

浮体式洋上圧入CCSに向けたDAS-FWIの適用性実証 ～残る課題と地下モニタリングの将来像～

大日本ダイヤコンサルタント株式会社

2026.1.29

本日の内容

- 本件の概要
- 取り組み内容と結果
- 課題と将来像

概要

■背景・目的

- 環境配慮型CCUS実証拠点・サプライチェーン構築事業（輸送・貯留等技術実証）では、地球温暖化対策の強化に貢献することを目的に、将来の貯留ポテンシャルの拡大を視野に入れた浮体式洋上圧入CCSの社会実装に向けて、**実用化の目途を立てる**ことを目指している。
- 海底下に貯留するCO₂のモニタリング分野では、**効率化や高度化、低コスト化を目指した技術開発**に取り組んでいる。

概要

■目標とキーワード

- 海底下に貯留するCO₂の広がりを把握する一般的な方法として反射法弾性波探査が挙げられる。これを補完し、坑井近傍の貯留層内CO₂挙動の把握精度向上（地下イメージングの向上、**貯留層CO₂飽和度と間隙圧を分離して推定する定量的モニタリングの技術確立**）を目標とする。
- 3つの要素技術を組み合わせた取り組みを通じて、目標達成を目指している。
 - 反射法弾性波探査と同じく弾性波を扱い、坑井を利用した垂直弾性波探査 **VSP (Vertical Seismic Profiling)**
 - 弾性波形全体の情報を用いP・S波の速度構造を捉え、精度の高い地下イメージを得る**解析手法FWI (Full-Waveform Inversion)**
 - データ取得に光ファイバーを活用した **DAS (Distributed Acoustic Sensing)**



* Geminiで作成

概要

■ 取組の流れと成果

➤ フェーズ1（平成28年度～令和2年度）「環境配慮型CCS実証事業」

- P波・S波の物性情報を用いた岩石物理モデルの検討、VSP形式のシミュレーションデータを用いたFWIの机上検討
➡岩石物理モデルとVSP-FWIを組み合わせた定量的モニタリングの有用性の提示した。

➤ フェーズ2（令和3年度～）

- DAS-VSPの実データ取得、取得したDASデータによるFWI解析の試行
➡DASの実データによりFWIの適用が可能であることを示した。

フェーズ1：机上検討	フェーズ2：実用性実証 【現段階】	今後：実用化に向けた実証 【残る課題の解決】
➤地下を伝わるP波・S波の物性情報を用いた岩石物理モデルを検討し、CO2飽和度と間隙圧を定量的にモニタリングする方法の提示	➤DAS-VSPの実データを取得するために、陸域フィールドの既存坑井を利用したデータ取得	➤海域のCO2圧入箇所でのDAS-VSP-FWIの試行
➤CO2圧入前後の条件でVSPの模擬データを作成し、FWI解析によりCO2飽和度と間隙圧の変化を再現	➤地下イメージングの点からDASデータの実用性についての確認	➤上記試行結果に対し、観測井（評価井）でのCO2飽和度や間隙水圧モニタリング結果とを対比し検証
● 岩石物理モデルとVSP-FWIを組み合わせ、定量的にモニタリングする方法の有用性の提示	➤DASデータのFWI適用性の点から、DAS-FWI解析試行により、P波・S波の速度構造把握が可能か確認 ● DAS-VSP-FWIの組み合わせで速度情報を抽出できることを確認し、より実用的な視点で有用性を提示	● 社会実装していくためには、CO2圧入の影響による地下の変化を実際に定量的に捉えられるか確認が必要

