

2021年8月3日  
CCUSの早期社会実装会議（第3回）

資料 1 - 4



---

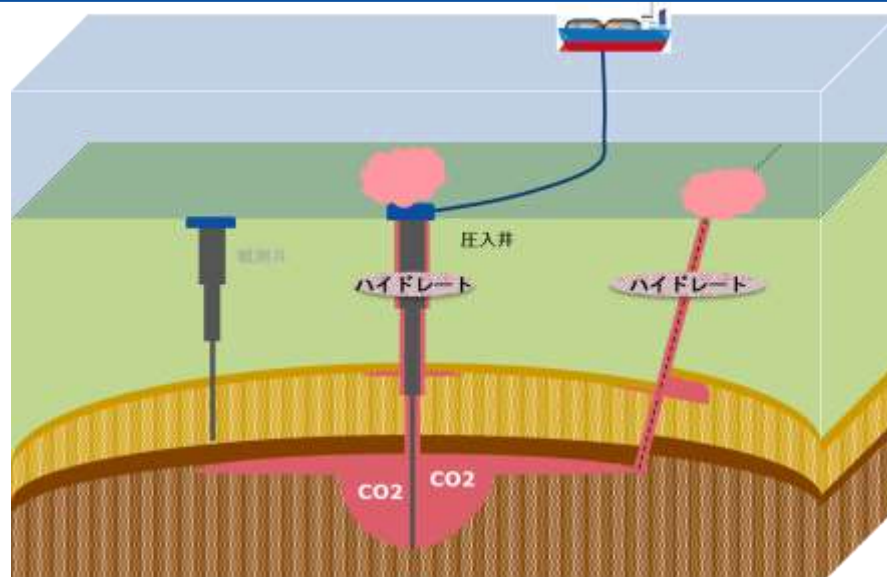
## 環境配慮型CCS実証事業 — モニタリング技術について —

---

日本エヌ・ユー・エス株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所、  
国立大学法人東京大学

## (背景・目的)

- 海底下CCSの実施に際しては、法律により海洋環境のモニタリングが要求されている。
- 社会的受容性の観点から、このモニタリングにおいては、万が一の海底面へのCO<sub>2</sub>ガスの漏出及びそれが海水に溶けることによる水質（pHやpCO<sub>2</sub>：水中のCO<sub>2</sub>分圧）の変化を想定し、その検知を目指すことが望ましい。
- 漏出の可能性は坑井周辺で比較的高く（下図）、また年間に数度のスナップショット的なモニタリングではCO<sub>2</sub>漏出を検知できないおそれがある。
- また、坑井周辺以外においても未検知の断層等から漏出する可能性が否定できない（下図）ため、貯留エリアの空間的（水平的）なモニタリングも重要である。これについては、採水し水質を分析するような方法では、漏出検知に必要な程度モニタリングの空間密度を高く保つことは困難なものである可能性がある。
- こうした背景を受け、**ベストアベイラブルな技術の導入によって海洋環境モニタリングの時空間密度を向上させ、CO<sub>2</sub>漏出を検知する可能性を向上させることを目的とした。**

