



CO₂の安定貯留に向けた措置 の基本的な考え方

CCS事業制度検討ワーキンググループ/海底下CCS制度専門委員会（第1回）

Japan Organization for Metals and Energy Security

2025年9月12日

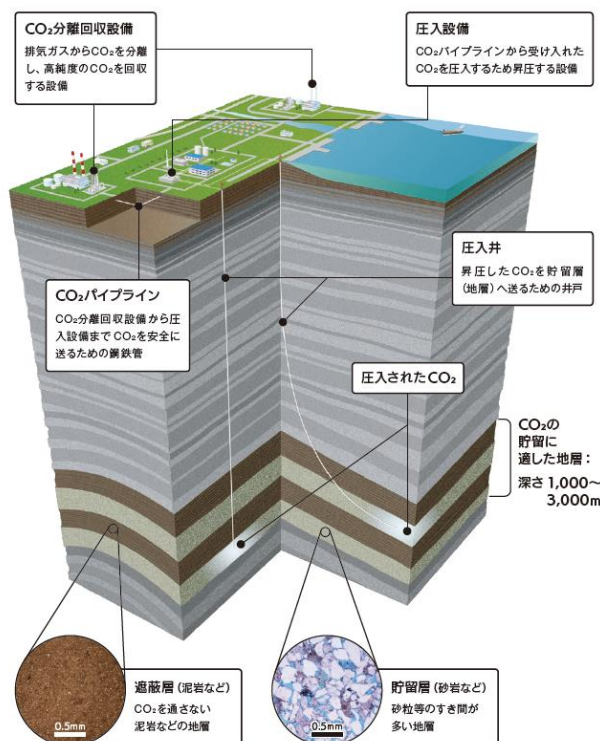
- CO₂の貯留メカニズム
- CO₂の安定貯留に向けたワークフロー
- 貯留CO₂モニタリングの基本的な考え方
- 漏えい防止措置の基本的な考え方

CO₂の貯留メカニズム

- CO₂の貯留場を構成する地下地質は、**十分な貯留容積と高浸透性を有する貯留層**と、**高遮蔽能力を有する遮蔽層**からなる。
- これらの地層を深度約800m以深で見つけることで、**地下の圧力を利用してCO₂を超臨界状態**とし、**高効率な貯留**が可能となる。
- 貯留メカニズムには、主に**①構造的トラップ**、**②残留ガストラップ**、**③溶解トラップ**、**④鉱物化トラップ**があり、これらは異なる時間スケールで進行する。その進行は、物理トラップは比較的早く、化学トラップは比較的遅い。従って、CO₂地中貯留では、**圧入からの経過時間が長くなるほど貯留は安定化**へ向かう。

