

■ 技術報告 ■

火炎の新しい分類とケミカルガスタービン構想

New Classification of Flames and Proposal of Chemical Gas Turbine System

新井紀男*・小林敬幸**

Norio Arai Noriyuki Kobayashi

(1995年6月21日 原稿受理)

1. はじめに

従来のガスタービンをはじめとする工業炉の設計基準を抜本的に見直さざるを得ないような新しい概念が、ここ数年、基礎研究者および設計技術者のなかで生まれつつある。ごく近い将来、いままでの常識を越えた高効率、低公害型のガスタービン、燃焼工業炉に代表されるエネルギー変換プロセスが出現するものと予測される。

とくに、十九世紀の燃焼装置の創成期において、燃焼現象そのものの解明および工業炉の設計に携わりその後、ほとんど離れてしまっていた化学 (Chemistry)、化学工学 (Chemical Engineering) を専門とする技術者、科学者が、最近、工業炉の開発研究の現場に復帰しつつあることが新しい概念に基づく工業炉設計が生まれるのに重要な役割を果たしている。

ここでは、燃料の有する化学エネルギーを動力エネルギーへの高効率エネルギー変換を考えると、最も基本となる燃料の酸化反応特性およびエクセルギー効率という立場から、燃焼現象そのものを、再評価していく必要があることの重要性をまず指摘するつもりである。ついで、このような考え方にに基づき、ガスタービン技術を例として、現存のテクノロジーの欠点を明らかにすると共に、いま、日米で同時にしかし、お互いに何の事前の接触なく独自にスタートした高効率ガスタービンを比較しつつ紹介する。そして、名古屋大学高温エネルギー変換研究センターの提案するケミカルガスタービンの基本構想を述べる。

* 名古屋大学高温エネルギー変換研究センター教授
** " " " " 助手

〒464 名古屋市中千種区不老町

2. 燃焼現象を利用する諸テクノロジー

図-1は、従来および現存の燃料と酸化剤の発熱反応を利用したエネルギー変換技術を横軸に当量比をとって定性的に表示したものである。なお、燃焼現象の特徴は、予混合、部分予混合および拡散燃焼により異なるが、ここでは、空気過剰燃焼および燃料過濃燃焼を含む広義の燃焼現象を利用している諸技術を概観する意味から、便宜上トータルの当量比を横軸にとっている。本図から、現存燃焼技術が比較的狭い領域で行われているものであって、その他の多くの技術は燃焼とは異なるものであると考えられてきたことがわかる。例えば、カーボンブラック製造プロセスは、燃焼現象そのものを利用していることを、いま再認識すべきものと考えられる。

燃焼を利用する熱プロセスにおいて、例えば、被加熱物を加熱処理する場合を考えると、燃焼による化学エネルギー (燃料) の熱エネルギーへの変換効率は、燃料によって差はあるものの90%以上である。ところ

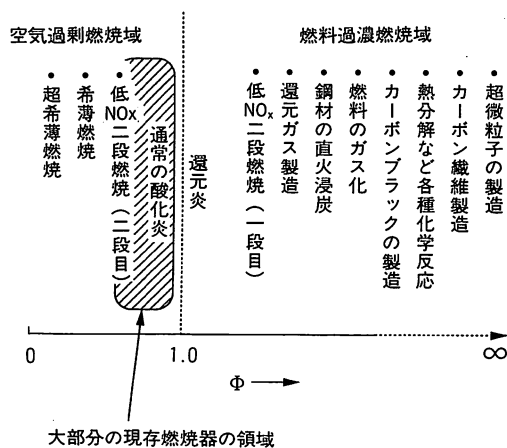


図-1 燃焼を利用した各種エネルギー変換技術

が、熱プロセス全体でエネルギー変換効率を考えると高々80%、蒸気発生ボイラでは80%以上、多くは50%以下(鋼材処理炉の多くはこの程度)、最先端のガスタービン・コンバインドサイクルシステムの総合発電端効率(低発熱量基準)も高々50%程度である。これは、何と云っても伝熱効率が低いからに他ならないが、同時にこれまでと抜本的に異なる概念のもとにガスタービン技術を考えないと、発電効率60%を超えるようなコンバインドサイクルは実現できないと思われる。

