

# 液体燃料合成に向けたSOEC共電解システム

川本 誠\*  
Makoto Kawamoto  
藤岡恭平†  
Kyohei Fujioka  
下笠諒平†  
Ryohei Shimokasa

篠木俊雄\*  
Toshio Shinoki  
西口博人†  
Hiroto Nishiguchi

SOEC Co-electrolysis System for Liquid Fuel Synthesis

\*先端技術総合研究所(工博)  
†同研究所

## 要 旨

三菱電機ではNEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)委託事業“次世代FT反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発”で、SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)共電解の動作安定化と高効率化を目指したシステム開発に取り組んでいる。カーボンニュートラル社会の実現に向けては、カーボンリサイクル技術の早期実用化と社会実装が重要になる。SOECを用いた共電解はその一つで、水蒸気とCO<sub>2</sub>を同時に電解し、効率良く、水素とCOから成る合成ガスを得られる。この合成ガスは液体燃料の原料として利用できるため、カーボンリサイクルに貢献する。このプロジェクトでSOECスタックモジュールの動作条件を満足しつつ、システム排熱の約70%を再利用できる50kW級SOEC共電解システムの基本構成と運転シーケンスを開発した。

## 1. ま え が き

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、NEDOではCO<sub>2</sub>からの液体燃料製造技術の開発を推進している。このプロジェクトは、SOEC共電解とFT(Fischer-Tropsch)合成を組み合わせた、CO<sub>2</sub>からの液体燃料一貫製造プロセスについて、要素技術の確立と事業化を見据えた実証を目標としている(図1)。当社は2023年10月から、一般財団法人 電力中央研究所、日本特殊陶業(株)及び東京科学大学と当該プロジェクトに参画し、50kW級SOEC共電解システムを開発している。

固体酸化物を電解質とするSOECは、約600~1,000℃の高温で動作することから、電極反応の抵抗や理論電解電圧が低減されて、低温で動作する他の電解方式と比較して高い電解効率を得られる(表1)。また、CO<sub>2</sub>を同時に電解する共電解が可能であり、得られるCOと水素から成る合成ガスを合成燃料の原料に利用できるため、カーボンリサイクル技術の一つとして注目されている。実用化に向けては、高温動作による電解セルの腐食劣化やCO<sub>2</sub>電解による炭素析出といったセルスタックの課題、SOECスタックモジュールの動作不安定や高温水蒸気の生成に必要なエネルギー融通といったシステム面の課題などがある。当社ではシステム面の課題を解決する構成や運転シーケンスを開発している。

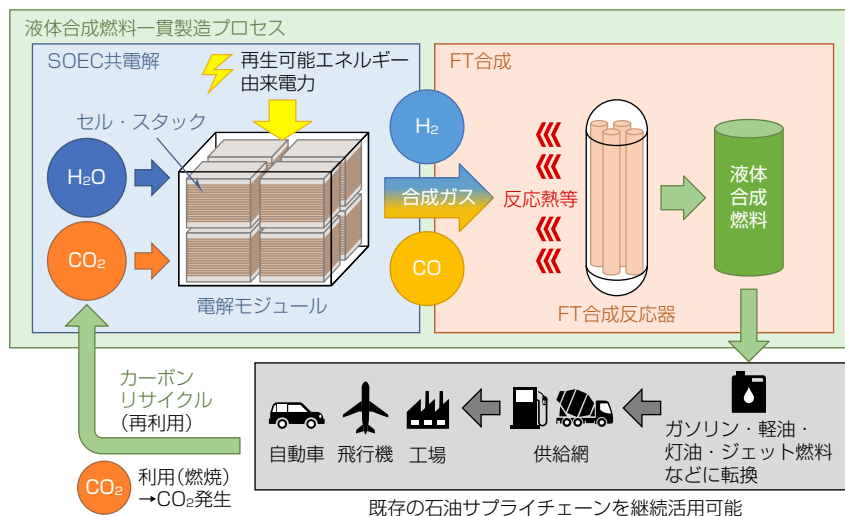


図1-液体合成燃料一貫製造プロセス<sup>(1)</sup>

表1-電解方式の比較

方式	アルカリ水電解	PEM	AEM	SOEC
概念図				
開発段階	商用	商用	技術開発	実証
動作温度	60~100℃	50~90℃	50~70℃	600~1,000℃
電解質	アルカリ水溶液	プロトン交換膜	アニオン交換膜	固体酸化物
電解効率	50~70%	45~70%	50~70%	80~85%
主な課題	・水素純度が低い ・逆電流による劣化	・触媒に貴金属を用いるため高価	・アニオン伝導性と耐久性の両立	・触媒や電解質の劣化 ・水蒸気生成に要するエネルギー

