

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 －

新エネルギーグループ 柴田 善朗

サマリー

近年、CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) として、CCS (Carbon Capture and Storage) と CCU (Carbon Capture and Utilization) が同一のカテゴリーに分類され、議論されることが多い。しかしながら、CCS は排出される CO₂ を固定化・貯留することで大気への放出を回避する技術、CCU は大気放出前の CO₂ を再利用して、燃料、化学品、建材等を製造・利用する技術である。CO₂ 分離回収より下流の特性が全く異なる CCS と CCU を CCUS に同分類することで、誤って CCU に対しても CCS と同様の機能を要求し、CCU の本来の意義を誤解した論調、学術論文、報告書等が数多く見られる。そこで、本研究では、CCS と CCU の機能や役割に関する違いに基づき、主に燃料製造を対象とした CCU の本来の意義を明らかにした。

CO₂ 再排出、CO₂ 固定化期間、CO₂ 起源の限定等、CCU に対する間違った解釈は、CCS と CCU を CCUS に同分類することによって、CCS 特有の CO₂ の永久的な固定化という機能を CCU にも求めてしまうことに原因がある。CCU は従来型燃料・原料を代替することで低炭素化を図る技術であることから、どの程度従来型燃料・原料を代替できるかが主要な評価軸であり、CO₂ 再排出の回避、CO₂ 固定化期間の長期化、CO₂ 起源の非化石由来のみへの限定は、考慮する必要がない。

一般に、多くの変換プロセスを必要とする CCU は、CCS と比べて CO₂ 排出削減効果が劣る。しかしながら、CCU 技術として燃料製造にフォーカスすると、化石燃料の代替による輸入削減を通じたエネルギーセキュリティ改善のメリットがある。したがって、CCU に対しては、低炭素化に加えて、化石燃料を利用し続けながら低炭素化を図る CCS には無いエネルギーセキュリティ改善効果という評価軸を踏まえた議論が求められる。

CCU の低炭素化効果をより高めるためには、燃料製造の場合に必要な水素の CO₂ 排出係数の最小化が必須となることから、水素は化石燃料+CCS 由来か再エネ由来が候補となる。しかしながら、化石燃料+CCS 由来の場合は、化石燃料を水素と CO₂ に分離後、再度燃料を製造するという無意味なプロセスであるとともに、CCU の重要な意義である化石燃料代替効果が得られない。したがって、CCU で利用する水素は再エネ由来が望ましい。むしろ、化石燃料+CCS 由来の水素は CCU に利用するのではなく直接利用することに意義がある。また、CO₂ を化石燃料という形で既に輸入しているわが国の視点から見ると、輸入水素を用いて CCU を実施するとなれば、エネルギーセキュリティ改善効果が得られない

だけでなく、低炭素化効果も CCS より劣ることから、国内で CCU を実施する意義が薄れる。したがって、CCU で利用する水素は国産の再エネ由来が望ましい。

CCU による燃料製造は、バイオマス由来や DAC (Direct Air Capture) 由来の CO₂ のみならず不可避に排出される化石燃料由来 CO₂ を再利用し、再エネ水素と結合させて、燃料を合成・利用することである。つまり、化石燃料を有効活用しつつ、徐々に低炭素化を目指すものであり、欧州を中心とした化石燃料利用の急激な削減・停止という方向性とは異なり、低炭素化に向けた現実的なパスを描くための参考になると考えられる。

一方で、CCU、カーボンリサイクル、炭素循環等の概念は重要であるが、CO₂ 利用の合理性や経済性を踏まえた議論も必要である。例えば、水素は直接利用が望ましく、都市ガスネットワークへの合成メタン注入に見られるような既存インフラの活用というメリットがなければ、CCU で水素を用いて燃料を製造する意義はない。

従来型燃料・原料の代替、エネルギーセキュリティーの改善、不可避な CO₂ 排出の再利用、既存インフラの活用等の CCU の本来の意義が正しく理解されない背景には、低炭素化に比重を置きすぎたエネルギーシステムの議論があると考えられる。低炭素化以外のこれらのメリットにも着目した CCU の議論が今後求められる。

はじめに

近年、CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) として、CCS (Carbon Capture and Storage) と CCU (Carbon Capture and Utilization) が同一のカテゴリーに分類され、技術評価、低・脱炭素化効果、経済性が論じられることが多い。CCS も CCU も CO₂ 分離回収技術を利用することから同分類されている。しかしながら、CCS は排出される CO₂ を固定化・貯留することで大気への放出を防ぐ技術、CCU は CO₂ を利用して、燃料、化学品、建材等を製造する技術であり、CO₂ 分離回収より下流の特性は全く異なる。特性の全く異なる CCS と CCU を CCUS に同分類することで、CCU 本来の意義を誤解した論調、学術論文、報告書等が数多く見られる。背景には、低・脱炭素化に比重を置きすぎたエネルギーシステムの議論があると考えられる。

本研究では、CCU に対する誤解や誤解を引き起こす要因を整理し、CCU 本来の意義や位置づけの正しい理解醸成に向けた説明を試みる。

1. CCUS という分類学

CCUS という表現は学術論文では 2000 年代の初期から見られるが、エネルギー関連の著名な国際機関等が発行している報告書を例にとると、IEA の WEO (World Energy Outlook) で採用されたのは 2018 年からで、それまでは CCS であり、CCU を含んでいない。ICEF (Innovation for Cool Earth Forum) では、2017 年の “Carbon Dioxide Utilization (CO₂U) ICEF Roadmap 2.0” で CCUS という表現が使われ始めた。GCCSI (Global CCS Institute) では 2015 年頃である。

断定するためにはより詳細な調査が必要ではあるものの、エネルギーの学際的分野において CCUS という表現が幅広く使われ、認識され始めたのは、脱炭素化への流れが世界的に強まった 2015 年末のパリ COP21 が一つの背景にあるものと考えられる。脱炭素化へのドライバーとして、CCS と並んで CCU の着目も高まり始め、CCUS という一つの分類になったと考えるのが妥当であろう。

なお、Carbon Recycling (カーボンリサイクル) という表現は、経済産業省による 2019 年 6 月の “カーボンリサイクル技術ロードマップ” の策定、9 月の “カーボンリサイクル産学官国際会議” の開催で一躍注目を浴びるようになったが、世界に目を向けると 2000 年半ばから企業名等で利用されている¹。

CO₂ 利用という点で、CCU も Carbon Recycling も大きな違いはないことから、本稿では以下 CCU という表現には Carbon Recycling を含むものとする。

¹ Carbon Recycling International (<https://www.carbonrecycling.is/about-us>) や Gussing Renewable Energy (<http://gussingcleanenergy.com/carbon-recycling/>) など。Carbon Recycling International は 2006 年創立のアイスランドの企業で、2012 年から、地熱蒸気に含まれる CO₂ と再生可能エネルギー由来水素からのメタノール合成 (Power to Methanol) を商用化している。

2. CCU にまつわる誤解

2.1 CCU における CO₂ 再排出の問題

(1) CO₂ の固定化期間

このように、CCU と CCS を CCUS として同分類し CCU と CCS を同列に取り扱うことで、CCU に対しても CCS と同様に CO₂ 固定化期間が議論されることが多い。これは、CCU における“CO₂ 再排出の問題”とも言える。CCS では CO₂ がほぼ永久に貯留されることで大気への放出はない (CO₂ 漏洩可能性に関する指摘はあり、見解のコンセンサスはまだないが、ここでは議論の単純化のため永久的な固定化を前提とする)。一方、CCU では、回収した CO₂ から燃料、化学品、建材等を製造し、製品の利用過程もしくは廃棄過程で燃焼されれば CO₂ が排出される (ただし、一部の建材用途では半永久的に CO₂ の固定化が可能²)。この CCU における CO₂ 再排出現象にフォーカスし、「一度回収された CO₂ が再排出されるから CCU は意味がない」、「CCU は CCS と比べて CO₂ 固定化の期間が短いから問題である」、「CO₂ 固定化期間のより長い CCU を検討すべき」との指摘が見られる。