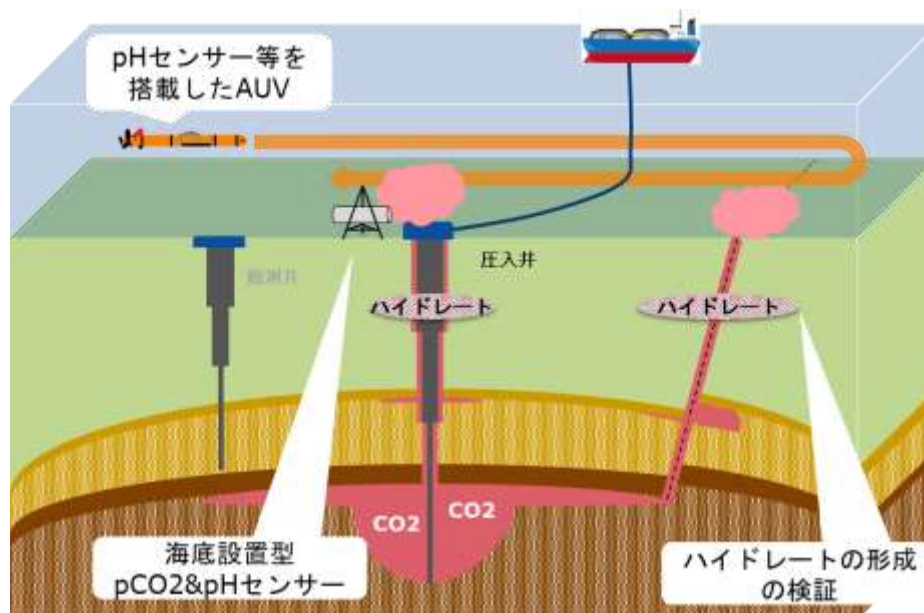


万が一のCO<sub>2</sub>ガスの漏出に関する概念図

# (実施方法)

- 以下の技術により時空間密度を向上させた場合の漏出検知能力を、室内試験やCO<sub>2</sub>が自然に湧出している海域における試験を通して把握しつつ、費用面等で現実的であるか検証し、**費用対効果の高い海洋環境モニタリングの在り方を模索**した（下図）。
  - 坑井周辺の**モニタリングの時間的密度向上**：水中で使用可能なpHセンサー、pCO<sub>2</sub>センサーのうち、長期安定性の高いものを海底に設置することによる長期連続モニタリング
  - 貯留エリアの**モニタリングの空間的密度向上**：pHセンサーやpCO<sub>2</sub>センサーのうち応答速度が高く空間プロファイリングに適したものを、AUV（自律型無人潜水機）等のプラットフォームに搭載することによる移動モニタリング
- このほか、貯留エリアの空間的なモニタリングにおいて低pH・高pCO<sub>2</sub>といった異常を検知した場合に、その原因となっているCO<sub>2</sub>漏出の位置及び量をシミュレーションによって推定する手法を開発した。
- さらに、モニタリング計画策定時に仮定する「CO<sub>2</sub>漏出シナリオ」について、これまで取り扱われてこなかったCO<sub>2</sub>ハイドレート生成プロセスによる漏出抑制\*効果を評価した。

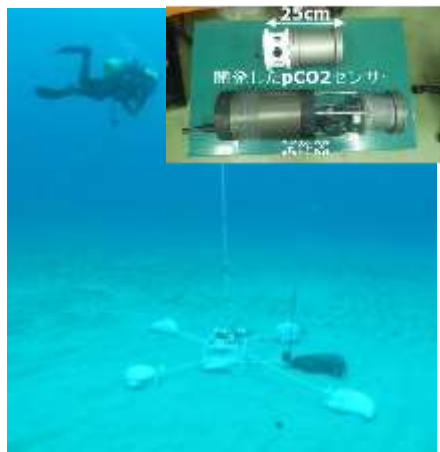
\* ガス又は液体としてCO<sub>2</sub>が地層中を上昇する際に、一定の物理条件を満たす深度において水と反応して固体であるハイドレートを生成することにより、漏出に対して一定の抑制効果が期待される。



