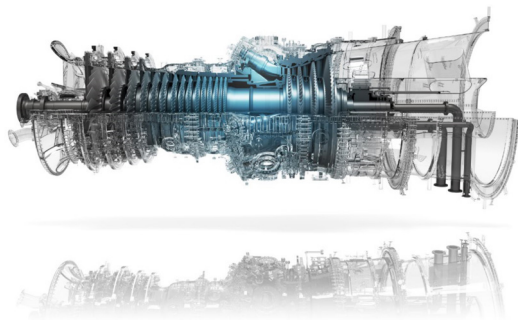


CO₂フリー社会の実現に向けた水素燃焼ガスタービン

Hydrogen Fired Gas Turbine for the Realization of a CO₂-free Society

野 勢 正 和 *¹

Masakazu Nose

荒 木 秀 文 *³

Hidefumi Araki

谷 村 聡 *⁵

Satoshi Tanimura

川 上 朋 *²

Tomo Kawakami

仙 波 範 明 *⁴

Noriaki Senba

ガスタービン複合発電(以下, GTCC)はそのクリーンかつ高効率な特性から, 現在, 発電に占める割合が大きくなっている。そのため CO₂ フリー社会の実現には, 発電用大型ガスタービンにおける水素の大規模利用が重要である。三菱重工グループでは, 天然ガスと水素の混焼方式と水素専焼方式の大型ガスタービンの開発を進めており, 現在, 水素 30vol%の混焼試験に成功している。さらに, 水素のエネルギーキャリアの一つとして有望なアンモニアの GTCC での利用についても研究を開始した。また, ヨーロッパにおける GTCC プラントの水素焚き転換プロジェクトにも参画している。これらの活動を通して, 三菱日立パワーシステムズ(株)(以下, 当社)は水素の供給・輸送・貯蔵に関する国際的な水素サプライチェーン構築を牽引し, 水素社会の実現に貢献していく。

1. はじめに

1980 年代からの電力需要の急激な増加に対応するために, 燃料に天然ガス/LNG(Liquefied Natural Gas:液化天然ガス)を用いた GTCC が注目され, これまで大容量・高効率化が進められてきた。GTCCは化石燃料を使用する火力発電方式の中で最もクリーン, かつ高効率な設備である。日本の一次エネルギーの主な変換先は電力で, 全体の実に 43%を占める。その中で, 火力発電による電力供給割合は85%にも及ぶ(2015年現在)。このため GTCC は, 今後も旺盛なエネルギー需要に対応する一方で, 資源の有効利用や低炭素社会の実現のために, より一層の CO₂ 削減が求められている。

日本では低炭素社会に向けた水素基本戦略として, 2030 年頃に水素発電の商用化を目指すことを掲げている。この先 10 年余りの短期間での商用化(技術開発から電力事業者への設備導入)をより現実的に進めるため, 当社では, 既存のガスタービン設備を使い水素発電ができるシステムを考案した。このシステムは, ガスタービン用燃焼器以外の発電設備の大規模なリニューアルを必要としない。そのため, 水素転換へのコストのハードルを下げ, 水素社会へのスムーズなシフトを促すことが期待される。現在, 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)にご支援をいただき, 発電用大型ガスタービンにおいて, 燃料の LNG に水素を 30%混ぜて使用することができる燃焼器の開発に成功した。水素の燃焼により懸念される NO_x の排出も, 従来レベルに抑制できる。70 万 kW 相当(タービン入口の温度 1600℃の GTCC)の出力に対

