

小型ガスタービンによる熱電可変

The Flexible Cogeneration System/Variable Power-Heat Ratio

三 浦 千 太 郎*

Sentarou Miura

1. はじめに

我が国の産業界は長期化する景気低迷やそれに伴う産業空洞化の流れなど厳しい経営環境が続いているが、加えて生産・労働環境の質的向上のためのFAや空調などの普及やCO₂による温暖化防止や廃棄物処理の自己責任に代表される地球環境保全への対応など企業のエネルギー戦略においても大きな変革が望まれる時代を迎えている。

このような状況変化に対応しうる企業内エネルギー戦略の基本は良質化と最適配置であると言えよう。その意味でコージェネレーションは最も根幹をなす「省エネルギー」の切り札として相変わらず重要な位置付けにあり、一層の普及・充実が図られていくものと思われる。

また一方では、規制緩和による新しい波として注目を集めた第1回のIPP落札結果が発表され、その結果の評価や今後の動向が様々に議論されている。内容がどうであろうと低廉な電力が得られ、それがまた来年以降の入札に繋がっていくようであるから、引き続き多くの関心を集められることは必定である。

このようなIPPや特定電気事業など新しい発電ビジネスがスタートすることによって、従来のコージェネレーションを加えた発電市場全体は一層活性化していくものと思われる。

今後の産業用分野における新しい発電ビジネスに対応していく効果的なツールとして、小型ガスタービンを使ったシステムがその技術的発展性や熱電可変などシステムとしての柔軟性から最も注目されるものであり、本稿ではここに焦点を当ててみたい。

2. 市場への適応

コージェネレーションに使用される原動機には蒸気

タービン、レシプロエンジンそしてガスタービンがある。原動機の選択に当たっては様々な要素を考慮しなければならないが、最も重要な選択肢は経済性を決定する需要にマッチした熱電比であろう。コージェネレーションのレゾン・デトルはその高いエネルギー利用効率にあるといっても過言ではない。したがって、排熱が十分に活用できる需要とそれにマッチした原動機の組み合わせこそがシステム導入の意義であり、また実質的な経済性が得られる条件でもある。オフィスビルや病院・ホテルなどの民生用分野では、熱負荷は空調用が主体であり昼夜や季節によるデマンド変化が大きく、その絶対量も産業用と比べるとそれほど大きくはない。したがって、熱電比の大きな蒸気タービンはもちろんのこと、ガスタービンでも活用できるケースは少ない。さらに、地域冷暖房センターなどを除き、一般に蒸気をハンドリング出来る有資格技術者がいないため、排熱は冷温水の形で使用しなければならない。そのため、通常はレシプロエンジンの複数台設置のケースが多い。

一方、熱負荷が大きく稼働時間の長い産業用分野、その中でもとくに熱需要の大きな製紙や化学工業などの分野では従来から背圧型蒸気タービンが熱併給発電の形で利用されてきたが、ガスタービンの性能と信頼性が向上してきた昭和50年後半頃から、比較的小規模なエネルギー消費企業においても「コージェネレーション」として数多く採用されるようになってきた。

表1 コージェネレーション実績一覧

	原動機種別	設置件数	発電量	1台当りの発電量
産業用	ディーゼルエンジン	430 54.2	1,095,626 43.1	2,548
	ガスタービン	176 22.2	1,322,130 52.0	7,512
	ガスエンジン	187 23.6	122,680 4.8	656
	小計	793 100.0	2,540,436 100.0	3,204
民生用	ディーゼルエンジン	593 54.7	302,507 56.9	510
	ガスタービン	33 3.0	78,290 14.7	2,372
	ガスエンジン	458 42.3	150,670 28.3	329
	小計	1,084 100.0	531,467 100.0	490
	合計	1,877件	3,071,902MW	1,637kW

*東京ガス㈱産業エネルギー事業部コージェネ技術グループ部長
〒163-10 新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワー27F

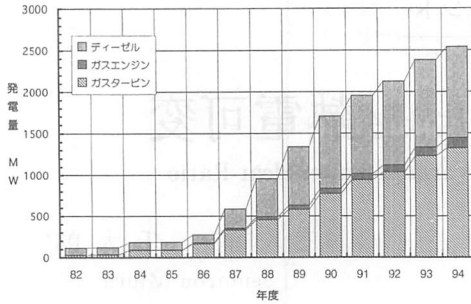


図-1 産業用コージェネ導入実績

昭和60年代に入って業務用電力の系統連携ガイドライン策定や自家発補給電力契約の実施に始まる規制緩和が契機となり、産業用・民生用両分野とも飛躍的にコージェネレーションが普及を始めた。丁度バブル期に当たっていたことも、普及に拍車をかける要因になったと考えられる。

しかし、コージェネレーション市場がテイク・オフを終えて10年、ようやく成熟期を迎えた訳だが、その成長もややスロウダウンの様相を呈している。これは先に述べた景気の低迷ももちろん大きな要因であるが、省エネルギーの進展や産業構造の変化による大熱電比需要の減少、電力化率の上昇による電力需要の変動幅が増大するなどエネルギー消費構造の変化が進み、それに現在のシステムがうまく対応できないと言う技術的な制約も要因の一つと考えられる。

様々な業種に対してコージェネレーションを適用していくとすると、負荷に対する追従性ももちろんのこと、熱電比も可変することが必要になる場合が多い。例えば、印刷、自動車、電機そして半導体などの業種では電力の需要は大変大きく安定しているが、熱についてはその絶対量そのものが比較的少なく、かつ季節、昼夜での変動が著しい。もちろん、年間を通じての総エネルギー需要量は大都市圏に密着した産業としては比較的大きい。また、そのデマンドも長期的には増加傾向にある業種といえよう。

発電コストのことだけを考えれば、発電効率が高いディーゼルエンジンなどによる自家発電設備の導入もあるが、環境への影響やエネルギー利用効率の観点から適当な選択肢とは言えない。

企業のボランタリープランの実行やCO₂削減のための省エネルギー目標の設定は、コージェネレーション導入の最も重要なインパクトになっており、その意味でも低炭素燃料使用、低NO_x技術の採用そして高い

