

**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
報告書
【2021 年度～2023 年度】**

2026年2月

日本CCS調査株式会社

はじめに：本報告書の位置づけ

日本CCS調査株式会社（JCCS）が経済産業省および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より受託している「苫小牧における CCS 大規模実証試験」では、実証の遂行に係る技術的課題に対して有識者からの助言と確認を得るために「課題検討会」と呼ぶ有識者委員会を JCCS 内に設置している。2019 年に実証試験目標の 30 万トン CO₂ 圧入を達成し、圧入停止後のモニタリングを継続する中、課題検討会では、将来の CCS 社会実装に向けたモニタリングに関し、実証試験の成果を踏まえた上で、経済性も含めたあるべき姿を提案し、社会実装を促進するための法整備等に資することの重要性が課題として挙げられた。そこで、2021 年度～2023 年度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」（「分科会」）を設置し、将来の CCS 社会実装を念頭に、安全な操業、貯留層管理を目的として、日本におけるモニタリングのあり方を、現行法規制にとらわれることなく、技術的、経済的な観点に加え、地元との信頼関係醸成等にも配慮して検討した。

その検討内容については、第 2 回カーボンマネジメント小委員会（2023 年 11 月 6 日開催）の資料 4「あるべき CCS 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」と題して一部概要を報告した。その後、同報告内容の一部修正を含む「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報告—最終とりまとめ—」が分科会（第 8 回、2023 年 11 月 16 日開催）および課題検討会（第 21 回、2024 年 3 月 8 日開催）で了承されているが、その全容は未公表となっている。

本報告書は、現在、2026 年 5 月の CCS 事業法の全面施行に向けた貯留事業に係る政省令の策定作業が進められており、今後法令に基づくより詳細なガイドライン等が検討されることが想定されることから、その検討の一助としていただくべく、また同時に、「先進的 CCS 事業」として選定され進行中のプロジェクトに関与する事業者等の検討に資することを目的として、スライド形式で整理されていた「最終とりまとめ」の内容を文章による補足を交えて解説したものである。本報告書のこのタイミングでの公表が CCS 関係者にとって有益なものとなれば幸いである。

なお、ここで示す内容は、上記目的と公表タイミングの重要性に照らし、2023 年度までの JCCS における検討内容を暫定的に反映したものとしており、その後も継続している苫小牧実証試験におけるモニタリングに関する経過や課題検討会における議論をカバーする

ものとはなっていない。そうした追加情報については、別途、実証事業に係る成果報告として整理することを予定している。また、CCS モニタリングは、今後世界で蓄積される実績や知見、技術の進展に応じて更新されていくべきものであることを付言する。

目次

はじめに：本報告書の位置づけ	i
第1章 「あるべき CCS モニタリングの姿」 提案骨子	1
1.1 提案骨子	1
1.1.1 モニタリングの主な目的	3
1.1.2 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	3
1.1.3 合理的なモニタリングのあり方（一次監視と二次監視）	4
1.1.4 法規制対象外とすべきモニタリング	4
1.2 あるべき CCS モニタリングの姿	5
1.2.1 CCS モニタリングのあるべき姿とは	5
1.2.2 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	6
1.2.3 モニタリング計画の設計	6
1.2.4 日本における CCS モニタリング計画作成	7
第2章 CCS モニタリング（MMV*）の考え方	9
2.1 CCS モニタリングの目的の分類	9
2.1.1 Jenkins et al.（2015）による定義	9
(1) 封じ込め（Containment）の保証	9
(2) 適合性（Conformance）の保証	10
(3) 環境影響のモニタリング（Environmental impact monitoring）	10
2.1.2 本報告書における整理	10
2.2 CCS プロジェクトにおけるモニタリング事例	11
2.2.1 Sleipner（1996～）	11
2.2.2 Quest（2015～）	12
2.2.3 Porthos（2026～の予定）	14
第3章 リスクに基づいたモニタリング計画の設計	16
3.1 「漏洩」と「漏出」の違い	16
3.2 モニタリング計画の策定の基本方針	16
3.3 リスクに応じたモニタリング設計の事例（リスクベースの考え方の導入）	17
3.3.1 Quest	18
3.3.2 Porthos	19
第4章 モニタリング計画の設計において考慮すべき事項	22
4.1 経済性	22

4.2	温暖化対策としての効果（アカウンティング）	22
4.3	社会的受容性（PA）	22
4.4	モニタリング結果の共有と定期的な見直し	24
第5章	日本におけるモニタリング計画のモデル案	25
5.1	モニタリング計画作成の基本方針	25
5.2	エリア A（浅海～陸域）	27
5.2.1	前提条件	27
5.2.2	モニタリング計画	29
5.3	エリア B（沖合、風力発電区域と一部重複）	29
5.3.1	前提条件	29
5.3.2	モニタリング計画	30
5.4	エリア C（沖合、断層で貯留層が隔離）	31
5.4.1	前提条件	31
5.4.2	モニタリング計画	32
5.5	エリア D（陸上）	33
5.5.1	前提条件	33
5.5.2	モニタリング計画	34
付録1	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実施概要	36
A.	開催日時	36
B.	委員	36
付録2	有識者ヒアリング実施先	37
A.	国内有識者	37
B.	海外有識者	38

第1章 「あるべき CCS モニタリングの姿」提案骨子

苫小牧における CCS 大規模実証試験は、我が国で初めて、CO₂の分離・回収から圧入・貯留、そしてモニタリングまでを一貫して実施した大規模プロジェクトである。CCS は、CO₂を回収して地中に貯留すれば終わりではなく、圧入開始後から圧入停止後を含む長期にわたり、貯留の安全性を科学的根拠に基づいて確認し続けることが不可欠となる。このため CCS プロジェクトにおけるモニタリング (MMV*1) は、漏洩・漏出リスクの早期把握、環境影響の確認に加えて、国際標準との整合性や、事業者・行政・地域社会の間での透明性確保という観点からも重要な役割を担う。他方で、その設計が過度に重くなれば事業性や持続性を損なう懸念が生じるため、必要十分性と合理性を備えた枠組みが求められる。

「はじめに」に記載したとおり、苫小牧実証試験では、技術的課題に対して有識者から助言と確認を得るため、日本 CCS 調査株式会社 (JCCS) 内に「課題検討会」を設置し、実証の進捗に応じて検討を重ねてきた。2019 年に累計 30 万トンの CO₂ 圧入を達成し、圧入停止後もモニタリングを継続する中で、実証で得られた知見を踏まえつつ、将来の社会実装段階に適した現実的なモニタリングの考え方を整理し、今後の CCS 事業に係る制度運用（法令、ガイドライン等の検討を含む）や、事業者によるモニタリング計画の策定・見直しにおける検討の参考情報を提示することが重要な課題として共有された。

この課題意識のもと、2021 年度から 2023 年度にかけて、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」（「分科会」）を設置し、将来の商用規模 CCS を念頭に、貯留層管理と安全な操業の観点から、技術面と経済面の両立、さらに地域との信頼関係醸成にも配慮したモニタリングのあり方を、現行制度にとらわれずに検討した。分科会での検討内容の一部は、2023 年 11 月のカーボンマネジメント小委員会*2 (CM 小委) において「提案骨子 (案)」として報告され、その後の分科会および課題検討会での審議を経て最終とりまとめとして整理されている。

本章では、最終とりまとめの内容を踏まえ、「あるべき CCS モニタリングの姿」を構成する中核的な考え方 (提案骨子) やその基本的考え方を、後続章で扱う詳細説明の導入として簡潔に示す。

なお、本章で示す提案骨子は、個々のプロジェクトの前提条件やリスク評価に応じて、項目・頻度・技術選択が適切に見直されるべき「考え方の枠組み」を提示するものであり、後続章では、その背景となる考え方や、国内外の事例、計画設計上の留意点等を順に解説する。

1.1 提案骨子

本節では、「あるべき CCS モニタリングの姿の『提案骨子』」について説明する。図 1-1 に提案骨子を示す。

1-3. あるべきCCSのモニタリングの姿のまとめ 「提案骨子」

4/4

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出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、また漏出につながる変化がないかを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が利用に供する地下水等、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次監視の対象(項目)に追加するものとするとも考慮する。

図 1-1 あるべき CCS モニタリングの姿「提案骨子」

1.1.1 モニタリングの主な目的

CCS プロジェクトは、安全に CO₂ 貯留事業を継続するため、国際的な基準等に従って貯留サイトを選定^{*3}したうえで行われる。そして、モニタリングはその基準に沿って事業が行われているかの妥当性を検証するために行われる。モニタリングの主な対象は、Jenkins et al.(2015)^{*4}や、Jenkins(2020)^{*5}において世界各国の CCS プロジェクトのレビューとともにまとめられている。モニタリングの目的の詳細については第 2 章で述べるが、概要は以下の通りとなる。

- (1) 圧入システムの不具合を検知すること (Containment)
- (2) 貯留状態の把握と漏出につながる変化を監視し把握すること (Conformance)
- (3) 地表付近、海洋の環境に焦点をあてて漏出を監視すること (Environment)

これらのモニタリングにより、安全かつ信頼性の高い CO₂ 貯留が実現されるとの考え方が基本となっている。

1.1.2 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

CCS のモニタリングにおける漏洩 (Leakage) と漏出 (Seepage) は以下の様に定義することとした (図 1-2)。

漏洩とは、地中に圧入した CO₂ が、想定貯留域 (貯留コンプレックス^{*6}) からその域外へ移動するものの、依然として地中に存在する状況のことである。他方、漏出とは、漏洩した CO₂ が大気や海水中、あるいは地下水などの身近な生活環境にまで到達することである。したがって、平時の監視において重点的に行われるべきモニタリングは、漏洩を察知することである。一方、漏出の監視は、少なくとも地中における漏洩が確認された場合やそのリスクが高まった際に限定して実施することが適切である。この考え方は文献調査^{*7}や国内外のヒアリングでも支持されている。また、漏出の指標として、海洋汚染防止法^{*8}で規定されている海水の採水モニタリングなどの手法は、苫小牧実証試験の結果では、自然変動が大きく、

*1 本書における「モニタリング」とは、測定 (Measurement)・監視 (Monitoring)・検証 (Verification) を指す。

*2 総合資源エネルギー調査会 資源・燃料分科会 カーボンマネジメント小委員会 (第 2 回) / 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 産業保安基本制度小委員会 (第 11 回) 合同会議

*3 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メントを実施。

*4 Jenkins, Charles Andy Chadwick, Susan D. Hovorka, The state of the art in monitoring and verification—Ten years on, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol 40, 2015, Pages 312-349, ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.009>.

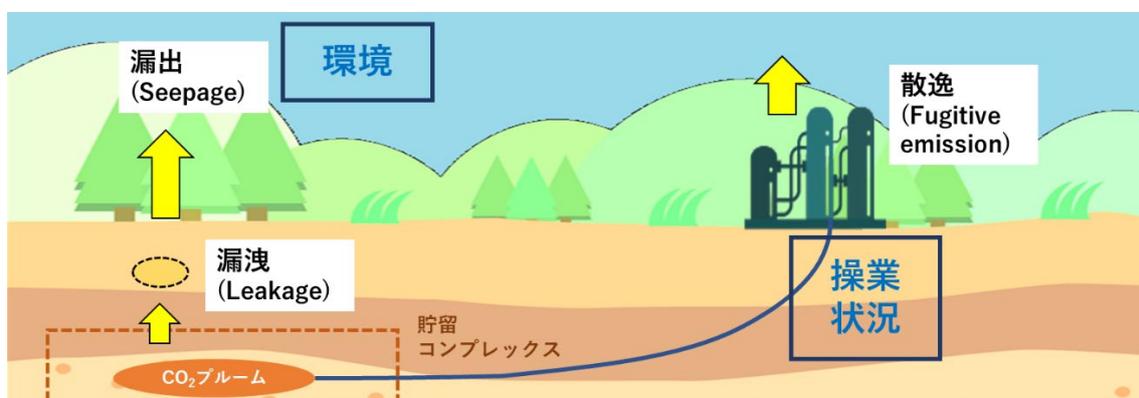
*5 Jenkins, Charles, The State of the Art in Monitoring and Verification: an update five years on, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol 100, 2020, 103118, ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103118>.

