

二酸化炭素（CO₂）の供給インフラ

CO₂回収貯留（CCS）を目的としたCO₂の輸送に関する状況及び課題

見解文書

2012年8月

Chapter 1 and chapter 6 of “CARBON DIOXIDE (CO₂) DISTRIBUTION INFRASTRUCTURE” 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.

「二酸化炭素（CO₂）の供給インフラ」は、利用者の便宜のために“CARBON DIOXIDE (CO₂) DISTRIBUTION INFRASTRUCTURE”の第1章及び第6章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。



第1章

序文

背景

本文書は、CO₂回収貯留（CCS: Carbon Capture and Storage）に利用されるCO₂（二酸化炭素）の供給インフラ（ネットワーク）に関して、公的に入手可能である査読付き研究論文からいくつかを選択し、専門知識がなくとも理解できる要約として提供することを目的とする。

CCSは、以下の4つの要素から構成される。

1. 排出源（CO₂を排出する。）
2. CO₂の回収（物理的又は化学的な分離処理によって、排出ガス中の他の成分からCO₂を分離する。このときのCO₂流は回収コスト、圧力及び純度がまちまちであることが多い。）
3. CO₂の輸送（回収されたCO₂を点排出源から貯留地点へ移動する。）
4. CO₂の貯留（CO₂は地層に圧入され、大気から隔離される。）

CCSは恒久的な削減効果を実現できるため、国連気候変動枠組条約（UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change）によって、技術的に妥当な緩和手法として認められている。また、CCSはクリーン開発メカニズム（CDM: Clean Development Mechanism）の適格なプロジェクトレベルの活動としても認識されている。これは、CCSの活動が、市場メカニズムの中で直ちにかつ体系的に制度化でき（及び成果を挙げることができ）、発展途上国の持続可能な開発という要件にも合致しているものとして、国際的に認められていることを示している。

CCSは、気候変動が危険な水準に至ることを回避するという地球規模の課題に対し、最大の排出削減成果を実現する緩和手段の一つである可能性がある。国際エネルギー機関（IEA: International Energy Agency）は、2050年までに温室効果ガスの大気中濃度を450ppmに維持するために必要な削減量の約20%をCCSが担うことができると試算している。気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）は、CCSは2100年までに必要なCO₂削減量の15～55%に寄与すると予測している。

さらにCCSは、カーボンニュートラルなエネルギー原料（例えば、持続可能なバイオマスなど）と組み合わせ、回収した排出分を深い地層中に恒久的に貯留する場合には、（大気からの温室効果ガスを取り除く）ネガティブCO₂排出(=大気中CO₂の削減)を促進することもできる。

本文書は、主にパイプラインによるCO₂の輸送に注目する。公的に入手可能な文献のほとんどによれば、今後数十年のうちに回収及び貯留しなければならぬと考えられる数十億トンのCO₂の大半を輸送する手法でもっとも有力なものはパイプラインである。気候変動が危険な水準に至ることを回避しうるCO₂収支（温室効果ガスの許容排出量）を維持するという国際社会の流れの中で、この規模の緩和措置は必要不可欠であると考えられている。

本文書では、CO₂の回収及び貯留の手法については特に言及していない。しかし、十分かつ確実なCO₂の排出源はもとより、十分かつ厳重で、安全に利用できる長期的な貯留方法がない限り、CO₂が相当規模にて輸送されることはないことを認識している。したがって、こうした活動には、所有権、長期的な義務に関する適切な規制、サイトの監視・測定・検証（MMV: monitoring, measurement and verification）及びCCSチェーン全体における効果的なコンプライアンス制度の確立が今後必要になるであろう。

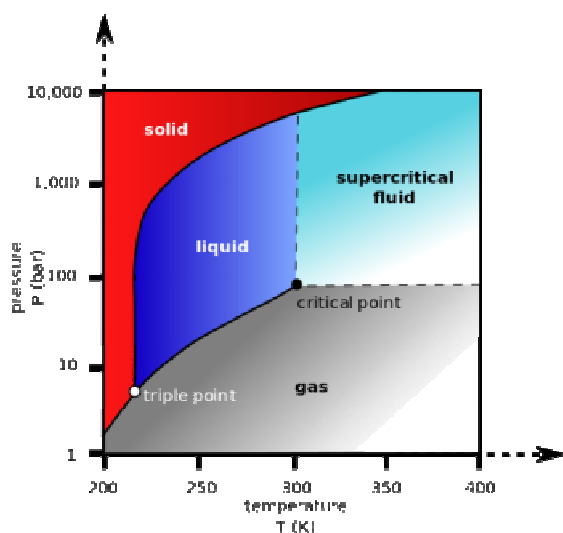
実際には、最低限のコストによる CCS の統合プロジェクトの実施は、以下に示す CCS の構成要素すべての最適な設計によって可能となる。

