

データセンター向け電子制御非常用発電エンジンの開発

Development of Electronic Control Emergency Generator Engine for Data Center



渡邊 壮太*¹
Sota Watanabe

小川 久雄*²
Hisao Ogawa

田村 太郎*³
Taro Tamura

今森 祐介*⁴
Yusuke Imamori

田中 健吾*⁵
Kengo Tanaka

鶴岡 誠司*⁶
Seiji Tsuruoka

データセンターや半導体工場向け非常用発電エンジンの大出力化に対応するため、現在三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社(以下、当社)が販売している機種 S16R2 をベースに、フットプリントを維持しながら 10%高出力化した電子制御非常用発電エンジンを開発した。自社開発したコモンレール式電子制御燃料噴射システムをエンジンに搭載することで、高出力化に加えて、負荷投入性や排ガス性能の向上も実現している。これまでにエンジン単体の性能検証及び耐久検証を終えており、発電機とカップリングした発電セットでの性能検証が完了後、市場投入予定である。

1. はじめに

近年、データセンターや半導体工場向けに非常用発電の需要は益々増加しており、また限られたスペースでの高出力化が求められていることから単機出力の大型化も進んでいる。非常用発電は運転時間が短く二酸化炭素排出量が少ない特徴から、カーボンニュートラルの潮流の中でもディーゼルエンジンへのニーズが依然として高い。

上述の市場ニーズに対応すべく、当社は電子制御非常用発電エンジン S16R2-PTAWT-CR を新規に開発した。本エンジンは、現在当社が販売している機種 S16R2 をベースに、1サイクル・単位排気量あたりの仕事量を表す正味平均有効圧力(BMEP: Brake Mean Effective Pressure)を向上させることで、フットプリントを維持しながら 10%の発電出力向上を実現している。

第2章では、S16R2-PTAWT-CR の主要諸元と適用技術について紹介する。本エンジンには、高出力化に対応した過給機やエアクーラを適用した。また、BMEPの10%増加に伴い、筒内最高圧力(以下、Pmax)も約10%増加させたことから、大規模3D FEM(Finite Element Method)による各部品の信頼性評価を実施し、シリンダヘッド・シリンダライナ・クランクケースの材料・形状を適正化した。さらに、自社開発したコモンレール式電子制御燃料噴射システム(CRS: Common Rail System)を搭載し、高出力化だけでなく、負荷投入性・排ガス性能の向上も図っている。

第3~4章では、これらの技術を適用した S16R2-PTAWT-CR の定格出力性能・負荷投入性といったエンジン性能について、机上検討と実機検証を行った内容を紹介する。

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術開発室 主席PJ統括 技術士(機械部門)

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術開発室 グループ長

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術開発室

*4 三菱重工工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部 主席研究員

*5 三菱重工工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部 主席研究員 技術士(機械部門)

*6 三菱重工工業株式会社 総合研究所 強度・構造研究部 主席チーム統括 技術士(機械部門)

2. S16R2-PTAWT-CR の開発概要

S16R2-PTAWT-CR の主要諸元を表1に示す。既存機種に対し、シリンダ径、ストローク、定格回転数、シリンダ数を同一として出力を 2750kVA Stand-by から 3000kVA Stand-by に 10%増加させた。これにより、BMEP は 0.2MPa 増加している。

表1 S16R2-PTAWT-CR 主要諸元

		既存機種 S16R2-PTAW2-S	開発機種 S16R2-PTAWT-CR
シリンダ径	mm	170	←
ストローク	mm	220	←
定格回転数	min ⁻¹	1500	←
シリンダ数	—	16	←
定格出力	kVA Stand-by	2750	3000
正味平均有効圧力	MPa	2.4	2.6
燃料噴射方式	—	機械駆動式 燃料噴射システム	コモンレール式 電子制御燃料噴射システム

図1に S16R2-PTAWT-CR の外観図を示す。既存機種 S16R2 からの主な変更箇所としては、高出力化に対応した給気系部品、高 BMEP 化に対応したシリンダヘッド・シリンダライナ・クランクケース等の構造系部品、CRS 適用に伴う燃料噴射系部品・電子制御部品及びピストン等が挙げられる。これらの適用技術について以下に述べる。

