

二酸化炭素流の地層貯留に適用可能な監視技術

1. IPCC SR-CCS/ IPCC 2006 Guidelines

IPCC 2006 Guidelines では、同じく IPCC による SR-CCS も念頭に以下の文章を記載し、漏洩の測定に既存技術が適用可能である旨、言及している。

これによれば、圧入前、圧入期間及び圧入後について、それぞれモニタリングを行うべきであること、シミュレーション結果とモニタリング結果の整合次第ではモニタリング頻度を減らしてもよいであろうことが述べられている。

地表もしくは海底へのリーケージの測定には、ANNEX (添付資料1) で概説されている既存技術の適用が可能である。『CCSに関する特別報告書 (SR-CCS)』(IPCC 2005) にはモニタリング技術に関する詳細情報が記載されているが、要約は以下の通り (以下の項目をモニタリング・プログラムに加えること) である。

- (i) 貯留サイト、および貯留サイト外部の排出可能性のある地点で CO₂ の基準フラックス(バックグラウンド・フラックス) を測定する。地中貯留サイトには、圧入前から存在する自然の CO₂ フラックス (生態学的および/あるいは工業的) が存在する場合がある。この基準となるフラックスを年間推定排出量に入れないこと。陸上では、地表から大気中へ向かう CO₂ の基準フラックスは、渦相関法、土壌ガスモニタリング、蓄積チャンバー技術 (accumulation chamber technique) 及びその他 CO₂ フラックス測定技術を用いて測定することが可能である。沖合では、リーケージの兆候 (堆積物の擾動など) のある場所でサンプリングを行い、海水中の CO₂ の環境レベルを測定することができる。自然の CO₂ と圧入した CO₂ を区別できるため、同位体を用いた CO₂ のバックグラウンド・フラックスの分析が推奨される。
- (ii) 圧入期間中、各圧入井において、圧入 CO₂ 量を連続測定する。
- (iii) 圧入システムからの CO₂ 排出の監視を行う。
- (iv) モニタリングを実施し、適切な場所 (坑井、湧水などの水源を含む) で海底および地表へ現れる CO₂ フラックスを測定する。サイト全体、また、モニタリングもしくはモデリングにより CO₂ 分布が示された地域の定期検査を実施し、予測されなかった漏洩を検出すること。
- (v) 圧入後のモニタリング。モニタリング計画の一環として、圧入期間終了後に圧入サイトのモニタリングを行うこと。CO₂ が予測通り貯留層内の長期的な貯留位置に到達し、モデル値と実際の測定値が一致している場合、モニタリングの頻度を減らしても (もしくは中断しても) よいと思われる。圧入後のモニタリングでは、CO₂ 分布のフォワード・モデリングの結果を検討し、モニタリング機器が適切な位置に配置されていることを確認し、適切な回数のモニタリングが実施されるようにすること。貯留サイトが地震活動など不測の事象の影響を受けた場合、モニタリングを再開する必要がある。
- (vi) 時間経過に伴うモニタリング技術の進歩を取り入れる。
- (vii) 推定排出量の検証に望ましい周期 (定期性)。圧入期間中は5年ごと、但しサイト・オペレーションを大きく変更した後は、検証を実施することが望ましい。

モニタリング計画の一環として、圧入圧の継続モニタリングおよび地表下の CO₂ 分布の定期的なモニタリングを実施する必要がある。圧入圧のモニタリングは、貯留層内の間隙流体の圧力の過度な上昇を防ぐなど、圧入プロセスを管理する上で必要不可欠である。圧入圧モニタリングにより、貯留層の特性に関する重要な情報およびリーケージの早期警告を得ることができる。地表下の CO₂ 分布の定期的なモニタリングもまた、直接的あるいは間接的に貯留層からのリーケージの兆候を検知し、大気もしくは

