



## 二酸化炭素流の地層貯留に適用可能な監視技術

表 1 実施可能な深部地下監視技術とそれぞれの用途 (IPCC 2006 Guidelines より 以下同じ)

| 技 術                                            | 機 能                                                                                                                                                                                | 検出限界                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 利用可能な場所、コスト                                                         | 制 約                                                                                                                                                                   | 技術の現況                                                                         |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 2D、3D、4D (経時) による多成分 (multi-component) 反射法地震探査 | サイト及び周辺地域の地質構造、貯留岩及び貯留層の構造・分布・厚さ、貯留層における CO <sub>2</sub> の分布 (経時探査ではその動きも) を撮像する。<br>検出限界の範囲内で貯留層内の CO <sub>2</sub> 量を検証することも可能。<br>必要に応じて恒久的地震アレイを設置し、経時 (4D) 的観測を行うことができる。       | サイトにより異なる。ターゲットの最適深度は一般に 500~3,000m。この技術にとつて条件がほぼ最適な Sleipner サイトでは、Utsira Sand における CO <sub>2</sub> の検出限界はおおよそ 2,800 トン。Weyburn サイトにおける CO <sub>2</sub> の検出限界はおおよそ 2,500~7,500 トン (White 他, 2004)。上層に分散した CO <sub>2</sub> も検出できると考えられる。浅部にある天然ガスのポケットは探査記録上ブライトスポットとして表され、ガスチャムニーから散出するメタンも鮮明に識別できる。 | 陸上及び沖合。<br>カルスト越しや岩塩または天然ガスの下部については撮像品質が低下する。一般的に分解能は深度が増すにつれて低下する。 | 溶解 CO <sub>2</sub> は撮像できな<br>い (CO <sub>2</sub> 飽和の間隙流体と本来の間隙流体とのインピーダンスの差が小さすぎず撮像できない。) 流体と CO <sub>2</sub> の飽和岩石のインピーダンスの差がわずかな場合は撮像できない。上記はかなり一般的である (Wang, 1997)。 | 非常に開発が進んでおり、石油/天然ガス産業では商業ベースで完全に普及している。                                       |
| 坑井間地震探査                                        | 坑井間の速度分布を撮像する。岩石とその含有流体について 2D 情報を提供する。                                                                                                                                            | サイトにより異なる。分解能は地表からの反射法地震探査よりも高い場合があるが、探査範囲は狭い。                                                                                                                                                                                                                                                        | 陸上及び沖合。                                                             | 同上。ただし、範囲は坑井間に限定される。                                                                                                                                                  | 非常に開発が進んでおり、石油/天然ガス産業では商業ベースで完全に普及している。                                       |
| 坑井内地震探査                                        | 単一坑井周囲の速度分布、坑井周囲の流体圧力分布を撮像・マッピングする。<br>坑井周囲の漏洩に対し早期に警報を出すことが可能。                                                                                                                    | サイトにより異なる。                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 陸上及び沖合。                                                             | 同上。ただし、範囲が単一坑井周囲の狭い地域に限定される。                                                                                                                                          | 非常に開発が進んでおり、石油/天然ガス産業では商業ベースで完全に普及している。                                       |
| 微小地震観測                                         | 貯留岩及び周辺層に存在する微小破壊を検出し、その位置を三角測量する。<br>圧入流体の前線を推定できる。誘発地震の危険要因を判断できる。                                                                                                               | サイトにより異なる。バックグラウンドノイズを始めとする様々な要因に左右される。坑井の数と受信装置の数を増やせば、微小破壊の位置に関する精度は向上する。                                                                                                                                                                                                                           | 陸上及び沖合。                                                             | 装置の配置に複数の坑井が必要。                                                                                                                                                       | 開発が進んでおり、一部では商業ベースで普及している。                                                    |
| 観測井                                            | 以下の多数の機能が可能：<br>CO <sub>2</sub> 飽和率、流体圧力、温度などの測定。<br>セメントまたはケーシングの劣化や破損の検出。検層。トレーサー検出 (高速移動トレーサーを使用し、その結果をうけた操業方法の修正で CO <sub>2</sub> の漏洩予防に役立てることも想定)。地層流体の地球化学的変化の検出。岩石及び流体のサンプル | 坑井内の地球化学的サンプルは (ppb の分解能を持つ) 誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) で分析可能。パーフルオロカーボンをトレーサーに使用すれば 10 <sup>12</sup> 分の 1 単位で検出可能。<br>検層では多数のパラメータ (孔隙率、比抵抗、密度など) を正確に測定できる。                                                                                                                                             | 陸上及び沖合。<br>沖合ではより多くのコストを要する。                                        | 一部の測定・観測は、坑井のケーシング前に行うか実行できない。その他の技術も、一定距離おきにケーシングに穴をあける必要がある。特に沖合ではコストが制約条件の 1 つとなる。                                                                                 | 例えば天然ガス貯蔵産業などでは観測井が普及している。石油/天然ガス産業では多くのツールの開発が非常に進んでおり、日常的に用いられているが、他の分野では研究 |

