

令和5年度環境配慮型CCUS一貫実証拠点・サプライチェーン構築事業
委託業務（輸送・貯留等技術実証） CCUS早期社会実装会議

洋上圧入CCSにおける モニタリングの考え方と今後の課題

令和5年10月27日

(背景)

- 現在、JOGMECによるCCS事業化支援の取り組みとして「先進的CCS事業の実施に係る調査」が進められている状況であり、CO2貯留に係る法的枠組みの導入検討も進められている。
- CCSでのモニタリングの役割
 - 人への危害や鉱害の防止、安全操業といった保安の観点
 - 地圏、海洋、生活圏といった環境保全の観点【自然環境・社会環境との調和・共存】
 - 地域の理解を得ながら二酸化炭素貯留場の開発を円滑に進めるための観点【円滑導入】
- モニタリングは、操業前・操業中・操業後の一定期間も含め長期間の対応が求められる。
- 商業段階のCCSでは、既存技術の活用は勿論のこと、コスト低減を求める声もあり、そのため技術開発が期待されている。

CO2地中貯留事業の基本的な流れ



➢ 高度化かつ効率化によるモニタリングコストの極小化

モニタリング

CO2地中貯留事業の基本的な流れとモニタリング

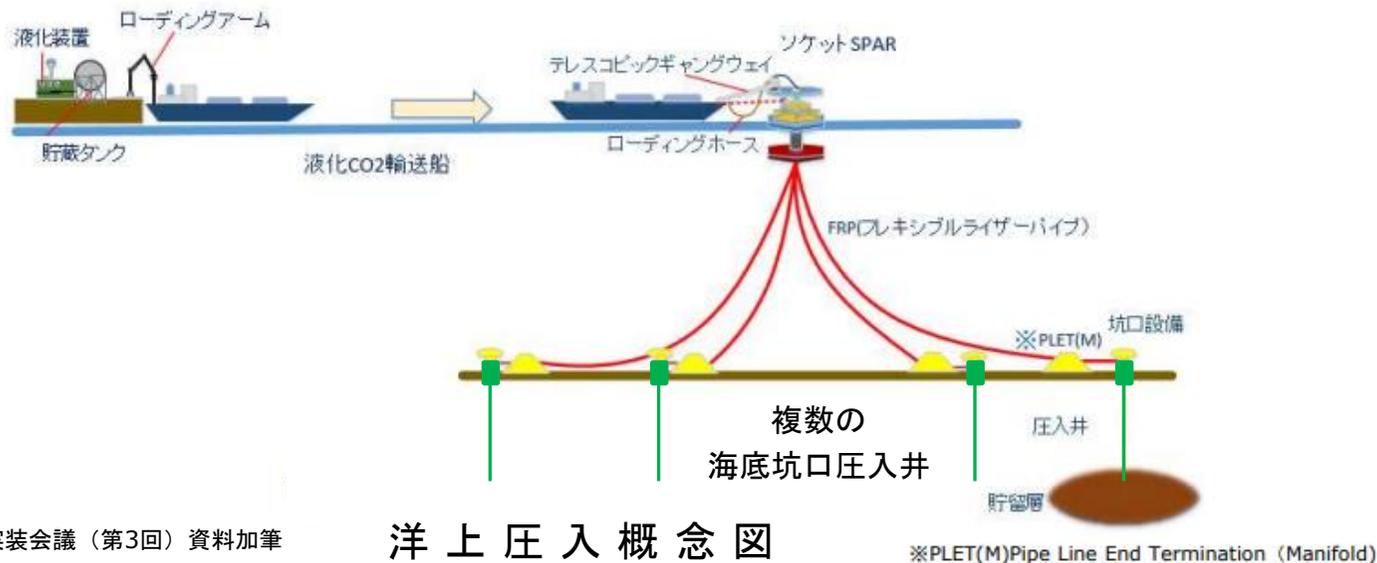
(洋上圧入CCSのイメージ)

■ 先進的CCS事業など商業化に向けたCCS事業の動向予想

- **【導入期】** 2030年 実用化段階のCCS事業イメージ
陸上基地をベースとした大偏距掘削井（Extended Reach Drilling）、
あるいは海底パイプライン輸送によるCCS事業が先行着手