*6 一つまたは複数の貯留層と遮蔽層の組み合わせからなる、CO₂ が貯留されることが想定される地下の空間領域を指す。

*7 IEAGHG (2019) The Shell Quest Carbon Capture and Storage Project EBN, TAQA (2021) Aanvraag CO₂-opslagvergunning reservoir P18-2

*8 海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律

漏出を検知することは極めて困難であると結論付けられた。現状では、しかるべき精度の結果が得られるようになるまでは参考値にとどめることが望ましい。



注：散逸は本報告書では扱わない

図 1-2 漏洩と漏出

1.1.3 合理的なモニタリングのあり方（一次監視と二次監視）

合理的モニタリングにおいては、「漏洩」と「漏出」を明確に区別した上で、「漏出」につながる兆候としての「漏洩」や想定外の事象の有無を確認するための一次監視と、一次監視で何らかの異常が認められた場合に「漏出」の検知等を目的に行う二次監視とに分類し、平時からすべてのモニタリング項目について実行する必要はないと考える。

すなわち、具体的なモニタリング計画は、以下のような枠組みに基づいて設計することが適切である。一次監視は、圧入システムの不具合を検知する Containment と貯留状態の把握と漏出につながる変化を監視し把握する Conformance のモニタリングに対応する。これは、平時から実施され、圧入井の作業状態（圧力、温度、流量）や、微小振動・自然地震の監視を常時行い、地層内での CO₂ の挙動や広がり把握するものである。なお、圧入中は圧入井から直接の漏出も懸念されるため、作業監視等のモニタリングが含まれる。二次監視は Environment のモニタリングに対応する。CO₂ の漏洩が検知された場合、またはその可能性が高まった場合に実施し、漏出の確認やリスク軽減策、対応策へとつなげるモニタリングである。以上、一次監視と二次監視の適切な区分と実行により、効率的で効果的なモニタリングが可能となると考えられる。

1.1.4 法規制対象外とすべきモニタリング

社会的関心等への対応として行われるモニタリングは、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追加で取り組むべき項目である。また、ロンドン議定書*9にも記載のあるサンゴを含む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

*9 廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（通称：ロンドン条約）、1972年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約の1996年の議定書（通称：ロンドン議定書）

合は、必要に応じて一次、二次以外のモニタリングの対象（項目）として追加することもあり得る。

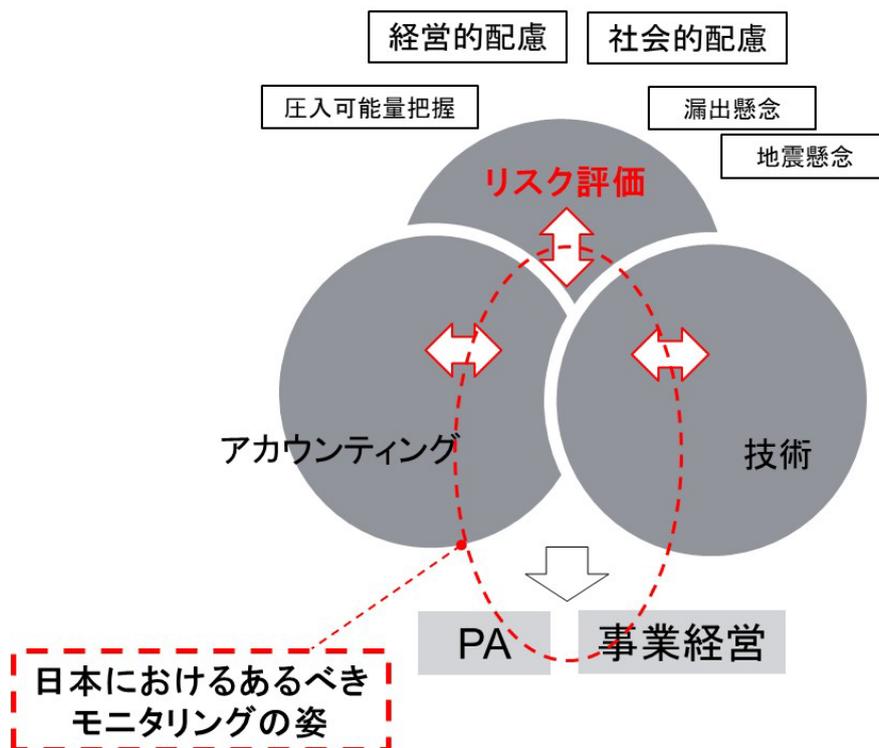
1.2 あるべき CCS モニタリングの姿

第2回 CM 小委では、提案骨子（案）とともに「日本におけるモニタリングモデルプラン」として、CCS モニタリングのあるべき姿（基本的な考え方）や、モニタリングプラン作成の具体的な進め方等を提示した。本節では、一部前節と重複する内容はあるが、あるべき姿の基本的な考え方について解説する。

1.2.1 CCS モニタリングのあるべき姿とは

図 1-3 に日本におけるあるべきモニタリングの姿のイメージを示す。合理的な CCS モニタリングを考える際は、法規制に則っていることはもとより、CCS プロジェクトのリスク評価を適切に行うことを基本として、技術的な面のみならず、アカウンティング、社会的受容性（Public Acceptance, PA）といった社会的側面、および事業性といった経営的側面など、複数の視点で考慮する必要がある。リスク評価には事業性や誘発地震なども含まれる。なお、分科会ではアカウンティングは検討対象外とした（4.2 節参照）。

上記のすべての視点で全体を俯瞰し、「過剰な要求を避け、効果的でシンプルかつ必要」と総合的に判断される内容が「あるべきモニタリング」であり、その内容はプロジェクト進行に伴い、経時的に見直しが行われるべきものである。



注：点線の範囲内が「あるべきモニタリング」の内容となるが、この範囲は個々のプロジェクトの状況に応じて変化し得る（赤の矢印で示されるように点線が伸縮し範囲が拡大または縮小する）。

図 1-3 日本におけるあるべきモニタリングの姿のイメージ

1.2.2 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

まず、リスク評価に基づいてモニタリングの対象、項目を選定する。モニタリングの項目は、操業状態の監視、CO₂貯留状態の監視を基本として、事業期間全体にわたるリスクを評価してモニタリング計画を立てる。最も重要なことは、サイト特有の前提条件を考慮することである。

以下のモニタリング計画の検討では、モニタリングのカテゴリーとして、①操業状態、②貯留状態、漏洩、③環境、漏出に分けて検討を行う。先に述べた3つの目的との関係は、①は Containment、②は Conformance、③は Environment に対応する。図 1-4 にモニタリングのカテゴリーと各モニタリング項目の関係を示した。

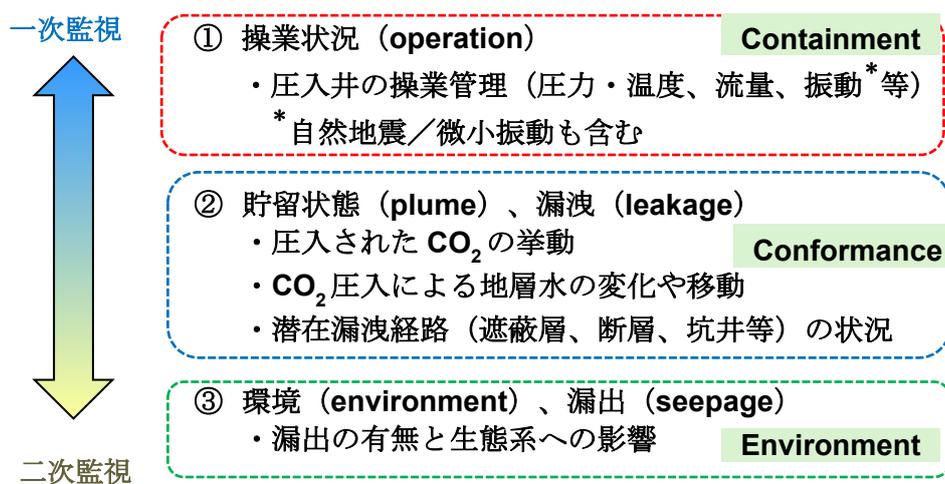


図 1-4 モニタリングのカテゴリーと各モニタリング項目の関係

モニタリングは、先に述べたように「一次監視」と「二次監視」に分けて考える。一次監視は、後述するように想定されるリスク要因の状態を判断するための監視で、平時から行われる、操業の監視、貯留状態の監視、漏洩リスクの監視が含まれる。二次監視は、想定されたリスクが上昇した場合や想定と乖離した場合に実施するもので、追加的に行う状況変化の監視、対策検討のための監視が含まれる。なお、二次監視が必要になることを想定して、二次監視項目としたベースラインデータ（主に環境に関する項目）を、圧入開始前に少なくとも1回は取得しておくべきである。

プロジェクトが進むにつれて知見や各種データが蓄積され、リスクの評価も変わり得る。したがって、リスクの再評価を行い、モニタリング項目、頻度、適用技術を見直してモニタリング計画を柔軟に更新することが望ましい。また、事業期間中に技術の進歩、他事業の知見の恩恵を受けられる可能性があるため、その時点で利用可能な最適な技術（Best Available Technology, BAT）の導入を検討するべきである。

1.2.3 モニタリング計画の設計

モニタリング計画は、一次監視と二次監視を明確に区分し、リスクに応じてモニタリング実施項目を選定するとともに、項目ごとに必要度に見合ったモニタリング手法の選定、測定

箇所数や頻度等の設定を検討する。

平時の一次監視結果から漏洩の懸念があると判定された場合には、二次監視に移行するが、二次監視へ移行するために判定を行う必要がある。図 1-5 にその考え方を示す。

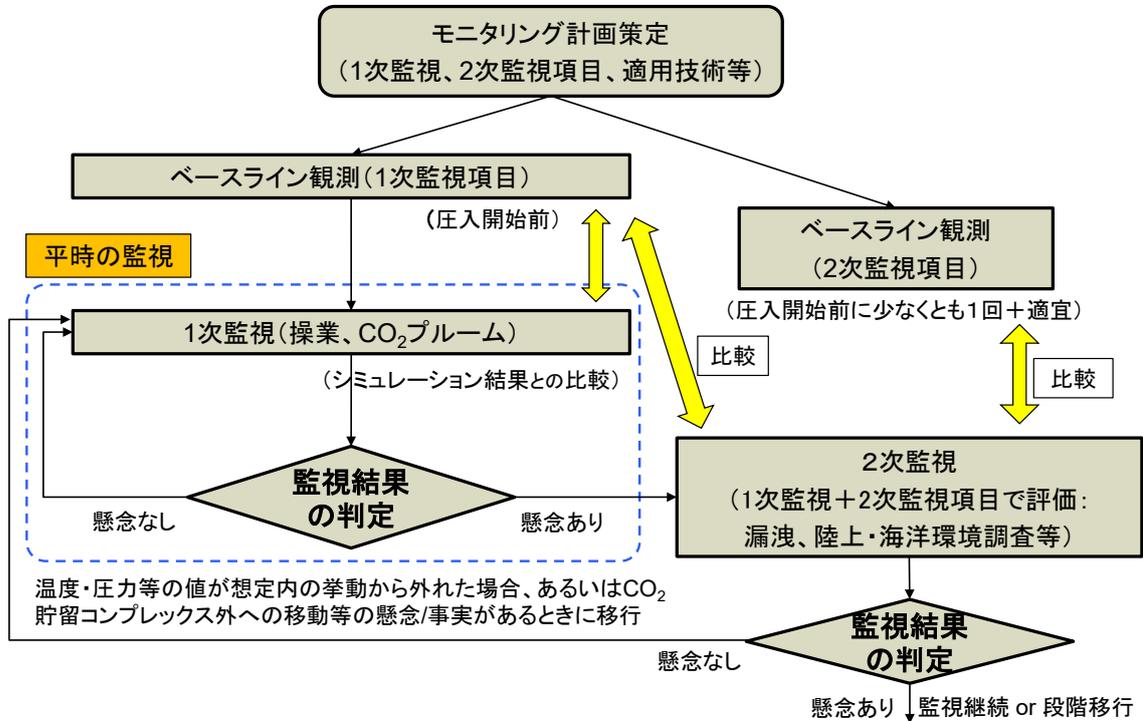


図 1-5 モニタリング計画の設計：二次監視への移行判定の考え方

1.2.4 日本における CCS モニタリング計画作成

モニタリング計画を作成するにあたっては、まず、サイトにおける地表・地下等に関する既往の情報や文献を整理し、リスク要因を洗い出すとともに再認識する（図 1-6）。懸念要因としては、地域・実施エリアの特性（市街地からの距離、地元の理解等）、地下の状態（廃坑井の有無、圧入性等）、開発コスト（地上設備、坑井、モニタリング設備等）等、幅広い観点から検討する必要がある。次に、列举した懸念要因のうち、CO₂漏出、地震の誘発、圧入困難等、事業継続に大きな影響を及ぼす可能性のある高リスク事象につながる要因を特定し、それらの事象を把握し、適切に対応するためのモニタリング項目を選択する。さらに、選定したモニタリング項目に対して、適用可能なモニタリング技術の選択や実施時期・頻度の検討を行うとともに、社会的・経營的側面への配慮やコスト評価を行い、総合的なモニタリング計画として取りまとめる。

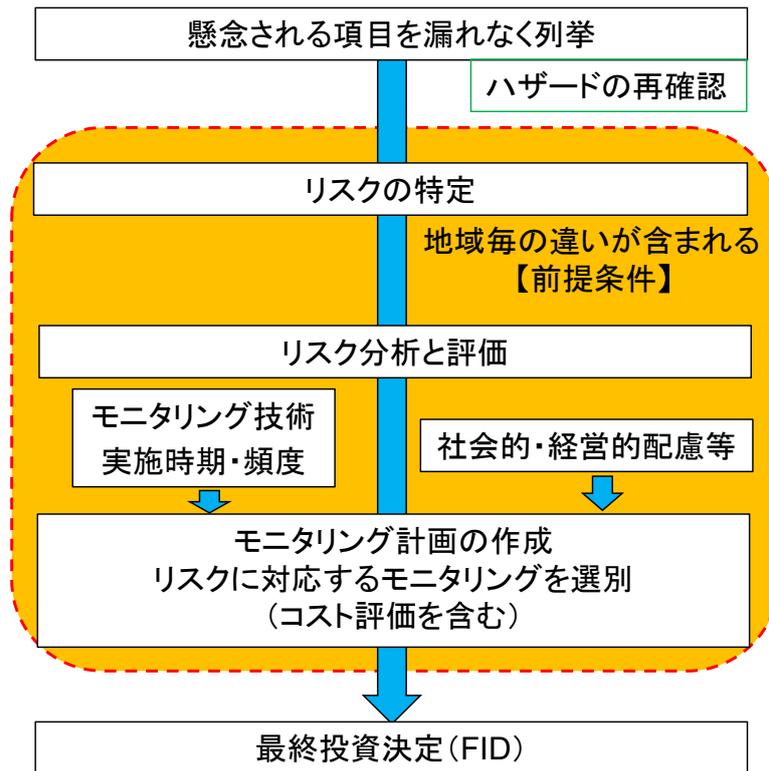


図 1-6 モニタリング計画の作成ステップ

具体的な日本におけるモニタリング計画の作成例を第 5 章に示した。

第2章 CCS モニタリング (MMV*¹⁰) の考え方

2.1 CCS モニタリングの目的の分類

2.1.1 Jenkins et al. (2015) による定義

モニタリングの目的を考える際、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) で長年 CCS モニタリング (MMV) を研究している Dr. Carles Jenkins の分類を参考とすることができる。Jenkins et al. (2015) は、IPCC による CCS に関する特別報告書*¹¹の発行以降、実際のプロジェクトをレビューし、CCS のモニタリングと検証がどのように進歩したのかを考察している。この論文によれば、世界中で様々なレベルの詳細さおよび状況で CCS に関する規制が策定されてきたが、モニタリングの目的については、以下のとおり比較的一貫しているとされている。

