

特集

石油関連産業・技術の
GX最前線

製油所の脱炭素化に向けた JPECの取組みについて

加藤 洋・秋本 淳

JPEC's Efforts Toward Decarbonizing Oil Refineries

1. はじめに

世界的に地球温暖化による気候変動が深刻化しており、エネルギー供給の一翼を担う石油産業においても2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向けた取組みが求められている。

一方、エネルギーは生活に欠かすことができないことから、石油産業には、現在の原油処理から将来のカーボンニュートラルエネルギー供給までの長期に渡るトランジション過程においてもエネルギーの脱炭素化と安定供給を両立することが求められる。

このような状況を踏まえ、JPECでは、2050年のカーボンニュートラル実現に向けた製油所の転換シナリオを検討したので、概要を紹介する。また、JPECが現在カーボンニュートラルに向けて行っている取組みの中から、トランジション過程において重要な「製油所の脱炭素化」に向けた技術開発についても併せて紹介する。

2. カーボンニュートラル社会に向けた製油所転換シナリオ

石油産業におけるカーボンニュートラル社会に向けた対応として、原油由来の液体燃料の製造拠点である製油所を、水素等の新たなカーボンニュートラルエネルギーの供給拠点に転換していくことが想定されている。一方、エネルギーセキュリティの観点からは、供給安定性を確保しながら段階的に原油処理量を削減し、バイオマスや廃プラスチックを原料とする低炭素原料に切り替えていくことが求

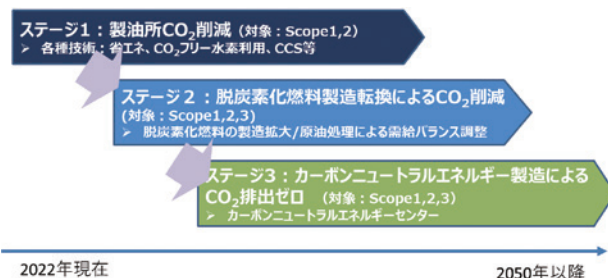


図1 カーボンニュートラル社会に向けた製油所の3つのステージ ※図中Scope1,2,3は国際基準「GHGプロトコル」で定義

められる。そこで、製油所の転換シナリオを考えるため、図1に示す3つのステージに分けて検討を行った。

この検討においては、2030年および2030年以降のCO₂削減に向けて各施策の影響を定量的に把握するため、日本の製油所を1つに統合した統合モデル製油所を想定し、検討を行った。この統合モデル製油所では、現在の各製油所を参考に装置構成や規模などを設定し、各装置でのエネルギー消費や製油所から排出されるCO₂量などを見積もった。さらに、図1の各ステージにおいて装置構成を変化させたときのエネルギー消費やCO₂排出に及ぼす影響を評価した。

初めにステージ1として、製油所の製造時のCO₂削減について検討した。製油所のエネルギー効率の向上、ボイラー燃料などの低炭素化、再生可能電力の導入、グリーン水素（再生可能エネルギーで水分解して作る水素）の導入、CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）の導入などの対応を行った時のCO₂削減効果を見積もった結果を表1に示す。この結果より、ステージ1で製油所のCO₂排出量削減効果が高い対策はグリーン水素利用やCCSであったが、これらの本格普



Hiroshi KATO
1993年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修了
現在 一般財団法人カーボンニュートラル燃料技術センター 製造プロセス技術部 部長
連絡先；〒136-0082 東京都江東区新木場2丁目3番8号
E-mail hi-kato@pecj.or.jp

2024年7月26日受理



Jun AKIMOTO
1991年 早稲田大学理工学研究科機械工学専攻修士課程修了
現在 一般財団法人エネルギー総合工学研究所 カーボンニュートラル技術センター 副センター長
連絡先；〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2 新橋SYビル6階
E-mail j-akimoto@iae.or.jp

表1 ステージ1における個別対策とCO₂削減率

個別対策項目	CO ₂ 削減率 (%)	分類	実現上の課題
ベース	0	-	
①-A 製油所全体の省エネルギー(全体の省エネ3%)	2	エネルギー効率	・効果<コスト ・運転制約の緩和見直し (要安全確認)
①-B 常圧蒸留装置周りの汚れ制御(常圧蒸留装置の省エネ25%)	5		
①-C FCCのコークス制御(FCC装置の省エネ10%)	3		
② 100%LNG ^{※2}	4	燃料の低炭素化	・効果<コスト
③-A 電力のみ再生可能電力100% ^{※2}	3	再生可能電力	・効果<コスト ・電源安定化
③-B 燃料も含め全て再生可能電力100%	56		
④ 再生可能電力による電解水素製造またはグリーン水素輸入100%	17	グリーン水素導入	・投資コスト ・輸送コスト
⑤-A 水素製造時に分離されるCO ₂ のみ回収	10	CCS導入	・投資コスト ・低濃度CO ₂ 回収技術
⑤-B 水素製造時に分離されるCO ₂ +燃焼排ガスからCO ₂ を10%回収	19		
⑤-C 水素製造時に分離されるCO ₂ +燃焼排ガスからCO ₂ を50%回収	56		

