

内部凝縮型反応器を用いたCO₂とH₂からのメタノール製造技術の開発

住友化学株式会社
エッセンシャル&
グリーンマテリアルズ研究所

川 端 智 則
松 田 雅 人*



はじめに

CO₂を回収して利用する技術（Carbon Capture and Utilization：CCU）は、炭素資源循環型社会の実現に向けて重要な選択肢であり、従来から存在する回収・利用技術を基盤に、近年、研究開発・実証・商用化が急速に進展している。今後は、再生可能エネルギーの活用やライフサイクルでの排出削減効果を確保しつつ、さらなる導入拡大が期待される。この中で、上記CO₂と水素とを原料として合成されるeメタノールは、各種化学品の原料や燃料として注目されている。特に、欧州連合（EU）は「Fit for 55」¹⁾や「FuelEU Maritime」²⁾などの政策を通じて、船舶燃料に対する温室効果ガス（GHG）排出規制を強化しており、これが従来の重油やディーゼルよりも環境負荷の低いeメタノール需要増加を後押ししている。

このような背景のもと、eメタノール製造技術の開発と商業化は、世界中の主要プレーヤーによって推進されている。欧州では、デンマークのEuropean Energy A/S³⁾や、アイスランドのCarbon Recycling International⁴⁾などが先行しており、グローバルでは中国、北米の大手化学メーカーも大型プラント建設を進めている。

eメタノールを得るためのCO₂と水素からメタノールと水を生成する反応では、化学平衡的に正反応が不利であり、ワンパスの原料転化率が極めて低いため、未反応原料のリサイクルプロセスが大きくなる。さらに、合成過程で副生した水が触媒の劣化要因になるだけでなく、水と生成物との分離に設備コストやエネルギー消費が増加するなどの課題もある⁵⁾。

反応で生じたメタノールと副生水を反応場から系外に分離することで、触媒劣化を抑制するとともに、化学平衡以上のCO₂転化率を達成し設備コストやエネルギー消費を大幅に抑制することができる。これを実現するための方法として、膜リアクターを利用す

るプロセスが数社から提案され開発が進められている。他方、当社は一般社団法人HiBD研究所藤元所長が開発し、国立大学法人島根大学（以下、島根大学）小俣教授が研究を進めた内部凝縮型反応器（Internal Condensation Reactor、以下ICR）^{6),7)}に着目し、eメタノール製造技術に適用することで、化学平衡を大きく上回るCO₂転化率を達成することができた。本稿では、ICR技術の特徴について他社が商業化しているeメタノール製法（従来法）との違いを中心に紹介する。

内部凝縮型反応器（ICR）の原理

従来法においては、CO₂/H₂の原料ガスは触媒層内で反応し、この温度圧力条件下での平衡転化率に達した時点で見かけ上反応が停止する。一般的な条件において、CO₂の平衡転化率は20%である。

一方、ICR技術においては、この温度圧力条件下での平衡濃度に達した後、平衡組成の混合ガスが反応器内に設置された冷却部により凝縮され、重力により反応器下部へ移動して排出される。これにより触媒層内のメタノールと水の濃度は常に平衡組成よりも低い状態に保たれるため、反応器全体として平衡転化率を超えることが可能となる。Fig. 1にICRの概念図を示

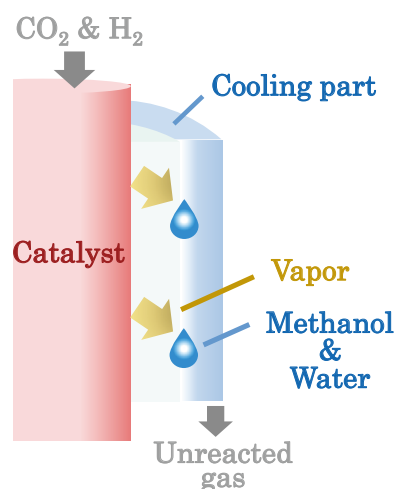


Fig. 1 Principle of ICR (conceptual diagram)

