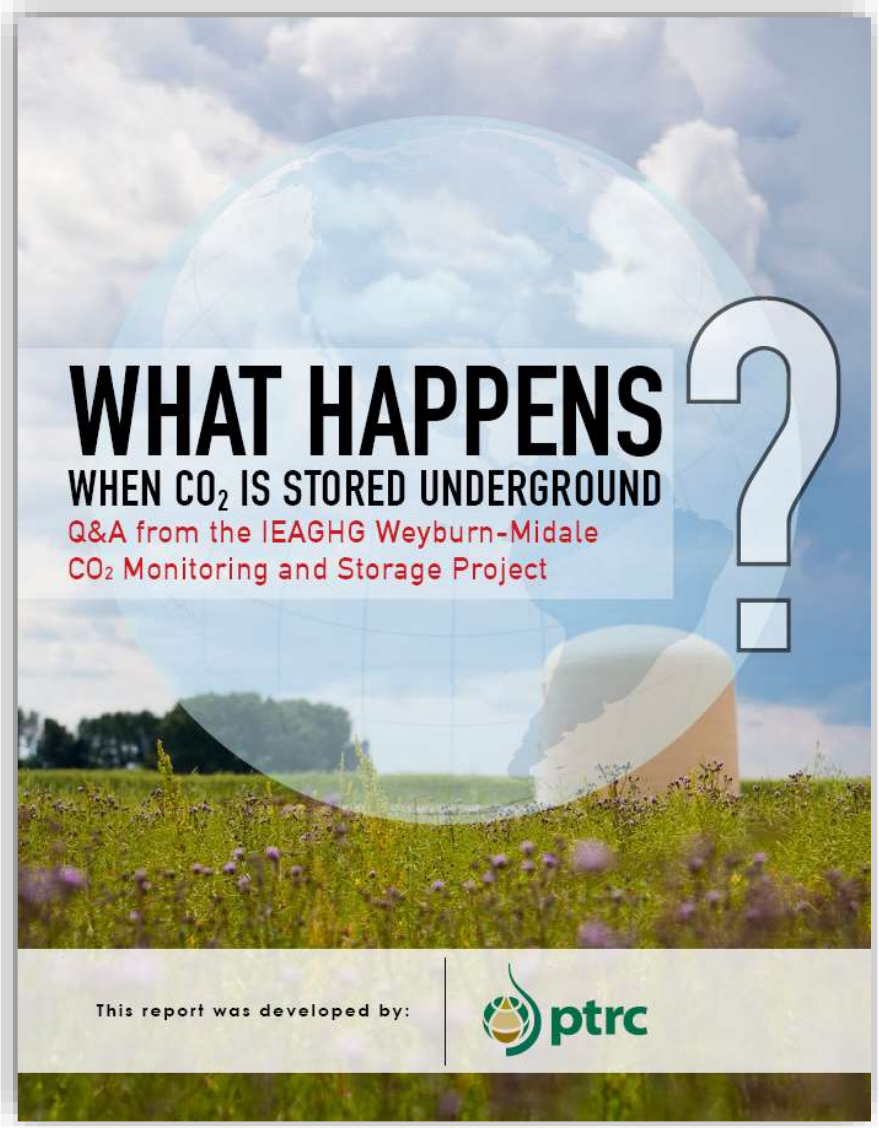
CO_2を地中に貯留すると、
何が起こるか

IEAGHG Weyburn-Midale CO_2モニタリング・貯留プロジェクトについてのQ&A



TRANSLATED BY THE GLOBAL CCS INSTITUTE

CO_2を地中に貯留すると、何が起こるか

IEAGHG Weyburn-Midale CO_2モニタリング・貯留プロジェクトについてのQ&A

本報告書は PTRC（石油技術開発センター）によって作成されました。

ptrc

CO_2を地中に貯留すると、何が起こるか
IEAGHG Weyburn-Midale CO_2モニタリング・貯留プロジェクトについてのQ&A

本文書の電子版は、グローバル CCS インスティテュートのウェブサイト www.globalccsinstitute.com および石油技術開発センター（PTRC）のウェブサイト http://ptrc.ca より閲覧可能です。

本書は、気候変動の重要な緩和策としての CCS の議論を広げるために、グローバル CCS インスティテュートの資金提供により作成されました。本書に含まれる見解は、必ずしもグローバル CCS インスティテュートまたはそのメンバーの意見を代表するものではありません。グローバル CCS インスティテュートは、情報の信頼性、正確さまたは完全性を一切表明または保証するものではなく、いかなる形によって生じた（過失を含む）情報の誤り、または、情報の欠如に関しても、一切責任を負いません。

著作権：2014, 2015 年グローバル CCS インスティテュート、メルボルン

お問い合わせ先

Global CCS Institute（グローバル CCS インスティテュート）
PO Box 23335
Docklands VIC 8012
Australia
info@globalccsinstitute.com

および／または

Petroleum Technology Research Centre（石油技術開発センター）
220, 6 Research Drive
Regina, Saskatchewan, Canada
S4S 7J7
info@ptrc.ca

ISBN 番号：978-0-9871863-9-3

1. 炭素回収と貯留
2. 二酸化炭素隔離
3. 二酸化炭素測定およびモニタリング

表紙：サスカチェワン州 Weyburn 近くのフィールドに設置されたファイバーグラス製の小屋で覆われた CO_2 圧入井

裏表紙：Cenovus Energy Weyburn プラントを点検する作業員（写真提供：Cenovus Energy）

この出版物は知識共有の目的でグローバル CCS インスティテュートが刊行したものです。もし当翻訳の一部が出典元と差異があった場合は、出典元に拠ります。

IEAGHG Weyburn-Midale CO_2 モニタリング・貯留プロジェクトは、カナダ・サスカチェワン州南東の石油埋蔵地への CO_2 圧入および貯留効果を調査するために設計された、世界でもトップレベルの研究プログラムです。

プロジェクトは2000年から2012年の間に2段階を経て完了し、深部地層に貯留されたCO_2の大規模な圧入、モニタリングおよびモデリングについて調査が行われました。本調査プロジェクトの第1フェーズの結果は2005年[1]に発表され、第2フェーズの結果は、2012年に発行された『***Best Practices for Validating CO2 Geological Storage: Observations and Guidance from the IEAGHG Weyburn-Midale CO2 Monitoring and Storage Project*** *(CO_2地中貯留の検証のベストプラクティス: IEAGHG Weyburn-Midale CO_2監視・貯留プロジェクトの考察とガイダンス)*』[2]という題名の書籍に記載されました。この書籍の出版をもって、油田におけるCO_2貯留に関する調査が完了しました。

上記の書籍より手軽な本冊子は、CCS について、一般市民から頻繁に寄せられる「よくある質問」をまとめたものであり、記載された回答は 12 年間の油田実地調査から得られた広範囲に及ぶデータおよび調査結果に基づいたものです。本冊子の意図は、CO_2 貯留に関してよく寄せられる質問に関し、事実に基づいた回答を提供することです。

最初の質問「Weyburn-Midale プロジェクトとは何ですか？」では、Weyburn-Midale 調査範囲に関する背景や状況について説明します。他の質問では、一般的な疑問（「CO_2 とは何ですか？」）から、より具体的な質問（「所有地の地下の鉱物権を所有している場合、CO_2 貯留で利用料が支払われますか?」）に移ります。質問は、以下の 3 つのカテゴリーに分類されます。

1. 基礎知識
   a. 二酸化炭素（CO_2）
   b. CO_2 回収・貯留（CCS）
2. 地中に貯留された CO_2 はどうなりますか？
3. 「もうしそうなったら」という仮説・想定。CCS に関するよくある質問

より広範囲に及ぶ技術的な詳細については、上記ベストプラクティスに関する書籍に説明されています。この詳細な情報が記載された書籍の入手方法については、本冊子の巻末に記載しています。

表記簡略化のため、本書ではこれ以降、IEAGHG Weyburn-MidaleCO_2 モニタリング・貯留プロジェクトを「WMP」と記載します。

INTRODUCTION **1**

Weyburn-Midale プロジェクト（WMP）とは何ですか？ **5**

基礎知識 **8**

二酸化炭素（CO_2） **8**

1. 二酸化炭素（CO_2）とは何ですか？ 10
2. 炭素循環とは何ですか？ 10
3. CO_2 の特性にはどのようなものがありますか？ 11
4. CO_2 は爆発したり、燃えやすいですか？ 12
5. CO_2 は有害ですか？ 12
6. 他に CO_2 の利用法はありますか？ 12

CO_2 回収・貯留（CCS） **14**

7. CO_2 回収・貯留とは何ですか？ 15
8. CO_2-EOR とは何ですか？ 17
9. なぜ CO_2 回収・貯留が必要なのですか？ 18
10. 人為起源の CO_2 を貯留しないと、どうなりますか？ 19
11. どのようにして CO_2 を回収するのですか？ 20
12. CCS の費用はどのくらいかかりますか？ 20
13. 石油会社にとって、CO_2 はどのくらいの価値がありますか？ 20
14. CO_2 の所有者は誰ですか？ 21
15. CO_2 回収・貯留（CCS）と CO_2-EOR は経済的に採算が取れますか？ 21

地中に貯留された CO_2 はどうなりますか？ **22**

16. CO_2 をどのように貯留し、貯留場所はどのように決めるのですか？ 23
17. 複数の場所に貯留したとして、どのくらいの量の CO_2 を貯留できますか？ 25
18. どのくらいの深さまで CO_2 を貯留するのですか？ 26
19. CO_2 の「恒久的な貯留」とはどういう意味ですか？ 26
20. 水や石油、ガスのように CO_2 は地下に自然に発生しますか？ 27
21. CO_2 は地中でどのように移動しますか？ 28
22. CO_2 が地層に留まっていることをどのように確認しますか？ 29
23. CO_2 が圧入されると、地下の貯留地はどのように変化しますか？ 29
24. 地中の CO_2 をどのように監視しますか？ 30
25. CO_2 の移動進路をどのように確認しますか？ 30
26. CO_2 の漏出をどのように検知しますか？ 32
27. CO_2 圧入により油層の圧力は上昇しますか？ 32
28. 地中に貯留された CO_2 をどのくらいの期間、監視する必要がありますか？ 32
29. CO_2 貯留に関する規制はありますか？ 33

「もうしそうなったら」という仮説・想定。CCS に関するよくある質問 **34**

30. CO_2 貯留の安全性をどのような方法で確認しているのですか？ 35
31. CO_2 貯留は飲料水に影響を与えますか？ 35
32. CO_2 貯留は表土に影響を与えますか？ 36
33. CO_2 貯留は魚類や野生生物に影響を与えますか？ 37
34. CO_2 貯留は地価に影響を与えますか？ 37
35. 断層、断裂とは何ですか? 38
36. CO_2 の地中への圧入により地震が発生しませんか? 39
37. CO_2 貯留地付近で地震が起こったらどうなりますか? 40
38. 裸孔とは何ですか？また、どのように維持しますか？ 41
39. CO_2 パイプラインの安全性は、どのようにして確認しますか? 42
40. パイプラインから CO_2 が漏出した場合、どうなりますか？ 43
41. 貯留プロジェクトではどの程度の騒音や混乱が発生しますか? 44
42. CO_2 貯留施設はどの程度目立ちますか? 45
43. 所有地の地下の鉱物権を所有している場合、CO_2 貯留で利用料が支払われますか? 46
44. 地中で CO_2 が漏出した場合、どうなりますか？ 46
45. 100 年または 1000 年後に CO_2 が漏出した場合、どうなりますか？ 47
46. 漏出が発生した場合、誰が修復に責任を負いますか? 47

CONCLUSION **48**

巻末注 **50**

謝辞 **51**

Weyburn-Midale プロジェクト（WMP）

WMP の一環として調査が実施された2000 年から2012 年の間に、約 2,200 万トンの CO_2 が、カナダ・サスカチェワン州南東の Weyburn および Midale 油田の深部 1.5km の地中に圧入されました。

Weyburn-Midale プロジェクト（WMP）とは何ですか？

IEA 温室効果ガス研究開発プログラム Weyburn-Midale CO_2 モニタリング・貯留プロジェクト（以下、WMP）は、地質貯留層への CO_2 圧入について詳細に調査した世界で最初の研究の一つです。CO_2 は、気候パターンに変化をもたらす主要原因の一つとみなされる温室効果ガスです。CO_2 の大気への到達を防止するための一つの選択肢となるという理由から、CO_2 の地中貯留に関心が集まっています。この活動を成功させるためには、貯留地は非常に長期間、つまり数千年、場合によっては何万年もの間、CO_2 を安全に封じ込めなければなりません。

WMP 調査の一環として調査が実施された 2000 年から 2012 年の間に、約 2,200 万トンの CO_2 が、カナダ・サスカチェワン州南東の Weyburn および Midale 油田の深部 1.5km の地中に圧入されました。これらの比較的古くから採掘された油田に CO_2 が圧入されている理由は、石油の採掘量を増加させるためです（このプロセスは石油増進回収または EOR と呼ばれます）。EOR を実施しないと、これらの油田の石油生産量は採算が見合わないほど少量となりますが、CO_2 圧入の直接的な結果として、各貯油層からの石油生産量は、圧入開始前の水準と比較して 3 倍に増えました。今日、年間 250 万トンを超えるペースで CO_2 が圧入され続けており、今後数十年は継続すると思われます。2012 年の研究プロジェクト終了時までに 2 つの油田の地中深部に貯留された CO_2 量および 1 日あたりの圧入総量の概要については、Figure 1 をご参照ください。

油田に CO_2 を圧入する主な理由は EOR ですが、WMP 調査は石油生産の増加や、CO_2 回収施設および CO_2 パイプラインの日常的な運用、または CO_2 圧入のいずれにも焦点を当てているわけではありません。WMP 調査では、いったん圧入された CO_2 がどうなるのかを理解することに注力しています。

WMP 調査では、次の 3 つの疑問に対する理解に努めました。1）圧入された CO_2 はどこに移動するのか、2）CO_2 は地下深部で、どのように地表下の環境と影響し合うのか、3）将来 CO_2 は安全に貯留されるのか、の 3 点です。これらの疑問に答えるために、様々な測定およびモニタリング方法が使用

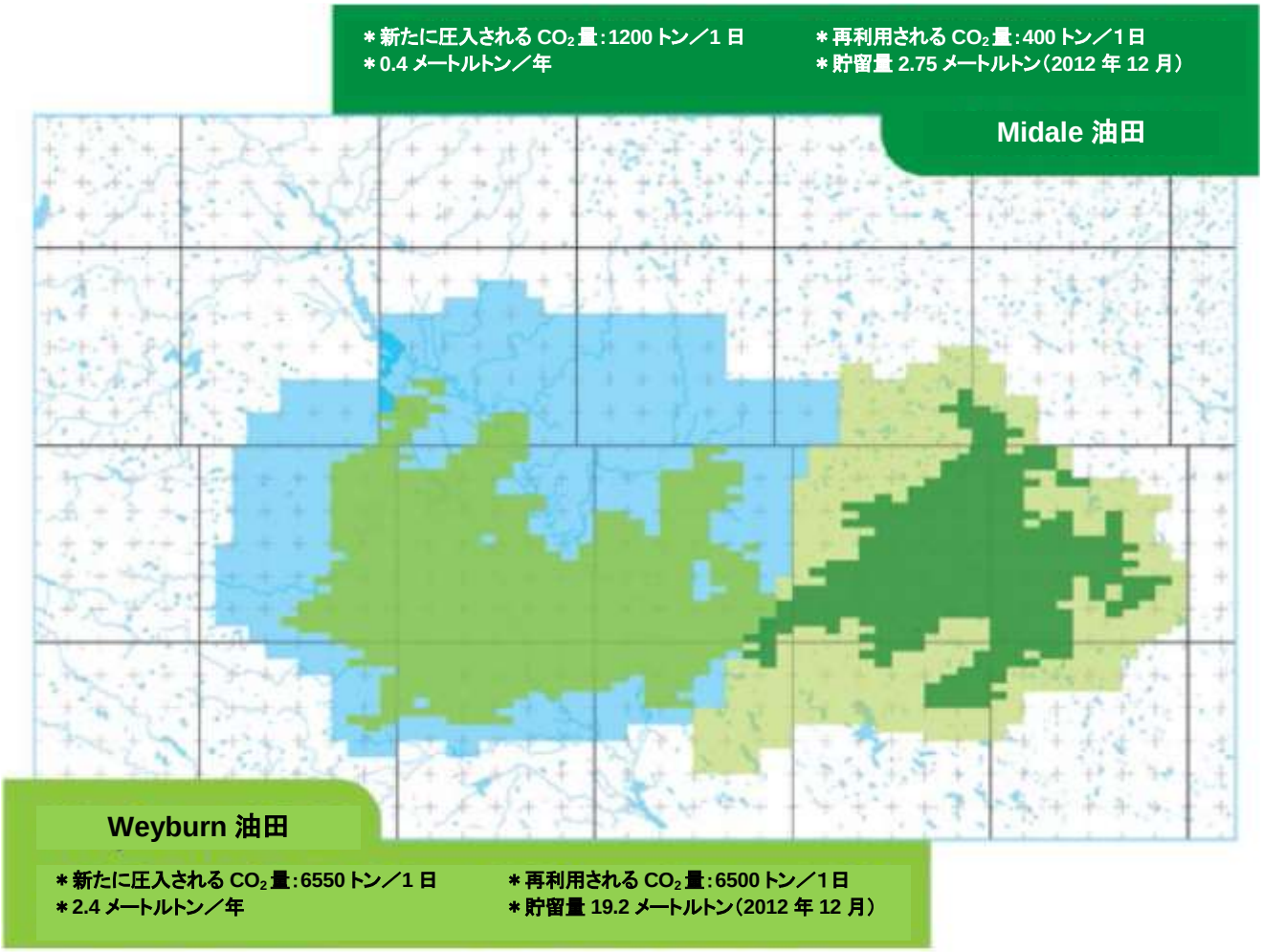
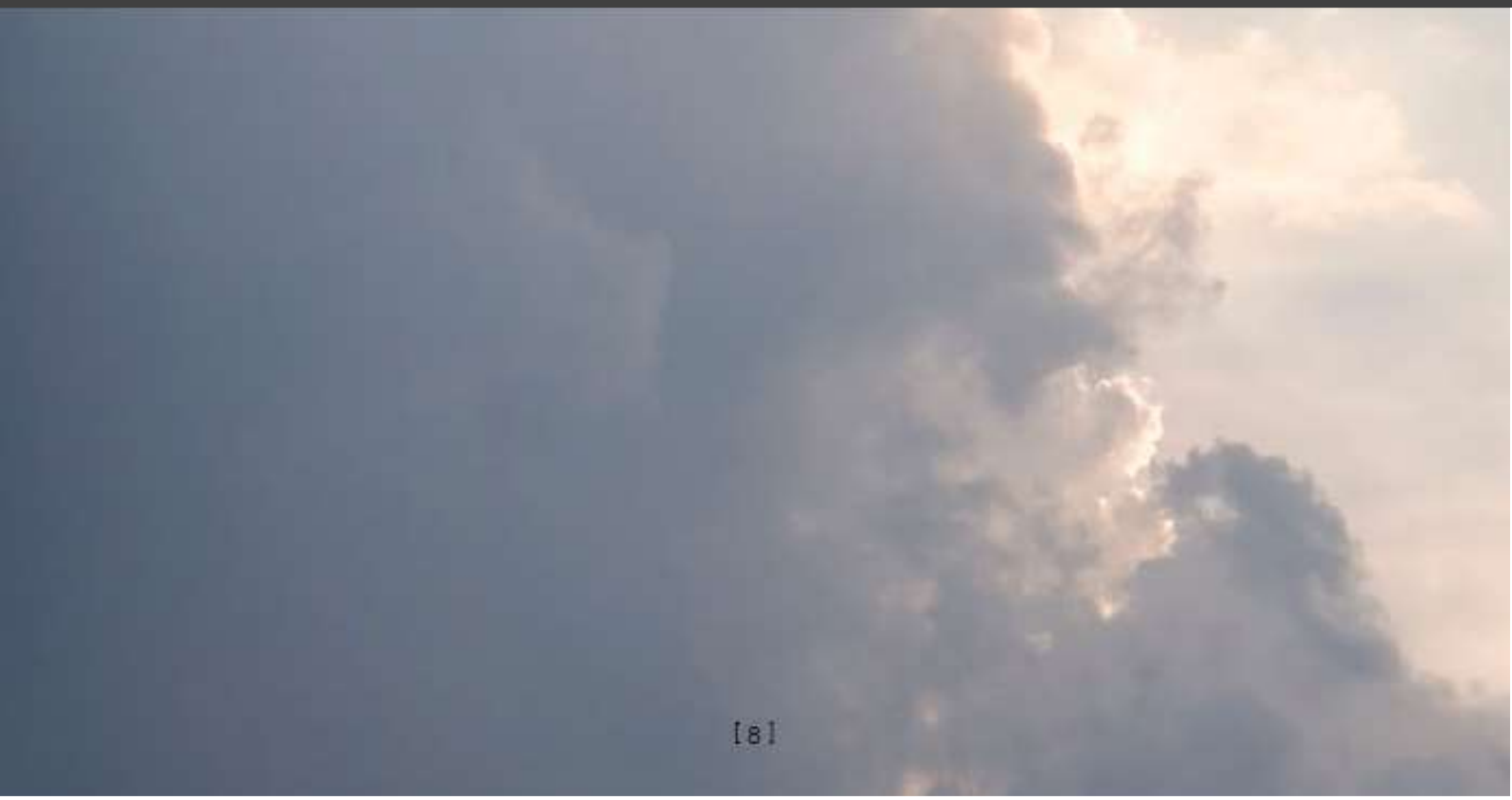


