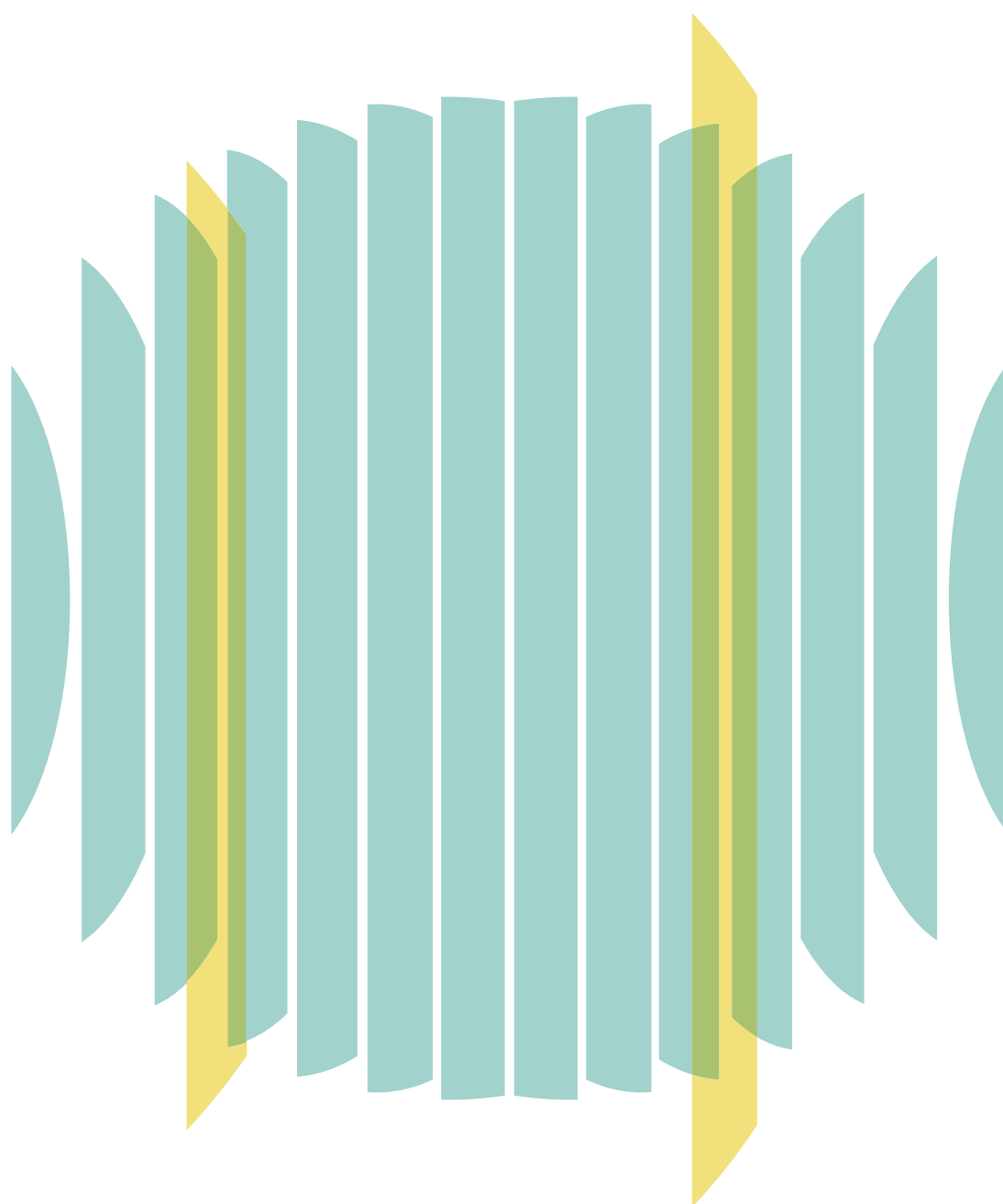


# 季報 エネルギー総合工学

Vol. 43 No. 4 2021. 1



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所  
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

# 目 次

## 【調査研究報告】

わが国における運輸部門のCO<sub>2</sub>排出削減に対する

バイオエタノール導入の効果

プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員 森山 亮  
日本環境エネルギー開発(株) 代表取締役社長 澤 一誠 …………… 1

## 【調査研究報告】

WNN ニュースから見た世界の原子力動向と

米国の原子力産業復活の国家戦略・支援策

原子力技術センター 参事 藤井 貞夫  
原子力技術センター 部長 主席研究員 都筑 和泰 …………… 10

## 【調査研究報告】

新型コロナウイルス感染症の原子力への影響と今後の原子力の役割

原子力技術センター 研究員 高野 大志 …………… 21

## 【調査研究報告】

水素燃焼タービン発電技術と世界の開発動向

プロジェクト試験研究部 主管研究員 松本 俊一 …………… 27

## 【寄稿】

大規模水素サプライチェーンの国際実証

千代田化工建設(株) 理事  
フロンティアビジネス本部 兼 地球環境プロジェクト事業本部長補佐 安井 誠 …………… 43

## 【寄稿】

国際水素サプライチェーンの構築に向けた取組み

川崎重工業(株) 技術開発本部  
水素チェーン開発センター プロジェクト推進部 部長 新道 憲二郎 …………… 52

【研究所のうごき】 …………… 62

【編集後記】 …………… 65

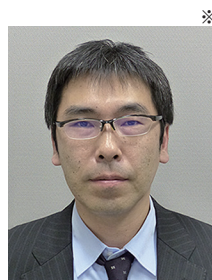


## [調査研究報告]

# わが国における運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出削減に対する バイオエタノール導入の効果

森山 亮 ※ (プロジェクト試験研究部部長  
副主席研究員)

澤 一誠 ※※ (日本環境エネルギー開発㈱  
代表取締役社長)



## 1. はじめに

気候変動問題は、先進国、開発途上国を問わず、国境を越えて人間の安全保障を脅かす喫緊の課題であり、その要因である温室効果ガス（GHG）の排出を削減するための取組み強化が急務となっている。

わが国においても 2020 年 10 月 26 日の菅内閣総理大臣所信表明演説において 2050 年までに、GHG の排出を全体としてゼロにすることが宣言された。

GHG はさまざまな社会経済活動に伴って排出されるが、その 8 割以上が化石燃料の燃焼で発生・排出されるエネルギー起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）である。2018 年度におけるわが国の最終エネルギー消費を見ると、排出量が多い順に、産業部門（46.6%）、運輸部門（23.4%）、業務他部門（16.1%）、家庭部門（14.0%）となっている<sup>(1)</sup>。

GHG 排出を全体としてゼロにするには、産業部門、業務部門のみならずインパクトの大

きな運輸部門での GHG 排出削減の取組みが求められるが、本報告では、次世代自動車の導入施策について解説し、次章で述べる 2030 年の政府目標を達成するための液体燃料としてのバイオエタノールの導入による寄与について述べる。

## 2. 排出削減目標

わが国は、地球温暖化対策推進本部の「日本の約束草案」<sup>(2)</sup>において、2030 年度の温室効果ガスを 2013 年度比で 26% 削減する目標を立てている。その達成のために運輸部門においては、表 1 に示すように、エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量を 2 億 2,500 万 t-CO<sub>2</sub>/年(2013 年度)から 1 億 6,300 万 t-CO<sub>2</sub>/年(2030 年度)へと 6,200 万 t-CO<sub>2</sub>/年削減することを目標としている。

約束草案では運輸部門における「温室効果ガス削減目標積み上げの基礎となった対策」として、燃費改善、次世代自動車の普及、バイオ燃料の供給体制整備促進を提示している。

表 1 エネルギー起源二酸化炭素の各部門排出量の目安<sup>(2)</sup>

|                        | (単位:百万t-CO <sub>2</sub> /年) |                       |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
|                        | 2030年度の<br>排出量の目安           | 排出量<br>2013年度(2005年度) |
| エネルギー起源CO <sub>2</sub> | 927                         | 1,235 (1,219)         |
| 産業部門                   | 401                         | 429 (457)             |
| 業務他部門                  | 168                         | 279 (239)             |
| 家庭部門                   | 122                         | 201 (180)             |
| 運輸部門                   | 163                         | 225 (240)             |
| エネルギー転換部門              | 73                          | 101 (104)             |

本報告では、CO<sub>2</sub> 排出削減対策の観点から、①従来車の燃費改善、②次世代自動車（EV、PHV、HV、FCV）の新規導入、③バイオエタノールの導入という3つのシナリオの政策効果を定量的に分析・比較する。

2016年5月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」<sup>(3)</sup>では日本の約束草案を達成するための具体的な対策が示されており、各対策による排出削減見込量も定量的に示されている。表2に次世代自動車の普及および燃費改善による対策評価の指標と排出削減見込量を2017年度までの実績とともに示す。

2017年度を基準とした2030年度におけるCO<sub>2</sub>削減目標は、2,089万t-CO<sub>2</sub>と計算された。なお、これまでの実績を見ると、次世代自動車の販売割合は2020年度の目標範囲に入っているものの、伸びが鈍化している。

### 3. 次世代自動車の導入シナリオとCO<sub>2</sub>排出削減効果

次に2030年度における自動車の保有台数と次世代自動車の内訳を推算する。（一社）自動

車検査登録情報協会<sup>(5)</sup>によると、2020年3月末時点におけるわが国の乗用車保有台数は6,180万台で、この10年を平均すると0.63%ずつ微増する傾向にある。本検討では、この傾向が2030年まで続くと仮定し、2030年の自動車保有台数を6,500万台程度と計算した。政府による次世代自動車の導入目標は表2に示した通り2020年度と2030年における数値が定められている。車種別の導入目標は経済産業省の「次世代自動車戦略2010」<sup>(6)</sup>や「自動車産業戦略2014」<sup>(7)</sup>に記載されており、表3に示したように、それぞれメーカーが燃費改善、次世代自動車開発等に最大限の努力を行った場合の「民間努力ケース」および「政府目標」として示されている。

本検討では表3に示した販売台数についての数値に加え、（一社）次世代自動車振興センター<sup>(8)</sup>が示した近年の実績を参考に、2030年度における次世代自動車の保有台数を推算した。なお、導入目標の数値にも幅があるため、推算にあたっては次世代自動車の普及台数を実績を元に保守的に見積もったケース（以下、基本ケース）と政府目標を元に最大限の普及

表2 2030年度に向けた対策評価指標および効果の目標と実績（次世代自動車の普及、燃費改善）<sup>(4)</sup>

|     |        | 新車販売台数に占める次世代自動車の割合(%) | 平均保有燃費(km/ℓ) | 省エネ見込量(万kℓ) | 2013年度基準排出削減見込量(万t-CO <sub>2</sub> ) | 2017年度基準排出削減見込量(万t-CO <sub>2</sub> ) |
|-----|--------|------------------------|--------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 実 績 | 2013年度 | 23.2                   | 14.7         | 19.9        | 53.3                                 | —                                    |
|     | 2014年度 | 25.6                   | 15.3         | 49.2        | 131.5                                | —                                    |
|     | 2015年度 | 32.3                   | 16           | 85.1        | 227.5                                | —                                    |
|     | 2016年度 | 35.8                   | 16.6         | 89.7        | 239.8                                | —                                    |
|     | 2017年度 | 36.7                   | 17.2         | 128.6       | 343.0                                | 0                                    |
| 目 標 | 2020年度 | 20～50                  | 18.5         | 283.4       | 702.5                                | 412.8                                |
|     | 2030年度 | 50～70                  | 24.8         | 938.9       | 2,379                                | 2,089                                |

表3 2020年および2030年の乗用車車種別普及目標（新車販売に占める割合）<sup>(6) (7)</sup>

| 車種※    | 民間努力ケース |        | 政府目標   |        |
|--------|---------|--------|--------|--------|
|        | 2020年   | 2030年  | 2020年  | 2030年  |
| 従来車    | 80%以上   | 60～70% | 50～80% | 30～50% |
| 次世代自動車 | 20%未満   | 30～40% | 50～70% | 50～70% |
| HV     | 10～15%  | 20～30% | 20～30% | 30～40% |
| EV・PHV | 5～10%   | 10～20% | 15～20% | 20～30% |
| FCV    | 僅か      | 1%     | ～1%    | ～3%    |

※HV:ハイブリッド車 EV:電気自動車 PHV:プラグインハイブリッド車 FCV:燃料電池車

を想定したケース(以下、最大ケース)の2ケースを検討した。

なお、両ケースにおいて以下を共通の前提条件とした。

- 全乗用車の新車販売台数は、2018年度の436万台(4,363,608台)<sup>(9)</sup>が2030年度まで横ばいで推移する。
- 計算の単純化のため、EVとPHVの保有台数を等しくする。(EV等保有台数統計の実績<sup>(8)</sup>では2013～2019年度のEVとPHVの保有台数および新車販売台数が同程度)
- 従来車の台数は2030年における自動車保有台数6,500万台から次世代自動車の保有台数を引いた分とする。

(1) 基本ケースにおける乗用車車種別保有台数の推算

基本ケースの2030年度における次世代自動車の保有台数は以下の通り推算した。

EVとPHVの合計の保有台数は(一社)次世代自動車振興センター<sup>(8)</sup>において示されている2013～2018年度の実績の保有台数推移から、毎年22.7%の伸びが続くと仮定し、2030年度に273万台になると推算した。これは乗用車全体の4.2%となる。

HVの保有台数は同じく(一社)次世代自動車振興センター<sup>(8)</sup>において示されている2013～2018年度の実績の保有台数推移から、毎年約113万台の増加が続くと仮定し、2030年度に2,297万台になると推算した。これは乗用車全体の35.3%に相当する。

FCVの新車販売台数に占める割合は、2018年度の実績値0.0138%から2030年度に民間努力ケースの1%まで直線的に増加すると見込

み、保有台数は2030年度に約28万台になると推算した。これは乗用車全体の0.43%に相当する。

(2) 最大ケースにおける乗用車車種別保有台数の推算

最大ケースの2030年度における次世代自動車の保有台数は以下の通り推算した。

EVとPHVの合計の新車販売台数に占める割合が2018年度実績の1%から2030年度に20%(政府目標の最小値)まで直線的に増加すると仮定し、累積の販売台数と2017年度末の保有台数を合計することによってEVとPHVの合計の保有台数が2030年度に約827万台になると推算した。これは乗用車全体の12.7%に相当する。

HVの新車販売台数に占める割合が2018年度実績の33.3%から2030年度に40%(政府目標の最大値)まで直線的に増加すると見込み、保有台数は2030年度に約2,672万台になると推算した。これは乗用車全体の41.1%に相当する。

FCVの新車販売台数に占める割合は、2018年度の実績値0.0138%から2030年度に政府目標の3%まで直線的に増加すると見込む。保有台数は2030年度に約83万台になると推算した。これは乗用車全体の1.27%に相当する。

表4に車種別の保有台数について2017年度の実績および2030年度の基本ケースと最大ケースの推算結果を示す。

(3) CO<sub>2</sub>排出削減効果の推算

次世代自動車の普及によるCO<sub>2</sub>の排出削減

表4 従来車および次世代自動車の保有台数推算結果

(単位:万台)

| 車種  | 2017年度<br>(実績) | 2030年度 |       |
|-----|----------------|--------|-------|
|     |                | 基本ケース  | 最大ケース |
| 従来車 | 5,319          | 3,902  | 2,918 |
| HV  | 818            | 2,297  | 2,672 |
| EV  | 10             | 137    | 414   |
| PHV | 10             | 137    | 414   |
| FCV | 0              | 28     | 83    |
| 合計  | 6,158          | 6,500  | 6,500 |

効果は従来車と次世代自動車のCO<sub>2</sub>排出量の差を代替した台数に乗じて算出した。

また、燃費改善によるCO<sub>2</sub>の排出削減効果は現状の燃費と2030年度の燃費目標値の差分を2030年度における従来車の台数に乗じて算出した。

計算に用いた主な原単位は表5の通りである。上記手順によって算出した従来車の燃費改善および次世代自動車の普及によるCO<sub>2</sub>排出削減効果の推算結果を政府目標値と比較して表6に示す。

以上のシナリオに基づいた推算結果から、従来車の燃費改善および次世代自動車の普及による対策では政府目標を達成するには不十分であり、例として以下のような、さらなる対策が必要となることが分かる。

- 次世代自動車を最大ケースよりも更に導入する。
- 乗用車全体の保有台数を減らす。
- バイオ燃料を導入・普及することにより燃料のCO<sub>2</sub>排出係数を低減する。

次世代自動車のさらなる導入には議論の余地があると考えられるが、乗用車全体の保有

台数については人々の利便性を低下させることにもなる。

以降、本検討では上記推算結果に対し、乗用車の燃料としてバイオエタノールを導入したときの効果と目標達成への寄与を検討する。

#### 4. バイオエタノールの導入によるCO<sub>2</sub>排出削減効果の推算

本検討ではガソリンにバイオエタノールを体積比で10%混合したE10ガソリンの効果を検証した。

バイオエタノールのCO<sub>2</sub>排出係数は「日本の約束草案」および「地球温暖化対策計画」の取り扱いに合わせ、自動車用燃料の燃焼時（走行時）のみの非LCAベースの排出係数を用い、ゼロとした。環境省の「地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン」<sup>(10)</sup>においても「バイオエタノールは、再生可能なバイオマス燃料であることから、京都議定書の定義において燃焼に伴う二酸化炭素排出量がカウントされない。」と定められている。

表5 CO<sub>2</sub>排出削減効果の推算に用いたパラメーター

| パラメーター                  | 数値    | 単位                                 |
|-------------------------|-------|------------------------------------|
| 電力のCO <sub>2</sub> 排出係数 | 370   | g-CO <sub>2</sub> /kWh             |
| 燃料のCO <sub>2</sub> 排出係数 | 2,320 | g-CO <sub>2</sub> /ℓ               |
| 水素のCO <sub>2</sub> 排出係数 | 550   | g-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> |
| 乗用車の年間走行距離(共通)          | 8,480 | km/年・台                             |
| 従来車の燃費                  | 19.2  | km/ℓ                               |
| 従来車の改善後の燃費              | 22.9ℓ | km/ℓ                               |
| EVの燃費                   | 7.75  | km/kWh                             |
| HVの燃費                   | 29.7  | km/ℓ                               |
| PHVの走行距離当たり電力消費量        | 9.62  | km/kWh                             |
| PHVの燃費                  | 28.3  | km/ℓ                               |
| PHVの電気による走行割合           | 9.2   | %                                  |
| FCVの走行距離当たり水素消費量        | 127   | km/kg                              |

表6 次世代自動車の普及および燃費改善によるCO<sub>2</sub>排出削減効果の推算結果

(単位: 万t-CO<sub>2</sub>/年)

|                   | 基本ケース | 最大ケース |
|-------------------|-------|-------|
| ① 目標値             | 2,089 |       |
| ② 従来車の燃費改善        | 642   | 480   |
| ③ 次世代自動車の普及拡大     | HV    | 832   |
|                   | EV    | 85    |
|                   | PHV   | 50    |
|                   | FCV   | 17    |
| ④ 対策による効果の合計(②+③) | 1,626 | 1,906 |
| ⑤ 目標値との乖離(①-④)    | 464   | 183   |



表7 バイオエタノールの導入による CO<sub>2</sub> 排出削減効果の推算結果

(単位:万t-CO<sub>2</sub>/年)

|                   | 基本ケース |         |       | 最大ケース<br>(全数の約5割にE10を導入) |         |       |
|-------------------|-------|---------|-------|--------------------------|---------|-------|
|                   | 表6より  | E10導入効果 | 合算結果  | 表6より                     | E10導入効果 | 合算結果  |
| ① 目標値             | 2,089 |         |       | 2,089                    |         |       |
| ② 従来車の燃費改善        | 642   | +289    | 931   | 480                      | +109    | 589   |
| ③ 次世代自動車の普及拡大     | HV    | 832     | +110  | 942                      | +65     | 1,033 |
|                   | EV    | 85      | →     | 256                      | →       | 256   |
|                   | PHV   | 50      | +6    | 151                      | +10     | 161   |
|                   | FCV   | 17      | →     | 51                       | →       | 51    |
| ④ 対策による効果の合計(②+③) | 1,626 | +406    | 2,031 | 1,906                    | +183    | 2,089 |
| ⑤ 目標値との乖離(①-④)    | 464   | →       | 58    | 183                      | →       | 0     |

以上のパラメータを用いて算出したバイオエタノールの導入による CO<sub>2</sub> 排出削減効果の推算結果を表 6 の結果に加えて表 7 に整理する。

基本ケースの場合、従来車、HV および PHV で消費されるガソリンをすべて E10 ガソリンに置き換えることによって、政府の目標値達成にかなり近くなることが分かる。一方、最大ケースの場合は次世代自動車の導入が進むため、ガソリン全数の約 5 割を E10 で代替することによって政府目標を達成できることがわかった。

なお、これらの試算結果で導入したバイオエタノールの量を求めると、基本ケースにおいて約 250 万kl（原油換算で約 150 万kl）、最大ケースにおいて約 110 万kl（原油換算で約 70 万kl）となった。

以上の通り、2030 年時点では燃費改善および次世代自動車の普及による対策のみでは乗用車の CO<sub>2</sub> 排出削減目標を達成することは困難であり、追加施策としてバイオエタノール

を導入した E10 ガソリンの利用が有効であることがわかった。

以降、バイオエタノール導入の現状と課題について述べる。

## 5. バイオエタノール利活用状況

気候変動対策の 1 つとして導入されつつあるバイオエタノールはアメリカとブラジルで世界の生産量の内、8 割以上を占めている。バイオエタノールを自動車用燃料として見ると、未だにガソリン価格と比較してコストが高く、ほとんどの国では導入義務やガソリン税の免除など政策誘導でバイオエタノールが導入されている。図 1 に各国のバイオエタノールの導入義務量や流通している混合ガソリンの状況を示す。

2018 年の世界のバイオエタノール消費量は 1 億 1,200 万kl で約 6 兆円の市場規模となって

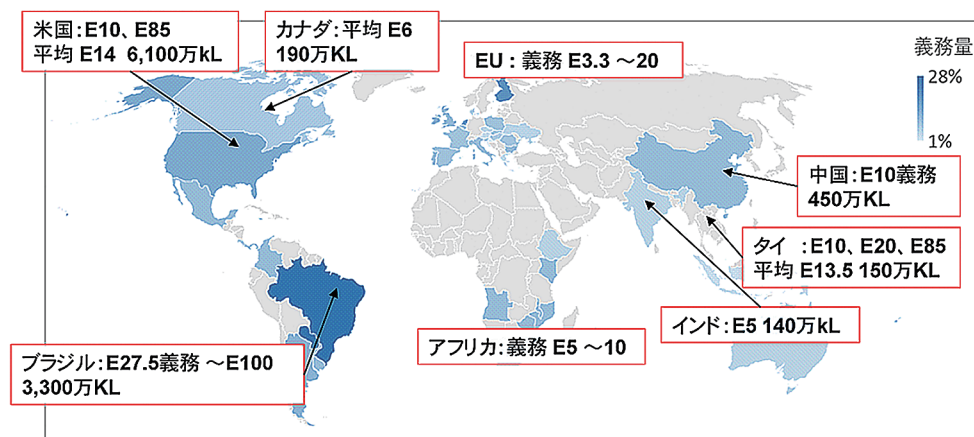


図1 世界のバイオエタノール導入義務および流通している混合ガソリン<sup>(11) (12)</sup>

いる。図1を見ると、南北アメリカの国々では概ね E10 以上のバイオエタノール混合ガソリンが流通しており、ブラジルが E27.5 の導入義務になっている点は特徴的である。ブラジルではエタノールを含まないガソリンは流通しておらず、エタノール 100% もしくは 27.5% の燃料をユーザーが選択するようになっている。

欧州はディーゼル車が多いこともあり、バイオエタノール自体に導入義務を課している国は少ないが、バイオ燃料全体の導入義務が課せられている。

アジアでも E5 ～ E10 の導入義務が多く、中国では E10 の導入義務により、消費量としても多い国であると言える。

わが国のバイオ燃料の導入について見ると、「エネルギー供給構造高度化法」において 2011 年度からバイオエタノールの導入目標量が設定された。導入目標量は 2011 年度の原油換算 21 万kl(エタノールで約 34 万kl)から徐々に増加させ、2017 年度に原油換算で 50 万kl(エタノールで約 82 万kl) となった。

2018 年の告示改正では 2018 ～ 2022 年度の 5 年間、バイオエタノールの導入目標量を原油換算 50 万klとすることが定められた。

現在わが国で利用されているバイオエタノールはブラジルにおいて製造されたものがほとんどであり、その原料は食料競合が指摘されているサトウキビである。

さらに、現在わが国に輸入されているバイオエタノールは、石油系ガスであるイソブテンと合成することによって得られる ETBE (エチル・ターシャリー・ブチル・エーテル) の形で利用されている。貿易統計によると、2019 年実績で 171 万klの ETBE と 6.6 万klの ETBE 転換用バイオエタノールが輸入された。輸入された ETBE はブラジルにおいて製造されたバイオエタノールをアメリカに輸送し、アメリカの ETBE 製造設備を用いて転換したものであることから、輸送に関わるコストや環境性を考慮すると、改善の余地があると考えられる。

## 6. 食料との競合

従来からバイオ燃料の食料競合が指摘されてきたが、その根拠は主に食料価格高騰のリスクにあった。図2に示ように、実際に 2008 年にはバイオ燃料の導入と干ばつが重なり、食料価格が高騰したが、それ以降、バイオ燃料導入量が増え続けても食料価格は高騰していない。

さらに元々飼料作物として利用されてきたトウモロコシからエタノールを製造する際には、併産される発酵残渣 (DDGS) を飼料としてカスケード利用しているため、トウモロコシをバイオ燃料に仕向けることによる食料競合の問題は起こっていない。

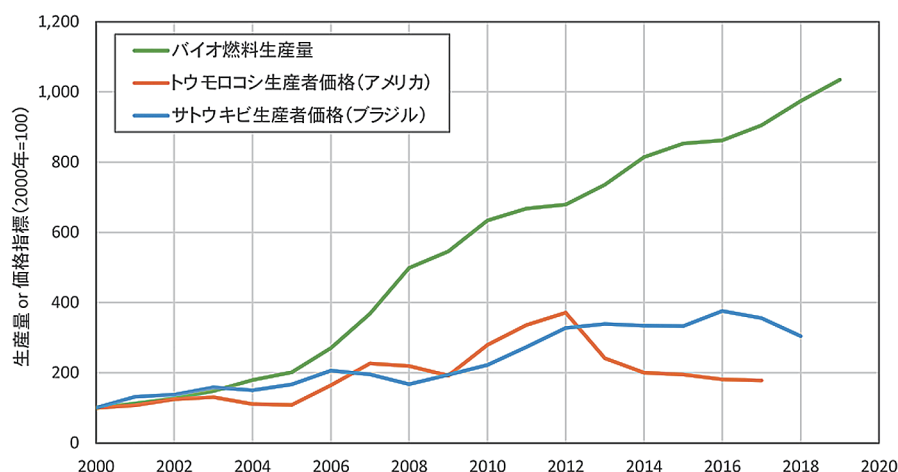


図2 バイオ燃料生産量とバイオエタノール原料作物の生産者価格の推移<sup>(13) (14)</sup>

その他の課題として、バイオ燃料の生産によって、林地や食料農地が転換される土地利用変化の問題がEUを中心に議論されている。図3にアメリカのトウモロコシとブラジルのサトウキビにおける収穫面積と単収の推移を示す。アメリカでは収穫面積が2000年に比べて現状1.13倍しか増加していないことにに対し、ブラジルでは2.09倍に増加している。これはブラジルの方がバイオ燃料の製造に伴う土地利用の変化が大きいことを表している。一方、単収を見ると、2000年との比較ではアメリカでは1.38倍、ブラジルは1.10倍であることから、アメリカではトウモロコシ農地面積を増やさずに単収を増やすことによって収穫量を増やしていることが分かる。

原料が食料と競合しないことから注目されている第二世代エタノールは未だ開発～実証中のものが多く、商業化を見据えると、製造コストが課題でもあるため、喫緊の課題であ

る温暖化への対策としては、当面は持続可能性に留意しながら第一世代バイオ燃料を利用することも考慮すべきと考えられる。

## 7. ETBE か直接混合か

前述の通り、現在わが国ではバイオエタノールをETBEに転換して利用している。

世界を見渡すと、バイオエタノールをETBEに転換して利用している国は少ない。バイオエタノール生産量世界第1位のアメリカ、第2位のブラジルともにバイオエタノールをガソリンに直接混合して利用しており、ETBEを利用していた欧州のフランスおよびスペインも直接混合が主流になりつつある。

