

[講演 4]

カーボンリサイクル

橋崎 克雄 (プロジェクト試験研究部
炭素循環エネルギーグループ 部長)



1. カーボンリサイクル

カーボンリサイクルとは、二酸化炭素 (CO₂) を資源として捉え、これを排ガスなどから分離・回収し、化学品、燃料、および鉱物などに加工して原材料として再利用することで、大気中への CO₂ 排出を抑制していくことです。

2020 年 12 月に策定された「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」、および 2020 年度第 3 次補正予算で創設された 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」に基づき、2021 年 7 月「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019 年 6 月経済産業省発表) が改訂されました。カーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル実現に向けたキーテクノロジーと位置付けられ、取り組みのさらなる加速が図られることとなりました。

そして、日米首脳会議の場で菅前首相は

2030 年温室効果ガス削減目標を「46%」(2013 年度比) と公約した 2021 年 4 月 22 日を境に、わが国は 2030 年「46%削減」、2050 年「カーボンニュートラルの実現」を目指し、社会が大きく動き始めることとなりました。

2. カーボンリサイクル技術ロードマップの改訂

カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版での CO₂ 利活用法を図 1 に示します。特に、改訂版には以下の 3 点が織り込まれました。

- ① DAC (直接大気回収：大気中から CO₂ を直接回収する技術) や合成燃料 (CO₂ と水素を合成して製造されるカーボンフリーな脱炭素燃料) の開発追加
- ② カーボンリサイクル製品 (汎用品) の普及開始時期を 2040 年頃に前倒し

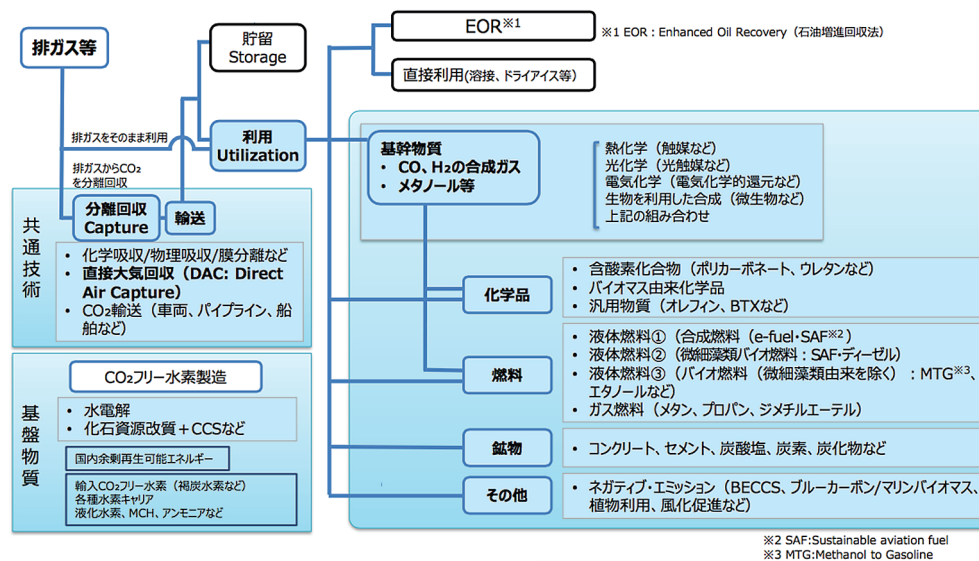


図 1 カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版⁽¹⁾

③ 国際連携（米国・豪州・アラブ首長国連邦（UAE）との協力覚書の締結、日米気候パートナーシップの締結等）の取り組みの追記

カーボンリサイクル技術には基幹物質としてCO₂フリー水素が必要です。水素自体は、導入目的の変遷はあったものの、1970年代のオイルショック時代から現在に至るまで、化石燃料代替エネルギーとして、そして海外の再生可能エネルギーを輸入するエネルギーキャリアとして検討されてきた歴史があります。また、CO₂分離回収・輸送技術も共通技術として重要視されています。

3. CO₂ 分離回収・輸送技術開発

CO₂を含む排ガスからCO₂を分離・回収する技術は、石油精製や天然ガス精製の分野では古くから実用化されています。その代表的なものとして、以下に示す、①化学吸収法、②物理吸収法、③物理吸着法、④膜分離法などです。現在、回収CO₂トン当たり、化学吸収法で4,000円／t-CO₂程度のところ、固体吸収法や物理吸収法を用いることで2,000円台／t-CO₂、将来は膜分離法で1,000円台／t-CO₂程度を目指す開発が進められています⁽²⁾。

① 化学吸収法

工業的に広く普及しており、燃焼後分離ではほとんどがこの方法が採用されています。装置は、吸収塔と再生塔からなり、排ガスを吸収塔に通して吸収液と接触させ、CO₂をガスから除去します。CO₂を多く含んだ吸収液は再生塔に送られ、加温してCO₂が分離されます。CO₂が希薄になった吸収液は、吸収塔に戻され、繰り返し使用されます。

