IEEJ：2021年5月掲載 禁無断転載

カーボンリサイクル燃料の炭素源に関する試論（2）

―2050 年の「脱炭素社会」実現に向けた留意点―

2021 年 5 月
日本エネルギー経済研究所　電力・新エネルギーユニット
新エネルギーグループ　主任研究員　大槻貴司，マネージャー　柴田善朗

1. 本稿のポイント

- 脱炭素社会の実現に向けてカーボンリサイクル燃料（CR 燃料：合成メタンや液体合成燃料，藻類培養によるバイオ燃料等）が期待されている．その炭素源は化石燃料やバイオマス，大気中 CO_2 が候補であり，何れを選択しても CO_2 削減効果は同等である．
- その一方で，脱炭素社会においてはカーボンリサイクルシステムから排出される CO_2 の「総量」の視点も重要となる．バイオマスや大気中 CO_2 を利用した場合には，カーボンリサイクルシステム全体として正味 CO_2 ゼロ排出と見なせる[1]．対して，化石燃料 CO_2 を再利用した場合，化石燃料を燃焼する発電所・産業プラント等も含めたシステム全体として見ると，原理的に正の CO_2 排出となる．
- 現在，我が国ではカーボンプライシングや 2050 年脱炭素社会の議論が進むが，それらが炭素源のあり方に影響を及ぼす可能性がある．例えば，炭素税が強化された場合，化石燃料 CO_2 を再利用するシステムには課税が発生する．また，2050 年に正味ゼロ排出を実現する際において，化石燃料 CO_2 を再利用する場合には，正の排出を相殺することが必要となる．本稿で試算するように，化石燃料 CO_2 を利用した CR 燃料の「コスト」には，CO_2 調達や水素製造，燃料製造のコストのみならず，CO_2 自体へのコスト（炭素税や相殺コスト等）も考慮することが重要である．
- 炭素制約が比較的緩い時点（2030 年や 40 年など）においては，化石燃料 CO_2 が CR 燃料拡大への鍵となりうる．他方で，2050 年までには，上記の要因から化石燃料 CO_2 の再利用に制約が生じる可能性も否定できず，場合によっては炭素源の移行が必要となる可能性がある．時間軸を考慮した CO_2 調達戦略が重要であろう．

[1] 議論を簡単にするため，本稿では幾つかの点を捨象している．バイオマス燃料や化石燃料の燃焼に伴う CO_2 排出に着目し，それらの採集・採掘や輸送等における CO_2 排出は考慮していない．また，バイオマス採集・輸送や化石燃料生産・輸送，直接空気回収（DAC）の設備建設に伴う CO_2 排出も考慮していない．DAC や CR 燃料製造に必要なエネルギーはゼロ・エミッションエネルギーで賄われると仮定している．

2. 本文

カーボンリサイクル燃料による CO_2 削減効果：何れの炭素源でも同等

2020 年 10 月の菅総理の 2050 年ネットゼロ宣言を受け，その実現に向けた取組みが加速している．同年 12 月には政府が「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を公表し，2021 年 3 月に閣議決定された地球温暖化対策推進法の改正案では「2050 年までの『脱炭素社会』の実現」が明記された．

脱炭素化に向けて期待される技術にカーボンリサイクルがある．カーボンリサイクルとは CO_2 を資源として捉え，発電所や産業プラント，大気中から回収した CO_2 を燃料や素材として再利用することを指す．燃料としての再利用では，藻類培養によるバイオ燃料製造がグリーン成長戦略に明記されている．また，政府の「カーボンリサイクル技術ロードマップ」や審議会等においてはメタン合成や液体燃料合成（メタノールやエタノール，ディーゼル等）が記述されている．

これらの CR 燃料が化石燃料を代替すれば，代替された化石燃料分の CO_2 排出を回避できる．CR 燃料の炭素源としては化石燃料やバイオマス，大気中 CO_2 が挙げられ，それらの何れにおいても CO_2 削減効果（CO_2 排出回避効果）は同等である．詳細は柴田（2020）で解説されているが，ここでは簡単な例を考えてみる．