| 技 術                 | 機 能                                                                                                                                                                                 | 検出限界                                                                                                                                              | 利用可能な場所、コスト              | 制 約                                           | 技術の現況                                                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                     | 採取。CO <sub>2</sub> 圧入に起因する地盤移動を検出するため坑井内を傾斜計で計測。貯留層からのCO <sub>2</sub> 漏洩の徴候を把握するための貯留層上部の地層観測。                                                                                      |                                                                                                                                                   |                          |                                               | 究開発段階である。                                                   |
| 圧入時の坑内圧力観測、坑内地層圧力試験 | 坑口の計器により圧入圧力を継続的に観測可能 (Wright 及び Majek, 1998)。坑内でゲージによる地層圧力の観測が可能。坑井での圧入圧力試験及び生産試験から、浸透率、貯留層内の障壁の存在、帽岩の流体保持能力を測定可能。                                                                 | 油田及びガス田における貯留層工学や埋蔵量推定において実証済みの技術。CO <sub>2</sub> 圧入による元素組成のわずかな変化を検出するには ICP-MS を利用。                                                             | 陸上及び沖合。沖合ではより多くのコストを要する。 |                                               | 非常に開発が進んでおり、石油/天然ガス産業では商業ベースで完全に普及している。                     |
| 重力探査                | 貯留層内での圧入CO <sub>2</sub> と元の間隙流体との置換により発生する重力の微小変化を捉え、それにより圧入CO <sub>2</sub> の質量及び概略分布を推定。反復によりCO <sub>2</sub> の鉛直方向の移動を検出できるが、これには超臨界流体が気体へ相変化する際の密度変化による移動が含まれる。検出精度は悪く、サイトにより異なる。 | 検出可能な最小量はおよそ数十万トンから数百万トンの単位である (Benson 他, 2004/Chadwick, 2004)。実際に検出可能な量はサイトにより異なる。孔隙率が高くなり、本来の間隙流体と圧入CO <sub>2</sub> との密度の差が大きくなればなるほど、分解能は向上する。 | 陸上及び沖合。陸上では安価。           | 溶解CO <sub>2</sub> は撮像できない (本来の間隙流体との密度の差が不足)。 | 非常に開発が進んでおり、石油/天然ガス産業では商業ベースで完全に普及している。地球物理学的調査でも広く用いられている。 |

#### 多成分反射法

P 波を用いる通常の地震探査とは異なり、横波である S 波は三次元場となるため、受信機側も 3 軸方向のセンサーが必要となる。このため “multi component” という。

#### ブライトスポット

炭化水素鉱床、特にガス鉱床の上下境界面で現れる記録断面上の強い反射波

#### 微小地震観測

水圧破砕や生産に伴う応力変化によって、新しいフラクチャが形成されたり、フラクチャ面で滑りが生じたりすることで発する微小地震 (AE: Acoustic Emission という) を、坑井内や地表に設置した受振器で観測する。発信源は必要ない。石油分野において北海を中心に実施例があるが、モニタリングできる範囲が坑井から 500m~1km であることや震源分布の正確な把握には複数の坑井によるモニタリングが必要なことから、ある程度開発が進んだ段階のフィールドでの適用となる。

#### パーフルオロカーボン

パーフルオロカーボン (CF<sub>4</sub>) はガスクロマトグラフィーで 10<sup>12</sup>~10<sup>15</sup>g まで検出可能な物質であり、また、移動性 (浸透性) が高い化学トレーサーである。