*現所属：工業化技術研究所

す。図は円筒形反応器の内部の一部分であり、生成したメタノールと水は、触媒を充填した触媒層と冷却部の間の空間部で凝縮する。触媒使用量と反応条件の組み合わせにより、原理的には90%程度までCO₂転化率を上げることができる。

ラボスケールによる原理検証

ICRの原理検証のため、Fig. 2に示す装置を作製した。原料ガスであるCO₂/H₂を上部から供給し、予熱ゾーンで温度を上げたのち、反応器内部に充填した触媒と接触させる。生成したメタノールと水は反応器外側のジャケット内を流れる冷却媒体により冷却されて反応が進行し、液・ガスの混合物を反応器下部から回収する仕組みである。

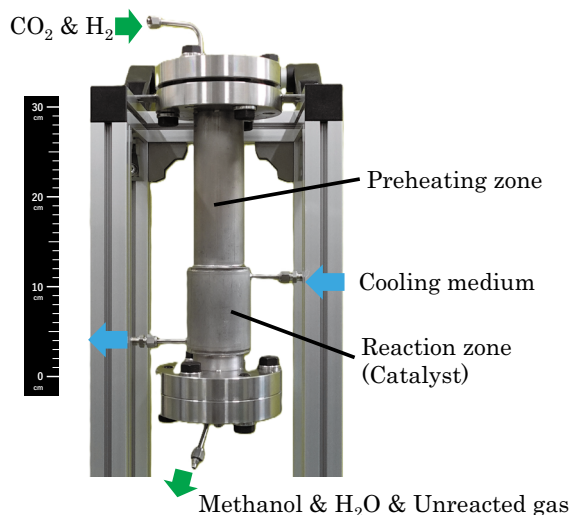


Fig. 2 Appearance of ICR lab prototype

Fig. 3に0.9MPaGの条件下、ICRラボ試作器を用いた反応実験で得られた典型的なメタノール収率および、各温度におけるメタノール収率の平衡値を示す。

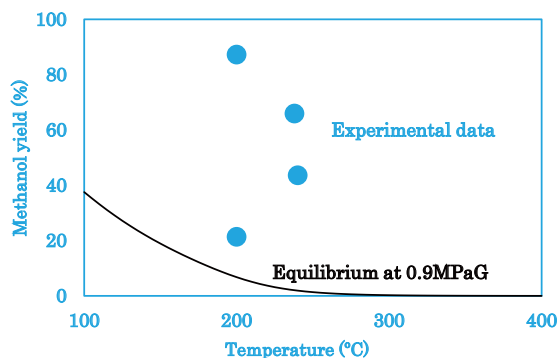


Fig. 3 Methanol yield obtained by ICR

ICRを用いることで、一般的なCO₂を原料とするメタノール合成の反応圧力5~10MPaGよりも低い圧力でも、CO₂転化率が平衡を大きく超え、20~90%の収率でメタノールが生成することを確認した。また、メタノール選択率は従来法と変わらず、副生物についてもほぼ同等であった。ラボスケールにおける原理検証に成功したため、パイロットスケールでの実証に進めることとした。

パイロットスケール検討

当社は、50~100トン/年規模のICR法によるパイロット設備を愛媛工場（愛媛県新居浜市）に設置し、2023年に運転を開始した。Fig. 4にパイロット設備の外観を示す。反応器は単管であり、主な検討項目はICR内部での凝縮方法の検討、熱バランスの把握、ならびに触媒の長期安定性の確認である。収率向上や熱効率改善を意図した改造も行いながら、2年以上トラブルなく検討を行っており、ワンパスのCO₂転化率の実績値は40~80%であった。転化率に幅があるのは、反応条件や凝縮方法の違いによるものである。このようにパイロットスケールでの検証により、工業化を見据えた実用レベルの技術であることが確認されつつある。