- **【発展期】** 2050年に向けたCCS事業の将来イメージ
浮体式洋上圧入方式と海底坑口型坑井を組み合わせた貯留事業も選択肢の1つ

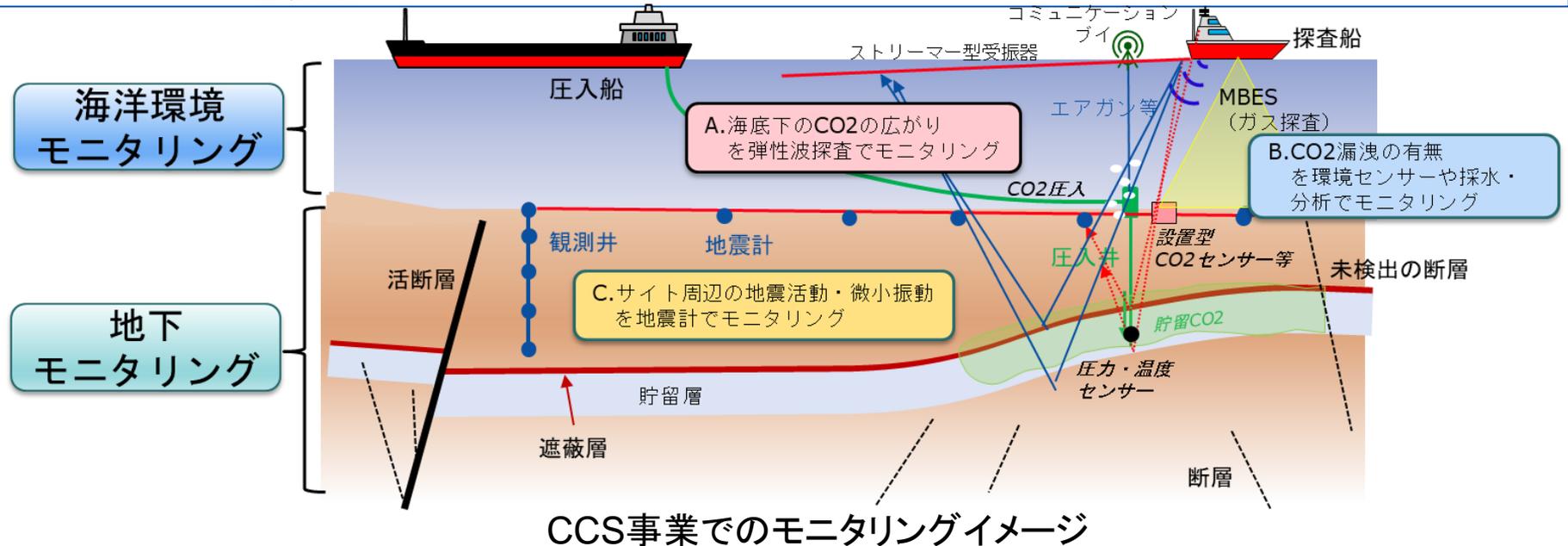


出展：
環境省「CCUSの早期実装会議（第3回）資料加筆

(地下と海洋環境のモニタリング)

■ CCS事業の貯留地及びその周辺における主なモニタリング

- A.二酸化炭素の地下における広がりを推認するための手法
 - ・ 主に弾性波探査（洋上・海底を利用した反射法や坑井を利用した方法）
- B.二酸化炭素の漏洩の有無を合理的に説明するための手法
 - ・ 主に坑井での圧力、温度、海洋環境（水質、pCO₂等）
- C.二酸化炭素の圧入行為に関連した地下の安定に係る手法
 - ・ 地震計



(モニタリングの現状課題)