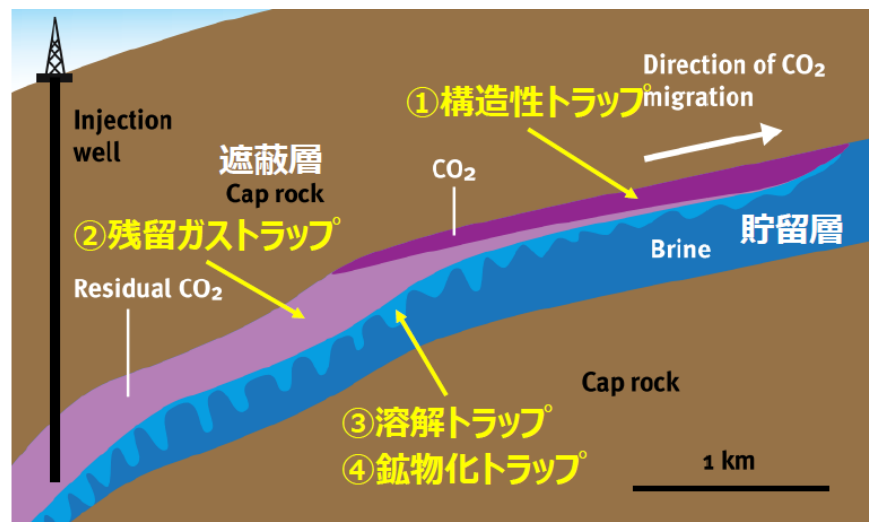
CO₂地中貯留の概念図

地下深部の貯留層に圧入されたCO₂は、遮蔽層の下位に超臨界状態で貯留される。



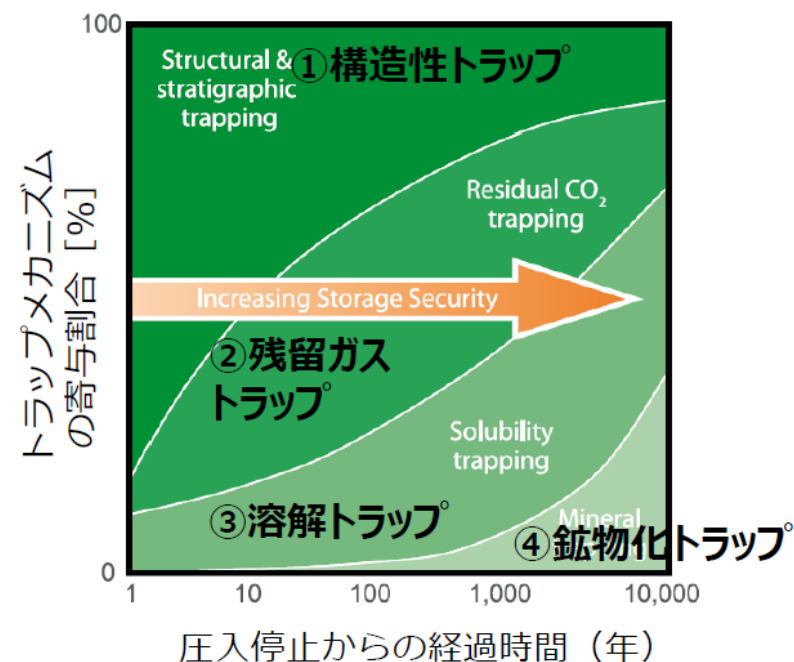
CO₂貯留メカニズム

- ① **構造的トラップ**：遮蔽層の下位に貯留
- ② **残留ガストラップ**：CO₂が移動する過程でバブル状となり流動性を失い岩石のすきまに貯留
- ③ **溶解トラップ**：圧入したCO₂が深部貯留層内の地層水に溶解して貯留
- ④ **鉱物化トラップ**：CO₂が溶解した地層水が岩石鉱物と化学反応を起こし岩石鉱物として固定化



