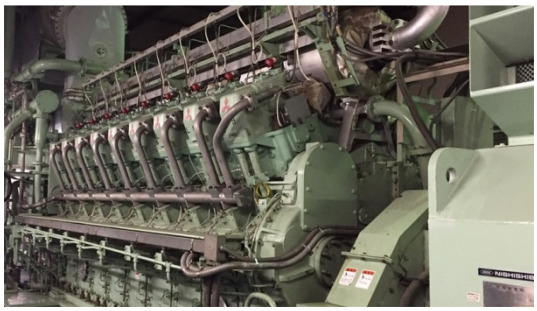
# 既設ガスエンジンの高効率化改造による発電効率3%pt 改善

Improvement of Power Generation Efficiency by 3% Point Remodeling Existing Gas Engines for Higher Efficiency



長面川 昇司*1 Shoji Namekawa
石田 道靖*2 Michiyasu Ishida
吉栖 博史*3 Hiroshi Yoshizumi
鈴木 元*4 Hajime Suzuki

環境負荷低減やエネルギー供給の強靭性を背景に，天然ガス資源は今後の主要な燃料として注目されている。三菱重工グループの KU ガスエンジンシリーズは，KU30G ガスエンジンを市場投入して以来，高効率化と高出力化を追求してきた。延べ運転時間は 900 万時間を超え，部品の 80%をシリーズエンジンと共通設計とすることで高い信頼性を確保している。本報では，シリーズ化によるメリットを最大限に生かし，長期間運用したガスエンジンの定期整備と同時に最新機種への改造工事を行い，発電効率や運用性の向上に寄与する技術と事例を紹介する。

## 1. はじめに

三菱重工グループの KU ガスエンジンシリーズは，1990 年に火花点火方式の KU30G ガスエンジンを市場投入して以来，2001 年にマイクロパイロット着火方式の KU30GA，2009 年には最新技術による効率向上と火花点火方式を採用した KU30GSI をリリース，経済性と信頼性を追求した開発を継続してきた。最新機種である KU30GSI シリーズは，総合効率を重視した KU30GSI と発電効率を重視した KU30GSI-PLUS をラインナップし，発電出力範囲 3650～5750kW をカバーしている [(1)(2)]。表1に KU30GSI シリーズの主要諸元を示す。KU ガスエンジンシリーズの延べ運転時間は 900 万時間を超え，部品の約 80%をシリーズエンジンと共通設計とすることで高い信頼性を確保し，豊富な運用と整備実績に基づいた製品とサービスを提供している。

表1 KU30GSI シリーズの主要諸元

| 形式 | | KU30GSI | KU30GSI-PLUS |
|---|---|---|---|
| シリンダ数 | | 12 - 18 | |
| ボア/ストローク | mm | 300 x 380 | |
| 回転数 | $min^{-1}$ | 720 / 750 | |
| 発電出力※ | kW | 3650 - 5750 | |
| 発電効率※ | % | 46.5 | 49.5 |
| $NO_X$ ($O_2$=0%換算) | ppm | ＜320 | |
| 重量 | Ton | 40 - 60 | |

※:ISO3046 条件及び当社推奨の標準ガスによる

一般的に，ガスエンジンを長期間にわたり効率良く運用するためには，最適なメンテナンスプログラムと適切な部品の交換が必要である。エンジンの稼働時間の増加に伴い，摺動部の摩耗や冷却面の汚れ，腐食などの発生による整備範囲の拡大，交換部品数の増加により，ランニングコ

*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・エナジー事業部サービス部 次長
*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部 次長
*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部 課長
*4 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部 主席技師 技術士(機械部門)

ストが上昇することが運用上の課題となる。また，ポンプ等の補機や計装品の経年劣化は計画外停止の潜在的な要因となる。

当社が 2000 年代に多数納入した KU30GA の多くはプラント運開から約 15 年が経過し，エンジンの累積運転時間が 10 万時間以上に達している。これらのエンジンの中には，経年劣化による故障を予防保全するため，比較的規模の大きな部品の交換や整備が必要となる場合がある。そこで，ガスエンジンの定期整備と同時に最新機の高効率化技術を適用する改造工事を行うことで，運用上の柔軟性を向上し，将来にわたり安定した継続運用をすることができる。

本報では，シリーズ化によるメリットを最大限に生かし，長期間運用したガスエンジンの定期整備と同時に改造工事を行い，発電効率や運用性の向上に寄与する技術と事例について述べる。