例えば、「化学品と燃料は、製品寿命が 6 ヶ月未満と期間限定的な CO₂ 貯留である。結果として、CO₂ 貯留のメリットが実現される前に CO₂ は大気放出される。したがって、寿命のより長い製品の合成に重きを置いた研究が必要である」[1]、「建材のように CO₂ の永久固定化ができる製品は、最終的に CO₂ を大気放出する燃料や化学品より大きな CO₂ 排出削減効果がある」[2]、「ほとんどの CCU では、CO₂ 貯留の期間は限定的である」[3]などが挙げられる。また、CCU 技術の評価指標として技術成熟度、ポテンシャル、製品の市場価値などと併せて CO₂ の固定化期間を含めている例[4]も見られる。

これらの見解は、低炭素化が CCU の目的であるならば、なぜ CO₂ を一度分離回収した後もう一度そのまま再排出するという無意味なことをわざわざするのか、ということ全く考えていない。これは、CCS を前提・起点に CCU を捉えているからである。CCS は CO₂ を永久に固定化する技術であり、その価値判断に基づき CCU に対しても、どの程度の期間 CO₂ を固定化できるか、ということしか見ていない。そもそも、CCU の意義が時限的な CO₂ 固定化しかなければ、CCU を実施する意味が全くないので、CCU に対して、CO₂ 排出削減効果を期待することなどあり得ない。それにも関わらず CCU が CO₂ 排出削減技術として挙げられていることには正当な理由があるのである。それは、CCU によって製造された製品は従来型燃料や原料を代替し、その代替によって CO₂ 排出を削減するからである。

1) 正しいバウンダリーの設定

上記の CCU に対する誤解は、CCU を CCS と比較することで生じている。この誤解が生

² 炭酸カルシウム (CaCO₃) は、Ca²⁺ を含有する産業廃棄物と CO₂ から製造され、直接建材への利用が可能であると同時に、焼成することでセメントを製造できる。前者の場合は CO₂ はほぼ半永久的に固定化されるが、後者の場合は再排出される。

じる原因をもう少し詳細に見てみる。CCS と CCU を比較するにあたり、多くの論調において見られるのは図 2.1 に示す方法である（燃料製造（例えばメタン）と原料製造（例えば炭酸カルシウム）の場合）。なお、議論の単純化のため、CCS や CCU のプロセスに投入されるエネルギーやエネルギー消費に伴う CO₂ 排出は表示していない。燃料製造（図の上半分）を例にとると、この比較方法の場合、CCU によって燃料を製造すると、燃料の利用時（燃焼時）に CO₂ が排出されるから意味がない、という見解を誘導してしまう。したがって、CCS の方が CCU より優れているということになる。

この比較方法における間違いは、CCS においては、CO₂ の貯留による CO₂ 排出削減効果が記されているが、一方、CCU において生産・供給される燃料や原料による従来型燃料や原料の代替効果が明示されていない点にある。CCU にはあって CCS にはないこの代替効果を踏まえなければならない。

したがって、CCS と CCU を同じ土俵で比較するためには、両者が有する機能を並列する必要があり、図 2.2 に示す比較方法が正しい。CCU の燃料製造の場合（図の上半分）を例にとると、CCS の場合は CO₂ 貯留に加えて、CCU における燃料製造・供給に相当する部分、つまり従来型燃料の供給も含めなければならない。この比較方法に基づくと、CCS の場合は、CO₂ が貯留されることで CO₂ 排出は削減されるが、従来型化石燃料は代替されず CO₂ は削減されない。一方、CCU は CO₂ の固定化はできないが、従来型燃料・原料の代替効果が本来の意義であることがわかる。

2) 正しい比較をすることで見えてくる CCU の意義

ここで、CCU において、何が従来型燃料・原料を代替しているか、が見えてくる。燃料製造の場合を例にとると、それは水素（図 2.2 の上半分参照）である。CCU によって分離回収・利用される CO₂ には従来型燃料の代替効果はなく、水素にある。CCU は化石燃料の代替であり、その代替効果は水素に依存しており、CO₂ にはではない。別の言い方をすれば、CCU によって製造される燃料は水素のエネルギーキャリア³に過ぎない[5]。ただし、水素製造方法に関する議論については後述（3.5）する。

CCS を起点とした CCU の捉え方は、CCU の“U”のところでバウンダリーを区切っている。つまり、“Carbon Capture and Utilization”を解すると「CO₂を分離回収してCO₂を利用すること」になり、CO₂の利用を意味する“U”で留まっている。CCU の本来の意味は、「分離回収したCO₂を利用して製造した燃料・原料を“利用”することにある。つまり、“CCU&U”と言うこともできる。製造した燃料・原料を利用することで初めて従来型燃料・原料を代替できる。従来型燃料・原料を代替するところまでバウンダリーを拡げなければ CCU の意味を見出すことはできない。

³ 水素の輸送方法として検討されている液化水素、メチルシクロヘキサン、アンモニアと同様にメタンやメタノール等の燃料も水素を輸送するエネルギーキャリアである。

<多く見られる間違った比較方法>

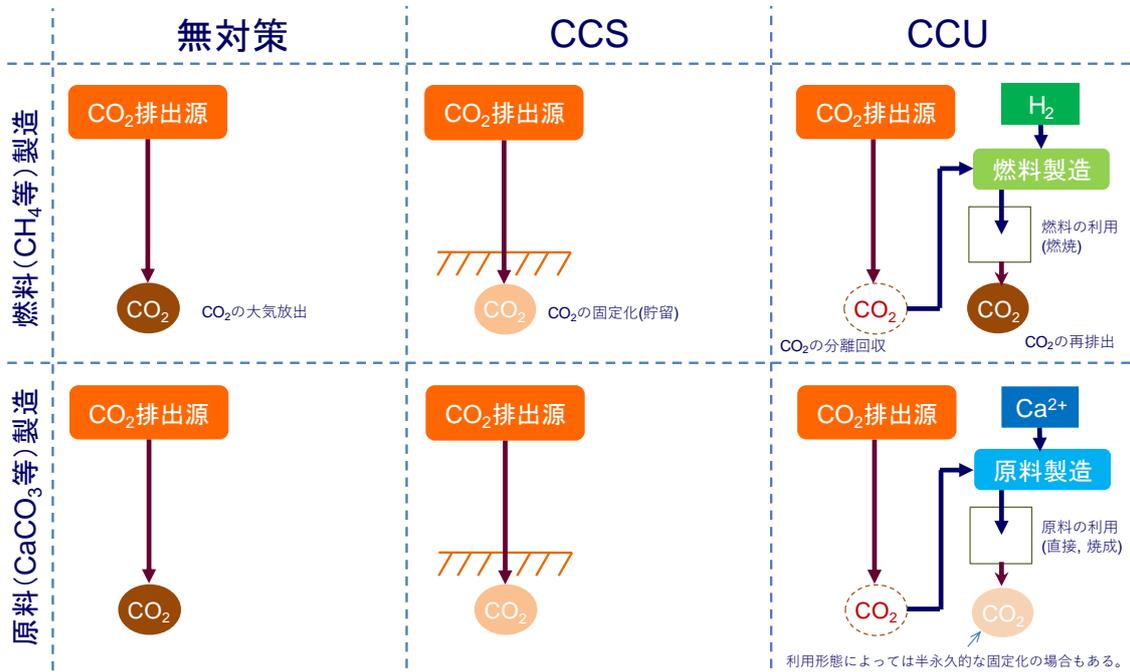


図 2.1 CCS と CCU の比較方法 (1)