- ・ 圧入された CO₂ が安全かつ効果的に封じ込められていることを示す
- ・ 現在の貯留プロセスを確実に理解していることを示す
- ・ 将来の性能予測を支える情報を提供する

これらの目的は主に「封じ込めの保証」と「適合性の保証」の2つのカテゴリーに分類しており、封じ込めや適合性の要件が満たされない場合には、緊急モニタリングが必要となる場合もあるとしている。また、CCS に特化していなくても、多くの規制等で環境影響評価が必要とされており、「環境影響モニタリング」が求められる場合があるとしている。以下に、モニタリングの目的の分類を示す。

(1) 封じ込め (Containment) の保証

封じ込めを証明する主な要素は、貯留された CO₂ が貯留サイト内に確実に保持されており、大気から隔離されていて健康や環境に危険を及ぼさないことを示すことである。

封じ込めモニタリングには、深部地下に焦点を当てたモニタリングと浅部地下に焦点を当てたモニタリングの2つの要素がある。深部地下に焦点を当てたモニタリングの目的は、CO₂ が圧入された層 (一次貯留層) に適切に留まっていることを確認し、上部層など (二次貯留層を含む) への予期せぬ移動をしていないかを監視することである。一方で、浅部地下に焦点を当てたモニタリング (例えば、土壌ガス、大気、水中のモニタリング) の目的は、地表近くへの CO₂ の移動の兆候を捉えることであるが、明確なリスク (欠陥のある坑井など) が存在しない限り、封じ込め状態を検証する手法としての有用性は高くない。

*¹⁰ 本書における「モニタリング」とは、測定 (Measurement)・監視 (Monitoring)・検証 (Verification) を指す。Jenkins et al. (2015) によれば、「検証」とは、観測データと予測、または観測データと要件との間に、合意された基準に基づく一貫性があることを示すことが本質とされている。我が国においては、モニタリング (平時の監視) の考え方に、事前予測の範囲内であることや、許可条件を満たしていることの確認も含まれており、「検証」の要素も含む点で共通しているため、本書では両者を同じ意味として扱う。

*¹¹ IPCC (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, <https://archive.ipcc.ch/report/srccs/>

(2) 適合性 (Conformance) の保証

適合性とは、モデル等で予測された CO₂ の挙動と実際の観測結果の一致度合いを指す。この一致が十分であれば、貯留プロセスが十分に理解されており、予測から大きな逸脱がないと示すことができる。

適合性モニタリングは、主に深部に焦点を当て、現状のサイト挙動モデルを検証・調整することを目的とする。これらのモデルは将来のサイト挙動や、長期的に安全な貯留や適切なサイト閉鎖の予測基盤となる。観測結果が予測から大きく逸脱した場合には、非適合 (non-conformance) となり、特に重大な非適合が発生した場合には、逸脱の追跡および影響を評価した上で、必要に応じて是正措置を設計し、実施後にその効果等を確認するための追加のモニタリング (contingency monitoring) が必要となることがある。

(3) 環境影響のモニタリング (Environmental impact monitoring)

環境影響モニタリングは、環境影響の検証や社会的受容性の確保のために実施される。規制上、これが義務付けられている事例は少なく、従来は研究目的の小規模パイロットプロジェクトで実施されてきたが、商業規模のプロジェクトでも実施される場合がある。社会的受容性の確保においては、モニタリング結果の公開や第三者によるデータの検証が重要となる。

環境影響モニタリングは、浅部に焦点を当てたモニタリングとも呼ばれる。環境影響モニタリングには、地下水、土壌ガスや土壌フラックス、大気中濃度、浅部の地球物理的特性、植生、土壌微生物群集、海底地形、気泡、水中の化学的性質などのモニタリングが含まれる。封じ込めや適合性のモニタリングにおいて CO₂ が浅部に移動する明確なリスクが確認された場合、環境影響モニタリングは封じ込めの検証に有用となる場合がある。また、地表に到達した場合、一部の規制では定量化が必要となる。

環境影響のモニタリングに関しては様々な手法が開発されているが、大きな課題として、自然変動の影響やそれによる偽陽性の可能性が挙げられる。貯留開始前に環境ベースラインを確立し、変化の原因を正しく明らかにできるようにすることが不可欠である。偽陽性を十分にコントロールできない限り、漏洩を検出する目的で実施することは望ましくない。

2.1.2 本報告書における整理

Jenkins et al. (2015) の定義を参考に、日本における CCS モニタリングを考えるうえでその目的を以下の通り整理した。

(1) 圧入システムの不具合を検知すること (Containment)

圧入システムを構成する装置やその操業が適切に機能していることを確認し、想定外の状況が生じないように監視を行うモニタリングである。

例：圧入井システムにおける操業管理、微小振動の観測などを行う。

(2) 貯留状態の把握と漏出につながる変化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、また漏出につながる変化がないかを監視するモニタリングで、貯留した CO₂ の広がり等を監視するモニタリングが含まれる。

例：圧入された CO₂ の挙動観測などを行う。

(3) 地表付近、海洋の環境に焦点をあてて漏出を監視すること (Environment)

漏出を直接把握しようとするモニタリングで、環境上の社会的関心等に対応するモニタリングを含む。

例：漏出の有無と生態系への影響検討などを行う。

2.2 CCS プロジェクトにおけるモニタリング事例

代表的な CCS プロジェクトにおけるモニタリングの事例および計画について紹介する。

2.2.1 Sleipner (1996～)

Sleipner プロジェクトは、ノルウェー北海に位置する、世界で最初の商業的な CCS プロジェクトである。1996 年より圧入が開始され、累積 2,300 万トン以上の CO₂ が貯留されている*12。

Sleipner におけるモニタリングの主な目的は、CO₂ が貯留層外へ漏洩しないこと（封じ込め）および、CO₂ の挙動が予測モデルと一致しているか（適合性）を確認することである。貯留層内の CO₂ 移動の追跡と、将来の移動を予測すること、また、地層上部の変化を検出し、貯留層外への移動（漏洩）について早期警告を得ることに重点が置かれている。モニタリングは、3D 弾性波探査が中心的なツールとして繰り返し使われており、CO₂ プルーム（広がり）のイメージングや、封じ込めおよび適合性の確認に活用されるなど、本プロジェクトにおいて CCS モニタリングの有用性が示された。

加えて、Sleipner は最初期のプロジェクトということから、様々な実証・研究要素も組み込まれ、規制の要件に加えて、モニタリング手法の開発を目的として環境影響モニタリングも実施されている。これまでにサイドスキャンソナー*13、ピンガー*14、シングル*15/マルチビームエコーサウンディング*16、AUV*17による海底音響測定、ROV*18によるビデオ観察、堆積物および間隙水中の化学分析などが実施されたが、異常は検出されていない。Sleipner プロジェクトにおける主なモニタリング項目を表 2-1 に示す。

*12 C&C Reservoirs, The Sleipner CCS Project, <https://ccreservoirs.com/the-sleipner-ccs-project-an-active-case-history-for-co2-storage-in-a-saline-aquifer/>

*13 SSS (Side Scan Sonar) : 海中（または海底近く）を曳航し、魚群探知機よりも広範囲な海底面の「画像」を 2 次元的に取得する装置

*14 Pinger : 定期的に一定の周波数の超音波パルスを発信する小型の音響装置

*15 SBES (Single Beam Echo Sounder) : 1 本の音響ビームを海底に発信し、1 点ずつの水深を測定する従来の測深機

*16 MBES (Multi-Beam Echo Sounder) : 扇状（ファン状）に多数の音響ビームを発信・受波し、一度の航走で広範囲の多点測深を行い、3 次元の地形データ（鳥瞰図など）を取得できる

*17 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) : 自律型無人潜水機

*18 ROV (Remotely Operated Vehicle) : ケーブルを介して船上や陸上から操作する「遠隔操作型無人潜水機」

表 2-1 Sleipner プロジェクトにおける主なモニタリング項目

モニタリングの目的	モニタリング項目*	
封じ込め	圧入流体	CO ₂ 濃度、流量、組成
	坑口	圧力、温度
	坑底	圧力、温度
適合性	弾性波探査	3D/2D
	重力探査	
	電磁探査	
環境影響モニタリング	海洋環境	水質、底質、水中ビデオ、音響探査

*モニタリング項目は、1回でも実施していた項目をすべて含めており、実施時期（例：圧入前、圧入中、圧入後、異常時）については考慮していない。

2.2.2 Quest (2015～)

陸域の深部塩水層を貯留先とするカナダ・アルバータ州の Quest プロジェクトは、2015年から商業運転を開始し、2023年末時点での累計貯留量は880万トンを超えている*¹⁹。

Quest プロジェクトのモニタリング計画では、「封じ込め」と「適合性」という用語が明示的に使われている。2010年に作成された最初のモニタリング計画では、保守的なアプローチを採用し、大気中から地下まで広範囲をカバーし、従来技術と新しい技術を組み合わせ、豊富なベースラインデータを取得している。図 2-1 に Quest プロジェクトにおけるモニタリング項目を示す*²⁰。「封じ込め」は深部観測井（Deep Monitoring Wells）と圧入井（Injection Wells）を用いて、「適合性」は地圏（Geosphere）を対象とし、「環境影響」は大気圏（Atmosphere）、生物圏（Biosphere）、水圏（Hydrosphere）を対象としてモニタリングを実施している。

*¹⁹ Shell Canada Energy (2024) Quest Carbon Capture and Storage Project, Annual Summary Report - Alberta Department of Energy and Minerals: 2023, <https://open.alberta.ca/dataset/e90a4e6e-2c11-44ee-b198-de244261c585/resource/20fd42f8-6627-44af-82ca-d4af052a040b/download/quest-annual-summary-report-2023-alberta-department-of-energy-and-minerals.pdf>

*²⁰ IEAGHG (2019) "The Shell Quest Carbon Capture and Storage Project", 2019-04, June 2019

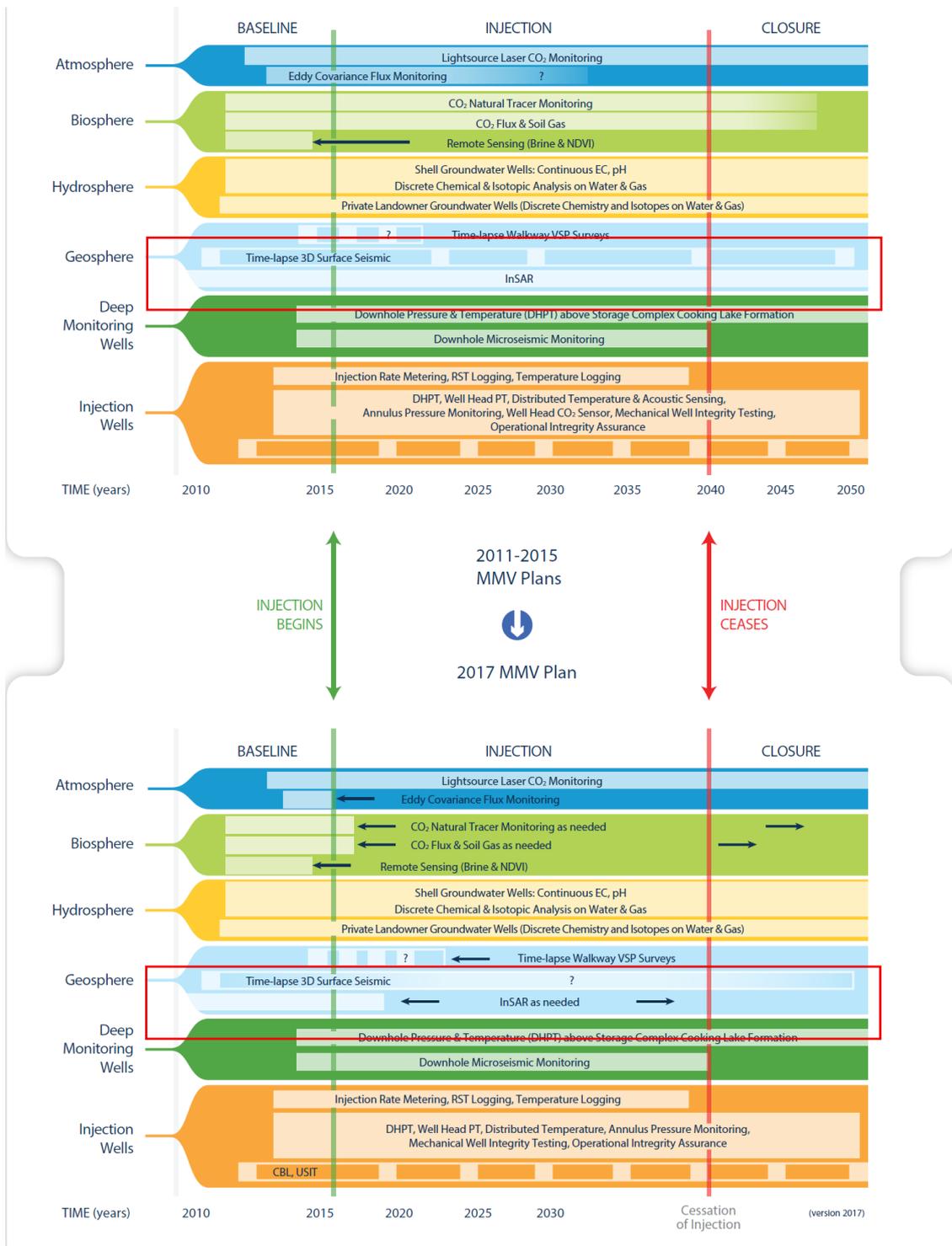


図 2-1 Quest プロジェクトにおけるモニタリング項目

操業とともに得られた知見をもとに、モニタリング計画はおおむね 3 年ごとに修正・更新されている。例えば、生物圏のモニタリングにおいて、更新後に「必要に応じて (as needed)」と修正され、その必要性が低下した項目がある。また、地圏のモニタリングにおいては、鉛直弾性波探査 (VSP) の結果を踏まえて 3 次元弾性波探査 (3D Seismic) や干渉合成開口レーダー (InSAR) の実施や頻度が見直されていることが伺える。