Fig. 4 Pilot-scale equipment

プロセスの特長と競争力

ICR法の特長の一つは、高効率な反応システムとシンプルなプロセス構成により、設備費の削減が期待できる点である。ICR法メタノール合成プロセスをFig. 5に示す。主に原料ガス圧縮工程、反応工程、気液分離工程、精製工程から成り、未反応ガスは分離し反応器にリサイクルされる。これは従来法と同じ構成であるが、リサイクルガス量が大きく異なる。Fig. 5中の

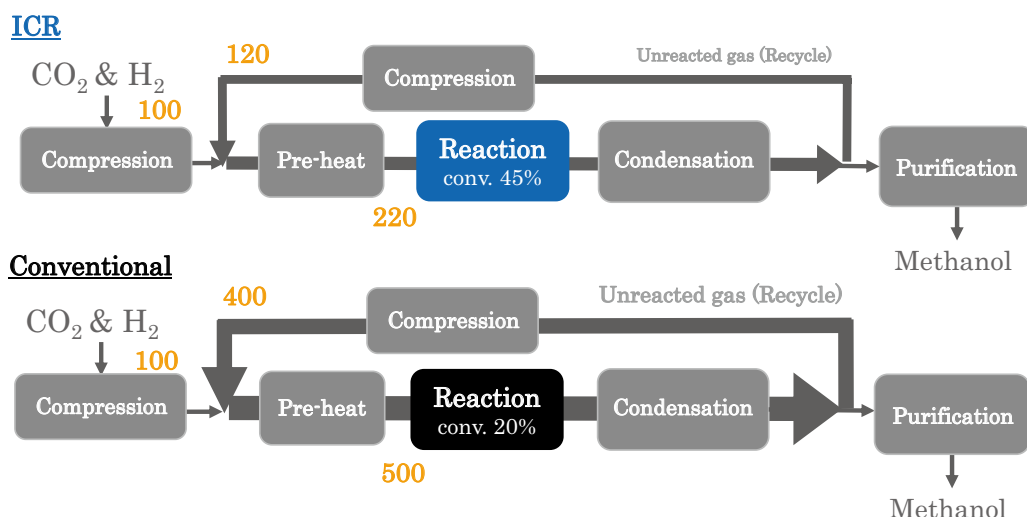


Fig. 5 Methanol production process (upper; ICR method, lower; conventional method)
The numbers represent the relative amounts of fluid at each step.

数字は、従来法およびICR法のワンパスCO₂転化率をそれぞれ20%、45%とした場合の各工程に存在する相対的な流体の量である。ICR法では、従来法に比べリサイクルガスの流量を7割、反応器入口ガスの流量を6割削減できることになる。

Fig. 6は原料ガスの圧縮やメタノールの精製の工程を除いた反応工程に関わる機器費をICR法と従来法で比較し、反応器、熱交換器、リサイクルガスの圧縮機の内訳も示している。前述のとおり、ICRは反応器の内部に熱交換の機能を持つため、従来法の反応器よりも高額となる。しかしながら、ワンパスCO₂転化率が高いために熱交換器のサイズや基数を削減することが可能となり、反応工程に関わる機器費全体で見れば約40%の削減が見込める。さらには、プラントの敷地面積の削減など初期投資の抑制と高い競争力が期待できる、当社独自の先進的なプロセスである。

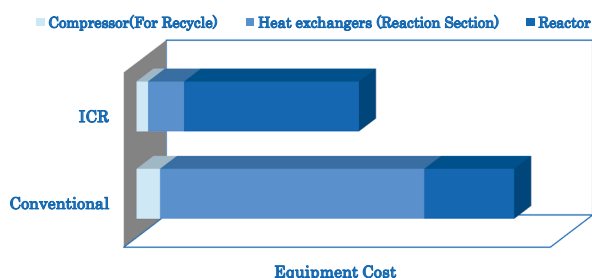


Fig. 6 Equipment cost comparison (Reaction part only)

