

2 | 俯瞰区分と研究開発領域

2.1 エネルギー区分

2.1.1 エネルギー資源探査・開発技術、CCS

（1）研究開発領域の定義

エネルギー資源探査・開発は、地中および海底下に存在するエネルギー資源を利用するための科学的調査や関連技術開発等を含む領域である。またCO₂貯留も共通する技術のため、本領域ではCO₂回収貯留（CCS）についてCO₂分離回収技術も含め①探鉱段階、②開発段階、③生産・操業段階、④CO₂分離回収に係わる適用技術や研究開発を対象とする。

（2）キーワード

■探鉱段階（衛星探査技術）

資源探査衛星、陸上広域資源探査、石油資源遠隔探知、ランドサット（Landsat）、パルサー（Palsar）、アスター（Aster）、光学センサ

■開発段階（水平坑井掘削技術）

坑井掘削法、水平掘、マルチラテラル仕上げ工法、水圧破碎法（フラクチャリング）、大偏距坑井掘削

■生産操業段階（環境保全技術）

ゼロエミッション技術、産業廃棄物地下再圧入、炭酸ガスによる石油増進回収法（CO₂EOR）、炭酸ガス地下貯留（CCS）、マイクロバブルCO₂EOR攻法、掘削屑処分法、随伴水処理・処分法、モニタリング

■CO₂分離回収技術

燃焼前回収（pre-combustion）、燃焼後回収（post-combustion）、アミン、吸収法、吸着法、膜分離法、DAC（Direct Air Capture）、分離回収エネルギー

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

■探鉱段階（衛星探査技術）

探鉱段階の研究・開発技術では、物理探査技術が主であり、広域地質情報の俯瞰的な分析、あるいは特定の狭い地域の地質特性分析・評価に区分される。

衛星探査探査は前者の分野であり、（1）資源産出国との交渉が不要で、（2）広域地質情報の分析が一度に可能であり、（3）インフラが整備されていない未開発地域場所においても現地探査なしで簡易的調査も可能であるため、探鉱初期の情報収集手段として極めて有用である。衛星探査技術の研究開発を推進することで、資源有望地域の効率的な絞り込みが可能となり、探鉱精度の向上と資源開発リスクの低減につながる。また、継続的に研究開発を実施し、高度な衛星探査技術を維持することで、技術提供・移転等を通じた資源産出国との関係強化が可能となり、国外での探査案件・資源開発案件参入の機会増大が期待出来る。すなわち、衛星探査技術の研究開発を通じて、我が国の安定的なエネルギー資源の確保に資することが可能となる。

■開発段階（水平坑井掘削技術）

在来型の油・ガス田の資源は生産と共に、油・ガス層圧力の低下や水生産の増加などによって生産能力が低下する。それを補う方法として、各種新技術が研究・開発されてきた。その一つとして、近年多くの油ガス

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

田の坑井で採用している水平坑井掘削技術がある。これは通常の坑井が垂直に掘られ、油・ガス層と交わる部分から生産をするのに対して、油・ガス層の中を水平に掘り進み、坑井の生産性の向上を図るものである。

水平坑井掘削技術は、地上の地形障害物がある場合や、貯留層が薄い場合、油・ガス生産性を効率良く生産が可能であり、開発段階の掘削技術として極めて有用である。この掘削技術の研究開発を推進することで、探鉱段階で確認された資源を効率的に開発生産が可能である。

非在来型タイトオイル・ガス（シェールガス）の開発では、この掘削技術の他に、水圧破碎法（フラクチャ―技術）の併用が、今日の米国でのシェールガス開発の起点となった。開発段階の掘削計画では、国内外の油・ガス田の開発の増産が有効となる技術である。この技術の応用として、国内の海洋CCS構想においても、従来の傾斜掘削方法より、水平坑井掘削方法は掘削コストを低減でき、より有効な技術となる。

■生産操業段階（環境保全技術）

石油・天然ガス開発産業の生産操業の研究開発分野では、生産増強促進等の正部分と環境保全の汚染処理技術開発や管理対応策等の負部分の検討がなされてきた。

環境保全技術は、生産操業時の汚染物質の業界のゼロエミッション方針を基に、汚染物資を除去回収し、再資源化や再有効利用化が進められている。このゼロエミッション構想の基に地下貯留層や有効である地層へ汚染物質を圧入し、汚染物の再利用化や廃棄処分技術を長年の研究開発および実務経験で既に実証化している。この長年の蓄積技術は、安全且つ適切に地下に貯蔵する管理体系が石油・天然ガス開発産業で確立されている。

特に典型的な地下貯留層への圧入技術としては、石油増進回収（Enhanced Oil Recovery）のためのCO₂圧入およびCCS（Carbon Capture & Storage）分野が環境保全技術の事例であり、国際的な地球温暖化政策促進が大規模に実施可能であり、極めて有用で技術開発分野である。この技術の研究開発を推進することで、地球規模の環境汚染のCO₂低減に大きく貢献する。また、高度な環境技術の提供・移転等を通じた資源産出国との関係強化が可能となり、国外での資源開発案件参入への機会増大やCCS技術の移転が期待出来る。

それ故、産油国に対して、この環境技術の研究開発および経験を通じて、我が国の安定的なエネルギー資源の確保に資することが可能であり、国際的にも環境技術移転（CCS）に大きく寄与・貢献すると考えられる。CCSは、再生可能エネルギーや原子力とともに発電部門のCO₂排出の削減に寄与するが、これらの直接適用が困難な鉄鋼業やセメント業などの産業部門では特に重要とみなされている。

商業規模のCCSは、設備当たりのCO₂削減規模が年間数百万トンと大規模なことに起因して、初期投資が極めて多額となるが、IPCC第5次報告書において、CCS無しでは世界のCO₂削減対策費用が2倍以上に増大してしまうことが示されていることにも見られるように、一定の前提条件下ではコスト効率の高い削減技術である。このことを考えると、CCSは可能な限り早急に導入し、社会的費用を低く抑えつつ、他の削減技術が成熟し、CCSに匹敵するコストで大幅削減に寄与できるようになるまでのつなぎの技術とみなすことができる。

■CO₂分離回収技術

国際エネルギー機関（IEA）の試算によると、所謂2℃シナリオの実現にはCCSが不可欠であり、2060年までの累積CO₂排出削減のうち15%程度をCCSが担うとされている¹⁾。諸外国では既に商用規模での実用化に至っているが、当該シナリオの実現に向けては社会実装の加速が必要である。また、回収したCO₂を資源として捉え、多様な炭素化合物等として再利用する技術（CCU）についても、世界各国でイノベーションを目指して研究開発が活発に行われている。我が国では、2019年に経済産業省が内閣府、文部科学省、

環境省の協力のもと策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」で、2030年に分離回収コスト1000-2000円台/t-CO₂を掲げている。2020年には、政府の統合イノベーション戦略推進会議がパリ協定の長期戦略等に基づく「革新的環境イノベーション戦略」を決定し、2050年までの確立を目指す革新的技術（全39テーマ）のなかに「⑫CCUS/カーボンリサイクルの基盤となる低コストなCO₂分離回収技術の確立」さらには「③⑨DAC（Direct Air Capture）技術の追求」が挙げられた。ここでDACは大気中の低濃度CO₂（現状410ppm程度）を分離回収する技術である。CO₂分離回収技術は、CCSおよびCCU（CCUS）の根幹をなす共通基盤技術であり、CCUSがCO₂排出量削減に実質的に貢献するために極めて重要な技術であると位置づけられている。

〔研究開発の動向〕

■探鉱段階（衛星探査技術）

衛星による資源探査は、1966年から米国で開始された地球資源観測衛星計画（Earth Resources Observation Satellites Program）に端を発する。同計画では、（従来、軍事目的で培ってきた）宇宙技術を地球資源探査等、人類に直接利益のある分野に応用するという理念のもと、地球資源探査のための基礎データの収集を目的とした人工衛星の打ち上げが行われた。同計画で打ち上げられた衛星（LANDSAT 1～3）のデータは、1980年代の初頭から民間で利用可能となり、これ以降、衛星データが民間会社による資源探査に利用されるようになった。これに伴い、我が国でも1981年から「石油資源遠隔探知技術の研究開発プロジェクト」に基づき、衛星による資源探査技術の研究開発が開始された。LANDSAT1～3に搭載されていた光学センサ（分解能80m）は、可視域から近赤外域にかけての複数の観測波長域（バンド）のみを対象としていたため、反射スペクトル（物質表面に色々な波長の光をあてた時の反射率を波長の関数として表わす）の解析による鉱物資源の特定は困難であり、この段階では、衛星データは主に写真判読的に広域地質構造の把握する目的で利用されていた。1980年代の後半に入ると、短波長赤外域付近のバンドも計測可能な光学センサ（分解能30 m）を搭載したLANDSAT4、5が打ち上げられ、これらのデータが利用可能となる1990年代には、この波長域に特徴の現れる鉱物の反射スペクトルを利用した（変質鉱物のマッピング等）資源有望地域の抽出が開始された^{2),3)}。

我が国においても、1992年に、資源探査を主目的とした地球資源衛星「ふよう1号」（JERS-1）が打ち上げられ、日本独自の衛星探査が開始された。この衛星では、光学センサに加えて、合成開口レーダ（SAR：進行方向にマイクロ波を照射し、地表からの反射を受信する能動型のセンサ、昼夜を問わず計測可能であり、雲の影響を受けにくい）も搭載された。両センサはそれぞれ以下の特徴を有している⁴⁾。