- 回収 (CO₂ 排出源の数、CO₂ の体積、CO₂ 流の質)
- 輸送 (パイプラインのサイズ、流量、パイプラインの立地及び距離)
- 貯留 (圧入井の数、種類及び位置並びに周辺地質の透水性及び圧入性)

CCS への投資を推進する主な要因は各構成要素ごとに異なるものの、CCS チェーン全体のあらゆる関係者 (CO₂ 排出事業者/回収事業者、CO₂ 輸送事業者及び地層貯留事業者) による決定事項は、必然的に互いに影響し合うことになる。

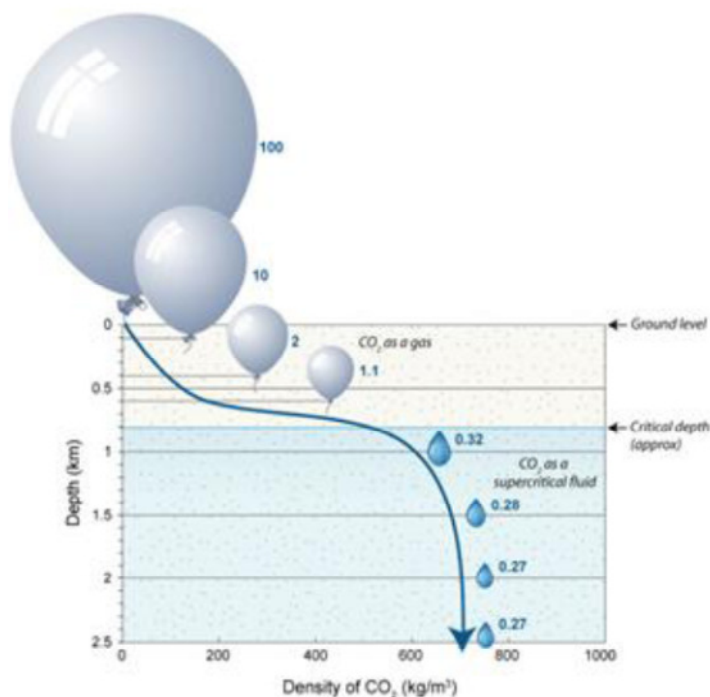
パイプラインは、高圧下で、比較的小さな径のパイプで大量の CO₂ を輸送することができる。輸送する CO₂ ガスは、まず濃密相 (超臨界流体ともいう) に変換しなければならない。CO₂ は、この状態では圧縮性液体のような挙動をとる (略図 1 参照)。濃密相への変換により、CO₂ の体積は大幅に減少する (略図 2 参照)。

略図 1 : CO₂ の濃密相



出典 : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Carbon_dioxide_pressure-temperature_phase_diagram.svg

略図 2 : CO₂ の体積



出典 : CO2CRC

結果として得られた CO₂ 流は、密度が 500~900 kg/m³ で、CO₂ の単位質量あたりの摩擦が比較的小さいため、パイプラインを通じて容易に長距離を輸送することができる。

CO₂ は液化天然ガス (LNG) 及び液化石油ガス (LPG) で使用されるようなトラック、船舶及びバージで輸送することもできる。文献では、一般的にこれらの輸送手段が実行可能であると評価される一方で、そうした CO₂ の大規模輸送手段としては比較的成本がかかるとも考えられている。これは、輸送しなければならない CO₂ 量に比べて輸送能力が限られているとともに、回収しなければならない CO₂ と対象の貯留地点とをつなぐ輸送手段も限られていることと大きく関係していると考えられる。

囲み 1 – 石油と CO₂ の体積

超臨界 CO₂ の密度が 700kg/m³ であると仮定すると、(IEA のブルーマップシナリオによれば) 年間 8.27Gt の CO₂ を回収し、恒久的に貯留する必要がある。また、全世界の一日の石油生産量は 8,000 万バレルであることから、以下のように計算できる。

CO ₂	削減量 8.2 Gt/年
	700 kg/m ³ (密度)
石油	3.2 × 10 ⁷ m ³ /日
	8,000 万バレル/日
	0.16 m ³ (石油 1 バレル相当)
比率	1.3 × 10 ⁷ m ³ /日
	2.5