Figure 1. 各油田に毎日圧入されている CO_2 量（Dakota Gasification Company より新たに輸送された CO_2 と、石油と共に生成され、その後再圧入された CO_2 の両方を含む）と合わせた、2012 年時点での Weyburn および Midale 油田の CO_2 貯留総量が、この数字（メートルトン）に含まれます。2 つの油田の貯留総量（2,200 万トンまたは 22 MT）は、年間 400 万台分の自動車の CO_2 排出量に相当します（原画像の提供：PTRC）。

CO_2 貯留関連の 7 つの重要分野に焦点を合わせた WMP 調査

- **貯留地特性の理解：**安全かつ恒久的に CO_2 を貯留する適性を判断するため、貯留地の全般的な地質学的な環境や状況の考察が行われます。これには、貯留層に焦点を当てるのと同時に、貯留層周辺の岩石の調査も含まれます。Weyburn の場合、地下 50,000 立方キロメートルを超える範囲にわたり、測量調査が実施されました。
- **貯留パフォーマンスの予想：**多くの要因が、所定の貯留層中に圧入および貯留可能な CO_2 量に影響を与えます。本作業では、岩石の物理的特性だけでなく、経済的および政策上の配慮を含む複数のシナリオを想定し、Weyburn 油田の貯留潜在性を調査しました。
- **貯留された CO_2 の測定および追跡：**CO_2（または液体）の圧入によって生じる岩石や液体の変化を検知し、測定する方法は、モニタリング調査の一部です。一般的に、データ結果によって、CO_2 の地中での移動方法や場所が明らかになります。CO_2 が圧入されている岩石の深層部、また、地表で、また人工衛星を使用した、より高部または浅部の地質レベルでのモニタリングが可能です。
- **調査を裏付けるためのモデリング：**将来的な拡散や貯留層のパフォーマンスを予想するために、高度なコンピュータを使用したモデリングによって、圧入される CO_2 の効果をシミュレートできます。モデルの精密度を検証する一つの方法として、過去の性質や挙動を予想するのにモデルを使用する、ヒストリーマッチング法が挙げられます。
- **裸孔の完全性：**古い坑井には、貯留層からの潜在的な漏出経路が存在する場合があります。WMP 調査では、古い坑井の状態を入念に調査し、漏出の可能性について現実的な評価ができるように、独自の試験プログラムを坑井内で実施しました。
- **リスク評価：**複数の調査によって、長期間の CO_2 地中貯留によってもたらされる潜在的なリスクの特定、評価および格付けが容易になりました。考慮されたリスクには、人間の健康への影響や安全性、環境、変化する経済状況および将来の運用へのリスクが含まれました。Weyburn での CO_2 漏出に関する技術上または地質上のリスクは低いといえます。
- **調査結果の情報交換および規制準拠：**実施されている科学調査に関し一般市民や政府に情報を伝達し、この草分け的な研究に人々を関与させるための包括的なアウトリーチプログラムが開発されました。

基礎知識：二酸化炭素（CO_2）



「地球の大気中の CO_2 量は、過去 35 万年で最高レベルに達しました。その理由は、現在世界中で燃焼されている大量の化石燃料と、大気中から CO_2 を吸収するのに重要な役割を果たす森林や植物の減少です。大気中に含まれる多量のCO_2 は、地球規模の気候変動に影響を与える主な懸念の一つです。」

Q 1. 二酸化炭素（CO_2）とは何ですか？

A 二酸化炭素または CO_2 は、2 つの酸素原子と 1 つの炭素原子が含まれる、極めてありふれた、自然に発生する分子です。CO_2 は、地球上の日常的な環境で一般的に発生する気体であり、私たちを取り囲んでいます。無色無臭で、地球の大気中に自然に存在し、地球の炭素循環の重要な一部です。すべての人間と動物は呼吸をする時に CO_2 を吐き出し、植物は成長のための光合成と呼ばれる過程の中で、CO_2 を取り込みます。

CO_2 は地球の大気の一部として太陽からのエネルギーを封じ込め、生物が生存可能な気温に地球を保ちます。このため、CO_2 は温室効果ガス（greenhouse gas GHG）と呼ばれます。しかし、人間の営みに関連した人為起源の CO_2 の増加によって、数々の問題が引き起こされます。例えば、一方で化石燃料の燃焼によって余分な CO_2 が（その他の温室効果ガスと共に）大気に放出され、もう一方で森林地帯の破壊が木々によって吸収される CO_2 量の減少を引き起こすといったような問題です。いずれの場合も、過剰なエネルギーや熱が大気中に封じ込められる原因となります。この余分なエネルギーによって、気候がどんどん不安定化し、結果的に気候パターンの大幅な変動が生じるのです。

Weyburn および Midale 油田に圧入された CO_2 は、米国の石炭ガス化発電所で石炭をメタンに転換することによって生成され、パイプラインを利用してサスカチェワン州（カナダ）南東部に輸送されます。発電所で生成されたメタンは、一般家庭や商業施設の暖房に利用されます。石炭をメタンに変化させるこの過程の一環で、CO_2 が副産物として生成されます。CO_2 の供給元であるノースダコタ州 Beulah の Dakota Gasification Company は、このガス化プロセス中に生成された CO_2 を回収し、液状になるまで大型の圧縮機を使用して圧縮（高圧状態にする）します。その後、Weyburn および Midale 油田に圧入するために、CO_2 はパイプラインによってサスカチェワン州南東に輸送され、より多量の石油を地中から生産するために活用されます。したがって、これらの油田で事業に従事する石油会社 2 社にとって、CO_2 は石油生産を増進するために使用される貴重な商品なのです。

Q 2. 炭素循環とは何ですか？

A すべての生物には炭素が含まれます。また、炭素は空気（大気圏）、海洋（水圏）および地面（岩圏）の一部です。炭素は異なる形を取りながら、これらすべての圏を通じて、常に再利用されています。この動きは、炭素循環という用語で表現されます。

大気中では、炭素は常に酸素と結合し、CO_2 を形成します。植物、木々、藻類および一部の細菌は大気中の CO_2 を吸収し（あるいは「光合成を行い」）、炭素と酸素を分解します。つまり、成長するために炭素を利用し、酸素を放出するのです。人間や動物は酸素を吸い込み、炭素を豊富に含む植物や動物を食物として取り入れます。「呼吸作用」と呼ばれる過程で、人間や動物はエネルギー源として植物や肉を活用し、CO_2 を吐き出します。動物の排泄物や枯れた植物は土の中で分解され、何百万年以上もかけ、最終的には植物質や動物質の一部は地中深くに堆積し、岩石層の圧力によって、高密度の炭素または炭化水素、すなわち化石燃料（石炭、石油およびガス）に変化します。

約 1 万 2 千年前の最後の氷河期後期以来、大気中の CO_2 量は 280 parts per million（ppm - Figure 3 を参照）を下回る数値で比較的安定していました。木々や草木を燃やしたり、化石燃料の燃焼といった人間活動によって、過去 200 年以上にわたって CO_2 の生成量が大幅に増加しました。これらの人間活動は、炭素循環に影響を及ぼし、現在毎年約 330 億トン（33 ギガトン）の CO_2 が新たに排出されています（これは 33,000,000,000 トン）[3]。大気中の CO_2 レベルは、大昔の方が

むしろ高かったのかも知れませんが（例えば、恐竜時代）、現在の地球大気中の CO_2 量は過去 35 万年で最高量を記録しました。大気中の多くの CO_2 量は、地球規模の気候変動に影響を及ぼすという意味で、重大な懸念の一つです。

WMP 調査では、一つの供給源であるノースダコタ州の石炭ガス化発電所から排出された人工または人為起源の CO_2 の Weyburn および Midale 油田への圧入について調査しました。石油増進回収事業の一環として、この人為起源の CO_2 が圧入されましたが、もう一つの利点として挙げられるのは、人為起源の CO_2 が大気中に放出されるのではなく、地中に恒久的に留まっている点です。

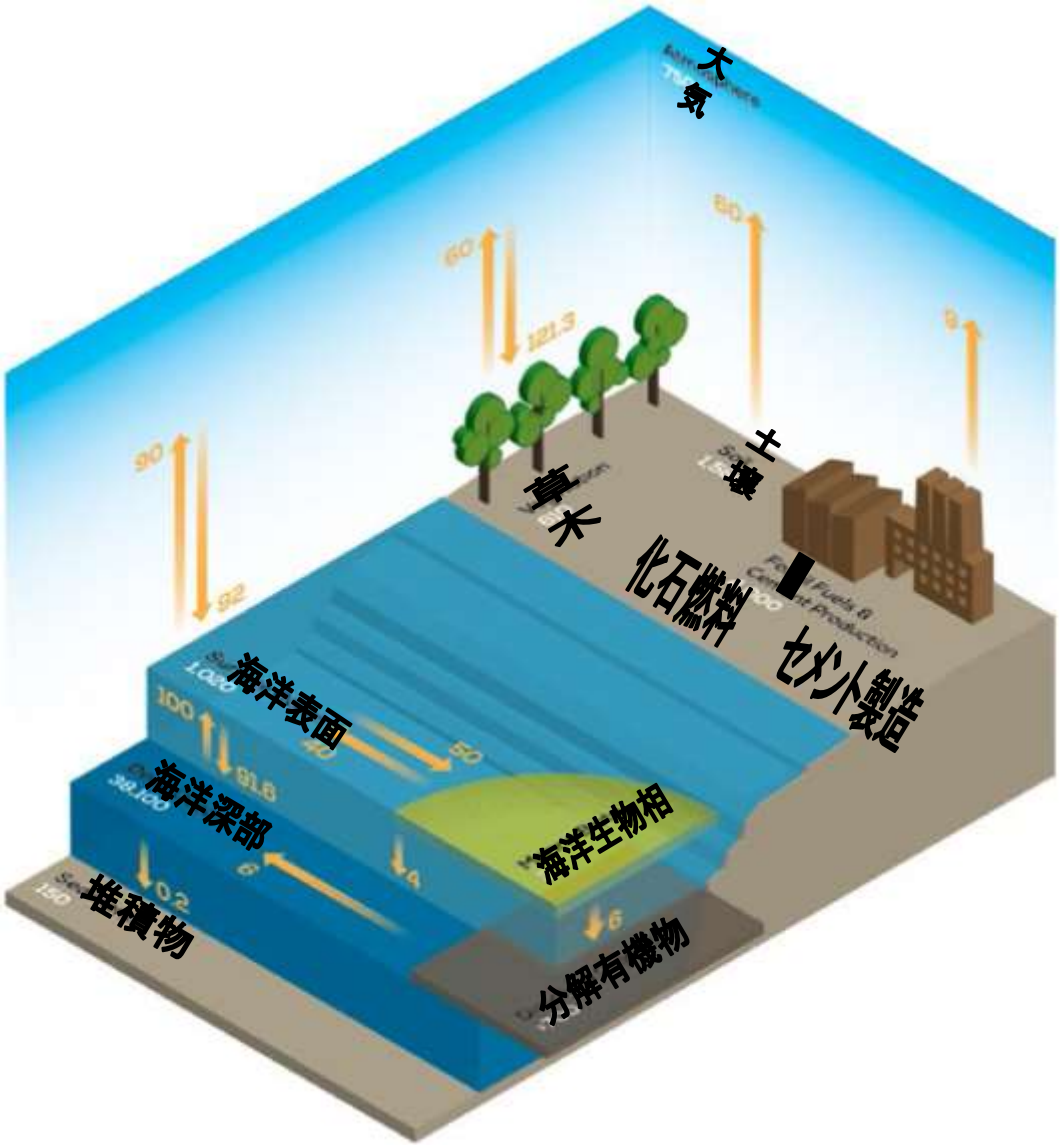


Figure 2. 炭素循環とは、何百億トンの炭素が、大気圏（空気）、水圏（水）および岩圏（土壌）を移動する過程を指します。上記イラストの数字の単位は、10 億トン（ギガトン）です。現在の人間活動によって、約 9 ギガトンの炭素が大気中に増加しています（33 ギガトンの CO_2 のうち 3 分の 1 が炭素、残りの 3 分の 2 が酸素）。推定 4000 ギガトンの石油、ガスおよびその他の炭素を含む炭化水素が燃焼されるため、この量は年々増加しています。

Q **3. CO_2 の特性にはどのようなものがありますか？**

A 混じり気のない CO_2 は、無色透明で無臭の気体です。高圧または超冷却状態では、液体または固体に変化します。-78.5℃以下では、CO_2 は固体（「ドライアイス）になります。

Weyburn および Midale 油田に圧入するために、ノースダコタ州からサスカチェワン州までパイプラインで輸送される CO_2 の純度は 95 パーセントです。石炭ガス化プロセスで生成される成分が他にいくつか含まれます。CO_2 はパイプラインによって高圧状態で輸送され、その過程で 2 つの貯油層への圧入を容易にする液状（「濃密相」とも言います）に変化します。

Q

4. CO_2 は爆発したり、燃えやすいですか？

A

CO_2 は不燃性であり、発火しません。実際、CO_2 は火災事故の消火時に、極めて良く使用されます。しかし、ノースダコタ州から Weyburn 油田に CO_2 を運ぶパイプラインは、液状の CO_2 を輸送するため高圧状態にあります。万一パイプラインが破裂した場合、CO_2 は急激に放出され、空気と接触して凝固し（ドライアイス・スノーを形成）、やがてゆっくりと蒸発します。パイプラインの圧力率にもよりますが、発火する危険のない不燃性ガスとして CO_2 は（大気に）急激に放出されます。

Q

5. CO_2 は有害ですか？

A

日常の濃度水準では、CO_2 は無害であり、むしろ極めて役立つものです。私たちが呼吸する空気、飲料水や口にする食べ物には CO_2 が含まれます。人間や動物は CO_2 を吐き出し、植物は成長のために CO_2 を取り込みます。CO_2 は、多くの飲み物や菓子類に含まれるありふれた材料の 1 つです。

しかし、CO_2 が高濃度（私たちが呼吸する空気の成分で 10%以上の濃度）になると、一定時間を超える曝露はガス中毒を起こしかねません。ノースダコタ州からサスカチェワン州までのパイプラインの CO_2 は、95%近い濃度です。この濃度の CO_2 への曝露は窒息を招きます。

しかし、天然ガス、石油、CO_2 またはその他の混合物などその内容物に関わらず、潜在的な危険物質を輸送する以上、すべてのガスパイプラインには厳格なモニタリング・保守点検に関する規制が実施され、安全な運用を心掛けています。13 年間の圧入経験で、パイプラインを利用して Weyburn および Midale 油田に輸送・圧入された CO_2 を原因とする損傷や死亡事故は今まで一件も起きていません。

Q

6. 他に CO_2 の利用法はありますか？

A

CO_2 の利用法はいくつかあります。食料品の添加物（例として、炭酸飲料や口の中でパチパチと弾ける炭酸キャンディーが挙げられます）として使用されます。また CO_2 は農作物の生産量を増やすために、温室やその他の植物栽培事業にも使用できます。固形 CO_2（「ドライアイス」のほうがなじみがあります）は、食品その他の冷凍保存に使用されます。CO_2 は、零下 78℃以下の温度で固形に変化します。

