

## CO<sub>2</sub>を原料とした液体合成燃料の開発への取組み

- ◇温室効果ガスの排出削減及び新たな資源の確保という2つの課題解決を両立させる技術として、CO<sub>2</sub>を原料とした液体合成燃料が期待されている。
- ◇JPECでは、2021年より新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の研究開発事業として、再生可能エネルギーを利用した合成ガス製造と、液体化石燃料に最も親和性が高いフィッシャー・トロプシュ（FT）合成を組み合わせた液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発を開始した。
- ◇本レポートでは、液体合成燃料の製造に係る基盤要素技術とその確立に向けたNEDO研究開発事業におけるJPECの取組みを紹介する。

### 1. はじめに

温室効果ガス（GHG）の排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラル（CN）の実現が喫緊の課題となっている。CO<sub>2</sub>と再生可能エネルギー由来電力等から得られるグリーン水素を原料とした合成燃料は、GHG排出削減への貢献が期待されており、欧米を中心として技術開発・実証事業が広がっている。

1. はじめに
2. CO<sub>2</sub>からの液体燃料合成の取組み
3. CO<sub>2</sub>からの液体燃料一貫製造プロセス
4. まとめと今後の取組み

わが国では、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」<sup>1)</sup>において、燃料のカーボンニュートラル化が「成長が期待される14分野」の中に取り上げられ、2030年までに高効率かつ大規模な製造技術を確立し、2030年代に導入拡大・コスト低減を行い、2040年までの自立商用化を目指す方向性が示された。気候変動問題への対応に加え、エネルギーの安定供給確保と経済成長を同時に実現するための取組みがまとめられた「GX実現に向けた基本方針」（2023年2月閣議決定）<sup>2)</sup>の中でも、官民協議会にて合成燃料（e-fuel）等の技術的・経済的・制度的課題や解決策を集中的に議論し、多様な製造アプローチ確保のための技術開発促進や実証・実装フェーズに向けた製造設備への投資等への支援を行うとされている。

合成燃料（e-fuel）の導入促進に向けた官民協議会の「2023年中間とりまとめ」（2023年6月）<sup>3)</sup>で示された商用化に向けたロードマップでは、2025年より製造を開始し、2030年代前半までに商用化を目指す、さらなる加速化が示されており、このロードマップに沿う形で、2022年度～2028年度の計画で「NEDOグリーンイノベーション（GI）基金事業

／CO<sub>2</sub>等を用いた燃料製造技術開発プロジェクト」として、高効率かつ大規模な製造プロセスを確立するための技術開発が開始された<sup>4)</sup>。一方で「NEDO 交付金事業／CO<sub>2</sub>からの液体合成燃料一貫製造プロセス技術の研究開発」<sup>5)</sup>では、2020年度～2024年度の計画で合成燃料の製造効率を高めて低コスト化を実現する次世代 FT 合成プロセスの研究開発を行っており、JPEC では産官学の 7 機関が連携する形で CO<sub>2</sub>を原料とした液体合成燃料の開発を進めている。

## 2. CO<sub>2</sub>からの液体燃料合成の取組み

本交付金事業では、「次世代 FT 反応の研究開発」及び「再エネ由来電力を利用した液体合成燃料製造プロセス（以下、一貫製造プロセス）の研究開発」の 2 つの研究開発を実施している。前者は CO<sub>2</sub>を含む合成ガスから一段で効率良く、FT 反応を行う技術や生成物の選択性制御技術、そして実用化に関する研究開発で、いずれも合成燃料の低コスト化を実現するため、NEDO 委託調査事業<sup>6)</sup>において抽出された技術課題の解決を目指したテーマである。後者に関して、JPEC は産業技術総合研究所と連携して、再エネ由来電力を利用した CO<sub>2</sub>からの合成ガス製造、液体化石燃料と最も親和性が高い FT 合成を組み合わせた液体合成燃料一貫製造プロセス、及びその合成燃料の利用技術開発を担当している。

さらに 2023 年 10 月より高効率・低コストから有望な技術として期待されている固体酸化化物形電気分解セル（SOEC ; Solid Oxide Electrolysis Cell）共電解技術に関して、さらなる長寿命化・電解効率向上を実現するため、新たに SOEC 共電解実用化の研究開発が NEDO 交付金事業に採択され、これに 4 機関が加わる形で現在は 11 機関に体制を強化して研究開発を進めている。<sup>7)</sup>