## 2. 従来機から最新機への改造の特徴とメリット

KU シリーズガスエンジンでは，エンジン本体の約 80%，発電機，プラント補機が共通設計である。そのため，既設プラントの設備を最大限に活用しながら，最新の燃焼技術や部品の信頼性技術を有する KU30GSI への改造が可能である。KU30GSI は以下の特徴を有しており，改造を行ったガスエンジンも同様のメリットが期待できる。

(1) 発電効率の向上

KU30GSI では，高効率過給機，排気バイパス制御などの採用により高ミラーサイクルを指向したサイクル効率向上に加え，燃焼室と副室形状の最適化による燃焼効率向上が図られ，従来機に比べて高い発電効率を達成している。また，着火方式は火花点火方式に変更されており，着火燃料が不要になるとともに，マイクロパイロット着火方式と同等の連続運転時間，すなわち同等の点火プラグ交換周期を実現している。

図1に従来機 KU30GA と最新機 KU30GSI との着火方式の比較を示す。

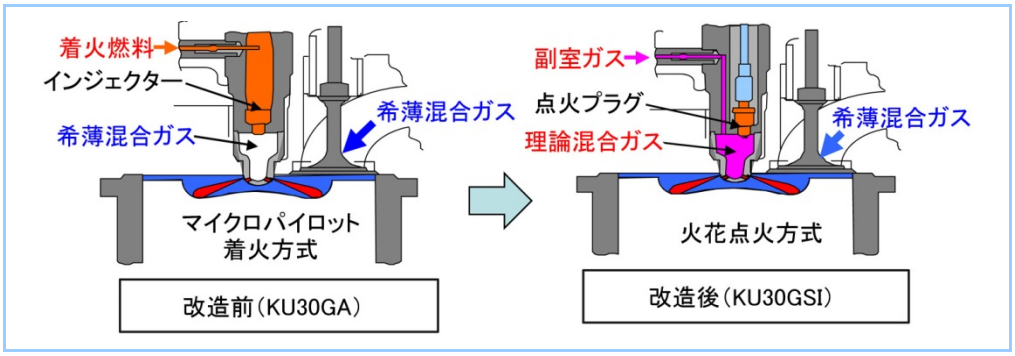



**図1 着火方式の比較**

(2) 総合効率と NOx 排出量の維持

発電効率の向上に伴い排ガスエネルギーは減少傾向となるが，KU30GSI では空燃比制御に排気バイパス方式を採用することで，従来機で使用していた給気放出方式に比べ排熱回収の損失を抑制している。図2に空燃比制御方式の比較図を示す。さらに，最新の燃焼技術により運転可能な空燃比領域を拡大しているため，排ガス温度を上昇させ排ガス量とのバランスを最適に調整することで，蒸気発生量の低下を最小限に抑え，総合効率を維持することが可能である。

排ガス中の NOx は，運転可能な空燃比領域の拡大により最新機の標準値 320ppm（$O_2$＝0%換算）より低く，既設ガスエンジンと同レベルである 200ppm（$O_2$＝0%換算）に維持することもできる。

