

カーボンニュートラルに向けた 発電装置における水素利用

堂 浦 康 司・中 安 稔・岡 伸 幸

発電所やコージェネシステムで用いられる発電装置について、カーボンニュートラルに向けた水素利用の課題、システム等をガスタービン発電装置を例として説明する。都市ガスと異なる特性をもつ水素を利用するには、その特性に対応した燃焼システムの適用が必要となる。また、実証運用を行った水素専焼システムや既存設備からの改造が可能な水素混焼システムについても紹介する。

キーワード：水素、発電、ガスタービン

1. はじめに

気候変動問題への対策として、各国でカーボンニュートラルに向けた取組みが加速している。我が国においても日本政府が「2050年カーボンニュートラル」を宣言、「グリーン成長戦略」等によるカーボンニュートラル実現を後押しする政策がとられている。

電力については太陽光や風力を用いた再生可能エネルギーによる発電が注目されるが、その出力変動を補償する必要があるため、従来の内燃機関を用いた発電設備の役割は将来においても重要である。ガスタービンやガスエンジンといった内燃機関におけるCO₂（二酸化炭素）排出量削減のため、コージェネ利用等による省エネ化に加え、水素やアンモニアといった燃焼時にCO₂を排出しない燃料の使用や、排ガス中のCO₂を分離・回収するCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）等の技術開発が進められている。本稿では、発電装置における水素利用について、実証事業等が先行しているガスタービン発電装置を例に説明する。

2. 水素サプライチェーン

水素を発電装置で用いるには、必要な水素量を安定して供給することが不可欠である。現状の産業界での水素製造は石油・化学工場や製鉄工場からの副生水素や天然ガス改質が主流であり、発電用途として十分な水素供給量とは言い難いが、国際水素サプライチェーンを構築することで水素供給量を増やしていく計画が進められている。

図-1は、川崎重工業が提示するCO₂フリー水素

チェーン構想である¹⁾。水素は豪州の褐炭をガス化・精製して製造後に液化され、液化水素運搬船で日本に海上輸送される。褐炭に限らず化石燃料をガス化・精製すると水素が得られるが、精製過程でCO₂が副生される。このCO₂を現地で回収して地中に貯蔵するCCS処理を行うことで、CO₂の大気排出を伴わない水素（CO₂フリー水素）が得られる。この水素は港近くに設置された水素液化機で液化水素に変換、液化水素運搬船に積み込んで日本に運搬され、利用される。

3. 水素燃焼技術

水素はメタンを主成分とする都市ガスや天然ガスとは異なる物性を有するため、内燃機関での利用には燃焼バーナ等の一部部品を水素特性にあわせたものに変更する必要がある。ガスタービンは圧縮機／燃焼器／タービンで構成されるエンジンであるが（図-2）、水素利用においては燃焼器の部品や燃料制御のみを変更する。

(1) 水素の特性

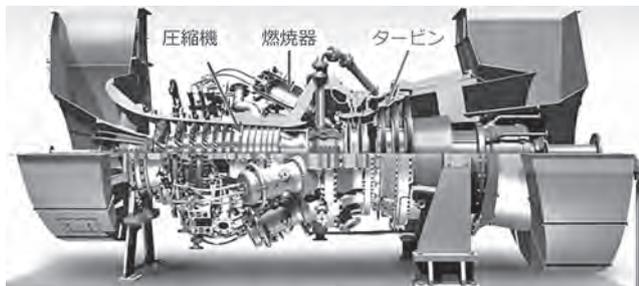
表-1に水素と都市ガス（13A）の比較を示す。水素は都市ガスに比べて可燃範囲が広い／燃焼速度が速いこと等から、燃焼バーナの高温化や火炎の燃焼バーナ内への逆流といった課題への対応が必要となる。

(2) 水素燃焼システム

具体例として、川崎重工業の3つの水素燃焼システム（図-3）を紹介する。



図一 CO₂フリー水素チェーン



図二 ガスタービンエンジン

表一 水素と13Aガスの比較

項目	水素	13Aガス(参考)
低位発熱量, MJ/Nm ³	10.8	40.6
可燃範囲, vol%(大気中)	4.0~75.0	4.3~14.5
MCP, cm/s	282	37
最小着火エネルギー, 10 ⁻⁵ J	1.6	28(メタン)

* MCP (Maximum Combustion Potential) 燃焼速度の指標

① 拡散燃焼器

燃焼領域へ直接燃料ガスを噴射するコンベンショナルな方法で、燃焼安定性に優れることから様々な燃料に用いられる。

水素燃焼には、先端の冷却強化や水素噴射部を最適化した燃焼バーナを適用する。水素専焼、都市ガス専焼、水素/都市ガス混合ガスでの運転が可能で、都市ガス100%から水素100%までシームレスに運転中切替えが可能である。

一般的に、NO_x (窒素酸化物) 低減のため水または蒸気噴射が行われる (ウェット方式)。

② DLE (Dry Low Emission) 燃焼器

燃料ガスが希薄となるよう空気と混合させてから燃焼領域へ供給する希薄予混合燃焼方法を用いた燃焼器で、水や蒸気を噴射することなく低NO_x燃焼が可能である (ドライ方式)。現在の標準的な都市ガス燃焼