しかし、上記の目的に使用する CO_2 は純度 100 パーセントでなければなりません。特に、私たちが口にする食べ物に入っている場合は尚更です。Weyburn および Midale 油田への圧入に使用されている CO_2 には、他の化合物が少量含まれます。つまり、食品生産には使用できません。

Weyburn 油田では、石油増産のために原油に混ぜる希釈剤として CO_2 が使用されます。CO_2 には「混和性」があり、つまり、原油に混ぜ合わせ、吸収されます。これによって、原油が油田の亀裂や孔隙から膨張します。膨張することによって、原油はよりたくさんの量が生産井に流れ込みます。CO_2 圧入によって、Weyburn 油田の石油生産量はほぼ 3 倍に達しました。

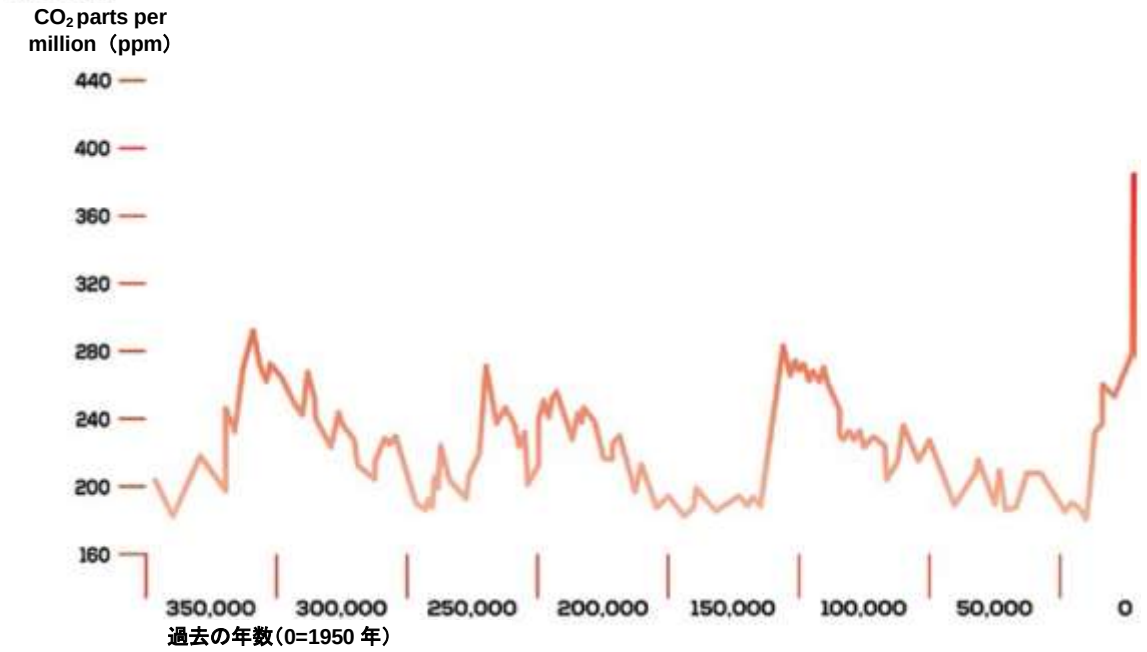


Figure 3. 人間の産業活動以前の 35 万年間は、大気中の CO_2 示数が 300 parts per million（ppm）を上回ったことは一度もありませんでした。産業革命（18 世紀）以降、そして、21 世紀に入り急激な増加割合で、大気中の CO_2 は 400ppm を超え、さらに急速なペースで増加し続けています。1950 年以降、大気中の CO_2 量は 30 パーセント増加しました。

CO_2 回収・貯留（CCS）

「18 世紀の産業革命の幕開け以来、石炭、石油、ガスなどの化石燃料の燃焼増加のため、地球大気中の CO2 量は絶え間なく上昇し続けています…

私たち人間が、地球規模の著しい気温上昇や気候変動の悪化を防ごうとするならば、人為起源の CO_2 量の削減が重要です。」

Q 7. CO_2 回収・貯留とは何ですか？

A CO_2 回収・貯留（CCS）は、大気への大量の CO_2 の放出防止を意図した排出削減プロセスです。技術的には、大規模な工業プラントから生成された CO_2 を回収し、輸送用に圧縮し、CO_2 を恒久的に貯留するために慎重に選出されたサイトの岩層深部への圧入が行われます。CCS は単一の概念とみなされることが多いですが、3 つの主要な段階と異なる種類の技術から成り立っています。

回収

石炭・天然ガス発電所、石油・ガス精製所、製鋼工場およびセメント工場などの施設から生成される他のガスから CO_2 を分離します。

輸送

回収・分離された CO_2 は、輸送の簡易化のために「濃密相」または液状に圧縮されます。通常、CO_2 はパイプラインを使用して地中貯留に適したサイトに輸送されますが、国によっては、少量の CO_2 の運搬に船舶を利用したり、トラックや鉄道が利用される場合もあります。

圧入／貯留

CO_2 は、通常 1 キロメートルまたはそれ以上の深度の地下深くの岩層に圧入されます。CO_2 が圧入される地層は、枯渇油田やガス田、または、石油ではなく鹹水つまり海水の数倍の濃度の水を含む酷似した深部岩層に圧入されるのが一般的です。これらの多孔質岩層は深部含塩層または含塩貯留層と呼ばれ、その殆どが砂岩や石灰岩などの堆積岩です。これらの岩層によって、恒久的に CO_2 を貯留できる安全な空間が生み出されます。堆積岩には、数百万年にもわたり大量の液体やガスを安全に貯留してきた細かい孔隙があります。

Weyburn 油田では、貯留層は深度 1.5km の石灰岩で、孔隙に原油と鹹水を封じ込めています。

Weyburn 油田および Midale 油田では、CO_2 の利用を行う企業によって、ここで述べた一連の技術が活用されてきました。

回収

ノースダコタ州 Beulah の Dakota Gasification Company 所有の石炭ガス化発電所から、CO_2 が回収されます。圧縮機によって CO_2 が液状に変化します。

Figure 4. ノースダコタ州の Dakota Gasification Company に設置された圧縮機によって、CO_2 が「濃密相」に圧縮され、液体のような状態でパイプラインに流入し、カナダに輸送されます。

輸送

ノースダコタ州 Beulah とサスカチェワン州の Weyburn および Midale 油田を繋ぐ全長 320km のパイプラインが CO_2 の輸送に利用されます。パイプラインの直径は、14～12 インチの幅です。

Figure 5. ノースダコタ州 Beulah から Weyburn 油田までを結ぶ CO_2 パイプラインの全長は 320km で、1 日に約 8000 トンの CO_2 を輸送します（画像提供：Dakota Gasification Company）。

圧入／貯留

WMP 調査は、2 件の商業用の石油増進回収プロジェクトに付随したものです。石油会社は、地下 1.5km の深さの油田からの石油回収量を増やすために CO2 を利用し（Q8 を参照）、油圧ポンプや圧縮機を使用して、多数の圧入井に分けて CO_2 を圧入します。CO_2 を貯留層の原油に混ぜ、流れやすくすることで、石油生産の増加に役立てます。原油が表面に押し出されると、圧力や温度が低下し始め、中に含まれる CO2 が原油から放出され始めます。この放出された CO2 が地表で回収・圧縮され、再び圧入されます。約 4 割の圧入 CO_2 は貯留層に留まり、原油と一緒に戻ってくることはありません。WMP 調査では、圧入された CO_2 が所定の位置に安全に留まっていることを確認するために、12 年にわたり観測とモニタリングを実施しました。

石油増進回収に CO_2 が利用されていなかったり、石油やガスが確認されない地下深い位置への貯留のためだけに CO_2 が圧入されているプロジェクトに関しては、坑井数は油田よりもさらに少なくなります。

Figure 6. ここで、Weyburn 油田の CO_2 は、地中への圧入のために油田の様々な場所に送られています。黄色は、パイプラインによって CO_2 が輸送されていることを示します（写真提供：Cenovus Energy 社）。

Q 8. CO_2-EORとは何ですか?

A EORは「enhanced oil recovery石油増進回収」の略です。油田の石油生産が低下(これは圧力低下、または油層に残る石油の粘度が非常に高く、流れないなど、採収井からの石油輸送を阻害する多くの理由から生じることがある)した場合、石油生産を「増進」し、生産量を増加させるために、様々な方法を使用することができます。

よく知られたEOR法の一つは、石油層の圧力を増加させ、石油を採収井へ押し上げる助けとなるように水を圧入する「水攻法」です。他にも、粘性の強い石油を膨張させてより流れやすくするために熱や溶媒を圧入する「蒸気圧入法」や「溶媒圧入法」があります。

CO_2-EORは、石油層にCO_2を圧縮圧入します。CO_2は溶剤のように作用し、石油を膨張させて採収井に流れやすくします。Weyburn油田の場合、CO_2が油田内の複数の圧入井から圧入されています(一度に70カ所以上)。CO_2圧入数日後、圧入井は水圧入に切り替えられます。こうしたガスと水の交互圧入(WAGと言います)により、CO_2が石油をまず膨張させ、流れやすくし、次に水が石油層内の圧力を増加させ、この新たに解放された石油を採収井に流します。

Weyburn 油田は、1990 年までは 1 日当たりわずか 8,000 バレルしか石油を生産していませんでした。2000 年に CO_2 が圧入されはじめると、5 年以内に石油生産は 1 日当たり 3 万バレルまで増加しました(Figure 7 を参照)。CO_2 は油との混和性(混和性とは、油と混じり合い、地表に出てくるにしたがって、混合油の一部となることを意味する)を持つため、一定量の CO_2 が石油生産中に地表に戻ってきます。Weyburn 油田の石油会社は、この CO_2 を地表で石油から分離し、圧縮して、米国から到着する新しい CO_2 と共に再圧入します。

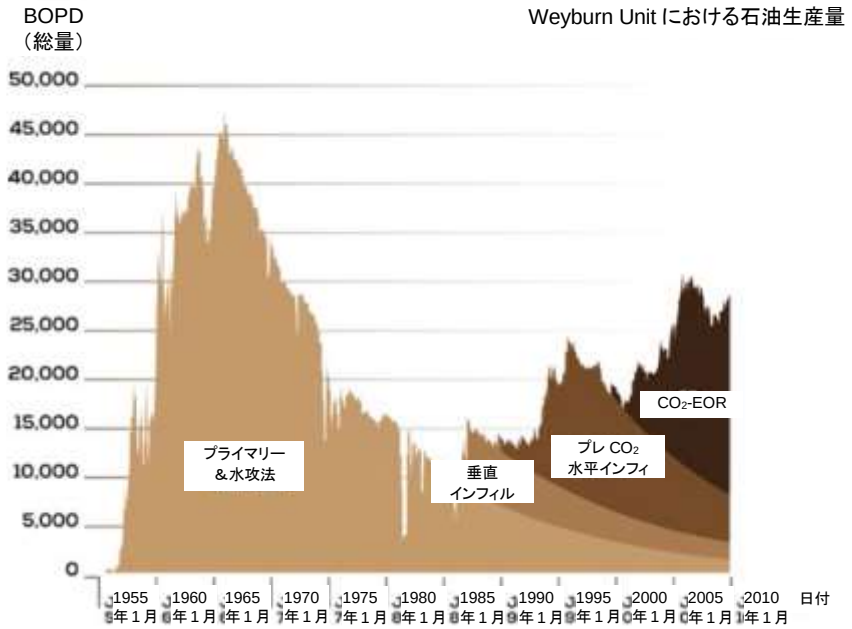


Figure 7. Weyburn 油田の生産量を示すグラフ。CO_2 圧入期間中、ピーク時には 1 日当たり 3 万バレル(BOPD)強の生産を記録しています。「infills インフィル」は油田に掘削された追加井を意味し、最初は垂直井でしたが、やがて 1990 年代に技術が開発されると、水平井が掘られるようになりました。これらの措置はいずれも、一時的に石油生産を増加させました。2000 年 1 月に始まった CO_2 の圧入は、飛躍的な生産増加につながりました。(画像提供:Cenovus Energy)

Q 9. なぜ CO_2 回収・貯留が必要なのですか？

A 18 世紀の産業革命以降、石炭や石油、ガスなどの化石燃料の燃焼量が増加し、大気中の CO_2 量がどんどん上昇しています。過去 300 年の間に、大気中の CO_2 量は 280ppm から、2013 年には 400ppm にまで達しています。増加率は過去 50 年間に急上昇しています。下の Figure 8 をご参照ください。

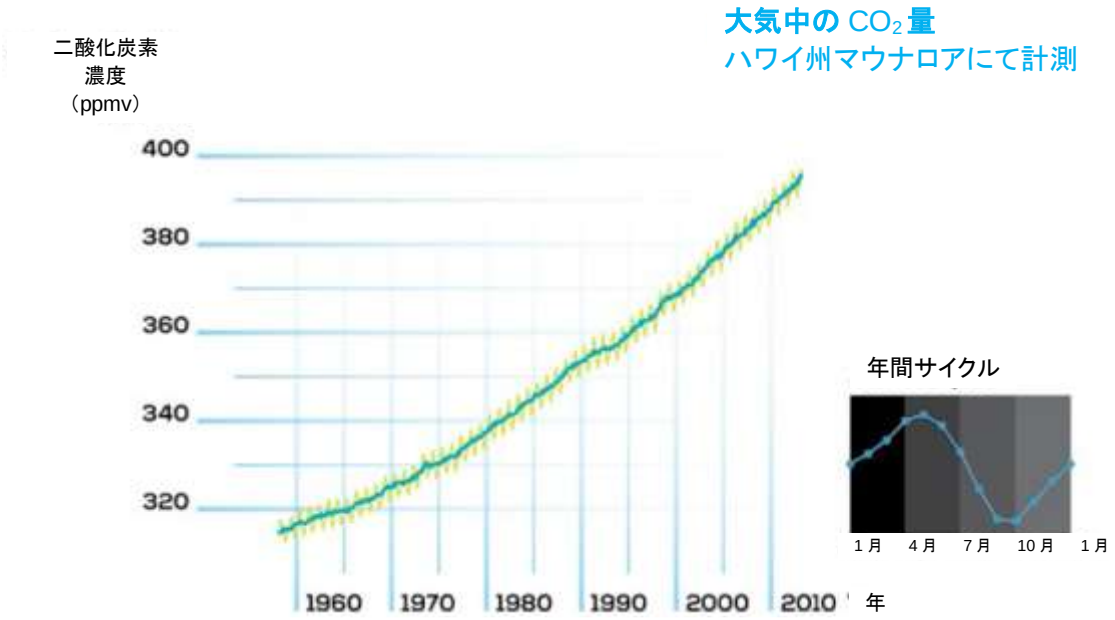


Figure 8. 大気中の CO_2 量の増加を示すグラフ。1960 年から 2013 年までハワイのマウナロア観測所で測定。グラフの上昇は、わずか 50 年間で大気中の CO_2 が 30%増加したことを示しています。（出典：マウナロア観測所）

大気中のCO_2は太陽の熱を宇宙空間に反射し返すのではなく封じ込めしまい、地球にとって温かい毛布の役目をするため、その増加が問題となっています。

地球の気温の大幅な上昇や気候変動を食い止めようとするなら、人間が排出する CO_2 の量を減らすことが重要です。国際エネルギー機関（2012）によると、世界的な CO_2 排出量に最も関わっている部門は発電と発熱です。これが 2010 年、世界の CO_2 排出量の 41%を占めており、発熱と発電の需要は、今後数年間にわたって飛躍的に増加します（Figure9 を参照）。

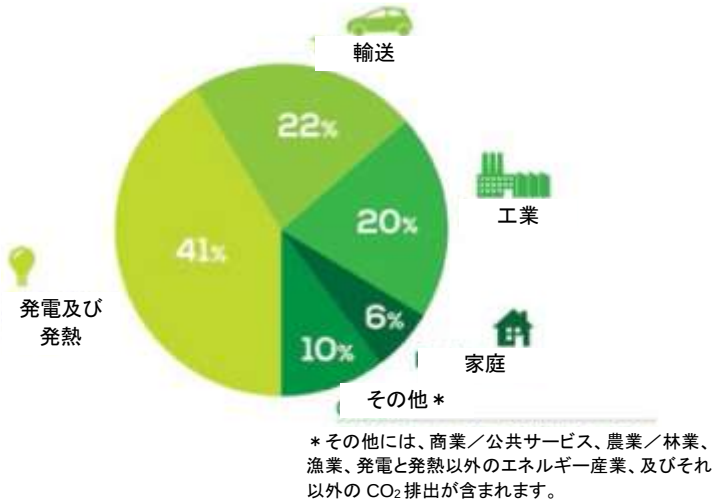


Figure 9. CO_2 の部門別排出量(IPCC： www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf、9 ページ)

発電や産業部門におけるCO_2排出量の削減は、エネルギー効率の改善（人々や業界がエネルギーの無駄使いを減らし、エネルギーを最大限有効活用するために行動を変える）、再生可能なエネルギーの資源量（太陽光、風、波、地熱）を大幅に増やし、CCSのような排出削減技術を使用して化石燃料の燃焼によって生じるCO_2を大気中に入れないようにCO_2を貯留するなど、多くの手段を通じて行うことができます。世界は依然として化石燃料に大きく依存しているため、化石燃料の使用によって生じる排出量を大幅に削減するためのCCSは非常に重要な技術です。

WMP 調査で考察した石油生産事業は、石炭ガス化施設から産出される毎年 300 万トン近くのCO_2を 2 つの油田の地中深くに圧入することによって、大気中への CO_2 放出を防ぎます。2000 年から 2012 年の間に、大気中に放出されるはずだった 2,200 万トンの CO_2 が地中に圧入されました。これは、400 万台以上の自動車が 1 年間に排出する CO_2 の量に等しいのです [4]。

Q 10. 人為起源のCO_2を貯留しないと、どうなりますか？

A 圧倒的多数の気候科学者の見解は、CO_2 排出量を削減しなければ、重大な気候変動が起こるということで一致しています [5]。実際、気候変動がすでにはじまっているという事実を裏付ける強力な証拠が存在します。これには、2℃から 4℃の世界的な気温の上昇、世界中の最も人口密集した沿岸地域の多くが水浸しになる海面上昇、干ばつや台風などますます厳しくなる天候が含まれます。1880 年以降、平均気温は 1.6℃も上昇しています（Figure 10 を参照）。

