

第20回 地圏資源環境研究部門成果報告会  
第35回 地質調査総合センターシンポジウム  
2022年2月10日開催

# 重力・自然電位を用いた 低コストモニタリング技術の開発

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
地圏資源環境研究部門 CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ  
(兼) ゼロエミッション国際共同研究センター 環境・社会評価研究チーム

堀川 卓哉

# 発表内容

## ■ CO<sub>2</sub>地中貯留における受動的モニタリングの概要

## ■ 高精度重力モニタリング

- 重力モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング
- 重力モニタリングの他サイトへの展開に向けた検討

## ■ 坑井近傍での自然電位モニタリング

- 自然電位モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング

## ■ まとめと今後の展望

# 発表内容

## ■ CO<sub>2</sub>地中貯留における受動的モニタリングの概要

## ■ 高精度重力モニタリング

- 重力モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング
- 重力モニタリングの他サイトへの展開に向けた検討

## ■ 坑井近傍での自然電位モニタリング

- 自然電位モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング

## ■ まとめと今後の展望

# CO<sub>2</sub>地中貯留における地球物理モニタリング

CO<sub>2</sub>地中貯留における地球物理モニタリングは  
繰り返し弾性波探査(反射法)が主要な方法。

→ プルームの広がりを高分解能に把握

一方で、

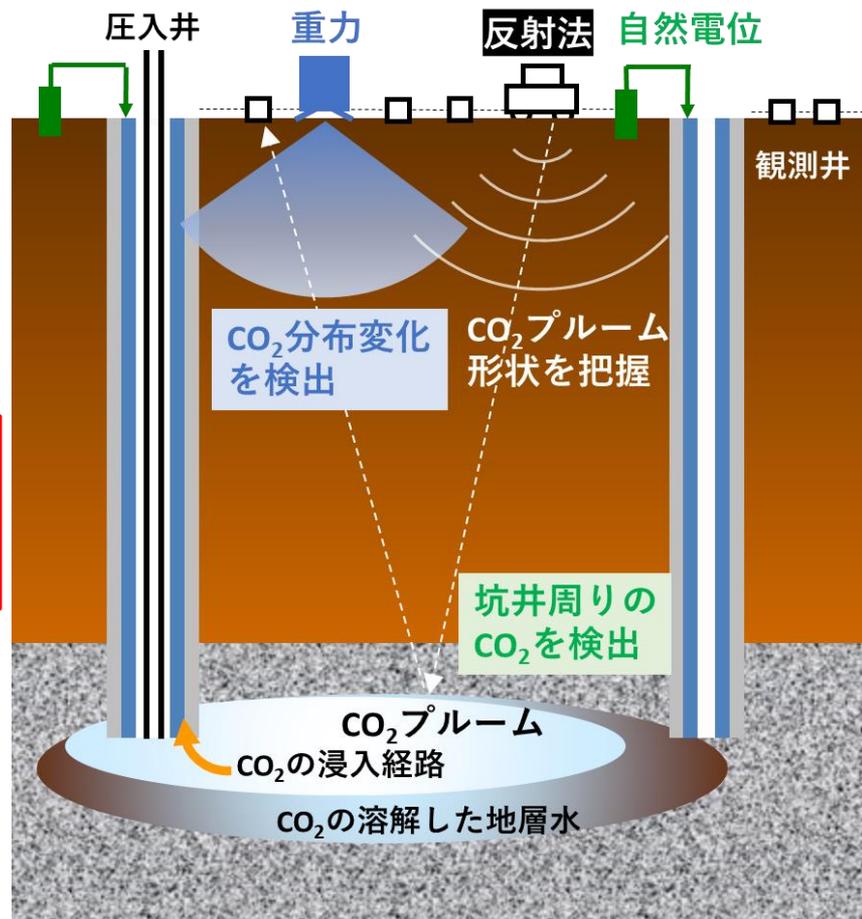
- 高コスト・高負担
- 圧入終了後のCO<sub>2</sub>分布変化は小さい

特に圧入終了後について、貯留の健全性を監視する他のモニタリング手法と組み合わせ、反射法の回数を減らすことが総コスト低減に繋がる。

反射法を補完するモニタリング手法の例

重力: CO<sub>2</sub>分布変化(漏洩含む)

自然電位: 坑井近傍のCO<sub>2</sub>



# 重力連続モニタリングによる低コスト化の例

- 重力モニタリングのコスト:

- 超伝導重力計(2台):9,400万円 (4,700万円×2台)
- 気象観測設備等その他設備費用:600万円
- 保守費用:1,500万円/年
- 10年毎に重力計交換と仮定 (2019年時点で8年間の運用実績 (Fores et al. 2019))

