「省エネルギー・クリーン環境エネルギー技術」特集

コージェネレーションと環境問題

古 屋 富 明

1. はじめに

近年、省エネルギーや電源多様化の観点からコージェネ（コージェネレーション；Cogeneration）が注目されている。コージェネは、ディーゼルエンジン、ガスタービンエンジン、ガスエンジンなどの原動機で発電機を駆動して発電を行い、同時に原動機の排熱を利用して蒸気や温水などの熱エネルギーを得ることができる熱電併給システムである。従来型の発電システムでは廃棄される排熱を利用するため、エネルギー利用効率が最大70～80%にまで達することが特徴である。また、現在開発が進んでいる燃料電池も排熱の活用により熱電併給が可能であり、コージェネ・システムの一つとして位置付けられている。コージェネ・プラントは、遠隔地への輸送が困難である熱エネルギーを有効利用するために、エネルギー消費地に設置される必要がある。したがって、従来の電力事業用の大型発電所とは異なり、分散型エネルギー供給システムの形態をとる。

コージェネは、エネルギーコストの削減に有効であるため、ここ数年の原油価格の低迷と相俟って、施設を導入する企業が急速に増加してきた（図1～3参照）。特に、都市地域や工業地域においての増加が著しい。しかし、これらの施設の大半はNO_x（窒素酸化物）の排出量が多いにもかかわらず、従来設置台数が少なかったため大気汚染防止法の規制対象とはなっていない。そこで、国では昭和63年から、施設に使用される原動機の種類、大きさに応じて規制対象に追加するとともに、大都市の地方自治体でも更に厳しい指導要綱の整備が進められた。

コージェネは、企業のエネルギーコスト削減を背景にした市場導入期を経て、発展期に入ろうとしている。本稿

では、今後のコージェネがグローバルな環境・資源問題の解決に寄与すべきであるとの観点から概説する。

2. コージェネ導入の背景

コージェネの概念は古く、北欧など暖房需要が大きく熱供給のみで経済性がある地域では、地域熱電併給として発展してきた。また、米国では、第二次石油危機後の1978年、PURPA法（Public Utility Regulatory Policy Act）により、コージェネからの余剰電力を電力会社が妥当な価格で購入する義務や税制優遇措置を制定して、コージェネによる省エネ促進を図ってきた。一方、国内では、蒸気などの熱エネルギー需要が大きな製紙工場などで蒸気サイクル（蒸気タービン）による熱電併給が行

出所：総合エネルギー統計

図1¹⁾ 石油価格とエネルギー需要の推移

Cogeneration/It's Environmental Concern

筆者紹介 TOMIAKI FURUYA

Chemical Laboratory, Research and Development Center, Toshiba Corporation

株式会社 東芝、総合研究所、化学材料研究所、主任研究員

筆者は、化学工学、エネルギー・環境分野を専門とされ、ガスタービン用の超低NO_x燃焼器として期待されている触媒燃焼器の開発に従事しておられる。趣味はゴルフ。

本稿では企業の経済性の観点から導入が進んだコージェネが、今後はグローバルな環境・資源問題の解決に寄与すべきであるとの観点から概説いただいた。

図2 コージェネ導入件数の推移（累積）

図3 コージェネ発電容量の推移（累積）

われていたが、一部の産業に限られていた。しかし、石油危機以降の省エネ努力の過程で、従来より熱電比（熱

図 4²⁾ 蒸気電力比とプラント効率

図5³⁾ コージェネ・システム

／電力)が小さな産業においても、熱電供給の要望が高まり、現在主流となっている原動機を用いたコージェネが導入されるようになった。図4²⁾は、横軸に(使用蒸気量／使用電力量)をとり、代表的な産業の値を示すと同時に蒸気サイクルとガスタービンサイクルの効率を比較したものである。蒸気電力比が比較的小さなところでは、原動機(ガスタービン)を利用したプラントの方が高効率を達成できることが分かる。図5³⁾に、現在のコージェネのシステム例を示した。一般的には、蒸気ボイラーなどの補助熱源を設けているものが多い。

