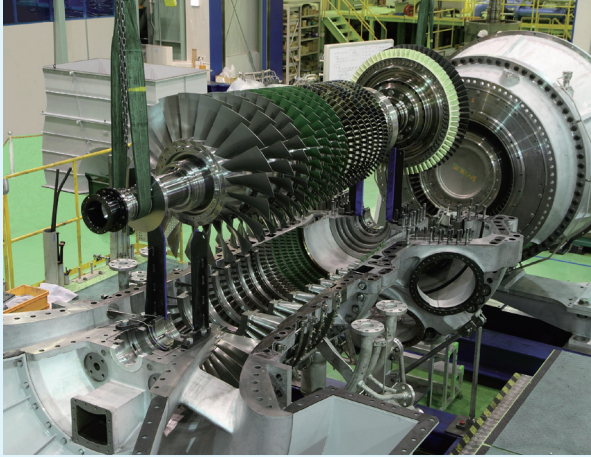


30MW級 高効率ガスタービン「L30A」

Highly Efficient 30MW Class Gas Turbine, L30A



池口 拓也① Takuya Ikeguchi
 松岡 右典② Akinori Matsuoka
 田中 良造③ Ryozo Tanaka
 奥戸 淳④ Atsushi Okuto
 寺内 晃司⑤ Koji Terauchi
 酒井 祐輔⑥ Yusuke Sakai
 仮屋 大祐⑦ Daisuke Kariya
 笠 正憲⑧ Masanori Ryu
 武 浩司⑨ Koji Take

地球温暖化抑制や分散型発電への需要の高まり、さらには経済的側面から高効率発電へのニーズを受け、30MWクラスにて世界最高効率を誇るL30Aガスタービンを開発した。本稿では、この設計コンセプト、基本構造、設計概要などについて述べる。

From the viewpoint of reducing environmental loads and being aware of a growing demand for distributed power generation and an economy-driven need for high-efficiency power generation, we have developed the L30A gas turbine that boasts the world's highest efficiency in the 30 MW class. This paper describes the design concepts, basic structure, general design, and other features of the engine.

まえがき

人々の節電意識が高まる中、安定した電力供給を図るために分散型発電需要も高まり、ランニングコスト低減などの経済的側面から高効率発電がクローズアップされている。さらに、地球温暖化抑制やCO₂排出量削減の観点から、環境負荷の少ない再生可能エネルギーや省エネルギー分野への期待が一層高まっている。そのため、最近では高効率で環境に優しい産業用ガスタービンを利用した複合発電プラント（CHP/CCPP）が省エネルギー分野で最も注目を浴びている。

当社では、こういった社会のニーズに応えた高性能でエコフレンドリーな産業用ガスタービンとして、新たに30MW級高効率ガスタービンL30Aを開発した。

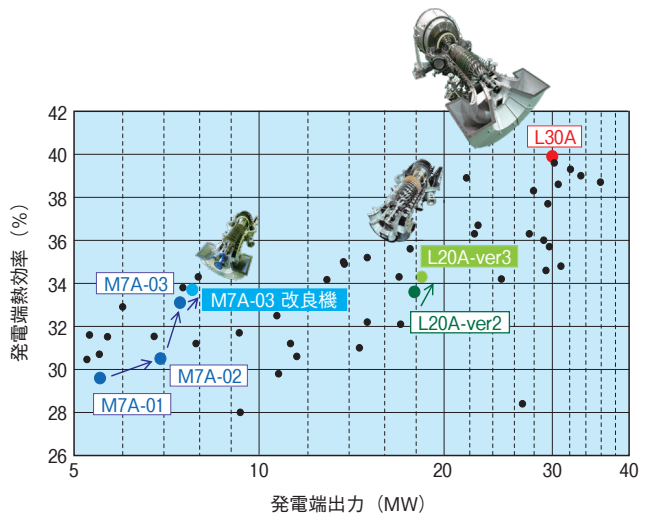


図1 5～35MWクラスの産業用ガスタービンの性能トレンド
 Fig. 1 Performance trend of 5-35 MW class industrial gas turbine

