

序

二酸化炭素(CO₂)のジオロジカル・ストレージ(地質学的貯留)は、温室効果ガス(GHG)排出、特に発電所、製油所、セメント工場、製鋼所など大規模排出源からの排出量の有意な当面的削減を実現するためのグローバル規模の取り組みにおいて、現実的進歩を生む可能性を持つ。二酸化炭素の回収・貯留(CCS)は万能解決策ではないが、既存のテクノロジーを活用、さらに改良することで大量のガス排出に対処するための具体的な方策を提供するものである。

CCS は新たなエネルギー未来へ移行していく間の橋渡しのテクノロジーの一種である。その成功への楽観は産業経験に根ざしているが、広範囲に及ぶ CCS の応用が達成されるには、種々の問題に取り組む必要があることは支持者らも認めるところである。主要な問題点を下に要約し、詳細な検討は以降の本文に続く。

典型的には、CCS または二酸化炭素の回収・貯留は産業プラント等におけるガス隔離、貯留地点への移動、地表下層への封入の統合的プロセスと定義される。アメリカ合衆国政府機関では“ストレージ”の代わりに“シークエストレーション”(隔離)という語が使用されるが、意味は同じであり、多くの国際機関を含む世界で用いられる頭字語は CCS である。CO₂ が貯留あるいは隔離される場合、安全なオペレーションを提供するために入念に設計された操作手順が順守され、CO₂ は地表下層深部の岩石の間隙(典型としては地下 1000 メー

トル以深の深層)に圧入される。一度 CO₂ が安全に地中に封入されれば、地質年代的期間においてそこに残留すると予測される。

石油およびガス産業の広範囲にわたる実質的経験を糸口に、本文書は CO₂ のジオロジカル・ストレージで用いる主要な手法的側面と技術的イノベーションを取り上げる。本文は大規模 CCS オペレーションに規模および領域的に同等のプロジェクト例を多数引証する。本文書はジオロジカル・ストレージまたは産業ベストプラクティスについての包括的見直しではなく、産業知識をシェアする中で特定の価値を発見するために頻繁に議論される分野を 4 章に渡って取り扱う。

第 1 章は根本的問題点を分析する：

- 貯留地点はどのように選択されるか？
- 提案された地点の適合性を客観的に評価するためにどのような基準が最重要となり、どのようなデータが収集されるか？
- 地質学的コンテキスト、知識、データ入手可能性に基づいて、どのような要因によってある特定の立地条件が他よりも貯留のために本質的によりよい選択肢となるか？
- どのようなプロセスをもってジオロジカル・ストレージとするか？

第 2 章は坑井と CO₂ が既存の坑井から帯水層へ、あるいは開渠やセメント劣化により地表へ漏れる可能性に焦点を置く。坑井の完全性、セメントや CO₂ にさらされる坑井の建設手

法をとりまく問題点と最近のフィールドおよびラボ実験結果について論じる。

分析が示唆しているのは、適切な坑井テストと有効な技術と精査をもってすれば、この潜在的な問題を容易に対処できる課題に変化させられる点である。しかしながら、ある特定の地点においては問題の坑井修復に必要とされる改善が、経済的に望ましくない状況をもたらすことになりかねない。

第3章はモニタリングとベリフィケーション手法について分析する。効果的なモニタリングは主にデータ取得と地表下のCO₂の位置をモデルとするシステムの確立を通して達成できる。モニタリングは意図的に潜在的懸案事項についての主要な問題点に対処し、実質的なプロジェクトパフォーマンスデータを提供する。有効なモニタリングプログラムはすでに発生してしまった問題を指摘するのではなく、潜在的な問題を避ける役割をになうものとなる。

第4章ではある貯留地点のオペレーションと最終的閉鎖により生じた諸問題について評価する。何人かの監査役はこの石油とガスオペレーションの閉鎖に伴い、重要な経験を得ている。それらの実践を基に、プロセスが安全で効果的であるという現実的な保証を提供する実際的なレギュレーションが生み出されうる。さらに、既定のシステムの最大限の貯留ポテンシャルとそれが圧入レートとプレッシャーにどう影響するかについて検証する。

CCS プロセスは天然ガスビジネスを逆方向に運営することに似ている。CO₂ は不燃性、非毒性であり、高濃度以外では危険性もないという点で注目に値する。地球上の全生物圏がその生存を CO₂ に依拠している。CO₂ は大気中において非常に急速に分散する。CO₂ のようなガスを地表下深部に埋めた状態での管理に際して生じる課題には、前例や経験がないわけではない。CCS プログラムの成功は最終的には、プログラムが生物、水、環境に無害であることを、オペレーター、政府、そして市民に保証するためのフレームワークを提供することを目的とする基準や想定の実立に依存するものとなるだろう。