> **【例 1】化石燃料由来の CO_2 を再利用する場合**：天然ガスを消費している A 社と B 社の 2 社を考えてみる．A 社は年間 a トン，B 社は年間 b トンの CO_2 を直接排出しているとすると，2 社の排出量合計は a+b トンである．ここで，A 社から r トン（r≦a かつ r≦b）の CO_2 を回収し，合成メタンを製造後，B 社の天然ガス消費を部分的に代替した場合，2 社の排出量は a+b-r トンとなる[2]．カーボンリサイクル実施の前後を比較すると，その CO_2 削減効果は(a+b)-(a+b-r)=r トンとなる．
>
> **【例 2】バイオマス由来の CO_2 を再利用する場合**：A 社はバイオマス燃料（炭素含有量は CO_2 相当で a トン）を，B 社は天然ガス（同 b トン）を燃焼しているとする．カーボンリサイクルを行わない場合，2 社の直接排出量合計は 0+b=b トンとなる．ここで，A 社からバイオマス由来 CO_2 を r トン（r≦a かつ r≦b）回収して合成メタンを製造し，B 社の天然ガス消費を部分的に代替した場合，2 社の合計排出量は 0+b-r=b-r トンとなる．CR 燃料による CO_2 削減効果は b-(b-r)=r トンとなる．

[2] 簡単のため，CO_2 回収効率の要素は捨象した．例 2 や後述の図 1 も同様である．

【例 3】大気中由来の CO_2 を利用する場合：ここではＢ社のみを考える．カーボンリサイクルを行う前の状況で炭素含有量ｂトンの天然ガスを消費しているとする．自社で大気中からｒトンの炭素を回収し，合成メタンとして天然ガスを代替した場合，炭素放出量は b-r となる．この場合の CO_2 削減効果は b-(b-r)=r となる．

簡易的な試算ではあるが，カーボンリサイクル有りと無しの場合の排出量を比較すると，CO_2 削減効果は炭素源に依らないことが分かる（全ての例でｒトンの CO_2 削減効果）．

カーボンリサイクルシステム全体の CO_2 排出「総量」には炭素源が影響

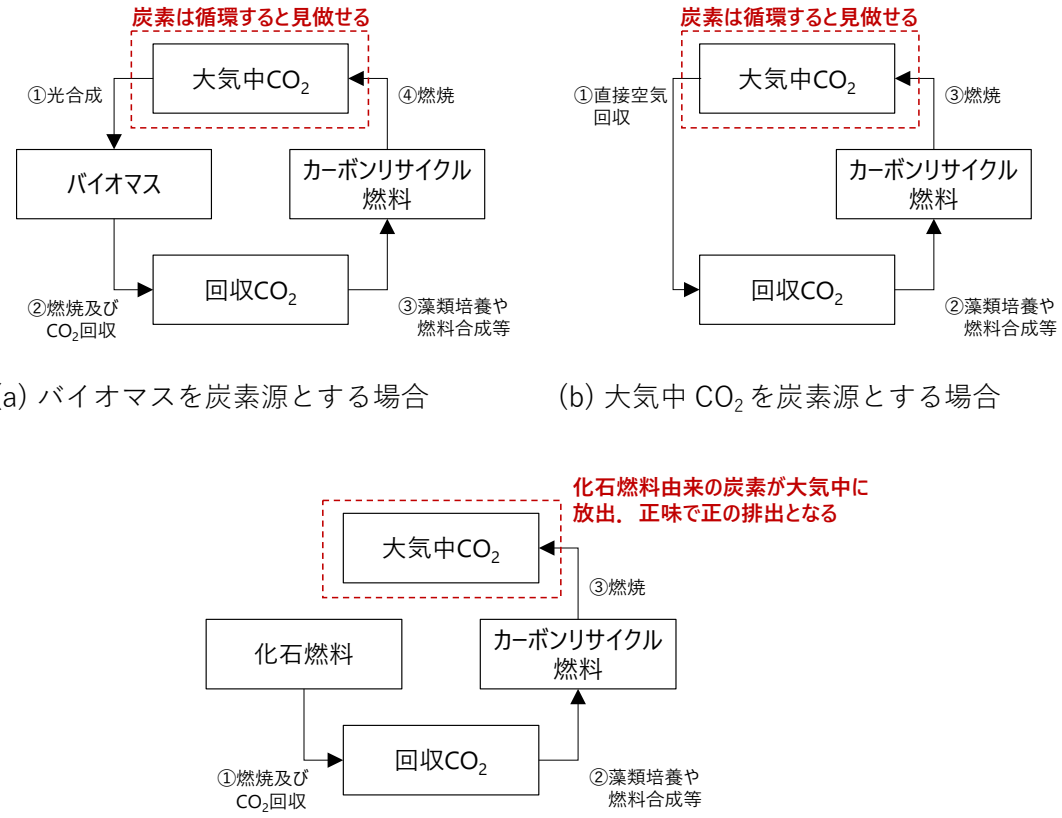
その一方で，カーボンリサイクルシステム全体としての CO_2 排出総量は，炭素源の選択によって異なる．ここで「カーボンリサイクルシステム全体」とは炭素提供者（発電所や産業プラント等）とCR燃料利用者の両者の直接排出量合計を指す．先の３つの例を見ると，カーボンリサイクル有の場合における炭素排出量は例１で a+b-r，例 2~3 では b-r である．CO_2 排出総量で見ると例１が最も多くなる．各炭素源の CO_2 削減効果は同じでも，排出総量は異なることが分かる．