1 概要

発電端出力が5～35MWクラスの当社産業用ガスタービン性能を図1に示す。発電市場で需要が著しい20～35MWクラスにおいて世界最高となる効率40%以上を目標の一つとして、さらに石油・ガス市場や機械駆動用も視野に入れて、2007年度に2軸型のL30Aの開発を開始した¹⁾。

L30Aの主要諸元を表1に、外観を図2に示す。

L30Aのガスジェネレータモジュールには、これまで当社で実績のあるM7AやL20Aシリーズで採用された多段軸流圧縮機、多缶型燃焼器、水平分割構造とした。パワータービンモジュールについては、当社の小型ガスタービンM1Fと国家プロジェクトで開発したSMGT（Super

表1 L30A主要諸元

Table 1 L30A main specifications

型式	単純開放2軸型
出力 (MW)	30.9
熱効率 (%)	41.3
圧縮機	軸流14段
燃焼器	8缶型
ガスジェネレータタービン	軸流2段
パワータービン	軸流3段
ガスジェネレータ回転数 (min ⁻¹)	9,330
パワータービン回転数 (min ⁻¹)	5,600
空気流量 (kg/s)	86.5
圧力比	24.5
排気温度 (°C)	470

※ISO条件（パワータービン軸端換算、燃料：天然ガス）

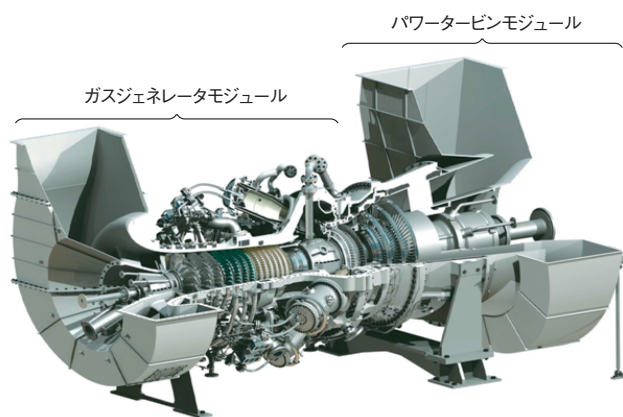


図2 L30Aガスタービン
Fig. 2 L30A gas turbine

Marine Gas Turbine) の各2軸型ガスタービンの開発実績を踏まえて、変形が小さく効率を上げやすいリング構造を採用し、設計に着手した。

2 特長

(i) 30MWクラスで世界最高効率

L30Aは同クラスで世界最高効率を達成するために、圧縮機の高圧力比化、各要素効率の向上、および最先端のタービン冷却技術を活用した。従来機では圧縮機の圧力比は18程度であったが、L30Aはこれを飛躍的に超える圧力比24.5を達成した。また、圧縮機では、翼形状最適化ツールを導入するとともに、全段のCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析から段間マッチング調整を行った。タービンには当社の特許技術であるフィルム冷却と流体・伝熱連成解析を適用し、タービン翼周りの詳細な温度分布を把握することで設計精度を高めている。

(ii) 低エミッション

エンジンの高効率化によるCO₂排出削減に加えて、M7AやL20Aで実績のある低NO_x乾式燃焼器設計思想(第3世代)を採用した²⁾。燃料ノズルには予混合型を採用し、3種類のバーナを用いて広範囲のDLE (Dry Low Emission) 運転を可能としている。

(iii) メンテナンスの容易性

各ケーシングを分解することなく全ての流路面を検査できるよう、適切な位置に点検口が設けられている。また、ガスジェネレータモジュールの高温部は従来機と同様に多

缶型燃焼器と水平分割構造とし、定期交換時のメンテナンス期間の短縮を図っている。さらに、オーバーホール時に交換作業を簡単に行うことができるよう、モジュール化構造設計を導入している。