■ 事業普及に向けた地下・海洋環境モニタリングにおける課題

➤ 時間的密度

➤ 空間的密度

➤ コスト:費用対効果

特に、洋上圧入を想定した沖合海域では、陸域に比べ場所へのアプローチ・資器材設置環境・維持管理等の点で、各課題の改善に対してハードルが高い。

A. 海底下のCO2の広がり弾性波探査でモニタリング

【ストリーマー型での弾性波探査の主な課題】

・時間的密度

➡ 常時観測ではない

急な漏洩等の異常に対応できない可能性

・空間的密度

➡ 海底や海底下での観測機会の不足

・コスト

➡ 高価:1回あたりの探査費用が一般に高額

B. CO2漏洩の有無を環境センサーや採水・分析でモニタリング

【海洋環境モニタリングの主な課題】

・時間的密度: 自然変動を有する海洋環境に対し、観測頻度の確保

・空間的密度: 漏洩・漏出検知や漏出点の特定に必要な貯留エリアのモニタリング空間密度の確保

・コスト: 時空間密度向上の最適化を図る方策

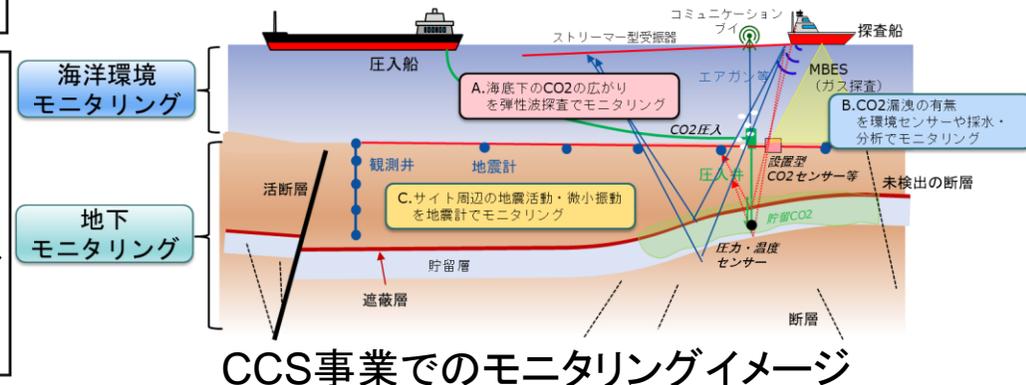
C. サイト周辺の地震活動・微小振動を地震計でモニタリング

【地震観測の主な課題】

・時間的密度: 常時観測網の確保

・空間的密度: 陸域に対し、一般的に多くの場合、海域では観測網が不足

・コスト: 海底や海底下への設置費や維持費



CCS事業でのモニタリングイメージ

(課題解決に向けた方向性)

■ 想定される洋上圧入方式を念頭に課題解決に向けた技術検討・開発

- 時間的密度 ➡ 常設型のセンサー、連続的な装置による監視
- 空間的密度 ➡ 観測点の充実
- コスト、費用対効果 ➡ センサーの効果的配置、長寿命化、実用的な運用法

A. 海底下のCO2の広がり弾性波探査でモニタリング

【弾性波探査改善に向けた方針】

- ・受振器を常設した連続的なモニタリング
 ➡ 光ファイバー型地震計の活用
- ・海域&陸域小型連続震源装置の開発
- ・坑井利用を想定した観測点設定

B. CO2漏洩の有無を環境センサーや採水・分析でモニタリング

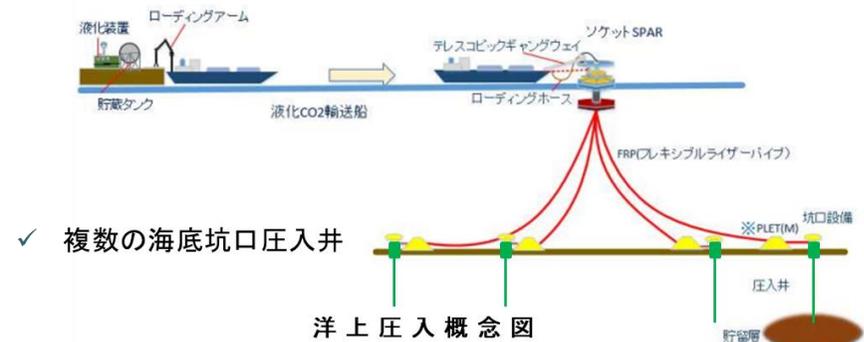
【海洋環境モニタリング改善に向けた方針】

- ・長期安定性の高いセンサーによる定点連続監視(CO2漏洩の可能性が高い坑井周辺域)
- ・音響測深技術によるガス態の空間定期監視
(事前にCO2漏洩を予見できない箇所)
- ・観測点や測線の最適化を図る解析技術開発

