

NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ

— 一定置用燃料電池技術開発ロードマップ（解説書） —

2023年2月

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」）では、1980年の創立以来、水素・燃料電池に関する技術開発に取り組んできました。基盤技術開発から各種実証研究、基準・規格作りなどの総合的な取り組みの成果もあり、我が国は2009年に家庭用燃料電池「エネファーム」を、2014年に燃料電池自動車先駆けて市場に導入するなど、水素・燃料電池分野で世界をリードしてきました。

昨今世界各国でカーボンニュートラルの実現に向けた動きが加速する中、水素・燃料電池に対する期待が急速に高まっています。同時に、本分野の技術開発や事業展開が加速度的に進展し、競争が激しさを増しています。このような状況下、我が国が引き続き本分野をけん引し、カーボンニュートラルの実現に貢献していくためには、中長期的なビジョンを関係者間で共有し、戦略的かつ効率的に取り組むを進めていくことが必要不可欠です。

NEDOは2005年から、産学官が長期的視野を共有して技術開発に取り組むために、燃料電池・水素技術開発ロードマップを公開してきました。今回の改訂において、定置用燃料電池技術開発ロードマップでは、カーボンニュートラルの実現に向けて定置用燃料電池に期待される役割を議論し、普及シナリオを再整理しました。また、このシナリオに基づき様々な用途やニーズに対応するため、レジリエンス強化や再生可能エネルギーの調整力として活用するための技術課題や更なる高効率発電に向けた技術課題を設定しました。

定置用燃料電池の普及拡大に向けては、一つの製品、システムのレベルアップを図るだけでなく、エネルギー市場全体、電力系統全体の中でどのような価値を提供していけるのか、より俯瞰的な検討が必要になってまいります。本ロードマップが燃料電池の研究開発に取り組む方々の指針となることに加え、ユーザーを含めた多様なステークホルダー間で今後の取り組みを議論する基礎として活用されることを願っております。

最後に、本ロードマップの作成にあたり、企業や研究機関、大学など、非常に多くの機関の方々のご協力を賜りました。この場をお借りして、厚くお礼を申し上げます。

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）
スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 燃料電池・水素室

目次

1. 定置用燃料電池技術開発ロードマップの概要	1
1.1 策定の背景	1
1.2 普及目標・普及シナリオ	2
1.3 製品開発課題	4
1.4 達成性能レベル	5
1.4.1 家庭用燃料電池	5
1.4.2 業務・産業用：純水素型 PEFC	6
1.4.3 業務・産業用：SOFC	6
1.4.4 業務・産業用：中容量ハイブリッドシステム、大容量コンバインドシステム	7
2. 達成性能レベルの考え方と技術開発課題	8
2.1 技術開発課題（PEFC）	8
2.1.1 定置用燃料電池と FCV・HDV 用燃料電池の共通課題に対する考え方	8
2.1.2 FCV・HDV 用燃料電池と独立した定置用燃料電池の独自課題	8
2.1.3 生産技術課題	9
2.1.4 純水素型 PEFC	10
2.2 技術開発課題（SOFC）	12
2.2.1 現在セル開発	12
2.2.2 次世代セル開発	12
2.2.2.1 高発電効率型	12
2.2.2.2 金属支持型	12
2.2.2.3 プロトン伝導性セラミック燃料電池（PCFC）	14
2.2.2.4 rSOC	15
2.2.3 次々世代技術開発	15
2.2.4 基盤技術開発	16
2.3 技術開発課題（共通）	16
2.3.1 設置工事費、機器メンテナンスコスト低減	16
2.3.2 レジリエンス強化	16
2.3.3 再エネ調整力、VPP・DR 対応	17
略語一覧	19

1. 定置用燃料電池技術開発ロードマップの概要

1.1 策定の背景

近年の世界における脱二酸化炭素に向けた水素関連施策の強力な推進には目を見張るものがある。例えば 2020 年だけで見てもドイツ政府が 6 月に国家水素戦略を策定し、水素製造装置設備に対して再エネ賦課金を免除するとした。これに次いで EU が 7 月に水素戦略を公表し、暫定的に低炭素水素（化石+CCUS）も活用しつつ製造、輸送・貯蔵、利用に向けて取り組むことを示した。また、フランスは 9 月に水素戦略を改定しグリーン水素の生産に向けた方向を示すなど、世界中で水素関連技術開発に拍車がかかっている。

我が国は 2009 年に家庭用燃料電池「エネファーム」を世界に先駆けて商品化し、政府・地方自治体等の積極的な導入支援策と民間企業の開発から販売に至る努力の結果、発売開始から 14 年で累積販売台数が 46 万台（2022 年 12 月末）を越えるに至った。業務・産業用の燃料電池についても、NEDO の開発・実証等の成果をもとに 2017 年より市場投入され、この分野の技術面で先行している国の一つとなっている。

水素・燃料電池戦略協議会において策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ（2014 年 6 月策定、2016 年 3 月改訂、2019 年改訂）」では、燃料電池の普及拡大に向けた政府の骨太大方針や政策目標が示されるとともに、今後の市場規模の拡大を予想している。このため産業技術政策の実現をミッションとする NEDO としては、これら政府目標等を具現化するために取り組むべき技術的課題を明確化するとともに時系列に整理した「NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ」を 2005 年に策定し、過去に 4 度、最新の政策、市場及び技術動向等を反映させるために改訂してきた。前回の改定は 2017 年であったが、その後はパリ協定やアフターコロナの経済成長戦略等で世界各国において水素社会に向けた取組が急加速するとともに、定置用燃料電池もデータセンターなどへの導入が進みつつあり、今後の普及拡大が期待されている状況である。このような背景のもと、本調査では家庭用、業務・産業用に分類し、それぞれに適合する固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）や固体高分子形燃料電池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）に関して 2030 年、2040 年頃までに達成すべき技術課題や最新の政策・技術動向を調査するとともに、多数の有識者を糾合してロードマップの見直しを検討し、定置用燃料電池技術開発ロードマップ（以下「本ロードマップ」）を策定した。本解説書は、本ロードマップにおける普及シナリオや製品開発課題の考え方、各種技術開発課題の詳細をまとめたものである。

1.2 普及目標・普及シナリオ

①家庭用燃料電池

国内の家庭用燃料電池は2009年に市場投入が開始され、現在までの累計普及台数は46.5万台に及ぶ（2022年12月末時点のメーカーが出荷・納品したエネファームの台数、コージェネ財団燃料電池室「エネファームメーカー販売台数」より引用）。経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、2025年頃までにユーザーの投資回収年数5年レベルのコストまでシステム価格を低減することによって、定置用燃料電池の自立的な普及拡大を目指すとしており、経済産業省「第6次エネルギー基本計画2030年におけるエネルギー需給の見通し」では2030年頃の普及台数目標値は300万台と策定されている。この普及台数を達成するためのシナリオを以下の様に整理した。

