

CO₂ を原料とした液体合成燃料の開発への取り組み

- ◇温室効果ガスの排出削減及び新たな資源の安定的確保という 2 つの課題解決を両立させる技術として、CO₂ を原料とした液体合成燃料が期待されている。
- ◇JPEC では、2020 年度より NEDO 研究開発事業に参画し、電解技術を用いた再エネ利用合成ガス製造と液体化石燃料に最も親和性が高い FT（フィッシャー・トロプシュ）合成を組み合わせた液体合成燃料一貫製造プロセス技術開発を開始した。
- ◇本レポートでは CO₂ を原料とした液体合成燃料の開発に係る要素技術の調査と課題の抽出を行い、今後の研究開発の方向性を具体化した 2020 年度 NEDO 調査事業の結果を中心に紹介する。

1. はじめに

2015 年に採択された「パリ協定」に基づく我が国の地球温暖化に対する取り組みとして、2020 年 10 月に「2050 年までに実質カーボンニュートラル（CN）を目指す」との方針が表明された。2050 年 CN 実現は極めて困難な課題であり、これまで以上に地球温暖化問題の解決に貢献できる非連続なイノベーションが求められている。

液体化石燃料が使用される自動車、航空機、船舶等移動排出源の脱炭素化を目指すには、液体化石燃料の使用量削減等と併せて、燃料の脱炭素化が必要である。液体燃料はエネルギー密度が高く可搬性に優れている特徴を有しており、高密度のエネルギーを必要とする電動化や水素などの代替燃料等を利用することが難しい大型車、船舶、航空機において、今後も一定量の需要を担うことが想定される。そのため、これら輸送用燃料として使用される液体燃料の脱炭素化に挑戦する意義は極めて大きい。

1. はじめに
2. 液体合成燃料の定義と CO₂ の原料化
3. 液体合成燃料製造に係るカーボンリサイクル技術
4. FT 反応技術による液体合成燃料製造
5. 再エネ電力を利用した液体合成燃料の一貫製造プロセス
6. まとめ

輸送用燃料として使用される液体燃料の脱炭素化技術として、火力発電等から回収した CO₂ を有効活用し、液体合成燃料を製造する技術が注目されている。液体化石燃料（ガソリン、軽油、ジェット燃料等）の代替品となる液体合成燃料は、既存の石油サプライチェーンを活用できることから供給インフラの整備が容易であり、新規インフラ構築への投資を抑制できる。図 1 に CO₂ を炭素資源として捉え、工場等からの排出 CO₂ や大気中 CO₂ を回収し、液体合成燃料（カーボンリサイクル液体合成燃料）へと変換し、そして、内燃機関用燃料として再使用することで、温室効果ガスの排出削減に貢献する循環型社会を示した。

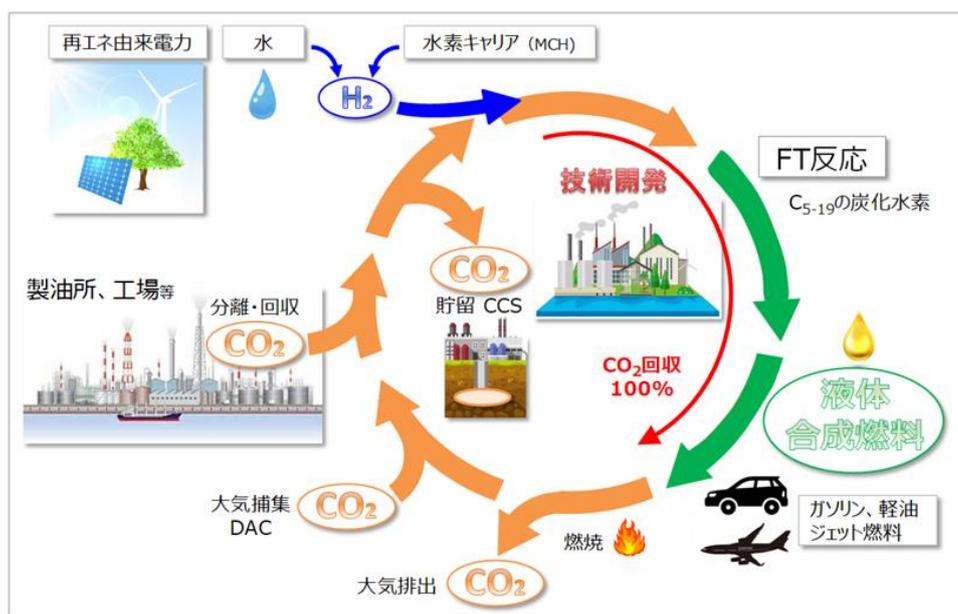
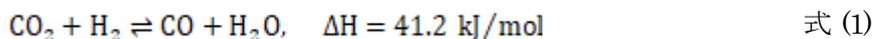