モニタリングシステムは順調に機能しており、坑井検層と弾性波探査により、CO₂プルームが予測通りに広がっていることが確認されている。モニタリング計画の修正・更新に関しては第3章 3.3.1 の項にて詳細を述べる。

2.2.3 Porthos (2026～の予定)

オランダの Porthos プロジェクトは、ロッテルダム港で回収した CO₂ をパイプラインにより沖合の北海海底下の枯渇ガス田へ輸送、貯留を行うものである。15 年間にわたり年間 250 万トンの CO₂ を回収・貯留する予定であり、枯渇ガス田の推定貯留容量は 3,700 万トンである。2025 年 3 月に CO₂ 貯留に関する許認可を取得し、2026 年の操業開始を目指している*21。

Porthos プロジェクトの許可申請書において計画されているモニタリング項目を表 2-2 に示す*22。Porthos プロジェクトのモニタリング計画では、弾性波探査が要求されていないことが特徴的である。その理由としては、貯留先が枯渇ガス田であることから遮蔽層の性能が既に証明されており、過去の調査データが十分に存在すること、圧入される CO₂ と貯留層内に残留する天然ガスをモニタリングにより区別することが困難であることが挙げられる。CO₂ 挙動の把握については、坑口や坑底の圧力・温度など、通常のモニタリングで対応可能と考えられている。また貯留層は断層で区切られた Fault block 構造であり、個々のタンクのような構造を持つため、貯留層の圧力等から貯留量を把握することも可能とされている。

誘発地震（微小振動を含む）については、非常に厚い遮蔽層が存在するため、断層や亀裂による封じ込めの損失（CO₂ の上位層への移動）リスクは小さいと判断されている。また、沿岸から十分な距離があることから、仮に海域で地震が発生しても陸上への影響は及ばないと予想された。微小振動に関しては本プロジェクト単独での観測は行わず、既存の陸上地震観測ネットワークを活用してモニタリングを実施することとされている。（なお、2025 年に、オランダの国立研究所 NWO が深部地下構造の画像化精度向上のために実施する DICTUM 研究プロジェクトの一環として、University of Twente と共同で Porthos プロジェクトの圧入井の 500m 圏内に数基の海洋地震計を設置し、地下の振動を継続的に測定することが表明されている*23。）

環境影響モニタリングについては、異常が検出された際に実施するという考え方が採用されている。環境影響モニタリングによる CO₂ 漏出の判断は難しく、実際に海底下から出てくる CO₂ の気泡を検知する実験でも、気泡検知の確実性が低いことが判明しているとし、規制当局との協議の結果、モニタリング頻度は最低限の頻度に抑えられている。

*21 Porthos, 2025 年 3 月 17 日付プレスリリース, NEa grants first emissions permit for CO₂ storage, <https://www.porthosco2.nl/en/nea-grants-first-emission-permit-for-co%E2%82%82-storage/>

*22 EBN, TAQA (2021) Aanvraag CO₂-opslagvergunning reservoir P18-2

*23 University of Twente, 2025 年 6 月 5 日付プレスリリース, New seismometer system for real-time monitoring in the North Sea, <https://www.utwente.nl/en/news/2025/6/339226/new-seismometer-system-for-real-time-monitoring-in-the-north-sea>

表 2-2 Porthos プロジェクトにおけるモニタリング項目

目的	パラメータ	技術	圧入開始前	圧入中	圧入停止後	サイト閉鎖後	
封じ込め	供給流量：排出事業者からの CO ₂ 量	流量計		連続			
	圧入流量：圧入総量	流量計測		連続			
	圧入流量：坑井ごとの圧入量	流量計測		連続			
	圧力：坑口	圧力センサ		連続			
	圧力：貯留層	圧力センサ		連続			
	温度：坑口	温度計		連続			
	温度：貯留層	温度計 (DTS)		連続			
	ガス組成	ガスクロマトグラフィー			連続		
		メタノール、酸素、水分含有量			連続		
		ガスサンプル採取			定期		
水の露点温度計測			連続				
微小振動*	オランダ王立気象研究所の微小振動モニタリングネットワーク	連続					
適合性	安定圧力 (密閉坑底圧)	圧力センサ	ベースライン	1年に1回			
	安定温度 (密閉坑底温度)	温度計 (DTS)	ベースライン	1年に1回			
	ケーシング健全性	CBL/USIT	ベースライン			検証	
	ケーシング健全性	アニュラス圧力	連続				
	チュービング健全性	EMIT/PMIT		5年に1回			
		DTS	連続				
	マイクロアニュラス	USIT：マイクロアニュラスの特定	ベースライン			検証	
		RST：上層のガス/CO ₂ 蓄積を特定	ベースライン			検証	
		DTS/DAS：マイクロアニュラス流れを特定	ベースライン	1年に1回	6カ月に1回	検証	
	プラグの健全性試験	荷重試験/圧力試験				圧入井 廃坑中	
環境影響	CO ₂ 漏洩の判断	断続的な漏洩		断続的			
	気泡検知	ROV	ベースライン	2年に1回		2年に1回 (10年まで)	
	海水サンプル採取	サンプル採取	ベースライン	漏洩の疑いがある場合			
	ポックマーク調査	サイドスキュンソナー (+海底サンプル採取)	ベースライン	漏洩の疑いがある場合	検証	(検証の結果次第)	
	ポックマーク付近における気泡検知	ROV	ベースライン	漏洩の疑いがある場合			
	ポックマーク付近における海水サンプル採取	サンプル採取	ベースライン	漏洩の疑いがある場合			

* 微小振動：Porthos のモニタリング計画では環境・周辺環境のモニタリングに分類されているが、本報告書の定義に基づき「封じ込め」のモニタリング項目に分類した。

第3章 リスクに基づいたモニタリング計画の設計

3.1 「漏洩」と「漏出」の違い

IPCC が 2005 年に発行した CCS に関する特別報告書*²⁴において、リスクや環境影響の規模に鑑み、CO₂ の貯留層内およびその外への移動と、地下から大気や環境への移動は区別されている。また、Oldenburg and Lewicki (2006) *²⁵においても、圧入された貯留層から地下内部を通して移動すること (leakage) と地表面や表層水への移動 (seepage) は区別されている。Hepple and Benson (2005) *²⁶は、CO₂ が圧入された貯留層から移動した場合であっても、地下プロセスによりその移動は減衰されるため、地表への CO₂ 移動に直結するとは限らないと指摘している。一方で、CCS における主要なリスクとされる CO₂ の「漏洩」という言葉は、様々な文脈において地層内の移動、大気や環境への移動のどちらの意味でも使用されてきた。CCS のリスク管理において、この CO₂ の移動が地下におけるものか、地表または海水中への移動なのかを明確に区別することは重要であるという認識の下、本報告書では以下の通り「漏洩」と「漏出」を定義した。

(1) 漏洩 (Leakage)

漏洩とは、想定された貯留域から域外に CO₂ が移動することを意味する。しかし、依然として CO₂ は地中にとどまっている状態であるため、漏洩が生じたとしても、対策を講じることが可能である。また、漏洩をモニタリング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 (一次監視) である。

(2) 漏出 (Seepage)

漏出とは、CO₂ が利用に供する地下水中、大気中あるいは海水中に出ることを意味し、発生した場合には環境への影響を評価する必要があるが生じる。また、漏出の検知は二次監視とすることが適切であり、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)。

3.2 モニタリング計画の策定の基本方針

モニタリング計画の策定にあたっては、適切なサイト選定およびリスク評価を実施し、その結果に基づいてモニタリングの対象および項目を選定する必要がある。その際、地質的特性や周辺環境等、サイト特有の条件が考慮される。

モニタリングは、すべての項目について平時から実施するのではなく、リスク評価に基づき「一次監視」と「二次監視」に区分し、段階的に実施することが適当である。モニタリングの目的および対象と、一次監視、二次監視との関係を整理すると表 3-1 のようになる。

*²⁴ IPCC (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, <https://archive.ipcc.ch/report/srccs/>

*²⁵ C. M. Oldenburg and J. L. Lewicki (2006) On leakage and seepage of CO₂ from geologic storage sites into surface water. *Environmental Geology*, Vol. 50, p. 691-705.

*²⁶ R. P. Hepple and S. M. Benson. (2005) Geologic storage of carbon dioxide as a climate change mitigation strategy: performance requirements and the implications of surface seepage. *Environmental Geology*, Vol. 47, p. 576-585.

表 3-1 モニタリングの目的・対象とモニタリング計画における方針

モニタリングの目的	モニタリング対象	項目（例）	モニタリング計画における方針
封じ込め（Containment）： 圧入システムの不具合を検知すること	圧入井の操業状態	温度、圧力、 流量、微小振 動・自然地震	平時から実施（一次監視）
適合性（Conformance）： 貯留状態の把握と漏洩につな がる変化を監視し把握するこ と	貯留状態（CO ₂ の挙 動や広がり）、漏洩	弾性波探査	平時から実施（一次監視）、 一次監視において異常が検 知された場合に追加的に実 施（二次監視）
環境影響（Environment）： 地表付近、海洋の環境に焦点を あてて漏洩を監視すること	環境影響、漏洩	水質、底質 気泡検知	一次監視において異常が検 知された場合に実施（二次 監視）

さらに、モニタリング計画は、モニタリングデータの蓄積に基づき、リスクを再評価した上で、モニタリング技術や頻度の見直しを柔軟に行うことが求められる。また、利用可能な最良の技術（BAT）を適用することも重要である。

(1) 一次監視

一次監視は、第 1 章（1.1.3）で述べたとおり、封じ込め（Containment）および適合性（Conformance）を確認するために実施する。モニタリング項目については、操業状況および CO₂ の貯留状態、漏洩（leakage）の有無の確認を基本とし、その他の項目や技術はサイト条件を考慮して設定する。深部地下に焦点を当てることで、漏洩につながる可能性のある CO₂ の漏洩を早期検知することが可能となる*27。

(2) 二次監視

二次監視は、一次監視において異常が検知された場合に、環境影響（Environmental impact）を確認するために実施する。当該リスクにカスタマイズした追加的モニタリングの他、適切なベースライン（圧入開始前に少なくとも 1 回）の設定が必要である。モニタリング項目については、漏洩（seepage）の有無と環境影響の確認を基本とする。

3.3 リスクに応じたモニタリング設計の事例（リスクベースの考え方の導入）

モニタリング計画は各種リスクの顕在化をいち早く検知するために構築されるが、すべてのリスクの顕在化に対応するモニタリング計画を立てることは現実的ではない。すでに実施されているプロジェクトでは、リスクの頻度と影響規模の大小の関係を踏まえて、優先順位をつける考え方（リスクベースの考え方）でのモニタリング項目の設計が行われている。さらに、リスク評価にはボウタイ（Bow-tie）分析が用いられることが多い。Shell Group が

*27 IOGP (2023) Seabed and overburden integrity monitoring for offshore CO₂ storage, Report 657

本手法をリスク分析と管理のための社内標準として採用するなど、Bow-tie 分析が産業界のリスク評価で広く用いられるようになった*28。

Bow-tie 分析は、特定の重大事象（トップイベント）を中心に、その発生原因（脅威）から結果・影響までのリスクの発生経路を可視化するリスク評価手法である。原因側（左側）には事故や故障の誘因となる要因を、結果側（右側）にはその重大事象が引き起こす潜在的影響を配置し、左側の予防的バリア（Preventive Controls）と右側の緩和的バリア（Mitigative Controls）を整理することで、リスク管理の全体像を体系的に把握できるとされている。

CCS プロジェクトでは、地下への CO₂ 圧入や貯留中の漏洩リスク、誘発地震、坑井健全性など複数のリスクが複雑に絡み合うため、これらのリスク要因と対策を図式的に整理できる Bow-tie 分析はリスクの全体像を関係者に伝達しやすく、モニタリング計画やバリア設計との整合性をとる上で有効である。具体的には、例えばカナダ・アルバータ州の Quest プロジェクトでは、Bow-tie 分析を用いて技術的・社会的リスクを包括的に整理し、モニタリングや評価範囲の設計に活用した事例が報告されている。

