

海外における CCU 関連の取り組み

Efforts on CCU outside Japan

小川玲奈^{*1}・ダーベル暁子^{*2}・稲田雄二^{*1}

1. はじめに

2050年カーボンニュートラル宣言が世界の多くの国々に広まる中、そのタイムラインに沿った実現のためには、技術開発に加えて、新たに開発された技術の社会実装を促すための社会・経済システムの変革が重要である。中でも気候変動対策を契機とした新たなルールの形成において主導的な立場にある欧州連合（EU）の政策は、今後の技術開発の方向性を考える上でも重要な因子になると考えられる。

本稿ではまず、脱炭素社会への転換と経済的な発展を両立させるための戦略として構築されたEUの経済戦略について示した後に、EU域内のルールがEU域外のビジネスに波及する端緒として注目されている炭素国境調整メカニズムについて解説する。それらを踏まえた上で、海外におけるCCUの取り組みについて紹介する。

2. 脱炭素に関連するEUの経済戦略

2.1 EUが掲げる優先政策

EUでは2019-2024年の期間における優先政策として6つの項目を挙げており¹⁾、その先頭に示されているのが欧州グリーン・ディール²⁾である。他の5つの項目は以下の通りである。

- ・デジタル時代にふさわしい欧州
- ・人々のための経済
- ・世界におけるより強い欧州
- ・欧州の生活様式の推進
- ・欧州の民主主義のさらなる推進

これらの優先政策は、気候中立の達成と両立させながら達成していくとしており、欧州グリーン・ディールとそれぞれの政策は互いに補完し合う関係になっている。例えば、カーボンニュートラル実現のためには、評価指標となる二酸化炭素排出量を見

える化し、効率よく一元管理するためのデジタル技術の活用が不可欠である。また、欧州グリーン・ディールはEU内だけに留まる政策ではなく、それによって生まれた欧州の生活様式を世界中に伝搬させることを通じて、欧州が世界的により強い影響力を持った存在となることが明確に志向されている。

2.2 欧州グリーン・ディール

欧州グリーン・ディールには大きく4つの狙いがある。

- ① 2050年までに炭素中立を実現する
- ② 人や動植物を汚染や公害から守る
- ③ 欧州企業をクリーン技術や製品のリーダーにする
- ④ 誰も取り残さない公正かつ包摂的な社会改革を実現する

これらの狙いを実現する包括的な気候・環境政策パッケージとするために、2019年から2021年の期間に多くの戦略、イニシアティブ、規制などを展開してきた。注力領域として、生物多様性、持続的な食料システム、持続的な農業、クリーンエネルギー、持続的な工業、建設と改築、持続的な運輸、汚染除去および気候行動の8領域を挙げている。

近年の主な施策としては、2021年6月にEU理事会で採択された欧州気候法が挙げられる。この法律によって、2030年までに温室効果ガス排出量を1990年比で55%削減するという気候目標に法廷拘束力が生じた。2021年12月15日には、エネルギーセクターにおけるメタン排出削減や建物のエネルギー性能指令に関わる指令の改正、脱炭素ガス市場創出・推進のための調整に関するイニシアティブが採択された。

^{*1} 株式会社三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

^{*2} 株式会社三井物産戦略研究所 国際情報部

2.3 エネルギーシステム統合戦略

EUの温室効果ガス排出のうち75%がエネルギー由来の排出であることから、温室効果ガス排出量削減において最も重要なのがエネルギーシステムの転換である。2020年7月に欧州委員会が発表したエネルギーシステム統合戦略³⁾では、図1に示すように、現在の直線的で廃棄の多いエネルギーの流れを、エネルギーが使用者と製造者の間を行き来する流れに変えることで、廃棄される資源（温室効果ガスを含む）の量と価格とを同時に下げていくことを目指している。

その具体的な戦略は以下の6つの柱からなり、CCUS推進に関する施策は③、④、⑤で述べられている。

①エネルギー効率ファーストを核とした、よりサーキュラーなエネルギーシステム

エネルギーキャリアを超えた比較のための指標として一次エネルギー（PEF）を使い、この値が低くなるようなエネルギーシステムを志向する。地域の排熱、廃水およびバイオ廃棄物や残渣の利用促進も重視する。

②再生エネルギーに基づいた電力システムを基礎としたエネルギー需要の電化の加速

新型コロナ危機の影響によって打撃を受けた経済の復興のための「次世代のEU」による再生エネルギーシステム拡大のための資金援助や各セクター、加盟各国への更なる電化促進の働きかけを行う。

③脱炭素化が難しいセクターに対する水素を含む再生可能・低炭素燃料の促進

生物多様性に配慮した、持続可能なバイオマスに

よるバイオ燃料、バイオガス、バイオメタン、再生可能水素の利用促進およびCCUSに対する投資・運用コスト削減プロジェクトへの支援を行う。また、水素については「欧州の気候中立に向けた水素戦略」という政策文書を発表している。

④脱炭素と分散化された資源に合うエネルギー市場の創造

全てのエネルギーキャリアが対等に競争できる環境とするために、エネルギー課税指令の改正を行う。たとえば、エネルギー製品やエネルギーの貯蔵、水素製造において二重課税を避けるための施策を講じるほか、一貫性のある炭素価格シグナルをエネルギーセクターや加盟各国に提供することを通じて、エネルギー課税の他のセクターへの拡張についても検討する。

⑤より統合されたエネルギーインフラ

大規模なものからローカルなインフラまでを対象とした新たな包括的アプローチとして、低温地域暖房システムの普及、電力グリッドの強化、ガスネットワークの水素対応およびCCUSのための二酸化炭素に特化した貯蔵・輸送インフラの構築を進める。

⑥デジタル化したエネルギーシステムと支えとなるイノベーションフレームワーク

柔軟なエネルギー消費を支援するデジタル技術、ICT機器およびサービスの利用増加によるエネルギー需要増への対応およびエネルギーセクターのためのサイバーセキュリティ対策には更なるイノベーションが求められているとの現状認識から、EUにおける各種支援プログラムを活用したイノベーション創出支援を行う。また、技術開発は、社会イノベ