燃焼方法	① 拡散	② DLE	③ マイクロミックス
燃焼器	水素/都市ガス 水素焚き拡散バーナ	水素/都市ガス 希薄予混合バーナ 追焚きバーナ	水素 マイクロミックスバーナ
水素割合 %vol	0~100 (都市ガスと任意の割合可)	0~30 (都市ガスと任意の割合可)	(50~)100
NO _x 低減方法	水噴射/蒸気噴射 (ウェット方式)	希薄予混合燃焼 追焚き燃焼 (ドライ方式)	微小拡散火炎 (ドライ方式)

図三 水素燃焼システム

システムであり、多くのサイトにて稼働中である。

水素燃焼では予混合部分に火炎が逆流する事象が発生しやすく、使用可能な水素割合は制限される。一方で、既存設備のレトロフィットでCO₂排出量削減を実現できる水素混焼が可能であること、NO_x排出量は都市ガス時と同等または若干の増加で抑えられることが、大きなメリットである。

③マイクロミックス燃焼器

水素専焼においても水／蒸気噴射無しで低NO_x燃焼（ドライ方式）を実現する新しい燃焼方法で、現在開発・実証中である。極小径の孔から噴射される水素が直交する空気噴流と急速に混合して生じる微小な水素火炎を多数形成する。予混合部分を有しないため、火炎逆流等の異常燃焼は発生しにくい。

4. ガスタービン発電装置における水素利用例

前項で説明した水素燃焼システムを用いた例を以下に示す。

(1) 神戸水素 CGS (CoGeneration System)

新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO 助成事業「水素 CGS 活用スマートコミュニティ技術開発事業」において、神戸ポートアイランドに川崎重工業製ガスタービン発電装置 PUC17 を用いた水素 CGS を設置し、2018 年に拡散燃焼器を用いた水素実証運用を行った²⁾。図-4 は設備全景であるが、水素は液体水素タンクから蒸発器にてガス化された後に水素ガス圧縮機にて加圧、都市ガスはパイプラインから都市ガス圧縮機で加圧されて、それぞれガスタービン発電装置に供給される。水素と都市ガスは混合装置にて混合されるが、水素専焼、都市ガス専焼、水素／都市ガス混焼それぞれのケースについて運用に問題ないことが実証された。図-5 に水素専焼時の運転監視装置モニタを示す。

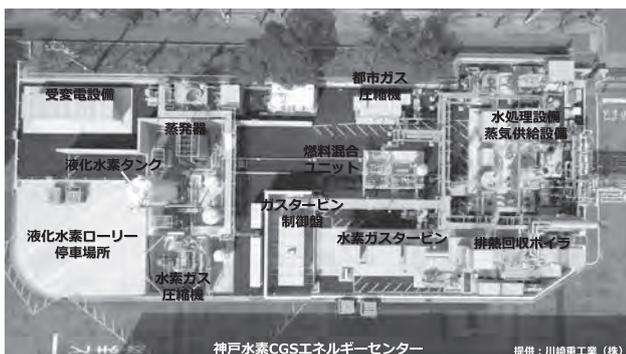


図-4 神戸水素 CGS

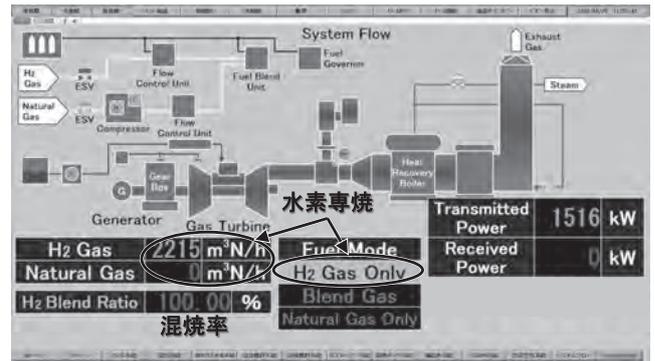


図-5 水素専焼運転

さらに 2020 年にはマイクロミックス燃焼器の実証運用を、NEDO 助成事業「ドライ低 NO_x 水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」にて実施、他に先駆けてドライ方式の水素専焼を実現した³⁾。現在も事業を継続しており、水素高割合での運用や水噴射を行う拡散燃焼器より低い NO_x 排出量を達成する見込みを得ている。

(2) 水素混焼ガスタービンコージェネシステム

DLE 燃焼器を用いたシステムとして、川崎重工業製ガスタービン発電装置 PUC80D を用いた水素 30% 混焼ガスタービンコージェネシステムを紹介する（図-6, 7）。本システムは、既設の都市ガス専焼コージェネのガスタービンエンジンや燃焼器、発電装置、さらに都市ガスのガス圧縮機等の主要補機類は流用可能とし、燃料ガス供給設備と燃焼制御の改造のみで水素 30% 混焼を可能とする。2021 年度コージェネ大賞技術開発部門で理事長賞を受賞した⁴⁾。

