のパイロットプラントを200トン/日のガス化パイロットプラントに併設し、その成果を次の実証プラントの設計に反映させることにしている。

これまでに当研究所が実施してきた2トン/日装置の試験では、装置の制約上、硫黄回収系を含めたシステムの検証がなされていない。そのため、パイロットプラントの試験では、実証プラントの運転条件を想定して、模擬的に運転負荷を変化させて、

- ①実証プラントと同一仕様のフィルタ、脱硫剤の性能確認
- ②硫黄回収系を含めたトータルシステムの検証（制御システムの検証）
- ③長時間運転（負荷追従性の確認）

などの検証が重要と考えられる。

1993年度から始まったパイロットプラント試験により、実証プラントの設計に向けた有益なデータが取得されることを期待している。

(3) ガスタービン技術

石炭ガス化複合発電に使うガスタービンは、石炭ガス化炉の生成ガスを燃料とすることから、天然ガスなど高カロリー燃料を使うガスタービンに比べて、多くの技術

課題を含んでいる。また、ガス化炉やクリーンアップ装置の方式によって、燃料ガスの性状が大幅に異なるために、各種燃料の特徴を十分に把握した上でガスタービン機器を開発することが重要である。

燃料としての石炭ガスの特徴をまとめると

①発熱量が低いために、燃焼の安定性が劣る。

ガス化炉のガス化剤によって燃料発熱量が異なり、空気吹きの場合には500~1,500kcal/m³Nの低カロリー燃料、酸素吹きの場合には2,000~3,000kcal/m³Nの中カロリー燃料となる。天然ガスの発熱量が9,500~11,000kcal/m³Nであるのに比べて、空気では約10分の1、酸素では約3分の1と低い。

②燃料中にアンモニアを含むために、フェルNO_xが生成されること。

クリーンアップ装置が乾式の場合には、ガス化炉で生成するアンモニアがクリーンアップ装置で除去されずにそのままガスタービンに導入される。石炭ガス中のアンモニアは濃度約500~1,500ppmであり、既往の燃焼方式ではその約90%が窒素酸化物(NO_x)に転換されてしまう。

③一酸化炭素が主要な可燃成分であること。

石油や天然ガスが炭化水素(C_mH_n)を可燃成分とするのに対して、石炭ガスは燃焼特性の異なる一酸化炭素(CO)が主要な可燃成分で、さらに水素(H₂)も含まれている。

したがって、ガスタービン技術としては、石炭ガス化炉の方式が空気吹きか酸素吹きか、クリーンアップ装置が湿式か乾式かによって、燃焼器の保炎構造や低NO_x燃焼などの方法が大幅に異なってくる。さらに、ガスタービン入口ガス温度を高めることによって、複合発電システムの熱効率が向上するが、このためには耐熱材料や冷却構造の開発が不可欠である。したがって、これらの各要素機器の仕様や構成の如何で、ガスタービン技術の難易度が異なってくる。

諸外国の石炭ガス化複合発電用ガスタービンは、たとえば米国のクールウォーターやオランダのブフナムの実証プラントに代表されるように、石炭ガス化炉は酸素吹き、クリーンアップには湿式の脱硫装置を用い、ガスタービンには高カロリー燃料での実績に優れた1,100℃級ガス

タービンを導入している。したがって、ガスタービンの技術課題は、主に中カロリー燃料の燃焼性能の向上に絞られている。

一方、日本のパイロットプラントでは、石炭ガス化炉は空気吹きを、クリーンアップ装置には乾式を、ガスタービンには1,300℃級高温ガスタービンを選定している。つまり、ガスタービンの技術課題としては、低カロリー燃料の安定燃焼、フェルNO_xの低減化、冷却構造の高性能化といった極めて高度な技術開発が要求されている。

当研究所では、1987年にガスタービン要素実験設備を設置して以来、既に運転実績のあった150MW、高カロリー燃料用のガスタービン燃焼器をベースとして、安定燃焼のための副燃焼室の新設、低NO_x化のためのリッチリー燃焼(過濃燃焼と希薄燃焼を組み合わせた二段燃焼法)の採用、インピンジメント冷却^{*1)}とフィルム冷却^{*2)}から成る複合冷却構造の導入など、新技術を培ってきた。

1991年までに、1,300℃級ガスタービン燃焼器の研究開発を完了し、実圧条件下でNO_x排出濃度を60ppm(16%O₂)以下まで低減することに成功した。ガスタービン負荷変動時の燃焼安定性や燃焼器壁面の冷却特性も良好であり、実用化に向けて見通しを得ることができた。図2-2-5には、当研究所が(株)東芝と共同開発した低NO_x燃焼器の一例を示す。

ところで、近年のガスタービンの高効率化は、主として耐熱超合金の開発と冷却技術の進歩によるものである。従来金属材料を使用する限り、高温化してもタービン翼の冷却空気量を増やさざるを得ず、高温化により得られる筈の利得が減殺されてしまう。

一方、ファインセラミックスは耐熱超合金に比べて高温における耐熱性、耐食性、耐磨耗性に優れているので、これをガスタービンの燃焼器や動、静翼に適用できれば、冷却空気量の低減が可能となり、熱効率の飛躍的な向上が期待できる。当研究所では発電用大型セラミックガスタービンの実現に向けて、現在、石炭ガス化複合発電用の20MW級セラミックガスタービンの燃焼器と静翼の開発を進めている。これまでに、20MW、1,300℃級セラミック燃焼器と第1段静翼を組み合わせたガスタービンの実圧条件下における燃焼実験と、セラミックスにとつ

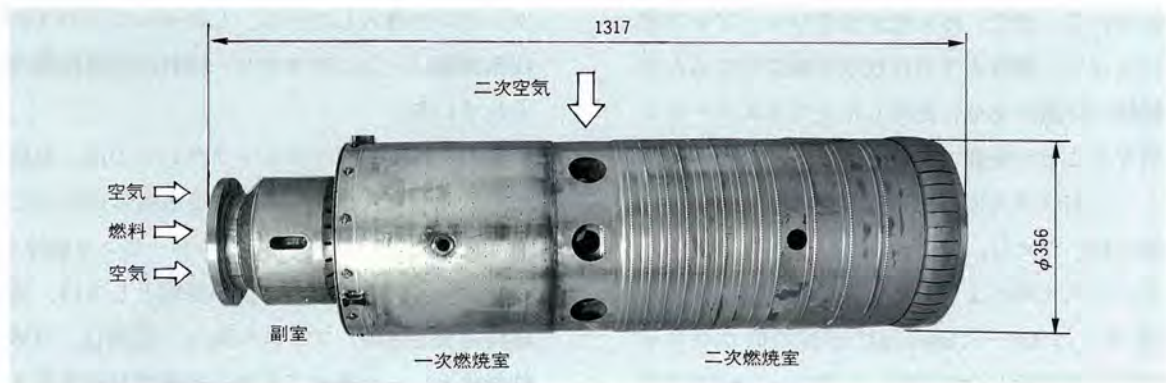


図2-2-5 150MW、1,300°C級ガスタービン低NO_x燃焼器

て最も過酷な緊急トリップを想定した燃料の急速遮断試験を行い、セラミックスの健全性を確認している。図2-2-6に、(株)日立製作所と共同で開発した1,300°C級セラミック燃焼器と第1段静翼の5枚翼列を示す。

当研究所ではさらに、石炭ガス化複合発電の熱効率を一層向上させることを目的に、1,500°C級低NO_x燃焼器と1,500°C級セラミックガスタービンの開発に着手している。今後とも、石炭ガス化複合発電の高効率化の要である高温ガスタービン技術の一層の性能向上を図っていく考えである。

2-2-2 高温型燃料電池

燃料電池発電は高効率でクリーンな発電方式として、最も注目されている将来技術の一つである。“電池”という言葉から受けるイメージとは異なり、基本的には水の電気分解と逆の反応を利用して、燃料の持つ化学エネルギーを直接電気エネルギーに変えることができる発電方法である。

燃料電池には種々のタイプがあるが、500°C程度以上の高温で動作するタイプの燃料電池は、石炭ガス化ガスを燃料として利用することが可能であり、高温の排熱を利用して付加発電を行うボトムリングサイクルと組み合わせた大規模集中型発電プラントとして利用することが考えられている。このようなプラントを構成した場合、そ

- *1) 冷却空気を、燃焼器壁面に高速で吹き付ける冷却方法
- *2) 燃焼器壁面に、冷却空気の薄い膜を吹き出す冷却方法

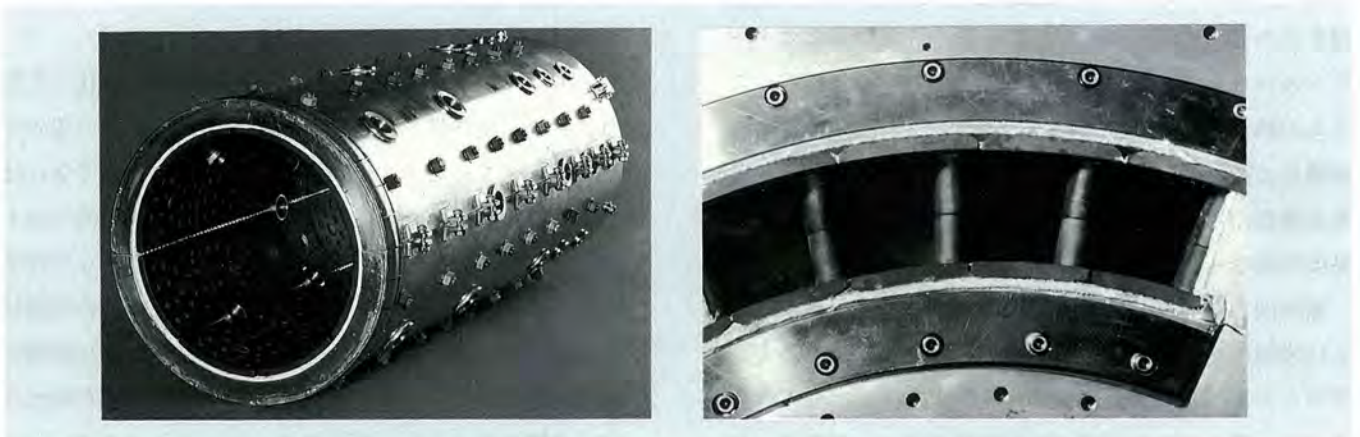


図2-2-6 20MW、1,300°C級セラミック燃焼器と静翼

の送電端熱効率は50%程度 (HHV基準) にも達することが、当研究所の試算からも明らかとなっている。

当研究所では、これら高温型の燃料電池の実用化を目指して、さまざまな研究開発を進めている。

(1) 燃料電池の構成と原理

燃料電池の構造は図2-2-7に示すように、一般に燃料極と空気極の2枚の電極とそれらの間に挟まれた電解質板、さらにそれぞれの電極に隣接するガス室から成る。

図のタイプの燃料電池の場合、燃料極には外部から燃料である水素が供給され、空気極には空気(または酸素)が供給される。それぞれのガス室に入った水素と酸素は電極で電子のやり取りをして、酸素が空気極で電子を受け取ってイオンとなって電解質中を燃料極側に移動し、水素と反応すると同時に電子を放出して水を生成する。このとき電子は外部回路を流れており、外部に電力が供給されていることになる。また、生成された水は排燃料ガスと一緒に外部に放出される。一方では空気極で反応しなかった窒素を主体としたガスも排空気として排出される。

このように、燃料電池は燃料(水素)と空気(酸素)を連続的に供給することによって、電力を連続的に直接

得ることができる。得られる電力は理想的には燃料(水素)の持つ化学エネルギー全てが変換されたものとなるが、電極反応の進行に若干のエネルギーを要し、その分得られる電力が減って熱が発生する。しかしそれでも、従来型の気力発電方式に比較すれば得られる電力の割合は大きく、より効率の高い発電が可能である。燃料電池では、発電と同時に水と熱も生成されることも特徴といえることができる。

燃料電池は、使用する電解質の種類と、それによって決まる動作温度から、いくつかのタイプに分類することができる。早くから開発が進んでいる常温あるいは低温で動作するリン酸型燃料電池などでは、利用できる燃料の組成が限られ、特に石炭ガス化ガスの主成分である一酸化炭素にさらされると、性能が低下するなどの制約があった。

これに対して、高温で動作する熔融炭酸塩型燃料電池(MCFC、600~700°Cで動作)や固体電解質型燃料電池(SOFC、約1,000°Cで動作)には、一酸化炭素濃度の制約はなく、高温であるが故に一酸化炭素を水素に変えてしまうシフト反応が十分に速く進行し、むしろ一酸化炭素も燃料として利用できる。すなわち、天然ガスなどを利用できるだけでなく、石炭をも利用できる発電プラント

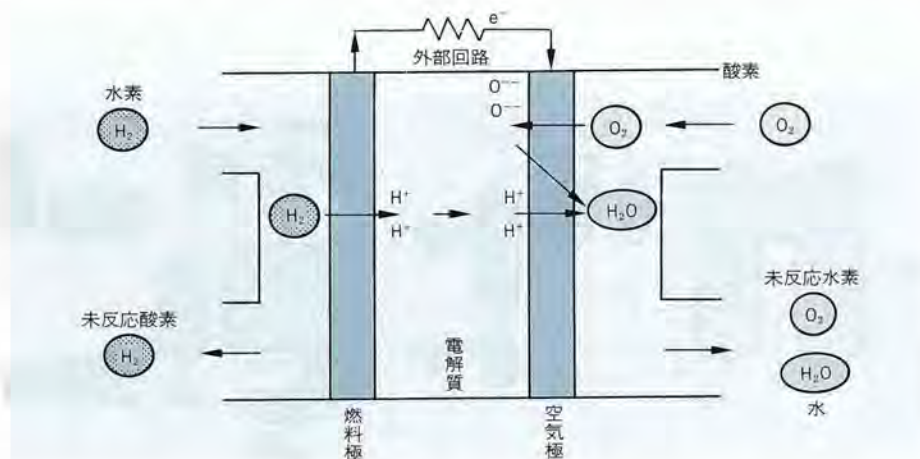


図2-2-7 燃料電池のしくみ

燃料極に供給された水素は、金属の触媒作用により、水素イオン(H⁺)と電子(e⁻)に分離される。水素イオンは電解質中を、また電子は外部回路を通じて空気極に伝わる。空気極では外部回路からの電子が供給され、さらに金属の触媒作用により、酸素が酸素イオン(O²⁻)になる。酸素イオンと電解質を伝わってきた水素イオンが反応し、水が生成される。

向きの燃料電池である。

MCFCの電池構造を図2-2-8に示す。単位電池（セル）は電解質と2枚の電極から構成され、ガス室を構成するセパレータ板を介して複数のセルが上下に積層される構成となっている。燃料電池の大容量化は、より面積の大きい電極を用いて大電流を得ることと、積層数を増やして高電圧を得ることによって達成される。積層した電池をスタックと呼ぶ。

(2) 石炭を燃料とする燃料電池発電プラント

MCFCは、大型化や、より高い発電効率が得られる加圧運転も比較的容易であることから、当研究所は早くからその開発を進めてきた。図2-2-9は当研究所が考えている石炭ガスMCFC複合発電プラントの構成例を示す。この例では、石炭ガス化装置に微粉炭供給の空気吹きタイプを、ガス精製装置には乾式方式を想定している。MCFCの周辺には、電池を高効率で安定して運転するた

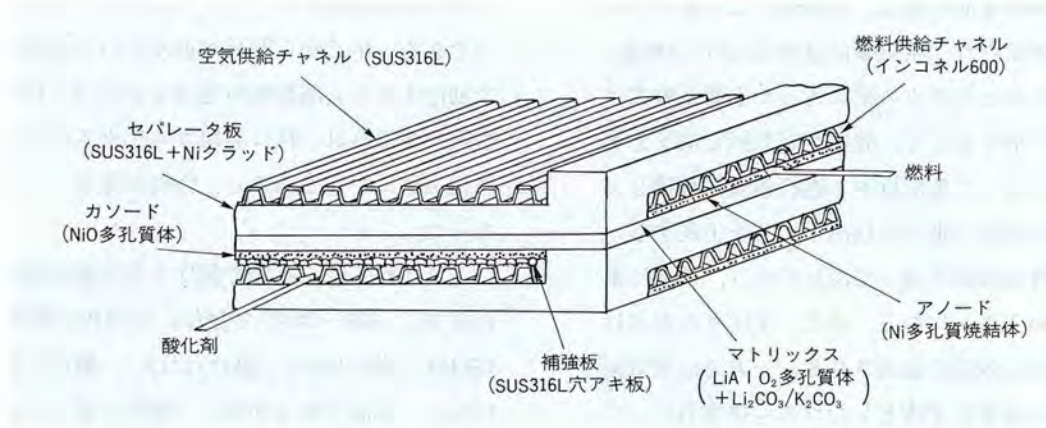


図2-2-8 溶融炭酸塩型燃料電池の積層構造

現在電解質板や電極は最大で1m²を超えるものが製造されている。この場合の電池出力は現在約1.2kW/セルであり、数100枚積層して1つのスタックを形成することが考えられている。

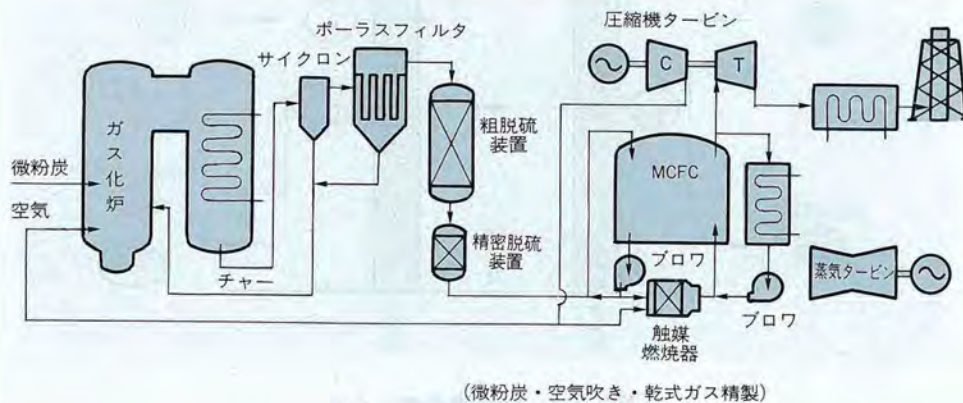


図2-2-9 石炭ガスMCFC発電プラントの概略構成

微粉炭供給の空気吹き石炭ガス化炉、乾式ガス精製システムを用いた石炭ガス化MCFC発電プラントのシステム構成の一例。

や熱併給型電源（コジェネレーション用電源）としての応用も考えられており、1997年までの数10kW級モジュールの完成を経て、大型プラントへの開発方針が示されていくことになろう。

国外では、MCFCについては、米国で早くから開発が進められており、エネルギー省の資金をもとに小型スタックの長時間試験などに多くの実績がある。現在3社がスタック開発を行っており、うち2社がここ2～3年における200kW、2MWのプラント開発計画をそれぞれ発表している。欧州では、ここ数年で開発の気運が高まり、オランダ、イタリアなどが国家プロジェクトを推進している。

また、SOFCの開発は、欧米での開発が先行してきた。米国では、既にウェスチングハウス社が25kW級モジュールを開発し、世界に先んじている。エネルギー省を主体とする国家プロジェクトも推進されている。欧州でも1kW級程度を当面の目標としてイタリア、オランダ、スイス、ドイツなどで開発が進められている。

当研究所においては、MCFCについては、数多くの小型電池による基本性能試験、連続発電試験などを通じて、その高性能化のための要因分析、寿命を制約する諸因子の影響度評価などを実施してきた。さらに実用化を目指

して、前述したプラント効率の解析の他、プラント実運転条件におけるスタック運転試験を実施してきており、その加圧特性、ガスリサイクル運転特性などについて、その動的な特性も含めて明らかにしてきた。最近では図2-2-11に示すように、10kW級スタックによる長時間運転試験を実施し、スタック改良の効果、運転方法の改良の効果を実証した。

SOFCについては、当研究所は1987年から基礎研究に着手し、燃料極・空気極・電解質板を同時に焼結する三層一体焼結型セルの開発を目指し、新材料を開発するとともに、1990年には110cm²単セルで40Wの発電に成功している。また、1993年からはムーンライト計画においてシステムの研究を開始した。

(4) 今後の技術開発課題

以上、燃料電池による石炭を利用した発電プラントについて高温型燃料電池を対象に概説したが、その実現に際しては、いくつもの課題が存在する。

当然のことながら、電池本体の高性能化、大容量化、長寿命化、低コスト化は、石炭以外の燃料を利用する場合にも当てはまる課題である。これに加えて、石炭を燃料とするプラントの特徴的な技術課題は、石炭ガスに含

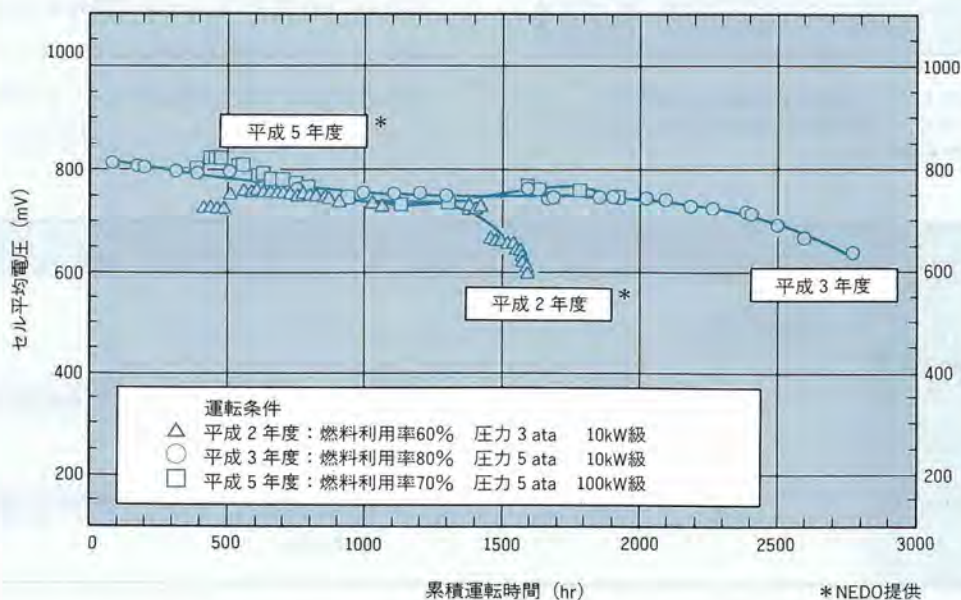


図2-2-11 大面積スタックの平均セル電圧経時変化

まれる微量不純物の電池性能への影響度評価と、その耐久性確保である。石炭ガスには一般に硫黄化合物、ハロゲン化物、窒素化合物などが微量含まれ、電池性能に大きく影響するものと考えられている。

図2-2-12はMCFCに対するそれら微量不純物の許容濃度を調査したものである。硫黄化合物はもとより、ハロゲン化物の許容濃度は達成可能なレベルより下にあり、より高性能なガス精製技術の開発が求められている。

SOFCでは、動作温度がより高く、不純物の影響はそれほど大きくはないと一般的にはいわれているが、その系統だった試験結果はあまり報告されていない。

このように不純物については、今後より高度な精製技術の開発のみならず、電池の許容濃度の総合的な実測、影響評価が必要であり、当研究所では近々にこれらの研究に着手し、石炭を利用する燃料電池発電プラントの実現に向けて、より総合的な研究を進めて行く予定である。

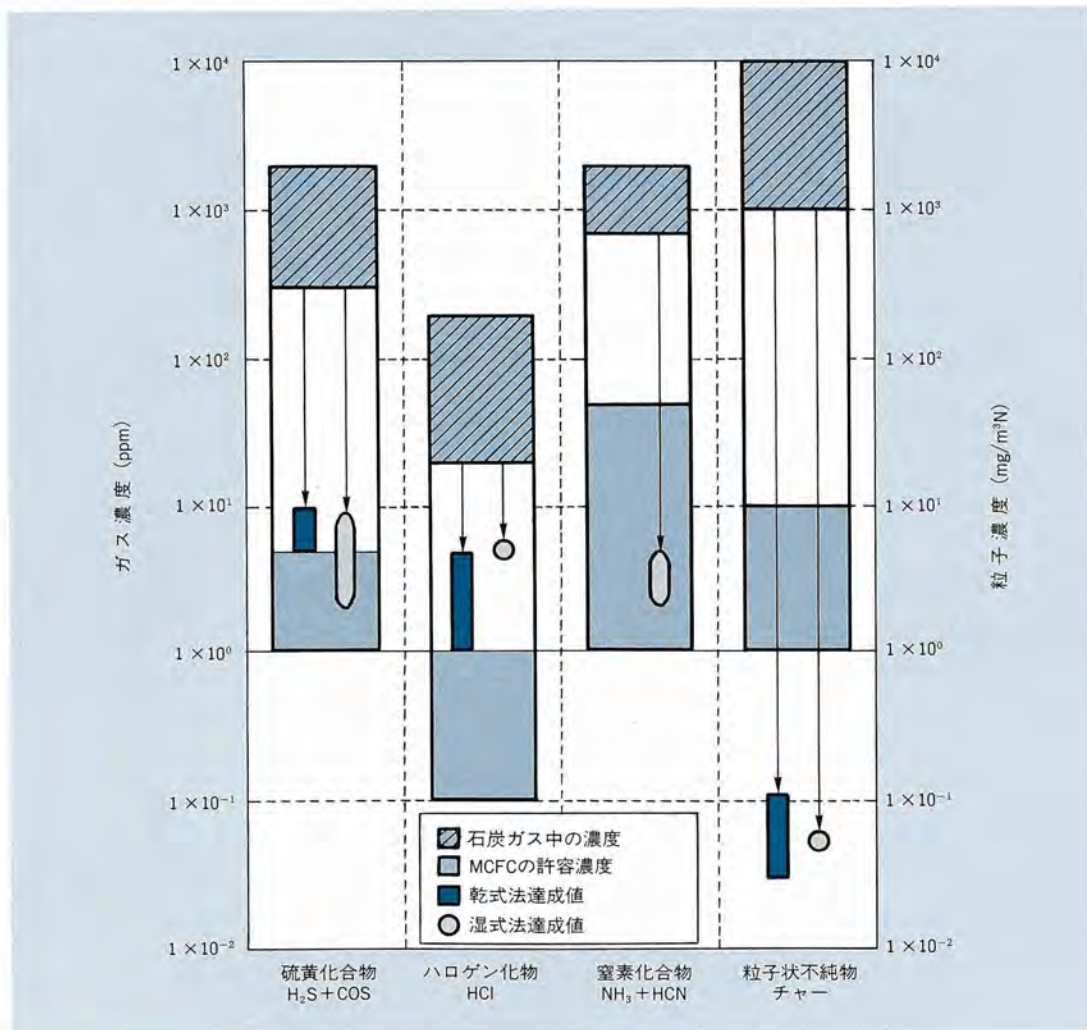


図2-2-12 石炭ガス精製技術のMCFCへの適用性

石炭ガス中の不純物の典型的な濃度と、MCFCの燃料として利用する際の許容濃度を、硫黄化合物、ハロゲン化物、窒素化合物および粒子状不純物について示した。粒子状不純物は湿式法も乾式法もMCFCの許容濃度を達成できる。しかし、ガス状の不純物については、湿式法、乾式法ともに現状の除去性能は十分とは言えない。MCFC用のクリーンアップシステムを開発するためには、まず個々の不純物の除去技術を高性能化することが不可欠である。