- ・光学センサ：短波長赤外域（中間赤外域）に3つのバンドを持ち、LANDSAT4、5に比べて、より詳細な鉱物種の推定が可能
- ・SAR（Synthetic Aperture Radar）：マイクロ波の中でも波長の長いLバンドを利用することで植生の内部に侵入し、植物により地表が覆われている熱帯雨林等の湿潤地帯でも、地表に現れた断層等の重要な地形情報の取得が可能

我が国では、JERS-1以降も、継続的に光学、SARの両センサの研究開発が続けられており、光学センサに関しては、可視から熱赤外域までの14バンド（この内、短波長赤外域6バンド、熱赤外域5バンド）を観測できる「ASTER」が開発され、1999年に米国産の地球観測衛星「TERRA」に搭載して打ち上げられた。これにより、反射スペクトルの分析から13種程度の鉱物分類が可能となり³⁾、油ガス層の形成に重要となる炭酸塩岩や堆積岩の識別がある程度可能となった。現在は、可視から短波長赤外域まで計185バンドの観測

が可能なハイパースペクトルセンサ（HISUI）の開発が進められており、より高度なスペクトル解析による堆積岩の岩質の推定精度の向上（30程度の鉱物分類が可能）が見込まれている。SARに関しては、JERS-1に搭載されたSARの性能を更に向上させたLバンドの合成開口レーダ「PALSAR」（分解能 10 m）が開発され、2006年に陸域観測技術衛星「だいち」に搭載されて打ち上げられた。これにより、植生の密な領域においても、褶曲・断層等の詳細な地形解析が可能となった。「PALSAR」の観測データを「ASTER」等の光学データと組み合わせた資源探査の研究開発事例が複数報告されている。また、2011年に「PALSAR」の運用は停止したが、2014年以降は、「だいち」の後継機である「だいち2号」にて、Lバンドの合成開口レーダ「PALSAR-2」（分解能 3 m）が稼働中であり、2022年にはLバンドの合成開口レーダさらなる後継機の打ち上げが予定されている。我が国では、上記の光学センサおよびSARの開発と並行して、これらのセンサから得られたデータの解析・利用技術についても、「石油資源遠隔探知技術の研究開発プロジェクト」のもと、世界最高水準の技術開発を目標として、画像データの補正や堆積岩の区分システムといった個別要素技術の開発から、堆積盆データベースの構築、「ASTER」および「PALSAR」の運用システムの開発まで、衛星資源探査の黎明期から幅広い取り組みが行われている。図表 2.1.1-1 に我が国の資源探査における衛星データの利用技術の変遷を示す。

国外においても、衛星資源探査の分野では、「ASTER」および「PALSAR」のデータ利用が一般的である。これは、探査衛星の開発が積極的に行われている欧米を含めて、近年までこれらのセンサの有効な代替手段が存在しなかったことによる。

- ・光学センサ：可視近赤外、短波長赤外、熱赤外データおよびステレオデータまですべて備えたセンサは、2014年まで国内外に「ASTER」以外に存在しなかった。
- ・SAR：森林における等価能力の高いLバンドを持つ合成開口レーダは、2014年まで、国内外に、「PALSAR」以外存在しなかった。

ただし、光学センサに関しては、短波長赤外域に「ASTER」ほどのバンド数を有さないが、デー

図表 2.1.1-1 我が国の資源探査における衛星データの利用法の変遷²⁾

年代	主な衛星センサ	キーワードとなる技術など
1990年以前 資源分野におけるリモートセンシング 利用の始まり	Landsat MSS、TMなど (光学センサ中心)	写真地形判読（可視近赤外画像から地質・地質構造判読、短波長を加えた画像から炭酸塩岩や変質帯の抽出など）
1990-2000年 画像判読と資源情報抽出研究	Landsat TM、SPOT、JERS-1 OPS、SAR	スペクトル解析（短波長マルチスペクトルデータを用いた炭酸塩鉱物抽出、変質鉱物部類）、地形解析（DEMを利用）
2000-2010年 実利用への展開	ASTER、PALSAR 高空間分解能光学センサ	詳細スペクトル解析（変質帯分類、岩相分類（ケイ酸塩含有量比）など） 差分干渉SAR処理 GIS技術の活用
2010年以降 衛星データの高精度化・多様化・高頻度化 基盤データベース整備	ASTER、PALSAR 高空間分解能光学センサ（光学、SAR） 複数衛星システム	より高度なスペクトル解析（鉱物同定） 高空間分解能衛星データ（光学、レーダー）を用いた融合処理・詳細解析 グローバルデータベース整備（IT技術の活用）

タ入手の容易さから、「LANDSAT7」に搭載されたETM+や、「LANDSAT8」に搭載されたOLI（Operational Land Imager）のデータの利用も一般的である⁵⁾。また、2014年に打ち上げられた商用衛星「WorldView-3」も、0.3 mの高分解能を誇り、短波長赤外域に8つのバンドを持つことから、資源探査への活用事例が報告され始めている^{5), 6), 7)}。SARに関しては、前述の様に、PALSARの後継であるPALSAR-2が2014年から稼働を始めており、これによる代替も可能である。

近年では、エネルギー資源分野における衛星探査技術は、探鉱段階のみならず、SARデータの差分干渉処理による高精度の地表変位検出技術を利用した油田管理および油・ガス供給能力の予測、変化や環境汚染状況分析（フレアガス量の推定、植生の経年年化、流出油の海上漂流軌跡等）や継続的モニタリングによる環境対策等の開発・生産段階にも幅広く適用されつつある^{8), 9), 10)}。

更に地球観測衛星として、温室効果ガスの分光度センサ技術（CO₂/CH₄濃度検知）としては、「いぶき/TANSO」（2009年1月打ち上げ）、「いぶき2号/TANSO2」（2018年10月打ち上げ）、「いぶき3号/TANSO3」（2022年打ち上げ予定）構想は世界的な地球温暖化観測のデータ収集に大きく貢献している。

■開発段階（水平坑井掘削技術）

水平坑井掘削技術の開発歴史は、1929年米国テキサス州で実施され、その後各国で生産性向上のため、1950-1960年代はソ連・中国で実施されていたが成功事例は数少ない。これらの要因は低原油価格、および掘削機器の未発達による要因が挙げられている。1970-1980年代になると掘削機器の高性能開発技術が進み、経済的にも技術的にも研究開発・実証試験が進められた期間であった¹¹⁾。

更に1990-2000年代には、商業的に水平坑井技術の利用の促進が進められ非在来型のタイトオイル・ガス開発が典型的な成功事例となり、今日の米国では、タイトオイル・ガス開発に伴いコンデンセート油の生産が寄与し、米国が世界最大の産油国になっている^{12), 13)}。この技術は、在来型・非在来型の資源開発に必要であり実際に適用されている。その事例を以下に挙げる。

• 在来型油・ガス田に対して

- ①貯留層の油層位置を維持するために随伴水・ガス流体層からの産出抑制を可能とする。

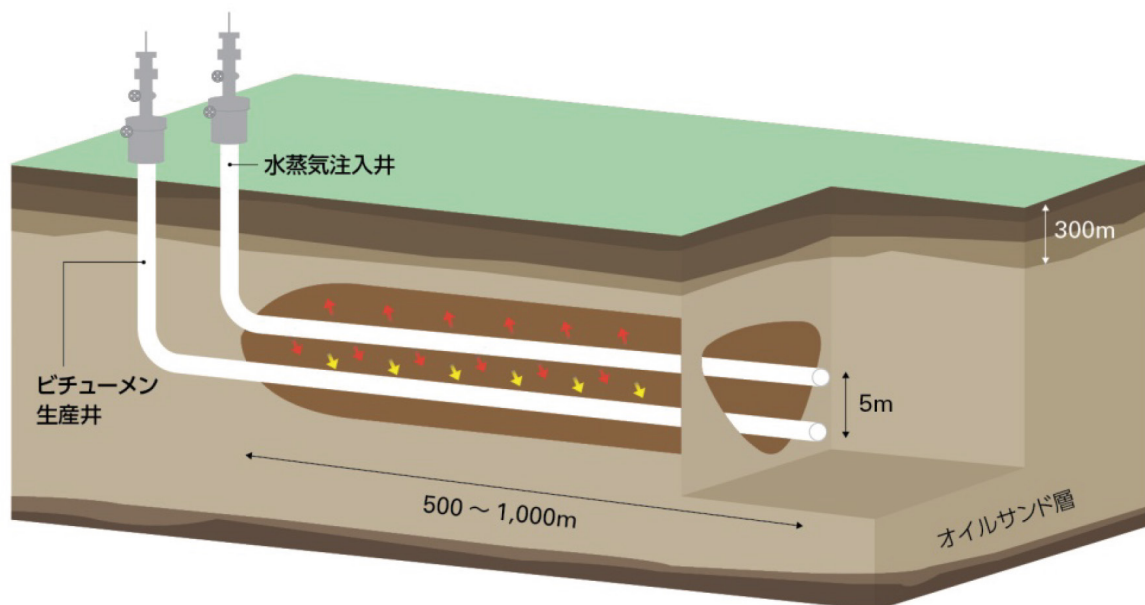
*注）随伴水とは原油を採掘する際に排出される水、原油と混在している地下水や原油採掘時に油井に注入する水。

- ②垂直方向のフラクチャが発達している油層への適用
- ③経済的にアクセス出来難い遠隔地の油層への適用
- ④重質油の層へのスチーム攻法（SAGD：Steam Assisted Gravity Drainage）：図表2.1.1-2 参照
- ⑤低厚さの油層への適用
- ⑥部分的に衰退した油層