- 繰り返し3D反射法弾性波探査のコスト:

- 1回あたり5億円と仮定
- 実施間隔3、5、10年で試算
- 反射法のコスト:実施間隔に依存
- 最初期を除き、重力モニタリングはコスト面で有利
- **モニタリング期間が長くなるほど、重力モニタリングと併用することがコスト面で重要になる。**

(徂徠ほか, 2021)

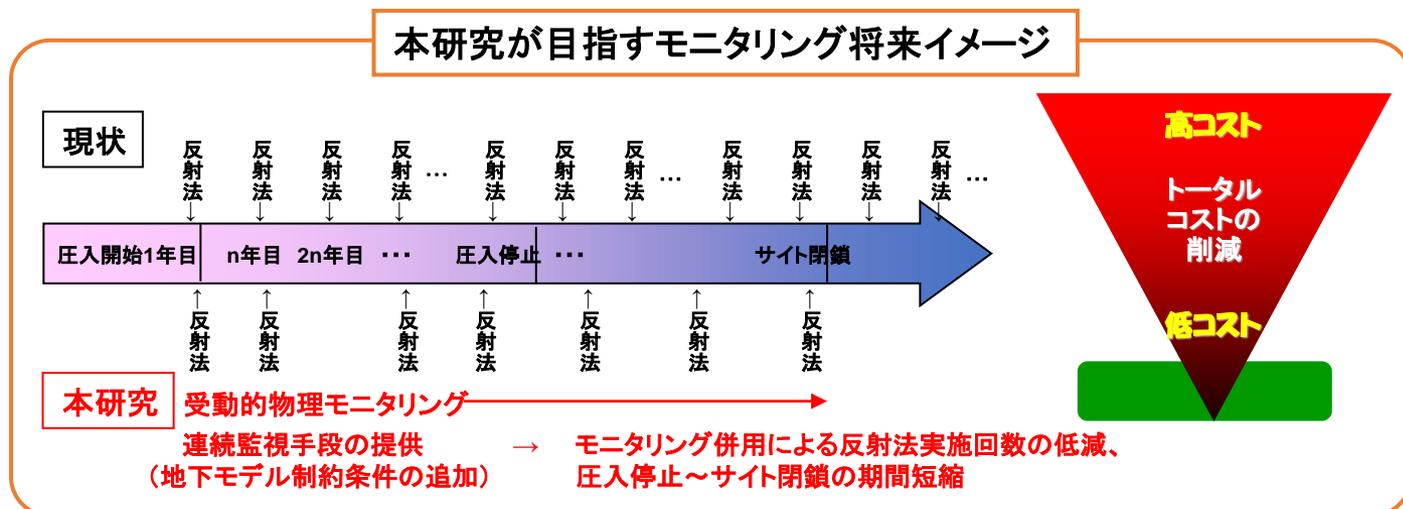
# 受動的モニタリング研究の概要

## ➤ モニタリング技術の選定条件

- 特に圧入終了後の長期間モニタリングに有効(漏洩リスク検知など)
- **地表からの連続観測**が可能(低負担,常時監視)
- 反射法と比較して**低コスト**
- (沿岸域貯留への適用可能)

受動的手法

弾性波探査(反射法)を補完する長期連続モニタリングシステムとして、  
受動的物理モニタリング技術を開発し、その適用性を検証する。



# 反射法を補完する地球物理モニタリング手法

探査手法	主な探査対象	備考
<b>受動的手法</b>		
重力	密度・CO <sub>2</sub> 分布	坑内重力観測では貯留域の厚さなど
自然電位	坑井近傍のCO <sub>2</sub> (貯留層内の流動)	←酸化還元反応 ←流動電位
微動観測 (AE観測等の常設観測)	震源位置・発震機構	※ 地震波干渉法などによる貯留域形状
測地(GPS, InSAR等)	歪み・傾斜	沿岸域への適用性?
物理検層	CO <sub>2</sub> 分布など	坑井周辺・高負担
<b>能動的手法</b>		
弾性波探査(VSP等)	CO <sub>2</sub> 分布など	VSPは坑井周辺
電気探査・電磁法探査	CO <sub>2</sub> 分布など	

