

カーボンマネージメント小委員会向け資料

将来のCCS社会実装を見据えたあるべきモニタリングに 係る分科会の進捗報告ならびに提案骨子

日本CCS調査株式会社

- 0. 将来のCCS社会実装を見据えたあるべきモニタリングに係る分科会の概要
- 1. 2021年～2022年の中間とりまとめを反映した日本におけるあるべきCCSモニタリングの姿「提案骨子」(案)
- 2. 日本におけるモニタリングモデルプラン
 - a. エリアAにおけるモニタリングプランの事例
- 3. 2023年度のモニタリング分科会の検討予定
- 4. 【参考】文献調査実施状況

0. 将来のCCS社会実装を見据えたあるべきモニタリングに係る分科会の概要

背景

- ・苫小牧におけるCCS大規模実証試験(以下、「実証試験」という)に係る実証実験計画を踏まえ、実証試験開始にあたり経済産業省および内閣府から指摘された技術的事項等を検討するため、有識者から助言と確認を得るために、2014年にJCCS内に「課題検討会」を設置。
- ・2019年に目標の30万トンのCO₂圧入を達成し、現在、圧入停止後のモニタリングを継続する中、同検討会における指摘事項の1つとして「将来のCCS社会実装に向けたモニタリングに関し検討すべき課題として、実証試験の成果を踏まえた上で経済性も含めた、そのあるべき姿を提案すること」が挙げられたことから、2021年に課題検討会の下部組織として「将来のCCS社会実装を見据えたあるべきモニタリングに係る分科会」を設置。
- ・分科会では、将来のCCS社会実装に向け、安全な貯留層管理を目的に、技術的、経済的な観点に加え、地元の安心感醸成等にも配慮した、日本におけるモニタリングのあり方を検討中。

検討スケジュール

- | | |
|------------------------|---|
| 第1回分科会
(2021/08/04) | ・開催趣旨の確認 技術動向調査計画 |
| 第2回分科会
(2021/11/17) | ・モニタリング実態文献調査
とモニタリング項目/目的/適応技術の整理 |
| 第3回分科会
(2022/02/22) | ・技術的視点からの取りまとめ |
| 第4回分科会
(2022/07/08) | ・アカウンティング/PAの視点からの実態調査 |
| 第5回分科会
(2023/01/18) | ・社会的観点からの取りまとめ
(PAに係る他事業事例調査含む) |
| 第6回分科会
(2023/03/22) | ・中間とりまとめ |
| 第7回分科会
(2023/07/25) | ・あるべきモニタリングに関する提案骨子
とモニタリングモデルプランの事例検討 |
| 第8～9回分科会
(開催予定) | ・日本におけるあるべきモニタリングの姿
取りまとめ |

分科会有識者委員

◎:委員長 2023/04/01 現在職位

- | | |
|--------|---|
| ◎佐藤 光三 | 東京大学大学院工学系研究科
システム創成学専攻 教授 |
| 海江田 秀志 | 電力中央研究所 名誉研究アドバイザー |
| 佐藤 徹 | 東京大学大学院新領域創成学研究科
海洋技術環境学専攻 教授 |
| 薛 自求 | 地球環境産業技術研究機構 主席研究員 |
| 徂徠 正夫 | 産業技術総合研究所
CO ₂ 地中貯留研究グループ グループ長 |
| 徳永 朋祥 | 東京大学大学院新領域創成学研究科 科長
環境システム学専攻 教授 |
| 松岡 俊文 | 深田地質研究所 特別研究員 |

1. 2021年～2022年の中間とりまとめを反映した 日本におけるあるべきCCSモニタリングの姿「提案骨子」(案)

モニタリング分科会を発足させた主旨ならびに検討方針に立ち返り、
中間とりまとめ結果から「あるべきモニタリングの姿の提案骨子」を再整理した。

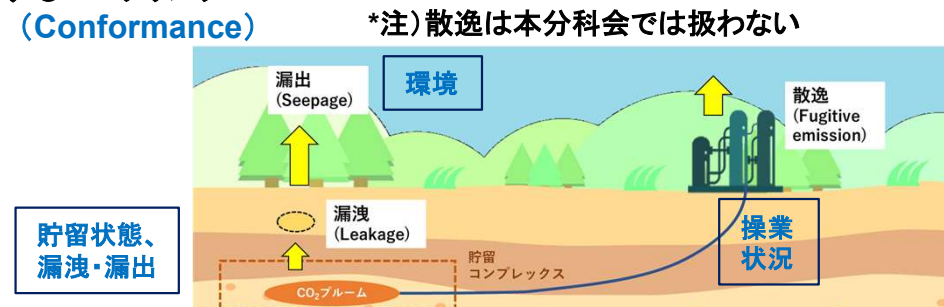
1-1. あるべきCCSのモニタリングの姿 「提案骨子」 (案)

1. モニタリングの主な目的

国際的な基準等に従って選定された貯留サイト*1で、安全にCCSを実施するためには、以下の目的でモニタリングが必要

1. 圧入システム(装置と操業)の不具合を検知すること (Containment)
 - ・ 装置の設計や操業等に伴う想定外の状況が生じないように監視するモニタリング
2. 貯留状態の把握と漏洩につながる変化として漏洩を監視し把握すること (Conformance)
 - ・ 貯留したCO₂の挙動が想定内かどうか、また漏洩につながる変化がないか、監視するモニタリング
 - ・ 貯留したCO₂の広がり等を監視するモニタリング
3. 地表付近、海洋の環境に焦点をあてたモニタリング (Environment)
 - ・ 社会的関心等に対応することを目的に行うモニタリング

*1: ISOやDNV等の基準に示されている貯留適地選定プロセスの中で、リスクを特定するハザードアセスを実施済み。



2. 漏洩と漏出を区別して扱うこと、漏洩をモニタリングすることの重要性

- ・ 漏洩とは想定された貯留域から域外にCO₂が移動すること、漏出とはCO₂が飲用に供する地下水、大気中あるいは海水中に出ることを指す。
- ・ 漏洩を監視することが、漏出の危険性を事前に察知するうえでも最も有効かつ、現実的なモニタリング(1次監視)である。
- ・ 漏出の検知は、想定内の挙動から外れた場合あるいは貯留コンプレックス外への移動等の懸念があるときに確認のために実施するモニタリング(2次監視)とすべきであり、文献調査や国内外でのヒアリング等の結果でも同様の考え方が確認される(圧入中は圧入井から直接の漏出も懸念されるが、操業監視等で対応し得る)。
- ・ 漏洩のモニタリング結果や経過年数など客観的操業状況と全く独立に、海防法で規定しているような採水モニタリング結果をもって、漏出の指標とすることは極めて困難であり、あくまでも参考値にとどめるべきとすべきである。

3. 合理的なモニタリングのあり方 (漏洩監視のあり方と2次監視への移行について)

1次監視では、圧入井の操業状態(圧力・温度・流量)および微小振動・自然地震等の監視(1-1)という常時観測、ならびに圧入されたCO₂の挙動(地層中での移動、広がり状況)の把握(1-2)という物理探査による観測等を行い、ここでの異常を検知した時にのみ2次監視(漏出の有無の確認など、各リスクに対応したモニタリング)へと移行する。

4. その他 (法規制の対象外とすべきモニタリング)

社会的関心等のために追加で行われるモニタリング(1-3)は、法の規制によるモニタリングとは別に事業者の責任として扱うべき項目である。また、ロンドン議定書にも記載のあるサンゴ等の海洋生物等が懸念材料(リスクの対象)となるような貯留サイトの場合は、必要に応じて2次監視モニタリングの対象(項目)に追加するものとするとも考慮する。

2. 日本におけるモニタリングモデルプラン

基本的な考え方とシナリオの考え方

a. サイト1

エリアAにおけるモニタリングプランの事例

2-1. CCSモニタリングのあるべき姿とは

- **CCSモニタリングの基本的考え方**

法規制を遵守することを前提に

- 技術的な面のみならず、アカウンティング、社会的受容性(PA)といった**社会的側面**、事業性といった**経営的側面**も考慮したもの
- 過剰な要求を避け、簡素かつ必要と総合的に判断される内容で、柔軟性をもって経時的に見直しをしていくもの

