

高効率型火花点火方式リーンバーンガスエンジン 28AGS を用いた CO₂ 削減に向けたコージェネレーション発電プラント

Co-Generation Power Plant with High-Efficient Spark Ignition Lean Burn Gas Engine 28AGS for Reduction of CO₂ Emission

黒 岩 隆 典 株式会社 IHI 原動機 技術センター RE 製品開発部
安 里 権 也 株式会社 IHI 原動機 陸用事業部プラントエンジニアリング部
安 藤 和 則 株式会社 IHI 原動機 陸用事業部プラントエンジニアリング部 主査
松 山 良 満 技術開発本部技術基盤センターターボ・機械要素グループ 主幹

株式会社 IHI 原動機は、ガスエンジン発電装置を用いたコージェネレーションシステムをさまざまな場所へ納入してきた。近年の主力機種である火花点火方式リーンバーンガスエンジン 28AGS は、希薄燃焼の安定化技術により、高効率かつ温室効果ガスである二酸化炭素 (CO₂) の排出量が少ないという特長を有している。2020 年に IHI 横浜事業所では、本ガスエンジンと IHI 製バイナリー発電機を組み合わせたガスエンジンコージェネレーションシステムを設置し、約 1 400 t/年の CO₂ 排出を低減できる見込みである。本稿では、本設備の概要について紹介する。

IHI Power Systems Co., Ltd. has supplied co-generation system equipped with a gas engine to various sites. The spark ignition lean burn gas engine 28AGS is a main model in late years. This model has features that it is highly efficient and emits a smaller amount of CO₂, a greenhouse effect gas due to adopt stabilization technology of combustion with the lean air-fuel mixture. In 2020 the gas engine co-generation system, which was composed of the gas engine 28AGS and the binary generator manufactured by IHI, was installed at IHI Yokohama Works and the site is expected to reduce CO₂ emissions by approximately 1 400 t/year. This paper introduces the outline of the system.

1. 緒 言

IHI グループは、さまざまなソリューションを提供することにより、2035 年までにお客さまの現行 CO₂ 排出量を 50%削減していくことを経営方針としている。その一環として、株式会社 IHI 原動機 (IPS) は、4 000 kW の高効率型 28AGS ガスエンジンとその冷却水からの熱により発電するバイナリー発電機をパッケージにした、コージェネレーションシステム (Co-Generation System : CGS) を株式会社 IHI 横浜事業所へ納入した⁽¹⁾。本設備は、省エネルギー化と地球温暖化の原因となる CO₂ 削減だけでなく、同時に防災性にも配慮した設計としている。本稿では、本 CGS 設備の概要と取組みについて述べる。

2. 市場環境と CGS の導入背景

2.1 C G S

CGS は、内燃機関、外燃機関などの排熱を利用して動力・温熱・冷熱を取り出し、総合エネルギー効率を高めるエネルギー供給システムである。需要地に近い場所で発電可能であり、送電によるエネルギーロスも削減できる。商

用電源から購入する電力とボイラなどで補われている電熱需要の一部を CGS で代替することで、商用電源の発電時に有効活用されずに廃棄されているエネルギーの一部などを削減する効果が注目されている。

また、エネルギーマネジメントシステム (Energy Management System : EMS) により、発電設備の運用データや、消費電力の詳細な使用量データを収集および見える化することで、省エネルギー化や需要最適化の実現により、将来いっそうの CO₂ 削減への貢献も期待できる。

2.2 ガスエンジンの特長

ガスエンジンの大きな特長としてクリーンな排ガス性状が挙げられる。石油などの液体燃料に比べ、天然ガスを燃料とするガスエンジンは、燃料種に由来する窒素酸化物 (NO_x)、硫黄酸化物 (SO_x)、すすなどの有害物質の排出は少ない。また燃料中の炭素 (C) に対する水素 (H₂) の含有率が高いため、地球温暖化の原因となる CO₂ の排出量を少なくできる。また、希薄燃焼化により、光化学スモッグや酸性雨の原因となる NO_x の排出量を抑制でき、環境への適合性は高い。

天然ガスの可採年数は、シェールガスの開発により延び

ており、液体燃料とガス燃料の価格差の関係から経済性のメリットが得られるケースもあるため、ガスエンジンを利用した CGS への期待が高まっている。

3. CGS 発電所の概要

IHI 横浜事業所の CGS 発電所のシステムフローを第 1 図に示す。1 次冷却水、2 次冷却水、潤滑油、燃料ガス、空気（エンクロージャ内で完結）、排ガスの 6 系統があり、以下に設備のシステム概要について述べる。

3.1 設備のシステム概要

3.1.1 冷却方式

ガスエンジンの冷却には 1 次冷却水と 2 次冷却水を用いている。両者は独立しており、1 次冷却水はガスエンジン本体を冷却後に、熱交換器を介して 2 次冷却水で冷却し、再びガスエンジンを冷却するために循環している。潤滑油についても同様にして熱交換器を介して 2 次冷却水で冷却し、適正温度に自動制御している。1 次冷却水および潤滑油と熱交換を行った 2 次冷却水は、2 次冷却水冷却塔へ移送され、冷却塔ファンで大気と熱交換して放熱を