CCS は化石燃料コンバチオンからの排出に対処する効率的な一手法である。いずれは CCS がバイオマス原料廃棄物を使用する発電施設において実施される可能性もある。バイオマスのコンバチオンにより放出された CO₂ の貯留は、大気中にある CO₂ 量削減のために再生可能エネルギーよりもさらに効率性の高いプロセスを作り出す見込みがある。このシナリオは発電と同時に大気中の純量 CO₂ を抽出する可能性を提供するものである—ユートピアではなく、進歩に他ならない。

大規模商業スケールの CCS プロジェクトが現在稀有である理由は、基本的なビジネスファンダメンタルズの欠如である。原油の二次回収 (EOR) を例外として、ほとんどの場合、CCS の施行は法的に認められていない。さらに重要な点は、CCS を使用して削減された CO₂ 排出を貨幣化するメカニズムが存在していないことである。ある商品 (電気、電力、

石油、ガス、精製品、セメントあるいは鉄鋼)を販売する企業にとって、一方的に CCS に着手するということはビジネスとして考えにくい。貯留された CO₂ に商業的価値が出ない限り状況は変わらないだろう。

それでも幸いなことに、世界のいくつかの法制度が CCS 実現のために必要な法的および規制のフレームワークをまとめ始め、現在の規制を改正したり新たなものを作り出している。産業界にはすでに産業スケールの CCS プロジェクトを実行するテクノロジー、スキル、キャパビリティがあり、そのテクノロジーを展開する商業的合理性が具体化すると見込まれる。

CCS プロジェクトオペレーターに必要なもの :

- 良質な貯留地点へのアクセスと貯留スペースの明白な使用权
- 圧入許可を与えるための法的フレームワークとライセンスプロセス
- 通常ビジネスのためのファイナンス施設を供給する用意がある金融機関
- 最終的なプロジェクトの法的閉鎖に関するクリアな想定
- 貯留された CO₂ の長期的責任管理 (受託責任)
- 投資に相応する収益への期待

個々の CCS プロジェクトに見られる規制遷移における明白な 4 フェーズ :

- *地点の選定と開発* (およそ 5~10 年): 地点の特定は地質学的査定、商業的因子と規制

的想定に基づく。地表施設のためのスペースの確保と初期の地表下貯留スペースを所有者(事業団あるいは政府)より購入または賃借。貯留許可が出たらインフラ建設(例 ; 坑井、組み立てライン、コンプレッサー)に入り、操業キャパシティーを確認する。

- *オペレーション*(10 年以上): ガス圧入全期間プラス手法的に適切な追加モニタリング
数年分
- *閉鎖*(数年以上): このフェーズは十分なモニタリングにより封入済み CO₂ 管理が良好であり、今後も問題が起こらないことが示唆された時点から開始する。監査役は坑井あるいはその他の施設を、非常に長い時間フレームで継続的に観察することも考えられる。ほとんどの坑井は封鎖され、インフラは除去される。その後その地点はノーマルな状態と見なされる。
- *閉鎖後*: 貯留層の CO₂ が想定された恒久不変性を確立する。オペレーターのプロジェクトへの取り組みが終了する。

いくつかのリスクについて。CCS が成功するためには、それらのリスクがオペレーターおよび監査役両者により客観的かつ敏感に対処されなければならない。誤認識されたリスクを過剰規制することや、未認識の危険を孕む真のリスクの規制を見過ごす可能性が挙げられる。適正な監査役の構成を持つことが CCS プロセスの成功に役立つだろう。封入された CO₂ に関連する“リスク”は時間の経過により変化するという点が重要な手法的検討のひとつである。想定外の出来事が起こる確率は、圧入量と地表下プレッシャーが増加するに従

い高まるので、オペレーションフェーズ期間中は緊密なモニタリングが必要となる。圧入が終了し、プレッシャーが平衡化すると共に、自然の捕獲メカニズムが働き、封入済み CO₂ は徐々に固定された状態となる。

オペレーターと監査役にとって、想定外の結果を最小限にするための最も効果的な方法は、賢明な貯留地点をまず選択することである。CO₂ 圧入と貯留に適した安全な地点となる因子が第 1 章中の地点の選定の主題である。引き続き、貯留プロジェクトを建設するためには、とりわけ新規坑井の建設や既存の坑井の査定および / または改良において適切な実践を行わなければならない。これらの手法的基盤については第 2 章で取り扱う。ベースラインとオペレーショナルメジャーメントの両方を含むプロジェクトのモニタリングはオペレーションフェーズ期間中にパフォーマンスを最大化し、潜在的な問題を早期に発見するためにも欠かせないものである。これは第 3 章で検証する。最後にプロジェクトの成功には知能設計、強固なオペレーショナルコントロール、オペレーターや監査役を含む健全なプランの統合が求められる。それによりプロジェクトの閉鎖、閉鎖後フェーズへのスムーズな移行が可能となる。これらについては第 4 章に説明する。