総合効率は不可欠のキーワードである。

とくに近年事業用ガスタービンの性能向上が著しく、航空機用と遜色のない性能を持つものが実用化されはじめ、これを使った事業用火力の「ACC」にいたっては発電効率54% (LHV) が実用化されており、21世紀にはそれも57~60%になろうとしている。したがって、コージェネレーションがその国家的意義を全うするためには、排熱の高度利用が従来にも増して不可欠な要素となってきた。

このような制約条件を踏まえ、規制緩和により環境整備が整い始めたことも併せて、市場ニーズに合わせたシステムとして欧米で既に多くの実績が出てきた小型熱電可変型ガスタービンシステムが我が国でも注目を集めている。

3. 熱電可変の種類とガスタービンの高性能化

ガスタービンを主機としたシステムで、熱電可変を行うには次の3ケースが考えられる。

- ①コンバインドサイクル
- ②蒸気噴射ガスタービン
- ③再生サイクル

いずれもサイクル論的には古くから知られている手法であるが、十分な性能や信頼性が期待できなかったり、コスト的に引き合わなかったりして小型ガスタービンの分野では実用化が進んでいなかった。

しかし、最近のガスタービン技術の飛躍的な向上により、欧米を中心に商品が進み、わが国でも多くのメーカーが真剣に実用化に取り組むようになってきた。

熱電可変システムではいずれの方法であっても、排熱を何らかの方法で電力に変える訳であるが、短期投資回収を実現するためにはガスタービンの基本性能が高いことが必要不可欠である。

コンバインドサイクルの総合発電効率は下式に示すように、ボトム側側の条件が影響するが基本はあくまで η_{GT} で決まる。

$$\eta_{CC} = \eta_{GT} + (1 - \eta_{GT}) \times (\eta_B + \eta_{ST}) \dots (i)$$

η_{CC} : コンバインド効率, η_{GT} : ガスタービン効率

η_B : ボイラ効率, η_{ST} : 蒸気タービン効率

η_{GT} は T_3 (タービン入り口温度), T_1 (圧縮機入り口温度), γ (圧力比), η_c および η_T (圧縮機効率, タービン効率) の関数である。

また、ボトム側側の効率はガスタービンの排ガス温度の関数になることから、やはり入り口温度が高い方が良好な結果が得られる。

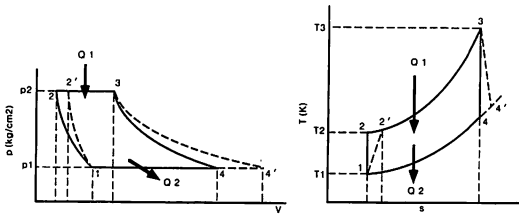


図-2 ガスタービンの熱力学的サイクル

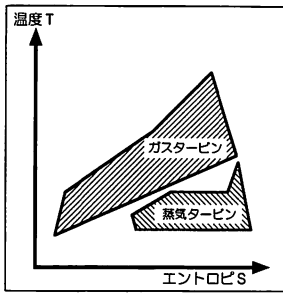


図-3 コンバインドサイクル概念図

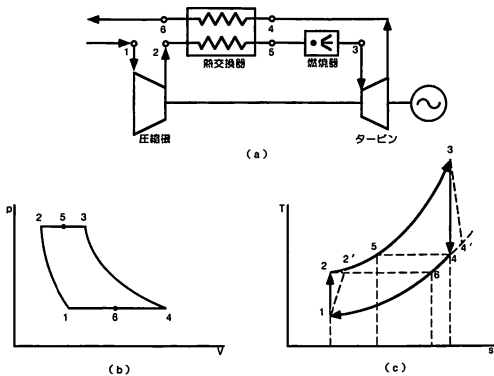


図-4 再生サイクルガスタービン

一方再生サイクルにおいても同様に効率は T_3 の関数となることから、圧力比や熱交換器の効率など他のファクターも関与してくるが、タービン入り口温度の高い基本特性の優れたガスタービンほど高い総合発電効率が得られる。

$$\eta_{cr} = \frac{\eta_T T_3 (1 - \gamma \frac{\kappa - 1}{\kappa}) - \frac{1}{\eta_c} T_1 (\gamma \frac{\kappa - 1}{\kappa} - 1)}{T_3 - T_1 \{ 1 + \frac{1}{\eta_c} (\gamma \frac{\kappa - 1}{\kappa} - 1) \}} \quad \dots (ii)$$

$$\eta_R = 1 - \gamma \frac{\kappa - 1}{\kappa} \times \frac{T_1}{T_3} \quad \dots (iii)$$

現在、最新鋭の航空機転用型や事業用火力向けのガスタービンは入り口温度が $1,200 \sim 1,300^\circ\text{C}$ クラスになっ

ており、現在建設中の発電所には $1,500^\circ\text{C}$ 級のものが採用され始めている。単純サイクルの場合には、TITの上昇は高温部への冷却空気増大などのロス増加を伴い、ストレートに効率向上には繋がらないが、事業用コンバインド発電においては排ガス温度が上昇することからボトム側の効率が上がり優れた総合効率をもたらす。このような巨額の開発費を要する高温化技術が、大型プロジェクトにより商品として次々に実用化するため、小型機への技術移植も着実に進んでいる。

10MW以下の「小型ガスタービン」の世界でも、高温部品にはEffusion Liner, DS Blade, TBCなどの最先端技術が採用され始めており、既にTITは $1,100^\circ\text{C}$ を超えるものも出てきている。また、1MWクラス常用ガスタービンにおいても、7～8年前から1段動静翼の空冷化が導入されており、TITは $1,000 \sim 1,100^\circ\text{C}$ に到達している。大型機と同様に今後さらに高温化が進められ、性能向上が図られていくものと思われる。