CO₂貯留メカニズムの経時変化

圧入からの経過時間が長くなるほど貯留は安定化へ向かう。



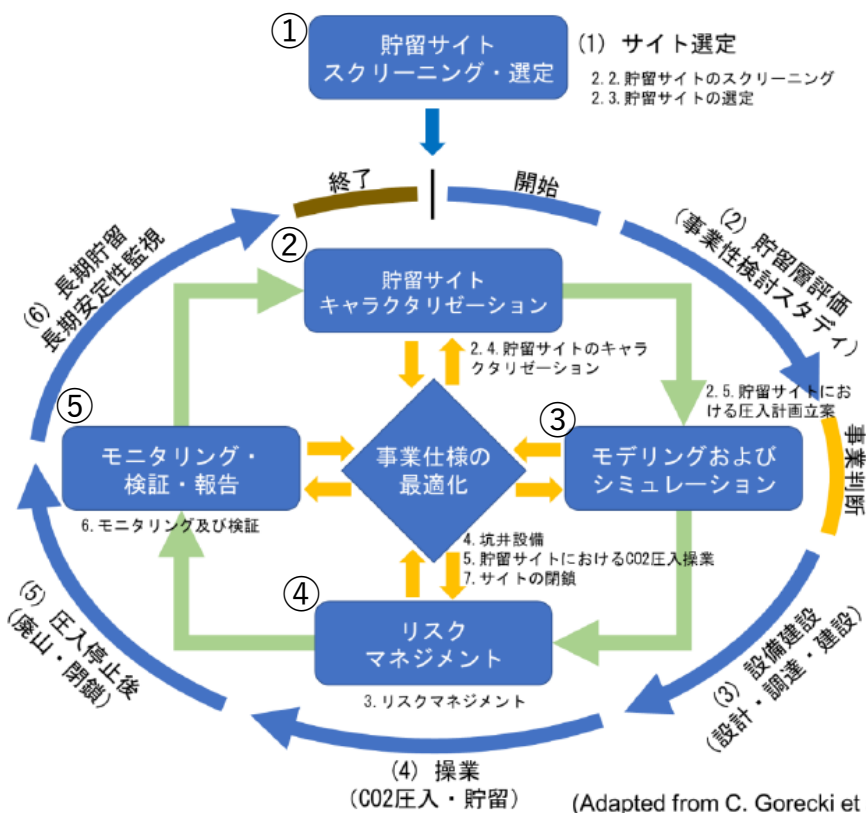
(出典) 第三回 カーボンマネジメント小委員会・資料 3 より

(出典) 「CCSで持続可能な未来へ」(JAPEX社) より

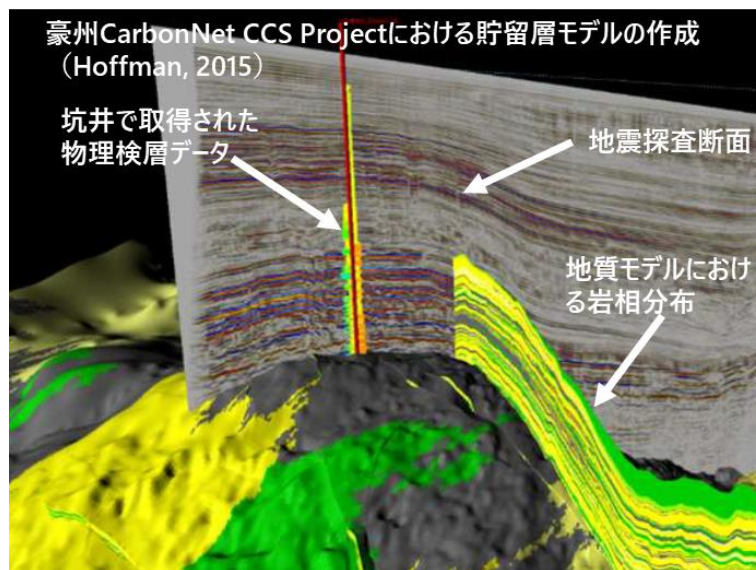
CO₂の安定貯留に向けたワークフロー

- DOEでは、貯留事業者に対して推奨される**地下評価ワークフロー**を提唱している（米国エネルギー省, 2017）。同様の考え方は、ISO27914(2017)でも踏襲されている。
- ワークフローを構成する各ステップ（下図①～⑤）は、**石油・天然ガスの探鉱開発で培われた地下評価技術**の手法を適用することができる。
- ②～⑤のステップを絶えず継続し、地下地質に関する**不確実性を低減し事業リスクを低下**させるとともに、**事業仕様（事業計画）の最適化**が可能となる。

地価評価のワークフロー

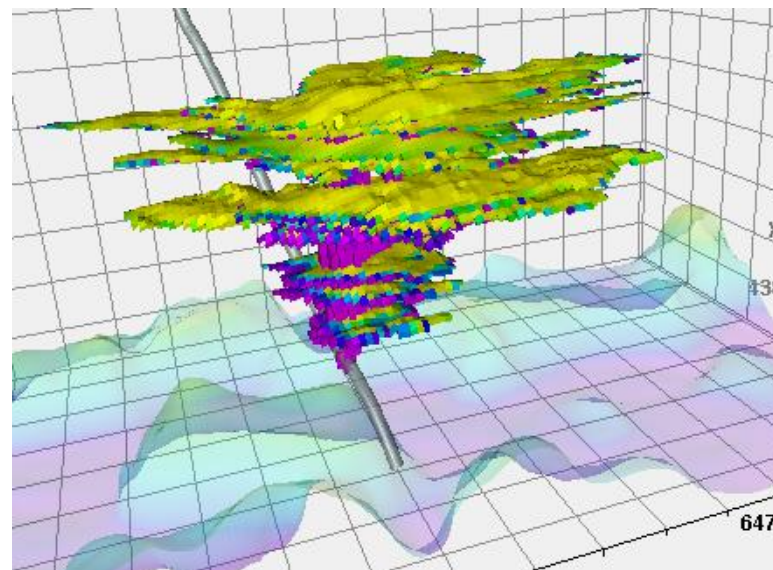


貯留サイトキャラクター化の例 Carbonet CCS事業より(Hoffman, 2015)