Fig. 7では、CO₂と水素の供給から精製したメタノールを得るまでの製造工程全体で使用するスチーム

および電力のエネルギーについてICR法と従来法との比較を行っている。ICR法については、Fig. 6の計算前提と同じくワンパスCO₂転化率45%で運転した場合を想定した。この値はパイロット運転における実績を踏まえた期待値となる。ここで、ICR法では、先述した反応条件や凝縮方法の適正化に加え、多段化や反応器構成の工夫によってワンパスCO₂転化率を幅広い範囲に調整し得る。この特徴により、立地も踏まえた柔軟なプラント設計が可能となるが、特にワンパスCO₂転化率を40~60%程度に抑制してリサイクルプロセス化するのが、トータルコストの観点で有利とされている。従来法に関しては、文献⁸⁾に記載のプロセス情報をもとに当社ICR法の計算と前提を合わせるようにプロセスを微修正した結果を反映している。

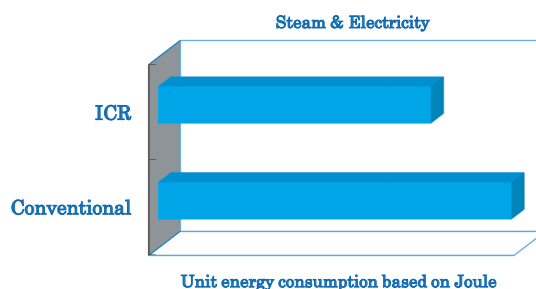


Fig. 7 Comparison of unit energy consumption (Steam and electricity)

この図に示すように、プロセス全体のエネルギー消費についてICR法は従来法に比べて省エネルギーで、コスト面と環境負荷の両面で優れたプロセスとなることが期待される。一方、従来法は先述したとおりワン

パスの転化率が低いためにリサイクルとして循環するガスが多く、エネルギー多消費型プロセスという課題がある。また、ICR法によるメタノールは、CI値⁹⁾の観点で優位となるポテンシャルがあり、低炭素燃料へのニーズの高まりとともに、その価値向上が期待される。

おわりに

当社は島根大学と連携しCO₂とH₂からメタノールを合成する反応に適したICRを開発し、パイロット試験による検証とブラッシュアップにより、工業化に向けた基盤技術をほぼ確立した¹⁰⁾。

ICRではワンパス転化率を高められることから、従来法よりも建設費が抑えられ、かつプロセスのシンプル化も期待される。さらにプロセス条件を緻密に制御することでエネルギー消費量の削減が期待される。

今後は「Sumitomo Process for eMethanol Production」¹¹⁾として、社外への技術ライセンスも視野に入れながら、社会実装に向けた取り組みを行う予定である。

この成果は、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）の補助事業（JPNP21021）において得られたものである。

引用文献

- 1) European Council, Fit for 55, <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> (参照2026/2/17)
- 2) European Commission, European Green Deal: Agreement reached on cutting maritime transport emissions by promoting sustainable fuels for shipping, (2023), https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1813 (参照2026/2/17)
- 3) Renewable Energy Liquefied for Tomorrow, (2026), <https://europeanenergy.com/kasso/> (参照2026/2/26)
- 4) Carbon Recycling International HP, <https://carbonrecycling.com/> (参照2026/2/26)
- 5) 室井 高城, “触媒からみる炭素循環（カーボンリサイクル）技術2021”, シーエムシー・リサーチ, (2021).
- 6) 小俣 光司 ほか, ペトロテック, 42(2), 108 (2019).
- 7) 北九州産業学術推進機構 JP 4487103 (2010).
- 8) “Process Economics Program Report Review 2020-07”, IHS Markit (2020).
- 9) JOGMEC, LNG・水素・アンモニアの温室効果ガス排出量及びCarbon Intensity 算定のための推奨作業指針（CI ガイドライン第2版）, (2023), https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/011_04_03.pdf (参照2026/3/9).
- 10) 住友化学(株), WO 2024/157578 A1.
- 11) Sumitomo Chemical Technology Licensing, <https://www.sumitomo-chem.co.jp/technology-licensing/> (参照2026/3/9).