C. サイト周辺の地震活動・微小振動を地震計でモニタリング

【海底地震観測網強化に向けた方針】

- ・海域での長期モニタリングに適した海底地震計タイプの選定
- ・既存観測網も含めた効果的な観測点配置

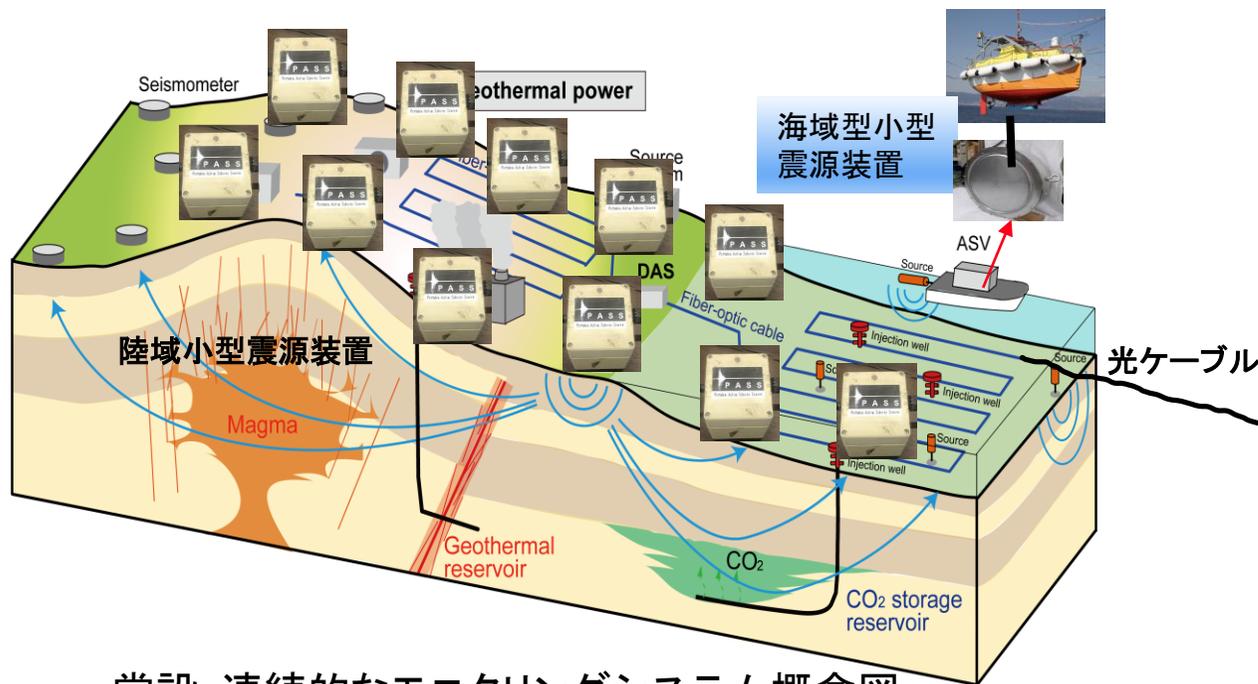


出展：環境省「CCUSの早期実装会議（第3回）資料加筆 ※PLET(M)Pipe Line End Termination (Manifold)

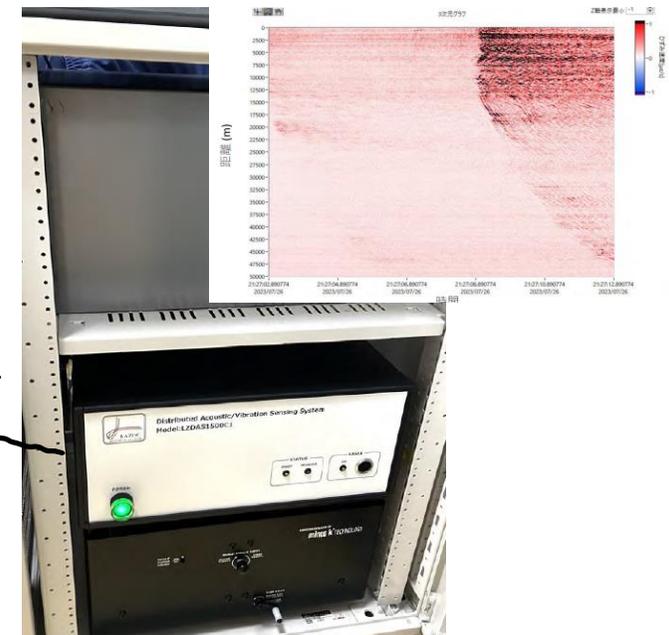
(開発事例A-1：弾性波探査によるモニタリング技術)

■ 弾性波探査の時空間的観測密度の向上

- 陸域及び海域での小型連続震源装置の連続運用による発振点密度向上
- 光海底ケーブルの光ファイバー等を利用した常設型長大稠密地震計アレイ (Distributed Acoustic Sensing: DAS) による受振点密度向上
- DAS計測技術 (計測器およびデータ解析) の内製化に向けた開発