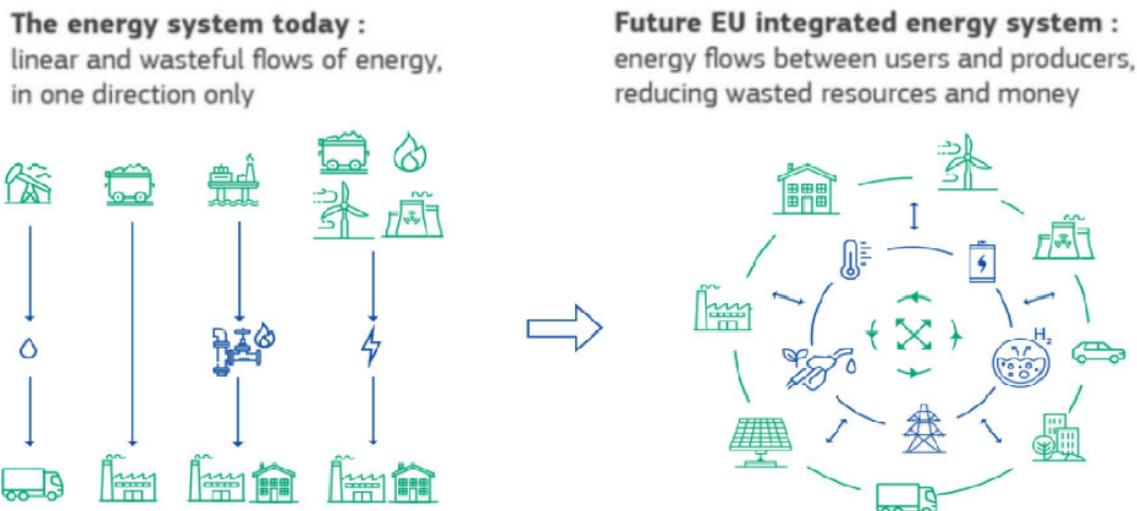


図1 エネルギーシステム統合戦略のイメージ
出典：欧州委員会⁴⁾

ションと手を携えて進められなければならない、とも言及している。

2.4 グリーン・ディールのもうひとつの基盤としての新循環型経済行動計画

脱炭素政策では再生可能エネルギーの導入や電化など、エネルギー関連の政策が注目されがちであるが、全世界の炭素総排出量のうち45%が製品起因⁵⁾である点も注目に値する。

欧州では、気候対策とサーキュラーエコノミーを脱炭素政策の両輪と位置付けており、製品由来の炭素排出量の削減をサーキュラーエコノミーの実現および実現されたシステムを世界的に展開することによって実現しようとしている。そのための方針が示されているのが、2020年3月に発行された新循環経済行動計画である。本計画では、重点的な対象となる7つの分野として①電子機器・ICT機器、②バッテリー・車両③包装④プラスチック⑤繊維⑥建築・ビル⑦食品・水・栄養を同定している。そしてこれらに対して、産業ごとに、持続可能な製品設計の開発と浸透から製造プロセスにおける循環性の促進、消費者や公共調達に対する働きかけまで、つまり、サプライチェーンの上流から消費者に至るまでの全ての段階における具体的な施策の検討が進められている。また、製品ライフサイクル終了後の製品に対しては、①廃棄物抑制および循環②毒物管理③リサイクル原料のためのEU市場④廃棄物輸出の4つの枠組みからなる廃棄物ポリシーを定めている。

循環、つまりリサイクルされた製品が適正に使用されるためには、循環の履歴を含んだ製品情報が共有されることが重要となる。そのためのデジタル化やデータベース構築も求められる。エネルギー産業において先行している二酸化炭素排出量の見える化で培われたデジタル技術には、サーキュラーエコノミーにおける二酸化炭素排出削減効果の測定や製品の循環にも応用できるものも多いと考えられる。

2.5 今後注目すべき動向

本章ではEU域内におけるカーボンニュートラル実現と経済成長を両立させるための主要な政策について紹介した。現在、EUにおけるCCU関連の政策はエネルギー政策を中心に議論されているが、将来的には製品循環への合流によって、サーキュラーエコノミーの一部としての重要性が高まっていくと予想される。また、脱炭素に関するEU域内の基準やルール形成が成熟してきたことにより、今後はそれらを国際化していくフェーズへと移行しつつある。次章ではその中でも脱炭素と関連の深い、炭素

国境調整メカニズムについて詳説する。

3. EUの炭素国境調整メカニズム

2021年7月14日、EUは包括的な気候変動政策パッケージ「Fit for 55」の中で、気候変動対策がEUよりも緩い国からの輸入品に炭素価格を課す「炭素国境調整メカニズム(CBAM)」の規則案を公表した。本章では、まずCBAMの制度概要をまとめる。またCBAMを巡る域内外からの反応や、貿易相手国でのCBAM対策としての気候変動政策の強化の動きに触れるとともに、CBAM法制化の状況などもまとめる。

3.1 炭素国境調整メカニズムの概要

炭素国境調整メカニズム(CBAM)は、2019年12月にフォン・デア・ライエン欧州委員会委員長が2050年までの気候中立を掲げる「欧州グリーン・ディール」の中核の一つとして導入する意向を明らかにした政策である。CBAM導入の目的は二つあり、一つは炭素リーケージリスク(EUと比べ域外国の排出規制等が緩いことでEU企業の国際競争力が低下し、EUから生産拠点が転移してグローバルでの排出量が減らないこと)の抑制、二つ目はEU域外での気候変動対策強化の促進である。

3.1.1 炭素リーケージリスクへの対応～EU-ETSにおける排出枠の無償配分からCBAMへ～

EUは2005年から排出量取引制度(EU-ETS)を導入している。EU-ETSはEU27カ国とノルウェー、アイスランド、リヒテンシュタインを加えたEEA(欧州経済領域)諸国において、域内の1万カ所以上の電力・工業施設とEEA域内を就航する航空便を対象に運用され、そのGHG排出量はEUの総排出量の約4割を占める。割り当てられた排出量の上限(キャップ)をもとに、対象の企業や施設がその過不足分を市場で取引するキャップ・アンド・トレード方式を採用、排出量上限を段階的に引き下げることで域内排出量の削減を進めている。

EUはこれまで、炭素リーケージリスクが高いとされる炭素集約的で輸出依存が高い部門にEU-ETSにおける排出枠を無償で配分することで対応してきた。しかし2050年までの気候中立、2030年までのGHG排出量55%削減(1990年比)という目標達成のためには、無償配分の廃止も含め、EU-ETS対象部門における排出削減の加速が不可欠である。このため、EUはEU-ETSにおける無償配分を段階的に縮小して域内排出量の削減につなげる一方、域外か

