

IEA テクノロジー・ロードマップ

CO2 回収貯留 2013 年版

エネルギー技術の展望



“Technology Roadmap” has been translated from English into Japanese for convenience. The Global CCS Institute does not warrant the accuracy, authenticity or completeness of any content translated in the Japanese version of the Report.

「テクノロジー・ロードマップ」は、利用者の便宜のために“Technology Roadmap”を英語から日本語に翻訳したものです。グローバル CCS インスティテュートは日本語版のいかなる内容についてもその正確性、信頼性又は完全性について保証しません。

テクノロジー・ロードマップ CO2 回収貯留 – 2013 年版

国際エネルギー機関 – IEA

9 rue de la Federation, 75015 Paris, France

電話: +33 (0)1 40 57 65 00/01

ファックス: +33 (0)1 40 57 65 59

メール: info@iea.org、ウェブサイト: www.iea.org

国際エネルギー機関

国際エネルギー機関(IEA)は、1974年11月に設置された独立機関である。その主な使命は、過去も現在も次の二つである。石油供給の実地的な途絶に対して加盟国が集団的に対処することで、エネルギー安全保障を促進すること。加盟28カ国等に対し、手頃な価格の信頼性のあるクリーンなエネルギーを確保するための方策について、信頼できる調査分析を行うことである。IEAは、加盟国間のエネルギー協力に関する包括的なプログラムを実施している。各加盟国は、石油純輸入量90日分に相当する備蓄を義務付けられている。IEAの目的は次の通りである。

- 特に、石油の供給が途絶えた場合に効果的な緊急対応を行う能力を維持することによって、加盟国に、あらゆる種類のエネルギーに関して、信頼の置ける十分な供給へのアクセスを確保すること。
- 特に、気候変動の要因となる温室効果ガスの排出削減を通じて、グローバルな経済成長及び環境保護を促進させる持続可能なエネルギー政策を促すこと。
- エネルギーデータの収集及び分析を通じて、国際市場の透明性を向上させること。
- エネルギー効率の改善や低炭素技術の開発及び活用等を通じ、将来のエネルギー供給を確保し、環境への影響を緩和するエネルギー技術に関するグローバルな協力を支援すること。
- 非加盟国、産業界、国際機関、その他の関係者との取組や対話を通じて、グローバルなエネルギー問題への解決策を見出すこと。

IEA加盟国:

オーストラリア
オーストリア
ベルギー
カナダ
チェコ共和国
デンマーク
フィンランド
フランス
ドイツ
ギリシャ
ハンガリー
アイルランド
イタリア
日本
大韓民国

ルクセンブルク
オランダ
ニュージーランド
ノルウェー
ポーランド
ポルトガル
スロバキア共和国
スペイン
スウェーデン
スイス
トルコ
英国
米国

欧州委員会もIEAの活動に参加。

© OECD/IEA, 2013年

国際エネルギー機関

9 rue de la Federation

75739 Paris Cedex 15, France

www.iea.org

この出版物の使用及び配布には一定の制限が掛かっている。

利用条件は、下記にオンラインで公開されている。

<http://www.iea.org/termsandconditionsuseandcopyright/>

序文

化石燃料の使用及びCO₂排出量の多い産業が私達の経済において中心的な役割を担う限り、CO₂回収貯留(CCS)は温室効果ガス削減の重要な解決策であり続ける。石炭等の化石燃料が、燃料ミックスにおいて依然として優位を占めている状態では、長期的には、CCSなくして気候変動への悪影響を抑えるシナリオはあり得ない。これまでのところ、一定の技術的な進歩があつたにもかかわらず、CCSの開発のペースは遅く、今やその普及を加速するために直ちに行動することが求められている。

今後数十年のうちに、世界がエネルギー関連のCO₂排出量を大幅に減らす必要があることは明らかである。そのためには、再生可能エネルギーや原子力エネルギー、よりクリーンな輸送技術、エネルギー効率化及びCO₂回収貯留等の様々なクリーンエネルギー技術の大規模な普及が必要とされる。実のところCCSは、この幅広いエネルギー情勢の中でしっかりと位置付けられなければならない。CCSの開発と普及を進めるとともに、効率の非常に良い発電所や産業施設の建設及び操業により、化石燃料の利用から生じるCO₂を最小限に抑える努力も必要である。IEAにとって、CCSはそれ自身が「特効薬」ではないが、相互に支え合うことのできるエネルギー解決策の整合のとれたポートフォリオに不可欠な要素である。

長年にわたる研究及び開発、並びに有用だが限られた実用経験を経て、我々は今、ギアをシフトアップし、CCSを大規模に展開できる真のエネルギーの選択肢として開発する必要がある。遠い未来のいずれかの時点で実現する解決策として、長期的なエネルギーシナリオの中にCCSを考えるだけでは十分ではない。そうではなく、ここで今すぐに、その真の開発に着手しなければならない。

このロードマップは、IEAのCCSテクノロジー・ロードマップ2009年版の改定版である。エネルギー状況は2009年から2013年の間に変化し、CCSの課題と必要性について新たな見識も得られた。本CCSロードマップは、政府や産業界が排出削減戦略にCCSを組み込むことを支援すること、並びにCCSチェーンの三つの構成要素(CO₂の回収、輸送・貯留)全てについて、その普及を拡大できる状況を創り出すことを目的としている。私達を正しい道筋へと導くように、本ロードマップでは、2020年からのCCSの普及開始に向けてしっかりとした基礎を築くために、今後7年間に必要とされる七つの重要な行動を強調している。これらの短期的な行動は、今日の政府及び産業界の意思決定者に直接関係するものである。恐らく最も重要な課題は、CCSの立ち上げに関するビジネスケースを創ることであろう。これには、政府の決断が求められるだけでなく、長期的視野に立った産業界の継続的な関与が必要とされる。

2020年までにCCSの広範な導入が確実に行われ、CCSが経済発展やエネルギー安全保障、並びに環境問題を考慮した持続可能な将来の一部となるよう、政府、産業界、学界及び金融界が協力することが不可欠である。私達は皆、この取組の重要な関係者なのであり、この行程に参加して成功させなくてはならない。

本出版物は、IEA事務局長としての私の権限の下で出版されるものである。

Maria van der Hoeven
国際エネルギー機関
事務局長

本出版物は国際エネルギー機関(IEA)事務局の見解を反映しているが、必ずしも個々のIEA加盟国の見解を反映しているものではない。IEAは、本出版物の内容について(その完全さ又は正確さを含め)、明示的か黙示的かを問わず、いかなる表明又は保証も行わないものではなく、また本出版物の利用、又はこれに対する依存について、いかなる責任も負うものではない。

目次

序文	1
謝辞	4
主要な研究成果及び行動	6
研究の成果	6
私達に求められること: 今後7年間の七つの重要な行動	8
序章	9
ロードマップの目的	9
CCSの必要性: CCSは依然として極めて重要である	9
前回のロードマップ以降のCCSの進展	11
回収、輸送、貯留及び統合プロジェクトの現状: CCSはスケールアップの準備万端	15
回収技術: 十分に研究されているが費用が高い	15
CO ₂ の輸送はCCSのうちで技術的に最も成熟した工程	19
CO ₂ 貯留は実証されてきたが、更なる経験が大規模で必要	19
統合プロジェクトの進捗	22
部品の組み立ては、依然として重大な課題	23
CCSの展望: 今世紀半ばまでに、CCSはどこにいなければならないか?	25
今後7年間の行動とマイルストーン: 普及のための条件作り	29
政策と規制の枠組みはCCSの普及に極めて重要	30
適したCO ₂ 貯留をタイムリーに特定することが最も重要	34
RD&Dによる回収技術の向上とコスト低減を追求する必要	36
CO ₂ 輸送インフラの開発では将来のニーズを予測	38
2020~2030年の行動とマイルストーン: 大規模な普及が加速	39
2030年以降の行動とマイルストーン: CCSが主流に	42
関係者の短期の行動	43
付属文書1 行動の詳細	44
2013~2020年の行動	44
2020~2030年の行動	46
付属文書2 IEAシナリオにおけるCCS普及: 地域ごと及び部門ごとの特性	49
発電部門のCCS	49
産業用途におけるCCS	51
付属文書3 CCSインセンティブ政策の枠組み	55
短縮語、略語、測定単位	58
短縮語と略語	58
測定単位	58
参考文献	60
図のリスト	
図1: CCSチェーン	15
図2: 貯留の概要	19
図3: 2012年末時点で、操業中や建設中、計画が進んだ段階にある大規模CO ₂ 回収プロジェクト(セクター並びに貯留のタイプ、回収の可能性及び実際の開始日や開始予定日別)	22
図4: 2DSにおける発電及び産業部門のCCS	26
図5: 2DSにおける、2015~2030年及び2050年までの地域別の累積CO ₂ 回収量	26
図6: 6DSと比較して2DSでは、2050年までの総排出削減量の14%がCCSによる	28
図7: CCS政策の枠組みにおける政策ゲートウェイ	32
図8: 2DSでの2020~2050年の世界の10地域についての回収設備を備えた石炭焚、ガス焚、バイオマス焚の発電設備(及び総設備)	50

図 9: 2DS における産業用途別の CO ₂ 回収量 (主要 7 発生源地域別)	52
図 10: 2DS で分析された、産業部門での CCS で回収・貯留された CO ₂	53
図 11: 典型的な産業サイトでの回収における CO ₂ 回避費用と CO ₂ 発生源の規模	54

表のリスト

表 1: CCS の進展	12
表 2: 発電 (燃料別) 及び産業用途 (産業別) における CO ₂ 回収経路	17
表 3: 国又は地域の CO ₂ 貯留の規制枠組みの一部	21
表 4: OECD 加盟国における CO ₂ 回収設備の追加によるコスト及び性能に対する影響の平均	51
表 5: CCS 普及にインセンティブを与える可能性を持つ現行及び/又は策定中の政策例	56

ボックスのリスト

ボックス 1: IEA のテクノロジー・ロードマップ	9
ボックス 2: CCS の実証の論理的根拠	11
ボックス 3: CO ₂ の利用	14
ボックス 4: CCS とガス火力発電	18
ボックス 5: CO ₂ 貯留と EOR	23
ボックス 6: ETP 2012 の 2DS 及び 6DS	27
ボックス 7: CCS 政策の枠組み内で可能なゲートウェイ	31
ボックス 8: CCS レディの発電と発電所への CCS 導入	32
ボックス 9: CCS インフラの開発における自らの役割を決定した英国政府の行動例	34
ボックス 10: CCS とバイオマスエネルギー源との結合	39

謝辞

本出版物は国際エネルギー機関(IEA)のCO₂回収貯留(CCS)ユニットが作成した。Ellina Levina、Simon Bennett 及び Sean McCoy が、本報告書の第一著者である。Ellina Levina は、プロジェクトの管理・調整も行った。CCS ユニット長である Juho Lipponen は、的確な指導を行い本業務に貢献した。IEA の同僚である Dennis Best、Wolf Heidug 及び Justine Garrett は、本報告書に重要な貢献を行った。エネルギー効率化・環境部(Energy Efficiency and Environment [EED] Division)部長の Philippe Benoit 及び持続可能エネルギー政策・技術局(Sustainable Energy Policy and Technology [SPT] Directorate)局長の Didier Houssin も指導を行い貢献した。

他の数名の IEA の同僚、特に以下の者も、本ロードマップの業務に貢献した。Laszlo Varro、Keith Burnard、Cecilia Tam、Araceli Fernandez、Uwe Remme、Nathalie Trudeau、Carlos Fernandez Alvarez 及び Jean-François Gagné。

本研究は、複数の IEA 常設委員会の指導を受けた。IEA エネルギー研究技術委員会(Committee on Energy Research and Technology: CERT)、長期協力常設グループ(Standing Group on Long-Term Co-operation: SLT)、並びに化石燃料作業部会(Working Party on Fossil Fuels: WFFF)及び石炭産業諮問委員会(Coal Industry Advisory Board: CIAB)である。これらの委員会の委員は重要な検討を行って意見を述べ、本報告書の向上に協力した。

本ロードマップは、以下のロードマップ諮問委員会の委員から得られた見識から、多大な恩恵を受けた。Jeff Chapman(炭素回収・貯留協会)、Jim Dooley(PNNL)、Jens Hetland(SINTEF)、John Gale(IEA 温室効果ガス研究開発プログラム: IEAGHG)、John Litynski 及び Bruce M. Brown(米国エネルギー省国立エネルギー技術研究所石炭発電研究開発室)、John Topper(IEA クリーンコールセンター)、Oyvind Vessia(欧州委員会エネルギー総局)、Richard(Dick)Rhudy(米国電力中央研究所: EPRI)、Tone Skogen(ノルウェー石油・エネルギー省)、Tony Surridge(南アフリカ CO₂ 回収貯留センター)、Bill Spence(Shell International)、Christopher Short(グローバル CCS インスティテュート)及び Jiutian Zhang(中国科学技術部中国アジェンダ 21 管理センター)。

IEA は、ロードマップのワークショップにおける産業界、政府及び非政府組織の専門家による洞察に満ちた有用な議論、並びに草案作成の過程において関係者から得られた意見及び支援に感謝する。以下の専門家諸氏に感謝の意を表す。Filip Neele(オランダ地質調査所: TNO)、Giles Dickson(ALSTOM)、Wayne Calder(豪州資源・エネルギー・観光省)、Xian Zhang(北京理工大学/中国科学技術部中国アジェンダ 21 管理センター)、Paal Frisvold(ペローナ財団欧州支部)、Peter Gerling(ドイツ連邦地球科学・天然資源研究所: BGR)、Tony Espie(BP Alternative Energy International Limited)、Luke Warren(炭素回収・貯留協会)、Arthur Lee(Chevron Services Company)、Peter Radgen(E.ON)、Christian Oeser(フランス エコロジー・持続可能な開発・エネルギー省)、Daniel Rennie(グローバル CCS インスティテュート)、Douglas Forsythe(カナダ政府)、Howard Herzog(マサチューセッツ工科大学: MIT)、Dick Wells(豪州 国家 CO₂ 回収貯留評議会)、David Hawkins(天然資源防衛委員会)、Lars Ingolf Eide(ノルウェー総合研究審議会)、田中良三(地球環境産業技術研究機構: RITE)、Bjorg Bogstrand(ノルウェー政府)、Paul van Slobbe(オランダ経済省)、Andrew Garnett(クイーンズランド大学)、Dominique Copin(TOTAL)、Mark Ackiewicz(米国エネルギー省化石エネルギー局国立エネルギー技術研究所)、John Overton(英国エネルギー・気候変動省)、Jon Gibbins 及び Hannah Chalmers(エディンバラ大学[及び英国 CCS 研究センター])、Benjamin Sporton(世界石炭協会)、Brendan Beck(南アフリカ CO₂ 回収貯留センター)、Tim Dixon 及び Stanley Santos(IEAGHG)、Sarah Forbes(世界資源研究所)、Bob Pegler(BBB Energy)、Mick Buffier(Glencore Xstrata)、Jeff Phillips(米国電力中央研究所)、Alex Zapantis(Rio Tinto)、Rob Bioletti(カナダ・アルバータ州政府エネルギー省)及び Jon Hildebrand(カナダ天然資源省)。

IEA は、本業務並びに当機関の CCS 作業プログラム全般の両方に関する長きにわたるグローバル CCS インスティテュートからの支援に感謝する。

著者らは、編集者 Kristine Douaud、並びに IEA 広報情報局(CIO)、特に Rebecca Gaghen、Muriel Custodio、Astrid Dumond、Cheryl Haines、Angela Gosmann 及び Bertrand Sadin に謝意を表したい。Jane Berrington にはロードマップ策定の全期間を通じて、後方支援及び事務的支援を頂いた。

主要な研究成果及び行動

研究の成果

- CO₂回収貯留(CCS)は、各国政府が気候変動の抑制に向けた野心的な方策に着手するならば、低炭素エネルギー技術のポートフォリオの重要な構成要素になるであろう。世界的にエネルギー部門のCO₂排出量が増加傾向にある現状、及び化石燃料が一次エネルギー消費において中心的な役割を果たし続けていることを考えれば、CCS普及の緊急性は増すばかりである。国際エネルギー機関(IEA)の2012年版エネルギー技術展望(ETP 2012)の2°Cシナリオ(2DS)¹の下でのCCSの貢献は、2050年に必要とされるCO₂排出削減量の6分の1であり、また何も対策を講じなかったケース(地球の気温上昇6°Cに相当)と比較した場合の2015年から2050年までの累積排出削減量の14%に相当する。
- 回収、輸送・貯留に必要とされる個々の構成技術は、一般的に良く解明されており、技術的に成熟しているものもある。例えば、天然ガスのガス精製及び水素製造からのCO₂回収は技術的に成熟し商業的に実施されており、パイプラインによるCO₂輸送も同様である。CO₂の安全で効果的な貯留については、実証されているものの大規模プロジェクトから学ばなければならない点も多く残されており、実行可能な貯留サイトを特定するため更なる努力が必要とされている。しかし、CCSの普及に向けた最大の課題は、構成技術を大規模な実証プロジェクトに取り込むことである。この技術に対する理解と支持が、一般市民並びに一部のエネルギー及び気候問題の関係者の間で不足していることも、普及の遅れと難しさの一因となっている。
- 政府と産業界は、広範なプロセスや産業部門において、2020年までに30件以上のCCSプロジェクトの操業を実現するように、インセンティブ及び規制の枠組みを確実に整備しなければならない。これは今日、計画がかなり進行した段階にあるプロジェクトが、その時点までに全て操業していることに相当する。全地球に散らばるプロジェクトが、CCS適用の全てを網羅するように政府間の協力を促進する必要がある。また、初期のCCSプロジェクトから得られた知識の共有を促進するメカニズムを構築する必要がある。
- CCSは発電に関することだけではない。2DSでは、2015年から2050年の間に回収されるCO₂の半分近く(45%)は産業用途からのものである。このシナリオでは、2050年までに世界の製鉄、セメント及び化学品の生産の25%から40%がCCSを装備していなければならない。産業用途においてこのレベルの普及を達成するには、2020年までに、特に製鉄及びセメントの生産における回収技術が実証される必要がある。
- 経済協力開発機構(OECD)非加盟国のエネルギー需要の急激な伸びを考えれば、CCSの最大規模の普及はこれらの国々で行われる必要がある。2050年までに、OECD非加盟国は総累積CO₂回収量の70%を占める必要があり、中国だけで2015年から2050年までの世界の総CO₂回収量の3分の1を占めなければならない。今後数十年の間にOECD非加盟国でのCCSの普及を推進するために、OECD加盟国政府及び国際開発金融機関はOECD非加盟国と協力し、確実に支援メカニズムを確立しなければならない。
- 2DSに従ってCCSの普及を実証段階より先に進める上で、この10年間は重要である。必要とされる多額の資金を集められるか否かは、未だ欠如しているCCSの有力なビジネスモデルの開発にかかっている。こうしたモデルを開発し、費用対効果の大きいCCS普及の推進を支援するインセンティブの枠組みを実行する緊急の行動が、産業界及び各国政府に求められ

¹ 2DSは、世界の平均気温の上昇を2°Cに抑える可能性を80%確保するために、2050年までに、全エネルギー部門にわたる技術をどのように変えていけるかを説明するものである。

ている。更に、CO₂の貯留及び輸送のインフラ整備を促進するために、将来の需要を考慮に入れた計画策定と行動が必要とされている。

私達に求められること: 今後 7 年間の七つの重要な行動

今後 7 年間は、低炭素安定化の目標（長期的な地球の平均気温の上昇を 2°C に抑えること）の達成に必要なとされる加速的な CCS の開発には極めて重要である。以下の七つの重要な行動は、CCS の普及拡大に向けて基礎を築くため 2020 年までに必要とされるものである。これらは各国政府及び産業界に、真剣な取組を求めるものであるが、現実的であり CCS プロセスの三つの要素全てをカバーしている。

- プロジェクトへの民間資金の調達を推進するため、CCS の実証及び早期普及のための資金支援メカニズムを導入する。
- CCS プロジェクトのための貯留地の探査、特性解明及び開発を促進する政策を実施する。
- 新設のベースロード用化石燃料発電設備を CCS レディとすることを事実上義務付ける国内法及び規制の整備並びに国際金融の提供。
- CO₂ 回収がまだ実証されていない産業用途で、回収システムをパイロット規模で実証する。
- CCS 技術やその普及の重要性について、一般市民及び関係者の理解を深めるための取組を大幅に拡大する。
- 技術開発を継続し、最も効率の良い可能な発電サイクルを利用することにより、回収設備を備えた発電所の発電コストを削減する。
- 将来の需要中心地の位置及び将来の CO₂ 量を予測し、CO₂ 輸送インフラの効率的な開発を促進する。

序章

IEA の CO₂回収貯留 (CCS)ロードマップの初版が出版された 2009 年から 2013 年までの4年間において、CCS の必要性は低くなっておらず、実際のところ、その普及の緊急性は高まっている。CCS 技術及びこれを実現する政策の枠組みには、多くの進展及び顕著な進捗が見られた。しかし、今日の化石燃料利用のレベル、並びに CCS の主な促進要因である炭素価格が依然として存在しないという状況により、CCS の普及は、地球の平均気温の長期的な上昇を 2°Cに抑えるために必要とされる道筋を遥かに下回っている。

ロードマップの目的

本 CCS ロードマップ最新版の目的は、CCS の持つ CO₂ 排出量削減の可能性をフルに発揮できるレベルまでその普及を加速するために必要な行動を記述し分析することにある。IEA は、過去 4 年間に起こった CCS の発展を反映し、現況を十分に反映した行動計画を策定するために、2009 年版ロードマップを改定した。

本ロードマップは、CCS 技術の現状を簡潔に報告し、地球の平均気温の上昇を 2°Cに抑えることと整合性の取れた、2013 年から 2050 年にかけての CCS 普及に向けた見通しを概略し、更に、この想定される普及を促進するために特に 2013 年から 2030 年の間に行う必要がある行動を提示している。私達は、提言した短期的な行動が、地球の平均気温の上昇を 2°Cに抑えるためのみならず、地球の気温変化を 4°C以下で安定させるために企画されるあらゆるシナリオにおいて、CCS の普及に極めて重要であると確信している。

CCS の必要性: CCS は依然として極めて重要である

地球のエネルギー関連の CO₂ 排出量は上昇し続けている。2011 年には 2010 年から 3.2%上昇し、過去最高の 31.2Gt に達した (IEA, 2012a)。この傾向が続けば排出量は、長期的には地球の平均気温がおよそ 6°C 上昇する道筋に乗ることになる (IEA, 2012a)。CO₂ 等の温室効果ガス (GHG) の排出量が多いほど温暖化も進み、これに伴う影響も厳しさを増す。こうした影響には、人類の居住地移転の原因となる海面上昇、並びに熱波の頻発や破壊的な嵐等の極端な天候、降雨パターンの変化等があり、その結果、干ばつや洪水が発生して、食糧生産や人間の病気や死亡率に影響する (IPCC, 2007)。

ボックス 1: IEA のテクノロジー・ロードマップ

IEA のテクノロジー・ロードマップは、ETP の 2DS (最新版は ETP 2012 [IEA, 2012c]) に基づいて技術開発と普及を促進するために、各国政府、産業界、金融機関、並びに市民社会が優先すべき行動を特定している。ロードマップは、エネルギー安全保障や気候変動等の将来の課題に取り組む上で、政府や産業界にとって重要な戦略的計画ツールである。IEA の低炭素エネルギー技術ロードマップは、技術の持つ可能性をフルに実現するために達成しなければならない優先事項並びにマイルストーンについての国際的なコンセンサスを創り出そうとするものである。これらの IEA の技術ロードマップは広範な技術を扱っており、種々の再生可能エネルギー、原子力発電、建築物のエネルギー効率化、セメント部門、高効率・低排出 (HELE) 石炭発電、CCS 等の技術が含まれている。

低炭素エネルギー技術のロードマップには多くの重要な共通点がある。技術の普及に関する展望、並びに、特定したベースラインと比較した場合の当該技術の CO₂ 削減の可能性について詳しく述べている点等である。技術開発のマイルストーンについて概略が示されており、政策や資金調達、研究、市民へのアウトリーチ及び市民関与、国際協力といった分野における対応する行動が述べられている。IEA 加盟国以外の国々でのエネルギー利用及びこれに関連する排出量の増加が予想されることから、ロードマップでは新興経済国

における技術開発と普及の役割についても考察している。ロードマップは、先進国及び発展途上国の両方において、各国政府や企業及び市民社会の広い協力を促進するように設計されている。

エネルギー関連の CO₂ 排出量を大幅に削減するためには、多種多様な低炭素エネルギー技術の大規模な普及が必要になる。これには、発電や工業生産におけるエネルギー効率の向上に向けた取組、並びに需要側での取組が含まれる。再生可能エネルギーや原子力発電、新交通技術の広範なポートフォリオも、私達の社会のカーボンフットプリントを減らす上で重要である。CCS はそれ自体が「特効薬」ではないが、この技術のポートフォリオの重要な部分でなくてはならない。

石炭は、全世界の一次エネルギーの最も増加率の高い供給源であり続ける。過去 10 年間に於いて石炭は、最も急増した一次エネルギーの供給源であり、石油とガスを合わせたものよりも 50% 以上も消費量の増加幅が大きかった。2011 年には、石炭の需要は、2010 年の 7,080Mt から 2011 年の 7,384Mt へと 4.3% 増加したが、この増加のほとんどは OECD 非加盟国、特に中国とインドで生じたものである (IEA, 2012b)。石炭などの化石燃料増加の継続は、世界的なクリーンエネルギー技術の確固たる進歩により全世界のエネルギー供給の CO₂ 排出係数は安定しているものの、全体としてのエネルギー関連の排出量が増加したことを意味している (IEA, 2013a)。従って、非化石エネルギー源の占める割合は急速に増大しているにもかかわらず、化石燃料が今後何十年にもわたって避けようなく一定の役割を担うことは明らかである。CCS は、化石燃料の使用からの排出に対処する解決策を提供するものである。

世界全体の政府及び民間は、燃焼すれば約 2,860 ギガトンの CO₂ (GtCO₂) を放出することになる石炭、石油及びガスの確認埋蔵量を有している (IEA, 2012a)。地球の平均気温の上昇を 2°C に抑えるに十分な可能性を世界が探るのであれば、2012 年から 2050 年までにエネルギー利用に許される排出量は累計 884GtCO₂ である。これは、CCS 技術を広く普及させなければ、2050 年までには、化石燃料の確認埋蔵量の 3 分の 1 に満たない量しか消費できないことを意味している (IEA, 2012a)。CCS は私達の気候問題の目標達成に役立つのみならず、化石燃料から多額の収入を得ている企業及び政府にとり CCS の開発と普及への投資は重要なリスク管理 (「ヘッジ」) 対策である。従って CCS は、気候変動の緩和に必要な強い行動を取っている世界において、化石燃料埋蔵量の経済価値と関連インフラの維持を約束するものである (IEA, 2012a)。

