

## 海底下のCO<sub>2</sub>貯留に関するモニタリング戦略

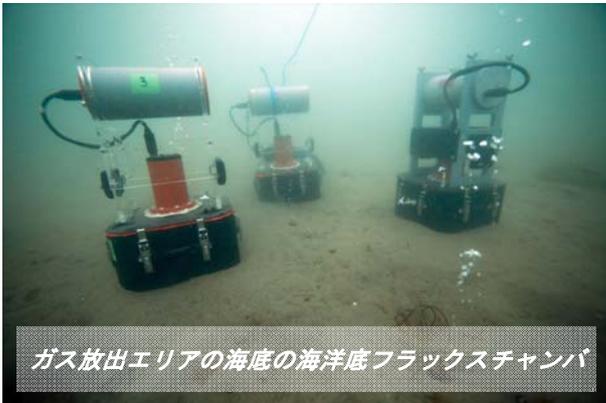
### なぜモニタリングが重要なのか？

海底下の貯留システムからCO<sub>2</sub>が漏出すると、堆積物を通じて上方へ移動し、水柱の中に漏れ出る潜在的可能性を孕んでいる。このCO<sub>2</sub>は堆積物の間隙水や覆層海水に溶け出し、酸性度を上昇させることになるだろう。また、可能性として堆積物から有毒金属を放出させることにもなるだろう。水化学にそういった変化が生じると、たとえば有機体殻の溶解、新陳代謝率の低下、死亡率の上昇など、さまざまな海洋生物に複雑な影響を引き起こす恐れがある。こういった理由から、CO<sub>2</sub>の回収・貯留層の上方にある海底のモニタリングを行って、法的に定められている要件よりも漏出率が低くなるよう確実性を期す必要がある。効果的なモニタリングでは、ベースライン状態についての包括的な理解が必要になるだろう（概況報告書のシート3&4）。

## QICSから学んだこと

### 貯留サイトから覆層堆積物へのCO<sub>2</sub>の移動

地震波反射などの地球物理学的手法は、堆積物における遊離ガスを検出したり、堆積物を通じてCO<sub>2</sub>が海底へと移動するのを画像化したりする上で効果的である。しかしながら、こういった地球物理学的手法は広いエリアを調査することは可能であるものの、比較的大きな特徴しか検出できず、またガスのタイプや漏出率を測定することはできない。



ガス放出エリアの海底の海洋底フラックスチャンバ



水柱調査に使用された遠隔操作船

### 堆積物から海水へのCO<sub>2</sub>の漏出

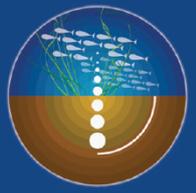
ひとたび漏らしきものが発見されたならば、堆積物と水の境界上、あるいはその境界付近で流体サンプルを回収したりCO<sub>2</sub>検出器を展開したりするなどして、CO<sub>2</sub>の出所と存在を確認し、またその漏出率を定量化しなければならない。

- 化学的センサーを用いて、酸性度（pH）および水中CO<sub>2</sub>分圧（pCO<sub>2</sub>）を測定する。
- 水中聴音装置を用いて、気泡の流勢が発する特徴的な音を聞き分ける（これは現在開発段階中の手法である）。
- 海洋底チャンバを用いて、溶解CO<sub>2</sub>フラックスを直接に測定する。しかしながら海洋底チャンバは複雑な装置であり、また展開するには空間的に限界があり費用も高額である。
- 収集されたコアの間隙水からフラックスを計算するのが、よりシンプルで費用のかさまない手法である。
- ダイバーと遠隔操作船を使えばガスフラックスを直接かつ正確に測定できるが、これは時間と費用がかかり、また空間的にも限界のある手法である。

こういった技術を組み合わせて使い、われわれはQICS実験期間中に堆積物に圧入されるCO<sub>2</sub>のおよそ15%が遊離ガスとして漏れ出たと推定している。残る85%のCO<sub>2</sub>は堆積物の間隙水に溶解した、あるいは圧入サイトから離れた場所に移動した可能性がある。