KU30GSI の技術は，エネルギーの有効利用と発電効率の向上にて $CO_2$ 排出量の低減にも寄与する。

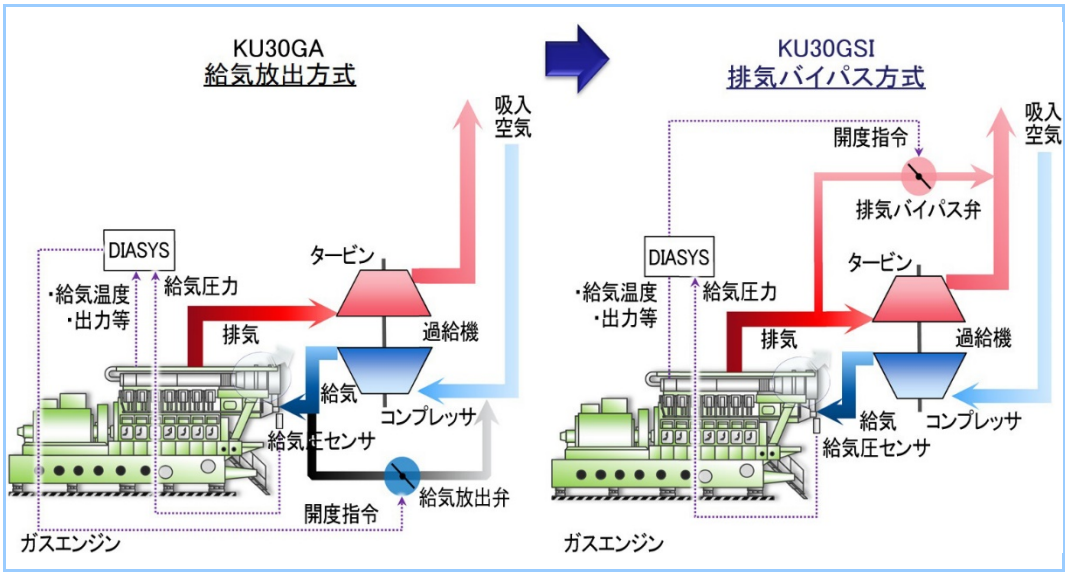



図2 空燃比制御方式の比較図

(3) 優れた起動・負荷追従特性

従来機のマイクロパイロット着火方式では，燃焼室や混合気の温度が着火油の着火性に影響を与えやすく，起動時間に 20 分以上を要していた。一方，火花点火方式の KU30GSI では，燃焼室や混合気温度が実際の運用範囲内では着火性に大きな影響を与えることはなく，混合気の濃度を適切に設定することで起動から定格負荷到達までの時間を約5分まで短縮した運用を実現している。改造機においても同等の起動性能は達成可能であるが，既設プラントの運用形態やサイトの環境により裕度も考慮して 10 分以内を目標に調整しているが，従来機に比べ少なくとも約 1/3 での起動時間を実現することができる。

(4) メンテナンス周期の延長

KU30GSI では KU ガスエンジンシリーズのフィールドでの実績をフィードバックし，各部の設計を改良，改善することで，主要部品の使用寿命が大幅に延長されている。既設ガスエンジンの部品は，老朽，劣化が進んでいる。将来交換が必要となる部品を改造工事で最新の部品に交換することで，従来 8000 時間ごとに実施していたピストン，軸受のメンテナンス周期が 16000 時間まで延長可能となる。更にマイクロパイロット着火方式ではインジェクタの整備が必要であったが，火花点火方式では点火プラグのみの交換となり，整備コストの軽減に加え，インジェクタ整備用予備品の保有，管理も不要となる。

以上のメンテナンス周期の延長により従来機に比べメンテナンスコストが低減され，発電効率向上に加え経済性の改善に寄与することができる。

(5) 既設設備の有効活用

発電効率の向上はもちろん，既設設備を最大限流用することで経済性やライフサイクルアセスメントにも配慮している。

前述の通り，プラント補機は新・旧型によらずほぼ共通の設計となっており，大部分の既設設備の流用が可能である。また，空燃比制御の相違により排熱回収の変化が最小限に抑えられるため，ボイラー等熱回収装置の変更も原則不要となる。

エンジン本体のみならずプラント補機の流用もできるため，ニーズに合わせた柔軟な設備改造・更新が可能であり，プラントの実情に合わせた計画により初期投資を抑えることができる。また，流用する機器・設備についても，エンジン本体改造前後のメンテナンスにて換装あるいは更新ができるため，投資の分散が可能であり，新規に発電設備をリプレイスするより柔軟かつ効率的な設備更新を実現できる。

# 3. 改造技術の特徴

## 3.1 ガスエンジン本体

改造工事は総合効率を重視した仕様，発電効率を重視した仕様，どちらへの改造も可能である。通常のプラントは排熱を利用した運用形態が多く，KU30GSI への改造をベースに総合効率を維持するのが一般的である。図3に改造部品と改造目的を示す。

ガスエンジン本体の改造は，燃焼室周りの部品と過給機，燃料ガス供給系の仕様変更が中心であり，燃焼室を構成するシリンダカバー，給気枝管，ピストン，シリンダライナー，副室や過給機は定期整備にて開放整備，交換を実施する部品である。また，これら部品の経年的な劣化，摩耗等による燃焼や性能の変化は，経年機の安定運転に影響を与える一要因となりえる。そのため，改造工事を定期整備工事に合わせて行うことで単独で改造工事を行うより工事費用を抑制することができるとともに，新品更新となることで劣化の状態もリセットされる。なお，交換する部品に大幅な構造変更はなく，着火方式変更に伴う最小限の変更となっており，改造後も同様な取扱い性を維持できることがメリットとなる。