注：CCS や CCU のプロセスに必要なエネルギー投入及びそれに伴う CO₂ 排出は表記していない。

<あるべき比較方法>

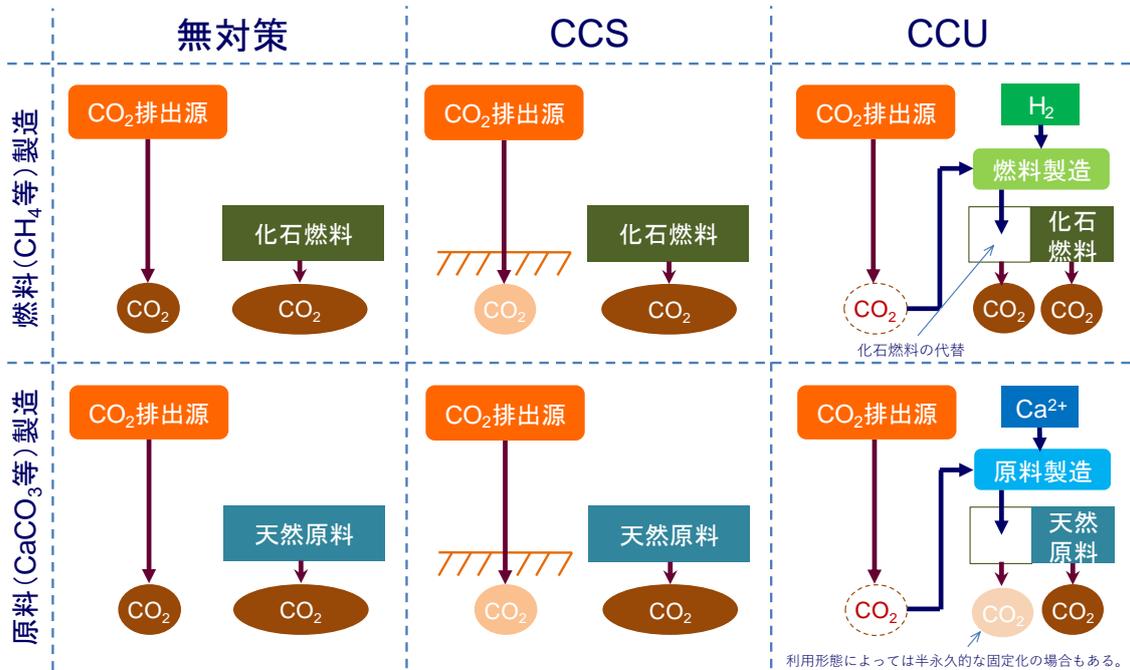


図 2.2 CCS と CCU の比較方法 (2)

注：CCS や CCU のプロセスに必要なエネルギー投入及びそれに伴う CO₂ 排出は表記していない。

CCU で製造した燃料・原料の利用過程では当然 CO₂ は再排出されるが、元々の CO₂ 排出源からの時間差・地点差の排出に過ぎない[5]。CO₂ の再排出の過程で従来型の燃料・原料を代替しているのだから CO₂ は再排出されても問題ないのである。

なお、以上は燃料を前提にしているが、炭酸カルシウム製造の場合は、水素が不要であり、また直接建材に用いると半永久的に CO₂ を固定化できることもあることから、CCS に近い概念となる。

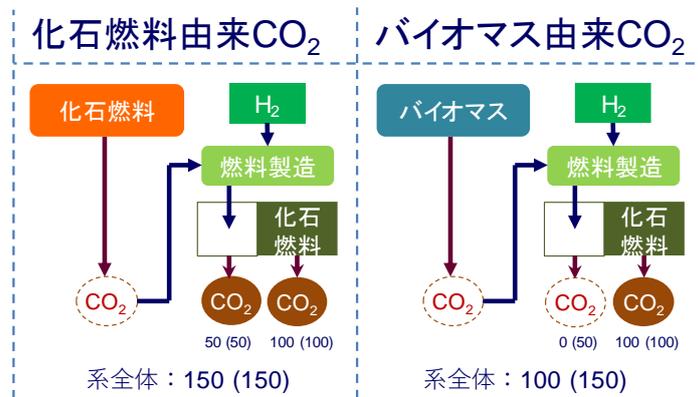
(2) CO₂ 起源の限定

次の誤解は、CCUにおいてCO₂は再排出されるので、せめてバイオマス由来やDAC(Direct Air Capture)由来など低環境負荷のCO₂利用に限定すべきだという主張である。例えば、「合成メタンは、合成プロセスに利用するCO₂がバイオマス由来かDAC由来でないかぎり、低炭素ではない。合成メタンは燃焼すると、CO₂が再排出される。したがって、気候変動対策の観点からは、CO₂起源が非常に重要なファクターである」[6]がこの主張を代表した解釈である。これも“CO₂の再排出の問題”の一つである。

この解釈も、間違ったバウンダリーの設定に基づいたCO₂起源の比較に起因している。例えば、“化石燃料由来CO₂+CCU”と“バイオマス由来CO₂+CCU”とを比較すると、当然のことながら、後者の方がCO₂排出量は少ない(図2.3)。その理由は明確である。バイオマスに起因する。この関係性はCCUを導入しようがしまいが関係なく、バイオマスか化石燃料かに依存している。つまり、CCUにおけるCO₂起源に関する上記の主張は「バイオマスはいいが、化石燃料はよくない」と言っていることと同義であり、CCUに対する見解は一切含まれていない(CCUを無視している)。CCUの意義・効果は、上述のとおり、あくまでCCUを行うことで従来型燃料・原料が代替されることによるCO₂排出削減効果である。このCCUによる効果のみを特定するためには、元来のバイオマスと化石燃料の差異を除外する必要があり、そのためにはバイオマスと化石燃料が併存する図2.4に示す比較方法が適切である。この比較方法においては、どちらの起源のCO₂を利用しても、系全体でのCO₂排出量(CO₂削減効果)は同じである。つまり、CCUの効果はCO₂起源に依存しない。

CO₂起源に関するこの間違った解釈の背景にも、CCSを起点としたCCUの解釈の方法があると思われる。つまり、火力発電+CCSとバイオマス発電+CCS(BECCS)の比較方法である。両者を比較すると、当然BECCSの方のCO₂排出量が少ないが、この差異は、火力発電とバイオマス発電のCO₂排出量の差異に起因しており、CCSとは関係がない。本来は、火力発電とバイオマス発電が併存している場合(図2.4と類似の比較方法)について比較すべきであり、その場合、どちらにCCSを付けても系全体のCO₂削減効果は同じである(議論の単純化のため、両者からの発電電力量とCO₂分離回収貯留量は同じと想定すると)。BECCSやDAC+CCSのネガティブエミッションに注目し過ぎることで、火力発電+CCSの劣後性が強調される傾向にあるが、比較方法が間違っている。

<多く見られる間違った比較方法>

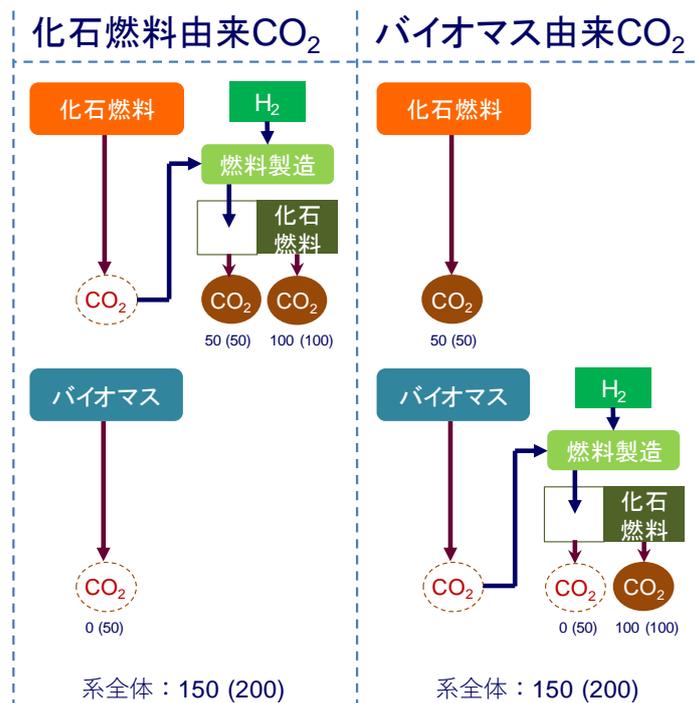


数字は、カウントされるCO₂排出量 (物理的CO₂排出量)を示す。

図 2.3 CO₂起源別CCUの比較方法(1)

注: CCSやCCUのプロセスに必要なエネルギー投入及びそれに伴うCO₂排出は表記していない。

<あるべき比較方法>



数字は、カウントされるCO₂排出量 (物理的CO₂排出量)を示す。

図 2.4 CO₂起源別CCUの比較方法(2)