図1 液体合成燃料製造におけるCO₂の流れ

2. 液体合成燃料の定義とCO₂の原料化

液体合成燃料は合成ガスから得られた液状炭化水素を指すことが一般的であり、大別すると2種類存在する。すなわち、鉄、コバルト、ルテニウム等の触媒を用いるいわゆるフィッシャー・トロプシュ（FT）合成と、メタノール経由で炭化水素に転換させる方法である。このうち、FT合成は工業的には石炭や天然ガス等の化石資源からスチームリフォーミング（水蒸気改質）、ドライリフォーミング（CO₂改質）、部分酸化等といったプロセスにより製造される合成ガスを使用する。これに対して、本レポートで取り扱う液体合成燃料は、CO₂と水素の反応によって合成される液状炭化水素を指す。この時、一連の製造過程において多量のCO₂が排出されることがないように、使用する水素も従来の天然ガス等の化石資源由来ではなく、水電解水素等の再生可能エネルギー由来のH₂（グリーン水素）への見直しが求められている。

CO₂は炭化水素を燃焼した際の最終生成物の一つであり、反応性の低い非常に安定な物質である。CO₂を原料として液体合成燃料を製造するには、反応性の高い合成ガスに転換する必要がある。この時、式(1)に示す水素を起点としたCO₂をCOに還元する逆シフト (RWGS ; Reverse Water Gas Shift) 反応が重要な役割を果たす。



RWGS 反応はシフト反応の逆反応で良く知られた吸熱平衡反応であるが、この平衡反応は同時にメタンリフォーミングの逆反応 (平衡反応) が進行するため、CO₂ 転化率 (還元率) だけでなく CO 選択性の面からも望まれる組成の合成ガス製造条件を設定する必要がある。

FT 合成に適した合成ガス組成 H₂/CO 比は、反応器の種類や触媒種によって異なるが、通常 2 付近であることが望ましく、かつ CO₂ 還元においては未反応の CO₂ が少ない、すなわち CO₂ 転化率と CO 選択性が高いことが重要な要件となる。H₂/CO₂ 比が大きいとメタン選択性が増加し、反対に H₂/CO 比が小さくなると、CO 不均化が起こり炭素析出による触媒劣化が顕著となる。

RWGS 平衡反応では原料の H₂O/CO₂ 比にかかわらず CO₂ 転化率と CO 選択率は温度とともに高くなる。H₂/CO 比は CO₂ 転化率が高くなる高温ほど低くなり (CO 濃度が高くなり)、原料の H₂O/CO₂ 比に応じて変化する。

3. 液体合成燃料製造に係るカーボンリサイクル技術

合成ガス製造に係るカーボンリサイクル技術としては、前述の RWGS による合成ガス製造に加えて、図 2 に示したアルカリ形水電解、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、CO₂ と高温水蒸気の固体酸化物形電気分解セル (SOEC ; Solid Oxide Electrolysis Cell) 共電解による合成ガス製造、CO₂ を直接 CO に還元する PEEC 形 CO₂ 電解による CO 製造、合成ガスを経由せずに CO₂ と水素から直接炭化水素を合成する直接 FT 合成技術 (Direct-FT) 等が注目されている。