燃焼を少しわかっている人ならば燃料を何も過剰空気燃焼せずとも空気不足条件下で所望の温度は原理的に実現可能であることは知っているであろう。ここに新しい概念の生まれる源があるのである。例えば、燃料過濃燃焼(fuel-rich combustion)により、鋼材の熱処理をしたとしよう。この場合、燃焼排ガス中に可燃ガスの H_2 、 CO や条件によってはメタンなどの炭化水素が残っているから、熱処理後の燃焼ガスの温度が常温まで低下し、熱エネルギーとしては価値はなくなっても、化学エネルギーが残っていることになる。そこで、当量比1.0を境にして、これ以下の当量比の火炎をメカニカル火炎(Mechanical flame)、一方、1.0より大きなものをケミカル火炎(Chemical flame)とそれぞれ定義¹⁾してガスタービンシステムに用いる燃焼形態を考えてみたところ、極めて有用な新しいガスタービン技術が考えられることが明らかになった。驚くべきことに、ほとんど全く同じ考え方をアメリカ・ペンシルバニア大学のLior教授らのグループが提案しているのである^{2),3)}。彼らは、MechanicalをThermomechanical, ChemicalをThermochemical, と

表現している以外は、著者とほとんど同じ考え方をとっている。

3. ケミカル火炎 (Chemical flame) とメカニカル火炎 (Mechanical flame)

断熱火炎温度、層流燃焼速度および平衡生成物濃度と当量比(または空気比)の関係は、燃料と酸化物(通常、空気)の混合比が決まれば、化学平衡計算によって理論的に求められる。ここでは、Sandia National Laboratoryにおいて開発されたCHEMKINコードを用いたこれらの計算結果を示し、そもそもケミカル火炎(Chemical flame)およびメカニカル火炎(Mechanical flame)とは、如何なる特徴があるかを概述する。

3.1 断熱火炎温度と当量比の関係

図-2に各種燃料の断熱火炎温度と当量比あるいは混合気中の燃料モル濃度との関係を示す⁴⁾。なお、左図中の H_2 - CO - N_2 は、炭化水素フリーの都市ガス6Bを想定している($H_2=41\%$, $CO=2.6\%$, $N_2=balance$)。両図から明らかにわかる特徴は、すべての火炎において断熱火炎温度の最大値は、燃料過濃(fuel-rich)燃焼条件下に存在することである。このことは、何も空気過剰燃焼をしなくても燃料過濃燃焼条件で十分に所望の高温場を形成しようということがわかる。しかも、 $\phi > 1$ では、燃焼生成物中に H_2 、 CO などの未燃ガスが含まれている。図-3に、正ペンタデカンの平衡濃度と当量比の関係を示すが、 $\phi = 1.0$ を境として1.0以下では、 CO_2 、 H_2O が主成分であるのに対し、1.0以上は、 CO 、 H_2 などの可燃ガスが多く含まれており

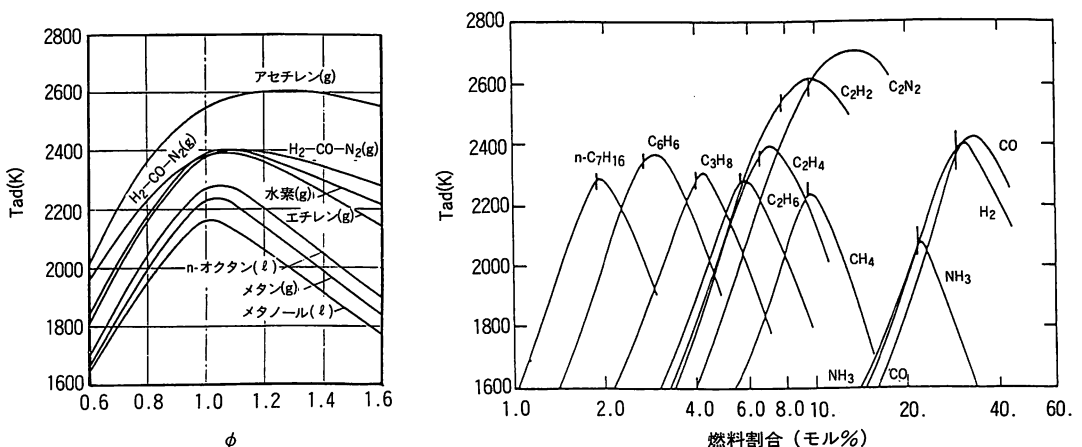


図-2 各種燃料の断熱火炎温度 ($P=0.1$ MPa, $T_0=298$ K)