らの輸入品に対して域内生産品と同等の排出コストを課して公正な競争条件を確保するCBAMを新たな炭素リーケージ抑制策として導入することとした。

3.1.2 域外での気候変動対策の促進剤としてのCBAM

CBAMには域外での気候変動対策強化の促進剤としての役割もある。CBAMでは輸入品の製造過程における直接排出量に応じて課金され、また生産国で炭素価格制度がある場合にはその支払額に応じてEUへの支払いが免除される。つまり、生産過程での排出削減技術の導入や域外国における炭素価格制度導入にインセンティブを与える仕組みである。英国でのCOP26に出席したフォン・デア・ライエン欧州委員会委員長は11月2日、「炭素リーケージ回避のため、段階的だが確実に炭素国境調整制度を導入する」とCBAM導入の意思を改めて示すと同時に、EUに支払うのではなく生産国が炭素価格制度を導入して徴収する方が望ましいとも述べた⁶⁾。

3.1.3 CBAMの導入スケジュールと対象範囲

CBAM規則案では、当初の対象品目を鉄鋼、セメント、肥料、アルミニウム、電力とし、2023年から導入を開始する(表1)。2025年末までの最初の3年間は移行期間となり、排出量等の申告義務のみで課金はされない。本格的な運用開始は2026年からで、導入は段階的となる。前述のとおり、CBAMは炭素リーケージ抑制策としてのEU-ETSの代替である。CBAMと同時に公表されたEU-

ETS改正案では、鉄鋼などのCBAMの適用対象部門における無償配分は2026年から10年かけて年に10%ずつ削減されることが発表された。CBAMもこれと連動して段階的に導入され、炭素リーケージ抑制策は2035年にCBAMに完全に置き換わる。

また、移行期間後には対象品目の拡大や間接排出を含めるかなどに関するレビューを実施する。対象品目については、EU-ETSの対象セクターの中で炭素リーケージリスクが高いとされている分野が優先され、CBAMの検討段階で対象となった化学品等が候補となる可能性がある。また、移行期間である2023年以降、直接排出だけでなく間接排出量も申告することとしており、移行期間で集めたデータを参考に、間接排出への課金を検討する計画だ。

3.2 CBAMに対する域内外から反応

3.2.1 域内外からの反発

CBAMに対しては特に対象品目のEUへの輸出額が大きいロシアや中国、インド(図2)などが「気候変動対策を装った保護主義」、「WTOルールに反する」などと批判し、WTOへの提訴もちらつかせる。輸出産業の規模が大きいドイツの産業団体は報復措置を懸念している。

発展途上国、特に後発開発途上国(LDCs、図表2ではモザンビークが該当)へのCBAM適用は不公平だとの指摘⁷⁾もある。現行案ではLDCsの適用除外はなく、CBAM収入をLDCsへの脱炭素化支援にまわすといった規定もない。欧州議会の国際貿易委員会における審議では、貿易摩擦リスクへの

表1 CBAM制度の概要

目的	<ul style="list-style-type: none"> ● EU域外国との気候変動政策の違いによって生じる炭素リーケージの防止。 ● 域外国における気候変動対策の強化。
導入時期	<ul style="list-style-type: none"> ● 2023~25年は移行期間とし、排出量等の申告のみを課す。本格運用開始は2026年から。
対象国	<ul style="list-style-type: none"> ● 非EU加盟国(スイス、ノルウェー、アイスランド、リヒテンシュタインを除く)。
対象品目	<ul style="list-style-type: none"> ● 鉄鋼、セメント、肥料、アルミニウム、電力に分類される輸入品。
課金方法	<ul style="list-style-type: none"> ● 製品生産過程における直接排出が対象。EU-ETS価格を適用。
支払方法	<ul style="list-style-type: none"> ● CBAM対象品輸入業者はCBAM証書を購入。価格はEU-ETS排出枠価格に連動。毎年5月までに輸入品に含まれた排出量を申告し、それに相応する証書を償却する。
適用除外/控除条件	<ul style="list-style-type: none"> ● EU-ETSに参加(ノルウェー、アイスランド、リヒテンシュタインが該当)もしくは同等の制度を持ち、EU-ETSにリンクしている国(スイスが該当)は適用除外。 ● 輸入業者が原産地国の生産過程で炭素価格を支払ったことを証明できれば、その額の支払いを免除する。
レビュー	<ul style="list-style-type: none"> ● 2023~25年の移行期間における制度の運用状況や収集したデータをもとに、制度内容の見直しを実施。 ● 間接排出の取り扱いや対象品目の拡大が見直しの対象。 ● 対象品目の拡大に当たってはEU-ETSの対象セクターで、炭素リーケージリスクが高いとされている分野を優先。今回適用対象として検討されていた化学品等が候補となる可能性あり。