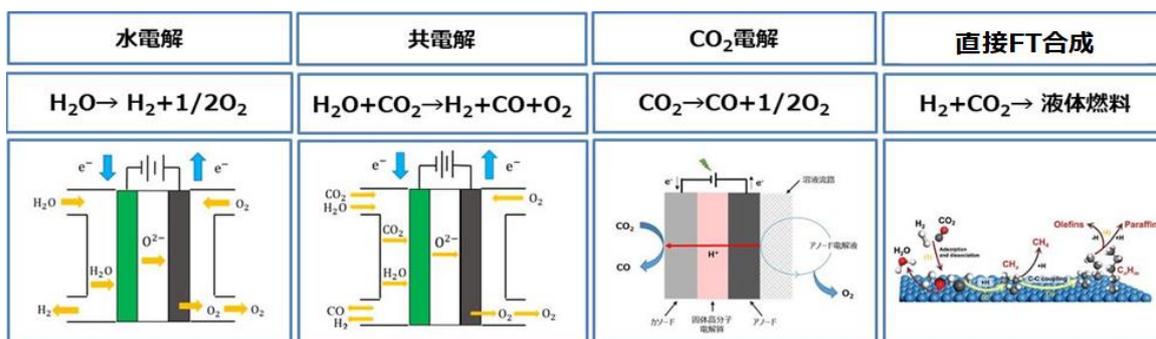
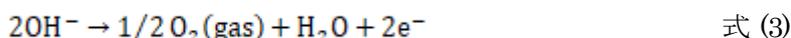
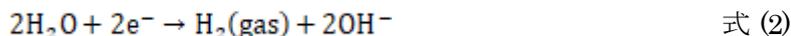


図 2 液体合成燃料製造に係るカーボンリサイクル技術

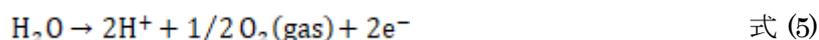
3-1 水電解技術を用いた水素製造

水電解技術は、アルカリ形、PEEC 形、SOEC 形の 3 種類に大別される。アルカリ形水電解はすでに実用化段階である。20~40 wt.%の KOH 溶液中に電極を浸し、電圧を印加することで以下の式(2)(3)に

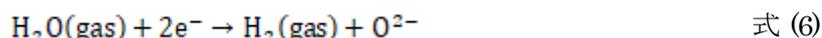
より水を分解する。



電解時の温度は 50～80℃程度、電流密度は 0.2～0.6 A cm⁻²、セル電圧は 1.8～2.4 V で行われ、スタックの耐久性は～90,000 時間程度とされている。電解質として固体高分子膜を用いる PEEC 形水電解もアルカリ水電解と同様にすでに実用化段階にある。反応式は以下式(4)および式(5)のとおりで、温度は室温～90℃程度、電流密度は 1.0～2.0 A cm⁻²、セル電圧は 1.8～2.0 V で行われる。



SOEC 形水蒸気電解は、高効率化が可能なデバイスとして期待されている。電解質として固体酸化物セラミックスを用い、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 700～1,000℃程度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 などが用いられる。反応式は以下の式(6)(7)のとおりである。電流密度は 0.3～2.0 A cm⁻²、セル電圧は 0.7～1.5 V、スタックの耐久性は～10,000 時間という報告がある。



3-2 SOEC を用いた CO₂ と水蒸気の共電解

SOEC を用いた CO₂ と水蒸気の共電解は、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(8)～(10)にカソードでの反応を、式(11)にアノードでの反応を示す。

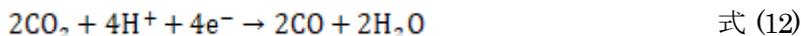


SOEC に用いるセル・スタックには、固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の開発で国内外に蓄積された技術と知見を転用することができる。さらに、電解に必要な反応エネルギー ΔH が電気エネルギー ΔG と熱エネルギー TΔS から与えられることから、高効率化が期待できる。ただし、高温作動させるシステムの大型化や電解運転では、発電運転とは異なる劣化現象や部材の高温腐食が懸念されている他、CO₂ と水蒸気の共電解においては、炭素析出の可能性など特有の問題の発生も懸念されているが、常圧、800℃で運転することによりメタンの生成及び炭素析出抑制できることが報告されている。また、原料組成 H₂O/CO₂=2.0 付近、利用率 80%程度の条件下にて、FT 原料として好ましい H₂/CO=2.0 付近の合成ガスを製造できる可能性を有する。

3-3 PEEC を用いた CO₂ 電解技術

PEEC 形 CO₂ 電解および液体電解質形 CO₂ 電解の反応セルは、CO₂ を還元するカソード、OH⁻を酸

化するアノード、固体高分子材料を用いた電解質（イオン交換膜）、または液体電解質から構成される。カソードおよびアノードでの反応式を式(12)(13)に示す。



PEEC 形 CO₂ 電解のメリットとしては、運転温度が低温であることから、触媒やセル部材に求められる要件が緩和されるため、高い耐久性を示す可能性があり、また設備投資の低減にもつながる可能性がある。また、PEEC 形水電解の応答性の良さといったメリットや PEEC 形水電解の蓄積技術を取り入れられる可能性がある。一方、PEEC 形 CO₂ 電解の課題は、前述の SOEC 形と比較するとエネルギー効率が低いことである。また、セルの大型化などに課題を残す。

