

CO₂地中貯留のための 受動的モニタリング手法開発

～産総研におけるモニタリングに関する研究の紹介～

地圏資源環境研究部門成果報告会
2016年12月9日

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
西 祐司

CO₂地中貯留モニタリング研究の略歴

- 先行研究: 地熱・火山・地下水等のモニタリング
- 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
 - 産総研つば 2009、幌延 2010
- 経済産業省受託研究 FY2010～
 - FY2010「二酸化炭素挙動予測手法開発事業(低コストなモニタリング技術及び断層モデリング手法の開発)」低コストなモニタリング技術の研究開発
 - FY2011～2015「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業(弾性波探査を補完するCO₂挙動評価技術の開発)」弾性波探査補完モニタリング技術の開発
 - 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
- 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 FY2016～
 - 経済産業省受託研究「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」のうち「CO₂長期モニタリング技術の開発」(FY2016～)
 - 苫小牧テストサイト 等

CO₂地中貯留のための受動的モニタリング手法開発 Outline

1. 産総研におけるモニタリング研究の概要

2. 高精度重力モニタリング

1. 重力モニタリングの原理・概要
2. テストサイトにおけるモニタリング
3. 今後の研究方向

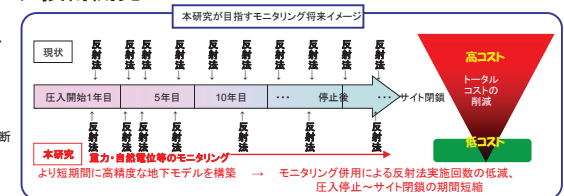
※自然電位(SP)、AE・測地・InSAR、比抵抗、モデリング等については Green Reportをご参照ください。

弾性波探査補完モニタリング技術の開発 (FY2010※～2015 METI受託)

(1) - 1. 多面的モニタリング技術開発

米国SWPのCO₂大規模圧入テストサイトFarnsworth Unitにおいて、重力、自然電位、AE等のモニタリングを行う

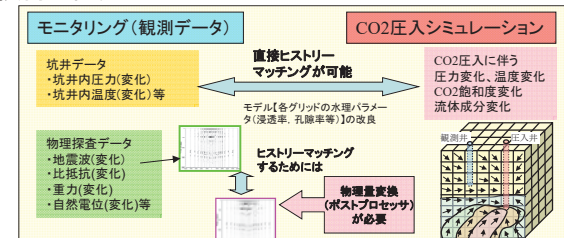
※: FY2010「低コストなモニタリング技術及び断層モデリング手法の開発」において手法選定



(1) - 2. 最適モデリング技術の開発

シミュレーションによる計算量(温度、圧力、CO₂飽和度等)から、観測可能な物理量(理論計算値)への変換プログラムを開発。

モニタリングデータを最大限利用したヒストリーマッチングの実施に必要な



最終成果: 多面的モニタリング&最適モデリングの有機的連携による、弾性波探査を補完するモニタリング技術の実現と、CCSでの普遍化のためのマニュアル製作

(1)-1. 多面的モニタリング技術開発

CO₂大規模圧入テスト地域における長期間の多面的モニタリングを実行するため、実サイトにおける高精度ベースライン測定を実施するとともに、CO₂圧入開始時の変動予測を行う

⇒ 高精度観測基点の設置と検証、ベースラインデータによるサイト特性評価、
 予定する測定手法に対する期待変動量の数値化、これらを受けた観測基点・手法の改良

①人工的な振動源等が不要、弾性波とは本質的に異なる地下情報

- ◎ コスト面や社会受容性で有利
- ◎ 常時観測可能
- ◎ 弾性波探査と相互補完的



重力:
 地下の質量変化が検出可能。



自然電位(SP):
 地下の流体流動や圧力変化に対応する。

AE:岩盤中の微小き裂の動きを反映した情報。

MT法:地下の比抵抗構造。

②CO₂貯留モデルの高精度化にリンクしたアプローチ

- ◎ 弾性波探査との密接な連携が可能
- ◎ 様々な手法の適用にも道筋
- ◎ 時間経過でモデル不確実性減少

反射法地震探査

CO₂貯留モデル

連携実現

多面的モニタリング

最適モデリング技術
 (物理量変換プログラム)