第 5 章

5

石炭をクリーンに使う



第3章 石炭をクリーンに使う ● 目次

社会経済研究所	社会システムグループ	主査研究員	山本 公夫
狛江研究所	大気物理部	大気環境グループ	グループリーダー 市川 陽一
		環境化学グループ	主任研究員 横山 隆寿
	我孫子研究所	耐震部	上席研究主幹 緒方 信英
		土質グループ	グループリーダー 岡本 敏郎
	構造部	建設材料グループ	グループリーダー 遠藤 孝夫
			(現 東北学院大学)
	環境科学部	海洋科学グループ	研究主幹 大隅多加志
		生物部	研究主幹 青木 正則
		陸生生物グループ	グループリーダー 河野 吉久
		バイオテクノロジー特別研究室	主査研究員 渡部 良朋
		バイオテクノロジー特別研究室	主査研究員 大村 直也
横須賀研究所	エネルギー化学部	燃料化学グループ	グループリーダー 牧野 尚夫
		燃料化学グループ	主任研究員 小野 哲夫
		プラント化学グループ	主任研究員 福沢 久
		プラント化学グループ	主査研究員 白井 裕三

3-1	環境対策技術	44
3-2	石炭灰の有効利用	56
3-3	貯炭管理	63
3-4	CO ₂ の抑制対策	67
3-5	景観などの環境創造	76



山本 公夫 (1981年入所)
発電所や送変電設備等の電力施設の景観アセスメント、景観設計、環境設計に関する研究を行ってきた。現在、発電所の立地支援方策に加えて、都市開発や都市デザインに関する研究を行っている。



緒方 信英 (1967年入所)
フィルダム、原子力発電所の地盤の耐震問題およびLNG地下タンク周囲地盤の凍結の研究に従事。現在は、放射性廃棄物処分に関するベントナイト材料、石炭灰の力学特性に関する研究に取り組んでいる。



市川 陽一 (1977年入所)
環境アセスメント手法の高度化に関する研究に携わってきた。専門は大気拡散。現在、石炭火力発電所からの炭じん飛散予測、排煙、排ガス拡散の数値モデルの開発、酸性物質の長距離輸送モデルの開発を行っている。



岡本 敏郎 (1977年入所)
発電所の基礎や斜面など地盤の安定性評価の研究を行ってきた。原子力発電所では在来立地および新立地方式における基礎地盤、水力発電ではロックフィルダム、火力発電では軟弱地盤とその改良に関する研究に取り組んでいる。



横山 隆寿 (1975年入所)
排水や排ガスなど火力発電所に係わる環境問題とその対策、石炭・石炭灰の分析と規格化を進めてきた。現在は、地球温暖化対策、特に、CO₂回収技術の研究に取り組む。



遠藤 孝夫 (1976年入所)
コンクリートおよびコンクリート構造の力学的特性の検討と解析法の開発に従事してきた。現在、破壊力学を用いた複合材料のひび割れ進展問題やローラーコンパクトドコンクリートの締め固め性状の理論的検討を行ってきた。
1994年4月から、東北学院大学工学部教授。



大隅多加志 (1987年入所)
CO₂の出会いは'86年にアフリカのニオス湖でのCO₂ガス突出災害調査に参加したとき。放射性廃棄物の地層処分や地熱開発についての地球化学的研究を経て、現在は'88年に開始したCO₂貯留技術の研究が中心テーマ。



牧野 尚夫 (1979年入所)
高性能集じん器の開発や、ばいじん性状評価手法の確立などの粉体技術および微粉炭燃焼技術に関する研究開発に従事。現在は、主に微粉炭燃焼時のNO_xと灰中未燃分の同時低減技術の開発を行っている。



青木 正則 (1961年入所)
大気汚染、塩害および肥料に関する研究を行ってきた。現在、石炭灰を利用した肥料の研究に従事している。



小野 哲夫 (1962年入所)
入所当時は石炭の低温酸化の研究に従事した。その関係から、「石炭が見直される」と直ぐに自然発火の研究に取り組み、現在は微粉炭計測およびCWMと一貫して石炭ハンドリングの問題を扱っている。



河野 吉久 (1974年入所)
大気汚染物質の中でも降下ばいじんの植物影響に関する研究を行ってきた。現在、酸性降下物の樹木影響評価に関する研究に若手研究員とともに取り組んでいる。



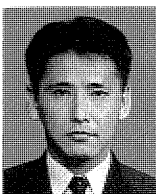
福沢 久 (1965年入所)
現泊江研究所に入所以来、排煙脱硫脱硝、接触燃焼、メタノール利用等、環境保全およびエネルギー関連技術の研究に従事。'88年より横須賀研究所勤務。得手分野は固体触媒や固体吸収剤を利用した気相反応（触媒化学、反応工学）。



渡部 良朋 (1988年入所)
微生物学を専門とし、バイオテクノロジーを環境保全技術や農林水産振興技術に応用し、電気事業へ適用することを目標に研究を行っている。現在、微細藻類を用いたCO₂固定技術に関する研究ならびに微生物を用いた水質浄化技術の研究に従事。



白井 裕三 (1983年入所)
入所以来、乾式脱硫剤の開発、性能評価、および長期信頼性評価を担当してきた。現在は、この知見を活かし、MCFC用高性能脱硫剤の開発や地球温暖化物質の対策技術にも取り組んでいる。



大村 直也 (1989年入所)
バイオテクノロジーを環境やエネルギー分野に応用することを目的に、微生物を用いた石炭の脱硫の研究に従事。現在、鉄酸化細菌を浮遊選炭へ応用した石炭の脱硫に関する研究を行っている。

3-1 環境対策技術

3-1-1 ばいじん対策

石炭中には10～20%の不燃の灰分が含まれており、燃焼によりこれらの大部分が、ばいじんになる。これを煙突から排出させないようにするため、ほとんどの発電所で、図3-1-1に示すような電気集じん器が用いられており、フライアッシュとして回収されている。

この集じん器は、微粉炭の燃焼で発生した濃度 $10\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ のばいじんの99%以上を除去し、 $100\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ 以下にまで低減させることができる。そして、集じん器を通過したばいじんは、後述の湿式排煙脱硫装置のスクラバーで、さらに80～90%が除去され、結局、煙突から排出されるばいじんの濃度は排出基準の $200\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ を大きく下回る $10\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ 程度以下となっている。

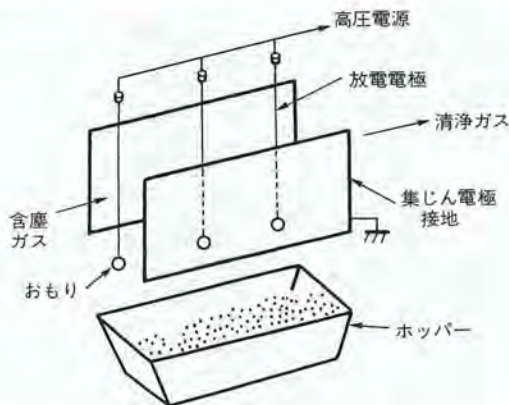


図3-1-1 電気集じん装置の概念図

接地した2枚の集じん電極（板状）の間に高電圧を印加した放電電極（棒状）を設ける。ガス中の粒子は、放電電極より出た電子に荷電され、集じん板に衝突し捕集される。捕集された粒子は電荷を放出後ホッパーに落下する。

このように電気集じん器と湿式排煙脱硫装置を組み合わせればばいじん対策は非常に集じん性能も高く、既に確立された技術になっているが、残されたわずかな課題を上げれば

- ①電気集じん器では、高電気抵抗のばいじんが除去し難いこと
- ②電気集じん器、湿式排煙脱硫装置のいずれにおいても、粒径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ のサブミクロンばいじんが捕集し難いこと

の2点である。①の課題である高電気抵抗灰の除去については、電気抵抗を下げるため排ガス中に SO_3 を注入する方法や、電気集じん器の操作温度を従来の 150°C から 350°C に上昇させ電気抵抗を下げる高温電気集じん器の開発などが行われている。

②の課題について、当研究所は、電気集じん器の中に直径 10mm 程度の絶縁体粒子を充填し、濾過集じんの作用と電気集じんの作用を併用する荷電粒子充填層集じん器を開発した。また、電気集じん器の集じん板を水膜で覆い一度捕集された粒子が、再び気流中に飛散しないようにする半湿式電気集じん器なども検討されており、この集じん器は、中部電力、碧南火力において平成3年10月に実用機が稼働を開始している。

3-1-2 窒素酸化物対策

石炭の燃焼によって発生する窒素酸化物(NO_x)には、石炭に含まれている窒素分の一部が燃焼により酸化して生成されるフュエル NO_x と、燃焼用空気中の窒素分が高温で酸化して生成されるサーマル NO_x があるが、ほとんど

はフュエルNO_xだと考えられている。

わが国の主要な石炭火力では、NO_x対策として、燃焼器でNO_xの生成を抑制する低NO_x燃焼法と、生成したNO_xを除去する排煙脱硝装置による対策が組み合わされている。

(1) 低NO_x燃焼技術

石炭に含まれている窒素分は、燃焼によって必ずしも全てがNO_xに転換されず、酸化雰囲気、温度などによってNO_x発生量が異なるため、燃焼条件をコントロールしてNO_xの生成を抑制しようという低NO_x燃焼技術が非常に有効である。

低NO_x燃焼技術としては、

- ① 微粉炭と燃焼用空気の混合を抑制し、NO_x発生量を低下させる低NO_xバーナ
- ② 燃焼用空気の一部を分割して火炎後部に注入し、バーナ廻りを還元雰囲気にする二段燃焼法
- ③ 燃焼排ガスの一部を循環してバーナ部から注入し、火炎温度を下げるとともに、酸素分圧も低下させ低NO_x化する排ガス再循環法

などがある。このうち、微粉炭燃焼においては二段燃焼法が最も効果的であるが、いずれの方法を用いても図3-1-2に示すように、NO_xの低減に伴い燃焼効率が低下し、石灰灰の中に未燃分が残存する割合、つまり灰中未燃分

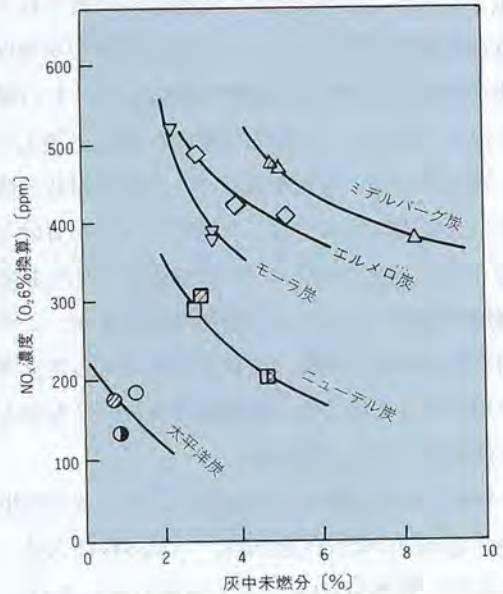


図3-1-2 灰中未燃分とNO_x濃度の関係 (当所試験炉での結果)

NO_x・灰中未燃分の発生量は炭種によって大きく異なる。ただし、同一の炭種の場合には、NO_xの低下に応じて灰中未燃分が増加するという双曲線の関係を持つ。

濃度が上昇する欠点があった。

当研究所では、灰中未燃分を増加させずにNO_xの低減を図るNO_x・灰中未燃分同時低減技術についての検討を1988年度から開始している。この方法の概念は、図3-1-3に示すように、まずバーナ部において低空気比で速やかな燃焼を行う。その際、石炭中の窒素分は放出され一旦

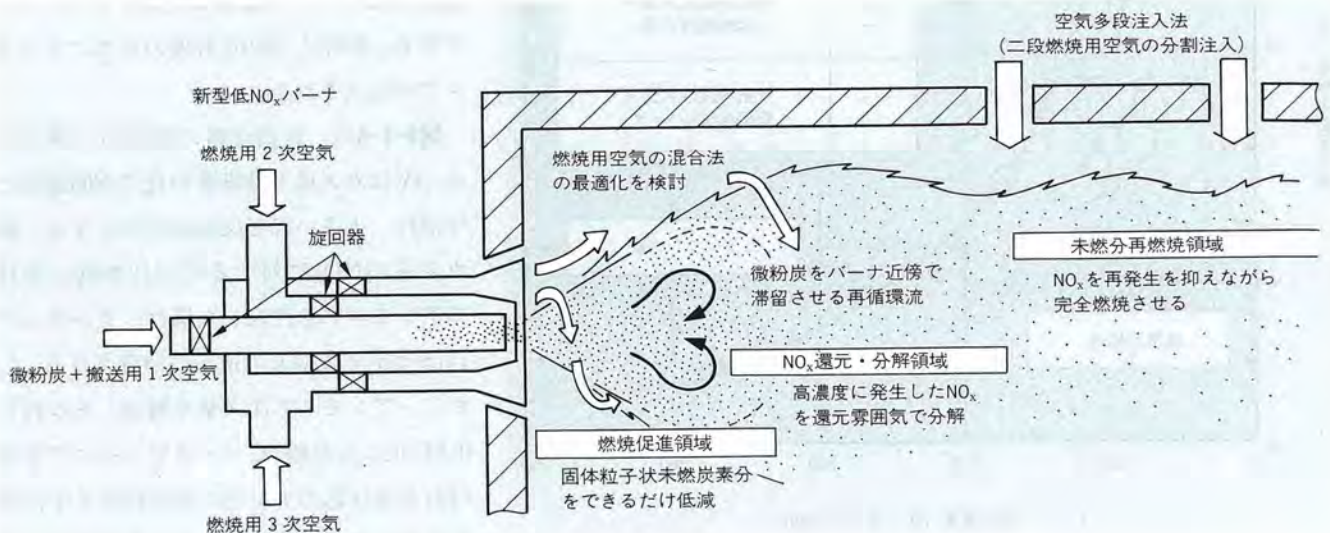


図3-1-3 NO_x・灰中未燃分同時低減燃焼技術の概念

はNO_xとなるが、低空気比のため酸素が消費された後に生じる還元炎で分解される。このような速やかな燃焼、還元炎の生成のためには新型の低NO_xバーナの開発が必要となる。さらに、一層の効果的なNO_xの還元のためには、還元性の強い炭化水素系ガスや低燃料比の微粉炭などを、火炎内に注入する二次燃料注入法が有効となる。NO_xを十分に還元分解した後の燃焼ガス中の未燃分は二段燃焼用空気の注入により再燃焼させるが、この二段燃焼用空気を分割し複数の位置から注入する空気多段注入法を用いることにより、再燃焼時においてもNO_xの再発生を抑制することができる。

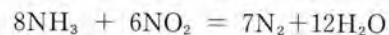
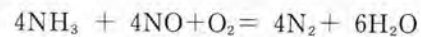
図3-1-4は、NO_x濃度を100ppmとしたときの灰中未燃分濃度を従来型の低NO_x燃焼法、空気多段注入法、二次燃料注入法、新型低NO_xバーナ適用のそれぞれについて、当研究所の石炭燃焼試験炉での実験結果で示したものである。灰中未燃分濃度は、空気多段注入法により相対値で約30%低減し、二次燃料注入法の適用でさらに約20%低減する。そして、現在、開発中の新型低NO_xバーナ

を適用した場合には、さらに約20%の灰中未燃分が低減でき、これらの技術を組み合わせることにより、未燃分は従来技術の約1/3まで低減可能との結論を得ている。

しかし、石炭はその産炭地、炭層によって性状が多岐にわたるため、NO_xの発生量も炭種によって大きく異なる。今後の燃料事情を考えると、低品位炭をも利用せざるを得ないことが予想されるので、それらに適合した一層の低NO_x燃焼技術の開発が必要となろう。

(2) 排煙脱硝技術

燃焼によって生成されたNO_xは、排煙脱硝装置を使うことにより、さらに低減させることができる。現在、主に利用されている脱硝方式はアンモニア接触還元法と呼ばれる方式で、排ガス中にアンモニア(NH₃)を注入し、次式のようにNO_xをN₂に還元する方法である。



この反応は触媒を用いない場合、1,000°C付近で起こるが、アンモニアをNO_xに対して過剰に使用する必要があり、反応率も50%程度と低い。

これに対して、触媒を用いた方式は反応温度を低く、かつ反応率を高くすることができる。通常は、350°C程度のガスにアンモニアが注入される。

図3-1-5は、脱硝装置の性能の一例である。SVはガス量と触媒量の比で空間速度と呼ばれ、小さいほど反応率は高くなる。排ガス中のNO_xに対するモル比が低い条件でアンモニアを注入した場合、アンモニアはほぼ完全にNO_xの還元消費される。しかし、アンモニア注入量を増加しモル比を0.8以上にした場合、リークアンモニアと呼ばれる未反応のアンモニアが排ガス中に残存する。そこで通常は、リークアンモニアが5ppm以下にできる0.8程度のモル比で

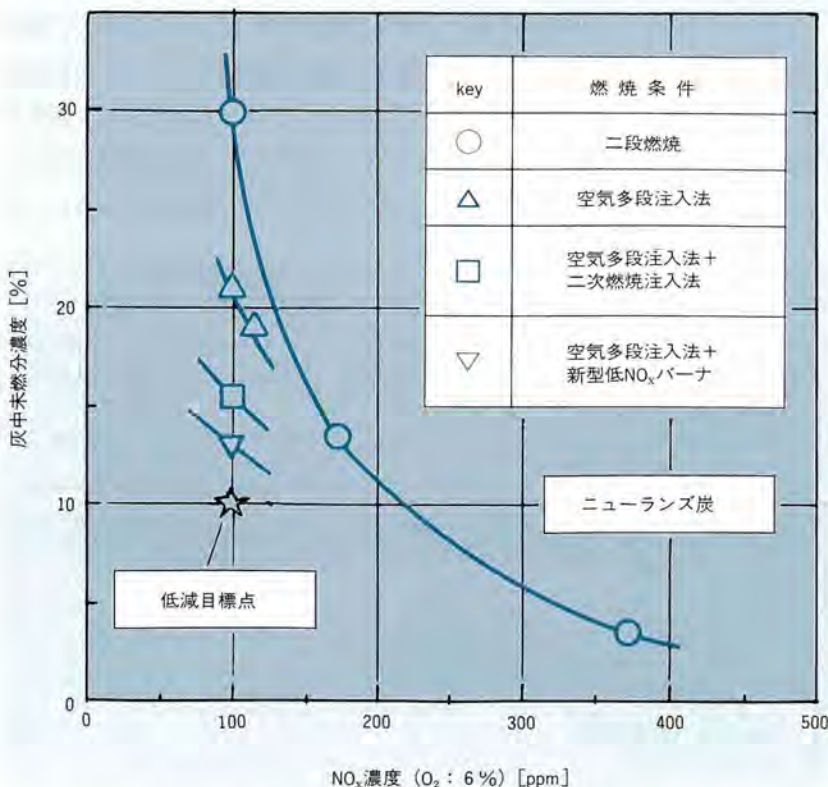


図3-1-4 NO_x・灰中未燃分同時低減燃焼技術による低減効果の一例

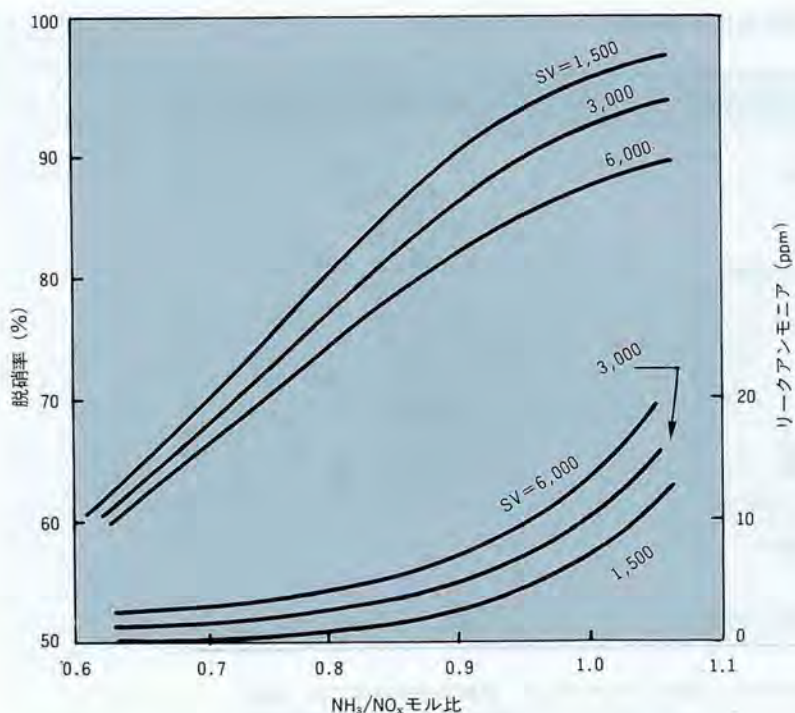


図3-1-5 石炭ボイラーの排ガス脱硝例
(ハニカム触媒10mmピッチ、入口NO_x300ppm)

脱硝装置の性能は空間速度SVが小さいほど、またNH₃/NO_xのモル比が高い程向上する。しかし、高くなるにしたがい、未反応のNH₃が残存するため、0.7~0.8程度のモル比に抑えられる。

注入され、脱硝率も70~80%に調節される。このように、脱硝装置自体の効率を上げることは可能だが、リークアンモニア濃度の制約があるため、前項に述べた低NO_x燃焼技術との併用により、大幅なNO_x低減を図っているのが現状である。

触媒式脱硝の問題点は、長期使用により触媒活性が劣化するため、更新する必要があることで、触媒寿命の延伸、触媒の再生などが重要な課題となる。

新しい脱硝技術として、電子線照射式や活性炭吸着法などが検討されているが、いずれも脱硝との同時方式であり、詳細は次項にて述べる。

3-1-3 硫黄酸化物対策

国内では火力発電所から排出される硫黄酸化物(SO_x)

の規制は、法に基づく排出基準と地方自治体との協定により定められた総量規制基準により地域毎に行われている。この対策として、低硫黄炭の利用により排出量を抑える方法と、排煙脱硫装置を適用して除去する方法がある。しかし、硫黄分が0.5%程度しか含まれていない石炭でもSO_x濃度は400ppm程度となり、排出基準の厳しい地域では排煙脱硫装置に頼らざるを得ないのが現状である。

現在、電気事業用石炭火力の83%に排煙脱硫装置が設置され、この内の約90%に湿式石灰石膏法と呼ばれる方式が用いられている。世界的には、酸性雨問題が深刻化し、各国でSO_xの排出規制の強化などが進められており、排煙脱硫装置の必要性が高まってきている。

脱硫法には、湿式石灰石膏法を代表とする脱硫効率が高く、かつ信頼性の高い湿式脱硫法、排水処理が不要な乾式脱硫法、さらに脱硫と脱硝を同時に行うことにより低コスト化を狙った同時脱硫脱硝法がある。

また、発展途上国向けの方式として脱硫効率は低いが安価な簡易脱硫法が注目されている。

(1) 湿式石灰石膏法

湿式石灰石膏法は90%を越す脱硫効率を有し、合理化、経済化が進んだ最も信頼性の高い方式である。この方法は、吸収塔内で排ガス中に石灰スラリーを噴霧して脱硫し、これにより生成された亜硫酸カルシウムを酸化塔で空気によって酸化して石膏にするものである。

最近では、表3-1-1に示すように吸収塔下部の液室に直接空気を吹き込み酸化させる方式が開発され、pH調整のための硫酸の添加や酸化塔を省いて、脱硫性能の高安定化、排水中に含まれる水質汚染物質の低減および装置のコンパクト化が図られてきている。

また、さらに低コスト化を目指し、中部電力(株)、三菱重工業(株)により無排水処理システムの開発が進められ

表3-1-1 湿式石灰石膏法酸化システムの比較

項目	酸化塔別置方式	吸収塔内酸化方式
基本フロー		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化塔 有り (別置き) ・硫酸 要 ・CaCO₃ 過剰率 大 ・吸収性能に対する酸化の影響 小 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化塔 無し ・硫酸 不要 ・CaCO₃ 過剰率 小 ・吸収性能に対する酸化の影響 大

酸化塔別置方式と吸収塔内酸化方式を比較したものである。最新の脱硫装置では、吸収塔内酸化方式が用いられており、コンパクト化、低コスト化が図られている。(火力原子力発電：「火力発電所の環境保全技術・設備 VI 脱硫・脱硝の将来技術」より引用)

ている。この技術は蒸発缶により排水を濃縮し、セメントと石灰を混ぜて固化物として処理するものであり、従来の処理方式に比べ、設備費は1/2、運転費は1/4、スペースは1/8になるといわれている。

(2) 乾式脱硫法

表3-1-2に最近の乾式脱硫および同時脱硫脱硝技術を示す。

排水処理を必要としない乾式脱硫法で、実用化された最新の技術に石炭灰利用乾式脱硫法が挙げられる。これは、北海道電力(株)、(株)日立製作所、パブコック日立(株)が開発したもので、図3-1-6にそのプロセスを示す。

この方法は、消石灰、石炭灰、石膏から直径6mm、長さ3~10mmのペレット状の脱硫剤をつくり、これを移動床脱硫塔に充填し、脱硫剤中のカルシウム分が排ガス中のSO_xを吸収することにより脱硫するものである。脱硫効率は90%以上、脱硫剤利用率は80%以上を得ている。また、使用済みの脱硫剤は石膏を多く含む硬化物となるため建材として再利用が期待できる。現在、苫東厚真発電所1号機(350MW、石炭専焼)で、排ガス量の1/2に