• 非在来型タイトオイル・ガス/炭層メタン（コールベッドメタン）に対して

- ⑦非在来型のタイトガス・オイル層において、フラクチャリングを併用する事で浸透率が低い（1 md以下：md（ミリダルシー））層での生産が適用可能である。
- ⑧コールベッドメタン層への適用

これらに効果的に対応するために、マルチラテラル（Multi-Lateral Wells）と称する掘削技術と坑内仕上げ技術が研究開発され、コスト削減等の経済性に富んだ技術が商業化された。



図表 2.1.1-2 カナダのSAGD法による重質油の生産概略図

出所：石油資源開発（株）

水平坑井にてスチームライン（上部）と原油生産ライン（下部）を有する。

■生産操業段階（環境保全技術）

石油・天然ガス開発産業は、一般の石油精製や石油化学産業と異なり、陸上の工場にとどまらず海洋での開発活動も多く、環境問題は広範囲の地域への影響を与えて国境を超えボーダレス化した環境対応が必要で、常に国際的な視点で捉えることが要求される。

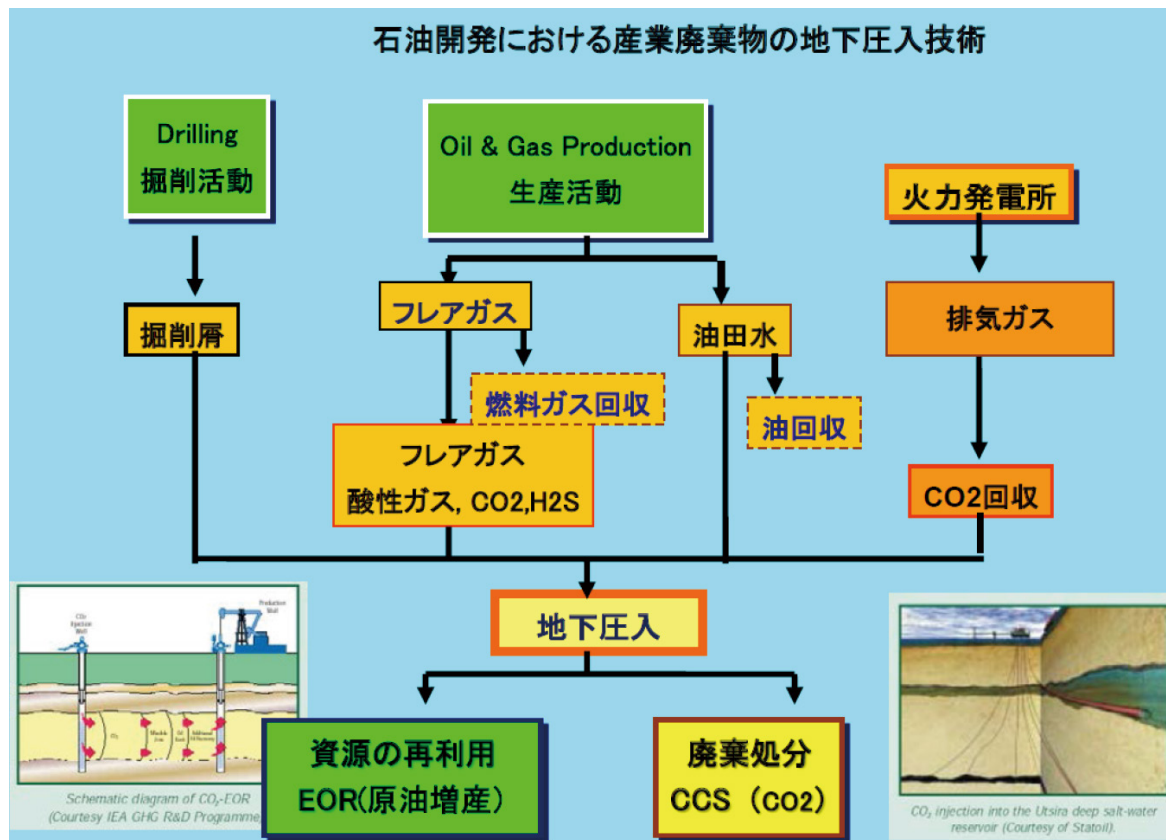
また、大規模油・ガス田の石油開発は、探鉱－開発－生産－廃坑までのライフサイクル期間が30年以上も続くので、各ライフサイクル段階の環境対策が必要で、対応技術や対策手法は国際的な標準化対応が進んでいる産業である。更に、生産操業段階の産業廃棄物のゼロエミッション化の対応技術に関して、従来の油層・生産技術を応用した地下圧入技術を利用することも進んでいる。以下で石油開発産業における環境対応技術の特徴的な研究開発動向を示す。

• ゼロエミッションへの技術

石油・ガス開発産業における環境課題は1990年代まで、陸上・海上油田の生産活動の規制は一般の産業と同様に、排気ガスの大気汚染や海洋油汚染対策が主体であった。1990年代に入ると、北海油田の開発もピークになり海洋汚染問題が顕著になり、環境課題も明確化された。この課題の克服として北欧（ノルウェー）産油国が環境税を新設した。

この環境税法改正制度に伴い、欧州系大手石油開発企業（BP、Shell、Total、Statoil等）は「環境ゼロエミッション」を世界的に提案し、現在では色々な産油国で検討・検証作業が実施しており、商業プラントも建設されている¹⁴⁾

石油開発産業における今日の環境ゼロエミッションは、産業廃棄物をできるだけ地下に圧入する方式が採用されており、地球温暖化対策の1つであるCO₂の地下貯留層への技術はこの圧入技術を利用しCCSプロジェクトを促進させている原点である。この関係を図式化すると、図表 2.1.1-3のように再利用するか、廃棄処分



図表 2.1.1-3 石油開発の廃棄物資源のゼロエミッション関連図

(日本オイルエンジニアリング作成)

するかに区分される。

石油開発のゼロエミッション技術は、資源の再利用技術の1つとして、原油増産と廃棄物処分を同時に実施する事により、経済的に負の環境対策をビジネス価値への転換を図ったことが特色である¹⁵⁾。

• CO₂EORおよびCCS

地中貯留は、地下にあった炭素水素化合物を人類が利用して元に戻すというごく自然な考え方に基づくものであり、貯留方式として、枯渇石油・ガス田への貯留、EOR（Enhanced Oil Recovery）、EGR（Enhanced Gas Recovery）、ECBM（Enhanced Coal Bed Methane）、帯水層貯留（CCS）などがある¹⁶⁾。

CO₂EORは、石油増進回収を目的として油層にCO₂を圧入するもので、米国では1970年代からエネルギー国家戦略の基に、政策的に行われていた¹⁷⁾。前述にて記載したように、CCSに関しては1990年後半から北海やアルジェリアにて実証試験が実施されてきた。さらにECBMは、石炭層に吸着しているメタンをCO₂によって置換させ、CO₂貯留とメタンの回収を図ろうとする研究もされている。

一方、我が国においては、1990年後半から、産業技術総合研究所や地球環境産業技術研究機構（RITE）が取り組んでいるのがCO₂を帯水層に貯留するシステムの開発である^{18), 19)}。

地層水を含んだ隙間の多い砂岩層からなる帯水層の上部に気体や液体を透さないキャップロックと呼ばれ

る固い層が存在することにより、帯水層に圧入した CO₂ を長期に安定して閉じ込めるものである。帯水層貯留の技術は、基本的に天然ガスの地下貯留や石油増進回収等で蓄積された地中へのガス圧入・貯留技術を応用できるので、最も即効的且つ、有効であると言われており、実証試験プロジェクトが日本では2016年から苫小牧CCS実証試験および世界各国で検討・建設が実施されている。現在も継続して地下でのCO₂挙動解析やCO₂漏洩モニタリング手法の研究がなされている。

• CO₂EOR以外の具体的事例は、

①余剰ガス（フレアガス）の燃焼排気による大気汚染：

油・ガスでのフレアガスはガス市場での有効利用の他に、油層のガスキャップへの圧入による油層の圧力維持に利用し、原油生産の延長や増産活動に活用している。

②随伴水の廃棄による河川・海洋汚染：

在来型資源（油・ガス田）では随伴水を適切に処理して、油層へ再圧入利用（水攻法）、非在来型資源（タイトオイル・ガス等）では、フラクチャリング時の戻り汚染水を処理後に、再利用し水資源の節減を図っている。

③掘削屑・マッド廃棄処分の海洋汚染：

掘削時の地下からの廃棄物を微細の粉碎スラリー化して地下へ再圧入廃棄し、海洋汚染の防止を図っている。

■ CO₂分離回収技術

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）がまとめたCCSに関する特別報告には、CO₂分離回収法として、物理吸収法、物理吸着法、化学吸収法、膜分離法、深冷分離法が挙げられている。深冷分離法は、空気を分離して高純度ガスを製造する際に確立された技術であるが、液化及び蒸留を伴うため、特に、対象ガスが低濃度の場合は多大なエネルギーを消費するため、CCSには不向きと考えられる。

CCS向けには、吸収法、吸着法、膜分離法によるCO₂分離回収技術の研究開発が盛んに行われてきた²⁰⁾。それらのうち、実用化が進み最も成熟した技術は吸収法によるものである。石炭燃焼排ガス等の比較的CO₂分圧が低い対象ガスに対する回収（燃焼後回収）ではMEA等の1（あるいは2）級アミン系化学吸収液が、他方、天然ガス精製時等、比較的CO₂分圧が高い対象ガスに対する回収（燃焼前回収）ではMDEA等の3級アミン系化学吸収液あるいはメタノール等の物理吸収液が用いられている。

