



米国初の M501G ガスタービンコンバインドサイクル“ MYSTIC COMBINED CYCLE PLANT ”の営業運転開始

A Commencement of Commercial Operation at "MYSTIC COMBINED CYCLE PLANT" as a First Unit of M501G Combined Cycle in United States

松田 秀雄^{*1}
Hideo Matsuda

安良岡 淳^{*2}
Jun Naraoka

内藤 拓哉^{*3}
Takuya Naito

堀 進^{*4}
Shinichi Hori

新藤 光^{*5}
Koichi Shindo

2003年から2004年にかけて米国各地域で当社最新鋭の1500級M501Gガスタービンを採用したコンバインドプラントが次々とプラント引渡しを完了し営業運転を開始した。これらプラントは環境規制の厳しい米国でエミッション規制値を満たしつつ、M501G特有の蒸気冷却燃焼器システムによりプラントとして高い熱効率を実現している。本論文では、米国内での客先引渡し初号機となったMysticコンバインド発電所を中心に米国内で営業運転が開始されたM501Gコンバインドプラントを紹介する。

1. はじめに

当社は米国においてこれまでに単独で大型ガスタービンを納入した実績はなかったが、1999年にマサチューセッツ州ボストン市内のMystic発電所（出力1600MW）及びFore River発電所（出力800MW）を受注し、これを足がかりとしてテキサス州、ミシガン州での受注も達成している（図1）。これらプラントはいずれも蒸気冷却燃焼器システムを採用したM501Gガスタービンを主機とする最新鋭のガスタービンコンバインドサイクルプラントであり、米国の厳

しい環境基準を満たしつつ、IPP事業の盛んな米国電力市場のニーズにマッチした高い熱効率と信頼性を誇っている。

2003年から2004年にかけてこれら計4プラントが保証性能及び保証エミッションを満足して相次ぎ営業運転を開始し、その後順調に運転を続けている。各プラントの概要を表1に示す。

2. MYSTIC 発電所の概要

Mystic発電所はボストン市近郊に位置し、Block 8、Block 9の2系列から構成される（代表図参照）。プラント運営は米国Boston Generating社（尚、契約時オーナーはSithe Energy社であった）であり、プラントのEPCはWashington Group International社（旧Raytheon E&C社）が取り纏めた。このうち当社供給範囲はガスタービン、蒸気タービン、HRSG（米国現地調達品）とGT/ST制御装置である。

また、同敷地内に既設のコンベンショナル火力設備（代表図左）があり、起動時にはガスタービン尾筒冷却システムに必要な補助蒸気を本ユニットより、あるいはBlock 8、9相互間で供給が行われる。プラントの冷却方式は空気冷却方式であり、各系列とも計36セル（一部可変速式）からなる空冷コンデンサが設置されている。

