

P2C 実現に向けた CO₂ 電解技術

CO₂ Electrolysis Technologies for Practical Application of P2C

水口 浩司 MIZUGUCHI Koji 尾平 弘道 ODAIRA Hiromichi 花井 哲 HANAI Satoshi

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）の主力電源化や、電動化、水素の社会実装への取り組みなどが大きく前進すると予想される。一方で、製造過程で二酸化炭素（CO₂）排出量の削減が難しい化石燃料由来の化成品やモビリティ燃料などは代替品が必要になる。

そこで東芝エネルギーシステムズ(株)は、排ガスや大気中のCO₂を再エネで電気分解（電解）して一酸化炭素（CO）に変換するCO₂電解技術で、COとグリーン水素（H₂）を合成して化成品や合成燃料などを製造するP2C（Power to Chemicals）の実用化を推進している。P2CのコアとなるCO₂電解技術として、燃料電池用製造設備を活用したセルスタック型高スループト電解装置及びモジュールを開発しており、2030年には年間数万トンレベルのCO製造を目指している。

Toward the achievement of carbon neutrality by 2050, substantial progress is expected in innovations related to transforming renewable energy into the predominant source of power, electrification, and the realization of a hydrogen society. On the other hand, there is a strong need for the replacement of fossil-derived mobility fuels as well as chemical products derived from fossil fuels because of the difficulty of reducing carbon dioxide (CO₂) emissions during the manufacturing of such products.

With the aim of overcoming this issue, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is promoting the practical application of power-to-chemicals (P2C) through the electrochemical conversion of CO₂ contained in exhaust gases and the atmosphere into carbon monoxide (CO) using surplus power generated from renewable energy sources, as well as the production of synthetic fuels and chemicals synthesized from CO and green hydrogen (H₂). Focusing on CO₂ electrolysis technologies that are playing a key role in P2C, we are developing a high-throughput CO₂ electrolysis cell stack and a CO₂ electrolysis module using fuel cell manufacturing equipment aimed at producing several tens of thousands of tons of CO annually by 2030.

1. まえがき

2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向けて、再エネの主力電源化、自動車などの電動化、エネルギー効率の向上などの取り組みが進められている。しかし、これらの取り組みだけでは、化石燃料由来の化成品や燃料の製造過程で排出されるCO₂を削減するのは難しい。H₂の利用拡大、CO₂の分離回収・貯留（CCS：Carbon Dioxide Capture and Storage）並びに回収したCO₂のカーボンリサイクル（CO₂リサイクル）などの新しい技術の社会実装が欠かせない。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、CO₂リサイクルの実現には、P2Cの成立が重要と考えている。P2Cにより、CCSなどで回収されたCO₂と再エネ由来の電力（グリーン電力）を用いて製造したグリーンH₂から、環境価値の高い化成品を生産できる。P2Cは、炭化水素資源の需要が今後も想定される化成品や、航空機、外航船舶、車両などの原料・燃料の生産法として期待されている。

P2Cの概念を図1に示す。大気中のCO₂や施設から排出

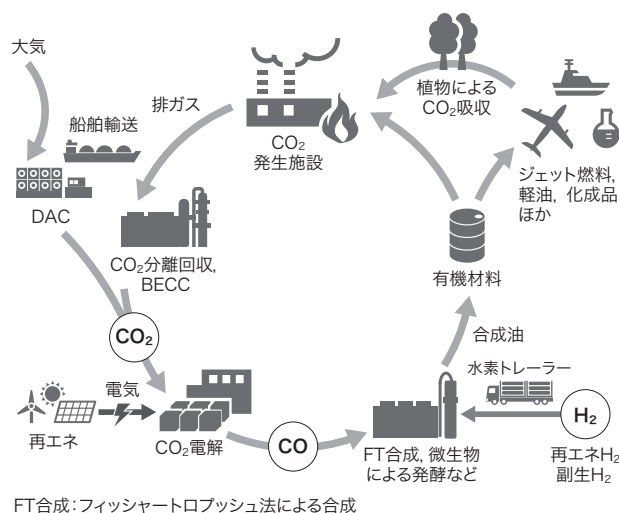


図1. P2Cの概念

P2Cは、大気や排出ガスから分離回収したCO₂をグリーン電力で電解し、製造したCOをグリーンH₂と合成や発酵によって反応させて有機材料や合成燃料を作るコンセプトである。