- **CCSモニタリングの定義**

- **Containment**

- 操業上の不具合を監視

- **Conformance**

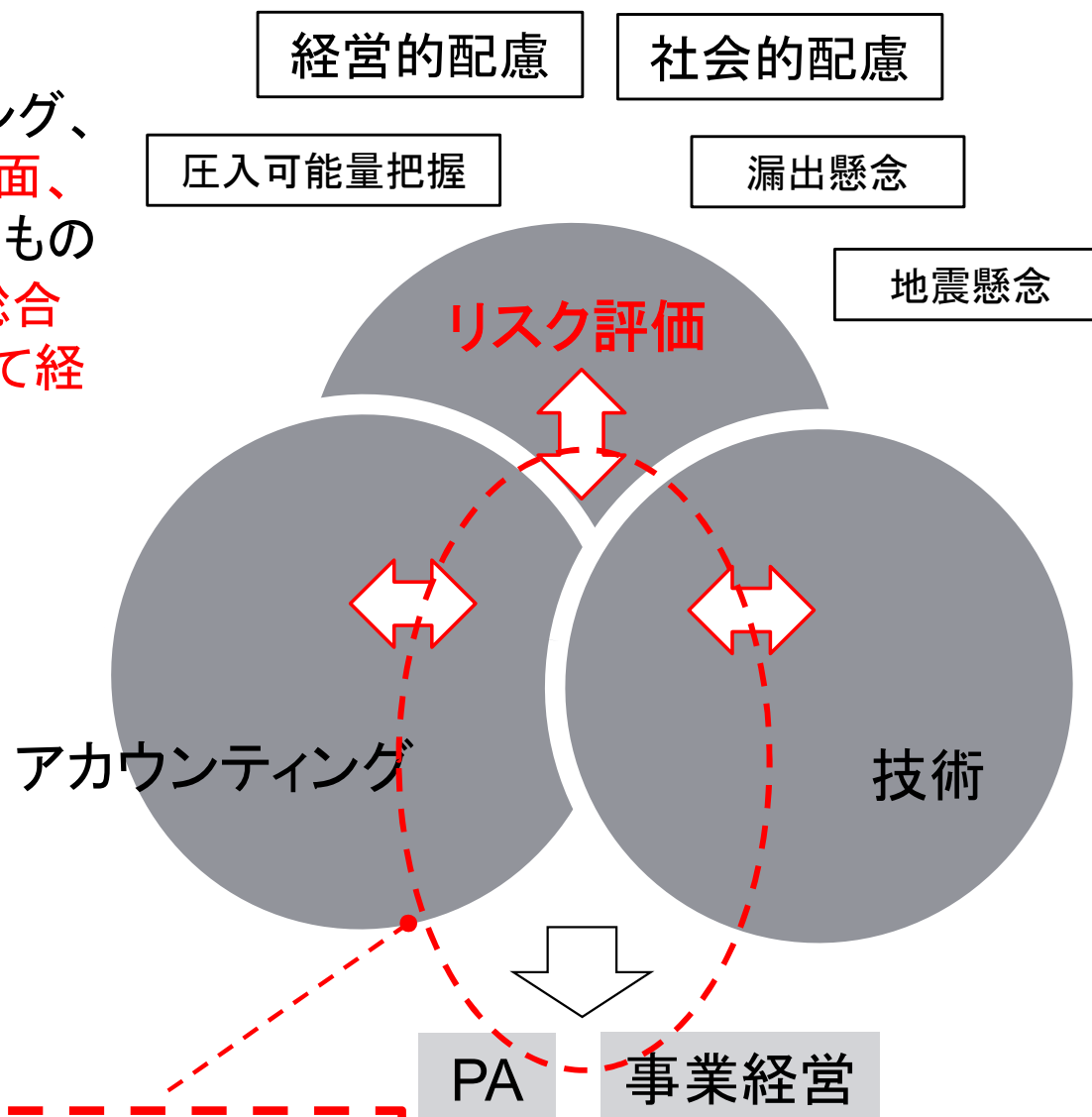
- 貯留状態の把握と漏洩・漏出につながる状態変化を把握

- **Environment**

- 地表付近の環境把握に焦点を当てたモニタリング

Jenkins(2015)*の論文の中での定義・概要

* The state of the art in monitoring and verification - Ten years on, 2015



日本におけるあるべき
モニタリングの姿

2-2. CCSモニタリングの考え方

モニタリングの基本的な考え方とモニタリングのカテゴリー

サイト選定、リスク評価に基づいてモニタリング対象・項目を選定

- 適切な操業ならびにCO₂の貯留状況を確認する項目が基本
- リスクに基づいた計画
- サイト特有の条件を考慮

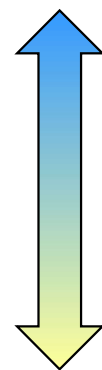
1次監視(リスクを判断)①～②

- ・ 操業状況の確認
- ・ その他項目・技術はサイト条件を考慮

2次監視(リスクに対応)③

- ・ 想定されたリスクが上昇したり、リスクが想定と乖離した場合に実施
- ・ 当該リスク(モニタリング結果)にカスタマイズした追加的モニタリング
- ・ 少なくとも事業開始前の適切なベースラインが必要

1次監視



2次監視

① 操業状況(operation)

- ・ 圧入井の操業管理(圧力・温度、流量、振動*等)
- ・ *自然地震／微小振動も含む

Containment

② 貯留状態(plume)、漏洩(leakage)

- ・ 圧入されたCO₂の挙動
- ・ CO₂圧入による地層水の変化や移動
- ・ 潜在漏洩経路(遮蔽層、断層、坑井等)の状況

Conformance

③ 環境(environment)、漏出(seepage)

- ・ 漏出の有無と生態系への影響

Environment

知見の蓄積/リスクの変化に伴う柔軟な更新

- 知見(モニタリングデータ)蓄積に基づくリスクの再評価と適用技術・頻度の見直し
- 利用可能な最良の技術(BAT)の適用

BAT: Best Available Technology

2-3. モニタリングプランの設計 (モニタリング標準プラン)

1次監視と2次監視を明確化し、リスクに応じた強弱・有無を考慮した計画とした

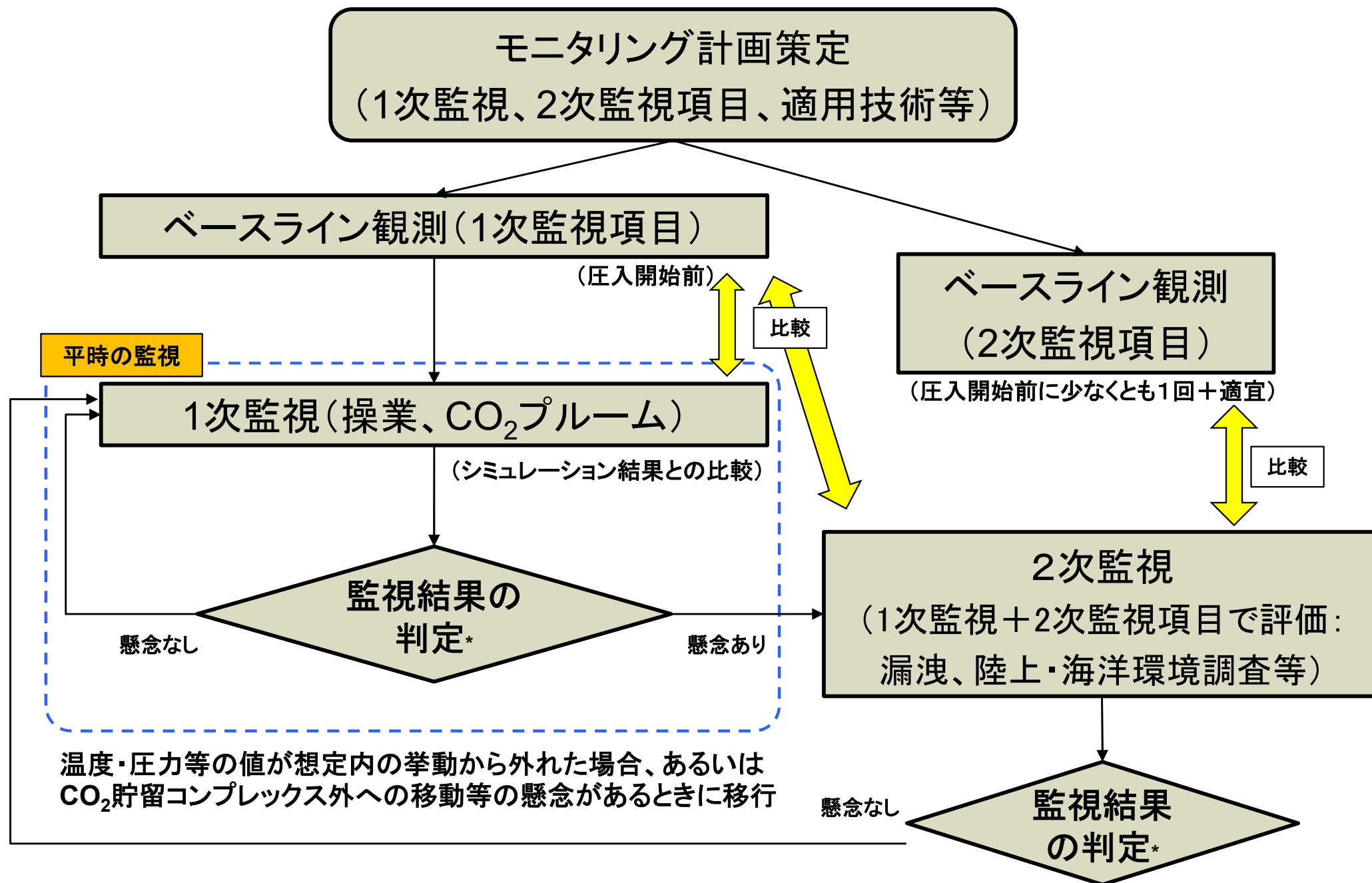
(チェック2つ以上を○、チェック1つを△とし、2次監視は(2次)とした。対象内の項目の選択については、リスクシナリオに基づいて選択する)

対象	項目		圧入前 (X年間)	圧入中	圧入終了後	
					Y年間	廃坑後
Operational	圧入流体(組成、流量、濃度)			○		
	坑口(圧力、温度)			○		
	坑底(圧力、温度)		Baseline	○	○	(測定手段有)
	坑井健全性(アニュラス圧力等)		Baseline	○		
	微小振動		Baseline	○	○	測定手段有
CO ₂ Plume	CO ₂ 挙動把握 *	坑井近傍 *	Baseline	○		
		坑井周辺 *	Baseline	○		
		広域 *	Baseline	○	○	測定手段有
Leak	地層水分析		Baseline	○		
	地表変位		Baseline	△		
Environment (リスクに応じて実施)	海洋環境	水質	Baseline	(2次)	(2次)	(2次)
		底質		(2次)	(2次)	(2次)
		気泡 *		(2次)	(2次)	(2次)
		同位体 *		(2次)	(2次)	(2次)
	環境影響(地下水)		Baseline	(2次)	(2次)	(2次)