は海底への漏洩の可能性を早期に発見することができる。

2. NEDO 調査

「H14 年度 NEDO 調査」では、モニタリング（監視）の目的及びそれを実現する手法について、次のようにまとめている。

モニタリング（監視）の目的は以下の 2 つに大きく集約される。

目的①「公共への安全確認」

： このためのモニタリングは、圧入された CO₂ が予定された貯留層から漏れて周辺の地下水や地上／空中の環境に悪影響を与えることが無いように、圧入後の CO₂ の移動状況を中心に監視することである。

目的②「事業の安全で効率的な実施」

： このためのモニタリングは、操業の安全性と経済性を満たしつつ圧入作業を最適化し、結果的に貯留層の容量を最大限に利用するため、圧入作業にともなう圧力・温度や圧入量を中心に監視することである。

これらを実現するために様々なモニタリング手法が検討されており、それらは 3 種類に大別できる。

手法①「圧入井における CO₂ の流量、圧力、温度等の監視」

： 各種の圧力計、流量計、温度計等を使用し、操業に必要な監視をリアルタイムで正確に行うことができる。

手法②「空中、地下水、土壌における漏出 CO₂ の直接検出」

： 採取した地下水あるいは空気を化学分析する方法に加えて、赤外線レーザーに対する吸収特性を用いた効率的な機器が実用化されている。また放射性同位元素等をトレーサーとして観測井で監視する方法もある。

手法③「CO₂ の移動（plume）の間接的な監視」

： 坑井での検層、地表からの地震探査、電氣的あるいは電磁氣的探査、坑井間あるいは坑井と地表の間でのトモグラフィ、重力・磁力探査、微小地震（AE）観測、傾斜計あるいは人工衛星等での地形微小変化の観測等が、実用化レベルあるいは開発中のレベルである。

（引用に当って、一部、体裁を変えている。）

また、同技術の課題については、次のようにまとめている。

モニタリング技術については、CO₂ の移動（plume）の間接的な監視手段として、地震探査、坑井を利用した各種の手法、重力探査、高精度傾斜計による地形変化の観測、リモートセンシングおよび RTK-GPS による地形変化の観測について述べた。このうち CO₂ の移動を最も高精度で視覚的に捕らえる可能性を持つものは、3 次元地震探査の繰り返し（4 次元地震探査）と考えられるが、地形変化の高精度観測も適切な地下モデルによるシミュレーションと組み合わせることで比較的経済的なモニタリングが可能なことも述べた。

3. モニタリングの実例

1) IPCC 2006 Guidelines による記載

IPCC 2006 Guidelines では、モニタリングの実例として、Rangely (米、EOR)、Weyburn (米・加、EOR) 及び Sleipner (ノルウェー、帯水層) を紹介し、いずれもモニタリングの結果、漏洩は検知されていないとしている。

レンジリーの EOR プロジェクトでは、1986 年に CO₂ の圧入を開始した。2003 年までの累積圧入量は、およそ 23M トンである。モニタリング・プログラムでは、78km² のサイトに点在する 41 の測定位置でのモニタリングを実施した。圧入開始前の参考測定値は存在しない。レンジリーでは、圧入前の基準測定値の代替として、油田の外側の調整区域内に設定された 16 の測定点でサンプリングを行った。モニタリング・プログラムの結果、深部に存在する CO₂ が、油田上部の地表から排出される量は、170 - 3800 トン/年 以下であることが明らかになった。このフラックスの一部（あるいは全て）は、油層もしくは被覆層から発生したメタンの酸化によるものと思われる。しかし、一部は油層に圧入された CO₂ の fugitive emission とも考えられる。圧入前の基準測定値がないため、発生源を特定することができない。

ウェイバーン油田の EOR プロジェクトでは、2000 年 9 月から CO₂ の圧入を行っている。土壌ガスサンプリングが、2001 年 7 月から 2003 年 10 月までに 3 回にわたり実施された。この主な目的は、基準濃度を測定し、CO₂ および貯留層からの随伴トレーサガスの漏洩の有無を判断することである。これまでのところ、圧入 CO₂ の漏出は検知されていない。しかしながら、今後もこの状態が持続するか否かを検証するため、引き続き土壌ガスサンプリングを行い、またさらに詳しい研究を行い、土壌ガスの含有物の変化の原因を究明し、可能性のある漏出経路を調査する必要がある。