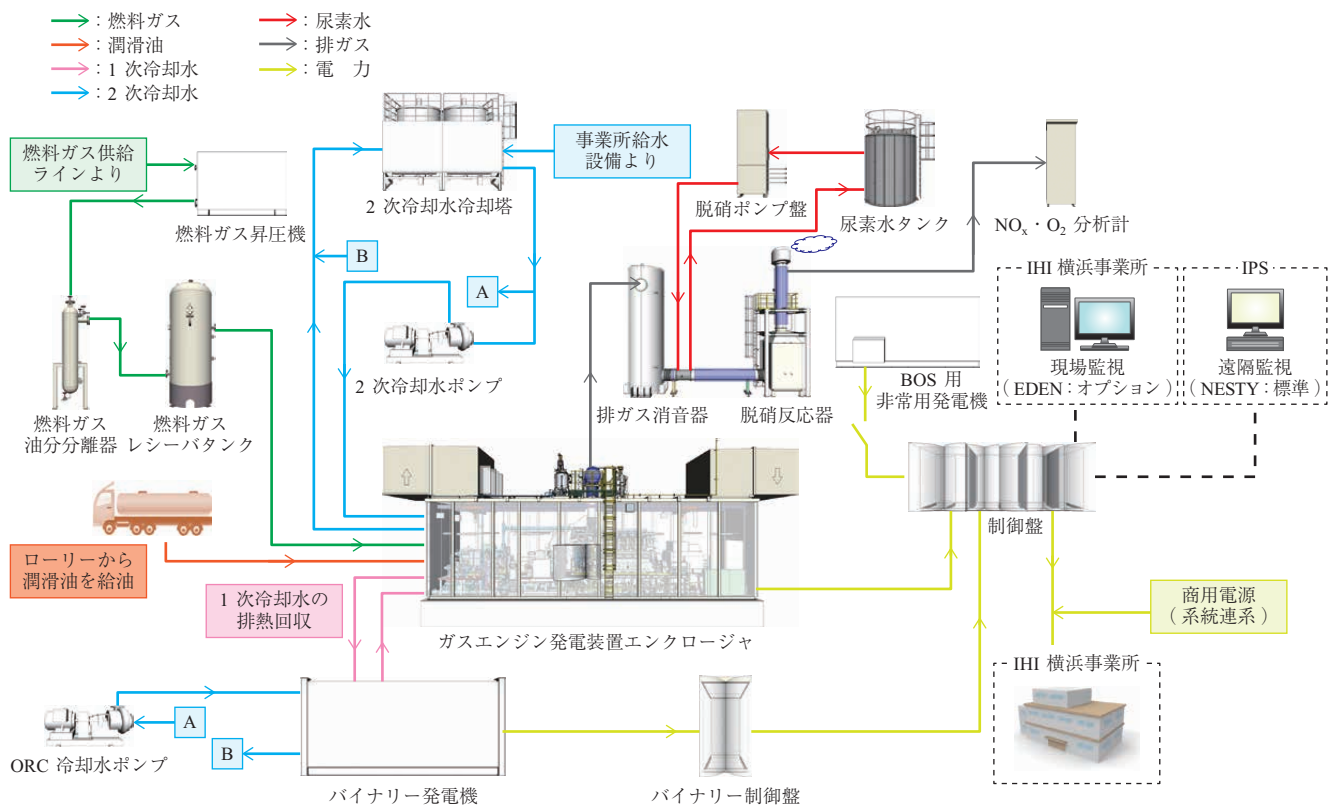
行っている。

3.1.2 潤滑油システムのシステム

ガスエンジンと発電機を載せている台床の内部は潤滑油のオイルパン（以下、潤滑油サンプタンク）となっている。潤滑油サンプタンクからエンジン駆動のポンプで潤滑油を各摺動部へ供給している。また、潤滑油清浄装置（ルブクリン）を用いて、潤滑油サンプタンク内の潤滑油を側流清浄し、潤滑油の使用時間の延長を図っている。補給時には、ローリーから潤滑油サンプタンクへの直接給油が可能である。

3.1.3 燃料ガスの供給方式

燃料ガスは、一般の都市ガスラインから供給されており、燃料ガス昇圧機で所定の圧力まで高めた状態でガスエンジンへ送られる。昇圧後の燃料ガスには、燃料ガス昇圧機の潤滑油成分（以下、油分）が含まれており、油分濃度が高い状態でガスエンジンへ送ると、燃料ガスを調節する電磁弁が固着する恐れがある。これを防止するために、燃料ガス油分分離器で油分濃度を低下させた状態で、ガスエンジンへ燃料ガスを供給している。



(注) 電力量
 ・ガスエンジン発電装置：4 000 kW
 ・バイナリー発電機：100 kW 級
 空気系統はエンクロージャ内で完結

第 1 図 IHI 横浜事業所の CGS 発電所のシステムフロー
 Fig. 1 Flow diagram of IHI Yokohama Works CGS power plant