国内におけるコージェネの急増は、制度面での促進効果に負うところも大きい。1986年には、コージェネで発電した電気を商用電源の配電系統に流して使用する系統連結が6000V以上の高圧電流に認められ、自ら配電設備を構築する設備投資を免れるようになった。低圧配電線への連系ガイドラインも1991年には整備され、買電との併用が容易になった。非電力事業者（コージェネ設置者など）による第三者への電力販売（特定供給）に関しても、1987年に、適用範囲が拡大され、建物所有者による同一建物テナントへの電力供給が可能となり、コージェネ設備の利用効率の向上が図られるようになった。それまでは、企業と電力会社が共同出資した共同火力のよう

表1⁵⁾ 各種コージェネの効率

エンジン形式	ガスタービン	ディーゼル	ガスエンジン
型 式 (メーカ)	GAS POWER 1000 (三井造船)	M200AL-EN (ヤンマー)	GP-450E (西芝)
発 電 出 力	1,100kW	500kW	380kW
熱 回 収	蒸気 (3,015kg/h)	温水 (25m ³ /h) 蒸気 (213kg/h)	温 水 (920ℓ / m)
発 電 効 率	25%	38.5%	31.3%
熱 回 収 効 率	48%	23.9%	52.8%
総 合 効 率	73%	62.3%	84.1%

な例外を除いて売電は許可されなかった。また、保安面でも、電気主任技術者選任の免除基準やガスタービンの検査義務が緩和され、管理費用の削減に繋がった。

3. コージェネへの期待

ここ数年、電力需要は予想を上回る高い伸びを示している。エネルギーを電力の形で使う電力化率は現在37% (米国36%) まで上昇、2010年には43%に達し (資源エネルギー庁推定)、エネルギー問題の中心は電力であるとされている。これは国民のアメニティ指向を反映して、空調設備などの普及が進んだこと、また、比較的高い経済成長により産業界での設備投資が増加したことなどに起因している。そのため、電力会社では夏季のピーク需要に対して電力を安定供給するのに苦心している。今後とも民生用需要を中心に、ある程度の伸びが継続すると予想されており、平成2年度の電力事業審議会の中間報告によれば、総需要電力量は、2000年まで年率2.7%程度、2000~2010年まで年率1.5%程度の伸びを見込んでいる。このような状況なかで、通産大臣の諮問機関である総合エネルギー調査会が平成2年6月にまとめた中間報告には、燃料電池も含めたコージェネの積極的導入を推進するとの考えが示され、電力需要ピークの平準化とエネルギー利用の効率化に果たす役割が期待されている。

また、地球温暖化の主要因子とされる二酸化炭素の抑制に対する期待も大きい。日本の二酸化炭素排出量は、米国、ソ連、中国に次いで第四位であり、世界全体の約4.7%である (1987年)。しかし、一人当たりの排出量は、石油危機以降の省エネ努力により、2.45トン (C換算) と比較的少なく (米国の40%、オランダの75%)、排出量の抑制は他の先進国に比べて容易ではないとされている。そのため、国では1990年、『地球温暖化防止行動計画』を策定し、今後の経済安定成長と排出量抑制の両立を図る実行可能な具体策の一つとしてエネルギー利用効率が高いコージェネの導入促進を掲げている⁴⁾。

4. コージェネの種類と特徴

コージェネに用いられる主な原動機の出力範囲は、ガスエンジンが10~5000kW、ディーゼルが30~10000kW、ガスタービンが100~20000kW程度である。発電効率では一般的にディーゼルが最も高く、ガスエンジン、ガスタービンの順である。表1⁵⁾に各種コージェネの効率を示した。ガスタービンは良質な蒸気が得られること、大型の方が効率が高いことなどから産業用に用いられるケースが多い。ガスエンジンは小出力のシステムでも経済性に優れているのが特徴である。表1はそれぞれのシステムの定格での一例であるが、総合効率が60~80%程度と高い。しかし、ユーザーの電力と熱の需要は、季節、時間によって、それぞれ別々に変化するのが普通であり、プラントを定格で連続運転することは希である。そのため、実運転における総合効率が40~50%程度に低下するケースも報告されている^{6,7)}。実運転での総合効率を高めるために、買電との並列運転 (系統連結) を行ってコージェネで発生する電力を最大限に使用すること、熱電比が可変であるシステム構成とすることなどが行われている。