1次監視(基本モニタリング)として行う項目 ○: 実施、△: 場合により実施、
 リスクレベルの変動に応じて、監視項目削減、頻度軽減など、柔軟な更新を行う(更新時期は3年毎のように明確にすることが好ましい)。
 Baselineとは、Project の開始前後で変化のないことを示すために必要なプレモニタリングと定義している。

* 従来と表現を変えたもの

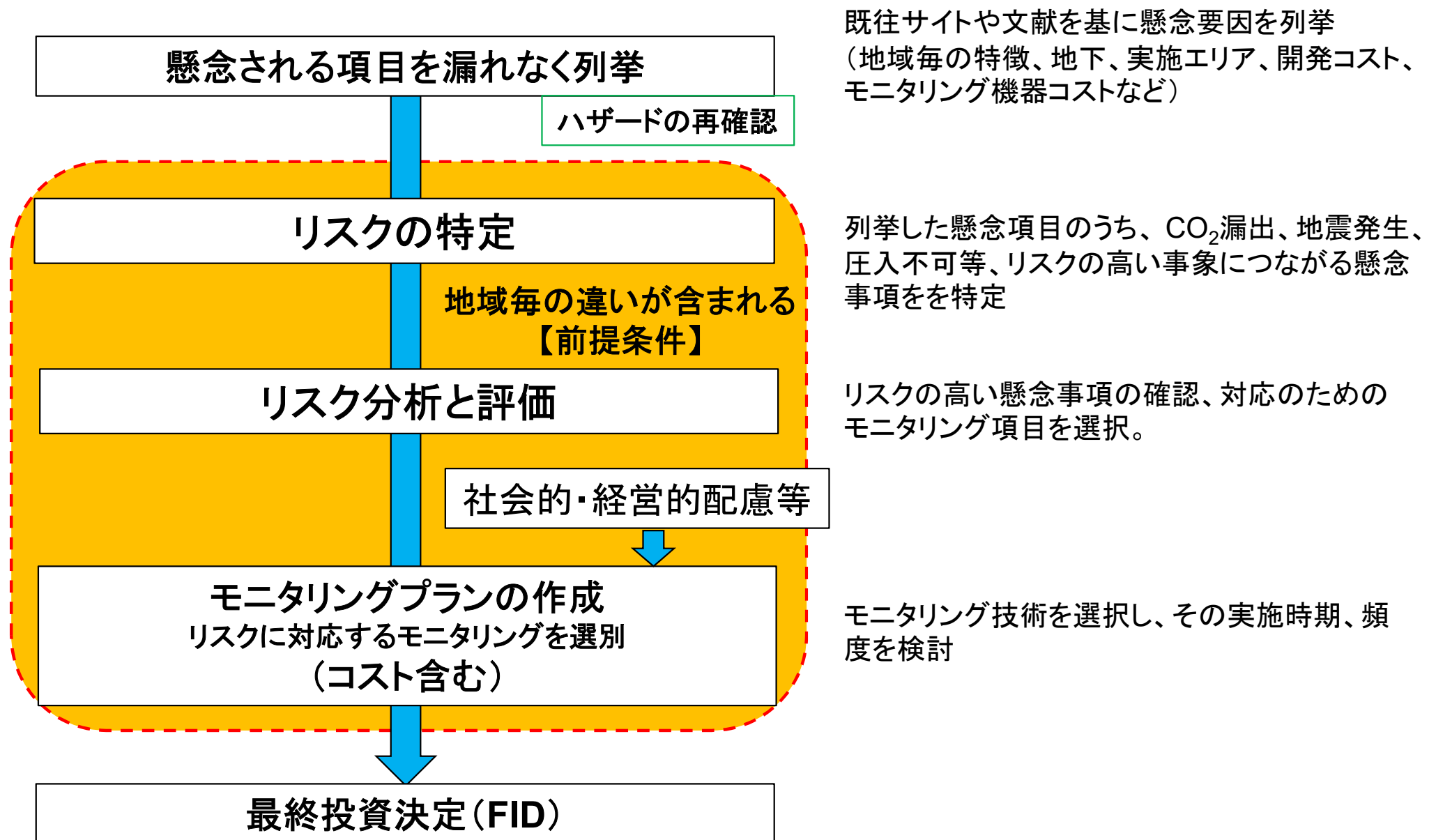
2-3. モニタリングプランの設計 (2次監視移行判定の考え方)



2-3. モニタリングプランの設計 (モニタリング技術と特徴)

対象	モニタリング技術	特徴
操業状況 (Operation) 温度、圧力ならびに微小振動の計測	温度・圧力計測(センサー)	操業状況把握のために必要。精度は様々。 ドリフトあり。適宜校正のための作業が必要。
	微小振動計測	操業に伴う振動、自然地震を坑内外の3成分地震計にて計測。 適宜維持作業が必要。
	自然電位	坑井健全性の把握。腐食によるCO ₂ 漏出を検出できる可能性。
	温度・振動・歪計測(光ファイバー)	操業状況把握のために近年実用例増加。 温度、歪、振動を坑井内の複数地点において同時に連続的に計測可能。 坑内での校正作業が軽減される。歪によって圧入に伴う応力変化、Plumeの把握が可能。
貯留状態 (Plume) CO ₂ の挙動を把握	坑井検層	坑井とその周辺の複数物性を詳細に把握可能。 最も分解能は高い。
	弾性波探査(坑内含む)	相対的速度・密度変化を検出。 坑井検層に次ぎ精度が高い。高価。海陸、対象深度を問わず適用可能。坑内計測器を用いるとさらに精度が上がる。小型振源を用いた連続観測の可能性もある。
	電気/電磁探査	比抵抗値からガス飽和率を検出。比較的高価。陸上～浅海まで
	重力探査	相対的密度変化を検出。分解能は低い。
漏洩 (Leak) 貯留コンプレックス外に移動したCO ₂ の挙動	地層水分析	CO ₂ の溶解度、岩石との反応性の把握。浅層地下水への漏出の検知。
	地表変位	陸域の地表変位を衛星画像を用いて検出可能。比較的安価。
環境 (Environment)	気泡観測技術	漏出CO ₂ の検出・定量化技術。漏出場所が特定されている場合に有効(開発中、魚影などとの分離が課題)。
	同位体分析	CO ₂ 起源についての同定が可能(圧入されたCO ₂ かどうか)
	地下水分析	CO ₂ の飲用に供する地下水への流入を検知(同位体分析も併用可)

2-4. 日本におけるモニタリングプラン作成(具体的な進め方)



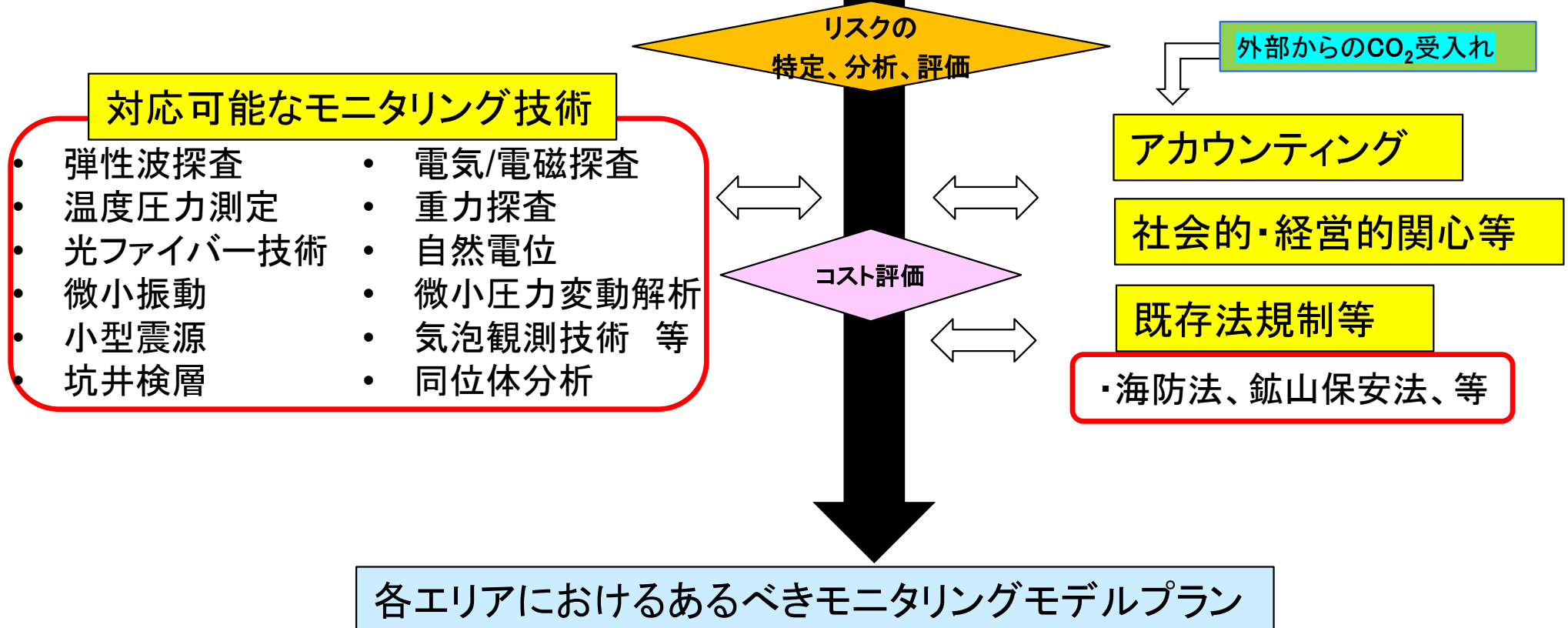
FID: Final Investment Decision

2-4. 日本におけるモニタリングプラン作成(概念)