しかしここで重要なことは、産業用ガスタービンにおいては低廉な設備費と保守費を維持しつつ高性能化を実現しなければならないことである。とくに小型ガスタービンの場合は、事業用や航空機用のようなスケールメリットがなく、しかも経済性の確立が至上命題である。したがって、大型機からの技術移植においても充分なコストをかけることが出来ない場合が多い。多少の量産効果は期待できるものの、産業用の場合航空機や自動車などの生産量にはほど遠く、逆に信頼性を損ねた場合の水平展開はかえって負担を大きくすることもある。

最新のガスタービンは高度な冷却技術が取り入れられ結果、大変精緻な構造を有しており、吸入空気に対して非常にセンシティブになっている。例えば、微小な煤塵による冷却孔の閉塞による熔損・焼損や燃料油中の有害成分と空気中の微量酸性煤塵などの複合汚染による高温腐食やピッチング・コロージョンなどが、重大な障害を与えている事例が数多く報告されている。このような必ずしも良好とは言えない設置環境下において、初期性能を維持しつつ8,000時間以上の単機連続運転を継続していくために、従来の洗浄よりもHEPAフィルターの採用による吸入空気の浄化が有効であることが知られている。

また、規制緩和により定期検査インターバルの延長が可能となったことから、高温部品の交換時期の判断や延命化のために寿命予測技術が重要性を増している。

このように高い性能を維持していくためには、単に技術開発や製造管理のみならず保守・運転まで含めた運用上の様々なノウハウが数多く蓄積されていく必要がある。

4. 小型コンバインドサイクル

ガスタービンの基本性能を向上させるために入り口温度は高温化していくが、サイクル的にはこれに動作領域が比較的低温の蒸気タービンを組み合わせることにより、カルノーに近づけたのがコンバインドサイクル(C/C)である。C/Cの効率を上げるには、もちろんガスタービンの効率向上が第一義であるが、ボトム側側の電力回収量を効果的に行うことも重要である。ボイラの熱回収率は一般的に90%程度あることから、蒸気タービンの設計がボトム側の性能を支配する。蒸気圧力・温度を高くとり、復水の場合は排気圧力を下げることが重要なのは周知のことであるが、小型C/Cの場合は制約条件が多く簡単に最適設計が出来るわけではない。まず復水の冷却は海水は物理的・コスト的に困難であり、地域によっては公共用水の確保が難しいところも多い。

小型ガスタービンの多くは、IGVを備えていないものが多いため気温変化や負荷変化に対応した排ガス温度制御が出来ない。したがって、冬期の吸気条件や負荷条件を考慮して、蒸気温度を決定しなければならない。蒸気条件の上限と下限が制約されることになる。

ついで、蒸気・温度圧力の検討においてはコストとハンドリングが重要である。既に、蒸気タービンをBTGで利用している場合は比較的容易にC/Cに移行できるが、一般的に高圧蒸気のハンドリングは多くの経験と技術が要求される。したがって、汎用ボイラに近い低圧蒸気を利用することが運用上、コスト上必要な条件となる。

これらの条件を勘案した上で、最新の小型ガスタービンを使用したC/Cのシステムの検討例を示す。ガスタービンは表に示すように、比較的多くの種類が我が国でも利用可能となってきた。ここでは、コストや信頼性そしてC/Cを必要とする工場規模から考え、10MWクラスのシステムを検討することにした。したがって、ガスタービンは4~7MWクラスのものを選定する。米国のSolar社あるいは英国のEGT社のものが適当で、国産ではKHIの新型ガスタービンなどがC/Cを組みやすい。米国Allison社の航空機転用型ガスタービンも我が国でも多くの実績を持つが、こ

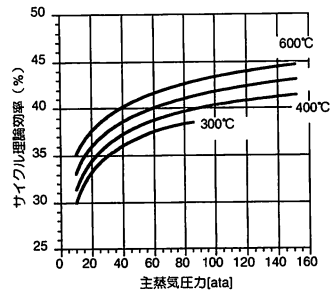


図-5 ランキンサイクル理論熱効率 (主蒸気圧力温度変化)

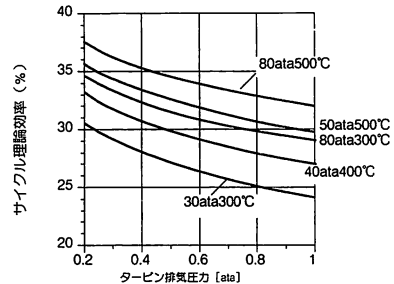


図-6 ランキンサイクル理論熱効率 (排気圧力変化)

れは次のSTIGで効果的な利用が出来るので除外した。

発電効率は全電力の場合で40%を超え、単純サイクルで運転した場合は30%、総合効率で70%以上となる。追い焚きバーナーを加えることにより、総合効率80%以上が可能となり、冬期の暖房需要時の運転に対応することにより年間平均効率の改善が出来る。いくつかの実際の企業(自動車、半導体など)におけるシミュレーションでも、55~70%の年間効率が達成できた。また、熱電可変特性も図に見られるように、プロセス蒸気をゼロから100%まで自由に振ることが出来、負荷変動の多いプロセスにも対応が可能である。

蒸気圧力は20atg、温度も300°C程度でそれほど厳しい条件ではない。

米国では小型のC/Cは比較的古くから利用されており、空港、大学そして病院などの民生用施設でも実施例は多くある。Solar社の「STACO CYCLE」はその代表的な例で、規格化・標準化により極めて低廉な汎用パッケージが実現できたとしている。