3.1.4 空気システムのシステム

エンクロージャ内には、補機ユニット上に空気圧縮機、始動空気槽を、点検架台上に計装空気圧縮機を設置している。空気圧縮機で生成した圧縮空気は始動空気槽に貯蔵されており、ガスエンジンの始動時に用いる。一方で、計装空気圧縮機で発生させた圧縮空気は、各計装品の動作用に用いている。

3.1.5 排ガスの処理方法

ガスエンジンの排ガスの騒音は、排ガス消音器で低減している。騒音低減後の排ガスは脱硝反応器を通過し、排ガス中の NO_x を低減した状態で大気へ放出している（脱硝反応器の詳細は5.2節で述べる）。

3.1.6 ガスエンジンの監視システム

ガスエンジンの各システムの温度や圧力の数値を記録している現場には発電監視装置 EDEN®（オプション）を設置している。また、当該情報はインターネット回線を用いて遠隔で集中監視システム NESTY（標準）へ伝送されており、IPS 内で常時ガスエンジンの状態を監視可能なシステムとなっている。

3.1.7 ブラックアウトスタート（Blackout Start：BOS）機能

本設備では BOS 用非常用発電機を設置し、商用電源が停電した際にもガスエンジンの始動用補機の電源を確保可能である。

3.1.8 バイナリー発電機

本設備ではバイナリー発電機を設置し、ガスエンジンの1次冷却水の排熱を用いて発電し、エネルギーの再利用を

行っている（バイナリー発電機の詳細は5.1節で述べる）。

3.2 CGS 発電所のレイアウト

IHI 横浜事業所の CGS 発電所レイアウトを第2図に示す。本発電所は主に次の特長を有している。

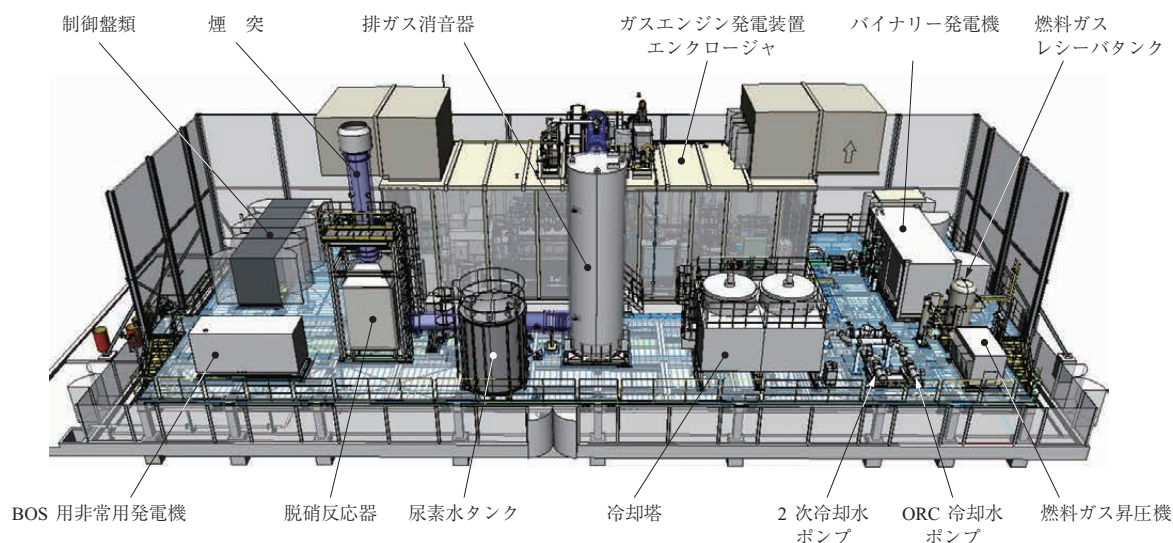
- ・ 省スペース化：ガスエンジン発電装置とユニット化した補機一式をエンクロージャ内に設置（第3図にエンクロージャ内部のレイアウトを示す）
- ・ 大気環境へ配慮したプラント設備
- ・ 事業継続計画（Business Continuity Plan：BCP）対策につながる災害に強い設備。
- ・ 津波対策：発電装置エンクロージャ基礎および補機架台の高さを GL（Ground Level）+ 2 m としている。
- ・ 停電時の備え：BOS 用非常用発電機を有し、災害時の従業員（約3800名）の帰宅支援や外部の帰宅困難者の支援に貢献する。
- ・ バイナリー発電機によるエネルギー再利用により、設備全体の効率向上。