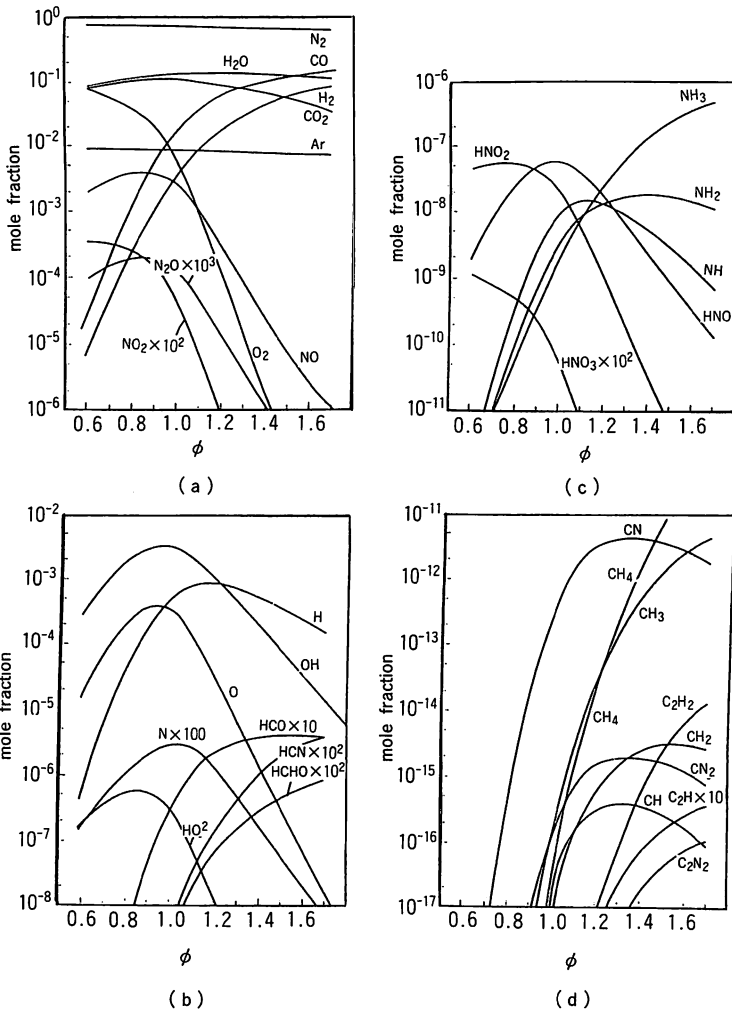


図-3 断熱火炎温度での平衡生成物組成 (正ペンタデカン, $C_{15}H_{32}$)

火炎の化学的特性は大きく異なっていることがわかる。

3.2 層流燃焼速度と当量比の関係

断熱火炎温度と同様な特徴が、層流燃焼速度 S_L と ϕ との関係にも存在し、典型的な燃料と空気との予混合気についての S_L と ϕ の関係を図-4に示す⁵⁾。層流燃焼速度は乱流燃焼速度と違って、燃料の化学的性質に強く依存していることが知られている。図-4から明らかなように、 H_2 、 CO のみならずすべての炭化水素燃料においても S_L の最大値は、燃料過濃燃焼において現れる。工業炉の多くは乱流燃焼下で操業されるため、乱流過濃燃焼火炎は燃焼速度がさらに増加する。加えて、3.1で述べたことから、乱流火炎においても空気過剰火炎に比べ火炎温度が高くなると予想される。従って工業炉をコンパクト化し、既存の燃焼炉と比べ実用上高負荷燃焼を行わせることが可能となるなどメリッ