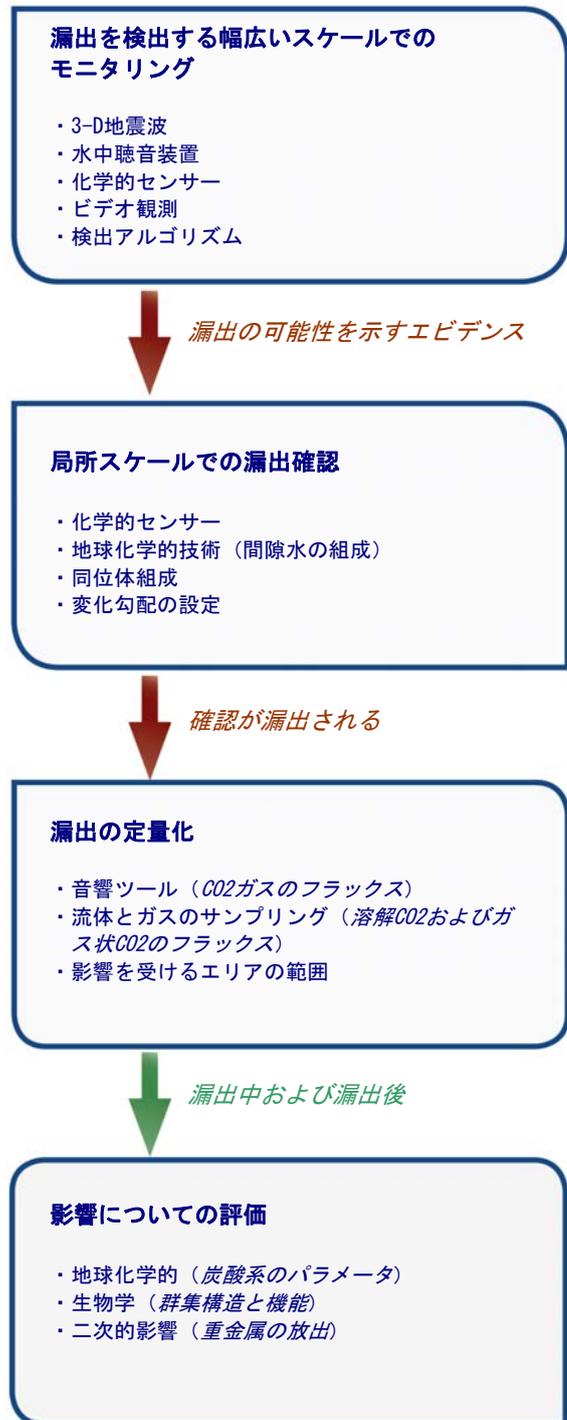
### 海水から大気中へのCO<sub>2</sub>の漏出

QICSプロジェクトの期間中に、CO<sub>2</sub>ガスの気泡は海水表面に到達した。その結果として生じた大気中CO<sub>2</sub>の増加については、海水表面の真上に展開したセンサーを用いてマッピングを行った。しかしながら、CO<sub>2</sub>貯留サイトであることが分かるように目印を付けたサイトの水深の場合には遊離ガスが海水表面に到達するのがほぼ妨げられてしまうことから、この技術はモニタリングツールとしての有用性はないといえる。



## モニタリング戦略案

QICSプロジェクト中に得られた知識に基づき、以下のCO<sub>2</sub>漏出モニタリング戦略を提案した。



(i) 貯留層の健全性の損失、および貯留サイトからのCO<sub>2</sub>の放出に関する初期的エビデンスは、貯留サイトを覆層する堆積物の3-D地震調査を行うことで得ることができる。海底からのガス気泡の流勢は、自動作動船あるいは遠隔操作船に展開したカメラシステムおよび水中聴音装置を用いて検出することができる。化学的なモニタリング（たとえばDIC、pH、pCO<sub>2</sub>など）の信頼性は、酸素、塩水濃度、温度を測定することで高めることができる。これらを用いれば、海洋のCO<sub>2</sub>を変化させる天然のプロセスを選別することができる。そういった調査では、空間的に広い範囲を網羅する必要があるだろう。

(ii) ひとたび異常が検出されれば、炭酸塩化学（DIC、総アルカリ度、pH、pCO<sub>2</sub>、カルシウムイオン濃度）の完全な分析試験を行って、堆積物の間隙水および覆層する水柱の双方の地層システムに入り込むCO<sub>2</sub>を定量化する必要がある。間隙水のDICの炭素同位体組成を見れば、確立されている共分散の関係性（たとえば酸素とDICなど）から、漏出CO<sub>2</sub>が貯留サイトを出発地点として発生しているものかどうかを確認できる可能性がある。勾配を設けることで、CO<sub>2</sub>源の位置を正確に示すことができる。

(iii) 漏出を定量化するためには、海洋底チャンバを用い、また間隙水化学と移流拡散モデリングを組み合わせることで、堆積物と海水の境界にわたって存在する溶解CO<sub>2</sub>のフラックスを定量化することができる。堆積物と海水の境界にわたって存在するガス状CO<sub>2</sub>のフラックスのアセスメントは、水中音響技術、および遠隔船を用いた直接のガスサンプリングによって行うことができる。漏出のエリア範囲をマッピングしなければならない。

(iv) (iii) 漏出中および漏出後に、海洋環境におよぼす影響および海洋環境が回復するまでのタイムスケールについてアセスメントを行うべきである。生物学的なインパクト（堆積物の間隙水や覆層水柱でのpHや重金属可動化など）を測定することで、海洋環境への影響の深刻度を示すことができる。生態系への影響やその回復を直接に推定するには、群集組成分析や微生物化学分析試験を用いることができる。