相当する644,000m³N/h規模の実機が運転されている。

(3) 同時脱硫脱硝法

この技術は、脱硫と脱硝を同時に行うことにより排煙処理の低コスト化を狙ったものであるが、電気事業用として実用化されている例はない。国内では主に排水処理の不用な乾式法による技術の開発が進められている。この中で実用化段階に達した技術として、活性炭吸着法を用いた同時脱硫脱硝技術(電源開発(株)、住友重機械工業(株))および電子線を用いた同時脱硝技術(中部電力(株)、(株)荏原製作所、日本原子力研究所、米国DOEなど)が挙げられる。図3-1-7にプロセスを示す。

活性炭吸着法による技術は、アンモニアおよび活性炭を用いて脱硫、脱硝を同時に行うものであり、前段の移動床で硫酸化物が活性炭に吸着され、後段の移動床で窒素酸化物が活性炭の触媒作用により窒素に還元されるもので、脱硫効率95%以上、脱硝効率85%以上を目標としている。吸着したSO_xは再生塔で脱離させ、単体硫黄として回収する。この技術は活性炭を用いた乾式脱硫技術より発展したものであり、石炭専焼の松島火力発電所で

表3-1-2 最近の主要な乾式脱硫および同時脱硫脱硝技術

方式	プロセス又は方法名	原理	開発状況	
乾式脱硫	石炭灰利用乾式脱硫法	石炭灰、石灰等よりペレット状の吸収剤を調整し、この吸収剤に硫黄酸化物を吸収させて脱硫する。	実用化	
	活性炭吸着法	活性炭に硫黄酸化物を吸着させて脱硫し、単体硫黄として回収する方式	実証終了	
	簡易脱硫	石灰吹き込み法	火炉、煙道に石灰石、消石灰を吹き込み、脱硫を行い、交流の集じん器によりフライアッシュの混合物として回収する方式	実用化
		炭酸水素ナトリウム吹き込み法	火炉、煙道に炭酸水素ナトリウムを吹き込み、脱硫を行い、後流の集じん器によりフライアッシュとの混合物として回収する方式	実証終了
		スプレードライヤ法	消石灰スラリーを噴霧してスプレードライヤ内で脱硫を行い、後流の集じん器によりフライアッシュとの混合物として回収する方式	実用化
乾式同時脱硫脱硝	活性炭吸着法	活性炭に硫黄酸化物を吸着させて脱硫し、窒素酸化物を活性炭の触媒作用によりアンモニアで窒素に還元し、硫黄酸化物は単体硫黄として回収する方式	実証中	
	電子線法	電子線を照射することによりアンモニアと硫黄酸化物、窒素酸化物を反応させ、粉体の硫酸、硝酸として後流の集じん器で回収することにより同時に脱硫、脱硝を行う方式	実証中	
	消石灰・尿素吹き込み法	尿素、消石灰 (Ca(OH) ₂) と炉内に吹き込むことにより同時に脱硫脱硝を行う方式	実証中	
	WAS-SNOX法	窒素酸化物を従来のSCR触媒によりアンモニアで窒素に還元し、硫黄酸化物をバナジウムベース触媒により硫酸にして回収することにより脱硫する方式	実証中	
	NOXSO法	NaAlO ₂ 吸収剤に硫黄酸化物、窒素酸化物を吸収させて同時に脱硫、脱硝を行い、硫黄酸化物は単体硫黄として回収する方式	実証中	

脱硫技術としては湿式石灰石膏法が主流となっている。本表では、現在技術開発が進められている乾式脱硫ならびに乾式同時脱硫脱硝法を示した。また、スプレードライヤ法のように半乾式法として扱われているものもあるが、ここでは乾式法に含めた。

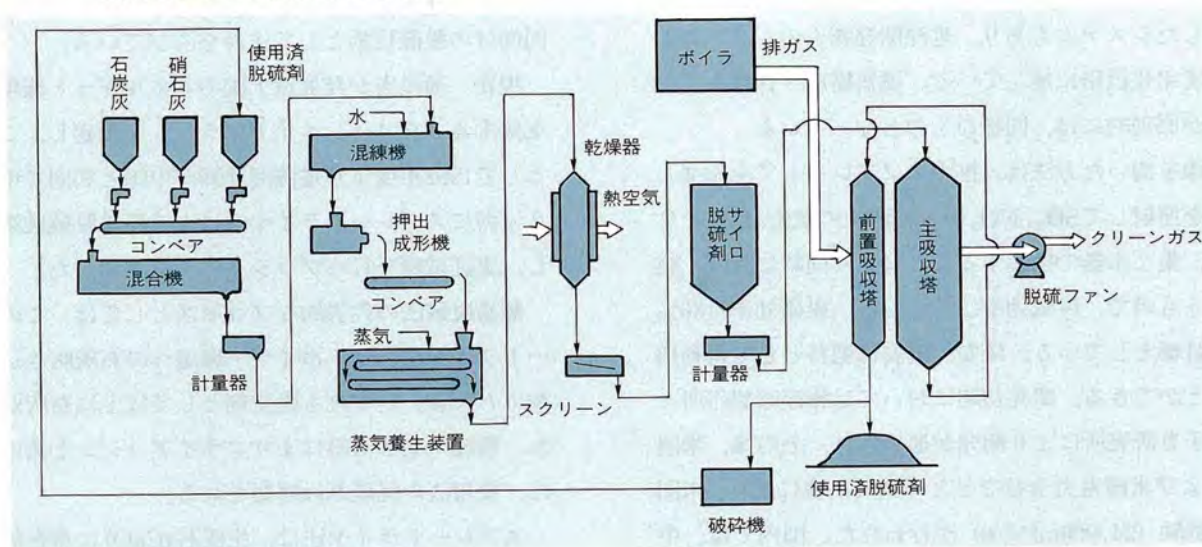


図3-1-6 石炭灰利用乾式脱硫プロセス

脱硫剤の製造設備も合わせた一貫プロセスとなっている。苫東厚真発電所1号機に設置され、運転が行われている。(火力原子力発電：「火力発電所の環境保全技術・設備 VI 脱硫・脱硝の将来技術」より引用)

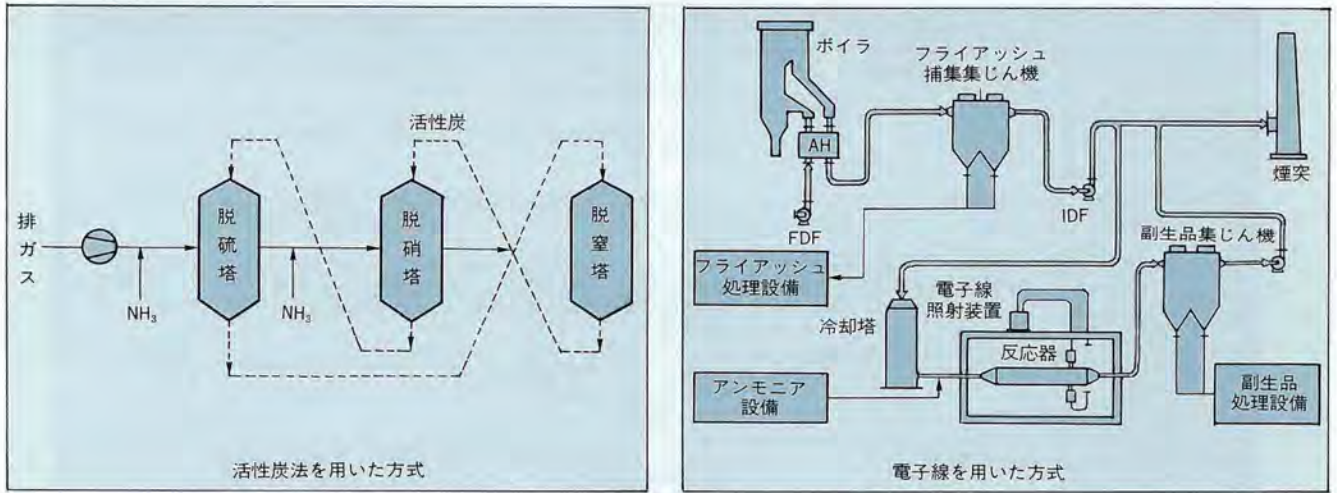


図3-1-7 同時脱硫脱硝プロセス

活性炭法では、硫黄酸化物は単体硫黄として回収し、窒素酸化物は窒素に分解される。電子線法では硫酸、硝安として回収する。(火力原子力発電：「火力発電所の環境保全技術・設備 VI 脱硫・脱硝の将来技術」「石炭火力発電所における乾式脱硫脱硝技術」より引用)

1993年3月から排ガス量150,000m³N/h (45MW相当) 規模の実証試験を開始し、94年1月まで、同技術の石炭火力への適用性を評価する計画となっている。

この他、活性炭吸着法を用いた技術には、三井鉱山(株)が開発したシステムもあり、電源開発(株)らのシステムと同様に実用化段階に達している。機器構成・仕様などは異なるが原理的には、同様なものとなっている。

電子線を用いた方法は、排ガスにアンモニアを添加し、電子線を照射してSO_x、NO_xから粉体状の硫酸、硝安を生成させ、集じん器で捕集することにより同時に脱硫、脱硝を行うもので、脱硫効率は90%以上、脱硝効率は80%以上を目標としている。硫酸、硝安は肥料として再利用することができる。開発初期においては(株)荏原製作所と日本原子力研究所により開発が進められ、その後、米国DOEおよび米国電力会社などとの共同出資により、米国で実証試験(24,000m³N/h)が行われた。国内では、中部電力(株)と共同で1992年11月に新名古屋発電所で排ガス処理量12,000m³N/h規模の実証試験を開始し、平成5年度末に評価を下す予定となっている。

(4) 簡易脱硫法

この技術は脱硫効率が50~80%と低いが、装置が簡素で低コストであるため、排出規制の緩やかな国々では既に実用化されており、排出規制を行っていない発展途上国向けの脱硫技術として注目を浴びている。

現在、通産省が発展途上国のエネルギー・環境技術を支援する「グリーンエイドプラン」を策定し、この一環として1992年度より電源開発(株)が中国と共同で中国国内2ヶ所にスプレードライヤ法による簡易脱硫装置を設置し、実証試験を行うプロジェクトを開始した。

簡易脱硫法の代表的なプロセスとしては、このスプレードライヤ法他、ボイラ・煙道への石灰吹き込み法が挙げられる。いずれも脱硫剤としては主に石灰が使用され、後流の集じん器によりフライアッシュと共に回収され、使用済み脱硫剤は廃棄される。

スプレードライヤ法は、生石灰(CaO)に水を加えて製造した消石灰(Ca(OH)₂)スラリーをスプレードライヤ内に噴霧して排ガス中の硫黄酸化物を除去する方式である。

また、集じん器内の捕集脱硫剤による脱硫効果により90%の脱硫効率を得ているシステムもある。

ボイラ・煙道への石灰吹き込み法は、石灰の粉末をボイラまたは煙道に吹き込み脱硫を行う方式である。吹き込みのみでは脱硫効率が45~50%と低く、石灰利用率も低いため、集じん器の前に脱硫塔を設置し、水を噴霧して加湿することにより性能の向上を図っているプロセスもある。

これらの簡易脱硫技術では、石灰に添加物を加え、脱硫効率の向上や同時脱硫脱硝効果を狙ったプロセスも開発が進められており、今後、高性能化が一層進むであろう。

3-1-4 石炭の燃焼前の脱硫・脱灰技術

現在の石炭火力発電においては、石炭中の硫黄分や灰分は燃焼後に除かれている。前述のようにほぼ成熟した技術になってきており、低硫黄炭を使用する現状の石炭火力発電においては十二分に対応できる技術レベルにある。しかし、今後は高硫黄炭の利用などが予想されることから、燃焼前の脱硫・脱灰も重要視されてくるであろう。

燃焼前脱硫・脱灰技術は、石炭を燃やす前に直接硫黄分や灰分を取り除き、クリーンな燃料にするもので、“コールクリーニング技術”と総称されている。この技術は、もともと産炭地で掘り出した石炭から鉱物質などの不純物を取り除く「選炭」と呼ばれる供給者側の技術として用いられてきた。しかし、最近では、石炭利用の多様化に合わせて石炭を使い易く加工する消費者側の技術として研究されるようになってきた。この技術により、石炭を発電用の燃料としてばかりでなく、ディーゼル機関やガスタービン用燃料、各種の化学原料などとして利用することも可能になるだろう。

このコールクリーニング技術は、物理的、化学的、生物的技術に分けられる。当研究所では、このうち生物的コールクリーニングについて研究を進めているが、ここでは他の技術についても合わせて、その開発状況を紹介する。

(1) 物理的コールクリーニング

石炭の硫黄分には、黄鉄鉱の形で含まれている無機硫黄と、石炭質と結合して含まれている有機硫黄がある。このうち物理的コールクリーニング技術は、主に黄鉄鉱を硫黄分や灰分の比重や表面の濡れ性などの物理的性質の違いによって除去する方法である。従来、産炭地で行う選炭では、主に比重の差を利用した比重選別が用いられてきた。しかし、さらに精度良く除去するには、石炭を細かく砕いて石炭質と硫黄分、灰分などをバラバラにし、分別させる必要がある。ところが、このように細かく微粉碎すると比重の差で分離することが難しくなる。そこで、表3-1-3に示すような微粉炭を対象とした浮遊選炭、選択凝集、磁性選別などが研究されている。

これらの方法は、まだ検討例が少なく脱硫・脱灰率も報告例にかなり幅があることから、現状では優劣をつけ難い。しかし、選択凝集は、石炭を補集するための軽質油などを大量に使用するため経済的に不利な面がある。また、磁性選別は、磁性を持つ黄鉄鉱硫黄は除去し易いが、灰分の除去率が低いという短所を持つ。

一方、浮遊選炭は、補集油の量も少なく、選炭機の形状を改良することにより分離能力を向上させることも可能である。既にパイロットプラントまでスケールアップされた例があることから、この中では最も将来性のある技術であると考えられる。

物理的コールクリーニング技術は、短時間に、低費用である程度の硫黄分や灰分を除ける点で有望な技術といえる。しかしながら、あくまでも石炭質と分離している黄鉄鉱と灰分を分別するものであり、石炭質と結合している有機硫黄は脱硫できない欠点がある。

(2) 化学的コールクリーニング

この技術は、硫黄分や灰分を化学反応によって溶かし出して脱硫・脱灰する技術である。表3-1-3のように、脱硫に利用する化学反応の種類によってアルカリ浸出、金属塩溶液浸出、湿式酸化、塩素化分解、マイクロ波処理などに類別される。

化学的コールクリーニング技術は、短時間で高い脱硫・脱灰率が得られる長所を持つ反面、石炭質の損失・

表3-1-3 物理・化学的コールクリーニング技術

	技術名	技術の概要	進捗度	脱硫度		脱灰度
				黄鉄鉱	有機	
物理的 コールクリーニング 技術	浮遊選炭	石炭の水に対する濡れにくさ、硫黄分や灰分の濡れ易さの違いを利用して分別する	パイロットプラント	○	×	◎
	選択凝集	石炭の油に対する濡れ易さ、硫黄分や灰分の濡れにくさの違いを利用して分別する。	パイロットプラント	○	×	◎
	磁性選別	磁性を持つ黄鉄鉱と磁性を持たない石炭とを磁力で分別する	実験室, パイロットプラント	○	×	△
化学的 コールクリーニング 技術	アルカリ浸出	水酸化ナトリウム等により硫黄分を可溶性の硫化ナトリウムに変えて脱硫する	全て実験室 規模	◎	◎	◎
	金属塩溶液浸出	塩化銅、鉄や硫酸第二鉄等により硫黄分を可溶性の硫酸塩に変えて脱硫する		◎	○	◎
	湿式酸化	酸素や過マンガン酸カリウム等により硫黄分を酸化して可溶性の硫酸塩に変えて脱硫する		◎	◎	○
	塩素化分解	塩素ガスにより硫黄分を塩素化した後、水により中和して塩酸や硫酸塩に変えて脱硫する		○	◎	△
	マイクロ波処理	石炭とアルカリ溶液を混合し、マイクロ波を照射して加熱し、硫黄を硫化ナトリウムに変えて脱硫する		○	○	△

文献調査の結果、脱硫度・脱灰度を、◎：非常に良い、○：良い、△：良くない、×：できないの4段階に分けて示した。

変質が起こること、また大量の化学薬品や高温・高圧条件を必要とするために処理費が高い短所を持つ。今のところ、実験室レベルで検討されている段階であり、その将来性を一様に評価するのは難しい。

アルカリ浸出は、ほぼ完全に脱硫・脱灰できることから、特に低硫黄・低灰分炭を必要とする場合に有効である。また、高い脱硫・脱灰効果は望めないが、比較的経済性が高く、石炭質の損失が少ない金属塩溶液浸出、湿式酸化が有利であると考えられる。

(3) 生物的コールクリーニング

この技術は、微生物の作用によって硫黄分を取り除くもので、表3-1-4のように、酸化浸出と表面処理の2種類の方法がある。

酸化浸出は、微生物が硫黄分を酸化する能力を直接利

用する方法である。すなわち、微生物により硫黄分を酸化し、硫酸に変えて水に溶かし出して石炭から脱硫する。微生物の中には、黄鉄鉱と有機硫黄のいずれか、もしくは両方を溶かし出す能力を持つ種類があり、目的に合わせて選択することができる。

この酸化浸出の最も簡便な適用例としては、ヒープリーチングが挙げられる。これは、貯炭場に野積みした石炭の山の上から微生物を含む液を散水するだけの簡単な方法で、水が石炭の間を浸透する間に微生物によって脱硫され、生成した硫酸は水とともに底部に移動し、石炭から除かれる。ヒープリーチングは簡単で経済的にも優れるが、脱硫に数カ月という長い時間を要する欠点がある。このため、大量の石炭を連続的に消費する発電所などに利用することは難しい。

一方、当研究所が開発を進めている方法は、脱硫時間

表3-1-4 生物的コールクリーニング技術

技術名	技術の概要	長所・短所	適用法	脱硫度		脱灰度
				黄鉄鉱	有機	
酸化浸出	微生物の働きにより硫黄分を酸化し、可溶性の硫酸に変えて溶かします	<ul style="list-style-type: none"> ・処理費が安価 ・有機硫黄の脱硫が可能 ・脱硫時間が長い 	・貯炭場でのヒープリーチング	◎	○	△
表面処理	水に濡れにくい黄鉄鉱に微生物を吸着させることにより、水に濡れ易い性質に変え、水に濡れにくい石炭と浮遊選炭で分別する	<ul style="list-style-type: none"> ・脱硫時間が短い ・処理費が安価 ・有機硫黄を脱硫できない 	・石炭-水スラリーの前処理法	◎	×	◎

文献調査の結果、脱硫度・脱灰度を、◎：非常に良い、○：良い、△：良くない、×：できないの4段階に分けて示した。



図3-1-8 微生物による表面処理の原理

浮遊選炭で水に微生物を混ぜると、黄鉄鉱（硫黄分）に微生物が吸着して、水になじみやすくなって沈む。
一方、石炭は水をはじくため、気泡に付着して浮く。この浮き沈みにより、硫黄分を分離する。

の短縮を目的として、微生物の作用を、物理的コールクリーニング技術の一つ浮遊選炭に応用したものである。その原理を図3-1-8に示す。微粉炭と水を混ぜ、その懸濁液に下から微細な空気を吹き込むと、石炭と黄鉄鉱はともに水をはじく性質を持っているので空気の泡に付着して浮き上がり水面に集まってしまう分別しにくい。とこ

ろが、鉄酸化細菌と呼ばれる微生物を使うと、この微生物はもともと黄鉄鉱を酸化して生きるために黄鉄鉱に吸着しやすい性質を持っており、直ちに石炭質と混合している黄鉄鉱の粒子に吸着する。その結果、黄鉄鉱の表面は微生物によって覆われ、水をはじく性質から水になじむ性質に変わり、気泡が付着しにくくなって底に沈む。

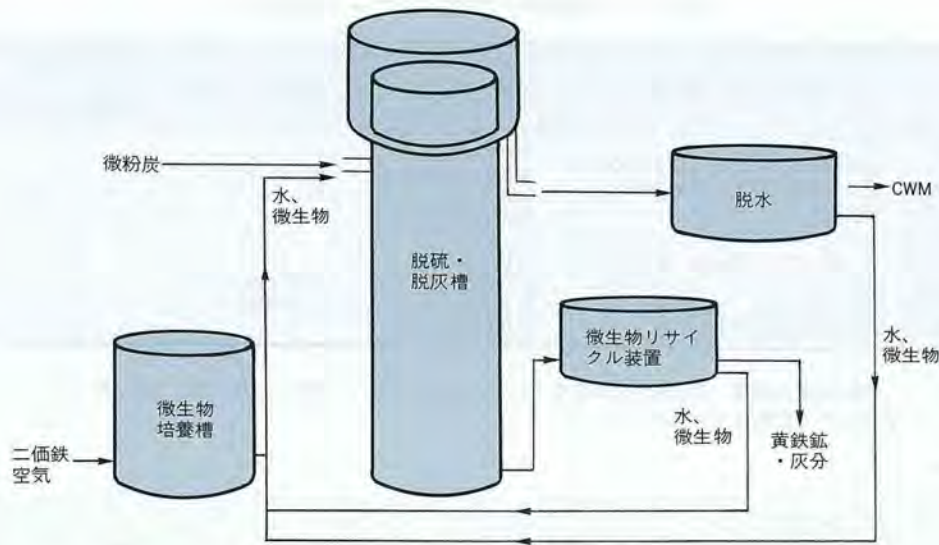


図3-1-9 微生物による表面処理による脱硫システムのイメージ

微粉炭は、微生物培養槽で生産された微生物を含む水と混ぜられ、脱硫・脱灰槽に導かれて微生物の作用を利用して脱硫・脱灰される。その後、脱水されてCWM（石炭-水スラリー）になる。一方、分別された黄鉄鉱および灰分は、水とともに槽底部から抜き出され、微生物リサイクル装置によって微生物を回収した後、除去される。また、回収された微生物は、再利用される。

一方、石炭質には微生物が吸着しにくいいため気泡が付着して浮き上がる。この浮き沈みによって両者分別することができる。

このように、微生物を使って黄鉄鉱の表面の性質を変えて分別することから、この方法は表面処理と呼ばれている。微生物が黄鉄鉱を溶かし出す必要がなく、吸着するだけで済むことから、脱硫に要する時間を数分の単位まで短縮でき、浮遊選炭を行うので灰分も同時に除去できる利点もある。

この方法は、微粉炭と水を混ぜて行うことから、近年既に実用化段階にある石炭・水スラリー燃料（CWM）用の脱硫・脱灰処理技術として適用できる可能性がある。図3-1-9に示すように、特に産炭地でのCWMの製造工程中にこの表面処理を組み込むことによって低硫黄、低灰分のクリーンな燃料を安価に製造することができる。

この処理法は、まだ原理的に実現性のあることを確かめた段階であり、実規模レベルまでスケールアップするためには、効率良く脱硫・脱灰する条件や微生物の大量生産法、さらに、一度使った微生物を繰り返して使う方

法などの検討が必要と考えている。

(4) 各コールクリーニング技術の比較

各技術の比較評価を表3-1-5に示す。脱硫・脱灰に大量の化学薬品を必要とせず、常温・常圧で行える物理的および生物的方法が経済的に有利である。このうち、生物的方法は微生物生産に費用がかかるため、物理的方法が最も経済性に優れており、

物理的<生物的<化学的
の順で処理費が高くなると予想される。

一方、物理および生物的方法の一部は、有機硫黄を脱硫できないので、

物理的<生物的<化学的
順で脱硫・脱灰率は高くなる。

したがって、生物的方法は、物理・化学的方法と比べ、比較的脱硫率も良く、安価な技術であると考えられることができる。

一方、これらの技術の実現性は、現状の研究開発の進捗度や技術的難易度から、物理的方法が最も高く、実用

表3-1-5 各コールクリーニング技術の比較

	経済性 高い ← → 低い			脱硫・脱灰率 低い ← → 高い
技術名	物理的コールクリーニング	生物的コールクリーニング	化学的コールクリーニング	
問題、改良点	有機硫黄は脱硫できない。	浸出法は、脱硫時間が長く、表面処理法は、有機硫黄は脱硫できない。	処理費が高価。石炭質の変質や損失の問題がある。	
脱硫・脱灰炭の用途	発電用炭：ガス化、CWM（石炭－水スラリー） 一般燃料用炭	発電用炭：ガス化、CWM（石炭－水スラリー） 一般燃料用炭	ディーゼル機関用燃料 ガスタービン用燃料 各種化学原料	

化に近い位置にあり、次いで生物、化学的方法の順となる。

なお、これらの技術により脱硫・脱灰された石炭の用途は、それぞれのコールクリーニングに要した費用と生産炭の硫黄分・灰分の含有量によって変わるものと考えられる。たとえば、物理、生物的方法によってある程度の硫黄分と灰分を除去した石炭は、従来の発電用炭や一般ユーザー向けの燃料炭としての利用や、新しい石炭の利用法であるガス化、CWM用炭などとしての用途が考えられる。一方、化学的方法によってほぼ完全に脱硫・

脱灰した石炭は、付加価値の高いディーゼル機関・ガスタービン用燃料や各種化学原料として使用するのが望ましい。

また、石炭は、炭種によって硫黄分や灰分の含量や形態が異なるため、各コールクリーニング技術によって脱硫・脱灰のし易さも、炭種によって変わることにも留意しなければならない。したがって、燃焼前脱硫・脱灰を行う際には、炭種の性状やその使用目的によって、経済性に見合った適切なコールクリーニング技術を選択する必要がある。

3-2 石炭灰の有効利用

石炭火力発電所からは、燃焼した石炭の15~20%が石炭灰となって排出し、全国大では毎年約400万トンの石炭灰が発生している。

最近の資料によれば、石炭灰は全発生量の約45%が有効利用されており、残りの約55%が陸上あるいは海面埋立てにより処分されている。

有効利用の用途としては、後述するようにセメント・コンクリート分野への利用が最も多い。

一方、陸上あるいは海面に埋め立てられる石炭灰については、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」に基づいて、管理型の処分場として定められた構造基準と維持管理基準にしたがって処分されている。