物理検層データ、地震探査データを統合して、貯留層モデル（地質モデル）を構築する。図中の黄色、緑、灰色は、地下での岩相（岩石の種類）の3次元分布を表し、それぞれ、砂岩、頁岩、炭層を表す。

CO₂圧入シミュレーションの例 Sleipner CCS事業より(JOGMEC, 2021)



深度約1,000mの圧入地点から年間約100万トンのCO₂が圧入されている。上図は、12年経過後のCO₂プルームの広がり。圧入点直上から約2kmの広がりを示した。

（出典）第三回 カーボンマネジメント小委員会・資料3より

貯留CO₂モニタリングの基本的な考え方

- モニタリング計画は、前頁②～⑤のステップの一環として、**キャラクターゼーション**、**シミュレーション**、**リスクマネジメント**を踏まえて立案される。
- 具体的なモニタリング計画は、貯留地ごと（**site-specific**）の地質や貯留事業ごと（**project-specific**）の条件を踏まえて、費用対効果（**cost-effective**）の高い手法により立案することが重要。
- 科学論文※1、国際機関※2、先行CCS事業※3において、一般的には、貯留CO₂モニタリングは、以下に示す**4つの目的**に分類できる。

（出典） *1: Jenkins et al. (2015)
*2: IEGHG (2020)
*3: Shell Canada Limited (2010)