# 産総研におけるCO<sub>2</sub>地中貯留モニタリング研究の略歴

- 初期: 小規模なトライアル ~FY2009
  - 国内他機関の実験坑: 夕張 2006 など
  - SWP Phase II : Anethテストサイト(米国ユタ州) 2007 Nov. ~2010
  - 産総研つくば 2009、幌延 2010
- 経済産業省受託研究 FY2010~FY2015
  - 米国テキサス州Farnsworthテストサイトにおける高精度重力/SP/AEモニタリング等
  - 最適モデリング技術の開発
- 二酸化炭素地中貯留技術研究組合
  - FY2016<sup>\*</sup>~FY2020
    - 経済産業省受託研究「安全なCCS実施のためのCO<sub>2</sub>貯留技術の研究開発」のうち「CO<sub>2</sub> 長期モニタリング技術の開発」(FY2017~)
    - 苫小牧テストサイトにおける高精度重力モニタリング(重力モニタリングの運用方法策定,他サイト展開に向けた検討)
  - FY2021~
    - 経済産業省受託研究のうち「自然電位による漏洩リスク検知」(FY2021~)
    - 苫小牧テストサイトにおける坑井自然電位(SP)モニタリング

# 発表内容

## ■ CO<sub>2</sub>地中貯留における受動的モニタリングの概要

## ■ 高精度重力モニタリング

- 重力モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング
- 重力モニタリングの他サイトへの展開に向けた検討

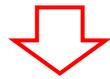
## ■ 坑井近傍での自然電位モニタリング

- 自然電位モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング

## ■ まとめと今後の展望

# 重力モニタリングの原理

- 重力: 周囲の質量からの万有引力の鉛直成分  
地球上の平均的な重力値  $g \sim 9.8 \text{ m/s}^2 = 980 \text{ Gal}$



(Gal(ガル)=1 cm/s<sup>2</sup>)

重力の時系列変化を監視することで、CO<sub>2</sub>地中貯留に伴う地下の密度変化を検知(重力モニタリング)

- 地中貯留における重力変化はμGalオーダー  
(地球の重力の約10<sup>-9</sup>倍)  
→ 重力の微小変化を検知する必要あり
  - 信号源に近づく  
海底下貯留 → 海底重力計  
鉛直方向 → 坑内重力計
  - 観測精度, 感度の向上  
超伝導重力計(常設)  
計測手法, データ処理手法の工夫

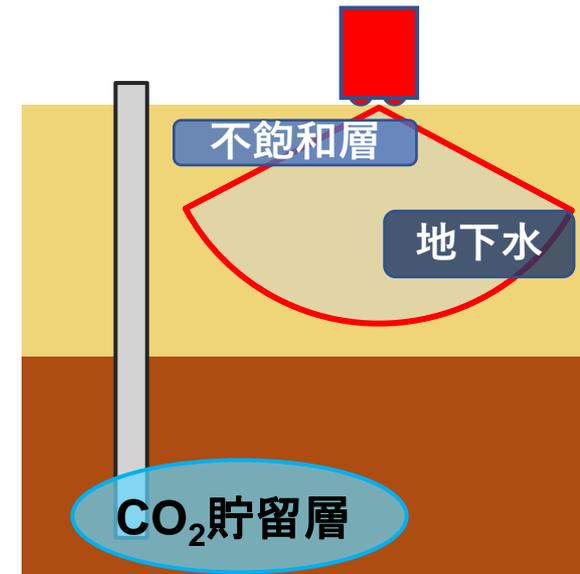
重力計



万有引力:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} = mg$$

$$\text{重力: } g = \frac{GM}{r^2}$$



# CCSにおける重力モニタリングの海外事例

## ➤ Sleipner, Norway

- 繰り返し海底重力測定
- CO<sub>2</sub>地中貯留による重力変化を検知  
(5.8 Mtで~12 $\mu$ Gal)
- 反射法解析と組み合わせ  
密度推定  
→ 貯留層解釈に貢献

(Alnes et al., 2011等)

- 他にCranfield, USAなどでも実施例(坑内重力計)
- いずれも、間欠的・高負担な観測手法  
→ 圧入終了後の長期モニタリングには不適

**高感度な超伝導重力計による定点連続観測**

# 苫小牧における重力モニタリング

## ➤ 風雪・波浪等の過酷な環境下における長期連続観測システムの構築

- 屋外用エンクロージャー
- 塩害対策（空調、基板コーティング）
- 防風柵の設置

6年以上の連続観測を達成  
(2015年～)