※1: 個々の対策における削減率は、理想的な数値(技術的困難さや設備投資等の経済性は考慮せず)

※2: 製油所ガスの対応要

- ・ 反応の特徴; 脂肪酸エステル(グリセリド)の水素化処理による脱炭素反応

$$C_3H_5O_3(COC_nH_{2n+1})_3 + 12H_2 \longrightarrow 3C_{n+1}H_{2n+4} + 6H_2O + C_3H_8$$
- ※多量の水素が必要(炭化水素1分子に対し、4分子の水素が必要)

- ・ 共処理の位置;

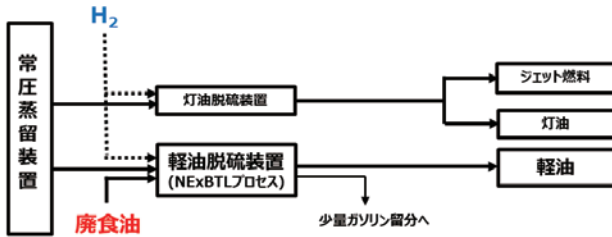


図2 ステージ2における共処理効果の前提条件

及は2030年以降と考えられるため、製油所の製造方法を見直すだけで石油産業において政府目標の2030年CO₂46%削減を実現することは困難であることが予想された。

次に、ステージ2として、低炭素原料と原油の「共処理(Co-Processing)」により脱炭素化燃料を製造した場合のCO₂削減効果について検討した。ケースとして廃食油を軽油脱硫装置の入口に混合し共処理することを想定した。廃食油の混合比率は、現在海外で計画されている最も高い40%とした。プロセスデータとしてはNeste社バイオディーゼル燃料プロセスである「NEXBTLプロセス」を参考にした。

図2に共処理の前提条件について記載した。その結果、表2に示すように製造時のCO₂排出量(Scope1, 2)は、原油のみを処理した時に比べて共処理を行うことにより増加した。これは共処理において大量の水素が必要になるためであり、製油所の水素製造装置の稼働が増加したためである。水素の調達とともに、グリーン水素の導入などにより製造時のCO₂を抑制することが課題となる。一方、製造～使用のトータル(Scope1, 2, 3)で見るとCO₂削減量が3600万tと大きく、製造時に排出されるCO₂とほぼ同等の削減効果があることが分かった。つまり、ステージ1で対応するどの施策よりも大きな削減効果と見積もられた。

以上の結果より、ステージ2での共処理技術による脱炭

表2 共処理によるCO₂削減効果試算結果

項目	原油処理(ベース)	廃食油共処理ケース	増減量
Scope 1,2 (自社)	34	40	6
Scope 3 (下流)	378	336	▲42
Scope 1,2,3 (全体)	412	376	▲36

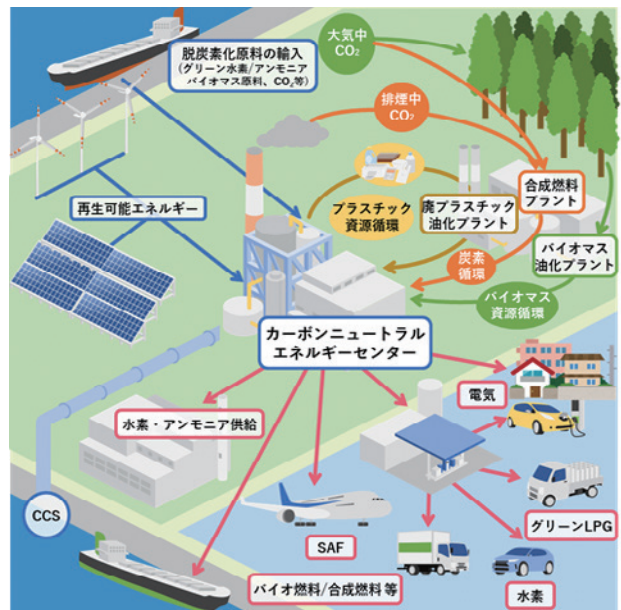


図3 カーボンニュートラルエネルギーセンターのイメージ

素化燃料製造対応を先行させ、ステージ1での製油所CO₂削減は大幅な削減技術導入が可能となった時期に実施することが適切と考えられる。一方、共処理を導入するためには、技術課題だけではなく、製造時にCO₂が増加し製品使用時に排出されるCO₂が削減されることを考慮した制度作り、海外も含めて取り合いとなっている廃食油などの脱炭素燃料の十分な確保、水素化処理に必要な水素の調達など課題も多い。早期にこれらの課題解決に取り組む必要がある。