Concept of P2C

されたCO₂をCCS技術により分離回収し、回収したCO₂をグリーン電力で電解し、COを製造する。この製造したCOとH₂とを反応させて化成品原料などの有機材料や合成燃料などを生成できるほか、微生物の発酵でエタノールの生成も可能である。

これらの有機材料は、用途に応じて加工を施され、品質保証のプロセスを経て、燃料や化成品の原料として供給・消費され、最終的にCO₂は製品として固定、あるいは燃焼されて大気中に放散される。放散されたCO₂はDAC (Direct Air Capture)やBECC (Bioenergy with Carbon Capture)で再び回収する。このようなCO₂リサイクルにより、カーボンニュートラルが成立する。DAC、BECCを用いない場合でも、原油採掘と比較して排出量を削減できる。このCO₂リサイクルの中で、CCSや合成・発酵のプロセスは、経済性の問題は残るが実用化されている。

P2Cの成立には、CO₂リサイクルの中のCO₂電解がキープロセスとなる。従来の単セル型のCO₂電解装置はスループットが低いため⁽¹⁾、CO₂リサイクルを成立させることが技術的に困難であった。CO₂リサイクルを成立させるためのスループットとして、年間100tレベル以上のCOを製造する電解装置が必要である。そこで、当社では、燃料電池のセルスタック製造技術を適用することで、CO製造レベルが年間100tの高スループット型のCO₂電解装置を開発している。

ここでは、CO₂電解技術の開発状況及びこれを用いたCO₂電解モジュールの開発計画について述べる。

2. CO₂電解技術の開発状況

2.1 東芝のCO₂電解技術の特長

東芝のCO₂電解技術^{(1), (2)}は人工光合成技術をベースとし、常温常圧でCO₂を電解してCOに変換できることが特長である。また、CO₂を水溶液に溶かさずにガスのまま反応させる、三相界面制御型の固体高分子形CO₂電解セルを開発した^{(3), (4)}ことにより、CO₂変換速度を劇的に向上でき、溶存CO₂を反応させる従来セル⁽¹⁾と比べて約450倍の変換速度の向上を実現した⁽⁵⁾。固体高分子形CO₂電解セルは、ガス拡散層と触媒層から成るカソード(陰極)、固体高分子隔膜、及びアノード(陽極)から構成される。この構成にすることで、カソードからアノードまでを膜電極接合体(MEA: Membrane Electrode Assembly)として扱うことができる。このMEAを積層することで、燃料電池のようにセルスタック化が可能である。

このため、当社の燃料電池のMEA製造技術を転用することで、セルの大型化(数百cm²レベル)及びスタック化(積層化)が容易になる。例えば、当社の燃料電池は、電極面

積数百cm²で100セルスタック以上の積層を実現しており、これを適用することで、1台で年間100tレベルのCOを製造可能な高スループット型CO₂電解装置が実現できる。

2.2 高スループット型CO₂電解モジュールの性能評価

燃料電池用製造設備を用いて、図2のセルスタック構成で、図3の高スループット型CO₂電解装置(単セル)を試作し、性能試験を実施した。

既に、燃料電池用の製造設備で製作した400cm²規模の触媒電極から4cm²分を5か所サンプリングし、小型電解セルでの試験で性能検証したことを報告⁽⁶⁾した。今回は、試作した電極面積400cm²の全体を用いた高スループット型CO₂電解装置としての性能評価を行った。

