

二酸化炭素の再資源化とカーボンプライシング、 ネガティブエミッション

Carbon dioxide recycling and carbon pricing, negative emissions

関根 泰*

1. 二酸化炭素再資源化の背景

2021年8月に発表されたIPCC第6次報告において、日々の二酸化炭素排出が一步步温暖化をすすめるとの報告がされた¹⁾。45億年の地球の歴史の中で、化石資源は3億年の生物の営みの遺産である。我々は現在、この化石資源を日々掘って使い、最後には燃焼により二酸化炭素と水と熱に姿を変えるところを続けている。しかしこれでは持続性を担保できない。物質としての閉鎖系である地球に対して、唯一外部からやって来る太陽のエネルギーを有効に活用することの重要性は論を俟たない。一方で私たちは化学産業や燃料において化石資源に頼った暮らしを続けている。今後は、太陽のエネルギーを駆動力として、地表にあまねく存在する資源（水や二酸化炭素、植物資源などのバイオマス、廃棄物）を使った化学品や燃料の生産が期待される。このような中で、とりわけ電化が効かない7つの産業として、以下が知られる。

(1) 化学産業 現代の高度な文明は、化学産業に支えられていると言っても過言ではない。高度な医療や医薬、衛生用品、食料の鮮度維持、日常生活に用いる品々などは、全て化学の貢献によって支えられている。肉や魚のトレイ、弁当の容器、マヨネーズやケチャップの容器、マスクやアクリルの衝立、レジ袋、紙おむつ、医薬品、家具、ポリエステルやナイロンなどの洋服、バケツから車のバンパーまで全て石油化学の産品である。これらを化石資源を使わずに持続的に利用するには、バイオマスあるいは二酸化炭素を出発原料とした化学品合成体系の確立が期待される。

(2) 航空燃料 スマートフォンやワクチン、時計や宝石など、重量の割に付加価値が高いものはみな航空貨物によって運ばれる。この際に用いられる航空

機は、小さいもの（エアバス A320）でも一回に30トン、ボーイング 777 などの大きいものだと一回に150トンもの航空燃料が充填される。6リットル16キログラムのリチウム電池と、300 cc 250gの液体炭化水素は同じエネルギーを蓄えている。ドローンやエアタクシーのようなものは電化可能だが、これら航空機は決して電化できない。

(3) 大型の自動車 上述の航空機と同様の理由によって、その重量とエネルギー密度を考えると、トラックや観光バスも電化には向かない。いずれも日々色々なところを移動するため、全国津々浦々にあまねく充電設備を設け、長時間充電することは、その運用から考えて現実的ではない。

(4) 都市ガス 現在都市部では天然ガス由来の都市ガスが大規模に燃料として用いられている。お風呂を沸かしたり暖房にしたりサンマを焼いたり、と都市ガス需要は多岐に亘る。従来の機器を使用しながらカーボンニュートラル化を進める上では、二酸化炭素を原料とした合成メタンの利用が欠かせない。

(5) LPG 農林水産業の盛んな地区では家庭用を中心にLPGが大量に用いられている。我が国だけで五千万近くの人が毎日利用しており、こちらも従来の機器を使用する上では、バイオマスや二酸化炭素を原料とした合成LPGの供給が重要となる。

(6) 火力発電 再生可能エネルギーは変動が大きい。よって変動安定化並びに周波数・電圧維持のためにもバックアップとしての変動電源として火力発電が必ず必要となる。このためには水素やアンモニア、合成炭化水素燃料が必要となる。

