

第3回事例研究会

グリーンフォーラム（藤井康正座長＝東京大学大学院工学系研究科教授）は、2024年度第3回事例研究会を開催した。テーマは「CN実現へ日本の切り札なるか!? CO₂回収・地下貯留（CCS）」で、活発な議論が展開された。



経済産業省 資源エネルギー庁
資源・燃料部 燃料環境適合
利用推進課 CCS政策室長

慶野 吉則氏

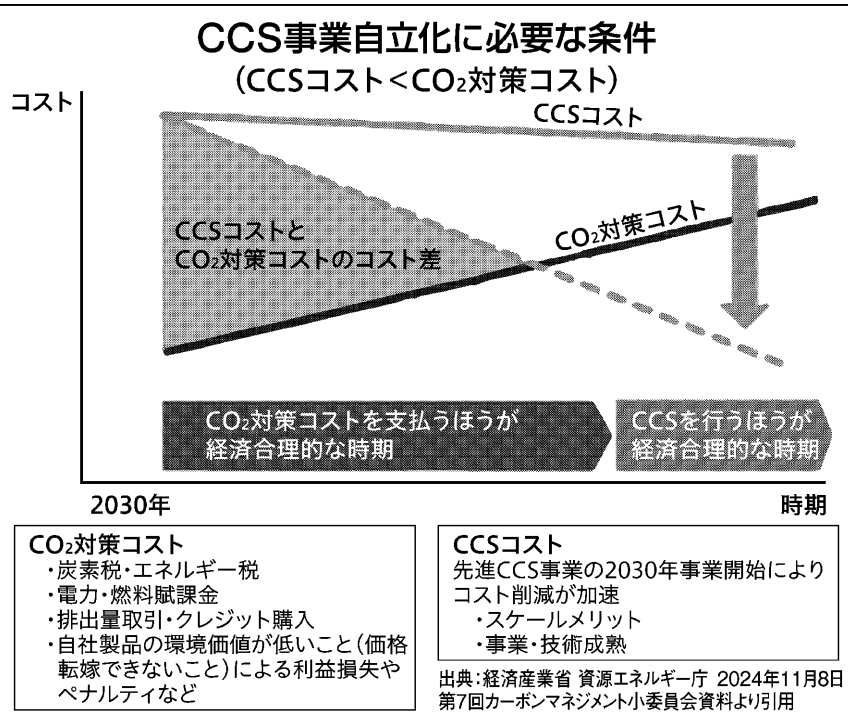
日本のCCS政策について



CCS（二酸化炭素回収・貯留）は、事業者から排出されるCO₂（二酸化炭素）を分離・回収して地中深くに貯留する技術であり、約50年来的石油増産技術を転用したもの。CO₂を貯留層と呼ぶ地中の安定した地層に閉じ込めることで、大気中に放出されるCO₂を削減する。日本政府は2030年からのCCS事業開始に向けた事業環境の整備を進めている。

日本のCCS政策は、生産活動プロセスにおいて不可避免的にCO₂が発生してしまう鉄鋼や化学、電力セクターといった多排出産業の脱炭素化がまず当面の狙いだ。一足飛びにCO₂排出の削減が困難な産業（ハード・トゥ・アベイト）に対して、トランジション期のソリューションにとどまらず、エネルギー安定供給、経済成長、脱炭素の同時実現の切り札となる。政府は30年までをCCSビジネスモデル構築期として事業環境を整備。30年以降に本格的にCCS事業を展開し、同時にスケールアップを図っていく。政策の扇の要が「CCS事業法」「改正ロンドン議定書」「先進的CCS事業」の三つ。国内ではCCS事業法と先進的CCS事業をステップとしてCCSバリユーチーエンを立ち上げていく。

エネ安定供給・経済成長・脱炭素を同時実現



まずは北海道・苫小牧地域を指定しており、早ければ今秋をめどに試掘の許可が出る。

第三段階の貯留に関わるレギュレーションについては、今夏をめどに環境省と共同で検討会を立ち上げる。モニタリングのやり方などの詳細を詰めていく。

国内のCCS開発と並行して海外のCCS開発案件も積極的推進していく。国内で排出されたCO₂を液化して船に積んで海外の枯渇油ガス田に貯留するプロジェクトだ。海外のCO₂貯留地を活用することは、条件がそろえば有力な選択肢の一つとなる。