さらに，エンジン本体の改造対象部品はエンジン総重量の 20%に留まり，最大重量部品は過給機であるため，特別な搬入・搬出路の確保や大型重機械等は不要であり，定期整備が実施できる設備さえ有していれば，ほぼすべての改造工事を現地で実施可能である。

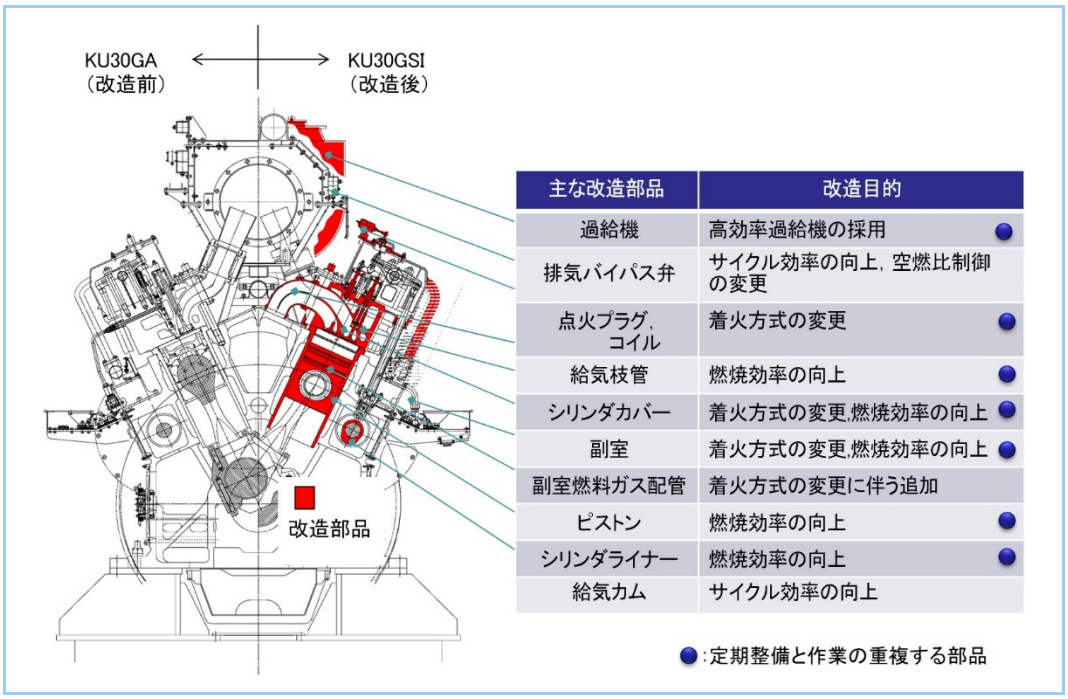



図3 改造部品と改造目的

## 3.2 エンジン制御装置

図4に KU30GSI のガスエンジンの制御システム構成図を示す。着火方式の変更には制御系，コントローラ等の変更が必要となるが，従来機から流用可能な部分が多く，最小限の変更で改造が可能である。

まず，パイロット噴射コントローラは点火装置に置き換え，燃焼方式の変更に伴い高い精度でノッキングを検知するためノックディテクタの追設が必要となる。他方，燃焼診断装置と主制御装置(DIASYS)は流用が可能であり，制御ロジックの改修と設定値の変更のみで火花点火方式に対応できる。ガス供給コントローラ(ガバナ)については，設定値の変更のみで流用できる。

一方，これら流用可能な燃焼診断装置，ガス供給コントローラ(ガバナ)は最新仕様への置き換えも可能である。最新の燃焼診断装置ではデータの解像度や処理能力の向上，ガス供給コントローラ(ガバナ)では制御機能の向上が図られている。なお，DIASYS については最新機種である

DIASYS Netmation 以降であればそのまま改修が可能となる。最新の DIASYS Netmation や燃焼診断装置ではオペレーション機能が向上し，遠隔での監視に加え設定値の変更も可能であり，設備の保守性の向上に寄与することができる。