CO<sub>2</sub>からの合成ガス製造および FT 反応からなる一貫製造プロセスの構築と最適化に関する JPEC の戦略については、2022 年 12 月の JPEC レポート<sup>8)</sup>で紹介した。合成燃料は、将来的に自動車や航空機、船舶等へ既存の石油サプライチェーンを活用して供給することを可能にすることから、新規インフラ構築への投資を抑制し、カーボンニュートラルな液体合成燃料として GHG の大幅な排出削減に貢献するために極めて重要である。本レポートでは、新たな資源の確保に繋がりエネルギー安全保障上の意義も大きい液体合成燃料に関して、NEDO 研究開発における JPEC の取組みとして、SOEC 共電解技術の方向性および FT 合成との一貫製造プロセス実証（図 1）に向けた現状について紹介する。

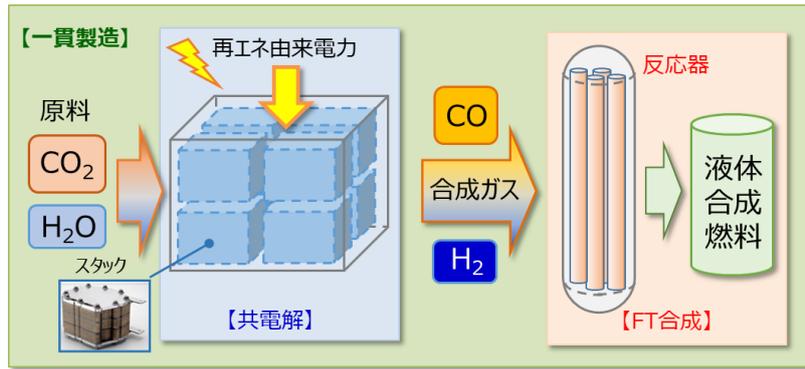


図1 CO2からの液体燃料一貫製造プロセス（イメージ）

### 3. CO2からの液体燃料一貫製造プロセス

#### 3.1 SOEC（固体酸化物形電解セル）電解技術

CO2を原料とした液体合成燃料製造には大量の水素が必要となるため、電解技術は重要な基盤要素技術である。図2に示した電解技術のうち、アルカリ形水電解、固体高分子形電気分解セル（PEEC；Polymer Electrolyte Electrochemical Cell）水電解による水素製造については既に実用化段階にある。

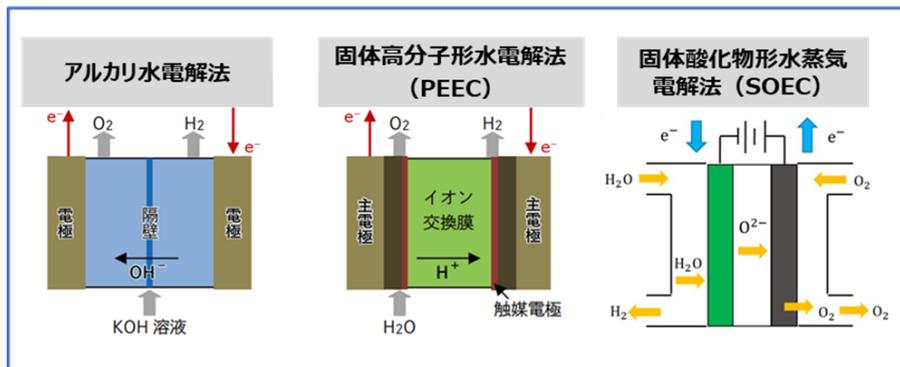
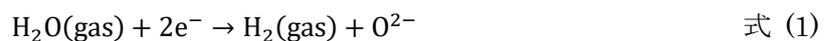


図2 代表的な電解技術（出典）METI HP、NEDO 報告書 等を元に JPEC 編集

SOEC 電解は水素製造を高効率で行うことが可能なデバイスとして期待されている。電解質として YSZ などの安定化ジルコニアを用い、水から水素を製造する際のイオン導電性を担保するために 700℃以上の高温で運転される。カソード材料としては Ni/YSZ などが、アノード材料としては LSM、LSCF などが用いられる。反応式は以下の式(1)(2)のとおりである。