## ➤ 高精度モニタリングのためのデータ処理手法開発

### 補助データ

- 地下水位: 観測井掘削
- 地盤変動: GNSS測量
- 降雨・風速: 気象センサー
- 高精度気圧計
- 土壌水分計



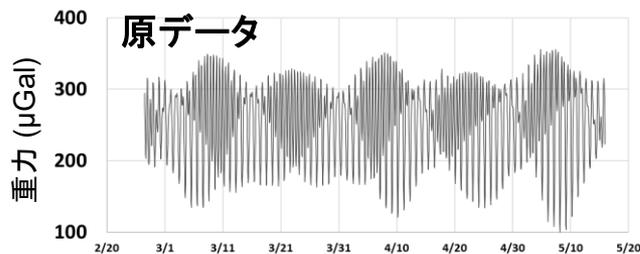
# CO<sub>2</sub>地中貯留に適したデータ処理手法開発

ノイズ	振幅 (μGal)	推定・除去方法
短周期ノイズ (風・波浪・微動等)	~200	ローパスフィルタリング
長周期潮汐・極運動	~4, ~2	理論値(Tamura 1987 など)
短周期潮汐	~150	Baytap-G(Tamura et al. 1991)
気圧一次応答	~10	
地下水位変動 (降雨等含む)	~8	地下水位の線形関数

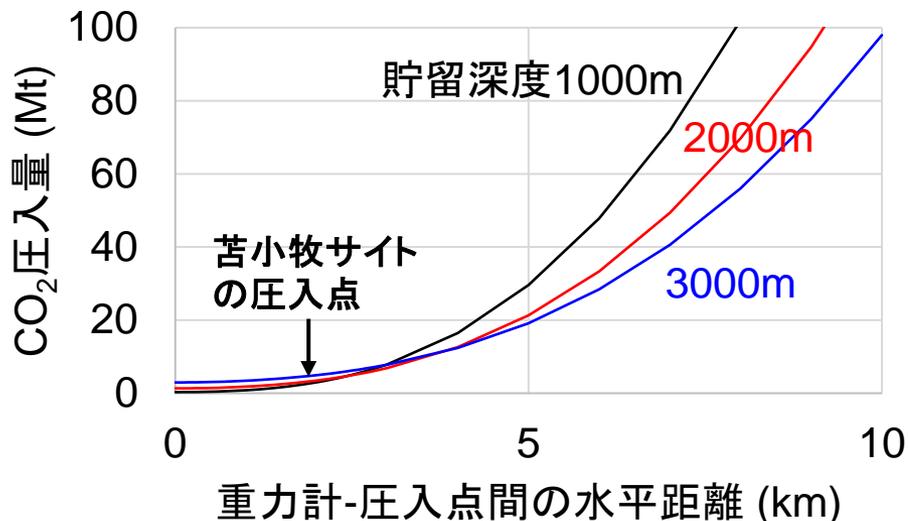
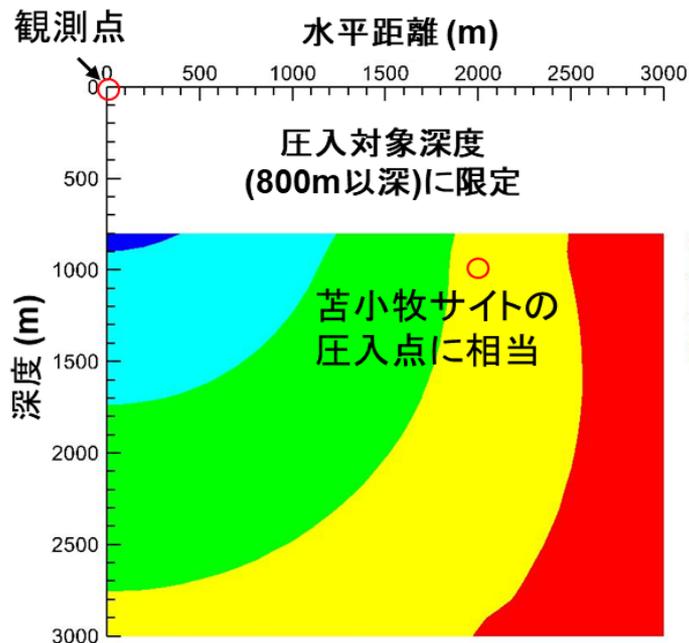
- 高精度モニタリングのためのノイズ除去手法を開発
- 長期観測データ(>800日)に対して有効性を確認

高ノイズレベルの沿岸域においても**1μGal程度の重力変化は検知可能**

(Goto et al., 2019)