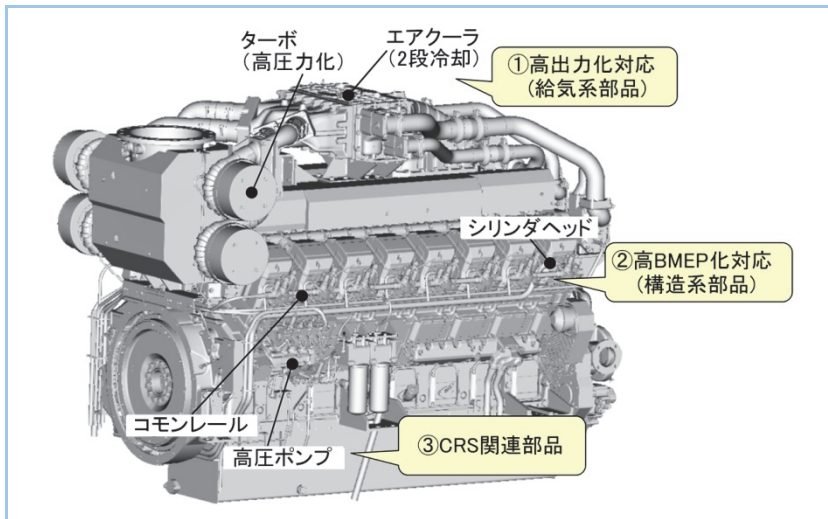


図1 エンジン外観

2.1 給気系部品の高出力化対応

高出力化するにあたり空気過剰率を保持するため、高圧力比に対応した過給機を採用した。また、高出力化に伴う給気量及び圧力比の増加により、エアクーラでの冷却水の熱交換量が増加することから、2段冷却式エアクーラを適用した。図2に冷却水系統図を示す。既存機種ではウォータージャケットとエアクーラで高温水・低温水の2系統を区分けしていたが、2段冷却式エアクーラを適用することでエアクーラの熱交換量の一部を高温水が負担し、低温水の熱交換量が低減した。ラジエータのサイズを決定づける低温水の熱交換量が低減することで、ラジエータのサイズを既存機種よりも縮小することができた。また、2段冷却式エアクーラ採用に伴いエアクーラのサイズはアップするが、輸送時にハイキューブコンテナに収まるサイズとなるようエンジンのレイアウトに配慮した。

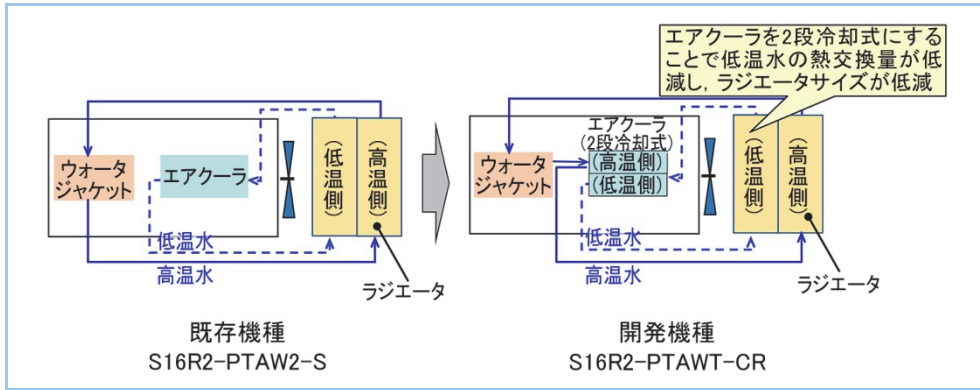


図2 冷却水系統図

2.2 FEM・CFD を活用した信頼性評価

BMEP の 10%増加に伴い、Pmax を約 10%増加させたことから、高 BMEP と高 Pmax 化に対して、大規模 3D FEM による応力・変形計算を行い、各部品の信頼性評価を実施した。ここでは、シリンダヘッド・シリンダライナ・クランクケースの信頼性評価について紹介する。全体解析モデル図を図3に示す。解析負荷低減のため、図中に示す 3.5 シリンダ分をモデル化している。解析コードは Adventure cluster ver.2018, モデル規模は節点数 9517210, 要素数 7448850 である。