エネルギーコスト削減の観点では、ユーザーの理想は、熱需要を満たすコージェネを設置して、電力が余る時には余剰電力を電力会社に買い取ってもらうことである。しかし、多数のコージェネからの余剰電力が電力会社の電力系統に不規則に流入するようになると、安定供給している電力の外乱となり、電力会社側での調整に大きな負担がかかるという問題やコージェネ側も一般の電力需要家への供給責任を負わなければならないという問題が生じ、一部の大口自家発電を除いて実現されていない。また、電力会社の最新鋭の火力発電所 (コンバインドサイクル) ではSOxの排出は無く、NOxも燃焼器の改良と排煙脱硝装置の設置により現状のコージェネより格段にクリーンである。こうした環境保護のための設備投資まで考慮したコージェネの導入が必要となってく

表2 東京都の指導基準と国の排出基準

東京都の指導基準						国の排出基準	
施設の種類および規模			第一種地域		第二種地域	規模 燃焼能力50ℓ/h以上	
			4年3月までの設置のもの	4年4月以後の設置のもの			
ガスタービン 燃焼能力 50ℓ/h以上	ガス燃料	発電出力 2000kW以上	150	100	150	ガス燃料	平成3年1月31日 294 *
		2000kW未満	200	150	200		
	液体燃料	2000kW以上	200	100	200	液体燃料	420 294
		2000kW未満	500	150	250		
ディーゼル 燃焼能力 5ℓ/h以上	燃焼能力 25ℓ/h以上	2000kW以上	500	300	700	シリンダー内径 3675	3150
		2000kW未満	500	300	1300	400mm以上	
	燃焼能力 25ℓ/h未満		1300	1000	1300	シリンダー内径 400mm未満	2494
ガスエンジン 燃焼能力 5ℓ/h以上	燃焼能力50ℓ/h以上		300	200	500	法対象外	
	燃焼能力50ℓ/h未満		500	300			

備考1 燃焼能力は重油換算。 備考2 NO_x 濃度 $=C_s \times (21-\text{O}_n) / (21-\text{O}_s)$ C_s :測定 NO_x 濃度(ppm), O_n :基準となる酸素濃度(%) O_s :排ガス中の酸素濃度(%)

る。さらに、従来はコージェネ・ユーザーの経済性から決定されていたコージェネ最適運転スケジュールをグローバルな二酸化炭素抑制の観点から見直していくことも必要になる。これらの問題は、コージェネが今後の資源・環境問題の解決に寄与する上で、大きな課題である。

5. コージェネの排ガス規制

現在、固定発生源から排出される二酸化硫黄は減少し、環境基準の達成率は99%以上と極めて良好な状況となっている。一方、二酸化窒素(NO_2)は、環境基準0.04ppm(日平均)を超えている測定局がまだ多く、しかも、大都市とその周辺地区で顕著である⁸⁾。この様な状況のなかで、コージェネの普及に伴う大気汚染の防止を図る観点から、国では昭和63年から大気汚染防止法施行令の一部を改正し、燃焼能力が重油換算で50ℓ/h以上のディーゼル、ガスタービンを規制対象に追加した。

しかし、東京都のように二酸化窒素の環境基準が達成されていない自治体では、国の規制は緩すぎると考え、独自の指導基準を設定している。表2に東京都の指導基準と国の排出基準を比較した。表における国の基準の数値は東京都との比較が容易であるように酸素濃度0%に換算して示した。この様に、 NO_x 濃度を比較するときには、排ガスの酸素濃度(あるいはその基準値)を表示するのが普通である。これは、故意に空気で希釈することを防止するとともに燃料消費量当りの NO_x 生成を比較するのに便利なためである。東京都の特徴は、国の規制では対象外の小型のディーゼルとガスエンジンを指導

図6 発電用ガスタービンの NO_x 対策の進展

対象としたこと、排出濃度の指導値も厳しくしたことである。特に、燃焼能力が25ℓ/h以上(100kW相当)のディーゼル排出基準は国に比較して大変厳しく、窒素酸化物に対する東京都の強い姿勢が伺える。その他、神奈川県、横浜市、愛知県、名古屋市、大阪府・市、兵庫県、神戸市、なども指導要項ないしは指針を策定しており、大都市周辺の自治体におけるコージェネ環境対策が整備されている。これらの規制・指導も、長期的に見ればコージェネの健全な発展を促すものと考えられる。

