

■ 技術報告 ■

コンバインドサイクル発電

Combined Cycle Power Plant

小島 民生*

Tamio Kojima

1. はじめに

東京電力における火力発電は、戦後の復興期を経て昭和34年には水力発電を上回りいわゆる火主水従の時代となった。その後の高度成長時代を含め電力需要は毎年10%を超える伸びを続けたため、急ピッチの発電所建設を進めたが、同時に技術開発の進展も加わり、単機発電設備容量は昭和30年には66MWであったものが昭和40年代末には1000MWへと急激に大容量化した。

熱効率についても、昭和30年には約30%（高位発熱量基準、発電端、以下特記なければ同じ）であったものが、亜臨界圧、超臨界圧など蒸気条件の向上により、昭和40年代前半には約40%へと大幅に上昇したが、蒸気の高温・高圧化に対する技術的な限界からその後はほとんど上昇していない。

しかし、昭和40年代末以降の2回のオイルショックにより、燃料供給の不安定、価格の高騰から熱効率向上の要請は一層大きくなった。

また、原子力発電が導入されベース供給力として発展するとともに、冷房需要の増加による昼夜間需要格差が拡大するなど需要形態の変化もあり、火力発電は、

表1 電源構成と見通し（東京電力）(万kW, %)

項目	平成2年度 (1990年)		平成7年度 (1995年)		平成12年度 (2000年)	
	比率	比率	比率	比率	比率	比率
年度末電源設備と構成比率						
水力	1,042 [19]	1,306 [21]	1,381 [19]			
石炭	165 [3]	265 [4]	365 [5]			
LNG	1,800 [33]	1,961 [32]	2,708 [36]			
石油	967 [17]	933 [15]	933 [13]			
原子力	1,344 [25]	1,564 [25]	1,850 [25]			
その他	153 [3]	153 [3]	155 [2]			
計	5,471 100	6,182 100	7,392 100			
設備率	1.14	1.16	1.23			

* 東京電力㈱火力部副部長

〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3

表2 発電電力量構成と見通し（東京電力）(億kWh, %)

項目	平成2年度 (1990年)		平成7年度 (1995年)		平成12年度 (2000年)	
	比率	比率	比率	比率	比率	比率
発電電力量と構成比率						
水力	197 [8]	230 [8]	241 [8]			
石炭	54 [2]	100 [4]	167 [5]			
LNG	763 [31]	842 [29]	962 [31]			
石油	613 [24]	627 [22]	514 [16]			
原子力	846 [34]	1,027 [36]	1,224 [39]			
その他	32 [1]	30 [1]	33 [1]			
計	2,505 100	2,856 100	3,141 100			

ベース供給力から需要変化に追従する負荷調整電源へと変化した。

原子力、水力、石油、LNG及び石炭などエネルギー源のベストミックスを図る中で、平成2年度には設備容量、発電電力量ともに約60%を占めている。（表1、表2、図-1）

コンバインドサイクルは熱効率の向上、負荷調整電源としての機動性の向上のため、昭和50年代後半になって建設が相次ぎ、さらに昭和60年代になってからの急激な需要増加と、地球規模の環境問題の表面化を背景

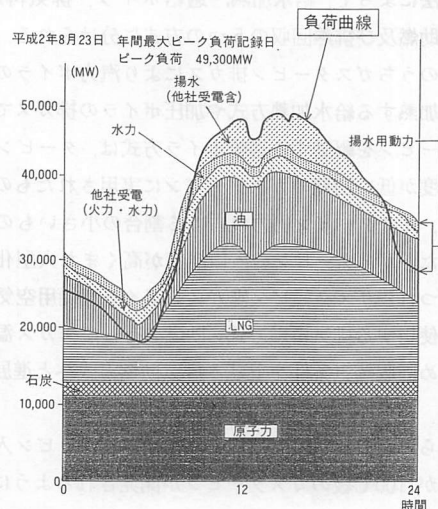


図-1 平成2年8月最大需要時の負荷パターン

に、より大容量、高効率をねらった改良型コンバインドサイクル(Advanced Combined Cycle, ACC)が計画されるようになった。本稿では、これらのコンバインドサイクルの運用及び開発状況について報告する。