Global CCS Instituteのデータベースによると、2019年時点では19の大規模CCS施設が稼働していた。（年間CO₂回収量400,000 ton以上を大規模と定義。ただし、石炭火力発電所の場合は年間800,000 ton以上。）それら19件のうち、吸収法による回収は16件を占め、そのうちの9件がアミン吸収液を用いている。石炭火力発電所での燃焼後回収で世界最大の規模（年間約1,500,000 ton-CO₂）を誇るPetra Nova CCUSプロジェクトでは、日本の回収技術（アミン吸収液KS-1を用いた関西電力と三菱重工業の共同開発技術）が採用されている。

実証レベルに達した現行吸収液技術に置き換わるものとして、非水溶媒液や相分離液など新規吸収液、革新的な吸着剤（あるいは固体吸収材）や分離膜を用いた分離回収プロセスなどに関する研究開発が分離回収エネルギーおよびコストの低減を目指して行われている。「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」（2016年6月）に示されるように、技術的には実用レベルにある化学吸収法の研究開発が先行しており、コスト低減を目指して、物理吸収法、固体吸収法、膜分離法、クローズドIGCCの研究開発が行われており、2030年頃の実用化を目指している。

DACについては、EUが力を入れており、パイロットプラントでの実証試験が盛んに行われている。米国やカナダでも実証試験レベルの研究は多額の資金援助を受けており、欧米でのDACの研究は急加速している。一方で、アジア地域では具体的な研究はほとんど行われていないが、日本では研究開発に向けた動きが加速しつつある。

CO₂分離回収技術の実用化のためには、実証試験によって実ガスに対する耐性を検証することが非常に重要であり、国内外の主要なプロジェクトでは実ガス試験サイトでの実証試験を実施あるいは予定している。米国DOEのCO₂分離回収技術のプロジェクトの多くは、プロジェクト後半にNational Carbon Capture Center (NCCC) 等の実ガス試験サイトでの実ガス試験を計画している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■探鉱段階（衛星探査技術）

・ハイパースペクトルセンサ

現在一般的に利用されている「ASTER」等のマルチバンドのスペクトルセンサを超えるスペクトル解析能力を有する衛星用ハイパースペクトルセンサの開発が我が国および欧米各国で進められている。現在までに打ち上げられた衛星用のハイパースペクトルセンサとしては、米国の「EO1」衛星（2000年打ち上げ）に搭載された「HYPERION」、英国の「PROBA」衛星（2001年打ち上げ）に搭載された「CHRIS」が知られているが、前者は信号雑音比（SN比）が実用レベルに達していない、後者は可視近赤外波長域のみにバンドを有するのみである等、いずれも実験的な色彩が強く、資源探査に実用的に利用可能ではない²¹⁾。今後打ち上げが予定されている衛星用ハイパースペクトルセンサとしては、以下の4件が挙げられる²²⁾。

- HISUI（日本）：分解能 30 m、バンド数 185
- EnMap（独）：分解能 30 m、バンド数 232
- HypsIRI（米）：分解能 60 m、バンド数 213
- PRISMA（伊）：分解能 20～30 m、バンド数 249

・ディープラーニング技術の適用

マルチスペクトルセンサやハイパースペクトルセンサのデータを用いたイメージ分類（岩相分布のマッピング等に利用）には、従来、Support Vector Machines等の教師付の機械学習が用いられてきた。しかしながら、こうした解析は、不均質な大気の状態、地表での光の散乱、等の影響によって極めて非線形性が強く、ある規定されたルール上で分類を行う機械学習では必ずしも良い結果を得られるわけではないことが明らかになっている。近年、ディープラーニング技術がこの分野にも適応され始めており、幾つかの期待できる成果が挙がってきている²³⁾。

■開発段階（水平坑井掘削技術）

・マルチラテラル仕上げ工法（Multi-Lateral Wells）

マルチラテラル仕上げ工法は、1本の坑井から油・ガス層に複数の水平坑井掘削し、同時に坑井仕上げをする方法である。複数の貯留層を同時に生産井に仕上げする事により、開発コストを削減化が可能であり、更に坑井の生産性を向上させる事が可能である。

従来の単独垂直、あるいは傾斜掘削工法に比較して、水平掘削法は約2倍強程度のコストが必要であるが、

このコスト低減のために、マルチラテラル水平坑井掘削・仕上げ工法が、2000年以降研究開発されている。この方法によって、米国のタイトオイル・ガス開発資源の低コスト開発化が可能となり、今日の非在来型資源の開発・促進となった。

• 水圧破砕法（Hydraulic Fracturing Technology）²⁴⁾

水圧破砕法は、地下の岩体に超高压の水を注入して亀裂を生じさせる手法である。高温岩体地熱発電や、タイトオイル・ガス（シェールガス）の採取に用いられている。

シェールガス開発の場合、約2000–3000 m 地下の頁岩層（シェール層）にガスが貯留層とし分布し頁岩の中に分散している。坑井を単に掘削しただけでは、頁岩中のガスを取り出すことができない。そこで掘削後に坑井に水を高压で注入し、水平坑井の周りの頁岩を破砕し、ガスが流動し易くする割れ目を作ることになる。しかしながら、地下は極めて高压な状態であり、頁岩を破砕した後も割れ目が閉じてしまう。そこで坑井の地層の特徴に合わせた砂などを水と共に頁岩の割れ目に押し込み、ひび割れを固定・安定化する。この一連の技術を水圧破砕と言い、亀裂を維持する特殊な砂粒の材料はプロパントと呼ばれる。

この水平掘削の際は、特殊な砂粒（プロパント）や、酸・防腐剤・ゲル化剤・摩擦低減剤などの化学物質を添加した水が使われており、フラクチャリング流体（fracturing fluid）またはフラッキング水（fracking water）とよばれ、2000年代初期においては、これらのフラッキング時の使用する化学物質による地下水の汚染、大量の水使用による地域の水資源不足の可能性、フラッキング排水の地下圧入による地震発生の危険性といった問題点²⁵⁾が指摘されていた。API（米国石油学会）では、2012年からガイドラインを作成し、現時点ではこれらの対応・対策が改善されている。

• 大偏距坑井掘削（Expanded Reach Drilling : ERD）

近年、油・ガス田の開発に際して、厳しい海洋環境下で経済性に乏しい鉱区、あるいは陸上での環境保全規制が厳しい鉱区では、垂直な地層地点から新規の掘削が困難な場所が増加している。この打開のために、傾斜掘・水平の掘削法を更なる研究・開発を進め、大偏距坑井掘削技術が実用化され、2010年には掘削地点から約10 km 程度まで遠隔地の貯留層への資源開発が可能となっている²⁶⁾。この技術は、油・ガス田の開発のみならず、掘削場所が制限されるCCSのCO₂貯留層への適応も可能であり、今後の適応性の検討を含めた技術開発が求められている。

■生産操業段階（環境保全技術）

• マイクロバブルCO₂EOR・CCS

地下貯留技術として、CO₂EOR・CCS開発技術が大規模なCO₂削減対策として注目されている。現在、CO₂EORを適用した油田は、米国がもっと多く約120箇所以上の実績が存在する。従来型CO₂EORのガス水相互圧入法（WAG : Water And Gas）では、効果が上がりにくい、あるいは比較的厚い油層や不均一性の高い貯留層に対して、圧入するCO₂をマイクロバブル化することで有効溶解表面積を大きくし、原油の回収率の効率向上を目的にした技術である。我が国においては、2013年からJOGMEC（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構）およびRITEが実証試験の概念設計²⁷⁾を進めており、現在はマイクロバブル発生製造技術、ラボ試験、および油層シミュレータの開発等の実証的な研究開発を実施している。この革新的なWAG技術向上が確立できると、生産性の低い油田にCO₂を圧入し石油回収率の向上や油田の寿命の延長を図ると共に、地球温暖化対策のためのCCS事業への貢献が期待できる。

■CO₂分離回収技術

アミン吸収液を用いた化学吸収法の適用性は、それまでは難易度が高いとされていた石炭火力発電所での商用スケールCCSでの実証に至った。カナダではBoundary Dam発電所の燃焼後回収設備（Cansolvプロセス、約2,500 ton-CO₂/day、2014年～）が、米国ではW.A. Parish発電所の燃焼後回収設備（KM CDRプロセス、4,776 ton-CO₂/day、2016年～）が稼働し、ここ数年の期間にデータを蓄積している²⁸⁾。

国内では、COURSE50プロジェクトでRITEと新日鐵住金（現：日本製鉄）が共同で開発した新規アミン吸収液（RN液）を採用した省エネ型CO₂回収設備（ESCAP）の商業機が室蘭製鉄所（2014年～）および新居浜西火力発電所（2018年～）でCO₂利用用途（各約120～140 ton-CO₂/day）で実用化した²⁹⁾。

上述のようにアミン液を用いた吸収法は大規模CCUSに適用可能であることが実証されており、現在は、新規吸収液（非水溶媒液や相分離液）、固体吸収材あるいは吸着剤、分離膜を用いたCO₂分離回収の技術成熟度レベル向上を目指した研究開発が重要となっている。