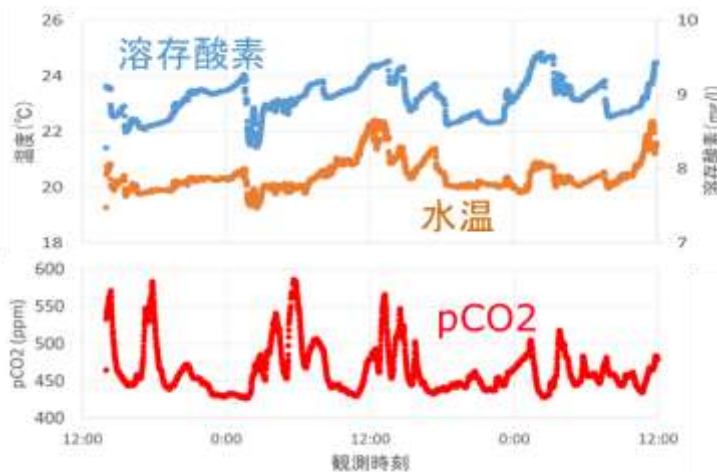
モニタリングの時空間密度向上に関する概念図

# (主な成果：坑井周辺の時間的な連続モニタリング①)

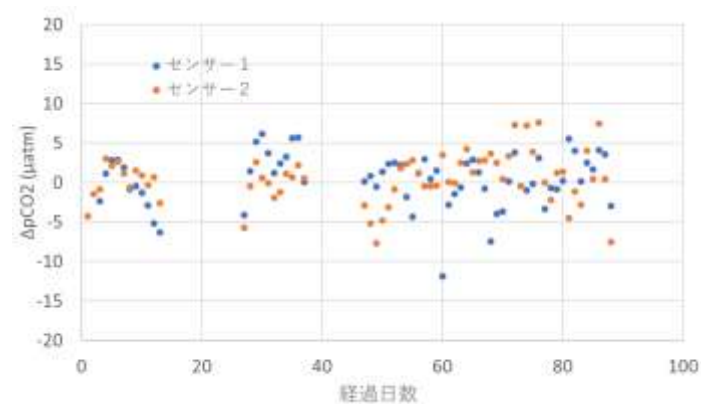
- 海底設置型連続モニタリングシステムとして、低コストなpCO<sub>2</sub>センサーを開発した(左図)。
- CO<sub>2</sub>湧出海域における試験観測において、瞬時値である採水分析では見逃す可能性が高かったpCO<sub>2</sub>の激しい時間変動を観測した(中図)。海底下CCSを実施するサイトの環境特性にもよるが、**連続測定を採用する利点大きいことが示唆された。**
- 室内水槽試験によって、約3カ月間安定したデータ取得が可能であることが確認された(右図)。これにより年4回の設置及び交換により、**坑井周辺の連続モニタリングが可能であることが示された。**



開発したpCO<sub>2</sub>センサー及びCO<sub>2</sub>湧出域近傍海底面(水深約24m)への設置



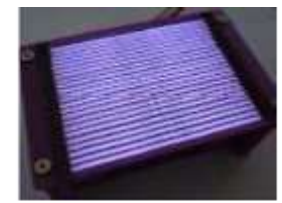
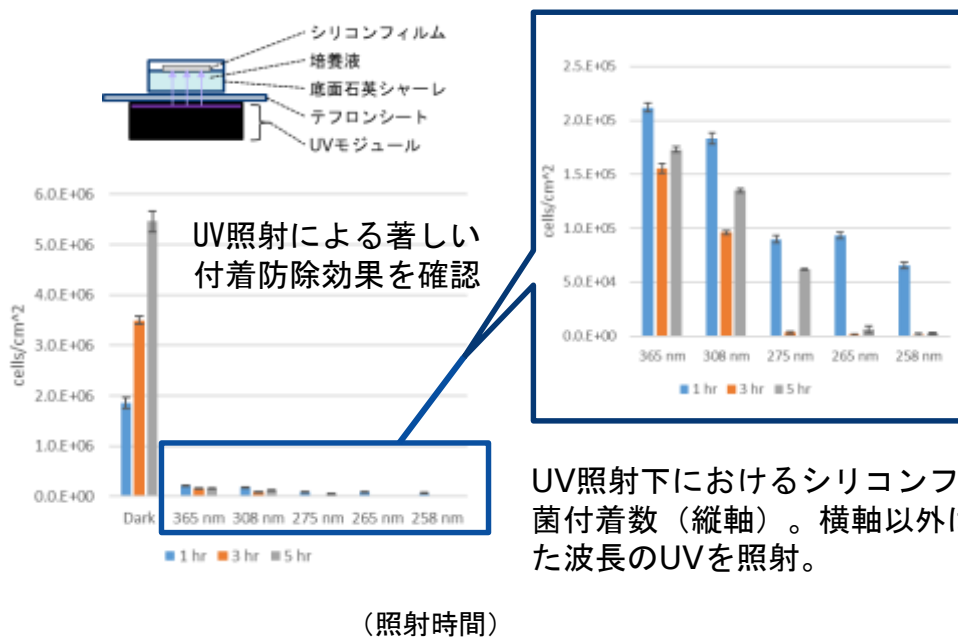
CO<sub>2</sub>湧出海域における試験観測データ



標準器(精度<1μatm)と本事業で開発したpCO<sub>2</sub>センサーとの測定値の差(ΔpCO<sub>2</sub>)