2. コンバインドサイクルの概要

2.1 コンバインドサイクルの原理

ガスタービンコンバインドサイクルは燃料の燃焼熱を熱源とするガスタービンのサイクル(ブレイトンサイクル)とガスタービンの高温の排ガスを熱源とする蒸気タービンサイクル(ランキンサイクル)とを組合せたものであり、ガスタービンサイクルの低温域をひろげることによりカルノーサイクルに近づけ、単独のサイクルでは達成できない高い熱効率を得ようとするものである。(図-2)

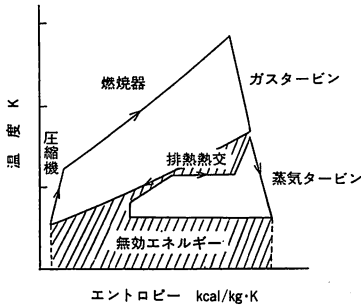


図-2 コンバインドサイクルのT-S線図

2.2 コンバインドサイクルの形式

コンバインドサイクルには、ガスタービンの熱回収の方法によって、給水加熱、過給ボイラ、排気再燃、排気助燃及び排熱回収の5つの方式に分けられる。

このうちガスタービン排ガスにより汽力ボイラの給水を加熱する給水加熱方式や加圧ボイラの排ガスでガスタービンを駆動する過給ボイラ方式は、タービン入口温度が低い初期のガスタービンに実用されたものであり、ガスタービン出力の占める割合の小さいものであった。ガスタービンの入口温度が高くまた大型化するにつれ、ガスタービン排ガスをボイラ燃焼用空気として使用する排気再燃方式、助燃を行って排ガス温度を高め回収蒸気条件を上げる排気助燃方式へと進展した。

さらに耐熱材料、冷却技術が進歩し、タービン入口温度が1100℃級のガスタービンが開発されるようになると、コンバインドサイクルとして十分高い熱効率が

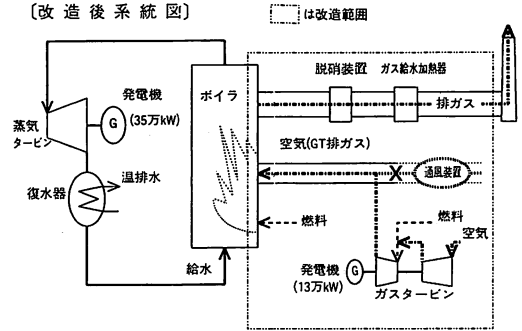


図-3 リパリングシステム一例

得られ、また構造的にシンプルで信頼性の高い、排ガスのもつ熱のみで蒸気を発生する排熱回収方式が主流となってきた。

なお、排気再燃方式は図-3に示すように、経年汽力のボイラにおいて、押込通風機の替わりにガスタービンを追設し、出力、効率の向上をはかるリパリングとして採用の計画が増えている。

また、排熱の回収方法の他に、ガスタービンと蒸気タービンの組合せ方により、一軸型と多軸型に分けることができる。一軸型はガスタービンと蒸気タービンを同一軸上に配置し発電機を駆動するものであり、多軸型はガスタービンと蒸気タービンを分離し各々別の発電機を駆動するものである。一軸型と多軸型の構成例を図-4に示す。

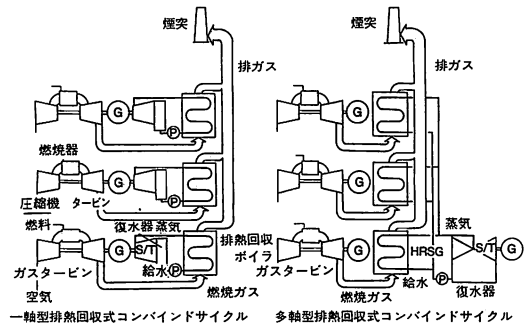


図-4 コンバインドサイクルの効率の変遷

コンバインドサイクルはガスタービンの出力に支配されるが、汽力発電に比較し、1台あたりの出力が比較的小さいため、これをいくつかの組合せで1つの運用単位(系列)としている。

一軸型では、各軸の独立した運用が可能で、系列としての出力は軸の運転軸数の増減で調節することにより部分負荷においても定格出力と同等の高い熱効率を

維持することができる。さらに軸の故障が他軸へは波及しないなど信頼性が高く、負荷調整運転としてのメリットが大きい。

一方、多軸型は、一般に蒸気タービン1台にガスタービンを複数台設置することにより一軸型にくらべ蒸気タービンを大容量として、定格効率が高くなることをねらったものであり、ベースロード運転に向けた方式といえる。