4. ガスエンジン発電装置

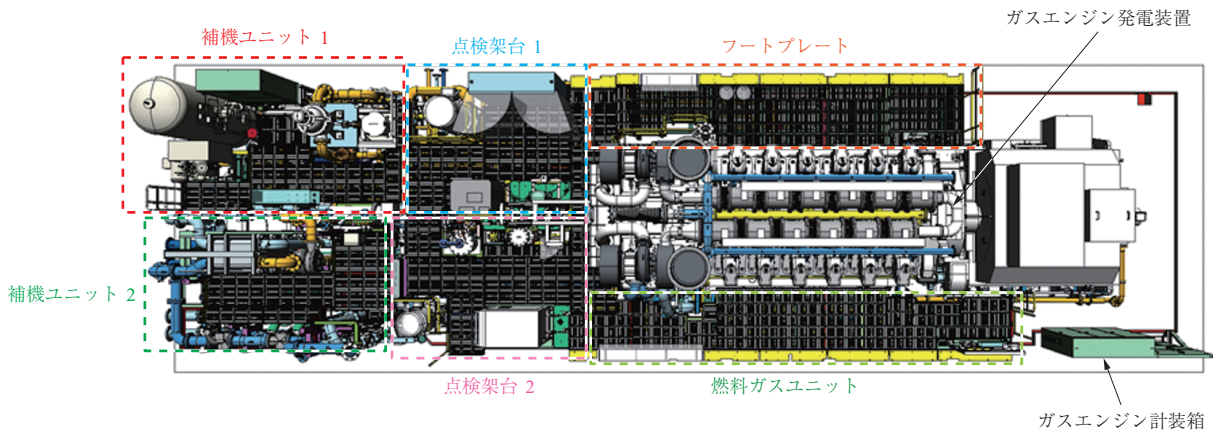
4.1 発電用 28AGS ガスエンジン

2012年に開発した28AGSガスエンジンは、点火プラグにより予燃焼室の混合気に点火し、予燃焼室からの火炎ジェットにより主燃焼室内の希薄混合気を燃焼させる火花点火方式リーンバーンガスエンジンである。28AGSシリーズのラインナップとエンジン仕様を第1表に示す。

以下に示す特長をもった28AGSシリーズは防災性も高



第2図 IHI 横浜事業所の CGS 発電所のレイアウト
Fig. 2 Layout of IHI Yokohama Works CGS power plant



第 3 図 エンクロージャ内部のレイアウト

Fig. 3 Inside layout of enclosure

第 1 表 28AGS シリーズのラインナップとエンジン仕様

Table1 28AGS series lineup and specifications

項目	単位	仕様					
シリンダ数・配列	—	6L	8L	12V	16V	18V	
シリンダ径	mm	295					
ストローク	mm	400					
回転速度	min ⁻¹	750/720					
発電出力	50 Hz	kW	2 000	2 650	4 000	5 300	6 000
	60 Hz	kW	1 900	2 550	3 800	5 100	5 750
正味平均有効圧力	MPa	2.0					
点火方式	—	火花点火					
燃焼方式	—	予燃焼室方式					
始動方式	—	エアスタータ					
燃料種	—	都市ガス, 天然ガス					

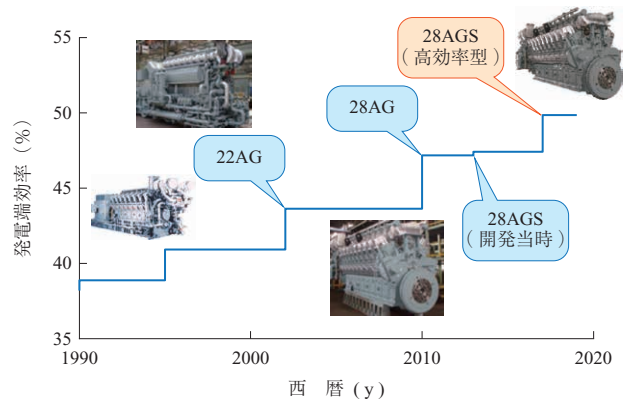
(注) サイト条件: ISO 15550

いガスエンジンとして十分な性能を備えていることで注目されている。

- ・ 高い発電効率を有するシリーズであり、発電出力 2 MW クラスは世界最高レベル
- ・ 空燃比制御の最適化による高い負荷投入特性
- ・ 始動性能の高いシリーズであり、28AGS は始動から 40 秒以内で電圧確立が可能
- ・ 有負荷生き残り機能（商用電源が停電時に、商用電源から瞬時に切り離し、発電運転を継続する機能）により重要負荷への給電を継続することで BCP 対応が可能

4.2 ガスエンジンの高効率化への取組み

IPS は、前述した優れた特長を維持しつつ、これまで蓄積してきた技術的知見を活かすことで、2017 年に 28AGS シリーズのさらなる高効率化を実現した。IPS 製ガスエンジンの効率向上の流れを第 4 図に示す。開発した高効率 28AGS シリーズの初号機は、2020 年 6 月に工場から出



第 4 図 IPS 製ガスエンジンの効率向上の流れ

Fig. 4 Trend of electrical efficiency improvement of IPS gas engines

荷し、すでに複数のフィールドで運用が開始されている。
また、今回の高効率ガスエンジンを利用した CGS 発電所では、本開発により効率を向上させた、同クラス最高レベルの効率を有する V 型 12 気筒の 28AGS を納入している。