懸念される事項の列挙(例)

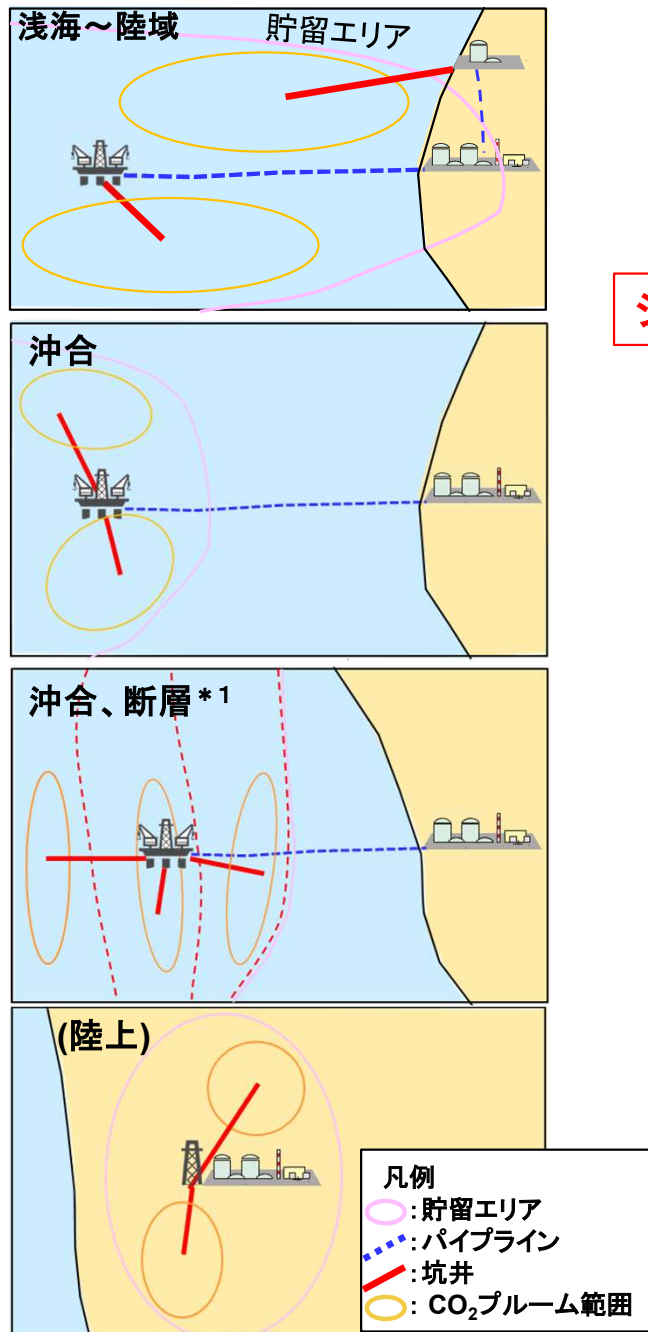
ハザードの再確認

市街地が近い 風評 地元大学等の理解・協力 コミュニケーション CO₂の安全性
陸域自然環境 地元住民の協力 希少な動植物 CCSに対する理解 津波等の自然災害 CO₂漏洩・漏出
地元商工会議所の理解 地元産業構造 鉱山活動に対する理解 水産資源 過去にM5以上の地震
漁業者の理解 過去の公害問題対応 経営資金 規制による運営リスク 為替環境 政府補助金 CO₂コスト
大型タンカー・コンテナの航路 母港からの距離 海流の変化 サンゴ等の海洋生物 モニタリングのしやすさ
公共事業に対する理解 CO₂発生源からの距離 地質構造 遮蔽層 貯留層 断層 浸透率
資材基地の用地 工事日程



2-5. 日本におけるモニタリングプラン作成 (シナリオの背景)

モデル地点模式図



サイト 1 (例; エリアA 陸域～浅海、貯留域が陸上にまたがる)

- ・ 浅海から陸域の範囲に貯留を行う。
- ・ 離岸距離は4 km程度を想定し、陸域の分離回収施設から、沖合のプラットフォームまでパイプラインによるCO₂輸送を行う。
- ・ 陸域からの圧入も想定する。

シナリオ2 以降については今後検討する

サイト 2 (例; エリアB 沖合)

- ・ 沖合の深海域(水深200m～)にて貯留を行う。
- ・ 離岸距離は10km以上を想定。エリアAと同様に陸域の分離回収施設から沖合のプラットフォームまでCO₂輸送を実施。
- ・ 地震発生深度は貯留対象深度より大きい(30km～)

サイト 3 (例; エリアC 沖合、断層で貯留域が隔離*1)

- ・ 沖合の深海域(水深200m～)にて貯留を行う
- ・ 離岸距離は10km以上を想定。エリアAと同様に陸域の分離回収施設から沖合のプラットフォームまでCO₂輸送を実施。
- ・ 地震発生深度は貯留対象深度より大きい(30km～)
- ・ 断層は貯留層/遮蔽層に変位を与えている。
- ・ 断層コンパートメント化の可能性があるため、区画毎に圧入井が必要。

サイト 4 (例; エリアD 陸上)

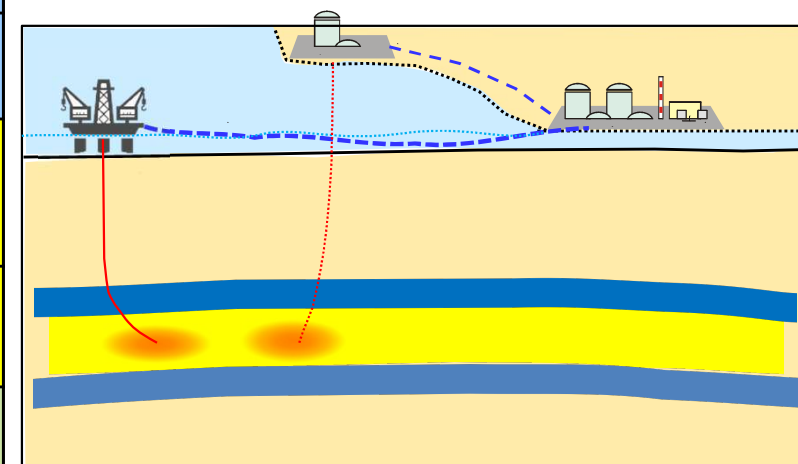
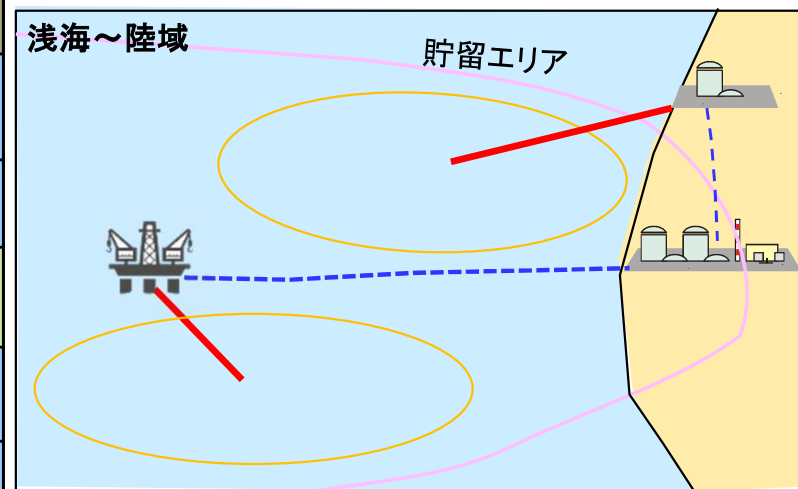
- ・ 排出源近傍の陸上にて貯留
- ・ 分離回収施設、圧入地点も陸上
- ・ 地震発生深度は貯留対象深度より大きい(30km～)
- ・ 市街地が近いいため、振動レベルが高い。

2-5. サイト 1 エリアAにおけるモニタリングプラン(前提条件)

エリアA (浅海～陸上)

モデル地点模式図(エリアA 浅海～陸上)

項目(地域ごとの特徴)	仕様	懸念項目	サイトの特徴
排出源	発電所等(陸上)	孔隙率(貯留可能量)	孔隙率大
分離回収基地	陸上(排出源に隣接)	浸透性	良
CO ₂ ガス輸送	パイプライン(陸上+海底)	遮蔽能力	中
貯留エリア水深	数10 m(平均)	地層圧	通常
圧入施設、圧入井	海上プラットフォーム	地震活動	エリア内は低調
圧入井	傾斜・水平井	断層	エリア内で認定されていない
圧入井数	少(3本)	貯留層上面深度	構造頂部が800m以浅
背景	陸上は工業都市であり、港への大型船の入港も頻繁。市街地を抱えていながらも、温泉産業も存在するため、飲用に供する地下水の水質には敏感。陸域は石油天然ガス鉱区が設定されており、現在も操業中。CCS事業を始めるにあたり、他社事業(温泉、石油・天然ガス事業、漁業等)に影響を与えないことが前提となっている	既存坑井	複数あり(陸上)
		貯留エリア	浅海～陸上(他社鉱区)
		競合	石油天然ガス鉱区と隣接
		リスク小←■-■-■-■→リスク大 赤字: 注意すべきリスク	



断面イメージ(エリアA 浅海～陸上)

凡例
○: 貯留エリア
---: パイプライン
---: 坑井
○: CO ₂ ブルーム範囲

2-5. エリアAにおけるモニタリングプラン (リスク特定と分析)