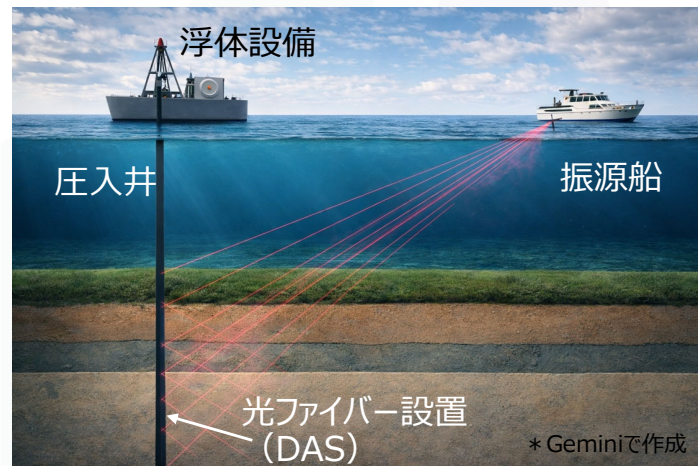
取組の方針

モニタリングに向けた着目点

- 地下モニタリングのうち、CO2の位置及び範囲のモニタリングにおいて反射法弾性波探査を補完 : **VSP**に着目
- 観測井の多数設置は費用面も含め制約が多いと想定されるため、主に圧入初期での補完 : **圧入井**を活用
- 長期モニタリングに備え、資機材は長期安定性やスペース性を有し、維持管理面でも有利な機器 : **DAS**を活用
- より高い精度で地下イメージを行い、弾性波データを基に物性データの変化を抽出する手法 : **FWI**を選定

CCSにおける主要な地下モニタリング一覧

主な地下モニタリング対象	主な項目	備考
温度、圧力	坑口、孔底等の温度&圧力	・ 坑井
坑井健全性	アニュラス圧力	・ アニュラス : 坑井内の間隙
地下の揺れ(振動)	微小振動 / 地震活動	・ 圧入の影響による微小振動の発生有無等 ・ 周囲の地震活動監視
CO2の位置及び範囲	反射法弾性波探査	・ 貯留層内及び区域外のCO2移動
	VSP	

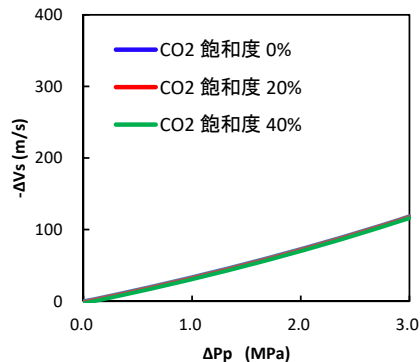


海域におけるVSPイメージ

机上検討 (シミュレーションによる間隙圧変化と飽和度変化のイメージング)

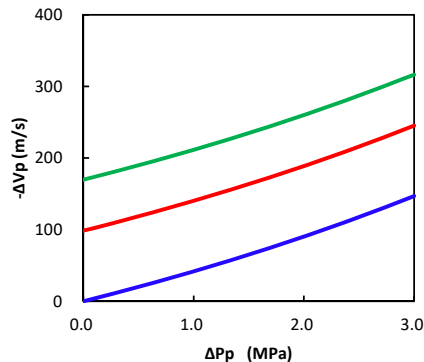
- シミュレーションを実施し、間隙圧やCO₂飽和度の変化を抽出できるか確認・検討を行った。
 - P波速度とS波速度の変化から、間隙圧とCO₂飽和度を分離できることを示した (左下図)。
- 模擬のモニタリングデータを用いて、FWI解析の問題点や有用性について検討を行った。
 - 理想的な条件で実施した結果、間隙圧や飽和度の变化抽出を確認し、**FWI解析の有効性を示した。**