また、2006年時点でE10導入の技術的な課題および懸念事項として表8が挙げられていたが、影響が見られなかったものがほとんどであり、ゴム材、樹脂の膨潤についてはすで

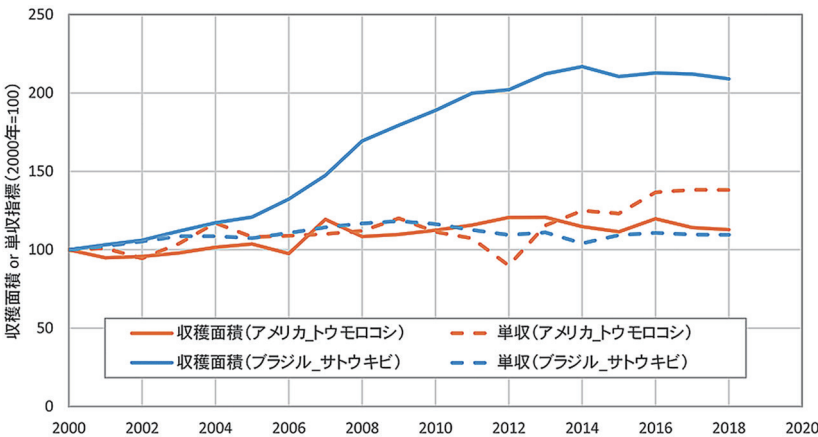


図3 バイオエタノール原料の作付面積および単収の推移<sup>(14)</sup>

表8 E10利用の影響<sup>(15)</sup>

| 燃料品質                | エタノール10%混合による燃料品質への影響  | 研究項目                                                                    | 調査結果                                                                          |
|---------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 蒸留性状<br>50% 留出温度    | 10%程度低下                | ①排出ガス、燃費/CO2への影響調査<br>②運転性能への影響調査<br>→T50(高温側)の影響の把握<br>→T50(低温側)の影響の把握 | T50のJIS上限域(110℃)で車によりE10の影響が見られた。<br>T50下限域を含め、それ以外の範囲ではT50によるE10の影響は見られなかった。 |
| 蒸気圧(RVP)            | 7kPa程度増加<br>(高温の蒸発量増加) | ③車両蒸発ガスへの影響調査<br>→透過の影響把握(駐車時)<br>→高温での蒸発量増加の影響把握(運転時)                  | 本WGで実施した供試車両では、E10の顕著な影響は見られなかった。<br>(先行研究WGで実施した車両でE10のHSL+DBLへの影響は見られた)     |
| 材料適合性(ゴム)           | ゴム材の透過                 | ④材料による燃料性状への影響調査                                                        | ゴム材によりE10の方が燃料中のガム値増加が見られた。<br>金属による燃料品質への影響はE0とE10で差は見られなかった。                |
| 保存安定性<br>(金属、ゴム、樹脂) | 金属腐食<br>ゴム材、樹脂の膨潤      |                                                                         |                                                                               |

(日本市場にある既販車を用いた試験では、E10の影響が見られた場合があった。E10導入時には、これらの影響に注意を払う必要がある。)

に自動車メーカーが対応済みである。

その他、エタノールをガソリンに混合するときに水分の吸収やそれによる相分離の影響も懸念されていたが、図 4 に示すように、エタノールの混合割合を増加させ、E10 になると、その影響はほとんど見られなくなる。

わが国の法整備状況を見ると、図 5 に示すように、すでにバイオエタノールを 10% 直接混合したガソリンである E10 の導入に関する法整備状況はすでに整っている。

バイオエタノールの導入拡大に必要な設備コストについて、バイオエタノールの導入当時は設備の付加や改造費が高額であると言われたが、現在すでに ETBE とエタノールで合計 50 万kl（原油換算）を輸入し、取り扱っているため、E10 の導入に必要な設備投資も当時よりは軽微となる。また、混合ガソリンの価格も ETBE への転換が無い分、直接混合の方が安価になることが予想される。

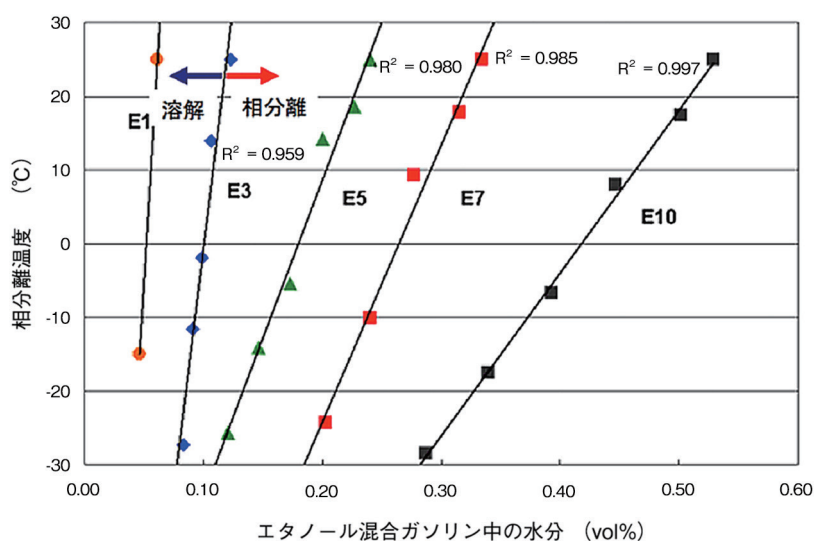


図 4 エタノール混合ガソリンへの水分の影響 (16)

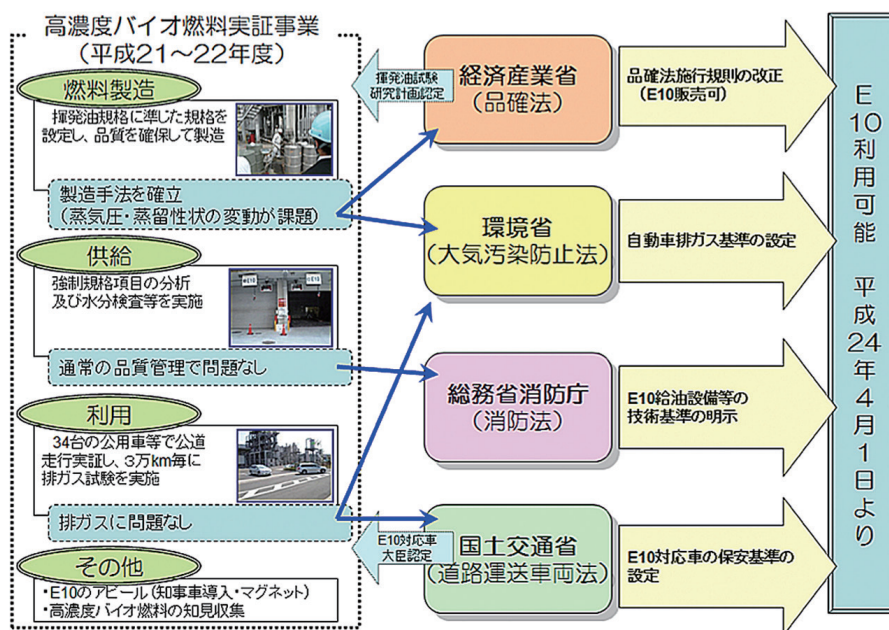


図 5 E10 利用のための法整備状況 (17)



## 8. まとめ

2030年の運輸部門におけるCO<sub>2</sub>削減目標を達成するためには次世代自動車の導入普及のみならず、E10の導入も重要な役割を果たすことができる。E10の混合割合は世界を見渡しても特別多い量ではなく、グローバルスタンダードに並ぶことになる。

E10の導入を実施するためには、エタノール生産量が多いアメリカやブラジルから輸入することが考えられ、液体燃料の調達先を中東以外にも広げることからエネルギー安全保障の観点でも有用である。

アメリカのトウモロコシは耕地面積を拡大させずに、単収を伸ばしていることから食料競争に対する問題はほとんど無い。また、エタノールを製造する際に発生する発酵残渣をカスケード利用することで、飼料も併産している。

エタノールの導入量を拡大するにあたって、石油由来成分を6割含むETBEを利用するよりも、オクタン価向上剤としても性能・価格ともに優れているエタノールの直接混合にもメリットがあると考えられる。

石油業界にとってはE10をETBEで導入するよりもエタノールで導入した方が輸入量は少なくなり、さらに本業である原油の輸入量（使用量）を大きく減らさずに実施できるメリットがある。

以上のことから、今後温暖化対策としてバイオエタノールの導入拡大を考えるためにはE10の導入についても検討が必要であり、利用方法についてもエタノールの直接混合を含めて環境性・経済性の観点で中立性をもって再度議論することも必要であると考えられる。

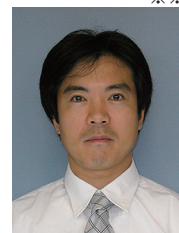
### 参考文献

- (1) 資源エネルギー庁,「エネルギー白書 2020」, 2020 年
- (2) 地球温暖化対策推進本部,「日本の約束草案」, 2015 年
- (3) 環境省,「地球温暖化対策計画」, 2016 年
- (4) 地球温暖化対策推進本部,「2018 年度における地球温暖化対策計画の進捗状況」, 2020 年

- (5) (一財)自動車検査登録情報協会ホームページ：  
<https://www.airia.or.jp/index.html> (アクセス日：2020 年 11 月 11 日)
- (6) 次世代自動車戦略研究会,「次世代自動車戦略 2010」, 2010 年
- (7) 経済産業省製造産業局自動車課,「自動車産業戦略 2014」, 2014 年
- (8) (一社)次世代自動車振興センターホームページ：  
<http://www.cev-pc.or.jp/> (アクセス日：2020 年 11 月 12 日)
- (9) (一社)日本自動車工業会,「自動車統計月報」, [http://www.jama.or.jp/stats/m\\_report/index.html](http://www.jama.or.jp/stats/m_report/index.html) (アクセス日：2020 年 11 月 12 日)
- (10) 環境省地球環境局,「地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン」, 2003 年
- (11) J. Lane, “The Digest’ s Biofuels Mandates Around the World 2020,” Biofuels Digest, 2020. (<https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2019/12/31/the-digests-biofuels-mandates-around-the-world-2020/> (アクセス日：2020 年 8 月 22 日))
- (12) USDA Foreign Agricultural Service, “Biofuels.” (<https://www.fas.usda.gov/commodities/biofuels>. (アクセス日：2020 年 8 月 22 日))
- (13) REN21, “Renewables 2020 Global Status Report,” 2020
- (14) FAO, “FAOSTAT.” (<http://www.fao.org/faostat/en/> (アクセス日：2019 年 3 月 6 日))
- (15) 廣瀬敏之,「ガソリン車バイオ燃料 WG 研究報告」, JATOP (Japan AuTo-Oil Program) 第 2 回成果発表会, 2012 年
- (16) 涌嶋恭司,「エタノール混合ガソリンの国内流通インフラへの影響」に関する調査, 2004 年
- (17) 大阪府, “E10 利用のための法整備.” (<http://www.pref.osaka.lg.jp/chikyukankyo/e10/gov.html>. (アクセス日：2020 年 9 月 18 日))

## WNN ニュースから見た世界の原子力動向と 米国の原子力産業復活の国家戦略・支援策

藤井 貞夫<sup>※</sup>（原子力技術センター  
参事）



都筑 和泰<sup>※※</sup>（原子力技術センター  
部長 副主席研究員）

### 1. はじめに

原子力の最新動向を分析するにあたって、関連ニュースの統計的な分析が有効な手法の1つである。本稿では、World Nuclear News (WNN)<sup>(1)</sup>に着目して、主にキーワードの推移を分析した。WNNは、世界原子力協会(WNA: World Nuclear Association)が発行する日刊ニュースであり、無料で、正確且つ公共的な原子力関連情報を提供することを目的としている<sup>(1)</sup>。WNNは原子力業界で広く認知されており、かつ公開情報であって比較的幅の広いニュースをカバーしていることから本分析に適切であると考えた。

本稿では、まず最近5年間のWNNについて、キーワードの推移の分析を行い、原子力業界の最近の動向について分析する。その中で特に注目すべきと考えた米国の動向については、第4章でやや詳細に紹介する。

これらの分析を通して、原子力業界全体の動向を紹介するとともに、今後のわが国の原子力政策を考える上での参考情報を示す。

### 2. 分析対象

分析対象期間は2015年1月～2020年5月の約5年間とした。この間のニュース総数は4,367件である。土日祝日は休刊日で、平日は1日平均3本程度の掲載がある。記事数は日によって1～6本程度の範囲でばらつきがあ

るが、月平均では対象期間中70本前後と概ね一定である。記事数のある程度管理している様子があり、記事数そのものよりも記事総数に対する該当記事の比率の方がより本質的と考えられることから、本稿では記事比率を整理していくこととした。なお、分析においては、必要に応じて、分析対象期間の後の記事も参照している。

WNNは各記事に対してRelated topicの欄で、例えば“USA”、“New build”、“Energy policy”といった国名や内容に関するキーワードを1～6個程度付している。今回は主にこのキーワードに着目した分析を行うこととした。

なお、WNNはRelated topicとは別に9つのカテゴリー分類も行っているが、こちらは、広い分野からニュースを拾うように配慮されているためか、キーワードと比較して比率の変化幅が小さい。このため、カテゴリー分類は主要な分析対象としなかった。

### 3. キーワードの分析結果

図1に、国に関連するキーワードについて、記事総数に占める比率の推移を示す。最も多いのは、米国で、以下、英国、ロシア、中国、日本、フランス、カナダの順である。キーワードとして登場した国は、期間中100程度に達するが、上位7カ国の記事比率がそれぞれ5%以上のところ、8番目以降はそれぞれ2%以下である。以下、主に上位7カ国について分析する。

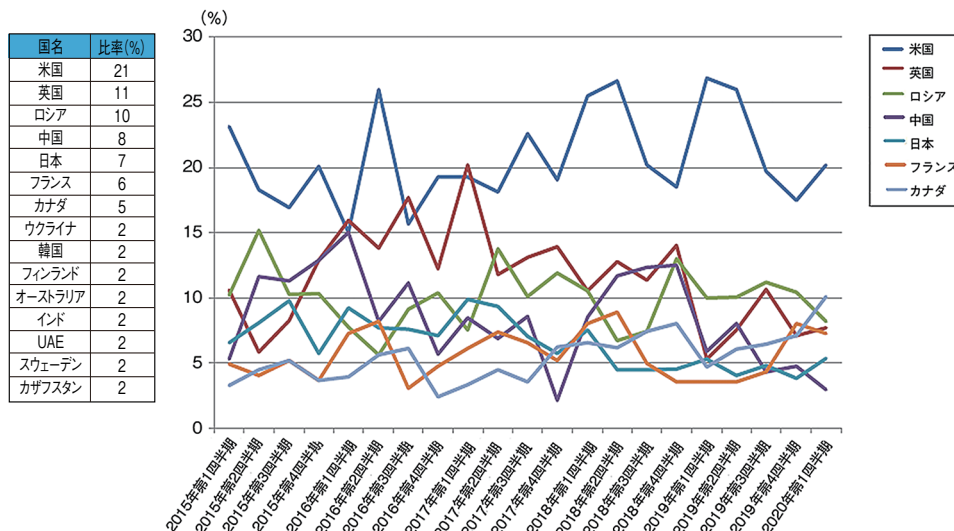


図1 上位7カ国の関連記事比率の推移

記事の内容に関するキーワードは50程度ある。上位7カ国について、記事比率が高いキーワードを表1に整理した。

これら7カ国は大きく3つに分類される。1つ目は、新規建設に関わるキーワード“New build”, “Construction”の記事比率が高い国（中国、ロシア、フランス）、2つ目は“Energy policy”, “Innovation”または“SMR”（小型モジュール炉）といった今後の原子力政策に関わる記事比率が高い国（米国、英国、カナダ）、3つ目はそのどちらにも含まれない日本である。

#### 4. 各国の動向

（1）New build, Constructionの記事比率が高い国（中国、ロシア、フランス）

代表例として、中国の記事の推移を図2に示す。中国では、“New build”, “Construction”の記事が全期間の平均でそれぞれ60%近くを占めており、それぞれほぼ同様の推移を示している。記事内容を詳細に見ると、そのほとんどは新規の原子炉建設の進捗報告に関するものであった。建設中の原子炉に関しては、燃料搬入、

表1 上位7カ国のキーワード上位10

|    | 米国                     | 英国                     | ロシア                 | 中国                  | 日本                       | フランス                  | カナダ                              |
|----|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1  | Energy policy (21%)    | New build (34%)        | New build (45%)     | Construction (58%)  | Fukushima response (37%) | O&M (23%)             | Mining (18%)                     |
| 2  | New build (17%)        | Energy policy (33%)    | Construction (31%)  | New build (56%)     | O&M (33%)                | New build (23%)       | O&M (18%)                        |
| 3  | Construction (14%)     | Decommissioning (21%)  | T&A (19%)           | O&M (27%)           | Decommissioning (32%)    | Construction (23%)    | SMR (18%)                        |
| 4  | O&M (14%)              | Waste management (17%) | Nuclear fuel (17%)  | T&A (22%)           | Fukushima accident (27%) | Regulation (19%)      | Innovation (15%)                 |
| 5  | Innovation (13%)       | Politics (17%)         | Energy policy (15%) | Nuclear fuel (16%)  | Regulation (27%)         | T&A (17%)             | R&D (14%)                        |
| 6  | Regulation (13%)       | R&D (16%)              | O&M (13%)           | O&M (13%)           | Energy policy (12%)      | Supply chain (15%)    | Uranium resources (13%)          |
| 7  | Waste management (13%) | Construction (15%)     | Contracts (13%)     | Contracts (13%)     | T&A (12%)                | Contracts (13%)       | Regulation (12%)                 |
| 8  | R&D (12%)              | EU (14%)               | Innovation (8%)     | Innovation (8%)     | Nuclear fuel (11%)       | Energy policy (12%)   | Upgrades and modernisation (12%) |
| 9  | SMR (11%)              | T&A (13%)              | Reactor design (7%) | Reactor design (7%) | Waste management (10%)   | Decommissioning (12%) | Waste management (12%)           |
| 10 | Decommissioning (11%)  | Regulation (13%)       | Regulation (6%)     | Regulation (6%)     | New build (8%)           | Nuclear fuel (11%)    | T&A (11%)                        |

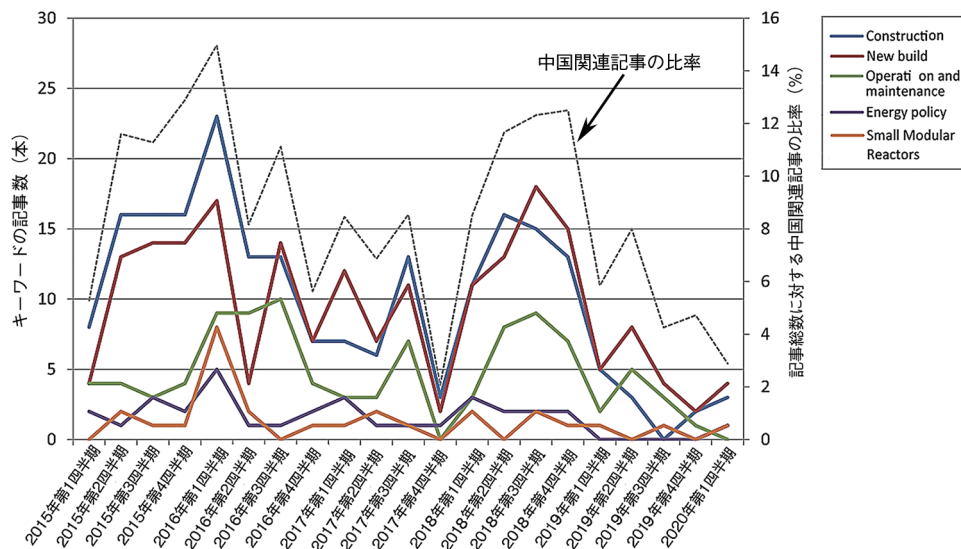


図2 各キーワードの記事数と中国関連記事の比率の推移

燃料装荷、初臨界、グリッド接続、商用運転などの記事が商用運転開始直前に多く出る傾向にあり、2016年と2018年頃のピークは、その時期に運転開始した炉の数と対応している。一方、分析対象の5年間の中国の状況を見ると、25基が運転を開始したのに対し、新規着工は5基にとどまり、結果として建設中の炉は20基減少した。そのこともあり、2019年以降新設関係の記事比率は低くなっている。

図には示さないが、ロシアも中国と同様に国内外で建設中の炉が多数あり、“New build”、“Construction”の記事が多くなっている。国内では、建設中の炉が着実に運転開始してく一方で、近年、新規着工があまりないという傾向も中国と共通している。ただし、海外で建設中の炉を合わせると、中国とロシアの合計で10基以上あり、両国が積極的な海外展開を行っている様子がうかがえる。フランスも国内で欧州加圧水型炉（EPR）の建設が継続していることに加え、中国、インド、フィンランド、英国、ブラジルなどにEPRを展開しているため、“New build”、“Construction”の記事比率が高くなっている。

## （2）Energy policy, SMR等の記事比率が高い国（米国、英国、カナダ）

このグループの代表例として、米国の記事

におけるキーワードの推移を図3に示す。中国のように顕著に比率が高い記事はないが、全期間の平均では“Energy policy”の比率が最も高い。2018年からの“Energy policy”を含む記事数の変化に着目すると、2018年のピーク以降減少傾向にある。2015年前後の米国は、シェール革命の影響などもあり原子力の競争力が低下し、多くのプラントで早期停止が検討される状況であった。そのため、2018年にかけて関係機関からの原子力の必要性を示す報告や、ゼロエミッションクレジットといったような原子力支援策に関する記事数が多かった。これらの記事は2019年に入ると減少し、“Energy policy”の記事は、気候変動に関連するエネルギー政策絡みで散発的に出てくる程度となった。最近、米国の記事で比率が最も高いのはSMR関連記事であり、記事数は最近5年間で着実に増加している。“New build”については、加圧水型炉 AP1000の新設を実施していたウェスチングハウス社が2017年3月連邦破産法第11条適用を申請し、その後、建設中の炉の動静に関する記事数が増加した。その後一旦減少したが、近年SMR建設に向けた動きが具体的になってきたことを受けて関連記事にも増加の兆しがある（“New build”は実際に建設を開始していても具体的な計画があれば、キーワードとし



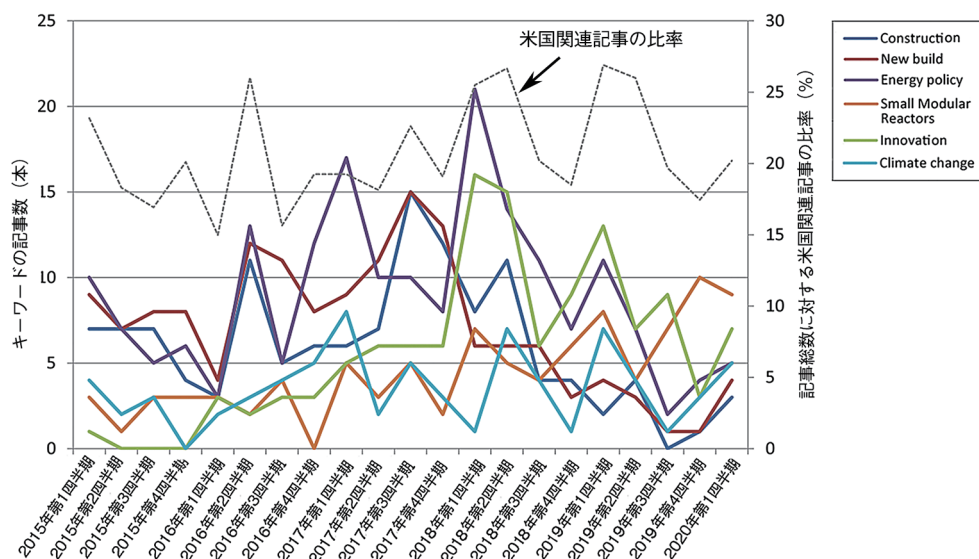


図3 各キーワードの記事数と米国関連記事の比率の推移

て記事に付される場合が多い)。このようなキーワードの変化は、SMRのような先進的な原子炉の導入に向けて、方針（コンセプト）の段階から具体的な行動（立地・設計・建設）の段階へとフェーズが切り替わっていることを意味していると考えられる。

英国の記事でも“Energy policy”が多いが、2017年頃にピークとなりその後減少している。この減少後に何か具体的な動きを示すキーワードの増加は見られない。英国では、先進原子炉の導入に向けてまだ方針の段階を抜け切れていないことを示唆している。カナダは、米国と同様にSMRの記事数が増加傾向にあるとともに、“Innovation”をキーワードとする記事の変化の傾向も米国と類似している。カナダも米国と同様、SMR等の先進的な原子炉の導入について、具体的な検討を進めている。

### （3）日本の動向

日本の記事は、キーワードでみると他の6カ国とは状況が異なると言える。表1に示すとおり、東京電力福島第一原子力発電所事故とその対応に関する記事が上位を占めている。グラフは割愛するが、最近5年間、上位を占めるキーワードに大きな変化はない。なお、“Fukushima accident”は主に福島第一原子力発電所サイト

内に関する記事で、“Fukushima response”は主に再稼働や訴訟対応といった、福島第一原子力発電所以外の原子力発電所に関する記事となっている。両方で6割程度を占めており、その内容に応じて“Operation and maintenance”, “Regulation”, “Decommissioning”といったキーワードが追加的に付されている。“New Build”も分析対象期間の平均で8%程度あるが、これは主にプラントメーカーの海外進出関連の記事である。少数ではあるが島根原子力発電所3号基、大間原子力発電所といった建設中の炉の状況に関する記事もある。

### （4）キーワード分析のまとめ

過去5年間のWNNニュースを分析した結果、近年の新規原子炉の建設の中心は中国、ロシアであることが改めて明らかになった。ただし、両国とも国内での新規着工はやや滞っており、着実な運転開始と相まって国内建設中の炉は減少傾向にある。その一方、国際展開は依然として活発である。中国とロシアに押され気味だった米国、英国、カナダは、政府による支援策を打ち出すなどして、SMRのような先進的な原子炉の開発を進めている状況にある。特に、米国については、2020年4月23日に米国エネルギー省(DOE)長官が「米



国の原子力での競争力優位性の復活－米国の国家安全保障の確保戦略」(The Nuclear Fuel Working Group's Strategy to Restore American Nuclear Energy Leadership) という報告書<sup>(2)</sup>を公表するなど、原子力産業の競争力の復活を明確に志向している。この米国の動きについては、東日本大震災(2011年3月)を契機に原子力研究開発動向が大きく変わったため、分析対象期間を拡げ、2011年3月まで遡ってWNNを調査した結果を次章で紹介する。

## 5. 米国の原子力産業復活のための国家戦略とその支援策

### (1) 米国の概況

米国は、1950年～1990年の間に世界の原子力技術開発と輸出市場を牽引してきたが、現在、そのリーダーシップは大幅に低下している。前章で示した通り、新規建設の中心は中国、ロシアに移行しており、2030年までに世界で新設される見通しの107基のうち、43基が中国、29基がロシア<sup>(2)</sup>であるのに対し、米国はわずか3基と予想されている。また現在の

米国内原子炉で使用されているウランの93%が輸入である。原子力産業基盤の衰退は米国の国益と国家安全保障の観点からも極めて忌々しき状況であり、その復活のために、政府、議会および規制機関の支援と協力も含めて、国立研究所の施設や人員などの持てる資源を総動員するための何らかの手を打つ時期にきていると認識されている。一方、コンサルティング会社UxCによると、今後30年間で原子炉の長寿命化、SMRや先進原子炉市場、エンジニアリングサービスや部品供給などの分野および廃止措置市場において米国企業の参入機会が十分にあると報告されている<sup>(3)</sup>。

### (2) 米国の原子力での優位性の復活

2020年4月23日、DOE長官が公表した報告書「米国の原子力での競争力優位性の復活－米国の国家安全保障の確保戦略」<sup>(2)</sup>において、米国の国家安全保障を確保しつつ原子力産業の復活に向けて表2に示す4つの戦略目標を掲げ、政府、議会および規制機関が講じべき18の支援策を勧告している。