以下に世界における CCS プロジェクトのリスク評価の事例とそれに基づいたモニタリング計画を紹介する。

3.3.1 Quest

Quest プロジェクトでは、プロジェクト開始時に Bow-tie 分析を用いたリスク評価（図 3-1）を実施し、モニタリング（MMV）計画を確立している。Quest プロジェクトのモニタリングは、圧入した CO₂ の「封じ込め」および「適合性」に対するリスクを評価し、合理的に可能な限りリスクを低減して（ALARP*29）、効果的に管理することに重点を置いている。

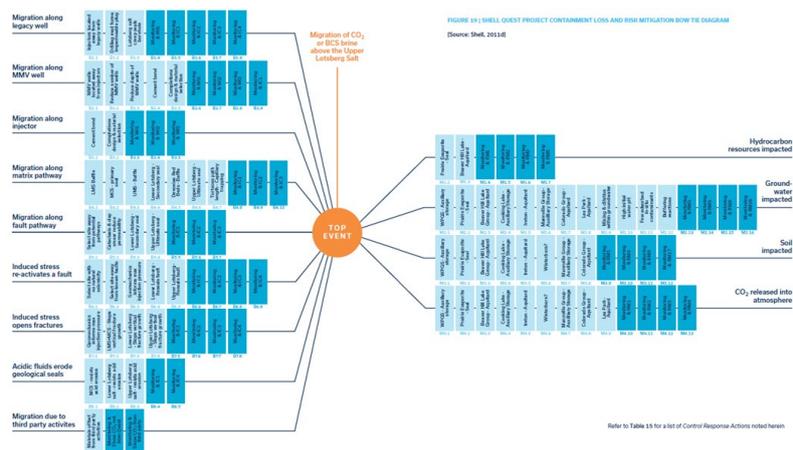


図 3-1 Quest プロジェクトの Bow-tie 分析を用いたリスク評価

*28 UK Government, BowTie: a visual tool to keep an overview of risk management practices, <https://www.gov.uk/government/news/bowtie-a-visual-tool-to-keep-an-overview-of-risk-management-practices>

*29 As Low As Reasonably Practicable

Quest プロジェクトのモニタリングはリスクベースの考え方をもとに、サイト特有で、順応的（3年ごとの更新）な計画となっている。すべてのモニタリング項目に対し、初期段階で異常が確認されたら次の段階に移るといった、段階的アプローチを採用している。

モニタリング計画は、操業を通じて得られた知見を基にリスクが再評価され、随時修正・更新されている。例えば、2013年のモニタリング計画ではモニタリング段階が Tier 0～4 に分けられていたが、2017年に承認された計画では、Tier 1～3 に変更されている（表 3-2）。

表 3-2 Quest プロジェクトのモニタリング計画の変遷

2013年に承認されたモニタリング計画	2017年に承認されたモニタリング計画
Tier 0 水の電気伝導度の継続的なモニタリング。	Tier 1 モニタリング技術には、継続的に稼働する坑内計器、定期的な健全性試験、地震データ取得が含まれる。Tier 1 データに異常があれば、他のデータの詳細分析や Tier 2 MMV 技術による追加モニタリングが行われる。
Tier 1 プロジェクトおよび土地所有者の地下水サンプリング。主要な水質パラメータ、主要イオン、栄養塩、ハロゲンの標準的な水質分析。組成および PFC トレーサー（CO ₂ と共注入）の存在分析のためのヘッドスペースガスサンプリング。	Tier 2 空気および水への影響に焦点を当てたモニタリング技術。Tier 2 データに異常があれば、追加のデータ分析や Tier 3 MMV 技術による追加モニタリングが行われる。
Tier 2 Tier 1 のサンプル収集と分析を繰り返す。ハロゲンの追加分析および溶存金属の標準分析（BCS 貯留コンプレックスからの CO ₂ 漏洩の可能性を示唆）。	Tier 3 潜在的な空気および水への影響の理解を深めるモニタリング技術。
Tier 3 Tier 1 のサンプル収集と分析を繰り返す。標準同位体（ストロンチウム、酸素、水素、炭素、ハロゲン比）の追加分析。	
Tier 4 Tier 0、1、2、3 のいずれかで水質の変化がプロジェクトに起因すると示された場合、汚染プルームの特定やリスク管理・緩和活動を支援するため、現場特有の様々な測定を実施する。	

なお、採用するモニタリング技術について、ベースライン調査および継続的なモニタリング調査の結果、採用していたモニタリング技術の約 40%が貯留リスクの最小化に役立つものではないと判断され、これらの技術を用いたモニタリングの頻度を低減または廃止している。

3.3.2 Porthos

Porthos プロジェクトのモニタリング計画は、リスクマネジメント計画を前提条件として策定されている（図 3-2）。リスクマネジメント計画では、Bow-tie 法を用いてリスク分析を実施し、リスクマトリクスを用いて残留リスクを評価している（図 3-3、図 3-4）。

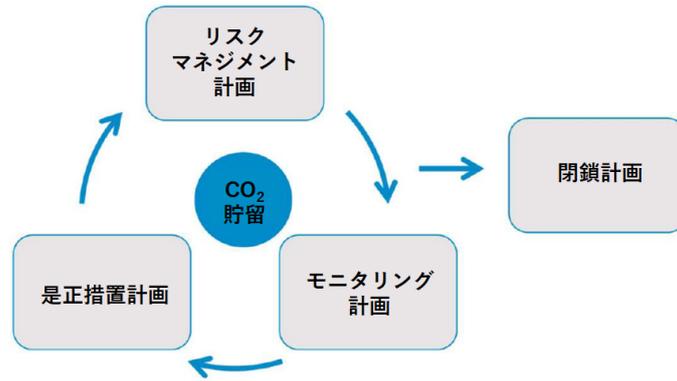


図 3-2 Porthos プロジェクトの許可に必要な4つの計画の関連性

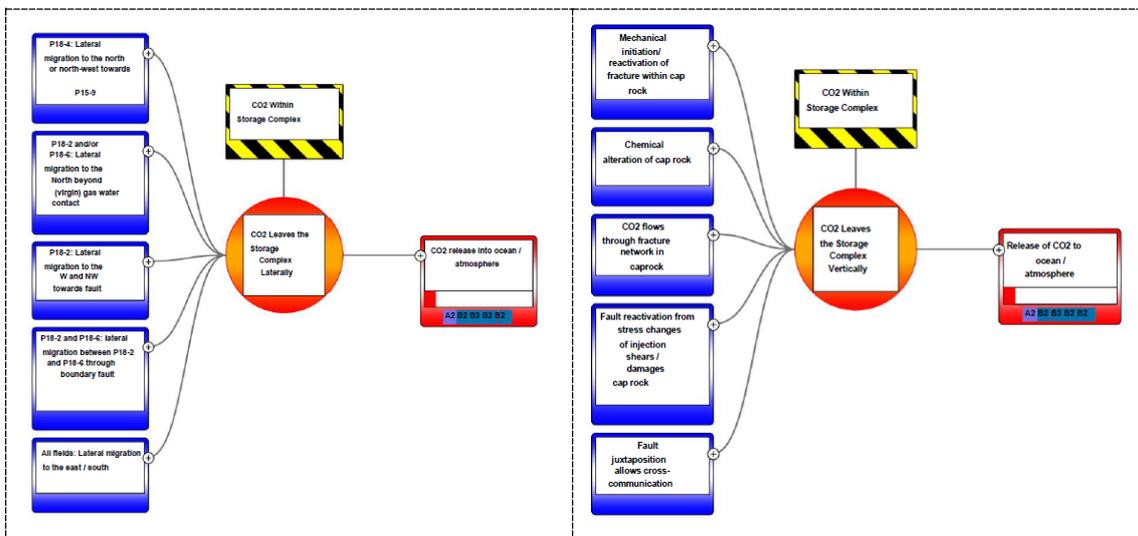


図 3-3 Porthos プロジェクトにおけるBow-tie法を用いたリスク分析の例

ebn EBN Risk Assessment Matrix goedgekeurd door de EBN directie op: 0-10-2020 eigenaar: Director Finance coördinator: HSE-coördinator			Likelihood (kans)				
			A	B	C	D	E
			Zeldzaam	Onwaarschijnlijk	Mogelijk	Waarschijnlijk	Zeer waarschijnlijk
Consequences (effect) People Environment Impact on stakeholders Assets & economics			Rare	Unlikely	Possible	Likely	Very likely
Severity (ernst)			Never heard of in EBN projects/operations/industry	Hard of in EBN projects/operations/industry	Has happened in EBN projects/operations/industry	Happens a few times a year in EBN projects/operations/industry	Happens several times a year in EBN projects/operations/industry
5	Massive impact/ Enorme impact						
4	Major, national impact/ Grote, nationale impact						
3	Moderate, local impact/ Matige, lokale impact						
2	Minor impact/ Kleine impact						
1	Slight impact / Geringe impact						

Category = action / Categorie = actie

- Hoog Not acceptable: stop work/intervene immediately and reduce risk (ALARP) - onderzoek en direct (mededel) actie plan
- Middel Not acceptable: work stoppen/direct ingrijpen om risico te verlagen (ALARP) - onderzoek en maak actie- en verbeterplan
- Laag Take measures to eliminate hazard or reduce risk (ALARP) / Maatregelen nemen om gevaar weg te nemen of het risico te verlagen (ALARP)
- Laag (Stuvia)manage for continuous improvement / (Stuvia)managen op continue verbetering
- Zeer laag Low priority, but strive/manage for continuous improvement / Lage prioriteit, maar streven naar/richten op continue verbetering

図 3-4 Porthos プロジェクトの残留リスク評価で用いたリスクマトリクス

さらに、本モニタリング計画では、パラメータの制限範囲を設定し、その範囲を超えると、その乖離率に応じて追加的モニタリングや是正措置に移行するという段階的なアプローチを採用している。Porthos プロジェクトが設定する段階的なモニタリングの考え方を表 3-3 に示す。

表 3-3 Porthos プロジェクトのモニタリングにおける段階的アプローチ

	通常モニタリング	追加的モニタリング	是正措置
操業	<ul style="list-style-type: none"> パラメータが制限範囲内に収まっている 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータが予想から外れている 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータが制限範囲から外れている
貯留層内のCO ₂ 拡散	<ul style="list-style-type: none"> 温度・圧力の測定値が動的貯留層モデルとの偏差が$\pm 10\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> 温度・圧力の測定値が動的貯留層モデルとの偏差が$\pm 20\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> 温度・圧力の測定値が動的貯留層モデルとの偏差が$\pm 30\%$
漏洩経路	<ul style="list-style-type: none"> パラメータが制限範囲内に収まっている アニユラス圧力に異常なし 温度変化に異常なし (DTS) 振動なし (DAS) 圧入圧力が制限範囲内に収まっている CO₂の漏洩なし 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータが予想から外れている アニユラスにおいて圧力が警戒レベルまで継続的に上昇 温度変化に異常あり (DTS) 振動を検知 (DAS) チュービングの壁厚減少 	<ul style="list-style-type: none"> アニユラスにCO₂が存在
環境影響	<ul style="list-style-type: none"> 微小振動なし 漏洩や気泡の形跡なし (ROV) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水中のCO₂濃度上昇 許可区域内で M2.0 以上の地震が 1 回発生 	<ul style="list-style-type: none"> 坑井周辺の海底や貯留層の上でCO₂を検出 許可区域内で M2.5 以上の地震が 12 カ月間で 3 回発生、または M3.0 以上の地震が 1 回発生

関係者へのヒアリングによれば、Porthos プロジェクトのモニタリング計画は、目的に合致し、リスクベースで、かつ費用対効果が高く、CO₂の長期的で安全な貯留を確保するものでなければならないという方針の下で策定されている。

第4章 モニタリング計画の設計において考慮すべき事項

第2章、第3章では、安全なCO₂貯留を実現するためのモニタリングについて技術的な観点からその考え方を整理した。一方で、将来的にCCSプロジェクトが社会実装されるにあたっては、事業としての経済性や温暖化対策としての効果、そして法規制の順守も含めた社会の受容性といった異なる側面もあわせて検討することが非常に重要である。

4.1 経済性

モニタリング計画はCCSプロジェクトの事業性に大きく影響する。モニタリングに係るコストは、ベースライン調査や操業時、圧入終了後のモニタリング実施費用として計上されるだけでなく、閉鎖後の長期管理に備えた積立金、不測の事態に備える賠償保険の枠組みなどにも深く関係することにも留意が必要である。

しかしながら、適用されうる技術は多岐にわたり、またその費用は貯留の条件により大きく異なること、さらに事業の経済性は回収・輸送も含めた個々のプロジェクトの状況や事業環境にも依存するため、モニタリングコストの多寡について一概に論じることは難しい。ただし、温暖化対策というCCSの目的に鑑みると、過剰な実施を避け、必要と判断される内容からなる効率的なモニタリングを目指すべきである。

4.2 温暖化対策としての効果（アカウンティング）

温暖化対策技術の一つであるCCSにとって、モニタリングはそのCO₂削減効果を示す手段でもある。事業活動におけるCO₂の排出量または削減量を定量化する「アカウンティング」において、CO₂貯留量および漏出量はモニタリングすべき対象となる。

現状のアカウンティング関連制度で要求されるモニタリング項目は、前述の技術的視点から検討した、安全な貯留のために必要なモニタリングに含まれている。一部の制度においては「漏出量」を計測することが要求されているが、具体的な定量的ためのモニタリング方法についての記載は確認されなかった。これらの状況を踏まえ、本報告書においては、アカウンティングの観点からの検討は含めないこととした。