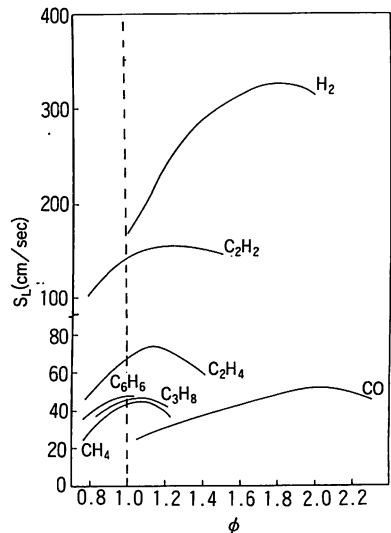


図-4 各種燃料の層流燃焼速度

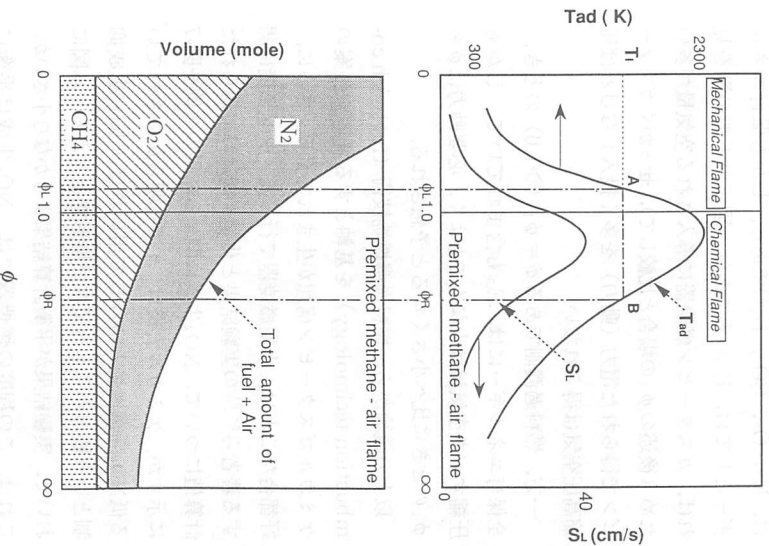


図5 T_{ad} および S_L と ϕ の関係

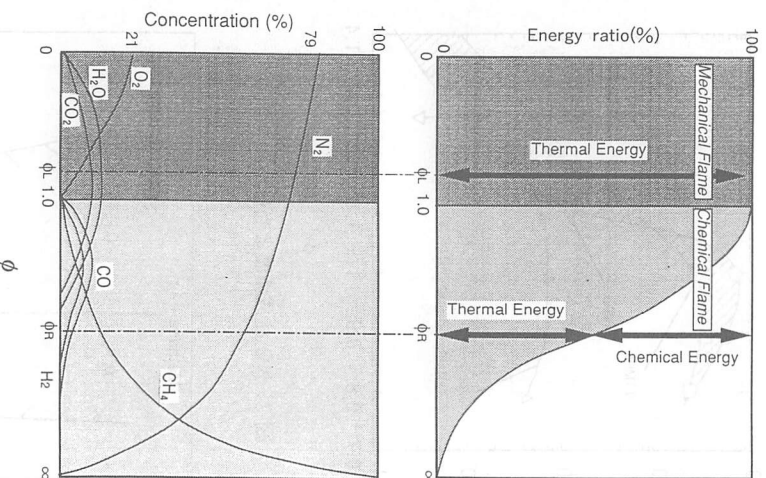


図6 化学平衡組成と当量比の関係

トが大きいと考えられる。

3.3 ケミカル火炎とメカニカル火炎の定義

実際の燃焼場では実現は困難であるが、化学平衡論の立場から、 ϕ が1.0より小さい火炎と大きい火炎を考察してみる。いまメタン・空気予混合火炎を想定し、図2~4に示した断熱火炎温度 (T_{ad})、層流燃焼速度 (S_L) および化学平衡と当量比の関係を模擬的に図示すると図-5と図-6のようになる。図-5は T_{ad} および S_L と ϕ との関係であるが、メタン量を一定に保ったときの全ガス量と ϕ との関係を、一方、図-6には燃焼ガスの保有エネルギーと ϕ との関係も併示してある。ここで、付言しておかなければならないことは、両図とも $\phi = 0 \sim \infty$ で表されているが、後述の図-8、図-9に例示するように他の燃焼パラメータにより可燃範囲が決って行くことである。

このような限定条件の下で、燃焼ガスが有する全エネルギーを E とすると、 $E = E_{Mie} + E_{Ch}$ のように、燃焼ガスの顕・潜熱の熱エネルギーと運動エネルギーなどの機械的エネルギーの総和に相当する E_{Mie} と燃焼ガス中の未燃ガスの反応熱である E_{Ch} との合計になる。 $\phi = 0$ では、 $E_{Ch} = 0$ 、 $\phi = \infty$ では、 $E_{Mie} = 0$ となり、

$\phi = 1.0$ を境にして、燃焼ガスのエクセルギー的価値は大きく異なる。すなわち、 $\phi < 1.0$ では、燃焼ガス温度が大気温度 (エクセルギー解析では、基準温度を大気温度とすることが多い) に低下したとき、そのガスは、何の動力源たり得ない、 $\phi > 1$ の場合は、燃焼ガス温度が大気温度まで低下しても、化学反応熱に相当する E_{Ch} が残っていて動力源として使い得ることになる。そこで、 $0 < \phi \leq 1.0$ の火炎をメカニカル火炎 (M.F.)、一方 $1.0 < \phi < \infty$ の領域の火炎をケミカル火炎 (C.F.) と定義することにする。

いま、メタン燃焼を用いるタービン入口温度 T_1 (TTT) のガスタービンシステムを考えてみよう。図-5においてTを実現する条件は少なくとも2つある (図-5における点AおよびBである)。ひとつは、現在のガスタービンで行われている空気を過熱燃焼条件 (図中の当量比 ϕ_1) である。この場合、燃焼ガスの組成