このうち3番目の戦略目標「技術と標準で世界を主導」に関連する支援策(⑦～⑩)の

表2 米国の原子力産業の復活に向けた4つの戦略目標と18の支援策

| 米国のウラン産業の支援と核燃料サイクルのフロントエンド全体の生存能力回復に向けた迅速な行動                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ①ウラン備蓄の確立によるウランの直接購入                                                                                |
| 核燃料サイクルのフロントエンドと国内原子力産業の再生と強化                                                                       |
| ②DOEのウランのバーター取引の終了と余剰ウラン在庫管理政策の再評価                                                                  |
| ③電力市場におけるすべてのエネルギー源の公平な競争条件を創設し卸売エネルギー市場での競争を改善するために連邦エネルギー規制委員会(FERC)の活動を奨励                        |
| ④ウラン抽出に対する規制改革と土地アクセスの合理化                                                                           |
| ⑤米国市場での将来のウランダンピングを防止するためロシアとのウラン輸入停止協定(Suspension Agreement)を延長する商務省の取組を支援                         |
| ⑥原子力規制委員会(NRC)が国家安全保障の目的でロシアまたは中国で製造された核燃料輸入を拒否できること                                                |
| 技術と標準で世界を主導                                                                                         |
| ⑦事故耐性燃料(ATF)の研究開発への資金提供、高アッセイ低濃縮ウラン(HALEU)の研究開発への資金提供、HALEU濃縮実証プログラムの完了、ウラン採鉱と原位置抽出法の先進的水処理技術への資金提供 |
| ⑧国立原子炉イノベーションセンター(NRIC)および多目的試験炉(VTR)の支援                                                            |
| ⑨米国の先進原子炉技術の研究開発への資金提供とその実証の支援                                                                      |
| ⑩SMRおよびマイクロ原子炉を使用して連邦施設への電力供給を実証                                                                    |

| 米国の輸出競争力の強化                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ⑪原子力資機材の輸出の調整・実施を主導する専門の上級行政職の指名                                                      |
| ⑫国防産業基盤に類似した原子力産業基盤体制の確立                                                              |
| ⑬ATF を含む外国製原子炉で使用する海外向け燃料を国産商用燃料で代替するための研究開発への資金拠出                                    |
| ⑭米国の民生用原子力技術、資材及び燃料輸出の新たな市場を開拓するために輸出プロセスと 123 協定採択の効率化を向上                            |
| ⑮毎年のセレクト USA 投資サミットに民生用原子力を追加                                                         |
| ⑯規制の技術交流や現行の NRC ライセンスを持つ米国の原子力技術の海外での許認可を加速するために海外の原子力規制枠組の開発支援を含む民生用原子力国際協力プログラムの拡大 |
| ⑰外国の国家資金調達に競合する米国金融機関による民間原子力産業の支援を保証                                                 |
| ⑱研究炉供給市場への米国供給業者の再参入の促進                                                               |

表 3 戦略目標「技術と標準で世界を主導」の支援策の内容

|                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 事故耐性燃料（ATF）の研究開発への資金提供、高アッセイ低濃縮ウラン（HALEU：U235 の濃縮度が 5 ～ 20% の低濃縮ウラン）の研究開発への資金提供、HALEU 濃縮実証プログラムの完了、ウラン採鉱と原位置抽出法の先進的水処理技術への資金提供                                               |
| DOE は原子力局（NE: Office of Nuclear Energy）の ATF プログラムを継続し首尾よく完了させ、米国起源の濃縮技術が確実に実証されるように 2022 年までに HALEU 実証プログラムを継続し首尾よく完了させる。また、HALEU 施設と設備が速やかに許認可されるように、HALEU のインフラ研究開発を支援する。 |
| 国立原子炉イノベーションセンター（NRIC）および多目的試験炉（VTR）の支援                                                                                                                                      |
| 2019 年 9 月 28 日、NRIC および VTR の設置を認可する原子力イノベーション能力法（NEICA）が成立。DOE はアイダホ国立研究所を NRIC のリーダーに指定し、先進原子力技術の開発を支援する。                                                                 |
| 米国の先進原子炉技術の研究開発への資金提供とその実証の支援                                                                                                                                                |
| 核燃料作業部会は、先進原子炉の研究開発への資金提供を継続することを支援し、民間部門との協力で先進原子炉の実証が可能となるよう支援する。                                                                                                          |
| SMR およびマイクロ原子炉を使用して連邦施設への電力供給を実証                                                                                                                                             |
| 遠隔地の国内軍事基地でエネルギー柔軟性とエネルギーセキュリティを強化する SMR の可能性を実証する大統領令による政策の採用を勧告。国防総省は SMR が設置エネルギー要件の実現を強化又は補完できる場所として国内の軍事施設での機会を提供すべきである。                                                |

内容は表 3 に示す通りである。次節で見る支援策の主な対象となっている。

### （３）米国の原子力支援策の実態

#### ① 原子力関係予算について

表 4 に、2019 ～ 2021 年度の DOE の原子力関係予算を示す。2007 年の修正アメリカ競争法によって創設されたエネルギー先進研究計画局（ARPA-E）も原子力へ一部資金提供している。過去 3 年間の原子力関係予算は 13 ～ 16 億ドルの間で推移している。

図 4 に、2021 年度の原子力関係予算の構成

比を示す。2021 年度の SMR 関係の予算項目の割合は全体の約 47%（6 億 3,150 万ドル）を占めている。この割合は 2019 年度および 2020 年度もほぼ同一であり、SMR 関係予算が全体予算のほぼ半分を占めており、最近の予算は SMR 関連の実証に重点を置いている。

#### ② SMR

SMR 関連の研究開発プログラム / 公募制度は 10 件程度あるが、以下に代表的なプログラム (a) ～ (g) について概説する。なお、(a) は産業界や大学等への連邦資金を提供するためのイニシ

表4 原子力関係予算（2019～2021年度）

(単位：千ドル)

| 項 目※               | 2019 年度   | 2020 年度   | 2021 年度   |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| 原子力                | 1,180,000 | 1,340,000 | 1,042,131 |
| アイダホ全体の保障措置とセキュリティ | 146,090   | 153,408   | 137,800   |
| 中間貯蔵と放射性廃棄物基金監督    | 0         | 0         | 27,500    |
| ウラン備蓄              |           |           | 150,000   |
| 海軍炉移転              | 85,500    | 88,500    | 0         |
| 合計                 | 1,411,590 | 1,581,908 | 1,357,431 |
| ARPA-E             | 366,000   | 425,000   | -310,744  |

※原子力局の予算を ■ で示す。2021 年度は ARPA-E 予算要求せず、支出負担行為未済額の約 310 百万ドルの取消しを要求。

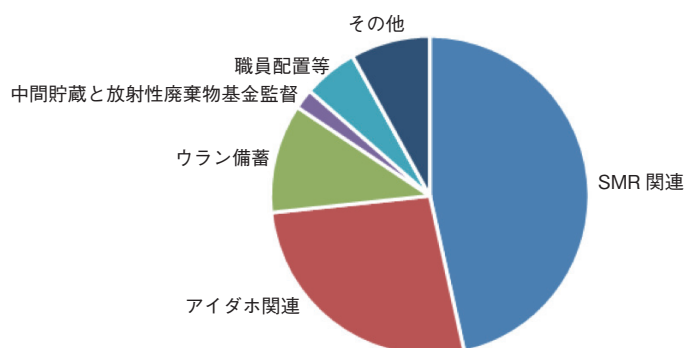


図4 2021年度の原子力関係予算の構成比

アティブであり複数の予算項目から資金提供される。一方、(b)～(g)は各年度の予算項目に対応して資金提供されるプログラムである。

(a) 原子力イノベーション加速ゲートウェイ (GAIN: Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear)

2015年11月、原子力コミュニティに革新的原子力技術を商業化に移行するために必要な技術上、規制上および財政上の支援へのアクセスを提供するためにGAINが創設された。DOEはGAINを通じて、最先端の継続的に改善している研究開発・実証(RD&D)インフラを利害関係者によらず利用できるようにし、商業化に向けた革新的な原子力技術のより迅速で費用対効果の高い開発を実現していく。

GAINを介した資金提供には以下の2つのルートがある。

i) 先進原子力技術開発のための米国産業への資金提供公募 (US Industry Opportunities for Advanced Nuclear Technology Development)

2017年12月に開始され、先進的な原子炉開発、初号機の実証および規制上の支援並びにその他の原子力の研究開発(R&D)の費用分担の機会を提供する5年間の資金提供公募である。DOEは、5年間のプログラムで合計4億ドルを供与する。2018年4月に第1回目が公表され2020年10月現在、第9回目の公募結果が公表されている。X-Energy社、NuScale Power社、BWXT社などが選定されている。

ii) 原子力バウチャープログラム (Nuclear Energy Voucher Program)

DOEの複合施設全体で利用可能な世界クラスの専門知識と機能へのアクセスを求める

申請者を支援するための資金を提供するものである。原子力バウチャープログラムの目標は、革新的な原子力技術の商業化を加速することである。Oklo 社、Terrestrial Energy 社などが選定されている。

(b) 先進原子炉実証プログラム (ARDP: Advanced Reactor Demonstration Program)

2020 年度の予算で 2 億 3,000 万ドルを投じて、先進的な原子炉の新実証プログラムを開始した。産業界との費用分担型パートナーシップを通じて、今後 5～7 年以内に運転可能な 2 つの原子炉を建設するための初期資金として 1 億 6,000 万ドルを供与する。申請者は、以下の 3 つの開発実証ルートを通じて支援を受けることができる。

- i) 先進的な原子炉の実証：7 年以内に完全に機能する先進原子炉をもたらしことが期待される。2020 年 10 月、TerraPower 社と X-energy 社にそれぞれ 8,000 万ドルを供与決定<sup>(4)</sup>
- ii) 将来の実証のリスク削減：将来の実証の機会を準備するための技術上、運転上および規制上の課題を解決する最大 5 つの追加チームを支援
- iii) 先進原子炉概念 2020 (ARC20)：2030 年代半ばに商品化される可能性のある革新的で多様な設計を支援

(c) 先進 SMR R&D (Advanced SMR R&D)

先進 SMR R&D は、設計開発を支える幅広い費用分担型の初期設計関連の技術と R&D を支援するものである。

SMR 許認可技術支援プログラムの成功に基づいて、先進 SMR R&D が 2019 年度に開始され、米国基準の SMR 技術の国内および国際市場への提供を加速するための研究開発および展開活動を支援する。DOE は NuScale Power 社およびユタ州自治体共同電力事業体と提携し、過去 10 年間にアイダホ国立研究所で初号機の原子炉技術を実証してきた。これらの取組みを

通じて、DOE は SMR 技術の多くの技術上および許認可上の問題を解決することにより、他の国内原子炉開発者に幅広い恩恵を与える一方、米国のエネルギー独立、エネルギー優位性および電力グリッドの回復を促進し、今後のクリーンで信頼できるベースロードの供給電源であることを保証するとしている。

(d) 多目的試験炉 (VTR: Versatile Test Reactor)

米国が先進原子力の世界的なリーダーシップを維持するには、多目的の高エネルギー中性子源を確保することが重要である。VTR は固有の安全機能、低い廃棄物収率、廃棄物を消費する能力、電力および非電力用途の両方を支援する能力および現世代の原子炉に対するその他の改善を備えた革新的な原子力技術の開発を支援することができる。

2019 年 2 月 22 日、DOE は段階的なプロジェクト承認プロセスを用いて、VTR プロジェクトのミッションニーズを承認。2020 年度の第 3 四半期の終わりまでに代替選択とコスト範囲の完成に向けて取り組んでおり、国家環境政策法 (NEPA) 文書の完成と第 4 四半期のリードタイムが長期となる調達の開始を予定。これらの取組みを見越して、2021 年度に DOE は新規の VTR プロジェクトを立ち上げ、2 億 9,500 万ドルを投資する。試験炉は、GE 日立ニュークリア・エナジー社の革新的小型モジュール炉 (PRISM) ベースの金属燃料高速炉が選定されている。

(e) 事故耐性燃料プログラム (ATF: Accident Tolerant Fuel Program)

2012 年度に、議会はメルトダウン耐性、事故耐性を有する軽水炉用核燃料を開発および認証するために、5,900 万ドルの予算を割当てた。2012～2016 年度に実現性評価と絞込み、2016～2022 年度に開発と認証および 2022 年度以降に商業化の 3 段階の計画を立案した。

2019 年 1 月、DOE は GE 社、ウェスチング



ハウス社およびフラマトム社の3社に ATF を開発するための資金 1 億 1,120 万ドルを供与。3 社は 2025 年までに商業炉に展開できると予想している。

(f) 高アッセイ低濃縮ウランプログラム (HALEU: High-Assay Low-Enriched Uranium Program)

HALEU は 5 ～ 20% に濃縮されたウラン 235 燃料であり、米国の先進原子炉が単位体積当たりの出力をより高くし小型炉設計を実現するために必要である。2030 年までに 600 トンの HALEU が必要になると予想されている。

米国の先進原子炉開発者の多くは、HALEU を燃料要件として特定している。現在、米国には HALEU の持続可能な国内供給量が不足している。DOE の原子力局は、HALEU を提供するために 3 つの方法を検討している。例えば、高濃縮ウランを再処理して ZIRCEX プロセスで HALEU を生成する実現可能性を調査研究している。さらに、2019 年度に開始された民生用ウラン濃縮プログラムは、米国の遠心分離技術 (Centrus Energy 社) を利用して HALEU を製造する能力を実証することを目的としている。

これらの活動は、マイクロ原子炉を含む先進原子炉の産業界の実証を支援し、先進燃料に関連する優先度の高い研究開発を支援するものである。

(g) 原子力実現化技術 (NEET: Nuclear Energy Enabling Technologies)

米国産業の原子力技術開発問題を解決する革新的かつ分野横断的な原子力技術を開発するために研究開発を実施し、研究能力に戦略的投資を行うものである。2021 年度は以下のプログラムに 1 億 1,600 万ドルを要求している。

- i) 分野横断的技術開発 (CTD: Crosscutting Technology Development)
- ii) 先進的原子力モデリングおよびシミュレーション (NEAMS: Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation)

iii) 原子力科学利用施設 (NSUF: Nuclear Science User Facilities)

iv) 先進原子炉開発 (TCR: Transformational Challenge Reactor)

③米国議会による支援 (法律と法案)

現在すでに成立している法律 (a), (b), そして未成立ではあるが今後成立が有力視される法案 (c), (d) および (e) について以下に紹介する。

(a) 原子力イノベーション能力法 (NEICA: Nuclear Energy Innovation Capabilities Act)

2018 年 9 月 28 日成立。NEICA は DOE に対して、先進炉概念を試験・実証するために民間の開発者との協力連携を促進するよう指示するほか、国立原子炉イノベーションセンター (NRIC) の創設に関する権限を授与する内容が盛り込まれている。また、原子力規制委員会 (NRC) との協力、先進炉用燃料や材料の試験に必要な高速中性子源炉の開発、高性能コンピューティング技術による新たな原子炉技術を開発するためのプログラムの実施などが含まれている。

(b) 原子力イノベーション・刷新化法 (NEIMA: Nuclear Energy Innovation and Modernization Act)

2019 年 1 月 14 日成立。NEIMA は、既存の商業炉に対する NRC の年間徴収手数料の上限を設けており、また NRC に対して 2 年以内に新型炉の許認可プロセスを策定し、2027 年までに新型炉設計者がオプションとして利用可能になるように技術的側面を包括した許認可枠組を完成させることを義務づけている。また、ウラン回収許認可の効率性を改善する方法を調査するように NRC に指示しており、ウラン回収許認可に関連する定型的業務に対する定額料金制システム導入の実現可能性に関する試験プログラムの開発も指示している。



(c) DOE 研究イノベーション法 (Department of Energy Research and Innovation Act)

2019 年 8 月 27 日, DOE は Stevenson-Wydler Technology Innovation 法 (1980 年) に準拠した技術移転活動に関連する費用の許容範囲に関する現在の取得規制を修正する最終規則を官報に公表した。これらの技術的修正の内容は, DOE 研究イノベーション法を通じて議会が制定した規定に対応している。本法の「セクション 102」は, DOE が所有する特定の国立研究所が DOE 内の技術移転を支援するために承認された資金を使用し, 初期段階および商用前の技術実証活動を実施し, 民間部門の利害を制限して国立研究所の活動から生じる研究および技術の潜在的な商業的应用を実証する技術障壁を取り除くことを DOE に要求している。

(d) 先進核燃料利用法 (Advanced Nuclear Fuel Availability Act)

超党派法案である先進核燃料利用法は, DOE に対して HALEU の米国での商業生産能力が現在欠落していることを受け, 米国国内において生産される HALEU を十分に供給できるように必要な措置を講ずるとともに, 関連する輸送インフラを整備することを指示している。2018 年 12 月 11 日下院で可決されたが, 上院では可決されなかったため, 現時点 (2020 年 10 月) においても成立していない。

(e) 原子力リーダーシップ法 (NELA: Nuclear Energy Leadership Act)

最大 40 年間, 電力会社と電力購入契約 (PPA) に署名することを連邦政府機関に許可し, DOE に新しい原子炉の試験的な PPA プログラムを策定するように要求する。先進原子炉技術を実証し, 原子力戦略計画を作成し, HALEU を先進原子炉で利用できるように DOE に指示する。DOE と NRC は, 先進原子力技術に関する大学の研究を支援するプログラムを策定することを要求されている。NELA

は先進原子炉の実証に焦点を当てるとともに原子力における米国のリーダーシップを確立することを狙っている。

NELA が支援する先進原子炉は, 軍事基地などの施設, アラスカ州などの遠隔地の地域共同体, さらに大きな町や都市に安全でクリーンで信頼性の高い手頃なエネルギーを提供する大きな可能性を秘めている。2020 年 7 月 23 日, 上院超党派によって 2021 年度の国防権限法の改正として可決された。

#### (4) 米国の取組みのまとめ

米国では, 原子力市場でのシェア低下, ウラン等の生産基盤の低下および新型炉の研究開発に必要な照射施設がないなど, 最近の米国の危機感と焦燥感を色濃く反映し, SMR の実証とそれに関連する先進技術の開発に集中的に資金を投下している。

先進技術開発の最たるものが ATF の開発と実証, SMR での使用が予想されている HALEU の製造実証であり, それらを試験する VTR の建設である。2020 年代後半の SMR 商業化を目指して, 議会の法律制定による支援と許認可を所掌する NRC の協力も含めて, DOE は所有する国立研究所のすべての施設の提供とマンパワーを総動員しているようである。

## 6. まとめ

近年の原子力業界は, 大型軽水炉の建設を中国, ロシアが主導する一方で, 米国, 英国, カナダが SMR を軸として巻き返しを図っているという構図になっている。特に米国は, 資金投入, 国立研究所の施設とマンパワー投入, 法律制定など, 危機感を持って競争力復活に取り組んでいる。そのような中, コロナ禍が加わることで今後の動静がより不透明となっており, 引き続き注視していく必要がある。

また, 米国の原子力産業の最近の状況と日本の状況は共通した点が多々あり, 米国の取組みから示唆されることが多いことから, 本稿の米

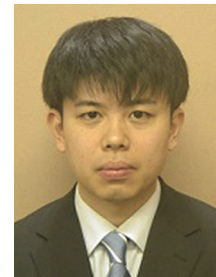
国の状況についての分析が日本の今後の原子力支援方策への参考となれば幸いである。

#### 参考文献

- (1) World Nuclear News (<https://www.world-nuclear-news.org/>)
- (2) RESTORING AMERICA'S COMPETITIVE NUCLEAR ENERGY ADVANTAGE, A strategy to assure U.S. National Security, ([https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/04/f74/Restoring%20America%27s%20Competitive%20Nuclear%20Advantage\\_1.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/04/f74/Restoring%20America%27s%20Competitive%20Nuclear%20Advantage_1.pdf))
- (3) WNN 7 月 31 日付記事 “US report highlights nuclear export opportunities”
- (4) WNN 10 月 14 日付記事 “US DOE selects advanced reactor designs for demonstration plants”

## 新型コロナウイルス感染症の原子力への影響と 今後の原子力の役割

高野 大志 (原子力技術センター  
研究員)



### 1. はじめに

2020年3月頃から世界中で新型コロナウイルス（COVID-19）の感染が広がっている。本稿執筆時（2020年10月5日）で、世界の感染者数は3,500万人を超えており、死亡者数も100万人を超える甚大な被害が出ている。また、経済にも大きな影響を与えており、図1の世界の国内総生産（GDP）成長率の推移予測が示すように、平時は3%前後で推移している成長率が2020年は新型コロナウイルスによる影響でマイナス3%となる見込みである。これは、2009年の「リーマンショック」時のマイナス0.1%よりも大きな下落幅である。

一方、国際エネルギー機関（IAEA）の報告<sup>(1)</sup>によると、2020年第1四半期の電力需要減少は2.5%、年間の電力需要減少は5%と予想されている。新型コロナウイルスによる活動自粛による減少は見られるものの、テレワークや医療機器などの需要増により年間での電力需要の大幅な減少は避けられる見込みである。

そのため、今後も原子力発電所を含む発電施設はこれまで通りの活動を維持することが求められる。

本稿では、原子力分野の活動を維持するために国際機関や各国の事業者、規制機関がどのような対応を行っているかについて、世界原子力ニュース（WNN：World Nuclear News）を主とした海外のニュースソースを参考に紹介する。

また、各国際機関が新型コロナウイルスの感染を警戒する新しい日常の中で原子力がどのような役割を担うべきかについて述べた内容を紹介し、今後の原子力の役割について検討を加える。

### 2. 新型コロナウイルスの原子力発電所への影響

最初に、新型コロナウイルス禍における原子力発電所の運転にはどのような課題があるかについて考える。

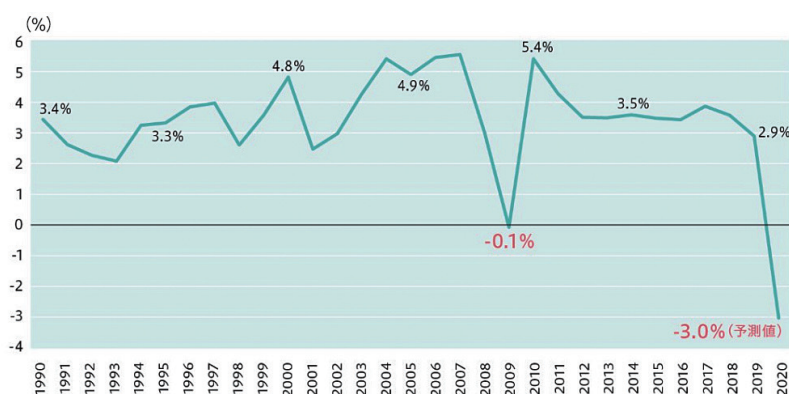


図1 世界全体の実質 GDP 成長率の推移<sup>(2)</sup>

一般に、通常運転中の原子力発電所においては、比較的「密」になりやすい管理建屋や工事事務所などにおける職員の密度は、通常のオフィス程度であり、その他はむしろ「疎」である。制御室での直交代ミーティングや通勤バス内、定検期間などで、相対的に密度が高くなることはあるが、その場合を考慮しても、通常のオフィスなどと比較して特別な対策を要することはない。しかし、原子力施設は緊急事態対応も含めた原子力安全を担保しなければならないため、対策の実施は慎重に進める必要がある。また、対策は厳しい規制を遵守して実施しなければならない、場合によっては、規制機関も柔軟な対応を行う必要が生じる。

### 3. 国際機関の新型コロナウイルスへの対応

国際機関は、世界の事業者や規制機関の新型コロナウイルスへの対応に関する情報を交換する場の提供や関連情報の発信などを行っている。また、テレワークを推進しつつも、根幹をなすコア業務は着実に履行している。

IAEA は流行が本格化し出した 2020 年 3 月中旬より“COVID-19: latest IAEA updates”というホームページを開設し、新型コロナウイルス対応に関する情報提供を行ってきた（ホームページの最終更新日は 2020 年 6 月 15 日）。その主要内容は以下の通りである。

- 事象報告データベース（IRS）の枠組みを利用して、世界の発電所でのコロナウイルスに関する運転経験の情報共有（非公開）を行っている。
- 35 の加盟国と世界気象機関の 2 つの地区特別気象センターが参加した緊急時対応訓練も実施している。この訓練は発災国役と支援提供国役に分かれて演習を実施したものである。この演習により、支援行動計画に支援チーム到着時のウイルス検査および個人用防護具の提供を盛り込むこととなった。
- IAEA は原則テレワークとなっているものの、緊急時対応ができるように、緊急時対応センターは 24 時間体制を保持している。また、保障措置に係る査察については一部に渡航障害はあったものの継続できている。

- 原子力分野のオンライン講義提供を行っている。原子力安全やセキュリティ、エネルギー開発等について無料のオンライン講義プログラムを公開している。
- 40 の加盟国にリアルタイム PCR セットを送送している。

経済協力開発機構 / 原子力機関（OECD/NEA）も様々な活動を行っており、それに関する情報をホームページで公開している。OECD/NEA は、2020 年 4 月にパンデミックに対する人的組織的要因を議論するワークショップを実施した。内容は、安全性を担保した上で事業者の負担を減らす方法、緊急時対応などのリソースの確保、事業者と規制機関の連携、世界の良好事例などについての議論である。また、リーダーに求められる要素として、重要な要員が不在となるケースでの組織の健全性の担保、対面コミュニケーション減少のフォロー、要員のメンタルヘルスの考慮などについて議論された。

OECD/NEA は、新型コロナウイルス後の原子力の役割についての政策概要（Policy Brief）の発行も実施しており、原子力の費用対効果の高さ、原子力業界の雇用創出などについて述べている。感染対策として、リモートワークを徹底しており、リモート会議や加盟国へのバーチャル訪問なども行っている。

### 4. 事業者の新型コロナウイルスへの対応

事業者の対応については、通常運転、保守関連、新設関連に分けて紹介する。通常運転に関し、ロシア連邦原子力企業ロスアトムがテレワークの促進、個人用防護具、衛生用品の調達、設備の消毒の徹底などを行っていること<sup>(3)</sup>、また、米国の事業者が制御室のボタンの除染、社会的距離の確保のための床への印付けなどを行っていること<sup>(4)</sup>などが報じられている。前述の通り、通常運転では発電所内の人口密度は通常のオフィスと大差がないこともあり、消毒の徹底や社会的距離の確保といった一般的な対策が行われているよう



である。やや手厚い対策の例として、ウクライナにおいて、キーとなる運転員には消毒と医療モニター完備のホテルの部屋を提供している<sup>(5)</sup>というニュースがあった。

保守関係では、作業員の人数を削減し、一部作業の延期といったニュースが報じられている。S&P グローバル・プラッツ社発行の週刊ニュース（S&P Global Platts Nucleonics Week）によると、米国で96基ある原子炉の3分の1が2020年6月までの燃料交換停止を予定していたが、作業員の人数を削減すると同時に不可欠な作業に絞ることで作業量を縮小している<sup>(6)</sup>。なお、9月15日の原子力エネルギー協会（NEI）のニュースリリースによると、6月までの燃料交換作業および重要な保守作業は無事完了しており、その経験を活かして、2020年秋に予定されている約20基の燃料交換も予定通り実施するとのことである<sup>(7)</sup>。

新設関係では、労働力の削減や作業の一部延期などの対応が見られる。加圧水型炉AP1000増設中のヴォーグル3、4号機では2020年4月15日新型コロナウイルスの影響軽減のため労働力の20%削減を表明している<sup>(8)</sup>。また、ロスアトムのレニングラード-II 2号機は5月19日に、立ち上げを2カ月延期することを申請した<sup>(9)</sup>。延期は6月19日に終了し立ち上げ作業が再開している<sup>(10)</sup>。

以上のように、原子力発電所は運転員の感染防止措置を取りつつ稼働を続けている。6月11日の時点には新型コロナウイルスの影響による原子炉の停止はないことが報告されており<sup>(11)</sup>、また、その後少なくともWNNでは新型コロナウイルスの影響で原子炉の停止があったという報告はなされていない。保守、新設作業については3月から6月にかけて労働力の削減、作業の一部が延期などといったニュースが報じられていたが、その後下火になっており、現在は対策を取りながらほぼ通常通りの作業が継続されていることが示唆される。

## 5. 規制機関の新型コロナウイルスへの対応

原子力分野は規制が厳しく、事業者が柔軟な対応を行いづらい側面がある。各国の規制機関は一部規制免除などの対応を行うことにより、事業者が対応しやすくしている。

米国の規制機関である原子力規制委員会（NRC）においては、人員確保のための規制緩和として、労働時間制限の規定を免除するレターを発行している<sup>(12)</sup>。これにより、新型コロナウイルスの感染により作業ができない人員が出た際に、他の人員の労働時間を延ばすことで要員不足に対応することが可能となる。また、運転員の再認定プログラムに関する要件と運転員の健康診断に関する要件を免除するガイダンスも提供している<sup>(12)</sup>。これにより、必要な試験の一時的な免除を行い、事業者が要員計画を見直すことが可能となっている。