脱石炭の動きの中でCCSへの期待が高まる一方、ゼロ/ネガティブエミッションの実現に向けて、天然ガス燃焼排ガスや大気などの低濃度CO₂や中小規模排出源を対象としたCO₂分離回収の重要性が増している。また、鉄鋼やセメント産業など、CO₂発生を本質的に避けることのできない産業部門でいかに削減を行うかも依然大きな課題である。CCUでは利用先に応じて回収CO₂が満たすべき要件が異なる。以上のようなことから、CO₂分離回収技術に求められる多様性が増加している。この流れの中で、近年DACについても、活発な研究開発が行われている。なかでも、カナダのCarbon EngineeringやスイスのClimeworks等による開発が注目され、多額の資金が提供される状況である。

米国では、2018年に成立した45Q法案によってCCSに対する政府補助（Tax Credit）が増額された。2024年までに施設建設を開始したCO₂回収設備に対し、操業開始から12年間を対象期間とする。当該税額控除は、CCUSプロジェクトに経済的インセンティブを付加するものと考えられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■生産操業段階（環境保全技術）

- ・2017年にはテキサス州のW.A. Parish 石炭火力発電設備において、日本のJBICおよびJX石油開発が出資したPetra Novaプロジェクトが開始された。
- ・2017年12月の炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）では、計画の詳細はまだ作成されていないものの、アラブ首長国連邦における追加の5つの施設についての計画が発表された。
- ・中国のYanchang 統合CCS実証施設は2017年3月に建設が開始されている、さらに、中国にはさまざまな計画段階にある大規模施設が7つあり、韓国とオーストラリアはそれぞれ2施設を計画中である。
- ・経産省が日本CCS調査（株）に委託した苫小牧一貫実証事業では、2016年から2019年11月までの間に石油精製用水素製造プラントから回収された累積30万トンのCO₂が海底下貯留層へ圧入された。
- ・環境省は2050年を目指した長期目標の実現におけるCCSの重要性を認識し、石炭火力発電所を対象としたCCS一貫実証を目指して、2013年からの事前検討プロジェクトを経て、2016年から「環境配慮型CCS実証事業」を実施している。ここでは、大牟田市にある三川発電所からの排出CO₂の半分以上（500 t/日以上）を回収し、船舶による輸送を経て、沖合の海底下に貯留することを目指している。
- ・経済産業省と環境省が共同で出資して「二酸化炭素貯留適地調査事業（2014年～）」を実施しており、環境省事業ではここで同定される候補地を実証事業で利用する。

■ CO₂分離回収技術

- ・環境省の環境配慮型CCS実証事業では、東芝エネルギーシステムズが三川火力発電所に設置したアミン吸収液（TS液）による回収施設で2020年10月より本格試験を開始し、630 ton-CO₂/dayの回収性能を実証している。本回収設備は、バイオマス発電所から排出されたCO₂を分離回収する世界初となる実用規模の設備であり、計画通りCO₂貯留が行われれば、BECCS（バイオマスエネルギーCCS）システムとして商用規模のネガティブエミッションを実現することになる。
- ・NEDO事業では、2018年から石炭火力発電所向けに固体吸収法の実用化に向けた研究開発に取り組んでいる。ベンチスケール試験（数ton-CO₂/day）では、RITEが開発した革新的な固体吸収材を用いて、CO₂分離回収エネルギー目標1.5 GJ/t-CO₂の達成と実用化を見据えた設備大型化への目途を得ている。2020年度開始の事業では、舞鶴発電所に川崎重工業（株）が設計製作するパイロットスケール試験設備（数10 ton-CO₂/day）を設置し、長期連続運転によるCO₂分離回収試験を行う計画である。また、燃焼前回収のためのCO₂分離膜モジュール（分子ゲート膜）の研究開発にも取り組んでおり、国内外で膜材料、膜エレメントの実ガス試験を実施中である。
- ・JOGMECのプロジェクトでは、日本ガイシと日揮が開発したモノリス型DDRゼオライト膜を用いたCO₂分離プロセスを米国でCO₂-EORでの実証試験を実施中である。米国のDOEプロジェクト中において、MTR社が実機サイズの高分子膜モジュールを開発中で、燃焼後回収用の20 ton-CO₂/dayの膜モジュール評価装置を実ガス試験サイトに設置するなど、実証フェーズに向けた研究開発が進んでおり、今後の動向が注目される。

（5）科学技術的課題

■探鉱段階（衛星探査技術）

衛星資源探査に利用する各種センサの研究開発分野において、日本は世界トップレベルの技術力を保持しており、今後も継続的な研究開発により、それらを維持・発展させることが期待される。我が国では、宇宙基本計画工程表に基づき、継続的にこれらのセンサの研究開発を実施することが計画されている。これらの研究技術は、資源探査のみならず、環境モニタリングの把握にも利用でき、今後のセンサ研究開発の技術力が問われている。

- ①ハイパースペクトルセンサの開発
- ②先進光学衛星の継続開発（分解能、観測幅の向上）
- ③先進レーダー衛星の継続開発（分解能、観測幅の向上）

■開発段階（水平坑井技術）

我が国は油・ガス田の貯留層の水平方向の広がり小さい状況下のため、実施する機会が非常に少ない。それ故、水平坑井掘削技術および水圧破砕法の技術は欧米の実務の知見等を学習しつつ、国内においては遠隔地の障害の事由で山間部油田と海洋ガス田の2か所だけの事例であり、数は少ないが実績も挙げている。

今後は継続的な研究開発により、生産性の向上のため油層の再開発や遠隔地からの掘削技術への適用性研究分野を検討し、技術を発展させることが期待される。

- ①油・ガス田の水平坑井の掘削およびマルチラテラル仕上げ法の実務の適用
- ②既存油田の水圧破砕法による不整合油層の再開発の適用
- ③CCS貯留モデルでは、海洋での掘削はコストが高いため、陸からのERDや水平坑井の可能性も検討し

ており、CCS プロジェクトでの水平坑井の適用検討

- ④油・ガス田以外に、山間部や沿岸部に穴を空けてケーブルやパイプ等を通す技術の応用として、パイプラインやケーブルを敷設する事の適用検討の促進

■生産操業段階（環境保全技術）

我が国の石油・ガスの地上設備における環境対策技術は世界トップレベルの技術力を保持しており、今後継続的な研究開発により、これら技術力の向上が期待される³⁰⁾。

しかしながら、我が国の石油開発産業界の基盤が弱いため、地下の圧入技術分野での経験が乏しい状況にある。この問題の打開のための研究開発を実施することが肝要である。

- ①CO₂EORの経済性の富む開発計画の促進

（我が国の最先端の油層技術とCO₂回収技術の組み合わせの海外技術移転）

- ②CO₂EORのマイクロバブル攻法等の高効率圧入法

- ③CCS貯留層のCO₂挙動メカニズムの解析

- ④CCSに特有な地下シミュレータの研究開発

- ⑤地下貯留層のCO₂モニタリング技術（反射波弾性探査等）

- ⑥CO₂漏洩モニタリングセンサーの開発

- ⑦CCS安全且つ経済的なモニタリング手法の確立

- ⑧統合システムの運用実証・・・再生可能エネルギーの大量導入時における火力発電所併設CCSのフレキシブル運用に伴うCO₂回収プラントの運用、船舶やパイプラインによる輸送、圧入等の統合システム運用の実証試験

■CO₂分離回収技術

- ・アミンを用いたCO₂を分離回収はその環境影響評価の重要性が指摘されており、特に、欧米の実証事業では多くのケーススタディが実ガスを用いて行われている。環境に出さないための対策は技術的に可能である一方、仮に出た場合の影響については、大気化学、生体毒性などの観点での学術的理解を深化させていくことが望ましい。
- ・従来のアミン吸収液に替わる新規材料として、新規合成アミン、イオン液体等の各種多孔質材料、高分子ポリマー、金属有機構造体（MOF）などを用いて、多様なCO₂分離回収材が多く提案され、ラボレベルでは高い性能が報告されている。それらのシーズがCCUS技術として実用化が見込めるかということの迅速な判断が求められる。その際、スケーラビリティや分離回収コストの評価のほか、実ガス耐久性の評価、さらにはCO₂-LCAを始めとする各種ライフサイクルアセスメントに関する国内あるいは世界的な共通基盤の整備が求められる。
- ・分離膜は透過ガス（CO₂）の圧力勾配によってCO₂を透過する。燃焼後回収は低圧のガスであり、十分な圧力差をつけるために供給側の圧縮あるいは透過側の減圧のコストがかかるため、コスト的に他の分離法よりも有利になるためには、高CO₂透過性膜の開発および膜分離システム上の工夫が必要であり、そのような観点での研究開発が進められている。燃焼前回収の場合、圧力差があるため圧縮ポンプや真空ポンプの動力が不要となり、分離膜はコスト的に有利と考えられる³¹⁾。ただし、高温・高圧条件での耐久性の高い分離膜が必要となる。分離膜特有の問題として、吸収法等に比べ純度を上げるのが難しいことや、回収率を上げると純度低下やコストが大きくなる等の問題がある。これらの技術課題を解決する

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

ため、吸収法、液化、吸着剤等とのハイブリッド化の検討も行われている²⁸⁾。

- ・DACについては実用化の最大の課題は運用コストであると言われている。2011年にAPSが試算した結果はDACでCO₂を回収する場合のコストは\$600/ton-CO₂となっており、今日でもこの試算が基準となっている³²⁾。現在の実証試験装置の多くはコスト低減のため排熱を利用することが必須となっており、設置場所を問わずにCO₂を回収することができるというDACのメリットを生かすためには更なる技術革新が求められている。また、装置の運転や吸収材など消耗品の交換、回収したCO₂の輸送時にもエネルギー由来のCO₂が発生するため、DACを含むプロセス全体がネガティブエミッションを達成し得るかどうかのLCA評価は非常に重要である。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