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 主席技師 博士 工学

*2 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 主席チーム統括

*3 三菱日立パワーシステムズ(株) エンジニアリング本部プロジェクト総括部電力計画部 主席技師 博士 工学

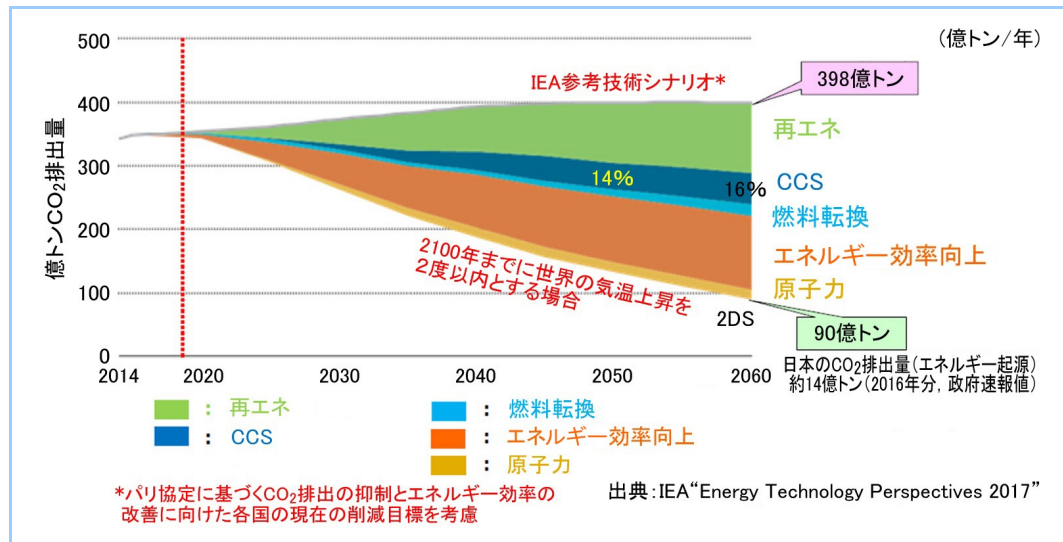
*4 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 グループ長

*5 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部 GT 技術総括部大型ガスタービン技術部 主幹技師

応できる技術で、従来の GTCC と比較し、発電時の CO₂ 排出を約 10% 削減できる。これは、水素社会構築のための大きな一歩である。本報では、水素燃焼ガスタービンを軸とした、当社の水素社会実現に向けた取組みを紹介する。

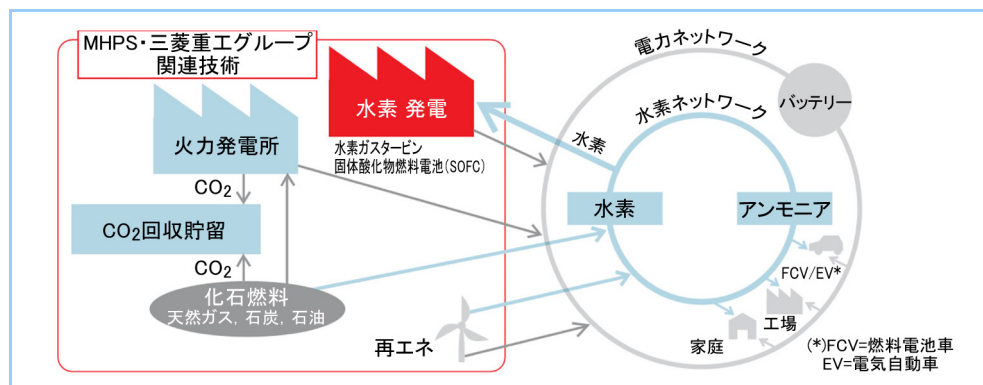
2. 発電用大型ガスタービンと水素社会

国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)で採択された“パリ協定”の温室効果ガス削減目標達成に向けた取組みが世界各国で始まり、再生可能エネルギー(以下、再エネ)の導入が加速している。図1⁽¹⁾に IEA (国際エネルギー機関) の報告書における、現在から 2060 年までの世界の累計 CO₂ 削減量の見通しを示す。再エネの利用による CO₂ 削減量を全体の約 3 割と見込んでいる。



風力、太陽光、水力などの再エネによる発電は、気候・気象条件、昼夜などの時間帯によって発電量が変動することや、世界の各地域で発電量が偏在していることから、効率よく電力を利用するために送電システムの柔軟性と安定性が求められる。一方で、再エネを水素に変換し貯蔵・輸送して利用することが、エネルギーの変動に対して有効であると考えられており、再エネの大規模発電地域から離れた日本においても水素のサプライチェーンの構築とそれに関わる技術開発が重要かつ、急務とされる。