常設・連続的なモニタリングシステム概念図

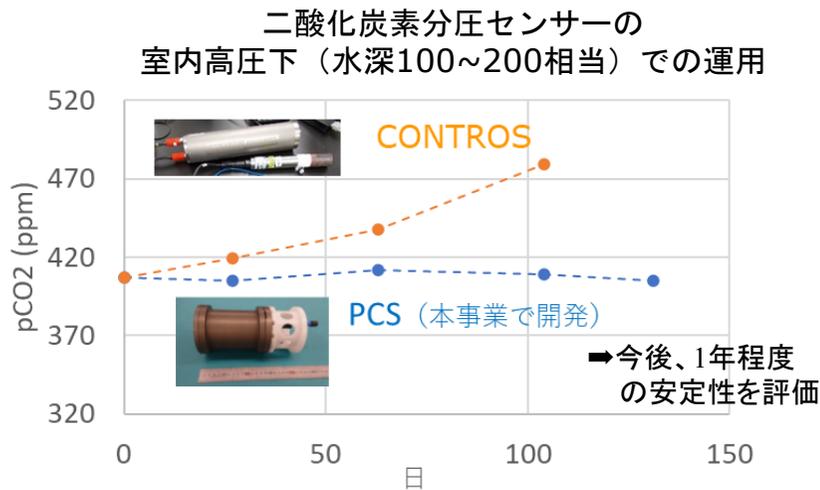


開発中のDAS計測器と観測された自然地震記録の例

(開発事例B-1：海洋環境モニタリング技術)

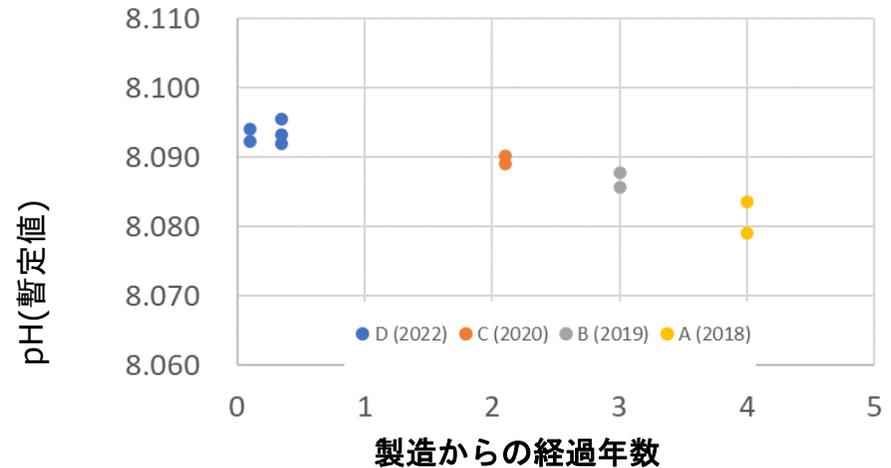
■ 万が一の海洋へのCO2漏洩検知に特に有効と期待される技術を開発

- 定期連続監視に用いる設置型pCO2センサーの長期安定性評価
- 高純度指標薬（pH参照用人工海水）の長期保存性能評価
- 空間定期監視に用いるマルチビームソナーによるガス態検知
- 最適モニタリング測点配置にも資する漏出位置数値推定法のアルゴリズム開発



標準ガス測定：長期安定性試験

- CONTROS（独4H-JENA engineering製）は内部校正機能を適用しても大きなドリフト発生
 - ➡ 試験を中断してメーカーにて再調整
 - ➡ 改めて長期運用評価



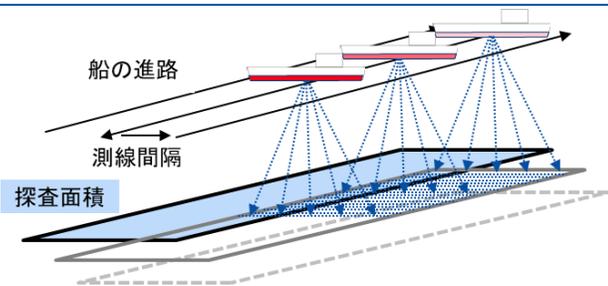
pH参照人工海水の経年変化

- 保存期間が長いほどpHが低く、経年変化の可能性を示唆
 - ➡ 容器の密閉度の問題と推測
 - ➡ 容器の仕様を変えたものを使用

(開発事例B-2：海洋環境モニタリング技術)

■ 万が一の海洋へのCO2漏洩検知に特に有効と期待される技術を開発

- 定期連続監視に用いる設置型pCO2センサーの長期安定性評価
- 高純度指標薬（pH参照用人工海水）の長期保存性能評価
- 空間定期監視に用いるマルチビームソナーによる海域実験でのガス態（気泡）検知
- モニタリング測点最適配置法のプログラム化