5 MW級の小型ガスタービンに比較的低压の蒸気タービンを組み合わせ、ライバルであるAllison社のCH ENG CYCLEに対抗すべく企画された低廉な熱電可変システムである。

- ・高圧・高純度の蒸気は不要
- ・標準型のガスタービン及び蒸気タービンを使用。

表2 代表的小型ガスタービン仕様一覧

メーカー	名称	出力 [kW]	軸出力 [ps]	排熱ボイラ [kg/h]	排気ガス温度 [°C]	排気ガス流量 [m³/h]	ガス量 [m³/h]	ガスコン動力 [kW]	NOx対応	備考
ガス三社 共同開発	MAKILA	1,100	1,550	3,000	490	15,200	365	75	水噴射	MAKILA.T.I
	GP-1000	1,100	1,558	3,015	495	14,300	381	50	低NOx燃焼器	SB5, ガスコン直結
	GP-1500D	1,453	2,080	4,460	522	22,600	522	67	低NOx燃焼器	M1A-13D
	GP-1500CC	2,300	3,292	0	589	23,600	622	78	蒸気噴射	M1A-13CC
	GP-2000	2,100	3,005	5,940	568	26,900	752	98	水噴射	M1A-23
石川島播磨 重工業	IM400	4,000	5,840	11,700	580	46,300	1,340	200	水噴射	501KB 5S
	IM400-KB 7	5,100	7,370	12,300	530	61,460	1,610	240	水噴射	501KB 7
	IM400-FLECS	6,280	9,030	3,400	560	56,130	1,510	220	蒸気噴射	501KH 5
川崎重工業	PUC30	2,200	4,150	8,650	508	46,000	1,087	132	水噴射	M1T-13
	PUC40	4,100	5,868	11,640	562	53,700	1,485	176	水噴射	M1T-23
	PUC60	5,720	8,018	9,790	528	63,900	1,658	226	蒸気噴射	M7A-01
神戸製鋼所	KGT4000-C	4,000	5,840	10,500	584	45,700	1,287	175	水噴射	501KB 5S
	KGT5000-C	5,000	7,300	12,400	535	58,100	1,588	220	水噴射	501KB 7
	KGT6500-C	6,090	9,125	400	545	56,400	1,363	200	蒸気噴射	501KHS
新海鐵工所	CNT-10C	1,100	1,550	3,660	492	18,200	411	75	水噴射	SATURN
	CNT-40C	3,360	4,750	9,500	443	52,400	1,081	180	低NOx燃焼器	CENTAUR 40S
	CNT-50C	4,170	5,900	11,500	507	53,500	1,273	220	低NOx燃焼器	CENTAUR 50S
	CNT-60C	4,750	6,720	12,300	487	60,100	1,398	220	低NOx燃焼器	TAURUS 60S
	CNT-70C	6,600	9,340	15,300	486	74,800	1,816	380	低NOx燃焼器	TAURUS 70S
	CNT-90C	8,940	12,600	21,700	471	110,300	2,505	520	低NOx燃焼器	MARS90S
日立製作所	TYPHOON	4,020	5,751	9,800	499	51,136	1,280	230	水噴射	
	TYPHOON-M	4,800	6,867	11,500	525	54,988	1,498	230	水噴射	
	TORNADO	6,340	9,069	14,900	481	81,501	1,983	320	水噴射	
日立造船	GT-10	4,100	5,925	10,800	579	46,880	1,344	210	水噴射	501KB 5S
	GT-13	5,100	7,369	12,600	545	59,280	1,613	270	水噴射	501KB 7
	CCS 7	6,100	8,707	400	554	56,410	1,355	210	蒸気噴射	501KH
三井造船	MSC40	3,370	4,823	8,880	442	52,020	1,077	170	低NOx燃焼器	CENTAUR 40S
	MSC50	4,180	5,982	11,410	507	53,210	1,271	195	低NOx燃焼器	CENTAUR 50S
	MSC60	4,760	6,812	12,010	486	59,810	1,395	230	低NOx燃焼器	TAURUS 60S
	MSC70	6,590	9,431	14,900	486	74,230	1,813	355	低NOx燃焼器	TAURUS 70S
	MSC90	8,950	12,809	21,000	470	109,450	2,504	520	低NOx燃焼器	MARS90S
三菱重工業	MF-61B	6,520	9,150	15,600	500	80,760	1,920	370	蒸気噴射+脱硝	
	MF-111A	14,180	19,780	34,000	556	143,470	3,990	730	蒸気噴射+脱硝	
	MF-111B	16,130	22,500	37,900	545	166,190	4,420	730	蒸気噴射+脱硝	
ヤンマーディーゼル	SATURN20	1,110	1,637	3,950	491	18,179	418	75	水噴射	T1500

条件：大気温度15°C時 有効発電所は、ガス圧縮機動力を差し引いたものになります。蒸気量：給水温度60°C、蒸気条件8.0kg/cm²G飽和（ブロー量は考慮していません）
燃料 都市ガス13A, 供給圧力1.0kg/cm²G

表3 4~6MW級ガスタービン代表メーカーの実績と機種

(a)用途別実績

用途別実績	Solar 台数	EGT 台数
圧縮機セット	2,939	450
機械駆動	1,563	764
発電セット	4,435	1596
船用	0	64
OEM	583	0
TOTAL	9,520	2,874

EGTは456台の航空機転用型を含む
船用&OEMの“0”は分類の違い

(b)Allison用途別実績

種別	台数
コージェネ用	346
発電用	195
非常用	181
Total	722

(c)新海鐵工所によるSolar国内実績

機種	常用	非常用
Saturn	9	44
Centaur	41	14
Taurus	6	0
Mars	2	0
Total	58	58

(d)パッケージによるEGT国内実績

機種	日立	タクマ	Total
Typhoon	10	3	13
Tornado	8	2	10
Tempest	0	1	1
Total	18	6	24

(e)Allisonの機種別国内実績

	IHI		神戸製鋼所		日立造船	
	常用	非常用	常用	非常用	常用	非常用
501-KB	7	57	15	19	13	3
501-KB 7	0	0	0	1	2	0
501-KH	7	0	2	0	3	0
571-K	1	0	1	6	0	3
Total	15	57	18	26	18	6