第 1 章：地点の特性解析

地表下の特性解析は CO₂ 貯留のための可能性のあるジオロジカルユニットを特定する際の基礎的ステップである。それは純粋な地球科学から始まり、データ検証のためのルーティ

ンおよび従来の手法を使用する。地表下の特性解析をする際には、内在的な自然の変動性による一定の不確定性は避けられないが、ジオロジカル・ストレージが手法的にフィージブルとなるために不可欠な 3 要素を挙げるができる。貯留ユニットポテンシャルには、すべての圧入物質を貯留するために十分な空隙がなければならない（‘キャパシティ’）；地層の特徴として坑井付近への圧入性を許容するものでなければならない（‘圧入性’）、上部を覆う封鎖パッケージは適切な液体の封入を保証するものでなければならない（‘封入’）。このコンテキストでの“液体”は、超臨界（濃厚）フェーズ、ガスフェーズ、ブライン溶解 CO₂ を含む多数の化学フェーズにおいて CO₂ を意味する。

キャパシティは次の 5 要因により決定される。地層の厚み、貯留・地点の領域、岩石孔隙率、CO₂ 濃度（任意の一貯留層中でも変化する可能性がある）貯留効率性（CO₂ で飽和されうる空隙量プラス CO₂ を溶液あるいは化合物形態にするため、既存の地層と液体のキャパシティ比率を反映する一要素）。主要な選択要因は孔隙率である。

圧入性は地層と圧入井の透過性により決定される。理想的には CO₂ 貯留に必要なのは、CO₂ の空隙スペースへの急速な移動を可能にするための坑井付近の高い透過性である。圧入が進むにつれ、地表下の CO₂ と貯留地層の岩石と液体の間の地球化学的反応が、圧入性を好都合にあるいはその反対に変化させることもありうる。封入に必要なのは、ある種のトラップと有能な封鎖である。封鎖は流れに対する天然のバリアで、それは最小限の透過性、

あるいは重大な浸透をまねく連動した断層や破碎のない流れや地層を許容するキャパシテ
ィを持つ岩石を意味する。封鎖は垂直方向でも水平方向でもよい。あるケースでは単一の
封鎖が優れた封入をもたらし、他のケースではトータルな封鎖パッケージとして機能する
ために複数の封鎖層が好まれることもあるだろう。封鎖する岩石の有効品質はラボのデー
タをもって定量化および測定できる。封鎖の継続性も重要である。圧入される全容量を封
入するために十分な領域をカバーする必要がある、ある特定の状況下で起こりうる不都合
な地球化学的あるいは地質工学的効果によるいかなる破損ポテンシャルをも防げる十分な
厚みが必要である。残留飽和は CO₂ の強力なトラッピングメカニズムとして作用しうる。

CO₂ のジオロジカル・ストレージにはいくつかの一般的モードがある。以下に挙げる：

- 1- 枯渇した石油またはガス貯留層、最もすぐに利用でき、適切な貯留解決策に 数
えられる；
- 2- 帯水層（深部塩水層）、より広範囲での地域が網羅される可能性、より一般的であり、
多くの CO₂ 排出地点付近の唯一の可能性となりうる；
- 3- 石油、ガス産業の原油の二次回収（EOR）との連携；
- 4- 炭層

石油とガス産出フィールド付近における貯留の主な利点は当該の石油、ガスオペレーショ
ンから作成されてきたであろう最初のデータベースが成熟していることと、実績ある封入

の適度な確実性である。

CO₂ が封じこめられるメカニズムを理解することは、地点の特性解析の重要な側面である。

物理的、地球化学的要素がトラッピングメカニズムの有効性を決定する。堆積盆地の地域構造、歴史、圧力領域を含む盆地規模側面も重要である。それぞれの地層は常に、盆地中の液体の流れと貯留メカニズムが理解されるべきとなるさらに大きなシステムの一部であるだろうから。貯留地点ポテンシャル付近の自然の液体の流れの方向や変化を特定することは不可欠である。物理的トラッピングメカニズムは構造的、層位的トラップの形状から成るもので、石油、ガス探査においてルーティン化した貯留層の査定により一般的によく理解されている。岩石層の中の空隙スペースに閉じ込められた残留 CO₂ はトラップとして作用することが可能であり、重要な貯留メカニズムをになうものである。地球化学的トラッピングでは、CO₂ は地表下（帯水層の塩水で飽和されているような層）の自然液体やミネラルと反応し、地表下での恒久的 CO₂ 貯留をもたらすこともできる。