2.3 コンバインドサイクルの特徴

コンバインドサイクルの特徴を整理すると次のようになる。

(1)熱効率が低い

コンバインドサイクルの定格熱効率は、LNG燃料の1100℃級ガスタービンを用いたもので約43%であり、従来型の汽力40%に対して約1割の効率向上となっている。

(2)部分負荷効率が低い

前述のように比較的小容量機の組み合わせで一つの系列を構成するため、ガスタービンの運転台数を増減することによって、部分負荷でも運転中のガスタービンは定格出力時と同等の高い熱効率の運転が可能である。

(3)機動性が高い

比較的小容量機の組合せであり、大容量の汽力設備に比較し、起動停止時間が短く、また負荷変化への追従性も高い。

(4)最大出力が外気温度により変化する

ガスタービンは、吸込空気温度によって吸込空気の重量流量に差がでるため全体の出力が外気温度によって大きく変化する。

(5)温排水量が少ない

ガスタービンが主体であるため、温排水を発生する

蒸気タービンが出力に占める割合が少なく、同出力の汽力発電と比較すると約3分の2となる。

3. コンバインドサイクルの実績

3.1 コンバインドサイクルの導入

ガスタービン入口温度の高温化にともなうコンバインドサイクルの性能向上により(図-5)、1970年代から本格的に欧米での導入が始まった。国内では、昭和46年(1971年)に四国電力(株)坂出1号にて出力225MWの排気再燃式が採用され、その後昭和56年に国鉄川崎発電所において本格的排熱回収式コンバインドサイクルが建設された。

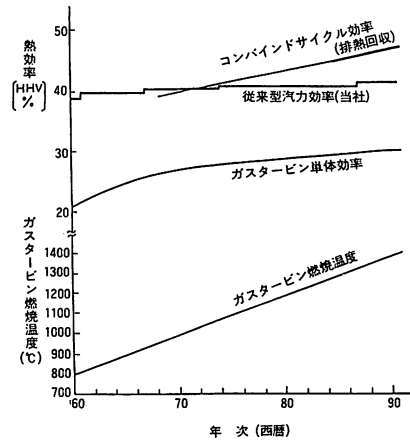


図-5 ガスタービン及びコンバインドサイクルの効率の変遷

事業用の大容量コンバインドサイクルプラントは、昭和59年の東北電力東新潟を始め、東京電力富津、中部電力四日市などが相次いで運開し、引続き中国電力柳井、九州電力新大分が最近運開している。これらの概要を表3に示す。

表3 わが国のコンバインドサイクルプラント一覧

発電所名	東北電力	東京電力		中部電力	中国電力	九州電力		関西電力	東京電力
	東新潟火力 3号系列	富津火力 1号系列 2号系列		四日市火力 4号系列	柳井火力 1号系列	新大分火力 1号系列 2号系列		姫路火力 5・6号系列	横浜火力 7・8号系列 (計画中)
出力	1090MW	1000MW	1000MW	560MW	700MW	690MW	870MW	670MW×2	1400MW×2
型式	多軸型	一軸型	一軸型	一軸型	一軸型	一軸型	一軸型	多軸型	一軸
GT台数	6	7	7	5	6	6	4	3×2	4×2
ST台数	2	7	7	5	6	6	4	1×2	4×2
使用燃料	LNG	LNG	LNG	LNG・LPG	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG
運開年月	84/12 85/10	85/12 86/2,5,5, 7,9,11	87/12 88/2,4,5, 9,9,11	87/2-7	90/11 92/12	91/7	94/7 ~99/3	94/7 96/7	98/7 98/7
製作者	三菱	GE(東芝)	GE(日立)	GE(東芝)	日立	日立			