3-4 直接 FT 合成

CO₂ と水素から液体合成燃料を製造する方法は前述の通り、逆シフト (RWGS) 反応により CO に還元して合成ガスを製造し、その合成ガスから FT (Fischer-Tropsch) 合成で液状炭化水素へ転換する方法と、CO₂ と水素からメタノールを経由し、メタノールから MTG (Methanol to Gasoline) 法で液状炭化水素に転換する方法である。

MTG 法は多量の芳香族を含むガソリン留分が主な生成物であるためジェット燃料や軽油留分がほとんど得られない。したがって、これらの液体合成燃料を製造する方法は、逆シフト反応 (RWGS 反応) + FT 合成プロセスしかないのが現状である。

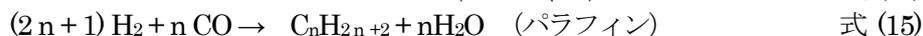
このプロセスの課題は、合成ガス中に CO₂ が含まれると、FT 合成においてメタンが副生する可能性が高いことが挙げられる。RWGS で CO₂ を出来るだけ低減することが望まれるが、RWGS は前述の通り熱化学平衡制約にあるため、高温で十分な活性、及び耐久性を示す RWGS 触媒の開発が課題となっている。

RWGS 反応+FT 合成に代わる、CO₂ からジェット燃料等の炭化水素を得る手法として、CO₂ と水素を直接反応させて、炭化水素を得る、直接 FT (Direct-FT) 反応の研究が近年盛んになってきている。これは RWGS 反応と FT 合成を 1 つの反応器、1 種類の触媒で実施するもので、反応温度は 300~400°C 程度と RWGS の平衡温度より低く、触媒の耐久性、エネルギー効率、建設コスト等において RWGS 反応+FT 合成に比べ、優位になると期待されている。ただし、現在は要素研究レベルで、パイロット規模の実証研究の例はない。

4. FT 反応技術による液体合成燃料製造

FT 合成は、1926 年にドイツにて Fischer が石炭合成ガスから液体燃料を合成したことに始まる。

FT 合成は重合反応であり、生成する炭化水素は CH₄ から C₄ までの軽質ガス (オフガス)、C₅+からワックスを含む液体炭化水素が幅広く得られる。反応式を式(14)(15)に示す。



液体炭化水素の分布は、炭素原子数 n に対する炭化水素の重量分率 W_n の対数プロットした Anderson-Schulz-Flory (ASF) プロットから得られる式(16)に示す直線関係で良く整理される。

$$\log(W_n/n) = n \log \alpha + \log\{(1-\alpha)/\alpha\} \quad \text{式 (16)}$$

上記の α は連鎖成長確率と呼ばれ、炭素原子数 n の炭化水素の $n=1$ から n への成長速度 r_p と n から $n+1$ への成長速度 r_{n+1} は炭素数に依存せず、一定であるとして導かれる分布式(17)によって求められる。一般的には、触媒系や反応器等の条件によって異なるが $\alpha=0.65\sim 0.85$ が好ましい条件とされている。

$$\alpha = r_p / (r_p + r_{n+1}) \quad \text{式 (17)}$$

FT 反応の原料である合成ガス (CO、H₂) が触媒表面に乖離吸着し、炭素同士がカップリングすることで反応が進行するが、上記の ASF 分布則に沿って合成された炭化水素は軽質オレフィンから重質ワックスまでの幅広い分布を持っており、微量ではあるがアルデヒドを含む含酸素化合物等の不純物が副生する。

4-1 商業化事例

FT 合成は、1926 年にドイツにて Fischer が石炭合成ガスから液体燃料を合成したことに始まる。その後、Sasol(南アフリカ)、Shell を中心に石炭や天然ガスを原料として、固定流動床、多管熱交換型固定床や懸濁床の反応器を用いて、南アフリカ、マレーシア、カタール、中国で工業化されている。

触媒活性金属としては、Fe、Ni、Co、Ru が知られており、CO が水素化されたカルベン (-CH₂-) が触媒表面で生成して直線的な連鎖重合することにより α オレフィン、水素化によりパラフィンが生成する。生成物は、ASF 分布に沿ったカーボン組成になる。Fe 系触媒は高温 (350°C) で用いられ主にガソリン成分が生成されるが、軽質オレフィンや含酸素化合物が副生する。Co 系触媒は高活性であるため低温 (250°C) で用いられ、軽油留分やワックスが製造される。Shell の SMDS (Shell Middle Distillate Synthesis) では、メタンの副生を抑えるためにカーボン数の多い重質油成分を多く生成させ、ワックスを分離した後に水素化分解により軽油が製造されている。