# (主な成果：坑井周辺の時間的な連続モニタリング②)

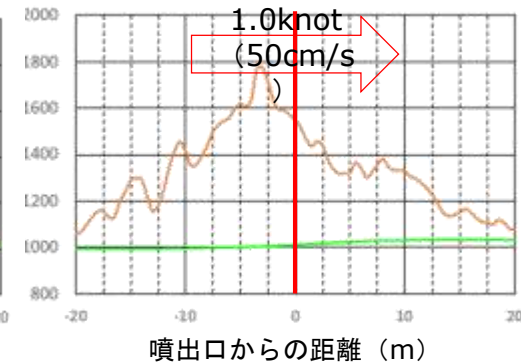
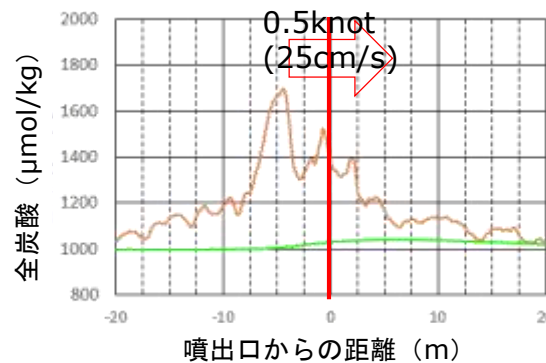
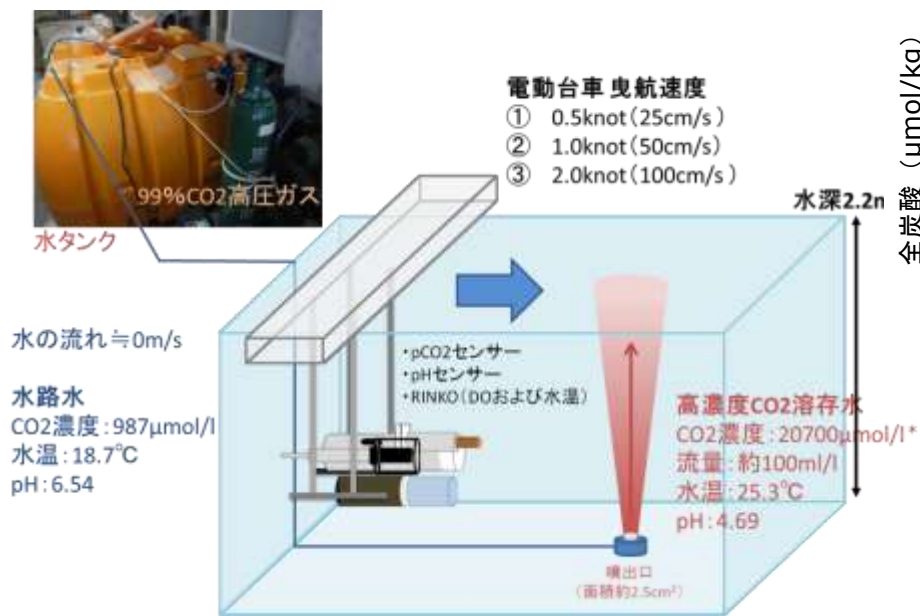
- 設置型センサーの性能劣化の要因となる生物付着に対して防止技術を開発した。
- 短波長UVの照射による顕著な付着抑制効果効果（左図）があることを確認し、またUVの光源として、点で照射するLED光源に対し、面的な照射を低消費電力で実施可能な発光管集合体シートタイプの使用が有効であることが確認できた（右図）。
- 海中設置型CO2モニタリングセンサーと組み合わせることにより長期安定性に寄与することが期待される。



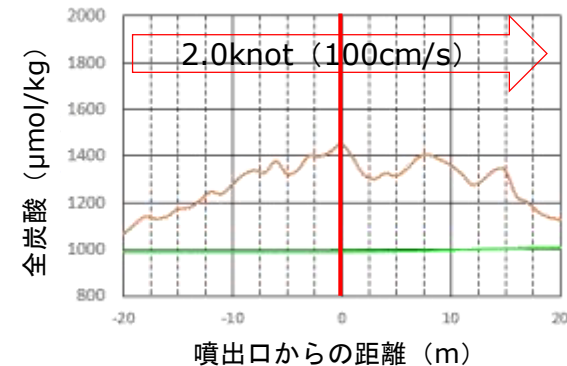
発光管集合体シートタイプ

# (主な成果：貯留エリアの空間的なモニタリング①)

- 市販されている複数のpHセンサー及びpCO<sub>2</sub>センサーを対象とした文献調査及び室内試験により、総じてpHセンサーが応答速度に優れることを把握し、それらの中でも応答速度や精度等に優れた機種を選定した。
- 当該センサーに関する室内試験（下図）及びCO<sub>2</sub>天然湧出海域における試験を通じて、これを搭載するAUVの望ましい航行速度を決定した。