出典：欧州委員会、駐日欧州連合代表部資料から三井物産戦略研究所作成

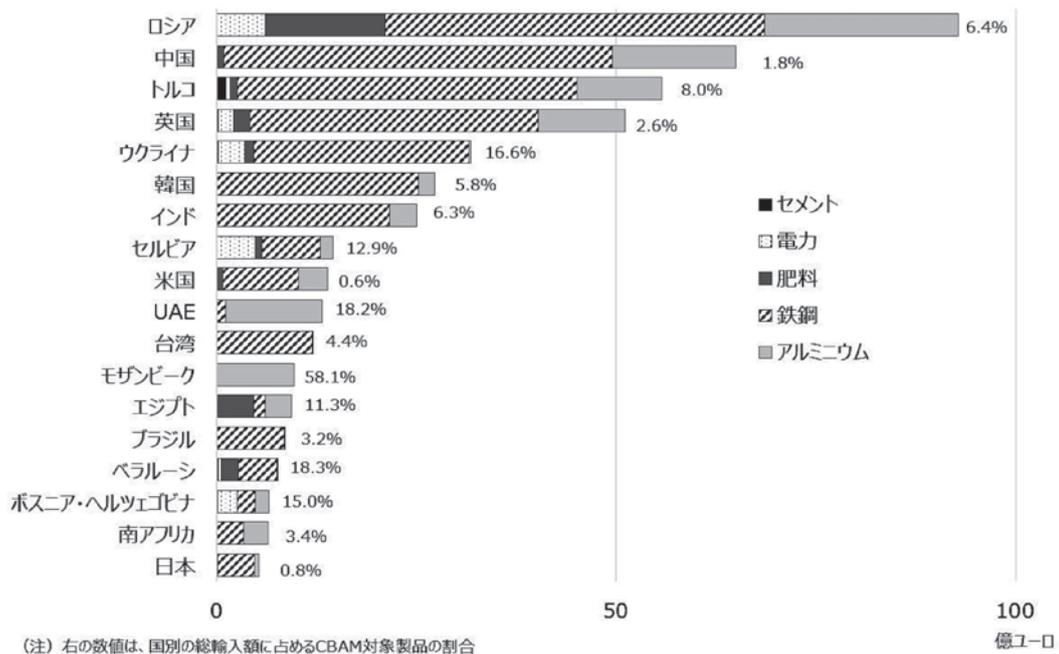


図2 CBAM 対象品目の国別輸入額 (2019年)
出典：欧州統計局データから三井物産戦略研究所作成

懸念に加え、LDCs への悪影響を懸念する声も多く出ている。

3.2.2 域外での気候変動対策強化の動き

反発も多い一方で、CBAMによる影響の回避や緩和のため、気候変動対策の強化に乗り出した国もある。トルコは2021年10月に2053年までの気候中立達成を目指すとして発表、排出権取引制度も導入する予定という。気候変動・持続可能移行欧州ラウンドテーブル(ERCST)では、現行のCBAM案でのトルコへのコスト賦課は約4億ユーロ(約519億円)と試算する⁸⁾。トルコは輸出の約4割がEU向けであり、前述のように、EUで今後CBAMの適用対象が拡大されれば、その影響はさらに膨らむリスクがある。トルコ政府関係者によれば排出権取引制度はEU-ETSに似たものとなり⁹⁾、CBAM適用の除外も視野に影響の軽減を図る考えだ。また中国では2021年7月に電力を対象に排出権取引を開始し、今後は鉄鋼や建材、化学品、非鉄金属等も対象に加える計画だ。ロシアでもサハリン州で排出権取引制度の導入が検討されている¹⁰⁾。

3.2.3 米国との協調の動き

EUと米国が脱炭素化促進の枠組みで協力する動きもある。バイデン米大統領とフォン・デア・ライエン欧州委員会委員長は2021年10月31日、鉄鋼・アルミ貿易における炭素集約的な製品や過剰供給問題に対応する「持続可能な鉄鋼・アルミニウムに関するグローバルな取り決め」に向けて交渉すること

表2 EU・米国による共同声明における「持続可能な鉄鋼・アルミニウムに関するグローバルな取り決め」に関する部分の抜粋

- 取り決めへの参加国は次のアクションを行うものとする：
 - ① 市場志向の条件を満たさない、非市場的な過剰供給を行っている非参加国に対しては、貿易救済措置等の適切な対応を取り、市場アクセスを制限する。
 - ② 低炭素基準を満たさない非参加国に対して市場アクセスを制限する。
 - ③ 取り決めの目的を果たすため、また生産過程全てにおける低炭素化を支援するための国内政策を整備する。
 - ④ 炭素集約的な生産や非市場的な過剰供給を行わない。
 - ⑤ 国内の法的枠組みに則り、非市場的な国からの対内投資を審査する。
- 米国とEUはグローバルでの持続可能な鉄鋼・アルミニウム取り決めの交渉における協調と促進を図るため、技術的作業部会を設置し、鉄鋼とアルミの排出量算出方法に関して協議を行い、データを共有する。

出典：欧州委員会資料より、三井物産戦略研究所作成

で合意した¹¹⁾。

共同声明では、当該取り決めは気候変動の脅威と市場のゆがみの問題に貿易政策で対抗するもので、取り決めの参加国は鉄鋼・アルミ産業の脱炭素化に取り組む一方、非参加国からの低炭素基準を満たさない製品の輸入は市場アクセスを制限するとした(表2)。バイデン大統領は、中国産の“汚い鉄鋼製品”の市場アクセスを抑制すると述べ、中国の過剰生産に対抗するという目的が色濃く出ている。ただ、多排出製品の貿易抑制により他国に排出削減を促すという目的はCBAMと同じであり、こういった枠組み設立に向け、米国を引き込んだことはEUの一つの成果といえよう。

詳細は今後2年間で交渉するとした。注目は非参加国からのGHG多排出製品に対する流入抑制の方法と、WTOルールとの整合性だ。EUはCBAM導

入に当たり、EU-ETS 価格を適用することで輸入品に課される排出コストは域内製品と同等であり、輸入品の差別的取り扱いには当たらず、WTO ルールに違反しないと主張している。欧州側は、当該取り決めを参加国間で炭素価格など共通の基準やルールを作って脱炭素化を共に進める一方、非参加国からの輸入品には炭素国境調整措置を取る、いわゆる気候クラブのような多国間枠組みに発展させることを理想形としていると考えられる。

2021年12月8日に就任したショルツ独新首相は、前メルケル政権下で財務相を務めていた2021年8月、米国などG7諸国に加え、中国やインドなどのG20諸国を含めた、多国間での気候クラブ創設を提案した¹²⁾。ショルツ首相はドイツが議長国を務める2022年6月のG7会合でも、気候クラブ創設を協議したいとの意向を示しており、議論の行方が注目される。

ただ、米国では連邦レベルでの排出権取引や炭素税などの炭素価格制度がなく、消費者へのコスト転嫁の懸念等から炭素価格導入は政治的に難しいとされる。このため、多国間での枠組み構築には障壁も多いと言え、実現できるかは不透明だ。

3.3 CBAMの今後～法制化に向けた審議・修正の行方～

CBAM 法制化には欧州議会と EU 理事会の合意が必要である。欧州議会としての意思決定に向け、環境・公衆衛生・食品安全委員会が中心となって審議が行われている。同委員会は2021年12月に最初の修正案を公表した。具体案としては、①欧州委員会案が2025年末までとした移行期間を、2024年末に前倒し、②EU-ETSでのCBAM対象品目に対する無償配分の段階的廃止の期間を、欧州委員会案の2026年から10年間から、2024年から5年間に前倒し並びに大幅に短縮する、③対象品目にはポリマー