その結果得られたCO生成ファラデー効率とセル電圧の

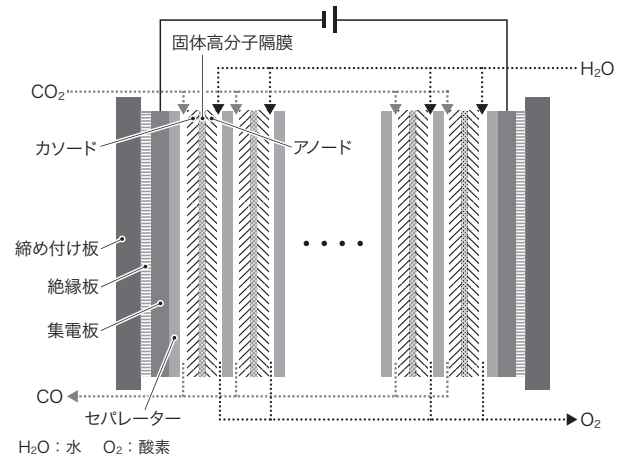


図2. 高スループット型CO₂電解セルスタック

電解セルを100層以上積層したCO₂電解装置であり、装置単体での処理能力を大幅に増やすことができる。

High-throughput CO₂ electrolysis cell stack

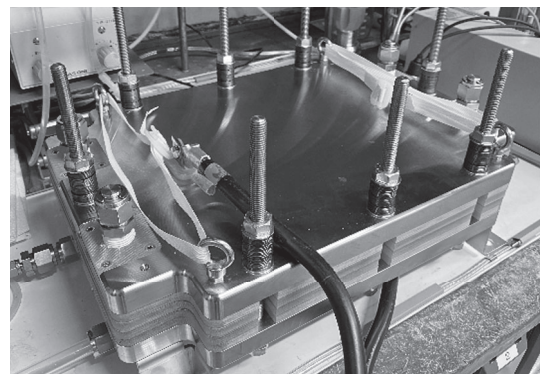


図3. 試作した高スループット型CO₂電解セルスタック

当社の燃料電池製造技術を活用して、電極面積400cm²のセルスタック型高スループットCO₂電解装置を試作した。

Prototype high-throughput CO₂ electrolysis cell stack

性能を、電流密度 100 ~ 300 mA/cm² の領域で、電極面積 4 cm² の小型セルの試験結果と比較して、それぞれ図4及び図5に示した。前回の報告と同様に、燃料電池製造アセットで製作した400 cm²の触媒電極から切り取ったものを、小形セルで使用して試験を行った。

図4のCO生成ファラデー効率の比較結果から、いずれも電極面積4 cm²の小型セルと同等の性能を示しており、スケールアップによる性能低下は観測されないことを確認した。また、図5のセル電圧についても、低電流密度側の100 mA/cm²では約0.2 Vの差で、300 mA/cm²の高電流密度側では、僅か約0.1 Vの差であり、セル電圧も小型セルと同等であることが分かった。このことから、燃料電池用製造設備で製造した高スループット型CO₂電解装置は、電流密度100 ~ 300 mA/cm²の領域内において、小型セルと同等の性能を確保できることを確認した。

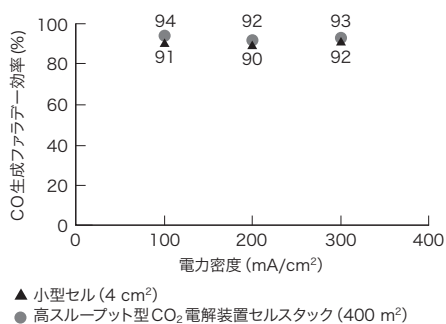


図4. 性能比較 (COファラデー効率)

COの生成率を表すファラデー効率の電流依存性を、試作した高スループット型CO₂電解セルスタックと小型セルと比較したところ、大きな差は見られなかった。

Comparison of CO faradaic efficiency of conventional small cell and prototype

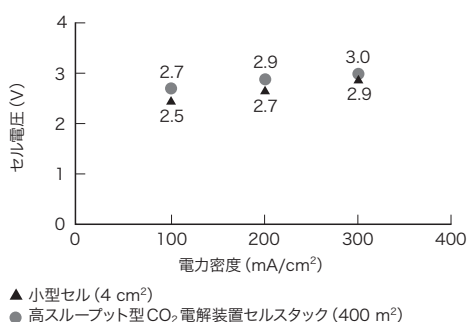


図5. 性能比較 (セル電圧)