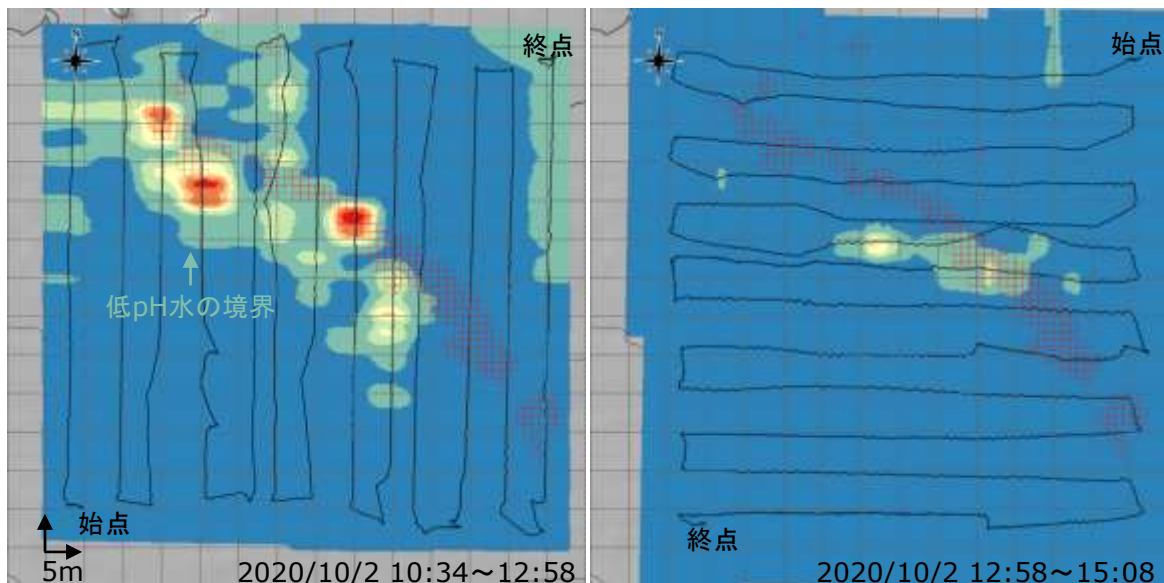
■ ガラス電極式pHセンサー  
■ pCO<sub>2</sub>センサー



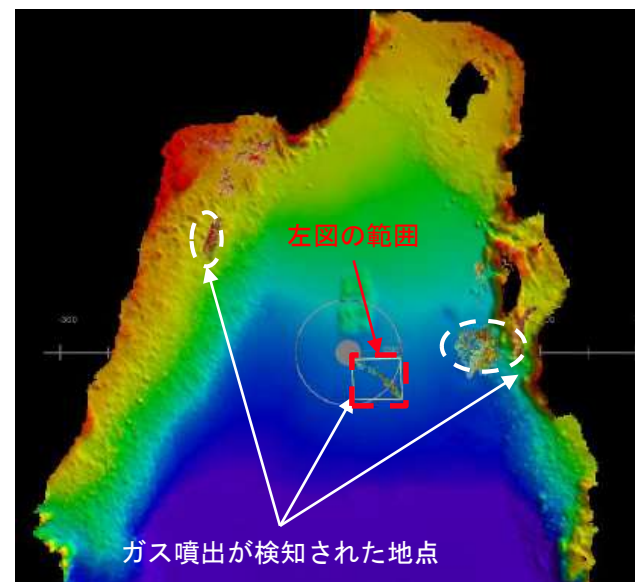
室内試験の概要と結果

## (主な成果：貯留エリアの空間的なモニタリング②)

- 一方で、CO<sub>2</sub>湧出海域における試験や既往知見から、低pH水塊が広がる範囲は狭いことが判明した（左図）。これを見逃さないような間隔でAUVを航行させつつ、当面の貯留エリアのスケールと想定される数km×数km程度の範囲をモニタリングすることは現実的ではないと示唆された。
- 貯留エリアの空間的なモニタリングについてはソナーを使用し、坑井等の比較的漏出リスクの高い場所やソナーによって異常が認められた場所の周囲を、狭い範囲で高密度にモニタリングする場合にセンサーを搭載したAUVを使用するという基本方針を確立した。