# 圧入時の重力検知への適用性 (観測点で $1\mu\text{Gal}$ の変化が生じる条件)



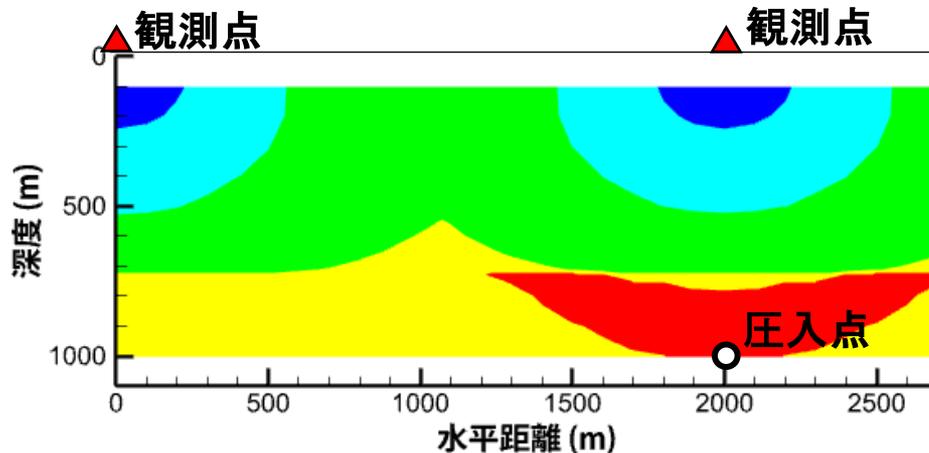
(※厚さ40mの円柱形プルームを仮定。  
温度圧力条件は苦小牧サイトの条件に基づく。)

- 重力モニタリングの適用性は深度・水平距離・圧入量等に依存**  
 圧入点が観測点の真下であれば数10万トンの圧入で検知可能  
 苦小牧サイト(観測点ー圧入点が水平2km)では200~300万トン以上

**CO<sub>2</sub>圧入量と見込まれる重力変化から最適な重力計配置を設定する必要**

# 適用性拡大に向けた提案： 複数台の超伝導重力計を用いたモニタリング

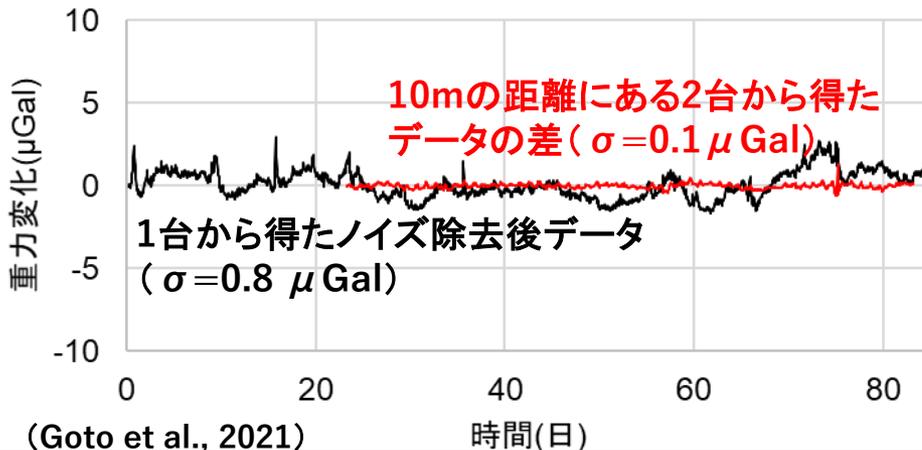
- 複数観測点によるモニタリング可能領域の拡大



$\Delta m_{CO_2}$	$\Delta m_{CO_2} / m_{\text{圧入量}} (\%)$
1	10 (圧入量が10Mtの場合)
0.1	1
0.01	0.1
0.001	0.01

面的に複数の観測点を設けることで、  
モニタリング可能領域を拡大できる  
→ 漏洩の早期検知にも有効

- 複数台の重力データの差分による検知能力の向上



- ノイズ環境が同様の複数点で得られるデータの差をとることにより、  
容易かつ正確にノイズを除去
- 検知能力が大幅に向上する可能性

# 発表内容

## ■ CO<sub>2</sub>地中貯留における受動的モニタリングの概要

## ■ 高精度重力モニタリング

- 重力モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング
- 重力モニタリングの他サイトへの展開に向けた検討