ステージ3では、カーボンニュートラル社会における石油産業の将来ビジョンとして液体燃料以外の水素や再生可能電力等をあらゆるエネルギーを供給するカーボンニュートラルエネルギーセンターへの転換を想定した。また、液体燃料の製造を継続する製油所は、バイオ資源を活用した脱炭素燃料や大気から回収したCO₂を原料とした合成燃料の製造、プラスチック資源を再び化学品とするカーボンリサイクル等を行う拠点を転換し、燃料や化学品の脱炭素化を進めることで石油産業のカーボンニュートラル化に重要な役割を果たすことが出来ると考えられる(図3)。

3. 製油所の脱炭素化技術開発

JPECでは、カーボンニュートラルの実現に向け様々な技術開発を行っているが、その中の1つとして製油所の脱炭素化に向けた技術開発を行っている。製油所の脱炭素化を実現するためには、操業の更なる最適化によりCO₂排出量を削減するとともに、製油所生産品の脱炭素化を進め、低炭素排出型製油所への転換を図っていくことが必要である。

そこで、JPECでは、原油や原油留分の残渣分である重質油を分子の集合体として理解し、その詳細な組成と化学構造に基づいて反応性を解析・予測する技術であるペトロリオミクス技術等による原油/低炭素原料の詳細な成分情報やAI技術の活用によりこれらの課題解決に取り組んでいる。本報では、主要テーマの概要と研究進捗状況を紹介する。

3.1 製油所操業最適化によるCO₂低減(Scope1, 2対応)

製油所装置群の中でCO₂排出量が多い装置の1つである常圧蒸留装置(Crude Distillation Unit: CDU)の省エネを実現するため、CDU最適化制御の高度化、及び熱交換器のファウリング抑制に資する技術開発を行っている。

①CDU最適化制御の高度化技術開発

原油は、輸入時期等が違っても同一原油名でも性状が異なることが知られているが、原油評価には時間を要するため、CDUの最適化制御では同一原油の過去の評価結果を用いて行われていることが多く、ここに運転最適化(省エネ)の余地がある。

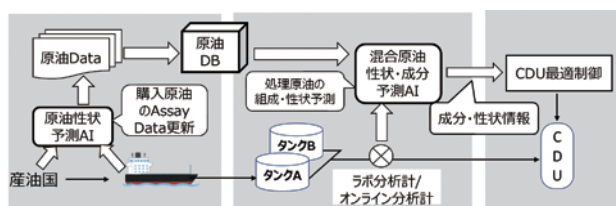


図4 CDU最適化制御の高度化技術開発

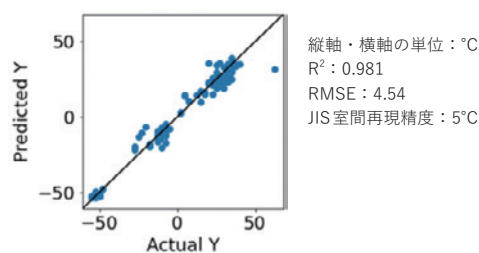


図5 原油/留分の流動点予測結果

そこで、本研究では、CDUで処理する原油の成分・性状を迅速に予測するAI技術、及びその予測結果をCDUの制御システムで活用する技術を開発することで最適化制御を高度化し、CDUの省エネを実現することを目指している(図4)。

JPECでは、どの製油所でも簡易かつ迅速に測定出来る分析項目を説明変数とし、原油及び留分の一般性状(約150項目)を予測するAIモデルの開発を行っている。その一例として、原油/留分の流動点を予測した結果を図5に示す。

今回の結果より、限られた機器分析データから開発中のAIモデルにより流動点を精度よく予測出来る見通しが得られた。また、その他の一般性状についても、多くの項目はAIモデルによりR²>0.7で予測出来る見込みである。

今後は、AIモデルで使用する説明変数の数を減らしながら予測精度を向上させる開発に取り組むと共に、本AIモデルをベースにCDUで処理する原油の一般性状・成分データを予測可能な技術開発を進めていく予定である。

②ファウリング抑制技術開発

原油予熱系熱交換器におけるファウリングは、CDU省エネ運転の阻害要因となっているが、ファウリングのメカニズムは十分に解明されていない。そこで、本研究では、ペトロリオミクス技術等を用いてファウリング物質の生成機構を検討すると共に、生成機構に基づき原油の違いによるファウリング挙動の違いが解析可能なモデルの開発を行っている。