(7) 製鉄 我が国では毎年の粗鋼生産量は一億トン近い。多くは高炉によるものであり、コークスやPC炭を必要とする。カーボンニュートラルを実現

*早稲田大学 先進理工学研究科 教授

するためには水素や合成ガスによる還元が必要となる。

このように、太陽光由来の再生可能エネルギー利用においては、電化だけではすべてを満たすことはできず、二酸化炭素の再資源化は重要なものとなる(図1)。一方で、二酸化炭素の再資源化に際しては、従来から知られる化学的転換プロセスを用いる限りにおいては、二酸化炭素回収コスト、水素製造コスト、二酸化炭素再資源化コストの3つが同時に重くのしかかり、産業は身動きを取りにくい状況にあった。2050年カーボンニュートラルを実現する上では、資金面でのサポートや技術開発のみならず、社会的制度設計も重要となる。とりわけ、炭素税やFIT、カーボンクレジット市場創設、各種取引によるオフセットなどが重要となる。これらを総称してカーボンプライシングと呼んでいる。以下、カーボンプライシングについて、現状をまとめる。

2. カーボンプライシングの現状

我が国では、経済産業省と環境省の間で、連携をしながらカーボンプライシングについての議論を進めてきている。経済産業省では「世界全体でのカーボンニュートラル実現のための経済的手法などのあり方に関する研究会」が、環境省では中央環境審議会地球環境部会の下に「カーボンプライシングの活用に関する小委員会」が立ち上がって、2021年2月からそれぞれ精力的な議論を進めてきている。この議論における争点となっているのは、まず明示的

なカーボンプライシングとしては、温室効果ガスに対して、排出量に応じたなにかの価格を設定する施策である。これには炭素税などの税制と実効炭素価格、排出量取引による排出枠価格などがあり、これによって、温室効果ガス排出量の見える化を進め、経済合理性をもとに費用効率の高いものから順に排出削減策を進めていくことが期待される。暗示的なカーボンプライシングとして、エネルギー課税、フィードインタリフ(FIT)、省エネ法、ICP(インターナショナルカーボンプライシング)などの自主的取組、温対法、などが挙げられる。これらは炭素の排出とは関連しないものもあるが、二酸化炭素以外の温暖化ガス削減に寄与する可能性が期待される。これらの他にも、ナッジなどの行動経済学的手法や、手続き的な手法なども存在する。以下これらについて詳細に紹介する²⁾。(図2に主な手法をまとめる)

2.1 税制について

我が国では、現在石油石炭税と温暖化対策税が輸入などの時点でかかっている。原油は2つの税制を合わせて2800円/kL、天然ガス・LPGは1860円/t、石炭は1370円/tが課税されている。また、消費者により近い側として、ガソリン税が53.8円/L、軽油引取税が32.1円/L、石油ガス税が17.5円/kg、航空燃料税が26円/L、電源開発促進税が0.375円/kWhで付加されており、我が国全体で5兆円弱の税収がある。この結果、日本の実効炭素価格は全体として30ユーロ/tCO₂程度となっている。これとは別にFIT賦課金が3兆円弱あり、日本全体で、