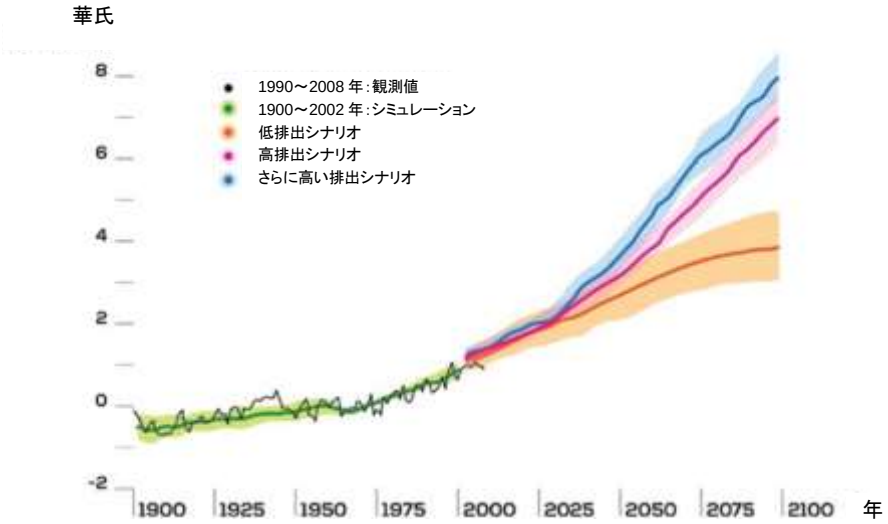


Figure 10. 気温の世界的上昇の推定値。CO_2 の排出量が低いおよび高い場合のシナリオを想定しています。 (出典：www.epa.gov)

CO_2貯留は、大気中のCO_2量を削減するために講じなければならない数多くのイニシアティブの一つに過ぎません。エネルギー効率と保全の向上、再生可能なエネルギー源の使用促進、大量のCO_2を吸収する森林や海洋保護の改善、化石燃料使用の低減がどれも重要です。

再生可能な資源はますます効率的になり、最終的にはかなり高い割合のエネルギー需要を満たせるようになるでしょう。しかし、予見可能な将来のために、化石燃料はエネルギーミックスに不可欠なものとして残り続け、CCS はこれらのエネルギー源からの CO_2 排出量を削減するために不可欠な技術です。

Q **11. どのようにして CO_2 を回収するのですか?**

A 現在、大型の固定CO_2排出源からCO_2を回収するために、燃焼前、燃焼後及び酸素燃焼という、主に3つの技術が使用されます。技術が非常に複雑であるため、これらプロセスの完全な説明はここでは行いません。これら回収プロセスの完全な説明は、www.ccs101.caとwww.globalccsinstitute.com/understanding-ccsから入手できます。

Weyburn-Midale 油田においては、Dakota Gasification Company が供給する CO_2 に燃焼前プロセスが使用されています。熱と圧力プロセスを通じて、石炭がメタンガス(家庭や企業で使用する)と CO_2 に変換されます。生じた CO_2 は圧縮されて、パイプラインで Weyburn-Midale へ送られ、石油増進回収に使用されます。

Q **12. CCS の費用はどのくらいかかりますか?**

A CCSチェーンでは、回収・圧縮施設の建物に最も費用がかかります。サスカチュワン州南東部のSaskPower's Integrated Carbon Capture and Storage施設は、総工費13.5億カナダドルと報じられ(2014年4月現在)、2011年から2014年にかけて建設されました。回収・圧縮施設と発電所のタービン交換とを分けたこれら建設費の最終内訳は現在公開されていませんが、既存のタービンを炭素回収技術に合わせようと考える多くの石炭火力発電所は、全体的な費用の一部として、基礎構造の変更を含める必要があります。回収費用の高さは、これまでのところ世界的に回収施設があまりにも少数しか建設されていないという事実に関連しています。回収技術は多くのプロジェクト全体に広範なレベルで採用されていません。建設数が増えるにしたがって、コスト節約が確認される可能性が高いのです。処理計画と技術の展開がより効率的になると、その結果として、価格が下がるはずです。

CO_2の輸送と貯留費用に関しては、ほとんどの技術が確立されており、石油やガス生産など、他の産業でも展開されているため、回収費用よりもかなり安価となります。Weyburn-Midale油田へのCO_2圧入については、ノースダコタ州から油田までパイプラインを320kmにわたって引く費用と、異なる地点にCO_2を圧入するために油田自体に必要な基礎構造のための費用という、2種類の多額な資本費が必要でした。

これらの資本費 – パイプライン費用数億ドルと、油田の基礎構造費用数億ドル – は多額な上に、継続的な運用費は含まれていません。しかし CCS の費用と利益はプロジェクト単位で比べる必要があります。Weyburn-Midale の場合、石油生産の増加によって石油会社が得る高収入に対して費用が比較検討されました。Weyburn-Midale CO_2-EOR 事業に関連するこれら総費用と利益は関係する石油会社にとっては機密情報ですが、費用が利益を上回る場合には、CO_2 が圧入される可能性は低いはずです。

Q **13. CO_2 はどのくらいの価値がありますか?**

A CO_2の価値は一定ではなく、特定のCCSプロジェクトの詳細によって変わってきます。(Weyburn-Midale 油田のように)より多くの石油を採収する目的のために圧入されるCO_2は、地面からより多くの石油を採収するために使用する貴重な製品であるために、関係する石油会社によって特定の価格で購入されます。廃棄や貯留のために深部塩水層に圧入され、経済的利益を生まないCO_2は、炭素税や、処分に炭素クレジットが提供される場合に限り、価値を有することになります(炭素税について、詳しくはQ15を参照)。

Weyburn 油田では、1 トンの CO_2 毎に石油約 2.5～3 バレルの生産増加につながっています。2013 年の石油価格は 1 バレル当たり約 90 ドルでしたので、1 トンの CO_2 毎に 220 から 270 ドルの増産額となります。油田の圧入井と基礎構造に関連する資本と運用費用はこれらの利益に

対して割り当てなければなりません。

Q

14. CO_2の所有者は誰ですか?

A

WMP 調査では、CO_2は、ノースダコタ州 Beulah の石炭ガス化発電所からCO_2を回収する Dakota Gasification Company (DGC)が所有しています。DGC は 1 トン毎に定価でCO_2を販売する契約を Apache Canada および Cenovus Energy と締結しています。引き渡し時に、CO_2は購入企業 2 社の所有となり、両社が油田への圧入や再圧入のための所有権を維持し続けます。

Q

15. CCS と CO_2-EOR は経済的に採算が取れますか？

A

温室効果ガスの排出を削減するための炭素回収・貯留の経済性は、依然として気候政策に大きく依存しています。石油増進回収のためにCO_2を圧入する場合、CO_2の回収、輸送、貯留は、さらなる石油生産のインセンティブにより、経済的に採算が取れ、実行可能であることが証明されています。WMP調査で考察された油田では、CO_2はさらに多くの石油を生産する商品として評価されています。回収施設、石油輸送用のパイプラインおよび圧入するためのインフラのための資本と運営費は、石油の増産から得られる利益によって相殺されます。

CCSが石油増進回収と関わりがない場合、CCS関連の現行費用は数多くの大型プロジェクトを割高にし、追加の公的資金を確保したり、他の低炭素技術と比べてより公平な競争の場を作り出す助けとなるのに十分な公平な炭素価格を設定したりすることがなければ、正当化が困難です。

CCSが世界的なCO_2排出量削減に対し多大な貢献をするポテンシャルを実現させるためには、発電所やセメント工場などの大型固定排出源にCO_2を回収・貯留するように誘導する適切なインセンティブプログラムを現地で策定し、すべての国がCO_2排出量を低減するという高い志を持つことが必要です。全体的な温室ガスの排出量を削減するには、（石油やガスの増産のためにCO_2を貯留するのではなく、人為的なCO_2排出源が大気中にCO_2を排出するのを停止するための）純粋な貯留目的のCCSが、CO_2の総排出量を削減するために必要となります。

世界中のさまざまな政府がさまざまな炭素価格の取り決めを導入し、基本的に排出者に CO_2 排出量 1 トン毎に料金を課しています。これらの取り決めが十分なら、排出者はこれらの費用を支払うのを避けるために、CCS に向かってさらに誘導されるはずです。例えば、一部の国は炭素税を導入しています。こうした国々には、ノルウェー（1 トン当たり約 75 米ドル）やカナダのアルバータ州（1 トン当たり 15 カナダドル）があります。一般的に、CCS が排出量削減の主要な技術ソリューションとなるためには、こうしたインセンティブが必要であると考えられています。同様に経済規模の成長により、多くの CCS プロジェクトが前進すれば、CCS 技術費も低下するでしょう。操業を始めた多くのプロジェクトからの教訓は将来の CCS 施設の建設費低減に役立つはずですが、大型産業規模の CCS プロジェクトがインセンティブなしに生じる可能性は低いです。

地中に貯留された CO_2 はどうなりますか？

CCS 用の地中貯留地は「漏出ゼロ」に基づいて選択され、綿密な調査（特性調査）をされ、設計されます。言い換えると、CO_2 が貯留層または貯留地に恒久的に貯留できるように、サイトを選択・運営します。

Q 16. CO_2をどのように貯留し、貯留場所はどのように決めるのですか?

A CO_2貯留には4つの要素が重要です。

- 深さと場所:貯留場所は地中の、十分な深さがあり、CO_2が岩の中へ入り込み、細孔内に貯留されるような透過性(孔が連結している)を持つ多孔岩(小さな孔が多くある岩)からなる場所でなければなりません。圧入されるCO_2は「濃密相」状態でなければなりません。つまり気体から液状に変化するまで圧力(圧縮)下に置かれるという意味です。液体は、気体よりも占有スペースがはるかに少ないため、大量のCO_2を圧入する場合、CO_2が液状なら、必要な地中のスペースが少なくて済みます。CO_2は水や他の化合物とたやすく混じり合うため、地中にCO_2を固定する助けとなります。貯留場所は地中の十分深いところでなければなりません。貯留地の上部の岩の複層圧力が濃密相にCO_2を保ち続け、安全な貯留場所に留まらせるのに役立ち、気体のように上昇することはありません。気体としてCO_2を圧入することは可能ですが、気体は液体よりもスペースを占有するため、貯留場所にはより高い貯留容量が必要になります。
- 封じ込め:貯留地は、CO_2の上昇移動をすべて止めるために、上部に密集した不浸透性岩の層を持っていなければなりません。貯留対象となる地層上部には大抵の場合そのような層が複数あり、貯留地にCO_2を留め続けるための保護となります。
- 容量:貯留地は、プロジェクトの期間中に圧入を予定されているCO_2の量を保持するために十分な孔隙を有していなければなりません。

これらの基準が満たされている場合に、CO_2貯留は可能なはずです。

WMP 調査で考察した石油層は深さ約 1500 メートルで、CO_2 が液体状態で留まるのに十分な深さです。貯留層は石灰岩や、苦灰岩と呼ばれる類似の地質で形成されています。どちらの岩石も、石油を数百万年も封じ込められる多くの孔隙を含んでいます。層の上部は、非常に緻密で孔のない硬石膏という岩でキャップされています。硬石膏はシールとして機能し、層内に石油と含まれた CO_2 の両方を保持します。

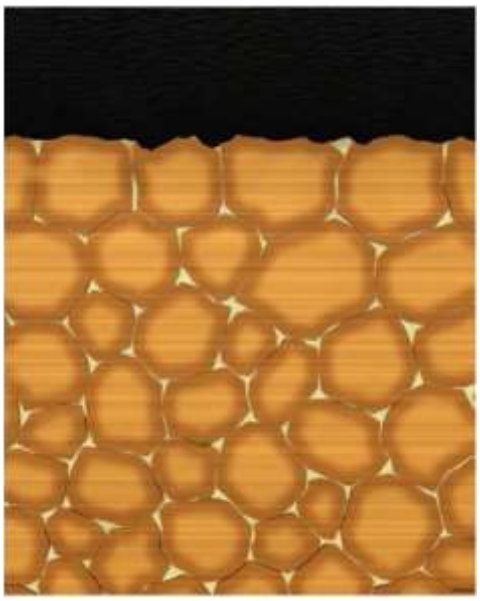


Figure 11. 塩水層は、このような水または他の液体を保持する小さな空間を含む砂岩などの多孔質岩で構成されています。液体 CO_2 が圧入されると、岩石内のこれらの小さな孔内に封じ込められ、既存の液体と混じり合います。層上部の不透過性のキャップロックも、CO_2 を封じ込め続けるのに役立ちます。(画像提供:Regina 大学)

貯留地には、十分な多孔（透過）層と非多孔性（不浸透性）キャップロックという地質学的性質が必要です。石灰岩、苦灰岩（ともに古代有機物から形成された炭酸塩）などの堆積岩や砂岩は優れた層を形成し、頁岩や硬石膏はよいシールまたはキャップロックとなります。他の岩石タイプを使用することもできますが、これらが最も一般的です。したがって、CO_2圧入前に、岩石が貯留地に適した特性を有していることを確認するために、岩石の分布を調べ、検討し、特性付けをしなければなりません。Weyburn油田の石油層からの地表までの岩石モデルを、Figure 12に示します。

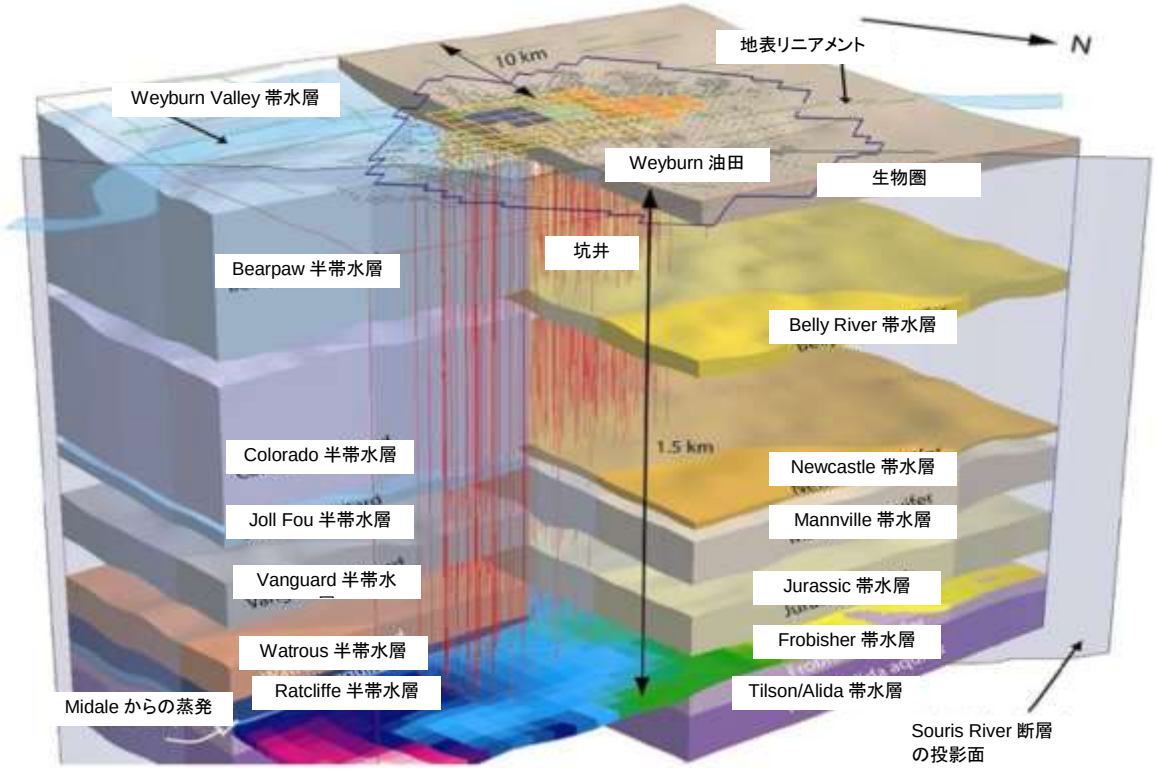


Figure 12. 地質特性データから作成した Weyburn 油田の 3 次元地質学的モデル。左側に垂直移動を妨げる障壁、右側に帯水層、地層に延びた坑井を示しています。「半帯水層」は液体の上下動を止める岩と土の層です。「帯水層」は大抵は砂岩などの多孔質な岩の層で、塩水や石油などの液体を含んでいます。

Q 17. 複数の場所に貯留したとして、どのくらいの量の CO_2 を貯留できますか？

A 地層に圧入・貯留できるCO_2の量はサイト毎に異なります。貯留容量は地層のそれぞれの岩石が持つ多孔性と透過性の特性によって違ってきます。多孔性とは岩石または物質中の空隙数の測定値のことです。透過性とは液体の圧入と通過を可能にする岩石の能力を指します。どのくらいのCO_2が貯留でき、どれほど早く圧入できるかはこれら2つの概念に関わっています。

圧入できるCO_2の量は、圧入井の数や配置に依存します。例えばWeyburn-Midale油田では、多孔性と透過性は塩水砂岩層におけるほど高くありません。さらに、CO_2が主に貯留のためにではなく、EORのために使用されているため、油田にCO_2を圧入するために多くの圧入井を用います。しかし、深部塩水層やその他の透過性の高い場所にCO_2を貯留することのみを目的としたプロジェクトでは、必要な圧入井数は少なくて済みます。これが、EOR目的のWeyburn-MidaleのCO_2圧入と純粋に貯留を目的としたその他のプロジェクトのCO_2圧入との主な違いです。

貯留地に選ばれる深部塩水層は通常は非常に大きいため、数千万から数億トンものCO_2を貯留する容量を有しています。これらの地層は非常に多孔質で、透過性の高い岩石（ほとんどの場合、砂岩）で構成されています。これらの地層タイプは非常に規模が大きく、きわめて透過性が高く、多孔質であるため、はるかに少ない圧入箇所により、地層内の圧力を大きく上げることなく、非常に大量のCO_2を圧入・貯留することができます。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によると、これらの地層タイプは世界合計で最高1万ギガトンの貯留容量があると推定されています（Figure 13）。

貯留層のタイプ	貯留容量の最低予想 (Gt CO_2)	貯留容量の最高予想 (Gt CO_2)
石油やガス田	675	900
深部非可採炭層 (ECBM)	3～15	200
深部塩水層	1000	不確実、しかし、おそらく10^4

Figure13. 世界全体の潜在的に可能なCO_2貯留量。表の右列下の10^4は1万。（出典：www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_chapter5.pdf）