註*) 燃焼ガスの有する運動エネルギー、位置エネルギー、さらに実際のエネルギー変換プロセスでは、摩擦損失などがあるが、ここでは、これらは全て最終的には熱エネルギーに変わるので、 E_{Mie} に含まれると考えることにする。

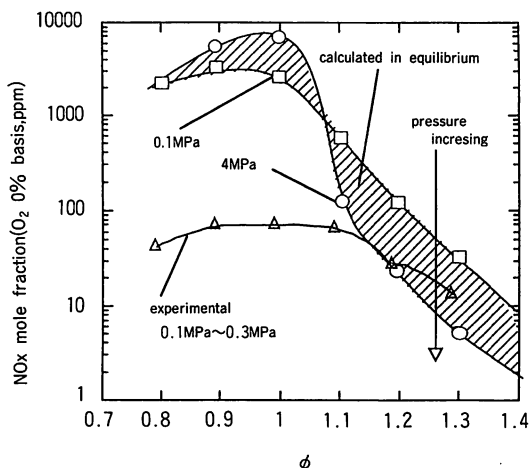


図-7 NO_x生成濃度と当量比との関係

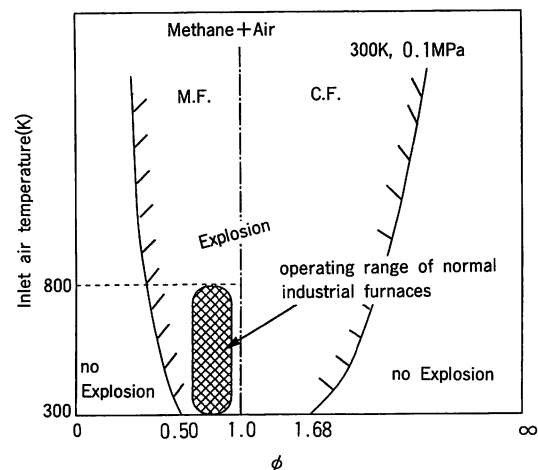


図-8 燃料の可燃範囲に与える空気予熱の効果

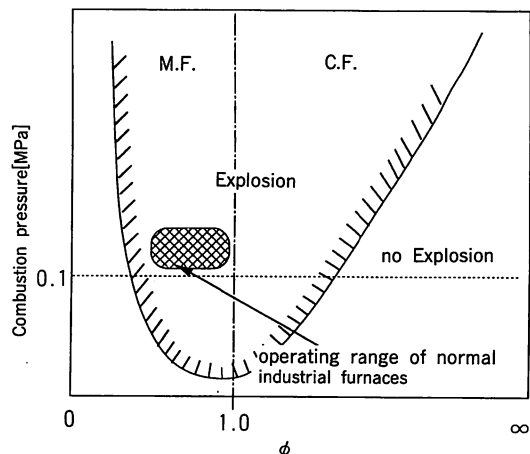


図-9 燃料の可燃範囲に与える燃焼圧力と当量比の影響

は、 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O であり、しかも保有エネルギーとしては、 E_{Me} のみであり、図-5の下部の図を見れば、ガスタービン燃焼器に導入される空気量が多いため(後述の ϕ_R の場合と比較して)、せっかくガスタービンで得られた電力(動力)を多く投入しなければ圧縮高压空気は得られない。

一方、燃料過濃側である $\phi = \phi_R (>1.0)$ のとき、全保有エネルギーには、 E_{Ca} も含まれていて、しかも圧縮すべき空気量は少なくともよく、必要動力は $\phi = \phi_L$ のときに比べ小さくなると予想される。

以上の議論から、燃料過濃燃焼技術(fuel-rich combustion technology)を基軸とする著者ら提案のケミカルガスタービン構想が生まれてくる。さらに、好都合なことは、小型燃焼器で行ったメタン燃焼に関する著者ら^{6~9)}の実験結果と化学平衡計算で得られた計算値について、NO_x生成に関する結果の一例を図-7に示すが、ケミカル火炎は、すでに明らかにされている低NO_x希薄燃焼と結合して用いられれば、NO_x生成抑制という観点からも有望な燃焼形態と言える。本図において、実験結果が平衡計算結果よりかなり小さいが、これは、この程度の燃焼器では、NO_x生成は平衡にらならないことを物語っている。

3.4 排熱回収等によるプロセス改善とケミカル火炎

超過エンタルピー火炎は、Weingberg^{10, 11)}が初めて提案して以来多くの研究者が検討を加えてきている。

いま、メタン-空気予混合火炎の可燃範囲を横軸に当量比、縦軸に空気温度をそれぞれとって図示すると図-8のごとくなる。現在の多くの工業炉を含む燃焼・熱プロセスは、図中で斜線で示す範囲で運転されている。燃焼ガスの排熱をそれ程多くの動力を使用しないで空気予熱に使い、燃焼器に入る空気温度 T_i を高くすれば、可燃範囲が広がるばかりでなく、プロセス全体の熱効率が向上することは言うまでもない。これがWeingberg提案の最も重要な点であろう。この場合、ケミカル火炎領域でも質的な意味で可燃範囲が拡大することが明らかになり、この点は実験的にも著者ら^{6~9)}が確かめている。