グローバル CCS インスティテュート M. Bonner による試算

図み 1 は、2050 年時点で CO₂ 排出源から恒久的な貯留サイトへ輸送する必要があると考えられる CO₂ 量の商業ベースの規模を示した仮説例である。一日に取り扱う必要のある CO₂ の体積は、現在生産及び輸送される石油の体積の約 2.5 倍になると予想される。しかし、考慮すべき重要な事項は、石油と比較した場合の CO₂ の輸送に必要な平均距離であり、いくつかの調査ではこれがかなり短くなる可能性が示唆されている。

CO₂ パイプラインの設計及び操業は、天然ガスパイプラインと同様であると考えられることが多いが、異なる点がある。主な違いは、CO₂ が通常超臨界流体として輸送されることである。超臨界状態を維持するため、CO₂ は 1 平方インチあたり 1,800~2,700 ポンド (psi: pound per square inch) (12,400~18,600 kPa 相当 ; kPa=キロパスカル) という極めて高い圧力下で輸送される。この CO₂ の圧力は、200~1,500 psi (1,380~10,340 kPa) という一般的な天然ガスパイプラインの操業圧力よりも高い傾向にある。これは、必要なパイプラインの圧力を維持するため、パイプラインの管路の途中にブースターステーション (ポンプ) が必要であることを意味する。また、CO₂ パイプラインの圧力が高くなるということは、通常天然ガスの輸送に使用されるパイプよりも壁面の厚いパイプが必要となるということである。

CO₂ ネットワークの構築は、天然ガスのパイプライン及び石油増進回収に使用される CO₂ パイプラインに関するこれまでの豊富な技術面、操業面及び規制面での実績を踏まえて実施可能であることは明らかである。しかし、上述のとおり、地層貯留プロジェクトのために輸送しなければならない CO₂ の規模は、天然ガスに比べて非常に大きい。

CO₂ の回収や貯留に関する公開文献と比較すると、全国規模のパイプラインシステムの大きさ、構成、商業構造及び規制に関する調査のような CO₂ パイプラインに関する分析調査は少ない。これは、CO₂ の輸送関連の問題が現時点で CCS 展開に対する大きな障壁とはみなされていないという、CCS 関係者間の一般的な認識を反映している可能性がある。

米国、カナダ、ノルウェーを除き、CO₂ パイプラインに関する実績がある国は比較的限られている。米国には、天然の発生源及び人為的な排出源から、年間 45~55 MtCO₂ を輸送する 6,000 km を超える専用パイプラインがある。

最近のある研究では CO₂ パイプラインに関して、「要素レベルでの技術革新の必要はない。(したがって) CO₂ の輸送に関する評価は、CCS の回収及び圧縮に関するものとは異なる性質を持つと考えられる」と述べている。

2005 年、IPCC の CCS に関する特別報告書 (IPCC's Special Report on CCS) は、「CO₂ パイプラインについては、石油・ガスパイプラインに関する同様の分野の問題よりも困難な問題、あるいは解決不能な問題は見当たらない」と結論づけている。

回収プロセス及び/又は貯留に関する解決策と比較して、CCS の大規模展開に対する CO₂ の供給ネットワークに関する障壁が少ないことはおおむね事実かもしれないが、それでも簡単というには程遠く、この部分でも設計、計画及び操業に関する多くの複雑な検討を要する。

CO₂ パイプラインのインフラ開発に影響を及ぼす 4 つの主な課題を以下に示す。

1. 以下を考慮に入れた工学設計

- 貯留のために CO₂ をより長い距離輸送し、より困難な地形 (例えば、市街地中心付近、沖合など) を横断する必要性が一層増していること。
- 回収プロセスから得られる CO₂ 流の物理化学的特性 — 燃焼前及び燃焼後回収プラントの CO₂ 流には、固体の硫黄、液体の水など、様々な濃度の不純物が含まれる可能性が高い。これらの不純物は、CO₂ の挙動に影響を与えるだけでなく、石油増進回収 (EOR) を目的とした既存の CO₂ パイプラインに比べて、より複雑な設計を必要とする可能性がある。