一方で海外での海域CCS目的でCO₂を輸出する場合、ロンドン議定書09年改正に基づいた国家間の協定または取り決めが必要となる。24年の国会で議定書交渉が承認されたことから、CCS貯留地確保とCO₂輸出に向けて、貯留国との対話が本格化している。

現在、CO₂の越境輸送先候補としてはマレーシア、インドネシア、豪州など。マレーシア政府との間では、本年1月の石破総理とアンワル首相の会談でもCCSの協力推進で一致。またCO₂輸出国間の連携として、経済産業省は24年8月にシンガポール貿易産業省との間で協力覚書を締結している。

経産省は、23年からエネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）と共同で「先進的CCS事業」を立ち上げてCO₂の分離・回収から輸送、貯留に至るバリユーチーエンの一体的支援に取り組んでいる。模範となる先進性のあるプロジェクトを通してCCS市場の創出や参入促進、事業の自立化につなげていく。

先進的CCS事業では24年に9案件を採択した。北海道・苫小牧地域など国内5カ所とマレーシアなど海外4カ所だ。バリユーチーエンの設計作業や海底構造の把握、貯留層の試掘など、初期段階のフェーズを政府が支援する。30年までの事業開始を目指し、26年をめどに事業者による投資決定へバトンをつないでいく。

資源エネルギー庁としては、26年頃の事業者による投資決定と時間軸を合わせ、事業者の円滑な参入や操業を可能とする支援制度を設計して実行していく。また、中長期的には40年に向けて高い予見性の下で自立的にCCS事業を開始できるよう、知見の横展開やコスト低減、貯留量確保に取り組んでいく。

CCSがビジネスとして自立するためには、大前提としてCCSコスト（分離回収と輸送と貯留の合計コスト）が、排出者が負担するCO₂対策コスト（カーボンプライシングのコスト）を下回ることが必要だ。現在、CCS単価はトン当たり3万円を超える水準にあり、CO₂対策コストとのギャップは大きい。ビジネスベースでは、CCSを実施するインセンティブはないというのが現状だ。

エネ庁ではCCSの実装を実現し、CCS関連企業の成長とビジネスモデルの自立化を促しつつ、産業の国際競争力維持とエネルギーセクターの脱炭素化に貢献していく支援制度の設計を進めている。

想定されるのがCCSコストとCO₂対策コストの差に着目したコスト差支援。水素やアンモニアの導入支援を参考に、支援制度を検討している。事業開始に必要な初期投資や操業時のランニングコストを、コスト差に着目した支援でカバーしていくことを検討する。

CCSはエネルギー安定供給、経済成長、脱炭素の同時実現に不可欠な手段として期待と役割は大きい。エネ庁は着実に社会実装を進めていきながら、より高次の目標としてカーボンマネジメントを推進していく。

将来的にはCO₂を資源として捉え、化学品や燃料などに再利用するCCU（回収・利用／カーボンリサイクル）への道筋もつけていく。

CO₂分離回収・有効利用技術開発の動向とRIITEの取り組み

地球環境産業技術研究機構
化学研究グループリーダー

余語 克則氏



地球環境産業技術研究機構（RIITE）では、二酸化炭素（CO₂）の回収・貯留（CCS）の早期実装に向けて技術開発に取り組んでいる。RIITEの設立は1990年。ほぼ期を同じくしてCO₂の分離回収技術の研究開発をスタート。常圧用ポリイミド膜から吸収液、そして固体吸収材へと対象技術を拡大し、2020年からは新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のムーブメント型研究開発事業として大規模のCO₂を直接回収する「DAC（ダイレクト・エア・キャプチャ）」の開発に着手した。パイロットスケール規模での実証試験が始まっている。