SOEC を用いた CO2 と水蒸気による共電解は、供給ガスとして水蒸気の他に CO2 を同時に供給することで、カソードで逆シフト反応と CO2 の分解反応が高温水蒸気電解のカ

ソードの反応に加わる。式(3)～(5)にカソードでの反応を、式(6)にアノードでの反応を示す。



SOEC に用いる水蒸気の発生に FT 合成の反応熱を利用することで高効率化が期待できる。また、SOEC はセル電圧 1.5 V 以下で電解運転が可能であり、従来の 2.0V 付近作動水電解よりも大幅な消費電力抑制が可能であることが分かった。

一方で、高温作動させるシステムの大型化や、電解運転では発電運転とは異なる劣化現象や部材の高温腐食が課題として挙げられる。そのため CO<sub>2</sub> と水蒸気の共電解における炭素析出への対応では、常圧、熱力学的炭素析出温度よりも高温運転することによりメタン生成及び炭素析出を抑制する必要がある。

### 3.2 SOEC 共電解による FT 用合成ガス製造

JPEC 石油基盤技術研究所では、SOEC 共電解検討のため装置 (図 3) を導入し、要素技術確立のための検討と、一貫製造プロセスの実証機用の設計データの採取を行っている。



図 3 セル電解評価装置 (左) スタック電解評価装置 (右)

要素技術確立のための具体的な検討項目は、SOEC 共電解による FT 用合成ガス製造能力及び基本特性の把握、電解スタック安定性・耐久性等である。これまでの検討結果から、FT 用として好ましい組成 H<sub>2</sub>/CO=2.0 付近の合成ガスが、原料利用率 80% 程度の条件下でほぼ平衡組成通りの合成ガスが得られることを確認している。製造能力に関しても原料流量および投入電力を変化させた試験を行い、投入電力に比例した合成ガス量が製造されることを確認した。(図 4)。