CO₂ の排出量が制限される世界に於いて、重要な生産設備や転換設備の退役を遅らせることができるため、CCS には戦略的な価値もある。2011 年に操業又は建設中であったインフラ (例えば発電所や産業施設、輸送用燃料の製造も含む) からの CO₂ 排出量は、2035 年までに合計約 550GtCO₂ になるが、上記の排出枠のほとんどを占める。これらへの CCS の追設は、これらインフラからの排出の「固定化」を防ぐのに役立つ。

CCS は発電部門における低コストな排出量削減の選択肢でもある。発電部門の排出量削減手段の選択肢リストから CCS が外された場合、同等の排出量削減を達成するために必要な設備投資は 40% 増加する (IEA, 2012c)。CCS が、化石燃料埋蔵量や既存のインフラの価値を維持しながら気候を護れる可能性がある、今日利用できる唯一の技術であることは明らかである。

その上、CCS は現在のところ、セメント、製鉄、化学品及び精錬等の産業部門からの排出量を大幅に減らす上で利用できる唯一の大規模緩和策である。今日、これらの排出量は地球の全 CO₂ 排出量の 5 分の 1 に相当し、これらの産業部門から発生する CO₂ の量は今後数十年間に増加する可能性が高い。これらの部門での更なるエネルギー効率の向上が緊急に必要とされているが、多くの産業プロセスからエネルギー関連でない排出があることも一因となり、CO₂ 排出量の削減の可能性は限られている。産業用途において CCS 技術の利用をしなければ、世界の気候変動に対する戦いへの重大な脅威となる (IEA, 2013b)。

再生可能エネルギーを優先する等、他の低炭素エネルギー源を好む社会もあるだろう。しかしこの選択は必ずしも費用対効果が大いとは言えず、場合によっては、特に現状で化石燃料が生産プロセスの本質的な部分を担っている産業用途においては利用できない。エネルギー効率の向上も、何らかの形で CCS に影響を及ぼす。例えば、発電効率の向上は、(均等化エネルギー原価を下げることによって) 発電部門におけ

る CCS によるエネルギー損失の影響を低減し、その経済性を高める(IEA, 2012f)。地球全体で必要とされる GHG 排出削減量の規模を考えれば、他の気候変動緩和策を CCS が全て代替できるものではないことを理解することは重要である。種々の形態の再生可能エネルギーや高効率石炭発電、産業施設における効率向上、需要側のエネルギー効率化、並びに新しい輸送技術等の低炭素技術は全て、必要とされる排出削減量において役割を担うであろう。これらの技術の役割は、それぞれの特性及び限界によって規定される。これらの技術の CO₂ 排出への対処力が、長期的な CCS の困難さのレベルに影響するかもしれない。

前回のロードマップ以降の CCS の進展

最初の IEA の CCS ロードマップ以降、CCS 技術及びこれを支援する政策は、期待されていたよりも遅いペースではあるが進展してきた。2009 年から 2013 年の間の CCS の進展は、CO₂ 回収技術に関する経験の蓄積と信頼性向上、貯留コストに影響を及ぼす要因についての知識の向上、技術的にアクセス可能な貯留資源の規模及び分布に関する分析の大幅な進展、多くの OECD 加盟国における CCS を確実に安全かつ効果的に実行するための法律の整備に関する著しい進展、並びに CCS が国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) のクリーン開発メカニズム (CDM) に含まれたことである。

CCS 技術に関する経験の蓄積と信頼性向上のほとんどは、年間数百万トンの CO₂ を貯留する 4 件の大規模 CCS プロジェクトの操業の継続、並びに、石油増進回収 (EOR) での利用向けに同じように大量の CO₂ を回収する、これ以外の少なくとも 4 件のプロジェクトから得られたものである。2009 年から 2013 年の間に EOR 向けに年間数百万トンの CO₂ を回収する少なくとも 2 件の新規プロジェクト、及び操業を開始した複数の比較的規模の大きい(数十 MW の発電設備又は年間数百 kt の CO₂)パイロットプロジェクト²から、更なる経験が得られた。加えて、大規模な回収貯留を実証するプロジェクト 7 件について前向きな投資判断が下され、2013 年現在、建設段階にある。

ボックス 2: CCS の実証の論理的根拠

多くの CO₂ 回収技術において、次のステップは実証への移行である。これは CO₂ 貯留においても同様であるが、産業レベルでの CCS と認められる流量並びに商業的条件の下で CO₂ の圧入・モニタリングが行われているサイトの数は、依然として限られている。実証からしか得られない経験を欠いては、解決できない技術的課題や不確かな費用の見積のため、CCS は商業的に投資の対象となる提案にならないだろう。

新しい技術は、パイロット段階からフルスケールの操業に一足飛びに移行するわけではない。ガスタービン業界では、高効率のブレード形状といった新設計をパイロットスケールから標準量産品に移行させるのに 10 年以上かかることがある。この間は、大型タービンの営業運転は行われるが、初期のプラントであるリスクを考慮した業務協定の下で実施される。例えば、設備の供給業者は、経験を積むとともにリスクを分散する目的で、こうしたプロジェクトの共同経営者になっている場合が多い。

従って実証は、実践による学びを促進する、リスクへの暴露が低い極めて重要な中間的技術段階であり、その結果として、投資家にとって確実に利益をもたらす性能保証のある市場で確たる技術が得られる。個々の実証プロジェクトは、商業操業とみなすのに十分大きな規模であればよい。これにより、市場や技術者に、設備性能や低炭素生産の市場、CCS バリューチェーンの統合、並びに貯留された CO₂ の挙動についての新たな情報がもたらされる。規模は一般的には、石炭発電所については少なくとも CO₂ 年間 0.8 メガトン (MtCO₂/年)、その他の排出の多い産業施設については少なくとも 0.4MtCO₂/年と考えられる(グローバル CCS インスティテュート、2013)。

² 2009 年(前後)から 2013 年の間に操業を開始した大規模パイロットプロジェクトの例: Schwarze Pumpe(ドイツ)、Mountaineer(米国)、Lacq(フランス)、Brindisi(イタリア)、Plant Barry(米国)、Test Center Mongstad(ノルウェー)、Compostilla(スペイン)、Callide-A(豪州)、Decatur(米国)及び Citronelle(米国)。

CCS 又は CCS チェーンの構成技術を実証するプロジェクトの 2007 年から 2012 年間の累積支出は、ほぼ 102 億米ドルに達した (IEA, 2013a)³。この総額のうち 77 億米ドルは民間資金によるものであり、この数字は多くの場合、産業プロジェクト全体に関するコストで、施設の排出量をコントロールするための CCS 要素だけを示すものではないが、それでもなお、これは CCS 技術への信頼が増しつつあることの表れである。更には、政府及び産業界からの研究開発 (R&D) 資金援助は、2006 年から 2011 年までの間の CCS 関連の特許申請数の複合年間成長率を 46% に引き上げた (IEA, 2013a)。

IEA の 2009 年版 CCS ロードマップで設定された短期のマイルストーンの幾つかについては、その達成に向けて、2009 年から 2013 年の間に、不十分とはいえ様々な面で進展があった (表 1)。

表 1: CCS の進展

分野	2013 年時点での進展
2009 年版 CCS ロードマップは、2010 年から 2020 年の間に 100 件の CCS プロジェクトを開発して、およそ 300MtCO ₂ /年を貯留する必要があることを強調した。	4 件の大規模 CCS プロジェクトが、圧入された CO ₂ が恒久的に保持されることについて信頼を与えるのに十分なモニタリングを行った。これらのプロジェクトは、合計で約 50MtCO ₂ を貯留した*。更に 9 件のプロジェクトが建設段階にあり、合わせて 13MtCO ₂ /年を回収・貯留する可能性を有している。9 件のプロジェクト全てが 2016 年までには操業可能になるはずである。このほかにも多数の大規模プロジェクトが操業段階にあり、CCS チェーンの一つ又は複数の技術を実証している。
2009 年版 CCS ロードマップは、ロードマップの普及に関するマイルストーンを達成するためには、2010 年から 2020 年の間に、OECD 加盟国は年間 35 億米ドルから 40 億米ドル、OECD 非加盟国は年間 15 億米ドルから 20 億米ドルを投資する必要があると提唱した。	2007 年から 2012 年にかけての、CCS を実証するプロジェクトの実際の累積支出は、ほぼ 102 億米ドルに達した。従って、支出は多額ではあったが、2009 年版ロードマップが目標としたレベルにはほとんど届かなかった。政府の補助金は、この総額のうち 24 億米ドルを負担した。この資金はほとんど全額が、米国及びカナダの (連邦及び州) 政府からのものである。加えて、同期間中に、CCS に利用できる資金が 121 億米ドル、公的資金から提供された**。
2009 年版 CCS ロードマップは、産業部門の CCS の重要性を強調し、特定の産業部門での積極的な行動を呼びかけた。	特にガス精製のように、顕著な活動が見られた産業分野があったにもかかわらず、多くの重要な産業部門では CCS の活動は全くといっていいほど見られなかった (IEA/UNIDO, 2011)。製鉄、セメント、石油精製、バイオ燃料及びパルプ・製紙部門のプロジェクトが不足している。計画がかなり進んだ段階にあるのは、製鉄所での実証プロジェクト候補が 2 件、及び石炭 - 化学品化/石炭液化プラントが 1 件のみである (グローバル CCS インスティテュート、2013)。

注: 特に断りのない限り、図表の内容は全て IEA のデータ及び分析からのものである。

* In Salah プロジェクトでの圧入は 2011 年 6 月に停止となった。将来的な圧入の戦略を検討中であり、総合的なモニタリングプログラムは継続されている。IEAGHG の Weyburn-Midale CO₂ モニタリング・貯留プロジェクトは 2011 年に終了した。但し Genovus 及び Apache が、CO₂ を多量に注入する EOR プロジェクトとして、それぞれ Weyburn 及び Midale の油田を操業し続けている。Snohvit プロジェクト及び Sleipner プロジェクトは、統合 CCS プロジェクトとして操業が継続されている。

** これらの政府補助金の中には、CCS を装備した発電設備が 100MW に満たない発電所に対するものもあるが、大規模な発電又は産業プロジェクトで、まだ建設段階に達していないもの又は一部の例では中止となったものに対する補助金もあると思われる。

³ この合計額には CCS を装備した発電所で設備容量が 100 メガワット (MW) を超えるもの、及び CCS の産業用途では全ての規模のもので、2007 年から 2012 年末までの間に建設中又は操業中だったものへの支出が含まれる。民間資金の構成比には、EOR 向けに CO₂ を供給する回収プロジェクトに関する多額の支出が含まれており、こうしたプロジェクトの中には、圧入された CO₂ が恒久的に保持されることを実証するのに十分なモニタリングを行っていないと思われるものもある。

表 1: CCS の進展(続き)

分野	2013 年時点での進展
<p>2009 年版 CCS ロードマップは CO₂ の輸送・貯留についての展望を示した。これは CO₂ の排出源、シンク及び貯留資源の分析に始まり、次いで 2020 年までにベストプラクティスガイドライン並びに安全規則を作成し、開発された貯留サイトにつながるパイプラインネットワークの展開へと至るものであった。</p>	<p>技術的にアクセス可能な貯留資源の規模と分布、貯留コストに影響する要因に関する理解、並びに地層貯留のベストプラクティスの提言及び規格の作成については、大幅な進展が見られた(CSA, 2012; DNV, 2009)。国際標準化機構(ISO)も、CCS の一連の国際規格を策定するプロセスを開始した。しかし、将来必要とされる規模の CCS の普及を支えるためには、CCS チェーンのこれら二つの要素を発展させるためにさらに多くのことを成さなければならない。</p>
<p>全ての国において 2020 年までに包括的な CCS の規制枠組みを構築し、2012 年までに CO₂ の越境移動に関する法的問題を解決することが、規制に関する重要なマイルストーンとして 2009 年版 CCS ロードマップで特定された。</p>	<p>幾つかの OECD 加盟国(例えば欧州、米国、カナダ、豪州では)、CO₂ 貯留の安全で効果的な実施を保証する法律の策定に関して、重大な進展が見られ、また下位法令を通して、その枠組みの各側面の改良が続けられている(IEA, 2012d)。南アフリカといった CCS の実証を計画するその他の国々では、CCS の包括的な規制につながるプロセスに着手している。国際法の分野では、北東大西洋の海洋環境保護のための条約(Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic)(OSPAR 条約)の 2007 年改正が 2011 年に発効した。しかし、ロンドン条約 96 年議定書の 2009 年改正は、まだ十分な数の署名国政府が批准していない。また重要な政治的進展として、CCS が国連気候変動枠組条約の CDM 活動として、関連する様式と手続きと共に認められた。</p>

注:特に断りのない限り、図表の内容は全て IEA のデータ及び分析からのものである。

近年、回収した CO₂ を直接地層貯留する場所で商用利用することにより CCS の経済性を高める可能性についての関心が増している。これには、市民からの支持も押し上げる可能性があると考えられている。しかしながら、EOR での CO₂ 利用は別として、この分野での取組から有意義な結果は得られていない(ボックス 3)。十分な規模の CO₂ 利用を実現するという課題に加えて、(大気からの長期的な CO₂ の隔離でも、化石燃料の使用の代替によるものでも)公称の純排出削減量を定量化することは、必ずしも簡単ではない。このことは、このような用途のビジネスにとって重大な問題となる。

回収された CO₂ の利用により、CO₂ が大気から恒久的に隔離されることを実証できなければ、CO₂ を回収する者が気候政策の枠組みの中で経済的な便益を得られる見込みはない。従って CO₂ の利用者は、CO₂ 回収のコストを賄う金額を支払わなければならない、更には、相手方が CO₂ 回収に投資するのに十分な確実性を与えるために、長期的な契約に同意する必要があるかもしれない⁴。例えば藻類からの燃料生産のように、CO₂ の利用が化石燃料の利用に取って代わり、ライフサイクルの排出削減をもたらすのであれば、結果として生じるあらゆる経済的な便益は、CO₂ を回収する者及び利用者の中で、二重計算を避ける方法で分配する必要がある。これらの事項は、回収した CO₂ を燃料生産に利用することによる化石燃料の代替が、炭素への価格付け制度の中でどのような見返りを得られるのかを含め、各国政府及び事業者が慎重に検討する必要がある。

⁴ これと同様だが、炭素価格が存在し、その価格が CO₂ の回収及び輸送のコストよりも高い場合には、CO₂ の利用者は回収施設が支払う損失をまかなうために CO₂ の価格を支払わなければならない。なぜなら CO₂ は排出されたとみなされるからである。起こり得る別の事例としては、回収された CO₂ 流が地層貯留と利用との間で分割できる場合には、利用に向けた CO₂ の販売がその恒久的な貯留よりも魅力的になるよう、利用者は炭素価格以上を支払う必要があるかもしれない。

ボックス 3: 回収 CO₂ の利用

回収 CO₂ の利用は、CO₂ 地層貯留の代替案又はこれを補完し、回収 CO₂ の経済価値を高めることができるものとして提案されてきた。数多くの CO₂ の利用が知られているが、その多くは依然として小規模である。毎年 80Mt から 120Mt の CO₂ が、広範な用途向けに商業的に販売されている(グローバル CCS インスティテュート、2011; IPCC, 2005)。この中には、化学溶剤、コーヒーのカフェインの除去、清涼飲料水の炭酸飽和、肥料の製造が含まれる。これらの用途には、冷媒や溶剤のように、年間 1MtCO₂ (MtCO₂/年) より遥かに少量しか必要としないものもあるが、飲料産業の利用量は 8Mt/年である。単独での最大の利用は石油増進回収(EOR)向けであり、その消費量は 60MtCO₂/年を上回り、ほとんどが自然起源である(ボックス 5)。プラスチック製造又は化学品及び燃料向けの藻類養殖の増進等、新たに登場しつつあるその他の利用はまだ小規模であるか、技術的な成熟に達するには今後長年の開発が必要とされる。

炭素が私達の使うほとんどの商品や燃料の素となっているにもかかわらず、炭素の比較的豊富な供給源である CO₂ の化学的な利用は、依然として限られている。これは、CO₂ が不活性であり、通常はその化学結合を切断するには多量のエネルギーを要するからである。CO₂ を地下に封じ込めることのできる不活性で安全なガスにしているのも、この同じ特性である。CO₂ の転換に必要なエネルギーを低減する触媒の研究は、活発な分野である(Cole and Bocarsley, 2010; Centi ほか、2013; Peters ほか)。

主な問題は規模である。今日の CO₂ 利用を考えると、将来の潜在的な CO₂ 需要は、大規模な点排出源から供給される可能性のある CO₂ の総量に比べれば微々たるものである(グローバル CCS インスティテュート、2011)。鉱物の炭酸塩化及び CO₂ によるコンクリート養生には、建築材料内での長期的な貯留の可能性がある。しかし、2DS において回収された CO₂ が炭酸塩化に用いられた場合に発生する炭酸カルシウムの量は、今日から 2050 年までの間の世界のセメント需要の予想総量のほぼ倍に匹敵する。

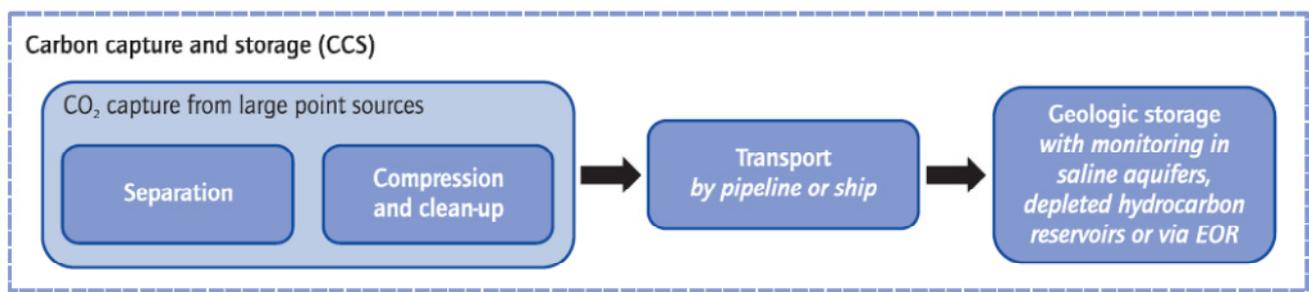
もう一つの問題は、利用された CO₂ がどうなるかということである。既存の商用利用ではほとんどの場合、CO₂ は恒久的に大気から隔離はされず、気候変動緩和の助けにはなっていない。尿素肥料に用いられる炭素は、植物のライフサイクルの間に大気に戻り、CO₂ から製造された燃料は燃焼時に炭素を放出する。一方、アルミニウム産業におけるボーキサイト残渣の炭酸塩化やモニタリングされている EOR 操業といった、CO₂ が大気から隔離されたことを検証できる CO₂ の利用は、CCS として分類できる。

回収、輸送、貯留及び統合プロジェクトの現状: CCS のスケールアップは準備が整っている

CCS は、ガスの混合物(例: 発電所の排ガス又は CO₂ を多く含む天然ガス)からの CO₂ の分離、液体に似た状態(超臨界状態)への圧縮、適した貯留サイトへの輸送、及び天然の(又はエンジニアリングによる)封じ込めの仕組みにより CO₂ が保持され必要に応じてモニタリングされる地層への CO₂ の圧入を統合して実施することである。(図 1)。

本章では CCS 技術の現時点での状況を捉え、多くの既存技術が技術的に普及できる状態にあることを示す。本章は CCS の三つのプロセスである CO₂ の回収、輸送・貯留の現状を提示する。本章はまた、この三つの構成要素が現在までのところ、CCS プロジェクトの中でどのように統合されてきたか、並びに、これらの要素を統合された CCS プロジェクトに組み込む上で重要な政策と制度的枠組みの現状について、概略を述べる。

図 1: CCS チェーン



回収技術:十分に研究されているが費用が高い

どうすれば CO₂ を回収できるかは、本質的には、産業施設で CO₂ がどのように産み出されたかによって決まる。発電やその他の幾つかの産業プロセス(例えばセメント製造並びに精錬における流動接触分解)では、CO₂ は燃焼の産物であり、プラントから出る排ガスの混合物の中にある。この CO₂ の分離には、従来のプロセスの改変を必要とし、その改変はプロセスの追加による場合が多い。その他の産業プロセスの中には、CO₂ の分離がプロセスの必須部分となっているものもある。いずれの場合でも、分離した CO₂ から不要な成分(例えば水)を取り除き、輸送に向けて CO₂ を圧縮する追加段階がほぼ常に必要とされるが、今日その全ては商業的に実施されている。

CO₂ の回収方法は、CO₂ を分離できるようにするために生産プロセスを改変する必要性の有無、及び改変内容によって分類することができる。これらの方法を組み合わせて、ハイブリッドの回収経路を創り出すこともできる。

- **プロセス後の回収** CO₂ は生産プロセスの最終段階でガスの混合物(例えば燃焼排ガス)から分離される。この経路は発電用途においては燃焼後回収と呼ばれている。
- **合成ガス/水素回収** 水素、一酸化炭素及び CO₂ の混合物である合成ガスは、化石燃料やバイオマスから生成できる。CO₂ を除去することができ、後には燃焼可能な燃料や還元剤、原料が残る。純粋な水素か更なる排出削減のどちらかが必要な場合には、シフト反応により合成ガスを水素に変えると同時に一酸化炭素を分離可能な CO₂ に転換することができる。この経路は発電用途においては燃焼前回収と呼ばれている。

- **酸素燃焼** 高 CO₂ 濃度の排ガスを得るために、燃焼プロセスにおいて、空気の代わりに純粋な(ほぼ純粋な)酸素を用いる。酸素燃焼では CO₂ 分離のためだけの段階は必要ないが、空気から酸素を抽出するための最初の分離段階があり、これによってエネルギー損失が大部分決まる。
- **本来的な分離** 濃縮された CO₂ の発生は、生産プロセス(例えばガスの精製や発酵によるバイオ燃料の製造)に内在するものである。CO₂ が回収されない場合、発生した CO₂ は通常は大気中に排出される。

CO₂ の分離が生産プロセスに内在している場合は全て、CO₂ 回収プロセスは商業的に利用可能であり、一般的に利用されている。石炭焚発電といったその他では、CO₂ 分離プロセスはあまり進歩していないか、従来からのプロセスの大幅な再設計が必要である。本ロードマップでは、成熟した CO₂ 回収プロセスを伴う産業プロセス(「第 1 段階」)と、更なる技術開発と実証が必要な産業プロセス(「第 2 段階」)を区別している(表 2)。概して、第 1 段階の産業は発電部門よりも成熟しており、普及に向けた準備ができていますが、第 2 段階のものは発電部門に後れを取っている。

表 2: 発電(燃料別)及び産業用途(部門別)における CO2 回収経路

		合成ガス-水素回収	プロセス後の回収	酸素燃焼	本来的な分離
第 1 段階の産業	ガス精製	-	-	-	スートニング
	製鉄	直接還元製鉄 (DRI)*、製錬 (例: コーレックス)		-	DRI*
	精錬	-	-	-	石炭液化、石炭からの合成天然ガス 水素生成
	化学品	-	-	-	アンモニア/メタノール
	バイオ燃料	-	-	-	エタノール発酵
発電	ガス	ガス改質・複合サイクル	天然ガス複合サイクル	酸素燃焼	ケミカルループ燃焼
	石炭	石炭ガス化複合発電 (IGCC)	微粉炭焚きボイラ	酸素燃焼	ケミカルループ燃焼
	バイオマス	IGCC	バイオマス焚きボイラ	酸素燃焼	ケミカルループ燃焼
第 2 段階の産業	製鉄	水素還元	高炉回収	酸素燃焼高炉	-
	精錬	水素燃料の蒸気発生	プロセス加熱及び熱電併給 (CHP) からの回収	プロセス加熱及び CHP 酸素燃焼	-
	化学品	-	プロセス加熱、CHP、スチームクラッカー回収	プロセス加熱及び CHP 酸素燃焼	-
	バイオ燃料	バイオマス液化	-	-	高度なバイオ燃料
	セメント	-	回転炉	酸素燃焼炉	カルシウムループピング
	パルプ・製紙	黒液ガス化	プロセス加熱及び CHP からの回収	プロセス加熱及び CHP 酸素燃焼	-

凡例: 操業可能な CO₂ 回収プラントの現在までの技術的成熟度

■ 商用 ■ 実証 ■ パイロット ■ 実験室又は構想

* 回収方法は利用する DRI 技術による。

CCS のコストに関する研究によれば、大規模な実証が行われた後、2020 年代に建設される新設の石炭火力発電所では、石炭火力発電からの CO₂ を回収する 3 つの経路は全て、今日の技術を用いた場合と同コストになると推定される (IEA, 2011a)。石炭火力発電のコストは、CO₂ 回収の追加により 40% から 63% 増加し、現在の技術を用いる商用プラント (初期モデル) では、メガワット時 (MWh) 当たりおよそ 100 米ドルになる。しかし、これはまだ太陽光発電及び洋上風力発電のコストと同等か低いレベルであり (IEA, 2012)、需要に応じて電力を供給できるという利点がある。CCS を伴う石炭火力発電やその他の低炭素の選択肢と比較すると、CCS を伴うガス火力発電の相対的なコストは、天然ガスの価格に大きく依存し、その価格は石炭

よりも変動しやすい。ガス価格が比較的高いシナリオでは⁵、CCSを伴う場合には、33%増加して1MW当たりおよそ100米ドルになると思われる。CCSを伴う複合サイクルガス発電所の資本コストが比較的低いことは、低炭素ベースロード発電を提供するものとして、同発電所を電力市場で魅力的にする可能性がある(ボックス4)。

ボックス4：CCSとガス火力発電

石炭焚からガス焚発電への燃料転換は、地域によっては現在のガス価格が低いために、今のところは魅力的である。ガスはCO₂の発生量が少なく(石炭では発電量1MWh当たりおよそ800キログラム[kg/MWh]であるのに対し、400kg/MWh未満)、高騰する可能性のあるCO₂価格に対する保険になる。今日、ガス焚発電所は出力が変動する再生可能エネルギー電源が多いシステムにおいて調整用電源として利用し易いため、ガス焚電源への投資は石炭への投資よりも魅力的にもなり得る。ガス焚発電所は資本集約率も低く、将来のガス価格や気候政策が不確定なことを考えれば、特に魅力的である。