（6）その他の課題

■探鉱段階（衛星探査技術）

内閣府の宇宙政策委員会の宇宙民生利用部会において、我が国における衛星データの利用全般に関して、以下のような課題が指摘されている。

① 継続性のある衛星データが必要

政府観測衛星は、試験研究開発目的で運用されており、センサが必ずしも継続的に搭載されていない（例えば、「JERS-1」、「PALSAR」、「PALSAR-2」の間に運用の空白期間が存在していた部分がある）。継続的に同じデータが使われるようにする必要がある。

② データの所在が分かり難い

各衛星の所有者もしくはデータ販売者が、各自のポータルサイト等でデータを取り扱っており、横断的にどのようなデータが存在するのか俯瞰できる環境にない。データカタログの整備や、政府系データのオープンフリー化を推進しデータアクセスを容易にする等の取り組みが必要である。

③ 衛星データ加工の難易度が高い

衛星のデータ間で、情報を複合利用しようとした場合、ビット数や利用ソフトの相違、撮影方法の相違、等によってデータ加工が困難となる。衛星開発の段階から、他分野データとの組み合わせを念頭に置き、加工しやすい衛星データフォーマットを整備する等の取り組みが必要となる。

④ リアルタイム情報-静止衛星

近年は資源開発だけでなく、環境保全や事故時の対応等のモニタリングにも利用されている。我が国の気象観測でも定点観測のために静止衛星が活用され、リアルタイムの情報が取得されおり、迅速の対応が可能となっている。リアルタイムに監視できる静止衛星も長期的な国際協力の視野で検討すべき課題でもある。

■開発段階（水平坑井技術）

水平坑井・大偏距掘削技術の課題³³⁾

これらは実証された掘削技術であるが、最先端技術であり、掘削リスクは以下の課題が存在する。

① ホールクリーニング

水平坑井やExtended Reach Wellのような高傾斜井の場合には、掘削屑（カッティングス）は水平坑井の構内に残り堆積すると、閉塞現象を起こす恐れがある。この閉塞現象が生じないように、定期的にモニタリングを実施し、堆積したカッティングスを機械除去する技術が必要である。

② トルク (Torque) およびドラグ (Drag)

掘削壁と掘削管の摩擦により生じる問題がある。摩擦力を最小にするために適切な掘削シミュレーションを行い、安全且つ信頼性のある掘削技術が必要である。

③ 掘進率の向上

ERDや水平坑井掘削の場合、高傾斜で且つ掘削推進長さが長くなるので、掘削ビットへの荷重を効率的に伝達できない場合が多い。事前に的確な掘削シミュレーションを行い、荷重伝達を把握し掘進率を向上させる事が必要である。

⑤ ウェルコントロール (坑井制御)

掘削中は常に垂直掘削時に限らず、ERDや水平坑井掘削時にも、異常高圧層に遭遇するリスクが存在している。ERDや水平坑井掘の場合、坑内の異常高圧挙動に対応する高信頼性の坑井制御技術の開発が必要である。

■生産操業段階 (環境保全技術)

CCSに関しては、海外では大規模な事業が数多く実施されている現実を見ても、既に2005年に発行されたIPCCの特別報告書にも記載されているように、CCSは既存技術の組み合わせで実施できることは明白である。もちろん、確立した技術ではあっても、さらなる普及のためにはコストダウンを図るための不断の努力が必要なことは言うまでもないが、CCSが真に気候変動対策技術として実効的なものとなるための課題は、世界的にも次の3点であると認識されている：

- ・法規制枠組みの整備
- ・資金調達の仕組みの整備
- ・社会的合意の獲得

経済産業省は2018年6月の「CCSの実証および調査事業のあり方に向けた有識者会議」の検討会において、下記の課題が示され、このロードマップも提案されている。

- ① CCS 安全性評価技術
- ② CO₂ 分離回収技術のコスト低減
- ③ 我が国のCCS貯留ポテンシャルの調査、貯留適地の同定
- ④ 国際機関との協力 (CCUS)
- ⑤ 産油国との二国間でのCO₂EOR/CCS共同研究

■CO₂分離回収技術

大学やベンチャー企業がシーズ技術を育てることができる環境の整備が課題として挙げられる。ラボレベルで見出される新規技術に対する障壁の一つとして実ガス試験がある。海外には、米国のNCCCやノルウェーのテクノロジーセンターモングスタット (TCM) などの大規模な実ガス試験サイトがある。これらのサイトで試験を行うにも、規模や予算に関する敷居はある程度高い。

(7) 国際比較**■探鉱段階 (衛星探査技術)**

サービス業者自身が技術開発を行っているものが多く、基本的に国別の比較は困難。また、サービス業者間の技術レベルの差はほとんどないため、国際比較ができず掲載していない。

■開発段階（水平坑井技術）

サービス業者自身が技術開発を行っているものが多く、基本的に国別の比較は困難。また、サービス業者間の技術レベルの差はほとんどないため、国際比較ができず掲載していない。

■生産操業段階（環境保全技術）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	CO ₂ EOR油層技術に関しては、JOGMECが2000年以降油層シミュレーションやラボ実験等の基礎的研究に関して十分な知識は把握し、海外産油国（UAE/ベトナム等）とも共同研究が進められている。 一方、CCSに関してはRITEを中心のIPCCとの共同研究や貯留層の効果的なCO ₂ 溶解貯留技術等の研究も検討し、マイクロバブルCO ₂ 圧入技術に関しては世界初の革新的なWAG方式研究が進み、試験の段階に至っている。
	応用研究・開発	○	↗	CO ₂ EORに関しては、日本での適用は、油田規模が小さいため、1990年代に小規模実証試験が油田で実施した実績しかない。一方、海外事例では1990年代にはトルコ国営石油と実油田での実証試験、2016年米国の油田で商用規模の実績がある。一方、海外産油国（UAE、インドネシア等）で、日本の最先端のCO ₂ 回収技術（無機膜）の現地での性能実証試験も計画され、1-2年後は評価が可能であり。今後、地上のCO ₂ 回収設備を含めた油層評価技術の基礎的構築が可能と推察される。 一方、CCS分野は、2015年から苫小牧の陸上大規模実証試験（経産省）の実施や船舶輸送と船上からの圧入を伴うCCS構想（環境省）の実証試験計画が進められており、陸上・洋上CCSの応用研究開発に関して、2030年以降の本格CCS案件の実現化計画が進められている。CO ₂ EOR及びCCS技術に関しては、油田開発の先進国である米国・英国、ノルウェー国と技術格差が短縮され、日本の独自研究開発の発揮できる可能性が強化されている。2020年コロナ感染症の拡大が進行しており財政的な影響度が危惧されるが、NEDOを通じて国内外でのCCS/CCUS研究開発および実証試験事業化案件は増加している。
米国	基礎研究	◎	→	米国でのCO ₂ EORの研究開発は、1970年代から国家エネルギー戦略計画から原油増産政策が実施され、基礎研究レベルは1990年台でほぼ完了している。 CCSに関する基礎研究分野はオバマ政権下で、DOE、USGS、EPA等がCO ₂ EORの実施した学習経験を含め、安全性、環境保全モニタリング等のガイドライン等の整備がされ着実に実績を上げている。
	応用研究・開発	◎	↗	米国でのCO ₂ EORの応用研究開発は、前述のごとく国家エネルギー戦略から実施され、今日約130の陸上油田で実施された経験があり、世界のトップランナーの技術国であり、CO ₂ EOR・CCS技術力は非常に高い。但し、CO ₂ EORを主体とした油田圧入CCS構想の実績で、帯水層型CO ₂ EOR/CCSの実績は2件しかない。 それゆえ、CCSに関しても、DOE、EPA、民間石油企業、電力企業等がCO ₂ EOR/CCS型が油・ガス田・帯水層へのCO ₂ 貯留を検討しているが、オバマ政権からトランプ政権に移行後、進展はやや低調になっている。2020年のコロナパンデミックの影響で、原油価格の低迷でシェールガス・オイル田の開発は低調であるが、油・ガス田でのCO ₂ CCS/CCUS案件は堅調に進められている。