エリアA(浅海～陸上)で想定される懸念項目

地下

- ・ 孔隙率
- ・ 浸透性
- ・ 遮蔽能力
- ・ 地層圧
- ・ 地震活動
- ・ 既存坑井
- ・ 断層
- ・ 貯留層上面深度
- ・ 貯留量
- ・ 貯留層平均層厚
- ・ 遮蔽層厚
- ・ 地層安定性
- ・ 地層傾斜
- ・ 活断層・主要構造線
- ・ データ充実度
- ・ 貯留エリア

開発

- ・ 排出源
- ・ 水深
- ・ 圧入レート(1本あたり)
- ・ 圧入期間
- ・ 圧入井位置(坑口)
- ・ 圧入井位置(坑底)
- ・ 圧入井本数
- ・ 圧入井タイプ
- ・ 分離回収施設
- ・ 圧入施設
- ・ 陸上PL
- ・ 海上PL
- ・ PF利用
- ・ 陸上観測井
- ・ 海上観測井
- ・ 内航船
- ・ 受け入れ港
- ・ 重要施設(温泉、天然記念物等)と坑口位置との隔離
- ・ 天災被害(坑口)
- ・ 離岸距離

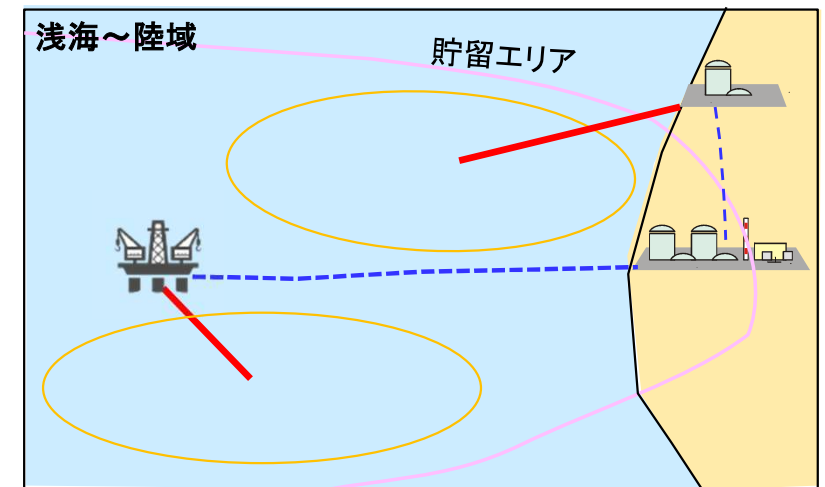
地元

- ・ 主要港
- ・ 船舶航路
- ・ 国立公園等
- ・ 動植物・海洋生物
- ・ 近隣鉱業権との隔離
- ・ 用地取得
- ・ 地場産業
- ・ 漁業活動
- ・ SLOの状況
- ・ PAの状況(vs公共事業等)
- ・ 自治体の姿勢
- ・ 競合(他業種含む)

懸念項目から想定されるシナリオ

1. 当初想定した圧入レートが維持できない
2. 圧入圧入による地震活動の活発化
3. 井もしくは既存坑井、断層を介した漏出
4. CO₂の浅部への移動による漏洩・漏出
5. CO₂の陸域への移動による地下水*1への漏出
6. 貯留層圧力上昇による近隣鉱区権者への影響
7. 陸上施設、坑口の天災被害
8. 漁業活動とのコンフリクト(海流の変化)
9. 圧入井数増加によるコスト増加
10. 陸上施設の用地取得
11. 洋上風力発電施設等との競合 ...

* 1: 飲用に供する地下水



- 凡例
- : 貯留エリア
 - : パイプライン
 - : 坑井
 - : CO2ブルーム範囲

※赤字はエリアAにおいて
リスクレベルの高いシナリオ

2-5. エリアAにおけるモニタリングプラン (発生シナリオとモニタリング項目)

エリアA(浅海～陸上)

懸念項目	発生シナリオ	モニタリング項目			
		坑内温度・圧力	微小振動	CO ₂ プルーム	坑井健全性
孔隙率×貯留層の体積	圧入性能、総貯留量の低下	○			
浸透性	圧入性能の低下	○			
遮蔽能力	漏洩、漏出	○		○	
地層圧	誘発地震	○	○	○	
地震活動	誘発地震		○		
断層	漏洩、漏出			○	
貯留層上面深度	CO ₂ の気化、漏洩、漏出※1			●	
既存坑井	漏出			○	○
貯留エリア	陸域の飲用に供する地下水への漏出※2			●	
競合	他業種へ、他業種からの影響※3	●		●	

※1: 想定シナリオ4、CO₂の浅部への移動による漏洩・漏出

※2: 想定シナリオ5、CO₂の陸域への移動による地下水への漏出

※3: 想定シナリオ6、貯留層圧力上昇による近隣鉱区権者への影響、モニタリングへの影響

○、●がモニタリング項目。

●は重点的にモニタリングすべき項目

2-6. エリアAにおけるモニタリングプラン（実施時期）

1次監視はリスクレベルを判断するために実施し、2次監視は懸念発生時をトリガーとして実施することをイメージした。2次監視のベースラインは圧入前ならびに平時に実施で対応。

対象	項目		圧入前 (必要な期間)	圧入中		圧入終了後		
				平時	リスク懸念時 シナリオ4.5.6.	Y年間	廃坑後	
Operational	圧入流体(組成、流量、濃度)			○				
	坑口(圧力、温度)			○				
	坑底(圧力、温度)		Baseline	○		○	△	
	坑井健全性(アニュラス圧力等)		Baseline	○				
	微小振動		Baseline	○		○	△	
CO ₂ Plume	CO ₂ 挙動把握	近 ↓ 遠	坑井近傍	Baseline	○			
			坑井周辺	Baseline	○			
			広域	Baseline	○		○	△
Leak	地層水分析		Baseline	○				
	地表変位		Baseline		△			
Environment (リスクに応じて実施)	海洋環境	必要に応じて	水質	Baseline (圧入前に少なくとも1回＋適宜)	(2次)*		(2次)*	(2次)*
			底質		(2次)*		(2次)*	(2次)*
			気泡		(2次)*		(2次)*	(2次)*
			同位体		(2次)*		(2次)*	(2次)*
	環境影響(飲用に供する地下水)		Baseline		(2次)*		(2次)*	(2次)*

1次監視(基本モニタリング)として行う項目 ○: 実施、△: 場合により実施、無印は通常のモニタリング状況である限りは実施しない項目。
 *2次監視移行時の実施項目は、リスクに対応した項目のみを選択的に実施。Baseline: 少なくとも圧入開始前に1回行うことを前提に、懸念の度合いにより取得開始時期については事業者が平時に適宜判断する。

2-6. エリアAにおけるモニタリングプラン（モニタリング手法）

地域における最大のリスク（最浅部・陸域での漏洩・漏出、隣接鉱区への影響）に対応
リスク発生シナリオに基づき、**赤色**の項目におけるモニタリングに特に注力する。

対象	項目		適用技術例	
Operational	圧入流体(組成、流量、濃度)			
	坑口(圧力、温度)			
	坑底(圧力、温度)		高精度温度圧力計	
	坑井健全性(アニュラス圧力等)		自然電位	
	微小振動※		坑内計測(海底設置も含む)	
CO ₂ Plume	CO ₂ 挙動把握	近 坑井近傍	坑内検層	
		坑井周辺	VSP、坑井間探査※	
		遠 広域	弾性波探査	
Leak	地層水分析※		観測井での採水と分析	
	地表変位		衛星を用いたリモートセンシング解析	
Environment (リスクに応じて実施)	海洋環境	必要に応じて	水質	海洋水の採水と分析
			底質	海底面からの採泥と分析
			気泡	音響探査
			同位体	海水を用いた同位体分析
	環境影響(飲用に供する地下水)※		陸域坑井からの採水とその分析	

黄色にハイライトした項目は、光ファイバー技術導入による省力化・コストダウンが期待される項目

サンゴ等の海洋生物が懸念材料（リスクの対象）である場合は、必要に応じてモニタリング対象（項目）に追加する

※観測井は、漏出リスクになりえるため、試掘井・評価井などの既存坑井を可能な限り活用予定。

2-7. エリアAにおけるモニタリングプランの事例（具体案）

柔軟性をもって合理的な監視を行うことが肝要

- 操業監視
 - 温度・圧力を監視し、想定内であることを確認。
 - 坑井健全性の強化は、坑井への到達が確認された後
 - 通常センサーと光ファイバー（DSS（歪）, DAS（振動）, DTS（温度））併用
 - 冗長性確保、空間サンプリング量の増加、キャリブレーション可能
 - データの質とメンテナンス性を向上、コストを最適化
 - ツールの長寿命化（ステンレスベゼル使用）
- 貯留状況把握（CO₂プルーム、漏洩検知）
 - 圧入時
 - 坑井近傍におけるCO₂プルームの先端部把握＋時系列変化に主眼
 - 坑井周辺の広がり把握は坑井を用いた弾性波探査
 - 拡散速度を同定し、シミュレーションに役立てる
 - 広域を対象とした弾性波探査は、拡散速度に合わせたタイミングで実行
 - サイトの状況に適合させた頻度、仕様でのモニタリングが可能
 - 圧入後
 - プルーム先端部のモニタリングを継続しつつ、その結果に基づき、モニタリングを継続する項目、頻度について合理的な判断を行う。
- 環境
 - ベースラインの取得タイミングは圧入開始前＋圧入中の平時に実施。
 - 海洋環境調査は想定内の挙動から外れた場合、あるいはCO₂貯留コンプレックス外への移動等の漏出につながるような懸念があるときに実行
 - 陸上直下へ移動の兆候が出た場合には地表変位、飲用に供する地下水調査を追加
- その他
 - 地元からの要望に応じ、事業推進のためにモニタリング項目を適宜追加を検討