しかし、天然ガスは炭素を排出しない燃料ではない。石炭からガスへの転換は短期的なGHG排出削減目標の達成を助け得るが、ETP 2012の2DSシナリオでは、2025年以降、全世界の発電の平均排出係数の目標は、ガス火力発電所の排出係数を下回る。ガス焚発電所を低排出の道筋に合致できるようにする唯一の方法は、その多くにCCSを装備することであろう。

CCSを用いてガス焚発電所からの排出量の85%以上を回避することは技術的に可能であることが、ノルウェーのMongstadでのプロジェクト等のパイロット規模のプロジェクトで実証されている。最も成熟度の高い手法は燃焼後回収である。CO₂の回収により、発電の送電端効率がおよそ57%から48%まで下がると推定されるが、発電した電力はそれでも競争力がある(IEA, 2011a)。コストはMWh当たりおよそ80米ドルから100米ドルで、CCSを伴う複合サイクルガスタービン(CCGT)プラント⁶は、均等化発電原価(LCOE)ベースで太陽光、風力並びにCCSを伴う石炭発電所に対する競争力がある(IEA, 2011a)。

費用の見積りは、当然ながら、ガス価格及び負荷率の設定の影響を非常に受けやすい。発電所の年間稼働時間が長いほど、CCSの構成要素を含めた発電所の投資を回収するのに必要な電力価格は低くなる。逆に、ガス焚発電所が再生可能エネルギー電力の変動する負荷に対応するのに用いられ、利用可能な時間の半分に満たない時間しか稼働しなければ、投資の回収期間は長くなって、投資家への魅力は小さくなる。2DSでは、2050年にはガス火力設備の20%がCCSを装備している。一般に、低負荷率で稼働する設備にはCCSを装備しない。

従って、世界が(又は特定の地域が)最大でも2°Cの気温上昇に向けて努力するのであれば、CCSを伴うガス焚発電所は、2030年代には魅力的な有望投資候補になり得る。2050年までには、一時的なピーク電力を賄うだけのもの以外の全てのガス焚発電所が、CCSを装備しなければならない可能性が高いであろう。

但し、技術の向上に向けた研究開発並びに設備の増加に伴う学習曲線の両方の結果として、回収設備を備えた発電所の資本コスト及び効率性は改善すると思われることには留意する必要がある(McDonald and Schrattenholzer, 2001; Rubinほか, 2007; Jones, McVey and Friedman, 2012)。

⁵ 米国ではギガジュール当たり7.40米ドル。

⁶ 今日のガス焚発電所は、おおむねCCGTである。

CO₂の輸送は CCS のうちで技術的に最も成熟した工程

パイプラインによる CO₂ の輸送は既知の成熟した技術であり、米国の 6,000 km を超える CO₂ パイプラインから重要な経験が得られている。限定的とはいえ、ノルウェーの Snøhvit プロジェクトによる沖合パイプラインを用いた CO₂ 輸送の経験もある。流体のパイプライン輸送に関する既存の技術規格(例: ISO 13623 及び ASME B31.4)を補足する CO₂ パイプラインの設計と操業の手引きが 2010 年に公開された(DNV, 2010)。CO₂ は、少量ではあるが船舶でも輸送されている。近年、船舶による CO₂ 輸送の技術的な要件及び条件に関する理解が高まってきている(例: Decarre ほか, 2010; Chiyoda Corporation, 2011)。

ETP 2012 の 2DS に描かれている規模の CCS の普及を達成するには、CO₂ パイプラインネットワークを国境を越えて船舶輸送インフラ(一時貯留及び液化の施設)までつなぎ、低コストの貯留場所にアクセスできるようにする必要がある。主な課題は、排出源からシンクへの輸送を最適化する、CO₂ 排出源のクラスターとパイプラインネットワークについての長期戦略を策定することである。この点に関しては、政府主導の国レベル又は地域的な計画作りが求められている。

CO₂ 貯留は実証されてきたが、更なる経験が大規模で必要

CO₂ の地層貯留は、一般的には地下 1km から 3km に位置する適切な地層への CO₂ の圧入を伴う。また、圧入した CO₂ のその後のモニタリングも必要とされる。適する地層としては、塩水帯水層、枯渇油ガス田、CO₂ を多量に注入する EOR の可能性がある油田、並びに採鉱できない炭層で炭層メタン増進(ECBM)回収の可能性があるもの等がある(図 2)。その他の種類の地層(例えば玄武岩)での貯留、並びにガス増進回収や地熱回といったその他の目的での貯留は、調査が盛んなテーマである。

図 2: 貯留の概要



出典: グローバル CCS インスティテュート、2013

地層貯留の基礎的な物理的プロセスや工学的な側面はよく知られており、これは数十年に及ぶ実験室での研究やモデリング、類似のプロセスによる操業(例: 酸性ガス圧入、天然ガス貯留、EOR)⁷、自然の CO₂ 蓄積に関する研究、パイロットプロジェクト、並びに現在操業中の大規模貯留プロジェクトに基づくものである。これらの経験は、サイト選定、計画及び操業が適正に行われれば CO₂ 貯留が安全に実施できるということだけでなく、全ての貯留層には違いがあり、詳細な個別の特性把握が必要であることを示している。

⁷ 類似するものに関する数多くの包括的な研究が行われている。例えば、Benson ほか(2002)、Benson and Cook(2005)並びに Bachu(2008)。

技術的に利用可能な貯留資源の国レベル又は地域レベルでの規模及び分布の把握については、進展が見られる(例えば、米国エネルギー省国立エネルギー技術研究所[NETL]、2010;小川ほか、2011;南アフリカ地球科学研究所、2010;Vangkilde-Pedersen ほか、2009;炭素貯留タスクフォース、2009;ノルウェー石油管理局、2012)。しかし、国又は機関は概して、CO₂貯留資源の推定に独自の手法を用いるため、これらの推定は簡単に比較できるものではない。従って、法域規模又は全国規模のCO₂貯留資源評価が確実に相互比較でき、また地球全体のCO₂貯留資源の意味のある評価を行うために整理できるようにすることが重要である(IEA, 2013c)。

こうした概括的だが極めて有用な評価以外では、具体的な貯留サイトを特定しようとする世界各国の取組の現在のレベルは、CCSを迅速に普及するには不十分である(IEAGHG, 2011a)。適切なCO₂貯留資源の探査は、特定のサイトが不適であることが判明するというリスク(石油産業の業界用語で言う「枯れ井戸を掘る」リスク)を伴う活動である。今日、CO₂の貯留に適する孔隙の発見に対する見返りは小さい。産業界には、広範囲の費用のかかる探査作業を実行するインセンティブはなく、また政府は概してこうした調査の委託には積極的ではない。とは言っても、大規模な排出源からのCO₂回収速度に見合う速さでCO₂の圧入を受け入れられる具体的な貯留サイトがあるかどうか、CCSの普及を制限する可能性がある。

CO₂貯留に適する地層は、適度な数の坑井を通じ、許容できる速度で、希望する量のCO₂の圧入を可能にするのに十分な容量及び圧入性を有している必要がある。更にその地層は、このCO₂(及びその地層に元々あった塩水)が大気や飲用地下水の水源、その他の地表下の影響を受けやすい地域に達するのを防げなければならない(Bachu, 2008)。加えて、他のCO₂貯留サイトや石油・ガスの操業、地熱の採熱等の、地表下のその他の利用との相互影響の可能性も考慮しなければならない。CO₂貯留の主要な技術的課題の一つは、今日の地表下からの石油やガスの採掘と同じような速度で、地層がCO₂の圧入を確実に受容できるようにすることである。

貯留の可能性や貯留地の特性は、回収・輸送インフラの普及コストや配置パターンに大きく影響するであろう(Middleton ほか、2012)。地域によっては、貯留がCCSの普及の速さを決定するCCSバリューチェーンの要素となることが考えられる。初期のサイト特定から、新たな塩水層がCO₂貯留に適格とされるまでに、一般的には5年から10年かかることが経験から示唆されており、場合によっては更に長期間を要する。枯渇油ガス層を用いるプロジェクトやEORによる貯留を行うプロジェクトでは、この事前の所要時間は短縮されるかもしれないが、貯留容量は通常は限られる(CSLF, 2013)。貯留のコストは回収のコストよりも遥かに低いと考えられているが、既存プロジェクトから得られた教訓は、貯留サイトの開発には、何年もの時間と、多くの場合、リスクを伴う数億ドルの資金を準備しなければならないことを示唆している(Chevron, 2012)。

地層は多様でサイトごとに特徴が異なるため、地層貯留のコストやパフォーマンスについて一般論を述べるのは難しく、地層貯留に付随するリスクについても多少そのような面がある。しかし、操業中のプロジェクトからの経験や貯留に似た活動、並びに研究によれば、地層貯留に伴うリスクは、慎重な貯留サイトの選定や、貯留中及び貯留後の徹底したCO₂の挙動のモニタリング、並びに修復活動に関する明確な計画によって対処することができる。適切な貯留サイトの選定は貯留リスクへの対処の第一歩であるため、慎重な分析をもって適切に行うことが特に重要である。

法や規制の枠組みは⁸、CO₂の地層貯留が安全かつ効果的で、天然資源が有効に利用され、貯留サイト及び付随するリスクがサイトの閉鎖後に適正に管理されることを保証する上で重要である。加えて、地層貯留のある面を適法とする(例えば、地層貯留を目的とする地表下の利用が現在禁止されている場合)ためにも、法や規制の枠組みが必要かもしれない。CO₂貯留の法や規制の枠組み策定の第一歩は、取り巻く環境を理解することである。例えば、石油やガスの探査の歴史がある国々のほとんどは、CO₂の地層貯留のニーズを満たすように改変できる規制を多数有している。多くのOECD加盟国は、既にCCSを組み込むために自国の法的枠組みを検討・調整する行動を起こしている(表3)。加えて、各国政府は、(例えばアルバータ州が行ったように)包括的な規制の枠組みを構築すべきか、(例えば西オーストラリア州のように)全般的で

⁸ チェーンの全ての要素に、それぞれ別個の法的な問題があるかもしれないが、最も重要で新しい規制の分野はCO₂貯留である。

包括的な枠組みの策定を進める一方で、限定的な実証を促進するためのプロジェクトごとの枠組みを構築すべきかを検討中である(IEA, 2011b)。しかし、どの手段を採るかにかかわらず、各国政府は、自国の枠組みが地層貯留の知識基盤の急速な進歩に後れを取らないようにしなければならない(Morgan ほか, 2012)。

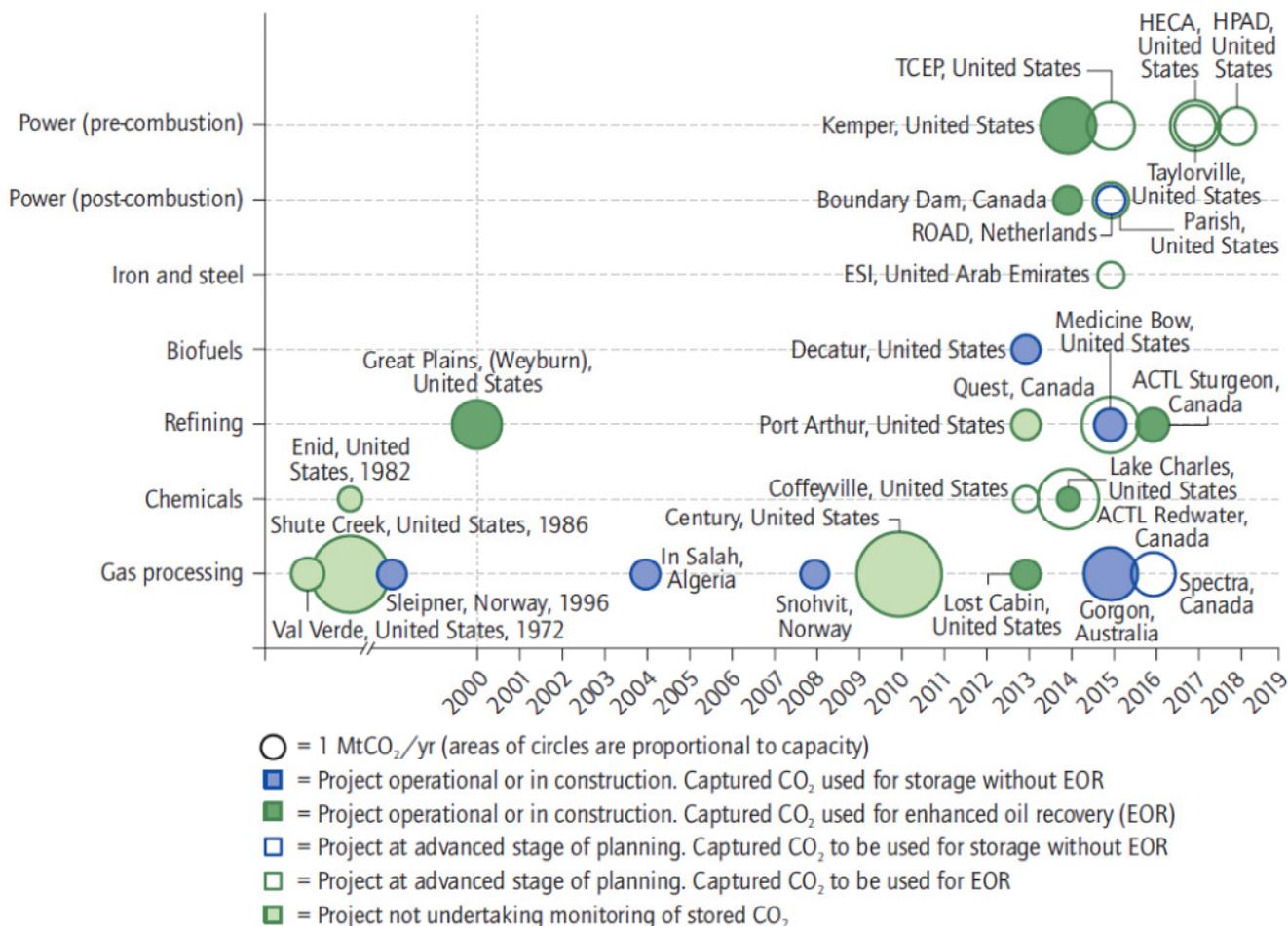
表 3: 国や地域の CO₂ 貯留の規制枠組みの例

オーストラリア	オーストラリアは 2011 年に、沖合貯留に関する連邦レベルでの CO ₂ 圧入及び貯留の枠組みの全ての項目を完了した。同国の三つの州では、陸域貯留を規制する州レベルの法律が施行されており(ビクトリア、南オーストラリア州及びクィーンズランド州)、また一つの州(ビクトリア州)では州内の CO ₂ 沖合貯留の法的枠組みも有している。加えて、2003 年バロー島法(Barrow Island Act 2003)は、西オーストラリア州の Gorgon プロジェクトに伴う CCS 活動を規制するためだけに制定されたプロジェクト限定の法律である。バロー島法の適用から得られた知識に基づいて、西オーストラリア州政府は現在、既存の 1967 年石油・地熱エネルギー資源法(Petroleum and Geothermal Energy Resources Act 1967)の改正によって、広範な CCS 規制を策定する過程にある。
カナダ	アルバータ州は 2010 年及び 2011 年に、自州の規制枠組みの重要な面を制定した。2011 年及び 2012 年には、同州は、自州の規制枠組みが全てのギャップ及び障壁に対処していることを確認するために、専門家による枠組みの検討を行い、規制の改正(例: 下位法令)等の枠組みの強化に向けた提言を策定した。隣接するブリティッシュコロンビア州及びサスカチュワン州は、包括的な規制枠組みの構築に向けた作業を行っている。サスカチュワン州は 2011 年に自州の石油・ガス保全法(Oil and Gas Conservation Act)を改正して、炭素貯留に関する州の規制権限の拡充及び明確化を行い、またブリティッシュコロンビア州の CCS 規制枠組みも、既存の石油関連の法令に立脚するものになる予定である。
米国	2010 年の終わり頃に、地下圧入規制(UIC)プログラムの一環として、地層貯留坑井の要件を創設する新たな規則が施行された。このプログラムは、貯留や処分のために地下に流体を置いておくための圧入井の建設や操業、認可、閉鎖を規制するものである。この新規制により、UIC では 6 等級と呼ばれる坑井の種類が創設された。その目的は、飲用の地下水源を地層貯留により起こり得る影響から守ることである。ほぼ同時期に、新たな補完的な規則が施行され、これにより温室効果ガス報告プログラム(Greenhouse Gas Reporting Program)の下で、地層貯留の操業(小区分 RR)並びに CO ₂ -EOR プロジェクト(小区分 UU)について報告の義務が設けられた。最近になって、CO ₂ 貯留の特性により、環境保護庁(EPA)は資源保全・回収法(Resource Conservation and Recovery Act: RCRA)の有害廃棄物規制から CO ₂ 流を除外することを提案した。また、七つの州で地層貯留のための州法を策定している。
欧州連合	2009 年に欧州委員会が CO ₂ の地層貯留に関する指令 2009/31/EC を導入した。この指令には、CO ₂ 貯留に関連する環境及び健康リスクの管理、認可の要件、CO ₂ 流の組成、モニタリング、報告、検査、是正措置、閉鎖時及び閉鎖後の義務、国への責任の移譲、並びに金融的保障に関する規定が含まれている。この指令はほとんどの欧州連合(EU)加盟国により国内法化されたが、多くの場合 EU の要件を完全には順守していない。この指令の完全な国内法化に向けたプロセスが続いている。

出典: IEA, 2012d に基づく。

数ある中でも、規制に関する三つの重要な課題は強調するに値する。第一に、ほとんど全ての国で、閉鎖後の管理に対処する方法、並びに責任の管理方法といった面がまだ解決していない。第二に、CO₂ による石油増進回収(CO₂-EOR)と規制下にある地層貯留との関係は、重要かつ異論のある問題であり、解決が必要である。そして最後に、規制の枠組みの策定や個別のプロジェクトの立地について一般市民が意見を提出できるようにする方法である(IEA, 2012d)。CO₂ 貯留資源の大きな可能性を有する国々が本ロードマップのマイルストーンを満たすためには、これらの法整備を直ちに開始する必要がある。

図 3:2012 年末時点で、操業中や建設中、計画が進んだ段階にある大規模 CO₂ 回収プロジェクト (セクター並びに貯留のタイプ、回収の可能性及び実際の開始日や開始予定日別)



注:「大規模統合プロジェクト」は、CO₂の回収、輸送・貯留を伴うプロジェクトで、石炭焚火力発電所では少なくとも年間80万トン(t)規模、またその他の高排出産業施設では少なくとも年間40万t規模のものと定義される。CO₂をEORに用いるプロジェクトで操業可能になっていないものは全て、圧入されたCO₂が恒久的に保持されるとの確証を得るに足る方法でモニタリングを行っている」と推定される。2017年以降に操業段階に入る予定のプロジェクトで、その他に注目すべきものとしては、米国のFutureGen 2.0並びに英国のWhite Rose及びPeterheadプロジェクトがある。これらはまだ、グローバル CCS インスティテュートのプロジェクトライフサイクルモデルに基づくライフサイクルの精査段階に達していない。

出典: グローバル CCS インスティテュート(2013)のデータに基づく。

キーポイント: 2012年までに操業可能になった大規模 CCS プロジェクトは4件しかないが、政府の資金援助プログラムによって、一連のプロジェクトが今後5年以内の操業に向けて進んでいる。

統合プロジェクトの進捗

CCSの短期的な実証や早期の普及を、長期的な排出削減の必要性和結びつける明瞭なインセンティブ政策がないにもかかわらず、20件を超えるCCSプロジェクトが現在、操業中又は計画の進んだ段階にある(図3)。従って、実証や早期の普及開始については明確な進展が見られている。しかしこの進捗は、求められている道筋を大幅に下回っている。

これらのプロジェクトの大半(約3分の2)は、CO₂-EORに用いられるCO₂の成熟した市場によって多少は推進されてきた。また、これらのプロジェクトはほとんどが、CCS実証プログラムからの政府支援もある程度受けている。下記のボックス5は、CO₂-EORを詳述しており、CO₂-EORの経験はCCS普及の進展の指標としては慎重に扱う必要があることを示している。

部品の組み立ては、依然として重大な課題

構成技術の多くは相当の規模で機能し、普及の準備ができていますが、上述したように、構成要素をフルチェーンのプロジェクトに統合することについては、限られた経験しかない。チェーンの各要素を統合する上での技術的な課題は明らかに残っているが、主な障害は政策的及び経済的な推進力の欠如である。一般市民の支持が得られず、技術に対する理解が乏しいことが事態を悪化させている。

ボックス5:CO₂貯留とEOR

石油の回収を増進するためのCO₂の圧入は、1970年代初頭から米国で商業的に実施されてきた。2010年には、世界中で140件近くのプロジェクトが開発中か操業段階にあった。プロジェクトの大半は米国で操業されており、1日にほぼ28万バレルの石油が生産されている(Moritis, 2010)。米国のプロジェクトでは60MtCO₂/年を超える量が圧入されており、その大半はプロジェクトが終了を迎えても貯留され続けるはずである。しかし、これらのプロジェクトの大部分は、自然の地層蓄積からのCO₂を用いており、人為起源のCO₂を用いているプロジェクトでは、CCSとして認可されるのに十分なモニタリング・測定・検証(MMV)に取り組んでいるものはほとんどない。注目に値する例外はカナダのWeyburn CO₂-EORプロジェクトであり、米国の石炭ガス化プロジェクトで産出されたおよそ2MtCO₂/年の貯留をモニタリング・検証している。

歴史的に、CO₂はEORプロジェクトに付随する最大の経費であり、それゆえに、今日操業中のプロジェクトのほとんどは、1バレルの石油を回収するのに用いるCO₂量(つまりは貯留量)を最小限に抑えるよう設計されている。高純度の排出源から人為起源CO₂を購入する費用を負担できるCO₂貯留プロジェクトもあるが(IEA/UNIDO, 2011)、CO₂-EORプロジェクトでの貯留を巡っては、多数の商業的な課題や答えの出ない問題がある(Dooleyほか, 2010; MIT, 2010; IEA and OPEC, 2012)。例えば、上記のように、従来のCO₂-EORプロジェクトでは、貯留が恒久的になる可能性が高いかどうかについて評価するための、十分なMMV活動を実施していない。CO₂の恒久的な貯留を目的としたサイトの選定・操業も行っていない。その上CO₂-EORでは、発生したCO₂の再利用の際に追加的なエネルギーを消費して、追加的な石油を生産するが、この石油は燃焼時に追加的なCO₂の排出を生じるため、CO₂-EORを伴うCCSプロジェクト(CCS-EORと呼ばれる)は、塩水帯水層にCO₂を貯留する同じようなプロジェクトよりも純排出削減量が小さくなる(Jaramilloほか, 2009)。

気候及びエネルギー政策並びに貯留規制により、こうした問題を緩和することができるかもしれない。しかし現在のところ、CO₂-EORがどれほど排出削減に貢献し得るかは不明である。この不確実性にもかかわらず、短期的にはCO₂-EORは、CO₂回収の実証コストを相殺する貴重な手段となり、CO₂輸送インフラの開発を推進し、一部地域ではCO₂貯留について学ぶ機会を提供することができる。

今日、CCSの明確なビジネスケースはなく、こうした事例を創出するために一層の努力が必要である。さもないければ、CCS普及の進展は、政府からの直接的な資金援助に全面的に依存し続けるであろう。長期的には、技術ニュートラルな排出削減メカニズム(例:CO₂排出の高コスト)が、排出削減を達成する上で競争力のある低炭素技術としてのCCSの普及を推進すると予想される。しかし現在は、キャップや価格等で表されるCO₂排出の制約は比較的緩く、将来の厳格さについては相当な不確実性がある。少数の例外を除き、現在の炭素価格はCCSを推進するものではない。

更に、市場は CCS 実証の社会的な利益(例えば知識の波及、長期的な協調や計画作り)に価値を見出しておらず、初期の採用者がこれらの利益をフルに確保することができないため、現在は民間団体が CCS に投資する上での商業的なインセンティブがほとんどない。従って各国政府は今日、インセンティブの枠組みを創設することによって、CCS を装備した施設への民間投資を推進することが必要である。その枠組みとは、短期的に、統合プロジェクトで CCS を実証するための資金を援助し、知識を共有し、長期的な計画作りを推進するとともに、長期的には実証を超えた普及に向けた適切なインセンティブを提供するものである。もちろん、CCS のインセンティブの枠組みは、強力で信頼できる排出削減政策により補完する必要がある。

CO₂ 排出への制約や、CCS を競争力のある排出削減の選択肢にし得る資金的インセンティブが欠如していることだけが、民間部門の投資への障壁なのではない。前章で指摘したように、幾つかの用途においては CO₂ 回収の設置や規模拡大に伴う技術的なリスクを巧みに管理しなければならない(Esposito, Monroe and Friedman, 2011)。

調査を行った貯留層が全て貯留に適すると認められるわけではないので、システムの貯留要素によりもたらされる重要な商業的リスクもある。相当な金額を特性の把握に費やした後不適だと判断されるものもあるかもしれない。操業中のパフォーマンスが予想よりも劣るもの(ノルウェーの Snøhvit プロジェクトが例)もあるかもしれない。その上、CCS チェーンの各部分の建設や操業に様々な関係者が数多く関わるので、これらのリスク全てを複雑な商業的な取決めを通して管理する必要がある。

回収及び貯留に伴う技術的なリスクは、実践による学習(例えば、より多くのプロジェクトの実施)、複数の排出源とシンクをつなぐことのできる輸送ネットワークの構築、並びに資源開発につきもののリスクを管理するための管理体制の構築(又は採用)を通して、徐々に削減することができる。とはいえ、決断力に欠ける政策立案がもたらす政治的なリスク並びに市場の不確実性は依然として残る。この状況は、金融業界に CCS の知識と経験が不足していること、並びに、長期的に見た低炭素エネルギー生産の総体としての競争力ではなく、むしろ CCS の追加的なコストが重視されることより、一層悪化している。各国政府、産業界及び金融業界は協力して、CCS への妥当な投資を促進する上でモデルとなるインセンティブの枠組みの重要点を(より広い排出削減の枠組みがある場合には、その一部として)特定して策定しなければならない。

一般市民の CCS に対する姿勢も重要な役割を果たす。陸域貯留を構想したプロジェクトには、一般市民の激しい反対に直面したものもある。また最新の研究によれば、社会の CCS に対する理解と受容性は国によってまちまちであり、認知度は一般的にどこでも低いことが示されている。この分野の研究のほとんどが、この点について更なる努力の必要性を訴えている(例えば P. Ashworth ほか, 2012; C. Oltra ほか, 2010; M. Prangnell, 2013)。