- CO₂の供給（回収）及び需要（貯留）の整合 — 発電所及び工業排出源から供給される CO₂の量及び質は時によって大きく変化すると考えられる。そのため、パイプライン内で相変化が生じないように CO₂流量の操業上の管理を慎重に行う必要がある。
 - パイプライン設備の操業は、その性質により、通常の運転始動や保守、季節変動などを理由に不定期（秒単位から週単位まで）に流量が大きく変化すると予想される。そのため、CCS チェーン全体で技術仕様のバランスを取り、調整する必要がある。
2. 政策及び規制に関する問題
- 経済的規制及びそれと相補的な支援政策
 - 短期及び長期の政策目標に即して、資金調達、将来の能力増強、柔軟性などの観点から最適化されたネットワーク設計
 - 管轄区域の境界を越えた CO₂ 輸送への規制等の法的な障害
 - 規制モデル及び管轄区域ごとの制度のバリエーション
3. 目的に適した基準の開発。特に、複数の CO₂ 排出源が同一のパイプラインネットワークに接続されており、CO₂の圧力、温度及び不純物の濃度に関して共通の仕様が必要となる場合に適用される基準。これは、結果として、CO₂の回収技術の選択（採用すべき回収、圧縮及び乾燥技術のコストなど）に影響を与える可能性がある。
4. パイプラインへの投資の全体コストと得られる施設能力及びそのための資金調達オプション
- パイプラインの均等化原価（levelised cost）
 - CO₂需要、巨額の設備投資、長期にわたる回収期間及び大型のパイプ等の要素からくる不確実性並びに不透明な CO₂の将来価格を考慮したビジネスモデル及び資金モデル

本文書は、以下の 5 つの章で構成される。

- 第 1 章では、ネットワークの概要及びその設計、建設、操業に影響を及ぼす課題を示す。
- 第 2 章では、所有権構造、市場、インセンティブその他の政府介入形態など、政策に関する課題について精査する。
- また、第 2 章では、ネットワークの設計及び建設の手引となる重要な基準も示す。
- 第 3 章では、均等化原価、相対的な原価構成、ネットワークの最適化、資金調達の枠組みなど、ネットワークの経済性に着目する。
- 第 4 章では、ネットワークの建設及び操業に対する社会的承諾に影響する可能性がある主な規制要素を考察する。
- 第 5 章は、合意に関する事項をまとめて整理する。

第6章

最終見解

背景

CO₂の供給ネットワークは、統合 CCS システムの重要な構成要素の一つである。統合 CCS プロジェクトにおいて費用効率の高い開発を行うには、回収、輸送及び貯留を含む CCS の構成要素すべての最適な設計が鍵となる。

公的に入手可能な文献の多くにおいては、今後数十年のうちに回収及び貯留を要する可能性のある数十億トンの CO₂ を輸送する手法でもっとも有力なものがパイプラインであるという見解で一致している。パイプラインは技術的に成熟しており、比較的成本が低いため、CCS の大規模展開において実質的な障壁ではないと考えられることが多い。

CO₂回収では技術・費用面での課題があり、貯留では地質学的情報や規制要件が必要となるのに対し、CO₂の供給ネットワークではより実務的な面が問題になるだろうが、それでもやはり財政的、政治的及び社会的な要因には大きく左右される。

CO₂の再利用が現在の CCS の主な経済的推進力であるが、CO₂の再利用単独では投資家への CCS プロジェクト出資の働きかけには十分であるとは考えにくく、それ以外の補足的な施策が必要であると考えられる。現在の CO₂パイプラインが、(EOR などの) 商用での CO₂の再利用が採算的に魅力があるために促進されているのとは対照的に、貯留を目的とした CO₂パイプラインの今後の開発は、法的強制力のある排出制限(及びそれに伴った炭素価格)によって、大きく促進されると考えられる。

現時点では、石油及びガスパイプラインの操業と比べて、恒久的な地層貯留利用のための CO₂パイプラインの設計及び操業に関する産業界の実績は極端に少ない。米国、カナダ、ノルウェーを除くと、CO₂パイプラインに関する実績がある国は比較的限られている。

CCS 操業実績の不足、十分かつ長期的な炭素価格制度の欠如、規制的推進力の欠如、CO₂排出源・貯留地点の場所、容量及びタイミングに関する不確実性が、大規模な CO₂パイプラインの商業開発を引き続き遅らせることとなる。このことは、全国規模の CO₂パイプラインのネットワークが直ちに必要となる可能性は低く、CO₂排出量の許容レベルが厳しくなるにつれて徐々に関連インフラを拡大すれば対応できることも示唆している。

しかし、天然ガスパイプライン又は EOR 用の CO₂パイプラインの工学的及び科学的知見を恒久的な貯留を目的とする CO₂パイプラインに適用すればよいという単純な問題ではなく、市場構造が必ずしも同じように発展するという確証もないと考えられる。例えば、米国で EOR に使用される CO₂の約 85%は天然の発生源に由来しており、高純度の CO₂流となる傾向があるため、CO₂を供給するための輸送が行いやすくなっている。

統合パイプラインのインフラを推進するか不確かな場所では、開発は段階的に進められていく可能性が高い。これにより、開発者は、複数の CO₂排出源及び貯留地点を連結できるような、よりコストがかかる国家レベル及び(可能性として)国際レベルの統合システムを検討する前に、規模の小さな二地点間のパイプラインから経験を積むことができる。