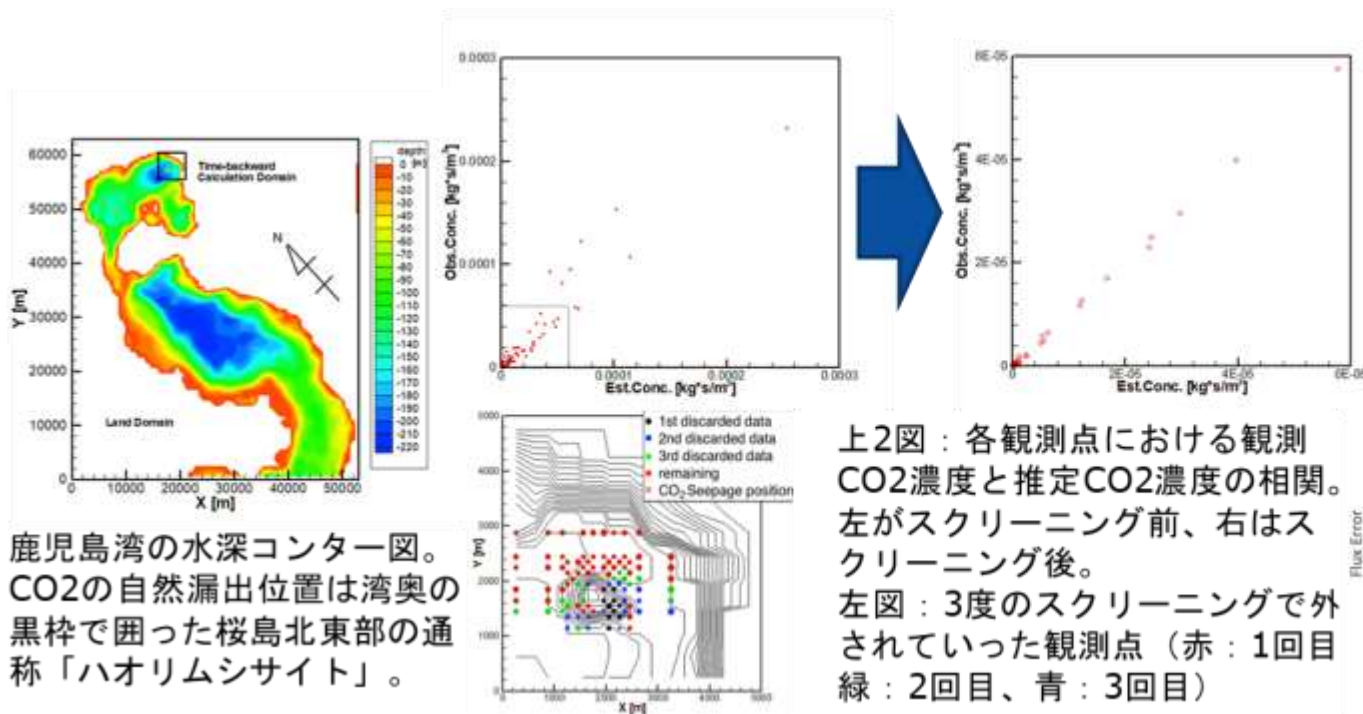
CO<sub>2</sub>湧出海域における海底面上1mにおけるpH分布  
— : AUVの航跡 (5m間隔に設定)    □ : 気泡が観測された箇所