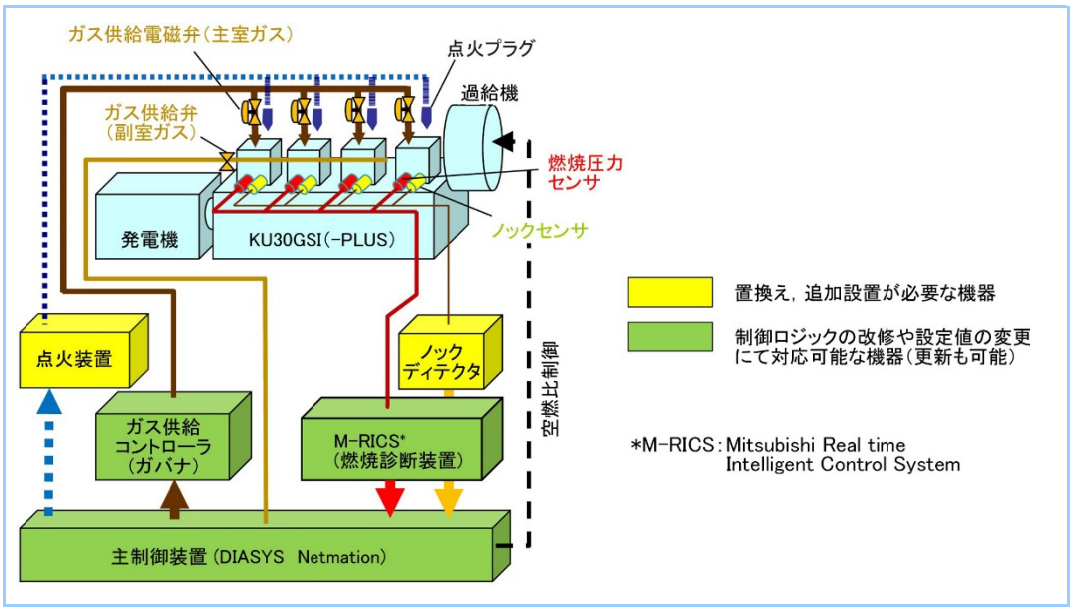



図4 ガスエンジンの制御システム構成図

### 3.3 プラント機器・補機

プラント機器・補機についても運用年数が進む中，一部の機器については旧型化して整備用消耗部品の入手が難しくなる場合や性能劣化が徐々に進行するなど，避けられない経年的な課題がある。このような課題に対し，前述した共通設計のメリットを生かし冷却系統のポンプを最新の省エネ型ポンプに換装することで，運用上の不安を解消するとともに，所内動力の低減を図ることも可能となる。

## 4. 改造プラントの事例

### 4.1 プラントの概要

表2に定期整備と併せて改造工事を実施したプラントの諸元を示す。本プラントは，ガスエンジン発電と排熱を利用した CHP（Combined Heat and Power plant）であり，マイクロパイロット着火方式 18KU30GA，2台である。発電出力は 5 500kW，回転数は 720min$^{-1}$，都市ガス 13A と BOG（Boil off gas）の2種類の燃料ガスを切り替えて使用しており，エンジンの設定にて燃料性状の変化に対応している。本プラントは 2004 年に発電所の運用を開始，総運転時間は約7万時間である [(3)(4)]。

表2 改造工事前後の諸元

| 項　目 | | 更新前 | 更新後 |
|---|---|---|---|
| エンジン型式 | | 18KU30GA | 18KU30GSI |
| エンジン台数 | | 2台 | ← |
| 発電出力 | kW | 5 500 | ← |
| 回転数 | min$^{-1}$ | 720 | ← |
| NOx（$O_2$＝0%換算） | ppm | ＜200 | ← |
| プラント運転開始 | | 2004 年 | 2018 年 |
| 運転時間 | Hr | 約 70 000 | - |
| 燃料ガス | | 都市ガス 13A，BOG | ← |
| 着火方式 | | マイクロパイロット | 火花点火 |
| 空燃比制御方式 | | 給気放出 | 排気バイパス弁 |
| 起動方式 | | 自動ターニング | スローターニング |

### 4.2 改造後の性能

改造工事後の試運転にてエンジンとプラントの性能，環境性能及び運転特性についての確認を行った。表3に試運転結果を示す。いずれも計画期待値を満足する結果を得ており，改造機においても KU30GSI と同等の性能を実現することができた。

表3 試運転結果

| 項 目 | | 計測結果 |
|---|---|---|
| 発電出力 | | 5500kW |
| 発電効率（平均） | 都市ガス 13A | ＋3.2%pt |
| | B.O.G | ＋3.0%pt |
| 排気温度 | 過給機出口 | ±0℃ |
| NOx（$O_2$＝0%換算） | | ＜200ppm |
| 起動時間 | | 約 1/3 |