4.3 社会的受容性（PA）

CCSプロジェクトにおいては、技術的な安全性の確保だけでなく、社会的受容性（Public Acceptance, PA）の向上も重要な課題である。モニタリングの実施とその結果は、科学的な裏付けとして社会的受容性の向上に寄与する。具体的には、社会的な配慮として、またステークホルダーの疑念を軽減するために、科学的根拠としてのモニタリング結果を活用することが可能である。

CCSにおける社会的受容性の事例として、苫小牧におけるCCS大規模実証試験が挙げられる。本事例では、自治体や地元企業による招致活動、一般市民向け説明会や講演会、情報開示、漁業関係者への対応（水産重要種であるウバガイを含む海洋生態系調査の実施）などのアウトリーチ活動等を通して、社会的受容性獲得のためのモニタリングや情報提供を積極的に実施している。

CCSプロジェクトのうち、CO₂圧入に対して一般市民が感じる不安としては、誘発地震

による被害、地下からの CO₂ 漏出による健康被害や環境影響、モニタリングのために繰り返し実施されることとなる弾性波探査や電気・電磁探査による漁業への影響等が考えられる（図 4-1）。このような不安に対応するために実施されるのが、社会的受容性獲得のためのモニタリングであり、それには次の 2 つの役割がある。

- ・ ステークホルダーの不安解消：苫小牧でのウバガイ調査の事例では、地元の意見を取り入れたモニタリング項目を追加することで、対象地域での CCS に対する理解と社会的受容性を高めた。
 - ・ 有事の際の対応：Weyburn プロジェクトにおいて、地元で家畜の大量斃死が発生したいわゆる Kerr 事件では、CO₂ の漏出が原因であるとの指摘がなされた。しかし、周辺地域における土壌ガスの CHO 比分析や同位体・トレーサー分析の結果に基づき、CO₂ 圧入による影響は認められないことが証明された。
- また、苫小牧 CCS 実証事業実施中に発生した北海道胆振東部地震についても、CO₂ 圧入に起因する誘発地震ではないかとの疑念が提起されたが、圧力・温度のモニタリングデータおよび CO₂ 挙動シミュレーション結果を総合的に検討した結果、CO₂ 圧入と当該地震との間に因果関係はないとの共通認識が得られている。

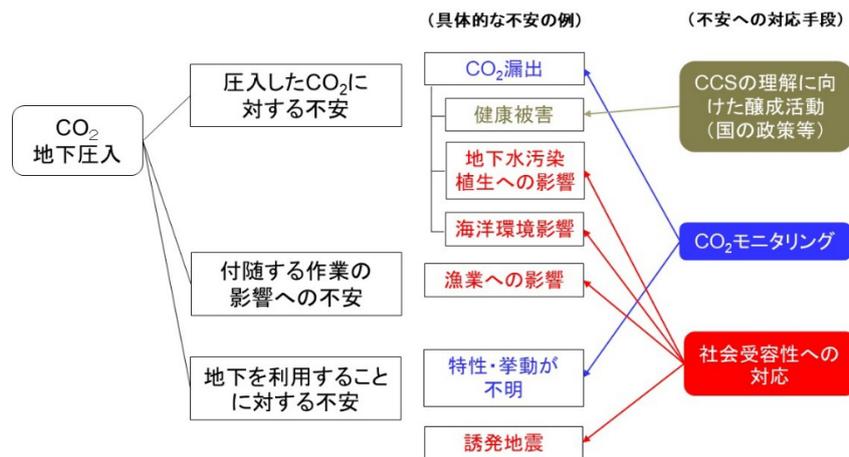


図 4-1 CCS モニタリングで対応すべき不安

社会受容性モニタリングの実施の是非については、技術的（科学的）合理性と社会的安心感のバランスを慎重に見極める必要があり、ケースバイケースで判断する必要がある。また、経営的・社会的配慮から実施する場合もあり、規制やガイドラインで一律に定めるものではない。

特に、地震が多い地域では、誘発地震に対する潜在的な懸念や不安を解消するために、そのリスクを適切に評価し、管理することが必要である。その結果、日本やカリフォルニアなどにおいては、微小振動のモニタリングが行われている。圧入中および圧入後の誘発地震に関連するリスクを監視・評価・管理し、必要に応じて緩和策を講じるため、サイト特有のモニタリング計画の作成が望ましい。

4.4 モニタリング結果の共有と定期的な見直し

各プロジェクトでは、リスクの頻度と影響規模の大小等を考慮して、優先順位をつけて具体的なモニタリング計画を策定する。作業が進めば、モニタリングデータが蓄積するので、モニタリング計画をより望ましい方向に見直すことができるようになる。そこで、定期的にモニタリング計画を見直すことを当初計画に入れておくことが有用である。あわせて、モニタリング結果やモニタリング計画の変更について、ステークホルダーに公表する要領等についても当初から具体的に計画しておくことが重要である。

第5章 日本におけるモニタリング計画のモデル案

本章では、日本における CCS プロジェクトを対象として、リスクベースの考え方に基づくモニタリング計画のモデル案について示す。リスクベースのモニタリングを行う方針については、第1章において既に述べたとおりである。

繰り返しとなるが、CCS プロジェクトにおいて考慮すべきリスクは、事前に実施される適地選定における調査によって一定程度絞り込まれており、基本的には事業として受け入れ可能と判断されたリスクが対象となる。本章では、主なリスク事象として、圧入井の健全性、地中に貯留された CO₂ の漏洩・漏出、および有感や被害を及ぼす誘発地震の発生を主に想定する。モニタリングにおいては、これら貯留の安全性に直接関わるリスク項目を主な対象として扱う。

モニタリングは、リスクが顕在化する兆候を事前に把握するとともに、万一リスクが顕在化した場合における適切な対処や是正措置を支援するための重要な手段である。そのため、各リスクの特性や発生可能性を踏まえたうえで、適切なモニタリング項目および手法を選定することが求められる。

特に日本は、世界的に見ても人口稠密地域が多く、既存の人間活動や他事業への影響に十分配慮する必要がある。このため、モニタリング計画の策定にあたっては、技術的妥当性のみならず、周辺環境や社会的条件を考慮した計画とすることが不可欠である。

以上を踏まえ、本章では、日本の地理的・社会的特性を考慮したモニタリング計画作成の基本方針と、具体的なモニタリング項目および技術の考え方について整理する。

5.1 モニタリング計画作成の基本方針

CCS プロジェクトに伴うモニタリング計画を作成する際、まずは地質構造や地震活動、既存坑井、断層、貯留層の特性、周辺環境、地元の理解・協力など、懸念されるリスク要因を挙げ、モニタリングすべき項目を特定する（図 5-1）。

分科会における検討では、以下 6 つのリスク顕在化のシナリオを想定した。

1. 圧入井または既存坑井を介した漏出
2. 断層を介した漏出
3. CO₂ の浅部への移動による漏出
4. CO₂ の陸域への移動による地下水等^{*30}への漏出
5. 圧入による地震活動の活発化
6. 貯留層圧力上昇による第三者への影響

続いて、それらが発生する可能性のあるフィールド例を 4 つあげることとした（エリア A～エリア D、5.2～5.5 参照）。

その後、エリアごとに、各リスクから想定されるシナリオについて、リスクマトリックス等を用いて分析し、対応順位を評価した上で、モニタリング項目を選択する。このプロセスにおいては、対応可能なモニタリング技術をあてはめていく。ただし、アカウンティング、既存法規制、コスト評価の結果も考慮する必要がある。

*30 飲用に供する地下水、温泉等

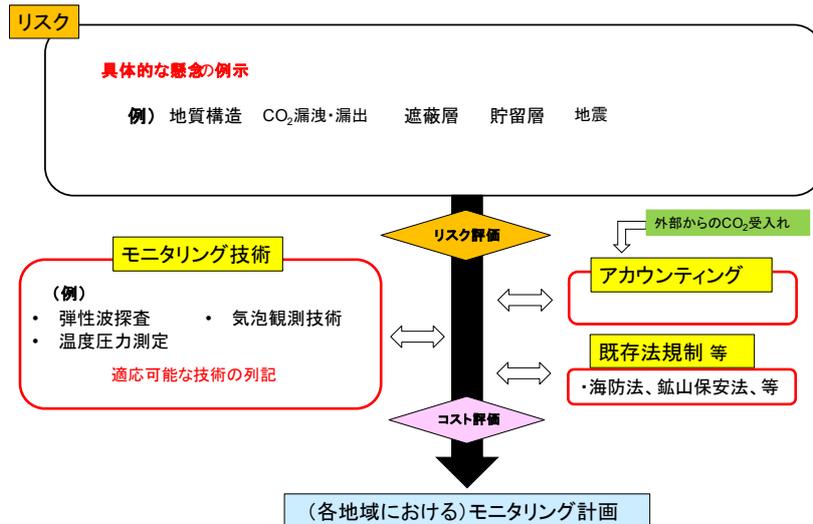


図 5-1 モニタリング計画の設計プロセス

具体的に適用するモニタリング技術としては、微小振動観測（観測点追加による観測精度向上）、温度・圧力の連続モニタリング、CO₂挙動把握（シミュレーションとの連携）、坑井健全性評価（検層、光ファイバー設置等）、地層水分析、地表変位観測（GPS、InSAR 等）、環境影響評価にかかる各種分析項目（水質、気泡、同位体分析等）が挙げられる。これらの技術は、対象エリアの地理的条件やリスク特性に応じて、オンライン・オフライン、海底・坑内等、最適な配置・観測頻度など、運用方法を選択する必要がある。その他、モニタリング技術の詳細については、「CCS におけるモニタリング技術とその特徴」*³¹を参照されたい。

圧入流体、温度・圧力、坑井健全性、CO₂挙動把握、微小振動等のモニタリング項目は、一次監視項目として位置付けられ、リスク判断に用いられる。環境影響に関するモニタリング項目は、二次監視項目として位置づけられ、一次監視において異常が確認された場合に実施する。各モニタリング項目の実施時期については表 5-1 を参照されたい。

*³¹日本 CCS 調査 (2025) CCS におけるモニタリング技術とその特徴,
<https://www.japanccs.com/news/20250411/>

表 5-1 代表的なモニタリング項目と実施時期

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	Y年間	廃坑後	
Operation	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, Leak	CO ₂ 挙動把握 (シミュレーション含む)	近 ↓ 遠	坑井近傍	Baseline		○	
			坑井周辺	Baseline		○	
			広域	Baseline		○	○**
	地層水分析		Baseline		△		
地表or海底面変位		Baseline		△			
Environment, Seepage (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(利用に供する地下水)		Baseline		(2次)**	(2次)**	(2次)**

一次監視として行う項目 ○：実施、△：場合により実施、無印：平時は実施しない（いずれもリスクレベルの変動に応じ、監視項目削減・頻度軽減など、柔軟な更新を行う）。

Baseline：圧入開始前に少なくとも1回行うことを前提に、取得開始時期についても適宜。

* 二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実施。

** 終了時に参考データを取得。

以降に日本で貯留が行われる可能性が想定されるエリア別にモニタリング計画のモデル案を示す。

5.2 エリア A（浅海～陸域）

5.2.1 前提条件

エリア A は、貯留エリアが浅海から陸域にまたがるケースである（図 5-2）。排出源や分離・回収施設は陸上に位置し、沖合のプラットフォームまでパイプラインによる CO₂ 輸送が行われる他、陸上からの直接圧入も想定される。圧入井には傾斜井や水平井が採用され、その数は 2 本とした。

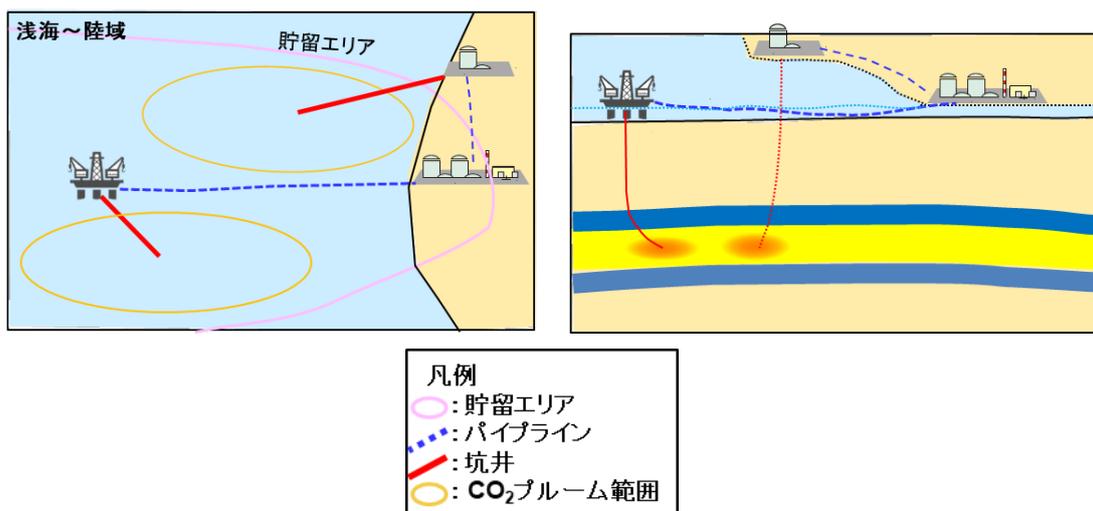


図 5-2 エリア A 模式図

当該エリアの地理的背景として、陸上は工業都市であり、港への大型船の入港も頻繁に行われている。一方で、温泉産業も存在するが、これは主として観光・保養目的で利用されているものである。これとは別に、飲用に供される地下水・湧水については、市街地を抱える地域特性も踏まえ、水質に対して特に高い関心が払われている。さらに、陸域には石油天然ガス鉱区が設定されており、現在も操業が継続されている。このような既存の土地・資源利用を踏まえ、CCS プロジェクトの実施にあたっては、温泉、石油天然ガス事業、漁業等の他社事業に影響を与えないことを条件としている。その他のリスクに関する前提として、表 5-2 の条件を想定した。