さらに、呼吸用防護具の要件緩和について、使用者の医療評価および呼吸用防護具のフィットテストに関する要件を免除することが可能となるガイダンスを提供している<sup>(12)</sup>。これにより、放射線環境下作業のために制御室などに設置されている呼吸用防護具を新型コロナウイルス対策として利用しやすくなる。

また、経済的な支援策として手数料請求の延長を行っている。新型コロナウイルスによる経済的な影響を緩和する措置として、4月から6月の間に請求される予定の手数料について7月まで請求を延期することとした。なお、この手数料は予定通り7月に回収されている。発電所の運転は継続されているため、支払い能力に問題はなく再度の延長措置は必要ないという判断だと推測される。

続いて、英国の規制機関である原子力規制庁（ONR）の対応について紹介する<sup>(13)</sup>。

2020年4月より、ONR職員は政府の勧告に従い在宅勤務をしており、緊急で必要不可欠な検査については限られた検査官で対応し

てきた。また、原子力発電所の人員レベルにより安全とセキュリティに影響を及ぼす可能性がある場合、事業者とともに対処することとしている。英国における感染が収束しない中、このような措置は10月末現在も継続されている。

また、フィンランドの規制機関である放射線原子力安全局（STUK）は建設中のハンヒキビ1号機に関してリモート検査を行っている<sup>(14)</sup>。

以上のように、海外の規制機関は、原子力の安全性を担保しつつも、規制要件を緩和するなど、柔軟かつ大胆な緩和策を行っていることが伺える。特に、米国においては、要員の確保のための大胆な施策を進めるとともに、呼吸用防護具の活用など柔軟な対応を進めている。また、業務のテレワークを推し進めるとともに、遠隔での検査の実施などに取り組んでいるケースも報告されている。

## 6. ウラン供給への影響

新型コロナウイルスの影響により世界各国のウラン鉱山が操業停止となっており、ウラン価格の上昇も発生している。カナダのシガーレイク鉱山（3月23日停止）<sup>(15)</sup>、ナミビアのロッシング鉱山（3月28日停止）<sup>(16)</sup>、カザフスタンのインカイ鉱山（4月7日停止）<sup>(17)</sup>などが操業停止を発表している。運営会社のニュースリリースによるとインカイ鉱山は8月上旬に運転を再開している。シガーレイク鉱山は9月に再開予定であるとのニュースがあったが<sup>(18)</sup>、現時点（10月16日）ではまだ再開の確認はできていない。

これらの影響を受けてシガーレイク鉱山が停止された3月23日から酸化ウラン（ $U_3O_8$ ）のスポット価格が上昇しており、1カ月で37パーセント増加の33.66ドル/バレルとなった。これは4年ぶりの高値となっている。

その後、 $U_3O_8$ のスポット価格は若干落ちてきており、現在は31ドル/バレル前後で

推移している。今後も燃料供給の状況について注視していく必要がある。

なお、原子力産業の調査・分析を行うUxC社は、年に2回実施している調査の今年の夏の調査において、将来の燃料の価格、調達計画、鉱山の閉鎖や再開などによる影響について電力会社および核燃料供給者から回答を得ている。これによると、ほとんどの回答者は、ウラン生産で初期に問題があったものの、ウラン市場はパンデミックの中でも適切に管理されており、パンデミックに対して強固であることが証明されたとしている。また、一部に悲観論はあるものの、電力需要の低下や、新型コロナウイルスによる影響は核燃料の時間スケールからすれば一時的なものであり、今後パンデミックが燃料供給に大きな影響を及ぼすことはないという楽観的な意見が大多数となっている<sup>(19)</sup>。

## 7. 今後の原子力の役割

WNNにおいては、新型コロナウイルスの流行が開始した2020年3月頃からしばらくは事業者や規制機関の対策の実施に関するニュースが多くを占めていた。

流行が一段落した6月頃になると、新型コロナウイルス流行を直接原因として運転停止に至った原子力発電所はなく、影響は限定的であることが明らかになってきた。原子力施設は元々様々な事態を想定した対策を行っているため、今回の事象もある意味で想定内であったと考えられる。それ以降のWNNでは、ウィズコロナの日常での持続的な電源として、国際機関やエネルギーのシンクタンクが原子力の有用性を主張するニュースの比率が高まってきてきた。

国際エネルギー機関（IEA）事務局長は、原子力のような安定したベースロード電源が必要であると評価しており<sup>(20)</sup>、また、世界原子力協会（WNA）局長は、原子力が新型コロナウイルス後の回復に重要な役割を果た

することができる<sup>(21)</sup>。さらに、多国籍の人員で構成されるエネルギーシンクタンク“Thomas Thor Associations”の最高経営責任者（CEO）は原子力が経済回復、雇用創出、エネルギー安全保障および気候変動の4つの問題に解決策を示すことが可能であると評価している<sup>(22)</sup>。また、IEAの新型コロナウイルス分析ハブは、エネルギー安全保障の重要性について述べている<sup>(23)</sup>。同様のニュースは、その後もコンスタントに出続けている。

この背景にあるのは、短期的にはパンデミック後の経済回復、中長期的には低炭素社会の実現に向けた投資対象に原子力を加えるかどうかという議論である。欧州委員会は必ずしも原子力に積極的ではなく、欧州委員会副委員長（欧州グリーンディール担当）が、「原子力を選択したいという国の邪魔をしないが、いったん建設すると非常に長期にわたってとられるということを考慮すべき」とコメントしたという記事がでている<sup>(24)</sup>。彼は原子力が運転時にCO<sub>2</sub>を出さないというメリットは認めつつ、放射性廃棄物の処理の問題や、建設から廃止措置に至る非常に長期のライフサイクル全体を考慮した経済合理性に不安を呈している。原子力がコロナ後の復興や、気候変動問題対応の主力エネルギー源の1つとして認められるかどうかは、原子力の将来像に大きなインパクトを与えるものであり、原子力関係機関から原子力を利用するメリットに係る積極的な情報発信が続けられている。

## 8. 結語

世界中で感染が広がっている新型コロナウイルスは、経済に大きな影響を及ぼしているものの電力需要は大きな減少を見せていない。そのため、今後も発電施設の継続的な運転が要求される。原子力発電所は感染に対して警戒しながらも運転を継続している。また、新設作業や保守作業については、初期の流行拡

大時、一部の発電所において作業の延期などの措置を取っているというニュースが報告されていたが、その後は感染に気を付けながらも必要な作業を継続しているようである。IAEAやNEAなどの国際機関は事業者対応などの情報の共有や意見交換の場を積極的に提供するとともに、新しい日常に向けて検査や会合の遠隔化も進めている。

海外の規制機関は、事業者が感染対策と運転継続を両立できるよう柔軟な対応を実施しており、特に、米国の規制機関は大胆な緩和策を実施していたことが分かる。

このような現状の中、パンデミック後の経済回復や将来の低炭素社会の実現を見据えて、経済性と気候変動問題対応を兼ね備えたエネルギーである原子力を積極的に利用すべきであるとの声が上がっている。

以上、述べてきたように、原子力発電所は新型コロナウイルスの影響の中、運転を継続してきている。経済的優位性の高い原子力発電所を利用することで、当面の電力安定供給に寄与するだけでなく、中長期的には新型コロナウイルスによる経済的ダメージを緩和し、また、気候変動問題の解決にも近づくことができる。このような、原子力の優位性による新型コロナウイルスの感染拡大の中での原子力の役割を社会にアピールしていくことで原子力利用を推し進めることができると考えられる。

## 参考文献

- (1) 4月30日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Global-energy-demand-and-emissions-impacted-by-COV>
- (2) <https://www.adecogroup.jp/power-of-work/154>
- (3) 3月30日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Rosatom-takes-measures-to-protect-workers-from-COV>
- (4) <https://www.nei.org/news/2020/what-refueling-nuclear-reactor-covid-19-taught>
- (5) 3月26日付 WNN: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Energoatom-separates-plant-personnel-for-protection>
- (6) S&P Global Platts Nucleonics Week, Vol.61, No.17, April 23, 2020

- (7) <https://www.nei.org/news/2020/what-refueling-nuclear-reactor-covid-19-taught>
- (8) 4月23日付 ANS: <https://www.ans.org/news/article-119/pandemic-prompts-cuts-to-vogtle-construction-workforce/>
- (9) 5月19日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Leningrad-II-2-start-up-postponed-to-April-2021>
- (10) 6月20日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Fuel-loading-starts-at-Leningrad-II-2>
- (11) 6月11日付 WNN <https://world-nuclear-news.org/Articles/Regulation-of-radioactive-sources-maintained-IAEA>
- (12) <https://www.nrc.gov/about-nrc/covid-19/>
- (13) <http://news.onr.org.uk/2020/09/covid-19-onr-position-180920/>
- (14) 4月29日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Finland-performs-remote-inspection-of-new-nuclear>
- (15) 3月24日付 WNN: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Canadian-uranium-operations-suspended-in-COVID-19>
- (16) 3月30日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Rossing-operations-suspended-in-Namibian-lockdown>
- (17) 4月8日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Cameco-assesses-Inkai-and-Ontario-operations>
- (18) <https://www.miningweekly.com/article/cameco-to-restart-cigar-lake-in-early-september-2020-07-29>
- (19) 10月8日付 WNN <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Uranium-market-is-weathering-the-COVID-19-storm?feed=feed>
- (20) 5月23日付 WNN: <https://world-nuclear-news.org/Articles/COVID-19-crisis-shows-need-to-keep-electricity-opt>
- (21) 6月1日付 WNN: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Nuclear-must-be-part-of-a-post-virus-and-low-carbo>
- (22) 4月27日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Viewpoint-The-impact-of-COVID-19-on-nuclear-jobs>
- (23) 4月6日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Energy-vital-for-coronavirus-response-and-recovery>
- (24) 6月26日付 WNN: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Europe-needs-all-energy-sources-for-recovery-Biol?feed=feed>



## 水素燃焼タービン発電技術と世界の開発動向

松本 俊一（プロジェクト試験研究部  
主管研究員）



### 1. はじめに

近年、欧米を中心に地球温暖化対策への取り組みが加速している。エネルギー分野では、温室効果ガスの排出を抑制するために、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギー（再エネ）の導入促進と合わせて、化石燃料を利用する火力発電において様々な脱炭素化対策が進められている。

火力発電の脱炭素化対策としては、発電効率の改善による燃料使用量の削減、燃焼時に発生する二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を分離回収して地中貯留や合成燃料等に利用する二酸化炭素回収・有効利用・貯留（CCUS）、燃焼してもCO<sub>2</sub>を発生しないCO<sub>2</sub>フリー燃料（水素、アンモニア等）への転換、などがある。なかでも化石燃料をCO<sub>2</sub>フリー燃料に転換する場合には、既存の火力発電設備を部分的に改造することでCO<sub>2</sub>排出量を削減できるため、実現性が高く費用対効果に優れた脱炭素化対策と言える。

特に、液化天然ガス（LNG）を燃料とするLNG火力発電は、石炭火力や石油火力よりも発電効率が高くCO<sub>2</sub>排出量が少ない上に、電力需要の急な変動に対応して電力を供給できる優れた運転特性を持っている。このため、天然ガスを水素などに転換すれば発電時にCO<sub>2</sub>を排出せず、更に、気象条件に影響される再エネと組み合わせることで、電力需給のバランスを調整するための電源やバックアップ電源となり、電力の安定供給に重要な役割を担うことができる。

本稿では、LNG火力発電の中核であるガスタービン発電技術について、国内外で行われている水素利用に向けた技術開発の状況を紹介する。最初に、わが国の発電分野の脱炭素化に必要な水素量の目安を試算し、水素燃焼タービン発電技術の概要を紹介する。次に、世界の主なガスタービンメーカーが実施している水素の混焼、専焼に関する技術開発や実証事業の状況、最後に、将来の高効率発電技術として期待される酸素水素燃焼技術について紹介する。

### 2. 水素による日本の発電分野の脱炭素化

#### （1）日本の発電電力量の推移

わが国の発電電力量は、図1のように経済成長に伴って着実に増加し、その間には1973年の第一次石油ショックを契機として、エネルギー安全保障の観点から電源構成の多様化が図られてきた。しかし、2011年の東日本大震災以降は火力発電への依存が増えており、表1に示すように、2018年度は全体の76.9%を占め、LNG火力と石炭火力が主力電源となっている。

#### （2）発電分野の脱炭素化とガスタービン発電の役割

発電分野の脱炭素化対策としては、再エネの導入、原子力発電の再稼働、火力発電からの二酸化炭素回収・貯留（CCS）、水素などのCO<sub>2</sub>フリー燃料の発電利用、の4つの方法があり、主な課題とガスタービン発電の役割を表2に示す。



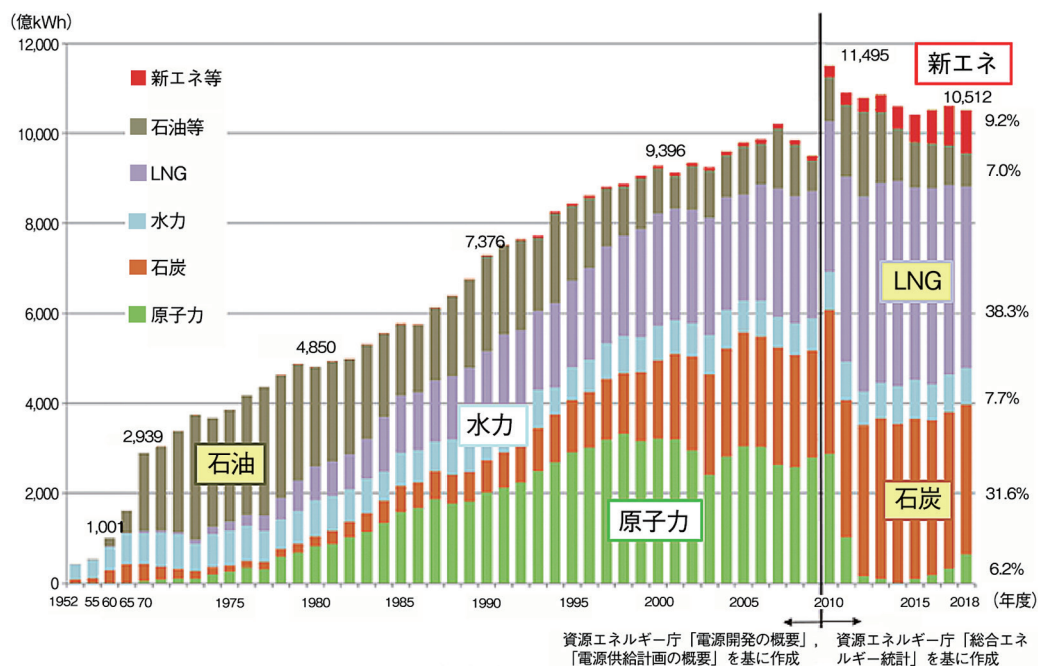


図1 日本の発電電力量の推移<sup>(1)</sup>

表1 2018年度の日本の電源構成<sup>(1)</sup>

| 電 源   | 発電電力量(億kWh) | 比率(%) |
|-------|-------------|-------|
| LNG火力 | 4,029       | 38.3  |
| 石炭火力  | 3,324       | 31.6  |
| 石油等火力 | 737         | 7.0   |
| 新エネ等  | 963         | 9.2   |
| 水力    | 810         | 7.7   |
| 原子力   | 649         | 6.2   |
| 合 計   | 10,512      | 100   |

表2 発電分野の脱炭素化とガスタービン発電の役割

| 脱炭素化対策                               | 主な課題                                                                            | ガスタービン発電の役割                                           |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 国内の再エネ発電の最大限の導入                      | 国内の再エネ資源の量的・質的な限界<br>再エネ余剰電力の貯蔵設備(電池、水素等)<br>再エネ調整電源等の整備                        | ガスタービン+再エネ水素による<br>分散電源、調整電源、バックアップ<br>電源             |
| 安全が確認された原発の再稼働                       | 地元の合意形成<br>殆どの原発が2050年までに設備寿命(新設やリ<br>プレースができれば発電能力が大幅ダウン)                      | 非常用発電設備としてのガス<br>タービン利用                               |
| 化石燃料による発電+CCS                        | CCSを経済的に実施可能な適地の選定                                                              | ガスタービンによるLNG火力+<br>CCS                                |
| CO <sub>2</sub> フリー燃料(水素等)の大量輸入と発電利用 | 新たなCO <sub>2</sub> フリー燃料のサプライチェーン構築<br>燃料価格の低減化(安価な再エネや褐炭+CCS<br>による大量製造、輸送、貯蔵) | ガスタービンによるLNG火力の<br>燃料転換(CO <sub>2</sub> フリー燃料の利<br>用) |

原子力発電以外では、発電分野の脱炭素化にはガスタービンでのCO<sub>2</sub>フリー燃料の利用が効果的であり、ガスタービンで水素を利用するための技術開発や実証事業が進められている。

### (3) 火力発電の燃料を水素に転換する場合の

#### 必要量の試算

火力発電のCO<sub>2</sub>排出量をゼロとするために

必要となる水素量の目安について、2018年度の発電電力量に基づいて以下の2ケースを試算した。

- ケース1：LNG火力のみを水素に転換する場合
- ケース2：すべての火力発電をLNGおよび水素に転換する場合

ケース1の試算結果を図2(左)に示す。LNG火力の平均発電効率の50.5%の場合に必

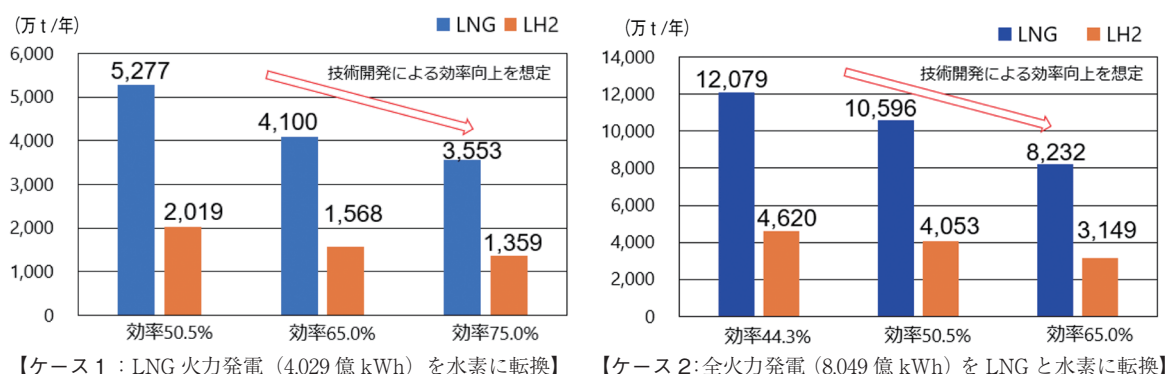


図2 LNG と LH<sub>2</sub> の必要量

要な LNG 量は 5,277 万トンとなり、液化水素（LH<sub>2</sub>）換算で 2,019 万トンとなった。この試算結果は、実際の 2018 年度の LNG 輸入量 8,055 万トンと国産量 186 万トン、そのうち電力用が 60%（他は都市ガス用 33%など）であることから算出した LNG 量の 4,945 万トンと比較して、試算結果の方が 7% 程度多いが、目安としては妥当なレベルと考える。

発電効率が向上すれば燃料量が減少するため、大型のガスタービンコンバインドサイクル発電（GTCC）が目指している最高効率 65% とした場合には、LNG で 4,100 万トン、LH<sub>2</sub> で 1,568 万トンとなり、将来の高効率化を期待して 75% とした場合には、LNG で 3,553 万トン、LH<sub>2</sub> で 1,359 万トンとなった。

ケース 2 の試算結果を図 2（右）に示す。全ての火力発電を対象として同様に試算した結果、全火力発電設備の加重平均発電効率の 44.3% では、LNG は 12,079 万トン、LH<sub>2</sub> は 4,620 万トンとなった。更に、効率を LNG 火力ベースの 50.5% とした場合の LH<sub>2</sub> は 4,053 万トン、効率 65% では 3,149 万トンとなった。

この試算により、発電分野の CO<sub>2</sub> 排出量ゼロを実現するためには、CO<sub>2</sub> フリー水素が年間

3,000 ～ 5,000 万トン程度必要であること、発電効率の向上が重要であることが分かる。但し、この試算では実際の実現可能性は考慮していないため、今後の関連技術開発の状況を踏まえて精査する必要がある。

#### （4）水素燃焼タービン発電と水素サプライチェーン

火力発電の燃料として水素を利用するためには、大量の水素を安価に供給できる大規模なサプライチェーンの整備が必要となる。

その際には、欧州が目指している再エネ由来水素の製造・供給が望ましいが、わが国は、再エネに適したエリアが北海道・東北地方と九州・沖縄地方であり、気象条件の季節変動が大きいこと、電力需要地から離れていること、などの課題がある。当面は大量生産による安定供給と低コスト化が期待できる海外の未利用化石資源 + CCS によってサプライチェーンを整備しながら、再エネによる水素製造を増やしていく方法が現実的と考える。

水素燃焼タービン発電の規模や用途に応じた水素サプライチェーンについて整理した内容を表 3 に示す。

表3 水素サプライチェーンと水素燃焼タービン発電

| 規模  | 水素サプライチェーン         | 普及範囲     | 水素源                       | 水素GT発電の規模・用途                           |
|-----|--------------------|----------|---------------------------|----------------------------------------|
| 大規模 | 海外で大量に製造し、輸入して国内消費 | 国（国際連携）  | 再エネ（P to X）、未利用資源（褐炭+CCS） | 大型GT：ベースロード電源、ミドル電源（コンバインドサイクルによる高効率化） |
| 中規模 | 国内で製造・貯蔵・消費        | 地域       | 再エネ（P to X）               | 中型GT：分散電源、コージェネレーション、ピーク電源（シンプルサイクル）   |
| 小規模 | 域内で製造・貯蔵・消費        | 小地域、離島など | 再エネ（P to X）               | 小型GT：分散電源（マイクログリッド）                    |

大規模水素サプライチェーンは海外と連携して実証事業が進められており、液化水素では川崎重工業(株)が、有機ケミカルハイドライド (SPERA 水素<sup>®</sup>) では千代田化工建設(株)が、関連機関と連携して商用化を目指している。また、中小規模については、国内で再エネ電力による水素製造、貯蔵、利用に関するFSや実証事業が行われている。

### 3. 水素燃焼タービン発電技術

#### (1) ガスタービン発電の概要

ガスタービンは、天然ガスなどのガス燃料や軽油などの液体燃料を燃焼して発生する熱エネルギー（高温高压の燃焼ガス）を機械的な仕事に変換する回転機械であり、発電用、航空機用、機械駆動用などの原動機として広く用いられている。

形式は、回転部分の構成によって主に一軸式と二軸式に分けられる。

- 一軸式：回転体（軸）が1本であり定速回転の発電用に利用されている。
- 二軸式：空気を圧縮して燃焼ガスを生成する回転体と出力を取り出す回転体用に回転軸が2本あり、回転数や負荷が変動する圧縮機・ポンプなどの機械駆動用に利用されている。

構造は、用途によって次の3つの型に分けられている。

- 重構造型：出力100～500MW～、定格出力での長時間運転用。排熱回収による蒸気タービン発電と組合せたコンバインドサイクル発電として普及している。
- 航空転用型：出力1～50MW、急な負荷変動に対応するため、コンパクトで高効率な航空機用エンジンを発電（ピーク電源）、機械駆動、船舶用に転用したもの。
- 軽構造型：出力1～50MW、定格出力での長時間運転用。産業用に電力と熱を供給するコージェネレーションやピーク電源用として普及している。

#### (2) ガスタービン発電の水素燃焼方式

水素は、温度と圧力条件によって複雑な燃焼特性を示すため、ガスタービンで利用する

ためには、新たな燃焼器を開発する必要がある。特に、天然ガスと比較して①発熱量が低い（体積当たり3分の1以下）、②燃焼温度が高い（+10%程度）、③燃焼速度が速い（約7倍）、という特徴があるため、主な開発課題は、燃焼の安定性（逆火による焼損防止）とサーマルNO<sub>x</sub>（窒素酸化物）の低減化である。

ガスタービンの燃焼方式は、以下のように2種類に区分できる。

- 拡散燃焼方式：燃料と空気を別々に噴出して燃焼させる方式で、両者の拡散混合速度によって燃焼速度が定まる。燃焼器内に局所的な高温部分が発生してNO<sub>x</sub>を発生しやすいため、水や蒸気などを噴射してNO<sub>x</sub>を低減している。熱効率は下がるが多様な燃料に対応でき、水素100%燃焼も可能である。
- 予混合方式：燃料と空気をあらかじめ混合してから燃焼する方式で、燃料に適した可燃混合範囲がある。水等を噴霧せずにNO<sub>x</sub>を低減できるため熱効率は低下しないが、負荷変動に伴って火炎が不安定になり、逆火、振動、吹き消えが起りやすく、水素の混焼割合に上限がある。

水素燃焼に対応するために、拡散燃焼方式では水や蒸気の噴射による湿式燃焼器が開発され、予混合燃焼方式では、様々な方式の乾式低エミッション (DLE) 燃焼器が開発されている。特に、DLE 燃焼器については、希薄予混合燃焼方式が一般的であるが、水素専焼用では、①水素と空気用の小径ノズルを組合せて一定数の群を構成し、ノズルごとに小さな火炎を作り低NO<sub>x</sub>化と逆火防止を図るマルチクラスター方式、②直列に2つのバーナを設けて、両バーナの燃焼条件を制御する逐次燃焼方式 (SCT) などが開発されている。

空気-水素燃焼方式のガスタービン発電システムは、既存設備の燃焼器等を改造することで、比較的、容易に実現できるが、発電効率は天然ガスと同等でありNO<sub>x</sub>対策が不可欠である。

一方、空気の代わりに純酸素を用いる酸素-水素燃焼方式のガスタービン発電システムは、燃焼生成物が水（蒸気）のみのゼロエミッショ

表 4 燃焼方式による水素燃焼タービン発電システムの比較

| 項 目      | 空気-水素燃焼タービン                | 酸素-水素燃焼タービン                       |
|----------|----------------------------|-----------------------------------|
| 燃料供給     | 液体水素または気体水素                | 液体水素または気体水素                       |
| 主な長所     | 豊富な実績, シンプルシステム, コンパクトな燃焼器 | 無公害, 無排気, 密閉系可能, エネルギー有効利用        |
| 主な短所     | NOx排出                      | システム制御系が複雑(酸素供給他)                 |
| 環境保全     | 良(大気開放系)                   | 優(密閉系)                            |
| 立地性      | 中~大                        | 中~大                               |
| 面積<br>場所 | 地域, 供給基地周辺                 | 地域, 供給基地周辺                        |
| 発電規模     | 中~大                        | 中~大                               |
| 発電効率     | 良(約50%, LNG火力と同等)          | 優(NG火力より10%程度高い)                  |
| 運転・保守性   | 容易                         | 気密保持が必要(密閉系)                      |
| 安全性      | 水素貯蔵供給系                    | 水素, 酸素の2系統の対策が必要                  |
| 供給体制     | 液水, 水素, 水素化合物              | 液水, 水素, 水素化合物, 酸素(液化水素の冷熱利用による製造) |
| 技術課題     | 低NOx燃焼器                    | 材料, 燃焼制御等                         |
| 開発段階     | 混焼は実証~商用段階, 専焼は技術開発~実証段階   | 基礎・要素研究段階                         |
| 新規性      | 小                          | 大                                 |
| 水素の優位性   | 中                          | 大                                 |

ン発電であり、クローズドサイクルを構成することで空気-水素燃焼方式よりも高い発電効率が期待できる。但し、発電サイクル、高温高压条件での燃焼技術やタービン技術など、様々な開発課題があり、長期的な開発が必要となる。

わが国では「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」(WE-NET) プロジェクトの第1期(1993~1998年)において実用化を目指した基盤研究が実施されている。その後、約20年を経て、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の事業として、2018年度から高効率でゼロエミッションを実現する水素発電技術についての研究開発が再開され、2020年度からは「酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発」が進められている。