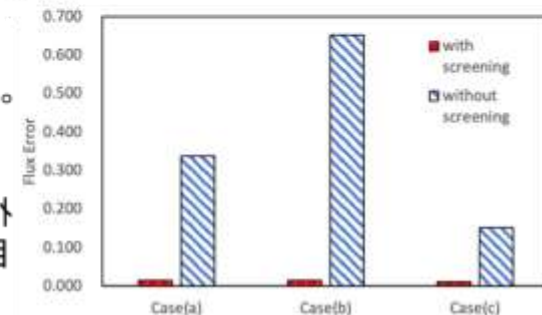
マルチビームソナーにより検知されたガス噴出地点

# (主な成果：CO2漏出位置及び量の推定法の開発)

- CO2が漏出し、流れにより拡散する場合のシミュレーションについて逆時間方向の計算を行うことにより、pH分布と流れの情報等からCO2漏出位置等を推定する手法を開発及び高度化した。
- 自然漏出CO2域におけるpH分布に関する既往知見を対象とした計算を行い、高精度に漏出位置及び漏出量の推定できることが確認されたことから（下図）、本手法はモニタリングで異常を検知した際の迅速かつ効果的な対応に寄与することが期待される。



精度を悪化させる観測点のスクリーニングの前後における推定漏出フラックスの誤差。数%あった誤差が0.1%に低減され、大幅に精度を向上させることができた。



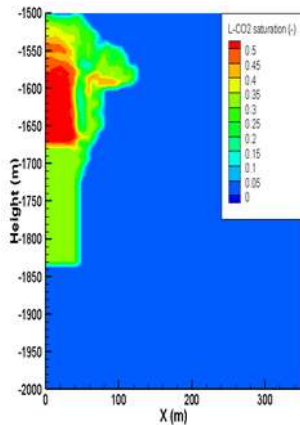
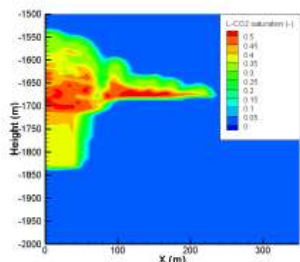
鹿児島湾の水深コンター図。CO2の自然漏出位置は湾奥の黒枠で囲った桜島北東部の通称「ハオリムシサイト」。

上2図：各観測点における観測CO2濃度と推定CO2濃度の相関。左がスクリーニング前、右はスクリーニング後。  
左図：3度のスクリーニングで外されていった観測点（赤：1回目、緑：2回目、青：3回目）



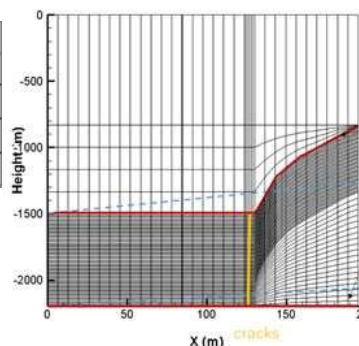
# (主な成果：CO2ハイドレート生成による漏洩抑制効果の評価)

- 室内実験やシミュレーションモデルの開発及び高度化によってCO2ハイドレート生成による漏洩抑制効果を評価できるようにした上で、さまざまな条件における漏洩抑制効果を実際に計算し（下図）、抑制効果に支配的な要因を抽出した。
- これらの成果は、CO2漏出シナリオの高精度化に寄与することが期待される。

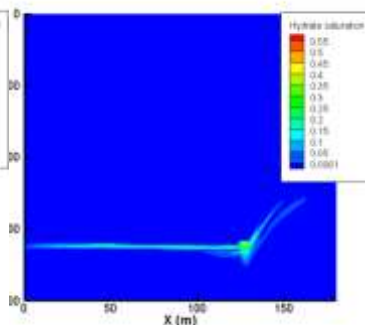
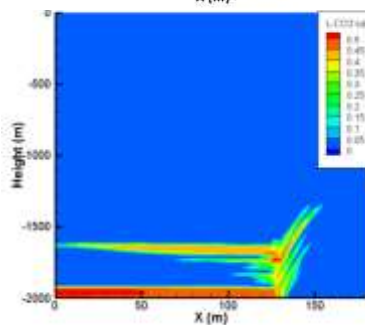


Permeability [m <sup>2</sup> ]	Leakage rate [ton/year]		
	2500	5000	10000
10 <sup>-14</sup>		case4	
10 <sup>-13</sup>	case1	case2	case3
10 <sup>-12</sup>		case5	