や有機化学品、水素を追加。④電力に関しては直接排出だけでなく間接排出に拡大、⑤生産国での炭素価格支払いによるCBAM適用免除は、生産国での炭素税や排出権取引などの明示的炭素価格のみを対象とし、規制や自主的取組、補助金等の暗示的炭素価格については対象から外す。同委員会では、5月11日に最終的な修正案を同委員会内で採決にかけたうえで、欧州議会に提出、6月の欧州議会本会議で採決が行われる予定である。修正案は対象範囲や移行期間、無償割当の廃止時期等、欧州委員会の原案の根幹部分を抜本的に、より厳しい方向に変える内容となっている。このため、ビジネスへの影響度は大きくなると考えられ、親ビジネス派の議員並びに加盟国からは反発が予想される。今後はこの修正案をスタート地点として、EU理事会とも協議し、妥協をしながら着地点を模索するものと考えられる。ただ、2023年からのCBAM導入にこぎつけられるかは予断を許さない。欧州議会の承認は現会期が終了する2024年5月ぎりぎりとなるとの見方¹³⁾もあり、今後の展開が注目される。

4. 海外におけるCCUの取り組み

4.1 CCSとCCU

CO₂を早期に削減する技術としてCCSとCCUが注目されている。CCSとはCarbon Capture & Storageの略でCO₂回収貯留を指し、例えば火力発電所の排気ガスからCO₂を分離回収して地中で長期にわたり貯留することを言う。CCUはCarbon Capture & Usageの略でCO₂回収利用を意味し、分離回収したCO₂と、例えば水素を加えて燃料などを合成し、CO₂を再利用することを言う(図3)。

2050年にCO₂排出量を実質ゼロにする目標を達成するには再生可能エネルギーを導入するなどの対策があるが、一方で重工業では化石燃料に依存せざ

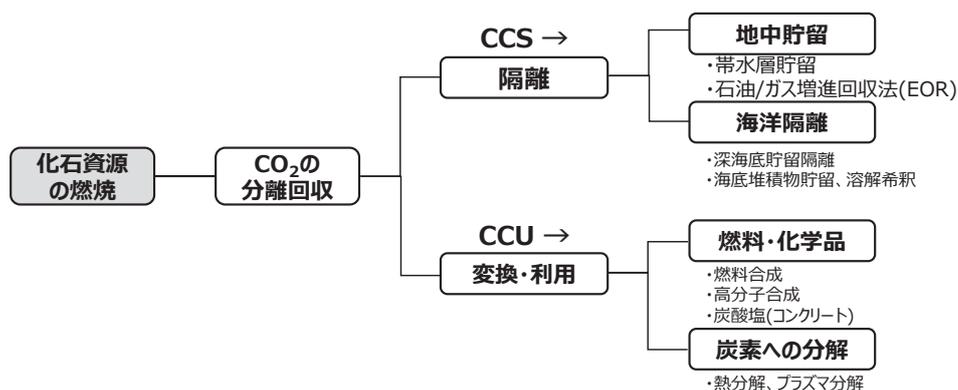


図3 CCSとCCUの概要

るを得ない産業が残るとみられる。やむを得ず排出されてしまうCO₂は地中貯留したり、化学品や燃料に加工して再利用したりして、大気中のCO₂濃度を増加させないようにすることがCCSとCCUの役割である。

CCSの普及状況は、Global CCS Instituteによると現在135の商用CCSプロジェクトがあり、その内、操業中の施設によって回収貯留されるCO₂は年間約4,000万トン、計画段階のプロジェクトも含めれば約1.5億トンに達する。CCSが着実に進展している状況となっている。一方、CCUは一部が実用化に至っているものの、まだ開発段階であると言える。

4.2 CCUの種類と市場規模

CO₂を資源として利用するCCUには主に4つの利用方法がある。CO₂をコンクリートの凝集剤や硬化剤として用いてコンクリート中にCO₂を貯留する建築材料としての利用、CO₂と水素(H₂)からメタンや軽油を合成して燃料としての利用、同様にCO₂をメタノールやポリマーに加工、あるいは分解してカーボンを取り出して化学品として利用することや、微生物がタンパク質を合成する原料にCO₂を使い、そのタンパク質を飼料や食品として利用す

る方法が開発中である(図4)。

CCUの市場は、イノベーション技術の調査会社である米国Lux Research, Inc.によると2030年に700億ドル、2040年頃には5,500億ドルへと拡大すると予測されている(図5)。最も大きな市場はセメントに代表される建築材料で、これはセメント自体の市場がもともと大きいことと、CO₂を閉じ込めるセメントの技術開発が進んでおり、すでに商用化が始まっていることも理由である。燃料と化学品は2030年ごろから市場投入が本格化するとみられ、その後市場は広がっていく見込みだが、技術開発に時間がかかることに加え、化石資源由来の製品との価格差がネックとなる。市場拡大には規制やカーボンのクレジット、補助金などの政策的な誘導が不可欠であろう。

4.3 CCUの海外事例

上述の通りCCUにはさまざまな技術や製品があるが、本稿では商業化が進むCCUの例としてCO₂セメントとeメタノール、またCCUで不可欠なCO₂を効率良く回収するケミカルルーピング燃焼を紹介する。