【4つのモニタリングの目的】

1. **CONTAINMENT**（封じ込め監視）

圧入したCO₂が貯留層内に安定的に貯留されているかを確認

2. **CONFORMANCE**（整合性監視）

圧入したCO₂が予測と整合的に挙動しているかを確認

3. **CONTINGENCY**（不測時監視）

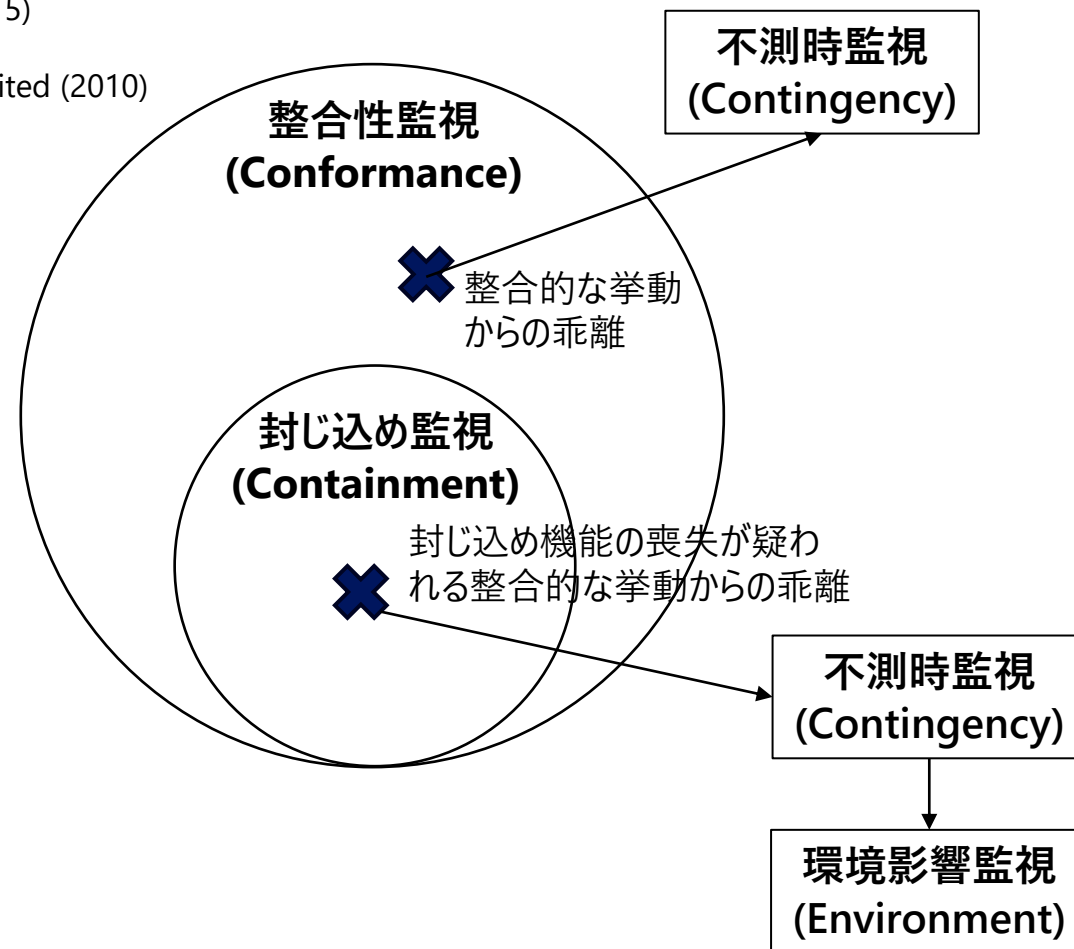
予測から著しい乖離が生じた場合、その原因を把握し、今後発生し得る事象を評価

4. **ENVIRONMENTAL IMPACT**（環境影響監視）

（主として地表近くの環境に焦点を当てた）海洋環境及び陸域への影響の可能性を確認

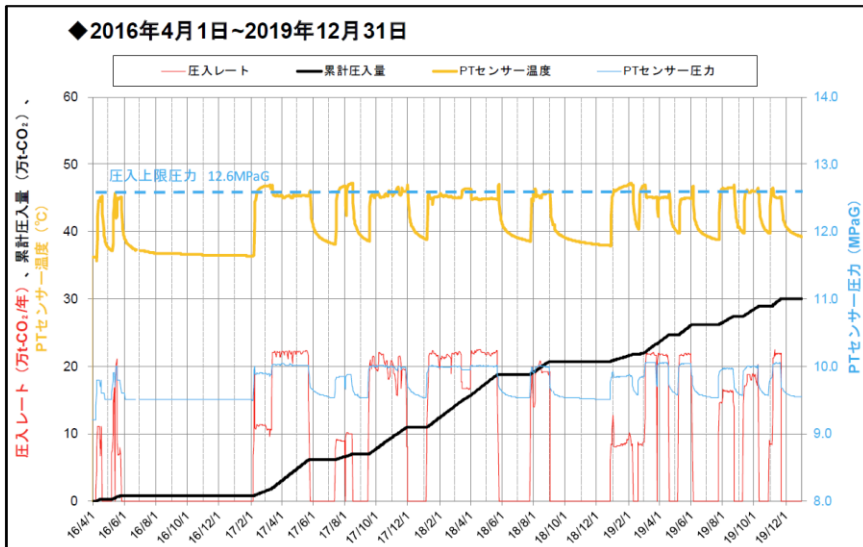
【モニタリングの対象】

- CO₂の成分・流量・濃度
- 温度・圧力
- 坑井健全性
- 地下の揺れ
- CO₂の位置及び範囲
- 海洋環境及び陸域の状況

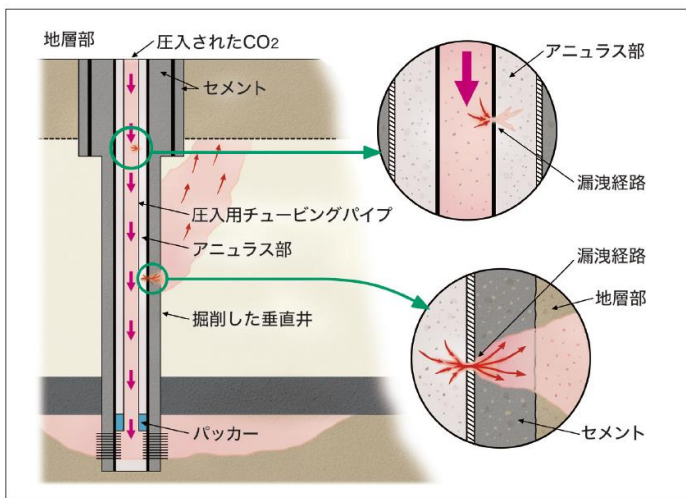


貯留CO₂モニタリングの基本的な考え方（モニタリングの方法の例）

坑井での温度・圧力監視



坑井健全性の監視（アニュラス圧）

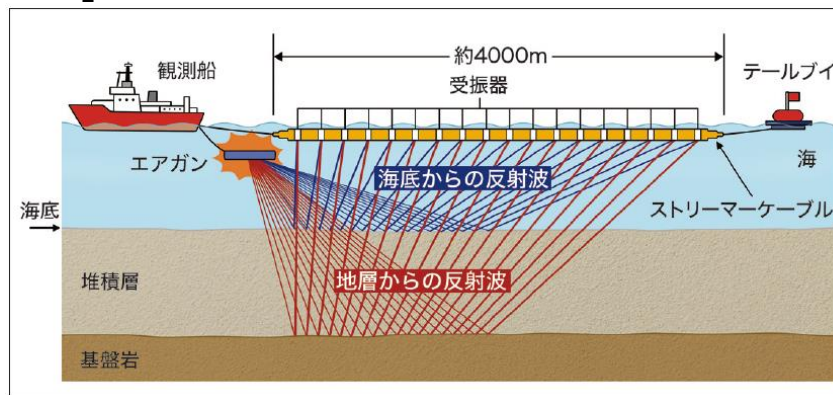


●アニュラス圧力計測の必要性

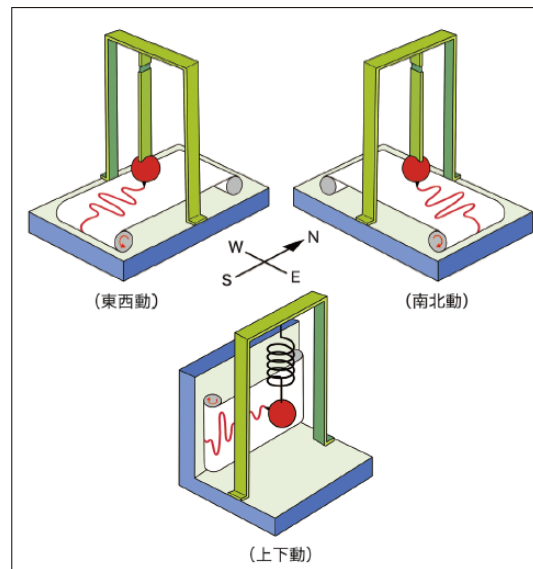