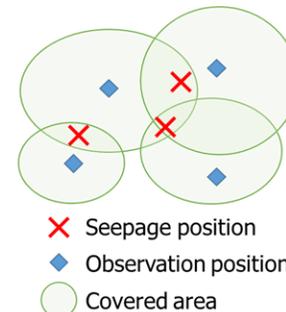


MBESによる
モニタリング模式図

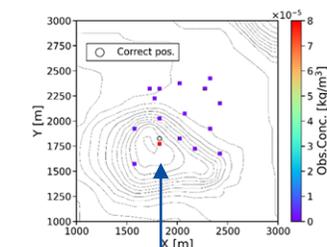
モニタリング運用の一例方法

	水深100m程度	水深20m程度
航行速度 (m/s)	1.5~2.0	1.5~2.0
周波数 (kHz)	190~300	420
スワス角(度)	75	150
測線間隔(m)	100	100
探査面積(km ² /h)	0.5~0.7	0.5~0.7

- ・ 水深20-100mの海域でMBESにより年間10t程度のCO2ガスフラックスを検知できた。
 - ➡ 水深が深いと自動検知が困難で目視検知となる
 - ➡ 自動解析法の模索、水深200m程度での適用性確認

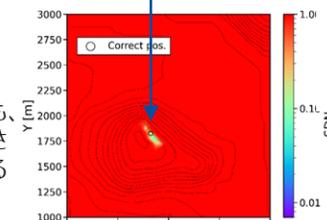


海域内のどこから漏出したとしても、必ず2つ以上の観測点でカバーされる漏出候補の範囲を表現するように最適化関数を定義



鹿児島湾奥の観測点最適配置

真の漏出位置
(上段)と
プログラム試行
により推定した
位置 (下段)



漏出位置の推定精度が高いアルゴリズムと 開発した観測点最適配置法による漏出点位置推定の試行事例

- ・ 開発したモニタリング測点の最適な配置法により漏出点を推定できることを確認した。
 - ➡ 観測点配備の範囲決定法と併せ汎用性が高くコスト削減に繋がるモニタリングプランの策定検討の開始

(検討事例C-1：海域での地震観測)

■ 海域での地震観測網強化：海底地震計タイプの整理

- 複数の海底地震計タイプがある。
- 長期モニタリング用途に対し、光海底ケーブル式インライン型海底地震計を海底表層へ埋設し設置する方法が実装に向けた候補の一つ。
(位置の再現性や欠測回避、即時性、沖合展開、漁業活動との共生など考慮)

海底地震計タイプの一覧

	自己浮上式 海底地震計 (OBS)	ケーブル式 OBS (OBC)	光海底 ケーブル式 ノード型 海底地震計OBC	光海底 ケーブル式 インライン型 海底地震計OBC	DAS式 海底地震計	海底地震計+ 海中無線通信 +洋上プイ +衛星通信
単体設置形態	点設置	線(面)状設置	線(面)状設置	線(面)状設置	線(面)状設置	点設置
長期地震観測 への適用性	△ 回収再設置 (主に期間限定の研究観測用途)	○ 長期常設可	○ 長期常設可	○ 長期常設可	△+ 長期常設可 (海底光ケーブルの 予備線で実績有)	× 準常設・要メンテ (研究段階：別件、地 殻変動データ取得では 音響通信による結合で 実績有)
大容量通信 の 安定性	-	○ (既製ケーブル)	○ (海底ケーブル)	○ (海底ケーブル)	○ (ケーブル自体が センサー)	× (課題有)
電源供給	△ ・バッテリー (内蔵)	○ (既製ケーブルシス テムでの給電：3成分 MEMSユニット)	○ (特注海底ケーブル)	○ (特注海底ケーブル)	× (計測専用信号線 のため不可)	△ (原位置発電システム +バッテリー)
備 考 (課題や 展望)	・再投入設置 時の位置ズ レあり *水深によっ て潜水土によ る回収・埋 設再設置可 ・漁業対応難度	・埋設可 (要埋設検討) ・既製品で制約有 (距離による電圧 降下) ・陸上基地局	・汎用性有 ・埋設可 (ケーブル敷設専用 船) ・要埋設検討 (ノード、展張ケー ブル、海底地震計 等) ・陸上基地局	・埋設可 (インライン型は ケーブルと一体化 の為、設専用船の みで埋設対応が可 能) ・陸上基地局	・埋設可 (要設置検討) ・DAS計測器は陸 基地局あるいは 洋上設備に設置 ・ケーブル軸方向1 成分のみ	・荒天時のプイ&通信 の安定性に課題 ・海中通信の課題 (水中工学的課題) ・大容量化に向け 光通信技術での 海中通信の研究有 ・要埋設検討 ・漁業対応難度
長期観測機器 としての 安定性	△ 可 (一時的用途)	○ 良	◎ 優	◎ 優	△ 可	× 現状不可