炭素源の選択が CO_2 排出総量に影響することについて，炭素フローの視点からも考えてみる．**図１**はカーボンリサイクルシステムの炭素フローである．**図 1a** は炭素源としてバイオマスを，**図 1b** は大気中 CO_2 を，**図 1c** は化石燃料を利用した場合である．バイオマスや大気中 CO_2 を利用する場合においては，もともと大気中に存在していた炭素が循環するため，CR 燃料を燃焼しても大気中 CO_2 増加には寄与しないと見なせる（**図 1a-b**）．対して，化石燃料を炭素源とする場合は，CO_2 を再利用しても最終的には大気中へ放出されるため，カーボンリサイクルシステム全体としては正の CO_2 排出となる（**図 1c**）．

現在，我が国ではカーボンプライシングや 2050 年脱炭素社会の議論が進むが，「カーボンリサイクシステム全体の CO_2 排出総量」の点を踏まえると，炭素源の選択が少なからず意味を持つ可能性がある．例えば，カーボンプライシングの一手法である炭素税が導入された場合，化石燃料 CO_2 のリサイクルシステムには，正の排出への課税が発生することになる．また，2050 年にネットゼロ排出を実現する際において，化石燃料 CO_2 を再利用する場合には，正の排出の相殺が必要となる．具体的な相殺策としては植林や DACCS，BECCS 等であり [3]，それらのコスト負担が生じることになる（相殺する場合には炭素税等のペナルティを免れられる可能性があるが，その代わりに相殺コスト負担が生じる）．化石燃料 CO_2 を再利用する場合，CR 燃料製造の「コスト」のバウンダリには，単に水素製造や CO_2 分離回収，燃料合成のコストのみならず，化石燃料を由来とする CO_2 自体へのコ

[3] DACCS＝Direct Air Capture with CCS；BECCS＝Bioenergy with CCS.

スト（炭素税や相殺コスト等に相当するもの）も併せて考える必要が出てくる．このようなコストを踏まえた上で，炭素源を化石燃料由来，バイオマス由来，大気中とする各オプションのうち，どれが総合的に最も経済性が高いのか，という視点が重要になる．