石油、ガス探査や生産における地表下特性解析活動に共通している一般的な 3 フェーズの作業があり、それらは CO₂ 貯留に応用することができる。第 1 フェーズは、地点選定で、CO₂ の圧入と貯留のための潜在的な地域を特定するための地域審査研究が含まれる。分析、モデリング、リスクアセスメントを考慮しつつ、一つあるいはそれ以上の地点を特定し、詳細な必要条件を検討することを目的とする。第 2 フェーズとなる地点の必要条件検討に

は、圧入と貯留のフィージビリティを明確化するための詳細な地表下研究が含まれる。

この段階には典型として（もしも適当な坑井がまだ存在しない場合）査定掘削、より詳しいデータの取得、将来のモニタリングを計画する一助となるベースラインテスト、そして詳細なリスクアセスメントが含まれる。第 3 フェーズは開発フェーズとなり、フィールド開発計画のさらなる改善やターゲット地層の岩石物性や圧入キャパシティなど、より明確な詳細を理解することを目指す。

地質学的アセスメントや石油フィールド開発のコンテキストではよく理解されていることであるが、ある一定のリスクと不確実性は内在するものであり、地点選定および CO₂ 貯留地点の必要条件に関する意思決定の際にはそれを受け入れなければならない。

石油、ガス貯留層の特性解析に使われた多くの最良策が、CO₂ 貯留地点ポテンシャルを査定するためにも用いることができる。（地震データの使用、3D 地質学的モデルを形成するための層位マッピングや地層分析など）多くの地球科学者らは上質の CO₂ 貯留地点を特定するタスクを、既存の知識や実践を応用することにより比較的馴染みのある作業と考えるだろう。客観的であれば、極めて頑丈な貯留ポテンシャルのための選定基準はそれほど困難ではない。これらの可能性の多くは単純に枯渇した炭化水素フィールドとなるだろう。

しかしながら、石油、ガス産業オペレーションから得た地表下の知識という大きなメリットなしでは、また貯留の効率性を予測するための地質学的要素がそれほどよく知られてないような状況では、地点の選定に強烈な経済的プレッシャーを感じざるを得ないだろう。

そのような場合はより慎重に、重要な新しいデータの取得が必要となり、初期の試験的デ
モプロジェクトから得た学習事項から利益がもたらされるだろう。

石油、ガス産業は高水準の機能を果たしながら有用なイノベーションや適応の歴史を築い
てきている。そこには高度に洗練された水準の問題解決実践がある。貯留地点への投資は、
地点選定基準やモニタリング手法を改良するためのさらなる投資への原動力となる。ある
主要なモデリングツールは、CO₂ と貯留アプリケーションのためにアップグレードされ、
この特殊な目的のためにさらに効果的で効率的となる。例えば、自然の状態の CO₂ の動き
の物理モデルを作ることは、典型的な石油とガスの挙動、特にマルチフェーズ液体構成の
大型貯留層中の物理モデルを作ることほど完全に定義されていない；けれども CO₂ に関す
る現象を説明する洗練された数学モデルは存在する。また現在研究されている多くの深部
塩水層に関するデータが比較的少ないのは、石油やガス生産からそれほど興味を持たれな
かったからである。その他の産業水準ツール、特に大規模スケール封入分析用ツールに、
CO₂ に関連したアップグレードや高度なキャリブレーションによるメリットが見込めるだ
ろう。

第 2 章：坑井建設と完全性

貯留地点の坑井における CO₂ の漏洩リスクポテンシャルの査定が不可欠であることは、

CCS プロジェクトのすべての関係者らが同意するところであり、これは新規あるいは建設

予定の坑井にも適応する。漏洩を防止することは石油、ガスオペレーションの標準的な役割であり、圧入井と生産井の両方の設計基礎の主要な目的のひとつである。坑井の物理的および工学的完全性を実証するために多大な努力が注がれる。漏洩の防止、検出、修復手法は標準的な実践項目である。石油、ガス産業は CO₂ および石油、水、天然ガス溶解 CO₂ の圧入と産出のための坑井の建設と操業において、数十年に渡る経験を有する。