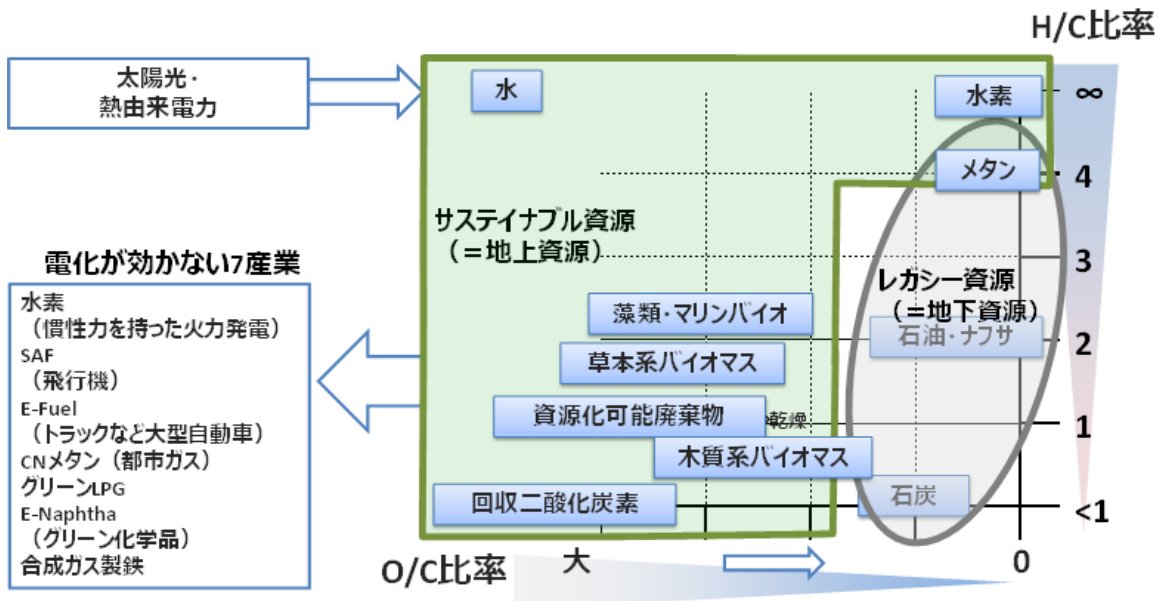


図1 電化が効かない7産業のための二酸化炭素再資源化・バイオマス利用

毎年一人9万円強のエネルギーに対する税金・賦課金を支払っていることになる。

2.2 排出権取引について

国内では企業毎に排出量の上限を決め、これを超過した企業が下回る企業との間で排出量を取引する仕組みである。また、海外との間では炭素国境調整措置がある。これは二酸化炭素の価格が低い国で作られた製品を我が国が輸入する際に、二酸化炭素の価格差を事業者が負担して、カーボンリーケージを抑制することが目的である。さらに、クレジット取引として、非化石価値取引やJクレジット、JCM（二国間クレジット制度）などが存在する。

2.3 クレジット市場とオフセットについて

ある程度の規模の商取引を介して、二酸化炭素排出の権利を売り買いしようというのがクレジット取引市場である。これは、2000年前後に英国を発祥として、二酸化炭素の排出権を売り買いしようという動きが生まれたものをきっかけとしている。出してしまった二酸化炭素を、植林などで穴埋めしようというものであり、多排出産業と森林保護団体などがクレジットをやりとりしている。主なプレイヤーは3つあると言われ、1つは森林保護などのグリーン事業の担い手、次にお墨付きを与える認証機関、そして3つ目はお墨付きを得たクレジットを企業とつなぐブローカー、である。一方で、アジアを中心に問題が多いとされており、クレジット頼みのオフセットはいずれ大きな問題となる可能性をはら

んでいる。他にもブラジルの森林再生プロジェクトにおいては、欧米企業にクレジットが売却された後に、伐採業者が木を切り倒してしまったケースが有る。また、フィンランドの非営利団体であるコンペンセートが最近、森林保護などの炭素クレジットを多数調査したところ、その9割が何らかの問題を抱えているとのことであった。このように、クレジットは現地での運用を担保する手法に乏しく、これに頼った二酸化炭素の削減は後々に禍根を残す可能性がある。愚直に技術を磨いて二酸化炭素を再資源化しコストを下げるのがやはり王道となるであろう。

2.4 省エネルギーについて

我が国は世界の中でも省エネルギー大国であり、オイルショック以降の省エネルギーにおいて技術的に高いレベルを維持してきた。とりわけエアコンではトプラランナー方式が取られ、高いヒートポンプの効率を誇る。我が国の事業者で年間のエネルギー消費量が1500 kL（石油換算）を上回る場合は、エネルギーの使用状況を定期報告しなくてはならないこととなっている。このような中、企業を中心に省エネ・二酸化炭素排出削減のための努力が続けられており、現在そのためのコストは削減量ベースで8000円/tCO₂程度となっている。また、一次エネルギー供給量をGDPと比較した場合、世界平均に対して日本はおよそ4割程度のエネルギーで済むという高いレベルの効率を有しているのが現状であ