表2 実施可能な浅部地下監視技術とそれぞれの用途

| 技 術                                                        | 機 能                                                                                                                                                                                                                                                | 検出限界                                                                                                       | 利用可能な場所、コスト                                                                     | 制 約                                                                                                                                 | 技術の現況                                                                 |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| スーパーカー<br>中心周波数約 0.1<br>～1.2kHz の震源<br>を通常浅部で曳航<br>する。     | 地下浅部におけるガス分布 (の変化) を<br>撮像する (探査記録上では一般に音響ブ<br>ランキンング、ブライストスボット、強い反<br>射面などで表される)。                                                                                                                                                                 | 一般に音響ブランキンングで識別できる<br>自由ガス濃度は >2% である。<br>鉛直分解能は 1m 以上。                                                    | 沖合                                                                              | 深部牽引ブーマーに比<br>べ透過距離は長いが分<br>解能では劣る。<br>濃度が 5% を超えるガス<br>については定量化が困<br>難な場合がある。                                                      | 非常に開発が進んで<br>おり、海底や浅深度の<br>地震探査作業や海洋<br>調査において商業ベ<br>ースで広く普及して<br>いる。 |
| 深部牽引ブーマー<br>中心周波数 約<br>2.5kHz の広域音<br>響パルスを発する<br>震源を曳航する。 | 地下浅部における堆積物中のガス分布<br>(の変化) を撮像する (探査記録上では<br>一般に音響ブランキンングやブライスト<br>ボットで表される)。<br>海底の形態を撮像する。<br>海水中の気泡流を撮像する。                                                                                                                                      | 一般に音響ブランキンングで識別できる<br>自由ガス濃度は >2% である。<br>海底の形態の分解能は通常 1m 未満。<br>パルスは海底下約 200m までの透過が可<br>能であるが、通常はそれより短い。 | 沖合                                                                              | メタン気泡より可溶性<br>が高い気泡流は、比較的<br>浅い海中 (約 50m) で溶<br>解する可能性がある。気<br>泡流は間欠的な場合が<br>あり、1 回の探査では見<br>逃す恐れがある。ブーマ<br>ーの正確な位置への配<br>置がきわめて重要。 | 非常に開発が進んで<br>おり、海底や浅深度の<br>地震探査作業や海洋<br>調査において商業ベ<br>ースで広く普及して<br>いる。 |
| サイドスキャンソ<br>ナー                                             | 海底の形態を撮像する。<br>海水中の気泡流を撮像する。<br>海底の岩質 (炭酸塩のセメント化など)<br>の特徴を明らかにする。                                                                                                                                                                                 | 気泡検出に最適な手法。                                                                                                | 沖合                                                                              | 同上。サイドスキャンソ<br>ナーフイッシュを正確<br>な位置に配置すること<br>がきわめて重要。                                                                                 | 非常に開発が進んで<br>おり、海底探査産業や<br>海洋調査において商<br>業ベースで広く普及<br>している。            |
| マルチビーム音響<br>測深 (スワース測深)                                    | 海底の形態を撮像する。<br>反復探査により形態変化の定量化が可<br>能。後方散乱から海底の岩石特性を識別<br>する。                                                                                                                                                                                      | 10cm というわずかな単位で海底形態の<br>変化を識別可能。                                                                           | 沖合                                                                              | 同上。短時間で広くカバ<br>ーできる。                                                                                                                | 非常に開発が進んで<br>おり、海底探査産業や<br>海洋調査において商<br>業ベースで広く普及<br>している。            |
| 電気探査                                                       | CO <sub>2</sub> が元の間隙流体と置換することとで生<br>じる比抵抗値の変化を検出できる。特に<br>CO <sub>2</sub> が超臨界状態である場合には容易に<br>検出が可能。電気探査と電気探査を用<br>いれば、貯留層における CO <sub>2</sub> の拡散をマ<br>ッピングできる可能性はある。<br>地表・海面での電気探査によって、貯<br>留層内における CO <sub>2</sub> 飽和度の変化をマ<br>ッピングできる可能性がある。 | 比較的低コストであるが低分解能。                                                                                           | 陸上と沖合。<br>地表・海面での電<br>気探査については実証済み。CO <sub>2</sub><br>貯留への応用につ<br>いては開発が必<br>要。 | 分解能をさらに高める<br>必要があり、また実証も<br>必要である。                                                                                                 | 研究段階                                                                  |

### スパーカー、ブーマー

どちらも海中地震探査に用いられる放電型震源装置。スパーカーの名は放電 (spark) からつけられている。

### ブレンキング

反射強度が弱まる現象。

ブレンキング、ブライトスポット、強い反射面などはいずれも地震反射法記録断面上に見られる兆候で、ガス層の所在を推測する手がかりとなる。

### サイドスキャンソナー

小さな送受信エレメントを直線的に多数配置して鋭い指向性を持たせたソナー。これを、フィッシュと呼ぶ曳航体に装備して曳航し、過程の地形、障害物などを調べるのに用いる。

### スワス測深機

一度に幅広い範囲を測深することができる測深機の総称。スワス (swath) とは、英語で芝刈りの刈り幅のことを意味する。スワス測深機は、単要素測深機が測線下の測深しかできないことに対し、芝刈り機が一定の刈り幅でフィールド全体を刈っていくように、海底を面的に測深することができる。

### 電気探査法

電気探査法の一つに、EM 探査＝電磁探査法 (electromagnetic method) があり、これは電磁誘導現象を利用する。

表中では海上及び地上で行う場合について述べているが、電気探査自体は坑井内でも可能。その場合は特に電気「検層」という。