一般的にCO₂の分離・回収方法は大きく四つに分類される。①アミン水溶液や塩基性固体吸収材など、CO₂と親和力のある吸収材での吸収（化学吸収法）②吸収液への溶解度差を利用した物理吸収（物理吸収法）③無機多孔質材料の細孔内表面への吸着（物理吸着法）④高分子膜などを使った膜分離法だ。アミンはCO₂回収技術で多用される化学物質であり、化学吸収法はアミン系水溶液（吸収液）に化学反応でCO₂を選択的に吸収することでCO₂を脱離させて回収する。CO₂の分離・回収技術は、CO₂発生源の規模と特性により技術選択の方向性が異なる。例えばDACは固体吸収材、火力発電所や高炉では化学吸収液、そしてCO₂分圧の高い天然ガス精製

新材料・システム開発 低コスト化・大規模化 課題

や改質ガスからのCO₂回収は膜分離といった真合だ。さまざまな圧力・濃度が存在し、コストや純度の担保など適応技術の難しさが異なる。

また、対象とする排ガス中のCO₂濃度が10%以下であったり、低圧状態である場合などは、分離回収コストが極めて高くなる。一般的にCO₂濃度が低いと化学吸収法は不利になる。物理吸収法も高圧ガスを対象とするのが有利であり、吸収液に物理的にCO₂を吸収させる。

一般的に化学吸収法による分離回収コストは、回収時のスチームのコストが5割超を上める。主に使用される吸収液はアミンを水に溶かしたアミン水溶液。アミン濃度は30～50%程度であり、半分以上が水だ。この水溶液に常温でCO₂をアミンとの結合反応で吸収させて、加熱により逆反応でCO₂を回収する。このとき分離回収エネルギーとして比熱が最も大きな水と一緒に温めるエネルギーコストが課題となっている。見方を変えれば、反応熱が小さく吸収液の回収時の加熱が低温で抑えられ、加えてスチーム損失がゼロであれば、回収エネルギーコストは低減させることができる。

最近の研究開発では、水の代わりに有機溶媒を使った混合溶媒（非水溶媒）系の吸収液がトレンドだ。また、CO₂を吸収させた後に水がリッチな相と分離して、CO₂を吸収した成分だけを加熱して再生する2相分離系やアミンを比熱の小さな多孔質の担体に塗布した水使用ゼロの固体吸収材を使う方法なども検討されている。

RIITEでは、アミンのさらなる改良を進めている。開発中の非水溶媒（混合溶媒）系は、従来の吸収液と比較して分離回収エネルギーを10%以上低減できることを確認している。25年度中にパイロットスケール試験を経て、先進的CCS事業での活用や社会実装に向けた量産化研究へ着手する予定だ。

一方、CCS事業に用いられるCO₂純度は95%以上が業界慣行となっている。海外のノーザンライツ・プロジェクトでは、条件によつては99・8%以上が要求される。日本は将来の海外貯留やCO₂輸出といった越境輸送に備えて、分離回収コストは上げずに回収率を引き上げ、しかも純度を担保できる技術を開発しておく必要がある。

政府はカーボンニュートラルに向けて30年から6000万～1200万トン、そして50年に年1・2億～2・4億トンのCO₂貯留を目指すとしている。このシナリオに沿った場合、単純計算で100万トン規模のCCSプラントを、国内に年6台ずつ20年間わたって計120台設置することになる。DACは他の排出削減技術に対するバックストップ・テクノロジーであり、いわば「最後の砦」といえる。現在、世界で稼働もしくは計画中のDACは40件程度。コストはトン当たり6000～8000ドルと極めて高い。CO₂濃度が約0・04%（400ppm程度）の空気から直接回収するDACは、言ってもなく濃度が低いいため多くの分離回収エネルギーを要しコストも高くなる。

DAC用の吸収材に関するアミン化合物はCO₂と反応性が高い（反応熱が大きなもの）ほどCO₂の吸収速度が速い。RIITEでは材料探索を高度化して、数千種類の中から反応熱が低くてもCO₂吸収・放出性能に優れるアミンの開発に成功している。これは排熱活用の幅を広げるものだ。