2-7. エリアAにおけるモニタリングプランの事例案

(モニタリング項目と技術)

- 諸外国の事例において実施されている主なモニタリング項目は以下の通り(青字は光ファイバー技術によって計測可能な項目)。
 - 操業状況 (operation)
CO₂組成、流量、坑口圧力・温度、坑底圧力・温度、アニュラス圧力*1、微小振動
 - 貯留状態 (plume)
弾性波探査(坑井内含む)、坑井検層*2、重力探査、電磁探査、電気探査、地表変位、歪
 - 漏洩 (leak)
腐食片試験、地層水分析、上層圧力、同位体分析
 - 環境 (environment)
海洋環境、陸域環境、環境影響、同位体分析

*1 アニュラス圧力は漏洩(leak)の監視にも適用可

*2 坑井検層は漏洩(leak)の監視にも適用可

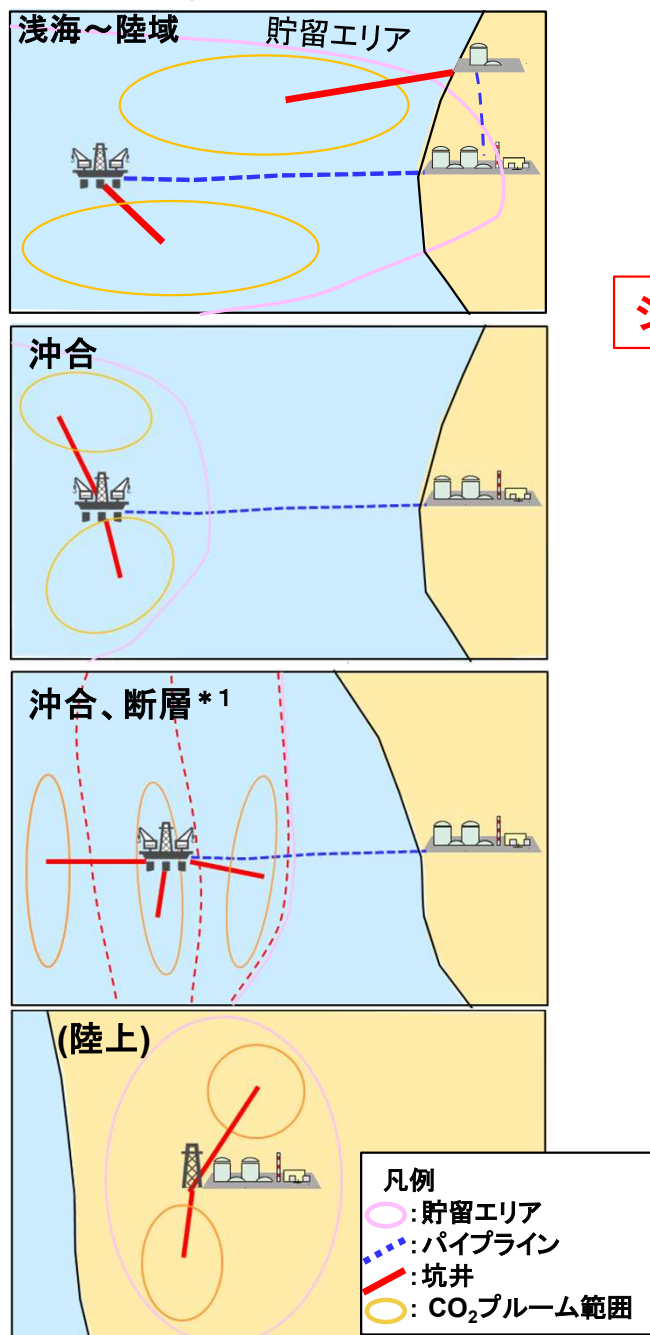
計測機器を光ファイバー技術に置き換えることによって、CCSモニタリング技術としての時間・空間サンプリング向上等が期待される事例

3. 2023年度検討予定のモニタリングプラン事例

- ・エリアB（沖合）
- ・エリアC（沖合＋断層で貯留域が隔離）
- ・その他（圧入におけるオペレーションが異なるケース）

日本におけるモニタリングプラン作成 (シナリオの背景)

モデル地点模式図



サイト 1 (例; エリアA 陸域～浅海、貯留域が陸上にまたがる)

- ・ 浅海から陸域の範囲に貯留を行う。
- ・ 離岸距離は4 km程度を想定し、陸域の分離回収施設から、沖合のプラットフォームまでパイプラインによるCO₂輸送を行う。
- ・ 陸域からの圧入も想定する。

シナリオ2 以降については今後検討する

サイト 2 (例; エリアB 沖合)

- ・ 沖合の深海域(水深200m～)にて貯留を行う。
- ・ 離岸距離は10km以上を想定。エリアAと同様に陸域の分離回収施設から沖合のプラットフォームまでCO₂輸送を実施。
- ・ 地震発生深度は貯留対象深度より大きい(30km～)

サイト 3 (例; エリアC 沖合、断層で貯留域が隔離*1)

- ・ 沖合の深海域(水深200m～)にて貯留を行う
- ・ 離岸距離は10km以上を想定。エリアAと同様に陸域の分離回収施設から沖合のプラットフォームまでCO₂輸送を実施。
- ・ 地震発生深度は貯留対象深度より大きい(30km～)
- ・ 断層は貯留層/遮蔽層に変位を与えている。
- ・ 断層コンパートメント化の可能性があり、区画毎に圧入井が必要。

サイト 4 (例; エリアD 陸上)

- ・ 排出源近傍の陸上にて貯留
- ・ 分離回収施設、圧入地点も陸上
- ・ 地震発生深度は貯留対象深度より大きい(30km～)
- ・ 市街地が近いいため、振動レベルが高い。

4.【参考】文献調査実施状況

4-1 文献調査状況（概要整理）

a. モニタリング技術の整理

モニタリング技術の整理

技術カテゴリー	技術概要	技術名称	適用方法			採用実績
			特徴	適用場所	適用対象	
弾性波探査	海上や坑井内にてエアガンなどの人工震源や微小振動・自然地震による弾性波の海底面および海底下からの反射波を捉え、受振器までの到達時間の差、振幅の変化等を解析することにより、海底下の地質構造および岩石物性を把握する調査法	3D 弾性波探査	●高分解能の立体的な地下地質構造の把握が可能	●構造物等のない広い海域 ●深度：海底下数 km	●サイト周辺の地質構造 ●貯留層および遮断層の構造・分布・厚さ ●貯留層内の CO2 分布	Sleipner、Snshvit、苫小牧 (検討) Goldeneye、ROAD
		2D 弾性波探査	●側線直下の平面画像を取得可能 ●3D 弾性波探査と比較してコストが低い	●3D 弾性波探査と比較して構造物等の影響は軽微 ●深度：海底下数 km		Sleipner、苫小牧
		P-Cable 弾性波探査	●高分解能の立体的な地下地質構造の把握が可能 ●3D 弾性波探査の地下浅部域の補完が可能 ●3D 弾性波探査と比較して小型でコストが低い	●3D 弾性波探査と比較して狭い海域でも適用可 ●深度：海底下約 1,000m 未満		Snshvit、メキシコ湾
		海底受振ケーブル (OBC) 海底ノード (OBN)	●高分解能の立体的な地下地質構造の把握が可能 ●常設型の場合、初期コストが高いが、反復探査のコストは抑えられる	●受振器配置の自由度が高く狭い海域でも適用可 ●深度：海底下数 km		苫小牧 (検討) Goldeneye
		サブトムプロファイラー	●地下浅部の断面画像を高分解能で取得可能	●狭い湾内や浅海で使用可能 ●深度：5～750m (振源の種類により対象となる探査範囲が異なる)	●海底表層部のモニタリング ●気泡の検出 (漏洩検知)	苫小牧、Sleipner (検討) Goldeneye
		VSP (Vertical Seismic Profile)	●坑井周辺の 3D 画像を高解像度で取得可能	●坑井から半径数十～百 m の範囲	●坑井周辺の地質構造	(検討) Goldeneye
		坑井間トモグラフィ	●複数の坑井間の平面画像を取得可能	●坑井間の距離は 1 km 以内 (陸域)	●坑井間の地質構造	海域 CCS での適用例なし
		受動振動モニタリング	●自然地震・微小振動による弾性波を利用して地下の圧力変化や地質工学的変化を観測可能	●海底もしくは坑井内	●CO2 貯留による誘発地震の評価に適用	苫小牧 (検討) Goldeneye、ROAD
重力探査	重量計を設置し、圧入 CO2 が貯留層中の間隙流体と置換することで生じるわずかな重力変化を捉えることによって、流体の密度変化を観測する手法	-	●周囲の流体との密度差が小さい場合は観測することが困難 ●干渉による重力変動やバックグラウンドノイズの影響が大きい	●船舶・AUV、海底面	●貯留層内の CO2 分布	Sleipner (検討) Goldeneye →計画から除外
電磁探査	海底下の電磁波に対する比抵抗を調査することにより地下構造を推定する手法 自然の電磁波を利用する (MT 法：Magneto-Telluric 法) と、人工的な信号源を利用する (CSEM 法：Controlled Source Electro Magnetic 法) がある	-	●電気探査との比較では感度は高いが、弾性波探査との比較では分解が低い	●海底面	●貯留層内の CO2 分布	Sleipner (検討) Goldeneye →計画から除外
電気探査	地層を構成する物質の比抵抗、誘電率、電気化学的性質に着目し複数の電流及び電位電極配置したケーブルを設置し人工的に発生した電位を測定して地下構造を調査する手法	-	●間隙流体との比抵抗の差から CO2 の分布を推定 ●低コストだが分解能は低い	●船舶・海底面	●貯留層内の CO2 分布	研究段階
音響探査	水中に音波を発振し海底面からの反射により海底情報を把握する手法	マルチビーム音響測深	●海底地形の面的データを取得可能 ●分解能が高く 10 cm 単位の地形変化を識別可能	●曳航体、ROV、AUV に搭載	●気泡の検出 (漏洩検知)	Sleipner、Snshvit (検討) Goldeneye、ROAD
		サイドスキャンソナー	●海底面の堆積物等を面的把握することが可能 ●分解能はマルチビーム音響測深より低い	●曳航体、ROV、AUV に搭載	●気泡の検出 (漏洩検知)	Sleipner、苫小牧 (検討) Goldeneye、ROAD