3 開発プロセス

エンジン開発に先立って、当社ではFMEA (Failure Mode and Effects Analysis) 手法を実施し、潜在的な事故や故障などの問題を設計段階で予測した。代表的な要素で故障モードの発生する確率が高いものを表2に示す。これらについては、事前に詳細な解析や要素試験を実施し、成立性を評価した。

(1) 先進的解析

(i) 流体・伝熱連成解析

運転中にタービン動翼が許容できるメタル温度となり設計クリープ強度を満足するために、燃焼器からの翼外部流れと翼内部の冷却空気流れ、それらに基づく動翼の伝熱連成解析を行い、冷却孔の配置・冷却通路形状を適正化した。

(ii) 非線形振動応答解析

パワータービンの動翼は全てチップシュラウド付き形状とし、Z型ノッチによる制振構造を採用している。そのため、運転時の振動はノッチ接触部における摩擦力や減衰を加味した振動応答解析を実施し、高次モードやランダム振動を含め十分な耐振強度設計ができていることを確認した。

(2) 要素試験

(i) 圧縮機要素試験

エンジン試験前に63%スケールの圧縮機要素試験を実施した(図3)。この試験設備を用いて起動特性、段間マッチング、圧縮機マップ、可変静翼スケジュールなどの各要素特性を確認し最適化して、故障の発生リスクの低減を図った³⁾。

(ii) 燃焼器要素試験

ドイツにあるアーヘン工科大学の試験設備にて、エンジン運転時と同圧力、同温度の条件で実スケールの要素試験を実施した。着火性能やエミッションなどの燃焼性能やライナ壁温計測による耐久性を確認し、エンジン試験前に故障の発生リスクを抑えることができた。

表2 L30Aの潜在的故障モード分析
Table 2 Failure modes and effects analysis of L30A

項目 (致命的要素)	故障モード	評価方法				
		設計	組立	エンジン試験		要素試験
				短期	長期	
245 (件数)	6,473	4,300	1,866	4,095	4,071	170
ガスジェネレータ1段動翼	クリープ破断	流体・伝熱連成解析	流量試験	パイロメータ計測	冶金検査	予旋回ノズル要素試験
軸流圧縮機	段間ミスマッチまたはサージ	多段3D-CFD	翼端隙間計測	壁面静圧計測	—	スケール圧縮機要素試験
DLE燃焼器	エミッション許容外	3D-CFD	(組立性確認)	NOx実測		実スケール要素試験

