

工場/事業所の未利用低温排熱を活用したSOECによる水素製造技術開発

大栗 延章
Nobuaki Oguri
加藤 芳樹
Yoshiki Kato

堀内 幸一郎
Koichiro Horiuchi
杉田 吉隆
Yoshitaka Sugita

概要

産業部門の脱炭素化において、電化が難しい熱需要領域ではグリーン水素の確保が課題である。アイシンでは生産カーボンニュートラルの実現及び地域水素利活用への貢献を目指し、工場/事業所の未利用低温排熱を活用した高効率な水素製造SOECシステムを開発している。

1. はじめに

我が国の温室効果ガス排出量は、着実に低減されており、二酸化炭素換算値では2013年度に14億800万トン¹⁾であった排出量が2021年度に11億7000万トン²⁾となっている。これは、省エネ技術の導入や再生可能エネルギーの利用拡大、原子力発電所の再稼働など、複数の要因によるものと考えられる。しかし、日本政府の掲げる2050年カーボンニュートラル、また2030年度には2013年度から二酸化炭素排出量46%削減の目標に向けては、更なる低炭素化・脱炭素化の技術導入が必要である。

水素は、電化が難しい熱利用の脱炭素化、電源のゼロエミッション化、運輸、産業部門の脱炭素化、合成燃料(e-fuel)・合成メタン(e-methane)等のカーボンリサイクル製品の製造、再生可能エネルギーの効率的な活用など多様な貢献が期待できるため、その役割は今後一層拡大する事が期待されている。2021年6月に日本政府はグリーン成長戦略を閣議決定し、水素・燃料アンモニア産業の導入目標として、2030年に最大300万トン、2050年に2000万トンを掲げた。これに向けて大規模な水素サプライチェーンを構築するにあたり、供給コストの低減は大きな課題である。グリーン成長戦略において、水素製造コストとして2030年に30円/m³、2050年に20円/m³が目標に掲げられており、水素の製造技術として革新的な高効率水電解技術の開発が期待されている。

主な水電解技術の特徴の構成を表1に示す。従来技術であるアルカリ水電解やPEM(Polymer electrolyte membrane)型といった低温水電解方式

が40~70%の電解効率(生成水素エネルギー/投入電力)であるのに対して、セラミックスを電解質としたSOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)は、作動温度が高く理論電解電圧が低くなり投入電力を抑えられることから、電解効率80%を超える高効率な水素製造技術として注目されている。

表1 各種水電解方式の比較
参考文献³⁾の情報を基に作成

電解方式	アルカリ	PEM	AEM	SOEC
電解質	濃厚KOH溶液	プロトン交換膜	アニオン交換膜	固体酸化物(YSZ)
水素極/酸素極	Ni/Ni	Pt/IrO ₂	Ni/Ni, NiFeCo	Ni(YSZ)/LSCF, LSM
動作温度[℃]	70-90	50-80	40-60	700-850
年代	現状	2050年	現状	2050年
技術フェーズ (※アイシン適用)	商用 (※大規模)	商用 (※大規模)	実証/商用 (※大規模)	実証/商用 (※大規模)
システム効率 [kWh/Nm ³ -H ₂]	4.5-7.0	<4.0	4.5-7.5	<4.0
システム効率 [%]	43-67	>74	40-67	>74
スタック耐久性 [kh]	60	100	50-80	100-120
			5	100
			<20	80

SOECの水素生成反応はSOFC(Solid Oxide Fuel Cell)の発電反応の逆反応である。アイシンはSOFCを用いたエネファームtypeSの開発知見及び市場実績を持つ。本開発では、エネファームtypeSで培ったSOFCの熱マネジメントやシステム化などの技術を活用して、高効率な水素製造SOECシステムの早期実現を狙う。

2. 未利用低温排熱の活用について

SOECは作動温度が高く理論電解電圧が下がる反面、電解反応に必要な熱エネルギーが増加する。このような特性から、SOECは外部熱供給により高効率化が図られ、安定した熱源であることから火力発電所の排熱や

原子力発電の高温蒸気を用いる例などが検討されている。他方、産業分野においては図1に示すように、排熱が高温かつ熱源が集約されているような形態で排出されるものは、排熱のカスケード利用等されているため、未利用排熱のうち200℃未満が76%と圧倒的に多い⁴⁾。加えて排熱利用が難しいことから活用ニーズとしては温水や温風等の100℃以下の排熱が特に高い⁵⁾。