IPCCは、深部塩水層には、大型固定排出源から排出されるすべての人為起源のCO_2を600年間、貯留するのに十分なポテンシャルを持った貯留スペースがあると推定しています。

WMP 調査は深部塩水層ではなく石油層への CO_2 貯留を検討しました。石油とガス層もまた、自然発生するガスや液体を封じ込め数千万年も貯留してきた塩水層と同じように、CO_2 貯留に適した場所です。その CO_2 貯留総量は、各層固有の特性によって異なります。Weyburn 油田は、油田の石油生産寿命の終わりまでに 3000 万トンの CO_2 を貯留する予定ですが、追加でさらに 2500 万トンを層に安全に圧入できると推定されています（Figure14 を参照）。現在、Weyburn 油田を運営している石油会社は、CO_2 を石油増産のためにだけ圧入しています。油田の生産寿命が終わる（EOR がもはや経済的に見合わなくなる時点）までに、運営者は最大で計 5500 万トンの CO_2 を層に圧入し続ける可能性があります。Figure14 は、2035 年には油田がもはや石油を生産できなくなると示しています。Weyburn 油田はその時点においても石油増進回収のためではなく貯留目的で CO_2 を圧入し続ける可能性があります。

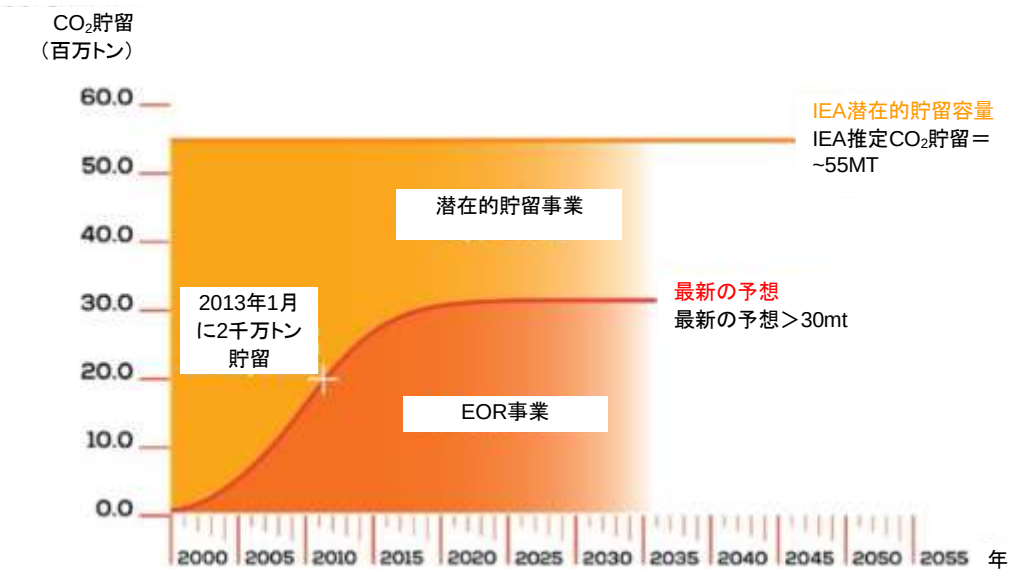


Figure 14. EOR 事業終了時の Weyburn 油田における CO_2 貯留総量の推定ポテンシャル。同油田は、EOR 終了時までに圧入された 30 メートルトンに加えて、さらに 25 メートルトンの CO_2 を保持する潜在性を有します。ここには示されていませんが、Midale 油田は EOR 終了時までにさらに推定 10 メートルトンを保持する予定です。（画像提供：IEAGHG）

Q

18. どのくらい深さまで CO_2 を貯留するのですか?

A

通常、地下800メートル以上の深さだと、CO_2が気体ではなく液体のようになり、濃縮されて、必要な孔隙がより少なくてすむため、貯留地層はそれ以上の深さをターゲットとします。有効な「封じ込め」層（キャップロック）層をすぐ上部に持つ適した多孔質層がある場合、それより浅くても貯留は可能です。しかし、ほとんどの貯留プロジェクトは、約1キロメートル以上深い貯留地をターゲットとし、貯留は地中1キロメートル以上深くなければならないとする複数の規制が設けられています（カナダ、アルバータ州）。

Weyburn-Midale油田は地表から1.5キロメートル地下に位置しています。油田の約30メートル上部で不浸透のキャップロックとなる高密度の硬石膏層によって蓋（キャップ）をされています。さらに、頁岩のいくつかの分厚い塊がキャップロックの上部に連続して存在します。これらの頁岩は半帯水層と呼ばれ、それらは液体の流れを制限し、それぞれが効果的な封（シール）となります（Figure 12を参照）。

Q

19. CO_2 の「恒久的な貯留」とはどういう意味ですか？

A

CCS用の地中貯留地は「漏出ゼロ」を基準に選定され、綿密な調査（特性調査）をされ、設計されます。言い換えると、CO_2が貯留層または貯留地に恒久的に貯留できるように、サイトを選択・運営します。「恒久的」という用語は、さまざまな組織が千年程度の期間を示唆していますが、特定の期間を示すものではありません。

WMP 調査は、CO_2 を貯留するために、プロジェクトの開始時に 4 年を費やして Weyburn-Midale 油田の適性を調査しました。そのプロセスの一部には、サスカチュワン州南部やカナダや北米のその他の場所における「ナチュラルアナログ」と呼ばれるものの観察も含まれます。ナチュラルアナログとは、地中に自然に発生した CO_2 の大規模な沈積です。これらは、地質時間（数千万年）にわたって CO_2 をまったく漏らすことなく、安全に封じ込めている場所です。これには、6500 万年前に Weyburn 油田に封じ込められて残るわずかな量の CO_2 が含まれます。Figure15 は、多量の CO_2 が地中に自然発生する世界のさまざまな場所を示しています。

CO_2貯留プロジェクトでは、これら類似の層状態を特定したり、人工的に再現することが試みられています。CO_2の天然沈積を含む岩石層はCO_2を所定の位置に維持する特徴を示しており、引いてはそ

れらの特徴が貯留予定サイトにも存在することを確認すれば、想定された貯留場所で有効な長期貯留が可能かも知れないという確信をもたらしてくれます。WMP調査作業には、Weyburn-Midale油田におけるこれらの長期貯留条件の特定が含まれています。それらが2カ所の油田の特性として特定された後にCO_2圧入が開始され、CO_2の挙動が想定のとおりであることを確認するため、試験が継続的に実施されました。

新たな世界中の CCS 規制はすべて「リスク管理フレームワーク」に基づいています。つまり、サイトは長期間にわたって圧入された CO_2 すべてを封じ込めるように設計・運営されなければならず、リスク評価は漏れなどが生じた場合や、漏れが生じた場合の最悪のシナリオに対処するために使用されます。すべての CCS 開発者は、プロジェクトの寿命期間にわたって包括的なモニタリングとテストプログラムを行う必要があります。これには、想定されるリスクを最小限に留め、対応するための完全な計画が含まれます。WMP 調査は貯留地と周辺領域の大規模なリスク評価を実施し、圧入した CO_2 の油田内の位置と動向の計測とモニタリングを 12 年間行いました。Weyburn-Midale で実施されたリスク評価やサイト特性調査やモニタリングは、どれも貯留地が非常に安定しており、漏出の可能性は極めて低いと結論付けるに至りました。

Q 20. 水や石油、ガスのように CO_2 は地下に自然に発生しますか？

A CO_2 は地中の岩石層の中だけでなく、有機物の分解を通じて土壌や水中に自然に生じます。CO_2 は、火山の生成などの地球内部の地質学的プロセスや、数百万年にわたる石油や天然ガスを生成する同様のメカニズムを通じても作り出されます。これは自然に発生したり、地質学的には CO_2 が多くの異なる場所に発生する場合もあります（Figure 15）。ガスや石油の創出につながる有機物（植物や微細な細菌）が地中に数百万年もの間封じ込められると、それらの有機物が分解され、CO_2 の発生につながります。実際に、石油やガス会社が石油やガスを掘削する際、CO_2 単体、または CO_2 と天然ガスや石油との混合物が地中の異なる深さで見られることがあります。

Figure15. 世界の CO_2 の自然蓄積例。（IPCC, Special Report on Carbon Capture and Storage（炭素回収・貯留に関する特別報告書）、2005 年、210 ページから転載）

一例として、北海のSleipnerガス田（ノルウェーの国営石油会社Statoilが所有）は、自然に生じたCO_2を約9%含むガスを長年生産しています。CO_2を大気中に単に排出するのではなく、Sleipnerプロジェ

クトはCO_2を回収・圧縮し、海底下1000メートルを超える大量の塩水を含む砂岩層に圧入して戻しています。

CO_2は発電所、自動車、またはその他の人為起源によるものから生成されます。これらの人間の活動からの発生源は「人為起源」と呼ばれます。化石燃料発電所などCO_2の大型排出源は、これら人為起源排出量を回収し、地中に貯留することができます。ノースダコタ州の Dakota Gasification Company は、1 日当たり 8000 トンの人為起源のCO_2を回収・圧縮し、Weyburn-Midale 油田に輸送して圧入しています。

Q 21. CO_2は地中でどのように移動しますか?

A CO_2は、貯留層内の圧力を克服するのに十分に高い圧力で、なおかつ地層内の岩盤を破砕しない程度に低い圧力で圧入されます。この圧入で、裸孔からCO_2を強制的に外に出し、周囲の岩盤に押し込みます(「裸孔」の定義については、Q38を参照)。その後、CO_2は坑井から拡散して、岩盤内で連結した孔や割れ目を通じて既存の流体と混じり合い置換します。圧入が完了すると、移動を引き起こす圧力が徐々に散逸し、CO_2の移動は深部地層内の流体の自然な流れにだけ反応することになりますが、通常、この流れは非常に緩慢です。

WMP調査では、油田に圧入されたCO_2が孔隙に封じ込められます。石油を動かし、膨張させ、採収井に向かって移動させるのに役立ちます。CO_2の一部は、層内に留まりますが、一部は分離圧縮、再圧入されるところまで石油と共に戻ってきます。

これは石油増進回収のためではなく、単に貯留のためにだけCO_2を圧入するプロジェクトとは異なります。例えば塩水層にCO_2を圧入する貯留プロジェクトでは、CO_2が地層内の塩水を動かし混合しますが、地層の規模と容量は非常に大きいため、時間をかけて圧力が散逸し、CO_2が貯留されたまま残ります。

Weyburn での詳細調査では、CO_2が貯留岩内にすでに存在する割れ目に沿って移動できることを示しています。油田運営者は層工学を通じてこの動きを調整することができ、CO_2を石油が封じ込められている岩盤の孔に主に移動させ、石油と混合させて、それら孔内のものと置き換えて、石油の回収を改善します。その結果、CO_2が大量にそれらの細孔中に恒久的に封じ込められることになります。

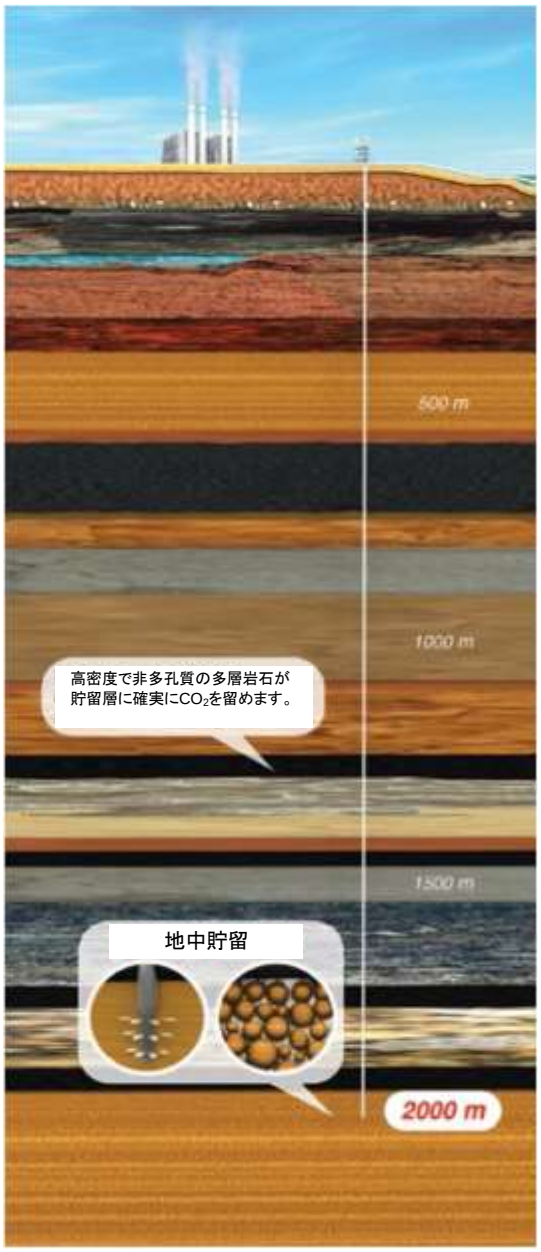


Figure16. CO_2は地中深く圧入され、岩盤の孔に封じ込められます。(画像提供:Regina 大学)

Q 22. CO_2が地層に留まっていることをどのよう確認しますか？

A 圧入を始める前に、CO_2貯留地は、圧入後に地中でCO_2がどのように作用するかを予測するための基礎データを得るために綿密な調査（特性調査）を実施し、モデリングします。一部の特性付けは、CO_2の移動を妨げる異なる障壁やCO_2を封じ込める方法を特定するために行われます。CO_2は次の複数の手段を通じて、所定の場所に貯留されます。

構造トラップ
貯留層上部の不浸透性岩石層（キャップロック）が液体や気体の垂直方向（上方）への移動を止め、数百万年の間、それらを封じ込めます。この種のトラップ（封じ込め方）には、数多くの例があります。不浸透性の層は、数百万年もの間、石油、天然ガス、CO_2を地中に封じ込めます。

溶解トラップ
時間が経つにつれて、CO_2の一部は岩石に自然に含まれている水に溶解します。溶解する量と速度は塩水の塩分濃度、貯留層内の温度や圧力によって異なります。この種のトラップは長期間の貯留に非常に有効です。

残留トラップ
CO_2が岩石中の孔を通って移動すると、非常に小さな通路や閉塞孔内にはまり込むことがあります。これが残留トラップで、特定の状況では、CO_2を貯留する非常に有効かつ重要な方法である場合があります。

鉱物トラップ
最後に、時間をかけて、岩石孔内に封じ込められたCO_2が貯留岩そのものや水中の塩分と反応して、新たな鉱物を形成することがあります。時間がかかるプロセスですが、実質的に、最も長続きし、安全な貯留手法です。

十分に特性が明らかにされた貯留地内には、数多くの自然の障壁やプロセスが貯留地内や上部に存在し、CO_2を地中に貯留するのに役立ちます。貯留層から延びる主な潜在的経路の一つは、貯留地に穿孔された裸孔です。Weyburn油田には、CO_2が圧入される層にまで達する稼働中の包み井が数千も存在します。裸孔は、政府や規制当局によって設けられた規制によって監視され、管理維持されています。使用されなくなった坑井は、層の深さから地表までセメントで埋め立てられ、CO_2やその他の物質が坑井から上ってこないように確実に処置されています。ガス層や塩水層では、稼働中の油田よりも、貯留用裸孔の数がはるかに少なくて済みます。

WMP 調査では油田内のどこに CO_2 が存在するかを調査するために、測定とモニタリング技術をいくつか使用しました。これらの測定は、CO_2 の地中での挙動を明らかにしました（例えば、一方向に移動しているかや、地層内で変化しているかなど）。これらの技術の詳細は、Q24 と 25 に記載されています。

Q 23. CO_2が圧入されると、地下の貯留地はどのように変化しますか？

A 貯留層へのCO_2の圧入は圧力の増加につながることがあります。もっとも、圧力は層や周囲の岩石層への損害を避けるために慎重に管理されています。Weyburn-Midaleなどの油田では、CO_2の圧入によって生じる圧力の増加を調整するために、石油やその他の液体の生産が積極的に管理されています。CO_2の圧入はまた、化学変化を通じて岩石内の鉱物をわずかに変化させることがあります。ただし、これらの変化は非常に長い期間にわたって生じる傾向にあります。CO_2が岩石内の他の鉱物と化学的に反応する場合、実際に、これはCO_2を恒久貯留する最善の方法の一つです。

10年にわたるWeyburn-Midaleの研究から、科学者たちは坑井からの生産流体をサンプリングする

ことによって、CO_2圧入による貯留液の組成変化を監視することができました。これらの変化は、貯留層や周囲の岩石に悪影響を少しも及ぼしていません。CO_2は安全に貯留され続け、科学者たちは現在、収集したデータを使って将来に向けた安全な貯留をモデリングし検証しています。

Q

24. 地中の CO_2 をどのように監視しますか?