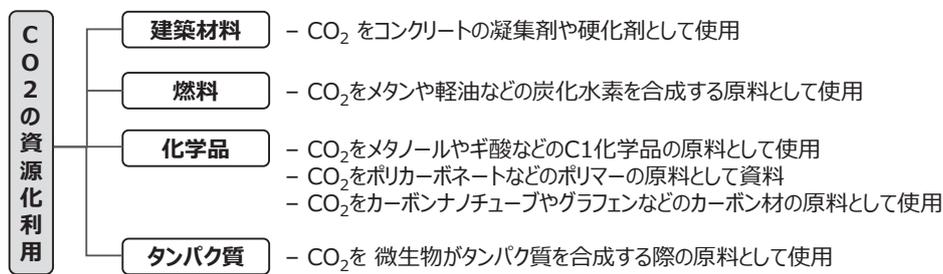


図4 CCU/CO₂の資源化利用の種類

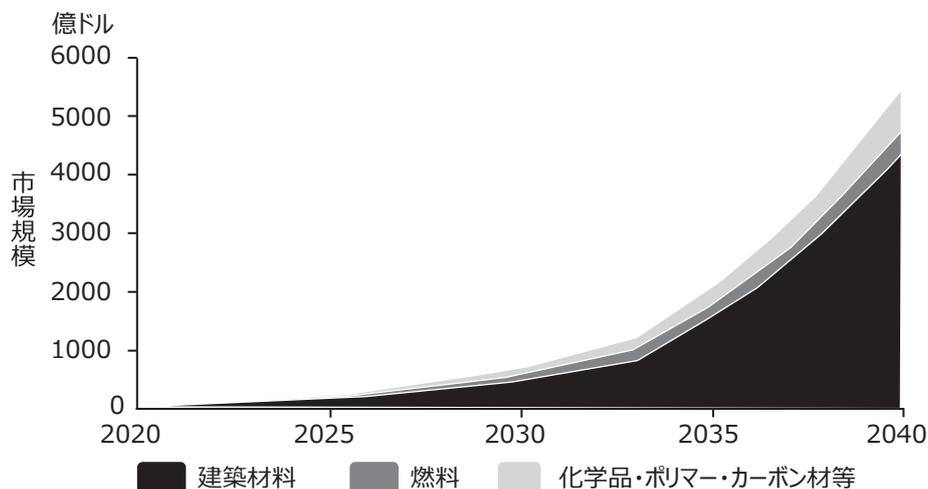


図5 CCUの市場規模

出所：LUX Research 資料¹⁴⁾を基に三井物産戦略研究所作成

4.3.1 CO₂ セメント

セメントは、石灰石や粘土、また廃材や廃プラスチックといった廃棄物などの原料を調合し、高温で焼成した後に急速冷却して、石こうを加え粉碎し製造される。高熱で加熱、冷却する過程で「クリンカ」という中間製品ができるが、このクリンカを生産するときに石灰石からCO₂が排出される。セメントは建築物で欠かせない材料で、その生産量も膨大であることから、セメント製造によるCO₂削減が急務となっている。

CO₂をセメントで削減する方法は種々提案されているが、実用され普及段階にある事例としてはセメント中のカルシウムとCO₂を反応させ固定する方法がある。カナダのCarbonCure社はCO₂をセメントに吹き込み、セメント内で溶出したカルシウムイオンと結合させて炭酸カルシウム結晶を形成させる技術を開発した(図6)。CO₂は炭酸カルシウム結晶として固定されるため、このセメント内でCO₂が貯留できることになる。さらに炭酸カルシウム結晶はコンクリートとしての強度を増す効果もあり、硬化後のコンクリートの圧縮強度は約10%増加するという。同社の他、米国Solidia Technologies社、カナダCarbiCrete社などCO₂セメントの商業化が進展している。



図6 CarbonCure社のCO₂セメント
出典：CarbonCure Technologies Inc.¹⁵⁾

4.3.2 e-メタノール

欧州では、「eMethanol」(e-メタノール)を製造するプロジェクトが多数立ち上がっている。e-メタノールとは、CO₂と水素(H₂)で作るメタノールのことで、発電所や化学工場などから排出されるCO₂と再生可能エネルギーで作るH₂(再エネ水素)を原料に使う(図7)。なお、e-メタノールは天然ガスなどから製造させる従来のメタノールと化学的な性質は同じものである。メタノールは燃料として利用できる他、化学品の基材としても重要な役割を果たすため、CCUにおいてメタノール合成は最も期待されている技術の一つと言えよう。

CO₂とH₂からメタノールを合成するプロセスはすでに開発済みであり、e-メタノール製造を操業して10年が経過する事例がアイスランドにある。CRI(Carbon Recycling International)は、地熱発電所から排出されるCO₂と、発電した電力で水を電気分解して得られるH₂からe-メタノールを合成する商用プラントを世界で初めて、2012年から運用している。年間のe-メタノール生産量は6,000トン、合成されたメタノールはガソリン混合用燃料として使用されている(図8)。

また、スウェーデンではLiquid Wind社と英国Carbon Clean社が共同でe-メタノールを製造する

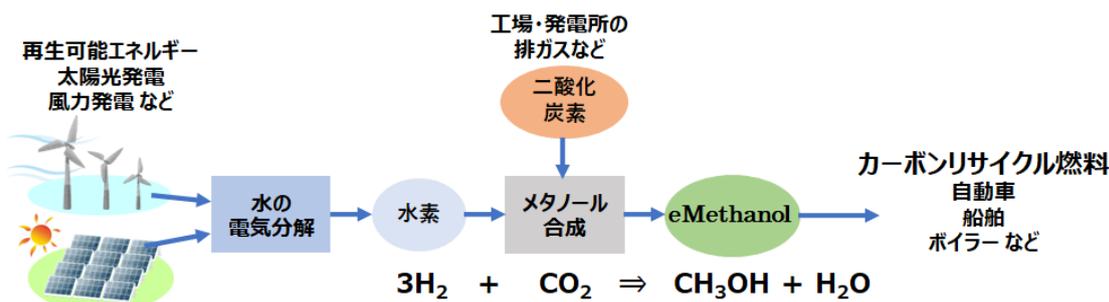


図7 e-メタノールの製造方法

計画を進めている。CO₂回収を手掛けるCarbon Clean社は、近隣の工業地域から排出されるCO₂を回収、Liquid Wind社の工場でCO₂と再エネ水素からe-メタノールを製造、船舶用燃料として活用するという。2024年初めに稼働し、年間7万トンのCO₂からe-メタノールを5万トン製造、化石燃料の代わりに使用することで年間10万トンのCO₂削減になると発表している。

欧州のCCUSで特徴的なことは、地域の産業クラスターが協力してCO₂を貯留や利用、ブルー水素を製造し（化石燃料とCCSを組み合わせ、CO₂を排出せずに製造される水素をブルー水素という）、カーボンリサイクルを促進しようとする動きがある。一例に、英国北部のTeessideで進行しているNet Zero Teesside projectが挙げられる（図9）。同プロジェクトは、Teesside地区に集積している石油企業BPやTotal、Shell、製鉄のBritish Steel、肥

料のCF Fertilisers等がCCUS技術を共同で導入し、同地域の完全脱炭素化を目指している。各企業から排出されるCO₂を北海の油ガス田へ圧入・貯留、その圧入経路を利用してブルー水素を製造する等、2030年には年間2,700万tのCO₂貯留を目標としている。企業や工場単位の対応では限界があり、産業クラスターでCO₂回収・輸送・貯留と利用を面的に対応していく方法である。英国政府は、10億ポンドの補助金を予算承認し、このようなCCUSクラスターの立ち上げを支援している。