注: CCSやCCUのプロセスに必要なエネルギー投入及びそれに伴うCO₂排出は表記していない。

ただし、ここで注意しなければならないのは、BECCS や DAC+CCS はネガティブエミッションであるが、CCU の場合は、CO₂ は再排出されることから、バイオマス由来 CO₂+CCU や DAC+CCU は決してネガティブエミッションではないという点である。

一方で、CCU に利用する CO₂ として化石燃料由来 CO₂ を認めることで生じる課題がある。例えば、「天然ガスを水素と CO₂ に分離し、これらを再結合させてメタンを製造するというプロセスも CCU として認めてしまうことになる」[7]という指摘である。このプロセスは、天然ガスから人工的にメタンを合成するという無意味なプロセスであり、指摘通り CCU として認められないことは明らかである。このようなケースを避けるためには、CCU で利用する水素は非化石由来（例えば再生可能エネルギー由来）でなければならないが（水素製造方法に関する議論については 3.5 で後述）、CO₂ に関しては、上記で説明した通り起源に依存して選別する必要はない。

このような懸念が生じるのは、CCU の目的の捉え方が間違っているからである。そもそも、CCU を行う目的で CO₂ 排出源を確保するためだけに、意図的に火力発電等の化石燃料利用設備を維持したり新設することはしない。火力発電の目的は電力の供給であり、CCU のための CO₂ 確保にはない。ここで、CCU を実施するもう一つの（上述の従来型燃料・原料の代替とは異なる）意義が明確にされる。つまり、CCU の意義は、バイオマス由来や DAC 由来は当然のことながら、既存でかつ短期的には減らすことのできない化石燃料利用設備（例えば、セメントや鉄鋼など）からの不可避な排出 CO₂ も利用することにある。

2.2 CO₂ 排出削減効果の帰属

“CO₂ の再排出の問題”をクリアしても、次に、「CO₂ 排出削減効果は、CO₂ 分離回収施設と CCU で製造された燃料を利用する施設で折半すべきである」との主張が見られる。果たして本当にそうであろうか。これは CO₂ 排出削減効果の帰属の問題である。この問題を議論する過程で、改めて 2.1 で先述した“CCU&U”に関する点の重要性が浮き彫りになる。

CCU は CC（CO₂ 分離回収）と燃料や原料を製造するための CO₂ の利用（Utilization）だけでは意味がない。製造した燃料や原料の利用（Utilization）があって初めて成立する概念である。製造した燃料・原料の利用による従来型の燃料・原料の代替に意味がある。

ここで気を付けなければならないのは、CCU による燃料製造の場合は、この代替効果は分離回収した CO₂ にはないということである。代替効果は水素（水素製造方法に関する議論については 3.5 で後述）から来ている。CO₂ はエネルギーではないので燃料の代替効果がないのは当然である。

CCU を CO₂ の排出・分離回収・燃料合成・燃料利用という全体の流れで見た場合、最下流の利用というところで初めて CO₂ 排出削減効果が顕在化される。燃料合成の段階で留まり、燃料を永久にタンクに貯蔵するというなら、その時点で CO₂ 排出削減効果は得られる

が、まさかそのような行為はあり得ない。燃料利用のところで顕在化される CO₂ 排出削減効果（既存燃料の代替効果）は水素に依存している。CCU が介在しなくても水素単独で既に代替効果を有しているのである。この観点から見ると、CCU における CO₂ 排出削減効果の全ては、CO₂ 分離回収施設ではなく、製造される燃料に帰属していると言うことができる。

ただし、原料製造の場合は状況が異なる。例えば、炭酸カルシウム製造においては、従来型原料である石灰石を代替するためには、カルシウムイオンと CO₂ の両方が必要であることから、CO₂ 排出削減効果は CO₂ 分離回収施設にも帰属していると考えられる。したがって、CCU の技術ごとに、CO₂ 排出削減効果の帰属に関する議論が今後必要となる。

3. CCU の意義と課題

これまでの議論に基づき、本来の CCU の意義と課題を整理する。ただし、CCU の技術として主に燃料製造を対象にする。

3.1 資源枯渇の回避

CCS と CCU の違いは明らかである。CCS はあくまで化石燃料を利用し続けて低炭素化を行う技術である。一方、CCU は化石燃料を代替することで低炭素化を行う技術であり、特に燃料製造の場合は、非化石由来水素が役割を担っている（3.5 に詳述）。この観点から、CCU には化石資源枯渇の回避というメリットがある。

化石資源枯渇の問題はかなり長期的な課題であり、大きな懸念はないとの見解が支配的で、近年議論されることは稀であるが、より長期的に化石燃料を有効活用し続けることは安定供給の観点からも重要である。再エネなどの非化石由来とする水素を軸とした CCU は化石燃料代替効果を有することから、CCU は化石由来 CO₂ と再エネによる化石燃料の持続可能的利用の促進と言うことができる。

3.2 エネルギーセキュリティの改善

資源輸入国の観点から見ると、CCS は化石燃料を利用し続けることからエネルギーセキュリティを改善することができない。一方、CCU は化石燃料を代替することで輸入を削減できるという点でエネルギーセキュリティに貢献する。特に化石燃料輸入依存度の高いわが国の視点からは、CCU の意義として低炭素化のみではなく、エネルギーセキュリティ改善のメリットにも着目すべきである。CCU を、CCS と切り離して、エネルギーセキュリティ改善や資源枯渇回避の観点から見るべき[8]との主張も見られる。また、CCU を評価するにあたり、CO₂ 排出削減効果と資源枯渇回避を指標としている例[9]もある。

しかしながら、近年の国内外の主要な CCU に関する報告書 [10][11][12][13][14]においては、CCU によるエネルギーセキュリティ改善に関する議論は全く見られない。全て低炭素化に主眼を置いている。[11]では、CCU の評価において低炭素化以外の影響も考慮すべきとしており、例として化学品であるジメチルカーボネート製造に必要な毒性の強いホスゲ

ンを CO₂ 由来原料によって代替することで製造工程における安全性を確保できるメリットを挙げているが、エネルギーセキュリティーに対する言及はない。[2]では、CCU への関心の高まりや普及のドライバーの要因の一つとしてエネルギーセキュリティーが挙げられているが、詳細な議論はなされていない。CCS にはないエネルギーセキュリティー改善効果を CCU の一つの意義として位置付けるべきである。

ただし、特にわが国において CCU によりエネルギーセキュリティーを改善するためには、燃料製造の場合は、せめて水素は国内生産でなければ意味がないという点に留意すべきである。現在 CO₂ を化石燃料という形で輸入しており、今後水素も輸入し、国内で CCU を行うのであれば、エネルギーセキュリティーの改善効果は得られない (3.5 に詳述)。

3.3 システム全体での CO₂ 排出削減効果⁴

CCS や CCU の正確な低炭素化効果を評価するためには、分離回収された CO₂ 量に対してシステム全体での CO₂ 排出削減量を定量化する必要がある。そのためには、図 2.1~2.4 では捨象したが図 2.5 に示すように各プロセスでの CO₂ 排出量を特定しなければならない。CCU は燃料製造のケースを表示している。CCS の場合は、分離回収された CO₂ 量 (CO_{2RM}) から、CO₂ の分離回収、輸送、圧入に必要なエネルギー消費に係る CO₂ 排出量 (CO_{2CP}、CO_{2TS}、CO_{2INJ}) を控除した分が CCS の効果となる。CCU の場合は、分離回収された CO₂ 量 (CO_{2RM}) から、CO₂ の分離回収、輸送に必要なエネルギー消費に係る CO₂ 排出量 (CO_{2CP}、CO_{2TS}) と併せて燃料製造、燃料輸送、水素製造に係る CO₂ 排出量 (CO_{2FP}、CO_{2FTS}、CO_{2HY}) と燃料利用時の CO₂ 再排出量 (CO_{2RM}) を控除する。ただし、従来型化石燃料の代替による CO₂ 排出削減量を加算する。つまり、CCU においては、分離回収される CO₂ と再排出される CO₂ が相殺されており、従来型化石燃料の代替による CO₂ 排出削減量が CCU の意義 (2.1 参照) であることを再確認できる (下式参照)。

$$\text{CCS の効果} = \text{CO}_{2\text{RM}} - \text{CO}_{2\text{CP}} - \text{CO}_{2\text{TS}} - \text{CO}_{2\text{INJ}}$$

$$\begin{aligned} \text{CCU の効果} &= \text{CO}_{2\text{RM}} - \text{CO}_{2\text{CP}} - \text{CO}_{2\text{TS}} - \text{CO}_{2\text{FP}} - \text{CO}_{2\text{FTS}} - \text{CO}_{2\text{HY}} - \text{CO}_{2\text{RM}} + \text{CO}_{2\text{RM}} \\ &= \text{CO}_{2\text{RM}} - \text{CO}_{2\text{CP}} - \text{CO}_{2\text{TS}} - \text{CO}_{2\text{FP}} - \text{CO}_{2\text{FTS}} - \text{CO}_{2\text{HY}} \end{aligned}$$