28AGS シリーズの効率向上のため、適用した要素技術の例を以下に述べる。

4.2.1 予燃焼室から主燃焼室への火炎ジェット適正化

28AGS で採用している予燃焼室付き火花点火方式では、点火プラグの放電火花を点火源としている。予燃焼室に直接供給したガス燃料は、主燃焼室から流入した空気と混合し、予燃焼室内にはほぼ理論空燃比の混合気が形成される。このほぼ理論空燃比の混合気が、点火プラグにより点火され燃焼する。その後、主燃焼室へ的高温ガスがジェット状に噴出し（火炎ジェット）、主燃焼室内の希薄混合気を燃焼させている。このため、安定した燃焼を得るためには、この火炎ジェットの適正化が必要不可欠になる。そこで、CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーションを活用して予燃焼室の形状を検討、評価し、火炎ジェットの適正化を図った⁽²⁾。

予燃焼室火炎ジェットの CFD による解析結果を第 5 図に示す。予燃焼室形状の計算パラメータと形状適正化前後の火炎ジェットの解析結果の一例を示している。形状適正化前は、火炎ジェットの直進性が弱く、到達距離が短い。一方で、形状適正化後の火炎ジェットは、直進性が増して到達距離が長くなった。これにより、主燃焼室中心から離れたシリンダライナ壁面付近の希薄混合気も安定して燃焼させることが可能になる。適正化された予燃焼室形状

は、試験機において検証され、主燃焼室内の燃焼のばらつきを抑制する効果が確認されている。この結果、燃焼圧力の上限值を超えることなく、主燃焼室内最大燃焼圧力を上昇させることができ、エンジン効率が向上した。

4.2.2 未燃ガス燃料の排出（メタンスリップ）削減

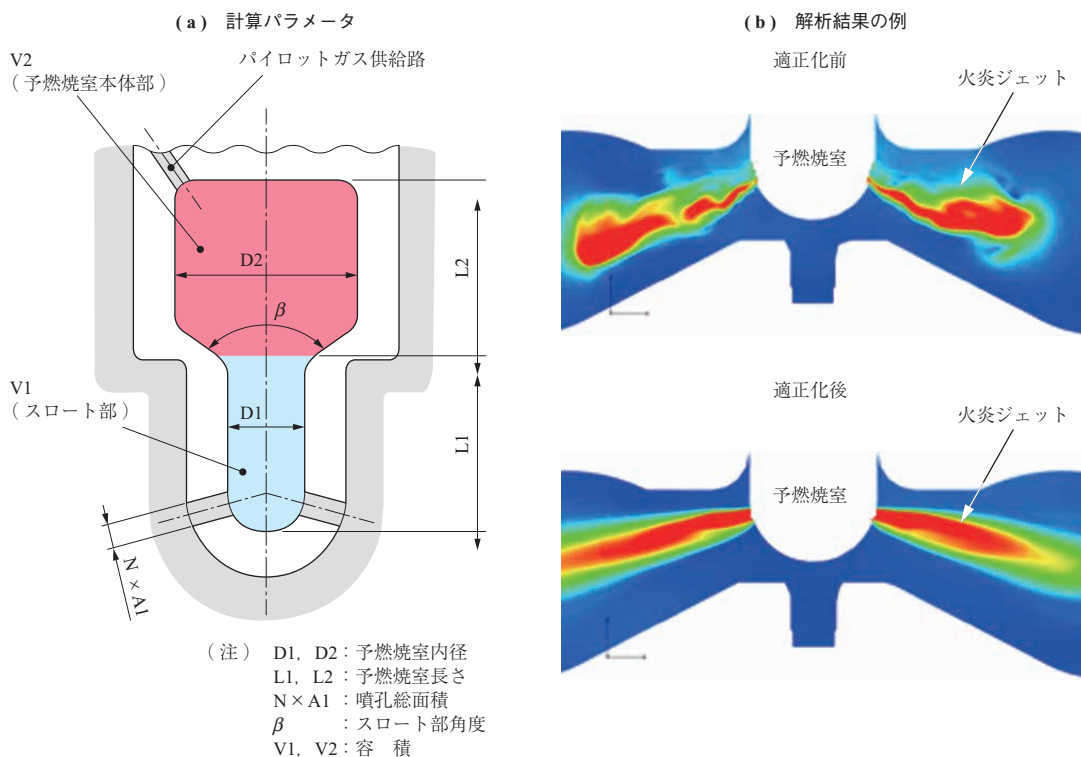
高効率型 28AGS では、効率を向上させるだけでなく、温室効果ガスの排出削減につながり、環境適合性も改善する未燃ガス燃料の排出量を削減している。28AGS は、吸気ポート内で空気とガス燃料を混合し、主燃焼室へ混合気を供給する。このため、燃焼室内に多数存在する狭い隙間、たとえばシリンダヘッドとシリンダライナの間隙などに流入した希薄混合気は、燃焼室壁面への熱損失が過大となり燃焼せずに、排気行程においてそのまま排出されるメタンスリップを発生させる。このため、未燃焼となり得る燃焼室内にある狭い隙間の容積を削減することで、メタンスリップは減少し、試験機により、開発当時と比べ約 40%削減することを検証した⁽²⁾。