電解槽に掛かる電圧を示すセル電圧の電流依存性を、試作した高スループット型CO₂電解セルスタックと小型セルと比較した結果、同等の性能を確認した。

Comparison of cell voltage of conventional small cell and prototype

3. CO₂電解モジュールの開発計画

CO₂電解技術の事業化に向けて、年間100 t級の高スループット型CO₂電解装置を用いたCO₂電解モジュール(図6)の検討を進めている。事業フェーズで要求されるCO製造量年間100 t級のCO₂電解装置を、モジュールで構成する。その基本単位となる大型モジュールのCO製造能力を、再エネ100 kW規模の入力電力で稼働させることを想定して、年間数100 tに設定した。

CO₂電解モジュールの実用化に向けた開発計画を、図7に示す。2024年度には、高スループット型CO₂電解セルスタックのプロトタイプ及び電解モジュールを完成させ、2025

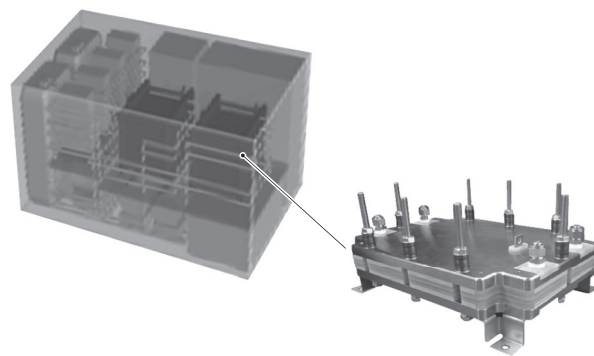
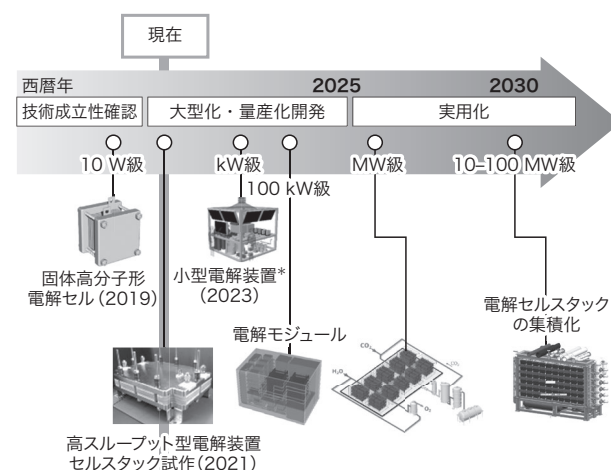


図6. CO₂電解モジュール

高スループット型CO₂電解セルスタックを数台載せたモジュール構成なので、製造量の調整が容易である。

Rendering of CO₂ electrolysis module



*環境省「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」による

図7. CO₂電解モジュールの開発計画

2025年頃までに100 kW級からMW級、2030年頃までに100 MW級までのCO₂電解モジュールの開発を計画している。

Plan for development of CO₂ electrolysis modules

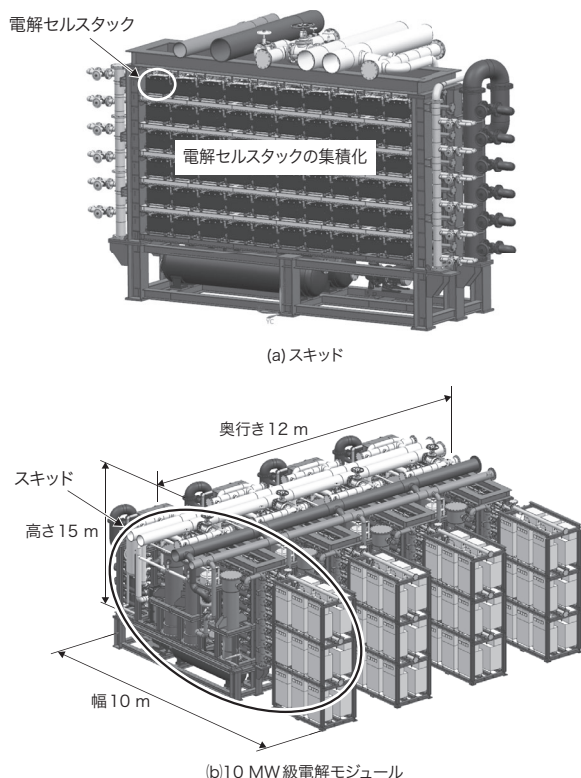


図8. スキッドと10 MW級電解モジュール(イメージ)