広範囲におよぶ CO₂ に特化した坑井建設の経験は、CO₂ 基盤の EOR プロジェクト[1]から得られたものである。初期のものは 1970 年代に開始され、高濃度 CO₂ を含む天然ガス混合物の生産から始まった。この活動が実践的経験とそれに呼応する分析の重要な体系を生み出した。CO₂ にさらされる環境に適した坑井の設計には、坑井の耐用年数の条件、廃棄、坑井の物理的性質（建設資材の選択、内外の封鎖完全性を確認するための実践など）のみならず、坑井操業中におけるプレッシャー、温度、産出 / 圧入時の化学反応についての理解が必要であることは明白である。

あるラボテストが、坑井建設によく使われているある種のセメントは、シミュレートされたラボ条件の下で、CO₂ の攻撃から破損を受ける可能性を提示したが、より大規模なラボ研究やフィールド応用、過去の実績や検証は、通常の石油フィールドで使われる良質な混合とテストやプレースメント実践を備えたセメントは、CCS 応用にも効果的であることを示唆している。これまでの経験が示しているのは、坑井アニュラスにおける効果的なセメントのプレースメントもまた、坑井の完全性を確立するためには非常に重要な役割を担う

という点である。CO₂ 回収プロジェクトにより実施された最近の研究は、CO₂ にさらされた坑井のバリア状態を検証するもので、ポルトランドベースセメントと炭素鋼が CO₂ への効果的なバリアとなることを発見し、どのセメントを選ぶかよりも、バリアシステムとセメントプレースメントの組み合わせが CO₂ 移行に顕著に耐えうることがわかった。

坑井建設にとりかかる前に、'基礎設計'と開発プランに掘削、完成、オペレーション、廃棄のニーズについて記録しておくべきである。坑井耐用年数（地点の選定、オペレーション、閉鎖、閉鎖後を通して）の各ステージの想定使用期間；圧入物質の詳述（レート、プレッシャー、容量、組成）と呼応する貯留層の特徴；必要な坑井の数とタイプ；必要な坑井完成タイプ；バリアシステム構成要素；腐食緩和；腐食とモニタリングプログラムとプラン；安全性システム；必要なサービスとメンテナンス；性能モニタリング準備と圧入性のメンテナンスと強化など広範囲な検討をカバーできるだろう。

温室効果ガス排出削減を目的とした圧入のターゲットとなっている大容量の CO₂ には、大量の新たな坑井が掘削される必要があることは明らかである。さらにこのことは坑井仕様の適切な理解と地点選定と開発時の最適な実践の必要性を際立たせる。幸いにも水平掘削、大規模水圧破碎、マルチラテラル坑井など最近の坑井テクノロジーの進歩が、個々の坑井の圧入性ポテンシャルを強化し、初期の CO₂ EOR プロジェクトに共通する従来の掘削手法と比較すれば、同量の CO₂ 圧入に必要となる坑井数を減少させられるだろう。

既存の坑井は CO₂ のジオロジカル・ストレージに使用でき、入手可能なインフラを使う有

益なチャンスを提供するものである。既存の坑井を使用するかどうかを決定する場合、オリジナルの設計特性の見直しと使用履歴（プラグの設置および廃棄履歴を含む。ただし該当する場合）の精密な調査が必要となる。坑井と関連する貯留層の状態（プレッシャー、温度、液体 / ガスの飽和、水質化学反応など）についてのベースライン情報も必要である。既存のインフラを当初の設計対象とは別の目的で再利用する場合、新規に建設された施設との比較時に操業的な制約が生じる可能性があるが、ほとんどのケースでは、EOR のために CO₂ を圧入することを目的に設計された坑井は、CO₂ を貯留させるための坑井と同一のものとなる。要するに、頑丈な設計と実行、CO₂ の必要性に適した考慮をもってすれば、どんな坑井も CO₂ 使用に改造することができる。

新規に坑井を建設すると、CO₂ と貯留地点の条件に特化したバリアシステムプランを作る機会が得られる。このことが重要な決定基準になる場合とそうでない場合もあるだろう。

坑井の耐用年数に適したバリアのクオリティ、貯留層の状態、CO₂ 貯留特有の条件などの要素を加味してプランを立てるべきである。新規に坑井を建設する場合の基本的な必要条件は、基礎設計、貯留スケジュール、開発プラン、ベースライン調査などであり、既存の坑井に必要とされるものと同じである。