表4 ガスタービンコンバインドシステム主要仕様

原動機メーカー	ガスタービン機種	EGT	Solar	川崎重工業
		Tempest	Taurus70S	M7A
ガスタービン台数		1	1	1
パッケージ		日立製作所	新海鐵工所 ・三井造船	川崎重工業
プラント性能	総発電端出力 [kW]	10,200	8,800	7,875
	総発電端効率 [%]	41.3%	41.9%	40.3%
	総送電端出力 [kW]	9,690	8,340	7,645
	総送電端効率 [%]	39.3%	39.7%	39.1%
	発電端出力 [kW/台]	7,750	6,600	5,540
ガスタービン	発電端出力 [kW]	7,750	6,600	5,540
	発電端効率 [%]	31.4%	31.4%	28.4%
	TIT [°C]	1,130	1,010	1,175
	排気ガス量 [m³/h]	83,371	74,340	60,900
	排気ガス温度 [°C]	536	486	535
	高压蒸気圧力 [ata]	20	30	33
	高压蒸気温度 [°C]	350	350	430
	蒸気エンタルピー [kcal/kg]	749.8	744.9	787.3
	高压蒸気量 [t/h]	13.2	10.9	10.6
	通風損失 [mmAq]	250	200	250
排熱ボイラ	最終排気ガス温度 [°C]	108	175	187
	発電端出力 [kW]	2,450	2,200	2,335
	主蒸気圧力 [ata]	19	30	31
	主蒸気温度 [°C]	345	350	425
	復水器真空 [mmHg]	710	672	715
	冷却水温度差 [°C]	10	10	10
	総発電端出力 [kW]	7,750	6,600	5,540
	総発電端効率 [%]	31.4%	31.4%	28.4%
	総送電端出力 [kW]	7,240	6,140	5,310
	総送電端効率 [%]	29.3%	29.3%	27.2%
蒸気タービン	蒸気回収効率 [%]	42.8%	41.4%	45.7%
	燃料ガス量 [m³/h]	2,136	1,816	1,690
	工業用水補給量 [t/h]	20.0	13.0	19.8
	所内補機動力 [kW]	510	460	230

表5 TEMPESTコンバインド負荷特性

<参考>

運転条件		全量復水	30%プロセス	50%プロセス	70%プロセス	全量プロセス	3倍追焚時
プラント性能	総発電端出力 [kW]	10,200	9,420	8,900	8,390	7,750	7,750
	総発電端効率 [%]	41.3%	38.2%	36.1%	34.0%	31.4%	16.9%
	総送電端出力 [kW]	9,690	8,910	8,390	7,880	7,240	7,240
	総送電端効率 [%]	39.3%	36.1%	34.0%	31.9%	29.3%	15.8%
	プロセス蒸気量 [t/h]	0.0	4.0	6.6	9.2	13.2	39.6
	蒸気回収効率 [%]	0.0%	12.8%	21.4%	30.0%	42.8%	69.3%
	発電端総合効率 [%]	41.3%	51.0%	57.5%	64.0%	74.2%	86.2%
ガスタービン	送電端総合効率 [%]	39.3%	48.9%	55.4%	61.9%	72.1%	85.1%
	発電端出力 [kW]	7,750	7,750	7,750	7,750	7,750	7,750
蒸気タービン	発電端出力 [kW]	2,450	1,670	1,150	640	0	0
	高圧蒸気量 [t/h]	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	39.6
排熱ボイラ	蒸気エンタルピー [kca/kg]	749.8	749.8	749.8	749.8	749.8	749.8
	燃料ガス量 [m ³ N/h]	2,136	2,136	2,136	2,136	2,136	3,964
ユーティリティ	工業用水補給量 [t/h]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	所内補機動力 [kW]	510	510	510	510	510	510

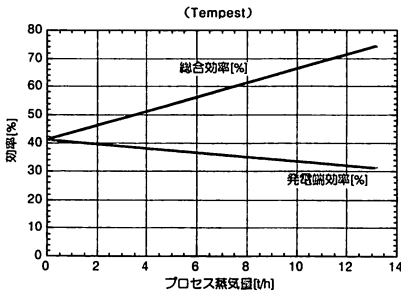


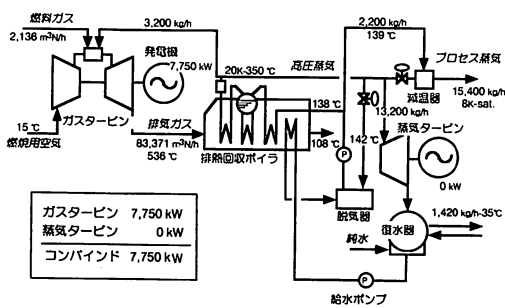
図-7 10MWGTCCのプロセス蒸気量と発電端効率/総合効率 (Tempest)

表6 STACO CYCLEの熱電可変特性

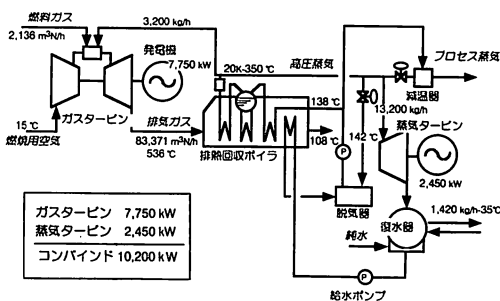
全発電出力	kW	4,760	5,400	6,160
GT出力	kW	4,760	4,760	4,760
ST出力	kW	0	640	1400
全発電効率	%	30	33.5	38.2
GT発電効率	%	29.5	29.5	29.5
燃料量	m ³ N/h	1,395	1,395	1,395
送気蒸気量	t/h	12	6	0

表7 STACO CYCLE適用例

場所	Rice University/Houston, TX.	
稼働年月	1989年1月	
用途	キャンパス内の電力供給及び地域暖房	
ガスタービン	Taurus60	4,500kW
蒸気タービン	Dresser-Rand	400kW 背圧式
蒸気入口条件	24.6kg/cm ² G	260°C
出口条件	8.8kg/cm ² G	飽和
排熱ボイラ	ERI/Nebraska	追い焚き式水管ボイラ
	排熱回収のみ	11.3t/h
	追い焚き時	22.7t/h



(a) (蒸気最大 at 15°C)



(b) (電力最大 at 15°C)

図-8 10MWコンバインドサイクル

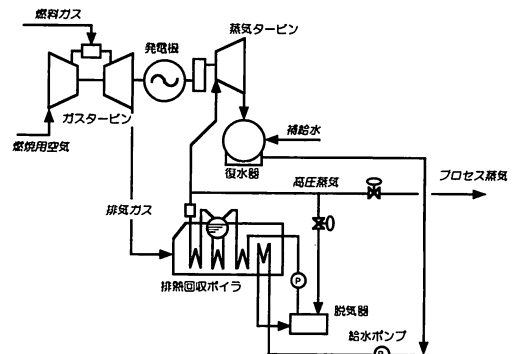


図-9 STACO CYCLE (復水式)