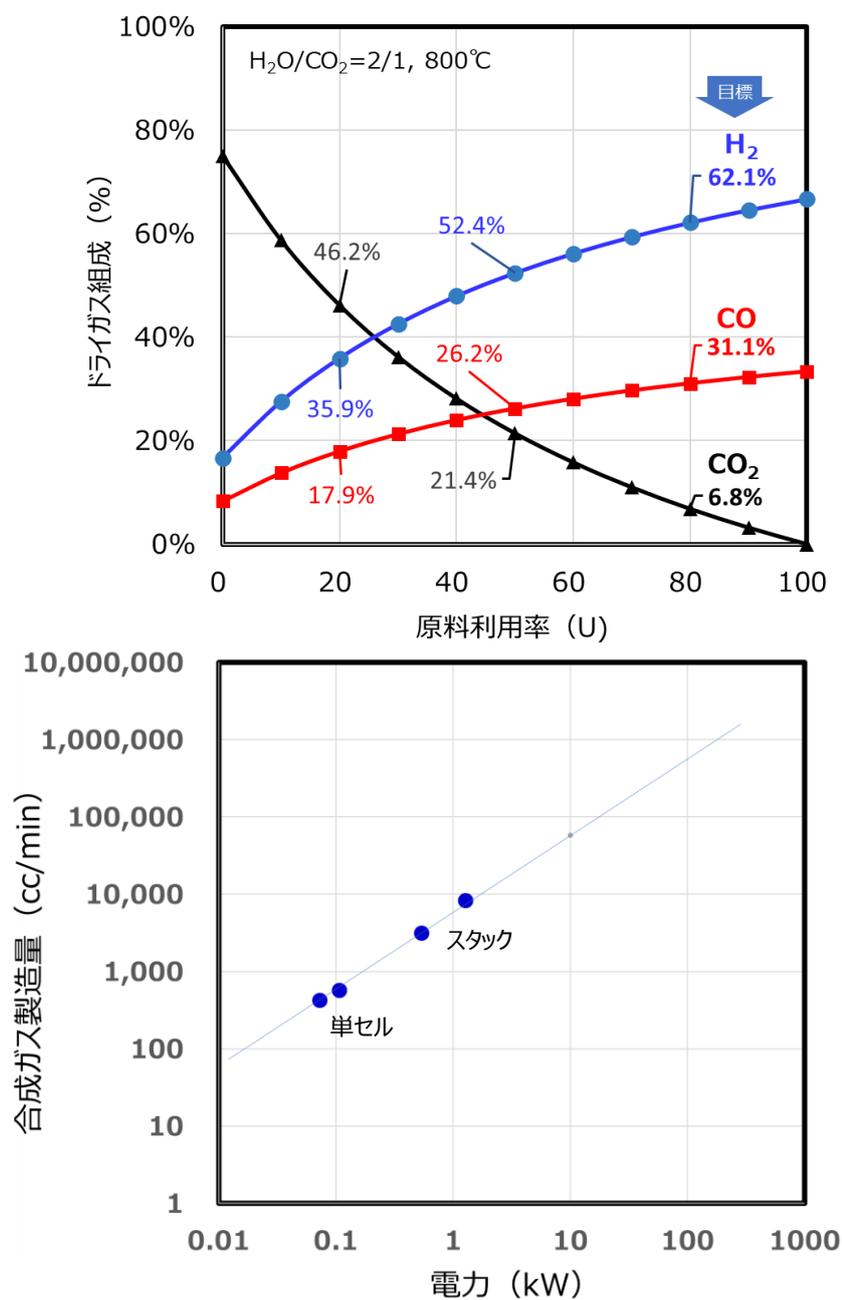


図4 原料利用率とガス組成の関係（平衡計算値）（上）  
投入電力と合成ガス製造量の関係（実測値）（下）

図5は一定条件（電解温度  $850^\circ C$ 、原料利用率 80%）で DSS（Daily Start Stop）運転による単セル耐久性評価を行った結果を示しており、熱サイクル 50 回の安定運転を確認できた。使用済みのセルについては、産業技術総合研究所等の関係機関と連携して分析・観察を行い、機械的構造破壊の有無やデバイスの構成材料の状態変化の調査を行っている。