5. おわりに

以上、カーボンニュートラルに向けた発電装置における水素利用について、ガスタービン発電装置を例に説明した。

最後に、発電装置における水素利用普及のひとつの

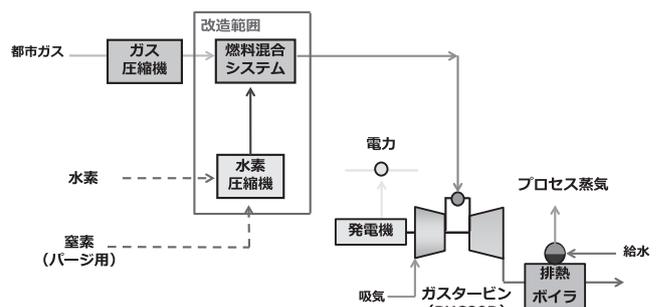
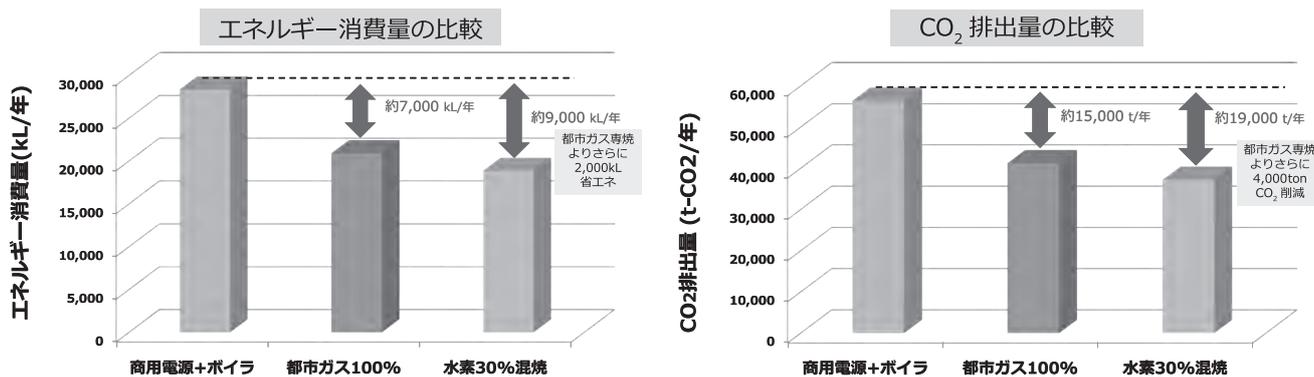
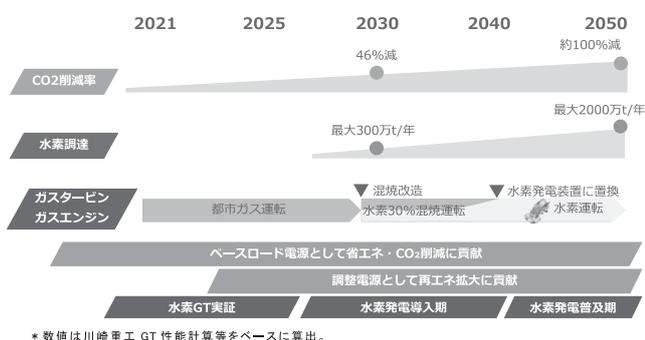


図-6 水素混焼コージェネシステム



* 数値は PUC80D 性能計算等をベースに算出。

図一 7 水素混焼による省エネ / CO₂ 削減効果例



* 数値は川崎重工 GT 性能計算等をベースに算出。

図一 8 発電装置における水素利用普及の見通し

見通しとして図一 8 を示す。2020 年代に実証設備や水素混焼設備の一部導入から始まり、2030 年代には水素流通量が増加して水素混焼設備が本格普及、2040 年代には更に水素価格が低下して水素専焼設備が普及すると考えられる。



《参考文献》

- 1) 西村他, 「国際液化水素サプライチェーン構築への取り組み」, 川崎重工技報, 182 号, 2020 年
- 2) NEDO ニュースリリース, 「世界初, 市街地で水素 100% による熱電供給を達成」 <https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100945.html> (2018 年 4 月 20 日)

- 3) NEDO ニュースリリース, 「世界初, ドライ低 NOx 水素専焼ガスタービンの技術実証試験に成功」 <https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html> (2020 年 7 月 21 日)
- 4) コージェネ財団, <https://www.ace.or.jp/web/gp/gp_2021.html> (2022 年 1 月 28 日)

【筆者紹介】

堂浦 康司 (どううら やすし)

川崎重工(株)

エネルギーソリューション & マリンカンパニー

エネルギーディビジョン

エネルギーシステム総括部

ガスタービン技術部



中安 稔 (なかやすみのる)

川崎重工(株)

エネルギーソリューション & マリンカンパニー

エネルギーディビジョン

エネルギーシステム総括部

発電プロジェクト部

営業技術一課



岡 伸幸 (おか のぶゆき)

川崎重工(株)

エネルギーソリューション & マリンカンパニー

エネルギーディビジョン

エネルギーシステム総括部

発電プロジェクト部

営業技術一課