【2025年頃まで】

- ハウスメーカーからのニーズとして、水害対策等の観点から壁掛けや高い位置での設置が求められている。また、CAPEX（初期投資費用）低減に向けては、工事費の低減も重要な観点である。設置・工事容易性が必要である。
- 従来、戸建て新築住宅を中心に展開してきた市場を集合住宅や既設住宅、並びに地方都市へ普及拡大する。
- 一部の製品では、停電時でも発電を継続できる機能や自家用車からAC100V電力の供給を受けて起動できる機能が実装されている。更なるレジリエンス強化の実現により、安定的な電力システムを構築するための機能充実が必要である。

【2030年頃まで】

- 一部のPEFC製品では、エネファームと太陽光発電を併用している住宅において、気象情報をエネファームの運転計画に活用し、晴天時は太陽光発電、雨天時や夜間はエネファームにより発電することで、エネファームを再エネ電源の調整用電源として活用するための機能が実装されている。また、各家庭のエネファームと再エネ電源を地域単位で広く融通するVPP実証の取り組みが開始されている。家庭用燃料電池の自立的な普及拡大には、こういった市場ニーズに応じた製品開発が必要である。
- 周辺設備を含めた小型化によって、集合住宅を対象とした普及台数増加を目指す。
- 低炭素化・脱炭素化に向けて、水素混合といった燃料多様化への対応が求められる。

【2030年以降】

- SOFCでは、プロトン伝導セラミック燃料電池（PCFC）やオフガスリサイクルSOFCの技術を用いて、超高効率化を目指す。
- ガス協会は2030年から2050年に向けて、段階的なパイプラインへのCNメタン投入を計画している。低炭素化・脱炭素化の社会的要請に対応すべく燃料電池のCNメタン対応が求められる。

尚、2017年改訂版の定置用燃料電池技術開発ロードマップにおける総合効率に関する目標設定は、今回の改訂で削除した。その背景は以下の通りである。PEFCの総合効率は既におおよそ100%に迫っている。一方、SOFCでは総合効率と発電効率のそれぞれに伸びしろがあるが、この2つは相反の傾向にあり、総合効率を向上させるためには、発電効率を犠牲にしなければならない。しかしながら、SOFCは電力負荷に追従して発電制御をし、発生する熱については熱需要が少ないときには廃棄するいわゆる電主熱従の運転制御をすることがほとんどであり、発電効率が重視される上、総合効率向上のために認識されている技術課題は存在しない。そこで、本ロードマップ改訂では、総合効率に関する目標は設定しないものとした。

その一方で、PEFCは熱負荷に応じて発電制御を行ういわゆる熱主電従の運転制御をすることが多く、総合効率が重要であり省エネ性に関連する。建築物省エネ法では、住宅の省エネ性評価基準に給湯設備のエネルギー消費量を含めた一次エネルギー消費量を設けている。更には、省エネ性は、ZEHやZEHマンションの評価に関連する指標であるため、総合効率はPEFCによる家庭用コージェネレーションシステムの重要な指標である。そこで、総合効率の具体的な目標設定は行わないものの、後述の製品開発課題では、省エネ性に関する課題を整理した。ただし、省エネ性にはいくつかの算定方法が存在し、業界標準が無いため、今後、業界標準の算定方法の策定が望まれる。

②業務・産業用燃料電池

業務・産業用燃料電池は、燃料電池以外の既存のコージェネレーションシステムと比べて発電効率が高いため、熱需要が豊富な病院、ホテルなどに加え、熱需要が少なく、現在は分散型エネルギーの活用が比較的進んでいないデータセンターなどの施設での活用も期待されている。

2017年以降、数kW～100kW級のPEFC製品や、数kW級、数10kW級、250kW級のSOFC製品が市場導入されているが、初期導入コストと運用メリットでは競合製品となるガスインジンなどに比べて優位性が低く、自立的な普及拡大に向けては、継続的な低コスト化や低炭素・脱炭素社会に向けたカーボンニュートラルへの貢献が必要不可欠である。ここでは普及シナリオを以下の様に整理した。

【2025年頃まで】

- 家庭用燃料電池と同様に、自然災害などによるライフライン遮断時のレジリエンスの役割が求められる。
- 動植物などから生まれた生物資源（バイオマス）は、下水処理場や清掃工場、食品工場など都市部近郊に存在する。主にSOFCでは、バイオガスと都市ガスの混焼など、安定的な電力と熱の供給の観点で期待されている側面もある。例えば、ビール工場では排水由来バイオメタンガスを原料とする実証事業が開始されているが、更なる実証実験が必要である。

【2030年頃まで】

- 分散型電源（モノジェネレーションシステム、コージェネレーションシステム）として普及
- 電力・熱需要を最適に制御するスマートコミュニティの実現
- 高効率化、高速生産を達成させる革新的生産技術を活用した低コスト化による普及促進

- 燃料多様化（カーボンニュートラル燃料他）
- 再エネ調整用電源としての普及
- 用途拡大による普及促進や海外展開

【2030年以降】

- CO₂フリー水素を用いた自立分散型エネルギーシステムの普及
- 超高効率（70%）、長寿命化（15年）の実現
- CNメタン、CO₂フリー水素による普及
- 最高効率を達成するコージェネ機として、熱需要が必要な設備への普及、及び高発電効率が活かせるモノジェネ市場への拡大
- 発電を主としながら、電力に余剰があるときに水素製造する rSOC システムの実用化
- SOFC の排ガスや燃料改質の際に発生する CO₂ を回収する CO₂ 分離回収型燃料電池の実用化

1.3 製品開発課題

上述の普及シナリオを達成するために必要な製品開発課題を下記の通り整理した。尚、家庭用と業務・産業用では、多くの点で製品開発課題が重複して存在するが、それぞれの市場普及ステータスは大きく異なる。上述の通り、家庭用燃料電池はエネファームの累積出荷台数が 46 万台を超えるに至っているが、業務・産業用燃料電池は未だ市場が確立されておらず、目指すべき市場も明確化されていない状況である。そこで、業務・産業用では製品にバリエーションを持たせる目的で、本ロードマップ上では製品開発課題の達成時期は設けず、現在から 2040 年以降を含めた幅広い期間で達成すべき課題として整理した。下記の達成時期は、主に家庭用燃料電池を想定し設定している。