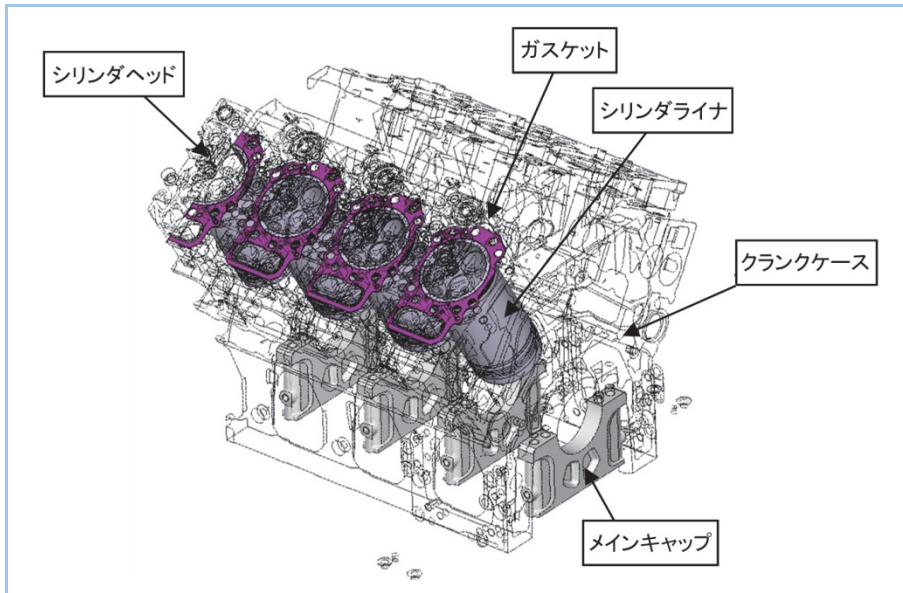


図3 解析に用いた 3D モデル

モデル化においては、“シリンダヘッドボルト・シリンダヘッド・ガスケット・シリンダライナ・クランクケース等の各部品間接触”“ガスケット材料弾塑性特性”“各物性値の温度依存性”等の非線形性を考慮し、実現象の再現性・評価精度向上を指向した。またシリンダヘッドについては、材料を変更した解析も実施した。

運転時にはシリンダ内での燃料の燃焼に伴う熱荷重と、圧力荷重が作用する。またこれら荷重は運転中の負荷に伴い変化する。これらの荷重を FEM の計算条件として付与し、応力・変形計算を行う。実機の負荷パターンを模擬し8つの荷重ステップを付与した計算を実施した。熱条件は、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を用いて燃焼室側、冷却水流路側それぞれ導出し、上述 FEM 解析に付与した。

計算結果から、各部の高サイクル疲労安全率・低サイクル疲労寿命を導出し、疲労評価・ガスケットシール性評価を実施した。疲労評価は、上述の8つの荷重ステップのそれぞれの応力値を考慮し、応力振幅が最大となる組合せで行った。また、表面応力のみによる評価ではなく、表面から肉厚内部への応力分布を考慮する、より高精度な評価手法を採用した。

図4にシリンダヘッド冷却面側の高サイクル疲労安全率分布の例を示す。本検討から信頼性確保のため材料の適性化を行った。また同様評価をシリンダライナ・クランクケースについても実施し、特にシリンダライナ上部に対して安全率最大化のため、形状の適性化を行った。各荷重ステップにおいて面圧評価を行い、ガスケットのシール性も評価した。

FEM・CFD を活用した信頼性評価を行った上で、実機耐久試験による検証を行い、各部品が十分な信頼性を有していることを確認している。

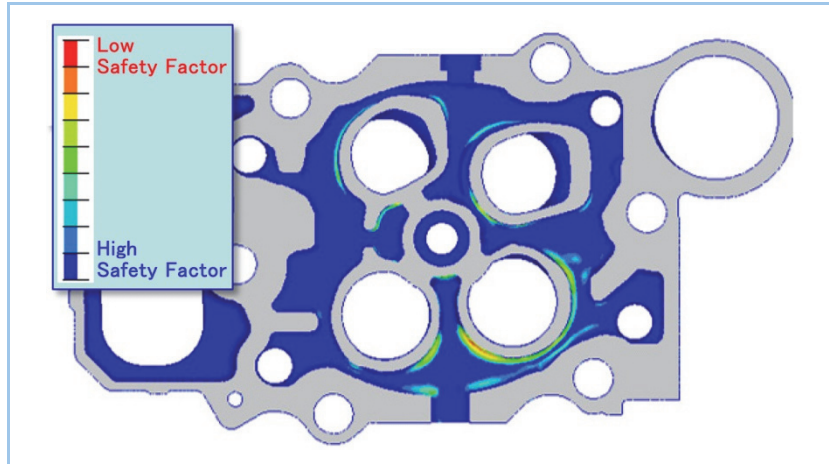


図4 高サイクル疲労安全率分布例

2.3 コモンレール式電子制御燃料噴射システムの開発

これまで当社主力機関である SR ディーゼル機関は、燃料噴射システムとして自社設計した機械駆動式噴射ポンプの内部部品を改良することで、長年にわたりお客様のニーズに対応してきた。しかしながら今回の開発においては、S16R2-PTAWT-CR の開発目標である高出力化や負荷応答性・排ガス性能の向上のため、噴射制御の自由度が最も高いコモンレール式電子制御燃料噴射システムを自社開発した。ここでは開発上のポイントについて紹介する。