S波速度の変化



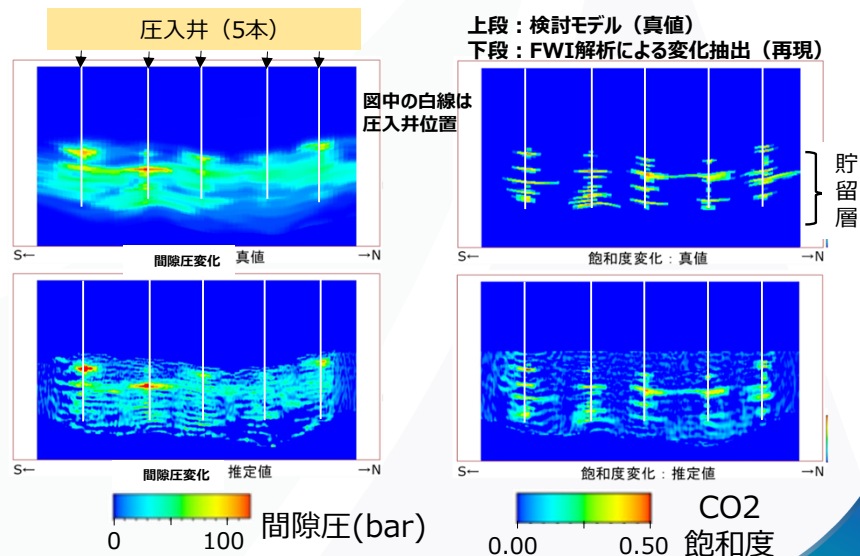
圧力により速度が変化するが、CO₂飽和度にはほぼ影響しない

P波速度の変化



圧力とCO₂飽和度の影響により速度が変化する

間隙圧上昇 (有効応力低下) とCO₂飽和度が弾性波速度に及ぼす影響



シミュレーションによる物性変化の再現 (FWIの有効性確認)

実用性検討 (現地計測試験)

- 実フィールドにて反射法弾性波探査、DASセンサーを用いたVSP探査を行った。【フィールド：北海道三笠市】
- 取得したデータを用いて地下のイメージングを行うとともにFWI解析を試行し、DAS-FWIの適用性について確認した。