技術カテゴリー	技術概要	技術名称	適用方法			採用実績
			特徴	適用場所	適用対象	
坑井モニタリング	貯留層や坑井において高感度のデータを取得可能	圧力計・温度計	● 圧入 CO ₂ の物理特性、貯留層の流動状況、健全性管理の主要な方法	● 坑井内	● 坑井内圧力、温度	Sngshvit, K12-B、苫小牧 (検討) Goldeneye, ROAD
		物理検層	● 各種計測機器を坑井内に降下させ、深度毎の地層の特性、坑井・ケーシングの特性を取得	● 坑井内	● 地層の物理特性 ● 坑井・ケーシング等の状態（腐食等の把握）	K12-B (検討) Goldeneye, ROAD
		地下水サンプリング	● 坑井内の流体を採取し組成変化等をモニタリングする手法	● 坑井内	● 流体内の pCO ₂ 、pH、HC0 ₃ 、溶解ガス等（貯留層のモデル化、CO ₂ の漏洩確認に有用）	K12-B (検討) Goldeneye
		トレーサー	● 圧入 CO ₂ に SF ₆ や Kr 等の希ガスを添加することで貯留層内の CO ₂ の移動、漏洩の追跡を行う手法	● 圧入 CO ₂	● 貯留層内の CO ₂ の移動、漏洩	K12-B (検討) Goldeneye
海洋モニタリング	浅海域を対象とした漏洩検知のためのモニタリングツール	水中ビデオ	● 静止画や動画による観測を行う手法	● 曳航体、ROV、AUV に搭載	● 気泡 ● 微生物群集、生物相	Sleipner、苫小牧 (検討) Goldeneye
		海底（地表）変位モニタリング 地表傾斜	● 海底面の傾斜計測を行い、CO ₂ 圧入による地形変化を観測する手法	● 海底面	● 圧入 CO ₂ による帯水層の体積変化	Sleipner、苫小牧 (検討) Goldeneye
		海水センサー	● 各種センサーを併用することにより、周辺の水塊とは異なる化学的性質を持つ水中部分の識別を行う手法	● 水柱	● CO ₂ の漏洩検知	Sleipner、Sngshvit、苫小牧 (検討) Goldeneye
		採水分析	● 海水サンプルを採取し、ガス含有量等を測定する手法	● 水柱	● CO ₂ の漏洩検知	Sleipner、Sngshvit、苫小牧
		採泥分析	● 海底の堆積物を採取・測定する手法 ● 経時観察により CO ₂ 漏洩を示唆する変化の検知に使用	● 海底	● CO ₂ の漏洩検知 ● 底生生物相	Sleipner、Sngshvit、苫小牧 (検討) Goldeneye
		生態系反応モニタリング	● CO ₂ 漏洩に伴う周辺水域の水質変化に伴う生態相の変化を、バイオマーカーを用いて観察する手法	● 海底	● CO ₂ の漏洩検知 ● 底生生物相	Sleipner、苫小牧 (検討) Goldeneye

4-1 文献調査状況（概要整理）

b.モニタリングの考え方に関する法的要件の整理

モニタリングの考え方に関する法的要件の整理

モニタリング分科会 第1回
参考資料 2

項目	EU	英国	ノルウェー	米国	カナダ ※アルバータ州	豪州 ※沖合の場合	日本（参考）
法体系	大きく分けて、米国や日本のような「地下水保護や海洋環境の保全を目的とした規制」、英国、ノルウェー、カナダ、豪州の「資源開発に関わる規制」の特組みの中で運用されている。EUが CCS のみを目的とした規制を有するが、CCS 指令は、具体的な運用について加盟各国の国内法の中で取り扱われるものとしている。ノルウェーにおいては、資源開発に関わる規制以外に CCS のための規制が存在する						
根拠法	EU-CCS 指令	Energy Act 2008	Petroleum Regulations Storage Regulations Pollution Regulations	安全飲料水法	Mines and Minerals Act Carbon Sequestration Tenure Regulation	沖合石油・温室効果ガス貯留法 ※沿岸海域においては、各州、準州の制定する法令が適用	海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律
管轄機関	-	Oil and Gas Authority (OGA)	石油・エネルギー省 気候・環境省	米国環境保護庁 (EPA)	Alberta Energy Regulator	国家海洋石油安全環境管庁 (NOPSEMA)	環境省
規制対象	CCS のための規制	石油・ガスや原子力などのエネルギーに関する規制	CCS のための規制および石油・ガス開発のための規制	地下水保護のための規制	石油・ガス開発のための規制、CCS のための規制	石油・ガス開発のための規制	海洋環境保全のための規制
法的要件							
サイト選定の前提	貯留コンプレックスおよび周辺地域の特性を把握した上で、CO ₂ 漏洩リスク、人の健康や周辺環境への影響について、短期的・長期的なリスク評価を実施	EU-CCS 指令に準拠	EU-CCS 指令に準拠	CO ₂ 流が安全に圧入できて地下飲料水源に影響を及ぼさないような基準を満たした適切な貯留サイトを選定	サイト固有の特性を加味したうえでリスク評価を実施しサイトを選定 (RFA より) ただし RFA では同時に、一般的なサイト選定における基準策定の必要性についても言及	サイトが安全に GHG を恒久的に貯留できること、操業に関するリスクの特定と排除・低減に伴う残存リスクの評価を示した上でサイトを選定	地質学的観点、技術的観点、自然保護の観点からなる廃棄海域の選択基準に基づきサイトを選定
目的	重大な漏洩リスクや、環境または人の健康への重大なリスクが存在しないことの確認	EU-CCS 指令に準拠	EU-CCS 指令に準拠	プロジェクトが許可内容に従って操業されていること、地下飲料水源に危険が生じていないことの確認	公共の安全の確保と地下飲料水源が毒影響を受けていないことの確認 (RFA より)	重大な事象の適時検知、サイト計画における予測からの逸脱の検知	廃棄した CO ₂ ガスが予定した位置に確実に貯蔵され、海洋環境への影響が事前の予測・評価の範囲に収まっていることの確認
モニタリング計画	貯留許可申請時に策定 (5年ごとに更新) 更新の際には漏洩リスクの評価、環境及び人の健康に対するリスクの評価、新たな科学的知識、利用可能な最良の技術の改善を考慮	EU-CCS 指令に準拠	EU-CCS 指令に準拠	許可申請時に策定 (最低 5 年に一度見直し) 坑井の建設段階で取得したデータを考慮の上、必要に応じて計画の改定を行う	貯留許可申請時に策定 (3年ごとおよび許可更新時に更新)	圧入許可申請時に策定するサイト計画に含まれる (5年に一度見直し)	監視計画は許可申請書の一部として位置付け (許可期間：最長 5 年) 圧入の継続の際は新たに許可を得る必要があり、その時点で適切な監視計画を策定する
	圧入終了後は別計画 (許可申請時に案を提示)			圧入終了後は別計画 (許可申請時に案を提示)	圧入終了後の計画について明確な記載はなし	圧入終了後は別計画 (許可申請時に案を提示、圧入終了の 5 年前までに要見直し)	圧入終了後も圧入時と同様に許可期間毎に計画を策定
手法	以下の観点を考慮し、計画策定時点での BAT を選択する ● 地下・地上における CO ₂ の存在、位置、移動経路を検出できる技術 ● CO ₂ 流の圧力・体積の挙動、水平・垂直における飽和度の分布に関する情報を把握することが可能な技術 ● 従来は検出出来なかった潜在的な漏出経路に関する情報が把握できるような広域モニタリング技術	EU-CCS 指令に準拠	EU-CCS 指令に準拠	手法の選択に当たっては EPA と協議の上サイト特有の条件や選択することとされており、計画書の中で以下の項目を提示することが推奨されている ● 選択した手法の説明とその妥当性 ● 選択した手法とパラメータとの適合性 ● モニタリングを行うパラメータ ● 選択した手法の期待される性能または感度 ● 手法を適用するための方針手法を適用するための方針 ● 結果の分析と解釈に用いる手順結果の分析と解釈に用いる	採用すべきモニタリング技術や実施すべき時期について詳細は規定されていない	採用すべきモニタリング技術や実施すべき時期について詳細は規定されていない	● CO ₂ ガスの組成については、省令で規定されているが BAT の観点からその他の方法の採用も可 ● CO ₂ ガスの位置及び範囲、圧入による地層内圧力等については、BAT が前提 ● 経時変化を比較するデータについては事前評価と同じ方法を採用することになっているが、BAT に基づいてより良い方法が実施可能であれば、事前評価のデータとの比較も考慮の上、採用することが出来る