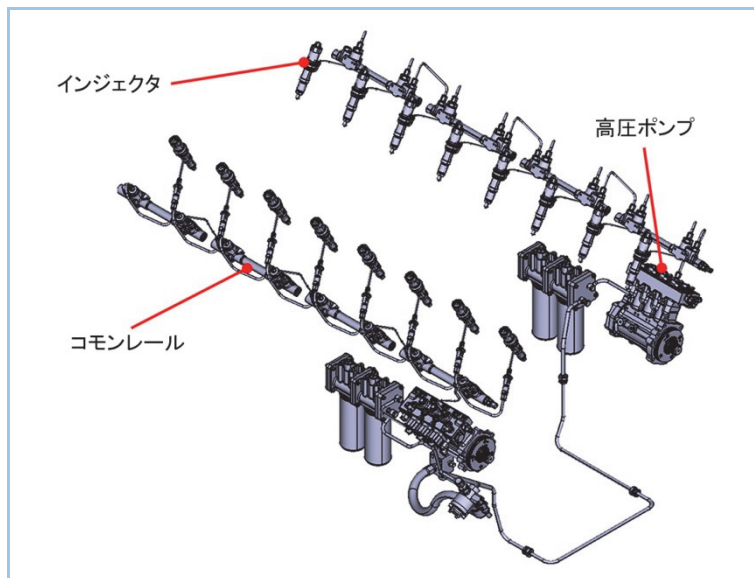


図5 コモンレール式電子制御燃料噴射システム構成図

(1) システム設計

コモンレール式電子制御燃料噴射システムの構成を図5に示す。本システムでは、インジェクタからの燃料排出量に対して高圧ポンプの吐出量を制御し、噴射エネルギーとしてのコモンレール内圧を一定に保ちながらインジェクタを電磁弁にて油圧駆動して噴射する。このため油圧制御設計は高圧ポンプとインジェクタ双方に対して重要な要素技術となる。本システムの設

計にあたっては、**図6**に示すように、一次元油圧解析モデルの精度向上を図り、最終的なアウトプットであるインジェクタの噴射率実態誤差を8%以内にまで高め、目標とする噴射性能や油圧変動状況下での確保すべき部品強度やシール設計の設計パラメータ決定に活用した。