漏洩量と浸透率を振ったケーススタディー結果：液体CO2飽和率のコンター図。上図はcase2（450年後）、下図はcase5（200年後）。上記表のcase5以外では安定的な漏洩抑制となったが、case5では約200年後に海底面上への漏洩が見られた。なお、海底面深度1,500m、海底面温度3℃。



Perm. sand [m <sup>2</sup> ]	10 <sup>-14</sup>
Perm. crack [m <sup>2</sup> ]	2*10 <sup>-13</sup>
Perm. mud [m <sup>2</sup> ]	10 <sup>-16</sup>
Leakage rate [t/y]	10000
Leakage point [m]	-1950
Initial CO2 temp. [°C]	16.5
Seafloor depth [m]	1500
Seafloor temp. [°C]	3



海盆周辺に未検知断層がある場合のシミュレーション結果（340年後）：左上は格子分割図（x=125mに鉛直断層を仮定）、右上は計算条件、左下は液体CO2飽和率のコンター図、右下はハイドレート飽和率。ハイドレート生成により漏洩が遮蔽されている。

# (5カ年の成果)

- 実証試験規模の海底下CCSプロジェクトを想定した場合に、センサーの設置やソナーの導入によってモニタリングの時空間密度を向上させる見通しが立った。
- なお、仮にCO2を年間100万トン圧入するとした場合、下記のコストが大幅に増加しなければ1トンのCO2あたりのコストは数百円程度である。

項目	最小限ケース	標準ケース
坑井付近の海底における溶存態／ガス態CO2の漏出に関する連続モニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海底設置型連続モニタリングシステム（<u>オフラインでバッテリー搭載</u>）を作業用ROV（遠隔操作無人探査機）で1坑井につき1式設置し、<u>四半期ごとに交換及びデータ取得</u></li> <li>・ 上記作業時にROVにより海水サンプルを取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海底設置型連続モニタリングシステム（<u>オンラインでバッテリーなし</u>）を作業用ROVで1坑井につき1式設置し、<u>四半期ごとに交換。データは常時取得。</u></li> <li>・ 上記作業時にROVにより海水サンプルを取得</li> <li>・ AUVにpHセンサー等を搭載して坑井周辺の100m四方を監視（四半期に一度）</li> </ul>
坑井付近の海底における海洋生物及び生態系の状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ AUVにカメラ等を搭載して坑井周辺の100m四方を監視（5年に一度）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 左列に同じ</li> </ul>
広範囲なエリアを対象としたガス態CO2の漏出に関するモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 船舶にマルチビームソナーを搭載し、圧入CO2が存在すると想定されるエリアを含む1km四方を監視（四半期に一度）</li> </ul>

# (今後の課題)

## ■ 坑井周辺の時間的モニタリングおよび貯留エリアの空間的モニタリング

### ➤ 坑井周辺の時間的モニタリング

- 海中設置型CO<sub>2</sub>モニタリングセンサーと生物付着防止技術を組み合わせた実証評価、センサー設置期間の長期化によるコスト削減
- 中深層現場海域での実証試験測定
- センサー（pCO<sub>2</sub>, pH）の校正手法の検討

### ➤ 貯留エリアの空間的モニタリング

- 面的なモニタリングが可能なベストアベイラブルなソナーの選定、性能の把握
- ガス漏出を検知した場合の対応の検討（ROV等によるガス採取、小型船舶上でのガス組成分析、AUV等による当該箇所周辺の高密度なモニタリング手法確立）

## ■ CO<sub>2</sub>漏出位置及び量の推定法の開発

- 海底からの漏出量によっては、有限の観測点での採水による調査ではCO<sub>2</sub>の漏洩を検知できない可能性がある。今後は、既に実海域にて漏出実験が実施されている海域にて、実海域CO<sub>2</sub>漏洩実験を行うか、それができない場合は、自然CO<sub>2</sub>漏出海域にて、漏出量を確認したうえで、観測点と漏出点の距離毎にCO<sub>2</sub>濃度を観測し、このデータをもって、既知の漏出位置と漏出量の推定を実施する。

## ■ CO<sub>2</sub>ハイドレート生成による漏洩抑制効果の評価

- 今後は、貯留候補地の地層を対象に、漏洩量を振ったシミュレーションを実施し、ハイドレート化による漏洩抑制可能性を検討する。