PEM: Proton Exchange Membrane, AEM: Anion Exchange Membrane

## 2. SOEC共電解システム構成の開発

この章ではプロセスシミュレーションを用いたSOEC共電解システム構成の開発について述べる。

### 2.1 SOEC共電解システムのプロセスシミュレーションモデル

SOEC共電解システムではスタックモジュールのカソード側に水蒸気とCO<sub>2</sub>を、アノード側に空気を、それぞれ800℃で供給する必要がある。これらの条件を満足するように、SOECスタックモジュールを中心に、ヒーター、冷却器、ブロワー及び気化器などの機器で構成されるシステム基本構成(図2)を決定した。機器の間の物質とエネルギーのやり取りを計算し、システムの成立性やエネルギー効率をシミュレーションするために、プロセスシミュレーターを用いた。商用シミュレーターを利用できるが、SOECスタックモジュールはシミュレーター内に既存のモデルが存在しないため、先行研究<sup>(2)</sup>で開発された性能表示式を用いて要素モデルを構築し、シミュレーターに組み込んだ。これによって、SOEC共電解システムの構成機器での物質とエネルギーのやり取りをコンピューター上で再現し、消費エネルギーの計算が可能になった。

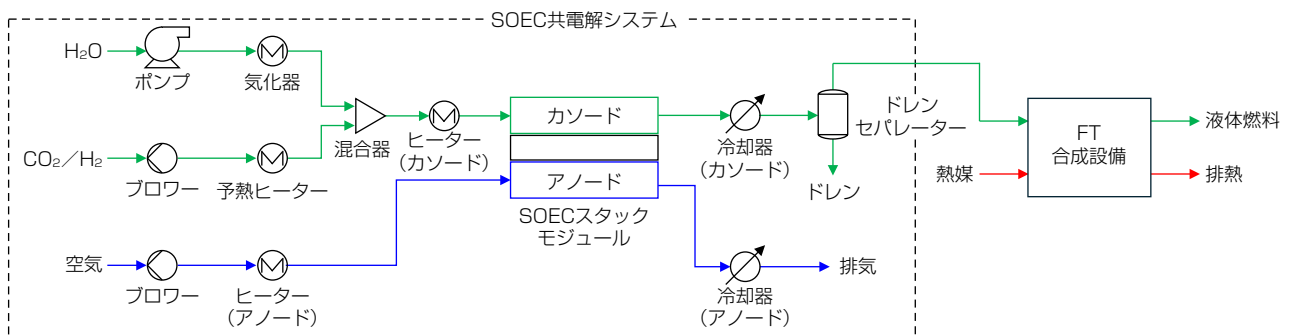


図2-基本構成のプロセスフロー

### 2.2 シミュレーションによるシステム内の熱需要と排熱の分析

図2の構成で、50kW級システムの熱需要とロスを計算した。スタックモジュールのカソード側にはH<sub>2</sub>O:CO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>を56.7:33.3:10の割合で供給し、ヒーターで800℃まで昇温すると仮定した。カソードからの合成ガスは冷却し、ドレンセパレーターで水分を分離してからFT合成設備に供給する。スタックモジュールのアノード側には、カソード側と同様に800℃まで昇温した空気を供給し、排ガスは冷却して排気すると仮定した。

図3左にシステムの排熱と熱需要の内訳を示す。排熱はカソードが11.7kW，アノードが10.9kWになった。また，FT合成設備からの15.0kWの排熱も利用可能である。システムの熱需要については各系統のヒーターが約9kW，気化器が10.7kWであった。スタックモジュールに供給する水蒸気の生成には多くの熱が必要で，システム熱需要の約36%を占めている。排熱と熱需要の温度は図3右に示すとおりである。

