

モニタリング方法事例の解説

(1) 二酸化炭素の組成及び流量の監視

二酸化炭素の組成及び流量の監視は、圧入井坑口や輸送配管、圧縮設備周辺において、二酸化炭素の純度（不純物成分：水分、 N_2 、 O_2 等）及び圧入流量を把握し、安定した圧入と圧入流量の確認、設備健全性の確保を目的とする。測定には流量計（差圧式、コリオリ式等）、ガス分析計（オンラインガスクロマトグラフ、水分計、赤外線分析計など）を用い、測定の対象・機器の特性に応じて連続的にデータを取得する。原理としては、流量は流体の密度・流速・圧力差などから算出され、組成はガスの分離・光吸収・電気化学反応を利用して各成分濃度を定量する。これらをリアルタイムで監視し、運転管理システムにより異常値の検知や履歴データの記録・解析を行うことで、圧入条件の安定性を維持する。

留意点として、不純物は腐食や相挙動（相分離・凍結）の原因となるため厳密な管理が必要であり、温度・圧力条件による測定誤差や計器校正にも注意する必要がある。

(2) 圧入または観測井における坑口及び坑底の温度・圧力の監視

圧入又は観測井における坑口及び坑底の温度・圧力の監視は、坑口設備及び坑底（圧入層または観測対象層近傍）において、圧力及び温度の変化を把握し、圧入挙動の管理並びに貯留層の応答や坑井健全性の評価を目的とする。

測定には、坑口では圧力計及び温度計、坑底では永久設置型ダウンホール圧力・温度ゲージや光ファイバー分布型温度計測装置（DTS）などの計測機器を設置し、連続的にデータ取得を行う。原理としては、圧力は圧電素子や歪ゲージにより圧力を電気信号に変換して測定し、温度は熱電対の起電力や抵抗温度計の抵抗変化を利用して定量する。

これらをリアルタイムまたは記録方式で監視し、運転管理システムや解析システムにより異常変動の検知や履歴管理を行うことで、圧入条件の維持及び貯留層挙動の把握、トラブルの早期発見を行う。

留意点として、圧入井においては圧入流体と地層との温度差に起因する熱応力がケーシング損傷の原因となり得るため温度変化の監視が重要であり、また圧力の異常上昇や急激な変動は亀裂進展や層間流動、設備異常を示唆する可能性があることから慎重な解釈が必要である。観測井においては測定値が貯留層の圧力・温度応答を直接反映するため、センサー位置や坑井条件の影響を適切に考慮して解釈する必要がある。いずれの場合においても高温高压環境下での長期観測となる場合には、計測機器の耐久性及び校正状態に留意し、信頼性の高いデータ取得を維持することが重要である。

（３）圧入または観測井におけるアニュラス圧力の監視

圧入や観測井におけるアニュラス圧力監視は、ケーシングとチュービング間の環状部の圧力変化を把握し、漏えいやバリア不全の検知を目的とする。圧力は坑口または坑井内に設置した圧力センサーやゲージにより測定され、連続または定期的に記録される。原理としては、ケーシングとチュービング間の環状部にかかる流体の圧力を電気信号として測定するものであり、その値の時間的な変化や増減の傾向を捉えることで、温度変化による膨張や収縮、流体の移動、ガスの侵入などに伴う圧力応答を把握し、これらの挙動から異常の有無を判断する。実際には地上計測装置やダウンホールゲージを用いてリアルタイムまたは履歴データとして監視し、異常圧の発生や持続を評価する[1]。

留意点として、温度変化・流体性状・圧入操作の影響を受けるため解釈に注意が必要であり、異常圧の原因特定には、他データとの統合解析が重要である[2]。

（４）坑井における Distributed Temperature Sensing (DTS)による温度の監視

坑井のケーシングパイプ裏に沿って光ファイバーケーブルを展開し、温度の変化に伴う光ファイバーを伝う光の特性の変化を利用して、坑井近傍温度分布を取得する（この時用いる光ファイバーを DTS と呼ぶ）。この温度分布変化を捉えることで坑井健全性の棄損に伴う二酸化炭素の漏えいを検知できる可能性がある[3]。光ファイバー全体が温度センサーとなることから、坑跡に沿った温度分布を取得できる。

（５）坑井における各種検層による監視

セメントボンド検層（Cement Bond Logging）

ケーシング管と地層の間に充填されたセメントの付着状態（ボンド状態）、セメントの充填状況、チャンネリング（流路形成）の可能性などを評価するために用いられる。測定原理は主に音波（超音波・弾性波）伝播特性を利用する[4]。

腐食検層（Corrosion Logging）

ケーシングやチュービングなどの金属部材の腐食の進行度、肉厚減少、ピitting（局部腐食）、割れなどの状態を評価する。測定原理は、主に電磁誘導法

（Electromagnetic thickness tool）と超音波法（Ultrasonic thickness tool）の２種類が存在する。電磁誘導法は磁場を発生させ、金属による誘導電流の応答を測定し、超音波法は超音波を金属表面に入射し、反射時間から厚さを測定する。