DAC技術の日本の現在地は1日当たり数百トン程度の開発。新しい材料・システムの開発を通じた低コスト化と大規模化がこれからの研究課題となる。

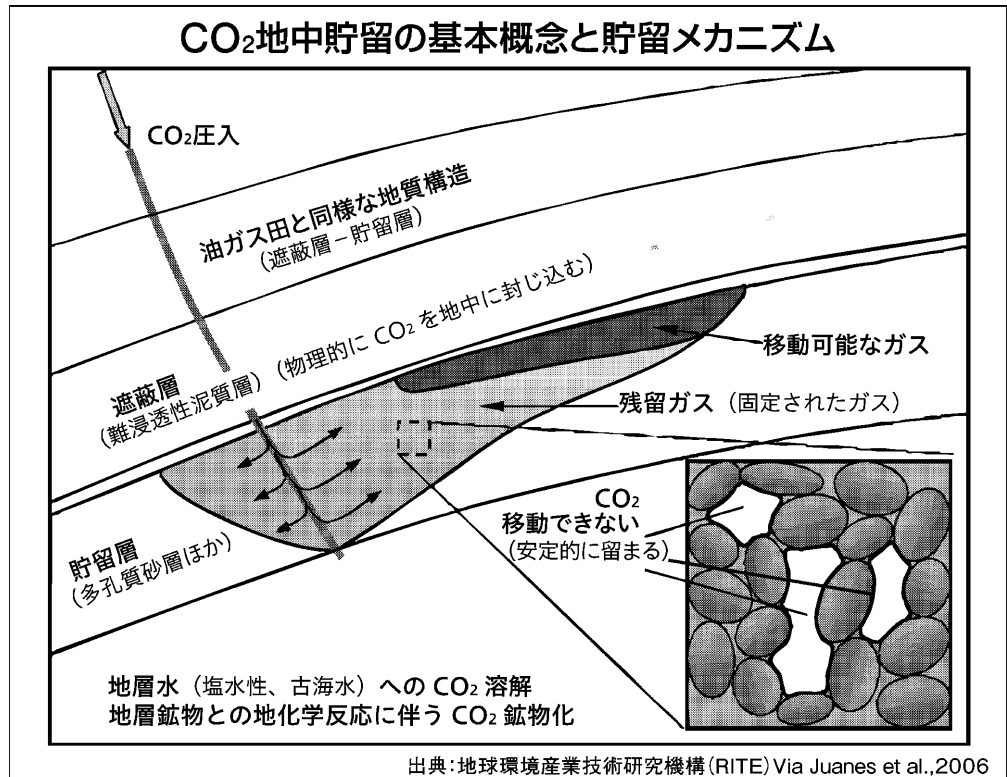
環境が企業価値向上のカギ

日刊工業新聞社が主宰する「グリーンフォーラム」は、産業界として地球環境保全に取り組むことを目的として1991年に設立された研究会です。有識者や行政関係者らの協力を得て、環境情報の収集・調査・研究、新聞やインターネットによる情報発信、環境事業の広報のサポートなどを展開しています。「環境が企業価値向上のカギ」を掲げて活動し、低炭素・循環型の経済社会システムの構築を目指しています。



CN実現へ日本の切り札なるか!?

CO₂回収・地下貯留



出典：地球環境産業技術研究機構(RITE) Via Juanes et al., 2006

カーボンニュートラル実現に向けてのCO₂地中貯留技術の社会実装

地球環境産業技術研究機構
CO₂貯留研究グループ
リーダー
薛自求氏



二酸化炭素(CO₂)の地下貯留は、2050年カーボンニュートラル(CN)実現に向けた切り札として期待される役割は大きい。国際エネルギー機関(IEA)によれば23年に世界で排出されたCO₂量は約370億トン。50年ネットゼロを前提とした世界で必要となるCO₂回収量は年38億76億トン。このうち95%が地層中に貯留されることと想定している。

地球環境産業技術研究機構(RITE)は政府目標に寄与する基礎技術の確立のみならず、早期の社会実装を主導していく使命がある。16年には石油や化学メーカーなどとタッグを組み、二酸化炭素地中貯留技術研究組合を設立。スケールアップやバリエーション構築に向けて技術実証や共同研究活動にも取り組んでいる。