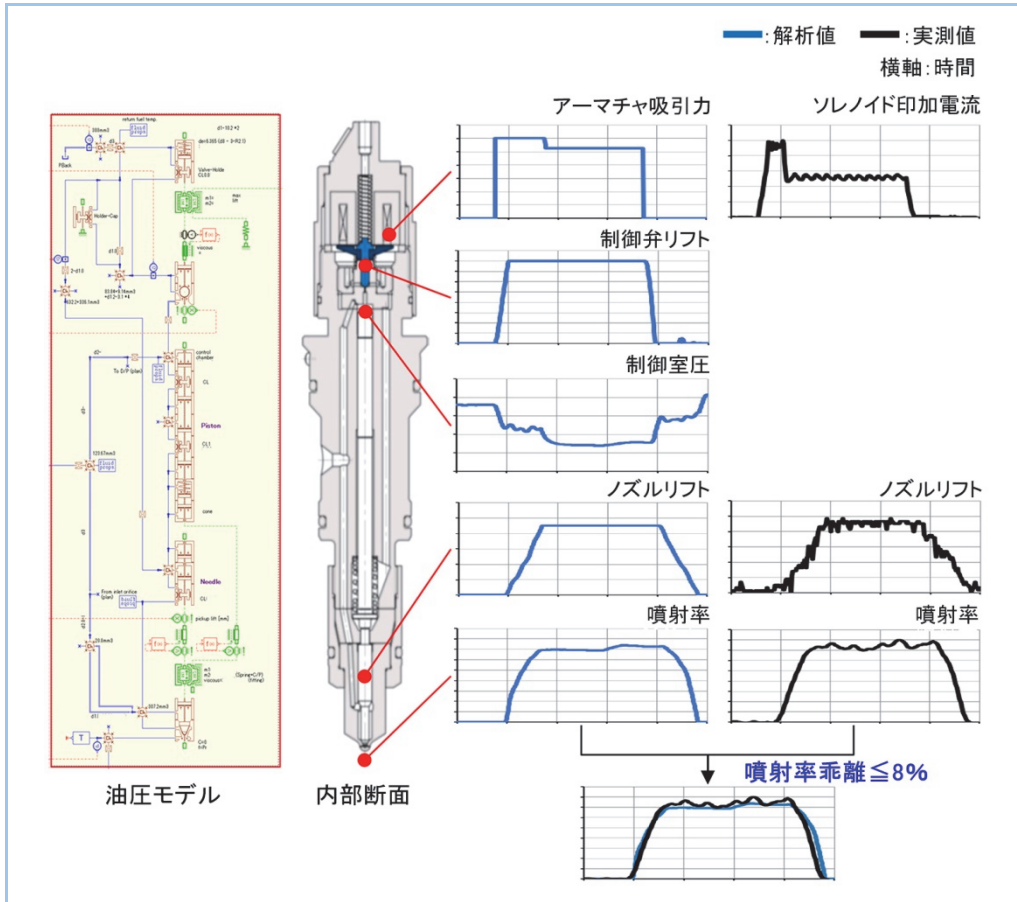


図6 油圧解析精度向上取組み事例 (インジェクタ)

(2) 高圧噴射対応技術

エンジンの燃焼効率を高めるためにはシリンダ内への燃料噴霧の霧化を促進することが望ましい。そのため燃料噴射圧を既存機種 S16R2 の約 50%以上高めることができるシステムとした。一方、エンジン側の基本筐体は従来製品を踏襲するため、インジェクタや高圧ポンプは従来の噴射装置のアウトライン内に収めるサイズで設計した。**図7**に対応構造事例を示す。燃料通路内に高圧が作用した際の応力集中緩和のため、インジェクタにおいては並列ノズルポート、高圧ポンプにおいてはオフセット交差通路の構造等を採用した。

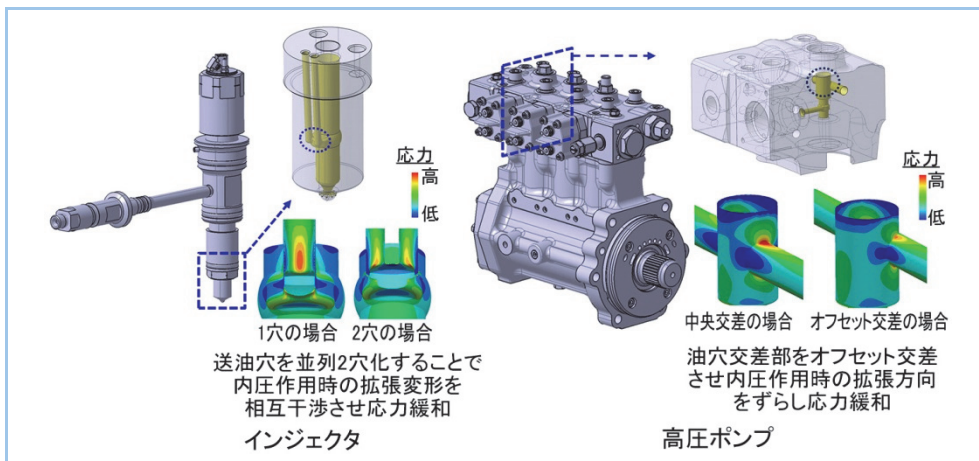


図7 高圧化対応構造事例

(3) インジェクタ燃料噴射の安定化技術

インジェクタの電磁弁構成図を図8に示す。インジェクタの電磁弁開閉動作では、弁体の着座時の跳ね返り動作が跳ね返り前後の噴射量変化に大きく影響し、特に微小量の噴射に対して制御性を悪化させる要因となる。そこで、跳ね返りを抑える対策として、弁閉鎖ばねをソレノイド内部に配置することで試作初期構造から約 50%の弁体の軽量化を実現し、また着座時には弁体が2体分離して慣性マスを軽減する構造を採用した。