また、先の報告書⁽¹⁾では、天然ガスをはじめとする化石燃料の改質により製造される水素の利用が 2030 年頃から増え始め、2050 年までの累積 CO₂ 削減量の 14% を担うことが見込まれている。製造時に大量に発生する CO₂ を回収して地中に貯留する Carbon dioxide Capture and Storage (CCS) と合わせて、再エネ主体に移行する過渡期においては、化石燃料の改質と CCS との組み合わせから製造される水素の利用技術も必要となる。



当社は、図2に示すように、これら再エネ由来/化石燃料由来の水素を最大活用し、強みの発電製品を水素バリューチェーンに適用することに取り組んでいる。その中で発電用大型ガスタービンは、高効率で発電できるだけでなく、低純度な水素（製造コスト・技術のハードルが比較的低い）が利用可能であり、大量かつ安定的な水素需要を生む。水素社会に向けて、インフラの拡充、多様な利用方法を含んだ水素利用ビジョンが示される中で当社の発電用大型ガスタービンの果たす役割は、今後より一層大きくなるものと考えられる。

3. 水素ガスタービン用燃焼器

発電用大型ガスタービンは、これまで高効率化を図るために、タービン入口温度（燃焼温度）を上昇させながら開発が進められた。燃焼温度の上昇により指数関数的に増加するNOx 排出量に対応するため、当社の発電用大型ガスタービンに搭載される Dry Low NOx (DLN) 燃焼器は予混合燃焼方式が採用されている。

予混合燃焼方式では燃料と空気をあらかじめ混合して燃焼器内に投入する。従来の拡散燃焼方式に比べて火炎温度を均一にできるため、NOx低減用の蒸気や水噴射が不要で、サイクル効率の低下も生じない。一方で、安定燃焼範囲が狭く、燃焼振動や逆火（フラッシュバック）の発生リスクがあり、未燃分も排出しやすい傾向がある。

天然ガスと水素を混焼、あるいは水素専焼させた場合、燃料成分の変化により火炎の性質が変化する。水素は天然ガスと比較して燃焼速度が高いため、天然ガスのみを燃焼させた場合と比較して、逆火現象の発生リスクが高くなる。したがって、水素ガスタービン用の燃焼器は逆火発生の防止に向けた改良を中心に、低NOx 化や安定燃焼化を図り、商品性の向上（低コスト、長寿命等）と合わせて開発・実用化する必要がある。

以下に、当社の水素混焼・専焼に対応する水素ガスタービン用燃焼器の開発状況について述べるとともに、図3にそれらの概要を示す。

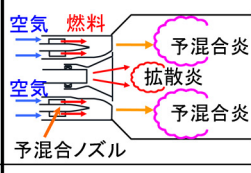
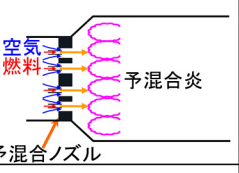
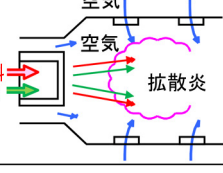
燃焼器	マルチノズル燃焼器	マルチクラスタ燃焼器	拡散燃焼器
燃焼方式	予混合燃焼方式	予混合燃焼方式	拡散燃焼方式
構造			
NOx	予混合ノズルにより火炎温度は均一にできるため、NOxは低い	小さな予混合ノズルにより火炎温度を均一にできるため、NOxは低い	燃料と空気を別々に噴射する。火炎温度が高い領域ができ、NOxが高くなる
フラッシュバック	火炎伝搬可能な領域が広く、水素専焼時にリスクが高くなる	火炎伝搬可能な領域が狭く、リスクは少ない	予混合方式のような予混合部を持たないためリスクはない
サイクル効率	蒸気・水噴射しないため効率低下なし	蒸気・水噴射しないため効率低下なし	NOx低減のため、蒸気・水を噴射し、効率が低下する
水素混焼比率	～ 30 vol%	～ 100 vol%（開発中）	～ 100 vol%

図3 当社の水素ガスタービン用燃焼器

(1) 水素混焼用 Dry Low NOx (DLN) マルチノズル燃焼器

水素混焼による逆火発生リスクの上昇を防ぐことを目的として、従来の DLN 燃焼器をベースとして新たに開発した水素混焼用燃焼器の概要を図4に示す。燃焼器内部に圧縮器から供給された空気は、旋回翼（スワラー）を通過することで、旋回流となる。燃料は、スワラーの翼表面に設けられた小さな孔より供給され、旋回流の効果で急速に周囲の空気と混合される。一方、旋回流の中心部（以下渦芯）には、流速の低い領域が存在することが明らかとなっている。旋