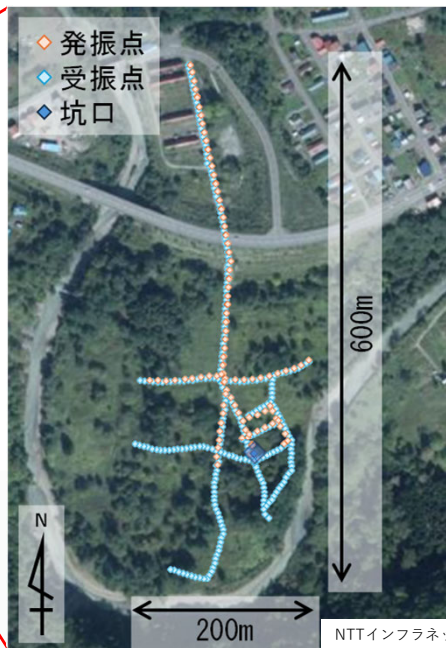


現地位置図

測定種目

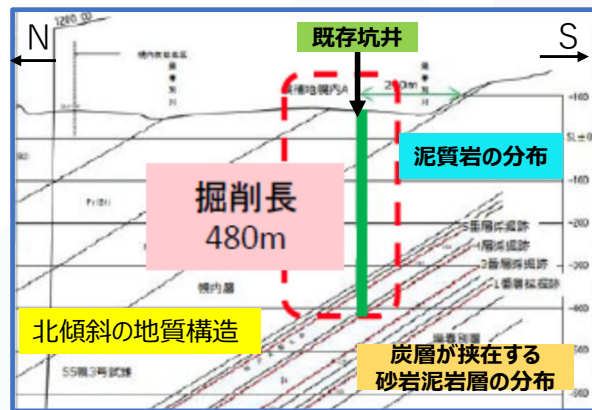
地表反射法弾性波探査

DAS-VSP



NTTインフラネットに加筆

三笠フィールド

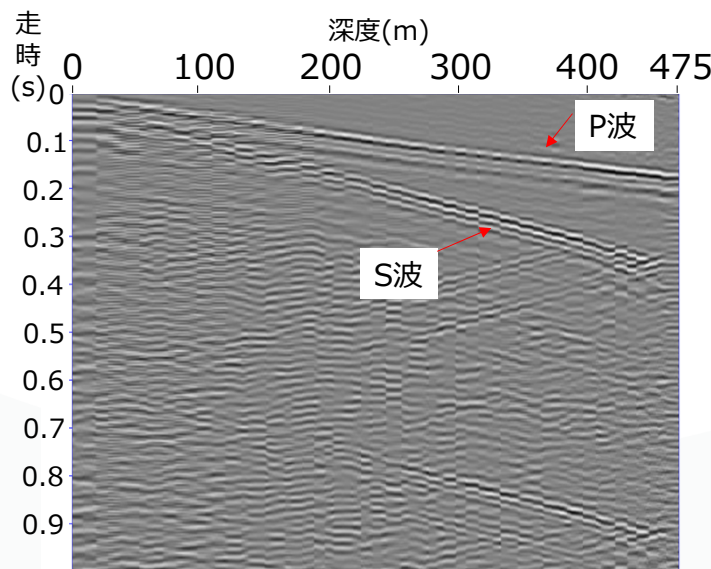


既存地質情報

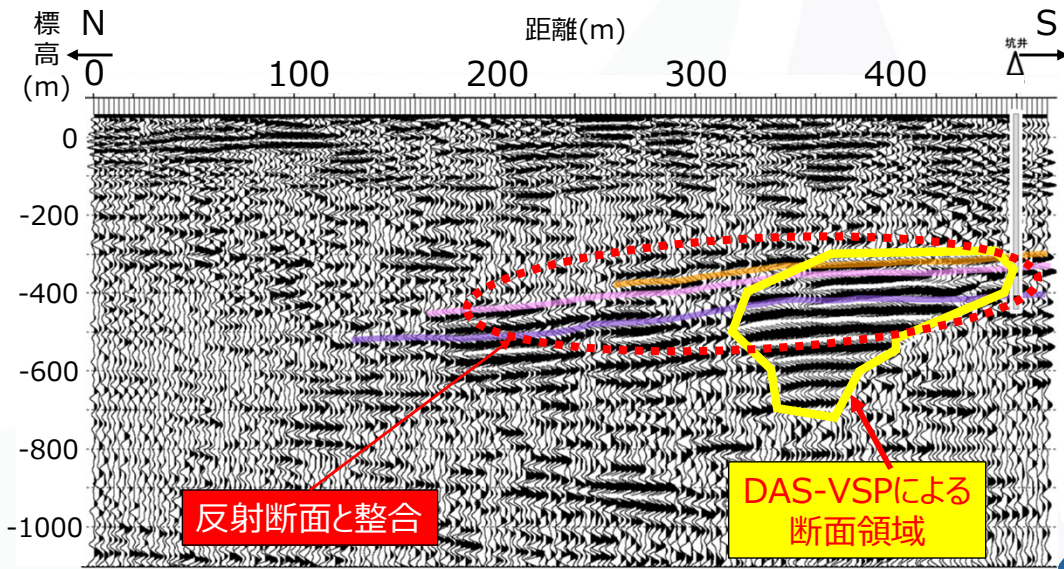
出典：2022年3月 三笠市CO2 地下固定研究業務受託コンソーシアム
「2021年度三笠市CO2 地下固定研究業務」から引用加筆

実用性検討 (従来法イメージングによるDASセンサーの品質確認)

- DASにより取得したデータの品質は、従来データ（ハイドロフォン）と同等であることを確認した。
- 取得データを用いてVSP処理を行った結果、反射法弾性波探査で得られた地質構造と整合していることを確認した。また、地質情報で確認されている北傾斜の構造とも調和的な結果であった。