(a) バイオマスを炭素源とする場合　　(b) 大気中 CO_2 を炭素源とする場合

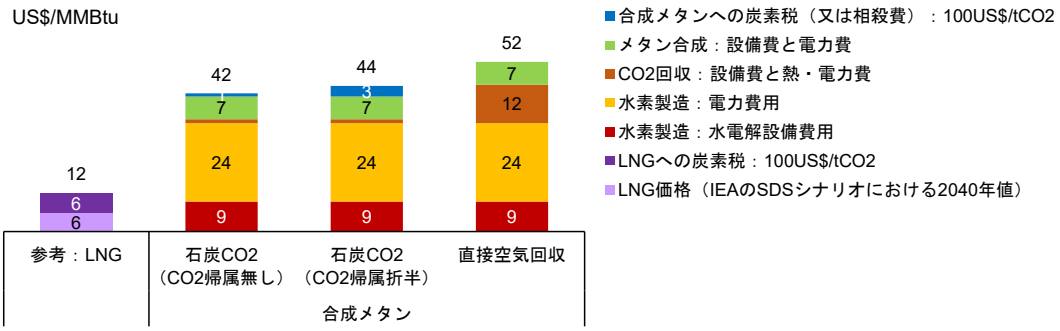
(c) 化石燃料を炭素源とする場合

図１　カーボンリサイクル燃料システムの炭素フロー

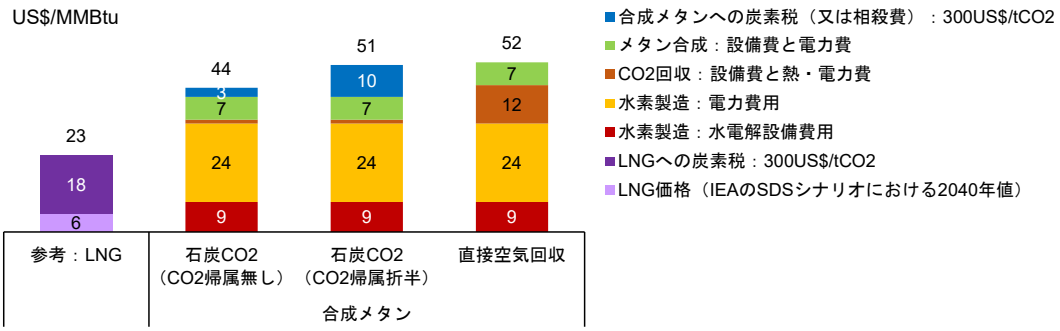
この炭素税支払いや相殺コストを誰が負うのか（炭素提供側か，炭素利用側か，もしくは両者か）といった論点[4]があるが，これは正に CO_2 の帰属の問題であり，試論（３）にて議論する．ここでは，帰属について仮定を置いた上で，合成メタンを題材に「CO_2 自体へのコスト」がどの程の影響を持ちうるか試算した（**図 2**）．試算対象としては，日本国内で水電解および CO_2 回収を行い，メタン合成（サバティエ反応を想定）を行うシステムを

[4] 相殺策の実施主体についても，炭素提供者または CR 燃料利用者が各自で相殺策を実施する方法や，第 3 者がネガティブエミッション事業を実施し，その一部をオフセットクレジットとして調達する方法等，さまざま考えられる．この点も今後議論を深化させる必要がある．

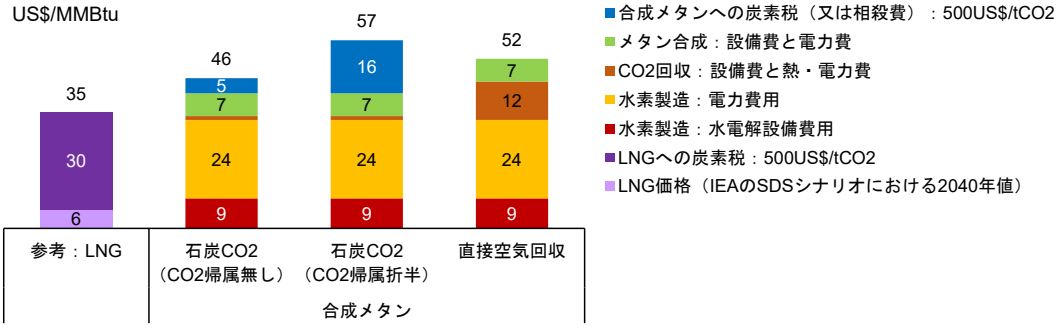
想定した．CO_2は石炭の燃焼後排ガスから回収する場合と，DACの場合を考慮している．石炭由来 CO_2 を利用する場合については，更に，合成メタン側に CO_2 帰属が無いケース（図中の「CO2 帰属無し」）と帰属を折半するケース（同「CO2 帰属折半」）を推計した．炭素税（もしくは相殺コスト）は 100US$/$tCO_2$，300US$/tCO_2，500US$/$tCO_2$ の 3 通りとした，詳細な推計前提は本論文末尾の付録を参照されたい．図中「CO2 帰属なし」の合成メタンにおいても炭素税課税が見られるが，その考え方も付録を参照されたい．