## ■ 坑井近傍での自然電位モニタリング

- 自然電位モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング

## ■ まとめと今後の展望

# 自然電位 (SP) の概要と測定例

## ➤ 自然電位 (SP: Self Potential):

地表・坑内などで自発的に存在する電位差  
電極を設置し電極間の電位差を測定

- 発生要因: 流動電位, 酸化還元反応, 熱電効果, 拡散電位など  
→ CO<sub>2</sub>地中貯留では酸化還元環境の変化に伴うSP変化が大きい

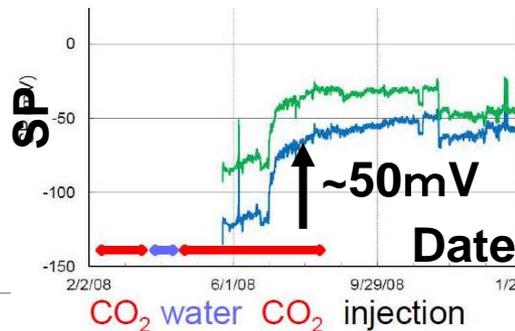


## ➤ CO<sub>2</sub>圧入に伴うSP変化の例 (Aneth, USA)

(Nishi and Ishido, in press)

- 圧入井, 観測井近傍に複数電極を埋設
- CO<sub>2</sub>圧入に伴い圧入井近傍の電極の電位変化 (~50mV)

CO<sub>2</sub>圧入による地下深部の酸化還元環境の変化が地表の電位変化となって現れる

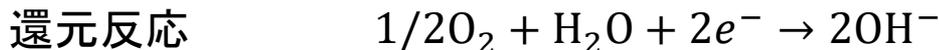


# 自然電位 (SP) モニタリングの原理

## ➤ 酸化還元反応 (ジオバッテリー効果)

- 導体 (坑井など) 周囲の環境の違いにより、酸化・還元反応が導体表面の異なる領域で生じる → 化学電池 (バッテリー)

帯水層中の坑井 (鉄) の場合

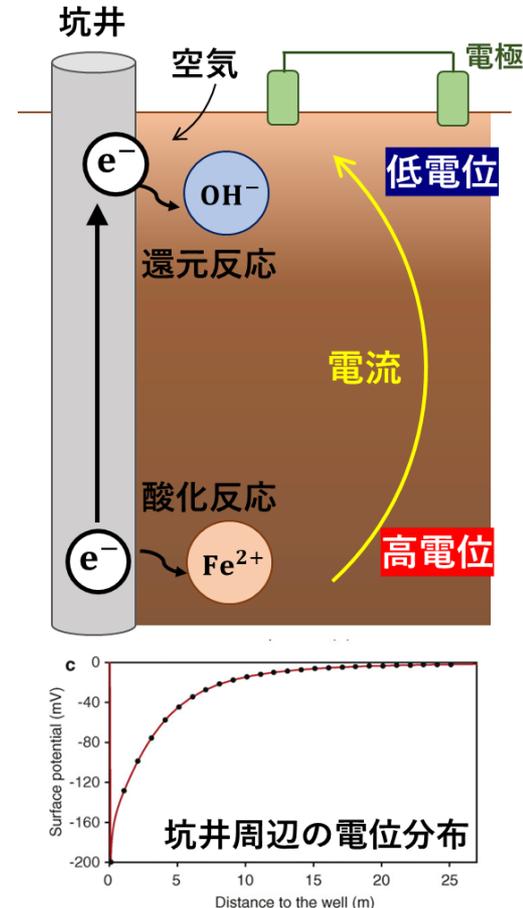


- 通常、坑井を中心に -数100mV の負異常
- $\text{CO}_2$  圧入・移動・接近等によって井戸深部の酸化還元環境が変化 (pH,  $\text{HCO}_3^{-}$  etc.)



坑井電位, 地表電位の変化

(※ 数値計算では  $\text{CO}_2$  圧入により数10mV以上の電位上昇)