ちなみに、1987年には全世界で約3億8,000万トンの石炭灰が発生し、そのうち6,200万トン、率にして16%が有効利用されている。

3-2-1 石炭灰の性質と有効利用技術の概要

(1) 石炭灰の性質

石炭灰は、発電システムの中の発生箇所別にクリンカーアッシュ、シンダーアッシュ、フライアッシュの3種類に大別される。

クリンカーアッシュは、ボイラの炉底に落下し、水で急冷された塊状の灰である。シンダーアッシュは、ボイラから排ガスとともに排出され、節炭器と空気予熱器を通過する際に落下した粗粒灰であり、フライアッシュは、排煙処理システム内の電気集じん器で捕集された細粒灰である。石炭灰全体に占めるそれぞれの割合は、クリンカーアッシュ10~15%、シンダーアッシュ3~7%、フラ

イアッシュ80~90%である。

石炭灰は灰白色であるが、未燃分（未燃炭素）の多い灰は黒みを帯びている。灰粒子の大きさは、クリンカーアッシュが0.1~10mm、シンダーアッシュが0.1~1mm程度である。発生量の最も多いフライアッシュは、90%以上が0.1mm以下の細粉であり、きれいな球形の粒子が多い。このため流動性・反応性がよく、その一部がセメントの原材料や混和材として利用されている。石炭灰の真比重は2.0~2.2程度であり、普通の土砂の比重2.6程度よりも多少軽い。粒子間に空気あるいは水を保有している状態での見掛けの比重は、0.8~1.0程度である。

石炭灰の化学組成は、土壌の無機成分と似通っており、主成分はシリカ (SiO_2) とアルミナ (Al_2O_3) であり、この二つで70~80%を占める。そのほか鉄 (Fe_2O_3) やアルカリ・アルカリ土類金属の酸化物 (Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO)、ホウ素やクロムなどの微量元素が含まれている。

石炭灰を水中に投入すると、多くの場合、その水はアルカリ性を呈する。これはアルカリ・アルカリ土類金属の酸化物が溶解するためであり、中でも、含有量の多い酸化カルシウム (CaO) の寄与が大きい。

(2) 石炭灰の有効利用

石炭灰の有効利用としては、セメント・コンクリート分野への利用が最も多く、全有効利用量の60~70%程度を占めている。次いで、鉱山充填用、道路、人工軽量骨材、農業、埋め戻し材などに利用されている。

石炭灰のうちクリンカーアッシュは、砂とほぼ同等の土質工学的性質を有しており、現在のところ、利用に際しての特段の技術開発は必要とされていないようである。

一方、フライアッシュは、炭種や燃焼条件などによって性質が大きく異なり、また、粉状であり取扱いも容易でないことから有効利用に際しては十分な検討が必要になってくる。石炭灰、特にフライアッシュの利用方法としては、安価でかつ大量に使用する方法が望ましく、今後、石炭火力発電所が増加していくと予想されるなかで、石炭灰の埋立処分量の低減と資源の有効利用の観点からも石炭灰のより有効な利用技術の開発が期待されている。

図3-2-1は、研究段階にあるものも含めて、石炭灰の有効利用の例を示したものである。このうち、セメント・

コンクリート分野、土木分野の道路、農業分野の肥料への利用および石炭灰埋立地の緑化について、以下に概要を紹介する。

3-2-2 セメント・コンクリート分野への利用

(1) 利用の現状

セメントやコンクリート分野での石炭灰の利用は、図3-2-2に示すように、セメント製造の際の原料や混合材として、あるいはコンクリートの混和材として広く利用さ

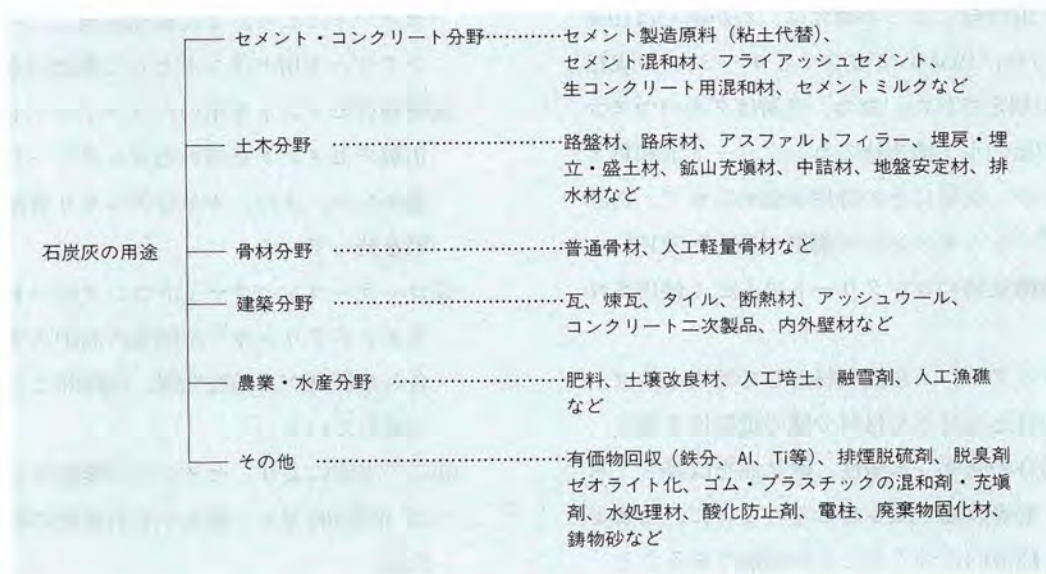


図3-2-1 石炭の用途

石炭灰の用途を分野別に示したもので、セメント分野が60～70%、土木分野が20～30%を占める。

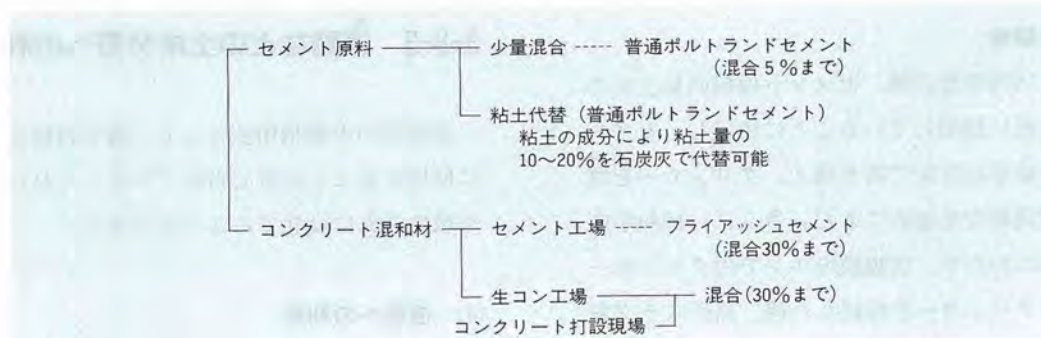


図3-2-2 セメント・コンクリート分野での利用

石炭灰のセメント・コンクリート分野での利用を大きく分類したもの

れ、年間に発生する石炭灰約400万トンの30%、123万トンに達している。このうち、セメント原料(粘土の代替)として88万トン、コンクリート混和材として35万トンが利用されている。

セメント原料としての使用は、普通ポルトランドセメントの原料として5%までの混合が許されている。また、粘土代替原料としてクリンカーアッシュやフライアッシュが粘土量の10~20%用いられている。さらに、セメント製造の主原料の粘土、その他の全量をフライアッシュで代替する新複合セメントも経済性があり、実用化が期待されている。

コンクリート混和材としての研究は、わが国では1950年頃から始められ、1958年にはフライアッシュの規格(JIS A 6201)が制定された。また、当初はダムのマスコンクリートその他の水工構造物のコンクリート混和材として用いられたが、次第にその特性が認められて、1960年にはフライアッシュセメントの規格(JIS R 5213)も制定され、一般構造物のコンクリートにも広く使用されるに至った。

一般に、フライアッシュを混和材として使用すれば、コンクリートの打込み易さや材料分離の抵抗性を増し、長期的にみた場合の強度、水密性、耐久性を改善し、水和熱を緩和し、乾燥収縮を減少させる。さらに、所要のコンクリートを経済的につくることが可能であること、アルカリ骨材反応が抑制できることなどの多くの利点を持っていることが明らかにされている。今後、生コンクリートへのフライアッシュの利用も大いに期待される。

(2) 当研究所の研究

当研究所は、1979年度以降、セメント原料の粘土分の化学組成が石炭灰に類似していることに注目し、セメント原料の粘土全量を石炭灰で置き換え、クリンカーを焼成する方法の開発研究を進めてきた。さらに、1984年度からは、3カ年にわたり、実規模キルンでのクリンカーの焼成を行い、クリンカーを粉砕した後、高炉スラグ粉末と混合することにより、新複合セメントを試製してきた。また、このセメントを用いてコンクリートを製造し、諸試験を行い、コンクリートの短期性状を明らかにする

とともに、コンクリートの強度や化学組成などの5年間にわたる変化やアルカリ骨材反応性、ローラーコンパクテッドコンクリートへの適用性を検討し、次のような結果を得ている。

- ①石炭灰中の未燃分がキルン中で燃焼することにより燃料費の節約が図れる。
- ②フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの諸性質は、いずれも市販されている高炉セメントと同等以上の特性を持っている。
- ③スラグを25%混合したものは軟弱地盤の安定用セメントとして、45%混合したものは普通ポルトランドセメントとして、また65%混合したものは、マスコンクリート用セメントとして使用できる。
- ④新複合セメントを用いたコンクリートの長期性状は、市販のセメントを用いたコンクリートと比較して遜色がない。また、十分なアルカリ骨材反応の抑制効果を持っている。
- ⑤ローラーコンパクテッドコンクリートには、新複合セメントクリンカーに65%の高炉スラグ微粉末を混合した種別が、強度発現、水和熱などの観点から最も適している。
- ⑥この方法により、セメントの製造を工業規模で行えば、年間400万トン発生する石炭灰の有効利用が図られる。

これらにより、石炭灰を原料とした新複合セメントの有効性が確認されたものと考えており、今後の実用化に期待したい。

3-2-3 道路などの土木分野への利用

石炭灰の大量利用法として、盛立材料として土の代りに使用することが考えられている。これにより道路建設や敷地造成に役立てることができる。

(1) 道路への利用

道路の構造は、図3-2-3のように舗装と路床からなる。舗装はさらに表層、基層、路盤に分けられ、表層や基層はアスファルトコンクリートやセメントコンクリートに

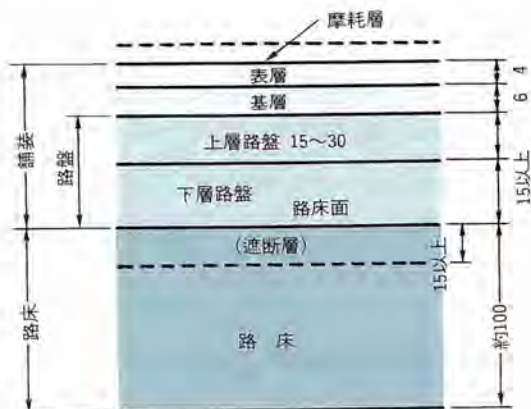


図3-2-3 道路舗装の代表的構造
(土質工学ハンドブックより)

より造られる。路盤は厚さ数10cmで、上層路盤と下層路盤に分けられることもある。路床は約1mの厚さで、一般に自然地盤もしくは盛土などによって構成される。この他道路基礎部の凍結と融解による軟弱化を防止するため遮断層が設けられることがあり、粗粒材料からなることが多い。

表層、基層、上層路盤はアスファルト、セメント、碎石などからなるため石炭灰を利用することはできないが、わが国では摩耗を減少させるためアスファルト中に混入させるフィラーとして石粉と同様にフライアッシュを使用できる。また遮断層にもクリンカーアッシュが砂礫などと同様使用できる。しかしこれらは利用量としては少ない。

下層路盤もしくは路盤と路床については石炭灰が利用でき、しかも大量となることが期待されており、わが国ではフライアッシュにセメントを混ぜる方法が検討されている。この場合、力学的な必要条件是満たされるが、フライアッシュの品質と供給体制をいかに確保するか、煩雑な現場での含水調整や混合作業をどう行うか、現場での養生時間が約3日と長いことなどが課題となっており、市場性と現地作業性を考えていかなければならない。なお、これに類するものとして、セメントと石灰を加えて造粒化し粒度調整して路盤材料とする方法も考案されている。

海外での路盤材の研究としては、やはりセメントや石

灰を混合させて安定処理する方法が盛んに用いられている。この場合、さらに品質を向上させるため碎石を用いたり、現地で発生する土を混合して有効利用するなどが研究されている。また、新生灰だけでなく既生灰をも利用する方法が検討されている。海外では室内試験だけでなくモニタリング、マニュアル化や経済性についても検討されており、実施工例も増えてきて、単なるデモンストレーションから実用化プロジェクトに移ってきている段階にある。

また、路床となる現地の土が軟弱なとき、石炭灰で置き換えることが考えられる。海外ではフライアッシュ単体を使用した例や、フライアッシュを混入して現地の土を改良する例がある。一般にアメリカではCクラスと呼ばれる瀝青炭などの灰が多く、これはカルシウムを多く含んでいる。このため固結力が強く、改良のための添加剤として使用されると考えられる。一方、わが国では褐炭などのFクラスの灰が多く、これはカルシウム分が少ないので、改良効果は低いと思われる。

(2) 盛立および埋立材料

道路など路線構造物のための盛立や敷地造成のための埋立への利用も多く検討されている。埋立てでは陸上もしくは海岸でのケースが考えられるが、海岸では水中に石炭灰を投入していく方法が考えられ、陸上と造成作業が異なる。しかし、上部構造物の種類に応じて材料をできるだけ高密度にして変形しにくくし、強度が大きくなるようにするのが原則である。

陸上で、盛立や埋立を行った所を資材置場として使う程度であれば、ブルドーザーの敷き均し作業程度で十分な場合もある。しかし、一般に図3-2-4のように、石炭灰も締固めにより高密度になり力学的性質も改善されるので、跡地利用方策によっては締固めを行ったほうがよい。

海岸部での埋立では、水中に投入すると密度が低くなることが考えられる。このとき地盤は変形しやすく強度が小さいので基礎の支持力が低くなる。さらに、地震による液状化現象についても考える必要がある。石炭灰も液状化の面では砂と同じような性質があるので、できるだけ高密度になるように埋立てるか、埋立後に地盤改良

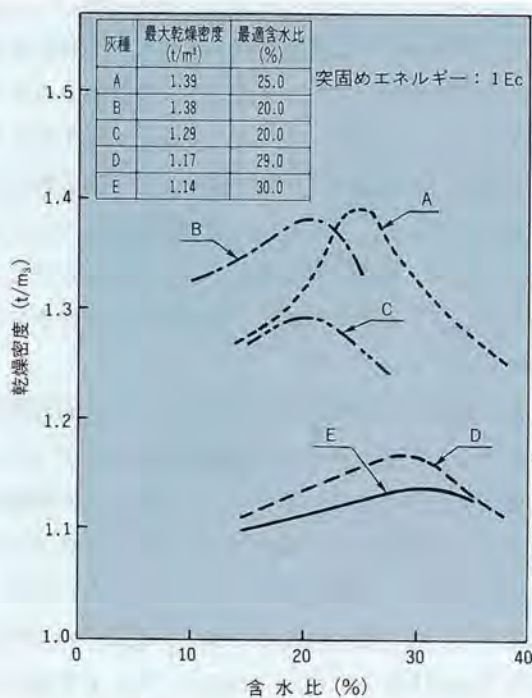


図3-2-4 締固めによる石炭灰の密度変化

締固めするとき、そのエネルギーを一定にして含水状態を変えると、密度が変化するので、灰種毎にピークの現れる近傍で施工するのが効率的となる。

する必要がある。

埋立時に高密度になるように考案されたのが高密度スラリー方式である。これは、事前に水と石炭灰をできるだけ高密度のスラリー状にしておき、水底で水と置き換えるようにスラリーを沈殿させる方式であり、水中での密度変化はほとんど起きないものである。場合によってはスラリーにセメントなどを加えて硬化させることもできる。このようなセメントスラリー方式は、単なる水中埋立てだけでなくグラウト、廃坑の埋立て、管路の埋戻しなどにも応用できる。

埋立て後に地盤改良を行う方法には多くの方法があるが、実際に効果を確認したものとしては、振動により砂柱を地盤中に作るサンドコンパクション法および重錘を地上から落下させる動圧密工法がある。これらは一般に経済的で確実な工法として知られている。

以上のように、土木分野への利用はいくつか考えられているが、力学的条件、施工性、経済性のほか、供給能

力や市場性が検討課題といえよう。また、海外では新生灰だけでなく既生灰の利用も検討されており、特に高度な技術を要しない大量利用の場合には既生灰が、また、セメント分野への利用やアスファルトフィラーなどは新生灰が適当であるという考え方もでてきている。今後、石炭灰の利用を、システムチックに考えていく必要があるだろう。

3-2-4 石炭灰の肥料への利用

石炭灰の農業分野への利用は、現在のところわずかであるが、これまでに得られた知見から、肥料として非常に有望な資源と考えられる。

ここでは農業への利用の現状と当研究所で実施している「けい酸加里肥料」、「石炭灰化成肥料」の研究成果の一部を紹介する。なお、石炭灰の農業への利用状況は表3-2-1に示す通りである。

(1) けい酸加里肥料としての利用

けい酸加里肥料はフライアッシュ60～70%とカリウム30～40%を混合したものである。フライアッシュには50～60%のケイ酸（シリカ、SiO₂）が含まれているが、このけい酸は極めて溶けにくく、そのままでは作物に吸収されにくい。そこで、これを可溶化し、作物に有効に

表3-2-1 石炭灰の農業への利用（トン）

用途	年度		
	昭63	平1	平2
けい酸加里	43,085	46,025	49,182
微粉炭燃焼灰	3,941	23,700	17,658
人口培土	年間10,000以上（実態は不明）		
化成肥料	—		

農業分野への石炭灰の利用量としては、けい酸加里肥料としての利用が最も多く、主に水稻の加里質肥料として用いられている。ついては微粉炭燃焼灰（特殊肥料）であり、主な肥料成分はホウ素であるが、土壌改良資材や融雪材としても用いられている。人口培土は最近になって急増しているもので水稻の育苗用培土として用いられている。化成肥料は、窒素、りん酸および加里の三要素を含む複合肥料の一つである。主にアブラナ科野菜、ジャガイモ等に肥効が認められ、平成4年度は約800トン近くが製造・販売され、今後急増すると予想されている。

利用させることと、水溶性のカリウムの溶出速度を抑えて緩効性のカリウムにするよう処理することで開発されたものが「けい酸加里肥料」である。

この肥料は世界初の緩効性加里肥料として評価されており、当研究所は原理の発明、製造法の検討および肥効試験を実施して、その実用化を図ってきた。このけい酸加里肥料は主に水稲用の加里質肥料として用いられており、稔実が良く登熟歩合が高まり、倒伏や稲熱病などの軽減効果が認められている。現在も試験が継続して行われ、イチゴ、トマト、レタス、その他の野菜用にも肥効があり、収量の増加、品質の向上ならびに病害の軽減効果が認められている。

(2) 化成肥料としての利用

フライアッシュの中には、植物の成長に欠かせないホウ素やモリブデンなどの微量元素が含まれている。当研究所では、窒素、りん酸、カリの肥料3要素に、このフライアッシュを10%程度混ぜた化成肥料の製造法を開発して、その肥効試験を実施してきた。

試験は1989年から当研究所をはじめ、福島、千葉、群馬県の各農業試験場、日本肥糧検定協会および群馬、千葉、茨城県の農業改良普及所で実施しており、キャベツ、ハクサイ、ナガイモ、レンコンなどの野菜および水稲の14作物で延べ43の試験例のうち、従来の化成肥料に比べてやや不良（収量指数97以下）は僅かに4例のみであり、ほとんどの例が同等（収量指数98～102）以上であり、収量の増加が認められている。

品質面からみると、キャベツなどでは収穫後の鮮度保持効果が高い傾向が認められ、ダイコン、ジャガイモ、ナガイモおよびレンコンなどでは、肌が白く、つやがあり、また、糖度が増加する。さらにジャガイモの粉状そうか病、ナガイモの褐色腐敗病、同根腐病、キャベツ、ハクサイの根こぶ病などが軽減される傾向が認められている。

(3) 微粉炭燃焼灰としての利用

肥料取締法では、石炭灰は微粉炭燃焼灰と呼ばれ、特殊肥料に指定されており、そのまま利用することもでき

る。この肥料取締法で、肥料に使用できる石炭灰は「石炭火力発電所において微粉炭を燃焼する際に生ずる熔融された灰で煙道の気流中および燃焼室の底の部分から採取されるもの（フライアッシュ）をいう。ただし、燃焼室の底の部分から採取されるもの（クリンカーアッシュ）にあつては、3mmの網ふるいを全通するものに限る」などの規程が設けられている。

肥料としての有効成分は、ホウ素である。この微粉炭燃焼灰は、1965年前後には、全国各地で年間約10万トンも利用されていたが、燃料の石炭から石油への移行に伴い減少し、1990年度は約1.7万トンである。現在は、土壤改良効果と融雪を兼ねて豪雪地帯の農地やゴルフ場などに利用されている。

(4) 人工培土としての利用

田植機の普及につれ育苗用床土の確保が問題となっている。従来は山土や水田土を利用していたが、最近では、床土の原料である山土の不足から代替え資材として石炭灰が利用されるようになった。

石炭灰の人工培土への利用は約1万トン程度とみられている。石炭灰に塩化アンモニウム、塩化加里溶液を加え混合し、乾燥した後に石灰を添加して養生、酸処理をへて分級して製品化する石炭灰培土が開発され、花き栽培、ゴルフ場の土壤改良材および農薬吸着剤などへ利用され成果をあげている。

(5) その他の利用

石炭灰に水酸化ナトリウムを加え、スラリーとした後、熱を加えて反応させ、過剰の水酸化ナトリウムを水で洗浄除去して風乾するプロセスで人工ゼオライトが合成されている。この人工ゼオライトは塩基置換容量（CEC）が極めて大きいことから土壤改良材、農薬吸着剤、畜産廃棄物処理資材および砂漠の緑化などに有望視されている。

3-2-5 石炭灰埋立地の緑化

石炭灰の埋立地では、灰の飛散や流亡を防ぐため覆土

表3-2-2 石炭灰上での牧草類の生育状況

良 好	中 程 度	不 良
シロクローバ アルサイククローバ アカクローバ ベレニアルライグラス ローズグラス	アルファルファ エンバク イタリアンライグラス ハトムギ	チモシー リードカナリーグラス トールフェスク メドウフェスク オーチャードグラス ケンタッキーブルーグラス ライ麦 シコクビエ

対照（砂土）で生育した地上部の乾物重量に対して、石炭灰で生育した乾物重量の比が0.85以上を良好、0.7を下回るものを不良として分類。

されているが、埋立地の大部分は、未利用のままにあるのが現状である。このよう埋立地の景観回復対策としての緑化は、埋立地の有効活用の促進にもつながるものである。

わが国の土壌は酸性であるが、国内で得られる石炭灰の大部分はアルカリ性で、土壌と石炭灰とではその性状が異なる。埋立地では石炭灰が露出する部分や覆土が石炭灰と混合する部分あるいは覆土の薄い部分もあり、植物の根が石炭灰に接触する機会は多い。

埋立が完了した直後の埋立地の覆土は、重機で整地され、締め固められているため非常に硬く、植生は極めて貧弱である。埋立てが完了してから年数が経過するとともに種々の植物が侵入し、自然に放置した状態では次第に樹木も見られるようになるが、植生がこのようになるまでには長い年月を要する。

石炭灰埋立地は、面積が大きいこと、埋立が完了するまでに長時間を要することから、ふんじん防止対策を兼ねて植生回復を早期に図ることが望ましい。この一環と

して、牧草類の種子の吹き付け緑化が部分的に行われている。このような場合、牧草類の中でも石炭灰に耐性あるいは適応性を示す植物を選択することが被覆効率あるいは緑化目標を効率よく達成する重要な鍵となる。

表3-2-2にイネ科とマメ科の牧草類について、石炭灰上での生育状況をポット栽培試験で比較検討した結果を示す。マメ科植物の中ではクローバ類が施肥しなくても石炭灰の上での生育が良好である。イネ科の中ではライグラス類が他の植物よりも生育は良好である。一方、イネ科の植物は無施肥では生育が全般的に貧弱で、無施肥でも生育が良好なマメ科牧草とはまったく生育反応が異なっている。

これらの結果から、石炭灰に接触する機会の多い埋立地を草本植物で緑化する場合には、イネ科の牧草を中心にした種子を用いるよりもマメ科のクローバ類を主にして、これにライグラス類を組み合わせる方が効率が良い結果が得られるといえる。

3-3 貯炭管理

3-3-1 自然発火対策

貯炭パイルにおける自然発火は、石炭の利用とともに古くから生じていたが、ブルドーザやスクレーパなどを用いた圧縮貯炭によって、貯炭パイル内へ空気が入らないようにして酸化発熱を抑えて、自然発火を防いできた。

しかし、石炭の復権とともに大量使用にともなうハンドリングの自動化が求められるようになり、スタッカ、リクレーマなどによる機械化された積込み、払出しシステムが採用されるようになった（図3-3-4参照）。この結果、貯炭パイルは自然積みとなり、パイル内部の空気の流通がよくなることから、自然発火が懸念されるようになった。このような経緯から、大量貯炭に見合った石炭

自然発火の予知が必要となり、当研究所は電源開発㈱と共同で自然発火発生過程の解明と防止対策の検討、さらに自然発火予知システムの開発を進めてきた。

これまでの研究で、石炭の自然発火は図3-3-1に示すような発生過程を経ることが明らかになった。まず、石炭の低温酸化による発熱が貯炭パイルの温度を80～90℃まで上昇させ、次にパイル内の水分蒸発による放熱と酸化発熱とがバランスしてほぼ一定温度を示す。この温度一定保持の間にパイル内部の乾燥が進み、乾燥部分がある程度拡大すると、放熱が生じないことから温度上昇が再び進み、これにより酸化発熱が大きくなることから自然発火に至る。