欧州	基礎研究	◎	↗	【英国】 CO₂EORに関しては、国際石油資本であるBPが国際的に石油開発の技術を2000年までに蓄積し、基礎研究部門はほぼ完了している。CCSに関しては、同国はGCCSI (Global CCS Institute) の本部が設置され、国際的には先駆的な政策を提言している。また、同国の政策 (DECC) においてもCCS Ready (CCR) 法に基づき電力企業に対してCCSが義務けられており、老朽化した北海ガス田や帯水層にCO₂を貯留する技術検討及び経済性評価の研究開発が進められている。 【ノルウェー】 政府及びStatoil社を中心に自国領海の海洋石油開発を実施している。CO₂EORの油田に関しては国内実績が無いが、石油・ガス産出国の中で、1992年世界で初めて産業物濃度排出規制から総量規制に転換した国であり、CO₂削減計画が進められている。CO₂削減に関する法制度も含めた基礎研究分野は、世界でも最も進んでいる国家である。それ故、CCSに関しては、1996年に世界初の海洋油ガス田にて年90万トンCO₂圧入大規模海洋帯水層CCS (Sleipner 油・ガス田) 案件を実施し、現在までほぼ同規模の圧入を継続している。 【その他】 フランス国、ドイツ国、オランダ国も民間の国際石油企業が存在し、独自のCO₂EORの基礎研究は進んでいる。 一方、北海の油・ガス田の開発も英国、ノルウェーとの競争もあり、自国海域でCCS構想計画が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	【英国】 CO₂EORに関しては、BPが国際的な石油開発企業として、CO₂EORの油田の実施の経験を有する。一方、CCSに関してはBPとStatoil社が同国ガス公社と2004年にアルジェリア国の陸上ガス田 (In Salah) で世界初の年100万トン圧入の大規模実証試験 (陸上深部帯水層) に実施している。更にこれらの経験を通じて、北海における英領の海洋の油・ガス田に対しても、CO₂EORや老朽化したガス田・帯水層にCO₂を貯留する大規模実証試験CCSの実際的な計画が進められている。しかしながら、2020年コロナ感染症の原油価格の低迷の影響で、石油開発産界も設備投資額の縮小の環境の中、大規模CO₂EOR/CCSの設備コストは巨額に投資であり、コスト低減への技術開発および政府の財政的支援補助の再検討がされている。 【ノルウェー】 前述のSleipner試験の経験を踏まえて、更に2004年アルジェリア国陸上CCSや、2008年自国LNG基地の天然ガス中の処理設備でCO₂を回収し、約150km離れた海底帯水層へ年約70万トン圧入している実績があり、帯水層のCO₂挙動、流動シミュレーション、CO₂固化解析、漏洩モニタリング等の貯留層解析技術を有している。日本での海洋CCS計画においては、学ぶべき事項は多い。2019年には、石油開発産業界のCCS知見および経験を踏まえて、世界発のセメント工場からのCO₂回収のCCS実証試験事業計画が実施され、他の産業への技術移転・波及策を強化している。また、この回収CO₂に加え、周辺各国からのCO₂を受け入れて北海の貯留サイトに圧入するCCSハブ構想を提唱し、実現が近いとみなされている。 【その他】 各国で、海洋CCS計画の実施に向けた安全性や経済性評価基準、法整備等の検討が進められており、2020年以降は具体的な実施案件の建設計画が進められる。2019年12月にはEU「欧州グリーンディール」を公表し、ポストコロナ以後の温暖化対策を促進する政策を推進し、CCS/CCUSおよび再エネ案件を強化している。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

中国	基礎研究	△	↗	同国はエネルギー政策として有数な石炭産出資源国であるので、2000年以前は産業のエネルギーは石炭に依存していた。それ故、石炭火力発電所からのCO ₂ 排出が主なる要因で世界のCO ₂ 排出量が最大の国家である。近年、国内大気汚染問題や国際非難的な要因で、国家政策として、再エネ技術・省エネ技術の研究・開発力のレベルは急激に高まっている。CO ₂ EORに関しては、国営石油企業（Sinopec, PetroChina）で国内油田の適用検討が独自に進められている。基礎研究の歴史が浅いため、十分な技術力を保有していないと想定される。またCCS分野も同様と予想される。
	応用研究・開発	○	↗	CO ₂ EOR/CCSに関しては、国営石油企業が陸上油田で約8案件が検討され、CO ₂ 源としては天然ガス処理設備、石炭火力発電所、石油化学等の排出CO ₂ であり、種々のCO ₂ 源を考慮しているのが特徴である。前述の基礎研究項目で言及したように、独自だけでは限界で技術力は米国等の海外先進国の支援が必要であり、上記案件の半数は米国との共同研究であり、今後も海外勢の技術支援が必要である。しかしながら、2020年以降、米中対立の影響で、自国の技術でCO ₂ EOR/CCS案件の推進を強化している。
韓国	基礎研究			N/A
	応用研究・開発	△	→	韓国では2010～2014年で10 MW 規模で、物理吸着法に実証プロジェクトを実施。2014年のプロジェクト終了直後、300 MW 規模での商用化を目指す計画であるとされていたが、その後の展開については言及がみられない。 浦項産業技術科学院（RIST）は、アンモニア水を利用し高炉ガスからCO ₂ 回収するプロジェクト研究を行っている。
その他の国・地域	基礎研究	◎	↗	【カナダ】 CO ₂ EORに関しては、1990年代から自国石油企業及び大学等で油田の原油増産技術の研究を実施しており、基礎研究分野のレベルは高い。CCSに関しても政府や州政府の支援の基で、2000年以降から基礎研究がなされ、国際機関IEAと大規模CO ₂ EOR/CCS計画の共同研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	【カナダ】 政府および州政府の資金的援助により、陸上油田のCO ₂ EOR/CCS型の実証試験・商用規模が大規模の推進されている。具体的には世界最大級のCO ₂ EOR/CCS（年300万トンCO ₂ 圧入）がWeyburn油田で実施しており、CO ₂ EORが終了する2035年には本格的なCCS活動を開始する予定である。更に帯水層への圧入するCO ₂ EOR/CCS案件も実施しており、陸上でのCCSへの技術力、社会的制度構築のレベルは非常に高い。

■ CO₂分離回収技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	● JST 未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域で、2050年の温室効果ガスの大幅削減に向け、CO₂分離回収技術の開発が行われている。 ● CO₂分離回収技術分野の特許出願数は米国や欧州に比べても多く、技術優位性を維持していると言える³⁴⁾。 ● 2019年に経済産業省によってカーボンリサイクル技術ロードマップが策定され、既存の分離回収技術と並んでDACが登場している。 ● 「ムーンショット型研究開発事業」では目標の一つに「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」を掲げ、DAC技術開発等を実施。
	応用研究・開発	◎	→	● 化学吸収法による燃焼後回収の分野で、三菱重工、東芝、IHIなどの世界的トッププレーヤーを誇る。 ● RITEと日本製鉄はCOURSE50プロジェクトで世界トップレベルの化学吸収液を開発しており、CCU分野では実用化されている。 ● RITEは燃焼後回収用途に革新的固体吸収材を開発した。当該固体吸収材を川崎重工の移動層回収システムに適用し、NEDOプロジェクト(2020年度～)でパイロット実証試験(数10 ton-CO₂/day)を行い、分離回収コスト2,000円/ton-CO₂を目指している。 ● 次世代型膜モジュール技術研究組合は、燃焼前回収用途に新規CO₂選択性分離膜(分子ゲート膜)モジュールの研究開発を実施しており、石炭ガス化ガスの実ガス試験を実施中である。 ● 日本ガイシ(株)と日揮(株)が開発したモノリス型DDRゼオライト膜を用いたCO₂分離プロセスを米国でCO₂-EORでの実証試験を実施中である(日揮(株)とJOGMECの共同実施)。
米国	基礎研究	◎	→	● 米国エネルギー省(DOE)傘下エネルギー技術研究所(NETL)予算のうち20%がCCUSを対象とし、そのうちCarbon Capture(基礎/応用)には\$101,000,000もの予算が割り当てられている(2019年)²⁸⁾。 ● DACに関しては、アリゾナ州大学のCenter for Negative Carbon Emissions(CNCE)はShellから資金援助を受け、CO₂を吸脱着する人工樹木の開発を行っている³⁵⁾。
	応用研究・開発	◎	→	● NCCCでは、開発技術の実ガス試験が可能である。日本を含む海外の技術の試験も積極的に受け入れ、技術と情報を集積している。 ● Global Thermostatは、発電所などの産業用ソースや大気からCO₂を回収する技術についてExxonmobileと共同開発契約を締結し、同社の技術の潜在的な拡張性を検討している³⁶⁾。
欧州	基礎研究	○	→	【EU】 ● シェフィールド大学(英国)、エジンバラ大学(英国)、ICL(英国)、NTNU(ノルウェー)、SINTEF(ノルウェー)、ECN(オランダ)など、CO₂分離回収技術研究を牽引する歴史ある大学、研究機関が多数存在する。 【フィンランド】 ● DACについては、VTT Technical Research Centre of FinlandはNEO CARBON FOODプロジェクトにおいて、水素酸化細菌、再生可能な電気、水、空気、栄養素から食用の微生物タンパク質を生産することに成功している。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

	応用研究・開発	◎	→	【ノルウェー】 ●石油エネルギー省傘下 GassnovaがフルスケールCCSプロジェクトを推進。 - 回収ではごみ焼却施設やセメント工場でアミン吸収法による試験を行う。 【EU】 ●DACには非常に精力的に取り組んでおり、政府や大手企業から資金援助を受けたベンチャー企業によって実証規模の試験が多数行われている。 【スイス】 ●ClimeworksはEUから資金提供を受けたCarbFixプロジェクトに参加しており、Hellisheidi地熱発電所から回収した不純物を含むCO₂を10,000 t/yのペースで連続的に直接地下に貯留し続けている³⁷⁾。
中国	基礎研究	○	↗	●当該分野の学術論文発表が増加し、数では米国や日本を超えた ³⁴⁾ 。
	応用研究・開発	○	↗	●化学工場や発電所での回収実証プロジェクトが実績、計画ともに増加。 ●中国と英国のCCUS分野での協力に関する覚書に基づき設立された英国・中国（広東省）CCUS センターが海豊の石炭火力発電所にCO₂回収試験設備を建設し、2019年より稼働。
韓国	基礎研究	○	→	●一定水準の学術成果を発表している。
	応用研究・開発	△	↘	●KEPCO/KIERのプロジェクトで、2013年に炭酸カリウム担持固体吸収材を用いた燃焼後排ガスを対象とした大規模試験回収装置（200 t-CO ₂ /day）を建設するなど活発であったが、その後、動きは鈍化。
その他の国・地域	応用研究・開発	○	→	【カナダ】 ●International CCS Knowledge Centre（2016年にBHPとSaskPowerにより設立された非営利組織）は、大規模CCSプロジェクト実施と、Boundary Dam 3 CCS施設およびShandスタディとして知られる包括的な次世代CCS研究の両方から得た基礎知識と最適化のノウハウを蓄積している。 ●Carbon EngineeringはOccidental PetroleumのEOR事業で使用するため、パーミアン盆地に0.5 Mt/yのCO₂が回収可能な世界最大のDACプラントを設計している。プラントは2021年に建設が開始され、2023年に稼働予定で、将来的には1 Mt/yに拡張することも検討している³⁸⁾。 【豪州】 ●CO₂CRCは世界最大規模のCCSの研究組織である。豪州政府のプログラムで、CCSを研究および実証することを目的に10年以上前に設立された。CO₂CRCはオトウェイで豪州初のCO₂地層貯留実証を行ってきたが、2016年からは同地で回収技術の試験も行っている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 化学エネルギー利用 (環境・エネ分野 2.1.12)
- ・ 分離技術 (ナノテク・材料分野 2.1.5)