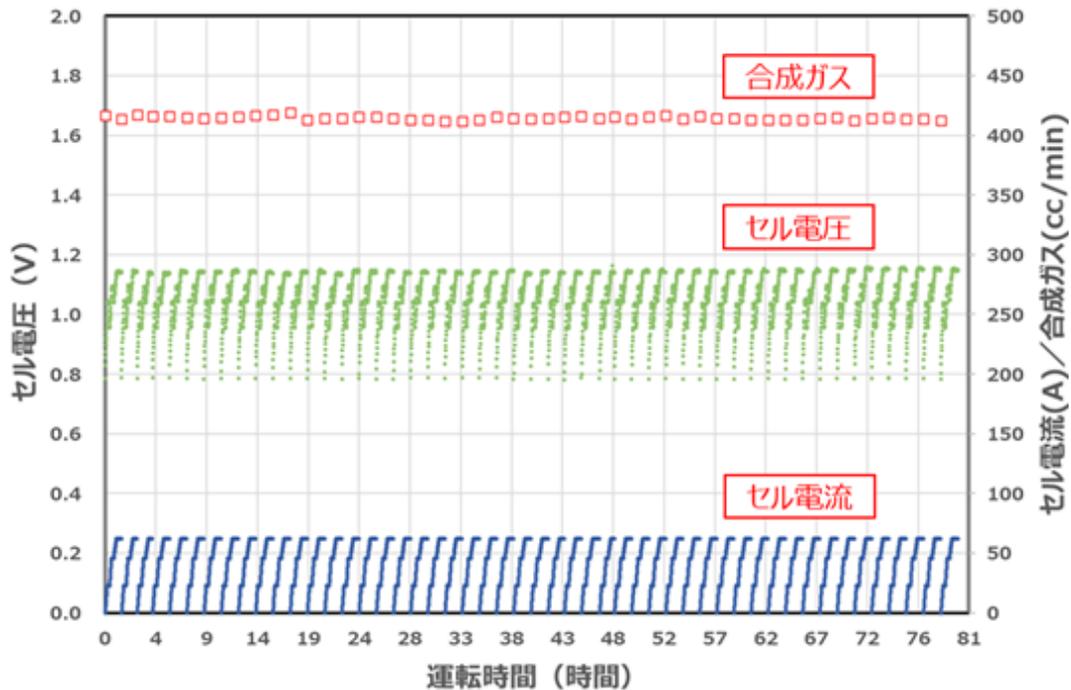


図 5 共電解における耐久性評価（単セル）

### 3.3 SOEC 共電解における課題

#### 1) SOEC の耐久性向上

SOEC に用いるセル・スタックには、固体酸化物形燃料電池(SOFC)の開発で国内外に蓄積された技術と知見を転用することができる。SOEC の劣化に関しても、不純物被毒や界面反応など SOFC と共通する現象が存在する。特に、動作温度が高いことから、界面反応・拡散などは顕著な課題である。

一方で、Ni-YSZ 電極で電解質近傍の Ni の減少、ポイド(空隙)の生成など、SOEC に特有の劣化現象も存在する。Ni-YSZ 電極の劣化については、気相輸送、空孔の集積、電気化学反応、濡れ角の変化など様々な機構が提案されているが、未だ解明されていない。さらに、共電解では CO<sub>2</sub> が存在することから、炭素析出による劣化の可能性を考慮する必要がある。

JPEC の共同研究先である東北大学では、SOEC の耐久性向上のために必要なセル劣化機構の解明、および劣化対策、運転条件最適化に必要な情報の取得を、自作したモデル電極や市販のセルを用いて検討に取り組んでいる、今後、SOEC 共電解用に最適化されたセル・スタックの設計のために、得られた情報を役立たせる予定である。

#### 2) スケールアップ

JPEC が、今回本研究で民間企業から購入したスタック 1 式(燃料電池用)から製造される合成ガス量は、1 時間当たり 1Nm<sup>3</sup> 未満で、その数量の合成ガスから FT 合成で製造される液体燃料は 1 時間当たり 100ml 程度にしかならない。SOEC 共電解技術を用いた産業規模のプロセスを

構築するためには、スケールアップは大きな課題である。

スケールアップには、スタック単体の製造能力の向上の他に、スタックを複数個連結させるマルチ化技術という方法がある(図 6)。スタックを複数個連結する場合に、スタックの劣化を抑制し、スタックの性能を最大限発揮させるためには、各スタックに供給される原料ガス流量の均一化、および各スタックにかかる温度を均一化する必要がある。

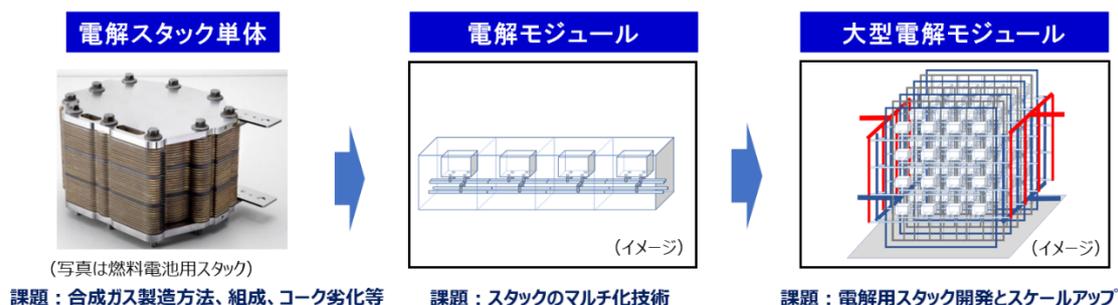


図 6 合成ガス製造能力スケールアップの方向性(イメージ)

JPEC では、将来の産業規模へのスケールアップを目的としたパイロット概念設計の一環として、大型電解モジュールのスタック、配管の配置の検討、およびシミュレーションソフトを用いて各スタックの供給ガス流れ、および温度均一性について解析を行った。なおシミュレーションは、電解モジュール筐体と、スタック 64 個、燃料極および空気極の導入配管、排出配管を 3DCAD 手法用いてモデル化した構造体(図 7)を用いて行った。