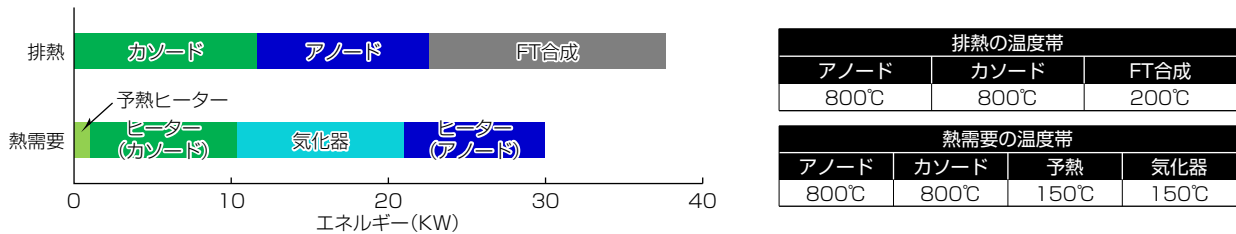


図3-基本構成でのプロセスの排熱と熱需要

### 2.3 熱マネジメントによるシステム消費エネルギー低減効果の試算

シミュレーション結果を受けて，温度帯の近い排熱と熱需要の間で熱融通ができる，図4のようなシステム構成を考案した。アノード，カソードの排熱はプレート型熱交換器を介して，それぞれの系統に供給されるガスの昇温に用いる。FT合成設備からの排熱は約200℃であることから，熱需要側の温度とマッチする水蒸気生成とCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>混合ガスの予熱に用いる。排熱を輸送する熱媒は高粘度のオイルが想定されるため，シェルアンドチューブ型の熱交換器を採用した。このシステムでのシミュレーションに当たって，熱交換器の性能を示す指標であるUA値は，予備検討から，カソード側，アノード側の熱交換器がそれぞれ125W/K，90W/K，水蒸気生成とCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>混合ガスの熱交換器がそれぞれ280W/Kと仮定した。

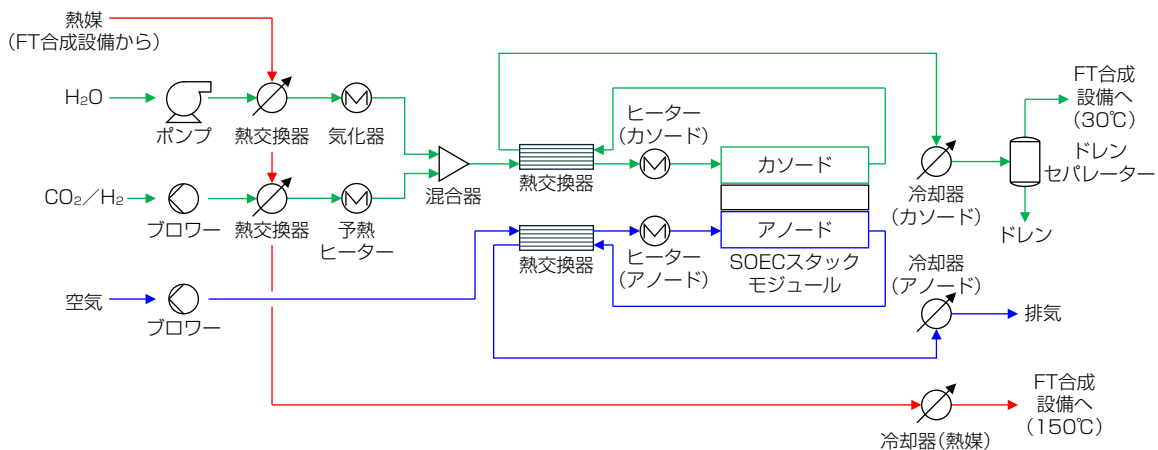


図4-排熱を融通するシステム構成

図5にシミュレーションで得たシステムの消費エネルギーと排熱の内訳を示す。アノード，カソードの排熱，及びFT合成設備からの排熱の72%を再利用し，ヒーター類の消費エネルギーを90%低減できる可能性が示された。しかしなが