夏場の電力需要増加に対応するための出力増加対策として助燃設備及び吸気冷却設備（Evaporative

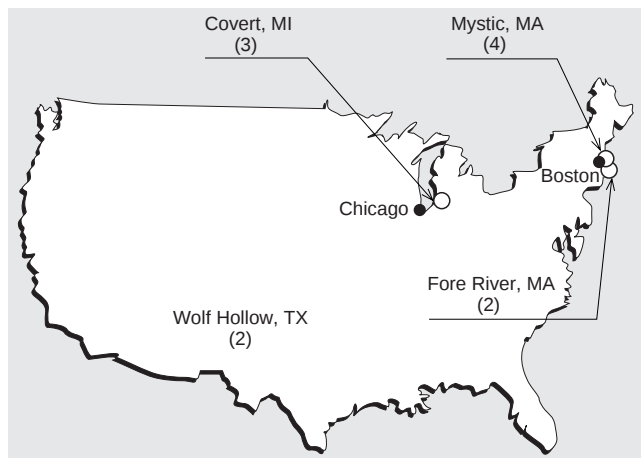


図1 米国における当社納入のM501Gコンバインドサイクルプラントの概略位置 カッコ内は納入ガスタービン台数を示す。

^{*1} 原動機事業本部火力プロジェクト部プラント技術二課長

^{*2} 原動機事業本部タービン技術部ガスタービン技術課

^{*3} 原動機事業本部火力プロジェクト部プラント技術二課

^{*4} 原動機事業本部タービン技術部ガスタービン技術課主席

^{*5} 高砂製作所プラント建設部次長

表1 プラント一覧表

発電所	MYSTIC (ミスティック) Block 8 & 9	FORE RIVER (フォーリバー) Block 1	WOLF HOLLOW (ウルフホロー)	COVERT (コバート) Unit 1, 2, 3
サイト位置	マサチュー セッツ州 ボストン	マサチュー セッツ州 ボストン郊外	テキサス州 ダラス	ミシガン州 南西部
契 約	機器供給 + SV	機器供給 + SV	機器供給 + SV	機器供給 + SV
プロジェクト	IPP	IPP	IPP	IPP
客 先	Boston Generating社	Boston Generating社	AES 社	NEG T 社
EPC	WGI (Raytheon)	WGI (Raytheon)	Stone & Webster (Shaw)	Stone & Webster (Shaw)
運 開	2003/4 及び 2003/6	2003/7	非公表	2004/1
構 成	2 ON 1 × 2 系列	2 ON 1 × 1 系列	2 ON 1 × 1 系列	1 ON 1 別軸 × 3 系列
出 力	1600 MW	800 MW	730 MW	1100 MW
吸気冷却設備	エバポレーティ ブクーラ	エバポレーティ ブクーラ	エバポレーティ ブクーラ	エバポレーティ ブクーラ
アンチアイシ ングシステム	あり	あり	あり	あり
助燃設備	あり	あり	あり	あり
ガスタービン	M501G(屋内)	M501G(屋内)	M501G(屋内)	M501G(屋内)
HRSG	横型再熱三重圧 (屋内)	横型再熱三重圧 (屋内)	横型再熱三重圧 (屋外)	横型再熱三重圧 (屋外)
蒸気タービン	タンデムコン パウンド複流 排気形(屋内)	タンデムコン パウンド複流 排気形(屋内)	タンデムコン パウンド複流 排気形(屋外)	単室軸流排気 (屋内)
ガスタービン 発電機	水素冷却, サイリスタ 起動装置	水素冷却, サイリスタ 起動装置	水素冷却, サイリスタ 起動装置	水素冷却, サイリスタ 起動装置
蒸気タービン 発電機	水素冷却	水素冷却	水素冷却	水素冷却
復水器	空気冷却 (供給外)	空気冷却 (供給外)	湿式冷却塔 (供給外)	湿式冷却塔 (供給外)
煙突出口 排出規制値 (15% O ₂ 換算)	NOx 2ppmvd アンモニア 2ppmvd CO 2ppmvd	(ガス/油) NOx 2/6ppmvd アンモニア 2/2ppmvd CO 2/7ppmvd	NOx 9ppmvd アンモニア 10ppmvd CO 25ppmvd	NOx 2.5ppmvd アンモニア 10ppmvd CO 5ppmvd
燃 料	ガス専焼	ガス焚/油焚	ガス専焼	ガス専焼

IPP: Independent Power Producer (独立発電事業)

EPC: Engineering Procurement and Construction (設計・調達・建設)

HRSG: Heat Recovery Steam Generator (排熱回収ボイラ)

Cooler) が設置されており、これら設備により大気温度 32℃、相対湿度 60% 付近の大気条件で相対的に 9% 以上のプラント出力増加を可能とする。

- 同地域では米国内でも厳しい環境規制があることで知られ、助燃の有無に関わらず煙突出口での排出エミッション規制値は 15% O₂換算で NOx 2 ppm、また CO 規制値も 2 ppm と非常に厳しい値となっている。このため、天然ガス予混合燃焼方式を採用した M501G ガスタービンを採用するとともに、HRSG には高効率の脱硝設備と CO コンバータを設置している。

3. M501G ガスタービンの技術

M501G ガスタービンは 1997 年に初めて蒸気冷却燃焼器を適用して以来、多くの実績を持ち、高い信頼性を有している。

圧縮機では大容量、高圧力比、高効率を達成するために新しい翼形を用いた 17 段構成を採用している。従来機より大容量となるため、前方段の動翼には遷音速翼列として高マッハ数領域で空力損失が少ない多重円弧翼 (MCA) を採用した。その他の翼列は減速率制御翼 (CDA) で構成し、境界層の成長を抑制して高効率化に貢献している。