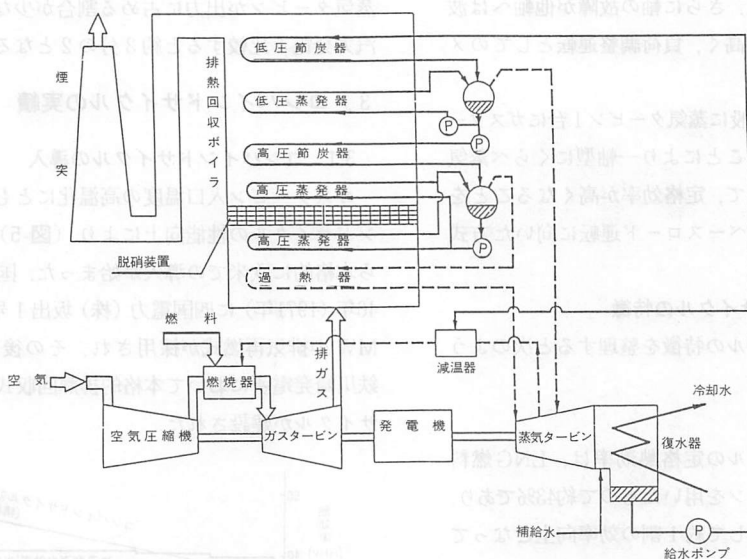


図-6 コンバインドサイクルの系統概要

表 4 富津火力の仕様概要

富津第1, 2号系列	
コンバインドサイクル発電プラント プラント型式 出力 (軸当たり出力) 使用燃料	1軸型排熱回収式 1,000MW×2系列(外気32℃) 165MW×7軸×2系列(外気8℃) LNG
ガスタービン 型式 出力 入口ガス温度(第1段動翼) 圧縮比	開放サイクル1軸型 113MW×7台×2系列(外気8℃) 1,085℃ 約12 燃焼器蒸気噴射付
蒸気タービン 型式 出力 最終段翼長	混圧単流排気復水型 52MW×7台×2系列(外気8℃) 26インチ脱気復水器付
ボイラ 型式 蒸気量	排熱回収2汽調式 強制循環型(縦置) 220t/h×7台×2系列
発電機 型式 蒸気量	交流同期式 184MVA×7台×2系列
排煙脱硝装置 方式 出口NOx濃度(15%O ₂ 換算)	乾式アンモニア接触還元法 10ppmv以下

3.2 富津火力発電所の概要

東京電力富津火力発電所は、当初は従来型汽力発電方式にて検討を進めていたが、オイルショックを契機に昭和52年より調査検討を加えた結果、熱効率、機動性、信頼性及び実績などから排熱回収一軸型コンバインドサイクルの採用を決定した。表4及び図-6にその設備及び系統の概要を示す。

ガスタービンはGE社製 MS9001E型ガスタービンが採用されており、タービン入口温度(第1段動翼入口)は1085℃である。タービンは3段で、静翼はコバルト系超合金であり、1,2段には対流、インピンジメント、フィルムの各冷却方式が組合せて採用されてい

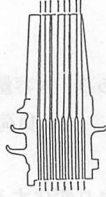
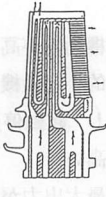
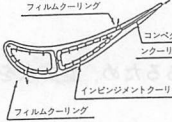
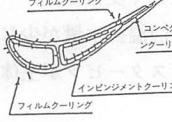
	9E型	9F型
第一段動翼	IN-738 	GTD-111 
第一段静翼	FSX-414 	FSX-414 

図-7 第一段動静翼構造比較

る。動翼はニッケル系超合金であり、同様に1,2段にはマルチフローの冷却が施されている。(図-7)

燃焼器は1軸に14缶設置され、内面にセラミックコーティングが施された拡散燃焼器であり、NOx低減のため蒸気噴射により燃焼温度を低減する方式が採用されている。

3.3 富津火力の運用実績

富津火力は昭和60年12月に1軸目の営業運転を開始し、その後各軸が順次運転を開始し63年11月に2系列、

合計14軸、2000MWが完成した。平成2年度末までの各軸の平均運転時間は20,342時間、平均起動回数は563.9回を記録している。コンバインドサイクルは起動・停止を容易に行うことができるので、電力系統の出力調整を行うためにその機能を遺憾無く発揮し、起動・停止回数が非常に多くなっている。

1軸の起動時間はガスタービン起動から定格出力まで約60分であるが、系列1000MWとしての起動時間は各軸を5分間隔起動することにより約90分となり、汽力1000MW機の約2分の1となっている。

また熱効率については、計画性能42.7%に対して受取性能試験値は43.54~44.31%と十分な性能が得られている。また、全軸運転開始後の運用熱効率も42%代となっており新鋭汽力の39%代に対し高い値を示している。

このように、コンバインドサイクルは予想通りの高い熱効率、機動性を示しており、また、主要機器の設計上のトラブル発生もなく信頼性も高いものであることが実績により証明されている。