4.3.3 ケミカルルーピング燃焼

CCUの前提として原料となるCO₂を効率良く回収する技術も重要であり、近年開発が進められ注目されつつある技術にケミカルルーピング燃焼がある。ケミカルルーピング燃焼（CLC：Chemical Looping Combustion）とは、燃料を燃焼させるのに空気を使うのではなく、金属粒子に吸着させた酸素



図8 左：CRI社のeメタノール工場、右：Liquid Wind社の工場予定図
出典：CRI¹⁶⁾、Liquid Wind¹⁷⁾

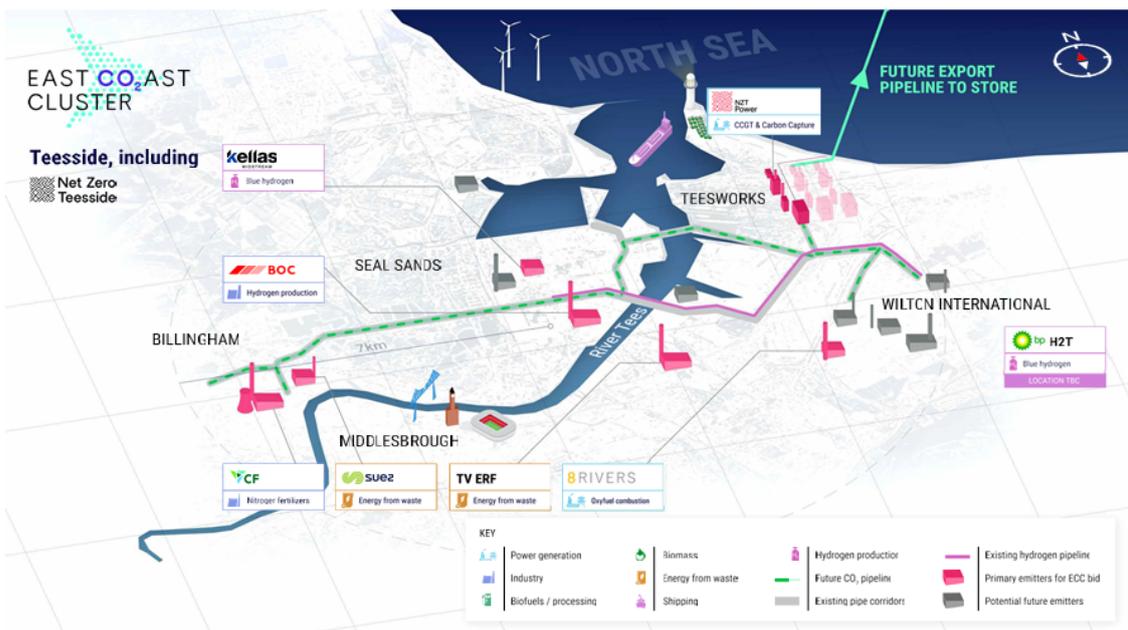


図9 Net Zero Teesside projectの概要
出典：Net Zero Teesside¹⁸⁾

と燃料を反応させる燃焼技術である。

CLCは、「酸素キャリア」と呼ばれる金属を含む鉱物の細かな粒子を酸化し、その粒子を燃料に接触させて燃焼させる(図10)。酸素キャリアは、まず酸化反応器で空気に接触して酸化され、次に燃焼炉に入り燃料と接触して酸素キャリアが運び込んだ酸素が燃焼する。酸素(O₂)を失った酸素キャリアは、再び酸化反応器で酸化され、燃焼炉へ投入、燃焼サイクルを繰り返す。酸素キャリアを用いた酸化還元の化学反応(Chemical Reaction)を利用すること、繰り返し循環(Looping)して燃焼させることからケミカルルーピング燃焼と呼ばれている。この燃焼方式であれば、原理的に酸素のみが燃焼との燃焼に使われるため、燃焼炉の排ガスの90%はCO₂で残りは水となり、CO₂を簡単に分離回収することができる。

火力発電所では、排ガスに占めるCO₂濃度は10～15%である。CO₂を貯留もしくは化学品製造などに利用するためには、CO₂濃度を高めるため排ガスからCO₂を分離回収する装置が必要になるが、CLCでは不要で、設備費を低減できる他、CO₂分離回収に必要なエネルギーも小さいため、発電効率を大幅に落とすこともない。発電所等の経済性を維持しながらCO₂分離回収する技術として期待

される。

実際のCLCによる発電装置は空気反応塔と燃料反応塔で構成され、それら反応塔を酸素キャリアが循環する(図10, 11)。酸素キャリアは空気反応塔で酸化し、気体と固体を分離するサイクロン装置でN₂と分離され、酸素キャリアだけが燃料反応塔に送り込まれ、燃料と接触し燃焼する。この燃焼熱で蒸気をつくり、蒸気タービンで発電するのがCLC発電プラントである。

CLCの核となる要素技術はいかに効率良く酸素を燃料反応塔に供給するかにあり、酸素キャリアの選択が重要となる。金属酸化物が有望視されており、酸素の運搬量とコストの両面から最適な物質の追求が進められている。現在、欧米を中心に120kWthから3MWth規模のCLCパイロット試験が進められてところで、中でも欧州と中国の共同開発であるプロジェクト「CHEERS」は2022年運転開始を目標に3MWthの試験機設置を計画。米国ではBabcock & Wilcox社とOhio State Universityが共同開発で、種々燃料からCLCを用いて水素や合成ガスを製造する独自プロセス「Bright Loop」の商業化を目指している等、本技術開発が活発化している。

5. おわりに

前半ではCCUの社会実装に影響を与えようと考えられるEUの政策、後半では海外におけるCCUの事例を紹介した。CCUは技術的にはエネルギーとマテリアル両面の視点、社会実装においては技術と政策、経済的合理性といった複眼的な視点が重要となる。本稿がCCUの技術開発や社会実装を検討する際の参考となれば幸いである。