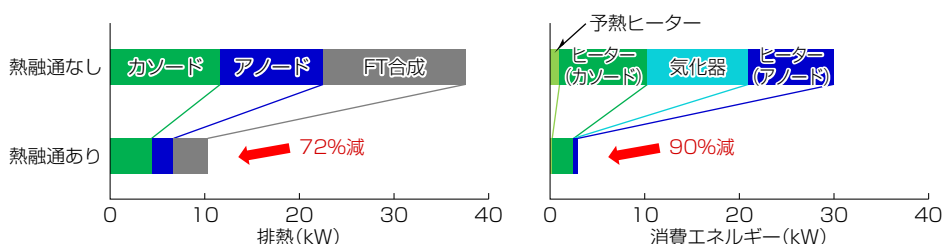


図5-排熱利用によるシステム消費エネルギー低減効果のシミュレーション結果

ら、現在のモデルは配管や機器からの放熱を無視した理想的な状態を仮定した結果である。実際のシステムでは放熱によるエネルギーロスが無視できないため、今後は機器からの放熱をモデル化してプロセスシミュレーションモデルの高度化を図るとともに、システム構成の最適化を進めていく。

### 2.4 システム圧力損失の計算

他のプロジェクト参画機関との情報交換を受けて、SOECスタックモジュールの耐圧は10kPaと仮定した。2.3節で検討した熱交換器の設置に当たっては、SOECスタックモジュールより下流の圧力損失、及びアノード-カソード間の極間差圧が耐圧を下回る必要がある。今回はシステムの主構成機器である熱交換器と配管の仕様を調整することで圧力損失を低減させた。各要素での圧力損失の計算結果を表2に示す。カソード、アノード共に圧力損失の総和は10kPaを下回っており、極間差圧も1.41kPaと、SOECスタックモジュールの耐圧要件を満たすことを確認した。

表2-スタックモジュール下流での圧力損失

カソード側		アノード側	
機器	圧力損失 (kPa)	機器	圧力損失 (kPa)
スタックモジュール	6.00	スタックモジュール	4.00
熱交換器	0.47	熱交換器	0.99
冷却器	0.47	冷却器	0.43
ドレンセパレーター	0.01	配管類	0.20
配管類	0.08		
総和	7.03	総和	5.62
		極間差圧	1.41

## 3. システムの運転シーケンス開発

この章ではSOEC共電解システムの動作を安定化するための運転シーケンス開発について述べる。

### 3.1 制御のためのシステム構成

2章ではシステム運転時の熱効率と圧力損失を検討したが、システム運転のためには、システム起動時の各機器の制御が必要である。信頼性と安全性を保ってシステムを起動させるために、不活性ガスを導入するためのバルブや配管を加えたシステム構成を考案した。図6にシステム構成を示す。