この発生過程から、自然発火の防止対策として次の二つが考えられる。

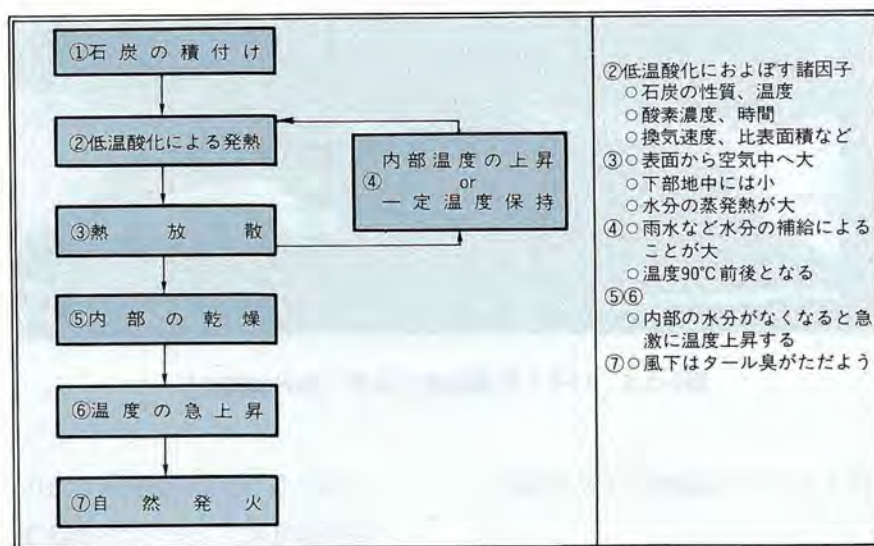


図3-3-1 石炭の自然発火過程

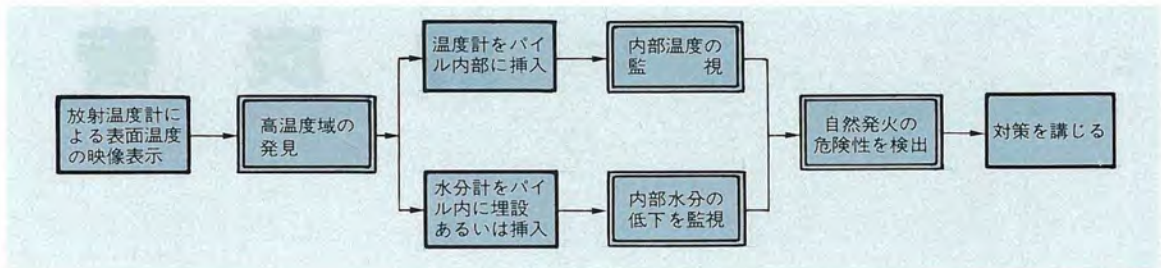


図3-3-2 自然発火予知システムの基本構成

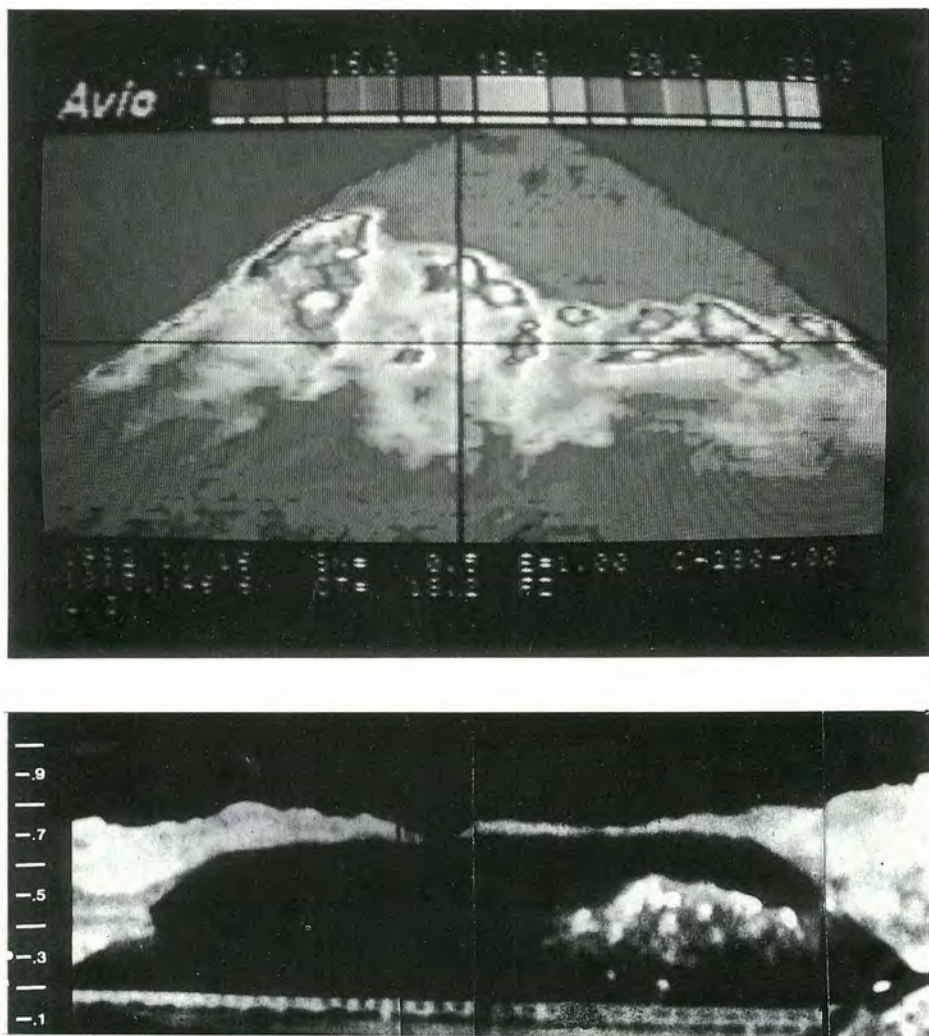


図3-3-3 パイル表面温度の分布（赤外線画像）

- ①パイル内に空気を流入させず、低温酸化を防ぎ発熱させない。
- ②熱放散させて、パイル内温度を90℃程度の温度に維持する。

このうち、①は圧縮貯炭、水中貯炭およびサイロなどの容器内貯炭、あるいは界面活性剤などによる表面コーティングがあげられるが、大量貯炭への適用は難しい。②はパイル内へ水分を補給して乾燥を防ぐことが考えら

れるが、石炭が濡れにくく、また大量貯炭では用水の確保も課題となる。

これらのことから、大量貯炭における自然発火の予知方法として、リモートセンシング技術を用いたシステムを開発した。システムの基本構成は図3-3-2に示すように、貯炭パイル内部の発熱が熱伝導によって表面に伝わって生じるパイル表面温度の分布を、図3-3-3に示すように、赤外線温度画像装置によって検知し、内部の高温域を推定する。この後、この高温域の温度および水分をデータ伝送により連続的測定して自然発火の可能性を監視するもので、その可能性が有る場合には、散水などの措置を講ずる。

このシステムは、実際の貯炭ヤードで赤外温度画像装置、貯炭パイル用温度・水分計およびデータ伝送方式などで検討を行い、実用化の見通しを得ている。また、パイル表面の赤外温度からパイル内部の最高温度を推定する方法も開発、システムのより簡易化が可能なことも明らかにしている。

3-3-2 炭じん飛散対策

石炭火力発電所の貯炭場では、粉じんの発生を抑えるために、石炭の湿分を管理したり、防風施設や防じん機器を設置している。当研究所では、1970年代後半から炭じん飛散防止の研究を始め、その成果を発電所の環境対策に反映させてきた。

(1) 炭じんの発生箇所

図3-3-4に石炭火力発電所における代表的な揚貯運炭システムを示す。石炭のハンドリングは、①アンローダによる揚炭、②コンベアラインによる搬送、③スタッカによる積み付け、④貯炭、⑤リクレーマによる払い出し、⑥その他、ブルドーザによる残炭処理、転圧などである。

これらが、いずれも炭じんの発生箇所となるが、連続式のアンローダやギャラリ、チューブ内のコンベアのように密閉構造にすると、環境への影響はなくなる。

(2) 炭じん量の推定と防じん対策

当研究所では、上記の全ての炭じん発生箇所について、発電所での実態調査や風洞実験を行い、炭じん量の予測式を導いた。

炭じん量は、貯炭場内の風速、石炭の湿分、揚貯炭機器の防じん対策などに依存する。たとえば、貯炭パイルからの炭じん飛散量は風速の4.3乗に比例して増加するので、貯炭場内の風速を抑えることが環境対策上大きな効果があることがわかった。また、スタッカのように石炭を落とすときの炭じん飛散は、受け入れ石炭を加湿することにより、風速10m/s以上の強風時を除けば、極く少量に抑えることができる。

(3) 環境アセスメント手法

発電所を新規立地あるいは増設する場合には、環境保全の立場から、事前に炭じん飛散対策を検討している。そこで、当研究所は炭じん飛散量を予測し、必要な防止対策を講ずるための環境アセスメント手法を開発した。

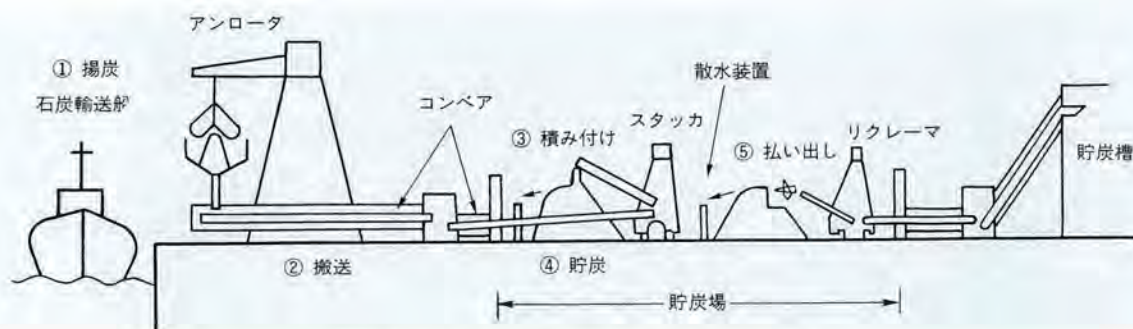


図3-3-4 発電所における揚貯運炭システム

①～⑤のハンドリングをしているとき、炭じん飛散が生じる可能性がある。

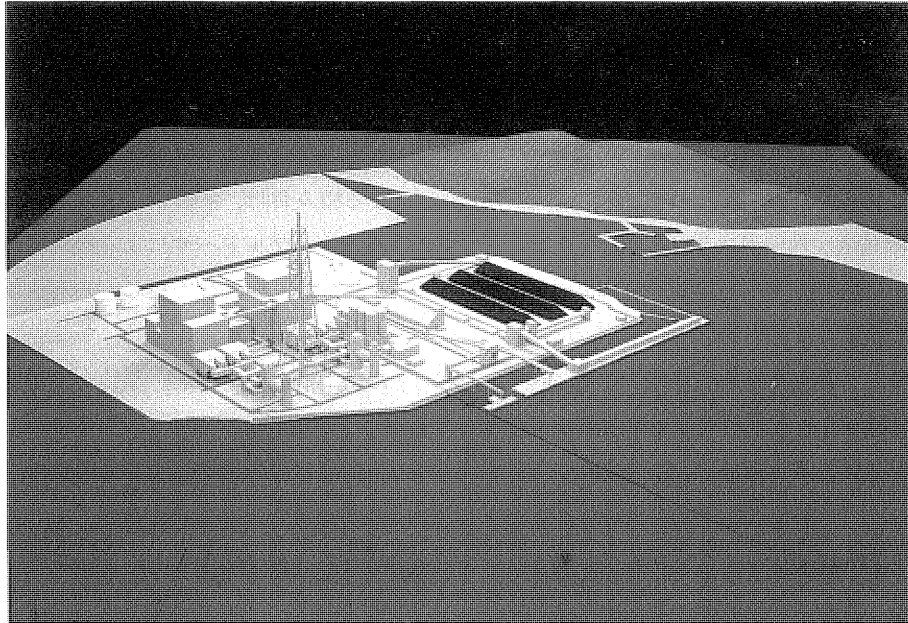


図3-3-5 環境影響予測に用いた発電所模型

本写真のような発電所模型を用いて、風洞実験で貯炭場内の風速分布を調べる。

この手法は、発電所の揚貯炭計画、気象データ、図3-3-5のような模型を用いた風洞実験で測定した貯炭場内の風速データ、さらに発じん量の予測式をもとに、大気拡散計算を行い、周辺への炭じん沈着量を評価するものである。もし、予測した炭じん沈着量が目標値を達成できなければ、炭じん飛散防止対策を強化することになる。

こうした環境アセスメント手法を1982年に開発してか

ら、多くの発電所の建設に適用してきたが、その後、大型石炭火力発電所の運転開始が続く中で、実際の貯炭場において揚貯炭機器の実態を調査し、より合理的な手法に改めている。新しい手法は1990年に提案し、それ以降、既に8つの発電所で炭じん飛散の予測と対策に活用されている。今後も、石炭火力発電所の円滑な立地推進、環境保全に役立てていきたい。

3-4-1 CO₂の回収と貯留技術

人間活動に伴い排出される温室効果ガスの大気中濃度は増加している。これがもたらす地球温暖化の影響には未だ不確定性があるが、世界は、悔いを残さない (no regrets) 方策として、人為的温室効果ガスの排出抑制に向けて動いている。

わが国では1990年に「地球温暖化防止行動計画」が閣議決定され、国としての姿勢が示された。中でも、地球温暖化への影響が最も大きいCO₂は、1人当たりの排出量を2000年までに1990年の水準(約2.5トン/人)に安定化することがその目標となっている。

CO₂の排出は化石燃料の使用と密接な関係があり、電気事業は、CO₂の排出を削減するため、積極的にその対策に取り組んでいる。

(1) CO₂の回収技術

電気事業におけるCO₂排出削減対策の1つとして、化石燃料の燃焼排ガスからのCO₂の分離・回収(以下、回収)が考えられる。この技術には、多くの方式があり、化学工業の分野での食品用・化学品用としてのCO₂の製造や、石油の強制回収のためのCO₂の、その他の目的に用いられている。しかし、温暖化防止のために火力発電所に適用された例はなく、その技術的可能性は大きな検討課題である。。

そのため、当研究所および電力各社は排ガスからのCO₂回収技術の適用性を評価することを目的に、技術開発を進めている。

この技術には、吸収法(化学吸収液、物理化学吸収液あるいは物理吸収液を用いる方法)、吸着法(吸着剤を用いる方法)、深冷法(低温蒸留を用いる方法)および膜分離法などがある。ここでは、主として化学吸収法に着目して、国内外や電力各社のCO₂回収技術および当研究所の研究を紹介する。

(i) 国内外におけるCO₂回収技術

燃焼排ガスから比較的大規模にCO₂回収を行っている実例は、表3-4-1に示すように多く米国に見ることができる。過去における最大規模のものは、CO₂回収量が約1,120トン/日(発電出力約100MW相当の排ガス処理)であり、これはオイルショック以後、1980年代に石油の強制回収用のCO₂製造を目的に、テキサス州のLNG発電所で運転されていたが約10年前に解体されている。現在では、Kerr-McGee/ABB Lummus Crest社のライセンスによるカリフォルニア州の800トン/日のプラントが最大規模である。

わが国では、この規模に匹敵する実例はないが、比較的大きなものとしてはM社のプラントで、燃焼排ガスから94トン/日の回収を行っていたが、最近解体された。

吸着法は、新日鉄のものが最大規模であろう。これはCO₂回収量は170トン/日であるが、処理排ガス量は17,000~18,000m³N/Hと少ない。

(ii) 電力各社の技術開発

当研究所を含め電力各社で開発中のCO₂回収技術は、表3-4-2に示すように、規模、方式は異なるが、化学吸収法、物理吸着法、深冷却と膜分離法との複合法などである。これら排ガスからのCO₂回収とともに、回収後のCO₂の有効利用および処理に関する研究も実施されている。

表3-4-1 燃焼排ガスからCO₂の回収を行っている例

排ガス源	プロセスライセンス	プロセス名	CO ₂ 回収量	サイト	製造目的/用途
天然ガス焚き火力発電所	Dow Chemical	Gas/Spec FT-1	1,120トン/日	ホーリーアヴェニュー発電所, テキサス州 米国 (解体済)	石油強制回収
石炭, ペトロコーク 天然ガス焚きボイラ	Kerr-McGee/ ABB Lummus Crest	CO ₂ Recovery	800トン/日	トロナ, シールスヴァレー カリフォルニア州 米国	ソーダアッシュ製造
石炭焚きボイラ	Kerr-McGee/ ABB Lummus Crest	CO ₂ Recovery	300トン/日	ソーダアッシュ ポツワナ ポツワナ共和国	ソーダアッシュ製造
石炭焚き循環流動床ボイラ	Kerr-McGee/ ABB Lummus Crest	CO ₂ Recovery	200トン/日	シャディポイント発電所 オクラホマ州 米国	食品用
天然ガスコンバインド サイクルタービン	Flour Daniel	Econamine FG	320トン/日	ベリンガム マサチューセッツ州 米国	化学品用

表3-4-2 排ガスからのCO₂回収技術—電力各社の研究開発—

	北海道電力	東北電力	東京電力	中部電力	北陸電力	関西電力	中国電力	四国電力	九州電力	電源開発	電中研
吸収法	・基礎実験 ・吸収液 性能評価		・1,000m ³ N/h ・石炭排ガス ・アミン法			・600m ³ N/h ・LNG排ガス ・アミン法		・基礎実験 ・熱炭酸カリ 法			・880m ³ N/h ・LNG排ガス ・アミン法
吸着法	・基礎実験 ・吸着剤 性能評価	・1,700m ³ N/h ・石炭排ガス ・PSA法	・1,000m ³ N/h ・石炭排ガス ・PTSA法	・吸着剤探索	・2 m ³ N/h ・石炭排ガス ・循環流動 床PTSA法			・石炭排ガス ・PSA法	・基礎実験 ・PSA法		
その他			・基礎実験 ・吸収液+ 中空糸膜	・複合シス テム (PSA+深冷法/ 膜+PSA)			・基礎実験 ・LNG冷熱利 用	・基礎研究 ・複合シス テム		・基礎試験 ・O ₂ /CO ₂ 燃焼	・O ₂ /CO ₂ 燃焼 ・CO ₂ 回収型発 電システム 概念検討

(iii) 当研究所の研究例

当研究所では、LNG火力を対象に化学吸収法によるCO₂回収技術について、主として所要エネルギーの低減化を目的に、回収規模3トン/日の装置を用いて実験による技術評価を行っている。

この方法は、CO₂とアルカリ性の吸収液との化学反応を利用したもので、そのシステムを図3-4-1に示す。吸収液のモノエタノールアミン水溶液は、ほぼ大気圧、約40℃の条件でCO₂をよく吸収し、約1.8気圧、約120℃の条件で吸収したCO₂を放出するので、温度と圧力をコントロールすることによって、吸収液を循環使用しながらCO₂を排ガスから分離し、回収できる。

実験はまだ継続中であるが、現在までの結果では、排ガスからのCO₂回収率は90%以上であり、99%以上の純

度で回収できる。しかし、所要エネルギーは1kgのCO₂を回収するのに約1,400kcalの熱量(吸収液濃度20%の運転条件、動力は別)を要し、これだけでも発電出力は、約15%以上も低下する結果となる。

所要エネルギーを低減する方法の一つとして、吸収液の濃度を高めることが考えられる。図3-4-2に示すように濃度を高めると回収のための所要エネルギーは低下する。しかし、この場合、吸収液による装置材料の腐蝕の抑制・防止が課題である。

一方、プロセスの改善もエネルギー低減化に重要であるが、現在まだ検討中である。

(iv) まとめ

化石燃料の使用量を減らしてCO₂排出量を削減する方法として超々臨界圧ボイラーの導入や複合発電における

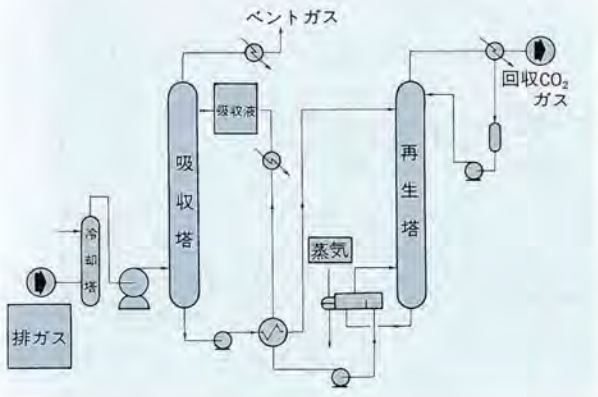


図3-4-1 CO₂回収のフロー

CO₂は低温の吸収塔内で吸収剤に吸収され、高温の再生塔で吸収されたCO₂を分離する。

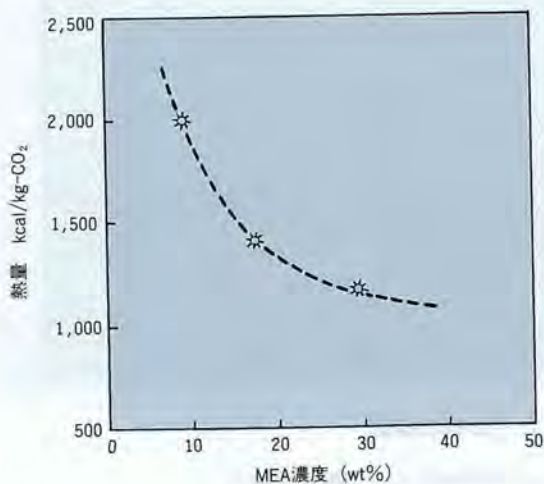


図3-4-2 MEA濃度とCO₂を1kg回収するのに要する熱量

吸収液の濃度を高めると、回収に必要なエネルギーは低下する。しかし、吸収液による材料の腐蝕が課題である。

1,300℃あるいは1,500℃級タービンの技術開発によって発電効率を向上させる研究が進められているが、CO₂回収装置を設置した場合には、その所要エネルギーが逆に向上した効率を相殺して、さらにそれ以上の効率低下を引き起こすことも考えられる。

CO₂回収技術は何よりもエネルギーの低減化が基本的な課題といえよう。この他、発電所とCO₂回収プラントとの関係、プラントの大容量化、回収したCO₂の利用・処理

および発電コストへの影響など、多くの解決すべき課題がある。

(2) CO₂貯留技術

CO₂を回収したとしても、それをどのようにして大気圏へ放出しないようにするかが大きな課題である。

ドライアイスの巨大な塊として陸上に積み上げておこうとの提案さえあるものの、基本的には容量の大きい天然のストックの形に変換して大気圏への再放出を極力抑えることが模索されている。現在、地中ないし海洋へ注入することが論議されているが、その際には、リスクの評価あるいは技術としての環境適合性の判断が重要である。

地中への投入は、石油の増産法として油田で実績があるものの大規模に実施した場合に、地下環境にどのような影響をもたらすのか、そのための研究には手が付けられていない。

一方、CO₂を深海へ投入すれば、1,000年間以上にわたって大気圏から隔離することが可能であると評価されている。また、化石燃料の埋蔵量すべてから生じるCO₂を受け入れることさえ困難ではないとの処分可能量試算がすでに示されている。ただ、CO₂を大気圏から隔離して気候変動の危険性が軽減されるメリットが、投入されたCO₂によって海洋環境に未知の影響（例えば海底のある局限された領域内の生物が、ある期間だけ絶滅してしまう）が及ぶというリスクを上回るものであるのか、それが許容されるものであるのかといった根本的な問題は提起されたばかりである。

当研究所では、広く世界の海洋学者に呼びかけてこの問題を討論することが重要であると考え、1991年には「第1回CO₂と海洋のかかわりに関する国際ワークショップ」を開催している。そこでは、CO₂の深海への注入に関する具体的な方式に即して、生物を含む環境への影響を議論することが必要であるとの指摘がなされた。

海洋へのCO₂の注入方式の具体案については、すでに数多くのアイデアが提出されている。1992年には、500m以浅の浅層にCO₂を放出したとしても、海水に溶けきって適当なCO₂濃度の水塊を形成させることができれば、

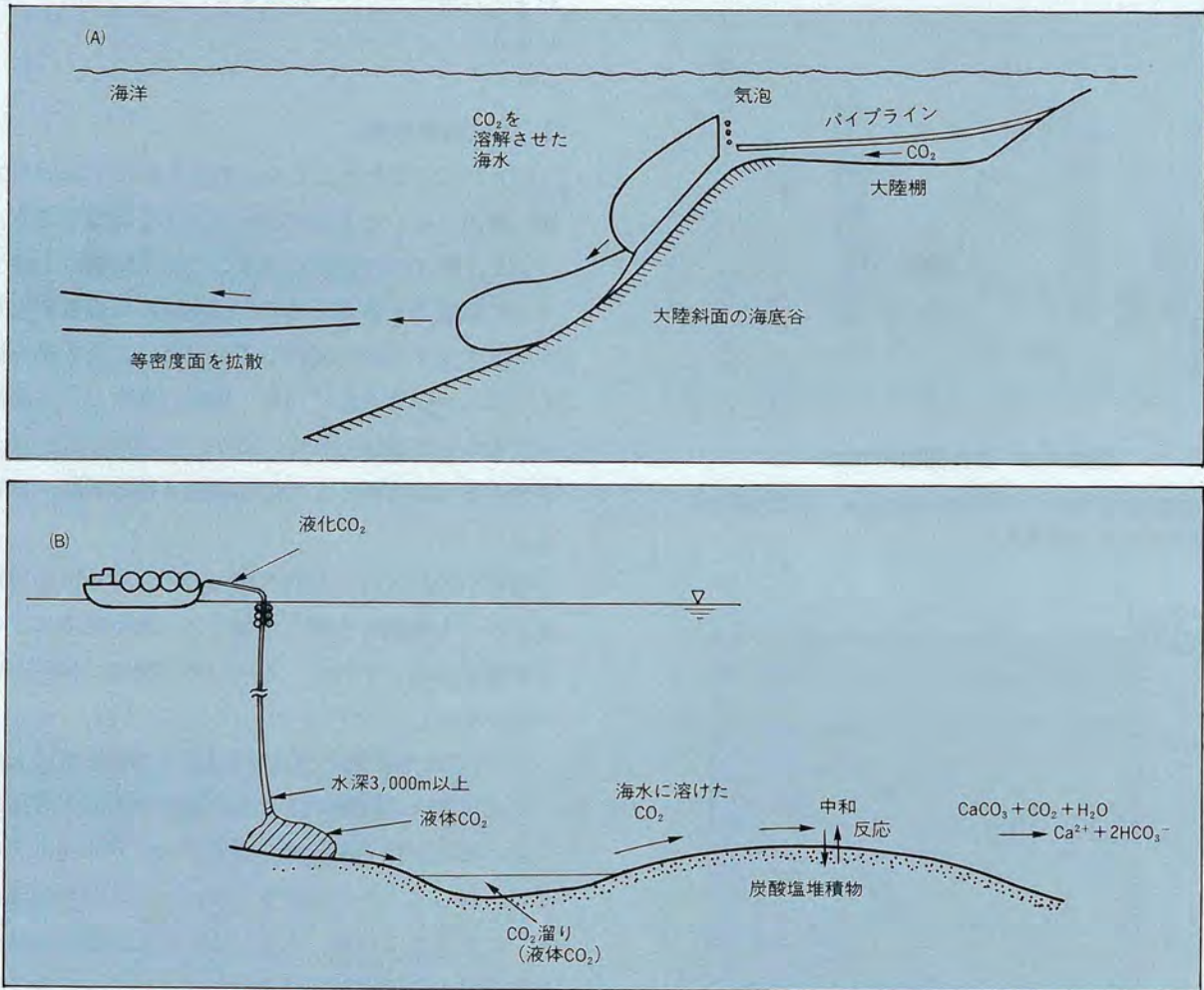


図3-4-3 CO₂の海洋への注入方式とその後の挙動

CO₂の注入方式を選択するためには、その後の海洋中でCO₂挙動を予測し、隔離の効果(持続期間)や海洋環境への影響の程度と注入可能量との関係などを明らかにする必要がある。図には水塊中に拡散してゆくことを期待している「浅層注入深海隔離」の方式(A)と、「深海底一時貯留中和無害化」の方式(B)について例示する。