【2025年頃まで】

- CAPEX（初期投資費用）と OPEX（ランニング費用）の低減が最優先課題である。
CAPEX 低減に向けては、小型化による設置条件への大幅緩和（設置工事費の低減）が挙げられる。また、OPEX 低減に向けては、技術開発課題の達成による発電効率の向上や耐久性の向上が挙げられる。
- メンテナンス性向上により、トータルコストが下がり、投資回収年数の削減が期待できる。尚、メンテナンス費用は家庭用では CAPEX、業務・産業用では OPEX にそれぞれ含まれる。
- 製品の付加価値向上のためには、ネットワーク接続による外部情報連携・遠隔メンテナンス等のサービス強化、並びに、停電時やガス供給停止時のレジリエンス強化等、市場ニーズに応じた製品開発が求められる。尚、ガス供給停止時のレジリエンス強化に関しては、家庭用と業務・産業用とで異なるレジリエンス性が要求される。家庭用では、ガス供給停止時に内蔵した電気ヒーターを用いて、お湯を供給することが可能である。その一方で、業務・産業用では、ガス供給停止時でも発電を継続できるようにするため、例えば、LPG ボンベや内蔵蓄電池搭載による燃料遮断対応が求められる。

【2030年頃まで】

- 様々な用途に応じた製品の開発、市場投入の観点から、大幅小型化や設置簡素化が求められる。PEFCは高温化することで、同容量の貯湯タンクへの蓄熱量が増加し、省エネ性向上が期待される。またSOFCはモノジェネレーションシステムとして活用することにより、貯湯槽や水の配管が不要になるため、より一層の小型化が可能である。
- 余剰の電力や熱を有効活用するためのエネルギーマネジメントシステムとして、VPPに資する技術開発や、再エネ電源の調整用電源としての価値向上が求められる。また、業務・産業用では、水電解システムと併設させることで、熱融通や地産地消といった使い方も想定される。
- 業務・産業用では、工場や製鉄所等において低炭素化・脱炭素化に対するニーズが高く、脱炭素化された電力による電化、水素化、メタネーションを通じた脱炭素化を進めることが必要である。現在の都市ガス13A、LPGなどに加え、バイオガスやLPGと水素などの混焼(dual-fuel)・切り替え(bi-fuel)、CNメタンといった燃料多様化への対応が求められる。

【2030年以降】

- 2030年以降の長期的な目線では、次世代セルスタックのシステム技術化、及び製品化が期待される。金属支持型SOFCやPCFCは、家庭用、業務・産業用の双方での実用化が検討されている。その一方で、rSOCやCO₂分離回収型燃料電池は、業務・産業用での実用化が目指されている。

1.4 達成性能レベル

1.4.1 家庭用燃料電池

表 1.4.1-1 に家庭用燃料電池の達成性能レベルを示す。尚、発電効率については、2035年頃、2040年頃に高効率次世代型として、超高効率な発電効率を設定した。これらは、プロトン伝導セラミック燃料電池(PCFC)、オフガスリサイクルSOFCの技術で目指すべき努力目標として記載している。

また、2025年のシステム価格目標(ユーザーの投資回収年数5年レベル)は、経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」からの引用であるが、システム価格としてはおおよそ50万円程度であり、2030年頃の価格目標は、それ以下を目指すものとして目標値を設定している。そして、2035年以降は、50万円以下のシステム価格を維持しつつ、発電効率や耐久年数など、更なる性能向上を目指すものとする。

表 1.4.1-1 達成性能レベル(家庭用燃料電池)

項目	現在	2025 年頃	2030 年頃	2035 年頃	2040 年頃
発電効率 ^{*1}	38~55%(最高 効率 PEFC: 40%、SOFC: 55%)	40~55%	40~60%以上	高効率次世代型 ^{*2} :65%	45~65%以上 高効率次世代型: 70%
耐久年数 ^{*3}	10 年	10 年以上	15 年	—	15 年以上
システム価格 ^{*4}	PEFC:86 万円 (2020 年度) SOFC:101 万円 (2020 年度)	ユーザーの投資 回収年数の低減 (7~8 年レベルの コスト⇒5 年レ ベルのコストへ)	50 万円以下	—	—

*1 「発電効率」は LHV で記載。家庭用 FC として製品が多様化することを想定し、数値は PEFC と SOFC を区別せずに幅をもって記載。

*2 高効率次世代型は PCFC、オフガスリサイクル SOFC の技術で目指す努力目標として記載。

*3 「耐久年数」は、所定の耐久年数後において定格運転時における出力維持および電圧低下量が初期から 10%以内を満たす条件。

*4 「システム価格」は 700W 級家庭用燃料電池システムの標準機タイプ、流通費および設置費を含むエンドユーザー負担額。

1.4.2 業務・産業用：純水素型 PEFC

業務・産業用途の純水素型 PEFC 製品は、5kW 級、100kW 級製品が市場投入されている。直接、水素を燃料とする純水素型 PEFC は、燃料改質器が不要となり、小型化・システム簡素化などによる設置工事費が低減できるため、大幅な低コスト化が可能であると考えられる。

業務・産業用の純水素型 PEFC の達成性能レベルは、燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ) の定置用 WG・水素利用 SWG の検討結果を開示頂いたものを掲載した。現状、先行開発フェーズとして市場投入が始まっており、2030 年には所定の水素価格におけるグリーンな系統電力同等の発電単価を目指す。更に、2040 年に向けては、機器コストの低減によりユーザー負担額が低減され、経済合理性が成り立つ価格帯の機器開発を目指す。

表 1.4.2-1 達成性能レベル(業務・産業用:純水素型 PEFC)

項目	現在	2030 年頃	2040 年頃
発電効率	50~55%	60%	65%
耐久年数	—	15 年	15 年

1.4.3 業務・産業用：SOFC

業務・産業用 SOFC の達成性能レベルを表 1.4.3-1 に示す。SOFC は発電効率が高い特徴を活かし、家庭用燃料電池と同等以上の発電効率を目指す。システム価格については、競合製品となるガスエンジンなどに比べて優位性が低いことから一層の経済性の向上が必要とされる。

ここで、システム価格における低圧、高圧の分類については、低圧は数 kW 級、高圧は数 10kW~数 100kW 級として分類した。

表 1.4.3-1 達成性能レベル(業務・産業用:SOFC)

項目	現在	2025 年頃	2030 年頃	2040 年頃
発電効率	50~55%	55%以上	60%以上	70%以上
耐久年数	10 年	10 年以上	15 年	15 年以上
システム価格	100 万円/kW	低圧:100 万円/kW 以下 高圧:50 万円/kW	低圧:50 万円/kW 高圧:30 万円/kW	低圧:50 万円/kW 以下 高圧:30 万円/kW 以下