参考・引用文献

- 1) IEA, *Energy Perspective* (2017) ,
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017> (2021年1月17日アクセス)
- 2) 汐川雄一, 「資源分野における貢献」『日本リモートセンシング学会誌』31巻2号 (2011) : 240-246,
 DOI : org/10.11440/rssj.31.240
- 3) 俣野米治, 「資源探査における衛星リモートセンシング技術の進歩」『地学雑誌』113巻6号 (2004) :
 878-881, DOI : org/10.5026/jgeography.113.6_878
- 4) 石井吉徳, 「JERS - 1 への期待」『日本リモートセンシング学会誌』12巻3号 (1992) : 317-321,
 DOI : org/10.11440/rssj1981.12.317
- 5) Ye, Bei, Shufang Tian, Jia Ge, and Yaqin Sun, "Assessment of WorldView-3 data for lithological mapping", *Remote Sensing* 9, no.11 (2017) : 1132, DOI : 10.3390/rs9111132
- 6) Lasica, Rebecca, "A new age for oil and gas exploration remote sensing data and analytics are changing the industry." *Earth Imaging Journal* (2015) , <https://eijournal.com/print/articles/a-new-age-for-oil-and-gas-exploration-remote-sensing-data-and-analytics-are-changing-the-industry> (2021年1月18日アクセス)
- 7) Asadzadeh, Saeid, and Carlos Roberto de Souza Filho, "Investigating the capability of WorldView-3 superspectral data for direct hydrocarbon detection." *Remote sensing of environment* 173 (2016) : 162-173, DOI : org/10.1016/j.rse.2015.11.030
- 8) 並川貴俊, 「石油・天然ガスの探鉱・開発分野でのSARデータ活用と、ALOS-2への期待」『ALOS-2ワークショップ』(2011) , https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/conf/workshop/alos2_ws3/ALOS2_4_1_Namikawa_Takatoshi.pdf (2021年1月17日アクセス)
- 9) 丸山裕一, 「資源開発における衛星地球観測の役割とこれからの方向性」『分野別推進総合PT フロンティアPT 第6回会合』(2008) , <https://www8.cao.go.jp/cstp/project/bunyabetu2006/frontier/6kai/haihu6.html> (2021年1月17日アクセス)
- 10) Mieggebielle, V, D Dubucq, C Taillandier, and S Angeliaume, "Use of Remote Sensing Radar Techniques for Oil and Gas O&G Facilities Survey in Offshore Domain for Environment and Exploration : Oil Slicks Detection and Interpretation Seeps and Spill." *SPE Health, Safety, Security, Environment, & Social Responsibility Conference-North America* (2017) , <https://doi.org/10.2118/184419-MS> (2021年1月17日アクセス)
- 11) U.S. Department of Energy , "Horizontal wells", *Innovative Technology Summary Report* DOE/EM-0378 (1998) , https://www.dndkm.org/DOEKMDocuments/ITSR/SoilGroundWater/Horizontal_Wells.pdf (2021年1月17日アクセス)
- 12) John T. Han, "There is Value in Operational Flexibility : An Intelligent Well Application" *SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, Texas* (2003) : SPE paper

82018, DOI : org/10.2118/82018-MS

- 13) *Horizontal Environmental Well Design and Installation*, (Directed technologies Drilling, Inc., 2004) , https://horizontaldrill.com/wp-content/uploads/2016/04/DTD_Horizontal_EnvWell_Handbook.pdf (2021年1月17日アクセス)
- 14) *Oil and Gas for the 21st Century-OG21* (Statoilhydro ASA ,2009) , https://www.og21.no/contentassets/1ba9f0520c0e449b89a429c8960b88d2/og21_rapport_innside_enkelt.pdf (2021年1月17日アクセス)
- 15) UN Environment, “The Emissions Gap Report 2017”, *United Nations Environment Programme (UNEP)* , <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2017>
- 16) Dr, Peter Brownsort, *Worldwide Comparison of CO₂-EOR Conditions* (Scottish Carbon Capture & Storage (SCCS) , 2015) , [https://www.sccs.org.uk/images/expertise/misc/SCCS-CO₂-EOR-JIP-Worldwide-Comparison-of-CO₂-EOR-Conditions.pdf](https://www.sccs.org.uk/images/expertise/misc/SCCS-CO2-EOR-JIP-Worldwide-Comparison-of-CO2-EOR-Conditions.pdf) (2021年1月17日アクセス)
- 17) NETL, Carbon Dioxide, *Enhanced Oil Recovery-Untapped Domestic Energy and Long Term Carbon Storage Solution* (US Department of Energy (DOE) ,2017) , [https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/CO₂_eor_primer.pdf](https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/CO2_eor_primer.pdf)
- 18) 経済産業省地球環境連携・技術室, 『CCSの現状について、資料③』(2012) , https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs_kondankai/pdf/001_03_00.pdf (2021年1月17日アクセス)
- 19) RITE, 『RITE年次報告書 (2014-2017年)』 , http://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2014_all_j.pdf (2021年1月17日アクセス)
- 20) S.-I. Nakao, K. Yogo, K. Goto, T. Kai, H. Yamada, *Advanced CO₂ Capture Technologies*, SpringerBriefs in Energy, (Springer, 2019) , <https://www.springer.com/jp/book/9783030188573> (2021年1月17日アクセス)
- 21) Kashimura, Osamu, 「HISUI 開発の現状とデータの利用可能性」『第4回 ALOS-2 / 3 ワークショップ』(2012) , https://ssl.jspacesystems.or.jp/library_technical/ (2021年1月17日アクセス)
- 22) 横矢直人, 岩崎晃, 「ハイパースペクトル画像処理が拓く新しい地球観測 (<特集> 宇宙に挑む人工知能技術)」『人工知能』29巻4号 (2014) : 357-365, DOI : org/10.11517/jjsai.29.4_357
- 23) Zhu, Xiao Xiang et al., "Deep learning in remote sensing : a comprehensive review and list of resources", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 5, no.4 (2017) : 8-36, DOI : 10.1109/MGRS.2017.2762307
- 24) 伊原賢, 「シェールガス革命とは何か：石油開発技術者の視点」『物理探査』66巻4号 (2013) : 243-251, <https://doi.org/10.3124/segj.66.243>
- 25) シーエムシー・リサーチ編集部, 『油ガスでの水処理関連技術・市場の最新動向、(在来型から非在来型資源開発)』(S&T出版, 2014)
- 26) 大備勝洋, 「大幅コストダウンと環境保護に威力、大偏距掘削技術」石油・天然ガスレビュー』39巻4号(2005) : 23-36, https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=200902283957186487 (2021年1月17日アクセス)
- 27) Ziqui Xue, 「マイクロバブルCO₂圧入方式革新的WAG技術開発」『JOGMEC Techno Forum

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

2014』, http://techno-forum.jogmec.go.jp/2014/_img/program/ab_Part20.pdf (2021年1月17日アクセス)

28) 2019 CARBON CAPTURE, UTILIZATION, STORAGE, AND OIL AND GAS TECHNOLOGIES INTEGRATED REVIEW MEETING (2019), <https://netl.doe.gov/node/9032> (2021年1月17日アクセス)

29) RITE, *RITE Today* (2019), <http://www.rite.or.jp/results/today/2019/> (2021年1月17日アクセス)

30) 香山幹, 「石油開発最新事情」『IEA-ROR, 第38回年次総会参加報告』(2017), https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1004689/1007484.html (2021年1月17日アクセス)

31) 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 『CCS (二酸化炭素回収貯留) の概要と展望 (Vol.2) - 膜による分離回収コスト及び貯留コストの評価と課題 - 』(2017), <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2016-pp-06.pdf> (2021年1月17日アクセス)

32) Socolow RA et al., “Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals-A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs”, *APS Physics* (2011), <https://www.aps.org/policy/reports/assessments/upload/dac2011.pdf> (2021年1月17日アクセス)

33) Sada Joshi, “Review Aspects of Horizontal and Multilateral Wells”, SPE (2008), <https://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e6-193-12.pdf> (2021年1月17日アクセス)

34) 特許庁, 『平成29年度特許技術動向調査報告書 (概要) CO₂ 固体化・有効利用技術』(2018), https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/29_09.pdf (2021年1月17日アクセス)

35) Center for Negative Carbon Emissions, <https://cnce.engineering.asu.edu/projects/> (2021年1月17日アクセス)

36) Global Thermostat, <https://globalthermostat.com/category/press/> (2021年1月17日アクセス)

37) CarbFix2, <https://www.carbfix.com/carbfix2> (2021年1月17日アクセス)

38) Carbon Engineering, <https://carbonengineering.com/news-updates/> (2021年1月17日アクセス)

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分