それが海底地形の傾斜に沿って流れ下り、結局はCO₂を深海へと処分することが可能となるとの指摘がノルウェーからなされ、国際的に注目を浴びている。また以前から、海底での炭酸塩堆積物との中和反応に期待する処分概念も有望であるとされている(図3-4-3)。海洋処分の特定の方法を絞り込んで、今すぐにも技術開発に着手すべきかどうか、国際的にも論議があるところである。

当研究所では、深海底に形成された液体CO₂溜りからCO₂が底層水中に溶けだしてくる場合について、深海中でCO₂がどのように希釈拡散を受け、また海底堆積物と

反応するかを予測する手法を開発することを目指して研究を進めている。

既に、海水がCO₂を溶かし込んだときにどの程度の密度増加を示すのかに関して実験的なデータを取得し、これを用いて深海底CO₂挙動の予測計算を実施している。CO₂の溶出速度が大きい場合には、液体CO₂溜りの周辺に高濃度CO₂水塊が形成され、海底地形にそって海底面を這うように広がってゆくことが示された。

3-4-2 CO₂回収型発電

CO₂の回収技術については、前述したように種々の方式が検討されている。しかし、いずれの方式においても、回収に要するエネルギー、コストが大きく、発電効率の大幅な低下、発電原価の上昇が避けられないため、CO₂の回収を前提とした、発電効率、コストともに優れたCO₂回収型発電技術の開発も望まれている。ここでは、幾つかの試案を紹介する。

(1) 酸素吹き微粉炭火力

CO₂回収型火力の代表的なものとして、当研究所や電源開発などが提案している酸素吹き微粉炭火力がある(図3-4-4)。石炭を酸素で燃焼させれば排ガス中に窒素が含まれず、SO_x、NO_xなど微量ガス以外はCO₂と水のみになる。冷却して水を除けば、容易にCO₂を回収できる。また、SO_xの液化温度はCO₂のそれに近いため、CO₂液化部で脱硫もでき、脱硫装置が不要になる。

ただし、純酸素燃焼では温度が上昇し過ぎるため、燃焼排ガス(ほとんどがCO₂)を希釈のため再循環して燃焼させる。つまり、空気中のN₂をCO₂に置換して燃焼させ

るシステムであり、酸素とCO₂の混合ガスでの燃焼は極端な低NO_x燃焼が可能との知見も得られているので、脱硝装置の省略も期待されている。

このシステムでは、酸素製造装置を設置しなければならないが、脱硫・脱硝およびCO₂濃縮装置が不要であり、また、大量の燃焼排ガスを煙突から排出する必要も無いため熱損失も少なくできることから、CO₂の濃縮回収法に比べ効率、コストとも有利であるとの試算がなされている。しかし、酸素製造装置に要するコスト、動力は膨大なものであり、酸素とCO₂の混合ガスでの燃焼など、これまでのシステムと大きく変わる点も多く、実用化には解決しなければならない課題が多数残されている。

(2) CO₂回収型石炭ガス化複合発電システム

CO₂濃縮を容易にし、かつ発電効率をも高くするための石炭ガス化複合発電を利用したCO₂回収型発電も検討されている。

この方式は図3-4-5に示すように、まずガス化を酸素吹きで行い、生成ガスに水を注入して、一酸化炭素と水から水素とCO₂を生成するシフト反応を起こし、水素とCO₂を主成分とするガスを発生させる。ガス中のCO₂濃度は40%と高く、またガス量も燃焼排ガスに比べ少ない

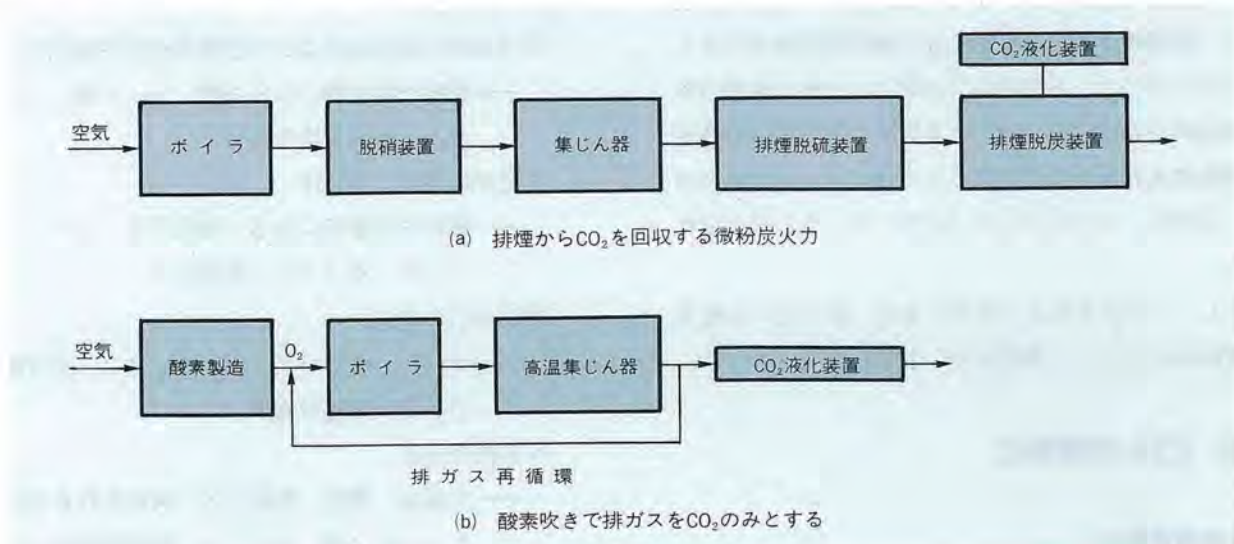
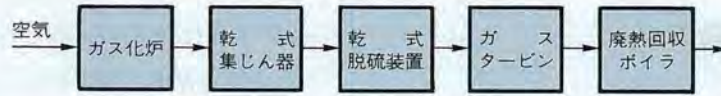
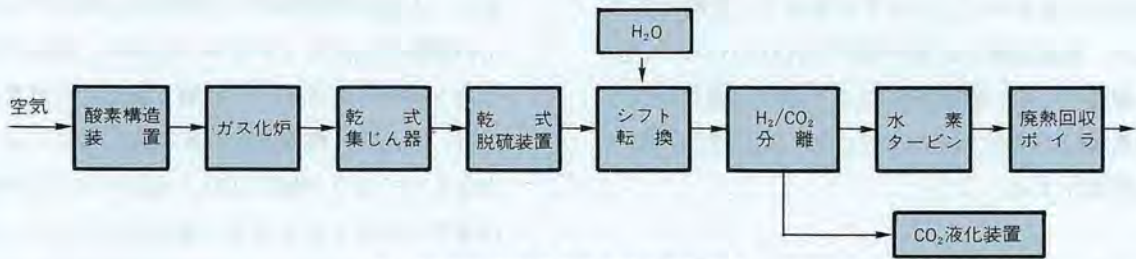


図3-4-4 微粉炭火力におけるCO₂回収方式

微粉炭火力からCO₂を回収する代表的な方式としては、排ガス中のCO₂を排煙脱炭装置で濃縮・回収する方式(a)か、酸素吹きで燃焼し、排ガスをほぼ純CO₂とし、濃縮せずに回収する方式(b)が挙げられる。



(a) 石炭ガス化複合発電方式



(b) CO₂回収型石炭ガス化複合発電方式

図3-4-5 CO₂回収型石炭ガス化複合発電システムと通常システムとの比較

CO₂回収型方式は通常の石炭ガス化複合発電に比べ、酸素製造装置、シフト転換装置、H₂・CO₂分離装置、CO₂液化装置が必要となるが、酸素吹きのため、集塵器、脱硝装置がコンパクトにでき、またCO₂の分離が容易になるなどの利点を持つ。

ため、CO₂の濃縮回収がコンパクトにかつ容易に行える方式である。CO₂除去後のガスは水素タービンで燃焼させる。

この方式では、CO₂の回収が容易になるだけでなく、酸素吹きガス化のため生成ガスの発熱量が高く、ガスタービンで燃焼し易いこと、また、酸素はガス化のみに使うので、酸素吹き微粉炭火力に比べ酸素製造量が少なくできるなどのメリットを持つ。石炭ガス化複合発電自体の発電効率が非常に高いので、本方式の発電効率も酸素吹き微粉炭火力以上に高くなるとの試算が、米国電力研究所 (EPRI)、ユトレヒト大 (オランダ) などで行われている。

しかし、いずれも机上の検討であり、実用化には酸素吹き微粉炭火力以上に課題が多いと思われる。

3-4-3 CO₂の資源化

(1) 化学的資源化

わが国では、CO₂は医薬品、基礎化学、肥料、合成樹脂などの原料として利用されているが、その利用量は他の化学原料に比べて極めて少ない。そこで地球環境保全に

寄与するべく、火力発電所、製鉄所、セメント工場などのCO₂大規模発生源を想定して、CO₂の有効利用を図るための化学的資源化技術の研究開発が電気事業をはじめとして産・学・官で進められている。

現在、研究開発中の代表的な化学的資源化の方法と、主な転換物質は

- ①光化学的還元法および(光)電気化学的還元法
——燃料や原材料になるギ酸、シュウ酸、メタノール、一酸化炭素など
- ②化学的還元・分解法
——燃料や原材料になる一酸化炭素、メタン、メタノール、ガソリン、炭素など
- ③高分子合成法
——ポリカーボネート、ポリウレタン、ポリ尿素などの合成樹脂や繊維
- ④有機合成法
——医薬品、香料、農薬などに利用される安息香酸、カルバミン酸、ラクトン、尿素誘導体など
- ⑤無機化合物合成
——医薬品や原材料などに利用される炭酸ソーダ、ハイドロタルサイト、メラノフロジヤイドなど

いずれの方法もCO₂を資源化して利用しようとするものであるが、ほとんどが基礎研究段階にあり、現時点での一様な評価は困難である。

しかし、技術的完成度が高く、早期の実現が可能な技術を強いて挙げるならば、化学的還元・分解法のうちの接触水素化法で、特に、エネルギー損失の少ないメタノール合成が有利になると考えられる。メタノールは安全性、運用性、ハンドリング性に優れており、接触水素化法においては、経済的なメタノール合成法や水素製造法などの技術開発が不可欠であり、また国際的な協力体制が必要になる可能性もあると考えられる。

石炭火力発電所においては、燃焼、脱じん、脱硝、脱硫などの技術を考慮し、CO₂資源化技術の最適化を図っていく必要がある。しかし、CO₂を単に炭素源として資源化しても、利用によってCO₂が再放出されては何の意味もなさない。

将来に備えて、炭素資源の有効利用を考慮した総合的なエネルギーシステムなどの構築が重要になってくるものと考えられる。

(2) 生物的資源化

生物を用いたCO₂の資源化とは、生物の持つ炭酸同化の作用によりCO₂を吸収固定し、その生物の増殖により有用物質を生産することである。そしてその有用物質を上手に利用することは、地球温暖化を抑制する効果を生むことにつながる。

CO₂の資源化の対象となる生物としては、まず炭酸同化速度が早く、生産物は付加価値が高く、また、火力発電所から排出されるCO₂量は多量であることから、大量に利用可能なものである必要がある。

こうした条件に適していると考えられるのは、微細藻類ならびに水素細菌と総称される微生物である。

(i) 微細藻類と水素細菌の利用

微細藻類とは、水中などに生息する微小な藻の総称で、太陽光のエネルギーを利用した光合成による炭酸固定を行う微生物である。実際のCO₂資源化システムを考えた場合、太陽光を得るために広大な土地、面積を必要とすることが難点である。しかし、光合成効率は高いため、

同じ量のCO₂を高等植物によって資源化する場合に比べれば、面積は格段に少なくすむ。

一方、水素細菌とは、水素の酸化により水素のエネルギーを利用して炭酸固定を行う微生物の総称である。この微生物は、高エネルギー物質の水素をエネルギー源として生育するため生育速度は速く、十分な水素さえ供給できれば比較的短時間のうちに大量のCO₂を固定できるという利点を持っている。また、太陽光を必要としないので立地上の制約も少ない。しかし、CO₂を固定するエネルギーとして水素を必要とするため、化石燃料から水素を得ている現状では、固定に必要な水素を得るためにCO₂を放出してしまうというジレンマが生ずる。これを解決するには、水素を原子力発電あるいは太陽電池で発電した電力で、水を電気分解して得ることが必要となる。したがって、水素細菌によるCO₂の資源化は、化石燃料に依存しない安価な水素生産が可能になった将来において、現実味を増すと考えられる。

微細藻類ならびに水素細菌を用いたCO₂の資源化法の概要を表3-4-3に示した。微生物を用いた資源化法には大きく分けて二つある。一つは微生物が増殖しながら体外へ放出する物質を利用する方法（生物機能の利用による物質生産）であり、もう一つは増殖した微生物の体自体や体から抽出した物質を利用する方法（生物体の生産）である。

前者の具体例としては微生物が増殖しながら菌体外へ放出するアミノ酸や酢酸などの物質を利用する方法がある。後者としては、微生物自体が高い栄養価を持つことや多くの有用物質を含むことから、菌体そのものを飼料や食物として、また抽出物を生理活性物質や食品添加物、医薬や化学製品原料として利用する方法がある。

これら微細藻類と水素細菌による資源化法は、CO₂固定産物の多面的な利用法が期待されるため様々な研究が進められており、一部企業化されているものもある。しかし、火力発電所に由来するCO₂の資源化についての研究は少なく、企業化されている例はない。

(ii) 微生物飼料の生産

生物を用いたCO₂の資源化において、温暖化抑制に最も効果があると考えられるのは、CO₂からの微生物飼料

表3-4-3 微生物を用いたCO₂の資源化法の概要

生物の種類	CO ₂ 資源化のエネルギー源	生物の利用形態	生産物	内容
微細藻類	太陽光	生物機能の利用による物質生産	・アミノ酸生産	・微細藻が光合成によってCO ₂ を取り込みながら成長する際に副産物を藻体外に算出する機能を利用して物質を生産する。
		生物体の生産 (1)生物体をそのまま利用 (2)生物体から有用物質を抽出 (3)生物体の他物質への変換	(1)・食品 ・食品添加物 ◎微生物タンパク質飼料(SCP) (2)・ビタミン・β-カロテン(食用色素) ・精製タンパク質生産 ・生理活性物質 ・医薬品原料 ・化学製品原料 (3)・燃料(アルコール, 重質油への変換)	・微細藻が光合成によってCO ₂ を自己の体に変換し増殖する。生産物である藻体は、様々な生体成分から構成されるため、多様な用途がある。微細藻の種類によって生体成分は異なるため、目的にあった微細藻を用いることが必須である。
水素細菌	水素(H ₂)	生物機能の利用による物質生産	・酢酸の生産	・水素細菌が水素とCO ₂ から酢酸を生成し、菌体外へ放出する。放出された酢酸を分離して利用する。
		生物体の生産 (1)生物体をそのまま利用 (2)生物体から有用物質を抽出	(1)◎微生物タンパク質飼料(SCP) (2)・精製タンパク質 ・化学製品原料(分解性プラスチック原料) ◎工業用酵素	・水素細菌が水素とCO ₂ から自己の体(菌体)を作り増殖する。菌体そのものを微生物飼料として用いたり、菌体に含まれるポリマー(PHB)を生成し生分解性のプラスチック原料として用いたり、菌体酵素を工業用酵素として用いる。

◎当所が研究を行っているもの。

の生産である。微細藻類や水素細菌は、タンパク質や脂肪の含量が高く、栄養価の高い家畜飼料として多量に利用できる可能性がある。現在、家畜飼料として穀物から作った配合飼料が多く使われているが、飼料穀物を微生物飼料で代替することが可能になれば、以下のような観点から、地球温暖化抑制に寄与できると考えられる。

飼料穀物の生産は畑で行われるが、その際、土壌中の微生物による肥料の分解や作物残さの堆肥化によって強力な温室効果ガスである亜酸化窒素(N₂O)やメタン(CH₄)が発生する。一方、微生物飼料の生産では、土壌を使わないため、このようなガスは発生しない。すなわち、CO₂を使った微生物飼料の生産は、従来の飼料の代替利用の分だけ温暖化抑制に貢献すると考えられる。

当研究所の試算では、1トンCの飼料穀物を微生物飼料で代替すれば、約6トンCのCO₂に相当するメタンや亜酸化窒素の放出を抑制することが可能である。このような微生物飼料の生産法は、いわば耕地を必要としない食糧生産法のため、飼料穀物増産のための森林耕地化を

抑える効果もあると考えられ、森林保護の観点からも温暖化抑制に寄与できる。

以上の観点から当研究所では、CO₂の資源化に関して微生物飼料の生産を目標に研究を進めてきた。火力発電所排ガスはそのCO₂濃度がおおよそ10~15% (乾ガスベース)であり、このまま用いた場合では、既に分離されている微細藻類では死滅するか成長が著しく阻害される。そこで、このような高いCO₂濃度の条件でも活発に成長する微細藻類の検索を試み、クロレラ属の微細藻類を自然界から新たに分離し、現在までにその培養特性や栄養価などについての基本的知見を集積している。

今後は、効率的な大量培養法の確立とCO₂固定バイオリクターの開発を進める予定である(図3-4-6)。水素細菌についても、成長の速い水素細菌を新たに分離しており、培養特性ならびに栄養価に関する知見を集積している。

現在、人類を支える食糧のうち最も重要な穀物の生産量はおよそ18億トン乾物であり、そのうち半分近くが

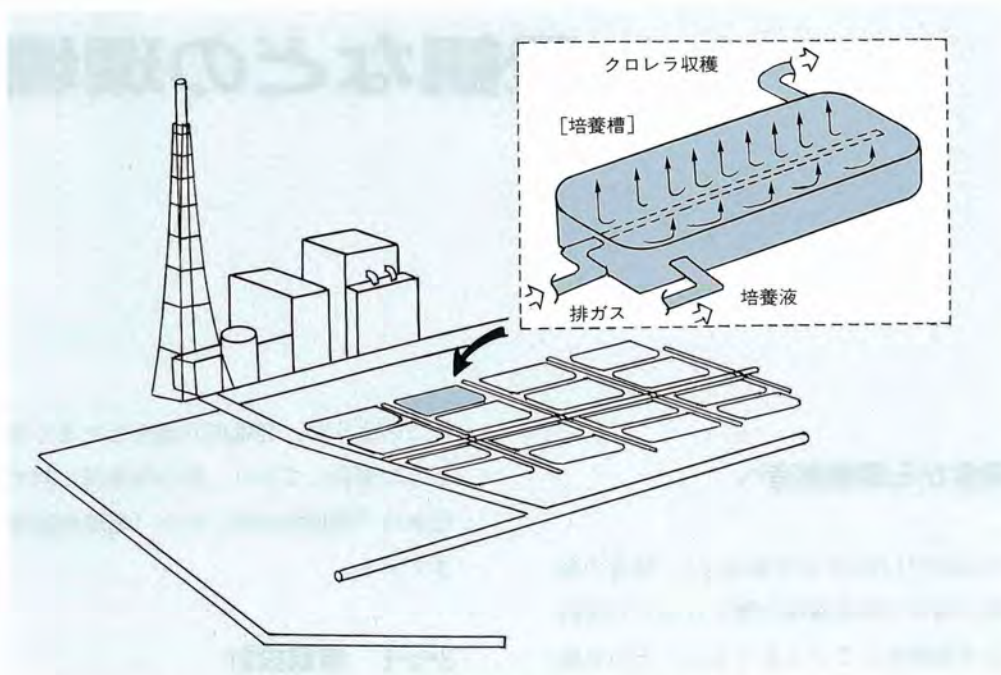


図3-4-6 火力発電所排ガスによる微生物飼料生産（CO₂固定）のイメージ

培養のための受光面は海上に求めた。クロレラ培養槽を海上に浮かべ、培養槽に培養液を入れ排ガスを吹き込みながらクロレラを培養し、増殖したクロレラ藻体は収穫・乾燥し微生物飼料に加工する。当研究所で探索したクロレラは高いCO₂濃度でも活発に生育するため、仮に光合成効率(太陽光エネルギーのクロレラ藻体の化学エネルギーへの変換効率)を3%とした場合、1ha当り30トンC/年のCO₂を微生物飼料として資源化できる。

家畜飼料として使われている。これからの人口増加を考えると、CO₂資源化技術としてのCO₂からの微生物飼料

生産は、温暖化抑制への貢献のみならず人口・食糧問題にも貢献できるのではないだろうか。

3-5 景観などの環境創造

3-5-1 環境保全から環境創造へ

原子力をはじめ石炭やLNG火力発電所など、最近の発電所は、発電容量の増大や用地確保の難しさなどの理由から、施設自体が大規模化していくとともに、その立地場所は都市部を離れていく傾向が見られる。このため、全国各地の沿岸域の自然風景地からも、発電所の大規模な構造物が見えるケースが増えており、構造物と周辺景観との調和に対して十分に配慮することが求められている。

一方、人々の生活環境に対するニーズは「安全で健康な環境」から「快適な環境」へと変化してきており、人々はゆとりと豊かさに満ちた生活を求めている。このため、地域住民は地元で立地する発電所に対しても、従来の「目立たなくする」や「周辺景観と調和させる」などといった景観対策から、地域イメージの向上に寄与し得る地域のシンボルとして活用したいという要望が高まってきている。

また、1992年6月に国の電気事業審議会需給部会では今後の電源地域振興のあり方について、発電所の有する諸資源を積極的に活用することによって地域と発電所との共生を図っていくこと、すなわち地域共生型発電所の実現が重要であると指摘している。この具体的なイメージは、地域の産業振興や生活環境の充実に発電所の敷地や施設、熱、人、情報などを活用していこうというものであり、生活環境面に関しては「地域環境に調和した発電所デザイン」や「敷地を活用した地元開放型公園、スポーツ施設」などが挙げられている。

このように、発電所立地をとりまく社会環境は時代とともに変化しており、特に発電所に対する地域ニーズは従来の「環境保全型」から「環境創造型」へと移行してきている。

3-5-2 景観設計

当研究所では、これまでに火力・原子力発電所の建設が周辺景観に与える影響を事前に予測・評価する景観アセスメント手法を開発しているが、前述した社会情勢に対応するため、これをベースに、望ましい地域景観を創造する上で効果のある発電所の景観設計手法を開発した。

具体的には、電力施設の周辺景観へのマイナス影響を軽減することを主眼とした景観対策を見直し、地域環境に対してプラスの効果を与える発電所の景観設計を明らかにした。

景観設計手法の開発にあたっては、まず石炭火力発電所の主要施設であるボイラー建屋、タービン建屋、煙突、貯炭場などを対象に、施設デザインや色彩計画、緑化などに係わる40数種の景観設計案を考案した。これらの設計案に対する評価を計量心理学的実験により抽出し、評価と個々の景観設計手法との定量的な関係を明らかにした。さらに、それらの関係にもとづいて発電所の景観設計手法を提案するとともに、実際の石炭火力発電所を対象にケース・スタディを行い、景観設計の有効性を実証した。