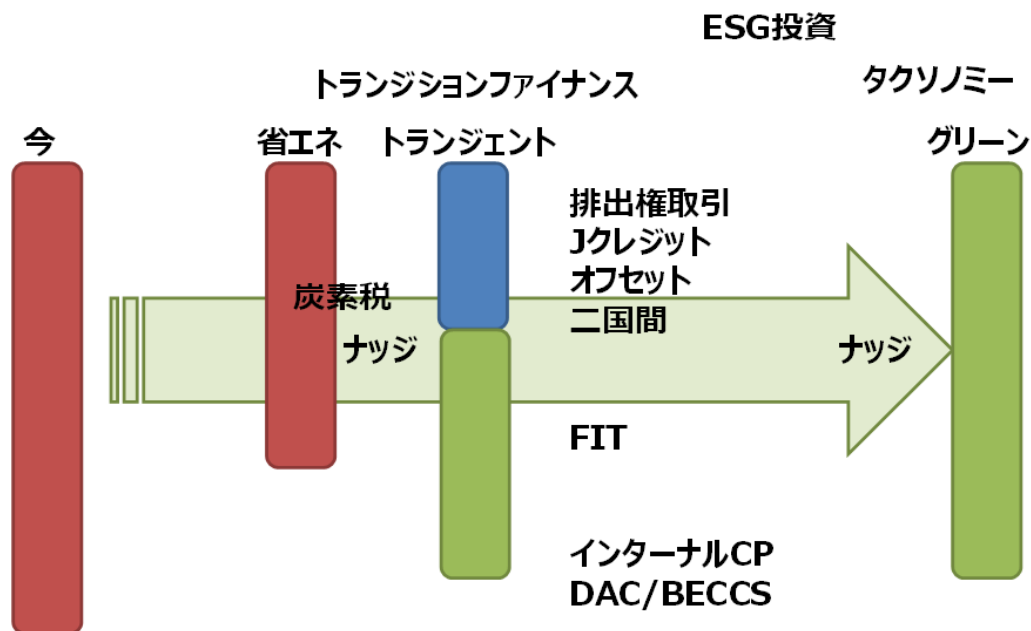


図2 主なカーボンプライシング手法と省エネ、タクソノミー、トランジションの位置づけ

る。逆に言えば、産業界を中心に、すでに乾いた雑巾を絞りきっている状態であり、これ以上の産業での二酸化炭素削減・エネルギー効率向上は難しいと言える。

2.5 FITについて

FIT 制度は、現在買取総額で4兆円弱、賦課金総額で3兆円弱の規模になっている。証書取引市場としては、FIT 証書（FIT 電源に対して）、非 FIT 証書（再エネ指定）、非 FIT 証書（指定なし）の3種が存在する。後者は大型水力やバイオマス、ごみ発電、廃棄プラ利用などで用いられている。FIT 証書については現在ほぼ全量のトラッキングが実施されており、非 FIT 証書についても全量トラッキング化に向けて進んでいる。

3. 直接的な手法として

最後に直接的な手法としてダイレクトエアキャプチャー（DAC と呼ばれる）や BECCS（バイオマス由来の二酸化炭素回収固定）についてまとめる。二酸化炭素を事業者自らが回収して利用するための手法としては、物理吸収法や化学吸収法などが知られ、数%から20%程度の濃度の二酸化炭素をその場で回収する方法はコスト的にはもっとも安く、1,500円～3,000円/t程度とされる。一方で、すでに出してしまった二酸化炭素を回収する方法としては、大気中の410ppmの二酸化炭素をアミンなどで回収する DAC、ならびにバイオマス育成を介して吸収させそのバイオマスをガス化や炭化などにより利用して炭素や二酸化炭素を地中に固定する BECCS が知られる（図3）。前者の DAC は、海外ではクレジッ