③米国SWP(Southwest Regional Partnership)大規模CO₂圧入サイトへの参加

- ◎ 実フィールド研究を推進
- ◎ 弾性波探査等の知見も入手可
- ◎ 複数回の初期圧入時変化の観測



Phase-II Anethサイトで研究実施



↑DOE/NETL 2010 ATLAS↓

地下モデルの高精度化とCO₂地中貯留のコスト低減に有効な モニタリング手法の確立

多面的モニタリング技術開発:これまでの流れ

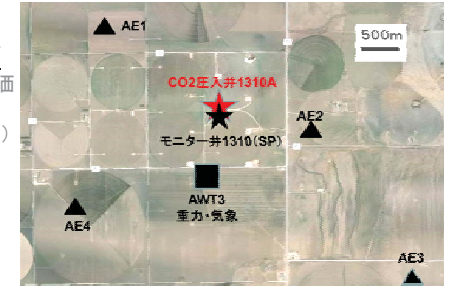
(モニタリング手法の検討: FY2010)

- ・ 重力、自然電位(SP)、AE(Acoustic Emission)の3手法中心
- 重力:超伝導重力計を用いた高精度連続モニタリング
- 自然電位:CO₂到達によるgeobattery効果による電位変化確認
- AE:SWP geophone arrayを補完する地表観測点配置検討
- 比抵抗調査:検討の上対応
- 測地・InSAR:SWP実施予定候補



米国FWUテストサイトにおけるモニタリング

- ・ 実サイト適用によるモニタリング手法の課題抽出・評価
- ・ Gordon Creek, UT: 2011.11~2012.11
- ・ Farnsworth, TX: 2012.11~(2015.12 重力・AE撤収)
- ・ 米国LANL, SWPと連携

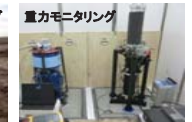
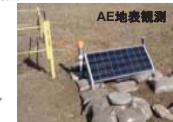


苫小牧における補助データ取得

- ・ 沿岸の特殊性・モニタリング技術評価等
- ・ CO₂圧入前のベースライン状態の把握・モデル化
- ・ 重力・SP(2014.12~)、MT(2015.9 海底2点)

最終年度(FY2015)とりまとめ

- ・ 多面的モニタリング手法の実施指針
- ・ 地球物理ポストプロセッサ使用マニュアル



モニタリング技術の選定:考慮した選定条件

- ・ CCSのモニタリングに有効と推定される手法
- ・ 弾性波探査を補完する手法
 (反射法などの高コストなActive Seismicは除く)
 - 反射法とは別の物性を探査対象 .or.
 - (ほぼ)常時監視が可能な手法
- ・ 弾性波探査に比較して低コストな手法 → 受動的な手法
 (プロジェクト予算の範囲内で実施可能)
 - モニタリング手法実施自体が低コスト .or.
 - 既存フレームワークの若干の仕様変更で実現可能
- ・ 他と重複しないモニタリング手法 ← 米国実証試験への参加
- ・ (沿岸域貯留へのモニタリングに利用可能)

※他国への技術提供を目的とした場合は条件とならない。

物理モニタリング手法の比較

探査手法	主な探査対象	備考
Active seismic (反射法・VSP等)	貯留域の深度・拡がり CO ₂ 気相の厚さ※	溶解・鉱物固定CO ₂ は検知せず ※:走時・振幅で推定(Sleipner)
重力	密度・CO ₂ 飽和度 貯留域層厚・飽和度	←坑内重力観測
自然電位	流動場・圧力分布 既存井へのCO ₂ 到達	←流動電位 ←geobattery
Passive seismic (AE観測等の常設観測) (固定震源利用含む)	震源位置・発震機構 き裂や伏在断層 貯留域形状※	※観測点での反射面位置等 (地震波干渉法など)
電気探査・電磁法探査	CO ₂ 溶解域 CO ₂ 飽和度	
測地(GPS, InSAR等)	歪み・応力・傾斜	

CO₂地中貯留のための受動的モニタリング手法開発 Outline

1. 産総研におけるモニタリング研究の概要
2. 高精度重力モニタリング
 1. 重力モニタリングの原理・概要
 2. テストサイトにおけるモニタリング
 3. 今後の研究方向