回流中での逆火現象は、この渦芯に存在する流速の遅い部分を火炎が遡上することで発生すると考えられる。新型燃焼器では渦芯の流速を上昇させるため、ノズルの先端から空気を噴射することを特徴としている。噴射された空気は、渦芯の低流速領域を補い、逆火の発生を防止する。

フルスケールの新型燃焼器1缶を使用した実機圧力下での燃焼試験を実施した結果、水素30vol%を混合した条件においても NO_x は運用可能な範囲内にあり、逆火の発生や燃焼振動の著しい上昇を伴わずに運用できる目途を得た。

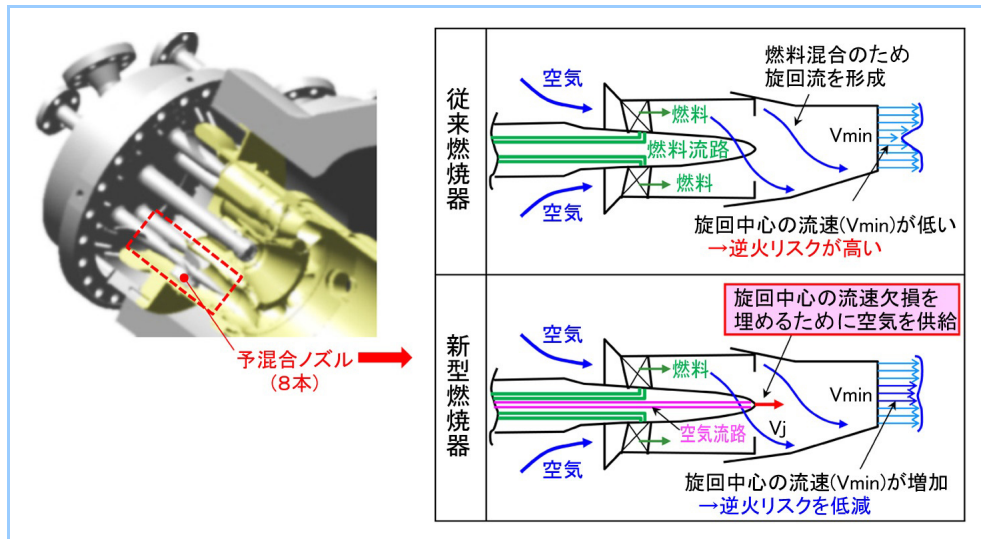


図4 水素混焼用新型燃焼器の概要

(2) 水素専焼用マルチクラスタ燃焼器(図5)

水素がさらに高濃度になれば、逆火のリスクは高まる。水素混焼 DLN 燃焼器のように旋回流を使って燃料と空気を混合させるには比較的大きな空間が必要であり、逆火のリスクが高くなるため、狭い空間で短時間に混合させる必要がある。そこで、火炎を分散し、より細かく、小さく燃料を吹き出す混合方式を考えた。従来の DLN 燃焼器の燃料供給ノズル(8本)に対して、より数多くのノズルを有する図5のマルチクラスタ燃焼器をベースとして、1本のノズルの孔を小さくし、空気を送るとともに、そこに水素を吹いて混合させる方式を採用した。旋回流を利用せず、より小さなスケールで空気と水素を混合でき、高い逆火耐性と低 NO_x 燃焼が両立する可能性を有しており、現在、燃料ノズル構造の基礎検討を進めている。

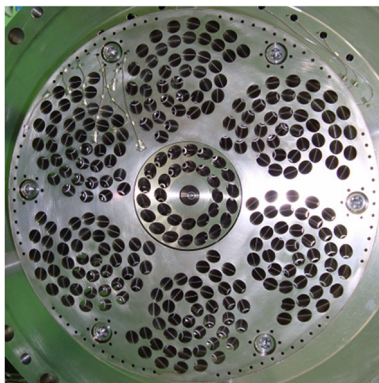


図5 マルチクラスタ燃焼器(開発中)