* 一般に、海底地震計設置は、陸域地震計設置に比べ、コスト大となる。

(今後の課題)

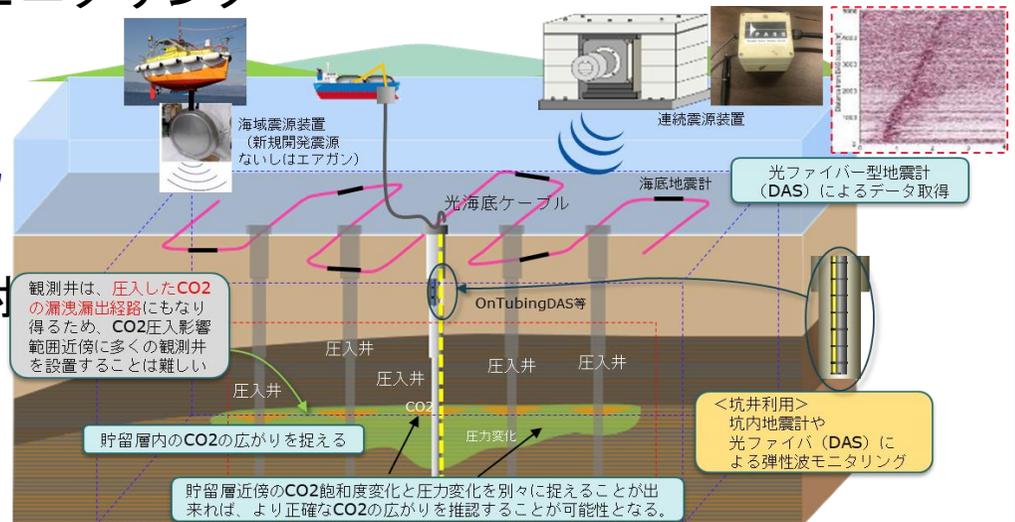
■ A : 弾性波モニタリング

- モニタリングに用いる連続震源装置とDASによる長期連続運用検証
 - ➡ これまでは数日程度の連続運用実績のみ
 - ➡ 今後1年程度の連続運用により機器の耐久性や安定性を確認し長期安定性検証
- 大量となる連続データの扱いや解析法開発
- 観測ジオメトリの充実
 - ➡ 坑井を利用した地震計やDASの利用による深度方向への受振点増設
- 解析技術の高度化による定量的なモニタリング

■ C : 海域での地震観測網強化

- 既存観測点網を活用した海域での追加地震計による効果的な配置検討

➡ 地震の検知能力や震源決定精度向上と低コスト化

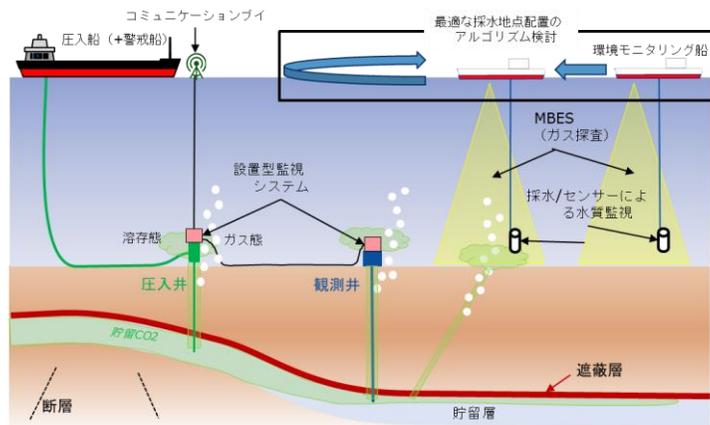


海域での常設型モニタリングイメージ

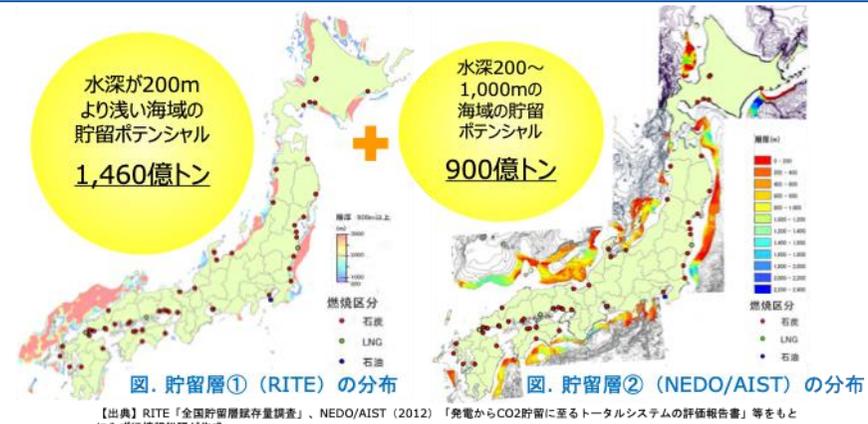
(今後の課題)