DAS測定データの一例

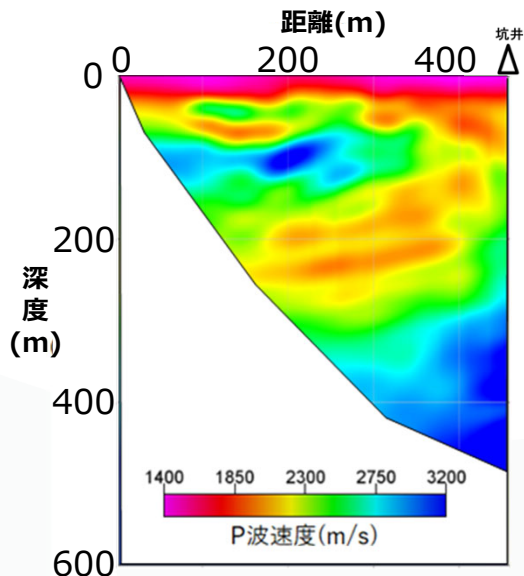


反射法弾性波探査+DAS-VSP結果

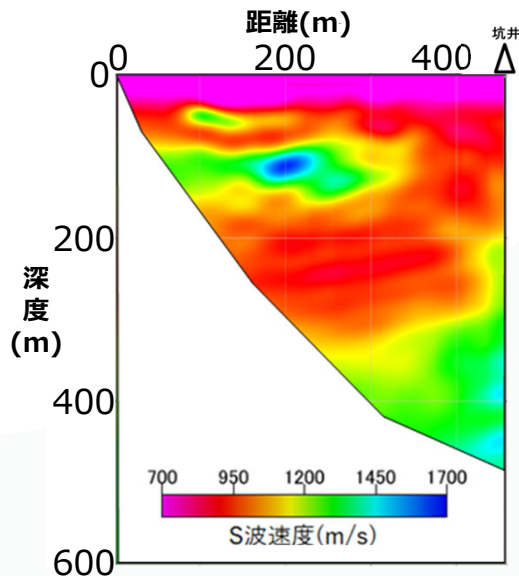
実用性検討 (DAS-FWIの適用性実証：FWI結果)

- FWI解析により、詳細な速度構造分布が得られた。
- 解析結果では、P波・S波ともに北傾斜の傾向を示し、現地で確認されている地質状況と整合的であった。

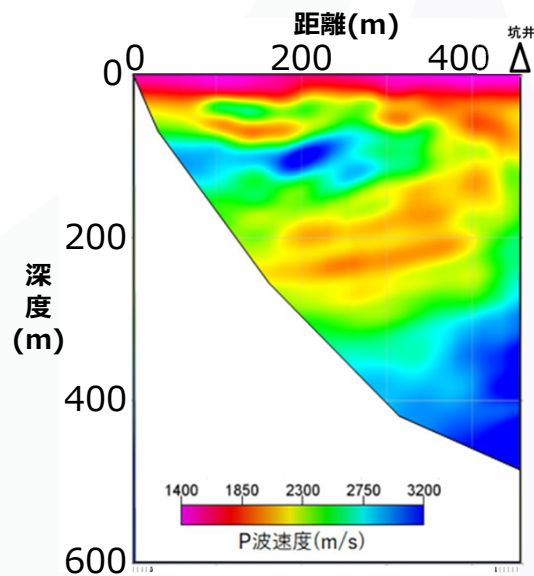
FWI解析結果



P波速度構造



S波速度構造



FWI解析結果（P波）と
VSPイメージング結果

実用性検討（得られた知見と残る課題）

■ データ取得：データの再現性の確保

- 時系列変化を捉えるモニタリング手法として観測される波形全体の情報を使った高度な解析手法を用いるため、時間軸上でより再現性の確保を前提としたデータ取得計画が必要（例：常設化、使用機器や設置法、計測環境の統一）