一方、圧力の影響を示したのが図-9の結果である。空気圧縮に動力を投入しても、圧力上昇に伴う可燃範囲の拡大は、特にケミカル火炎域で著しい。また、図-7のNO_xに関する結果を見てみると、圧力上昇と共に生成濃度も低下することが化学平衡計算及び実験結果^{6~9)}からも明らかになっている。したがってExcess Enthalpy火炎とは違った“Excess Pressure火炎”

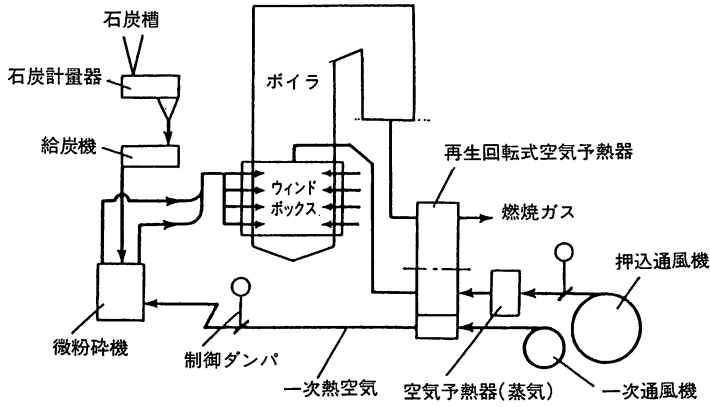


図-10 微粉炭燃焼システムのフローチャート

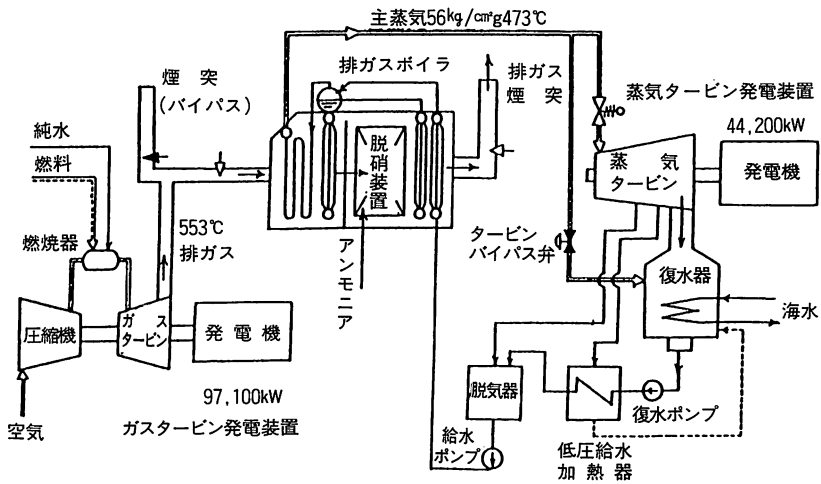


図-11 ガスタービン・コンバインドサイクル発電システムのフローチャート

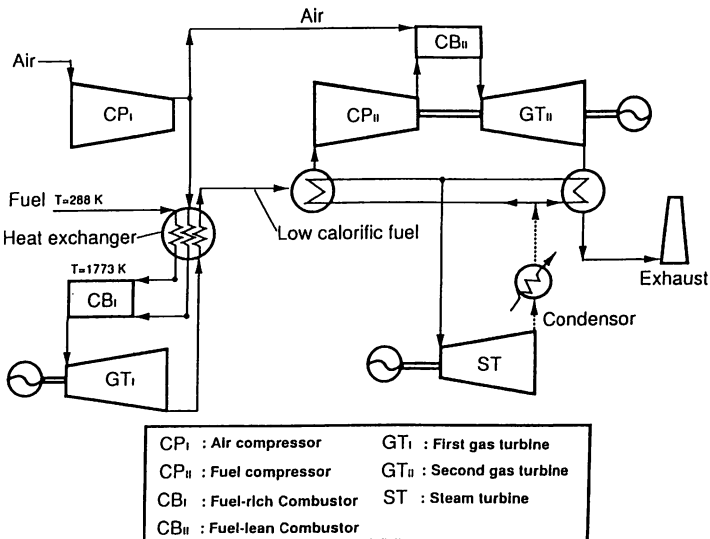


図-12 ケミカルガスタービン・コンバインドサイクルの概略フローシート

の立場からの燃焼器設計も今後興味深いテーマとなるであろう。

ここで、現在の燃焼システムやガスタービンシステムのフローチャートを検討してみよう。一例として、図-10に典型的な微粉炭燃焼システムを示す。本システムでは排熱回収が重要視されていて、排熱を用いて燃焼用空気を予熱しシステム全体の熱効率の向上を図っている。また、現在のガスタービン・スチームタービン・コンバインドサイクル発電システムの典型例を図-11に示す。本システムにおいて、熱効率を向上させるために排熱を蒸気タービン駆動の熱源として利用している。このように、これまでの燃焼現象を用いるシステムでは、全体の熱効率を改善するために排熱回収技術が数多く施されている。しかし、燃焼現象自体の改善・改良を行う観点から排熱を利用するという技術はほとんど見受けられない。