**SPが坑井周辺の $\text{CO}_2$ を検知するセンサーとなる可能性**

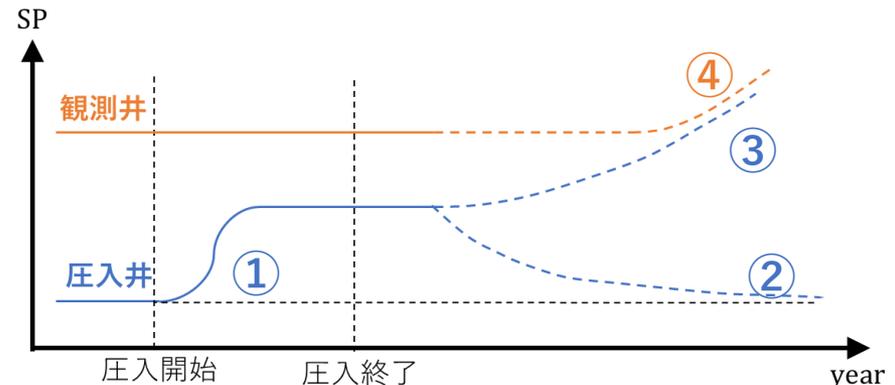
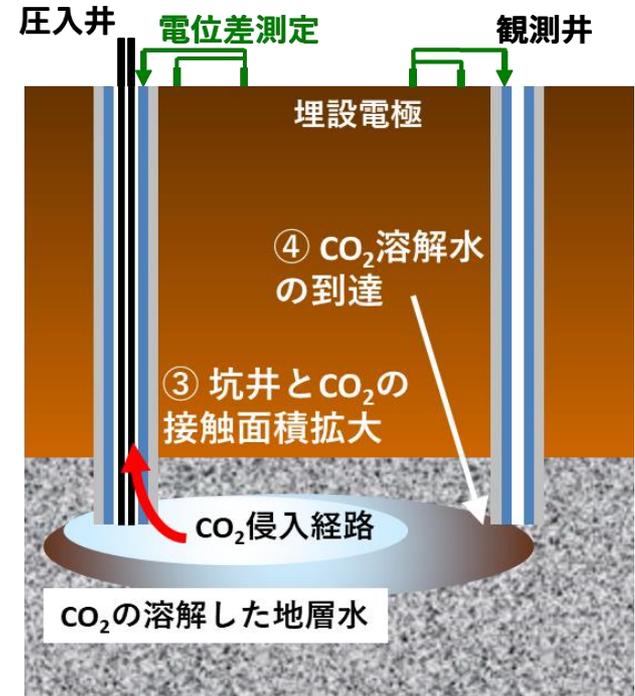
# CCSにおける自然電位モニタリングの運用イメージ

## ➤ 目的・利点

- 坑井近傍のCO<sub>2</sub>の賦存状態をモニタリング  
→ 坑井・廃坑井からの**漏洩リスク早期検知**
- 極めて**低コスト**かつ維持管理が**容易**な連続観測技術  
→ 圧入停止後の長期間モニタリングに有効

## ➤ 期待されるSP変化

- ① CO<sub>2</sub>圧入に伴う地層水のpH低下, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等の存在
- ② CO<sub>2</sub>溶解水の拡散
- ③ CO<sub>2</sub>溶解水と坑井の接触面積増大 (漏洩リスク?)
- ④ CO<sub>2</sub>溶解水の観測井到達