■ FWI解析段階での精度向上

- 抽出の難しいS波の抽出精度向上が必要（例：前処理の工夫など）



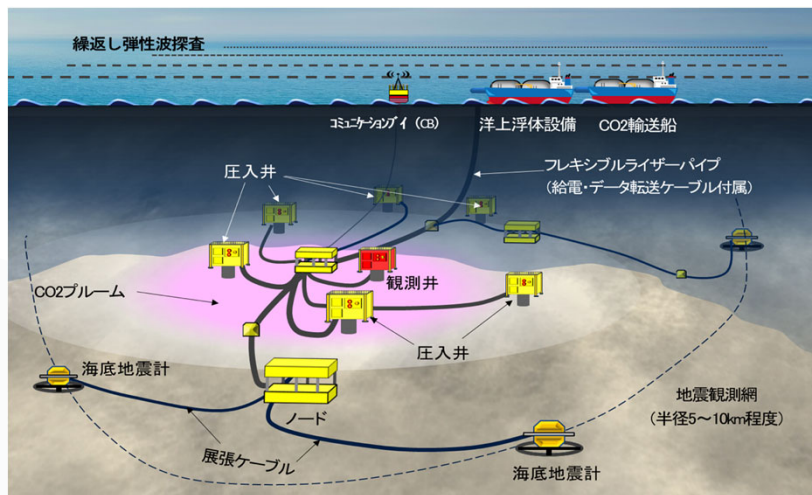
■ 残る課題：CO2圧入サイトでの実証

- CO2圧入サイトでDAS-VSPデータの蓄積
- サイトデータでのFWI解析の試行
圧入に伴う速度変化を抽出し、圧入規模に対する検出能力の関係等を実データで把握
- 定量評価に必要な岩石物理モデルの最適化
岩石物理モデル・・・速度情報を基にCO2飽和度・間隙水圧の変化を推定するために必要
- 直接観測した地下情報による検証
観測井等に到達したCO2や間隙水圧変化を直接観測し、本手法の結果と比較して検証

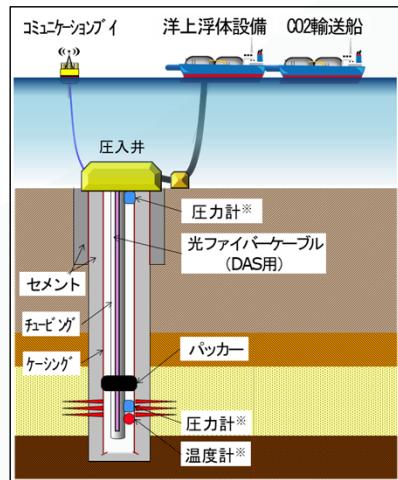
浮体式洋上圧入CCSにおける地下モニタリングイメージと課題

- 給電・通信機能を有する浮体施設を起点とした、圧入井・観測井、ノード、海底地震計等の配置
- 海底に設置された機器は、その立地環境から直接的なアクセスが容易ではない。そのため、長期運用を前提とした高度な実装技術が必要となることが課題
 - モニタリングの継続性の確保・・・機器・センサー等の長期安定性・冗長性の考慮（例：センサーや電源のバックアップ）
 - 漁業活動など他の海域利用との共生・・・ケーブル類の埋設などの海底設置における工夫
 - 万が一の災害、地震・海底地すべり等によるケーブル・機器の破損・紛失時の復旧等