また、燃焼器は F 形と同様に中心に配置したパイロットノズルの周囲に 8 個のメインノズルを配置し、パイロットノズルの形成する拡散火炎により予混合火炎を安定燃焼させる方式とした。

本予混合方式において 1500 級ガスタービンで F 形並の低 NOx を達成するためには燃焼用空気を増加する必要がある。従来の冷却方式では必要な燃焼冷却用空気量を確保できない。そこで米国における本プロジェクトでも冷却用空気を必要としない蒸気冷却方式を採用した。

ここで燃焼器を冷却する際に蒸気が得た熱量は蒸気サイクル側で回収され、コンバインドプラント熱効率の向上に寄与している。本冷却構造については、大気圧燃焼試験及び実圧燃焼試験にて、その性能及び信頼性を検証、さらに現在では米国以外においても実機が順調に運転されている。

タービンはより高いタービン入口温度から効率良く出力を取り出すため、高負荷翼による軸流 4 段構成を採用している。

翼列は両翼端近くの 2 次ロスを低減するため半径方向に曲率を持った完全三次元設計翼で、第 1～第 3 段動静翼に空冷翼を採用している。第 1 段静翼にはインピンジメント冷却による内部冷却に加え、翼表面をフィルム冷却空気で覆う全面膜冷却により高温ガスからの入熱の低減を図り、翼部とシュラウド部全面に TBC (Thermal Barrier Coating) を施工し遮熱効果を高めている。第 1 段動翼では乱流促進体付サーペンタイン式冷却通路を採用し、翼面には第 1 段静翼と同様全面膜冷却を用い冷却性能を高めている。第 2 段以降の冷却翼にも適切な冷却技術が用いられており、ガスタービンの高性能化に寄与している。また第 1、2 段動翼には一方向凝固翼を採用し高温部品の寿命を延ばしている。

以上のような最新技術を適用し、高性能、高信頼性を実現している (図 2)。

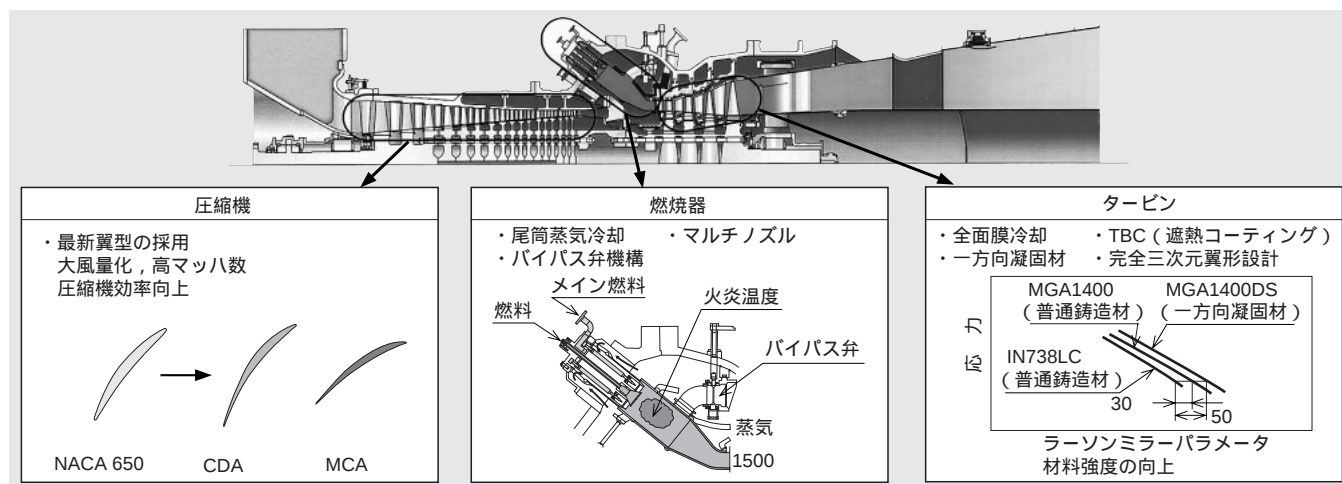


図2 G形ガスタービンに適用された最新技術

4. 排熱回収ボイラ (HRSG)