パルス中性子検層（Pulsed Neutron Logging）

ケーシング設置後の坑井において主に貯留層区間で実施される検層であり、中性子を地層にパルス照射し、その減速及び捕獲に伴って発生するガンマ線を測定することにより、地層中の水素原子含有量や塩分を反映した応答から流体分布や水飽和率を評価する手法である。

これらはいずれもワイヤーラインで坑井内部を昇降しながら連続的にデータ取得し、深度方向の状態を監視・確認する。これらを定期的または連続的に測定し、過

去データと比較した時間変化（Time-lapse monitoring）を評価することで、坑井健全性や貯留層挙動を含む二酸化炭素貯蔵の安定性評価に利用できる[5]。

留意点として、各検層は測定原理や坑内条件（流体、温度・圧力、ケーシング状態等）の影響を受けるため、必ずしも全ての情報が確実に取得できるとは限らず、複数データの統合的な解釈が重要である[5]。

（６）既存の地震計観測網による微小振動の監視

気象庁や防災科学技術研究所が展開している地震計観測網（例：Hi-net, S-net 等）を用いることで自然地震や微小振動を捉える。

（７）陸域または海域に展開した地震計観測網による微小振動の監視

陸域の場合は地表設置型の地震計、海域の場合は海底設置型の地震計（Ocean Bottom Seismometer (OBS), Ocean Bottom Node (OBN), Ocean Bottom Cable (OBC)）を許可貯留区域及びその周辺に展開することで、自然地震や微小振動を捉える。

周辺のノイズ状況及び周辺環境によっては観測井坑内に地震計を設置して観測することもある。

（６）の既存の地震観測網よりもより貯留層の深度及び許可貯留区域とその周辺に特化した観測が可能となる。

（８）坑井における Distributed Acoustic Sensing (DAS)による微小振動の監視

坑井のケーシングパイプ裏に沿って光ファイバーケーブルを展開し、微小振動に伴う光ファイバーのひずみによって生じる光ファイバーを伝う光の特性の変化を利用して、微小振動を観測する（この時用いる光ファイバーを DAS と呼ぶ）。光ファイバー全体が振動センサーとなることから、時間的・空間的に連続したデータを取得することができる[3]。しかし、光ファイバーの展張方向のひずみにしか感度が無いため微小振動・自然地震の発生特性と坑井の坑跡との位置関係に注意する必要がある。（６）及び（７）で述べた地震計による計測とあわせて用いることで、これらを補助するデータ取得が可能となる。また、後述する DAS-VSP を実施する場合、それに用いる DAS をこの微小振動の監視に利用することもできる。

（９）３次元弾性波探査による貯蔵された二酸化炭素の監視

地表面及び海水面に発振点及び受振点を平面的に展開し、発振点から人工的に弾性波を発生させ、地下構造からの反射波を地表面に展開した受振器で捉えることで地下構造を３次元的に推定する技術[3][6]。二酸化炭素が貯蔵された領域では反射波の強度やその伝播特性の変化、及び伝播速度が変化することから、圧入開始前に同じ場所で取得したデータと比較することで貯蔵された二酸化炭素の位置を推定することができる[3]。

(10) 3次元 DAS-Vertical Seismic Profile (VSP)による貯蔵された二酸化炭素の監視

地表に発振点を平面的に展開し発振点から人工的に弾性波を発生させ、坑井内に坑跡に沿って展開した受振点で地下構造からの反射波を捉えることで地下構造を3次元的に推定する技術を3D VSPと呼ぶ。この受振点をケーシングパイプ裏など、坑井内に展開したDASとしたものを3D DAS-VSPと呼ぶ。地下構造や二酸化炭素の位置の推定の原理は3次元弾性波探査と同様。VSPは坑井内でデータを取得するため、坑井周辺の限られた範囲であるものの、高品質な地下構造や二酸化炭素の位置の推定結果を得られる[3]。また、DASを用いることで光ファイバー全体が振動センサーとなることから、空間的に連続したデータを取得することができる[3]。しかし、光ファイバーの展張方向のひずみにしか感度が無いことから発振する弾性波の伝播の様子と坑井の坑跡との位置関係には注意する必要がある。

(11) 海洋環境調査（定点観測による海水の化学的性状、海洋生物・生態系等）

海底貯留層上部の海域及び海底面において、採水及び多項目水質センサーなどによる鉛直観測を実施する。これにより、海水の水温、塩分、水素イオン濃度（pH）、溶存酸素（DO）、全炭酸、アルカリ度、硫化物イオン濃度及び二酸化炭素分圧などの化学的性状を把握する。さらに、定量ネットによるプランクトン調査、採泥による海底土壌や底生生物の状態把握、ROVによる底生生物の観察・採取や水中カメラでの気泡調査などを通じ、二酸化炭素漏えいや環境影響の有無を監視することを目的とする。測定にはCTD(電気伝導度/水温/水深)やpH計、CO₂分析装置、採水器に加え、海底堆積物採取器（グラブ採泥器・コアラー）や底生生物調査用のふるい分け装置、ROV、水中カメラ、顕微鏡や生物分析機器等を用いる。