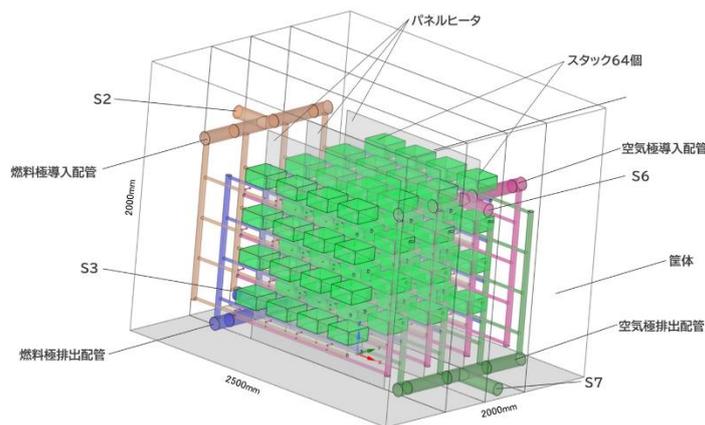


図 7 3DCAD モデル(モデル全体)

モジュール配管の流れ解析では、圧力損失が配管のみ場合は、全体の配管内の差圧が非常に小さいため、流量は供給ガスの入口からの距離が大きく影響し、流量ムラが最大 16%も発生する結果となった。一方現在使用しているスタックの差圧を前提として与えたところ、スタックにかかる圧

力損失が配管と比較して非常に大きいため、配管入口からの距離には影響を受けることはなく、流量ムラは1%以下となり、全スタックにほぼ均一に流れる結果となった(図8)。

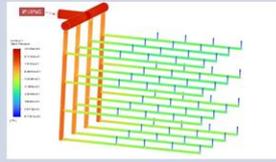
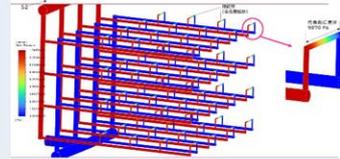
| 前提            | 流れ解析図   | 流量 (分布)   |      |          |      |          |      |          |       |       |
|---------------|---|---|------|----------|------|----------|------|----------|-------|-------|
| 配管の差圧のみ       |  | <table border="1"> <tr><td>全体最大</td><td>3.05E-04</td></tr> <tr><td>全体最小</td><td>2.60E-04</td></tr> <tr><td>全体平均</td><td>2.80E-04</td></tr> <tr><td>分布(%)</td><td>16.03</td></tr> </table> | 全体最大 | 3.05E-04 | 全体最小 | 2.60E-04 | 全体平均 | 2.80E-04 | 分布(%) | 16.03 |
| 全体最大          | 3.05E-04  |   |      |          |      |          |      |          |       |       |
| 全体最小          | 2.60E-04  |   |      |          |      |          |      |          |       |       |
| 全体平均          | 2.80E-04  |   |      |          |      |          |      |          |       |       |
| 分布(%)         | 16.03   |   |      |          |      |          |      |          |       |       |
| 配管とスタックの差圧を規定 |  | <table border="1"> <tr><td>全体最大</td><td>8.47E+00</td></tr> <tr><td>全体最小</td><td>8.39E+00</td></tr> <tr><td>全体平均</td><td>8.44E+00</td></tr> <tr><td>分布(%)</td><td>0.90</td></tr> </table>  | 全体最大 | 8.47E+00 | 全体最小 | 8.39E+00 | 全体平均 | 8.44E+00 | 分布(%) | 0.90  |
| 全体最大          | 8.47E+00  |   |      |          |      |          |      |          |       |       |
| 全体最小          | 8.39E+00  |   |      |          |      |          |      |          |       |       |
| 全体平均          | 8.44E+00  |   |      |          |      |          |      |          |       |       |
| 分布(%)         | 0.90  |   |      |          |      |          |      |          |       |       |

図8 モジュール配管の流れ解析(配管差圧のみ、スタック差圧込み)