1.4.4 業務・産業用：中容量ハイブリッドシステム、大容量コンバインドシステム

中容量ハイブリッドシステム（数 100kW～数 MW 級）、大容量コンバインドシステム（数 10MW 以上）については、2016 年 6 月に策定された経済産業省「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」（GTFC：ガスタービン燃料電池複合発電、IGFC：石炭ガス化燃料電池複合発電）に基づき設定した。達成性能レベルを表 1.4.4-1 に示した。SOFC は発電効率が高いものの大型化によるスケールメリットが得られ難い状況であるため、コスト低減のための技術確立、ハイブリッドシステムの普及拡大による量産効果の実現などを通じて普及を進めていく必要がある。

表 1.4.4-1 達成性能レベル(業務・産業用:中容量ハイブリッドシステム、大容量システム)

項目	現在	2025 年頃	2030 年頃	2040 年以降
発電効率	中容量ハイブリッド: 55%	—	中容量ハイブリッド: >60% GTFC:63% IGFC:55%	中容量ハイブリッド: >75%
耐久年数 (見通し)	中容量ハイブリッド:10 年	GTFC:10 年 IGFC:5 年	中容量ハイブリッド:15 年 大容量コンバインド:15 年	—
システム 価格	中容量ハイブリッド: 数 100 万円⇒30 万円 /kW(数 10MW/年、生 産ケース)	大容量コンバインド: 数 100 万円/kW	中容量ハイブリッド: <30 万円 /kW(数 100MW/年、生産ケー ス) 大容量コンバインド: 量産後従来機並みの発 電単価(数 100MW/ 年、生産ケース)	—

2. 達成性能レベルの考え方と技術開発課題

2.1 技術開発課題（PEFC）

2.1.1 定置用燃料電池とFCV・HDV用燃料電池の共通課題に対する考え方

FCV・HDV用燃料電池では、2030年頃の目標達成に向けて、 $-30\sim 120^{\circ}\text{C}$ の広範囲で作動する材料・部材の開発が求められる。一方で、定置用燃料電池では、作動温度が高温化すると蓄熱量が増え、一次エネルギー削減率が向上し、省エネ性を高めることができるため、燃料電池の高温作動対応が求められる。ただし、定置用燃料電池では、FCV・HDV用燃料電池の様なラジエーターによる作動温度への制限は無いが、 100°C を超えると加圧のスタックになるため、排熱の回収効率を考慮すると、 $80\sim 90^{\circ}\text{C}$ 程度が妥当な数字であると考えられる。従って、定置用燃料電池の高温化では、目標とすべき作動最高温度は $80\sim 90^{\circ}\text{C}$ と設定した。

2040年に向けた次世代セル材料開発では、高電位耐性、CeやCe以外のラジカルクエンチャー、プロトン伝導性向上と耐久性向上の両立に係る機能性補強層材料探索といった技術開発課題が挙げられる。また、評価解析技術では、マテリアルズ・インフォマティクス（MI）やプロセス・インフォマティクス（PI）を活用した材料・プロセス探索や、高度な解析技術を活用した現象・機構解明、ならびに、計算科学技術（シミュレーション）を活用したセル性能・劣化解析、および上記インフォマティクスに活用するための解析・計算科学によるデータベース構築といった課題が挙げられる（技術課題の詳細は、FCV・HDV用燃料電池技術開発ロードマップ（解説書2.6節）参照）。

2.1.2 FCV・HDV用燃料電池と独立した定置用燃料電池の独自課題

定置用燃料電池では、FCV・HDV用燃料電池と比べて負荷変動が小さいが、一定出力で長時間運転といった使い方が想定されるため、高出力における連続運転時の安定性の向上が重要である。また、定置用燃料電池の小型化・低コスト化に向けては、ある程度高い出力密度での運転が重要となる。また、高効率化に対しては、カーボン腐食の課題が顕著である。

以下では、定置用燃料電池の独自課題を整理した。

- 電解質膜材料：ラジカルクエンチャー改良による膜の高耐久化、反応ガスのクロスリーク抑制
- 電極触媒：セルスタックの高効率化に伴い、カソード触媒の高電位耐性が必要
- セパレーター：セパレーターの薄膜化、加熱硬化の必要ない材料開発
- 燃料系：各種ロバスト性の向上
 - 燃料多様化対応技術としては、不純物が多く含まれるところに対して、安価にできる脱硫システムの技術が必要とされる。FCV・HDV用燃料電池と比べ、定置用では長時間運転の使い方が想定されるため、リフレッシュする機会が少なく、脱硫システム技術の影響は大きいと考えられる。硫黄耐性がある触媒や、システム前で簡易かつ安価に脱硫出来るシステム開発が求められる。

- 空気中に硫黄や有機溶剤などが含まれると、選択酸化触媒が劣化し、改質ガス中 CO 除去不十分によるセルスタック電極 CO 被毒での電圧低下や、燃焼排ガス中に腐食成分（含塩素有機溶剤の燃焼生成物である塩酸など）が含まれることによる排気煙道腐食による排気漏れ、排気熱交腐食による漏水故障、燃焼生成物由来のイオン成分がドレンに溶け込むことによるイオン交換樹脂の過剰消費といった不具合を起こす可能性がある。これらの耐不純物対応のためには、セルスタックや改質器の耐久性向上や、吸気フィルターに不純物除去機能を持たせるなどの対応が求められる。
- 水質ロバスト（高硬度水への対応）
- 実用化技術：セルスタック・システムのコンパクト化・軽量化、不可逆的な吸着種への対策、補機類の小型化、小型水素専用循環ポンプ開発（低コスト、水素脆化・水蒸気に強い水素循環ポンプ）

2.1.3 生産技術課題

PEFC の生産技術に係る数値目標や、FC スタックの生産技術課題は、「定置用燃料電池技術開発ロードマップ（PEFC 生産技術）」の通り整理した。生産技術目標は主として、2030 年頃のエネファーム普及台数目標値 300 万台を達成するために必要な生産技術目標として設定している。まず、2030 年頃の目標普及台数を達成するためには、国内の燃料電池スタックの製造能力を段階的に拡大する必要がある。それと同時に、2025 年におけるユーザーの投資回収年数 5 年レベルのコストへの低減を達成することで、普及スピードの向上を図る。生産速度は、現状の枚葉工程 20 秒/セル単位から、2030 年に向けては 1~2 秒/セル単位へと、飛躍的な向上を目指す。

コスト低減目標は、2030 年にかけて現状の加工費、材料費を 70%程度削減する目標を設定しており、触媒、アイオノマー、電解質膜、GDL、BPP の材料コスト低減と共に、製造設備の生産性、スペースの向上、工程の短縮・削減を図り、全体の設備投資の低減が必要である。

図 2.1.3-1 に一般的な燃料電池製造ライン工程を示す。前述のコスト低減目標を達成するためには、高価な材料の歩留まりを上げ、工程全体の大幅な生産性向上を図る必要があり、各工程において工法の技術革新が求められる。