（注記）発電効率，排気温度，起動時間は改造前後での差を示す。

(1) プラント性能

発電効率は定格出力 5500kW にて都市ガス 13A では 3.2%pt，BOG ガスでは 3.0%pt の向上を達成した。ガスエンジンの熱効率が向上すると排ガス量は減少傾向となるが，前述した空燃比制御方式の変更と排気温度の調整にて排熱回収と合わせた総合効率を同レベルに維持し，コージェネ設備全体の運用に影響がないことを確認した。また，熱交換器などのプラント補機の性能にも問題なきことを確認した。

排ガス中の $NO_X$ は，試運転時に空燃比と点火時期を最適に調整し，都市ガス 13A にて 140ppm，BOG で 170ppm と既設ガスエンジン運用時の排ガス NOx200ppm（$O_2$＝0%換算）以下を全負荷帯で十分下回ることを確認した。

(2) 運用特性

試運転においてプラント特性の確認試験を行い，遮断器投入から定格負荷到達まで8分以内を確認，起動時間は改造前より約 1/3 に短縮された。また負荷増減試験では広い負荷範囲での負荷追従性の向上を確認しており，より柔軟なプラント運用に耐える性能を実現した。

起動性と負荷追従性の向上は，エンジンの起動・停止や燃料ガス切替えの際のプラント運用，デマンドの追従性を容易かつ迅速に行えることから，運用上の大きなメリットとなっている。

一方，火花点火方式の特徴を生かした機能として，エンジン起動時の暖機状態により“通常始動”と“冷態始動”に自動的かつ選択的に切り替わるモードを有している。図5に始動モードによる負荷到達時間を示す。冷態始動モードとは，不十分な暖機条件下でも負荷追従速度を抑えることでエンジンを起動させることができる運転モードである。定期整備後の試運転など短い起動時間を必要としない場合など，停止中の積極的な暖機は不要となり省エネに寄与することができる機能である。

上述の通り，改造工事にて最新機種の機能を実現することでエンジン及びプラント性能を向上させ経済性の改善を図るとともに，より柔軟なプラント運用が可能になるなど運用性能向上にも寄与している。

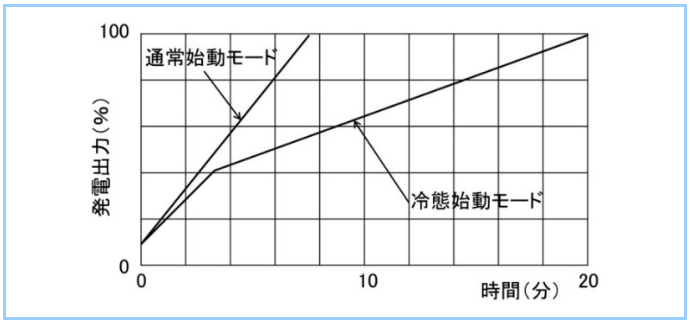



図5 始動モードによる負荷到達時間

## 5. まとめ

既設ガスエンジンの定期整備に合わせ最新型ガスエンジンへの改造を行う技術を構築，良好な結果を得ることができた。

共通設計に基づきシリーズ化してきたKUエンジンでは，既設プラントに最新技術をレトロフィットすることで導入コストを最小限に抑え，発電効率の向上とメンテナンスコストの削減を図り，安定したプラントの運用を長期にわたり提供することが可能になる。現在，同様の改造工事を2プラント3エンジンにて施工済であり，更に1プラント1エンジンを受注している。また，同じプラットフォームを利用するKU30Aディーゼルエンジンからガスエンジンへの改造工事も可能であり，今後増加が見込まれる経年機に対して運用期間の延長や環境負荷低減に寄与し，お客様保有資産の有効活用に繋げていきたいと考えている。

## 参考文献

(1) 吉栖ほか，発電用ガスエンジンKU30GSIの発電効率向上と冷却水エネルギー利用技術，三菱重工技報 Vol.50 No.1(2017)
(2) 吉栖ほか，The Field Experience of Mitsubishi Gas Engine，CIMAC Congress 2019，Vancouver；Paper No.286
(3) 鈴木，既設コージェネのオーバーホールと高効率化改造工事で発電効率を3%pt改善（経年機更新），月刊省エネルギー Vol.71 No.7(2019) p.41-44
(4) 鈴木ほか，ガスエンジンコージェネ設備の高効率化改造，クリーンエネルギー Vol.29 No.7(2020) p.62-68