なお、商業化事例ではないが、日本においても日本 GTL 技術研究組合が設立され、2002 年北海道、2009 年新潟とパイロット運転が行われた。

4-2 小型 FT 合成プラントの開発動向

従来の FT 合成プラントでは、天然ガス等の化石炭素資源から合成ガスを取り出すための大規模な水蒸気メタン改質(SMR)/自己熱改質 (ATR) 反応器と FT 反応器が必要であり、多額の設備投資を回収するためには大量の液体合成燃料を製造できる大型プラントのみが経済的に実現可能であった。しかし現在では、Oberon Fuels 社、Greyrock Energy 社、CompactGTL 社、Velocys 社、Gas Technologies LLC 社といった複数の新興企業でコンパクトタイプの反応器 (マイクロリアクター) を利用した小規模プロジェクトを目指した技術開発が進展しており、注目を集めている。

商業規模の小型 FT 合成プラントの実現に近い企業として、特に CompactGTL 社、Velocys 社、Greyrock 社が挙げられる。2006 年に創設された CompactGTL 社が開発を進めている FT プロセスは、マイクロリアクターから構成される反応プロセスを 2 ステージで構成し、2 ステージ式反応器を複数個並

列に接続したマイクロプラントを設計している。これにより触媒寿命が延び、運転コストの低減に成功している。また、生成物の一部を ATR へのリサイクルに回すことで 90% を超える全体の変換効率および 74,000 時間を超える連続運転の実績を有すると公表している。カザフスタンにマイクロリアクターを用いた商用 GTL プラントを建設しており、2,500 BPD の合成原油の生産能力を有する。

Velocys 社は 2001 年に創設され、2010 年にオーストリアで最初のパイロットプラントのデモンストレーションを実施した。商業用反応器と触媒の製造に成功しており、オクラホマ州に設置した GTL プラントでは 200 BPD の生産能力を実現している。また、Velocys 社では木材のバイオマス燃料を液体燃料に転換する BTL 事業への展開も行っている。

Greyrock Energy 社では、自社で開発した技術について Rock Mountain GTL 社、Expander Energy 社等と技術供給契約を締結することで業務展開を行っている。2011-2013 年には、オハイオ州トレドのプラントで 30BPD の燃料製造に成功している。また、Greyrock 社は、開発する Direct Fuel ProductionTM は 50 BPD から 5,000 BPD の生産能力を有すると公表している。

小型の FT プラントは、再生可能エネルギー製造プラントに地理的に隣接したエリアにも建設することが可能であるため、再生可能エネルギーの普及促進に貢献できると考えられる。また、小型プラントは建設費コストが少なく建設期間の短縮も期待されることから、新規設備導入に関するリスクも低減する。再生可能エネルギー製造プラントと小型 FT プラントを消費地近傍に設置することによる CO₂ フリー液体合成燃料の地産地消型の新たなビジネスモデルの創出にも繋がると考えられる。

4-3 FT 合成触媒の開発動向

FT 合成の一つの課題として、生成するワックスの輸送用液体燃料への転換が挙げられる。ワックスを分離し、その後の高圧条件での水素化分解によって各内燃機関に合わせた炭素数分布へ制御するには、多くのエネルギーが必要であり、汎用性の観点からも液体燃料として回収できるのが好ましい。近年の FT 反応の技術開発では、図 3 のイメージ図に示すような副生するメタンと CO₂ の生成を抑制しつつ、ASF 分布に準じない、連鎖成長の制御によりワックスではなく燃料収率の向上を目的とした FT 合成の研究開発が期待されている。しかしながら、現在のところ ASF 分布則を破ったという報告は非常に少なく、新たな研究のアプローチが求められている。