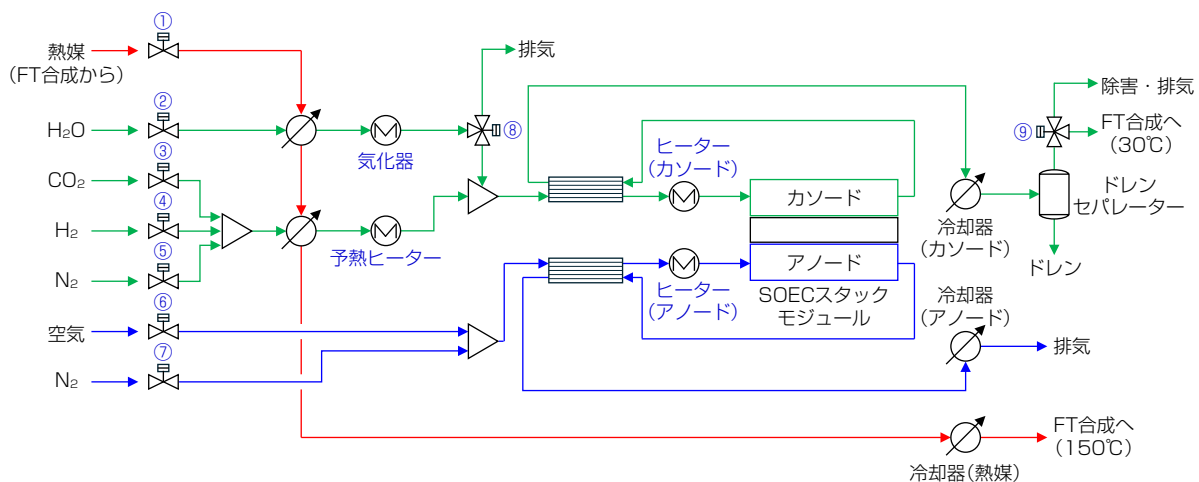


図6-運転シーケンス開発に用いたシステム構成

### 3.2 運転シーケンスの開発

図6のシステム構成でSOECスタックモジュールの動作を安定化するための運転シーケンスを検討した。一例として表3に起動時の運転シーケンスを示す。

表3-起動時の運転シーケンス

機器	フェーズ i	フェーズ ii	フェーズ iii	フェーズ iv	フェーズ v	フェーズ vi	フェーズ vii	フェーズ viii
① 熱媒	閉	閉	開	開	開	開	開	開
② H <sub>2</sub> O	閉	閉	閉	開	開	開	開	開
③ CO <sub>2</sub>	閉	閉	閉	閉	閉	開	開	開
④ H <sub>2</sub>	閉	開	開	開	開	開	開	開
⑤ N <sub>2</sub> (カソード)	開	開	開	開	閉	閉	閉	閉
⑥ 空気	閉	閉	閉	閉	閉	開	開	開
⑦ N <sub>2</sub> (アノード)	開	開	開	開	開	閉	閉	閉
⑧ 蒸気供給弁	排気側	排気側	排気側	排気側	プロセス側	プロセス側	プロセス側	プロセス側
⑨ 合成ガス弁	排気側	排気側	排気側	排気側	排気側	排気側	排気側	プロセス側
気化器ヒーター	オフ	オフ	オン	オン	オン	オン	オン	オン
予熱ヒーター	オフ	オフ	オン	オン	オン	オン	オン	オン
ヒーター(カソード)	オフ	オフ	オン	オン	オン	オン	オン	オン
ヒーター(アノード)	オフ	オフ	オン	オン	オン	オン	オン	オン
スタックモジュール	オフ	オフ	オフ	オフ	オフ	オフ	通電	通電

フェーズ i：窒素を供給し、システム内を窒素で置換する。

フェーズ ii：窒素／水素の混合ガスを供給し、システム内を還元雰囲気にする事でスタックの劣化を抑制する。

フェーズ iii：各ヒーターに通電し、システムの昇温を開始する。後段のFT合成設備で熱媒の昇温が始まっていると仮定する。熱媒を供給するバルブ(図6の①)を開いて、SOEC共電解システムの予熱に利用する。また、次フェーズでの水の供給に備えて、気化器の昇温を開始する。

フェーズ iv：水蒸気の供給を開始する。供給開始直後は水蒸気流量が不安定であり、水滴による異常昇圧などの懸念があるため、気化器の安定を確認してから次フェーズに移行する。

フェーズ v：蒸気供給弁(図6の⑧)を切り替えて、水蒸気をSOECスタックモジュールへ供給を開始する。

フェーズ vi：CO<sub>2</sub>の供給を開始する。水蒸気の供給後にCO<sub>2</sub>の供給を開始することで、SOECスタックモジュールでの炭素析出を回避する狙いがある。

フェーズ vii：SOECスタックモジュールに通電し、共電解を開始する。電解の安定を確認するまで合成ガスは除害してから排気する。

フェーズ viii：合成ガス弁(図6の⑨)を切り替えて、FT合成設備へ合成ガスの供給を開始する。

現在、このシーケンスはバルブの開閉やヒーターのオン／オフだけを対象としているが、今後は実際のシステムに適用できるように、バルブの開度やヒーター出力、PID(Proportional, Integral, Derivative)パラメーターなどを加えた運転シーケンスに高度化していく。

## 4. む す び

SOEC共電解の実用化に向けたシステム開発について述べた。システム内の熱マネジメントによって排熱の70%を再利用できるシステム構成と動作安定化のための運転シーケンスを開発した。

今後、起動・停止までを含めたシステム動作安定化が可能な運転シーケンス、及び動的なプロセスシミュレーションを開発し、SOEC共電解システムの実用化に貢献していく。

本稿の内容は、NEDOの委託事業(JPNP16002)として行った研究成果である。ここに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 三菱電機：液体合成燃料製造に向けた「SOEC共電解実用化の研究開発」をNEDO委託事業として4者共同で開始(2023)  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/ja/pr/2023/pdf/1220.pdf>
- (2) Imabayashi, T., et al.: Evaluation of Electrolytic Characteristics with a Single Cell Developed as SOFC, ECS Transactions, **111**, No.6, 1493~1500 (2023)