モニタリングの考え方に関する法的要件の整理

モニタリング分科会 第1回
参考資料 2

項目	EU	英国	ノルウェー	米国	カナダ ※アルバータ州*	豪州 ※沖合の場合	日本(参考)
項目	詳細な規定はなく、ベースライン、操業中、閉鎖後、各段階において、モニタリングの目的を満たす項目を選定 ただし、以下の項目は必ず実施する ● 圧入設備付近の CO₂ の放出 ● 圧入坑口における CO₂ の流量 ● 圧入坑口付近の CO₂ の圧力と温度 ● 圧入 CO₂ 流の化学分析 ● 貯留層の温度と圧力 (CO₂ 相の挙動と状態の把握)	EU-CCS 指令に準拠	EU-CCS 指令に準拠	手順 ● CO₂ 流の物理的・化学的特性 ● 圧入圧力、圧入レート、流量 ● 坑井の材料の腐食モニタリング ● 地下水源のモニタリングと遮断層上の地層の地球化学的变化 ● 坑井の健全性試験 ● 圧力解析 (フールオフ試験) ● CO₂ ブルームの存在検知 EPA 長官が必要と判断した場合 ● 大気および土壌中ガス ● レビュー区域のモデリングの改善に必要な情報 ● その他	詳細な規定はなく以下の項目が規定されている ● 事業者が実施する MMV 活動 ● 当該 CO₂ 貯留により鉱物採掘に影響を及ぼす可能性の分析 ● その他、大臣が求める情報	詳細な規定はなく、下記のモニタリングに関する要件に基づき項目を選定 ● 貯留した GHG 物質の挙動 ● 貯留する GHG 物質の輸送と圧入に伴う漏出モニタリング ● 貯留した GHG 物質の坑井からの漏出モニタリング	通常時監視 ● CO₂ ガスの状況 数量、組成、圧入圧力・速度・圧入時の温度等の経時変化 (1 回以上/年) ● 海域の状況 CO₂ の圧入等による地層内変力 (1 回以上/年) ● 地層内温度変化等の地層及び地層の状況並びに CO₂ ガスの位置及び範囲等 (2 回程度/許可期間) ● 海水の化学的性状 (1 回/年) ● 海洋生物及び生態系の状況、海洋の利用の状況 (1 回以上/許可期間) 概念時監視 ● 海底下廃棄をした地層内の圧力の経時的変化 ● 海底下廃棄をした地層の状態 ● 海底下にある CO₂ ガスの位置・範囲 ● 海水の化学的性状 ● その他 異常時監視 ● 海底下廃棄をした地層内の圧力の経時的変化 ● 海底下廃棄をした地層の状態 ● 海底下廃棄をした CO₂ ガスの状態の詳細 ● 海水の化学的性状 ● 海洋生物及び生態系の状況 (必要な場合) ● 海洋の利用状況 (必要な場合) ● その他
結果の報告	少なくとも 1 年に 1 回は報告 (頻度は管轄当局により決定)	EU-CCS 指令に準拠	EU-CCS 指令に準拠	● 半年ごとに報告 ● CO₂ 流が地下水源に影響を及ぼした場合は速やかに圧入を停止し、原因を特定して 24 時間以内に EPA 長官に報告、その後修復対応計画を実行	モニタリング結果を示す報告を 1 年に 1 回提出	モニタリング結果は可能な限り速やかに提出する	通常監視 項目により異なるが多くの場合、年 1 回以上環境大臣に報告 概念時監視、異常時監視 事態の解消が確認出来るまで、定期的かつ直ちに環境大臣に報告
モニタリングの義務	貯留サイト閉鎖後、責任移転までの期間 (原則 20 年以上)	EU-CCS 指令に準拠	EU-CCS 指令に準拠	圧入終了後、最低 50 年間 (地下飲料水源に危険を及ぼさないことを証明できる場合は頻度の減少、期間の短縮が可能) ※責任は事業者に永久に帰属する	貯留サイト閉鎖後、州政府へ責任移転までの期間 (具体的な期間の規定は未定) は事業者によりモニタリングの義務 ※RFA では最低 10 年を標準	圧入終了からサイト閉鎖までの期間は事業者がモニタリングを実施 (最長 5 年) サイト閉鎖後のモニタリングは連邦政府が実施 ※長期責任はサイト閉鎖から最低 15 年後に移転が認められる	圧入終了後も圧入時と同様に許可申請を行う必要があり、モニタリングの義務も変わらず課せられる 責任移転に関する記載はない

* カナダのアルバータ州については、詳細に関する規定は確認されておらず、ここでは規則の枠組みを網羅的に検討した Regulatory Framework Assessment (RFA) の内容や、既存の油ガス関連の Directive のうち関連が強い (ただし CCS に特化した内容は確認できなかった) と考えられるものを参照した。

4-2 一般公開用資料に添付する モニタリング技術紹介事例

1. 光ファイバー計測技術
2. 弾性波探査技術（修正中）

4-2-1. モニタリング技術紹介 (例: 光ファイバー計測技術)

CCS モニタリング技術 - 光ファイバーによる計測技術 -

技術概要

光ファイバーによりひずみ、温度およびひずみから換算される圧力を計測する技術で、点センサー方式と分布式センサー方式があり、CCS においては分布式センサー方式の採用が検討されている。

分布式センサー方式について

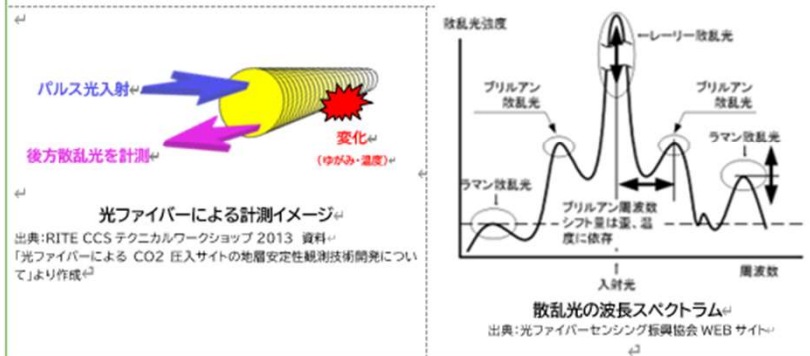
点センサー方式と異なり光ファイバーに加工を行わないため、加工による光の減衰がなく光の伝送距離が大きいのが特徴。点センサー方式よりも長距離かつ連続的な多点計測が可能のため、石油ガス生産等の坑内温度分布の連続モニタリング(DTS:Distributed Temperature Sensor)等で多く用いられる。また温度変化および光ファイバーのひずみの変化を同時に測定可能。

産業への応用

光ファイバーを用いた計測技術は、先述のとおり石油ガス生産での開発での利用の他、橋梁、トンネルやプラント設備等に敷設し、ひずみ・振動センサーとして用いることで、損傷・不具合の早期発見、点検箇所の絞り込みによるメンテナンスコストの削減等へ活用され、次世代の構造物のメンテナンス技術として注目されている。

モニタリングの原理 ①

測定には光ファイバー内で発生する散乱光を利用する。光ファイバーの素線はガラス(溶融石英)からなる高屈折率のコアと低屈折率のクラッド層で包んでいる。コアに入射されたレーザー光パルスは光ファイバー内部で散乱される。散乱光にはブリルアン散乱光、レイリー散乱光、ラマン散乱光の3種類があり、それぞれの特徴を利用して、温度、ひずみ等の変化量の測定が可能となる。



モニタリングの原理 ②

ブリルアン散乱光

散乱光が発生した場所のひずみや温度の変化に伴い、周波数が変化する(周波数シフト)特徴を有する。

測定に使用する光ファイバーの特性を事前に確認しておき、測定したブリルアン散乱光の周波数シフト結果に光ファイバーのひずみや温度の係数を用いることにより、ひずみや温度の変化を測定することが可能。

レイリー散乱光

入射光と同じ周波数で戻る散乱光で、散乱光が発生した場所の光ファイバーの損失の変動に伴い散乱光の強度が変化する特徴を有することから、レイリー散乱の強度を測定しひずみ量を解析することが可能。

また、レイリー散乱の位相を測定し振動を解析することで、DAS(Distributed Acoustic Sensing)の計測にも用いられる。

ラマン散乱光

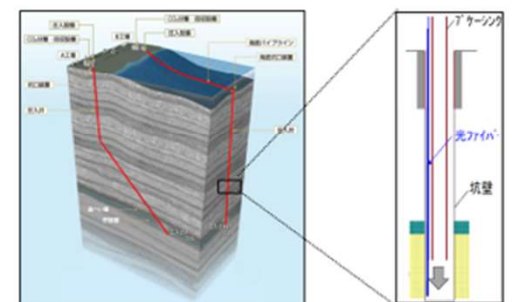
ラマン散乱光には、入射光よりも周波数の低いストークス光と周波数の高いアンチストークス光があり、発生した場所の温度変化に伴い散乱光の強度が変化する特徴を有する。

特にアンチストークス光の強度は散乱を起こした位置での光ファイバーの温度により大きく変化し、光ファイバーの各部の温度を知ることが可能。

CCS モニタリングへの活用

光ファイバー技術の期待される効果としては、位置、時間の連続データを取得可能であること、半永久的に使用できることと、音響・温度・ひずみといった多項目でのデータ取得に活用できることで、CCS モニタリングの品質向上とコスト削減につながる。

- 従来は温度や圧力の測定は別途坑井中にセンサーを入れ、定期的なメンテナンスも必要とされたが、光ファイバーの場合は一度設置してしまえば ケーブル部分のメンテナンスが不要
- 廃坑後は、通常であれば温度・圧力センサーは撤去されるが、光ファイバーの場合は設置したままなので、廃坑の健全性確認にも活用できる。



CCSにおける光ファイバー計測技術の適用例

FIN