表 5-2 エリア A のリスクの前提条件

リスク項目	前提条件
坑井	複数あり（陸上）
断層	エリア内で認定されていない*
遮蔽能力	中
貯留層上面深度	構造頂部が 800 m 以浅
貯留エリア	浅海～陸域（他社鉱区と重複）
地震活動	エリア内は低調
地層圧	通常
貯留層（孔隙率、浸透率、貯留層平均層厚）	大
第三者（他産業、他者）	石油天然ガス鉱区と隣接

* 活断層および貯留層となる地層の透水性に影響を及ぼす断層が認定されていない

5.2.2 モニタリング計画

エリア A の前提条件に基づくモニタリング計画モデル案は表 5-3 のとおりである。エリア A では、CO₂ の貯留コンプレックス外への移動、CO₂ の陸域への移動、および第三者への影響が大きナリスクとして考えられる。このことから、坑口および坑底での圧力および温度の測定、陸域における圧入井の坑井健全性だけでなく、CO₂ プルーフが陸域に近づいた場合に備えて海域近くの既存坑井の健全性および CO₂ の挙動把握を重点的にモニタリングする必要がある。

表 5-3 エリア A のモニタリング計画モデル案

対象	項目	適用技術・計測	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	Y年間	廃坑後	
Operation	圧入流体(組成、流量、濃度)	圧入量計測			○			
	坑口(圧力、温度)	圧力・温度計、 DSS, DTS			●			
	坑底(圧力、温度)	圧力・温度計、 DSS, DTS	Baseline		●	○**	△	
	坑井健全性(アニュラス圧力等)	圧力計、検層、 DSS, DTS	Baseline		●(●)			
	微小振動	地震計、DAS	Baseline		○	○**	△	
CO ₂ Plume, Leak	CO ₂ 挙動把握 (シミュレーション 含む) 近 ↓ 遠 ↓	坑井近傍	検層、坑井物理探査、 DSS, DTS, DAS	Baseline		●		
		坑井周辺	坑井物理探査、 2D/3D弾性波、DAS	Baseline		●		
		広域	2D/3D弾性波、 DAS	Baseline		●	○**	△
	地層水分析	組成変化並びに定量化	Baseline		△			
地表変位(陸上)	GPS測位、In-SAR	Baseline		△				
Environment, Seepage (リスクに応じて実施)	海洋環境 必要に応じて	水質	有人探査、無人探査等	Baseline (圧入前に少なくとも1回+適宜)		(2次)**	(2次)**	(2次)**
		底質	有人探査、無人探査等			(2次)**	(2次)**	(2次)**
		気泡	音響探査			(2次)**	(2次)**	(2次)**
		同位体	圧入起源のCO ₂ 検出			(2次)**	(2次)**	(2次)**
環境影響(利用に供する地下水)	組成変化並びに定量化	Baseline		(2次)**	(2次)**	(2次)**		

一次監視として行う項目 ○: 実施、△: 場合により実施。●、▲は重点監視項目。無印: 平時は実施しない項目。
 * 二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実施。Baseline: 圧入開始前に少なくとも1回行うことを前提に、取得開始時期についても適宜。** 終了時に参考データを取得。

5.3 エリア B (沖合、風力発電区域と一部重複)

5.3.1 前提条件

エリア B は、貯留エリアが沖合に位置し、風力発電区域と一部重複するケースである(図 5-3)。排出源や分離・回収施設は陸上に位置し、沖合のプラットフォームまでパイプラインによる CO₂ 輸送が行われる。圧入井には傾斜井や水平井が採用され、その数は 2 本とした。

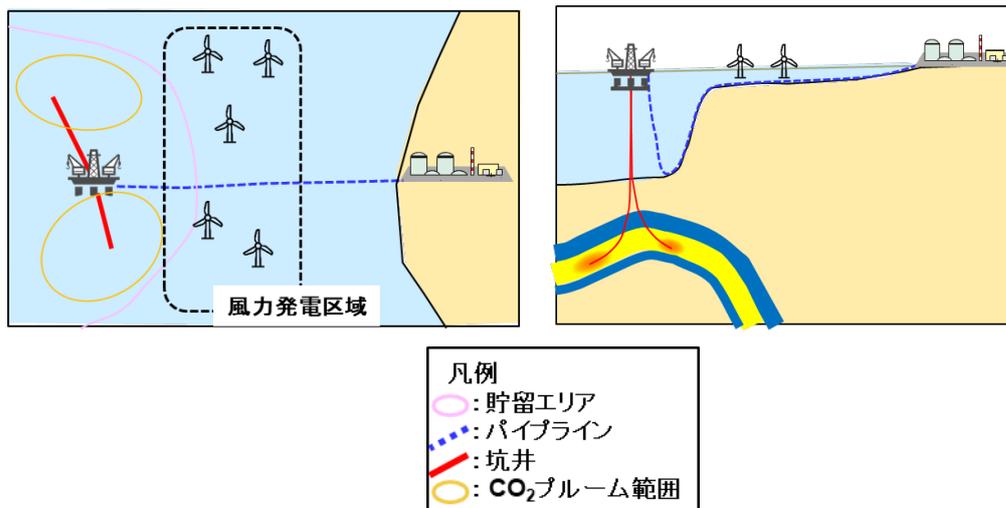


図 5-3 エリア B 模式図

当該エリアの地理的背景として、陸上はそれほど大きな都市ではないため、港は風力発電と共用することになる。洋上風力発電の計画があり、貯留エリアの一部が発電区域と重複する。その他のリスクに関する前提として、表 5-4 の条件を与えた。

表 5-4 エリア B のリスクの前提条件

リスク項目	前提条件
坑井	試掘井のみ
断層	エリア内で認定されていない*
遮蔽能力	大
貯留層上面深度	十分深い
貯留エリア	深海（水深 200 m 以上）
地震活動	並
地層圧	通常～高
貯留層（孔隙率、浸透率、貯留層平均層厚）	中
第三者（他産業、他者）	風力発電区域と一部重複

* 活断層および貯留層となる地層の透水性に影響を及ぼす断層が認定されていない

5.3.2 モニタリング計画

エリア B の前提条件に基づくモニタリング計画モデル案は表 5-5 のとおりである。エリア B では、泥質層の割合が比較的高い沖合堆積物に伴う CO₂ の圧入レートの不足が想定されており、それを補うための圧入圧力上昇による誘発地震の発生、CO₂ の移動による風力発電事業者への影響（例えば海底面の変形、隆起）が大きなリスクとして考えられる。このこ

とから、坑口および坑底での圧力および温度の測定、坑井健全性、微小振動、CO₂の挙動把握、および地層水を重点的にモニタリングする必要がある。

表 5-5 エリア B のモニタリング計画モデル案

対象	項目	適用技術・計測	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	Y年間	廃坑後	
Operation	圧入流体(組成、流量、濃度)	圧入量計測			○			
	坑口(圧力、温度)	圧力・温度計、DSS、DTS			●			
	坑底(圧力、温度)	圧力・温度計、DSS、DTS	Baseline		●	○**	△	
	坑井健全性(アニュラス圧力等)	圧力計、検層、DSS、DTS	Baseline		○(●)			
	微小振動	地震計、DAS	Baseline		●	○**	△	
CO ₂ Plume, Leak	CO ₂ 挙動把握 (シミュレーション含む) 近 ↓ 遠 ↓	坑井近傍	検層、坑井物理探査、DSS、DTS、DAS	Baseline	●			
		坑井周辺	坑井物理探査、2D/3D弾性波、DAS	Baseline	●			
		広域	2D/3D弾性波、DAS	Baseline	●		○**	△
	地層水分析	組成変化並びに定量化	Baseline		▲			
	海底面変位	音響探査	Baseline		△			
Environment, Seepage (リスクに応じて実施)	海洋環境 必要に応じて	水質	有人探査、無人探査等	Baseline (圧入前に少なくとも1回+適宜)		(2次)**	(2次)**	(2次)**
		底質	有人探査、無人探査等			(2次)**	(2次)**	(2次)**
		気泡	音響探査			(2次)**	(2次)**	(2次)**
		同位体	圧入起源のCO ₂ 検出			(2次)**	(2次)**	(2次)**
	環境影響(利用中の地下水)							

一次監視として行う項目 ○: 実施、△: 場合により実施。●、▲は重点監視項目。無印: 平時は実施しない項目。
 * 二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実施。Baseline: 圧入開始前に少なくとも1回行うことを前提に、取得開始時期についても適宜。** 終了時に参考データを取得。

5.4 エリア C (沖合、断層で貯留層が隔離)

5.4.1 前提条件

エリア C は、貯留エリアが沖合に位置し、断層で貯留層が分断・隔離されているケースである(図 5-4)。排出源や分離・回収施設は陸上に位置し、沖合のプラットフォームまでパイプラインによる CO₂ 輸送が行われる。圧入井には傾斜井や水平井が採用され、その数は3本とした。

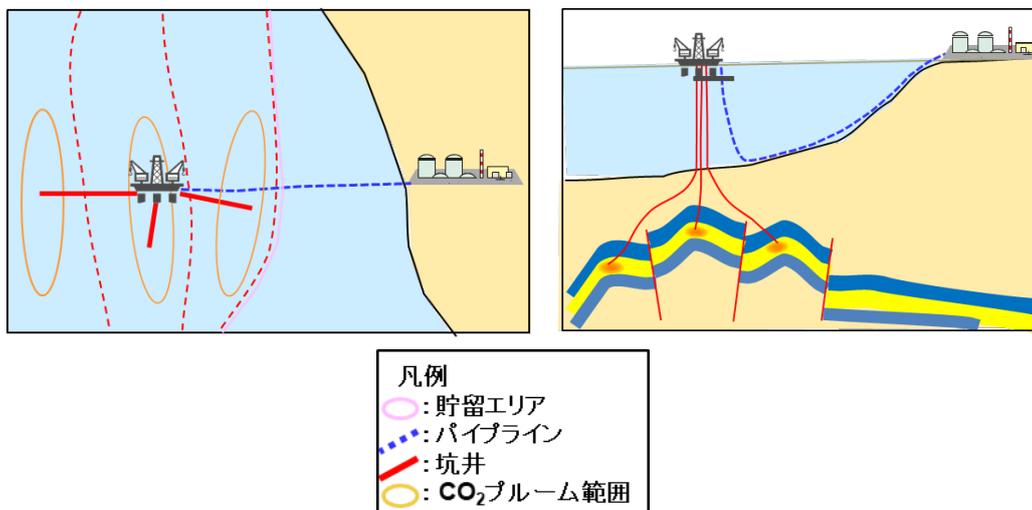


図 5-4 エリア C 模式図

当該エリアは断層によって貯留層が隔離されているエリアである。帯水層は断層で分断されているが、断層は海底面には到達しておらず、既に活動を停止している。このようなフィールドはノルウェーの Snøhvit プロジェクト*32とオランダの Porthos プロジェクトが似た例として挙げられる。その他のリスクに関する前提として、表 5-6 の条件を与えた。

表 5-6 エリア C のリスクの前提条件

リスク項目	前提条件
坑井	試掘井のみ
断層	エリア内で多数
遮蔽能力	大
貯留層上面深度	十分深い
貯留エリア	深海（水深 200 m 以上）
地震活動	並
地層圧	通常～高
貯留層（孔隙率、浸透率、貯留層平均層厚）	中
第三者（他産業、他者）	なし

5.4.2 モニタリング計画

エリア C の前提条件に基づくモニタリング計画モデル案は表 5-7 のとおりである。エリア C では、CO₂ の断層を通じた移動による漏出、貯留層不具合による CO₂ の圧入レートの不足、圧入による地震の発生が大きなリスクとして考えられる。このことから、坑口および坑底での圧力および温度の測定、坑井健全性、微小振動、および CO₂ の挙動把握を重点的にモニタリングする必要がある。Porthos プロジェクトの様に、圧入エリア内に既存坑井が多数ある場合には、坑井を通じた漏出もリスク顕在化の要因となりえるため、その場合には坑井健全性のモニタリングも重点項目となりうる。

*32 White, J.C., Williams, G. and Chadwick, A. (2018) Seismic amplitude analysis provides new insights into CO₂ plume morphology at the Snøhvit CO₂ injection operation, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 79, p. 313-322

表 5-7 エリア C のモニタリング計画モデル案

対象	項目	適用技術・計測	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	Y年間	廃坑後	
Operation	圧入流体(組成、流量、濃度)	圧入量計測			○			
	坑口(圧力、温度)	圧力・温度計、 DSS,DTS			●			
	坑底(圧力、温度)	圧力・温度計、 DSS, DTS	Baseline		●	○**	△	
	坑井健全性(アニュラス圧力等)	圧力計、検層、 DSS, DTS	Baseline		○(●)			
	微小振動	地震計、DAS	Baseline		●	○**	△	
CO ₂ Plume, Leak	CO ₂ 挙動把握 (シミュレーション 含む) 近 ↓ 遠 ↓	坑井近傍	検層、坑井物理探査、 DSS, DTS, DAS	Baseline	●			
		坑井周辺	坑井物理探査、 2D/3D弾性波、DAS	Baseline	●			
		広域	2D/3D弾性波、 DAS	Baseline	●	○**	△	
	地層水分析	組成変化並びに定量化	Baseline		△			
海底面変位	音響探査	Baseline		△				
Environment, Seepage (リスクに応じて実施)	海洋環境 必要に応じて	水質	有人探査、無人探査等	Baseline (圧入前に少なくとも1回+適宜)		(2次)**	(2次)**	(2次)**
		底質	有人探査、無人探査等			(2次)**	(2次)**	(2次)**
		気泡	音響探査			(2次)**	(2次)**	(2次)**
		同位体	圧入起源のCO ₂ 検出			(2次)**	(2次)**	(2次)**
	環境影響(利用中の地下水)							