CO₂地中貯留における重力Monitoring

- 既にいくつかの適用例:
 - Sleipner (海底), Cranfield (坑内) 等でも実施 [Monitoring Technologies: Evaluation](#)

- 評価: Just Do It, but to be tested
 - Wright (2014)は、先行プロジェクトから判断された各種モニタリング手法の評価(右図)で重力モニタリングはコストは中程度かかるがBenefitは高いとして、「To be tested」ではあるものの「Just Do It」、即ち、既に選択肢に入れるべきモニタリング手法の一つと評価。

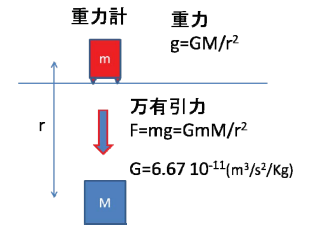
- 低コストの常時監視手段重視の流れ:
 - 米国等の先行CO₂地中貯留プロジェクトではIn Zone Pressure Monitoring等の低コストの常時監視手段が求められてきている。
 - これは、反射法・VSPによるモニタリングはCO₂ブルーム監視に有効かつ高分解能であるが高コスト・高負担で繰り返し実施が実際上難しいため。
(DOE CGS Review Mtg. 2016; Benson, RITE Technical WS 2015).



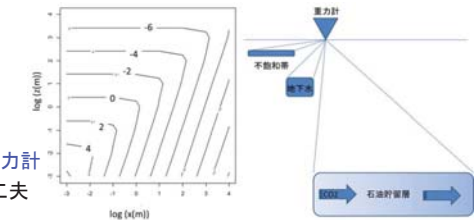
Wright, I (2014) Up-scaling CCS - In Salah Lessons. in RITE CCS Technical Workshop 2013 - CCS大規模実証プロジェクトに向けた安全性評価技術開発の最前線.

重力モニタリング: 原理

- 重力: 周囲の質量による万有引力の鉛直成分
- 重力モニタリング: (地表における)重力変化をモニタリングすることで、CO₂地中貯留等により生じる地下の質量・密度の変化を監視



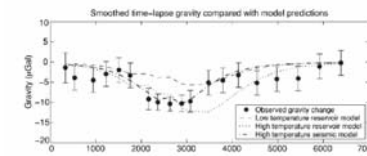
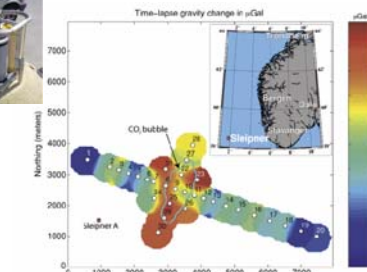
- より小さな変化を探知するためには:
 - 信号源に近づく
水平方向 → 海底重力計
深度方向 → 坑内重力計
 - 観測の精度と感度を上げる
高感度重力計の導入 → 超伝導重力計
計測器・計測方法・データ処理の工夫



深度z(m), 水平距離x(m)の質量変化1Kgにより地表観測点で観測される重力変化Δg (nGal) コンター上の数字は log(Δg)

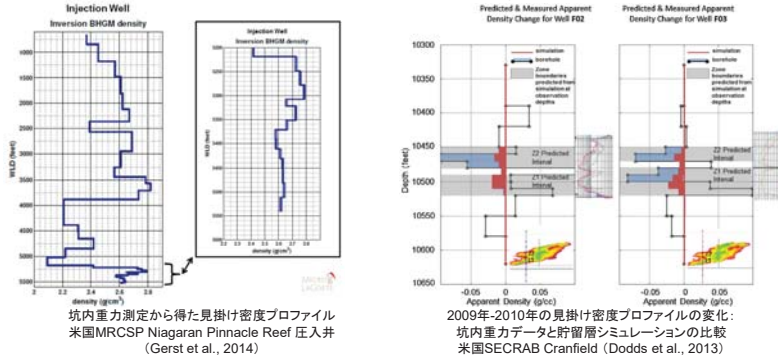
CO₂地中貯留における重力モニタリング Sleipner by StatOil

- 海底重力測定 (3台の相対重力計での同時測定 → 信頼性向上)
- CO₂地中貯留による重力変化を検知
- 反射法解析と組み合わせ密度推定 → 貯留層解釈に貢献 (Nooner et al., 2007; Alnet et al., 2008; Ales et al., 2011等)
- 有効性が認められて、定期的に実施
2-3 year interval (Stat Oil HP)
少なくとも 2002, 2005, 2009年に実施
Snohvitにも適用