4. 1300℃級改良型コンバインドサイクル (ACC)

コンバインドサイクルは、前述のように期待通りの性能を有しているが、常用の発電プラントとしては新しい方式であり、引続き開発が進められているが、汽

力発電プラントのように熱効率の向上が、優れた材料を持ってしても既に頭打ちになっているのに比べ、さらに大幅な熱効率の向上が期待できる。

ガスタービンはタービン入口温度を高温化することによってより熱効率を向上することができ、また、空気圧縮機の圧縮比との組合せによってガスタービンの出口温度も高くとれるため、排熱回収ボイラの発生蒸気圧力、温度を上げることができ、コンバインドサイクルとしての熱効率も合わせて向上させることが可能となる。

(1)1300℃級高温ガスタービンの開発

ガスタービン入口温度が1300℃級であるガスタービンは、既に実用化され信頼性の確立されている1100℃級をベースとして開発が進められている。

ガス温度を上げるためには、高温燃焼ガスに曝される燃焼器や初段の動静翼の材料、冷却、遮熱技術及びそれらの製造技術などの開発が必要であり、これらは進歩の著しい航空機用ジェットエンジン用に開発された技術が適用され、さらに発電用ガスタービンに合わせ大型化するための製造技術が開発されている。

図-7に1100℃級と1300℃級の第1段の動静翼の構造例を示すが、特に動翼は、高温強度の高い材料の採用に加え、精密鑄造技術によって可能となったリターンフローと呼ばれる冷却方法が採用されており、冷却効率の向上による冷却空気量の低減をはかりつつ、金属

表5 ガスタービン仕様例

		1100℃級 (富津用)	1300℃級 (ACC用)
性能	(ISOガス焚ベース) コンバインドサイクル出力	165MW	330MW
	熱効率 (HHV)	42.7%	48.0%
	ガスタービン出力	113MW	220MW
	ガスタービン入口温度	1085℃	1300℃級
圧縮機	型式	軸流：17段	軸流：18段
	圧縮比	12	15
	吸込空気流量	400kg/s	600kg/s
燃焼器	型式	キャン型拡散燃焼器	キャン型予混合燃焼器
	缶数	14	18
ガスタービン	型式 翼冷却方法	軸流衝動：3段	軸流衝動：3段
	①静翼	1段：インピンジメント +フィルム+対流 2段：対流 3段：無冷却	1段：インピンジメント +フィルム+対流 2段：インピンジメント +対流 3段：対流
	②動翼	1段：マルチホール 2段：マルチホール	1段：リターンフロー 2段：マルチホール

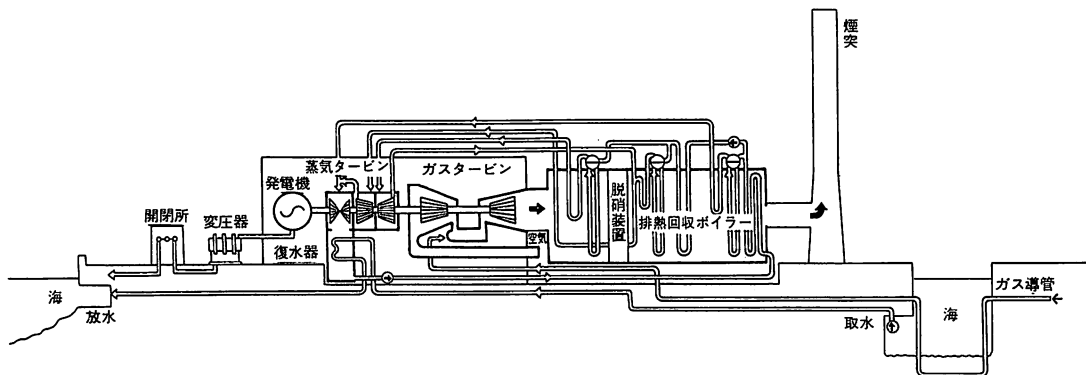


図-8 ACCプラント系統概要

温度を1100℃級と同等としており、効率及び信頼性の一層の向上がはかられている。

1300℃級ガスタービンは国内外で開発が進められ、海外の60Hz機では、米国バージニア電力において、GE社製の出力160MW級（ISO）のガスタービンを使用したコンバインドサイクルが、平成2年6月より商業運転が開始されている。また50Hz機では出力230MW級のガスタービンの工場試験が完了している。また、国内では、60Hz機については工場試験を終了、50Hzについても現在製作中であり、平成4～5年に試運転の予定である。50Hz、1300℃級ガスタービンの仕様の一例を表5に示す。