左図は圧入井が損傷してCO₂が地層に漏れ出す例を示したものである。アニュラス部にセンサーを設置して計測することにより、圧入井の健全性が損なわれたことを検知することができる。図の上から1番目はチュービングに穴が開いた例、2番目はケーシングに穴が開いた例。こうした損傷があれば、アニュラス部の圧力変化となって現れる。圧力が上がるか下がるかは、地層、アニュラス部、チュービング内の圧力の関係、および損傷の箇所によって異なるが、圧力変化を検知し、調査を進めることで、原因把握と対策が可能になる。なお、損傷はしていなくても、操業時にパイプ内を通る流体の熱が伝導し、アニュラス部の流体が膨張して、その結果、アニュラス部の圧力が上昇することがある。

図の出典：EPA, "Geologic Sequestration of Carbon Dioxide Underground Injection Control (UIC) Program Class Six Well Testing and Monitoring Guidance" (2013) を参考に作成

CO₂の位置及び範囲（弾性波探査）



微小振動監視（地震計）

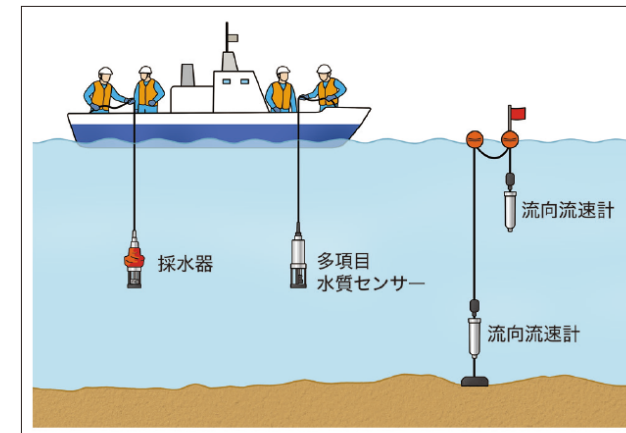


●微小振動計

一般に地震観測は、地震計により東西動・南北動・上下動の3成分で地面の動きを電気信号に変換して記録する。振動計は地震計の一種であり、微小振動計は、加速度センサーを用いて3次元空間の3成分(XYZ)の加速度を記録する。加速度センサーにはいくつかの種類があるが、微小振動を含む地震観測には主に高精度の測定が可能なサーボ型が用いられる。