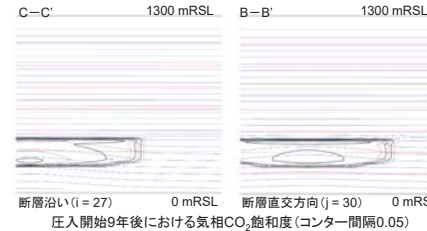
CO₂地中貯留における坑内重力測定: Cranfield by SECRAB, Niagaran by MRCSP

- 坑内近傍の密度を重力測定値から算出→貯留層内密度変化モニタリング
- 坑内重力計:L&R型センサ1970年代→シントレクス型センサ:傾斜井にも対応
- CO₂地中貯留サイトを想定したモデル計算: Sherlock et al(2006), Gasperikova and Hoversten (2008), Krahenbuhl et al.(2011) 等
- CO₂地中貯留サイトにおける測定: Cranfield, Niagaran Pinacclle Reef 等

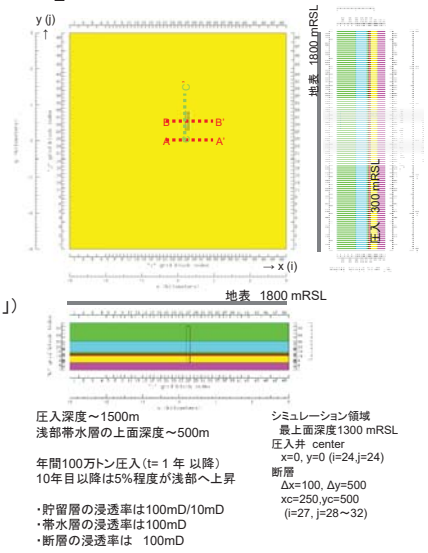
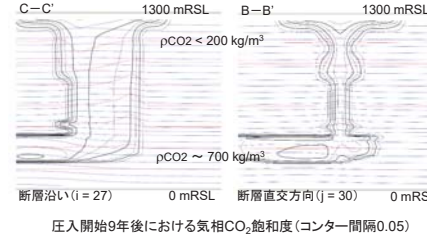


ケース・スタディ:GCモデル 貯留層シミュレーションによるCO₂プルームの挙動

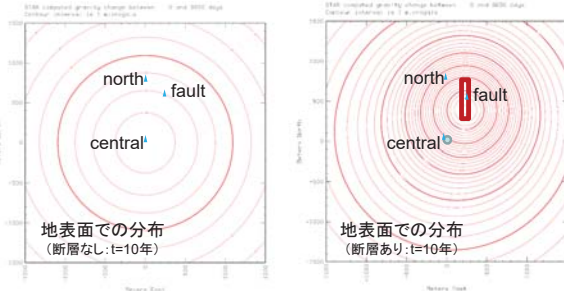
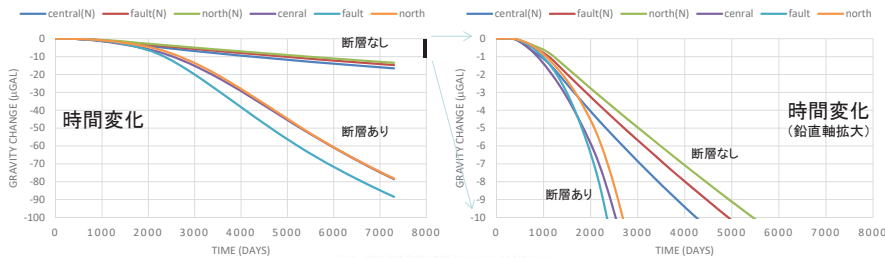
想定した地下モデル通りの仮想的なCO₂地中貯留(「断層なし」)



上記モデルで、想定外のCO₂上昇経路があった場合(「断層あり」)



ケース・スタディ:GCモデル 地球物理ポストプロセッサで計算した重力変化



この計算例では:
•断層におけるCO₂の上昇による重力変化を連続観測で検知可能
•測定点は、圧入井周囲の比較的広い範囲内に設定可能
→反射法実施頻度低減に寄与可能