伝熱解析では、モジュール全体に与える熱量は一定という条件下で、電気ヒータの発熱量、スタックの吸熱量、パネルヒータの発熱量の条件を変化させ、構造体内の温度分布を観察した。スタックの吸熱がない条件においては、電気ヒータおよびパネルヒータの発熱量を変化させても、モジュール内の温度分布がほぼ無い良好な結果となった。一方で、スタックの吸熱がある条件では、モジュール内で30%を超える温度分布が観察される結果となり(図9)、スタックの吸熱がない条件、すなわちスタックへの印加電圧が重要であるという示唆が得られた。

|                   | ベース条件 分布1.21%   | スタックが吸熱 分布32.2% | パネルヒーターでの加熱 分布2.1% |
|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 電解モジュールの外部放熱量     | 1.06 kW (6面総和量) |                 |                    |
| 配管予熱              | 2.43 kW (発熱総量)  |                 |                    |
| 電気ヒータ             | 19.74kW         | 31.45kW         | 17.77kW            |
| スタック発熱            | 0kW             | ▲11.71kW        | 0kW                |
| パネルヒータ            | 0kW             | 0kW             | 1.97kW             |
| 電気ヒータ・スタック・パネルヒータ | 19.74kW         | 19.74kW         | 19.74kW            |

図9 モジュール内のスタック伝熱解析(スタック吸熱、ヒーター加熱ケース)

CO<sub>2</sub>と水素を原料とする液体合成燃料は、既存供給インフラと内燃機関を利活用可能で、CO<sub>2</sub>削減に有効な手段だが、高コストと低生産効率が課題となっている。一貫製造プロセス構築の中種々の電解技術が研究されているが、SOEC 共電解技術は、高効率・低コストから有望な技術として期待されている。

NEDO は、SOEC の今後更なる長寿命化・電解効率向上の課題解決が重要であり、開発能力のある事業者との連携・共同作業が必要と判断し、2023年10月よりSOECセル・スタックの設計・製作に関する研究開発、SOECスタックを用いたFT反应用合成ガス製造のシステム化に関する研究開発を加速するため、新規委託事業者を追加して研究体制を強化した。

### 3.4 一貫製造プロセス実証試験機の建設

JPEC は産業技術総合研究所と共同で、産業技術総合研究所つくばセンター西事業所内に SOEC 共電解と FT 合成を組み合わせた一貫製造プロセス実証試験機を建設し、2024 年度から実証運転を開始する計画である。

安全に安定した実証運転を行うために、高圧ガス供給設備、局所給排気設備及びその他必要なユーティリティ設備（配電盤、排水）等の環境整備工事に関して、法令に準拠した安全対策（ガス拡散防止設備、ガス検知器・警報システム、ガス緊急遮断システム等）を施した工事を 2022 年度に完了させた。