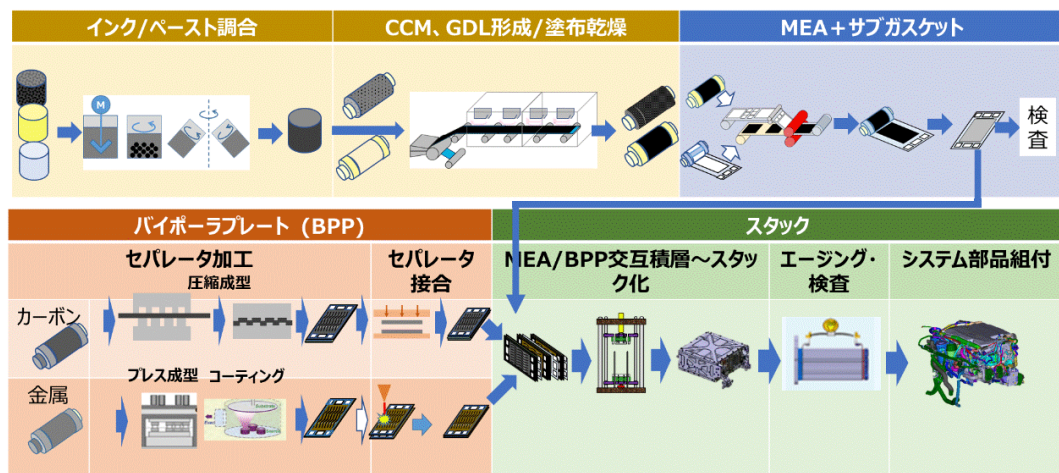


図 2.1.3-1 燃料電池スタック生産工程

(FCV・HDV 用燃料電池技術開発ロードマップ(解説書)図 2.7.4-1 を引用)

表 2.1.3-1 に主要工程ごとの開発のポイントと目標とする指標（KPI）を示した（各工程の具体的取り組み課題の詳細については、FCV・HDV 用燃料電池技術開発ロードマップ（解説書 2.7.4 節）参照）。

表 2.1.3-1 工程ごとの開発のポイントと目標 KPI

工程	革新の主眼/開発のポイント (協調して開発を進めたい課題)	工程の目標 KPI (本ロードマップに記載)
触媒調合 触媒塗工乾燥 MPL 塗工乾燥	高品質塗工面の形成技術の確立 ①ダマのない均一分散促進 ②脱泡時間短縮 ③塗工欠陥・カスレなし ④乾燥エネルギー・排风量減 ⑤Pt・アイオノマー利用率向上	①粒径<3μm、ろ過歩留>99.9% ②脱泡混錬時間 従来法▲70% ③塗面欠陥なきこと(ダマ、ひび) ④乾燥エネルギー▲70% ⑤排风量▲70% ⑥Pt 歩留>98%
MEA 化 セル化	セルのシール信頼性の確保 ①RtoR 貼合の高速・高精度化 ②型レス、使い捨て材レス	①位置精度±0.5mm@10m/分 ②裁断加工費▲70% ③搬送加工費▲70%
流路形成	高性能流路形成技術の確立 ①印刷・3DP 活用 ②簡素なプレス加工 ③型費削減	①リブ高さ 300μm@0.5 秒/セル ②成型荷重▲70% ③型製作費▲70%
エージング	エージング工程の短縮化 レス化 セル製造工程における触媒被毒抑制とプロトンパス形成促進	①エージング時間<5 分 ②設備投資額▲70% ③検査用 H ₂ ガス使用量▲70%
品質検査	製造プロセス品質管理の最適化 レス化	①検査項目▲70% ②リーク検査時間▲70% ③金属異物検出感度 アップ

SOFC の生産技術目標については、各社でセル構造が異なり、製造方法も異なることが想定されるため、本ロードマップとしては定義せず、技術開発課題（SOFC）の製造プロセスの中で技術開発課題を整理した。

2.1.4 純水素型 PEFC

純水素型 PEFC では、表 1.4.2-1 の通り、2030 年に発電効率 60%、2040 年に発電効率 65% と同時に耐久年数 15 年を目標として性能向上を目指す、定性的なシナリオを以下のとおりに考えた。

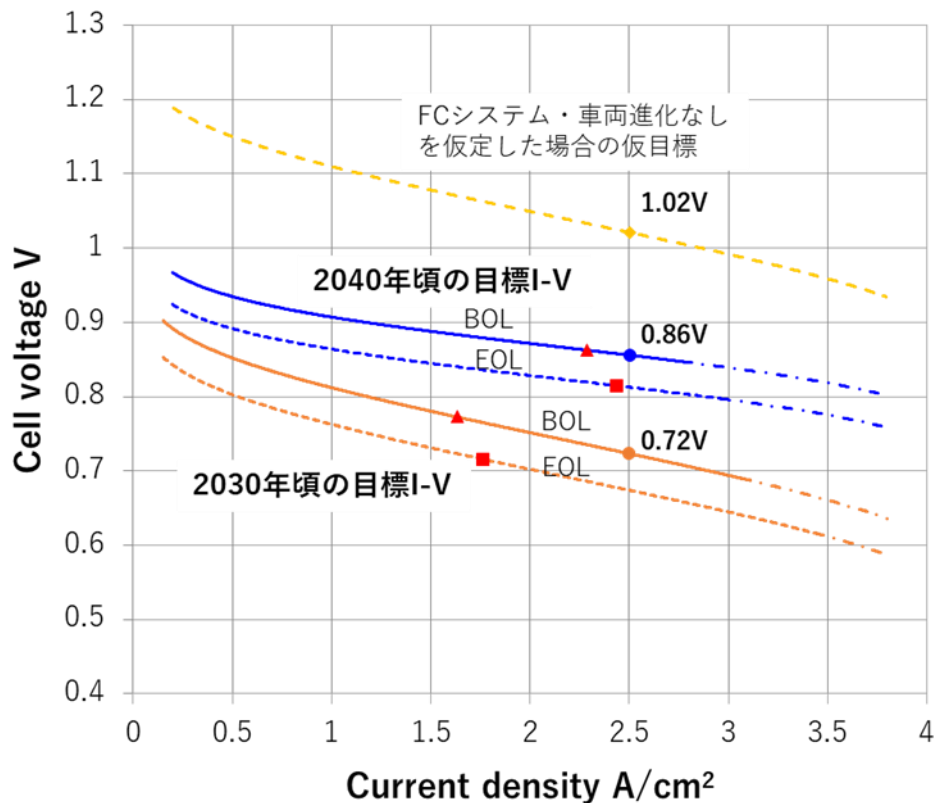


図 2.1.4-1 FCV・HDV 用燃料電池の目標 I-V 特性(参考)
(FCV・HDV 用燃料電池技術開発ロードマップ(解説書)図 2.2.4-6 を引用)