貯留についての最終判断を下す前に、重要な市民関与への取組が必要である。プロジェクトレベルで問題や課題を解決することは極めて重要だが、国/地域の気候変動緩和戦略の重要な要素としての CCS について、幅広いコミュニケーションが必要なことも明らかである。起こり得る健康及び環境リスク(貯留した CO₂ の漏出に伴うもの)、並びにこれを緩和する方策の説明についても、多大な努力が必要とされる。各国政府は、こうしたコミュニケーションにおける役割を強化しなければならない。

CCS の展望：今世紀半ばまでに、CCS はどこにいないければならないか？

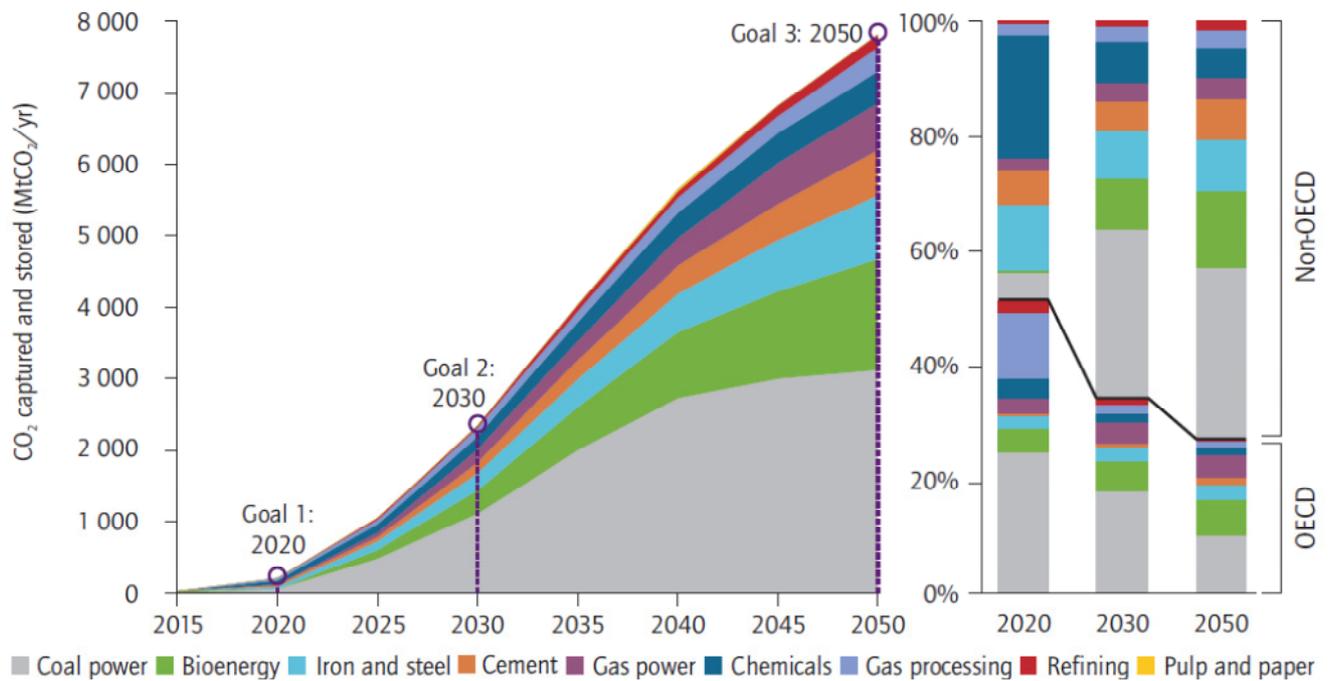
IEA の分析は、CCS があらゆる低コスト緩和シナリオにおいて不可欠な要素であることを示している。そのシナリオとは、長期的な地球の平均気温の上昇が 4°C よりも大幅に低く制限されるシナリオ、特に 2°C のシナリオである (ETP 2012 を含む)。その他の研究でも同様の結論が得られている (Edenhofer ほか, 2010; Edmonds ほか, 2007; IPCC, 2007)。

ETP 2012 の 2DS は、エネルギー部門における野心的な変革についての見解を示している (ボックス 5)。2DS では、CCS は発電及び産業用途の両方で広範に普及する (図 4)。排出削減の課題に対処するためには、全体としての CO₂ の回収・貯留のペースは、2013 年の数十 MtCO₂ から、2050 年には数千 MtCO₂ にまで増加しなければならない。種々の排出削減の選択肢の可能性及び相対的な競争力は、セメント製造や製鉄、類似製品の生産の分布と相まって、CCS の用途が地域ごとに大きく異なり、また時と共に大きく変化することを意味している。

2020 年までには、OECD 非加盟国 (例えば中国やアフリカ・中東の国々) での石炭から液体や化学品を産み出すプロセス、OECD 加盟国 (例えばカナダ、米国、並びに欧州 OECD 加盟国) でのガス精製といったプロセスにおいて、CCS は比較的低コストで普及できるようになるであろう。カナダや米国、欧州 OECD 加盟国での発電、並びに OECD 非加盟国での製鉄におけるコストの高い CCS の適用も、2020 年には着手する必要がある。2050 年には、全 CCS プロジェクトの 70% が、世界の工業成長の大半を占める OECD 非加盟国で実施される必要がある。CCS がこのように地球全体で大きな役割を果たすためには、かなり規模の大きい CCS 産業を創出する必要がある。

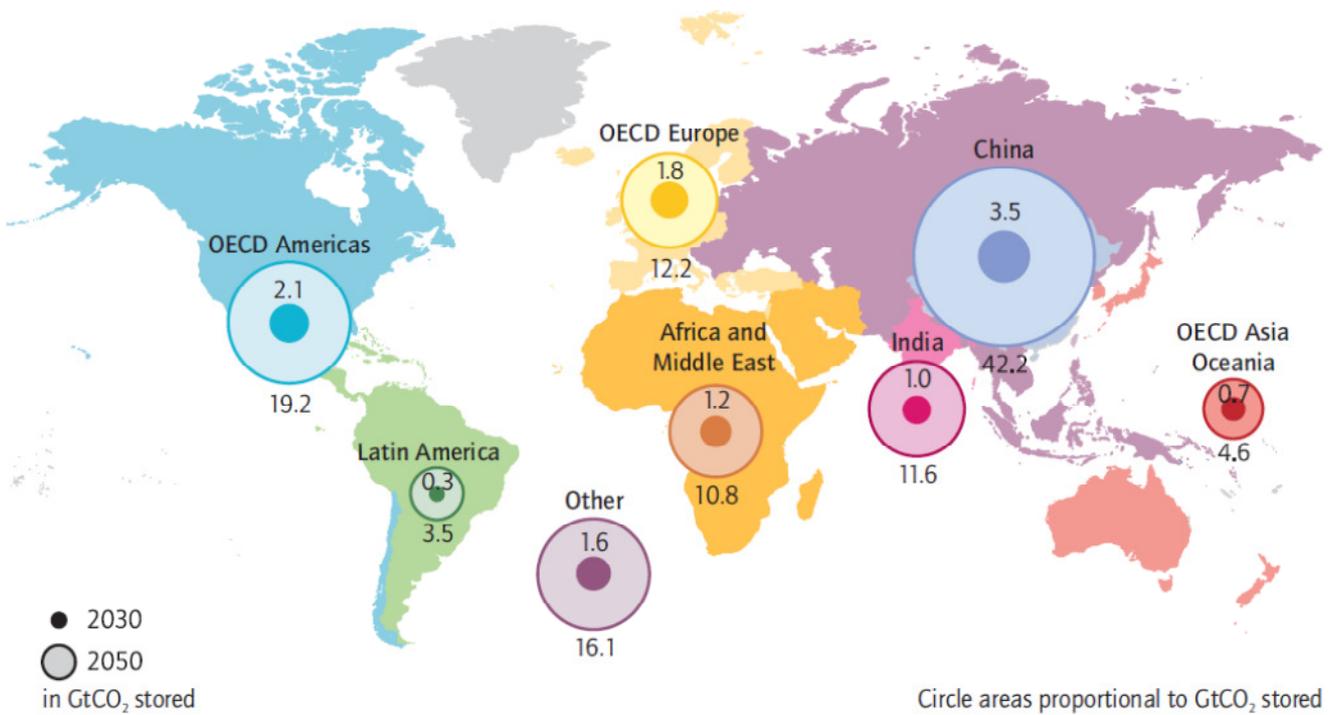
2DS では、化石燃料による発電は 2050 年までには現在のレベルに比べて相当に減少するとみているが、それでも 2DS において、CCS の単独で最大の適用対象は石炭火力発電及びガス火力発電である。2050 年までには、合計で 950GW を超える発電設備、言い換えれば地球全体の全発電設備の 8% が回収設備を装備するであろう。これには、全石炭焚設備の約 3 分の 2、全ガス焚設備の約 5 分の 1 が含まれる。それでもなお CCS の産業への適用は、2013 年から 2050 年までに回収・貯留される総量の 45% を占めると想定されるため、2DS、特に製鉄やバイオ燃料生産においても重要である。事実、OECD 非加盟のアメリカ諸国やその他の幾つかの OECD 非加盟国 (例えばインド) のように、産業用途の CCS が発電への適用よりも遥かに重要な地域もある。

図 4: 2DS における発電及び産業部門の CCS



キーポイント: 2DS は、発電や多数の産業に適用できる CCS 技術を急速に普及する道筋を示唆している。2050 年までには、全 CCS プロジェクトの 70% 超が OECD 非加盟国で実施される。

図 5: 2DS における、2015~2030 年及び 2050 年までの地域別の累積 CO₂ 回収量



This map is without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries, and to the name of any territory, city or area.

注: 累積 CO₂ 回収量の地理的分布は、大規模 CO₂ 点排出源の位置に合わせている。

出典: IEA, 2012c

キーポイント: 2DS では、2015 年から 2050 年の間に地球全体で 120GtCO₂ が回収され、適切なサイトに輸送されて貯留される必要がある。

2015年から2050年の間に、地球の全地域にわたって累積総量として約120GtCO₂を回収・貯留しなければならない(図5)。比較として、現在の天然ガスの産出量はおよそ年間2.5Gtである。従って2DSでは、2050年には、貯留容量は各国政府や民間企業にとって価値ある資産になるであろう。このペースでの貯留を促進するには、年間何十億トンものCO₂を地域内や更に遠くまで、回収施設と貯留サイトの間で輸送する大規模ネットワークが利用できるようになる必要がある。

2DSにおける、現在から2050年までの、CCS技術の割引前投資総額は3.6兆米ドルになる。融資の優先順位の大膽な変革を必要とするが、CCSへの投資は利益をもたらす。私達の分析は、発電部門の排出削減の選択肢リストからCCSが削除された場合、同じ排出制約を満たすために必要な設備投資は40%増加することを示している。

- 2020年までに、石炭火力発電、ガス火力発電、ガス精製、バイオエタノール、化学品や精製向けの水素の生成及びDRI等の多くの部門にわたり、少なくとも30件のプロジェクトでCO₂の回収が成功裏に実証される。これは、現在、計画策定が進んだ段階にあるプロジェクトの全てが実現し、これ以外にも幾つかのプロジェクトが急速に進展して、年間50MtCO₂超の安全かつ効果的な貯留につなげることを意味している⁹。
- 2030年までに、CCSは、発電や工業において排出削減のために日常的に用いられ、セメント製造、製鉄用熔鉱炉、パルプ・紙生産、第二世代バイオ燃料並びに精製所及び化学品工場における加熱装置及び触媒分解装置等の産業用途において成功裏に実証される。このレベルの活動により、2,000MtCO₂/年を超える貯留につながる。
- 2050年までに、CCSは、世界中のサイトにおいて、発電や工業の適用可能な全てのプロセスで排出削減のために日常的に用いられ、年間7,000MtCO₂超が貯留される。

ボックス 6: ETP 2012 の 2DS 及び 6DS

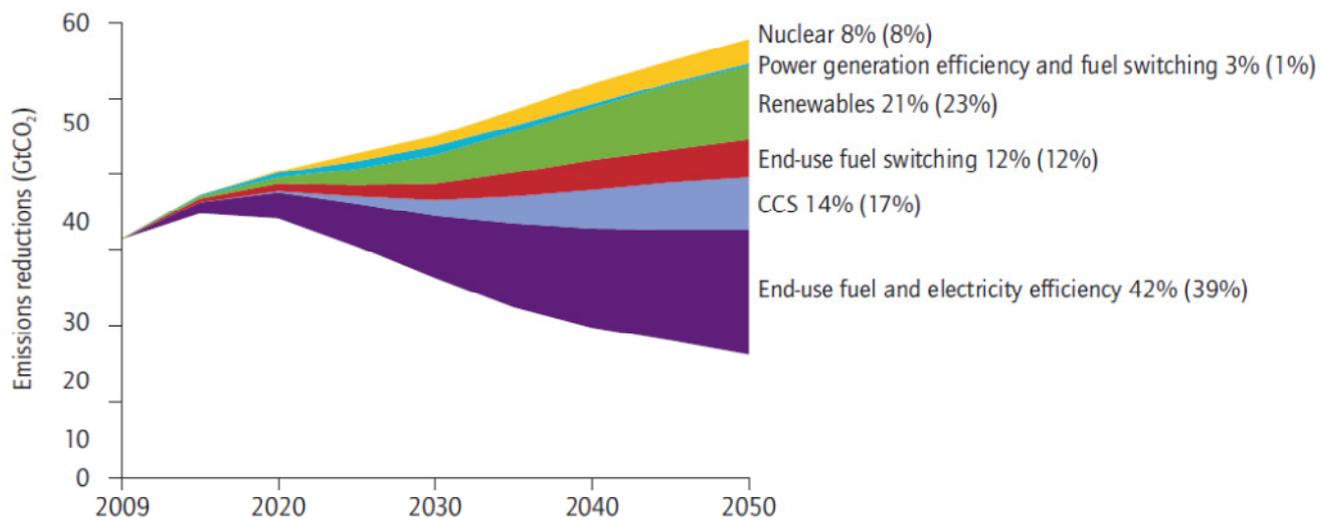
2DSは、地球の平均気温の上昇を2°Cに抑えられる可能性を80%確保するために、2050年までに、全エネルギー部門にわたって技術をどのように変えていけば良いかを記述している。2DSは、2050年までにエネルギー関連のCO₂排出量が(2009年の排出レベルと比較して)半分以上削減され、排出量がその後も確実に減り続けることを目標に据えている。

2DSは、エネルギー部門を変えることは極めて重要だが、それだけでは解決できないことを認めている。非エネルギー部門のCO₂やGHGの排出量も削減されて初めて、目標を達成することができる。2DSは、大枠ではWorld Energy Outlook (WEO)の2035年までの450シナリオと合致している。

ETP 2012は、6°C及び4°Cのシナリオも検討している。6°Cシナリオ(6DS)は、ロードマップのベースラインでもあるが、ほとんど現在の傾向の延長である。2050年までに、エネルギー利用はおよそ倍になる(2009年比)。大気中のGHG濃度を安定させる取組がないため、地球の平均気温は長期的には少なくとも6°C上昇すると予想される。6DSは、大枠ではWEOの2035年までの現行政策シナリオと合致している(IEA, 2012c)。下の図6は、2050年までにCO₂排出量を半分以上削減するというエネルギー部門の目標を満たす上で、種々の技術がどう貢献するかを示している。IEAはこれらの技術のほとんどについてロードマップを作成しており、CCSもその一つである。

⁹ 2020年には操業している予定のプロジェクトは恐らく、既に計画策定が進んだ段階にある。2020年の目標は、従って、こうした中で設定されている。2030年及び2050年の目標は、2DSの普及の展望に沿っているため、2020年から行動を加速することが求められるであろう。

図 6:6DS と比較して 2DS では、2050 年までの総排出削減量の 14%が CCS による



注: 括弧内の数字は 2050 年における割合である。6DSと比較して、例えば 14%は 2050 年までの累積排出削減量に占める CCS の割合、17%は 2050 年における排出削減量に占める CCS の割合である。

出典: IEA, 2012c

今後 7 年間の行動とマイルストーン: 普及のための条件作り

2020 年までのビジョン: 30 超の大型プロジェクトが操業中で、経験を得られ、コスト削減が可能になる。早期普及を推進するインセンティブ政策が実施されている。

2020 年の客観的なオブザーバーの目には、CCS は地球全体の多くの場所で大規模に操業中の目に見える実際的な技術である。GHG の排出削減を目指す地球全体の取組と、政府の CO₂ 排出削減戦略において CCS が明確に認知されることにより、一貫した政策が実施されているであろう。これらの政策によって民間部門には CCS プロジェクトへの投資に対する信頼感が生まれているはずであるが、それが 2013 年現在は欠如している。基本的に、これらの政策によって、普及に向けた部門ごとに安定した CCS 支援制度が創出されているだろうし、これを炭素価格が上昇するという信頼できる見通し(さもなくば排出に対する制約の厳格化)が後押しする。

2013 年現在操業中の 4 つのプロジェクトに加え、CO₂ を回収、輸送、貯留するプロジェクトが、2020 年までに 30 以上着工及び操業しているであろう。現在の 4 つのプロジェクトで得た経験と教訓は、新技術のために続けられている研究開発を補足するものであり、新技術が実現すれば、2020 年代に操業するプラントの資本費用及び操業費用を低減することが可能になる。それと並行して、企業が適切な措置を講じて後の段階で追加すべき CCS 技術を確実に整備できるよう、政策の枠組みが整えられているであろう。更に、CO₂ の地層貯留容量の開発に関して現在は民間部門のリスクと報酬がアンバランスであることを認め、各国政府が競争前の貯留サイト選別をスピードアップし、世界の各地域で、プロジェクト数を増やすためにプロジェクト開発スケジュールを短縮する措置を講じているであろう。先発大型プロジェクトの操業と並行して、CO₂ 貯留に関する総合的で透明性のある規制の枠組みが策定され、先発プロジェクトの教訓を取り入れて、地域住民の懸念を適切に認識し対処しているであろう。重要なことに、そうした規制の枠組みに基づいた CO₂ のモニタリングは、気候変動に対する行動の緊急性への理解の広がりとともに、人々の CCS の安全性や有効性への信頼に貢献しているであろう。

本章で述べる行動は達成可能であり、今後 CCS の普及拡大を実現するために短期間で実行しなければならない。行動は大きく 4 つに分けることができる。

- 統合 CCS プロジェクトにつながる政策や規制
- 貯留
- 回収
- 輸送

この 4 つの組合せは CCS を、現状では実証されてはいるものの商業的でない技術から、商業的に実証された裏付けのある、低炭素エネルギー生産の要素に移行させる上で必要なビルディングブロックである。2020 年以降は、化石燃料の持続可能な利用を可能にし、工業生産プロセスを再活性化し、危険な気候変動の回避に役立つものとして、社会は益々 CCS に依存できるはずである。各行動の詳細は付属文書 1 に示されている。

政策と規制の枠組みは CCS の普及に極めて重要

本ロードマップは以下の行動を推奨する	期 間
行動 1: プロジェクトへの民間の資金供給を促すため、CCS の実証や早期普及のための資金援助メカニズムを導入	2013～20 年
行動 2: 新設のベースロード用化石燃料発電設備を CCS レディとすることを事実上義務付ける国内の法律や規則並びに多国間資金提供に関する規定を整備	2013～20 年
行動 3: CCS 技術及びその普及が持つ重要性について一般市民及び関係者の理解を深める取組を大幅に拡大	2013～20 年
行動 4: 政府及び国際開発金融機関は、OECD 非加盟国における CCS の実証を支援する資金提供メカニズムを確保	2013～20 年
行動 5: 政府は、CO ₂ の輸送・貯留インフラの設計や操業で自らが果たす役割を決定	2013～20 年

これら五つの行動は CCS チェーン全体に関係する。つまり、技術の実証と特定用途における早期の普及、幅広い普及を区切る重要なゲートウェイを通る CCS 普及に向けた道筋を確立する政策措置に関係している。今後 7 年間で最も求められているのは、初期の大型 CCS プロジェクトのためのビジネスを考案して強化することである。これは、強力な政策上の措置とインセンティブを直ちに実行しない限り実現不可能である。本章で示した以上の行動は、実証プログラムが CO₂ 回収だけに注力し CO₂ 貯留に同等の関心を払わずにいるわけにはいかないことを前提としている。同様に、CCS の採用を企業に促すインセンティブも、CO₂ の輸送や貯留の商業モデルが不明確なままであれば、失敗に終わる可能性がある。CCS の普及は、CCS プロセスの中で最も進展が遅い部分と同じ速さでしか進まないものである。

行動 1: プロジェクトへの民間の資金供給を促すため、CCS の実証や早期普及のための資金援助メカニズムを導入。

現在の炭素価格決定メカニズムは、ほとんどが CCS の早期導入を促進するという点では成功しないと証明されている。従って、短期・中期的に経済全体での炭素価格を補完するためには、たとえ既にそうしたメカニズムが存在する場合でも、別のメカニズムが必要である。政府の役割は、明確に区別される 3 つの段階、すなわち CCS を装備した施設が具体的な支援なしに他の低炭素生産技術と競合する場合の実証と早期の普及、幅広い普及を支援し、各段階の間の移行を管理する政策を策定することである。直近でとりわけ重要なのは実証と早期の普及であり、早期の普及では、幅広い普及に役立つ必須の経験と知識を得られる。

世界の先発大規模 CCS 実証プロジェクトは、主に補助金を通じた公的支援の重要性と、短期的な市場インセンティブとしての CO₂ 利用の有用性も明らかにした。個々の国々が非常に多様な CCS 実証プロジェクトに資源を投入することはできないかもしれない。しかし各国政府には、活動を協調させて、全世界の実証プロジェクト群が対象となり得る広範な CO₂ 排出源や貯留地層を確実にカバーする機会がある。それに加え、初期の CO₂ 実証プロジェクトで得た教訓を共有するメカニズムを各国政府が創り上げ、その後のプロジェクトの設計改良に貢献することが重要である。全世界の初期の普及プロジェクト群で、発電部門の燃焼後技術や燃焼前技術並びに酸素燃焼技術、DRI(直接還元製鉄)による製鉄、精製や化学工場での水素生産、バイオエタノール、石炭からの液体製造及びガスの精製、水の消費を削減する技術(例えば乾式冷却システム)を網羅するためには、国々の間の協力を確立しなければならない。

短期から中期では、各国政府は十分な個別のインセンティブメカニズムを通じて CCS の普及を促すことにより力を注がなければならない。このような政策としては、以下が考えられる。

- 学習コスト(商業化前の技術を利用するために資本費用が高くなる初のプロジェクトを開発するコスト)の負担を一部分担するための政府による直接の資金援助(補助金、投資税額控除、優先的融資、官民パートナーシップ等)。

- 電力価格へのコストの転嫁が、市場の協定や政治的・社会的理由で不可能な場合、限られた期間について操業費用の増加分を部分的又は全体的に賄う直接の操業支援(固定価格買取制度、生産税額控除、例えば証書等の購入を義務付ける再生可能エネルギー義務付け制度に類似したポートフォリオスタンダード)
- 炭素の漏洩や、同じレベルの GHG 対策への投資が義務付けられていない(又は何らかの GHG 対策を行うことが現状では義務付けられてない)競合相手との関係で、セメントや製鉄といった部門の CCS 付き産業施設が直面する可能性のある国際競争力の問題に対処するための支援ツール
- 初期プロジェクトの開発者の CO₂ 輸送パイプラインや圧入施設へのアクセスを容易にするインフラの整備とアクセスへの支援
- 可能な場合、普及促進のための CO₂ 利用に向けての既存市場の活用

国や自治体の中には、既に CCS への投資を促す政策を取っているところがある。研究開発や実証(RD&D)のための補助金や支援を与えて投資を「引き出そう」とする政策(例えば英国、日本、中国、米国、欧州連合、カナダ)の例や、性能要件や直接規制、高い炭素価格によって CCS に投資を「押し込もう」とする政策(例えばノルウェー、英国、カナダ)の例がある。幅広い考察と様々な実例が付属文書 3 に示されている。

CCS を支援する政策を成功させるには、例えば「ゲートウェイ」手法(ボックス 7)を採用して、時間をかけて政策を深化させる必要がある。この手法は、技術の状況や市場の成熟に政策が合うように、政策の変更を示す明確に定義されたブレイクポイントやゲートウェイのある安定した政策の枠組みを前提としている。これらの枠組みには組み合わせた政策が含まれ、個々の CCS プロジェクトに確実性を与えるであろう。

ボックス 7: CCS 政策の枠組み内で可能なゲートウェイ

柔軟性と確実性を両立させる解決法になり得るのは、政策深化の幅広いアーキテクチャとルールを確実なものにするために、安定した枠組みの中に政策を位置づけることである。安定した枠組みの中では、ブレイクポイントや「政策ゲートウェイ」は必要な柔軟性を与えることができる。これらは、①政策を次の段階に移行して良いか、いつ移行するか、②各段階の政策、③ゲートウェイをクリアできなかった場合に政府はどう対応するかのアウトライン、の三つの要素で構成されている。

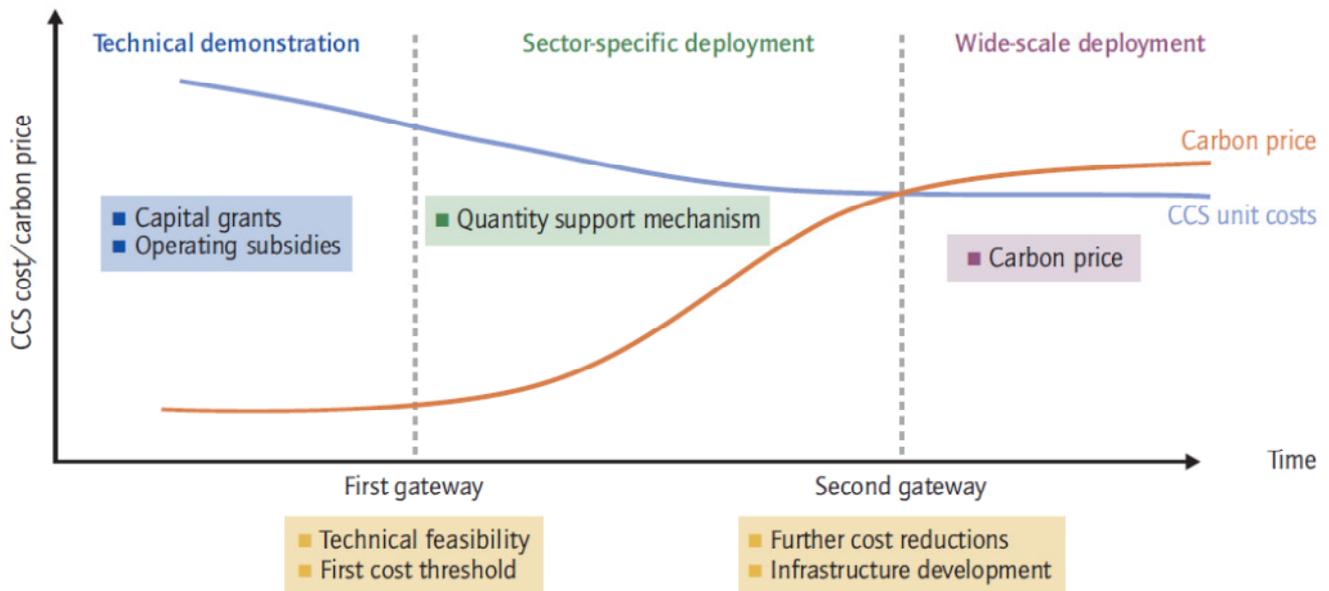
ゲートウェイを用いれば、政府のコミットメントと民間の資源を結び付けて(パフォーマンスの閾値といった)一定の目標を達成することができる。これにより政府は、その資源を広げ過ぎるリスクや、コストパフォーマンスの悪い義務を他人に押しつけるリスクを負わずに、資金を投入することができる。企業にとっては、政策のコミットメントが広がれば政策リスクが減少し、資産回収不能のリスクが減ることで、資金調達コストを軽減できるであろう。CCS 政策の枠組みの中に、多様なタイプのゲートウェイを設けることができるだろう。

第一の政策段階では、例えば公的な補助金や操業助成金で、十分な数のプロジェクトで CCS 技術の有効性を調査する。最初の数年間の操業期間が経過した後は、一定の基準を満たせば、恐らくは技術の有効性や地域市場で商業的競争力のある CO₂ の利用の開発に関する次の段階に、政策を転換できるかもしれない。

第二段階は、規模の大きい普及の期間になり得る。公的な補助金だけでは、単一の部門のみにおいても幅広い普及が実現できる可能性は低いため、間接的な補助金を伴う民間による資金提供に力点移るであろう。

CCS 技術が商用規模で完全に実証され、サプライチェーンが成熟すれば、費用対効果に優れた方法である限り、価格によって CCS を促す第三段階に進める可能性があるだろう。それを実現するのは、経済全体での安定した炭素価格かもしれないが、義務付け等の部門別の狭いやり方も利用できるかもしれない。

図 7: CCS 政策の枠組みにおける政策ゲートウェイ



出典：IEA, 2012f

行動 2: 新設のベースロード用化石燃料発電設備を CCS レディとすることを事実上義務付ける国内法や規則並びに多国間資金提供に関する規定を整備

CCS 設備を有する化石燃料発電所の発電コスト、特に石炭火力発電所の発電コストは、炭素削減義務を負わない発電設備に対して競争力を持ち得ず、しかも CO₂ 価格（又はそれと同等な制約）への期待も少ないため、CCS を考慮しない発電所の建設が（複数の市場で）驚くべき割合で続いている。全般的に見て、現在建設されている発電所は、回収設備の追設が必要以上に困難で費用が掛かるか、回収した CO₂ の輸送が問題になる立地にある。このような身動きの取れない状況が発生するのを避けるため、政府は法律や規則を通じて、ベースロード用化石燃料発電所を新設する際には、後に CO₂ 回収設備が追加できるように建設することを義務付ける必要がある（ボックス 8）。この要件は、例えば CCS 追設の資本費用の回収が困難と考えられる「ピーク対応」設備（例えばオープンサイクルガスタービン）や熱電併給プラントにまでは必ずしも拡大適用するべきではない。国際金融機関も、その融資方針にこうした要件を含める必要がある。

ボックス 8: CCS レディの発電と発電所への CCS 導入

2010 年の設置発電設備 1,600GW 超のうち、石炭火力発電所が毎年 9Gt 近い CO₂ を排出している。更に石炭火力発電所の数は直近の 10 年間で急激に増加しており、米国で石炭から天然ガスへの移行が進んだことで国際的な石炭価格が比較的安価であるため、当面は増加し続ける見通しである（IEA, 2012e）。こうした発電施設からの排出は気候にとって深刻な脅威である。減価償却が完全には済んではいない既存の発電所を早期に退役させることを避けながらも 2DS の炭素軌道内に留まるためには、場合に応じて CO₂ 回収設備を追設する方法がある（IEA, 2012c）。こうした発電所の改修は、場合によっては発電所を低炭素発電形式に代替するよりも低コストの CO₂ 排出削減オプションである（IEAGHG, 2011b）。

既設発電所への CCS 追設は複雑なプロセスであり、サイト固有の要素を数多く含み、しかも市場と技術によって異なる操業条件に大きく左右される。技術的要因の組合せが既設施設への CCS 追設の技術的魅力を決定するため、輸送・貯留サイトへのアクセスも非常に重要な意味を持つ（IEAGHG, 2011b；IEAGHG, 2007）。

改修を技術的に実行可能なものにし、将来の改修が持つ経済的魅力を高めるためには、設計及び建設の段階で何らかの措置を講じれば、将来の改修コストを低減し、それによって施設を「CCS レディ」にすることができる。CCS レディの施設とは、産業又は発電部門における大型の CO₂ 排出源であるが、規制

と経済面で必要な条件が整えば CCS 技術を導入する改修を予定しており、更に改修後の発電所が他の新設の CCS 装備発電所に対して可能な限り競争力を持つことのできる措置を講じた設計になっているものをいう。ここでいう措置には、回収関連設備を追設できる十分なスペースをサイトに確保できること、高性能の排煙脱硫装置の設置、冷却（つまり水）及び加熱（つまり蒸気）の必要量の増加に対応可能、所定の貯留サイト候補地に CO₂ を輸送できる適切な敷設用地を確保できること（IEA, 2010）等がある。しかしながら、CO₂ の輸送や貯留に関する案を評価することは、「回収レディ」の範囲を超えている。

CCS レディの状態は、発電所の建設と共に終了するものではなく、発電所が CCS 操業を開始するまで維持しなければならないものである。例えば石炭焚発電に関する最近のカナダ排出基準において一時的な免除を受けている発電所も、CCS レディ状態の維持を定期的の実証しなければならない（石炭焚発電からの二酸化炭素排出量削減規則 2012（Reduction of Carbon Dioxide Emissions from Coal-Fired Generation of Electricity Regulations, 2012））。

行動 3: CCS 技術及びその普及の重要性についての一般市民並びに関係者の理解を深める取組を大幅に拡大

世界の複数の地域では、CCS が一般市民並びに気候とエネルギーに関する一部の関係者から十分に理解されず、リスクが高いと認識されている。こうした懸念を打破し、CCS に対する支持を勝ち得るためには、関係する当事者全員が協力して努力することが必要である。政府もまた、国家のエネルギーと気候に関する戦略における CCS の役割を説明するとともに、CCS のリスク及びリスクへの対処方法を検討する責任を果たさなければならない。

国や地方、自治体も、政治的、社会的、文化的な伝統が許すならば、情報交換と公平な対話を促進するため、全国レベル及び CCS プロジェクトレベルの両方で重要な関係者と協力するべきである。産業界も、個別の CCS プロジェクトのメリットとリスクを地元住民に説明する責任を果たさなければならない。一般市民の容認を得るため積極的に活動することは、どのような CCS プロジェクトにおいても、更にその後の幅広い普及においても不可欠の要素である。

NGO や学界といった他の重要な関係者も、国内外の政策の展開においても世論の形成においても、重要な役割を果たすことができる。

行動 4: 政府及び国際開発金融機関は、OECD 非加盟国での CCS の実証を支援する資金提供メカニズムを確保

最少コストで実証プロジェクトを行う機会の一部と、普及サイトが最大となる可能性の一部は、OECD 非加盟国に存在する。UNFCCC は、CDM、国として適切な緩和行動(NAMA)及びグリーン気候基金といった国際的な資金提供メカニズムを複数作り上げ、途上国における気候変動緩和行動を促進し、途上国が国内状況と優先順位に応じて選択した措置を実行するのを支援してきた。これらの資金提供メカニズムは、CCS プロジェクト、技術研究及び CCS 関連政策の展開に適するように作り上げなければならない。

行動 5: 政府は、CO₂ の輸送・貯留インフラの設計や操業で自らが果たす役割を決定

輸送・貯留インフラがなければ、CCS の普及を規模拡大することは不可能である。CCS は今後数年で政策によって商業的な実行可能性を持ち始めることから、CCS チェーンにおける輸送・貯留という要素を発展させ、収益の流れを確保した産業活動に育て上げる必要がある。しかし、現在の CCS 開発の初期段階においては、通常であれば民間が担う活動に政府が参画して手を付ける必要があると考えられる。政府は CO₂ の輸送・貯留インフラの将来の所有権と操業に関する複数のオプションについて、並びに政府の協力が必要とされる範囲について、関係者と協議することが必要である。

ボックス 9: CCS インフラの開発における自らの役割を決定した英国政府の行動例

英国政府は同国の CCS ロードマップの一部として、CCS インフラ開発を支援するために自ら行う行動の種類と時期を決定した。同政府は、資金を出すに値することが明確に示されれば、将来の需要並びに地方ネットワークの発展を見据えた CCS 商業化プログラムを通じて、インフラの開発支援を検討するつもりだと発表した。英国政府の長期戦略はこうした CCS 商業化プログラムのほか、民間投資によって CCS インフラに資金を供給し、需要に応じて時間をかけインフラ整備を進めるというものである。更に同政府は、第三者が公平公正にインフラを利用でき、ネットワークの展開に向けて新規パイプラインを既設の貯留容量と相互接続できることを保障する規制権限も確保した。

また英国政府は、2010 年に行った CCS インフラ開発に関する会議の中で、CCS の普及にとって必要なパイプライン及び貯留容量の開発をどうすれば最も効果的に進められるか意見を求めた。政府が特に関心を寄せていたのは、(全国的又は地域的な)パイプラインと貯留のネットワークの建設を担う単一組織を設立することが、CCS インフラに対する投資の時期や規模、場所について英国が効果的な決定を下すことを容易にするかどうかという点であった。結果は決定的なものではなく、政府は将来、異なった制度設計を行うことができる。

出典: 英国 DECC, 2012

また、インフラの共同開発によって CCS に要する官民のコストを大幅に低減する可能性の有無を判断するため、各国政府が現在の産業生産及びその発展に関するパターンを検証することも重要である。更に産業部門で複数の利用者用の CO₂ 輸送・貯留インフラの出現を促すため、革新的な方法(例えばパイプライン設備への公共投資)を検討することも必要であろう。

CO₂ 貯留適地をタイムリーに特定することが最も重要

本ロードマップは以下の行動を推奨する	時間枠
行動 6: CCS プロジェクトのために貯留の探査や特性解明、開発を促進する政策を実施	2013~20 年
行動 7: 安全で効果的な貯留を担保し、(孔隙空間等の)天然資源の健全な管理を促し、貯留プロジェクトの開発に際して一般市民と適切な協議をすることを保障するガバナンスの枠組みを実施	2013~20 年
行動 8: 貯留資源に関する理解を深めベストプラクティスを強化する協調の取れた国際的な取組や方法論の開発と採用を継続	2013~20 年
行動 9: 長期の地層貯留の一環として CO ₂ -EOR を実施する場合には、貯留ごとに適切な規制体制での実施を担保	2013~20 年
行動 10: 大量の CO ₂ を大気から恒久的に除去できる新技術に向けた研究開発を支援	2013~20 年

希望する圧入速度で CO₂ を安全に受け入れて、圧入した CO₂ を保持できる適切な貯留地を特定することは、恐らく CCS に関する最大の課題であろう。この課題を更に難しいものにしていくのが、発電や産業プロセスにより地球全体で使用される化石燃料の量を大幅に削減する方法が見つからないのであれば、貯留すべき CO₂ が大量だということである。適切な貯留地層の評価や特定、特性解明を行うために行動が必要である。貯留資源については国内及び国際レベルで高い水準の評価が行われてきたが、今は焦点を個別の貯留地の特定及び選定に移行させることが必要である。各国政府は現在開発中又は計画中の回収プロジェクトのために貯留サイトの特定を開始するか、そのためのインセンティブを用意する必要がある。また CO₂ 貯留のリスクを投資家に対して低減するには、いくつかの法的問題、通りわけ長期的な賠償責任と受託責任に関するものを解決する必要がある。CO₂-EOR が CCS にとって早期の機会を生み出し、強力な気候規制がない場合でも CCS の経済性を向上させる以上、この種の CCS を慎重に検討し、通常は油田に適用される規制に加え、CO₂ 貯留としても規制を掛ける必要がある。そうすることで CO₂ 貯留のインセンティブが生まれ、CCS-EOR プロジェクトの環境面での完全性を確保することができる。

行動 6: CCS プロジェクトのために貯留の探査や特性解明、開発を促進する政策を実施

確認された貯留地を提供するには長いリードタイムと商業的リスクを伴うため、競争前の探査や評価プログラムに対する地域や国家による公的な資金提供を行う必要がある。IEA の推定によると、2020 年ロードマップの目標を達成するために必要な競争前の貯留調査作業のコストは、地球全体で合わせておよそ 10 億米ドルの規模に達するという。

国や地域によっては、既に潜在的な貯留地について詳細な評価を実施しているところもあるが、それ以外の国は、この点でなお具体的な行動を必要とする状況にあるかもしれない。各国政府は(産業側の適切な関係者と共に)、貯留の探査や特性解明の優先順位を確定するため、排出の集中する地域や国の全てにおいて、貯留データや知識の重大なギャップを再検討する必要がある。地下資源を国有にしている地域については、CO₂ 貯留資源をどのように配分するかを定めるプロセス(例えば探査区画に関する許認可手続)を政府が決定する必要がある。政府は、地下資源の管理計画を変更(場合によっては策定)して、CO₂ の貯留資源を含めてもよい。

行動 7: 安全で効果的な貯留を担保し、(孔隙空間等の)天然資源の健全な管理を促し、貯留プロジェクトの開発に際して一般市民と適切な協議をすることを保障するガバナンスの枠組みを実施

各国政府は CO₂ 貯留への障壁を特定するために、既存の法律や規則を包括的に見直して、現行の規制の枠組みが地層貯留の規制に適しているかどうかを判断する必要がある。更に政府は、安全で効果的な貯留を実現するため、産業界や学界、市民社会と連携して、許認可手続等、適切な法律や規則を策定する必要がある。

政府はまた、環境影響評価プロセスの市民参加要件(又はその他の適用される貯留固有の規制)が、一般的に受け入れられているベストプラクティスの原則と合致するように担保する必要がある。

未解決になっている長期的な賠償責任の問題は産業界に懸念をもたらし、CCS に投資することに経済的リスクを生み出している。各国政府は、長期的な賠償責任及び貯留サイトの受託責任を管理するための明確な枠組みを、官民の間での適切なリスクの分担を含め、構築する必要がある。

行動 8: 貯留資源に関する理解を深めベストプラクティスを強化する協調の取れた国際的な取組や方法論の開発と採用を継続

国内や地域の貯留情報の比較可能性を改善するため、各国政府並びに関係当局及び関係者は、CO₂ 貯留容量を推定し分類するための地球全体で共通の方法について合意する必要がある。その第一ステップとして、関係者はそれぞれの方法論を共有して互いの違いを理解し、管轄をまたがってデータを比較する際にそうした違いを考慮できるようにする必要がある。更に関係者は、関係する規格制定プロセス(例えば ISO TC265 や国際海事機関[IMO]のプロセス)に関連する業界や非政府機関、政府間組織の参加を促し、先発 CCS プロジェクトから得た知識を、新しく産み出される技術規格に反映されるように担保する必要がある。2006 年気候変動政府間パネル(IPCC)の GHG 国別報告に関するインベントリガイドラインには、CCS プロジェクトからの CO₂ 会計についての規定が含まれている。CO₂ 排出量の会計に関して CCS プロジェクトを地球全体で同様に扱うため、こうしたガイドラインを UNFCCC で義務化する必要がある。

企業や学界は、CO₂ 貯留プロジェクトの圧入終了後専用のモニタリング・検証手順も実証する必要がある。また企業や学界は、CO₂ や地層流体の貯留コンプレックスの外への想定外の移動を管理する技術を実証し、貯留層やキャップロックの特性を予測するツールを開発し改善する必要がある。それに加え、必要な場合には地層流体の生成と処理を含め、圧入圧力の蓄積を管理する最新の技術を進歩させ続けることが重要である。

行動 9: 長期の地層貯留の一環として CO₂-EOR を実施する場合には、貯留ごとに適切な規制体制での実施を担保

各国政府は、長期の CO₂ 貯留において EOR にどのような役割を負わせるかを決定することが重要である。EOR を長期貯留のための戦略として検討する場合は、関連する規制要件を定めなければならない。そして政府は、産業界と協議して、CO₂-EOR に適した MMV の枠組みを策定しなければならない。

行動 10: 大量の CO₂ を大気から恒久的に除去できる新技術に向けた研究開発を支援

CO₂ を原料として用いることにより効果的に貯留して、CO₂ 回収に向けた他のビジネスケースとなり得る CO₂ 利用の可能性が複数ある(ボックス 3 参照)。それは、例えば鉱物の炭酸化や CO₂ によるコンクリート硬化である。現在これらの技術は開発のごく初期段階にあり、その構想を証明し、規模を拡大して、結果として得られる建築資材の有効性と費用便益を実証するには更に研究が必要である。化学品や燃料における他の CO₂ 用途は、恒久的な CO₂ 貯留は実現できないものの、初期の個々のプロジェクトに更なる収益を与えて役割を果たし得る。これらの用途には藻類による CO₂ の転換のほか、合成天然ガスやメタノール、肥料、プラスチック、特殊化学品の生産等がある。研究の重点は、触媒や光触媒、電極触媒による CO₂ の還元であろう。もう一つ重要な研究開発テーマは水素のクリーン生産であり、これは恐らく CO₂ の製品への転換にとって不可欠になる可能性が高い。

RD&D による回収技術の向上とコスト低減を追求する必要

本ロードマップは以下の行動を推奨する	時間枠
行動 11: 技術開発の継続と、可能な中で最も効率の高い発電サイクルの利用によって、回収設備を備えた発電所からの発電コストを低減	2013~20 年
行動 12: CO ₂ 回収がまだ実証されていない産業用途において、回収システムをパイロット規模で証明	2013~20 年
行動 13: 回収コストと資源の消費を劇的に低減する新しい回収技術や発電サイクルに向けた研究を支援	2013~20 年

現在の回収技術は一部の用途では成熟しているものの、他の用途、つまり製鉄やセメント、精錬、化学品、パルプ・紙の部門における特定のプロセスでは、なお学ぶべき点が数多くある。更に、現在の相当に成熟した回収技術についても、エネルギー要件(例えば McGlashan and Marquis, 2007; Bhowan and Freeman, 2011)及び水利用(Zhai, Rubin and Versteeg, 2011)の観点からは比較的非効率的であるため、なお多くの改善の余地がある。CCS に関する技術開発の現状と必要性については、炭素隔離リーダーシップフォーラム(CSLF)が策定し、近く発表予定の CCS 技術ロードマップに詳しい(CSLF, 2013)。

政府及び(設備メーカーを含む)企業的意思決定者は、以下の行動を取ることで、費用の低減と改善された回収技術及び新たな回収技術の開発の推進に寄与することができる。

行動 11: 技術開発の継続と、可能な中で最も効率の高い発電サイクルの利用によって、回収設備を備えた発電所からの発電コストを低減

回収技術については、様々な技術改良が可能である。研究開発の取組により、CO₂ 回収の効率を改善してコスト低減につながる行動が特定されている。こうした改善点には、燃焼前及び燃焼後の回収に用いる溶媒の再生エネルギーの低減や、操作性を考慮した上での回収プラントとベースプラントとの熱的統合の改善、高濃度溶媒での燃焼後技術における腐食問題の管理改善、溶媒の劣化を抑制するためにアミンベースの溶媒を用いる場合の吸収装置への供給ガスの組成の最適化、劣化や操業費用を最低限に抑えるための排煙中の窒素酸化物(NO_x)と SO₂ 及び場合によっては酸素の濃度低減等がある。こうした改善は、政府や企業が支援する集中的な研究開発の取組や、経験に基づく教訓の共有、全ての当事者にとってコスト低減につながる研究努力の分担によって実現することができる。資格のある専門家に対する訓練も、新しい技法や

技術の開発や更新に役立つであろう。排ガス洗浄システムのプロセスに馴染みがない部門の排ガス洗浄システムのオペレータのために、規格化された訓練を開発する必要がある。

CCSを備えた発電所からの発電コストは、ベースとなる発電所の効率が高ければ低くなる。2012年、IEAはHELE発電所に関するロードマップを策定しており、HELEロードマップに示された行動を行う必要がある(IEA, 2012f)。HELEロードマップが特に求めているのは、300MW超の新設火力発電所全てにおいて、少なくとも超臨界技術を採用することである。

行動 12: CO₂回収がまだ実証されていない産業用途において、回収システムをパイロット規模で証明

パイロット規模の試験が、セメント窯でのガス洗浄や製鉄用溶鉱炉でのガス洗浄、蒸気や触媒による接触分解装置でのガス洗浄について必要である。

ガスリサイクルの溶鉱炉については、費用対効果の高い回収技術についての更なる研究が必要である。精製所や石油化学コンプレックスのCO₂排出源全体に対する排ガス洗浄の最適化も必要である。

高温ガス洗浄技術も更に改善する必要がある。酸素燃焼によるセメント生産についても設計を改善して、CO₂回収を追設しているセメント窯への空気の漏れを最小限に抑える必要がある。また高い操業温度に対する耐火性を実現するため更に研究を進める必要がある。酸素燃焼技法によって産み出されるセメントクリンカーの商業的実用化を証明しなければならない。

酸素燃料を利用する精製所や石油化学施設における流動接触分解や熱電併給の可能性を探る選択肢もあるかもしれない。

産業施設におけるパイロット規模のCCSプロジェクトは、(ノルウェーMongstadのパイロット施設と同様な)オープンアクセスの回収パイロット事業で行えば、最もメリットが大きい。公的資金によって開発したプロジェクトにオープンアクセスを採用すれば、幅広いピアレビューや知識の共有、プロセスの透明性によって学習曲線を加速できるかもしれない。

行動 13: 回収コストと資源の消費を劇的に低減する新しい回収技術や発電サイクルに向けた研究を支援

CO₂回収技術の多大なエネルギー損失とそれに関連する追加コストを軽減する新たなアプローチや手法は既に特定されているが、突き詰めて試す必要がある。例えば、吸着剤(つまり表面積の極めて大きい多孔性物質)を用いる革新的な排ガス洗浄プロセスや、ハイブリッド回収システム、並びに新たな再生法(例えば電気分解や電気透析)は、パイロット規模で試す必要がある。また酸素燃料ガスタービンといった酸素燃焼発電のための新たなプロセスも、パイロット規模で試す必要がある。

同様に、高温溶媒や固形吸着剤、膜、強化水-ガスシフト反応器といった、水素や合成ガスの生産(例えばIGCC)のための新たなCO₂分離プロセスを試す必要がある。セメント生産では、CO₂回収用の膜や固体吸着プロセスの適性を、低コストCO₂回収を備えた工業製品の新生産プロセスとともに、パイロット規模で試す必要がある。

CO₂ 輸送インフラの開発では将来のニーズを予測

本ロードマップは以下の行動を推奨する	時間枠
行動 14: 将来の需要中心地と CO ₂ 量を予測し、CO ₂ 輸送インフラの効率的な展開を促進	2013~20 年
行動 15: ロンドン条約 96 年議定書に基づく地層貯留のための CO ₂ の越境移動に関する重大な法律問題を解決	2013~20 年
行動 16: 法律規制をパイプラインと船舶輸送に適したものにす。	2013~20 年
行動 17: 経験から得た知識を共有して共通の方法論を編み出すことにより、パイプライン輸送のコストとリスクを低減	2013~20 年

毎年何百万トンもの CO₂ を回収サイトから様々な距離を特定の貯留サイトまで輸送するには、大規模なネットワークが必要なことは自明である。従って、輸送のネットワークとクラスターを今こそ計画して展開する必要がある。更に、パイプラインの立地や安全な操業、第三者のアクセス権に対応するため、各国は規則を整備する必要があるだろう。

行動 14: 将来の需要中心地と CO₂ 量を予測し、CO₂ 輸送インフラの効率的な展開を促進

今後の CO₂ 輸送を支える輸送インフラの展開に際しては、将来の様々な需要や状況を検討する必要がある。数多くの検討事項には、沖合貯留や、船積インフラの資本費用、将来のコストを最少化するための冗長化とルート選定がある。統合されたパイプラインネットワークの展開も検討する必要がある。各国政府は CO₂ 輸送インフラ展開の少なくとも最初の段階で、自らが果たすべき役割を決定する必要があるだろう。

行動 15: 地層貯留のための CO₂ の越境移動に関する重大な法律問題を解決

ロンドン条約 96 年議定書の附属書は、沖合地層貯留のための CO₂ の越境移動を可能にするために 2006 年に修正された。しかし、締約国によるこの修正事項の批准は難しいことが分かっている。従って、締約国は、CO₂ の越境移動を可能にするこの批准に向けた作業を続けていかなければならない。ロンドン条約 96 年議定書のこの修正事項が批准されない場合には、締約国は CO₂ の越境移動を可能にする別の手段(例えば条件付きの適用や締約国間での別個の合意)を検討することも必要であろう。

行動 16: 法律規制をパイプラインと船舶輸送に適したものにす。

インフラの立地を促進する法律や規則を、CO₂ パイプラインを含むように適応させなければならない。そしてパイプラインに関係する保健安全法律や規則を、モニタリング要件を含め、CO₂ 輸送に適切にすることを担保するとともに、CO₂ 輸送規則には市民参加の規定を盛り込まなければならない。各国政府は、輸送業者に関する市場規則を 2020 年までに整備しなければならない。

行動 17: 知識の共有と共通の方法論により、パイプライン輸送のコストとリスクを低減

CCS チェーンの中で CO₂ 輸送は最も成熟した技術ではあるが、なお改善は可能であり必要である。漏出時の CO₂ の挙動について理解を深めれば、適切で費用対効果に優れた緩和計画を策定することができるかもしれない。また国際規格があれば、輸送業界や CO₂ 輸送ルートのある国の政府にガイダンスや信頼を与えることができ、関係する業界に関連規格の策定プロセス(例えば ISO T265 や IMO プロセス)への参加を促すこともできるはずである。各国政府と産業界は、先発した CCS 実証プロジェクトからの教訓を今後の技術規格に反映させなければならない。

2020～2030年の行動とマイルストーン: 大規模な普及が加速

2030年までのビジョン: CCSは産業に成長し、大規模な普及が加速する。研究開発の継続と規模の経済によってコストは大幅に下がる。ビジネスケースが確固たるものとなり、民間投資を促進する。

2020年以降のCCSの普及の進捗を目にした2030年の客観的な観察者には、CCSは過去10年で爆発的に成長し著しく成熟した技術に映るであろう。2020年から2030年までの10年間で、CCSは新設の石炭火力発電所3基のうち2基に普及し、ガス焚やバイオマス焚の発電所では8基のうち1基がCCS付きになり、OECD加盟国と中国を中心にCCS装備の発電設備は数百ギガワットに達しているであろう。CCSを伴うバイオエネルギーとCCS装備のバイオ燃料プラントも、大気からのCO₂除去に重要な役割を果たし始めている(ボックス10)。更に、大量のバイオ燃料や化学品、水素の生産設備(精製時)とともに、世界全体のガス精製設備の3分の1近くがCCSを装備するであろう。ほとんどの回収プロセスが、既に試行し確立した方式(例えばアミン吸収)の改良版を採用している一方で、新しいプロセスがパイロット規模で試験中であり、(CO₂分離を本来的に備えた生産プロセス等の)一連の新技术が開発中である。

こうした成長を推進するのは、回収や輸送、貯留プロジェクトの開発にかかわる民間企業のための健全なビジネスモデルの構築である。CCSプロジェクトで肯定的な結果が出れば、一般市民の信頼を得て広く受け入れられるであろう。この10年間の前半には、ほとんどの用途でCCSへのインセンティブは、実証段階のメカニズムから普及初期(例えば量的コミットメントやポートフォリオスタンダード)に移行しているであろう。それと同時にCCSを専門とするサービス産業が生まれていて、個々のプロジェクト用の貯留方式の開発や孔隙空間の資源としての財務評価を行っているであろう。こうしたサービス産業はまた、何百億トンものCO₂貯留容量の探査や開発を行う。この10年間に、多くの地域で貯留規制が改正され、新たに得られた多くの知識が反映される。10年間の後半には、多くの場所にネットワーク化したパイプラインインフラが生まれ、それが毎年何十億トンものCO₂を輸送して、インフラ(例えば貯留サイト)の一部分の故障で生じる商業的リスクを低減しているであろう。

ボックス10: バイオマスエネルギー源へのCCSの組み合わせ

炭素回収貯留を伴うバイオエネルギー(BECCS)は、大気中からCO₂を恒久的に純減させる排出削減技術である。BECCSは、大気中の炭素を吸収したバイオマスをその成長サイクル中に利用することで、燃焼や発酵により生じて排出されたCO₂を地下に恒久的に貯留する。大気中のCO₂量の減少は、バイオマス利用の長所とCCSの長所の組み合わせによって生まれるものであり、最終的な目標は、化石燃料の使用によって排出されるよりも多くのCO₂をバイオマス利用によって貯留することである。

BECCSには大きな可能性がある一方、バイオマスの持続的生産の確保が、達成できる排出削減のレベルを大きく左右して、結果として生じる排出量が「どれほどマイナスになるか」を規定するため、バイオマスの持続的生産を確保することが重要である(IEAGHG, 2011c)。BECCSは幅広いバイオマス変換プロセスに応用でき、相対コストという観点からも魅力的かもしれない。その用途は、バイオマス混焼やバイオマス専焼の火力発電所からのCO₂の回収からバイオ燃料生産プロセスまで多岐にわたる。しかしながら、現在までのところ、BECCSはまだ十分には認知や実現はされていない。この技術を支援するインセンティブ政策は、排出量に対して達成できる純影響の評価に基づくものである必要がある。IEA(2011c)は、BECCSの炭素に対する全ての影響を、最大限にUNFCCC及び京都議定書に基づく炭素の報告・会計システムに十分反映させることを勧告している。BECCSが達成可能なライフサイクルの排出回避を明確に理解することが、的を絞ったBECCS支援に必須の前提条件になる。BECCSは、他のCCS適用の排出量削減と比べてBECCSが達成できるライフサイクルでのマイナス排出量を反映した特定セットのインセンティブに値する。

出典: IEA, 2012c

我々のビジョンでは、2020年代には、この10年間(すなわち2020年まで)に比べてCCSの普及が産業規模で大幅に進行すると予測している。このビジョンを実現するには、多くの行動を行う必要がある。以下の

行動の多くは 2020 年の時点でしか適用できないかもしれないが、2020 年より前に下される判断に影響を及ぼすと思われるため、CCS に関する協調の取れた政策の枠組みの一部として現時点でこれらを検討することが重要である。CCS の適用対象となる原資産（例えば石炭発電所、製鋼所）は数十年に及ぶ寿命を持ち、何年も前から事前に計画することが求められる。以下に列記する具体的な行動に加え、2020～2030 年の成功は、2020～2030 年の CCS の急速な普及の条件を整備するための 2013～2020 年の行動の成功に掛かっているであろう。

本ロードマップは以下の行動を推奨する	時間枠
行動 18: 各国政府は、実証段階の支援から幅広い普及のためのメカニズムに移行	2020～30 年
行動 19: OECD 非加盟国の政府は、地球全体の CCS 実証プロジェクトの経験に基づき、普及促進のための適切な支援メカニズムを構築	2020～30 年
行動 20: 各国間の RD&D 協力を拡大し、CO ₂ 回収を備えた化石燃料発電所の発電コスト及び資源フットプリントを更に低減	2020～30 年
行動 21: CCS 装備の生産コストを低減する革新的な新プロセスへの研究開発を促進	2020～30 年
行動 22: システムの故障やボトルネックからの利用者のリスクを低減するため、統合された輸送・貯留ネットワークの展開を促進。CO ₂ の長距離・越境・複合輸送を可能に	2020～30 年
行動 23: 貯留と貯留規制のベストプラクティス策定に関しての学習と改善を継続	2020～30 年
行動 24: 地層貯留に向けた商業環境を醸成	2020～30 年

行動 18: 各国政府は、実証段階の支援から幅広い普及のためのメカニズムに移行

政策の枠組みを発展させ、初期の CCS 実証プロジェクトへの的を絞った支援から、固定価格買取制度やポートフォリオスタンダードといった部門別の幅広い量的メカニズムに移行できるようにする必要がある。こうした政策は、炭素の価格付けを補って、CO₂ 回収への民間の資金提供を後押しする。支援メカニズムは、この期間の早期に、技術の習得から CCS による大幅な排出量削減の達成へと重点を移し始める必要がある。

ロードマップでは、この期間までに地球全体の排出量削減の枠組みが機能することになっており、それによって、GHG 排出量削減目標の達成を促すメカニズムやツールとともに、長期の野心的な GHG 排出削減目標を設定できる。こうした枠組みにより、各国の政策決定者及び民間の関係者に対して、低炭素技術・措置への投資は時間を追うごとに価値を増すという確実性を創り出さなければならない。そうなれば、CCS プロセスの全てのステップに対する多額の投資の正当化が容易になる。しかしながら、炭素価格（又は相同の政策）では CCS を装備した施設に市場で競争力を持たせるレベルに素早く到達できない可能性があり、市場及び市場外での障壁が存在するだろうことも考えれば、初期のプロジェクトには部門別の支援メカニズムが必要となる可能性が高い。貯留及び輸送インフラの大規模な開発を促進するための支援も必要であろう。

行動 19: OECD 非加盟国の政府は、地球全体の CCS 実証プロジェクトの経験に基づき、普及促進のための適切な支援メカニズムを構築

OECD 諸国及び一部の OECD 非加盟諸国では、2020 年までの期間に CCS 技術についての経験と信頼が大幅に増していると予想される。こうした成果は、ますます多くの OECD 非加盟諸国が、国際的な支援メカニズムに依拠した CCS 普及戦略を策定するきっかけとなる。そして、そうした取組を支援するため、UNFCCC に基づき開発されたメカニズム等の国際的なメカニズムを利用できるようにしなければならない。OECD 非加盟諸国は、他の国々で既に開始され効果的であると証明された CCS 専用のメカニズムを、CO₂ 排出量削減に向けた自国の幅広い枠組みに取り入れられるように担保する必要がある。更に、技術ライセンスや知識移転のための革新的な取組も役立つであろう。

行動 20: 各国間の RD&D 協力を拡大し、CO₂ 回収を備えた化石燃料発電所の発電コスト及び資源フットプリントを更に低減

回収コストの低減は、様々なプラント用途で多様な回収技術を普及させ、新しいプロジェクトそれぞれで学ん

だ教訓を活用することで実現できる。CCS を装備した化石燃料発電所のコストと資源フットプリントは、CO₂ 回収システムに標準化したモジュール式の設計の採用や、100%近い水素燃焼に適した、空気分離並びに商用ガスタービン用の膜（例えばイオン輸送膜）の更なる開発と採用、独立型ガス化装置の最適化や柔軟な操業を可能にする中間合成ガスや水素貯留オプションの検討、溶媒や固形吸着剤、膜や低温を利用する CO₂ 分離のエネルギー要件の最適化、水の消費を劇的に低減する回収技術や発電サイクルの開発、等によって更に低減が可能である。こうした技術の向上には、CCS 技術への需要が増大し続けた場合に、産業界が支援し易いと考えられる可能性が最も高い試験・パイロットプロジェクトが必要である。

行動 21: CCS 装備の生産コストを低減する革新的な新プロセスへの研究開発を促進

CO₂ 回収の新しく革新的な方式が実現すれば、現行のシステムが比較的効率であることから、回収に際してのエネルギー損失とコストを大きく低減できるかもしれない。そのためには、新しい回収方式に向けた実験室やベンチスケールでの研究には、引き続き大きな資金を投入することが必要である。ガス洗浄の有望な方式には、新しい吸着剤（例えば表面積が極めて大きい多孔性物質）やハイブリッド回収システム、新しい再生法（例えば電気分解と電気透析）がある。（例えば IGCC 用の）水素や合成ガス生産のための新しい CO₂ 分離方式には、高温溶媒や固形吸着剤、膜や強化した水-ガスシフト反応器がある。特にセメント生産からの回収の新方式（例えば膜や固体吸収プロセス）は、低コスト CO₂ 回収を組み込んだ新しい工業製品生産プロセスとともに、注力すべき分野である。

行動 22: システムの故障やボトルネックからの利用者のリスクを低減するため、統合された輸送・貯留ネットワークの展開を促進。CO₂ の長距離・越境・複合輸送を可能に

2020~2030 年の期間に、年間に回収・貯留する CO₂ の量を 40 倍まで増大させる必要がある。そのためには、大規模なパイプラインインフラの建設と操業が必要である。見込まれている CCS の普及の大部分が 2020~2030 年の期間に操業を開始するのであれば、船舶とパイプラインインフラを組み合わせることで CO₂ の長距離輸送を実現する CO₂ 輸送システムを急速に拡張しなければならないだろう。国境を越えて、特に欧州の OECD 加盟国において CO₂ 輸送ネットワークを統合する機会も、徹底的にできるだけ早く模索する必要があるだろう。沖合地層貯留のための越境 CO₂ 輸送を可能にするロンドン条約 96 年議定書の修正事項が早期に採択できれば、メリットが非常に大きいと思われる。

行動 23: 貯留と貯留規制のベストプラクティス策定に関する学習と改善を継続

最少コストでの貯留を利用できるようにするためには、CO₂ 貯留に関する国際市場の発展に歩調を合わせ、CO₂ のモニタリングと検証に関する各国の法律や規則を調和させる国際的なプロセスが重要である。更に各国政府は、企業や市民団体と協議しながら、CO₂ の安全で効果的な貯留に関する法律や規則を、地球全体での経験や生まれつつあるベストプラクティスに基づいて見直して、必要があれば改定することが必要である。

行動 24: 地層貯留に向けた商業環境を醸成

孔隙空間という資源を適切な安全・環境規則を遵守しながら商業的に利用可能な貯留容量に変換する CO₂ の地層貯留に向けて、独立した多様なサービス会社からなるサプライチェーンの発展を促す。発見した孔隙空間を資本市場が査定できるように、財務会計基準を修正する。

2030年以降の行動とマイルストーン: CCS が主流に

2030年以降の我々のビジョン: 2050年には、CCSは化石燃料発電所及び適した全ての産業用途でCO₂排出量を削減するために日常的に用いられている。

新設の石炭発電所全て、ガス発電所2カ所のうち1カ所、バイオマス発電所5ヶ所のうち1カ所にCCSが装備されている。2050年までには、合計で950GWを超える発電設備に回収設備が装備されている。製鉄やセメント・化学品製造の全てのうち、地球全体で25~40%にCCSが装備されている。

全世界の貯留量は、年間で二酸化炭素7ギガトン(GtCO₂/年)を超えている。CO₂貯留は、2013年のガス・石油産業の規模を超える十分に成長した産業になっている。2050年までには、およそ120GtのCO₂が世界中の地層貯留サイトに貯留済みで、探査・貯留産業は、10GtCO₂/年の市場需要を満たすためにプロジェクトを開発中であろう。

政策の状況を見ると、世界中の対象技術を選ばない気候変動政策の下で、CCSプロジェクトは全ての部門において商業化されている。

2030年以降の期間には、2030年に進行中の行動を継続し強固にし、それによってCCS産業は大きく成長する。各国政府と産業界は、CCS技術の現状と普及を定期的に評価し、それに応じてフォローアップの政策や研究開発、資金提供等の行動を設計すると想定される。

関係者の短期の行動

今後7年間は、気候に関する国際目標に合わせて、全面普及に向かった正しい道筋にCCSを乗せる上で極めて重要である。各国政府や主要関係者には、本ロードマップの本文で概略を示した全ての行動を実施することが強く推奨されている。しかしながら、以下の7つの重要な行動は、2020年までの7年間に絶対的に必要な活動の根幹を成すものである。これらは難しいが現実であり、CCSチェーンの3つの要素全てに及んでいる。各国政府と産業界の真剣な努力が必要なものである。GHG排出量を大幅に削減すると各国政府が強いコミットメントは、CCS普及に必要な行動を呼び起こす環境を創造するであろう。地球全体での長期的な気候への体制についての国際的な議論は決着していないが、各国政府は、支援のための政策や規制を通じて、CCSのためのビジネスケースを創り出す必要がある。

主要関係者	行 動
政府	プロジェクトへの民間の資金提供を促すために、CCSの実証と早期の普及のための経済的支援メカニズムを導入
政府	CCSプロジェクトのための貯留場所の探査や特性解明、開発を促す政策を実施
政府	新設のベースロード用化石燃料発電設備をCCSレディとすることを事実上義務付ける国内の法律や規則並びに多国間金融に関する規定を整備
産業界	CO ₂ 回収がまだ実証されていない産業用途で、回収システムをパイロット規模で証明
政府	CCS技術とその普及の重要性についての一般市民や関係者の理解を深める取組を大幅に拡大
産業界/ 研究開発機関	技術開発を継続し、可能な中で最も効率の良い発電サイクルを利用することにより、回収設備付きの発電所の電力コストを低減
政府	将来の需要中心地とCO ₂ 量を予測し、CO ₂ 輸送インフラの効率的な展開を促進

付属文書 1 行動の詳細

2013～2020 年の行動

2020 年の行動	統合 CCS
行動 1.	<p>CCS の実証や早期の普及のための経済的支援メカニズムを導入し、プロジェクトへの民間の資金供給を促す。</p> <p>a. 政府による直接の経済的支援や直接の操業支援、競争力の問題に対処するツール、インフラ開発のための支援等の、CCS の普及を促進する専用の経済的メカニズムを導入。可能なならば、CO₂ 利用のための既存の市場のテコ入れ。</p> <p>b. 初期の CO₂ 実証プロジェクトから得られた知識を共有し、後続のプロジェクトの設計改善につながるメカニズムを創設。</p> <p>c. 地球全体の実証プロジェクトのポートフォリオが、CO₂ 排出源や貯留地層の候補を広く網羅できるように各国間の協力を確立。</p> <p>d. CCS 技術が実証から早期普及段階へとゲートウェイを通過する際には、政府は、実証から早期普及の支援政策へと移行する必要あり。</p>
行動 2.	<p>新設のベースロード用化石燃料発電設備に CCS レディを事実上義務付ける、国内の法律や規則並びに多国間金融に関する規定を整備。</p> <p>a. 上述の通り、全ての新設の発電所に CCS レディ要件を盛り込んで施行。</p> <p>b. 規定が CCS レディ状態の維持を義務付けるように担保。</p>
行動 3.	<p>一般市民や関係者の間の CCS 技術やその普及の重要性についての理解を深める取組を大幅に拡大。</p>
行動 4.	<p>政府や国際開発金融機関は、OECD 非加盟国における CCS の実証を支援する資金提供メカニズムの設置を担保する必要あり。</p> <p>a. CDM や NAMA、グリーン気候基金のような国際的な資金提供メカニズムを、CCS に対して運用可能に。</p>
行動 5.	<p>政府は、CO₂ の輸送・貯留インフラの設計や操業で自らが果たす役割を決定する必要あり。</p> <p>a. CO₂ の輸送・貯留インフラの将来の所有権と操業に関するオプション、並びに政府の調整(と恐らくは規制)が求められる程度について、関係者と協議。</p> <p>b. 官民のインフラの共同開発によって CCS の官民のコストを大幅に低減できる可能性があるかどうかを判断するために、現在の産業生産や将来の発展のパターンを調査。</p> <p>c. 産業クラスターで複数が利用する CO₂ の輸送・貯留インフラの出現を促すための革新的な方式を検討。</p>

2020 年の行動	CO ₂ 貯留
行動 6.	<p>CCS プロジェクトのため貯留場所の探査や特性解明、開発を促進する政策を実施。</p> <p>a. 公的資金による地域や国レベルの競争前の探査や評価プログラムを実施。</p> <p>b. 商用化前の貯留作業に対して、2020 年までに地球全体で 10 億～60 億米ドルの公的資金が利用できるように。</p> <p>c. 貯留場所の探査や特性解明の優先順位を決定するため、排出量の多い全ての地域/国における貯留データのカバー範囲や知識の重大なギャップを再検討。</p> <p>d. 地下資源を国有にしている地域では、CO₂ 貯留資源の割当手続き(例えば、探査区画へのライセンス供与)を政府が決定。</p> <p>e. CO₂ 貯留資源を含むように地下資源の管理計画を修正(又は策定)。</p>
行動 7.	<p>安全で効果的な貯留を担保し、(孔隙空間を含む)天然資源の健全な管理を促し、貯留プロジェクトの開発において一般市民と適切に協議することを保証するガバナンスの枠組みを実施。</p> <p>a. 各国政府は CO₂ 貯留への障壁を特定するために現行の法律や規則の包括的な再検討を行い、既存の枠組みが地層貯留の規制に適しているかどうかを判断。</p> <p>b. 安全で効果的な貯留を可能にするため、必要な場合には、各国政府は産業界や学界、市民団体とともに、許認可手続等、適切な法律や規則を策定。</p>

	<p>c. 各国政府は、環境影響評価プロセスの市民参加要件(やその他の貯留に関する規則)をベストプラクティスの原理と合致するように調整。</p> <p>d. 長期的な賠償責任や貯留サイトの受託責任を管理する明確な枠組みを構築。</p>
行動 8.	<p>貯留資源に関する理解を深めベストプラクティスを強化するための、協調の取れた国際的な取組や方法論の開発と採用を継続。</p> <p>a. CO₂貯留容量を推測し分類する地球全体で共通の方法について合意。</p> <p>b. 関係する規格制定プロセス(例えば ISO TC265 や IMO のプロセス)への関係業界の参加を奨励。</p> <p>c. 先発の CCS 実証プロジェクトから学んだことを、新たな技術規格に反映。</p> <p>d. 技術規格が利用できる最善の技術を反映し、いっそうの技術開発を促すよう担保。</p> <p>e. UNFCCC に基づく GHG 国別報告に関して、2006 年 IPCC インベントリーガイドラインを義務化。</p> <p>f. CO₂貯留プロジェクトの圧入後段階用のモニタリング及び検証手続きのパフォーマンスを実証。</p> <p>g. 統合モニタリングネットワークを最適に設計するアルゴリズムを開発。</p> <p>h. CO₂や地層流体の貯留コンプレックス外への想定外の移動を管理する技法を実証。</p> <p>i. 貯留層やキャップロックの特殊な特性を予測するツールを開発し改良。</p> <p>j. 地層水の産出や処理等、圧入圧力の蓄積を管理する最新の技術やプロセスを高度化。</p>
行動 9.	<p>長期の地層貯留の操業の一環として CO₂-EOR を行っている場合には、貯留に特化した適切な規制体制の下で実行されるよう担保。</p> <p>a. 各国政府は、長期の CO₂貯留と関連して CO₂-EOR がどのような役割を果たすべきかを決定して、ガイダンスを提供。</p> <p>b. 各国政府は、関連する規制要件を策定。</p> <p>c. 各国政府や研究団体、産業界は、CO₂-EOR に適した MMV の技法や枠組みを策定。</p>
行動 10.	<p>CO₂の大気からの恒久的な隔離につながるような、CO₂を大量に利用できる可能性のある新技術への研究開発を支援。</p> <p>a. 研究の重点は、CO₂の触媒還元や光触媒還元、電極触媒還元であろう。</p> <p>b. もう一つの極めて重要な研究開発テーマは、水素のクリーン生産であろう。水素のクリーン生産は、CO₂の製品への転換に不可欠である可能性が高い。</p>

2020 年の行動	CO ₂ 回収
行動 11.	<p>弛まぬ技術開発と可能な中で最大効率の発電サイクルの利用により、回収設備を装備した発電所からの発電コストを低減。</p> <p>a. 効率的な化石燃料発電に関する IEA HELE ロードマップの勧告を実施。</p> <p>b. 燃焼前回収や燃焼後回収に用いる溶媒による、全体的な電気出力の損失を低減。</p> <p>c. 操業性に関する要件を考慮に入れながら、回収プラントと基本プラントとの熱統合を改善。</p> <p>d. 発電所等の用途ごとに、建設資材と溶媒の処方と共に最適化。</p> <p>e. 溶媒濃度が高い燃焼後技術についての腐食問題の管理を改善。</p> <p>f. 溶媒の劣化を減らすため、アミンベースの溶媒を用いる際の吸収装置への供給ガスの組成を最適化。</p> <p>g. 溶媒の CO₂吸収特性に影響を及ぼして溶媒の補充費用を押し上げる、耐熱性の塩やその他の分解産物の生成を最小限に抑えるレベルまで、排ガス中の NO_x や SO₂、酸素の上流側濃度を削減。</p> <p>h. NO_x の上流側濃度を低下させる手段として、段階的な燃焼の設計を検討。</p> <p>i. 設定した操業条件下での操業を改善するため、運転員の研修や戦略を策定。</p>
行動 12.	<p>CO₂回収がまだ実証されていない産業用途において、回収システムをパイロット規模で証明。例えば</p> <p>a. オープンアクセスの回収パイロット施設を創設(Mongstad が例)。</p> <p>b. セメント窯で排ガス洗浄のパイロット規模の試験を実施。</p> <p>c. 製鉄用溶鉱炉で排ガス洗浄のパイロット規模の試験を実施。</p>

	<ul style="list-style-type: none"> d. 蒸気による接触分解装置で排ガス洗浄のパイロット規模の試験を実施。 e. ガスリサイクルの溶鉱炉で用いる最も費用対効果の高い回収技術への更なる研究を促進。 f. 精製所や石油化学コンプレックスの複数の CO₂ 排出源全体に対する最適な排ガス洗浄策を開発。 g. 酸素燃焼に基づくセメント生産用の設計を最適化するため、パイロット規模の試験を活用。 h. CO₂ 回収の追設に向けて、セメント窯への空気漏れを最小化する技法を開発。 i. 酸素燃焼を利用している精製所や石油化学サイトにおける、流動接触分解や熱電併給のオプションを検討。 j. 酸素燃焼技法で生産したセメントクリンカーの商業的実行可能性を証明する。 k. より高温での操業に耐えられる耐火物質の研究を更に推進。 l. 水素の生産といった他のコベネフィットによって、ガス化に基づくシステムの LCOE(均等化発電原価)や CCS コストを削減するオプションを調査。
行動 13.	<p>回収コストと資源の消費を劇的に減らす新しい回収技術や発電サイクルへの研究開発を支援。</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 革新的な吸着剤といった新しいガス洗浄プロセス b. ハイブリッド回収システム c. 電気分解といった新しい再生法 d. 酸素燃焼ガスタービン e. 高温溶媒や固体吸着剤、膜、強化水-ガスシフト反応炉といった、水素や合成ガスの生産用の新たな CO₂ 分離プロセス f. セメント生産からの CO₂ 回収のための膜や固体吸着プロセス

2020 年の行動	CO ₂ 輸送
行動 14.	<p>将来の需要中心地と CO₂ 量を予測して、CO₂ 輸送インフラの効率的な展開を促進。</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 沖合貯留や船積みインフラの資本費用を検討。 b. 将来のコストを最小化するための過大規模化や「適正規模化」とルート選定。 c. 統合パイプラインネットワークの展開に向けた動き。
行動 15.	<p>ロンドン条約 96 年議定書に基づく地層貯留のための CO₂ の越境移動に係る重大な法的問題を解決。</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 沖合地層貯留に向けての CO₂ の越境移動を可能にするために、ロンドン条約 96 年議定書の修正事項の批准追求を継続。 b. ロンドン条約 96 年議定書の修正事項が批准されない場合には、CO₂ の越境移動を可能にする代替策(例えば暫定適用、締約国間での別個の合意)を検討。
行動 16.	<p>法律や規則及び市場構造が、パイプラインや船舶輸送に適したものになるように担保。</p> <ul style="list-style-type: none"> a. インフラの立地を促進する法律や規則が、CO₂ パイプラインを含むように担保。 b. パイプラインに関係する健康や安全についての法律や規則が、モニタリング要件等、CO₂ 輸送にとって適切なものになるように担保。 c. 各国政府は輸送業者に関する市場規則やインセンティブを創り上げる必要あり。
行動 17.	<p>経験から得た知識を共有して共通の方法論を編み出すことによって、パイプライン輸送のコストとリスクを低減。</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 漏出時の CO₂ の挙動について理解を深める。 b. 関連規格(例えば ISO TC265 や IMO プロセス)制定プロセスへの関連業界の参加を奨励。 c. 先発の CCS 実証プロジェクトからの教訓が、今後の技術規格に反映されるように担保。

2020~2030 年の行動

2030 年の行動	統合 CCS
行動 18.	<p>各国政府は、実証段階の支援から、炭素の価格付けを補完し OECD 加盟国における発電での CO₂ 回収への民間の資金供給を後押しする、広範な普及のためのメカニズム(例えば量的コミットメントやポートフォリオスタンダード)へと移行する必要あり。</p>

行動 19.	OECD 非加盟国の政府は、地球全体での CCS 実証プロジェクトの経験に基づき、普及を促進する適切な支援メカニズム(例えば国際的なコンソーシアムや革新的な許認可制度、知識の移転、利用可能な国際的資金調達ツールの利用)を構築する必要あり。
--------	---

2030 年の行動	CO ₂ 回収
行動 20.	<p>回収を備えた化石燃料発電所の発電コストや資源フットプリントを更に低減するため、各国間の RD&D 協力を拡大。例えば</p> <ol style="list-style-type: none"> 可能な限り、標準化されたモジュール式の設計を CO₂回収システムに使用。 水の消費を劇的に減らす回収技術や発電サイクルを開発。 空気の分離のための膜の利用を実証。 100%近い水素燃焼に適した商用タービンを提供。 独立型ガス化装置のサイズの最適化や柔軟な操業を可能にする成ガスや水素の貯留オプションを検討。 溶媒や固体吸着剤、膜、低温による圧縮を用いて CO₂を分離する際の全体的な電気出力損失を最適化。
行動 21.	<p>CCS を装備した生産のコストを削減する革新的な新プロセスへの研究開発を促進。</p> <ol style="list-style-type: none"> 新しい吸着剤(例えば表面積が極めて大きい多孔性物質)やハイブリッド回収システム、新しい再生法(例えば電気分解や電気透析)といった新しい排ガス洗浄プロセスをパイロット規模で試験。 酸素燃焼ガスタービンといった酸素燃焼発電用の新プロセスをパイロット規模で試験。 高温溶媒や固体吸着剤、膜、強化水-ガスシフト反応炉といった、水素や合成ガス生産(例えば IGCC)用の新しい CO₂分離プロセスをパイロット規模で試験。 セメント生産からの CO₂回収への、膜や固体吸収プロセスの適性をパイロット規模で試験。 低コストの CO₂回収を取り込んだ、新しい工業製品生産プロセスを開発。

2030 年の行動	CO ₂ の輸送
行動 22.	<p>CO₂輸送・貯留システムの故障やボトルネックによる影響を低減する、統合した輸送・貯留ネットワークの構築を促進。</p> <ol style="list-style-type: none"> 船舶とパイプラインインフラを組み合わせることで CO₂の長距離輸送ができるように CO₂輸送システムを拡張。 特に欧州の OECD 加盟国で、国境を跨ぐ CO₂輸送ネットワークの統合の可能性を調査。 沖合地層貯留のための越境 CO₂輸送ができるように、ロンドン条約 96 年議定書修正事項を採択。

2030 年の行動	CO ₂ 貯留
行動 23.	<p>貯留のベストプラクティスや貯留規制の策定における学習と改善を継続。</p> <ol style="list-style-type: none"> CO₂貯留に関する国際市場の発展に歩調を合わせて、CO₂のモニタリングや検証に関する各国の法律や規則を調和させる国際プロセスに参加。 各国政府は、産業界と協議しながら、CO₂の安全で効果的な貯留に関する法律や規則を、地球全体での経験や生まれつつあるベストプラクティスに基づいて再検討して、必要ならば修正。
行動 24.	<p>地層貯留のための商業環境を醸成。</p> <ol style="list-style-type: none"> 関連する安全・環境規制を遵守しながら、孔隙空間という資源を商用の貯留容量に変える CO₂の地層貯留のための、独立した多様なサービス会社から成るサプライチェーンの発展を促進。 発見した孔隙空間を資本市場が評価できるようにするために、財務会計基準を修正。

2030～2050年のマイルストーン

回収	世界全体でおよそ 964GW の発電設備に回収を装備。 全ての新設石炭発電所、ガス発電所 2カ所のうち 1カ所、バイオマス発電所 5ヶ所のうち 1カ所に CCS を装備 第 2 段階の産業における年間 CO ₂ 回収率は、およそ 2.8GtCO ₂ /年 第 1 段階の産業における年間 CO ₂ 回収率は、およそ 0.9GtCO ₂ /年
輸送	輸送インフラは、年間 7GtCO ₂ 超を輸送可能
貯留	世界中で、120GtCO ₂ 超を地層貯留サイトに貯留
統合	予め策定した政策のゲートウェイに従って、世界中の対象技術を選ばない気候変動政策の下で、CCS プロジェクトは全ての部門で商業化済み。

付属文書 2 IEA シナリオにおける CCS 普及：地域ごと及び部門ごとの特性

本付属文書では、IEA ETP 2012 2DS における CCS の普及を詳述する。本付属文書は、本ロードマップの「CCS の展望」の章の補足として、CCS の普及に関する情報を地域別・部門別に提供する。本付属文書は、CCS 費用のいくつかの面も詳述する。

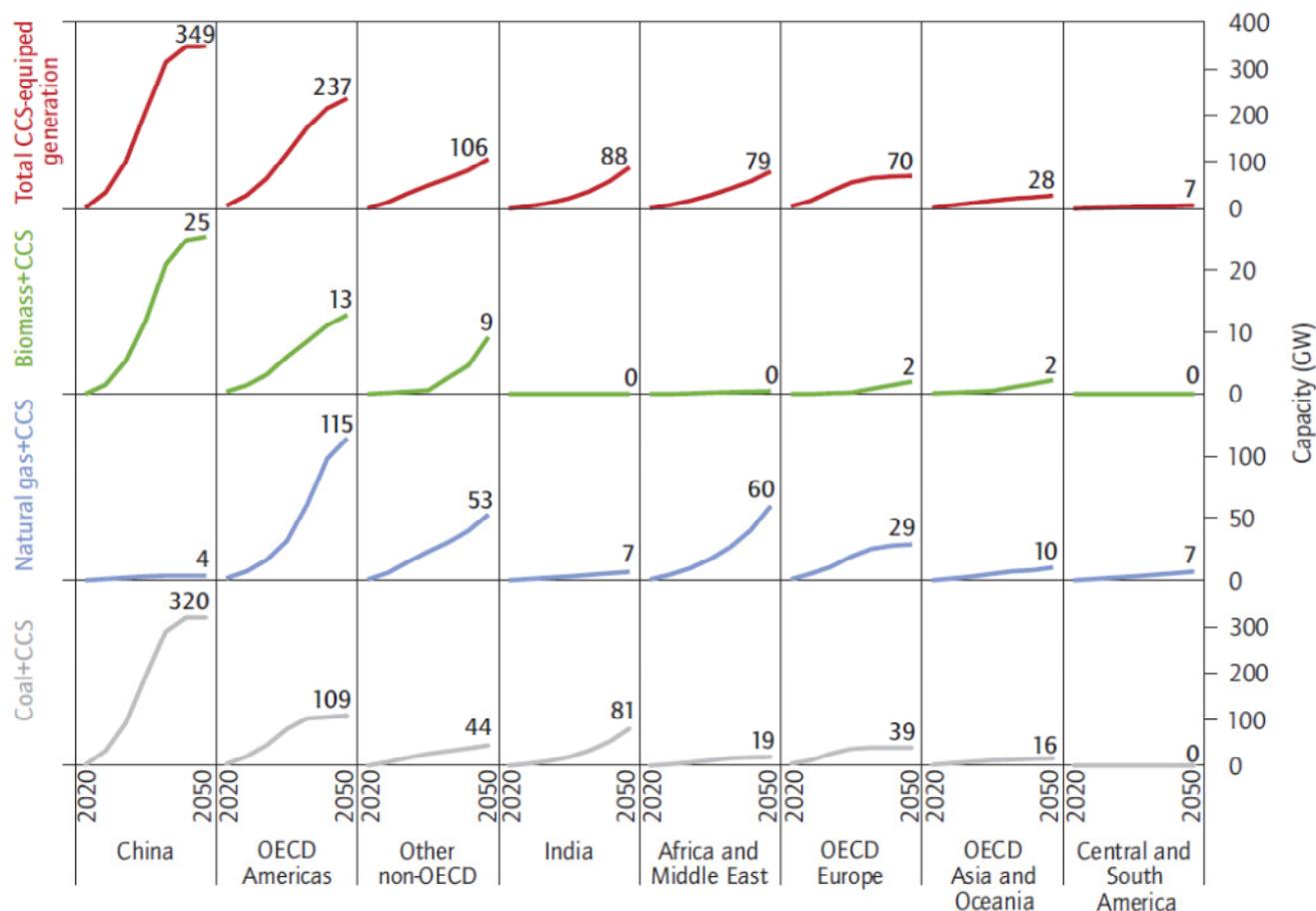
発電部門の CCS

2DS では、回収を備えた発電所が世界のほぼ全ての地域で設置される。2050 年までには、純発電量の 15%が CCS を装備した発電所から来ることもあり得る。しかしながら、CCS を装備する発電の種類（つまり石炭やガス、バイオマス）及び発電設備、並びにこの発電設備の建設のペースは、地域によって大きく異なる。2DS における 2050 年の回収設備を備えた合計 964GW の発電設備のうち、60%超（586GW）が中国と南北アメリカ大陸 OECD 加盟国（主に米国）に位置している。しかしながら、図 8 が示すように、中国ではこの設備の 90%超が石炭焚であるのに対して、米国では回収設備を備えた設備の半分だけが石炭焚で、残りは主にガス焚設備である。

大きなガス焚設備が回収を装備している世界の他の地域には、中東や欧州 OECD 加盟国、東南アジアが含まれる。中東では、回収設備を備えた設備の 90%超がガス焚であることが特に注目される。

2DS では、CCS 普及の速度と普及が始まる年は、世界中で大きく異なる。インドや東南アジア、ロシア、アフリカでは、2020 年には回収設備を備えた設備はないが、OECD 加盟国では 13GW 近くあり、小さい設備が中国と中東にある。

図 8:2DS での 2020~2050 年の世界の 10 地域についての回収設備を備えた石炭焚、ガス焚、バイオマス焚の発電設備(及び総設備)



キーポイント: 発電における CCS 普及の過程は、世界の地域によって大きく異なる。

2050 年までに、回収設備を備えた発電設備の増加は、中国や欧州 OECD 加盟国、アフリカでは横ばいになるが、インドや中東、東南アジアでは CCS を備えた発電設備は急増を続ける。2DS では、ほとんどの国々で、回収設備を備えた全種類の発電設備の明白な増加が 2030~2040 年の間に起こるが、バイオマスの増加は全般的に、石炭焚やガス焚の設備よりも遅れてピークを迎える。

発電用途で回収設備を追加する影響は、LCOE に反映される。CO₂ に価格がない場合、発電所の資本費用が増加し、回収プロセスのために燃料の消費量が増し、その他の資源の消費も増えるため、CCS 付きの発電所の LCOE は CCS なしの同様の発電所よりも高くなる。2DS では、LCOE の増加は、燃焼後回収付きの天然ガス焚コンバインドサイクル(NGCC)の 33%から、燃焼後回収や酸素燃焼回収付きの微粉炭(PC)焚発電所の 64%まで幅がある(表 4)。

しかしながら、回収設備を備えた発電所の資本費用や効率が、学習効果によって、また設備容量が大きくなるにつれて改善すると見込まれる(McDonald and Schratzenholzer, 2001; Rubin ほか, 2007)ことは重要である。技術を改善して費用のいくつかの部分を実減できる大きな可能性もある(例えば Bhowan and Freeman, 2011)。例えば、CO₂ 排出に対する新しいアミン回収技術が、華能/西安熱工研究所(Huaneng/Xi'an Thermal Power Research Institute)により開発された。再生熱が少ないため、発電損失を減らせる。熱や酸化による劣化のレベルが下がることも見られている。発電損失の減少と溶媒劣化の軽減は、従来の 30%モノエタノールアミン溶媒に比べて、さほど大きくはないものの明らかな費用面でのメリットをもたらす(Jones, McVey and Friedman, 2012)。

CCS 付きの発電所に CCS なしの同様の発電所よりも競争力を持たせることができる CO₂ 価格は、CO₂ の回避費用で表すことができるが、CO₂ 1 トン当たり 40～80 米ドルの幅がある。他の投入可能な低炭素発電オプション(例えば原子力、大規模水力、エネルギー貯蔵付きの集中型太陽光)と比べて、CO₂ 回収付きの化石燃料焚の LCOE(輸送・貯留の推定費用を含む)は競争力を持つ計算になる。

表 4: OECD 加盟国における CO₂ 回収設備追加による費用及びパフォーマンスへの平均的影響

回収ルート	石炭			天然ガス
	燃焼後	燃焼前	酸素燃焼	燃焼後
回収なしの基準発電所	PC	IGCC (PC)	PC	NGCC
回収付きの純効率(LHV、%)	30.9	33.1	31.9	48.4
純効率損失(LHV、パーセンテージポイント)	10.5	7.5	9.6	8.3
相対的な純効率損失	25%	20%	23%	15%
回収付の金利抜き建設費用(米ドル/kW)	3,808	3,714	3,959	1,715
金利抜き建設費用の増分(米ドル/kW)	1,647	1,128 (0)	1,696	754
相対的な金利抜き建設費用増分	75%	44% (0%)	74%	82%
回収付きの LCOE(米ドル/MWh)	107	104	102	102
LCOE 増分(米ドル/MWh)	41	29 (0)	40	25
相対的な LCOE 増分	63%	39% (0%)	64%	33%
回避した CO ₂ の費用(米ドル/tCO ₂)	58	43 (55)	52	80

注: OECD 加盟国の平均値には、CO₂ の輸送・貯留コストは含まない。

LHV=低位発熱量、kW=キロワット、MWh=メガワット時、tCO₂=二酸化炭素トン

概念設計からの資本費用の推定値の精度は、平均で±30%。そのため石炭の場合、金利抜き建設費用や LCOE、回避した CO₂ の費用の平均の回収ルートの間での違いは、不確実性の範囲内。

根拠として用いた酸素燃焼データには、CO₂ 純度<97%の複数の事例を含む。金利抜き建設費用には、分担関連費やエンジニアリング・調達・建設(EPC)費用、予備費を含むが、建設中の金利(IDC)は含まない。

CCS 以外では予備費を 5%としたのに対して、CCS では、技術面や規制面での想定外の難しさを勘案して、EPC 費用に基づく 15%の予備費を加えた。LCOE の計算には IDC を含めた。

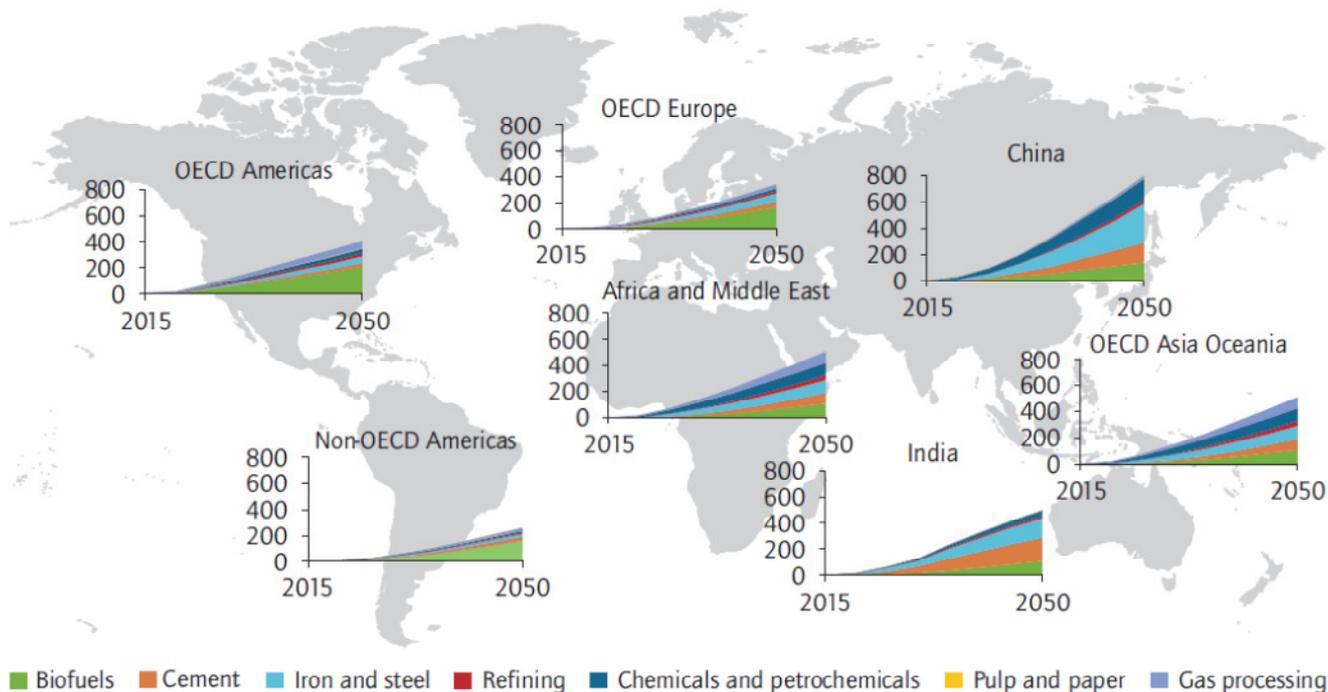
出典: IEA, 2011b

キーポイント: 発電所に CCS を適用すれば、発電所の種類によって LCOE が 1/3～2/3 増加すると見込まれる。しかしながら、LCOE と CO₂ 回避費用は、低炭素発電の代替オプションに対して競争力を持つ。

産業用途における CCS

2DS においては、全世界で見て、産業用途での CCS の利用も発電での CCS の利用と同様に重要である。しかしながら、太平洋 OECD 加盟諸国といったいくつかの地域やいくつかの OECD 非加盟国(例えばインド)では、産業用途での CCS の利用の方が、発電での利用よりも遥かに重要である(図 8)。鋼鉄やセメント、いくつかの化学品を作るプロセスの不可避の副産物として、CO₂ は産み出される。これらのプロセスでは、効率の向上や再生可能エネルギーによってこれらの排出量を緩和することは困難である。幸いなことに、これらのプロセスの多くでは、CO₂ は比較的純度が高く、回収が容易である。これらの部門で 50%超の排出削減を達成し、経済全体として最少費用の CO₂ 緩和の道筋を辿るためには、CCS が大きな役割を果たす可能性が非常に高い。

図 9:2DS における産業用途別の CO₂ 回収量(主要 7 発生源地域別)

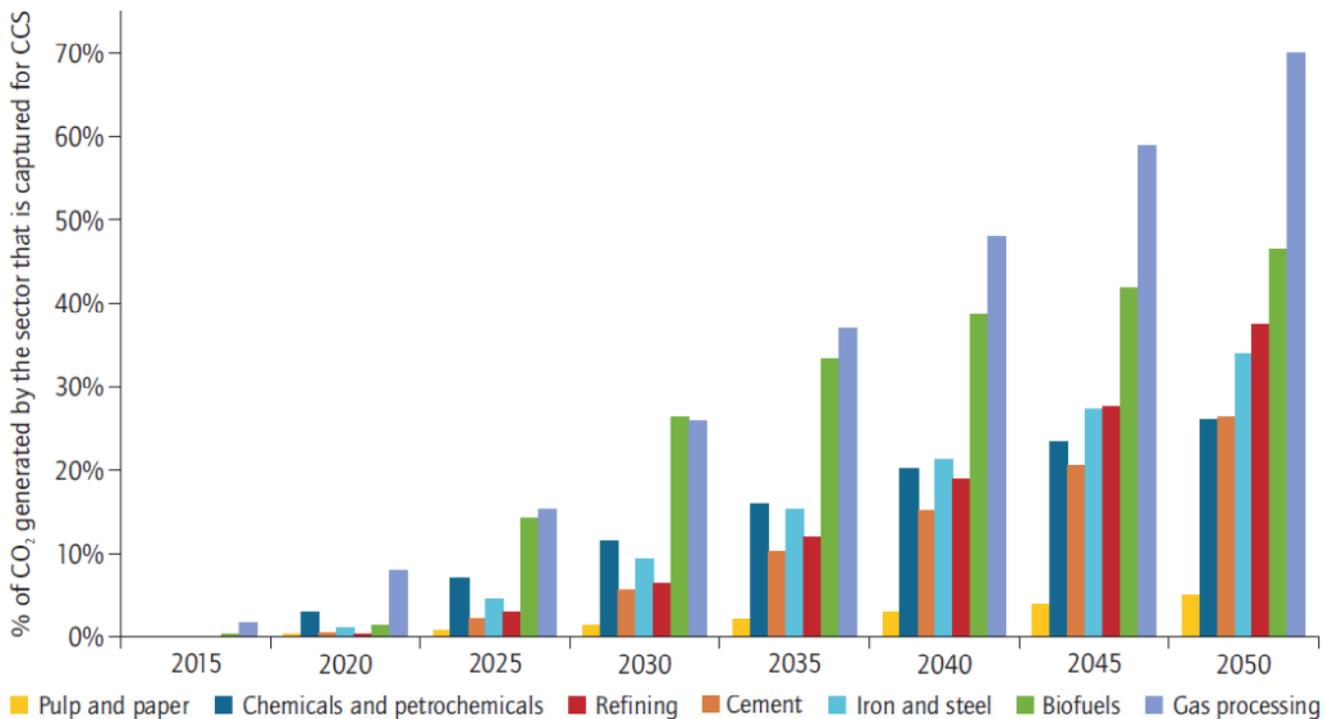


This map is without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries, and to the name of any territory, city or area.

キーポイント: 2DS シナリオにおいて CCS が普及する産業部門は、地域によって異なる。これらの産業部門には、それぞれ固有の技術や課題があり、全て同じやり方では不十分であろう。

全ての産業部門で CCS が同じスピードで普及するわけではない。ガス精製やアンモニアといった用途が、現在から 2025 年までの普及のほとんどを占める一方で、2030 年までには、第 2 段階の産業用途が、回収・貯留される CO₂ 量においてこれらを追い越す。このことは、2025 年までに、製鉄用溶鉱炉やセメント窯、精製所の排ガス洗浄といった用途が、第 1 段階の産業用途で今日見られている商業的な成熟のレベルに到達しなければならないことを意味している。今日の経済・政治環境であれば、そのためにはパイロットプロジェクトや実証プロジェクトへの的を絞った公共投資を行って、そこで得られた教訓を迅速に広めることが求められる可能性が高い。

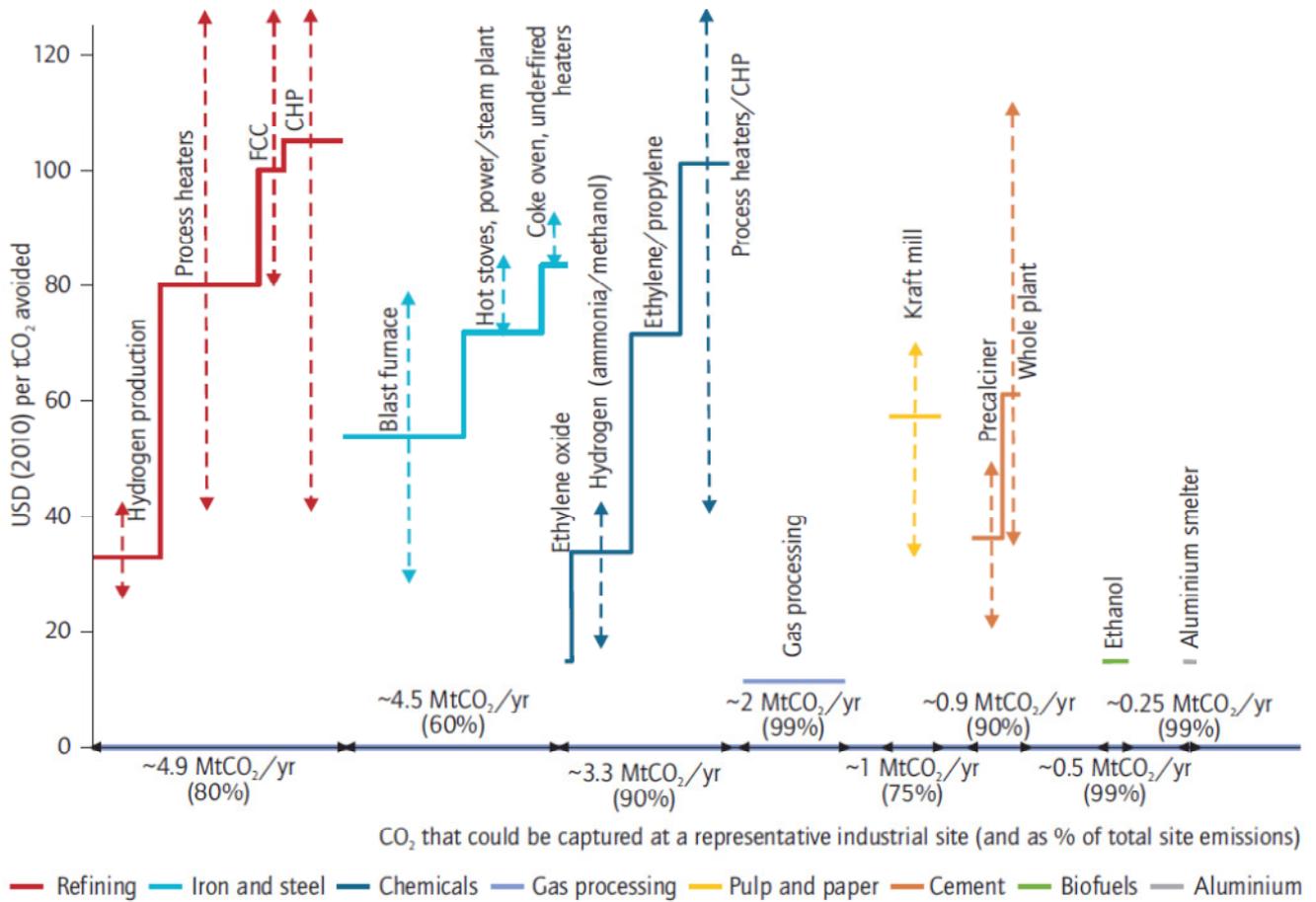
図 10: 2DS で分析された、産業部門での CCS で回収・貯留された CO₂



キーポイント: 地球全体の温度上昇を最少費用で 2°C に制限するには、地球上の産業生産の多くに CCS を装備することが求められる。これらの産業部門のいくつかでは、CCS が大幅に CO₂ を削減する唯一の選択肢である。

産業用途における CO₂ 回収の推定費用は、技術が多様なことや産業施設に独特なものが多いこと、発電部門と比較して分析が乏しいため大きく異なる。産業サイトにはサイト特有の多くの属性、特に、溶媒再生用の蒸気を供給するボイラの増設を避けられる程の余剰熱の有無があるが、第 2 段階の産業用途の費用の幅を狭めることが、政策決定を支援する上で喫緊の作業である。図 11 は、いくつかの産業部門では、複数の発生源からの排出を回収するために、費用や回収率の異なる回収プロセスを同一サイトで適用しなければならないことを示している。産業クラスターの中で最も費用の掛からない発生源から段階的・累積的に拡張していくということも、構想できるかもしれない。

図 11: 典型的な産業サイトでの回収における CO₂ 回避費用と CO₂ 発生源の規模



注: 矢印は文献データからのデータを示す。点線は、参照した複数の調査からの範囲。

キーポイント: 多様な産業サイトに CCS を適用した場合の量と除去費用との間には、トレードオフの関係がある。単一サイトでの CO₂ 回収費用にも大きなバラツキがある。これらの違いや費用については、まだ理解を進める必要がある。

付属文書 3 CCS インセンティブ政策の枠組み

本付属文書は、インセンティブ政策についての更なる考察と詳細を提供する。インセンティブ政策の根拠とその目標、並びにいくつかの国々と地域からの現状の例について概略を示す。

CCS 技術の主な効果は CO₂ 排出量の削減なので、排出量を削減する確固たる政策があつて初めて、CCS は広く普及するであろう。最も効果的な政策の種類は、技術が成熟し政策目標が変わるにつれて、時間とともに変化する。万能な政策はない。異なる政策手段は、異なる目標（つまり、異なる市場の不具合の是正）に役立つ。IEA 等の機関による分析は、CCS の実証や商業的普及を支援するには、統合政策と経済手段の組合せが必要なことを示している（IEA, 2012f; Goulder and Parry, 2008）。

初期の段階では、政策の重点は、排出量の削減そのものよりも、多様な用途での CCS 技術の進歩を通しての学習の促進と（民間）資本へのアクセスの促進にある。この段階では、資本補助金や生産助成金、投資や生産に対する税額控除、固定価格買取制度、プレミアム付きの固定価格買取制度、ポートフォリオスタンダード、信用保証といった技術ごとの手段によって、知識の獲得やそれによる費用低減に向けて望む数の大型 CCS 施設を建設し操業することができる。

統合 CCS プロジェクトの未熟さを考えれば、CCS 専用で排出量削減政策を補完するインセンティブが必要不可欠である。実際、この段階が 2020 年代までずっと続く可能性が高い。

技術が成熟するにつれて、政策の目標は排出削減に移行する。この後期段階では、キャップアンドトレード方式や炭素税、ベースラインとクレジット方式、フィーバート制度、排出性能基準といった、対象技術を選ばないインセンティブメカニズムによって、最も費用対効果の高い技術に投資が向かうようにすることができる。しかしながら、こうしたメカニズムだけでは、今後 10 年での CCS の早い立ち上がりを担保することはできない。表 5 は、現行及び計画中のインセンティブメカニズムを列挙している。

インセンティブ政策は CCS 技術の商業的成熟レベルに合っていなければならないが、民間投資を促せるレベルの確実性ももたらさなければならない。これらの矛盾する要求に対処するひとつの方法は、明確なマイルストーンと関連する政策から構成されるしっかりした枠組みに基づく「政策ゲートウェイ」方式である（IEA, 2012g）。それぞれのゲートウェイに到達すると、技術の成熟レベルに合った、個別の市場の不具合への対処に的を絞った政策が開始される。この方式は、ゲートウェイに達しなかった場合に政府がどう対応するかについての概要を示すことも必要とする。部門ごとの包括的な政策の枠組みは、ゲートウェイ方式に基づくか否かに係わらず、実証だけでなく実証段階の先の広範な普及に対しても十分なインセンティブを与えるために今実施する必要がある。

産業用途における CCS の必要性のほとんどは、貿易にさらされている部門にあるだろうから、適切なインセンティブの枠組みは、国際競争力の問題に対処しなければならない。この問題を地域レベルや国際レベル、部門レベルで克服することができれば、これらの部門における純粋に低炭素な生産への移行は、低コストの気候変動緩和の機会をもたらすのみならず、エネルギー集約型産業に、GHG が制約される世界での長期操業許可を与えるだろう。

途上国（つまり UNFCCC における非附属書 1 国）での CCS 普及にとって重要になり得るもう一つの手段は、京都議定書で定められたプロジェクトベースの国際的な資金調達メカニズム、CDM である。CCS は 2011 年 12 月に CDM の適格プロジェクトとして認められ、その際に、CCS CDM プロジェクト実施のガイドとなる方法論と手続きも採択された。認証済排出削減量（CER）の現在の価格は、CCS による排出量削減のインセンティブになり得るレベルを大きく下回っているが、CDM に CCS が受け入れられたことは、地球全体での排出量削減戦略の一要素として技術が国際的に受け入れられたことを示しており、将来の国際的なプロジェクトベースの資金供給方式に CCS を含める基礎を築いて、途上国における CCS プロジェクトの開発に方向性を与える可能性がある（Levina and Lipponen, 2012）。

表 5: CCS の普及にインセンティブを与える可能性のある既存・策定中の政策の例

政策目標	政策手段の種類	例	
		地域	説明
排出量の削減	平均 CO ₂ 排出削減基準	米国	2012 年 3 月 27 日、新設発電所に対する炭素汚染基準*を提案。この案では、CCS を取り入れる発電所には、基準案の遵守に際して、基準を毎年満たすのではなく、30 年間の平均 CO ₂ 排出量で満たす選択肢がある。
	排出性能基準	カナダ・アルバータ州	アルバータ州の排出強度削減政策: 特定のガス排出者に対する規則; 保留中の隔離オフセット手続。CCS は、オフセット手続に適格な活動になる予定。
	炭素税	ノルウェー	1 トン当たり 51 米ドルという炭素価格が 1991 年に導入され、沖合で生産する炭化水素燃料に課せられたことにより、Statoil は北海における同社の Sleipner CCS プロジェクトを 1996 年に開始。圧入施設の建設に 1 億米ドルを要したと推定され、現在の圧入費用は CO ₂ 1 トン当たり 17 米ドルであるが、Statoil は毎年、推定 100 万トンの圧入した CO ₂ に対する税金の支払いを免れている。Statoil は同じ北海にある同社の Snohvit CO ₂ 貯留プロジェクトで、同様のプロジェクトを 2008 年に開始。
	統制管理	豪州	西オーストラリア州 (WA) の大型 CCS プロジェクトは、液化天然ガス生産から分離した CO ₂ を毎年 330 万トン貯留する計画。同プロジェクトを規制しているのは 2003 年バロー島法 (Barrow Island Act 2003) (WA) で、同プロジェクト専用の法律として、Gorgon プロジェクトに伴う CCS 活動を規制するためだけに制定。
	排出性能基準	英国	少なくとも部分的な CCS なしでは、新設の石炭火力発電所を建設することができないようにするためのレベル (メガワット時当たり二酸化炭素 450kg) に設定された排出性能基準。
	排出性能基準	カナダ	カナダ政府の「石炭焚発電からの二酸化炭素排出量を削減するための規則 (Reduction of Carbon Dioxide Emissions from Coal-Fired Generation of Electricity Regulations)」は 2015 年 7 月 1 日に発効。これらの規制では、CCS を取り入れる、全ての新設の石炭焚ユニット並びに経済的寿命の終わりに到達しつつあるユニットは、天然ガスコンバインドサイクル発電の排出性能に基づく性能基準から、2025 年まで一時的に免除。これらの規則は、ユニットが基準の適用を受ける前に CCS を実施することも認可。
技術の学習 商業的リスクへの対処	資本補助金	英国	英国では、商用規模の CCS の設計や建設、操業における実際的な体験を支援するため、英国 CCS 商業化コンペティション (UK CCS Commercialization Competition) により 10 億ポンドの資本金供与が利用できるほか、英国電力市場改革 (UK Electricity Market Reforms) による支援も受けられる。2013 年 3 月、英国政府は優先入札者 2 社を発表。政府は、最大で 2 件までのプロジェクトの建設に関する最終投資判断を、2015 年初めに下す予定。

出典: IEA, 2012g; IEA, 2012h; Levina and Lipponen, 2012 に基づく。

* メガワット時当たり二酸化炭素 1,000 ポンドという出力ベースの基準。

<http://epa.gov/carbonpollutionstandard/pdfs/20120327factsheet.pdf> を参照。

表 5: CCS の普及にインセンティブを与える可能性のある既存・策定中の政策の例(続き)

政策目標	政策手段の種類	例	
		地域	説明
技術の学習 商業的リスクへの対処	資本補助金	欧州連合	欧州委員会(EC)は、EU-ETSによる CCS へのインセンティブが不十分だと認め、CCS に更なるインセンティブを与える専用のメカニズムを導入。「NER 300」プログラムと呼ばれるこのメカニズムは、CCS や革新的な再生可能エネルギー技術の開発の支援に使うように、新規参入者用留保から 3 億の EU 排出枠(EUA)を配分するもの。この留保は、2015 年 12 月 31 日まで利用できる。しかしながら、最初の 2 億 EUA が売却された NER 300 の第 1 回は、欧州連合内の CCS プロジェクトはどれも支援せず。その他に EC は、復興のための欧州エネルギープログラム(European Energy Programme for Recovery)を通じて、欧州における CCS の実証を支援。総額 10 億ユーロの支援を受けて 6 件の実証プロジェクトが早期に開始済み。
	資本補助金	日本	多数の研究開発プロジェクトに立脚し、日本は、公的資金 500 億円を投じて苫小牧精製所サイトで統合 CCS 実証プロジェクトを開発中。CO ₂ の圧入は、2016 年に年間 CO ₂ 10 万トン超の割合で開始の予定。
	RD&D の支援	中国	CCS に関するオプションを探るため、政府と企業双方の研究開発プログラムで活発な動き。中国の現在の RD&D の取組は、様々な炭素回収技術に重きを置いているが、利用機会への注目が高まりつつある。2005 年に中国は、化石エネルギー開発における排出量ほぼゼロを達成する最先端技術として、CCS を国家中長期科学技術開発計画に盛り込んだ。2006 年には、科学技術部(MOST)が EOR における資源としての GHG の利用並びに地下貯留に向けて、中国国家基礎研究プログラム(China's National Basic Research Programme)(973 プログラム(973 Programme))に乗り出す。2007 年には、国家気候変動プログラム(National Climate Change Programme)において、GHG 排出量削減に向けた重要研究分野として CCS に言及。2008 年には、国家ハイテクプログラム 863(National High-tech Programme 863)の下で、MOST が CCS の技術研究プログラムに乗り出した(MOST, 2008)。
	差金決済契約 固定価格買取制度	英国	英国は、発電部門の脱炭素化(CCS によるものを含む)を推進するための改革を提案。CCS に関する施策には、低炭素発電の事業者に安定した収益の流れを提供するための、差金決済契約(CFD)と組み合わせた固定価格買取制度を含む。提案した改革は、実証プロジェクトへの CCS 専用の資金供給プログラムと炭素価格制度のみに裏打ちされた普及との間のギャップを埋める CCS 普及インセンティブを(広範な改革パッケージの一環として)創り出すことを目指した地球全体で初の試み。
	RD&D プログラム	米国	大規模実証プロジェクト(産業発生源と発電所の両方、その一部は建設に向けて進行中)に重きを置いた広範な RD&D プログラム並びに第二世代・変換技術の開発。

出典: IEA, 2012g; IEA, 2012h; Levina and Lipponen, 2012 に基づく。

短縮語、略語、測定単位

短縮語と略語

2DS	2°Cシナリオ
6DS	6°Cシナリオ
BECCS	炭素回収貯留を伴うバイオエネルギー
CCGT	ガスタービンコンバインドサイクル
CCS	(二酸化)炭素回収貯留
CDM	クリーン開発メカニズム
CHP	熱電併給
CO ₂	二酸化炭素
CO ₂ -EOR	二酸化炭素による石油増進回収
CSLF	炭素隔離リーダーシップフォーラム
DRI	直接還元製鉄
EC	欧州委員会
ECBM	炭層メタン増進回収
EOR	石油増進回収
EPC	設計・調達・建設
ETP	エネルギー技術展望
EUA	EU域内排出枠
GHG	温室効果ガス
HELE	高効率低排出
IDC	建設中の金利
IEA	国際エネルギー機関
IGCC	石炭ガス化コンバインドサイクル発電
IMO	国際海事機関
IPCC	気候変動に関する政府間パネル
ISO	国際標準化機構
LCOE	均等化発電コスト
LHV	低位発熱量
MMV	測定・モニタリング・検証
MOST	中国科学技術部
NAMA	国としての適切な緩和行動
NGCC	天然ガスコンバインドサイクル
NO _x	窒素酸化物
OECD	経済協力開発機構
PC	微粉炭
R&D	研究開発
RD&D	研究・開発・実証
UNFCCC	国連気候変動枠組条約
WEO	世界エネルギー展望

測定単位

Gt	ギガトン
GtCO ₂	二酸化炭素ギガトン
GW	ギガワット
kg/MWh	メガワット時当たりのキログラム
kW	キロワット
kWh	キロワット時

Mt	100 万トンすなわちメガトン
MtCO ₂	二酸化炭素メガトン
MW	メガワット
MWh	メガワット時
t	トン
tCO ₂	二酸化炭素トン

参考文献

Ashworth, P., Jeanneret, T., Stenner, K. & Hobman, E.V. (2012). International comparison of the large group process. Results from Canada, Netherlands, Scotland and Australia. CSIRO: Pullenvale

Bachu, S. (2008), "CO₂ Storage in Geological Media: Role, Means, Status and Barriers to Deployment", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 34, No. 2, pp. 254-273, Elsevier, Amsterdam.

Benson, S.M. and P. Cook (2005), "Underground Geological Storage", in B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos and L. Meyer (eds.), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Benson, S.M., R. Hepple, J. Apps, C.-F. Tsang and M. Lippmann (2002), Lessons Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geological Formations, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

Bhown, A. S. and B. C. Freeman (2011), "Analysis and Status of Post-Combustion Carbon Dioxide Capture Technologies," Environmental Science & Technology, Vol. 45, No. 20, pp. 8624-8632.

Canadian Environmental Protection Act (1999), "Reduction of Carbon Dioxide Emissions from Coal-Fired Generation of Electricity Regulations", Vol. 145, No. 35, August 27, 2011, www.gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2011/2011-08-27/html/reg1-eng.html.

Carbon Storage Taskforce (2009), National Carbon Mapping and Infrastructure Plan – Australia, Department of Resources, Energy and Tourism, Canberra, Australia.

Centi, G., E. A. Quadrelli, S. Perathoner, (2013), Catalysis for CO₂ conversion: a key technology for rapid introduction of renewable energy in the value chain of chemical industries. Energy & Environmental Science 2013 (6) 1711-1731

Chevron (2012), "Gorgon Carbon Dioxide Injection Project", presentation by Chevron at the IEA CERT Committee Workshop, Sydney, Australia, 20-21 February.

千代田化工建設株式会社(2011)、Preliminary Feasibility Study on CO₂ Carrier for Ship-Based CCS, a report for Global CCS Institute, Global Carbon Capture and Storage Institute (GCCSI), Canberra, Australia.

Cole, E. B. and A. B. Bocarsley (2010), Photchemical, electrochemical and photoelectrochemical reduction of carbon dioxide. In Ed: Aresta, M., Carbon dioxide as a chemical feedstock. John Wiley & Sons, New Jersey, US.

Council for Geoscience (2010), Atlas on Geological Storage of Carbon Dioxide in South Africa, Council for Geoscience, South Africa.

CSA (Canadian Standards Association) (2012), Geological Storage of Carbon Dioxide, CSA, Z741-12.

CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) (2013), Carbon Sequestration Leadership Forum Technology Roadmap 2013, CSLF, Washington, DC, forthcoming.

Decarre, S., J. Berthiaud, N. Butin and J.-L. Guillaume-Combecave (2010), "CO₂ Maritime Transportation" International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 4, No. 5, pp. 857-864.

DNV (Det Norsk Veritas) (2009), "CO₂QUALSTORE: Guideline for Selection and Qualification of Sites and Projects for Geological Storage of CO₂", DNV, Hovik, Norway.

DNV (2010), "Recommended Practice DNV-RP-J202: Design and Operation of CO₂ Pipelines", DNV, Hovik, Norway.

Doctor, R., A. Palmer, D. Coleman, J. Davison, C. Hendriks, O. Kaarstad and M. Ozaki (2005), "Transport of CO₂", in B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos and L. Meyer (eds.), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Dooley, J.J., R.T. Dahowski and C.L. Davidson (2010), CO₂-driven Enhanced Oil Recovery as a Stepping Stone to What?, US Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.

Edenhofer, O., B. Knopf, T. Barker, L. Baumstark, E. Bellevrat, B. Chateau, P. Criqui, M. Isaac, A. Kitous, S. Kypreos, M. Leimbach, K. Lessmann, B. Magne, S. Scricciu, H. Turton and D. P. van Vuuren (2010), "The Economics of Low Stabilization: Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs", Energy Journal, Vol. 31, pp. 11-48.

Edmonds, J.A., J.J. Dooley, S.K. Kim, S.J. Friedman and M.A. Wise (2007), "Technology in an Integrated Assessment Model: The Potential Regional Deployment of Carbon Capture and Storage in the Context of Global CO₂ Stabilization", in M.

Schlensinger, H. Khesghi, J.B. Smith, F.C. de la Chesnaye, J.M Reilly, T. Wilson and C. Kolstad (eds.), Human-Induced Climate Change: An Interdisciplinary Assessment, Cambridge University Press.

Esposito, R.A., L.S. Monroe, and J.S. Friedman (2011), "Deployment Models for Commercialized Carbon Capture and Storage", Environmental Science and Technology, Vol.45, No.1, pp. 139-146.

Global CCS Institute (2011) Accelerating the uptake of CCS: industrial use of captured carbon dioxide. Global CCS Institute, Canberra.

Global CCS Institute (2013), The Global Status of CCS, Global CCS Institute, Canberra.

Goulder, H.L. and I.W.H. Parry, "2008 Instrument Choice in Environmental Policy", RFF Discussion Paper No. 08-07, Washington, DC.

IEA (International Energy Agency) (2009), Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage, OECD/IEA, Paris.

IEA (2010), "Carbon Capture and Storage: Progress and Next Steps", IEA/Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) report to the Muskoka 2010 G8 Summit.

IEA (2011a), Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation, IEA working paper prepared by Matthias Finkenrath, OECD/IEA, Paris.

IEA (2011b), Carbon Capture and Storage, Legal and Regulatory Review, 2nd Edition, OECD/IEA, Paris.

IEA (2011c), Combining Bioenergy with CCS: Reporting and Accounting for Negative Emissions under UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) and the Kyoto Protocol, IEA working paper, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012a), World Energy Outlook 2012, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012b), Medium-Term Coal Market Report 2012, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012c), Energy Technology Perspectives 2012, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012d), Carbon Capture and Storage Legal and Regulatory Review 3rd Edition, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012e), CCS Retrofit: Analysis of the Globally Installed Coal-Fired Power Plant Fleet, IEA Information Paper, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012f), Technology Roadmap: High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012g), A Policy Strategy for Carbon Capture and Storage, Information Paper, OECD/IEA, Paris.

IEA (2012h), Facing China's Coal Future: Prospects and Challenges for Carbon Capture and Storage, IEA working paper, OECD/IEA, Paris.

IEA (2013a), Tracking Clean Energy Progress 2013: IEA Input to the Clean Energy Ministerial, OECD/IEA, Paris.

IEA (2013b), "Global Action to Advance Carbon Capture and Storage: A Focus on Industrial Applications", Annex to Tracking Clean Energy Progress 2013, OECD/IEA, Paris.

IEA (2013c), Methods to Assess Storage Capacity for CCS: Status and Recommendations, OECD/IEA, Paris, forthcoming.

IEA GHG (IEA Greenhouse Gas R&D Programme) (2007), CO₂ Capture Ready Plants, Report 2007/4, IEA GHG, Cheltenham, UK.

IEA GHG (2011a), Global Storage Resources Gap Analysis for Policymakers, Report 2011/10, IEA GHG, Cheltenham, UK.

IEA GHG (2011b), Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage, Report 2011/06, IEA GHG, Cheltenham, UK.

IEA GHG (2011c), Retrofitting CO₂ Capture to Existing Power Plants, Report 2011/02, IEA GHG, Cheltenham, UK.

IEA and OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) (2012), Joint IEA-OPEC Workshop on CO₂-Enhanced Oil Recovery with CCS, report prepared by W. Heidug, OECD/IEA, Paris,
www.iea.org/publications/freepublications/publication/HEIDUG_Workshop_Report_IEA_OPEC_FINAL.PDF.

IEA and UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) (2011), Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage in Industrial Applications, OECD/IEA, Paris.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005), Special Report on Carbon Capture and Storage, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), Fourth Assessment Report of the IPCC, Working Group III, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jaramillo, P., W.M. Griffin and S.T. McCoy (2009), "Life Cycle Inventory of CO₂ in an Enhanced Oil Recovery System", Environmental Science and Technology, Vol. 43, No. 21, ACS, Washington, DC, pp. 8027-8032.

Jones, D.A., T.F. McVey and S.J. Friedmann (2012), Technoeconomic Evaluation of MEA versus Mixed Amines for CO₂ Removal at Near-Commercial Scale at Duke Energy Gibson 3 Plant, report LLNL-TR-607574, Lawrence Livermore National Laboratory, [https://e-reports ext.llnl.gov/pdf/700272.pdf](https://e-reports.ext.llnl.gov/pdf/700272.pdf).

Levina, E. and J. Lipponen (2012), “CCS in Carbon Markets”, GHGT 11 paper, Energy Procedia, Vol. 10, Elsevier, Amsterdam.

McDonald, A. and L. Schratzenholzer (2001), “Learning Rates for Energy Technologies”, Energy Policy, Vol. 29, No. 4, Elsevier, Amsterdam, pp. 255-261.

McGlashan, N.R. and A.J. Marquis (2007), “Availability Analysis of Post-Combustion Carbon Capture Systems: Minimum Work Input”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 221, No. 9, pp. 1057-1065.

Middleton, R.S., G.N. Keating, H.S. Viswanathan, P.H. Stauffer and R.J. Pawar (2012), “Effects of Geologic Reservoir Uncertainty on CO₂ Transport and Storage Infrastructure”, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 8, pp. 132-142.

MIT (Massachusetts Institute of Technology) (2010), Role of Enhanced Oil Recovery in Accelerating the Deployment of Carbon Capture and Sequestration, MIT, Cambridge, MA.

Morgan, M.G., S.T. McCoy, J. Apt, M. Dworkin, P.S. Fishbeck, D. Gerard, K.A. Gregg, R.L. Gresham, C.R. Hagan, R.R. Nordhaus, E.R. Pitlick, M. Pollak, J.L. Reiss, E.S. Rubin, K.Twaite and E.J. Wilson (2012), Carbon Capture and Sequestration: Removing the Legal and Regulatory Barriers, RFF Press, New York.

Moritis, G. (2010), “CO₂ Miscible, Steam Dominate Enhanced Oil”, Oil and Gas Journal, Vol. 108, No. 14, pp. 36-40.

NETL (National Energy Technology Laboratory) (2010), Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada, US DOE, Pittsburgh, PA.

Norwegian Petroleum Directorate (2012), “CO₂ Storage Atlas Norwegian North Sea”, NPD, Stavanger, Norway.

小川豊和、中西繁隆、志田原巧、奥村忠彦、林栄治(2011)、「日本における深部塩水層 CO₂ 隔離:貯留可能量評価法」、International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 5, No. 2, Elsevier, Amsterdam, pp. 318-326

Oltra C., R.Sala, R.Sola, M. Di Masso, G.Rowe, (2010). Lay perception of carbon capture and storage technology, International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 4 (4) 698-706, Elsevier

Peters, M., B. Köchler, W. Kuckshinrichs, W. Leitner, P. Markewitz, T. E. Müller, (2011), Chemical Technologies for Exploiting and Recycling Carbon Dioxide into the Value Chain, ChemSusChem 2011, 4, 1216-1240.

Prangnell, M, (2013). Communications for Carbon Capture and Storage: Identifying the benefits, managing risk and maintaining the trust of stakeholders. Global CCS Institute. Canberra <http://cdn.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/92266/communications-carbon-capture-storage.pdf>

Rubin, E.S., S. Yeh, M. Antes, M. Berkenpas and J. Davison (2007), “Use of Experience Curves to Estimate the Future Cost of Power Plants with CO₂ Capture”, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 1, No. 2, Elsevier, Amsterdam, pp. 188-197.

UK DECC (UK Department of Energy and Climate Change) (2012), "CCS Roadmap, Building Networks: Transport and Storage Infrastructure", URN 12D/016f, UK DECC, London, www.decc.gov.uk.

Vangkilde-Pedersen, T., K. Kirk, N. Smith, N. Maurand, A. Wojcicki, F. Neele, C. Hendriks, Y.-M. Le Nindre and K.L. Anthonsen (2009), GeoCapacity Final Report, Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Denmark.

Zhai, H., E.S. Rubin and P.L. Versteeg (2011), "Water Use at Pulverized Coal Power Plants with Postcombustion Carbon Capture and Storage", *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, No. 6, pp. 2479-2485.

本書及び本書中の地図は、領土のステータスや主権、国際的な境界の確定、並びに領土や都市、地域の名称に対していかなる影響も及ぼすものではない。

IEA Publications, 9 rue de la Federation, 75739 PARIS CEDEX 15
CORLET が、2013 年 6 月にフランスで印刷、

表表紙の写真(大): © SaskPower
表表紙の写真(小): © Comstock
裏表紙の写真(大): © Global CCS Institute
裏表紙の写真(小): © Mississippi Power

本書に用いた紙は、森林認証プログラム(PEFC)の生態や社会、倫理に関する基準に従って生産されたものであるとの PEFC からの認証を得ている。PEFC は、独立した第三者による認証を通じて持続可能な森林経営(SFM)を促進するための国際的な非営利・非政府組織である。