4.2.3 その他の要素技術

前述した要素技術のほかに、

- ・ 混合気濃度の均一化によるノッキング抑制
- ・ 空燃比制御装置の最適化による燃焼安定性の確保
- ・ 機械損失や冷却損失の低減

などの要素技術を組み合わせ、最適化することで、同クラ



第 5 図 予燃焼室火炎ジェットの CFD による解析結果
Fig. 5 CFD analysis of flame jet from pre-combustion-chamber

ス最高レベルの効率を実現している。

5. 大気環境へ配慮したプラント設備

省エネルギー化による CO₂ 排出量の低減や環境への適合性を改善するため、ガスエンジンの排熱を利用し、発電するバイナリー発電機、および排ガスを浄化する脱硝設備を本 CGS 発電所へ導入している。各設備のシステムや特徴について以下に述べる。

5.1 バイナリー発電機

バイナリー発電機は、ガスエンジンの 1 次冷却水などの低温の排熱を利用して発電を行う装置である。通常は、2 次冷却水との熱交換で捨てられている 1 次冷却水の排熱をバイナリー発電機の熱源として利用する。これにより、CGS 発電所全体の総合効率向上およびガスエンジン 1 kWh 当たりの CO₂ 排出量低減を実現している。

5.1.1 原理とシステム構成

バイナリー発電機のシステム構成を第 6 図に示す。循環ポンプ、蒸発器、タービン発電機、凝縮器から成り、これらの機器をパッケージ化するため、据付けが容易となっている。第 7 図にバイナリー発電機の外観を示す。この

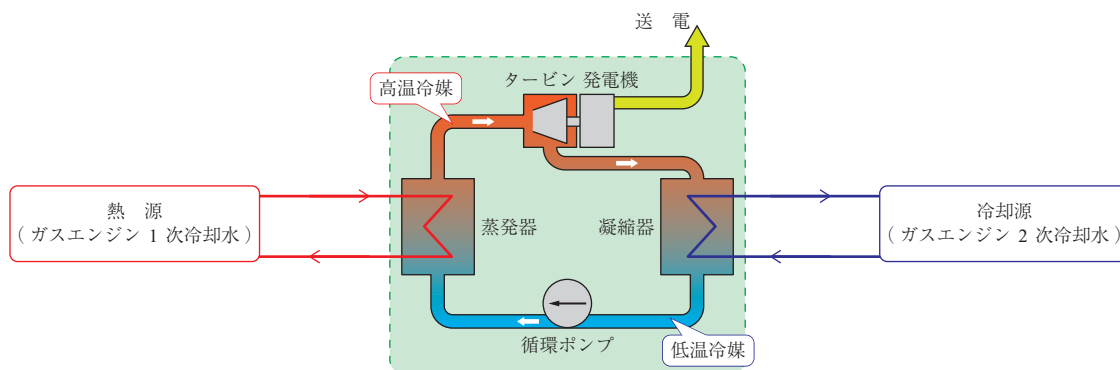
システムは、沸点の低い媒体を加熱・蒸発させ、タービン発電を行うオーガニックランキンサイクル (Organic Rankine Cycle : ORC) を採用している。

液状の低温冷媒は、循環ポンプで昇圧されて蒸発器へ移送され、熱源となる約 90℃ の 1 次冷却水 (エンジン 100% 負荷時) と熱交換により加熱、気化し、冷媒蒸気を生成する。高圧の冷媒蒸気は、タービンで膨張した後、凝縮器でガスエンジンの 2 次冷却水と熱交換により冷却、凝縮され、元の低温冷媒の状態に戻る。これら各機器は、すべてパッケージ内に収納され、1 次、2 次冷却水をつなぎ込むだけでよく、シンプルな外観となっている。

5.1.2 バイナリー発電機の能力

本 CGS 発電所では、IHI 製バイナリー発電機を採用しており、主な仕様は第 2 表のとおりである。

ガスエンジン単体およびガスエンジン + バイナリー発電機の 2 条件で 24 時間運用した場合、従来のように電気事業者から電源を購入した場合と比較し、CO₂ 排出量を大幅に削減できる。第 3 表に IHI 横浜事業所の CO₂ 排出の削減量を示す。さらにバイナリー発電機を併用すれば、ガスエンジンのみの運用よりも約 200 t/年多く CO₂



第 6 図 バイナリー発電機のシステム構成⁽³⁾
Fig. 6 System of binary generator⁽³⁾

(a) バイナリー発電機屋外設置用コンテナ



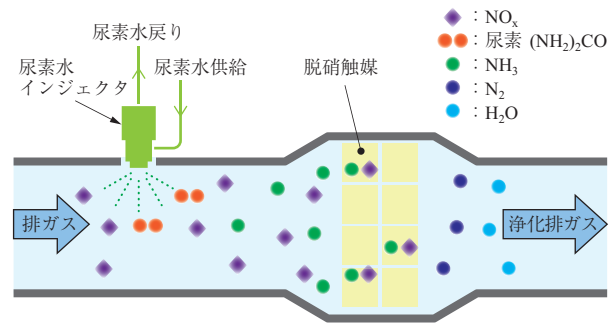
(b) 100 kW 級バイナリー発電機本体



第 7 図 バイナリー発電機の外観
Fig. 7 Outside view of binary generator

第2表 バイナリー発電機の仕様
Table2 Specifications of binary generator

項目	単位	仕様
出力(送電端)	kW	100 kW 級
電圧	V	AC400, 三相
周波数	Hz	50
冷媒	-	R245fa
発電方式	-	磁気軸受式単段遠心式タービン + 高速発電機
外形サイズ (幅×奥行×高さ)	mm	2 100 × 4 100 × 2 200