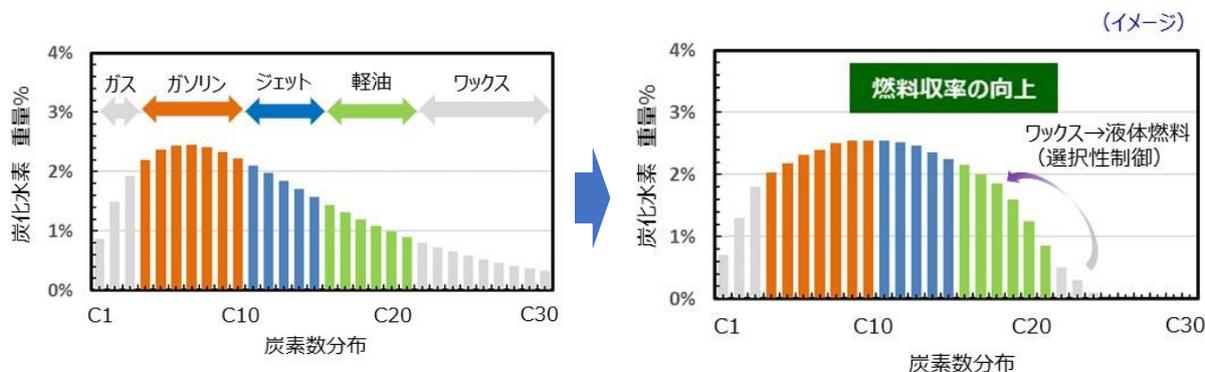


図 3 FT 合成における選択性制御による液体収率の向上 (イメージ)

FT 合成では無機材料を中心として多様な触媒・助触媒・担体の組合せが研究されている（表 1）。触媒は主に単体金属、合金、金属酸化物・炭化物で報告されている。特に Ru は助触媒を必要とせず低温で長鎖炭化水素を生成する優れた触媒活性を示すものの、高価であることから実用面での課題は多い。また Ni は触媒活性を示すが水素化活性が高いためメタンを生成しやすく、液体燃料の製造には不向きである。そのため比較的安価で高活性な Fe、Co 系触媒が最も代表的な FT 触媒となっている。Fe 触媒は広い温度領域の FT 反応に対応しており、Co 触媒に比べ安価だが軽質オレフィンの選択性が高いという特徴がある。一方、Co 触媒は比較的高価だが低温での FT 反応に対応し長鎖パラフィンの選択性が高いことが知られている。

助触媒は FT 触媒活性を最適化するために導入され、少量の助触媒を添加することで活性や生成物の選択性を制御することができる。Fe、Co 触媒に対して金属酸化物、遷移金属、アルカリ金属、希土類金属が用いられる事例が多い。

担体はナノ粒子上の Fe、Co の安定的な反応場を提供する。多孔質材料が用いられ、表面構造や細孔サイズの調整により、触媒粒子の分散性や反応物・生成物の拡散係数の制御が可能となる。また、FT 反応では生成物の分布が炭化水素の連鎖成長率によって支配されている（ASF 則）。そのため、所望の質量分布を持つ炭化水素を直接合成することは困難であると考えられてきた。しかし、近年、触媒・助触媒・担体を組合せることで、合成ガスの乖離吸着、逆シフト（RWGS : Reverse Water Gas Shift）、連鎖成長、水素化分解等の複数の触媒反応を連鎖発生させることにより、ASF 則を見かけ上、破るような FT 触媒が開発され、大きな注目を集めている。

表 1 主要な FT 反応触媒の報告事例

活性金属	助触媒		担体	
	貴金属、希土類	遷移金属、アルカリ金属	酸化物	ゼオライト
Fe, Co, Ru, Ni, Os	Pt, Pd, Ru, Re, La, Ce	Na, K, Cu, Ru, Mn, Ca, Ta, V, Zr, Mo, Zn, Cr	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , SiO ₂ , ZrO ₂ , MgO	ZSM-5, MCM-22, ITQ-2, ITQ-6

カーボンリサイクル技術による液体合成燃料は、CO₂ 還元工程で多くのエネルギー投入が必要となるため、プロセス全体のエネルギー効率を上げるためには、製造に係るエネルギーをセーブするか、FT 合成における液体燃料収率を上げるか、一方あるいはその両方が求められる。すなわち、製造効率の向上のための具体的な手段として、合成ガスの転化率を上げて未反応を少なくする、オフガス（C₄ 以下の軽質ガス）生成を抑制し液収率を高める（C₅₊ 選択性向上）、燃料ガスのプロセスでの有効利用および反応熱を回収利用する等が挙げられる。

5. 再エネ電力を利用した液体合成燃料の一貫製造プロセス

再エネ電力を利用した CO₂ からの液体燃料の一貫製造プロセスの研究開発においては、合成ガス製造と FT 合成からなるプロセス全体の効率等を見据えることが重要であり、欧州の先行事例（Sunfire 社）