表8 R&R-Allison 501-Kシリーズの蒸気噴射システム比較

	シンプルサイクル	チェンサイクル	2流体サイクル
型式	501-KB 5	501-KH 5	501-KH 5
出力	4,190kW	6,090kW	6,290kW
TIT	1,057°C	1,000°C	1,016°C
蒸気噴射量		9.8t/h	9.8t/h
蒸気圧力/温度		17ata/483°C	18ata/208°C
発電効率	26.2%	38.6%	36.1%
特徴	航空機転用型の中型ガスタービンとしては世界で最も成功している機種。わが国でのコージェネレーション用として20台以上の実績がある。	蒸気噴射による出力増強方式としては最も実績がある。過熱蒸気を用い、発電効率も複合発電並になる。パッケージは神戸製鋼所と日立造船。	IHIが新しく提案している蒸気噴射方式。圧縮空気の一部を抽気し、飽和蒸気と混合し、乾き蒸気としてタービンに噴射して出力増強を図る。

→低廉

- NOx低減には希薄予混合燃焼器（DLE）を採用。
- 発電機は両端駆動，ガスタービンは直結，蒸気タービンはクラッチを介して余剰蒸気の成り行き。

詳細の情報は未入手であるが，適用例及び性能を図に示す。

5. 蒸気噴射出力増強型ガスタービン

小型ガスタービンの世界で最も注目を集めているのが，蒸気を出力向上用に噴射するシステムで最も有名なものが「チェンサイクル」である。1978年米国サンノゼ大学のチェン教授により考案されたシステムで，従来のde-NOx用や夏場の特性改善程度ではなく初期特性の約1.5倍程度まで出力増強を図ると共に，発電効率の飛躍的な向上も併せて実現するものである。チェン教授が試験に用いたガスタービンは米国Allison社製の航空機転用型で，実績・性能ともにこのクラスでは世界トップクラスである。それにも増して重要な要素は，大量の蒸気をいれることによる空気圧縮機側の

サージマージンの大きさである。一般に航空機用ガスタービンは，高性能であるばかりでなく産業用より大きな条件変化を想定して設計している。離陸，巡航の際の負荷変化，高度・姿勢そして気候などの空気の入力条件の変化などに対応しなければならず，必然的に大きなサージマージンを持つ。産業用ガスタービンで行う場合は，静翼のカットバックが必要となることもあり，初期性能の低下を伴うことになる。

このシステムの特徴は蒸気タービンが不要であることに加え，C/Cよりも低圧蒸気で十分な性能が出せることにある。そのため，単純サイクルと比べそれほど大きなコストアップにならず，システム全体でも約1～2割程度の上昇に抑えることができる。

このシステムが我が国ですぐに利用されなかった理由は，電気事業法のボイラ検査にあった。規制緩和により検査回数が削減され，これがボイラコストの低減に繋がったため，一昨年末から急速に注目を集めることになった。すでに3台が稼働を始め，10台近くが内定あるいは建設中である。現在検討中の物件は，パッケージ3社で全国で35社に及ぶと聞いている。とくにパッケージの1社であるIHI社の考案したシステムは，「FLECS」（2流体サイクル）の商品名で我が国における起爆剤的役割を果たしたが，チェン教授の考案と異なり過熱蒸気を用いずに出力アップ・効率アップを実現している。図に示すように，航空機用ガスター

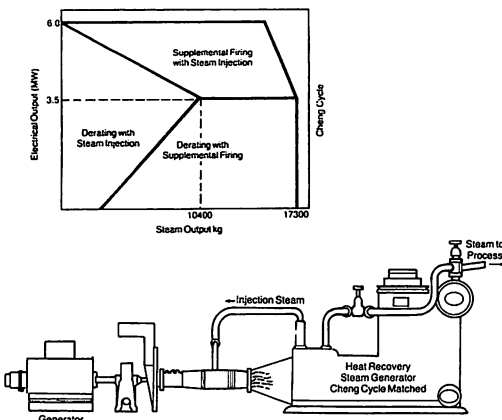


図-10 チェンサイクル概念図

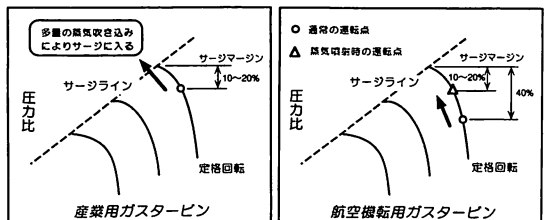


図-11 サージマージン概念図

表9 我が国のKHエンジン実績

番号	設置場所	運転開始
FLECS		
1	TS社大阪	Jul-96
2	S社	Des-96
3	NZ社神奈川	Mar-97
4	T社	Jul-97
5	T社	Jul-97
6	T社	Jul-97
7	S社仙台	Oct-96
CHENG		
1	日立造船 C社富山	Jul-96
2	神戸製鋼所 NS社千葉	Nov.-96
3	日立造船 N社京都	97?
4	神戸製鋼所 TY社愛知	97?