一次監視として行う項目 ○: 実施、△: 場合により実施。●、▲は重点監視項目。無印: 平時は実施しない項目。
 *二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実施。Baseline: 圧入開始前に少なくとも1回行うことを前提に、取得開始時期についても適宜。**終了時に参考データを取得。

5.5 エリア D (陸上)

5.5.1 前提条件

エリア D は、排出源、分離・回収施設、貯留エリアのすべてが陸上にあるケースである(図 5-5)。日本における CCS プロジェクトでは現状、圧入エリアが陸上で行われることは想定されていないため、この例はあくまでもこれまでのすべてのリスクが包含されている仮説として示すこととする。貯留エリアまでの CO₂ 輸送はパイプラインによって行われる。圧入井には傾斜井や水平井が採用され、その数は 2 本とした。

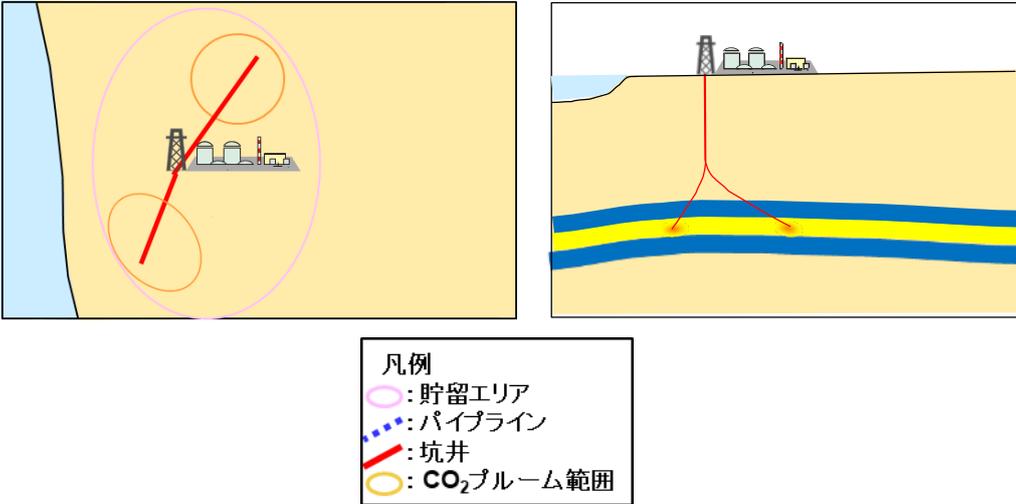


図 5-5 エリア D 模式図

当該エリアの地理的背景として、陸上は CO₂ を大量に排出する工業都市であり、市街地も抱えている。エリア A と同様に温泉産業も存在する。飲用に供される地下水・湧水についても、市街地を抱える地域特性も踏まえ、水質に対して特に高い関心が払われている。ここでは石油天然ガス鉱区の設定はなく、一方で地下水採取用、温泉用など多数の既存坑井が位置しているが、CCS の貯留層には到達していない。陸域で CCS プロジェクトを始めるにあたり、他社事業（温泉、上水道等）に影響を与えないことが条件となっている。地震活動もエリア A と比較して大きい。以上に挙げたリスクに関する前提として、表 5-8 の条件を与えた。

表 5-8 エリア D のリスクの前提条件

リスク項目	前提条件
坑井	地下水や温泉など、多数あり
断層	エリア内では認定されていない※
遮蔽能力	中
貯留層上面深度	十分深い
貯留エリア	陸上
地震活動	並
地層圧	通常
貯留層（孔隙率、浸透率、貯留層平均層厚）	大
第三者（他産業、他者）	温泉、水道、工業用水等

※ 活断層および貯留層となる地層の透水性に影響を及ぼす断層が認定されていない

5.5.2 モニタリング計画

エリア D の前提条件に基づくモニタリング計画モデル案は表 5-9 のとおりである。エリア D では、CO₂ の貯留コンプレックス外への移動、CO₂ の移動による第三者への影響、圧入による地震の発生が大きなリスクとして考えられる。このことから、坑口および坑底での圧力および温度、圧入井だけでなく、周辺の既存坑井における坑井健全性、微小振動、CO₂ の挙動把握、地層水、および地表変位（陸上）を重点的にモニタリングする必要がある。

表 5-9 エリア D のモニタリング計画モデル案

対象	項目	適用技術・計測	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	Y年間	廃坑後
Operation	圧入流体(組成、流量、濃度)	圧入量計測			○		
	坑口(圧力、温度)	圧力・温度計、 DSS,DTS			●		
	坑底(圧力、温度)	圧力・温度計、 DSS, DTS	Baseline		●	○**	△
	坑井健全性(アニュラス圧力等)	圧力計、検層、 DSS, DTS	Baseline		●(●)		
	微小振動	地震計、DAS	Baseline		●	○**	△
CO ₂ Plume, Leak	CO ₂ 挙動把握 (シミュレーション 含む) 近 ↓ 遠 ↓	坑井近傍	検層、坑井物理探査、 DSS, DTS, DAS	Baseline		●	
		坑井周辺	坑井物理探査、 2D/3D弾性波、DAS	Baseline		●	
		広域	2D/3D弾性波、 DAS	Baseline		●	○**
	地層水分析	組成変化並びに定量化	Baseline		▲		
地表変位(陸上)	GPS測位、In-SAR	Baseline		▲			
Environment, Seepage (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)			
		底質					
		気泡					
		同位体	圧入起源のCO ₂ 検出			(2次)**	(2次)**
	環境影響(利用中の地下水)	組成変化並びに定量化			(2次)**	(2次)**	(2次)**

一次監視として行う項目 ○: 実施、△: 場合により実施。●、▲は重点監視項目。無印: 平時は実施しない項目。
 * 二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実施。Baseline: 圧入開始前に少なくとも1回行うことを前提に、取得開始時期についても適宜。*** 終了時に参考データを取得。

付録1 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実施概要

A. 開催日時

- 第1回：2021年8月4日（水）
 第2回：2021年11月17日（水）
 第3回：2022年2月22日（火）
 第4回：2022年7月8日（金）
 第5回：2023年1月18日（水）
 第6回：2023年3月22日（水）
 第7回：2023年7月25日（火）
 第8回：2023年11月16日（木）
 第9回：2024年2月8日（木）

B. 委員

2024.03.31 現在

委員名簿（五十音順、敬称略）	
海江田 秀志	電力中央研究所 名誉研究アドバイザー
佐藤 光三 （委員長）	東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授
佐藤 徹	東京大学 大学院新領域創成学研究科 環境学研究系 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 CO ₂ 貯留研究グループ 主席研究員 （兼）二酸化炭素地中貯留技術組合 技術部長
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 大学院新領域創成科学研究科 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

付録2 有識者ヒアリング実施先

A. 国内有識者

本検討に際して、各分野に精通する国内有識者へのヒアリングを実施し、公開文献からは得ることが困難な情報を入手するとともに、モニタリングのあるべき姿に関して意見交換を実施した。ヒアリング実施概要を以下に示す。

実施日	有識者所属（専門性）	ヒアリング事項（視点）
2021年9月29日	大学・研究者（海洋環境工学）	海洋モニタリングと漏出検知の可能性
2021年10月6日	企業・コンサルティング	既存の関連規制における考え方 国内におけるリスクの考え方
2021年10月7日 2022年9月21日	公益研究機関・プリンシパル研究者（岩盤力学、地震岩石物性）	モニタリング全般 光ファイバー技術の応用
2022年1月14日	大学・研究者（地震学・火山学）	誘発地震について 微小振動観測の適用可能性
2022年1月17日	大学・研究者（地球・資源システム工学）	個別モニタリング技術の詳細
2022年1月17日 2023年8月18日	大学・研究者（地圏環境システム学）	モニタリングの考え方 MMVにおけるリスクの考え方
2022年7月27日	企業・技術サービス（物理探査・地震探査）	地下探査技術全般
2022年8月22日	独立行政法人（エネルギー・鉱物資源）CCS推進グループ	他のCCSガイドラインとの整合性
2022年8月23日	国立研究機関・プリンシパル研究者（地球・資源システム工学）	モニタリング全般 研究機関のCCSへの取組
2022年9月27日	大学・研究者（地球・資源システム工学）	潮汐現象を利用した微小圧力変動解析
2022年11月11日	大学・研究者（地球システム工学）	個別モニタリング技術の詳細 社会実装に向けたモニタリング技術
2022年11月17日	大学・研究者（自然災害科学）	電磁探査/電気探査の適用可能性
2023年10月3日	企業・金融 CCS検討メンバー 4名	ファイナンスの立場からみたモニタリングの考え方
2023年10月16日	企業・エンジニアリング リスクマネジメント担当 3名	プラント事業におけるリスクマネジメントについて
2023年12月1日 2024年1月31日	企業・保険 CCS検討メンバー 4名	CCSを対象とした事業保険の在り方について
2024年5月7日	企業・保険 CCS検討メンバー 3名	CCSを対象とした事業保険の在り方について

B. 海外有識者

本検討においては、海外の有識者に対してもヒアリングを実施した。

Porthos プロジェクトは、オランダの全排出量の 16%を占めるロッテルダム港の産業排出を回収し、パイプラインにより沖合の北海海底下の枯渇ガス田へ輸送、貯留を行うハブ・プロジェクトである。そのモニタリング計画は EU-CCS 指令に準拠しており、完成度が高く、規制当局からの許認可取得済みであること、また海域プロジェクトでありロンドン議定書の規制対象となること等から、日本におけるモニタリング計画策定に際し参考になると考え、詳細な調査の対象とした。ヒアリングでは、**Porthos** プロジェクトのモニタリング計画策定に関し、オランダの総合研究機関である TNO（オランダ応用科学研究機構）でプロジェクトマネージャーを務めているプリンシパル研究者に対して、その経緯や考え方、ステークホルダーとの関係について話を聞いた。

分科会の検討において、CCS のモニタリング計画策定の考え方や各モニタリング項目の必要性等に関して、CCS モニタリング研究の第一人者である Dr. Charles Jenkins の研究内容^{*31}を参照している。また、同氏が所属するオーストラリア連邦政府の研究機関である CSIRO の海洋モニタリンググループは CCS の海洋モニタリングに関する研究をリードしていることから、CCS モニタリングに関する意見交換および関連技術の最新情報を得ることを目的に Dr. Charles Jenkins および CSIRO 海洋モニタリンググループに対してヒアリングを実施した。

また、ブラジルの国営石油会社 Petrobras 社の Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCUS プロジェクトの担当者に対してもそのモニタリングの内容についてヒアリングを実施している。

さらに、規制当局との関わり方について、**Porthos** プロジェクト関係者に加え、英国の研究者および Shell 社の CCS 担当者にもヒアリングを実施した。英国の研究者は OPEN University において環境変化の社会的側面に焦点を当てた研究を行っており、苫小牧 CCS 実証事業を事例として、沿岸および沖合インフラ事業における社会影響評価の課題を評価している。Shell 社の CCS 担当者は、カナダ・アルバータ州で 2015 年より商業運転を開始した Quest CCS プロジェクトの貯留マネージャーを約 6 年間務めた後、同社の Global CCS Deployment Lead として世界各地の CCS プロジェクトを主導している。

ヒアリング実施概要を以下に示す。

^{*31} Jenkins, C. (2020) The State of the Art in Monitoring and Verification: an update five years on, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol.100. 他

実施日	有識者所属	ヒアリング事項
ヒアリング内容：Porthos プロジェクトのモニタリング計画		
2022年10月27日 2023年1月27日	オランダ応用科学研究機構 (TNO)：CCS プロジェクトリ ーダー／研究者	Porthos プロジェクトの現状、関連規 制、モニタリング計画、規制当局を含 むステークホルダーとのやりとり、ア カウンティングとの関係
ヒアリング内容：海洋モニタリング		
2022年11月28日、 11月29日	オーストラリア連邦科学産業 研究機構 (CSIRO)：CCS プロ ジェクトリーダー／研究者	海洋モニタリング全般 (苫小牧実証試験におけるモニタリ ング、分科会検討内容に関する意見交 換含む)
2022年11月30日	CSIRO：海洋モニタリンググル ープ研究者 14名	海洋モニタリング全般 CSIRO における研究開発の内容
2021年12月15日	Petrobras 社：CCS プロジェク ト担当者	Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCUS プロジェクトのモニタリング
ヒアリング内容：規制当局との関わり方		
2023年6月7日	英国 OPEN University：PA に 係る研究者	規制当局との折衝等に関する実証プ ロジェクトにおける事例
2023年10月23日	Shell 社：CCS プロジェクト担 当者	Peterhead プロジェクト等における モニタリング計画策定時の規制当局 との関わり方
2023年10月25日	TNO：CCS プロジェクト研究 者 3名 EBN：CCS プロジェクト担当 者	ROAD、Porthos プロジェクトにおけ るモニタリング計画策定時の規制当 局との関わり方

この報告書は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の一環として日本 CCS 調査株式会社が作成しました。

【禁無断複製】 本報告書の全部または一部を無断で複写複製（コピー）、磁気または光学記録媒体に入力することを、著作権上の例外を除き、禁じます。