電解セルスタックを集積してスキッド化することで、現地に搬送して組み上げることが容易になる。スキッド化に加えて、補機での処理を一括化することで、省スペースで大量処理できるようになる。

Renderings of skid-type module and 10 MW-class CO₂ electrolysis module integrating hundreds of electrolysis cell stacks

年度以降にはこの電解モジュールを100台つなげたMW級以上も手掛けていく。

また、2030年度には、更に大型の10 MW級の電解モジュールを開発し、量産化学プラントに対応していく。大型化にあたって、数十台の電解セルスタックを集積してスキッド化する(図8)。それまで電解セルスタックごとに設けていた補機(加湿器など)をまとめて、処理を一括化することで、省スペース化を図る。10 MW級電解モジュールは、スキッドを四つ束ねたもので、1モジュール(設置面積約120 m²、補機を含めると約500 m²) 当たり年間数万tのCOの製造が可能となる。

スキッドを工場を組み立てて、現地に搬入してから10 MW級電解モジュール全体を組み上げることで、現地での溶接作業を最小化でき、大型商用プラントに高い自由度で適用できる。

4. あとがき

人々がふだん使っている化成品は、化石燃料由来から

CO₂由来のものにシフトしつつあり、近い将来CO₂由来の化成品が当たり前の時代が訪れる。CO₂電解装置をコアとするP2Cを早期に社会実装することで、カーボンニュートラルの世界の実現に貢献していく。P2Cを実装した新しいエネルギー世界の構築は、当社だけでは難しい。異なる分野の産業及び自治体・政府と連携し、構築を実現していきたい。

この成果の一部は、環境省の委託事業「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」で得られたものである。

文献

- (1) 菅野義経, ほか. 光電気化学セルを用いたソーラーフューエル技術の開発. 東芝レビュー. 2016, **71**, 5, p.56-59. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2016/05/71_05pdf/b07.pdf>. (参照 2022-04-05).
- (2) Tamura, J. et al. Electrochemical reduction of CO₂ to ethylene glycol on imidazolium ion-terminated self-assembly monolayer-modified Au electrodes in an aqueous solution. Physical Chemistry Chemical Physics, 2015, **17**, 39, p.26072-26078.
- (3) 小藤勇介, ほか. “Auナノ粒子触媒によるCO₂還元セルの電流密度向上”. 日本化学会 第99春季年会予稿集. 神戸, 2019-03, 日本化学会, 2019, 1PC-023, (DVD-ROM).
- (4) Kofuji, Y. et al. "EFFECTS OF OPERATING PARAMETERS ON POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE CO₂ ELECTROLYSIS CELL". Proceedings of the Nature Conferences on Solar Fuels. Wuhan, China, 2019-10. Springer Nature. 2019, p.48.
- (5) 小藤勇介, ほか. Power to Chemicalsの実現に向けたCO₂電解セルの高電流密度化. 東芝レビュー. 2020, **75**, 6, p.48-51. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/06/75_06pdf/f02.pdf>. (参照 2022-04-05).
- (6) 大田裕之, ほか. 再生可能エネルギーを用いた電解によるCO₂の資源化. 東芝レビュー. 2021, **76**, 3, p.26-30. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2021/03/a07.pdf>>. (参照 2022-04-05).



水口 浩司 MIZUGUCHI Koji, Ph.D.
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーアグリゲーション事業部
博士(工学) 日本原子力学会・電気化学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



尾平 弘道 ODAIRA Hiromichi
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーアグリゲーション事業部 水素エネルギー技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



花井 哲 HANAI Satoshi
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 京浜事業所 設計第三部
電気学会・低温工学・超電導学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.