ピンの特徴で与圧用に用いられる圧縮空気の抽気孔から、高温高圧の空気を抽気して飽和蒸気を混合・減圧することにより、過熱側に持っていきドレンアタックを回避するというものである。この方法で一層のコスト低減とイーザーハンドリングが可能となり、様々な業種からの検討要請が来るようになった。

最後に、航空機用の大型ガスタービンにおいても、GE社が「STIG」の名称でこのサイクルを実用化しているの、併せて紹介する。

6. 再生サイクル

ガスタービンの性能向上には、高圧・高温化が有効であることは周知であるが、同時に大きなリスクも伴う。高効率の高圧圧縮機は必然的に軸流の場合は多段化し、遠心の場合は周速度やチップクリアランスを限界に近づけることになる。また、高温化は冷却の高度化・超耐熱材料の採用を伴う。このほかにも全般的な製作精度の向上やアライメント精密化などが必要となり、いずれも複雑化を伴うためコストへのインパクトは極めて高いものとなる。重量軽減と出力の向上が何よりも優先する航空機用の場合と異なり、陸船用のガスタービンにはこのような制約は少ない。むしろ自動車用や船用の場合、複雑さや高価さを避けて高効率化する手法として再生サイクルを採用してきた。

再生サイクルは先に述べたように、排ガスの熱回収の1手法で燃焼空気の前熱に利用する。再生器とはすなわちガス-ガス熱交換器であり、大きな容積と重量になり、設置した場合若干の抵抗増大による出力減少も伴うが、熱消費率は大幅に削減できる。先述のii式のように圧力比を小さくするほど効率は高くなり、 $\gamma \rightarrow 1$ になるとカルノー-そのものになる。したがって、サイクル的・構造的には比較的構造の簡単で圧力比の低い遠心圧縮機で単缶式の燃焼器を持つ小型ガスター

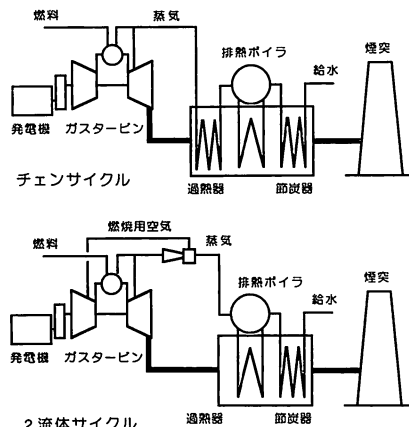
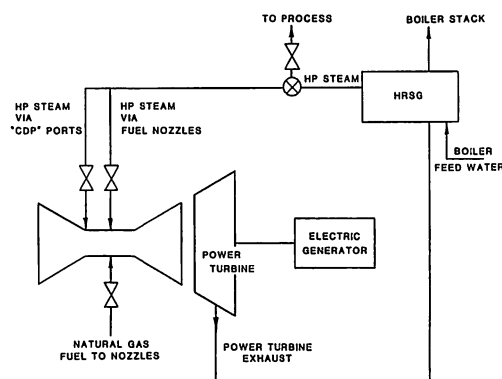


図-12 チェンサイクル及びFLECS概念図



	LM2500 -33	LM2500 STIG40	LM5000	LM5000 STIG80	LM5000 STIG120
ISO Continuous KW*	21450	27013	33210	46890	51620
Standby KW*	23675	-	37080	-	-
Fuel Rate(BTU/KW-HR)*	9460	8297	9380	8174	7907
Number of Shafts	2	2	3	3	3
Turbine Speed (RPM)	3600	3600	3600	3600	3600
Firing Temp. °F	1461①	1475①	1425②	1410②	1450②
Exhaust Flow (#/Sec)	149.0	164.8	267.5	328.8	346.5
Exhaust Gas Temp. °F	955	937	835	775	765

①Measured at inlet to free power turbine
②Measured at inlet to low pressure turbine
Ratings are at 59°F, Sea Level. No Inlet or Exhaust Losses and Using Natural Gas

図-13 GE社LMシリーズSTIG概念図

ビンに適用しやすい。さらに等温・等圧変化のエリックソンサイクルに近づくために空気圧縮機を高圧段と低圧段に分け、その間に中間冷却器を付ける。併せて再生器の代わりに燃料を加える再熱器を付け、タービン入口温度も低下させたものが中間冷却再熱サイクルである。

このサイクルは出力可変にはならないが、再生器のバイパスを設けることにより蒸気発生量と熱効率を可変する事が出来る。

実用的にはKONGSBERG社のものが古くは商品となっているが、これで判るように、主に遠心圧縮機

を持つ数百kWから1,000kWクラスの超小型ガスタービンへの適用が効果的である。

現在開発中の新しいコンセプトに基づく再生サイクルガスタービンとしては、我が国ではACT90の成果を受けたKHIと大手ガス3社（東京、大阪、東邦）で開発中の650kW級ガスタービンの効率向上用に採用されている。また、本場の欧州ではOPRA社とHERON社の開発中のシステムが有名である。以下に、後者の2機種について説明する。

HERON社はオランダのベンチャーで1993年（ロンドン）と1995年（インターラーケン）のCIMAXに開発計画と進捗状況について報告しているが、開発機の諸元及び概念図は示すとおりである。中間冷却器、再生器そして再熱器と考えられる全てを搭載している。2軸ガスタービンの単純サイクル特性は発電効率30%で、これを全熱回収により約43%を期待している。

また、OPRA社はオランダのメーカーで我が国のダイハツ工業をパートナーとして、2種類の超小型ガスタービンを開発している。既に昨年横浜で開催された「国際ガスタービン会議」に試験機を展示している。

大型の熱交換器を含むプラント用のシステムとなることから、コスト・設置面積そして操作性などが、どこまで実用的な仕様により上げられるかが課題であろう。このクラスにおける熱電可変・効率向上の有効な手法として、蒸気噴射型ガスタービンと共に注目していかなければならないシステムである。

7. おわりに

事業用火力用コンバインドサイクルの発電効率には比べるべくもないが、小型ガスタービンもより多くの需要に対応するために少しでも発電効率を向上する努

力は重要であるが、それとともに総合効率を改善する熱電可変が不可欠の技術としてクローズアップされてきた。ガスタービン本体の性能向上についてはリスクもあり、今後のメーカー各位の一層の努力を期待するが、システムとしては既存の技術の組合わせであり、むしろエンジニアリングや運用技術の分野であるとも言える。

現に、蒸気噴射型ガスタービンの最近の急速な普及は昨年行われた電気事業法の規制緩和を受けての運用上のメリットが起点である。一般にコージェネレーションシステムの排熱ボイラは労働省管轄のボイラであるが、発生蒸気の半分以上を発電のように供するボイラは、昭和40年7月1日通産省公益事業局長通達により通産省管轄のボイラになる。この「電事ボイラ」は大変高額であり、普及の大きな障害になっていたが、規制緩和により溶接検査の扱いが変更され、溶接方法の事前認可の廃止、検査内容・方法等の簡素化などが実施されることになり、大幅にコストが低減可能となったことから導入意欲の高まりに繋がった。