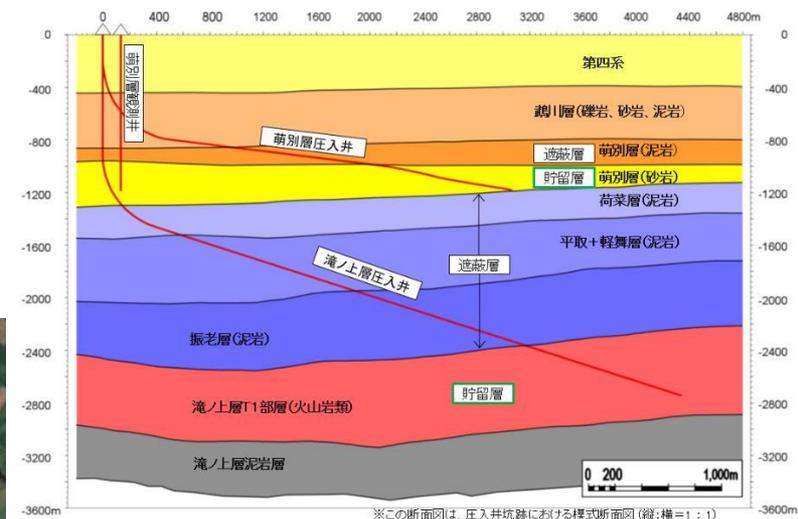


# 苫小牧における自然電位モニタリング

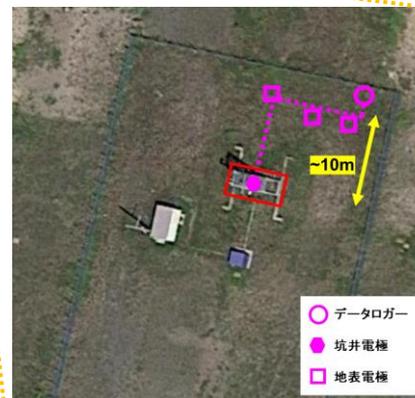
## ➤ 苫小牧サイトにおいて実坑井を用いたSPモニタリングを開始

深度の異なる圧入井, 観測井 各2坑

- 萌別層 圧入点深度 約1000m
- 滝ノ上層 圧入点深度 約2200m



出典：日本CCS調査株式会社

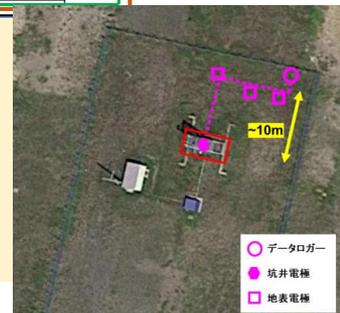
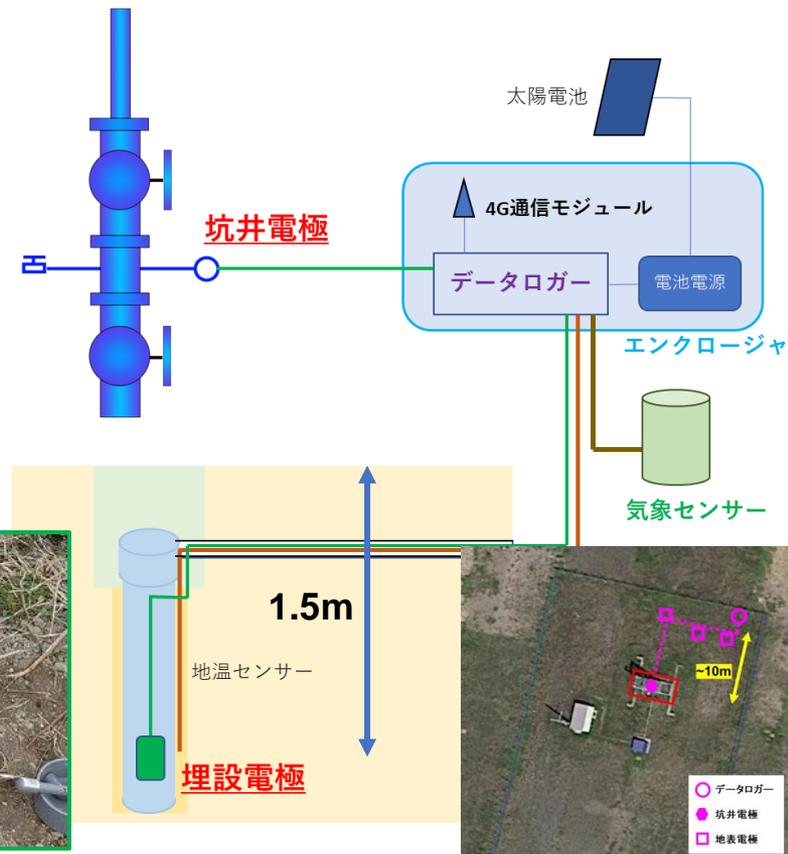


# 苫小牧における自然電位モニタリング

## ➤ 本モニタリングの目的

- 長期連続観測システムの構築
- CO<sub>2</sub>圧入後のSP変化を監視
- ノイズ要因の特定、除去手法の開発

ラボ実験でのSP変化検証やシミュレーションによる検討などもあわせて実施



# 発表内容

## ■ CO<sub>2</sub>地中貯留における受動的モニタリングの概要

## ■ 高精度重力モニタリング

- 重力モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング
- 重力モニタリングの他サイトへの展開に向けた検討

## ■ 坑井近傍での自然電位モニタリング

- 自然電位モニタリングの原理
- 実サイトにおけるモニタリング

## ■ まとめと今後の展望

# CCSにおける受動的モニタリング まとめ

- **CCS事業のコスト低減のため、反射法を補完する受動的モニタリングの導入は重要。**
  - 高精度重力モニタリング
    - 超伝導重力計を用いた長期モニタリング技術を確立し、他サイト展開も含めた運用方法を策定。
    - 沿岸域貯留における重力計の海底設置等、ハード面の進歩が望まれる。
  - 坑井における自然電位モニタリング
    - 苫小牧サイトの坑井を用いての連続観測を開始。
    - 観測システムの安定性確認、ノイズ処理・CO<sub>2</sub>起因の信号抽出手法検討。



**CO<sub>2</sub>圧入終了後を見据えた低コスト連続モニタリング技術の確立**

# ご清聴ありがとうございました

苫小牧における観測は、日本CCS調査(株)・苫小牧市・苫小牧港管理組合・北海道開発局  
苫小牧港湾事務所にサポートしていただきました。

本研究開発の多くは、産総研が参加する二酸化炭素地中貯留技術研究組合が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より受託した「CCS研究開発・実証関連事業／安全なCCS実施のためのCO<sub>2</sub>貯留技術の研究開発」により得られたものです。