第8図 脱硝反応プロセス⁽⁴⁾
Fig. 8 Process of denitrification⁽⁴⁾

第3表 IHI 横浜事業所の CO₂ 排出の削減量
Table 3 Amount of reduction of CO₂ emission in IHI Yokohama Works compared to conventional numbers

運用条件	CO ₂ 削減量 (t/年)
ガスエンジン(負荷 3 960 kW)	約 1 200
ガスエンジン(負荷 3 890 kW) + バイナリー発電機(負荷 70 kW)	約 1 400

排出量を削減可能である。

5.2 脱硝設備

脱硝設備とは、ガスエンジンの排ガス中に含まれる NO_x を低減する装置一式のことであり、脱硝反応器、尿素水タンク、脱硝ポンプ盤、尿素水インジェクタ、NO_x・O₂ 分析計の構成から成る。排ガス中に含まれる NO_x は、主に一酸化窒素(NO)と二酸化窒素(NO₂)に大別されるが、燃焼過程で発生する NO がほとんどの割合を占める。NO は大気中へ放出された際、オゾンなどと反応して有害物質である NO₂ を生成する。脱硝設備の役割は、化学反応のプロセスを用いて、大気へ放出される前の排ガス中の NO を窒素(N₂)と水(H₂O)へ還元し、無害化することである(以下、脱硝反応)。

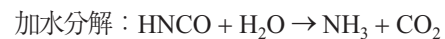
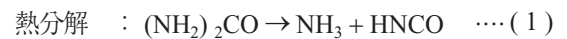
本 CGS 発電所では、NO_x の低減とガスエンジンの効率維持を両立させるよう脱硝設備と組み合わせ、尿素還元剤との脱硝反応により NO_x を低減させて、環境適合性を改善している。

5.2.1 原理とシステム構成

第8図に脱硝反応プロセスを示す。脱硝設備では、尿素水インジェクタで霧状の尿素水を排ガス中へ噴霧することにより、排ガス中の NO_x と反応させる。当該反応は以下の2段階の過程から成る。

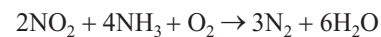
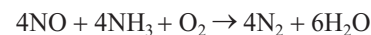
(1) 尿素水分解/アンモニア生成⁽⁴⁾

排ガス中へ噴霧された尿素水は、300～450℃の高温排ガスの熱によって、以下に示す2段階の分解反応により、アンモニア(NH₃)を生成させる。



(2) NO_x 選択還元反応⁽⁴⁾

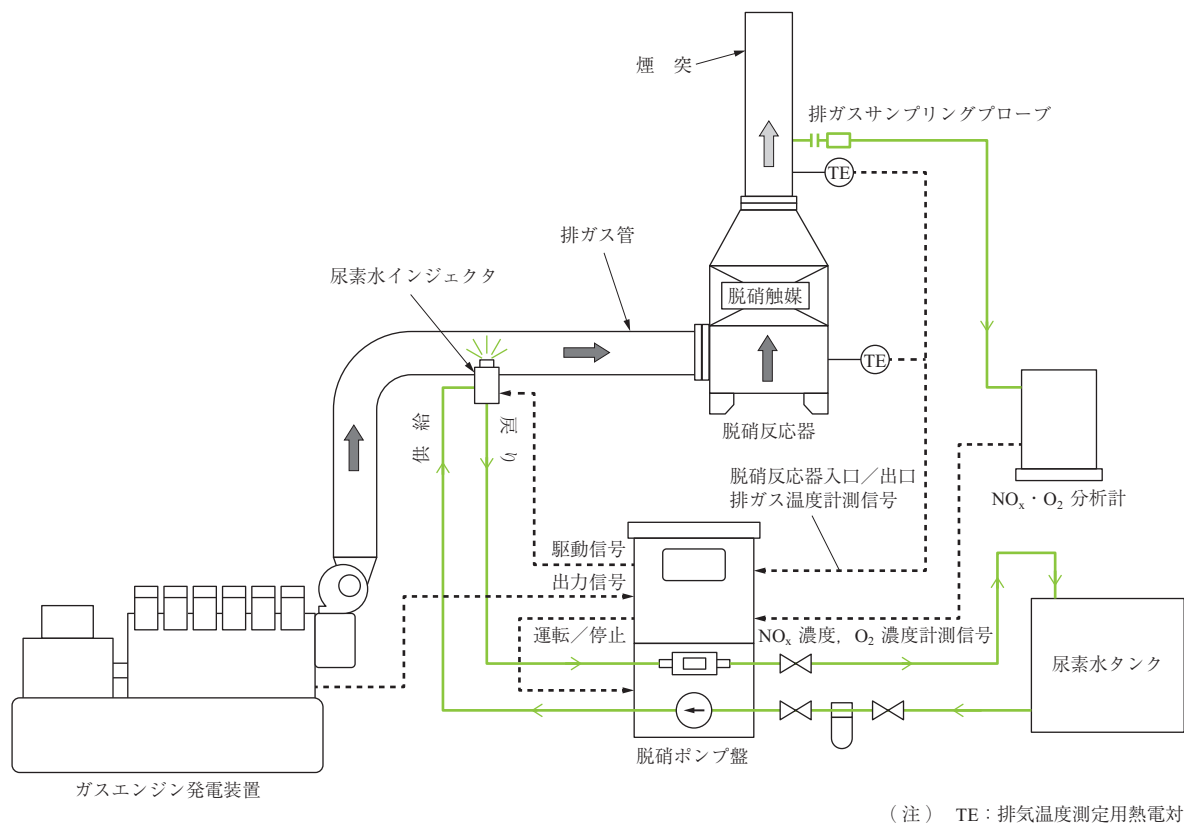
(1) 式の反応の熱分解で得られた NH₃ は、脱硝反応器内の脱硝触媒を通過する際に、NO_x (NO または NO₂) を、下記の反応により N₂ と H₂O へ変換する。