図6 拡散燃焼器

(3) 拡散燃焼器

拡散燃焼器は、燃料と燃焼用空気を別々に燃焼器内に噴射する。予混合燃焼方式に比べて火炎温度が高い領域ができやすく NO_x 発生量が増えるため、蒸気・水噴射による NO_x 低減対策が必要になる。一方で、比較的、安定燃焼範囲が広く、燃料性状変動への許容範囲も大

さい。

当社の拡散燃焼器を図6に示す。これまで、小型から中型のガスタービン発電設備においてオフガス(製油プラント等で発生する排ガス)の燃料利用により幅広い水素含有割合(～90vol%)の燃料に関する実績を有するとともに、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発(World Energy NET WORK(WE-NET))プロジェクトへの参画の際に、水素専焼による燃焼試験にも成功している。

4. アンモニア分解 GTCC

発電用大型ガスタービンで必要となる大量の水素を安定に利用可能とするためには、水素の製造・運搬・貯蔵等を担うサプライチェーンが構築されることが前提になる。水素の運搬・貯蔵に関しては、水素を液化して運搬・貯蔵する方法だけでなく、アンモニアや有機ハイドライド等のエネルギーキャリアを活用することが水素基本戦略⁽²⁾で提示されている。

当社は、2017年度から内閣府SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)に参画して、アンモニアをエネルギーキャリアとしたガスタービンシステムの検討を実施している。アンモニアは、液化水素の1.5倍の体積水素密度を有しており、液化石油ガスなどの既存の運搬・貯蔵インフラを転用可能である等の特徴がある。同プログラムでは、アンモニアを燃料としてマイクロガスタービン⁽³⁾及び小型ガスタービンで直接燃焼させる研究がなされているが、大型ガスタービンに適用するには表1に示す課題がある。そこで当社では、図7に示すように、アンモニアを熱分解して水素に変換し、ガスタービンで燃焼させるシステムを検討している。分解反応を起こすためには、アンモニアを触媒接触下で高温に加熱しつつ、原料アンモニア1モルあたり46 kJ/molの反応熱の投入が必要となるが、この反応熱は生成する水素の発熱量増加(化学再生)になるため、原理的な効率低下はない。原料アンモニアを分解させる際に残留する微量の残留アンモニアが燃焼器でのNO_x生成の原因となるため、残留アンモニアの量を低減できる分解装置の機器構成、分解触媒の選定等を同プログラムで進めている。

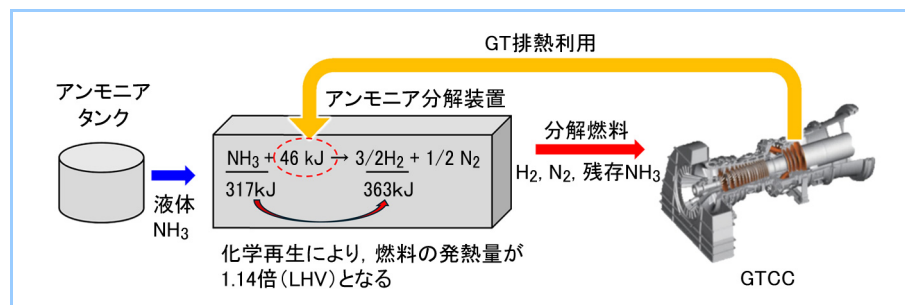


図7 アンモニア分解ガスタービンサイクルの概念

表1 アンモニア燃焼の特徴と大型ガスタービンにおける考慮事項

アンモニア燃焼の特徴	大型ガスタービンにおける考慮事項
燃焼速度が遅い(メタンの約 1/5 ⁽³⁾)	- 燃焼完了に必要な時間を確保するため、燃焼器のサイズが大きくなる。 - 大型ガスタービンは多缶式燃焼器のため燃焼器のサイズ拡大に制約あり。
燃料中に窒素を含む	- Fuel NO_xが発生するが、大型ガスタービンは Thermal NO_xが許容する範囲で燃焼ガス温度を高温化しており、Fuel NO_xを許容する余地は少ない。 - 二段燃焼による低 NO_x化が考えられるが、大型ガスタービンの場合、燃焼器の大型化や複雑化など技術課題が多い。

本システムには表2に示すように、高効率かつ大容量な GTCC システムに対して比較的少ない改造で適用できる特徴があり、CO₂フリーアンモニアを用いることにより、大量の CO₂削減に寄与することができる。本システムを適用することにより、現在開発中のガスタービン用水素燃焼器を

活用できるだけでなく、開発したアンモニア分解装置は汎用的な水素サプライチェーンの構成機器として活用することが可能となる。

表2 アンモニア分解ガスタービンシステムの特徴

項目	特徴
高効率	- アンモニア分解反応に必要な熱は、生成する水素の発熱量増加(化学再生)に使われるため、原理的な効率低下は無い。 - 高効率の GTCC との組み合わせにより全体効率が低いシステムを構築可能。
導入性	主要な開発機器はアンモニア分解装置であり、ガスタービン側は水素燃焼器など比較的少ない改造で適用可能。
柔軟性	アンモニア分解水素の専焼、天然ガスとの混焼など、水素燃焼器の仕様の変更により、インフラの構築状況、立地条件に応じたシステム構築が可能。
CO ₂ 削減効果	GTCC 出力 500MW、設備利用率 70%、アンモニア分解燃料 100%利用の場合、年間 80 万トンの CO ₂ 排出削減可能。
発展性	アンモニア分解装置で必要となる熱源はガスタービン排熱に限定されるものでなく、汎用的な水素サプライチェーンの構成機器として活用可能。

5. 海外プロジェクトにおける取組み

海外では、例えば、化石燃料由来の水素製造時に発生する CO₂ を CCS によって処理するシステムなど、水素供給の段階から輸送、貯蔵そして利用までを視野に入れた包括的な水素利用プランが示されている。特にヨーロッパでは既存の天然ガスパイプラインが発達しているという利点もあり、国境を越えた総合インフラとして、水素活用のプロジェクトが進められている。

当社は、その中で、オランダのエネルギー企業であるヌオン社(N.V. Nuon)が運営する出力 132 万 kW 級の天然ガス焚きガスタービン複合発電(GTCC)を水素焚きに転換するプロジェクトに参画している。同プロジェクトは、図8に示すオランダ最北部のフローニンゲン(Groningen)州に位置するヌオン・マグナム(Nuon Magnum)発電所に、当社が納入した M701F 形ガスタービンを中核とする発電設備3系列のうち1系列を 2023 年までに 100%水素専焼の発電設備へと切り替えるものであり、これまでに初期フィージビリティスタディー(FS:実現可能性調査)を実施した。既存技術である拡散燃焼器の適用を検討し、水素燃焼への転換が可能であることを確認した。天然ガス焚きでは 44 万 kW の GTCC 発電設備1系列につき年間約 130 万トンの CO₂ を排出するが、水素焚きへの転換によりそのほとんどを削減することができる。当社は引き続きガスタービン技術領域での FS を担当し、具体的な改造範囲の計画等、同プロジェクトの実現に向けて協力を続ける。



図8 オランダのヌオン・マグナム発電所

6. まとめ

本報の第3章に記載した内容は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の“水素社会構築技術開発事業”の成果の一部である。同助成事業において水素・天然ガス混焼方式のガスタービンの燃焼器の開発に取り組み、30vol%の混焼条件においてガスタービンの運転が可能な目途を得た。引き続き、水素専焼方式の開発を進めている。

また、本報の第4章に記載した内容は、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)“エネルギーキャリア”(管理法人:JST)の成果の一部である。同研究により、水素のエネルギーキャリアの一つとして有望なアンモニアを利用したアンモニア分解 GTCC システムの開発を開始した。

2050 年の再エネによる世界的な CO₂ フリーの水素社会に向けて、また、その移行期における CCS を組み合わせた化石燃料由来の水素利用において、当社の水素燃焼ガスタービンの果たす役割は大きい。今後も、大量かつ安定的な水素需要を生む水素発電で、国際的な水素サプライチェーンの構築を牽引し、CO₂ フリーの水素社会に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 経済産業省, CCS を取り巻く状況 CCS の実証および調査事業の在り方に向けた有識者検討会
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs_jissho/pdf/001_05_00.pdf
- (2) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 水素基本戦略, (2017)
<http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>
- (3) 壹岐典彦ほか, ガスタービンにおけるアンモニア燃焼利用, 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会(酒田)講演論文集 C-12 (2016.10) p.259~264