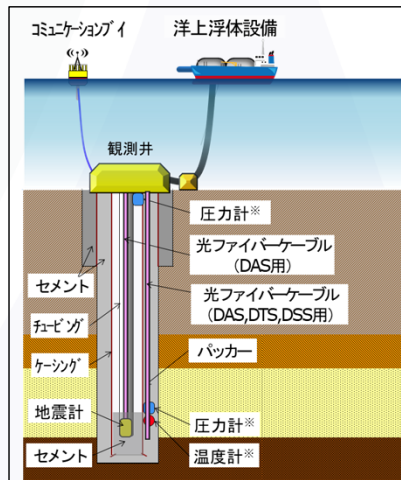
ROV/AUV等のロボ
テックス技術の活用



沖合での海底常設型の地下モニタリングイメージ



圧入井の例

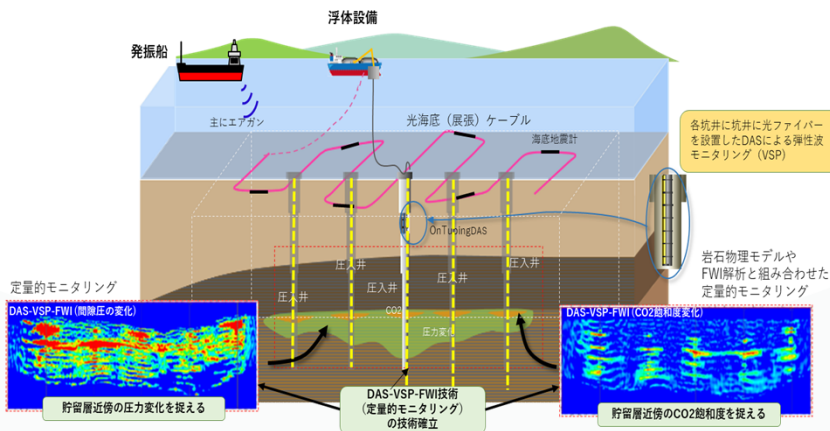


観測井の例

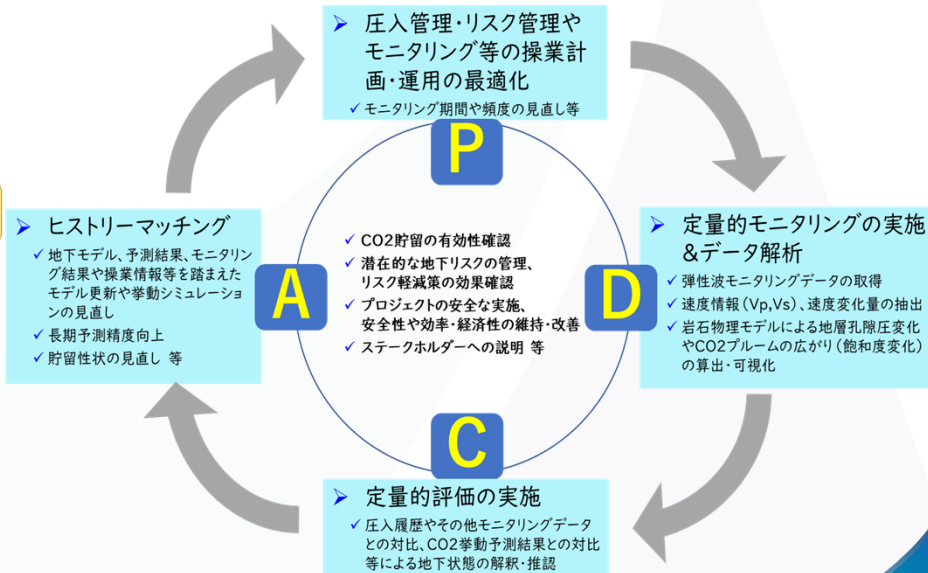
浮体式洋上圧入CCSにおける地下モニタリングの将来像

■ 本件の取り組みの確立により期待される成果

- 定量的モニタリングとしてCO₂圧入の影響範囲（CO₂飽和度や間隙水圧の変化）の可視化情報は、様々なデータと組み合わせた地下の監視に活用【弾性波の振幅変化を捉える方法との併用によるモニタリングの付加価値向上】
- 的確な地下状態の把握や評価・予測につなげることで、より安全な操業に寄与できることを期待



定量的モニタリングイメージ



モニタリング情報を活用した運用イメージ

まとめ

- CCSの地下モニタリングとして、圧入井近傍のCO₂挙動をよりの確に捉えられる「**DAS-VSP-FWI**」手法の開発を進めている。
- **DASの実データを用いたFWIの適用性を確認**する目的で、陸域の既存坑井にて**データの取得と解析の試行を実施**した。
- 結果
 - DASデータの品質は良好であり、VSP処理により既知の地質構造や反射法探査と整合する北傾斜のイメージが得られた。
 - DASデータを用いたFWIにより、北傾斜の反射イメージに調和的なP波・S波の速度構造分布を得ることができ、**DASデータによるFWI適用の有効性を確認**した。
- 課題
 - 継続的なモニタリングには**データの再現性**が不可欠であり、使用機器や海象など**計測条件を可能な限り統一**することが必要である。解析では、特に**S波の抽出精度向上が重要**と考えられ、各サイトのデータ特性を踏まえた前処理などの工夫が必要と考える。
- 今後への期待
 - 実際の圧入サイトにおけるデータ蓄積と解析の試行、物性情報に基づく定量的評価および実測データを用いた検証を通じた技術実証により、技術の確立を目指す。

ご清聴ありがとうございました