第 3 章：モニタリング

地球科学者は地表下モニタリングを、複雑な地表下関係の効果的な理解をテストし、時間

とともに変動する液体やガスの位置と動きについての想定を実証するために設計された科学的評価の一部として実施される特定の目的のためのデータ収集プロセスと考える。モニタリングは安全な貯留のための主要な性能指標であるが、モニタリング自体が安全を保証すると考えるのは誤りである。モニタリングは車のスピードメーターのようなものである。安全への貢献はするけれど、車自体のデザインや、道路の状態、運転の仕方などその他の要素の方がより重要である。国連の IPCC (気候変動に関する政府間パネル) は、適切に選択管理された地点によって保管された CO₂ の比率は今後 1000 年の間に 99% を超える見通しであると示唆した。安全な貯留に重要なのは、適切な地点の選定と管理であり、効率的なモニタリングが全プロセスにとって基礎となる。直接的モニタリングツールと手法は、地表下の坑井付近あるいは地表で測定することにより CO₂ 濃度を測ることに使えるが、ほとんどのモニタリングは地震調査、重力調査、電磁探査など間接的測定メソッドにより行われる。モニタリング活動を実行するためのさまざまなツールがすでに存在するので、必ずタスクに合ったツールを使うために、地域的、地点特有の条件を考慮に入れた慎重な選択が求められる。ほとんどのケースでは、複雑な 3D コンピュータモデルが作成され、地表下環境を視覚化、数量化した代用物として使われる。モニタリングから得る情報はこれらのモデルを改善、改良する一助となる。

3D 地震探査は石油、ガス産業において、岩石容量の形状や分布、相対応力や液体タイプを

描写するために広く使われている。これは極めて洗練された強力なツールであり、低速度撮影テクノロジー（'4D'地震探査）が導入され始めることで、さらなる改良が見込まれるだろう。それでも地震探査には、塩層を通して高精度のイメージを作る手法的困難、あるいは財政的問題や地震探査を行う土地の使用アクセスの問題など制約がある。この手法で必要なデータを得られないケースもある。重力測定は、岩石の理論的垂直柱の密度の変化を検出し、CO₂ 地点への応用が考えられるもうひとつの間接的測定ツールである。衛星ベースの応用もまた地面の標高の変化の検出、例えば 1 ミリメートルの垂直方向の高さの変化を見つけられ、地表下の変化が起因しうる地盤隆起あるいは地盤沈下を検出するために使用されている。

- これらの手法は現在、商業規模プロジェクトや石油、ガスオペレーションで世界的に使用されている。例としてインサラーパートナーシップが挙げられる。このプロジェクトは、アルジェリアの砂漠における CO₂ 圧入モニタリング手法として衛星モニタリングを利用している[2]。スライプナーCO₂ 貯留地点では、CO₂ 挙動モニタリングのための 4D 地震探査と重力探査の価値が実証された[3]。ニューメキシコ州のパーミアン盆地内のバキュームフィールド[4]とアラスカ州のノーススロープにあるクパラックフィールドにおいて、包括的な 3D および 4D 地震探査が展開された。重力モニタリングと 3D および 4D 地震探査テクノロジーがアラスカ州のプラッドホーベイ[5]で採用さ

れ、以来長年に渡りフィールドからのリカバリーの一助を担い続けている。ワイオミング州のパインデールフィールドでは、さまざまなテクノロジーが用いられ、フィールド内の天然ガス分布と濃度および時間の経過と共にどのような変化をするかを理解する助力となっている。カナダのピースリバーオペレーションでは、貯留層の挙動理解を向上するために地震探査、微小地震探査と傾斜計モニタリングプログラムが数年間実施された。

- いずれのモニタリング手法が選択されても、圧入開始に先駆けて十分なベースライン調査を行うことと、手法が無効となる可能性および特定の位置が示唆する事象を理解しておくことが重要である。
- 第4章：開発、オペレーション、閉鎖
- 地点の特性分析、坑井建設ならびにモニタリングの領域と同じく、石油、ガス産業はフィールド上および地表下設置施設の管理、操業、閉鎖における広範囲にわたる経験を有する。フィールドオペレーションの側面におけるライフサイクルアセスメントが実施され、健康、安全、環境問題の効果的な管理について広く認証されている指針が確立されている。ガイドライン、最優良例、認証フレームワーク、CO₂ 貯留ライフサイクルのための規制提議がさまざまな機関により国際的に提示されている。
- 石油、ガス産業オペレーションは長年に渡り‘フィードバックループ’のコンセプトによ

り情報を提供されてきており、その中で操業およびモニタリングデータは、システムを特徴づける地球モデルと力学モデルに継続的な向上についての情報を与える。このことが創業的なレスポンスを促進する。フィードバックは実績ベースの閉鎖においても主要なコンセプトである。それはひとつの貯留プロジェクトの閉鎖と閉鎖後フェーズが高度に特性分析され、よく理解されたシステムのスタート地点から開始できるようにするためである。