(a) 炭素税 100US$/$tCO_2$ の場合



(b) 炭素税 300US$/$tCO_2$ の場合



(c) 炭素税 500US$/$tCO_2$ の場合

図 2　炭素税を考慮した合成メタンの製造コスト

図 2 から次の主に 2 点が読み取れる．

- 炭素税率が 100US$/tCO$_2$ の場合，それが合成メタン製造費に及ぼす影響は大きくない．CO$_2$ の帰属を折半した場合においても，石炭 CO$_2$ 利用の方が，DAC 利用よりも安価となる．ただし，100US$/tCO$_2$ ほどの炭素税であれば，LNG 価格に炭素税率分を上乗せした方が十分に安価であり，そもそも国内で CO$_2$ 回収＋水素製造＋合成メタン製造を行う意義があるかには留意が必要である．
- 環境政策が強化された場合（300US$/tCO$_2$ や 500US$/tCO$_2$）においては，石炭利用へのペナルティが大きくなる（石炭由来 CO$_2$ を利用した合成メタンのコスト競争力が低下する）．CO$_2$ 帰属が無いケースでも DAC 利用時のコストに近くなり，CO$_2$ 帰属を折半するケースのコストは，DAC 利用時と同等または上回るようになる．石炭由来 CO$_2$ の再利用が経済合理性を持たなくなる可能性がある．

IPCC の 1.5℃特別報告書の整理によれば，世界 1.5℃目標を達成するために必要な世界全体の炭素価格は 2050 年に 700US$/tCO$_2$ 程度まで上昇する可能性がある [5]．我が国の 2050 年脱炭素化に向けては，その水準もしくはそれ以上の政策強化が実施される可能性がある．仮にそれ程の気候変動対策が必要であるとすれば，コスト的な観点から化石燃料 CO$_2$ の再利用は難しくなると思われる．ここでは合成メタンを例示したが，合成石油や藻類培養によるバイオ燃料等の他の CR 燃料についても，化石燃料 CO$_2$ を利用する際には同様と考えられる．CR 燃料に関心を持つ事業者は，その点を踏まえて炭素源を選定することが重要であろう．

なお，「CO2 帰属無し」のように，CR 燃料利用側へのペナルティが免除される場合は，そのペナルティを炭素提供側が負うことになる．炭素提供側（火力発電所等）が，そのペナルティ（重い炭素税の負担）を負ってまで燃料として化石燃料を利用し続けるか（つまり，2050 年まで炭素源として存在し続けられるか）という点についても検討する必要がある．炭素源として存続できない（化石燃料の消費とそれに伴う CO$_2$ の排出が無い）場合には，化石燃料 CO$_2$ の再利用自体が不可能となる．環境政策が強化された際に，CO$_2$ 帰属を折半すると CR 燃料利用側にとってのコスト的な魅力が低下し（**図 2**），他方，炭素提供側に CO$_2$ 排出を帰属させると提供側にとっての魅力が低下する．ジレンマ的な状況といえるかもしれない．

[5] 1.5℃特別報告書の Figure2.26 は複数モデル・シナリオの炭素価格推計値を示しており，ここでは 1.5℃ Low Overshooting の分析結果の中央値水準を参照した．ただし，同図に示されているように，炭素価格の推計結果にはモデルによって大きな幅があり，不確実性が高い点にも注意が必要である．

時間軸を考慮した炭素源選択の必要性

本稿では，炭素源がカーボンリサイクルシステムの CO_2 排出総量に影響することを指摘した．ここで，試論（1）から読み進めて頂いた方は試論（1）の図 1 との違いに混乱されたかもしれない．試論（1）では「系全体」の排出量が試算されているが，炭素源に関わらず同量となることが指摘されている．これは系（本稿ではシステムと呼んでいる）のバウンダリや前提条件の違いに起因する．試論（1）では，「系」の中に化石燃料使用者が存在する状況を前提とし，それであればどの炭素源を利用しても「系」としての排出は変わらないことを示している（化石燃料 CO_2 を再利用しない場合には直接大気中へ放出され[6]，CR 燃料として再利用しても最終的には同量の CO_2 が大気中へ放出される）．対して，本稿で CR 燃料製造の当事者（炭素提供者と CR 燃料利用者）の排出のみに着目している．