HRSGは米国での現地調達品 (Deltak社製) であり, 横型自然循環方式, 再熱三重圧である。環境規制が厳しいため脱硝設備とCOコンバータを設置していることは先に述べた通りであるが, 特に脱硝設備についてはアンモニア排出規制値がNO_x規制値と同等な2 ppmと規定されているため, 設計に際しては下記のような特殊な配慮を行っている。

- 排ガスボイラ入口部に多孔板を配し, 排ガス流速の均一化を図っている。
- 脱硝部の通過排ガス流速を低減するため脱硝設備設置部を広げた構造としている。
- アンモニアと排ガスを均一混合のためにアンモニア噴射部の下流に混合器を設置している。
- 助燃バーナの位置と容量, ガスタービン負荷範囲などをもとに脱硝設備付近の排ガス温度を最適化し, 触媒位置を決定している。

以上の設計思想にもとづき, 環境負荷低減の観点においても優れた性能を実現している。

5. 蒸気タービンの技術

蒸気タービンは, 高中圧一車室及び低圧一車室から構成されている。

高中圧タービンには外部車室のコンパクト化を狙い, ノズル室一体型ダミーを採用している。高圧第2, 第3, 及び第4段静翼はノズル室一体型ダミーにてサポートされる構造とし, 外部車室/ノズル室間には冷却蒸気を循環させて, 設計圧力/温度の低下を図り, 外部車室中圧入口部はフランジ冷却方式を採用する事により低Cr鋼 (V無し) でありながら外部車室一重化を実現した。

静翼は連結静翼を採用して外部車室で直接支持する

構造として翼環を不要とし, 熱容量低減による非定常時クリアランスコントロールと静止部全体の軽量化を図った。また, 静翼シール径を下げて漏洩蒸気量を低減して性能向上を図った。

ダミー部での漏洩蒸気量の低減を実現するため, スラストバランスはトータルバランス設計としてダミー径を下げた。トータルスラストバランス設計を行うに当たっては, 各部圧力分布の実運転上のバラツキやシールクリアランスの変化等を考慮に入れて実運転上問題のないものとした。スラスト軸受にはスラスト耐力に優れ且つ損失の少ない直接潤滑型を採用した。本軸受を採用するに当たっては, 非定常荷重限界界面圧試験を実施してその耐力を充分検証するとともに, 実機スラスト力計測により設計妥当性を確認した。

またダミー部にはACC (Active Clearance Control) を採用して高負荷運転中の半径方向間隙を小さくして漏洩蒸気量の低減を図った。

低圧タービンは, 最終翼に高性能スチール40インチ翼を採用して低コスト化と高性能化を実現した。排気フローガイドはCFD解析結果にもとづいて非対称型とすると共に, 排気室の補強リブ等を極力削減してコンパクトな高性能排気室とした。

軸受は基礎置きとしてロータ支持剛性を上げ, 軸系振動特性を向上させるとともに, グランド環は軸受箱から支持し内部車室も基礎から直接支持する構造として真空荷重によるクリアランス変化を解消し, 静止部と回転部との接触を回避する構造とした。