実際の地中貯留では、漏れ出さない理想的な砂層とそれを覆う泥層の地質構造を選定し、地下1000〜3000m程度の深さにあ

海域地下深部 塩水性帯水層がターゲット

塩水性帯水層にCO₂を圧入して封じ込む。CO₂の圧入は地中貯留に適した流体性状(超臨界状態)にすることで、地上と比べて体積比で約200倍以上の高密度な貯留が可能だ。国内では政府の適地調査によって、日本周辺で11地点約160億トンのCO₂貯留ポテンシャルがあると推定されている。

CCSにおける貯留候補場所は大まかに三つある。減退した油層もしくは枯渇ガス層、そして帯水層だ。国内においては、さらに陸域か海域かという議論も存在する。

非資源国である日本は、欧米のような石油やガス田の採掘量が少なく、回収したCO₂を生産性増進回収(EOR)に用いるような使い方は期待できない。一方、化学工場や発電所、石油精製プラントは臨海部に多く、陸域のパイプライン構築や輸送には多大な費用がかかってしまう。CCSバリエーションとしても沿岸域が現実解となるだろう。具体的には海域地下深部の塩水性帯水層がターゲットとなる。

CO₂は水に溶けやすい物質だ。大気中に増え続けているCO₂が海水に溶けている海水は酸性化し、海洋生物の生態系を脅かす懸念があると言われる。しかし、地層水の溶解は日本は諸外国と比べて有利だ。一般的に低温で低塩分濃度の海域ほどCO₂を多く溶解する。日本の地層水は欧州や北米と比べると塩分濃度が1桁〜2桁程度低い。溶解されやすく深部に安定的に留まることは封じ込めポテンシャルが大きいと言える。

では、最初から溶解水として貯留すればいいのではないか。溶解水による貯留は新しい考え方だ。例えば、ペロブスカイト太陽光パネルの原料になるヨウ素。ヨウ素は、水溶性天然ガスが溶解している地下水「かん水」に溶け込んでいる。千葉県が国内1位の産出量を誇り、シェアは約80%。天然ガス採取時に抽出され、脱ヨウ素化した「かん水」は地中に戻される。溶解水貯留の議論は、この時にCO₂を溶かして地中に戻すという考え方だ。「かん水」には、元々は天然ガスのメタンが水に溶解した状態であり、CO₂はメタンより水に溶けやすい。メタンが溶解した状態で貯留されているのであれば、CO₂溶解水を地中に貯留することは可能だ。しかも安全性が高くコストも抑制できる。生産した天然ガスを使えばゼロエミッションとなり、効率的で簡便な貯留手法となる可能性を秘めている。

CO₂圧入による貯留メカニズムには、経時変化順に複数の隔離プロセスが伴う。①構造トラップ②残留ガストラップ③溶解トラップ④鉱物トラップの四つだ。構造トラップは遮断層など地質構造による遮断。残留ガストラップは貯留層内の孔隙に取り込まれたCO₂の界面張力による停滞。溶解トラップはCO₂溶解によって地層水の密度が増加し安定した状態。鉱物トラップはCO₂溶解による水素イオン指数(pH)低下によって岩石と化学反応を起こす鉱物化。

これらメカニズムは地中貯留の安定性を高め、CO₂の地中固定化に寄与するものだ。それぞれ寄与度合いに差はあるが、圧入からの経過時間が長くなるほど貯留は安定化へ向かうことになる。

CCSでは計画通りの圧入できない事業リスクや貯留したCO₂の一部が漏れ出すリスクがゼロとはいえない。数値シミュレーションや弾性波探査解析によるCO₂分布状況の可視化、圧入中や圧入後における貯留層内部の挙動予測が重要となる。また、光ファイバーを用いた地層の変化監視モニタリングや音響ソナーによるCO₂漏れ検知技術の開発も進行中だ。

しかし、こうした基礎技術と緻密な実施計画においても、地下(地層)情報の不確実性と潜在的なリスクは排除できない。それは断層調査と特性評価だ。地震大国である日本は断層を正しく評価し、諸外国以上にCCSスクリーニングによる誘発地震や地質リスクに関わるリスクマネジメントが求められる。RITEでは豪州機関との共同研究で断層安定性と漏れによる影響評価に向けてフィールド実験を行う予定だ。