試論（1）と本稿の考え方は，どちらが正しいかというものではなく，実際の状況や時間軸に応じて選択すべきものと思われる．2030~40 年といった時間軸では，製鉄やセメント生産等，化石燃料を利用せざるを得ない事業者は多い．このような状況であれば，試論（1）が論じたように，化石燃料 CO_2 を再利用するにせよ，バイオマス・大気中 CO_2 を利用するにせよ，「系全体」（例えば，社会全体）での排出量は変わらなくなる．どの炭素源を利用しても良いであろう．

対して，化石燃料を利用している事業者が 2050 年に向けてカーボンリサイクル以外の対策を打てる場合は前提条件が変わってくる．つまり，①カーボンリサイクルを行う，②カーボンリサイクルを行わない場合は大気中に直接放出する，の 2 択に加え，③電化・水素化・CCS 等で低炭素化する，という選択もとれるようになる．試論（1）の前提では，バイオマス・大気中 CO_2 を利用した場合，化石燃料 CO_2 は大気中へ放出されるが，そこで仮に③が実施可能であればバイオマス・大気中 CO_2 によるカーボンリサイクルと③を組合せて「系全体」としても脱炭素化を図れることになる．他方，③を選択できるにも関わらず，①を実施してしまえば，正味で正の排出となる．「系全体」の排出量が，炭素源によって変わることとなる．

以上を踏まえると，2030 年や 40 年といった転換期においては，産業 CO_2 をはじめ，化石燃料を利用せざるを得ない事業者の CO_2 を活用して低炭素化を進めることは重要な選択肢といえる（短中期的にはカーボンプライシング等も比較的緩く，化石燃料 CO_2 を利用してもコスト的なペナルティは低いものと想定される）．対して，2050 年に向けては環境政策や CO_2 相殺のコスト・量的ポテンシャル，電化・水素化・CCS 等の観点を基に炭素源を選択する必要がある．環境政策の度合いに応じて炭素源を移行させる等，時間軸を考慮した

[6] 例えば，バイオマス由来 CO_2 を再利用する場合，化石燃料 CO_2 は第 3 者の排出となるが（炭素提供者や CR 燃料利用者の排出ではなくなるが），試論（1）ではその CO_2 も「系」に含めて議論している．

戦略が炭素提供側・利用側の両者で必要となるかもしれない．例えば，炭素利用側にとっては，代替の炭素源や CO_2 調達手法（CO_2 パイプラインや液化 CO_2 タンカー）を予め想定し，その上で CR 燃料製造プラントの立地選択やインフラ形成をしておくことが有用に思える．また，化石燃料 CO_2 の提供側においては，環境政策が強化された場合や，代替の CO_2 源が出現した場合の対応策を予め練ることが必要に思える．

カーボンリサイクル燃料からの CO_2 再回収の課題

化石燃料由来 CO_2 を利用しても，CR 燃料の CO_2 を再回収すれば，大気中への放出を抑制できる．本稿では最後に，この再回収について考察を行う．再回収を行えば大気中への CO_2 放出を抑制できるものの，次の 2 点への対応は考える必要があると思われる．

1 点目の課題は CO_2 回収効率の観点から挙げられる．ここまでの議論では捨象したが，燃焼ガス等からの CO_2 回収効率は現状で 90%程とされる．そのため，化石燃料からの CO_2 回収時や CR 燃料からの CO_2 再回収時には化石燃料由来 CO_2 の一部が大気中に放出されてしまう（**図 3** 中の赤点線）．再回収して炭素を循環させても，一部が放出され続けるため，その分を相殺することが必要となる．