そこで、エネルギー効率を高めるとともに燃焼反応の積極的改善を行うために、ケミカル燃焼技術に、排熱を用いた燃料および空気の予熱を付加し、プロセス全体の熱効率改善と共に、新しいプロセスを構築することを試みることも興味深い。

4. 新しい概念に基づくガスタービンシステム —ケミカルガスタービン構想—

前項までの検討より、次世代の高効率ガスタービン開発に必要なキーテクノロジーは、以下のものが必要となるであろう。

- (1) ケミカル火炎領域を用いる燃焼技術
- (2) 燃焼排熱からあまり動力を使うことなく高温の予熱空気を作るための高温再生技術 (High-temperature Regenerator)
- (3) 低動力型空気圧縮技術
- (4) 耐熱性材料創成技術

図-12は、名古屋大学高温エネルギー変換研究センターにおいて、上述のキーテクノロジーを積極的に取り込んで提案された、新しいガスタービンシステム“ケミカルガスタービンシステム”のフローシートの概要である。この新しいケミカルガスタービンの詳細に関しては、化学工学会27回秋季大会および第4回動力・エネルギー技術シンポジウムにおいてすでに発表した^{12, 13, 14, 15)}。著者らは500MW級コンバインドサイクル発電システムで天然ガスを燃料として図-12のフローシートを基準に発電効率を計算したところ、ガスタービン効率44%，総合発電端効率66%，水素・空気燃焼系では64%と若干低いがエクセルギー効率は76%得られている。現在、鋭意、民間企業とも共同で研究開発を実施中であるが、高圧還元燃焼器の開発、タービンブレード材用のこだわりのC/Cコンポジットの開発^{16, 17)}、