出典：国立研究開発法人防災科学技術研究所HPを参考に作成

海洋環境（採水、水質）

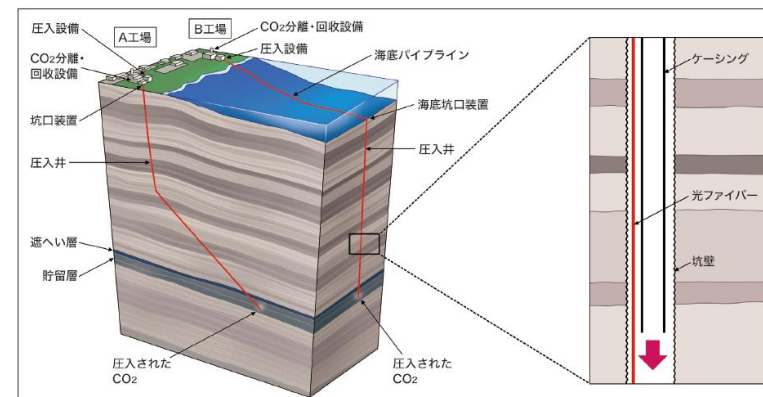


●採水、水質観測、および流況観測の模式図

水質調査では、①採水器による海水採取とあわせて、②多項目水質センサー（水深、水温、塩分、pH等を測定）による観測、さらに③観測点における潮流の流向・流速の観測が行われる。観測精度は、採水による分析が最も優れている。一方で、多項目水質センサーは、複数の水深で鉛直方向の分布を測定でき、多項目水質センサーで得られたデータと、採水器で採水したサンプルの水温とを比較することで、採水が所定の水深で行われているかどうかを確認できる。また、流向・流速の観測データは、異常な観測結果が得られた場合に、異常の発生場所の推測に利用できる。

出典：公益財団法人海洋生物環境研究所による海洋環境調査報告書（3点とも。イラストは報告書をもとに作成）

光ファイバーでの振動・温度・ひずみ計測



●光ファイバーによる計測のイメージⅡ

坑井の坑壁に沿って、光ファイバーを地下深くまであらかじめ設置しておき、温度やひずみ等を観測する。

出典：日本CCS調査株式会社HPの画像等を参考に作成

（出典）日本C C S 調査株式会社(2020)および(2025)より

漏えい防止措置の基本的な考え方

- 例えば、EU CCS指令においては、「**漏えいまたは重大な異常**が発生した場合、事業者が直ちに管轄当局に通知し、**人の健康の保護に関連する措置を含む必要な是正措置**を講じることを確保するもの」とされている。
- また、そのガイダンス図書では、「是正措置に関する一般原則は、貯留コンプレックスの**リスク評価とモニタリング**と非常に類似しており、そして、これらと密接に関連している。」とされ、事前のリスクマネジメントプロセスにおいて、**潜在的漏えい経路のリスク評価を行っておくことが重要**。
- また、漏えいが確認された際の措置としては、IEA CCUS Handbookでは、**圧入の一時停止、貯留層圧力の管理、坑井の改修**、等が例示されている。

潜在的漏えい経路のリスク評価

- (A) 遮蔽層の保持圧力以上の圧力が負荷され上部遮蔽層へ漏えい。
- (B,D) 透水性のある断層を介してさらに上の層準へ漏えい。
- (C) 遮蔽層が一部途切れている箇所からの漏えい。
- (E) 坑井を介しての漏えい。