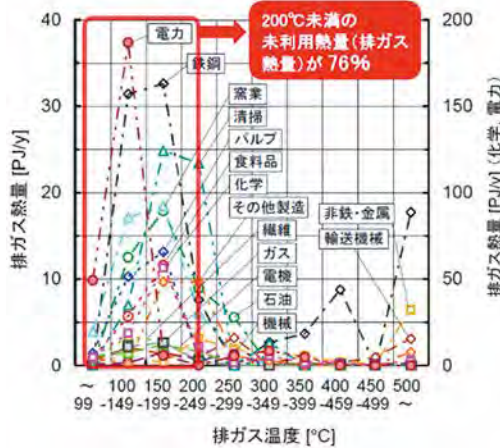


図1 業種別・温度帯別の未利用熱量の全国推定値⁴⁾



図2 温度帯別の未利用熱活用ニーズ 設備件数⁵⁾

そこで本開発では、この100℃以下の未利用低温排熱に着目した。図3に示すように未利用低温排熱をSOECに供給する水蒸気の生成熱源として活用することで水素製造のシステムエネルギー効率を向上し、電解効率80%以上のシステムを目指す。多くの業種で活用ニーズの高い低温排熱を有効利用するシステムを開発し、アイシン生産CO₂の削減に加え、産業分野への展開を目指している。



図3 未利用排熱を活用したSOEC水素製造システム概要

3. 未利用低温排熱を活用した水素製造SOEC

3.1 排熱回収-蒸気生成ユニット

100℃以下の低温排熱として、工場内で発生が炉の周囲などある範囲で集中しており、発生量も安定していると想定される40℃程度の温風排熱をターゲットに仮定し、これを回収してSOECに供給する水蒸気を生成するユニットの構成及びその開発状況について説明する。

3.1.1 ヒートポンプによる蒸気生成プロセス

100℃以下の低温熱源から温度を持ち上げ水蒸気を生成する手法としてヒートポンププロセスが考えられた。汎用の機械圧縮式ヒートポンプから「出口流体温度が120℃程度であること」「40℃程度の未利用排熱を利用可能であること」「小型かつ加熱能力がSOEC投入電力より十分に小さいこと」を要件にヒートポンプを文献調査⁶⁾した結果、加熱能力0～600kW、加熱温度0～200℃の領域において、40℃程度の排熱から120℃の水蒸気生成を単独の機器で成立させることは困難であった。そこで、図4に示すように40℃程度の空気熱源から60～80℃の温水を生成するヒートポンプと60～80℃の温水を熱源に120℃の飽和水蒸気を生成するヒートポンプを多段活用するプロセス及び水蒸気生成を安定的に行うために、低温側ヒートポンプと高温側ヒートポンプの中間に蓄熱槽を設けたプロセスを考案し、2023年度に藤岡試験場内のエネルギーラボにて設置/評価を実施した。

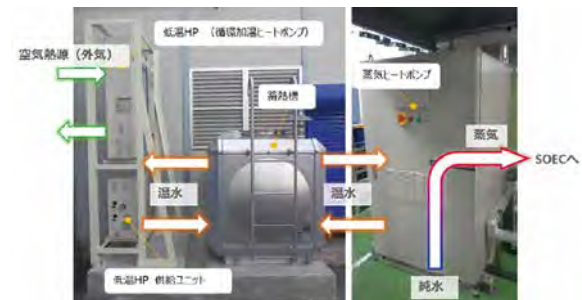


図4 排熱回収-水蒸気生成ユニット

外気を40℃程度の温風排熱に見立て、2段階のヒートポンププロセスにより昇温する要素試験を実施した結果、図5に示すように2段階のヒートポンププロセスでもCOP (Coefficient of Performance: 生成熱量/投入電力の成績係数) 2.0以上で120℃の水蒸気を生成可能であることを確認した。なお、低温側のヒートポンプは40℃程度の空気を吸気して $\Delta T = -5 \sim -10^\circ\text{C}$ 程度を排気するため、既存の空調設備を置換もしくは負荷低減する事が可能である。低温側のヒートポンプの動力を既存の空調設備のエネルギー削減分で相殺すると考える場合、蒸気ヒートポンプ単体のみのCOP 3.0以上で水蒸気を生成可能とも言える。