A

WMP調査では、油田のCO_2の監視に複数のツールを使用しました。地震画像装置（妊婦の胎児画像に使用される超音波診断器に似た装置）もこのようなツールの一つで、地中での岩石の外観の画像を作成するためのデータを提供します。Figure 17、Q 25「CO_2の移動進路をどのように確認しますか?」を参照。

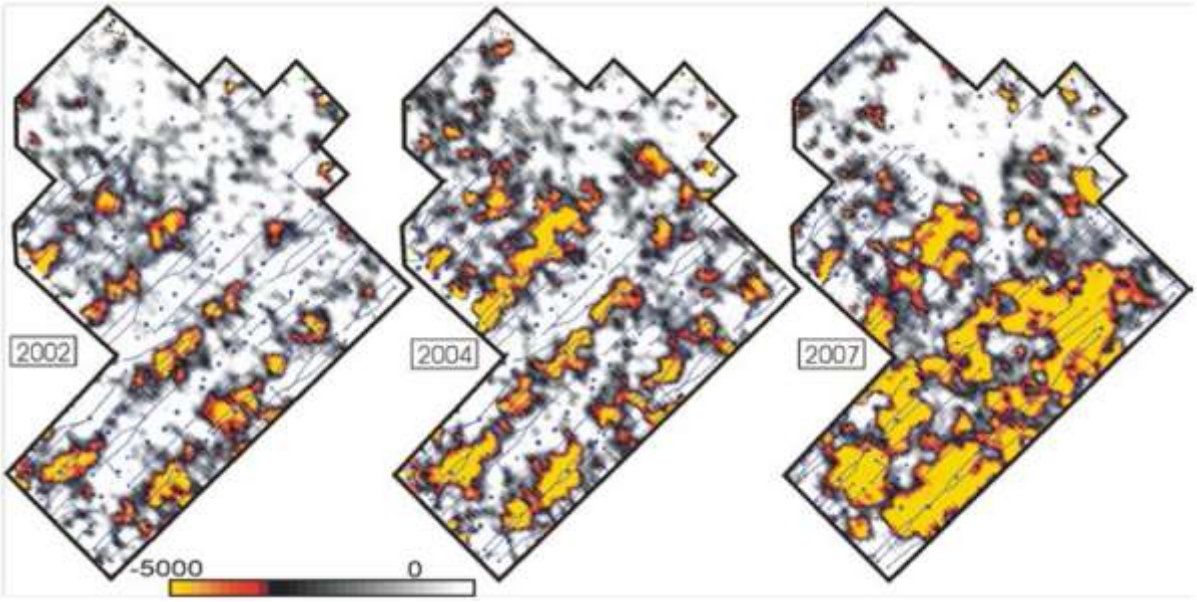


Figure 17. 2002年、2004年、2007年に撮影されたWeyburnの圧入後CO_2の4D（低速度撮影）地震画像。圧入前に実施された基礎地震波の振幅の違いが黄色で強調され、Weyburn貯留層内のCO_2の分布を表すための変換が行われている。

地中内のCO_2は他の様々な方法で監視されます。圧入時の、またCO_2-EORプロジェクトの場合は生産井内の水と液体の測定による化学組成の変化の監視、および貯留層内の圧力の測定により、CO_2が当初の位置から移動していないことを証明する、などの方法が用いられます。

Q

25. CO_2の移動進路をどのように確認しますか?

A

科学者は、削岩サンプルの外観検査（Figure 18を参照）や、地震画像（Figure 19を参照）などの土壌の地球物理学的測定を含む標準技術を通じて、貯留層と周囲の岩石を完全に理解します。モデルの構築、および累積された地質データに基づくシミュレーションの実施、および他のモデルとの比較にはコンピュータが用いられ、CO_2が移動する可能性のある場所が予測され、予測どおりに移動するかが検証されます。地理的な貯留場所と周囲もマッピングされ、地表下の特徴とCO_2の予想移動経路が示されます。

Figure 18. 上掲の南サスカチュワンのサンプルのような、掘削井のコアサンプルの検査は、地中でCO_2がどのように移動するかの判断に役立つ。（写真提供: PTRCのAcquisition Project）

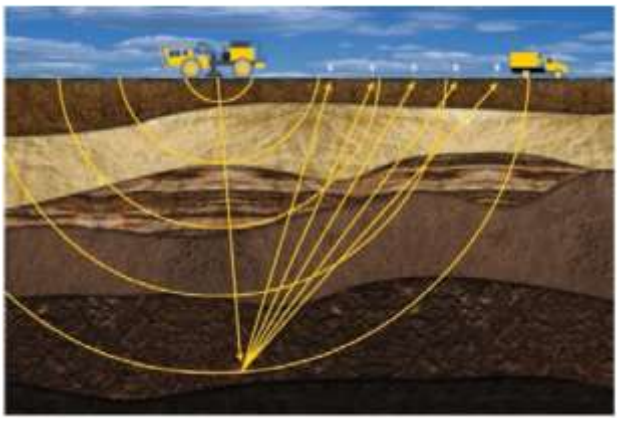


Figure 19. CO_2の圧入の開始前に地震調査が実施され、貯留層の外観が示され、また貯留層が安全にCO_2を封じ込めるかどうかが示される。上記の図では、振動が地中に伝送され、振動の反響が測定されて変化のある岩石層の存在が明らかになる。（写真提供: Schlumberger Carbon Services）

天然の地層水の移動に反応して、貯留層内で長期的なゆっくりとした CO_2 の移動が起こる可能性がありますが、物理的な封じ込め（CO_2 の上または周囲に、頑丈で多孔性ではない岩石が形成されるなど）や、水および鉱物との反応といったメカニズムで、CO_2 は安全に封じ込められます。

WMP 調査は圧入の間および圧入前に、予想される CO_2 の移動方向と動きを予測するために、現地の地質学的な詳細事項に基づくコンピュータのモデルとシミュレーションを用いました。地震測定と貯留層の圧力測定を通じた、圧入の間の監視により、科学者は貯留層内の CO_2 の位置を確認することができました。

WeyburnとMidaleにおけるこのような詳細な調査から、CO_2は貯留層の岩石内の割れ目に沿って移動することが示されています。油田の操業会社は、原油が封じ込められている岩石の細孔にCO_2が移動するように、CO_2の移動を操作できます。原油は拡散してCO_2に接触し、細孔から流出し、生産井に移動します。最終的に原油が入っていた細孔に、大量のCO_2が恒久的に封じ込められ、CO_2の移動は最小限に留まります。

Q **26. CO_2の漏出をどのように検知しますか？**

A 貯留層内の CO_2 の位置の測定と、CO_2 の状況の変化の測定に使用された同じツールが、CO_2 の漏出の確認にも使用されます。WMP 調査では調査員が地震画像を用いて、CO_2 が貯留層のキャップロックの下に留まり、上方に移動していないことを確認しました。また圧入エリアの上部エリアの井戸水と土壌の化学組成を定期的に測定した結果（約 2 年毎）、裸孔から地下水または土壌への CO_2 の漏出は起こっていないことが示されています。

地表へのCO_2の漏出は、土壌のガスと坑井で測定できます。圧入区画の上部の漏出（但しまだ地中に留まっている場合）、についても裸孔の液体とガスのサンプリングにより、また地震画像により測定できます。

Q **27. CO_2圧入により油層の圧力は上昇しますか?**

A 原油を常に地表に移動させるためには、油層の圧力を維持する必要があります。油層からの生産が数年間続いた後、ほぼ生産が停止するまで圧力が降下する場合があります。この時点では、石油増進回収（EOR）の各種の方法が増産に用いられます。

油層内の圧力を高め、石油生産を高めるために最も共通に使用される方法の一つに、「水攻法」と呼ばれる方法があります。当初、石油生産が開始した時点のレベルまで圧力を回復するために、大量の水を油田に注入する方法です。水攻法により、通常は石油生産量が短期的に回復しますが、水と油は混和しないため（混合されない）、最終的に水の効果は損なわれます。

Weyburn 油田では、まず 1970 年代と 1980 年代に水が注入され、圧力の上昇および石油増産を実現しましたが、最終的に水攻法の効果は縮小しました。2000 年、石油会社は CO_2 圧入計画を開始し、石油を増産しました。石油の増産は主に、CO_2が油と混和（混合）するために、石油の流量が増加し（軽く、密度が低下する）、また膨張しやすくなる（容積が増加する）ことが原因でした。その結果、わずかですが圧力も上昇しました。

多くの油田と同様に、Weyburnでも水とCO_2の圧入により圧力が上昇する場合があることが証明されました。圧力上昇の利点の一つが、石油回収の改善です。しかし深部塩水層などの大規模な貯留層へのCO_2の圧入は、塩水層の規模が膨大であるために、圧力が上昇しない場合もあります。このような場合、CO_2貯留プロジェクトが開始する前に、圧力上昇を許容範囲内に調整するために、関連する貯留層毎に安全な圧力レベルが規定されます。

Q **28. 地中に貯留されたCO_2をどのくらいの期間、監視する必要がありますか？**

A CO_2圧入の前、圧入の間、および圧入の完了後に貯留層または塩水層の監視を開始します。圧入以降も、CO_2 がコンピュータモデルに従って貯留層内で予測どおりに挙動していることを操業者が規制当局に証明できるようになるまで、監視が延長されます。監視は大気（坑井周囲の大気の測定）と表面（地中土壌の CO_2 の測定）で行われます。表面付近（井戸水内、または表面の裸孔付近などでの CO_2 の測定により、地下から CO_2 が上昇していないかどうかの確認）、また地表下（貯留層の深部の地震画像）で監視される場合もあります。

貯留が恒久的であり、安全であることを実証する必要があります。いったん基準を満たすことが出来れば、監視を続ける必要はありません。このような要件を満たすために監視が要求される正確な期間は、各貯留地の特定の性質および状況により異なりますが、いずれの場合も、CO_2圧入の終了後10年以上続くと見られています。

Q **29. CO_2の貯留に関する規制はありますか?**

A 国ごとに、また県や州ごとに CO_2 貯留関連の規制のレベルは異なります。WMP 調査が実施され、Weyburn と Midale 両油田が立地するカナダ、サスカチュワン州では、州政府が地表下への物質（廃水、溶剤、CO_2 を含む）の圧入と貯留を統制する拡大的規制、および油田とその他の層の裸孔の維持を統制する規制を施行しています。これらの基準は、表面下への圧入・貯留を含むあらゆる側面を網羅し、特定の物質として CO_2 を扱うわけではなく地中に圧入される物質すべてを対象としています。これらの規制は、圧入される物質に関わりなく、圧入方法と裸孔の安全性を扱っています。

米国では、環境保護庁（EPA）が CO_2 圧入専用の油井の建設に関連した規制を、2012 年に導入しました。このタイプの油井は「Class 6 Well」と呼ばれ、CO_2 の安全な圧入と貯留を保証する特定のセーフガードが求められます。

CO_2の安全な地中貯留に関する世界初の規格が、2012年にカナダ規格協会（CSA）によりまとめられ、カナダと米国における将来のCCS運営のガイドラインとして展開されています。このCSA規格はまた、国際規格の基準としても考察されています。裸孔の検証やCO_2の測定、監視、検証（MMV）を含むWMPの調査結果も、カナダや他国でプロジェクトが一般的に実施される中で、今後の規制の参照として有益に利用される可能性があります。

「もうしそうなったら」という仮説・想定。

CCS に関する最も一般的な質問

地質学的な時間軸はは数百年あるいは数千年単位ではなく、数百万年単位で測定されます。世界各地に存在する自然に発生したCO_2 埋蔵は、その多くがWeyburn 油田とMidale 油田に似た地中層に存在しますが、数千万年の間、安定した状態が続き、移動していません。

上記のような天然の貯留地と類似する地が、CO_2 貯留地として選ばれます。

Q 30. CO_2貯留の安全性をどのような方法で確認しているのですか?

A WMP の 12 年間にわたる調査から、CO_2 貯留の安全性が例証されています。CO_2 は、貯留層内の CO_2 の位置と CO_2 の移動状態を示す各種技術を用いて、油田において広範に監視されています。その他に、圧入地の地表上の様々な箇所で井戸水と土壌がサンプリングされ、CO_2 が地下水にも表土にも移動していないことが証明されています。

WeyburnとMidaleの油田では、CO_2が1.5キロメートルの深さまで圧入されています。これはフットボール(すなわちサッカー)グラウンド15面を垂直に並べた、端から端までの深さに相当します。圧入の深度に加え、圧入されたCO_2の上に不浸透性の岩石が何層にも厚く横たわり、CO_2が地表に戻るのを防いでいます。またCO_2が地表下の空洞の空間または水域内に圧入されるのではなく、通常は砂粒の大きさ以下の、数百万個の細孔にCO_2を保持する岩石層に圧入されることも覚えておく必要があります。このような層内でのCO_2の移動は遅くなるのが普通であり、監視が可能です。

Q 31. CO_2貯留は飲料水に影響を与えますか?

A

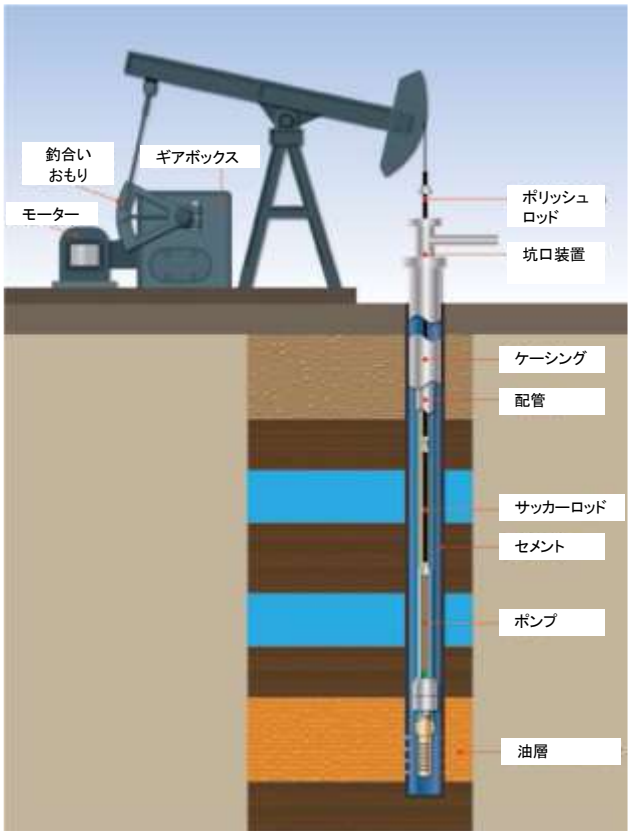


Figure 20. くみ揚げポンプを取り付けた標準の油田の裸孔。この画像は比率が実物と異なり、裸孔の地下の深さは1000メートル以上になる。CCSの油井では、通常はケーシングと配管もその深さに沿って伸長する。

WMP 調査では、飲料水に影響することなく、CO_2 を安全に岩石層に貯留できることが証明されています。2000 年から 2012 年の間にかけての WMP 調査では、CO_2 が圧入されている場所の上に掘られた飲料水用井戸から水のサンプルが採取され、2000 年の値が「基準」として用いられました。すなわち、これらの井戸からの測定値から、CO_2 の圧入が開始する前の水質が分かることを意味します。CO_2圧入が開始した後の数年間に、様々な箇所で実施された測定結果は基準値と比較されました。圧入の前、圧入期間中、および圧入後の井戸水の比較から、CO_2 の油田への圧入により水質に変化が生じていないこと、また記録された井戸水の軽微な変化は、自然、季節、またはその他の原因によるものらしいことが証明されました。同エリアの井戸水は、継続的に州の規制基準にも適合しています。

CO_2貯留プロジェクトからのCO_2漏出が、地下水に生じる場合、ほぼ確実に裸孔内でも漏出が起こっていると考えられます。裸孔はCO_2などの物質を圧入し、原油などの原料を地表に移動させることを目的に、油層やガス層のような岩石層に深く掘削された穴です。飲料水への影響を避けるために、油井の表面は金属とセメントで被覆されます。Figure 20をご参照ください。

操業中のすべての油井の上面に坑口装置(Figure 21を参照)が設置されます、これは油井の生産の間、または油井が永続的に閉じられる(閉鎖される)までの間、油井の圧入期間中は固定されています。油井の使用が停止すると、「閉栓」され、大量のセメントが注入されて完全に密閉されます。

Figure 21. このCO2圧入井は、圧入を停止するON/OFF操作が可能な坑口装置を装備しています。生産に使用されていない、または圧入に使用されていない裸孔は、地表にこのような坑口装置が装備されます。使用の予定のない油井は、坑口装置が撤去され、裸孔の深さ全体にセメントが充填され、液体とガスが地表に上ってくるのを確実に防止します。地表のすべてのラインと機器は撤去され、油井は恒久的に閉栓されます。（写真提供: Cenovus Energy）

政府と業界は、油井とガス井の完全性の維持に関する厳密な規制を施行しています。

Q

32. CO_2貯留は表土に影響を与えますか？

A

ほぼすべての土壌に、「生体」プロセスと呼ばれるプロセスで発生する天然の CO_2 が含まれています。植物性・動物性物質の腐敗により土壌に CO_2 が残されることを意味します。2000 年の WMP 調査の開始時点において、CO_2 が圧入される予定の油田上の様々な箇所で、土壌ガスのサンプルが採取されました。これらの測定値から、土壌の CO_2 の含有率の幅広さ（2%～11%）が示されました。これらの測定値は、その後 10 年間に同じ箇所で採取され続けた土壌ガスのサンプルを比較する際

の、基準として使用されました。

Figure 22. Weyburnの油層上の畑における、土壌ガスのサンプル採取。（写真提供: PTRC）

圧入前と圧入後の土壌の比較により、12年にわたる測定後に、Weyburn油田のCO_2の貯留に起因する土壌内のCO_2の増加は起っていないことが証明されています。わずかな変動は、季節の循環あるいは湿度の変動に拠るものです。

Q **33. CO_2貯留は魚類や野生生物に影響を与えますか？**

A WMP調査で証明されているのは、油田の上および周囲の水質と土壌が検査されるエリアでは、CO_2は地下水にも土壌にも影響していないということです。魚に影響が及ぶと予想されるのは、CO_2が地下の深部から地下水、湖、または河川に流出する場合に限られます。同様に、動物に影響が及ぶのは、CO_2が大気中または土壌に漏出する場合に限られます。前の2つの質問で示したように、漏出が発生しているという証拠はなく、Weyburn油田の上の魚類や他の動物はCO_2貯留の影響を受けていません。

Q **34. CO_2貯留は地価に影響を与えますか？**

A Weyburn 地域と Weyburn 市（人口約 10,000 人）では、Weyburn 油田への CO_2 の圧入を理由とした不動産評価額の下落が起こっていません。同地域は「産業ツーリズム」の恩恵も享受しています。国内外の多くの観光客が、圧入施設のツアーに訪れ、滞在中にホテルや食事にお金を使います。

地価と資産価値は多くの問題の影響を受けます。同地域における経済状況と、高速道路、鉄道、送電鉄塔を中心とした民家あるいは農場の位置の 2 つの要因のみが、資産価値にマイナスまたはプラスに影響します。

漏出の可能性または産業活動の増加などの認識済みの問題を理由に、プロジェクトが予定されているコミュニティの地価にCO_2貯留プロジェクトがマイナスに影響すると提言している個人や団体があります。しかしWeyburn地域は、CO_2の圧入により多大な利益を享受しています。油田の生産可能期間が延びているためであり、実際に圧入区画の上および都市部の一部の地価は上昇しています。

Figure 23. 上記のようにCenovusのWeyburn油田では科学者、規制当局者、政治家など、CO_2貯留についての視察を希望する人々が、世界各国から数百名単位で訪問している。地域コミュニティが産業ツーリズムの恩恵に預っているのは実証されているが、CCSプロジェクトが一般化するに従い、このような国際的な関心が低下すると見られる。（写真提供: PTRC）

Weyburn などの、石油の増産を最終的な目的とした CO_2-EOR プロジェクトと異なり、貯留のみを目的に CO_2 を圧入する CCS プロジェクトは、CCS インフラの建設中に経済活動や雇用が増加する可能性以外に、CO_2-EOR プロジェクトと同じ直接的な経済的利益が見込めない場合があります。

CCSプロジェクトにおける交通量の増加や圧入場所についての問題は、コミュニティが考慮すべき現実的な問題です。プロジェクトが実施に移される前に、プロジェクトの計画策定者と影響を被る個人の地主との間で討議されるべき問題です。プロジェクトの潜在的な影響が正しく特定され、処理された場合、CO_2貯留プロジェクトによる地価へのマイナスの影響は解消されるはずです。

Q

35. 断層、断裂とは何ですか?