なお、プロセスにおける CO₂ 漏洩や未反応 CO₂ もあるが、分離回収される CO₂ の全量 (CO_{2RM}) が、CCS の場合は貯留でき、CCU の場合は燃料製造に利用できることを想定している。

⁴ CCS や CCU の評価には LCCO₂ (Life Cycle CO₂) が必要との指摘が多い。LCCO₂ の場合、エネルギーのみならず設備製造プロセスでの CO₂ 排出量まで含めることになる。本稿では、CCS や CCU の本質に関する議論が目的であるため、あえて LCCO₂ という表現を避けている。

ここで、CCS と CCU におけるシステム全体での CO₂ 排出量の定性的な比較を行う。CCS と CCU において CO₂ 分離回収を同一施設とし、分離回収される CO₂ 量 (CO_{2RM}) を同じと想定すると、CO₂ の分離回収における CO₂ 排出量 (CO_{2CP}) は同じである。

CO₂ 輸送における CO₂ 排出量 (CO_{2TS}) は貯留サイト (CCS) までの距離と燃料製造場所 (CCU) までの距離に併せて、CO₂ 輸送方法・条件によって異なる。既往研究[15]に基づく、CCS に必要な電力消費のうち最も大きなシェアを占めるのは CO₂ の昇圧である。貯留サイトまでの輸送の効率化のために、CO₂ を臨界状態にするため 7MPa まで昇圧される。一方、CCU では、例えば合成メタン製造 (メタネーション) の場合は、大きな昇圧が不要である (0.1~0.5MPa)。したがって、同一距離の CO₂ 輸送の場合は、合成メタン製造の方が CCS より CO₂ 排出量が少なくなる。ただし、CO₂ 輸送の条件は CCU の技術・製造製品の種類によって異なることに留意は必要である。

一方、CCS と CCU での大きな差異は、CCS の CO₂ 圧入に係る CO₂ 排出量 (CO_{2INJ}) と CCU の燃料製造、燃料輸送、水素製造に係る CO₂ 排出量 (CO_{2FP} + CO_{2FTS} + CO_{2HY}) にある。CCS の CO₂ 圧入に係る CO₂ 排出は圧入サイトの深度や圧入に必要な電力消費量及び電力の CO₂ 排出係数に依存する。CCU の燃料製造における CO₂ 排出量は製造効率や製造に必要なエネルギー消費量及びエネルギーの CO₂ 排出係数に依存する。また、水素製造における CO₂ 排出量は製造方法に依存する。

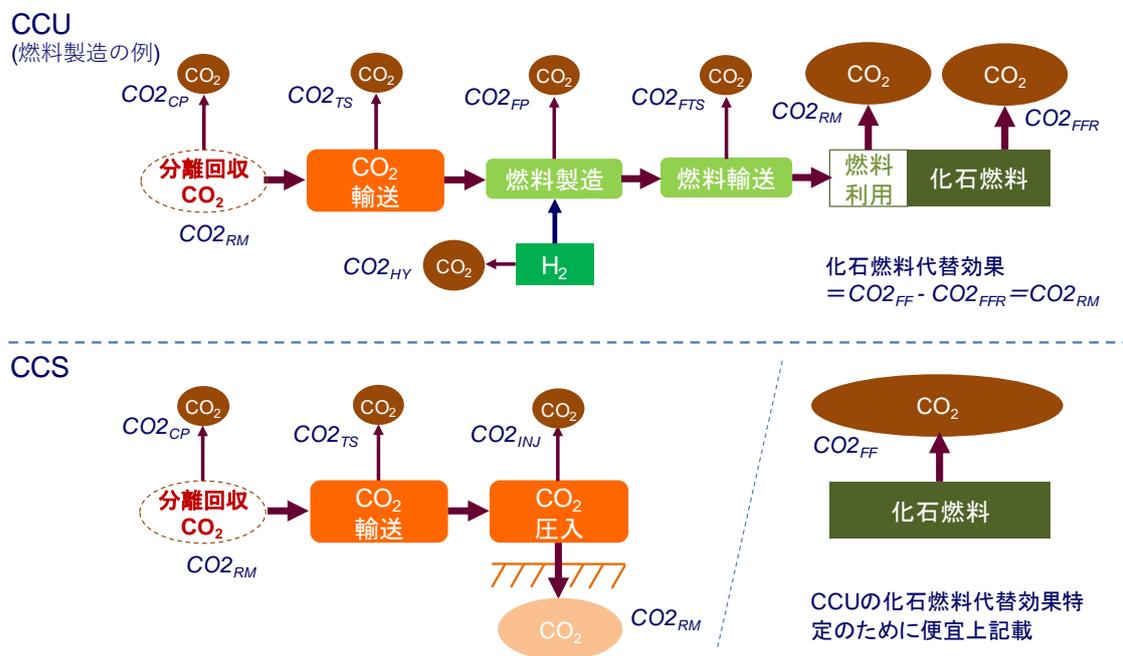


図 2.5 システム全体での CO₂ 排出量の評価 (CCU は燃料製造の場合)

注: CCS における右側の化石燃料のブロックは CCU の従来型燃料代替効果の把握のために必要であることから表示しているが、CCS のシステム CO₂ 排出量評価には不要である。

注: なお、プロセスにおける CO₂ 漏洩や未反応 CO₂ もあるが、分離回収される CO₂ の全量 (CO_{2RM}) が、CCS の場合は貯留でき、CCU の場合は燃料製造に利用できることを想定している。

注: CO₂ 輸送や燃料輸送には必要な圧縮・貯蔵工程も含む。

このように CCS と CCU のシステム全体の CO₂ 排出削減効果は、多種多様な要因に影響を受けることから普遍的な結論を出すのは早急ではあるものの、一般に、CCU において CO₂ 分離回収利用量を増加させることで必ずしも CO₂ 排出削減量が増加するわけではないと言われている[11]。また、CCS と CCU の比較に関しては、図 2.6 の既往研究が示すように、システム全体での単位 CO₂ 分離回収量あたりの CO₂ 排出量は、CCU よりも CCS の方が少なく、低炭素化に向けては CCS の方が優れている傾向が見られる。CCU においては、CO₂ 分離回収量よりも CO₂ 排出量が多い技術（図 2.6 で 1.0 を超える技術）もあることから、慎重な検討が求められる。

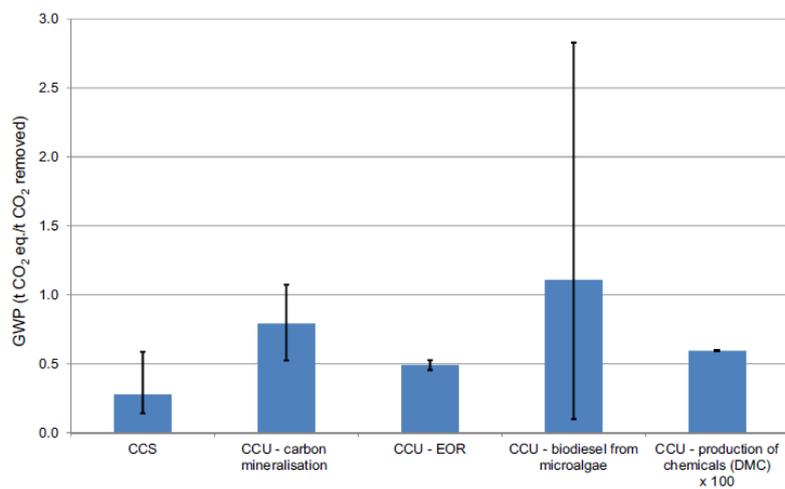


図 2.6 CCS と CCU の地球温暖化係数の比較事例 [1]