現在、JPEC 石油基盤技術研究所で取得した設計データをもとに実証試験機の設計を完了させ、装置の建設を行っているところである（図 10）。

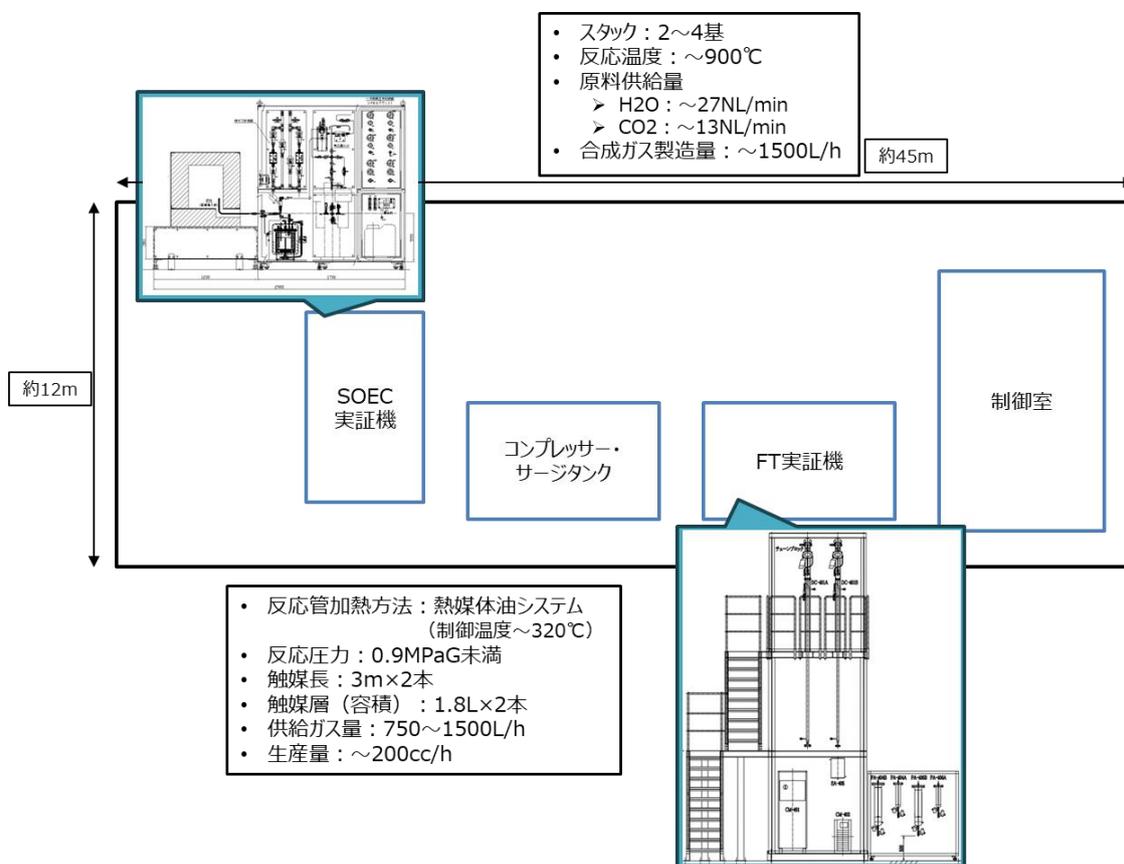


図 10 一貫製造プロット（産総研つくばセンター西事業所内）

## 4. まとめと今後の取組み

本レポートでは、合成燃料の一貫製造プロセスの要素技術開発と、一貫製造試験機の実証運転準備に関する JPEC の取組みを紹介した。

将来の社会実装に向けては、電解合成ガス製造技術の高度化及び次世代 FT 触媒による高性能化を行いながら、実証運転を通して最適化を図り、さらにパイロット規模のスケールア

ップ（準プラント実証）を経て実用ステージへと進むことが必要である。

JPEC においては、カーボンニュートラルの実現に貢献が期待される CO<sub>2</sub> を原料とした液体合成燃料一貫製造プロセス確立に向け、今後とも関係機関と密接に連携しながら研究開発に取り組んでいく。

謝辞

本投稿に関する成果は、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）からの委託事業によるものです。この場をお借りしまして関係各位に感謝の意を表します。

1) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（2021 年 6 月）

[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html)

2) GX 実現に向けた基本方針（2023 年 2 月閣議決定）

<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>

3) 合成燃料（e-fuel）の導入促進に向けた官民協議会 2023 年中間とりまとめ（2023 年 6 月 30 日） [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/e\\_fuel/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/e_fuel/index.html)

4) 「グリーンイノベーション基金事業／CO<sub>2</sub> 等を用いた燃料製造技術開発プロジェクト」

[https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3\\_100249.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100249.html)

5) NEDO 交付金事業「CO<sub>2</sub> からの液体合成燃料一貫製造プロセス技術の研究開発」

[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101410.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101410.html)

6) NEDO 「CO<sub>2</sub> からの液体燃料製造技術に関する開発シーズ発掘のための調査」 報告書

（2020.11.19 公開） [https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3\\_100200.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100200.html)

7) NEDO 交付金事業「CO<sub>2</sub> からの液体合成燃料一貫製造プロセス技術の研究開発」既存課

題の拡充 [https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3\\_100267.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100267.html)

8) JPEC レポート「CO<sub>2</sub> からの液体燃料合成に関する JPEC の戦略」

[JPEC report No.221201.pdf \(peci.or.jp\)](https://www.peci.or.jp/JPEC_report_No.221201.pdf)

（問い合わせ先）

一般財団法人石油エネルギー技術センター 合成燃料部 [jrepo-4@peci.or.jp](mailto:jrepo-4@peci.or.jp)

本研究開発は、一般財団法人石油エネルギー技術センター（JPEC）が国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託により実施しているものです。無断転載、複製を禁止します。

Copyright 2023 Japan Petroleum Energy Center all rights reserved