第9図に脱硝設備システム構成を示す。尿素水は、タンクから脱硝ポンプでインジェクタへ供給され、排ガスパ管中へ噴霧される。尿素水の噴霧量は、ガスエンジンの各負荷の機関出口 NO_x 濃度(理論値)に応じて決定しているが、NO_x・O₂ 分析計にて計測された脱硝反応器出口の NO_x 濃度を脱硝ポンプ盤へフィードバックして補正をかけている。

本 CGS 発電所ではフォレコ株式会社の脱硝設備を導入している。同社の設備の特徴は、尿素水インジェクタへ供給した尿素水の一部を尿素水タンクへ戻して循環させていることにある。これによって以下の効果を得ている。

- ・ 戻りの尿素水でインジェクタを常に一定温度以下に冷却する。
- ・ 尿素水供給ライン中の尿素水は、排ガスパ管中へ噴霧される状態よりも温度が低い(200～300℃)ため、すべての尿素水が NH₃ へ分解されるわけではなく、一部の尿素水からシアヌル酸、アンメリドなどの非水溶性物質が生成される。これらの物質によってインジェクタ内が閉塞しないように尿素水を循環させる。また、電磁弁を内蔵したインジェクタを用いているため、従来の2液式エアアシストノズルでは必要であった圧縮空気と洗浄水が不要となる。



第 9 図 脱硝設備システム構成
 Fig. 9 System of denitrification equipment

5.2.2 脱硝能力

本 CGS 発電所の 100% 負荷時の脱硝能力を第 4 表に示す。排ガス量、排ガス温度、脱硝反応器の入口 NO_x 濃度の条件において、脱硝率 92.8% と高い脱硝能力を有していることから、大気環境に対して十分配慮したシステムとなっている。

6. 結 言

IHI 横浜事業所へ環境、防災に配慮したガスエンジン CGS 発電設備を納入した。本設備は、ガスエンジンとバイナリー発電機の併用により、本事業所の CO₂ 排出量を 1 400 t/年削減達成が見込めることから、世界的な動向である温室効果ガス削減に寄与する。

また、ブラックアウトスタート機能を備え、万一の災害においてもガスエンジンによる電源確保が可能な能力を十分有している。

ガスエンジンを用いた CGS 発電設備は、環境への適合性の高さと省エネルギー性を両立できるため、さまざまなサイトへの導入が拡大している。

今後も IPS は、国内外に向けて品質の高いガスエンジン CGS 発電設備を提供していく。

第 4 表 100% 負荷時の脱硝能力

Table 4 Specifications of denitrification at 100% load

排ガス条件項目	単 位	数 値
排ガス量 (最大)	m ³ /h (N)	19 410
排ガス温度 (最大)	℃	385
脱硝反応器入口 NO _x (O ₂ = 0%)	ppm (dry)	400
脱硝反応器出口 NO _x (O ₂ = 0%)	ppm (dry)	29
脱硝率	%	92.8

参 考 文 献

- (1) 株式会社 IHI : プレスリリース, https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2019/resources_energy_environment/1190456_1591.html, (参照 2021. 3. 2)
- (2) 中山貞夫, 黒岩隆典, 中里隆文, 齊藤俊之 : 火花点火方式リーンバーンガスエンジン 28AGS の性能向上, IHI 技報, Vol. 59, No. 4, 2019 年 12 月, pp. 61 - 71
- (3) 株式会社 IHI : 100 kW バイナリー発電装置 ~ HEAT INNOVATOR ~ カタログ, pp. 1 - 2
- (4) フォレコ株式会社 : 尿素水脱硝システム取扱説明書, システム構成, pp. 2 - 3