ト獲得手段としてベンチャーなどでの展開が進められているが、そのコストは25,000円/tを下回らないと言われる。これは、東京ドーム1杯分の大気を回収して濃縮しようやく1tの二酸化炭素を得ることができるため、であり、コスト低減は至難の業であると言えよう。一方の BECCS は、いま注目されているネガティブエミッション技術の一つとしても興味深い。ネガティブエミッション技術とは、他の二酸化炭素多排出産業の削減が不完全な際に、それをカバーしてトータルでゼロにしようするものである。2009年のコペンハーゲンでの COP15以降、期待を集めてきている。再生可能な樹木や穀物を經由して燃料や炭化物などを産出させ、エネルギーを獲得したあとに二酸化炭素や炭化物を固定するものである。これにより大気中の二酸化炭素を正味削減しようする切り札として考えられている³⁾。

3.1 4パーミルイニシアチブ

これらネガティブエミッション技術の一つとして、2015年の COP21 でフランス政府が提案した国際的な取り組みとしての4パーミルイニシアチブというものがある。現在、日本を含む566の国や国際機関が参画しており、都道府県では山梨県がはじめて参加した。概念としては、1年間に土の中の炭素を0.4%（4/1000）増やすことができれば、人間による二酸化炭素の排出の影響を相殺できる、というものである。この際に人間が経済活動によって大気中に排出している炭素は、年間約100億トンであり、木などが吸収する分を差し引くと、毎年約43億トン排出していると言われる。一方で、土の中には、1兆5,000億～2兆トンの炭素が存在し、表層の

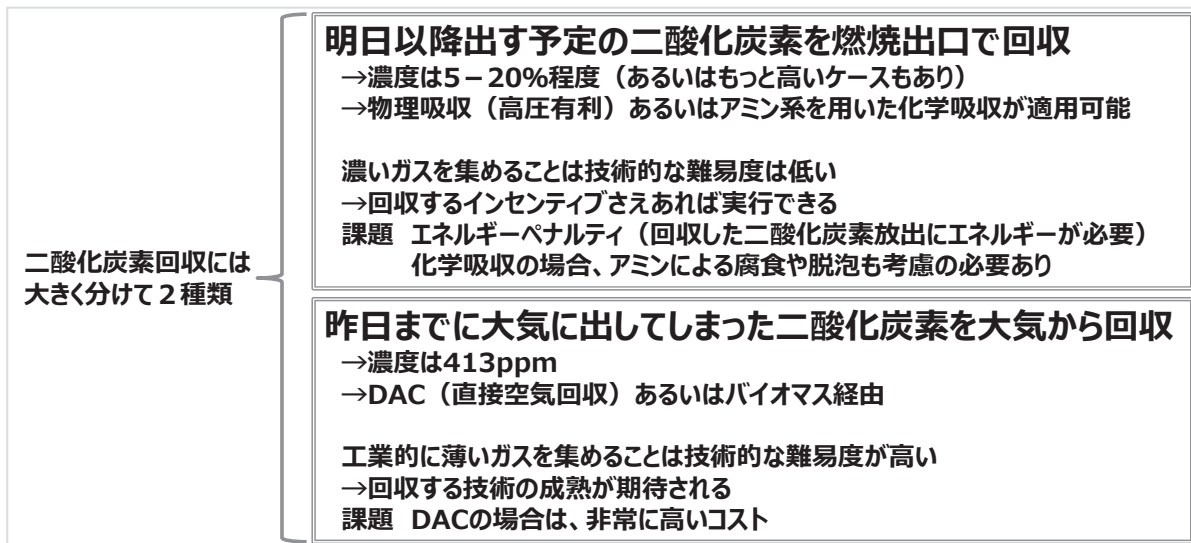


図3 二酸化炭素回収手法と DAC

30~40 センチには約 9,000 億トンの炭素があると言われる。この表層の 9,000 億トンの炭素を年間 0.4% 増やすことができれば、43 億トンの排出分の大半を帳消し可能になるというものである。バイオマスから炭化によって炭素を作り有機物として土に戻すことで、施肥効率の向上と植物生育の促進、炭素固定の 3 つが同時に実現できるものとなる。