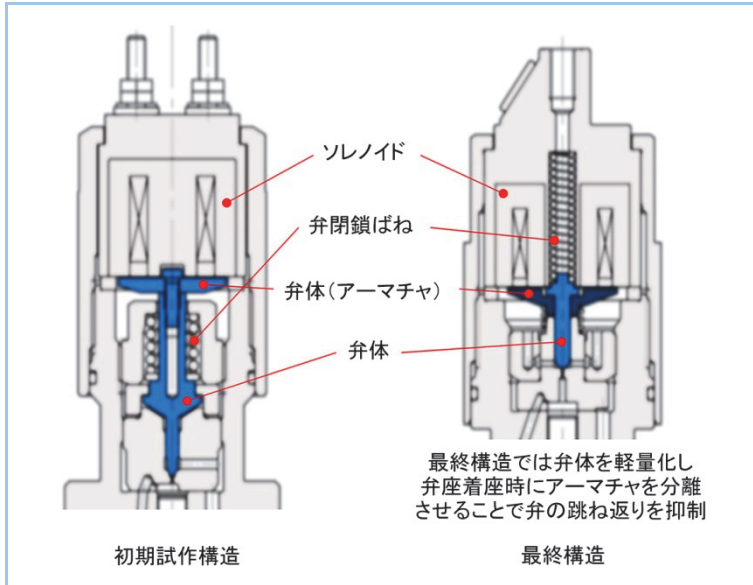


図8 電磁弁構成

(4) インジェクタ噴射量個体ばらつき抑制技術

高圧噴射化するとインジェクタの同一噴射期間に対する噴射量の個体差が大きくなるが、これは各筒の排温や筒内最高圧力のばらつきに繋がるため、エンジン本体の信頼性の観点からでもできるだけばらつきを抑制しなければならない。そこで図9に示すとおり、各インジェクタの噴射ノズルにおける噴口流量を砥流研磨加工技術により $\pm 1\%$ に管理し、またインジェクタ本体の噴射作動時間を制御コントローラにて電氣的に個体補正することで噴射量のばらつきを抑制する技術を取り入れた。

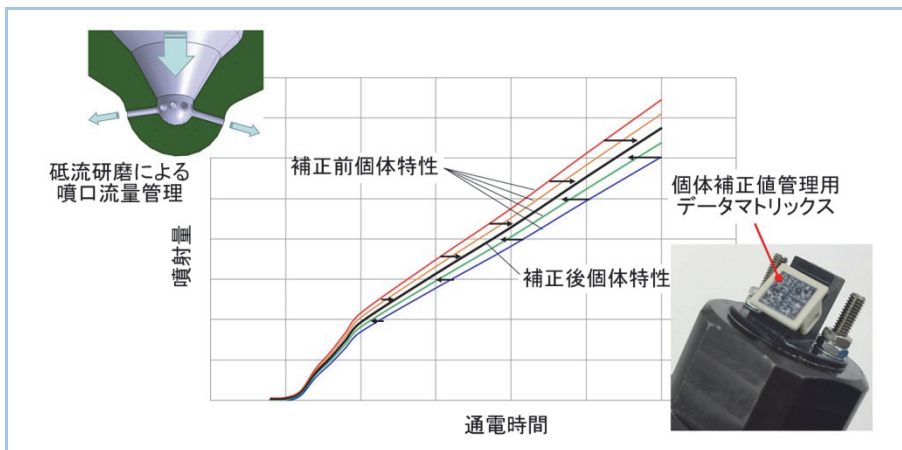


図9 噴射量個体ばらつき抑制技術

3. エンジン性能の検討

3.1 定格出力性能の検討

既存機種 S16R2 に対し出力を 10%向上させるため、機関性能計算コード(GT-Power)を用いて、主な制約条件である排気温度と筒内最高圧力を抑制できるエンジン仕様を検討した。図 10

に、吸気弁閉時期とタービノズル面積、燃料噴射タイミングをパラメータとした計算結果を示す。吸気弁の遅閉じ仕様に対し早閉じ仕様にする、排気温度増大に伴うターボ回転数の上昇により空気過剰率は同等になるものの、筒内最高圧力と排気温度のトレードオフの関係が悪化する。一方で、タービノズル面積を縮小すると、空気過剰率が増加することで、筒内最高圧力と排気温度のトレードオフの関係が改善し、筒内最高圧力同一で排気温度が7~10K 低下する見込みが得られたため、本仕様を選定した。

また、出力向上により燃焼室構造部品への熱負荷が増大する懸念があることから、ピストン形状及びノズル仕様をパラメータとした燃焼 CFD を行い、火炎分布の適正化を図った。図 11 に適正化後の燃焼室内の温度分布の解析結果を示す。火炎がピストン表面方向とライナ方向の広範囲に分散しており、構造部品の局所的な温度上昇を抑制できる見込みを得た。