将来の CO₂供給や貯留サイトあるいは炭素価格政策に関して不確実性が高い場所では、将来的に回収不能資産となるリスクを軽減するため、二地点間ネットワークがより好ましい手法とされる可能性がある。この手法は、将来的に同じパイプライン経路に複数のパイプラインを敷設可能なように、敷設権を留保することによって十分に補完されると考えられる。これにより、過剰に先行投資することなく、後続プロジェクトの計画及び承認に関するリスクを軽減し、その期間を短縮することができる。

分析によれば、類似した所有権構造の下で比較すると、容量の大きいパイプラインの方が、容量の小さいパイプラインよりも単位コストが低い傾向がある。その結果、国家レベルの統合大型CO₂パイプラインの開発は、将来のCO₂の回収設備及び貯留サイトの地点選定にも影響を与える可能性がある。これは、敷設するパイプラインの規模の経済がどの程度になるかによることになる（すなわち、パイプラインの容量を効率よく最大限に活用するようになる）。

パイプラインの開発者は、CO₂パイプラインの敷設費及び操業費を引き上げる要因をよく理解している。数例を挙げると、横断する地形、鉄鋼やパイプなどの設備の国際市場、請負業者の国内市場、パイプの径などに左右されるため、費用はプロジェクトごとに大きく異なる。

IEAは、CO₂パイプラインに関する政策的課題を端的にまとめており、CO₂の輸送インフラ整備について確実性を欠くことでCCSの展開に影響が及ぶおそれがあること、輸送の自然独占が起これば、サービス不足の傾向が生じかねないことを示唆している。

CO₂パイプラインへの投資における競争市場の確立を可能な限り追求すべきである。この可能性が存在しない場合、垂直的統合を推進する前に、市場参入者間の協力及び/又は交渉を奨励してもよいと考えられる。垂直的統合がCO₂パイプラインの関連リスクを低減するための有効なアプローチとなる場合は、将来のある段階において同アプローチが競争構造に与える影響の可能性にも配慮する必要がある。

特にEORプロジェクトが多い場所では、CO₂パイプライン開発の初期段階における政府の役割は少ないというもったもなしな意見があるが、パイプラインの敷設が増えるに従って政府が関与する重要性が増し、パイプラインの立地、第三者の利用権、環境パフォーマンスなどに対して規制が必要になる。

煩雑あるいは不適切な規制が、CO₂パイプラインのインフラに対する民間投資への重大な妨げとなり得ることは明らかである。これは、さらなる説明を要する分野の一つにすぎず、他の重要な規制制度の分野を以下に示す。

- 安全性（すなわち、濃密相CO₂の特殊な物理的特性を考慮し、HSEの要件を十分に認識して安全規定に含めること。）
- 立地
- 輸送料の設定又は料金体系
- 第三者による利用権
- パイプラインの廃止措置

例えば、CO₂パイプラインの規制に関する主な課題は、濃密相CO₂及び回収プロセスから生じる不純物を含むCO₂流をどう分類するかが不確実であることと考えられる。しかし、これらの条件は、既存の石油・ガスパイプライン用に定めた要件と同様に対応できるため、CO₂パイプラインの設計、敷設、許可又は安全制度を完全に新たに構築する必要があるとは考えられない。

統合CCSチェーンに特化した既存の認定された民間基準、国家基準又は国際基準はいずれも存在しないが、一方CO₂の操業に直接的にも間接的にも適用可能なパイプラインに関する技術標準が形成されつつある。また、国際的に合意され、目的にかなった自発的な基準を遵守することが、CO₂パイプラインのプロジェクトを社会的に受容されやすくするとともに、新たなCO₂パイプラインの許認可、立地の特性評価、敷設及び操業化の実現に伴う負担を最小限にするためのガイドとして規制当局及び事業者の双方に役立つ可能性がある。

回収場所及び貯留設備間のCO₂輸送に関する重要な検討事項は、CO₂流の成分の詳細である。回収されたCO₂の質は、燃焼後回収の酸化回収環境又は燃焼前回収の還元回収環境のどちらでCO₂が回収されたかによって必然的に異なるが、CO₂の質はパイプラインの（費用及び操業面での）性能に影響を与えることになるため、CO₂流はCCSチェーン全体で高度な一貫性を保つ必要がある。

また、特に CDM 及びロンドン条約締約国の加盟国における CO₂ の越境移動を可能にする決議を促すための国際社会の更なる努力は、先進国及び発展途上国の双方の CCS 及び CO₂ パイプラインの開発に大きく役立つであろう。