A

断裂は地殻内の応力により生じる岩石の不連続性または「亀裂」です。断裂の片側の岩石が別の方向に移動し、岩石層の変位（オフセット）を引き起こす場合、断裂は断層と呼ばれます（Figure 24を参照）。断層と断裂は形状が単純な場合と複雑になる場合があり、開放型か閉鎖型か一定ではないため、液体が流動する水路、あるいは液体が封じ込められる障壁を形成します。断層により油の封じ込めが促される場合、通常は油田が形成されます。

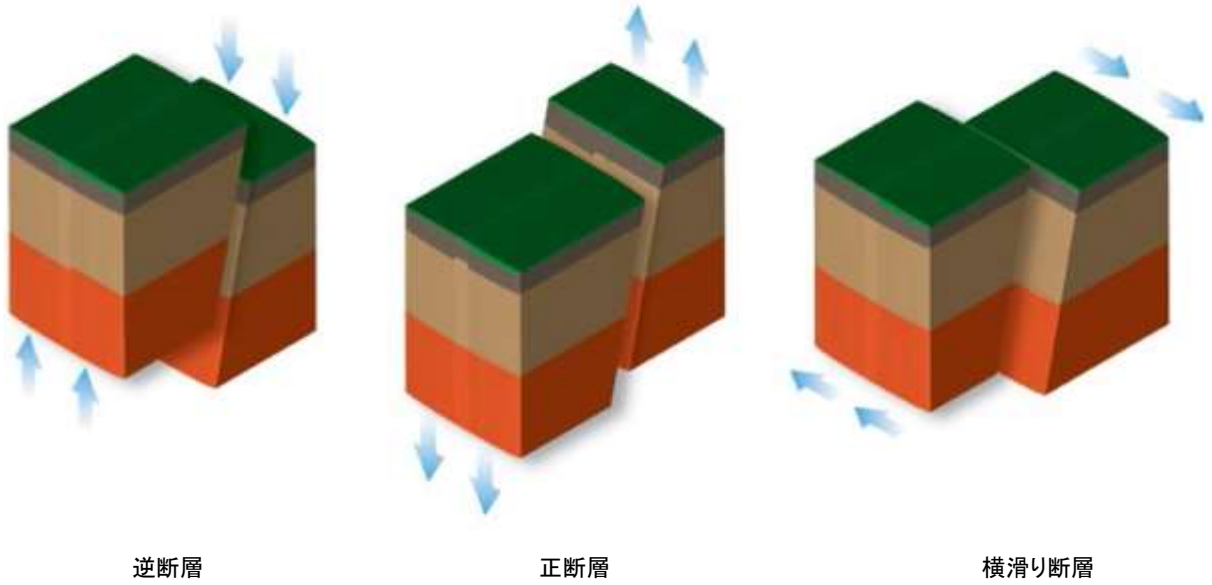


Figure 24. 基本的な3種類の断層の例。アメリカ地質調査所（http://sound-waves.usgs.gov/2009/11/fieldwork2.html）が提供した情報に基づき再加工した画像。

科学者は貯留層または油田の断裂を理解することにより、圧入された CO_2 の拡散および封じ込めの状態を容易に予測することができます。圧入された CO_2 の安全な封じ込めを確実にするためには、周囲の岩石の断裂と断層の性質を理解する必要があります。

WMP調査では、データとサンプルの収集と拡大的な調査を通じて、油層と周囲の岩石の特性付けが可能になりました。最終的に断層と断裂の分布と性質が包括的に理解され、石油とガスが数百万年封じ込められてきたように、貯留層に圧入されたCO_2や他の液体を封じ込め、封じ込める油田の能力が、Weyburn-Midale油田の既存の断層と断裂により損なわれないことが証明されました。

Q 36. CO_2の地中への圧入により地震が発生しませんか?

A 石油とガスの抽出と全く同様に、CO_2 の圧入により起こる圧力の変化は、「誘発地震活動」と呼ばれるプロセスで、ごくわずかな地震移動を引き起こす場合があります。圧入圧力の細心の管理と、石油産業において標準採用される拡大的な貯留層管理方式により、潜在的な誘発地震活動による損傷のリスクが微細なレベルまで軽減されます。実際には、このような非常に低レベルの地震活動を観察することにより、地球物理学者にとっては貯留層内での CO_2 の安全な分散についての詳細なデータが得られるなど、非常に有益な場合があります。

WMP調査では、地震活動（この場合、より正確には誘発微小地震活動と呼ばれる）の広範囲な監視から、振動事象は比較的稀であり、規模も小さいことが示されています。振動は地表では感知されません。実際に非常に微細な振動であるため、ほとんど測定不能な地震活動もあります。さらに監視対象である事象の大半は、CO_2ではなく注水期間に関連付けられています。Weyburn油田では、微小地震事象の大半は生産井周囲で発生しています。つまり貯留層における石油と水の流入の増加により微細振動が誘発されており、CO_2の圧入に起因するものではない可能性があるのです。Figure 25に図式化したWeyburn油田の振動結果から、記録された微小地震事象の大きさは、地上で人間により感知される最も微弱な地震よりも数十倍から数千倍も弱いことが示されています。Figure 26に示すのは、Weyburnの地震活動の背景情報です。

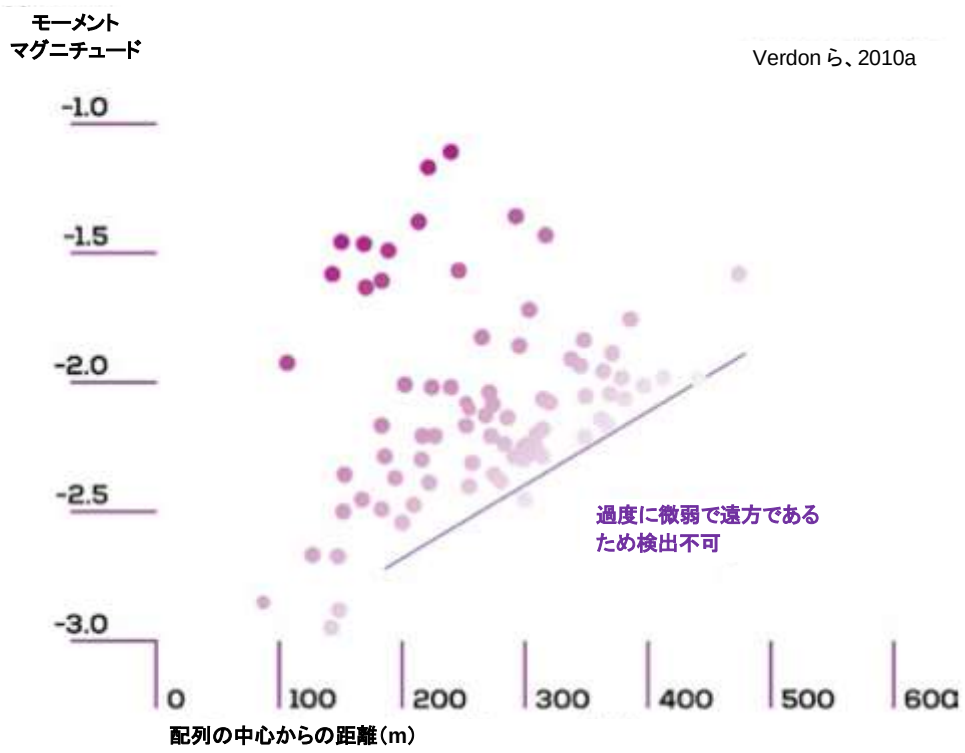


Figure 25. 上記の図は 2003 年から 2007 年の期間に、Weyburn 油田で測定された約 100 件の微小地震事象を示している。（写真提供: サスカチュワン大学 Don Gendzwill 博士）

地震と微小地震の比較

マグニチュード	TNT当量輻射エネルギー	エネルギー比較
+3	480 キログラム	大規模カリ鉱山地震
+2	15 キログラム	小規模カリ鉱山地震
+1	480 グラム	10 トントラック衝突
0	15 グラム	高い建物からの飛び降り
-1	0.5 グラム	30-30 ライフル弾
-2	15 ミリグラム	厚い辞書の落下
-3	0.5 ミリグラム	小枝の折れ

赤=WeyburnCO_2圧入微小地震規模

Figure 26. Weyburnで記録された微小地震事象と大規模測定の比較。Weyburnでは-1.0を上回る事象は起こっていない。（写真提供: サスカチュワン大学Don Gendzwill博士）

Q **37. CO_2貯留地付近で地震が起こったらどうなりますか？**

A 居住地で地震が頻繁に起こるか全く起こらないかに関わらず、CO_2 貯留の議論になると常に地震についての質問が寄せられます。

CO_2 貯留地は、安定性を特定するための地震画像などの技術を使用して特性付けおよび調査が行われ、地震の影響を受けにくいという理由で選定されます。WMP 調査は地震の活動が活発ではない北米地域において、活性断層を含まない油田に CO_2 を貯留するための安定した場所を選択しました。

日本や北米の西部海岸などの、地球上の地震活動が活発な場所においても、地震が発生した場合、地下深くの地中層からの漏出が起こる可能性は非常に低いものです。カリフォルニアと日本はいずれも、これを裏付ける証拠を揃えています。

カリフォルニアの陸上と沖合には、地震活動が活発な断層付近および地震発生地帯の付近に、多くのガス・石油埋蔵地が存在します。これらの埋蔵地の一部は、その深度とキャップロックの利用可能性に応じて CO_2 貯留地となる可能性があります。また何百万年もの間（石油生産の調査期間の数十年間を含む）、また数百回の地震を経ても、安全に石油とガスが貯留され続けてきました。地表近くの一部の貯留層では、断層に沿って石油やガスが地表への移動する動きが見られますが、このような潜在的な漏出経路を特定することにより CO_2 の漏出を防ぐために、圧入の前には CO_2 貯留の候補地の特性評価が実施される予定です。石油とガス資源に恵まれながらも、地震活動の活発なカリフォルニアにおいても、貯留候補地の正しい特性化が行われることにより CO_2 を安全に地中に貯留できます。

CO_2の実際の貯留地のごく近くで地震が発生した最近の例として、日本の長岡市が挙げられます。2004年、地下1,100メートルのCO_2圧入地からわずか20キロしか離れていない場所で、マグニチュード6.8を記録する大地震が発生しました。圧入されたCO_2は地震の前、地震の間、および地震後にわたり専門家の監視が続けられていますが、現在まで漏出は検出されていません。

Q

38. 裸孔とは何ですか？ また、どのように維持しますか？

A

裸孔は、CO_2 などの物質を圧入し、さらに石油などの物質を表面に移動させるために、油層やガス層のような岩石層に深く掘削された穴です。裸孔は石油の上方への移動、あるいは CO_2 や他の物質の下方への移動に使われる経路です。裸孔の安定、液体の移動と計装器の設置および撤回のための経路確保、飲料水の保護、またその他の目的のために、裸孔全体（特に表面付近）はセメントと金属で被覆されます。

油井は非常に厳しい基準に沿って建設されているため、効果的な監視が可能です。例えば、坑井ケーシングの内側でも、ケーシングと周囲の岩石（裸孔環（annulus）内部）の間でも圧力と温度を監視できます。不測の挙動を詳細に点検するために、貯留層内から液状サンプルを取得することが可能です。また坑井ケーシングの内側に特殊な監視ツールを降ろすことで、坑井の深さ全体の状態を測定することが可能です。ケーシングまたは裸孔環（annulus）内部（最も深い箇所はセメントが充填）に欠陥が見つかった場合、石油・ガス業界の標準の手順に従ってこれらの欠陥を修復（改善）できます。Figure 27は、導入可能な監視装置の一部を含む、炭素貯留プロジェクトの圧入井を示しています。

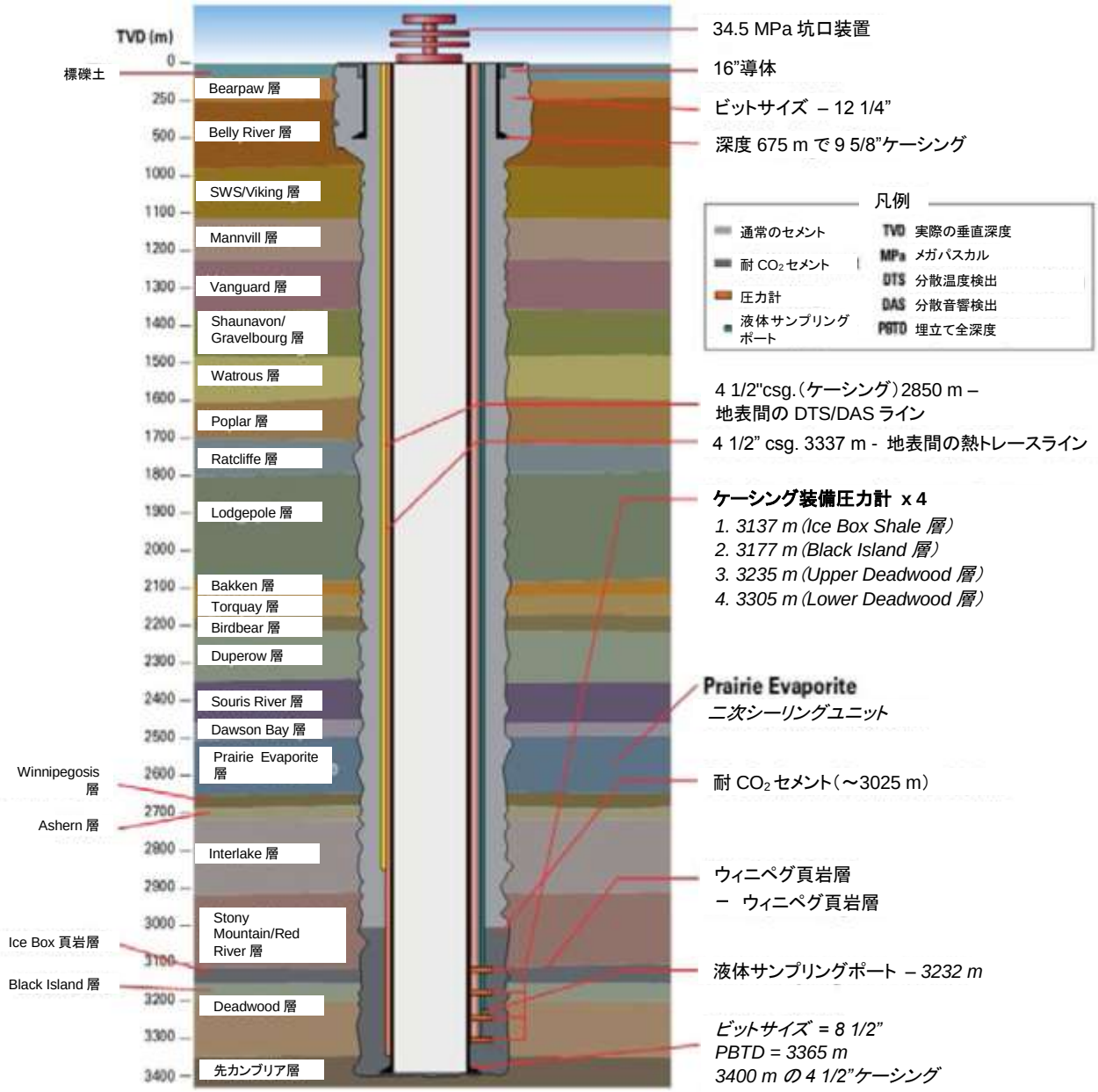


Figure 27. CCSプロジェクトの一部の裸孔は、様々な聴音および測定装置が使用されます。サスカチュワンの新たな深部塩水層プロジェクトAquistoreで使用される、この裸孔もその一つ。ここは、CO_2の地表への排出が起こっていないことが裸孔の監視装置により容易に確認できる。(画像提供: PTRCのAquistore Project)

WeyburnとMidale油田の操業者は、工業規模のCO_2圧入に利用される裸孔の安全操業について、世界でも最先端の知識を備えています。WMPの調査により、注意深く建設・監視される坑井が安全で長期的な完全性を有することが実証されています。

Q 39. CO_2パイプラインの安全性は、どのようにして確認しますか?

A CO_2、石油、天然ガス(メタン)、その他の化合物のいずれのパイプラインも、政府により制定された規制で統制されています。パイプラインの操業者は、規制に準拠した操業が要求され、パイプライン内の圧力の測定、圧力損失の位置の特定、シャットダウン操作と速度および効率の管理といった機能を備えた自動コンピュータシステムを通じて、規制準拠の操業が一層促されています。

WMP調査では、Dakota Gasification Company(CO_2を米国からカナダに輸送する大型パイプラインの操業者)、およびWeyburnとMidale油田の両操業者(Cenovus EnergyとApache Canada)は、圧

力、流速、流量の監視に役立つコンピュータ監視システムをCO_2パイプラインに導入しています。このような体制により、漏出が発生した場合でも迅速な検出と修復が可能になります。

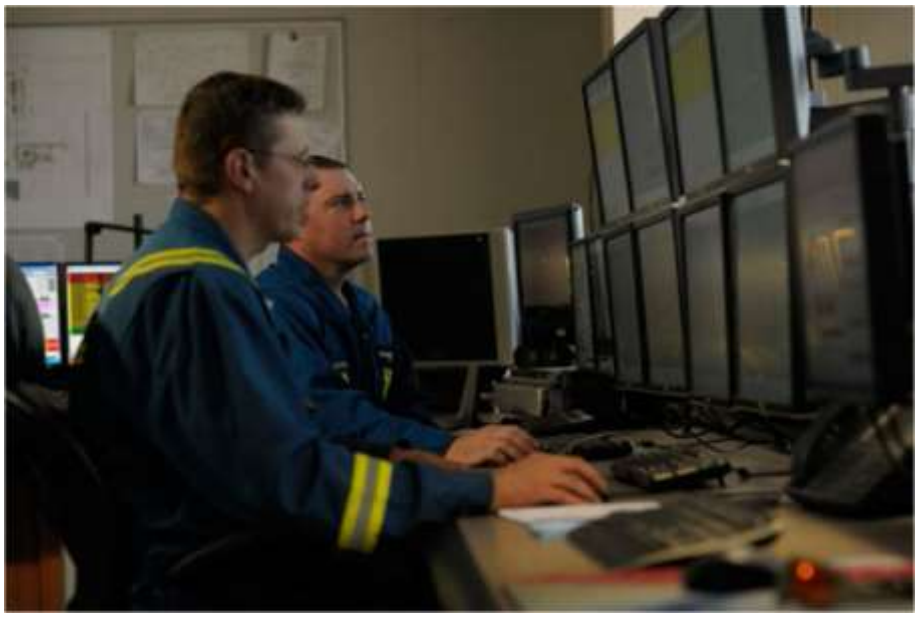


Figure 28. CenovusのWeyburn油田のスタッフが、先端の圧力・温度技術を採用したコンピュータを使ってCO_2パイプラインを監視している。（写真提供: Cenovus Energy）

Q

40. パイプラインからCO_2が漏出した場合、どうなりますか?