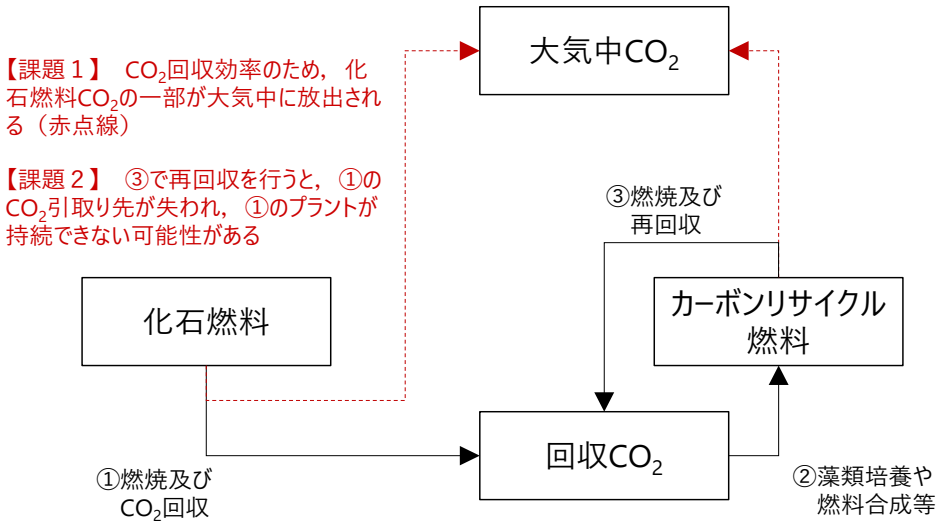


図 3　化石燃料由来のカーボンリサイクル燃料から CO_2 を再回収する場合の炭素フロ―とシステム的課題

より重要な課題として，化石燃料 CO_2 の受入先（**図 3** 中の①のフロー）が減ることが挙げられる．例えば，化石燃料の火力発電で回収した CO_2 から CR 燃料を製造し，産業プラント等での燃焼後，産業プラントで CO_2 を回収して同プラント向けに CR 燃料を製造するシステムを考える．CO_2 回収効率は 100%ではないことから，2 度目の燃料製造を行う場合に

は炭素の補充が必要となるものの，1 度目に発電所から提供された CO_2 よりは少ない量の提供で十分となる．その結果，発電所では CO_2 がダブつき，新たな対応（他の引き取り先を探す，CO_2 貯留や燃料転換を行う等）をせざるを得なくなる．効果的な対応策を打てない場合には，環境制約によって発電所の存続が困難となる可能性がある．発電所を保有する事業者の目線からすれば，このシステムは持続可能とは言えない恐れがある．再回収を行う場合には，このように，大元の炭素源への課題が窺える．

おわりに

本稿では，CR 燃料の可能性を炭素源の観点から考察した．ポイントしては次の 3 点が挙げられる．

- 何れの炭素源を選択しても，CO_2 削減効果（排出回避効果）は同等である．
- 他方，カーボンリサイクルシステム全体の CO_2 排出総量には炭素源が影響する．
- CR 燃料からの CO_2 再回収には持続性の課題が生じうる．

社会全体として 2050 年までのネットゼロ排出を目指す場合においては，この 2 点目が大きな意味を持つ．我が国では化石燃料 CO_2 の再利用に期待が高いが，その場合には経済的なペナルティ（炭素税や相殺費用等）が生じる可能性がある．そのようなペナルティも考慮した上で炭素の調達戦略を立案することが重要であろう．もし相殺する術がない場合には，ネットゼロに向けて化石燃料由来の CR 燃料導入は困難となり，2050 年までにはバイオマス由来もしくは大気中 CO_2 を利用せざるを得なくなるかもしれない．

勿論，2030 年や 40 年といった転換期においては，化石燃料を利用せざるを得ない事業者（産業部門など）が数多く存在すると思われる．CR 燃料の拡大に向けては，その炭素源の有効利用が鍵を握るであろう．カーボンリサイクルでは CO_2 を物理的に調達してくることが必要なことから，転換期から 2050 年までのストーリーを予め想定し，炭素源選定や CR 燃料製造の立地選定，CO_2 調達インフラ形成等を行うことが大切ではないか．

付録：図 2 の推計前提

図 2 の推計は以下の前提に基づく．国際機関や学術機関の論文・報告書等から設定した．

- 図 2 中の LNG 価格は国際エネルギー機関（IEA）の World Energy Outlook 2020 における Sustainable Development Scenario の 2040 年値（5.7US$/MMBtu）を参照．
- 割引率…5%．
- 化石燃料の炭素含有量（低位発熱量基準）…天然ガス：0.0560tCO_2/GJ，石炭：0.0946tCO_2/GJ．