スライプナーの CO₂ 貯留サイトでは、ユトシラ帯水層に 1996 年から毎年およそ 1M トンの CO₂ を圧入している。2004 年までの累積圧入量は、7M トンを超えている。地表下の CO₂ 分布は、反復三次元地震探査によりモニタリングされている。最近では、重力探査も用いられている。三次元地震探査では、リーケージの兆候は発見されていない。

2) RITE における実証試験

新潟県長岡市における実証試験においては、圧入の開始に先立って、①坑口・坑底温度圧力測定、②弾性波トモグラフィ及び③物理検層を開始し、CO₂ 圧入中から圧入終了後まで観測を継続している。

このうち、弾性波トモグラフィでは、CO₂ の圧入により圧入井近傍に地盤弾性波速度の低下と低下域の拡大が認められること、地盤速度低下領域は CO₂ の圧入進行により地層の傾斜方向に沿って拡大する傾向があることが確認されている。

また、物理検層では、観測井において、音波検層、比抵抗検層および中性子検層について CO₂ の到達を示唆する変化（P 波速度の減少、比抵抗値の増加、中性子孔隙率の減少）を認めている。

(1) 温度・圧力観測

圧力・温度計測は、圧入対象である貯留層 Zone-2 の圧力・温度変化を連続的に直接測定するもので、圧入井 IW-1 坑の穿孔区間（深度 1,093.0～1,105.0mMD）につながるチュービング内の深度 1,072.46mMD および観測井 OB-4 坑のケーシングの外側深度 1090.83mMD の 2 箇所、二酸化炭素圧入開始前の平成 15 年 6 月 23 日よりデータの取得を開始し、圧入による貯留層の圧力・温度変化を継続的に把握した。

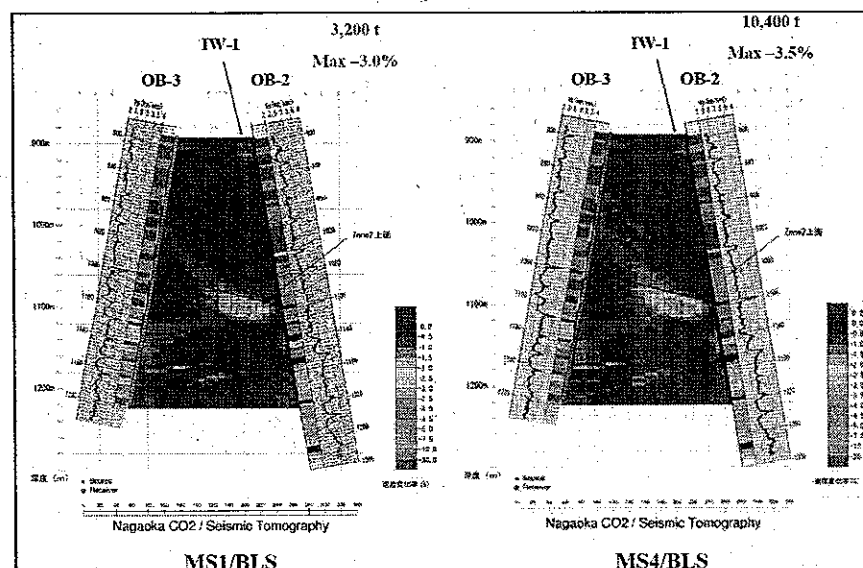
(2) 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィは、貯留層に圧入した二酸化炭素の分布とその経時変化を坑井間の広い範囲で把握することを目的として実施した。

観測井 OB-2 坑～OB-3 坑間についての測定を、二酸化炭素圧入開始前の第 1 回測定（BLS：ベースライン測定）、圧入中～圧入終了直後の第 2 回～第 5 回測定（MS1～MS5：モニタリング測定）として実施した。

圧入終了直後の第 5 回測定（MS4）では、圧入後の二酸化炭素挙動を 3 次元的に捉える基礎情報を得るために、観測井 OB-2 坑～OB-3 坑間に加えて、観測井 OB-2 坑～OB-4 坑間および観測井 OB-3 坑～OB-4 坑間の 3 測線での測定も実施した。平成 17 年 10 月には同じく 3 測線での第 6 回測定（MS5）を実施し、現在結果を解析中である。