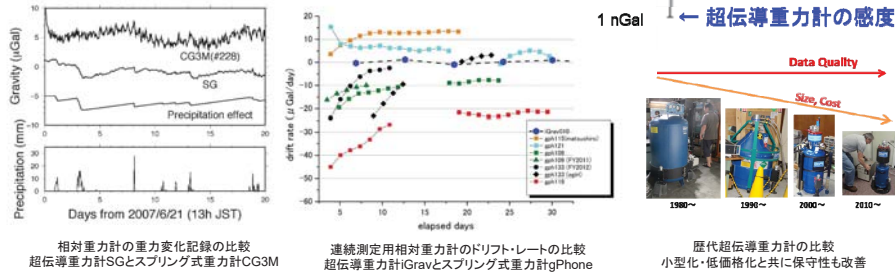
さらに、サブμGal精度での連続観測が達成できると...
•圧入開始3~5年の早い時期にFault有無の検出が可能となり得る。
→早期の対策立案・対応が可能

重力モニタリングの活用イメージと研究目標

- **想定外の事象の発生を検知するための指標として活用可能**
- **重力変化は小さい** (計算例:年間100万tonCO₂圧入→10年後:直上観測点にて9μGal程度)
- →**高分解能・高安定の超伝導重力計使用が必要**
- **重力連続観測点は、比較的広い範囲内に設置可能**
→ **2D反射の弱点の補完、反射法実施頻度の低減に寄与可能**
- さらに、サブμGal精度での連続観測が達成できれば、**圧入開始後の早い時期に地下モデルからの乖離を検知可能**
→ **地下モデルの改良、早期の対策等に活用可能**
- **目指した研究成果:**
 - 実際のCCSサイトにおけるデータ取得を通じ:
 - 超伝導重力計の性能評価と観測ノウハウの蓄積
 - テストサイトにおけるノイズ要因抽出
 - 重力連続観測の高精度化のための信号抽出技術の高度化
 - 効果予測のための貯留層シミュレーション手段の準備とケース・スタディ実施

超伝導重力計の特徴

- 桁違いの高分解能 (nGalオーダー)
- 非常に高い安定性
→ より小さな重力変化まで検出可能
- 連続測定が可能
- 課題であった可搬性の低さ・高コスト(大きさ・He補給等)も最新機種では克服
→ 実用分野での利用、複数台並行測定が実用的選択肢に:
地下水(米国Oregon州)、地熱(インドネシア by 独Gr)、CCS(AIST) など



CO₂地中貯留のための受動的モニタリング手法開発 Outline

1. 産総研におけるモニタリング研究の概要
2. 高精度重力モニタリング
 1. 重力モニタリングの原理・概要
 2. テストサイトにおけるモニタリング
 3. 今後の研究方向

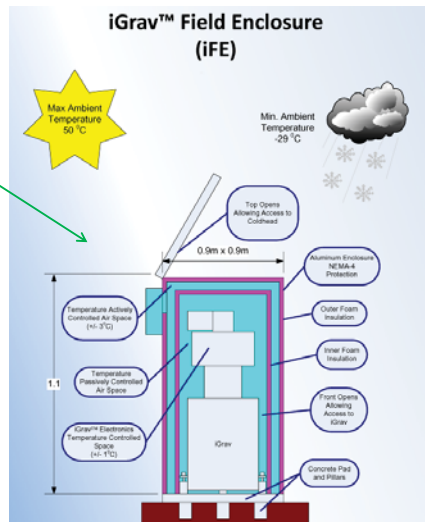
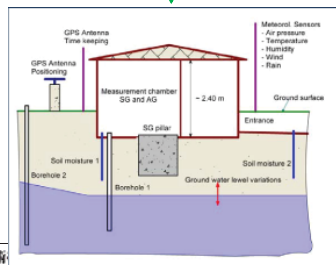
重力モニタリング 連続観測点の仕様検討

超電導重力計



<連続観測点>

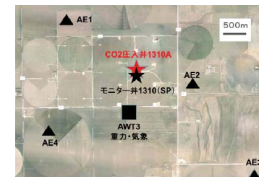
通常の観測ハウスを設置する方法の他に、小型のエンクロージャーを利用する方式も可能。