以上のような諸策を講じて, 高性能で運転性に優れたコンパクトな蒸気タービンを実現した (図3)。

6. 建設・試運転工程

建設及び試運転工程においては当社は自社供給機器に対する指導員派遣 (TA: Technical Adviser) の立

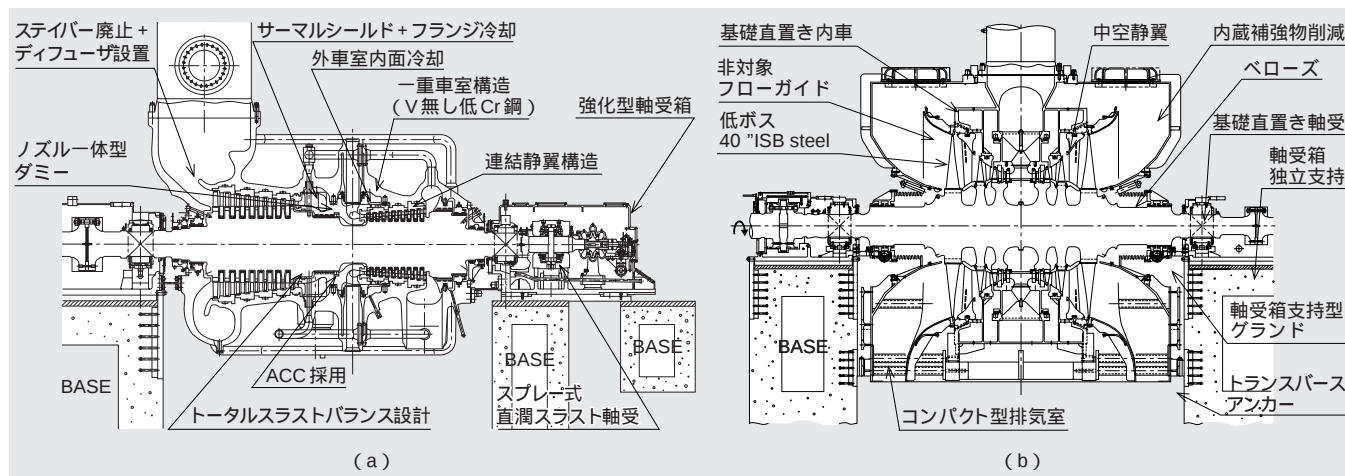


図3 タービン (a)は高中圧タービン、(b)は低圧タービン

場として現地工事を行った。試運転期間はおおよそ下記の通りの実績であり、据付工程では若干EPC遅延の問題はあったものの、試運転に入ってから大きなトラブルもなく進捗し、引渡しをおこなうことができた。

●Mystic Block8 試運転実績

# 81 ガスタービン着火	2002年9月上旬
# 82 ガスタービン着火	2002年11月上旬
# 85 蒸気タービン通気	2002年12月上旬
Block 8 100 % 負荷到達	2002年12月下旬
Block 8 脱硝装置調整	2003年2月
排煙10日間連続監視試験	
10日間信頼性試験	

●Mystic Block9 試運転実績

# 93 ガスタービン着火	2003年3月上旬
# 94 ガスタービン着火	2003年4月上旬
# 96 蒸気タービン通気	2003年4月下旬
Block 9 100 % 負荷到達	2003年5月中旬
Block 9 脱硝装置調整	2003年5月
排煙10日間連続監視試験	
10日間信頼性試験	
Block 9 性能試験	2003年5月下旬

7. 他発電所の概要紹介

米国内では前述のMystic発電所の他にも3プラントが営業運転を開始している。

Fore River発電所はMystic発電所と同様米国Boston Generating社に納入されたプラントであり、サイト位置、仕様もMysticとほぼ同一であるが、バックアップとして油焚設備が設置されている。

テキサス州ダラス郊外に建設されたプラントは、ガ

スタービン、蒸気タービンの主機仕様は屋外仕様であることを除きMystic発電所とほぼ同一である。また、環境規制が他地域に対して比較的緩くHRSGにCOコンバータは設置されていない。

ミシガン州南西部に位置するCovert発電所は1GT + 1STの別軸式コンバインドサイクル3系列からなるプラントであり、蒸気タービン型式は単車室軸流排気となっている。NO_x規制値は2.5 ppm (15 % O₂換算)と比較的厳しいが、リークアンモニアが10 ppmまで許容されるためMystic/Fore Riverのように脱硝設備に対する特殊設計は考慮されていない。

8. ま と め

2003年から2004年にかけて米国で営業運転を開始したM501Gコンバインドプラントについて、初号機となるMystic発電所を中心にプラント概要と技術を記した。

今後米国ではより一層の高性能とエミッション低減が求められており、本プラントの実績を踏まえさらなる技術開発に努める所存である。



松田秀雄



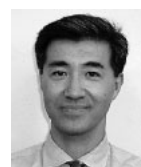
安良岡淳



内藤拓哉



堀進一



新藤光一