意見交換



グリーンフォーラム座長
東京大学大学院 教授
藤井 康正氏

秋元圭吾委員 政府が初期段階で投資リスクをサポートするセントラル方式の採用は考えているだろうか。

(資源エネルギー庁) 慶野吉則氏 先進的CCS事業では、事業者の投資決定前の特にリスクの高い調査等の部分を支援する。例えば初期の貯留層評価における試掘などのJOGMECが実施し、その後は事業者の投資にバトンを引き継ぐ。政府と事業者で適切にリスク分担する仕組みだ。24年度補正予算では320億円を措置している。(パナソニック) 下野隆氏 CCSプロジェクトが米国がリードする理由は。

(RITE) 薛自求氏 貯留サイトが多いこともできることながら、米政府によるインセンティブが大きい。貯留サイトは圧倒的にEORであり、石油の増進回収というCCSが貯留サイトといふならない。数値シミュレーションや弾性波探査解析によるCO₂分布状況の可視化、圧入中や圧入後における貯留層内部の挙動予測が重要となる。また、光ファイバーを用いた地層の変化監視モニタリングや音響ソナーによるCO₂漏れ検知技術の開発も進行中だ。

(ホンダ) 青木健氏 ホンダもDACの技術開発に取り組んでいる。DAC(DACCS)のロードマップは。

慶野氏 まず大規模エミッターがけん引するCCSプロジェクトで貯留地の開発や実証支援を講じるとともに投資を促していく。並行してDACの研究開発は進めており、最終的にCCSと合流させていくこともあり得る。

下野氏 日本の技術力の現在地は。

余語氏 日本の環境技術はレベルが高く、CO₂分離・回収技術では三菱重工が独立している。アミン吸収法による商用プラントでは世界シェアは7割。世界ナンバーワンと言っても過言ではない。RITEが開発した化学吸収液も小規模ながら一部実用化されており、高性能だと自負している。

(RITE) 薛自求氏 RITEは米ノースダコタ州の貯留サイトで光ファイバーによるCO₂モニタリングを行っている。2022年から圧入を開始して6月末に50万トンを超えた。100万トンまでモニタリング技術を積み上げれば監視システムの知見を蓄積できる。日本の安全技術として世界をリードできるものとなるだろう。

竹内純子委員 CCS事業法では事故時の賠償責任は無過失無限責任。参入事業者はリスクマネジメントの観点から二つの分離から電機業界に対して期待するところは。

慶野氏 技術革新の余地が大きい。CCSの分離・回収セクターにおけるコスト削減技術と温室効果ガス(GHG)の測定・報告・検証するプロセス「MRV」だ。CCSビジネスにおいて企業やプロジェクトのCO₂排出削減が重要なポイントになる。BEECCSなど、ネガティブエミッションの取り組みもみられる。藤井座長 破碎した岩石に大気中のCO₂を吸収・固定化させる「岩石風化促進」技術が注目されている。

余語氏 DACの領域の中では、技術成熟度はまだ低いと認識している。スケールアップという部分も疑問だ。また海中からCO₂を回収するDOC(ダイレクトオキシチャンキャプチャー)と同様に、CO₂をどれだけ固定したか、定量的に評価するのが難しいと思う。

藤井座長 本日はありがとうございました。

足踏む規制とならないか。

慶野氏 無過失賠償責任については指摘通りだ。事業者の責任という部分ではCCS事業法は厳しい法律になっている。原子力と似ているが、制度的にCO₂が確実に圧入できて事故リスクが伴わない限り貯留許可は降りない。他方で、相当因果関係がないものに限っては貯留事業者が責任を負うことはない。

藤井康正座長 CCS単価の見通しは。

慶野氏 現在のCCS単価はトン当たり3万円以上という試算がある。CCS事業を通して実装とスケールメリットの両面からコスト削減を加速していく。50年の目標値としてはDACCSは1000ドルというのがあるが、CCSはそれ以下を目指したい。