- 水電気分解…設備費：450US$/kW，変換効率：74%（低位発熱量基準），設備利用率：30%，設備寿命：15 年，年間運転維持費：設備費の 1.5%，投入電力費用：50US$/MWh（約 5 円/kWh），工業用水費用：0.6US$/$m^3$．投入電力は，下記の直接吸気回収やメタン合成含め，ゼロ・エミッション電力を想定．
- 石炭燃焼後ガスからの CO_2 回収（化学吸収法）…設備費：80US$/($tCO_2$/year)，設備寿命：40 年，年間運転維持費：設備費の 5%，設備利用率：70%，回収効率：90%，熱消費：1.5GJ/tCO_2，熱供給価格：61US$/t（上述の IEA 見通しから一般炭の値を参照），石炭発熱量（低位発熱量基準）：26GJ/t．
- 直接空気回収（高温・水溶液システム）…設備費：815Euro/(tCO_2/year)，設備寿命：30 年，年間運転維持費：設備費の 5%，設備利用率：90%，電力消費：1.535MWh/tCO_2，投入電力価格：50US$/MWh．為替は 1Euro=1.19US$と想定．
- メタン合成（サバティエ）…設備費：5000US$/($Nm^3$-$CH_4$/hour)，設備利用率：30%，設備寿命：30 年，年間運転維持費：設備費の 5%，補機動力：0.32kWh/Nm^3-CH_4．

図 2 では石炭由来 CO_2 を再利用する場合に，合成メタンに課せられる炭素税相当額を推計したが，次の考え方を基に推計している．メタン合成用に α トンの CO_2 を回収する場合，CO_2 回収効率を η とすると，炭素源では α/η の CO_2 が生成していることになる（図 4）．この内訳を考えると，(a)CO_2 回収設備における熱消費に伴う CO_2 と(b)発電所や産業プラントなどの事業に由来する CO_2 に分けられる．合成メタン側に CO_2 の帰属が無い場合は，発電所や産業プラントの事業に由来しない(a)を合成メタン側の CO_2 排出として考慮した．合成メタン側と炭素供給側で CO_2 帰属を折半する場合には，(a)と(b)の和の半分（$\alpha/2\eta$）を合成メタンの CO_2 排出として考慮した．

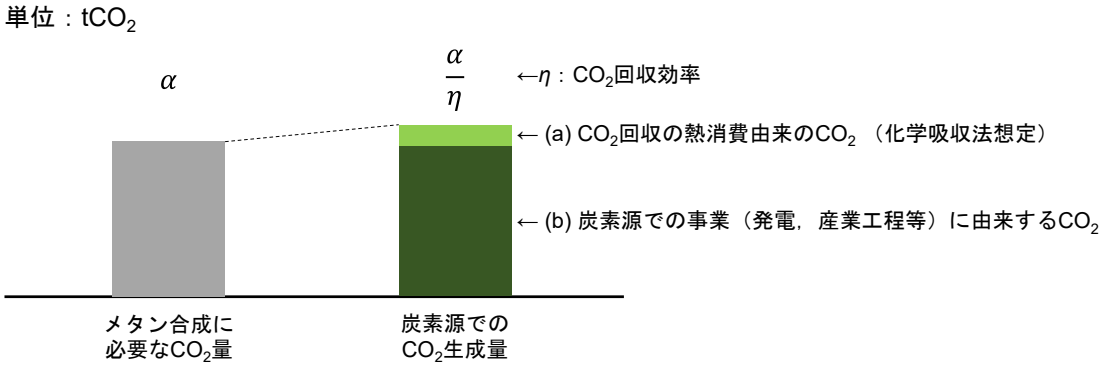


図 4　炭素源での CO_2 生成内訳のイメージ

参考文献

柴田善朗：「CCU ・カーボンリサイクルに必要な低炭素化以外の視点 －CCUS という分類学により生じる誤解－」，2020 年，https://eneken.ieej.or.jp/data/8821.pdf（アクセス日：2021 年 3 月 8 日）

以上

お問い合わせ: report@tky.ieej.or.jp