模擬ファウリング物質を用いて行った検討の結果、無機硫黄存在下では原油予熱系熱交換器と同程度の温度でファウリング物質が生成することが分かった。今後、硫黄の作用機構等を検討し、ファウリング挙動が解析可能なモデルの構築に取り組んでいく。

3.2 製油所生産品の脱炭素化(Scope3対応)

本研究では、廃プラスチック再生油やバイオマス由来の原料油等の各種低炭素原料の活用を促進し、生産品の脱炭素化を実現するため、低炭素原料と原油由来の基材のCo-Processing技術開発、及びCo-Processingの原料となる低炭素原料の評価(DB構築)を行っている。

表3 低炭素原料の評価結果例

試験項目名	単位	PE・PP 再生油	PVC+3P 再生油	FAME (脂肪酸 メチルエステル)	HVO (水素化 機油)	木質 分解油	トール油
密度(15℃)	g/cm ³	0.7785	0.8022	0.8845	0.7805	1.2240	0.9060
動粘度(30℃)	mm ² /s	1.661	1.824	5.704	3.741	200	23
酸価	mgKOH/g	0.02	0.04	0.54	0.02	80.1	200
水分	質量ppm	52	151	192	8	29.6質量%	0.1
HAの不溶解分	質量%	-	-	-	-	44.1	0.1未満
残留炭素分	質量%	-	-	-	0.00 参考値	25.1	0.11
酸素	質量%	0.1	0.1	11.2	0.1未満	44.8	11.4
Cl	質量ppm	1.1	115.9	3	50 未満	100未満	100未満
無機塩素分	質量ppm	1 未満	47	1 未満	1 未満	50未満	50未満

①低炭素原料の評価

低炭素原料は、原料・製造法等を考慮して約30種類を入手・評価したが、触媒被毒や装置腐食の原因となる成分を多く含むものが存在していること(表3)、低炭素原料の入手時期によっては同じ原料種から作られた油であっても分析値が大きく異なることも確認されたことから、今後も評価を継続していく予定である。

また、低炭素原料のうちバイオマス由来の原料油については、成分分析技術が十分に確立されていないことから、今後は分析技術の確立に取り組み、成分情報のDBへの登録も進めていく予定である。

②Co-Processing技術開発

欧米等の製油所では、燃料油由来のCO₂排出量削減のため、バイオマス由来の原料油と石油系基材をCo-Processingする技術の導入が始まっている。しかし、現状は、バイオマス由来の原料油の混合比率は5~10%程度と低いことに加え、廃プラスチック再生油等も含めた多様な原料に対応出来る技術はまだ確立されていない。

そこで、本研究では、低炭素原料と原油由来の基材を図6に示す装置で共処理し、持続可能な航空燃料(SAF)や石化原料等今後需要増が見込まれる製品を製造するための技術開発を行っている。

石油系に対する低炭素原料の混合比率としては、世界最高レベルである40%を目指しており、現在モデル化合物

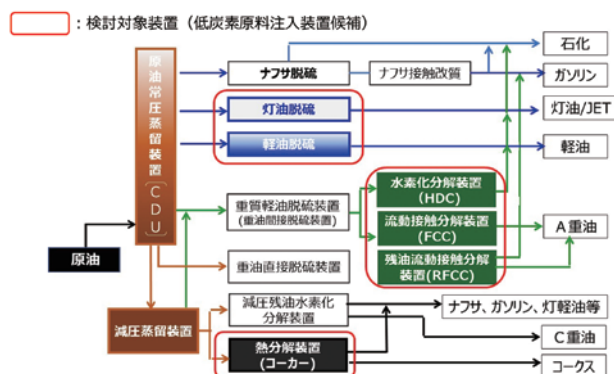


図6 本技術開発におけるCo-Processing検討対象装置

を用いた反応評価試験等を実施している。

③Co-Processing技術の導入・利用拡大に向けた課題

Co-Processingは、原油由来の原料と低炭素原料を混合処理する技術であり、既存の製油所装置を利用出来る利点がある。また、低炭素原料は品質が不安定であるが、原油由来の原料と混合処理することで製品の品質調整が容易になるという利点もある。

一方、製油所へのCo-Processing技術の導入及び利用拡大に向けては、必要な低炭素原料の確保、混合処理比率アップの制約要因となる腐食/ファウリング等の抑制に必要な前処理技術や目的生産物の最適製造技術の確立、コスト増に対する支援措置など制度面も含め多くの課題がある。

JPECとしては、今後、Co-Processing技術の導入や利用拡大に向けてボトルネックとなる課題を抽出するとともに、JPECの強みである詳細組成構造解析技術等を活用し、技術課題の解決に向け取り組んでいく。

謝辞

本研究は経済産業省・資源エネルギー庁の補助事業の一環として実施された。ここに記し、謝意を表する。