昨年欧米のガスタービンメーカーの我が国への参入意識を調査したところ、規制の厳しさを理由に否定的な意見を述べるところが多かった。

現に、既に進出しているメーカーでは規制緩和の動きを受け、積極的な戦略展開を図るところが増えている。

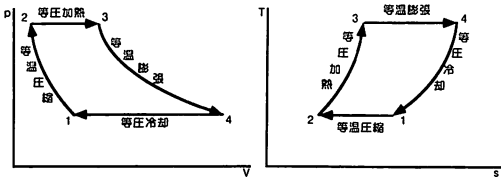


図-14 エリクソンサイクル

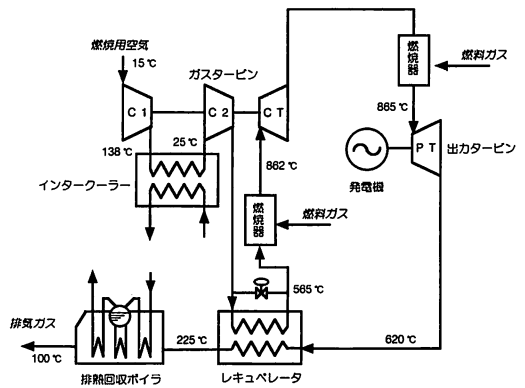


図-16 HERON TURBINES

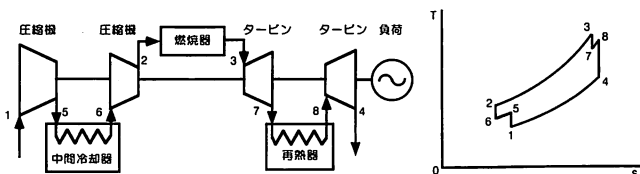


図-15 中間冷却再熱サイクル

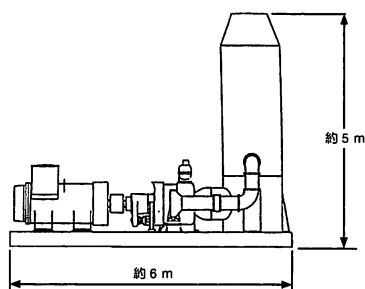
表10 Heron社1.4MWガスタービン

型式	2軸開放型中間冷却・再生式	
出力	1,407kW	発電機端
出力軸回転数	20,000rpm	
燃料消費量	375m ³ N/h	天然ガス
発電効率	42.9%	発電機端

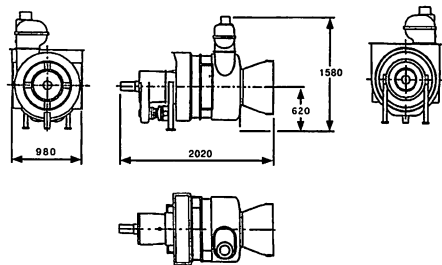
表11 欧州の開発途上高効率ガスタービン

メーカー名	OPRA			UNITED TURBINE	EURODYN
型式	OP-16	OP-16-R	OP-5	UT600	
軸端出力	1645	1517	487	650	2200~2900
圧力比	6.5	6.5	14.5	—	
軸端効率	25.5	37	28.3	25	33~35
NOx	10	10	10	—	
圧縮機	遠心1段	同左	遠心2段	—	遠心2段
タービン	ラジアル1段	同左	ラジアル2段	—	
備考	コンクルベルクで開発していたDuraの流れを組む。	同左機に再生器を付け、効率改善をしたもの。	遠心+ラジアル1軸を2セット複合させたもの。	近い将来800kW-26%に性能向上予定	ウルスタインタービン、チュルボメカ、ユナイテッドタービンの3社共同開発

NOxは0.15%換算



(a)再生サイクルシステム



(b) ガスタービン外観

図-17 OPR社ガスタービン

る。私見ではあるが、コージェネレーションの技術およびノウハウにおいて、欧米は我が国より10年以上進んでいると考えているが、彼らの情報が多量に入ってくるようになったことも、エンジニアリングや運用上の新しいアイデアに繋がり、ひいては熱電可変の気運を盛り上げる遠因となっているものと思われる。

コージェネレーションの新しい展開として、ガスタービンの高効率化と熱電可変技術は一層注目を集めていくものと思われるが、稼動実績の評価はこれからである。慎重に結果の解析を行い、技術蓄積を図っていききたい。また、海外の優れた製品が低廉に入手するばかりではなく、世界中に展開しているメンテナンスセン

ターと保守システムも信頼性・経済性両面から評価し、導入の実現を図っていききたい。

いずれにせよ、小型ガスタービンの世界は、発展性を秘めた夢のある分野である。関係各位の一層のご尽力を期待して本稿を終えたい。

参考文献

- 「ジェットエンジン概論」J. L. ケルブロック著 東京大学出版会
- 「火力原子力発電」Apr. 1984 vol.35 No. 4
- 同上 Jun. 1984 vol.35 No. 6
- 日本機械学会 [NO. 930-46] 講習会教材 川池和彦著 日立製作所「'93 9.28 川崎；近未来の電力エネルギーシステム」
- CIMAC/20th. International Congress On Combustion Engines
[Heron Turbine Proto-type Test Result] by R. Hendriks LONDON 1993
- CIMAC/21st, International Congress On Combustion Engines
[Heron Turbine Intergrated Systems with Hydrogen Technology & Fuel Cell] by R. Hendriks Interlaken 1995
- [Gas Turbine World] May-June 1995 vol.25 No. 3
- [Gas Turbine World] Jul-Aug 1996 vol.24 No. 4
- [Diesel & Gas Turbine] Jan.,-Feb. 1996
- 各社の技術資料：石川島播磨重工業、日立製作所、神戸製鋼所、日立造船、Allison Engine Company, Solar Turbines, Europiann Gas Turbine