- CO₂ 貯留フィールドの開発は、多くの点で石油、ガスフィールドの開発と類似しており、この広範囲に及ぶ経験を利用することが成功への鍵になるだろう。CO₂ 貯留のためのフィールド再開発は、石油、ガス産業の成熟フィールドの水攻めや、EOR プロジェクト設置のための再開発から多くを学べるだろう。フェーズのある開発のレッスンや「開発を通しての学習」は CCS 展開プランおよび規制開発の中で考慮されるべきである。石油、ガスフィールド生産に関しては、CO₂ 貯留施設の最良開発は、明確に定義された規制の有無にかかわらず、オペレーターの最大利益になるものである。
- フィールドプランニングと開発には坑井の数、タイプ、圧入戦略と操業的条件(特にプレッシャー)を決定するための地点アセスメントの中で発展した地球モデルと力学モデルが用いられる。水平井やマルチラテラル井のような高度な坑井設計は、CO₂ 貯留において個々の坑井レートを向上するため、坑井付近のプレッシャー衝撃を減らし、CO₂

の分布をコントロールするために使用できる。貯留層の特徴が坑井数や密度に影響を与え、圧入戦略を変更することもありうる。坑井レートやプレッシャーなどの操業的条件は坑井建設やインフラ設計に必要な情報をあたえる。CO₂ 貯留プロジェクトの最も重要な要素は間違いなく、坑井下部穴の圧入プレッシャー最大化であり、封入システムの完全性に妥協することなく圧入比率を最大化することが目的となる。

- このようなプロジェクト設計検討には石油、ガス産業のワークフローと実践例が利用できる。力学的貯留層モデルは、開発しうる最適な設計を実現する地質学的シナリオを発展させるために使用できる。これはコスト効率的モニタリングプランの作成をもサポートするだろう。
- 坑井の完全性モニタリングにおいて、セメント査定のログが坑井のキャストイングと地層間のアニュラススペース内のセメントのシースの完全性を評価するために使える。このログが提供する情報は、掘削レポート、掘削液体レポート、オープンホールログ情報、セメントプレースメント情報に加えて重要なデータとなる。
- 坑井完成装置に使用される素材を決定する際には、酸素、CO₂、硫化水素 (H₂S) の有無や濃度、装置の作動耐用年数など多くの要因が加味される必要がある。CO₂ にさらされる坑井建設の資材選択には広範囲に及ぶ産業経験があり、そこにはオーストラリアのゴーゴンガスプロジェクトなどの CO₂ 貯留プロジェクトプランからのレッスン

が含まれる。これは CO₂ ガスの流れの中に封入された H₂S レベルとステンレススチールを含む鉄鋼の選択への影響や、極限的環境において作用するための非金属封鎖のキャパシティについて検討した例である。コロラド州のレンジリーウェバーフィールドは 1940 年代に建設された坑井を検証し、CO₂ 貯留に再利用することに成功した例である。

- 坑井オペレーションフェーズ中は、坑井の完全性モニタリングにさまざまな手法を採用することができる。工学的完全性テストは、封鎖が完全であることを確認するために用いられる。プレッシャー / 温度ログ、ノイズログ、熱崩壊時間ログ、セメント査定ログなども使える。必要に応じて対処と修復を実施し、まれに坑井の完全閉鎖が必要となる場合もあるだろう。
- モニタリング構想は引き続きオペレーションフェーズの重要な役割をになう。モニタリングは単に坑井が意図したように機能し、設計寿命に対し許容レベルのリスクを担いつつ、設計条件内での操業および維持の確認追求のみならず、CO₂ 貯留のケースでは、コントロールされていない CO₂ の放出リスクを減少させるようなやり方で操業することを目指すものである。包括的なモニタリングプログラムには、全アニユラーに対するプレッシャーの最大および最小限度の明確化と、様々な種類の診断的テスト手法が含まれる。それらの手法にはアニユラス液体およびガス分析アプローチや、漏洩

探知ログ、ビデオログ、超音波ノイズログ、温度ログ、パイプ検査ログ、チューブラー検査ログ、キャリパーログなど、さまざまなログの使用が含まれる。坑井から除去された装置も検査されるべきである。全モニタリングおよび検査データは、該当する一連情報にいつでもアクセスでき、意思決定サポートに使えるように管理されるべきである。