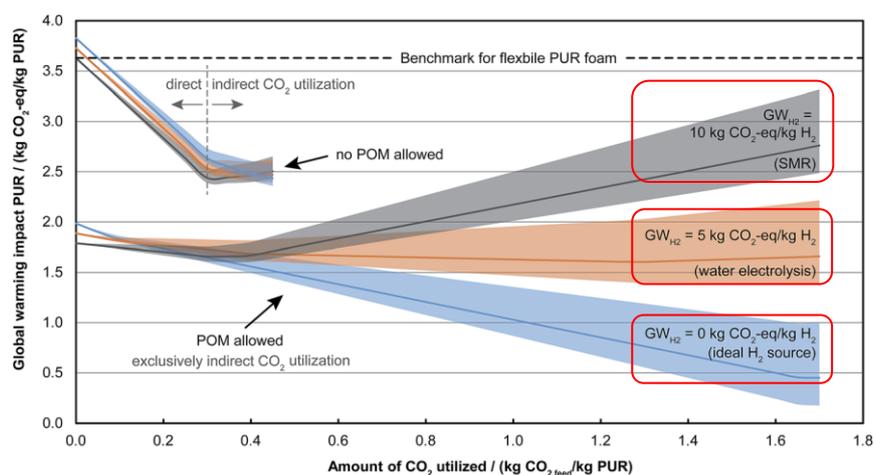


図 2.7 水素の CO₂ 排出係数別 CCU・ポリウレタン製造での CO₂ 排出量比較事例 [9]

注：“SMR”は Steam Methane Reforming（メタン水蒸気改質），“water electrolysis”は系統電力（電力の CO₂ 排出係数は 100kg CO₂-eq/MWh）を利用した水電解、“ideal H₂ source”は CO₂ 排出 0 のケース（再エネ電力）を指す。

特に注意すべき点は、CCUにおいて燃料や一部の化学品製造に必要な水素のCO₂排出係数である。水素のCO₂排出係数がポリウレタン製造におけるCO₂排出量に与える影響の研究事例(図2.7)によると、ポリウレタン製造のCO₂排出量は、化石燃料から製造した水素を利用する場合(図中灰色のゾーン)は、再エネ水電解から製造する水素を利用する場合(図中青色ゾーン)と比べて非常に大きいことがわかる。

したがって、一般に、CCSと比べてCO₂排出削減効果が劣るCCUにとって、少しでもCO₂排出削減効果を高めるためには、利用する水素の製造過程でのCO₂排出量の最小化が必須条件となる。

このように、CCUのCO₂排出削減効果はCCSに劣後する場合が多いことから、CCUSという分類において低炭素化対策のみの観点からCCUを進めようとする際に、その導入効果に対しては慎重にならなければならない。したがって、CCU促進のためには、上述(3.2)のようにCCSには無くCCUに特有のエネルギーセキュリティー改善効果も併せた議論が求められる。

3.5 水素製造源

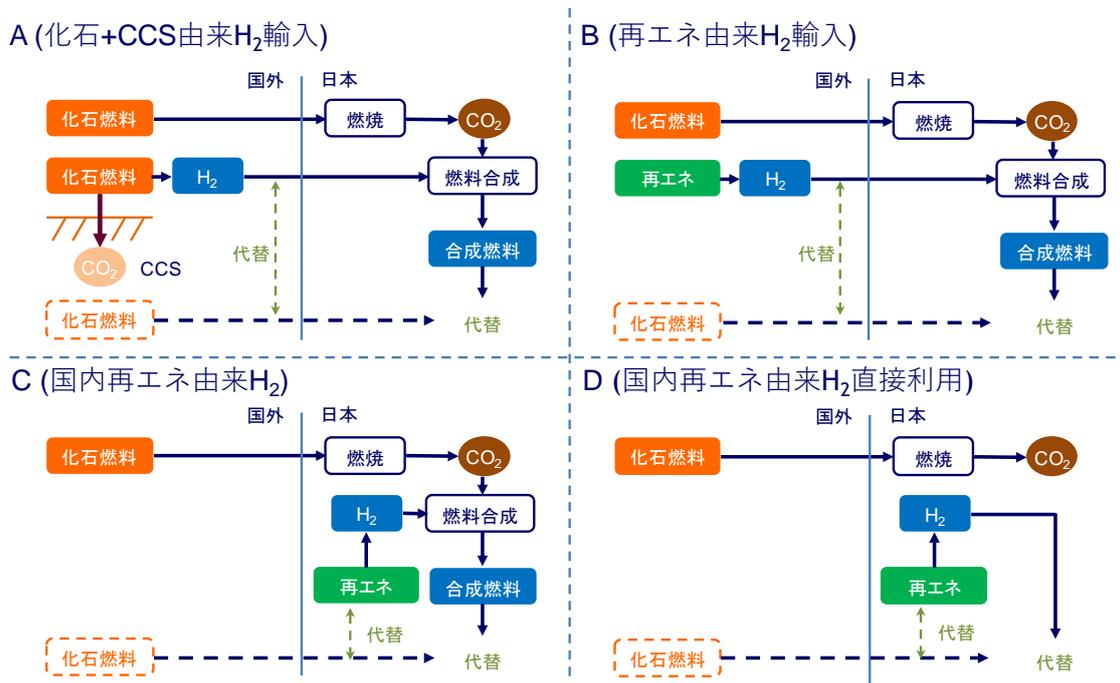
例えば建材として期待される炭酸カルシウムの製造の場合、CO₂と陽イオンを含む産業廃棄物が必要であるが、水素は不要である。一方、燃料製造の場合、CO₂の他に水素が必要となり、水素をどのように調達するかによってCCUの意義が左右される。

上述の通り、CCUによる燃料製造において必要となる水素のCO₂排出係数は可能な限り小さくしなければならないが、そのためには、水素は化石燃料+CCSか再生可能エネルギー由来でなければならない。ここで問題となるのは、水素が化石燃料由来の場合である。つまり、CCUの意義は“不可避に排出されるCO₂を再利用することで化石燃料消費を削減する(本来必要であった化石燃料を代替する)とともに、エネルギーセキュリティーの改善にも貢献すること”にあるにも関わらず、燃料製造に必要な水素を化石燃料から製造すると、化石燃料代替効果が帳消しされるということである。更に、その水素を輸入していれば、エネルギーセキュリティー改善効果(輸入削減)は得られない。

図2.8は、わが国においてCCUによって燃料を製造する場合の水素製造源と調達先のオプション別にCCUの効果を比較したものである。化石+CCS由来水素を輸入する場合(A)は、化石燃料代替効果もエネルギーセキュリティー改善効果も得られないことから、CCUの燃料製造において、選択してはならないオプションである。もっとも、Aの場合は2.1(p.9)に先述の通り、化石燃料を水素とCO₂に分離後、再度結合させることで燃料を製造しており、CCUと見なすことはできない。むしろ、AはCCSによって既にCO₂排出削減効果があるという点にのみ意義がある(それ以上追加的な措置を行うことは無意味)。再エネ由来水素を輸入する場合(B)は、化石燃料代替効果は得られるが、エネルギーセキュリティー改

善効果は得られない。国内再エネ由来水素を利用する場合（C）は、化石燃料代替効果とエネルギーセキュリティー改善効果の両方を得ることができる。したがって、CCU で利用する水素は、国内再エネ由来が最適であり、次は国外再エネ由来となる。

A、B、C の比較によって水素と CCU（燃料製造）の関係性が明らかになる。CCU（燃料製造）における化石燃料代替効果は水素にあるので（2.2 参照）、むしろ水素は、変換ロスが生じる CCU（燃料製造）に利用せずに直接利用する方（図 2.8 の D）が望ましい。ここで、CCU（燃料製造）を行うもう一つの意義を次節で論じる。



<p>A (化石+CCS 由来 H₂ 輸入)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ CCU の意義は化石燃料の代替にあるにも関わらず、このケースでは化石燃料から水素製造用の化石燃料への代替になっており、意味がない。水素は、CCU ではなく直接利用すべき（CCS による CO₂ 排出削減効果）。 ・ しかも輸入量（熱量ベース）は変わらないことからエネルギーセキュリティー改善に貢献しない。 	<p>B (再エネ由来 H₂ 輸入)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 再エネからの水素製造によって、化石燃料代替効果が得られる。 ・ ただし、輸入量は変わらないことからエネルギーセキュリティー改善に貢献しない。
<p>C (国内再エネ由来 H₂)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 再エネからの水素製造によって、化石燃料代替効果が得られる。 ・ また、化石燃料の輸入も削減していることから、エネルギーセキュリティー改善に貢献している。 	<p>D (国内再エネ由来 H₂ 直接利用)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ C の場合と同様の効果がある。 ・ また、水素直接利用により変換ロスを回避できるメリットがある。 ・ 既存インフラの課題（3.6 参照）

図 2.8 水素製造源別・調達方法別の CCU（燃料製造）の効果

注：A の場合は、2.1（p.9）に先述の通り、化石燃料を水素と CO₂ に分離後、再度結合させることで燃料を製造しており、基本的に CCU と見なすことはできない点に留意が必要。

3.6 既存インフラの活用

水素は、CCU（燃料製造）への利用よりも直接利用の方が高効率であるにも関わらず、CCUを行う理由には、既存インフラの活用がある。最も代表的な例が都市ガスインフラである。水素の利用拡大のための方策の一つとして、都市ガスインフラへの水素ブレンドが挙げられているが[7]、非常に多くの障壁があることに留意が必要である。例えば、体積から熱量へのガス計量方法の変更、需要家機器の熱量調整、安全性対策、特殊工業用途（ガスが含有するカーボンを経済で必要とする浸炭や超高温加熱炉等）への対応などである。これらの課題へ対応するためには、規制の変更や技術的対策と同時に経済性への配慮も求められる。また、水素は体積当たりの熱量が都市ガスと比べて非常に小さいことから、例えば2 vol%をブレンドしても、都市ガスの低炭素効果は0.6%程度にしかない。つまり、都市ガスへの水素ブレンドはデメリットがメリットを上回る。水素とCO₂から製造するカーボンニュートラルメタンはこれらの障壁の多くを回避できることから、既存都市ガスインフラを利用できるというメリットがある[16][17]。また、近年、IMO (International Maritime Organization) の環境規制や野心的なCO₂排出削減目標の設定によりLNG燃料船が注目されているが、経済性の観点からLNG燃料船は数十年にわたる利用が求められ、LNGの次の燃料がカーボンニュートラルメタンであればエンジンをそのまま利用できるメリットがある。

これらの例からわかるように、既存インフラ活用のメリットなくしてCCU（燃料製造）を論じてはいけない。逆の言い方をすれば、水素を直接利用できるのであれば、CCUを行わない方が好ましいということである。CCU（燃料製造）は水素利用の次善策である[5]ということ忘れてはいけない。燃料製造に必要なCO₂の起源については、究極はバイオマス由来やDAC由来であるとの見解も見られるが、それは、工業部門においてカーボンが必要不可欠な限定的な用途のみで利用すればよい。

3.7 ポテンシャル

CCUの世界のCO₂排出削減ポテンシャルについては、[10]が分析を行っている。化学品（メタノールやポリマー）のポテンシャルは小さいが、建材等（コンクリートや炭酸塩）のポテンシャルは1~5Gt-CO₂と、現在の世界全体のCO₂排出量の3%~15%（2030年）に相当する（図2.9）。また、燃料は建材等に比べて小さいものの0.1~2Gt-CO₂とそれなりの規模である。他の低炭素技術と同様にCCUの低炭素化への貢献度は大きいと考えられる。

「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（経済産業省）では、安価な水素の調達に燃料製造のボトルネックとなっており、短期的には水素が不要なCCU技術として、建材（炭酸カルシウムなど）を進めることになっており、ポテンシャルの大きさや技術の障壁の低さを踏まえると、合理的な見方と考えられる。

燃料に関しては、製造に必要な水素の確保が課題となる。上述（2.1、3.3）の通り、CCUは化石燃料の代替に意義があることから、CCUに利用する水素は再エネ由来が望ましい。

したがって、燃料製造には、大規模の再エネ導入が求められることに留意が必要である。図 2.10 では、わが国で都市ガスを低炭素化するためのカーボンニュートラルメタン製造に必要な再エネ発電電力量と CO₂ 量を示している。例えば都市ガスの 30%の低炭素化に必要な CO₂ 量に比べて国全体の CO₂ 排出量はかなり大きいことから CO₂ 利用の障壁は小さいが、再エネ（太陽光発電+風力発電）は大規模な導入量が必要となる。

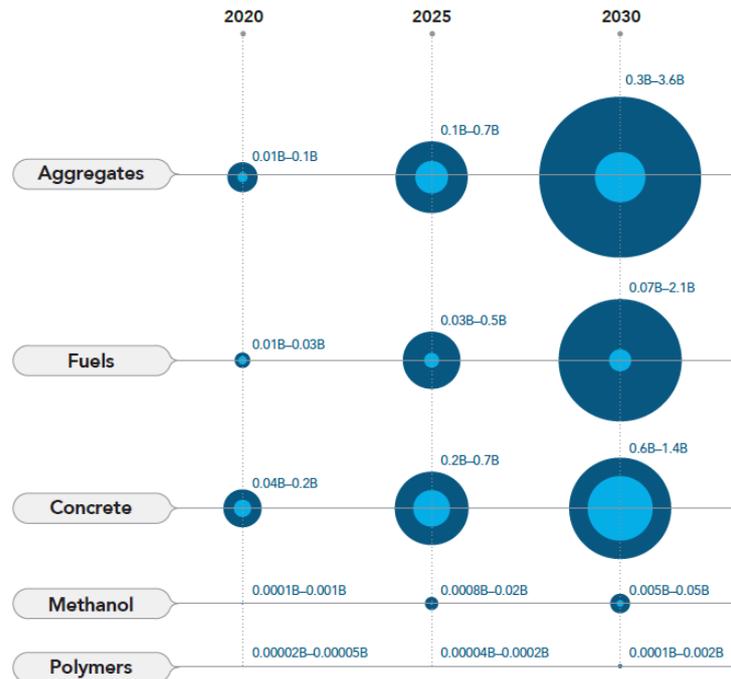


図 2.9 CCU による製品別 CO₂ 排出削減ポテンシャル [10]

注：単位は 10 億 t-CO₂ である。円の色は CCU 推進政策の有無による違い。

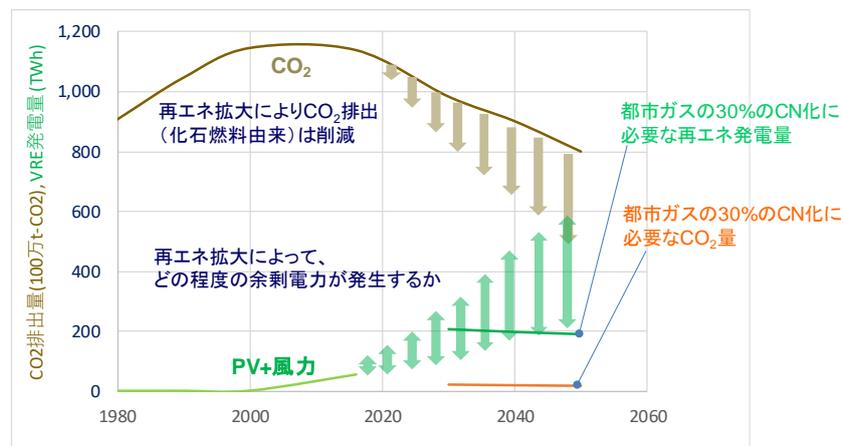


図 2.10 わが国における CO₂ 排出量、再エネ、合成メタン製造規模の比較 [18]