下図に二酸化炭素圧入前地盤速度（BLS）に対する二酸化炭素圧入 3,200 tCO₂ 時（MS1）および二酸化炭素圧入 10,400 tCO₂ 終了後（MS4）の地盤速度の変化率を示す。



弾性波トモグラフィにより、以下が確認された。

- 二酸化炭素の圧入により、圧入井 IW-1 近傍に地盤弾性波速度の低下と低下域の拡大が認められる。
- 地盤速度低下領域は、二酸化炭素の圧入に進行により地層の傾斜方向に沿って拡大する傾向がある。

(3) 物理検層

物理検層は、観測井 OB-2 坑、OB-3 坑および OB-4 坑を対象として、二酸化炭素到達を捉え、かつその経時変化を高い分解能で計測して、地下における二酸化炭素の挙動を把握することを目的として実施した。

以下に示す 4 種目について、平成 15 年度は 2 週間～2.5 ヶ月の間隔で、平成 16 年度は約 1 ヶ月の間隔で測定を実施した。平成 17 年度には 4 回の測定を行う予定で、平成 18 年 2 月現在において 3 回（計 29 回）の現地測定が終了している。

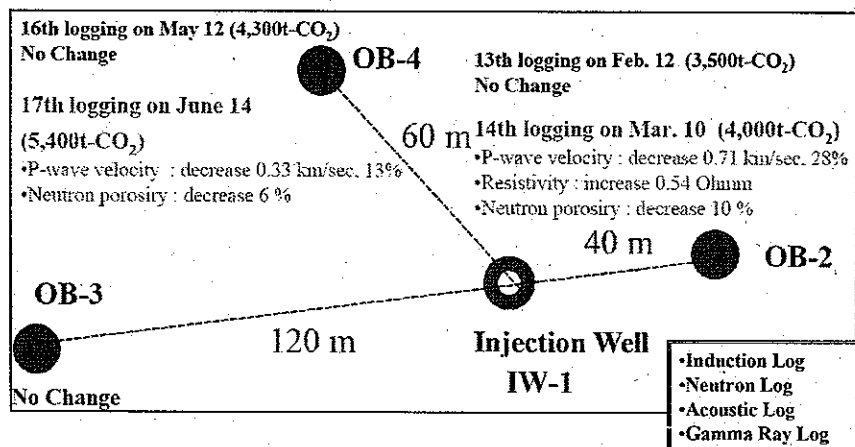
- ・音波検層（Sonic Logging）
- ・比抵抗検層（Induction Logging）
- ・中性子検層（Neutron Logging）
- ・ガンマ線検層（Gamma Ray Logging）

観測井 OB-2 坑においては、平成 16 年 2 月 12 日に実施した第 13 回物理検層までは、二酸化炭素が到達したことを示す変化は見られなかったが、同 3 月 10 日に実施された第 14 回検層において、Zone-2 区間で、音波検層、比抵抗検層および中性子検層において二酸化炭素の到達を示唆する変化（P 波速度の減少、比抵抗値の増加、中性子孔隙率の減少）が認められた（下図）。

観測井 OB-4 坑においては、平成 16 年 5 月 12 日に実施した第 16 回物理検層までは、二酸化炭素が到達したことを示す変化は見られなかったが、同 6 月 14 日の第 17 回検層では、観測井 OB-4 坑の Zone-2 区間にも二酸化炭素の到達を示唆する変化（P 波速度の減少、中性子孔隙率の減少）が見られた。

その後の二酸化炭素圧入の進行に伴い、観測井 OB-2 坑および OB-4 坑で検出された変化に拡大傾向が継続した。

観測井 OB-3 坑においては、二酸化炭素が到達したことを示す変化は認められていない。



（「二酸化炭素地中貯留国際ワークショップ」（2006, RITE；発表要旨より）

注：一部の図表については記載を省略している。