A

CO_2パイプラインからの漏出は可能性が非常に低く、非常にわずかな漏出も迅速に検出され、処理されます。ただし、漏出が発生した場合、いくつかの影響が想定されます。長期的なゆっくりとした漏出は、ほとんどの場合拡散され、パイプライン内に他の有害な物質が含まれていなければ、健康に影響しません。しかし CO_2 は空気よりも重いために、例外的な状況（風も空気の移動も起こらない日など）では、低平地に CO_2 がゆっくりと漏れた場合、潜在的な危険が生じるレベルまで特定の箇所に CO_2 が堆積する可能性があります。しかし、このような漏出はパイプ内の圧力が低下するため、迅速に検出され、処理されます。

パイプラインの大規模な破裂（穿刺などを原因とする）が起こった場合、パイプラインは加圧下にあるため初期爆発が発生する可能性があり、破裂の近くの人々が爆発で負傷する可能性があります。圧縮 CO_2 の膨張により生じる温度の低下を原因とする負傷も想定されます。

高濃度のCO_2蒸気が充満した狭いスペースで作業する場合、酸素を補給する必要がありますが、ほとんどの気候条件では、空気中の水蒸気が突然の低温条件下で凝縮するために、発生するCO_2の噴煙は容易に見分けられます。パイプラインから漏出したCO_2は空気に触れた後すぐに固体に変化しします。このような漏出CO_2は、固体からガスに変わるときにゆっくりと消散します。CO_2は周囲の空気よりも重いために、低平地に集まりますが、わずかな風によって非毒性レベルまで容易に拡散します。

Figure 29. ノースダコタ州ベウラの、サスカチュワン南部のCO_2パイプラインは、破裂が起こらないように、6フィート以上の深部に埋設されている。（写真提供: Dakota Gasification Company）

重要な点として、現代のすべてのパイプライン（WMP調査に基づくノースダコタ州からサスカチュワンにCO_2を供給するパイプラインを含む）は、先端のコンピュータシステムで監視されています。このシステムはパイプライン内の圧力降下を感知し、圧力の降下が発生した場合に、経路沿いの様々な箇所で非常に素早くガス流を停止できます。WeyburnとMidale油田に供給するパイプラインでは負傷事故も発生しておらず、またCO_2の漏出も発生していません。北米では長距離のCO_2の配管は一般に行われています。

Q **41. 貯留プロジェクトではどの程度の騒音や混乱が発生しますか?**

A 建設や継続的な操業を伴うプロジェクトと同様に、CO_2 石油増進回収と炭素回収・貯留プロジェクトは、建設地のコミュニティに目立った存在感を示します。

CO_2回収・圧縮施設の建設、CO_2輸送用パイプラインの建設、圧入井と監視坑井の掘削など、混乱のほとんどは、短期的なものです（Figure 30）。しかしこのようなプロジェクトの一部の側面においては、物理的な圧入井と監視坑井など継続的な影響発生します（ただし存在感は最も低い - Figure 31を参照）。また、付近の道路の交通量が増加する可能性があり（特にEOR-CO_2圧入の場合に適合。石油タンカーとメンテナンス用トラックが必要になる可能性があるため）、さらにコンプレッサーと坑井の操業に伴い、ある程度の騒音が発生します。

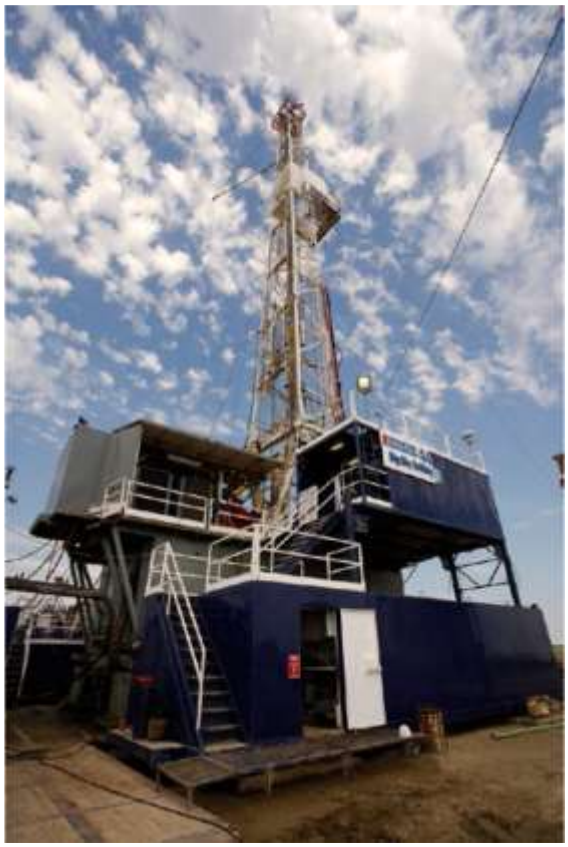


Figure 30. Weyburn地域で稼働する掘削リグ。CCSプロジェクトにより生じる混乱の一つに掘削があるが、通常は比較的短期間で終了する。（写真提供: Cenovus Energy）

CO_2 石油増進回収、特に Weyburn と Midale 油田への CO_2 圧入においては、同地域における 50 年近い石油回収の実績により、地域のコミュニティは産業活動慣れています。圧入井と生産井、地方の砂利道のトラックの存在、および機械の稼働はすべて周知の事実です。石油会社はコミュニティと連携し、坑井を設置する際の占有面積をできるだけ抑え、立地場所を美化し、牛の放牧と農業用途への影響を防ぎ、地域の道路を整備しています。私有地に立ち入る場合は事前に許可が申請され、住居から離れた場所に坑井とコンプレッサーを配置し、騒音の影響を最小限に抑えるための規制を遵守します。

プロジェクトのオーナーと企画立案者がコミュニティと対話し、プロジェクトからどのような種類の影響が予想されるか、潜在的な混乱以外に、雇用、CO_2排出量の削減、経済発展などの潜在的な利益についても隠さず公表することがカギとなります。

Q

42. CO_2貯留施設はどの程度目立ちますか?

A

CO_2 貯留は地中深くで行われるため、貯留プロジェクトの地表からの視覚的な存在感は非常に薄くなります。CO_2 を輸送するパイプは通常は埋設され、現地で視覚的にプロジェクトの存在を示すものは、圧入井のみになります。CO_2 石油増進作業では、多くの圧入井と生産井が建設されますが、CO_2 を深部塩水層にのみ圧入する貯留プロジェクトでは、1 基または 2 基の圧入井から貯留作業が外観的に示されるに過ぎません。

Weyburn油田では、人里離れた畑でも生産井（ポンプジャック）は普通に見られます。CO_2圧入井を増設しても景観に大きく影響しませんでした。坑井の立地場所は美観を重視して手入れされ、圧入井はベージュのガラス繊維製のカバーで覆われて、内部の機器が保護され、周囲にもうまく溶け込んでいます（Figure 31を参照）。パイプラインは、作物の栽培や家畜の放牧が可能になる深さまで埋設さ

れています。

Figure 31. Weyburn地域の菜種畑に設置されたポンプジャック（右、生産井）とCO_2圧入井（左、ベージュのガラス繊維製カバーで保護）

Q **43. 所有地の地下の鉱物権を所有している場合、CO_2貯留で利用料が支払われますか?**

A この質問の答えは一律ではなく、各国の CO_2 貯留と採鉱を統治する規制により決定されます。CO_2 は鉱物ではないため、特定の区画の土地の下への CO_2 の貯留自体が、鉱物権保有者への支払い理由になることはありません。ただし CO_2 が油層に圧入され、石油の生産量が増加した場合、鉱物権の保有者は、石油会社と交渉したロイヤリティ率に応じて利益が得られる可能性があります。Weyburn と Midale 油田もこの例にもれず、CO_2 の圧入により石油生産が増加し、最終的に鉱物権保有者へのロイヤリティも上昇しました。

カナダの石油会社および掘削会社は、いわゆる「地上権」利用に対しても支払いを行っています。土地所有者が地所の下の鉱物権を所有していない場合でも、その地所への CO_2 圧入井または石油生産井の配置に対して、（年間）使用料が支払われる場合があります。

深部塩水層または生産していない石油/ガス層へのCO_2の貯留は、別の問題になります。貯留により石油や他の鉱物生産が発生していないため、貯留に使用される孔隙が、鉱物権所有者への支払い対象となることはありません。カナダでは、地表アクセスおよび坑井の配置に対してのみ補償が行われます。カナダ、アルバータ州は2011年、孔隙は鉱物権に含まれず、政府に帰属すると公布しています。しかし孔隙と鉱物権に関連した規制は国毎に大幅に異なり、貯留プロジェクトを策定する前に調査が必要になります。

Q **44. 地中でCO_2が漏出した場合、どうなりますか？**

A 貯留地は慎重に選定および調査され、CO_2 が貯留層から漏出して周囲の岩石に移動する可能性を低く抑えています。漏出が発生した場合、CO_2 は狭い経路に沿って断層、断裂、または深部の坑井から付近の岩石に移動することが確実であることが、調査により示されています。CO_2 が圧入区画よりも千メートル以上、上部に位置する浅い地下水または生態系などの環境保護指定区域に到達するには、貯留地の上に存在する多層化した岩石の中を、さらに数層の封止岩石を通過しなければなりま

せん。

WMPの調査から、貯留層から浅い地表面下の飲料水用の地下水にCO_2が大量に漏出する可能性は非常に低いことが示されています。これは岩石層の性質と、油田に掘削されている古い坑井の状況について最悪の仮説が行われている場合も同様です。WMP調査においては、最も関心の高い環境資産を評価し、漏出の影響を評価することを目的に、地域のコミュニティと環境問題の専門家とのワークショップが開かれました。これらの詳細な評価の結果から、リスクは低く、リスクの効果的な監視および管理が可能であることが証明されています。

Q 45. 100年または1000年後にCO_2が漏出した場合、どうなりますか？

A 地質時代は 100 年、1000 年単位ではなく数百万年単位で測定されます。世界各地に存在する天然の CO_2 埋蔵地の多くは Weyburn 油田と Midale 油田に似た地下に形成されていますが、数千万年の間安定性を保ち、移動していません。

CO_2 貯留地は、天然の貯留地と全く同じ種類のものになるように選ばれます。長期的には、CO_2 の漏出は、人間が貯留層に掘削して作った裸孔を通じて発生する可能性があります。

CO_2を圧入した企業と人が去ってから何年も経た後に、裸孔あるいは貯留地における不測の事態により、CO_2が漏出する場合、これらの貯留地の責任を引き受け、問題を修復するための計画が策定されます。例えば2011年、カナダ、アルバータ州政府は貯留地の「長期的責任」を引き受けました。これは企業と人が去った後は州政府が土地の保守責任を負うことを意味します。

Q 46. 漏出が発生した場合、誰が修復に責任を負いますか?

A 国および管轄区によって規則は異なりますが、一般的に言われるのは、稼働中の CO_2 貯留地で漏出が発生した場合、漏出の修復は操業者の責任になるということです。サスカチュワンの Weyburn と Midale 油田の場合、両石油会社（Cenovus と Apache）が州政府が施行した規制と法律に従って各油田の坑井、パイプライン、インフラを保守することが要求されています。パイプライン、または貯留層から裸孔を通過して漏出した CO_2 は、対応手順を定めた企業による迅速な対応が要求されます。

貯留地が閉鎖され、施設の操業が停止した後、誰がCO_2貯留の長期的な安全性確保・維持を行うのかについて、各国の政府毎に異なった法律が施行されています。カナダ、アルバータ州では、操業停止後の、貯留されたCO_2の長期的な責任は州政府が引き継いでおり、漏出の修復と裸孔の維持を保証する作業も州政府が担う予定です。

CONCLUSION

IEAGHG Weyburn-Midale 監視・貯留プロジェクトは、炭素回収・貯留について寄せられるすべての質問に答えるものではなく、CO_2-EOR（石油増進回収作業）の付加作業として、主に圧入された CO_2 の測定と監視に関する識見を提供するものです。このプロジェクトは世界最大量の人工圧入 CO_2 の地下貯留層で実施されたものであり、継続調査も含むプロジェクトです。このプロジェクトは、CO_2 の安全で確実な地下貯留を実証するものであり、CO_2 貯留に関して人々から最も多く寄せられる懸念の多くに対応し現実的なデータと科学的な情報を提供することができます。

本書で扱われる質問と回答には、CO_2 貯留の科学的知識、ロジスティクス、利点、潜在的なリスクを理解するのに役立つ重要な情報が含まれています。読者によっては CO_2 地中貯留のトピックを初めて耳にした、あるいは居住地の近くで類似するプロジェクトが提案されているため、ある程度の問題には知識があるといった様々な状況が想定されます。本書内で扱った質問と回答の一部は炭素回収・貯留チェーン（深部塩水層貯留、油層、回収の各技術）の側面にも触れていますが、これらのトピックについては、他の活動中のプロジェクトからより詳細な情報が得られます。詳細情報はウェブサイト（http://www.globalccsinstitute.com と http://www.sequestratin.org）をご参照下さい。

炭素回収・貯留は、気候変動の潜在的な影響の軽減を促す大規模なプロセスであり、世界的な実施にあたっては、高いレベルでの理解、および業界の代表、政府役人、政策決定者、政治家の側との対話、また最も重要な一般大衆との対話が要求されます。グローバル CCS インスティテュートと石油技術研究センターは、本書により対話が促されること、また本書で得られる回答から CO_2 貯留が成功を収め、科学的および環境的メリットがもたらされることを期待しています。

WMP調査による科学的調査結果に関心がある場合は、最終報告書の完全版『***Best Practices for Validating CO2 Geological Storage: Observations and Guidance from the IEAGHG Weyburn-Midale CO2 Monitoring and Storage Project*** *（CO_2地中貯留の検証のベストプラクティス: IEAGHG Weyburn-Midale CO_2監視・貯留プロジェクトの考察とガイダンス）*』が、Geosciences Publishing（www.geosciencepublishing.ca）から販売されていますのでご参照下さい。同書籍の購入方法詳細については、PTRC（info@ptrc.ca）までお問い合わせください。

巻末注

[1] Wilson, M. and M. Monea.編集。『*IEAGHG Weyburn CO_2 Monitoring and Storage Project Summary Report, 2000-2004 （IEAGHG WeyburnCO_2監視・貯留プロジェクトサマリーレポート、2000-2004）*』第7回温室効果ガス制御技術国際会議（2004年、9月5-9日開催）の議事録から抜粋。第III巻。カナダ、バンクーバー

[2] Hitchon, B 編集。『***Best Practices for Validating CO_2 Geological Storage: Observations and Guidance from the IEAGHG Weyburn-Midale CO_2 Monitoring and Storage Project** （CO_2 地中貯留の検証のベストプラクティス: IEAGHG Weyburn-Midale CO_2 監視・貯留プロジェクトの考察とガイダンス）*』Geoscience Publishing（Sherwood Park, Alberta Canada）

[3] http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html

[4] 米 EPA の見積に拠ると、乗用車は年間 5000 kg（5 メートルトン）以上の CO_2を排出する。したがって 2,200 万トンの CO_2 の貯留は、420 万台の乗用車の削減に相当する。

[5] Cook, J ら。2013 Environ. Res. Lett. 8 024024。http://iopscience.iop.org で閲覧可能。

謝辞

石油技術研究センターとグローバル CCS ンスティテュートは、本書の製作に貢献した研究科学者とコミュニケーションの専門家に感謝の意を表します。特に技術的な回答の多くに助言を与え、レビューを行った Steve Whittaker 氏（現 CSIRO（オーストラリア連邦科学産業研究機構）職員、PTRC 元職員）と、Neil Wildgust（現 PTRC 側 WMP 調査責任者）に感謝します。また Weyburn-Midale の 12 年間の研究結果に貢献し、今回の執筆プロセスに助言を与えてくれた多くの科学者の方々にも感謝します。

本書は、Rick Fink 氏（Empresa Communications）と Trent Fraser 氏（Fraser Strategies）の支援の下、Weyburn 地域におけるフォーカスグループによる検証を受けています。またフォーカスグループの結果と本書は、CCS に関するコミュニケーションエキスパート会議による検証を受けています。これらの検証には Sallie Greenberg 氏（イリノイ地質学調査、Decatur Project）、Dan Daly 氏（ノースダコタ州、Energy and Environmental Research Center）、Duncan Kenyon 氏（アルバータ州エドモントン、Pembina Institute）、Twila Walkeden 氏（Cenovus Energy）、Lori Gauvreau 氏（Schlumberger Carbon Services）、Chris Smith 氏（環境 NGO ネットワーク代表）、Jonathan Tremblay 氏（SaskPower）、Sarah Wade 氏（Wade LLC）、Camilla Svendsen Skriung 氏（ZERO）、Aleana Young 氏（PRRC - Aquistore Project）、Jolene Goulden 氏（PTRC）が参加しています。

最後に Norm Sacuta 氏（PTRC）の執筆と校正に対して、また本書の完成まで指導して下さった Kirsty Anderson 氏（グローバル CCS インスティテュート）の支援に感謝します。

報告書製作委託者: グローバル CCS インスティテュート

GLOBAL CCS INSTITUTE