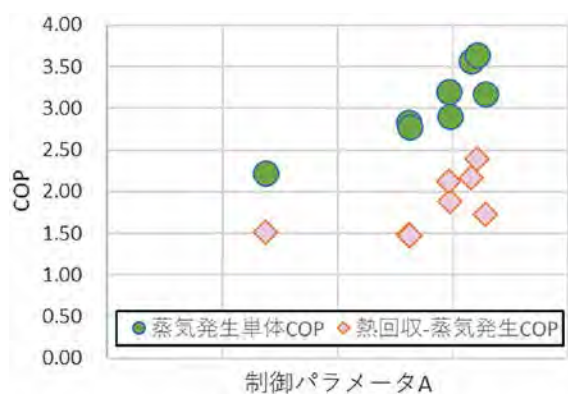


図5 排熱回収-水蒸気生成ユニットの要素試験結果

3.2 水蒸気電解SOECシステム

1章にて示した通り、SOECの最大の技術的な優位性は、高温作動に起因した電解効率の高さである。アイシンでは、世界最高効率(システム電解効率80%以上※)を目標にSOECシステムの開発を進めている。本稿では2023年度に実施した要素技術の開発状況について紹介する。

※100℃未満低温排熱活用の補機損失及びAC/DC変換を考慮した値

3.2.1 高効率SOECホットモジュール

SOECの高効率という特徴を最大限発揮するためには、SOECスタック本体を700℃以上という高温に昇温し、適正な温度分布を維持するホットモジュール(SOECスタック本体と熱交換器等を断熱筐体に格納したもの)による熱マネジメントが必要である。また、700℃という高温領域においては水蒸気によりSOEC水素極に用いられるNi触媒が酸化劣化してしまうため、高効率を長時間維持して高耐久とを両立するためには水素極の雰囲気還元雰囲気に維持する事が重要である。

図6,7に2023年度に試作/評価を行ったDC入力2.4kWのSOECホットモジュールの概要及び外観を示す。SOECシステムでは、純水を供給し、SOECホットモジュール内もしくは外部で水蒸気を生成する。その後、SOECスタックの作動に適した流体温度となるよう熱交換等で水蒸気を加熱した後、スタックへ供給することになる。開発したSOECホットモジュールでは、3.1節に示した水蒸気生成ユニットにより水蒸気が供給されるため、ホットモジュール内部に気化機能を有しない構成である。本構成のホットモジュールにおいては、生成した水素の一部をホットモジュールに還流し、ホットモジュール内の燃焼器で燃焼させて水蒸気の予熱を行う点の特徴である。電気ヒーターによる予熱に対し、絶縁性の課題が無い点や高温燃焼である事から高い温度追従性が得られる点がメリットである。水素燃焼や高温水素/水蒸気の熱交換構造が課題となるが、エネファーム

typeSの開発知見や市場実績のある高温部材を活用し、燃焼器や熱交換器の構造設計を実施した。

また、燃焼用の水素と別に、生成水素の一部を酸化劣化防止用としても還流して供給する水蒸気に混合している。供給する水蒸気に水素を混合する手法は一般的で、多くの場合、ユーティリティもしくは貯蔵した水素を用いるが、本構成ではホットモジュール出口の生成水素を、気液分離した後の常温・常圧部から還流する点が特徴である。これにより貯蔵に係る昇圧エネルギーを削減でき、システム効率の向上を図っている。

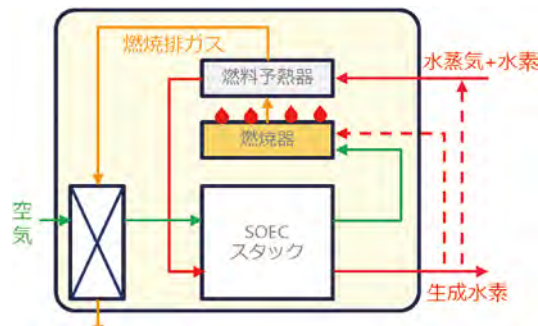


図6 SOECホットモジュールの概要



図7 SOECホットモジュール外観

試作したDC2.4kW SOECホットモジュールの電解効率評価を行った結果、図8に示すようにDC電解効率85%を超える($\leq 3.52\text{kWh/Nm}^3$)性能検証に成功した。一方で、ホットモジュール内の熱マネジメントに関して、内部の熱交換特性、燃焼器における燃焼性が今後の改善点として抽出された。システム電解効率80%以上の達成に向けてはDC電解効率90%を上回る更なる高効率化が必要であり、抽出された課題に対して改良を図る。

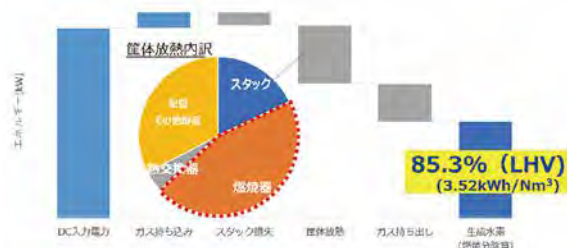


図8 SOECホットモジュール評価結果