発電効率 60%, 65%を達成するためには、FCV・HDV 用燃料電池技術開発ロードマップの目標 I-V 特性の中で、それぞれ、2030 年頃（2021 年度策定）、2040 年頃（2022 年度策定）の目標 I-V と同等に近い性能が求められると想定される（図 2.1.4-1）¹。2030 年頃の目標 I-V は、現行技術の延長線上の改良を中心として性能向上を目指すものであるが、2040 年頃の目標値は、現行原理の触媒活性や電解質膜のプロトン伝導率の極限を目指す方向性のみならず、現行技術の限界を突破するような新規材料開発も必要となる（詳細は FCV・HDV 用燃料電池技術開発ロードマップ（解説書 2.6 節）を参照）。FCV・HDV 用燃料電池の定置用燃料電池への技術流用も含め、定置用燃料電池で必要な技術開発課題を以下の様に整理した。

まず、空気極触媒については、FCV・HDV 用燃料電池と同様に、触媒活性を大幅に上げることが前提とする。白金系触媒で現行原理の極限を目指していくと同時に、ハイブリッド材料によるヘテロ界面サイト、超低白金触媒などによる活性向上も目指すものとする。

次に、電解質膜に関して、FCV・HDV 用燃料電池では 2040 年頃の目標達成に向けて 55℃（高加湿）～125℃（低加湿）の広作動範囲でのプロトン伝導性向上と 1μm までの薄膜化を目指し、プロトン抵抗の大幅低減を目指す方向性が示されている。特に高電流密度での性能向上に大きく影響する。その一方で、定置用燃料電池では薄膜化するとクロスリークの増大による化学的耐久性、機械的耐久性の低下が懸念される。定置用では定格電流密度が FCV・HDV 用燃料電池の動

¹ 発電効率の目標を達成するためのシステム仕様の検討から、具体的な定格電流密度および電圧を決定することが必要である。

作点よりも低く、プロトン抵抗低減による性能改善の効果が限定的であることから、電解質膜については長時間耐久性を重視し、機能性補強層材料の開発や、ラジカルクエンチャーの探索、クロスリーク低減を進め、高耐久・高機能電解質材料開発によって耐久性を向上させることを基本方針とする。

また、上述の新規触媒材料開発に応じて、材料系に対応した MEA や触媒層の作製方法や、GDL/セパレータの検討が必要になる可能性がある。また、長期的には、GDL/セパレータの最適設計や、新材料に対応した MEA の量産技術開発も重要な課題である。それらを支える基盤技術として、DX 技術を用いた材料・プロセス探索や現象・機構解明については、FCV・HDV 用燃料電池と共通課題を設定した（詳細は FCV・HDV 用燃料電池技術開発ロードマップ（解説書 2.6 節）参照）。

2.2 技術開発課題（SOFC）

2.2.1 現在セル開発

SOFC では、現在製品化されているセルスタック技術の製品性向上（現在セル開発）と、2030 年以降の製品化を目指して現在研究開発が進められている次世代セル開発の二つの方向性が存在する。現在セル開発の製品性向上の指針は下記の通りである。

- 発電効率向上、高出力密度化・部分負荷効率向上、スタックの小型化・軽量化、触媒、金属系インターコネクタの高耐久化、等
- 製造プロセスの低コスト化については、インクジェット、3D プリント等、低コスト新規製造プロセスの開発が必要である。また、ロールツーロールプロセス等の低コスト量産製造プロセスを開発することによって、量産技術確立による更なる低コスト化が求められる。
- 実用化技術では、CN 燃料対応に向けた実証試験が必要であり、バイオガスや水素混合燃料、複数燃料切り替え対応等が想定される。また、長期的には、SOFC の純水素対応や CN メタンへの対応も求められる。

2.2.2 次世代セル開発

SOFC の次世代セル開発として、高発電効率型、耐化学被毒セル（石炭ガス化ガス対応）、金属支持型、PCFC、rSOC の研究開発が進められている。SOFC の基本技術はセルスタックであるため、セルスタックができた段階で次世代セルスタック技術は現在セルへ適用することが想定される。

2.2.2.1 高発電効率型

将来的には、モノジェネレーションシステムにも適用可能な高発電効率 SOFC（60%以上）の開発が期待される。高燃料利用率対応技術の開発や、システム簡素化、補機動力削減、高効率パワーコンディショニングシステムの開発等が必要である。

2.2.2.2 金属支持型

金属支持型は空気極に多孔質金属支持体を用いることにより、従来の電解質支持型セルや燃料極支持型セルに比べて強靱性、耐久性に優れる。現在までの研究開発では、700℃の高温下にお

いて、セルレベルで従来セルと同等の性能が達成できている状況（電流密度：1A/cm²@700°C）であるが、起動停止特性や耐久性の向上、更には長期的にはモビリティへの適用を見据えて、600°C近傍までの低温化が必要である。

現行の NEDO プロジェクトにおける、金属支持型セルの定量目標を表 2.2.2.2-1 に示す。2025 年までにはセルレベルでの検証を行い、2030 年に向けてスタックへの展開が必要である。急速起動特性については、これから検証に着手する段階であるが、負荷変動に強いセルが実現できると、再エネ調整用電源としての出力変動吸収や、燃料電池と水電解のリバーシブルな運転モードへの適用が期待される。

表 2.2.2.2-1 達成性能レベル(金属支持型セル)

項目	2025 年頃
電流密度	1A/cm ² @600~650°C
急速起動特性	10~30 分

金属支持型の実用化に向けては、以下の技術開発が必要である。

- 基盤技術開発
 - 開回路電圧改善
 - 電流密度向上
 - 低温作動化
 - 急速起動停止特性向上
- 実用化技術開発
 - 低コスト化
 - 大面積セル開発
 - スタックへの実装、強靱化の解析

また、金属支持型が実用化された後には、再エネ調整用電源やリバーシブル運転へ適用し市場へ普及させるため、下記の技術開発が必要である。

- 実用技術開発
 - 実証機での技術実証
 - 実証機での耐久性向上
 - 量産技術確立による更なる低コスト化
 - PCFC への適用
- EC モード適用検証
 - EC モード時の耐久性検証（特に、燃料極側は高水蒸気分圧にさらされるため、高耐久性が必要になると想定される）
 - EC モードにおける劣化モード検証

2.2.2.3 プロトン伝導性セラミック燃料電池 (PCFC)

PCFC は理論上発電効率 70%を超える高効率燃料電池として期待され、技術開発が進められている。現在までの開発では、直径 60mm 程度のセルが作製されているが、現時点では商品化に向けた研究開発段階である。今後は、2035 年頃の商品化を見据えて、セルの大面积化やスタック化、システム開発が必要である。更に、PCFC は高効率水素製造、水素分離・精製、水素圧縮などの水素エネルギーデバイスとして期待されているため、2025 年度以降は逆運転の EC モードで使用するための電子リークを抑制可能な材料の開発や、PCFC の起動停止回数や信頼性の向上を目的とした作動温度低温化に向けた材料探索といった基礎研究の検討も必要である。