海外においても、酸素水素燃焼タービン発電に関するサイクル検討、再エネによる水素・酸素製造と酸素水素燃焼タービン発電の実証

事業、天然ガスを酸素燃焼する超臨界CO<sub>2</sub>発電技術開発、などが進められている。

水素タービン発電システムに適用可能な空気・水素燃焼方式と酸素・水素燃焼方式の特徴を表4に示す。

### (3) ガスタービン発電における水素の混焼割合とCO<sub>2</sub>削減効果

天然ガスに混合する水素の量(体積比, Vol%)と燃焼後に排出されるCO<sub>2</sub>(質量比, w%)の関係を図3に示す。①のように天然ガスに水素を30Vol%混焼する場合のCO<sub>2</sub>削減効果は10w%程度である。また、②のようにCO<sub>2</sub>排出量を50w%削減するためには、水素を80Vol%近くまで混焼する必要がある。当面は水素供給インフラの整備状況に応じて水素の混焼割合を増やしていくことになるが、将来的にはCO<sub>2</sub>フリー水素の供給インフラを整備して水素100%専焼とする必要がある。

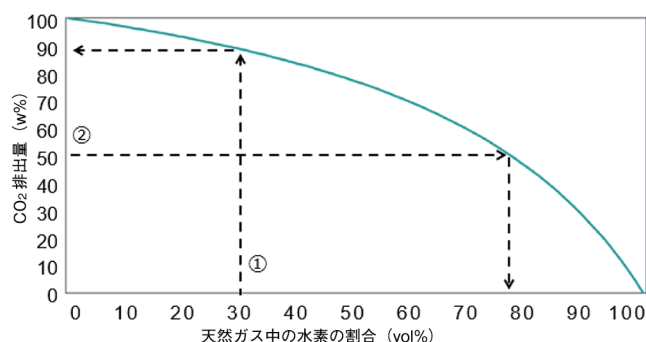


図 3 天然ガス中の水素の割合と燃焼後の相対的な CO<sub>2</sub> 排出量 (2)



#### 4. 空気水素燃焼方式に関する技術開発動向

##### (1) ガスタービンの技術開発概要

ガスタービンは、発電効率の向上とともに、運転制御性、信頼性、保守性、経済性、環境性などを改善するために様々な技術開発が行われており、その性能は進化し続けている。

近年、天然ガスと水素の混焼技術や水素専焼技術の開発に加え、風力発電や太陽光発電などの再エネの大量導入に伴い、これらの不安定電源の調整およびバックアップ用としての運転柔軟性が求められている。このため、従来はベースロード運転用の大型機であっても、高速スタートや部分負荷運転、高いターンドアウン特性など、電力需給の変化に柔軟に対応できる運転性能が実現されている。

表5に単体出力400MW以上の大型ガス

タービンを製造している4社の代表的な製品の仕様を示す。発電効率は、単体で42～44%、コンバインドサイクルで62～64%台である。また、海外メーカーのコンバインドサイクルでは、起動時間が30分未満、負荷変化率がプラント出力の約10%/分など、優れた特性を示す機種もある。

表6に主要ガスタービンメーカーが実施している水素発電に関する取組み概要を示す。各社とも天然ガスとの水素混焼割合は30～50%（体積比、以下同様）まで商用段階であり、混焼時のNO<sub>x</sub>排出が25ppm以下のケースもある。100MW以下の中小型機では50～70%程度まで混焼でき、水や水蒸気を燃焼器に添加することで水素100%も可能である。大型機では30%混焼までは商用段階であり、2025～2030年までに水素100%用燃焼器を開発する計画である。

表5 大型ガスタービンメーカーの製品仕様

| 項 目                                           | GEパワー     |        | シーメンス・エナジー  |             | 三菱パワー   |         | アンサルド・エネルギア |         |
|-----------------------------------------------|-----------|--------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|---------|
|                                               | 9HA.01    | 9HA.02 | SGT5-9000HL | SGT-69000HL | M701JAC | M501JAC | GT36-55     | GT36-56 |
| <ガスタービン単体性能>                                  |           |        |             |             |         |         |             |         |
| 周波数(Hz)                                       | 60        | 50     | 50          | 60          | 50      | 60      | 50          | 60      |
| ISO定格出力(MW)                                   | 448/446   | 571    | 593         | 405         | 448     | 435     | 538         | 639     |
| 熱効率(%LHV)                                     | 42.9/43.1 | 44.0   | 42.8        | 42.6        | 44      | 44      | 42.8        | 42.3    |
| 熱消費率(kJ/kWh, LHV基準)                           | 8,398     | 8,201  | 8,411       | 8,451       | 8,182   | 8,182   | -           | -       |
| 排ガス流量(kg/s)                                   | 821       | -      | 1,050       | 725         | 765     | 764     | 1,020       | 710     |
| 排ガス温度(℃)                                      | 648       | -      | 670         | 670         | 663     | 645     | 621         | 630     |
| 廃気排出物 NO <sub>x</sub> (ppm)@15%O <sub>2</sub> | 25        | -      | <2(SCR)     | <2(SCR)     | 25      | 25      | ≤26/16      | ≤26/16  |
| CO(ppm)@15%O <sub>2</sub>                     | 15        | -      | 10          | 10          | 9       | 9       | ≤9          | ≤9      |
| ターンドアウン負荷(%)                                  | -         | -      | -           | -           | 50      | 50      | -           | -       |
| 負荷変化率(MW/分)                                   | -         | -      | 85          | 85          | 53      | 42      | -           | -       |
| 起動時間(分)                                       | -         | -      | -           | -           | 30      | 30      | -           | -       |
| <コンバインドサイクル性能>                                |           |        |             |             |         |         |             |         |
| 1 on 1                                        |           |        |             |             |         |         |             |         |
| プラント出力(kW)                                    | 680       | 838    | 870         | 595         | 650     | 630     | 760         | 520     |
| プラント熱効率(%LHV)                                 | 63.7      | 64.1   | >63         | >63         | >64.0   | >64.0   | 62.6        | 62.3    |
| 熱消費率(kJ/kWh, LHV基準)                           | 5,651     | 5,613  | <5,714      | <5,714      | -       | -       | -           | -       |
| 最低負荷運転(%)                                     | 33.0      | 33.0   | 40          | 40          | -       | -       | 10～15       | 10～15   |
| 負荷変化率(MW/分)                                   | 65        | 88     | -           | -           | -       | -       | -           | -       |
| 起動時間(分)                                       | <30       | <30    | -           | -           | -       | -       | -           | -       |
| 2 on 1                                        |           |        |             |             |         |         |             |         |
| プラント出力(kW)                                    | 1,365     | 1,680  | 1,740       | 1,190       | -       | 1,263   | 1,525       | 1,046   |
| プラント熱効率(%LHV)                                 | 63.8      | 64.3   | >63         | >63         | -       | >64.2   | 62.8        | 62.6    |
| 熱消費率(kJ/kWh, LHV基準)                           | 5,639     | 5,598  | <5,714      | <5,714      | -       | -       | -           | -       |
| 最低負荷運転(%)                                     | 15.0      | 15.0   | 40          | 40          | -       | -       | 5～8         | 5～8     |
| 負荷変化率(MW/分)                                   | 130       | 176    | -           | -           | -       | -       | -           | -       |
| 起動時間(分)                                       | <30       | <30    | -           | -           | -       | -       | -           | -       |

表6 主要ガスタービンメーカーの水素発電への取組み

| メーカー           | 所在   | GT出力(MW) | 水素の発電利用(混焼・専焼)に関する取組み                                                                                                                                                      |
|----------------|------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アンサルド<br>エネ르기ア | イタリア | 80-538   | GT36: 38MW, 42.8%, 水素混焼0~50% (Sequential Combustion Technology), 欧州での天然ガス火力の水素利用を推進中                                                                                       |
| ベーカー<br>ヒューズ   | 米国   | 3.5-130  | NovaLT 16: 16.9MW, 36.4%, 水素混焼5~100%<br>豪州のHydrogen Utility社より2019年2月に受注                                                                                                   |
| GEパワー          | 米国   | 24-571   | 9HA.02: 571MW, 44.0%, 水素混焼~50% (中小型機では65~100%), 水素等のCO <sub>2</sub> フリー燃料による発電分野の脱炭素化を推進中(既設改造含む)                                                                          |
| 川崎重工業          | 日本   | 1.5-30   | 3種類の水素燃焼器を開発(追焚き, 拡散燃焼(ウエット), 微小水素火炎方式), 神戸での水素コージェネレーション実証事業では1.1MWe, 2.8MWthを供給し, 水素の混焼~100%専焼を実証済                                                                       |
| 三菱パワー          | 日本   | 28-563   | 3種類の水素燃焼器を開発(予混合燃焼器, 拡散燃焼器, マルチクラスター燃焼器), オランダ/Mugnum水素焚き転換事業では440MWユニットで2025年までに水素専焼の予定。米国/Advanced Clean Energy Storage事業では, 420MW×2ユニットで2025年までに30%水素混焼, その後100%水素専焼の予定 |
| シーメンス<br>エナジー  | ドイツ  | 2-593    | SGT-9000HL: 593MW, 42.8%, 水素混焼0~30% (DLE燃焼器)<br>SGT-750: 39.8MW, 40.3%, 水素混焼0~40% (DLE燃焼器)<br>欧州でのPower to X to Power実証事業に参画。2030年までに全ユニットで水素100%専焼とする計画                   |
| ソーラー<br>タービン   | 米国   | 1.2-23   | 2006年からLow Swirl Injector燃焼技術による発電パッケージを提供し, 水素混焼は~70%まで実用化済。多様な水素含有燃料を産業用コージェネレーションで利用可能                                                                                  |

## (2) ガスタービン各社の技術開発の概要

### ① アンサルド・エネ르기ア社

アンサルド・エネ르기ア社の事業用ガスタービン GT36 の外観を図4に示す。

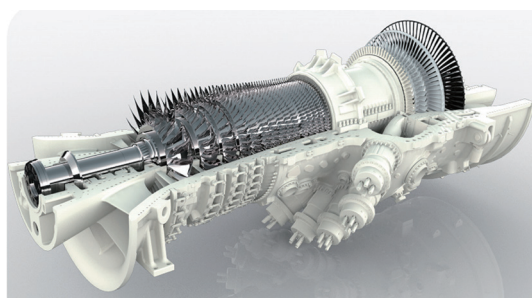


図4 GT36 タービン (3)

GT36 は、独自開発の順次燃焼技術 (SCT) を適用して天然ガスと水素の混焼割合を 30 ~ 50% としている。この順次燃焼技術は、図5に示すように、2つの燃焼段階を設けて燃料の燃焼特性と出力変動に対応するもので、水

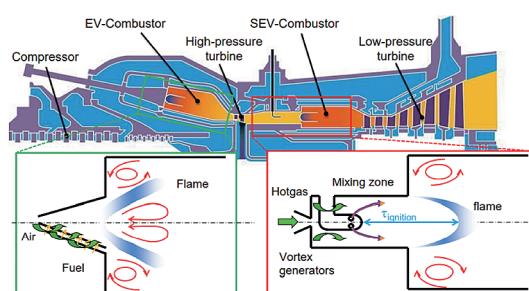


図5 SCT 燃焼器 (4)

素のような高い反応性を持つ燃料では、第1段階での燃焼ガスに希釈空気を混合させて火炎温度を下げ、第2段階での水素燃焼によってガスタービンの入口ガス温度を一定に制御することを特徴としている。

また、SCT のコンセプトに基づいて構造を集約化した Flame Sheet<sup>TM</sup> 燃焼器を開発し、既設ガスタービンや他社製ガスタービンに適用して水素対応に改造するレトロフィット事業を進めている。図6に示すこの燃焼器は、1桁オーダーの NO<sub>x</sub> および CO の排出レベルを維持しながら、ガスタービンの負荷変動の範囲を最大 30% 増加することを可能とし、シェールガス (天然ガス)、エタン、プロパン、水素などのガス燃料に適用できる。

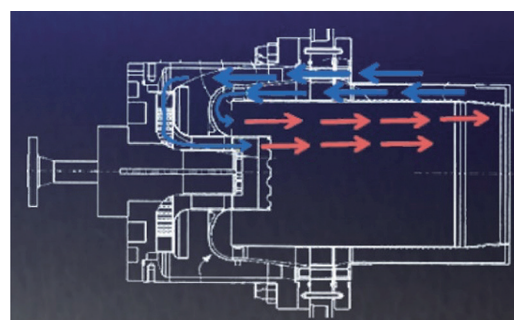


図6 Flame Sheet<sup>TM</sup> 燃焼器 (5)

## ②ベーカーヒューズ社

ベーカーヒューズ社は中小型機で豊富な実績があり、主に石油・ガス業界向けに発電用および機械駆動用のガスタービンを供給している。図7のガスタービンは、出力16.9MW、発電効率36.4%、NO<sub>x</sub> 15 ppm、排ガス温度495℃、DLE 燃焼器での水素混焼割合は30%である。現在、水素100%に向けて開発中である。

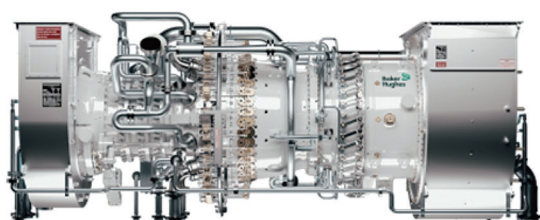


図7 NovaLT™16 ガスタービン (6)

また、オーストラリアの南豪州ポートリンカーンで行われている再エネ電力によるグリーン水素とグリーンアンモニアを製造するための実証事業において、このユニットを2台設置して100%水素での発電を行う計画である<sup>(7)</sup>。

## ③GE パワー社

GE パワー社の事業用ガスタービン GE 9HA の外観を図8に示す（仕様は表5参照）。

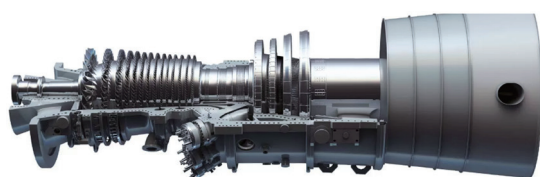


図8 GE 9HA ガスタービン (8)

GE パワー社では、水素燃焼用として、ガスタービンの型式に応じて以下の燃焼器を開発、実用化している。主な燃焼器の外観を図14に示す。

- SAC：航空転用型ガスタービン用（混焼割合：30～85%）
- SN：B および E ガスタービン用（混焼割合：最大90～100%）

- MNQC：E および F ガスタービン用（混焼割合：最大90～100%）

- DLE 燃焼器：混焼割合5%に制限

- DLN 燃焼器：

DLN1 燃焼器：6B、7E および 9E ガスタービン用5（混焼割合：最大33%）

DLN2.6+ 燃焼器：6B、7E および 9E ガスタービン用（混焼割合：最大15%）

DLN2.6e 燃焼器：9HA ガスタービン用（混焼割合：最大50%）

航空転用型ガスタービン



重構造型ガスタービン



Single Nozzle



MNQC



DLN 2.6e

図9 GE パワー社の水素燃焼用燃焼器 (9)

大型機用の DLN2.6e 燃焼器は最大50%の水素混焼が可能である。この燃焼技術は水素と燃焼用空気を小さな噴流として交差させて燃焼するもので、この高度な予混合機能によりNO<sub>x</sub>発生を低減しながらGE 9HA ガスタービンの柔軟な運転を可能としている。

GE パワー社では、世界的な地球温暖化対策の強化に伴い、ガスタービン主体の発電システムから、風力発電や太陽光発電と組み合わせたハイブリッド発電システムを指向し、同時に天然ガスから水素に燃料転換していくことで、CO<sub>2</sub>排出ゼロの発電システムの実現を目指している。また、IoT技術とセンシング技術を活用して運転情報のデジタル化を進め、単体機器レベルからグリッドレベルまでの運転データ等の収集・分析をはじめ、保守補修を含めたガスタービン製品のライフサイクル全体に関する情報管理を行うことで、電力の供給安定性の向上や発電コストの低減化などに取り組んでいる。



#### ④川崎重工業(株)

川崎重工業(株)は、中小型機で豊富な実績があり、主に産業用のコージェネレーションや非常用発電機用のガスタービンを供給している。図 10 に示す 1 MW 級小型ガスタービン M1A-17D は、定格出力 1.77MW、発電効率 27.7%、NOx 35 ppm であり、神戸市におい

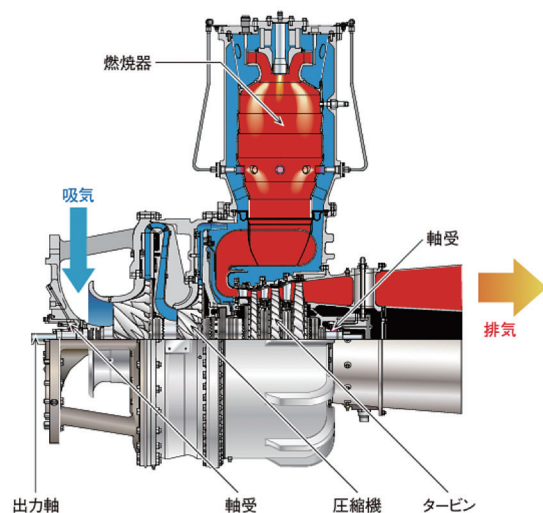


図 10 小型ガスタービン M1A-17D <sup>(10)</sup>

て世界初の水素 100%によるコージェネレーション実証事業を実施している。天然ガスと水素の混焼運転や水素専焼運転に対応でき、約 2,200Nm<sup>3</sup>/h の水素で近隣施設に 1.1MW の電力と 2.8MW の熱を供給している。

また、図 11 に示すように、川崎重工業(株)では追焚き、拡散燃焼（ウエット）、微小水素火炎方式の 3 種類の水素燃焼器を開発している。

#### ⑤三菱パワー(株)

三菱パワー社の事業用ガスタービン J シリーズ（JAC 形ガスタービン）の外観を図 12 に示す（仕様は表 5 参照）。

JAC 形ガスタービンはコンバインドサイクル効率が 64%を超えるガスタービンであり、M501J、M501JAC、M701J、M701JAC の 4 種類がある。主な特徴は、世界最高効率のコンバインドサイクルプラント性能、DLN 燃焼器を備え、負荷応答性が高く DSS 運転が可能なことである。

| 水素燃焼方式  | ①天然ガス・水素混焼<br>追焚き   | ②水素専焼・混焼<br>拡散燃焼                 | ③水素専焼<br>微小水素火炎                         |
|---------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
| NOx 低減  | ドライ(DLE)            | ウエット（水噴射）                        | ドライ(DLE)                                |
| 燃焼器形状   |                     |                                  |                                         |
| 最大水素混焼率 | 60vol%<br>(L30A燃焼器) | 100vol%                          | 100vol%                                 |
| 開発状況    | 実用化済み<br>           | 神戸・トクトで実証運転終了<br>(2015-18年度)<br> | 燃焼器を開発し神戸・トクトで<br>実証運転中 (2019-20年度)<br> |

図 11 川崎重工業(株)の水素ガスタービン開発状況 <sup>(11)</sup>

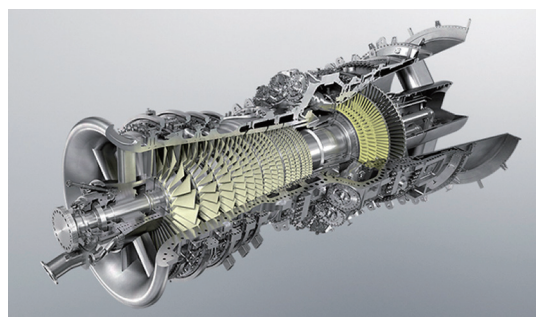


図 12 三菱パワー(株)の JAC 形ガスタービン <sup>(12)</sup>



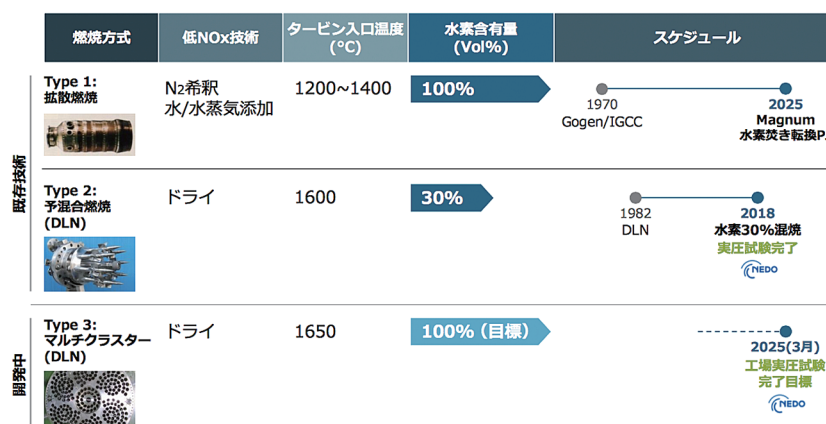


図 13 三菱パワー(株)が開発中の水素燃焼技術 <sup>(13)</sup>

図 13 に示すように、三菱パワー(株)では 1970 年代から高水素燃料用の燃焼器を開発しており、これまでに拡散燃焼方式と予混合燃焼方式の燃焼器を実用化している。拡散燃焼方式では窒素による希釈や、水または水蒸気の添加によってサーマル NO<sub>x</sub> を低減するとともに火炎の逆火防止対策により 100% 水素での運転が可能である。この方式の燃焼器は、欧州の「Magnum プロジェクト」に適用する予定である。但し、水等を添加することで、タービン入り口温度が低下するため発電効率も低下する。このため、予混合方式の乾式低 NO<sub>x</sub> 燃焼器を開発し、高いタービン入り口温度であっても、30% までの水素混焼を可能としている。現在、更に高いタービン入り口温度で 100% 水素燃焼を実現することを目標としてマルチクラスターバーナと称する乾式低 NO<sub>x</sub> バーナを開発しており 2025 年度までに実用化の計画である。

三菱パワー(株)は、欧米の発電事業者が進めている脱炭素化プロジェクトに積極的に参画しており、オランダで進められている天然ガス火力発電所での水素への燃料転換プロジェクト (Magnum プロジェクト) において出力 440MW の M701F ガスタービンの改造を行う予定である。また、米国では再エネで製造した水素を岩塩洞窟に一時貯蔵した後に発電利用する「Advanced Clean Energy Storage プロジェクト」において、M501JAC ガスター

ビンによるコンバインドサイクルを納入し、2025 年までに 30% 水素混焼、2045 年までに 100% 水素運転を行う予定である。これらのプロジェクトを皮切りに、天然ガス火力での水素利用による脱炭素化のための「統合型グリーン水素ソリューションパッケージ」を欧米の電力会社に提案し、複数の電力会社と契約しており、今後の展開が期待される。

#### ⑥シーメンス・エナジー社

シーメンス・エナジー社の事業用ガスタービン SGT-9000HL の外観を図 14 に示す (仕様は表 5 参照)。

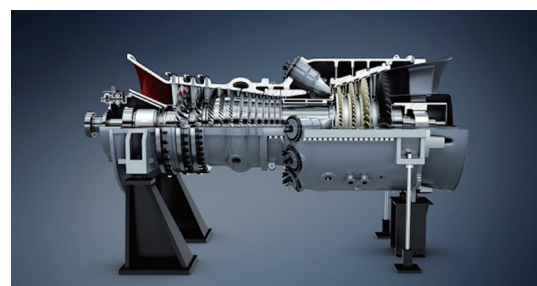


図 14 SGT-9000HL ガスタービン <sup>(14)</sup>

SGT-9000HL はコンバインドサイクル効率が 63% を超えるガスタービンであり、SGT5-8000HL, SGT5-9000HL および SGT6-9000HL の 3 つのガスタービンがある。HL クラスのガスタービンの主な特徴は、先進的な 3D ブレードによる高い空力効率、高度燃焼システムによる高い燃焼温度と操作の柔軟性、多層コー

ティングによるタービンプレードの堅牢性向上、ブレードとベーンの効率的内部冷却機能、シール強化による漏れ空気低減、高出力用の大型自立型タービンプレードなどである。

シーメンス・エナジー社では、ガスタービンの型式に応じて水素対応用の燃焼器を開発しており、大型機用として発電効率の低下が無いDLE（乾式低エミッション）バーナをベースに3種類の燃焼器を実用化している。また、中小型ガスタービン用の燃焼器を積層造形（3Dプリンター）で製作しており、これまで製造できなかった複雑な構造であっても一体成型できることから、今後は、より高性能な燃焼器が短期間で開発されるものと期待されている。

大型ガスタービン用の燃焼器の開発状況は以下の通りである。図15には同社の水素燃焼器を示す。

- SGT5 / 6-2000E, SGT5 / 6-4000F : HR3 バーナ  
中央パイロツトスワラーと、スワラーベーン(SFI)を介したガス噴射を備えた同心の斜めスワラーによるハイブリッドバーナであり、天然ガスとの混焼割合は最大30%。
- SGT6-5000F, SGT5 / 6-8000H : SFI 技術を予混合パイロツトおよび同心円状に配置されたメインスワラーに統合する超低 NOx プラットフォーム燃焼システム (ULN / PCS) を適用している。天然ガスとの混焼割合は最大30%。
- SGT5 / 6-9000HL : 高度な燃焼効率 (ACE) システムを適用し、天然ガスとの混焼割合は最大30%。

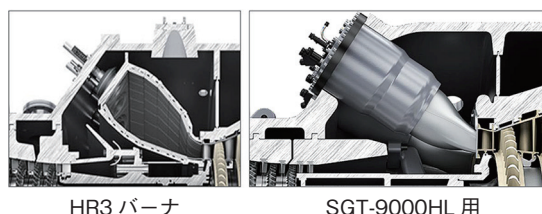


図15 シーメンス・エナジー社水素燃焼器<sup>(15)</sup>

現在の大型ガスタービン用DLEシステムの水素混焼割合は30%を上限としているが、2030年までには100%水素で稼働できることを目標に開発を進めている。

シーメンス・エナジー社は、近年の世界的な地球温暖化対策の強化に伴い、発電部門の事業内容をガスタービン主体の発電ビジネスから、風力発電および水電解による水素製造などを含めた水素サプライチェーン全体に範囲を広げており、将来的には、再エネ電力による水素の製造・貯蔵と水素発電を行うことでゼロエミッション発電システムの実現と商用化を目指している。

## ⑦ソーラータービン社

ソーラータービン社は中型タービン市場でトップシェアを占め、発電用および機械駆動用（ガス圧縮機、ポンプなど）での豊富な実績を有している。8MW級Taurus 70ガスタービンは、出力8.18MW、発電効率33.6%、NOx約50ppm、排ガス温度490℃、である。図16にTaurus 70ガスタービンの構造を示す。

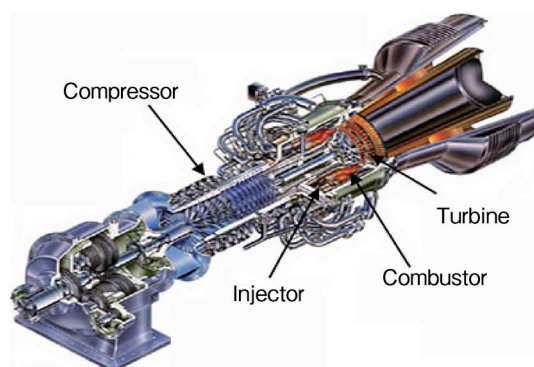


図16 Taurus 70 タービン<sup>(16)</sup>

ソーラータービン社のDLE燃焼器は、米エネルギー省ローレンス・バークレー国立研究所とともに2006年に水素燃焼試験用に開発した、図17に示す低渦巻きインジェクター(LSI)技術をベースとし、発熱量の高低に関わらず、様々な燃料に対応している。2006年からバイオガスや高水素含有ガスを利用できる発電パッケージを商用化しており、最大70%の水素含有ガスで200万時間以上の稼働実績があり、必要に応じて水素100%にも対応している。

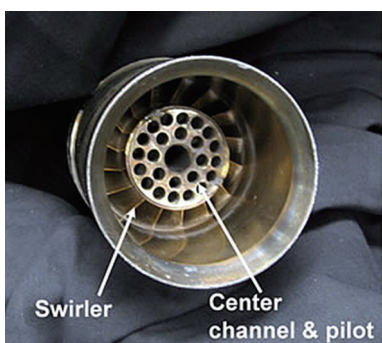


図 17 低渦巻きインジェクター (17)

## 5. 酸素水素燃焼方式に関する技術開発動向

### (1) 酸素水素燃焼タービン発電技術の概要

純酸素と純水素を燃焼して発電利用する酸素水素燃焼タービン発電技術は、以下のような特徴から、現行の空気燃焼のタービン発電よりも熱損失が少なく、高効率化が期待できる理想的な発電システムと言われている。