6. 排ガス対策の現状

6.1 ガスタービン

図6に発電用ガスタービンの NO_x 対策の進展を示し

た。電力事業用の大型ガスタービンでは、燃焼器への蒸気噴射あるいは予混合強化型燃焼器により燃焼器からのNO_xを削減し、さらに接触還元方式の排煙脱硝装置(SCR; Selective Catalytic Reduction)を設置することにより、プラント出口NO_xを10~15ppm (16% O₂)程度にしている。しかし、排煙脱硝装置による発電コスト上昇や蒸気噴射によるプラント効率低下を余儀無くされており、本質的な低NO_x技術の確立が望まれている。そこで、NO_xの発生が極めて少ない触媒燃焼器の開発が国内外で精力的に行われている^{9~11)}。一方、コージェネに用いられるガスタービンにおいては、電力事業用プラントの様な対策がなされていないのが現状である。これは、低NO_x化の要求が少なかったこと、低NO_x対策によりコージェネの建設・運転コストが上昇して経済性が低下するためである。また、技術的には可能である排煙脱硝装置の設置に関しても、使用するアンモニアの微小リークによる隣接地への影響など、管理面の問題もある。そのため、東京都では、2000kW以上のものは主に産業用であることから排煙脱硝装置の設置を前提にした指導基準(100ppm; 0% O₂)を設定しており、それ以下の出力のものに関しては燃焼改善等の対策によって低減可能な値(150ppm; 0% O₂)を設定している。そこで、2000kW未満のガスタービンでは燃焼改善で150ppm (0% O₂)を目指した開発が進められている¹²⁾。しかし、今後のガスタービンの高温化に伴ってNO_xの増加が予想されるため、コージェネクラスのガスタービンにおいても、触媒燃焼器の開発が進められている^{13, 14)}。また、アンモニアなどの還元剤を使用しないNO_x分解触媒が最近注目されており、研究の進展が期待されている¹⁵⁾。

6.2 ガスエンジン

通常、ガスエンジンのNO_x排出レベルは2000ppm (0% O₂)を超えており、NO_x対策なしでの運転は許容されなくなっている。これまでガソリン自動車の排ガス処理に使用されている三元触媒による脱硝技術が実用化され、NO_xを200ppm以下にすることが可能となっている。三元触媒では、理論空燃比付近の酸素濃度が低い領域で、COおよび炭化水素の酸化とNOの還元が同時に起きる。しかし、触媒の定期交換が必要であること、三元触媒の性能を維持するために酸素センサーを用いた高度な空燃比制御が必要なことなどの問題を抱えている。一方、エンジン本体での低NO_xを計るため、理論空燃比より大幅に空気過剰側で燃焼させる稀薄燃焼方式のエンジンが実用化されはじめ、今後の主流になると期待されている。この方式では、稀薄燃焼により燃焼温度が低下して、NO_xを東京都の排出基準以下に削減で

きるものも実用化されている¹⁶⁾。

6.3 ディーゼル

ディーゼルの排気は、自動車などでも問題になっているようにNO_xと黒煙が多い。種々の燃焼改善方式の開発が進められているが、都市部の厳しいNO_x排出基準を達成することは困難であり、排ガスの後処理が必要とされる。しかし、ディーゼル排気には酸素が10%以上も含まれるため、三元触媒方式は適用できない。そのため、アンモニアを用いたSCR方式をディーゼル排気に適したものに改良することが進められているが、実用上は、小型ディーゼルにおけるコスト増加とアンモニア管理の問題がある¹⁷⁾。東京都では、ディーゼルのNO_x排出濃度が高いため、100kW相当より大きな出力なものには、排煙脱硝装置の設置を前提とした一段と厳しい指導基準を設定している。

7. おわりに

ユーザーのエネルギーコスト削減の観点から導入が急速に進んだコージェネは、今後、グローバルな環境・資源問題の解決への寄与が期待されている。そのためには、地球環境にやさしいコージェネ・システムをハードとソフトの両面から構築していくことが求められている。ハード面では、排ガスのクリーン化、効率の更なる向上、熱電比可変のための開発、ソフト面では、大規模発電供給体との調和、ユーザー側の経済性と地球環境問題との調和などが課題である。