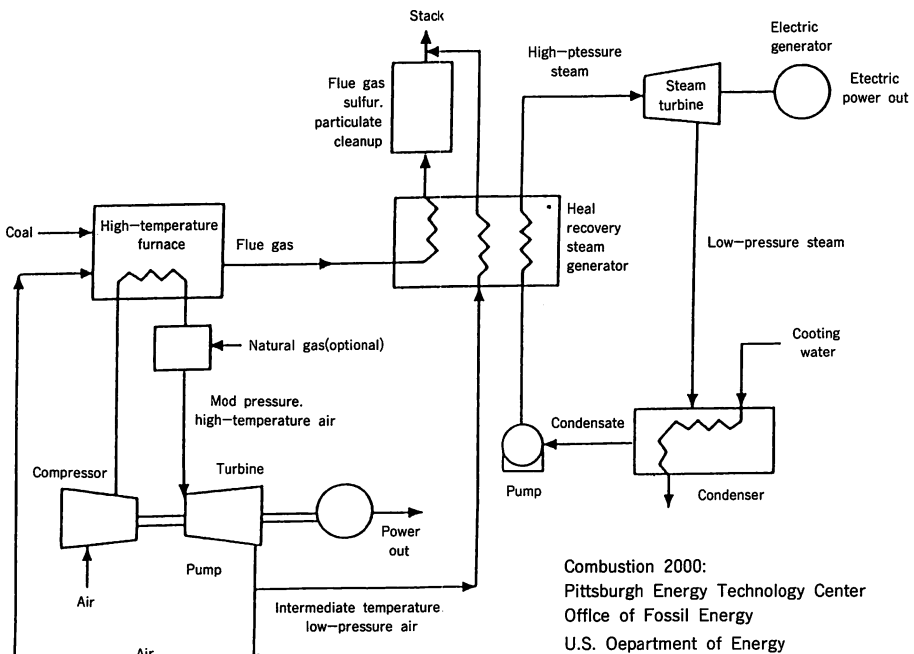


図-13 アメリカエネルギー省のCombustion 2000ガスタービンシステムの構成

さらに空気予熱器設計，低NO_x化技術が重要課題となっている。

アメリカ・エネルギー省が中心となり，最近スタートした高効率石炭ガスタービンプロジェクトが“COMBUSTION 2000”として図-13のようなシステムを提案している¹⁰⁾。既存のガスタービンシステムと異なり，著者らが提案したものと同様に空気予熱器が重要な役割を果たしている。この“COMBUSTION 2000”の特徴は，ガスタービンに導入されるガスは，燃焼ガスでなく，システムに吸入された空気が燃焼器に送られ，間接加熱により温度上昇した予熱空気であり，ガスタービンから排出される空気が燃焼器に送られ，石炭と燃焼反応するようになっている点にあるものと思われる。この技術を応用した高い熱効率をもつガスタービン，スターリングエンジンなどが将来出現するものと期待される。

5. おわりに

最初に述べたように，現在の工業炉，ガスタービンシステムに代表されるエネルギー変換プロセスは，今後，大変革のシナリオに向かって進むと思われる。しかし，基本的原理がまだ理論的にしっかり固められていないため，今後さらなる詳細な検討を各方面から行わなければならない。そのような場合に，本稿が多少なりとも役立つならば，著者の最大の喜びとするところである。各方面の方から多くの御批判を賜れば幸いに存ずる次第です。

謝辞

本報告は，日本工業炉協会がNEDOから委託された技術開発項目「平成5年度高性能工業炉等の開発に係る高性能工業炉の開発」の再委託先である日本ファーンズ工業(株)よりの基礎調査研究費の補助を受け行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Arai, N., N. Kobayashi and K. Nakano : "What are Chemical Flame and Mechanical Flame, it's Principal Difference?" 1994 Spring Meeting of WSS/CI, Univ. of California, Davis (1994)
- 2) Dunbar, W. R. and N. Lior : AES-Vol.25/HTD-Vol. 191, pp. 81 (1991)
- 3) Dunbar, W. R., N. Lior and R. A. Gaggioli : J. Energy Resorce Technology, 114, pp. 75, March (1992)
- 4) 新井紀男 : 第2回日本燃焼研究会-JFRC合同研究会, 資料, 東京ガス技術研究所 (1987)
- 5) Glassman, I. : Combustion, 2nd ed., pp. 137, Academic Press (1987)
- 6) Hashimoto, T., T. Yoshino, T. Takakusagi, N. Arai, N. Teramae, N. Kobayashi A. Kataoka and M. Hasatani : AAIA/SAE/ASME/ASEL 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Monterey, CA USA. (1993)
- 7) 片岡明博, 新井紀男, 小林敬幸, 架谷昌信, 田中雅 : "メタンの高温高圧燃焼特性", 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.913 (1993)
- 8) 橋本孝, 吉野智哉, 新井紀男, 小林敬幸 : "メタン-空気高温・高圧燃焼装置", 第30回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 55 (1992)
- 9) 小林敬幸, 中野康治, 新井紀男, 架谷昌信, 田中雅 : "メタン高圧還元燃焼における圧力の影響"; 第31回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 141 (1993)
- 10) Weingberg, F. J. : Nature, 233, pp. 239 (1971)
- 11) Weingberg, F. J. "Advanced Combustion Methods", pp. 183, Academic Press (1986)
- 12) 新井紀男, 北川邦行, 小林敬幸 : "次世代型ケミカルガスタービン構想", 第27回化学工学会秋季大会講演要旨集, G101, pp. 114 (1994)
- 13) 堤香津雄, 新井紀男 : "ケミカルガスタービン-部分燃焼ガスタービンシステムの熱効率" 第27回化学工学会秋季大会講演要旨集, G102, pp. 115 (1994)
- 14) 新井紀男, 北川邦行, 小林敬幸, 堤香津雄 : "ケミカルガスタービンを基幹とするガスタービン複合発電システムに関する基礎研究", 第4回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, A16, pp. 110 (1994)
- 15) 小林敬幸, 北川邦行, 新井紀男, 橋本孝 : "ケミカルガスタービン用メタン/空気燃料過剰低NO_x燃焼器の燃料特性", 第4回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, B13, pp. 261 (1994)
- 16) 小林敬幸, 伏谷一成, 新井紀男, 加藤吉成 : "燃焼ガス中におけるC/Cコンジットの劣化特性", ガスタービン秋季講演会, A-2, pp. 7 (1994)
- 17) 北川邦行, 新井紀男 : 日本エネルギー学会誌, 73, pp.959 (1994)
- 18) Ruth, L. A. : "CHEMTECH", pp. 33, June (1993)