- 燃焼生成物が水（水蒸気）のみであるため、外部に放出せずにクローズドサイクルを形成して効果的な熱利用を実現できる。
- 水蒸気を作動媒体としてガスタービン（ブレイトン）サイクルと蒸気タービン（ランキン）サイクルを直結した複合システムを構成できる。

但し、純酸素と純水素を発電用として大量に利用することは経済性等の課題もあり、これまでの研究開発は、高効率サイクルの検討や水素または天然ガスの酸素燃焼技術に関する基礎研究が主体であり、発電実証に至るケースは少ない。国内外での開発状況は以下の通り。

#### <酸素水素燃焼技術>

- オーストリア：グラーツ工科大学 グラーツサイクル (1980 年～)
- 日本：WE-NET プロジェクト 水素燃焼タービンの開発 (1993 ～ 2002 年)
- 米国：クリーンエネルギーシステム社 酸素水素燃焼発電システム (1993 年～)
- 日本：酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発 (2018 年～)

#### <酸素天然ガス燃焼技術>

- 米国：ネットパワー社 超臨界 CO<sub>2</sub> サイクル発電システム (2010 年～)
- 米国：SwRI 超臨界 CO<sub>2</sub> サイクル発電開発プロジェクト

## (2) 技術開発の動向

### ① グラーツサイクル

グラーツサイクルは、1980 年代にオーストリア グラーツ工科大学で提案された酸素水素燃焼発電サイクルであり、わが国の WE-NET プロジェクトの際に技術交流が進められた。燃料を純酸素で燃焼して作動流体の約半分を再圧縮することで 65% 以上の発電効率を実現できる。図 18 にグラーツサイクルの基本フローを示す。熱力学的検討では、タービン入口条件 1500℃、40 気圧の最先端ガスタービン技術を前提として、サイクル効率は 68.5% (LHV, 低位発熱量) を試算している<sup>(24)</sup>。現在は、実機規模の試験設備を用いたタービンコンプレッサ関連の実験研究や高効率発電サイクル検討などを実施している。

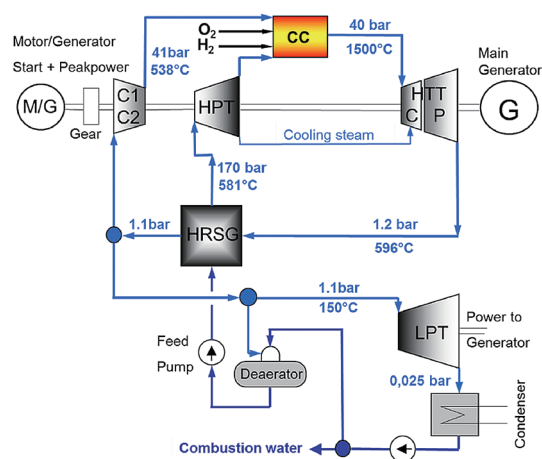


図 18 グラーツサイクルの基本フロー (18)

### ② WE-NET プロジェクト

WE-NET プロジェクトは、世界的に偏在する再エネを水素等の輸送可能な形に転換し、世界の需要地に輸送し、発電、輸送用燃料、都市ガス等の広範な分野で利用する国際エネルギーネットワークの確立を目的として計画



され 1993 年から 2002 年まで実施された。その一環として、酸素水素燃焼タービン発電システムを開発するために次の 5 項目の調査、要素技術開発が行われ、その開発概要を図 19 に示す。

- 最適システム：タービン入口温度 1700℃で発電端効率 60%以上 (HHV, 高位発熱量) のサイクルを選定。
- 燃焼制御技術：燃焼器の燃焼方式、基本構造を開発
- タービン翼、ロータ等主要構成機器：タービン翼冷却技術、ロータ冷却技術を開発
- 主要補機類：液体水素冷却熱利用技術、高温熱交換器を開発
- 超高温材料：タービン入口温度 2000℃を目標とした超高温材料に関する基礎研究を実施

WE-NET プロジェクトには海外の研究機関やタービンメーカーも参画しており、得られた

成果や知見は、その後のガスタービンの高効率化に向けた研究開発等に活用されている。

### ③クリーンエネルギーシステム (CES) 社

CES 社では、2000 年ごろから、米国スペースシャトルのロケットエンジン開発の知見をベースに、酸素水素燃焼技術によるゼロエミッション発電システムを開発している。天然ガスや水素を酸素燃焼して発生する高温高压ガス (最大 1,650℃, 110 気圧) をガスタービンで利用して 50MWe 級および 200MWe 級の発電プラントを建設、運転している。図 20 に再エネ発電による酸素、水素製造と発電システムを組み合わせたゼロエミッション発電システムの概念を示す<sup>(20)</sup>。

- 水素の特徴を最高に発揮できる(理想的な)発電技術は、純水素/純酸素燃焼タービン。
- タービン動作媒体がスチームであることから、ガスタービンとスチームタービンを直結できるので高効率。
- サーマルNOx生成がゼロなので材料の耐熱性いっばいまでタービン入口温度を高められる。
- タービン入口温度の目標1700℃に対応できる耐熱材料の開発が必須。
- 最適タービンサイクルは設計コンペにより選定。
- 4方式が提案され、設計コンペの結果トッピング再生サイクルが選定された。

トッピング再生サイクルの期待される性能:

- ・ 出力 500MW
- ・ 発電効率 61.8%(HHV)  
68.5%(LHV)
- ・ タービン入口ガス温度 1700℃
- ・ タービン入口圧力 4.75MPa

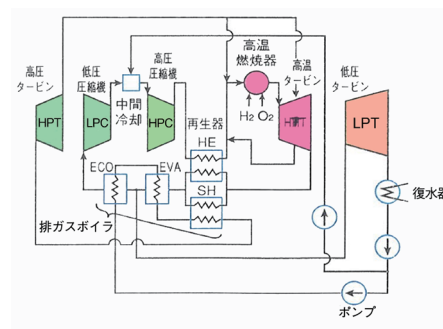


図 19 WE-NET 水素燃焼タービンの開発概要<sup>(19)</sup>

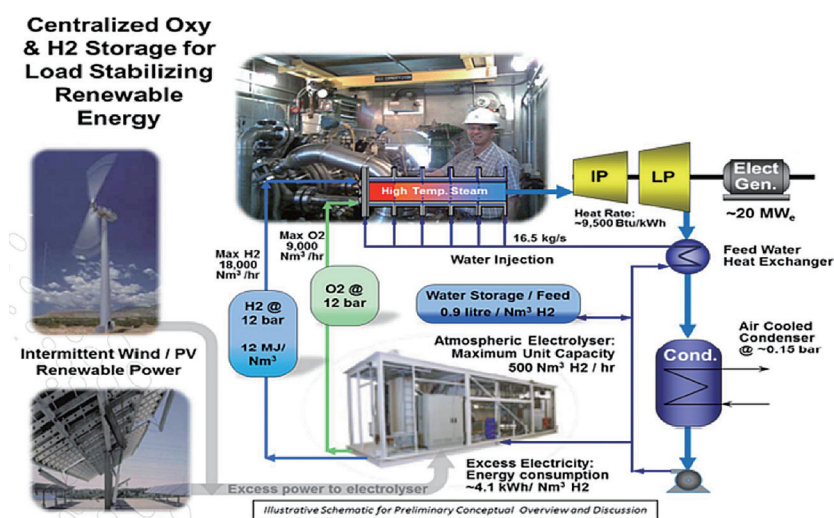


図 20 再エネと組み合わせた酸素水素燃焼発電システム<sup>(20)</sup>



#### ④酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発

2018年度より「NEDO 水素利用等先導研究開発事業／超高効率発電システム基盤技術研究開発」として実施された酸素水素燃焼タービン発電システムの特徴を図21に示す。また、開発の概要は以下の通りである。

- 目標発電端効率 75% (LHV) のサイクル検討
- 発電システムの経済性
- 開発課題の提示：燃焼器，タービン翼，高圧蒸気用熱交換器等
- 燃焼実験：酸素水素の着火と保炎確認等

2020年度から新たなフェーズに進んでおり、今後の成果が期待される。

#### ⑤ネットパワー社

米国のネットパワー社では、天然ガスを高圧で酸素燃焼し、発生する超臨界状態のCO<sub>2</sub>を用いて発電する超臨界CO<sub>2</sub>サイクル発電システム（アラムサイクル）の実証プロジェクトを実施中である。タービン入口条件 1,150℃、300気圧で発電効率 55～59% (LHV) を達成し、300MWe級の商用プラントを目指している。また、発生するCO<sub>2</sub>は高純度であるため、そのままでCCS用として利用できる。システムフローを図22に示す。

現在、実証運転中のプラントは世界初の大規模超臨界CO<sub>2</sub>発電所と言われており、その中核となる燃焼器とタービン発電設備は東芝エネルギーシステム(株)が開発しており、今

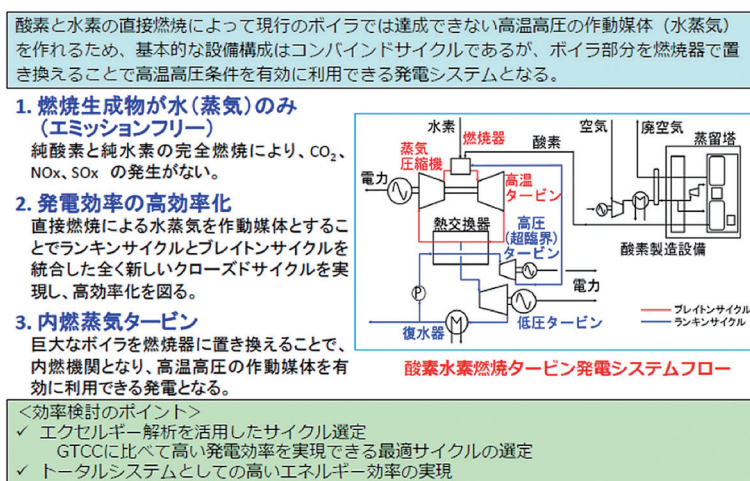


図21 酸素水素燃焼タービン発電システムの特徴 (21)

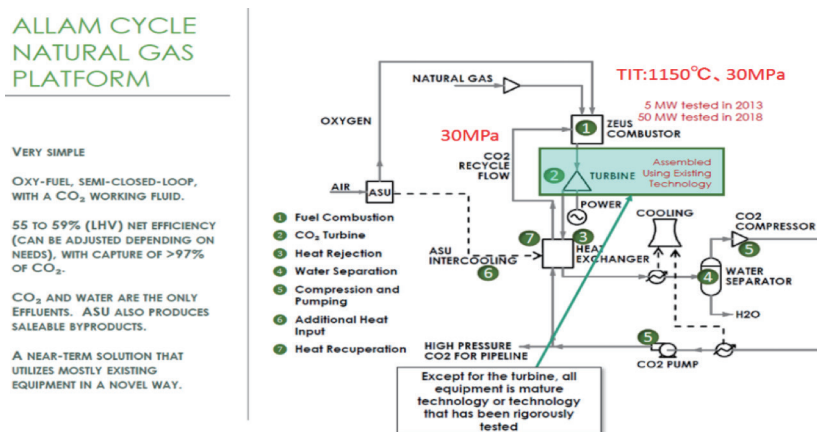


図22 ネットパワー社の超臨界CO<sub>2</sub>発電システムフロー (22)

- Design, construct, and operate a 10 MWe sCO<sub>2</sub> Pilot Plant Test Facility
- Advance the state of the art for high temperature sCO<sub>2</sub> systems
- Project team includes Gas Technology Institute, SwRI, and General Electric Global Research
- Six year, \$110 million project with \$80 million funded by DOE-NETL
- Test facility located at SwRI

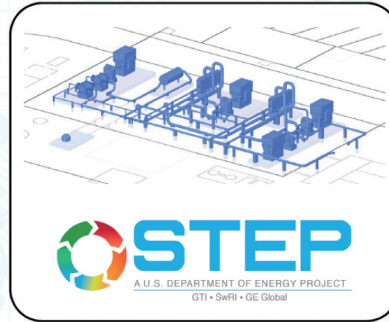


図 23 超臨界 CO<sub>2</sub> パイロットプラント試験施設の概要 (23)

後の商用化が期待される。また、燃料を天然ガスから水素に転換することで、酸素水素燃焼タービン発電への適用が可能と考えられる。

#### ⑥サウスウエスト・リサーチ・インスティテュート (SwRI)

米国では、先のネットパワー社のほかにも超臨界 CO<sub>2</sub> サイクル発電開発プロジェクトが実施されており、SwRIにおいては、超臨界 CO<sub>2</sub> に関する基盤的な研究から、実証プラントの建設・運転等に関するエンジニアリング検討など、幅広い研究開発プロジェクトを推進している。現在、米国エネルギー省の補助事業として、ガス技術研究所 (GTI)、GE 社とともに 10MW 級パイロット試験施設を建設しており、その概要を図 23 に示す。

## 6. おわりに

本報告では、LNG 火力発電の中核であるガスタービン発電の脱炭素化技術について、国内外の企業や研究機関で行われている水素利用に関する開発動向を紹介した。

最初に、わが国の発電分野の CO<sub>2</sub> 排出量をゼロとするために必要な水素量の目安を試算し、水素を燃焼するためのタービン発電技術について紹介した。

更に、国内外の主要ガスタービンメーカーが実施している水素の混焼、専焼に関する技術開発や実証事業の状況、将来の高効率発電技術として期待される酸素水素燃焼技術につ

いて紹介した。

ガスタービン発電での水素利用技術は既に実用レベルにあるが、実際に発電分野の脱炭素化を実現するためには、CO<sub>2</sub> フリー水素を安価に大量供給できるサプライチェーンの整備が不可欠である。今後、戦略的な取り組みが加速され、わが国が世界に先駆けて水素社会を実現していくことが期待される。

#### 参考文献

- (1) 経済産業省, 「エネルギー白書 2020」, p.155
- (2) Siemens energy White paper, “Hydrogen power with Siemens gas turbines,” p.5, April 2020
- (3) <https://www.ansaldoenergia.com/PublishingImages/GT36/GT36.pdf>
- (4) Dr.-Ing. Mirko Bothien, “Sequential Combustion in Gas Turbines – the Key Technology for Burning High H<sub>2</sub> Contents with Low Emissions,” June 24, 2019
- (5) [https://psm.com/wp-content/uploads/2019/09/PSM\\_FlameSheet.pdf](https://psm.com/wp-content/uploads/2019/09/PSM_FlameSheet.pdf)
- (6) <https://www.bakerhughes.com/gas-turbines/novalt-technology/novalt16>
- (7) Government of South Australia, “South Australia's Hydrogen Action Plan” (<http://www.renewables.sa.gov.au/content/uploads/2019/09/south-australias-hydrogen-action-plan-online.pdf>)
- (8) <https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/9ha>
- (9) Power to Gas: Hydrogen for power generation, GEA3 3861, February 2019
- (10) 川崎重工技報, 第 182 号 (水素サプライチェーン特集号), p.29, 2020 年 9 月
- (11) 経済産業省, 「第 2 回 2050 年に向けたガス事業の在り方研究会資料 6 (国際水素サプライチェーン構築への取組, 川崎重工業(株)), 2020 年 10 月 6 日
- (12) <https://power.mhi.com/jp/products/gasturbines/lineup#anc03>
- (13) 経済産業省, 「第 2 回 2050 年に向けたガス事業の在り方研究会資料 7」 (水素ガスタービン, 三菱パワー(株)), 2020 年 10 月 6 日
- (14) Siemens energy, Siemens HL-class
- (15) Siemens energy White paper, “Hydrogen power with Siemens gas turbines,” p.12, April 2020

- (16) [https://www.solarturbines.com/en\\_US/products/turbine-ratings.html](https://www.solarturbines.com/en_US/products/turbine-ratings.html)
- (17) <https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/EETD-LSI.html>
- (18) Wolfgang Sanz, Martin Braun, Herbert Jericha, Max F. Platzer, “ASME GT2016-57988”
- (19) 福田健三, 「WE-NET が目指した社会と今」, (一財) エネルギー総合工学研究所, 2015 年 2 月 12 日
- (20) Clean Energy System 社からの受領資料, “CES's HY-  
OX System : Renewable energy storage solution, Oct. 2018”
- (21) 2019 年度 NEDO 次世代電池・水素成果報告会, 発表  
No.H1-10, 2019 年 7 月 18 日
- (22) Net Power 社からの受領資料, “Truly Clean, Cheaper  
Energy, Oct. 2018”
- (23) SwRI からの受領資料, “SwRI Machinery Department  
Overview, Dec 7 2018” ([https://www.swri.org/industry/  
advanced-power-systems/supercritical-transformational-  
electric-power-pilot-plant](https://www.swri.org/industry/advanced-power-systems/supercritical-transformational-electric-power-pilot-plant))

[寄稿]

## 大規模水素サプライチェーンの国際実証

安井 誠

( 千代田化工建設株式会社 理事 フロンティアビジ  
ネス本部 兼 地球環境プロジェクト事業本部長補佐 )



### 1. はじめに

昨年 2020 年はエポックメイキングな年になった。新型コロナウイルスで社会・生活スタイルの大きな変革を迫られ、就任した菅首相が所信表明演説で温室効果ガス排出量を 2050 年までに実質ゼロとする目標を宣言されたのである。

震災後、2014 年に策定された「第 4 次エネルギー基本計画」で、水素が将来の重要なエネルギーとして位置づけられ、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」とともに、「水素基本戦略」が策定されて、日本が世界をリードする形で水素社会へ向けてスタートがきられた。2018 年の「第 5 次エネルギー基本計画」では、水素基本戦略の実行が記載され、今まさに「第 6 次エネルギー基本計画」の策定へ向けて、2050 年温室効果ガス排出量実質ゼロ宣言の下、議論が開始された。

このようにエネルギーをめぐる状況が大きく変革する中、昨年 5 月、海外から輸送された水素で国内初の発電利用が開始され、水素社会の実現に向けた重要なマイルストーンが達成された。日本における水素社会の早期実現のためには、クリーンで安価、かつ大量の水素資源を日本に輸送することが考えられるが、それには、水素の長期間安定貯蔵と長距離輸送技術・システムの実用レベルでの確立が必須である。昨年 5 月に発電利用が開始された水素は、当社千代田化工建設株式会社が組合員企業として参加する「次世代水素エネ

ルギーチェーン技術研究組合」(AHEAD)が、ブルネイでメチルシクロヘキサン (MCH) とし、海上輸送し、川崎市臨海部にある脱水素プラントで分離し、発電所のガスタービン向けに供給を開始したものである。

本稿では、(一財)エネルギー総合工学研究所主催の第 404 回月例研究会(2020 年 11 月 13 日)で紹介した、水素サプライチェーン構想、それを実現するための有機ケミカルハイドライド (LOHC) 法・SPERA 水素技術、この度の国際実証の内容および今日に至るまでの開発の経緯を紹介する。

当社の経営理念は「エネルギーと環境の調和を目指し持続可能な社会の発展に貢献する」であり、“未来エンジニアリング”に基づく「エネルギーと地球環境の未来の創造」が経営ビジョンである<sup>(1)</sup>。当社は 1948 年に創立され、その 3 年後には研究部門を設置、触媒技術や環境技術を柱とし独自技術を確立してきた。その対象は社会の発展・変化に伴いシフトし、そのいくつかは実装・商用化されている。同様に、本稿で紹介する水素サプライチェーンの国際実証、ひいては将来の水素社会の実現に向けて、当社で開発・商用使用に成功した触媒がブレークスルーとなっている。

### 2. 水素サプライチェーン構想<sup>(2) (3)</sup>

水素は、再生可能エネルギー(再エネ)を含むすべての一次エネルギーから製造可能であり、また、これらの一次エネルギーを水素



燃料の形態で「貯める」「運ぶ」を行うエネルギーキャリアでもある。地球温暖化防止のための脱炭素化には再エネの利用拡大が必須であるが、再エネから発電した電力の大規模長距離輸送や大規模蓄電には、送電ロスや経済性の観点から限界があるため、再エネと水素によるエネルギーシステムが人類が永続的に利用できる究極のエネルギーシステムといわれている。このエネルギーシステムの普及拡大を図るためには、水素を石油や天然ガス等の化石燃料と同様に安全に大規模貯蔵輸送する技術の実用化が必須である。

当社では将来構想として、図1に示すグローバルな水素サプライチェーン構想を提案している。再エネの利用拡大による地球温暖化防止は人類の喫緊課題である。エネルギー問題の最終ゴールは、各国が自国内の再エネで自給できることと考えられ、将来の技術革新による達成が期待されるが、実現までに相当の期間が必要であり、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出削減目標は可能な限り早期にクリアする必要がある。

石炭、石油、天然ガス等の化石資源は偏在しており、エネルギーのほとんどを輸入に頼っているわが国にとってエネルギー安全保障は、常に重要課題である状況に変わりはない。一方、太陽光は赤道周辺や豪州等に多く賦存す

るほか、風力は南米の極地に近い緯度に豊富であり、わが国が化石資源を輸入している国以外にも豊富に賦存している。また、太陽光や風力が高い強度で豊富な地域は、気候が厳しいため人口が少なく、主要な需要地から離れている場合が多い。風力や太陽光といった再エネ由来の電力は直接に送電利用した方が効率上好ましいが、電力輸送は送電ロスによって距離が制限されるほか、送電線の敷設に相應の設備投資が必要となる。すなわち、このような未利用再エネが豊富に存在している国では、これらを自国で利用するとともに、商品化することが外貨獲得に繋がり経済発展に寄与することとなる。こうした安価で大規模な未利用の再エネを購入して、水素燃料の形態で再エネを日本に輸送する構想は、国内の再エネで自立できるまでの間、有効な手段と考えられる。

近年、海外の風力、太陽光由来の電力価格が相当低減している国が増えている。最近、再エネ由来の水素を「グリーン水素」、化石資源から水素製造して発生したCO<sub>2</sub>を二酸化炭素回収貯留（CCS）などで処分した水素を「ブルー水素」と呼んでいる。当面は、ブルー水素の方が安価な状況が続くと考えられ、グリーン水素の大規模な輸入は2030年代から本格化するものと考えられる。本水素サプライチェーン

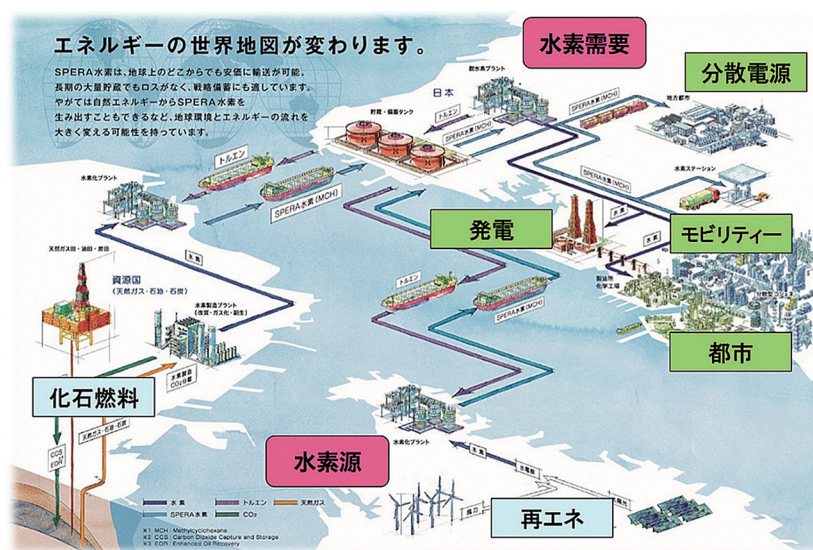


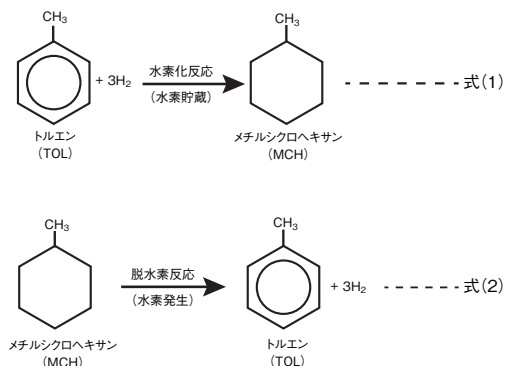
図1 水素サプライチェーン構想

ン構想の趣旨は、経済性の観点から利用できる水素を最大限に利用して、最終的にグリーン水素に移行することで、スムーズに低炭素社会に移行することである。

### 3. 有機ケミカルハイドライド法

#### (1) 技術概要<sup>(2)(3)</sup>

式(1)、(2)に、水素貯蔵反応となる水素化反応、水素発生反応となる脱水素反応の反応式を、そして、図2に有機ケミカルハイドライド(LOHC)法システムの全体構想を示す。LOHC法は、水素をトルエン(TOL)などの芳香族と反応させて、分子内に水素を取り込んだメチルシクロヘキサン(MCH)などの飽和環状化合物に転換することで、常温・常圧の液体状態で「貯める」「運ぶ」を行い、その後、利用場所で必要量の水素を脱水素反応で取り出して利用する方法である。水素とTOLを反応させる水素化反応(水素貯蔵反応)



と MCH から水素を発生させて TOL を回収する脱水素反応(水素発生反応)からなる。水素を取り出した後に生成するトルエンは回収して繰り返し利用する。

#### (2) LOHC 法の特長

LOHC 法では、水素ガスが体積 530 分の 1 の MCH 液の中に収蔵される。TOL と MCH は両方とも常温・常圧で無色の液体でガソリンと同じ「危険物第 4 類第一石油類」に分類される石油化学品であり、通常はペンキや修正ペンの溶剤に利用されている。水素は爆発範囲が広く、そのまま大規模に貯蔵する際は潜在的なリスクが大きな気体であるが、本法では既存の石油化学品として常温・常圧の液体として大規模な貯蔵が可能である。従って、火災に巻き込まれた場合でも、リスクは既存の石油工場の火災と同程度であり、潜在的なリスクが少なく水素キャリアとして安全性が高い方法である<sup>(4)(5)</sup>。

TOL と MCH は常温・常圧で液体のため、特殊な容器や機器を使用する必要がない。また、腐食性がないため安価な材料で済み、特殊な鋼材などを使用する必要もない。さらに、数十年間長期貯蔵しても他の物質に変化することがなく、常温・常圧のため、エネルギーロスが極めて少なくて済む。このため、将来の国家備蓄にも対応できる唯一の方法と考えられ、既存の石油備蓄基地の大型タンクを水

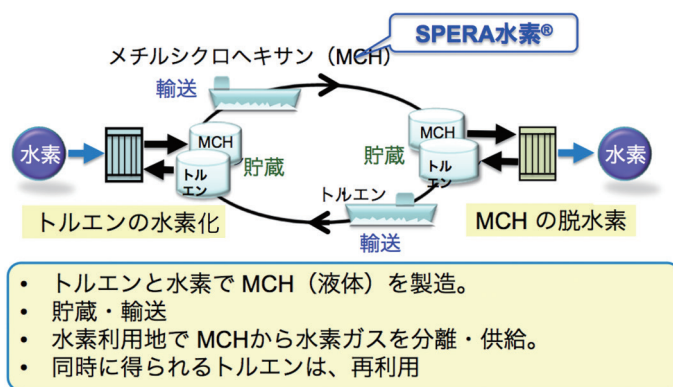


図2 LOHC システムの全体構想

素エネルギーの備蓄基地に転換することが可能である。

また、TOL と MCH はケミカルタンカーによる大規模海上輸送や ISO タンクによる貨物船輸送が実用化されているほか、タンクローリーや鉄道貨物による陸上輸送、油槽船やフェリーによる離島への海上輸送も可能であり、製油所の大型原油タンクなどの既存設備をはじめ、ガソリンや軽油の流通インフラを水素流通インフラとして利用できる。このことから、ガソリンや軽油と同様に、水素を国際間ばかりでなく、離島を含めた日本全域に配送することが可能であり、インフラ整備コストを最小限とした水素社会の構築が可能になると考えられる。以上の特徴を図3にまとめる。

### (3) LOHC 法の経緯 (4) (5)

水素は1970年代からクリーンな二次エネルギーとして注目されてきた。わが国では、サンシャイン計画（1974～1992年）、ムーンライト計画（1978～1992年）、ニューサンシャイン計画（1993～2001年）において、水素製造技術や燃料電池の研究開発が進められた。わが国における水素の大規模貯蔵輸送技術では、WE-NET プロジェクト（1992～2002年）において液化水素法の開発が開始されている。