表6 ACCプラント仕様概要

項目		ACC
原動力の種類		ガスタービン及び汽力 (コンバインドサイクル方式)
出力		140万kw
発電効率		48%(発電端効率, 高位発熱量基準)
ボイラー	種類	排熱回収自然循環型
	蒸発量	高圧: 約260t/h×4基 中圧: 約60t/h×4基 低圧: 約40t/h×4基
ガスタービン 及び 蒸気タービン	種類	開放サイクル型及び串型再熱式
	出力	35万kW×4基 (気温5℃)
発電機	種類	横軸円筒回転磁石型
	容量	約430,000kVA×4基
主変圧器	種類	送油風冷式
	容量	約430,000kVA×4基
ばい煙処理装置	排煙脱硝装置	乾式排煙脱硝法 (アンモニア接触還元法)
	煙突	容量
種類		4筒身集合型 { 内筒: 鋼製 外筒: コンクリート造 }
冷却水取放水設備	高さ	地上高 200m
	取水方式	カーテンウォール方式
	放水方式	表層放水方式
冷水水量		36m ³ /s

(2)改良型コンバインドサイクル（ACC）の概要

ACCの開発に当たっては、1300℃級ガスタービンの性能を十分に発揮させるとともに、環境への影響を極力抑えるため、

- ガスタービン入口温度の上昇に伴うNOx発生を抑え、高い熱効率を維持するため、蒸気噴射を行わない予混合燃焼式の低NOx燃焼器の開発、さらに煙突出口NOx濃度を低減するための高性能脱硝装置の開発
- 排ガス温度が1100℃級に比較し50℃程度高温となることを利用して、排熱回収ボイラーにおいて、再熱サイクルの採用及び発生蒸気圧力を3圧式とするなど、排ガスの熱を高温から低温まで効率よく回収する蒸気サイクルの最適化

などの開発を行うとともに、機動性、運用性のさらなる向上のため制御、電気を含めたシステムの最適化を行っている。

ACCプラントの概略系統及び仕様概要を図-8、表6に示す。

ACCプラントは、出力350MW（気温5℃）の一軸型ACCを1系列4軸構成とし、系列出力1400MWとする計画である。このACCプラントは、

- 熱効率が48%（低位発熱量基準では53%）が見込まれ、これは従来の汽力発電に対し約2割、1100℃級コンバインドサイクル（富津火力）に対し約1割の効率向上となり、省エネルギー性に優れているとともに、地球規模の環境問題に対しても効果的である。
- 1軸出力が1100℃級コンバインドサイクルに比較し約2倍となり、スペースファクター、建設コストとも有利になる。
- 1100℃級と同様の高い機動性を有す。
- 低NOx燃焼器及び高性能脱硝装置により1100℃級

と同等の環境性能が得られる。
 などの特徴がある。

5. おわりに

コンバインドサイクル発電は、前述の通り、高い機動性、運用性、信頼性、省エネルギー性を有しており、既に多数の発電所で実績を上げている。また、ACCプラントは一層の高効率化が可能であり、省エネルギー、地球規模の環境対策の面からも大いに期待されるものであり、まさに実現されようとしている。

さらに、既存の経年汽力発電設備の効率及び出力の向上をはかるリパワリングへの適用もはかれるとともに、火力燃料として欠くことのできない石炭の新利用技術である石炭ガス化への適用などコンバインドサ

イクルの応用範囲は幅広いものになると予想されている。

これらの種々の技術開発が効果的になされるとともに、基幹となるガスタービンの一層の高温化による超高効率コンバインドサイクルが近い将来実現することを期待してやまない。

参 考 文 献

- 1) 小島 民生 ; 「LNG複合発電」火力原子力発電, Vol.38 No.10(1987)
- 2) D.E.Brandt ; MS7001F Gas Turbine Design Evolution and Verification, GER-3622A GE Power Generation
- 3) 相沢 善吾 ; 「LNGコンバインドサイクル発電の現状と展望」, JATEC第3回エネルギー有効利用研究セミナー予稿, 1991