■ B : 海洋環境モニタリング

- 定点連続監視用センサー長寿命化：約1年の長期連続運用試験による安定性評価
➡ 海域試験を通じた設置や運用の方法検討
- モニタリング信頼性向上
➡ 高純度指標薬（pH参照用人工海水）の長期保存性能評価&センサー校正法検討
- マルチビームソナーでのガス態検知
➡ 適用可能水深拡大を目指した検証：先ず水深200m程度での実海域実験実施
- 最適モニタリング測点配置に向けて開発した漏出位置数位推定法の検証
➡ 実海域での観測データによる手法検証



海洋環境モニタリングイメージ



水深200mを境にした貯留ポテンシャル
第3回早期社会実装会議（2021年8月3日）資料から抜粋

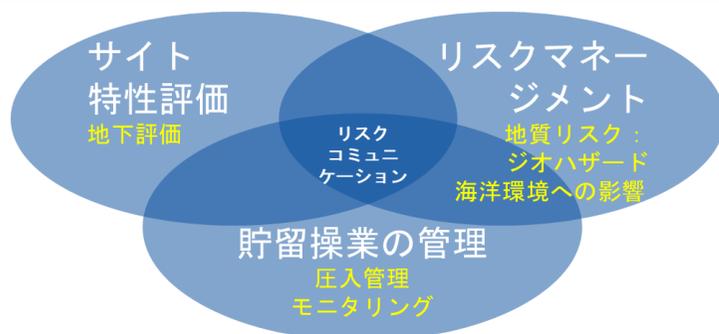
(今後の課題：貯留に係るモニタリング全般)

■ 費用対効果を考慮した運用シナリオ

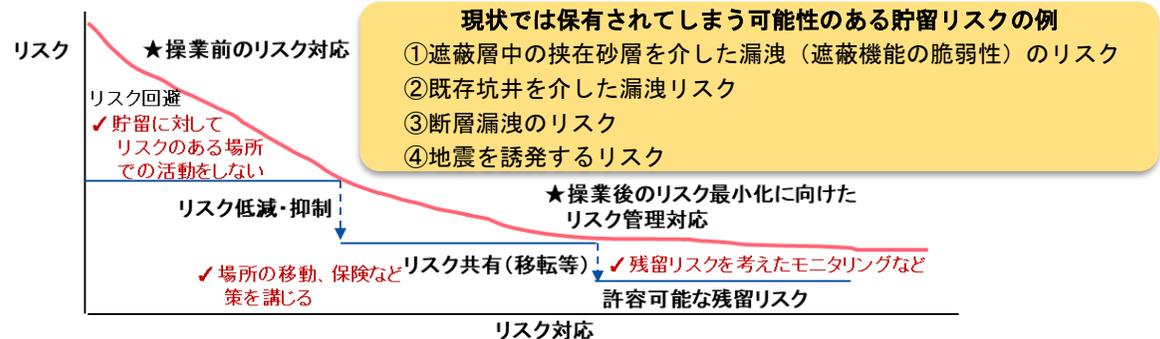
- 開発中の各モニタリング手法の効果的な運用シナリオ検討

■ 事業者の操業方針やリスク管理との整合性【安全操業と受容醸成】

- 事業者は、事業目的、サイト毎の特性、地元の事業に対する受容状況、貯留事業の中で許容可能な残留リスクを考え、操業方針や圧入計画、更にはモニタリング計画などを具体化
- ただし、長期的な事業では不確実性などにより、最初からリスク最小化は困難
- 操業段階で操業管理やモニタリングなどにより新たな情報を取得し、それを安全管理に活かして、リスクの最小化を進めていくことが肝要
- モニタリングをはじめとする操業情報やリスク管理に関する情報発信



サイト特性評価とリスクネージメントと貯留操業管理の相関図



貯留事業でのリスク低減に向けた概念と現状では保有されてしまう可能性のある貯留リスクの例