一方、LOHC 法の開発の歴史は古く、1980年代にカナダのケベック州政府と欧州12カ国による国際研究開発プロジェクトとして実施

されたユーロケベック計画まで遡る。この計画は、ケベック州に豊富に存在する余剰の水力由来の電力で水を電気分解して水素を製造し、大西洋を輸送して欧州で利用する計画であった。水素の輸送方法としては、第1候補として液体水素法、第2候補として液体アンモニア法、第3候補としてLOHC法が検討されている。当時、LOHC法はMCH法と呼ばれていた。この計画は1992年頃まで約10年間遂行されたが、いずれの方法も実用化に至らずに計画が終了している。この計画での水素の貯蔵輸送技術として、液体水素法と圧縮水素法が検討された。その後、工業ガス輸送や燃料電池車（FCV）の水素ステーションで活かされ、車両1台分の規模では実用化されているが、タンカーレベルの大規模貯蔵輸送では未だ実用化されていない。

わが国では前述のWE-NETプロジェクトにおいて、液化水素法の開発が進められる一方、LOHC法の研究が日本の大学を中心に進められていた。当社では、2002年から脱水素触媒の開発に着手、2004年に横浜で開催された世界水素会議で初めての学術発表を行った。この時期から企業による研究開発例が発表されるようになった。当社が開発した「SPERA水素システム」は全体システム技術が確立されており、世界に先駆けて初めて国際間でシステム全体技術の実証が実現した技術である。

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>常温・常圧で液体（ガソリンと同じ扱い可）</p> <ul style="list-style-type: none"><li>⇒ 貯蔵・輸送における<b>ハンドリングが容易</b></li><li>⇒ 石油流通の<b>既存インフラの活用</b>が可能</li><li>⇒ 水素貯蔵・輸送におけるリスクが<b>石油製品並みに低減</b></li></ul> <p>化学的に安定</p> <ul style="list-style-type: none"><li>⇒ 長期間貯蔵・長距離輸送による<b>ロスがきわめて少ない</b></li></ul> <p>確立・実証された技術の組み合わせ</p> <ul style="list-style-type: none"><li>⇒ <b>早期の商用化</b>が可能</li></ul> | <br> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

図3 MCH-LOHC 法の特徴



## 4. SPERA 水素システムの開発

### (1) 開発経緯

当社は、水素の大規模貯蔵輸送技術として、最も安全性が高いと考えられる LOHC 法に着目し、2002 年に実用化の鍵となる脱水素触媒開発を開始し、以来、継続的な技術開発を実施している。2009 年に脱水素触媒の開発に成功した後、工業的に脱水素触媒を製造調達する体制を確立した。2014 年には、パイロットプラントによる約 10,000 時間におよぶ技術実証運転を完了して技術を確立し、開発されたシステムを「SPERA 水素システム」と命名した。

### (2) 脱水素触媒開発<sup>(6)</sup>

当社は以前から脱水素技術が将来より重要になると考え、色々な脱水素触媒・技術の研究開発を行っていた。そのような中で芳香族の脱水素技術として開発した新規脱水素触媒は、1nm 程度のサイズの白金粒子をアルミナ担体

全体に高分散させた触媒である。従来の触媒と同様の成分であるが、白金粒子を極限まで微小化することで飛躍的な触媒性能の向上が実現できたことがブレイクスルーとなっている。図 4 に、実験室で確認した際の脱水素触媒の性能を示す。

### (3) 技術実証<sup>(7)-(10)</sup>

実験室およびベンチスケールでの触媒開発を受けて、商業機に向けて次のステップである技術実証のための実証プラントへ進んだ。図 5 に技術実証プラントの写真を示す。本装置はパイロットプラントとして商業機設計からスケールダウンして設計・建設した。2013 年 4 月から 2014 年 11 月まで延べ約 10,000 時間の運転を通じて、設計通りの高い性能を安定的に維持できることを確認するとともに、商業化に必要なデータ採取を行って、本システムの技術確立が完了した。

図 5 の本実証プラントは、毎時 50 Nm<sup>3</sup> の

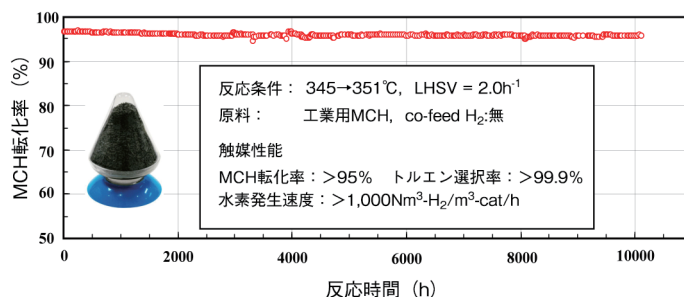


図 4 実験室で確認した脱水素触媒の性能

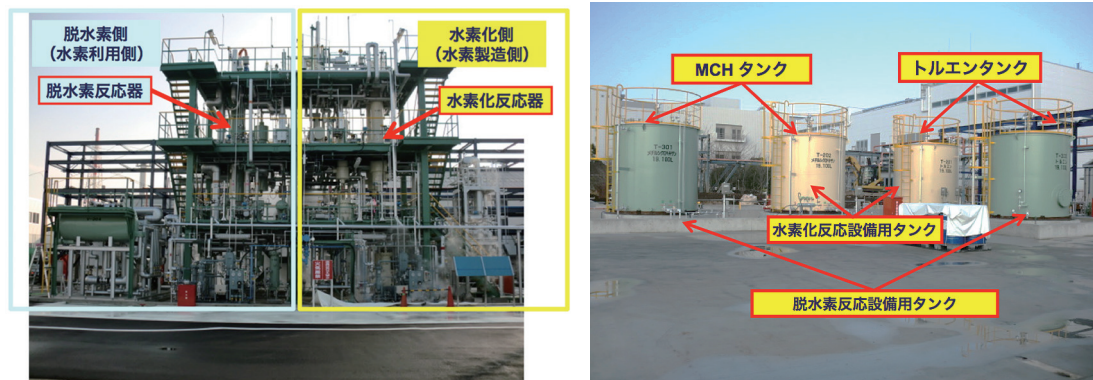


図 5 技術実証プラント



水素を TOL に固定する水素化（水素貯蔵）反応（右側）と、MCH から水素を取り出す脱水素（水素発生）反応（左側）からなる反応セクションと貯蔵タンクのセクションで構成されている。商業システムでは、右側と左側の各反応は、それぞれ水素出荷場所と水素受け入れ場所で行われ、その間に貯蔵タンクを介して海上輸送や陸上輸送の工程が入るが、本実証プラントでは、両方の反応を隣接する場所で連続的に行った。

図6に水素化側と脱水素側の簡略プロセスフローを示す。反応器は、水素化、脱水素ともに、触媒を充填した反応管を用いた熱交換器型である。気化した原料ガスを反応条件下

で触媒と接触させて反応を行い、いずれも反応後の出口ガスを一般的な冷却水を用いて熱交換器で降温させた後に、単純なドラムで気液分離を行うことで、液体状態の MCH と TOL を高い収率で得ることができる。水素化反応温度は 250℃ 以下、脱水素反応温度は 400℃ 以下で、反応圧力も 1 MPa 以下のため、低圧で比較的温和な反応条件であるとともに、非常に単純なプロセスである。

実証運転における初期性能は水素化プロセス側の MCH 収率は 99 % 以上であり、脱水素プロセス側の TOL 収率は 98 % 以上であった。図7に運転データの一部を示す。

触媒は定期的に交換するが、延べ約 10,000

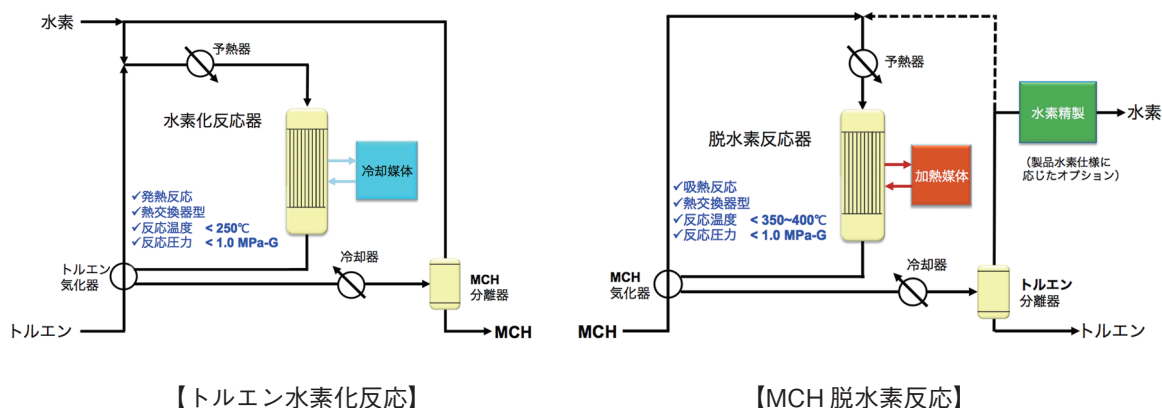


図6 水素化および脱水素プロセスの簡略フロー

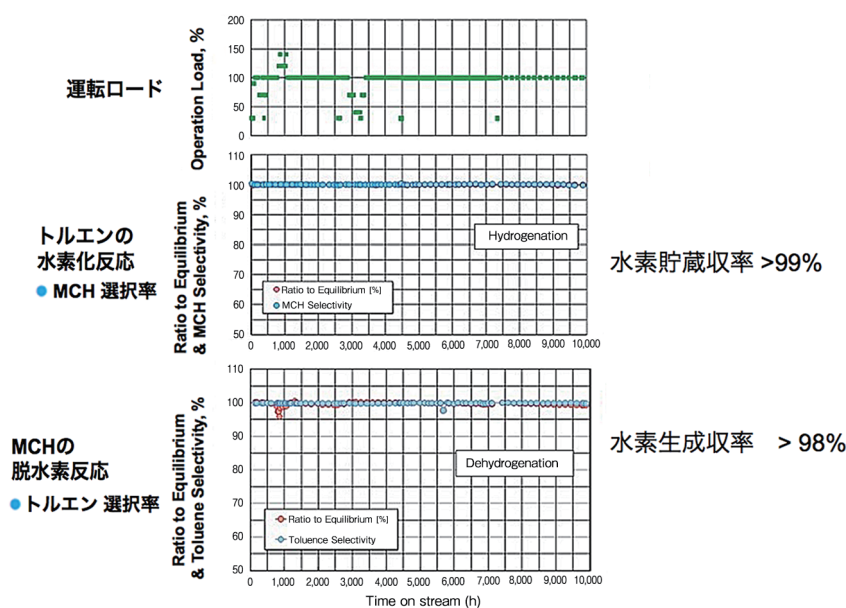


図7 技術実証運転データ

時間の運転後も 95 % 以上の収率を維持する性能を確認している。収率が 95 % になった時点を設定下限とし触媒寿命として交換する方式を前提としており、触媒寿命は現状では 1 年以上であるが、その後、改良触媒の開発も実施しており、倍以上の触媒寿命が期待できる脱水素触媒が実証段階にある。

触媒には 1 wt% の白金が利用されているが、使用済み触媒から回収した白金は交換用触媒に再利用されるため、初期チャージ触媒に比べて交換用触媒は低価格での提供が可能となる。

## 5. 国際間水素サプライチェーン事業実証

本年度、SPERA 水素システム開発は最終段階としての「国際間水素サプライチェーン実証」が遂行されている。この 2015 年度から開始された実証プロジェクトは、国際間水素輸送の実効性の確認を目的に、千代田化工建設(株)、

三菱商事(株)、三井物産(株)、日本郵船(株)の 4 社が「次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合」(AHEAD) を設立し、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) による助成を受けて実施した、「有機ケミカルハイドライド法による未利用エネルギー由来水素サプライチェーン実証」事業 (NEDO 助成事業：水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発) である。

東南アジアの天然ガス輸出国であるブルネイ・ダルサラーム国で水素から MCH を製造し、これをトラックや貨物船で輸送可能な ISO タンクに常温・常圧の液体として貯蔵し、貨物船で川崎市臨海部の東亜石油(株)京浜製油所内に建設した脱水素プラントまで輸送、MCH から分離した水素を水江発電所のガスタービン向けに火力発電燃料の一部として供給するものである。昨年 2020 年 3 月に稼働して以来、順調に運転されている。

| 内 容    |                                 |
|--------|---------------------------------|
| 設備規模   | 最大210 トン/年                      |
| 運用期間   | 2020年                           |
| 水素供給源  | ブルネイ・ダルサラーム国<br>(水素製造)          |
| 水素需要   | 川崎市<br>(ガスタービン発電設備用燃料)          |
| 輸 送    | ISO タンクコンテナ<br>(コンテナ船 / トラック輸送) |
| 事業スキーム | 技術研究組合を組成、<br>NEDO助成事業として実施     |

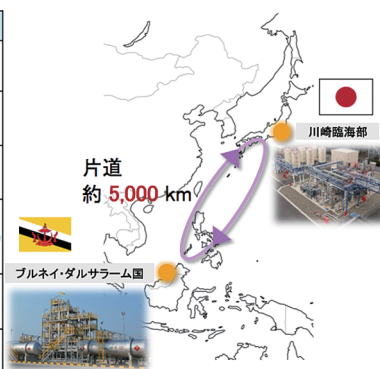


図 8 国際間水素サプライチェーン事業実証の概要



図 9 水素化プラント (左) と脱水素プラント (右)

図8に示したように、ブルネイ／日本間の海上輸送距離は片道 5,000km である。商業チェーンではケミカルタンカーで輸送することになるが、標準的な5万トンクラスのケミカルタンカーで一度に約 3,000 トンの水素が輸送可能である。本実証ではトラックと貨物船による小ロット輸送も視野に入れて、ISO タンク（20kl のMCHで約1トンの水素輸送）を採用した。図9にブルネイに建設した水素化プラントと川崎市に建設した脱水素プラントの写真を示す。

## 6. 事業実証の成果および今後の展望

本国際間事業実証により、海外で MCH を製造し、海上輸送を行い、日本で火力発電燃料として供給する国際間水素サプライチェーンの全工程が世界で初めて実証されたほか、海外調達した水素を燃料とした火力発電による電力供給も世界で初めて実証された。これは、日本が世界に先駆けて実現を目指す「カーボンフリーな水素社会」への大きな一歩である。

国際間水素サプライチェーンの本格始動に関しては、2020 年 4 月 24 日に web リリースを行い<sup>(11)</sup>、「海外から輸送した水素による国内初の発電開始」に関しては2020 年 5 月 26 日にプレスリリース<sup>(12)</sup>を行っているので、詳細はそれぞれ参照願う。

また、当社ホームページでは、本事業実証の映像と両プラントの VR ツアーを公開しているのでご覧頂けると幸いです<sup>(13)</sup>。

ブルネイ側のプラント、川崎側のプラントともプロセス性能を含む各種データを蓄積しながら運転し、整理後公開する予定であるが、設計通りのプロセス性能、触媒性能を確認済である。事業実証成果としては、実際に既に100 トン以上の水素を国際間でチェーンとして輸送しており、その水素を発電に使うことが最も重要である。これにより、国際間水素サプライチェーン実証は完了し、実用化段階に移行する。

改めて本事業実証の意義を以下に列挙する。

- 海外からの安定的な水素供給の実行性の証明
- 商業ベースの国際水素サプライチェーンの実現促進
- システム全体の最適化と効率化の実現
- コスト低減、信頼性の向上

政府の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、既存の天然ガス火力発電燃料に水素を混合して利用することから実用化を目指し、2030 年までに段階的に商業規模での水素火力への燃料供給を目指しており、我々千代田化工建設も同様の目標を持って事業開発を進めている。最大の課題はコストであり、多方面でコストダウンを目指した技術開発・事業開発を継続している。

## 7. まとめ

再エネを水素燃料に変えて「貯める」「運ぶ」を行うエネルギーシステムは、永遠に利用できる究極的なシステムと考えられている。水素の大規模貯蔵輸送技術は、再エネの利用拡大による CO<sub>2</sub> 削減に不可欠な要素技術であることから、その実用化は極めて重要である。

冒頭で述べた通り、政府が温室効果ガス排出量を 2050 年までに実質ゼロとする目標に向って動き始め、今まさに議論されている「第6次エネルギー基本計画」の内容に非常に注目している。近年の国内における極端気象による災害の増加等から地球温暖化の弊害が肌で感じられるレベルとなり、地球温暖化防止は、さらに喫緊の課題となっていると考えられる。

当社では SPERA 水素システムの実用化を通じて、これらの地球温暖化防止に繋がるカーボンリサイクル社会・脱炭素社会の実現に向けて貢献して行きたいと考えている。

### [謝辞]

国際間水素サプライチェーン実証、再エネの貯蔵輸送システム、水素ステーションの開発および膜分離型脱水素反応器の開発は NEDO の資金援助を頂いて実施している。ここに深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- (1) 千代田化工建設ホームページ (<https://www.chiyoda-corp.com/jp/about/policy/>)
- (2) 岡田佳巳, 安井誠, 「水素エネルギーの大量貯蔵輸送技術」, 化学工学, Vol.77 No.1, pp.46 - 50, 2013 年
- (3) 岡田佳巳, 今川健一, 河合裕教, 三栗谷智之, 安井誠, 「水素エネルギーの大量貯蔵輸送技術」, 日本エネルギー学会誌, 93 (1), pp.15 - 20, 2014 年
- (4) 岡田佳巳, 「水素の大規模貯蔵輸送技術開発と将来の展望(1)」, 東京都高圧ガス保安協会 会報, 2019 年 7・8 月号,
- (5) 岡田佳巳, 「水素の大規模貯蔵輸送技術開発と将来の展望(2)」, 東京都高圧ガス保安協会 会報, 2019 年 9 月号
- (6) 岡田佳巳, 安井誠, 「水素エネルギーの大規模貯蔵輸送技術 - " SPERA 水素<sup>®</sup> システム - 」, 表面化学, Vol.36 No.11, pp.577- 582, 2015 年
- (7) 岡田佳巳, 安井誠, 「水素の大規模貯蔵輸送技術と今後の展望」, 日本機械学会誌, Vol.119 No.1169, 2016 年 4 月
- (8) 岡田佳巳, 三栗谷智之, 安井誠, 「水素エネルギーの大量貯蔵輸送技術 -SPERA 水素システム - 」, 月刊 ケミカルエンジニアリング, 化学工業社, 2015 年 3 月号
- (9) 岡田佳巳, 安井誠, 「有機化合物をキャリアに用いた水素の大規模貯蔵・輸送技術」, 化学と教育, 64 巻 2 号, pp. 60-63, 2016 年
- (10) 岡田佳巳, 安井誠, 「有機ケミカルハイドライド法による水素の大規模貯蔵輸送技術」, 計測技術, 2017 年 5 月号
- (11) 千代田化工建設ホームページ, ニュースリリース, 2020 年 4 月 24 日 (<https://www.chiyodacorp.com/media/200424.pdf>)
- (12) 千代田化工建設ホームページ, ニュースリリース, 2020 年 5 月 26 日 ([https://www.chiyodacorp.com/media/200526\\_R1.pdf](https://www.chiyodacorp.com/media/200526_R1.pdf))
- (13) 千代田化工建設ホームページ (<https://www.chiyodacorp.com/jp/service/spera-hydrogen/>)



[寄稿]

## 国際水素サプライチェーンの構築に向けた取組み

新道 憲二郎

（川崎重工業株式会社 技術開発本部 水素チェーン  
開発センター プロジェクト推進部 部長）



### 1. はじめに

川崎重工業株式会社は、1896年の創立以来、120年以上にわたり、陸・海・空の幅広い事業分野でものづくりを通じて高い技術・知見を培い、それぞれの時代において最先端の技術をベースにさまざまな価値を提供してきた。

1878年に創業者である川崎正蔵が築地に川崎築地造船所を創業したことにはじまり、1911年には国産化第1号の蒸気機関車を製造し、ライト兄弟の初フライトからわずか15年後の1918年に航空機工場を開設するなど、当社は常に「革新」の道を辿っている。

標題に掲げた「国際水素サプライチェーンの構築」もそうした「革新」の1つであり、この取り組みは、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出削減の機運と解決に向けたニーズが急速に高まってきたことから、地球環境と人類の未来のために大きく役立つと注目を集めている。水素は、使用時にCO<sub>2</sub>を一切出さないクリーンエネルギーであり、CO<sub>2</sub>の排出を今世紀中に実質ゼロとするパリ協定の目標を達成する上で不可欠となることが認識され、多くの国が水素の利用・供給を政策に組み込み始めた。

### 2. 水素利用への動き

京都議定書が発効した2005年には、「低炭素社会」の実現を目指し、2015年にパリ協定が採択されて以降、「脱炭素社会」達成への目標を世界187の国と地域が提出した。しかし

ながら、このような社会環境の変革よりも速く、リアルな地球環境の変化が起こっており、今やCO<sub>2</sub>削減は待ったなしの環境問題から社会問題に発展している。パリ協定に署名した国々は、CO<sub>2</sub>の削減目標を掲げており、ノルウェー、スウェーデン、フランス、英国他が2050年までに実質排出量ゼロを法制化した。日本は、2030年までに26%削減、2050年までに80%削減し、その後すみやかにゼロを目指すとしている。この目標達成には、省エネや再生可能エネルギー（再エネ）の導入促進はもとより、エネルギー安全保障、経済性、環境性および安全性（いわゆる3E+S）を満たしつつ、安価で大量に導入可能な新しいゼロエミッションエネルギーが求められてきた。

このような背景から、「CO<sub>2</sub>フリー水素」の導入・普及拡大が不可欠と考えられ、経済産業省では、図1に示すように、電力、運輸、産業分野など様々な用途で活用する方針を打ち出している<sup>(1)</sup>。

日本政府は2014年の「第4次エネルギー基本計画」において、水素社会実現への取組みを進めることを謳ったことを始めとして、世界に率先して水素関連政策を打ち出し、世界の閣僚級を東京に集めた「水素閣僚会議」を2018年より毎年開催するなど、世界をリードしてきた。その後、日本政府の動きを追うように欧米、オセアニア、中国・韓国などが水素戦略を策定し始めた。

一方、民間の水素エネルギーに向けた動きも活発化している。グローバルな動きとして、

- 水素エネルギー利用は、90%以上の一次エネルギーを海外化石燃料に依存する**日本のエネルギー供給構造を多様化させ、大幅な低炭素化を実現するポテンシャルを有する手段**。
- ✓ 化石燃料を水素に代替することによるエネルギー源の多様化・エネルギーセキュリティの向上
- ✓ 水素発電やFCV、産業分野での水素利用（熱、プロセス）によるエネルギー利用の低炭素化

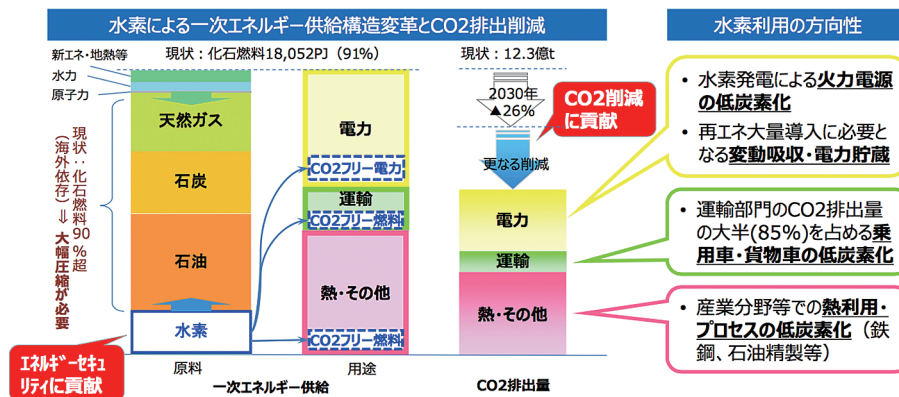


図1 水素エネルギー利用の意義 (1)

2017年に設立された「水素協議会」(Hydrogen Council)が挙げられる。エネルギー、製造業などの企業が13社で発足したが、構成企業に商社や銀行なども加わり、2020年7月には幅広い世界的なリーディングカンパニー92社まで増えた。この水素協議会は、水素を利用した新エネルギー移行に向けた共同のビジョンと長期的な目標を提唱し、各国政府や主要なステークホルダーと共に、効果的な実行計画を作り出すことを目指している。水素協議会から、水素市場は2.5兆ドル規模、世界で3,000万人の雇用を創出するとし、年間60億トンのCO<sub>2</sub>削減に寄与することがビジョンとして示されたことも、前述の各国が水素戦略を策定する動きにつながった。

日本国内においては2020年3月に「中部圏水素利用協議会」が発足した。中部圏での水素需要拡大と安定的な利用のためのサプライチェーン構築を目指し、伊勢湾岸のエネルギー、石油化学、自動車、金融など10社が参加し、産業界全体で横断的に検討を行っている。6月には、「東京湾岸ゼロエミッションイノベーション協議会」が設立された。中長期的な視点の下、ゼロエミッションに関する研究開発・実証プロジェクト（例えば、水素、炭素回収・有効利用・貯留－CCUS－、エネ

ルギーマネジメントなど）の企画・推進、広報活動を実施することを目的とし、設立時には約90の企業、大学、研究機関、行政機関などが参加している。8月には水素利活用の推進に取り組む事業者11社によって、先駆的な水素供給および水素利活用に関する実証事業の成果を社会実装に向けて一層加速させるため、「神戸・関西圏水素利活用協議会」が設立された。更に、12月には水素社会構築を進めていくための課題である「水素の需要創出」「技術革新によるコスト削減」「事業者に対する資金供給」を解決するために、幅広い業種の企業による横断的な活動を行う「水素バリューチェーン推進協議会」が設立された。

こうした政府、民間の動きと並行して、当社が取り組んでいるのが、海外の安価な未利用資源を水素にして日本に輸入し、利活用するコンセプトである。

なお、菅総理の所信表明演説（2020年10月26日）における「我が国は、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」という宣言は、今後のエネルギー政策に多大な影響を与え、政府目標などの変更などが考えられるため、注目していかなければならない。

### 3. 水素サプライチェーンのコンセプト

図2に「CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン（水素サプライチェーン）構想」の概念図を示す。本構想は、豪州ビクトリア州ラトロープバレーの褐炭をガス化・精製して水素を製造し、液化した水素（LH<sub>2</sub>）を専用の運搬船で日本に海上輸送するものである。褐炭は、水分が多いため輸送効率が低く、乾燥すると自然発火し易いため、採掘地近傍でのみ発電に利用されている。この褐炭は海外取引されていない「未利用資源」であり「権益取得」も可能である。世界に賦存する石炭の半分は褐炭であるが、特に、豪州ビクトリア州には莫大な量が存在し、ラトロープバレー地区だけで日本の電力需要量の240年分を発電できる量の褐炭がある。図3は、豪州でも最大の褐炭ロイヤン炭田である。露天掘りの周長は14kmにも達し、そのスケールは圧倒的である。

褐炭に限らず化石燃料をガス化し精製すると水素が得られるが、同時にCO<sub>2</sub>が発生する。このCO<sub>2</sub>を現地で炭素回収貯留（CCS）処理することでCO<sub>2</sub>の大気中への排出を伴わない「CO<sub>2</sub>フリー水素」が得られる。豪州連邦政府およびビクトリア州政府は共同してCCSプロジェクト“CarbonNet”を推進<sup>(2)</sup>しており、ラトロープバレーから南東80kmの海岸沖には褐炭利用時に排出するCO<sub>2</sub>を全量安定して貯留できるサイトがあることが調査により分かっている。2020年1月には評価井の試掘を完了し、順調にプロジェクトは進捗しており、ビクトリア州は褐炭とCCSを同時に利用できる適地となっている。水素サプライチェーン構想では、ラトロープバレーで製造した水素がガスパイプラインで圧送され、港近くに設置された水素液化機でLH<sub>2</sub>に変換され一旦貯蔵タンクに貯めておき、LH<sub>2</sub>運搬船に積み込んで日本に運搬される。