主な結果は、つぎのとおりである。

- ① 発電所施設の外部形態デザインや色彩に関する景観評価について、「明美感」「格調感」「爽快感」「重

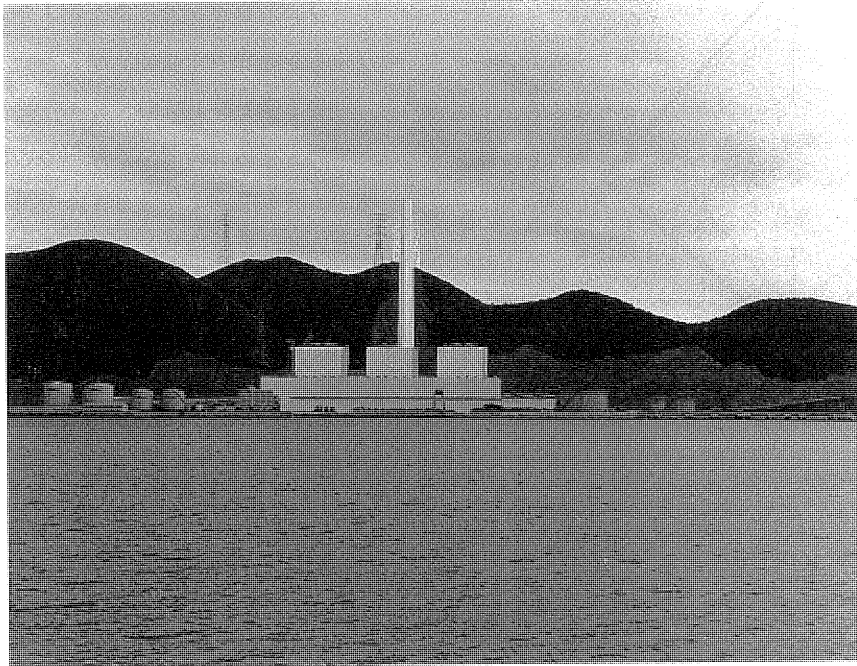


図3-5-1 現状の石炭火力発電所

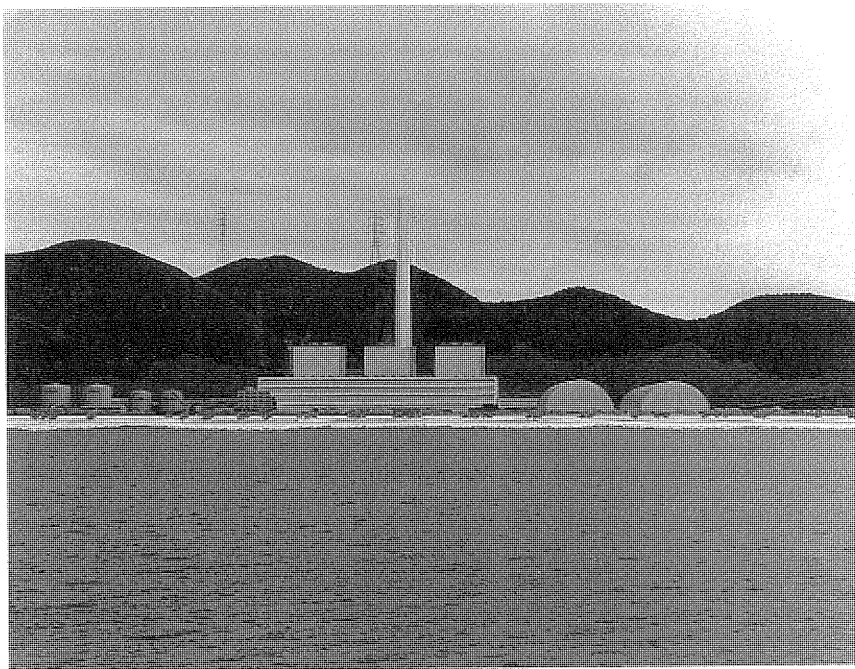


図3-5-2 石炭火力発電所の景観設計例

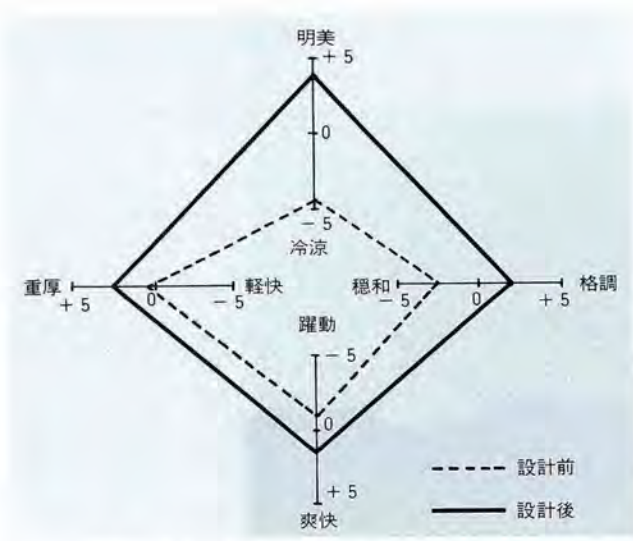


図3-5-3 景観設計前後の評価の違い

厚感」の4つのイメージ軸を抽出した。

- ② これらの4つの評価軸と個々の景観設計との関連性を明らかにし、地域イメージの向上・創造に寄与する景観設計手法を提案した。

- ③ 実際の発電所を対象に景観設計手法を適用し、「明美」で「格調」のある発電所など約20数種の地域イメージ効果の高い発電所をデザインするとともに、その効果を定量的に明らかにした（図3-5-1、図3-5-2、図3-5-3参照）。

また、当研究所では景観以外の観点からも、発電所立地地域の環境向上に寄与する方策について検討している。一つには、立地地域の特性やニーズに応じて、発電所環境施設である公園やスポーツ施設などを、地元開放施設として活用する方策を提案している。この他にも、技術的側面から海浜造成技術や藻場造成技術、海域環境改善技術などについても研究開発を行っている。

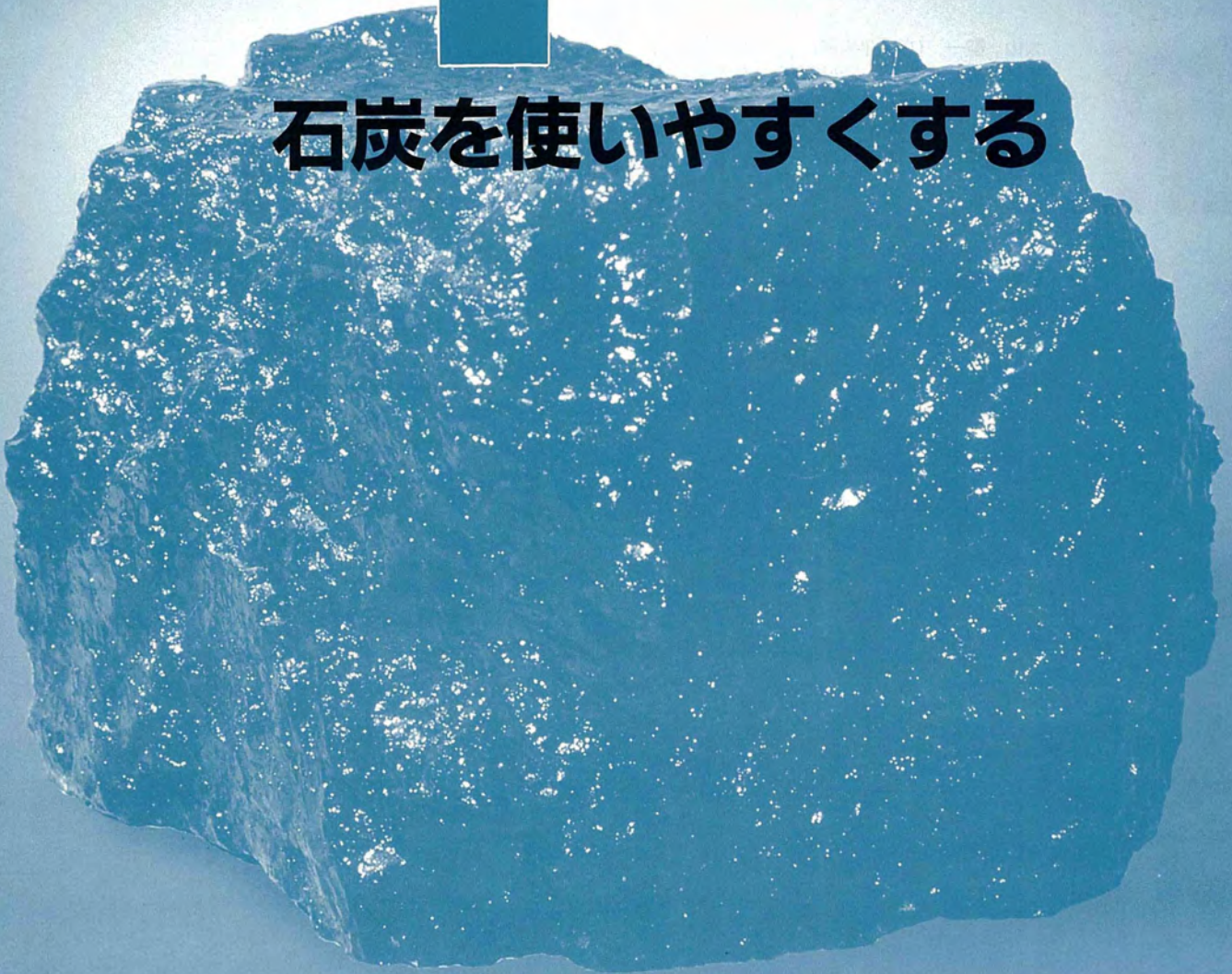
今後は、こうした計画・設計手法や環境創造技術の実用化を図るとともに、地域の総合計画や環境計画と整合のとれた導入方法を総合的なシステムとして捉えて検討していくことが重要であり、これらの研究開発を通じて地域共生型発電所を実現していくことが望まれる。

第 4 章

4



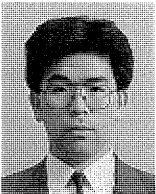
石炭を使いやすくする



第4章 石炭を使いやすくする ● 目次

狛江研究所 大気物理部 環境化学グループ 主査研究員 大山 聖一
横須賀研究所 エネルギー化学部 燃料化学グループ 主任研究員 小野 哲夫
プラント化学グループ 主任研究員 福沢 久

4-1	石炭の流体化技術	81
4-2	石炭からの新燃料製造技術	83



大山 聖一 (1986年入所)
接触燃焼、メタノール液相合成等触媒を利用したエネルギー関連技術の研究に携わってきた。現在、より高効率のメタノール合成技術の開発を目標に研究を行っている。

小野 哲夫 43ページに記載
福沢 久 43ページに記載

石炭の流体化技術は、固体である石炭をスラリー状の疑似流体として利用しようとするものであり、ガス化や液化のように流体燃料に改質するものではない。

この技術には、スラリー化に用いる流体などによって次のような種類がある。

- ①石炭・油混合燃料 (COM)
- ②石炭・水スラリー (CWM)
- ③石炭・メタノールスラリー (CMM)
- ④石炭・タールスラリー (TCM)
- ⑤溶剤精製炭・油スラリー (SOM)

この他にも液体CO₂・石炭スラリーなども検討されているが、現在、既に実用化の域にきているものはCOMおよびCWMである。

4-1-1 石炭・油混合燃料 (COM)

COMは、1930年代には戦艦用の新燃料として検討されたこともあるが、オイルショック以降米国において発電所に試験的に導入された。わが国では、同時期に電源開発(株)がメーカーと共に、既設油焼きボイラの転換燃料と位置付けて開発された。

その製造法は、重油50%、石炭50%に界面活性剤0.1~0.2%を添加し、これを重油で粉碎・分散させる方式で、2カ月程度のタンク貯蔵後も支障なく取出せる流動性が確保された。これらの検討は、同社竹原火力発電所1号機(250MW)を用いて、COM製造容器10トン/h、タンク貯蔵容量980l、バーナ容量4トン/h×2本によって実施された。

この結果を受けて、東京電力(株)は横須賀火力発電所

1・2号機をCOM転換することにした。このCOM転換の決定にともなって、1981年4月に東京電力(株)、電源開発(株)および東北電力(株)など7社で日本COM株式会社が設立され、1984年11月から年間90万トンの商業生産が開始された。製造されたCOMは、いわき市小名浜からCOM船によって横須賀火力に運ばれ、COM転換された同ボイラの燃料として今日まで順調に運転されている。

4-1-2 石炭・水スラリー (CWM)

CWMはCOMに比較してより一層の脱石油となるため、オイルショック後注目され、各国が研究開発に着手した。

その特徴は濃度であり、輸送を主目的にした従来型の石炭・水スラリーは濃度50%がほぼ限界であった。これに対してCWMと呼ばれているものは、石炭粒子の粒径分布を調整して濃度70%と高濃度化して、しかも流動性を持たせたものである。これによりパイプ輸送はもとより、脱水せずにそのまま燃焼させることができるようになった。

この特徴により、産炭国から一貫した流体輸送が可能になり、ハンドリングも一点係留ブイにより沖積み、沖取りなど石油並みの設備での取扱いが可能になった。このように取扱いの煩雑性が解消されるとともに、炭じん飛散や自然発火、さらに騒音などの問題も解消された。

CWM製造は、乾式で粉碎した微粉炭を界面活性剤を添加した水と混練してCWM化する乾式法と、石炭を界面活性剤を添加した水とともに湿式ミルに入れて湿式粉碎してCWM化する湿式法がある。前者は粉碎コストが

表4-1-1 商業化プロジェクト

	プロジェクト名 (推進団体、社)	場 所	CWM生産量 千t/年	操業状況	輸送手段	供 給 先
ロシア	TECHMASHIMPORT (シベリア パイプラインP/J)	BELOSO/ NOVOSIBIRSK	5000	'89 夏完成 '89.3 部分開通	パイプライン (256km)	ボイラ(220MW×6)
中国	兗州鉱務局 (日揮～日商岩井)	山東省 (石臼所)	250	'92～	製造基地～ バース(1.4km) 船舶(5千t)	全量輸出(日本、その他) テイカ(5千t/年)
	華能集团公司 (華能集団～丸紅)	河北省 (秦皇島)	500～1000	未定	秦皇島 船舶(5～35千t)	全量輸出予定
豪州	Gunneda Coal トーマン 電源開発	Gunneda	300	'93.3～		ボイラ(50MW)

安価であるが、石炭に撥水性があることからCWM化が難しいという欠点がある。一方、後者は粉砕コストが高くなるが、CWM化は比較的容易である。

このことから、現在実用化されているCWM製造は湿式法によっている。国内では、日本COM(株)が常磐共同火力(株)の勿来発電所に年間7万トン供給しており、複数のバーナのうちの一部のバーナでCOMを利用している。さらに、日本COM(株)は1993年6月には年間50万トンの設備を完成させる予定になっている。

一方、国外では、シベリアパイプラインプロジェクトや中国におけるプロジェクトがある。中国でのプロジェクトは表4-1-1に示すように日本との係わりがあり、1992年3月には中国産CWMの第1船が日本に到着しており、主に産業用として利用されている。

このような湿式法による商業生産が進められる中、当研究所は製造コスト低減の観点から、乾式法の確立を検討してきた。*乾式法は、前述のように石炭が撥水性をもっていることから微粉炭と水との混練が難しいが、混気

ジェットポンプにこの作業を受けもたせるよう技術開発した。これにより石炭の撥水性を打破し、極く短時間に微粉炭をCWM化することが可能となった。また、この方法で製造したCWMの性状は、従来の湿式製造によるCWMの性状と同等であることを、試作した基礎試験装置の製造実験にて確認した。

この乾式法の経済性評価を行ったところ、設備費は湿式法の約60%減、運転費は5%減となった。この乾式製造法は、このように大幅なコスト低減が可能となる他、設備がコンパクト化されることからスケールアップが容易になり、大容量製造システムに向いていると考えられる。

このため、本乾式製造法の実用化を図るべく、その隘路となる粒径調整のための超微粒子(3μm以下)を容易に得る方策を開発中であり、この開発を待って次世代のCWM製造法として、システムを確立していきたいと考えている。

4-2 石炭からの新燃料製造技術

石炭をより高度に利用するために、石炭変換クリーン燃料製造技術の研究開発が内外で進められている。代表的な変換技術を分類すると次のように大別される。

- ① ガス化（低・中・高カロリーガス化）→一酸化炭素、水素
- ② 液化（直接・間接液化）→ガソリン、ナフサなど
- ③ 乾留（低温・高温乾留）→メタン、水素、コークス

石炭から変換された気体、液体および固体は、発電用、産業用、民生用の燃料などとして有用な資源である。現在、ガス化技術については電気事業、石炭利用総合センター、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が、液化技術については瀝青炭および褐炭を対象にNEDOが、乾留技術については製鉄業が、それぞれ中心になって従来技術の改良や新技術の開発を進めている。また、石炭の合成ガス化とその液体燃料化についての幅広い基礎研究が大学を中心に行われている。

ここでは、液化技術および乾留技術については割愛し、石炭からの新燃料製造の代表例として、石炭ガス水素製造技術および石炭ガス化メタノール製造技術について紹介する。

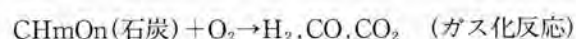
4-2-1 水素製造

従来、水素は天然ガス、LPG、ナフサなどの水蒸気改質などによって製造されているが、世界中に豊富に賦存する石炭を原料とする水素製造技術の研究開発が進められている。

水素は、化学工業や石油精製などの原材料として広範

な分野で利用されているばかりでなく、将来的には燃料電池の燃料や石炭液化用としての利用が大きく期待されている。

石炭から水素を製造するには、次式に示すように、石炭を水素と一酸化炭素に分解するガス化反応と、石炭ガス中の一酸化炭素を水蒸気によって水素と二酸化炭素に変成するシフト反応を利用することになる。ガス中に残存する二酸化炭素や不純物の硫黄化合物（ H_2S 、 COS ）を除去することで、より高純度の水素が得られる。



代表的な石炭ガス化プロセスとして、固定床式、流動床式、噴流床式などがあり、それぞれについて酸素吹きと空気吹きがある。石炭からの水素製造では、石炭処理速度が速く、石炭ガス中の水素濃度が高く、ガス化圧力が高いことが望ましいことから、前記の石炭ガス化プロセスの中では酸素吹き噴流床式が適していると考えられる。

わが国では既に、宇部アンモニア工業がテキサコプロセスを採用し、石炭を原料にしてアンモニア製造用の水素を製造している例がある。

図4-2-1に示すように、NEDO/石炭利用水素製造技術研究組合（HYCOL）においては、新しい水素製造用の石炭ガス化プロセスとして石炭の乾式供給、酸素吹き一室二段旋回流式ガス化炉からなるHYCOLプロセスの開発が進められている。このプロセスの眼目はガス化効率と

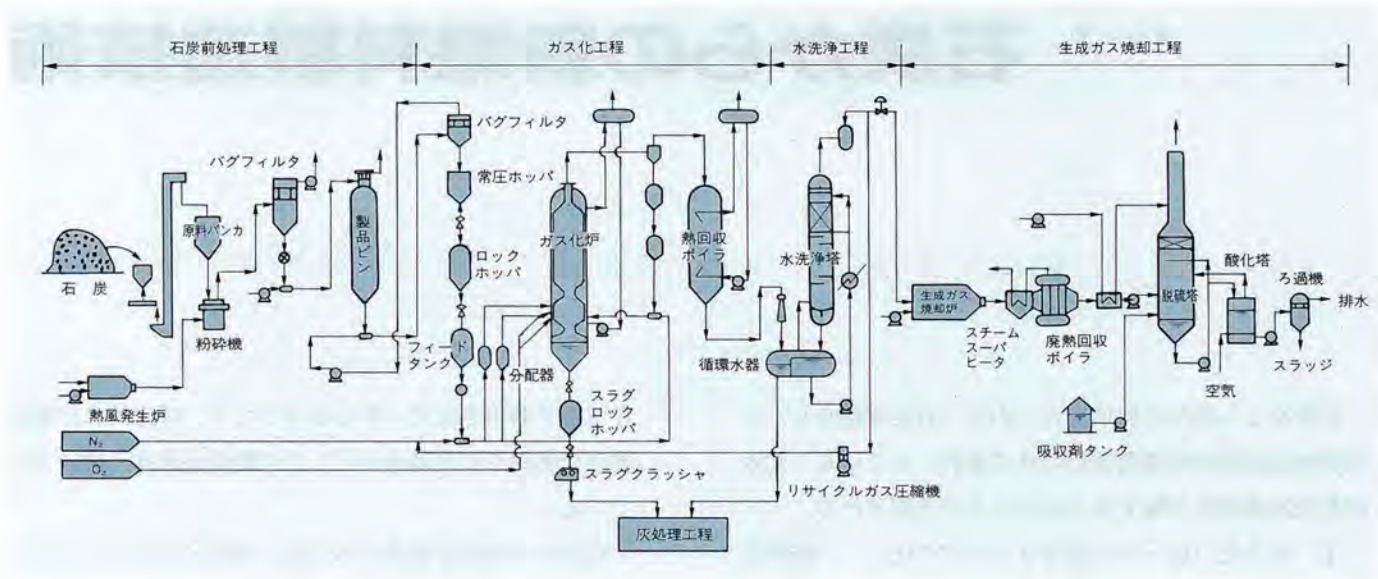


図4-2-1 石炭利用水素製造パイロットプラントフローシート (HYCOL)

石炭の前処理、ガス化、水洗浄、生成ガス焼却の5工程で構成されている。石炭を微粉炭気流搬送で1室2段旋回流方式のガス化炉へ供給し、1,500~1,800°C、10~30kg/cm²Gでガス化する。石炭処理量は20~50t/日である。

熱効率の向上にある。

また最近、石炭を水添ガス化して生成するメタンを水素と炭素に分解し、炭素をカーボンブラックとして除去するという水素製造法が提案されており、今後の研究開発動向が注目されている。

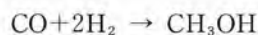
4-2-4 メタノール製造

メタノールは、輸送、発電、民生の各分野での活用が期待されているが、メタノール自動車などで一部利用されているに過ぎない。しかし、近い将来の発電用燃料として有望視されており、燃料電池発電およびガスタービン（直接燃焼型及び改質燃焼型）発電への導入が検討されている。また、LNGや都市ガスなどが入手しにくい地域におけるクリーンかつ高効率利用が可能な発電用燃料としても期待されている。

従来、メタノールは天然ガスなどの水蒸気改質反応によって得られるガスから製造されているが、石炭の高度利用の観点から、石炭を原料とするメタノール製造は、将来有望な一技術になると考えられる。さらに、現在開

発が進められている石炭ガス化複合発電にメタノール製造工程を付加することで、電力需要オフピーク時のガス化炉の負荷平準化手段にもなり得ると期待されている。

メタノールは一酸化炭素と水素から、次の反応によって合成される。



すなわち、一酸化炭素と水素の混合ガスが得られる化石燃料資源であれば原料として利用できる。

現在、メタノールはそのほとんどが天然ガスから製造されており、石炭を原料とするメタノールプラントは世界の製造設備容量の1%を占めるに過ぎない。しかし、将来的にはその資源量、供給安定性から原料は天然ガスから石炭へと推移していこう。

石炭からメタノールを製造するには、図4-2-2に概略工程を例示するように、石炭をガス化して一酸化炭素と水素の混合ガスに転換し、ガス精製、ガス組成調整の後にメタノール合成を行う。石炭ガスには灰分、硫黄分、窒素分、タールなどの不純物が多量に含まれるため、下

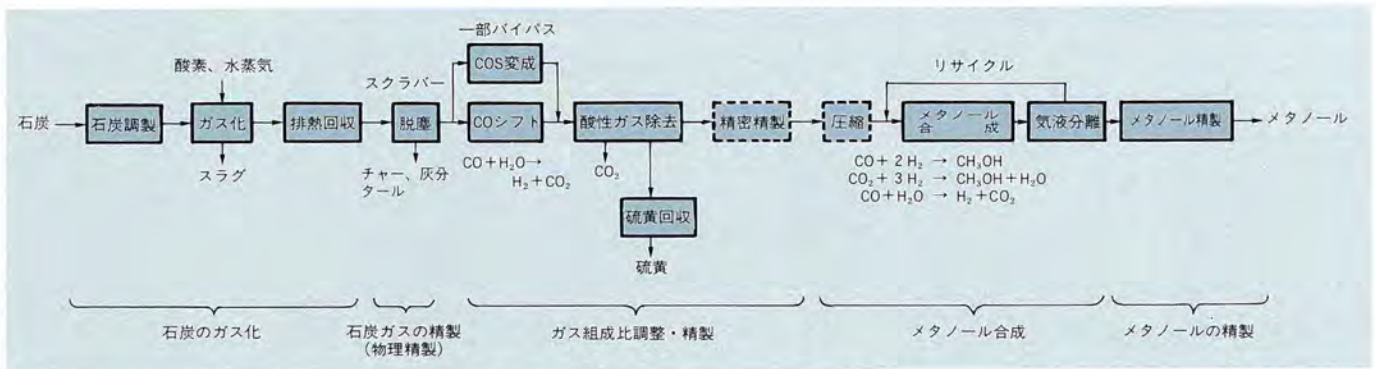


図4-2-2 石炭原料メタノール製造プロセス工程図

流のメタノール合成触媒の劣化を招かないよう、高度なガス精製技術が要求される。また、石炭ガスには一酸化炭素が多く含まれるため、水素濃度を高めてメタノール合成に適したガス組成に調整する必要がある。

このように高効率なメタノール製造を実現するには、石炭ガスの高度精製技術とともに新しいメタノール合成技術の開発が課題となろう。従来、メタノール製造における課題はメタノール合成に伴う反応熱をいかに効率的に除去するかということであり、これを克服する方法として気相流動法、液相合成法が提案されている。このうち液相合成法は、既存の気相合成法に比べ、熱容量の大きな溶媒により反応熱の除去が容易であり、しかも転化率を向上できる可能性があることから、将来のメタノール

製造技術として期待されている。

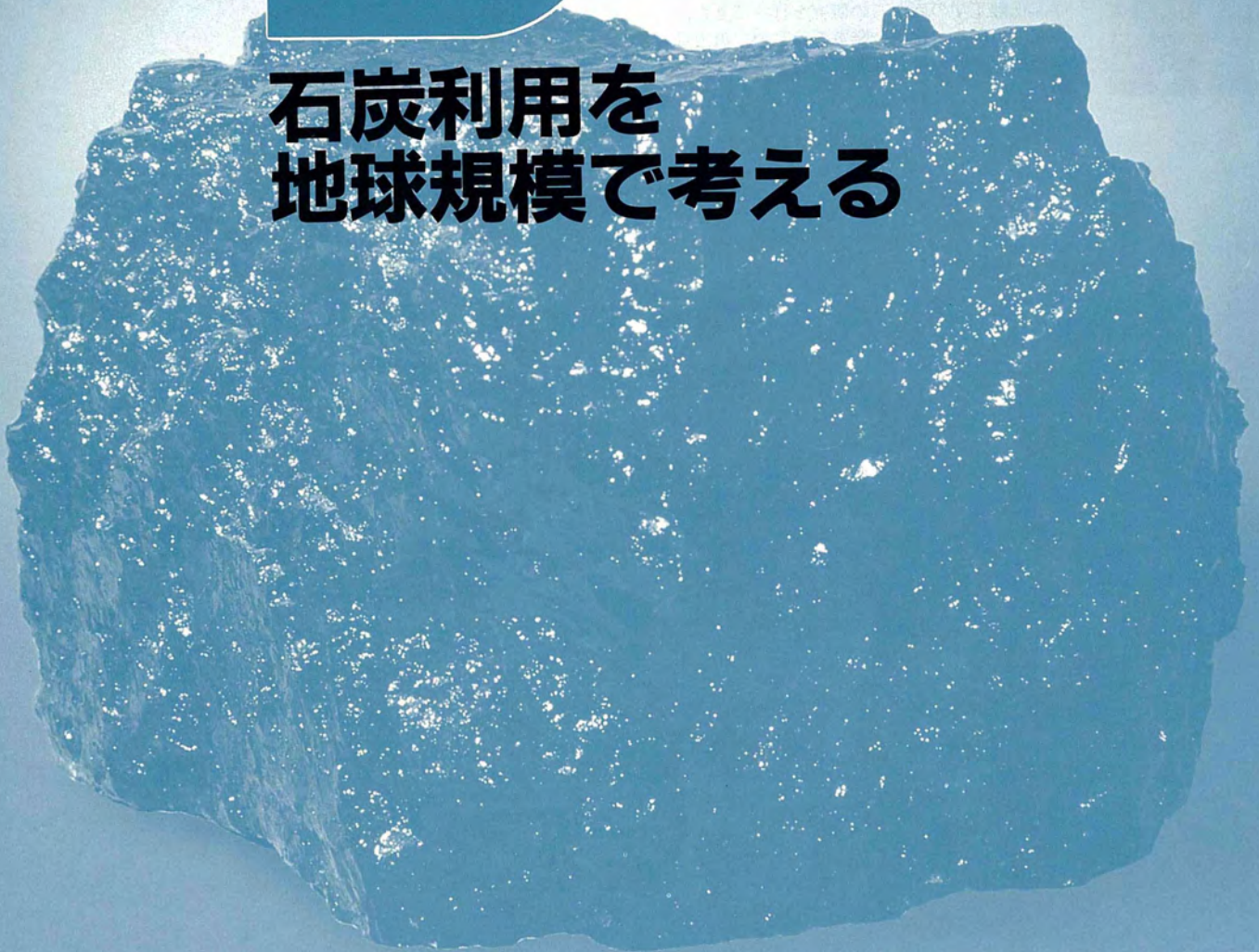
この液相合成法については、大別して液相懸濁床プロセス（銅-亜鉛系酸化物触媒使用）と低温液相プロセス（遷移金属系液相触媒使用）とが提案されている。特にアメリカのブルックヘヴン国立研究所が提案する低温液相プロセスは、これまでのメタノール製造技術とは異なる新しい技術であり、プラントの大型化と製造コストの低減が期待されている。