に見られるように、吸熱反応の合成ガス製造工程と発熱反応である FT 合成のインテグレーションにおいて反応熱の授受をしっかりと行い、全体システムの効率を高めることが重要なエンジニアリング的技術要素となる。

5-1 再エネ電力を利用した合成ガス製造

既に実用段階にある PEEC 形水電解+RWGS 反応と、高温水蒸気と CO₂ の SOEC 共電解の二つの合成ガス製造における投入エネルギーと合成ガスの平衡組成に関しては、SOEC は作動温度が 650°C～850°C と高く、水蒸気電解電圧が 1.36V 程度で、従来の 2.0V 付近作動の PEEC 水電解より 3 割ほど高率に水素を製造することができる。そのため、両者の比較において、SOEC 共電解による合成ガス製造で消費電力が小さい。また、RWGS 反応による H₂/CO=2 付近の合成ガスを製造するケースと比べて、SOEC 共電解では 100°C ほど低温側に操作点があり、残存 CO₂ 濃度も低く、FT 合成により適した組成の合成ガスを高効率で得ることが出来る。

5-2 FT 合成による液体燃料への転換

液体燃料一貫製造プロセスの概念設計と製造効率に関して、FT 合成の物質・エネルギー収支は文献情報を一例として用いて試算した。ここでは FT 合成の CO 転化率は約 78% で、液体燃料としてカウントする C₅₊ 収率は 58%、残りは C₄ 以下の軽質ガス（オフガス）である。

5-3 CO₂ からの液体燃料一貫製造プロセスの概念設計

本プロセスの基本概念は、CO₂ を原料とし製造過程で CO₂ を排出しない再エネ電力を利用する液体燃料一貫製造技術である。CO₂ の還元工程で多くのエネルギーが必要となるため、プロセス全体の効率向上には、製造に係るエネルギー投入量の低減と液体燃料の収率向上が求められる。したがって、図 4 に示したイメージフローの通り、本プロセスの概念設計では吸熱反応である合成ガス製造工程に対する FT 回収熱利用を基本的なエンジニアリング的手法として取り入れている。液体燃料と一緒に FT 合成で副生される C₄ 以下の軽質ガス（オフガス）は未反応の合成ガスとともに、SOEC 共電解では発電用の燃料ガスとして使用する想定とした。燃焼排ガス中の CO₂ は回収し原料に戻すことにより、製造過程で CO₂ は排出されない。この場合、液体燃料としてプロセス系外にアウトプットされる分の CO₂ のみを原料としてメイクアップする。以上により、概念設計を行う本プロセスの CO₂ 収支は原則 100% であり、製造段階では CO₂ が排出されない CO₂ エミッションフリーのプロセスとなる。

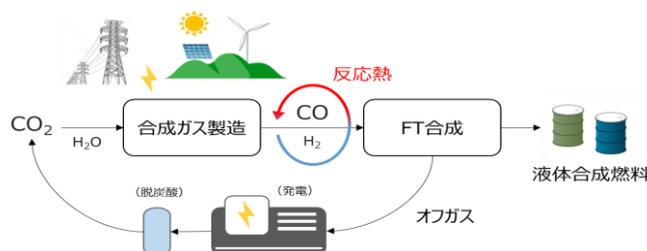


図 4 CO₂ からの液体燃料一貫製造プロセスの基本概念（イメージフロー）

具体的な概念設計の流れとしては、ブロック・フローを作成し、原料組成と流量、投入エネルギー（電気及び熱）等のデータを入力し、FT 反応熱を含む熱物質収支から製造効率や CO₂ 収支の試算を行った。

【液体燃料の製造効率（総合）】 = 液体合成燃料熱量 / {消費電力（電解+動力） - オフガス発電電力}

【CO₂ 収支（総合）】 = 液体合成燃料中の炭素 / 原料としてプロセスに投入した炭素

今回の概念設計の生産規模は、平均的な製油所から排出される CO₂ 量をイメージし、FT 合成油で 600BPD とした。合成ガス製造から FT 合成までの液体燃料の製造効率を試算したところ、PEEC 水電解+RWGS 反応では約 32%、SOEC 共電解では約 45%であった。エネルギーバランスで整理すると、どちらの一貫製造プロセスとも CO₂ から液体燃料への転換は投入エネルギーの半分以下となった。PEEC 水電解+逆シフト反応で製造効率が低くなっている要因としては、水素製造に係る消費電力（電解）が SOEC 共電解と比べて大きいことが挙げられる。なお、CO₂ 収支については、FT オフガスから回収した CO₂ を回収・リサイクルして原料として使用しているため、再エネ由来電力を用いる場合には CO₂ 収支は 100%となる。