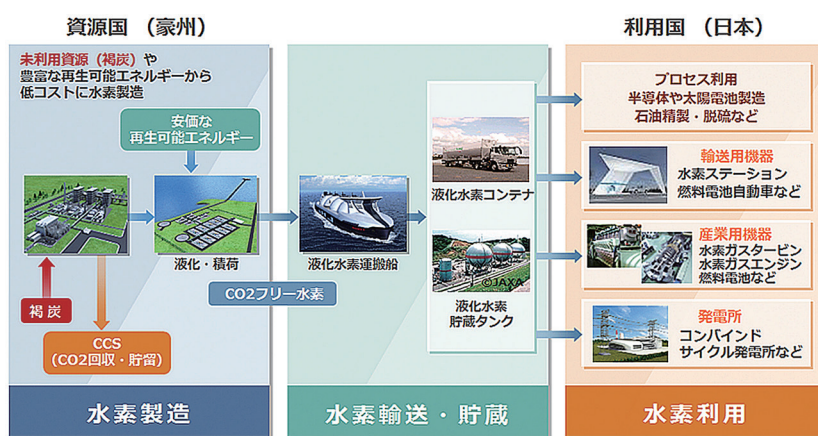


図2 CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン構想



図3 豪州ビクトリア州ラトロープバレーロイヤン炭田



水素キャリア（媒体）として、LH<sub>2</sub>、圧縮水素ガス、吸蔵合金、化学媒体があるが、商用レベルにある LH<sub>2</sub> は大量輸送貯蔵に適し、気化時のエネルギーを必要としない。LH<sub>2</sub> は密度 70.8kg/m<sup>3</sup> で、大気圧水素ガスの約 800 倍で容積効率が高い。LH<sub>2</sub> の沸点（- 253℃）は、LNG（- 162℃）より約 90℃ 低く、容積当たりの潜熱が小さく、高効率の液化技術と高度な断熱技術が必要となる。LH<sub>2</sub> の主な利点は次の通りである。

- 産業利用やロケット燃料として実用化済の輸送媒体
- 金属、有機溶剤他の輸送用媒体と吸着 / 結合させないので重量が増えず、輸送効率が高い
- 需要地では常温で気化（エネルギー不要）可能
- 高純度 = 精製不要。気化させるのみで燃料電池に供給可
- 供給地が海外の場合、現地の安いエネルギーで液化
- さらにエネルギーは消失するわけではなく冷熱（-253℃）に変換されるため需要地で冷熱発電等の利用が可能
- 毒性・臭気が無く、温暖化係数ゼロのクリーンかつ持続可能なエネルギーキャリア

運搬される LH<sub>2</sub> は極低温（- 253℃）の液体であり、体積は気体の 800 分の 1 となり、輸送効率が高い。また、極低温であることから貯蔵には高性能の断熱技術が必要であるが、当社は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の種子島宇宙センターに設置されている液化水素タンクの設計・製造で培った二重殻真空断熱技術を保有しており、数多くの LNG 運搬船を建造してきた実績もある。

こうした技術を活用して LNG と同様の長期貯蔵が実現可能である。

また、褐炭由来水素がクリーンであることを示す CO<sub>2</sub> 排出評価の結果を図 4 に示す。水素製造、貯蔵・輸送およびステーションでの燃料電池自動車へのガス充填に至る“Well to Tank”の CO<sub>2</sub> 排出量を見ると、褐炭由来水素は再エネ由来水素と同等に低排出である<sup>(3)</sup>。

水素サプライチェーンを実現するには、「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」まで、すなわちサプライチェーンの上流から下流に至るまでのコア技術やシステムを、途切れることなく「利用できる状況」を整える必要がある。コア技術が 1 つでも欠ければ、そこでサプライチェーンは分断され実現しない。また、海外の製品が間に入ると、規格、仕様などを適合させるために余分な労力とコストが発生する。

また、「利用できる状況」とは、技術・製品が存在するのみならず、運用や安全確保のためのルール、法規なども整備されている状態を指す。このように、世界初の水素サプライチェーンを実現するには、技術開発とルール整備を両輪として進める必要があり、加えて先行者優位を確立するための知的財産の獲得も同時に行わなければならない。このため当社は、監督官庁を含む関係各所と連携して、技術開発とシステム（LH<sub>2</sub> 運搬船や LH<sub>2</sub> 用ローディングシステムなど）にかかわるルール・規格の整備に取り組んでいる。

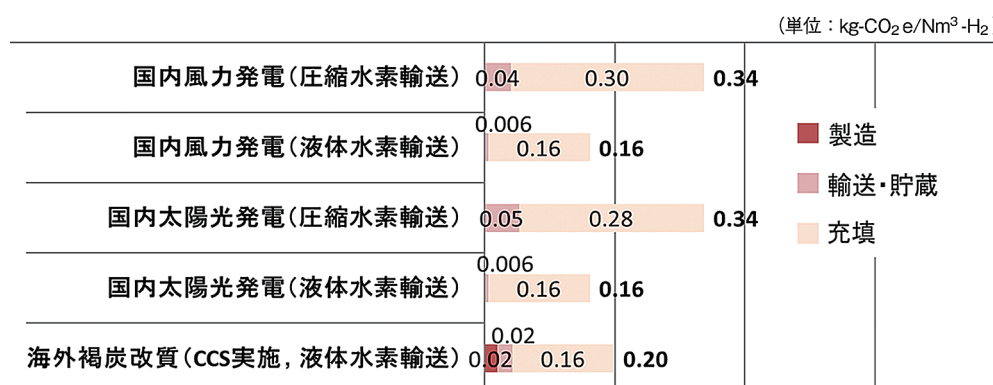


図 4 水素 1 Nm<sup>3</sup> 当たりの CO<sub>2</sub> 排出量



## 4. 日豪パイロット実証への取り組み

### (1) パイロット実証の構成

水素エネルギーの社会実装に向けて、2020年度より、世界初、褐炭由来水素によるLH<sub>2</sub>の長距離大量海上輸送を含む、パイロット規模（運搬船容量で商用の約120分の1）での「つくる」「はこぶ」「ためる」のサプライチェーン技術実証（以下パイロット実証）を開始する。

図5に示すように、パイロット実証は、ラトロープバレーに設置する褐炭ガス化水素製造設備から、神戸空港島の神戸液化水素荷役基地に至る一気通貫の水素サプライチェーンであり、技術、安全、運用および社会受容性にかかわる課題の抽出を行う。NEDO ポーションは、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）の助成事業で実施しており、豪州ポーションは、豪州政府の補助金を得て取り組んでいる。

NEDO ポーションについては、技術研究組合 CO<sub>2</sub> フリー水素サプライチェーン推進機構（HySTRA）が2016年に設立され推進母体となっている。加入企業は、川崎重工業(株)、岩谷産業(株)、電源開発(株)、シェルジャパン(株)、丸紅(株)、ENEOS(株)および川崎汽船(株)である。

豪州ポーションについては、当社の現地法人 Hydrogen Engineering Australia (HEA) が豪州政府補助の窓口となり、川崎重工業(株)、岩谷産業(株)、電源開発(株)とその現地法人 J-Power Latrobe Valley (JPLV)、丸紅(株)、Australian Gas and Light Loy Yang Pty Ltd および住友商事(株)が参画している。

### (2) 褐炭ガス化・水素製造設備

褐炭ガス化水素製造設備は電源開発(株)が担当している。本設備は、褐炭乾燥・粉碎設備、ガス化炉、ガス精製設備、シフト反応器、水素PSA（Pressure Swing Adsorption：圧力変動吸着法）、水素圧縮機、用役設備で構成されている。高純度の水素ガスを、圧縮して搬送用トレーラーに供給し、ヘイスティング港の液化基地に向けて出荷する。現在、現地での設備建設をほぼ終え、試運転調整を進めている。

### (3) LH<sub>2</sub> の大規模海上輸送技術の開発

#### ①パイロット船の開発

これまで世界にLH<sub>2</sub> 運搬船の例がないため、日豪両海事当局は、LNG 船に適用される国際海事機関（IMO）のIGCコード「液化ガスのばら積み運送のための船舶の構造および設備に関する国際規格」をベースとして、LH<sub>2</sub> ばら積み運搬船（パイロット船）の運航のため、2014年より安全基準の協議を進め、2016年11月、両国が共同提案した安全要件の暫定勧告がIMOで承認された<sup>(4)</sup>。これは、LH<sub>2</sub> 海上大量輸送を実現する上で着実な一歩となった。パイロット船は、この暫定勧告に沿った「液化水素運搬船ガイドライン」に基づいて設計されている。

本船は、LNG 内航船と同じく蒸発ガスをタンク内に留めおく蓄圧式シリンダー型を採用している。カーゴシステムには、真空断熱方式タンク（容量1250m<sup>3</sup>）を1基搭載する。

内槽支持構造には、荒波による荷重に耐える強度と同時に、熱を伝えない低い熱伝導率



図5 日豪パイロット実証の全体構成



図6 液化水素（LH<sub>2</sub>）運搬船進水式（2019年12月11日）

が要求される。そこで、ヘリコプターのローターに採用されているGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）の技術を適用した。

本船は、基本設計、詳細設計および建造を進め、2019年12月、図6に示すように神戸工場で命名・進水式を迎えた。2020年3月にはカーゴタンクが船体に搭載され、2020年秋には図7に示すように海上での試運転を行い、更なる艤装工事と調整が急ピッチで進められている。



図7 海上試運転する液化水素運搬船

## ②荷役実証ターミナルの建設

LH<sub>2</sub> 荷役技術の開発に向け、神戸空港島に神戸液化水素荷役実証ターミナルを建設した。完成イメージを図8に示す。



図8 神戸液化水素荷役実証ターミナルCG



当ターミナルは、2017年度の神戸市による敷地造成、係留施設整備に引き続き、2018年4月より建設工事に着手した。2020年2月時点で、管理棟やLH<sub>2</sub>貯蔵タンクの建設が完了し、荷役技術実証の中心的設備となるローディングシステムの組立、据付工事が行われ、2020年6月より実証を進めており、2021年にはLH<sub>2</sub>の船陸間荷役実証を行う予定である。主要目を表1に示す。

表1 神戸液化水素荷役実証ターミナル主要目

| 機 器                            | 主 要 目                                            |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|
| 液化水素貯蔵タンク（LH <sub>2</sub> タンク） | 容積 2,500 m <sup>3</sup><br>直径 19 m<br>構造 球形真空二重殻 |
| ローディングシステム                     | 口径 6インチ<br>構造 真空二重断熱フレキシブルホース（緊急離脱機構付き）          |
| BOG(Boil Off Gas)処理            | 圧縮機<br>ガスホルダー<br>ベントスタック                         |
| ローリー受入設備                       | 一式                                               |

## (a) ターミナルの全体構成

当ターミナルは、LH<sub>2</sub>の取り扱いのために、船陸間荷役を行うローディングシステム、LH<sub>2</sub>タンク、配管内などで蒸発による水素ガス（ボイルオフガス（BOG））を集めて圧縮するBOG圧縮機、圧縮した水素ガスを貯蔵するBOGホルダー、およびLH<sub>2</sub>荷役中に発生する水素ガスを処理するベントスタックを備えている。重要機器であるLH<sub>2</sub>タンクおよびローディングシステムについては後述する。BOGホルダーに貯蔵した水素ガスは、基地内設備のガス置換やLH<sub>2</sub>を船から揚荷する際の

自己加圧による搬送バックアップなど（ポンプの代替）に使用される。また、LH<sub>2</sub>タンクへの充填のため、LH<sub>2</sub>ローリーの受入設備も有している。なお、本基地は前述の通り船陸間の荷役技術の実証を主目的としているため、発生する水素ガスを他の施設に供給する設備や、再液化設備などは備えていない。

#### (b) LH<sub>2</sub>タンク

神戸液化水素荷役実証ターミナルに設置されたLH<sub>2</sub>タンクは、幾何容積2,500m<sup>3</sup>の球形真空二重殻貯槽となっている。図9に建設中の外観写真を示す。

日本国内のLH<sub>2</sub>タンクとしては、種子島宇宙センターに設置されている600m<sup>3</sup>タンクが従来の最大サイズであるが、本ターミナルのタンクは容量にして約4倍の国内最大サイズとなる。断熱構造としてパーライト真空断熱を採用しており、球形の外槽と内槽の間に断熱材であるパーライトを充填の上、真空引きを行って断熱性能を高めている。

#### (c) ローディングシステム

ローディングシステムは海上に係留されるLH<sub>2</sub>運搬船と接続して荷役を行うため、運搬船の海上揺動に追従する必要がある。また、LH<sub>2</sub>用のローディングアームは既存LNG用よりも高い断熱性能を要し、真空断熱構造とすること

が求められる。以上のことから、本基地のローディングシステムには、真空二重フレキシブルホースを採用した。図9のLH<sub>2</sub>タンク手前にローディングシステムが設置されている。

真空二重フレキシブルホースを、クレーン状のアームで吊り下げ、運搬船の揺動に対応しつつホース内をLH<sub>2</sub>が流れる。フレキシブルホースを吊り下げるアーム構造は実績がないため、様々なアーム姿勢での構造解析を行った上、極低温状態での繰り返し変位への耐久性を確認するために、プロトタイプを製作して、実際にLH<sub>2</sub>を使用した耐久試験を実施した。また、当ローディングシステムは、海上揺動への追従機能だけでなく、緊急事態発生時に安全かつ速やかにLH<sub>2</sub>運搬船を離岸させるための緊急離脱装置（ERS）を備えている。

#### (4) 実証に向けて

当社が参画しているHySTRAでは、いち早く日豪水素サプライチェーンのパイロット実証に向けた開発・実証に取り組み、これを着実に進めてきた。

本実証事業による日豪航行および運用を完遂し、褐炭のガス化技術、長距離大規模海上輸送技術および液化水素荷役技術を構築することによって水素サプライチェーンの実現に貢献していきたい。



図9 建設中の神戸液化水素荷役実証ターミナル（2020年4月）



## 5. 水素を燃料とした熱電供給実証への取り組み

水素のサプライチェーン（「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」）の「つかう」について、神戸市沖合の神戸ポートアイランドで実施している水素ガスタービンコージェネレーション実証がある。

水素と天然ガスを任意に混焼可能な1MW級ガスタービンを有する熱電供給設備（水素コージェネレーションシステム）を用いて、地域レベルでの「電気」「熱」「水素」エネルギーの効率的な利用を目指す新たなエネルギーマネジメントシステム（統合型EMS）の技術開発・実証が、NEDO 助成事業として、2015～2018年度にかけ神戸市ポートアイランドにおいて実施された。㈱大林組が幹事を担い統合

型EMSおよび電力・熱供給システムを設置・運用し、川崎重工業㈱が水素コージェネレーションシステムを供給した。当事業は、神戸市、関西電力㈱、岩谷産業㈱、㈱関電エネルギーソリューション、大阪大学の協力を得て行われていた。図10に当技術実証設備の写真を示す。

当実証における当社所掌範囲での目的は、①水素専焼（水素100%）および水素と天然ガスの任意割合の混焼において、安定した燃焼を実現すること、②ガスタービンの運転試験によりデータの蓄積と安定性の確認を通して技術を実証し、もって水素発電の実用化に資することにある。

図11に示すように、実証設備は市街地に設置されており、近隣の公共設備である国際展示場、スポーツセンター、病院、下水処理場などが供給先である。

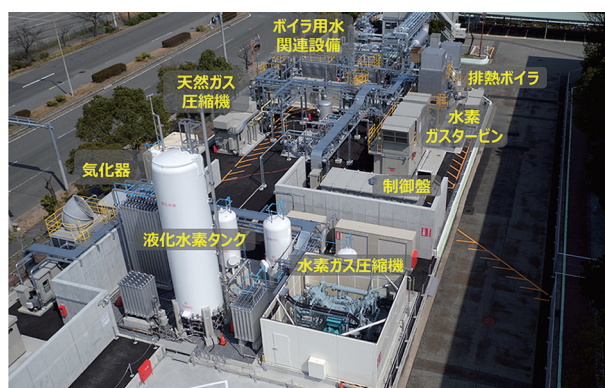


図10 水素 - 天然ガス燃料混合比自在型の熱電供給設備



図11 水素 CGS 実証設備のエネルギー供給先



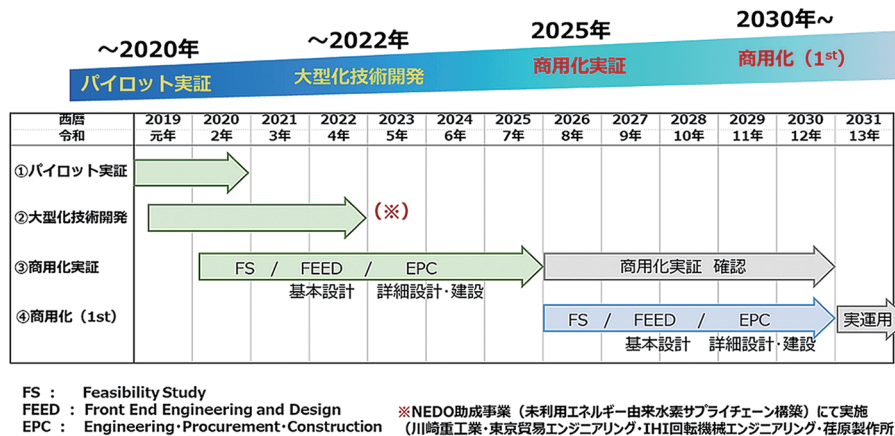


図 12 液化水素の商用化に向けたスケジュール

2018 年 4 月には、世界で初めて市街地において水素 100%を燃料としたガスタービンによる熱と電気の供給に成功した。

なお、水素と天然ガスの混合比の切り替えは、運転を継続しながら可能であり、水素 / 天然ガスの全量切り替えも 5 分以内でできることを確認している。発電効率は天然ガス仕様の当社相当機種とほぼ同等であり、水素を燃料とすることによる性能上のトレードオフはない。

なお、現在は水 / 水蒸気噴射を用いない低 NOx 化技術による燃焼器の実証などを実施している。

## 6. 商用化に向けて

わが国の水素基本戦略<sup>(5)</sup>では、2030 年頃に商用規模のサプライチェーンを構築し、年間 30 万トン程度の水素を調達すること、技術開発として 2020 年代半ばまでに商用化実証を実施することとされている。

当社では商用化実証を、機器サイズは商用規模（大型化）としつつ、プラント構成はミニマム系列として経済性を含めた商用化の成立性を見極める実証事業、国や事業者視点では商用一歩手前の実証事業と位置付けている。2019 年より NEDO の助成事業として大型化技術開発に採択いただき、図 12 のスケジュールに沿って、様々な機器サプライヤーと共に機器の大型化に取り組んでいる。

## 7. おわりに

水素エネルギーは、脱炭素のみならずエネルギー安全保障や経済・雇用にも貢献すると、多くの国々が実証に着手している。その動きをリードして来たわが国の政策に沿って、当社は、いち早く水素サプライチェーンに向けた開発・実証に取り組み、これを着実に進めてきた。

水素サプライチェーンの「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」全般にわたっての実証事業を完遂し、水素サプライチェーンの実現に貢献していきたい。

### 【謝辞】

当実証事業は NEDO の課題設定型産業技術開発費助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」として実施しており、また、豪州連邦およびビクトリア州両政府からも補助を頂いております。ここに改めて、感謝の意を表します。

本稿の執筆にあたり、技術研究組合 CO<sub>2</sub> フリー水素サプライチェーン推進機構並びに組合員各社から頂きました協力に深謝致します。

### 参考文献

- (1) 経済産業省ホームページ「第 10 回水素・燃料電池戦略協議会資料」、2017 年 9 月 22 日 ([https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/pdf/010\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/pdf/010_01_00.pdf))
- (2) 豪州ビクトリア州 CarbonNet Project ホームページ

- (<https://earthresources.vic.gov.au/projects/carbonnet-project>)
- (3) みずほ情報総研, 「ライフサイクルを考慮した水素の温室効果ガス排出量に関する評価報告書」, 2016 年 12 月  
(<https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2016/wttghg1612.html>)
- (4) 国土交通省ホームページ ([https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06\\_hh\\_000128.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06_hh_000128.html))
- (5) 経済産業省ホームページ, 「水素基本戦略」 (<http://www.meti.go.jp/prss/2017/12/20171226002/20171226002.html>)

## 研究所のうごき

(令和2年10月1日～12月31日)

### ◇ 第25回理事会 (書面決議)

決議があったものとみなされた日:12月23日(水)

議 題:

第一号議案 公益目的支出計画変更認可申請について

### ◇ 月例研究会

#### 第403回月例研究会 (Web開催)

配信日時:10月9日(金)14:00～16:00

テーマ:

1. CO<sub>2</sub>を利用する循環エネルギーシステム  
「カーボンリサイクル」  
(一財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部部長 橋崎克雄, 同副部長 酒井 奨)

#### 第404回月例研究会 (Web開催)

配信日時:11月13日(金)14:00～16:00

テーマ:

1. 水素燃焼タービン発電技術と世界の開発動向  
(プロジェクト試験研究部 主管研究員 松本 俊一)
2. 大規模水素サプライチェーンの国際実証  
～世界初国際間水素サプライチェーンの紹介～  
(千代田化工建設株式会社 理事 フロンティアビジネス本部 兼 地球環境プロジェクト事業本部長補佐 安井 誠 氏)
3. 国際水素サプライチェーン構築に向けた取り組み  
(川崎重工業株式会社 技術開発本部 水素チェーン開発センター プロジェクト推進部部長 新道 憲二郎 氏)

#### 第405回月例研究会 (Web開催)

配信日時:12月11日(金)14:00～16:00

テーマ:

1. ネット・ゼロ排出とその達成に向けた課題  
(プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員 加藤悦史)

2. 先進的CO<sub>2</sub>分離膜の開発とその将来展開  
(九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 准教授 藤川 茂紀 氏)
3. 総合討論

### ◇ 外部発表

[講演]

講演者:岡崎 徹

テーマ:蓄熱発電と各種蓄エネルギー技術との比較および世界の開発状況

講演先:講習会 No.20-73「再エネとの協調技術」  
(主催:(一社)日本機械学会)

日 時:10月6日

講演者:岡崎 徹

テーマ:再エネ普及により世界で顕在化する蓄熱発電と鍵を握る伝熱技術

講演先:第57回日本伝熱シンポジウム 特定推進研究特別ワークショップ

日 時:10月8日

講演者:岡崎 徹

テーマ:脱炭素社会に必須の蓄熱発電と国内外の技術開発動向

講演先:(株)技術情報センター セミナー

日 時:10月20日

講演者:坂田 興

テーマ:我が国への水素導入の意義, 施策動向および技術開発の現状と展望

講演先:兵庫水素社会推進協議会(事務局:兵庫県企画県民部)

日 時:10月22日

講演者:岡崎 徹

テーマ:Wind-powered thermal energy system and electric thermal energy storage having rotating inertia

講演先:Global Chinese Chemical Engineers Symposium (Web開催)

日 時:10月28日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：炭素循環エネルギーシステムについて  
講演先：日本学術振興会 炭素材料第 117 委員会  
第 335 回委員会 特別講演  
日 時：11 月 13 日

講演者：小野崎 正樹

テーマ：カーボンリサイクルによる化石燃料のゼロエミッション化  
講演先：エンジニアリング協会第 2 回カーボンリサイクル懇談会  
日 時：12 月 1 日

講演者：坂田 興

テーマ：水素エネルギーシステムの意義と HESS の役割  
講演先：水素エネルギー協会（HESS）大会  
特別講演  
日 時：12 月 2 日

講演者：黒沢 厚志

テーマ：エネルギー需給分析から見た脱炭素社会移行の課題  
講演先：2050 年のエネルギーと社会：課題解決の方向性 2020 年度シンポジウム（主催：「2050 年に向けた日本のエネルギー需給」エネルギー・資源学会研究委員会，東京大学生産技術研究所エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門）  
日 時：12 月 10 日

講演者：岡崎 徹

テーマ：蓄熱発電の国際的開発状況と今後の展望～再生エネルギーの弱点を救う～  
講演先：日本環境倶楽部 セミナー  
日 時：12 月 10 日

講演者：坂田 興

テーマ：水素エネルギーシステムの大量導入の意義と主要国の政策  
講演先：（一財）エンジニアリング協会（ENAA）水素インフラ研究会  
日 時：12 月 15 日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクルエネルギーシステムについて  
講演先：（国研）産業技術総合研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター  
日 時：12 月 22 日

講演者：小野崎 正樹

テーマ：カーボンリサイクルで 2050 年温暖化ガス排出実質ゼロを目指すには  
講演先：カーボンリサイクルに関する講演会（Web 開催，主催：横河電機（株））  
日 時：12 月 23 日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクルエネルギーシステムについて  
講演先：（公財）地球環境産業技術研究機構 無機膜研究センター 産業化戦略協議会  
日 時：12 月 24 日

[学会発表]

発表者：石本 祐樹

テーマ：再生可能エネルギー由来のエネルギーキャリアを用いた小規模 P2G システムの分析  
発表先：第 40 回水素エネルギー協会大会  
日 時：12 月 2～3 日

発表者：加藤 悦史

テーマ：Role of negative emissions technologies (NETs) and innovative technologies in the transition of Japan's energy systems toward net-zero CO<sub>2</sub> emissions  
発表先：Research Workshop on Carbon Neutrality and Beyond in East Asia

主催者：Institute for Future Initiatives, Global Energy Policy and East Asia Research Unit, University of Tokyo (Japan), Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University (China), Korea Environment Institute (Korea)

日 時：12 月 15 日



[その他]

発表者：木野 千晶

テーマ：Investigation of Accident Scenario and  
Fission Products Behaviors in Fukushima  
Daiichi Nuclear Power Plant Unit-1/2/3  
using SAMPSON code

発表先：OECD/NEA ARC-F プロジェクト本会議  
日 時：12 月 14 ～ 16 日

[寄稿]

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：水素エネルギーシステム

寄稿先：化学工学誌 84 巻 10 号『化学工学年鑑  
2020』

発行日：2020 年 10 月

寄稿者：今岡 隆司

テーマ：水素キャリアの経済性・環境性評価

寄稿先：『エネルギーと動力 No.295』（2020 年秋  
季号），（一社）日本動力協会

寄稿者：石本 祐樹，坂本 茂樹

テーマ：1. エネルギーマネジメントの国際規格  
の現状と今後の開発計画（概論）  
2. 日本提案のエネルギーマネジメント  
国際規格  
2-1. ISO 50009「複数組織が実施する共  
通の EnMS のガイダンス」

寄稿先：『月刊アイソス』2020 年 12 月号（㈱シス  
テム規格社）

寄稿者：坂田 興

テーマ：水素に対する期待の高まりと水素エネ  
ルギー協会の役割

寄稿先：（一社）水素エネルギー協会会誌『水素  
エネルギーシステム』Vol.46, No.4（2020  
年 12 月）

## 編集後記

近年、ITの著しい進歩により世の中の変化が加速した。昨年は新型コロナウイルスで世の中が一変し、さらに2050年にカーボンニュートラルを目指す日本の環境政策も大きく変化した。カーボンニュートラルとは、地球上の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)に代表される温室効果ガスの排出と吸収がプラスマイナスゼロになるようなエネルギー利用のあり方である。

約30年後の2050年でのカーボンニュートラルは、ごく一部の国を除くと極めて高い目標である。特に、地理的、気候的に再生可能エネルギー(再エネ)の導入余地が限定される日本では本当にできるのかという意見が出るのも理解できる。しかし、世界的な気候変動は日々進んでおり、具体的にCO<sub>2</sub>排出量を下げていかないと温暖化は止まらない。その意味で、パリ協定よりも踏み込んだ、日本政府のカーボンニュートラルの目標設定の意義は大きい。

2050年に化石燃料利用が、輸送、産業利用を含めて完全に無くなるとは考えにくい。CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)も回収率が90%程度にとどまる見込みである。そのため、カーボンニュートラル実現に向けては、CO<sub>2</sub>を再利用するカーボンリサ

イクルが必須である。

一方で、エネルギー的に低位なCO<sub>2</sub>の再利用にはエネルギー投入が必要であり、そのエネルギーはCO<sub>2</sub>フリーでないという意味がない。

本号では、CO<sub>2</sub>フリーとみなされるエネルギー源として、バイオマス利用、世界的に唯一・大規模かつ50年以上の供給実績のある原子力、そしてカーボンリサイクル時に必須となる水素の導入に関する現状を取り上げた。

これら以外にもカーボンニュートラル実現には様々な技術開発、導入、実用化が必要である。日本では再エネ由来のCO<sub>2</sub>フリー水素輸入が必要になる可能性も高い。まずは、全方位的にどの技術が何処までカーボンニュートラルに貢献できるか、課題は何かを明確にするのが急務であろう。日本が技術で世界の低炭素化社会に貢献することが、資源の少ない日本のエネルギーセキュリティ確保にもつながると考える。

本号の記事が、皆様の今後の事業活動に少しでもご参考となれば幸いです。

編集責任者 茶木雅夫

### 季報 エネルギー総合工学 第43巻第4号

令和3年1月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

<https://www.iae.or.jp/>

(印刷) 株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。