吸収液は、一般的に、アミン系水溶液が用いられ、各社独自の添加剤が加えられ、高効率化（吸収液の再生エネルギーの低減化）が図られています。

② 物理吸収法

物理吸収法も化学吸収法と同様に吸収塔と再生塔からなり、吸収塔ではガス圧力を高くしてCO₂を吸収液に溶解させます。再生塔ではガス圧を下げてCO₂を吸収液から放出させます。

世界では、吸収液に低温のメタノールを用いたレクチゾール法（Rectisol法）や、ポリエチレングリコールのジメチルエーテル溶液を用いたセレクソール法（Selexol法）が普及しています。レクチゾール法は、運転温度が-40～-60℃と低く、H₂S（硫化水素）やCOS（硫化カルボニル）を0.1ppm以下まで除去することもできます。セレクソール法は、吸収液が熱化学的に安定で、吸収液の損失が小さいのが特長です。

③ 吸着分離法

吸着分離法には、ゼオライトなどの固体吸着剤を用い、圧力差を利用して吸着と脱着を繰り返すPSA（Pressure Swing Adsorption）、温度差を利用するTSA（Thermal Swing Adsorption）、両者を併用する、PTSA（Pressure and Temperature Swing Adsorption）法があります。

PSAは、一般的に水素製造装置の水素純度を上げるために使用されています。これらはいずれも、複数の吸着塔を切り替えて使用されます。一般的に回収されたCO₂濃度は低く、高濃度CO₂を得ることは難しいと言われています。

④ 膜分離法

膜分離法は、膜を中空糸状に束ねてカートリッジ化したものを使用することが多いと言われています。前述の分離回収法と異なり、分圧差があれば再生に要するエネルギーが不要です。よって、膜に導入するガスが高圧の場合は、有利となります。一般的に、分離対象の分子径と分離膜の孔径の差異でガスが分離される分子篩と、膜への親和性の違いを利用した溶解拡散があります。前者の例では、水素分離膜として、ポリイミドやポリスルホンの膜が実用化されています。

② バイオ燃料

バイオ（生化学反応／光合成）プロセスによる CO₂ フリー合成燃料製造は、図 3 に示すように、植物や廃棄物をガス化や化学反応プロセスを通じた合成や微細藻類を利用した合成が必要なため、大規模に生産するに当たっては、原材料の確保が課題となります。原料調達は地域の事情（バイオマスなどの地域偏在性など）に影響されるため、その普及は限定的になると考えられます。

の CO₂ 削減効果が見込めます。人為的であるので、既存インフラに適合した合成燃料を製造することも可能です。例えば、ガソリン代替となる高オクタン価のメタノールを脱水して、高セタン価のジメチルエーテル（DME：DiMethyl Ether）や、さらに重合させて常温、常圧で液体のポリオキシメチレンジメチルエーテル（OME：Polyoxymethylene Dimethyl Ethers）を製造することで、ディーゼル油の代替にすることも可能です。

③ e-Fuels

化学反応プロセスによる CO₂ フリー合成燃料の製造は、図 4 に示すように、大量の CO₂、水素を人為的に分離・回収、電解などで製造するため、大規模化が比較的容易で、大量