3.2 海洋のブルーカーボン

また、海洋のブルーカーボンについても、賦存量としてはこれほど多くないが、海洋国家日本としては期待されるものである。現在世界でのブルーカーボンの消失率は、熱帯雨林の 4 倍以上に達すると言われ、年間で平均して約 2% ~7% もの割合で減少している。今後、対策を講じなかった場合、ブルーカーボン生態系のほとんどは今後 20 年のうちに失われると言われる。国内においても、日本の湿地の面積は大正時代から 1999 年までの間に半以下になっており、瀬戸内海の高草藻場は沿岸開発や水質悪化などにより、1960 年~1991 年の間に 1 万 6,000 ha が消失したとされる。国内のブルーカーボンとしては、海草藻場と海藻藻場が主なものとなる（他に塩性湿地やマングローブもある）。海草藻場とは、「アマモ」が主要種であり、北海道から九州まで広く分布している。進化の過程で陸域から海洋へ回帰した被子植物であり、もっとも炭素固定ポテンシャルが大きいとされる。これに対して海藻藻場は、「ガラモ場」「コンブ場」「アラメ場」が主要なものであり、岩盤などの固くて安定した基質の上に定着するが、海底が岩盤で泥がないため、海藻類の藻場自体には炭素を貯留する機能が低い。

3.3 その他のネガティブエミッションと IPCC

さらに、海台などのオーシャンバサルトといわれる海底玄武岩を用いた固定についても、実現性は遠いものであるが、そのポテンシャルの高さは注目に値する。他にも岩石の風化促進やコンクリートへの吸い込みなど多様な手法が提案されている。

IPCC は 2022 年 4 月に、第 6 次報告の第 3 部を発表し、その中では大気中の二酸化炭素を除去する 10 の方法が大事である、との提言がなされた。この中には上述のネガティブエミッション技術が全て含まれている。今後政府でもこれらを後押しする政策が出てくることとなるであろう¹⁾。

4. おわりに

二酸化炭素を回収再利用することで、物質閉鎖系である地球において、新たな化石資源掘削を行わずとも、化学産業や燃料を供給可能となり、地球の持続性を担保することができる。しかし二酸化炭素回収コスト、資源化のための外部水素製造コスト（電解合成の場合は不要となる）、そして資源化プロセスのコスト、が重くのしかかり、化学産業や燃料製造業は身動きが取りにくい状況にある。このような中で、排出二酸化炭素を量的にきちんと評価し、これに価格的なインセンティブを上乗せすることで、カーボンニュートラルに向けた産業の動きを加速することが可能となる。ともすると、カーボンクレジットなどに頼ってオフセットした気になってしまうケースが多いが、他のカーボンプライシング手法を用いながら、真に技術を磨いて愚直に二酸化炭素再資源化を行った者が最終的な勝利を掴み取るようになると思われる。政府の早急な制度設計と、これを見据えた骨太な技術開発が期待される。

参考文献

- 1) IPCC 第 6 次報告 第 1 部会・第 3 部会報告 2020 年 8 月並びに 2021 年 4 月公表
- 2) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 経済産業省ほか, 2020 年 12 月 20 日.
- 3) 関根 泰, 炭化水素の本質を考え流れを創ろう, ペトロテック, **44** (4), 255 (2021) .

著者略歴



関根 泰 (セキネ ヤスシ)

1993 年東京大学工学部応用化学科卒業, 1998 年同博士 (工学), 1998 - 2001 年同助手, 2001 年より早稲田大学理工学部助手, 講師, 准教授を経て 2012 年より現職

2011 年より JST フェロー, 現在他に JST さきがけ総括, 政府グリーンイノベーション関連委員, Elsevier 社 FUEL 誌基幹エディターなどを務める。