5-4 液体燃料一貫製造プロセスの技術課題

CO₂ からの液体燃料一貫製造プロセスの製造効率が相対的に高かった SOEC 共電解+FT 合成に関して、もう一段高い製造効率を実現させる方法を検討するため技術課題を検討した。SOEC 共電解が PEEC 水電解+RWGS 反応と比較して相対的に高い製造効率が得られる理由としては、電解に必要なエネルギーを電気と熱から得ることができるため、消費電力を少なくできること、FT 反応熱を合成ガス製造工程で利用できていること、オフガス発電で電解での消費電力を補うことができること等が挙げられる。前述の通り、PEEC 水電解+RWGS では水電解による水素製造での消費電力が多いことが製造効率に対するマイナス要因となる。

一方、合成ガス工程で利用される FT 反応熱に関しては未回収分があるので、この回収熱を利用した合成ガスからの CO₂ 除去も可能と考えられる。FT 合成においては組成制御、すなわち C₄ 以下の軽質ガスの選択性抑制及び燃料収率の向上、触媒性能やプロセス面の改良による CO 転化率の向上等、といった技術課題への取り組みが製造効率の向上に直接寄与すると考えられる。

5-5 CO₂ からの液体合成燃料一貫製造に係る経済性評価

上記の PEEC 水電解+RWGS 反応+FT 合成と SOEC 共電解+FT 合成プロセスの液体燃料製造に係る経済性評価を行った。ここでは、製造規模は 3 万 BPD、CO₂ 源は製造拠点と隣接した火力発電からの排気回収を前提とした。水素源は再エネ電力価格に依存する製造コストと圧縮・貯蔵に係るコストのみで、輸送コストは考慮していない。PEEC 水電解と SOEC 共電解コストはパラメーターとして加えている。電力価格は 2 円～10 円/kWh で試算を行ったが、製造コストは電力価格に依存し、2 円/kWh で PEEC 水電解では 183 円/L、SOEC 共電解では 125 円/L と試算された。製造コストはプラントの償却コスト、人件費・メンテ費等の変動費、プラント償却費から構成されるが、電力コストが最も多くの部分を占め

る。また、製造効率の違いがコストに及ぼす影響も大きく、電力価格 10 円/kWh では PEEC 水電解が 399 円/L に対して、製造効率が高い共電解プロセスでは 272 円と約 130 円/L 低くなった。

以上のことから、合成燃料の製造コストには電力価格が最も大きく影響すること、製造コスト低減のためには製造効率の向上が重要な要素であることが分かった。なお、これらに加え、変動費やプラントコストの低減も重要な開発要素となる。

6. まとめ

人々の生活に欠かせない有用な炭化水素を利用し続けるために、燃料の脱炭素化にかかる期待は大きく、2050 年 CN 社会においてこれを支えるカーボンリサイクル技術が担う役割は極めて大きい。化石燃料、CO₂ が悪者のように捉えられることもあるが、製油所は CN 社会の実現において中心的な役割を担う基地となる可能性を有する。バイオ燃料を含む合成燃料の社会実装に向けた石油産業のノウハウや既存のアセットの活用、水素のサプライチェーン、CCUS の拠点としての活用など、大きなポテンシャルがあると考えられる。JPEC においても NEDO 研究開発事業に参画し、将来の CN 社会に向けた、イノベーション創出のための基盤技術の確立や機会の創出に貢献したい。

本レポートで述べた液体合成燃料の一貫製造技術は、既存の液体化石燃料へのドロップインを想定した場合に、炭化水素製造に最も親和性が高いと考えられる FT 反応技術をベースに、温室効果ガスの排出削減へ直接貢献する CO₂ 原料化、CO₂ フリー製造プロセスに係るカーボンリサイクル技術を利用した高効率な燃料製造技術である。研究開発の進展に向け、今後とも関係機関と密接に連携して取り組んでいく。

(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

本資料の一部は、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「CO₂ 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」(2019 年～2020 年) によるものです。無断転載、複製を禁止します。

Copyright 2022 Japan Petroleum Energy Center all rights reserved