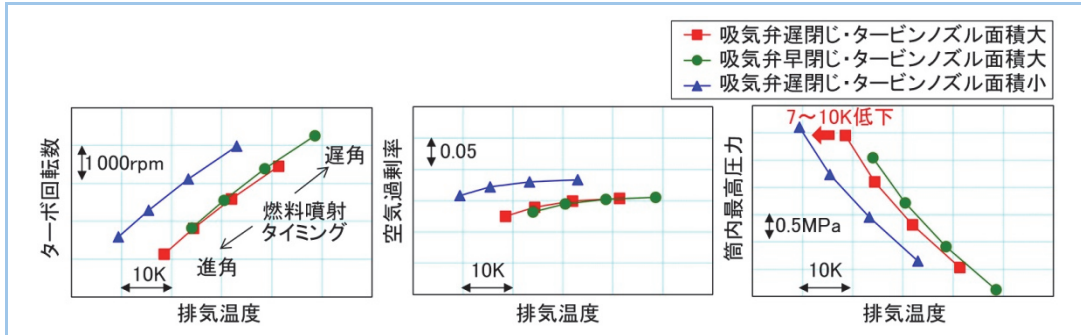


図 10 機関性能計算結果

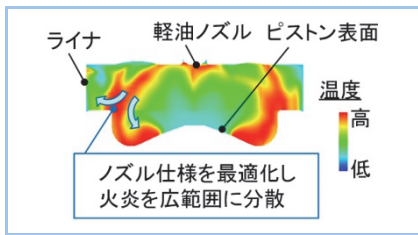


図 11 燃焼 CFD 結果

3.2 負荷投入性能の検討

新たに CRS を搭載することから、発電セットとしての負荷投入性能等の動特性をシミュレーションで検討した。図 12 に解析モデルを示す。エンジン本体は前節の GT-Power モデルを使い、エンジンコントローラによる燃料噴射制御や発電機制御の MATLAB/Simulink モデルと連携させることで、エンジン本体の詳細仕様に対する動特性を評価できるようにした。図 13 に解析結果の一例を示す。過給機のタービノズル面積を縮小することで発電セットの負荷投入時の周波数回復時間を短縮している。本シミュレーションを用い、エンジン本体及び発電機の仕様を適正化した。

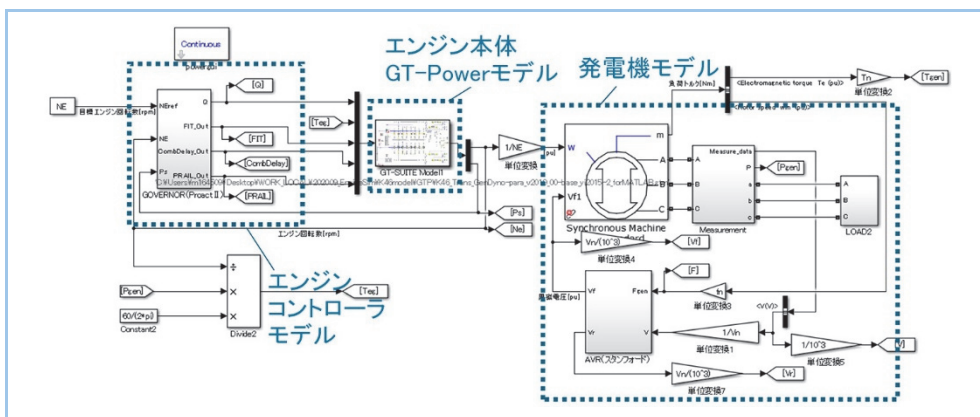


図 12 発電セット解析モデル

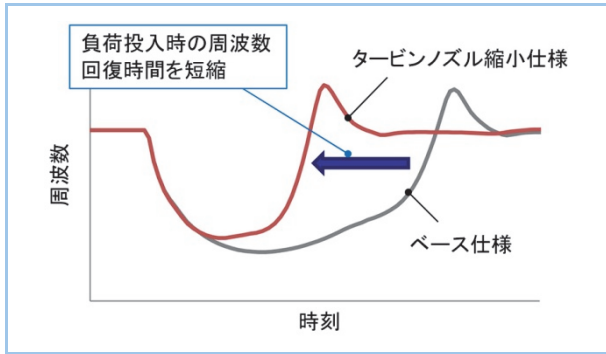


図 13 発電セット負荷投入性能解析結果例

4. 実機性能試験結果

各種シミュレーションを活用して選定した機関仕様にて性能試験を実施した。S16R2-PTAWT-CR の主要性能について、現在当社で販売している機種 S16R2 と比較する形で以下に示す。

4.1 定格出力性能・排ガス性能

定格出力での主要機関性能(図 14)と燃焼状態(図 15)を示す。S16R2-PTAWT-CR は、CRS の特徴である高い燃料噴射設定自由度を活用し、燃焼系仕様(ピストン等)に合わせて適切な燃料噴射圧と燃料噴射タイミングを選定し、筒内の燃料と空気の混合状態及び燃焼の適正化を図った。その結果、既存機種同等レベルの冷却損失及び燃焼効率を維持しつつ等容度を向上させることで、既存機種同等の燃費率を維持しながら定格出力を 10% 向上させた。また、排ガス性能についても、D2 モード各点の燃料噴射パターンを適正化することで、排ガスモード値の大幅低減(NOx+HC:36%低減)を実現し、EPA (Environmental Protection Agency) Tier2 規制に対応可能なポテンシャルを有することを確認した。