3.8 カーボンリサイクルにおける留意点

近年、“炭素循環”や“カーボンリサイクル”という言葉の表面上の意味にフォーカスし過ぎることで、低炭素化という本来の目的から離れて、CO₂を循環させること自体を主目的とした概念も見受けられる。例えば、再エネ水素とCO₂から燃料を合成し、その合成燃料を燃焼させることで排出されるCO₂を回収し、再度水素と結合させることで燃料を合成する、という工程を繰り返すものである。この場合、CO₂は閉鎖系において循環し系外への排出はないことから環境負荷が最小化されているイメージが植えつけられやすい。しかしながら、この循環プロセスの各段階において水素とCO₂を結合させるために必要なエネルギー投入に係るCO₂が排出されることから、水素を直接燃焼させた方が低炭素化効果は高い。既存インフラの活用というメリットがないならば、水素は直接利用が望ましい。“循環”や“リサイクル”という表現が先行するあまり、このような本末転倒な概念が登場してしまう懸念がある。CO₂は閉鎖系で循環させる必要はなく、一度大気放出しても別の排出源から分離回収すればよいので、大気を含めた系での循環であれば問題ない。

元来、カーボンリサイクルの意義は低炭素化、エネルギーセキュリティ改善、既存インフラ活用にあり、特に水素を必要とする場合は水素を経済的に利用することが重要であり、CO₂を循環させることが目的ではない。手段の目的化に注意が必要である。

一方、建材用途で期待されている炭酸カルシウム(CaCO₃)製造の場合には水素が不要であり、異なる見方もできる。炭酸カルシウムは、CO₂とカルシウムイオン(Ca²⁺)を反応させることで製造される。炭酸カルシウムは直接建材等への利用やセメント製造工程の焼成に用いられることで、天然の石灰石の代替となる。カルシウムイオンは海水や鉱物からも調達できるが、高炉スラグ、フライアッシュ、更にはその他の産業廃棄物やコンクリート廃材からも調達できる。つまり、システム全体でのエネルギー収支やCO₂排出削減効果の評価は必要であるものの、CO₂と産業廃棄物の両方のリサイクルを目指すことができ、本当の意味での循環型社会構築に貢献できる可能性がある。

近年注目されている“Circular Carbon Economy”[19]の概念においても、これらの点を踏まえた議論が今後求められる。

まとめ

本研究では、CCSとCCUの機能や役割に関する違いを明確にし、CCUSとしてCCSと同分類されるCCUに対する誤った理解を修正することで、CCUの意義を明らかにした。

CO₂再排出、CO₂固定化期間、CO₂起源の限定等、CCUに対する間違った解釈は、CCSを起点としたCCUの捉え方に原因がある。CCSは排出されるCO₂を固定化・貯留することで大気への放出を防ぐ技術、CCUはCO₂を利用して、燃料、化学品、建材等を製造する技術であり、CO₂分離回収より下流の特性が全く異なる。CCSは化石燃料を利用し続けつつ低炭素化を図る技術であるが、CCUは従来型燃料・原料を代替することで低炭素化を図る

技術である。したがって、CCU においては、どの程度従来型燃料・原料を代替できるかが主要な評価軸であり、CO₂再排出、CO₂固定化期間、CO₂起源は不要な視点である。

一般に、変換プロセスが多いCCUはCCSと比べて、CO₂排出削減効果が劣る。しかしながら、CCU技術として燃料製造にフォーカスすると、化石燃料の代替による輸入削減を通じたエネルギーセキュリティー改善のメリットがある。したがって、CCUに対しては、低炭素化のみならずCCSには無いエネルギーセキュリティー改善効果を踏まえた議論が必要である。

CCUの低炭素化効果をより高めるためには、プロセスで発生するCO₂排出の削減が必要であるとともに、燃料製造の場合は必要となる水素のCO₂排出係数の最小化が必須となる。したがって、CCUで利用する水素は化石燃料+CCS由来か再エネ由来でなければならない。しかしながら、化石燃料+CCS由来の場合は、化石燃料を水素とCO₂に分離後、再度燃料を製造するという無意味なプロセスであるとともに、CCUの重要な意義である化石燃料代替効果が得られない。したがって、CCUで利用する水素は再エネ由来でなければならない。化石燃料+CCS由来の水素は、CCUへの利用ではなく直接利用しなければならない。更に、CO₂を化石燃料という形で既に輸入しているわが国の視点から見ると、将来的に輸入する水素を用いてCCUを実施するとなれば、エネルギーセキュリティー改善効果が得られないだけでなく、低炭素化効果もCCSより劣ることから、国内でCCUを実施する意義がない。したがって、CCUで利用する水素は国産の再エネ由来が望ましい。

CCUによる燃料製造は、バイオマス由来やDAC由来のCO₂のみならず不可避に排出される化石燃料からのCO₂を再利用し再エネ水素と合わせて、燃料を合成・利用することである。つまり、化石燃料を有効活用しつつ徐々に低炭素化を目指すものであり、欧州を中心とした化石燃料利用の急激な削減・停止という方向性とは異なり、現実的なパスを描くための参考になるかもしれない。

一方で、CCU、カーボンリサイクル、炭素循環という言葉が先行するあまり、CO₂を利用する・循環させること自体が目的化されることを避けなければならない。水素が必要となる燃料製造を例に挙げると、水素は直接利用が望ましく、既存インフラの活用というメリットがなければ、燃料を製造・利用する意義はない。

従来型燃料・原料の代替、エネルギーセキュリティーの改善、不可避なCO₂排出の利用、既存インフラの活用等のCCUの本来の意義が正しく理解されない背景には、低炭素化に比重を置きすぎたエネルギーシステムの議論があると考えられる。低炭素化以外のこれらのメリットにも着目したCCUの議論が求められる。

参考文献

- [1] Rosa M. Cuéllar-Franca, Adisa Azapagic, “Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts”, *Journal of CO₂ Utilization* 9 (2015) 82–102
- [2] IEA, “Putting CO₂ to Use”, September 2019
- [3] IASS, “CO₂ Recycling – An option for Policymaking and Society?”, Potsdam, December 2015
- [4] ADEME, “Valorisation Chimique Du CO₂, ETAT DES LIEUX QUANTIFICATION DES BENEFICES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX ET EVALUATION ECONOMIQUE DE TROIS VOIES CHIMIQUES”, Juillet 2014
- [5] 柴田, “低・脱炭素社会に向けたメタネーションの意義”, *エネルギー・資源* Vol. 41 No.1 (2020)
- [6] IEA, “World Energy Outlook 2019”
- [7] IEA, “The Future of Hydrogen”, 2019
- [8] Thomas Bruhn, Henriette Naims, Barbara Olfe-Kräutlein, “Separating the debate on CO₂ utilisation from carbon capture and storage”, *Environmental Science & Policy* 60 (2016) 38–43
- [9] Niklas von der Assen, André Sternberg, Arne Kätelhön and André Bardow, “Environmental potential of carbon dioxide utilization in the polyurethane supply chain”, *Faraday Discuss.*, 2015, 183, 291, Royal Society of Chemistry
- [10] ICEF, “CARBON DIOXIDE UTILIZATION (CO₂U) ICEF ROADMAP 1.0”, November 2016
- [11] ICEF, “CARBON DIOXIDE UTILIZATION (CO₂U) ICEF ROADMAP 2.0”, November 2017
- [12] “CO₂ 利用に当たってのボトルネック課題及び研究開発の方向性” 内閣府「ボトルネック研究会」
- [13] “エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会” 2019年6月 経済産業省、文部科学省
- [14] “カーボンリサイクル技術ロードマップ” 2019年6月
- [15] 「平成17年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書」(平成18年3月) 財団法人 地球環境産業技術研究機構
- [16] 柴田, “カーボンニュートラルメタンのポテンシャルと経済性 –PtG と CCU の活用–”, 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2019年1月
- [17] 柴田, “分散型コージェネのカーボンニュートラルメタン利用による再エネ出力変動緩和”, 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2020年1月
- [18] 柴田, 「低炭素社会に向けた Power to Gas ・メタネーションの役割」, 未来を拓く無機膜環境・エネルギー技術シンポジウム, 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE), 2019年11月7日 (<http://www.rite.or.jp/news/events/2019/11/2019117.html>)
- [19] Eric Williams, “Achieving Climate Goals by Closing the Loop in a Circular Carbon Economy”, KAPSARC, November 06, 2019