下野氏 CCS推進の観点から電機業界に対して期待するところは。

慶野氏 技術革新の余地が大きい。CCSの分離・回収セクターにおけるコスト削減技術と温室効果ガス(GHG)の測定・報告・検証するプロセス「MRV」だ。CCSビジネスにおいて企業やプロジェクトのCO₂排出削減が重要なポイントになる。BEECCSなど、ネガティブエミッションの取り組みもみられる。藤井座長 破碎した岩石に大気中のCO₂を吸収・固定化させる「岩石風化促進」技術が注目されている。

余語氏 DACの領域の中では、技術成熟度はまだ低いと認識している。スケールアップという部分も疑問だ。また海中からCO₂を回収するDOC(ダイレクトオキシチャンキャプチャー)と同様に、CO₂をどれだけ固定したか、定量的に評価するのが難しいと思う。

藤井座長 本日はありがとうございました。

CCS成果の正確測定・定量把握に商機 システム整備期待



出削減や吸収成果を正確に測定し、それを第三者が検証できる仕組みはクレジット市場における価値担保において重要な部分となる。センサーやモニタリング技術など、MRVを支える国際規格に基づいた測定・定量把握システムの整備に期待している。

水戸部氏 国内貯留サイトへの液化CO₂船舶輸送は考えているか。

慶野氏 日本海側など国内での通地域は一定程度存在する。パイプラインを新規で200km以上敷設する場合は、液化CO₂船舶輸送の方が経済的という試算もある。国内での船舶輸送の場合は貯留国との取り決めは不要であり、国内貯留に比べて、海外に持つのか、それとも海外に持つのかの両面から適切に判断していきたい。

稲垣氏 CCSクレジットの供給は。

慶野氏 CCS政策は時間軸的には、まず鉄鋼や発電などCO₂排出削減が困難な産業(ハード・トゥ・アベイト)が着実に脱炭素化に向かうための移行支援からとなる。ただ先進的CCS事業に参加する事業者はクレジット供給源になりうる。BEECCSなど、ネガティブエミッションの取り組みもみられる。藤井座長 破碎した岩石に大気中のCO₂を吸収・固定化させる「岩石風化促進」技術が注目されている。

余語氏 DACの領域の中では、技術成熟度はまだ低いと認識している。スケールアップという部分も疑問だ。また海中からCO₂を回収するDOC(ダイレクトオキシチャンキャプチャー)と同様に、CO₂をどれだけ固定したか、定量的に評価するのが難しいと思う。

藤井座長 本日はありがとうございました。

TREK!

ビジネスに使える産業情報が
今すぐ読める! 転載できる!

日刊工業新聞が運営するコンテンツマーケット

「TREK!」は新聞記事や雑誌記事、画像、セミナー動画を販売するECサイトです。商品の検索から決済、著作権利用までオンライン上で完結できます。すぐに必要な商品を手続き、情報収集や社内回覧、営業資料への転載、顧客への配布など、幅広いビジネスシーンでご利用いただけます

著作権の利用手続きが
オンラインで完結

記事や画像を
1本ずつ購入可能

HP掲載は、22,000円
社内共有は、5,500円から

日刊工業新聞社

OPEN

PCでも スマホでも OK

会員登録が完了すれば、
すぐに購入して利用可能!

独自の産業情報コンテンツが **数千本** 以上

産業用ロボットの受注額 (単位: 億円)

年次	受注額
79	1500
80	1600
81	1700
82	1800
83	1900
84	2000
85	2100
86	2200
87	2300
88	2400
89	2500
90	2600
91	2700
92	2800
93	2900
94	3000
95	3100
96	3200
97	3300
98	3400
99	3500
00	3600
01	3700
02	3800
03	3900
04	4000
05	4100
06	4200
07	4300
08	4400
09	4500
10	4600
11	4700
12	4800
13	4900
14	5000
15	5100
16	5200
17	5300
18	5400
19	5500
20	5600
21	5700

(日本ロボット工業会の資料を基に作成、会員登録)

TREK! TREK!
https://trek.nikkan.co.jp