潜在的リスクの評価／分析の結果、その発生確率を低減するように事業仕様を変更したり、モニタリングを実施するなどの対策を講じる。

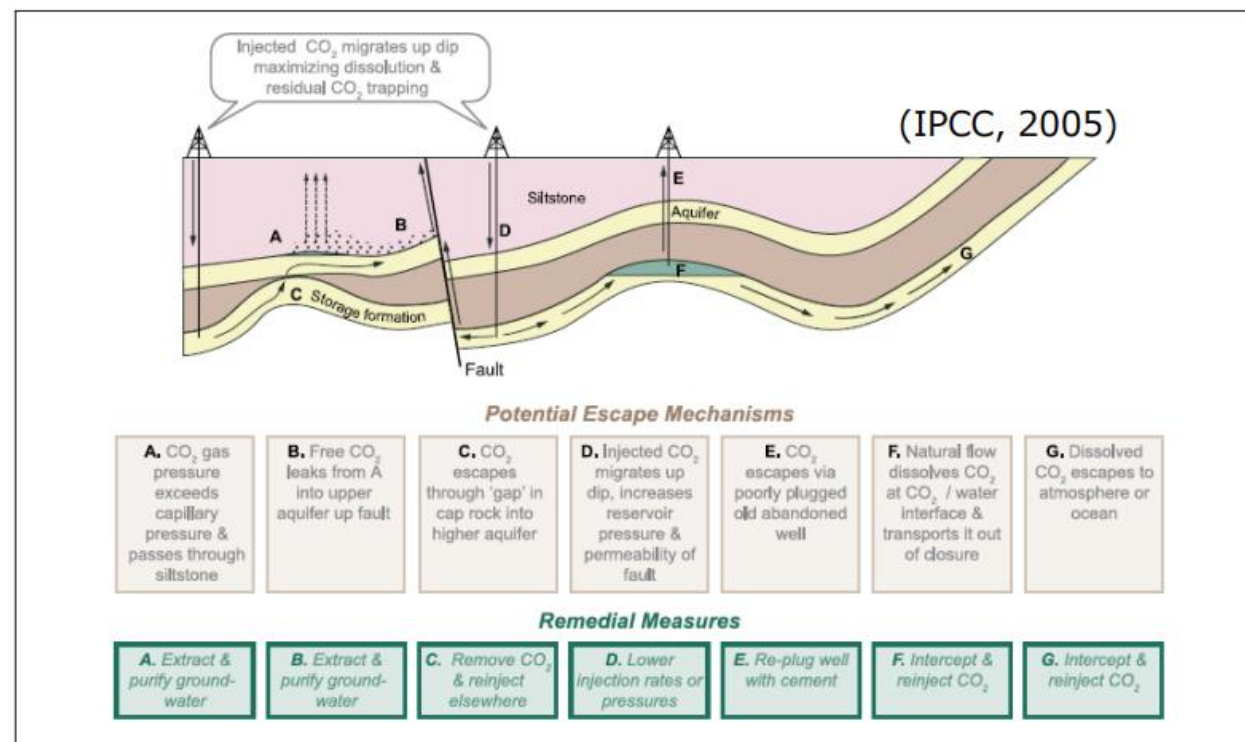


Figure TS.8. Potential leakage routes and remediation techniques for CO₂ injected into saline formations. The remediation technique would depend on the potential leakage routes identified in a reservoir (Courtesy CO2CRC).

参考文献

第三回 産業保安基本制度小委員会/カーボンマネジメント小委員会CO2貯留メカニズムとリスクマネジメント（資料3）,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/carbon_management/pdf/003_03_00.pdf

石油資源開発株式会社, CCSで持続可能な未来へ～限りある資源から限りなき挑戦へ～,
https://www.japex.co.jp/business/uploads/pdf/CCSpamphlet_maintext.pdf

National Energy Technology Laboratory, “BEST PRACTICES: Monitoring, Verification, and Accounting (MVA) for Geologic Storage Projects 2017 REVISED EDITION” (2017),
<https://www.netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/strategic-program-support/best-practices-manuals>

Jenkins et al., “The state of the art in monitoring and verification—Ten years on” (2015),
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583615001723>

IEAGHG, “Monitoring and Modelling of CO₂ Storage: The Potential for Improving the Cost-Benefit Ratio of Reducing Risk” (2020),
<https://ieaghg.org/publications/monitoring-and-modelling-of-co2-storage/>

Shell Canada Limited, Quest Carbon Capture and Storage Project MEASUREMENT, MONITORING AND VERIFICATION PLAN” (2010)

経済産業省, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 日本CCS調査株式会社, 苫小牧におけるCCS大規模実証試験30万トン圧入時点報告書（2020）,
https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2020/05/report202005_full.pdf

日本CCS調査株式会社, CCSにおけるモニタリング技術とその特徴（2025）
https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2025/04/CCS_monitoring_brochure_20250416FA.pdf