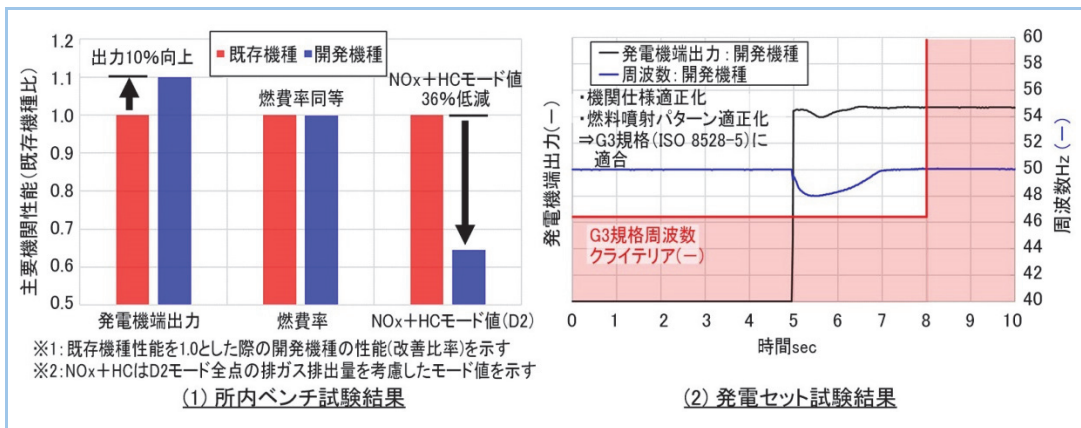


図 14 主要機関性能

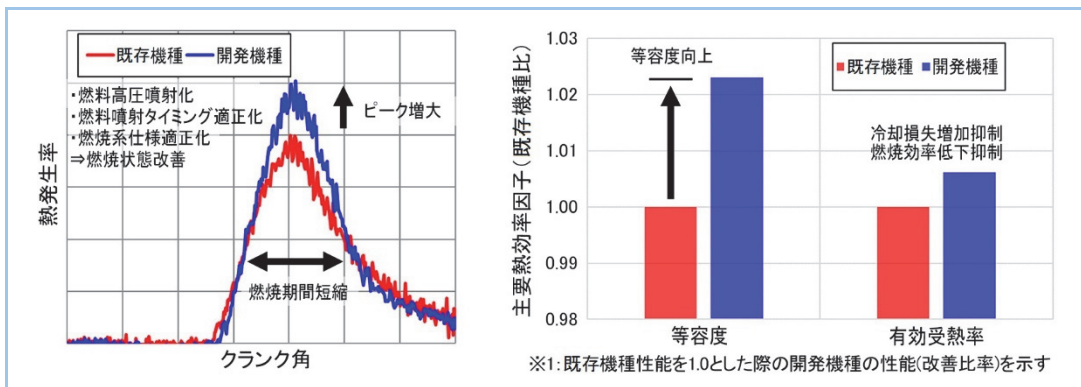


図 15 燃焼状態(定格出力:所内ベンチ試験結果)

4.2 動特性性能

動特性性能の代表例として、S16R2-PTAWT-CR と発電機をカップリングした発電セットでの負荷投入性能を示す(図 14)。動特性性能は Stand-by 出力基準にて G3 規格 (ISO 8528-5) に適合していることに加え、100% 負荷での負荷投入も達成している。定格出力性能・排ガス性能と同様、動特性性能についても CRS の燃料噴射設定における高い自由度を活用することで、シミュレーション結果と実機試験結果に基づき、負荷状態に応じて燃料噴射パターンを適正化して目標動特性性能を達成している。

今後、ピストン、インジェクタ等の燃焼系仕様や燃料噴射パターンの改良により、更なる機関性能改善を目論んでいる。

5. まとめ

データセンターや半導体工場向け非常用発電エンジンの大出力化に対応するため、CRS を搭載した電子制御非常用発電エンジン S16R2-PTAWT-CR を開発した。

本エンジンは、既存機種同等の燃費率を維持しながら、10% の出力向上と排ガスモード値の大幅低減を実現した。動特性性能については、Stand-by 出力基準にて G3 規格 (ISO 8528-5) に適合し、100% 負荷投入も達成した。また、大規模 3D FEM・CFD 解析と実機耐久試験を通して、十分な信頼性を確保していることも確認している。

発電機とカップリングした発電セットでの性能検証を完了後、市場投入する予定である。