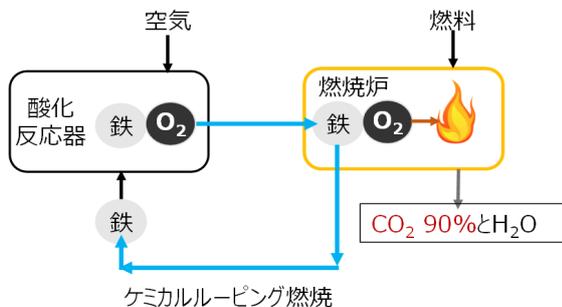


図10 ケミカルルーピング燃焼の仕組み

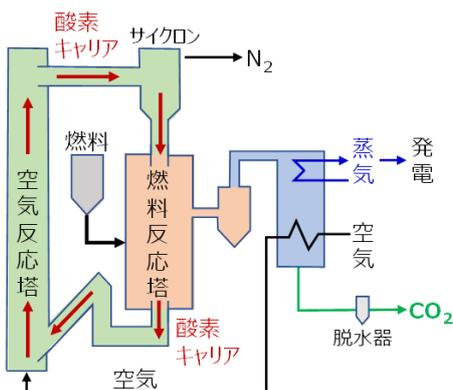


図11 CLC発電プラントのイメージ

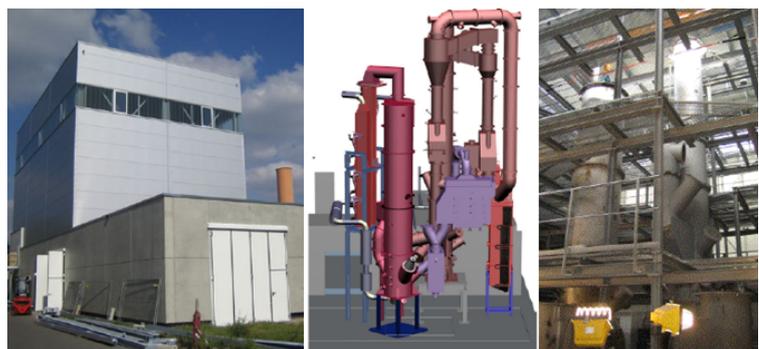


図12 実際の装置例
出典：Alstom¹⁹⁾

参考文献

- 1) The European Commission, The European Commission's priorities (accessed Apr. 4 2022), https://ec.europa.eu/info/strategy_en
- 2) The European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION, The European Green Deal (accessed Apr. 4 2022), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=ET>
- 3) The European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, Powering a climate-neutral economy : An EU Strategy for Energy System Integration (accessed Apr. 4 2022), https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy_system_integration_strategy_.pdf
- 4) The European Commission, EU strategy on energy system integration (accessed Mar. 2 2022), https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-system-integration/eu-strategy-energy-system-integration_en
- 5) Ellen Macarthur Foundation, Completing The Picture How The Circular Economy-Tackles (accessed Apr. 4 2022), <https://emf.thirdlight.com/link/w750u7vysuy1-5a5i6n/@/preview/1?o>
- 6) Politico, EU pushes carbon border tax at climate talks in Glasgow (accessed Apr. 4 2022), <https://pro.politico.eu/news/eu-pushes-carbon-border-tax-at-climate-talks-in-glasgow>
- 7) United Nations, Smooth transition for graduating LDCs under the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (accessed Apr. 4 2022), <https://www.un.org/ldcportal/smooth-transition-for-graduating-ldcs-under-the-eu-carbon-border-adjustment-mechanism/>
- 8) Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition, Implications of EU Carbon Border Adjustment Mechanism for Turkey (accessed Apr. 4 2022), http://bestanden.turkishcarbonmarket.com/20210728_Turkey_CBAM%20final%20results_v1.pdf
- 9) Politico, EU's looming carbon tax nudged Turkey toward Paris climate accord, envoy says (accessed Apr. 4 2022), <https://www.politico.eu/article/eu-carbon-border-adjustment-mechanism-turkey-paris-accord-climate-change/>
- 10) Center for Strategic & International Studies, Climate Darling or Potemkin Village? Russia's Carbon-Neutral Experiment in Sakhalin (accessed Apr. 4 2022), <https://www.csis.org/analysis/climate-darling-or-potemkin-village-russias-carbon-neutral-experiment-sakhalin>
- 11) European Commission, Steel & Aluminium EU-US Joint Statement (accessed Apr. 4 2022), https://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2021/october/tradoc_159890.pdf
- 12) Federal Ministry of Finance, Joint key-issues paper presented to the federal cabinet (accessed Apr. 4 2022), <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/EN/Pressemitteilungen/2021/20210825-german-government-wants-to-establish-an-international-climate-club.html>
- 13) E3G, Fit for 55% package : Briefing ahead of the July 14 release (accessed Apr. 4 2022), https://www.e3g.org/wp-content/uploads/E3G_Press-Briefing_Fit_for_55-July-2021.pdf
- 14) Lux Research, Inc., CO₂ CAPTURE & UTILIZATION The Emergence of a Carbon Economy (Dec. 2020)
- 15) CarbonCure Technologies Inc. (accessed Apr. 4 2022), <https://www.carboncure.com/>
- 16) Carbon Recycling International (accessed Apr. 4 2022), <https://www.carbonrecycling.is/>
- 17) Liquid Wind (accessed Apr. 4 2022), <https://www.liquidwind.se/>
- 18) Net Zero Teesside (accessed Apr. 4 2022), <https://www.netzeroteesside.co.uk/>
- 19) ALSTOM, ALSTOM Chemical Looping Technology Status (accessed Apr. 4 2022), https://ieaghg.org/docs/General_Docs/OCC2/Abstracts/Abstract/occ2Final00050.pdf

著者略歴



小川玲奈（オガワ レイナ）
2007年9月東京工業大学総合理工学
研究科博士課程修了後、テサテープ株
式会社、株式会社サムスン日本研究所
での素材開発業務を経て2020年3月
より現職。マテリアル全般の調査分析を担当。博士
(工学)。



ダーベル暁子（ダーベル アキコ）
1998年3月桜美林大学国際学部卒業。
三菱UFJ銀行（在ロンドン経済調査
室）、欧州三井物産等を経て、2019年
10月より現職。欧州の政治・経済の調
査研究を担当。



稲田雄二（イナダ ユウジ）
1991年3月東京都立科学技術大学(現
東京都立大学)工学部卒業。エンジニ
アリング会社等を経て2017年10月よ
り現職。資源エネルギーの調査研究を
担当。