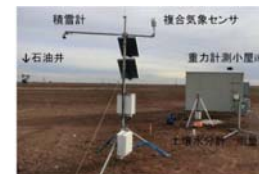
- 土台以外の工事は簡略(ある程度の可搬性)
- 耐環境性が弱くなる

米国FWUにおける重力モニタリング

- FWU gravity change
- 2台の示す重力変動は一致→機器ノイズではない重力変動 分解能μGal以下
- 重力変動はCO₂圧入・地下水変化・土壌水分変化等を含む。顕著な重力減少は観測点近傍での灌漑用水の汲み上げによる地下水位低下の効果。



FWU gravity change
Recorded by iGrav15 & iGrav17

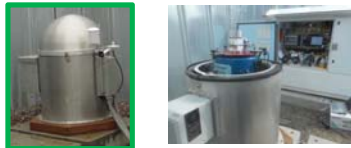


苫小牧における重力モニタリング

苫小牧サイトの概要



- 実施内容**
- ・海岸近傍における測定の評価(測定環境・ノイズレベルの高い記録の評価)
 - ・設置が簡単な測定設備であるエンクロージャの評価
 - ・高精度重力 ベースライン測定 → 2016.4~ 圧入時モニタリング



苫小牧における観測環境への対応:
エンクロージャ、塩害対策

- ・屋外設置用エンクロージャの使用
- ・塩害対策: 空調機、基板コーティング
- ・外部へのセンサ設置: 温度計・気圧計
- ・設置形態の検討: 直方体、坑内設置

CO₂地中貯留のための受動的モニタリング手法開発 Outline

1. 産総研におけるモニタリング研究の概要
2. 高精度重力モニタリング
 1. 重力モニタリングの原理・概要
 2. テストサイトにおけるモニタリング
 3. 今後の研究方向

高精度重力モニタリング:これまでの成果

従来の測地研究での実績:

- ・高分解能で長期連続重力計測可能
- ・時間領域で μGal 以下、周波数領域で mGal
- ・小型化による応用領域拡大
- CCSサイトへの適用評価

数値計算によるケース・スタディ結果:

- ・CO₂浅部移行等に対する連続監視手段として有望
- (分解能 $>\mu\text{Gal}$ の従来型重力計では難しい)

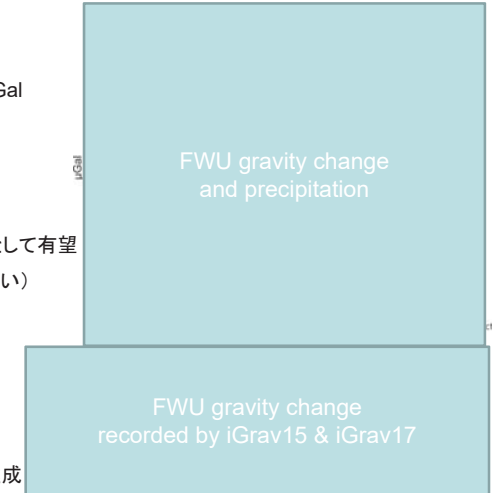
ファンズワースでの成果:

- ・iGrav小型超伝導重力計評価
- ・時間領域 μGal 以下の分解能を確認
- ・並行観測の有効性を確認

苫小牧での成果:

- ・世界一海岸近くの観測点で通年観測を達成
- ・ノイズ等の評価と数 μGal のトレンド成分検出

→ CO₂地中貯留の長期間モニタリングに使える監視手段



今後の研究方向

- ・ 苫小牧における圧入時モニタリングの継続
- ・ モニタリング手法としての改良
 - 複数超伝導重力計の利用技術(並行測定手法など)の確立
 - 海洋・土壌水分・地下水等の物理モデルに関する検討
 - 海洋と浅層の水の影響を補正
 - 観測方法の検討: 設置方法・設備、耐環境性、補完データ
 - 坑内・海底設置の検討
- ・ CO₂長期モニタリング技術としての確立
 - サイト閉鎖迄の長期間に対応した監視手段としての超伝導重力計を用いた長期モニタリング技術を確立
- ・ 高精度重力モニタリングの他分野(地熱・地下水・地下空洞等)への応用

↓
二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員として、経済産業省受託研究「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」にて実施予定