8. 参考文献

- 1) 日経ビジネス, 7月30日号(1990)
- 2) 桧垣, 池上, 石川, 日本ガスタービン学会誌, Vol.15, No.60, 44 (1988)
- 3) コージェネレーション, Vol. 6, No. 1, 127 (1991)
- 4) 加藤, 柳下, 日本ガスタービン学会誌, Vol.18, No.72, 1 (1991)
- 5) 平山, 他, 日本ガスタービン学会誌, Vol.18, No.72, 43 (1991)
- 6) 村松, 電気学会誌, Vol.111, No. 8, 701 (1991)
- 7) 服部, 井上, 日本ガスタービン学会誌, Vol.15, No.60, 62 (1988)
- 8) 斎藤 孟, 日本ガスタービン学会誌, Vol.16, No.64, 4 (1989)
- 9) Furuya, T., et al., ASME Paper 87-GT-99 (1987)
- 10) Beebe, K., et al., Proc., Tokyo Int., Gas Turbine Cong., III-53 (1987)
- 11) 小沢, 他, 第10回触媒燃焼シンポジウム (1990)

- 12) 木村, 他, 第19回ガスタービン定期講演会, B-11, (1991)
 13) 志賀, 日本ガスタービン学会誌, Vol.18, No.69, 18 (1990)
 14) 貞森, 他, 第10回触媒燃焼シンポジウム (1990)
 15) Iwamoto, M., et al., *Chem. Lett.*, 213 (1989)
 16) 日経産業新聞, 7月6日 (1991)
 17) 今井, 定置型内燃機関の排気規制とその対策セミナー, 3-7 (1991) (先端科学技術・情報教育センター)
 (平成3年11月12日受理)

正 会 員 入 会 者 (70名)

	紹 介 者		紹 介 者
長谷川浩二 (伊藤忠)	小笠原真次	宮里 幸三 (愛機製作所)	小見山二郎
小林康太郎 (新神戸電機)		田中 進 (阪南大)	
酒井 正弘 (鐘紡)		高比良 淳 (鐘紡)	
戸倉 進 (〃)		本郷 靖志 (〃)	
柳瀬 聡 (旭化成)		出村 誠 (農工大)	
永田 康久 (東邦レーヨン)		山崎 利久 (ニチビ)	
小椋 東一 (鐘紡)		林 清秀 (東洋紡)	
北野 高広 (〃)		斉藤 徹 (鐘紡)	
小橋 達弘 (〃)		井置 正人 (〃)	
東 竜典 (〃)		伊黒 敏裕 (〃)	
岩田 一男 (〃)		宇根 智夫 (〃)	
風岡 学 (〃)		佐野 準治 (〃)	
斉藤 俊夫 (〃)		田中 豊安 (〃)	
武田 俊英 (〃)		瀧澤 康二 (〃)	
府川 昌弘 (〃)	市川 通夫	新井 正志 (〃)	市川 通夫
荒井 喜明 (〃)		足立 定己 (〃)	
岩越 勝広 (〃)		小川 和夫 (〃)	
大野 雅人 (〃)		河野 宏 (〃)	
川原 明浩 (〃)		川瀬 健男 (〃)	
改森 道信 (〃)		金子 正秀 (〃)	
北村 研治 (〃)		櫛田 勝章 (〃)	
草木 一男 (〃)		斉岡 正博 (〃)	
澤村 政廣 (〃)		下平 弘之 (〃)	
下村 高司 (〃)		杉本 達也 (〃)	
鈴木 俊之 (〃)		谷藤 譲二 (〃)	
谷村 智昭 (〃)		中井 靖 (〃)	
中川 一良 (〃)		中江 綱大 (〃)	
中村 健朗 (〃)		西田 武司 (〃)	
野口章一郎 (〃)		深澤 一之 (〃)	
松岡 美哉 (〃)		森本 和義 (〃)	
桃井 直陸 (〃)		山中 敬雄 (〃)	
安江 正身 (〃)		綿奈部 昇 (〃)	
楽家 信幸 (〃)		飯塚 憲央 (東洋紡)	
安部 雅子 (松蔭女子短大)		北洞 俊明 (〃)	
中野 恵之 (兵庫工技センター)		八木 晃 (〃)	
			一志 道生
			〃
			〃