- CO₂ 貯留プロジェクトのオペレーションフェーズは固定的期間ではなく、そこには継続中のモニタリング、学習、必要に応じた対処活動がある。オペレーションは地表下について学習することを促し、貴重な操業結果とモニタリングデータを提供する。エンジニアリングスタッフ、地質工学スタッフ、オペレーションスタッフが共に作業し、毎日の作動をモニタリングおよび管理する。生産と貯留層エンジニアリングスタッフは同じく坑井と貯留層の作動を解明するために操業データを精査し、CO₂ プルームの動きを査定する。オペレーション期間中の活動には、腐食メンテナンスプログラム、坑井メンテナンス、圧入戦略の改良、定期的なプロジェクトの地質学的モデルのアップデートと強化などが含まれる。重要な問題が記録され、リスクポテンシャルと管理レスポンスが要約されたオペレーション管理の文書化は、有効な実施であり、最終的な閉鎖のための強固な情報基礎を提供する。

CO₂ 貯留施設の閉鎖には石油、ガス産業の枯渇フィールド閉鎖の経験を利用できる。この

フェーズ必要条件は規制の中にも提示されるだろう。プロジェクトオペレーターは、圧入終了後の期間も CO₂ プルームの管理責任を継続することが適切である。この管理責任の期間はプロジェクトのサイズ、タイプ、リスク分析結果に依存し、すでに観察された地表下 CO₂ 挙動についての知識を利用する。圧入が終了するまでには、地表下環境と CO₂ プルームのよく調整されたモデルを使って、未来に向けて長期的な CO₂ の位置の確かな予測を立てることが可能となるだろう。地表下の封入領域における何らかの不良の発生などの残余的リスクは、数値化およびモデル化できるものである。概して手法的な想定としては、長期封入は達成可能であり、長期的対処や介入の必要が想定されることなくモデル化およびデモ化できる。市民の安全と環境の保護は最優先事項であり、それを実現するためにはプロジェクトオペレーターの管理責任期間の限界を、大規模な私的あるいは公的作業に見合う適切な期間として認識する必要がある。このバランスを決定する際、長期的な受託責任問題を検討する多数の新たなフレームワークを加味するべきである。

閉鎖フェーズ期間中は、圧入物質の自然のおよび人工的システムにおける長期的封入と隔離に焦点が置かれる。長期的に CO₂ にさらされることによる資材の劣化ポテンシャルについて考慮される。このことは閉鎖業務に使用されるために選択された資材に影響を与える。もしも資材の性能が長期的封入に影響するなら、資材の再選択により問題は緩和されうる。閉鎖後フェーズにおいて、貯留地点が以前のフェーズで適切に想定された安定性に順じて

作動していれば、さらなる行動をとる必要はない。地点安定性が想定よりも低い場合は、安定性を得られるまで必要に応じてモニタリングと修正が継続されるべきである。

謝辞

本研究は CO₂ 回収プロジェクトの下記メンバー企業からの代表者らによる多くの個別的貢献により生まれた。BP, Chevron, ConocoPhillips, Eni, Petrobras, Shell, StatoilHydro, Suncor。研究の成功にはこれら企業のマネジメントによるサポートが不可欠であり、ここに感謝の意を表したい。本論文の通常筆者に加え、主要な貢献者となった方々を企業のアルファベット順に列記する：BP-Charles Christopher, Walter Crow, Kevin Dodds, Brian Williams, Iain Wright; Chevron-Craig Gardner, Scott Imbus; ConocoPhillips-H.G.(Gary) Limb, Randy McKnight, Scott Rennie; Eni-Mario Marchionna; Petrobras-Rodolfo Dino; Shell-Heath Nevels, Alessandra Simone, Charlie Williams; StatoilHydro-Philp Ringrose; Suncor-Alan Young; 元 Shell-Nigel Jenvey(初期段階での寄与) テクニカルライティングおよび原稿アシスタント-Derek Smith

文献

1. J.P.Meyer, Summary of carbon dioxide enhanced oil recovery (CO₂EOR) injection well technology, American Petroleum Institute (2007) 54p.
2. A. Mathieson, I. Wright, D. Roberts & P. Ringrose. Satellite Imaging to Monitor CO₂ Movement at Krechba, Algeria. Paper (307) GHGT-9; (2008)
3. R.A. Chadwick, D. Noy, R. Arts, O. Eiken, Quantification issues from the latest time-lapse seismic data at the Sleipner CO₂ injection operation, GHGT-9, (2008)

4. Daniel J. Talley, Thomas L. Davis, Robert D. Benson, and Steven L. Roche, Dynamic reservoir characterization of Vacuum Field, *The Leading Edge*; v. 17; no. 10; (1998) p. 1396-1402;.

5. J.L. Brady, J.L Hare, J.F Ferguson, J.E., Seibert,, F.J. Klopping, T. Chen,, and T Niebauer, T., Results of the world's first 4D microgravity surveillance of a waterflood-Prudhoe Bay, Alaska: SPE Annual Technical Conference & Exhibition , San Antonio, September (2006), Expanded Abstracts, SPE 101762.