当研究所ではこの低温液相プロセスに着目し、その触媒活性および反応特性を国内で初めて明らかにするとともに、取扱いがより容易な触媒の開発を目指して研究を進めている。

第 章

5

石炭利用を
地球規模で考える



第5章 石炭利用を地球規模で考える ● 目次

横須賀研究所 発電システム部長 浜松 照秀

5-1	21世紀の石炭需給と国際協力	89
5-2	石炭利用発電における新技術	91



浜松 照秀 (1970年入所)

発電所温排水対策、蒸気貯蔵発電、石炭ガス化技術など火力、原子力発電に関する熱力学、伝熱工学の面からの研究を行ってきた。現在、石炭ガス化複合発電をはじめ、火力発電新技術全般の研究推進の業務を担当している。

5-1 21世紀の石炭需給と国際協力

今日の人類の繁栄と生活の便益をもたらした化石燃料は、依然として中長期的にエネルギーの安定供給力の要である。しかし、枯渇が近いとされる石油、天然ガス資源に対し、400年はあるとされる石炭やその他の燃料は、その性状が大きな変化幅をもつ。

再度の石炭の本格活用時代を迎えるにあたり、中長期的な石炭の需給、石炭産出国、途上国との国際協力などを視点においた検討も必要である。21世紀に向けた石炭需給の展望については、総合エネルギー調査会石炭部会での検討が進められつつあり、近い将来政策レベルでの方向性も打ち出されると予想される。

5-1-1 石炭の需給について

1989年の世界エネルギー会議における世界の石炭可採埋蔵量は1兆3,000億トンであり、石油に換算すれば石油可採埋蔵量の6.7倍に相当する。現在世界の石炭生産量は約35億トンであるが、年間輸出入市場規模は4億トンにすぎず、消費構造は自国消費型となっている。

わが国は石炭利用拡大を基本施策の1つとして、輸入量(約1億トン/年=世界輸出入市場の26%)は増加の一途をたどっており、世界一の輸入国となっている。このうち燃料用一般炭は約3,500万が輸入されている。発電用一般炭は硫黄分1%以下、灰分10%以下、水分10%以下の高品位な瀝青炭を用いており、今後21世紀半にかけ、3~5倍必要になる(「21世紀に向けた火力発電技術の研究ビジョン」電中研1993-3)。当面は高効率な新型火力発電技術もこの高品位瀝青炭が使われる。さらに原料炭については、製鉄における溶融還元法などの技術進歩によ

り適用炭の範囲が拡大され、21世紀には製鉄での一般炭利用が予想以上とも言われている。

一方、わが国の石炭需給を左右するアジア太平洋地域について、中国、インドネシア、オーストラリア、米国などの石炭産出国の産炭事情、ならびにその他にも含めたアジア諸国の経済成長を注視しなければならない。

10億トン/年もの石炭を生産・消費する中国は、21世紀首には17億トン/年以上を必要ともされている。巨大人口を支えるこの他のアジア地域開発途上国の経済成長(年率7~8%)は著しく、産炭地でもあるインドネシア、インド等も国内需要優先化の傾向にあり、石炭需要圧力へ向く。また、オーストラリア、米国など先進国産炭事情については、今後の生産・輸出の経済的インフラ整備が不十分期待できるほどでもなく、需給は2000年で厳しいとも思われている。以上の各方面の事情から、2010年以降になると低硫黄、低灰分、低水分の高品位炭の需給はタイトになり、高硫黄、高灰分の瀝青炭、亜瀝青炭・褐炭等の低品位炭の使用を迫られる可能性が強い。

5-1-2 国際協力の視点

石炭利用の拡大がもたらす地球規模の大気汚染に対応する途上国との関わり、石炭の需給や低品位炭活用による産炭地との関わり、といった視点が、来る第2の石炭時代に不可欠となってきている。

たとえば中国では、1930年代に製造された発電プラントが未だに稼動しているとも言われている。近代的排煙処理設備を備えた石炭火力プラントは唯1台といった中国は、今後の著しい経済成長を支えるための電力は概ね

石炭にたよる情勢にある。稼働中の中小規模石炭火力の排煙処理対策のためには、ボイラ炉内脱硫あるいは煙道簡易脱硫技術の開発・普及援助などの国際協力が必要で、その努力もなされつつあるが、緊急かつ効果的な方策が望まれている。

一方、低品位石炭の利用のためには、多様な性状をもつ低品位炭を、産炭地で高品位なものに転換・改質する

技術や、わが国へ輸送する技術、あるいはわが国でクリーンかつ高効率で利用する技術の開発とその条件整備が必要となろう。そのためには先ず、多様な低品位炭の利用技術体系の評価研究、基礎研究、技術開発が不可欠であり、これら各種研究の石炭産出国との国際協力による推進が効果的と考えられる。

5-2 石炭利用発電における新技術

石炭は21世紀の電力需要増に対応できる重要なエネルギー資源であり、硫黄分、窒素分の含有量、CO₂発生量原単位が大きいという逆風にもかかわらず、供給力の確保の要である。また、燃料性状も品位の高いものから低いものまで千差万別である。

前節で述べたように21世紀初頭には低品位炭、天然重質油の利用が求められる。各品位の石炭とこれを高度に利用する新型発電方式との関係や燃料の流れの鳥瞰を図5-2-1に示す。

同図中の高品位炭利用については、第2章で述べたように、既存の微粉炭火力発電から、2000年実用化目標の石炭ガス化ガスタービン複合発電、さらにはガスタービ

ン(GT)単筒型燃焼器で直接石炭を燃焼させる究極(?)の複合発電であり、高品位炭ですら、すでに多様な技術に分かれている。

また、低品位炭については、高品位化のための脱灰(含、超脱灰)、脱硫の技術、石炭ガスによるメタノール生産、高品位化したものをCWMとして流体化するなど、石炭利用チェーン、燃料体系は多様なものがあり、在来概念にとらわれない挑戦的な基礎・基盤研究の実施とともに、主要な候補についてフィジビリティ・スタディを重ね、魅力のあるものの開発・実用化を図る必要がある。

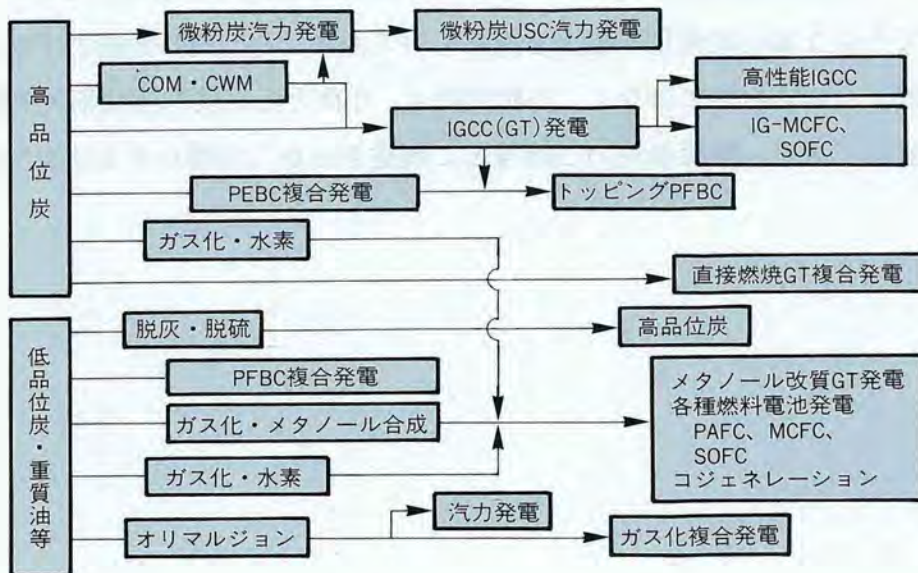


図5-2-1 21世紀の石炭利用発電新技術

お わ り に

理事 横須賀研究所長 宮岡 貞隆



地球温暖化など厳しい環境問題の中で、石炭をいかにクリーンにかつ効率的に使っていくかということが、21世紀へ向けて、わが国のみならず世界人類の大きな命題の一つであります。

石炭は、埋蔵量の豊富さ、供給の安定性、優れた経済性等数多くの利点を有しており、原子力に次ぐエネルギー資源として21世紀のエネルギー供給に重要な役割を担うものと期待されています。しかし、環境汚染物質の排出量の多い石炭の利用に際しては、より地球環境に調和した技術開発が重要となっております。

本レビューは、「環境に優しい石炭利用技術」として、地球環境に調和した石炭利用技術の現状と将来動向について、当所の研究開発を中心に、内外の研究をも含めて紹介したものであります。

21世紀に向けてさらなる石炭利用の拡大を図っていくためには、既存技術の不断の改良と、新しい技術開発の徹底した追求以外にはなく、当研究所も、今後とも石炭利用技術の開発にさらに力を入れて取り組む覚悟である。関係各位のご指導とご鞭撻を心からお願いする次第である。

関連する主な研究報告書等

● 1-1~4 ●

1. 「GREEN COAL」 Vol.1~12 (1991.5~1992.4) 東京電力 燃料部燃料計画課
2. 「石炭エネルギーと環境問題」 富永博夫 エネルギー・資源、Vol.11, No.2, 97~100 (1990)
3. 「徹底検証 エネルギー問題」 ニュートン Vol.12, No.9, pp.60-80 (1992)

● 2-1 ●

1. 「石炭火力燃焼技術の高度化に関する研究現状」 昭和62年度電力中央研究所研究発表会 -火力部門- 予稿集 (1987)
2. 「石炭火力技術の高度化に関する調査 (その2)」 電中研 調査報告: W870034 (1988)
3. 「微粉炭ワイドレンジバーナの開発 (その1)、(その2)」 電中研 研究報告: W8800 (1988)、W88032 (1989)
4. 「微粉炭火力の運用性改善燃焼技術の開発状況」 日本機械学会動力エネルギー技術シンポジウム予稿集 (1989)
5. 「石炭火力の新燃焼技術の現状と展望」 平成元年度電力中央研究所研究発表会 -火力部門- 予稿集 (1989)
6. 「石炭火力の極低負荷運用のためのワイドレンジバーナの開発」 平成2年度電力中央研究所研究発表会 -火力部門- 予稿集 (1990)
7. 「石炭火力の極低負荷運用のためのワイドレンジバーナの開発」 平成2年度JFRC年次大会予稿集 (1990)
8. 「差圧式粉体流量計のボイラ微粉炭計測への適用」 化学工学第23回秋期大会予稿集 (1990)
9. 「微粉炭バーナの安定燃焼範囲の検討」 第28回日本燃焼シンポジウム予稿集 (1990)
10. 「微粉炭バーナにおける燃焼安定性に及ぼす微粉炭噴出位置の影響」 第28回日本燃焼シンポジウム予稿集 (1990)
11. 「微粉炭濃度・粒度自動監視装置の開発」 電中研 研究報告: W91013 (1991)
12. 「Development of the Wide Range Burner」 Pittsdsurgh Coal Conference Proccedinge (1991)
13. 「多段分級法による粒度自動監視装置の開発」 化学工学米沢大会予稿集 (1991)
14. 「石炭火力の運用性を改善するワイドレンジバーナの開発」 平成3年度火力原子力発電大会予稿集 (1992)
15. 「微粉炭濃度・粒度自動監視装置の開発」 火力原子力発電技術協会第19回新技術発表会概要集 (1992)
16. 「EPRIにおける流動床燃焼ボイラのプロジェクト研究の概要」 電中研 調査報告: A82001 (1982)
17. 「石炭加圧流動床燃焼複合発電プラントの評価」 電中研 調査報告: A82003 (1982)
18. 「加圧流動床ボイラ石炭火力発電技術の開発の現状と展望」 電中研 調査報告: W89053 (1990)

● 2-2 ●

1. 「2T/D加圧二段噴流床石炭ガス化炉特性」 電中研 研究報告: W88018、W88019(1989)、W89042(1990)
2. 「石炭ガス化炉内の混合流動特性」 電中研 研究報告: 285015、285080(1986)
3. 「加圧二段噴流床石炭ガス化炉におけるNH₃生成特性」 電中研 研究報告: W89043 (1990)
4. 「噴流床石炭ガス化炉内スラグコーティング予測手法の開発」 電中研 研究報告: W9003 (1990)
5. 「フラックス添加による高灰融点炭の高性能ガス化技術の開発」 電中研 研究報告: W89027(1990)、W90022、W91012(1991)
6. 「混炭による高灰融点炭の高性能ガス化技術の開発」 電中研 研究報告: W90017(1991)、W91043(1992)
7. 「石炭ガス化炉のインゼクタ方式による新型チャー回収技術の開発」 電中研 研究報告: W90044(1991)、W91036(1992)
8. 「石炭ガス化複合発電の性能評価手法とガス化炉基本特性」 火力原子力発電、Vol.40-9 (1989)
9. 「加圧二段噴流床石炭ガス化炉の開発」 日本機械学会論文集 57巻535号 (1991)
10. 「Development of technology to measure the coal ash fusion temperature in the range of ultra-high temperature」 2nd JSME-KSME thermal engineering conference (1992)

11. 「石炭ガス化用ポーラスフィルタの高圧逆洗」電中研 研究報告：W88035(1989)、W89007(1989)
 12. 「石炭ガス化用ポーラスフィルタの燃焼再生」電中研 研究報告：W89031 (1990)
 13. 「ポーラスセラミックフィルタの耐久性評価手法に関する考察」エアロゾル研究、Vol.5, No.2 (1990)
 14. 「石炭ガス化用ポーラスフィルタ集塵装置の大型化のための適正なフィルタサイズの選定」電中研 研究報告：W90031 (1991)
 15. 「石炭ガス化用乾式脱硫剤の長期信頼性 - 脱硫性能低下因子の総合評価」電中研 総合報告：W89040 (1990)
 16. 「石炭ガス化ガス用乾式脱硫剤の開発 - Fe₂O₃粒状脱硫剤のH₂S吸収特性」燃料協会誌 Vol.69, No.6 (1990)
 17. 「固定床脱硫システムの評価 - シミュレーションプログラムの開発」電中研 研究報告：W91015 (1991)
 18. 「石炭ガス化複合発電用固定床クリーンアップシステムの開発」火力原子力発電 No.425, Vol.43 (1992)
 19. 「石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の開発(第1報)～(第9報)」電中研 研究報告 W87035(1988)、W87036(1988)、W89010(1989)、W89014(1989)、W89017(1989)、W90005(1990)、W90011(1990)、W91004(1991)、W91011(1991)
 20. 「低カロリーガス燃焼に関する研究(その1)～(その5)」電中研 研究報告 285041(1986)、285068(1986)、W86034(1987)、W87030(1988)、W88028(1989)
 21. 「石炭ガス化燃料の燃焼反応解析(第1報)～(第3報)」電中研 研究報告 W88008(1988)、W89026(1990)、W92010(1992)
 22. 「石炭ガス化燃料中のアンモニア除去に関する研究(第1報)～(第3報)」電中研 研究報告 W88006(1989)、W88013(1988)、W91049(1992)
 23. 「噴流床石炭ガス化複合発電用ガスタービン要素実験設備」電中研 研究報告 W87019 (1987)
 24. 「石炭ガス化用ガスタービン燃焼器におけるライナ壁温の予測手法(第1報)」電中研 研究報告 W88001 (1988)
 25. 「ガスタービン燃焼器の数値シミュレーション(第1報)」電中研 研究報告 W91001 (1991)
 26. 「火原協会講座 火力発電所の環境保全技術・設備」火力原子力発電技術協会 (1991)
- 3 - 1 ●
1. 「微粉炭燃焼に伴うサブミクロンばいじんの性状と防除対策」電中研 総合報告：W02 (1987)
 2. 「燃料転換とSO_x・NO_x対策技術」安藤淳平著 プロジェクト ニュース社 (1983)
 3. 「微粉炭燃焼に伴うNO_x・灰中未燃分同時低減燃焼技の開発(その1)(その4)(その6)」電中研 研究報告 W88010(1988)、W89006(1989)、W91010(1991)
 4. 「石炭の生物加工 - 1 -, - 2 -, - 4 -, - 5 -」電中研 研究報告 U89032(1989)、U89042(1989)、U91010(1991)、U92001(1992)
 5. 「石炭をクリーンにする - 微生物のはたらき脱硫 -」電中研ニュース No.225 (1992)
 6. 「微生物を使い石炭中の硫黄分を取り除く？」エネルギーフォーラム9月号 p.116 (1991)
 7. 「微生物による石炭の脱硫」石炭利用技術情報6月号 pp.7~10 (1991)
 8. 「微生物を応用した浮遊選炭による石炭の脱硫」石炭利用技術情報10月号 pp.11~13 (1992)
 9. 「微生物による石炭の脱硫」発酵工学会誌第70巻 第4号 p.314 (1992)
 10. 「微生物による石炭の脱硫」バイオインダストリー第9巻 第2号 pp.108~116 (1992)
 11. 「微生物による石炭の脱硫」石炭利用技術会議要旨集 (1991)
 12. 「微生物による石炭からの黄鉄鉱硫黄の脱硫」資源と素材学会 秋季大会 分科研究会資料 N資源処理におけるバイオテクノロジー - pp.5~8 (1992)
 13. 「石炭中の無機硫黄を除去する細菌の分離」農芸化学会 91年度大会講演要旨集 p.329 (1991)
 14. 「微生物を用いた石炭中の無機硫黄の脱硫」農芸化学会 92年度大会講演要旨集 p.267 (1992)
 15. 「Mechanism of microbial flotation using *Thiobacillus ferrooxidans* for pyrite suppression」Biotechnology &

Bioengineering 41巻 pp.671~676 (1993)

● 3-2 ●

1. 「土質工学ハンドブック第21章 土工設計」土質工学会
2. 「アスファルト舗装要項」道路協会編
3. 「石炭灰を利用した道路路盤材の実用化研究」中部電力電力技術研究所パンフレット
4. 「第9回国際石炭灰シンポジウム」アメリカ石炭灰協会 (1991) オーランド
5. 「石炭灰の有効利用に関するシンポジウム」中国石炭協会など (1991) 上海
6. 「石炭灰埋立地盤の物理的・力学的特性 — 締固めによる強度増加特性—」電中研 研究報告 U91025 (1991)
7. 「電力中央研究所所内資料」片岡哲之
8. 「フライアッシュの不拡散高密度埋立・盛立システム設計施工マニュアル(案)」電源開発株式会社 石炭技術研究所 (1988)
9. 「石炭灰を利用した新複合セメントの開発」電中研 総合報告 U13 (1988)
10. 「新複合セメントコンクリートの耐久性とローラーコンパクテッドコンクリートへの適用性」電中研 研究報告 U91065 (1992)
11. 「肥料要覧」農林水産省肥料機械課監修 (1992)
12. 「石炭灰ハンドブック」環境技術協会、日本フライアッシュ協会編 (1990)
13. 「土肥誌」58(3) 378-380 逸見彰男 (1987)
14. 「けい酸加里の特徴と肥効」珪酸カリ研究会・全農肥料農薬部監修 (1978)
15. 「焼成温度の異なるけい酸加里肥料の溶解性と肥効」電中研報告：U86030 (1987)
16. 「けい酸加里肥料の溶解性とその肥効」土肥誌、59(5)：445-451 青木正則ほか (1988)
17. 「石炭灰を利用した肥料の開発研究」農業電化、44(4)：8-13 (1991) 青木正則
18. 「石炭灰化成肥料の開発とその肥効」電中研 研究報告 U92026 (1993)
19. 「石炭灰の農業への利用」産業公害 Vol.28, No.12 (1992) 青木正則ほか

● 3-3 ●

1. 「石炭の低温酸化による発熱量低下に関する研究 — 貯炭層内における低温酸化—」燃料協会誌 Vol.52, No.549 (1973)
2. 「海外炭の自然発火特性(1) — 試験パイルにおける温度上昇と自然発火—」火力原子力発電 Vol.33, No.3 (1982)
3. 「海外炭の自然発火特性(2) — 自然発火過程と防止対策—」火力原子力発電 Vol.33, No.4 (1982)
4. 「海外炭の自然発火特性」電中研 総合報告：213
5. 「石炭自然発火予知システムの開発(その1)~(その4)」電中研 研究報告：280048(1981)、281061(1982)、283084(1984)、283088(1984)
6. 「Development of Spontaneous Combustion Warning System for Coal Stockpiles」International Conference on Coal Science (1989)
7. 「揚貯炭施設からの炭じん飛散に関する検討」電中研 研究報告：281060 (1982)
8. 「揚貯運炭施設からの炭じん飛散量予測手法の開発」電中研 研究報告：T89025 (1990)

● 3-4 ●

1. 「二酸化炭素の資源化利用技術の調査」電中研 調査報告 W90029 (1991)
2. 「地球温暖化に挑む」電中研レビュー No.28 (1992.4)
3. 「地球温暖化の防止技術 — CO₂回収・処理技術を考える」季刊 エネルギー総合工学 Vol.14, No.3 (1991)
4. 「新エネルギー技術によるCO₂利用」ケミカル・エンジニアリング (1992.4)
5. 「資源エネルギー技術研究の動向」ケミカル・エンジニアリング (1992.4)

6. 「地球温暖化ハンドブック」小宮山宏監修、アイピーシー (1990)
7. 「二酸化炭素回収のための火力発電システムの検討 (第2報)」電中研 研究報告 W89044 (1990)
8. 「微生物によるCO₂固定(1)、(2)」電中研 研究報告 U90020(1990)、U92014(1992)

● 3 - 5 ●

1. 「発電所の景観設計手法 - 景観対策の効果と海岸イメージ」電中研 研究報告 583017 (1984)
2. 「電力施設の環境設計」電中研 研究報告 585008 (1986)
3. 「発電所の景観設計手法」電力経済研究 No.19 (1985)

● 4 - 1 ●

1. 「高濃度石炭水スラリーの発電への利用」火力原子力発電 Vol.38, No.1 (1987)
2. 「混気ジェットポンプによるCWM乾式製造法の検討」電中研 研究報告: W87038 (1988)
3. 「高濃度石炭・水スラリー(CWM)の乾式製造法の検討」電中研 研究報告: W88015 (1989)
4. 「CWM乾式製造法の検討 - 試作試験装置による製造とCWM性状-」電中研 研究報告: W91047 (1992)

● 4 - 2 ●

1. 「石炭利用水素製造」ENERGY (1988-9)
2. 「Abstract of 1989 International Conference on Coal Science (IEA) Tokyo」(1989)
3. 「石炭を原料とするメタノール製造技術の調査」電中研 調査報告 T91094 (1992)
4. 「Low Temperature Methanol Synthesis Catalyst and Process Development」Proceedings of Tenth Annual EPRI Contractions' Conference on Clean Liquid and Solid Fuels (1985)
5. 「メタノール低温液相合成(2)」電中研 研究報告 T91086 (1991)

● 5 - 1 ~ 2 ●

1. 「21世紀に向けた火力発電技術の研究ビジョン」電力中央研究所 (1933)

本部／経済社会研究所 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)3201-6601 ☎100
柏江研究所／情報研究所
原子力情報センター／ヒューマンファクター研究センター
東京都柏江市岩戸北2-11-1 ☎(03)3480-2111 ☎201

我孫子研究所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-11
横須賀研究所 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-01
赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(0272)83-2721 ☎371-02
塩原実験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-28

編集後記

電中研レビュー第30号「環境に優しい石炭利用技術」をお届けします。

前号の発刊からだいぶ間が空いてしまい「どうしたんだ、電中研レビューはやめてしまったのか?」といったお問い合わせをずいぶんいただきました。申し訳ございませんでした。

特に、ご多忙中にもかかわらず快く巻頭言をご寄稿いただきました電源開発(株) 常務 中林 恭之 様には、心からお礼を申し上げますとともに、原稿をいただいてからずいぶん時間が空いてしましまして、この場をお借りいたしましてお詫びいたします。

さて、本レビューで取り上げた“石炭”ですが、昭和の30年代ごろまでは身近に感じられるエネルギー源だったのではないのでしょうか。冬の学校では達磨ストーブでがんがん燃やしていましたが、家の掘炬燵などでも練炭を燃やして、中で寝てしまった猫が一酸化炭素中毒にったりしました。石炭が燃えるあの独特の匂いを今でも時々思い出します。

その後、家庭のエネルギーは電気や灯油に取って代り、石炭の姿は目の前から消えていきました。今の子供たちにとっては「よもやあんな石が燃えるとは!」といった感じでしょう。より使いやすいものに移っていくことは仕方のないことです。

電気事業にとっても同じことが言えました。扱いづらく、燃やすといろいろと悪影響をおよぼす物質を吐き出す石炭は、扱いやすい石油や、クリーンなLNGに取って代わりました。

しかし、時代の要請により石炭にもう一踏ん張りしてもらわなければならないことになりました。もちろん環境に悪影響を及ぼすことのないようにすることが前提条件ですが。そのために、今さまざまな技術が求められています。

本レビューは、そのような石炭をクリーンに効率よく利用する技術に関して当研究所の研究を中心に、国内外の動向を紹介したものです。

本冊子が関係諸機関の皆様方の一助となれば幸いです。

IR