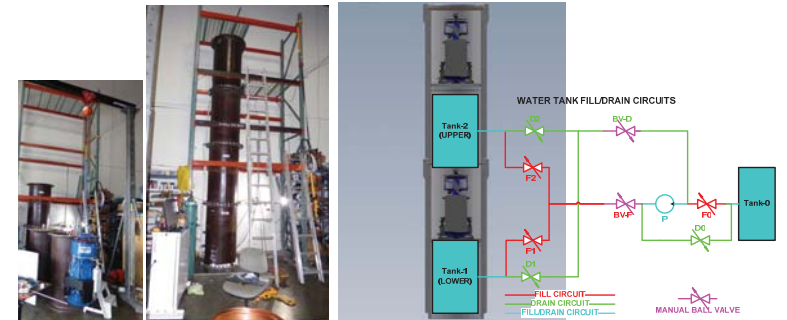
複数超伝導重力計の利用技術の確立

- 複数機器間での測定データの連続性確保
 長期モニタリング→故障・老朽化による更新は不可避
 → 予備機準備が必要 → 予備機の活用＝並行測定
- 予備機を利用した並行測定の利用
 - 目的: 較正、重力傾度測定、ノイズ要因特定等
 - 策定法・解析法等の確立
- まず、基礎的な室内実験、短距離移動による影響の評価等から実施中

基礎研究: 鉛直配置並行測定実験

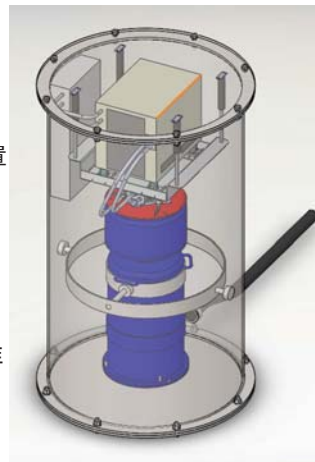
約1m間隔で超伝導重力計と水タンクを鉛直方向に配置
 タンク内の質量変化により生じる重力変化を同時連続記録。

- 超伝導重力計の(時間領域における)計測精度の確認
- 孔内/海底設置検討のための予備実験
- 鉛直配置並行測定の有効性の検討



坑内/海底設置型超伝導重力計の開発

- 利点:
 - 波浪等によるノイズ発生源から遠く and/or ノイズの小さな場所への設置が可能
 - 土壌水分等の地表近傍起因のノイズの低減
 - 貯留サイトの位置に寄らず貯留層直上に設置可能[海底設置]→より大きなシグナル
- S/N比向上により小さな変化まで検出可能
- 技術開発要素
 - 耐圧容器内への機器実装(熱・ノイズ・水平維持・保守性等)
 - 可能な限りの小型化→低コスト化
 - (海底への設置方法: サイトの観測条件依存)



耐圧容器・電源供給等: 海底観測機器の既存技術を適用
 → 当面の目標は、基礎的検討 or 低耐圧のプロトタイプ作成まで

CO₂地中貯留のための受動的モニタリング手法開発 ~産総研におけるモニタリングに関する研究の紹介~

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 苫小牧港事務所にごサポートいただいた。また、米国における実証調査プロジェクト自体は、米国エネルギー省NETL予算によって実施されており、産総研のモニタリングは、米国ロスアラモス国立研究所の協力の下、SWPとChaparral Energy社にごサポートいただきました。本研究開発の多くは、経済産業省からの受託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業(弾性波探査を補充するCO₂挙動評価技術の開発)」(平成23~27年度)及びその前身の「二酸化炭素挙動予測手法開発事業(低コストなモニタリング技術及び断層モデリング手法の開発)」(平成22年度)により実施し、経済産業省産業技術環境局 環境政策課及び二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業研究推進委員会委員の皆様にご指導をいただきました。また、プロジェクト実施に当たってはRITEIにごサポートいただきました。本報告は、重力は杉原を中心に名和・宮川、自然電位とポストプロセスは石戸、AEは相馬、比抵抗は光畑と上田、InSAR解析は田中(明)の研究結果(産総研, 2016)を引用しています。これらの研究は、産総研が参加する二酸化炭素地中貯留技術研究組合が経済産業省より受託した「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」の一部として引き継がれています。