6. 炭素循環エネルギーシステム

2050 年カーボンニュートラルを実現させるためには、既存インフラを活用し、エネルギー供給の安定化を図りながら、効果的な CO₂ 削

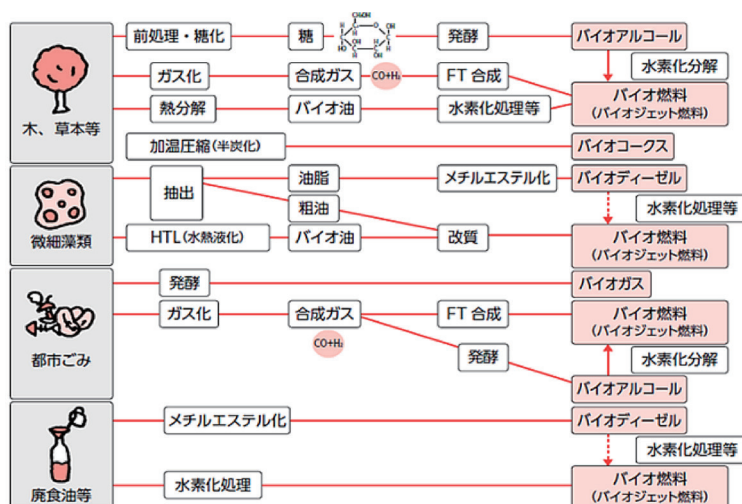


図 3 バイオ（生化学反応／光合成）プロセスによる CO₂ フリー合成燃料製造 ⁽⁵⁾

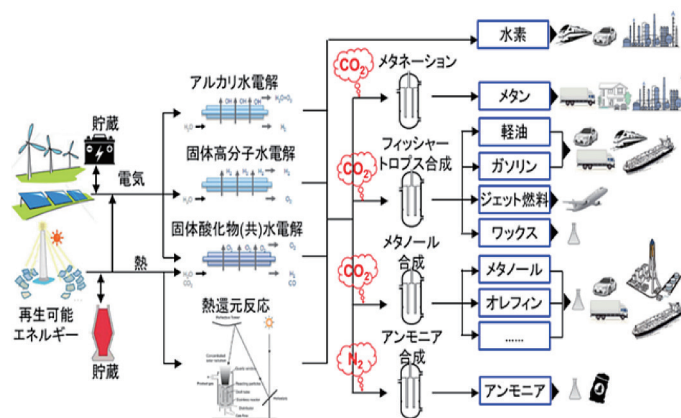


図 4 化学反応プロセスによる CO₂ フリー合成燃料製造 ⁽⁵⁾

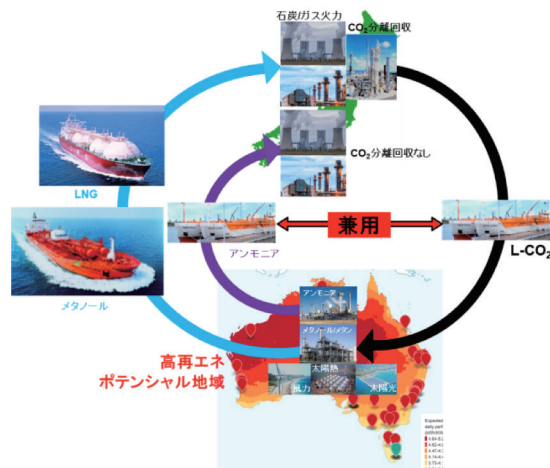


図5 ACC with NH₃ エネルギーシステム ⁽⁴⁾

減策を推進していくことが必要です。そして、水素などの新エネルギーへの移行期にマッチしたわが国独自の新しいエネルギーシステムが求められています。

現在、わが国では、(株) JERA による石炭火力発電からの CO₂ 排出量削減対策としてのアンモニア (NH₃) 混焼が発表され ⁽⁶⁾、NH₃ の活用がエネルギー転換 (発電) 部門における当面の大きな CO₂ 削減策として取り上げられています。そして、「第 6 次エネルギー基本計画」にも盛り込まれています。2030 年まではコスト面も考え、当面ブルー NH₃ (化石燃料由来の NH₃) を中心に展開されていくでしょう。最終的にはグリーン NH₃ (CO₂ を排出せずに製造された NH₃) への展開が期待されていますが、再エネの発電コストが安価になってきたとは言え、船舶による水素系燃料の 1 隻当たりのエネルギー輸送量は、炭化水素系に比べて 4 分の 1 ～ 5 分の 1 程度と小さく、荷役基地を含めた輸送コストが物理的なコストネックになることが予想されます ⁽⁵⁾。

そこで、図 5 に新しいハイブリットなエネルギーシステムを示します。グリーン水素 (CO₂ を排出せずに製造された水素) をベースとした炭化水素系燃料、CO₂ 分離回収・輸送、そしてグリーン NH₃ を組み合わせた「ACC with NH₃ エネルギーシステム」(ACC: Anthropogenic Carbon Cycle) です ⁽⁴⁾。液化

炭酸ガスと NH₃ の輸送時の物性には大きな差はなく、兼用船化が可能と考えられます。この兼用船化により、NH₃ や液化炭酸ガスの輸送時の船舶利用効率の向上を図りながら、炭化水素系燃料、水素系燃料を同時並行的に輸入できるようにすれば、利用可能なエネルギーの選択肢が広がり、安定供給の確保が実現できるというものです。

このエネルギーシステムであれば、基本的に CCS を必要とせず、炭化水素系燃料でありながらも CO₂ 分離回収を行うため、CO₂ フリー燃料化を図ることが可能です。また、ほぼすべての技術が既存技術の延長線上に位置づけられるレベルであり、実現へのハードルも高くなく、早期実装も可能です。

カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版には、直接空気回収 (DAC) と合成燃料が織り込まれましたが、DAC が実現できれば、CO₂ 輸送は必ずしも必要ありませんが、合成燃料の導入を少しでも安価に図ろうと考えた場合、「ACC with NH₃ エネルギーシステム」は非常に有効的、かつ現実的な手段だと考えられます。

参考文献

- (1) 経済産業省 2021 年 7 月 26 日プレスリリース
- (2) 内閣府「革新的環境イノベーション戦略」、2020 年 1 月
- (3) Michele Aresta et al., “The changing paradigm in CO₂

- utilization", Journal of CO₂ Utilization, pp.3-4, pp.65-73,
(2013)
- (4) (一財)エネルギー総合工学研究所,『図解でわかるカー
ボンニュートラル』, 技術評論社, 2021 年 9 月
- (5) (一財)エネルギー総合工学研究所,『図解でわかるカー
ボンリサイクル』, 技術評論社, 2020 年 9 月
- (6) (株)JERA プレスリリース,「2050 年におけるゼロエミッ
ションへの挑戦について」, 2020 年 10 月 13 日
- (7) 小野崎正樹, 橋崎克雄,「火力発電の脱炭素化に向
けたカーボンリサイクル活用の検討」, 火力原子力発電,
72 巻 5 号, 2021 年 5 月