PCFC の定量目標を表 2.2.2.3-1 に示す。上述の通り、PCFC の商品化は 2035 年頃と見込まれるが、実証機としての目標として 2030 年頃の目標値を示した。2040 年時点において PCFC を商品として成立させるためには、2030 年頃の SOFC 達成性能レベルと同水準の目標値を達成する必要がある²。

表 2.2.2.3-1 達成性能レベル(PCFC)

項目	2030 年頃	2040 年頃
発電効率	65%以上 [※]	70%
耐用年数	10 年 [※]	15 年以上
システム価格		50 万円/kW

※ システム効率 (AC, LHV)、2030 年は実証機レベル

PCFC の実用化に向け、以下の技術開発が必要である。

- 材料開発
 - 新規電解質の探索 (プロトン伝導性酸化物、欠陥ペブロスカイト等の新規材料)
 - 低温高活性アノード、カソード電極材料の探索
- セル開発
 - リーク電流抑制による効率および出力密度向上
 - セルの耐久性向上 (劣化メカニズムの解明、劣化要因の定量化、劣化対策)
 - セルの大面积化、機械的信頼性向上 (化学膨張への対応)
- スタック開発
 - スタックレベルでの高効率検証
 - SOFC でのスタック耐久性に関する知見を PCFC スタックに活用
- システム開発
 - 実証機での技術実証や耐久性向上

² 2040 年頃の耐用年数 15 年という数字は、PCFC 製品の使用開始から 7 年程度でセルスタック交換を前提とするという議論もある。

- 脱炭素化に向けた燃料対応として、2030年頃までに都市ガス燃料対応、2040年頃までに水素燃料、CNメタン燃料対応するための実証試験
- 水蒸気分圧など、PCFCシステムを最も効率よく運転させるための最適条件確立

また、PCFCの低温作動運転対応や逆運転（ECモード）への適用には、下記基礎研究が必要である。

- 低温作動運転
 - 低温作動運転・低コスト化に向けた材料開発
- PCEC
 - ECモードでの運転を見据えた材料開発
 - ECモードで運転する際の電子リーク抑制による、高効率化
 - PCECセル開発、スタック開発
 - PCEC実証機開発

2.2.2.4 rSOC

SOFCとSOECではほぼ同一の材料やセルスタックを使っており、技術課題の相関性が高い。また、再エネ調整用電源の観点から、SOFCやSOECが利用されることが想定されるため、rSOC・SOECの技術開発課題詳細はNEDO水電解技術開発ロードマップに記載されるものの、本ロードマップでも整理した。尚、rSOCの想定アプリケーション先は、事業所、オフィスビル等で通常時は発電し、余剰電力がある際には逆運転する運転パターンが想定されるが明確には定まっておらず、逆運転機能の使われ方も明確化されていないため、rSOC・SOECに関する達成性能レベルは、次年度以降にNEDO水電解技術開発ロードマップ上で設定される予定である。

rSOCの個別技術課題は、SOFCのものと類似するが、逆反応させた際の部材安定性や耐久性向上が重要なポイントである。また、生成した水素をどのように貯蔵するかなど、システム全体の設計や最適化も必要である。材料開発としては、電極/電解質界面での材料開発が必要であり、SOFCでは酸素を吸着・解離させて酸化物イオンにするのに対し、SOECでは酸化物イオンが酸化して酸素となって効率よく発生するように設計する必要がある。一方で、水蒸気極では多量の水蒸気により、Niの凝集・形態変化に起因する劣化が発生するため、電極・触媒や電解質の安定化が重要であり、継続的な基礎研究が必要である。

短期的には、リバーシブル運転可能なスタックを用いて、ホットモジュールとしてリバーシブルの実証運転を実施し、課題を抽出することが重要である。それと並行し、材料開発やシステム設計の検討が必要である。

2.2.3 次々世代技術開発

2040年以降の実用化に向けて、化学・電気・熱を同時供給するトリジェネレーションシステムの開発や、それに向けた材料、化学プロセスの開発などが求められる。

2.2.4 基盤技術開発

- 材料レベル・化学プロセスの探索、耐久性評価の加速、計測精度向上による開発期間の短縮、等
- SOFC システムからの CO₂回収法の検討・検証
 - 高温型の燃料電池の特徴は、空気中から酸素を電気化学的に分離利用しているために、燃料極に生じる CO₂を水蒸気、未酸化燃料から分離するには、未酸化燃料を酸化するに足る酸素を注入すれば、CO₂と H₂O の混合物になり、低エネルギーコストで CO₂を分離回収することが可能である。この方法に関する実機での検証が必要である。
- 燃料オフガスを利用して CO₂を回収するシステムの開発
 - 再エネの大量導入によって、水電解の装置が多く導入され、酸素の生成が期待される。生成される酸素を有効活用し、オフガスを酸素燃焼し水を落とすことによって、CO₂を回収することが可能である。

2.3 技術開発課題（共通）

2.3.1 設置工事費、機器メンテナンスコスト低減

- システムノーメンテナンス化
 - 家庭用燃料電池のメンテナンスに関しては、現在の製品は 12 年間のノーメンテナンスの設計となっている。個々の燃料電池は、サーバーに接続されており、異常が無いが常時監視されている。
 - 2030 年目標の耐久時間 15 年に向けては、スタックの耐久性が問題となり得る。また補機類についても、補機メーカーの製品保証がすぐに 15 年に変更されることは想定しづらいため、実績を見てから判断する必要がある。現在、初代を発売して 12 年が経過しているため、今後、補機類の課題が明確化されてくる可能性がある。

2.3.2 レジリエンス強化

- LPG ボンベ搭載による燃料遮断対応（13A/LPG 両対応の改質器、脱硫器の開発）
 - 外部に 50kg のボンベを置くことが想定される。
 - 都市ガス遮断時に LPG 起動というイメージであるが、脱硫器などを積んでいるため、LPG との両立が必要である。
 - 現在のエネファームでは、都市ガスと LPG 対応機がそれぞれある。しかし、LPG は都市ガスの 2 倍の熱量があるので、同じ出力を出すためには、LPG の流量は半分になり、流量が少ないと、シビアなコントロールが必要となる。
 - 13A/LPG の両方を使うとなると、都市ガス用と LPG 用で切り替えるような内部制御が必要である。また、切り替えるタイミングで燃料が混ざった場合の発電ユニットの制御も必要とされる。
- BOS 機能装備のための内蔵蓄電池搭載（コスト、搭載スペース確保、連系制御のためのパワーコンディショナー開発）