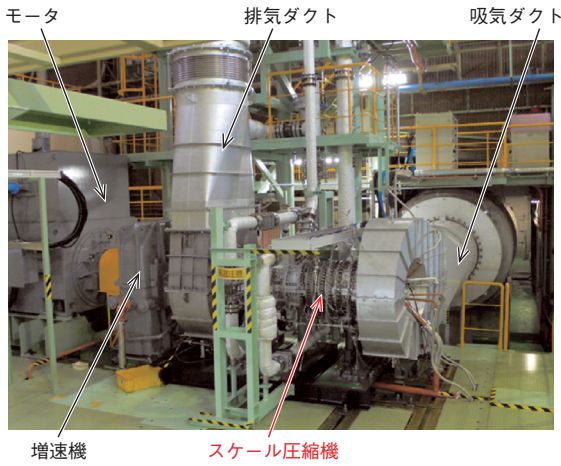


図3 スケール圧縮機要素試験設備
Fig. 3 Scaled-compressor rig test facility

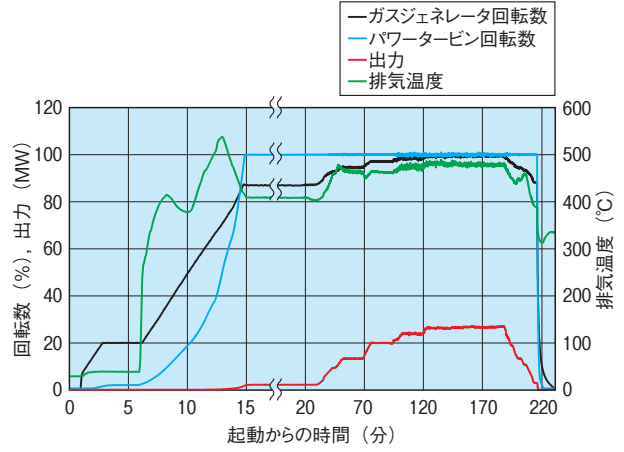


図5 起動から全負荷までのタイムチャート例
Fig. 5 Typical trend graph from startup to full load

(3) 製造面における特殊工程の確立

動翼の鋳造方法やコーティング施工法，電子ビーム溶接など各種特殊工程の加工条件を確立し，初号機の部品製造から適用できる体制を整えた。

4 運転試験結果

当社明石工場内にL30Aの運転試験設備を新設し，同時に天然ガス貯槽サテライト設備も新たに建設した。L30A運転試験設備内の各機器の配置を図4に示す。

エンジン試験は大きく4段階に分けて実施した。

(i) 起動試験・負荷投入試験

起動時から最大負荷条件までのタイムチャートを図5に示す。エンジン起動中の燃料スケジュールなどを調整し問題なく起動完了できた。さらに，負荷投入時におけるエンジンの運転状態を監視し，最大負荷条件まで安定した作動特性を持つことを確認した。

(ii) 性能試験

L30Aの性能は，エンジン運転中の各試験データをもと

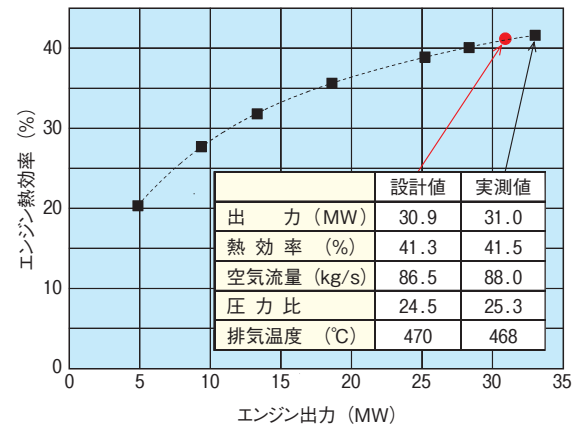


図6 L30A性能試験結果
Fig. 6 L30A performance test results

に当社で開発した性能計算システムを介してISO条件に換算して求められる。L30Aの性能を設計値と併記して図6に示す。エンジン出力に対するエンジン熱効率の目標を達成した。

(iii) 耐久性確認試験

運転中に動翼が共振して破損することがないように，圧縮機とタービンの各動翼について，多チャンネルを有するテレメータシステムを使用し翼振動を計測した(図7)。同時に，レーザによる非接触翼振動計測も実施し，両計測データから全動翼とも許容値以内であることを確認した。

さらに，タービン動翼は運転中に高温雰囲気さらされるため，放射温度計測システム(パイロメータ)による温度計測を実施した⁴⁾。計測データから動翼の耐久性に問題がないことと，事前検証した連成解析との整合性を評価し，両手法の有用性を確認した。

他にもクリアランス計測などを実施し，計測データをもとに組立時の隙間設定やエンジン再始動条件などを決定している。

(iv) DLE燃焼器試験

燃焼器は3種類のバーナ(パイロット，メイン，追い焚き)で構成される。DLE運転時にはパイロットバーナは

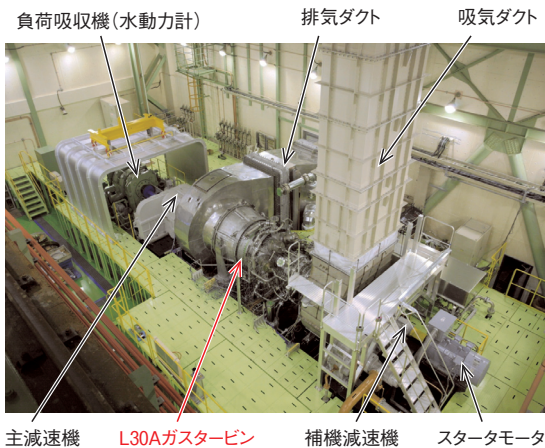


図4 L30A運転試験設備
Fig. 4 L30A test facility

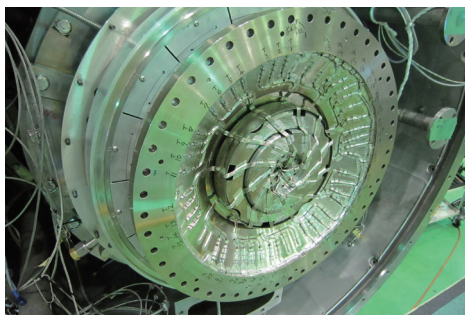


図7 パワータービンのテレメータによる翼振動計測
Fig.7 Telemetry system for power turbine and vibration measurement test results

最小限の保炎の役割をする。そして、負荷が増加するにつれて追い焚きバーナの燃料割合を増加させ、低NO_xレベルを維持する機構をとっている。

この燃焼器をエンジンに搭載した試験結果から、事前実施した要素試験と同様に、排気ガスに含まれるNO_x量は負荷50～100%の範囲で15ppm (O₂=15%換算) 以下という世界最高レベルの目標を実現することができた。

5 L30A を用いた複合発電

適用例として、コージェネレーションシステムにL30Aを導入した際のプラント性能を算出した。表3に示すように、電力28MWと飽和蒸気46t/hを発生でき、総合熱効率率は83.1%に到達することが分かる。

今日では、関西の某化学工場にてこの複合発電プラントの初号機商用運転が決定し、2012年10月からサイトでの実証運転を開始している。L30AパッケージPUC300DとCHPプラント全景を図8に示す。

あとがき

L30Aは30MWクラスで世界最高効率を誇るガスタービンとして発電用途の開発が完了した。また、商用運転も開始され、CO₂削減や省エネルギーに貢献している。

今後は、石油・ガス市場を見据えた機械駆動用としても開発を進め、高性能で環境保全に貢献するL30Aのますますの拡販に注力していく。

表3 L30Aコージェネレーション発電設備仕様
Table 3 Specifications of L30A combined heat & power plant

発電量 (MW)	28.4
蒸気量 (t/h)	46.2 飽和蒸気 (圧力：0.83MPaG, 温度：177℃)
熱効率 (%)：低位発熱量換算	38.8
総合熱効率 (%)：低位発熱量換算	83.1
吸気温度 (℃)	15
吸気／排気損失 (kPa)	0.98/3.43
燃料	天然ガス (低位発熱量=40.6MJ/Nm ³)



図8 L30AパッケージPUC300DとCHPプラント全景
Fig.8 Panoramic view of L30A package PUC300D and CHP plant

参考文献

- 1) R. Tanaka, et al.: "Verification Test of Newly Developed High Efficient 30MW Class Gas Turbine, The Kawasaki L30A", ACGT2012-7138 (2012)
- 2) 小田ほか：“ガスタービンの環境性能をさらに高めるDLE燃焼技術”，川崎重工技報，No. 173, pp. 34-37 (2013)
- 3) T. Ikeguchi, et al.: "Design and Development of a 14-stage Axial Compressor for Industrial Gas Turbine", ASME GT2012-68524 (2012)
- 4) T. Taniguchi, et al.: "Application of an Optical Pyrometer for Newly Developed Industrial Gas Turbine", ASME GT2012-68679 (2012)



池口 拓也



松岡 右典



田中 良造



奥戸 淳



寺内 晃司



酒井 祐輔



飯屋 大祐



筈 正憲



武 浩司