原理としては、海水の炭酸系化学分析により二酸化炭素溶解の影響を評価するとともに、採取した底質試料中の粒度・化学成分分析や底生生物の種組成・個体数解析などにより、生態系の変化を定量的に把握する。これらは事前のベースライン調査と操業後の観測として実施され、時系列での比較や空間分布の解析により異常の有無を監視できる[3][7]。

留意点として、海水の化学的性状は季節変動などの自然変動があり、底生生物は環境変化に敏感である一方、自然変動や海況の影響も受けやすい。事前のベースライン調査などの長期継続データの蓄積と、多項目の統合解析により、自然変動と貯留事業による影響の判別を行うことが重要である[7]。

(12) 人間活動の利用に供する地下水の分析

利用に供する地下水監視は、観測井や取水井において、水質（pH、電気伝導度、主要イオン類、重金属など）を把握し、二酸化炭素漏えいの影響有無と水利用の安全性や地下環境の変化を評価することを目的とする。測定には採水装置、ボトルサンプラー、水質センサー（pH計、電気伝導度計等）、及び実験室での化学分析機器

（イオンクロマトグラフ、ICP 分析装置等、それらを満たす標準ラボ機器）を用いる。

原理としては、電気化学測定と、採取試料の化学分析により地下水組成を定量化し、二酸化炭素溶解に伴う酸性化や溶存成分変化の有無を評価する。これらは事前のベースライン調査と操業後の観測として実施され、長期的な時系列比較により水質変動の有無を監視する[8][9]。

留意点として、地下水は自然起源の化学変動や地層間混合の影響を受けるため、ベースラインデータの確保と多項目の統合解析により、自然変動と貯留事業による影響の判別を行うことが重要である[9]。

（１３）Interferometric Synthetic Aperture Radar（InSAR）データを用いた地表変位の監視

軌道上を周回する人工衛星からマイクロ波を対象となる地域に連続的に照射し、照射したマイクロ波の位相差から地表変位を観測する技術。

圧入前後のデータを用いることで、地表変位の程度を監視することができる。ただし、海域における CCS 事業へは適用は困難である[6]。

（１４）洋上プラットフォーム上に配置した変位計による地表変位の監視

洋上プラットフォームに受信機を設置し、人工衛星からの電波の伝達時間から受信機の位置を測量する技術[10]。圧入前後のデータを用いることで、地表変位の程度を監視することができる。海域における CCS 事業においても適用できる可能性がある。

参考文献：

- [1] Valstar, D., Nettleton, A., Borchardt, E., Costeno, H., Landry, G., Laronga, R., 2024. Importance of Well Integrity Measurements Throughout the CCS Project Life Cycle. *Petrophysics - The SPWLA Journal* 65, 896–912.
- [2] European Commission: Directorate-General for Climate Action, 2025. Guidance document 2 – Characterisation of the storage complex, CO₂ stream composition, monitoring and corrective measures. Publications Office of the European Union.
- [3] 環境省, 2025. CCS モニタリング技術に関する技術資料.
- [4] Pardue, G.H., Morris, R.L., 1963. Cement Bond Log-A Study of Cement and Casing Variables. *Journal of Petroleum Technology* 15, 545–555.
- [5] Laronga, R., Swager, L., Bustos, U., 2023. Time-Lapse Pulsed-Neutron Logs for Carbon Capture and Sequestration: Practical Learnings and Key Insights. *Petrophysics - The SPWLA Journal* 64, 680–699.
- [6] 日本 CCS 調査株式会社, 2025. CCS におけるモニタリング技術とその特徴.
- [7] 日本 CCS 調査株式会社, 2024. 苫小牧における CCUS 大規模実証試験成果報告書.
- [8] Brydie, J., Jones, D., Jones, J.P., Perkins, E., Rock, L., Taylor, E., 2014. Assessment of Baseline Groundwater Physical and Geochemical Properties for the Quest Carbon Capture and Storage Project, Alberta, Canada. *Energy Procedia*, 12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-12 63, 4010–4018.
- [9] Shell Canada Limited, 2023. Shell Quest Carbon Capture and Storage Project. MEASUREMENT, MONITORING AND VERIFICATION PLAN.
- [10] 国土地理院, GNSS 測位とは, 国土地理院ホームページ, https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_aboutGNSS.html, (2026 年 6 月 9 日アクセス)

なお、モニタリング技術の検討にあたっては、以下の資料も参考にされたい。

環境省, 2025, CCS モニタリング技術概要.

<https://www.env.go.jp/content/000300901.pdf>