- 蓄電池の搭載には、コストがかかる上、搭載のためのスペース確保が必要である。
 - セルと蓄電池の統合制御を行うためには、パワーコンディショナーの開発が必要となる。
- 設置多様性（ホットモジュールや改質器等のコンパクト化・軽量化）
 - PEFC では貯湯タンクが大きく、小型化する余地がある。しかし、タンクを小さくすると排熱回収量が減り稼働時間が短くなることにより省エネ性が低下する。それを埋め合わせるためには、発電効率を上げる必要がある。
 - SOFC では、高出力密度の平板スタック採用によるホットモジュールの小型化・軽量化が可能である。また、高効率化すると排熱量が低減するので、タンクの小型化や、あるいは、モノジェネによるタンクレス化が実現可能である。
 - PEFC、SOFC 共に、純水素型では改質器が不要であるため、小型化・軽量化が可能である。
 - 蓄電池連結（※FC の課題ではないため、解説書のみ記載）
 - 蓄電池充放電制御のための通信プロトコルや、それに沿った制御の改良が必要である。

2.3.3 再エネ調整力、VPP・DR 対応

- 効率よりも出力優先の運転モード（セルスタック自体の高性能化、熱マネジメントのためのホットモジュール断熱構造開発）
 - PEFC では、排熱回収量が貯湯タンク容量まで達するとシステムが停止するように設計されている。そのため、VPP・DR を行う際に PEFC では指令通り動かさないものが出る可能性がある。SOFC と同様に、ラジエータを積むことで、熱を逃しながら発電することが必要とされる。
 - 700W で設計しているホットモジュールを、800W、900W で運転すると、電流が多く流れスタック内部のジュール熱により高温になってしまい、耐久性が担保できなくなってしまう恐れがある。そこで、熱マネジメントするためのホットモジュールの断熱構造や冷却のための空気の流し方など、調整が必要となる。
 - セルスタック自体の高性能化、つまり内部抵抗を小さくして効率化し、出力を上げてもジュール熱が増えないような設計が可能となれば、効率よりも出力を優先するモードも可能になる。
- サーバーの負荷増大とトラブルに対する対策、通信途絶対策
 - FC 内部の制御を工夫し、家庭の電力需要に対して余剰な電力を発電するモード（余剰電力 100W 等）を予め用意すれば、サーバーからの高頻度な出力指示を機器内部で代替することが可能となり、サーバーの負荷を減らすことが可能である。
 - VPP では、通信が途絶する場合があります、その場合は通常運転に戻す制御が求められる。

- 高速出力変動への対応（ヒートショック耐性、ロバスト性の高いセルスタック）
 - PEFC では、電気の要求が変動した際、水素が足りないとセルが劣化するという問題があるため、余剰の水素を供給しているのが現状である。余剰の水素が無くとも壊れないようなロバスト性の高いセルスタックの開発が必要である。

- 負荷変動速度の向上による DR への対応（オフガスの燃焼安定化、水蒸気改質の気化の安定化）
 - 一部の SOFC では、発電で使わなかった燃料：オフガスはセルの先端で燃焼させ、改質器・気化器を炙り改質を行っている。負荷変動が速くなり、オフガスの量が急峻に変わると、ガスの供給ができず炎が消えてしまうことがある。また今後、高効率化を目指していく上で、燃料利用率が上がると、オフガスの割合が少なくなり、オフガスの燃焼は不安定化するため、負荷変動速度の向上に係る課題は大きくなると想定される。
 - FC 自体の開発ではないが、制御指令システム、通信速度・安定性の課題も存在する。

- 発電電力のトレーサビリティ技術（FC、PV 由来発電のトレース）（※FC の課題ではないため、解説書のみ記載）
 - FC と PV を切り分けるための追加計量器の開発が必要である。

- 再エネ調整力、VPP・DR 対応に係る制度・政策（※FC の課題ではないため、解説書のみ記載）
 - 個企業だけでなく、マイクログリッドや地方自治体、アグリゲータとの連携・体制構築や国としての後押しが必要である。
 - PEFC では、DR を行う際に捻出できる調整力を予測するにあたり、停止状態の機器の規模を予測する必要がある。そのためには、FC の運転制御ロジックをある程度把握する必要があり、統合制御の作り手と FC メーカー間の連携、事前の取り決めが必要である。
 - 遠隔での起動・停止に同一通信規格を使用したとしても、各社で細かな違いがあり、実際に動かすには統合制御の作り手と FC メーカー間で調整が必要になる可能性がある。調整不要な統一規格の詳細ルール化等必要である。
 - 需給調整市場では低圧リソースの参入が認められていないため、制度面での対応が必要である。

略語一覧

略語	英語表記	日本語表記
AL	Active Learning	能動的学修
BPP	Bipolar Plate	バイポーラプレート
BOS	Black Out Start	停電起動
CAPEX	Capital Expenditure	初期投資費用
CCUS	Carbon dioxide Capture, Utilization, and Storage	二酸化炭素回収・有効利用・貯留
CN	Carbon Neutral	カーボンニュートラル
DB	Database	データベース
DR	Demand Response	デマンドレスポンス
DX	Digital Transformation	デジタルトランスフォーメーション
EC	Electrolysis Cell	電解セル
FCV	Fuel Cell Vehicle	燃料電池自動車
GDL	Gas Diffusion Layer	ガス拡散層
GTFC	Gas Turbine Fuel Cell combined cycle	ガスタービン燃料電池複合発電
HDV	Heavy Duty Vehicle	大型・商用モビリティ
HEMS	Home Energy Management System	ホーム・エネルギー・マネジメントシステム
IGFC	Integrated coal Gasification Fuel Cell combined cycle	石炭ガス化燃料電池複合発電
MEA	Membrane Electrode Assembly	膜電極接合体
MEGA	Membrane Electrode Gas diffusion layer Assembly	膜電極ガス拡散層接合体
MI	Materials Informatics	マテリアルズ・インフォマティクス
OPEX	Operating Expense	ランニング費用
PCEC	Protonic Ceramic Electrolysis Cell	プロトン伝導セラミック電解セル
PCFC	Protonic Ceramic Fuel Cell	プロトン伝導セラミック燃料電池
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナー
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell	固体高分子形燃料電池
PI	Process Informatics	プロセス・インフォマティクス
PV	Photovoltaic power generation	太陽光発電

略語	英語表記	日本語表記
rSOC	Reversible Solid Oxide Cell	リバーシブル固体酸化物形燃料電池－水蒸気電解セル
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell	固体酸化物電解
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体酸化物形燃料電池
VPP	Virtual Power Plant	仮想発電所
ZEH	net Zero Energy House	ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス