

「CCUS研究開発・実証関連事業」

事業原簿

【公開版】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------

—目次—

概要	3
プロジェクト用語集	1 1
1. 事業の位置づけ・必要性について	1 - 1
1. 1. 事業の背景・目的・位置づけ	1 - 1
(1) 政策的重要性	1 - 2
(2) 我が国の状況	1 - 3
(3) 世界の取り組み状況	1 - 5
1. 2. NEDO が関与する必要性・制度への適合性	1 - 6
(1) NEDO が関与することの意義	1 - 6
(2) 実施の効果（費用対効果）	1 - 8
2. 研究開発マネジメント	2 - 1
2. 1. 事業の目標	2 - 1
2. 2. 事業の計画内容	2 - 2
2. 2. 1. 研究開発の内容	2 - 2
2. 2. 2. 研究開発の実施体制	2 - 1 1
2. 2. 3. 研究開発の運営管理	2 - 1 5
2. 2. 4. 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性	2 - 1 6
2. 3. 情勢変化への対応	2 - 1 8
2. 4. 中間評価への対応	2 - 1 9
2. 5. 評価に関する事項	2 - 2 1
3. 研究開発成果	3 - 1
3. 1. 研究開発項目①苫小牧における CCS 大規模実証試験	3 - 1
3. 2. 研究開発項目②安全な CCS 実施のための CO ₂ 貯留技術の研究開発	3 - 9
3. 3. 研究開発項目③CO ₂ 分離・回収技術の研究開発	3 - 1 8
③-1)先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発	3 - 1 8
③-2)先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究開発	3 - 1 8
③-3)二酸化炭素分離膜モジュールの研究開発	3 - 3 0
3. 4. 研究開発項目④CCUS 技術に関連する調査	3 - 4 2
4. 成果の実用化に向けた取組および見通し	4 - 1
4. 1. 本プロジェクトにおける「実用化」の考え方	4 - 1
4. 2. 実用化に向けた戦略	4 - 2
4. 3. 実用化に向けた具体的取組	4 - 3

(添付資料)

- ・添付資料 1 プロジェクト基本計画
- ・添付資料 2 特許論文等リスト
- ・添付資料 3 苫小牧における CCS 大規模実証試験 30 万トン圧入時点報告書
(「総括報告書」)
- ・添付資料 4-1 安全な C C S 実施のための C O 2 貯留技術の研究開発_2018 年度中間年報
- ・添付資料 4-2 安全な C C S 実施のための C O 2 貯留技術の研究開発_2019 年度中間年報
- ・

概 要

	最終更新日	2020年8月26日	
プロジェクト名	CCUS研究開発・実証関連事業	プロジェクト番号	P18006
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 PM：布川 信（2020年9月現在）		
0. 事業の概要	<p>二酸化炭素分離・回収・貯留・有効利用（CCUS：Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）は、工場や発電所等から排出されるCO₂を大気放散する前に回収し、地下へ圧入・貯留する技術で、温室効果ガス削減効果が大きいこと等から、地球温暖化対策の選択肢の一つとして世界的に期待されており、国際エネルギー機関（IEA；International Energy Agency）が公表したEnergy Technology Perspective 2017では、2050年までの累積CO₂削減量の9%をCCUSが担うとされている。</p> <p>CCUSの実用化に向けては、CO₂の分離回収、圧入貯留、モニタリングまでトータルでのCCUS技術の確立、CCUS事業コストの十分な低減、十分な貯留能力を有した貯留地点の選定、社会的受容性の醸成活動等が不可欠である。</p> <p>本プロジェクトでは、CCUS技術の実用化に資するべく、大規模CCS実証試験、CO₂分離・回収コストの低減及び、CO₂貯留の安全性確保を目指した研究開発を実施する。</p> <p>研究開発項目① 苫小牧におけるCCS大規模実証試験 研究開発項目② 安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発 研究開発項目③ CO₂分離・回収技術の研究開発 1)先進的CO₂分離膜モジュールの実用化研究開発 2)先進的CO₂分離膜モジュールの石炭排ガス適用性研究 3)革新的CO₂分離膜モジュールの研究開発 研究開発項目④ CCUS技術に関連する調査</p>		
1. 事業の位置 付け・必要性について	<p>我が国においても、エネルギー基本計画（2018年7月閣議決定）において、「2020年頃のCO₂回収・有効利用・貯留（CCUS）技術の実用化を目指した研究開発、国際機関との連携、CCUSの商用化の目途等も考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready導入に向けた検討や、国内における回収・輸送・圧入・貯留の一連のCCUSのプロセスの実証を着実に進めるなど、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電導入を進める。」との方針が示されるなど、CCUS技術を重要な気候変動対策の一つとして位置付けている。</p>		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>本事業を通じて、大規模実証試験におけるCO₂の貯留や地中CO₂のモニタリング技術の開発、CO₂分離・回収コストの低減等、CCSの実用化による約束草案の実現に寄与する革新的なCCUS関連技術の確立を目指す。</p> <p>本事業の開発成果により、2019年度にCO₂分離・回収エネルギー1.5GJ/t-CO₂以下となる固体吸収材・システム、2020年度に同0.5GJ/t-CO₂以下となる分離膜技術の確立を目指すとともに、それらの技術の発電プラントへの適用性について検証を進める。また、苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業においては、年間10万トン規模の貯留実績を達成し、その後のモニタリングによるCO₂の漏出（海水の化学的性状の測定値を含む各監視データの総合判断からCO₂漏出が認められる状況）回数ゼロを達成する。</p>		

事業の計画内容	主な実施事項	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
		fy	fy	fy	fy	fy	fy	fy	
	① 苫小牧における CCS 大規模実証試験								
	年間 10 万トン規模での CO2 分離・回収／圧入貯留	→							
	貯留した CO2 のモニタリング	→	→	→	→	→			
	海洋環境調査	→	→	→	→	→			
	社会的受容性の醸成に向けた情報発信活動	→	→	→	→	→			
	② 安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発								
	大規模 CO2 圧入・貯留の安全管理技術の確立	→	→	→	→				
	大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立	→	→	→	→				
	CCS 普及の条件整備、基準の整備	→	→	→	→				
	③-1) 先進的二氧化碳固体吸収材実用化研究開発								
	高効率システム開発	→	→	→	→				
	実用化のための材料最適化と製造技術開発	→	→	→	→				
	スケールアップ検討と経済性評価	→	→	→	→				
	③-2) 先進的二氧化碳固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究								
	移動層パイロットスケール試験設備の詳細設計・建設、試運転			→	→	→			
	高効率 CO2 分離回収技術基盤技術開発			→	→	→	→	→	
	③-3) 二氧化碳分離膜モジュール実用化研究開発								
	実ガスを用いた CO2 分離性能試験による課題抽出と解決	→	→	→	→				
	膜材料と膜エレメントの最適化	→	→	→	→				
	経済性評価	→	→	→	→				
	④ CCUS に関連する調査			→	→	→	→	→	

	会計・勘定	2018 fy	2019 fy	2020 fy	2021 fy	2022 fy	2023 fy	2024 fy	総額
事業費推移	一般会計								0
(会計・勘定別に NEDO が負担 した実績額 (評価実施年度 については 予算額) を記載) (単位:百万円) (委託)・ (助成)・ (共同研究) のうち使用しない 行は削除	特別会計(需給)	4,855	7,840	7,662	6,900	14,900	14,300	6,200	62,657
	開発成果促進財源								0
	総 NEDO 負担額	4,855	7,840	7,662	6,900	14,900	14,300	6,200	62,657
	(委託)①苫小牧 CCS	3,165	5,560	4,482					13,207
	(委託)②安全貯留	957	1,145	1,221					3,323
	(委託)③-1)固体	550	685	-	-	-	-	-	1,235
	(委託)③-2)固体	-	-	1,347	2,283	2,139			5,769
	(委託)③-3)膜	183	440	286					909
	(委託)④調査	-	10	326					336
開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 環境政策課 地球環境対策室							
	プロジェクト リーダー	研究開発項目① 日本 CCS 調査(株) : 取締役 田中 豊 (2018年4月~2020年6月) 常務取締役プラント本部長 今井 英貴 (2020年7月~)							
	プロジェクト マネージャー	NEDO 環境部 布川 信							
	委託先 (助成事業の場合「助 成先」とするなど適宜変 更) (組合が委託先に含ま れる場合は、その参加企 業数及び参加企業名も 記載)	研究開発項目①日本 CCS 調査株式会社 研究開発項目②二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (参加5社) <組合企業> 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 国際石油開発帝石株式会社 大成建設株式会社 応用地質株式会社 石油資源開発株式会社 <再委託> 国立研究開発法人産業技術総合研究所 研究開発項目③-1)公益財団法人地球環境産業技術研究機構 <再委託> 川崎重工業株式会社 研究開発項目③-2)公益財団法人地球環境産業技術研究機構、川崎重工業株 式会社 <再委託> 名古屋大学 研究開発項目③-3)二酸化炭素分離膜モジュール技術研究組合 <組合企業> 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 住友化学株式会社 <再委託>							

		<p>名古屋大学 研究開発項目④三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工エンジニアリング(株)、三菱瓦斯化学(株)</p>
<p>情勢変化への対応</p>	<p>「2020年頃のCO₂回収・有効利用・貯留（CCUS）技術の実用化を目指した研究開発、国際機関との連携、CCSの商用化の目途等も考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready導入に向けた検討や、国内における回収・輸送・圧入・貯留の一連のCCSのプロセスの実証を着実に進めるなど、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電導入を進める。」との方針が示され、CCUS技術の必要性が示された。</p> <p>「パリ協定における成長戦略としての長期戦略」において、2030年以降のCCUS技術の本格的な社会実装に向けて、2023年までに最初の商用規模のCCU技術を確立することを目指し、その後の普及の起爆剤とすべく、幅広い関係者の取り組みを加速するとされている。</p>	
<p>中間評価結果への対応</p>	<p>（中間評価を実施した事業のみ） 産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会 第47回評価ワーキング（2019年2月22日）</p> <p>●全体</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目標設定について、研究開発の進捗状況を客観的に評価検討できるように、定量的な事業アウトプット指標の設定を検討すること。コスト目標についても、適地調査及び輸送も含めた目標値の設定を検討すること。 ⇒目標設定について、研究開発項目にもよるが、可能な限り定量的なアウトプット指標を設定すべく検討を行う。コスト目標については、実証試験の結果、研究開発の動向、適地調査の進捗状況等を踏まえて検討を行う。 ・社会的受容性に関して、国民の理解が得られるように、広報活動の実施方法を検討すること。 ⇒CCSに対する社会的受容性の醸成を目的として、これまで本プログラムで実施してきた情報発信活動を継続するとともに、NEDOとも連携し、その広報力を活用したPRについても検討を行う。 ・知財や研究開発データの取り扱いについての戦略及びルール、特に事業終了後のルールについて、できるだけ早めに検討し具体化すること。 ⇒知財管理について、プロジェクトごとにルールを定め、適宜調整を行う体制をとっており、各プロジェクトのルールに則り適切な運用を行う。データや事業の成果については、各事業者の機密等に配慮しつつ、可能な限り社会一般への公開に努めるべく検討を行う。 <p>①苫小牧におけるCCS大規模実証試験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・滝ノ上層（火山岩層）へのCO₂圧入は想定を大きく下回る結果であったが、その原因を明らかにし、適地選定においても滝ノ上層のような浸透性が低い地層を選定するリスクを回避する方法についても検討すること。 ⇒滝ノ上層のような浸透性が低い地層を選定することがないよう、原因分析を行い、今後の適地サイト選定に生かせるよう対処法について検討を行う。 ・社会的受容性に関して、国民の理解が得られるよう、広報活動の実施方法を検討すること。 ⇒CCSに対する社会的受容性の醸成を目的として、実証試験地の地元を中心として国内各地域に対してこれまで本プロジェクトで実施してきた情報発信活動や双方向の意見交換を継続するとともに、NEDOとも連携し、その広報力を活用したPRについても検討を行う。 <p>②安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目標設定について、研究開発の進捗状況を客観的に評価検証できるように、定量的な事業アウトプット指標の設定を検討すること。 ⇒技術開発成果適用によるCCSの安全性・効率向上、貯留CO₂監視効率・精度の向上、あるいはCCS実用化に向けた課題解決貢献度等について、可能な限り定量的な目標を設定すべく検討を行う。 	

	<p>・知財や研究開発データの取り扱いについての戦略及びルール、特に事業終了後のルールについて、できるだけ早めに検討し具体化すること。</p> <p>⇒知財についての戦略やルールは、技術研究組合の「知的財産権取扱協定書」に定めている他、技術研究組合の「知的財産委員会」において、適宜調整を行う体制としている。知的財産権については、事業終了後も視野に、技術開発の貢献度に応じて組合から組合員へ知的財産権の譲渡ができるルールとしている。データや事業の成果については、企業機密に配慮しつつ、可能な限り社会一般への公開に努める。</p>	
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	
	<p>中間評価</p>	<p>2018年度 中間評価実施（経済産業省）</p>
	<p>事後評価</p>	<p>2025年度（予定）</p>
<p>3. 研究開発成果について</p>	<p>●研究開発項目①苫小牧における CCS 大規模実証試験</p> <p>CO₂ 圧入期間中、濃度 99%以上で CO₂ を分離・回収し、年間 10 万トン規模での CO₂ 圧入を実施し、累計圧入量 30 万トンを達成した。また、圧入期間中か現在まで、CO₂ の漏出（海水の化学的性状の測定値を含む各監視データの総合判断から CO₂ 漏出が認められる状況）は検知されていない。</p> <p>●研究開発項目②安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術の研究開発</p> <p>2019 年度以降に CCS 実証サイトに適用可能な技術開発として、CO₂ 圧入・貯留に関わる安全管理技術の開発、大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発、CCS 普及条件の整備や技術事例集の作成等を実施した。</p> <p>●研究開発項目③CO₂ 分離・回収技術の研究開発</p> <p>③-1)先進的二氧化碳素固体吸収材実用化研究開発</p> <p>本事業では、先進的な固体吸収材法による CO₂ 分離回収技術の実用化を促進することを目的に、固体吸収材製造技術の合理化、回収プロセスの最適化検討、ベンチスケール回収試験、実ガス曝露試験、石炭火力発電所におけるスケールアップ試験装置の設計、商用化に向けたシステム検討を実施し、ラボスケール試験において、回収エネルギー 1.5 GJ/t-CO₂ 以下、回収率 90%以上、回収純度 99%以上の性能を示すとともに、有用なシミュレーターの構築および高精度化を実現した。</p> <p>また、ベンチスケール試験については、装置改良を実施し、固体吸収材循環量を増大させるとともに、安定した循環運転に成功し、改良した固体吸収材に、運転条件を適合させることで事業目標の CO₂ 回収量を超える 7.2 t/d を実現する目途を得た。</p> <p>③-3)二氧化碳素分離膜モジュール実用化研究開発</p> <p>実ガス（石炭ガス化ガス）を用いた CO₂ 分離性能試験による課題抽出と解決のため、実ガス IGCC 試験設備での試験に着手し、膜材料と膜エレメントの最適化を図るとともに、CO₂ 分離・回収コスト 1,500 円/t 以下、エネルギー 0.5GJ/t 以下を達成する目途を得た。</p> <p>●④CCUS 技術に関連する調査</p> <p>最新の関連技術の収集・解析により、CCUS 技術の国際競争力の強化を図るために必要な基礎的情報を得るとともに、CCUS 技術の開発動向と導入可能性、適応性、課題等を整理するため、周辺技術調査を行った。</p> <p>メタノールは、カーボンリサイクル技術の中でも様々な業界で重要な基礎原料として使用されるため、特定の産業の景気に左右されにくく、安定的な需要が見込まれることより、水素と CO₂ から合成される基幹物質として、最初に立ち上がる分野の一つとして期待されている。</p> <p>そこで、CCUS 連携運用技術に着手するため、CO₂ からのメタノール合成実証に資する可能性検討および周辺技術調査を行うとともに実証試験を行う場合に必要となる基本設計を実施した。</p>	

	投稿論文	<p>「査読付き」7件、「その他」49件</p> <ul style="list-style-type: none"> ●研究開発項目①苫小牧における CCS 大規模実証試験 <ul style="list-style-type: none"> ・査読付き論文：0件、その他論文：8件 ●研究開発項目②安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発 <ul style="list-style-type: none"> ・査読付き論文：0件、その他論文：36件 ●研究開発項目③ <ul style="list-style-type: none"> ③-1)先進的 二酸化炭素 固体吸収材 実用化 研究開発 ③-2)先進的 二酸化炭素 固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究開発 ・査読付き論文：7件、その他論文：2件 ③-3)二酸化炭素分離膜モジュールの研究開発 ・査読付き論文：0件、その他論文：3件 																																																																	
	特許	<p>「出願済」5件、「登録」0件、「実施」0件（うち国際出願2件）</p> <p>特記事項：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本事業中で得られた技術成果のうち、ノウハウについては、公開につながる特許化は行わない。ただし、必要に応じて、新たな基本特許になりうる重要なものは特許化を推進する。 ・本事業によって得られた成果を活用し、標準化機関等との連携を図り、わが国の優れた CCUS 技術を普及させることを念頭に、積極的な提案活動を展開していく。 <ul style="list-style-type: none"> ●研究開発項目②安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発 <ul style="list-style-type: none"> ・出願済み：1件、登録：0件、実施：0件 ●研究開発項目③ <ul style="list-style-type: none"> ③-1)先進的 二酸化炭素 固体吸収材 実用化 研究開発 ・出願済み：4件、登録：0件、実施：0件 																																																																	
	その他の外部発表 (プレス発表等)	<ul style="list-style-type: none"> ●研究開発項目①苫小牧における CCS 大規模実証試験 <p>国内における社会的受容性の醸成に向けた情報発信活動</p> <table border="1" data-bbox="635 1160 1449 1384"> <thead> <tr> <th></th> <th>2018年度</th> <th>2019年度</th> <th>2020年度 6月19日現在</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>新聞・雑誌等への掲載</td> <td>44</td> <td>56</td> <td>29</td> <td>129</td> </tr> <tr> <td>Web版への掲載</td> <td>18</td> <td>42</td> <td>19</td> <td>79</td> </tr> <tr> <td>TV報道</td> <td>3</td> <td>10</td> <td>1</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>専門誌等への寄稿</td> <td>7</td> <td>1</td> <td>6 (執筆中)</td> <td>14</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">※2020年6月19日現在</p> <p>海外への情報発信ならびに情報収集</p> <table border="1" data-bbox="635 1462 1449 1664"> <thead> <tr> <th></th> <th>2018年度</th> <th>2019年度</th> <th>2020年度</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>研究発表・講演</td> <td>17</td> <td>19</td> <td>18</td> <td>54</td> </tr> <tr> <td>新聞・雑誌等への掲載</td> <td>約15</td> <td>約30</td> <td>約20</td> <td>65</td> </tr> <tr> <td>展示会への出展</td> <td>3</td> <td>7</td> <td>3</td> <td>13</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">※2020年8月23日現在</p> <ul style="list-style-type: none"> ●研究開発項目②安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発 <table border="1" data-bbox="635 1742 1449 1966"> <thead> <tr> <th></th> <th>2018年度</th> <th>2019年度</th> <th>2020年度</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>研究発表・講演</td> <td>47</td> <td>35</td> <td>3</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>受賞実績</td> <td>-</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>新聞・雑誌等への掲載</td> <td>1</td> <td>4</td> <td>-</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">※2020年6月17日現在</p>		2018年度	2019年度	2020年度 6月19日現在	計	新聞・雑誌等への掲載	44	56	29	129	Web版への掲載	18	42	19	79	TV報道	3	10	1	14	専門誌等への寄稿	7	1	6 (執筆中)	14		2018年度	2019年度	2020年度	計	研究発表・講演	17	19	18	54	新聞・雑誌等への掲載	約15	約30	約20	65	展示会への出展	3	7	3	13		2018年度	2019年度	2020年度	計	研究発表・講演	47	35	3	85	受賞実績	-	1	-	1	新聞・雑誌等への掲載	1	4	-	5
	2018年度	2019年度	2020年度 6月19日現在	計																																																															
新聞・雑誌等への掲載	44	56	29	129																																																															
Web版への掲載	18	42	19	79																																																															
TV報道	3	10	1	14																																																															
専門誌等への寄稿	7	1	6 (執筆中)	14																																																															
	2018年度	2019年度	2020年度	計																																																															
研究発表・講演	17	19	18	54																																																															
新聞・雑誌等への掲載	約15	約30	約20	65																																																															
展示会への出展	3	7	3	13																																																															
	2018年度	2019年度	2020年度	計																																																															
研究発表・講演	47	35	3	85																																																															
受賞実績	-	1	-	1																																																															
新聞・雑誌等への掲載	1	4	-	5																																																															

●研究開発項目③CO2 分離・回収技術の研究開発

	2018年度	2019年度	計
研究発表・講演	9	9	18
受賞実績	1	0	1
新聞・雑誌等への掲載	8	7	15
展示会への出展	1	5	6

※2020年6月22日現在

●研究開発項目④CCUS 技術に関連する調査

	2019 年度	2020 年度	計
研究発表・講演		1	1
受賞実績			0
新聞・雑誌等への掲載		5	5
展示会への出展			0

※2020年7月8日現在

<p>4. 成果の実用化・に向けた取組及び見通しについて</p>	<p>実用化とは、CCUS に係る社会的受容性を配慮した上で、各研究開発項目の技術を確認し低コスト化を図ることである。具体的には、地中貯留技術として圧入レート 10 万 t-CO₂/年の実証成果を踏まえ、圧入レート 100 万 t-CO₂/年規模の安全・安心な貯留技術を確認すること、安全貯留管理技術として CO₂ 圧入に係るモニタリング手法を検証、分離・回収技術として所用エネルギーの低減を図り、これらの成果を整理し、CO₂ 排出削減に繋がる技術の見通しを得ることである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 温室効果ガス削減目標（2050 年度に温室効果ガスを 2013 年度比 80%削減する目標等）に向けた材料選定や設備実証等により要素技術を完成させる。 ● CCUS の社会受容性醸成に向け、安全運用方法の確立とモニタリング等の継続実施、結果公開等のアウトリーチ活動を進める。 ● 要素技術開発プロセス、アウトリーチ活動等の進捗管理を行い、開発優先度の調整、開発スケジュールの最適化、技術開発の相互連携を図り、中長期の CCUS 技術開発全体プロセスの最適化・効率化を図る。さらに調査活動等により CO₂ 削減に対する市場ニーズを見極めることで、経済性見通しを確立する。 	
<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>2018 年 1 月 作成</p> <hr/> <p>2019 年 1 月 改訂（PL を記載、評価時期変更、研究開発項目①の事業期間延長など）</p> <p>2019 年 9 月 改訂（CCS を CCUS に変更、研究開発項目③2）の実施期間延長に伴い事後評価を前倒し事後評価に変更など）</p> <p>2020 年 2 月 改訂（新規事業追加、研究開発項目④の延長など）</p> <p>2020 年 5 月 改訂（評価時期の変更、研究開発スケジュールの更新など）</p>

プロジェクト用語集

研究開発項目① 苫小牧における CCS 大規模実証試験

名称	略号	意味
International Maritime Organization	I M O	国際海事機関
Carbon Sequestration Leadership Forum	C S L F	炭素隔離リーダーシップ・フォーラム
International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies	G H G T	温室効果ガス制御技術国際会議

研究開発項目② 安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発

名称	略号	意味
圧入安全管理システム	ATLS	サイト周辺での微小振動を含む地震発生状況を操業側にフィードバックし、地中への CO2 圧入時の安全性確保を行うためのシステム。
アップスケール技術		貯留規模を 100 万トン/年の実用化規模にするために必要な大規模化技術。地質モデル確立やシミュレーション技術、圧入井等の最適配置技術等がある。
圧力緩和井		大量の CO2 圧入による貯留層の圧力上昇を緩和する目的で、貯留層内から揚水するために用いる坑井。
イメージ検層データ		比抵抗、空隙径分布等の検層データを図面化し、視覚的に理解しやすいようにしたデータのこと。
インシデント		CO2 貯留事業を遅滞または中断させる可能性がある事象がある事象。具体的には CO2 漏出懸念や地震の発生が相当する。
化学的漏出検出手法		海水の pH 等化学的な数値で、海水への CO2 漏出を検出する手法。
気圧応答成分		気圧の変化により、重力が変化する成分。
検層データ解析		地質モデル構築やモニタリング目的のため、観測井等に観測機器を降下させ、深さ方向毎に、中性子や音波を利用した物理データ測定や、比抵抗の測定を実施し、地層の状態を把握するための解析。
コア試験		ボーリングで採取された岩石コアを用いた試験。
コアスケール		ボーリングによって採取された岩石コアを対象とする規模。CCS サイト全体（数 km 四方）と対比した規模感を示す。
高精度重力モニタリング技術		超伝導重力計を用いて、重力の微小変化から、CO2 の挙動を監視するための技術で、弾性波探査を補完するためのもの。
サイドスキャンソナー		音波を発して、その反射画像を面的に捉える機器を使用し、水中の CO2 気泡に対する反射信号を解析し、海底下地中深部の貯留層からの万が一の CO2 漏出監視に利用する。
ジオメカニクス		流体の圧入等で生じる貯留層等の変形を、応力、間隙圧力、

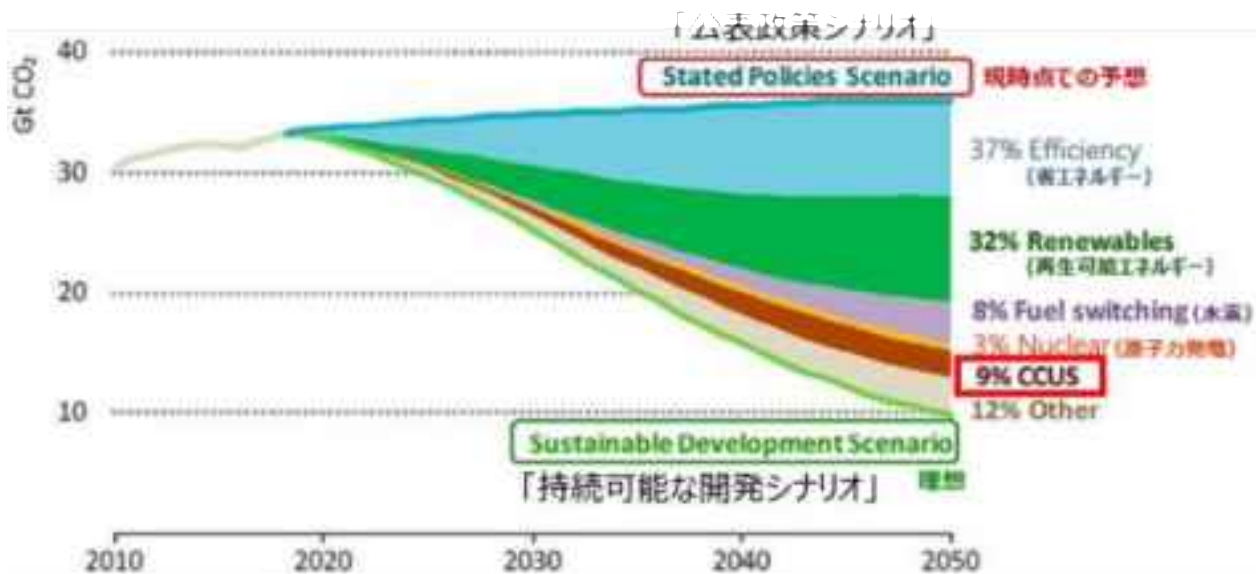
		岩盤強度といった力学的データで評価するもの。
地層安定性観測システム		坑井周辺の地盤変形を時間的・空間的に連続に計測するための測定機器。
シミュレーションコード		貯留層内における CO2 挙動把握のため計算プログラム。
スペクトラム・デコンボリューション		弾性波探査データを周波数帯に分けて分析することで、堆積体の境界の明瞭化や堆積体の層厚の変化を調べる技術。
堆積環境		堆積物は、それらがたまる区域やその周辺地域の物理的・化学的・生物的・地理的・地質的な条件の違いに応じて、それぞれ特有の性質をもっているが、堆積物がたまる時の諸条件を堆積環境という。
弾性波探査		地表または地中で人工的に発生させた弾性波（縦波：P 波、または横波：S 波）が直接または屈折して地層中を伝播する状況を地表に設置した測定装置で観測し、その結果を解析して地下構造を解明する方法。
地下学反応		圧入した CO2 が地下水に溶解し、その CO2 溶解水が地層中の鉱物に及ぼす化学的反応。
地層孔隙		貯留層内の岩石粒子間の空間および隙間であり、通常は地下水で満たされている。
長期挙動シミュレーションツール		圧入された CO2 が、長期にわたり貯留層内をどのように移動拡散していくかを予測するプログラム。
潮汐成分		潮の満引きと地球の変形により、重力が変化する成分。
超伝導重力計		超伝導体を通る電流によって生じる磁場を利用して球体を浮かせ、その位置の制御に必要な電圧変化から重力を測定するもの。高精度の重力測定が可能。
トレーサーシミュレーション		溶存態 CO2 の広がりや移動を推定するため、海流や潮流を表現する海洋循環モデルを使って、海水の流動で移動していく仮想物質（トレーサー）の広がりを計算すること。
長岡実証試験		RITE が新潟県長岡市 INPEX 岩野原基地内で実施した、深部帯水層へのわが国初の CO2 圧入試験。平成 15 年から 17 年にかけて 10400 トンの CO2 を圧入し、各種の貴重なデータを取得した。
物理的漏出検出技術		海中の CO2 気泡を音波等によって見つけることで、海水への CO2 漏出を検出する技術。
米国 SWP サイト		米国エネルギー省（DOE）が主導する地域パートナーシップ（Regional Carbon Sequestration Partnerships : RCSP）の 1 つである南西部炭素隔離地域パートナーシップ（Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration : SWP）に参画して重力モニタリングを実施した、テキサス州ファーンズワースの EOR サイト。

マイクロバブル CO2 圧入技術		CO2 をマイクロバブル（微細気泡）化し、貯留層に圧入することによって、CO2 が地層の狭い孔隙まで入り込み、貯留率を高める方法。
溶存態 CO2 濃度		海水中に溶解している CO2 の濃度を示す指標。

1. 事業の位置づけ・必要性について

1. 1. 事業の背景・目的・位置づけ

二酸化炭素回収・貯留（CCS: Carbon dioxide Capture and Storage）は、工場や発電所等から排出される CO₂ を大気放散する前に回収し、地下へ圧入貯留する技術である。CCS は、温室効果ガス削減効果が大きいこと等から地球温暖化対策の選択肢の一つとして世界的に期待されており、国際エネルギー機関（IEA ; International Energy Agency）が公表した Energy Technology Perspective 2017 では、2050 年までの累積 CO₂ 削減量の 9% を CCUS が担うとされている。そのため、CO₂ 削減には、省エネや再エネの導入だけでなく、CCUS 技術を含む複数手段の組み合わせが重要である。



出典：World Energy Outlook 2019 CO₂ 削減に関する取り組みとその貢献度

図 1 - 1 CO₂ 削減に関する取組みとその貢献度

現在、海外では大規模 CCS プロジェクトが 59 件稼働しており、稼働中の事業の大半は CO₂-EOR であり、帯水層での大規模 CCS は 5 件のみ(2020 年 6 月調査時点)である。ほとんどが、北米で多くのプロジェクトが先行している一方、中東、東アジアでのプロジェクト数も増加傾向にあり、今後後続の CCS 関係プロジェクトの立ち上げが期待されている。



図1-2 世界のCCSプロジェクトの普及状況

(1) 政策的重要性

2018年7月3日に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」においては、2020年頃のCO₂回収・有効利用・貯留（CCUS）技術の実用化を目指した研究開発、国際機関との連携、CCSの商用化の目途等も考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready導入に向けた検討や、国内における回収・輸送・圧入・貯留の一連のCCSのプロセスの実証と貯留適地調査等を着実に進めるなど、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進めるとしている。

2019年7月に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では、2050年までの温室効果ガス排出80%削減（2013年比）の実現に向け、CCS・CCU/カーボンリサイクルについて、2023年までに最初の商用化規模のCCU技術を確立することを目指すとともに、排出源と利用・貯留地までの最適なCO₂輸送を実現する取り組みを実施するとしている。

その長期戦略に基づき2020年1月に策定した「革新的環境イノベーション戦略」では、CO₂の大幅削減に不可欠なカーボンリサイクル、CCUS技術を重点領域の一つと位置づけて、脱炭素かつ安価なエネルギー供給技術の実現を進め、温室効果ガスの国内での大幅削減とともに、世界全体での排出削減に最大限貢献することが肝要である。

2020年7月7日には、グリーンイノベーション戦略推進会議を開催し、『革新的環境イノベーション戦略』を実行する司令塔として設置され、「ビヨンド・ゼロ」に向けた取組の具体化としてカーボンリサイクル/CCUSに係る取組や国内外の技術開発動向、施策が議論された。

(2) 我が国の状況

2016年6月に官民協議会で策定した「次世代火力発電に係るロードマップ」においてはCO₂排出量削減のため、2030年度以降を見据えた取組に係る技術に関する方針として、CCSは火力発電からのCO₂排出量をゼロに近づける切り札となり得るもののひとつとされており、長期的な視点で戦略的に技術開発を進めることが適当とされている。

また、2019年6月に経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」においては、CO₂排出量削減の鍵となる取り組みとして、省エネルギー、再生可能エネルギー、CCS、カーボンリサイクルが挙げられている。CO₂を資源として捉えて利用するカーボンリサイクルを実施するにあたっては、CCSの場合と同様に、排ガスなどからCO₂を分離・回収する技術が必要となる。

我が国のCO₂大規模排出源としては、火力発電のほか、鉄鋼業における製鉄プロセス（高炉法）が挙げられ、これら大規模排出源からのCO₂を削減すべく、CO₂分離・回収に係る技術開発が種々行われているが、CO₂貯留に関しては、特に石油増進回収を伴う実証等について、欧米勢が先行して実施している状況である。

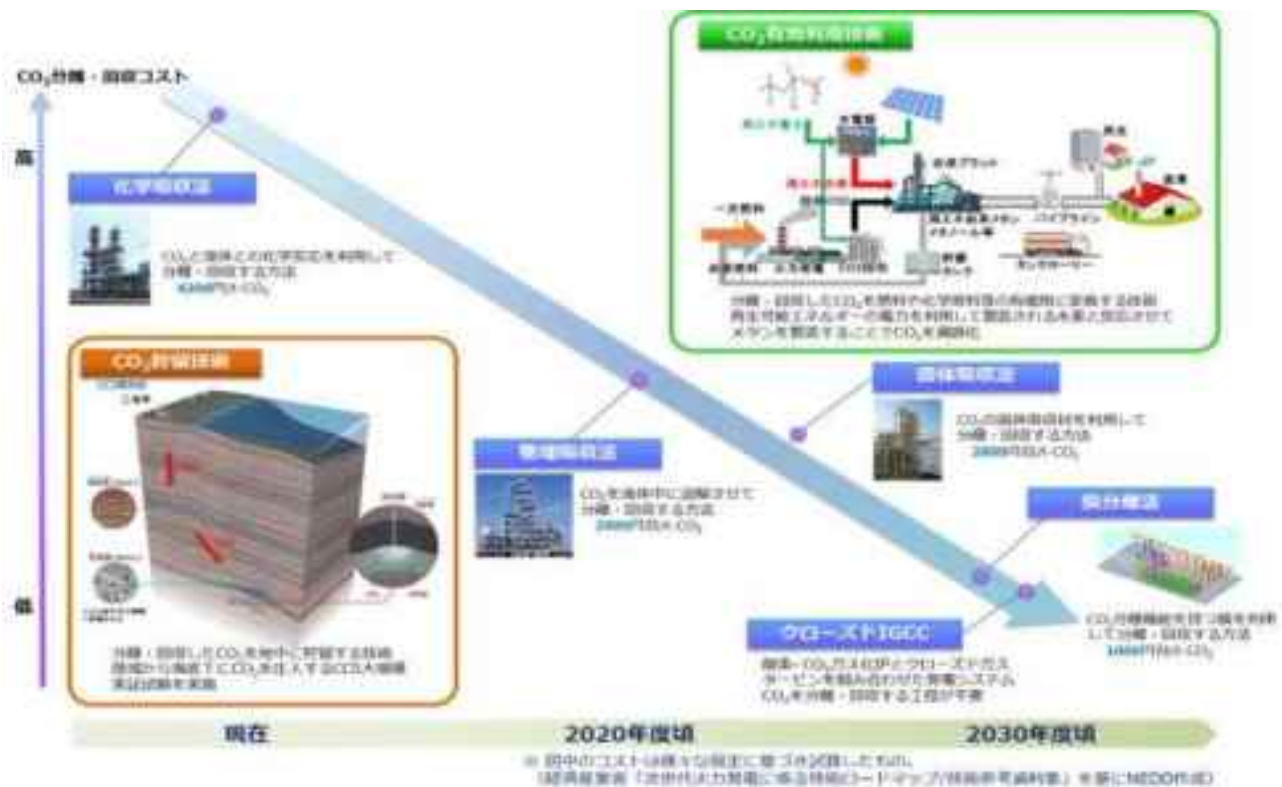


図1-3 異世代火力発電に係る技術ロードマップ（CO₂回収関連技術）

CCUS/カーボンリサイクル

● **カーボンリサイクル**：CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等とともに、大気中へのCO₂排出を抑制していく。

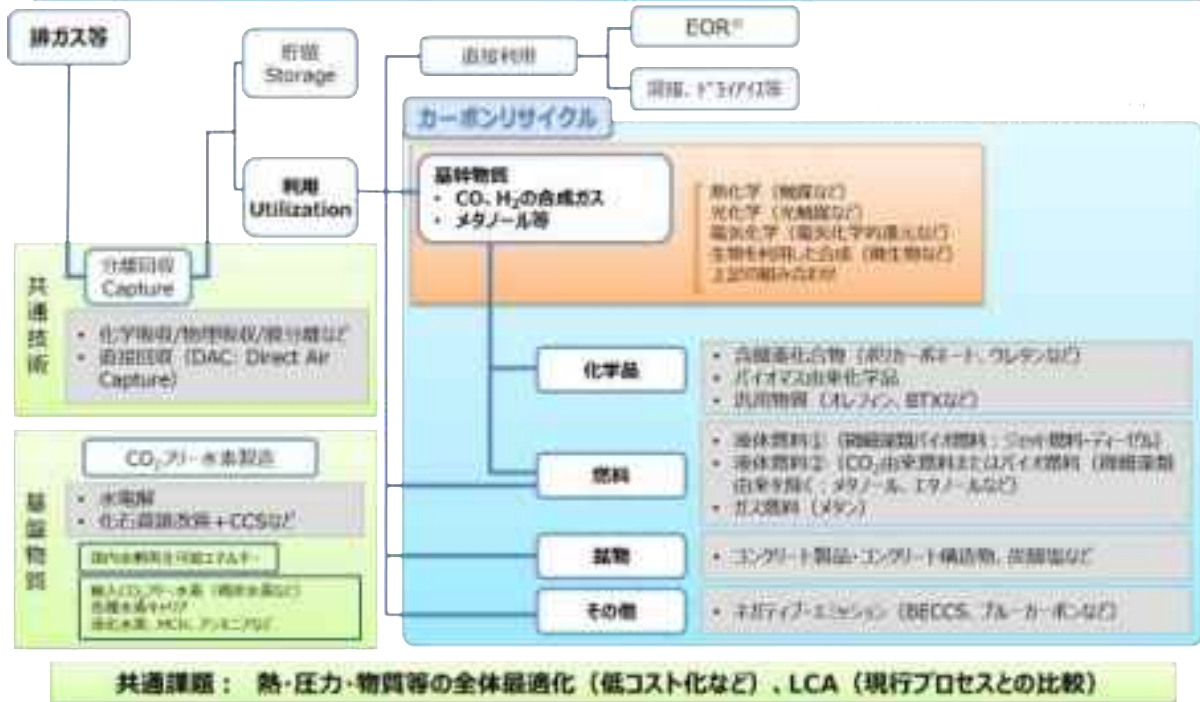


図1-4 カーボンリサイクル技術ロードマップ

(3) 世界の取り組み状況

2015年にパリで開催された国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において採択された「パリ協定」が発効され、世界的に一層のCO₂の排出削減が必要とされている。このような流れの中、既に米国等ではCCS無しでは石炭火力発電所の新設が事実上不可能なレベルの規制を設けるなど、CO₂排出に対する規制強化の動きがある。また、米国の他、欧州、豪州等においてはいくつかのCCSの実証試験も行われており、船舶輸送でCO₂を集積するプロジェクトも進められている。

また、低炭素化に繋がる取り組みとして、欧州委員会が再生可能エネルギー指令（RED II）により2030年に運輸部門で消費されるエネルギーの14%を非化石由来とすることを義務化した。また、国際海事機関（IMO）による国際海運からの温室効果ガス削減戦略では、2030年に燃費効率（輸送量当たりの排出量）を40%改善（2008年度比）し、2050年までに総排出量の50%削減（2008年度比）を目指すとしており、輸送燃料に係るCO₂排出量削減の取り組みが世界的に加速されている状況にある。

	削減目標	柔軟性の確保	主な戦略・スタンス	
米国	▲80%以上 (2005年比)	削減目標に向けた 野心的ビジョン (足下での政策立案を意図するものではない)	ゼロエミ比率 引き上げ 変動再エネ + 原子力	大幅な電化 (約20%→45~60%) CCUS ・2050年 CCS火力 0~25%。 ・シナリオにより CCS付火力存在
カナダ	▲80% (2005年比)	議論のための 情報提供 (政策の青写真ではない)	電化分の確保 水力・変動再エネ + 原子力 <small>※既にゼロエミ電源比率は約80%</small>	大幅な電化 (約20%→40~70%) ・2050年 CCS火力 0~10% ・多排出産業で CCSの削減余地
フランス	▲75% (1990年比)	目標達成に向けた あり得る経路 (行動計画ではない)	電化分の確保 再エネ + 原子力 <small>※既にゼロエミ電源比率は90%以上</small>	大幅な省エネ (1990年比半減) ・完全ゼロエミ化 シナリオではCCS 不可欠 ・多排出産業で CCS活用
英国	▲80%以上 (1990年比)	経路検討による今後数年の 打ち手の参考 (長期予測は困難)	ゼロエミ比率 引き上げ 変動再エネ + 原子力	省エネ・電化を 推進 ・2025年までに CCSの無い石炭 火力を廃止 ・CCUS技術開発 を先導
ドイツ	▲80~95% (1990年比)	排出削減に向けた 方向性を提示 (マスタープランを模索するものではない) <small>※定期的な見直しを行う</small>	引き上げ 変動再エネ	大幅な省エネ (1990年比半減) 産業部門で新技術 による低炭素化が 困難な場合に、 CCU, CCSの順に 検討

出典：資源エネルギー庁 エネルギー情勢懇談会提言 関連資料（2018年4月）を基にNEDO作成

図1-5 2050年に向けた主要国のCO₂削減目標とCCUS戦略

1. 2. NEDO が関与する必要性・制度への適合性

(1) NEDO が関与することの意義

世界的に CO2 排出削減に関する取り組みが加速している状況において、第 5 次エネルギー基本計画（2018 年 7 月）、パリ協定に基づく長期戦略としての成長戦略（2019 年 7 月）でも温室効果ガス削減技術として、CCS・CCU／カーボンリサイクル技術は重要な技術として位置付けられている。

CCS は生産性向上、省エネルギーなどに寄与せず、利益の向上に資さない地球温暖化問題への対応に特化した技術であり、外部不経済（ある経済主体の行動が、その費用の支払いや補償を行うことなく、他の経済主体に対して不利益や損失を及ぼすこと。例えば、公害）であるため、研究開発に経済性がなく、市場原理だけでは、その導入を図ることが困難である。

そのため、国が主導して、CCS の技術実証やコスト低減、安全性の担保、社会的受容性の確保等を実施し、そのうえで制度的枠組みを構築するなど、CCS 導入に向けた環境整備を行っていく必要がある。

温室効果ガス排出量の大部分を占める CO2 について、排出削減、貯蔵・固定化、再利用を全て考慮する炭素循環という観点から、社会システム全体で持続可能な社会を目指すことが重要である。

そこで、NEDO では、気候変動問題の解決に向けた技術開発の在り方や目指すべき方向性などをまとめた「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020（NEDO 総合指針）」を策定した。

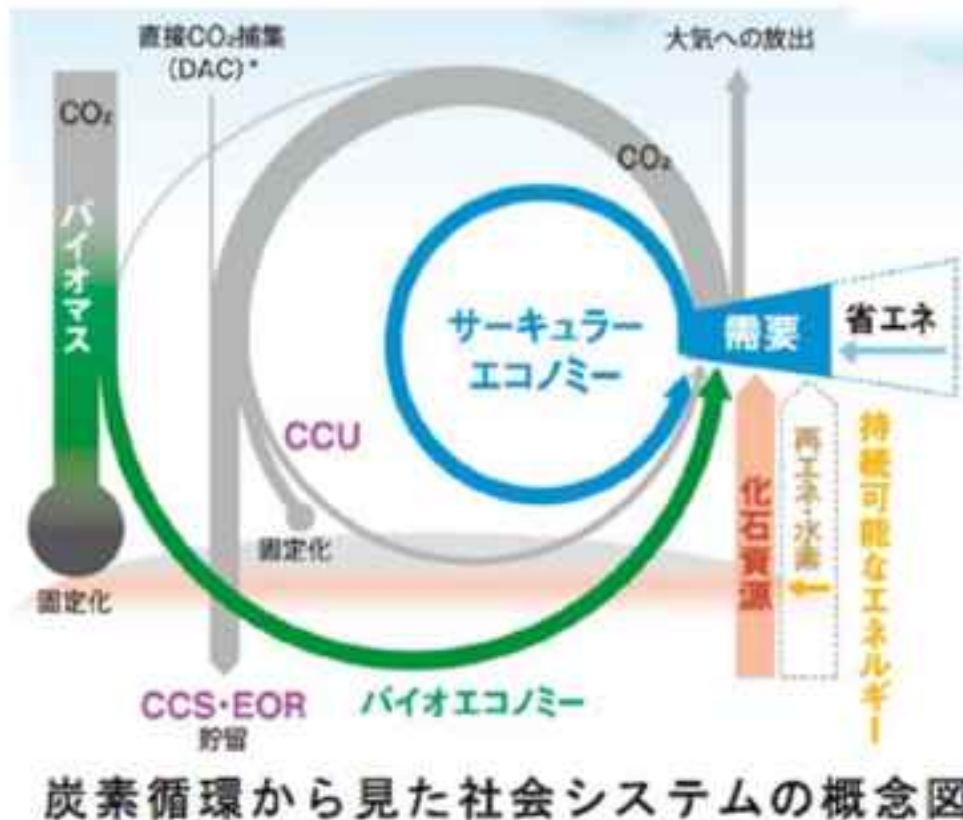
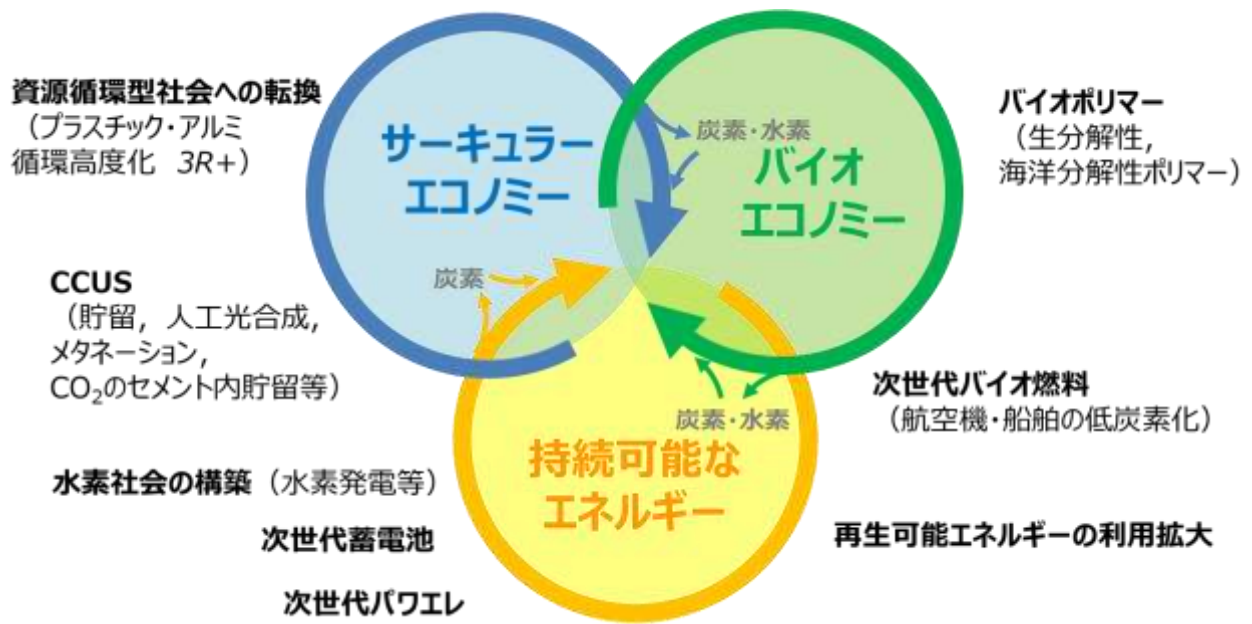


図 2 - 1 持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020 (2020 年 2 月)

(2) 実施の効果（費用対効果）

CCS 技術については、温室効果ガス削減に極めて重要な役割を果たすものであり、IEA の試算によると、気温上昇を 2℃に抑えるシナリオにおいて、CCS 技術がない場合の電力分野の追加コストは全世界において、40 年間で 240 兆円（6 兆円／年）に達すると試算されている。

本プロジェクトの実施により、CCS 技術の実用化を図ることは、CO2 削減への寄与のみならず、経済面からも重要な技術であると考えます。

2. 研究開発マネジメント

2.1. 事業の目標

本事業を通じて、大規模実証試験におけるCO₂の貯留や地中CO₂のモニタリング技術の開発、CO₂分離・回収コストの低減等、CCSの実用化による約束草案の実現に寄与する革新的なCCUS関連技術の確立を目指す。

本事業の開発成果により、2019年度にCO₂分離・回収エネルギー1.5GJ/t-CO₂以下となる固体吸収材・システム、2020年度に同0.5GJ/t-CO₂以下となる分離膜技術を確立するとともに、それらの技術の発電プラントへの適用性について検証を進める。また、苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業においては、年間10万トン規模の貯留実績を達成し、その後のモニタリングによる漏出（海中の化学的性状の測定値を含む各監視データの総合判断からCO₂漏出が認められる状況）回数ゼロを達成する。

各研究開発項目毎の目標については、以下「2.1 研究開発の内容」に記載する。



図2-2 各研究開発項目の位置づけ

図2-2 各研究開発項目の位置づけ

2. 2. 事業の計画内容

2. 2. 1. 研究開発の内容

CCUS 実用化に向けた、大規模実証試験、安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術の研究開発、CO₂ 分離回収技術の研究開発、CCUS 技術に関連する調査を実施する。実施に当たっては、各項目の性質に合わせ、委託事業により実施する。

研究開発項目① 苫小牧における CCS 大規模実証試験

研究開発項目② 安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術の研究開発

研究開発項目③ CO₂ 分離回収技術の研究開発

1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

研究開発項目④ CCUS 技術に関連する調査

① 苫小牧における CCS 大規模実証試験

本事業では、CCS 技術の実用化に資するべく、CO₂ 分離回収から圧入貯留、モニタリングに至るまでのトータルでの CCS 技術の確立を目指し、北海道苫小牧市において、実際の CO₂ 排出源から分離回収した CO₂ を用いて、実用に近い規模（年間 10 万トン規模）での CCS 大規模実証試験を実施する。また、CCS 実施に際しての法規制等の現状と課題を明らかにするとともに、CCS に対する国民の認知度を高め理解を深めるために種々の取り組みを行う。

本事業では、北海道苫小牧市において、商業運転中の製油所の水素製造装置を排出源として、年間 10 万トン規模で、CO₂ 分離回収から圧入貯留までを一貫して実施し、必要なモニタリングを行うことにより、CCS 実施に必要な操業能力を獲得するとともに、CCS が安全かつ安心できるシステムであることを実証する。

また、CCS 実施に際しての法規制等の現状と課題を明らかにするとともに、CCS に対する国民の認知度を高め理解を深めるために種々の取り組みを行う。

(1) CCS 全体システムの実証

年間 10 万トン規模で CO₂ を圧入し、分離回収から圧入・貯留までの CCS 全体システムを実証する。すなわち、全体システムが安定して操業できることを実証すべく、最大レート年間 20 万トン相当をはじめとした各種操業レートで運転を行い、必要なデータを取得する。また 2 層への同時圧入が可能であることを実証する。

(2) モニタリング（圧入中）及びモニタリング技術の検証

地下の温度・圧力の常時観測や弾性波探査、海洋環境調査等のモニタリングの実施や、CO₂ 賦存範囲等の測定技術、地質モデルの構築・精度向上、CO₂ 挙動予測技術等、CCS に係るモニタリング技術の検証を行う。また、自然地震および微小振動の観測や海洋汚染防止法に係る海洋環境調査等の対応等を通してデータを蓄積し、CCS が安全かつ安心できるシステムであることを実証する。

(3) 法規制対応等に係る調査・検討及び社会的受容性の醸成に向けた情報発信活動

実証試験に適用された法規制について、実証試験の実績に基づいて必要に応じて制度上の課題を確認する。また、CCSに係る各国の諸法令をはじめとする動向等を調査する。

社会的受容性の醸成に向けて、地元および国民への情報発信活動を広くかつ継続的に実施する。

海外の政府関係者や CCS 従事者との情報交換、日本における CCS 実証試験の取り組みや成果についての紹介等の情報発信活動、国際的な活動強化に向けネットワークの構築等を行う。

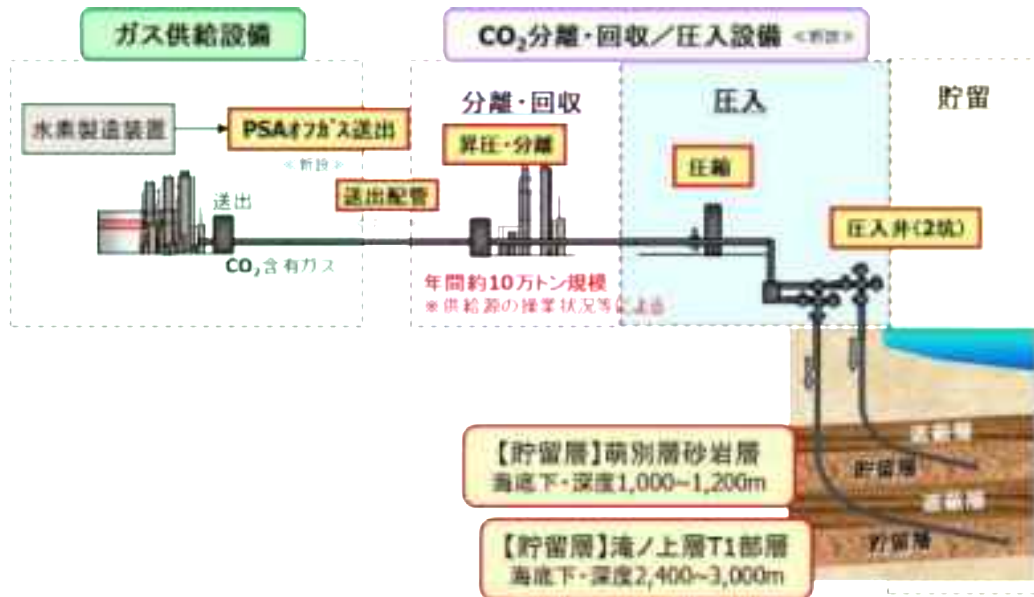


図 2 - 3 CCS 大規模実証試験設備の全体システムフロー



図 2 - 4 モニタリング設備の配置

②安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発

本事業では、安全かつ経済的な実用化規模（100 万トン規模／年）での CO2 圧入・貯留技術の確立に向け、我が国の不均質で地質構造が複雑な貯留層に適した、実用化規模の CCS における CO2 貯留安全管理技術を開発する。さらに、我が国の CCS 技術の海外展開を志向した研究開発等を実施する。

本事業では、技術開発の柱として「大規模 CO2 圧入・貯留の安全管理技術の確立」、「大規模貯留層を対象とした有効な圧入・利用技術の確立」、「CCS 普及条件の整備、基準の整備」を設定し、それぞれ具体的な技術課題を定め、CCS 実証サイトも活用しつつ研究開発を進めている。

これにより、実用化規模へのアップスケーリング技術の確立、安全な CO2 圧入管理や大規模貯留層の適切な性能評価によるリスクと不確実性の低減、モニタリングの効率化による CCS の経済性向上、更には CCS 実現に向けた社会的受容性の向上に貢献する。本事業における技術開発項目と各技術の関連性を図 2 - 5 に示し、研究成果の適用イメージを図 2 - 6 に示す。

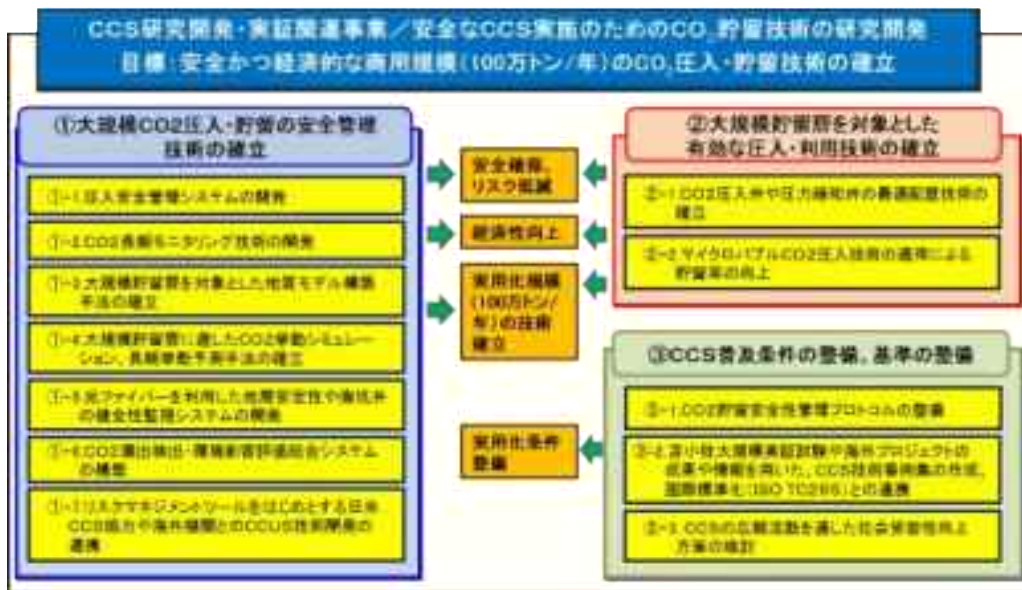


図 2 - 5 技術開発項目と関連性

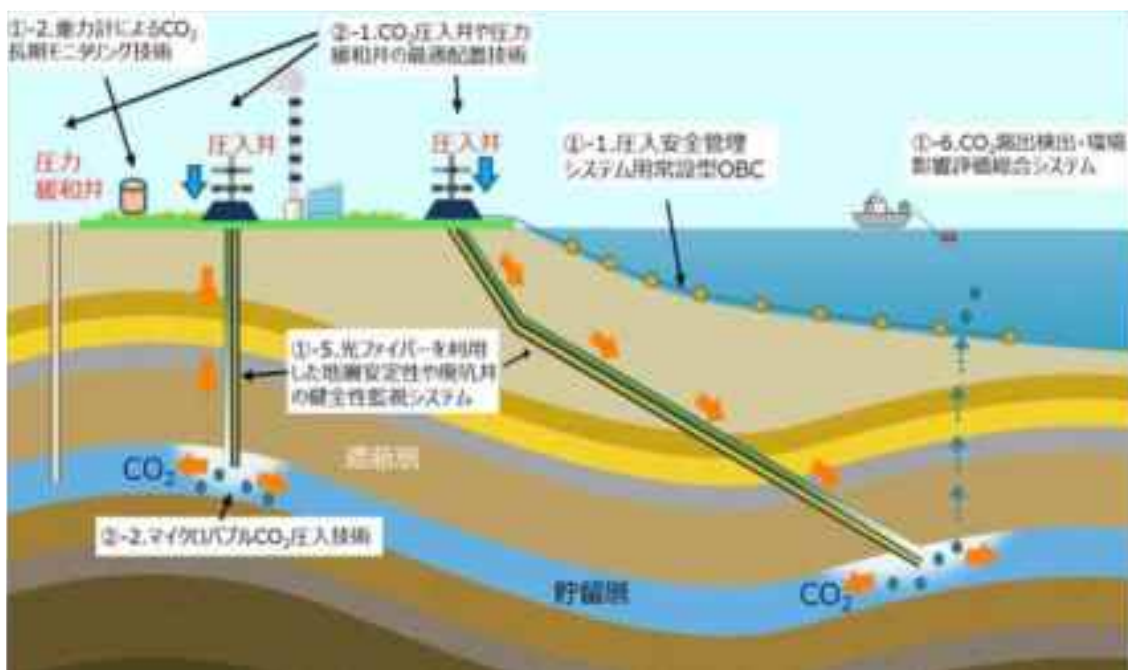


図 2 - 6 技術開発項目の将来的な適用イメージ

③CO2 分離・回収技術の研究開発

③-1)先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

本事業では、固体吸収材によるCO2回収技術の実用化研究開発フェーズとして、高効率システム開発、実用化のための材料最適化と製造技術開発およびスケールアップ検討と経済性評価について検討を行い、以下の項目の達成を目指す。

- ・ 石炭火力発電に適用可能な先進的CO2吸収法の実用化技術（燃焼後回収技術）の基盤技術の確立
- ・ CO2分離回収エネルギー1.5 GJ/t-CO2、回収コスト2,000円台/t-CO2を達成する固体吸収材CO2分離回収システムの開発

川崎重工業株式会社保有のベンチスケール移動層試験装置（5 t-CO2/d）で石炭火力発電排ガス相当のガスを用いた性能評価試験が可能である。これと併せて、関西電力株式会社舞鶴発電所において実ガス曝露試験を実施することで、実ガスに対する評価を効率的に取得する。また、上記のベンチスケール移動層試験装置と、RITE所有のラボスケール固定層試験装置および新規に作製する固定層試験装置を活用し、目標の分離回収エネルギーを達成しうる固体吸収材CO2分離回収システムの開発に取り組む。

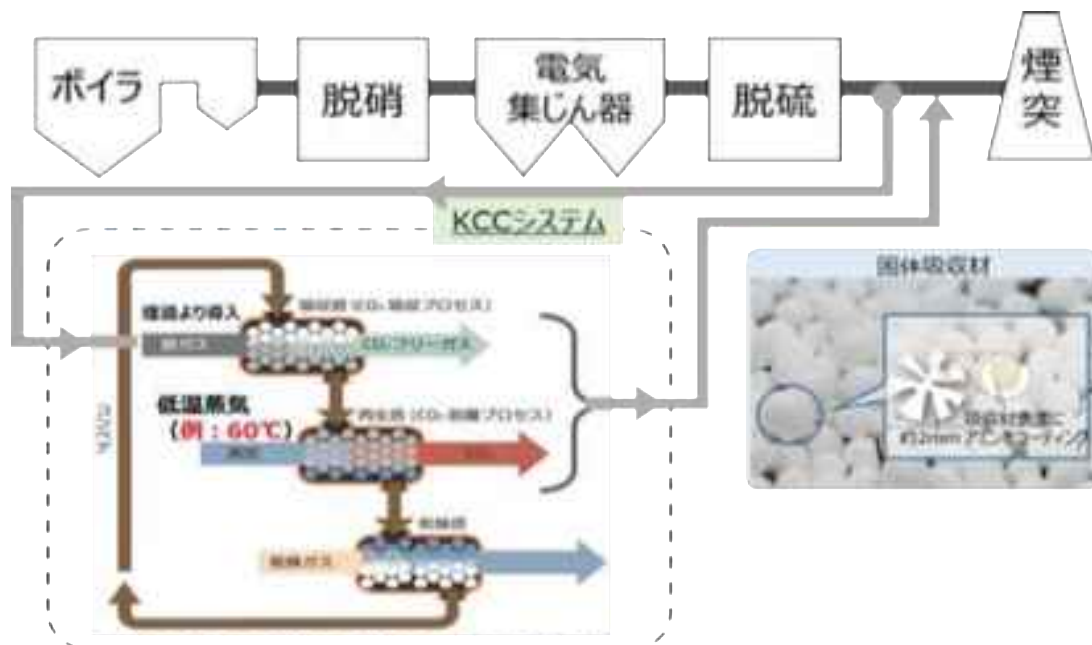


図2-7 固体吸収材の適用イメージ

③CO2 分離・回収技術の研究開発

③-2)先進的二氧化碳固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究開発

本事業では、固体吸収材によるCO2分離・回収技術について、石炭火力発電所等の実燃焼排ガスを対象としたスケールアップ試験を行い、石炭燃焼排ガスへの適用性を研究する。そこで、固体吸収材移動層システムのCO2分離・回収試験を実施するための、石炭火力発電所向け移動層パイロットスケール試験設備（40t-CO2/d規模）について、設計・建設・試運転等を行う。

具体的には、設計として、機器設計、建屋・基礎設計、鉄骨・架構設計、配管詳細設計、電気計装・制御詳細設計等を行う。移動層システム本体は、吸収塔、再生塔、乾燥塔、ならびに供試する固体吸収材用のコンベヤ、分級機、フィーダー等で構成する。また、発電所からの排ガス供給設備など、移動層パイロットスケール試験に必要な付帯設備や、設備に実装する制御・ロジック・性能評価用のデータ収集機能等をはじめとするシステム監視機能を含める。

建設においては、石炭火力発電所と協調して発電所への設備の設置ならびに運用に必要な許認可を取得した上で、移動層パイロットスケール試験設備を建設・設置する。

ベンチスケール試験設備（川崎重工業明石工場）を用いてあらかじめ性能評価した固体吸収材を用いて、パイロットスケール試験設備の試運転を実施する。発電所の実燃焼排ガスに含まれるCO2を安定的に分離・回収できることを確認する。また、固体吸収材移動層システムの性能解析に必要なデータを収集し、長期連続試験を確実に進めるための準備を完了する。



図2-8 事業概要イメージ図

③ CO₂ 分離・回収技術の研究開発

③-3) 二酸化炭素分離膜モジュールの研究開発

本事業では、高圧のガス源である IGCC からの CO₂ 分離・回収において、CO₂ 分離・回収コストを大幅に低減する革新的な技術として、H₂ に対して CO₂ を選択的に透過させる機能を発現する分子ゲート膜モジュールを対象に、実ガス試験を通じ実用化研究開発を行う。

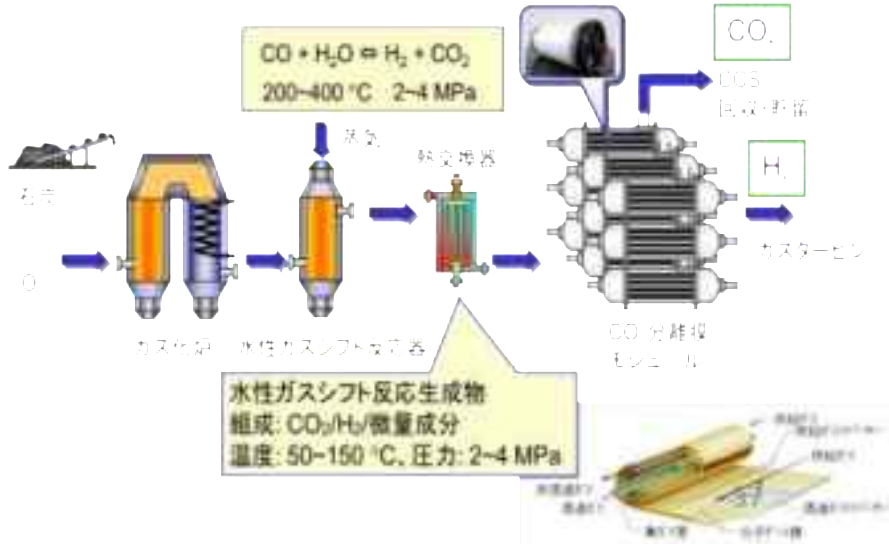


図 2 - 9 分離膜 適用イメージ図

④ C C U S 技術に関連する調査

苫小牧の CO₂ 貯留地点におけるメタノール等の基幹物質の合成による CO₂ 有効利用技術に関する調査事業（2020 年 3 月～2021 年 2 月）

本調査では、CO₂ 貯留地点において、CCS 設備と組み合わせたメタノールの合成を行い、CO₂ 有効利用に関する技術についての調査を実施する。具体的には、既存 CCS 設備との融通を考慮したメタノールの合成に関するプラント全体の基本設計やコスト検討を行い、苫小牧におけるメタノール合成システムのプラント機器コストやランニングコストを試算し、メタノール合成による CO₂ 有効利用の経済性について評価することを目標とする。具体的には以下の 4 項目について調査を実施する。

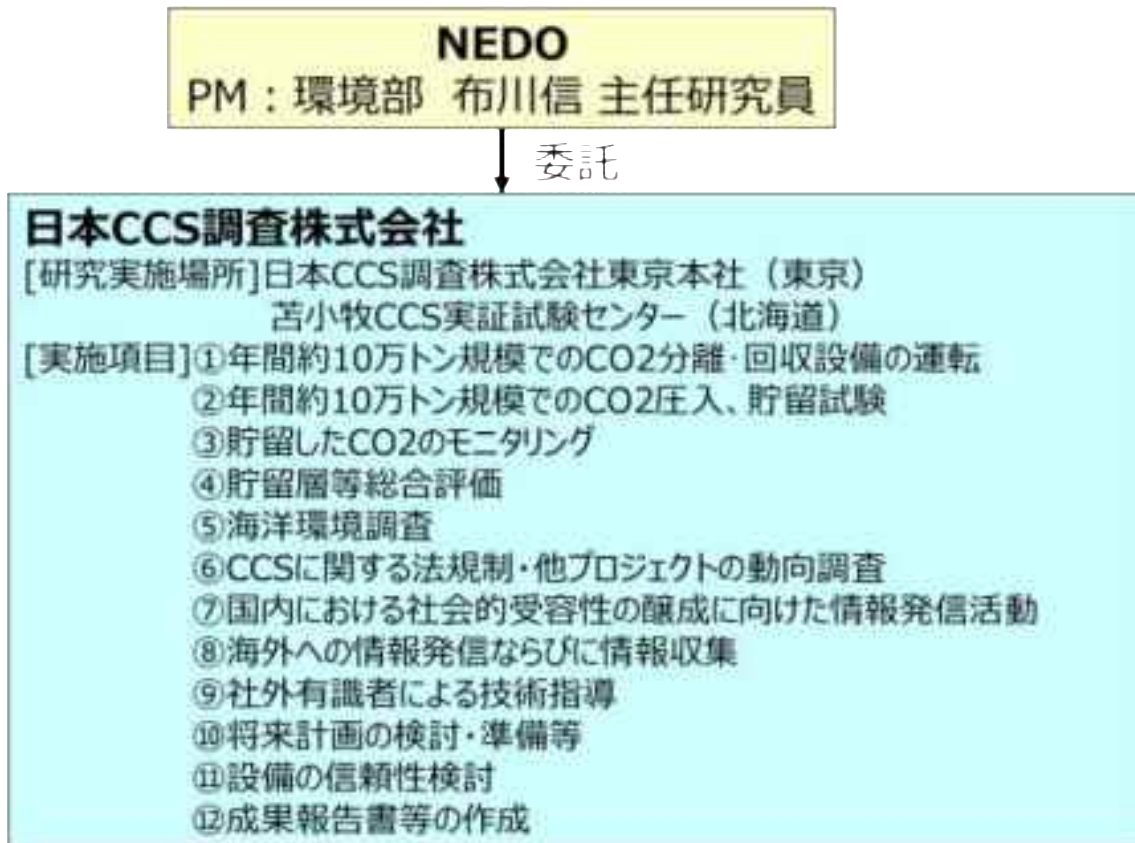
- (1) 既存の CCS 設備を活用したカーボンリサイクル技術の可能性検討
- (2) 原料ガスの精製・処理方法の調査
- (3) 水素と CO₂ から直接メタノールを合成する場合における触媒評価
- (4) メタノール合成の経済性評価

表 2 - 1 各事業の研究開発予算

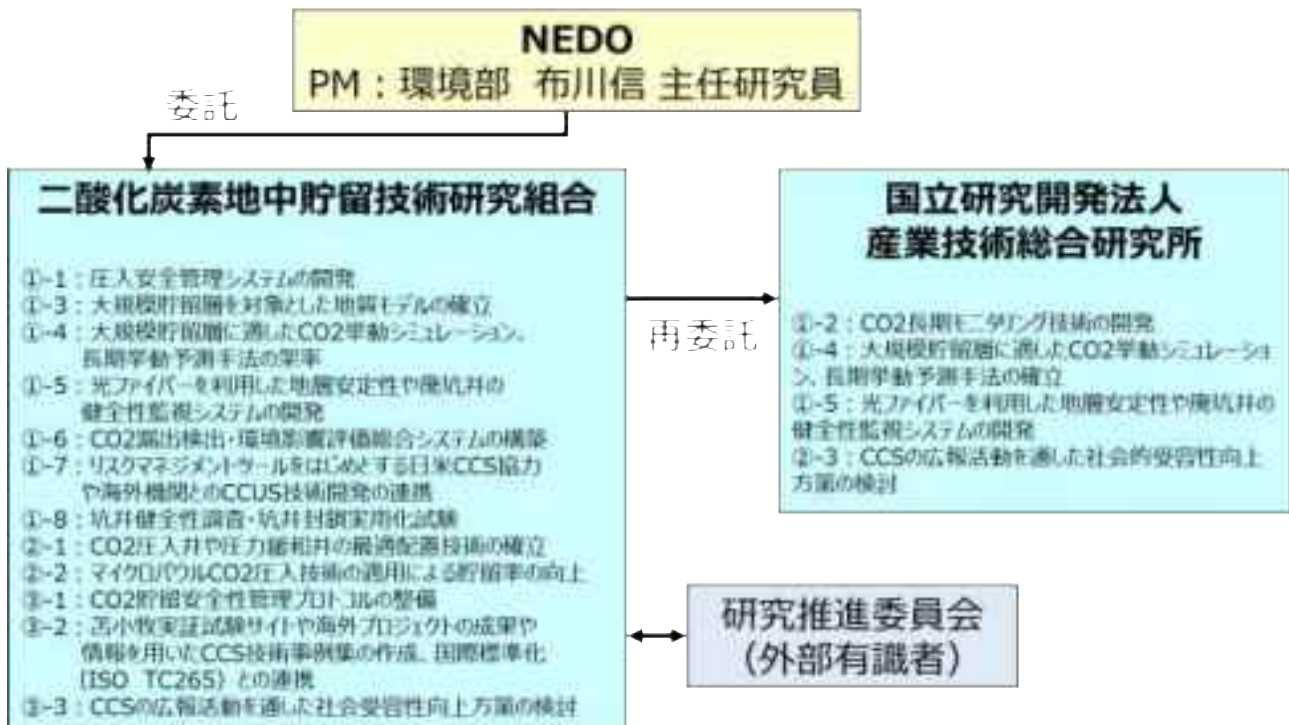
事業名	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	事業合計
①苫小牧における CCS 大規模実証試 験	3,165	5,560	4,482					13,207
②安全な CCS 実施 のための CO2 貯留 技術の研究開発	957	1,145	1,221					3,323
③ - 1)先進的二酸 化炭素固体吸収材の 実用化研究開発	550	685	-	-	-	-	-	1,235
③ - 2)先進的二酸 化炭素固体吸収材の 石炭燃焼排ガス適用 性研究	-	-	1,347	2,283	2,139			5,769
③ - 3)二酸化炭素 分離膜モジュールの実 用化研究開発	183	440	286					909
④CCUS 技術に関連 する調査	-	10	326					336
年度合計	4,855	7,840	7,662	2,283	2,139			24,779

2. 2. 2. 研究開発の実施体制

① 苫小牧における CCS 大規模実証試験



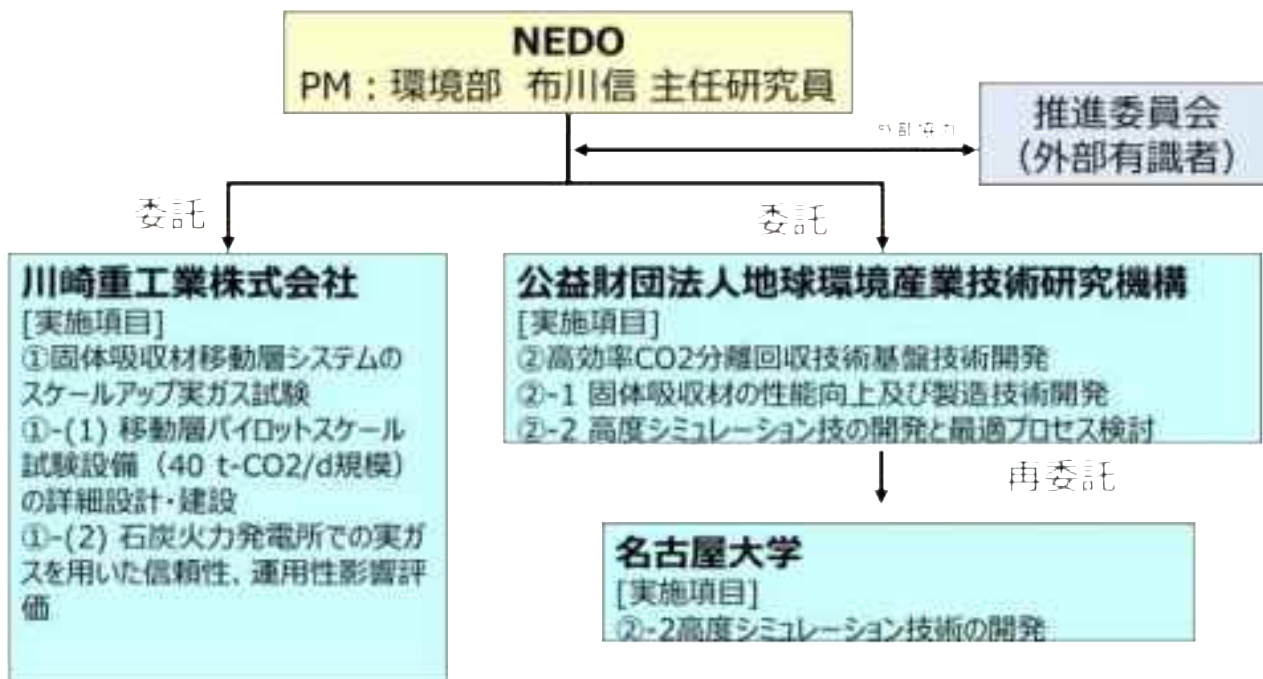
② 安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発



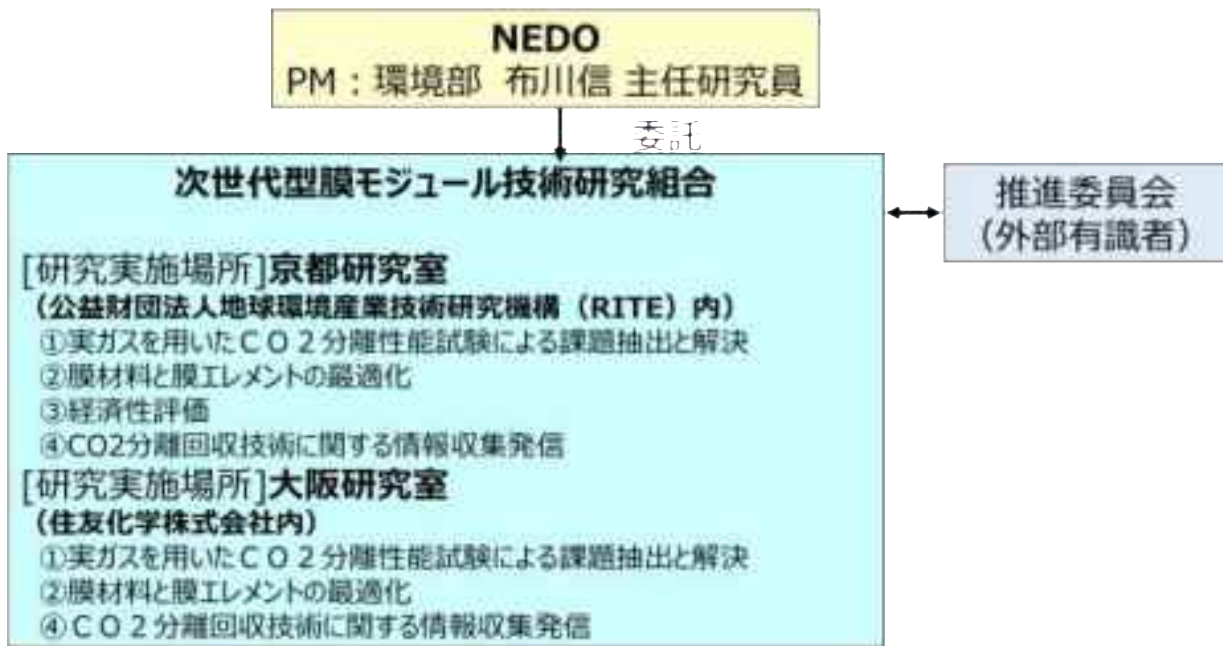
③-1)先進的二酸化炭素固体吸収材の実用化研究開発



③-2)先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究開発



③-3)二酸化炭素分離膜モジュールの実用化研究開発



④CCUS 技術に関連する調査



2. 2. 3. 研究開発の運営管理

NEDO は研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進捗の他、外部環境の変化等を適切に把握し、必要な処置を講じた。

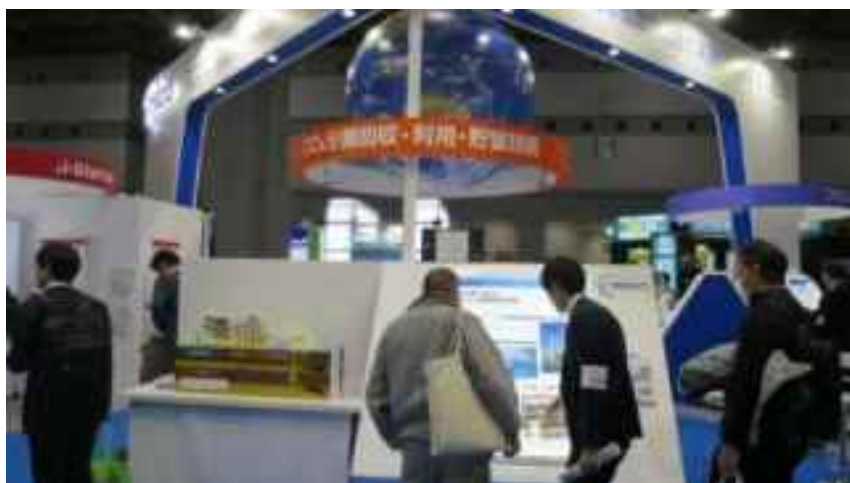
PM は、外部有識者で構成する事業者主催の課題検討会、研究推進委員会等に出席し、更に 2020 年 1 月 31 日には同じく外部有識者で構成する技術検討委員会を開催し、事業の進捗や計画、目標の達成見通しなどに関する指導・助言を受けることで、より効果的な事業推進に努めた。また、PL や研究開発実施者と密接に連携し、研究開発の進捗状況を把握し、毎月、従事日誌、月間行程表、執行管理表および適宜ヒアリング等により、実施状況を確認し、目標達成の見通しを常に把握することに努めた。

2. 4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

①成果の普及

得られた事業成果については、NEDO、実施者とも普及に努めた。

(NEDO 主催の環境部事業報告会や電力会社向け技術成果発表会、気候変動・災害対策 Biz への出展、実施者による CCS 講演会、CCS テクニカルワークショップ、分離・回収技術に関するシンポジウム、学会発表、出典等)



(写真) 気候変動・災害対策 Biz 2019 に CCS 関連事業のブースを出展

NEDO は 2019 年 11 月 15 日、NEDO 本部において、ユーザーニーズを研究開発に反映させると共に、研究成果の早期社会実装を促進させることを目的に、その成果を社会実装の主体となる電気事業者へ紹介する「NEDO 火力発電技術開発成果発表会」を開催した。9 電力、電事連、電中研から 51 名が参加した。



電力向け技術成果発表会

②知的財産権の帰属

「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条（委託の成果に係る知的財産権の帰属）の規定に基づき、原則として、事業成果に関わる知的財産権は全て委託先に帰属させる。

一方、得られた事業成果については、標準化機関等との連携を図り、わが国の優れた CCUS 技術を普及させるために、標準化への提案等を積極的に行う。

③知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

- NEDO では、『日本版バイ・ドール条項（産業技術力強化法第 19 条）』を適用し、当該研究開発に係る知的財産権は、NEDO に譲り渡すことなく、委託先に帰属する。
- 実施者の知的財産の取り扱いについては、約款にて規定し、知的財産権の出願、申請等の手続きを行った場合は、NEDO に報告すること。
- プロジェクト内での共同実施者には実施を許諾する。

また、発明委員会を開催し、下記の運用を実施する。

- 実施者より、発明等を創作した旨の報告がなされたときは、報告日の翌日から 30 日以内に発明委員会を開催
- 発明の技術的評価、本研究開発に関わることの認定、出願要否に関することについて審議・認定
- プロジェクト実施期間中、必要に応じ、任意に開催

2. 3. 情勢変化への対応

情勢変化	対応方針
2018年7月に策定された「エネルギー基本計画」において、温室効果ガス排出量を抜本的に下げするための技術等の開発を更に進める。	本技術開発にて、大規模実証試験におけるCO ₂ の貯留（CCS）や地中CO ₂ のモニタリング技術の開発、CO ₂ 分離・回収コストの低減等のCCS関連の技術開発を実施する。
2019年6月に策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、排出されるCO ₂ を資源として捉え、有効利用することで大気中へのCO ₂ 排出を抑制する取り組みが示された。	CO ₂ を資源として捉えて利用するカーボンリサイクルでは、排ガスなどからCO ₂ を分離・回収する技術が必要。また、CO ₂ 排出源および用途に適合した省エネ、低コストとなるCO ₂ 分離回収システム実用化に取り組む。
2019年6月に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」の目標として、CCU/カーボンリサイクル製品を既存製品と同等コストとすることやCO ₂ 排出削減に貢献するインフラ輸出の強化などの国際展開を挙げている。	2023年までに最初の商用化規模のCCU技術を確立することを目指すとともに、排出源と利用・貯留地までの最適なCO ₂ 輸送を実現する取り組みを推進する。
エネルギー安定供給に万全を期しながら脱炭素社会をいかに実現していくかという、大きな課題に取り組んでいく必要がある。	石炭を含む化石燃料を徹底的に効率的に利用した上で、最終的に発生するCO ₂ については、CCUS/カーボンリサイクルなどの技術開発や実証を進める。

2. 4. 中間評価への対応

産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会
第 47 回評価ワーキンググループ（2019 年 2 月 22 日）

プロジェクト全体に対するコメント

ワーキンググループコメント	コメントに対する対処方針
目標設定について、研究開発の進捗状況を客観的に評価検証できるように、定量的な事業アウトプット指標の設定を検討すること。コスト目標についても、適地調査及び輸送も含めた目標値の設定を検討すること。	目標設定について、研究開発項目にもよるが、可能な限り定量的なアウトプット指標を設定すべく検討を行う。コスト目標については、実証試験の結果、研究開発の動向、適地調査の進捗状況等を踏まえて検討を行う。
社会的受容性に関して、国民の理解が得られるよう、広報活動の実施方法を検討すること。	CCS に対する社会的受容性の醸成を目的として、これまで本プログラムで実施してきた情報発信活動を継続するとともに、NEDO とも連携し、その広報力を活用した PR についても検討を行う。
知財や研究開発データの取り扱いについての戦略及びルール、特に事業終了後のルールについて、できるだけ早めに検討し具体化すること。	知財管理について、プロジェクトごとにルールを定め、適宜調整を行う体制をとっており、各プロジェクトのルールに則り適切な運用を行う。データや事業の成果については、各事業者の機密等に配慮しつつ、可能な限り社会一般への公開に努めるべく検討を行う。

苫小牧における CCS 大規模実証試験事業へのコメント

ワーキンググループコメント	コメントに対する対処方針
滝ノ上層（火山岩層）への CO2 圧入は想定を大きく下回る結果であったが、その原因を明らかにし、適地選定においても滝ノ上層のような浸透性が低い地層を選定するリスクを回避する方法についても検討すること。	滝ノ上層のような浸透性が低い地層を選定することがないよう、原因分析を行い、今後の適地サイト選定に生かせるよう対処法について検討を行う。
社会的受容性に関して、国民の理解が得られるよう、広報活動の実施方法を検討すること。	CCS に対する社会的受容性の醸成を目的として、実証試験地の地元を中心として国内各地域に対してこれまで本プロジェクトで実施してきた情報発信活動や双方向の意見交換を継続するとともに、NEDO とも連携し、その広報力を活用した PR についても検討を行う。

安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術に関する研究開発事業へのコメント

ワーキンググループコメント	コメントに対する対処方針
<p>目標設定について、研究開発の進捗状況を客観的に評価検証できるように、定量的な事業アウトプット指標の設定を検討すること。</p>	<p>技術開発成果適用による CCS の安全性・効率向上、貯留 CO2 監視効率・精度の向上、あるいは CCS 実用化に向けた課題解決貢献度等について、可能な限り定量的な目標を設定すべく検討を行う。</p>
<p>知財や研究開発データの取り扱いについての戦略及びルール、特に事業終了後のルールについて、できるだけ早めに検討し具体化すること。</p>	<p>知財についての戦略やルールは、技術研究組合の「知的財産権取扱協定書」に定めている他、技術研究組合の「知的財産委員会」において、適宜調整を行う体制としている。知的財産権については、事業終了後も視野に、技術開発の貢献度に応じて組合から組合員へ知的財産権の譲渡ができるルールとしている。データや事業の成果については、企業機密に配慮しつつ、可能な限り社会一般への公開に努める。</p>

2. 5. 評価に関する事項

本プロジェクトに係る評価の履歴を以下に示す。

○産業構造審議会 産業技術分科会 第58回評価小委員会

実施時期：2013年3月15日

(評価検討会：2012年11月、2013年1月)

○産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会
第47回評価ワーキング

実施時期：2019年2月22日

(評価検討会：2018年11月、2018年12月)

【評価委員】

座長 森 俊介	東京理科大学工学部経営工学科教授
大島 まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
亀井 信一	株式会社三菱総合研究所研究理事
斉藤 栄子	VALUENEX 株式会社ソリューション事業推進本部本部長代理
鈴木 潤	政策研究大学院大学教授
高橋 真木子	金沢工業大学大学院イノベーションマネジメント研究科教授
津川 若子	東京農工大学大学院工学研究院教授
西尾 好司	株式会社富士通総研経済研究所上席主任研究員
浜田 恵美子	日本ガイシ株式会社取締役

(敬称略、座長除き五十音順)

○CCS研究開発・実証関連事業(複数課題プログラム) 中間評価検討会

実施時期：2019年2月22日

(評価検討会：2018年11月、2018年12月)

【評価委員】

座長 宝田 恭之	群馬大学大学院 理工学府環境創生部門 特任教授
金子 憲治	日経BP総研 クリーンテックラボ 上席研究員
川上 浩良	首都大学東京 都市環境学部 教授
栗原 正典	早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科 教授
芝尾 芳昭	イノベーションマネジメント株式会社 代表取締役
杉村 英市	電気事業連合会 技術開発部長

(敬称略、座長除き五十音順)

3. 研究成果について

2020 年度時点の中間目標に対し、今年度実施中の分の達成見込みを含め、おおむね目標達成できる見込みである。

苫小牧 CCS では、累計圧入量 30 万トンを達成し、圧入レート 10 万 t-CO₂/年での海底下貯留に関する基盤技術を確立し、これまでの CCS 実証試験成果について、総括報告書を作成し、HP 上にて公開。

安全貯留では、CCS 技術の実用化に必要な技術・手法の有効性を検証ができた。

先進的 CO₂ 分離・回収技術の固体吸収材や分離膜モジュールの研究開発については、実用化に向けた目標達成の目途を得ている。

周辺技術調査については、メタノール実証に向けた周辺技術調査とプラント基本設計を今年度末までに完了する見込みである。

いずれの研究開発項目についても、CCUS/カーボンサイクル技術の早期の確立及び実用化を目指す技術として、非常に重要である。

3. 1. 研究開発項目①苫小牧における CCS 大規模実証試験

事業の目的	結果概要
1) CCS の実証 実用プロジェクトと同等の設備構成で我が国として初となる CO ₂ の分離・回収から貯留までの CCS 全体を一貫システムとして実証すること。	「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」に従い、我が国初となる大規模排出源（製油所）の CO ₂ を分離・回収して貯留する CCS プロセス全体を一貫システムとした実証試験を行い、2019 年 11 月 22 日に目標としていた累計 CO ₂ 圧入量 30 万 t を達成した。圧入期間の実績は、予定した 3 年間に対して、外部要因等により 3 年 8 ヶ月となった。
2) CCS の安全性の実証 一連の操業を通じて、CCS が安全かつ安心できるシステムであることを実証すること。	本事業により、分離・回収から圧入・貯留までの CCS 一貫システムの操業および安全・環境管理ならびに各種モニタリングおよび海洋環境調査を通じて、CCS が安全かつ安心できるシステムであることを確認した。
3) CCS の理解 情報公開、社会的受容性の醸成の活動を通じて、本事業に関する情報を広く公表し、CCS の理解を深めること。	本事業への理解および CCS の社会的受容性の醸成を目的として、地元および国内への情報発信活動を継続的に実施した。海外へ向けては、本事業に関する情報発信、情報収集、海外との国際協力や連携を推進する活動を継続的に実施した。
4) CCS 実用化 操業技術を獲得するとともに実用化に向けた取り組みを行うこと。	操業技術を獲得した。また、CCS 実用化に向けた取り組みを通じて得られた知見と残された課題を整理した。

●年間約10万トン規模でのCO₂分離・回収設備の運転

分離・回収/圧入設備の実証において、①所定の回収量、回収率、純度、分離・回収エネルギーを達成、②分離・回収に必要なアミン溶液の組成・性能は安定、③CO₂圧縮機制御システムの完全自動化（異なるタイプの貯留層への同時圧入）、④設備の安全操業、設備の耐震設計、緊急時の地震対策の面で安全対策の健全性の実証を達成した。

分離回収プロセスには、活性アミンを使用した2段吸収法を採用。分離・回収エネルギー（消費量）については、目標値である1.22GJ/t-CO₂以下を達成。海外CCSプロジェクト（Quest）の1段吸収法での実績（2.79GJ/t-CO₂^{（注1）}）よりも56%の削減となっており、2段吸収法が有効なプロセスであると評価した。

（注1）

Questの公表データ（リボイラー熱量2.27GJ/t-CO₂）から推定した電気消費量も含めた分離・回収エネルギー値

省エネ型CO₂分離・回収フロー（二段吸収法）

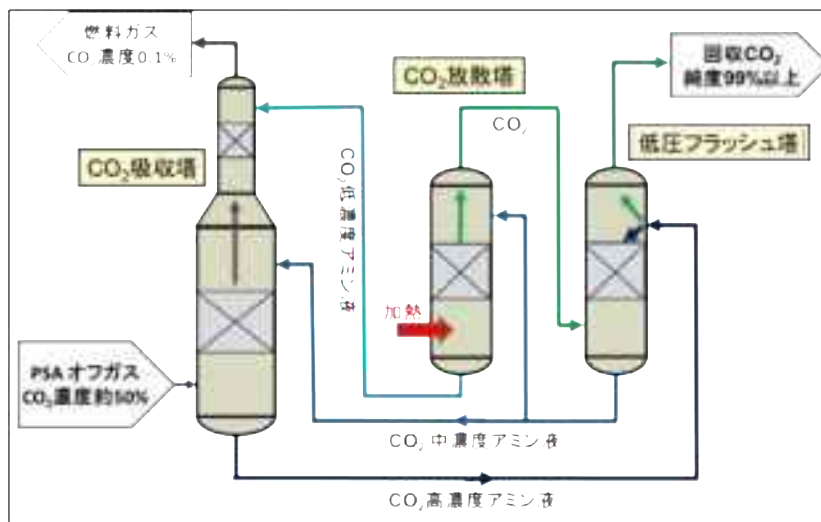


図3-1 苫小牧CCSにおけるCO₂分離回収装置フロー

表3-1 分離回収エネルギー（消費量）の試験結果

		2016年度	2017年度	2019年度	設計値
CO ₂ 回収量	t/h	25.3	24.3	26.4	25.3
リボイラー熱量	GJ/t	0.923	0.882	0.915* ¹	0.862 ~ 0.949* ²
ポンプ電気量	kWh/t	19.8	21.0	18.8	19.2（期待値）
分離・回収エネルギー* ³	GJ/t-CO ₂	1.20	1.16	1.18* ¹	目標値: 1.22* ²

*¹補正值、*²熱損失含む、*³分離・回収エネルギー=熱量/ボイラ効率+電気量×熱換算係数/発電効率
 計算例(2016年度): 0.923/0.9+19.8×0.0036/0.42=1.20GJ/t-CO₂

●年間約10万トン規模でのCO₂圧入、貯留試験

深度が異なる2つの貯留層（萌別層・滝ノ上層）に、累計300,110トン（萌別層300,012トン、滝ノ上層に98トン）のCO₂圧入を達成した。

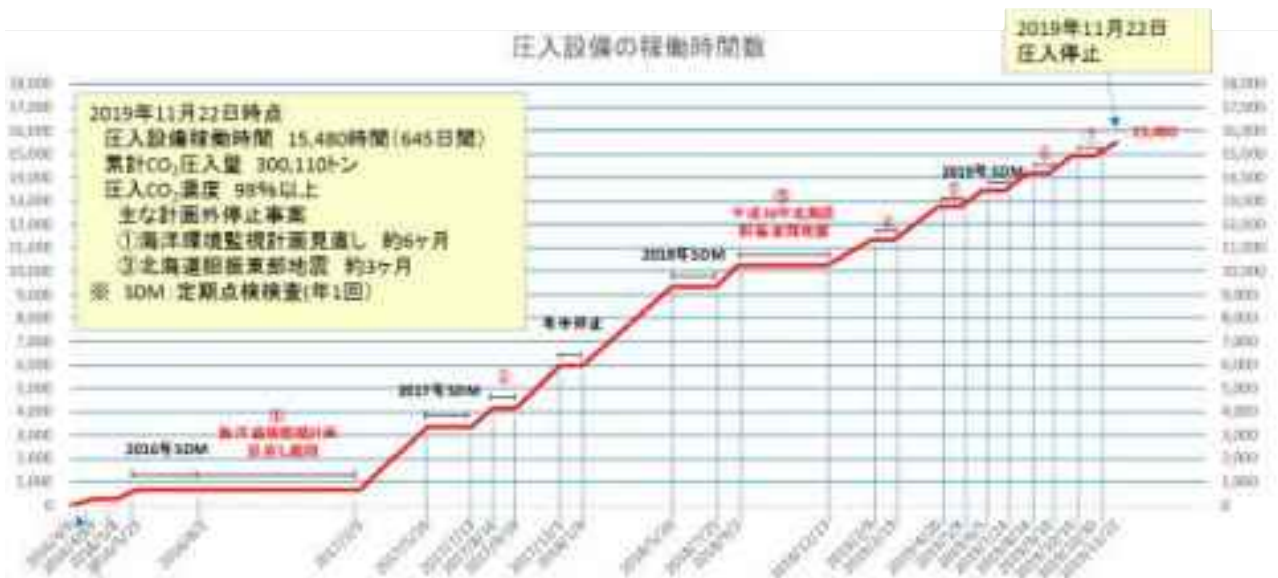
このとき、CO₂圧入におけるPTセンサー圧力の最大値は、各層の遮蔽層破壊を避けるために設けた上限圧力に対して十分低く、圧入開始以降、PTセンサー圧力・温度は正常な範囲内にあった。

一方、圧入されたCO₂は貯留層内に留まっていることが確認され、長期挙動予測シミュレーションにより、圧入されたCO₂は圧入停止から1,000年後においても貯留層に留まっていることが予想された。

さらに、圧入したCO₂の分布範囲や貯留層の圧力上昇に制約を設けたうえで、現状の萌別層圧入井のみを用いて連続的に圧入することを仮定したシミュレーションを実施し、573万トンの圧入可能量を推定した（P50モデル）。同じ制限範囲内に分布する萌別層砂岩層全体の、容積法による貯留可能量は4.86億tと推定された。

試験圧入期間 2016年4月6日～5月24日（萌別層）

本圧入期間 2017年2月5日～2019年11月22日（萌別層）



2016年4月6日
圧入開始

【海洋汚染防止法「二酸化炭素の海底下廃棄申請」】
 実施期間：2016年4月1日～2020年3月31日までの5年間
 ① 萌別層圧入期間：2016年4月1日～2016年4月24日
 ② 滝ノ上層圧入期間：2017年1月11日～2019年11月22日

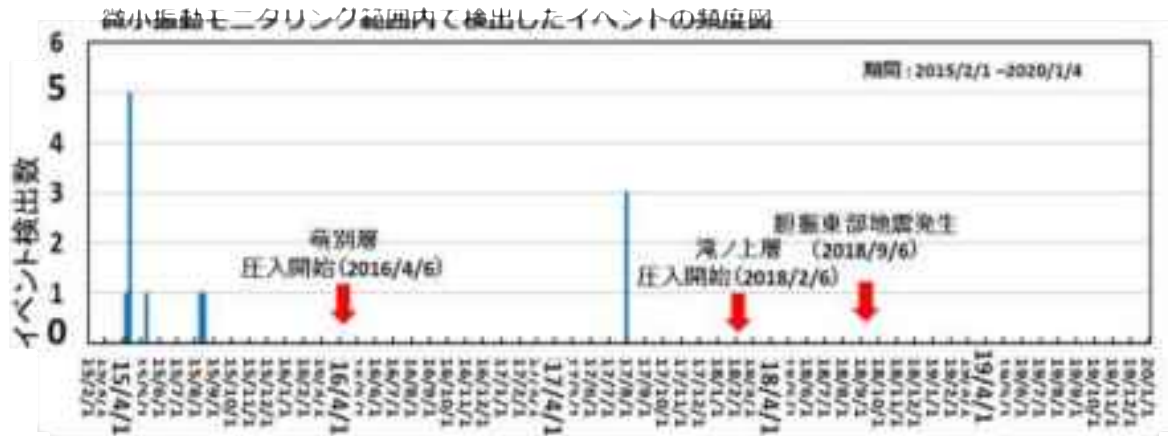
図3-2 圧入実績

●貯留した CO₂ のモニタリング

2017 年度の弾性波探査以降、萌別層における CO₂ 分布状況が確認され、圧入した CO₂ は事前の想定どおりに貯留層の上部付近に限定して存在しており、貯留層区間外への漏洩等の異常は生じていないものと考えらえる。

一方、滝ノ上層への CO₂ 累計圧入量は 98 トンと非常に少なく、弾性波探査による検知限界未満であったため、CO₂ 分布状況は確認できなかった。

圧入開始以降、2019 年 12 月まで、平成 30 年北海道胆振東部地震本震の前後を含めて、貯留地点近傍において圧入との関連を疑うべき微小振動および自然地震は検知されなかった。



微小振動モニタリング範囲内で圧入地点に深さ 5km 以内の主震は圧入開始前 (2015 年 12 月) に発生し、圧入開始後 (2017 年 8 月 2 日) に発生した地震は検知された。2018 年 9 月 6 日に胆振東部地震 (発生) 発生し、微小規模の自然地震は微小振動モニタリング範囲内では検知されなかった。

図 3 - 3 微小振動観測モニタリング結果

●海洋環境調査

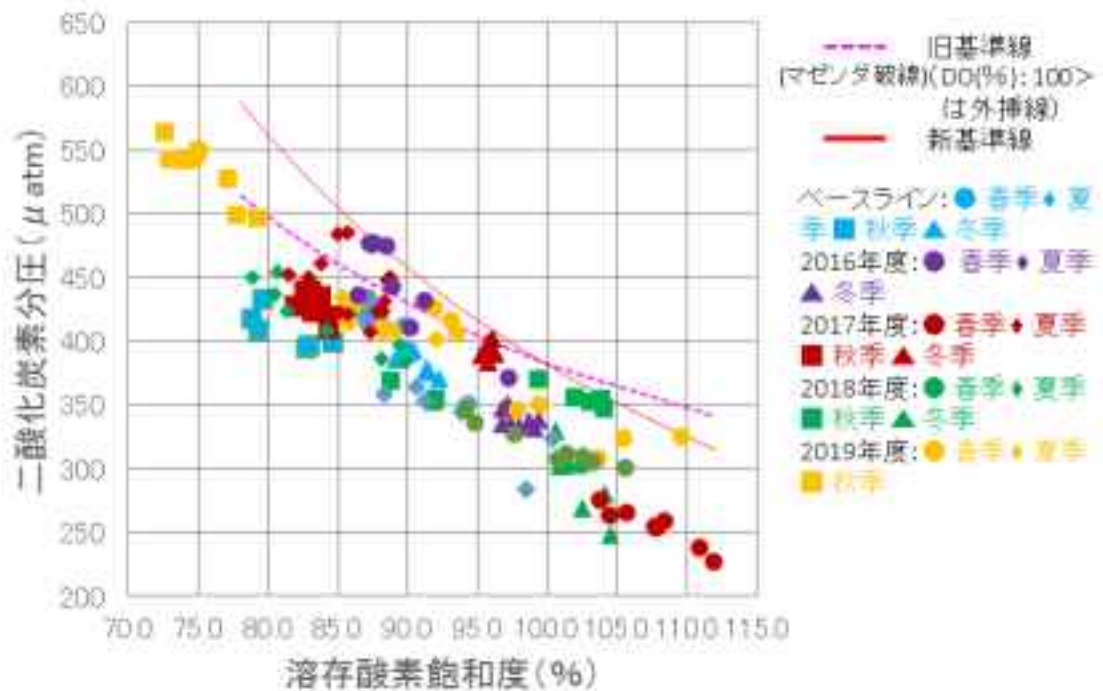
「海水の化学的性状」および「海洋生物の状況」の調査において、2016 年度以降の調査結果は、ベースライン調査（2013 年度～2014 年度）結果と大きな相違はなく、またベースライン調査結果から大きく逸脱するような傾向も見られなかった。

基準超過判定は、旧基準線（ベースライン調査）に対して、2016 年度春季、2017 年度夏季、冬季に基準超過の結果が生じたが、確認調査等の結果により、「CO₂ の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった」との見解が環境省から示された。（旧基準線は 1 年間のベースラインデータのみに基づいて作成したものであり、自然変動を反映するためには不十分であり複数年のデータ取得が必要であった。）

2018 年度以降は、基準線の超過数値は認められなかった。
 （2018 年度夏季以降、新基準線にて超過判定）

ただし、海洋汚染防止法で定められている現「監視計画」には、下記の課題があり、引き続き実証結果を基に、次期海洋汚染防止法許可（2021 年度～2025 年度）に向けた新たな申請手続きにあたり、これらの課題を踏まえて、適正化が必要である。

- CO₂ が漏出していなくても自然変動により基準超過が発生する可能性がある。
- 底質の科学的調査や海洋生物の状況調査は CO₂ 漏出監視としての有用性が低い。
- 調査項目によっては、現行の調査測点数、調査頻度等は過剰と考えられる。



●平成30年北海道胆振東部地震の際の対応

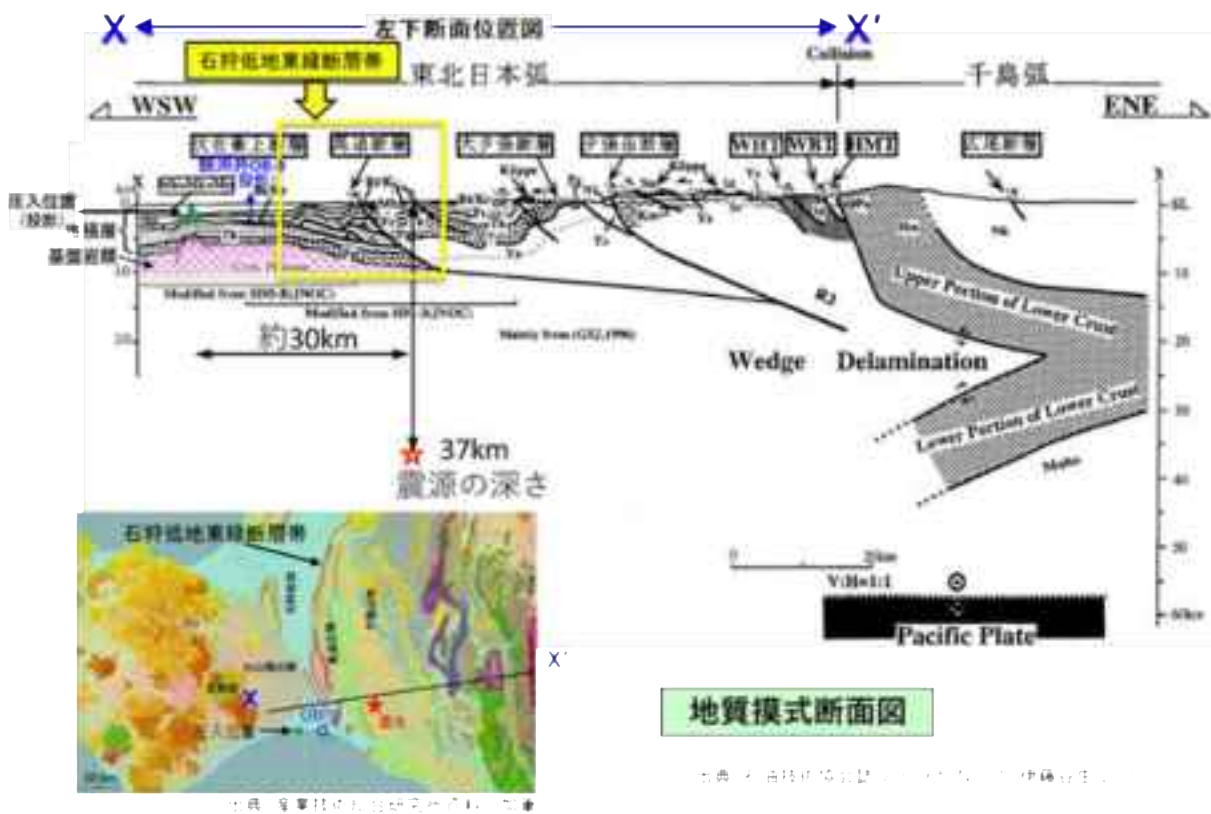
平成30年北海道胆振東部地震（2018年9月6日午前3時7分発生）の規模はM6.7、震源は胆振地方中東部の深さ37km、苫小牧 CCS 実証試験センターでも震度5弱相当の揺れを観測した。

地層の圧力・温度について、CO2の漏洩を示唆するデータは確認されなかった。また、圧入地点における微小振動は常にモニタリングしているが、検出されなかった（圧入開始以来検出されていない）。

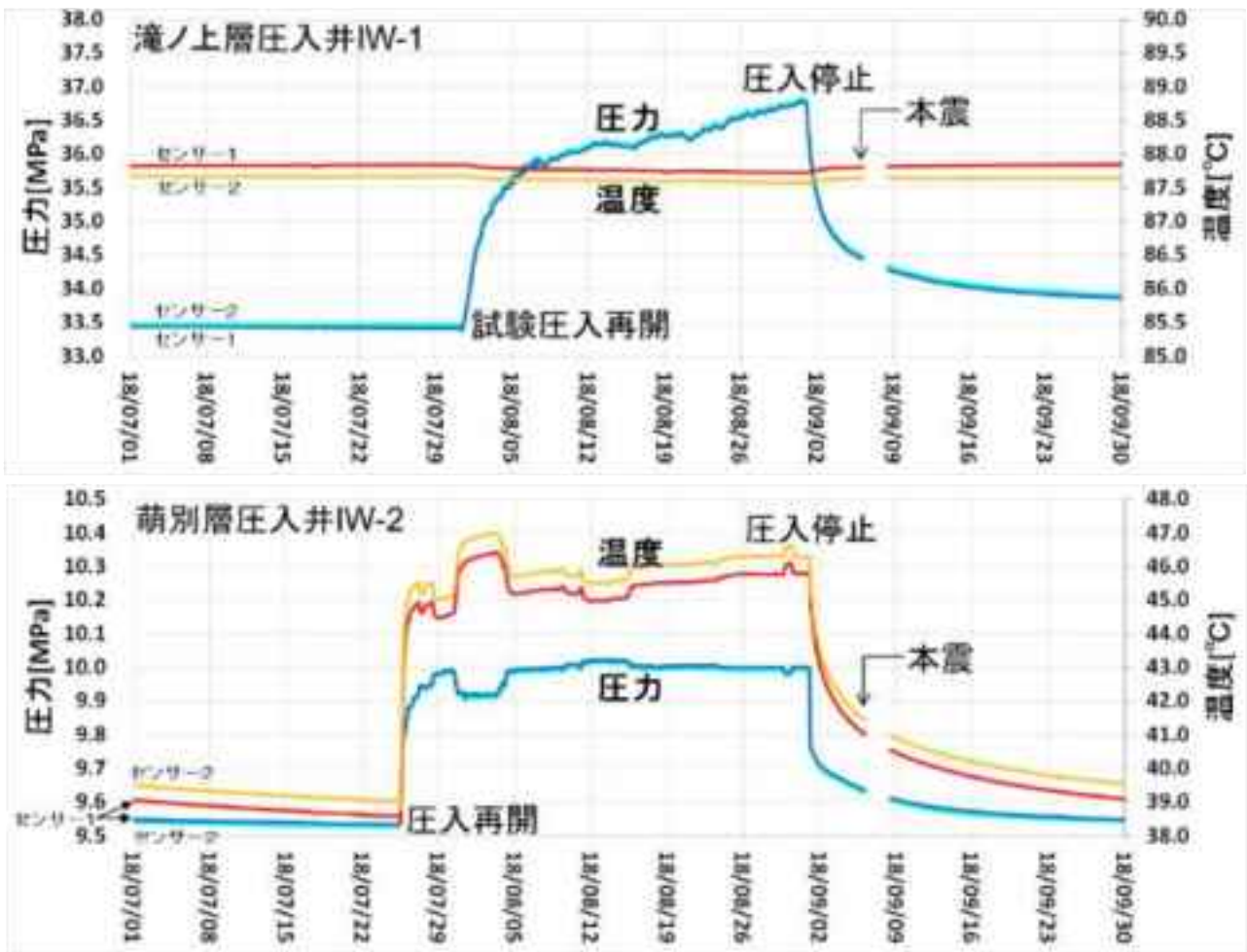
地震発生後に、圧入実績に基づきCO2挙動シミュレーションを実施した。更に、本事業でのCO2圧入による当該地震の震源位置での応力変化は地球潮汐力による地殻への圧力変化（数kPa）の1/1,000程度と計算された。

2018年10月19日「苫小牧 CCS 実証試験に係わる課題検討会」にて、地震学等の専門家を含む委員の間で、1) 同地震によるCO2漏洩がない、2) CO2の地中貯留と本地震との関係を示唆するデータは確認されていない、との共通認識が得られた。

なお、検討結果を取りまとめた報告書をJCCSホームページに掲載している。



平成30年北海道胆振東部地震震源位置と圧入位置の地質模式断面図



地震前後の圧入井構内温度・圧力観測結果

図3-5 北海道胆振東部地震のCO2貯留層への影響等に関する検討報告書の一部抜粋

●総括報告書の作成

これまでの実証事業により得られた成果について、機械工学、化学工学、地質学、地球物理学等の有識者から成る JCCS 課題検討会及び NEDO 技術検討委員会におけるご検討も踏まえた上で、「苫小牧における C C S 大規模実証試験 3 0 万トン圧入時点報告書（「総括報告書」）」をとりまとめた。

「総括報告書」では、事業の成果や事業を通じて得られた課題等を下記の構成でとりまとめている。

- 第 1 章：苫小牧における CCS 大規模実証試験の目的および結果概要
- 第 2 章：CO₂ 分離・回収／圧入設備
- 第 3 章：圧入井および CO₂ 圧入・貯留の実施と結果
- 第 4 章：モニタリングおよび海洋環境調査の実施と結果
- 第 5 章：社会的受容性の醸成活動
- 第 6 章：法規制対応
- 第 7 章：得られた知見と残された課題



図 3 - 6 総括報告書の編集内容については、課題検討会にて有識者へ報告

3. 2. 研究開発項目②安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発

実用化規模（100 万トン規模/年）での効率的な CO2 圧入・貯留技術の確立に向け、我が国の不均質で地質構造が複雑な貯留層に適した、CO2 貯留安全管理技術を開発する。

大規模 CO2 圧入・貯留の安全管理技術の確立に向け、CO2 長期挙動予測シミュレーション技術、光ファイバーや重力計を使用したモニタリング技術など、低コストで高精度のモニタリング技術の開発を実施した。

また、大規模貯留層における効率的な圧入・利用技術の確立に向け、マイクロバブル CO2 圧入技術や坑井の適正配置技術の開発等を実施した。

さらに、CCS 普及条件・基準の整備に向け、CCS 技術事例集の作成、CCS 国際基準（ISO）との連携を行う。

a) 圧入安全管理システムの開発

概要

・CO2地中貯留事業において懸念される誘発地震を監視し、サイト近傍での地震発生時に作業側にフィードバックするシステムを開発する。

2019年度までの成果と課題

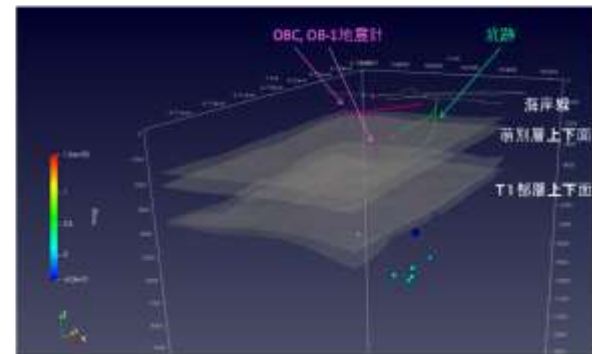
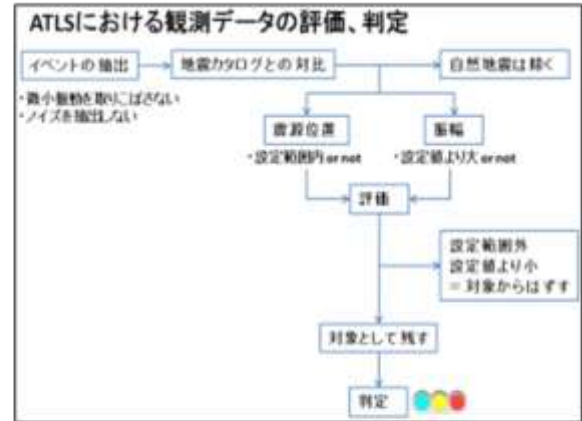
- ・地動ノイズに強い地震イベント抽出手法の開発
- ・気象庁等で観測した自然地震との分別
- ・リアルタイム処理可能なシステムの構築
- ・開発した機能(モジュール)の統合と検証が課題

2020年度の計画

- ・苫小牧サイト等での観測データによる、システム全体の統合機能検証と確立
- ・必要な観測体制等、経済性評価可能な観測システム構築ツールの構築

2021年以降の予定と成果のPRポイント

- ・2020年度までに、当初予定していた圧入安全管理システムの開発を達成予定のため、2021年度以降は実適用段階へ移行
- ・誘発振動発生時のシステム停止と安全時の稼働継続を実現 → 社会受容性向上と作業率の維持・向上



b) CO2 長期モニタリング技術の開発

概要

・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、高精度重力モニタリング技術を開発する。

2019年度までの成果と課題

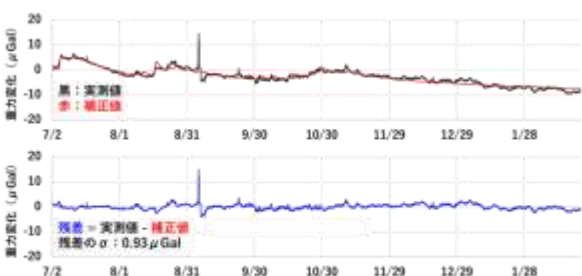
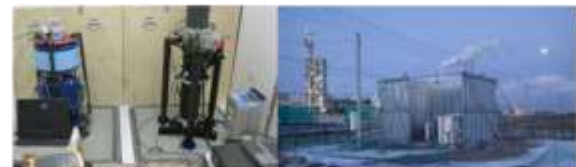
- ・重力データを長期連続的に取得するための方法の構築
- ・沿岸域設置時のノイズ除去方法の確立
- ・重力モニタリング運用方策の試案策定
- ・漏洩検知手法の検証と、重力変化の異常を検知するシステムの構築が課題

2020年度の計画

- ・重力変化の異常を自動で検知する、沿岸域での高精度重力モニタリング技術確立
- ・重力モニタリングの運用方策の策定

2021年以降の予定と成果のPRポイント

- ・2020年度までに、当初予定していたCO2長期モニタリング技術の開発を達成予定のため、2021年度以降は実適用段階へ移行
- ・サイト閉鎖後の弾性波探査実施頻度を減少させる、低コストのモニタリング技術が確立



c) 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立

概要

・我が国のような構造が複雑で不均質性の大きい地層において、数少ない坑井データを基にした地質モデル構築手法を確立する。

2019年度までの成果と課題

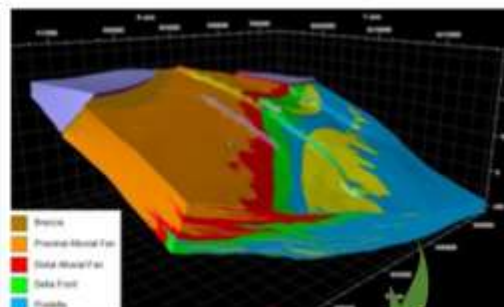
- ・検層・弾性波探査データの統合手法の策定
- ・不均質性・不確実性評価手法の要件整備
- ・実用化規模の貯留層モデル構築手法の確立
- ・シミュレーションと統合した不確実性定量評価が課題

2020年度の計画

- ・CCSライフサイクルごとに必要データおよび構築すべき地質モデルのレベル等を明確化した、地質モデリング技術の確立
- ・貯留層マネジメント手法(SRM I-1参照)へ統合

2021年以降の予定

- ・2020年度までに、当初予定していた地質モデリング技術の開発を達成予定のため、2021年度以降はSRMの一部として実適用段階へ移行



d) 大規模貯留層の適した CO2 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立

概要

・地化学反応およびジオメカニクスを取り入れた、長期CO2挙動シミュレーションツールを開発する

2019年度までの成果と課題

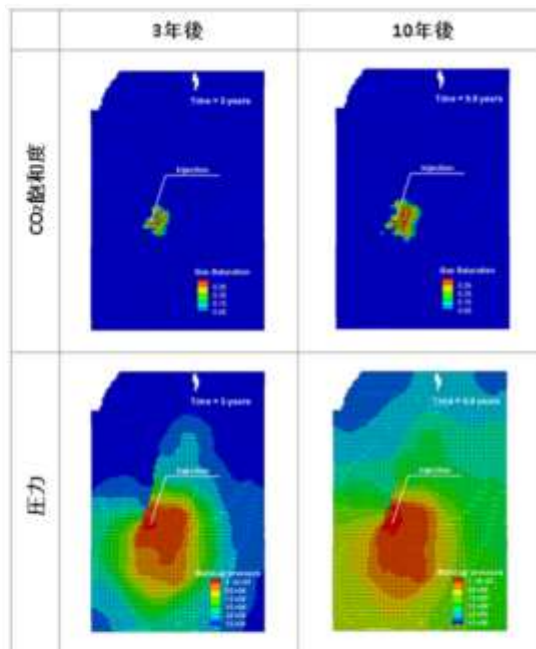
- ・並列化処理による地化学高速計算の実現
- ・マイクロとマクロなCO2挙動のモデル化
- ・化学的浸透現象のCO2貯留における影響評価
- ・地化学・水理・流動連成解析手法の検討
- ・個別課題ごとの対応ツールの統合化が課題

2020年度の計画

- ・化学的浸透現象および電磁探査によるモニタリング技術を取り込んだシミュレーションツールキットの構築
- ・地化学・水理・流動連成解析のためのシミュレーション技術の確立
- ・貯留層マネジメント手法(SRM I-1参照)へ統合

2021年以降の予定

- ・2020年度までに、当初予定していたシミュレーション技術の開発を達成予定のため、2021年度以降はSRMの一部として実適用段階へ移行



SRM: Storage Resource Management

e) CO2 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立

概要

- ・実用規模の貯留を行う際に、複数の坑井からの圧入や圧力緩和井を用いた圧入の検討や、それらの最適配置を決定するツール開発を行う。

2019年度までの成果と課題

- ・海外サイトでの事例調査
- ・自動的かつ効率よく最適配置を求めるための計算手法の開発
- ・何を最適化(目的関数)するべきかの検討と、多目的最適化手法の検討
- ・利便性のよい最適配置ツールの完成が課題

2020年度の計画

- ・最適配置ツールの確立・運用マニュアルの作成
- ・貯留層を最大限活用・管理するためのマネジメント手法(SRM: 次スライド)の概念設計

2021年以降の予定

- ・2020年度までに、当初予定していた最適配置技術開発は達成予定のため、2021年度以降はSRMの一部として実適用段階へ移行



QUESTの事例



Gorgonの事例

SRM: Storage Resource Management

f) SRM (Storage Resources Management) 技術の構築

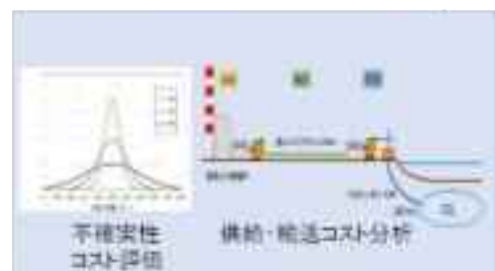
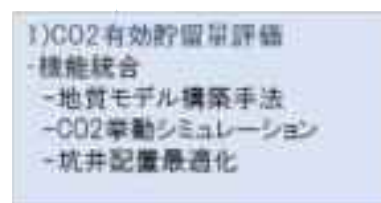
開発目標

- ・我が国のような地質構造が複雑で不均質性が著しい地層において、CO2有効貯留量評価からCO2事業性の評価まで一貫して支援する、貯留層管理技術を開発し、貯留層の利用率向上20%
- ・CO2事業統合種計の一体化/効率化

開発計画

- 1) CO2有効貯留量評価
 - ・既入手法の前項を統合し、CO2有効貯留量評価手法・ツールを開発
 - 機能別モジュール開発、インターフェース設計等
- 2) CO2供給地帯や貯留不確実性を考慮した経済性評価
 - ・貯留層の不確実性、CO2供給地帯や輸送方式別のコストを統合した経済性評価手法・ツールを開発
- 3) SRM手法の機能検証
 - ・CO2有効貯留量評価からCO2の事業性評価を我が国全体のCO2事業を想定して検証

SRMの全体開発イメージ



g) 光ファイバー等を利用した地層安定性や坑井の健全性監視システムの開発

概要

- ・光ファイバーをマルチセンサーとして、分布式の地層ひずみや音響センシング(DAS)測定技術を開発
- ・ファイバーの設置・施工技術を開発・改良

個別成果

1) マルチセンサー機能の実現

1本のファイバーケーブルで以下の複数の計測機能を持つことを検証

- ・ひずみ測定 ⇒ 地層安定性監視
- ・DAS-VSP ⇒ 貯留CO₂の挙動監視
- ・自然地震観測
- ・温度・圧力計測

2) 設置・施工技術、観測システム開発

- ・大深度に安定し効率的にファイバーを設置する技術を開発
- ・遠隔地で長期・連続してデータ取得するシステムを開発

3) その他

- ・軟岩亀裂発生によるジオメカニクスモデルの構築

開発目標

- ・実規模CO₂貯留サイトでの検証による技術確立
- ・マルチセンサー機能等を活かす運用マニュアルの整備
- ・建物保守等、CCS以外への適用方法の提言
- ・自然電位等による漏洩リスク低減（次項参照）

開発計画

1) 実規模CO₂貯留サイトでの機能検証

米国CO₂貯留サイト(18万トン/年)で、以下を実施

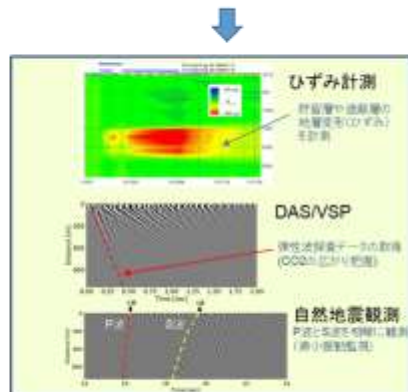
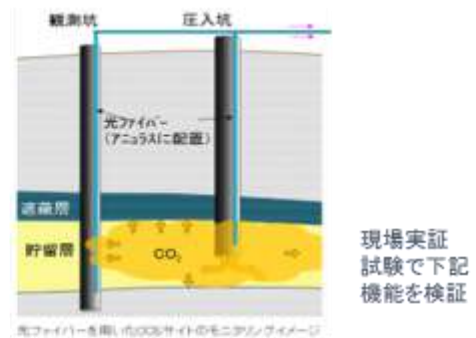
- ・坑内計測・地表弾性波計測
⇒ 地層安定性監視、CO₂挙動モニタリング技術確立
- ⇒ 以後(2024~)は民間主導の活用へ

2) 運用マニュアルの整備

マルチセンサー機能、パーマネント機能、常時・連続位置監視機能を活かす運用マニュアルを整備
⇒ CCSサイト地点に特化した活用とコストダウン実現

3) CCS以外への適用方法の提言(波及効果)

建物保守等、CCS以外への適用方法を提言
⇒ 適宜別プロジェクトを立上げ、膨大な市場形成へ



DAS: Distributed Acoustic Sensing
VSP: Vertical Seismic Profiling

【実規模CO₂貯留サイトでの実証】



米国ノースダコタ州実証サイト

CCS Components & Major Activities	2018	2019	2020
Characterization & Monitoring	Seismic Data Acquisition	Seismic Data Processing	Seismic Data Interpretation
Capture System	CO ₂ Capture	CO ₂ Transport	CO ₂ Storage
Permits & Wells	Well Drilling	Well Completion	Well Production
CCS Components & Major Activities	2021	2022	2023
Characterization & Monitoring	Seismic Data Acquisition	Seismic Data Processing	Seismic Data Interpretation
Capture System	CO ₂ Capture	CO ₂ Transport	CO ₂ Storage
Permits & Wells	Well Drilling	Well Completion	Well Production

【コストダウン実現例】

- ・光ファイバーによる常時&深度方向連続監視で、3D探査の間隔を2年から5年に延長できると想定(圧入CO₂の全体像の把握が必要な時に詳細な3D探査を実施)
- ・3D探査費を約4億円/回とすれば、年平均費用2億円/年を0.8億円/年に低減。20年間では24億円のコストダウン効果

h) 自然電位等による漏えいリスク低減研究

概要

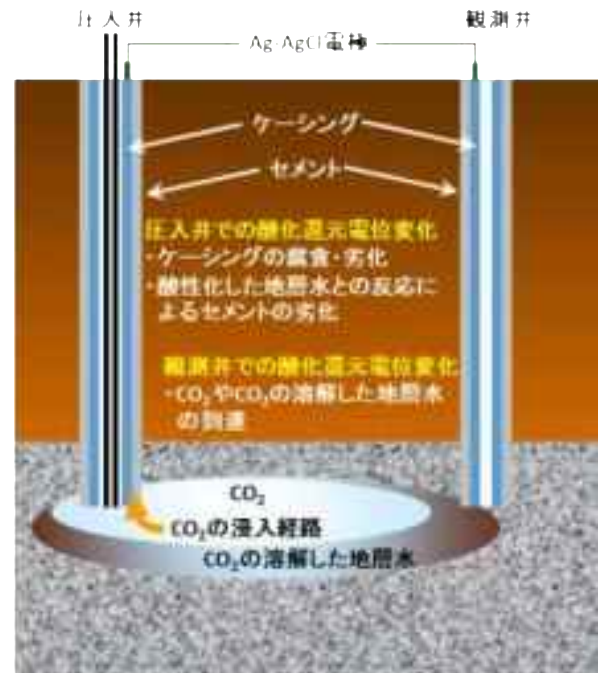
・坑井について低コストの漏れリスク検知システムを開発する

技術的課題

- ・自然電位法による酸化還元電位の測定・解析技術の確立
- ・自然電位とpHやpH変化との関係の検証
- ・CO₂とケーシング・セメント反応速度の評価

当該事業実施の目的及び社会的意義

- ・ほぼコストフリーの自然電位の活用により、坑井健全性の高時観測を目指す
- ・漏れリスクの最も高い坑井に電極を設置することで、坑井の劣化や劣化およびそれに伴うCO₂の漏洩を検知する技術を開発する
- ・観測井にも電極を設置することで、CO₂およびH₂CO₃の溶解の到達検知の可能性も期待できる



i) CO₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

概要

・万一のCO₂漏出に備え、海域でのCO₂漏出検出技術、CO₂の拡散範囲や生物など環境への影響評価を行い、CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムを開発する。

2019年度までの成果と課題

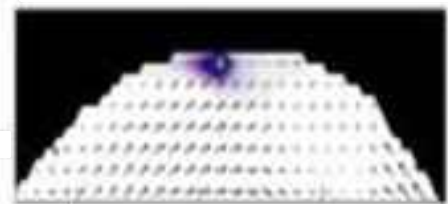
- ・漏出検出技術要素技術や生物影響評価データベースの構築を検討
- ・大阪湾での海水中CO₂濃度の長期観測を実施し、ベースライン調査を実施
- ・生物影響データの充実とユーザーインターフェースの整備、および、総合システムの活用方法の例示

2020年度の計画

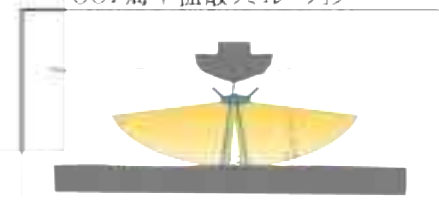
- ・生物影響データベースの作成
- ・生物影響データベースを組み込んだCO₂漏出検出・環境影響総合評価システムの改良と運用マニュアルの作成

2021年以降の予定と成果のPRポイント

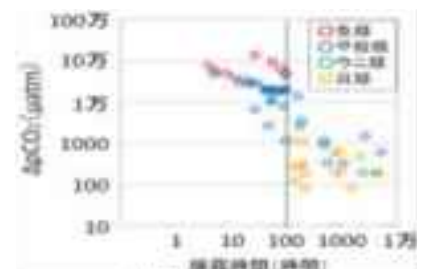
- ・2020年度までに、当初予定していた、CO₂漏出検出・環境影響総合システムの開発を達成予定のため、2021年度以降は実適用段階へ移行
- ・社会受容性向上や海防法対応に必要とされる海洋モニタリング及び環境影響評価の手法をマニュアル化し、事業者による手法選択を容易化



CO₂海中拡散シミュレーション



漏出検出(気泡探査)



生物影響評価

J) リスクマネジメントツール、日米 CCS 協力や海外研究機関との CCUS 技術開発の連携

概要

リスクマネジメントツール等に関する海外研究機関との連携を図り、共同研究を実施する

2019年度までの成果と課題

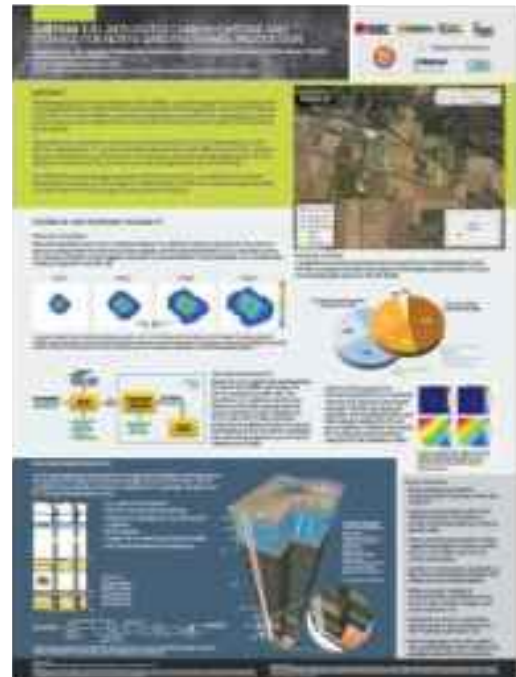
・NAC機能調査と日本向けスケッチ設計手法策定
 ・米国でのファイバー光計測技術実証の開始（右図参照）
 ・米国からの試井の許可開始（2019年度は15口実施）
 ・海外連携の拡充（米、欧州、豪州）
 ・断層安定性監視技術と試井封鎖技術が今後の重要課題

2020年度の計画

・海外連携拡充の促進と
 ・断層安定性監視技術の開発（豪州）
 ・試井封鎖技術の開発（試井健全性評価を含む）
 ・（1）4巻冊

2021年以降の予定と技術確立内容

・断層安定性監視技術の開発（豪州）
 ・海外連携強化
 ・大規模実証サイトの確保、日本での実用化技術の先行開発、海外プロセス展開



Red Trail Energy CCS プロジェクト
 光ファイバー計測技術を実証

k) 断層安定性監視技術

概要

・日本は断層が多いため、CO₂貯留が断層に及ぼす影響や漏えいリスクを調べ、漏えいや微小振動発生リスクを低減させる技術開発を行う

2019年度までの成果と課題

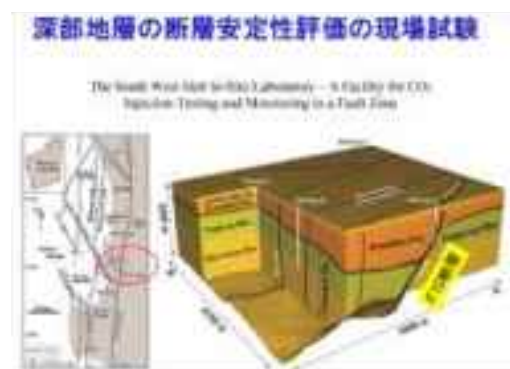
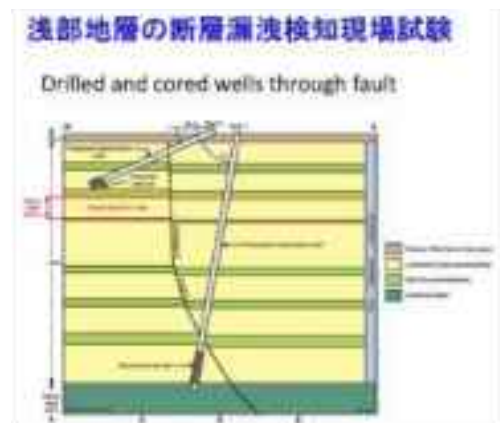
・試井非決定に適した長尺光ファイバーの開発
 ・長期びりびり観測システムの開発
 ・設置方法とDAS/VISとしての観測精度の検証
 ・断層を有するサイトでの現場実証については未実施

2020年度の計画

・断層安定性監視技術の開発について、サイトを所有する豪州関係者と協議を開始

2021年以降の予定と技術確立内容

・豪州での浅部断層漏えい監視技術の開発
 ・豪州での深部断層安定性監視技術の開発
 ・断層による漏えいリスクや微小振動発生リスクを低減させる技術を開発し、安全な貯留と社会受容性向上を達成



L) 断層安定性監視技術

表 3 - 2 実施内容と日豪の役割分担

	日 本	豪 州
実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ・浅部断層漏えい監視技術の開発（浅部断層からの漏えいの検証） ・深部断層安定性監視技術の開発（CO2 圧入が断層に与える影響の検証） 	
役割分担 （費用はそれぞれの実施事項を負担）	<ul style="list-style-type: none"> ・試験内容の検討（日豪共同） ・新規坑井の掘削（必要な場合） ・光ファイバー・観測機器等の敷設 ・試験の実施、データ取得・処理 ・研究成果の共有（日豪共同） 	<ul style="list-style-type: none"> ・試験内容の検討（日豪共同） ・既存坑井等、試験場所の提供 ・電源等インフラ設備提供 ・行政機関や地元等の対応 ・研究成果の共有（日豪共同）
主に期待する成果	<ul style="list-style-type: none"> ・断層からの漏えい、CO2 圧入場所と断層をどれだけ離すと影響が無いかなど、断層安定性技術の習得 	<ul style="list-style-type: none"> ・組合が持つ、光ファイバーによる温度、ひずみ、圧力同時計測技術による試験の実施（豪州は温度計測を主に実施）
豪州で実施する理由	<ul style="list-style-type: none"> ・浅部に断層を有するサイトがあり、断層からの漏えい試験が可能 ・深部に断層を有するサイトがあり、断層安定性試験が可能 ・豪州側が組合の光ファイバー技術に興味を示し共同実施に前向きであること。 ・国内では同様の試験を実施するのが困難であること。 	

m) 坑井健全性調査・坑井封鎖実用化試験

【開発目標】

CO2圧入後15年間以上経過した長岡サイトの圧入井の健全性を確認するとともに、坑井封鎖作業を実際に行い、適切な坑井封鎖手法を提言する。

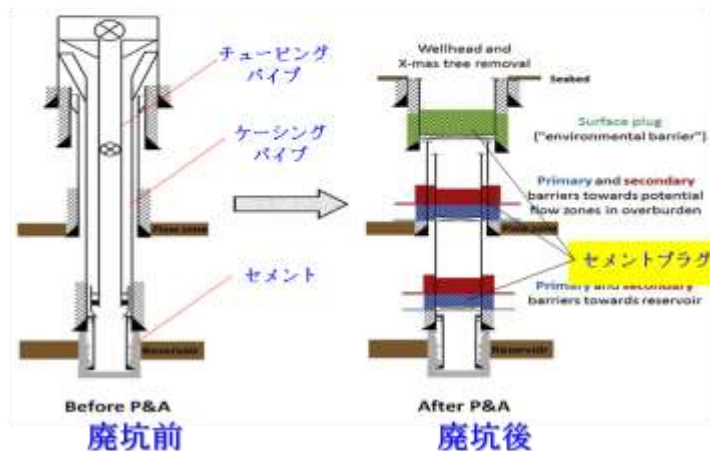
⇒CCS事業に不可欠な坑井封鎖手法の構築

⇒CO2圧入後、15年におよぶ影響の評価（唯一の他事例のドイツケッチンは3年間）

⇒苫小牧サイトの参考

【開発計画】

- ①適合法規の調査圧入井、チューピングの現状調査
- ②チューピング抜き取り（ケーシングやセメントのサンプルを採取・分析）
- ③ケーシングの一部を切断し、セメントプラグを設置



n) マイクロバブル CO2 圧入技術の適用による貯留率の向上

概要

- CO2をマイクロバブル(微細気泡)化し貯留層に圧入すると、CO2を素早く溶解させるとともに、貯留層の圧力増加の抑制効果が期待できるため、マイクロバブルCO2圧入技術の確立を行う。

2019年度までの成果と課題

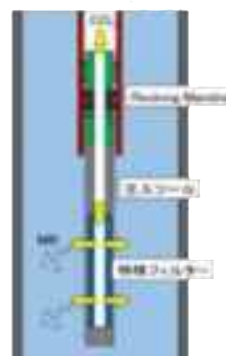
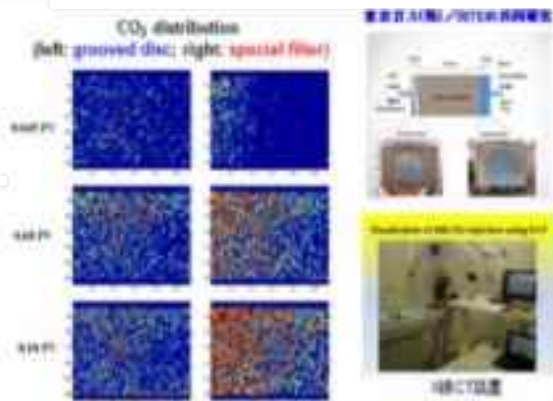
- これまでに、実験室レベルならびに実フィールドレベルにおいて、マイクロバブル圧入による、圧入性向上、CO2貯留率の向上等の効果を確認
- 効果的かつ効率的なマイクロバブル圧入方法の確立が課題

2020年度の計画

- 効率的かつ効果的な実施に向け、実フィールドにおいて、坑井仕様に応じたマイクロバブルツールの効率的な設置に伴うマイクロバブル圧入性能の評価試験実施

2021年以降の予定と成果のPRポイント

- 2020年度までに、当初予定していた、マイクロバブルCO2圧入技術の確立を達成予定のため、2021年度以降は実適用段階へ移行
- 貯留率の向上と貯留層の圧力抑制(安全性)の同時達成が可能



o) CCS 事業化に向けた条件整備 = SLO 開発手法 =



3. 3. 研究開発項目③CO₂ 分離・回収技術の研究開発

③-1)先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

③-2)先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究開発

1. 事業全体の成果

本事業では、先進的な固体吸収材法による CO₂ 分離回収技術の実用化を促進することを目的に、固体吸収材製造技術の合理化、回収プロセスの最適化検討、ベンチスケール回収試験、実ガス曝露試験、石炭火力発電所におけるスケールアップ試験装置の設計、商用化に向けたシステム検討を実施した。

ラボスケール試験では、低コスト化・実用化に向けて開発した固体吸収材を用いた CO₂ 連続回収試験を行い、回収エネルギー < 1.5 GJ/t-CO₂、回収率>90%、回収純度>99%の性能を示すとともに、プロセス効率化のために重要なパラメータを抽出した。さらに、回収システムの効率的運転条件や装置設計の指針を提示すべく、プロセスシミュレーターを構築し、感度解析、データ検証を実施した。その結果、本固体吸収材を用いたシステムの優位性を示すとともに、有用なシミュレーターの構築および高精度化を実現した。

固体吸収材の製造技術については、複数の民間企業の協力を得て、ベンチスケール (>10 m³) の製造技術を確立し、品質および性能の向上を達成した。また、今後の大量生産へ向け、製造期間短縮等を可能とするよう合理化を進めた。

固体吸収材の劣化に関しても調査および試験を行い、知見を蓄積した。特に、酸化劣化等を加速あるいは抑制するいくつかの重要な要素を抽出した。実ガス曝露試験では、実プロセスの約 1 年間に相当する期間にわたり、ほぼ同等の CO₂ 吸着性能を維持できる条件を見出すことができた。

ベンチスケール試験については、装置改良を実施し、固体吸収材循環量を増大させるとともに、安定した循環運転に成功した。また、改良した固体吸収材に、運転条件を適合させることで事業目標の CO₂ 回収量を超える 7.2 t/d を実現できた。さらに、蒸気量および乾燥ガス量を調整することにより、回収エネルギー 1.5 GJ/t での CO₂ 回収を達成した。また、吸収材循環量、吸収材層高、供給ガス量などパラメータを変更した試験も実施し、スケールアップ設計に必要な試験データ取得を完了した。

得られた試験結果をもとに、スケールアップ試験装置の基本設計を実施した。構成機器の配置も工夫することで、装置高さをほぼ同等としながら装置設置面積を大きく削減することができた。

以上の研究開発結果を踏まえ、800,000kW の新設石炭火力発電所を想定し、CO₂ 分離回収コストを算出したところ、2,000 円台の見通しを得ることができ、事業目標を達成した。

2. 研究開発項目毎の成果

2-1. 高効率システム開発

「高効率システム開発」では、高効率 CO₂ 回収のための固体吸収材システムの検討、シミュレーションによるシステム高性能化検討、および移動層ベンチスケール試験を実施した。項目毎の目標および達成状況は下記の通りである。

2-1-1. 「高効率 CO₂ 回収のためのシステム検討」

【目標】

- ・ 最適運転条件の提示と回収エネルギー ≤ 1.5 GJ/t-CO₂・回収率 ≥ 90%・回収純度 ≥ 99%の達成
- ・ ラボスケール試験装置の改良と固体吸収材使用量 20%低減
- ・ 0.1 t/d 規模固定層システムの設計・構築・検証

【達成状況】

3 塔式ラボスケール試験装置を用いてプロセスパラメータを最適化し、固体吸収材の性能を最大限に引き出す運転条件の詳細を提示した。ベンチ試験用に 10 m³ 規模で製造した改良固体吸収材を評価し、運転プロセスを最適化した結果、模擬ガス(12%CO₂)から回収純度>99%、回収率>90%で CO₂ を回収し、この際、60℃の再生工程に必要なスチーム供給エネルギーは 1.5 GJ/t-CO₂ 以下と、目標性能の達成を確認した。

2-1-2 「シミュレーションによるシステム高性能化検討」

【目標】

- ・ 移動層シミュレーション技術の構築と CO₂ 分離回収性能向上可能性の提示
- ・ スケールアップ試験の最適プロセス条件の提示

【達成状況】

計算収束性の改善、材料特性の精密測定データの反映を行い、シミュレーターを改良し、ベンチ試験結果との比較を通して、CO₂ 分離回収性能を定性的に予測できる移動層シミュレーション技術を構築した。感度解析を実施し、CO₂ 分離回収性能向上の指針を提示した。
さらに、本事業で設計したスケールアップ試験装置に対する推算を実施し、最適なプロセス条件を予測し、40 t/d 程度での CO₂ 回収能力を確認した。

2-1-3 「移動層ベンチスケール試験」

【目標】

- ・ 要求仕様±2wt%でのアミン担持
- ・ 移動層システムの効率向上による回収量増大（6.5 t/d）
- ・ パラメータ最適化（回収エネルギー1.5 GJ/ t -CO₂）
- ・ システム高性能化検討に必要なデータの取得

【達成状況】

要求仕様以内でのアミン担持を実施し、大量生産へ向けた担持技術を取得できた。コンベア、ホップ、運転シーケンスの変更・改良により吸収材循環量を従来の 1.5 倍まで増大しての安定運転に成功した。改良固体吸収材に運転条件を適合させ、目標を超える 7.2 t/d の CO₂ 回収量を実現した。

また、蒸気量・乾燥ガス量の調整により、回収エネルギー1.5 GJ/t-CO₂ を実証した。

さらに、吸収材循環量、吸収材層高、供給ガス量などのパラメータ変更試験を実施し、スケールアップ設計に必要な試験データの取得も完了した。



図3-7 移動層ベンチスケール試験装置

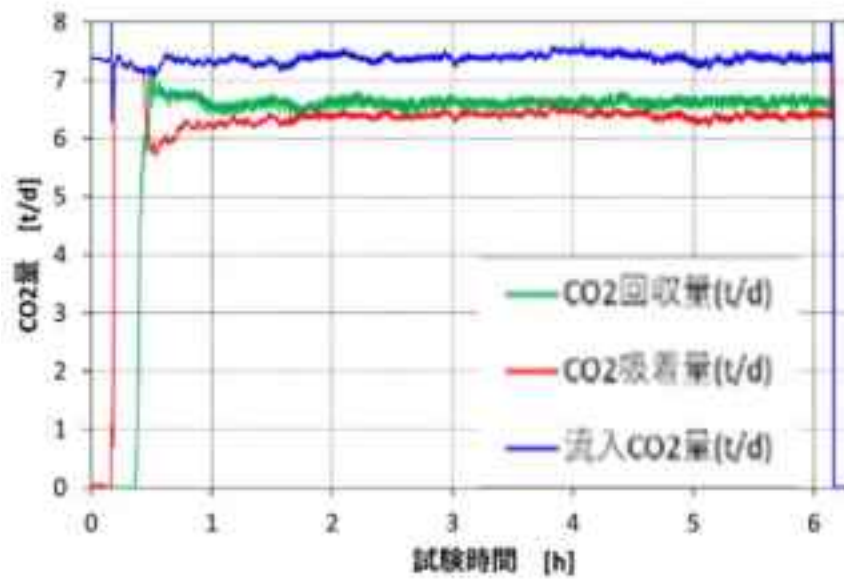


図3-8 ベンチ試験結果：CO2 吸収脱離量

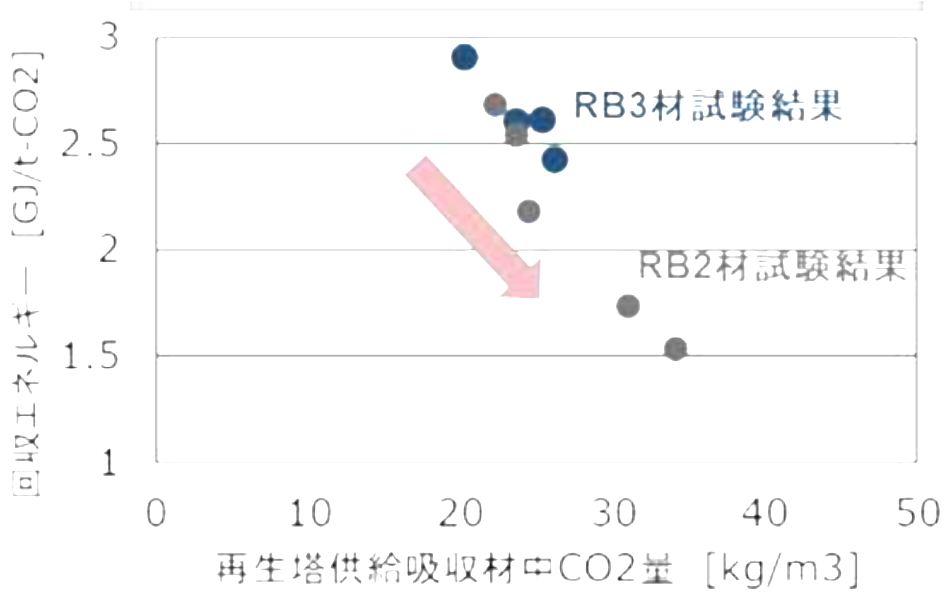


図3-9 ベンチ試験結果：吸収材中CO2量とCO2回収エネルギーの関係

表 3 - 3 「高効率システム開発」の成果まとめ

目標	達成状況
高効率 CO₂ 回収のためのシステム検討	
回収エネルギー ≤ 1.5 GJ/t-CO ₂ ・回収率 ≥ 90%・回収純度 ≥ 99%の達成	3 塔式ラボスケール試験装置を用いてプロセスパラメータを最適化し、ベンチ試験用に 10 m ³ 規模で製造した改良固体吸収材を評価し、目標性能を達成した。
ラボスケール試験装置の改良と固体吸収材使用量の 20%低減	ラボスケール試験装置を 3 塔式から 2 塔式して回収システムを効率化し、固体吸収材使用量の低減目標を達成した。
0.1 t/d 規模固定層システムの設計・構築・検証	上記ラボスケール試験装置の 100 倍規模のシステムを設計・構築し、温度分布等、スケールアップに伴う課題を抽出した。
シミュレーションによるシステム高性能化検討	
移動層シミュレーション技術の構築と CO ₂ 分離回収性能向上可能性の提示	計算収束性の改善、材料特性の精密測定データの反映を行い、ベンチ試験結果との比較を通して、CO ₂ 分離回収性能を定性的に予測できる移動層シミュレーション技術を構築し、性能向上の可能性を提示した。
スケールアップ試験の最適プロセス条件の提示	本事業で設計したスケールアップ試験装置に対する推算を実施し、最適プロセス条件で、40 t/d 程度での CO ₂ 回収能力を確認した。
移動層ベンチスケール試験	
要求仕様 ± 2 wt % でのアミン担持	アミン担持を要求仕様以内で実施し、大量生産へ向けた担持技術を取得できた。
移動層システムの効率向上による回収量増大 (6.5 t/d)	吸収材循環量を従来の 1.5 倍まで増大しての安定運転に成功した。改良固体吸収材に運転条件を適合させ、最大 7.2 t/d の CO ₂ 回収量を <u>実現</u> した。
パラメータ最適化 (回収エネルギー 1.5 GJ/ t -CO ₂)	蒸気量・乾燥ガス量の調整により、回収エネルギー 1.5 GJ/t-CO ₂ を実証した。
システム高性能化検討に必要なデータの取得	吸収材循環量、吸収材層高、供給ガス量などのパラメータ変更試験を実施し、必要データの取得を完了した。

2-2. 実用化のための材料最適化と製造技術開発

「実用化のための材料最適化と製造技術開発」では、固体吸収材の大量合成・低コスト化検討および劣化対策検討を実施した。項目毎の目標および達成状況は下記の通りである。

2-2-1. 「大量合成・低コスト化検討」

【目標】

- ・ ベンチスケール試験用改良固体吸収材の製造・供給（10 m³ 規模）
- ・ スケールアップ（100 m³ 規模）に向けた製法の合理化・最適化、および商用化に向けたコスト削減

【達成状況】

ベンチ試験用にアミン組成および担持量最適化等を施した改良固体吸収材を製造・供給（> 10 m³）し、ベンチ試験目標の達成に寄与した。

さらに、複数の民間企業の協力を得て、原料の調達、品質管理、製造期間短縮（1/3）等の合理化を進めた。その結果、スケールアップ（100 m³ 規模）製造および商用時のコスト削減の目途を得た。



図3-10 固体吸収材の製造

2-2-2 「劣化対策検討」

【目標】

- ・ 劣化耐久性に関する長時間データ取得（連続 300 時間運転）
- ・ 長期使用時の性能低下因子の同定と高耐久性化方策の立案

【達成状況】

ラボスケール試験装置を用いて、連続 300 時間の耐久性評価試験を実施し、酸素共存条件下でも有意な性能低下がないことを確認した。

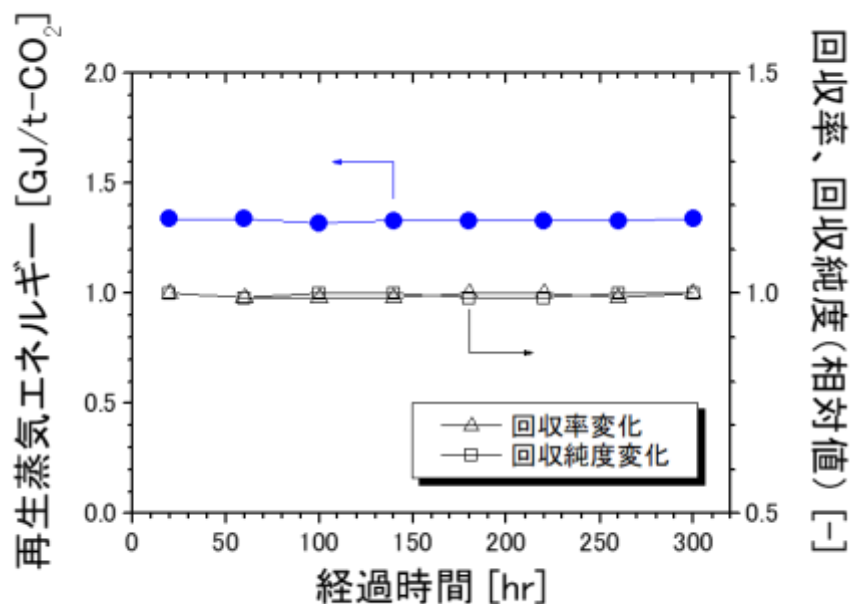


図3-11 ベンチ材 CO2 回収性能の経時変化（酸素あり）

さらに、高温・酸素高濃度条件下での加速酸化処理試験を実施し、固体吸収材を長期使用時に酸化劣化について調査した。その結果、本事業開発アミンの高い酸化耐性を示すとともに、水蒸気が酸化抑制因子となることを見出した。

実ガス曝露試験の結果を分析し、長期使用のための方策（脱硫条件等）を得た。

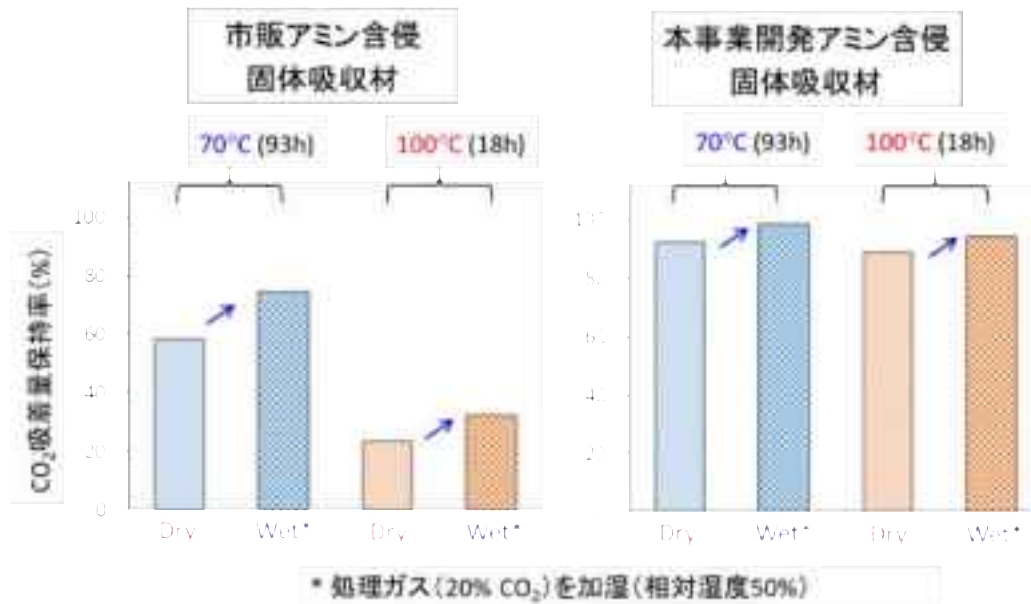


図3-12 固体吸収材の酸化劣化の加湿による抑制効果

表 3 - 4 「実用化のための材料最適化と製造技術開発」の成果まとめ

目標	達成状況
大量合成・低コスト化検討	
ベンチスケール試験用改良固体吸材の製造・供給（10 m ³ 規模）	改良固体吸収材を製造・供給（> 10 m ³ ）し、ベンチ試験目標の達成に寄与した。
スケールアップ（100 m ³ 規模）に向けた製法の合理化・最適化、および商用化に向けたコスト削減	複数の民間企業の協力を得て、原料の調達、品質管理、製造期間短縮（1/3）等の合理化を進めた。その結果、スケールアップ（100 m ³ 規模）製造および商用時のコスト削減の目途を得た。
劣化対策検討	
長時間データ取得（連続 300 時間運転）	連続 300 時間の耐久性評価試験を実施し、酸素共存条件下でも有意な性能低下がないことを確認した。
長期使用時の性能低下因子の同定と高耐久性化方策の立案	高温・酸素高濃度条件下での加速酸化処理試験を実施し、本事業開発アミンの高い酸化耐性を示すとともに、水蒸気が酸化抑制因子となることを見出した。 実ガス曝露試験の結果を分析し、長期使用のための方策（脱硫条件等）を得た。

2-3. スケールアップ検討と経済性評価

「スケールアップ検討と経済性評価」では、関西電力株式会社舞鶴発電所の石炭燃焼排ガスを対象としたスケールアップ回収試験装置の設計（40 t/d 規模）、同発電所で実施した固体吸収材への実ガス曝露試験、将来の商用化を視野に入れた経済性評価等を実施した。項目毎の目標および達成状況は下記の通りである。

2-3-1. 「スケールアップ装置の設計」

【目標】

- ・ スケールアップ装置の基本設計完了、主要仕様の明確化
- ・ 商用化システムで回収コスト 2,000 円台/t-CO₂ を達成

【達成状況】

供給機の排出量増加と簡素化検討を実施し、ベンチ試験結果をもとに、スケールアップ試験装置の基本設計を完了した。塔および機器の配置を最適化し、装置高さ同等としながら装置設置面積を大幅削減することができた。

さらに、ベンチ試験結果をもとに、800,000kW の新設石炭火力発電所を想定し、1 t 当たりの CO₂ 分離回収コストを算出したところ、2,000 円台達成の見通しを得た。



図 3 - 1 3 分離回収コストの内訳

2-3-2 「吸収材の実ガス曝露試験」

【目標】

- ・ 実ガス曝露試験装置の設計・製作・調達、および試験の実施
- ・ 所定の吸収材性能を維持するために必要な前処理システムの提示

【達成状況】

固体吸収材を充填した塔と前処理装置（脱硫吸着剤塔、脱硝吸着剤塔）で構成された曝露試験装置を設計・製作し、舞鶴発電所へ据付後、各前処理違いの実ガスをそれぞれの系統に導入し約 1,000 時間以上の曝露を実施した。

さらに、約 300 時間ごとに吸収材を採取して分析・評価を実施した結果から、必要な前処理システム（脱硫装置）仕様が概ね明らかとなった。

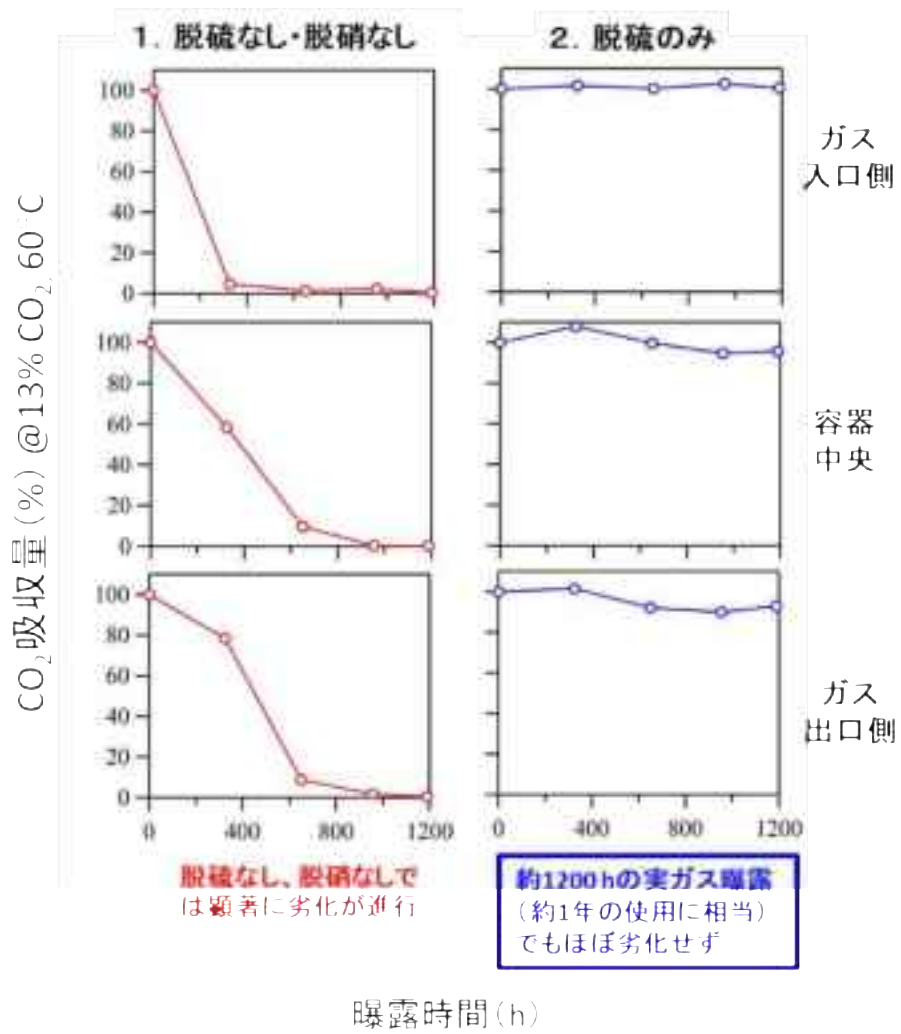


図3-14 実ガス曝露試験後の固体吸収材のCO₂吸着量変化（曝露前を100%とした）

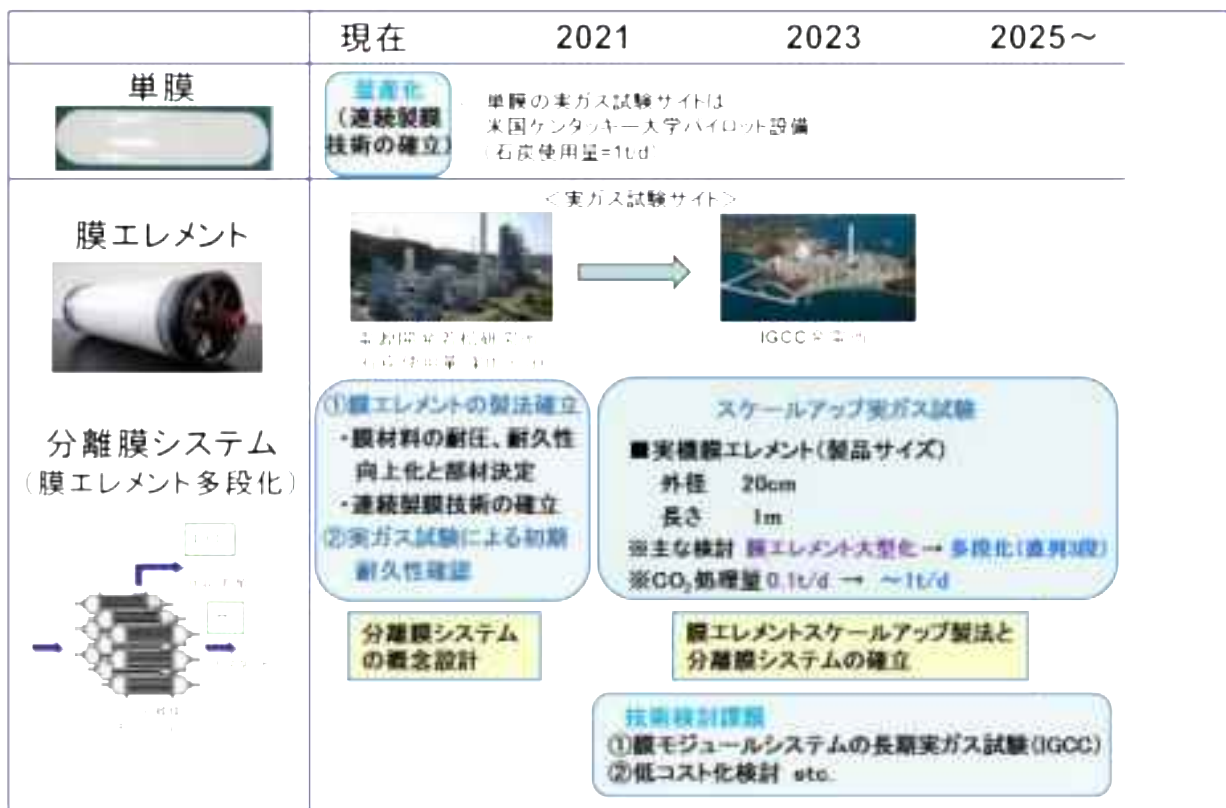
表 3 - 5 「スケールアップ検討と経済性評価」の成果まとめ

目標	達成状況
スケールアップ装置の設計	
スケールアップ装置の基本設計完了、主要仕様の明確化	供給機の排出量増加と簡素化検討を実施し、ベンチ試験結果をもとに、スケールアップ試験装置の基本設計を完了した。塔および機器の配置を最適化し、装置高さ同等としながら装置設置面積を大幅削減することができた。
商用化システムで回収コスト 2,000 円台/t-CO ₂ を達成	ベンチ試験結果をもとに、800,000kW の新設石炭火力発電所を想定し、CO ₂ 分離回収コストを算出したところ、2,000 円台達成の見通しを得た。
吸収材の実ガス曝露試験	
実ガス曝露試験装置の設計・製作・調達、および試験の実施	固体吸収材を充填した塔と前処理装置（脱硫吸着剤塔、脱硝吸着剤塔）で構成された曝露試験装置を設計・製作し、舞鶴発電所へ据付後、各前処理違いの実ガスをそれぞれの系統に導入し約 1,000 時間以上の曝露を実施した。
所定の吸収材性能を維持するために必要な前処理システムの提示	約 300 時間ごとに吸収材を採取して分析・評価を実施した結果から、必要な前処理システム（脱硫装置）仕様が概ね明らかとなった。




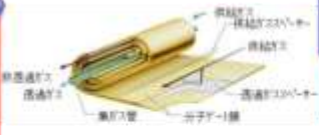
③-3)二酸化炭素分離膜モジュールの研究開発

本研究開発では、圧力を有するガス源である石炭ガス化複合発電（IGCC）からのCO₂分離・回収において、CO₂分離・回収コストを大幅に低減する革新的な技術である分子ゲート膜モジュールについての実ガス試験による実用化研究開発を行う。実用化段階において分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂以下を達成する膜モジュールシステムの実用化を目指すことを目的としている。

前身の経済産業省からの委託事業「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」及び「二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業」で新たに見出した膜材料、及び、この膜材料を用いたエレメント化や膜分離システムに関する検討結果を基礎として、実用化に向け、分離膜の量産化技術（連続製膜技術）と量産化した分離膜のエレメント化技術の開発を行う。また、石炭ガス化ガス（実ガス）を用いた実ガス試験を実施し、IGCCプロセスへの適用のための、分離膜、膜エレメントの性能、耐久性等に関する技術課題の抽出と解決を行う。



2019年度は、2018年度にNEDOより受託した本事業（「二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発」）において、膜エレメント実ガス評価を国内実ガスサイトに変更して実施する方針に基づき、次世代型膜モジュール技術研究組合と電源開発(株)との間で、若松総合事業所において、2020年度までの期間に、膜エレメントの実ガス試験を実施するための契約を締結するとともに、NEDOとの間で本事業の実施期間を1年間延長（2020年度まで）するための業務委託変更契約書を締結した。上記の契約締結手続きと並行して、本事業の実用化研究開発を実施した。

	(基盤技術開発)	(実用化研究)	(実機)
名称	単膜	膜エレメント	膜モジュール
概要	ラボスケールの平膜 (膜面積: 1.2~58cm ² 程度)	大面積の膜を用いた構造体膜・支持体・流路材などを一体化したもの	膜エレメントとそれを収納する容器 (ハウジング) を組み合わせたもの
サイズ、外観	 (膜面積: 1.2 cm ²)  (膜面積: 58 cm ²)	 (2~4inch、長さ 200mm) ⇒2022年度までの延長により、実機膜エレメント (8inch、長さ1m) を作り上げる。 	 実機膜エレメント (8 inch、長さ 1m程度)
課題等	膜素材開発 (分離性能向上、耐圧性・耐久性等向上)	製膜法、エレメント部材開発 (連続製膜、大面積化、シール技術等)	実機モジュール開発 (容器形状、量産化、システム化)

次の①～④の実施項目について検討を行い

- ①実ガスを用いたCO₂分離性能試験による課題抽出と解決
- ②膜材料と膜エレメントの最適化
- ③経済性評価
- ④CO₂分離回収技術に関する情報収集発信

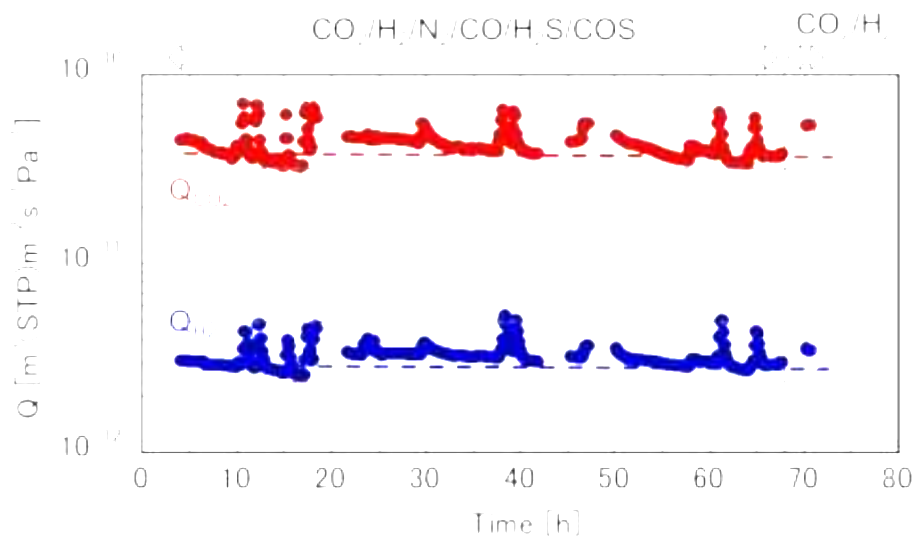
以下の成果を得た。

●実ガスを用いたCO₂分離性能試験による課題抽出と解決

単膜の実ガス試験については、米国ケンタッキー大学応用エネルギー研究センター (The University of Kentucky Center for Applied Energy Research (UK-CAER)) において、同センターが所有する石炭ガス化ガスを用いた試験及びH₂S、CO等の不純物を含有する不純物添加ガスを用いた試験を実施した。

石炭ガス化ガスを用いた実ガス試験に関しては、石炭ガス化炉や周辺設備等に不具合が発生したことに伴い、高圧での試験完了に至らなかったため、UK-CAERとの外注契約を2020年度まで延長し、継続することになった。

一方、今年度から実施した不純物添加ガスを用いた試験においては、約1,000ppmのH₂S濃度での加速試験 (IGCCプロセスでの想定ガスH₂S濃度は10ppm以下) を実施し、2.4MPaにて約3日間の試験期間に、分離性能の低下がほとんど見られないことを確認した。



<測定条件> 85℃, 全圧 2.4 MPa 非透過ガス (≒供給ガス) 組成 :
 不純物添加ガス : CO₂/H₂/N₂/CO/=36/63/0.3/0.7+H₂S, COS ;
 不純物無し : CO₂/H₂=33/67

Q : 膜の単位面積、単位分圧差当りの透過速度 (読み方はパーミアンス)

膜エレメントについては、電源開発(株)若松総合事業所での実ガス試験に向けて、実ガス試験評価ユニットの設計、製作、据付、ガスポンペを用いた試運転を実施した。その後、石炭ガス化ガスを用いた実ガス試験（試験時間：約18時間）を実施し、膜エレメントの分離性能がほとんど低下しないことを確認した。さらに、実ガス試験前後にRITEで実施した模擬ガス試験の結果、実ガス試験後に分離性能がほとんど低下しないことを確認した。

また、7月にさらに長時間の実ガス試験（試験時間：約50時間）を実施し、不純物濃度（硫化水素濃度350ppm）の加速条件において、安定性を確認した。このことから、膜エレメントに対しても短期の耐久性を確認できた。一方、膜のCO₂透過係数 Q_{CO_2} は目標値の50%（湿度条件補正後）であることが判明し、膜エレメント特有の低下要因を解析しており、課題の抽出と対策を実施中である。



外観図

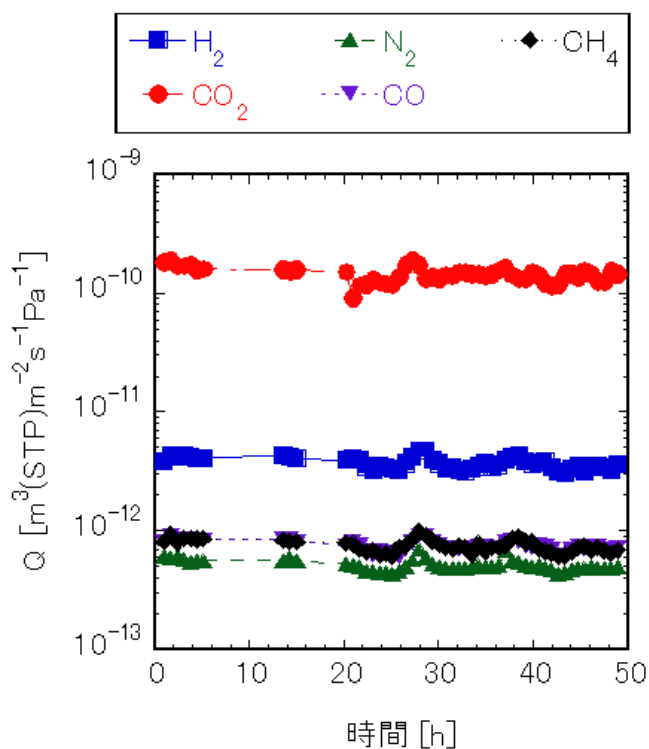


正面図



膜エレメント設置部

膜エレメント実ガス試験設備（電源開発(株)若松総合事業所）



<測定条件> 85℃, 全圧 0.85 MPa

非透過ガス (≒供給ガス) 組成 : H₂/CO₂/N₂/CH₄/CO=10.9/12.0/47.4/0.47/29.2 vol%, H₂S: 約

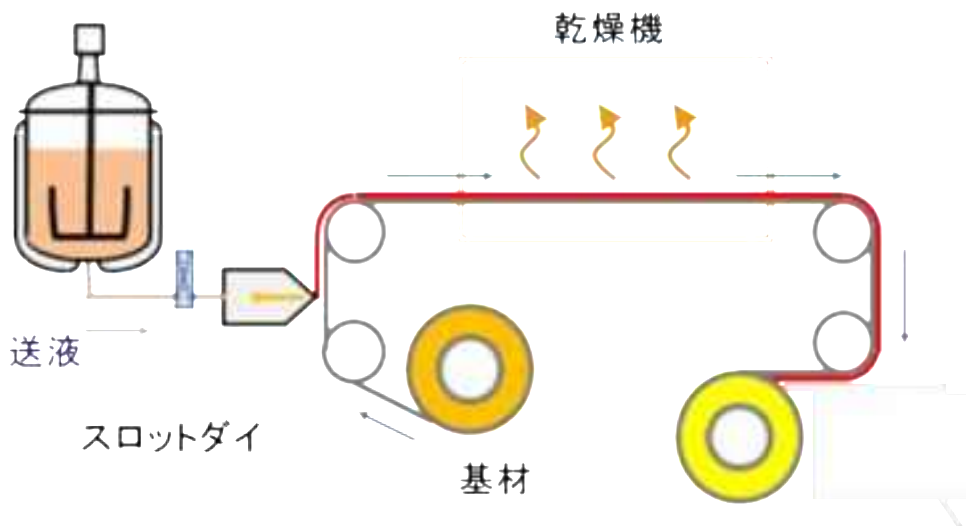
実ガスを用いた膜エレメントでの短期耐久試験結果

成果まとめ

項目	成果	今後の予定	備考
単膜	<ul style="list-style-type: none"> ・加速試験 (硫化水素濃度 1,000ppm) ⇒耐久性低下無し 	連続試験 (～500h) 等による耐不純物性詳細検討	米国の新型コロナウイルス問題収束後に試験再開
膜エレメント	<ul style="list-style-type: none"> ・加速試験 (硫化水素濃度 350ppm) ⇒耐久性低下無し ・Q_{CO2} : 目標値の 50% (湿度条件補正後) 	スケールアップ膜エレメント (外径 5cm⇒10cm) の実ガス試験 (2020/10)	エレメントの性能低下原因を推定。改良検討を実施中。

●膜材料と膜エレメントの最適化

膜素材開発については、膜性能及び耐久性を向上させるための製膜処方を検討し、作製した膜の分離性能評価、分離性能の長期安定性（耐久性）試験、運転条件の変動に対する安定性等について検討した。その結果、製膜処方の改良によって、膜素材の分離性能の耐久性が向上することを見出した。今後、本成果に基づいた改良膜エレメントを製作する予定である。



連続製膜作成の概念図

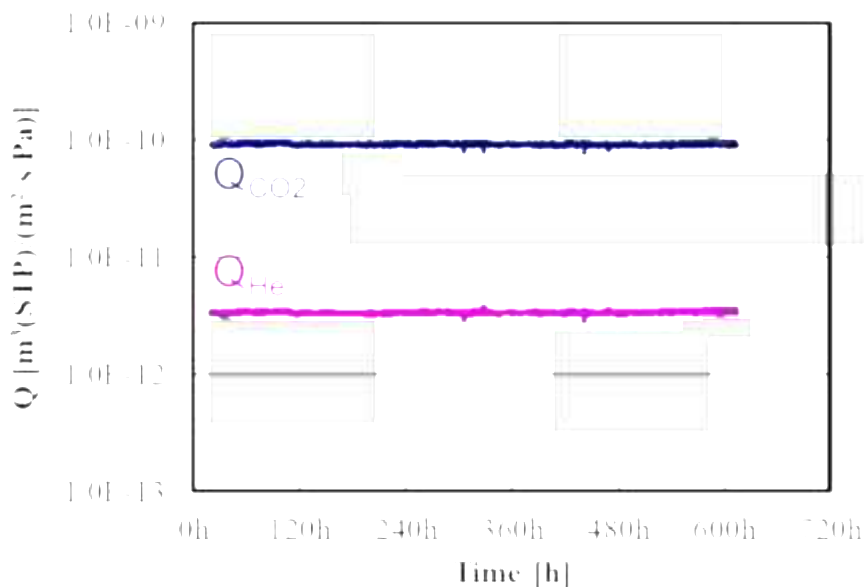


作成した膜エレメント例

膜エレメントの開発については、エレメント部材等の最適化検討及び膜エレメントを用いた製作方法の検討を行い、膜エレメントの仕様を決定した。新たな仕様で製作した膜エレメントは従来よりも分離性能の向上が確認された。これらの知見を元に、電源開発(株)若松総合事業所での実ガス試験用膜エレ

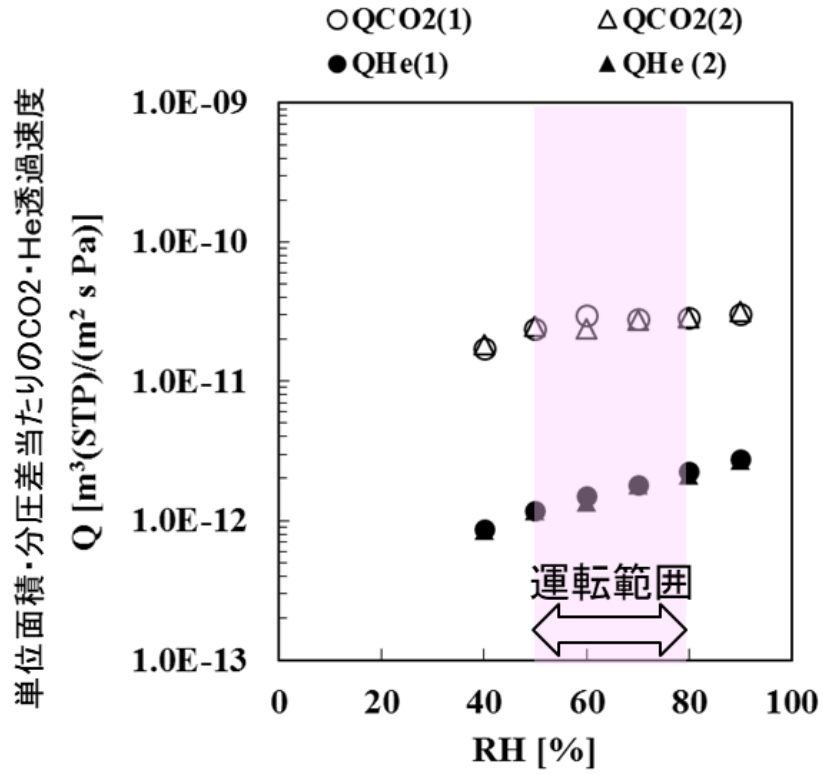
メントの仕様を決定し、膜エレメントを製作した。また、膜エレメントのスケールアップ検討（2インチ⇒4インチ）を進め、新たな仕様に基づく4インチエレメントの製作を行った。

また、2018～2019年度はじめでの開発成果を取り入れた機械的強度向上させた単膜に対して、実運用時の圧力を想定した2.4MPaのHeとCO₂の混合ガスを用いた模擬試験で500時間以上の安定した分離性能を確認した。今後、さらに長期（3000時間以上）の耐久性試験の実施を予定している。



単膜における耐久性確認試験

さらに、過湿状態と分離性能の相関を取得し、実運用上の諸条件を想定した基礎データを蓄積した。その結果、加湿条件 50-80%RH での運転を行うことが望ましいことが判明した。



測定条件： 温度：85℃； 供給側：全圧 2.4MPa, 混合ガス組成 CO₂/He=40/60 vol./vol.,
 湿度： (a) 60RH, (b) 40~90RH； 透過側：大気圧

単膜における加湿条件と分離性能の相関図

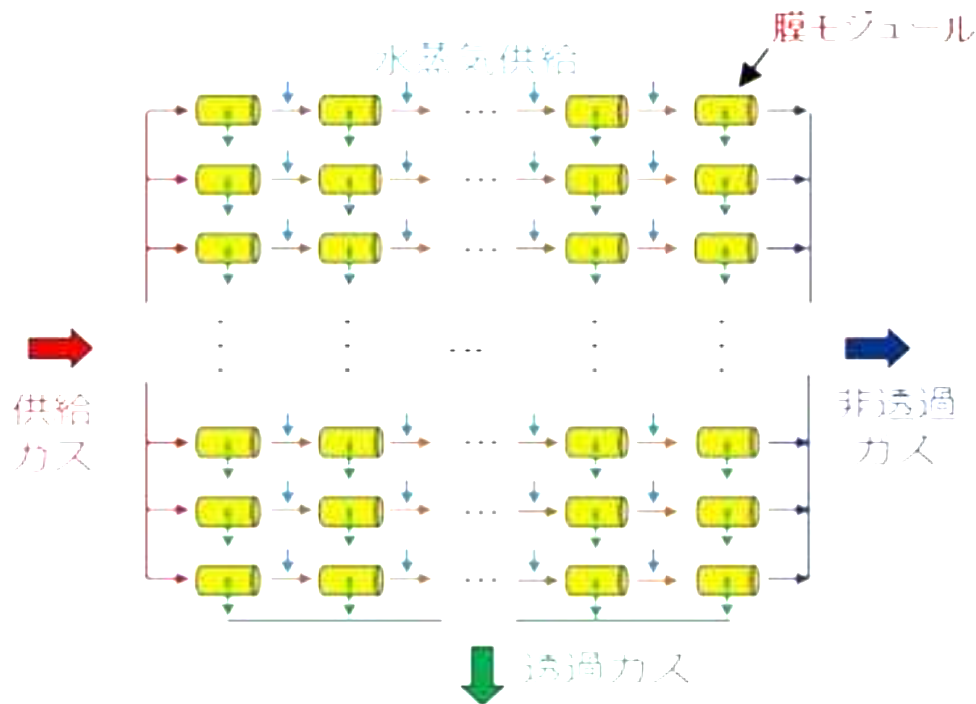
結果まとめ

試験体	技術課題	成果	今後の予定
単膜 (膜素 材)	耐圧性	・機械的強度を改良 ⇒2.4MPa において安定した分離性能と 600 時間の耐久性を発現	
	耐久性	・機械的強度を改良 ⇒2.4MPa において安定した分離性能と 600 時間の耐久性を発現	3000 時間以上の長期 耐久性評価
	湿度依存 性	・湿度 50～80%の範囲で初期の分離性 能を発現	
膜エレメン ト	連続製膜	・大量生産のための連続製膜技術の検討 ⇒製膜処方を決定	
	膜エレメン ト化	・膜エレメント部材改良、基本製法確立 ⇒2.4MPa の耐圧性、短期耐久性を確 認 ・大型化検討 (外径 5cm→10cm) ⇒10cm 膜エレメント試作	・実機サイズ (外径 20cm) 膜エレメ ント仕様検討

● 経済性評価

CO₂ 分離・回収コスト及び CO₂ 分離・回収エネルギーの検討では、実ガス試験における分離性能の経時変化から CO₂ パーミアンスの変化を確認し、CO₂ 分離・回収コスト及び CO₂ 分離回収エネルギーへの影響を確認する。今年度の実ガス試験においては、単膜の実ガス試験（UK-CAER）、膜エレメントの実ガス試験（若松）いずれも試験期間中に分離性能はほとんど低下していないため、実ガス成分によるコスト増加は現時点では確認されていない。2020 年度中に、単膜及び膜エレメントについてより長期の実ガス試験を複数回実施し、取得したデータに基づき分離・回収コスト、エネルギーへの影響を評価する予定である。

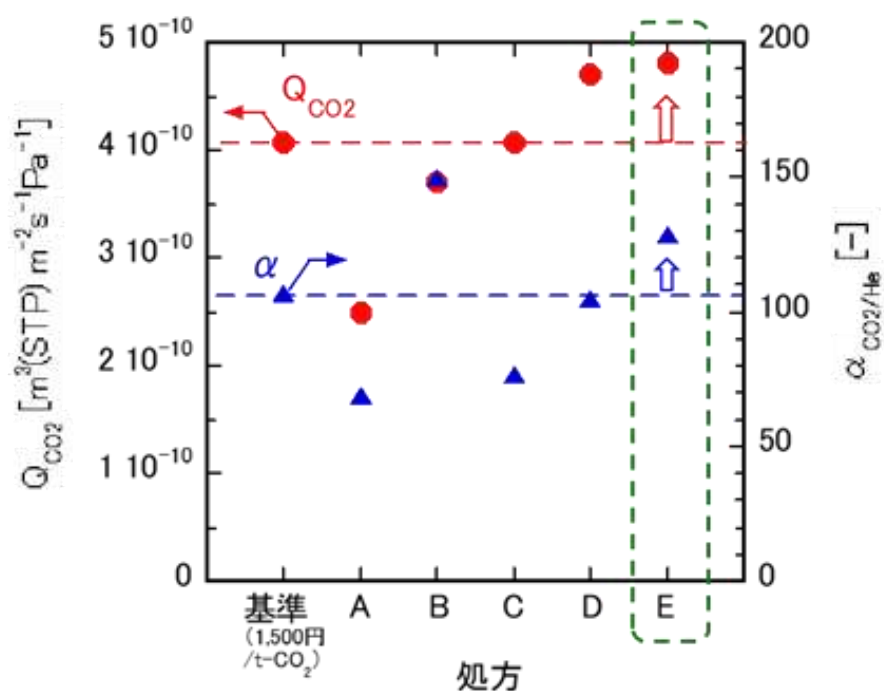
IGCC への膜モジュールシステムの導入が発電効率等に与える影響について把握するために、プラント効率解析を実施するためのシミュレーションソフトを作成した。次年度は、作成したシミュレーションソフトを用いて、膜モジュールシステムの運転パラメータと発電効率の関係について検討し、発電効率の低下を最小にする条件を明らかにする予定である。



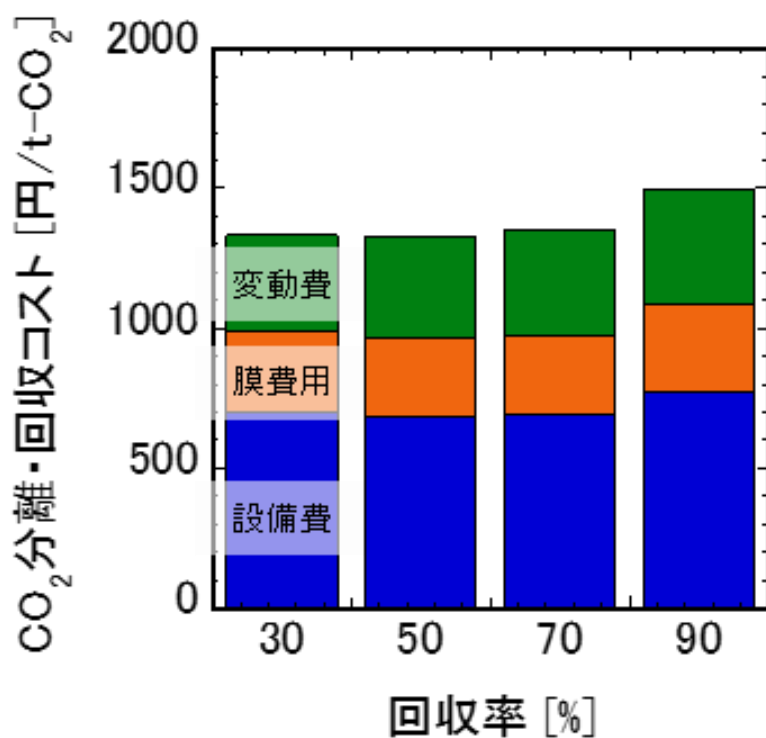
- (前提条件)
- 1) CO₂ 回収量 1,000,000 t/年 (63,000 Nm³/h)
 - 2) CO₂ 回収率 90 %
 - 3) ガス条件 供給側圧力：2.4MPaA；透過側圧力：大気圧
 - 4) 温度 85℃

多段膜モジュールシステム概念図

さらに、膜材料の最適化検討で得た知見をもとに作成した単膜改良品に対してラボレベルでの模擬ガスによる分離性能の向上を行い、以下の通りの性能向上を確認し、コスト目標達成の目処を得た。



また、単膜の分離性能から、必要な多段型膜モジュールシステム設備を想定し、その運用に要する投入エネルギー等の変動費の予測計算を行った。その結果 CO₂ 回収率に対する、CO₂ 分離回収コストの試算を得た。



結果まとめ

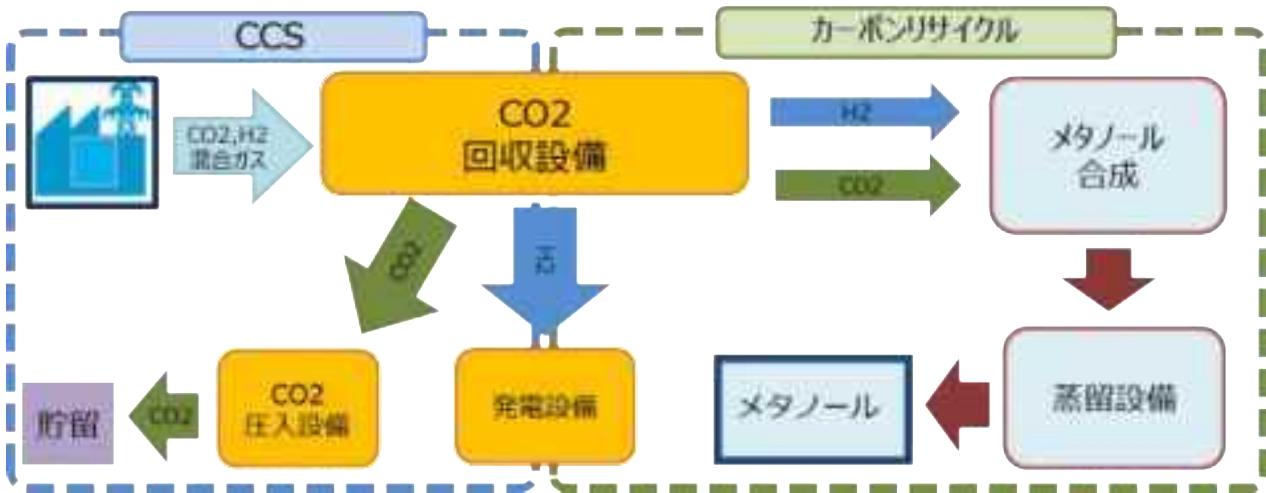
項目	成果	今後の予定
分離・回収コスト、エネルギー試算	<ul style="list-style-type: none"> ・単膜：ラボレベルの模擬ガス試験で目標達成の目処 ・膜エレメント：実ガス分離性能がコスト目標性能の 50%。 ・経済的な膜システム運転条件（回収率等）の検討 	実ガス試験等に基づく膜エレメントのコスト、エネルギー試算
膜システム導入の IGCC 発電効率への影響評価	<ul style="list-style-type: none"> ・シミュレーション：回収率、純度の発電端効率（HHV）への影響試算 	概念設計に反映
概念設計	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計に必要な要素技術の検討、改良提案 	膜システムの概念設計

3. 4. 研究開発項目④CCUS技術に関連する調査

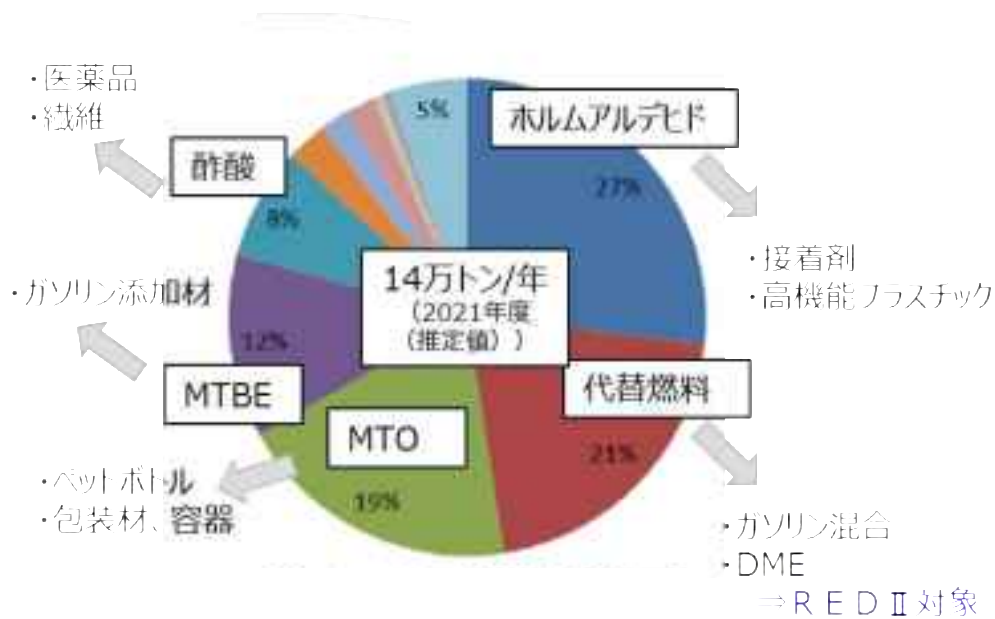
最新の関連技術の収集・解析により、CCUS 技術の国際競争力の強化を図るために必要な基礎的情報を得るとともに、CCUS 技術の開発動向と導入可能性、適応性、課題等を整理を行った。

メタノールは、カーボンリサイクル技術の中でも様々な業界で重要な基礎原料として使用されるため、特定の産業の景気に左右されにくく、安定的な需要が見込まれることより、水素と CO₂ から合成される基幹物質として、最初に立ち上がる分野の一つとして期待されている。

そこで、CCUS 連携運用技術に着手するため、CO₂ からのメタノール合成実証に資する可能性検討および周辺技術調査を行うとともに実証試験を行う場合に必要となる基本設計を実施した。



3 - 1 5 CCUS 連携運用技術の確立に資する可能性検討



出典：経済産業省 質の高いエネルギーインフラシステム海外展開促進事業（2017年2月）

図 3 - 1 6 メタノールの適用例（世界市場）

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

4. 1. 本プロジェクトにおける「実用化」の考え方

実用化とは、CCUS に係る社会的受容性を配慮した上で、各研究開発項目の技術を確立し低コスト化を図ることである。具体的には、地中貯留技術として圧入レート 10 万 t-CO₂/年の実証成果を踏まえ、圧入レート 100 万 t-CO₂/年規模の安全・安心な貯留技術を確立すること、安全貯留管理技術として CO₂ 圧入に係るモニタリング手法を検証、分離・回収技術として所用エネルギーの低減を図り、これらの成果を整理し、CO₂ 排出削減に繋がる技術の見通しを得ることである。

- 温室効果ガス削減目標（2050 年度に温室効果ガスを 2013 年度比 80%削減する目標等）に向けた材料選定や設備実証等により要素技術を完成させる。
- CCUS の社会受容性醸成に向け、安全運用方法の確立とモニタリング等の継続実施、結果公開等のアウトリーチ活動を進める。
- 要素技術開発プロセス、アウトリーチ活動等の進捗管理を行い、開発優先度の調整、開発スケジュールの最適化、技術開発の相互連携を図り、中長期の CCUS 技術開発全体プロセスの最適化・効率化を図る。さらに調査活動等により CO₂ 削減に対する市場ニーズを見極めることで、経済性見通しを確立する。

4. 2. 実用化に向けた戦略

CCUS 技術が地域社会や国民の理解・賛同を得て受け入れられるよう、研究開発および実証を着実に推進して成果を積み上げるとともに、CO₂ 排出削減コストの低減を図る。

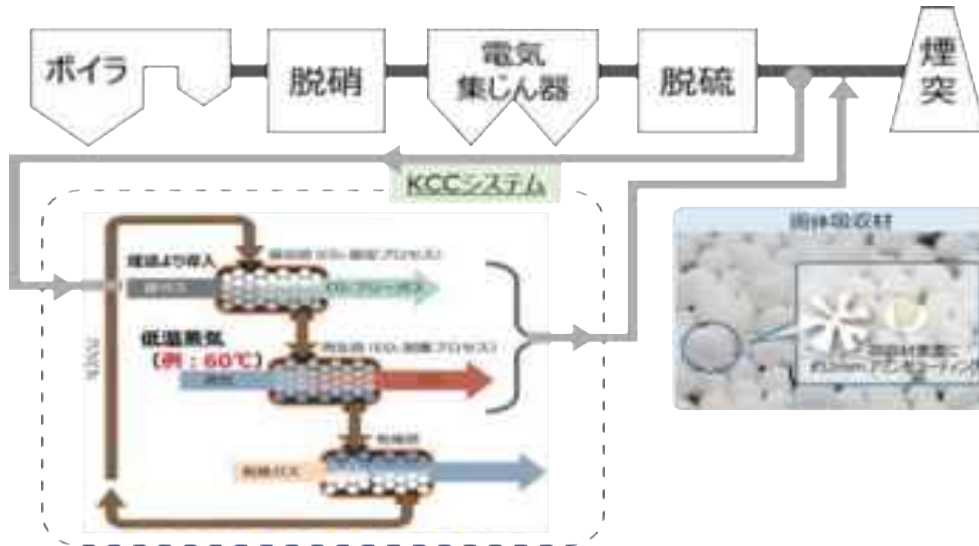
そのため、研究開発を継続して実施するとともに、社会のニーズに応じた技術の信頼性の確保を進め、実用化できる技術から順次導入を図る。

一方、国内外での大規模貯留事業に向け、科学的根拠に基づく CCUS 技術データおよびノウハウを継続的に蓄積し、法整備等含めた国の政策検討に資する情報を的確に提供する。

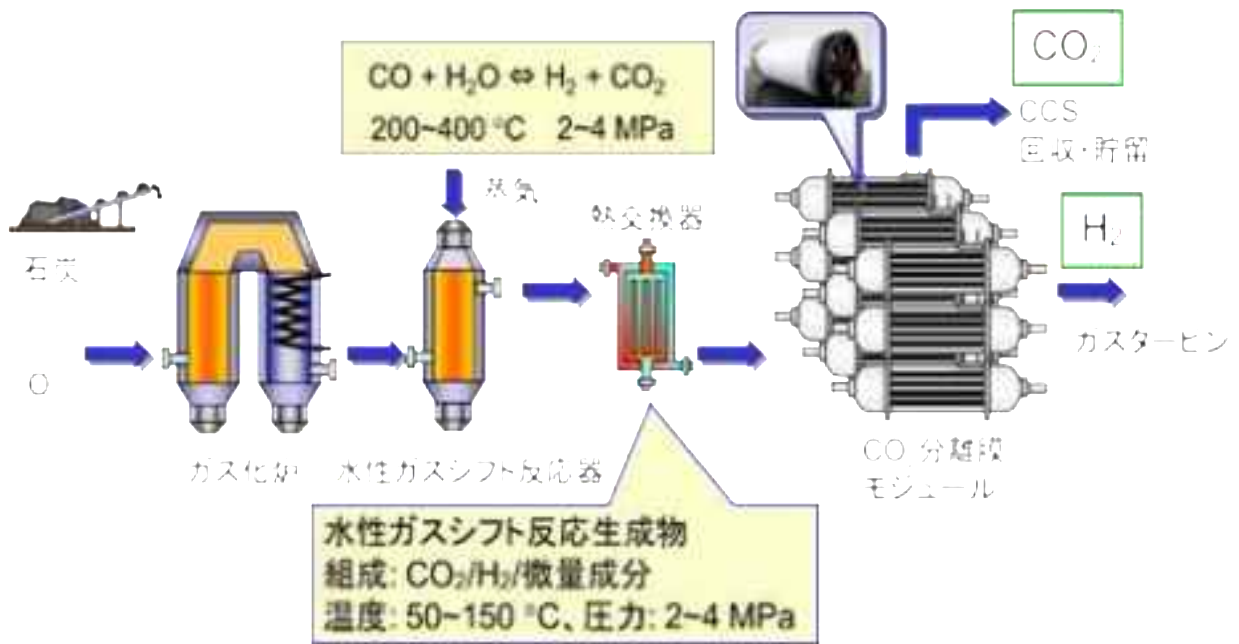
4. 3. 実用化に向けた具体的取組



CO2 輸送手段としての船舶輸送は、日本型 CCS 事業を進める上での重要なオプションとなる。



実用化可能なレベルのコスト削減を目指し、低温化による所要エネルギー削減に加えて、廃熱利用による効率化の可能性を検討。



実用化に必要な連続製膜技術、膜エレメント技術を確立し、実機サイズの膜モジュールを開発することで、実用化を目指す。

「CCUS研究開発・実証関連事業」基本計画

環境部

1. 事業の目的・目標・内容

(1) 事業の目的

① 政策的重要性

2018年7月3日に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、2020年頃のCO₂回収・有効利用・貯留（CCUS）技術の実用化を目指した研究開発、国際機関との連携、CCSの商用化の目途等も考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready導入に向けた検討や、国内における回収・輸送・圧入・貯留の一連のCCSのプロセスの実証と貯留適地調査等を着実に進めるなど、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進めるとしている。また、2015年7月に我が国は、2030年度に温室効果ガスを26%削減し、2050年度に80%削減（いずれも2013年度比）する約束草案を国連気候変動枠組条約事務局に提出しており、COP21において、その着実な実施を表明した。CCS技術の地球温暖化対策への貢献度からも、本事業の重要性は高い。更に、2016年4月策定のエネルギー環境イノベーション戦略においてはCO₂分離・回収コストの低減が技術課題として記載されており、本戦略はCCSのコスト低減にも寄与するものである。

② 我が国の状況

2016年6月に官民協議会で策定した「次世代火力発電に係るロードマップ」においてはCO₂排出量削減のため、2030年度以降を見据えた取組に係る技術に関する方針として、CCSは火力発電からのCO₂排出量をゼロに近づける切り札となり得るもののひとつとされており、長期的な視点で戦略的に技術開発を進めることが適当とされている。

また、2019年6月に経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」においては、CO₂排出量削減の鍵となる取り組みとして、省エネルギー、再生可能エネルギー、CCS、カーボンリサイクルが挙げられている。CO₂を資源として捉えて利用するカーボンリサイクルを実施するにあたっては、CCSの場合と同様に、排ガスなどからCO₂を分離・回収する技術が必要となる。

我が国のCO₂大規模排出源としては、火力発電のほか、鉄鋼業における製鉄

プロセス（高炉法）が挙げられ、これら大規模排出源からのCO₂を削減すべく、CO₂分離・回収に係る技術開発が種々行われているが、CO₂貯留に関しては、特に石油増進回収を伴う実証等について、欧米勢が先行して実施している状況である。

③ 世界の取組状況

2015年にパリで開催された国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において採択された「パリ協定」が発効され、世界的に一層のCO₂の排出削減が必要とされている。このような流れの中、既に米国等ではCCS無しでは石炭火力発電所の新設が事実上不可能なレベルの規制を設けるなど、CO₂排出に対する規制強化の動きがある。また、米国の他、欧州、豪州等においてはいくつかのCCSの実証試験も行われている。

④ 本事業のねらい

「エネルギー基本計画」に基づく2020年頃のCCUSの実用化を目指した研究開発として、本事業では、大規模CO₂排出源からのCO₂を低コストで分離・回収する技術開発を実施し、CO₂大規模貯留実証試験を通じた、貯留を安全に実施するためのモニタリング技術の開発や、関連する技術の調査等を行う。CO₂分離・回収から貯留、有効利用及びその関連技術の調査までを一体的に進めることで、早期の技術確立及び実用化を狙う。

(2) 事業の目標

① アウトプット目標

本事業を通じて、大規模実証試験におけるCO₂の貯留や地中CO₂のモニタリング技術の開発、CO₂分離・回収コストの低減等、CCSの実用化による約束草案の実現に寄与する革新的なCCUS関連技術の確立を目指す。

本事業の開発成果により、2019年度にCO₂分離・回収エネルギー1.5GJ/t-CO₂以下となる固体吸収材・システム、2020年度に同0.5GJ/t-CO₂以下となる分離膜技術を確立するとともに、それらの技術の発電プラントへの適用性について検証を進める。また、苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業においては、年間10万トン規模の貯留実績を達成し、その後のモニタリングによる漏出（海中の化学的性状の測定値を含む各監視データの総合判断からCO₂漏出が認められる状況）回数ゼロを達成する。

研究開発項目毎の目標については、別紙にて定める。

② アウトカム目標

石炭火力発電所の年間総発電量を3,300億kWh（2018年水準）、石炭火力発電所からのCO₂排出量を超々臨界圧火力発電（USC）並の820g-C

O₂/kWhとすると、石炭火力発電所由来のCO₂は年間約2.7億トン、そのうち50%が分離・回収されるとすると、年間約1.35億トンの削減効果が見込まれる（2030年以降、CO₂分離・回収設備が建設され、稼働しているとした場合の試算）。

本事業で開発するCO₂分離・回収技術によってCO₂分離・回収コストを2,000円/t-CO₂とすることで、現状の4,200円/t-CO₂（化学吸収法の場合）に比べてCO₂1トンあたり2,200円の低減となり、石炭火力発電所から排出されるCO₂の50%を分離・回収する場合には約3,000億円のコスト削減効果が見込まれる。

海外展開については、苫小牧等での実証事業、CO₂分離・回収技術の研究開発を経て、CO₂回収・有効利用・貯留（CCUS）技術について市場参入を図る。

③ アウトカム目標達成に向けての取組

温室効果ガス削減目標（2050年度に温室効果ガスを2013年度比80%削減する目標等）に向けた開発状況、またCCUSの社会受容性及びCO₂削減に対する市場ニーズを見極めつつ、各技術開発プロセス、アウトリーチ活動等の進捗管理を行い、開発優先度の調整、開発スケジュールの最適化、技術開発の相互連携を図り、中長期のCCUS技術開発全体プロセスの最適化・効率化を図る。そして、技術開発におけるコスト低減と信頼性の確保により、商用機導入を早期に実現する。

(3) 研究開発の内容

CCUS実用化に向けた、大規模実証試験、安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発、CO₂分離回収技術の研究開発、CCUS技術に関連する調査を実施する。実施に当たっては、各項目の性質に合わせ、委託事業により実施する。なお、個別研究開発項目の内容の詳細については、別紙において記載する。

研究開発項目① 苫小牧におけるCCS大規模実証試験

研究開発項目② 安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発

研究開発項目③ CO₂分離回収技術の研究開発

1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

研究開発項目④ CCUS技術に関連する調査

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本事業は、NEDOが単独又は複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別の研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な部分はこの限りではない。）から、原則公募によって実施者を選定し実施する。ただし、経済産業省からの移管事業に関してはこの限りではない。

NEDOは、プロジェクトの進行全体の企画・管理やプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させるため、プロジェクトマネージャー（以下「PM」という）を任命する。また、各実施者の研究開発ポテンシャルを最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、必要に応じて研究開発責任者（プロジェクトリーダー、以下「PL」という）を指名する。PMは以下のとおり。

NEDO 布川 信

また、PLは以下のとおり。

研究開発項目① 苫小牧におけるCCS大規模実証試験

PL：日本CCS調査株式会社 田中豊

研究開発項目③ CO₂分離回収技術の研究開発

2) 先進的二氧化碳素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

PL：公募後にNEDOにより選定

(2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適切に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

①進捗把握・管理

PMは、PLや研究開発実施者と密接に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

②技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策の分析及び検討を行う。

3. 研究開発の実施期間

本事業の実施期間は、2018年度から2024年度までの7年間とする。なお、研究開発項目①は2009年度から2017年度、研究開発項目②1)、3)は20

16年度から2017年度、研究開発項目③は2015年度から2017年度に経済産業省により実施したが、2018年度からNEDOが実施する。

4. 評価に関する事項

NEDOは、政策的観点から、事業の意義、目標達成度、成果の意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、研究開発項目①、②、③、④について、中間評価を2020年度、2023年度、事後評価を2025年度に実施する。当該事業に係る政策動向や当該事業の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 事業成果の取扱い

①成果の普及

得られた事業成果については、NEDO、実施者とも普及に努める。

②標準化等との連携

得られた事業成果については、標準化機関等との連携を図り、我が国の優れたCCUS技術を普及させるために、標準化への提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

事業成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、海外動向や国際展開を見据えた知財管理を行うとともに、海外における知財の確保を積極的に推進する。

④知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトのうち、研究開発項目②、研究開発項目③1)、研究開発項目③2)は、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

(2) 基本計画の変更

PMは、当該事業の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、事業費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実

施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号ハ、第三号及び第六号イに基づき実施する。

(4) その他

最新の技術動向や政策上の必要性に鑑み、必要に応じた研究開発項目の追加や見直しを行うことがある。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2018年1月、基本計画制定

(2) 2019年1月

2. 研究開発の実施方式にPLを記載。4. 評価に関する事項に係る評価時期の変更。別紙 研究開発項目①の実施期間の延長及び1. 具体的研究内容の追記、延長に伴う事後評価時期の変更、中間目標及び中間評価の追加。研究開発スケジュールの更新。

(3) 2019年9月

別紙・研究開発項目④のCCSにCO₂有効利用の考え方を追加しCCUSに変更。研究開発項目③2)の実施期間の延長、延長に伴い事後評価を前倒し事後評価に変更。研究開発スケジュールの更新。和暦を西暦に変更。

(4) 2020年2月

1. 事業の目的・目標・内容の(3)研究開発の内容に2)先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究を追記、2)二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発を3)に変更。事業に係る諸状況などを追記修正。別紙の研究開発項目③に先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究を追加。研究開発項目④の実施期間の延長。

(5) 2020年5月

2. 研究開発の実施方式の(1)研究開発の実施体制に研究開発項目③CO₂分離回収技術の研究開発のPLについて追記。4. 評価に関する事項を修正。5. その他の重要事項の(3)根拠法を誤記修正。研究開発スケジュールの更新。

研究開発項目① 苫小牧におけるCCS大規模実証試験

[実施期間] 2018年度～2022年度

1. 具体的研究内容

製油所から排出されるガスからCO₂（年間約10万トン規模）を分離・回収し、地中（地下1,000m以深）に貯留するCCS実証試験を行う。試験では、（1）年間約10万トン規模でのCO₂分離・回収設備の運転、（2）年間約10万トン規模でのCO₂圧入、貯留を2019年度まで実施するとともに、（3）貯留したCO₂のモニタリングを主として実施する。

また、貯留後のCO₂挙動評価のための貯留層等総合評価、海洋汚染防止法に基づく海洋環境調査、CCSに関する法規制・他プロジェクトの動向調査、国内における社会的受容性の醸成に向けた情報発信活動、海外への情報発信ならびに情報収集、社外有識者による技術指導、将来計画の検討・準備等を実施する。

加えて、CCS実証試験設備の運転結果を踏まえ、（4）設備の長期運用における劣化状況の分析、調査を行い、CCSに係るプラント設計に反映すべき知見を得る。

2. 達成目標

（1）年間約10万トン規模でのCO₂分離・回収設備の運転

[最終目標] 2019年度

圧入期間中（～2019年度）、分離・回収したCO₂の濃度を99%以上とする。

（2）年間約10万トン規模でのCO₂圧入、貯留試験

[最終目標] 2019年度

圧入期間中（～2019年度）、貯留層に年間10万トン規模のCO₂を圧入する。

（3）貯留したCO₂のモニタリング

[中間目標] 2020年度

CO₂圧入作業を終了し、CO₂の漏出（海中の化学的性状の測定値を含む各監視データの総合判断からCO₂漏出が認められる状況）回数をゼロとする。

[最終目標] 2022年度

圧入期間中（～2019年度）貯留層に圧入したCO₂の漏出（海中の化学的性状の測定値を含む各監視データの総合判断からCO₂漏出が認められる状況）回数をゼロとする。

（4）設備の信頼性検討

[最終目標] 2022年度

プラント運転期間中の設備劣化状況を評価して、CCS実用化の際のプラント設計に資する知見として纏める。

研究開発項目② 安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発
[実施期間] 2018年度～2020年度

1. 具体的研究内容

CO₂回収・貯留（CCS）技術の2020年頃の実用化に向け、大規模レベルでのCO₂貯留の安全な実施に必要な技術の実用化研究を実施する。具体的には、①大規模CO₂圧入・貯留に係る安全管理技術の開発（圧入安全管理システム、CO₂の長期モニタリング技術、大規模貯留層を対象とした地質モデリング技術など）、②大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発（CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術、CO₂溶解促進技術など）、③CCS普及条件の整備、基準の整備（CO₂貯留安全性管理プロトコル（IRP）の整備、苫小牧実証データの提供による技術事例集の完成、海外機関との連携、社会的受容性の向上、国際標準化との整合など）を実施する。また、本事業で開発した技術・手法は、CCS実証サイトにて活用あるいはフィードバックすることで、その有効性を検証する。

2. 達成目標

[中間目標] 2018年度（経済産業省により実施していた際の目標）

2019年度以降実証サイトに適用する技術の開発を行う。

[最終目標] 2020年度

2020年度末までに、開発した安全評価技術・手法をCCS実証サイトで活用あるいはフィードバックすることを目指す。実用化レベルを想定したCO₂貯留・モニタリング等のCCS関連技術・手法の開発を進めることで、CCSの安全な実施に資する。

研究開発項目③ CO₂分離回収技術の研究開発

1. 具体的研究内容

本事業では、CO₂の分離・回収コストを大幅に削減するために以下の実用化研究を実施する。

1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

[実施期間] 2018年度～2019年度

CO₂の分離・回収技術の一つである化学吸収法のうち、高効率な回収が可能な「アミンを固体に担持した固体吸収材」について、燃焼排ガスを対象としたプラント試験設備を用いた実用化研究を行う。

2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

[実施期間] 2020年度～2024年度

固体吸収材によるCO₂分離・回収技術について、石炭火力発電所などの実燃焼排ガスを対象としたスケールアップ試験を行い、石炭燃焼排ガスへの適用性を研究する。

3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

[実施期間] 2018年度～2020年度

石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからCO₂を分離・回収するのに有効な分離膜技術について、実ガスを用いた実用化研究を行う。

2. 達成目標

1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

[最終目標] 2019年度

CO₂分離・回収エネルギーを1.5 GJ/t-CO₂を達成する固体吸収材・システムを開発する。

2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

[最終目標] 2024年度

火力発電所などの燃焼排ガスなどからCO₂を分離・回収する固体吸収法について、実燃焼排ガスからのCO₂分離回収連続運転を実施し、パイロットスケール設備においてCO₂分離回収エネルギー1.5 GJ/t-CO₂の目途を得る。

3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

[最終目標] 2020年度

石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからのCO₂分離・回収エネルギーについて、実用化段階（数百万t-CO₂/年規模を想定）で回収エネルギー0.5GJ/t-CO₂以下を達成する分離膜技術を開発する。

研究開発項目④ CCUS技術に関連する調査

[実施期間] 2018年度～2024年度

1. 具体的研究内容

CCUS技術に関し、最新技術動向調査、最新技術のコスト検討や市場参入へ向けた国内外動向の調査等を実施する。また、GCCSI (Global CCS Institute) 等に参画し、技術情報交換・各種技術情報収集を行うとともに、国内関係者への情報提供を行う。

2. 達成目標

[最終目標] 2024年度

最新の関連技術の収集・解析により、CCUS技術の国際競争力の強化を図るために必要な基礎的情報を得るとともに、実用化に向けたCCUS技術の開発動向と導入可能性、適応性、課題等を整理する。

研究開発スケジュール

◇中間評価 ◆事後評価

年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
評価													◇			◇		◆
研究開発項目① 苫小牧におけるCCS大規模実証試験								*			*							
研究開発項目② 安全なCCS実施のためのCO ₂ 貯留技術の研究開発											*							
研究開発項目③ CO ₂ 分離回収技術の研究開発																		
1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発										*								
2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究																		
3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発										*								
研究開発項目④ CCUS技術に関する調査																		

* METIにて中間評価を実施

① 苫小牧における CCS 大規模実証試験

● 新聞・雑誌リスト（一部抜粋）

掲載日	新聞	記事タイトル
2018年04月06日	読売新聞（全国版）	CO ₂ 埋没3か所程度に21年めど選定 日本海沖など調査
2018年04月18日	苫小牧民報	高橋知事5選出馬へ含み 後援会主催の集いで道政報告
2018年04月27日	北海道新聞	CCS実証試験 NEDOに移行
2018年04月27日	苫小牧民報	事業主体 NEDOに移行 苫小牧沖 CCS実証試験
2018年04月27日	北海道建設新聞	事業の委託元を NEDOに変更 日本 CCS 調査
2018年05月18日	苫小牧民報	海底下への圧入期間延長を検討へ 地元と相談
2019年04月29日	日本経済新聞	CO ₂ 海底貯留 商用へ前進
2019年06月03日	下野新聞	特集：気候変貌 排ガス回収 地層近くへ CO ₂ 地下貯留
2019年06月06日	北海道新聞	CCS実証試験「技術確立へ大きく前進」苫小牧で事業化焦点
2019年06月06日	北海道新聞	苫小牧沖CO ₂ 封じ込め試験10月にも目標達成
2019年06月06日	苫小牧民報	日本CCS調査 実証試験を延長 目標の30万トンを目指す
2019年06月07日	電力時事通信	日本CCS G20関連イベントで苫小牧実証見学会
掲載日	雑誌	記事タイトル
2018年08月08日	日経 ESG 9月号	CO ₂ を地下1000mに封じ込め
2019年02月28日	週刊新潮 3月7日号	北海道地震は人災と断言 鳩山由紀夫の科学的センス
2019年03月15日	地球温暖化 3月号	スペシャルインタビュー COP24で実感した日本の質の高さ

● 学会誌等への寄稿（国内）

掲載日		記事タイトル
2018年07月	(一社)燃料電池開発センター 機関紙『燃料電池』夏号	二酸化炭素回収・貯留（CCS）と苫小牧 CCS 実証試験について
2018年11月	日本工業出版(株) 『月刊 配管技術』11月号	苫小牧における大規模 CCS 実証試験
2019年02月	(一社)日本機械学会 学会誌「日本機械学会誌」	苫小牧における CO ₂ 分離・回収／貯留大規模実証事業の現況と適地調査事業の技術的考察
2019年02月	(一社)産業環境管理協会 機関紙「環境管理」	世界の大規模 CCS プロジェクト動向と苫小牧における CCS 大規模実証試験事業の現況
2019年03月	石油鉱業連盟 機関紙「石油開発時報」	CCS 関連動向と苫小牧 CCS 大規模実証試験の現況
2019年04月	(一社)日本応用地質学会 学会誌「応用地質」	苫小牧における大規模 CCS 実証試験
2019年05月	(一社)エネルギー・資源学会 学会誌「エネルギー・資源」	苫小牧における CCS 大規模実証試験事業の現況について
2019年10月	電気硝子工業会 『電気ガラス・61号』	日本初のCO ₂ 削減技術 ～苫小牧における CCS 大規模実証試験の現況～

●海外への情報発信ならびに情報収集（出典）（国際）

日付	イベント	実施内容
2018年6月	JAPAN CCS Forum	GCCSI 主催、本事業視察ツアーを実施。
2018年10月	GHGT14（豪州メルボルン）	出展、発表(3件)
2018年12月	COP24 日本パビリオン	CCS セミナーを METI と共催
2019年5月	World Coal Association 東京会合	web サイトにて、事業紹介
2019年6月	軽井沢 G20	事業紹介
2019年9月	カーボンリサイクル産官学国際会議	事業紹介
2019年12月	COP25（スペイン・マドリッド、日本パビリオン）	CCS セミナー主催、ブース出展
2020年1月	World Future Energy Summit 2020	事業紹介
2018年6月	JAPAN CCS Forum	GCCSI 主催、本事業視察ツアーを実施。
2018年10月	GHGT14（豪州メルボルン）	出展、発表(3件)
2018年12月	COP24 日本パビリオン	CCS セミナーを METI と共催
2019年5月	World Coal Association 東京会合	web サイトにて、事業紹介
2019年6月	軽井沢 G20	事業紹介
2019年9月	カーボンリサイクル産官学国際会議	事業紹介
2019年12月	COP25（スペイン・マドリッド、日本パビリオン）	CCS セミナー主催、ブース出展
2020年1月	World Future Energy Summit 2020	事業紹介
2020年6月	ACEF2020, Deep Dive Workshop on CCUS	webinar による事業概要発表
2021年3月	GHGT15 で事業総括、プラント、貯留、広報に関する口頭発表 4 件実施、出展予定 CSLF テクニカルミーティングにおいて、事業紹介予定	
2021年11月	COP26（英国グラスゴー）	出展、CCS セミナー開催予定

②安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発

●新聞・雑誌リスト

掲載日	新聞	記事タイトル
2018年 1月17日	電気新聞	CCS テクニカルワークショップ 2019 開催について掲載
2019年 12月 5日	化学工業日報	CCS テクニカルワークショップ 2019 開催について掲載
2020年 1月23日	電波新聞	CCS テクニカルワークショップ 2019 開催について掲載
2020年 1月24日	電気新聞	CCS テクニカルワークショップ 2019 開催について掲載
2020年 3月15日	ガスレビュー	CCS テクニカルワークショップ 2019 開催について掲載

③CO2 分離・回収技術の研究開発

●特許リスト

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	公益財団法人地球環境産業技術研究機構、川崎重工業株式会社	特願 2018-204311	国内	2018/10/30	公開	二酸化炭素分離回収システム及び方法	山本 信 他
2	川崎重工業株式会社	特願 2018-204321	国内	2018/10/30	公開	二酸化炭素分離回収システム及び方法	西部 祥平 他
3	公益財団法人地球環境産業技術研究機構、川崎重工業株式会社	PCT/JP2019/042335	PCT	2019/10/29	公開	二酸化炭素分離回収システム及び方法	山本 信 他
4	川崎重工業株式会社	PCT/JP2019/042336	PCT	2019/10/29	公開	二酸化炭素分離回収システム及び方法	西部 祥平 他

(Patent Cooperation Treaty: 特許協力条約)

●論文リスト

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Quyen T. Vu	RITE	Exploring the Role of Imidazoles in Amine-Impregnated Mesoporous Silica for CO2 Capture	Ind. Eng. Chem. Res., 57 (2018) 2638-2644	有	2018/2/2
2	吉澤克浩	KHI	低温排熱利用による省エネ型 CO2 分離回収システム (KCC: Kawasaki CO2 Capture)	エネルギー・資源 39 (2018) 1-4	無	2018/9/10
3	沼口遼平	KHI	アミン含浸固体吸収材を用いた CO2 回収技術の開発	Adsorption News 32(4) (2019) 5-9	無	2019/1/31
4	Quyen T. Vu	RITE	Oxidative Degradation of Tetraethylenepentamine-Impregnated Silica Sorbents for CO2 Capture	Energy Fuels, 33 (2019) 3370-3379	有	2019/3/6

5	Quyen T. Vu	RITE	Inhibitors of Oxidative Degradation of Polyamine-Modified Silica Sorbents for CO2 Capture	Ind. Eng. Chem. Res. 58 (2019) 34, 15598-15605	有	2019/8/5
6	Junpei Fujiki	東京農工大学	Water Adsorption on Nitrogen-Doped Carbons for Adsorption Heat Pump/Desiccant Cooling: Experimental and Density Functional Theory Calculation Studies	Applied Surface Science, 492 (2019) 776-784	有	2019/10/30
7	Hidetaka Yamada	RITE	Enhancement Mechanism of the CO2 Adsorption-Desorption Efficiency of Silica-Supported Tetraethylenepentamine by Chemical Modification of Amino Groups	ACS Sustainable Chem. Eng., 7 (2019) 9062-9726	有	2019/4/29
8	山田秀尚	RITE	固体吸収材による省エネルギー CO2 回収	高分子 68 (2019) 222-223	有	2019/5
9	余語克則	RITE	固体吸収材を用いた省エネルギー型 CO2 回収技術の開発	ゼオライト 37 (2020) 47-58	有	2020

●外部発表リスト

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	奥村 雄志	KHI	固体吸収材を用いた CO2 回収技術の実用化に向けて	CCT ワークショップ 2018	2018/6/21
2	山本信	RITE	ポリアミン担持固体吸収材による CO2 分離回収技術の開発	化学工学会第 50 回 秋季大会	2018/9/18-19
3	山田秀尚	RITE	先進的 CO2 分離回収技術の研究開発	化学工学会第 50 回 秋季大会	2018/9/18-19
4	西部 祥平	KHI	低温廃熱を利用した固体吸収材による CO2 分離回収システムの開発	機械学会関西支部秋季フォーラム	2018/10/20
5	Hidetaka Yamada	RITE	Advanced Post-combustion CO2 Capture System Using Novel Polyamine-Based Solid Sorbents	14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies	2018/10/21-26

6	Takeshi Okumura	KHI	Demonstration Plant of the Kawasaki CO ₂ Capture (KCC) System with Solid Sorbent for Coal-fired Power Stations	14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies	2018/10/21-26
7	余語克則	RITE	「CCS 研究開発・実証関連事業/CO ₂ 分離回収技術の研究開発/先進的二氧化碳素固体吸収材実用化研究開発」について	グローバル CCS インステテュート第 25 回勉強会	2018/11/6
8	吉澤 克浩	KHI	低温排熱利用による省エネ型 CO ₂ 分離回収システム (KCC) の開発	化学工学会 中国四国支部 中国地区化学工学懇話会	2018/11/16
9	沼口 遼平	KHI	低温排熱利用による 省エネ型 CO ₂ 分離回収システムの開発	機械学会関西支部専門部会	2019/1/31
10	Junpei Fujiki	東京農工大学	Experimental and DFT Calculation Studies on Water Vapor Adsorption on Nitrogen-Doped Carbons	13th International Conference on Fundamentals of Adsorption	2019/5/26-31
11	Kazuya Goto	RITE	RITE Solid Sorbent for Energy-Saving CO ₂ Captur	CEM10/MI-4 Innovation Showcase	2019/5/28-29
12	Shin Yamamoto	RITE	CO ₂ Separation and Capture System with Polyamine-Supported Solid Absorbent	5th Post Combustion Capture Conference	2019/9/17-19
13	Shohei Nishibe	KHI	Development of CO ₂ Capture Technology with Solid Sorbent Utilizing Low-Temperature Steam: Progress in Bench-Scale Demonstration	5th Post Combustion Capture Conference	2019/9/17-19
14	沼口 遼平	KHI	Kawasaki CO ₂ Capture: an energy-saving capture system using amine solid sorbent	5th Post Combustion Capture Conference	2019/9/17
15	Quyen T. Vu	RITE	Oxidative Degradation of Polyamine-Containing CO ₂ Adsorbents	5th Post Combustion Capture Conference	2019/9/17-19

16	Katsuhiro Yoshizawa	KHI	Development of KCC (Kawasaki CO2 Capture) System with Solid Sorbent Utilizing Waste Heat	I2CNER International Workshop	2020/1/31
17	余語克則	RITE	二酸化炭素の分離・回収技術開発の動向と RITE の研究開発	日本機械工業連合会 第 101 回環境配慮事例研究会	2019/5/14
18	余語克則	RITE	先進的 二酸化炭素 固体吸収材 実用化 研究開発の進捗について	革新的 CO2 分離回収 技術シンポジウム	2020/1/20

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	RITE	未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西	化学工業日報, p.7	2018/7/20
2	RITE	RITE 温暖化対策技術 研究成果を報告 9月、大阪でシンポ	電気新聞, p.5	2018/8/29
3	RITE	温暖化対策技術進歩	読売新聞, p.19	2018/9/7
4	RITE	RITE が革新的環境技術シンポジウム 開催／ 19日に東大で	鉄鋼新聞, p.6	2018/12/6
5	RITE	革新的環境技術でシンポ 長期低排出発展戦略を議論 RITE、都内で 19日 から	日刊工業新聞, p.6	2018/12/14
6	RITE	RITE 2度目標実現 道探る 都内でシンポ 技術革新成果を発信	電気新聞, p.2	2018/12/20
7	RITE	RITE 「革新的環境技術シンポジウム 2018」開催 過去最多の参加者を動員	ガスレビュー	2019/2/1
8	RITE	省エネ CCS 開発前進 川重、日量 5.5 トン回収 独自移動層システム改良	化学工業日報, p.13	2019/2/28
9	RITE	RITE 温暖化対策技術でシンポ 国際的取り組みなど報告	化学工業日報, p.3	2019/9/30
10	RITE	温室ガス削減 投資環境整備が必須 RITE、都内でシンポ	電気新聞, p.2	2019/12/19
11	RITE	CO2 削減する革新技術	化学工業日報, p.10	2019/12/20

		RITE、東大でシンポ		
12	RITE	(Disruption 断絶の先に) 第 10 部 地球に生き続ける (2) CO2 から資源「厄介者」の変身	日本経済新聞, p.11	2020/1/15
13	RITE	RITE、CO2 分離・回収シンポ 実質ゼロ貢献 意義発信	電気新聞, p.2	2020/1/21
14	RITE	二酸化炭素を効率的に分離・回収 東京大学でシンポ	電波新聞, Web 独自 版	2020/1/21
15	RITE	温暖化対策で CCUS 技術に注目 シンポやワークショップ相次ぐ	電波新聞, Web 独自 版	2020/1/23

(c)その他 (受賞)

番号	受賞者 (所属)	タイトル	学会名	発表年月
1	吉澤 克浩 (KHI) 奥村 雄志 (KHI) 長谷川 祐介 (KHI) 余語 克則 (RITE) 山田 秀尚 (RITE)	低温排熱利用による省エネ型 CO2 分離回収システム (KCC : Kawasaki CO2 Capture)	エネルギー資源学会・ 第 7 回学会賞	2018/6/11

(d)その他 (展示会)

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	RITE	R I T EにおけるC C S研究開発の概要	Japan CCS フォーラム 2018	2018/6/18
2	RITE	RITE Solid Sorbent for Energy-Saving CO2 Captur	Clean Energy Ministerial 10 / Mission Innovation 4 (CEM10/MI-4) Innovation Showcase	2019/5/27-29
3	RITE	R I T EにおけるC C S研究開発の概要	Japan CCS フォーラム 2019	2019/6/12
4	RITE	RITE における CO2 分離・回収技術の研究開発 (固体吸収材、分子ゲート膜)	カーボンリサイクル産学 官国際会議	2019/9/25
5	RITE	「NEDO の CCUS に係る取組について」 - CO2 分離回収技術 -	気候変動・災害対策 Biz 2019	2019/12/6
6	RITE	RITE における CO2 分離・回収技術の研究開発 (固体吸収材、分子ゲート)	WFES2020 (World Future Energy	2020/1/13-16

		膜) ※日本パビリオンの CO2 分離・ 回収のブースにて技術紹介を実施	Summit) Japan パビ リオン	
--	--	---	-------------------------	--

④ C C U S 技術に関連する調査

●新聞・雑誌リスト

掲載日	新聞	記事タイトル
2020 年度 4 月 1 日	電気新聞	
2020 年度 4 月 1 日	化学工業日報	
2020 年度 4 月 1 日	Power Insider Asia	
2020 年度 4 月 6 日	日刊工業新聞	
2020 年度 6 月 8 日	経団連「チャレンジ・ゼロ」	

●研究発表・講演等リスト

掲載日	イベント	実施内容
2020 年度 6 月 19 日	ACEF (Asia Clean Energy Forum)	事業内容紹介

**苫小牧における C C S 大規模実証試験
30 万トン圧入時点報告書
（「総括報告書」）**

2020年5月

**経済産業省
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
日本 C C S 調査株式会社**

目次

はじめに	1
第1章 苫小牧における CCS 大規模実証試験の目的および結果概要	3
1.1 本事業の目的	4
1.2 本事業の全体概要	4
1.3 本事業の概要	7
1.4 結果概要	15
添付資料1 「課題検討会」有識者委員名簿	17
添付資料2 「NEDO 技術検討委員会」委員名簿	18
第2章 CO ₂ 分離・回収／圧入設備	19
2.1 分離・回収／圧入設備の建設	19
2.2 分離・回収／圧入設備の実証	24
2.3 分離・回収エネルギー消費量	32
2.4 CO ₂ 分離・回収／圧入設備の実証結果まとめ	38
2.5 実用化モデルの CCS コスト試算	39
第3章 圧入井および CO ₂ 圧入・貯留の実施と結果	51
3.1 概要	51
3.2 圧入井	51
3.3 貯留層評価	54
3.4 結果のまとめ	78
第4章 モニタリングおよび海洋環境調査の実施と結果	81
4.1 概要	81
4.2 モニタリング結果	82
4.3 海洋環境調査結果	102
4.4 モニタリングおよび海洋環境調査実施時のトラブル	113
4.5 結果のまとめ	115
第5章 社会的受容性の醸成活動	117
5.1 CCS に対する社会的受容性の醸成活動の目的・意義	117
5.2 国内に向けた情報発信活動	118
5.3 海外に向けた情報発信活動	129
5.4 有事における情報発信活動の実績	146
5.5 地元ステークホルダーとのコミュニケーションの実績と検証	148
5.6 社会的受容性の醸成活動の総括	169

第6章 法規制対応	173
6.1 本事業に係る対応	173
6.2 各国法令・動向調査	175
6.3 制度上の課題	186
6.4 法規制対応の総括	187
第7章 得られた知見と残された課題	189
7.1 本事業を通じて得た知見	189
7.2 CCS を実用化するにあたり残された課題および今後の CCS 事業に向けた検討	196
おわりに	203

はじめに

日本は、最終到達点として「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現していくことを目指している。また、これまでの延長線上にない非連続なイノベーションを通じて環境と成長の好循環を実現し、温室効果ガスの国内での大幅削減を目指すとともに、世界全体の排出削減に最大限貢献し、経済成長を実現することとしている。

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) は、CO₂を大量回収・貯留する抜本的な方策として、IEA (国際エネルギー機関) 報告書において、2060年までの世界のCO₂削減量の14%をCCSが担うことが期待されるなど、気候変動問題の解決に向けて、国内外でその技術の実用化と社会導入が期待される技術である。2019年日本が議長を務めたG20において、その重要性を合意した「非連続なイノベーション」を先導する日本に対しては、この分野においても、技術開発および社会導入に向けた方策を示していくことについて、期待される役割は大きなものがある。

経済産業省は、北海道苫小牧市の海底下をCO₂の貯留地点とし、その沿岸部に地上設備(CO₂の分離・回収/圧入設備)および圧入井等を設置したCCS実証試験を行うべく、2012年度から準備を開始し、2016年4月より、年間10万t規模のCO₂圧入を開始した。世界的には、年間100万t規模の大規模CCSが進みつつある中において、大都市近郊において、地上から海底下にCO₂を圧入するCCSは世界的にも初めての試みであり、この実証の成果は、国内外のCCS導入に大きな影響を与えうるものとして、国際的に注目が高い。このため、本事業を通じて得られた経験やデータ等を広く共有することは、今後の国内外のCCS発展にとって非常に有意義である。

2019年11月22日、本事業では、目標としていた累計CO₂圧入量30万tを達成した。この節目にあって、これまで得られた経験や成果を総括し、報告書としてまとめるものがある。

第1章 苫小牧における CCS 大規模実証試験の目的および結果概要

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) は、火力発電所や工場等で発生する二酸化炭素 (CO₂) を大気中に排出せずに回収し、地中へ貯留する技術であり、再生可能エネルギーの利用拡大やエネルギー利用の効率化等とともに地球温暖化対策の一つとして世界的に期待されている。

経済産業省、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」と称する。）および日本 CCS 調査株式会社（以下、「JCCS」と称する。）の3者（以下、「3者」と称する。）は、2012年度から2020年度の9年間にわたって、苫小牧における CCS 大規模実証試験に係る下記の事業（以下、「本事業」と称する。）を実施している。

- 1) 経済産業省「平成24年度二酸化炭素削減技術実証試験事業（国庫債務負担行為に係るもの）」（2012年度～2015年度）
- 2) 経済産業省「平成28年度二酸化炭素削減技術実証試験事業」（2016年度）
- 3) 経済産業省「平成29年度苫小牧における CCS 大規模実証試験事業」（2017年度）
- 4) NEDO「CCS 研究開発／苫小牧における CCS 大規模実証試験」（2018年度～2020年度）

JCCS は、2012年度から2015年度の4年間にわたって上記1)の事業を受託し、設備の設計・建設・坑井掘削等の CCS 実証試験の準備を実施した。その後、2016年度から2017年度にかけて上記2)および3)の事業を受託し、CCS 実証試験を実施した。その事業を引き継いで2018年度から開始された4)の事業を2018年4月から2020年度末までの3年間にわたって受託し、CCS 実証試験を継続実施している。

2016年4月より、年間10万t規模のCO₂圧入を開始し、2019年11月22日に目標としていた累計CO₂圧入量30万tを達成した。本報告書は、2012年度から苫小牧において開始された本事業の累計CO₂圧入量30万t達成時点までの成果および本事業を通じて得られた課題や今後の取組への方向性等をとりまとめたものである。

なお、本事業を遂行するにあたり、機械工学、化学工学、地質学、地球物理学等の有識者から成る「苫小牧 CCS 実証試験に係わる課題検討会」（以下、「課題検討会」と称する。）を設置して、事業推進の一助としてきた（本章添付資料1参照）。また、2020年1月31日にはNEDO技術検討委員会に報告し、本事業に関する技術開発の推進に係る検討を行った（本章添付資料2参照）。

本章では、本事業の目的と概要およびこれまでの結果概要を記す。

1.1 本事業の目的

本事業は、北海道苫小牧市の苫小牧港港湾区域の海底下を CO₂ の貯留地点とし、その沿岸部に地上設備（CO₂ の分離・回収／圧入設備）および圧入井等を設置した上で実施された事業である。本事業の主な目的は、「苫小牧地点における実証試験計画」（平成 24 年経済産業省）等によれば以下のとおりである。

1) CCS の実証

実用プロジェクトと同等の設備構成で我が国として初となる CO₂ の分離・回収から貯留までの CCS プロセス全体を一貫システムとして実証すること。

2) CCS の安全性の実証

一連の操業を通じて、CCS が安全かつ安心できるシステムであることを実証すること。

3) CCS の理解

情報公開、社会的受容性の醸成の活動を通じて、本事業に関する情報を広く公表し、CCS の理解を深めること。

4) CCS 実用化

操業技術を獲得するとともに実用化に向けた取り組みを行うこと。

1.2 本事業の全体概要

本事業の全体構成を図 1.2-1 に示す。出光興産(株)北海道製油所（以下、「製油所」と称する。）の水素製造設備から発生する、約 52%濃度の CO₂ を含む PSA（Pressure Swing Adsorption）オフガス（2.1 節参照）の一部を、隣接する CO₂ 分離・回収／圧入設備まで 1.4 km の長さのパイプラインにより輸送して CO₂ を分離・回収し、独立した 2 坑の圧入井（傾斜井）により、海岸から 3～4 km 離れた海底下の異なる深度の 2 層の貯留層である萌別層および滝ノ上層へ圧入・貯留するものである。

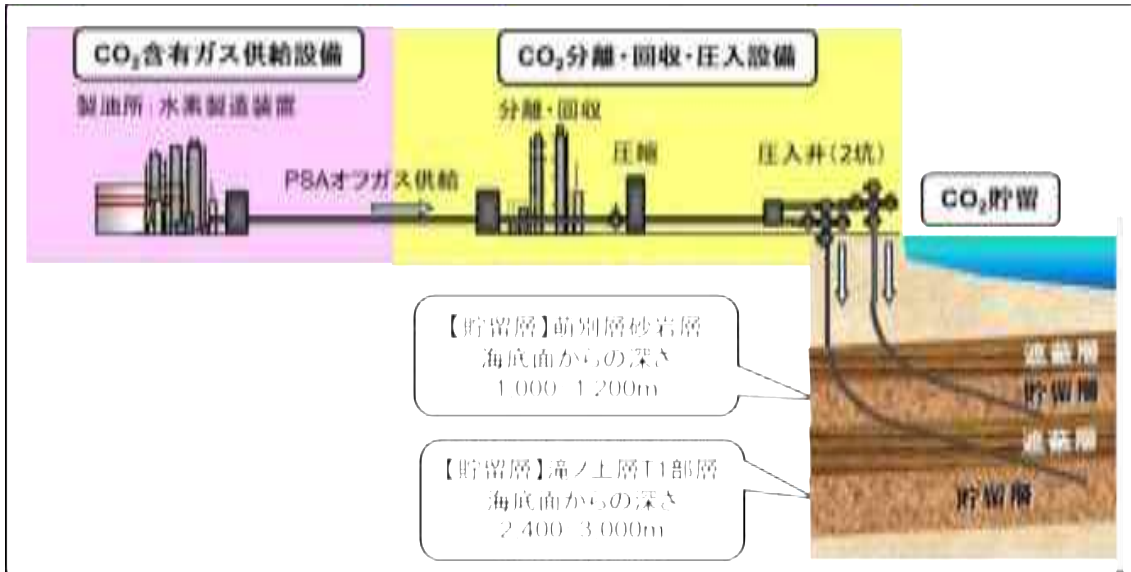


図 1.2-1 本事業の全体概要

本事業の実施期間は、図 1.2-2 に示すように、2012 年度から 2020 年度までの 9 年間で
ある。

2012 年度から 2015 年度までの 4 年間で、本事業に必要な地上設備の設計・建設・試運
転、圧入井の設計・掘削およびモニタリング設備の設計・設置を完了した。この期間中
に、CO₂圧入前の各種データ取得のための調査を実施した。2013 年度に二次元弾性波探
査を、2013 年度から 2014 年度には「海洋汚染等および海上災害の防止に関する法律」
(以下、「海洋汚染防止法」と称する。) に対応した海洋環境調査 (四季調査) を実施し
た。完成したモニタリング設備による圧入開始前の連続観測を 2014 年度末から開始し
た。



図 1.2-2 全体スケジュール

2016年4月に、CO₂圧入を開始した。ただし、海洋汚染防止法の定めによる監視計画に基づいて最初に実施した海洋環境調査の結果に起因して、各種調査の実施および監視計画の見直しを行うこととなり、見直し期間中のCO₂圧入を中断した。当初計画では2016年度から2018年度の3年間で累計CO₂圧入量30万tを達成する予定であったが、中断の影響によりCO₂圧入期間を2019年度まで延長し、累計CO₂圧入量300,110tに達した2019年11月22日にCO₂圧入を停止した。圧入設備の運転実績（稼働時間数）を図1.2-3に示す。なお、全体スケジュールに則り、2020年度末までモニタリングを継続実施する予定である。

以上により、1.1節で述べた本事業の目的のうち、1) CCSの実証では、分離・回収から圧入、貯留までのCCSプロセス全体を一貫システムとして実証するとともに、適用した既存の各技術が、それぞれ適切かつ有効に機能することを確認した。2) CCSの安全性の実証では、適用法規を遵守又は適用法規に準拠するとともに、実証試験前に作成された経済産業省「CCS実証事業の安全な実施にあたって」に従い対応した。3) CCSの理解では、本事業期間中の広報活動等により対応した。4) CCS実用化では、CO₂の分離・回収から圧入・貯留までのプロセスがCCS一貫システムとして機能し、安定して操業できることを実証した。事業を通じて獲得した操業技術、貯留技術等により、今後のCCS実現の可能性が高められた。

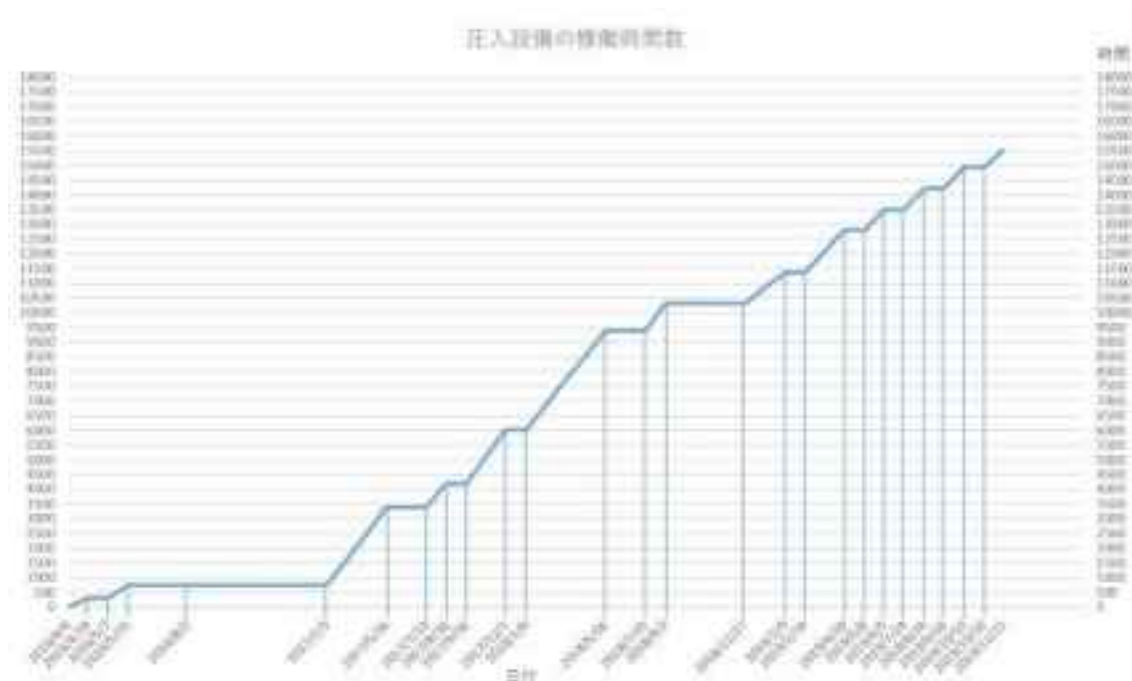


図 1.2-3 CO₂圧入設備の運転実績（稼働時間数）

1.3 本事業の概要

本節では以下の概要を述べ、各論の詳細については第2章～第6章に記す。

- 1) CO₂分離・回収／圧入設備の概要
- 2) 圧入井およびCO₂圧入・貯留の概要
- 3) モニタリング設備および海洋環境調査の概要
- 4) 社会的受容性の醸成活動の概要
- 5) 法規制対応の概要

1.3.1 CO₂分離・回収／圧入設備の概要

図1.3-1に本事業のCO₂分離・回収／圧入設備の俯瞰図を示す。CO₂供給源である製油所の水素製造設備では、PSA方式により高純度の水素が石油精製のために製造されている。水素を回収した後のPSAオフガスには約52%のCO₂が含まれており、他に約39%の水素、約7%のメタン等の可燃性ガス成分が含まれる。PSAオフガスの一部を製油所に隣接する本事業の分離・回収設備に延長1.4kmのパイプラインにより輸送し、CO₂原料とした。

分離・回収設備（CO₂吸収塔、CO₂放散塔、低压フラッシュ塔）では、このPSAオフガスから活性アミン系化学吸収プロセスにより濃度99%以上の高純度CO₂を回収する。

図1.3-2にCO₂分離・回収フローを示す。本事業では、二段吸収法（CO₂吸収塔の上段に低濃度CO₂のアミン溶液、下段に中濃度CO₂のアミン溶液を供給する。）を採用し、さらに低压フラッシュ塔を設置してCO₂分離・回収のためのエネルギー消費量の大幅低減を可能にした。

隣接する圧入設備（第1低压CO₂圧縮機、第2低压CO₂圧縮機、高压CO₂圧縮機）では、回収したCO₂を圧入に必要な圧力まで遠心式圧縮機で昇圧し、昇圧したCO₂を圧入井により海底下の貯留層に圧入・貯留した。

CO₂吸収塔の塔頂から排出されるCO₂分離・回収後のPSAオフガス（約80%の水素と約14%のメタンを主成分とする燃料ガス）を、CO₂放散塔においてアミン溶液からCO₂を分離させるための熱源および分離・回収／圧入設備等用の電力を供給する蒸気タービン発電機の燃料として利用した。



図 1.3-1 分離・回収/圧入設備の俯瞰図

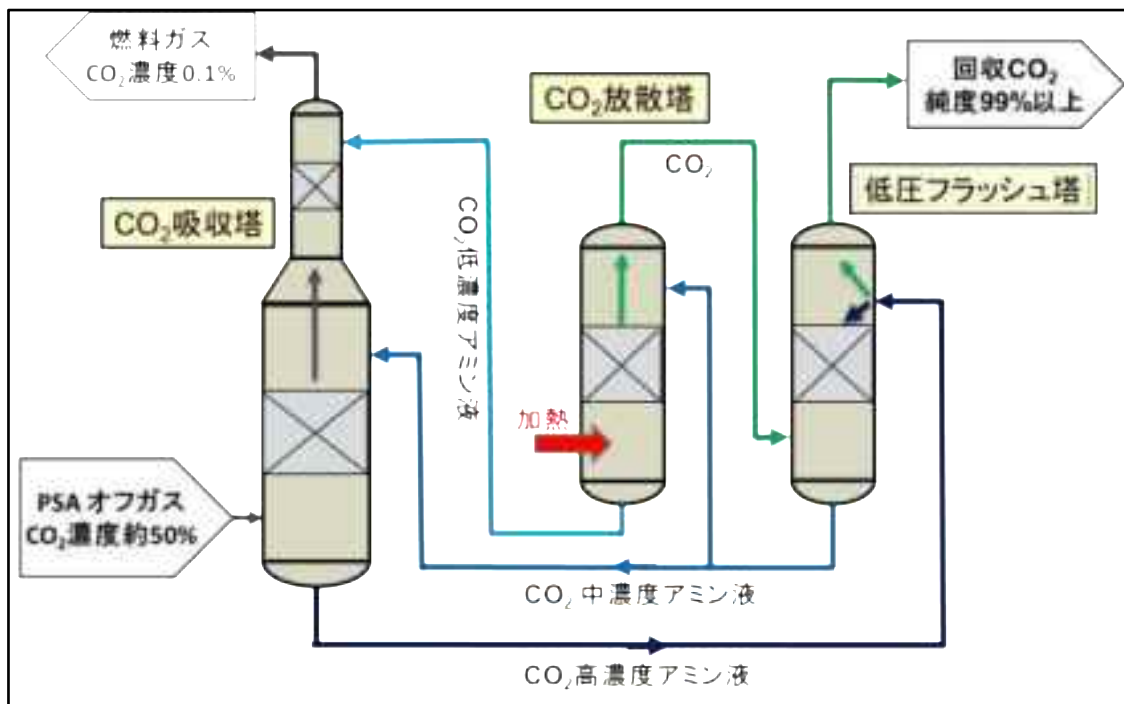


図 1.3-2 CO₂分離・回収フロー

1.3.2 圧入井およびCO₂圧入・貯留の概要

(1) 圧入井の概要

本事業における2坑の圧入井は、ともに陸上沿岸部の坑口地点から沖合の海底下へ向けて掘削された傾斜角（鉛直方向に対する坑井の角度）が大きな高傾斜井である。

図1.3-3に示す萌別層圧入井IW-2は、掘削長3,650m、鉛直深度1,188m、最大傾斜角約83°で、坑口位置から坑底までの水平距離（以下、「水平偏距」と称する。）が3,058mの水平偏距と垂直深度の比が2以上の傾斜井（以下、「大偏距井」と称する。）である。萌別層圧入井IW-2の偏距率（水平偏距と鉛直深度の比）は、わが国の坑井で最大のものである。

図1.3-4に示す滝ノ上層圧入井IW-1は、掘削長5,800m、鉛直深度2,753m、最大傾斜角約72°で、水平偏距は4,346mの大偏距井である。滝ノ上層圧入井IW-1の水平偏距4,346mは、わが国で掘削された坑井で最長のものである。

大偏距井の掘削では、非常に長い高傾斜区間を掘削しなければならないため、高トルク・高ドラグ、不十分なホールクリーニング、坑壁の不安定、ケーシングの降下・設置の困難等を克服する高い技術力が要求される。

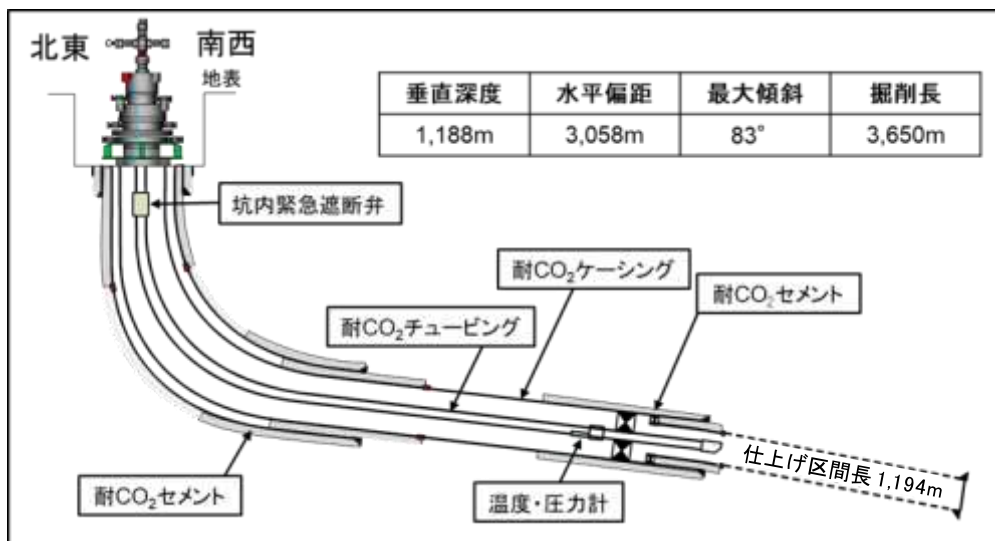


図1.3-3 萌別層圧入井IW-2の形状（模式図）

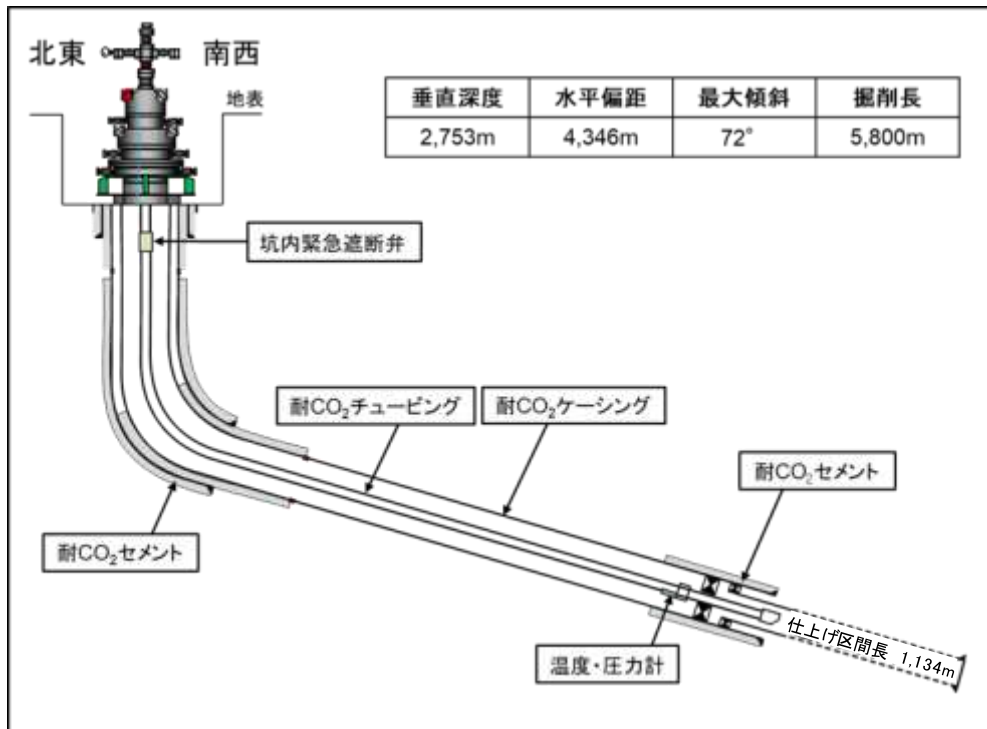


図 1.3-4 滝ノ上層圧入井 IW-1 の形状（模式図）

いずれの圧入井においても、CO₂は、ケーシングと呼ばれる坑井を保護する鋼管内に設置されたチュービングと呼ばれる直径 3.5 インチの鋼管を通して貯留層に運ばれ、直径 7 インチのケーシングにスリット等が施された CO₂ 圧入区間（以下、「仕上げ区間」と称する。）で地層中に圧入される。萌別層圧入井 IW-2 の仕上げ区間長は 1,194 m、滝ノ上層圧入井 IW-1 の仕上げ区間長は 1,134 m である。萌別層は固結度が比較的低いため、坑内への砂粒流入を防止する目的で、仕上げ区間にワイヤースクリーンで覆ったケーシングを用いた。

圧入井を陸域から海底下に向けた高傾斜井として陸上掘削したことにより、港湾の船舶運行と漁業に対する影響がなくなり、かつリグレートが高い移動式リグや開発に要するプラットフォーム等の設備を必要とする海上掘削に比べて掘削コストが大幅に低減した。また、仕上げ区間長を 1,100 m 以上と長く設けたことにより、単位有効層厚当たりの必要圧入量を小さくすることで圧入時の地層の圧力上昇の抑制が期待できるものとなった。

(2) 圧入・貯留の概要

本事業では、CO₂ 圧入を 2016 年 4 月に開始し、2019 年 11 月 22 日に萌別層と滝ノ上層の合計で累計 CO₂ 圧入量 300,110 t を達成した。

萌別層圧入井 IW-2 による CO₂ 圧入は 2 基の低圧 CO₂ 圧縮機を使用して 2016 年 4 月 6

日に開始し、2019年11月22日の圧入停止までに300,012 tを圧入した。萌別層は圧入性状が良好であり、測定圧力は上限圧に対して十分に低く、1坑で50万～100万 t/年のCO₂圧入可能性が示唆された。

2018年2月と8月には、各3～4週間にわたって高圧圧縮機も稼働させ滝ノ上層圧入井IW-1にも圧入し、異なるタイプの貯留層（萌別層、滝ノ上層）への同時圧入を実施した。滝ノ上層の圧入性状は当初期待よりも低く、上限圧力の制限により圧入レートを調整したため98 tの圧入に留まった。滝ノ上層圧入井IW-1の仕上げ区間は、三次元弾性波探査や既存坑井等による事前評価では、調査井のコア試験や圧入テストで確認した圧入性状が良好な溶岩・凝灰角礫岩と予想していたが、実際には凝灰岩が主体であり、十分な圧入性を有する貯留層を確認できなかった。広範囲に均質な岩相が広がる砂岩層に比べて火山岩類は岩相の側方変化が大きいいため、岩相分布が予想通りとならなかった。火山岩層の岩相の側方変化に起因する圧入性状の不確実性をいかに予測するかが課題となった。

1.3.4 モニタリング設備および海洋環境調査の概要

(1) モニタリング設備の概要

本事業では、CO₂圧入前、圧入中を通してモニタリングを実施し、圧入したCO₂の挙動（地層中での移動、広がり状況）を把握し、CO₂が貯留層内に安全に貯留されていることを確認した。なお、全体スケジュールに則り、CO₂圧入終了後、2020年度末までモニタリングを継続する予定である。

表 1.3-1 にモニタリング項目、図 1.3-5 にモニタリング設備の配置、図 1.3-6 にモニタリングシステムの概要を示す。

表 1.3-1 モニタリング項目

観測設備/作業	モニタリング項目
圧入井・プラント設備	坑内：温度・圧力 坑口：圧入温度・圧力・CO ₂ 圧入量
観測井	坑内：温度・圧力 微小振動、自然地震
常設型海底受振ケーブル (OBC)	微小振動、自然地震 二次元弾性波探査の受振
海底地震計 (OBS)	微小振動、自然地震
陸上設置地震計	微小振動、自然地震
二次元弾性波探査	貯留層中の CO ₂ 分布範囲
三次元弾性波探査	貯留層中の CO ₂ 分布範囲
海洋環境調査	海洋データ (物理・化学的特性、生物生息状況等)



出典：「LC81070302016141LGN00, courtesy of the U.S. Geological Survey」を加工。

図 1.3-5 モニタリング設備の配置

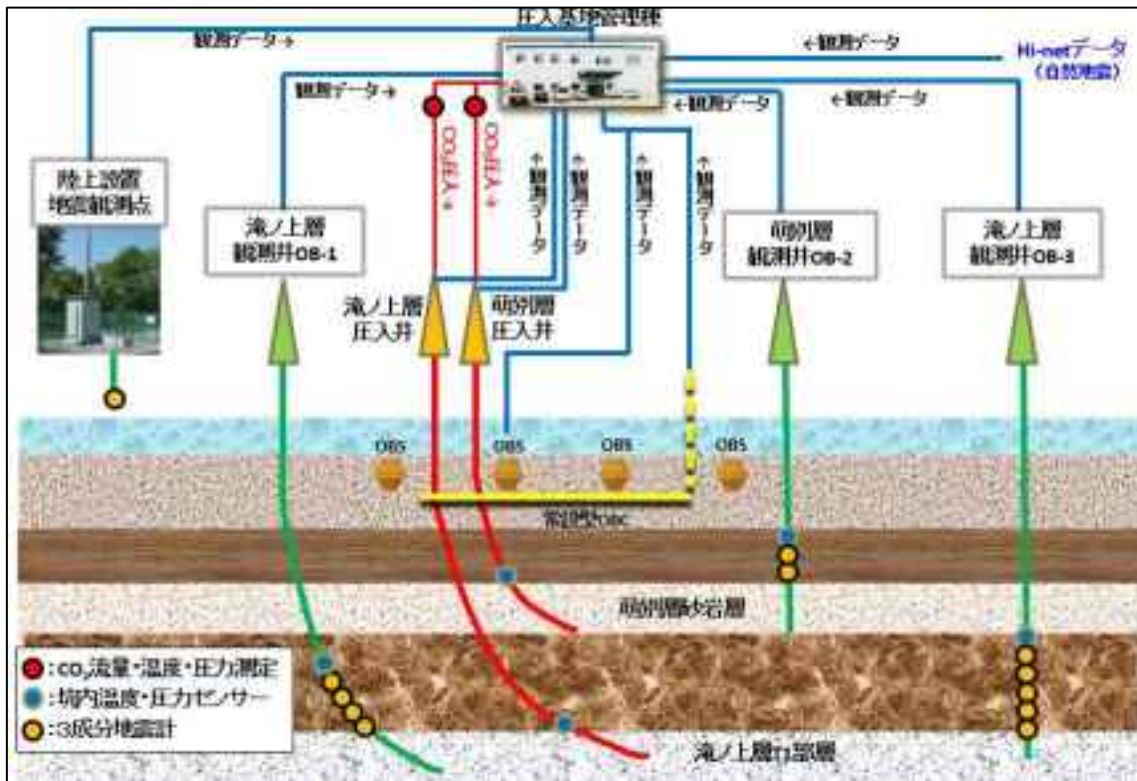


図 1.3-6 モニタリングシステムの概要

3 坑の観測井（OB-1、OB-2、OB-3）に設置された地震計と温度圧力計、複数の地震計が接続された常設型の海底受信ケーブル（以下、「OBC」と称する。）、4ヶ所の海底地震計（以下、「OBS」と称する。）および1ヶ所の陸上地震計により、CO₂ 圧入開始 14ヶ月前の 2015 年 2 月に連続観測を開始し、現在（2020 年 3 月）においても継続中である。

弾性波探査については、CO₂ 圧入前のベースライン観測として、調査段階の 2009 年度に三次元弾性波探査を、準備期間の 2013 年度に二次元弾性波探査を実施した。2016 年 4 月の CO₂ 圧入開始後、二次元弾性波探査（2017 年 1 月～2 月）、三次元弾性波探査（2017 年 7 月～8 月）、二次元弾性波探査と小規模三次元弾性波探査（2018 年 9 月～10 月、萌別層圧入地点近傍のみを対象）を実施した。2019 年度に二次元弾性波探査および小規模三次元弾性波探査を実施し、その調査結果の解析を 2020 年度に実施する予定である。CO₂ 圧入前のベースライン観測データと CO₂ 圧入中および圧入後の観測データを比較し、その差分を得ることにより、圧入した CO₂ の挙動の把握が可能となる。

(2) 海洋環境調査の概要

我が国における CO₂ の海底下の地中貯留は、海洋汚染防止法に則り、環境大臣の許可を

得て実施するものである。許可を得た CCS 事業者（本事業では経済産業省）は、申請時に提出する「監視計画」に基づいて監視を実施し、CCS が計画に従い安全に行われていることを確認しなければならない。本事業の「監視計画」では、貯留層の温度・圧力の観測や弾性波探査による CO₂ の分布範囲の把握に加えて、海洋環境調査として、海域の流況観測、採水・採泥等による水質・底質・プランクトン・底生生物の調査、海底面のビデオカメラ撮影による底生生物の観察・気泡の発生の有無の観察等を年 4 回（四季調査）実施した。

CO₂ 圧入終了後、貯留層地点周辺における微小振動観測および海洋環境調査、圧入した CO₂ の挙動等のモニタリングを引き続き 2020 年度末まで実施する。

1.3.4 社会的受容性の醸成活動の概要

本事業への理解および CCS の社会的受容性の醸成を目的として、苫小牧市民をはじめとして国内に向けた以下の情報発信活動を継続的に実施した。

- 1) 苫小牧市およびその周辺地域への情報発信活動
- 2) 国内他地域における情報発信活動
- 3) メディアを通じた情報発信活動
- 4) CCS 解説ツールの制作

加えて、本事業の進捗や成果等の海外に向けた情報発信、CCS に関連する国際的な情報収集、海外との国際協力や連携を推進する以下の活動を継続的に行った。

- 1) 海外における情報発信・情報収集
- 2) 苫小牧市における情報発信・情報収集
- 3) 国際協力・技術交流
- 4) CSLF における活動

上記のほかに、有事における情報発信活動および地元ステークホルダーとのコミュニケーションの実績を検証し、社会的受容性醸成活動の総括を行った。

1.3.5 法規制対応の概要

本事業の実施にあたっては、関連設備の設置、操業の安全確保、環境保護等に係る適用法規を遵守または準拠した。また、CCS 技術の大規模実証事業を実施する際に遵守することが望ましい基準として 2009 年 8 月に経済産業省が策定した「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」への適切な対応を行うため、2012～2019 年度継続して海外の CCS に関する「規制」および「技術基準・ガイドライン」等をリストアップし、以下の動向調査を実施した。

- 1) 異常が発生した場合に採るべき措置（国内）
- 2) 周辺環境への影響評価
- 3) CO₂ 圧入・運用時の安全確保
- 4) 圧入する CO₂ の濃度基準
- 5) モニタリング
- 6) 異常が発生した場合に採るべき措置（海外）
- 7) CO₂ 貯留に際し地質面から検討すべき事項
- 8) 海洋環境影響・評価
- 9) 監視移行基準の検討に資する CO₂ 漏出の考え方
- 10) 海洋酸性化の監視体制
- 11) 坑井閉鎖
- 12) 圧入終了後のモニタリングとその現状
- 13) プロジェクトリスク
- 14) CO₂ アカウンティング

調査により最新情報を入手・分析するとともに、CCS に特化した法令がない我が国における制度上の課題を整理した。

1.4 結果概要

ここでは目的に対する結果の概要を述べ、本事業において得られた知見と残された課題について第 7 章に記す。

- 1) 「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」に従い、我が国初となる大規模排出源（製油所）の CO₂ を分離・回収して貯留する CCS におけるプロセス全体を一貫システムとした実証試験を行い、2019 年 11 月 22 日に目標としていた累計 CO₂ 圧入量 30 万 t を達成した。圧入期間の実績は、予定した 3 年間に対して外部要因等により 3 年 8 ヶ月となった。
- 2) 本事業により、分離・回収から圧入・貯留までの CCS 一貫システムの操業および安全・環境管理ならびに各種モニタリングおよび海洋環境調査を通じて、CCS が安全かつ安心できるシステムであることを確認した。
- 3) 本事業への理解および CCS の社会的受容性の醸成を目的として、地元および国内への情報発信活動を継続的に実施した。海外へ向けては、本事業に関する情報発信、情報収集、海外との国際協力や連携を推進する活動を継続的に実施した。
- 4) 操業技術を獲得した。また、CCS 実用化に向けた取り組みを通じて得られた知見

と残された課題を整理した。

添付資料1 「課題検討会」有識者委員名簿

(敬称略:五十音順)

委員長	佐藤 光三	国立大学法人東京大学 大学院工学研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター システム創成学専攻 教授 兼 米国スタンフォード大学 客員教授
副委員長	松岡 俊文	公益財団法人深田地質研究所 理事長
委員	薛 自求	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 技術部 部長 兼 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 主席研究員
	徂徠 正夫	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 ₂ 地中貯留研究グループ グループ長
	徳永 朋祥	国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
	中垣 隆雄	学校法人早稲田大学 理工学術院創造理工学部 総合機械工学科 教授
	渊野 哲郎	国立大学法人東京工業大学 大学院物理工学研究科 化学工学専攻 准教授
	増田 昌敬	国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 教授

添付資料2 「NEDO 技術検討委員会」委員名簿

(敬称略:五十音順)

委員長	藤岡 祐一	公立大学法人福岡女子大学 名誉教授
委員	海江田 秀志	一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 首席研究員
	齋藤 文	みずほ情報総研株式会社 グローバルイノベーション&エネルギー部 エネルギービジネスチーム 課長
	佐藤 光三	国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター システム創成学専攻 教授
	鷹觜 利公	国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域研究戦略部付
	松岡 俊文	公益財団法人深田地質研究所 理事長

第2章 CO₂分離・回収／圧入設備

本章では、2012～2015年度に実施したCO₂分離・回収／圧入設備の設備概要と建設・試運転の工程、2016～2019年度に実施したCO₂圧入実証試験における分離・回収／圧入設備の運転・検証、分離・回収エネルギー消費量の分析評価について記述し、CO₂分離・回収／圧入設備の実証結果のまとめを示した。あわせて、CCS実用化に向けて、本事業結果を基にしたCCS実用化モデルのコスト試算を示した。

2.1 分離・回収／圧入設備の建設

CO₂供給源である製油所の水素製造設備では、PSA (Pressure Swing Adsorption) 方式によりCO₂を含む水素原料ガスから高純度の水素が製造され、石油精製に使用されている。PSAユニットで高純度水素が製造された際に副生するPSAオフガスには約52%のCO₂が含まれており、他に約39%のH₂、約7%のCH₄等の可燃性ガス成分も含まれるため、水素製造設備の燃料ガスとして使用される。

PSAオフガスの一部を製油所に隣接する本事業の分離・回収／圧入設備に延長1.4kmのパイプラインにより輸送し、CO₂原料とした。製油所内でのPSAオフガスの分岐から送風機での昇圧、パイプラインでの輸送までをガス供給設備(D1-1基地)と称する。

隣接する分離・回収／圧入設備(D1-2/D0基地)では、パイプラインで送気されたPSAオフガスから高純度(99%以上)のCO₂(海洋汚染防止法で定める特定二酸化炭素ガス)を回収し、それを超臨界状態(7.38MPa、31.1℃以上)まで圧縮して2本の圧入井に移送した。

2.1.1 設備概要

(1) D1-1基地(ガス供給設備)

PSAオフガスの一部を既設のPSAパージガス配管から分岐し、送風機で昇圧して延長1.4kmのパイプラインにより輸送する。

D1-1基地は以下の設備で構成され、そのプロセスフローを図2.1-1に示す。

- 1) PSAオフガス送気設備(ピンク色で示す)
- 2) ブタン(BS)供給設備(茶色で示す)

PSAオフガスは、CO₂の他にH₂、CH₄、COの可燃性ガスを含むため、図2.1-1に示すように、水素製造装置のReformer(改質炉)の燃料として使用されている。PSAオフガスの代表組成(容量%)を表2.1-1に示す。

表 2.1-1 PSA オフガスの代表組成（容量%）

CO ₂	51.6
H ₂	38.8
CH ₄	6.6
CO	2.3
H ₂ O	0.7

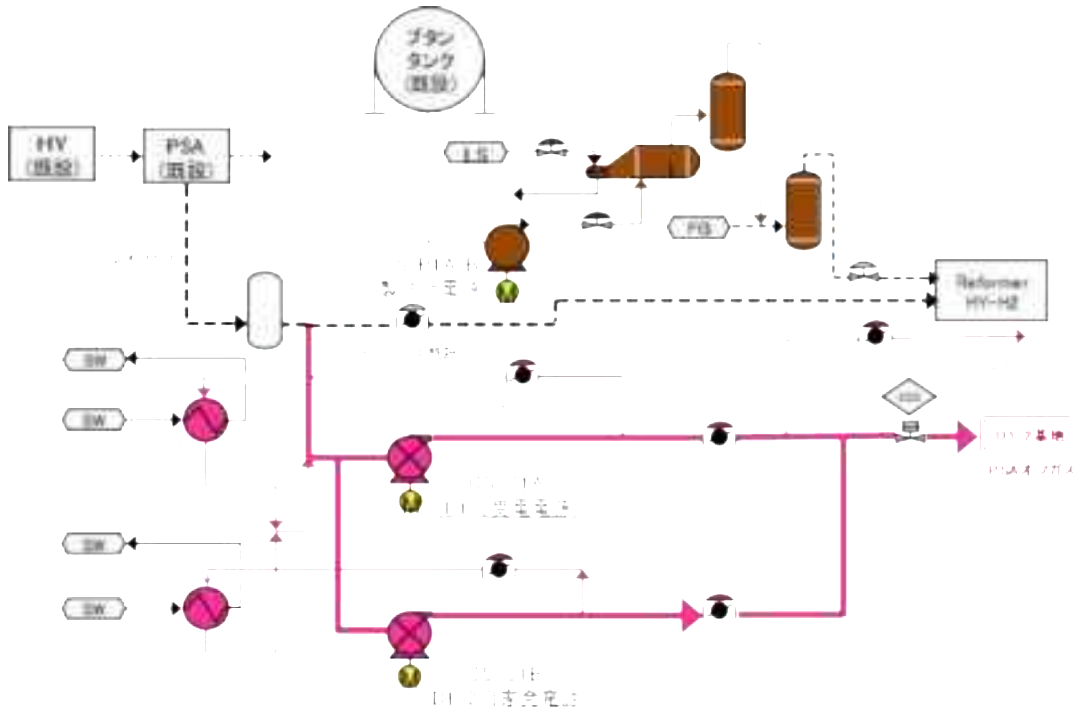


図 2.1-1 D1-1 基地のプロセスフロー（ピンクと茶は新設、黒は既設）

PSA オフガスが CCS の原料として、分離・回収設備（D1-2 基地）に分岐されると、それに相当する改質炉の燃料を補充しなければならない。このため、ブタン供給設備を新たに設置した。

(2) D1-2/D0 基地のプロセス設備

D1-1 基地から送られてきた PSA オフガスを PSA オフガス圧縮機で昇圧し、分離・回収設備で高純度の CO₂（濃度 99%以上）を回収する。回収した CO₂ を圧縮機で圧入井坑口圧力まで昇圧した後、D1-2/D0 基地内にある各圧入井へ構内配管で移送する。

プロセス設備は以下の設備で構成され、そのプロセスフローを図 2.1-2 に示す。

- 1) PSA オフガス圧縮機
- 2) 分離・回収設備

3) CO₂ 圧入設備

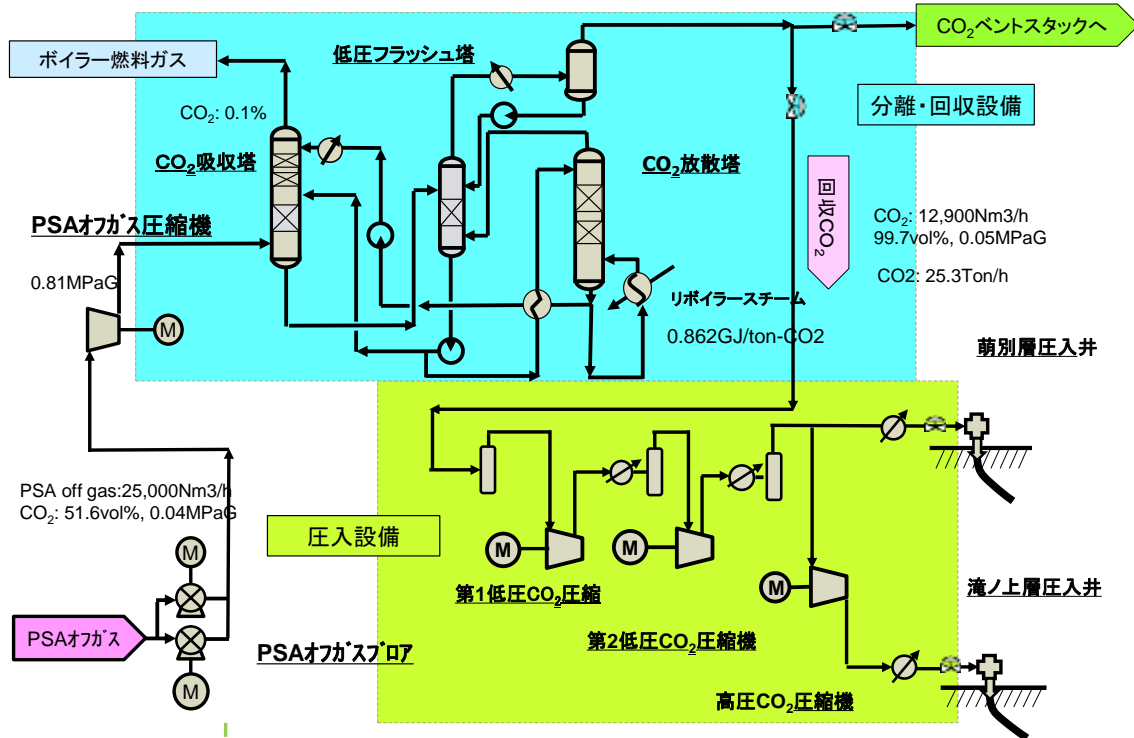


図 2.1-2 PSA オフガス圧縮、分離・回収設備、CO₂ 圧入設備のプロセスフロー

(3) D1-2/D0 基地のボイラー設備と自家発電設備

分離・回収設備で CO₂ を分離した後のガス (H₂、CH₄、CO 等からなる可燃性ガス) を燃料として使用する高圧ボイラーと低圧ボイラーを設置した。高圧ボイラーで発生させたスチームは自家発電設備に送られ、スチームタービン発電機による発電に用いられる。発電された電力は、D1-2/D0 基地および D1-1 基地設備への電力供給の一部として利用される。低圧ボイラーで発生させたスチームは、CO₂ 放散塔リボイラーの熱源等として利用される。

- 1) ボイラー設備
- 2) 自家発電設備

(4) D1-2/D0 基地の用役設備

プロセス設備、ボイラー設備と自家発電設備を稼働するために必要な用役 (燃料、空気、水、窒素等) を供給する設備とその他付属設備を設置した。用役設備とその他付属設備は、以下の設備で構成される。

- 1) 循環冷却水設備

- 2) 排水処理設備
- 3) 純水設備
- 4) 燃料設備
- 5) 計装空気設備
- 6) 窒素製造設備
- 7) 防消火設備
- 8) フレア・ベントスタック設備

(5) D1-2/D0 基地の共通設備

共通設備であり、基地内各プラント設備に共通して設置される。

- 1) 共通配管
- 2) 土木建築
- 3) 電気
- 4) 計装

2.1.2 D1-1 基地および D1-2/D0 基地 EPC 全体工程

D1-2/D0 基地の設備設計・機器調達・設備建設（Engineering Procurement and Construction、以下、「EPC」と称する。）および試運転の期間は 2012 年 11 月 1 日から 2016 年 2 月 10 日までの 39 ヶ月であった（EPC：36 ヶ月、試運転：3 ヶ月）。

業務は 48 ヶ月にわたり、その全体工程を図 2.1-3 に示す。

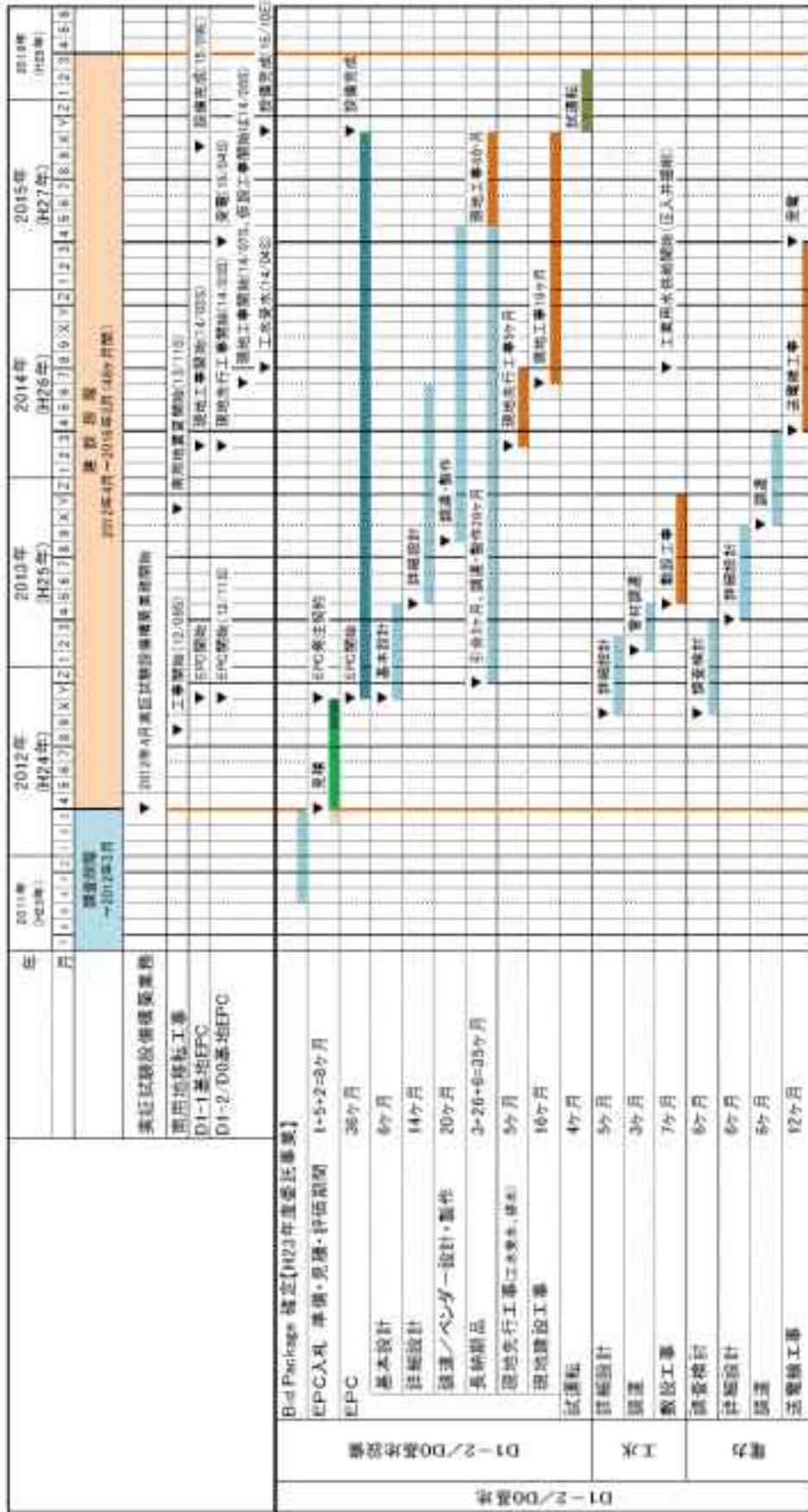


図 2.1-3 D1-1 基地および D1-2/D0 基地 EPC 全体工程 (全体)

一方、D1-1 基地の EPC もほぼ同時に進行し、2012 年 9 月から開始し 2015 年 10 月に完成した。

D1-1 基地および D1-2/D0 基地の 21 ヶ月にわたる現場工事は厳密な安全審査・安全管理の下で計画通りに遂行され、労働安全衛生法の労働災害認定において、無事故・無災害を達成した。

2.2 分離・回収／圧入設備の実証

2016 年 4 月 6 日の圧入開始から 2019 年 11 月 22 日の圧入停止までの分離・回収／圧入設備の実証試験は 1,326 日（約 44 ヶ月）となった。1,326 日の実証日数を内容別に分類したものを図 2.2-1 に示す。

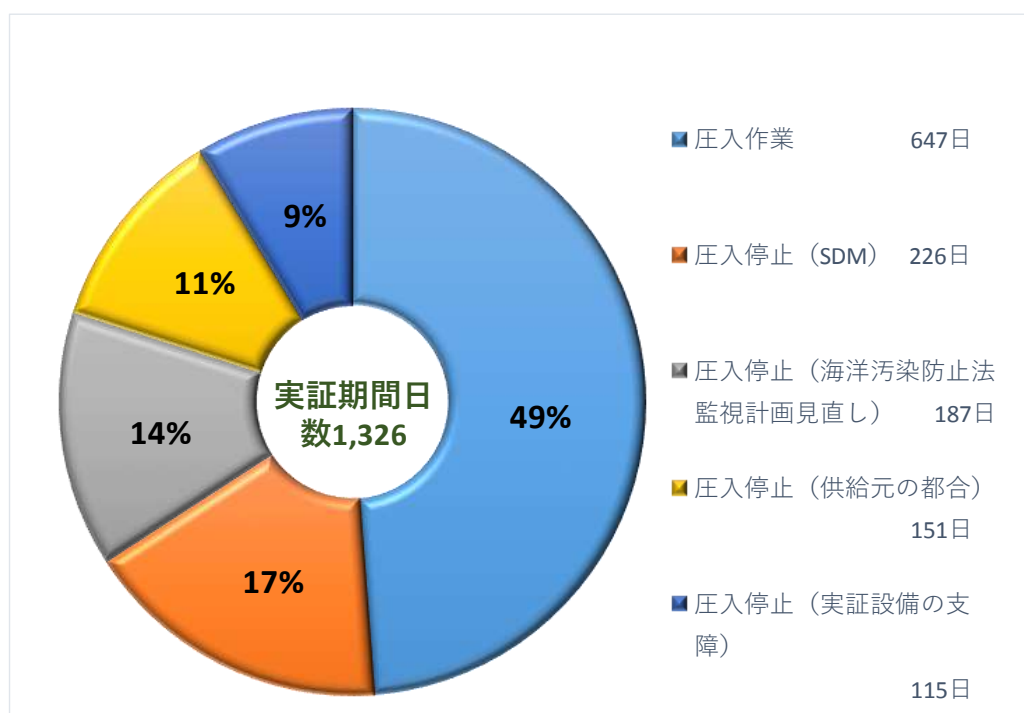


図 2.2-1 実証試験期間中の日数内容分類

CO₂ 圧入作業は延べ 647 日、圧入停止日数は延べ 679 日であった。圧入停止の原因別日数は、2016 年度、2017 年度、2018 年度、および 2019 年度の定期保全工事（Scheduled Shut-Down Maintenance、以下、「SDM」と称する。）に伴う停止期間が計 226 日、海洋汚染防止法に係る監視計画（海洋環境）の見直しによる停止期間（詳細は 3.5.1 に後述）が計 187 日、PSA オフガス供給設備の停止（2018 年 9 月 6 日発生 of 平成 30 年北海道胆振東部地震の影響を含む）による停止期間が計 151 日、分離・回収／圧入設備の不具

合による停止（表 2.2-2 参照）が計 115 日であった。したがって、PSA オフガスの供給が可能な日数 762 日に対して、実際に圧入を行った日数は 647 日であり、その割合は 84.9%となった。

平成 28 年度（2016 年度）の実証試験計画から、分離・回収／圧入設備の実証試験課題として以下の 2.2.1 から 2.2.7 までの 7 項目を掲げ、令和元年度（2019 年度）まで年度ごとに各項目を実証した。

2.2.1 D1-1 基地の供給設備の運転、検証

PSA オフガスの一部を既設の PSA パージガス配管から約 0.03 MPaG で分岐し、送風機で 0.08 MPaG まで昇圧して延長 1.4 km のパイプラインにより D1-2/D0 基地まで輸送した。D1-2/D0 基地との境界では 0.04 MPaG の受入圧力であった。表 2.1-1 の代表組成での PSA オフガス分岐は 25,000 Nm³/h、純 CO₂ の供給量は 25.3 t/h（607 t/日）である。

D1-1 基地の運転を通じて、水素製造装置からの PSA オフガス分岐圧力の変動、PSA オフガス送風機の流量と圧力の変動、D1-2/D0 基地への送風量と着圧の変動に対する自動化運転の追従性を検証した。44 ヶ月の運転期間で、水素製造装置の急激な運転変動により、各基地での自動緊急停止（Emergency Shutdown、以下、「ESD」と称する。）、フレアスタックへの緊急放出等のトラブルが発生したが、PSA オフガス送風機と次項で述べる下流の PSA オフガス圧縮機が自動で安全に停止した結果、各基地の安全対策が適切であると確認した。D1-1 基地の運転と管理は PSA オフガスを供給する出光興産(株)に再委託し、以上の D1-1 基地の自動化の検証、安全対策の評価、課題の抽出等を共同で実施した。

2.2.2 分離・回収設備の運転、検証

分離・回収設備のプロセスフローを図 2.2-2 に示す。PSA オフガスは圧縮機で 0.81 MPaG まで昇圧された後、吸収塔（Absorber）でアミン溶液によって PSA オフガス中の CO₂ が選択的に吸収される。吸収塔出口の CO₂ 濃度は 0.1%（乾式基準）以下であるので、分離・回収設備の CO₂ 回収率は 99.9%以上となる。吸収塔出口の CO₂ 濃度は、CCS 実用化の際に水素製造、アンモニア製造、LNG 製造等の湿式ガス精製プロセスで製品ガス仕様（不純物濃度）から要求される 0.1%（1,000 ppm）以下を前提条件とし、その条件下での回収 CO₂ の純度や分離・回収エネルギーを実証することとした。

回収 CO₂（海洋汚染防止法で定める特定二酸化炭素ガス）の純度は海洋汚染防止法で定める分析方法（ガスクロマトグラフ法および化学吸収法）に基づいて定期的に分析した結果、平均 99.4%（乾式基準）で同法の定める基準である 99%以上を満たすものであ

た。

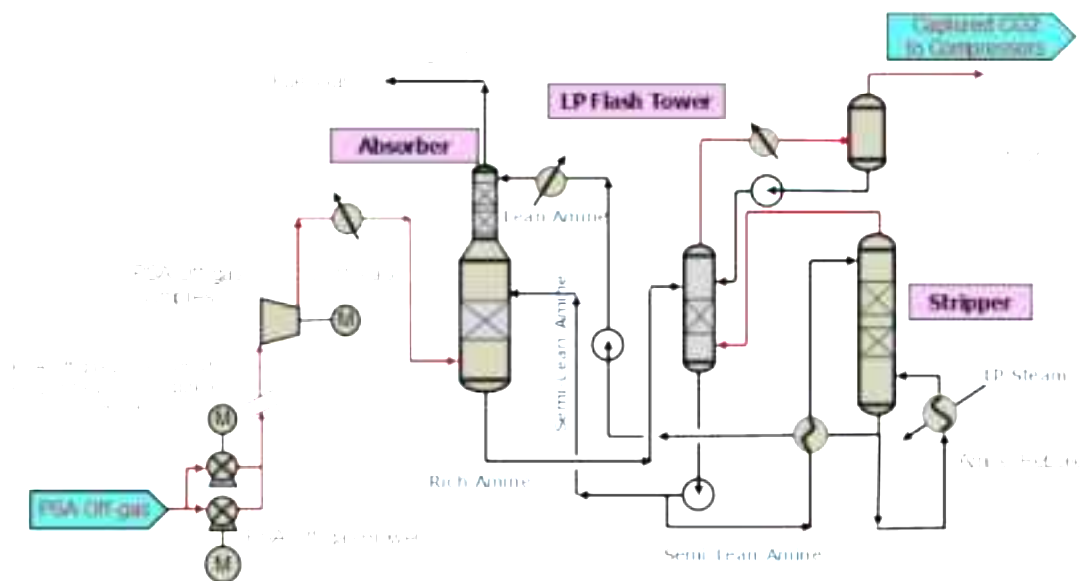


図 2.2-2 分離・回収設備のプロセスフロー

分離・回収設備の課題の一つとして、分離・回収エネルギー (GJ/t-CO_2) の低減がある。代表組成ケースにおいて、 CO_2 回収率（設計値：99.9%以上）、回収 CO_2 純度（設計値：99%以上）および CO_2 回収量（設計値：25.3 t/h）の設計条件下で、アミンリボイラースチーム消費量とポンプ動力を実測することにより分離・回収エネルギーを算出した。

代表組成ケースの分離・回収エネルギーは、設計時の期待値（計算値）が 1.13～1.22 GJ/t-CO_2 （数値の変動は 100°C 以上の高温機器からの熱損失に起因する）である。この検証結果は 2.3 節に記載した。

分離・回収設備の運転開始時に系内に導入したアミン溶液は、約 44 ヶ月にわたる実証試験期間で、アミン劣化物の除去（活性炭吸着）、アミンの再生（リクレーマー）は不要で、アミン溶液の入れ替えも不要であった。アミン溶液の劣化物（熱安定性塩）の生成は少なく、 CO_2 吸収性能（Rich Amine Loading, Semi-Lean Amine Loading）や CO_2 放散能力（Lean Amine Loading）の顕著な変化は認められず、溶液性能は安定していた。鉄イオン濃度にも顕著な変化はなく（平均 17 ppm 程度）、管理目標値の 20 ppm 以下を維持していたため、炭素鋼の全面腐食はないと考えられた。

炭素鋼の腐食は設備全体（塔類、槽類、熱交換器、ポンプ、配管、制御弁等）に発生する全面的腐食と機器の一部に発生する局部的腐食がある。2019年10月9日にセミリー

ンアミン溶液ラインで、一部機器（流量制御弁の一部、その下流配管の一部）に局部的腐食が発生した。その溶解鉄イオンがアミン溶液中で CO_2 と反応して炭酸鉄 (FeCO_3) を生成し、それがセミリーンアミン溶液/リーンアミン溶液熱交換器（プレート型）の高温部で固体状に析出しプレート表面に付着蓄積したため溶解鉄イオン濃度に大きな変化はなく（平均 17 ppm）、局部的腐食を検知できなかった。

一方、アミン溶液中の鉄イオン濃度が 20 ppm 以下であれば、全面腐食はないと判定したが、設備の解放点検（2020年2月時点）ではセミリーン溶液ラインの局部的腐食以外の機器は全て健全であったため、20 ppm の管理目標は妥当性があることを確認した。今後は、アミン溶液熱交換器に閉塞が検知された場合には（炭酸鉄の生成）、熱交換器のみならず、関連機器も開放点検する。

2.2.3 圧入設備の運転、検証

CO_2 圧縮機における制御システムの検証と同システムの最適化に取り組んだ。同制御システムを図 2.2-3 に示す。

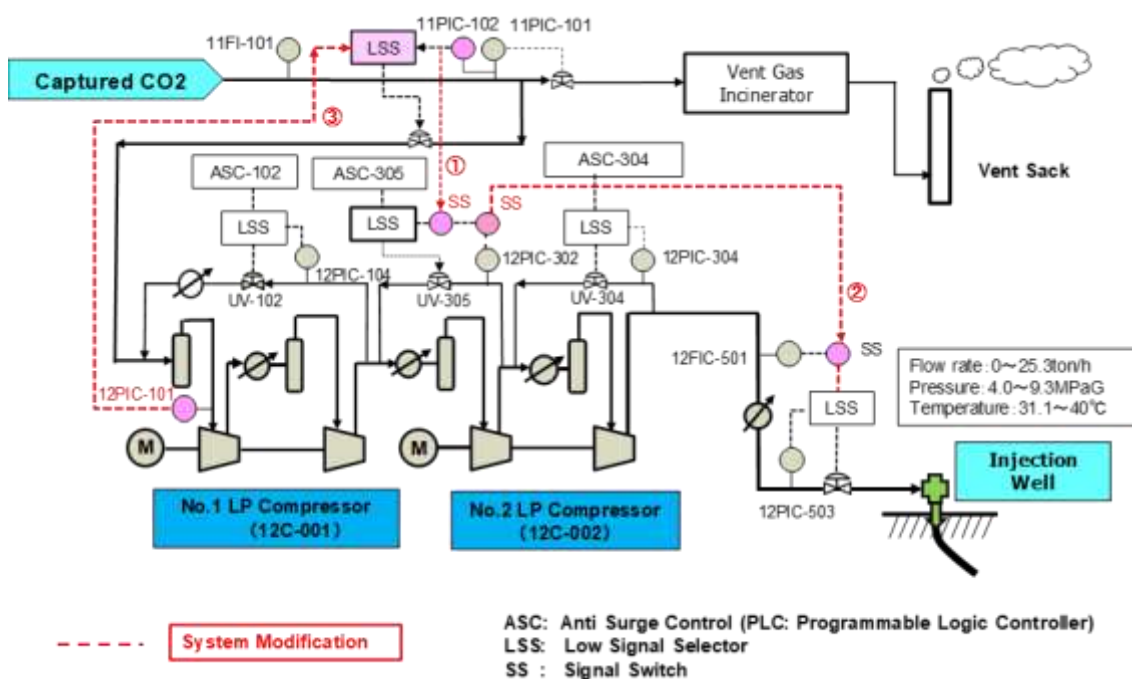


図 2.2-3 CO_2 圧縮機の最適制御システム

第 1 低圧 CO_2 圧縮機（12C-001）および第 2 低圧 CO_2 圧縮機（12C-002）を使用して回収 CO_2 を萌別層へ圧入する。 CO_2 圧縮機制御システムは 4 段の CO_2 圧縮機（12C-001 は 2 段、12C-002 も 2 段）と、3 系列の吐出圧力制御（12PIC-104、12PIC-302、12PIC-

304) とアンチサージ制御器 (ASC-102、ASC-305、ASC-304 の Programmable Logic Controller) から構成される。

2016年4月～5月の間は、回収CO₂圧力 (11PIC-102 目標 : 0.05 MPaG) と 12C-001 吸込み圧力 (12PI-101 目標 : 10 kPaG) が頻繁に変動し、回収CO₂をベントスタックに放出することがあった。この原因は、CO₂原料のPSAオフガス量が30分程度の周期で±4%程度変動し、さらに、CO₂濃度も変動するため、回収CO₂量 (11FI-101) が周期的に±5%程度変動するためである。回収CO₂を全量圧入するためには、CO₂圧縮機制御システムが流量および圧力の変動に自動的に追従する必要があることが判明した。

このため、2016年10月から2017年10月にかけてダイナミックシミュレーションを使用した制御システムの改善を検討し、2018年1月には図2.2-3の赤色の丸数字で示した3ヶ所の制御システムを以下の1)～3)の考え方に基づいて改造した。

- 1) 回収CO₂の圧力変動 (11PIC-102) が上限 (52 kPaG)、もしくは下限 (48 kPaG) に達した後、12C-002 リサイクル弁 (12UV-305) の開度を自動で0.5%ずつ変更する。同時に、ハンチングを避けるため12UV-305は開度を一度変更させてから5分間は変化させない。
- 2) 12C-002 吐出圧力 (最大 9.7 MPaG) の圧力制御は、12PIC-304 と 12PIC-503 が競合するため、12PIC-302 で12PIC-503をカスケード制御する。
- 3) 12PIC-101 が上限 (15 kPaG) もしくは下限 (5 kPaG) を超えた場合、11PV-102で保護する。この際、11PIC-102は11PV-102による制御が切れるので、同時に1)で述べた12UV-305での制御を開始する。

改造実施後は11PIC-102、12PIC-101 および12UV-305の自動制御が安定し、回収CO₂のベントも皆無となり、圧縮制御システムの完全自動化が達成された。この結果、萌別層に流量制御方式および圧力制御方式で安定的に圧入ができること、最大25.3 t/h (年間20万t相当)を圧入できることを確認した。

2018年2月と8月には、各3～4週間にわたって12C-001 および12C-002に加えて高圧圧縮機 (12C-003) も稼働させ (図2.1-3を参照)、異なるタイプの貯留層への同時圧入を実施し、萌別層では所定の流量制御弁、滝ノ上層では少量流量制御弁による安定した運転を達成することができた。

2.2.4 運用システムの検証

運転期間に分離・回収/圧入設備および用役設備で発生した緊急遮断システム作動の実績を解析し、システムの妥当性を評価した。特にPSAオフガス圧縮機、CO₂圧縮機の急

激な変動により、自動緊急停止（ESD）、安全弁（PSV）の作動、ベントスタックへの放出等が発生したので、その実績データを解析して基本設計時の運用システム設計およびダイナミックシミュレーションの結果が妥当であるか否かを評価し、自動緊急停止（ESD）システムの内容、安全弁（PSV）の設置場所が妥当であることが検証された。具体的な事例を後述の表 2.2-2「D1-1 基地および D1-2/D0 基地の主なトラブル事例リスト」の第 2、4、6、11 項にまとめた。

2.2.5 保安管理・保安設備の運転、検証

分離・回収／圧入設備の異常事態を想定した保安設備の安全性を実証試験で検証した。その結果を表 2.2-1 にまとめた。

表 2.2-1 保安設備安全性の検証

異常想定項目		保安設備
1	PSA オフガス・燃料ガス系統の緊急遮断	フレアスタック（高さ 30 m）で、PSA オフガス・燃料ガスの全量を燃焼可能とする。地上での最大熱強度を推算し安全であることを確認した。
2	回収 CO ₂ 圧縮系統の緊急遮断	ベントスタック（高さ 30 m）で、分離・回収および系内残存の CO ₂ 全量を放出する。地上での最大 CO ₂ 濃度を推算し安全であることを確認した。さらに、CO ₂ に同伴される少量（0.6%程度）の可燃成分を完全に焼却できる燃焼炉を設置した。
3	機器設計圧力以上の異常昇圧	機器の保護のために、ほとんどの機器に安全弁を設置した。安全弁からの PSA オフガス、燃料ガス、回収 CO ₂ ガスはフレア・ベントスタックに接続した。
4	火災発生	停電保護用電池でディーゼル発電機を起動させ、防火ポンプ（96 m ³ /h）を起動する。
5	巨大地震の発生	150 gal で地上設備を全て自動で緊急停止する。 一方、2 本の圧入井の各坑口上流の CO ₂ 配管には各々遮断弁を設置し、さらに、各圧入井本体にも遮断弁と逆止弁を設置した。 (なお、2018 年 9 月 6 日早朝の平成 30 年北海道胆振東部地震の際は地震計で 158 gal を検知したが、製油所の都合で 9 月 1 日から圧入を停止していたため、各圧入井坑口の遮断弁は事前に閉にしていた。)
6	有害ガスの漏洩	漏洩箇所を素早く検知するために、CO ₂ 検知器を 18 ケ所、毒性ガス検知器を 15 ケ所、可燃性ガス検知器を 22 ケ所に設置した。

操業に係る規程類（環境管理規定、保安管理規程、安全管理規程、運転管理要領、設備保全計画等）を体系的に作成した。また、保安訓練を定期的に実施した。

自治体（苫小牧市）作成の「大規模地震に伴う津波の浸水深さ」においても、本プラントの浸水深さは 0.5～1.0 m であり、危険物施設である燃料油タンクの安全性は確保される。

分離・回収／圧入設備は高圧ガス保安法の製造所に該当するため、規程類は主に高圧ガス設備等耐震設計基準に従って作成した。それ以外は、油のタンク等は消防法、その他の建築物については建築基準法の耐震設計基準に従って作成した。また電気事業法の規定に

基づき必要な保安規定を改定・追補した（長時間の停電時の電源設置等）。

保安および環境保護に関するトラブルについて、その原因と対策を検証し、システムの妥当性を評価した。CO₂圧縮機の安全弁からのCO₂放出、熱交換器や配管からのアミン溶液の漏洩等が発生したため、その原因と対策を実施した。具体的な事例は後述の2.2.8項にまとめた。

2.2.6 日常保全および定期保全

設備保全に関する管理規程、要領、および年間計画を適切に運用した。

3年8ヶ月の日常保全、SDM期間中には、法令で定期的な点検が定められた機器の局所的腐食劣化状況を検査した。各年の点検実績と設備使用実績（腐食、故障等）を資料としてまとめた。この主な事例として（表2.2-2参照）、12C-002アフタークーラー（112E-005）の冷却水側のチューブ表面（内部は萌別層圧入井へのCO₂）の腐食が明確となり、2019年6月のSDMで新規のチューブバンドルに交換した。

2.2.7 安全・環境管理

安全衛生および環境に関する管理規程、要領、および年間計画を実証試験で適用し、実証試験期間を通じての安全環境管理の実績をまとめた。災害対応マニュアルとしては、緊急時措置要領、自然災害対策要領、緊急連絡要領等を作成し実行した。2018年9月6日の平成30年北海道胆振東部地震の経験を踏まえ、地震発生時の出社基準および安否確認を改訂した。

2.2.8 トラブル事例のまとめ

以上の2.2.4～2.2.6項の事例として、設備運転の停止あるいは負荷低下を引き起こした主なトラブルに関しては、「D1-1基地およびD1-2/D0基地の主なトラブル事例」として表2.2-2に示す17の事例を選定し、各項目の事象、発生年月日等の情報を一覧表にまとめ、原因と対策等の関連情報を容易に検索できる社内データベースを別途作成した。

各トラブルの発生要因はA、B、C、Dに分類した。AについてはESDシステムと安全弁が作動して機器を保護したが、その都度北海道胆振総合振興局に報告し、Bについては予め想定して設備を設計して周囲の環境には影響を与えなかったが、その一部は苫小牧市に報告した。

以上のトラブルには、設計上の安全システムによる自動的な設備の緊急停止、あるいは運転員による適切な設備の停止および対応により対処し、設備運転の安全性を確保しながら目標のCO₂累積30万t圧入量を達成した。

表 2.2-2 D1-1 基地および D1-2/D0 基地の主なトラブル事例リスト

番号	発生年月日	トラブル事象	発生要因
1	2016/4/17	CO ₂ ベントスタックからの可燃性ガスの飛散	C
2	2016/5/12	第 2 低圧 CO ₂ 圧縮機安全弁 (12SV-301) の作動	A
3	2016/7/18	計装空気圧縮機トリップ	B
4	2016/10/3	第 2 低圧 CO ₂ 圧縮機 (12C-002) のトリップ	A
5	2016/11/14	基地間通信異常のため送気停止	C
6	2017/2/4	12C-002 手動停止時の安全弁 (12SV-201) の作動	A
7	2017/3/14	吸収塔上段充填層のフラッディング現象	B
8	2017/8/16	PSA オフガス圧縮機ガスリサイクル弁 (10UV-102) 閉塞傾向のため送気停止	B
9	2017/12/4	アミン溶液熱交換器の開放・点検	B
10	2018/1/16	第 1 低圧 CO ₂ 圧縮機 (12C-001)、12C-002 制御システムの改造工事	B
11	2018/2/23	高圧 CO ₂ 圧縮機 (12C-003) トリップ	A
12	2018/5/27	熱交換器からのアミン溶液の漏洩	B
13	2018/9/6	全停電によるモニタリング欠落	D
14	2019/3/14	セミリーンアミンポンプ (11P-002B) チェッキバイパス弁からのアミン漏洩	B
15	2019/3/26	PSA オフガス圧縮機 (10C-001) トリップ	C
16	2019/6/4	12C-002 出口 CO ₂ 冷却器 (12E-005) チューブバンドルの新規交換	B
17	2019/10/9	セミリーンアミン流量制御弁 (11FV-002) 下流配管よりアミン漏洩	B

トラブルの発生要因：

- A：緊急停止 (ESD) が発生し安全弁が作動したトラブル。但し、機器の個別故障等による正常停止 (ESD も含む) は対象外とする。
- B：機器の腐食、機器の閉塞、機器の変動等で連続運転が不可能となったトラブル
- C：製油所側に起因、製油所側からの要請、および D1-1 設備に起因して運転を停止したトラブル
- D：巨大地震発生によるトラブル

2.3 分離・回収エネルギー消費量

2.3.1 分離・回収エネルギーの検証

図 2.2-2 の分離・回収設備のプロセスフローで示した吸収塔入口の PSA オフガスおよび吸収塔出口の諸条件 (代表組成) を表 2.3-1 に示した。

表 2.3-1 吸収塔入口・出口でのガス条件（代表組成）

項目	吸収塔入口	吸収塔出口
処理量 (Nm ³ /h)	25,000	12,059
ガス組成 (容量%)	PSA オフガス	燃料ガス
CO ₂	51.60	0.1
H ₂	38.80	80.20
CH ₄	6.60	13.62
CO	2.30	4.75
H ₂ O	0.70	1.33
合計	100	100
吸収塔入口圧力 (MPaG)	0.81	0.79
入口温度 (°C)	40	40

分離・回収プロセスには、活性アミンを使用した OASE（BASF 社のライセンスプロセス）の 2 段吸収法を採用した（図 2.3-1 参照）。分離・回収設備は、吸収塔、放散塔、低圧フラッシュ塔から構成され、吸収塔は上下 2 段の充填層に分割されている。CO₂ を高濃度（51.6%）で含む PSA オフガスは加圧下（0.81 MPaG）で吸収塔に供給され、下部充填層でセミリーンアミン溶液により CO₂ 供給量の 60～70% が粗く吸収される（Bulk Absorption）。次に、ガスは吸収塔上部充填層に上昇し、30～40% の残存 CO₂ がリーンアミン溶液によって濃度 0.1% 以下まで吸収される（Lean Absorption）。

吸収塔底から排出されるリッチアミン溶液は低圧フラッシュ塔に送られる。CO₂ を高濃度に吸収したリッチアミン溶液は、低圧フラッシュ塔での減圧効果（0.06 MPaG）と放散塔頂から低圧フラッシュ塔に供給される CO₂ に同伴される余剰熱（水蒸気）による加熱効果により、吸収した CO₂ の 60～70% 程度を放散し、CO₂ を中濃度に吸収したセミリーンアミン溶液となる。大部分のセミリーンアミン溶液は外部から加熱することなしに吸収塔下部に循環される。

一部のセミリーンアミン溶液は放散塔に送られ、加熱によって CO₂ 供給量の残りの 30～40% の CO₂ を放散し、CO₂ を低濃度で含むリーンアミン溶液となる。このリーンアミン溶液は、吸収塔上部充填層へと循環される。

この 2 段吸収法の吸収塔下部での Bulk Absorption と低圧フラッシュ塔での CO₂ フラッシュの効果によって、大量の熱を必要とする放散塔でのアミンリボイラー熱量を大幅に低減することができる。

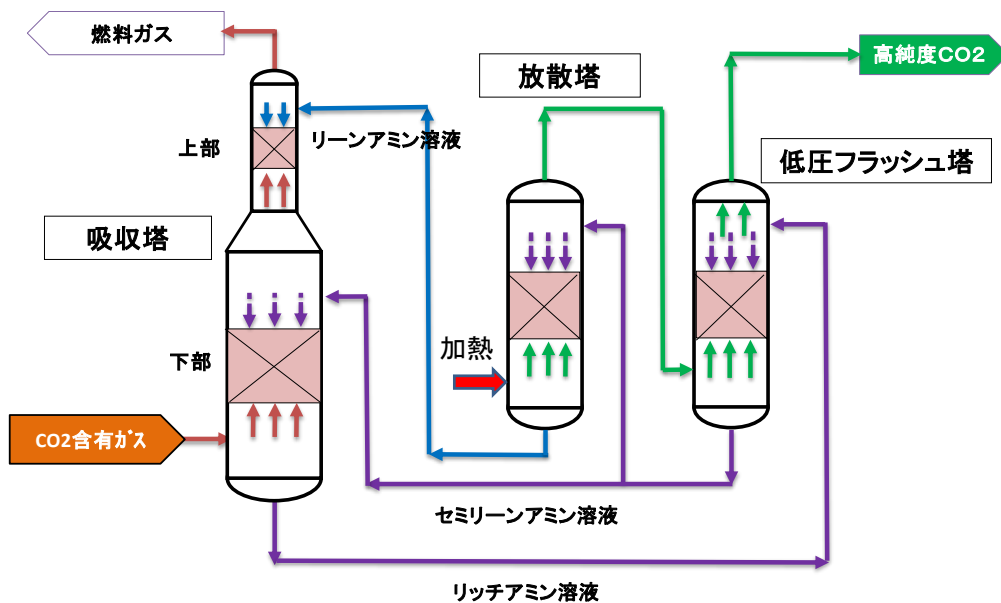


図 2.3-1 OASE 2 段吸収法

CO₂ 吸収塔、低圧フラッシュ塔、CO₂ 放散塔には不規則充填物が充填されて、気体 (CO₂、水蒸気、その他が上昇) と液体 (アミン溶液が降下) の向流接触が促進される。

2.3.2 分離・回収エネルギー消費

44 ヶ月の実証試験期間中に 3 回 (2016 年 12 月、2017 年 10 月、2019 年 5 月) の分離・回収エネルギーの性能確認試験を実施した。PSA オフガス量、アミン溶液循環量、各部の温度圧力条件は、極力、目標値 (設計値) に近づけた。なお、PSA オフガス量が周期的に±4%程度変動すること、CO₂ 濃度も周期的に変動することから、CO₂ 回収量も周期的に±5%程度変動したが、性能確認試験中 5 時間程度、アミン溶液循環量、各部の温度圧力条件を静定させた。ただし、PSA オフガス供給設備の稼働状況により供給量が増減した場合もあった。

3 回の性能確認試験結果を表 2.3-2 にまとめた。表 2.3-2 の目標値とは設備設計値を示す。リボイラー熱量については、高温機器 (放散塔、アミンリボイラー、アミン溶液熱交換器高温部等の 100℃以上の運転温度) からの熱損失によって変動し、その結果、分離・回収エネルギーも幅のある目標値となっている。

表 2.3-2 性能確認試験の結果

		2016 年度	2017 年度	2019 年度	目標値
CO ₂ 回収量	t/h	25.3	24.3	26.4	25.3
リーニアミン溶液	t/h	111	100	118	100*
セミリーニアミン	t/h	102	99.5	93.6	100*
リボイラー熱量	GJ/t-CO ₂	0.923	0.882	0.915**	0.862～ 0.949***
ポンプ電気量	kWh/t	19.8	21	18.8**	19.2
分離回収エネルギー	GJ/t-CO ₂	1.20	1.16	1.18**	1.13～1.22

*アミン溶液循環量は、目標値（設計値）を 100%とした比較値を表示した。

**CO₂回収量が設計値を超過し、リーニアミン溶液が設計値の 118%と過剰となったので（製油所側で PSA オフガス量の調整が変動）、100%リーニアミン溶液量と 100%CO₂回収量に補正した。

***目標値のリボイラー熱量は、100℃以上の高温機器からの熱損失を算出しないケースと算出したケースの値を示した。

アミンリボイラーへの供給熱量は目標上限値よりも小さい 0.882～0.923 GJ/t-CO₂程度となった。そして、アミンリボイラー加熱用スチームを製造するスチームボイラーの熱効率（90%）とアミン溶液循環ポンプ電気消費（熱量に換算）を加算した分離・回収エネルギーは、目標値 1.22 GJ/t-CO₂（代表組成ケース）よりも小さな値（1.16～1.20 GJ/t-CO₂）を達成し、良好な結果となった。

なお、分離・回収エネルギーの算出は以下の計算式を用いた。

$$\begin{aligned} \text{分離・回収エネルギー (GJ/t-CO}_2\text{)} = & \\ & \text{CO}_2\text{放散塔リボイラー熱量 (GJ/t-CO}_2\text{)} / (\text{スチームボイラー効率}) + \\ & \text{分離・回収設備電力消費量 (kWh/t-CO}_2\text{)} \times (\text{電気熱量換算係数}) / \\ & (\text{代表発電効率}) \end{aligned}$$

- ・スチームボイラー効率=0.9（ボイラー設計値）
- ・電気熱量換算係数=0.0036（GJ/kWh）
- ・代表発電効率=0.42（LHV 基準）（2012 年度に分離回収エネルギーの算出のために独自に推定した火力発電所の送電端発電効率）

設備設計時の分離・回収エネルギーの期待値は表 2.3-2 に示すように、熱損失なしのケースでは 1.13 GJ/t-CO₂、熱損失ありのケースでは 1.22 GJ/t-CO₂（計算値）であるが、実証試験の性能確認試験では放散塔およびアミンリボイラーからの熱損失が入った場合でも 1.16 GJ/t-CO₂となった。

この性能試験結果において、二段吸収法での吸収塔下段の粗吸収（Bulk Absorption）と低圧フラッシュ塔による 60～70%の CO₂フラッシュの効果で、目標値の運転条件にお

いてアミンリボイラー熱量を大幅に低減できることが検証された。2.5.6 項では海外 CCS プロジェクト (Quest) の低圧フラッシュ塔を設置しない 1 段吸収法での分離・回収エネルギーの実績 (2.79 GJ/t-CO₂) を示したが、性能試験は目標値 1.22GJ/t-CO₂ 以下を達成できたので 56%の削減となっている $((2.79-1.22)/2.79 \times 100\%)$ 。

2.5.6(2)にて 1 段吸収法と 2 段吸収法を燃料費用と電力費用の同一価格 (国内価格) で比較したところ、1 段吸収法がトン当たり 2,013 円上昇する結果となったため、燃料および電力費用が高価な状況における国内 CCS プロジェクトを推進するためには、2 段吸収法が有効なプロセスと評価できる。

2.3.3 CO₂回収率と分離・回収エネルギーの相関

本実証試験設備は CO₂回収率を 99.9% (代表組成ケース) に設定したが、PSA 精製法水素製造、IGCC に CCS を適用するケースでは 90%~95%程度に回収率を下げて分離・回収エネルギーを低減することが想定される。CO₂回収率と分離・回収エネルギーの相関を実証するため、シミュレーションにて相関性を予測した後、CO₂回収率を低下させる実証運転を実施した。その結果を図 2.3-2 に示す。

CO₂原料ガスの発生源である PSA 装置は 10 塔から構成され、各塔内の吸着剤 (分子篩) で水素の不純物 (CO₂、CH₄、CO) を吸着・脱圧・脱着・加圧等のステップを各塔の入口・出口に設置された切換弁によって繰り返し行われる。そのサイクル運転によって原料ガス (PSA オフガス) が変動するため、可能な限り設計流量の 98%~100%の範囲に保持して、リーンアミン流量とリボイラーsteam量を開始点 (基準値 100%とする) から 5%毎に段階的に減少させ 80%まで低下させた (回収 CO₂純度は 99.5%一定に維持)。

リーンアミン量が 80%では分離・回収エネルギーを 82%まで低減できると予測したが、実証運転では 86%であった。リーンアミン流量とリボイラーsteam量を 80%に減少して (横軸左端)、回収率は 95% (◆左側縦軸)、分離・回収エネルギーは 86% (▲右側縦軸) を達成した。

即ち、95%回収率では (吸収塔出口の CO₂濃度 5.1%)、回収 CO₂当たりの分離・回収エネルギー (GJ/t) を約 9.5% (=1-86/95) 減少できることを示唆している。

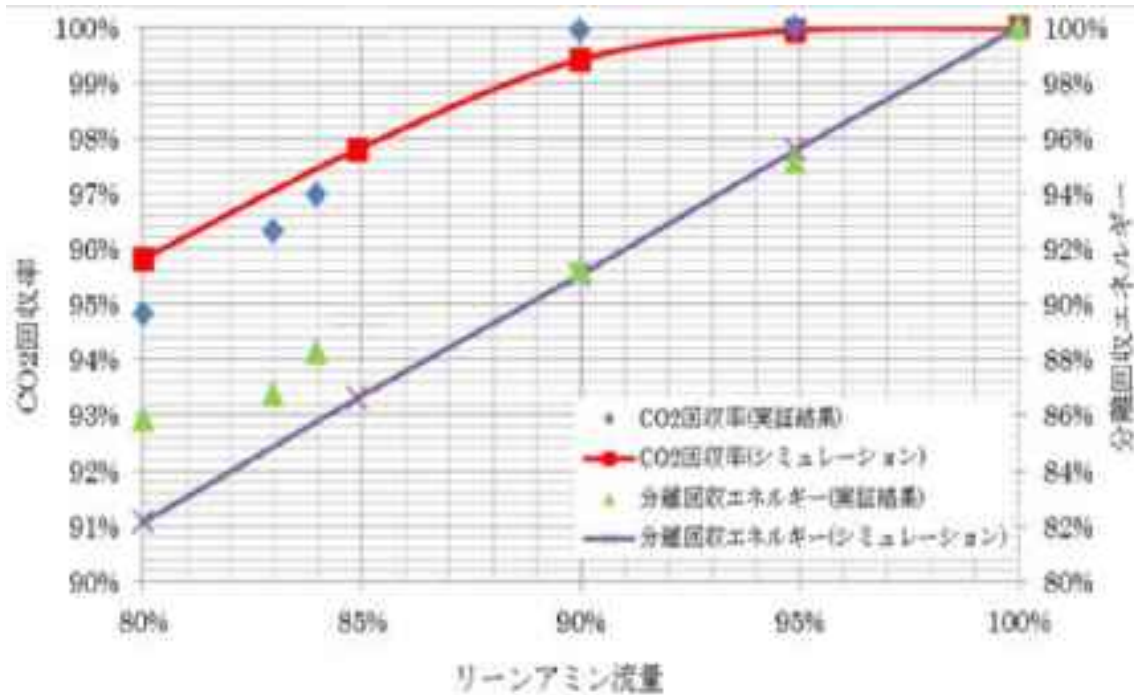


図 2.3-2 CO₂回収率と分離・回収エネルギーの相関

本実証試験設備では、吸収塔出口でのオンライン CO₂分析計（赤外線式）の測定上限値が 5%であるため、回収率が 95%以下の試験はできなかった。

CCS 商業化の際に回収率の低下が許容されるケースでは、費用対効果を勘案した最適回収率の詳細な経済性検討（Feasibility Study、以下、「FS」と称する。）が必要である。

2.3.4 分離回収エネルギーのさらなる低減

実用化に向けた検討のために、本実証試験目標値（熱損失なしケース）からさらに分離回収エネルギーを低減できる、新たな方法（以下、「画期的プロセス構成（Innovative Process Layout）」と称する。）のシミュレーションを実施した。

プロセスの機器構成は、図 2.3-1 に低低圧フラッシュ塔（Low-Low Pressure Flash Tower : LLP）と小型圧縮機を追加したもので、分離回収エネルギーは 0.73 GJ/t-CO₂に低減できる結果を得た。シミュレーションの主な結果を表 2.3-3 に示す。

画期的プロセス構成では、吸収塔下段（Bulk Absorber）、吸収塔上段（Lean Absorber）、放散塔、低圧フラッシュ塔の直径を縮小できるため、設備費用の増加は少ないと期待される。

画期的プロセス構成は、本実証試験の二段吸収法に軽微な設備を追加することで達成できるため、信頼性が高く、熱エネルギー（リボイラー熱負荷）の大幅削減は CCS コスト

削減に非常に有効であるため、今後の実用化レベルの FS では画期的プロセス構成も検討に値すると考える。

表 2.3-3 画期的プロセス の分離・回収エネルギー

Process Layout		実証試験 目標値	画期的プロセス構成 計算値
CO ₂ Capture	t/h	25.3	26.4
Lean Amine	Relative flow	100 (Base)	49.4
Semi-Lean Amine	Relative flow	100 (Base)	99.8
Reboiler Heat Duty	GJ/t	0.862	0.487
Capture Energy			
Heat	GJ/t	0.958	0.541
Electricity	kWh/t	19.2	22.1
Overall Capture Energy	GJ/t	1.13	0.73

2.4 CO₂分離・回収／圧入設備の実証結果まとめ

平成 28 年度（2016 年度）の実証試験開始から、44 ヶ月にわたる分離・回収／圧入の実証試験において、実施計画書で設定した以下の 7 項目の課題を全て実証することができた。各課題の結果は 2.2.1～2.2.7 に記載したが、主な成果を下にまとめた。

1) 供給設備の運転、検証

供給ガス量と着圧の変動に対する自動化運転の追従性、自動緊急停止（ESD）とフレアスタックへの緊急放出等の安全対策等が適切であることを実証した。

2) 分離・回収設備の運転、検証

実施計画書に掲げた CO₂回収量、回収率、回収 CO₂純度、分離・回収エネルギー、アミン溶液の安定性を検証し、すべての目標を達成することができた。分離・回収エネルギーは、目標値 1.22 GJ/t-CO₂ よりも小さな値（1.16～1.20 GJ/t-CO₂）を達成し、良好な結果となった。さらにプロセスフローを改善することで 0.73 GJ/t-CO₂ の可能性を検討した。

3) 圧入設備の運転、検証

萌別層に流量制御方式および圧力制御方式で安定的に圧入ができること、さらに高圧の滝ノ上層への小流量一定圧入運転を検証することができた。

4) 運用システムの検証

運転期間に分離・回収／圧入設備および用役設備で発生した緊急遮断システム作動の実績を解析し、システムの妥当性を検証した。

5) 保安管理・保安設備の運転、検証

分離・回収／圧入設備の異常事態を想定した保安設備の安全性を検証し、操業に係る規程類を体系的に作成し運用した。

6) 日常保全および定期保全

設備保全に関する管理規程、要領、および年間計画を適切に運用することができた。

7) 安全・環境管理

安全衛生および環境に関する管理規程、要領、および年間計画を実証試験で適用し、実証試験期間を通じての安全環境管理の実績をまとめた。

設備の一部に不具合が発生したが、それらの原因究明と適切な対策を実施し、トラブル事例として表 2.2-2 にまとめ、さらに各項目の詳細を社内のデータベースにまとめた。さらに、回収率と分離回収エネルギーの相関性、画期的プロセス構成による更なる分離回収エネルギーの低減等の成果は、CCS の実用化の際の最適な設備設計に貢献できるよう、2.5 節の実用化モデルで CCS コストの削減幅を試算した。

2.5 実用化モデルの CCS コスト試算

本事業では年間 20 万 t 規模の CCS の技術の課題を明確にした。年間 20 万 t の設備能力は、D1-1 基地の水素製造装置で予定外の生産調整や操業停止等が生じて、年間 10 万 t の圧入を確実に確保するために設定したものである。次に、実用化段階で想定される規模に拡大する場合の技術的課題とその実現のための手段と方法を明確にするために、年間 100 万 t 規模の CCS 設備のコストを推算した。コストデータは本事業の EPC 実績コスト（2015 年 9 月建設業務終了）および 2016 年度の操業費を基準とした。推算の前提条件として、設備の耐用年数を 25 年とし、減価償却費は毎年均等とした（EPC コスト/25）。年間 20 万 t 基準で t 単価（圧入 CO₂ の t 当たり分離・回収／圧入・貯留・モニタリングコスト）を算出し、次に年間 100 万 t 基準で t 単価を算出した。

2.5.1 設備コスト試算の仮定（年間 20 万 t-CCS）

設備コストの試算にあたっては、本事業のプロセスフロースキーム（図 2.5-1）の代わりに、水素製造、アンモニア製造および IGCC（石炭ガス化複合発電）の CCS に適用できる実用化モデル（将来の商業段階モデル）を想定し（図 2.5-2）、年間 20 万 t を分離・回収／圧入する設備コストを推算した。

本事業では、排出源側（D1-1 基地）の CO₂ 原料ガスの種類や供給条件の制約から、PSA ガス精製ユニットの下流から低圧の PSA オフガスを送気したため、CCS の分離・回

収／圧入に直接的には必要とされない付帯設備も設置した（図 2.5-1、図 2.5-3 を参照）。しかし、CO₂ 原料ガスを PSA 上流から分岐することも可能で、その場合には高圧（2.5 MPaG 前後）で分離・回収できる（CO₂ 分圧は 0.47 MPaA）。PSA 上流からの分岐と CO₂ 回収後の水素原料ガスの返還を図 2.5-3 に示す。この流れにより上記の付帯設備に該当する高圧ボイラー、発電設備、D1-1 基地への給電設備、PSA オフガスブローア、PSA オフガス圧縮機等を除外し、水素製造やアンモニア製造の CCS に適用できる実用化モデル（将来の商業段階モデル）とした。

表 2.5-1(1)～(2)に、本事業 CCS と実用化モデル CCS の相違箇所をまとめた。なお、本事業では、CO₂ 圧入設備は分離・回収設備と同一敷地（D1-2/D0 基地内）に設置されているため、長距離の CO₂ 輸送パイプラインは不要であった。

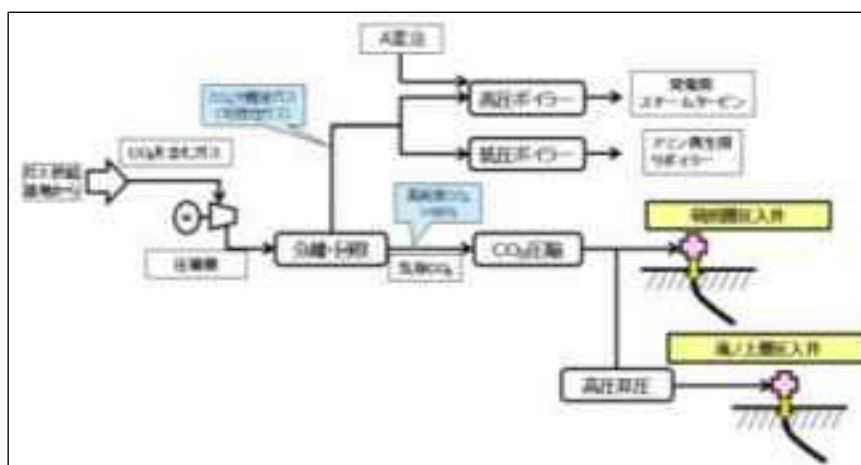


図 2.5-1 本事業のプロセスフロースキーム（分離・回収／圧入設備の構成）

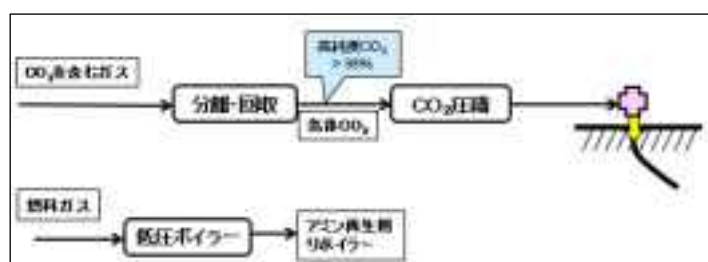


図 2.5-2 実用化モデルのプロセスフロースキーム（分離・回収／圧入設備の構成）

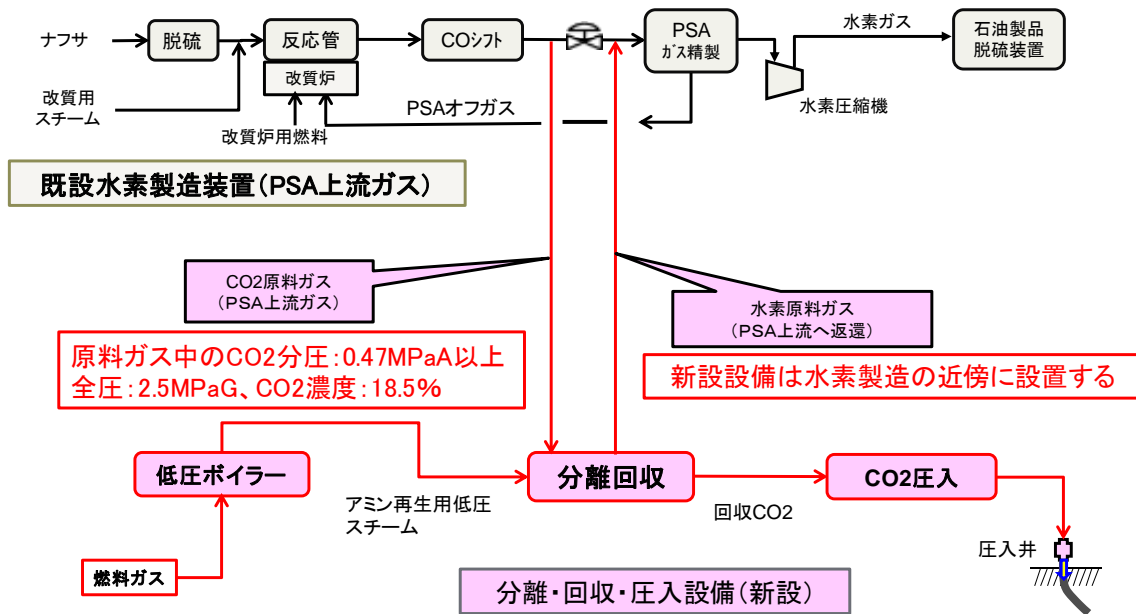


図 2.5-3 実用化モデルでの CO₂ 排出源と原料ガスの流れ

表 2.5-1(1) 地上設備構成の相違箇所

設備構成	本事業	実用化モデルにおけるイメージ
原料ガス圧縮設備	原料ガス圧縮機	なし
CO ₂ 圧縮設備	第一低圧・第二低圧圧縮機 高圧圧縮機	第一低圧・第二低圧圧縮機
自家発電設備	高圧蒸気発電機	なし
ボイラー設備	高圧ボイラー 低圧ボイラー	高圧ボイラー: なし 低圧ボイラー: あり (アミン再生用)
循環冷却水設備	冷却塔	なし
排水処理設備	加圧浮上設備	なし
純水製造設備	イオン交換式純水製造設備	なし

表 2.5-1(2) 貯留設備構成の相違箇所

モニタリング構成	本事業	実用化モデルにおけるイメージ
圧入井	滝ノ上層圧入井 IW-1 萌別層圧入井 IW-2	滝ノ上層圧入井 IW-1：なし 萌別層圧入井 IW-2：あり
観測井	滝ノ上層観測井 (OB-1,OB-3) 萌別層観測井 (OB-2)	OB-1,OB-3：なし OB-2：あり
海底受振ケーブル	貯留地点直上を通過する 1 測線	なし
二次元弾性波探査	圧入中隔年	なし
三次元弾性波探査	圧入中隔年	25 年に 10 回実施

2.5.2 運転コスト試算の仮定（年間 20 万 t-CCS）

燃料ガス、電気、工業用水、冷却水、窒素等の用役消費量は本事業の実績値を基に実用化モデルの設備構成用に再計算し、さらに CCS による CO₂ 排出量を算出した（燃料、電力消費量当たりの排出係数から算出）。主な用役消費量を以下に示す。

- 1) スチーム供給熱量：アミン再生用 21.8 GJ/h、設備加熱用 9.2 GJ/h、合計熱量 31 GJ/h
- 2) 電力消費量：アミンポンプ用 490 kW、ボイラー駆動用 74 kW、CO₂ 圧縮用 3,941 kW、共通設備用 117 kW、合計電気量：4,622 kW

弾性波探査については、三次元弾性波探査を 25 年で 10 回実施とした。環境省「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可申請に係る指針」によると、特定二酸化炭素ガスの位置および範囲等の地震探査は、海底下廃棄実施期間（最長 5 年）内に 2 回程度と定めている。

設備の保全コストは設備コストの 3.7%/年と想定し、年間稼働時間は 7,920 時間（24 時間/日、330 日/年）とした。なお、3.7%/年は本事業の実績値であり、330 日/年は年間の SDM を 35 日予定した場合の連続運転日数である。

燃料ガス単価については、液化天然ガス価格（CIF）2018 年 1 月～2019 年 12 月平均額に諸経費を加算し 1,205 円/GJ とした（消費税抜きでガス仕様としては、40 MJ/Nm³（LHV）で 48.2 円/Nm³に相当）。この諸経費は内閣府資料 LNG の燃料諸経費で 2,200 円/t とした。

電力単価については、新電力ネット（一般社団法人エネルギー情報センターが運営する

会員制情報サイト)のホームページに掲載されたガス火力発電単価データ(2018年1月～2019年12月平均額)より、10.84円/kWhとした(消費税抜き)。なお、電力単価を変化させた場合の試算結果は、2.5.5(1)で示した。

2.5.3 設備および運転コスト(年間20万t-CCS)

年間20万t実用化モデルの設備コストと運転コストを表2.5-2にまとめた。

表 2.5-2 年間20万t実用化モデルの設備コストと運転コスト(消費税抜き)

設備構成 コスト分類	設備コスト		運転コスト		合計	
	円/t	%	円/t	%	円/t	%
分離・回収	335	3.0	1,860	16.7	2,195	19.7
CO ₂ 圧縮	385	3.4	2,174	19.5	2,559	22.9
共通設備	132	1.2	686	6.2	818	7.4
圧入井・貯留	922	8.3	4,635	41.7	5,557	50.0
合計	1,774	15.9	9,355	84.1	11,129	100.0

年間20万t圧入の小規模ケースの場合、CCSコストは11,129円/t-CO₂と推算した。設備コストは1,774円/t-CO₂(CCSコストに占める割合15.9%)、運転コストは9,355円/t-CO₂(同84.1%)となった。ここで示すCCSコストはキャプチャーコスト(Cost of CO₂ Captured)であり、CCSコストを圧入したCO₂量(単位はt)で除した値である。

運転コストの中では、低圧スチームボイラー用の燃料コスト(燃料コストはスチーム供給熱量をボイラー効率90%で除した値)が1,664円/t-CO₂、電力コストが2,008円/t-CO₂で、この二つの占める割合が大きい(同33.0%)。その理由は燃料ガスと電力の単価にある。本事業では、実用化モデルにおいても燃料ガスと電力を外部から購入することとしたが、CCS設備が水素製造・アンモニア製造・石炭ガス化発電等に隣接する場合は同一工場で燃料ガスや電力を融通することができ、その場合は、それらの単価は大幅に低減できるものと考えられる。

CO₂圧縮の運転コストが2,174円/t-CO₂でCCSコストの19.5%を占める。この大部分はCO₂圧縮機の電力コストによるものであり、コスト低減には圧縮機効率の向上が重要である。分離・回収の運転コストは1,860円/t-CO₂でCCSコストの16.7%を占め、そのうちアミンリボイラー熱のコストは1,171円/t-CO₂(CCSコストに占める割合の10.5%)で

二段吸収法の採用による熱エネルギー低減効果が発揮されている（アミン再生熱が 0.862 GJ/t-CO₂に低減する）。

海洋環境調査は 1,540 円/t-CO₂（308 百万円/20 万 t）で、CCS コストの 13.8%を占めるため、その削減は重要である一方で、実用化に向け、必要な調査回数のみ実施することにより、一定程度の削減は可能なコストと考えられる。

CO₂排出係数は 0.165 であることから、アボイデットコスト（Cost of CO₂ Avoided）は 13,328 円/t-CO₂と算出された。ここでアボイデットコストは、CCS コストを「（圧入した CO₂ 量；単位は t）－（CCS で発生した CO₂ 量；単位は t）」で除した値である。

2.5.4 年間 100 万 t-CCS のコスト推算

年間 100 万 t 規模の分離・回収／圧入・貯留では、スケール効果による設備コストの低減が期待できる。そして、電力消費量の削減、CO₂排出係数の低下、アボイデットコストの低減等には CO₂圧縮機動力の低減が重要である。

設備構成は 50 万 t/年×2 系列とし、地上設備の EPC コストは 0.6 乗法則を適用し（2.5 倍の 0.6 乗×2 系列で年間 20 万 t-CCS 設備の 3.46 倍）、100 万 t の設備コスト（円/t-CO₂）は 20 万 t の 0.693 倍（=3.46/5 倍）とした。

CO₂圧縮機は大型モデルによる効率向上（インペラーサイズ・枚数等の増加）により、約 22%の動力（156⇒122 kWh/t-CO₂）を削減することができると推測した結果、圧縮コストは 377 円/t-CO₂減少し、圧縮機冷却水コストは 23 円/t-CO₂減少した。この動力削減により CO₂排出量が 17 kg/t-CO₂減少するため、排出係数は 0.148 となる。なお、燃料ガス単価および電力単価については、2.5.2 に記載した 20 万 t のケースと同額と仮定した。

さらに、100 万 t の年間保全コスト（設備コストの 3.7%）も 20 万 t の 0.693 倍となり、241 円/t-CO₂減少したので、100 万 t の分離・回収／圧入の運転コストは合計 641 円/t-CO₂減少し、4,079 円/t-CO₂となった。

100 万 t での圧入井・観測井設備費は 20 万 t の 2 倍（円/t-CO₂では 1/2.5）、年間モニタリング費は 20 万 t の 2 倍、年間弾性波探査費は 25 年で 10 回、年間海洋環境調査費は 20 万 t と同額と仮定したため、圧入井・貯留運転コスト（円/t-CO₂）は 1/4 となった。

年間 20 万 t と年間 100 万 t との CCS コストの推算値の比較を表 2.5-3 に示す。100 万 t 実用化モデルでは 6,186 円/t-CO₂（Captured）、7,261 円/t-CO₂（Avoided）となった。

なお、今回のコスト試算は、苫小牧の実証データを基に、年間 20 万 t 規模の実用化モデルのコストを試算し、さらに前述の仮定の下で年間 100 万 t 規模の実用化モデルのコストを試算したものである。

表 2.5-3 実用化モデルでの年間 20 万 t-CCS と年間 100 万 t-CCS のコスト比較

CCS コスト (円/t-CO ₂)	20 万 t (実用化モデルにおける イメージ)	100 万 t (実用化モデルにおける イメージ)
1) 分離・回収／圧入		
設備コスト	852	590
運転コスト	4,720	4,079
合計	5,572	4,669
2) 圧入井・貯留		
設備コスト	922	369
運転コスト	4,635	1,148
合計	5,557	1,517
3) 総合計		
Captured	11,129	6,186
Avoided	13,328	7,261
4) CO ₂ 排出係数 (分離・回収／圧入設備から排出された CO ₂ t 数) ÷ (分離・回収／圧入した CO ₂ t 数)		
t-CO ₂ /t-CO ₂	0.165	0.148

2.5.5 年間 100 万 t-CCS のコストに関する各種検討

(1) 電力単価が CCS コストに与える影響

2.5.4 「年間 100 万 t-CCS のコスト推算」では電力単価は 10.84 円/kWh と仮定したが、当該単価を変更した場合の CCS コスト (Captured) を試算した。100 万 t 実用化モデルにおいて、燃料ガス単価ごとの試算結果を図 2.5-4 に示した (電力単価 10.84 円/kWh、燃料ガス単価 1,205 円/GJ が今回の仮定値、電力単価 15.42 円/kWh、燃料ガス単価 1,072 円/GJ が平成 28 年度に試算した際の仮定値)。燃料ガス単価 1,205 円/GJ の今回のケースで、仮に電力単価を 5.0 円/kWh とした場合では、CCS コストは 5,307 円/t-CO₂ (Captured) まで低下することが分かった。

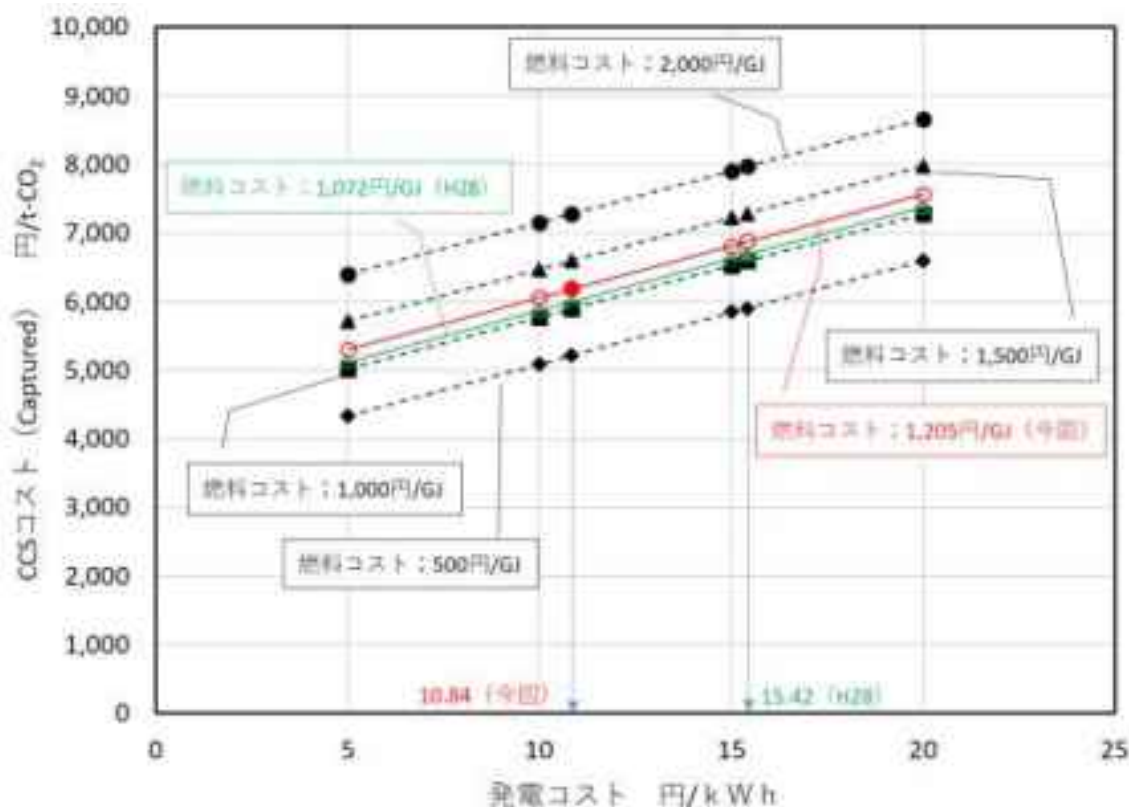


図 2.5-4 電力単価と CCS コスト (Captured) の関係 (100 万 t 実用化モデル)

(2) CO₂回収率が CCS コストに与える影響

2.3.3 「CO₂回収率と分離・回収エネルギーの相関」において、回収率を 99.9% から 95% に減少させた場合は、分離・回収エネルギーを約 9.5% 低減できることを試算した (回収率 95% 以下の試験が本実証試験設備で不可であることは、2.3.3 を参照)。

この場合、100 万 t の実用化モデルのアミンリボイラー熱費用 1,170 円/t-CO₂ およびアミンポンプ電気費用 245 円/t-CO₂ の合計 (1,415 円/t-CO₂) で 134 円/t-CO₂ 削減でき、CCS コストは 6,052 円/t-CO₂ (Captured) となる。

(3) 将来プロセスによる CCS コストの試算

2.3.4 「分離回収エネルギーのさらなる低減」では、画期的プロセス構成により分離・回収エネルギーは 1.130 GJ/t-CO₂ から 0.730 GJ/t-CO₂ まで低減できることが期待された (表 2.3-3 参照)。この場合、実用化モデルのアミンリボイラー熱費用 1,170 円/t-CO₂ は 502 円/t-CO₂ 減少し、アミンポンプ電気費用 245 円/t-CO₂ は 31 円/t-CO₂ 増加して、合計では 471 円/t-CO₂ (31.3%) 低減できるため、CCS コストは 5,715 円/t-CO₂ (Captured) と 6,708 円/t-CO₂ (Avoided) まで削減することができる。

2.5.6 海外 CCS プロジェクトのコスト調査

海外の大規模 CCS プロジェクトでは、Quest CCS Project (Alberta, Canada) の CCS コストが公表されているため、その内容を調査した。本プロジェクトは Scotford Upgrader 製油所の水素製造装置の PSA 上流から CO₂ 原料ガスを分岐して CO₂ 回収後のガスは PSA 上流に返還しているため、図 2.5-1 と同じガスの流れである。年間 100 万 t 以上の CO₂ を分離・回収・圧縮し、65 km のパイプラインで輸送したのち、地下 2,000 m の貯留層に圧入している。

2015 年 8 月から CO₂ 輸送を開始し、2016 年～2018 年の 3 年間で 331.4 万 t (平均：年間 110.5 万 t) を貯留した。そのコスト分析結果 (3 年間の平均値) を実用化モデルと比較して表 2.5-4 に示す。

表 2.5-4 実用化モデルと Quest CCS Project の CCS コスト比較

比較項目		実用化モデルにおけるイメージ	Quest CCS (3年間平均)
1	排出源	水素製造 PSA 上流	水素製造 PSA 上流
2	年間圧入量	100 万 t	110.5 万 t
	分離・回収・圧縮	工場内に設置 50 万 t 設備：2 系列	製油所内に設置 吸収塔：3 系列 放散塔：1 系列 圧縮機：1 系列
	輸送	無し	65 km
	貯留・モニタリング	工場隣接に設置 圧入井 2 本 坑口圧力：9.3MPaG	圧入井：1 本×2 ヶ所 (+1 本予備) 坑口圧力：9.6MPaG
3	分離回収率、回収量	99.9%, 126.5t/h	82%, 148.4t/h
	リボイラー熱量	0.862 GJ/t-CO ₂	2.27 GJ/t-CO ₂
	ポンプ電気消費量	19.2 kWh/t-CO ₂	31 kWh/t-CO ₂
	分離回収エネルギー	1.13 GJ/t (Design)	2.79 GJ/t
4	CO ₂ 圧縮機		
	段数	4 stages	8 stages
	吸込/吐出圧力 (MPaG)	0.05/9.3	0.03/10.5 (PL 入口)
	圧縮動力 (kWh/t)	122	113
5	設備コスト (CAPEX) 百万円 @85 円/Canadian\$		
	初期投資額	分離～圧縮：14,761 輸送：0 貯留・観測：9,214 設備合計：23,975	分離～圧縮：56,130 輸送：12,650 貯留・観測：10,270 設備合計：79,050
	償却年数	25 年	25 年 Fixed Charge
	年間償却率	ゼロ	Factor=0.062
年間償却コスト	959 百万円 (23,975/25)	4,895 百万円 (=79,050 × 0.062=79,050/25 × 1.55)	
6	運転コスト (OPEX) 百万円/年 @85 円/Canadian\$		
	年間燃料コスト	1,664@1,205 円/GJ	618@490 円/t-steam (233 円/GJ)
	年間電気コスト	1,631@10.84 円/kWh	433@2.84 円/kWh
	モニタリング/弾性波 探査/海洋調査	465+344+308=1,117	504 (MMV, Seq-Ope)
	設備保全+その他	569+246=815	963 (人件費、税金含 む)
	年間合計	5,227	2,518
7	年間合計コスト (OPEX+CAPEX)	5,227(85%) + 959(15%) =6,186 百万円/年	2,518(34%)+4,895(66%) =7,413 百万円/年
8	CO ₂ 排出係数 (t-CO ₂ /t-CO ₂)	0.148	0.208
9	CCS コスト	t 単価 (円/t-CO ₂)	t 単価 (円/t-CO ₂)
	Captured	6,186	6,708 (5,501) *
	Avoided	7,261	8,470 (6,946) *

* () 内の数値は CO₂パイプラインの設備コストと労務費用を除外した CCS コスト

Quest CCS コスト解析の主な結果を下に列記する。

- 1) Quest の CCS コスト (Captured) は日本円に換算して 6,708 円/t-CO₂ であるが、実用化モデルと比較するために長距離パイプラインの設備費 (12,650 百万円) を年間償却費に換算して (783.2 百万円/年)、CO₂ 回収量 1.105 百万 t/年で割り算すると 709 円/t-CO₂ となるため、パイプラインを除外した CCS コストは 5,999 円/t-CO₂ に相当する。更に、Quest では OPEX に労務費用 (Direct Labor and Personnel Costs) として 550 百万円が入っているため (498 円/t-CO₂)、これを差し引くと 5,501 円/t-CO₂ に相当する。
- 2) Quest の OPEX=2,518/1.105=2,279 円/t (34%)、CAPEX=4,895/1.105=4,430 円/t (64%) の割合は、実用化モデルの OPEX=5,227 円/t (85%)、CAPEX= 959 円/t (15%) の割合と大きく異なるが、Quest の燃料単価および電力単価が実用化モデルの約 1/4~1/5 であることが OPEX 差の原因である。
参考として、Quest の分離・回収エネルギーを実用化モデルと同じ燃料単価 (1,205 円/GJ) と電気単価 (10.84 円/kWh) で比較すると、燃料費用は 1,885 円/t (= (2.27-0.862) × 1205/0.9)、電気費用は 128 円/t (= (31-19.2) × 10.84) で合計 2,013 円/t の差額となり、実用化モデルが大幅に分離・回収コストを削減したことになる。
- 3) Quest の CAPEX はパイプラインコストを除外しても実用化モデルとの差は大きい。Quest では主要機器の耐用年数を 30 年で設計し、更に主要機器は実用化モデルより高品質である。例えば、吸収塔、放散塔のインターナルは実用化モデルでは不規則充填物を使用しているが Quest では特殊なトレイを使用している。CO₂ 圧縮機は実用化モデルの 4 段に対し 8 段としている。圧入 CO₂ の脱水は実用化モデルでは気液分離方式であるが Quest では TEG 方式である。
- 4) 更に、Quest の CAPEX 償却費用には FCF (Fixed Charge Factor) を使用しているため、実用化モデルの単純平準ファクター (1/25) の 1.55 倍となっている。

2.5.7 CCS コスト試算のまとめと考察

本事業で蓄積した EPC 実績コストおよび実証試験で検証した用役消費量 (分離・回収エネルギーおよび CO₂ 圧縮動力等) を基準とし、年間 100 万 t 圧入を想定した実用化モデルの CCS コストを試算した。

モデルには以下のような主な条件を設定した。

- 1) 水素製造装置の PSA 上流から CO₂ 原料ガスを分岐し、CO₂ を分離・回収・圧入し、CO₂ を回収した後の水素含有ガスは PSA 上流に返還する。この原料ガス条

件はアンモニア製造、LNG 製造、ガス化発電（空気吹き）等の分離・回収条件（ガス圧力、CO₂分圧、ガス温度等）にも類似している。

- 2) 長距離 CO₂ パイプライン設備費用は含まない。
- 3) 設備運転期間は 25 年を想定し、設備費用の年間償却には金利、税金、利益を含まない（25 年間の平準化）。
- 4) 分離・回収・圧入設備は製油所内に設置されたため、燃料ガス、高圧電気、ボイラー供水、冷却水等の用役は製油所から有償で買い取りできるものと考え、管理棟、排水処理設備も製油所と共有できるものとする。さらに、設備運転員は製油所と融通できると想定し、その労務費は考慮しない。

以上の条件で、CCS コストは 6,186 円/t-CO₂ (Captured) 、7,261 円/t-CO₂ (Avoided) となった。さらに、回収率の低下（99.9%から 95%への変化）、「画期的プロセス構成」による分離・回収エネルギーの低減（1.22 GJ/t-CO₂から 0.73 GJ/t-CO₂）等を勘案すると、CCS コストは 5,580 円/t-CO₂ (Captured) 、6,360 円/t-CO₂ (Avoided、CO₂ 排出係数が 0.122 に減少) まで減少が期待できる。

一方、カナダのアルバータ州では Quest CCS プロジェクトの運転が稼働し（年間 110 万 t 圧入実績）、その CAPEX および OPEX が公表されているため、実用化モデルと比較した。

比較のために CO₂ パイプラインと運転労務費を除外した CCS コストは、5,501 円/t-CO₂ (Captured) 、6,946 円/t-CO₂ (Avoided) となった。

国内での実用化モデルと Quest プロジェクトでは、燃料コストや電気コストが 4~5 倍の格差があるものの、本事業での分離・回収エネルギーの低減成果および画期的プロセス構成の適用等で運転費用（OPEX）を低減することにより、Quest プロジェクトの実績と同等の CCS コストを達成することが期待できる。

なお、国内の実用化 CCS モデル（年間 100 万 t 貯留）の詳細なコストの試算には、具体的な CCS プロジェクトを想定した、FEED（Front End Engineering Design）が必要であることを付記する。

第3章 圧入井およびCO₂圧入・貯留の実施と結果

本章では、2014～2015年度に掘削したCO₂圧入井の概要、2016～2019年度に実施したCO₂圧入実証試験におけるCO₂圧入状況およびCO₂圧入状況に基づいた貯留層の評価について記述し、CO₂圧入・貯留の実証結果のまとめを示した。

3.1 概要

本事業は、苫小港西港の港湾区域の海底下の異なる深度の2層の貯留層である萌別層および滝ノ上層へCO₂を圧入・貯留するものであり、2016年4月に圧入を開始し、2018年度末（3月31日時点）には累計CO₂圧入量は235,598 tに達し、2019年11月22日には累計圧入量300,110 tを達成した。

3.2 圧入井

本事業における2坑の圧入井はともに陸上沿岸部の坑口地点から沖合の海底下へ向けて掘削された傾斜角（垂直からの角度）が大きな高傾斜井である。圧入井を陸域から海底下に向けた傾斜井として掘削したことで、港湾の運行と漁業に対する影響を低減するとともに、洋上掘削に比べて掘削コストの大幅な削減が実現できた。また圧入時の地層の圧力上昇を抑制するため仕上げ区間を1,100 m以上と長く設けた。

3.2.1 萌別層圧入井 IW-2

図3.2-1に示す萌別層圧入井IW-2は、掘削長3,650 m、垂直深度1,188 m、最大傾斜角約83°で、坑口位置から坑底までの水平距離（水平偏距）が3,058 mの大偏距井（水平偏距と垂直深度の比が2以上の傾斜井）である。萌別層圧入井IW-2の偏距率（水平偏距と垂直深度の比）は、わが国の坑井で最大のものである。

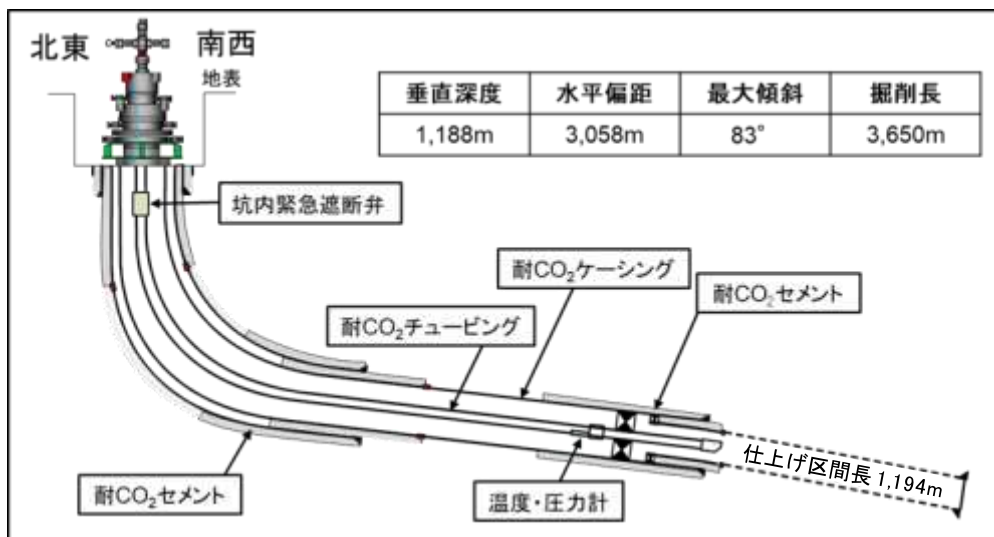


図 3.2-1 萌別層圧入井 IW-2 の形状（模式図）

CO₂は、ケーシング（坑井を保護する鋼管）内に設置したチュービングと呼ばれる鋼管（直径 3.5 インチ）を通して貯留層に圧入する。萌別層圧入井 IW-2 の仕上げ区間は 1,194 m となり、その全区間にわたり図 3.2-2 に示すような孔明管を設置したため、CO₂ は仕上げ区間全体から貯留層の孔隙に浸透可能である。萌別層は固結度が比較的低く、砂粒が坑内に流入することが懸念されたため、仕上げ区間の孔明管を砂粒よりも目が細かいワイヤーラップスクリーンで覆った。

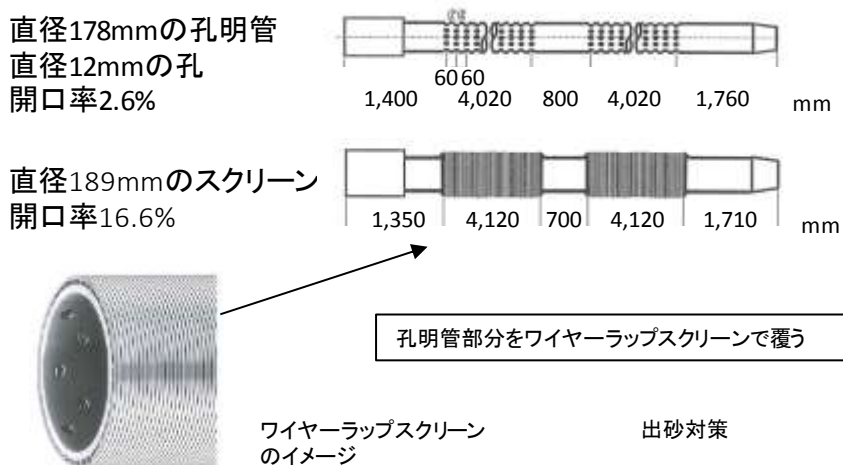


図 3.2-2 萌別層圧入井 IW-2 の仕上げ様式

3.2.2 滝ノ上層圧入井 IW-1

図 3.2-3 に示す滝ノ上層圧入井 IW-1 は、掘削長 5,800 m、垂直深度 2,753 m、最大傾斜

角約 72° で、水平偏距は 4,346 m の高傾斜井である。滝ノ上層圧入井 IW-1 の水平偏距 4,346 m は、わが国で掘削された坑井で最長となる。

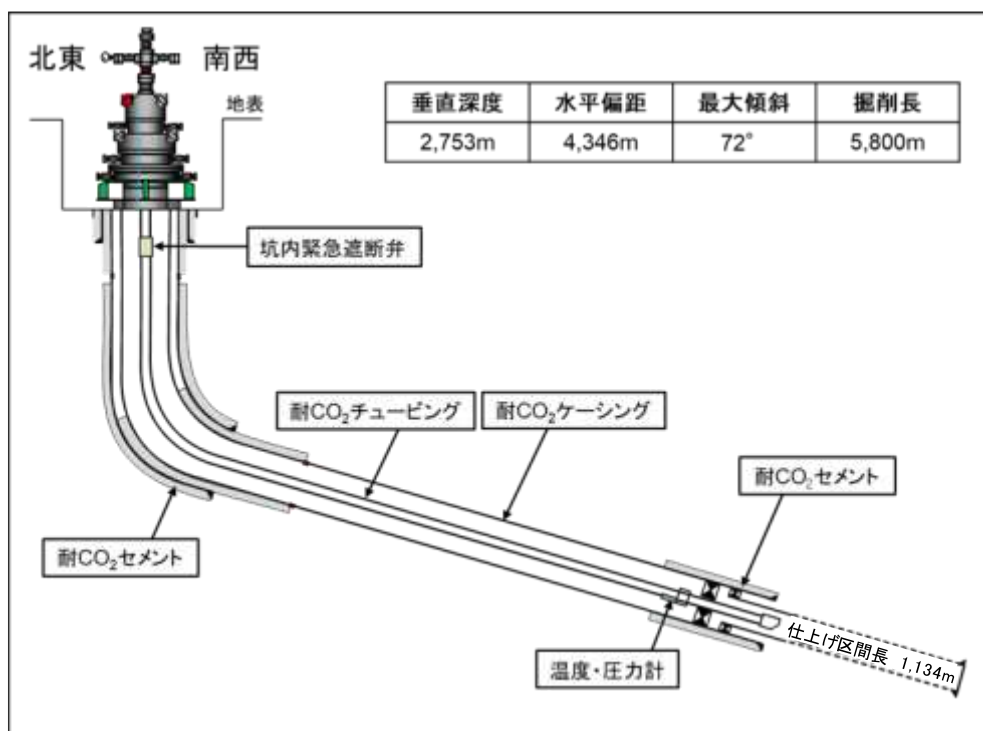


図 3.2-3 滝ノ上層圧入井 IW-1 の形状（模式図）

CO₂ は、ケーシング内に設置したチュービング（直径 3.5 インチ）を通して貯留層に運ばれる。滝ノ上層圧入井 IW-1 の仕上げ区間は 1,134 m となり、その全区間にわたり図 3.2-4 に示すように直径 7 インチのケーシングにスリット等が施されており、CO₂ は仕上げ区間全体から貯留層の孔隙に浸透可能である。

◆ 滝ノ上層 T1 部層区間には、スリット管を設置

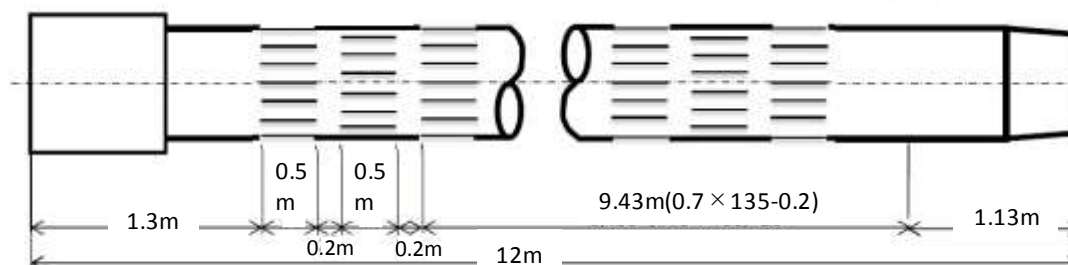


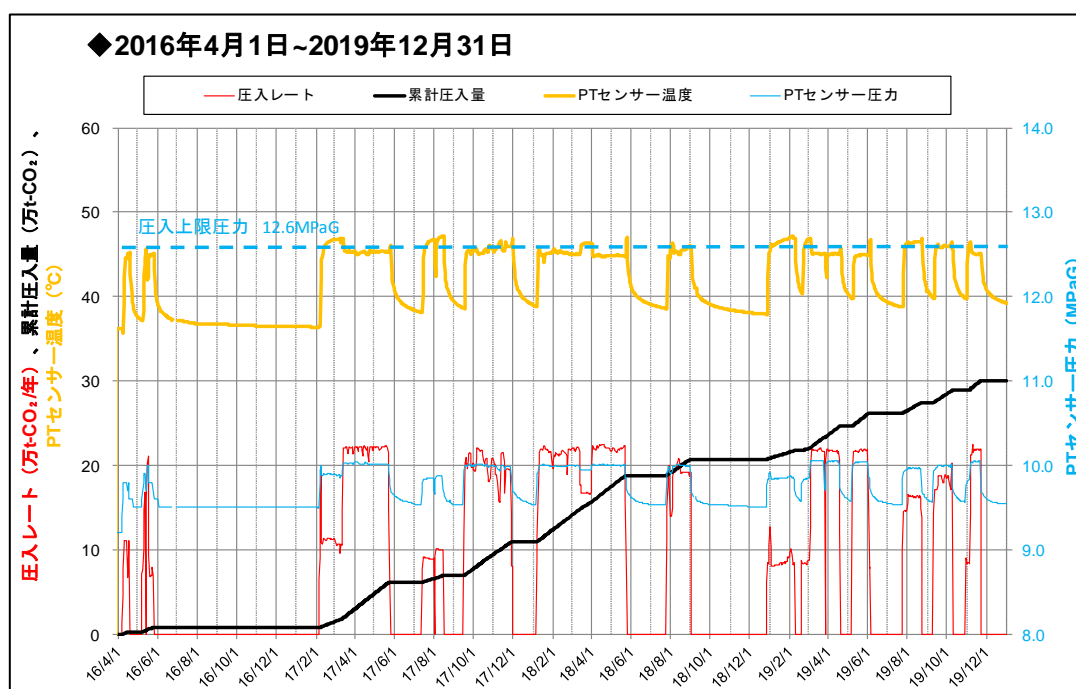
図 3.2-4 滝ノ上層圧入井 IW-1 の仕上げ様式

3.3 貯留層評価

3.3.1 圧入状況

(1) 萌別層への圧入状況

図 3.3-1 に萌別層への圧入実績を示す。萌別層圧入井 IW-2 への CO₂ 圧入は 2016 年 4 月 6 日に開始し、2016 年 4 月 6 日～5 月 24 日まで試験圧入を実施のうえ、2017 年 2 月 5 日から連続的に多量の CO₂ を圧入する本圧入を開始した。これまでの連続圧入レートは 6.7～22.5 万 t/年であり、PT センサーの測定圧力の最大値は 10.07 MPaG で、萌別層の遮蔽層破壊を避けるために圧入井掘削時に測定したリークオフ圧力の 90% として設定した上限圧力 12.63 MPaG に対して十分に低く、圧入開始以降の PT センサーの圧力・温度はあらかじめ想定した範囲内にあった。



PT センサー：坑内の貯留層近くに設置した温度・圧力計

図 3.3-1 萌別層 圧入実績

CO₂ 圧入開始以降、2019 年 11 月 22 日の圧入停止までに 300,012 t を圧入した。萌別層への月間圧入量および累計圧入量の推移を図 3.3-2 に示す。

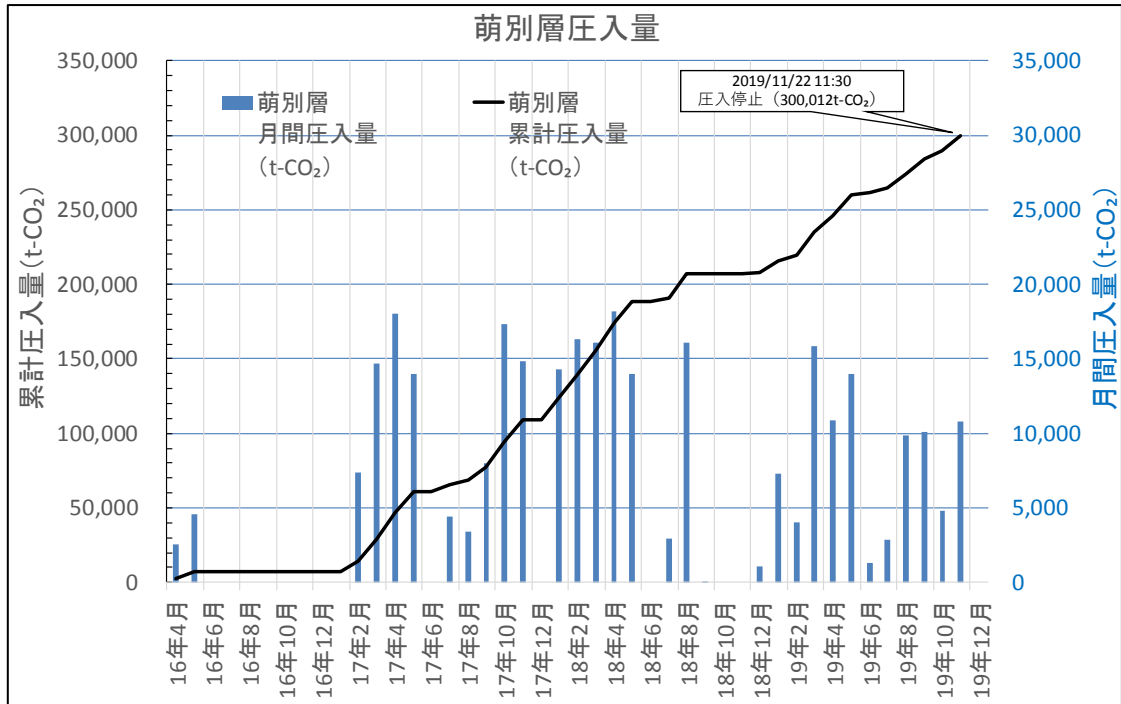


図 3.3-2 萌別層 月別圧入量および累計圧入量

(2) 滝ノ上層への圧入状況

図 3.3-3 に滝ノ上層への圧入実績を示す。滝ノ上層圧入井 IW-1 へは、2018 年 2 月 6 日～2 月 23 日および 2018 年 7 月 31 日～9 月 1 日に試験圧入を実施した。滝ノ上層の遮蔽層破壊を避けるために、圧入井掘削時に測定したリークオフ圧力の 90%として設定した PT センサーにおける上限圧力 38.00 MPaG に対して十分に低い 37.07 MPaG を上限圧力として数週間から 1 ヶ月程度の期間に連続的に圧入した。圧入レートは 435～1,601 t/年となった。圧入開始以降の PT センサー圧力・温度はあらかじめ想定した範囲内にあった。

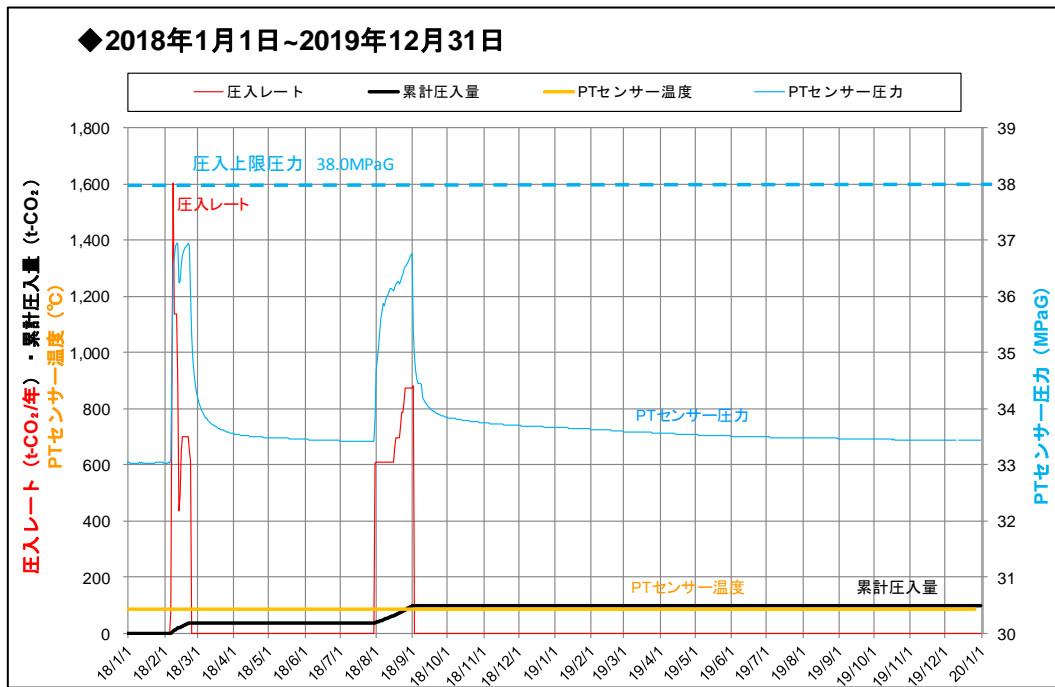


図 3.3-3 滝ノ上層 圧入実績 (日報ベース)

CO₂ 圧入開始以降、2019 年 11 月 22 日までに累計 98t を圧入した。滝ノ上層への月間圧入量および累計圧入量の推移を図 3.3-4 に示す。

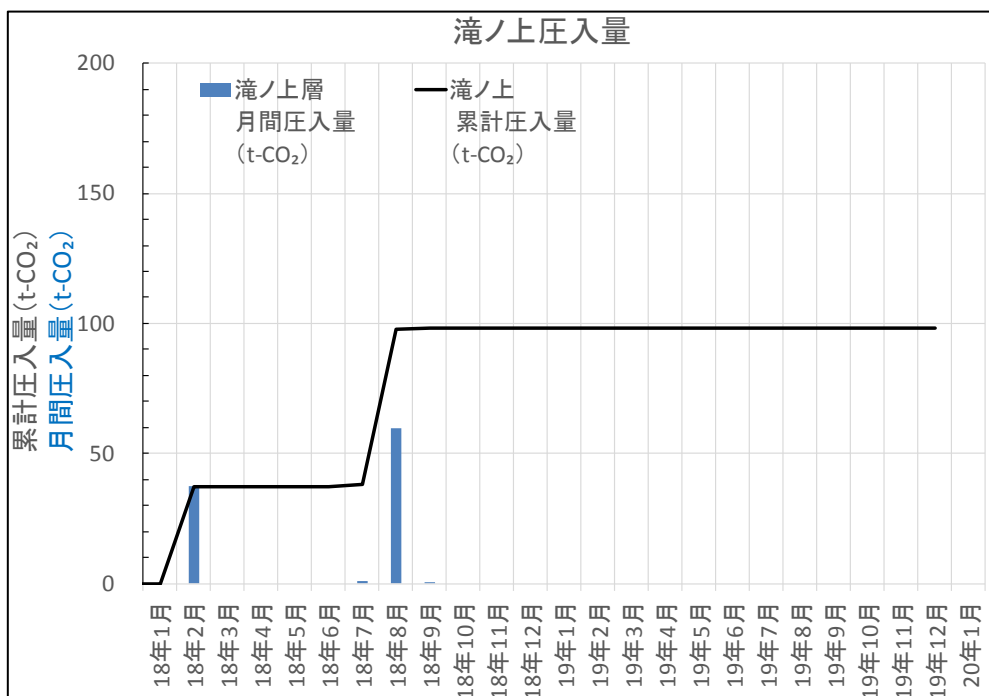


図 3.3-4 滝ノ上層 月別圧入量および累計圧入

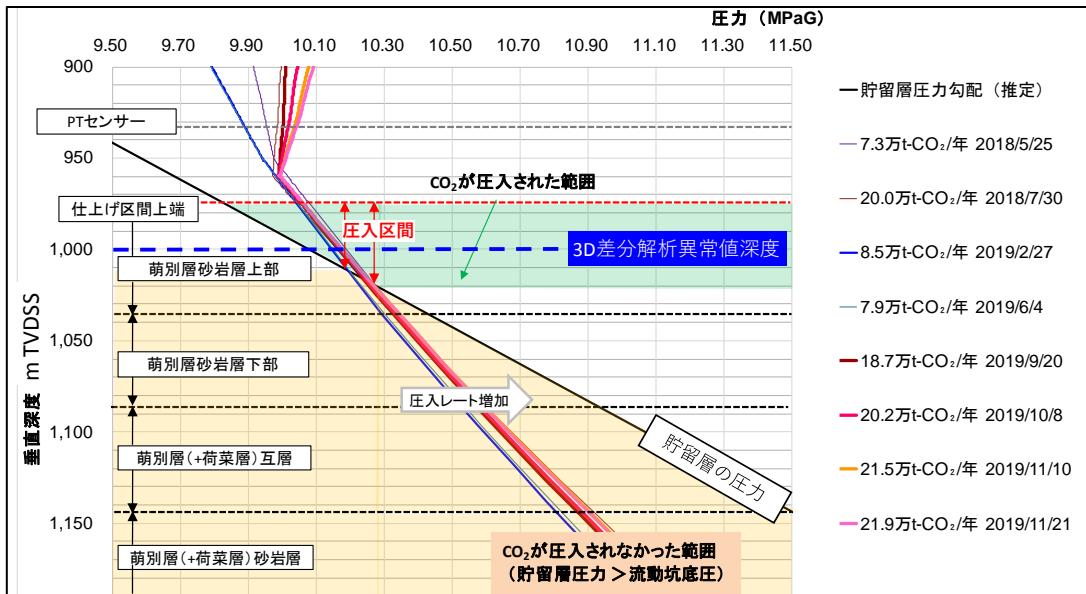
3.3.2 萌別層貯留層評価

(1) 萌別層の圧入区間

萌別層圧入井 IW-2 は、貯留層区間のすべての層準から CO₂ を圧入可能な設計としたが、貯留岩性状が良好であることから圧入による貯留層圧力の上昇が少なく、圧入圧力が貯留層圧力を上回る貯留層深度が貯留層の上部のみとなると推定される。そのため CO₂ は貯留層の上部のみに圧入されているものと考えられる。図 3.3-5 に貯留層圧力と圧入中に貯留層にかかる圧力および圧入区間の関係を示す。萌別層砂岩層（貯留層）はほぼ静水圧であることを考慮して、貯留層圧力と垂直深度との関係を推定した。圧入中に貯留層に加わる圧力は圧入レートによって異なるが、圧入レートが上がるほど上昇する傾向がある。7.3 万 t/年にて圧入時に貯留層に加わる圧力が、貯留層圧力を上回る深度の下限は 1,010 mTVDSS（海水面からの垂直深度）程度と推定されることから、この圧入レート時の圧入区間は仕上げ区間上端～1,010 mTVDSS 程度となり、高レートでの圧入時には貯留層に加わる圧力が増加するため、最大で 1,020 mTVDSS 程度まで圧入区間の下限が拡大すると考えられる。

4.2.3 項で示す三次元弾性波探査の差分解析の結果、振幅異常は 1,000 mTVDSS (1,010 mTVD) 程度の深度に認められたことから、圧入区間の推定と整合的な結果となっている。

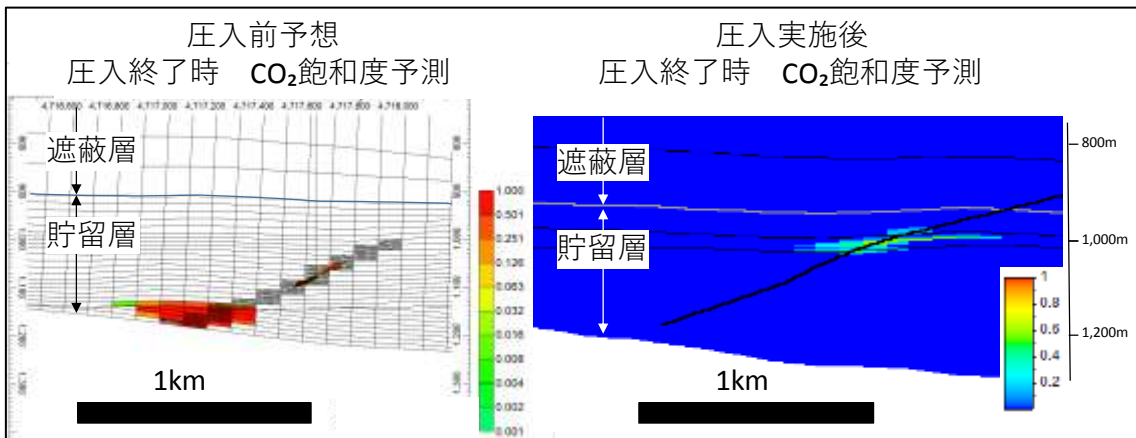
なお、図 3.3-6 に示すように、CO₂ 圧入開始前には CO₂ は主に圧入井の下部から圧入されるものと推定していた。これは圧入井の掘削時に取得した物理検層データから圧入井の下部に高浸透率な貯留層の存在が確認されたことによる解釈を反映したものである。CO₂ 圧入開始後に、貯留層の上部にのみ圧入されている可能性を仮定し、CO₂ 圧入後に実施した繰り返し弾性波探査記録の解析からこの仮定が確認された。物理検層結果だけでは圧入性の把握が不確実であるため、仕上げ区間を選択的な部分仕上げとせず、できるだけ有効層厚全体を網羅することも検討することが、今後 CCS を進めるにあたり有効であると考えられる。



注) mTVDSS：海水面からの垂直深度。

注) 圧入中に貯留層に加わる圧力は、圧入中の地上の温度・圧力と PT センサーによる温度・圧力値を基に、管内流動シミュレーションにより推定した圧力勾配を、貯留層内に延長して推定。圧入中に PT センサーの温度圧力値が安定した期間のものを抽出して検討。

図 3.3-5 萌別層圧入井 IW-2 におけるの圧入区間の推定



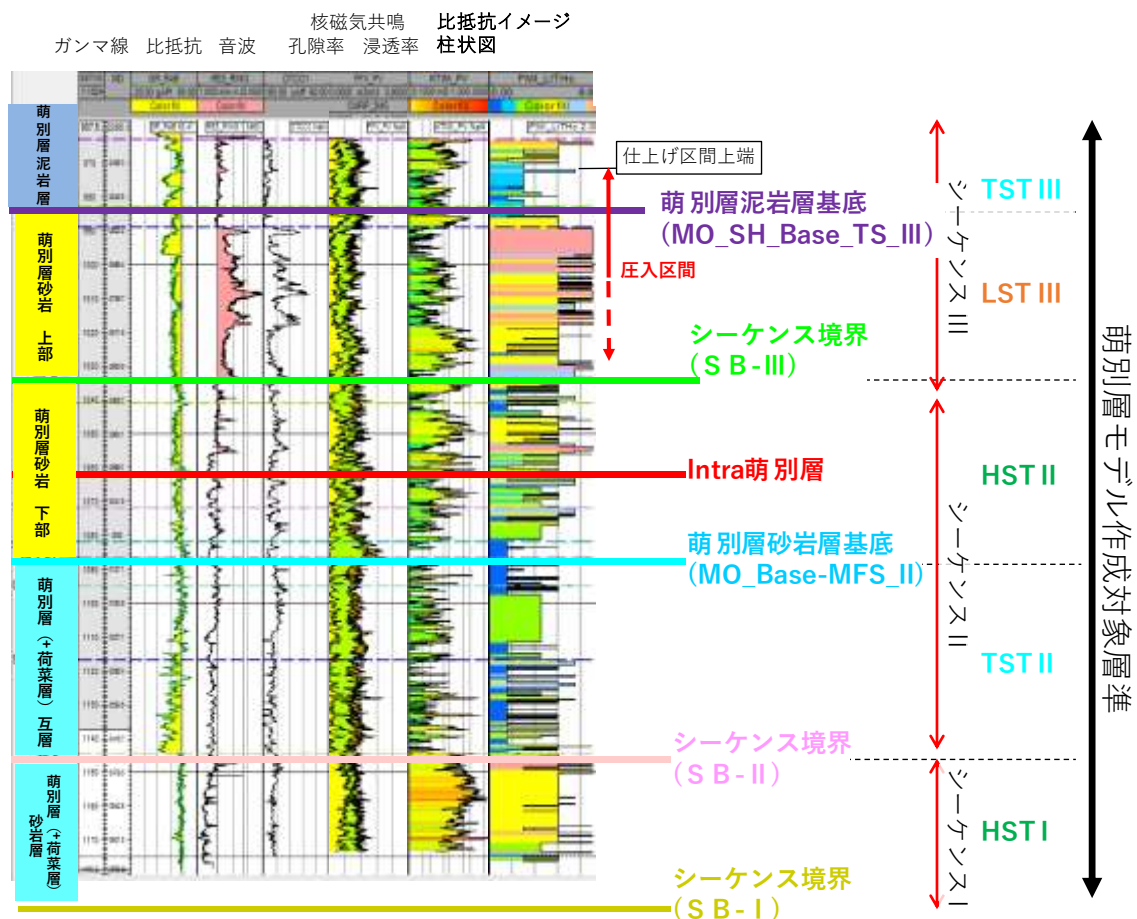
注) 左図は萌別層圧入井 IW-2 のデータを考慮し、CO₂ 圧入開始前に実施したシミュレーションによる 60 万 t 圧入時の CO₂ 飽和度分布予測断面図。右図は CO₂ 圧入開始後に実施したシミュレーションによる 30 万 t 圧入時の CO₂ 飽和度分布予測断面図。CO₂ 圧入前には、主に圧入井の下部から CO₂ が圧入されると推定していたが、圧入開始後には圧入井の上部から圧入されていると考えている。

図 3.3-6 萌別層圧入井 IW-2 掘削後、圧入開始前後の圧入区間の予測

(2) 萌別層地質モデルの作成

地質モデルは、圧入井、観測井、調査井等の坑井データと、三次元弾性波探査記録を用いて作成した。図 3.3-7 に萌別層圧入井 IW-2 における層序区分を示す。地層は同一時間面上にあっても側方で礫岩、砂岩、泥岩等の岩相変化が生じる可能性があることから、相

対的海水準等も考慮したシーケンス層序学的な層序区分を行った。これにより、岩相の側方変化を考慮した地質モデルを作成することが可能となる。萌別層（荷葉層含む）は、シーケンスⅠ～Ⅲの三つのシーケンス（堆積物の周期性）から構成され、主に圧入に寄与する層準はシーケンスⅢに相当する。



注) SB : シーケンス境界、MFS : 最大海氾濫面、TS : 海進面、LST : 低海水準期堆積体、TST : 海進期堆積体、HST : 海水準期堆積体

図 3.3-7 萌別層圧入井 IW-2 における層序区分

シーケンス層序区分に基づいて堆積相解析を実施し、堆積環境を推定した（図 3.3-8）。萌別層砂岩層は河川が海域に流れ込む河口付近に形成されたファンデルタから構成されると解釈される。砂岩、礫岩、泥岩等の堆積物は岩相が側方に変化し、どこまでも均質な岩相が分布するものではない。シーケンス層序区分により、同時時間面を設定して堆積相解析を実施することで、同じ時期に堆積した堆積物の堆積する環境（堆積環境）を推定し、堆積物の側方変化について推定することができる。圧入井、調査井、観測井等の坑井で確認した堆積相を弾性波探査や地球統計学を用いた推定により、周辺への側方変化

を加味した岩相分布の予測を実施した。堆積相解析ではファシス区分やその組み合わせからなるファシス組相を実施し堆積環境の推定も行った（図 3.3-9）。

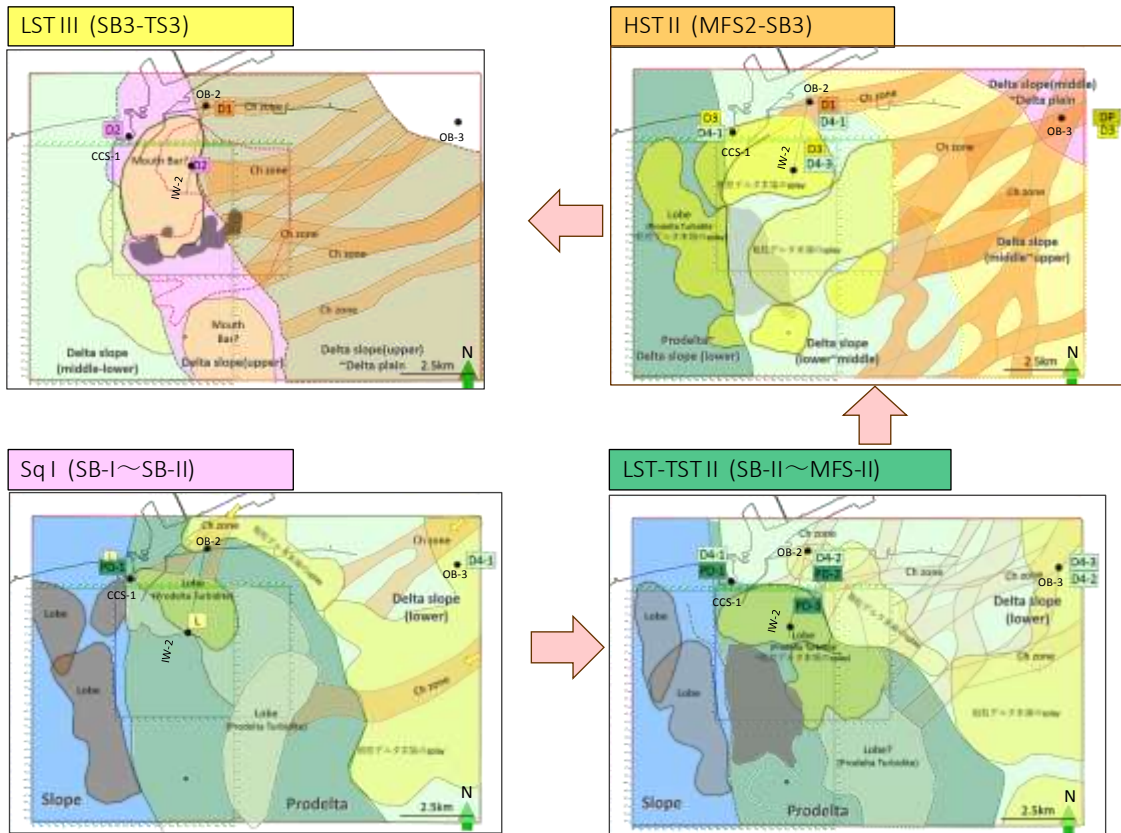
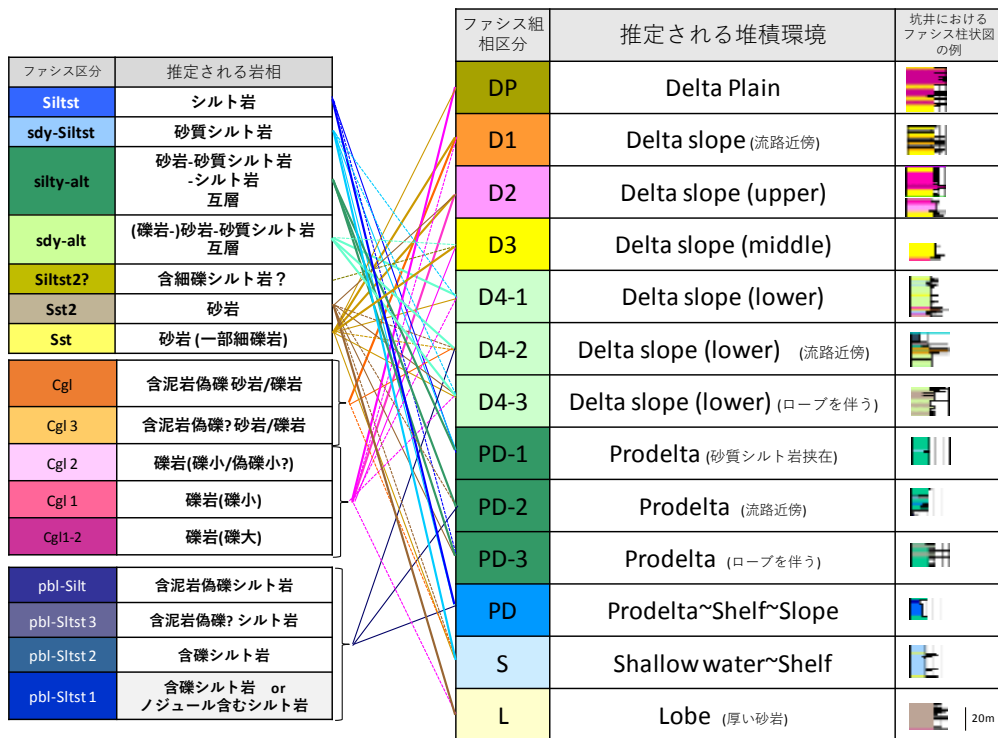


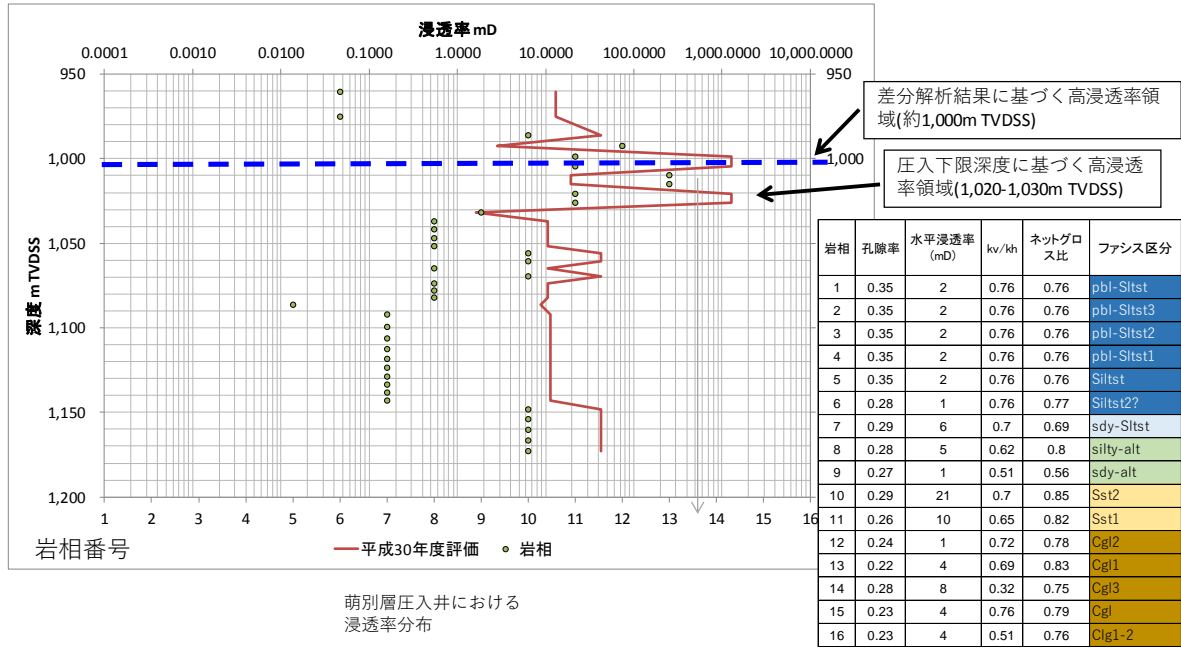
図 3.3-8 層序区分ごとに推定した堆積環境



注) ファシス：検層データから推定した岩相・堆積相。ファシス組相：検層データから推定した堆積組相。ファシス組相から堆積環境を推定した。

図 3.3-9 層序区分ごとに推定した堆積環境

各ファシスには図 3.3-10 (右図) に示す物性値を入力した。また、萌別層圧入井 IW-2 において取得したブライン圧入試験結果、CO₂ 圧入中の圧力挙動、圧入停止時の圧力データの解析等から、萌別層圧入井 IW-2 において妥当と思われる浸透率分布を推定したものを図 3.3-10 (左図) に示す。

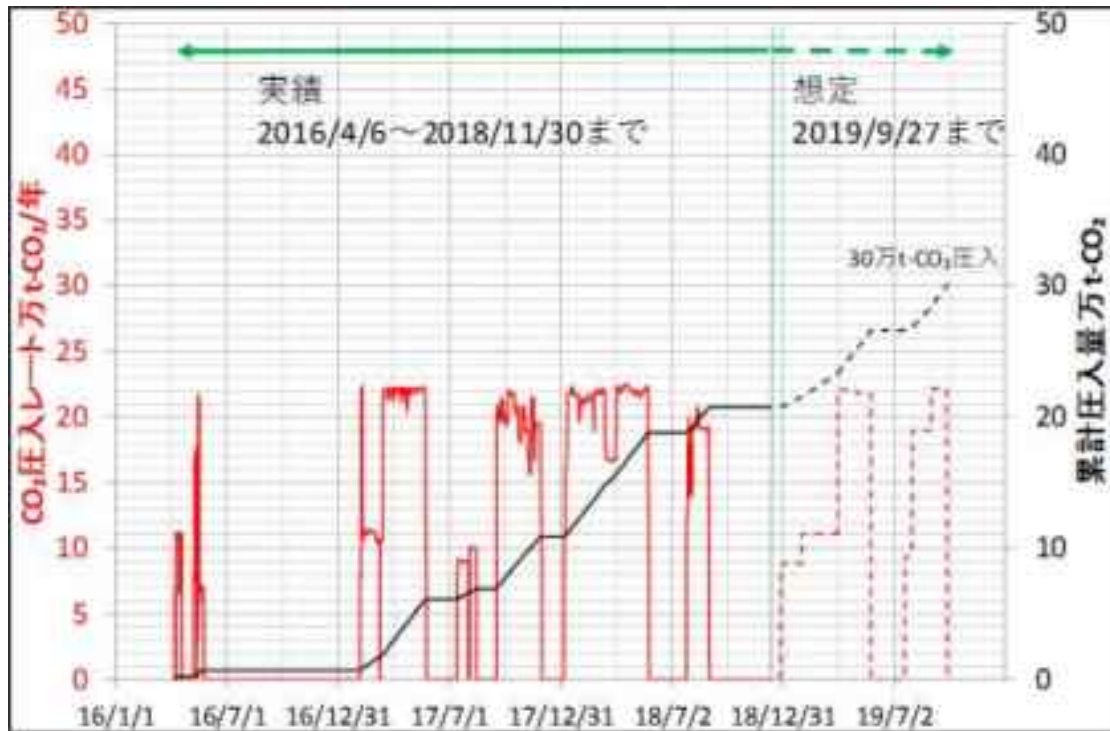


注 1) TVDSS : 海水面からの垂直深度。
 注 2) 縦軸は地質モデルの萌別層圧入井 IW-2 における海水面からの垂直深度を示す。赤線はその深度に与えた浸透率を示し、値は上側 X 軸で読む。緑の丸印はその深度に与えた岩相番号を示し、その番号は下側 X 軸で読む。右表はそれぞれの岩相番号に与えた物性値を示している。

図 3.3-10 地質モデルに入力した物性値と萌別層圧入井 IW-2 における浸透率分布

(3) 萌別層 CO₂ 圧入長期挙動予測 (流動シミュレーション)

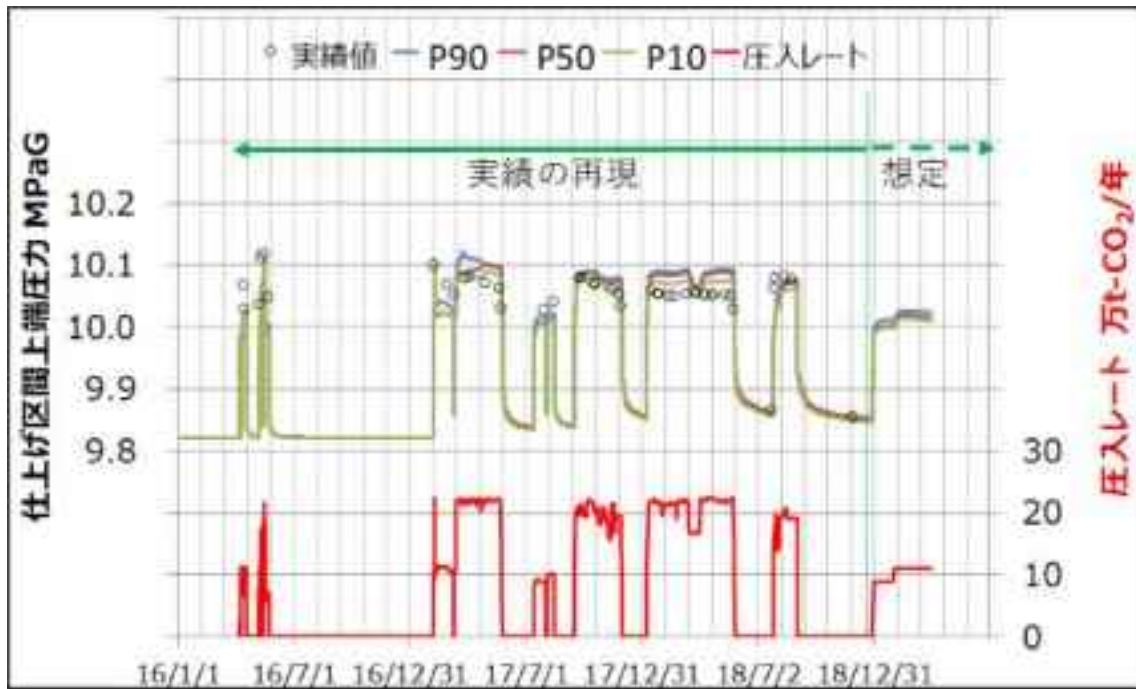
圧入開始から 2018 年 11 月 30 日までの圧入実績と、2018 年 11 月 30 日時点で PSA オフガスの供給量や供給元の SDM スケジュールを考慮のうえ想定した圧入計画に基づき、2019 年 9 月 27 日までに累計圧入量 30 万 t を圧入するケースにて、CO₂ 圧入長期挙動予測シミュレーションを実施した (図 3.3-11)。



注) 2019年9月27日まで圧入を継続し、累計30万t圧入するケースを想定

図 3.3-11 累計30万tを圧入ケース シミュレーションシナリオ

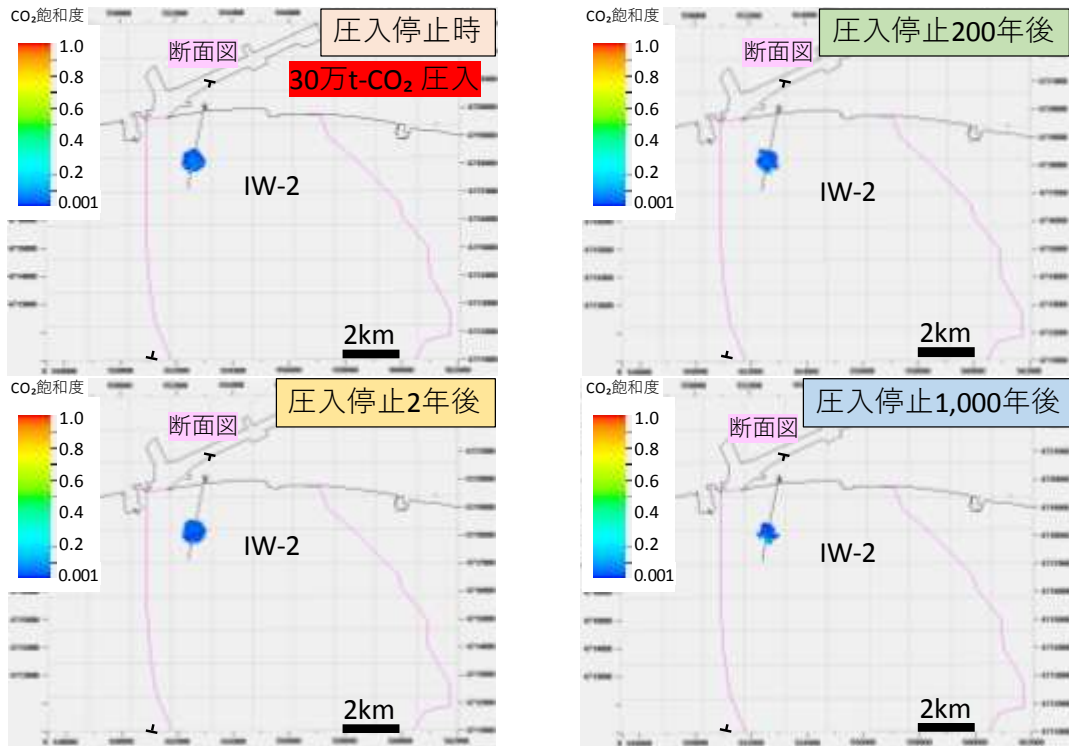
圧入井、観測井、調査井におけるファシス区分の層序的な出現状況を基に、坑井データの無い部分のファシスの三次元的な出現状況を地球統計学的に予測し、その組み合わせであるファシス組相や堆積環境の分布が異なる複数の貯留層モデルを作成し、それぞれに30万tを圧入するCO₂圧入長期挙動予測シミュレーションを実施した。複数のモデルにより圧入終了時点で予測される坑内圧力（仕上げ区間上端）値を値順に並べ、その圧力値が全予測結果の低い方から10%となるモデルをP10モデル、50%となるモデルをP50モデル、90%となるモデルをP90モデルとして設定した。P10、P50、P90モデルにより予測される坑内圧力（仕上げ区間上端）の再現状況を図3.3-12に示す。P10、P50、P90の再現結果に大差はなく、実績値とも概ね一致していることを確認した。



- 注 1) P90:作成した複数のモデル（具現像）によるシミュレーションの結果、予想される坑内圧力（仕上げ区間上端圧力）が、90%の確率で P90 モデル以下となる。P50、P10 も同様。
- 注 2) 実績値：圧入実績に即し、坑口温度・圧力値と PT センサー温度・圧力値から推定した仕上げ区間上端深度における圧入中の圧力の推定値。

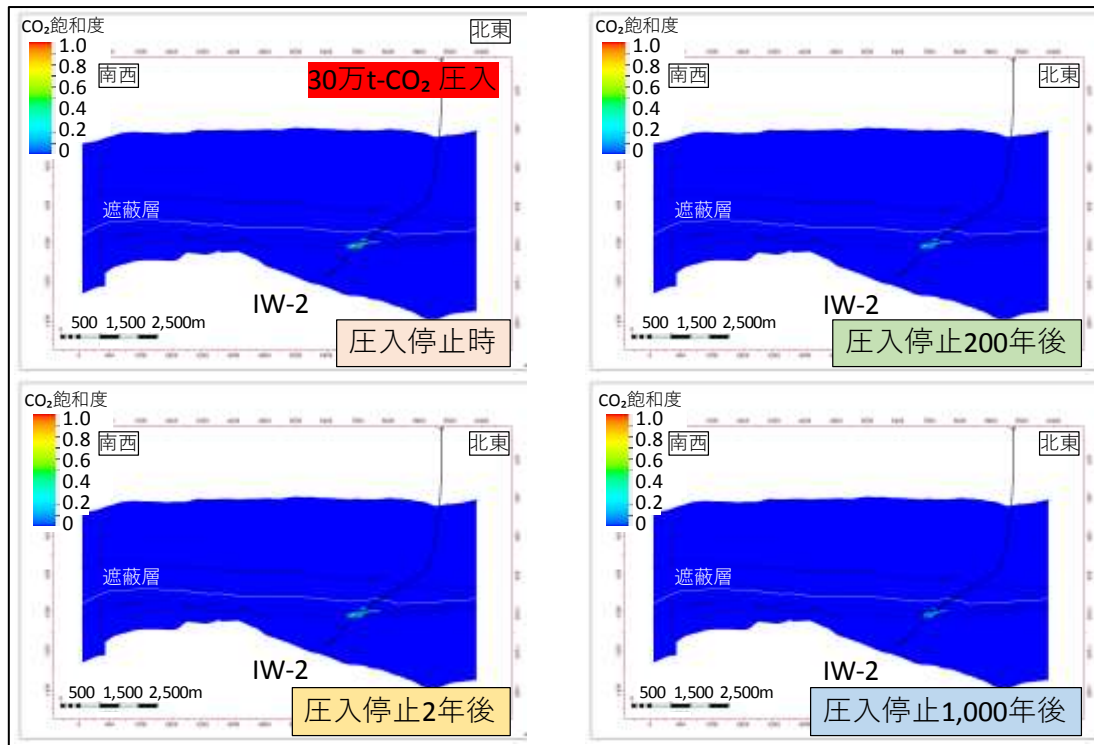
図 3.3-12 シミュレーションによる坑内圧力の再現

累計 30 万 t の圧入における長期挙動予測シミュレーションによれば、圧入した CO₂ は、圧入停止時から 1,000 年後において圧入井を中心に 1,000 m 程度の範囲に分布するものと予測され（図 3.3-13、図 3.3-14）、圧入停止時における圧入井周辺の貯留層圧力の変化は 200 kPa 程度となることが予測された。



注) 圧入した全 CO₂ の飽和度を真上から俯瞰。表示の下限値を 0.001 (frac) とした

図 3.3-13 P50 モデルによる CO₂ 飽和度分布予測 (平面図)

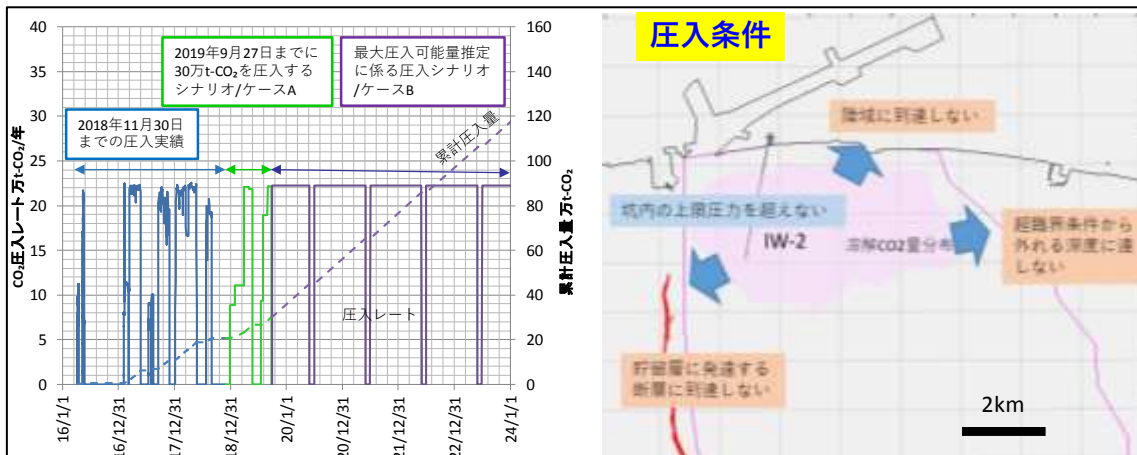


注) 断面図作成位置は図 3.3-13 に示す。

図 3.3-14 P50 モデルによる CO₂ 飽和度分布予測 (断面図)

(4) シミュレーションによる現状の萌別層圧入井 IW-2 のみを用いた最大圧入可能量の推定

30 万 t 圧入後、圧入を継続することを想定したシミュレーションを行い、最大圧入可能量を推定した。30 万 t 圧入後の圧入シナリオは、6 月の 1 ヶ月間（SDM を想定して圧入停止）以外は、22 万 t/年の圧入レートにて 100 万 t を圧入する。その後、1,000 年間の監視期間を設け、図 3.3-15（右図）に示す四つの圧入条件を確認し、この圧入条件を満たすことを確認した場合には、監視期間前に戻り、22 万 t/年の圧入レートにて 100 万 t を圧入する。圧入条件を満たす限り 100 万 t ごとに圧入条件の確認を繰り返し、現状の萌別層圧入井 IW-2 のみを使用した最大圧入可能量を推定した。



注) 左図の圧入実績+ケース A が 30 万 t 圧入時の圧入シナリオ。本検討はケース B のシナリオ。

図 3.3-15 シミュレーションによる現状の萌別層圧入井 IW-2 による最大圧入可能量の推定にかかる圧入シナリオと圧入条件

シミュレーションは(3)で示す P10、P50、P90 の三つの貯留層モデルにて実施し、113 万 t (P90) ~1,023 万 t (P10)、平均的な P50 モデルでは 573 万 t の圧入が可能とする結果を得た。

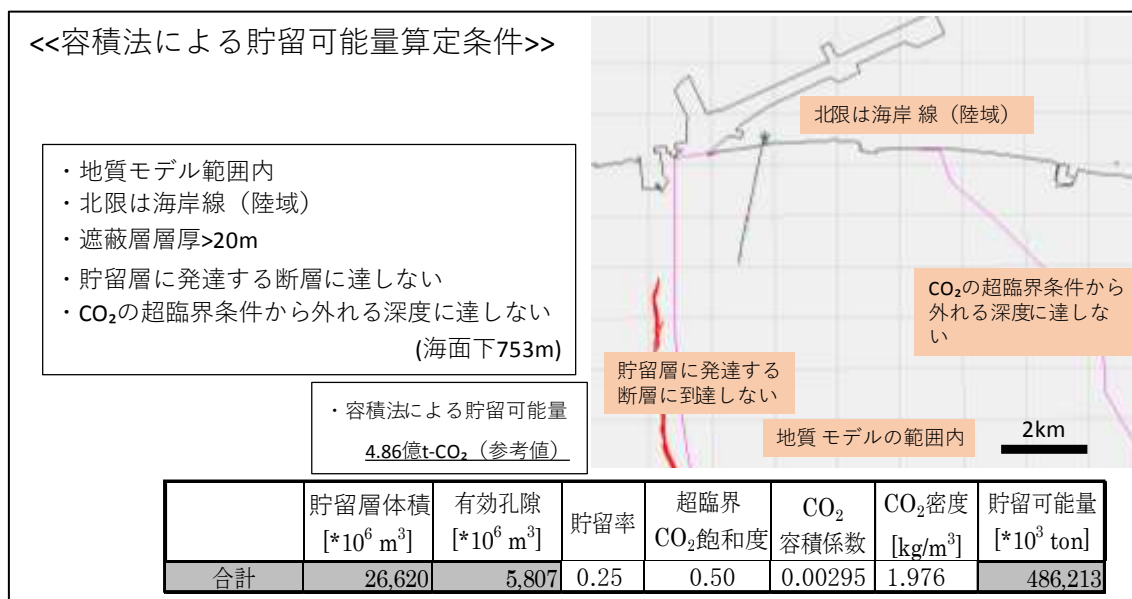
この結果は現状の萌別層圧入井 IW-2 のみを使用した最大圧入可能量を圧入した CO₂ の挙動をシミュレーションにより動的に考察したものであるため、次に述べる容積法による貯留可能量を大幅に下回る量となるが、圧入井の坑数やその配置、仕上げ区間等を工夫することで現状の圧入可能量よりは容積法による貯留可能量に近づけられることが考えられる。

(5) 萌別層貯留層の容積法による貯留可能量の推定

作成した貯留層モデル (P50 モデル) を用いて、容積法により貯留可能量を推定した結

果、4.86 億 t となった（図 3.3-16）。

容積法による貯留可能量評価は指定する範囲・層準における貯留層の孔隙容量に対する静的な評価であり、貯留層の浸透率や圧力、圧入した CO₂ の移動等を考慮していない。圧入井数、配置、圧入区間や圧入レートの設定等を最適化することにより、シミュレーションによる圧入可能量を増加させることは可能であるが、容積法による貯留可能量には及ばないことが多い。



注 1) 西側の断層は、弾性波探査記録において貯留層中に認識されるが、遮蔽層では確認されていない。
注 2) 活断層や活構造との距離の扱い等が、適地調査事業とは異なる。
注 3) 容積法による貯留可能量は、圧入した CO₂ の移動や圧力上昇を考慮していないため、実際に圧入できる量ではない。

図 3.3-16 容積法による貯留可能量の推定

(6) 萌別層圧入井 IW-2 の現状設備での最大圧入可能レートの推定

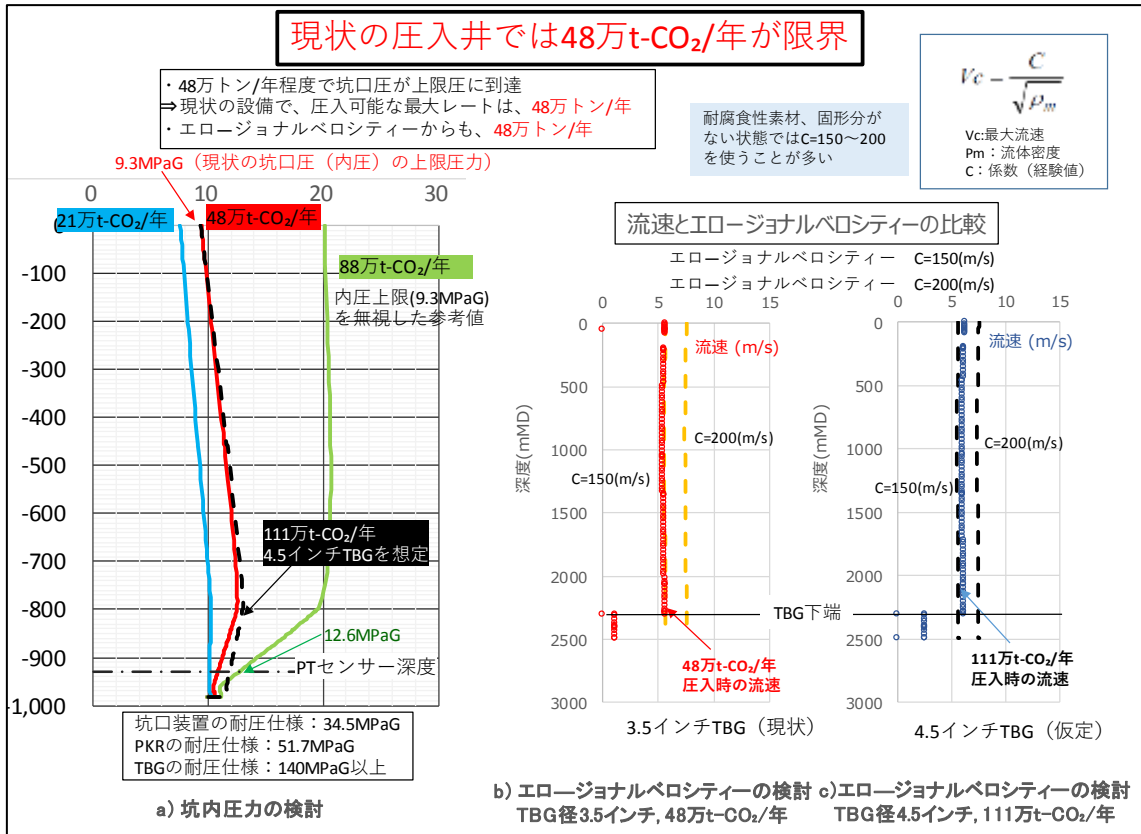
圧入井や圧入設備に係る耐圧的な観点とチューブングのエロージョナルベロシティの観点から、現状の萌別層圧入井 IW-2 における最大圧入レートを推定した。エロージョナルベロシティは CO₂ を地下に圧入するチューブングとその中を流れる CO₂ とに摩耗が生じる速度のことで、チューブングの材質、CO₂ の状態（固形物の有無等）から推定する経験値（C 値）を使用した参考値である。C 値は圧入しやすい条件であるほど大きい値が使用される。萌別層圧入井 IW-2 では、砂粒等の固形分がない CO₂ を圧入し、チューブングは耐 CO₂ 素材を使用しているため大きめの C=150、200 を使用して算出した。

図 3.3-17a) は圧入レートを規制する坑井設備の圧力的な制約を示している。現状の萌別

層圧入井 IW-2 (チュービング径 3.5 インチ) で、圧入レートを上昇させた場合、48 万 t/年において、圧入中の坑口圧 (内圧) があらかじめ規定した上限圧力 (9.3 MPaG) に達するため、圧力の面からには 48 万 t/年が上限の圧入レートとなる。図 3.3-17b)は、現状の萌別層圧入井 IW-2 で使用するチュービング径 (3.5 インチ) により 48 万 t/年で圧入した際に予想されるチュービング内での CO₂の流速とチュービングのエロージョナルベロシティーの関係を示している。C=150 とした場合には、48 万 t/年で圧入した際に予想される CO₂の流速がエロージョナルベロシティーに到達する可能性があるが、C=200 とした場合には、エロージョナルベロシティーに到達しないものと推定されることから、エロージョナルベロシティーの制約を考慮した場合も 48 万 t/年での圧入が可能であることが考えられる。

仮に、現状の萌別層圧入井 IW-2 (チュービング径は 3.5 インチ) において、予め遮蔽層を破壊しないために設定した PT センサーにおける圧力の上限値 (12.6 MPaG) に到達するまで圧入レートを上げた場合、圧入レートは 88 万 t/年となるが、このレートで圧入するためには、圧入中の坑口圧 (内圧) は予め設定した上限値 (9.3 MPaG) を大幅に上回る 20 MPaG まで上昇させる必要がある。高圧コンプレッサー等の地上の圧入設備を強化し圧入中の坑口圧 (内圧) の上限値を高めたとしても、現状のチュービング径 (3.5 インチ) では、100 万 t 規模の圧入は不可能であると考えられる。

参考として萌別層圧入井 IW-2 のチュービング径を 4.5 インチとした場合を想定した検討を実施した。圧入中の坑口圧 (内圧) をあらかじめ規定した上限圧力 (9.3 MPaG) まで上昇させた場合、圧入レートは 111 万 t/年となり、遮蔽層を破壊しないために想定した PT センサー圧力を下回る圧力での圧入が可能となることが考えられる (図 3.3-17a)の黒色破線)。また、この時のチュービング内の CO₂の流速は、チュービングのエロージョナルベロシティーに到達しない (C=200 としたケース) ことが考えられるため (図 3.3-17c) 、エロージョナルベロシティーの検討からは、萌別層圧入井 IW-2 のチュービング径を 4.5 インチとした場合には、流速の制約が軽減され 100 万 t/年規模の圧入が可能であると判断される。



注1) PKR：パッカー、TBG：チュービング

注2) API RP 14Eによると、C値は、固体が含まれていない流体の連続的な流れに対しては150~200を適用することとしている。これは、油ガス田の生産に際するチュービングへの適用を規定しているものであるが、萌別層圧入井IW-2ではCO₂に対する腐食耐性が高い13Crを使用していることから、本検討でもC=150~200を用いて推定した。

American Petroleum Institute, "API RP 14E: Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems", 1991

図 3.3-17 萌別層圧入井IW-2の現状設備での最大圧入レートの推定

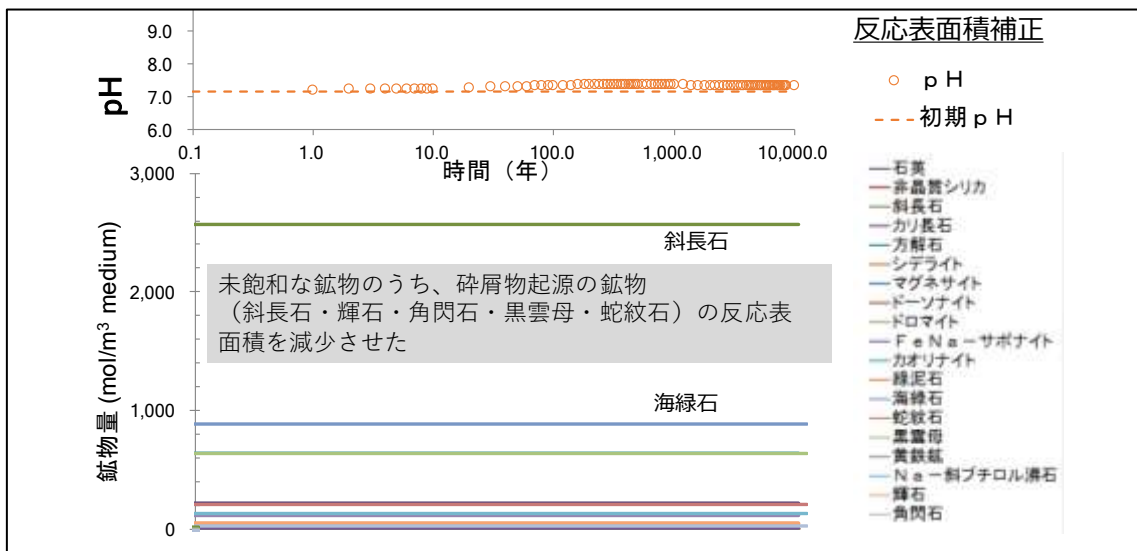
(7) 萌別層流動-地化学連成シミュレーション

一般に、圧入したCO₂の一部は地層水、貯留層鉱物と反応し、長期的には炭酸塩鉱物として貯留層中に固定されることが考えられる。この反応性を推定するために、萌別層におけるCO₂圧入長期挙動予測(流動シミュレーション)と、圧入したCO₂と地層水、貯留層鉱物との化学反応を考慮した流動-地化学連成シミュレーション(以下、「連成シミュレーション」と称する。)を実施した。

貯留層の鉱物組成やその化学組成は、調査井、観測井、圧入井で採取した萌別層の岩石試料の各種分析結果を総合して推定した。地層水組成は萌別層観測において採取した地層水の組成等の測定・検鏡結果に基づき、岩石試料で分析・認識される自生鉱物と地層水との化学平衡を仮定し、地層水中の化学種を推定して熱力学的再構成を行った。こうして推定した鉱物組成、地層水組成のもと、CO₂を圧入しない状態で地層水の組成、貯留層の鉱

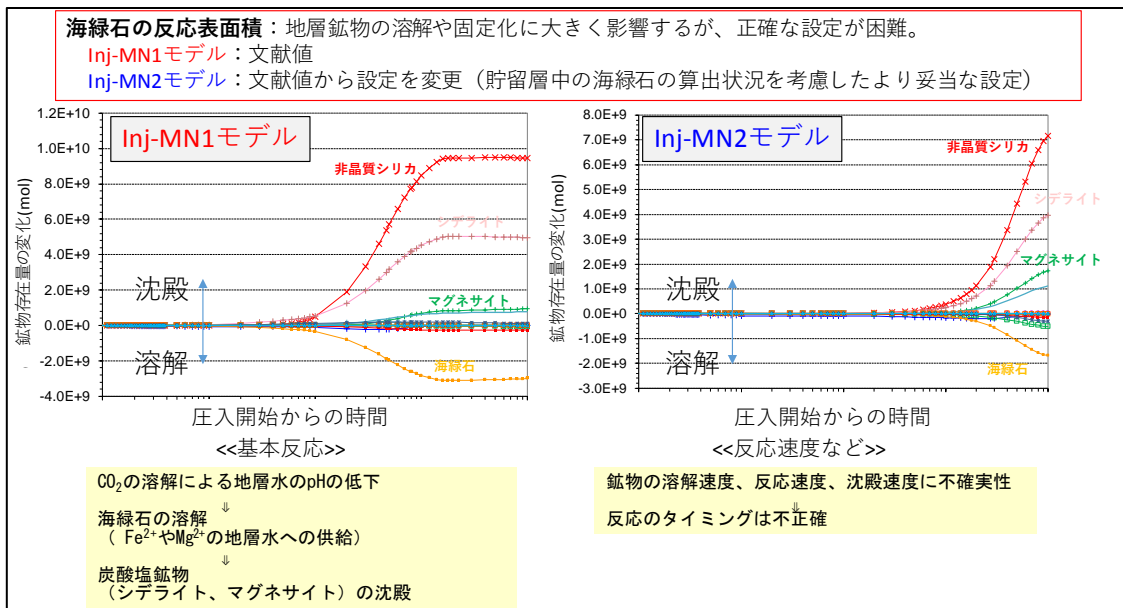
物組成が長期的（10,000年間）に安定することを前提とし、貯留層鉱物のなかで溶解して反応しやすいと推定される鉱物（地層水に未飽和な鉱物）の一部のパラメータ（反応表面積）を調整した（図 3.3-18）うえで連成シミュレーションを実施した。反応表面積は、反応速度や反応量にとって重要なパラメータであるが、正確に把握することが困難であるため、前提条件のもとに文献値を基準として推定した。

連成シミュレーションは 30 万 t を圧入するケースについて実施した。図 3.3-19 に概要を示す。対象地域の萌別層では 12.4% 程度の体積比率で貯留層中に含まれる海緑石との反応が重要になると考えられる。CO₂ が地層水に溶解し、地層水が酸性化するため貯留層鉱物を溶かし、おもに海緑石から Fe²⁺ や Mg²⁺ が供給される。CO₂ が地層水に溶解し生じた HCO₃⁻ や CO₃²⁻ と反応し、鉄を含む炭酸塩鉱物（シデライト）やマグネシウムを含む炭酸塩鉱物（マグネサイト）として鉱物固定されることが基本的な反応となると推定された。



注 1) 文献から推定したパラメータ（反応表面積）を一部変更し、地層水の pH と貯留層鉱物量（反応）が安定するように調整した。

図 3.3-18 連成シミュレーション実施前の地層水-貯留層鉱物安定化の確認結果



注1) E+数字は10のべき乗を意味する。例：1.0E+10=1×10¹⁰

注2) 現代の科学では貯留層中で生じる化学反応に係る反応速度等を、正確に推定することが困難。

図 3.3-19 連成シミュレーションから予想される貯留層で生じる地化学反応

3.3.3 滝ノ上層貯留層評価

三次元弾性波探査記録・調査井・周辺井の掘削結果等を用い、貯留層の不均質性を考慮した解析の結果、十分な貯留層性状が考えられる場所に滝ノ上層圧入井 IW-1 を掘削したものの、滝ノ上層の貯留層性状は予想外に低いものであり、十分な量の圧入を実施することができなかった。滝ノ上層調査井の掘削時に実施した水圧入テストで最大 650 kL/日の圧入性（解析浸透率 1.18 mD）が確認されていたが、水平距離で 1～1.6 km ほど離れた滝ノ上層圧入井 IW-1 の掘削時に実施した水圧入テストの結果は、最大で 35 kL/日程度（解析浸透率 7.7×10⁻⁴ mD）であった。滝ノ上層圧入井 IW-1 の掘削前は、調査井のコア試験や圧入テストにより、本井で想定した溶岩・凝灰角礫岩では圧入性状が良好と予想していたが、実際には凝灰岩が主体であり、十分な圧入性を有する貯留層を確認できなかった。火山岩類は岩相の側方変化が大きいため、砂岩層のように広範囲に均質な岩相が広がりにくいため、岩相分布が予想通りとはならなかった。火山岩層の圧入性状予測の岩相に起因する不確実性が課題となった。火山岩類（滝ノ上層）の不均質性の評価が困難であることを示す結果であると考えられる。

(1) 滝ノ上層 CO₂ 圧入長期挙動予測（流動シミュレーション）

2018年2月および同年7月～9月に実施した試験圧入の実績（図 3.3-20）に基づき、長期挙動予測シミュレーションを実施した。2回の試験圧入で計 98 t の CO₂ を地下に圧入し

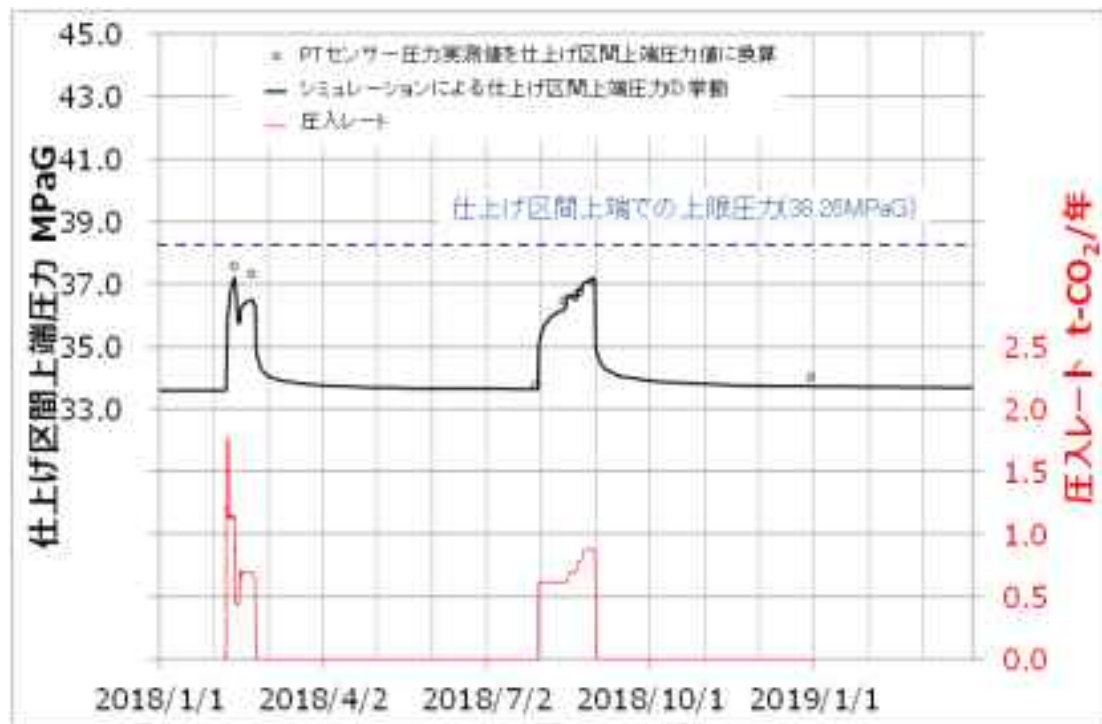
たが、CO₂圧入以前に圧入井の管内を満たしていた管内流体が先に貯留層中に圧入されたため、実際に貯留層に圧入されたCO₂は35t程度と考えられる。



注) 98tの圧入：実際の貯留層への圧入量は管内容量分の坑内流体がまず圧入されていたため、約35tと推定。

図 3.3-20 圧入実績に基づくシミュレーションシナリオ

長期挙動予測シミュレーションは、既存の貯留層モデルのパラメータを圧入実績に基づいて微調整し、圧入中の坑内圧力（仕上げ区間上端）の再現状況を確認したうえで実施した（図 3.3-21）。

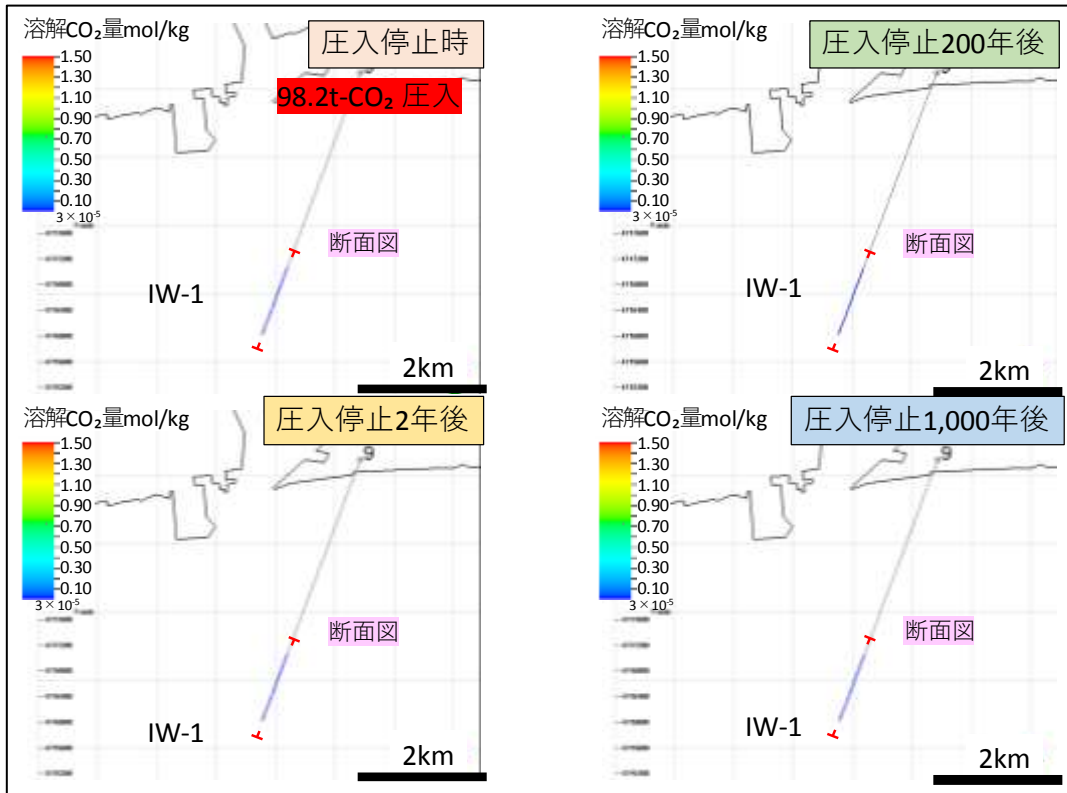


注) 2018年2月の圧入時にはCO₂が貯留層に到達していないと考えられる。

図 3.3-21 シミュレーションによる坑内圧力の再現

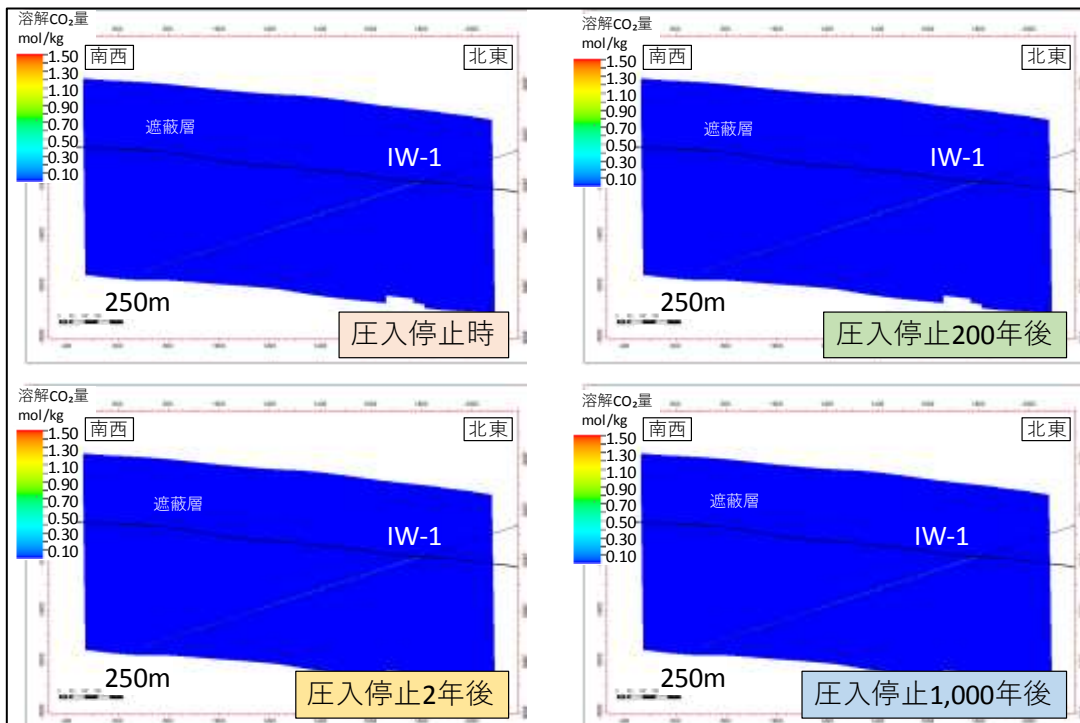
図 3.3-22 および図 3.3-23 に 98 t の圧入（貯留層へは 35 t 圧入）停止時～圧入 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布を示す。圧入した CO₂ は圧入井仕上げ区間の全区間から圧入され、圧入井の極近傍にのみ圧入された。圧入した CO₂ は少量であり、シミュレーションでは、全量が速やかに地層水に溶解するため CO₂ 飽和度分布を再現することができない。

図 3.3-24 および図 3.3-25 に圧入停止時～圧入 1,000 年後のシミュレーションによる貯留層圧力の変化状況の予測を示す。圧入停止時（2018 年 9 月）の圧力変化は圧入井の近傍では 3 MPa 程度に達するが、坑井から 150 m 程度離れた地点では圧力上昇の影響がほとんどなくなることが予測された。圧入井近傍の圧力上昇も圧入停止 2 年後には徐々に貯留層圧力に近づきほとんど解消されるものと予測された。



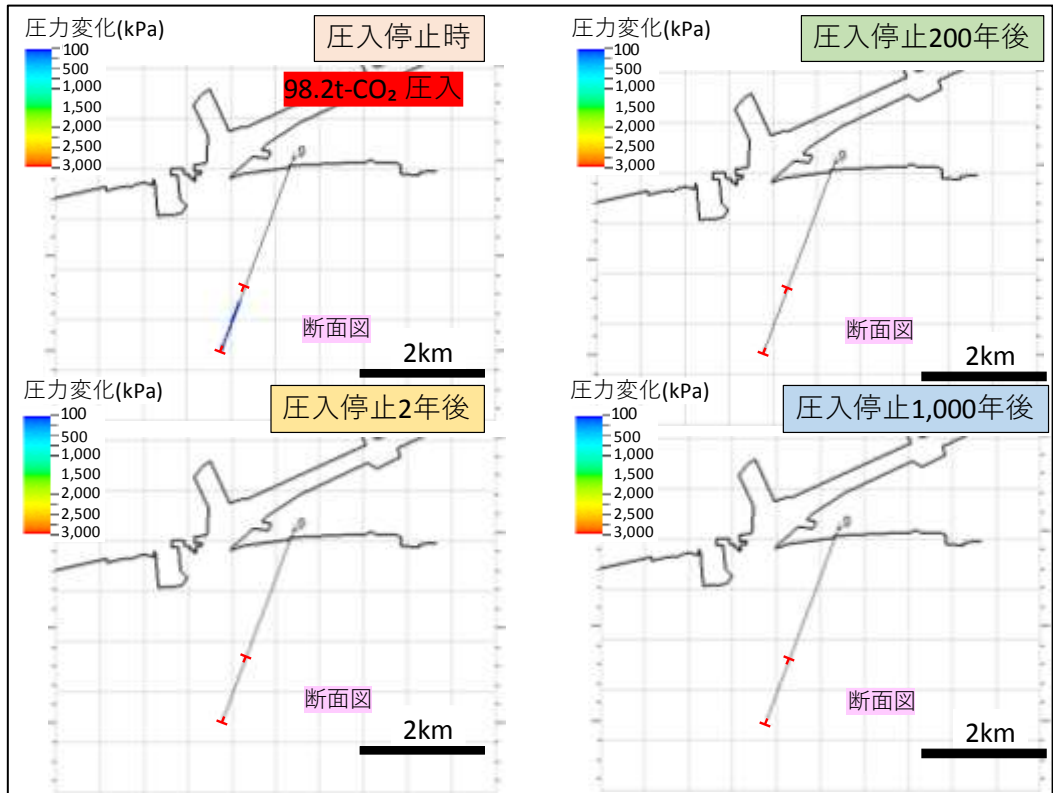
注) 溶解 CO₂ 量の分布範囲を真上から俯瞰。表示の下限値は 3×10^{-5} (mol/kg)。

図 3.3-22 溶解 CO₂ 量分布予測 (平面図)



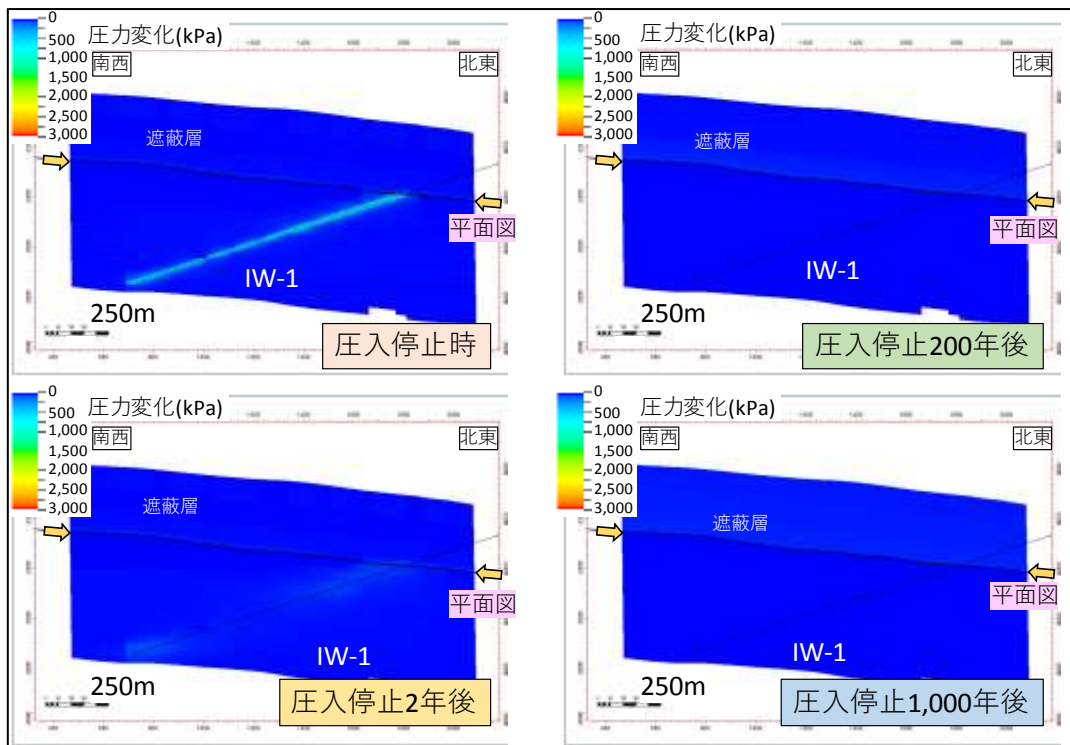
注) 断面図作成位置は図 3.3-22 に示す。

図 3.3-23 溶解 CO₂ 量分布予測 (断面図)



注) 貯留層最上部の圧力変化を表示。

図 3.3-24 貯留層圧力変化予測 (平面図)



注) 断面図作成位置は図 3.3-24 に示す。

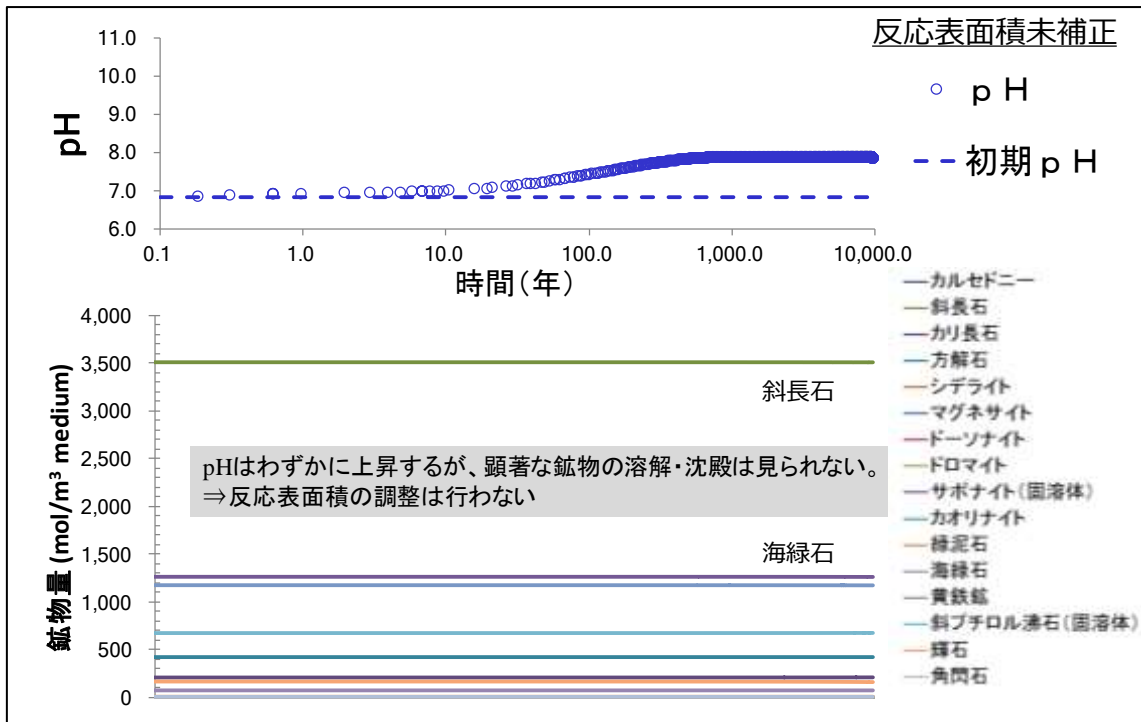
図 3.3-25 貯留層圧力変化予測 (断面図)

(2) 滝ノ上層流動-地化学連成シミュレーション結果

一般に、圧入した CO₂ の一部は地層水、貯留層鉱物と反応し、長期的には炭酸塩鉱物として貯留層中に固定されることが考えられる。この反応性について推定するために滝ノ上層における CO₂ 圧入長期挙動予測（流動シミュレーション）と、圧入した CO₂ と地層水、貯留層鉱物との化学反応を考慮した連成シミュレーションを実施した。

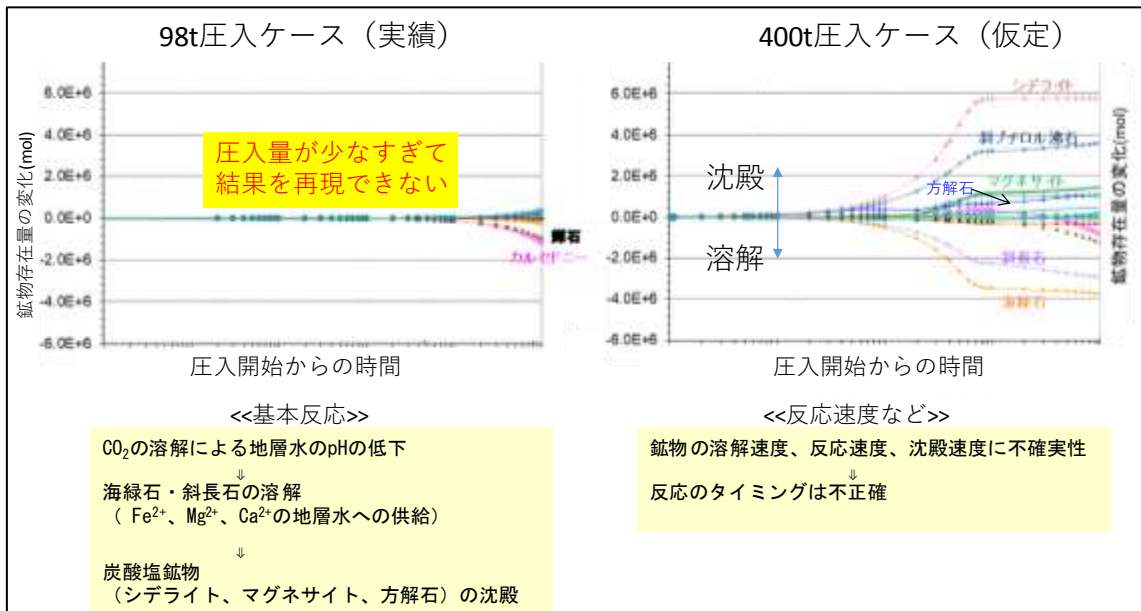
貯留層の鉱物組成やその化学組成は、調査井、観測井、圧入井で採取した滝ノ上層の岩石試料の各種分析結果を総合して推定した。地層水組成は調査井（現滝ノ上層観測井）において採取した地層水の組成等の測定・検鏡結果に基づき、岩石試料で分析・認識される自生鉱物と地層水との化学平衡を仮定し、地層水中の化学種を推定して熱力学的再構成を行った。そのうえで、推定した鉱物組成、地層水組成のもと、CO₂ を圧入しない状態で地層水の組成、貯留層の鉱物組成が長期的（10,000 年間）に安定することを確認の上（図 3.3-26）連成シミュレーションを実施した。pH は若干変動（図 3.3-26 上図）するものの、生成する鉱物量が安定（図 3.3-26 下図）しているため、これ以上のパラメータの調整は実施しなかった。

実績にもとづいた 98 t 圧入の設定による連成シミュレーションでは、CO₂ 量が少ないために状況を再現できなかったため、400 t を圧入するケースを仮定して実施した。図 3.3-27 に結果の概要を示す。対象地域の滝ノ上層 35.3% 程度含まれる斜長石と 16.4% 程度含まれる海緑石の反応が重要になると考えられる。圧入した CO₂ が地層水に溶解し、地層水が酸性化するため貯留層鉱物を溶かし、おもに海緑石と斜長石から Fe²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ が供給される。CO₂ が地層水に溶解し生じた HCO₃⁻ や CO₂ と反応し、鉄を含む炭酸塩鉱物（シデライト）、マグネシウムを含む炭酸塩鉱物（マグネサイト）、カルシウムを含む炭酸塩鉱物（方解石）として鉱物固定されることが滝ノ上層に CO₂ を圧入した際に生じる主な反応であると推定された。



注) 文献から推定したパラメータもとに、地層水の pH と貯留層鉱物量(反応)が安定するように調整。文献値の反応表面積は砂岩を対象としたものであるが、滝ノ上層は火山岩類から構成されるため、反応表面積を一律に 1/100 とした。

図 3.3-26 連成シミュレーション実施前の地層水-貯留層鉱物安定化の確認結果



注 1) E+数字は 10 のべき乗を意味する。例: 1.0E+10=1×10¹⁰

注 2) 貯留層中で生じる化学反応に係る反応速度等を正確に推定することは困難

図 3.3-27 連成シミュレーションから予想される貯留層で生じる地化学反応

3.4 結果のまとめ

3.4.1 圧入井のまとめ

本事業による CO₂ 圧入は、陸上から海底に向けて掘削した萌別層と滝ノ上層の 2 坑の圧入井により実施した。

萌別層圧入井 IW-2 は、仕上げ区間がほぼ水平となる大偏距井であり、仕上げ区間を孔明管により仕上げた。また、貯留層砂岩が軟質であることから、仕上げ区間には出砂対策を施した。滝ノ上層圧入井 IW-1 は、坑口から坑底までの水平距離がわが国最大の坑井であり、圧入区間を全層仕上げとした。

3.4.2 CO₂ 圧入状況

萌別層への CO₂ 圧入は 2016 年 4 月 6 日に開始した。CO₂ 圧入開始以降、2019 年 3 月 31 日までに 235,499 t、2019 年 11 月 22 日までに 300,012 t の CO₂ を圧入した。PT センサー測定圧力の最大値は 10.07 MPaG で、萌別層の遮蔽層破壊を避けるために設定した上限圧力 12.63 MPaG に対し十分低く、圧入開始以降、PT センサー圧力・温度は範囲内であった。

滝ノ上層への CO₂ 圧入は 2018 年 2 月 6 日に開始した。2018 年 2 月 6 日～2 月 23 日および 2018 年 7 月 31 日～9 月 1 日に試験圧入を実施し、CO₂ 圧入開始以降、2019 年 3 月 31 日までに 98 t を圧入した。滝ノ上層の遮蔽層破壊を避けるために設けた上限圧力 38.00 MPaG の制限により圧入レートを調整した。PT センサー測定圧力の最大値は 37.07 MPaG であり、圧入開始以降、PT センサー圧力・温度は範囲内であった。

3.4.3 貯留層総合評価

萌別層は、貯留層性状が極めて良好なため、圧入に伴い上昇する圧力が深度による地層圧力勾配に比して低いため、貯留層の上部にのみ圧入されたものと推定された。CO₂ 圧入開始前には、地層水と性状が近いブライン（塩水）を使用した圧入試験の結果と検層による貯留層内の浸透率分布から、圧入井の下部から多くの CO₂ が圧入されるものと推定していたが、実際に CO₂ を圧入することで圧入区間に関する推定を変更した。物理検層だけでは圧入性を確実に把握できないことが課題である。なお、弾性波探査の差分解析結果からこの推定を裏付ける結果を得た。

萌別層への圧入に際して CO₂ 挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレーションに用いる地質モデルは圧入井、調査井等の坑井データと、圧入海域で取得した三次元弾性波探査記録を主に用いて実施した堆積相解析に基づいて作成した。また、地球統計学的に複数の地質モデルを作成しそれらを用いたシミュレーションを実施した結果、平均的な地

質モデル（P50モデル）によるシミュレーション結果から、30万t圧入後の貯留層中でのCO₂分布範囲は、圧入井を中心に1,000m程度の範囲であると推定された。

また、圧入したCO₂の分布範囲や貯留層の圧力上昇に制約を設けたうえで、現状の萌別層圧入井IW-21坑のみを用いて連続的に圧入することを仮定したシミュレーションを実施し、573万tの圧入可能量を推定した（P50モデル）。同じ制限範囲内に分布する萌別層砂岩層全体の、容積法による貯留可能量は4.86億tと推定された。容積法による貯留可能量は、貯留層の孔隙容量に対する静的な容量を示しており、圧入井の配置や圧入後のCO₂の移動、貯留層圧力の上昇等一切考慮されていない推定であるため、実際に圧入が可能な量とは異なることに注意が必要である。

追加検討として、エロージョナルベロシティと呼ばれる経験値を用いて現状の萌別層圧入井IW-2における最大圧入レートを推定したところ、48万t/年程度と推定された。大口径のチュービングに改修すれば、さらに高レートの圧入が可能になる可能性がある（4.5インチで100万t/年程度）。

萌別層に対しCO₂と地層水および貯留層鉱物との地化学反応を考慮する連成シミュレーションを実施した。長期的には、圧入したCO₂の一部が地層水と溶解し、萌別層貯留層中の海緑石の溶解で生じるFe²⁺やMg²⁺と反応することで、シデライトやマグネサイト等の炭酸塩鉱物として鉱物固定されるとする結果を得た。

滝ノ上層への圧入は2018年2月6日～2018年2月23日および2018年7月31日～2018年9月1日の間に実施し、累計98tを圧入した。事前に想定した圧入中の坑内圧力・温度の範囲内で圧入を実施した。また、圧入実績にもとづくCO₂挙動予測シミュレーションを実施した。CO₂は圧入井の圧入区間全体から貯留層中に圧入され、溶解CO₂量の分布範囲は、圧入井の圧入区間の極近傍に限定されることが予想された。なお、シミュレーション上、圧入したCO₂量が少ないため、圧入したCO₂のすべては圧入後直ちに地層水に溶解する。また、圧入による貯留層圧力の上昇範囲は圧入井の近傍に限定的であることが推定され、上昇した圧力は圧入停止2年後にはほぼ解消されるものと考えられた。

滝ノ上層に対してもCO₂と地層水および貯留層鉱物との地化学反応を考慮する連成シミュレーションを実施した。圧入量が少ないため、実績の圧入量では結果を再現できなかった。400tの圧入を仮定した検討の結果、長期的には、圧入したCO₂の一部が地層水と溶解し、滝ノ上層貯留層中の海緑石と斜長石の溶解で生じるFe²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺と反応することで、シデライト、マグネサイト、方解石等の炭酸塩鉱物として鉱物固定されるとする結果を得た。

3.4.4 総括

CO₂圧入は、萌別層には2016年4月6日から2019年11月22日までの間に300,012t、滝ノ上層には2018年2月6日から9月1日の間で98tを圧入した。CO₂圧入におけるPTセンサー圧力の最大値は、各層の遮蔽層破壊を避けるために設けた上限圧力に対して十分低く、圧入開始以降、PTセンサー圧力・温度は正常な範囲内であった。

2019年12月までのモニタリングにより、CO₂貯留層の温度・圧力に異常はないこと、CO₂圧入と貯留に伴う微小振動や自然地震の発生は認められないこと、圧入されたCO₂は貯留層内に留まっていることが確認され、長期挙動予測シミュレーションにより、圧入されたCO₂は1,000年後も貯留層に留まっていることが予想された。また海洋環境調査により、海洋にCO₂圧入開始前からの変化は認められず、CO₂の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった。これらにより、本事業においてCO₂が安全に貯留されていることが確認された。

第4章 モニタリングおよび海洋環境調査の実施と結果

本事業では、CCSの安全性実証およびCO₂圧入前中後の貯留層状況把握を目的に、2012～2020年度にかけてモニタリングおよび海洋環境調査を実施中である。本章では、2019年度までのモニタリングおよび海洋環境調査の実施状況を記述し、結果のまとめを示した。

4.1 概要

本事業では、CO₂圧入とあわせて各種モニタリングを実施し、圧入したCO₂の挙動（移動、広がり）把握、貯留地点近傍および周辺における地震発生状況の把握、坑井内の温度・圧力の観測を行った。また、海洋環境調査（海域の流況観測、採水・採泥等による水質・底質・プランクトン・底生生物の調査、海底面のビデオカメラ撮影による底生生物の観察・気泡の発生の有無の観察等）により、CO₂圧入に伴う異常の有無を監視してきた。

2012年より設計等の準備を開始し、2015年から事前モニタリング、2016年より圧入開始と共にモニタリングを開始した。観測設備／観測作業詳細とモニタリングおよび海洋環境調査項目を表4.1-1に示す。

表 4.1-1 観測設備／観測作業詳細とモニタリングおよび海洋環境調査実施項目

観測	モニタリング項目	観測頻度	特記事項（設置数など）
圧入井・プラント設備	坑内：温度・圧力 坑口：圧入温度・圧力・CO ₂ 圧入量	連続・リアルタイム観測	淹ノ上層圧入井 萌別層圧入井
観測井	坑内：温度・圧力 微小振動、自然地震	連続・リアルタイム観測	淹ノ上層観測井OB-1 萌別層観測井OB-2 淹ノ上層観測井OB-3
常設型海底受振ケーブル(OBC)	微小振動、自然地震 二次元弾性波探査の受振	連続・リアルタイム観測	貯留層直上を通過する1測線
海底地震計(OBS)	微小振動、自然地震	・連続・リアルタイム観測 (貯留地点直上) ・連続観測(貯留地点周辺)	貯留地点直上 : 1台(有線型) 貯留地点周辺海域 : 3台(独立型)
陸上設置地震計	微小振動、自然地震	連続・リアルタイム観測	苫小牧市：1箇所 他にHi-net観測データも利用
二次元弾性波探査	貯留層中のCO ₂ 分布範囲	2016年度実施 2018年度は二次元＋小規模 三次元探査を実施 2019年度は二次元＋小規模 三次元探査を実施予定	三次元弾性波探査の補完として実施(常設型OBCも利用) ベースラインデータは2013年度に取得済
三次元弾性波探査	貯留層中のCO ₂ 分布範囲	2017年度実施 2020年度実施予定	ベースラインデータは2009年度に取得済
海洋環境調査	海洋データ (物理的・化学的特性、生物生息状況など)	四季調査を実施	ベースライン観測は2013-2014年度に実施

これらの結果、坑井内の温度・圧力挙動に異常が認められないこと、地震発生状況には

圧入に伴う変化が認められないこと、圧入した CO₂ が事前の想定どおりに貯留層内に留まっていること、海洋環境に変化が認められず CO₂ の漏出またはそのおそれがある事象がないことを確認した。

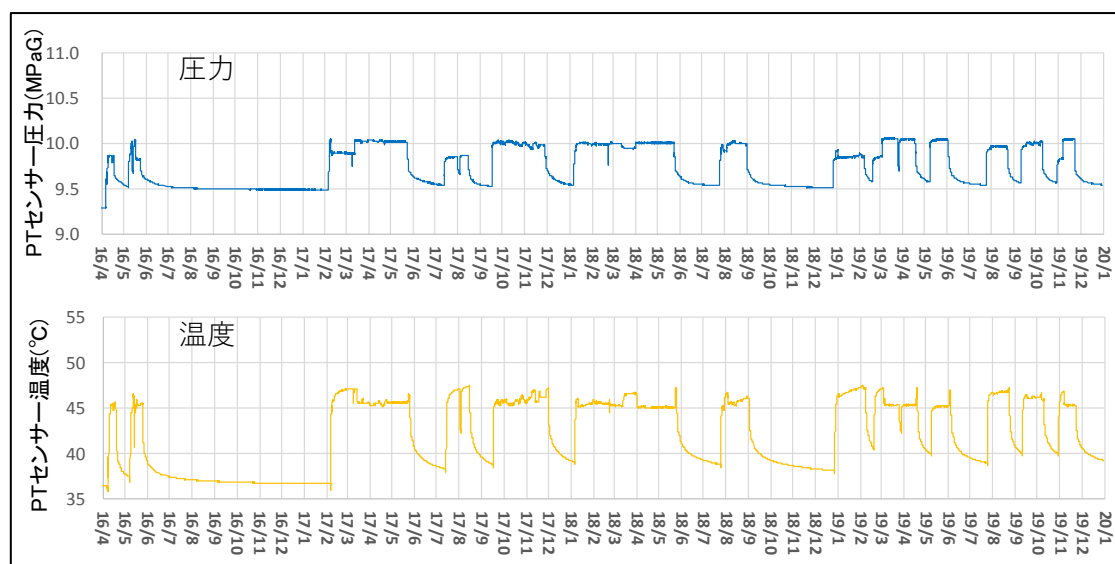
4.2 モニタリング結果

4.2.1 温度・圧力観測

安全な圧入を実施するため、圧入井の坑内に設置した PT センサーにより圧力・温度データを連続的に監視・記録し、圧入中にあらかじめ想定する温度・圧力範囲から逸脱しないことを常時確認している。その結果は、貯留層評価のための重要なデータである。

(1) 萌別層圧入井 IW-2

図 4.2-1 に萌別層圧入井 IW-2 の PT センサー圧力・温度の推移を示す。当該期間の萌別層圧入井 IW-2 の PT センサー圧力は 9.28～10.07 MPaG であり、実績値はあらかじめ想定した設定値の範囲内（9.28～12.63 MPaG）であった。なお、9.28 MPaG は CO₂ 圧入前に坑内が仕上げ流体（ブライン）で満たされていた時点の PT センサー圧力（静止圧力）であり、坑内が CO₂ で満たされた後の静止圧力は 9.51 MPaG であった。また、PT センサー温度は 35.8℃～47.5℃であり、あらかじめ想定した設定値の範囲内（32.2～52.2℃）であった。

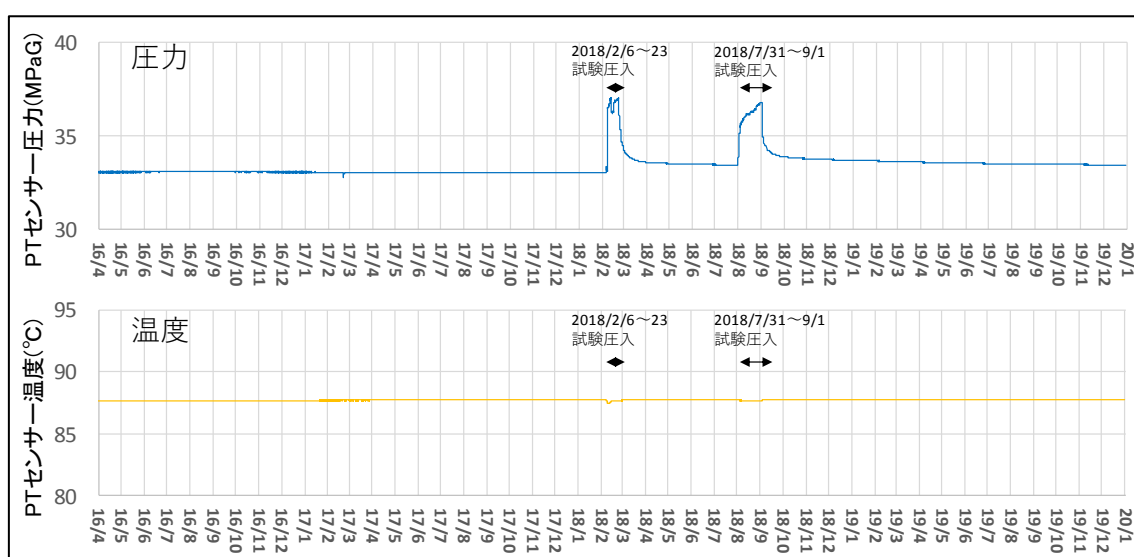


注) PT センサーは地表から垂直方向に 930 m となる坑内に設置。

図 4.2-1 萌別層圧入井 IW-2 PT センサー圧力の推移（上図）および温度の推移（下図）

(2) 滝ノ上層圧入井 IW-1

図 4.2-2 に滝ノ上層圧入井 IW-1 の PT センサー圧力および温度の推移を示す。当該期間の PT センサー圧力は、32.84~37.07 MPaG であり、実績値はあらかじめ想定した設定値の範囲内 (32.78~38.04 MPaG) であった。PT センサー温度は、87.4°C~87.8°C であった。圧入開始初期には地表で圧入する CO₂ の温度が低下したため、坑内においても若干の温度低下が認められたが、実績値はあらかじめ想定した設定値の範囲内 (78.7~96.6°C) であった。



注) PT センサーは地表から垂直方向に 2,351 m となる坑内に設置。

図 4.2-2 滝ノ上層圧入井 IW-1 PT センサー圧力の推移 (上図)
および温度の推移 (下図)

(3) 観測井

本事業では、図 4.2-3 に示す観測井を設置して、2015 年から坑内温度圧力の観測を行っている。萌別層を対象に観測を実施している観測井 OB-2 の温度圧力の変化を図 4.2-4 に示す。坑内機器の回収・点検に伴う変化は認められるものの、顕著な変動は確認されていない。



図 4.2-3 観測井配置

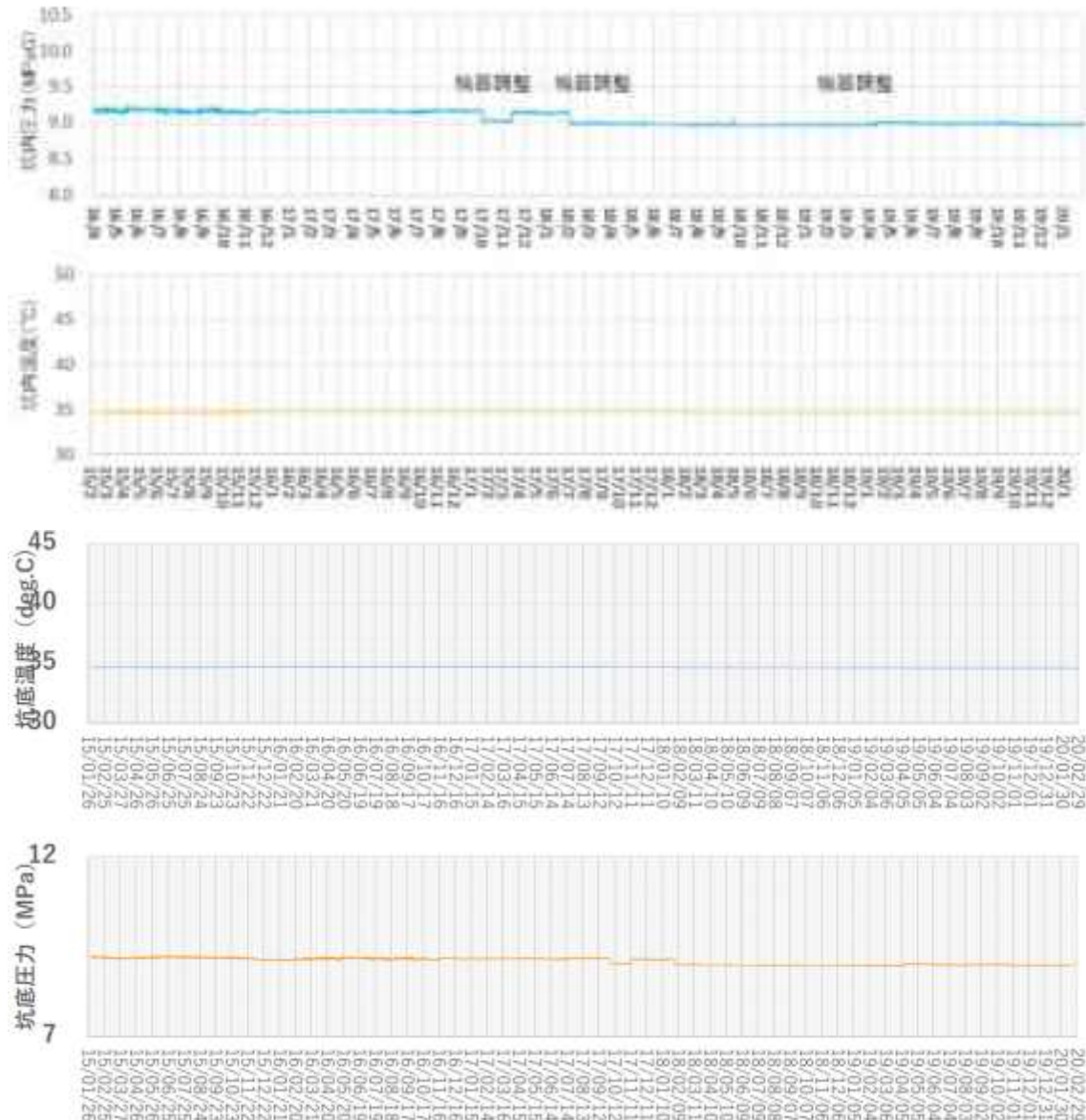


図 4.2-4 観測井 OB-2 による温度圧力の観測結果

4.2.2 微小振動・自然地震観測

本事業では、図 4.2-5 に示す以下の地震観測設備を設置して、2015 年から微小振動・自然地震の観測を行っている。

- 1) 圧入地点の北西約 6 km 地点に設置した陸上地震計
- 2) 圧入地点近傍の 2 地点および東方約 10 km の 1 地点の計 3 地点の観測井に設置した大深度坑内地震計
- 3) 圧入区間直上近傍の 4 地点に設置した OBS
- 4) 圧入区間直上を横切る測線上に設置した常設型 OBC (受振測線長 3.6 km)

これらから得られるデータに周辺の Hi-net 観測点14 点のデータを加えて、同図に示す東西約 50 km×南北約 38 km の範囲を自然地震モニタリング範囲と定め、地震活動を監視した。また、圧入地点近傍の微小な振動を重点的に監視するため、本事業で設置した地震計を用い、前述の範囲のうち地下の圧入地点を取り囲む東西 6 km×南北 6 km の範囲を微小振動モニタリング範囲と定め、極めて小さな振動を監視した。この微小振動モニタリング範囲内では、貯留層相当深度付近におけるマグニチュード-0.5 以上の微小振動を高い確度で検知することが可能である。

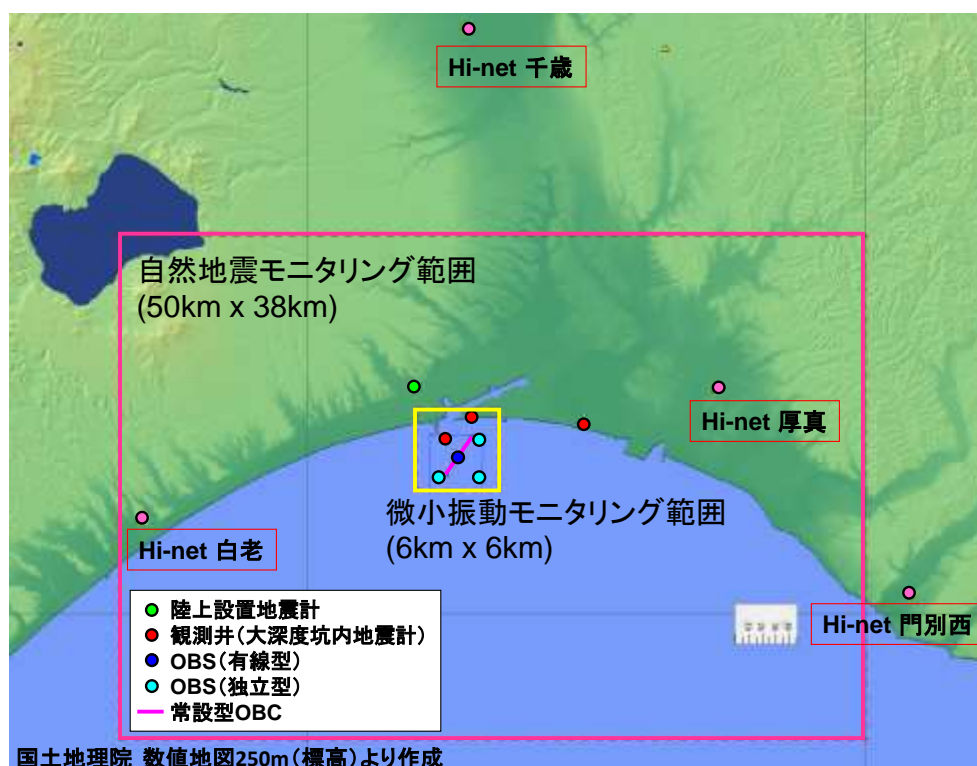


図 4.2-5 地震観測点配置およびモニタリング対象範囲

図 4.2-6 に 2015 年 2 月から 2020 年 1 月末までの期間に微小振動モニタリング範囲内で検知したイベント²の件数および推定震源位置を示す。推定震源位置は、震央を示す平面図と震源深度を示す南北断面図および東西断面図による三面展開図で示している。

圧入開始前の 2015 年 4 月から同年 8 月にかけて 9 件、圧入開始後の 2017 年 8 月に 3 件のイベントを同範囲内で検知した。これらのイベントはいずれも深度約 6 km 以深で発生し

¹ Hi-net : 国立研究開発法人防災科学技術研究所が運用する高感度地震観測網。

² 本章におけるイベントとは、検知した微小振動および自然地震を指す。

ており、当範囲で自然に発生した極微小地震³を捉えたものである。2017年8月の3件のイベント以降、2020年2月末時点までにおいて、平成30年北海道胆振東部地震本震（2018年9月6日午前3時7分発生）の前後を含め、同範囲内ではイベントを検知しなかった。

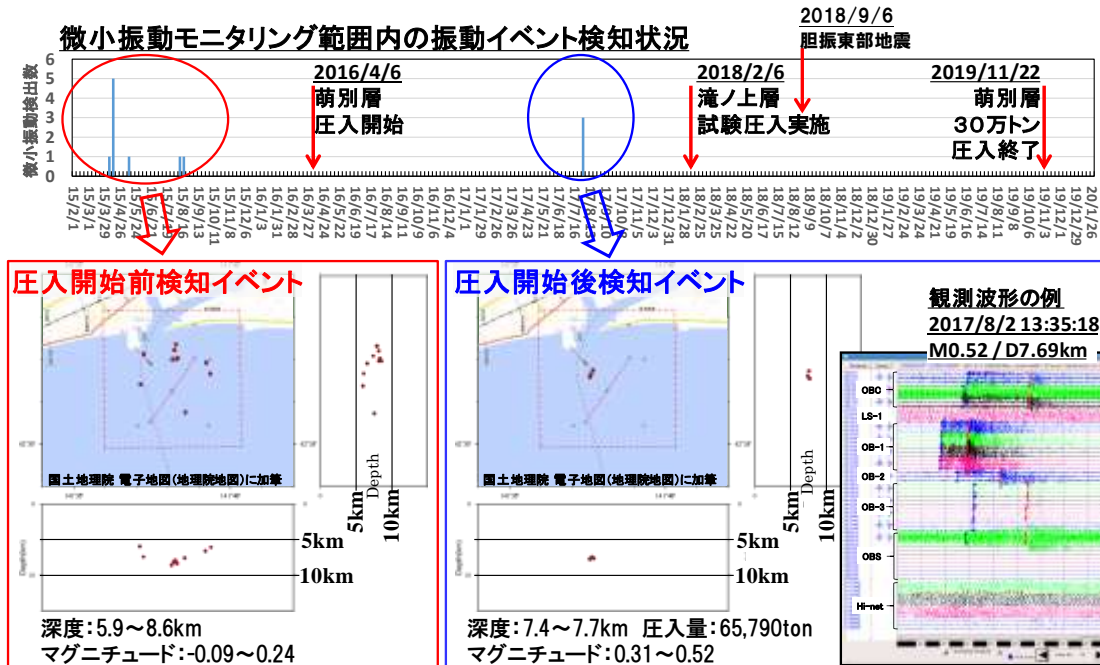


図 4.2-6 微小振動モニタリング範囲におけるイベント検知状況

図 4.2-7 に 2015～2018 年度の年度毎（2018 年度は平成 30 年北海道胆振東部地震本震；2018 年 9 月 6 日以前まで）の自然地震モニタリング範囲内の観測結果を示す。平成 30 年北海道胆振東部地震本震以降は、多数の余震が発生しているため、2018 年度は期間を限定した。いずれの年度においても、樽前山南方周辺（同図中、西方の陸域に震央がある地震）および石狩低地東縁断層帯南部周辺（同図中、東方に震央が分布している地震）に顕著な地震活動が認められる。石狩低地東縁断層帯南部周辺では、2017 年度に苫小牧港東港付近で微小地震、極微小地震が集中して検知された点が特徴としてあげられるものの、いずれの年度においても多くの微小地震、極微小地震を検知しており、圧入前後で地震活動に顕著な時系列的変動も認められなかった。

³ マグニチュード 1 以上 3 未満の地震は微小地震、マグニチュード 1 未満の地震は極微小地震と呼ばれている。

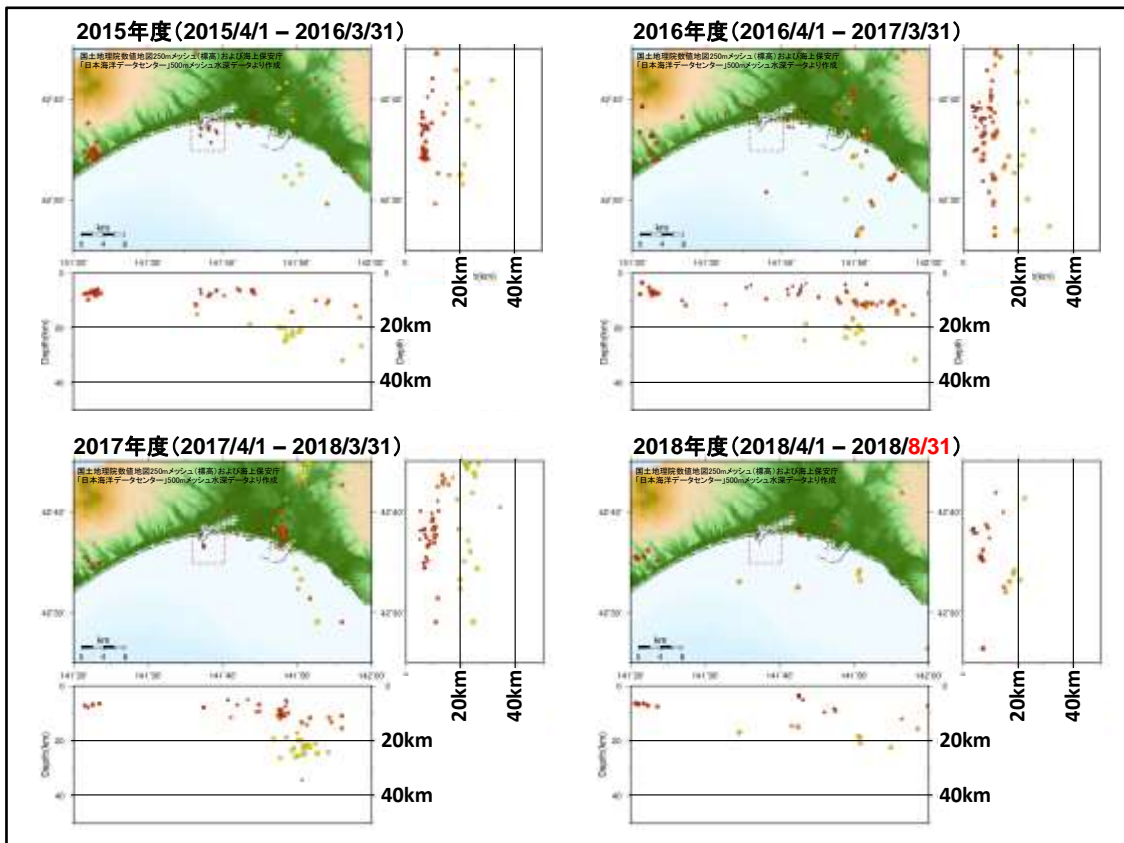


図 4.2-7 2015 年度～2018 年度の自然地震観測結果（2018 年度は 8 月末分まで）

図 4.2-8 に 2018 年度の自然地震モニタリング範囲の観測結果を示す。ただし、平成 30 年北海道胆振東部地震本震直後の停電および定期点検に伴って観測データの欠測が生じており、同図には当該欠測期間の震源は反映されていない。また、本震震源域近傍では膨大な数の余震が発生したため、本震近傍の余震はモニタリング対象から除外した。

勇払から苫小牧港東港にかけての狭い範囲（同図中、中央東寄り陸域で震央が集中している範囲）に多数の微小地震、極微小地震を検知しており、これらの地震の多くは平成 30 年北海道胆振東部地震の余震活動と考えられる。既に述べたように、この周辺は石狩低地東縁断層帯南部付近に位置しており、平成 30 年北海道胆振東部地震の本震以前より微小地震、極微小地震を多く観測している。本震震源域周辺の全体的な地震活動の活発化に伴って発生数は顕著に増加したものの、震源位置は本震以前の自然地震の活動範囲を外れるものではなく、貯留地点近傍においては本震に伴う地震活動領域の変化は確認していない。

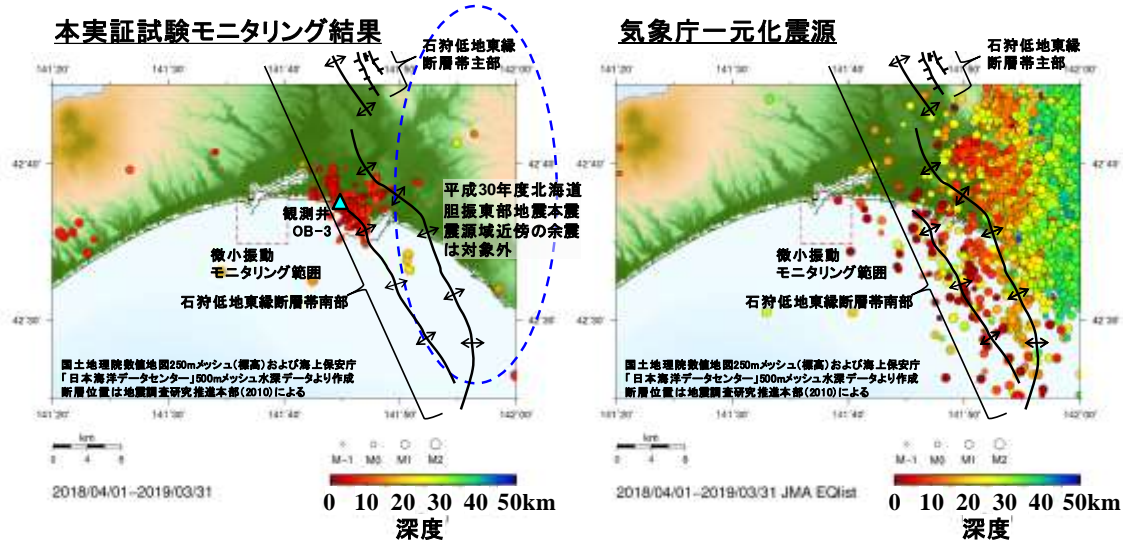


図 4.2-8 2018 年度自然地震観測結果（本事業の観測結果と気象庁一元化震源）

4.2.3 弾性波探査（圧入した CO₂ の分布状況）

弾性波探査は地下深部（ここでは深度 1～3 km 程度）の地質構造を調べる調査手法であり、本事業では弾性波探査を CO₂ 圧入開始前と圧入開始後に複数回実施すること（以下、「繰り返し弾性波探査」と称する。）により、CO₂ 圧入に伴う地下の状態変化を把握している。具体的には、CO₂ 圧入開始後の探査（以下、「モニター調査」と称する。）結果から圧入開始前のベースライン調査結果を減算して得られる結果（差分記録）が CO₂ 圧入による地下の貯留層の物性変化を反映し、差分記録に反射波の振幅が異なる帯域（振幅異常域）として現れることを利用して CO₂ の分布域を求めた。

本事業では、海洋汚染防止法に基づいて環境省より許可を受けた監視計画にしたがい、圧入期間中および圧入終了後 2 年間は弾性波探査を毎年度実施し、CO₂ の分布状況を把握することとしている。

弾性波探査には立体的に地下の構造を調べる三次元弾性波探査と、特定の鉛直断面上の地下構造を調べる二次元弾性波探査の 2 種類がある。地下の CO₂ の状態を精度よく把握するためには、三次元弾性波探査を高頻度で実施することが理想的であるが、三次元弾性波探査は二次元弾性波探査と比較して高額であり、また、調査範囲が広く作業期間も長くなるため、本事業では当該海域利用者への影響も考慮し、原則として二次元弾性波探査と三次元弾性波探査を隔年交互に実施する計画とした。圧入開始前のベースライン調査としては、2009 年度に三次元弾性波探査、2013 年度に二次元弾性波探査をそれぞれ実施した。

2016 年 4 月の圧入開始以降、2019 年度末までに計 4 回のモニター調査を実施した。表 4.2-1 に、これまでのモニター調査実施状況と結果の概要を示す。2016 年度の第 1 回モニ

ター調査時点では圧入量が少なかったことから、CO₂ 圧入に伴う地下の物性変化は検知されなかった。2017 年度の第 2 回モニター調査以降では、地下の CO₂ 分布状況が確認され、事前の想定どおりに、圧入した CO₂ は貯留層内の圧入地点近傍に留まっているものと推測された。

表 4.2-1 繰り返し弾性波探査モニター調査実施状況

年度／ 実施内容	調査時累計圧入量	調査結果
2016 年度 二次元弾性波探査	約 7 千 t (萌別層) 0 t (滝ノ上層)	圧入に伴う変化は検出されなかった。
2017 年度 三次元弾性波探査	約 6 万 5 千 t (萌別層) 0 t (滝ノ上層)	圧入に伴う変化が認められ、貯留層内の CO ₂ 分布が推定された。
2018 年度 二次元弾性波探査 小規模三次元弾性波探査 注	約 21 万 t (萌別層) 98 t (滝ノ上層)	萌別層貯留層については 2017 年度調査に引き続いて圧入に伴う変化が認められた。 滝ノ上層貯留層については圧入に伴う変化は検出されなかった。
2019 年度 二次元弾性波探査 小規模三次元弾性波探査	約 30 万 t (萌別層) 98 t (滝ノ上層)	調査結果の解析は 2020 年度に実施する。

注) 2018 年度および 2019 年度に実施した小規模三次元弾性波探査は、萌別層に着目し、将来の圧入進展に伴って CO₂ 分布域が当初想定範囲の北側に拡大した場合に備えて、三次元弾性波探査の北縁部および北部の領域を対象として実施した調査領域を限った小規模なものである。

以下に各年度のモニター調査の概要および結果を示す。2019 年度は、2020 年 1～2 月に小規模三次元弾性波探査と二次元弾性波探査を実施し、その調査結果は 2020 年秋頃にまとめる予定である。

(1) 2016 年度 (第 1 回モニター調査)

圧入開始後の第 1 回目のモニター調査として、二次元弾性波探査を実施した。データ取得期間および期間中の CO₂ 累計圧入量は以下のとおりである。

データ取得期間	2017 年 1 月 25 日～同年 2 月 6 日	
累計圧入量	萌別層貯留層	: 7,162.9～7,459.9 t
	滝ノ上層貯留層	: 0 t

図 4.2-9 に調査測線図を示す。本調査は、萌別層を対象とする北東-南西方向の測線配置 A および滝ノ上層を対象とする南北方向の測線配置 B の各測線配置で実施した。測線配

置 A では 2 本の受振測線に対して 4 本の発振測線、測線配置 B では 2 本の受振測線に対して 2 本の発振測線で観測を行った。この結果、測線配置 A では計 7 本の重合測線上で、測線配置 B では計 3 本の重合測線上でそれぞれ二次元鉛直断面を得た。

図 4.2-10 に、測線配置 A の 7 本の二次元鉛直時間断面のうち最も南東側の断面（ベースライン調査、モニター調査の各断面および両者の差分断面）を示す。萌別層砂岩層深度付近（往復走時 1~1.2 s 付近に対応）において、本モニター調査時点とベースライン調査時点との間に明瞭な変化を認めることはできなかった。同様に、他のいずれの鉛直断面においても変化は検出されなかった。本調査実施時の CO₂ 累計圧入量が約 7 千 t であり、圧入による地下の物性変化が繰り返し弾性波探査の検知限界未満であったためと考えられる。

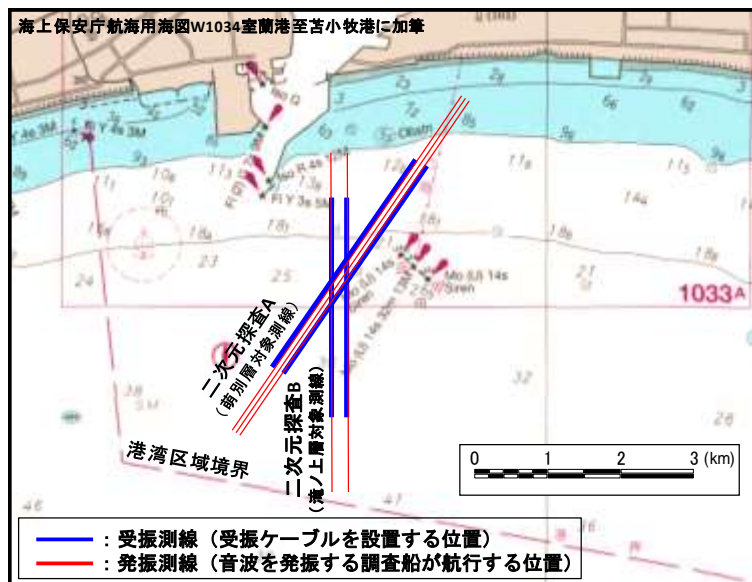


図 4.2-9 2016 年度二次元弾性波探査 調査測線図

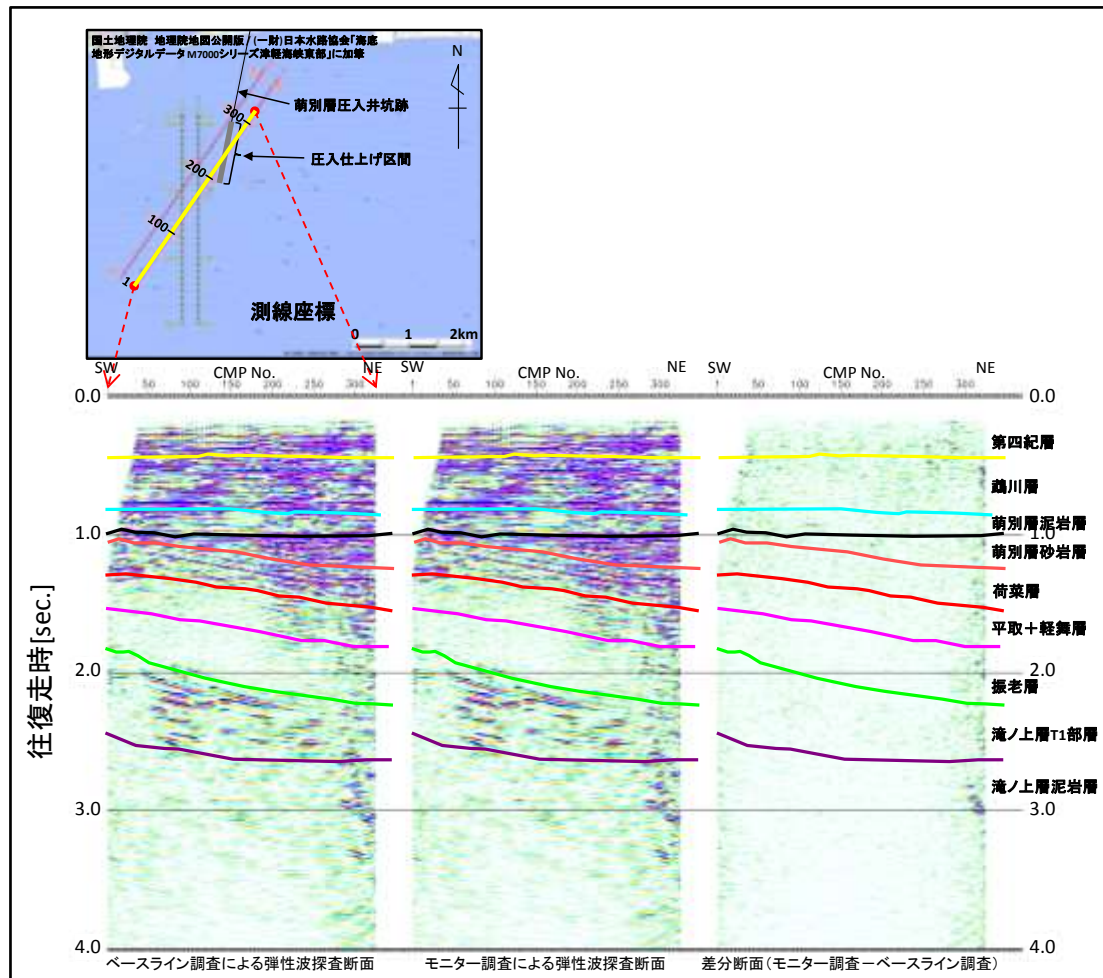


図 4.2-10 2016 年度二次元弾性波探査 鉛直断面例 (測線配置 A)

(2) 2017 年度 (第 2 回モニター調査)

第 2 回目のモニター調査として三次元弾性波探査を実施した。データ取得期間および期間中の CO₂ 累計圧入量は以下のとおりである。

データ取得期間	2017 年 7 月 9 日～同年 8 月 17 日
累計圧入量	前別層貯留層 : 61,238.9～69,070.0 t
	滝ノ上層貯留層 : 0 t

図 4.2-11 に調査測線図を示す。本調査では、同図に示すように、南北方向計 16 本の受振測線および東西方向 26 本の発振測線を設定した。受振測線のうち東側の 6 測線はベースライン調査範囲東側の地下構造を確認するために設定したものであるため、差分記録の作成は西側 10 本の受振測線で収録したデータおよびベースライン調査のデータを用いて実施した。

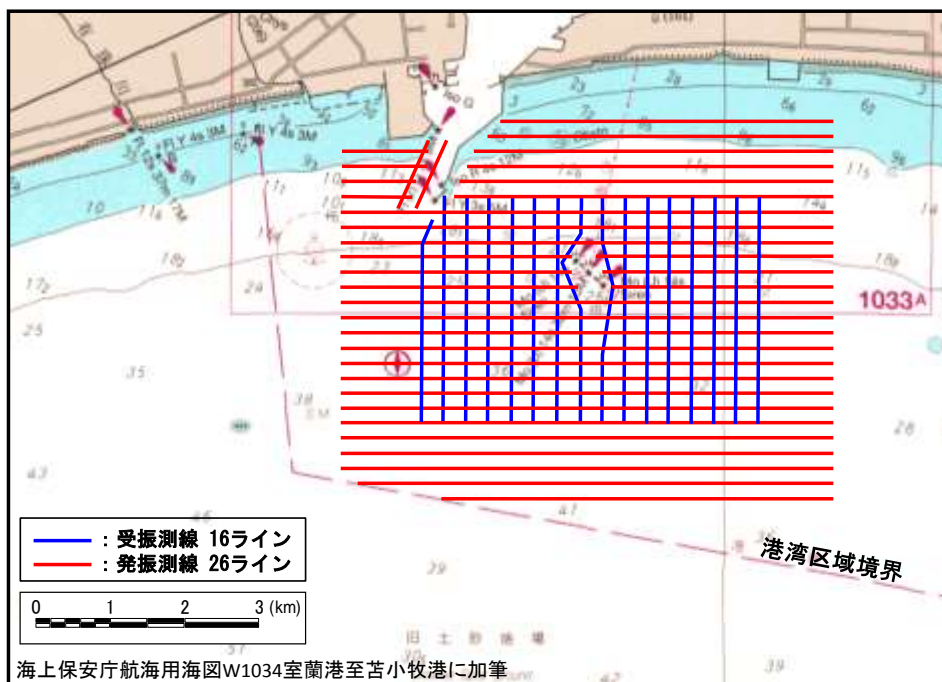


図 4.2-11 2017 年度三次元弾性波探査 調査測線図

図 4.2-12 および図 4.2-13 に差分記録のうち東西鉛直時間断面および南北鉛直時間断面を例示した。この二つの断面は萌別層貯留層への CO_2 圧入に伴って差分記録上に変化が認められた領域を含む代表例である。差分記録上には、圧入井坑跡周辺の萌別層砂岩層上面深度付近（往復走時 1 s 付近の赤色の楕円内）に、反射波の振幅が異なっている帯域（振幅異常域）が明瞭に認められた。これらは、 CO_2 圧入に伴い、ベースライン調査時点から本モニター調査時点までの期間に地下の物性変化が生じたことを示している。

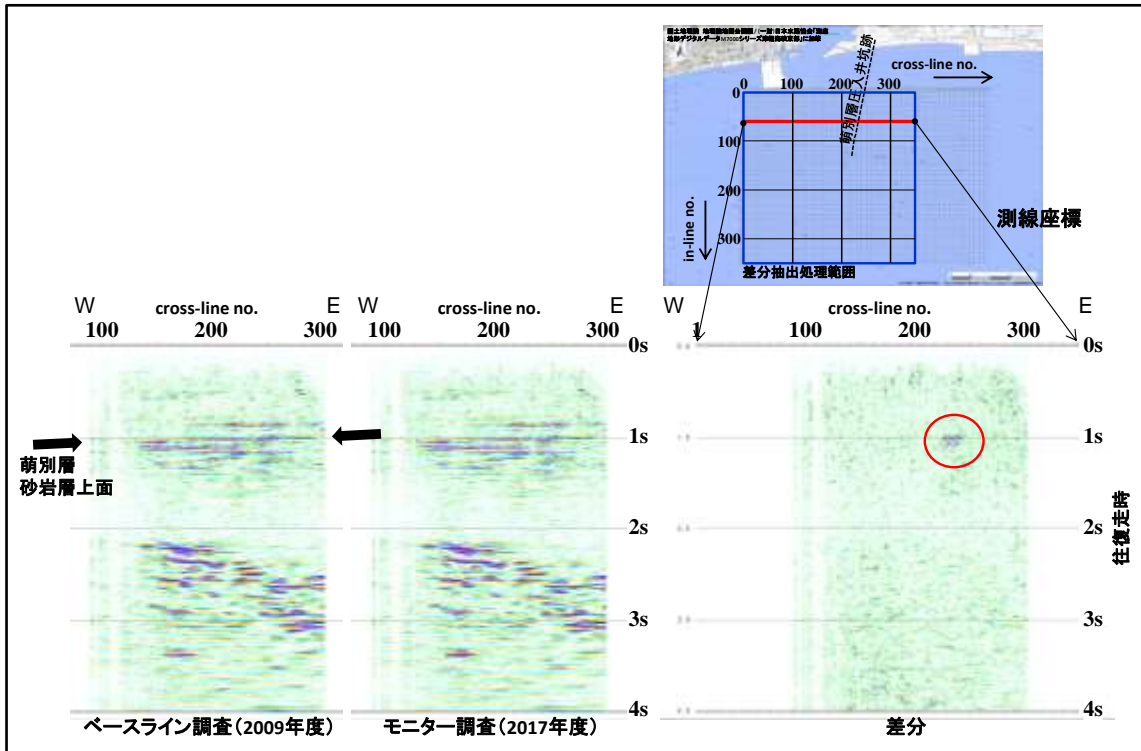


図 4.2-12 2017 年度三次元弾性波探査 東西鉛直時間断面例

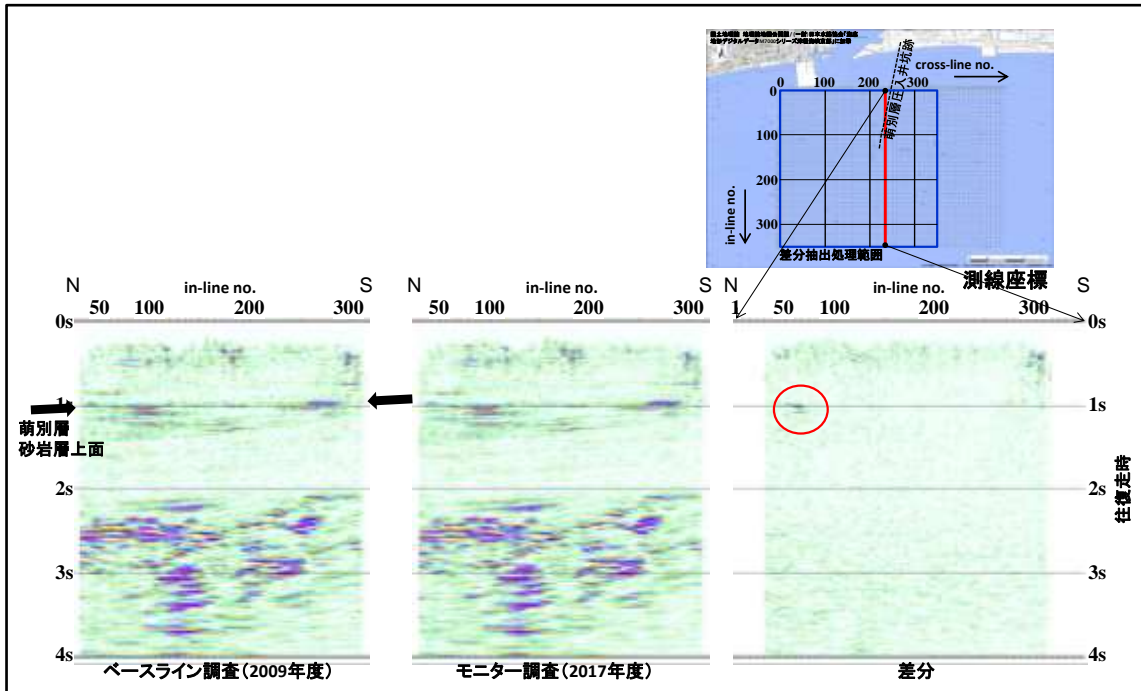


図 4.2-13 2017 年度三次元弾性波探査 南北鉛直時間断面例

図 4.2-14 に東西鉛直時間断面の拡大図を示す。時間断面上の振幅異常域は、図中に黒の

実線で示す萌別層砂岩層上面付近に位置しており、圧入した CO₂ が萌別層砂岩層最上部、およびその直上の萌別層泥岩層最下部に狭在する砂岩層内に貯留されていることがわかる。同図では、往復走時約 1.07 s と同約 1.15 s 付近にも弱い振幅異常が認められたが、これらは下方進行波が CO₂ 貯留領域を透過する際に振幅が減少したために生じた偽像であり、下部の地層に物性変化が生じたことを示すものではない。以上のことから、圧入した CO₂ は貯留層の上部付近に限定して存在しており、貯留層区間外への漏洩等の異常は生じていないといえる。

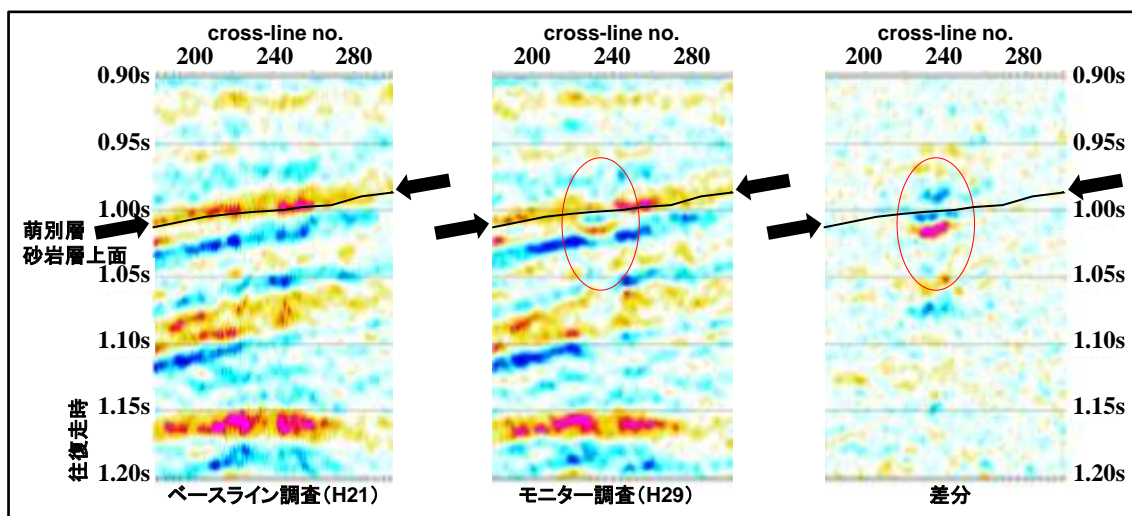


図 4.2-14 2017 年度三次元弾性波探査 東西鉛直時間断面拡大図

図 4.2-15 は、鉛直時間断面上で顕著な振幅異常が観測された往復走時 992 ms から 1,032 ms までの時間ウインドウ内の差分記録の RMS 振幅⁴を計算し、平面図上に投影して表示したものである。同図には萌別層圧入井 IW-2 坑跡の平面投影位置を重ねて表示した。

この平面上では圧入井坑跡を中心として暖色系の RMS 振幅の大きい領域が分布しており、CO₂ が圧入井から周囲に浸透していることを示していると考えられる。この RMS 振幅が大きい領域の中心部付近において、その値は最大を示しており、当該位置は投影平面上で圧入井坑跡上に位置している。坑跡上の当該位置の深度は約 1,010 m であり、圧入仕上げ区間の上部区間に相当する。なお、この平面図の南西側縁辺部に認められる RMS 振

⁴ RMS (Root Mean Square) 振幅：ある任意の往復走時の間（時間ウインドウ）の内において計測された信号の二乗平均平方根。波動の強度（実効値）を表す際に用いられる。

幅の大きな領域は、鉛直時間断面（例えば、図 4.2-14）と同様に、観測に伴うノイズによるものである。

RMS 振幅値の変化は定性的に貯留層内の物性変化の程度に対応しているため、圧入した CO₂ は深度約 1,010 m 付近を中心として貯留層内に浸透しているものと考えられる。

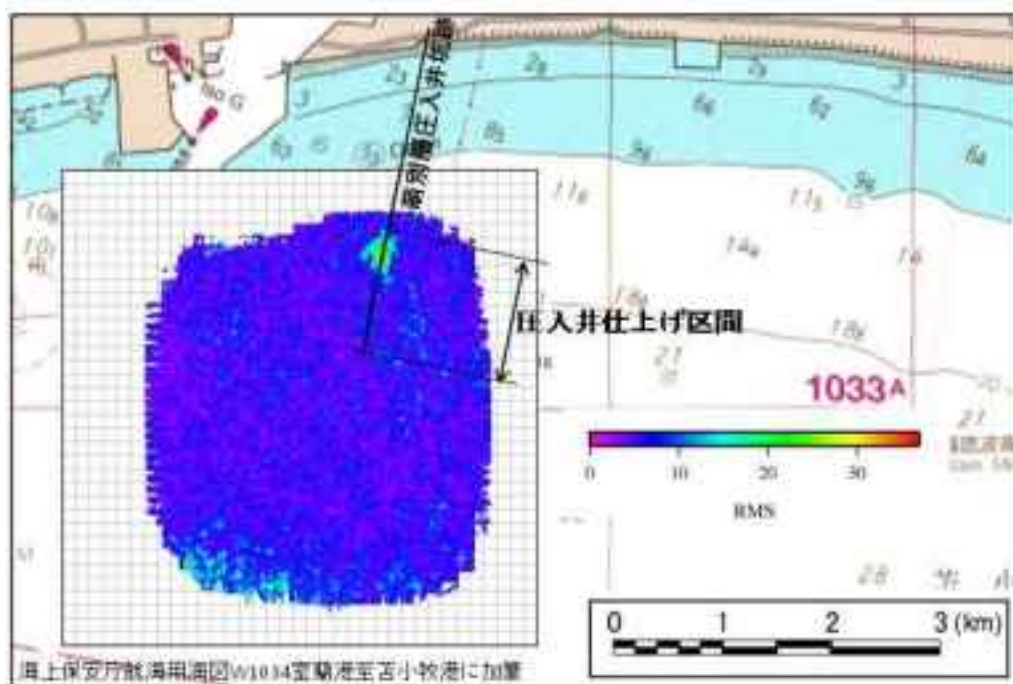


図 4.2-15 2017 年度三次元弾性波探査 差分記録の RMS 振幅水平分布
(時間ウインドウ : 992 ms~1,032 ms)

(3) 2018 年度 (第 3 回モニター調査)

第 3 回目のモニター調査として二次元弾性波探査を実施した。データ取得期間および期間中の CO₂ 累計圧入量は以下のとおりである。

データ取得期間	2018 年 9 月 26 日~同年 10 月 18 日
累計圧入量	萌別層貯留層 : 207,208.9 t (圧入停止中に調査を実施)
	滝ノ上層貯留層 : 98.2 t

図 4.2-16 に調査測線図を示す。

本調査では当初計画した二次元弾性波探査に加えて、今後の圧入進展に伴って北方に CO₂ 分布域が拡大する場合に備えたベースライン記録を取得するために、三次元弾性波探査ベースライン調査領域の北端部および同北側領域を対象とした小規模三次元弾性波探査を実施した。これらの調査測線は図 4.2-16 に併記した。

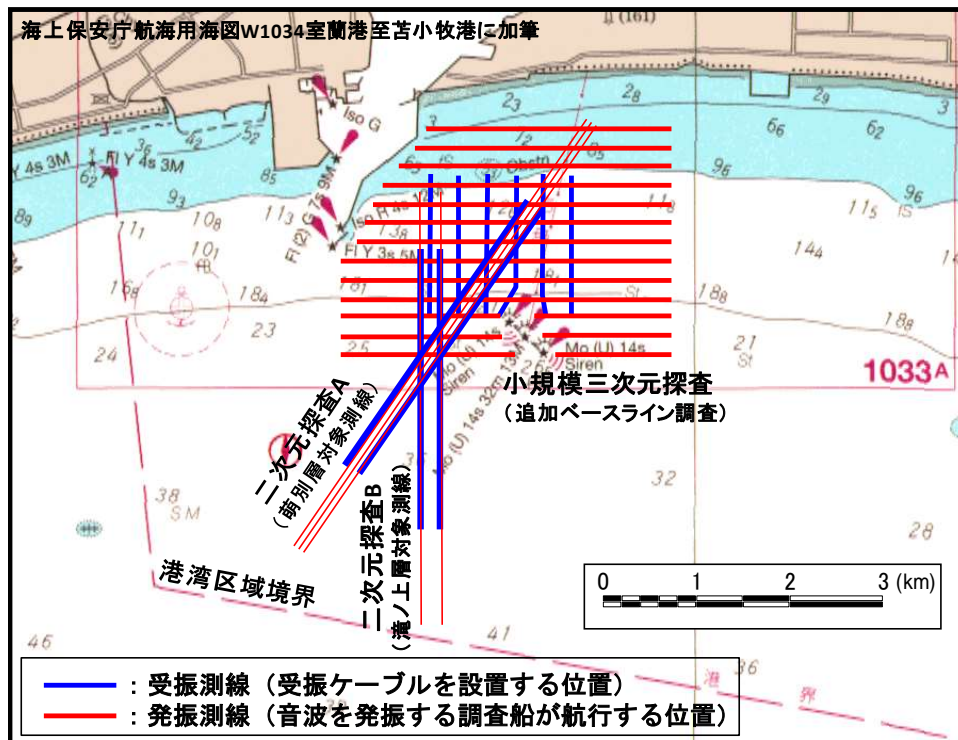


図 4.2-16 2018 年度二次元弾性波探査および小規模三次元弾性波探査 調査測線図

二次元弾性波探査では 2016 年度の第 1 回モニター調査と同様の測線配置で観測を行い、測線配置 A では計 7 本の重合測線上で、測線配置 B では計 3 本の重合測線上でそれぞれ二次元鉛直時間断面を得た。

図 4.2-17 に、測線配置 A の 7 本の二次元鉛直時間断面のうち最も南東側の断面（ベースライン調査、モニター調査の各断面および両者の差分断面）を示す。萌別層砂岩層深度付近（往復走時 1~1.2 s 付近に対応）において、本モニター調査時点とベースライン調査時点との間に振幅異常が明瞭に認められた。三次元弾性波探査とは異なって、二次元弾性波探査結果からは詳細な空間分布を求めることはできないものの、第 2 回モニター調査時点に引き続いて地下の CO₂ 分布状況が確認され、CO₂ は想定どおりに貯留層内に留まっていると考えられた。

図 4.2-18 に、測線配置 B の 3 本の二次元鉛直時間断面のうち中央の断面（ベースライン調査、モニター調査の各断面および両者の差分断面）を示す。滝ノ上層深度付近（往復走時 2~2.5 s 付近に対応）において、本調査時点とベースライン調査時点との間に明瞭な変化を認めることはできなかった。本モニター調査実施時の滝ノ上層への CO₂ 累計圧入量は約 98 t であり、圧入による地下物性変化が、繰り返し弾性波探査の検知限界未満であったためと考えられる。

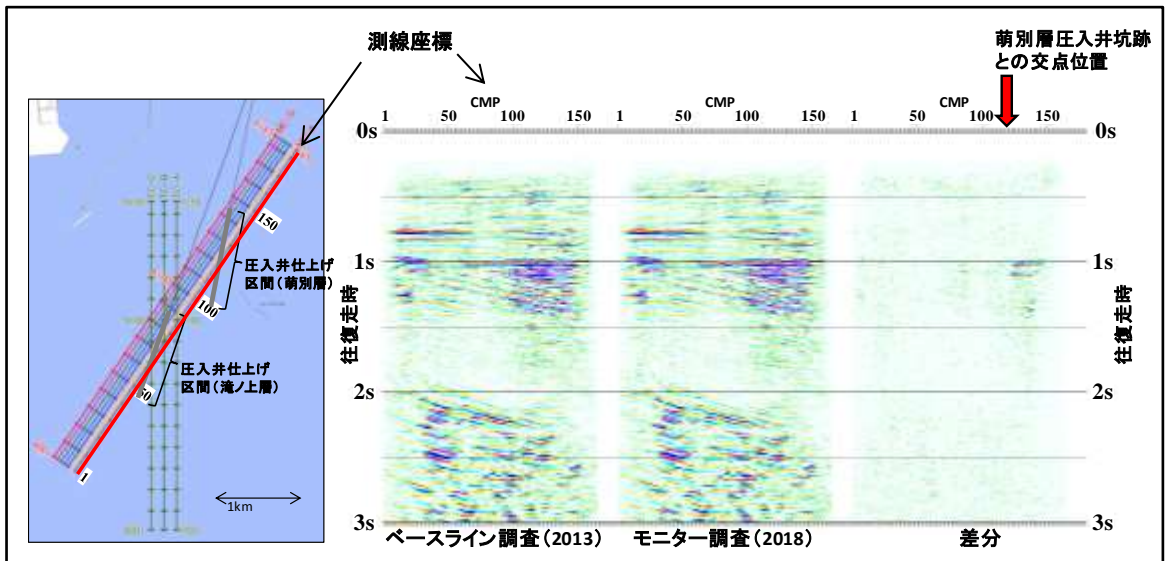


図 4.2-17 2018 年度二次元弾性波探査 鉛直断面例 (測線配置 A)

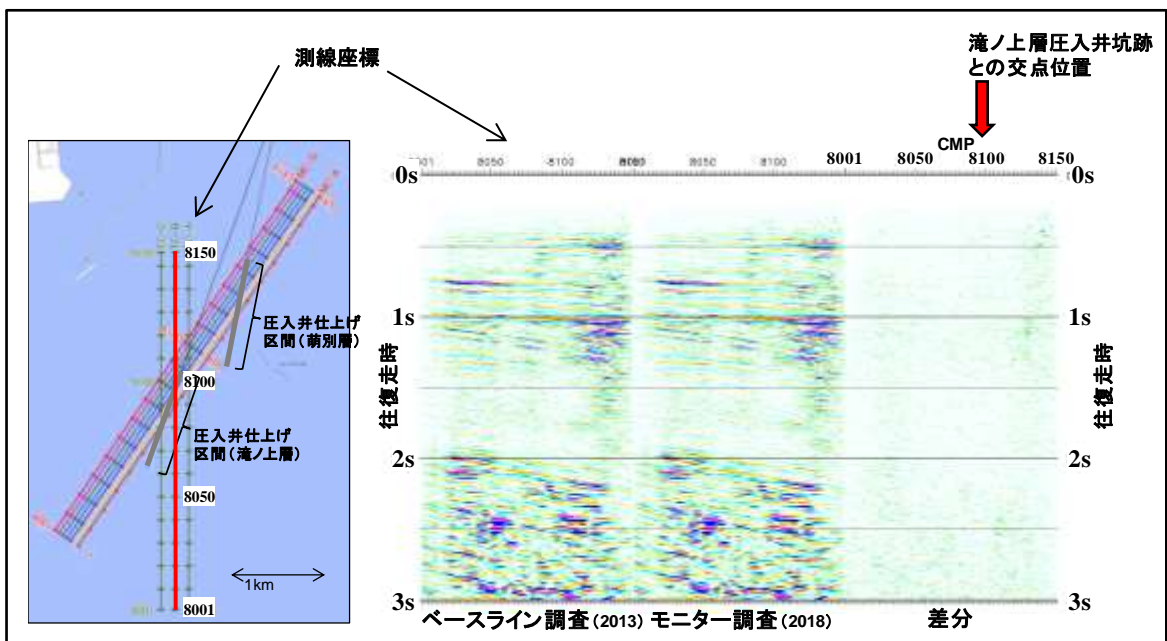


図 4.2-18 2018 年度二次元弾性波探査 鉛直断面例 (測線配置 B)

図 4.2-19 に小規模三次元弾性波探査で得られた三次元反射法ボリュームの東西鉛直時間断面および南北鉛直時間断面の例を示した。弾性波探査では地層境界等の構造変化を地震波の伝搬速度で把握するが、萌別層貯留層深度に相当する往復走時 1 s 前後の反射面およびこれ以深の地層による反射面が明瞭に捉えられており、ベースライン記録を補間するためのデータとして十分な品質が確保されている。

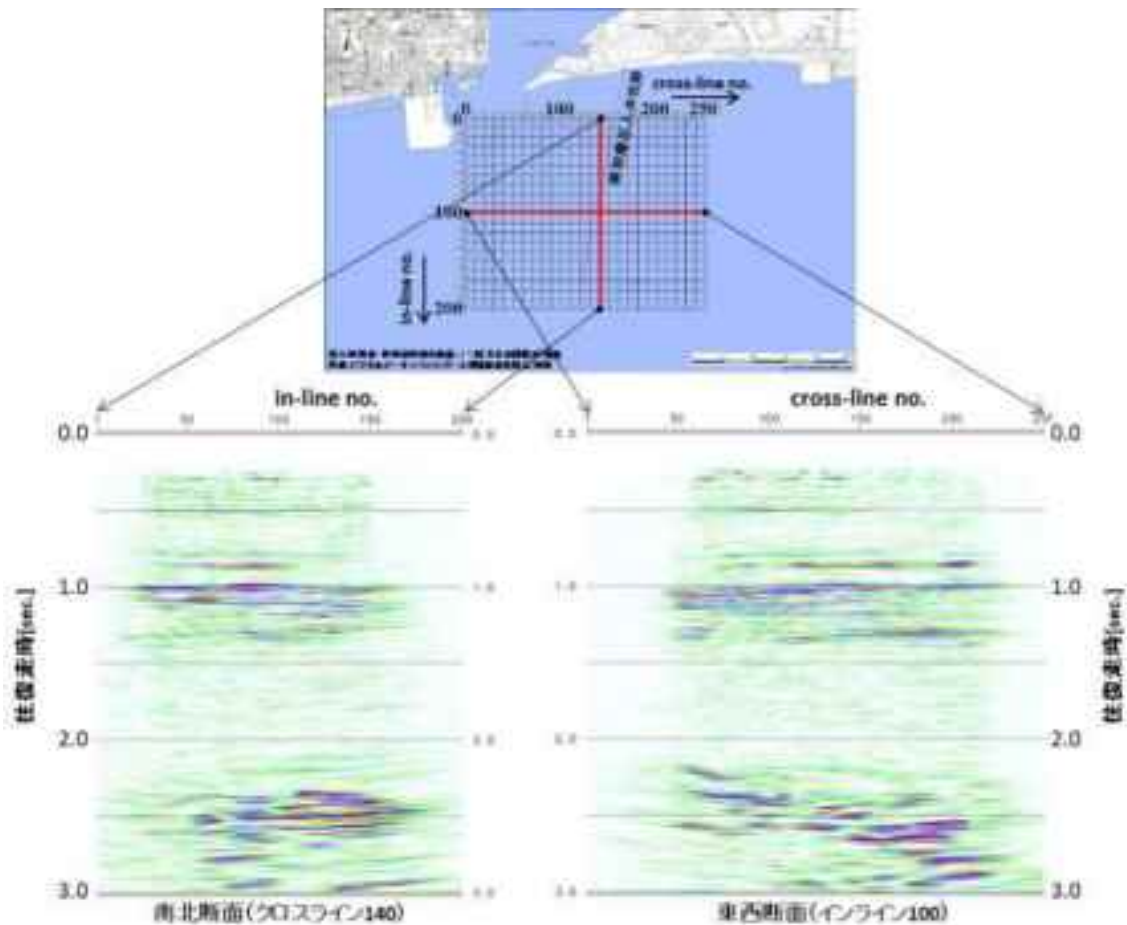


図 4.2-19 小規模三次元弾性波探査による鉛直時間断面例（東西断面および南北断面）

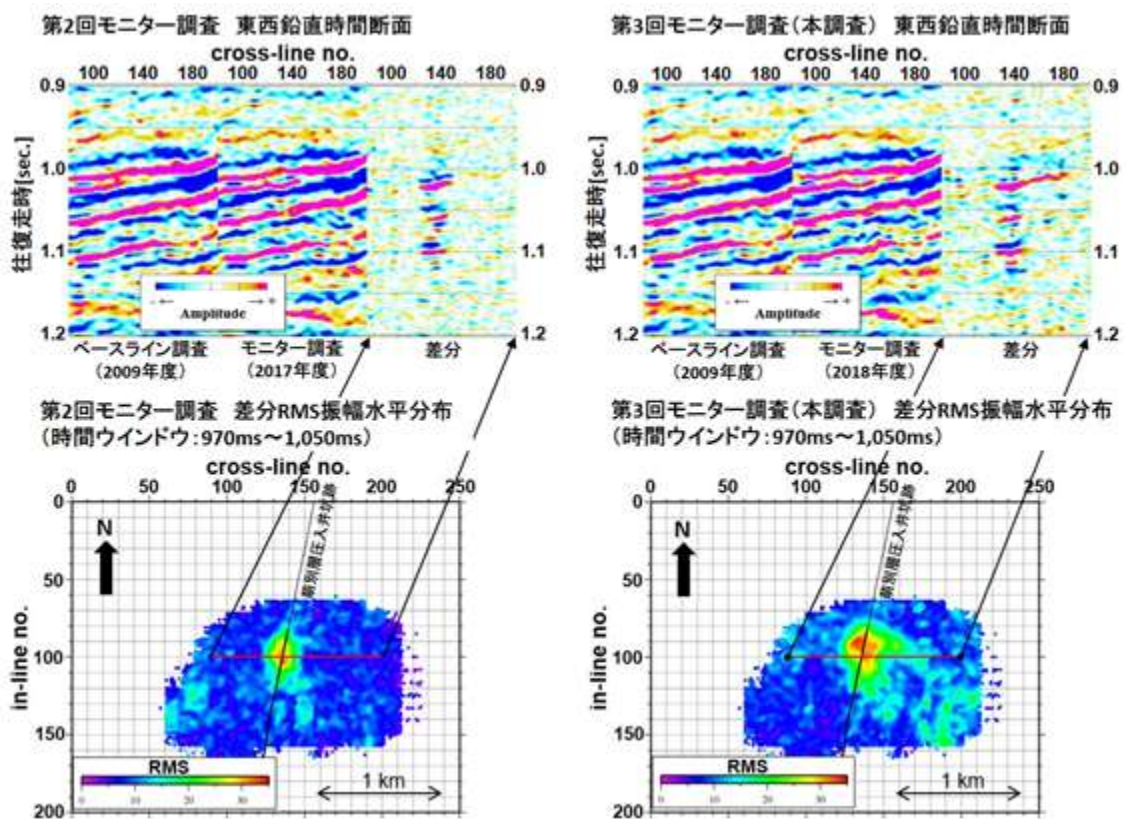
図 4.2-20 に本調査記録と 2009 年度の三次元弾性波探査ベースライン調査記録による差分抽出処理結果を示す。差分抽出処理は両調査の重複領域（本調査範囲の概ね南半分）に共通して存在する受振点と発振点の組み合わせによる限られたデータのみを用いて実施するため、重合数の低下に伴って特に縁辺部における S/N が低下し、得られた差分記録には圧入した CO₂ とは無関係のノイズが含まれる点に注意を要する。

同図には、作成した差分記録のうち、前年度の第 2 回モニター調査において CO₂ 圧入に伴う振幅異常を示した領域のほぼ中心を通る東西鉛直断面（拡大図）および萌別層砂岩層上面付近に対応する往復走時 970 ms から 1,050 ms の範囲で計算した RMS 振幅の平面分布を示した。また、比較のため第 2 回モニター調査の結果も併せて示した。

第 2 回モニター調査時点と比較して振幅異常の領域が拡大しており、圧入の進展に伴い CO₂ 貯留範囲が拡大していた。その北側への拡大範囲は 50 m 程度と小さく、当初計画の繰り返し三次元弾性波探査で捕捉可能な範囲に収まっているため、本調査で取得したデータのうち 2009 年度の三次元弾性波探査ベースライン調査と重複しない受振測線北側区間

で取得したデータには、これまでに圧入した CO₂の影響を受けていないデータが十分に含まれており、三次元ベースライン調査記録と併用することが可能である。

これらのことから、同図に示した 2009 年度の三次元弾性波探査ベースライン調査と重複しない領域において取得されたデータは、今後の弾性波探査データを比較するためのベースライン記録として参照に資するデータであると判断した。



注) 2018 年度に実施した小規模三次元弾性波探査は、将来の圧入進展に伴って CO₂ 分布域が当初想定範囲の北側に拡大した場合に備えたベースライン調査を想定して実施したものであり、縁辺部における S/N の低下によって、得られた差分記録には圧入した CO₂ とは無関係のノイズが含まれる点に注意する必要がある。

図 4.2-20 2018 年度小規模三次元弾性波探査と前回調査との比較
(差分記録の鉛直時間断面および RMS 振幅水平分布の例)

(4) 2019 年度 (第 4 回モニター調査)

第 4 回目のモニター調査として二次元弾性波探査および小規模三次元弾性波探査を実施する。データ取得期間および期間中の CO₂ 累計圧入量は以下のとおりである。

データ取得期間 2020 年 1 月 16 日～同年 2 月 10 日

累計圧入量 萌別層貯留層 : 300,012 t (圧入停止後に調査を実施)

滝ノ上層貯留層 : 98 t

図 4.2-21 に調査測線図を示す。2019 年度は、2020 年 1～2 月に小規模三次元弾性波探査と二次元弾性波探査を実施し、その調査結果の解析は 2020 年度に実施する。

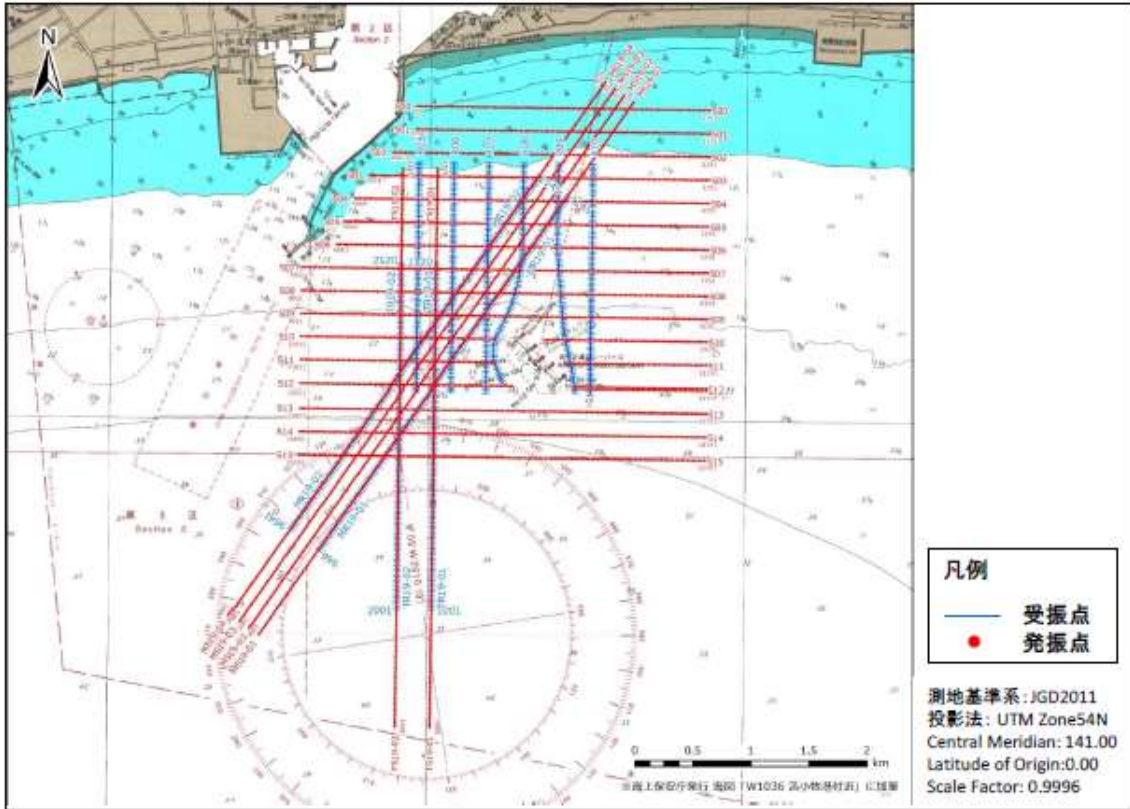


図 4.2-21 2019 年度弾性波探査の調査測線

4.2.4 モニタリング結果のまとめ

CO₂ 圧入に伴う貯留層の温度圧力の変化をモニタリングし、あらかじめ想定した設定値の範囲内にあることを確認した。圧入開始以降から 2019 年度まで、平成 30 年北海道胆振東部地震本震前後を含めて、貯留地点近傍において微小振動および自然地震をモニタリングした結果、圧入との関連を疑うべき微小振動等は検知されなかった。

弾性波探査を用いたモニター調査の結果、2017 年度以降では、萌別層における CO₂ 分布状況が検知され、圧入した CO₂ は貯留層の上部付近に限定して存在しており、貯留層区間外への漏洩等の異常は生じていないと考えられた。滝ノ上層への CO₂ 累計圧入量は 98 t と非常に少なく、弾性波探査による CO₂ 分布状況は確認できなかった。弾性波探査による検知限界未満であったためと考えられる。

4.3 海洋環境調査結果

4.3.1 概要

わが国における CO₂ の海底下の地下貯留は、海洋汚染防止法に則り、適切な「監視計画」等の同法に規定する許可条件を満たした上で、環境大臣の許可のもと実施されねばならない。また許可を受けた事業者は監視計画に従い監視を実施し、その結果を環境大臣に報告する必要がある。監視計画においては監視段階を三段階に定め、事前に定めた移行基準により監視段階が移行する。

経済産業省は、特定二酸化炭素の海底下廃棄許可申請の準備として、2013年6月よりベースライン調査（2013年度夏季、秋季、冬季および2014年度春季）を実施する一方、環境省との事前協議を行い、2016年2月22日に環境省へ、海洋汚染防止法に係る「特定二酸化炭素の海底下廃棄許可申請書」を提出し、同年3月31日に本事業海域における CO₂ 海底下貯留についての許可証⁵の交付を受けた。これに基づき、同年4月6日に萌別層への CO₂ 圧入を開始し、同年5月24日まで継続した後、本事業の設備定期保全工事のため計画的に圧入を停止した。この間に萌別層には 7,163 t の CO₂ が圧入された。

萌別層への CO₂ 圧入の再開は 2016 年 8 月初旬を予定していたが、監視計画に則って同年 6 月に実施した海洋環境調査（春季調査）において、海水の化学的性状に、事前に定めた溶存酸素飽和度と二酸化炭素分圧との関係に基づく監視段階の移行基準（後述図 4.3-4 の旧基準線）を上回る値が認められた。そのため圧入の再開を延期し、監視計画で定めた一連の追加調査を同年 10 月まで実施した。経済産業省は、それらの結果を環境省に報告し、環境省からは同年 10 月 13 日に、「特定二酸化炭素の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった」との見解を得た。

あわせて経済産業省は、2016 年 10 月 13 日に環境省より発せられた「海底下 CCS 事業に係る監視計画のあり方について」に基づく監視計画の見直しを実施し、同年 12 月 28 日に監視計画の変更申請を環境省に届出し、翌 2017 年 2 月 1 日に監視計画の変更⁶を許可された。

従来の監視計画では、圧入を中断して監視段階を移行するか否かを判断するための確認調査は、海水の化学的性状の再調査のみであった（図 4.3-1）。一方、新たな監視計画では、海水の化学的性状の再調査に pH センサー調査と気泡確認調査を加えて、より詳細な

⁵ 環水大水発第 1603319 「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可証について」。

⁶ 20161222 産第 1 号「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄変更許可申請書」の添付書類-1「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄する海域の特定二酸化炭素ガスに起因する汚染状況の監視に関する計画に係る事項」。

海域の状況を把握した後に、圧入を中断して監視段階を移行するか否かを判断することとなり（図 4.3-2）、萌別層への CO₂ 圧入を、2017 年 2 月 5 日に再開した。2016 年度冬季海洋環境調査（2017 年 2 月 15 日～22 日に実施）以降は、この改定された監視計画に従って海洋環境調査を実施した。

新旧いずれの監視計画においても、そこに示された移行基準は、圧入前 1 年間（2013 年度夏季～2014 年度春季）に実施したベースライン調査（以下、「ベースライン」と称する。）のデータのみに基づいて作成したこともあり、監視を継続することで毎年蓄積される自然変動のデータを加えることにより見直すこととされている。上述の 2016 年度冬季海洋環境調査以降、2017 年度に四季の海洋環境調査を行いデータが蓄積されたことから、経済産業省はそれらのデータを追加した移行基準の見直しを行い、2018 年 7 月 19 日に移行基準を見直した監視計画の変更申請を環境省に届出し、同年 8 月 31 日に監視計画の変更⁷が許可された。

本章では、監視計画に記載した監視方法のうち、海域の状況に関する事項の「海水の化学的性状」と「海洋生物の状況」について、2016 年度から 2019 年度秋季までに実施した海洋環境調査の結果を報告する。

⁷ 20180709 産第 1 号「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄変更許可申請書」の添付書類-1「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄する海域の特定二酸化炭素ガスに起因する汚染状況の監視に関する計画に係る事項」。

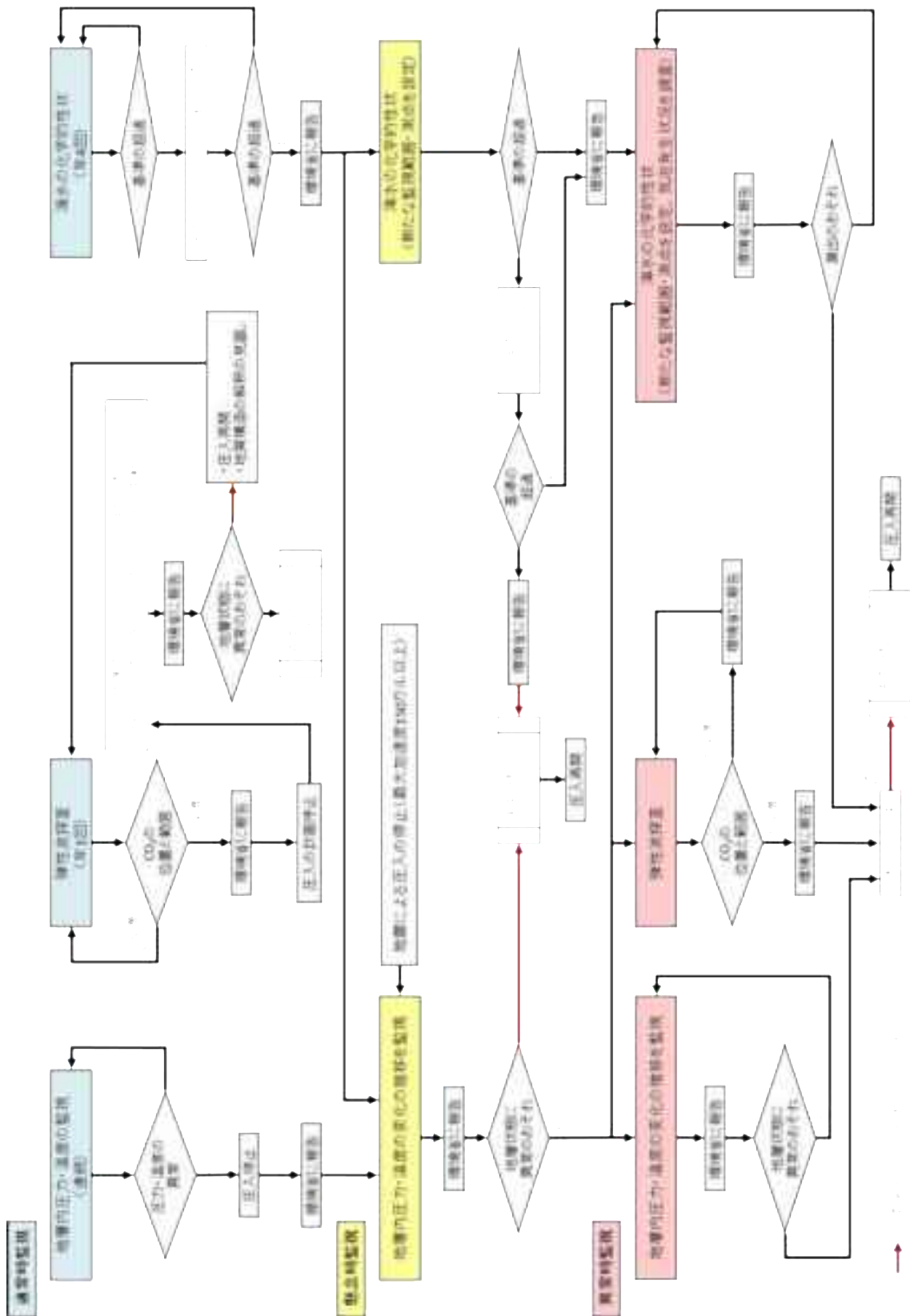


図 4.3-1 変更前の監視計画における通常時・懸念時・異常時監視の移行の流れ (2017年1月31日まで)

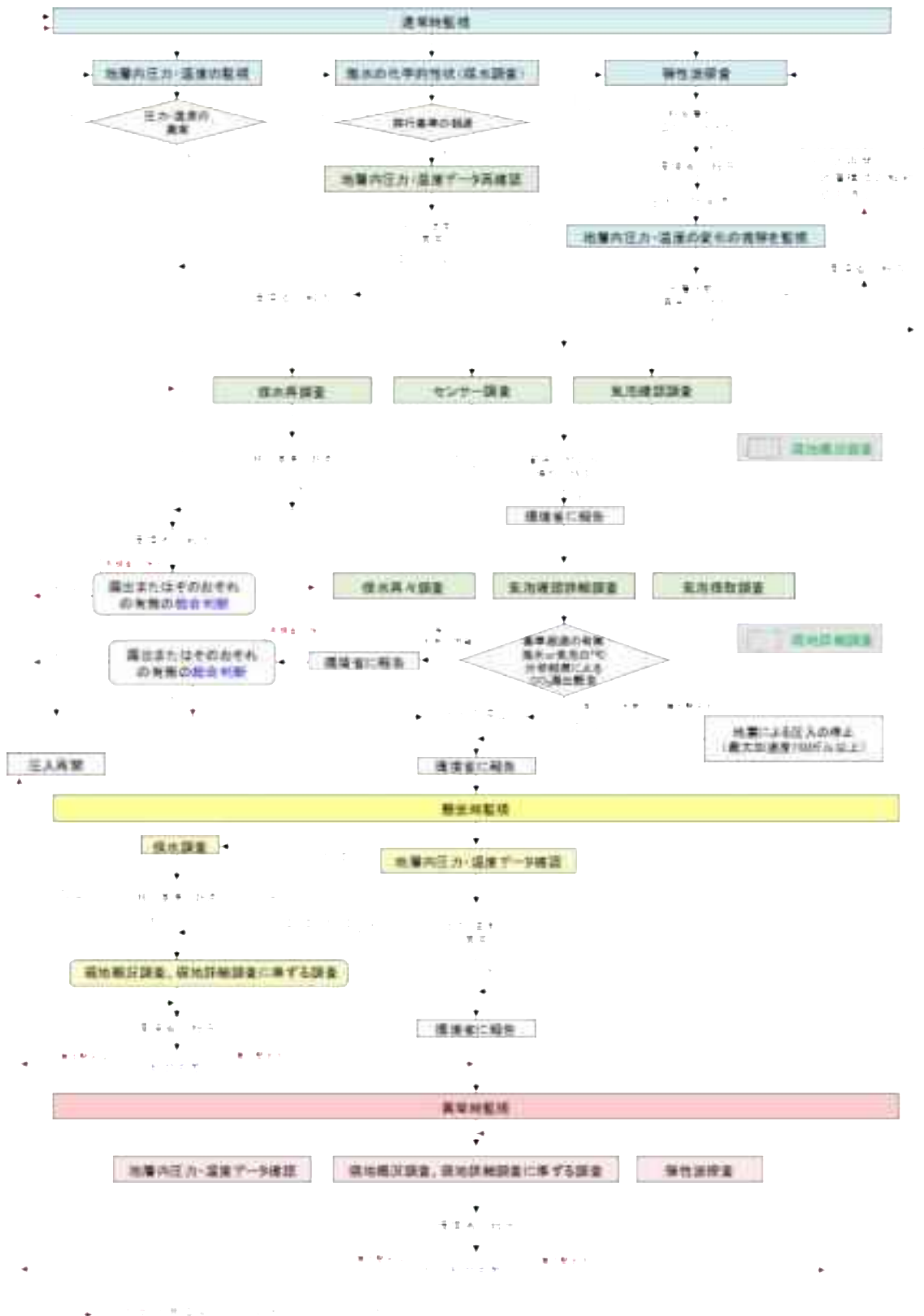


図 4.3-2 変更後の監視計画における通常時・懸念時・異常時監視の移行の流れ
(2017年2月1日以降)

4.3.2 海洋環境調査の目的と調査内容

海洋環境調査は、採水・採泥等により「海水の化学的性状」調査および「海洋生物の状況」調査を、環境省との事前協議に基づいて決定した12点の調査測点⁸（図4.3-3中の赤丸印）で、春夏秋冬の四季毎に行う。

なお、海水の化学的性状に関しては、CO₂の海洋への漏出のおそれを検知する指標として、監視段階の移行基準が設定され、調査ごとに基準超過判定を実施している。



図 4.3-3 調査海域と測点位置 (No.01~12)

4.3.3 海洋環境調査結果

調査は、表4.3-1に示す時期に実施した。2016年度から2019年度秋季までの調査結果について、CO₂貯留前のベースラインの結果と比較して報告する。

⁸ 萌別層および滝ノ上層の圧入地点の直上を最も可能性の高い漏出点と想定して2点の調査測点を設定し、萌別層圧入地点を中心とする2km四方のエリアと滝ノ上層圧入地点を中心とする2km四方のエリアと統合した3km四方のエリアの四辺に4点の調査測点を設定した。さらに漏出点の不確実性に備えて、萌別層圧入地点を中心とする6km四方のエリアと滝ノ上層圧入地点を中心とする6km四方のエリアを統合した周辺エリアに、水深等を考慮して計6点の調査測点を設定した。

表 4.3-1 海洋環境調査の実施時期

		春季	夏季	秋季	冬季
ベースライン	CO ₂ 貯留前	2014年5月	2013年8月	2013年11月	2014年2月
2016年度	CO ₂ 貯留 開始後	2016年6月	2016年8,9月	実施せず	2017年2月
2017年度		2017年5月	2017年8月	2017年11,12月	2018年2月
2018年度		2018年5月	2018年8,9月	2018年11月	2019年2月
2019年度		2019年5,6月	2019年8,9月	2019年11,12月	2020年2月

(1) 海水の化学的性状

① 水質調査

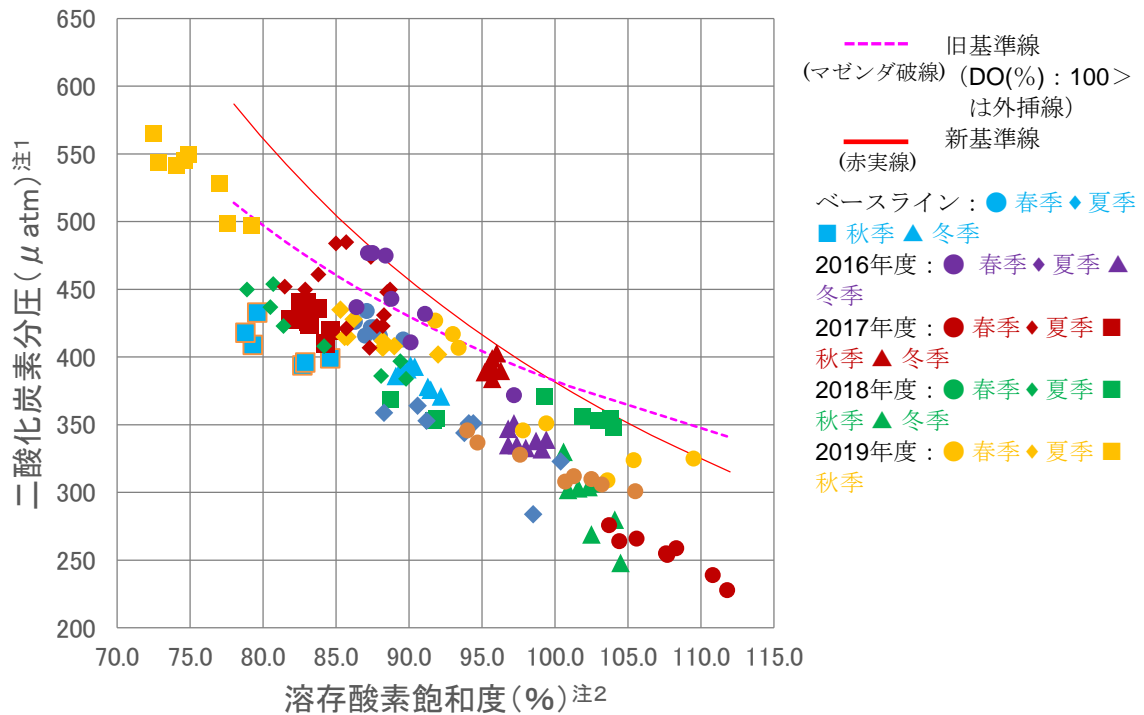
多項目水質センサーを用いた海水中の鉛直観測および採水（採水水深の深い方から、底層、下層、上層および表層の4点で採水）により、海水の化学的性状を分析した。測定項目は、表 4.3-2 のとおりである。

表 4.3-2 測定項目

測定項目	定義	観測の目的
pH	酸および塩基の指標	水質の異常（CO ₂ 漏出）
溶存酸素	水中に溶存する酸素（量）	採水値を基準超過判定に使用
二酸化炭素分圧 (pCO ₂)	二酸化炭素の圧力	基準超過判定に使用
塩分	海水の塩分（実用塩）	pCO ₂ の算出に使用
全炭酸	海水に溶けている炭酸物質の総和	pCO ₂ の算出に使用
アルカリ度	海水中の塩基濃度	pCO ₂ の算出に使用

多項目水質センサーによる底層の pH および溶存酸素は、ベースラインの結果および 2016 年度春季以降の結果を比較して、大きな相違は見られなかった。

採水調査による底層の塩分、全炭酸、アルカリ度およびこれらから算出された pCO₂ について、ベースラインの結果および 2016 年度以降の結果を比較して、顕著な上昇または増加傾向は見られなかった。



注1) 水温（多項目水質センサー）、塩分、全炭酸、およびアルカリ度から CO2SYS による炭酸平衡の関係式により算出。

注2) 水温（多項目水質センサー）、塩分および溶存酸素から Weiss（1970）式に従って算出。

図 4.3-4 監視段階の移行基準と観測値

ベースラインの結果に基づき作成された旧基準線（図 4.3-4 中のマゼンダ色破線）による超過判定（図 4.3-3 の No.5、7、8 および 12 を除く 8 測点を対象）では（図 4.3-4）、2016 年度春季、2017 年度夏季および冬季に基準線超過の結果を生じたが、その後の確認調査等により、「特定二酸化炭素の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった」との見解が環境省より出された。

図 4.3-4 中の旧基準線はベースライン 1 年のみのデータに基づいて作成しており、自然変動の反映が不十分と判断し、2018 年 8 月にベースラインデータに 2016 年度冬季から 2017 年度冬季までのデータを追加して作成した新基準線（図 4.3-4 中の赤色実線）を経済産業省へ提案し、2018 年 8 月 31 日に経済産業省は環境省から変更許可を受けた。

2018 年度夏季以降は、この新基準線により超過判定を行っており、2018 年度春季から 2019 年度秋季まで、基準線を超過する数値は認められなかった。

② 底質調査

採泥試料から分取し測定した底質の pH の変動幅は、ベースラインの結果と 2016 年度春季以降の結果を比較して、大きな相違は見られなかった。

③ 気泡発生の有無と状況調査

船上からの目視による海面の観測、水中カメラおよび遠隔操作型無人探査機（Remotely Operated Vehicle、以下、「ROV」と称する。）による海底面付近の観測のいずれにおいても、気泡の発生は確認されなかった。

(2) 海洋生物の状況

植物プランクトン、動物プランクトン⁹、メイオベントスおよびマクロベントスの門数、綱数、種数、1 調査測点あたりの平均細胞数と平均出現個体数を調査した。

いずれもベースラインの結果および 2016 年度春季以降の結果を比較して、大きな相違は見られなかった（表 4.3-3、表 4.3-4）。メガロベントスはベースライン時に出現した主要な種について、2016 年度春季以降の調査で生息数を確認した。

⁹ 植物プランクトンおよび動物プランクトン調査は、監視計画以外の調査項目。

表 4.3-3 プランクトンの出現種類数および出現個体数

年度	植物プランクトン				動物プランクトン				
	門	綱	種	平均細胞数 /L	門	綱	種	平均出現 個体数/m ³	
春季	ベースライン	4	5	100	1,000,000	10	14	78	8,400
	2016 年度	5	6	92	3,500,000	12	19	85	17,000
	2017 年度	5	9	96	1,100,000	11	18	85	53,000
	2018 年度	6	7	49	3,000,000	9	14	72	26,000
	2019 年度	6	7	69	690,000 ¹⁰	9	18	70	29,000
夏季	ベースライン	5	7	131	1,200,000	12	17	115	21,000
	2016 年度	5	6	94	70,000	13	19	126	43,000
	2017 年度	6	9	105	10,000,000	10	19	113	23,000
	2018 年度	6	8	91	620,000	13	19	87	10,000
	2019 年度	5	7	96	2,400,000	12	21	104	21,000
秋季	ベースライン	5	7	102	370,000	10	14	100	5,500
	2016 年度	—	—	—	—	—	—	—	—
	2017 年度	6	8	87	1,200,000	11	17	91	20,000
	2018 年度	6	7	101	130,000	13	21	135	14,000
	2019 年度	6	7	81	100,000	10	18	89	5,300
冬季	ベースライン	5	5	82	120,000	10	13	58	1,500
	2016 年度	4	6	79	1,300,000	8	15	79	8,700
	2017 年度	6	7	65	330,000	9	14	86	4,100
	2018 年度	6	8	84	5,600,000	10	16	67	4,400

注) ベースライン 2013 年度～2014 年度

¹⁰ 植物プランクトンの大増殖は、2018 年度冬季調査の時期にみられており、2019 年度春季は大増殖の時期を過ぎたタイミングの時期であったこと等が考えられる。

表 4.3-4 ベントスの出現種類数および出現個体数

年度	メイオベントス				マクロベントス				
	門	綱	種	平均出現個体数/0.01m ²	門	綱	種	平均出現個体数/m ²	
春季	ベースライン	6	9	31	27,000	10	16	155	3,100
	2016年度	5	9	34	10,000	10	16	156	3,000
	2017年度	6	11	32	11,000	8	16	155	2,200
	2018年度	6	12	34	13,000	9	16	153	2,000
	2019年度	6	11	39	23,000	9	17	182	5,800
夏季	ベースライン	6	8	35	7,700	8	16	158	5,300
	2016年度	6	8	38	3,700	9	15	129	1,800
	2017年度	6	12	35	27,000	8	16	146	2,100
	2018年度	5	11	33	19,000	8	15	133	2,100
	2019年度	6	13	48	17,000	9	16	162	3,200
秋季	ベースライン	5	5	19	9,400	10	18	147	2,200
	2016年度	—	—	—	—	—	—	—	—
	2017年度	6	13	38	9,400	9	18	126	1,300
	2018年度	7	14	34	9,000	7	14	133	2,100
	2019年度	6	11	35	24,000	9	7	133	1,800
冬季	ベースライン	5	8	25	21,000	10	16	146	2,500
	2016年度	6	11	32	10,000	8	14	134	1,800
	2017年度	7	13	27	35,000	10	16	139	2,100
	2018年度	6	13	28	19,000	8	15	151	1,900

注) ベースライン 2013年度～2014年度

4.3.4 海洋環境調査結果のまとめ

海洋環境調査結果のまとめを下記に記す。

- 1) 「海水の化学的性状」および「海洋生物の状況」の調査において、2016年度春季から2019年度秋季までの調査結果はCO₂貯留前のベースラインの結果と大きな相違は見られなかった。
- 2) 基準超過判定結果は、旧基準線に対して3回の超過判定が生じたが、その後の確認調査等により、全て自然変動の範囲内であり、環境省から「特定二酸化炭素の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった」との見解を得た。旧基準線は1年間のベースラインデータのみに基づいて作成したものであり、自然変動を反映するためには不十分であり複数年のデータ取得が必要であった。
- 3) 基準超過判定の対象となっている各調査測点における溶存酸素飽和度-pCO₂プロットに、いずれも大きな相違は認められなかった。

- 4) 基準超過判定について、水温により低温（春季、冬季）と高温（夏季、秋季）に分類することで、累乗近似式の相関係数の二乗（以下、「R2」と称する。）はそれぞれ向上することがわかった。春季と冬季を比較すると、春季の R2 が高いが、冬季の方は観測値のばらつきが小さく、また夏季と秋季を比較すると、秋季の方が R2 は高く、観測値のばらつきも小さいことから、基準判定は春季と冬季のいずれか 1 回と、秋季の年 2 回で十分と考えられる。
- 5) 気泡発生の有無と状況調査は、船上からの目視による海面の観測および水中カメラによる海底面付近の観測で十分であったと考えられる。
- 6) 底質調査は、CO₂ 漏出との関係が不明確であり、CO₂ 漏出検知に対する有用性は高くないと考えられる。
- 7) 海洋生物の状況調査は、ベースラインも含めて調査毎の変動が大きく、またベースラインと比較した統計解析等の定量的な評価が困難であることから、CO₂ 漏出検知に対する有用性は高くないと考えられる。

4.3.5 今後の海洋環境調査

今後の海洋環境調査に関する課題等を以下に記す。

- 1) 海洋環境調査は海洋汚染防止法に則り実施しており、現行法令の下でも、より簡素化が可能である。すなわち、調査範囲は、萌別層への圧入口に最も近い測点（No.1）および CO₂ が分布している範囲とその近傍とし（合計で数測点）、調査頻度は水温の低温時期（春季または冬季）および高温時期（秋季）の年 2 回、調査内容は採水調査のみとすること、また底質調査および海洋生物の調査については、CO₂ 漏出との関係が不明確であったことから、特定二酸化炭素ガス海底下廃棄許可期間に 1 回の実施とすることについて、当該許可更新申請時に反映させるべく今後環境省との協議が必要である。
- 2) 基準判定には溶存酸素飽和度－pCO₂ プロットを当面使用するが、より判定の精度を高めて誤検知の発生を極力防ぐために、さらに自然変動を反映させるためのデータを追加した基準線の改訂、溶存酸素飽和度－pCO₂ と他の指標と組み合わせた判定、現行の溶存酸素飽和度－pCO₂ に代わり得る指標の検討等を行う。
- 3) 海洋汚染防止法が改正され、監視計画に対する規制が緩和された場合、通常時監視においては、他の監視項目に異常が見られた場合のみ海洋環境調査を実施するとする監視計画について、将来的に環境省と協議する必要がある。

4.4 モニタリングおよび海洋環境調査実施時のトラブル

4.4.1 三次元弾性波探査ケーブル紛失

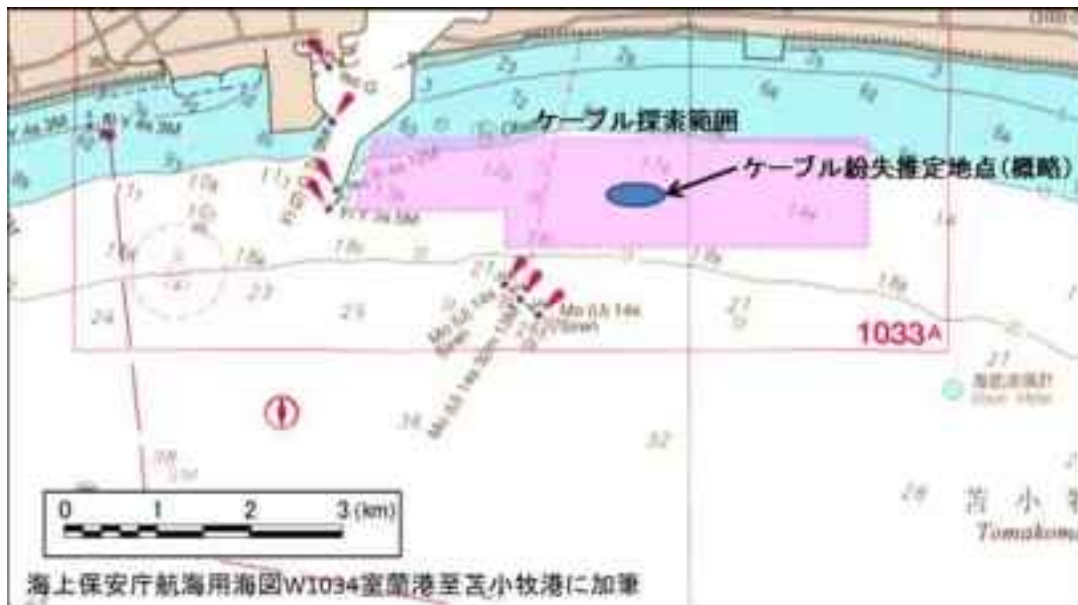
2017年7月から同年8月にかけて実施した三次元弾性波探査において、調査海域に設置中の海底受振ケーブルの一部が何等かの外力により切断され、そのうちの一部を紛失し、海底に残置した。切断されたのは、センサーを装着したケーブルと観測船との間を接続する全長400mの延長ケーブルのうちの約200m分であり、このうち約120mを紛失した。

受振ケーブルの移設作業中の2017年8月12日に当該ケーブルの切断を確認し、その後の各作業船の船底調査を経て、同年8月15日に最終的に紛失を確認した。その後、漁具による海底の浚い（同年8月21～同年8月22日）、およびサイドスキャンソナーによる海底探査（同年9月5日～同年9月7日）により、付近の海底を探索したものの発見に至らなかった（図4.4-1）。同年9月7日に、苫小牧海上保安署、苫小牧漁業協同組合および苫小牧港管理組合に探索結果を報告し、他に有効な手段がないことから探索を打ち切った。

2017年9月14日に、苫小牧漁業協同組合および苫小牧海上保安署に対してあらためてケーブル紛失の経緯、探索結果を報告するとともに、残置ケーブルにより漁業に支障が生じた際の費用弁済、再発防止策について説明し、了承を得た。

港湾区域内にケーブルが着底している可能性があることから、2017年9月19日および9月20日に苫小牧港管理組合および港湾関係各社各所を訪問して文書を配布し、紛失の経緯と残置ケーブルによる損害が発生した場合の対応を説明した。

その後、2019年9月末時点までにおいて、当該ケーブルの発見あるいは当該ケーブルによる損害等の情報はない。



注) 港湾関係各社配布文書より

図 4.4-1 ケーブル紛失推定地点および探索範囲

4.4.2 海洋環境調査アンカーおよびアンカーロープ紛失

2017年度秋季海洋環境調査期間中の2017年11月24日に、調査測点 St.10 において ROV による海洋生物調査を終了し、調査船船尾側の抜錨作業中に、アンカーロープが何らかの原因により切断された。当初、アンカーロープが海面上で目視できたことから回収を試みたが、波が高くなりアンカーロープを見失い、アンカーおよびアンカーロープを紛失した。

2017年11月25日から12月2日までの間、紛失現場周辺の目視搜索および紛失箇所を中心に半径約500mの範囲のサイドスキャンソナー探索3回を実施したが、発見できなかった(図4.4-2)。その後、2017年度冬季海洋環境調査(2018年2月)、2018年度春季海洋環境調査(2018年5月)、2018年度夏季海洋環境調査(2018年9月)および2018年度秋季海洋環境調査(2018年11月)実施時に、目視およびROVによる探索を実施したが、アンカーおよびアンカーロープの発見には至らなかった(以下にこれまで実施した探索手段、回数および実施年月日をまとめた)。

- | | |
|---------------|--------------------------------------|
| 1) サイドスキャンソナー | 3回 (2017/11/27、12/1、12/2) |
| 2) 目視 | 4回 (2017/11/25、11/30、2018/2/15、2/20) |
| 3) ROV | 4回 (2018/2/16、5/26、9/26、11/15) |

紛失から時間が経過しており、アンカーは潮流により流され、アンカーロープも含めて砂に埋もれている可能性が高く、これ以上探索を継続しても発見できる可能性は極めて低

いものと判断し、苫小牧港管理組合と協議の上、2018年度秋季調査時をもってアンカーおよびアンカーロープの探索を終了することとし、2018年度冬季調査開始時（2019年1月）に港湾関係各社に探索終了を周知した。

また、再発を未然に防止する策として、作業実施前にアンカーやアンカーロープの状況を作業員が点検し、整備が不十分である場合は、交換等の措置を施すとともに、投錨時にアンカー投入位置をGPSにより記録し、緊急的に設置する浮標を作業船に配備することとした。

その後、2019年12月末時点までにおいて、当該アンカーおよびアンカーロープの発見あるいは当該アンカーおよびアンカーロープによる損害等の情報は無い。

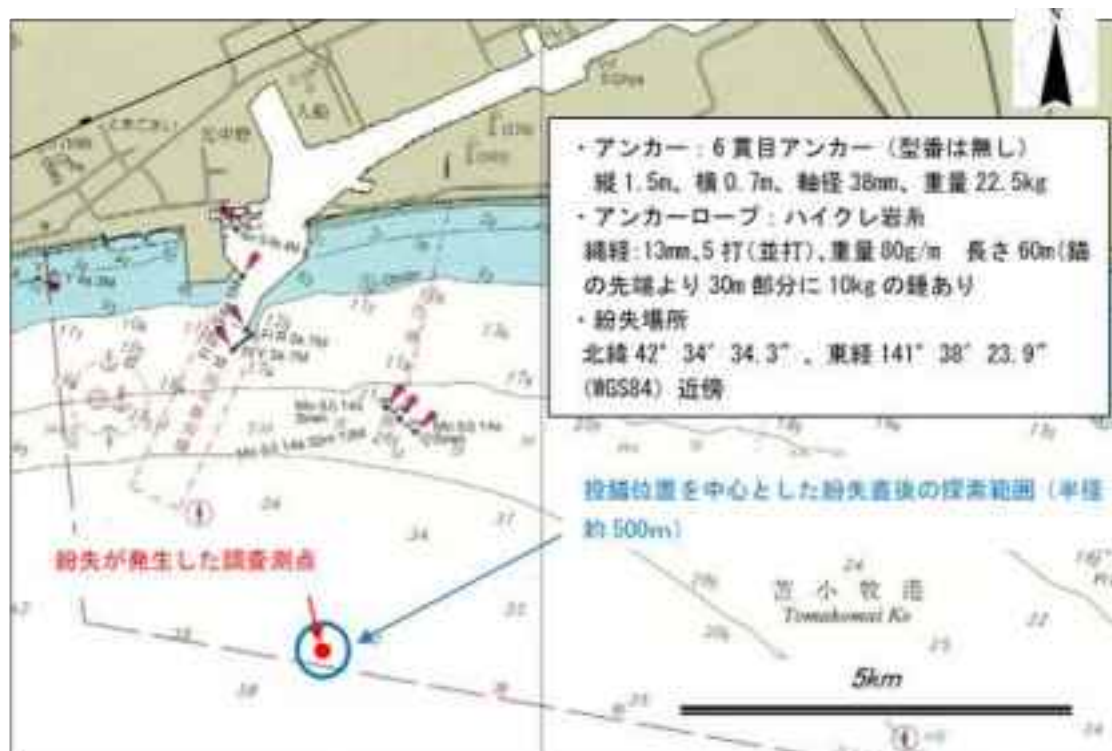


図 4.4-2 アンカー紛失地点および探索範囲

4.5 結果のまとめ

4.5.1 モニタリング結果

圧入開始以降、2019年12月まで、平成30年北海道胆振東部地震本震前後を含めて、貯留地点近傍において圧入との関連を疑うべき微小振動および自然地震は検知されなかった。

2017年度の弾性波探査以降、萌別層におけるCO₂分布状況が確認され、圧入したCO₂

は事前の想定どおりに貯留層の上部付近に限定して存在しており、貯留層区間外への漏洩等の異常は生じていないものと考えられる。

滝ノ上層へのCO₂累計圧入量は98tと非常に少なく、弾性波探査によるCO₂分布状況は確認できなかった。弾性波探査による検知限界未満であったと考えられる。

4.5.2 海洋環境調査結果

2016年度以降の調査結果は、ベースライン調査（2013年度～2014年度）結果と大きな相違はなく、またベースライン調査結果から大きく逸脱するような傾向も見られなかった。

基準超過判定は、旧基準線（ベースライン調査）に対して、2016年度春季、2017年度夏季、冬季に基準超過の結果が生じたが、確認調査等の結果により、「CO₂の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった」との見解が環境省から示された。2018年度は、基準より高い数値は認められなかった（2018年度夏季以降、新基準線にて超過判定）。

4.5.3 総括

CO₂圧入は、萌別層には2016年4月6日から2019年11月22日までの間に300,012t、滝ノ上層には2018年2月6日から9月1日の間で98tを圧入した。CO₂圧入におけるPTセンサー圧力の最大値は、各層の遮蔽層破壊を避けるために設けた上限圧力に対して十分低く、圧入開始以降、PTセンサー圧力・温度は正常な範囲内にあった。

2019年12月までのモニタリングにより、CO₂貯留層の温度・圧力に異常はないこと、CO₂圧入と貯留に伴う微小振動や自然地震の発生は認められないこと、圧入されたCO₂は貯留層内に留まっていることが確認され、長期挙動予測シミュレーションにより、圧入されたCO₂は圧入停止から1,000年後においても貯留層に留まっていることが予想された。また海洋環境調査により、海洋にCO₂圧入開始前からの変化は認められず、CO₂の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった。これらにより、本事業においてCO₂が安全に貯留されていることが確認された。

第5章 社会的受容性の醸成活動

本章では、CCSに対する社会的受容性の醸成に向けて実施した国内に向けた情報発信活動および海外に向けた情報発信活動について記述した。あわせて、有事における情報発信活動および地元ステークホルダーとのコミュニケーションの実績の検証に基づき、社会的受容性の醸成活動を総括した。

5.1 CCSに対する社会的受容性の醸成活動の目的・意義

本事業開始時点の2012年において、国内の一般社会ではCCSはほとんど知られておらず、CCSの認知度は低かった。CCS実用化のためには、CCS技術実用化の取組に加え、幅広い各世代が、CCSが地球温暖化対策の一つであることを知り、CCSに対する社会的受容性の醸成を図る必要があった。

CCSの社会的受容性の醸成を図る際、Wüstenhagen¹⁾によれば以下の三つの項目に関して、効率よく情報発信や意見交換を実施する必要があるとされている

- 1) 社会的・政策的な受容性の醸成として、地球温暖化やエネルギー問題等の関連情報を通じてCCSの必要性を伝える。
- 2) 地域の受容性の醸成として、信頼を獲得するための継続的なコミュニケーション活動に加え、二酸化炭素の漏洩、誘発地震等に関するリスクコミュニケーションや万が一の際の対応に備える。
- 3) 事業の受容性の醸成として、実用化に際しては事業として成り立つために、国の政策等の支援が必要である。

本事業では、国内においてCCSの目的・意義・技術を理解してもらうことを目的に、様々な情報発信活動を行ってきた。できるだけ平易な言葉でCCS技術の内容や必要性を伝えるとともに、こちらからの一方的な情報提供にとどまらず、CCSへの意見や疑問、不安を聞き取り、それに対する説明を行うといった相互に意見が述べられる機会を創出する情報発信活動に重点を置いた。

海外に向けては、海外の研究機関および企業との意見交換、CCS関連の国際会議等を活用した本事業の情報発信等、日本におけるCCSへの取り組みに関する情報発信に努めた。本事業実施期間中、海外からの視察を積極的に受け入れ、英語および中国語資料の提供、英語による説明により本事業の情報提供を実施した。

上記情報発信活動のほかに、有事における情報発信活動の実績、実証試験の地元ステー

¹⁾ Wüstenhagen, R., Wolsink, M., Burer, M.J., 2007. Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. Energy Policy 35, 2683-2691.

クホルダーとのコミュニケーションの実績と検証、社会的受容性の総括を 5.4 節～5.6 節に記述する。

5.2 国内に向けた情報発信活動

5.2.1 概要

本事業の実施地である苫小牧市および周辺地域（以下、「地元地域」と称する。）の住民に CCS を正しく理解してもらうことが本事業を円滑に推進するために重要であると位置づけ、地元住民と直接コミュニケーションを取り信頼関係を構築することに重きを置いて、地元地域の様々な活動を通じた情報発信と独自の広報活動を継続的に実施した。広報活動では、地元住民への CCS 理解促進の機会を多くもつことを目的に、子ども、一般、シニアと三つの世代それぞれに適したイベントを地元地域で開催した。

本事業を実施するうえで関係する行政機関、漁協および港湾事業者等へは、本事業に関する情報を迅速かつ正確に提供するとともに、各機関からの情報提供要望に対応した。苫小牧市は本事業の誘致のために苫小牧市長を会長とする「苫小牧 CCS 促進協議会」を立ち上げており、同会の協力により円滑な情報発信活動を実施した。

本事業の情報発信活動の分類を以下に示し、各活動について 5.2.2～5.2.5 項に記述する。情報発信活動実績を表 5.2-1 に示す。

- 1) 苫小牧市およびその周辺地域への情報発信活動
 - ・ CCS 講演会の実施
 - ・ 地元住民向け現場見学会（バスツアー）、パネル展、地元の学校での講座、子どもを対象としたイベントの実施
 - ・ 苫小牧市との連携
- 2) 国内他地域における情報発信活動
 - ・ 全国からの現場見学の積極的な受入れ
 - ・ 各種団体や大学等での講演・講義
 - ・ 展示会、シンポジウム、学会へのブース出展
- 3) メディアを通じた情報発信活動
 - ・ プレスリリース、メディアからの取材への対応
 - ・ 専門誌等への寄稿
 - ・ JCCS ホームページ (<https://www.japanccs.com/>) からの情報発信
- 4) 地元住民／メディア向けリスクコミュニケーションの充実
 - ・ JCCS ホームページの活用

- ・ 地元住民への対応

5) CCS 解説ツールの制作

- ・ 上記の活動や理解促進のための本事業を解説する様々なツールの制作（制作したツールに関しては 5.2.6 項に具体的に示す。）

表 5.2-1 情報発信活動実績

年度		現場 見学会	パネル 展	展示会 等ブー ス出展	子ども 実験教 室	高専・ 大学 講義	講演会 (企業/ 団体)	CCS 講演会
2012	件数	3	29	0	1	0	0	1
	人数	83	—	0	100	0	0	236
2013	件数	19	18	4	10	12	0	1
	人数	221	—	2,460	242	536	0	202
2014	件数	44	8	4	3	6	0	1
	人数	558	1,160	2,118	89	245	0	369
2015	件数	126	6	4	6	7	19	1
	人数	1,570	859	2,827	110	534	1,508	320
2016	件数	153	5	5	1	8	14	1
	人数	2,013	688	2,834	24	404	908	312
2017	件数	168	8	6	5	7	12	1
	人数	1,944	1,417	4,080	176	313	1,139	315
2018	件数	181	7	7	5	11	10	1
	人数	2,276	1,690	4,653	130	1,104	591	368
2019	件数	206	8	11	3	12	15	1
	人数	2,168	1,896	7,128	120	724	875	600

現場見学会には海外からの視察者を含む

5.2.2 苫小牧市およびその周辺地域への情報発信活動

(1) CCS 講演会の開催

「CCS 講演会」は、地元住民を対象として、環境問題や CCS の重要性、本事業への理解を高め、協力体制を構築するために「地球温暖化と CCS」をテーマとして 2012 年度から毎年実施した。「CCS 講演会」は、地元地域における社会的受容性の醸成活動の総括的な位置づけであり、経済産業省が本事業の進捗状況をはじめ、CCS 技術や CCS を取り巻く国際情勢について地元住民に説明を行う重要な機会であることから、多くの地元住民が聴講することが大切との考えの下で実施した。具体的には、地元住民の積極的な参加を促すために、環境問題を語れる著名人や有識者を講師として招くこと等により、毎年 200 名

以上の地元住民が参加した。講演会の最後には聴衆からの質疑を受ける時間を設け、対応した。また、2014年度からは講演会の午前中に現場見学会もあわせて開催した。

CCSに関する有識者の委員からなる社内の課題検討会からは、社会的影響力の大きい、発言力のある人物に CCS を理解してもらい、そのような人物から発信してもらうことも社会的受容性の醸成、すなわち、本事業の推進、ひいては CCS 実用化に重要であるとの指摘があった。その指摘に基づき、社会的な影響力も講師の選定基準に加えて検討するという改善を行った。「CCS 講演会」において、地球温暖化対策の解決に CCS が資することを伝えること等により国の地球温暖化への取り組みを紹介できたことは、CCS の地元理解への一助となったと考えられる。

「CCS 講演会」で実施した参加者へのアンケート結果によると、CCS について「よく知っている」、「知っている」と回答したのは、2013年度は4割程度であったが、2018年度には8割となり、CCS への認知度が約2倍に増加した。

2019年度は「苫小牧 CCS 大規模実証プロジェクトにおける社会的受容性の醸成活動についての外部評価業務」の対象として、CCS 講演会のアンケート調査の設計・分析・評価を実施した。今後はこのフォーマットに統一してアンケートを実施し、質疑応答・アンケート等で関心が高いと思われる内容について、より重点的に丁寧な説明を実施することで、参加者の満足度・理解度を高めていくことが課題である。

2019年度のアンケートの回収率は58%で、回答者の67%が講演会に初めての参加であった。講演会による本事業の理解度については、講演会前に「既によく知っていた」、「ある程度知っていた」と回答したのは48.5%であったが、参加後の理解度は90%と大幅に上昇した。また、本事業について「意義がある」、「ある程度意義がある」と回答したのは92%、国内での CCS について「意義がある」、「ある程度意義がある」と回答したのは93%と高い数値であり、地元住民の環境への関心度、CCS への理解度の高さがうかがえた。これは、現場見学会と講演会を組み合わせた開催や、講演会の継続開催等による効果によって、CCS や本事業に対する認知・理解が促進されたものと考えられる。

「CCS 講演会」に代表される地元地域での様々な活動は、対象年齢も幅広く、また、内容が多彩であるため、有識者の委員からなる課題検討会でも評価されている。

CCS 講演会の様子を図 5.2-1 に示す。



(左)2019/3/9 CCS 講演会／(右)2020/2/13 CCS 講演会

図 5.2-1 CCS 講演会の様子

(2) 地元住民向け現場見学会（バスツアー）

地元住民とのコミュニケーションの場として、また、現場を見て理解してもらうことを目的に、幅広い世代に対して、それぞれの世代に合う現場見学会を企画・実施した。

地元住民向け現場見学会（バスツアー）は一般向けに 2014 年度から開始した。2015 年度から 5.2.2(5)に記す「夏休み宿題教室」と併せた子ども向け現場見学会（バスツアー）を、2016 年度からシニア世代向け現場見学会（バスツアー）を開始した。子どもやシニア世代には現場見学を楽しい思い出として捉えてもらえるよう、苫小牧市のリサイクルプラザや(株)J ファーム苫小牧工場等の見学先を組み合わせた。

見学会終了時に実施したアンケート結果からは、回答者の 90%以上が説明内容を理解でき、良い見学会だったと回答していた。また、本事業が苫小牧市で行われていることに関して、80%以上が良いことだと思うとの回答をしていた。

現場見学会の様子を図 5.2-2 に示す。



(左)2015/6/5 苫小牧市民による見学会／(右)2018/7/30 長生大学による見学会

図 5.2-2 現場見学会の様子

(3) パネル展の開催

パネル展は、地元住民と直接対話することにより、CCS および本事業の周知を図ることを目的として本事業開始前の 2011 年度から開催した。開催当初は経済産業省および苫小牧市と協議のうえ開催場所を選定したが、途中からそれまでの実績を考慮し地元住民が比較的多く集まる場所を開催場所とした。

パネルや DVD、パンフレット等の解説用ツールに加えて地下の地層のコアサンプルや CCS 全体の仕組み模型の展示を行う等、初心者でも理解可能な説明に工夫を凝らし、来場者と直接コミュニケーションを取ることににより、CCS 技術および本事業の説明を行った。

パネル展の様子を図 5.2-3 に示す。



(左)2013/6/17-21 駒澤大学附属苫小牧高校 (苫小牧市) / (右) 2018/10/21 “とまこまい Style!!”

図 5.2-3 パネル展の様子

(4) 地元の学校での講座

地元で実施中の本事業の情報発信と環境問題への関心喚起のため、地元の大学の学生および高等専門学校生徒を対象として、2013 年 6 月より 2019 年 12 月までに計 14 回の講座を開催した。開催実績は、苫小牧駒澤大学 6 回、苫小牧工業高等専門学校 3 回、北海道大学 3 回、室蘭工業大学 2 回である。

講座・講演会の様子を図 5.2-4 に示す。



(左) 2018/11/5 苫小牧工業高等専門学校／(右)2019/7/18 室蘭工業大学

図 5.2-4 地元の学校での講座の様子

(5) 子どもを対象としたイベント

子供を対象としたイベントとして、「子ども実験教室」および「夏休み宿題教室」を開催した。

苫小牧市の小学校高学年生を主な対象として、アニメーションによる説明や二酸化炭素を利用した実験等を通じて、楽しみながら環境問題や CCS について学習することを目的として開催した。また、同伴の保護者や児童センターのスタッフ等を通じた家庭や地元地域社会への波及効果も期待した。

「子ども実験教室」は、2012 年度よりプログラム内容等を十分検討して実施した。子どもたちの理解が容易となるように、大人向けの説明を子ども向けの表現にして簡潔に説明した。また、アニメーション「地球温暖化と CCS」や子供向けの CCS バナー等のツールを利用して子どもたちの興味をひいてもらうようなプログラムを導入した。

2015 年度には、「夏休み宿題教室」を開催した。これは、子どもたちが記者になり、CCS を取材（現場見学）し、予め用意したフォームに各々が記事を書いて、新聞を作成するというイベントである。

「子ども実験教室」「夏休み宿題教室」は、検討・改善を重ねながら継続実施した。環境問題を他人事ではなく自分自身の問題として捉えるという意識を子ども時代より育み、また、日本の先端技術について知る機会となったと考えられる。そのために、子どもたちとのコミュニケーションを通じて、良好な信頼関係を醸成することに努めた。

子ども実験教室／夏休み宿題教室の様子を図 5.2-5 に示す。



(左)2015/8/6 夏休み宿題教室／(右)2018/10/31 子ども実験教室（錦岡児童センター）

図 5.2-5 子ども実験教室／夏休み宿題教室の様子

(6) 苫小牧市との連携

苫小牧市とは、常時情報共有を行い、様々な活動を連携して行ってきた。例えば、苫小牧市役所は、本事業のデータ・情報等の発信のために市役所内にモニターの設置や、市の広報紙による CCS 関連記事の掲載・イベント開催案内を行った。本事業では、苫小牧 CCS 促進協議会から同協議会総会等への参加や情報提供を行う機会を得る一方、CCS 講演会への協賛や集客等で協力を得た。地元行政機関である苫小牧市と連携して本事業を行うことにより、行政機関が関与し支援しているという安心感から、地元住民は本事業への理解を深めたと考えられる。

5.2.3 国内他地域における情報発信活動

(1) 全国からの現場見学の積極的な受入れ

CCS の意義、技術概要、安全性および本事業について理解を深めてもらうことを目的として、2012 年度より現場見学を開催した。JCCS ホームページでの掲載および開催イベント等での現場見学案内等により、全国から見学者を積極的に受け入れた。現場見学会では、映像やプレゼンテーションにより CCS および本事業内容を紹介後、説明担当者が各施設を案内し、見学後に質疑応答時間を設けることで、本事業への理解を深めてもらうことに努めた。質疑応答を記録に残し、以降の現場見学会の参考資料とした。

見学者数は、2013 年度の 221 名から、2018 年度には 2,276 名と、5 年間で約 10 倍に増加した（2019 年度は 2,168 名）。地上設備の完成、圧入開始、30 万 t に向けた圧入というフェーズの進展に伴う本事業への関心の高まりを示すものと考えられる。見学者の約半数は企業関係者であり、見学の目的は、低炭素・脱炭素に向けた取り組みや環境問題等に関連して CCS についての情報を収集することであった。見学者が企業内で報告することによる、企業内での CCS 情報の共有と周知が期待できる。

現場見学会の様子を図 5.2-6 に示す。



(左) 2013/7/11 CCS 促進協議会 / (右) 2019/8/21 世耕経済産業大臣 (当時) 現場視察

図 5.2-6 現場見学会の様子

(2) 各種団体や大学等での講演・講義

これから社会人となる若い世代や環境への関心の高いビジネス関係者、研究者を対象に CCS への理解促進と本事業の情報発信を目的に、大学や研究機関、企業・団体等で講座・講演会を開催した。

大学での講座は 2013 年度より開催し、計 47 回開催した。企業・団体向け講演会は 2015 年度から開催し、計 68 回開催した。

大学での講座、企業・団体での講演会では、世界の CCS の状況や本事業の具体的な情報を発信することで、広く CCS 技術の周知が進むことを期待した。特に、聴講した教授あるいは研究者等が、有識者かつ第三者としての立場で CCS を取り上げることにより、学内あるいは企業・団体はもとより広く社会へ情報の波及と CCS への信頼性の醸成につながるよう対応した。

講座・講演会の様子を図 5.2-7 に示す。



(左) 2014/11/21 早稲田大学理工学院／(右) 2017/4/20 中大技術士会

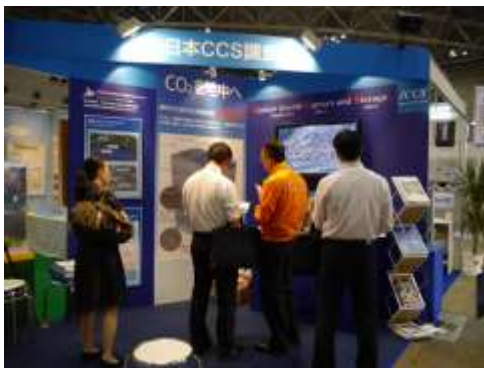
図 5.2-7 講座・講演会の様子

(3) 展示会、シンポジウム、学会へのブース出展

多くの来場者が見込める首都圏で開催される「地球温暖化防止展」「エコプロ」を中心に、CCSの周知および本事業を認知してもらうことを目的として、2013年度から展示会等にブースを出展した。

展示会ごとの主な来場者層を対象としたブース展示内容の構成を企画した。「エコプロ」は、環境学習に取り組む小中学生を中心とする子どもたちの来場が多いことから、子どもたちが体験しながらCCSを理解できるようなコーナーを設け、子どもたち向けに短い時間でCCSを紹介するミニプレゼンテーションを行う等、説明方法の工夫を図った。

ブース出展の様子を図 5.2-8 に示す。



(左)2014/5/27-30 地球温暖化防止展／(右)2018/12/6-8 エコプロ 2018

図 5.2-8 ブース出展の様子

5.2.4 メディアを通じた情報発信活動

(1) プレスリリース、メディアからの取材への対応

地元地域および広く国内外に CCS 技術ならびに本事業の情報を発信することを目的

に、新聞、テレビ等メディアへの対応を実施した。メディア対応に際し、CCS および本事業の正確な情報を伝えることを第一とし、広く社会に発信してもらうことが重要と考えた。

2019年12月までの実績として、プレスリリースは2012年度から52件、新聞の掲載実績は2012年度から478件、雑誌への掲載実績は2017年度から4件、テレビでの報道実績は2012年度から58件、ラジオでの報道実績は2012年度に1件、新聞・テレビ等のWEB版での掲載実績は2018年度から57件となった。

本事業が取り上げられた新聞記事としては、見学会や講演等に関するものが93件、イベントに関するものが16件、本事業に係るものが266件、実用化に向けた課題等に関するものが32件、その他72件であった。本事業に関わる取材に対しては専門用語等の解説も行った。

(2) 専門誌等への寄稿

CCS 技術および本事業への理解を深めてもらうため、学会誌および業界の会報誌や技術系あるいは産業系のビジネス雑誌等に分野にとらわれず、機会をとらえて寄稿した。

2012年度より2019年12月までに延べ52誌に寄稿した。

講演や現場見学を契機として寄稿を依頼された事例もあり、積極的に対応した。また、本事業の進展にともない複数回依頼された学会誌等もある。産業界の分野によっては、CO₂削減が課題となっており、それを意識した記載も行った。

(3) JCCS ホームページからの情報発信

国内の幅広い対象者に向けて、JCCS のホームページを活用して CCS と本事業の情報発信を行った。

2012年度にホームページを開設し、「お知らせ」「プレスリリース」欄で、最新情報を発信した。ホームページには、CCS の解説、本事業の紹介、子ども向け、ライブラリー等の専門ページを設けた。ライブラリーでは、パンフレットやパネル、ツールとして制作した動画等を公開した。QA コーナー、CCS に関連する用語解説ページ（準備中）も開設した。

ホームページでは、常に新しい情報の発信に努めた。情報更新を月に平均5~10回程度実施した。2019年5月~11月のホームページアクセス数の平均は、約4,200件/月であった。

2018年度から、モバイルサイトからの CCS 講演会参加申込を可能としたところ、事前の申込数441名のうち、メールを含めたモバイルサイトから140件程度の申込があった。

CCSの社会的受容性の醸成に向けた情報発信活動を充実させるため、CCSに関する情報収集およびホームページ等での情報更新を日々実施した。新聞やインターネット、関係する官庁、団体、企業等から、日頃よりCCSに関連する情報収集を心掛け、必要に応じ各種講演会、現場見学等での説明資料を更新した。特に、本事業で関与した、大きな国際イベントや国内でのイベント後には各種資料の更新、ホームページのお知らせ欄の更新等を実施し、常に新しい情報を提供した。

5.2.5 地元住民／メディア向けリスクコミュニケーションの充実

リスクコミュニケーションを充実させる一環として、本事業開始時からホームページを通じた情報公開を行ってきた。また、2013年度からはホームページ上でライブカメラによる実証試験設備のリアルタイム映像の公開を開始し、現場の様子をいつでも見られるようにした。2016年度からは苫小牧市役所のホールに設置したモニター上で、前日の圧入状況（圧入量）、前月の圧入井・観測井の温度・圧力測定データ、各種モニタリング結果、圧入停止中の設備稼働状況等の情報開示を継続して行った。

本事業では、四季毎（年4回）の海洋環境調査、弾性波探査等の海域でのモニタリングを実施している。地元漁業関係者からは、弾性波探査が水産物であるホッキ貝をはじめとする二枚貝の生態系に影響を与えているのではないかとの懸念が示された。そのため実態把握のため、年4回の海洋環境調査の範囲外を含めて本事業海域での二枚貝等の生態系調査を2019年10月～2020年3月に実施した。

また、苫小牧地域における社会的受容性の醸成活動についての外部評価も実施した。本調査業務では、今までの情報発信活動を受けて、本事業およびCCS技術が苫小牧地域においてどのように受け入れられているかの社会的受容性を調査し、下記の活動評価を2020年1月31日から3月25日に実施した。

- 1) アウトリーチ活動結果の分析・評価
 - 2) 市民現場見学会・CCS講演会（2020/2/13）アンケート調査の設計・分析・評価
 - 3) 社会的受容性の醸成活動に資するアウトリーチ活動に向けた今後の改善点の提言
- 外部評価の結果、今後の改善点に関する提言は次のとおりである。

海外の大規模CCSプロジェクトや実証試験の事例でみられるように、CCSに関するアウトリーチ活動の際は、予め情報提供やコミュニケーションすべき対象者別にアウトリーチ活動の目的や目標を設定し、誰にどのような情報をどのタイミングでどうやって情報提供・共有すべきかについて戦略を立案し、体系的・合理的に進めていくことが重要である。そして、それらの目的・目標が達成できているかどうかを確認するため、適切な評価

指標や評価手法を選定し、毎回の活動結果に基づき評価・改善していくことが重要である。

5.2.6 CCS 解説ツールの制作

専門家および地元住民の世代別に向けた説明用ツールを制作し、常に最新情報に更新することに注力した。説明対象に応じて、適切なツールを選択して活用することで、より効果的に CCS の情報発信を行い、理解を促進した。例えば、家族連れが多い展示会等では「CCS の仕組み模型」に興味を持った家族連れがブースに来場した。その家族連れの大人にはパネルやパンフレットを用いて CCS と本事業の説明を行い、子どもには「CCS の仕組み模型」に加えて、CCS アニメや CCS マンガも用いて説明を行った。

「CCS の仕組み模型」は、説明者と聞き手の双方向コミュニケーションツールとして機能し、子どもだけでなく大人も楽しみながらより良く CCS について理解できるとの意見が大人の来場者からあった。

1) 子ども向けツール

CCS マンガ（「美しい地球☆僕らの星」、「地球の未来を支える技術」）、CCS アニメ、下敷き、CCS の仕組み模型、CCS の大型模型（2015 年度エコプロブース展示物を苫小牧 CCS 実証試験センターエントランスに移設）、子ども向けバナー、CCS マンガバナー、高校生向けポスター（A1 サイズ、4 枚組）等

2) 大人向けツール

パンフレット（「CCS（二酸化炭素回収・貯留）について」、「CCS 実証試験プロジェクト」）、実証試験パネル（A1 サイズ、12 枚組）、実証試験ポスター（A0 サイズ、2 枚組）等

3) 共通ツール

DVD（「CCS の可能性」、「苫小牧 CCS 実証プロジェクト」、「建設の記録」、「苫小牧から世界へ」）、コアサンプル観察セット、CCS バナー、鳥観図バナー、ジオラマ模型、展示会用テーブルクロス（2 種）等

4) その他

「北海道胆振東部地震の CO₂ 貯留層への影響等に関する検討報告書」

5.3 海外に向けた情報発信活動

5.3.1 概要

日本国政府は、本事業開始前の 2008 年 7 月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」において「CCS 技術の実証試験を通じて 2020 年頃の CCS 技術の実用化」を目標

とし、また経済産業省が本事業の取り組みを開始する前の 2011 年に公表した本事業の概算要求資料においても「CCS 等、我が国企業の優れた省エネ・新エネ技術やシステムを海外に積極的に展開・普及を進めることで、成長著しいアジア諸国を始めとした途上国でのビジネスの獲得や、先進国における積極的な実証事業を通じたビジネスの獲得と、国際標準化の提案につなげていくこと」を目標としていた。最近では、「エネルギー基本計画」や「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」等でも CCS の重要性が謳われている。

こうした政府の目標を受け、本事業の国際活動として、本事業の進捗や成果等に関する海外に向けた情報発信、CCS に関連する国際的な情報収集、海外との国際協力や連携を推進する活動を 2012 年度から 2019 年度の 8 年間にわたり行った。

本節では本事業の国際活動を、以下の項目に分類して報告し、国際活動の総括を「5.6 社会的受容性の総括」の節に記載する。

- 1) 海外における情報発信・情報収集
- 2) 苫小牧市における情報発信・情報収集
- 3) 国際協力・技術交流
- 4) Carbon Sequestration Leadership Forum (炭素隔離リーダーシップフォーラム、以下、「CSLF」と称する。)における活動
- 5) 本事業の国際的な評価

なお、海外に向けた情報発信活動では、海外に向けた情報発信活動で製作した CCS 解説ツールの英語版および中国語版を製作し活用した。

5.3.2 海外における情報発信・情報収集

(1) 講演、口頭発表

本事業を開始した 2012 年度から、事業の進捗に合わせた国際的な情報発信を積極的に進めてきた。2012 年から 2015 年にかけての事業の前半では本事業の安全な取り組みや進捗状況について、事業の後半では将来的な国際協力や日本の CCS 技術の国際展開を見据えた情報発信を行った。

2012 年 4 月から 2019 年 11 月までの講演／口頭発表回数は 65 回、論文 (Proceedings を含む) 投稿数は 22 件、国際会議での出展回数は 19 回となった。表 5.3-1 に (年度別) 講演、口頭発表、論文投稿、および出展先の一覧を示す。

① 主な発表先

2012 年から 2015 年の準備期間のうち前半は The Greenhouse Gas Control

Technologies Conference (GHGT 国際会議：温室効果ガス制御技術国際会議)を含め、本事業の安全な実施に向けた海外調査の際に視察した、米国バリー発電所の CCS 技術関係者に本事業の紹介をする等、年に数回の発表機会を得たのみであったが、実証設備が完成し操業準備期間に入ると、本事業の計画や目的に関して CCS 研究等を実施している台湾、インドネシア等のアジア諸国や CCS 先進国である米国等の海外組織から発表依頼を受け対応した。また 2016 年の 4 月の分離・回収、圧入、貯留という一連の操業が計画通り始めると、一貫した CCS 技術の実証概要に加え、本事業中の課題、さらに実証設備を地元の反対を受けずに予定通り完工し、操業準備を進めた際の地元広報活動や成果に関する発表依頼も増加し、豪州、英国、第 13 回 GHGT 国際会議 (GHGT-13) が開催されたスイスにおいて計 6 回の発表を行った。こうした国際活動を通じて本事業の国際社会における認識度が向上したことにより、2016 年 6 月には世界的シンクタンクであるグローバル CCS インスティテュートより本事業が世界の Notable Project の一つに指定され、同インスティテュートのプレゼン資料やレポートの表紙に本事業の空撮写真が掲載される等、本事業が国際機関からも世界に向けて発信されたこと、10 月には CSLF の認定プロジェクトに選出されたことから、2017 年度は、アジア、欧米、中東等で 11 件の発表を実施した。さらに 2018 年度は、国際連合主催の気候変動枠組条約第 24 回締約国会議 (COP24) において、政府や海外組織と連携して CCS セミナーを開催する等、計 17 件の発表を実施した。本事業において累計圧入量が 30 万 t に達成した 2019 年度は、圧入やモニタリングの課題と成果のほか、経済産業省や NEDO と協議の上、日本の CCS の将来計画や政策的な位置づけについて、2018 年度に続き COP25 の開催地となったスペインを含む欧米諸国、アジア等で 17 件の発表を実施した。

本事業に係る発表を行った主な国際会議は、IEAGHG が世界各地で隔年開催する GHGT 国際会議やワークショップ、米国を中心に開催されている IEAGHG モニタリングネットワークミーティング、Post Combustion Capture Conference 等、CCS 事業に従事するステークホルダーを中心に CCS 技術を専門的に扱う会合等のほか、グローバル CCS インスティテュートが主催する Asia Pacific CCS Forum、欧州を中心とする世界的な地質関連学会である CO2GeoNet が主催する CO2GeoNet Open Forum、英国の CCS 専門学会である UKCCSRC が主催する年次会合、石油開発関連学会である European Association of Geoscientist and Engineers と Society of Exploration of Geophysics (EAGE/SEG) が主催する Research Workshop 等であった。また 2015 年の COP21 を境にパリ協定達成に向け CCS への関心や導入への着手が世界的に進むにつれ、海外政府や民間企業が主催する環境、金融、政策等をテーマとする会合で、政府や金融関係者等を

含めあらゆるステークホルダーを対象とする発表等を行った。一例ではグローバル CCS インスティテュート主催の Norwegian CCS Safari、ノルウェー政府主催の European High Level Conference on CCS や米国とノルウェー政府の二国間会合である US-Norway Bilateral Meeting、英国政府が主催の Accelerating CCS や、TOTAL 社等の民間が主催する環境、金融、政策等をテーマとする会合であった。

主催者側の依頼の主な動機は、いずれも本事業が政府、民間、地元等が一体となって CCS 事業の成功を目指し取り組んでいること、本事業期間を通じて全てのステップを計画通りに踏み、成果を積み上げていること等を発表して知見を共有してほしいことにあった。

② 発表概要

海外の政府関係者や国際的な CCS の推進組織は、CCS 事業者による成果や知見の積極的な情報発信が、自国の CCS 技術の向上や国際展開はもとより、世界の CCS 事業の発展にも貢献するという事を国際社会に呼びかけている。本事業ではこうした呼びかけに応じ、事業の進捗状況を積極的に発信した。

発表では海外の CCS プロジェクトに比較して、高傾斜井による陸上から海底下貯留層への圧入等、世界に前例のない取り組みや本事業の特徴を中心に、地上設備、坑井・モニタリング設備の詳細、社会的周辺環境やステークホルダーの概要、広報活動の実施概況等、事業を技術面と社会受容性の側面から包括的に説明した。さらに 2018 年 9 月に発生した平成 30 年北海道胆振東部地震についての検討報告書の公開（2018 年 11 月）以降は、地震後のモニタリングの分析結果や、地震発生直後の地元対応についても発表した。本事業の特徴として海外向けに発信した主な要点は、以下の通りである。

- 1) 一貫システムの実証試験
- 2) 高傾斜井による陸上から海底下貯留層への圧入
- 3) 充実したモニタリングシステム
- 4) 省エネ型分離・回収システム
- 5) 市街地近傍での世界初の CCS、および国内外における広報活動等
- 6) 平成 30 年北海道胆振東部地震についての検討報告書の結果等

表 5.3-1 (年度別) 講演、口頭発表、投稿(寄稿)、および出展

年度	講演、口頭発表	投稿	出展
2012	3件：韓国、日本(2)	9件	GHGT-11
2013	1件：豪州	1件	Clean Coal Day
2014	3件：台湾、米国(2)	0件	GHGT-12、Clean Coal Day
2015	6件：台湾(3)、米国 インドネシア、日本	0件	Clean Coal Day
2016	6件：豪州、英国、日本、 スイス(3)	1件	GHGT-13、Clean Coal Day、 CSLF リヤド閣僚級会合
2017	10件：中国、インドネシア、 イタリア、米国(4)、日本 (2)、サウジアラビア	3件	Clean Coal Day、 Japan CCS Forum
2018	17件：米国(1)、ノル ウェー(3)、英国、豪州 (3)、イタリア(2)、中国 (2) カナダ、韓国、ポーラ ンド(2) オランダ	6件	GHGT-14、Clean Coal Day、 Japan CCS Forum
2019 (12 月迄)	19件：米国(3)、日本 (6)、イタリア(3)、中国 (2)、豪州(2)、カナダ、 スペイン(2)	2件	WCA Tokyo Conference、G20 軽 井沢エネルギー大臣会合、Clean Coal Day、 カーボンリサイクル産官学国際会議 Japan CCS Forum、COP25
合計	65回	22件	19回

(2) 投稿

GHGT 国際会議を中心とする CCS の国際学会の論文集への発表や、グローバル CCS インスティテュートの紹介による「Carbon Capture Journal」等の海外 CCS 専門誌への投稿を合計 22 回実施した。本事業期間中は主に事業の全体計画や概要、技術の詳細な解説等を中心に執筆した。これらの投稿内容は、IEAGHG のブログやグローバル CCS インスティテュートのホームページでも引用や紹介がされ、海外の CCS 関係者への本事業の理解に寄与したと考えている。

なお今後のモニタリングの成果等を含む本事業の総合的な成果に関する執筆は、今後実施する。

(3) 出展

国内外において、海外に向けた情報発信を目的とする出展は計 16 回となった。

海外では、隔年開催の GHGT 国際会議に 4 回、CSLF リヤド閣僚級会合に 1 回(ポスター出展)、COP においてはポーランドで開催された COP24、スペインで開催された COP25 に 2 回出展した。また国内では、一般財団法人石炭エネルギーセンター(以下、

「JCOAL」と称する。)がクリーンなエネルギーとしての石炭利用(以下、「クリーンコール」と称する。)の普及に向けた技術開発の取り組みをテーマに毎年開催する Clean Coal Day International Conference に7回のほか、2019年に長野県軽井沢町で開催された G20 持続可能な成長のためのエネルギー転換と地球環境に関する関係閣僚会合とカーボンリサイクル産官学国際会議での出展を行った。

本事業開始当初は、GHGT 国際会議等、CCS の専門家を対象とする会議への出展が中心であったが、2015年12月のパリ協定の採択後から、経済産業省の要請により海外の閣僚や政策担当者、科学者、金融関係者等が参加する CSLF や COP、G20、カーボンリサイクル産官学国際会議にも出展した。これらの出展では、日本がパリ協定に基づく長期戦略の中において CCS を、経済成長を伴う低炭素社会実現への重要な施策としていること、その実現に向けて本事業を推進していること等を発信した。

(4) 国際会議における情報収集

世界では CCS の技術開発や CCS 市場の確立に向けて、様々なアプローチで CCS を議論する国際会議が開催されている。本事業では日本の 2030 年頃の CCS の実用化に向けた制度設計等に有効と考えられる海外の技術動向や制度が議論される会議等に参加し、情報発信を行うとともに、日本の CCS の実用化に向けた制度設計等に有効と考えられる海外の技術動向や制度に関する情報収集を行った。参加した会議では主に CCS の分離・回収、貯留、モニタリング等の動向や開発状況を扱う技術テーマのほか、CCS のコスト、法整備、排出源やビジネスモデル、インセンティブ、さらには CCS による大規模な CO₂ 削減の価値等、CCS の普及条件に必要な議論が行われた。これらの情報は、日本の制度設計に向けた提言等に活用し、また海外における CCS 全般の情報を纏めたデータベース用の情報として整理した。

2012 年から 2019 年の 8 年間を通じて参加した会議では、常に世界が共通の課題として CCS 事業普及の障壁を取り上げていた。CCS は投資額が大きく、操業している事業も少ないことから、課題の解決にはそれなりの時間を要する。そのため、会議の参加各国からは、国際協力による CCS の推進が重要であること等が常に報告されている。特に 2018 年度頃からは、欧米を中心に CCS のビジネスモデルの研究が進んでおり、ノルウェーやイギリス、米国、カナダ、豪州におけるプロジェクトを参考に、各国における制度設計やインセンティブ等の効果、官民の役割等も議論され、日本への適用に参考となる有益な情報が多く得られた。

日本の CCS の実用化に有効な情報となり得るような事業環境の整備に関する情報は、

CCS コストの低減、社会的受容性の醸成活動のあり方、法整備や官民の役割（貯留やモニタリングの期間や責任）、CO₂の輸送方法、CO₂の貯留適地選定、インセンティブ等で、これらの動向についても多数の報告があった。一例として、英国政府が示したビジネスモデル、CSLF 等で発表された米国におけるインセンティブ情報、カナダの CCS プロジェクト視察の際に示された州レベルのインセンティブ情報、カナダ国際ナショナル CCS ナレッジセンターが Shand プロジェクトのフィージビリティスタディを通じて示した建設コストの低減策、その他、将来の CCS 事業を検討する上で、参考となる貯留やモニタリング等の技術情報等がある。その他収集した情報の概要は、7.1.4 項に、別途記載する。

5.3.3 苫小牧市における情報発信・情報収集

(1) 海外からの視察者への情報発信、情報交換、情報収集

① 海外からの視察者の概要

本事業を開始した 2012 年 4 月から 2019 年 11 月までの間、50 ヶ国以上の国から、総計約 1,400 名の海外からの視察者を受け入れた。表 5.3-2 に（国別）海外からの視察者と主な所属先を示す。

表 5.3-2 (国別) 海外からの視察者と主な所属先

国別	主な所属先
米国	米国政府（エネルギー省）、米国大使館（経済科学部、政治部、エネルギー省）、テキサス大学、イリノイ大学、ワイオミング州政府、ローレンスバークレー国立研究所、USA Today 他
豪州	豪州政府、ビクトリア州政府、CarbonNet、豪州大使館（産業・エネルギー部）、BHP、CO2CRC、グローバル CCS インスティテュート、Geoscience Australia 他
中国	国家発展改革委員会、MOST（科学技術部）、SINOPEC、中国大使館科学技術部、中国能源局 中国生態環境部 他
英国	英国政府（ビジネス・エネルギー省）、Shell、World Coal Association、クランフィールド大学、ロバートゴードン大学、ロイター通信、Financial Times 他
ノルウェー	ノルウェー政府（石油エネルギー省）、ECCSEL、ノルウェー大使館
カナダ	カナダ政府、International CCS Knowledge Centre
タイ	タイ政府（エネルギー省） 他
フランス	TOTAL 社、BGV フランス
台湾	工業技術研究院（ITRI）、台湾電力、
インドネシア	インドネシア政府（エネルギー・鉱物資源省）、プルタミナ国営石油会社、バンドン工科大学
韓国	韓国地質資源研究院（KIGAM）

視察者の主な所属先は、海外政府や国営企業、大使館、民間企業、CCSの研究機関、シンクタンクやコンソーシアム、大学関係者、学会、銀行や金融関係者、メディア等であった。また視察者の多くはCCSの先進国である欧米、豪州からのほか、アジア圏では中国、台湾や韓国、タイ等であった。また中東、南米のエネルギーや石油関連企業からの研修生の来訪も受けた。

視察目的は視察者の所属先によって多岐にわたり、海外政府関係者は将来のCCSの導入の検討や政策立案、法整備、インフラ等の環境整備の参考とするため本事業を視察した。例えば、台湾や韓国ならびにタイからの政府機関や研究機関の場合は、自国民へのCCSの理解促進に向けて、本事業を通じてCCS技術の実証と安全性が十分に確保されている事例として確認するために来訪するケース等である。

またシンクタンクや金融関係者等は、CCSが将来的にもたらず経済性や市場の見極めに

向け、世界の CCS の開発状況と日本の CCS 技術の到達点等を確認するため来訪した。大学や研究機関、技術者等の企業関係者は、CCS 技術の開発や CCS 事業の推進に向けて、日本における本事業から知見を得ることや、国際協力の可能性の検討に向けた情報交換等を目的としていた。

海外からの最初の視察者は、2012 年 11 月に京都で開催された第 11 回 GHGT 国際会議 (GHGT-11) に合わせて JCCS が主催した「GHGT-11 フィールドトリップ」(以下、「本ツアー」と称する。)の参加者で、CCS プロジェクトや研究が既に進んでいた欧米や豪州の技術者や研究者 (CCS プロジェクトを行う Shell 社、The Midwest Geological Sequestration Consortium (MGSC : 米国政府が主導する米国 7 地域における CCS 研究組合の一つ) の理事、CCS に関する多数の論文発表のあるイリノイ大学の研究者等を含む) のほか韓国、台湾、日本等からの CCS 研究者や技術者 44 名であった。

当時、本事業の設備建設予定地周辺には、1 坑の調査井 (坑口装置) があるのみの状況であったが、苫小牧市長をはじめ地元漁業協同組合、商工会議所等の地元関係者等を交えて開催した情報交換会では、地元関係者が、苫小牧市が本事業の誘致を目指していることや町内会や地元企業のステークホルダーを中心に苫小牧 CCS 促進協議会を立ち上げたこと等を説明した。欧州では、2010 年にオランダの Barendrecht とドイツの Schwanau における CCS 計画が地元の反対運動により相次ぎ撤回された後であり、市街地近傍における CCS の難しさが大きな課題として認識されていたため、こうした地元関係者との信頼形成と社会的受容性の醸成活動に対し、本ツアー参加者から高い関心を得た。

以上の取り組みを契機に、本事業は政府と民間と地域社会が一体となって取り組む事業として世界的にも注目を集め、その後の海外政府や海外組織からの視察依頼や情報交換依頼、さらに海外組織からの国際協力の検討依頼の増加に大きく寄与した。一例として地上設備の建設開始後まもなく、米国政府機関 (米国エネルギー省、以下「DOE」と称する。) が日米協力に向けた調査団を派遣し、また操業開始直後には、豪州政府が CO2CRC と共に国際協力の可能性についての意見交換を求めて来訪した。さらにグローバル CCS インスティテュートの CEO や、豪州大使をはじめ国内大使館関係者等、その後も約 1400 名の視察者が日本における一貫した CCS 技術の実証である本事業の調査や国際連携等を求めて来訪し、対応した。

② 視察者数の推移

図 5.3-1 に海外からの視察者数の推移を示す。地上設備の建設が本格化した 2015 年頃

から海外からの視察者数は増加し、2016年4月よりCO₂圧入と本格的な操業が開始以降、2017年度より、年間視察者数は毎年100名単位で増加した。

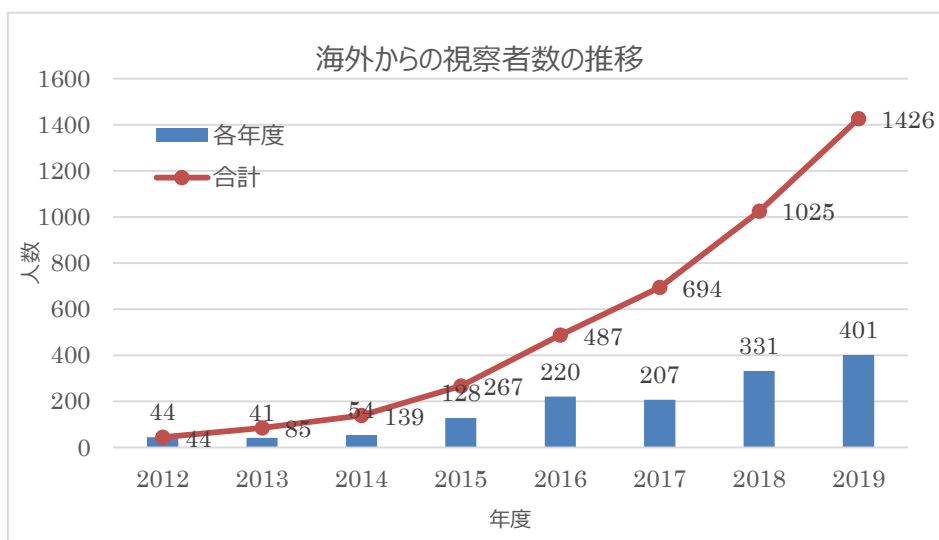


図 5.3-1 海外からの視察者数の推移

以下に、視察を受けた国を地域ごとに、視察者数の上位順に示す。

- 1) 欧米地域：米国、カナダ、ノルウェー、英国、フランス、ドイツ、ロシア、イタリア、オランダ、スイス、スペイン、ウズベキスタン、カザフスタン、フィンランド
- 2) アジア太平洋地域：タイ、中国、豪州、韓国、インドネシア、台湾、ベトナム、モンゴル、ミャンマー、カンボジア、インド、フィリピン
- 3) 中東・アフリカ地域：イラン、サウジアラビア、UAE、クウェート、イラク、カタール、リビア、スーダン、オマーン
- 4) 中南米地域：メキシコ、ブラジル、ペルー、コロンビア

欧米では CCS の事業化が進んでいる米国、カナダ、ノルウェーからが多く、アジア・太平洋地域では同じく CCS が進んでいる豪州から多数の視察を受けた。

中近東および中南米地域では(一財)JCCP 国際石油・ガス協力機関 (以下、「JCCP」と称する。)の技術者研修コースの一環で毎年、同地域の産油国研修生の現場見学を多数受け入れている。

視察者数の上位 2 国は、タイ (1 位)、中国 (2 位) であった。タイからはエネルギー省等政府幹部による視察を計 5 回受けた。タイはいずれも将来的に自国での CCS の導入等を視野に入れ、政府のエネルギー政策の中での CCS の安全性について国民からの理解

を得るため本事業の安全な取り組みを事例とした視察であり、政府がタイのメディアを数十名帯同したことが、視察者数が多数となった理由である。

中国については、2017年2月に中国国営石油会社 SINOPEC 社が来訪し、その後2017年4月に同社主催の会合で本事業の発表したことを契機に、同社からの視察団を多数受けるようになった。また、中国大使館エネルギー部参事官の2017年10月の視察以降、大使館の紹介により中国国家発展改革委員会の副委員長をはじめ、中国科学技術部、生態環境部等、中央政府からも多数の視察を受け入れた。このほか中国科技日報等のメディアや企業関係者、大学関係者の視察も多数受けた。中国では帯水層貯留については2016年末までに中国中部（オルドス盆地）において30万tの圧入を成功させる等、CCSへの取り組みが日本に先行している一方で、分離・回収エネルギーコストの低減等のCCSの技術的課題解決に向けた情報収集や、国際協力による技術開発にも積極的に取り組んでおり、本事業の情報収集や国際協力の可能性検討を目的とした視察であった。

こうした視察のほか、政府が取り組むCCSを通じた二国間または多国間協力事業の推進に協力するための視察対応を実施した。

米国関連では既述のGHGT-11フィールドトリップにおいて、米国CCS研究組合であるMGSCの理事やイリノイ大学のCCS研究者に対応したことを契機に、2013年9月にCSLFのメンバーでもある米国DOE化石燃料総局クリーンコール局企画環境分析部長が米国大使館DOE日本事務所代表と共に東京本社に来訪し、本事業の取り組みについて説明した。その後2015年4月には、経済産業省と米国エネルギー省との間でCCS分野に係る協力文書の署名がなされたことを受け、同年6月に米国政府団として初めて来訪した米国DOEアジア地域代表視察団と、同年9月に来訪した米国DOE化石燃料総局クリーンコール局次官補の視察に対応した。その際米国側より、日米協力事業の具体的な検討に向け新たな視察団を早々に再派遣すること等の約束を受けた。これにより2016年1月には日米協力事業の検討団としてテキサス大学、イリノイ大学（兼MGSC）、Los Alamos National Laboratory（LANL：ロスアラモス国立研究所）、Battelle Memorial Instituteを含む米国政府視察団が来訪し、対応するとともに日米協力事業(案)についての検討等を実施した。こうした一連の視察と検討結果を受けて2016年7月に、米国DOEが苫小牧CCS実証試験フィールドを使用した共同研究の実施者となるテキサス大学に約2.5億円の資金提供を決定し、2017年よりテキサス大学が浅層高分解能三次元弾性波探査等のデータ取得・解析を行った。本事業ではこうした調査の際の地元対応等に協力し、日米協力事業を支援した。

多国間協力では、2016年10月に経済産業省がメンバーとして参画している多国籍間の

国際気候変動イニシアティブである CSLF の視察を受け、CSLF 認定プロジェクトに認定するための検討が行われた。CSLF による検討の結果、本事業は CSLF 認定プロジェクトとしての認定を受けるとともに、JCCS は本事業の広報活動における国内外のステークホルダーに対する対応に基づき、CCS 事業の実施組織として適切な調整役であるとの評価を CSLF より受け、CSLF の活動支援を行うアジア・太平洋地域のリージョナルチャンピオンに選出され、本事業の国際社会における認知度向上等に貢献した。

その他、政府が構築している Joint Credit Mechanism（二国間クレジット制度、以下、「JCM」と称する。）による途上国の事業推進を支援するため、政府の要請の下、メキシコ国営石油会社の視察や、インドネシア政府による視察、サウジアラビア政府、サウジアラムコ社研究者による視察対応を実施し、各国の CCS 研究やインフラ整備を担う政府支援の人材育成事業等にも協力した。

③ 視察行程

一般的な視察行程は新千歳空港からウトナイ湖を経て、苫小牧 CCS 実証試験センターの見学を基本とし、視察者の要望に沿って、(株)Jファームの温室型植物工場（CO₂利用による野菜の温室栽培）を見学した。社会的受容性の醸成活動に関心の高い視察者には苫小牧市役所を案内し、市役所内に設置されている情報公開モニターの説明を実施した。またグローバル CCS インスティテュートの CEO や豪州大使、BHP の副社長の来訪時には、苫小牧市長と視察者との意見交換等も調整し、地元自治体による本事業への協力状況の説明の機会を設けた。

④ 説明概要、質疑概要

視察者には本事業の特徴を中心に、地上設備、坑井・モニタリング設備の詳細と、周辺環境やステークホルダーの概要、広報活動の実施概況等を紹介し、事業の全体像を技術面と社会的受容性の両面から包括的に説明した。また日本における実証試験の趣旨や目的等も説明し、資料提供や情報交換、技術協力に関する依頼にも、今後の国際協力や連携を見据え、委託者と協議のもと可能な限り対応した。視察者に対し発信した主な要点は、既述の 5.3.2 (1)②を参照されたい。

またこれに加えて、視察者の主な関心事項として質疑応答内容を以下に記す。本事業の技術的な優位点やコスト、日本の法令下の CCS の課題やインセンティブ、社会的受容性の課題等、各自が将来 CCS の導入を検討する上で必要な情報と考える。

- 1) 本事業終了後の計画（次の展開や商用化の可能性等）
- 2) 世界における深部塩水層貯留と CO₂-EOR の実施状況、相違点や有効性

- 3) 地球温暖化対策における CCS の貢献度
- 4) 炭素税やインセンティブの導入状況、CO₂貯留適地調査等について
- 5) ビジネスモデルの構築状況
- 6) 官民の役割
- 7) CCS 導入に向けた法整備や環境整備の状況等

(2) 情報収集、意見交換

視察者は、海外における CCS の取組み状況を中心に情報収集を行い、また国内外の産業界への CCS 導入の展望や課題、CO₂の有効利用の展望についても、日本政府が公表するロードマップを元に意見交換を実施した。多数の視察者との意見交換を実施したうち、本事業についての主要な確認事項は以下のとおりであった。

- 1) 政策面：本事業終了後の計画、日本における CCS の将来展望、制度やインセンティブ、モニタリング期間と責任の所在、ビジネスモデル、取得データの公開状況
- 2) 技術面：地上・地下設備のエンジニアリング技術、エンジニアリング企業、陸上から海底下への圧入のメリット、苫小牧港の水深、建設および操業費、分離・回収プロセスとライセンス、CO₂圧入時の圧力、分離・回収後の CO₂純度、苫小牧地点の貯留ポテンシャル、火山岩層の浸透性等
- 3) その他：世界の CCS の概要等、本事業の開始段階での広報活動の様子、地震への対応等

5.3.4 国際協力・技術交流

本事業では、政府が目指している CCS 技術の国際展開の可能性を拡大すること、さらに第 5 次エネルギー基本計画にある「国際協力の展開」の下に推進する多国間、または二国間によるエネルギー協力体制（協力関係）の強化、深化を支援すること等を目的に、国際協力・技術交流の推進に取り組んだ。

各国がパリ協定の合意を受けて、野心的な温室効果ガス排出量の削減目標の達成に向けて ESG 投資を促進する等、持続可能な産業への移行に向けた様々な取り組みや環境整備を進めている中で、石炭（火力発電）だけでなく石油等のエネルギー産業や、製鉄、セメント産業等も、市場環境の変化に合わせ温室効果ガス排出量削減に努めながら、持続可能な産業へのシフトを進めている。こうした産業界は CCS の導入を検討する上で、本事業によって得られた分離・回収技術や陸上から海底下への圧入井の掘削技術、また貯留・モニタリング技術の成果の知見の共有と活用を望んでいることから、本事業の後半である

2017年頃から海外から複数の国際協力の依頼を受けた。日本の CCS 技術を世界へ展開するためには、海外組織との国際協力・技術交流が必須であるとの認識のもとに、これらの要請に積極的に対応した。

(1) DOE（米国エネルギー省）との日米協力

2015年4月に経済産業省は DOE との間で CCS 分野に係る協力文書に署名した。2016年7月に DOE は、本事業のサイトにおける日米間の CCS の共同研究を行うことを目的として、浅層高分解能三次元弾性波探査等データ取得・解析の実施に関し、実施者のテキサス大学へ US\$2.5million（約 2.5 億円）の提供を決定した。2017年8月には苫小牧 CCS 実証試験フィールドで、日本協力のもとテキサス大学が浅層高分解能三次元弾性波探査を実施した。政府の日米協力事業の推進を支援するため、調査事業の支援やデータ提供等を通じて協力した。本調査の結果により、2坑の圧入井、直上の浅層部には CO₂ の漏出経路となる断層がないことが解り、その成果は日米間で共有している。なお 2017年10月には、日米間の協力範囲を具体的事業案件の形成等の協力も含むべく協力文書を改訂した。

(2) 日・サウジワークショップにおける発表

政府が 2016年に推進することを発表した「日・サウジビジョン 2030」の一貫で、同年9月に経済産業省が、サウジアラビアのエネルギー産業鉱物資源省と MOU を締結した。本事業では政府の国際協力の支援に向けて、同年12月に本合意のもとにサウジアラビアで開催された、再エネ分野での企業間の情報共有等を目的とする両国の共同ワークショップ「CCS and Hydrogen in the framework of Collaboration in studies on technologies toward low carbon energy system in Saudi Japan Vision 2030」に参加し、サウジアラビアの政府関係者、石油産業関係者等を対象に本事業についての紹介を行った。

(3) UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy（BEIS：英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省）との日英協力

2019年7月に経済産業省は BEIS とクリーンエネルギーのイノベーションについての協力文書に署名した。署名文書には、CCUS の研究開発および展開に関し情報と専門知識を共有し、国際協力の促進を図ることが記載されていることから、2019年10月に、第一回日英 CCUS ワークショップが開催され、本事業の成果と日本の CCS や CCUS の展望等を英国政府に向けて紹介した。英国政府からは将来の CCUS の検討内容やビジネスモデル研究成果等が紹介された。

(4) International CCS Knowledge Centre（国際 CCS ナレッジセンター）との協力文書の署名

2019年10月にカナダ サスカチュワン州の CCS 促進組織である International CCS Knowledge Centre との間で、JCCS は CCS 分野に係る協力文書に署名した。これは二酸化炭素排出量を大幅に削減することで気候変動に対処するという共通の目標に向け、CCS の促進に協力することに合意したものである。

同センターはバウンダリーダムプロジェクトで築いた膨大な知見やデータの公開を通じて世界に貢献し、それらの知見に基づき複数の海外プロジェクト関係者との情報交換にも取り組んでいる。2019年にはセメント産業における CCUS 事業の立ち上げに協力し、有効利用のノウハウの取得にも専念している。本合意はこうしたカナダの大規模事業の経験と知見の習得を通じて日本が CCS への理解をより一層深める契機であり、双方の知見の共有化を図ることで、国際的な CCS の発展に寄与するものと考えられる。この合意に基づき、2019年10月に苫小牧 CCS 実証試験センターにて第1回技術交流会を実施した。

(5) TOTAL 社との情報交換

ノルウェーの Northern Lights プロジェクトにも参画しているフランスの TOTAL 社からの要請を受け、2019年9月に TOTAL 社の貯留関係者と NDA（守秘義務契約）を締結し技術交流会を実施した。10月には船舶関係者と技術交流会を実施した。

5.3.5 CSLF における活動

(1) Carbon Sequestration Leadership Forum（CSLF）の概要

CSLF は、2003年に米国 DOE の主導により設立された閣僚級国際気候変動イニシアティブで、25箇国の政府機関および IEA がメンバー（日本は経済産業省が代表）となり、国際協力を通じて費用対効果が高い CCS の技術開発と事業展開の推進を目指している。年2回の定例会（年次会合：Midyear Meeting、年次会合：Annual Meeting）を通じて、CCS の世界的な技術開発の促進に向けて技術的、経済的、環境的障壁に共同で対処することで CCS の認知度の向上を図ること、また法務・法規、制度面の環境整備を進めることを目標としている。組織構成は、CSLF の枠組みや政策の統括や CCS に関する法規制・財務・主要課題の特定等を担う Policy Group（政策グループ：省庁の政策担当者）、CCS の技術、経済、環境上の主要課題や協力可能分野の特定を行う Technical Group（技術グループ：国立研究機関等の CCS の専門家）、技術グループに属し、CSLF 認定プロジェクトの審査や技術グループへの提言を行う PIRT（Project Interaction and Review Team）からなり、これらのメンバーのほか、CSLF 活動を民間

サイドから支援するステークホルダーが活動に参加している。

なお上記のうち、Policy Group については IEA が事務局を務める閣僚級フォーラム (Clean Energy Ministerial、以下、「CEM」と称する。) に活動基盤を移した。CEM は、24 ヶ国および欧州委員会の政府 (大臣・閣僚級)、多国籍企業 (経営幹部)、NGO、国際金融機関が加盟し、世界のベストプラクティスの共有と、クリーンエネルギーへの移行の促進を行っている。

CSLF は、2016 年の 10 月に日本で開催した東京総会 (年次会合) で、本事業を CSLF 認定プロジェクトに認定し、また JCCS をアジア・太平洋地域の CCS 事業普及の主導役としてリージョナルチャンピオンに任命した。詳細を、以下 (1) ~ (2) の通り記す。

(2) 本事業の CSLF 認定プロジェクト認定について

CSLF は、同組織が定める一定の条件を満たし、また世界的な CCS の推進に寄与する事業を CSLF 認定プロジェクトとして認定している。

本事業は 2016 年 10 月に東京で開催された CSLF 年次総会で、CSLF 認定プロジェクトの認定を受けた。CSLF は認定プロジェクトの条件として「情報交換」、「研究開発」、「実証等」を総じて満たすことを定めており、本事業ではこれらの活動を国際活動を通じて実施しているが、最も評価された点は、海洋環境を保護するため陸上から海底下へ圧入井を掘削し CO₂ の地中貯留を行う世界初の CCS プロジェクトであること、充実したモニタリングシステム、取得データの情報公開等である。本認定は PIRT を統括する DOE と CSLF 技術グループの推薦を受け、CSLF 政策グループによって全会一致で採択された。また本事業の仕様を記載した認定申請書は、今後の新たな認定プロジェクト申請者のための雛形として活用されている。

(3) アジア太平洋地域リージョナルチャンピオンの活動

2016 年 10 月に東京で開催された CSLF 年次総会において、本事業の広報活動が評価され、DOE の推薦によりアジア太平洋地域リージョナルチャンピオンに選出された。それ以降、CSLF の会議に経済産業省のオブザーバーとして定期的に参加し、発表等を通じて本事業についての国際的な情報発信を行うとともに、情報収集の機会拡充に努めてきた。また国際協力の深化を見据え、海外政府関係者や各国のステークホルダーとの関係強化も図った。

また 2017 年 7 月から 11 月にかけて、CSLF 活動の支援の一貫で、アジア太平洋地域のステークホルダー (300 名超) に対するアンケート調査と意見交換を実施し、CCS の国際的な普及に向けた意見の集約を行った。本調査により集約した意見は下記の通りである。

- 1) CCS 実証プロジェクトの実施と継続を支援
- 2) 分離・回収技術と貯留管理技術の研究開発への支援
- 3) CCS 導入のためのインセンティブの確立
- 4) 実証から実施への CCS 普及に向けたインフラストラクチャの確立の検討
- 5) CCS の普及に関する法的および規制枠組みと技術基準の確立
- 6) 国際協力推進への支援

上記の意見は他地域のステークホルダーの意見との統合に向けて、米国、ヨーロッパ、中東・アフリカ地域のリージョナルチャンピオンと協力してまとめ、2017年12月に UAE エネルギー省と CSLF が主催した CSLF 閣僚級会合において発表される等、関係各国の閣僚への提言に協力した。

5.3.6 本事業の国際的な評価

既述のように、本事業は各国閣僚レベルの CCS 国際推進組織である CSLF の認定プロジェクトに選ばれた。

また本事業は2016年6月に、CCS 展開促進のための国際的なシンクタンクであるグローバル CCS インスティテュートによって世界の Notable Project（注目すべきプロジェクト）の一つに指定された。また2016年に公開した「The Global Status of CCS 2016-Summary Report」においては、本事業が地元住民に対し長年にわたり取り組んできた広報活動について、CCS 事業を地元住民が受け入れる上で必要な鍵となる事業者と地元住民間の信頼関係を醸成し、地元住民が CCS を深く理解することで CCS 事業も受け入れやすくなるという好循環を生むモデル活動として紹介した。2018年12月にポーランド・カトヴィツェで開催された COP24 では、グローバル CCS インスティテュートが「Global Status Report of CCS 2018」を世界に発表した際に、苫小牧市長による CCS を通じた国際協力についてのメッセージとともに、本事業の紹介をした。また翌年2019年12月にスペイン・マドリードで開催された COP25 のグローバル CCS インスティテュートの講演でも、本事業の広報活動に言及し、本事業が CCS の社会必要性醸成活動における国際的なモデル事業であるとの紹介をした。

2018年頃から CCS 事業やビジネスモデル形成の計画を進めている英国政府は、2018年11月に英国政府が公表した CCUS ロードマップ“Clean Growth: The UK Carbon Capture Usage and Storage Deployment pathway”の中で、本事業を革新的技術開発プロジェクトとして紹介した。また2019年7月に同政府が公表した CCUS ビジネスモデル“Business Models for Carbon Capture, Usage and Storage”の中では、JCCS が CCS 事業の調整・

実施組織の適切な組織として紹介された。

5.4 有事における情報発信活動の実績

5.4.1 有事広報マニュアルの作成

本事業において不測の事故・事態が発生した際、報道機関やマスメディアその他社外に対してとるべき対応の原理・原則、心得や考え方、やるべきこと、その手順と公表基準等を定めた有事広報マニュアルを作成した。有事における様々な状況を想定し、想定した状況に応じたマニュアルを整備した。

情報開示方法として、JCCS ホームページへの掲載、プレスリリース、記者への個別説明、記者会見の四つを設定した。本マニュアルの位置付けを図 5.4-1 に示す。

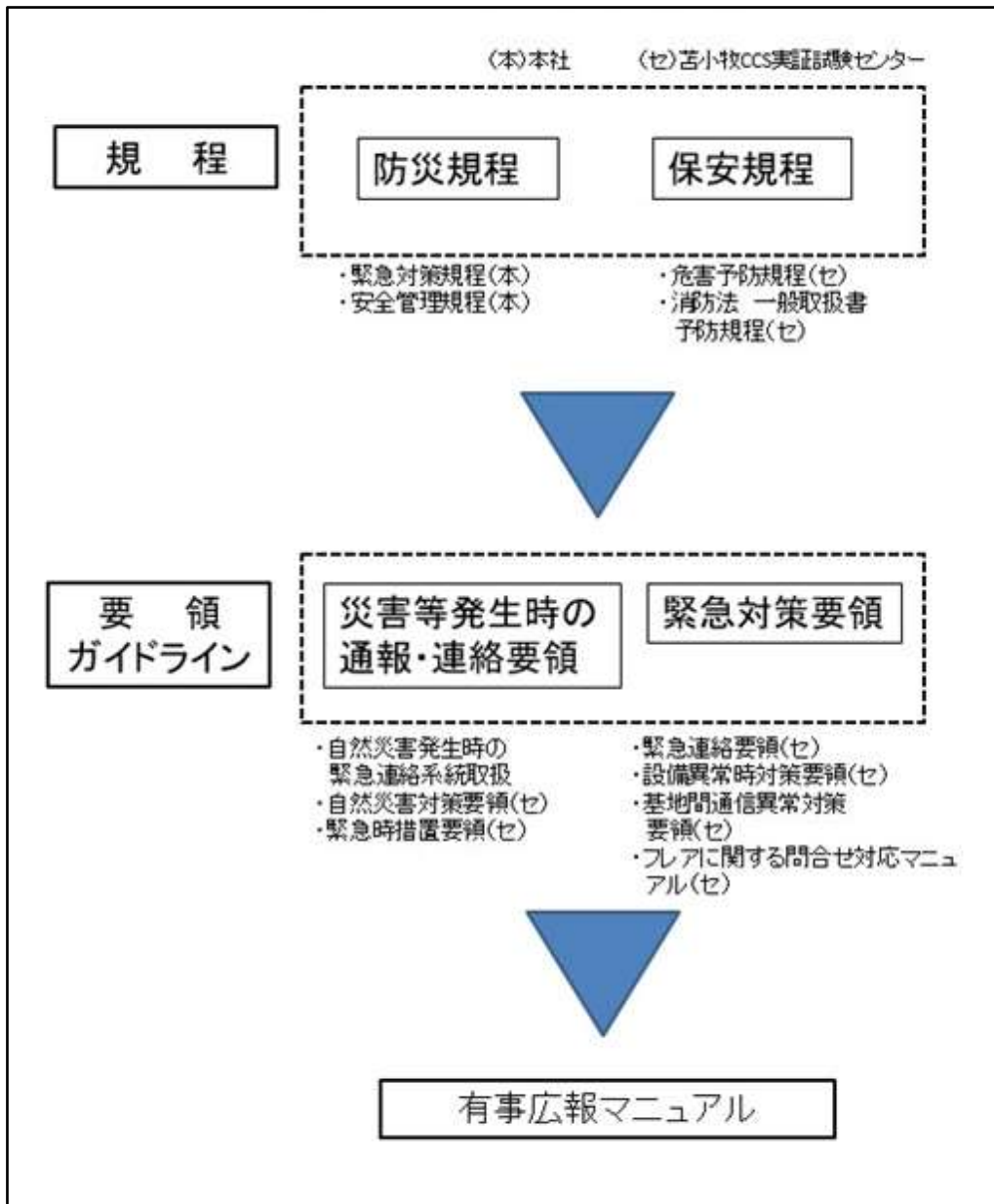


図 5.4-1 有事広報マニュアルの位置付け

想定した有事とは、一般的な地上設備運転における災害事故や自然地震の発生等に加えて、CCS 事業に特有のものである CO₂ の漏出である。

2018 年 9 月の平成 30 年北海道胆振東部地震と、その後 2019 年 2 月に発生した余震後の情報発信においては、「有事広報マニュアル」に沿って地震直後と地上設備点検後に情報発信を行った。この対応結果を踏まえ、震源が圧入エリア外であっても経済産業省／NEDO と協議の上情報発信を行う必要があること、SNS 等への対応方法の追記等、マニュアル内容を見直した。

5.4.2 「平成 30 年北海道胆振東部地震」後の情報発信活動

2018 年 9 月と 2019 年 2 月、苫小牧市の近隣の厚真町を震源地として大きな地震が発生した。気象庁の発表によると、2018 年 9 月 6 日（1 回目）：マグニチュード 6.7、2019 年 2 月 21 日（2 回目）：マグニチュード 5.8）であった。

2018 年 9 月 6 日「平成 30 年北海道胆振東部地震」の発生後、有事広報マニュアルに則り、同日中に地上設備を点検し健全性を確認したことをホームページに掲載した。9 月 12 日には圧入井の圧力と温度のモニタリングデータを、会社見解とともにホームページを通じて公表した。その後、10 月 19 日に地震学等の専門家を含む有識者からなる検討会を開催し、モニタリングデータ等の解析結果を踏まえて、以下のことを委員の共通認識として確認し、検討会の結果を取りまとめた報告書を、11 月 21 日にホームページに掲載した。

- 1) 同地震による CO₂ の漏洩がない
- 2) 同地震の発生と CO₂ 圧入の間には因果関係がない

一方、2019 年 2 月 21 日に胆振地方中東部で発生した最大余震の前後に、地震と CO₂ 圧入の因果関係についての誤情報が SNS を通じて発信された。マスメディアや一般からの問合せに対応し、誤情報を否定し上記検討会報告書に基づく情報を提供した。

その後も、行政機関やステークホルダーに対して、上記検討会報告書を用いて同地震による CO₂ の漏洩がないこと、地震と CO₂ 圧入の間には因果関係がないことの説明を行った。現場見学や地元地域で開催されたパネル展等でも、同様の説明を行った。

5.5 地元ステークホルダーとのコミュニケーションの実績と検証

本事業の実施にあたっては、準備段階から圧入操業および圧入後のモニタリングの全期間を通じて、地元地域を中心とした住民一人一人の事業に対する理解が必要である。加えて、地元地域での事業活動を、安全、安心に、また地元地域の信頼のもとに推進していくためには、主要なステークホルダーである苫小牧市および苫小牧漁業協同組合（以下、「苫小牧漁協」と称する。）からの支援が不可欠である。

本節では、両者をはじめとした地元ステークホルダーとのコミュニケーション実績について記録し、その検証を行うことで、将来、相互信頼関係に基づくより円滑な事業運営の糧としたい。

5.5.1 苫小牧市

地元行政として本事業を受け入れた苫小牧市（産業経済部企業立地推進室企業立地課（現：企業政策室港湾・企業振興課））は、本事業の遂行に協力して、以下の業務を実施した。

- 1) 経済産業省、CCS 事業者からの報告・相談に係る対応
- 2) 苫小牧市での CCS 関連イベント・来客等への対応・関与
- 3) CCS モニター（市庁舎設置）の管理
- 4) 地元住民への周知普及活動、地元住民からの問い合わせへの対応（電話、面談、まちかどミーティング）、議会報告
- 5) CCS 事業に係る同意書の立会人
- 6) 経済産業省への市職員の派遣（CCS に係る業務、地元関係先との連絡調整等）
- 7) 苫小牧 CCS 促進協議会に係る事務

5.5.2 苫小牧漁業協同組合

苫小牧漁協は、民間団体でありながら海域の利用者として、地元漁協および胆海共第 26・27 号共同漁業権共有管理委員会（苫小牧、室蘭、いぶり中央、鶴川の 4 つの単位漁業協同組合の共有になる胆振沖海域の共同漁業権の管理、運営を目的とする組織、以下、「26・27 共有管理委員会」と称する。）事務局の立場より、本事業の遂行に協力して、以下の業務を実施した。

- 1) 漁業者への対応：事業の説明、苦情対応、不安の払しょく等
- 2) 弾性波探査による漁業への影響懸念の調査（ホッキ貝の歩留、鮭の漁獲量等）
- 3) 漁業関係者（北海道漁業協同組合連合会、胆振総合振興局、室蘭漁協、いぶり中央漁協、鶴川漁協等）への情報共有、事前説明、報告、調整等（苫小牧漁協理事会・総会、26・27 共有管理委員会、周辺漁協訪問時の同行等）
- 4) 経済産業省、JCCS からの報告・相談に係る対応
- 5) 漁業者との調整：漁期との調整、漁具の移動手配。荒天時の再調整等
荒天待機対応：2016 年度 25 日、2017 年度 29 日、2018 年度 29 日
- 6) 事故・トラブル時の現場確認や漁業者との調整
- 7) CCS 事業を実施のための周辺漁協の同意を得るための対応（26・27 共有管理委員会の事務局）
- 8) 海洋環境調査・弾性波探査等実施に係る備船手配

2016 年度 146 隻、2017 年度 232 隻、2018 年度 126 隻

本事業実施にあたって、苫小牧漁協は、26・27 共有管理委員会の事務局として、経済産業省が環境省に対して海洋汚染防止法に基づく「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄についての許可申請」を行うに際し、2015 年 11 月 25 日付で、経済産業省産業技術環境局地球環境連携室と「苫小牧西港区周辺海域における二酸化炭素ガスの海底下貯留に係る同意

書」を手交している。苫小牧漁協は、CO₂貯留への同意条件として、以下の同意書の条件が満たされていることを継続的に確認できることをあげている。

- 1) 貯留した CO₂の漏出による海洋環境への影響を起さず、漁業活動への支障が生じないこと
- 2) 定期モニタリングの実施とモニタリング結果の年度ごとの遅滞ない報告
- 3) 漁業活動との調整（漁具の移設や撤去等）が必要な調査等についての協議等

苫小牧漁協は、万が一の CO₂漏洩があった場合の風評被害や水産資源等への影響を懸念した漁業者から直接苫小牧漁協に漁業への影響等の不安の声が出る場合を想定し、漁業者に対して CCS 事業説明、苦情対応、不安の払しょく等を行うため、事業者である経済産業省および JCCS に適時の情報開示、共有を常に履行するよう要請した。

5.5.3 地元ステークホルダーとのコミュニケーションの課題と対応

本事業を開始して以降、これまでの間に発生した緊急時等の対応のなかで、JCCS において当該事象、対応が地元関係者に及ぼす影響、懸念等を十分に斟酌できず、結果として、地元関係者、特に苫小牧漁協をはじめとする苫小牧港湾利用関係者に対して適時の報告、連絡が遅延することとなった事例が存在する。

以下に、このような代表的な事例Ⅰ～Ⅳを取り上げるとともに、そこでなされた地元関係者からの指摘事項を踏まえることで、本事業における初動対応の在り方、緊急時の報告・連絡体制の実効性を確保するための判断基準等について検証し、今後の本事業の運営、対外対応の改善に資することとしたい。

事例Ⅰ：OBC 埋設工事に関する報告および対応について

事例Ⅱ：CO₂濃度観測値の基準線超過に係る対応について

事例Ⅲ：アミン漏洩時の報告について

事例Ⅳ：平成 30 年北海道胆振東部地震発生後の会社見解公表に係る事前連絡遅延について

(1) 事例Ⅰ OBC 埋設工事に関する報告および対応について

2013 年 7 月～8 月、モニタリング用 OBC 敷設工事に際して、当初計画していなかった屈曲が生じたことおよび埋設深度（計画値 2.0 m）が一部で未達となり不十分な施工区間が発生した。

ケーブルの屈曲事象を即時に地元関係者へ報告せず、また作業終了報告時にも OBC が所定の埋設深度に達していないことが未報告であった。とりわけ苫小牧漁協への報告は同年 11 月末となり、他の地元行政機関への報告より大幅に遅延した。

その後、JCCSは深度未達への対策として施工業者を変更したうえ、埋設深度が60 cmとなった区間を追加施工(2014年2~3月)した。なお、追加施工後も埋設深度が1.2 m未満である区間への措置として、将来、強風時等の船舶の走錨により万一OBC損傷事故が発生した場合、苫小牧港湾関係者への賠償請求を回避するために、JCCSとOBC所有者公益財団法人地球環境産業技術研究機構(以下、「RITE」と称する。)ほかとの間で「求償権放棄に関する協定書」を締結し、当該情報を関係者に周知、共有することで、関係者の了解を得た。

① ケーブル屈曲および埋設深度未達の経緯等について

2013年7月~8月に実施したOBCおよびOBS用接続ケーブルの海底埋設作業(実施責任者:RITE、請負工事者:日本サルベージ(株))において、OBCが、海岸より約4.16 km付近を中心に長さ約200 mにわたり、敷設計画ルートから西側に最大53 m離れ、大きく屈曲していることが判明(8月8日時点)した。屈曲の原因は、他船舶の錨等にOBCが牽引されたため、仮置きした位置から移動したものと推定された。

8月~11月の間、JCCSはRITE現場責任者への状況確認、善後策に係る検討作業を進めるとともに、苫小牧海上保安署、第一管区海上保安本部海洋情報部監理課に対し、全埋設位置および深度等に関し当初計画と変更が生じた状況について、都度、報告を行ってきたが、苫小牧漁協に対しては未報告であった。

11月下旬、JCCSは、苫小牧漁協に対し、全埋設位置および深度等に関して、当初計画と変更が発生した点について報告するも、事前説明の内容と異なったことから、苫小牧漁協より、早急に屈曲と埋設深度との問題を解決できる対応策を提示するよう要請を受けた。

12月、JCCSは、苫小牧漁協に対し報告遅延の謝罪と顛末書の提出およびOBC敷設工事に係る経緯報告を行ったが、再度、苫小牧漁協より、埋設深度の問題を解決できる対応策の提示を要請された。

その後、2014年2月~3月の間に、深度未達区間の一部(ケーブル屈曲部40 m区間)で埋設工事を追加施工した(図5.5-1)ものの、他の区間では海底下の地盤が固いことから、機械式埋設機による強力なジェット水流による埋設工事が必要とされたが、当該ジェット水流によって既設OBCに組み込まれたセンサーに、重大な障害を与える可能性が高いとの調査結果を得た。

調査結果を踏まえ、JCCSでは、次の条件を前提に追加埋設工事を行なわないとしたうえで、関係者の了解を求めていくこととした。

- 1) 埋設深度 1.2 m 以上あれば、船舶の走錨により OBC および OBS 伝送ケーブルを引っかける恐れがないこと。
- 2) OBC および OBS 伝送ケーブルに、将来、強風時等の船舶の走錨により万一の事故が発生した場合、苫小牧港湾関係者に一切の迷惑が及ばないように、事故に伴い発生した損害賠償の求償権を放棄すること。
- 3) この前提の下で、追加埋設工事を行わないことで、苫小牧港湾関係者として苫小牧市、苫小牧港管理組合、苫小牧海上保安署並びに苫小牧漁協から、了承を得ること。

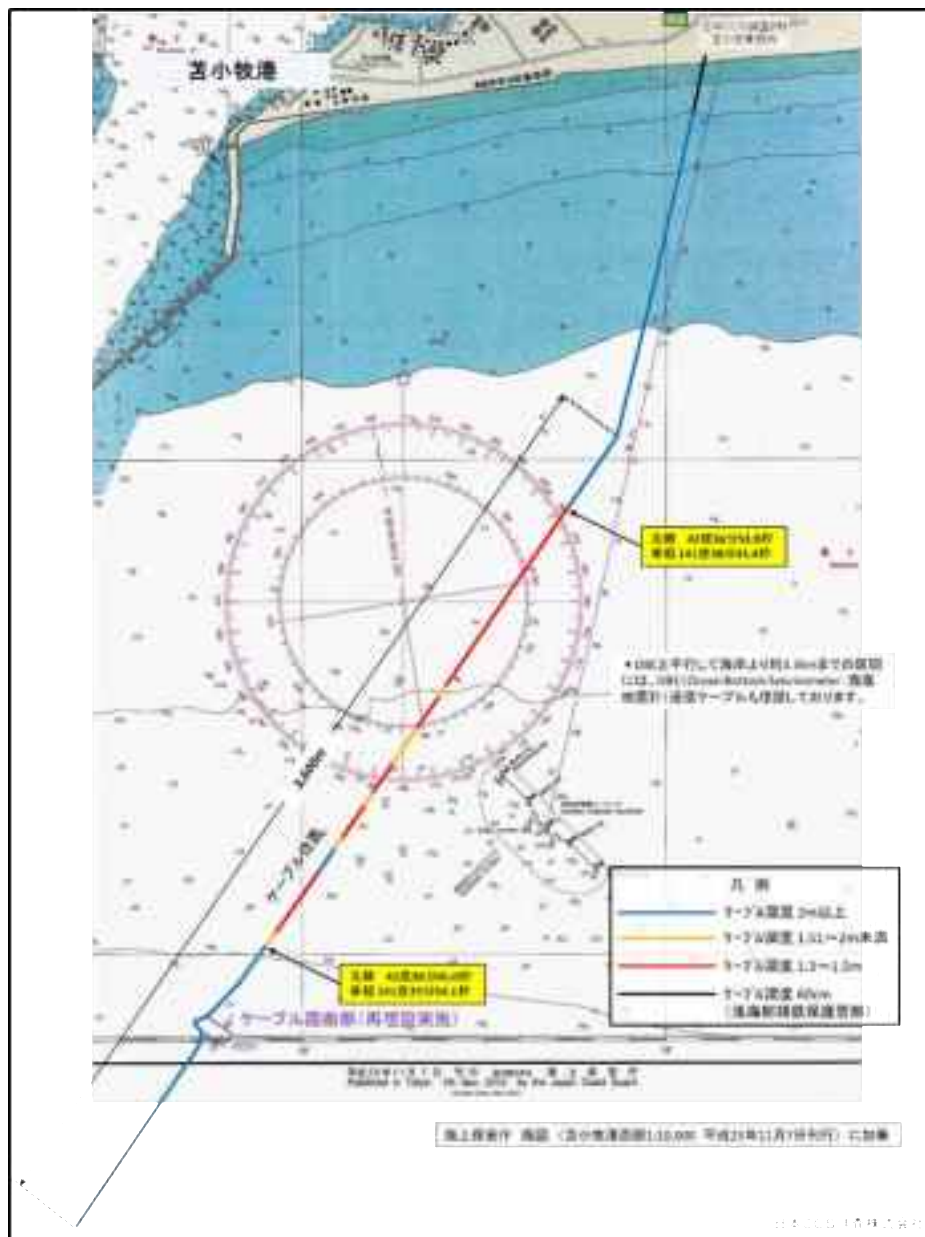


図 5.5-1 OBC および OBS 用接続ケーブルの海底埋設実績図

② 地元関係者からの指摘事項について

地元関係先は下記のとおりである。

- 1) 苫小牧市産業経済部 企業立地推進室企業立地課
- 2) 苫小牧漁業協同組合
- 3) 苫小牧港管理組合
- 4) 苫小牧海上保安署
- 5) 第一管区海上保安本部海洋情報部監理課

JCCS 担当者は、屈曲が判明した時点で、OBC 埋設深度が 60 cm となった箇所は海底下地盤が極めて固いためさらに深く埋設する事は困難であることから、以下の判断を基に当工事終了後直ちに報告しなかった。

- 1) OBC 屈曲部は苫小牧漁協の操業区域ではない。
- 2) 敷設したケーブル位置が以後の海図に記載されることで、港湾を利用する船舶に対しては、ケーブル敷設位置付近への投錨は回避され安全を損なうものではない。

かかる JCCS の判断は「他の港湾利用船舶の航行の安全を確保するうえで、極めて安易な行為ではないか。」との指摘を受けた。

また、「JCCS における人事異動に伴い地元対応の引継ぎや業務連携の不十分さが露呈し、苫小牧市における本事業に対する苫小牧漁協によるこれまでの理解と協力に対して、信頼関係を著しく損ねるものでないのか。」との指摘もあった。

③ 再発防止のための対策について

JCCS は、追加埋設工事施工後、なお埋設深度未達が解消困難な区間の対策として、将来、強風時等の船舶の走錨により万一 OBC 損傷事故が発生した場合、苫小牧港湾関係者への賠償請求を回避するために、JCCS と OBC 所有者 RITE ほかとの間で「求償権放棄に関する協定書」を締結し、当該情報を港湾関係者に周知、共有し、その了解を得た。

今後は、苫小牧漁協ほか地元関係先への報告対応が迅速で遺漏がないよう、JCCS の対苫小牧漁協連絡担当に係る業務分掌を総務部に移管するとともに、直接窓口は、苫小牧事務所長（現・苫小牧 CCS 実証試験センター副センター長）を主担当者とし同事務所全体でサポート、本社での苫小牧漁協の統括担当部を総務部とする強化体制で臨むこととした。図 5.5-2 に緊急連絡系統図を示す。

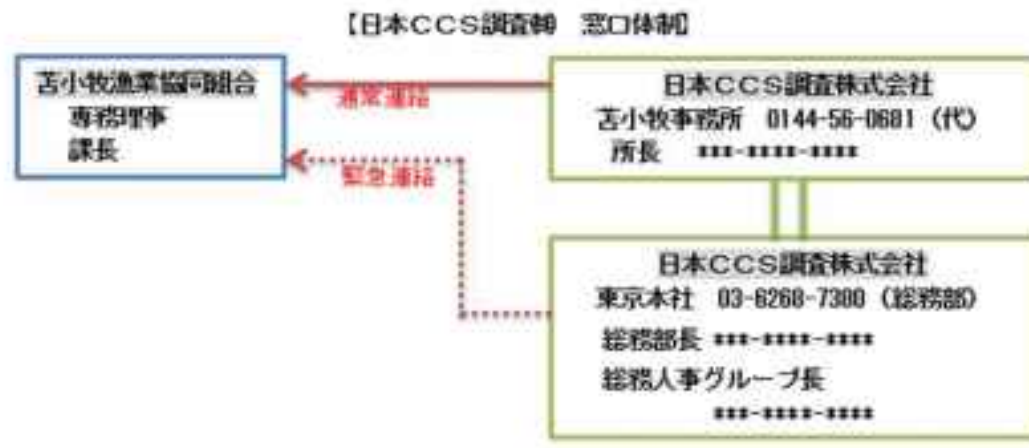


図 5.5-2 2013 年 12 月に設定した緊急連絡系統図（個人情報・省略）

(2) 事例Ⅱ CO₂濃度観測値の基準線超過に係る対応について

2016 年 6 月～2017 年 2 月の間、海洋汚染防止法に基づき実施した海洋環境調査において、取得した CO₂ 濃度の観測値が基準線を超過したことにより、当初 2016 年 8 月に予定した圧入再開がおおよそ半年間遅延することとなった。

その間、監視計画に従って懸念時調査として追加の海洋環境調査を実施（～2016 年 9 月まで）した。2016 年 10 月、環境省より「今後の監視計画のあり方」が示された。2016 年 12 月、経済産業省が「新たな監視計画」を取りまとめ、26・27 共有管理委員会に説明のうえ、環境省に変更計画申請を実施した。

2017 年 2 月、環境省より「海洋汚染防止法の変更許可書」が発出され、地元説明を経て圧入を再開した。

① 海洋環境調査での CO₂ 濃度観測値が基準線を超過したことにより、圧入再開が半年間遅延した経緯等について

JCCS は、2016 年 4 月、「平成 28 年度二酸化炭素削減技術実証試験事業」を経済産業省より受託し、2016 年 4 月 6 日から 5 月 24 日にかけて、7,163t の CO₂ 圧入を実施し、同年 5 月末、実証設備の法定点検および保全工事ならびにガス供給元（出光興産(株)北海道製油所）の大規模保全工事に伴って CO₂ 圧入を停止し、同年 8 月初旬の圧入再開を予定していた。

同年 6 月から 7 月にかけて、CO₂ 貯留海域において実施した海洋汚染防止法で定める許可申請書に基づく春季海洋環境調査において、海水中の CO₂ 濃度について、基準線を上回る値が確認され、圧入再開を延期し懸念時追加調査を行うこととなった。その後、数次にわ

たり追加調査および分析等を行い、その結果を環境省に報告した。

報告内容について環境省において検討が行われた結果、同年 10 月 13 日に環境省より、漏出は発生していなかったと考えられる旨、および今後の監視計画のあり方がとりまとめられ、経済産業省へ示された。特に監視計画については、今後、採水調査によって基準線を上回る値が得られた場合には、採水調査に加えて、より直接的に CO₂ の漏出の有無やそのおそれを確認するための調査（センサー調査や気泡調査）を迅速に実施したうえで CO₂ 漏出の有無を総合的に判断できるような監視計画のあり方について取りまとめられ、「海底下 CCS 事業に係る監視計画のあり方について」として経済産業省へ示された。

これらを踏まえ、経済産業省では監視計画の見直し作業を行い、同年 12 月 28 日、「海洋汚染防止法に基づく監視計画の変更許可申請書」を環境省へ提出した。変更許可申請書は環境省において受理された後、1 ヶ月間の公告縦覧が実施された。

公告縦覧の結果を踏まえた審査の後、2017 年 2 月 1 日環境省から経済産業省へ変更許可書が通知された後、26・27 共有管理委員会の構成 4 単協に経過報告、説明を実施したうえで、2 月 5 日、圧入を再開した。

② 地元関係者からの指摘事項について

地元関係先は下記の通りである。

- 1) 苫小牧市産業経済部 企業立地推進室企業立地課
- 2) 苫小牧漁業協同組合
- 3) 鷗川漁業協同組合
- 4) いぶり中央漁業協同組合
- 5) 室蘭漁業協同組合
- 6) 胆海共第 26 号・第 27 号共同漁業権共有管理委員会
- 7) 北海道漁業協同組合連合会環境部、同室蘭支店
- 8) 北海道胆振総合振興局産業振興部水産課
- 9) 苫小牧港管理組合、同バース会議
- 10) 苫小牧海上保安署
- 11) その他、民間フェリー運航会社等

海洋環境調査の結果、何らかの要因により移行基準の超過が確認された場合、CO₂ 圧入設備や圧入井・観測井のデータからは CO₂ 漏出を疑う状態にはないにも関わらず、懸念時監視に移行し、より詳細な追加調査を長期に継続することは、安全側に立った考え方とはいえ、この状況は風評被害等から地元関係者を守る観点から、可能な限り避けなければな

らない。

また、自然変動により海水の化学的性状の異常を観測する可能性はあり、懸念時監視に移行すると CO₂ 圧入を停止することとなるが、実際に CO₂ が漏出していないにも関わらず、今回のように半年間の長期間に渡り圧入再開を延期するような事態は、結果として、本事業の信頼性と社会的受容性を損なうこととなり、風評被害等が発生する懸念がある。

「特に、26・27 共有管理員会の 4 単協の構成組合員、周辺漁業者からの疑問に対しては、正確な情報をタイムリーに開示し、丁寧な説明で答えていかなければ強い反発を招くことにもなりかねないため、そうした対応が懸念を払しょくするためには不可欠である。」との指摘を受けた。

上記状況を踏まえ、苫小牧漁協では、経産省による「海洋汚染防止法に基づく監視計画の変更許可申請」の許可、圧入再開までの約半年余りの期間中、26・27 共有管理委員会および構成 4 単協への経過報告、説明のため、数次にわたって委員会開催や単協を訪問し、調整にあたった。また、経済産業省および JCCS、並びに環境省を含め、新たな監視計画策定のための実務的な協議を十数回重ねることとなった。

③ 再発防止のための対策について

a. 環境省による対応

報告内容について環境省において検討が行われた結果、10 月 13 日に環境省より、漏出は発生していなかったと考えられる旨、および今後の監視計画のあり方がとりまとめられ、経済産業省へ示された。特に監視計画については、今後、採水調査によって基準線を上回る値が得られた場合には、次の監視段階に移行すべきかを確認するための調査（確認調査）として採水調査に加えて、より直接的に CO₂ の漏出の有無やそのおそれを確認するための調査を迅速に実施したうえで CO₂ 漏出の有無を総合的に判断できるような監視計画のあり方について取りまとめられ、「海底下 CCS 事業に係る監視計画のあり方について」として経済産業省へ示された。

b. 経済産業省による対応

これらを踏まえ、経済産業省では監視計画の見直し作業を行い、同年 12 月 28 日、「海洋汚染防止法に基づく監視計画の変更許可申請書」を環境省へ提出した。変更許可申請書は環境省において受理された後、1 ヶ月間の公告縦覧が実施された。

c. 2018 年 8 月、移行基準の見直し

なお、当初、2016 年 3 月の「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可申請」に係る

海洋環境監視計画の移行基準に関しては、その後、モニタリングデータの経年蓄積状況を踏まえて、2018年7月19日、経済産業省より環境省へ「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の変更許可申請書（移行基準の見直し）」を提出、同年8月31日、変更許可となったところである。それ以降の各年四季の海洋環境調査では、いずれも「移行基準」の超過は発生していない。

(3) 事例Ⅲ アミン漏洩時の報告について

2018年5月、圧入停止後の熱交換器からアミン溶液の漏洩が発生したが防液堤内に留まったため、苫小牧漁協への即時通報を怠り、翌々日の報告・説明となった。

漏洩したアミン溶液は防液堤内に留まったため外部環境への影響なしと判断したが、漏洩量は約15.5 m³と大量に及んでいたため、気象条件等によっては万一の影響が懸念される状況であった。

公害防止協定締結先の道・市環境部局へは即時に報告するも、苫小牧漁協へは即時連絡がなく、翌々日の報告・説明となった。

アミン漏洩再発防止対策の実施、緊急連絡体制の強化・連絡項目の見直し、CCS施設管理体制を強化した。

① 圧入停止後の熱交換器からアミン溶液漏洩が発生した経緯等について

表 5.5-1 に発生状況を示す。

表 5.5-1 発生状況

2018/5/25（金） 13時45分	PSA オフガス受入停止（定期保全のため圧入停止。再開は7月下旬を予定）
5/26（土） 12時40分	設備全停止に向けアミン溶液冷却循環運転開始
5/27（日） 5時25分	運転員が熱交換器（11E-001）からアミン溶液が漏洩し、防液堤内に溜まっていることを発見。直ちに冷却循環運転を停止し、漏洩は止まった。漏洩量：約15.5 m ³

JCCSでは、現場での事後処置として、防液堤外の土壤汚染がないことの確認および漏洩したアミン溶液の処理を直ちに実施し、防液堤内アミン溶液を水中ポンプで地下タンクに回収後、防液堤内を洗浄、洗浄水も地下タンクに回収した。5月28日、回収アミン溶液および洗浄水は、産業廃棄物運搬処理業者にてローリー車に汲み出し運搬、適正に処理した。

JCCS は、公害防止協定に基づき、5月29日、北海道苫小牧地方環境監視室および苫小牧市環境衛生部環境保全課に漏洩事案を報告し、その後、道や市の立入調査が実施され、土壌汚染がないことの現地確認を得た。

現地において、熱交換器の運転履歴と現地開放点検による調査を実施した。今回の漏洩原因は、前年の2017年12月に実施した熱交換器の現地開放点検において、組付けの際の施工不良と推測され、その要因は、寒冷時期による屋外作業環境、不十分な点検・再組み込み設備環境、時間制約による突貫作業がガスケットの取付け不良を誘発させた可能性が示唆された。

この間、苫小牧漁協に対しては、漏洩したアミン溶液は防液堤内に留まったため外部環境への影響なしと判断し、報告に及んでいなかったが、漏洩発生から3日目の第1報・報告となった。

② 地元関係者からの指摘事項について

地元関係先は下記の通りである。

- 1) 北海道苫小牧地方環境監視室
- 2) 苫小牧市環境衛生部環境保全課
- 3) 苫小牧漁業協同組合
- 4) 鷗川漁業協同組合
- 5) いぶり中央漁業協同組合
- 6) 室蘭漁業協同組合
- 7) 胆海共第26号・第27号共同漁業権共有管理委員会
- 8) 北海道漁業協同組合連合会環境部、室蘭支部
- 9) 北海道胆振総合振興局産業振興部水産課

苫小牧漁協から「OBCの屈曲、埋設深度未達時の対応と同様に、JCCSの体質に関し、危機管理等に問題があるのではないかと。即時の第一報を受ければ、苫小牧漁協サイドでも直ちに緊急体制を敷くことができるが、こうした報告の遅れがあるようでは過去のOBC埋設不具合時の対応と同じで、基本的な手順を間違っており、この間、何度も確認を求めてきたはずの相互の信頼関係を損なうものである。」との指摘を受けた。

③ 再発防止のための対策について

a. CCS施設管理体制を強化

今後、熱交換器の開放点検は、必ずメーカー工場に搬入し薬液洗浄、ガスケット交換

を行い、気密試験による健全性を確認した後に、現地搬入取付けを実施する。また工場での作業には十分な時間を確保する。併せて、漏洩早期検知のための対策として、冷却循環運転中の熱交換器は、点検巡回頻度を上げ巡視強化を行うことで早期検知に努めることとする、等の作業手順書・マニュアルの整備を行った。

b. 緊急連絡体制の強化

本事業設備現場操業に係る重要事項に関する臨機応変の判断を可能とする観点から、2018年7月、JCCSとして相応の職務権限を有する者、常務取締役プラント本部長を緊急時連絡体制に組み込むこととし、苫小牧漁協との間で臨機に緊密な情報共有に努めることとした。

(4) 事例Ⅳ 平成30年北海道胆振東部地震発生後の会社見解公表に係る事前連絡遅延について

2018年9月6日、圧入停止中に「平成30年北海道胆振東部地震」が発生した。JCCSは翌週9月12日にCO₂貯留層の圧力・温度のモニタリングデータを開示したうえでCO₂の漏洩は生じていない旨の会社見解をJCCSホームページに公表するも、地元関係者への説明は公表翌日となった。

翌10月19日、有識者検討会を開催し、報告書を取りまとめ、地元説明を経て、2018年12月、圧入を再開に至った。

① 平成30年北海道胆振東部地震発生時、会社見解の事前連絡遅延の経緯等について

9月6日の本地震の発生に伴い、社内規程に沿った対応を行うとともに、次のように関係先への報告や情報開示を逐次、実施した。

3:07 地震発生により、当直運転員は、まず、避難、人員点呼、情報収集を行った後に、点検リスト（「自然災害対策要領」において点検すべき箇所を定めたもの）に従い、現場点検を実施し、「地上設備」の事故・災害、設備異常がないことを確認して、苫小牧 CCS 実証試験センター長に報告した。

7:03 本社貯留技術部長、追ってプラント本部長より経済産業省産業技術環境局地球環境連携室、NEDO 環境部に対し、プラントに異常がない旨の第一報を社内規程に従い、メール送付した。

8:00 「点検リスト」以外の安否確認、設備や建屋、構内全域についても異常がないことが確認できたため、改めて「点検結果、人的、設備の物的被害、異常が認められない」ことを苫小牧 CCS 実証試験センター長から本社プラント本部に連絡した。

8:50 苫小牧漁協、9:00 苫小牧市産業経済部、9:15 北海道漁業協同組合連合会に苫小牧 CCS 実証試験センターより、「設備異常がない」旨の第一報を携帯電話で行った。

9:37 JCCS ホームページのお知らせに地上設備に異常がないことを掲載した。以降、地元関係先に対して「設備異常がない」旨の第一報を逐次、実施した。

9月12日 19:40、JCCS ホームページのお知らせに CCS と本地震に関する見解を掲載した。

9月13日、震源がモニタリング範囲以外であり、社内規定では情報開示しないが、適切な情報を適宜提供する観点から、苫小牧漁協、苫小牧市産業経済部、北海道漁業協同組合連合等の主な地元関係先にお知らせの内容を連絡した。

② 地元関係者からの指摘事項について

地元関係先は下記の通りである。

- 1) 苫小牧市産業経済部企業立地推進室企業立地課（現：企業政策室港湾・企業振興課）
- 2) 苫小牧漁業協同組合
- 3) 北海道漁業協同組合連合会環境部
- 4) 北海道経済産業局エネルギー対策課
- 5) 北海道産業保安監督部電力安全課
- 6) 北海道胆振総合振興局産業振興部商工労働観光課
- 7) 北海道苫小牧地方環境監視室
- 8) 苫小牧市環境衛生部環境保全課
- 9) 苫小牧消防署

苫小牧漁協から、以下の指摘を受けた。

「本事業実施エリアに近接しての地震発生は、かねて本事業に入る以前から懸念してきた事態であり、周辺漁業者として、特に地震による CO₂ 貯留層からの漏洩有無に関する情報に関しては、ことさら過敏にならないければならないことは、理解しているはず。」

「本件事態においても、26・27 共有管理員会の 4 単協の構成組合員、浜の漁業者から疑問、懸念が出た際には、正確な情報を適時に開示し、丁寧な説明で答えていかなければならないが、JCCS から何の事前連絡もなくこうした会社見解を一方的に示されては、苫小牧漁協執行部としても対応が後手に廻ってしまわざるを得ない。一つ対応を誤れば強い反発を招くことにもなりかねない。プレスリリースに関しては、事前連絡が必

須条件である。」

③ 再発防止のための対策について

a. 危機管理に係るマニュアルの体系の整備

本事業の開始にあたっては2016年4月の圧入開始前に、発生しうる危機に必要な対応措置等の想定に基づき、災害等発生時取るべき措置についてルール化した規程を整備していた。体系としては、危機管理基本マニュアルを中心に、事業形態（地上設備・地下貯留層・広報）毎に危機管理のマニュアル体系（図5.5-3）を整えており、今回の地震発生時においても本マニュアルの体系が適用され、これに沿った対応を行った。

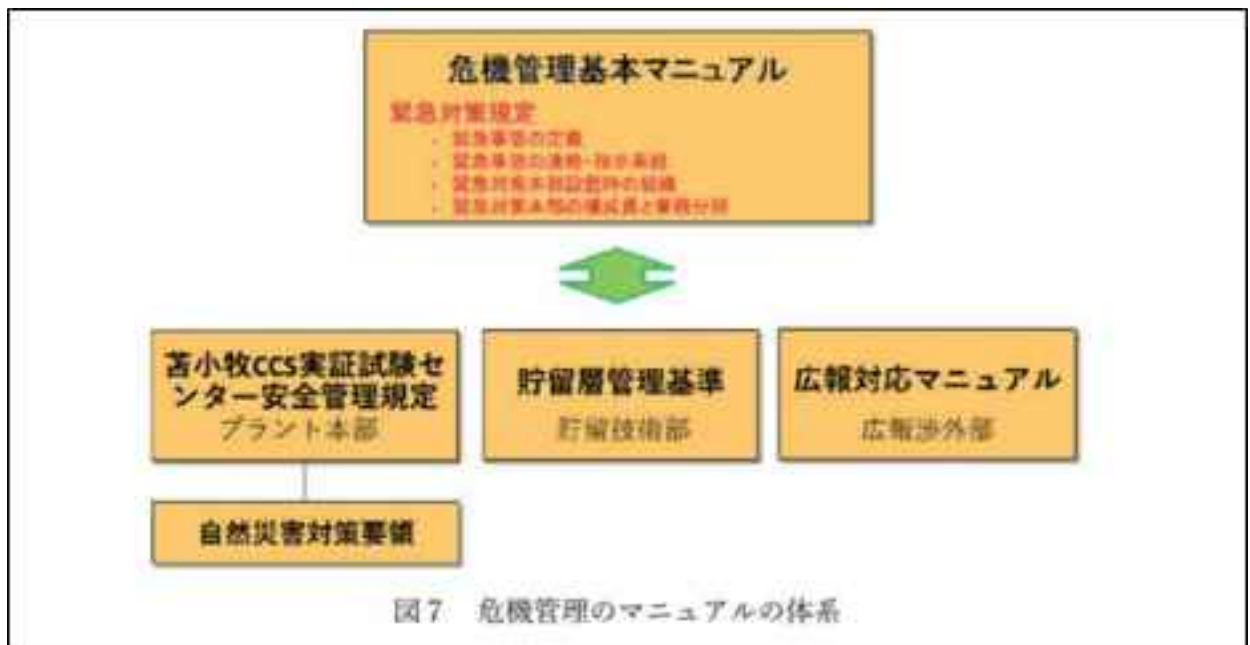


図 5.5-3 危機管理のマニュアルの体系

b. 有識者委員会の開催、報告書のとりまとめ

2018年10月19日、課題検討会による委員構成に加えて、地震学等の専門家を含む有識者からなる検討会（出席委員合計13名）を開催し、「北海道胆振東部地震のCO₂貯留層への影響等に関する検討報告書」をとりまとめた後、地元説明を経て2018年12月、圧入を再開した。本報告書はJCCSホームページでも公開し、製本したうえで関係方面の求めに応じて広く配布、活用している。

c. 緊急連絡体制の強化、CCS 施設管理体制を強化

本事業設備現場操業に係る重要事項に関する臨機応変の判断を可能とする観点から、JCCS として相応の職務権限を有する者を現地苫小牧 CCS 実証試験センターに配置し、緊急時連絡体制を強化する（図 5.5-4 参照）ため、常務取締役プラント本部長を同年 10 月 15 日より常駐することとした。以降、苫小牧漁協との間で定期（2 回/月）および必要に応じて緊密な情報共有に努めることとした。

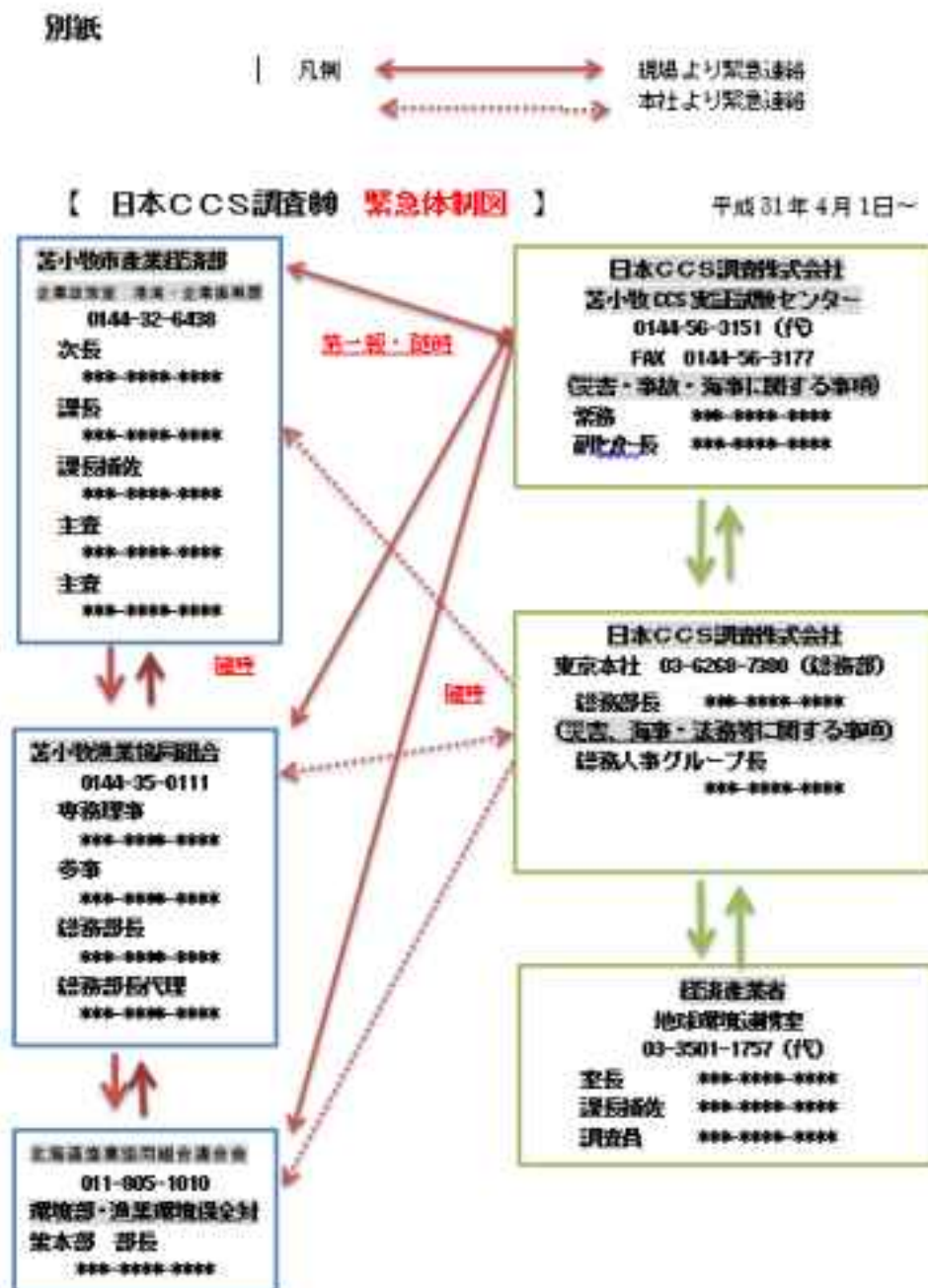


図 5.5-4 改訂した緊急体制図（個人情報・省略）

d. 連絡項目の見直し

本件対応を機会として、JCCS では、「苫小牧 CCS 事業の実施に伴う漁業活動との調整に係る特定情報取扱規程」を制定し、2015年11月25日付、26・27 共有管理委員会（事務局・苫小牧漁協）が経済産業省産業技術環境局地球環境連携室との間に取り交わした「苫小牧西港区周辺海域における二酸化炭素ガスの海底下貯留に係る同意書」（以下、「同意書」と称する。）の規定に基づき、同意書の条件が満たされていることを、苫小牧漁協が継続的に確認できるよう、表 5.5-2 に定める重要事項について、事前の情報共有、報告に最大努力することとした。

表 5.5-2 重要事実等一覧表

対象事項	主管部	備考
<p>1. METI による海洋汚染防止法の許可条件の変更または新たな許可申請に関する事項 <u>実施位置・範囲、圧入期間・モニタリング期間、圧入対象層・圧入量の変更または新たな許可申請に関する事項等</u></p>	<p>技術企画部、 貯留技術部</p>	<p>海洋汚染防止法の許可条件</p>
<p>2. METI への同意書に記載の条件及び関連する事項</p> <p>① 貯留した CO₂ の漏出による海洋環境への影響（海洋生物の状態や海水の化学的性状の変化等）の懸念が発生し、漁業活動への支障が生ずると想定される場合</p> <p>② 定期モニタリング（海水の化学的性状や海洋生物の調査、井戸の圧力温度の常時観測、地震計による微小振動や自然地震の常時観測、弾性波探査による地層の状態の確認等）の実施、モニタリング結果の年度ごとの遅滞ない報告</p> <p>③ 漁業活動との調整（漁具の移設や撤去等）が必要な調査（弾性波探査等、<u>モニタリング機器に係わる海域での工事・保全作業を含む</u>）等を実施しようとする場合</p> <p>④ 事業計画の変更や H33 年度以降の事業計画の策定を行う場合（<u>前項上の場合</u>）</p> <p>⑤ <u>貯留地点に近接した地域での地震等の自然災害が発生するなど、不測の事態が生じた場合（不測の事態による影響並びに事後対処を含む）</u></p> <p>⑥ その他、本件に関連した事項（<u>当社により 2.①～⑤関連のプレスリリース、ホームページへの掲載を実施しようとする場合など</u>）</p>	<p>貯留技術部、 技術企画部、 広報渉外部、 総務部</p>	<p>H27.11.25、委員会による METI に対する同意条件 ・海水の化学的成分の移行基準超過に関する事例は、2.①、②の該当事項と認識。</p> <p>・OBC 埋設深度に関する事例は 2.③の漁業活動との調整が必要な海域での工事に付帯する事項と認識。</p> <p>・北海道胆振東部地震に対する見解の事例は、2.⑤の不測の事態が生じた場合への事後対処に係る事項及び⑥事項と認識。 なお、下線部については、同意書の記述内容に追加したものを。</p>
<p>3. 火災・災害等の発生による圧入作業の中断、再稼働</p> <p>① JCCS 設備等に発生した火災・災害（地震、津波、大雨、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮等の自然災害により生じた設備被害・</p>	<p>プラント本部</p>	

損傷を含む)等により、圧入作業が一定期間中断を余儀なくされる場合 ② ①の設備被害等に起因する大気汚染、水質汚濁、土壌汚染及び地下水汚染に係る排出、漏えい、飛散等、外部環境に影響を及ぼすおそれのある事態が発生した場合		
4. 圧入作業の一時的な停止、再稼働等 ① JCCS設備(CO2分離・回収、CO2圧入)、ガス供給元設備(CO2含有ガス送気)等の不調・故障、及び補修実施等に伴う一時的な圧入作業の停止、再稼働 ② ①の設備の不調等に起因する大気汚染、水質汚濁、土壌汚染及び地下水汚染に係る排出、漏えい、飛散等、外部環境に影響を及ぼすおそれのある事態が発生した場合	プラント本部	・アミノ漏えいに係るトラブル対応は4.②に係る事例と認識。
5. 圧入作業の計画停止、再稼働 JCCS設備、ガス供給元設備の定期補修等の実施による設備の計画停止、再稼働(あらかじめ年度事業計画に織り込まれ、事前に報告済みであるもの)	プラント本部	随時、または定期報告事項
6. 圧入作業を伴う定常運転	プラント本部	随時、または定期報告事項

上表中、4.に該当する一時的なJCCS、ガス供給元設備の不調、トラブル、補修等に起因する事項は事前察知が困難であることから、発生した場合は遅滞なく報告するものとし、5.6項のあらかじめ年度事業計画に織り込まれた事項、または定常運転期間の事項に関しては、随時、または定期報告の中で連絡することとする。

5.5.4 その他、地元関係者との間で、検討課題とされた事例

(1) 海洋環境調査・弾性波探査等モニタリング実施に係る備船手配について

モニタリング期間中、海防法による監視計画のもと毎年四季毎の海洋環境調査および毎年1回実施する繰り返し弾性波探査(二次元、三次元)の実施にあたっては、当該調査のための調査船、並びに海上航行の安全を確保するための警戒船(小型漁船)の配備が必要である。

過去の3年間に当該調査に備船した苫小牧漁協所属の漁船の備船実績は、2016年度146隻、2017年度232隻、2018年度126隻である。

こうした漁船備船に関しては、調査実施者からの苫小牧漁協に対する備船斡旋依頼に応じて、都度、苫小牧漁協が必要な漁船の割当、備船連絡・手配等の実務処理を実施、さらに荒天時には備船待機、再調整(荒天待機:2016年度25日、2017年度29日、2018年

度 29 日) を要するもので、通常の苫小牧漁協業務に加え追加的に発生するため、その事務負担は大きいと、かかるロードの軽減、解消が要請されている。

(2) 海洋環境調査・弾性波探査等モニタリング実施に係る漁業者との調整について

前項モニタリングの実施に際しては、当該海域で実施されている通常漁業操業への支障を回避するため、漁期との調整を図り、休漁期に調査を行うこと、また可能な場合は海域設置の漁具の移動手配等を実施する等、所要の調整が求められる。

何れの調整作業も前項同様に、事務負担の軽減、解消が要請されている。

(3) ホッキ貝の生態系に係る調査の実施について

2019 年度海洋環境調査の実施に伴う海上作業計画に関して、苫小牧漁協よりホッキ貝の身入り減少が 9～10 月分で顕著に表れており、組合員からは作業期間に必要な調整を施したとしても、なお CCS 事業との因果関係に対する不安の声があった。「鮭の漁獲減とともに、ホッキ貝の身入りが減少しているのは事実として受け止めなければならない、貝の身入り減少による収入減の組合員への影響は大きい。」「モニタリング期間終了後の弾性波探査は歓迎したくない、モニタリング期間以降の計画も早く示してもらいたい。」等のコメントがあった。

かかる要請を踏まえ、ホッキ貝の生育状況の調査（軟体部の湿重量測定等）について、次期以降のモニタリング期間中、四季の海洋環境調査に際してホッキ貝の生態調査方法とその規模（個体数等）等に関し、協議のうえ実施することとした。

併せて、海洋環境調査ほかのモニタリング調査自体がホッキ貝の生育状況に直接影響を及ぼしているのではないかと、という漁業者懸念との因果関係を調査するため、2019 年 10 月より 6 ヶ月間・月単位で、四季の海洋環境調査とは別に、JCCS が苫小牧漁協に調査作業を委託して、苫小牧沖東海域においてホッキ貝の生態系調査を実施し、ホッキ貝の身入り等の生育状況の海洋環境調査実施の経時変化を観測することとした。

5.5.5 その他、地元関係者との間で、速やかな報告、連携により情報共有の支障を回避できた事例

(1) 三次元弾性波探査ケーブル紛失

2017 年 7 月～8 月に実施した三次元弾性波探査において、調査海域で海底受振ケーブルの一部が何等かの外力により切断され、一部約 120 m 分を紛失し、海底に残置した。漁具による海底浚い、サイドスキャンソナーによる海底探査により、付近海底を探索したが発見に至らなかった。

同年 9 月、苫小牧海上保安署、苫小牧漁協および苫小牧港管理組合に探索結果を報告し、他に有効な手段がないため探索を打ち切った。同月中にあらためて、苫小牧漁協、海上保安署に対してケーブル紛失の経緯、探索結果を報告するとともに、残置ケーブルにより漁業に支障が生じた際の費用弁済、再発防止策について説明し、了承を得た。

(2) 海洋環境調査アンカーおよびアンカーロープ紛失

2017 年度秋季海洋環境調査期間中の 2017 年 11 月、ROV による海洋生物調査を終了し、調査船船尾側の抜錨作業中に、アンカーロープが何らかの原因により切断された。回収を試みたが、波が高くなりアンカーロープを見失い、アンカーおよびアンカーロープを紛失した。

同年 11～12 月、紛失現場周辺の目視搜索および半径約 500 m 範囲のサイドスキャンソナー探索 2 回を実施したが、発見できなかった。その後、2018 年 2 月、5 月、9 月および 11 月の海洋環境調査実施時に、各々目視および ROV による探索を実施したが、発見には至らなかった。

紛失から時間が経過し、潮流、砂による埋没を考慮すれば、これ以上の探索を継続しても発見可能性は極めて低いものと判断し、苫小牧港管理組合と協議の上、2019 年 1 月に探索を終了することとした。

(3) アミン溶液の漏洩

2019 年 10 月 9 日、CO₂分離回収装置の吸収塔に接続しているセミリーンアミン溶液配管から、アミン溶液が防液堤内のコンクリート床に約 3L 漏洩した。発見時に直ちにウェス拭き取り処理し、外部環境への影響は生じなかった。

道・市環境部局並びに苫小牧漁協、北海道漁業協同組合連合会に即時通報、説明を実施、所要の補修工事を実施後、圧入作業を再開した。

(4) 圧入作業の計画停止、圧入作業の一時的な停止および再稼働

本事業設備またはガス供給元設備の定期補修等の実施による設備の計画停止、再稼働、またはそれら設備等の不調、トラブルおよび補修実施等に伴う一時的な圧入操業の停止に関しては、あらかじめ年度事業計画に織り込まれ、事前に報告済みである場合を含め、発生の都度、または定期的な報告（2 回/月）のなかで、情報共有に遺漏がないよう努めた。

5.5.6 地元ステークホルダーとのコミュニケーションの課題と対応のまとめ

本事業に着手して以降、この間、JCCS では当該対応が地元関係者に及ぼす影響等を十分に斟酌できず、結果、地元関係者、特に苫小牧港湾利用関係者に対して即時の報告、連

絡、説明が遅延することとなった事例が関係者より指摘された。

このような事例に対し、JCCS では、設備操業上のトラブル等に対しては、定期点検の実施方法、手順に改善を図り、点検巡回頻度を上げ巡視強化を行うことで危険の早期検知に努める等、安全管理規程、作業手順書・マニュアルの整備を行い、施設管理体制の強化に努めた。

また、地元関係者からの指摘事項の多くが、緊急時における報告、連絡、説明や JCCS の初動対応の在り方に関してのものであったことを踏まえ、適宜、苫小牧 CCS 実証試験センター、本社組織の業務分掌を見直す等して、緊急連絡体制の改善、強化に努めてきたが、実効性の面で、結果として必ずしも関係先ステークホルダーの期待に応え得るものではなかったといえる。

しかしながら、平成 30 年北海道胆振東部地震後の報告・連絡体制に関する指摘とその見直しに関して、本事業設備現場操業に係る重要事項に関する臨機応変の判断を可能とする観点から、相応の職務権限を有する者を現地苫小牧 CCS 実証試験センターに常駐配置し、緊急時連絡体制を強化するとともに、平常時から定期的な報告、情報共有に努めること、また、併せて「苫小牧 CCS 事業の実施に伴う漁業活動との調整に係る特定情報取扱規程」を整備し、報告・連絡と情報共有のあり方について、具体的な項目を明文化したことで、以降の本事業の運営と対外対応の改善にむけた一定の対応を行った。

また、平成 30 年北海道胆振東部地震後に 1 ヶ月半後に実施した地震学等の有識者による有識者委員会の開催、報告書のとりまとめに関しては、その後の大きな余震発生時への対応を含め、地震による緊急事態に対して、本事業実施者として機動的に対処し、地元関係者に対しても納得性、説得力の高い報告の提供が可能となり、この側面では先鞭となる事例となった。

ここに、地元ステークホルダーとのコミュニケーション実績を踏まえ、事業者における初動対応の在り方、緊急時の報告・連絡体制の実効性を確保するための判断基準等について検証し、今後の本事業の運営、対外対応のさらなる改善に努める必要がある。

については地元地域におけるコミュニケーション活動に関して、社会的受容性の醸成に関する専門家による外部評価を継続して実施し、これまでの活動についての科学的な裏付けのある分析・評価を行うとともに、今後の活動のための提言を受けることを予定している。

外部評価のスケジュール（予定）と内容を表 5.5-3 に示す。

表 5.5-3 外部評価のスケジュール（予定）と内容

(1) 2020年4月～2021年3月（予定）
① 社会的受容性の醸成活動に資するイベントの際に、収集すべき情報項目の提言
② 地元対応活動に対する評価の実施（関係者からのヒアリングを含む）
③ CCS技術そのものに対する地域受容性の分析と評価の実施
④ 報告書の作成

5.6 社会的受容性の醸成活動の総括

5.6.1 CCSに対する国内における社会的受容性の醸成活動の目的・意義

地元地域において、本事業開始前年の2011年より情報発信活動を開始した。2011年時点では、苫小牧市は実証試験候補地の一つであったため、この時期の活動はCCSを認知してもらうことに主眼を置いた。

実証試験の実施が苫小牧市に確定した2012年2月以後は、住民の理解を深めることを目的として、世代別に各種情報発信活動を実施してきた。子ども世代にはCO₂を用いた実験を通して環境問題への興味・喚起を、大人世代にはCCS技術の説明をすることにより、CCSに対する不安を払しょくし、本事業に対する理解を深めてもらうことに注力した。

また、行政が責任を持って関与していることを示すため、CCS講演会等では経済産業省が直接地元住民に進捗を説明し、市役所に設置したモニターで観測データ等を公表すること等により、国や地元の自治体と連携して本事業を推進していることを地元住民に示した。

広く国内へのCCSの認知と理解促進のため、全国的な各種環境関連の展示会等へのブース出展や大学での講義、専門誌等への寄稿、メディア対応を通して、本事業の進捗とCCSの安全性や必要性について発信した。

平成30年北海道胆振東部地震後には、ホームページにてモニタリングデータの公表や有識者による検討会報告書の掲載を行った。また、検討会報告書を用いて現場見学やパネル展等で説明を続けた。

実証試験地である苫小牧市では、実証試験開始前の2011年当時行ったCCSフォーラムにて、実証試験はもとより、CCSそのものに反対の意見を述べる人も見られたが、最近の講演会では、今後はどうするのか、世界で行っているCCSと苫小牧市でのCCSはどのように違っているのか等、質問の質が変わってきた。これは地元地域において、パネル展等直接対話による説明を継続した結果が出てきていると考えられる。

今後、地元地域ではそれぞれのイベントをアンケート内容等も含めて評価し、より深い理解促進のために効果的な活動を継続する。また、他の国内の広い地域では、幅広い世代を対象に、より効果的な周知活動を検討しながら継続する。

5.6.2 地元ステークホルダーとのコミュニケーション

本事業の実施にあたっては、準備段階から圧入操業および圧入後のモニタリングの全期間を通じて、地元住民を中心とした一人一人の事業に対する理解が必要なことは言うまでもないが、加えて、地元地域での事業活動を、安全、安心に地元地域の信頼のもとに推進していくためには、主要なステークホルダーである地元行政としての苫小牧市（産業経済部企業政策室港湾・企業振興課）ならびに本事業が苫小牧西港区沖合の海底面下へのCO₂地中貯留を実施することから、当該海域の利用者としての苫小牧漁協からの支援が不可欠である。

これまでの間、JCCSでは本事業に着手して以降、当該対応が地元関係者に及ぼす影響等を十分に斟酌できず、結果、地元関係者、特に苫小牧港湾利用関係者に対して即時の報告、連絡、説明が遅延することとなった事例が関係者より指摘された。

かかる既往事例に対し、JCCSでは、設備操業上のトラブル等に対しては、定期点検の実施方法、手順に改善を図り、点検巡回頻度を上げ巡視強化を行うことで危険の早期検知に努める等、安全管理規程、作業手順書・マニュアルの整備を行い、施設管理体制の強化に努めた。

また、地元関係者からの指摘事項の多くが、緊急時における報告、連絡、説明やJCCSの初動対応の在り方に関してのものであったことを踏まえ、適宜、苫小牧 CCS 実証試験センター、本社組織の業務分掌を見直す等して、緊急連絡体制の改善、強化に努めたが、実効性の面で、結果として必ずしも関係先ステークホルダーの期待に十分に応え得るものではなかったといえる。

しかしながら、平成30年北海道胆振東部地震後の報告・連絡体制に関する指摘とその見直しに関して、現場操業に係る重要事項に関する臨機応変の判断を可能とする観点から、相応の職務権限を有する者を現地苫小牧 CCS 実証試験センターに常駐配置し、緊急時連絡体制を強化するとともに、平常時から定期的な報告、情報共有に努めること、また、併せて「漁業活動との調整に係る特定情報取扱規程」を整備し、報告・連絡と情報共有のあり方について、具体的な項目を明文化したことで、以降の本事業の運営、対外対応の改善にむけ一定の進捗があったと認識する。

また、平成30年北海道胆振東部地震後に速やかに実施した地震学等我が国の権威によ

る有識者委員会の開催、報告書のとりまとめに関しては、その後の大きな余震発生時への対応を含め、地震による緊急事態に対して、本事業実施者として機動的に対処し、地元関係者に対しても非常に納得性、説得力の高い報告の提供が可能となり、この側面では先鞭となる事例となったのではないかと受け止めるところである。

ここに地元ステークホルダーとのコミュニケーション実績を踏まえることで、事業者における初動対応の在り方、緊急時の報告・連絡体制の実効性を確保するための判断基準等について検証することで、今後の本事業の運営、対外対応のさらなる改善に努めることとしたい。

5.6.3 国際活動の総括

本事業では、2012年度から2019年度の8年間の本事業の国際活動として、日本のCCS技術の国際展開に資する活動を実施することを目的に、本事業の進捗や成果等に関する海外に向けた情報発信活動、CCSに関連する国際的な情報収集、海外組織との国際協力を推進する活動を行った。またこうした活動を推進するため、2016年7月には社内の体制強化を行い適切な対応に取り組んだ。

こうした活動の最大の成果は、人口が密集する都市近傍等の社会的受容性の厳しい環境下でも、CCSが実現可能な技術であることを示し、また事業開始前の2008年からおよそ10年間にわたり積み上げた経験やCCS事業の実施や運営に伴う様々なノウハウを得たことを海外に向けて示したことである。特に苫小牧市長をはじめとする苫小牧CCS促進協議会や地元住民の支援のもと、政府、民間、地元社会が一体となり事業の目標を達成するまでの事業者と地元住民との信頼関係の醸成を通じた社会受容の取り組みは、国際社会からCCSの社会的受容性のモデルと評され、CSLFのアジア・太平洋地域のリージョナルチャンピオン選出の要因となり、本事業の国際的な知名度向上にも寄与した。

また本事業が陸上から海底下の深部塩水層にCO₂貯留を安全に遂行したことを海外に発信したことにより、世界のCCS関係者には、陸域から海底下に向けた深部塩水層貯留という選択肢が安全かつ有効性の高い選択肢であること、社会的受容性の面でも受け入れられやすく実効性が高いオプションであることを示した。

情報収集については、政府がCCS技術の国際展開や、国内産業界へCCS技術の導入とそれに必要な環境や整備に向けた検討を進めていることから、本事業では諸外国のCCSの研究開発の状況や課題、さらに技術導入に向けた政策・法整備の状況等包括的な情報収集を実施し、情報の入手に有効となる海外組織とのネットワークも構築した。とくに国際協力のあり方や将来の日本のビジネスモデル形成において参考となる情報を得るため、米

国とノルウェー政府間のバイラテラルミーティングや、経済産業省が関与する国際イニシアティブである CSLF、CEM、ICEF、IEA の各種会合等にも積極的に協力した。またこれらの成果等は、今後の日本のインセンティブや法整備、ビジネスモデルの研究や形成に必要な情報として整理し、政策検討に活用した。

また技術的な面でも、今後の CCS 事業を検討する際に、有効かつ参考となる分離回収、貯留、モニタリング等の情報も収集した。

国際協力では、5.4.4 に既述の通り、政府の国際協力の指針に従い、多国間、または二国間によるエネルギー協力体制（協力関係）の強化、深化を支援する事等を目的に、米国、欧州、アジア圏諸国等政府と経済産業省との CCS を通じた多国間、二国間協力を促進する政府による活動の支援も行った。

世界では 2050 年の低炭素化を目標とした CCS への取り組みが期待され、そうした中で日本が本事業の構想段階から一連の経験を積んだこと、すなわち事業の立ち上げ方、実施体制の形成、事前調査による貯留地点の選定、仕様・システム設計、許認可プロセス等の経験を得たことを海外に示したことは、CCS 事業を検討中の海外の産業関係者との協力の可能性の拡大にも寄与したと考える。

また石油開発等の既存の技術を適用し、陸上から海域における分離・回収から貯留まで一貫した CCS 技術の実証と 30 万 t の圧入を達成したことは、世界の海域に面する CO₂ の排出事業者に、充実したモニタリング設備の配置による安全な CCS の検討への道筋を大きく切り開き、こうした事業との連携の可能性も大いに高まったと考える。

第6章 法規制対応

本事業の実施にあたり、我が国においては CCS に特化した法令がないため、国内関連法規および海外の法規制状況を調査した。本章では、本事業の法規制対応状況ならびに法規制に関する調査状況および調査結果に基づいた制度上の課題を記述し、法規制対応の総括を示した。

6.1 本事業に係る対応

6.1.1 地上設備の操業に係る法規制対応

地上設備の操業に関しては、国内にある化学プラントと同様な法規が適用されており、当該諸法規に対応するかたちで事業を進めた（図 6.1-1）。分離・回収／圧入運転が開始された 2016 年度から毎年、定期保全工事の一環として、各種法規に基づく法定点検を実施し、所管官庁からの検査証受領により、法規対応の妥当性を確認した。

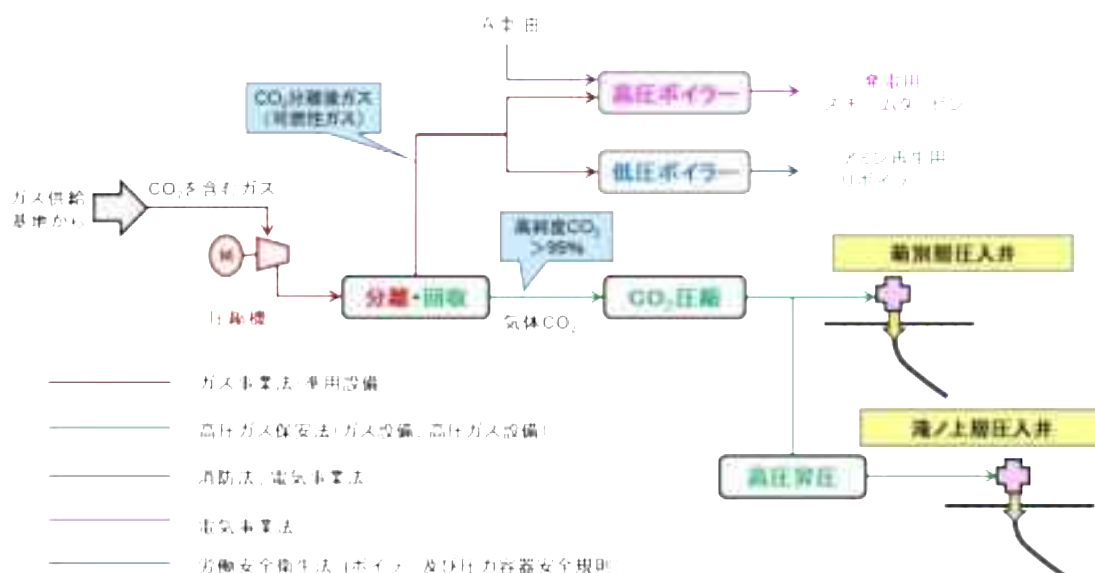


図 6.1-1 地上設備（分離・回収／圧入設備）の適用法規

他方、圧入井から先の CO₂ の海底下貯留に係るプロセスについては、化学プラントの法規とは異なる海洋汚染防止法が適用され、当該法規に係る「監視計画」に基づき、CCS 独自の対応を行った。

6.1.2 圧入した CO₂ ガスに含まれる CO₂ と不純物の濃度測定方法

圧入した CO₂ ガスに含まれる CO₂ と不純物（水素、酸素、窒素、メタン、一酸化炭素）の濃度測定方法の主な検討結果を記す。

検討対象は、CO₂分離・回収設備の運転管理のため、定期的に自動でサンプリングし、プロセスガスクロマトグラフで行う分析とは別に、「特定二酸化炭素ガスに含まれる二酸化炭素の濃度測定の方法を定める省令」（平成十九年九月十九日環境省令第二十二号）

（以下、「省令」と称する。）に従い年1回以上実施し、環境大臣に報告する濃度測定に関わる場所である。省令によれば、CO₂については、日本工業規格 K1106 の 4・3・2 に定めるアルカリ吸収法により、不純物の水素・窒素・酸素については日本工業規格 K1106 の 4・3・1(4)および(6)(a)、メタンについては K0225 の 9、一酸化炭素については K0225 の 7・1 に定めるガスクロマトグラフィー（以下、「GC」と称する。）により、第三者機関で測定するのが基本である。しかし、環境省令に規定された分析方法と第三者機関が通年採用している手法とに違いがあり、キャリアガスの変更、校正ガスの準備、検量線の作成等、分析条件の確立に多大な時間が掛かり、迅速に分析できないことが挙げられた。経済産業省と環境省で協議した結果、下記の省令と実質同等で現実的に対応可能な分析要領で濃度測定を行うことが認められた。

- 1) CO₂濃度は、アルカリ吸収法の一つであるオルザット法を用い、5回繰り返し測定をして小数点以下2桁まで算出する。
- 2) 不純物濃度（水素、酸素、窒素、メタン、一酸化炭素）は、GCを用いて、第三者機関が実質的に省令と同等と判断した分析条件で測定する。
- 3) 2)のGCに用いる校正ガスの濃度設定にあたっては、省令に指定されている校正ガス濃度はあくまで参考とし、作成する検量線の精度を高めるため、実際に分析するガスの濃度の上下それぞれ近傍に位置すると予想される濃度のものを使用する。

この要領に合わせて、CO₂ガスをCO₂分離・回収設備の下流（CO₂圧縮設備の上流）からサンプリングし、海洋汚染防止法に係る「監視計画」に基づきアルカリ吸収法とGCによりガス濃度を測定する方法を確立した。

6.1.3 海洋環境調査に係る対応

海洋環境調査は、海洋汚染防止法に係る「監視計画」に基づき、全12点の調査測点において、採水・採泥等による海水・底質の化学的性状調査や海洋生物の状況調査を四季毎に実施してきた。また、海水の化学的性状に関しては、CO₂の海洋への漏出のおそれを検知する指標として、監視段階の移行基準が設定され、基準超過判定を実施してきた。

本事業中、2016年6月に実施した春季海洋環境調査において、当時の移行基準（旧基準線）を上回る値が認められたため、同年8月に予定していた設備定期保全による中断後

の圧入再開を延期した。その後、一連の追加調査を実施して環境省から特定二酸化炭素の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかったとの見解を得るとともに、経済産業省は監視計画の見直しを実施し、同年 12 月 28 日に監視計画の変更申請を環境省に届出し、翌 2017 年 2 月 1 日に許可されたことから、CO₂ 圧入を 2017 年 2 月 5 日に再開した。

ベースライン調査のみに基づき作成された移行基準では自然変動の影響があることから、2018 年に 2017 年度の海洋環境調査データを追加した移行基準の見直し（新基準線の設定）を行い、同年 7 月 19 日に移行基準を見直した監視計画の変更申請を環境省に届出し、同年 8 月 31 日に許可され、以降は、許可後の計画に従って、新基準線に基づく基準超過判定を実施している。

6.1.4 海洋環境調査に係る今後の課題

本事業において、今後も CO₂ の漏出がなくても自然変動により現行の移行基準超過が発生する可能性があること、底質の科学的調査と CO₂ 漏出監視の関係が不明確であること、海洋生物の状況調査は CO₂ 漏出監視としての有効性が低いと考えられること等の課題が明らかになった。

海洋汚染防止法の次期海洋汚染防止法許可期間（2021 年度～2025 年度）に向けた新たな更新申請手続きにおいては、これらの課題を踏まえて、現行の調査測点数、調査頻度、調査項目の削減等の提案について検討を行う。

6.2 各国法令・動向調査

6.2.1 CCS 規制等のリストアップ

2009 年 8 月に経済産業省が公表した「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」の「まえがき」では、「実証事業を行う事業者は、関連法規を遵守または準用するとともに、本基準を踏まえて適切な対応を図り、加えて、事業を実施するサイトに応じてより詳細な安全性確保のための体制（組織、内規等）を整備することが期待される」と記載されている。

上記を受け、「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」への適切な対応に資するため、2012 から 2019 年度継続して海外の CCS に関する「規制」および「技術基準・ガイドライン」に関する最新情報を入手・整理した。この期間を通じて調査対象とした全ての文献の総数は、「規制」が 42 件、「技術基準・ガイドライン」が 43 件であった。調査対象とした文献はその内容によって、1) 「規制」等に関する文献、2) 「技術基準・ガイドライン」等に関する文献に分類した。1) は、国際条約または各国の国内法等に基づくもので

あり、事業者に対する拘束力が2)に比べて厳しい。2)は、Best Practice Manual等の事業者に対する指針あるいはガイドラインに類するものである。

6.2.2 「異常が発生した場合に採るべき措置」に関わる調査

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」の「9. 異常が発生した場合に採るべき措置」に対応し、国内関連法および異常の判断基準について整理するとともに、異常時対応に含むべき内容について調査した。

(1) 国内関連法

① 海洋汚染防止法

2006年の「ロンドン議定書」の改正により国際的にCO₂の海底下地層貯留が許可制で可能となったことを受け、日本においても2007年に当該条約の国内担保法である海洋汚染防止法が改正され、環境大臣の許可の下にCO₂海底下地層貯留が可能となった。海洋汚染防止法における許可申請時に必要な主な書類として実施計画と監視計画があり、実施計画における異常時対応の記載内容については告示に示されている。さらに、告示をより詳細に解説する指針では、許可申請にあたっては、万一の事態を想定した障害防止計画を立案し、これを勘案して許可の可否を審査するとしている。

一方、監視計画はCO₂の漏出リスクに対応した3種類の計画から構成される。何らかの異常を検出した場合、圧入中止等の緊急措置を講じた後に通常時監視から懸念時監視へ移行し、さらに漏出のおそれが強まれば異常時監視を行いつつ漏出防止措置をとることになる。

② 高圧ガス保安法

「高圧ガス保安法」は、高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、移動その他の取扱および消費ならびに容器の製造および取扱を規制する法律である。ここでいう高圧ガスとは、主に常用の温度において圧力1MPa以上となる圧縮ガスを指し、CCS事業においてはCO₂を圧入するための昇圧設備から坑口直近元弁までが適用される。高圧ガス保安法では、一定規模以上の設備を有する第一種製造者は、災害の発生の防止や災害の発生が起きた場合において、事業所が自ら行うべき保安活動について規定した危害予防規程を定めることとされている。

高圧ガス保安法においては、製造施設等が危険な状態となった場合には、直ちに災害の発生防止のための応急の措置を講じ、またそのような事態を発見した者は、直ちにその旨を都道府県知事または警察官、消防吏員もしくは消防団員もしくは海上保安官に届

け出なければならぬとある。

(2) 異常の判断基準について

「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」では、「異常」の検知に有用な項目として常時モニタリングを行う温度、圧力、微振動に加えて、以下の項目があげられている。

- 1) 圧入井や観測井における圧力または温度の急変
- 2) 弾性波測定や比抵抗測定を通じた CO₂ 漏洩の検知
- 3) 施設または貯留サイトに被害を及ぼす可能性のある強い地震動
- 4) 施設の火災

各国政府や国際機関が定める法規制やガイドラインでは、異常時の対応についての記載があるものの、異常の判断基準については確認することができなかった。一方で、プロジェクトベースの文献については、米国 Illinois Industrial CCS の 1 件のみで坑口圧力の異常判断基準を 2,380 psi (約 16.41 MPa) と定める等の具体的な数値に関する記載があるものが確認できた。

なお、海洋汚染防止法の監視においても異常が懸念される場合は、懸念時監視、異常時監視と監視体制を強化する仕組みになっているものの、その移行基準については示されていない。

(3) 異常時対応に含むべき内容の検討

海洋汚染防止法では、漏出発生時を「異常時」としており、異常時対応について記載する障害防止計画に以下を含むべきとしている。

- 1) 海洋環境での漏出発生あるいは漏出のおそれが生じる可能性のある想定ケースの整理
- 2) 上記想定ケースごとの漏出防止のための措置内容
- 3) 漏出を未然に防止する、あるいは最小に留めるための安全設備等の説明
- 4) 関連法規に基づく保安計画等。緊急時の連絡体制や訓練等の計画、従業員の安全教育等

上記の海洋汚染防止法の考え方をもとに、海外のプロジェクトベースの異常時対応計画等を参考にし、異常時対応に含むべき内容を表 6.2-1 のようにまとめた。

表 6.2-1 異常時対応に含むべき内容

カテゴリー	項目
漏出時の措置	施設からの漏出時の人体および設備保護を目的とした緩和措置 地層からの漏出時の漏出軽減、緩和措置
漏出の未然防止または最小化のための安全設備等	施設からの漏出を予防・制御する緊急遮断弁等の設備 サイト選定、貯留計画、モニタリング計画等における地層からの漏出予防措置
保安計画	緊急時における事象の緊急度合いの分類 作業員および公衆の安全確保 緊急時のコミュニケーション（緊急連絡網等の通知体制の明確化） 作業員に対する異常発生時の安全教育、訓練 異常発生時に迅速に対応することを目的とした社内、社外協力体制の構築

6.2.3 「周辺環境への影響評価」に関わる調査

ロンドン議定書では海洋投入処分の許可を発行するにあたっての評価の枠組みの一環として、CO₂の漏洩による海洋環境への潜在的影響を評価することが求められている。OSPAR 条約および EU-CCS 指令においても、同様に漏洩の潜在的影響を評価するように求められており、英国の国内法では EU-CCS 指令にしたがって評価をするように定められている。一方、米国 UIC プログラムでは、漏洩による環境影響評価等は求められておらず、貯留層の健全性を説明することのみが求められていた。また、豪州においては、漏洩のリスクは地層評価の一環として検討することとなっており、漏洩による環境影響評価に関する規定は特になかった。

「技術基準・ガイドライン」においては海洋環境への影響についての研究が進められている。代表的な研究プロジェクトの例として、欧州の **Research into Impacts and Safety in CO₂ Storage**（以下、「RISCS」と称する。）があった。RISCS ではさまざまな種類の生物への CO₂の暴露実験が行われており、石灰化を行う生物への影響が大きいことや、藻類等一部の生物の個体数が増加することが確認された。その結果として、種ごとの脆弱性に差異があるため、CO₂の漏出が生物群集の変化に影響を及ぼす可能性があることが示された。

6.2.4 「CO₂圧入・運用時の安全確保」に関わる調査

CO₂圧入に対する坑井の健全性および貯留層の安全性（遮蔽層の破壊等）に関連した運

用条件（圧入圧力や圧入レート）に関する記載を中心に情報収集を行った。その結果、UIC プログラムを除く「規制」や「技術基準・ガイドライン」では圧入圧力や圧入レート等の運用条件に関する具体的な数値が規定されていないことが確認された。これは、貯留サイトの特性はそれぞれ異なるため、すべてのサイトに有効な圧入圧力と圧入レート等の基準を定めることが難しいためであると考えられる。

6.2.5 「圧入する CO₂ の濃度基準」に関わる調査

圧入する CO₂ 濃度の基準に関しては、EU-CCS 指令等の「規制」において極めて高い割合であることといった記載があるのみで、具体的な数値基準を設けた「規制」は存在しなかった。一方で、World Resources Institute が発行する EOR を行うための CO₂ パイプラインに関するガイドラインによれば、濃度約 95% が 1 つの基準であることが確認され、不純物に関しても輸送の観点から一定濃度以下であることが望ましいことが確認された。

6.2.6 「モニタリング」に関わる調査

米国の National Energy Technology Laboratory の文献には、大気、地表付近、地下のモニタリング技術についての解説があった。また、弾性波探査やワイヤーライン検層だけでなく、地下水モニタリングが多くプロジェクトで行われていることが確認された。一方、生物モニタリングや重力探査、電磁探査を行っている事例は少なかった。

沖合の深部塩水層のモニタリング可能性を分析した Scottish Carbon Capture & Storage（以下、「SCCS」と称する。）プロジェクトの報告では、弾性波探査に加えて、モニタリングの目的に応じて異なる地球物理学的手法（電磁探査、重力探査等）を組み合わせることによって、より正確なモニタリングが可能になるとの記載があった。

RISCS の文献では海洋環境におけるモニタリング手法に注目しており、海洋環境ではベースラインデータが変動するため、それに対する理解と微量の漏出を検知する能力が課題となると指摘していた。漏出を検知する方法について、CO₂ が溶解した場合は pH のモニタリングが効果的と指摘していた。

6.2.7 「異常が発生した場合に採るべき措置」に関わる海外規制の調査

RISCS の 1 件のみに、「異常が発生した場合に採るべき措置」に関する詳細な記述があった。

当該文献では、RISCS コンソーシアムによる 4 年間の研究に基づき、CO₂ 貯留サイトからの CO₂ 漏洩の潜在的な影響について結論と提言がまとめられていた。この文献の第 9 章に漏洩に対する緩和策がまとめられており、その中で、断層やキャップロックの破壊によ

る漏洩や地下水中への CO₂ 蓄積等の、海域および陸域における漏洩シナリオが複数想定されており、それぞれのシナリオに対して、圧入停止を含むさまざまな緩和策が整理されていた。緩和策ごとにリスクと不確実性の低減に対する費用対効果を評価し、評価結果に基づいて優先度を定めて、適切な対策を検討することを推奨していた。

6.2.8 「CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項」に関わる調査

(1) ヒストリーマッチングの手法および考え方

ヒストリーマッチングとは、数値シミュレーションモデル構築後、坑井において圧入前に実施されるさまざまな検層等によって得られるデータおよび圧入後のモニタリングデータをフィードバックしてモデルの更新を行い、精緻化することである。地質面から CO₂の挙動を検討するにあたって、水理地質および地質構造についての数値シミュレーションモデルを構築することが必要である。ヒストリーマッチングによって、実測データとシミュレーション結果との乖離を可能な限り小さくし、CO₂挙動予測にあたってのシミュレーションモデルの信頼性向上を図ることが重要となる。

多くの「規制」ではヒストリーマッチングの実施を要件としていたが、実際の手法に関する具体的な記載は見られなかった。これは地層条件等の圧入サイトの状況がサイト特有であるため、一意的な手法や考え方を定めるのが難しいためであると考えられた。

海洋汚染防止法では指針（3-3（1）1）において、海域の状況に関する事項の一つである地層および地質の状況の監視方法の一つとして、新たに取得されたデータに基づく数値シミュレーションがあげられているものの、ヒストリーマッチングについて明確には言及していなかった。

(2) 貯留容量および貯留可能性の評価

ロンドン議定書等の多くの「規制」では、サイトの絞り込み、選定および特性把握の段階における重要な検討事項として貯留容量および貯留可能性の評価を規定していた。

EU-CCS 指令および UIC プログラムでは、サイトの特性把握の一環として、貯留容量や貯留可能性を評価するように求めており、十分な貯留容量を持つことを許可の要件としていた。「技術基準・ガイドライン」においては、モデル計算を使った貯留容量の推定手法が具体的に示されていた。

我が国の海洋汚染防止法では、告示（3. 2（3））において、特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量は、利用可能な最良の手法を用いて、調査および解析した結果を海域選定書に記載することを求めていた。さらに指針（5.（3））によると、選択した廃棄海域の地層が十分な CO₂ 収容能力を有しており、予定する廃棄を確実に実施できることを示す必要が

あるため、廃棄（貯留）海域の地層／地質の特徴の詳細に基づいた数値シミュレーション等により、廃棄した CO₂ の地層中における空間的な広がりや貯留可能容量等を把握し、記載することが必要とされていた。これにより、日本においても、他国と同様に、貯留容量の評価が許可要件として規定されているといえる。

(3) 貯留性状および圧入性に及ぼす地層内での反応性の影響

地層内での反応性について、EU-CCS 指令では貯留サイトの選定のための特性把握にあたって考慮すべき項目の一つとして地層内反応をあげており、米国の UIC プログラムでは坑井の掘削や圧入の許可等において考慮すべき情報として、CO₂ の地下における反応性に関する情報があげられていた。「技術基準・ガイドライン」においては、サイトの情報に基づいて地層内反応を想定しその影響を評価することとしていた。

海洋汚染防止法では指針（5（2））において、廃棄した特定二酸化炭素ガスと廃棄する地層やシール層の成分との相互作用について推定による記述を行うことが求められていた。

(4) 自然地震および誘発地震の評価および影響

EU-CCS 指令等の多くの「規制」では、自然地震および誘発地震の評価影響について、サイトの絞り込み、選定、特性把握および評価の段階で、対象地域の自然地震に関する情報を確認することを許可の要件としていた。米国の UIC プログラムおよび豪州の沖合石油・温室効果ガス貯留法では、自然地震に関する情報が CCS 事業の許可の申請に必要であり、UIC プログラムは参照すべき情報源についても詳細に記載していた。「技術基準・ガイドライン」においては、地震により必ずしも貯留の安全性が脅かされるわけではないとしつつも、そのリスク評価を行うことを推奨していた。

我が国の海洋汚染防止法では省令第 2 条 1 において、特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をするサイトは、地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がない海域と定めている。さらに、告示（3-2（1））では、海底下廃棄をする海域を含む広域の地層の特徴に関する情報を把握することを求めており、指針（5.（1））ではその詳細として、プレート構造、活断層の存在、火山の存在、大規模地震の履歴等、廃棄の安全性に関わるものを中心に整理することを求めていた。

6.2.9 「海洋環境影響・評価」に関わる調査

CO₂ 漏出による海洋環境への影響については、深海底での調査が技術的に困難であることや海洋の生態系の複雑さ等の理由から、影響が未だ不明瞭な部分がある。一方、モデリ

ングの分野が大きく進展していることに加え、生物影響についても海洋酸性化の影響を確認するための多くの実験が行われていることから、生物種ごとの影響や、影響を受けやすい時期といった要因が解明されつつある。複雑な生態系への影響をより正確に理解していくためには、英国で行われた QICS (Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage) プロジェクトのような実際の海洋における漏出実験等を通じて、総合的な影響を評価し、知見を蓄積していく必要がある。

6.2.10 「監視移行基準の検討に資する CO₂ 漏出の考え方」に関わる調査

CO₂ 漏出の考え方については、海洋汚染防止法のほか、EU-CCS 指令においても監視計画策定時に判断基準を設定することが求められていたものの、具体的な設定方法は記述されていなかった。従って、各国における個別の CCS サイトで、ベースラインデータを蓄積して判断基準を設定していくほか有効な手段が見出せない状況である。

天然のトレーサによる CO₂ 漏出検知の手法については、地層中における CO₂ の挙動を監視する際には有効であることが期待できるが、海底面付近で漏出検知が可能か否かは、CO₂ 漏出量、監視箇所におけるバックグラウンドのトレーサ濃度と圧入 CO₂ 中のトレーサ濃度の差異の程度によるものであり、現時点では一般化されていなかった。

6.2.11 「海洋酸性化の監視体制」に関わる調査

海洋酸性化の監視については、世界的にも関心が高い問題であることから、国内外の機関で積極的に調査が行われている。国内では気象庁や水産庁、国立環境研究所、海洋研究開発機構等の機関が定期的な観測調査を行っていた。一方、海外では、米国の NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration) を中心とした研究機関により、沿岸ブイによる測定や、沖合・外洋における全球的な海洋観測等が実施されていた。このような国際的な海洋観測プロジェクトにおいて得られたデータは、国際的なデータ同化プログラム Carbon Dioxide Information Analysis Center (以下、「CDIAC」と称する。) に集約されており、世界的な情報共有が進んでいる。

6.2.12 「5. CO₂ 地中貯留を目的とした坑井の掘削・閉鎖に当たっての安全確保」における坑井閉鎖に関する調査

(1) CCS のための CO₂ 圧入井の閉鎖に関する調査

CO₂ 圧入井の閉鎖に関する「規制」について、米国、英国、EU、豪州の文献調査を行った。その結果、米国の UIC プログラムが坑井の閉鎖作業も含めた具体的な技術要件を示す一方、他国の規制は許認可の枠組みや基本的かつ定性的な要件の提示のみであった。

「技術基準・ガイドライン」としては、ISO（International Organization for Standardization, 国際標準化機構）とカナダの標準化機関である CSA（Canadian Standards Association）による基準において坑井の閉鎖に関する記載が確認され、いずれも坑井自体の閉鎖に関する技術的手順が具体的に示されていた。UIC プログラムの記載内容は、これら「技術基準・ガイドライン」の記載内容に近いものであった。

いずれにしても、圧入井の閉鎖に関する記載内容は、油ガス開発における一般的な坑井の閉鎖に関する内容とほぼ同様、または、それを簡易に表現したものとなっており、技術的には坑井閉鎖後の管理を除いて、油ガス業界の基準・慣習を基本として実施されることが要求されていた。

(2) EOR のための CO₂ 圧入井の閉鎖に関する調査

米国における CO₂-EOR の圧入井は、CCS と同様に UIC プログラムにより規制され、その規制内容は技術的な詳細に踏み込んだ内容となっていた。ただし、UIC プログラムの規制は広く油ガス開発に係る圧入井が対象であり、CO₂ 圧入井に特化したものではなかった。また、油ガス生産井に関する「規制」と比べると、その技術的内容はセメントプラグ（坑井を密閉することを目的として坑井内に設置するセメント）の設置方法等の一部にとどまっていた。これは、ベースとして類似事業である油ガス開発の生産井に関する詳細な法規制・基準が既に存在するためと考えられる。

(3) 沖合の油ガス生産井の閉鎖に関する調査

沖合の油ガス生産井を対象とした「規制」について、米国、ノルウェーおよび英国では事前の承認の下で適切な廃坑が実施されるよう規定されていた。中でも米国はその規則において、閉鎖作業に関して最も詳細に技術的な要件を示しており、パッカーとブリッジプラグに関しては米国内の産業基準である API の規格に適合することを求めている。ノルウェーおよび英国では、必要な手続きや定性的な要件を示したうえで、技術的な詳細についてはそれぞれ NORSOK 規格、Oil & Gas UK ガイドラインを参照するものとしていた。

「技術基準・ガイドライン」を含めた坑井の閉鎖に関する規制内容はいずれの国も類似しており、セメンチングおよびプラグの適切な実施方法について、数値基準も含めた詳細な基準が確認された。米国はその「規制」において、プラグ方法や撤去後の海底面の障害物撤去確認方法等について詳細に記述していた。ノルウェーおよび英国では、坑井閉鎖の主な目的である対象層を確実に隔離し、坑井を介した流体の移動を防止するための技術基準を詳細に記載していた。英国では、廃坑の際にリスクをベースとしたセーフティケース

の提出とその内容を規則で規定していたことも特徴的である。

(4) 坑井の閉鎖に関する海外の法規制や技術基準

CCS のための CO₂ 圧入井、EOR のための CO₂ 圧入井、沖合の油ガス生産井、の三つの種類の坑井について、その閉鎖に関する米国および欧州等を対象として海外の「規制」や「技術基準・ガイドライン」の内容を整理した。

米国における CO₂-EOR の圧入井は UIC プログラムにより規制され、その規制内容は技術的な詳細に踏み込んだ内容となっている。沖合の油ガス生産井の廃坑に関して、米国、ノルウェー、英国の法規制・技術基準では、セメンチングおよびプラグの適切な実施方法に関する数値基準も含めた詳細な基準が確認された。各国とも法規制により、坑井の閉鎖に関してその計画から実施に至るまでの具体的な作業内容を規定していた。加えてそれらの法規制と強く連携した産業界の技術基準がその実施方法を詳細に解説しており、事業者はこの「技術基準・ガイドライン」に従って坑井を閉鎖すればよい。ただし、CCS のための CO₂ 圧入井の閉鎖に関しては油ガス開発関連の「規制」と「技術基準・ガイドライン」をベースに作成されており、「使用する資機材は CO₂ に耐性を持つこと」といった程度の記述しか確認できなかった。

(5) 海底下への CO₂ 圧入井の閉鎖に関する国内法

坑井の閉鎖に関する技術基準として、我が国の鉱山保安法と温泉法の関連文書を調査した。鉱山保安法において、油ガス生産に係る坑井（生産井および EOR のための CO₂ 圧入井等）を対象とした坑井の閉鎖に関する明確な規定が定められていた。「鉱業権者が講ずべき措置事例」および「石油鉱山の坑井の廃止に関する措置基準の解説」に坑井閉鎖の方法が示されていた。

温泉法では温泉井戸および地熱井を対象とし、事業を廃止した際には届出と埋戻しを行うことが求められているが、その具体的な内容については定められていなかった。

6.2.13 圧入終了後のモニタリングとその現状に関する調査

米国の Illinois Industrial CCS プロジェクト等の多くの CCS プロジェクトにおいて、圧入終了後には、三次元弾性波探査、坑底の温度圧力、環境モニタリングといったモニタリング技術が採用されていた。廃坑後のモニタリングについて具体的な計画を確認できたのはいずれも海域のプロジェクトであり、三次元弾性波探査と音響探査によるモニタリングが計画されていた。実施頻度は、数年に一回や異常検知時のみと限定的であった。米国およびカナダの大規模プロジェクトでは、圧入終了後も廃坑せずに坑井を用いた数十年間

のモニタリングを実施し、規制当局から許可を得られ次第、廃坑するといった計画であった。

圧入終了後のモニタリングでは、稼働中のモニタリングの一部を継続し、廃坑後のモニタリングは、さらに項目と頻度を限定する事例がいくつか確認された。また、廃坑までの期間がプロジェクトによって異なることが確認された。

6.2.14 プロジェクトリスクに関する調査

CCS プロジェクトのリスクマネジメントとしては、プロジェクト全体に対するリスクを対象としたものと、貯留のリスクを対象としたものに分けられる。プロジェクト全体に対するリスクに対しては、リスク登録簿を作成しリスクマネジメントを実施している事例がいくつか確認された。リスク登録簿にはリスクの詳細、リスク所有者、対応策といった情報が含まれており、これらは定期的に更新されるとともに、プロジェクト関係者に共有される仕組みであった。また、リスクマトリクスを用いて、可能性および影響の大きさという二つの要因によってリスクの評価を行っていた。

貯留のリスク評価に対しては、様々な背景や状況からリスクシナリオを想定した上でリスクの評価を行い、対応策やモニタリング計画を検討するといった事例が確認された。リスクの評価結果に対しては、専門家によるレビューを受けることが一般的であった。

6.2.15 CO₂ アカウンティングに関する調査

CO₂ アカウンティングとは、事業活動における CO₂ または温室効果ガスの出入りを算出することであり、大きく分けて排出量を算定するものと、削減量を算定するものに区分される。前者は、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change、IPCC）のインベントリガイドライン、米国の GHG Reporting Program や欧州連合域内排出量取引制度（European Union Emissions Trading System、EU-ETS）における算定、日本の温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度（SHK 制度）等においてその手法が整備されていた。後者は、クリーン開発メカニズム（Clean Development Mechanism、CDM）に代表されるように、削減に伴うクレジット取得が主な目的であり、それぞれのクレジット制度に即した算定手法が整備されていた。CO₂ 貯留に関する算定の焦点は主に漏洩や散逸等の CO₂ の直接的排出であり、事前に準備されたモニタリング計画に従って排出量が算定されていた。

ISO/TC265, Carbon Dioxide Capture, Transportation and Geological Storage (CCS) が発行した CO₂ の定量化および検証に関する技術報告書によれば、CCS および CO₂-EOR プロジェクトにおける排出量の定量化に関する課題として、長期的な貯留性能と貯留層か

らの漏洩リスクについて一部の算定手法を除き算定に反映されていないこと、算定手法により報告対象範囲が異なること、定量化のためのベースラインの設定等があげられていた。

6.3 制度上の課題

我が国においては、CCSに特化した法令はないが、日本初のCCSプロセスを一貫して行うCCS実証試験の実施に際し、環境保全、安全確保等を目的として、本事業の設備操業に係る各種法規制に対応した。具体的には、CO₂分離・回収設備は、高圧ガス保安法、労働安全衛生法、ガス事業法等が適用され、圧入・貯留設備と圧入時の安全基準等は、鉱業法、鉱山保安法に準拠し、CO₂の海底下廃棄（地中貯留）については、6.2節に示す海洋汚染防止法が適用されている。

この内、圧入・貯留設備と圧入時の安全基準等で準用している鉱業法、鉱山保安法は、油ガス開発の貯留層からの生産が対象であるのに対し、CO₂貯留の場合は、貯留層へのCO₂の圧入であり、圧入管理基準のような適用可能な項目が存在しない。そこで、経済産業省が公表した「CCS実証事業の安全な実施にあたって」（2009年8月）に準じた対策を取り、海外のCCS規制および技術基準・ガイドライン等を参考として「CO₂圧入時の貯留層管理基準要領」を作成し適用した。

また、今後CCSの実用化に際しては、国内でCO₂貯留に関し、大きく二点の制度上の課題が顕在化すると考える。

1) 圧入井掘削のための地下の権利

鉱業法では鉱業権がある。CO₂の圧入井の掘削についても、CO₂貯留を含め地下の利用の権利を定めるべきか検討する必要がある。

2) 貯留地点および貯留CO₂に係る長期的責任

我が国では、長期的責任とその移管の主体が定められておらず、唯一海洋汚染防止法において、CO₂が地中貯留（廃棄）されている限り実施者が監視を続けることが示されている。

一方、実際にCCSプロジェクトが実施されている海外においては、国や地方自治政府の法令等によるCO₂貯留に関する法的枠組みの整備が進んでいる。法的枠組みの形式は多様であるものの、貯留層の探査・アクセス・利用に係る許認可、圧入期間中の圧入・貯留の管理、法的責任の移転に関する規定、モニタリング・報告・検証等の項目が含まれている点は、ほぼ共通である。

また、海外では税控除や補助金などのCCS導入のインセンティブとなりうる制度整備

が国や地方自治政府が主導する形で進んでいる。国内においてもそうした CCS 導入のインセンティブとなる制度整備が課題である。

6.4 法規制対応の総括

6.4.1 本事業に係る対応の総括

(1) 設備操業に係る法規制対応の総括

分離・回収・圧入設備（地上設備）に適用されている各種法規（高圧ガス保安法、ガス事業法、消防法、電気事業法、労働安全衛生法）への対応については、分離・回収／圧入運転が開始された 2016 年度から毎年、定期保全工事の一環として、各種法規に基づく法定点検を実施し、所管官庁からの検査証受領により妥当性を確認した。また、CO₂の海底下廃棄に係るプロセスについては、海洋汚染防止法が適用され、当該法規に係る「監視計画」に基づき対応を行った。

(2) CO₂濃度の測定方法の総括

圧入した CO₂ ガスに含まれる CO₂ と不純物（水素、酸素、窒素、メタン、一酸化炭素）の濃度測定方法について、省令による方法が困難な場合は、省令と実質同等で現実的に対応可能な分析要領が認められた。認められた要領を含め、省令に基づいて CO₂ ガスを CO₂ 分離・回収設備の下流（CO₂ 圧縮設備の上流）からサンプリングし、海洋汚染防止法に係る「監視計画」に基づきアルカリ吸収法と GC によりガス濃度を測定する方法を確立した。

(3) 海洋環境調査に係る対応の総括

海洋汚染防止法に係る「監視計画」に基づき、海洋環境調査を実施したが、CO₂の海洋への漏出のおそれを検知する現行の指標が、CO₂の漏出がなくても自然変動により現行の移行基準超過が発生する可能性があること、底質の科学的調査や海洋生物の状況調査は CO₂ 漏出監視としての有用性が低いと考えられること等の課題が明らかになった。

海洋汚染防止法の次期海洋汚染防止法許可期間（2021 年度～2025 年度）に向けた新たな更新申請手続きにおいては、これらの課題を踏まえて、現行の調査測点数、調査頻度、調査項目の削減等の提案を行うべく検討する。法規制の問題点については、「7.2.2 圧入貯留・監視計画に関する法規整備」にて記載する。

6.4.2 各国法令・動向調査

2009 年 8 月に経済産業省が公表した「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」の「まえがき」では、「実証事業を行う事業者は、関連法規を遵守または準用するとともに

に、本基準を踏まえて適切な対応を図り、加えて、事業を実施するサイトに応じてより詳細な安全性確保のための体制（組織、内規等）を整備することが期待される」と記載されている。

上記を受け、「CCS実証事業の安全な実施にあたって」への適切な対応に資するため、2012～2019年度継続して海外のCCSに関する「規制」および「技術基準・ガイドライン」に関する最新情報入手・整理した。この期間を通じて調査対象とした全ての文献の総数は、「規制」が42件、「技術基準・ガイドライン」が43件であった。調査対象とした文献はその内容によって、1)「規制」等に関する文献、2)「技術基準・ガイドライン」等に関する文献に分類した。1)は、国際条約または各国の国内法等に基づくものであり、事業者に対する拘束力が2)に比べて厳しい。2)は、Best Practice Manual等の事業者に対する指針あるいはガイドラインに類するものである。

また、2012～2019年度の各年度において、「CCS実証事業の安全な実施にあたって」にあげられている9項目からテーマを設定し、国内および海外の「規制」および「技術基準・ガイドライン」を収集・整理し、国内におけるCCSの実施に資することを目的として設定したテーマごとの調査を実施した。

6.4.3 制度上の課題

6.4.1項で示した海洋汚染防止法の見直しの他に、今後のCCS導入に向けて、CO₂貯留に関する法的枠組みの整備が必要である。

海外では、CCS関連法規制が制定されている国や地方自治政府もあり、サイト閉鎖後のモニタリング・法的責任の国や地方自治政府への移転事例がある。一方、国内では、分離・回収には高圧ガス保安法等プラント設備の法令が適用され、海域での海底下地中貯留には海洋汚染防止法が適用されるものの、CCSを目的にした事業法は存在せず、苫小牧CCS実証試験では坑井掘削や圧入は鉱業法や鉱山保安法に準拠した。さらに、CO₂地中貯留に関しては、適用できる項目がなく、新たに「CO₂圧入時の貯留層管理基準要領」を作成し適用したが、圧入終了後のモニタリングおよび坑井閉鎖等、CCS事業に関連する法的な規制体系を構築し、民間参入の障壁を取り除くことが必要である。

また、海外では、税控除や補助金などのCCS導入のインセンティブとなりうる制度整備が進んでおり、国内においてもそうしたCCS導入のインセンティブとなる制度整備が課題である。

第7章 得られた知見と残された課題

7.1 本事業を通じて得た知見

7.1.1 安全性実証

(1) 実証の内容

CCSの実施に当たっては、貯留したCO₂の漏出が起きないことに加えて、自然地震が起きても貯留したCO₂に影響が及ぶことがないこと、CO₂の圧入によって地震が起きることがないことを収集したデータに基づいて検討し、地震に関連する不安を払しょくすることが肝要である。本事業では、安全性に関する実証として、一連の操業を通じてCCSが安全かつ安心できるシステムであることを実証するため、表7.1-1に示す「CCS実証事業の安全な実施にあたって」（2009年8月）に記載された事項への具体的な対策を実施して、妥当性を確認してきた。

表 7.1-1 「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」（2009 年 8 月）
に記載された事項および対策

番号	事項	対策
1	地質的検討	地質構造モデルを用いたCO ₂ 挙動予測および漏洩の可能性等の検討
2	関連施設における保安	関連法規の遵守または準拠（高圧ガス保安法、鉱山保安法等）
3	周辺環境への影響評価	関連法規の遵守（海洋汚染防止法等）
4	坑井掘削・閉鎖における保安	関連法規の遵守（鉱山保安法）および国内外関連法規動向調査
5	圧入・運転時の保安	関連法規の遵守または準拠および圧入・運用における最適化
6	圧入CO ₂ 濃度基準	関連法規の遵守（海洋汚染防止法等）
7	モニタリング	圧入開始前後に実施すべき事項の整理および的確な運用
8	異常発生時の措置	保安設備整備と保安管理体制構築

設備的には、分離・回収・圧縮設備の緊急遮断システム（主要機器、個別機器）を整備し、大規模地震検知による緊急停止、圧入井の緊急遮断弁・逆止弁の設置、ガス検知器（CO₂、可燃性ガス、毒性ガス）等の設置等により、異常発生時に安全かつ速やかな措置を施せるようにした。

貯留技術面としては、CO₂の圧入とあわせて各種モニタリングを実施し、圧入したCO₂

の挙動（移動、広がり）把握、貯留地点近傍および周辺における地震発生状況の把握、坑井内の温度・圧力の観測、海洋環境調査、海域の流況観測、採水・採泥等による水質・底質・プランクトン・底生生物の調査、海底面のビデオカメラ撮影による底生生物の観察・気泡の発生の有無の観察等により、CO₂圧入に伴う異常の有無を監視してきた（第4章参照）。

これらの結果、圧入に伴う地震発生状況の変化が認められないことから地震に対する不安が払しょくされるほか、坑井内の温度・圧力挙動に異常が認められないこと、圧入したCO₂が事前の想定どおりに貯留層内に留まっていること、海洋環境に変化が認められずCO₂の漏出またはそのおそれがある事象がないことを確認した。

上記の確認事項に基づき、本事業によるCO₂圧入は安全に実施されているものと判断している。今後も、モニタリングを継続し、CCS実用化に向けて必要な監視事項の整理および適切な監視計画立案に向けた検討を行っていく。

(2) 平成30年北海道胆振東部地震

平成30年北海道胆振東部地震が2018年9月6日午前3時7分に発生した。地震の規模はM6.7、震源は胆振地方中東部の深さ37kmを震源と気象庁は発表し、苫小牧CCS実証試験センターでも震度5弱相当の揺れを観測した。

苫小牧CCS実証試験センターでは150gal以上の地震の揺れを感知した場合に設備を緊急停止する安全システムを採用している。ただし、平成30年北海道胆振東部地震が起きた当時、苫小牧CCS実証試験センターは、CO₂含有ガス供給元の都合により、9月1日午前2時25分からCO₂含有ガスの供給が停止しており、当該地震発生時には地上設備の操業および圧入は既に停止中であったため、当該地震による緊急停止は生じなかった。また、実証試験設備には当該地震による被害や異常は認められなかった。

萌別層圧入井IW-2および滝ノ上層圧入井IW-1の2本の圧入井については地層の圧力と温度の値を連続観測しているが、一部停電の影響によるデータの欠損はあるものの、復電後にデータの取得を再開したところ、停電前と同じトレンドにあり、過去の圧入停止時と同様であることから、CO₂の漏洩を示唆するデータは確認されなかった。また、圧入地点における微小振動は常にモニタリングしているが、検出されなかった（圧入開始以来検出されていない）。

本事業実施前の2011年に、圧入量75万t（年間25万tで3年間圧入）を実施した場合の地層への影響を評価しており、岩盤亀裂等に沿った滑りが生じる（微小地震が発生する）可能性がないことは確認済であった。また平成30年北海道胆振東部地震発生後に、

圧入実績に基づき CO₂挙動シミュレーションを実施して、当該地震の震源位置での応力変化は地球潮汐力による地殻への圧力変化（数 kPa）の 1/1,000 程度と計算された。

上記については、2018 年 10 月 19 日に開催した「苫小牧 CCS 実証試験に係わる課題検討会」にて報告され、委員の間で CO₂圧入と当該地震の因果関係があるとは考えられないとの共通認識が得られた後、「北海道胆振東部地震の CO₂貯留層への影響等に関する検討報告書」としてまとめて 2018 年 11 月に JCCS ホームページにて公開した¹。

7.1.2 CO₂分離・回収／圧入

2016 年 4 月から 2019 年 11 月までの約 44 ヶ月にわたる、分離・回収、および圧入設備による圧縮の実証試験の結果、主に、以下の知見を得た。

分離・回収エネルギーについては、3 回（2016 年 12 月、2017 年 10 月、2019 年 5 月）の性能確認試験を実施し、アミンリボイラーからの熱損失等を勘案した目標値 1.22 GJ/t に対して、1.16～1.20 GJ/t の実証値を得て目標を達成した。

分離・回収設備の運転開始時に系内に張り込んだアミン溶液については、実証試験期間において、アミン劣化物の除去およびアミンの再生は不要で、アミン溶液の入れ替えも不要であった。アミン溶液の劣化物（熱安定塩）の生成は少なく、CO₂吸収性能（Rich Amine Loading, Semi-Lean Amine Loading）や CO₂放散能力（Lean Amine Loading）の顕著な変化は認められず、溶液性能は安定していた。

圧入設備については、CO₂圧縮機制御システムを改造し、回収 CO₂の流量および圧力の変動に自動的に追従するようにしたことにより、回収 CO₂のベントスタックからの放出がなくなり、回収 CO₂の安定かつ全量圧入が可能になった。また、2 層同時圧入運転の安定的実施が可能なることを実証した。

分離・回収／圧入設備の安全対策については、緊急遮断システム、安全操業、設備の耐震設計、および緊急時の地震対策の面で健全性が実証された。

なお、設備の一部に不具合が発生したが、それらの原因究明と適切な対策を実施し、トラブル事例として文書にまとめた。まとめた文書は社内のデータベースとして扱っている。さらに、回収率と分離・回収エネルギーの相関性把握、更なる分離・回収エネルギーの低減の提案等の成果は、CCS の実用化の際の最適な設備設計に貢献できると考える。

7.1.3 CO₂貯留・モニタリング

萌別層への CO₂圧入は 2016 年 4 月 6 日に開始し、2019 年 11 月 22 日までに 300,012 t

¹ URL : <https://www.japanccs.com/news/北海道胆振東部地震のCO2貯留層への影響等に関する-6/>

の CO₂ を圧入した。圧入性状が良好であったため、PT センサーの測定圧力の最大値は 10.07 MPaG で、萌別層の遮蔽層破壊を避けるために設けた上限圧力 12.63 MPaG に対して十分低く、計画した量の圧入が可能であった。

滝ノ上層への CO₂ 圧入は 2018 年 2 月 6 日に開始した。2018 年 2 月 6 日～2 月 23 日および 2018 年 7 月 31 日～9 月 1 日に試験圧入を実施し、圧入性状が予想したよりも悪かったため、PT センサーの測定圧力の最大値を滝ノ上層の遮蔽層破壊を避けるために設けた上限圧力 38.00 MPaG に対し十分に低い圧力に収まるよう圧入レートを調整したことにより、累計 98 t の圧入にとどまった。事前に想定した溶岩・凝灰角礫岩とは異なり、実際には凝灰岩が主体であったため、火山岩層の圧入性状予測の岩相に起因する不確実性が課題となった。

圧入開始以降、平成 30 年北海道胆振東部地震本震の前後を含めて、貯留地点近傍において圧入との関連を疑うべき微小振動および自然地震は検知されていない。

2017 年度の弾性波探査以降、萌別層における CO₂ 賦存状況が確認され、事前の想定どおりに貯留層内に留まっていることが確認された。圧入した CO₂ は貯留層の上部付近に限定して存在しており、貯留層区間外への漏洩等の異常は生じていないものとする。一方で滝ノ上層への CO₂ 累計圧入量は 98 t と非常に少なく、弾性波探査による CO₂ 賦存状況は確認できなかった。物性変化が、弾性波探査の検知限界未満であったと考えられる。

海洋環境調査については、2016 年度以降の調査結果は、ベースライン調査（2013 年度～2014 年度）結果と大きな相違はなく、またベースライン調査結果から大きく逸脱するような傾向も見られなかった。基準超過判定は、ベースライン調査のみに基づく旧基準線に対して、2016 年度春季、2017 年度夏季、冬季に基準超過の結果が生じたが、確認調査等の結果により、CO₂ の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった。2018 年度および 2019 年度についても、2018 年度夏季以降は新基準線にて超過判定を行っており、基準より高い数値は認められなかった。

これまでのモニタリングにより、CO₂ 貯留層の温度・圧力に異常はないこと、CO₂ の圧入と貯留に伴う微小振動や自然地震の発生は認められないこと、圧入された CO₂ は貯留層内に留まっていることが確認され、長期貯留挙動予測シミュレーションにより、圧入された CO₂ は 1,000 年後も貯留層に留まっていることが予想された。また海洋環境調査により、海洋に CO₂ 圧入開始前からの変化は認められず、CO₂ の漏出またはそのおそれがある事象は確認されなかった。これらモニタリング手法の実証により、本事業の CO₂ が安全に貯留されていることが確認された。

7.1.4 CCSに対する国内における社会的受容性の醸成活動

苫小牧および周辺地域においては、本事業決定の前年の2011年より本格的な情報発信活動を開始した。ひとりでも多くの地元住民に地球温暖化対策の1つに「CCS」という技術があることを知ってもらうため、2011年には市内、周辺地域で22回のパネル展を開催した。本事業の実施地が苫小牧市に確定した後は、本事業について地元住民の理解を深めることを目的として、世代別のイベントを企画し、情報発信活動を実施した。子ども世代にはCO₂を用いた実験を通して環境問題への興味を喚起し、大人世代にはCCS技術の説明をすることによりCCSに対する不安を払しょくし、本事業に対する理解促進に努めた。

このような実証プロジェクトにおいて、地元住民の協力を得ることや更に理解を深めてもらうために重要なことは、事業への行政の関与と、関与しているという事実を地元住民に明確に伝えることである。本事業においては、国が責任を持って実証試験を進めていることを地元住民へ伝えるため、CCS講演会では経済産業省の担当者が直接進捗を説明し、また、地元自治体と連携して事業を推進していることを示すために、市役所に設置したモニターで観測データ等を公表した。これにより地元住民は、責任所在が明確な公の事業であると認識し、事業そのものへの信頼の増幅につなげることができた。

また、地元住民と実施事業者間の信頼関係も重要である。事業者に対しての信頼があれば、事業そのものに対する不安も軽減する。本事業開始当初、「CO₂が漏れたらどうなるのか」「CO₂が漏れても危険はないのか」といった質問がイベントのたびに多数あったが、お互いの意見を述べ合う双方向の情報発信活動を続けたことで、それらの質問が出る頻度が減った。これは地元住民がCCSへの理解を深めるとともに、CCS事業やCCS事業者に対する信頼感が醸成されたことによるものと考えられる。

また、広く国内へのCCSの認知を高め、理解を促進するためには、出来る限り多くの機会を利用し、あらゆる方法や様々な手段を駆使してCCSに関する情報を発信することが必要であり、それを継続して行っていくことが重要である。

7.1.5 海外における情報発信と情報収集

(1) 海外におけるCCSの現況

深刻化する気候変動の脅威に対し世界全体が一致して対応するため、国際社会では2015年のCOP21においてパリ協定やSDGsの理念が掲げられた。各国政府は2020年度からのパリ協定の本格的な運用に伴う野心的な削減目標の達成に向け、脱炭素化に向けた水素等の革新的技術の導入や産業システムの構築等、インフラ整備や制度設計を進めている。

金融分野では、「脱炭素社会」への好循環を促す ESG 投資（環境（Environment）、社会（Social）、企業統治（Governance）の頭字語）を拡大し、企業の脱炭素化への設備投資等、環境面への取り組み等を重視している。こうした脱炭素化への情勢を踏まえ、世界の産業界は大幅な炭素削減が可能となる CCS にも着目し、世界各地で CCS 導入への動きが加速傾向にある。

グローバル CCS インスティテュートが 2019 年の世界の CCS 情報をまとめた報告書「Global Status Report 2019」で公表した 2019 年 11 月現在の世界の大規模 CCS プロジェクトは、操業中プロジェクトが 19 件である。19 件の、合計の分離回収能力は、約 3700 万 t/年に上る。その内訳は米国が 60%、カナダが 14%、欧州が 5%、中国が 2%、その他のプロジェクトの総計が 20%で、分離回収量は米国が最も大きい。産業別では、天然ガス処理が 78%で最も多く、発電が 7%、水素製造が 5%、肥料製造が 5%であった。また EOR と深部塩水層への貯留で比較した場合、EOR が 81%、深部塩水層への貯留が 19%である。天然ガス処理（含、合成天然ガス）、かつ、EOR のケースは 64%、その他のケースは 36%である。またこれら 19 件に加え、4 件のプロジェクトが建設中である。

一方で、IEA が 2019 年に公開した“The IEA’s World Energy Outlook 2019”における持続可能なシナリオ（SDS : Sustainable Development Scenario）では、2050 年までに年間あたりおよそ平均 15 億 t の分離・回収、貯留の実施と、2050 年時点には年間 28 億 t の分離・回収、貯留の実施を達成することが必要であることが示されている。この目標達成には今後 2040 年までに現在の 100 倍規模の CCS 事業の世界的展開が必要となり、IEA はこうした CCS 導入の加速化に向けて、インフラ等の環境や法整備、および投資の拡大等の早急な策を講ずることが重要であることを指摘している。

CCS のプロジェクト数、分離・回収量が最も大きい米国では、パリ協定からは離脱するものの、産業界の CCS の導入の後押しとなる補助金の導入や融資、45Q 等の税額控除等の CCS 導入のインセンティブとなりうる制度の整備を率先して進めている。基本的に CCS 事業は、分離・回収費の大小や EOR か深部塩水層への貯留か等の条件の違いにより、ビジネスモデルや官民のコスト負担の割合が大きく異なる。天然ガスに含まれる CO₂ 処理のように分離・回収費が CCS の費用とならず、また回収した CO₂ を EOR 用に販売し、石油会社が CO₂ を利用して石油を増産している場合は、公的補助がなく商業的に成り立っているプロジェクトが多い。一方分離・回収費が大きい場合や CO₂ を EOR 用に販売できない場合等は、補助金や税額控除制度が重要なインセンティブとなっている。

カナダでは、世界で初めての石炭火力発電所の排出ガスから分離・回収を行う Boundary Dam CCS プロジェクトや、深部塩水層に CO₂ を貯留する Quest CCS プロ

プロジェクト等の商業プロジェクトが稼働している。またカナダ政府は CCU の技術開発を支援しており、小規模の CCU 事業の創生と研究開発への投資の強化を図っている。さらに世界の大規模な CCS の展開の推進を目的として 2016 年に BHP 社と SaskPower 社が設立した Canada International CCS Knowledge Centre を拠点に、中国をはじめとする国際協力や情報発信にも取り組んでいる。

欧州ではノルウェーにおいて世界で初めての CCS プロジェクトが北海の海底下地層貯留層で行われた。ノルウェー、英国、オランダにおいて船舶輸送を伴う CCS プロジェクトの構想が進んでおり、天然ガスからの水素製造や、複数の排出源から回収、集約した CO₂ の有効利用や貯留ポテンシャルの高い北海の海底下地層貯留等を検討している。ノルウェーの Northern Lights プロジェクトでは、事業の大規模化によるコスト低減を目指し、CO₂ の越境受入も検討している。CCS のスケールアップは CCS のコスト低減の重要なドライバーであり、日本が将来の CCS の大規模化を図る上でこうした欧州のケースはモデルケースとなりうる。また英国ではビジネスモデルの研究が 2018 年頃から特に活発化しており、官民の役割分担の提言や、分離・回収と輸送・貯留の事業を分離しコストダウンを図る等、様々なビジネスモデルを研究し、レポートも公開している。オランダの Porthos プロジェクトでは、ロッテルダム港を CO₂ のハブ拠点として複数の排出源から CO₂ を集め、既存海底パイプラインの利用や船舶輸送により、海底下地層貯留を目指している。

中国では 1996 年までに中国中部（オールドス盆地）の深部塩水層に 30 万 t の CO₂ の圧入実証試験を行い、また吉林 CCS プロジェクト等の商業化されているプロジェクトが複数ある。分離・回収の実証試験や CO₂ 利用研究のほか、情報発信にも取り組む等活発な活動をしている。

サウジアラビアでは Uthmaniyah CCS プロジェクト、アラブ首長国連邦では Al Reyadah CCS プロジェクト等、実証プロジェクトや商用化 CO₂-EOR プロジェクトが稼働している。中東では 2020 年にサウジアラビアが議長国を務める G20 の主要テーマでもある CO₂ を有効利用する「Circular Carbon Economy」のコンセプトのもと、CCUS を必須の技術と捉えている。

豪州では、深部塩水層に貯留するプロジェクトとしては世界最大である Gorgon CCS プロジェクトが 2019 年に操業を開始したほか、南オーストラリア州の Santos' Moomba CCS プロジェクト、クイーンズランド州の Surat Basin CCS プロジェクト、ビクトリア州の Carbon Net プロジェクト等の大型プロジェクトの検討が進んでいる。

(2) 日本の CCS 技術の世界への貢献について

こうした世界の CCS の動きの中で、日本が本事業を通じて築いた“日本の強み”は、特に地震多発国である日本の都市近傍において海底下地層貯留を行い、CCS 技術の安全性を確保し、技術を確立したこと、地元や政府の協力を得ながら多くの課題を乗り越えたこと等であり、長期にわたり日本の強みとして国際的な CCS の推進に大きく寄与するものとする。こうした日本の CCS の強みを常に発信していく必要がある。この際、海外の動向把握にも注力し、海外の CCS、CCUS 事業への積極的な関与のタイミングを見極めていくことが重要と考える。

7.1.6 有事対応への備えとしての情報発信

本事業において不測の事故・事態が発生した際、速やかな情報発信を行うべく、報道機関やマスメディアその他社外に対してとるべき対応の原理・原則、心得や考え方、やるべきことの手順と公表基準等を定め、「有事広報マニュアル」を作成した。具体的な情報開示方法として、JCCS ホームページへの掲載、プレスリリース、記者への個別説明、記者会見の 4 つを設定した。

ここで想定する「有事」とは、一般的なプラント運転における事故や地震発生等の自然災害に加えて、CCS 事業に特有のものである CO₂ の漏洩懸念を指す。

2018 年 9 月 6 日に発生した平成 30 年北海道胆振東部地震と、その後 2019 年 2 月 21 日に発生した最大余震後の情報発信においては、「有事広報マニュアル」に沿って速やかに情報発信を行った。また、実際の対応を踏まえ、内容の見直しを行った。

7.2 CCS を実用化するにあたり残された課題および今後の CCS 事業に向けた検討

7.2.1 CO₂ 多排出産業への分離・回収技術の展開

(1) 展開可能な産業分野

国内で早期に CCS を実用化する際の大きな課題の一つとして、経済的な分離・回収技術を適用できる排出源を探し出すことが重要である。分離・回収技術には大きく燃焼前回収 (Pre-Combustion Capture : Pre-CC) と燃焼後回収 (Post-Combustion Capture : PCC) に分類されるが、世界では、Pre-CC と PCC の両方で、すでに年間 100 万 t 程度の大規模分離・回収設備が稼働している。多くは Pre-CC であるが、その理由は、Pre-CC が技術的および経済的に有利な特徴を有するからである (CO₂ 分圧が高い、供給ガスの全圧が高い、還元性ガスが多いので吸収液が劣化しない、処理後のガスを燃焼するため二次公害を起こさない等)。

本事業での CO₂ 排出ガスは製油所からの PSA オフガスを使用し、Pre-CC 技術を採用し

たが、その特徴は以下のとおりである。

- 1) 可燃性の還元性ガスであり、CO₂の他に H₂、CH₄、CO を含有する。この還元性ガスは、水素製造、アンモニア製造合成ガスに類似する。これらの合成ガスはアミン溶液の劣化の原因となる不純物（酸素、硫黄化合物、ダスト等）を含有しない。IGCC（石炭ガス化複合発電）ではガス化やガス精製に多くのオプションがあるが（物理吸収法、化学吸収法）、例えば、空気吹きガス化でスウィートシフト方式（脱硫後の CO シフト）では、合成ガスと同様な組成の還元ガスである。
- 2) PSA オフガスは低圧であるが、本事業では圧縮機で昇圧することによりガス中の CO₂ 分圧を上記製造ガス（合成ガス）と同等の 0.47 MPaA とした。よって、本事業の成果を上記の水素製造やアンモニア製造の分野にも応用できると考える。また、空気吹きガス化でスウィートシフト後のガスは、CO₂ 分圧が本事業と同等となり、本事業の成果を応用できると考える。
- 3) 本事業では、分離・回収エネルギーを従来の Pre-CC 技術（1 段吸収法）の 1/2～1/3 に削減できたので、CCS コストも大幅に低減できると期待する。

本事業の分離回収技術を展開できる可能性を確認するために、本事業の運転条件と水素製造、アンモニア製造、IGCC（石炭ガス化複合発電）の条件を類似の事例として表 7.2-1 にまとめた。

水素製造分野では表に記載した PSA 以外にも湿式吸収法が多く使用され（熱炭酸カリウム法）、さらに、IGCC でもアミン法による Pre-CC が開発段階であるので、今後の CCS 実用化でこれらの産業分野に本事業の成果を応用することは大いに期待が持てる。

なお、この表に示された分野に本事業で得られた分離・回収技術が全て適用できるものではないが、今後、CCS 実用化モデルの経済性検討（Feasibility Study : FS）あるいは基本設計（Front End Engineering Design : FEED）を実施する段階で、多くの本事業の情報（分離・回収エネルギー、設備設計実績、運転実績データ、用役消費量等）を活用できるものと考えられる。

これらの可能性を実現していくためには、今後の CCS 事業者には情報を提供できるシステムの構築（社内情報の文書化、コンサルタント業務、有望な排出源の発掘等）が今後の課題と考えられる。

表 7.2-1 CO₂ 多排出産業への分離・回収技術の展開可能性がある分野

排出源		水素製造	アンモニア製造	IGCC	水素製造
CO ₂ 回収対象ガス		天然ガスの水蒸気 改質合成ガス	天然ガスの水蒸気 改質合成ガス	石炭ガス	PSAオフガス
プロジェクト名		カナダ Quest	標準型	空気吹きFS	苫小牧実証試験
対象ガス条件					
ガス圧力	MPaA	3.00	2.8	1.51	0.91
CO ₂ 入口濃度	mole%	17.00	17.8	23.67	51.60
CO ₂ 分圧	MPaA	0.51	0.49	0.38	0.47
吸収塔出口CO ₂ 濃度	mole%	3.94	0.1	0.03	0.10
CO ₂ 回収率	%	80.0	99.9	99.9	99.9
CO ₂ 分離方法		活性アミン	活性アミン	活性アミン	活性アミン
アミン溶液名称		Adip-X	OASE	Activated MDEA	OASE

(2) 国内での大規模 CCS への展開可能性

海外プロジェクトにおける CCS の規模や大型化技術の信頼性およびスケールメリットによる CCS コストの低減等を勘案して、年間 100 万 t 以上の CO₂ を処理するプロジェクトを、「大規模 CCS プロジェクト」として考える。

(1)で述べた Pre-CC の分離・回収技術を、展開可能な産業分野を国内に限定して大規模 CCS プロジェクトを想定すると、空気吹き石炭ガス化の IGCC が挙げられる。

既に 540 MW（発電端出力）の IGCC 設備が建設中であるが、その CO₂ 排出係数は 650 g/kWh 程度と予測されているため、年間 330 日稼働で計算した場合、年間 CO₂ 排出量は 280 万 t 程度と想定される。

空気吹き石炭ガス化ガスは、還元性ガスを用いたスウィートシフト反応後の CO₂ 吸収塔入口において、ガス圧力（全圧）は 1.5 MPaG 以上の高圧となる場合であれば、CO₂ 濃度は 20% 以上となることが期待できるので、二段吸収法によって分離・回収エネルギーが 0.73 GJ/t-CO₂ まで低減可能であることを期待できる。

また、この二段吸収法による分離・回収技術を展開することによって、石炭 IGCC に CCS を設置した場合でも分離回収エネルギーとして使用する発電用スチームタービンの抽気スチーム量（アミン溶液再生用）および使用電気量（アミン溶液ポンプ動力）を大幅に節約できるため、送電端出力の低下を抑えることが期待できる。

7.2.2 圧入貯留・監視計画に関する法規整備

本事業において、30 万 t の CO₂ 圧入、微小振動および自然地震検知、弾性波探査による CO₂ 賦存状況確認、海洋環境調査による CO₂ の漏出調査、長期貯留挙動予測シミュ

レーションによる長期 CO₂ 賦存状況予測等の実施については、貯留層が今回と同様の条件であれば、技術的に実用化が可能であると判断できる。100 万 t 規模の大規模 CCS プロジェクトにおける圧入貯留についても、坑井数を増やすことで適用可能と思慮される。

適用法規については、我が国においては CCS に特化した法令が存在しないため、本事業実施に当たっては、関連法規制を遵守または準拠することで対応した。地上設備に関しては適用法規が存在し、高圧ガス保安法、労働安全衛生法、ガス事業法等が適用された。一方で、圧入井掘削と圧入時の安全基準等は存在しないため、鉱業法、鉱山保安法等に準拠した。CO₂ の海底下廃棄（地中貯留）については、海洋汚染防止法が適用されている。

本事業から見出された、CCS の事業化にあたっての法規制の問題点を以下にまとめる。

問題点の一つとして、海洋汚染防止法に係る「監視計画」に基づく廃棄した特定二酸化炭素ガスに含まれる CO₂ および不純物の濃度測定方法があった。すなわち、環境省令に規定された分析方法と第三者機関が通年採用している手法とに違いがあり、キャリアガスの変更、校正ガスの準備、検量線の作成等、分析条件の確立に多大な時間が掛かり、迅速に分析できないことがあげられた。そのため、経済産業省と環境省が協議を行った結果、下記の分析条件で濃度測定を行うことが認められた。

回収 CO₂ 濃度はオルザット法で、不純物濃度は GC 法で測定するが、GC 法においては分析の正確性を確保しつつ、水素の分析でキャリアガスにアルゴンを使用、CH₄ と CO の分析ではキャリアガスに市販の高純度窒素（99.999%以上）を使用する等、省令とは異なる方法も採用した。

海洋環境調査においては、海洋汚染防止法に係る「監視計画」に基づき、全 12 点の調査測点において、採水・採泥等による海水・底質の化学的性状調査や海洋生物の状況調査を四季毎に実施してきた。また、海水の化学的性状に関しては、CO₂ の海洋への漏出のおそれを検知する指標として、監視段階の移行基準が設定され、基準超過判定を実施してきた。

これまでの調査によって、今後も自然変動が原因で現行の移行基準超過が発生する可能性があること、底質の科学的調査と CO₂ 漏洩監視の関係が不明確であること、海洋生物の状況調査は CO₂ 漏洩監視としての有用性が低いと考えられること等の課題が明らかになった。海洋汚染防止法の次期海洋汚染防止法許可期間（2021 年度～2025 年度）に向けた新たな申請手続きにおいては、これらの課題を踏まえて、現行の調査測点数、調査頻度、調査項目の削減等の検討が必要である。

実際に CCS プロジェクトが実施されている海外においては、既存法を改正する等、国や地方自治政府の法令等による CO₂ 貯留に関する法的枠組みの導入が進んでいる。法的枠

組みの形式は多様であるものの、貯留層の探査・アクセス・利用に係る許認可、圧入期間中の圧入・貯留の管理、法的責任の移転に関する規定、モニタリング・報告・検証等の項目はほぼ共通である。特に圧入終了後に CO₂ の漏洩がないかのモニタリング等の管理は長期間続くため、民間企業である貯留実施者に何十年も義務を課すのは現実的ではない。海外では 15 年から 20 年、最大 50 年程度で、規制当局に管理義務を移管する制度がとられている例もある。また、税控除や補助金等の CCS 導入のインセンティブとなりうる制度整備が進んでおり、今後日本でも CCS 導入のインセンティブとなりうる制度の整備が課題である。

7.2.3 国内における社会的受容性の醸成に向けた情報発信活動

このような実証プロジェクトにおける社会的受容性の醸成活動の一番の目的は、地元住民の理解を得ることである。7.1.4 項でも記載したが、地元住民の協力を得ることやさらに理解を深めてもらうために重要なことは、事業への行政の関与と、関与しているという事実を地元住民に明確に伝えることである。本事業においては、国が責任を持って本事業を進めていることを明らかにするために、国の担当者が CCS 講演会で直接進捗を説明し、また、地元行政が協力していることを示すために市役所のロビーにモニターを設置して、本事業で得られたデータの開示を実施した。これらにより地元住民は責任所在が明確な公の事業であると認識し、本事業そのものへの信頼の増幅につなげることができた。その上で、事業者への信頼を醸成するために、できるだけ多くの機会を得て対面で技術の説明を行い、安全であることへの理解促進を行った。

また、苫小牧地域の住民は新しいものを受け入れることに比較的柔軟であり、説明に耳を傾ける傾向が高かったため、結果としてはパネル展等の対面での説明が CCS の周知・理解に効果をもたらしたが、今後の CCS の展開の際、特定地域で社会受容性の醸成活動を行う場合は、その地元住民の特性を事前調査等により見極め、その地域に合ったアプローチを検討し、情報発信活動を行うことが望ましい。そしてその上で地元住民と実施事業者とのお互いの信頼関係の構築を行うことが必要である。

さらに、これまで苫小牧地域で実施してきた数々の周知活動の内容や、地元ステークホルダーとのコミュニケーションの実績を踏まえ、外部専門家による評価により事業者における初動対応の在り方、緊急時の報告・連絡体制の実効性を確保するための判断基準等について検証し、今後の本事業の運営、対外対応のさらなる改善に努めるとともに、それらを体系的にまとめることにより、社会的受容性の醸成活動の実績として今後の CCS 展開の際の参考とすることができると考えられる。2020 年 2 月、3 月で実施した、これまでの

数々のイベントでの市民からのアンケート等に対する専門家による分析では、活動自体は評価できるが、その内容の分析と改善が不十分であるとの結果が出ている。また、今後の改善点として、地域事情、当該対象者や対象団体の特徴を踏まえた上で、活動の基盤となる基本方針を策定し、戦略的な企画立案を実施する必要がある等の提言を得ている。

一般的にはまだまだ CCS の認知度は低い。国内の広い地域へは今後も各種環境関連展示会への出展や大学での講義等の周知活動を継続して実施し、さらに CCS を新しく実施する地域においては、行政が責任を持って事業を推進していることを地元を知って頂くこと、本事業で得られた知見を基に地域に合った適正な活動を実施すること、その上で地元住民と実施事業者間の信頼関係を構築することが重要である。

7.2.4 国際活動

2019 年に政府が閣議決定した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では 2050 年までに 80% の温室効果ガスの削減を長期目標としており、その重要な施策として CCS への取り組みと国際協力の重要性が示されている。本事業ではこの目標達成のために重要なマイルストーンとなる 30 万 t の圧入目標を達成し、今後の国際的な技術協力や連携に向け有効となる膨大な知見や経験を蓄積した。また本事業は政府、民間、地元等が一体となり着実な成果を積み重ね、世界で初めて圧入地点近傍における大地震を経験し、その後も事業を継続した世界的にも稀少なケースであるほか、実証した分離・回収、貯留、モニタリング等の一連の CCS システムは、日本の厳しい環境下でも CCS が安全に実現可能であることを示しており、日本の CCS 技術の安全性や取り組みに対する信頼性も獲得した。

現在、世界各地域で水素社会の構想や脱炭素社会に向けた CCS、CCUS の導入・検討が急速に進んでおり、本事業の知見や広報活動による経験を礎としたビジネスチャンスや技術展開の可能性は非常に大きい。これらのチャンスを確実な形にするため、引き続き海外への情報発信による知見の共有を進めるとともに、日本の CCS 技術、企業の国際展開のため、官民の役割分担の協議を開始し、海外事業や組織との連携・協力への着手を早急に進めることが重要である。またこうした海外事業との連携・協力を通じて日本の経験を培い、知見の深化を図ること、さらに日本と海外の共通課題や CCS 事業におけるさまざまな障壁を、国際協力を通じて解決するノウハウを蓄積することが今後の取り組みの主要テーマとなる。

前述のとおり、CO₂ 貯留やモニタリング期間等に関する法的枠組みの整備は、CCS の実用化や導入には必須であり、持続可能な CCS のビジネスモデルや事業推進のための制度

の形成とともに、早急に取り組む必要がある。CCSの法整備やビジネスモデルの概念設計の議論は、海外では先行している現状がある。日本はこうした国際議論に積極的に関与することにより、官民の役割等についても多様なケースから情報を得ることが重要かつ有効である。

特に世界各国と共に早急な温暖化対策を進めるには、経済性を追求するとともに、多彩な発想のもとに柔軟性のあるCCS産業の形成を進めることが重要であり、法律の未整備により国内におけるCCS導入のチャンスが限定されないようCCSのポテンシャルの拡大を見据えた法整備の検討を進めること、2030年には商用化を前提とするCCS導入にスムーズに移行すること、そして世界の温暖化削減に貢献することを目標とする。

おわりに

CCS の個別技術は、産業部門における研究開発や取組等により、更なるコスト低減が必要であるものの、既に確立していたが、苫小牧における実証試験では、それら CCS の個別技術を一貫したシステムとして実証し、累計圧入量 30 万トンを達成した。また、各種モニタリングや海洋環境調査を通じて、CCS が安全かつ安心できるシステムであることを確認した。さらに、事業を通じて操業技術、貯留技術等を獲得した。これにより、国内においても CCS 技術の実用化ができたものと考えられる。

他方で、商用化を前提に、2030 年までに CCS を導入するためには、更なる低コスト化、CO₂ 輸送手段の確立、CCS とカーボンリサイクルの組み合わせによる拠点化、貯留適地の確保、事業環境整備、といった課題が存在する。実証試験で得られた成果を踏まえて、このような課題を解決していくとともに、今回とりまとめた「総括報告書」を国内外の関係者に広く共有することで世界の叡智を結集し、国内での CCS 導入に向けて着実に取り組む必要がある。

CCS は将来の脱炭素化を実現する上で鍵となる技術である。本実証事業に直接携わった関係者のみならず、苫小牧市及び地元関係者の皆様にも、気候変動問題の解決に向けた方策の重要な一端を担っていただいていると認識している。引き続き、苫小牧市や地元関係者のご理解とご協力を仰ぎながら、安全を最優先に事業を進めていく所存である。

苫小牧におけるCCS大規模実証試験 30万トン圧入時点報告書（「総括報告書」）
2020年5月15日 発行

* 本報告書の無断転載・複写を禁ずる。

問合せ先

経済産業省 産業技術環境局 環境政策課 地球環境対策室

〒100-8901 東京都千代田区霞が関1丁目3番1号

電話：03-3501-7830

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310 ミューザ川崎セントラルタワー 電話：044-520-5293

日本CCS調査株式会社

〒100-0005 東京都千代田区丸の内一丁目7番12号 サピアタワー

電話：03-6268-7610

平成30年度

CCS研究開発・実証関連事業／

安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発

平成30年度～平成31年度のうち

平成30年度分中間年報

平成31年3月

二酸化炭素地中貯留技術研究組合

1. 研究開発の内容および成果等

目次

第1章 概要	3
1.1 事業目的	3
1.2 事業概要	3
1.3 実施・推進体制	4
第2章 大規模CO ₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立	7
2.1 要約	7
2.2 圧入安全管理システムの開発	9
2.3 CO ₂ 長期モニタリング技術の開発	27
2.4 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立	37
2.5 大規模貯留層に適したCO ₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立	51
2.6 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発	82
2.7 CO ₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築	100
2.8 リスクマネジメントツールをはじめとする日米CCS協力や海外機関とのCCUS技術開発の連携	113
第3章 大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立	121
3.1 要約	121
3.2 CO ₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立	122
3.3 マイクロバブルCO ₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上	134
第4章 CCS普及条件の整備、基準の整備	142
4.1 要約	142
4.2 CO ₂ 貯留安全管理プロトコルの整備	143
4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS技術事例集の作成、国際標準化（ISO TC265）との連携	149
4.4 CCSの広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討	161

第1章 概要

1.1 事業目的

本事業は、平成32年度末までに、安全かつ経済的な実用化規模のCO₂地中貯留技術を確立するとともに、日本のCCS技術の海外展開、新産業創生の基盤作りを行うことを目的とする。

1.2 事業概要

上記目的を達成するため、大規模CO₂圧入貯留に係る安全管理技術の確立、大規模貯留層への有効圧入・利用技術の確立、およびCCSの普及に向けた環境整備を行っている。具体的には、以下の研究開発を実施している。

①大規模CO₂圧入・貯留の安全管理技術の確立

- ①-1. 圧入安全管理システムの開発
- ①-2. CO₂長期モニタリング技術の開発
- ①-3. 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立
- ①-4. 大規模貯留層に適したCO₂挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立
- ①-5. 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発
- ①-6. CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築
- ①-7. リスクマネジメントツールをはじめとする日米CCS協力や海外機関とのCCUS技術開発の連携

②大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立

- ②-1. CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立
- ②-2. マイクロバブルCO₂圧入技術の適用による貯留率の向上

③CCS普及条件の整備、基準の整備

- ③-1. CO₂貯留安全性管理プロトコルの整備
- ③-2. 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS技術事例集の作成、国際標準化（ISO TC265）との連携
- ③-3. CCSの広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討

それぞれの研究課題の課題の実施目的と実適用イメージは以下の図1.2-1、図1.2-2に示すとおりである。

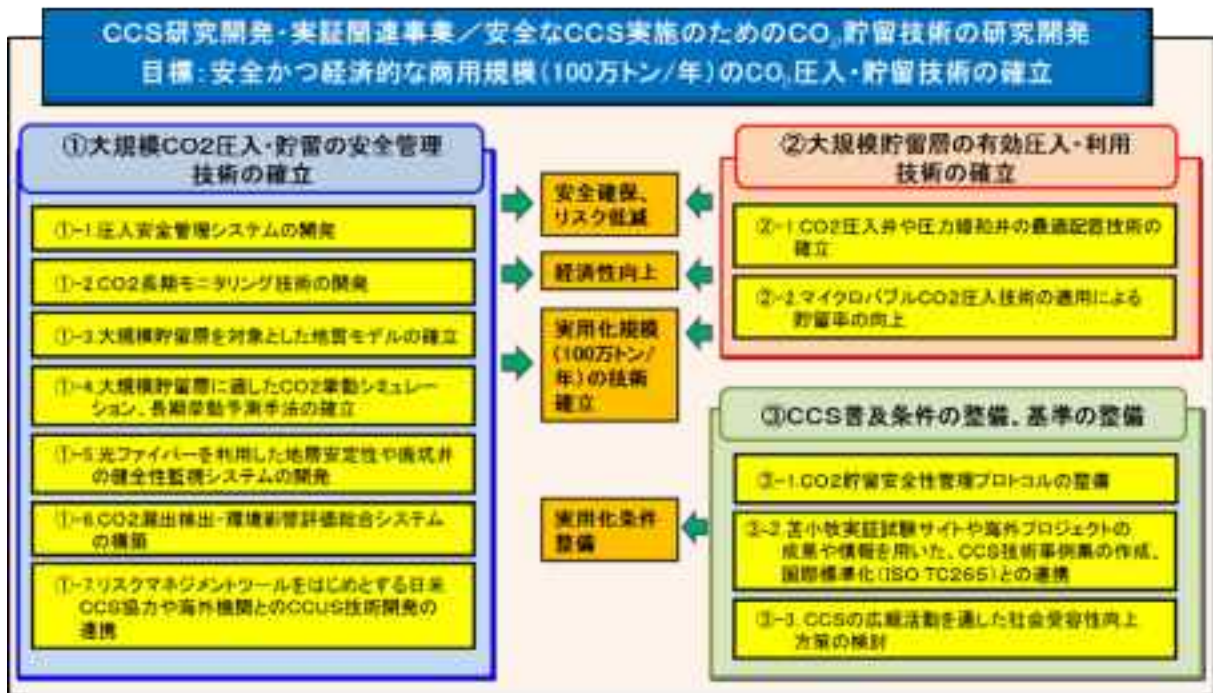


図1.2-1 事業全体概要図



図 1.2-2 事業内容イメージ図

1.3 実施・推進体制

①事業の実施体制

本事業の実施体制を図1.3-1に示す。

プロジェクトリーダーによる全体とりまとめや進捗管理を行うとともに、第三者の有識者委員会による「研究推進委員会」を設置し、進捗状況の確認と技術的な助言を得るなど、計画を適宜改善しながら事業を実施している。

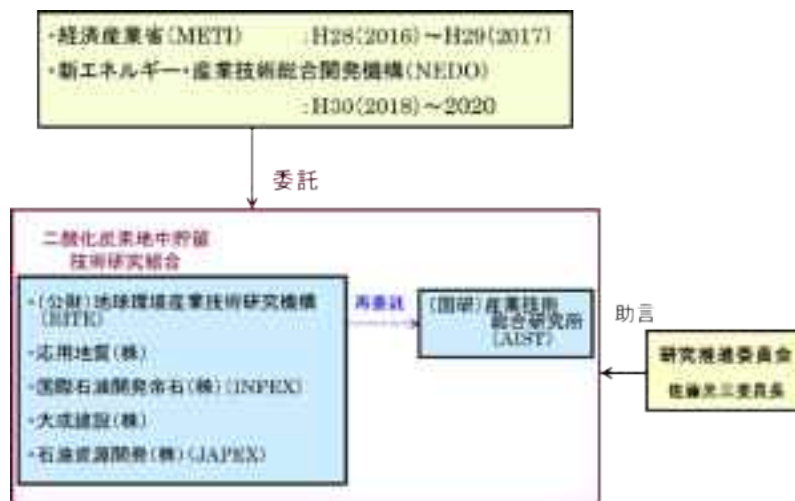


図1.3-1 実施体制

②事業の推進体制

二酸化炭素地中貯留技術研究組合は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE)、国立研究開発法人産業技術総合研究所 (AIST)、石油資源開発株式会社 (JAPEX)、国際石油開発帝石株式会社 (INPEX)、大成建設株式会社、応用地質株式会社により構成される。それぞれの組合員が保有するCCS関連基礎・基盤技術、石油・天然ガスの探鉱・開発・生産技術、物理探査技術、地盤調査技術ならびに大規模数値シミュレーション技術を統合させて研究を進めるとともに、国内外の大学や研究機関等とも協力して推進するなど、総合力を発揮した研究開発を行っている (表1.3-1)。

表1.3-1 二酸化炭素地中貯留技術研究組合における役割分担

研究課題		実施組合員
(1)大規模CO ₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立	①圧入安全管理システムの開発	RITE、JAPEX、INPEX
	②CO ₂ 長期モニタリング技術の開発	AIST
	③大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立	RITE、JAPEX、応用地質
	④大規模貯留層に適したCO ₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立	RITE、AIST、大成建設、応用地質
	⑤光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発	RITE、AIST、JAPEX、INPEX
	⑥CO ₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築	RITE
	⑦リスクマネジメントツールをはじめとする日米CCS協力や海外機関とのCCUS技術開発の連携	RITE、大成建設
(2)大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立	① CO ₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立	RITE、大成建設
	② マイクロバブルCO ₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上	RITE、JAPEX
(3)CCS普及条件の整備、基準の整備	① CO ₂ 貯留安全管理プロトコルの整備	RITE
	② 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS技術事例集の作成、国際標準化(ISO TC265)との連携	RITE
	③ CCSの広報活動を通じた社会受容性向上の方策の検討	RITE

具体的技術課題解決に向けては、技術検討ワーキンググループを構成し、適宜学識経験者や産業界の助言を受けている。

また、CCS実用化に向けた課題を抽出・整理するため、CCSフォーラムを開催し、学識経験者や産業界等の意見を広く吸い上げつつ、実用化のための研究開発を進めている。

第2章 大規模 CO₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立

2.1 要約

本章では、「大規模 CO₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立」の状況について関連する開発テーマ別に報告する。それにあたり、本節では、それぞれの開発状況の要点を紹介する。

(1) 圧入安全管理システムの開発

圧入安全管理システムの基本機能である震源決定機能について、適用する地震計の種類・配置ごとに震源決定精度を分析し、安全管理システムとしての適切な構成について分析・評価した。また、震源決定機能をシステムに組み込み、その動作を検証した。

一方、海外サイトでの微小振動観測結果と苫小牧実証試験サイトのものとを比較し、微小振動の発生に関する我が国の特徴について整理した。また、地熱発電など他分野の圧入管理手法を調査し、参考になる事例を抽出・整理した。

(2) CO₂ 長期モニタリング技術の開発

苫小牧実証試験サイトでの重力モニタリングを継続実施し、安定的な連続データの取得に成功した。また、地下水位変動が重力データに与える影響を推定し、残差が 1 μ gal 以下になることを確認した。さらに、重力観測点周辺で自然電位の連続計測を開始し、降雨浸透に伴い発生する流動電位が主要因と考えられる自然電位変化を捉えることに成功した。

一方、複数の超伝導重力計を用いた並行測定により、機器障害発生時にも連続データ取得を可能とする方法を確立した。

(3) 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立

三次元弾性波探査データと検層データの統合的アプローチ手法として、機械学習により妥当性のある孔隙率分布モデルが構築可能であることを確認し、地質モデリング手法の一般化に向けた可能性を示した。

次に、地質モデルに内在する不確実性評価のため、複数の地質シナリオを想定して CO₂ 圧入挙動シミュレーションを実施した。その結果、三次元弾性波探査データがない領域でのチャンネル分布形態（不均質性）が、CO₂ の分布範囲や貯留層圧力の伝播範囲に大きく影響を与えることがわかった。

一方、広域水理地質モデル構築に必要な解析項目の把握では、広域水理地質モデル概念図を作成した。広域水理地質モデルの構築には、7 種類のイオン濃度を解析項目に選定することにより、地中での存在期間推定に有用であることがわかった。

(4) 大規模貯留層に適した CO₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立

CO₂ 挙動メカニズムを把握するため、コアスケールとフィールドスケール双方のメカニズム分析を行った。また、地化学反応を考慮した大規模貯留層での CO₂ 挙動解析シミュレータに並列化計算機能を組み込み、計算精度、速度の向上を実現した。さらに、CO₂ 流動

と力学応答の連成解析ソフトとして注目を集め始めているECLIPSE-VISAGEについてその性能を評価し、CCSに十分適用できる機能があることを確認した。

また、電磁探査による応答をシミュレーションで確認できる環境整備を目的に、関連する手法の調査と評価を実施し、その有効性を確認した。

一方、CO₂貯留の安全性に極めて重要になる遮蔽層の性能について、地化学反応および化学的浸透性のメカニズムを把握したうえで、その影響評価手法を検討・開発した。

(5) 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発

光ファイバーの設置を新規坑井掘削時に行い、施工方法の妥当性を検証した。また、揚水試験を行い、10 μ ε 以下のひずみも明瞭に計測できることを確認した。さらに、自動計測システム開発を進め、外部からの稼働状況確認や取得データの確認を行えるようにした。

一方、大深度・傾斜井におけるDAS/VSPデータの有効利用法の構築のため、DASデータに含まれるノイズの低減化手法を策定し、さらにDAS/VSPデータによる地下イメージング（地層境界可視化）手法を確立した。

また、遮蔽層に亀裂が存在する場合のすべり現象に関連して、軟岩亀裂・断層モデルを求めるためのコア試験を実施し、浸透率に与える影響のプロトタイプモデルを構築した。

(6) CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築を目指し、生物影響評価データセットの整備、漏出CO₂の拡散シミュレーション手法の開発、CO₂濃度のベースライン調査における観測期間と頻度の設定に関わるデータ・知見の蓄積を進めた。

ベースライン調査における観測期間と頻度について、大阪湾での長期観測データを用いて検討を行い、四季ごとの調査であれば5年前後以上の観測が望ましいという結果を得た。また四季調査の意味を明らかにするために、大阪湾での長期連続観測を開始した。

(7) リスクマネジメントツールをはじめとする日米 CCS 協力や海外機関との CCUS 技術開発の連携

経済産業省-米国DOE間の日米CCS協力の一環として、CCSのリスクマネジメントの検討と光ファイバー計測実証試験を実施した。

リスクマネジメントとしては、米国DOEが開発したNRAPというCCSのリスク評価ツールの有効性を確認した。さらに、地震多発国で地層が複雑など、我が国の特徴に対応して必要となるリスクマネジメントの要件を明らかにした。

一方、光ファイバー計測実証試験を茂原サイトで行い、光ファイバーが坑井周辺の流体移動検知に有効であることを確認した。

2.2 圧入安全管理システムの開発

地熱利用やシェールガス・オイル開発等、地下への流体圧入を行っている分野では、圧入作業と誘発地震発生との関係を監視し、青、黄、赤の交通信号のようなシグナルを出し安全に圧入実施を行うための管理システム（Traffic Light System : TLS）が導入されている。CCS においても同様な圧入管理システムが海外サイトにおいて導入されつつあるが、CO₂は水とは異なり圧縮性が大きいことと、地層水に溶け込むという特徴があるため、既存の TLS にこれらを考慮した機能を付加する必要がある。特に我が国で TLS を導入するためには、人為的活動が活発なため地動ノイズが大きいこと、および自然地震が多い中で微小振動観測を行うこととなるため、我が国独自の圧入安全管理システムが必要である。

本課題では、CO₂圧入に伴い発生する可能性のある微小振動を監視するため、CCS サイトでの微小振動モニタリングを CCS 操業側にフィードバックし、地中への CO₂圧入時の安全性確保を行うための圧入安全管理システム：Advanced TLS (ATLS) の開発を行う。このシステムでは、自然地震や微小振動の観測データだけでなく、CO₂挙動モニタリングおよび海洋環境モニタリングの評価結果、CO₂圧入関連データなどをも含めて総合的な評価を行う。

2.2.1 観測システムの有効性の確認

(1) 各観測システムの比較

苫小牧サイトにおける海域およびその周辺における地震観測網として、OBC、坑内地震計、海底地震計があるが、これらの有効性を確認する目的で、波形の比較、ノイズレベルの確認、自然地震に対する応答の比較を行った。

OBC は計 72 個のうち陸側から 36 番目のモジュール、坑内地震計は OB-1 坑 No.1（最も浅い地震計で鉛直深度 2,008.74m）、OB-2 坑 No.1（浅い地震計で鉛直深度 901.05m）、海底地震計は OBS-1 である。2018 年 9 月 12 日 20:41:32.02 秒に発生した M0.8 の地震（深度 13.5km）に対する、各地震計の波形を図 2.2.1-1 に示す。いずれも速度計であり縦軸は cm/sec である。

振動到来前のノイズ部分の振幅を比べると、OBS > OBC > OB-2 > OB-1 である。また、シグナル部分については、X 成分、Y 成分では、OBS > OB-2 > (OBC、OB-1) であり、Z 成分では、OBS > (OB-1、OB-2) > OBC である。坑内地震計 (OB-1、OB-2) は OBC、OBS に比べてノイズが小さく、より小さい振動を捕えるのに有効と考えられる。

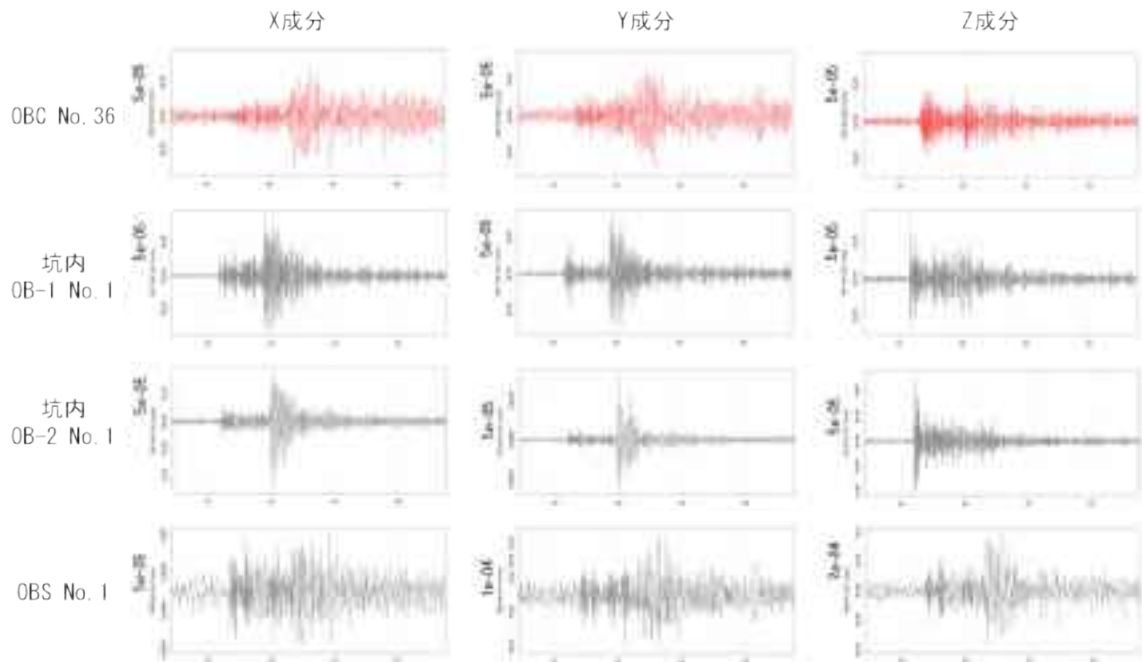


図 2.2.1-1 2018 年 9 月 12 日 20:41:32.02 秒の地震に対する各地震計の波形

(2) OBC の配置状況と震源決定誤差の検討

苫小牧サイトを例に、図 2.2.1-2 に示す範囲において OBC の配置状況を変えた場合の震源決定誤差を検討した。モード A : OBC モジュール（地震計）の間隔は一定とし OBC ラインの長さを短くする、モード B : OBC ラインの長さは一定とし OBC モジュールの間隔を大きくする、の双方について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・モード A、B ともに、震央距離が大きくなると震源決定誤差が大きくなる。
- ・モード A では、OBC ラインが短くなると（3.6～2.0km）震源決定誤差が大きくなる。
- ・モード B では、モジュール間隔が大きくなると震源決定誤差が徐々に大きくなる。
- ・モード A、B ともに、貯留層想定部分（Zone2、深度 1,100m）に震源が位置する場合、震源決定誤差は 15m 以下である。
- ・深部（Zone2、深度 8,100m）に震源が位置する場合、震源決定誤差は、モード A では 200～400m 程度、モード B では 200m 以下である。

したがって、同数のモジュール（地震計）を使う場合には、OBC ラインの長さを大きくする方が震源決定誤差に対しては有利であるものと言える。

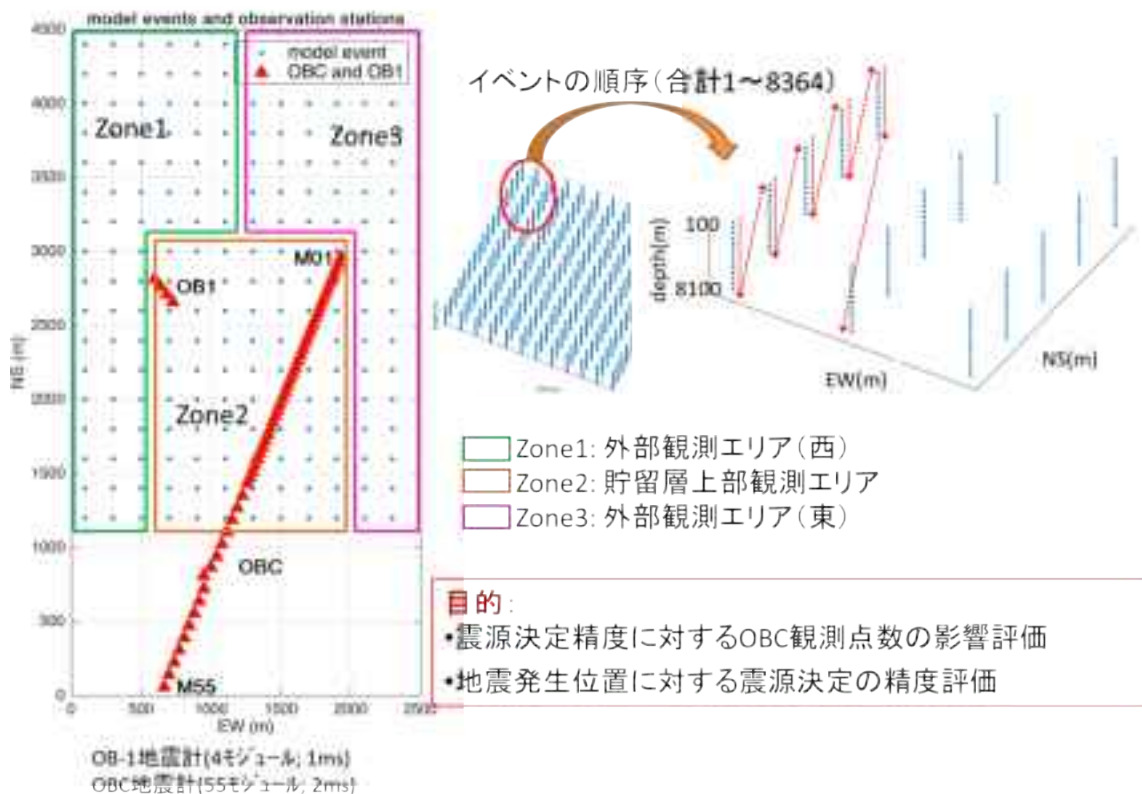


図 2.2.1-2 OBC の配置状況を変えた場合の震源決定誤差の検討

2.2.2 震源決定機能の ATLS への実装

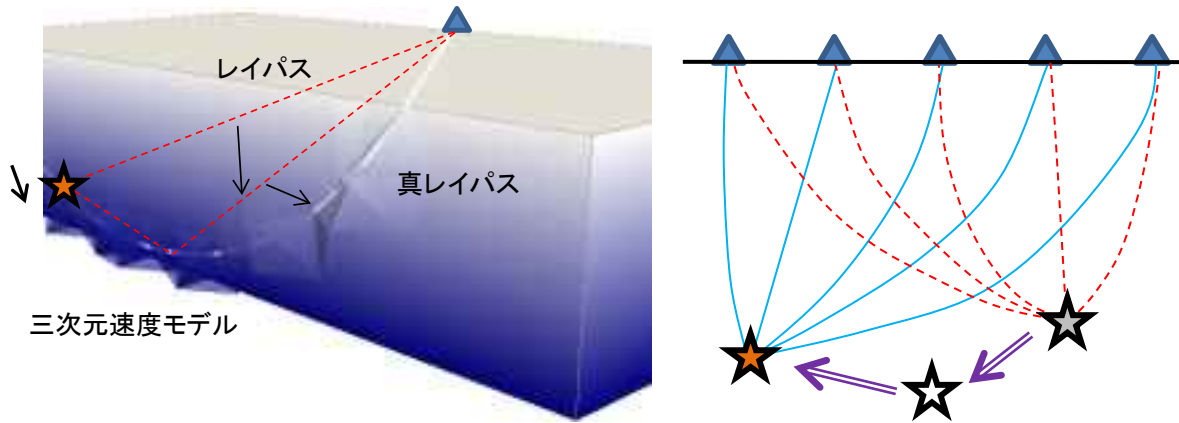
(1) 震源決定方法の実装

震源決定方法には大きく分けて、①観測波形から先にイベントを抽出、到達時刻を求めてから震源決定を行う方法（観測走時と理論走時の残差が小さくなるように震源位置を求める、hypomh など）、②アレイ観測を行っている場合には、イベントピックと同時に correlation を求めて震源位置精度を向上させる方法（例えば Shi et al., 2019）、などが提案されている。

ATLS には hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) の組み込みを進めているが、これは①の手法である。

その他の震源決定手法として、観測走時と理論走時の残差が小さくなるように震源位置を求める方法である次の手法（図 2.2.2-1）を動作するようにした。

- ・仮の震源位置を決め、三次元レイトレーシングにより各地震計の P 波到達時間（理論走時）を計算する。
- ・地震計間の走時差を観測走時と理論走時に対し求めて、その残差を小さくするように CG (conjugate gradient) 法により震源位置を修正する。
- ・修正した震源位置に対し理論走時を計算し、以下、観測走時差と理論走時差の残差が十分に小さくなるまで反復計算を繰り返す。



レイの各点でのモデル速度に従ってレイの bending 係数を計算する

CG 法により震源位置を修正

図 2.2.2-1 CG 法を用いた震源決定手法

(2) SDAR 法の各地震計への適用と震源決定誤差について

平成 29 年度までに開発した SDAR 法を各地震計のデータに適用し、振動イベント抽出を行った。そうして得た走時データを震源決定の入力パラメータとし震源決定を行い、気象庁および防災科研の震源データと比較し震源決定誤差について検討した。

① SDAR 法による振動区間抽出

SDAR により表 2.2.2-1 に示すパラメータを用いて振動区間抽出作業を行った。対象とした自然地震は、震源距離により昇順にソートを行った上位 216 地震である。

SDAR 法の適用結果を波形に重ねて表示した例を、図 2.2.2-2 に示す。OBC では 55 個のデータをスタックしているため、SDAR 結果が平滑化されている。坑内地震計 OB-1 では坑内の 4 深度の地震計をスタックしてある。

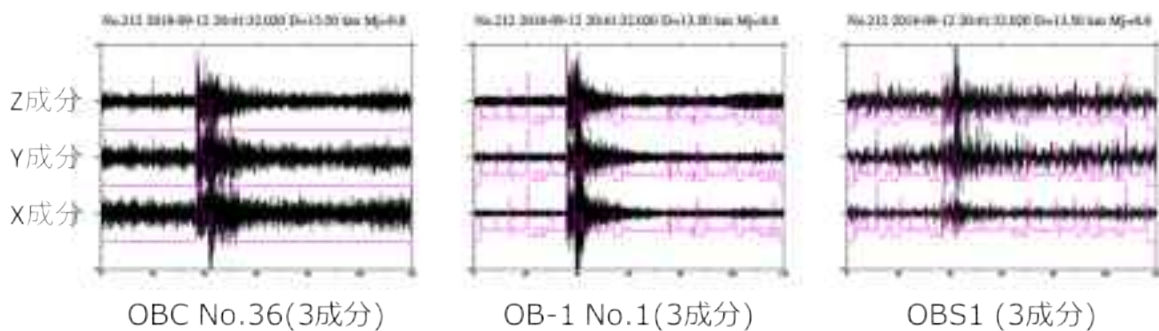


図 2.2.2-2 SDAR 法の適用結果と波形

② 震源決定誤差の検討

216 個の自然地震について、表 2.2.2-2 に示す STA/LTA 法の解析条件により P 波初動時刻の決定を行い、これらを入力パラメータとして hypomh により震源決定を実施した。図 2.2.2-2 に示した地震 (2018 年 9 月 12 日 20:41:32.02 秒) に対する震源決定結果を、気象庁/防災科研の震源データと対比して、表 2.2.2-3 に示す。

表 2.2.2-1 振動区間抽出のパラメータ

解析条件	OBC	OB-1	OB-2	OBS1	OBS2	OBS3	OBS4
速度データ帯域フィルタ下限周波数(Hz)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
速度データ帯域フィルタ上限周波数(Hz)	20	20	20	20	20	20	20
SDAR データ間隔	10	20	20	4	4	4	4
AR 次数	10	10	10	10	10	10	10
Discounting 数	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
外れ値平滑化窓幅	20	20	20	20	20	20	20
変化点平滑化窓	20	20	20	20	20	20	20
スコア帯域フィルタ下限周波数	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
スコア帯域フィルタ上限周波数	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
地震判定スコア値	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
短区間統合時間	3	3	3	3	3	3	3
長区間統合時間	20	20	20	20	20	20	20

表 2.2.2-2 STA/LTA の解析条件

解析条件	OBC	OB-1,2	OBS1(有線)	OBS2,3,4 (オフライン)
STA サンプル数	12 (0.024 秒)	25 (0.025 秒)	5 (0.025 秒)	12 (0.06 秒)
LTA サンプル数	2000 (4 秒)	4000 (4 秒)	1600 (8 秒)	1600 (8 秒)
開始閾値	3.0	2.3	3.0	3.0
終了閾値	1.6	1.3	1.2	1.6
継続サンプル数	250 (0.5 秒)	500 (0.5 秒)	100 (0.5 秒)	100 (0.5 秒)

表 2.2.2-3 震源決定結果

オリジンタイム	震央緯度	震央経度	震源深さ	マグニチュード	推定オリジンタイム
2018-09-12 20:41:32.0200	42.643	141.882	13.5	0.8	2018-09-12 20:41:24.2090

推定震央緯度	推定震央経度	推定震源深さ	時間差	緯度差	経度差	深さ差
42.7477	142.0528	-1.865	7.811	-0.10465	-0.1708	15.365

216 個の自然地震について、オリジンタイム（発震時）、緯度、経度、深さの気象庁／防災科研の震源データとの差をヒストグラムで、図 2.2.2-3 に示す。かなり誤差 0 付近に集中しているが、まだ改善の余地はあるものと考えられる。

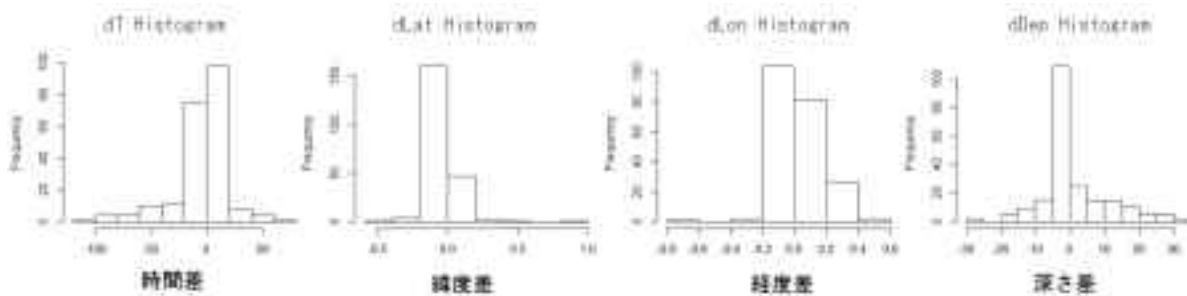


図 2.2.2-3 震源決定結果と震源データとの差のヒストグラム

2.2.3 海外サイトでの微小振動観測結果と日本での観測結果との差異分析

海外 CCS サイトにおける微小振動観測の事例として、カナダ QUEST、米国 Decatur の例を整理した。また、これらのサイトと苫小牧の微小振動発生状況の差異についてまとめた。

(1) カナダ QUEST の事例

カナダ・アルバータ州の QUEST サイトでは、2015 年 8 月から深度約 2km の基底のカンブリア紀砂岩層に年間 100 万トンの CO₂ 圧入が行われている。圧入井から約 30m 離れたモニター坑の深度 1,750m 以浅に設置された地震計で微小振動のモニタリングが行われており、貯留層内のマグニチュード-2 程度の振動まで検知できるように設定されている。

2014 年 11 月から圧入前の観測が行われ、震源位置を決めることができるようなイベントは皆無であった。最初の震源位置決定が可能であったイベントは、圧入開始から 9 か月後の 2016 年 7 月に観測され、2016 年末までに 3 個のマグニチュードの小さい震源位置決定が可能な振動を観測した。全ての振動は、圧入範囲と貯留層の十分下方の先カンブリア紀の基盤岩内で発生している。2017 年 1 月以降、Quest の AOR（area of review：対象範囲のことで圧入井から半径 10km としている）の範囲内で継続した小さなマグニチュードの微小振動活動が観測され、2017 年には 100 以上の震源位置決定可能なイベントが観測された。その平均マグニチュードは-0.7、最大マグニチュードは 0.1 で、多くは週に 1～2 個の割合で発生した。全ての振動は圧入井から約 3km 離れており、貯留層の底部から約 1km 下方の先カンブリアン紀の基盤岩内の小さな範囲に集中して発生した。いずれの微小振動活動も CO₂ 封じ込めに対してリスクを及ぼすものではなかった。(Bacci et al., 2018)

QUEST における TLS の基準は、2015 年にカナダ・アルバータ州の Fox Creek で発生した水圧破碎の際の誘発振動に対応するために州当局が設けた下記の基準（Alberta Energy Regulator, 2015）によっている。

緑色：M_L<2.0：計画通りに操業継続

黄色： $2 \leq M_L < 4$ （圧入井から 5km 以内）：関係機関に即刻報告し軽減計画を実施

赤色： $M_L \geq 4$ （圧入井から 5km 以内）：関係機関に即刻報告し圧入作業を中止

(2) 米国 Decatur の事例

米国イリノイ州の Decatur サイトでは、2011 年 11 月～2014 年 11 月の 3 年間で、合計 100 万トン弱の CO₂ を深度約 2,100m の深部塩水帯水層である Mt. Simon 層へ圧入を実施した。

Will et al. (2014)によれば、坑内観測では、CO₂ 圧入開始の 2011 年 11 月～2013 年 10 月までの計 22 か月間に合計で 10,123 個の微小振動が検知され、そのうち 2,573 個のイベントについて震源決定およびマグニチュードの算出を行うことができた。微小振動のマグニチュードの範囲は Mw マイナス 1.91～+1.0 であり、平均は Mw マイナス 0.85 であった。微小振動の震源は、貯留層である下部 Mt. Simon 層やその下の pre-Mt. Simon 層、および先カンブリア紀の基盤の上部に広がっている。したがって、観測で得られた微小振動の震源は貯留層内部もしくはその下部に位置しており、遮蔽層内部での発生は確認されていない。

Decatur プロジェクト終了後の 2015 年より、同じ場所で本サイトの事業主である ADM (Archer Daniels Midland Company) 主導の元、Illinois Industrial Carbon Capture and Storage Project (IL-ICCS)が実施されている。3 年間で総圧入量 500 万トン（年間 100 万トン以上、日量 3,000 トン）を予定した商業規模のプロジェクトである。これに伴い、新たな圧入井、観測井、検証井が設置され、2013 年 9 月に検証井の坑内に 5 連のジオフォンを設置して観測を開始している。IL-ICCS での微小振動観測では、表 2.2.3-1 の基準を設定している。(Archer Daniels Midland - Final Modified Permit Attachments, 2017)

表 2.2.3-1 米国 Decatur の IL-ICCS における基準

状態表示色	閾値の基準	対応作業
緑色	$M \leq 1.5$	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通常操業の継続
黄色	30 日以内に $1.5 < M \leq 2.0$ の地震が 5 回以上発生	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通常操業を継続 ・ 24 時間以内に UIC（イリノイ大学）の計画責任者と ISGS（イリノイ州地質調査所）に坑井の状況を連絡
橙色	$M > 1.5$ かつ有感	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通常操業を継続 ・ 24 時間以内に UIC の計画責任者と ISGS および ADM に坑井の状況を連絡 ・ 地震発生状況と圧入データの関係を検討する ・ UIC の計画責任者に知見を報告し、適切な対応策を講じる
	$M > 2.0$ かつ無感	
マゼンタ (赤紫色)	$M > 2.0$ かつ有感	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧入レート低減プランの開始 ・ 地表施設から CO₂ を放出する ・ 24 時間以内に UIC の計画責任者、ISGS、ADM に坑井の状況を連絡 ・ 坑井へのアクセスを特定の者に限定する ・ 必要に応じて、ADM の担当者および地方自治体と連絡を取り、避難計画を開始する ・ 坑井の圧力、温度を監視して坑井の状態を確認し障害の原因と程度を特定する。（UIC の計画責任者と協議して）適切な是正措置を特定し実施する ・ 地下水または地表近傍の地下水への漏出が発生しているかどうかを確認する ・ 飲料水源が汚染されている場合には、適切な対応を講じる ・ 地震発生状況と圧入データの関係を検討する ・ UIC 計画責任者に知見を報告し、適切な対応策を講じる
赤色	$M > 2.0$ で有感、かつ地表で被害報告あり	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧入停止措置の開始 ・ フローバルブを閉じ、地表施設から CO₂ を放出 ・ 24 時間以内に UIC の計画責任者と ISGS および ADM に坑井の状況を連絡 ・ 坑井へのアクセスを特定の者に限定する 以下、マゼンタの場合と同じ
	$M > 3.5$	

(3) 苫小牧サイトとの微小振動発生状況の差異について

QUEST サイトでは、圧入前の 2014 年 11 月～2015 年 7 月は観測された振動は 0 個、2015 年 8 月に圧入開始してから 9 か月後の 2016 年 7 月に最初の振動が観測され、2016 年末までに 3 個の振動を観測した。2017 年 1 月以降、圧入井から半径 10km の AOR の範囲内で微小振動活動が観測され、2017 年には 100 以上の震源位置決定可能な振動が観測された。その平均マグニチュードはマイナス 0.7、最大マグニチュードは 0.1 であった。

Decatur サイトでは、圧入開始の 2011 年 11 月～2013 年 10 月までの計 22 か月間に合計で 10,123 個の微小振動が検知され、そのうち 2,573 個の振動について震源決定およびマグニチュードの算出を行うことができた。微小振動のマグニチュードの範囲は Mw マイナス 1.91～+1.0 であり、平均は Mw マイナス 0.85 であった。

一方、苫小牧サイトでは、日本 CCS 調査（株）の HP によれば、2016 年 4 月 6 日の圧入開始から 2019 年 1 月 30 日までに 215,426.1 トンの CO₂ を圧入し、微小振動観測は 2015 年 2 月から行われており、圧入地点周辺の深度 50km 以浅に発生するマグニチュードマイナス 0.5 以上の微小振動を観測対象としている。圧入前の 2015 年 2 月～2016 年 3 月に 9 個、圧入後の 2016 年 4 月～2018 年 11 月に 3 個の微小振動を観測している。いずれもマグニチュード 0 程度の微小なものである。

このように苫小牧において観測された微小振動は、規模（マグニチュード）は他の 2 サイトと同程度であるが、発生数は非常に少ないものと言える。この理由のひとつとして、海外の 2 サイトの貯留層はカンブリア紀（約 5 億 4,200 万年前から約 4 億 8,830 万年前まで）の古い地層であるのに対し、苫小牧の貯留層である萌別層は新第三紀（2,303 万年前から 258 年前）の新しい地層であり、比較的柔らかいので振動が起こりにくい可能性が考えられる。

2.2.4 他分野圧入管理手法から CCS に適用可能な要素の ATLS への反映

地熱利用のうち高温岩体における水圧破碎やシェールガス・オイル開発における水圧破碎等、地下への流体圧入を行っている分野では、圧入操業と誘発地震発生との関係を監視し安全に圧入を実施・継続するため、TLS が導入されている。本項は、地熱開発のうち Enhanced Geothermal System (EGS) を対象に米国エネルギー省 (Department of Energy, DOE) が発表した誘発地震に関するプロトコル (Majer et al., 2012 ; 以下、EGS 誘発地震プロトコルと称す)、およびシェールガス・オイル開発において実施される水圧破碎による誘発振動を対象として米国オハイオ州が発表した白書 (Wong et al., 2015 ; 以下、オハイオ州白書と称す) について、概要を示すとともに、CCS を対象とする ATLS への適用の可能性、有用性が認められる要素について検討したものである。

(1) EGS を対象とする米国 DOE による誘発振動プロトコルの概要

EGS 誘発振動震プロトコルは、地熱開発のうち高温岩体に水を圧入して水圧破碎により新たな割れ目を生成する EGS に対する地域住民・規制当局を含む利害関係者の合意 (public acceptance) を促進する目的で、International Energy Agency (IEA)の主導で2009年に作成されたものを、その後米国 DOE の主導によって 2012年に改定されたものである。そもそもは 2009年6月に New York Times 紙において地熱開発における誘発振動のリスクが取り上げられ、マグニチュード 3.4 の誘発振動を引き起こしたと考えられているバーゼル地熱フィールド (スイス) の事例とガイザース地熱フィールド (米国) の比較がなされた (Glanz, 2009) ことを受けて始まった取り組みである。

EGS 誘発振動プロトコルの作成にあたっては、米国内外の科学者、政策立案者、その他利害関係者からの意見聴取が行われたほか、代表的な EGS プロジェクトでの教訓も取り込まれている。プロトコルは、適切な研究と技術開発によって、誘発振動は軽減されるだけでなく、貯留層管理の上で有効なツールとなるだろうと結論付けている。また、EGS 誘発振動プロトコルは地熱開発を円滑に進めるためのガイドラインを提供することを目的として作成されており、当局からの規制事項をまとめたものではないと言及されている。

一般的なガイドラインとして機能するよう配慮されており、具体的な段階的評価プロセスとしてステップ①～ステップ⑦の手順が示されている。各ステップの内容については、以下に述べるが、TLS 関連のトピックとしては、従来用いられてきたマグニチュードだけではなく、地表振動による実際的な影響、被害の推定に基づいて閾値を設定することが推奨されている点が挙げられる。想定されるマグニチュードの誘発振動による地表振動強度の推定を行い、当該地域の建造物や人口密集度などサイト毎の特徴を反映した (site-specific) 精緻な評価が必要とされている。

① Perform a preliminary screening evaluation (予備的な審査の実施)

社会受容性 (public acceptance) に関わる観点で障害要因となる要素の洗い出しと対処可能性を評価し、プロジェクトの実施可能性 (feasibility) を評価する。対象地域の政治状況 (local politics)、コミュニティの優先傾向 (community preference)、法規制 (regulation) 等の要素に加えて、実際の地表振動強度を含む誘発振動リスクの評価という技術的な項目も本ステップの検討対象に含まれる。本ステップでの評価は、成功の可能性が明らかに低いサイトを対象から除外するスクリーニングを目的としている。明らかに克服が困難な障害が予想されなければ、次のステップに進むことになるが、その過程で得られるデータや検討結果に基づいて、本ステップでの評価結果は随時見直されていく。

② Implement an outreach and communication program (アウトリーチとコミュニケーションプログラムの実施)

地域社会、利害関係者、規制当局、公安当局との積極的な関係構築を促し、各者からのフィードバックを得ながら計画を推進することを目的とする。アウトリーチの対象となる

人々、組織の特定にはじまり、アウトリーチの計画およびその実施までが本ステップに含まれる。後述のステップでの各種の評価結果も、アウトリーチの一環で随時公表されることとなる。アウトリーチの具体的な方法、タイミングとしては、事前の現地事務所の設置、利害関係者への説明会や現地視察会の開催に始まり、計画が実施に移された後も、掘削現場の見学会、水圧破碎実施前の説明会、水圧破碎作業の見学会、また事後の説明会の実施等が提唱されている。

③ Review and select criteria for ground vibration and noise (地盤振動と騒音の基準の見直しと設定)

現状の環境下での地表振動強度のベースラインの評価、騒音や振動に関する既往の規制・条例等の事例把握（対象地域外や鉱山開発等の他分野の事例も含む）、対象地域の建造物の把握、一定の振動発生時の地域住民の反応予測（American National Standard Institute (ANSI)によってその評価ガイドラインが示されている）、振動によって運転に影響を及ぼし得る産業活動（医療施設、研究機関等の機器等）の特定と影響の評価、等が求められる。

④ Establish local seismic monitoring (ローカルな振動観測システムの構築)

振動観測は水圧破碎作業中だけでなく、ベースラインの地震活動も把握するため、事前に設置・運用されている必要があり、少なくとも6か月の事前観測が推奨されている。水圧破碎の影響域の少なくとも2倍の範囲を対象に、マグニチュード0~1のイベントが観測できることが望ましいとされ、多くの場合既存の自然地震観測網だけでは不十分であり独自の観測網設置が必要となる場合が一般的とされている。また、時間・空間的に偏りなく観測できるよう設計・設置される必要があり、プロジェクトのライフタイムを通じての保守が必要である。観測結果としては、少なくとも震源位置、マグニチュード、震源メカニズム解を提供する必要がある。観測結果は、誘発振動リスク評価・管理だけでなく、き裂分布や応力状態の推定等、貯留層管理の観点でも有用な情報を提供することも目的とすることを念頭に観測網の仕様を考える必要がある。

⑤ Quantify the hazard from natural and induced seismic events (自然地震および誘発振動によるハザードの定量化)

自然地震による地表振動強度を評価し、これをベースラインとして、誘発振動による地表振動強度を危険要因 (hazard) として定量的に評価する。自然地震による地表振動強度の予測は、過去の自然地震発生履歴や周辺地域の断層の規模を基に一定のマグニチュードを想定することとなるが、最低でもマグニチュード4.0までは想定しておくことを推奨している。誘発振動の最大マグニチュードとしては既存の断層のサイズ等を考慮して決めることとなる。また過去の水圧破碎事例と比較し参考にする。Shapiro et al. (2007) や

McGarr (1976) によって圧入パラメータと誘発振動の最大マグニチュードの相関性が評価されており、これらをレビューしておくことも必要である。

地表振動強度を推定するモデルについては、自然地震を対象としてこれまで検討・提案されているものがあるが、その多くはマグニチュード 5 以上を対象としており、それよりも小さいマグニチュードを想定する誘発振動への適用性は不十分とする検討結果もあり (Chiou et al., 2010)、不確実性を加味して評価する必要がある。またプロジェクトの進行により新たな情報・データが追加されれば、適宜評価を見直すことも必要である。地表振動は表面最大加速度 (peak ground acceleration, PGA) として評価・計測するのが地震工学の分野では一般的であるが、表面最大速度 (peak ground velocity, PGV) とその周波数特性である応答スペクトルを推定しておくこと、建物の耐震設計等で使われている数値であり、リスク評価を進めるうえで建造物への損害等のリスク評価に使いやすい。

⑥ Characterize the risk of induced seismic events (誘発振動のリスクの評価)

ステップ⑤で評価された地表振動強度に基づく影響・被害をリスクとして評価する。建造物 (一般住宅、公共施設、商用施設、工業施設、社会インフラ) への物理的損傷、地域住民の生活 (睡眠、会話、レクリエーション等) への影響、またこれらの結果として現れる社会的経済的損害を考える必要がある。最終的にリスクを空間的に表現したマップとしてまとめ、利害関係者に示すことが必要である。

⑦ Develop risk-based mitigation plan (リスクに基づく緩和措置の構築)

具体的かつ直接的なリスク緩和措置 (direct mitigation) が、Traffic Light System の赤色、黄色、緑色のリスクレベル毎に以下のように示されている。

- ・赤色: 該当エリアの建造物への被害が想定される地表振動強度として閾値が定義される。この場合の緩和措置は即時圧入を中断すること。
- ・黄色: 人々が地表振動に気がつく程度の地表振動強度として閾値が定義される。この場合、圧入レートの低減や観測体制の強化など慎重に圧入を継続する。
- ・緑色: 一般的な検出感度を下回るバックグラウンドの自然地震活動を下回る発生率として閾値が定義される。この場合、計画通りに圧入を継続する。

ただし、圧入停止後も誘発振動が発生する場合には、以上の緩和措置は機能しない。EGS に関する全ての作業が中断してからも問題となるような規模の誘発振動が発生している場合、地下の状態が自然状態に戻るにつれて誘発振動は収まる。地震活動が数か月以内に収まらない場合は、間接的緩和措置を検討する必要がある。地震活動がプロジェクト開始前のバックグラウンドレベルを越えているかどうかを判断するため、観測はプロジェクト終了後少なくとも 6 ヶ月間は継続する必要がある。

以上の直接的緩和措置に対して、間接的緩和措置 (indirect mitigation) として、継続的な振動観測と観測結果の公表、より積極的なアウトリーチや地域コミュニティへの貢

献を通じて地域住民・規制当局を含む利害関係者と良好な関係を築いておくことに加えて、損害への補償なども提唱されており、不測の事態に備えた準備と対処が求められる。

(2) シェールガス・オイル開発における水圧破砕による誘発振動を対象とした米国オハイオ州の白書の概要

本白書は、Ohio Oil and Gas Association (OOGA)からの指示により、URS 社が 2015 年に取りまとめたものである。近年、鉋廃水圧入による誘発振動が着目されているが、本白書では特に水圧破砕に起因する誘発振動に焦点が当てられている。

一般的な地震発生機構、マグニチュード評価、地表振動の評価法、自然地震と誘発振動の比較といった地震学的な知見の整理に始まり (Section 2)、水圧破砕による振動誘発メカニズムに関する一般的な理解や、カナダ、英国、米国オクラホマ州、オハイオ州での誘発振動事例が紹介されているほか (Section 3)、地震観測の機器・理論についても解説がなされており (Section 4)、TLS についてはドイツとスイスの地熱 EGS サイトの事例および米国とカナダの事例を紹介し、マグニチュードと地表振動の大きさについて述べている (Section 5)。さらに Ohio Department of Natural Resources の運用する TLS に関する評価を述べた後 (Section 6)、地表振動 (PGA: 地表最大加速度、PGV: 地表最大速度) を用いることの有効性 (Section 7) と TLS および誘発振動に関連して想定される疑問とその回答が述べられている (Section 8)。

TLS については、先述の EGS 誘発振動プロトコルを引用し、地表振動と実際的な地表への影響、被害の推定結果に基づく閾値の設定を支持する内容であり、誘発振動による地表振動は、自然地震を対象とした従来のモデルに必ずしも整合せず、サイト特有のモデルの構築と評価が必要という点でも EGS 誘発振動プロトコルの主張を踏襲している。

本白書においては、地表振動強度の予測に要する項目として以下を挙げており、これらを予め推定ないし想定しておく必要があると述べている。(1)ラプチャー域の形状、寸法、走向傾斜、ラプチャーのタイプ、ストレスドロップ、(2)断層からの距離、(3)振動のマグニチュード、(4)波動伝搬経路での減衰の程度、(5)該当地点の表層地質の影響。

特にサイト付近の表層地層が地表振動に及ぼす影響は大きく、土壌で覆われたサイト (soil site) では岩盤上に位置するサイトより増幅効果が働いて強い振動が観測される。表層深度 30m までの平均 S 波速度 (V_{s30}) が U.S. building code において、地盤強度の階級分けに使われており、これも参考とすることが本白書では推奨されている。

(3) CCS を対象とする ATLS への適用の可能性、必要性が認められる要素

いずれの文献においても、従来の TLS で一般的に使われている誘発振動のマグニチュードに応じた閾値とそれに応じたリスク緩和措置 (mitigation plan) の提示では不十分と述べている。具体的には、想定されるマグニチュードの誘発振動による地表振動強度を推定し、さらに周辺地域の地表建造物の耐震性や人工密集度等を加味して評価した実際的な影

響に基づいて、TLS の閾値とリスク緩和措置を示す必要があると述べている。技術的なハードルとしては、例えば地表振動強度の推定に関して、自然地震を対象とする既往研究でいくつかのモデルが提案されているが、これらが誘発振動の地表振動強度の推定に適しているか否かの検討が十分とは言えず、別途モデルを検討する必要性などが挙げられている。しかしながら、合理性の観点ではより理想的な TLS の閾値設定の方針であり、CCS を対象とする TLS においても、今後考慮する必要があるものと思われる。

また、EGS 誘発振動プロトコルに示されたステップ①～ステップ⑦からなる段階的な評価プロセスでは、最終的に TLS が誘発振動リスクの緩和措置の一環として位置づけられており、その運用に至るまでのガイドラインとも読み取ることができる。CCS を対象とする ATLS においても参考になるものと考えられる。

(4) 海外の TLS における閾値

昨年度の報告書（二酸化炭素地中貯留技術研究組合(2018)）および前述した内容等を整理し、海外の TLS における閾値を一覧表にまとめ、表 2.2.4-1 に示す。

イギリスの例を除くと、閾値は、

緑色： $M < 1.5 \sim 2.0$

黄色： $1.5 \sim 2.0 < M < 2.0 \sim 4.0$

赤色： $M > 2.0 \sim 4.0$

である。日本の場合は国土が狭いことを考慮すると、緑色： $M < 0.5$ 程度、赤色： $M > 2.0$ 程度が目安になるものと思われる。振動の規模（マグニチュード）に加えて、震源の位置（圧入範囲からの距離）、震源の深さ（圧入範囲との位置関係）、想定される地表における振動（速度、加速度）等を考慮して、閾値を検討する必要がある。

表 2.2.4-1 海外の TLS における閾値

国、サイト	緑色	橙色、黄色	赤色
イギリス DECC	$M_L \leq 0.0$: 計画通り圧入 継続	$0 < M_L \leq 0.5$: 注意して 圧入レートを下げて継 続、モニタリング強化	$M_L > 0.5$: 圧入を即座に 中止
カナダ・アルバー タ州 Subsurface Order #2	$ML < 2.0$: 計画通りに 操業継続	$2 \leq ML < 4$ (圧入井から 5km 以内): 関係機関に 即刻報告し軽減計画を 実施	$ML \geq 4$ (圧入井から 5km 以内): 関係機関に 即刻報告し圧入作業を 中止
カナダ・ブリティ ッシュコロンビ ア州、BCOGC	記載無し	記載無し	$ML \geq 4$: 即刻操業を中 断する
米国イリノイ州 Administrative Code, Section 240.796	州当局がイリノイ州で $M < 2.0$ の振動発生 の通知を USGS または ISGS から受信した場 合	州当局がイリノイ州ま たは隣接の州境を接し た郡で $2.0 \leq M < 4.0$ の 振動発生 の通知を USGS または ISGS か ら受信した場合	州当局がイリノイ州ま たは隣接の州境を接し た郡で $M \geq 4.0$ の振動 発生 の通知を USGS ま たは ISGS から受信し た場合
米国イリノイ州 Decatur	$M \leq 1.5$	黄色: 30 日以内に $1.5 < M \leq 2.0$ の振動が 5 回以上発生 橙色: $M > 1.5$ かつ有感 $M > 2.0$ かつ無感	マゼンタ: $M > 2.0$ かつ 有感 赤色: $M > 2.0$ で有感、 かつ地表で被害報告あ り $M > 3.5$
米国オハイオ州 水平坑井対象 Ohio Revised Code Chapter 1501:0-3-06	$ML < 1.5$: 計画通り操 業継続	$ML \geq 1.5$: 事業者と当 局の間で直接連絡開始 $2.0 \leq ML \leq 2.4$: 事業者 と協力して操業内容の 提案または変更	$ML \geq 2.5$: 水平坑井の 一時停止 $ML \geq 3.0$: 承認された 計画が事業者から提出 されるまで操業停止

2.2.5 まとめ

本課題では「圧入安全管理システムの開発」として、以下の内容を行った。

- 1) 観測システムの有効性の確認
- 2) 震源決定機能の ATLS への実装
- 3) 海外サイトでの微小振動観測結果と日本での観測結果との差異分析
- 4) 他分野の圧入管理手法から CCS に適用可能な要素の ATLS への反映

1)では、苫小牧の観測に使用されている各システムの観測波形を比較し、坑内地震計は OBC、OBS に比べてノイズが小さく、より小さい振動を捕えるのに有効と考えられた。また、OBC の地震計配置状況を変えた場合の震源位置決定誤差を検討し、同じ地震計の数であれば、間隔を短くして密に配置するより、間隔を広げて OBC ラインの長さを大きくする方が震源位置決定誤差が小さくなることが判った。

2)では、ATLS に hypomh の組み込みを進めているほか、CG 法を用いた震源決定手法を動作するようにした。SDAR 法を各地震計のデータに適用し振動イベント抽出を行い、STA/LTA 法により P 波初動時刻を決定し、hypomh により震源決定を行った。216 個の自然地震に対し震源決定を行い、気象庁／防災科研の震源データとの差をヒストグラムで示した。かなり誤差 0 付近に集中しているが、まだ改善の余地があるものと考えられた。

3)では、カナダ QUEST、米国 Decatur の例を整理した。いずれの地点もマグニチュードは 1.0 以下と小さいものの QUEST では 2017 年に 100 以上、Decatur では 22 か月間に 10,000 以上の微小振動が観測された。これに対し苫小牧のサイトでは、圧入後の 2016 年 4 月～2018 年 11 月にマグニチュード 0 程度の 3 個の微小振動を観測している。苫小牧において観測された微小振動の数が非常に少ないが、この理由のひとつとして、海外の 2 サイトに比べ貯留層が新しい地層であり、比較的柔らかいので振動が起こりにくい可能性が考えられた。

4)では、他分野として EGS を対象に米国 DOE がまとめた誘発振動に関するプロトコル、シェールガス・オイル開発における水圧破砕による誘発振動を対象に米国オハイオ州がまとめた白書について、概要を整理し CCS を対象とする ATLS への適用可能性、有用性が認められる要素について検討した。いずれの文献も、従来の TLS で一般的に使われている誘発振動のマグニチュードに応じた閾値とそれに対応したリスク緩和措置の提示では不十分と述べており、想定されるマグニチュードの誘発振動による地表振動強度を推定し、周辺地域の地表建造物の耐震性などを考慮して実際的な影響の評価に基づいて、TLS の閾値とリスク緩和措置を示す必要があると述べている。これはより理想的な TLS の閾値設定の考え方であり、CCS を対象とする TLS においても参考になるものである。また、海外の TLS における閾値について一覧表にまとめた。この閾値を参考にすると、日本の場合は国土が狭いことを考慮すると、緑色： $M < 0.5$ 程度、赤色： $M > 2.0$ 程度が目安になるものと思われ、振動の規模（マグニチュード）に加えて、震源の位置（圧入範囲からの距離）、震源の深さ（圧入範囲との位置関係）、想定される地表における振動（速度、加速度）等を考慮して、閾値を検討する必要がある。

参考文献

1) Alberta Energy Regulator (2015) : Subsurface Order No.2, February 19, 2015.

<https://www.aer.ca/documents/orders/subsurface-orders/SO2.pdf> (2018/6/21 アクセス)

2) Archer Daniels Midland - Final Modified Permit Attachments, ATTACHMENT F:

- EMERGENCY AND REMEDIAL RESPONSE PLAN (2017),
https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-01/documents/adm_ccs2_att_f_-_err_plan.pdf (2019/1/23 アクセス)
- 3) Bacci, V.O., Halladay, A., O'Brien, S. (2018) : Quest CCS facility: Microseismic Observations, GHGT-14 Session 9B - Monitoring Passive Seismic, Microseismic, and Geomechanics,
<https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-ieaghg-public/9fd030d25fad4ad685a735a7db973394> (2019/1/31 アクセス)
- 4) British Columbia Oil and Gas Commission (2012) : Investigation of Observed Seismicity in the Horn River Basin,
<http://www.bcogc.ca/node/8046/download?documentid=1270>
- 5) Chiou, B., Youngs, R., Abrahamson, N., Addo, K. (2010) : Ground-motion attenuation model for small-to-moderate shallow crustal earthquakes in California and its implications on regionalization of ground-motion prediction models, *Earthquake Spectra*, 26, 907-926.
- 6) Dade, S. (2017) : OhioNET: State of Ohio's Response to Induced Seismicity, AGI Policy & Critical Issues Webinar April 14, 2017.
https://www.americangeosciences.org/sites/default/files/webinar/assets/AGI_InducedEQ_Webinar_Apr2017_Dade.pdf (2019/2/13 アクセス)
- 7) Department of Energy & Climate Change (2014) : Fracking UK shale: understanding earthquake risk,
https://www.northyorks.gov.uk/sites/default/files/fileroot/About%20the%20council/Partnerships/Fracking_UK_shale_-_understanding_the_earthquake_risk_%28Feb_2014%29.pdf (2018/8/2 アクセス)
- 8) Glanz, J. (2009) : Deep in Bedrock, Clean Energy and Quake Fears,
<https://www.nytimes.com/2009/06/24/business/energy-environment/24geotherm.html> (2019/1/30 アクセス)
- 9) Hirata, N., Matsu'ura, M. (1987) : Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.47, pp.50-61, 1987.
- 10) Illinois Administrative Code, Section 240.796 Operating and Reporting Requirements, Hydraulic Fracturing Operations, Seismicity :
<http://www.ilga.gov/commission/jcar/admincode/062/062002400G07960R.html>
(2019/2/13 アクセス)
- 11) McGarr, A. (1976) : Seismic moments and volume change, *Journal of Geophysical Research*, 81, 1487-1494.

- 12) Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J., Wong, I. (2012) : Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems, https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/geothermal_seismicity_protocol_012012.pdf (2019/1/30 アクセス)
- 13) Shapiro, S.A., Dinske, C., Kummerow, J. (2007) : Probability of a given-magnitude earthquake induced by a fluid injection, *Geophysical Research Letters*, 34, L22314.
- 14) Shi, P., Angus, D., Rost, S., Nowacki, A., Yuan, S. (2019) : Automated seismic waveform location using multichannel coherency migration (MCM)-I: theory, *Geophysical Journal International*, Volume 216, Issue 3, 1 March 2019, Pages 1842–1866, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy132>
- 15) Will, R., Smith, V., Leetaru, H.E., Freiburg, J.T., Lee, D.W. (2014) : Microseismic Monitoring, Event Occurrence, and the Relationship to Subsurface Geology, *Energy Procedia*, 63, 4424-4436
- 16) Wong, I., Nemser, E., Bott, J., Dober, M. (2015) : Induced seismicity and traffic light systems as related to hydraulic fracturing in Ohio, https://c.ymcdn.com/sites/www.ooga.org/resource/resmgr/Files/OOGA_IS_TLS_White_Paper_fina.pdf (2019/1/30 アクセス)
- 17) 日本 CCS 調査 (株) ホームページ : <http://www.jccs-tomakomai-monitoring.com/JCCS/wp-content/uploads/2019/01/201901.pdf> (2019/2/4 アクセス)
- 18) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合(2018) : 平成 28 年度成果報告書

2.3 CO₂長期モニタリング技術の開発

CO₂圧入サイトでは、繰り返し弾性波探査（反射法）を中心に、CO₂モニタリングが実施されている。CCS実用化に向けては、高コストかつ地元負担の大きい弾性波探査の実施回数を、可能な限り低減させる必要がある。本課題では、弾性波探査を補完する長期的・連続的な監視手段として、現在最も高精度な重力計である超伝導重力計を用いた高精度微重力測定技術の開発を行う。苫小牧サイトを初めとして、我が国では主に海底下の貯留層へのCO₂地中貯留が想定されていることから、特に沿岸域における重力データ取得・解析技術の開発を目的とする。

具体的には、超伝導重力計を用いて苫小牧サイトにおけるCO₂圧入前および圧入後2年程度にわたる重力データを取得する。重力モニタリングでは、可能な限りCO₂貯留点に近い海岸近傍におけるデータの取得が望ましいが、そのような風雪、波浪、塩害等の影響を受ける過酷な環境下に超伝導重力計が設置された例はない。本課題では既存技術を利用しつつ沿岸域特有の課題を抽出し、その対処方法を検討する。また、得られた重力データに対しては、種々の自然現象（例えば、潮汐、気圧変化、降雨など）に起因する重力変化（ノイズ）を除去する処理が必要となる。このため、個々の自然現象の重力変化を見積もるとともに、重力データの実測値からこれらを除去するデータ解析の方法を開発する。特に、必ずしも定型的な方法が確立されていない降雨浸透および地下水位変動に伴う重力変化の見積もりについて、実用化を念頭に置いたデータ解析方法を検討する。

2.3.1 重力データを長期連続的に取得するための方法の構築および観測ノウハウ蓄積

(1) はじめに

重力モニタリングでは、地下のCO₂プルーム内における質量変化に伴う重力変化をモニタリングの対象としている。コスト、保守性、沿岸漁業への影響などの観点から陸上における高精度モニタリングを目標としており、その場合は可能な限りCO₂圧入領域に近い海岸近傍の陸上において、現在最も高精度な重力計である超伝導重力計を用いた長期連続観測を実施することが必要となる。海岸近傍の観測点においては、海岸に打ち寄せる波浪と海からの強風による振動や、それらによって生じる空気中の海水飛沫による塩害等の発生が予想される。そのため、そのような過酷な観測環境に対応した超伝導重力計の運用方法の構築が必要となる。また、機器故障・寿命等のトラブルへの対処および予備機も含めた複数台の重力計の使用などの長期連続観測を可能とするための運用法の構築も必要となる。

今年度は、苫小牧サイトでの重力モニタリングを継続実施し、特に海岸近傍での長期連続観測実現の観点から機器の状態監視を行い、保守・点検作業を行った。具体的には、塩害や連続稼働に伴う機器の劣化・損傷などの情報の蓄積とそれらの解決方策の策定を行った。また、重力データの解析に必要な補助データについて、その選定を目標としつつ、新たに地下水位データとGNSSデータの連続取得を開始した。

(2) 重力モニタリングの実施状況および長期連続観測を実現するための運用方法の検討

苫小牧サイトでは、2015年3月6日から米国GWR Instruments社製超伝導重力計 iGrav を用いた重力モニタリングを継続実施しており、海岸近傍における過酷な観測環境下において今年度も順調に重力データを取得している。図 2.3.1-1 に苫小牧サイトにおける機器配置を示す。データ取得におけるトラブルを可能な限り回避し、トラブルが生じた際にはより早い回復を図るために製造元技術者による定期的な保守・点検作業を実施しており、今年度は2018年6月28日～7月1日および10月22日～10月25日に保守・点検作業を実施した。

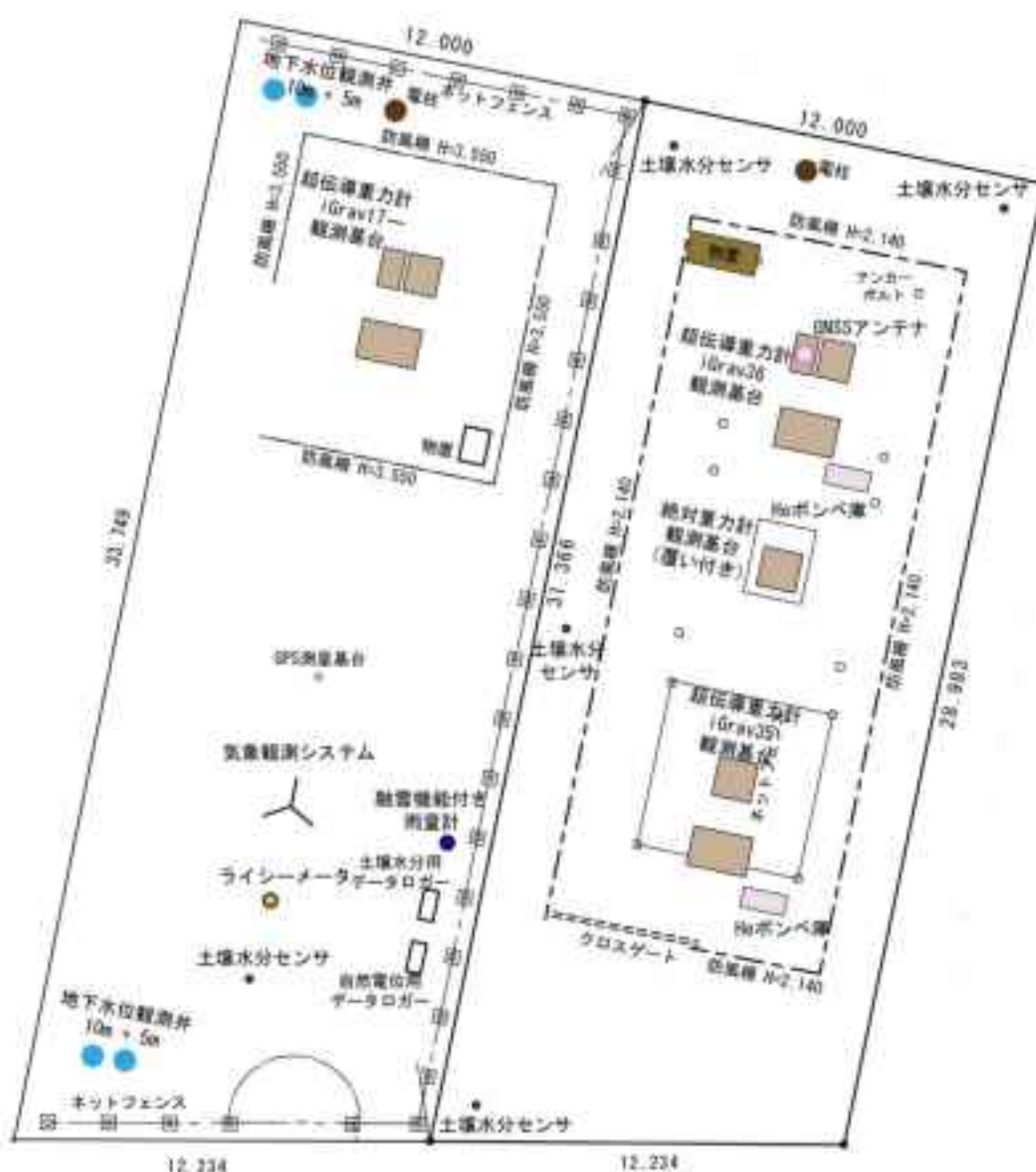


図2.3.1-1 苫小牧サイトにおける機器配置の概念図（距離の単位はメートル）

本プロジェクトにおいて新たに導入した iGrav35 は、国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）が所有する iGrav17 を設置した観測基台に併設する絶対重力計基台に 2017

年 11 月に仮設した。同じく iGrav36 は、2018 年 1 月に苫小牧サイトの新設観測基台に設置し、測定を開始した。同時期には、iGrav35 を新設観測基台に移設したものの、ドリフト特性改善を目的とした一部回路改良のため米国 GWR 社に戻した。その後、2018 年 6 月 29 日に製造元技術者による定期保守・点検作業に併せて新設観測基台に再設置した。iGrav35・iGrav36 については、設置後、常温復帰・再冷却、常温復帰後のヘリウムトランスファによる急冷等の様々なイベント時の初期ドリフト計測を重点的に実施した。2018 年 9 月 6 日には、苫小牧サイトから約 31km 離れた胆振東部において発生した北海道胆振東部地震により、苫小牧サイト周辺においても震度 5 強の地震動が発生した。さらに、地震に引き続いて北海道全域において停電が発生した。これを受けて、地震と停電による電源断が重力モニタリングに与える影響も評価した。

iGrav35・iGrav36 による観測が順調であったため、iGrav17 は 2018 年 9 月 10 日に苫小牧における観測を終了し、9 月 11 日に本体をエンクロージャーから取り出して観測期間中の塩害ダメージの有無等を点検した後に、AIST 内の他観測目的のために撤去した。約 3 年半の連続観測により海岸沿いの過酷な観測環境に曝され続けた iGrav17 は、エアコンを備え付けたエンクロージャーの密閉空間内で稼動させたことによって腐食雰囲気による本体ダメージから防護され、回収時の点検では本体には視認できる腐食等は生じていなかった。補機を収めたエンクロージャー (CUFE) 内の機器についても同様に腐食等は生じていなかった。ただし、エンクロージャー外側、特に CUFE の屋根状の板材の端部には若干の錆の発生が見られた。観測初期には本体を収納したエンクロージャー (iGFE) の内部冷却に使用している小型エアコンが腐食によるトラブルで停止して観測が中断したものの、その後のフィルター改良と定期的交換等によって問題無く稼動するようになり、今回の移設時点検でもフィルター内側ではトラブルに繋がるような腐食等は生じていなかった。約 3 年半の間、問題無く動き続けた CUFE 内冷却用の商用エアコンには外見上の損傷はほとんど生じていなかった。これらの iGrav17 の状態確認から、定期的な再塗装・部品交換等を実施することにより、エンクロージャーを用いた長期観測が実用的な選択肢となることが明らかとなった。なお、iGrav35・iGrav36 のエンクロージャーに対しては、商用エアコンによって空調している CUFE 内に置いた熱交換機を用いた液冷システムが採用されており、iGrav17 の初期型エンクロージャーの弱点であった iGFE 内冷却用エアコンは用いられていない。現時点においては液冷システムには特段のトラブルは発生していないものの、その長期稼動能力については今後の稼動実績を待つ必要がある。

(3) 重力モニタリングの補助データの取得

重力モニタリングの補助データとして、地下水位データと GNSS データの連続取得を開始した。地下水位データに関する詳細は 2.3.2 項を参照されたい。重力測定値は標高差に敏感であるため、測定した重力変化に重力計の標高変動の影響が出ていないかを確認することは重要である。苫小牧サイトにおいては、比較的合理的なコストにて測定点の標高変

動を確認するために、米国の GPS (Global Positioning System) やロシアの GLONASS (GLOBAL NAVIGATION Satellite System) 等の衛星測位システムを用いた GNSS (Global Navigation Satellite System) 測量と水準測量によって年に 1~2 回程度、各重力基台の標高変動を測定してきた。しかし、このような繰り返し測定では測定間隔より短い標高変動は捕捉不可能であり、また、三脚を用いた臨時設置の GNSS アンテナの位置再現誤差も比較的大きくなる。そのため、今年度から、苫小牧サイトの iGrav36 用基台に併設した絶対重力計基台に直接アンテナを固定して GNSS 測量データの連続取得を開始した。GNSS 衛星からの電波を連続的に受信し、国土交通省国土地理院の GNSS 連続観測システム (GEONET : GNSS Earth Observation Network System) で得られた電子基準点観測データ等を用いた相対測位によって、連続的にスタティック測量を実施できるいわゆる固定局(リファレンスステーション)用 GNSS 受信機として Trimble 社の NetR9 を導入した。導入にあたっては、苫小牧サイトに近い苫小牧特別地域気象観測所における観測史上の最低気温がマイナス 21.6℃であること、アンテナが屋外に設置され海岸近くの風雨・波の飛沫に直接に晒されること、および絶対重力測定用覆い内に設置した受信機本体についても覆い内の密閉性が低く多湿・低温に晒されることから、本来の GNSS 受信機能に加え耐環境性能を考慮した。今後、連続データの取得と解析を進めていく予定である。

2.3.2 地下水位変動影響評価手法の確立

(1) はじめに

重力観測点において得られる重力データには、観測点周辺における地下水位変動に起因する重力変化が含まれる。CO₂地中貯留サイトでの重力モニタリングにあたっては、地下水位変動に起因する重力変化を評価し、それに基づき重力データを補正する必要がある。

今年度は、地下水位変動が重力データに与える影響を評価する手法を確立するために、苫小牧サイトの重力観測点近傍において地下水位の連続データを取得した。さらに、得られた地下水位データを用いて、地下水位変動が重力データに与える影響を推定した。最後に、得られた推定値を用いて重力データを補正し、残差を評価した。

(2) 地下水位の連続データの取得

苫小牧サイトの重力観測点近傍に地下水位観測井を掘削し、地下水位の連続データを取得した。地表面(標高約7m)から深度約5mまでおよび深度約6mから深度10mまでの区間に砂層が、2つの砂層の間には厚さ数十cmの粘土質シルト層が確認された。2つの砂層内にはそれぞれ地下水面が確認された。下層の地下水は、水面が標高0m付近に位置することと、水位データに潮汐応答が確認されたことから、海水と連続した不圧地下水である一方、上層の地下水は宙水であると考えられる。両方の水位変動ともに重力データに影響を及ぼすことが予想されたため、井戸底の深度が5mと10mの観測井を2地点にそれぞれ2本ずつ掘削し(図2.3.1-1)、宙水と不圧地下水の水位の連続データを取得した。観測は2018年6月上

旬に開始し、現在に至るまで連続データの取得に成功している。

(3) 地下水位変動が重力データに与える影響の推定

地下水位観測井を掘削する以前は、宙水が存在しない単純な系を想定していたため、以下の手順による検討を予定していた。すなわち、まず比較的単純な地下水流動シミュレーションを実施し、地下水位の連続データを再現するパラメータセットを得る。次に、地下水位データを再現したパラメータセットを用いて得られる計算結果に基づき、重力観測点における地下水位変動に起因する重力変化を算出する。

しかしながら、観測井の掘削により重力観測点周辺に宙水が存在することが明らかとなったため、推定の方法を以下の手順によるものに変更した。すなわち、宙水と不圧地下水の水位変動をそれぞれ Δh_a と Δh_b とし、両方の水位変動に起因する重力変化 Δg_{est} を、 $\Delta g_{est} = a \times \Delta h_a + b \times \Delta h_b$ と表現した。ここに、 a と b は経験的に決定される係数であり、重力変化の観測値と Δg_{est} の二乗平均平方根誤差が最小となるように決定した。この方法の変更は以下の理由による。すなわち、宙水が存在することにより、重力計と地下水面の距離は想定よりも短かった。重力データは重力計により近い位置における質量変化に対する感度が高く、宙水の水位変動の影響はより深い位置にある不圧地下水の水位変動の影響よりも大きくなると予想した。そこで、シミュレーションよりも簡便で直接的な推定手法として、重力変化を地下水位変化の線形な関数として表現する方法を採用した。図2.3.2-1に Δg_{obs} から Δg_{est} を除して得られた残差を示す。残差の標準偏差は $0.7\mu\text{Gal}$ であった。なお、 a と b はそれぞれ $13.6\mu\text{Gal/m}$ 、 $1.6\mu\text{Gal/m}$ とした。



図2.3.2-1 重力変化の観測値から推定値を除した残差の時間変化

ここで用いた手法は簡便であるため、実用性が高い手法が確立されたと言える。一方で、当該手法は推定の妥当性に関する物理的な説明が容易ではなく、この手法が積雪・融雪期を含む長期に渡って適用可能であるかは現時点では明らかでない。今後、積雪・融雪期間を含む通年のデータおよび1年以上の長期データに対して当該手法の適用性を検証する必

要がある。また、物理に基づく重力データの説明も順次試みる予定である。今年度は、重力観測点周辺で自然電位の連続計測を開始し、降雨浸透に伴い発生する流動電位が主要因と考えられる自然電位変化を捉えることに成功した。今後は計測データの定量的な解析を実施するとともに、降雨浸透過程を反映させた重力データの解析についても実施を検討している。

2.3.3 複数の超伝導重力計の並行測定技術の確立

(1) はじめに

CO₂地中貯留サイトでの重力モニタリングにおいて、複数の超伝導重力計による並行連続測定が有効であることを確認し、その活用手順を示すことが今年度の目標の一つである。Sleipnerでの重力モニタリングに適用された海底重力計に3台の同型の重力計が組み込まれていたことには2つの利点があった：①1台が不調でも欠測にならない、②3台の同時計測によってデータの品質を評価できた。特に超伝導重力計のように他の重力計に比べて桁違いの高精度・高分解能を有する機器の性能は、同型器同士の比較でしか評価できないため、②の効果は大きい。

(2) 複数の超伝導重力計による並行測定の結果

苫小牧サイトでは、AISTの超伝導重力計iGrav17を2015年3月に設置して以降連続観測を行ってきた。一方、本プロジェクトでは2台の超伝導重力計（iGrav35・iGrav36）を新たに導入し、2017年度中に苫小牧サイトへの設置を試みた後再調整を経て、2018年7月初めに苫小牧サイトへの設置を完了した。3台の重力計による約2か月間の並行測定によって性能を確認後にiGrav17は撤去し、2018年9月11日以後は2台による並行測定状態にある。この間、2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震が重力観測点で震度5強の震動を引き起こし、また北海道全域に停電を引き起こしたことは重力観測にも大きく影響した。停電により1台の記録は中断したが2台の連続観測は維持された。また本震後も度々発生した大きい余震により重力計記録にオフセットが生じることがあったが適切に補正処理することでデータの連続性を確保できた。これらの経験はより安定な連続観測のための改良に貢献した。地震時以外には、短期間の欠測・内部気圧計の異常などの軽微なトラブルが数回発生したが、いずれも並行測定の特長を活かして検出して修正対応できた。

(3) 並行測定データの整合性の確認・ドリフト評価等

超伝導重力計はドリフトが極めて小さいことが長所の一つである。標準的なドリフト評価方法は絶対重力計との並行測定であるが、絶対重力計の性能が制約となるため、半年あるいは1年の期間をおいた並行測定結果の比較によってドリフトを評価する。半年より短い期間でドリフトを評価するためには、超伝導重力計同士の並行測定が有効である。特に既設の超伝導重力計に隣接して新設観測点を設けて超伝導重力計を設置する場合には、既

設の重力計を基準にして新設重力計のドリフト特性を速やかに評価できる。図2.3.3-1左に移設直後のiGrav36の記録とiGrav17の記録の差を示す。ここに、iGrav17は約1年間連続計測を継続してドリフトが十分小さい状態にあった。超伝導重力計のドリフトは経験的に経過時間について時定数の異なる2つの指数関数の和で表すが、安定な連続観測のためには長期ドリフトが十分に小さいことが必要である。8月下旬の記録（図2.3.3-1右）では長期ドリフトが十分に小さくなっていることを確認できた。もう1台の重力計iGrav35については、設置直後の記録が調整作業に伴い、やや乱れたが、7月4日以降はiGrav36とほぼ同じ経過をたどった。これらの評価を経て、2018年9月に重力計を引き継いで連続観測を維持できた。

苫小牧サイトでは、これとは別の特性評価も実施した。超伝導重力計は一般には高感度に設定して連続観測することが想定されているが、超伝導重力計の調整時にはほかに3つの感度の切り替えができる。苫小牧サイトは海岸に位置するためにノイズレベルが大きく、高感度設定よりは測定可能レンジの広い中感度設定の方が実用的である可能性が考えられたため、1台を中感度設定にして並行測定を行っている。

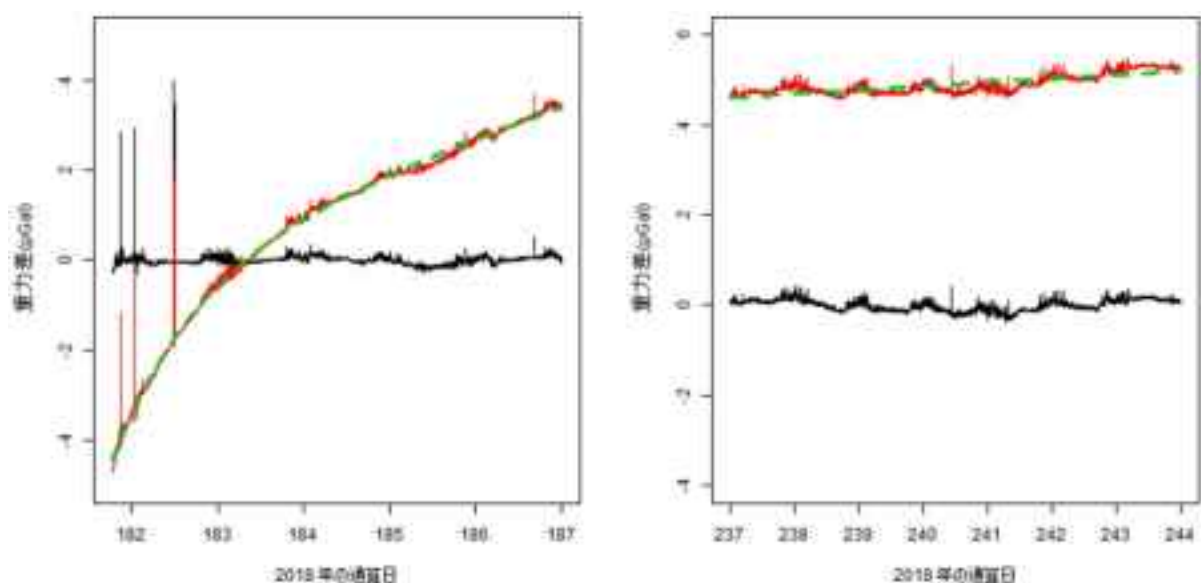


図2.3.3-1 2台の超伝導重力計の比較測定によるドリフト評価

（左：2018年7月1～6日の設置直後のiGrav36の記録と既設のiGrav17の記録の差（赤線）から評価したドリフト関数（緑線）と残差（黒線）；右：2018年8月26日～9月1日のiGrav36とiGrav17の差（赤線）から評価したドリフト関数（緑線）と残差（黒線））

(4) 並行測定により機器障害発生時に連続性を維持する方策

並行測定していれば重力計1台の停止でモニタリングの中断にはならない。また並行測定データの相互比較によって、小さい異常でも速やかに発見して対策できるので単体の観測中断も最小限にできる。機器の稼働状態は重力計に付属するPCにリモートで接続して各

チャンネルの信号成分を見比べること、あるいはPCにインストールされている標準的なデータ処理システムを使って処理結果を見比べることにより把握できる。さらにはダウンロードしたデータをルーチ的に処理することで異常を早期に把握できる。連続性が乱されたデータはダウンロードしたデータを詳細に比較解析することで連続的な評価に利用できるように補正処理できる。北海道胆振東部地震後に度々発生したオフセットについては、こうした方策が有効に機能した。現時点では重力観測点は1か所だが、仮に複数の観測点があれば、1か所で常時複数台による並行測定を行うのではなく、1台を短期ドリフト評価用の比較用機とすることで、効率的な運用を図る方策もありうる。

(5) 並行測定により重力観測点近傍の質量分布変化を評価する可能性

並行測定データに含まれる同相シグナルを相殺して得られるデータに基づいて、微小な重力差を検出し、それから重力計近傍の質量分布変化を評価できる可能性がある。並行測定データの差から降雨時・融雪時に有意な重力差を検出できた（図2.3.3-2左）。これは2台の重力計の基台の面積が異なることによる、降水の地下浸透過程の違いが主に影響したためと考えられる。並行測定データから重力観測点近傍地下の質量分布変化を評価できる一例と言える。一方、図2.3.3-1、図2.3.3-2左において、2台の重力計記録の差には日周・半日周の微小な信号成分も認められる。2台の重力計が海岸線からの距離がそれぞれ異なる地点に設置されている（図2.3.3-2右）ことを鑑みると、これらの微小な信号成分はそれぞれの観測点における潮汐成分にわずかな差がある可能性を示している。なお、図2.3.3-2左において、2台の重力計の感度設定は異なっており約20倍の差があったが、中感度に設定したiGrav035でも実用上十分な感度の記録が得られていることを確認した。

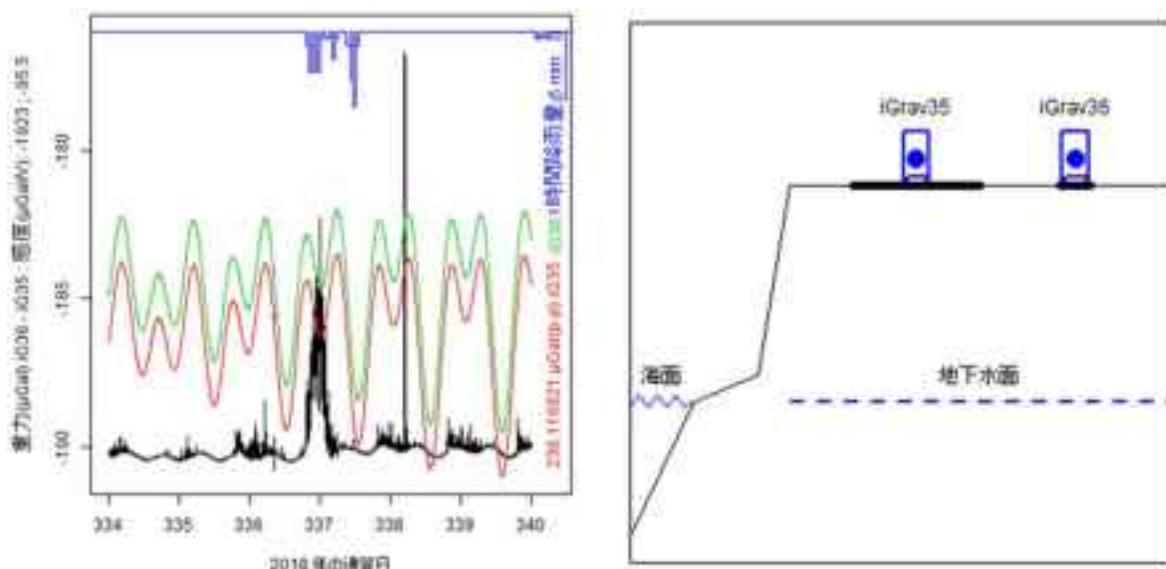


図2.3.3-2 超伝導重力計記録および重力観測点と海面・地下水面の位置関係

左：2台の超伝導重力計記録（iGrav35の記録（赤線）；iGrav36の記録（緑線）；iGrav35とiGrav36の記録の差（黒線）；降雨量（青線））；右：重力観測点と海面・地下水面の位置関係を示した概念図

2.3.4 まとめ

(1) 重力データを長期連続的に取得するための方法の構築および観測ノウハウ蓄積

苫小牧サイトでの重力モニタリングを継続実施し、海岸近傍での長期連続観測実現の観点から機器の状態監視を行い、定期的な保守・点検作業を行った。その結果、安定的な連続データの取得に成功した。また、2018年6月29日に苫小牧サイトに設置した iGrav35・iGrav36 による観測が順調であったため、約3年半の観測を継続してきた AIST の iGrav17 は 2018年9月10日に苫小牧における観測を終了した。9月11日に本体をエンクロージャーから取り出して観測期間中の塩害ダメージの有無等を点検し、連続観測に伴う損傷等を確認したが、エンクロージャーに若干の錆が確認された以外には大きな損傷は確認されなかった。これらの iGrav17 の状態確認からは、定期的な再塗装・部品交換等を実施することにより、エンクロージャーを用いた長期観測が実用的な選択肢となることが明らかとなった。

また、今年度は重力データの解析に必要となる補助データについて、新たに地下水位データと GNSS データの連続取得を開始した。GNSS データの取得については、耐環境性能を重視しつつ機器を選定し、苫小牧サイトの iGrav36 用観測基台に併設した絶対重力計基台に直接アンテナを固定して設置した。

(2) 地下水位変動影響評価手法の確立

重力観測点周辺の地下水位変動が重力データに与える影響を評価する手法を確立するために、苫小牧サイトの重力観測点近傍において地下水位の連続データの取得を開始した。さらに、得られた地下水位データを用いて、地下水位変動が重力データに与える影響を推定した。最後に、得られた推定値を用いて重力データを補正し、残差を評価した。

観測は2018年6月上旬に開始し、現在に至るまで連続データの取得に成功している。観測井の掘削により、重力観測点周辺に宙水が分布することが明らかとなった。そのため、当初予定していた方法よりも簡便で直接的な経験的手法により地下水位変動の影響の評価を試みた。その結果、重力変化の観測値から推定値を除いて得られた残差について安定的な結果が得られ、残差の標準偏差は $0.7\mu\text{Gal}$ であった。

ここで用いた手法は簡便であるため、実用性が高い手法が確立されたと言える。一方で、当該手法が積雪・融雪期を含む長期に渡って適用可能であるかは現時点では明らかでない。今後、積雪・融雪期間を含む通年のデータおよび1年以上の長期データに対して当該手法の適用性を検証する必要がある。

また、今年度は、重力観測点周辺で自然電位の連続計測を開始し、降雨浸透に伴い発生する流動電位が主要因と考えられる自然電位変化を捉えることに成功した。今後は計測データの定量的な解析を実施するとともに、降雨浸透過程を反映させた重力データの解析についても実施を検討している。

(3) 複数の超伝導重力計の並行測定技術の確立

苫小牧サイトにおいて複数の超伝導重力計を用いた並行測定により、機器障害発生時にも連続データ取得を計測する方法を確立した。特に、重力計1台の停止によりモニタリングが中断しない点に加えて、並行測定データの相互比較によって小さい異常でも速やかに発見して対策できる点において、並行測定技術が有効であることが確認された。また、既設・新設の重力計から得られるデータの整合性が確認されるとともに、並行測定技術を適用することにより、速やかなドリフト評価・トラブル発見とデータの補正処理の実施が可能であることが確認された。さらに、並行測定データの同相ノイズ成分を除去することにより、微小な重力変化の原因推定が可能となることが示唆された。特に、重力観測点近傍における質量分布の変化の詳細な把握に貢献するとともに、データ解析の分解能を更に向上させることができると考えられる。

2.4 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立

CCSを事業として成立させるには、CO₂を貯留する地層を的確にモデリングし、CO₂の貯留量や性状を精度よく見極め、事業の不確実性を低減することが極めて重要である。この地質モデル構築のための基本的な技術は、石油天然ガス生産分野で開発されてきたものを利用できるものの、CO₂地中貯留に特有の課題が残されている。ひとつは、石油天然ガス田では坑井を掘削し石油を生産することにより収益が上がることで期待されるため、比較的多くの（サイトにより100本規模の）坑井が掘削されると同時に地層の物性値も検層により取得され、正確な地質情報が蓄積されていくのに対し、CO₂地中貯留では坑井掘削自体が貯留コスト増加につながるだけでなく、坑井それ自体がCO₂漏洩パスになるため、少ない（1本のみの場合もある）坑井で事業を進めざるを得ない可能性がある。そのためCO₂地中貯留においては、把握が難しい貯留層の広がりや、数少ない坑井からの情報を用いて地質モデルを構築する必要がある。

もう一つは、石油天然ガス田では密度の軽い流体が地下にある状態のモデリングを行うため、検出が比較的容易で反映しやすい一方、CO₂地中貯留では帯水層の広がりをモデリングし、性状の良い貯留層（帯水層）の判別が難しいことである。

正確な地質モデル構築は、貯留容量不足や、圧入性低下（地層破壊圧まで圧入井の圧力を増加させてもCO₂が地中に入っていくなくなる状態）といった事業リスクを低減すること、およびモニタリング範囲を決定するサイト設計において重要な位置を占めている。そこで本課題では、我が国のような構造が複雑で不均質性が大きい地層における大規模CO₂地中貯留を想定した、海域での地質モデル構築手法の確立を目指す。

二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員であるRITEは、陸上の長岡サイト（坑井4本、トータル1万トン）での地質モデル構築については知見がある。これに加え、海域の苫小牧実証サイト（主要な坑井3本、10万トン／年圧入）での地質モデル構築のノウハウを集約することは、1万トン／年、10万トン／年での知見から実用化規模の100万トン／年にスケールアップしていく上で有効である。また日本CCS調査（株）が構築した地質モデルは、苫小牧サイトに特化したものであるが、二酸化炭素地中貯留技術研究組合において様々な手法を検討することにより、日本の地質特性に適した地質モデル構築手法の洗い出しになる。なお、苫小牧サイトの検層・弾性波データは日本CCS調査（株）が取得したものであり、二酸化炭素地中貯留技術研究組合では初期のデータを借用し、我が国のサイトを対象とした地質モデル構築手法の一般化と、効率的なデータ取得種目等の検証、および大規模化が必要なモデリング技術を確立する。

一方、広域地下水流動について、「CCS実証事業の安全な実施にあたって」（経済産業省：2009）において、地下水流動に関して可能な範囲で考慮・予測することが記されており、対応する研究を進めている。この地下水流動は、CO₂貯留層よりも浅部の生活圏を含む範囲を想定しており、日本CCS調査（株）とは独立に実施している案件として、基となる採水データ収集も二酸化炭素地中貯留技術研究組合が行っている。

2.4.1 検層・弾性波探査データ統合手法の策定

(1) はじめに

孔隙率および浸透率の空間分布推定は、貯留量評価やCO₂の広がりを把握するために必要不可欠である。坑井で取得される検層データやコア解析データは、坑井近傍の地層情報を反映したものであるが、貯留層全体を代表するものではない。そのため、空間データとして取得される三次元弾性波探査データをガイドにして、坑井で得られた物性値を外挿する技術が有効である。坑井の数が多い場合には、地球統計学的手法による空間補間手法を用いることができるが、坑井が数本しか使用できない場合には精度が低い。CO₂地中貯留事業では、少ない坑井数のデータを用いて貯留層評価を実施して、事業の進行の可否を決定することになる。たとえ坑井が一本であっても、弾性波探査データと予測対象である検層データの関係性を導出することができれば、坑井から離れた地点における孔隙率などの貯留層の水理学的パラメータを推定が可能となる。

そこで本年度は、苫小牧CO₂圧入実証試験サイトのデータを用いて、検層データと弾性波探査データの統合手法を検討した。まず、弾性波探査データから各種アトリビュートデータを作成し空間的な広がりをもとに整理した。次に、弾性波探査データよりもデータ間隔の狭い検層データをアップスケールし、両データ間の関係性を評価した。さらに、複数のアトリビュートデータと孔隙率データとの関係性を定量的にモデル化する手法として、機械学習によるアプローチを検討した。最後に、構築した機械学習モデルを用いて、苫小牧サイトの孔隙率分布モデルを作成した。

(2) 検層・弾性波探査データの比較

はじめに、苫小牧サイトで取得された検層データと弾性波探査データの対比を行った。掘削された坑井のうち、弾性波探査データ領域内において本検討で対象とした萌別層を通過するものは、二号圧入井（以下IW2）のみである。IW2では各種物理検層が実施されているが、本検討ではNMR検層から推定された孔隙率プロファイルを予測対象として使用した。また、弾性波探査データのz方向は時間軸であるため、坑井データに対して深度時間変換を実施し、時間軸での解析を行った。

図2.4.1-1に、弾性波探査データから作成された振幅や位相など各種アトリビュートデータを示す。アトリビュートデータは、元の弾性波探査データと同一サイズのボリュームデータであり、後述する機械学習アプローチにおける入力データとして使用する。アトリビュートデータを坑井に沿って内挿補間し、坑井データと対比した（図2.4.1-2）。アトリビュートデータの変動周期は、孔隙率データ変動周期よりも長く、直接的な対比が難しい。そのため孔隙率データを平滑化してアトリビュートデータの変動周期に近づけた。また、個々のアトリビュートと孔隙率の相関は弱く、どのアトリビュートデータからも直接的に孔隙率を推定するような関係式を求めることは困難であった。

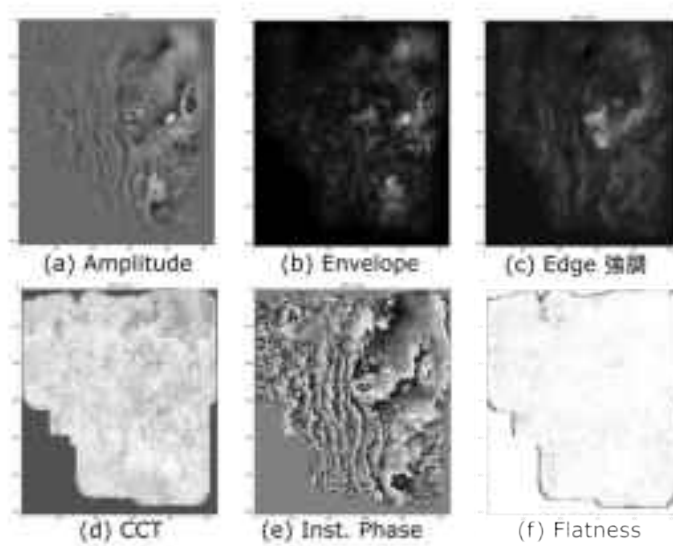


図2.4.1-1 サイスマトリビュート例

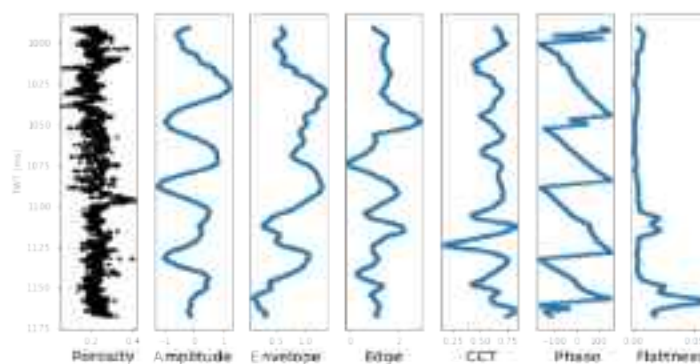


図2.4.1-2 坑井沿いのアトリビュートプロフィール

(3) データ統合のための機械学習アプローチ

機械学習とは、入力データと予測対象データ間の関係性を既知のサンプルデータを用いて学習し、新たな入力データを用いて予測を行う技術である。様々な機械学習アルゴリズムがあるが、深層学習モデルへの発展性を考慮して、最もシンプルな全結合型ニューラルネットワークモデルの適用性を検討した。本検討では、隠れ層を1層から9層まで、各層の要素数を最大200まで拡張して、パラメータスタディを行い最適な予測モデルの構築を行った。

機械学習では、サンプルデータが多いほど学習精度が高い。坑井データと弾性波探査データの統合において、坑井データをアップスケールすることでデータサンプル数が少なくなると学習精度が低下する。そのため、データサンプル数を確保するためには、弾性波探査データの内挿補間と、坑井データの適切な平滑化が有効であることを確認した。

単一のアトリビュート入力では、そのアトリビュートの傾向が強く現れるために、地下

の物性分布としては堆積学的に整合的でない可能性が高い。そこで、複数のアトリビュートを組み合わせることによって、予測対象によりマッチした予測が可能となることがわかった。またその際には、類似した傾向のアトリビュートよりも、異なる傾向のアトリビュートを組み合わせる方が、坑井近傍における予測の精度が高いことがわかった。

(4) 萌別層孔隙率分布予測

構築した機械学習モデルを使用して、三次元弾性波探査領域に対する孔隙率の空間分布モデルを作成した。貯留対象層である萌別層の孔隙率モデルを図2.4.1-3に示す。坑井において観測される比較的高い孔隙率を示す層が、地層境界に沿って連続する分布が予測された。また、坑井近傍の浅部においては、坑井南西側に低孔隙率領域が広く分布する可能性が示唆された。

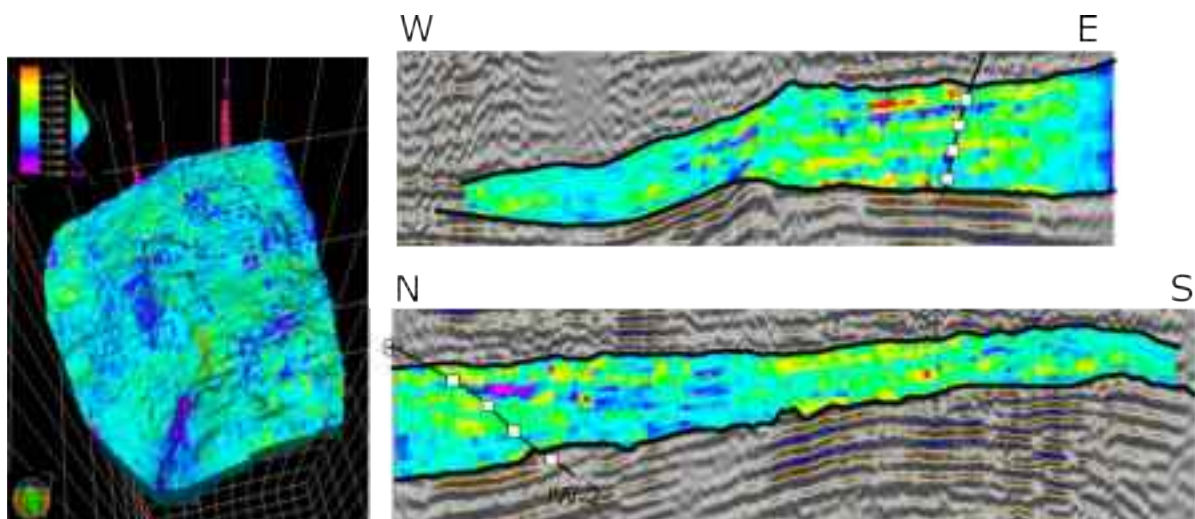


図2.4.1-3 萌別層における予測孔隙率分布図

(5) まとめ

検層データと弾性波探査データを統合手法の一つとして、機械学習によるアプローチの有効性を示した。本アプローチにより、対象領域を通過する坑井が一本しかない場合においても、比較的容易に貯留層モデルを構築できることが示された。また、同手法は坑井近傍データを用いた機械学習モデル構築時には計算機資源を多く使用するが、領域全体を予測する際は極めて高速である。そのため、100万トン規模の大規模サイトにおけるモデル構築において強力なツールとなる。

2.4.2. CCSライフサイクルにおける不均質性・不確実性評価手法の要件整備

(1) はじめに

CO₂地中貯留のプロジェクトは、サイト選定、圧入前評価、詳細設計・建設、CO₂圧入、サイト閉鎖後管理といったステージ（CCSライフサイクル）に大きく分けられる。特に設計・建設までのステージでは、プロジェクトを次のステージに進めるかどうかの意思決定が求められるが、その判断基準の根幹をなすのが地質モデルとなる。したがって、実用化規模の100万トン/年という大規模地中貯留を想定した地下地質データの解析手法・地質モデルの構築手法を確立することは非常に重要である。

一方、直接目視することが不可能な地下地質は地層の分布形態・岩相・物性の分布は不均質であり、常に不確実性がつきまとう。特にCO₂地中貯留のプロジェクトは石油天然ガス開発事業と比較して、データが少ない中で地質モデルを構築する必要がある。したがって、CCSライフサイクルの各ステージで求められる地質モデルの精度とそれに見合う地質の不確実性を理解し、不確実性を低減させるためのデータや解析手法を把握する必要がある。

そこで本課題では、苫小牧実証サイトで取得された弾性波探査データおよび坑井データを用いて、大規模二酸化炭素地中貯留を想定した場合の地質の不均質性や不確実性の程度について検討を行い、CCSライフサイクルの各ステージで取得すべきデータや物性値および不確実性を低減させるための解析手法を整備することを目的とする。

初めに、苫小牧サイトで掘削された坑井から得られたコア試料や物理検層データを利用した堆積学的検討および物性値の解析を実施した。この検討により、坑井スケールで想定される貯留層の分布および貯留層内の物性値に関する不均質性や不確実性を把握する。

次に、坑井データと弾性波探査データを統合して、地質の不確実性を反映した複数の地質モデルを構築し、そのモデルでCO₂圧入挙動シミュレーションを実施した。本シミュレーション結果により、地質がもつ不確実性が貯留量に与える影響を評価し、その不確実性を低減させるデータや解析手法の整備に繋げる。

(2) コア解析およびイメージ検層解析による堆積学的な貯留層評価と物性値整備

坑井スケールで想定される貯留層の不均質性や不確実性を把握するため、苫小牧実証サイトで得られているコア試料およびイメージ検層を併用した堆積学的な検討と物性値の算出を行った。コア試料は貯留層を構成する岩石から直接的にデータを取得できるため有効であるが、CO₂地中貯留では掘削コスト等の制約からコア試料の採取は限られる。石油開発業界を中心として、地層の比抵抗値から孔壁を高解像度で可視化するイメージ検層が従来から一般的に取得されており、コア試料に近い分解能で孔壁に沿って貯留層を構成する堆積相や堆積構造を解析することが出来る。このため、限られたコア試料とイメージ検層を併用することで、コア試料を取得していない深度や

坑井の堆積学的解析を実施することができる。一般に、複数の坑井の堆積柱状図を作成し、堆積学的・シーケンス層序学的に対比することによって、地層の時間的・空間的な堆積環境の変遷を理解することが出来る。今年度は、各坑井のイメージ検層を用いた堆積柱状図の作成および堆積シーケンス層序区分・岩相区分および坑井間対比、古流向解析、堆積シーケンス毎・堆積相毎の孔隙率・浸透率の岩石物性値の算出を実施した。

図2.4.2-1は、各坑井における堆積柱状図とそのシーケンス層序学的な対比を示す。本サイトでは、CCS-2からオールコア試料を採取しており、このコア試料における堆積柱状図を作成した。コア試料の堆積相解析結果とイメージ検層の坑壁イメージ上の堆積相を比較することで、コア試料を取得していないCCS-1 (OB-1)、IW-2、OB-2の堆積柱状図を作成した。各坑井の堆積柱状図のシーケンス層序学的な対比を実施することで、垂直方向に加え側方方向の堆積環境の変化、つまり地層の不均質性の推定ができる。

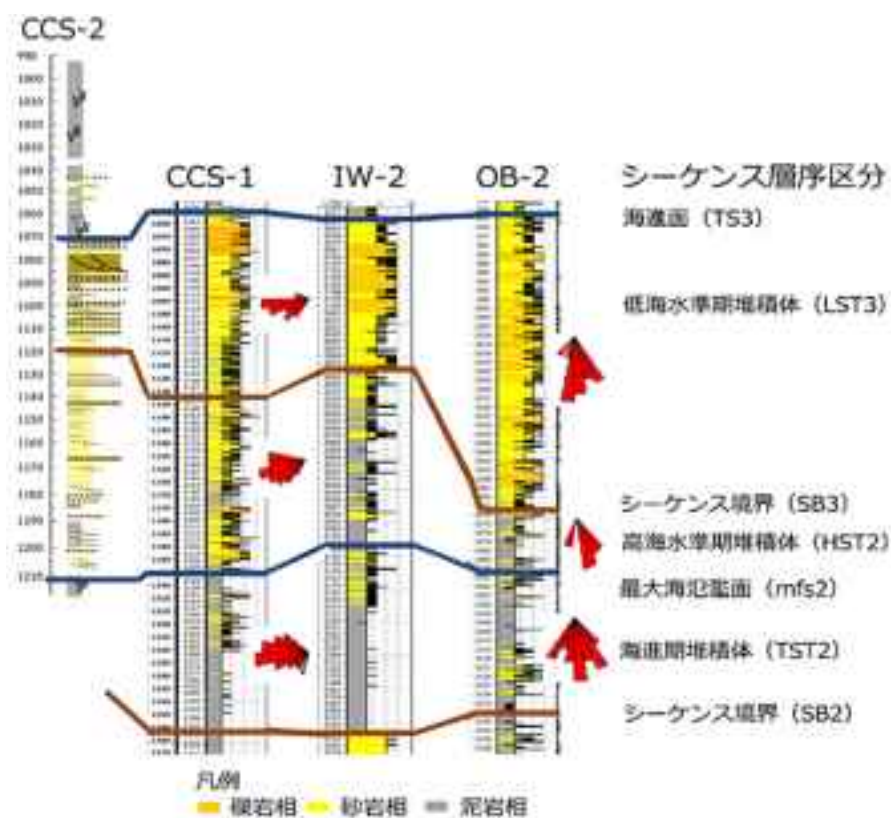


図2.4.2-1 各坑井のコア試料・イメージ検層に基づく堆積柱状図構築
および古流向解析

イメージ検層では、貯留層を構成する堆積岩に特徴的な堆積構造を可視化できる。本サイトでは、イメージ検層から堆積岩に認められる主要な堆積構造のひとつである斜交層理が砂岩部に発達している。斜交層理とは、貯留層を構成する堆積物が河川等

から運搬・堆積するとき形成するベッドフォームのひとつであり、そのフォーセット面の走向・傾斜解析から堆積物の古流向を解析できる。ただし、本サイトでは地層堆積後に地層が変形を被っていることから、地層の層理面を水平面に戻した後、斜交層理の古流向解析を実施した。図2.4.2-1のローズダイアグラムは、CCS-1（OB-1）とOB-2における古流向解析の結果を表している。両者の坑井では、堆積物の古流向は概ね西から南方向を示していることが読み取れる。この古流向の傾向は、三次元弾性波探査データを用いた堆積学的解析から得られている貯留層の発達様式と概ね相補的なものである。このことは、イメージ検層に基づく古流向解析は、堆積体の発達様式を示す情報源のひとつとして貢献できる可能性が高いことを示す。このような堆積物の古流向情報は、三次元弾性波探査データの取得が困難な沿岸域付近の堆積体分布を制約する重要な指標となる。

コア試料とイメージ検層に基づく堆積学的検討結果に基づき、貯留層をプロデルタ（泥岩相）、デルタフロント（砂岩相）、チャンネル（礫岩相）の3つに分類し、堆積シーケンス毎、ファシス毎の物性値を算出した。孔隙率・浸透率は、堆積シーケンス毎、堆積相毎のヒストグラムから統計値を算出し、それを代表値とした。図2.4.2-2は、IW-2における堆積シーケンス毎、堆積相毎の全孔隙率のヒストグラムを示す。一方、図2.4.2-3は、IW-2におけるCMR検層の中のSchlumberger-Doll Research法（SDR法）から算出した浸透率のヒストグラムを示す。両者のヒストグラムは、堆積相毎の不均質性を示しており、後述する（2）複数シナリオに基づく地質モデル構築およびCO₂圧入挙動シミュレーションによる不確実性評価の検討において、物性モデル構築の際に入力パラメータの参考となった。

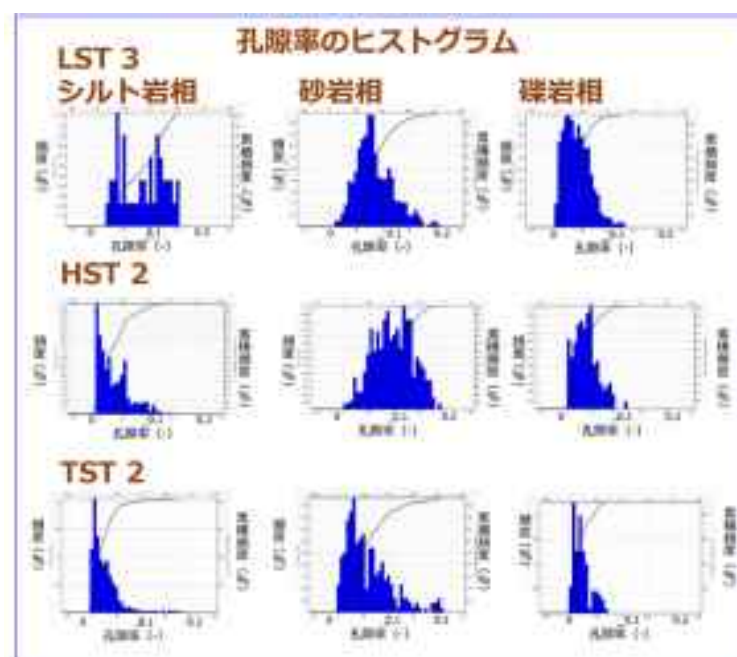


図2.4.2-2 堆積シーケンス毎、堆積相毎の全孔隙率ヒストグラム

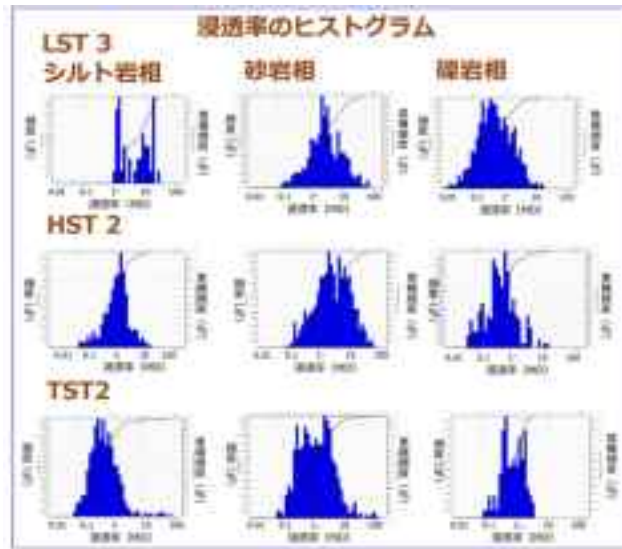


図2.4.2-3 堆積シーケンス毎、堆積相毎の浸透率ヒストグラム

(3) 複数シナリオに基づく地質モデル構築およびCO₂圧入挙動シミュレーションによる不確実性評価

昨年度までの成果である苫小牧サイトにおける三次元弾性波探査データを用いた堆積学的な解析結果および今年度実施したイメージ検層データの堆積学的解析結果（上記(1)コア解析およびイメージ検層解析による堆積学的な貯留層評価と物性値の算出）を用いて、地質の不確実性を反映した複数のシナリオを構築し、各地質シナリオを三次元的なファシスモデルおよび物性モデルとして複数の具現象を作成した。また、技術研究第四グループ大成建設（株）との協働により、CO₂圧入挙動シミュレーションを実施し、地質の不確実性が貯留量・貯留範囲にもたらす影響について検討を行った。本検討結果によって、不確実性の高い地質要素の特定とその原因および不確実性を低減させるための対応策を洗い出すことが出来ると期待される。

図2.4.2-4に堆積学的シーケンス層序区分ごとの地質シナリオを示す。弾性波探査データおよびイメージ検層の解析結果に基づき、①礫質な岩相が卓越するチャネル、②砂質な岩相が卓越するデルタフロント、③泥質な岩相が卓越するプロデルタの3つのファシスに区分した。

また、図2.4.2-5に示すように、本検討では沿岸に位置する苫小牧OB-2を地質モデルの中に入れるため、三次元弾性波探査データエリアよりも範囲を北に拡張して地質モデルを構築した。拡張した範囲では三次元弾性波探査データがないため、ファシスの分布形態の不確実性が非常に高い。このファシス分布の不確実性を表現するために、上記3つのファシスの分布形態をシーケンス層序区分LST IIIに対して4つ、HST Iに対して3つの地質シナリオを構築し、三次元的な地質モデルとして具現化を行った。

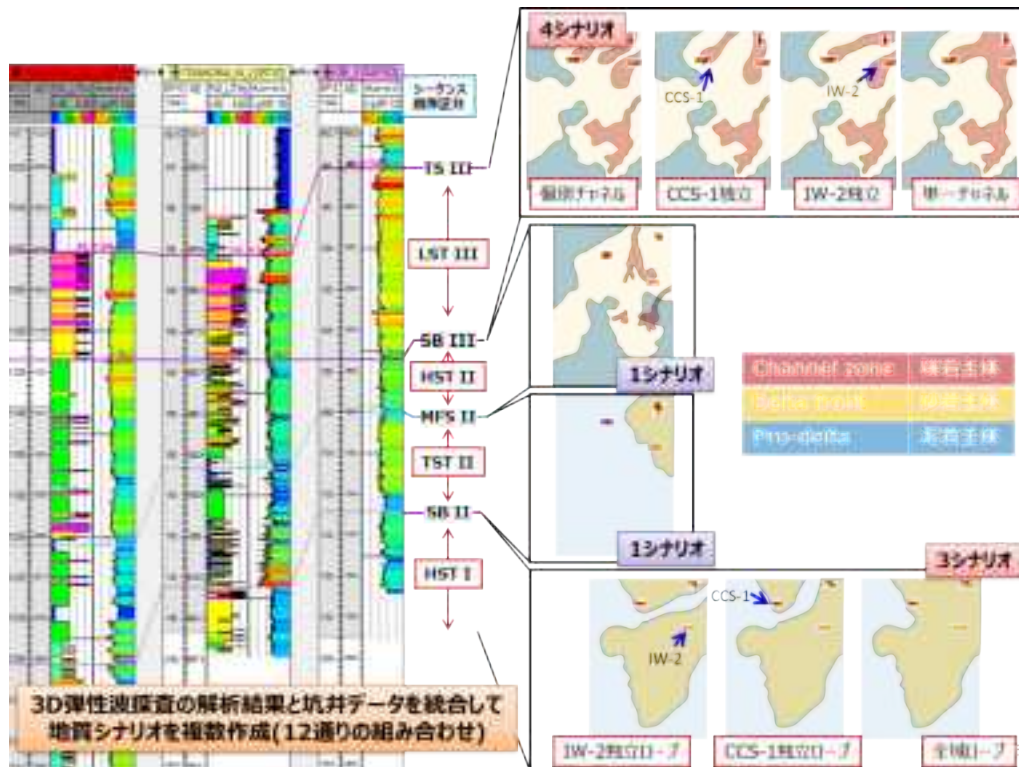


図2.4.2-4 シーケンス層序区分ごとの地質シナリオ（計12通りの組み合わせ）

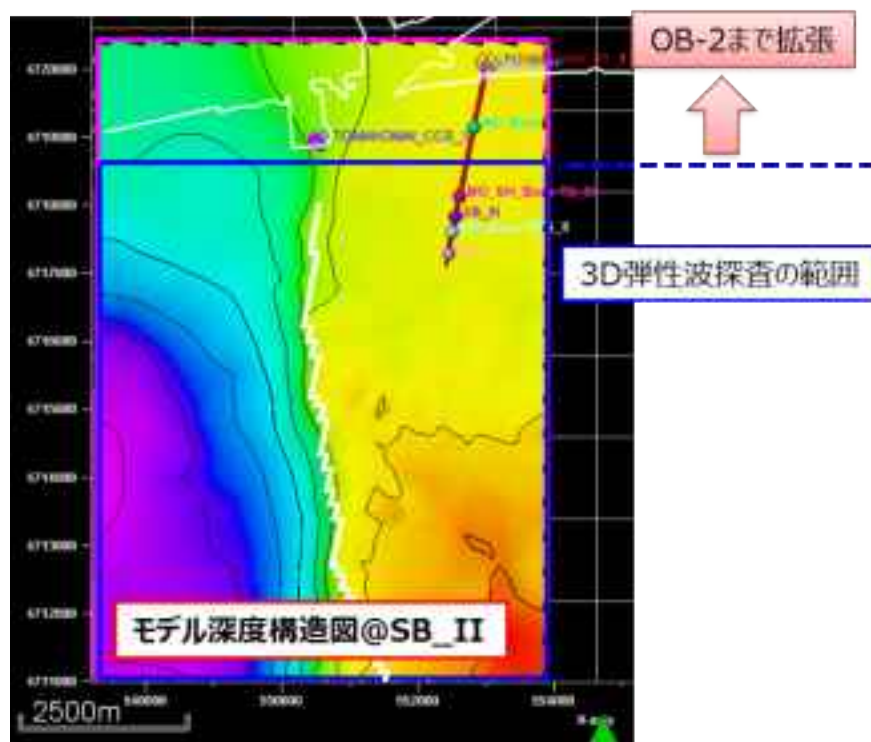


図2.4.2-5 ピンク枠：地質モデル構築範囲、青枠：三次元弾性波探査範囲

具現化した計12通りの物性モデルを用いてCO₂の圧入挙動シミュレーションを実施した。その結果、地質シナリオの違いによって、①観測井である苫小牧OB-2までのCO₂

到達のタイミング、②CO₂の分布範囲、③貯留層圧力の分布範囲の3点に違いが表れた。図2.4.2-6にそのうちの2ケース（個別チャンネルケースと単一チャンネルケース）の1,000万トン圧入後（10万トン×100年）のCO₂飽和率分布および貯留層圧力分布の例を示す。

①に関しては、単一チャンネルケースの方が相対的に早くOB-2に達している。②に関しては、個別チャンネルケースでは圧入地点を中心に同心円状に分布する一方、単一チャンネルケースでは南北に細長い分布となっている。③に関しては、個別チャンネルケースでは検討範囲の中央部まで広く分布する一方、単一チャンネルケースでは南部に広がらず北部を中心とした分布となっている。

以上の3点の違いは、浸透率の高いチャンネルゾーンが単一チャンネルでは広くOB-2まで連続的に分布していること、および個別チャンネルケースでは北部に3本のチャンネルが密に分布していることが原因であると考えられる。つまり、三次元弾性波探査データがなく、不確実性の高い地質要素を含む範囲におけるチャンネルの分布形態が最終的なCO₂の分布範囲および貯留層圧力の伝搬範囲に大きく影響を与えていると言える。

本検討結果より、大規模地中貯留を想定する場合においては、地質の不確実性を考慮した地質モデル・CO₂圧入挙動シミュレーションの有効性が示された。また、不確実性を低減させるためには沿岸域での三次元弾性波探査データの取得が有効であると考えられる。

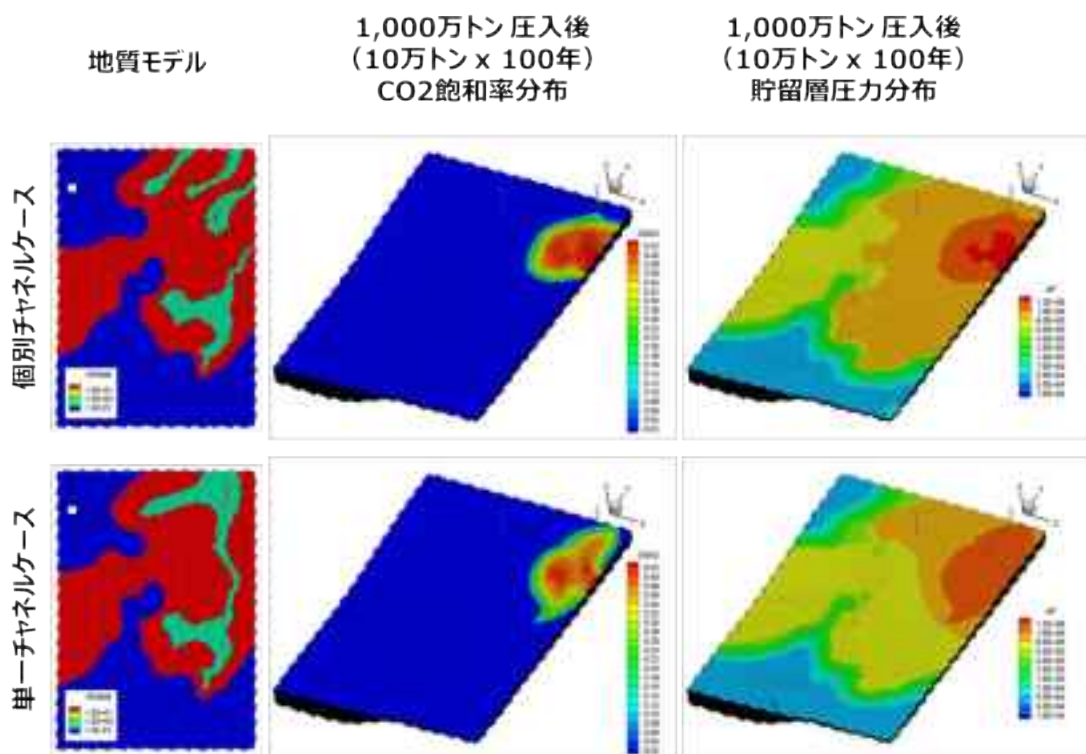


図2.4.2-6 個別チャンネルケースと単一チャンネルケースにおけるCO₂圧入挙動シミュレーション結果（10万トン/年のレートで100年間CO₂を圧入した時のCO₂飽和率分布および貯留層圧力分布）

2.4.3 広域水理地質モデル構築に必要な解析項目の把握

CO₂地中貯留に関連する生活圏への潜在的影響を考える上で、貯留層から地表を含めた地下水流動を考慮する必要がある（図 2.4.3-1）。潜在的影響の原因は、CO₂圧入による圧力伝搬、塩水の移行、CO₂流の移行などと考えられており、それらが圧入サイト周辺の地下水流動場に影響し、その結果として水位変化や pH の低下などの地下水環境の変化が生じると考えられている。また、浅部に移行した CO₂が浅部地下水流動場の効果でより遠くまで影響範囲が広がってしまう可能性も考慮する必要がある。

地下水環境に関しては、米国では飲料水保護に関わる CO₂圧入井に関する法律が制定されている（EPA, 2010）だけでなく、貯留事業の長期的な信頼性を高めるに当たり、万一の漏洩を想定した地下水環境変化を考慮する必要性が高まってきている（IEAGHG, 2011）。我が国では海洋汚染防止法により、万一を想定した環境影響評価と、貯留事業時の定期的なモニタリングが義務づけられている。

これらの規制に対応するための地下水影響評価技術は、①CO₂圧入による影響の範囲の想定と、②影響の有無の判断に分けられる。①は浅部までを考慮した広域水理モデルを構築した上で評価を実施することになり、②は効果的なモニタリング技術の開発と適用に相当すると考えられる。二酸化炭素地中貯留技術研究組合（2018）では①と②の評価技術の研究開発を進めている。

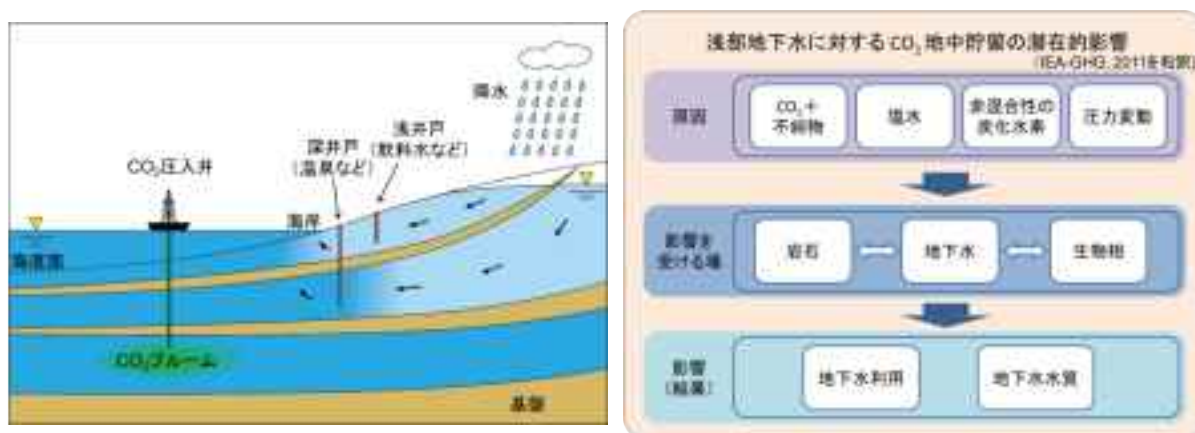


図 2.4.3-1 地下水流動の模式ならびに CO₂ 地中貯留の潜在的影響

特に、広域地下水流動については、「CCS実証事業の安全な実施にあたって」（経済産業省：2009）に、地下水流動に関して可能な範囲で考慮・予測することが記されており、対応する研究を進めている。本研究ではこの地下水流動をCO₂貯留層よりも浅部の生活圏を含む範囲を想定し、広域地下水流動（生活圏地下水）の概念的なモデルを構築することを目的とした。地質モデルはCO₂貯留性能評価の観点から地層区分を基に構築されているが、地下水流動は必ずしも地層区分と一致するとは限らない。つまり、広域地下水流動の概念モデルの構築には対象とする解析項目等の水理情報の入手も必要となる。

そこで、苫小牧サイト周辺の既存井戸調査を行い、そのうちの約30か所から地下水の採

水ならびに溶存イオン分析を夏季と冬季、計2回、今年度を実施した。主要イオン7種類の濃度を6成分（ナトリウム+カリウム、カルシウム、マグネシウム、塩化物、炭酸塩、硫化物）に集約し、ヘキサダイアグラムを作成して水質型を検討した結果、次の知見を得た。

- ・地表付近の完新統や支笏火山噴出物の地層では、重炭酸カルシウム型（I型、図2.4.3-2下段の黄緑色とピンク色）が主で、非炭酸塩型（III型、図2.4.3-2下段の緑）の水質型も圧入地点より東部の井戸で認められた。
- ・地下100～300m付近の更新統では、重炭酸ナトリウム型（II型、図2.4.3-2下段の水色）が主な水質型であった。
- ・さらに深部の鮮新統では、塩化ナトリウム型（IV型、図2.4.3-2下段の青色）であった。

ヘキサダイアグラムのスケールは他の型の50倍と濃度が高いことに注意が必要である。一般に、浅部の地下水の組成は、地下水が大気や地層と反応する時間が長くなるにつれ、つまり、山側からCO₂圧入地点のある海側へ向かって地下水が流れるにつれて、ヘキサダイアグラムが太くなる傾向になると予測される。このような傾向は、西側の更新統以浅と東側の支笏火山噴出物以浅で認められた。一方で、東側の更新統では圧入地点から遠く、かつ、浅くなるとヘキサダイアグラムが太っており、浅部とは地下水流動系が異なると考えられた。さらに、圧入地点を含む深部の鮮新統では、より上部の地層とは水質型が全く異なり、地下水は地質堆積時に取り込まれた塩水を胚胎していた。

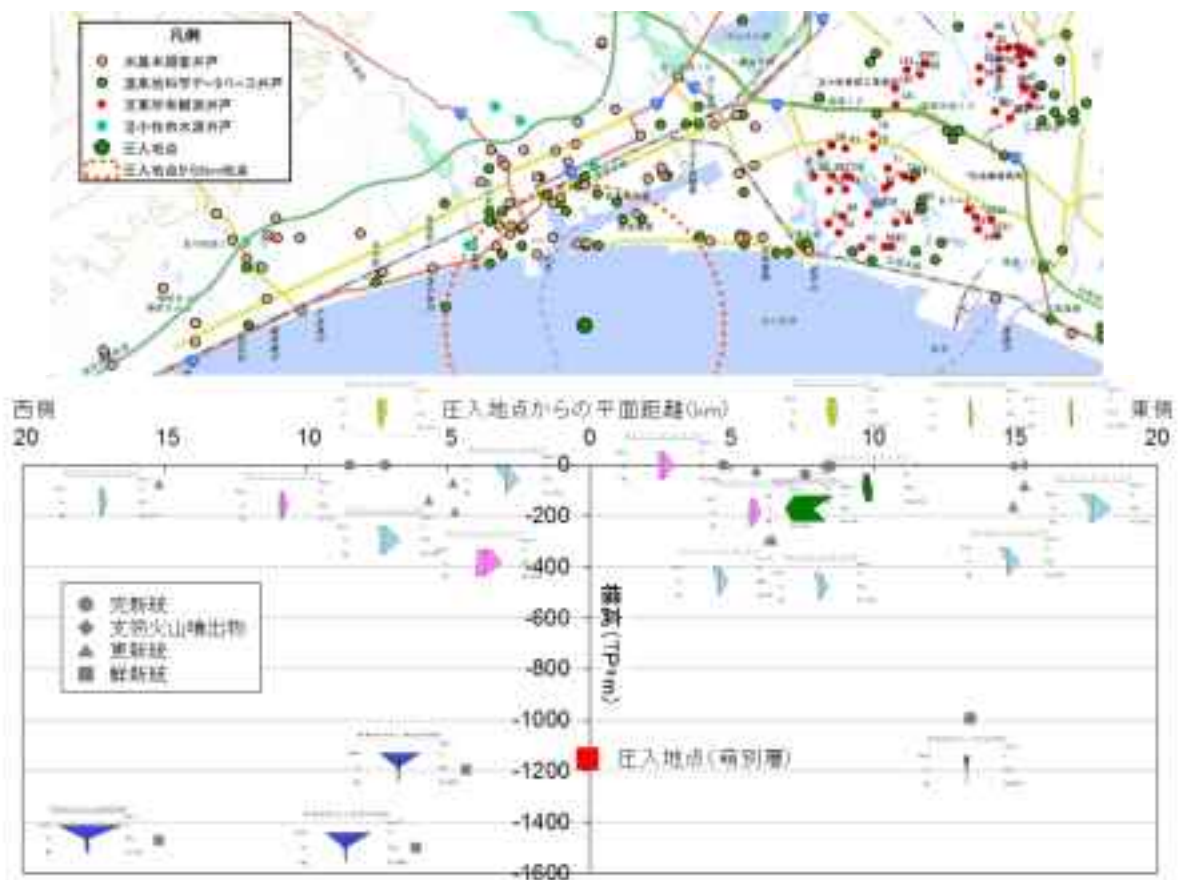


図 2.4.3-2 苫小牧地域の地下水水質

以上をまとめると、苫小牧地域の広域水理地質モデルの概念は図2.4.3-3のように表される。圧入地点より西側では地下300m程度までの地下水は地表付近と地下水流動がつながっており、東側では地表とのつながりはより浅くなると考えられた。圧入地点を含む鮮新統の地下水は、浅部の地下水とは隔離されており、その流動速度も極めて緩慢であると言える。今回得られた考察は、町田ら（2016）による、水質型と水の同位体比を用いた地下水流動解析報告と整合していることから、広域水理地質モデルの構築には上述の7種類のイオン濃度を解析項目に選定することが有用と言える。

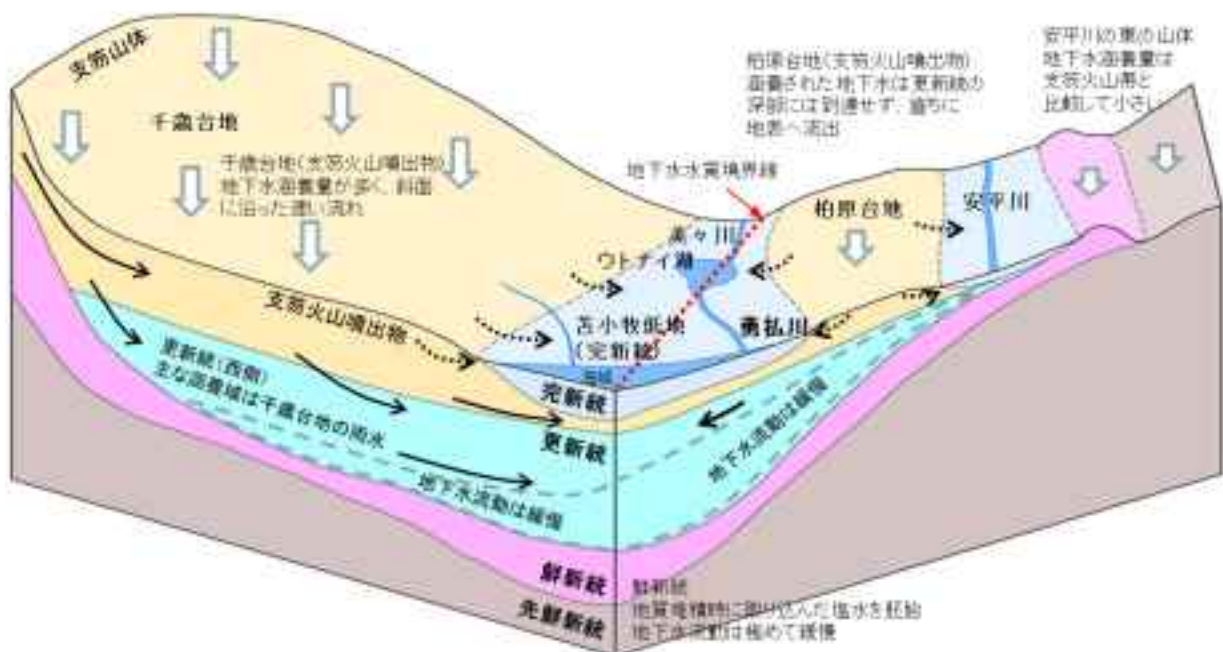


図 2.4.3-3 苫小牧周辺の広域地下水流動の概念モデル

参考文献

- 1) Environmental Protection Agency (EPA) (2010) : Geologic sequestration of carbon dioxide: Draft Underground Injection Control (UIC) Program Class VI well area of review evaluation and corrective action guidance for owners and operators, EPA 816-D-10-007
- 2) IEAGHG (2011) : Potential impacts on groundwater resources of geological storage, Report No. 2011/11
- 3) 経済産業省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 研究会 (2009) : CCS 実証事業の安全な実施にあたって, pp.41
- 4) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (2018):平成 29 年度 安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術の研究開発事業 成果報告書
- 5) 町田功, 福本幸一郎, 森野祐助, 丸井敦尚 (2016) : 苫小牧周辺の広域地下水流動概念モデル, 地下水技術, 58, 1-11

2.4.4 まとめ

本課題では「大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立」として、検層・弾性波探査データ統合手法の策定、不均質性・不確実性評価手法の要件整備、および広域水理地質モデル構築に必要な解析項目の把握を行った。

検層・弾性波探査データ統合手法の策定では、三次元弾性波探査データと検層データの統合的アプローチ手法として機械学習の有効性を示した。特に沿岸域のCO₂地中貯留で使用される傾斜坑井では、傾斜角に合わせたアップスケーリングが精度向上に寄与することがわかった。陸域である長岡データ（坑井4本、トータル1万トン）と、海域である苫小牧データ（実質使用坑井1本、10万トン/年）のどちらに対しても、本検討による手法によって孔隙率分布モデルを構築することで、地質モデル構築手法の一般化に向けた可能性を示した。

100万トン規模の大規模貯留層を対象とする場合には、坑井からより遠方の推定精度に課題が残るが、圧入坑井数の増加による追加地下情報によって精度向上を望むことができる。また、スペクトラルデコンポジションをはじめとするアトリビュート解析は空間的に広がる堆積学的特徴を捉えることが可能な手法であり、これらを機械学習の入力データとして用いることで、大規模貯留層モデル構築の精度向上が期待される。

不均質性・不確実性評価手法の要件整備では、地質モデルに内在する不確実性低減に向けて、複数の地質シナリオを想定してCO₂圧入挙動シミュレーションを実施し、三次元弾性波探査データがない領域でのチャンネル分布形態（不均質性）が、CO₂の分布範囲や貯留層圧力の伝播範囲に大きく影響を与えることがわかった。水深が浅い海陸境界域においては三次元弾性波探査の取得が難しいため、それに代わるデータ取得方法の検討が必要となる。

広域水理地質モデル構築に必要な解析項目の把握では、安全な事業実施のための広域地下水流動モデルのモデル化に向けて、苫小牧サイト周辺の地下水採水調査および溶存イオン分析を2回行い、広域水理地質モデル概念図を作成した。圧入地点の西側では地下300m程度、東側では100m程度までの地下水流動は地表付近とつながっていること、鮮新統の地下水は浅部地下水とは隔離されており、その流動速度は緩慢であることがわかった。また、広域水理地質モデルの構築には、7種類のイオン濃度を解析項目に選定することが有用とわかった。

2.5 大規模貯留層に適したCO₂挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立

CCSを実用化するには、貯留したCO₂が長期にわたり、安全に貯留されることを担保する必要がある。地質モデルには不確実性が含まれるため、計算機上で挙動予測を行うCO₂挙動シミュレーションの役割が大きくなっている。CO₂挙動解析を行うシミュレータは、主に油層工学で開発されてきたツールにCO₂用の状態方程式を付加することによって実施されてきた。一般的にCO₂に圧入流体が変わっても大きな挙動変化はないと考えられてきた。しかし、岩石内での挙動が油層と同じではなく非常に薄い層にCO₂が入り込んでいくことがX線CTを用いた可視化で明らかになってきていること、およびCO₂が地層水に溶けると弱酸性水となるため地化学反応を考慮すべきであること、等が指摘されている。また海外のIn Salahサイトでは、CO₂圧入に伴い地表面の隆起が確認されている。これらの現象を説明する方程式には不明なパラメータも多い。

本課題では、CO₂挙動予測シミュレーションにおいて基礎となるマイクロとマクロなCO₂貯留メカニズムの解明、信頼性の高いCO₂挙動シミュレータの開発、それらの結果を活用したCO₂の長期挙動予測技術を確立する。コアスケールの挙動メカニズム把握ではX線CTを、フィールドスケールの挙動メカニズム把握には、圧入停止後12年間にわたる長期観測を実施している世界的にも例のない長岡サイトでの継続的なモニタリングデータの取得と解析を行う。信頼性の高いシミュレータとしては、マイクロとマクロなCO₂挙動の特徴を取り込むとともに、数百万格子のシミュレーション（数十km×100km程度の規模）が必要な実規模サイトにおいても短時間で計算結果を出せるような高速化の技術開発も行う。シミュレータとしてはLBNLで開発され、CO₂地中貯留においても各国で広く使われているTOUGH2をベースとした開発を行う。

2.5.1 コアスケールのCO₂挙動メカニズム評価手法の確立

(1) はじめに

マイクロなCO₂挙動メカニズムの把握のために、コア試料のX線CTによる可視化環境下での流動試験を実施した。コア流動試験による特性把握は、大規模貯留層でのシミュレーションを行う際の流動特性のモデル化につながる。挙動シミュレーションにおいて流動特性は不確実性が大きく、影響の大きなパラメータであるため、この特性をコア試験により把握しておくことは、確度の高い挙動予測のために重要な作業である。今年度は特に、技術組合で実証試験を予定しているマイクロバブル（以下MBと記す）とノーマルバブル（以下NBと記す）CO₂での挙動把握のための実験を行った。MBを用いることにより、細かい孔隙にアクセス可能となることと、それと同時にCO₂-EORにおける掃向効率の向上が期待されるため、これらの効果を評価するための試験を実施した。加えて、CO₂圧入にともなうひずみ変動の伝播とCO₂プルームの広がりを検討するために、光ファイバーとの同時計測を行った。

(2) コア試験概要

試験にはBerea砂岩を用いた。コアの軸方向と葉理が平行になるように直径35 mm、軸長300 mmの試料を切り出した。平均の孔隙率と浸透率はそれぞれ、0.196と126 mDであった。このコアを封圧15 MPa、間隙圧10 MPa、温度40 °Cの条件でCO₂の流動試験を行った。コア端面のCO₂圧入部分は、複数の数mmの穴の開いた、Multi-Ports Injector (MPI) と4 μm均一の穴の開いた Porous Filter Injection (PFI) を用いることで、NBとMB注入の違いを生成させた。このコア試料をX線CT、Aquilion ONE TSX 301A (Toshiba Medical Systems Corp.)で撮影しながらCO₂注入試験を行った。X線CTの分解能は78.125×78.125×1,000μm (3番目が軸方向)である。またブラインにはCT値が大きくなるように12.5 wt%のKI溶液を用いている。コアの孔隙率、および実験中のCO₂飽和度は、ブライン飽和時・CO₂飽和時・乾燥時・流動実験中のCT値を線形補間することにより求めた。また、実験条件でのcapillary numberは 7.8×10^{-3} で、毛管圧力卓越の条件となっている。

(3) コア流動試験結果

図2.5.1-1にコア鉛直断面での定常状態CO₂飽和度を示す。CO₂圧入側から徐々にCO₂飽和度が下がっていること、および葉理に沿ってCO₂飽和度が高い部分が存在していることが分かる。MPIとPFIの比較では、PFIの方が葉理面から上下にCO₂飽和度が高い範囲が広がっていることが分かる。特にコア上部でCO₂飽和度が高い範囲がPFIにおいて広がっていることが特徴的である。PFIを用いた方が、コア内にCO₂が多く存在していることが、注排出量の物質収支だけでなく、X線CT画像からも確認した。特にMPIではCO₂が入らない部分にCO₂が入っていることが確認されたため、CO₂-EORにおいてMBを使うことで高い掃攻効率となることが期待される。

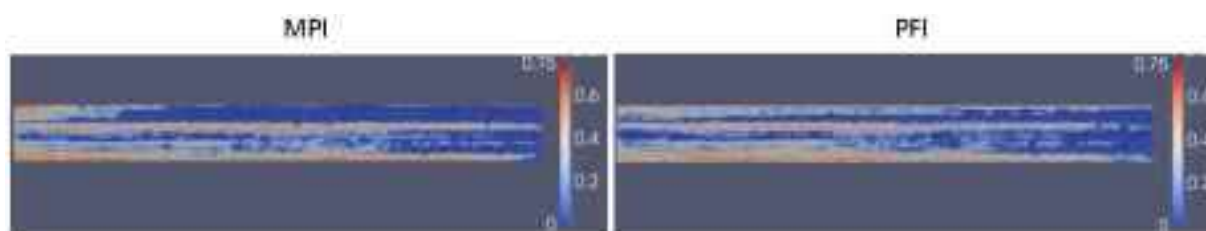


図2.5.1-1 コア流動試験での定常状態でのCO₂飽和度分布 (鉛直断面)

図2.5.1-2にCO₂飽和度の軸距離ごとの平均、および鉛直距離ごとの平均を示す。PFIの方がMPIよりもCO₂飽和度が高い範囲が広がっていることが分かる。定常状態でのコア全体の平均のCO₂飽和度は、PFIの場合が0.2315で、MPIの場合が0.2967となった。

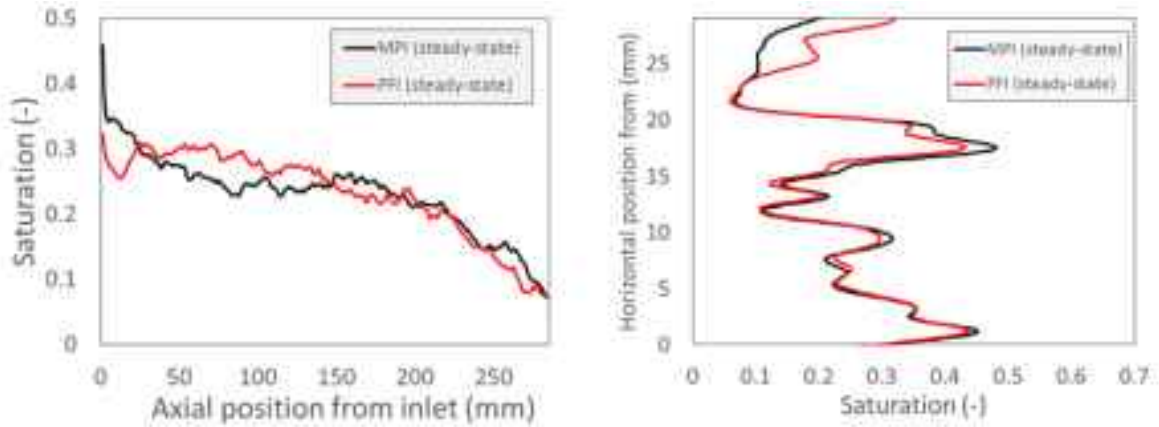


図2.5.1-2 コア流動試験での定常状態のCO₂飽和度
左：軸距離依存、右：鉛直距離依存

(4) 流動モデル構築

実験で得られたCO₂分布を説明する流動特性について検討した。孔隙率 ϕ と浸透率 k をつなぐ関係としてKozeny-Carman式 (Carman, 1937) が用いられているが、最近になりローカルな毛管圧力に依存した浸透率も考えられている (Krause et al., 2013; Krause and Benson, 2015)。毛管圧力曲線は以下の式2.5.1-1で関係づけられている (Leverett et al., 1942)。

$$P_c(S_w) = \sigma \cos \theta \sqrt{\frac{\phi}{k}} J(S_w). \quad (\text{式2.5.1-1})$$

ここで、 P_c は各地点の毛管圧力、 S_w は水飽和度、 σ はブライン=CO₂間の表面張力、 θ は接触角、 J はJ-functionと呼ばれている。これより各地点の浸透率 k_i に関する式2.5.1-2に変換し、

$$k_i = \phi_i \frac{1}{\bar{P}_c(S_w)^2} [\sigma \cos \theta J(S_{w,i})]^2. \quad (\text{式2.5.1-2})$$

ここで \bar{P}_c は、軸断面での平均の毛管圧力を示す。この式2.5.1-2より、同じ岩種でも時間依存した浸透率が設定可能となる。この設定を $\phi - P_c$ 基準の浸透率設定と呼ぶ。

コア試験で得られている孔隙率・CO₂飽和度と式2.5.1-2を用いて、浸透率を計算した。MPIとPFIの差異に関しては、毛管圧力のエントリー圧の違い (PFIの方が1/3) に設定することで表現した。

このようにして作成したコア流動モデルに対し、LBNLで開発されたTOUGH2を用いてシミュレーションを行った。ただし、シミュレーションは簡単のため2次元断面のみとし、計算に用いた格子数は284×38で、X線CTで得られた結果を平均化した孔隙率とCO₂飽和

度を用いている。

シミュレーション結果を図2.5.1-3に示す。MPI、PFIともに葉理に沿ったCO₂の浸透が起きていることが再現できている。また、PFIの方がCO₂飽和度分布が広がっていること、およびコア上部でCO₂飽和度が高くなっていることも再現されている。このように、Kozeny-Carmanのようなべき乗則ではなく、 $\phi - P_c$ 基準の浸透率を用いることで、コア内の葉理に沿ったCO₂の浸透現象を説明できることを示した。またMB注入でのCO₂浸透の違いも、エントリー圧力の違いという比較的簡単なモデルで説明できることが示された (Patmonoaji et al., 2018)。

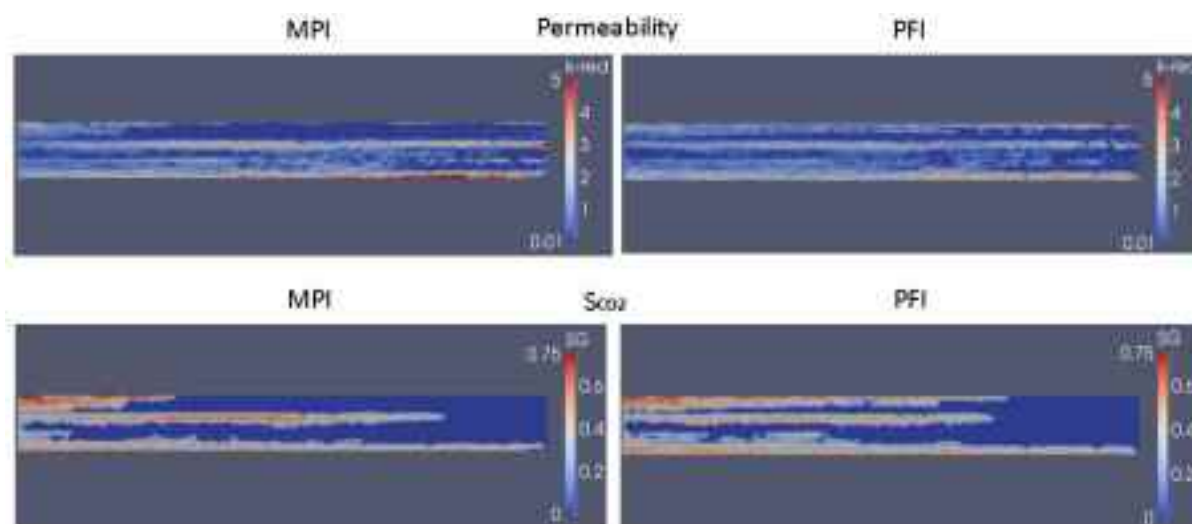


図2.5.1-3 2次元シミュレーション結果（定常状態時）
浸透率モデル（上）とCO₂飽和度（下）、（左）MPI、（右）PFI

(5) 光ファイバーによるひずみ同時計測

貯留層—遮蔽層システムの安定性評価のためには、地下深部から地表までのひずみの連続計測が望ましい。ここでは、模擬的な貯留層—遮蔽層モデルをコアスケールで作成し、CO₂圧入にともなうひずみ変化の計測と、X線CTを使用したCO₂プルームの広がり の把握を行った (Zhang et al., 2019)。

粘土鉱物カオリナイトに富んだ低浸透性（約0.02mD）の多胡砂岩を、層理面と垂直な方向にコアリングし、粗粒部と細粒部を有した試料を作製した（図2.5.1-4a-b）。完全に乾燥させた試料を、ブライン飽和し、試料出口（試料の細粒端）圧力を10 MPa に維持しながら、注入圧10.1 MPa で試料の粗粒端からCO₂を約40時間に渡って注入した。その後、注入圧力を10.3 MPa まで段階的に上昇させると、CO₂は毛管圧を越えて低浸透性の細粒部に浸透した。

圧入CO₂によってブラインが置換され、試料中のCO₂飽和度が上昇し（図2.5.1-4c）、同時にひずみが増加する様子が捉えられた（図2.5.1-4d）。注入圧力を上昇させるまでは、

CO₂ プルームは試料の粗粒部にとどまり、ひずみは約 260 $\mu\epsilon$ まで徐々に増加した。CO₂—ブラインの置換フロント付近においては、CO₂ 飽和度の変化は急激であるのに対して、ひずみの変化はなだらかであった。これは、ひずみ変化が CO₂ プルームよりも先に伝播しているためである。

また注入圧力増加後は、CO₂ プルームが細粒部へ浸透し、細粒部におけるひずみが急激に上昇した (図 2.5.1-4d-e)。注入圧力の増加にともなうひずみ変化は約 10 $\mu\epsilon$ 以下と算定されるが、細粒部へのブレイクスルーの後にそれより大きなひずみ変化が生じた。

本実験で得られたひずみ変化 ($\sim 260 \mu\epsilon$) は、間隙圧上昇から予想されるひずみ変化よりもはるかに大きかった。そのため、このひずみ変化が粘土鉱物の CO₂ 吸着によって誘起されたひずみである可能性を検討するために、数値シミュレーションを実施した (図 2.5.1-5)。その結果、CO₂ 圧入にともなうひずみ増加は、粘土鉱物の CO₂ 吸着によるひずみ増加を考慮することで、よく説明できることがわかった。

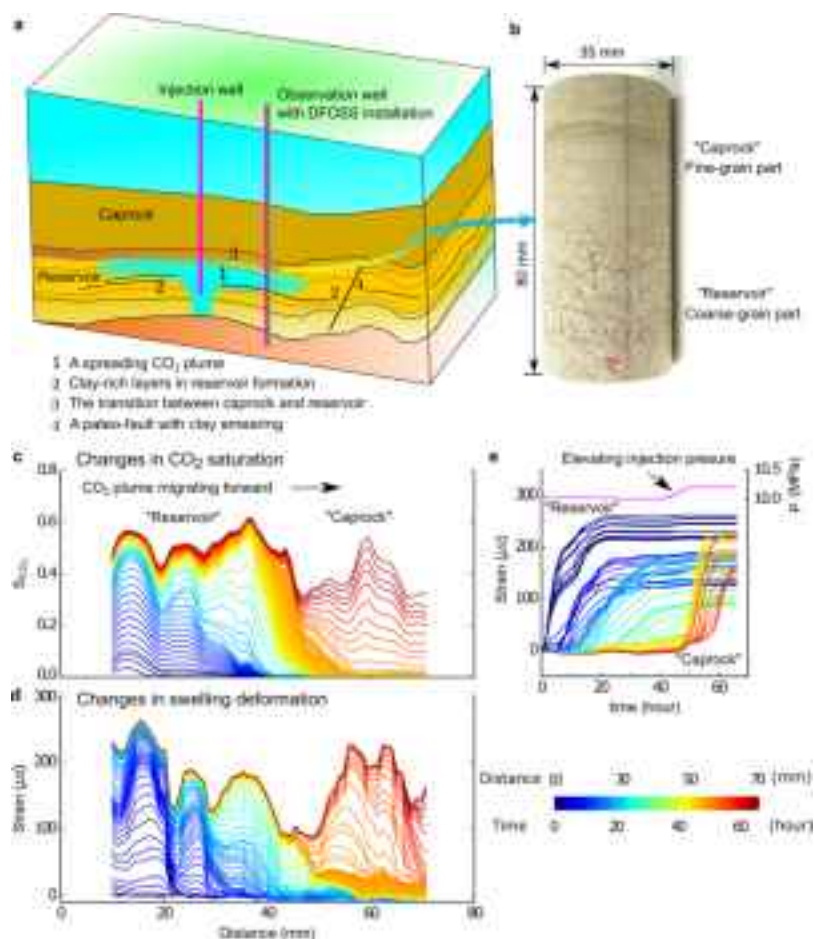


図 2.5.1-4 a. CO₂ 地中貯留サイトの模式図、b. 貯留層—遮蔽層システムを模した実験試料、c. CO₂ 飽和度、d. ひずみの空間分布、e. ひずみの時間変化

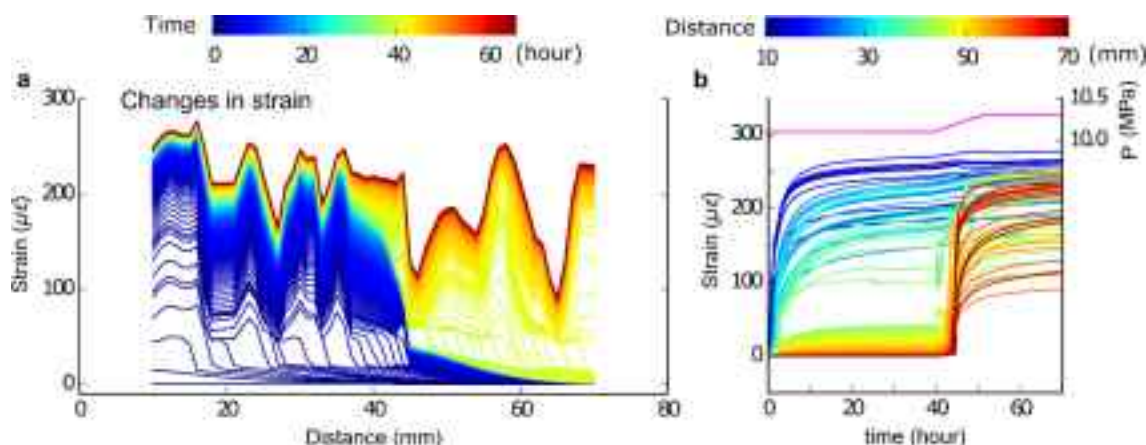


図 2.5.1-5 粘土鉱物への CO₂ 吸着を加味したシミュレーションによるひずみ変化

(6) まとめ

X線CTで撮影しながら、MBとNBでの圧入試験を実施した。どちらの圧入においても、Berea砂岩の葉理に沿って高いCO₂飽和度の部分が存在するが、MBの方がさらに拡散の影響でコア内に広がっていくことが確認された。この挙動を流動シミュレーションで再現するために、毛管圧力がCO₂飽和度に依存する $\phi - P_c$ 基準の関数を導入することと、バブルの種類によりエントリー圧力を変化させることで、定性的な再現結果が得られることを確認した。

光ファイバーによる同時計測からは、CO₂圧入にともなう岩石の膨張ひずみが計測された。また、そのひずみ変化はCO₂プルームの移動よりも先に伝播することが確認された。さらに、観測されたひずみ変化は、粘土鉱物へのCO₂の吸着によって誘起されたものである可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Carman, P.C. (1937): Fluid flow through granular beds. Trans. The Inst. Chem. Eng. 15, 150-167.
- 2) Krause, M., Krevor, S., and Benson, S.M. (2013): A procedure for the accurate determination of sub-core scale permeability distributions with error quantification. Transp. Porous Media 98, 565-588.
- 3) Krause, M.H. and Benson, S.M. (2015): Accurate determination of characteristic relative permeability curves. Adv. Water Resour. 83, 376-388.
- 4) Leverett, M.C., Lweis, W.B., and True, M.E. (1942): Dimensional-model studies of oil-field behavior. Trans. AIME 146, 175-193.
- 5) Patmonoaji, A., Zhang, Y., Xue, Z., and Suekane, T. (2018): Two dimensional numerical simulation of CO₂ injection into brine saturated Berea sandstone with normal bubble and micro bubble injection modules. Presented at GHGT-14.

October 21-24, Melbourne, Austraria.

- 6) Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999): TOUGH2 User's Guide Version 2.0, pp210.
- 7) Zhang, Y., Xue, Z., Park, H., Shi, J. - Q., Kiyama, T., Lei, X., et al. (2019): Tracking CO₂ plumes in clay - rich rock by distributed fiber optic strain sensing (DFOSS): A laboratory demonstration, *Water Resources Research*, *55*, 856–867, <https://doi.org/10.1029/2018WR023415>

2.5.2 フィールドスケールのCO₂挙動メカニズム評価手法の確立

(1) はじめに

前節のコア試験によって得られるのは、ミクロな挙動メカニズムである。実際の圧入サイトではマクロスケールのCO₂挙動に基づいて長期挙動予測や安全管理が行われる。マクロな挙動把握には、実圧入サイトでのモニタリングが必要となる。CO₂地中貯留の実証試験は海外でも実施されているが、圧入後（ポスト・インジェクション）のCO₂の状態（超臨界または溶存体）と挙動を詳細にかつ10年以上の長期に渡りモニタリングを実施しているのは長岡サイトだけであり、その成果は世界から注目されている。この様にして得られるマクロなCO₂貯留メカニズムは、CO₂挙動シミュレーションにおける流動特性として反映され、長期挙動予測の精度に大きく影響する。そのため、マクロな流動特性を把握することは、大規模貯留層での挙動シミュレーションの基礎的なパラメータを決めるために重要な作業となる。

この節では、フィールドスケールでのCO₂挙動メカニズム評価のために実施した、平成30年度の長岡サイトにおけるモニタリング検層結果、およびこれらのモニタリング結果を関係各所で情報共有するためのデータベース構築に関して報告する。

(2) 長岡サイトの検層作業と解析結果

長岡実証試験サイトでは、METIの補助事業として2003年7月から2005年1月にかけて総量約1万トンのCO₂が圧入された（薛・松岡, 2008）。当サイトでは3つの観測井を用いた物理検層により、定期的にモニタリングが実施されている（図2.5.2-1）。

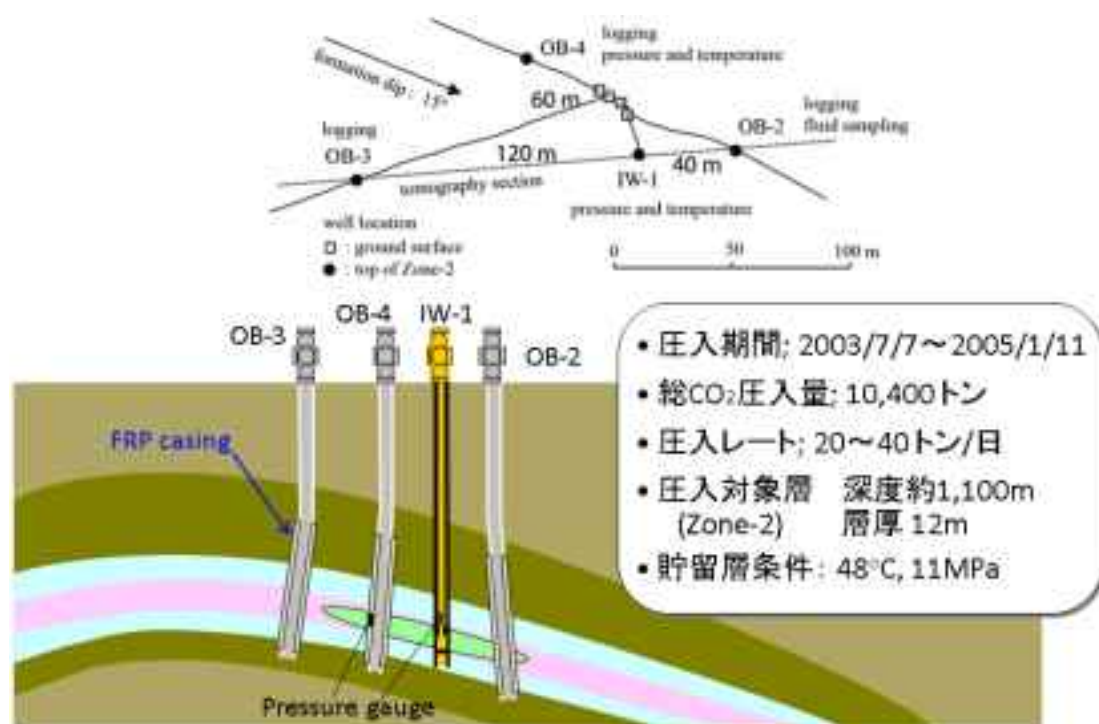


図 2.5.2-1 長岡 CO₂ 圧入試験の概要

今年度は観測井 OB-2 と OB-4 において、圧入開始から 5,559 日後（圧入停止後 5,005 日後）の音波検層、インダクション比抵抗検層、中性子検層を実施した（図 2.5.2-2）。結果として、前回検層からの変化が少なく、CO₂ 飽和度が最も高かった深度において残留ガストラップ状態になっていることが確認された。一方、音波検層では、CO₂ 飽和度変化に限らずほぼ一定の速度に留まっている。また、比抵抗検層でみられる緩やかに低下していく現象は CO₂ 溶解の影響を示していることが推定された。このような音波速度や比抵抗値等の物性値の結果は、弾性波探査や比抵抗探査によるモニタリングにおける可探範囲を知るうえで有用な情報となる。

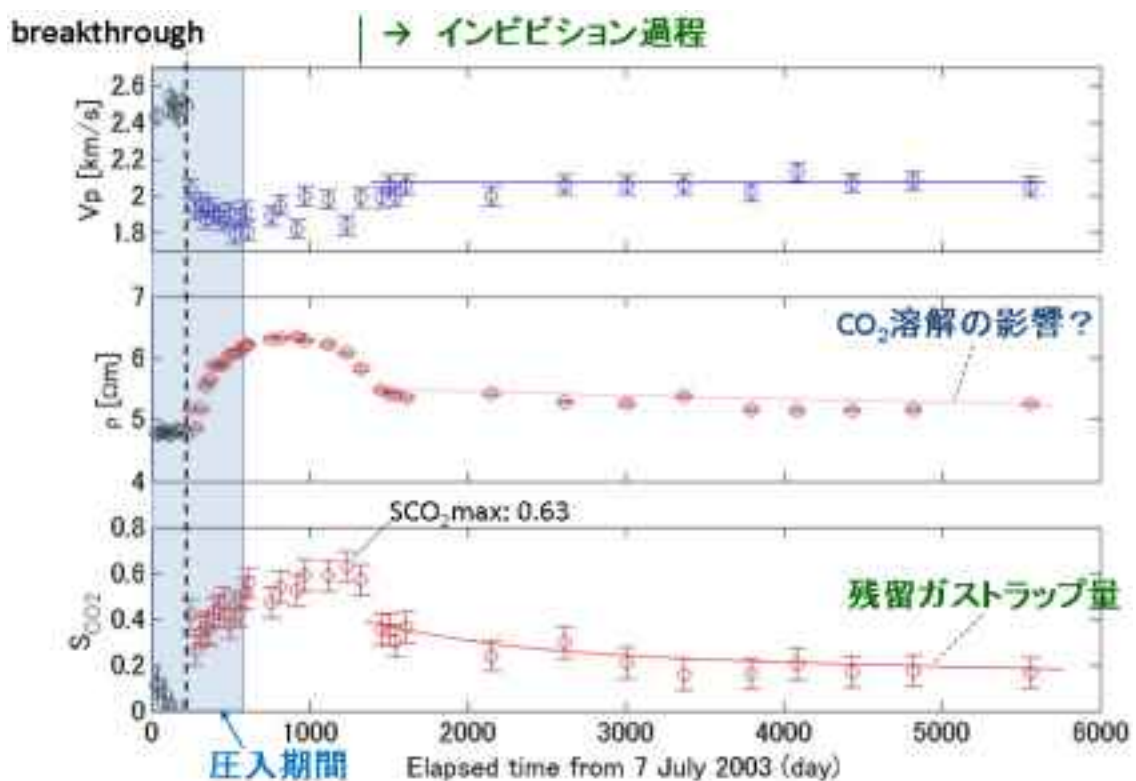


図 2.5.2-2 OB-2 深度 1,116m での検層値の経時変化

また残留ガストラップ量を確認するために、最大 CO₂ 飽和度と最新観測値の関係を確認した。この結果より、コア試験から予想されている Land (1968) の最大 CO₂ 飽和度と残留ガストラップ量の関係がフィールド観測においても成立すること、および貯留層内でシルトが多い層ではこの関係が異なっていることが示されている (Nakajima and Xue, 2017)。

(3) データベース構築

CO₂ 地中貯留を安全に進めるためには、サイトに対する共通した認識とデータを取扱い、共通した認識を持って事業を進めることが重要である。特に実規模貯留プロジェクトでは

多数の関係者が関わるようになるため、情報と知識の共有（Knowledge Shearing）が必要となる。このような情報の管理を持続的に維持するためには、アクセス許可を持った複数の管理者によって内容を更新してくデータベースが有効である。このような機能を有するソフトのひとつとして、Alfresco が存在する（Alfresco Software, 2019）。当該ソフトは、WEB ページを基にした様々な箇所からのアクセス、各種情報のアップロード/ダウンロード、各種検索機能、アクセス履歴の記録、アクセス権限の管理、といった機能を有するコンテンツ（ファイル）管理システムである。

このソフトを技術組合の PC にインストールし、長岡サイトの CO₂ 圧入試験プロジェクト、および茂原サイトでの光ファイバー現場試験等のプロジェクト情報を入力し（図 2.5.2-3）、使い勝手や各種機能の検証を実施した。このソフトでは、アクセス権限として「マネージャ」「共同作業員」「投稿者」「利用者（閲覧のみ）」の設定が可能であることを確認した。また検索機能の確認を行い、入力したファイルの中から”AND”・”OR”等を利用したキーワード検索、詳細検索、タグ検索等が利用できることを確認した。

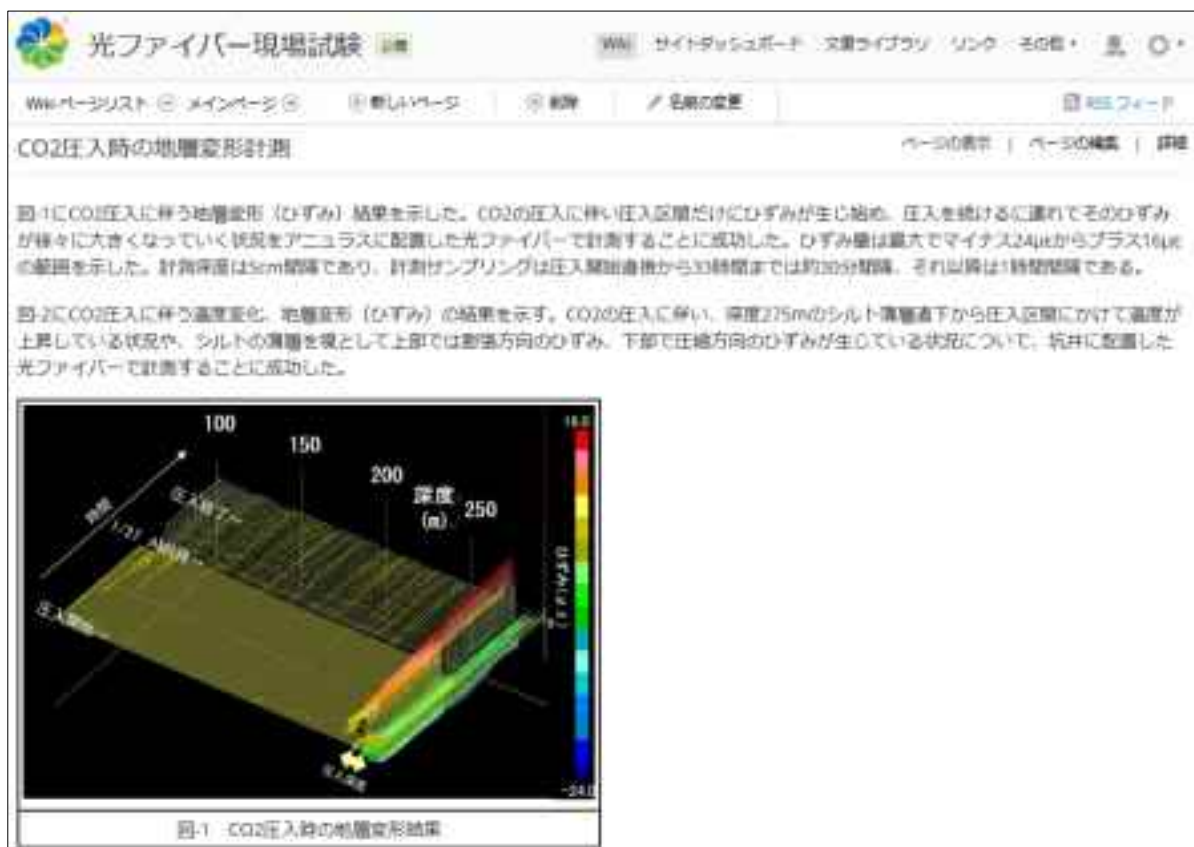


図 2.5.2-3 Alfresco 上に作成した茂原サイトで光ファイバー試験情報例

(4) まとめ

フィールドスケールの CO₂ 長期挙動予測に関する基礎的な流動特性を把握するために、圧入終了後 12 年以上経過している長岡サイトにおいてモニタリング検層を実施した。観

測結果からは、圧入した CO₂ は安定的に貯留層内に留まっていることを確認したとともに、コア試験から予想されている残留ガストラッピングに関する関係がフィールドスケールにおいても成立することを確認した。また、貯留サイト関連情報を関係各者で共有するための管理システムとして Alfresco を採用し、技術組合で現場試験を実施しているサイトの情報の入力を行い、文書管理ソフトとして有効であることを確認した。

参考文献

- 1) Alfresco Software: <https://community.alfresco.com/welcome> (2019/2 アクセス)
- 2) Land, C.S., (1968): Calculation of imbibition relative permeability for two and three-phase flow from rock properties, SPE Journal, 8, 149–156.
- 3) Nakajima, T. and Xue, Z. (2017): Trapping mechanisms in field scale: Results from Nagaoka geologic CO₂ storage site. Energy Procedia, 114, 5015-5022.
- 4) 薛自求, 松岡俊文 (2008) : 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素 地中貯留技術の現状と課題, 地学雑誌, 117(4), 734-752.

2.5.3 地化学反応を考慮した大規模貯留層でのCO₂挙動シミュレータの構築

(1) はじめに

CO₂地中貯留の長期挙動シミュレーションには、石油・天然ガス業界で開発されてきたソフトが使われることもあるが、CO₂は石油・天然ガスに比べ水溶性が高いこと、水に溶けたCO₂は地層水を酸性化すること、CO₂溶存地層水と岩石鉱物が化学反応を起こす、という点を考慮する必要がある。また、石油・天然ガス業界で使われるシミュレータはプログラムの詳細は不明であり、ユーザ独自の計算を付加させることは難しいという課題がある。CO₂地中貯留分野において、主に大学等の研究機関ではTOUGH2系シミュレータ (Pruess et al., 1999) が利用されており、これをベースとした地化学反応計算用ツール (TOUGHREACT; Xu et al., 2004) や、地盤変形との連成解析ツール (TOUGH-FRAC; Rutqvist and Tsang, 2003) が開発されている。この節では主に地化学反応計算のためのTOUGH2系シミュレータの開発について記す。なお、ジオメカニクスとの連成解析コードの開発については2.6.3節において記す。

(2) 大規模貯留層シミュレーションのためのTOUGHREACTの改良

ここではTOUGHREACT V2.0 (Xu et al., 2012) に対して、大型計算機で採用されている分散メモリ (計算領域ごとにメモリ (データ) とプロセッサを振り分ける) 環境に対応する並列化の改良 (TOUGHREACT V2.0-MPIと記す) について記す。なお、現在TOUGH2を開発したLBNLからTOUGHREACT V3.0-OMP (Xu et al., 2014) が発表されているが、このソフトでは共有メモリ型 (同一のメモリ上のデータを複数のプロセッサで利用する) 環境で利用できるもので、計算モデルがメモリで制限される。分散メモリ方式では並列させるプロセッサ数を多くすれば、モデルサイズの制限を気にせずに計算が可能であるため、大規模貯留層への対応も容易である。

① 分散メモリ型並列化 (Message Passing Interface: MPI)

TOUGHREACT V2.0の並列化には、TOUGH2-MP (Zhang et al., 2003) で用いられているものと同等の手法を用いた。すなわち、領域分割にはMETIS (Karypis and Kumar, 1998) というフリーのライブラリを、線形計算にはAZTEC (Tuminaro et al., 1999) というフリーのライブラリを用いている。実際のコードのコンパイル時には、これらのライブラリを事前に作成しておき、なおかつ並列計算用にMPIライブラリが利用できる環境上で作業を行う必要がある。ただし、METIS, AZTECのライブラリは個別のソースコードをコンパイルして作成することができるため、UNIX、Linux、およびWindows等の様々な計算機環境上で実行ファイルを作成することが可能である。

② 履歴性効果 (ヒステリシス) 機能の追加

基としたTOUGHREACT V2.0には、相対浸透率曲線と毛管圧力曲線の流動特性に対し

履歴性効果が組み込まれていなかった。このため地中貯留の初期段階での流動特性や、CO₂ 圧入停止状態からの変化で重要な残留ガストラッピング量を小さく評価する可能性があった。そのため、流動特性にヒステリシスがある場合にも対応可能なように改良を、もモデル化できるように改良を行った。ヒステリシスには、TOUGH2系ソフトで採用されている Doughty (2009) のモデルを用いることとした。

(3) 開発コードの検証

開発したコードを各種検層データが多数あり、CO₂挙動が明らかになっている長岡サイトのモデルに適用した。まず、検層データによって得られている観測井へのCO₂の到達時間とCO₂プルームの範囲に対してマッチングを行った。図2.5.3-1に観測井OB-2位置でのCO₂飽和度と溶存CO₂量に関するシミュレーション結果を示す。CO₂飽和度では、1,107 m以浅にはCO₂が上昇していかない結果となっており、観測結果と同等の結果が得られた。一方溶存CO₂量については、1,107 m以浅と、1,112 m以深にも広がっていることを示し、これも観測と同等の結果が得られたことを示す。特に1,107 m以浅については、下位のCO₂が上昇してきたものではなく、この深度の地層中のCO₂プルームの先端部分の影響を表していることが明らかになった。

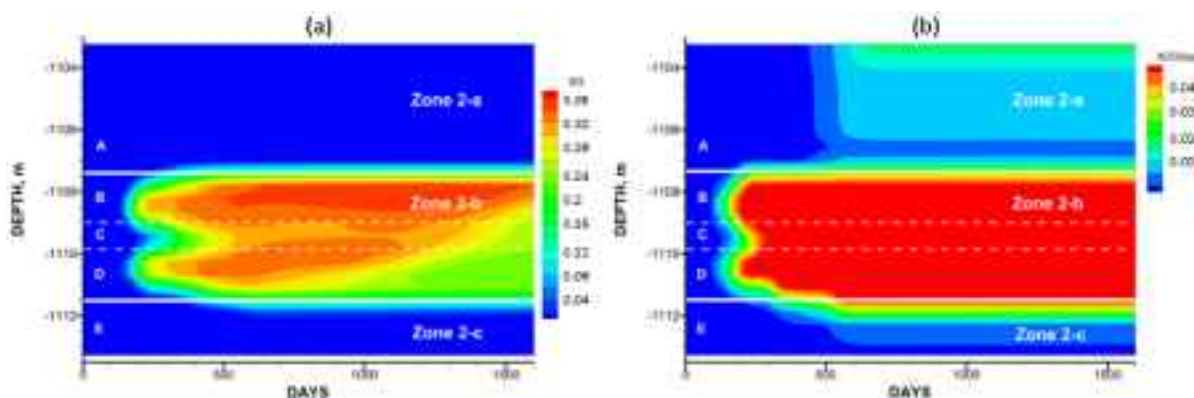


図2.5.3-1 長岡サイトシミュレーションによるOB-2位置のCO₂飽和度 (a) と溶存CO₂量 (b)

図2.5.3-2には、長岡サイトで実施した採水によるpHと鉍物イオンの観測結果と、地化学反応に関するシミュレーション結果の対比を示す。このうち、pHに関してはあまりマッチングができていないことを示唆しているが、他の鉍物イオン成分に関しては変化の傾向が表現できることが示された。特にCaイオンに関して、CO₂圧入後、一度上昇したものの、低下に転じている傾向をシミュレーションによって再現できていることが示された。

最後に、開発したコードの並列化の効果を確認した。検証に用いた長岡サイトの格子数は約10万であるが、このモデルでの計算時間を使用した並列プロセッサ (コア) 数に対して比較を行った (図2.5.3-3)。この図の(a)計算時間より、コア数の増加とともに計算時間が大きく減少し、計算の高速化が図られていることを確認した。

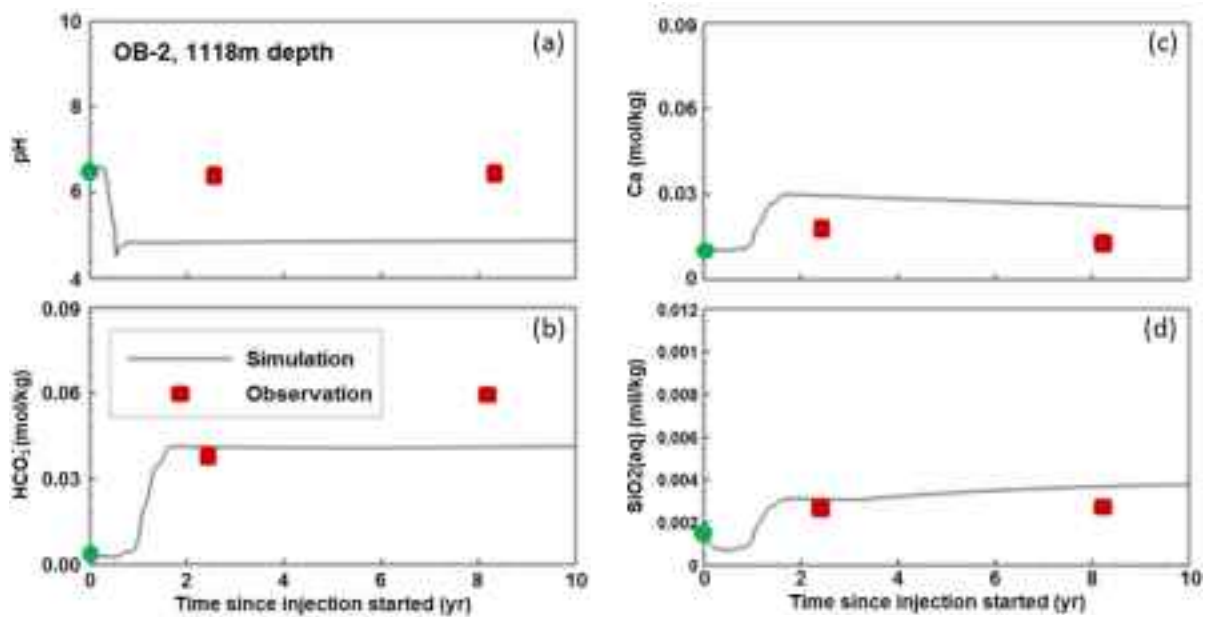


図2.5.3-2 長岡サイト地化学シミュレーションによるOB-2位置での pH(a)、炭酸イオン(b)、Caイオン(c)、シリカイオン(d)の経時変化

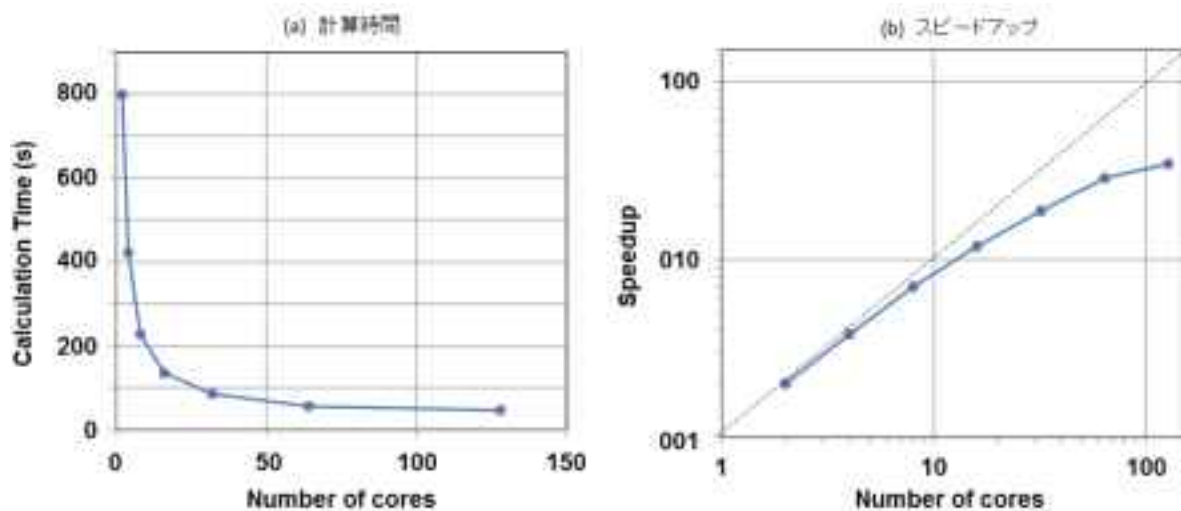


図2.5.3-3 TOUGHREACT V2.0-MPIのスケールビリティ

(4) まとめ

本節では、地化学反応を考慮した大規模貯留層でのCO₂挙動解析シミュレータの開発について説明した。CO₂は石油・天然ガスと比較して反応性の高い流体であることから、長期の安全性評価のためには地化学反応を考慮したシミュレータが必要である。地化学反応を考慮すると計算時間も長くなることから、並列化したシミュレータが必要となる。そのため、ソースコードが利用できるTOUGHREACT V2.0を基にした並列化シミュレータの開発を行った。このシミュレータの動作を、長岡サイトモデルを用いて検証を行った結果、結果精度と計算時間ともに良好な結果が得られた。TOUGH系シミュレータではデータ入

出力ファイルをユーザが作成する手間があることから、使用環境に関する改善を継続して行い、比較的容易に地化学反応を考慮したCO₂挙動シミュレーションを実施可能な環境を整備する予定である。

参考文献

- 1) Doughty, C. (2009) : “User’s Guide for Hysteretic Capiillary Pressure and Relative Permeability Functions in TOUGH2”, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBLN-2483E, 1-27
- 2) Karypsis, G. and Kumar, V. (1998) : METIS V4.0, Technical Report, University of Minnesota
- 3) Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999) : TOUGH2 User’s Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-43134, 1-198
- 4) Rutqvist, J., and Tsang, C.-F. (2003) : TOUGH-FLAC: A numerical simulator for analysis of coupled thermal-hydrologic-mechanical processes in fractured and porous geological media under multi-phase flow conditions. Proceedings of the TOUGH symposium 2003, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, May 12-14
- 5) Tuminaro, R.S., Heroux, M., Hutchinson, S.A. and Shadid, J.N. (1999) : Official Aztec user’s guide, Ver 2.1, Sandia National Laboratories
- 6) Xu, T., Sonnenthal, E., Spycher, N., and Pruess, K. (2004) : TOUGHREACT User’s Guide: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-55460, 1-195
- 7) Xu, T., Spycher N., Sonnenthal E., Zheng L., and Pruess K. (2012) : TOUGHREACT User’s Guide: A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Geologic Media, Version 2.0, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, 1-240
- 8) Xu., T., Sonnenthal, E., Spycher, N., and Zheng L. (2014) : TOUGHREACT V3.0-OMP Reference Manual: Parallel simulation program for non-isothermal multiphase geochemical reactive transport, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 1-140
- 9) Zhang, K., Wu, Y.S., Ding, C., and Pruess, K. (2003) : TOUGH-MP: A parallel Version of TOUGH2, Proceedings of TOUGH Symposium 2003, Berkeley, CA, May 12-14, 1-8.

2.5.4 ECLIPSE-VISAGE の精度と効率評価

(1) はじめに

CCS を安全に実施する上で、地表面の変形や坑井に沿う地層のひずみ、誘発微小振動発生の可能性を評価し、それらに伴うリスク軽減策を検討することが重要となる。これには、CO₂ 流動と地層変形の連成解析などジオメカニクス解析が必要となる。技術研究組合において、ジオメカニクス解析は TOUGH-FLAC 環境を活用しているが、石油開発分野で利用され、使用環境に優れる ECLIPSE-VISAGE の活用はなされていない。そこで、将来の ECLIPSE-VISAGE の活用可能性を検討するため、CCS を対象としたジオメカニクス解析を実施し、その解析精度と解析効率の分析を行った。

本検討では、まず①既存研究における ECLIPSE-VISAGE 連成解析の事例調査を行い、②ECLIPSE-VISAGE 連成解析方法を整理し、③ECLIPSE-VISAGE ジオメカニクス解析の精度と効率に関する分析を行い、最後に④連成解析結果に与える貯留層物性感度解析を行った。

(2) ECLIPSE-VISAGE の精度と効率評価

① ECLIPSE-VISAGE 連成解析事例調査

ECLIPSE-VISAGE を用いた連成解析の実施例の調査として、ECLIPSE と VISAGE の連成解析について具体的な記載のある 18 件の論文を要約した。そのうち CCS 関連が 3 件、ガス地下貯蔵関連が 1 件、石油・天然ガス開発関連が 14 件であった。論文の多くが、SPE（世界石油工学技術者協会）関連のカンファレンス論文であり、石油・天然ガス開発において、ジオメカニクス解析のために ECLIPSE-VISAGE の利用が進みつつある。

例えば、Haghi ほか(2011)では、北海グラーベン構造の中央部に位置する Ekofisk 油田の圧力減退にともなう地層変形と、それによる孔隙率、浸透率の低下にともなう生産性の低下についての検討と連成方法の違いによる精度検証を行い、ECLIPSE100 + ROCKTABH と VISAGE の連成解析結果が、ECLIPSE 単体のものや、ECLIPSE300 と GEOMECH を用いた完全連成方式よりも高い精度であることが示された。

CCS 関連では、Masoudi ほか(2011)は、マレーシア・サラワク堆積盆地のガスフィールドを CCS 転換するためのシミュレーションスタディを実施して、貯留層の最大許容圧力を算定した。

② ECLIPSE-VISAGE における連成解析方法の調査

ECLIPSE-VISAGE の連成解析で用いられている連成方式には、(a) One way 解析、(b) Two way 解析、(c) ECLIPSE-VISAGE 両者の孔隙率整合解析があり、それらのアルゴリズムについて調査した。(a) One way 解析とは、流体流動計算結果を用いて力学計算を行う連成方法であり、力学計算の結果は流体流動計算には反映されない。ECLIPSE のタイムステップ毎に得られる圧力、温度、流体飽和率を用いて VISAGE が力学計算を行い、

そのタイムステップにおける応力，変位，ひずみを計算する連成方法である。それに対して、(b) Two way 解析では、One way 解析に加えて、力学計算結果を用いて流体流動計算のパラメータ補正を行うことで、相互に計算結果を反映させる手法である。VISAGE の計算結果として、ひずみと応力変動から孔隙率を算定し、孔隙率-浸透率の関係式から浸透率の補正を行う。(c) ECLIPSE-VISAGE 両者の孔隙率整合解析では、(b) Two way 解析と同様に浸透率の更新を行うが、ECLIPSE-VISAGE 間での孔隙体積が異なるため、その差がしきい値以下になるまで反復補正をする手法である。連成方式の違いは、解析精度として現れ、(a)、(b)、(c)の順に精度がよくなるが、計算時間も増加する。

③ ECLIPSE-VISAGE ジオメカニクス解析の精度と効率の分析

解析モデルは、In Salah プロジェクトサイトデータを参考として、圧入井を中心とした 10km 四方の領域とし、深度 1,800m~1,820m に貯留層、その上位に厚さ 900m の遮蔽層を設定した。流体および地層の物性値は、先行研究のデータを参考とした。使用したグリッドモデルは、Large モデルとして約 70 万グリッド、Small モデルとして約 4 万グリッドモデルを用いた。圧入地点は深度 1,810m とし、約 100 万トン/年の圧入レートで CO₂ を圧入した。

連成解析方法の違いによる計算時間および解析精度を比較するために、②で調査した 3 種類の連成解析手法をそれぞれ使用し、一年間の圧入シミュレーションを行った（図 2.5.4-1）。Small モデルではばらつきが大きいですが、Large モデルでは、坑底圧力(BHP)の時間変化は、Two-way 解析および孔隙率整合解析でほとんど差がなく、One-way 解析ではその他の方法に比べて高くなることがわかった。BHP は、圧入開始直後に急上昇するが、その後、低下に転じ徐々に低下率が小さくなり、最終的にわずかであるが直線的に低下することがわかる。この低下は貯留層地層圧力に一致するまで継続するものと考えられ、実際に観測される BHP の挙動を反映している。また、地表の鉛直方向変位は、解析方法によらずほとんど同一であることがわかった。

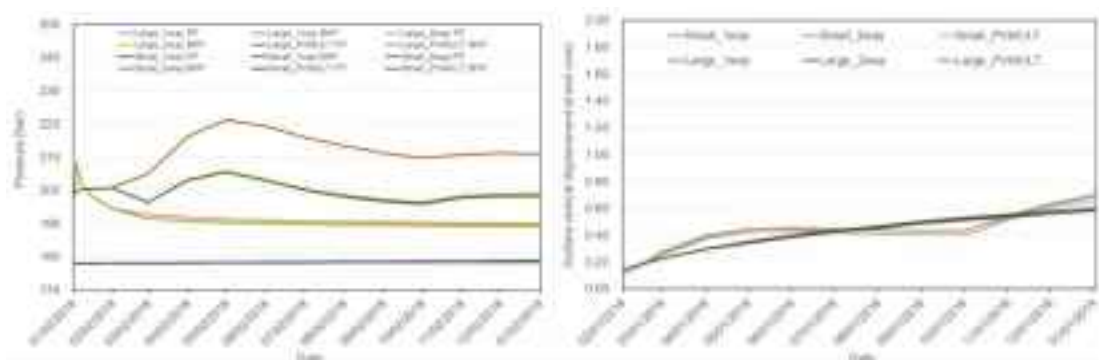


図 2.5.4-1 各連成方式における(a)坑底圧力と(b)鉛直方向変位の時間変動

また計算時間を比較すると、(a)One way に対して(b)Two way では約 2 倍の計算時間を要

し、(c)整合解析では、約 4 倍程度の計算時間がかかることがわかった。これらのことから、本検討での以下の感度解析においては、Large モデル、Two way 解析を用いた検討を行った。

④ ECLIPSE-VISAGE 連成解析結果に与える貯留層物性感度解析

ECLIPSE-VISAGE 連成解析において、地表面およびキャップロックの鉛直変位変動、BHP に影響を与える貯留層物性値として、初期浸透率、初期孔隙率、ヤング率を変えてシミュレーションを行った（図 2.5.4-2）。その結果、BHP に対しては浸透率の影響が大きく、ヤング率の影響はほとんどないことがわかった。一方、キャップロックおよび地表面変位に対してはヤング率の影響が最も大きいことがわかった。

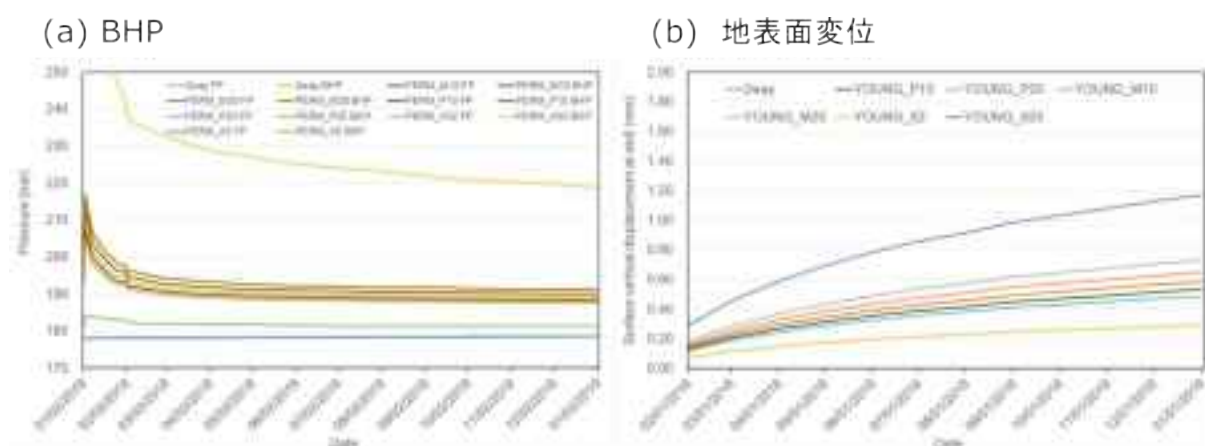


図 2.5.4-2 坑底圧力および地表面変位に影響を与えるパラメータの感度解析

(3) まとめ

石油業界で一般的に使用される環境である、ECLIPSE-VISAGE を用いたジオメカニクス解析の有効性を検討した。同手法を用いて CCS を対象とした連成解析を実施する上では、Two way 方式の連成解析を実施することが望ましいことがわかった。また、CO₂貯留層および遮蔽層の性能評価解析を安定して実施するためには、境界領域を大きくとることやグリッド数を多くするなどの工夫が必要であるなど、CCS 分野への適用に当たっての分析要件を明らかにした。今後は、ECLIPSE-VISAGE の機能向上を追跡し、適切な時期にさらなる機能検証を行った上で本格活用について検討することが望ましい。

参考文献

- 1) A. H. Haghi, R. Kharrat and M.R. Asef (2011) : Simulation and Analysis of Production Induced Reservoir Compaction using Geomechanical Formulation of Fracturing Technology (GFFT) for Stress Prediction, IPTC-14832-MS.
- 2) R. Masoudi, M. A. A. Jalil, D. Press, K. Lee, C. P. Tan, L. Anis, N. Darman and M.

Othman (2011) : An Integrated Reservoir Simulation-Geomechanical Study on Feasibility of CO₂ Storage in M4 Carbonate Reservoir, Malaysia, IPTC-15029-MS.

2.5.5 CCSにおける電磁探査法の適用事例とシミュレーション手法調査

(1) はじめに

CO₂ 地中貯留事業において、貯留した CO₂ の挙動を把握する手段としては弾性波探査が主流となっている。しかし、地表からの三次元弾性波探査はコストがかかること、およびより詳細に CO₂ の状態把握のためには異なる物理情報を取得することが好ましいことから、電磁気探査法の利用が検討されてきている。電磁気探査では、地層水で満たされた地中の空隙に不導体の CO₂ が浸入することにより、比抵抗が変化することを利用する。実際に小スケールの CO₂ 挙動に関しては、電気探査手法が利用された事例も存在する。

今後 CO₂ 地中貯留事業において、電磁探査手法をどのように活用するかに関する評価を行うため、まず海外における地中貯留での電磁探査法の適用事例を調査した。また、我が国での地中貯留事業を想定した電磁探査手法の有効性や適用方法を検討するため、電磁探査のためのシミュレーション手法を調査し、適用範囲に関する検討を行った。

(2) CO₂ 地中貯留における電気・電磁探査適用事例の調査

① 米国 Cranfield サイトでの適用事例

EOR の目的で圧入している CO₂ 挙動把握のために、30 m 離れた 2 本の観測坑井間での比抵抗トモグラフィー (Electric Resistivity Tomography) を実施した (Hovorka et al., 2013)。深度約 3,200 m 地点において 20 m の貯留層を挟む 60 m 区間において、5~10 m 間隔で坑井に電極を設置し、電流電極と電位電極を組み替えながら比抵抗トモグラフィーを作成した。約 4 か月間の試験期間中に定期的に測定を行った (Yang et al., 2014)。測定結果では、CO₂ の移動と浮力による上昇の様子がとらえられている。

② ドイツ Ketzin サイトでの適用事例

深度 650~670 m の貯留層に対し、3 つの坑井に 10 m 間隔で電極を設置し、ひとつの坑井での鉛直方向比抵抗 (Vertical Electric Resistivity Array: VERA)、坑井間 ERT、および地表設置電極間のトモグラフィーを実施した (Schmidt-Hattenberger et al., 2013)。観測結果により坑井間にどのように CO₂ が広がっていくか、空間的な CO₂ の広がりをモニタリングすることができている (Bergmann et al., 2012)。比抵抗値は、ベースラインの 1 Ω m 程度から 2.5 Ω m まで変化した。

(3) 電磁探査シミュレーション手法の調査と選定

既存の電磁探査シミュレーションコードについて調査した。電磁探査においては地表が比抵抗として大きなギャップのある境界となるため、一次元地層モデルの解法が電磁探査シミュレーションでの基本的要素のひとつとなっている。一次元地層モデルの電磁応答シミュレーションを行う既存のコードを、表 2.5.5-1 にまとめた。

表 2.5.5-1 代表的な一次元電磁探査シミュレーションコードの比較

Software	Measurement type	Transmitter	Received response	Source code	Author
em1d	frequency	dipole	E, H	open	K.H. Lee
em1d-t	time	dipole loop (in/out) line	E, H EMF	open	K.H. Lee (UC Berkley)
TD1D	time	dipole loop (in/out)	E, H dE/dt EMF	close	Technoimaging
IX1D	time/freq.	loop (in/out, coincident) line	EMF Apparent resistivity	close	Interpex
w1dem	time/freq.	VMD, loop	E, H dE/dt EMF	close	Ueda (Waseda Univ.)

これらの適用範囲の比較に加え、計算精度の比較も行った。この結果、w1dem が最も汎用性が高く、かつ計算精度が高いことが確認されたため、以下のシミュレーションにおいて w1dem を用いることとした。

(4) 電磁探査シミュレーションのためのモデル設定

CO₂ 地中貯留に対する電磁探査のシミュレーションのため、図 2.5.5-1 のような一次元モデルを考えた。このモデルでは大規模 CO₂ 貯留に対応するために、CO₂ プルーム（緑層）がある深度の層に広く広がった場合を想定している。この CO₂ 層の深度および層厚を変化させて、地表で観測される電磁場がどの程度の変化するかを検討した。また電磁場発信はループ電流で行い、受信はループ中心で磁場 z 成分を測定するものとした。

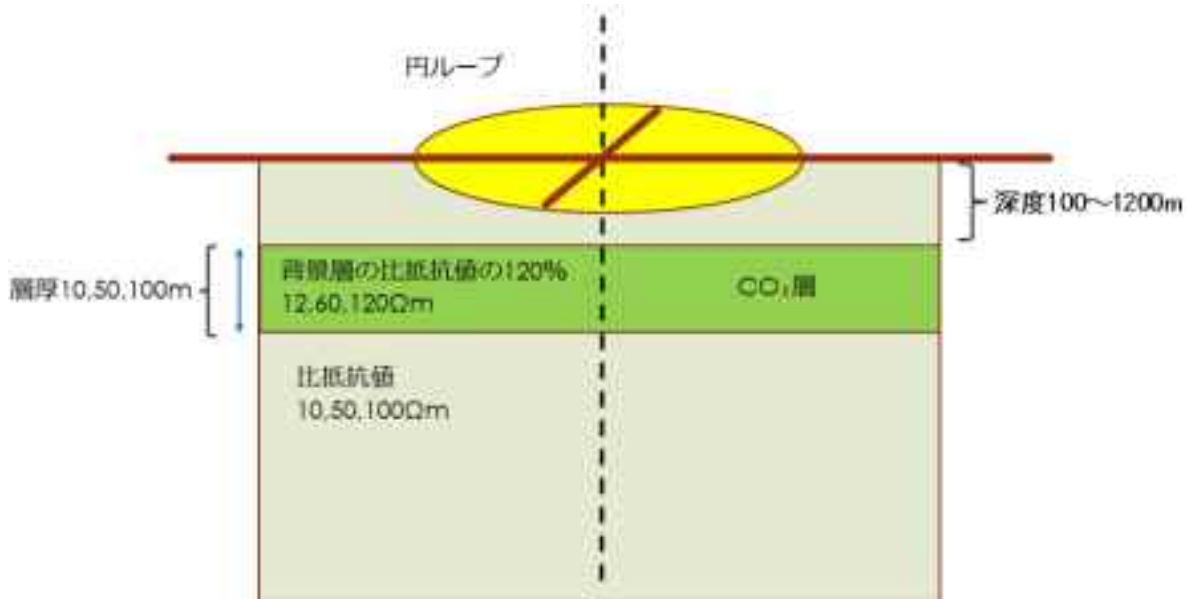


図 2.5.5-1 地中に CO₂ 層がある場合の電磁場シミュレーションの一次元モデル

(5) 電磁探査シミュレーション結果

周囲の地層の比抵抗、CO₂層の比抵抗、CO₂層の厚さ、CO₂層の深度等を変化させて、CO₂層が存在しなかった場合からの時間領域での受信磁場の変化率を計算した。CO₂層の比抵抗は、文献調査の結果より、20%上昇するものとした。図 2.5.5-2 には、それらの結果の中から、(a)層厚 50m の CO₂層の深度を変化させた場合、(b)深度 1,000m の CO₂層の層厚を変化させた場合、の地場の変化率を示している。図 2.5.5-2(a)から分かるように、CO₂層が浅い方が変化率が大きい。一方、同図(b)から、層厚の厚い方が変化率が大きくなっている。変化のピークは地盤と CO₂層の比抵抗によって異なり、変化がピークとなる時間・ピークの大きさ等から、CO₂層の深度や比抵抗値を推測することとなる。

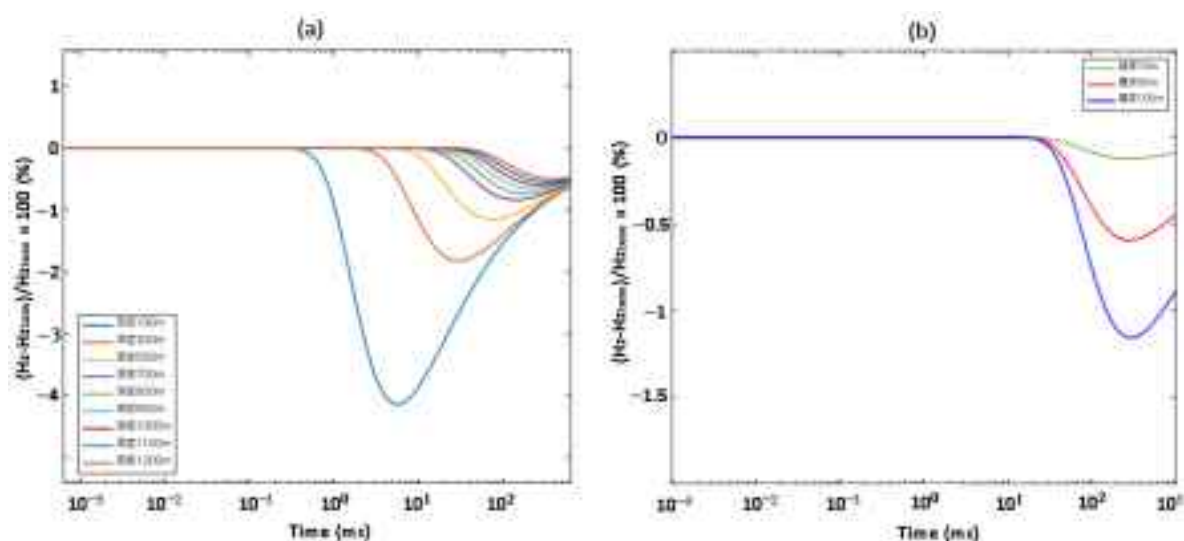


図 2.5.5-2 CO₂層がある場合の観測電磁変化率の時間変化。

(a)層厚 50m の CO₂層の深度を変えた場合。(b)深度 1,000m で層厚を変えた場合

(6) まとめ

CO₂地中貯留の挙動モニタリングへの電磁探査手法の適用可能性について検討した。大規模貯留を想定し、一次元地質モデルでの評価を行った。CO₂地中貯留で想定される微小な電磁場変化に対しては、一次元地質モデルであっても計算誤差の小さい正確な評価を行うための計算コードは限られており、その目的に合った `w1dem` を用いることとした。このコードを用い、地層中の CO₂層の有無による電磁場変化を計算した。今回得られた結果は、地層中の CO₂層を検知するために必要な機器のスペックや、必要とする観測精度に関する指針を与えるものである。

参考文献

- 1) Bergmann, P., Schmidt-Hattenberger, C., Kiesseling D., Rücker, C., Labitzke, T., Henniges, J., Baumann, G., and Schütt, H. (2012): Surface-downhole electrical

resistivity tomography applied to monitoring of CO₂ storage at Ketzin, Germany. *Geophysics*, 77, B253-B267.

- 2) Hovorka, S.D., Meckel, T.A., and Treviño, R.H. (2013): Monitoring a large-volume injection at Cranfield, Mississippi-Project design and recommendations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18, 345–360
- 3) Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Bösing, D., Labitzke, T., Möller, M., Schröder, S., Wagner, F., and Schütt, H. (2013): Electrical resistivity tomography for monitoring CO₂ migration from tool development to reservoir surveillance at the Ketzin pilot state. *Energy Procedia*, 37, 4268–4275
- 4) Yang, X., Chen, X., Carrigan, C.R., and Ramirez, A.L. (2014): Uncertainty quantification of CO₂ saturation estimated from electrical resistance tomography data at the Cranfield site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 59–68.

2.5.6 地化学反応による遮蔽性能への影響評価手法の確立

(1) はじめに

CO₂地中貯留は、キャップロックによりCO₂が地表に漏洩することなく安定に隔離され続けることを前提としている。しかしながら、CO₂が溶解した間隙水中で長期にわたる地化学プロセスを経た後も、キャップロックの遮蔽性能が保証されるかどうかは確認されていない。そこで、本研究ではキャップロックが反応する際の遮蔽性能変化を定量的に評価する手法の開発を行った。また、地化学プロセスの応用可能性検討の一環として、坑井周囲からの漏洩防止に向け、石灰水によるCO₂の炭酸塩化促進の方策の検討を行った。

(2) 地化学反応の遮蔽性能への影響評価

① 炭酸塩含有岩石の地化学影響評価

地化学反応により遮蔽性能に変化が生じる際には、キャップロック内部の空隙構造が変化するケースと、キャップロックの界面状態が変化するケースの2通りが想定される。前者に関して、岩石の反応とそれに伴う空隙構造の変化を定量的に理解するためには、反応プロセスが明確、かつ空隙構造を制御した系で実験を行うことが合理的である。そこで、0.5、1、5、10 μm の粒径からなる2種類の密度のシリカ粒子焼結体をベースとし、その間隙中に炭酸カルシウム(CaCO₃)を含む人工試料を作製して供試体とした。本試料を10MPa、40 $^{\circ}\text{C}$ の超臨界CO₂-水条件下で反応させ、浸透率 k の経時変化を調べた。

図2.5.6-1に、未反応試料の浸透率 k_0 に対する k の変化の割合 $(k-k_0)/k_0$ を示す。ここでは、粒子密度の違いにより k の変化の挙動が異なる様子が明らかである。高密度焼結体では、粒径が0.5および1 μm において k は一旦増加してから低下する一方で、粒径が10 μm では k はほぼ単調に低下した。これに対して、低密度焼結体では、0.5 μm 焼結体で k が低下する一方で、1および10 μm 焼結体では k がわずかに増加した。

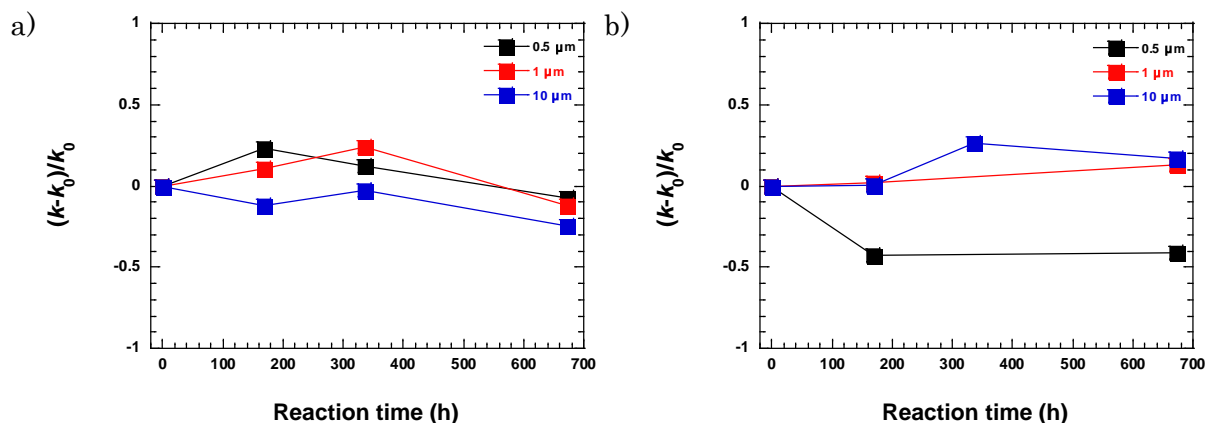


図 2.5.6-1 炭酸塩含有焼結体の k の変化の割合の経時変化

a) 高密度焼結体、b) 低密度焼結体

岩石空隙中の CaCO_3 が溶解すると k が増加し、逆に CaCO_3 が沈殿すると k が低下することが予想される。これに基づいて、 CaCO_3 の反応に伴う k の変化のメカニズムを考察した。高密度試料では、 CO_2 溶存水の浸透により試料の周囲から CaCO_3 が溶解するが、溶液が CaCO_3 飽和濃度に達するとそれ以降の溶解は起こらない。また、溶液が飽和濃度に達していなくても、試料内部では溶出成分の逃げ場がないため、局所的に CaCO_3 に対して過飽和となり、再沈殿が起こり得る。このため、 k は初期に増加するが、その後は一定あるいは元のレベル程度まで低下することが予想される。これに対して低密度試料では、 CO_2 溶存水が試料深部にまで浸透し、試料表面と内部での物質の移動も容易であるため、より多くの CaCO_3 が溶出することで k が増加する。今後は、 $0.5 \mu\text{m}$ 焼結体で k が低下した原因の究明に加えて、 k に依存した岩石内部での浸透速度と CaCO_3 含有量に基づいて、キャップロックからの漏洩リスクの定量化を図ることが課題である。

② 接触角評価手法の開発

界面状態の変化に関しては、これまでに考案した接触角 θ をスレッシュホールド圧 P_{th} から算出する手法に基づいて、各種岩石・鉱物の接触角の計測を行った。昨年度適用したパルスレーザー加工では、数 μm 程度のきわめて微細な穴径を実現できるものの、試料の浸透性がきわめて悪くなり、 CO_2 を試料に到達させるまでに相当の時間と圧力を要した。そこで、今年度はマイクロドリルを適用し、穴径を $20\sim 30 \mu\text{m}$ 程度まで拡張させるとともに、1 つの試料に多数の穴を開けることを試みた。今回は、各種泥岩に加えて、従来の接触角の測定値と比較するために、石英、長石、カルサイトに対して微細穴加工を施した。例として、図 2.5.6-2 に石英の微細穴の光学顕微鏡観察像を示す。

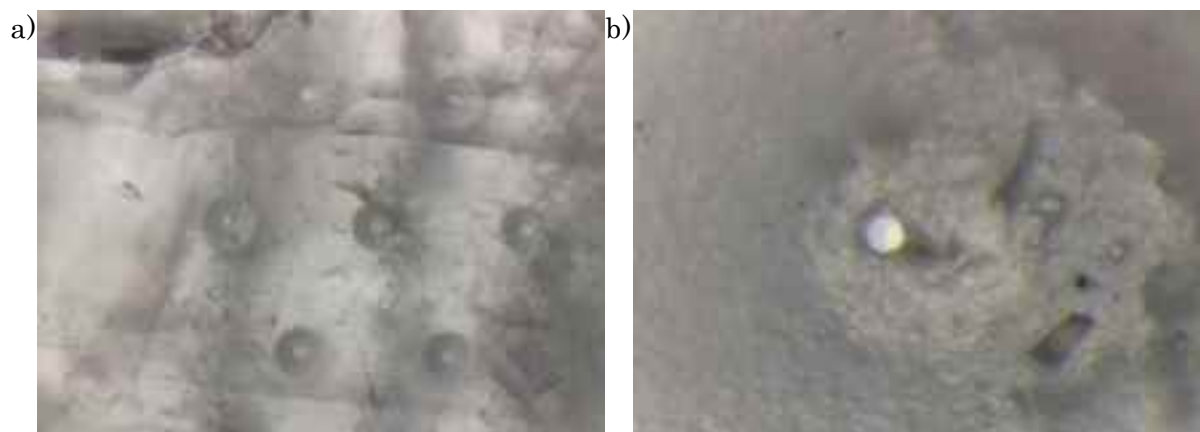


図 2.5.6-2 石英の微細穴の光学顕微鏡観察像：a) 低倍率、b) 高倍率（穴径：約 $28 \mu\text{m}$ ）

微細穴加工した試料について、 10 MPa 、 40°C の条件で超臨界 CO_2 のブレイクスルー実験を行った。この際、再現性を確認するために、1 回のブレイクスルーが終了した段階で一旦水を押し戻し、再度 CO_2 圧を増加させてブレイクスルーを起こす操作を繰り返すこと

で、合計3回のブレイクスルーを観測した。次に、得られた $P_{e^{th}}$ に基づいて θ を求めた。ここで、10 MPa、40°CにおけるCO₂-水系の σ として、文献値に基づいて最小値と最大値の範囲を設定した。石英では θ は σ の値に依存して敏感に変動したが、一部のケースを除き、いずれも $\cos\theta$ の値が1以下に収まっており、 θ の算出値として0~61.3°が得られた。なお、同条件下での θ の文献値はこの範囲内に収まっていた。今後は、どのブレイクスルー時の $P_{e^{th}}$ を採用するかに加えて、 σ の最適値についての検討が必要である。いずれにしる、今回の実験により、本手法が新たな θ 導出法として有効であることが示された。

(3) 地化学プロセスの活用に向けた検討

CO₂地中貯留の安全性向上に地化学プロセスを有効に活用する方策として、CO₂の炭酸塩化による坑井周囲からの漏洩防止をこれまで提案してきた。CO₂を速やかに炭酸塩化させる例として、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)水溶液(石灰水)にCO₂を注入することでCaCO₃(カルサイト)を沈殿させる反応が知られている。今年度は、Ca(OH)₂を溶解させた温泉水とCO₂を反応させ、カルサイト種結晶の表面観察から炭酸塩化速度を測定するとともに、炭酸塩化が貯留岩(ベレア砂岩)の遮蔽性能に及ぼす影響を調べた。

カルサイトの表面観察からは、種結晶自体の成長に加えて、カルサイトの単結晶が多数生成している様子が明らかとなった。これらの単結晶は、CO₂の注入により局所的に高過飽和となった領域でカルサイトが核形成し、それが種結晶表面に沈積した結果と考えられる。このことは、Ca(OH)₂濃度や石灰水とCO₂の混合比、混合順序に関して、顕著な違いが確認されなかった事実からも示唆される。これに対して、結晶面自体の成長量は時間の経過とともに増加した。これが温泉水そのものがカルサイトに対して過飽和であることに起因しているのか、石灰水の注入による効果なのかは現時点では不明である。しかしながら、今回の実験条件においては、少なくともCO₂の一部はカルサイトとして固定され、CO₂収支上はこのカルサイトは溶解していないことが示されたと言える。一方で、ベレア砂岩の顕著な浸透率変化は確認されなかった。この理由として、石灰水とCO₂の反応が必ずしもベレア砂岩内部で起こらなかった可能性がある。今後は、この問題を回避するために、岩石試料を溶液中に曝露するのではなく、岩石内部のみを流体が浸透する試験を実施する予定である。

2.5.7 化学的浸透現象が遮蔽性能に与える影響評価

(1) はじめに

CCS では、CO₂の漏出を阻むため泥岩などでできた遮蔽層が存在する必要がある。貯留された CO₂の浮力など物理的な影響のほかに、CO₂の化学的性状が要因となり、遮蔽性能に影響を及ぼすことが懸念されている。たとえば、一部の泥岩は半透膜性を持ち、濃度の異なる間隙水の移動（化学的浸透）によって異常間隙水圧を発生させることが報告されている。特に濃度勾配が狭い領域に集中している場合、化学的浸透により局所的に岩石が大きく変形することが想定される。

そこで本検討では、遮蔽性能評価手法の開発を目指して、遮蔽層として有力な泥岩中の化学的浸透現象によって生じるひずみ変動を捉えることを目指した。まず、難浸透性泥岩の物性値を計測し、同泥岩から作成したコアサンプルを高濃度塩水中に長期間浸し、化学的浸透現象によるひずみ変動をひずみゲージと光ファイバーを用いて計測した。

(2) 難浸透性泥岩の物性値計測

本検討で用いた難浸透性泥岩は、北海道稚内地域の泥岩（深度 100m 地点と 350m 地点）および、秩父地域の河床から採取した小鹿野町層の岩石である。化学的浸透現象に影響する可能性のある物性値として、浸透率、間隙率、間隙径分布および鉱物組成を測定し、その結果の一部を表 2.5.7-1 にまとめた。

表 2.5.7-1 難浸透性泥岩の物性値

	秩父地域泥岩	稚内層泥岩 (深度 100m)	稚内層泥岩 (深度 350m)
浸透率[m ²]	2.4~2.8 × 10 ⁻¹⁹	2.4~2.8 × 10 ⁻¹⁹	3.8~9.8 × 10 ⁻¹⁸
間隙率（水銀圧入法）	0.101	0.339	0.393
間隙率（wet-dry 法）	0.223	0.387	0.434

(3) 化学的浸透現象によって生じるひずみ変動の計測

① 実験概要

本実験では、稚内泥岩および秩父泥岩から作成したコア試料に対して、光ファイバーとひずみゲージを取り付けた後、側面と上面をシリコンゴムで不透水処理して（図 2.5.7-1(a)）、高濃度塩水中に浸して化学的浸透現象を生じさせ、約 240 時間にわたってひずみ変動を連続観測した。光ファイバーは、試料の周囲に螺旋状に巻き付け、ひずみゲージは、試料の上端および下端付近の側面に、周方向と軸方向に設置した。図 2.5.7-1(b)に示すように、高濃度塩水で満たされた水槽内に、ビニール袋で隔離された低濃度塩水域を設け、試料を数日間放置し平衡状態に達した後に、ビニール袋を取り除くことで、濃度差による化学的浸透現象を生じさせた。

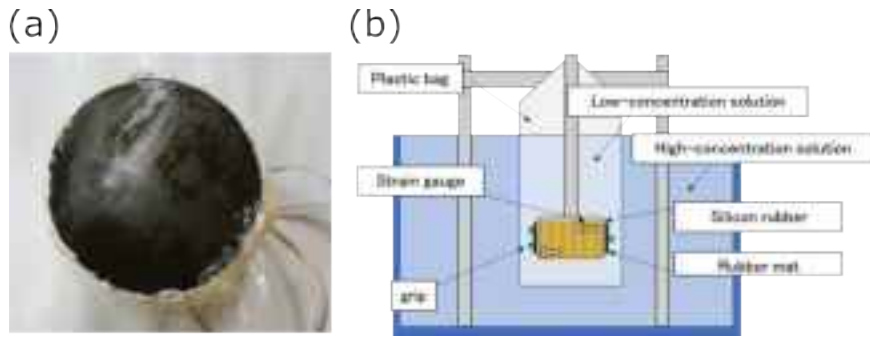


図 2.5.7-1 (a) シリコン塗布した秩父泥岩、(b) 実験設備簡略図

② ひずみゲージによる計測結果とドリフト補正

高濃度塩水と間隙水の境界面において浸透圧が生じるために、泥岩内の間隙水が高濃度塩水側に滲出するため泥岩試料は収縮する。本実験では、稚内泥岩試料と秩父泥岩試料を2サンプルずつ計測した。稚内泥岩試料1の計測結果を図 2.5.7-2 に示す。実験開始後すぐに、全てのひずみゲージで、収縮方向のひずみが計測された。周ひずみとして 20~40 $\mu\epsilon$ 程度、軸ひずみとして最大約 100 $\mu\epsilon$ の収縮方向のひずみであった。不透水処理された上端のひずみ (W1LC) に比べると、高濃度境界付近の下端のひずみ (W1HC) 変動が大きかった。

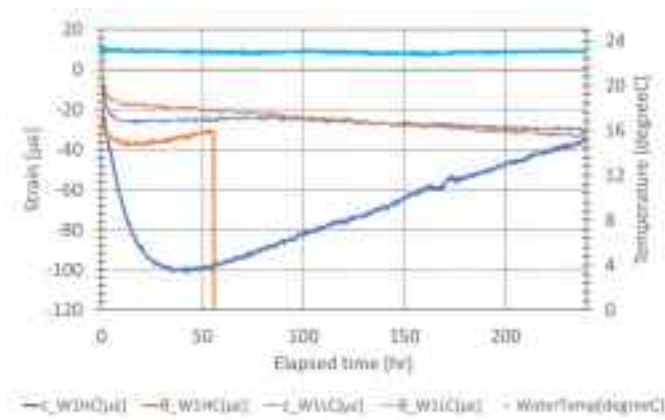


図 2.5.7-2 稚内試料1における電気式ひずみ計測結果

ひずみゲージによって得られたひずみ挙動は、通電に伴う発熱などの影響を受けている。そこで、化学的浸透現象が生じる前のひずみの挙動からひずみゲージのドリフトの大きさを推定し、ひずみの補正を試みた。化学的浸透現象が生じる前のひずみ挙動はひずみゲージのドリフトと温度変化によって記述でき、時刻を $t[\text{hr}]$ 、水温を $T[^\circ\text{C}]$ とすると、計測された歪 ϵ は $\epsilon = At + BT + C$ となる。この補正を、ビニール袋を除去する前 12 時間のデータを用いてひずみゲージごとに実施した。各ひずみゲージのドリフト係数(A)を表 2.5.7-2 に示す。温度変化の小さかった稚内試料では妥当な補正係数が推定されたが、秩父試料で観測された負のドリフト係数は、温度変化による影響があると考察される。

表 2.5.7-2 実験前の歪挙動より得られた各ひずみゲージについてのドリフト係数

	稚内試料 1	稚内試料 2	秩父試料 1	秩父試料 2
高濃度側軸歪	0.518	-	-0.359	-0.106
高濃度側周歪	0.208	0.048	0.093	-0.104
低濃度側軸歪	0.286	0.005	-0.240	0.381
低濃度側周歪	2.78×10^{-5}	0.092	-0.130	-

③ 光ファイバーによる計測結果との比較

本検討の光ファイバーセンシングによる歪計測ではレイリー散乱光を使用し、光ファイバー方向に 1cm 間隔で計測した。稚内試料 1 では 60–70 $\mu\epsilon$ の、稚内試料 2 では 30 $\mu\epsilon$ 程度の、秩父試料 1・2 試料では 80 $\mu\epsilon$ 程度の収縮方向のひずみが発生した。ドリフト補正を行った後のひずみゲージ記録を光ファイバー方向に変換して、光ファイバーによる計測結果と比較した（図 2.5.7-3）。実験開始後数十時間の歪挙動は、両計測において概ねよい一致が見られた。実験期間の後半に両者で差が大きくなるが、これは、ひずみゲージ計測におけるドリフト補正が適切ではない可能性を示唆している。また、空間的に連続して計測された結果からは、高濃度境界域から不透水域へ、空間的・時間的にひずみが伝播する様子が観察された。これは、光ファイバー計測によって、遮蔽層の安定性をモニタリングすることができることを示している。

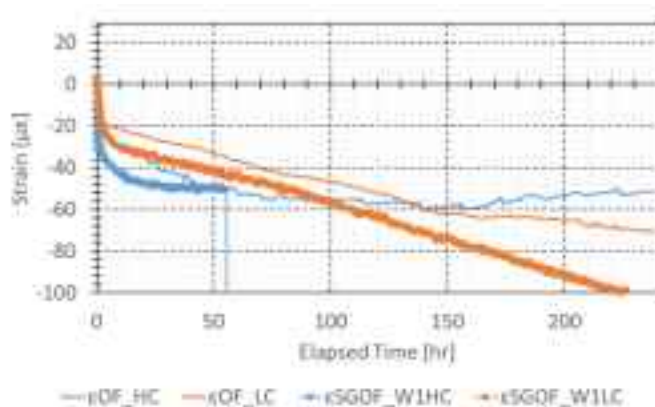


図 2.5.7-3 稚内試料 1 におけるひずみゲージによる計測結果（ドリフト補正後）と光ファイバーセンシングによる計測結果の比較

(4) まとめ

化学的浸透現象によって引き起こされる難浸透性泥岩のひずみ変化を、ひずみゲージと光ファイバーによって計測した。本検討の条件下では、40~100 $\mu\epsilon$ 程度のひずみが生じることが示された。また、光ファイバーによる計測では、ドリフト誤差の補正が不要であり、かつ、空間的に連続したデータがよい精度で得られることがわかった。化学的浸透現象によって引き起こされうる泥岩のひずみ変化は、無視できるほど小さなものではなく、引き

続き検討することが望ましい。そのためには、光ファイバーを用いた空間的に連続した計測方法が有効であり、圧入井や観測井中に光ファイバーを設置することで、貯留層と遮蔽層のひずみ変化を常時モニタリングする技術の確立が期待される。

2.5.8 まとめ

本節では、大規模貯留層に適したCO₂挙動シミュレーション、長期挙動予想手法についての開発状況を報告した。

まず、CO₂挙動メカニズムを把握するため、コアスケールとフィールドスケール双方のメカニズム分析を行った。コアスケールの分析としては、ノーマルバブルおよびマイクロバブルCO₂をコアに圧入した際の流れをX線CT装置で可視化するなどし、その挙動メカニズムを明らかにした。一方、フィールドスケールの分析として長岡サイトにおける検層を継続実施し、CO₂が安定して貯留されていることを確認するなど、フィールドスケールの挙動に関する知見の蓄積を図った。

次に、地化学反応を考慮した大規模貯留層でのCO₂挙動解析シミュレータの開発として、計算時間を短くするためシミュレータの並列化を図った。その結果、計算精度、速度とも良好な結果を得ることができた。

さらに、CO₂流動と力学応答の連成解析ソフトとして注目を集め始めているECLIPSE-VISAGEについてその性能を評価し、CCSに十分適用できる機能があり、今後の性能向上を把握しつつ、適切な時期に本格適用を検討すべきとの判断を得た。

弾性波探査を補完するモニタリング手段として、電磁探査の適用が有望視されているが、実際のフィールド試験を重ねるのは費用的に現実的ではないため、電磁探査の有効性をシミュレーションで確認する必要がある。そこで、関連するシミュレーション手法の調査と評価を実施し、その有効性を確認した。

一方、CO₂貯留の安全性に極めて重要になる遮蔽層の性能について、地化学反応および化学的浸透性のメカニズムを把握したうえで、その影響評価手法を検討・開発した。

2.6 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発

CCS事業を安全に実施するためには、地層変形や坑井を通じた漏洩といったリスク評価を行う必要がある。光ファイバーを用いた計測技術が近年目覚ましく進歩しており、光ファイバーの一端から光パルスを入射し、ファイバーの各地点からの後方散乱光を連続的に計測する。光ファイバーに変形や温度変化が発生すると、後方散乱光に変化が生じるため、その発生個所と変化量の推定が可能となる。光ファイバーを地中に設置すると、空間的・時間的に連続した計測を行えるという特徴を持っている。これまで、連続的温度センサとしての利用は進んでいるが、ひずみセンサとしての利用は、光ファイバーの適切な補強方法、坑井への施工方法、データの解析手法等の様々な課題がある。また2010年以降データ処理技術の向上により、分布型音響センサ（DAS：Distributed Acoustic Sensing）の技術開発が行われるようになってきている。これらの手法では、光ファイバーを設置した坑井を受信センサとして半永久的に利用できるため、モニタリングコストの削減につながることで期待されている。

本課題では、光ファイバーのひずみセンサとしての利用方法と、音響センサとしての利用方法に関して、大規模地中貯留での実用化を目指した技術開発を行う。ひずみセンサとしての利用に関しては、CO₂圧入等による地層の変形（ひずみ）を深度方向に連続して把握することを可能とする光ファイバーの設計・製作、坑井への設置工法の検討、連続モニタリングのための機器等を開発し、地層安定性・廃坑井健全監視システムを構築する。一方、音響センサとしての利用に関しては、CO₂挙動把握のための垂直・傾斜井対応の弾性波探査（VSP：Vertical Seismic Profiling）に用い、光ファイバー測定手法特有のデータ処理および解析技術を確立する。

2.6.1 ひずみ計測用光ファイバー仕様の確定

(1) はじめに

ひずみに対する感度を十分に持つ光ファイバー仕様の検討を行った。ひずみ測定のためには、光ファイバーは周囲の地層と一体化して変形することが必要となるが、実際の光ファイバー周囲には被覆や、断線防止用のアーマードケーブルが存在する。また、ケーシングの外側に固定して降下させる場合に、孔壁と接触することによる光ファイバーの断線や損傷が懸念される。このように、ひずみ感度が高いことと、光ファイバーの強度が強いことは相反する目的となり、光ファイバーの選定、または新規製作のための仕様を明確にする必要がある。ここでは、今年度に検討し、2.6.2節以下の現場試験に適用した光ファイバーの選定方法について記す。

(2) ひずみ測定用光ファイバーの選定

大深度坑井アニュラスに設置可能な光ファイバーケーブルを選定するという目的のため、これまでに利用実績のある光ファイバーを中心に比較・検討を行った。ただし、調査対象とする光ファイバーは、以下の仕様を満足するものの中から選定した。

- ・ シングルモード (SM) 光ファイバー
- ・ ケーブル構造に抗張力体を有すること
- ・ 直径 1cm以下
- ・ 長尺化が可能であること
- ・ ひずみ感度が高いこと

これらの検討項目を基に、既存の光ファイバーから表2.6.1-1の2種類を選択した。これらの光ファイバーがひずみ測定のために基本的に十分な性能を有していると考えられたため、新規に製作は行わず、既存のケーブルを2.6.2節で説明する現場試験に適用し、性能評価を行うこととした。図2.6.1-1に、FutureNeuro とFIMTケーブルの一端をほどいて心線をむき出した状態の写真を示す。

表2.6.1-1 選定したひずみ測定用既存光ファイバー

名称	心線	寸法 (mm)	抗引張特性	特徴
FutureNeuro FN-SILL-3	シングルモード 光ファイバー: 2本	幅:4.3 ×厚さ:1.7	SUS304×2本	構造物と光ファイバーを密着させるエンボス構造
FIMTケーブル	シングルモード 光ファイバー: 2本	外径:3.8	強度: 152kgf(設置時) 101kgf(運用時)	油ガス井計測用温度 圧力用ケーブル

FutureNeuro 光ファイバー



FIMT 光ファイバー

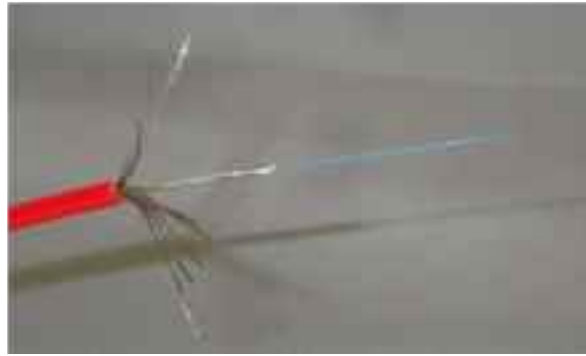


図2.6.1-1 ひずみ測定用光ファイバーの外見および心線

(3) ダイナミックなひずみ (DAS) 測定用光ファイバーの選定

光ファイバーによるひずみ測定は、基本的にケーブルの軸方向の伸縮に対する感度を有している。ダイナミックなひずみ：地震等の地中が揺れる現象に対しても、軸方向成分に顕著に指向性を持って計測されることになる。鉛直坑井に設置した光ファイバーであれば、主に z 成分を記録していることに相当する。

この不足分を補うため、ヘリカル光ファイバーが考案されている。この光ファイバーでは、図2.6.1-2のように軸 (z) 成分以外にも水平 (x, y) 成分を持つように設計されており、同じ方位角の成分を抽出していくことにより、原理的には任意方向の振動成分を求めることが可能となる。また単純に、軸方向の距離に対する光ファイバー長が長くなるので、 z 方向の分解能が上がることも予想される。

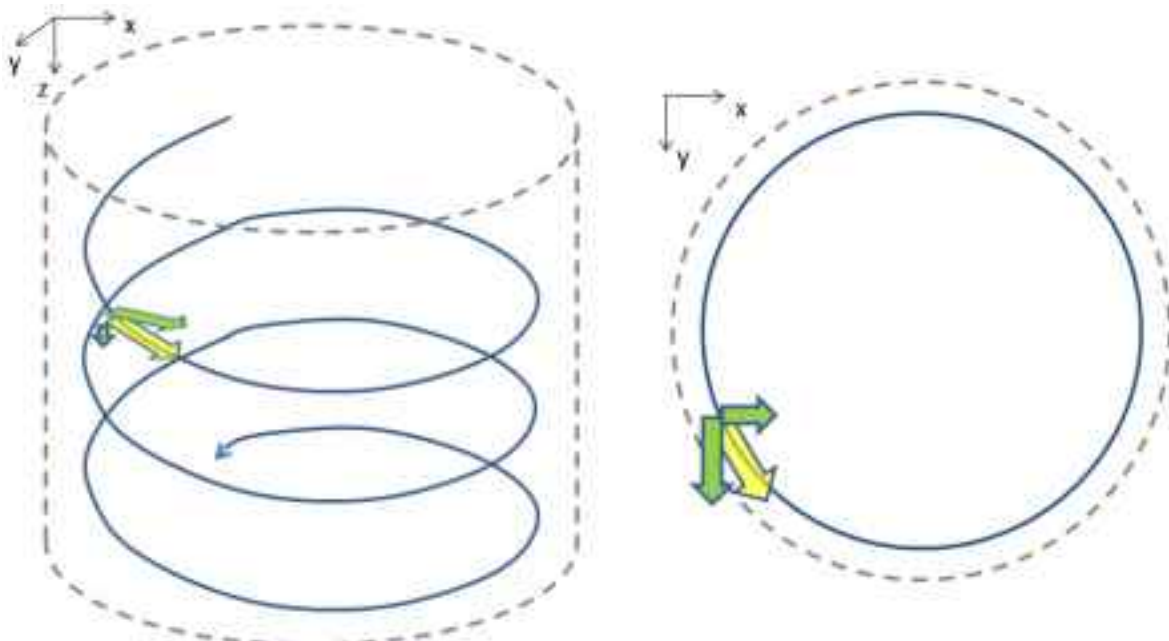


図2.6.1-2 ヘリカル光ファイバーによる3成分観測の原理



図2.6.1-3 ヘリカル光ファイバーの端末処理作業

このようなヘリカル光ファイバーを現場測定用に導入し（図2.6.1-3）、2.6.2節のDAS測定に適用した。

(4) まとめ

ひずみ計測用に適用する光ファイバーの選定を行った。ひずみ測定用には、2種類の光ファイバーを選定し、特にひずみ感度が高いと予想され、かつ長尺化が可能な光ファイバーが存在することを確認した。ダイナミックなひずみ測定用には、3成分の振動が観測可能と予想されるヘリカル光ファイバーを選択した。これらの光ファイバーが現場観測において有効であるかを確認するため、次節において現場適用試験を行っている。

2.6.2 ひずみ測定精度の向上および、長尺ファイバーの設置技術の確立

(1) はじめに

これまで技術組合では、光ファイバーを用いて坑井に沿って時間・空間的に連続なモニタリング手法の技術開発を進めてきた。このうち、ひずみセンサとしての利用としては、光ファイバーの適切な補強方法と坑井への設置方法が測定結果に大きな影響を及ぼすことが明らかになっていた。本年度はこれらの検討を進めた上で、これまでの現場観測実績のある茂原地区試験サイトにおいて、新規に光ファイバーを設置するとともに、既設の光ファイバーとの観測結果との比較を行うための揚水試験を行った。

また、2.6.1節で検討したヘリカル光ファイバーを用いたダイナミックなひずみ計測(DAS)性能試験の一環として、地表からの起振による振動計測を行った。

(2) ひずみ用光ファイバーの設置および揚水試験

図 2.6.2-1 に、茂原地区試験サイト 1 における坑井配置を示す。このうち OF-3 が新規に設置する坑井である。この坑井では、ガス管(チュービング)の外側に、一定間隔で光ファイバーを固定した上に、セメンチングにより光ファイバーと地層とを一体化させる。その上で、昨年度までの既設のひずみ測定用光ファイバー(図 2.6.2-2)での測定結果との比較を行い、ひずみ測定に最適な設置方法について検討を行う。

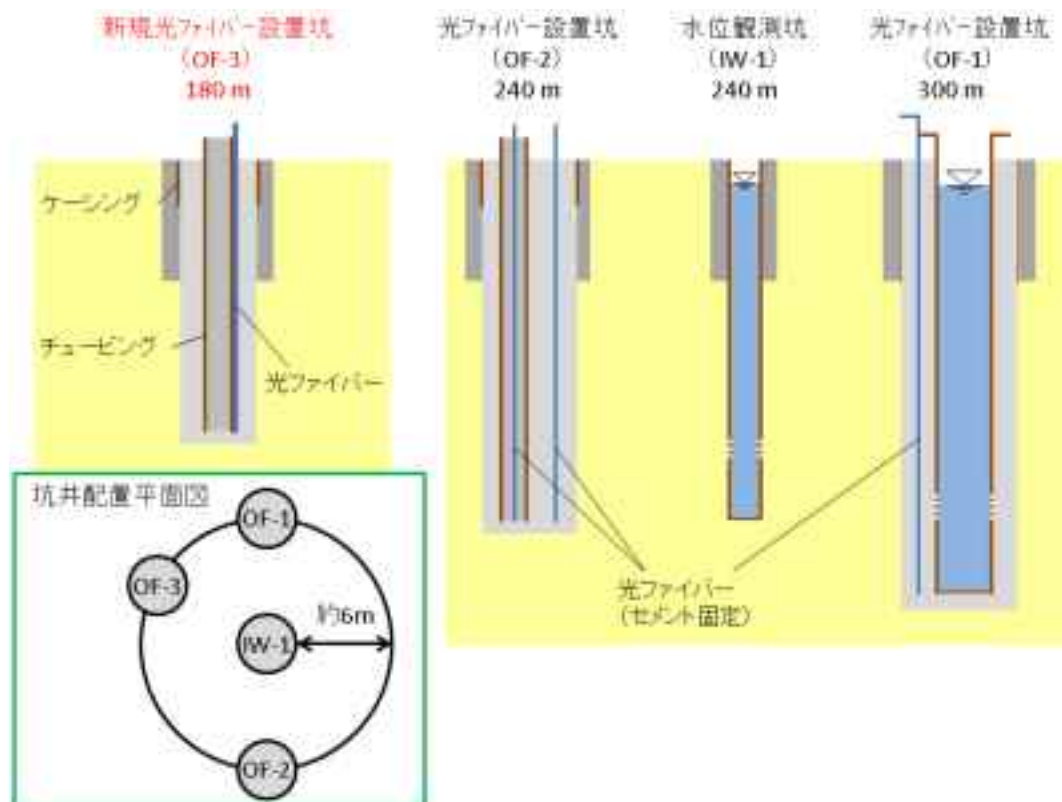


図 2.6.2-1 茂原地区試験サイト 1 での坑井配置と光ファイバー設置状況の概要

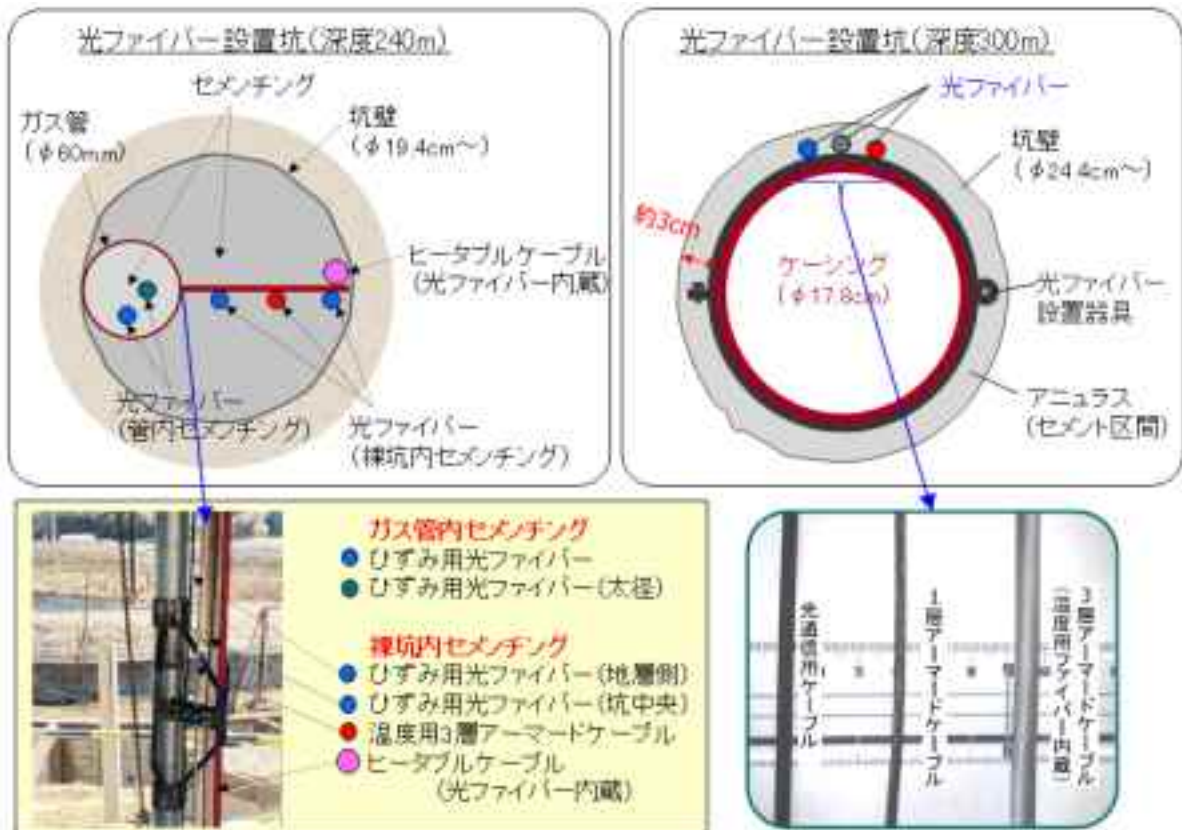


図2.6.2-2 茂原地区試験サイト1での既設光ファイバーの設置状況

次に、試験サイト周辺での農業用水の揚水時の光ファイバーの応答を観測した。これまでに光ファイバー設置坑から異なる距離にある農業用水用坑井からの地下水汲み上げ時の応答を測定している。今年度はこれまでよりも遠く、1 km以上遠方にある坑井からの揚水試験を実施した。これら一連の揚水時のひずみ計測の目的は、ひずみ計測の精度検証だけでなく、帯水層のつながりを明らかにすることと、それらの浸透性の不均質性推定に、圧力に加えてひずみ測定の有効性の検証を行うことである。

図2.6.2-3にOF-1で観測されたひずみ測定結果の速報値を示す。図に示すように3/12から深度約170 m付近において、数 $\mu\epsilon$ 相当のひずみが観測されている。ただしこの結果においては、ノイズ低減処理や、温度とひずみの分離を行っていないため、今後これらの処理を行うことで、より正確なひずみが求まることが期待される。昨年度までの試験を含めた一連の揚水試験により、揚水を行う坑井の位置、揚水開始から水圧・ひずみ変化が現れるまでの遅延時間、水圧・ひずみの変化量、ひずみ変化が現れる深度、といった情報が取得される。これらのデータは、地下の不均質性の議論、特に不透水境界がどれくらい遠方にあるのか、といった推定を行うために利用されるだけでなく、流体流動=岩石力学の連成解析におけるひずみ測定的重要性を明らかにするために活用される予定である。

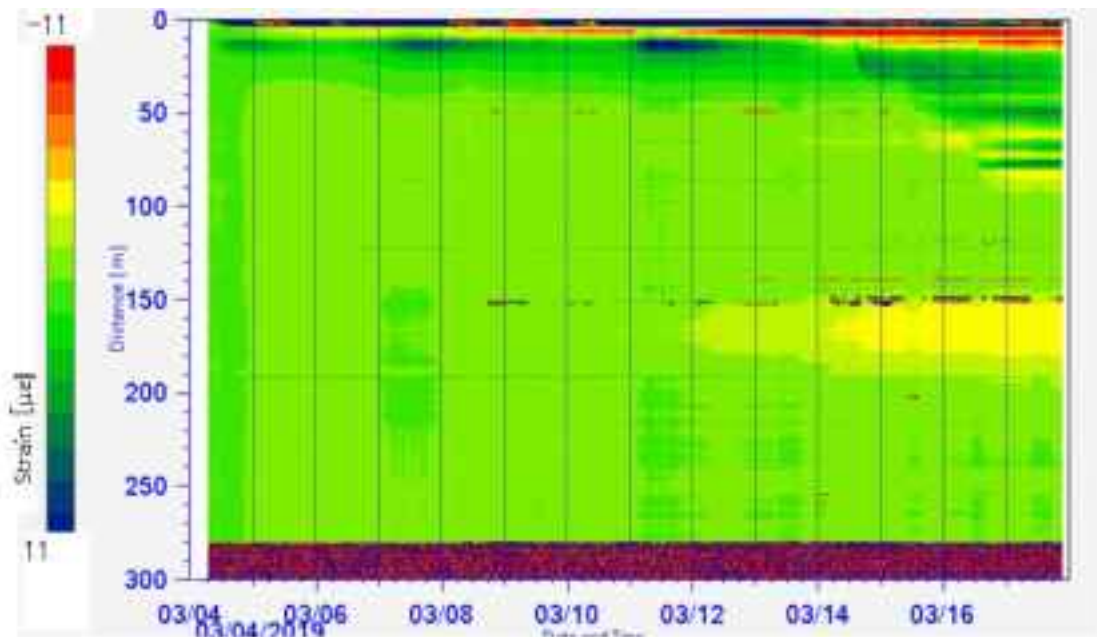


図2.6.2-3 茂原地区試験サイト1での揚水試験時の光ファイバー測定結果（速報値）

(3) ダイナミックなひずみ計測（DAS）性能評価試験

茂原地区試験サイト2において、DAS性能評価試験を行った。図2.6.2-4に坑井配置および試験概要を示す。

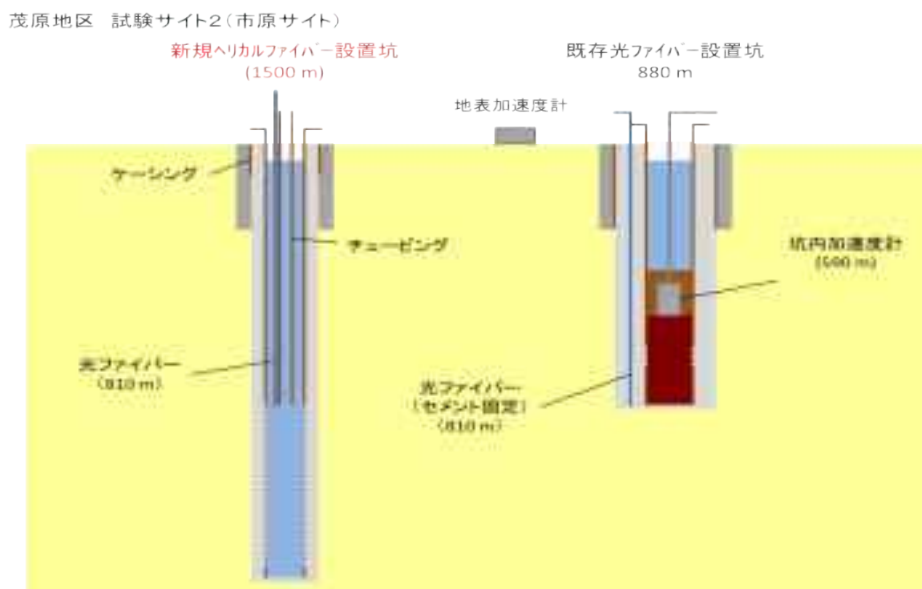


図2.6.2-4 茂原地区試験サイト2での坑井配置と試験概要

DAS計測においては、ひずみ測定とは異なり、シングルパルスではなく線形周波数変調（チャープ）パルス方式による計測技術が必要となる。そのためDAS評価試験においては、Silixa社のiDAS（Silixa, 2019）を用いることとした。また近接の880mの坑井、および地

上には加速度計を設置し、光ファイバーで計測される振動と、加速度計で観測される波形の比較を行い、光ファイバーで計測されるダイナミックなひずみ成分の大きさのキャリブレーションを行うこととした。現在、本試験で得られたデータの解析を実施中である。

(4) まとめ

光ファイバーを用いた時間的・空間的に連続な温度・圧力・ひずみおよびダイナミックなひずみ（DAS）の計測技術の向上を行った。光ファイバーが既設の茂原地区試験サイトにおいて、新規掘削された坑井に新しい設置方法による光ファイバーを設置し、周囲での揚水試験、および地表からの振動試験を行った。詳細な解析はこれからとなるものの、取得されたデータのクオリティは良好であり、実際の CO₂ 地中貯留深度までの長尺化の見込みは得られたと考えられる。

参考文献

- 1) Sirixa (2019): intelligent Distributed Acoustic Sensor (iDAS™).
<https://silixa.com/products/idas/> (2019年3月にアクセス)

2.6.3 光ファイバー長期観測システムの構築

(1) はじめに

CO₂地中貯留において、地下の温度に加えて地層変形（ひずみ）を深度方向に連続的にモニタリングすることは、CO₂圧入時の地層の安定性評価の上で重要である。そのため、光ファイバーによる分布式ひずみ計測技術を積み上げてきた。しかし、そのモニタリング期間は10数年以上に及ぶことが想定され、深度軸にも時間軸にも膨大なデータを取り扱う必要がある。このため光ファイバーひずみ計測システムとして、サイトの計測室の状況を遠方から確認可能なシステムとすることだけでなく、データ計測・処理・解析の自動化を進めることが重要である。本節では、光ファイバーによるひずみ測定の長期観測ツールの構築状況について説明する。

(2) サイト内計測装置への外部サイトからのアクセス・動作制御

光ファイバーによる自動ひずみ計測システムの概念図を図2.6.3-1に示す。計測室には、光ファイバー計測器が配置され、ここから光パルスを入力、散乱波データの収集を行うシステムとなっている。自動データ計測・処理・解析ツールはパソコンにインストールされたソフトであるが、このソフトにより光ファイバー計測器の制御、収集データの解析、結果表示、データベース化を行っている。このシステムに、長期観測ツールを新たに付加し、インターネット回線により外部との通信が可能となるようにした。



図2.6.3-1 光ファイバー長期観測システムの概要

この長期観測ツールにより、データ取得のスケジュール管理や、データベースから取得済みの解析結果（画像）を外部から参照可能となった。外部の端末としては、インターネットに接続可能でかつWebブラウザが使用可能であれば、パソコン・タブレット・スマートフォン等の種類によらずアクセス可能で、各端末の画面の大きさを考慮して、最適な表示となるように自動調整される（レスポンシブデザイン）。また、ライブカメラ機能を付加し、例えば抗口周辺や観測小屋内部の様子を、遠方からでも映像によりリアルタイムに確認できるようにした。

図2.6.3-1では動作検証用の一時的な使用のための回線として、グローバルIPアドレスの割り当てが可能なモバイルWi-Fiルータを用いたシステム構成となっている。実運用の際には、光ファイバー通信などの固定回線を設置することが望ましいと考えられる。

(3) 自動光ファイバーひずみ測定ツールの改良

① ブリルアンとレイリーの同時計測

これまでのハイブリッド計測（温度・ひずみ分離計算）では、同一の測定機器を用いてブリルアン計測及びレイリー計測を順次実行していた。この場合、厳密には同一のタイミングでの計測ではないため、坑井内での流体の急速な変化には対応できなかった。そこで光カプラーを使用して1つの計測用光ファイバーに対し、2台の計測器を接続し、同時計測を行う方法を考案した。現在使用しているNEUBREGATEおよび長期観測ツールは、この複数計測器の測定にも対応できるように改良されているため、同時計測が有効な現象の測定にも対応可能である。

② ブリルアン計測処理の改良

長期観測ツールでは、ブリルアン計測とレイリー計測を行った後、連立方程式を解くことにより温度・ひずみの値に分離している。それぞれの計測における周波数シフトの差分を計算する際に、異なるロジックを用いないと、誤差が蓄積されることが明らかになった。

レイリー計測データでは、ある基準計測データから周波数差分を計算する際に、相関処理によって詳細な差を求めているが、この相関処理を向上させるために、参照データを定期的に交換している。

ブリルアン計測では、周波数シフト量が大きいため、相関処理を行う必要がなかったものの、レイリー計測と同様な処理を行うと、かえって誤差が大きくなることが明らかになった。そのため、ブリルアン計測では個別データのフィッティング処理により中心周波数を求め、そこから差分を計算していく方法に改良した。

図2.6.3-2にブリルアン計測での改善前後の同一点での周波数シフトの自動処理結果の時系列データを示している。改善前のトレンド波形は矢印の時点から誤差により大きく下がり、このオフセット分の誤差をそのまま含んだ結果となっている。それに対し改善後のトレンド波形ではこの現象はなくなっていることが分かる。



図2.6.3-2 ブリルアン計測での差分計算法の改善前後のトレンド波形

(4) まとめ

光ファイバー長期観測システムとして、サイト内計測機器の稼働状況を遠方から確認可能とするだけでなく、データ計測スケジュールの管理、取得データの自動処理、データの自動解析を行うことを可能とするシステム構築を進めた。外部からの接続に関しては、インターネット経由でWebブラウザから行うようにし、かつ外部端末の種類に応じて自動調整された表示がさせるようなシステムを構築した。また、自動データ収集時にブリルアン計測とレイリー計測が同時に行えるように改良するとともに自動解析における誤差の要因となっていた解析手法を改良した。これらの改善の結果、光ファイバーによるひずみ長期観測システムとして適用するための準備が整ったといえる。

2.6.4 DAS/VSP データの有効利用法の確立

平成 29 年度に取得した DAS/VSP 測定データ・反射法弾性波探査データの解析を実施した。まず、DAS/VSP 取得データ（70 地点からの発振データ）のノイズ低減化、品質向上化を行った。次に、坑口に近い発振点からのデータに関して VSP 処理を行った。さらに、坑口からの距離をずらした発振点のデータを用い VSP イメージング処理手法を確立した。並行して、発振点から光ファイバーの各点間の速度トモグラフィ処理技術に関する検討を実施した。これらの光ファイバーによって取得された結果を、地表で計測した反射法弾性波探査結果と比較し、計測データの精度等について評価を行った。以下、(1) DAS/VSP データのノイズ低減化手法の策定、(2) DAS/VSP データによる地下イメージング（地層境界可視化）手法の確立、(3) DAS/VSP データによる走時トモグラフィ手法の確立について報告する。

(1) DAS/VSP データのノイズ低減化手法の策定

一般に VSP データを用いた地下イメージングでは、取得データからイメージングに使用する P 波反射波のみを精度よく選択的に取り出すことが重要である。DAS/VSP データにも地層境界面からの反射波以外に様々な波やノイズが同時に記録されるため、DAS/VSP データに対する有効なノイズ低減化手法を検討した。

DAS 計測ではファイバーケーブルと地層のカップリングが記録データの質に大きく影響する。本実証試験の収録環境では、観測井の垂直区間で良好なカップリングが得られにくいといった特徴があり、実記録においてもデータの質が劣る区間が確認できた。このような区間ではノイズレベルが非常に大きいだけでなく、以降の処理において周辺のデータに対してノイズを拡散させるといった悪影響がある。そのため、処理に入る前段階として、ノイズレベルの大きい区間を取り除く作業を行った。

次に、VSP データに特徴的なノイズであるチューブウェーブノイズの低減が挙げられる。今回採用した Inside CT 法 DAS/VSP では、最も卓越するノイズであった。本年度はチューブウェーブノイズを除去するために、線形 Tau-P フィルターを適用した。これは取得データにおける連続的なイベントの切片 (= Tau) および傾き (=P、Slowness : 速度の逆数) を計算し、特定の傾きを持ったイベントを除去できるフィルターである。詳細なデータ検証から、本収録仕様でのチューブウェーブは、コイルドチュービング (CT) 内の流体中を伝播する波であり、その伝播速度はおよそ 1,500m/s の値をとることが分かった。そこで今回は 1,667m/s 以下の速度を持ったイベントを除去するフィルターを適用した。さらにシグナル・ノイズ比（以下、SN 比）を向上させるために、近接する 3~4 発振点の記録を重合した。これらの処理の結果、チューブウェーブノイズを大きく低減することに成功し、オリジナルデータでは確認できなかった P 波反射波や S 波反射波を認識できるまでデータの質を向上させることに成功した。

PS 波動場分離は VSP 処理における重要なステップであり、従来のジオフォン VSP では 3

成分のデータを用いて、P波とS波の分離を行うことが一般的である。しかしながら、現行のDAS/VSPで取得可能なデータは1成分のみであり、PS波動場の分離がより困難となる。加えて、オフセットVSPや傾斜井でのVSPでは、原理上、ショットギャザー上でP波反射波が曲率をもって記録されることになり、前述の線形Tau-PフィルターやFKフィルターといった特定の傾きをもったイベントを取り出す速度型フィルターをそのまま適用するだけでは、P波を十分に分離できない、もしくはP波の信号に損傷を与えるリスクがある。そこで反射法弾性波探査データ処理で用いられるムーブアウト補正を応用する手法を考案した。ムーブアウト補正は記録されたデータの記録時間を予想される反射点深度に変換する処理である。用いる速度モデルとして水平多層構造を仮定する場合、実際の地下速度構造が水平に近く、かつモデルの速度が現実とおよそ一致していれば、ムーブアウト補正後のP波反射波イベントはほぼ水平に現れる。ムーブアウト補正処理を適用した結果、補正適用前と比べて、P波反射波を水平に近いイベントとして出現させることに成功した。一方、S波反射波は適用後においても傾きおよび曲率をもっており、引き続き速度型フィルターの効率向上に大きく寄与する。

ムーブアウト補正後のデータには速度型フィルターであるKKフィルターを適用した。KKフィルター（K：波数）はインプットデータに2Dフーリエ変換を適用し、KKプロット上でフィルターを設計することで、特定の傾きを持った信号のみを抽出する処理である。ムーブアウト補正により、必要なP波反射波がほぼ水平なイベントに変換されているため、KKフィルターによって高いSN比でP波反射波を抽出することに成功した。

(2) DAS/VSP データによる地下イメージング（地層境界可視化）手法の確立

CDPマッピングと呼ばれる手法を用いて、地下イメージングを行った。KKフィルター適用後、25点の重合発振点のうち、SN比を考慮して17点のデータに対してCDPマッピングを適用した。次にCDPマッピング後にtrim staticsを適用しそれぞれの反射イベント連続性を向上させたのち、17発振点によるCDPマッピング結果を重合した。得られた断面図を、DAS/VSPと同時に取得した反射法弾性波探査の結果と比較すると、DAS/VSP断面図では反射法弾性波探査と整合的かつ、より明瞭で連続的な反射イベントを確認することができた（図2.6.4-1）。また、得られた断面図と周辺坑井で取得された電気検層結果との対比も実施した。坑井対比の結果、DAS/VSP断面図における特徴的な反射イベントが地層境界面と整合的であることが確認できた。これらの結果から、大深度・高傾斜井においても、またInside CT法であっても、十分な精度で地下イメージングが可能であることが証明できた。

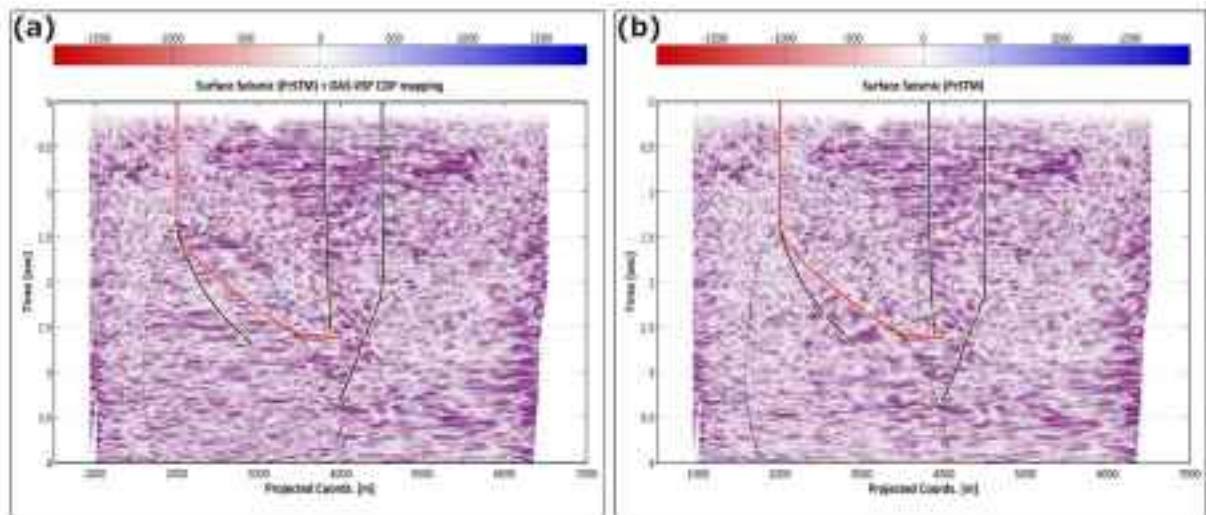


図 2.4.6-1 断面図（黒破線内が DAS/VSP によるイメージング領域）
 (a) DAS/VSP および 2 次元反射法弾性波探査、(b) 2 次元反射法弾性波探査のみ

(3) DAS/VSP データによる走時トモグラフィ手法の確立

VSPデータのイメージング以外の活用法として、反射波情報を用いるイメージングでは把握することが難しい、坑跡よりも浅部の速度構造を把握することを目的とする、直達波の初動走時によるトモグラフィが考えられる。DAS/VSPデータでの走時トモグラフィの有効性を検討するために、本実証試験でのデータを用いて走時トモグラフィ解析を実施した。

観測井を挟んで両側に位置する計15か所の発振点に対し、DAS/VSPの記録からP波直達初動を読み取って観測走時を作成した。音波検層結果に基づく速度構造から推定される速度モデルを用いて計算した理論走時と観測走時は概ね対応しており、作成した観測走時は妥当であると判断された。得られた観測走時を用いたBPT (Back Projection Technique) により初期モデルを作成し、SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) によって速度モデルを繰り返し更新することで、地表と観測井坑跡との間のP波速度モデルが得られた(図2.6.4-2)。得られた速度モデルは想定された水平成層構造よりも若干傾斜した構造となったが、傾斜井での受振と偏った発振点配置が影響していると推察される。速度モデルの格子サイズは、十分小さくかつ偽像の発生が少ないサイズを検討した結果20mを採用した。受振点は732深度全てを利用したが、その数を1/3や1/5に減らした場合でも最終的な速度モデルには大きな差は見られなかった。最終的に得られた速度モデルからレイトレーシングにより算出される弾性波の波線経路は、坑底を除く観測井坑跡沿いに集中しており、地表付近と坑底付近は波線密度の低下により、速度推定精度が低い区間が存在することがわかった。波線密度は、受発振ジオメトリが大きく影響しており、トモグラフィも含めた解析を想定する場合、測定範囲を十分カバーできる速度モデルを得るための収録仕様立案が重要であることが確認された。

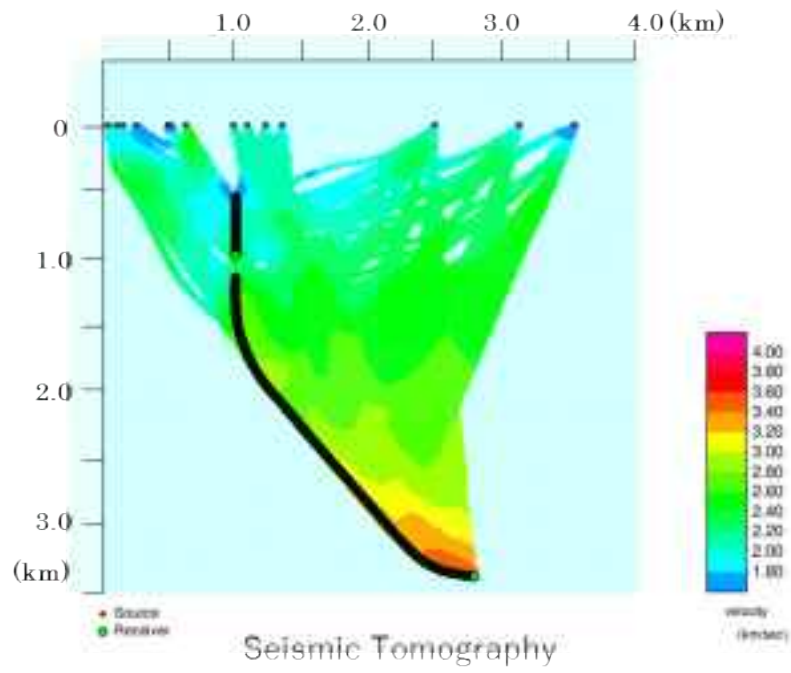


図 2.6.4-2 走時トモグラフィによるP波速度モデル

2.6.5 軟岩亀裂、断層モデルのプロトタイプ完成

CO₂地中貯留において、貯留層へのCO₂の圧入は、もともとの地中の応力均衡を崩す一つの要因となる。そのため、CO₂漏出を未然に防ぐキャップロック中にき裂や断層が存在する場合には、応力均衡の崩れに伴い、き裂の更なる進展や断層面同士のすべり現象が生じやすくなることが予測される。その結果、それらはより大きな流路になると同時に、CO₂の漏出経路にもなり得ると考えられる。そこで、わが国のCCSで主として対象となる軟岩に着目し、せん断・透水室内実験で得られた岩石力学・水理データに基づく軟岩亀裂、断層モデルのプロトタイプの開発と力学-水理連成解析への適用を行った。

(1) 軟岩のせん断・透水実験

これまで、キャップロックに相当する泥岩・頁岩・粘板岩（以後、キャップロック類と呼ぶ）、および貯留岩に相当する砂岩・凝灰岩（以後、貯留岩類と呼ぶ）を対象に、せん断・透水実験を行い、特に力学-水理連成解析に必要な体積ひずみ（ ε_v ）と浸透率（ K ）に関するパラメータを取得してきた。今年度は、これまでの蓄積データに基づき、 ε_v と K の関係について岩石の種類ごとに体系化を図るとともに、力学-水理連成解析に必要な ε_v と K に関連した定式化を行った。その結果、図2.6.5-1に示すように、 ε_v と K の関係はキャップロック類と貯留岩類で2パターンに大別されることがわかった。キャップロック類と貯留岩類の大きな違いは、破壊時の浸透率の変化の傾向が異なることである。具体的には、キャップロック類は、破壊とほぼ同時に浸透率が急激に増加し、その後なだらかに減少する。一方で、貯留岩類の場合には、破壊挙動に関係なく、はじめから体積ひずみの増加に伴って、浸透率が一定に増加する傾向が明らかとなった。

次に、これまでの蓄積データに基づき、 ε_v と K の関係について定式化を試みた。既存モデル（たとえば、Cappa et al., 2009など）に従い、破壊時の体積ひずみ（ ε_{v_fr} ）とそれに対応した浸透率（ K_f ）をパラメータとすることで、図2.6.5-1で示されるような軟岩類の複雑な ε_v と K の関係を十分に説明できることがわかった。今回新たに開発した軟岩亀裂、断層モデルのプロトモデルは、以下のとおりである。

$$\frac{K}{K_0} = 1 + \beta \cdot \varepsilon_v \quad (\varepsilon_v \leq \varepsilon_{v_fr}) \quad \text{(式2.6.5-1)}$$

$$\frac{K}{K_0} = \frac{K_f}{K_0} + \gamma \cdot (\varepsilon_v - \varepsilon_{v_fr}) \quad (\varepsilon_v > \varepsilon_{v_fr}) \quad \text{(式2.6.5-2)}$$

ここで、 K_0 は破壊前の初期浸透率、 β および γ は係数である。

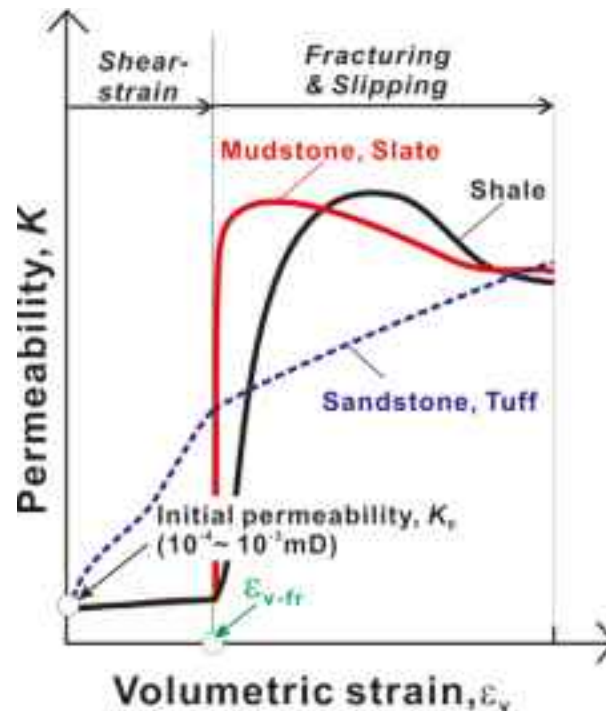


図2.6.5-1 破壊・すべり過程を含む軟岩の体積ひずみと浸透率の関係

(2) 軟岩亀裂、断層モデリング手法の開発

今年度は、力学-水理連成解析に必要な軟岩の亀裂・断層モデルのプロトタイプを完成するため、連成解析の一部である多相流解析プログラムToughに新規構成則を追加した。軟岩のせん断・透水実験結果を参考に、亀裂や断層を含む地層単位（離散化セル）の浸透率は式2.6.5-1~2に従うものとした。これにより、せん断破壊後の浸透率の減少が再現できることとなった。改良したプログラムを用いて、湧水を伴う松代群発地震ナチュラログモデル（産業技術総合研究所、2015）の再解析を実施した。旧モデル（ $\beta=30000$ 、 $\gamma=30000$ 相当）に対して、新モデル（ $\beta=30000$ 、 $\gamma=0$ ）を用いることで観測した群発地震時空間推移模様の再現性が著しく改善された。

岩種によっては実験で得た浸透率と体積ひずみ等との関係が複雑であり、数式化することが難しいケースもある。このような地層に対して、実験データをそのまま連成解析に取り組むためのプログラムの改良も行った。

参考文献

- 1) Cappa, F., Rutqvist, J., Yamamoto K. (2009) : Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep CO₂-rich fluids during the 1965–1967 Matsushiro earthquake swarm in Japan, Journal of Geophysical Research, 114, doi: 10.1029/2009jb006398
- 2) 産業技術総合研究所（2015）：平成26年度二酸化炭素回収・貯留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）成果報告書

2.6.6 まとめ

本節では、光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発として、ひずみ測定とDAS計測によるイメージング結果について報告した。

まず、CO₂地中貯留でのモニタリングに適した光ファイバー仕様として、既存のファイバーケーブルを確認した結果、ひずみ測定、およびDAS計測に適したファイバーが存在することが分かり、現場試験に適用することでその性能を検証することとした。

また、光ファイバーの設置方法の検討のため新規坑井の掘削を行うとともに、サイト周辺の農業用水用坑井からの揚水試験を行った。観測結果では、10 $\mu\epsilon$ 以下のひずみも明瞭に計測されているほか、流体挙動＝ジオメカニクス連成解析のためのフィールドデータも取得した。さらに光ファイバーによるDAS計測と、通常の地震計での観測波形の比較のためのデータ取得も行った。

これらの光ファイバーの計測を長期に自動的に行うためのシステム開発も進めた。特に、外部からの稼働状況確認や取得データの確認を行えるように観測システムを変更したことと、自動解析処理のためのロジックの改良を行い、長期運用のためのシステムがほぼ完成した。

一方、大深度・傾斜井におけるDAS/VSPデータの有効利用法の確立として、DASデータに含まれるノイズの低減化手法を策定し、さらにDAS/VSPデータによる地下イメージング（地層境界可視化）手法を確立した。さらにDAS/VSPデータによる走時トモグラフィ手法を検討し、取得データによる解析結果を得るとともに、貯留層モニタリングの可能性について検討した。

また遮蔽層に亀裂が存在する場合にすべり現象が発生しやすくなるかに関連して、軟岩亀裂・断層モデルのプロトタイプを求めるためのコア試験を実施し、浸透率に与える影響のモデル化を行った。さらにこれらの知見を力学－水連成解析シミュレーターに入れるために、TOUGH2に新規構成則の追加を行った。

これらの結果より、光ファイバーによるひずみ測定手法の確認、およびDAS/VSPデータの解析技術はほぼ確立されたと言える状態にあると言え、今後実フィールドでの検証を進め、実適用可能な技術となるように開発を進めていく。

2.7 CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

我が国では主に海底下の貯留層へのCO₂地中貯留が想定されている。万一のCO₂漏出に備え、海域でのCO₂漏出検出技術が必要である。漏出検出としては、CO₂気泡の検出（物理的手法）と海水のCO₂濃度上昇の検出（化学的手法）がある。海水中のCO₂の濃度は自然環境により変動するため、化学的手法でCO₂の漏出を検知するには、もともとのCO₂の濃度変動（ベースライン）を明らかにしておく必要がある。苫小牧実証試験においては、1年間の四季調査のみでベースラインを設定しているが、様々なCO₂自然変動要因を考慮した場合、それで十分なのか検討する必要がある。

そこで、海水中のCO₂濃度の1年間の連続観測を大阪湾で行う。大阪湾では、過去9年分の四季観測データを二酸化炭素地中貯留技術研究組合として整理しており、今回実施する連続観測データと合わせて解析することにより、ベースライン検討を的確に実施できる。

また漏出が起きた場合のCO₂の拡散範囲や生物など環境への影響を評価する必要がある。このため、漏出CO₂の海中拡散シミュレーション、および生物影響評価手法を開発するとともに、これらを統合化し、分析・評価するCO₂漏出検出・環境影響評価総合システムを開発する。

2.7.1 生物影響評価データセットの整備

(1) 評価項目の検討

沿岸海域の環境は非常に多様であり、事前に生物影響評価項目を整備しておくことは、CCS事業での環境影響評価やモニタリング計画を滞りなく実施するうえで有用である。CO₂濃度の増加による生物影響には致死や石灰化抑制、成長抑制などさまざまな項目があり、CCS事業化の展開に対して多様な海域や生物種の情報を取りまとめることが望ましい。また、海底下CO₂貯留における利害関係者の懸念する影響は地域の特性に応じて異なるであろう。このような懸念に迅速に対応するためには、柔軟に対応できる生物影響データセットを整備しておくことが望ましい。

生物影響に関するデータの収集にとって、CO₂貯留における漏出影響を目的としている実験例は限られている。しかし、大気中CO₂の増加に伴う海洋酸性化影響が重視されるようになり、2010年ごろから急速に海洋酸性化影響に関する実験報告が増加してきた。海外では、海洋酸性化に関してBIOACIDやOA-ICCなどの海外プロジェクトがデータや文献情報を集積している。これらの情報は、オンライン情報共有サイトMendeleyやデータ公開サイトPANGAEAにおいて検索あるいは利用することが可能である。例えば、MendeleyではOA-ICCが提供する5377の記事や文献情報が検索可能である（2019年2月12日現在）。ただし、これらは文献情報あるいは一次データであり、CCS事業に有用な情報を選別・抽出し、活用できるように加工・解析処理が必要となる。

本事業は沿岸域での海底下CO₂貯留が対象であり、影響情報の収集にあたっては沿岸を対象として絞り込んで検索する。漏出時にCO₂濃度が高い海底近傍に生息する底生生物が

中心となるが、海中に拡散することを考えると遊泳生物も対象となる。例えば、生物分類群として主要なものは脊椎動物の魚類、軟体動物、甲殻動物が水産上直接的に重要である。しかし、これらの生物の食物や生息環境の保全を考えると、プランクトン、藻類、多毛類等の情報も重要となる。また、日本近海に限らず、海外の近縁種についても有効に活用できるため対象とする。

(2) 評価項目の整理手法

RITE では、過年度に致死影響について半致死濃度 (LC50) や半致死曝露時間 (LT50) 等の閾値が推定できるデータを収集し、致死濃度を推定してデータセットを構築した。しかし、致死閾値以外の生物影響も取り込むには、多様な影響に対応できるデータベースの構築が望ましい。致死以外の生物影響は様々な影響項目 (エンドポイント) が対象となるため、共通した指標で表現することが必要となる。そこで、メタ解析手法で用いられる対数リスク比 (LnRR : Log response ratio) に変換する指標を採用することとした。通常の生物実験では CO₂ 濃度が高い実験区に対して通常濃度の対照区を設けることが一般的である。LnRR は実験区の値を対照区の値で割り対数に変換して表したものである。このような統一指標の提供は、多数のデータを基盤とする、より信頼性の高い情報の提供につながる。

今年度から文献の収集を開始したが、海洋酸性化の実験は温度上昇との複合影響を評価する実験が増加しつつあり、情報の採用においては温度上昇のような複合要因の取扱いに注意が必要である。また、生物影響の記述内容は文献により異なるため、データを管理するデータベース構造の検討が重要である。例えば、図 2.7.1-1 に示すように、文献情報には CO₂ 濃度に対して、環境条件、生物種、観察項目が存在するため、効率的に処理できるデータベースについて検討した。

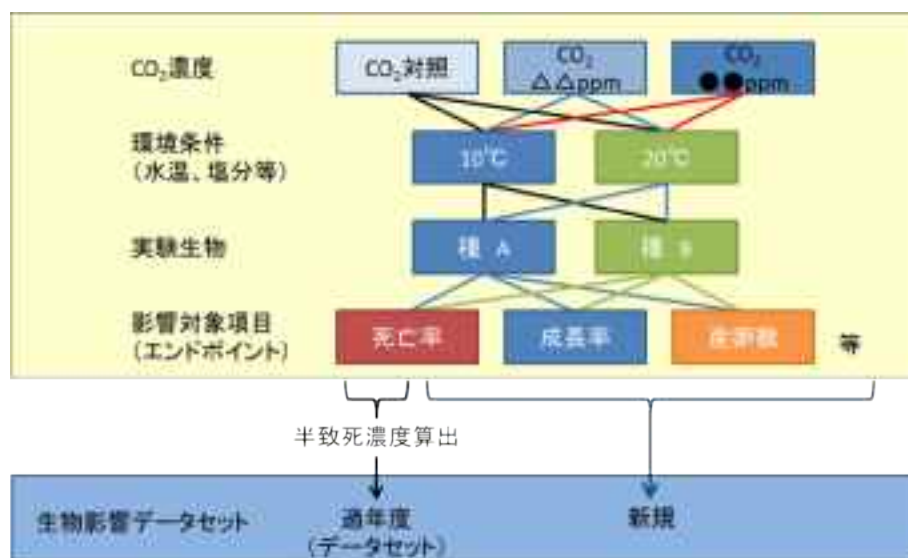


図 2.7.1-1 文献における生物影響情報の組合せ例

(3) データセットの構成

多様な情報を処理するためにはリレーショナルデータベース形式が適していると考え、
図 2.7.1-2 に示す構成とした。

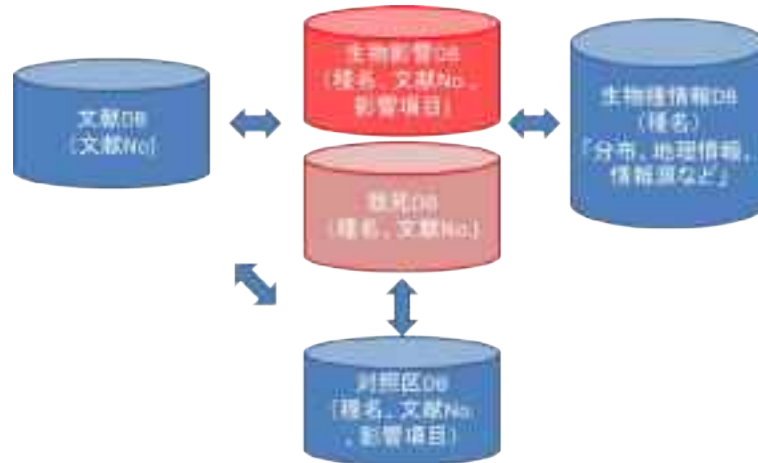


図 2.7.1-2 想定している生物影響データベースの構成

ここで、文献 DB は文献に関する情報を保存する。生物種情報 DB は生物種についての特性、分布や地理情報を取り扱う。生物影響は 2 種類に分離して保存することとした。致死 DB は、LC50 等の致死閾値が算出できた文献の情報に限られる。一方、生物影響 DB は致死影響でも上記のような閾値が求められない情報や致死以外の影響を包含したものである。また、各実験では対照区の情報が存在しており、データの重複を避けるために独立した対照区 DB で管理することとした。それぞれのデータファイルは、図中にカッコ内に示した共通項目（主キー）でリンクし、検索に応じて必要なデータを連結して出力する。各データファイルの主なフィールド内容を表 2.7.1-1 に示す。

表 2.7.1-1 生物影響データセットの主要な内容

DB名	項目	内容
文献DB	内容	引用文献情報
	主キー	文献番号
	フィールド名	doi.、著者名、発表年、タイトル、雑誌名等
生物種DB	内容	致死情報のうち、LC50等の算出ができない報告。致死影響以外の報告。
	主キー	種名
	フィールド名	種名、分類群名、地理情報、生息環境、生活形態、石灰質外骨格の有無、重要性(水産、生態系)
致死影響DB	内容	致死情報のうち、LC50等の算出が可能な報告。
	主キー	文献番号、種名、生活史段階、影響指標(濃度、時間)
	フィールド名	文献情報、種名、生活史段階、実験条件(水温、pHなど)、曝露時間、エンドポイント(LC50等)
生物影響DB	内容	致死影響以外の影響結果
	主キー	文献番号、種名、生活史段階、影響指標(濃度、時間)
	フィールド名	文献情報、種名、生活史段階、実験条件(水温、pHなど)、曝露時間、エンドポイント(LnR等)
対照区DB	内容	対照区に関する情報のとりまとめ
	主キー	文献番号、種名、生活史段階、影響指標(濃度、時間)
	フィールド名	文献情報、種名、生活史段階、実験条件(水温、pHなど)、曝露時間、測定値等

(4) 今後の課題

概念設計に従いデータベース設計・製作する必要がある。また、これに並行して文献を引き続き収集する。また、文献内容の解読からデータベースに保存する数値の抽出・加工等の効率的な手順および入力ツールの作製が必要と考えられる。

2.7.2 広域の流れや水塊分布の影響を組み込んだ狭域モデルシミュレーション手法の構築

(1) はじめに

海底下に貯留した CO₂ が万が一海底から海に漏出した場合にはどのような範囲でどのような生物影響が生じ得るのかをあらかじめ評価する必要がある。漏出した CO₂ は海の流れによって移流・拡散されて広がっていくため、そのシミュレーションには海の流れや成層状態(水温や塩分の分布)をシミュレーションすることが必要になる。また、漏出 CO₂ は気泡として海底から出てくると考えられるが、気泡の溶け方は気泡サイズや水温などに依存するため、モデルには気泡の溶解を計算する気泡モデルを結合させる必要がある。

本事業では数百 km スケールの領域を計算する広域モデルと数十 km スケールの領域を計算する狭域モデルの2つを組み合わせた漏出 CO₂ の拡散シミュレーション手法の開発を行っている。漏出 CO₂ の拡散範囲が数百 km に及ぶことは考えにくい。それにもかかわらず、広域モデルが必要な理由は、海の流れ場や密度場が必ずしもその直上の大気（すなわち風や気温）によってのみ作られるわけではなく、広域の大気条件（風、熱）によって作られ得るからである。

今年度は、広域モデルの計算結果（水温、塩分および境界通過流速）を狭域モデルの開境界条件として与え、広域の流れ場や水塊分布を組み込んだシミュレーションができるようにした。その際、広域モデルの流量が保存する境界条件データを作成できるようにした。さらに、狭域モデルに CO₂ 気泡モデルを組み込み、漏出 CO₂ を気泡で与えられるようにした。

(2) モデル

苫小牧沖の東経 141.2628 度～142.0622 度、北緯 42.47109 度～42.63464 度を狭域モデル領域とした。領域の南境界は開境界になっている。この開境界で、北西北太平洋を領域とする広域モデルと全く同じ地形・水深とした。狭域モデルの水平解像度は、広域モデル（1/120 度）の 16 倍、すなわち東西、南北とも 1/(120×16)度とした。鉛直解像度は 3m とした。格子数は、1536×315×27 である。

モデルは、海面に与える風速データと開境界境界条件によって駆動される。広域モデルが 2011 年の大気データで駆動されているため、狭域モデルの風速データも 2011 年のデータを用いた。実際には、風速は空間的に変動していると考えられるが、ここでは気象庁ホームページの「過去の気象データ検索」の苫小牧の風速データを全領域一様に与えた。

① 開境界境界条件

開境界の境界条件として、5分ごとに出力させた広域モデルの水温（T）、塩分（S）、流速の南北成分（V）を与える。境界の通過流量を保存させるため、広域モデルの各格子の流量（格子断面積×V）と、その広域モデルの格子に含まれる狭域モデルの格子の流量和が一致するように、狭域モデルの格子のVは広域モデルの各格子流量をその格子に含まれる狭域モデルの断面積で割った値とした。このようにすると、基本的には1つの広域モデル格子に含まれる狭域モデル格子では全て同じVになる。そこで、データを滑らかにするために、水平方向に17格子で移動平均し、それを境界条件データとした。トレーサー（T、S）は格子ごとの積算量は考えず、広域モデルの格子に含まれる狭域モデルの格子には、そのまま広域モデルの格子のT、Sを与えるようにした。そのため、トレーサーにはついては、積算量は保存しない。トレーサーもVと同様に水平方向に17格子で移動平均を掛けた。

② CO₂ 気泡モデル

狭域モデルには、CO₂気泡モデルを結合させ、漏出CO₂を気泡で与えることができるよ

うにした。CO₂気泡モデルは、RITE(2016) のモデルを用いた。例として、水深約30mの地点から約2,622トン/年、約26,220トン/年の漏出率で気泡CO₂を漏出させるケースと、水深約10mと水深約30mの2地点から（2地点合わせて）約2,622トン/年の漏出率で漏出させるケースの計算を行った。

(3) 結果

狭域モデルの開境界の地形、水深を広域モデルの地形、水深と一致させ、狭域モデルの水平解像度を広域モデルの整数倍（16倍）にすることで、広域モデルの流量を保存した狭域モデル境界条件を作ることができた。

広域モデルには、潮汐効果が含まれているため、その流速データを境界条件として使った狭域モデルにも潮汐効果が含まれる。検潮所の推算潮位と狭域モデルの計算結果の水位変動を比較するとよい一致が見られた。

漏出CO₂として気泡CO₂を与えると、気泡は上昇しながら溶解し、溶解したCO₂（全炭酸）が流れによって移流・拡散されることが表現された。

時間ステップを3秒未満にすると、一部のCO₂気泡は最下層の一つ上の格子まで到達したが、時間ステップを5秒にすると全ての気泡が最下層で溶け切った。時間解像度により気泡の挙動が異なる。また気泡が溶ける格子のサイズによって、その格子の溶存CO₂濃度が変化する。格子サイズが小さければ同じ漏出率でも溶存CO₂濃度は高くなる。

(4) まとめと今後の課題

狭域モデルに流量が保存する開境界境界条件を与えることができるようになり、海流などの広域の流れや水塊分布の影響を組み込めるようになった。またCO₂気泡モデルを結合し、漏出CO₂を気泡としても、全炭酸としても与えられるようになった。

気象条件の違いにより、海流の流れや水塊分布は異なる。またCO₂気泡の溶解やそれに伴うDICの増加が空間解像度や時間解像度に依存する可能性が示された。今後、気象条件やCO₂の拡散に対する影響について、今後、検討を進める。

2.7.3 ベースライン調査における観測期間と頻度の設定に関わるデータ・知見の蓄積

過年度来、海水中のpCO₂と溶存酸素飽和度（DO）の関係をういた異常値（漏出）検出手法の研究を進めてきた。今年度は、異常値判定基準の作成に必要なベースライン調査の頻度や年数を検討した。苫小牧 CCS 実証試験では四季調査一年（すなわち一測点につき4データ）のベースラインデータを基に異常値判定基準が作成された。そこで、過年度来、解析を続けている大阪湾の四季調査データ（浅海定線調査；地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所 HP）を用いて、四季調査データであれば何年分のベースラインデータが必要かについて検討を行った。一方で、短期変動が大きい季節、海域では一季節一回の調査では、その季節、海域の特徴を把握することはできない。そこで、海水の炭酸系

の値などの変動特性を把握し、その変動特性を基にして、適切なベースライン調査の時期や期間を検討するために、長期観測を開始した。

(1) 四季調査データの解析

① データと解析方法

解析には、過年度と同じデータ、すなわち大阪府立環境農林水産総合研究所が大阪湾で年4回（2月、5月、8月、11月）行っている浅海定線調査（地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所HP）の底層データを用いて、過年度に作成したpCO₂とDO飽和度のデータセットを用いた。このデータセットには2002年から2010年までの9年分のデータが含まれている。

この9年分のデータから、N年（ $1 \leq N \leq 9$ ）分のデータを取り出してpCO₂とDOの相関関係を利用した基準値を作成する。9年のデータからN年のデータを選ぶ選び方は 9C_N 通りあるので、 $\sum_{N=1}^9 {}^9C_N = 511$ 通りの基準値ができる。各基準値に対し、9年分全てのデータを適用し、false-positive（基準値を超える自然変動のデータ）の割合を計算した。

また、季節ごとに重複を許してN年（ $1 \leq N \leq 9$ ）分のデータを取り出し、同様にfalse-positiveの計算を行うということも行った。これを各Nに対し、100万回行った。9年のデータから重複を許してN年取り出す組合せは、 9H_N 通りあり、その4季節の組合せのため、その組合せは $({}^9H_N)^4$ 通りである。

② 結果

9年分のデータからN年分のデータを取り出して基準値を作る場合、N=1のときには、false-positiveが約50%となる場合があった。すなわち、1年分の四季調査データをもとにして、異常値判定基準を作ると、モニタリングにおいて、2回に1回の割合で異常値が検出されてしまうということも起こり得るということである。Nが大きくなるにつれて、false-positiveの最大値は小さくなっていく。

季節ごとに重複を許してN年分のデータを取り出して基準値を作ることを100万回ずつ行った結果、false-positive率は海域によって異なることが明らかになった。N=9のときのfalse-positive率の100万回の平均値をその海域のfalse-positive率と仮定した。4年以上のデータを使えば、90%以上の確率でfalse-positive率がその海域のfalse-positive率の2倍以内に収まり、6年以上のデータを使えば95%の確率でその海域のfalse-positive率の2倍以内に収まるという結果が得られた。すなわち、ベースライン調査を四季調査（1測点につき各季節1回、年4回の調査）で行う場合には、4～6年以上の調査を行うことが望ましいと考えられる。

(2) 大阪湾での海水中 CO₂ 濃度の長期観測

① 方法

a) 観測海域および観測地点

長期観測は過去に観測が十分に行われており、海域の特徴が明らかになっている海域で行う必要がある。そこで、過去 40 年以上に渡り大阪府が浅海定線調査を続けている大阪湾で観測を行うことにした。

観測海域および観測地点を図 2.7.3-1 に示す。本研究では神戸港および関空沖を観測海域とした。神戸港では神戸港波浪観測塔近傍(A1)と、A1 から南側に 1km 離れた地点(A2)、A2 からさらに南側に 1km 離れた地点 (A3) の 3 か所を観測地点とした。関空沖では関空 MT 局近傍 (B1) と、B1 から西側に 1km 離れた地点 (B2)、B2 からさらに西側に 1km 離れた地点 (B3) の 3 か所を観測地点とした。なお、観測海域の水深は、神戸港では 17 ~18m、関空沖では 22~24m である。

大阪湾は、水深の深い西側（淡路島側）と浅い東側（湾奥側）とで海域の特徴が大きく異なる海域である（中嶋・藤原，2007）。神戸港の観測点は東側の海域に属し、関空 MT 局の観測点は西側に属すと考えられ、この長期観測で異なる特徴を持つ二海域の検討ができる。



図 2.7.3-1 観測海域および観測地点

b) 長期観測の概要

長期観測の概要を表 2.7.3-1 に示す。観測機器を使用して A1 および B1 の底層の pCO₂、水質（水温、pH、塩分、溶存酸素）および流向流速を連続観測するとともに、観測機器の

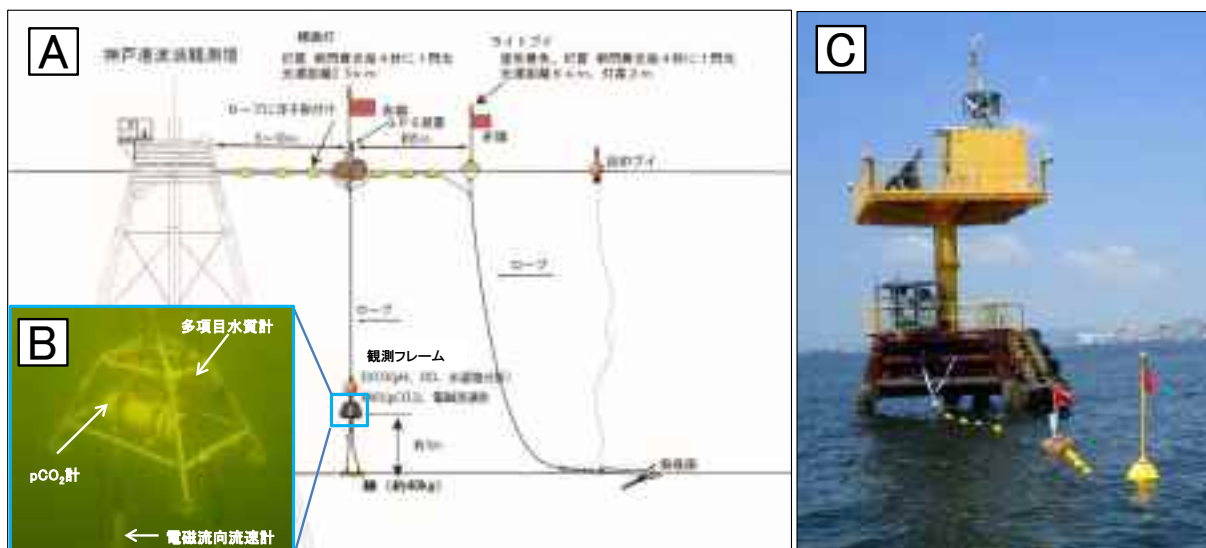
投入時、揚収時にすべての観測地点で鉛直プロファイルを測定した。また、毎月1回、観測機器の投入時にすべての観測地点の表層および底層の海水を採取し、炭酸系および栄養塩類を分析した。

表 2.7.3-1 長期観測の概要

区分	観測項目	観測地点	観測・採取層	観測頻度
連続観測 (観測機器)	pCO ₂	A1、B1	底層	連続 (pCO ₂ : 約4時間 毎、流向流速: 10分 毎、その他: 3-30分 毎)
	水温、pH、塩分、溶存酸素			
	流向流速			
鉛直プロファイル (観測機器)	水温、塩分、溶存酸素	A1、A2、A3 B1、B2、B3	—	機器投入時、揚収時 (1~2回/月)
採水分析	炭酸系 (pH、塩分、溶存酸素、 アルカリ度、全炭酸) 栄養塩類	A1、A2、A3 B1、B2、B3	表層、底層	機器投入時 (1回/月)

c) 連続観測

図 2.7.3-2 A に示した係留装置を作製した。pCO₂ センサー (SubCtech 社 OceanPack MK5)、多項目水質計 (YSI/Nanotech 社 Model6600) および電磁流向流速計 (JFE アドバンテック社 COMPACT-EM) を観測フレームに組み込み、これを係留装置のブイに取り付けて海中に垂下した (図 2.7.3-2 B)。観測装置の取り付け位置は、神戸港では底上 5 m、関空沖では底上 2m とした。毎月 1 回、係留装置から観測機器を取り外し、データの回収、観測機器の点検およびバッテリー交換を行った後、再び係留装置に取り付けて観測を継続した。なお、係留装置はベルトスリングで神戸港波浪観測塔または関空 MT 局に固縛されているが (図 2.7.3-2 C)、台風などの影響で著しい波浪が予想される場合には、観測機器の流失を防止するため、事前に係留装置および観測機器を揚収し、気象海象が回復した後、再投入した。したがって、この間の連続観測は行われなくなる。



A:係留装置の概観（イメージ図）、B:観測フレーム（水中写真）、C:神戸港波浪観測塔に取り付けた係留装置

図 2.7.3-2 係留装置のイメージ

d) 鉛直プロファイル測定

観測機器の投入時、揚収時にすべての調査地点で鉛直プロファイルを測定した。鉛直プロファイル測定には多項目水質計（JFE アドバンテック社 RINKO-Profiler ASTD102）を用いた。

e) 採水分析

毎月 1 回、観測機器の投入時に各調査地点の表層（0.5m）および底層（観測機器の設置位置と同水深）で採水し、炭酸系および栄養塩類を分析した。採水分析における分析項目および分析方法を表 2.7.3-2 に示す。

表 2.7.3-2 採水分析における分析項目および分析方法

区分	分析項目	分析方法
炭酸系	水温	海洋観測指針(1999)4.2.1.1
	溶存酸素濃度	海洋観測指針(1999)5.4
	pH	海洋観測指針(1999)5.6
	塩分	海洋観測指針(1999)5.3.4.2
	アルカリ度	開放セル電極法
	全炭酸	りん酸添加、電量滴定法
栄養塩類	NH ₄ -N	JIS K 0102 42.6 流れ分析法
	NO ₂ -N	海洋観測指針(1999)5.5.2.4
	NO ₃ -N	海洋観測指針(1999)5.5.2.3
	PO ₄ -P	海洋観測指針(1999)5.5.2.1
	SiO ₂ -Si	海洋観測指針(1999)5.5.2.2

② 結果

神戸港では7月24日に、関空沖では7月26日にそれぞれ連続観測を開始した。12月末までの月別の観測日数を表2.7.3-3に示す。概ね、毎月20日以上を観測を行うことができたが、9月および10月は、台風の接近にともない一時的に観測機器を揚収したため、観測日数が少ない結果となった。

表 2.7.3-3 連続観測における観測日数

調査海域	観測開始	観測日数					
		7月	8月	9月	10月	11月	12月
神戸港	7月24日	8	23	19	21	28	29
関空沖	7月26日	6	21	10	14	30	20

連続観測で得られた12月末までの観測データのうち、CO₂濃度および溶存酸素濃度の観測結果の概要を表2.7.3-4に示す。神戸港では夏季のCO₂濃度は概ね1,000~1,500ppmで推移しており、顕著な日周変動がみられた。また、CO₂濃度が高い場合には溶存酸素濃度が低い傾向がみられており、しばしば貧酸素状態になることが確認された。一方、関空沖ではCO₂濃度は概ね500~800ppmで推移しており、日周変動も小さい傾向がみられた。いずれの観測海域においても、夏季、秋季に比べて冬季はCO₂濃度が低く推移し、溶存酸素濃度は高い値で推移した。また、CO₂濃度および溶存酸素濃度の日周変動は小さかった。

表 2.7.3-4 連続観測におけるCO₂および溶存酸素濃度の観測結果の概要

調査海域	CO ₂ 濃度 (ppm)			溶存酸素濃度 (mg/L)		
	夏季 (7~8月)	秋季 (9~11月)	冬季 (12月)	夏季 (7~8月)	秋季 (9~11月)	冬季 (12月)
神戸港	531 ~ 1,630	380 ~ 1,110	304 ~ 556	0.1 ~ 6.9	1.4 ~ 8.5	5.7 ~ 9.7
関空沖	510 ~ 796	450 ~ 761	370 ~ 545	4.5 ~ 7.9	4.1 ~ 7.5	7.7 ~ 8.7

注) 数値は、各季節(期間)の最小値~最大値を示す

(3) DIC を用いた異常値判定基準

過年度来、pCO₂ と DO を使った異常値判定基準について研究を進めてきた。また、2.7.2(1)におけるベースライン調査の年数の検討も pCO₂ と DO を用いた基準に関するものである。ここでは、本苦小牧で観測された既存データを解析し、pCO₂ ではなく全炭酸(DIC)を使った基準について検討を行う。

まず、観測時の水温や塩分に基づいてクラスタリングを行い、グループごとに pCO₂ と DO を用いた異常値判定基準を作成した。その結果、クラスタリングにより多くのグループで精度が大幅に向上した。しかし、いくつかの問題点がある。最大の問題は、クラスタ

リングは海域に依存し、どのようにクラスタリングをすればよいかを決めるには、十分な量のデータが必要となることである。すなわち、長期に渡るベースライン調査が必要になる。また、CO₂が海水に溶けると、CO₂, HCO₃⁻, CO₃²⁻に解離する。この総和が DIC である。すなわち、CO₂の漏出が起きた場合、「CO₂の漏出量=DICの増加量」となる（大気に出ていく漏出 CO₂は除く）。一方、pCO₂は CO₂の指標である。DIC が変化しなくても pCO₂が変化することもある一方で、DIC が増加しても pCO₂がほとんど変化しない場合もある。そこで、DIC を使う基準を検討することにした。

DIC は生物活動（光合成や呼吸、分解）によって変動する。Chen and Pytkowicz (1979) は太平洋の観測データから、生物活動による DIC と DO の増減比として、 $\Delta \text{DIC}:\Delta \text{DO}=-0.722:1$ という関係を得た。この関係が成り立っていると仮定すると $\text{DIC}+0.722\text{DO}$ は生物活動によらない値ということになる。これに塩分と全アルカリ度による補正を行った結果、 $\text{DIC}+0.722\text{DO}$ は水温の関数として、きれいに回帰できることがわかった。この $\text{DIC}+0.722\text{DO}$ を用いた異常値判定基準の有用性は今後検証が必要である。

2.7.4 まとめ

CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築として、生物影響評価データセットの整備、広域の流れや水塊分布の影響を組み込んだ狭域モデルシミュレーション手法の構築、ベースライン調査における観測期間と頻度の設定に関わるデータ・知見の蓄積を行った。

生物影響評価データセットの整備では、評価項目とその整理手法の検討を行い、データセットの構成まで決定した。今後、データベースの設計・製作を行うとともに、データの収集を継続する。

狭域モデルシミュレーション手法の構築では、広域モデルによるシミュレーションで得られた水温、塩分、流速を狭域モデルの開境界条件として与えることができるようになった。また、CO₂気泡モデルを結合した。これにより、漏出 CO₂を気泡としても溶存態(DIC)としても与えられるようになり、漏出 CO₂の拡散シミュレーションができるようになった。今後、気象データやモデル解像度について検討を行う。

ベースライン調査における観測期間と頻度については、四季調査データを用いたベースライン調査期間の検討を行い、四季調査データであれば5年前後以上のベースライン調査が望ましいという結果を得た。また四季調査の意味を明らかにするために、長期連続観測を開始した。連続観測は本年度夏季に開始したので、来年度の夏季まで継続し、一年間のデータを取得する予定である。

- 1) Chen C-T A, Pytkowicz RM. (1979): On the total CO₂ – titration alkalinity – oxygen system in the Pacific Ocean. Nature 281, 362-365.
- 2) RITE (2016): 平成 27 年度 二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 成果報告書

- 3) 気象庁ホームページ：過去の気象データ検索，
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (2019/2 アクセス)
- 4) 地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所ホームページ：水産技術センター
事業資料集，平成 28 年度事業資料集, 1. (1)浅海定線調査
http://www.kannousuiken-osaka.or.jp/publication/suisan_shiryo/h28-suisan.html
(2019/2 アクセス)
- 5) 中嶋昌紀，藤原建紀(2007). 大阪湾のエスチュアリー循環流と貧酸素水塊．沿岸海洋
研究 44 (2) , 157-167.

2.8 リスクマネジメントツールをはじめとする日米 CCS 協力や海外機関との CCUS 技術開発の連携

安全かつ効率的なCCSを実用化させるには、CO₂地中貯留に関わる問題点（環境影響など）を抽出し、それによる影響や不確実性によるリスクを評価し、事業者、地元住民、投資家、規制機関などのステークホルダーが理解・納得できる形で説明する必要がある。

そこで、米国DOEが開発したリスク評価ツール（NRAP: National Risk Assessment Partnership）などを活用し、我が国に適したCCSの定量的なリスクマネジメント手法を構築する。

また、経済産業省—米国DOE間の日米CCS協力に基づき、米国ローレンスバークレー国立研究所（LBNL）等と協力して、光ファイバーを利用したCO₂地中貯留のモニタリング技術開発とその検証を実施しているが、その研究協力範囲を拡充していく。さらにはCCUS技術（CCS+CO₂利用技術）についても、米国を含め海外連携を図っていく。

2.8.1 我が国に適したリスクマネジメント手法の要件整備

(1) 米国におけるリスクマネジメントと NRAP

CO₂地中貯留の実用化および普及のためには、その安全性を担保すると共に、懸念されるリスク事象に対し、事業者、規制機関、地元住民などの共通理解を熟成し、社会受容性を高めていくことが不可欠である。CCSの事業化が先行している米国では、NRAPと呼ばれている研究事業の中でリスク評価手法の開発を行っている。具体的には、米国エネルギー省（DOE）傘下の国立エネルギー技術研究所（NETL）が主導し、5つの国立研究所（ロスアラモス国立研究所：LANL、ローレンスバークレー国立研究所：LBNL、ローレンスリバモア国立研究所：LLNL、パシフィックノースウエスト国立研究所：PNNL）と共同でリスクマネジメントのためのツール開発を行っている。NRAPの取り組みは2011年より開始され、2016年にPhase 1が終了した（DOE, 2016）。この期間に、地中貯留における物理化学特性の明確化とその不確実性評価を行ったとともに、迅速にリスク評価可能な評価ツール「NRAP tools」の開発が行われた。2016年後半からPhase 2に移行し、実サイトへの「NRAP tools」適用を通じた性能評価とともに、微小振動リスク低減のためのツール開発が継続されている。

NRAPツールでは、対象とするリスクごとに定量化されたリスクプロファイルを構築していくこととなる。2016年に公開されたVersion 1では、表2.8.1-1で示された2～10の個別ツールと、全体評価を行うNRAP-IAM-CSツールの10個のツール群からなる。個々のツールでは、主にモンテカルロシミュレーションを中心とした不確実性評価を行う。計算負荷軽減の目的からReduced Order Model（ROM）と呼ばれる簡略化されたプロセスの計算を実施し、フルの計算に対しおよそ1/1000のオーダーの計算時間で

結果が得られるように工夫されている。

表2.8.1-1 NRAP tools (2016年公開版) のツール群

番号	名称	対象	具体的機能
1	NRAP Integrated Assessment Model-Carbon Storage (NRAP-IAM-CS)	全体	圧入～漏洩～環境中拡散までの要素を統合するリスク評価を行う
2	Reservoir Evaluation & Visualization (REV)	貯留層	圧力およびCO ₂ ブルームサイズの経時変化を図示
3	Reservoir Reduced-Order Model - Generator (RRM-Gen)		貯留層解析結果より IAM-CS に入力できるファイルを作成
4	Wellbore Leakage Analysis Tool (WLAT)	漏洩評価	既存坑井からの CO ₂ 漏洩を評価
5	NRAP Seal barrier Reduced-order model (NSealR)		遮蔽層の亀裂や浸透による CO ₂ の漏洩を評価
6	Aquifer Impact Model (AIM)	環境評価	CO ₂ およびブラインが地下水に与える影響を評価
7	Multiple Source Leakage Reduced-order model (MSLR)		大気中に漏洩した高濃度 CO ₂ ガスの挙動を評価
8	Short-Term Seismic Forecasting (STSF)	地震関連	CO ₂ 圧入の効果 considering 誘発地震の頻度を確率的に評価
9	Ground Motion Prediction applications to potential induced Seismicity (GMPIS)		誘発地震による地表の地震動強度を評価
10	Designs for Risk Evaluation And Management (DREAM)	モニタリング	地下の CO ₂ 挙動解析結果に基づいて観測井の最適配置を決定

(2) 我が国に適したリスクマネジメント要件

① リスクマネジメント領域

CCSのリスク項目は上記に示した通りであるが、リスクマネジメント領域として以下の3領域が挙げられる。

- 1) 設計・建設・運用・保守に関するリスクマネジメント
- 2) 地元対応など、社会受容性に関するリスクマネジメント
- 3) 1)、2)で対応できない残存リスクに対するリスクマネジメント

② 我が国に適したリスクマネジメント要件と対応

我が国は地震多発国であり、特に地震に対するリスクマネジメントが重要である。さらには、地層が不均質であり、また一般的にCCSでは坑井情報が限定されることから貯留性能の分析に不確実性が生じる。さらに、我が国のCCSは沿岸域で実施することから海洋環境についても考慮が必要である。

一方、CCSの建設・運用には、地元住民のほか、幅広いステークホルダーの理解が欠かせない。つまり社会受容性の確保・向上も重要なリスクマネジメント要件となる。

本事業においては、これらのリスクマネジメント要件への対応を実施しており、以下の表2.8.1-2はそれを整理したものである。

表2.8.1-2 リスク項目と本事業での対応

リスク項目	本事業での対応テーマ	リスクマネジメント
地震・自然災害	<ul style="list-style-type: none"> ・ ATLS ・ IRP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震カタログの整備により、不要な停止を排除し、CCS全体の稼働率を向上させる。 ・ 大規模地震など自然災害発生時に適切な地域対応を行い、CCSに対する不安払しょくを図る。
貯留性能の不確実性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地質モデル構築 ・ 長期シミュレーション ・ NRAP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯留可能量を推定するとともに、不確実性やリスクも定量評価し、投資メリット・リスクを明確化する。
設備・運用上で想定されるトラブル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 光ファイバーセンサー ・ CO2漏出検知 ・ 超伝導重力計、電磁探査 ・ 長期シミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 重力計と光ファイバーセンサーにより、CO2圧入後のモニタリング頻度と期間を短縮する。 ・ サイドスキャンソナーにより海域におけるCO2漏出監視を効率化する。 ・ 長期シミュレーションにより、CO2挙動安定時期を明確にし、超長期のモニタリングを不要にする。
国民・地元住民のCCSに対する不安	<ul style="list-style-type: none"> ・ PO/PA 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国民・住民の理解を得ることで、CCS促進や適切な貯留地点の選定が可能となる。 ・ 国内外の適切な先例を的確に把握することにより、CCS立地計画を効率化する。

(3) 残存リスクに対するリスクマネジメント要件

上述のリスクマネジメント領域は、「設計・建設・運用・保守に関するリスクマネジメント」と「地元対応など、社会受容性に関するリスクマネジメント」であるが、当該リスクマネジメントを適切に実施しても、リスクが完全になくなるわけではない。また、リスクを極小化しようとした場合、それに関わる設備投資や調査費は膨大となり、経済的にCCS事業の実施が困難になる。

むしろ、リスクが残るのは当然と考え、ファイナンスの面からリスクマネジメント

をするのが妥当である。具体的には、残存リスクや不確実性を定量化し、保険あるいはオプションの設定により、残存リスクに備えるのが合理的と言える。

(4) サイト選定に関するリスクマネジメント要件

本項において、リスクマネジメントの対象段階を「設計・建設・運用・保守」としてきたが、CCSサイトの決定についても大きなリスクがある。具体的には、貯留性能の不確実性である。

CCS事業の規模と経済性は、CO₂供給点、輸送方法、貯留サイトを設定すれば試算することができる。A事業とB事業が候補となった場合、一般的にはコストが低い方が実施事業として選択される。しかしながら、A事業の方が確定論的には事業コストが低い場合でも、貯留性能の不確実性が大きければ、リアルオプションの視点からB事業が経済性に優れると判断される場合もある。さらに、A事業で調査井の追加掘削で不確実性を減らすことができれば元通りA事業が優位となることもある。

以上の考え方を整理すれば、以下のリスクマネジメントが重要といえる。

- 1) 限定された情報の中で、できるだけ正確な貯留層モデル構築を行い、貯留量の予測を行う必要がある。その場合、予測貯留量を提示するとともに、貯留量の不確実性を定量的に示すことも重要となる。
- 2) CCS事業経済性評価においては、単純な確定論による試算ではなく、リアルオプションなど、不確実性を組み込んだコスト計算を行うべきである。
- 3) 調査井の追加掘削などは、不確実性を抑制する効果を持つ。その実施の判断は、調査に要する費用と不確実性の抑制度合い（コスト換算したもの）の大小により決定されるべきである。

参考文献

- 1) DOE (2016) : NRAP Phase I Tool Development and Quality Assurance Process, NRAP-TRS-II-021-2016

2.8.2 坑井健全性評価における流体移動の評価手法の検討

(1) はじめに

坑井健全性評価手法の開発に関して、日米共同研究の一環として、カナダのCaMIサイトにおいて、光ファイバーを用いたモニタリング手法の開発を進めていた。当該サイトでは浅い坑井からのCO₂圧入・上位層への移行実験を予定しており、日本側では光ファイバーによる坑井周辺での温度・ひずみ測定、米国側ではDAS計測を実施する計画であった。しかし当地層の浸透率が小さく、CO₂圧入が行えない状況となった。当サイトでの現場試験により、4 kmを超える長さの光ファイバーでひずみ計測が可能であること、および温度計測が坑井周辺の状況把握に有効であることは確認できたものの、流体移動の評価は難しいことが分かり、当初予定していた試験を日本の茂原試験サイトで実施することとなった。

本節では、坑井周辺での流体移動評価手法として、海外での先行事例調査を行ったとともに、茂原試験サイトでの流体移動評価のための現場試験結果について報告する。

(2) CO₂漏洩検知手法に関する情報収集

GHGT-14において、CaMIサイトでの漏洩検知に関する現状、およびNRAP等で検討されている坑井健全性・CO₂漏洩検知手法に関する情報収集を行った。以下ではそれらの内容の情報収集結果の概要を記す。

① CaMIサイトでのCO₂移行モニタリング：Joint Inversionの検討 (Rippe et al., 2018)

CaMIサイトでは様々なCO₂モニタリング手法の検証が行われている。そのうち、弾性波探査の高解像度と比抵抗探査のCO₂高感受性の両方を活用するために、Joint Inversion手法の有効性を検討しており、**aCQurate** (accurate CO₂ monitoring using Quantitative joint inversion for large-scale on-shore and off-shore storage applications) と名付けられている。より具体的には、弾性波探査データに対しては Full Waveform Inversion (FWI) を利用し、比抵抗データとしては Electrical Resistivity Tomography (ERT) を用いることを想定している。現状では、CaMIサイトの観測体制に合わせた合成データによるFSを行い、Joint Inversion手法の有効性を確認した段階である。

② 廃坑井からの漏洩に対するモニタリング手法の検討 (Yang et al., 2018)

廃坑井からのCO₂とブラインの漏洩リスクに関しNRAPツール (DREAM) を用いて評価した。San Joaquin Basin (米国カリフォルニア州) を例として6つのモニタリング手法：総溶解固形分 (TDS)、比抵抗トモグラフィ、MT、地表からの弾性波探査、重力観測、圧力モニタリングの感度を比較した。モニタリング時の変化量は、漏洩量、漏洩箇所、センサ感度に依存するため、20,000 トンのCO₂漏洩を検知できるかについて検討した。その結果、1本の坑井でのin-situでのTDSや圧力モニタリングよりも、地表での面的な弾性波探査の方が検知能力が高いことが示された。漏洩量を変えた場合には、重力センサアレイ

と弾性波探査の検知能力が高いことが示された。

(3) 茂原サイトでの坑井健全性評価のための光ファイバー測定

既設の光ファイバー設置坑を用い、その周辺で坑井掘削を行った影響のモニタリングによって、実際に流体移動を計測可能であるかを評価する試験を行った。既設光ファイバー設置坑として茂原試験サイト1の300 mの坑井を用い、そこから約2.8 m離れた地点で直径約6インチの坑井を掘削した。掘削時に泥水を用いるため、その泥水の浸透の影響を光ファイバーでモニタリングする試験観測を行った。光ファイバーでの計測では、高速レイリー計測が可能な機器を用い、約2分間隔でのモニタリングが可能な観測体制とした。

図2.8.2-1に、速報として得られた観測結果を示す。カラーコンタで示しているのは、周波数シフト量であり、まだひずみと温度への分離を行っていない、生のデータである。図の四角ピンクで示しているのが、各作業日の最終の掘削深度であり、その間の線が途中の掘削実績を示している。図から分かるように、掘削深度が進むにつれて、負の周波数シフトを示す深度が徐々に深くなっていくことが確認できる。また掘削休止日（3/16）には、深度方向に周波数シフトが変化していないことが分かる。

この結果のうち、地表付近の赤い領域は、気温の影響であると予想できる。しかし、等深度で変化していない領域と、周波数シフトが発生している領域との差異や、温度・ひずみとの分離に関しては、これから詳細な解析を行う必要がある。しかし、図2.8.2-1の結果は、光ファイバーによって、坑井に沿った流体移動のリアルタイムのモニタリングが行えることを支持していると考えられる。

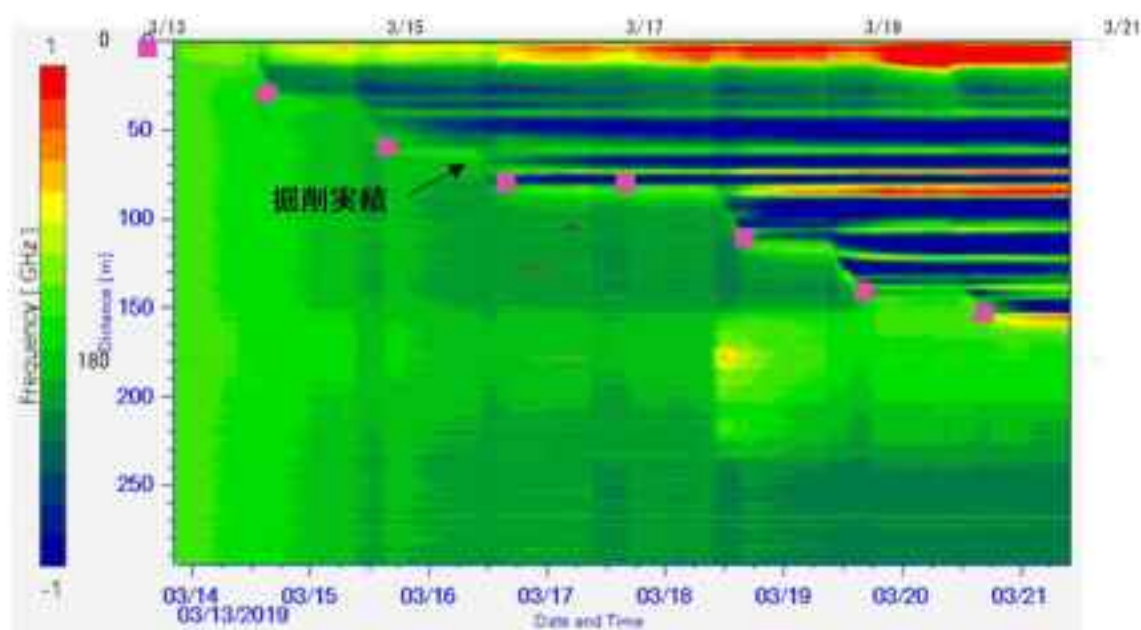


図2.8.2-1 光ファイバーによる流体移動検知試験結果（速報値）

(4) まとめ

坑井健全性評価手法の開発に関して、海外での先行事例調査と、茂原試験サイトでの現場観測試験を行った。先行事例調査では、カナダCaMIサイトでの評価事例と、NRAPに関連した評価手法比較に関して調査を行った。どちらの事例においても、複合的なモニタリング手法が有効であるという結論である。茂原サイトでの現場試験では、既設の光ファイバー設置坑周辺での掘削影響に関するモニタリングを行った。まだ予察的な結果であるものの、掘削深度に応じた光ファイバーでの周波数シフトが観測されており、光ファイバーによる高速レイリー計測が、坑井周辺の流体移動検知に有効であることを示している。

参考文献

- 1) Rippe, D., Jordan, M., Romdhane, A., Schmidt-Hattenberger, C., Macquet, M., and Lowton, D. (2018): Accurate CO₂ monitoring using quantitative joint inversion at the CaMI Field Research Station (FRS), Canada. Presented at GHGT-14, October 21-24, Melbourne, Australia.
- 2) Yang, X., Buscheck, T.A., Mansoor, K., Wang, Z., Appriou, D., and Carroll, S.A. (2018): Assessment of multiple monitoring methods for detection of brine and CO₂ leakage. Presented at GHGT-14, October 21-24, Melbourne, Australia.

2.8.3 まとめ

本節では、経済産業省—米国DOE間の日米CCS協力の事例として、NRAPと光ファイバー計測実証試験を紹介した。

NRAPは、米国DOEが開発したCCSのリスク評価ツールであるが、CCS事業の各フェーズにおけるリスクを定量的に分析でき、我が国のCCS事業リスク評価にも利用可能である。一方、我が国は地震多発国であり、地層が複雑などの特徴があり、我が国独自に実施すべきリスク評価、リスク対策もある。本節の中では、その具体的な取り組みを示すとともに、今後必要となるリスクマネジメントの要件を明らかにした。

一方、光ファイバー計測実証試験として、流体圧入の難しいCaMIサイトから、茂原サイトに変更して流体移動評価試験を行った。光ファイバー設置坑周辺での掘削影響モニタリングのための計測を行った結果、掘削深度に応じて光ファイバーの周波数シフトが計測されており、本手法が坑井周辺における流体移動の検知に有効であることが示された。

第3章 大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立

3.1 要約

本章では、「大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立」として、「CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立」および「マイクロバブル CO₂圧入技術の適用による貯留率の向上」の研究進捗状況を報告する。それにあたり、本節では、それぞれの開発状況の要点を紹介する。

(1) CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立

坑井の最適配置技術を検討するため、海外の実証サイトでの複数坑井の運用事例を調査し、圧力緩和井により CO₂の貯留効率が向上することを確認した。

次に、複数坑井配置を最適化するにあたり、貯留安全性と CO₂プルームの長期安定性に関連する目的関数を設定することで、貯留効率と安全性に優れた複数坑井配置を求めることが可能であることを確認した。さらに、地質データが不十分であるという現実的な状況にも対応しうるように、不確実性に対してロバストな最適解探索手法を確立した。

一方、多目的最適化手法の一つである、集中化遺伝的アルゴリズム (NSGA-2) による坑井配置最適化のモデル解析を行った。その結果、複数の目的関数に対する最適な坑井配置を表示でき、状況に合わせて最適なシナリオを選択するのに有効であることを確認した。

(2) マイクロバブル CO₂圧入技術の適用による貯留率の向上

本年度は、マイクロバブル CO₂圧入のメカニズム解明と現場実証試験の準備を行った。

メカニズム解明については、平成 29 年度のコア掃攻実験を再現するモデルを構築し、マイクロバブル CO₂圧入時の挙動をシミュレーションにより説明できるようにした。

現場実証試験については、マイクロバブル CO₂圧入効果確認に適した実油田フィールドを選定し、CO₂圧入量 100 トン規模の実証試験計画を策定した。さらに、マイクロバブル CO₂圧入ツールの製作、CO₂圧入設備の現場設置を行った。

3.2 CO₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立

実用化規模（100 万 t/年程度）の大規模貯留サイトでは、複雑な地層構造や貯留層の不均質性に対応して、複数の圧入井や、CO₂ 圧入に伴う圧力上昇を抑える圧力緩和井を設けることが考えられている。複数の圧入井とは、同一サイトにおいて複数の坑井から地中に CO₂ 圧入を行うことを示し、個々の圧入井での圧力を低下できるメリットがあるだけでなく、万一ある坑井の圧入性能が低下した際のバックアップとして使えるメリットがある。圧力緩和井は、地層水を積極的に揚水、あるいは深度の異なる他の貯留層へ逃すことにより地層圧力の上昇を抑え、CO₂ 貯留量を増やすことにつながる。しかしどちらの手法も坑井掘削が必要なことから、追加のコストがかかるデメリットがある。これらの手法のリスクを低減するためには、あらかじめどこに坑井を掘削すればよいか、または最適な坑井配置はどこか、に関して事前に評価することが重要である。

先行事例としては、カナダの QUEST プロジェクトやオーストラリアの Gorgon サイトで実施されているが、坑井位置の決定プロセスがオープンにされていない点も多い。しかし、実サイトの事例として貴重な知見を含んでいると考えられる。

本課題では、複数の CO₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立のために、先行事例調査を行うとともに、最適化問題としての解法の検討を行う。一般的に最適化問題では、多数（1,000 個程度）の計算が必要となるため、効率のよい探索手法と、高速計算技術が必要であり、それらの検討を行う。さらに、開発した最適配置決定アルゴリズム（最適化する目的関数）を実際の大規模圧入サイトの地層モデルに対し適用する。また、圧力緩和井は圧入井からの CO₂ が到達した時点から、廃坑または CO₂ 圧入井への転用が必要となるが、この転用にも対応する機能を持った複数坑井の最適配置ツールの開発・確立を行う。

3.2.1 複数坑井の先行事例調査

実証規模サイト（オーストラリア Gorgon 等）の複数坑井（圧入井および圧力緩和井）の運用情報を収集し、実証規模サイトにおける坑井位置の決定プロセスの分析を行なった。また、圧力緩和井の貯留率向上への効果などについて確認した。

(1) Gorgon における圧力緩和井の効果予測

Gorgon プロジェクトでは、8 本の圧入井と 4 本の圧力緩和井を用い、年間 380 万 t の圧入レートで、25 年～50 年間で 1 億 t～2 億 t の CO₂ を圧入する計画である。このような大規模貯留における圧力緩和井の効果予測結果は、我が国の将来の大規模貯留に参考になるものであるため調査した。

圧力緩和井の効果予測は、圧入レート、圧入期間、圧力緩和井の有無による複数ケースの解析により実施している。計画圧入レート（50 万 t/年/井戸）での圧力上昇低減の効果という観点では、25 年間の圧入中の貯留層内圧力の上昇は、圧力緩和井の設置により低減できることが示されている。一方、圧入量を最大化する観点では、圧力緩和井を設置すれば圧力上昇量を変えずに CO₂ 圧入量の増加が可能であることを示している（25 年間の CO₂

累積圧入量は圧力緩和井の設置により 5.5 億 t から 6.3 億 t に 14.5%増加する)。ただし、圧力緩和井の稼働は CO₂ が圧力緩和井に到達するまでに限られる。圧力緩和井に CO₂ プルームが到達すると CO₂ リークにつながるため、その地層水生産を止める必要がある。圧力緩和井への CO₂ 到達時期は圧入レートが大きいほど早くなる。

Gorgon においては、計画圧入レートであれば圧力緩和井は必ずしも必要でない予測結果となっている。ただし、貯留サイトは島内に位置しており、陸域での坑井の設置範囲が制限されることから、将来的な貯留のアップスケールの可能性も考えた方策とも推察される。圧力緩和井への CO₂ 到達後は圧入井に転用することも考えられる。

(2) Decatur における圧力緩和井の設置検討プロセスと貯留率向上の効果予測

米国イリノイ州で行われている Decatur プロジェクトでは、IBDP (Illinois Basin Decatur Project)としてエタノール工場から排出される CO₂を 2011年から3年間で約 100 万 t 圧入した。続く ICCS (Illinois Industrial CCS Project)では 5年間で 500 万 t の CO₂を圧入する。Brine Extraction Storage Test(BEST)では、この追加圧入に対する圧力緩和井の設置方法を検討している。前述の Gorgon は公開情報が非常に限られているのに対し、BEST では、圧力緩和井の設置位置の検討プロセスが公開されているため調査対象とした。

圧力緩和井の設置位置の検討プロセスに関し、鉛直井と水平井の場合について広範な条件でのシミュレーションにより圧力緩和井の設置位置を検討している。着目した要因は、地質の不均質性、地層構造、坑間距離などである。

鉛直井については、次のような配置が効果的であるとの結果が得られている。

- ・圧力緩和井への早期の CO₂ リークを避けるためには、低浸透率の場所や地層の傾斜下方（ダウンディップ）に設置するのが有利である。
- ・CO₂ プルームを効果的にコントロールするためには、圧入井のできるだけ近くに設置するのが有利である。

水平井については次のような利点があることを示している。

- ・圧入井との坑間距離を小さくすることができ、より小さい生産レートで効果的な貯留層内の圧力管理が可能である。
- ・既存の CO₂ プルームと異なる深度に設置することにより、すでに存在する CO₂ を引き込む可能性を低減することができる。
- ・既存井近傍に設置するため、観測井としての機能も持たせることも可能であり、設置地点の地質情報の確実性も高い。

以上のような検討の結果、圧力緩和井には水平井を採用し、設置位置と概略設計図を示している。

圧力緩和井の貯留効率向上に関しては、坑井の配置や地層水の塩分濃度、水の再圧入 (WAG) などを含む様々なケースでのシミュレーションスタディを実施し、その結果、条件により数%～約 10%の貯留効率の向上が見込まれることを示している。特に貯留効率を

高めるオプションとして、生産した地層水を再圧入（WAG など）の有効性を示している。WAG により CO₂ モビリティを制御することにより、貯留率を高めることが可能である。ただし、WAG は追加の水圧入により圧力を増加させるため、圧力緩和効果とのトレードオフとなる。WAG による貯留率向上は CO₂ の溶解度が高くなる地層水塩分濃度が低い場合ほど顕著であり、地層水の塩分濃度の低い我が国ではより有利なオプションになる可能性がある。

3.2.2 実サイト相当モデルにおける最適化のための目的関数設定

実証規模サイトにおいて、複数の目的関数を用いて最適配置決定のためのシミュレーションを実施する。このシミュレーション結果の分析を行うとともに、最適化する目的関数の選定を行った。

(1) 目的関数の設定

昨年度の坑井配置最適化では、目的関数を貯留可能量としてその最大化を考えた。しかし、CO₂ 地中貯留では、貯留量の最大化だけでなく、操業で要求される所定量を安全に貯留できることが重要である。そこで今年度は、必要な貯留レートを確保しつつ、安全性や長期安定性にも配慮した坑井位置を探索することとし、次の 2 つの目的関数を選定して最適配置決定のためのシミュレーションを実施した。

① 貯留安全性に着目した目的関数（目的関数①）

$$\text{坑底圧力} / \text{許容圧力} \rightarrow \text{最小化} \quad (\text{式 3.2.2-1})$$

② CO₂ 長期安定性に着目した目的関数（目的関数②）

$$\text{可動ガス量} / \text{圧入した CO}_2 \text{量} \rightarrow \text{最小化} \quad (\text{式 3.2.2-2})$$

ここに、

$$\text{可動ガス} = \text{圧入 CO}_2 \text{量} - \text{不動 CO}_2 \text{量} (\text{溶解 CO}_2 + \text{残留 CO}_2) \quad (\text{式 3.2.2-3})$$

とした。

(2) 実証規模サイトモデル

使用した実証規模サイトモデルを図 3.2.2-1 に示す。これは、苫小牧実証試験サイトを対象に構築された 3 次元貯留層モデルである。地質は、チャネル部、砂質部、泥質部に区分され、各々の浸透率は 1D、100mD、1mD である。領域の大きさは 8 (km)×12 (km)×50 (m)、格子数は 31,280 である。上下面ならびに側面境界は閉鎖境界とした。CO₂ 圧入レートは 10 万 t/年とし、圧入期間は 10 年間とした。

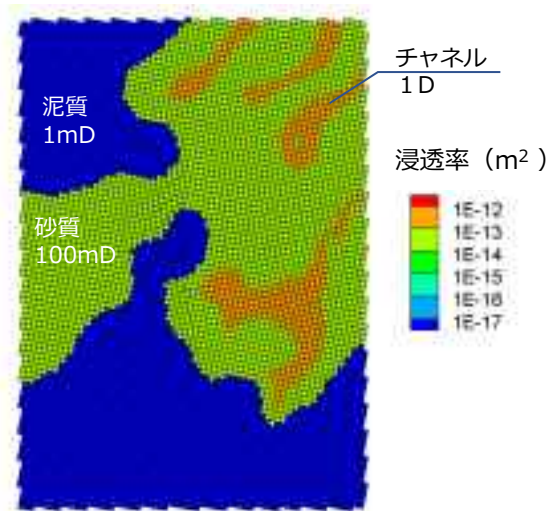


図3.2.2-1 実証規模サイトモデル（平面図、8km×12km）

(3) 最適化結果

各目的関数に関する最適解探索で得られた解候補（坑井の平面座標）とその目的関数値の分布をグレイコンターと共に図 3.2.2-2 に示す。

目的関数①（坑底圧／許容圧）の最小化を行った結果を図 3.2.2-2(a)に示す。目的関数①の値が1以下であれば、許容圧以下の圧入が可能である。最適位置としては同図中の水色の点を選択された。ここで、同図中の赤点以外の地点であれば、所定レートでの圧入が可能である。すなわち、図中に示したほとんどの位置で圧入可能であることが分かる。一方、目的関数②（可動 CO₂/圧入 CO₂）の最小化を行った結果を図 3.2.2-2(b)に示す。これを見ると、目的関数①と比較して、南側（図の下側）のチャンネル部分において良好な目的関数が計算されている。つまり、長期的安定性の観点を加えることで、CO₂貯留により適した圧入地点を絞り込める。このように、異なる観点で選定した複数の目的関数を考えることは、多面的により良い圧入地点を絞り込む上で有効なアプローチといえる。

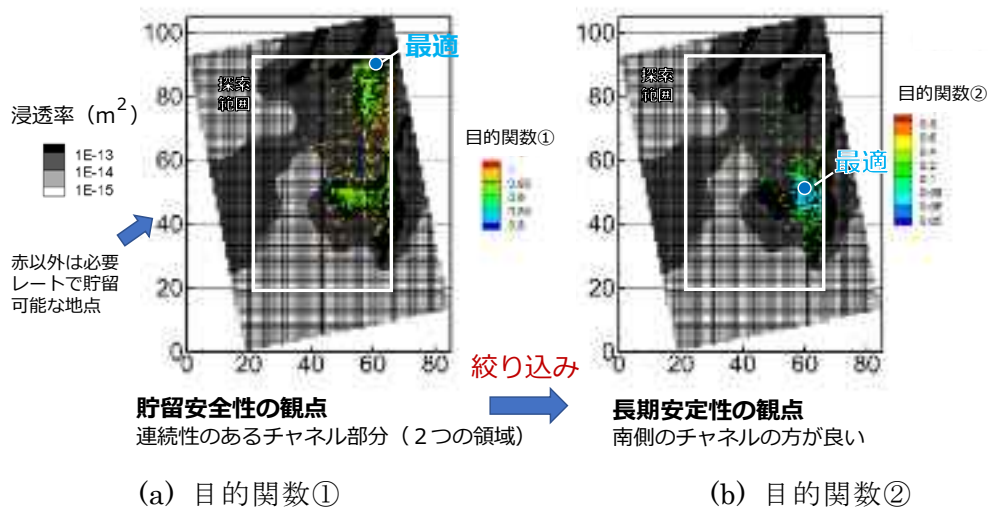


図3.2.2-2 異なる目的関数による坑井位置の最適化計算結果

3.2.3 不確実性評価のための最適解探索手法の確立

貯留層モデルには、地質調査データの不足など様々な要因による不確実性が含まれている。坑井配置の最適化にあたっては、その前提となる貯留層モデルの不確実性に左右されない評価が望ましい。そこで今年度は、不確実性に左右されにくいロバストな最適化手法を開発した。そして、昨年度のように1つの地質モデルだけではなく、確率的に発生した複数のリアライゼーション（可能性のある地質モデル）に対して開発した手法を適用し、その有効性を確認した。

(1) 開発した最適化手法

複数の貯留層モデル（リアライゼーション）がある場合、ある1つの貯留層モデルに対して坑井位置を最適化すると、そのモデルに対しては高い性能を発揮するが、他のモデルでは性能が低下することになる。ここでは、複数の貯留層モデルに対して、ある程度高い性能を発揮可能な解候補を探索する手法を新たに考案した。必要な貯留容量を確実な確保できる地点を選定するための目的関数として次を考える。

$$\text{目的関数} = \sup\{f(x) : \Pr[f(x)] > p\} \quad (\text{式 3.2.3-1})$$

ここで、 $f(x)$ は、1つの解候補 x （坑井配置）に対して複数のリアライゼーションで求められた目的量（圧入量など）の分布であり、 $\sup\{f(x) : \Pr[f(x)] > p\}$ は $f(x)$ の累積確率 $\Pr[f(x)]$ が p を超える上限の $f(x)$ である（図3.2.3-1）。具体的には、1つの解候補に対して複数のリアライゼーションのシミュレーションを実行して $f(x)$ の分布を求め、上記の目的関数値を算出する。最適化アルゴリズムはこの目的関数値が最適となる位置を探索する。このとき、複数のリアライゼーションに対するシミュレーションに多くの時間を要することが問題となる。本研究では、多数のCPUを有する超並列コンピュータを用い、図3.2.3-2に示すような並列化されたフローで複数のリアライゼーションのシミュレーションを同時実行することとした。これにより、計算時間を大幅に短縮することが可能である。

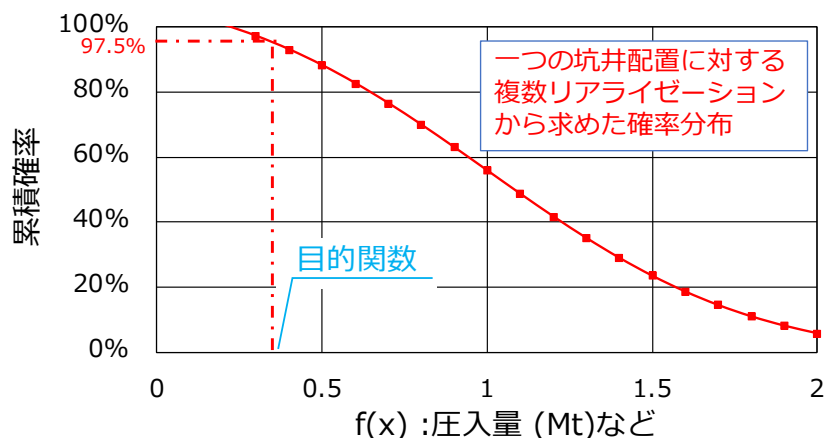


図3.2.3-1 目的関数の設定方法

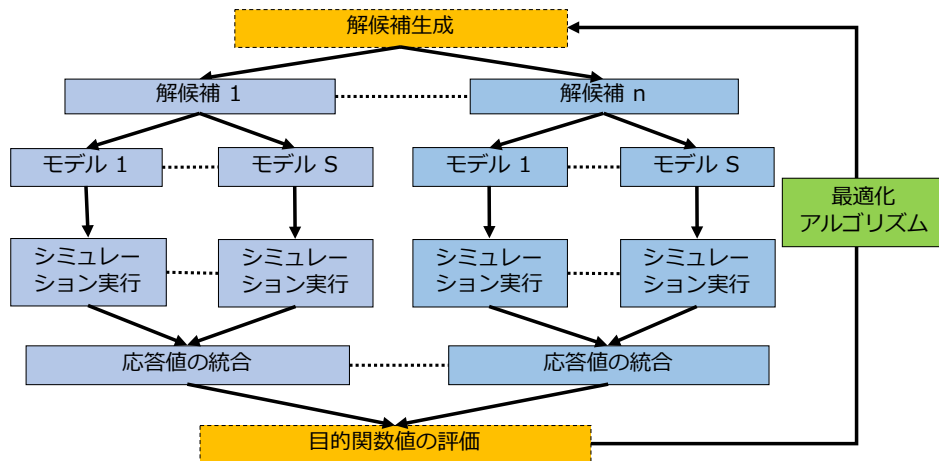


図3.2.3-2 複数リアライゼーションを考慮するために並列化された最適化フロー

(2) 複数リアライゼーションによる最適配置計算

例題として、3本の圧入井を最適に配置することを考える。地質モデルとしては、地質統計学シミュレーション（Sequential Gaussian Simulation）により、浸透率分布の異なるリアライゼーションを50個作成した。地質統計学シミュレーションは、浸透率を確率的に空間分布させるものであるが、40地点の浸透率を固定した条件付きとすることで、ある程度共通した分布特徴を有するリアライゼーションとなっている。

図3.2.3-3には、同図中の上段に示した3つのリアライゼーションの各々に対して、圧入量を最大化する最適な坑井配置を求めた結果を示す（個別最適化の結果）。同図中には貯留層モデルの浸透率分布をグレイコンターと合わせて示してある。各最適解は高い浸透率を有する地点が選定されており、各リアライゼーションの浸透率分布に依存している。このような場合、複数のリアライゼーションの結果を総合してどの坑井配置を採用すれば良いかの判断は難しいことが分かる。仮に、1つのリアライゼーションに対する最適配置を他の49リアライゼーションにも適用し、全50リアライゼーションの圧入量の平均値、標準偏差、最大ならびに最小値を求めた結果を表3.2.3-1中に示す（個別最適化による最適解）。これは不確実性を考慮せず、1つのリアライゼーションの最適化で全体を代表させた場合に相当する結果である。

一方、本手法として、図3.2.3-2のフローを用いて得られた最適配置を図3.2.3-4に示す。なお、目的関数の設定に必要な p は97.5%とした。図中には、解探索を行った他の解候補（候補位置）もあわせて示した。また、表3.2.3-1中には、本手法で得た最適解（最適位置）における50リアライゼーションの圧入量の平均、標準偏差、最高値、最低値を示した。個別最適化による結果と比較すると、最高値に関しては、本手法よりも個別最適化の結果の方が優れている。これは特定の貯留層モデルに対して最適化しているため当然の結果といえる。しかしながら、平均値と標準偏差に関して、本手法で得られた坑井配置の方が圧入量の平均値が大きくかつ標準偏差が小さい。すなわち、総合的に安定して多くの圧入が可能な地点を探索しているという点で個別最適化よりも優れており、「考えられる貯留層モデ

ル全てに対してある程度高いパフォーマンスを期待できる解」であることがわかる。

以上の結果から、貯留層モデルの不確実性を考慮して坑井配置を最適化する上で、今回開発した手法の有効性が確認された。

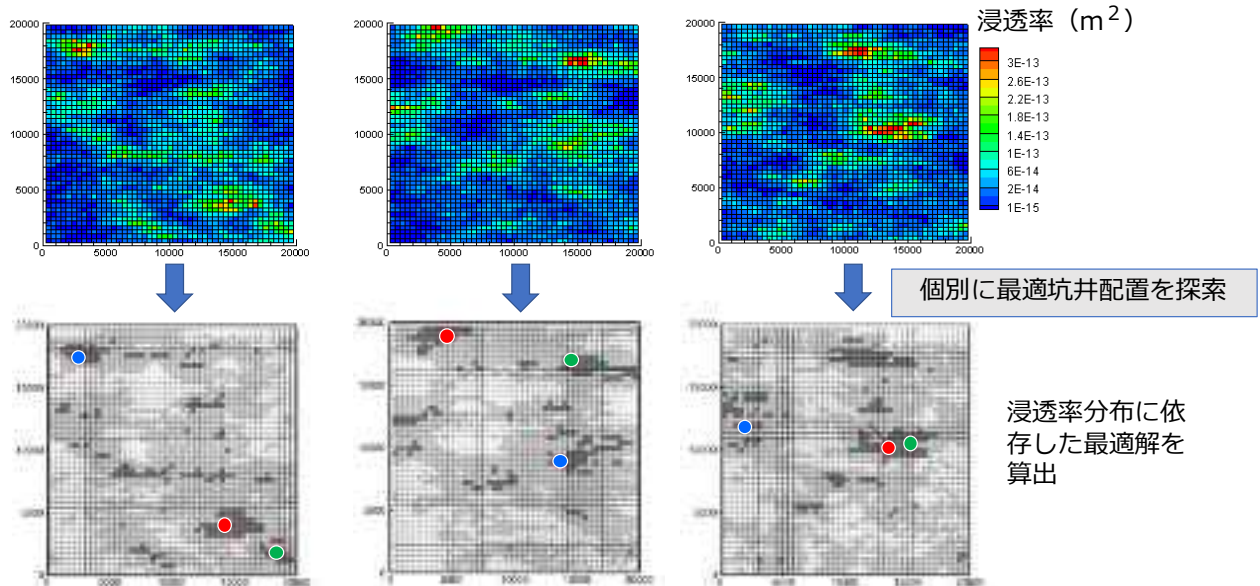


図3. 2. 3-3 浸透率分布の異なる複数リアライゼーションと個別の最適化結果 (50リアライゼーションのうち、3つのみを例示)

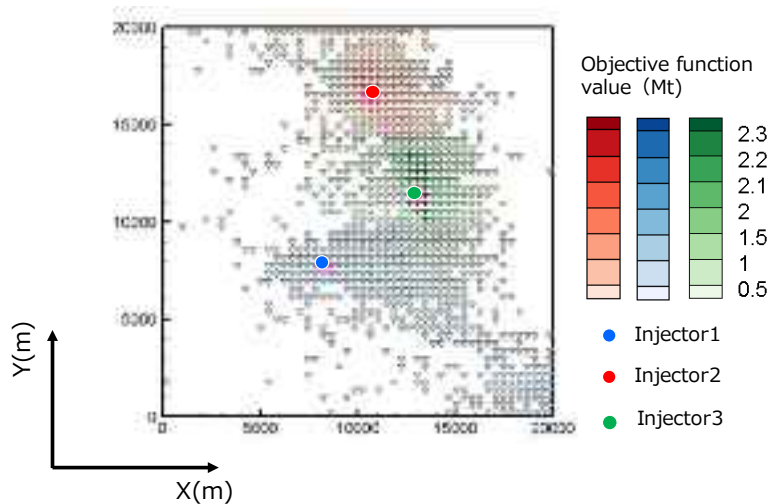


図3. 2. 3-4 本手法による最適解と解候補の分布 (50リアライゼーション)

表3. 2. 3-1 最適化位置により得られた圧入量 (3本合計) の比較 (単位 : Mt)

	平均値	標準偏差	最高値	最低値
個別最適化による最適解	2.93	1.25	7.53	1.53
本手法による最適解	3.27	0.66	5.70	2.12

3.2.4 坑井最適配置決定法や多目的最適化手法の策定

(1) はじめに

CO₂地中貯留の実施に際し、圧入計画の効率化や貯留層データの持つ不確実性低減を目的として、貯留層シミュレーションを伴う最適化計算が必要となる。特に大規模なCO₂地中貯留の場合多数の坑井を利用することが必要となり、また地質的な不確実性が大きいいため、確実に貯留できる地点に坑井を掘削する箇所を決定する手法の重要性は顕著である。

この最適化手法のひとつとして、近年、多目的最適化手法が期待されている(下田, 2018)。多目的最適化では、複数のトレードオフの関係にある目的関数を同時に評価出来るため、地質の不確実性を考慮することが可能である。

本節ではまず、多目的最適化の原理を説明し、それに適用可能な最適解探索手法に関する調査結果をまとめる。次にCO₂地中貯留における目的関数について検討を行い、そのうえで仮想的な貯留層に対して適用計算を行うことにより、CO₂貯留への適用可能性について検討する。

(2) 多目的最適化問題とパレート最適解

ここでは、多目的最適化問題の定義と用語の説明を記す。一般的に最適化とは、ある1つの評価基準(目的関数) $f(\mathbf{X})$ を最少とする変数 \mathbf{X} を求めることである。実際には複数の評価基準を同時に考慮すべき問題であることが多く、それらを同時に考慮しながら最適解を探索する場合を多目的最適化問題と呼ぶ。この場合、考慮する複数の目的関数は互いにトレードオフの関係(ある目的関数の値を改善するためには他の目的関数を改悪せざるを得ない状態)になることが多い。そのため、全ての目的関数が最良であるような最適解は一般には存在しない。従って多目的最適化問題では、目的関数間の最適なトレードオフを表す複数の解を求めることがゴールとなる。この複数の解の集合はパレート解と呼ばれ、トレードオフ表面はパレートのフロントと呼ばれる。

(3) 多目的最適解探索手法の調査

多目的最適化手法では様々なアルゴリズムが提案されているが、中でも遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を適用した例(多目的GA)が数多く研究されている(Deb, 2001)。その代表的な手法として、ベクトル評価遺伝的アルゴリズム(Vector Evaluated Genetic Algorithm: VEGA; 渡邊, 2003)、重み準拠遺伝的アルゴリズム(weight-Based Genetic Algorithm: WBGA; Hajela and Lin, 1992)、多目的遺伝的アルゴリズム(Multi Objective Genetic Algorithm: MOGA; Fonseca and Fleming, 1993)、ニッチパレート遺伝的アルゴリズム(Niched Pareto Genetic Algorithm; Horn et al., 1994)、集中化遺伝的アルゴリズム(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-2; NSGA-2; Deb et al., 2002)について調査した。このうちNSGA-2が解探索性能の高さを持ち、かつチューニングを必要とするパラメータが少ない特徴を持つことが示されている(下田, 2018)。そこで、以

下の多目的最適解探索にもNSGA-2を用いることとした。

NSGA-2では主に、初期集団の生成、遺伝的操作、適合度の評価、世代更新の4つのステップのうち、後半の3つを繰り返し行うことにより最適解の探索を行う。このうち遺伝的操作に優位な解を選択的に発生させる仕組みと、世代更新時に優位な解を淘汰させずに多様性をもたせる仕組みが組み込まれている。

(4) CO₂貯留層モデルにおける多目的最適解探索法の適用

① 貯留層モデルの設定

アルゴリズムの検証に用いた地質モデルは、合田（2012）に基づき、深度が800 mから1,200 mまで変化する貯留層を想定した（図3.2.4-1）。各格子位置の孔隙率・浸透率はSequential Gaussian Simulationにより設定した。CO₂は年間100万トンの圧入レートで20年間CO₂を圧入する場合を基本としたが、地層破壊が起こさないための最大許容圧力を15MPaとし、この圧力を超えるCO₂圧入は行わないものとした。また、圧入シミュレーションにはTOUGH2を用いた。

この設定モデルに対し、圧入井が1 or 2本の場合、モデル側面が開境界 or 閉境界の場合、鉛直方向の層の数が1 or 3の場合、目的関数の選択、による最適解の違いについて検討を行った。

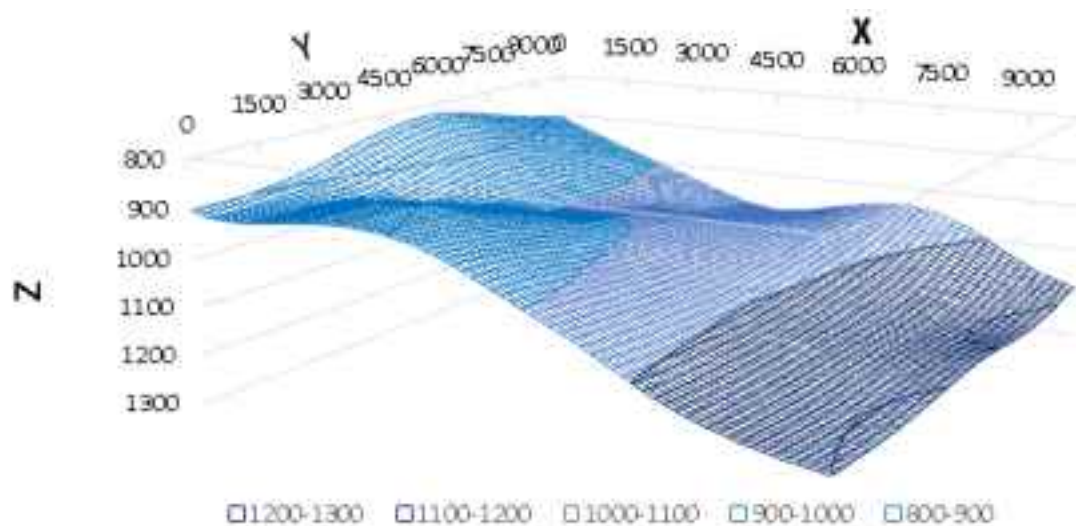
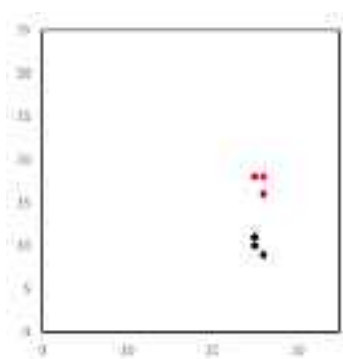


図3.2.4-1 仮定した貯留層モデル（1層）

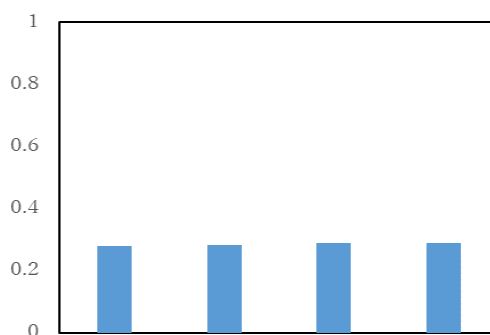
② 計算結果

ここでは圧入井2本、側面を閉境界、鉛直層数1、の場合の多目的最適解探索結果のみ示す。シミュレーションモデルの格子数は34×34×1である。目的関数はf1：100年後の可動CO₂質量割合、f2：坑底圧減衰時間、を選択した。

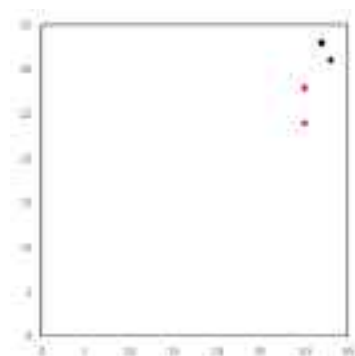
(a) Group1: 坑井配置 (XY 平面)



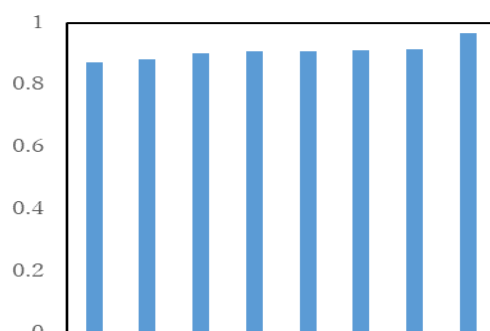
(b) Group1: Well-1 からの CO₂ 圧入割合



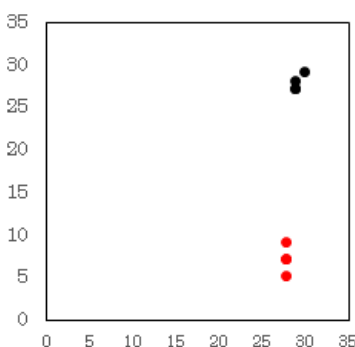
(c) Group2: 坑井配置 (XY 平面)



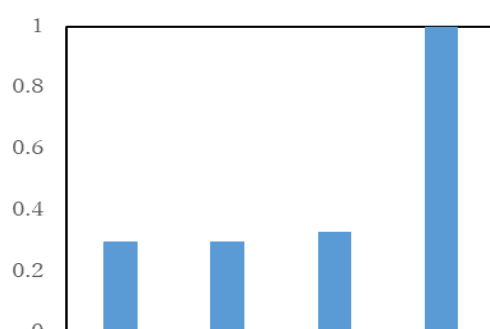
(d) Group2: Well-1 からの CO₂ 圧入割合



(e) Group3: 坑井配置 (XY 平面)



(f) Group3: Well-1 からの CO₂ 圧入割合



(g) パレートフロント

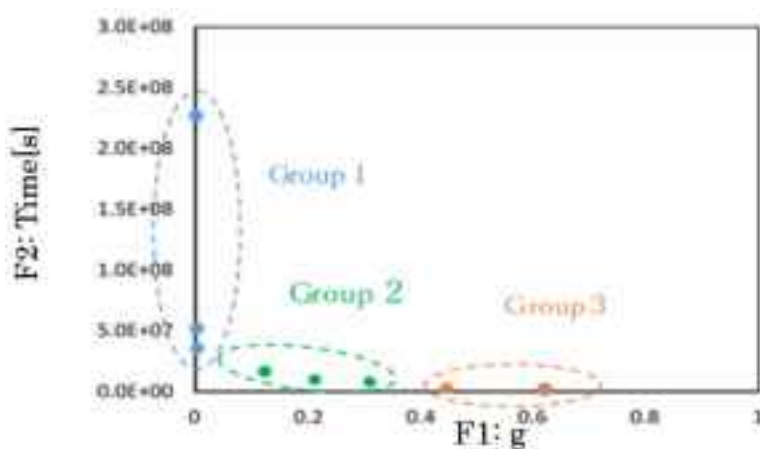


図3.2.4-2 パレート解のGroup別の坑井配置 (a, c, e)、Well-1からの圧入割合 (b, d, f)、パレート解と目的関数の関係 (g)

図3.2.4-2は最終世代における目的関数空間でのパレート解、最終世代での最適坑井位置、Well-1からの圧入割合を示す。パレート解は図3.2.4-2(g) に示すように3つのグループに分かれることが示された。Group1はWell-1からの圧入割合が小さくなっているのに対し、Group3は坑底圧が減衰する時間が短くなっている。Group2ではどちらの目的関数も比較的小さいが、Well-1は圧力割合が小さい領域に、Well-2は坑底圧の減衰時間が短い領域に集まっている。このようにグループ分けできる場合には、実際の意思決定において状況に合わせた最適なシナリオを選択することができることを示唆している。

(5) まとめ

今回の検討により、CO₂地中貯留の坑井配置最適化問題において、NSGA-2を用いた多目的最適解探索が有効であることが示された。また得られたパレート解が複数のグループに分類される場合には、実際の意思決定プロセスにおいて複数の最適解の中から状況に合わせた最適シナリオの選択が可能となることが示された。

3.2.5 まとめ

本節で得られたCO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立に関する成果を以下にまとめる。

1. 複数坑井の先行事例調査に関し、豪州 Gorgon と米国 Decatur で実施中の大規模 CO₂ 地中貯留プロジェクトを対象に、複数坑井の運用情報を収集した。その結果、圧力緩和井は、圧力上昇緩和と貯留率向上の両者の効果により、CO₂ 貯留量の増加に有効であることが分かった。圧力緩和井の坑井位置の決定プロセスにおいては、地質の不均質性、地層構造の特徴、坑間距離など広汎な条件を考慮したシミュレーションスタディが実施されており、その考え方は我が国での圧力緩和井の設置検討に参考になる。特に CO₂ プルームの圧力緩和井への到達時期は圧力緩和井の稼働期間を制約するため、設置位置の決定に際しては十分な検討が必要である。
2. 最適化の目的関数の選定に関し、苫小牧実証試験サイトの貯留層モデルを用いて、複数の目的関数による最適配置決定のためのシミュレーションを実施した。目的関数としては、安全性に関する指標として（坑底圧／許容圧比）、CO₂ の長期安定性に関する指標として（可動 CO₂／圧入 CO₂ 比）などを複数選定した。ここで可動 CO₂ とは、残留ガストラップあるいは溶解トラップにより可動性を失っていない CO₂ である。その結果、上記の異なる観点で選定した複数の目的関数を用いることは、多面的により安全性に優れた圧入地点を絞り込む上で有効なアプローチであることが分かった。
3. 不確実性評価のための最適解探索手法に関し、不確実性に左右されにくいロバストな最適化手法を開発した。開発した手法を地質統計学手法で確率的に発生した複数のリアライゼーション（可能性のある地質モデル）に対して適用した。その結果、本手法を用いることにより、1つの地質モデルだけで最適化した場合よりも、CO₂ 圧入量な

どの目的関数に対して、期待値やばらつきの少ない坑井位置を効率的に探索できることが示された。

4. 多目的最適化手法の策定に関し、集中化遺伝的アルゴリズム (NSGA-2) による多目的最適解探索手法を仮想的な貯留層モデルに適用した。その結果、複数の目的関数の観点で最適な坑井位置をパレート解によって表示することで、グループ分けして吟味できる。これは実際の意味決定において状況に合わせた最適なシナリオを選択する上で有効な手法となることが示唆された。

参考文献

- 1) DOE(2017) : Brine Extraction and Treatment Strategies to Enhance Pressure Management and Control of CO₂ Plumes in Deep Geologic Formations Final Technical Report
- 2) Deb, K (2001): Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, Vol. 16, John Wiley & Sons.
- 3) Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.A.M.T. (2002): A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182-197.
- 4) Fonseca, C.M. and Fleming, P.J. (1993): Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. In *Icga*, Vol. 93, No. July, pp. 416-423.
- 5) Hajela, P and Lin, C.-Y. (1992): Genetic search strategies in multicriterion optimal design. *Structural Optimization*, 4, 99-107.
- 6) Horn, J., Nafpliotis, N., and Goldberg, D.E. (1994): A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. *In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Vol. 1, pp. 82-87
- 7) IEAGHG (2012) : Extraction of Formation Water from CO₂ Storage, 2012-12
- 8) 下田佳祐 (2018): 貯留層開発におけるヒストリーマッチングのための多数目的最適化. 東京大学修士論文
- 9) 合田 隆 (2012): 二酸化炭素地中貯留の安全な実施のための大域的最適化アプローチの構築, 東京大学博士論文
- 10) 渡邊 真也 (2003): 遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化に関する研究. 同志社大学大学院博士論文

3.3 マイクロバブル CO₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上

地中の圧入された CO₂ がより多くの孔隙に浸透できれば、CO₂ 貯留率を高めることができ CCS のコスト削減（経済性向上）に寄与する。また、CO₂ 圧入に伴う貯留層の圧力上昇を抑えることができれば CCS の安全性向上につながる。

CO₂ をマイクロバブル（微細気泡）化し貯留層に圧入すると、地層水との接触面積との増加によって CO₂ を素早く溶解させることから貯留層の圧力増加の抑制効果が期待でき、CO₂ 圧入時の安全確保に貢献できる。また、マイクロバブル CO₂ は、地層の狭い領域に入り込む特性を有するため、従来の圧入方法に比べて貯留層に含まれる孔隙の利用効率が高くなり、CO₂ 貯留率向上につながる。

そこで、マイクロバブル CO₂ 圧入技術について、コア試料を用いた室内実験の知見を基に現場適用手法の検討を行った。文献資料を基に既存坑井や地下情報等を調査した上で、現場適用試験のサイトを選定する。そのサイトの所有者、監督官庁および地元住民との調整後、現場試験を実施する。この実フィールド試験では、マイクロバブル方式と従来方式でそれぞれ CO₂ 圧入を行い、マイクロバブル方式の CO₂ 貯留効率向上、および貯留層の圧力抑制効果を検証する。

3.3.1 コアスケールでのマイクロバブル CO₂ 浸透メカニズムの解明およびモデル開発

平成 29 年度までに行われたコア掃攻実験により、マイクロバブル（MB）化した CO₂ を水飽和したコア内に注入した場合は、従来の手法でノーマルバブル（NB）CO₂ を注入した場合に比べて CO₂ 貯留率が高くなり、また、X 線 CT 装置を用いて CO₂ の注入領域が拡大していることが確認された。実験からは MB 注入では置換効率の改善が確認されたものの、そのメカニズムは特定されていないことから、実験データの解析、貯留層シミュレータを用いた数値計算を通して、メカニズムに関する検討を行った。

貯留層シミュレータを用いて実験で使用した岩石コアを再現するために NB でのコア掃攻実験結果を基に図 3.3.1-1 に示す 3 次元のベースモデルを作成した。ベースモデルでは X 線 CT 装置での測定結果（CT 値）から得られたコア内の飽和度分布、孔隙率分布を反映した。また、実験から得られた孔隙率分布や絶対浸透率から浸透率分布もモデルに反映し CO₂ 注入領域に影響するコアの不均質性を再現した。

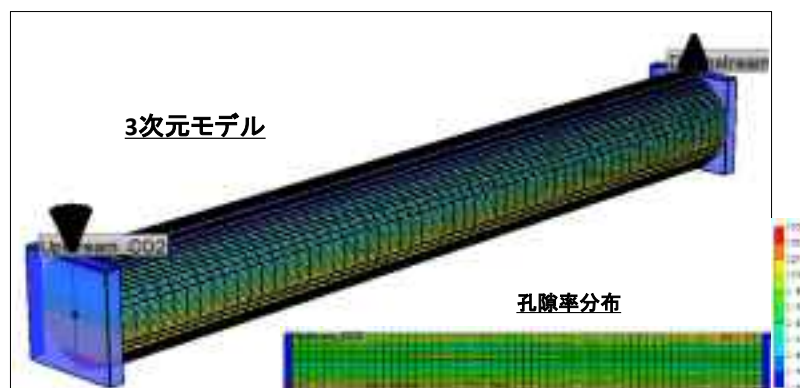


図 3.3.1-1 シミュレーションモデル

MB での実験結果の解析および NB との比較からメカニズムの因子の抽出を行った。MB で CO₂ 注入領域が拡大する理由として、図 3.3.1-2 に示すように MB では NB より気泡径が小さくなり、より狭い領域に浸入しやすくなると考えられる。この現象を表す因子として毛細管圧力に注目した。



図 3.3.1-2 MB 注入イメージ

各グリッドの毛細管圧力は実験結果（CT 値）から得られた飽和度およびダルシーの法則から算出した。得られた毛細管圧力はばらつきがあり、このままでは MB、NB 注入挙動を表現する毛細管圧力曲線を評価することは困難である。そこで、岩石コアの岩相を 5 つのグループに細分化し、それぞれの孔隙率や浸透率の特性を代表するような毛細管圧力曲線（J-function）を算出することによって、実験結果を良く再現する岩石コアモデルを作成した。図 3.3.1-3 はグループ細分化後の岩相分布、図 3.3.1-4 は MB、NB の毛細管圧力および代表曲線である。NB、MB ケースそれぞれの毛細管圧力曲線を比較すると、MB で注入領域の拡大が見られたコア上部に多く分布する岩相にて、MB 注入の場合では NB 注入よりも毛細管圧力が約 30%低い結果が得られた。

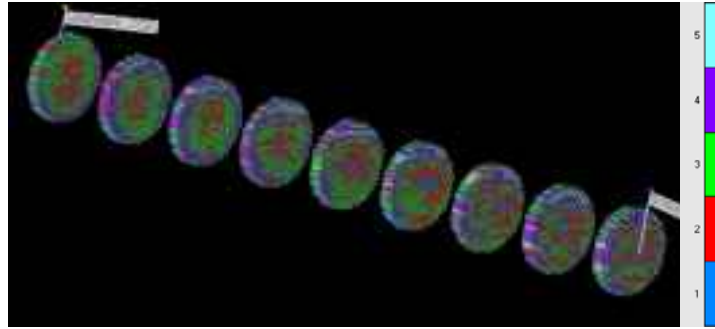


図 3.3.1-3 グループ細分化後の岩相分布

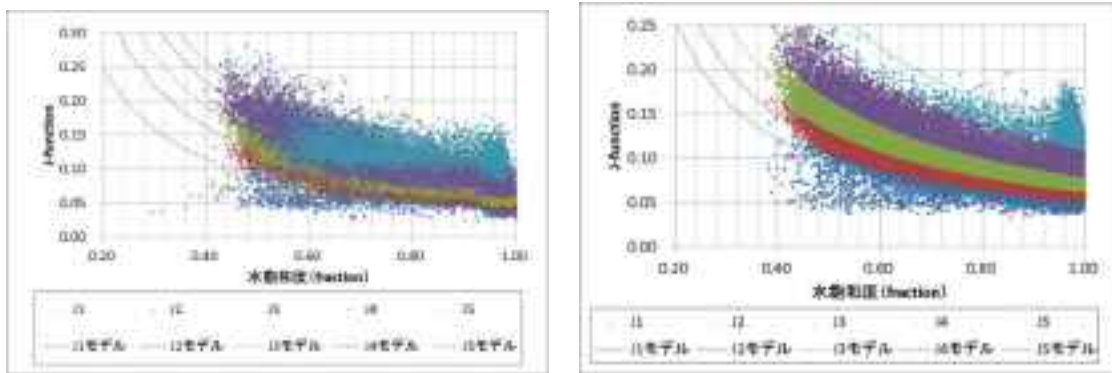


図 3.3.1-4 毛細管圧力曲線（左：MB、右：NB）

上記検討から得られた毛細管圧力曲線を使用してシミュレーションを行った結果、実験での CO_2 飽和度変化（図 3.3.1-5）、 CO_2 飽和度分布（図 3.3.1-6）をほぼ再現することができた。本検討から、MB 注入での置換効率改善は圧入性向上に起因し、水- CO_2 間の毛細管圧力変化として表現できることを明らかにした。

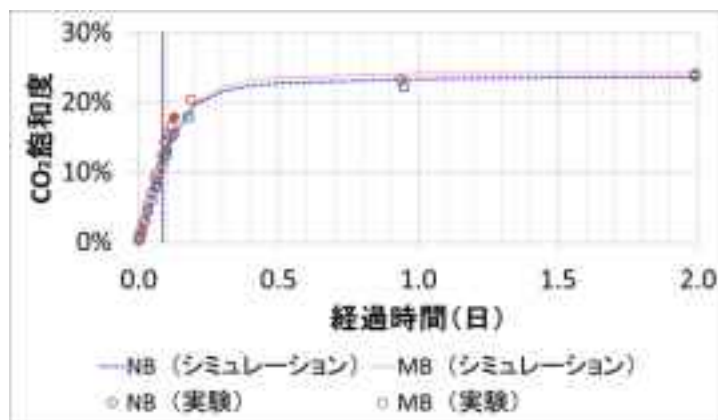


図 3.3.1-5 CO_2 飽和度変化

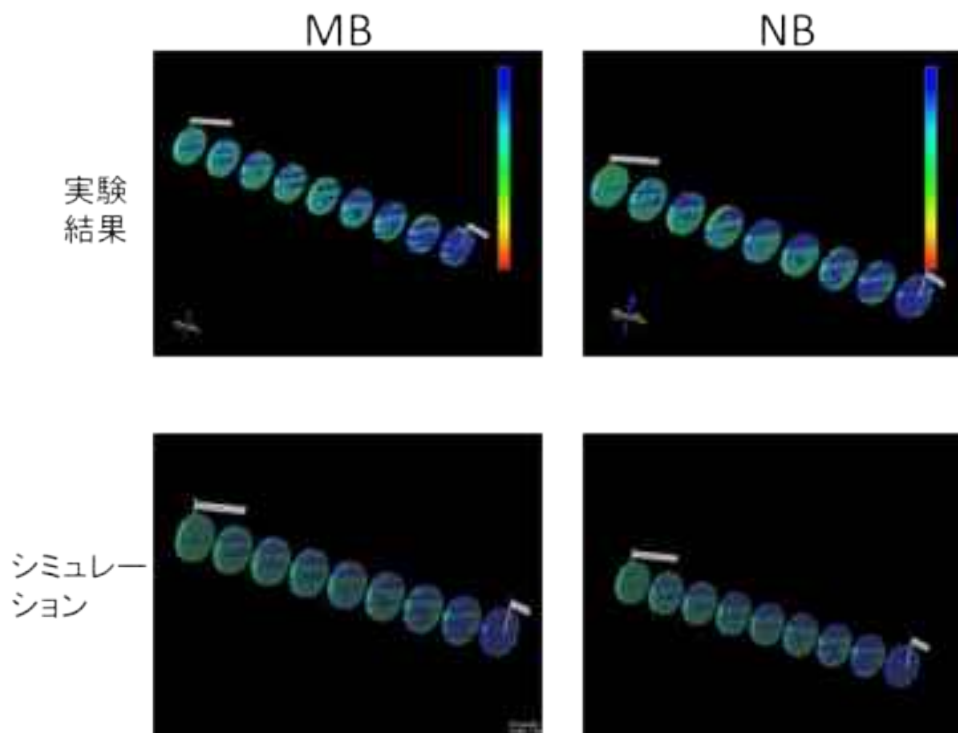


図 3.3.1-6 CO₂ 飽和度分布 (CO₂ 注入終了時)

3.3.2 地中貯留実証試験の現場実証試験計画策定、マイクロバブル CO₂ 圧入方式の有効性把握

平成 29 年度は、MB での溶解促進技術の現場適用に係る手法として、坑内ツールズ（坑内 CO₂ 圧入装置）の試作および坑内試験を実施し、現場適用に資するツールズを開発した。平成 30 年度は平成 31 年度に計画している現場適用試験に向けて、サイト選定、試験計画策定、CO₂ 圧入設備設置や各種機材の準備、また、MB 圧入技術の有用性を確認するための予備検討を実施した。

(1) 現場実証試験計画策定

① 試験サイト

現場試験サイトとして、秋田県男鹿市にある石油資源開発株式会社（JAPEX）申川油田を選定した。申川油田は 50 年以上の原油生産実績があり、数多くの生産井、水攻法用圧入井が掘削されている。そのため、本試験でも既存坑井から試験井（申川 SK-77 号井）を選定した。油層は砂層と泥層が交互に積み重なった砂泥互層であり、垂直方向の不均質性すなわち浸透率の違いが大きい。MB 圧入では低浸透率層への CO₂ 圧入効果が期待されることから、本サイトは試験サイトとして適していると考えられる。また、圧入対象層となる油層の圧力は 8MPa 程度、温度は 50℃ 程度であり、これまでのラボ試験での検証条件（10MPa、40℃）にも近い条件である。

② 試験概要

本試験はパイロット試験の位置づけであり、1回の試験でのCO₂圧入量は日量10t×10日の100tを想定し、MBを連続的に発生させるため圧入（油層）条件でCO₂：水＝9：1の体積比で水も同時圧入する計画とした。手法はHuff'n Puff法を採用し、CO₂圧入後に再生産（フローバック）を行うことで圧入圧力などのCO₂圧入挙動やフローバック時のCO₂排出量などの生産挙動を確認する。試験期間はMB圧入を平成31年5月～6月、従来のCO₂圧入（NB圧入）を平成31年10月～11月の各1ヶ月程度を計画しており、2つの異なる圧入手法を比較することにより、MB圧入での毛細管圧力低下や油層流体への溶解促進による圧入圧力低下や低浸透性油層への圧入による残留CO₂飽和度増加に伴うCO₂排出量低下など期待される有用性の確認を行う。

③ 試験準備

平成30年度は平成31年度の実証試験に必要なMBツールの製作およびCO₂圧入設備の設置を実施した（図3.3.2-1）。実証試験では平成29年度に試作したMBツールを複数接続し、油層区間をカバーするように設置する計画である。図3.3.2-2にMBツールおよび坑内設置概念図を示す。MBツールは平成28年度の概念設計の通り、坑内配管（チュービング：TBG）の先端に設置する。油層区間に設置するMBツールは約18mとなるが、TBG先端と油層区間には64mの深度差があるため、中空の配管（ブランクパイプ）で深度差を補う。平成30年度は本計画に沿うMBツールの製作および坑内配管等の必要機材の準備を実施した。

CO₂圧入設備は平成30年5月より液化CO₂貯蔵タンク、昇圧ポンプ、液化CO₂加温設備の大型機材の製作を開始し、11月より試験現場での基礎工事を開始、平成31年1～2月に製作した大型機材の現場設置、配管・電装工事を行った。2月下旬に設備の試運転を行い設備工事は終了となる。

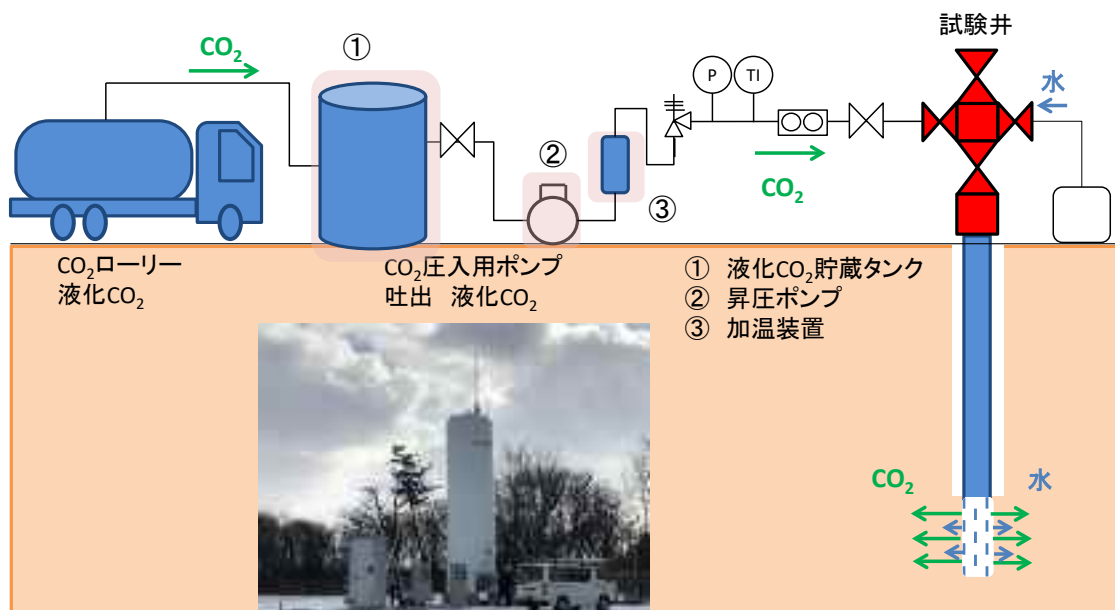


図 3.3.2-1 CO₂ 圧入設備概念図

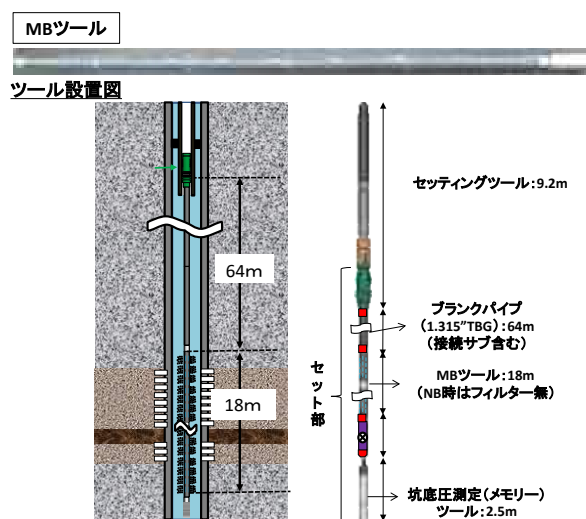


図 3.3.2-2 MB ツール坑内設置概念図

(2) 予備検討

平成 31 年度の実証試験へ向けて試験井近傍のフィールドモデルを構築し、MB 圧入効果の感度分析を実施した。試験対象となる油層の地層傾斜や不均質性（孔隙率、浸透率分布）を考慮し、図 3.3.2-3 に示すモデルを構築した。

3.3.1 で述べたメカニズム検討結果を基に、MB 圧入では油層の低浸透率領域の毛細管圧力が約 30%低下する想定での感度分析を行った。結果を図 3.3.2-4 に示す。NB 圧入では最も浸透率が高い層に優先的に CO₂ が圧入されているが、MB 圧入では最も浸透率が高い層以外にも CO₂ が圧入されており、圧入領域の違いが確認された。今後は平成 31 年度の実証試験結果を反映させることで検証の精度を高める予定である。

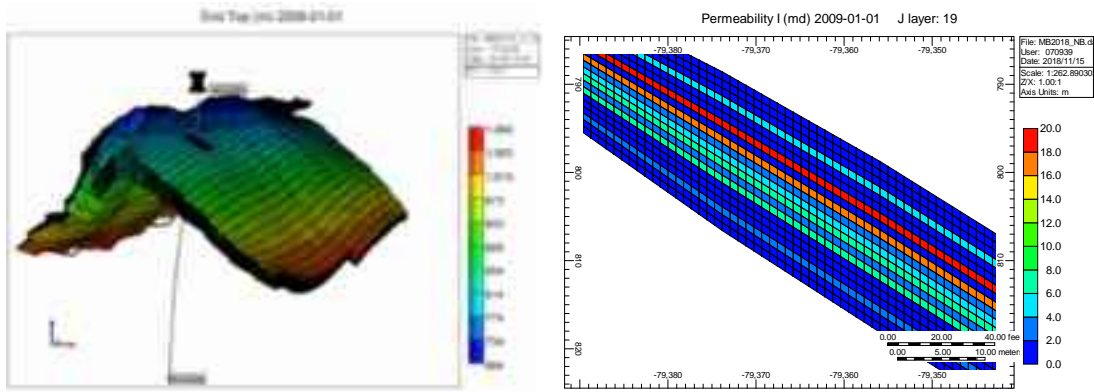


図 3.3.2-3 予備検討フィールドモデル（左：全体図、右：浸透率分布）

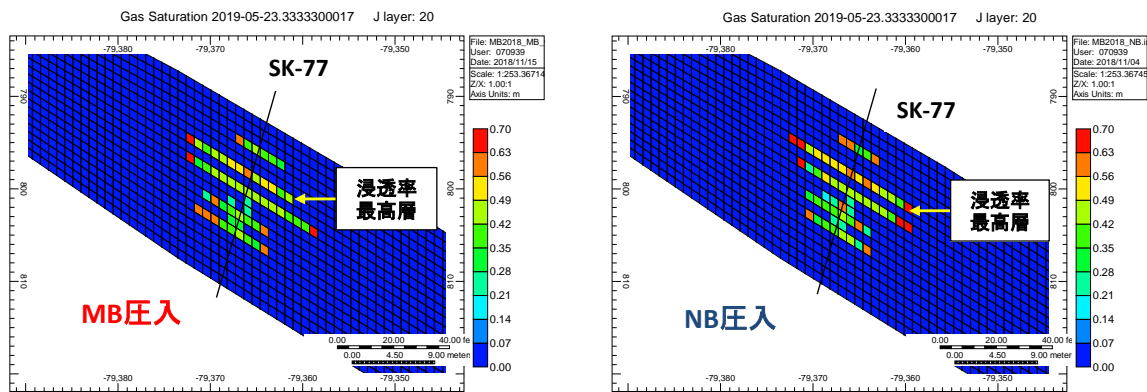
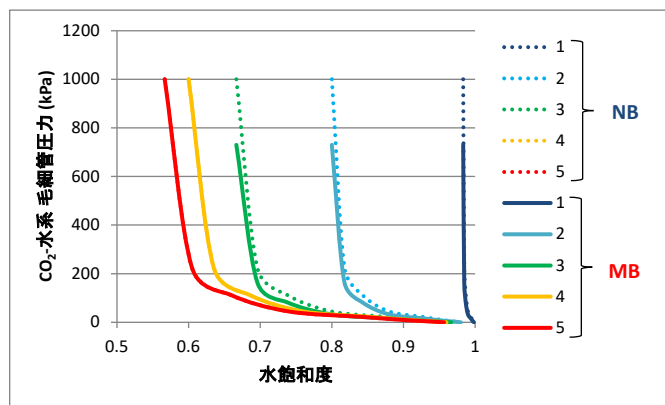


図 3.3.2-4 予備検討感度分析結果

3.3.3 まとめ

平成 30 年度のマイクロバブル CO₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上に係る成果について、コアスケールでのマイクロバブル CO₂ 浸透メカニズムの解明およびモデル開発では、平成 29 年度のコア掃攻実験を再現するモデルを構築し、シミュレーションでの検討から MB 注入での置換効率改善メカニズムは圧入性向上に起因し、水-CO₂間の毛細管圧力変化として表現できることを明らかにした。地中貯留実証試験の現場実証試験計画策定、マイクロバブル CO₂ 圧入方式の有効性把握では、フィールドでの MB 効果確認に適した実油田フィールドを選定し、Huff'n Puff 法での CO₂ 圧入量 100t 規模の実証試験計画を策定し

た。また、実証試験への準備として MB ツールの製作、CO₂ 圧入設備の現場設置を行った。更にフィールドモデルでのシミュレーションによる予備検討から、MB 圧入によるフィールドでの CO₂ 圧入領域の違いを確認した。

第4章 CCS普及条件の整備、基準の整備

4.1 要約

本事業では、「大規模 CO₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立」や「大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立」等の技術開発とともに、「CCS 普及条件の整備、基準の整備」として、CO₂ 貯留安全管理プロトコル (IRP) の整備、技術事例集の作成、CCS の広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討を行った。本年度の研究成果は、「4.2 CO₂ 貯留安全管理プロトコル (IRP) の整備」、「4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS 技術事例集の作成、国際標準化 (ISO TC265) との連携」、「4.4 CCS の広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討」として取りまとめた。

本章ではまず「4.2 CO₂ 貯留安全管理プロトコル (IRP) の整備」として IRP の研究成果を紹介する。IRP は、CO₂ 貯留事業を遅滞または中断させる可能性がある事象、すなわち、インシデントが生じた際の対応手順をまとめることを目的としている。昨年度までに海外の先行事例を調査し、IRP 策定に資する情報を蓄積してきたが、本年度はそれをもとに日本版 IRP の技術的な対応手順、および社会的な対応手順の枠組み案を策定した。さらに、IRP を補完するものとして、科学的根拠に基づいた QA 集の作成に着手した。

次に、「4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS 技術事例集の作成、国際標準化 (ISO TC265) との連携」として技術事例集の成果を報告する。技術事例集は、国内の事業者が CO₂ 地中貯留事業実施の参考となるよう、事業工程別に、第1章「基本計画」、第2章「サイト選定」、第3章「サイト特性評価」、第4章「実施計画」、第5章「設計・建設」、第6章「操業・管理」、第7章「サイト閉鎖」、第8章「閉鎖後管理」としてまとめている。第4章「実施計画」までは取りまとめ済みであり、本年度は第5章「設計・建設」、第6章「操業・管理」、第7章「サイト閉鎖」および第8章「閉鎖後管理」のドラフト版を作成した。また、技術事例集は海外展開を視野に入れていることから、CO₂ 地中貯留の国際規格の動向にも注目しており、その整合性について検討し、分析を行った。

最後に、「4.4 CCS の広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討」について報告する。主な内容は、

- 1) CCS の技術開発状況の社会への情報発信
- 2) PO およびリスクコミュニケーションに関わる研究開発
- 3) 研究成果の海外への紹介状況と展開方策検討

であり、1)については、テクニカルワークショップやフォーラムの開催、2)については、PO 教材やマニュアルの開発、さらにはリスクコミュニケーションの手法の検討、3)については、研究成果を海外展開するためのビジネスモデルやライセンス契約の枠組研究などを実施した。

4.2 CO₂貯留安全性管理プロトコルの整備

CO₂貯留事業の安全確保、緊急時対応に加え、CCSの社会受容性を確保するため、CO₂地中貯留事業を遅滞または中断させる可能性のある事象(インシデント: Incident)が生じた際のプロトコル(手順・計画)を明確にしておくことが必要となる。この対応をとりまとめ、我が国固有の特徴を盛り込んだ日本版CO₂貯留安全性管理プロトコル(IRP: Incident Response Protocol)および、それを補完する科学的根拠に基づいたQA集を作成する。本年度は、日本版IRPの対応手順の枠組み案を中心としたドラフトと市民の懸念に係るQAの概要案を策定した。

4.2.1 日本版 IRP のドラフトの作成

CO₂貯留安全管理プロトコル(IRP)は、CO₂地中貯留事業に関して、地元ステークホルダーの関心が高いと想定されるインシデントが生じた際のCCS事業者の技術的および社会的な対応手順を取りまとめたものである。したがって、CO₂地中貯留の安全性確保のための取り組みであるとともに、CCSプロジェクトの社会受容性の向上に寄与するものである。本事業では、海外サイトの事例の調査を通じて、日本でのCCS事業に特化したIRP(以下、日本版IRP)の構築を目指している。

本年度は、昨年度に整理した日本版IRPの要件とステークホルダーのCCS事業に対する懸念事項を念頭において設定した想定インシデントを基にして、その想定インシデントの区分とレベル分けを検討した後、想定インシデントの発生後に必要となる対応を整理した。これらを基にして、日本版IRPの技術的な対応手順、および社会的な対応手順の枠組み案を策定した。

(1) 想定インシデントの区分とインシデントレベルの整理

IRPの対象として昨年度に抽出した想定インシデントを精査し、我が国の海域CO₂地中貯留の規制法である「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」とその関連法規等(以下、海防法)で採用されている「通常時」「懸念時」「異常時」という3段階のインシデントレベルに対応した区分を検討した。検討結果を表4.2.1-1にまとめる。

想定インシデントを①その発生によってIRPの開始が必要となるインシデントと②これらのインシデントの原因となるインシデントとに整理することとし、前者を「IRPトリガー」、後者を「異常事態」と呼ぶこととした。また、IRPトリガーに区分した想定インシデントを海防法で採用されている概念を拡張する形で、(a) CO₂漏出の可能性を示す異常値の検出、異常事象の発生、(b) CO₂漏出の誘因となり得る事象の発生の検知、(c) CO₂貯留に起因する・起因し得る有害事象の発生(CO₂漏出以外)とに分類した。(a)と(b)のインシデントレベルを「懸念時」とし、(c)の場合は「異常時」とした。(c)を「異常時」とした理由は、(c)で想定したインシデントがいずれもステークホルダーに直接影響するため((2)を参照のこと)である。

表 4.2.1-1 海防法に則した「懸念時」および「異常時」の整理

IRPにおけるインシデント区分		インシデントレベル
IRP トリガー 発生により IRP の開始が 必要となる インシデント	(a) CO ₂ 漏出の可能性を示す異常値の検出、異常事象の発生	懸念時
	(b) CO ₂ 漏出の誘因となり得る事象の発生の検知	懸念時
	(c) CO ₂ 貯留に起因する・起因し得る有害事象の発生（CO ₂ 漏出以外）	異常時
異常事態 IRP トリガー の原因となる インシデント	(a) CO ₂ 漏出の発生の検知	異常時
	(a') CO ₂ 漏出の発生が懸念時監視によって否定できない場合	異常時
	(b) CO ₂ 漏出の発生するおそれの検知	異常時
	(b') CO ₂ 漏出の発生するおそれが懸念時監視によって否定できない場合	異常時

(2) 想定インシデント発生後に必要となる対応

IRPトリガーに区分した想定インシデントの数は13であり、これらが発生した場合に必要となる対応を検討した。その検討結果を図4.2.1-1に示す。

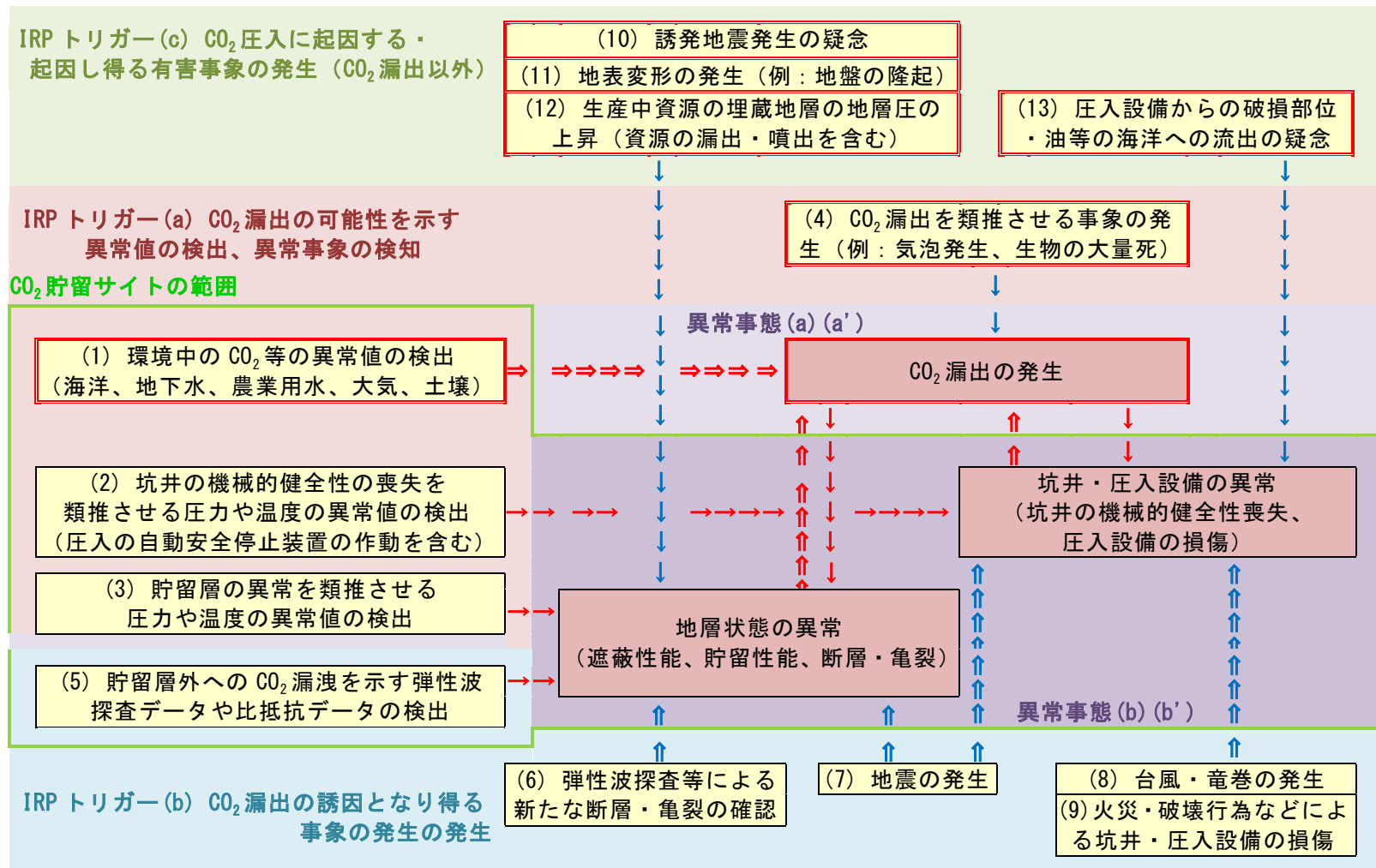
必要となる対応はその内容および順序がインシデントにより異なってくる。内容としては、① CO₂漏出に対する懸念時監視や異常時監視、② 原因究明のための各種調査、③ インシデントのCO₂地中貯留事業への影響評価のための各種調査、④ インシデントと事業との因果関係の確認のための各種調査の4種類となった。この他に、問題があった場合には是正措置が必要となる。

(3) IRP の枠組み案

IRPトリガーの(a)～(c)の3つの区分に対して、想定インシデント発生後に必要となる対応、および問題があった際の是正措置と、インシデントレベルの移行、すなわち「通常時」「懸念時」「異常時」の移行との関係を整理した。整理した関係を図4.2.1-2に示すが、これがIRPの技術的な対応の枠組みとなる。

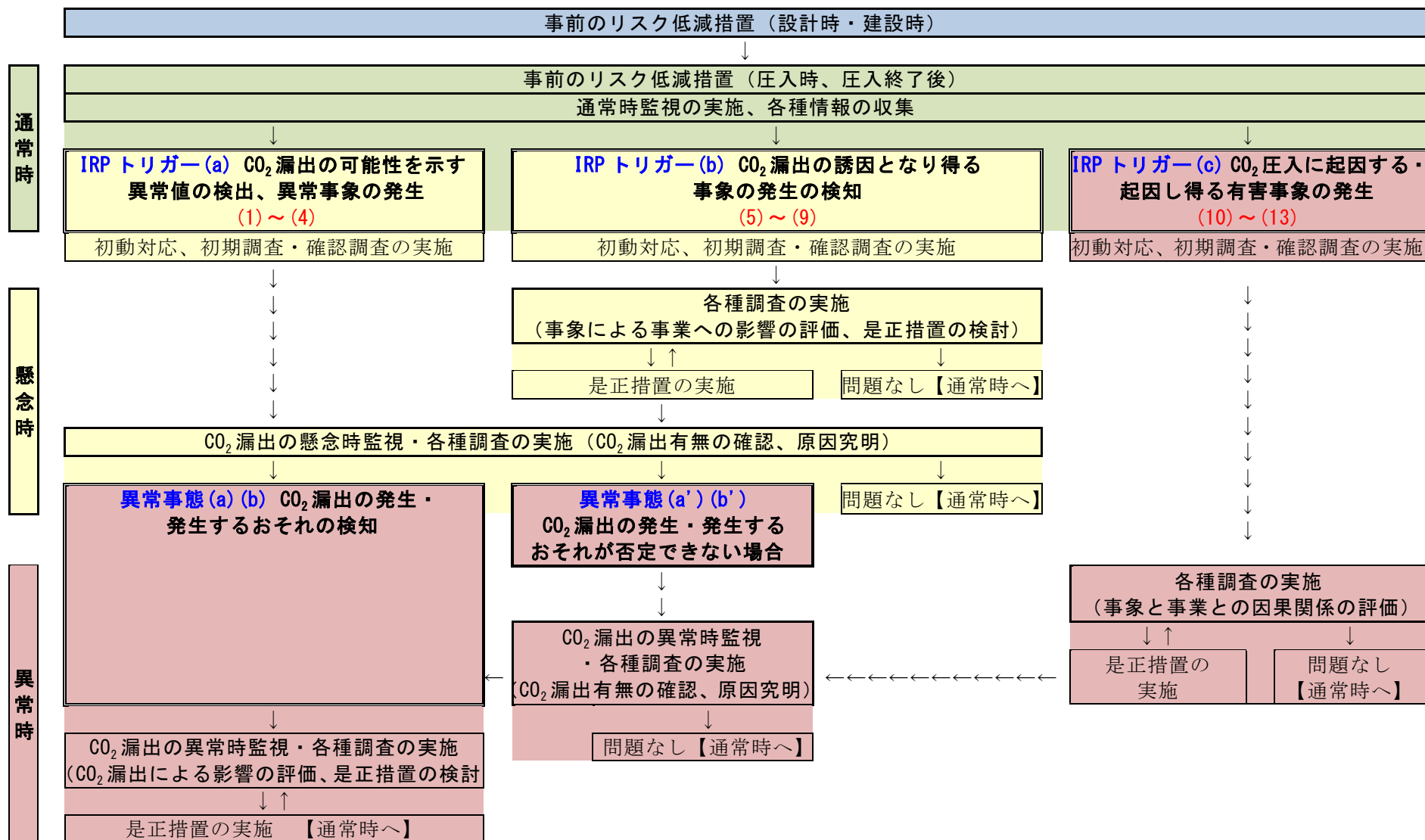
また、IRPトリガーに位置付けた13の想定インシデントごとに外部専門家の協力を仰ぐケースを検討した。各インシデントの「通常時」「懸念時」「異常時」において、「外部専門家による審議」の実施が好ましいケースと「外部専門家による審議、および第三者評価」の実施が好ましいケースとを整理した。

さらに、IRPの社会的側面への対応として、13の想定インシデントごとに市民とのコミュニケーションレベルを検討した。コミュニケーションレベルとして、「市民への情報発信」と「市民への情報発信、および特定の市民との双方向コミュニケーション」の2段階を設定して、各インシデントの「通常時」「懸念時」「異常時」ごとに適切なコミュニケーションレベルを評価した。



□ : 想定インシデント、■ : 事業の異常事態、□ (赤枠) : ステークホルダーへ影響する想定インシデント・事業の異常事態
 ⇒ : CO₂ 漏出に対する懸念時監視・異常時監視、→ : 原因究明、⇒ : 事業への影響の評価、→ : 事業との因果関係の確認

図4.2.1-1 想定インシデントの発生後に必要となる対応



()内数字：対象インシデントの番号

図 4. 2. 1-2 IRP における技術対応プロトコル： インシデントレベル（通常時、懸念時、異常時）の移行

4.2.2 科学的根拠に基づくQA集の作成

本QA集は、日本版IRPで想定した地元ステークホルダーの懸念や疑念の解消を目的としたものであり、日本版IRPを補完するものとなる。懸念に対する回答は、科学的根拠に基づいたものを志向する方針である。

本年度は、国内外の既存のQA集の調査を行い、市民の懸念に係るQAを抽出した。

(1) 国内外の既存のQA集の調査

CCSに関連する国内外の企業や組織、また、研究プロジェクトがウェブサイトなどで公開している計17のQA集を調査した。QAの総数は約180に上り、これらを気候変動、気候変動対策、CO₂の特性、CCS/CCUS全般、コスト、メリット、貯留、輸送、回収、利用に分類して分析した。

(2) 市民の懸念に係るQA

分類したQAを基に、市民がCO₂地中貯留事業に対する懸念から抱くと想定される4つの疑問を抽出し、それに対する回答の概要案をまとめた。4つの疑問は、貯留層の安全性・健全性、地震による貯留サイトへの影響、貯留事業による誘発地震、CO₂漏出時の人や生物、環境等への影響である。4つの疑問とその回答の概要案を表4.2.2-1に示す。

調査対象としたQA集はいずれも、一般向けに平易な記述としており、数値等の科学的根拠を示したものは限定的であった。海洋環境への影響については、科学的な内容が提示されているウェブサイトを紹介しているものもあった。本事業でのQA集においては、科学的根拠として提示する内容とその方法について独自に検討する必要がある。

表 4.2.2-1 市民の懸念に係る QA の整理

<p>貯留層の安全性・健全性（地震関連以外）に対する疑問</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ CO₂地中貯留の原理（遮蔽層やトラップメカニズムなど）の説明 ・ 安全なCO₂地中貯留事業の実施を目的とした法規制（責任の所在を含む）のほか、ロンドン議定書やCCS技術の国際標準（ISO）の説明 ・ サイトの選定と性能調査による科学的に適した貯留サイトの選定プロセスの説明 ・ CO₂圧入オペレーションでの安全性確保、圧入したCO₂プルームの確認、圧入井などのCO₂貯留インフラの健全性の確認などを目的としたモニタリング実施の説明 ・ 数値シミュレーションによるCO₂プルームの挙動予測の説明 ・ CCSにおけるCO₂地中貯留の実績（Sleipner等）のほか、EORにおけるCO₂圧入の実績（北米等）やCO₂地中貯留の類似事例（油ガスの埋蔵、天然ガス地下貯蔵など）の説明
<p>地震による貯留サイトへの影響に対する疑問</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 貯留サイトは、断層を避けて選定されることの説明 ・ 一般的な震源深さと貯留層の深度の差異、地震時の地下の揺れが地上の揺れよりも小さいといった事実の説明 ・ 中越地震および中越沖地震による長岡サイトへの影響の説明
<p>貯留事業による誘発地震に対する疑問</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 貯留サイトは、断層を避けて選定されることの説明 ・ 誘発地震が発生したシェールガス開発などとCO₂圧入との違いの説明 ・ 誘発地震の発生を監視するためのモニタリング（孔底圧力や微小振動など）実施の説明
<p>CO₂漏出時の人や生物、環境等への影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ CO₂の一般的な特性（不燃性など）の説明 ・ （人体への影響）CO₂の人体への影響が限定的であることを示す致死量などの説明 ・ （海洋環境・海洋生物への影響）CO₂の海洋環境・海洋生物への影響が限定的であることを示す実験データやCO₂の自然放出サイトでの生物の存在の説明 ・ （地下水への影響）CO₂貯留層の深度と利用される地下水として利用される深度が一般的に大きく異なること、貯留層内の地層水は一般的に利用価値が小さい塩水であることの説明。

4.2.3 まとめ

本年度は、日本版IRPの技術的な対応手順、および社会的な対応手順の枠組み案を中心としたドラフトを策定し、また、科学的根拠に基づくQA集の策定に向けて市民の懸念に係るQAを抽出した。次年度は、日本版IRPについてはIRPトリガーごとの技術的および社会的な対応の具体例をまとめる。QA集については、市民の懸念に係るQAを具体化するとともに、気候変動やCCS全般に係るQAの具体化も図ることになる。また、科学的根拠として提示する内容とその方法についても検討する必要がある。

4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS技術事例集の作成、国際標準化（ISO TC265）との連携

CCSの事業化の促進に向けては、多くのCCS関連情報を取りまとめ、CCS事業の基本計画から閉鎖後の管理に係る技術事例およびコスト評価について取りまとめた「CCS技術事例集」を作成することが重要となる。また、国内ではCCS関連法規が未整備であるため、「CCS技術事例集」の内容と、CCSの国際規格 ISO/TC265の議論において、整合性を確保することが必要である。このため、国際規格とも整合をとりつつ、「CCS技術事例集」を作成する。作成にあたっては、学識経験者や産業界の意見を反映させるため、CCS技術事例集検討ワーキンググループにより、助言・指導を受けつつ進める。

4.3.1 CCS技術事例集

(1) 概要

平成29年度までの主な成果として、第1章基本計画、第2章サイト選定、第3章特性評価、第4章実施計画までの技術事例を収集してドラフトを作成した。平成30年度には、第5章設計建設、第6章操業管理、第7章サイト閉鎖、第8章閉鎖後管理のドラフトを完成させ、平成31年度には公開版を作成する予定である。

(2) CCS技術事例集の構成

この事例集は、CCS全体工程のうちの輸送と、貯留層にCO₂を圧入するまでの工程における手続、準備を含めた作業全般を対象として、基本計画、サイト選定、サイト特性評価、実施計画、設計・建設、操業・管理、サイト閉鎖、閉鎖後管理に至るまでの8段階に分け、それぞれを、第1章から第8章に対応させて構成されている。図4.3.1-1には、事例集の全体概要を示した。

また、CCSプロジェクトの推進においてCCS全体システムとしてのコスト評価も必要不可欠である。そこで、CO₂の大規模発生源となる石炭火力発電を対象としたCCS全体システムのコスト計算の標準事例の提示を試みた。



図4.3.1-1 CCS技術事例集 全体概要

技術事例集を構成する全8章のうち、第1章「基本計画」から第4章「実施計画」までを前半部ドラフトとして2015年度に完成させた。今年度は、第5章「設計・建設」から第8章「閉鎖後管理」までの後半ドラフトを完成させた。2019年度には第1章から第4章の見直しを行い、第1章から第8章までを完成させ、2020年度には関係者への聞き取り結果を反映し、完成させる予定である。

以下に、第5章から第8章までの各章の概要を記載する。

(3) 第5章 設計・建設

本章では、CCS事業のうち、CO₂の輸送、地中貯留に関わる地上施設および坑井の設計、建設について国内外の実績、ガイドラインを参考に、規制法規および作業実施上要求される手続きの概略などを併せて事例を紹介する。

地上設備の建設には土地利用や建設、安全基準に係る多くの許認可が必要である。概念設計では地上設備の稼働率や、操業人員構成に対する検討は重要である。前者は設備全体の能力、予備系列の設計に、後者は設備全体の監視項目の設計や人員採用計画に、それぞれ影響を与える。

事業許可承認後に、基本計画から実施計画段階で行った概念設計および基本設計を基に、地上設備（CO₂輸送、貯蔵タンク、加温装置、昇圧装置等）、圧入井およびモニタリング関連設備の詳細設計、建設を行うものである。

まず、設備の詳細設計に際して、基本計画から実施計画までのフェーズにおいて検討した概念設計、実現可能性調査、基本設計、詳細設計フローを再評価する必要がある。

基本計画策定、事業実施の最終決定、許可申請、詳細設計・建設に至るまでのプロセスには、以下の作業が対象となる。

- 基本計画フェーズ：排出源、圧入想定量などを決定
- サイト選定フェーズ：圧入サイトに関し、一つないし二つの最終候補を選定
- サイト特性評価フェーズ：サイト候補の詳細評価を経て圧入サイトを最終決定
- 実施計画フェーズ：詳細な事業計画策定、コスト評価、事業実施を最終決定、事業許可申請
- 設計・建設フェーズ：実施計画に基づき必要な設備を詳細設計・建設、試運転・検収

そこで、この事例集では、事業計画から圧入に必要な設備設計と建設までの工程において、設計作業からのアプローチとして、概ね以下のように定めている。

- ・基本計画フェーズ、サイト選定フェーズ、サイト特性評価フェーズ
 - ⇒概念設計（Conceptual Design）、実現可能性調査（Feasibility Study）
- ・実施計画フェーズ
 - ⇒基本設計（Preliminary Study）= FEED（Front-End Engineering Design）
（実施計画フェーズ後⇒事業許可申請および事業最終決定（License Application & final investment decision）
- ・設計・建設フェーズ
 - ⇒詳細設計・資機材調達建設（Engineering、Procurement & Construction）、
設備建設・完成・試運転 = 検収（Commissioning）

前述したように、実現可能性調査の後に、実施計画を策定し、事業実施の最終決定が行われるが、その判断材料として、経済性に関する検討は非常に重要である。

まず、基本設計（FEED = Front-End Engineering Design）においては、CCS事業の経済性を検討するための高い精度の地上設備の工事費を見積もることが大きな目的の一つである。一旦地上設備の施工が開始されると総額数十～数百億円クラスの設計工事費が見込まれることから、資金管理の観点から工事費見積精度の幅を狭めることが重要となる。

FEEDでは、設備工事費、操業費が一定水準で算定可能になるまでのエンジニアリング業務が行われる。通常エンジニアリング会社に外注され、CO₂圧入100万トン/年規模の場合、期間は1年程度であるが、追加検討がある場合は2年間程度かかるものと推測される。

見積コストの単価や算定方法はエンジニアリング会社独自のデータベースとノウハウに基づくものであり、事業者は当該コストの妥当性を検討するため、別のエンジニアリング会社にコストの第三者評価を依頼することがある。

FEED作業自体のコストを含め、CCSプロジェクト全体のCAPEX（設備工事費）およびOPEX（年間操業費）のFEEDでの見積概算を公開している事例は数少ないが存在する。図4.3.1-2には、海域（Peterhead）と陸域（Quest）のCCSプロジェクト全体の設備工事費と年間操業費の概算を示す。一般に陸域に比べて海域の設備費および操業費は、かなりのコスト増となる傾向がある。

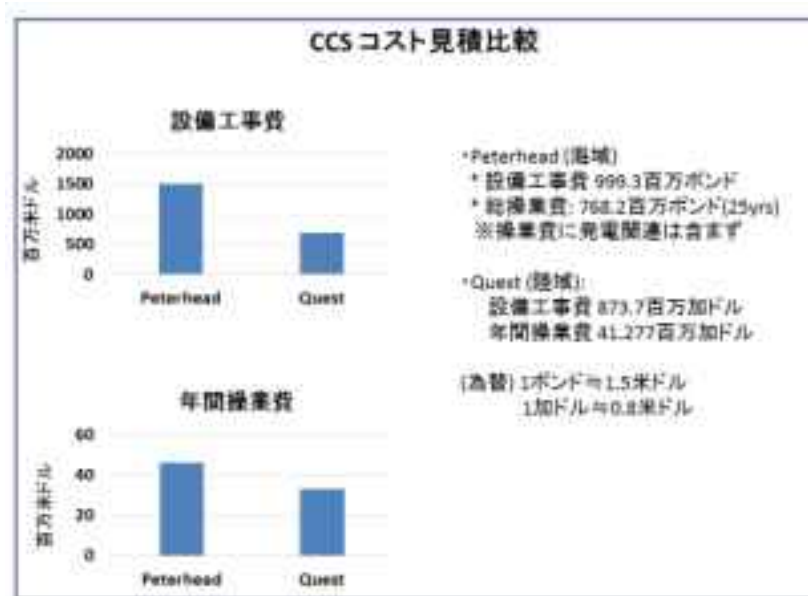


図4.3.1-2 海域貯留と陸域貯留におけるコスト概算

(4) 第6章「操業・管理」

この章では、「実施計画」で定めたCO₂圧入操業に伴う設備の運転・維持管理、モニタリング、異常時対処そしてPO（public outreach）を実施する。

貯留プロジェクト事業者（storage project operator）は、回収施設から圧送されてきたCO₂が、圧入サイトの受け入れ施設に達し、圧入井を経て貯留層に送入・貯留される間に発生する様々な作業について管理し、責任を負っている。通常のCO₂圧入操業は、CO₂の回収事業者から受け入れたCO₂を、圧力・温度を再調整したうえで、事前に設計された圧入レートで、圧入井を通して貯留層に送ガス・貯留する一連のプロセスであり、そこには様々な理由に基づく圧入停止・遮断作業も含まれる。圧入操業の眼目であるプロジェクト期間中の必要量のCO₂の安全・効率的な地中貯留を実現するためには、CO₂の受け皿である貯留層を適切に管理することが必要かつ重要な事項となる。具体的には、貯留層におけるCO₂の分布状況や、圧力変化に関するモニタリングと、圧入前のCO₂挙動シミュレーションを実施し、定期的なヒストリーマッチングにより、地中に圧入したCO₂がほぼ予測通りに貯留できていることを確認することが重要である。

苫小牧実証試験では、海底下の貯留層を対象とした事業であることから、環境省が海底下の地層にCO₂を圧入する事業を対象として制定した海洋汚染防止法に則り、環

境省大臣の許可申請が必要となり、海洋環境影響評価を実施しなければならない。

モニタリングによって様々な観測・測定データが取得されるが、どのようなデータをどのような頻度で取得するかという、データ種類、取得頻度に関して定まった仕様はない。各々の貯留プロジェクトが有している様々（地質学的、地政学的、経済的、社会的等）な特性、業界・製造業者の推奨事例、あるいは規制当局からの要求事項と言ったあらゆる要素を考慮して、実施計画立案の際にモニタリング計画に組み入れられる。

(5) 第7章 サイト閉鎖

CO₂圧入の終了に伴いモニタリングに必要な施設を除いてCO₂の輸送や圧入に関する施設を撤去し、使用済み坑井は封鎖することとなる。予定された量のCO₂が圧入される、あるいは何らかの理由で圧入が終了し、さらなる追加圧入や、他の用途で坑井を利用する予定がない場合、圧入井は封鎖され、サイトは閉鎖されることとなる。この際、規制側からの要求に沿った圧入井封鎖、サイト閉鎖が行われるが、サイト閉鎖については、下記の手順が必要である。

- ・圧入井封鎖に際し、まず圧入井の健全性調査を実施し現状把握を行い、封鎖方法を検討し、作業を実施する。
- ・サイト閉鎖に関し、ステークホルダ、地元および関係者に対するPOを実施する。
- ・サイト閉鎖後管理計画を策定する。閉鎖後の長期モニタリングの計画およびリスク管理の計画、さらにはサイト管理責任の移譲に向けた手続を進めなければならない。

また、圧入井封鎖のタイミングも検討要素である。規制面からは、EUのCCS指令や米国EPAのUIC Class VI規定でも、圧入終了直後での実施は求めている。サイト閉鎖時に封鎖を実施すべきか、閉鎖後ある程度の期間が経過した後に実施すべきか、それぞれに利点と問題点を持っている。

圧入終了直後に封鎖作業を行う場合は、坑井経由のCO₂漏洩、漏出リスクおよび坑井健全性試験にかかるコスト負担を回避することができるが、圧入井内の貯留層の温度、圧力データが取得できず、圧入終了後の貯留層圧力減少状況を把握できず、CO₂挙動に関する将来予測の信頼度に問題を生じる恐れがある。

一方で、閉鎖後ある程度の期間が経過した後に封鎖する場合は、圧入井内の長期データの入手と、それに伴うCO₂挙動予測の大幅な信頼性向上が期待できるが、坑井の現状維持による坑井経由のCO₂漏洩、漏出リスクが継続することになる。また、坑井が存在することにより、定期的な坑井健全性試験の義務を負うことになる。この問題は、責任移譲の時期と密接に関係し、慎重な判断が必要である。

CO₂圧入井封鎖における最大のリスクは、漏出漏洩であり、封鎖技術には確実性が求められる。圧入されたCO₂には、①浮揚性がある、②セメントとの反応性と金属へ

の腐食性を持つ、③貯留層の地層圧力を上昇させる、という特性がある。これらの特性は、ケーシング、セメント、それらを取り囲む空間を含めた坑井を構成する材質の低下と地層流体移動につながる恐れがある。これらの要因によるサイト閉鎖後の地層流体の漏洩/漏出を完全に防止し、CO₂貯留サイトにおける長期的安全性の維持するためには、圧入井を含む坑井の適切な封鎖が不可欠である。

(6) 第8章 サイト閉鎖後管理

第7章で記載されたように、地中へのCO₂圧入が終了した後は、圧入井は封鎖され、モニタリング施設を除いて、パイプラインなどCO₂輸送のための諸施設や、圧入にかかわる諸施設も全て撤去され、サイト閉鎖が完了する。これ以降は閉鎖後管理フェーズに入り、CCS事業者が圧入操業時に引き続き貯留サイトの管理責任を持つ期間に移行する。

閉鎖後管理においては、サイト閉鎖時に策定した管理計画に基づき、貯留層内のCO₂挙動モニタリング、漏出モニタリングを継続し、ヒストリーマッチングによって閉鎖後の安全を確認する。圧入が終了し貯留サイトが閉鎖されても、リスク管理の重要性に変化はない。CO₂の圧入終了後には、貯留層の圧力は低下し、相対的には圧入操業時よりリスクは低下する。しかし、長期にわたり圧入されたCO₂や溶解CO₂を含む地層流体の浅部や地表、海底への漏出、CO₂圧入による微小振動の発生の可能性は、極めて小さいながらも依然として存在し、モニタリングが必要である。また、各種手段による貯留層中のCO₂挙動のモニタリング、そしてその結果を利用した貯留層モデルの修正、ヒストリーマッチング、挙動予測も長期的安全性確保にとって極めて重要な作業である。

一般にCCS事業のライフサイクルは長期にわたり、国などの管轄当局に責任が移譲されるまでの閉鎖後管理期間は場合によっては数10年以上になる。

CCS事業者によるサイト閉鎖後管理期間と、管理責任の移譲手続の問題は、CCS事業にまつわる様々な議論の中でも、最も強く利害関係者の関心を引く論点の一つである。この点に関しては、国、州などにより概念が大きく異なっており、日本を含め規定されていない国も多い。米国ではEPAのUICプログラムのクラスVIにおいて公的機関への責任移譲については触れていないが、事業者は原則として圧入停止後、最低50年の管理期間終了時には責任から解放される、と規定されている。しかし、飲用地下水源への影響に係る責任は無期限に事業者を負うこととなっている。州によっては圧入管理期間終了後の長期的責任について規定されており、永久に事業者の責任と規定する州も、最低10年で州に責任が移譲される州もある。EUのCCS指令では、原則として20年の管理期間後、条件に合えば規制当局（当該国）に責任が移譲される。オーストラリア連邦政府の場合では、指定された一定の条件を事業者が全て満たしていると判断した日（Decision Day）から、CCS 事業に関する事業者の責任をから免責すると、

規程されている。

責任移譲後の長期的責任を規定する法整備は喫緊の課題である。リスク管理をどの程度の期間継続すべきか、事業者が永遠に責任を負うのか、リスク管理や事故の際の財政はどこが負担するのかといった点が長期的責任に係る課題である。責任移譲後のモニタリングに係る経費や、漏出などの事故が発生した場合の経費については、多くの国、地域では責任移譲前に何らかの財政的保証を事業者に求めているが、この点に関して明確に規定されていない場合も多い。財政保証の金額は、CCS事業の経済性を大きく左右する可能性もあり、各国の取り組み方に注目していく必要がある。

(7) コスト評価

① 概要

ここでは、石炭火力発電、CO₂の回収、輸送の一連の流れにつき、代表的なシステムを設定し、コスト試算例を紹介することにより、CCS全体システムのコスト計算の標準事例を提示するものとする。さらには、貯留方式以外の処理方法として注目を集める鉱物固定化のコスト試算事例も紹介する。

② CO₂回収コスト試算事例

a) CO₂回収コスト評価用基本モデルの設定

石炭火力発電の規模は500MW～1000MWを想定するのが標準的である。モデル例としては、米国のNational Energy Technology Laboratory (NETL) が、550MW級の超臨界石炭火力発電所の基本モデルを公開している。

b) 発電およびCO₂回収シミュレーション

発電条件やCO₂回収条件により、発電効率等が基本モデルから異なってくる。その状況を把握するため、発電・回収条件に即したシミュレーションを行う必要がある。

具体的には、CCSなしの発電モデルのブロック図とシミュレーションフローと、CCSありのものを設定しシミュレーションを行う。シミュレーションにはプロセスシミュレータとして実績のあるAspen Plusの活用が推奨される。

c) 発電コスト、CO₂回収コスト、CO₂回収回避可能コストの計算式

発電コスト、CO₂回収コスト、CO₂回収回避可能コストは以下の式4.3.1-1~4により求める。

$$\text{発電コスト (COE) [円/kWh]} = \frac{\text{資本費[円]} + \text{運転維持費[円]} + \text{燃料費[円]} + \text{社会的費用[円]}}{\text{発電電力量[kWh]}} \quad (\text{式 4.3.1-1})$$

$$\text{発電電力量[kWh]} = \sum_{t=1}^T \frac{E}{(1+r)^t} \quad (\text{式 4.3.1-2})$$

t : 稼働年数 (T=30年)、 E : 年間発電量 (発電端出力 550MW、設備稼働率 85%)、 r : 割引率 (3%)

$$\text{CO}_2 \text{ 回収コスト [円/t-CO}_2\text{]} = \frac{(\text{COE}_{\text{CCSあり}} - \text{COE}_{\text{CCSなし}}) [\text{円/kWh}]}{\text{CO}_2 \text{ 回収量 [t-CO}_2\text{/kWh]}} \quad (\text{式 4.3.1-3})$$

$$\text{CO}_2 \text{ 回収回避可能コスト} = \frac{(\text{COE}_{\text{CCSあり}} - \text{COE}_{\text{CCSなし}}) [\text{円/kWh}]}{(\text{CO}_2 \text{ 排出量}_{\text{CCSなし}} - \text{CO}_2 \text{ 排出量}_{\text{CCSあり}}) [\text{t-CO}_2\text{/kWh}]} \quad (\text{式 4.3.1-4})$$

d) コスト評価のための数値の設定

上述の各式に具体的な数値を設定し、コストを計算するが、数値設定は以下により行う。

ア) シミュレーション結果の反映

発電電力量、燃料費、CO₂回収量、CO₂排出量は、(2)シミュレーション結果を反映して設定する。

イ) 資本費、運転維持費については、サイト固有のデータとなるが、標準値として、NETLのデータ、あるいは国内の発電コストワーキンググループが公表しているデータの採用などが考えられる。社会的費用については考慮しないことを検討のベースとしてもよいと考える。

③ CO₂輸送費用コスト試算事例

CO₂船舶輸送コストを評価するにあたっては、1)CO₂液化、2)一時貯留、3)荷積み、4)船舶輸送、5)船内におけるCO₂調整、6)荷下ろし、7)荷下ろし後のCO₂調整について、それぞれのCAPEX、OPEXを求めてから、それらの総額を正味CO₂輸送量で割り、CO₂輸送単価を評価する(式4.3.1-5)。

$$\text{輸送コスト [円/t-CO}_2\text{]} = \frac{\sum_i(\text{CAPEX}_i + \text{減価償却年数}_i) + \sum_i(\text{OPEX}_i) [\text{円/年}]}{\text{CO}_2 \text{ 輸送量} - \text{CO}_2 \text{ 排出量 [t/年]}} \quad (\text{式 4.3.1-5})$$

パイプライン輸送コストについても上記の式4.3.1-5で算出される。上記の1)から7)に相当する諸元は、1)回収後のCO₂引受け、2)CO₂圧縮、3)パイプライン輸送、4)CO₂圧入設備への引き渡しとなる。

④ 鉱物固定化によるCO₂処理コスト試算事例

地中貯留以外のCO₂処理方法として、鉄鋼スラグ利用固定化が注目を集めている。当該コスト算出にあたっては、製鉄製鋼プロセスのスラグ固定化効率データを設定の上、固定量とコスト計算を行う。一方、鉄鋼スラグはコンクリート骨材に利用できるため、その利益分を処理コストから差し引くこととなる。

4.3.2 次年度更新情報の蓄積

第1章の基本計画、第2章のサイト選定、第3章の特性評価、第4章の実施計画については、平成27年度にドラフトを作成して以降、約3年が経過しており、最新の情報、動向を考慮し、追加すべき点を検討した。編集作業は次年度に予定しているが、追加すべき情報として、下記の項目を収集中である。

(1) 第1章

① 漏洩、漏出について

本事例集で用いてきたCO₂の漏洩漏出の定義については、経済産業省の二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会が2009年にとりまとめた「CCS実証事業の安全な実施にあたって」に記載された、「漏洩（leakage）；貯留対象とする貯留層からの移動と、漏出（seepage）；飲料用地下水への移動、地中から大気又は海洋への移動を意味する」という定義を採用してきた。しかしながら近年、海外での定義としてはCCS指令が提案したようにCO₂貯留に係る領域を「貯留サイト」、「貯留コンプレックス（貯留サイト外の二次的な封入領域）」、「モニタリング領域」と整理し、貯留サイトから貯留コンプレックスへの動きを「CO₂の移動」、貯留コンプレックスからモニタリング領域への動きを「漏洩」との使い分けが使用されている。よって、次年度の第1章から第4章への追加に際し、漏洩/漏出の表記方法について、海外の現状を調査し、見直すべきと考える。

② 最新事業コスト情報について

前述したように、CCS事業実施の最終決定の判断材料として、経済性に関する検討は非常に重要である。現在は、サイト選定後の特性評価の中で、コストに関する記述をしているが、まず第1章の基本計画において、CCSのコスト事例を紹介し、コスト要因を理解した上でサイト選定、特性評価、実施計画を立案するというプロセスを明記する必要があると考える。後述のように、海域におけるCO₂地中貯留では、非常に大きなコストがかかることも認識し、現実として理解しておく必要がある。

③ PO/PAについて

本事例集においては、地中貯留に関する社会受容性について、PO/PA（Public Outreach／Public Acceptance）という表現を使用してきたが、最近では、PAについては殆ど用いられてない状況にある。Risk Communication や、Public Consultationや、Public Engagement等の語彙も使用されており、今一度どのような表現が適切か検討を行い、最適な言葉を採用すべきと考える。

④ 用語集について

海外のガイドライン、マニュアル類には、ほとんどの場合、用語集が添付されてい

ることから、本事例集についても、第1章の基本計画に添付することとし、用語集の作成に着手している。World Resources Institute (2008): CCS Guidelines – Guidelines for Carbon Dioxide Capture, Transport, and Storage, WRIのGLOSSARY AND ACRONYMS が、World Resources Institute (2008): CCS Guidelines – Guidelines for Carbon Dioxide Capture, Transport, and Storage, WRIのGLOSSARY AND ACRONYMS は発行から10年が経過しているが、対象としている用語の範囲が広く、我々の事例集が対象とする読者にとって使いやすい様式であることから、これを参考とすることを決定した。

各用語に対する説明の詳細さについては、基本的には1～2行程度が最適、と結論付けた。例えば、下記のような記載とする；

物理検層＝坑井掘削時に、ワイアラインによって各種のセンサーや測定器を坑内に降下させ、掘削された地層と地層流体に関する各種データを取得する調査方法。

しかしながら、CO₂地中貯留技術にとってカギとなるような技術用語、関係機関など、少し詳細な説明を必要とする用語は例外として5行前後まで可とし、理解度を高めることを優先して作成することにした。例えば、トラッピング、leak、UIC-Class VI、EU-CCS指令、IPCC、などが例外の対象になる。

⑤ サイト閉鎖後管理について

第1章の基本計画から第4章の実施計画までのドラフト作成時には、圧入操業が終了して坑井を封鎖し、サイトを閉鎖した後の管理についてはまだ議論が少なかったが、近年、サイト閉鎖後の責任の移譲をも含めて、閉鎖後の管理計画が議論されている。管理対象期間を50年間とする例もあれば、特に年数を定めていない例もある。サイト閉鎖後の管理は、事業コストに大きく影響することも懸念され、モニタリングのみならず異常時の対応の予算もどのように確保するか、責任はどの段階で、事業者から国（連邦、州など）へ移譲するのか、などの検討を行うべきと考える。

(2) 第2章サイト選定・第3章特性評価

① 海域の貯留層について

現在、経済産業省・環境省が合同事業として「二酸化炭素貯留適地調査事業」（以後、適地調査と称す）を実施し、圧入中の苫小牧実証試験以後に対象となる貯留適地を選定している。この適地調査では、平成25年度に環境省が抽出した海域と経済産業省が抽出した海域を合わせた10海域において貯留層の評価が実施されている。この10海域を対象として2次元弾性波探査、3次元弾性波探査により絞り込みを実施し、有望サイト3海域で総合評価を実施する予定となっている。海外でも、メキシコ湾、ノルウエー沖などで海底下貯留層へのCO₂貯留が検討されていることから、この事例集のサイト選定においても、海域貯留について言及しておく必要があると考える。

② 地質モデルとシミュレーション

最近、世界各地で海底下CO₂地中貯留のための評価が実施、公表されている。地質モデルを構築し、シミュレーションによる動的貯留量を評価した例も多く、それらのうちのいくつかを例として、北海、メキシコ湾等の事例を追加で紹介する。

4.3.3 整合性分析結果とりまとめ

技術事例集は前述の通り、日本のCCS関連技術力の海外への発信・展開・普及の支援を目的の一つとしていることもあり、現在、作業が進められている、CCS技術の国際標準化との整合を取る事が求められる。このCCS技術の国際標準化は、国際標準化機構（ISO）の下に2011年8月に設置されたISO/TC265と呼ばれる専門委員会（Technical Committee）によって行われている。具体的な標準化作業は、回収、輸送、貯留、Q&V（定量化と検証）、クロスカッティングイシュー、EORの6つのワーキンググループによって進められている。

貯留WG（WG3）では、陸域と海域貯留の国際規格を担当し、国際規格原案（DIS）・最終国際規格案（FDIS）を経て、2017年10月にISO27914（Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Geological storage）を発行した。

ISO27914では、CO₂の商業的な安全で長期的な封じ込めを環境、天然資源、人間の健康に対するリスクを最小化する形で推進するための要求事項や提言を定めているが、対象として、貯蔵タンク、昇圧設備、圧入設備、モニタリング機械装置などの地上設備は含まれていない。また、圧入操業終了に伴い圧入井を封鎖し、サイト閉鎖した後の閉鎖後管理や、化石燃料の増進回収に伴うCO₂地中貯留は対象外となっている。そこで、このISO27914での不足部分を補完し、将来の改訂に貢献することを目的として、貯留WGとEORWGが協力してテクニカルレポートの発行作業が進められている。このレポートの構成は、スコープ、前書き、用語と定義、貯留オペレーションの概要、設備（坑井以外の設備、坑井設備）、CO₂圧入操業、モニタリング、操業終了（閉鎖後管理を含む）、石油ガスリザーバーへのCO₂圧入との項に整理して作り上げることが検討されている。今後のどのような内容が記載されるか、情報を入手し、事例集との整合性について、引き続き検討していく予定である。

表4.3.3-1 CCS技術事例集とCCSガイドライン等と国際規格原案の対応

Stage	I				II		III			
Phase	1	2	3	4	5	6	7	8		
CCS技術事例集、RITE	基本計画	サイト選定	サイト特性評価	実施計画	設計・建設	操業・管理	閉鎖	閉鎖後管理	責任移譲	移譲後
DOE/NETL	プロジェクト分析	スクリーニング サイト選定 初期評価	サイト 特性評価	許可申請	(設計・建設)	操業・管理	圧入終了	圧入後 サイト管理	閉鎖	閉鎖後 スチュワード シップ
	-	0.5~1年	3年強	2年強	-	30~50年		10~50年後		
EPA	プロジェクト計画		サイト 特性評価	許可申請	坑井掘削・ 施設設計/ 建設	操業	圧入終了	圧入後 サイト管理	閉鎖	閉鎖後 スチュワード シップ
EU	-	評価	特性解析	-	開発	操業	閉鎖	閉鎖後管理	責任移譲	移譲後
	-	0.5~2年	2~11年	-	1~3年	5~50年		~20年		
DNV	-	スクリーニング	評価	許可申請	設計/建設	操業	圧入終了		閉鎖	
ISO(Under development)	Clause1 Scope Clause2 Reference publications Clause3 Definitions Clause4 Management systems	Clause5 Site screening, selection, characterization			Clause7 Well infrastructure development	Clause8 CO2 injection operations	Clause10 Closure			
	Clause6 Risk assessment Clause9 Monitoring and Validation									

※1 プロジェクトの管理のほか、P0 / PA、文書管理等を含む。

4.3.4 まとめ

CCSの事業化促進に向けて、CCS事業の基本計画から閉鎖後の管理までを網羅する「CCS技術事例集」を作成するため、国内外CCS事業者・研究機関との連携を通じた海外及び苫小牧実証試験サイトの情報収集を行い、設計建設、サイト閉鎖を中心とした技術事例集ドラフトを作成した。また、これまでの課題であった苫小牧実証試験サイトの情報を入手・整理し、昨年度までに作成済みの技術事例集へ反映させた。

また、我が国においては、CCS関連法規が未整備であり、日本のCCS技術の海外展開もにらみ、CCSの国際標準化機構（ISO）の技術委員会（TC265）での議論との整合性を確保することも必要であり、国際標準化の動向調査およびCCS技術事例集とISO内容の整合性検討を実施した。

4.4 CCSの広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討

CCSの実用化には、国民全体や地元住民の理解が不可欠である。そこでワークショップ等の開催を通して、CCSの理解促進を図るとともに、参加者からのフィードバックや海外専門家との情報交換を通して、社会受容性向上策の検討や研究協力テーマの抽出を行う。また、国内外のCCSのPO（Public Outreach）や教育活動を調査・分析した上で、日本の社会特性に適したCCSの社会受容性向上の考え方や有効な手法を策定し、CCS技術事例集に反映させる。また、日本のCCS技術の普及展開のため、海外研究者等への紹介と研究協力等の条件整備を図る。

4.4.1 CCSテクニカルワークショップおよびCCSフォーラム

(1) テクニカルワークショップ

① 開催概要

二酸化炭素地中貯留技術研究組合では、経済産業省とNEDOの共催により「大規模CO₂地中貯留の事業化を見据えたリスク評価について」をテーマとするCCSテクニカルワークショップ2019を開催した。



図 4.4.1-1 ワークショップ風景

<日時> 2019年1月16日（水） 10:00～17:15

<会場> 虎ノ門ヒルズフォーラム 5Fメインホール（東京都港区虎ノ門 1-23-3）

<参加者数> 362名（省庁、企業、大学、研究機関など）

<プログラム> (敬称略)

モデレーター：松岡俊文（（公財）深田地質研究所 理事長、京都大学 名誉教授）

10:00 開会挨拶 山地憲治（二酸化炭素地中貯留技術研究組合 理事長、（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）理事・研究所長）

10:05 共催者挨拶 川口征洋（経済産業省 地球環境連携室長）

10:10 共催者挨拶 田中秀明（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部長）

10:15 趣旨説明 松岡俊文（（公財）深田地質研究所 理事長、京都大学 名誉教授）

10:20 CCS事業における法規制への対応

Tim Dixon, Programme Manager, IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG)

11:20 CCS 事業における海域 CO₂ 漏出のリスク評価について

Katherine Romanak, Research Scientist, The University of Texas at Austin (米国)

12:20 ー 昼食休憩 & ポスターセッション ー

13:30 米国の CCUS 事業におけるリスクマネジメントについて

Joshua White, Group Leader, Atmospheric, Earth and Energy Division, Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL) (米国)

14:30 大規模 CO₂ 貯留における地震観測およびリスク評価の事例紹介

Bettina Goertz-Allmann, Senior Research Geophysicist, NORISAR (ノルウェー)

15:30 ー コーヒーブレイク & ポスターセッション ー

16:00 二酸化炭素地中貯留技術研究組合の研究開発状況

薛自求 (二酸化炭素地中貯留技術研究組合 技術部長、RITE CO₂ 貯留研究グループ グループリーダー)

17:00 総括 松岡俊文 ((公財) 深田地質研究所 理事長、京都大学 名誉教授)

17:15 閉会挨拶 高橋明久 (二酸化炭素地中貯留技術研究組合 理事、JAPEX 執行役員 環境・新技術事業本部 本部長)

② 講演概要

講演に先立ち、モデレーターの京都大学松岡名誉教授から、本ワークショップは地球温暖化対策として有力な CCS について知識共有を図ることが狙いであり、CCS 普及の条件である法規制とリスク評価について紹介する旨説明があった。特に、CO₂ 圧入の事業推進上のリスク評価と、CO₂ を地中貯留する際の適切な管理技術が重要であり、講演のなかで、それらの具体的な事例が報告されることが紹介された。

最初に、IEAGHG の Tim Dixon プログラムマネージャーより、「CCS 事業における法規制への対応」について紹介がなされた。まず、欧州を中心とした CCS の法整備の経緯や現状について説明し、その後、米国 EPA の CCS に係る規制や ISO/TC265 の状況など世界全体の状況が報告された。さらに、各国の CCS のプロジェクトの実施概要と法規制の対応状況が紹介され、最後に、IPCC のレポートで 1.5°Cシナリオを満たすには、CCS の実現が必要不可欠である旨が強調された。

次に、テキサス大学オースティン校の Katherine Romanak 研究員から、「CCS 事業における CO₂ 漏出のリスク評価について」紹介がなされた。最初にリスク評価を生かしたモニタリングを行う ALPMI (Assessment of Low Probability Material Impact) 法について概説された。次に CO₂ の自然増加のため、ベースラインに基づくモニタリングでは擬陽性 (自然変動を漏出と判定) が生じやすく、貯留事業にとって最大のリスクは漏出ではな

く、擬陽性による圧入停止や社会受容性の低下であると指摘された。最後に、プロセスベース法で陸域モニタリングにおいてはベースラインに基づかずに異常を判定できることが紹介された。

米国 LLNL の Joshua White グループリーダーからは、「米国の CCUS 事業におけるリスクマネジメントについて」紹介があった。まず、米国の CCS 規制として、Class-II の廃水処理と CO₂-EOR, Class-VI の長期 CO₂ 貯留の説明があった。次に CCS 市場リスクとして経済性と CO₂ 供給源の確保、技術リスクとして坑井漏洩、断層漏洩、圧入性の低下、貯留量不足、微小振動、長期モニタリングコストがある旨の説明があり、Salt Creek の坑井漏洩、Snohvit での貯留量および圧入性に関するリスク、米国における微小振動の発生状況の報告があった。最後に、地球環境対策として CCS を政策的に位置づけ、長期計画を策定・推進し、社会受容性を高めていくことが重要である旨の提言がなされた。

NORSAR (ノルウェー) の Bettina Goertz-Allmann 主任研究員からは、「大規模 CO₂ 貯留における地震観測およびリスク評価の事例紹介」と題して、アルジェリア・In-Salah プロジェクトおよび米国イリノイ州 Decatur プロジェクトにおける CO₂ 圧入に伴う誘発微小振動モニタリングに関する報告がなされた。震源位置の推定に加えて、震源特性を明らかにすることで、CO₂ の圧入によって誘発される微小振動の発生メカニズムに関する解釈と、誘発振動のデータが CO₂ 圧入時の貯留層挙動や遮蔽層の安定性評価に寄与することが示された。

本技術研究組合の薛技術部長からは、NEDO 事業「安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術の研究開発」の背景、重要性についての説明があり、その代表的な研究成果として、「マイクロバブル CO₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上」、「圧入安全管理システムの開発」、および「CO₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築」に関する進捗状況の紹介がなされた。最後に、社会受容性の獲得、法体系の検討、人材育成など、技術開発以外の取り組みも重要である旨の説明がなされた。

最後にモデレーターの松岡名誉教授から、本日の講演を通して、CCS の事業推進や安全面のリスクについて、参加者が幅広い視点で考えられるようになり、関連する技術課題がまだまだ多いことへの理解が進んだのではないかと期待の表明があった。また、CCS の事業推進と法規制の調整・整合は早期に実施すべき点、サイト固有のリスク評価やモニタリング技術の開発が重要である点、さらには事業保険や PO 活動などの非技術面の研究も今後は必要となる点を強調し、本ワークショップの総括とした。

③ ポスターセッション

以下の 8 件の研究成果についてポスターセッションの場で発表を行い、参加者との間で意見交換、質疑応答を行った。

- 1) 音波検層波形振幅データを用いた CO₂ 移行モニタリング
- 2) Track CO₂ plume migration by distributed fiber optical strain sensing (DFOSS).

- 3) Gas-tight pH measurements to assess an effect of CO₂ on groundwater.
- 4) A preliminary experiment on the detection of bubbles in the sea with side-scan sonar.
- 5) Gravity monitoring with a superconducting gravimeter at the Tomakomai CO₂ storage site.
- 6) 大深度・高傾斜井における地層監視技術としての DAS-VSP 技術開発
- 7) CO₂ 地中貯留における坑井配置問題への最適化ツールの適用とその高速化
- 8) マイクロバブル CO₂ 圧入技術の適用による貯留効率向上 ～ フィールド実証試験へ向けて ～

④ アンケートの実施と分析

ワークショップ参加者に対して、毎年以下のアンケートを実施し、参加者の理解度、CCS に対する意見・コメントなどを収集している。

- Q1. 「CCS の関心分野」
- Q2. 「CCS 実施の必要性」
- Q3. 「日本国内で CCS の実用化を実現するための取組み」
- Q4. 「今回のワークショップテーマへの理解度」
- Q5. 「今回のプログラムで特に関心のある講演」
- Q6. 「今回のポスターセッションで特に関心のあったテーマ」
- Q7. 「次回の CCS ワークショップの開催時期」
- Q8. 「次回の CCS ワークショップの開催時間」
- Q9. 「意見、感想、開催テーマの希望」
- Q10. 「技術事例集への反映を希望する項目」
- Q11. 「回答者の所属機関が保有・開発中の CCS 関連技術・サービス」
- Q12. 「「二酸化炭素地中貯留技術研究組合」の活動等に対する意見

アンケート項目のうち、Q2. 「CCS 実施の必要性」と Q4. 「今回のワークショップテーマへの理解度」の結果を以下に示す。



図 4.4.1-2 アンケート結果：テーマへの理解度と CCS の必要性

また、アンケート Q9.「意見、感想、開催テーマの希望」などについて、参加者から多くのコメントが得られた。以下はその主なものである。

- ・世界の CCS 関連の法規制やインセンティブについて知りたい。
- ・CCS 導入に当たって、その具体的なコスト負担、関連業界についてそのアクションプログラムについて紹介して欲しい。
- ・日本国内での法規制などの進捗状況や展望について知りたい。
- ・中国の動向について（サイト選定、技術動向、法制度他）について知りたい。
- ・社会受容性の構築、EOR（中国）の動向について知りたい。
- ・社会受容性を高めるための取り組み（海外事例も含む）を紹介して欲しい。
- ・大変参考になる講演が多かった。想定よりも多く地震が起こっている事がわかった。
- ・リスク管理の考え方、取り組みを丁寧に色々な観点で講演いただいた。良い企画であった。
- ・大変興味深かった。特に保険など事業化に向けた法率整備が重要と考える。

これらのアンケート結果を参照し、参加者の CCS の理解向上策、社会受容性向上策の検討を行い、次回以降のワークショップのテーマの設定や運用に反映していく。アンケート Q2、Q4 の結果から判断して、CCS の実用化に対する期待は高く、またワークショップを通して CCS の理解度向上につながっており、この社会受容性向上策が有効に機能していると評価できる。

(2) 海外専門家との意見交換：社会受容性向上策、研究協力テーマ候補等

テクニカルワークショップの翌日、海外招待講演者と技術研究組合研究員との間で、社会受容性向上策や研究協力テーマ候補について意見交換を行った。以下、その概要である。

① 社会受容性向上策

- ・誘発振動のリスク評価、CO₂漏洩リスク評価など、CCS のリスクに関連する研究成果を積極的に公開すべきである。
- ・漏洩リスクの場合、「漏洩リスクは（わずかだが）あります」とだけ答えるよりも、なぜその貯留サイトを選定し、モニタリングをどのように行っているかを適切に説明すべきである。
- ・地元住民に現場を実際に見ていただくことが重要である。CCS は迷惑施設ではなく、最先端の科学技術の検証をしているという実感を得ていただくことが重要である。
- ・市民は必ずしも合理的な思考をすることは限らない。一言で言えば「信頼」を得ることが重要である。

② 研究協力テーマ候補

- ・日本は自然地震が多く、米国では誘発振動が多い。日米が協力すれば、自然地震と誘発

振動の両方のデータセットがそろい、有意義である。

- ・海域 CO₂ 貯留での漏洩検知について、日米欧協力すればよい知見が得られる。
海中の CO₂ 濃度の自然変動に関するベースラインデータの取得期間・方法、サイドスキ
ャンソナーなどによる物理的なモニタリング方法、CO₂ 漏洩懸念時の対応方法など、情
報共有や協力が可能な研究課題は多い。

(3) CCS フォーラムの開催実績

CCS の専門家によるフォーラムを平成 29 年度の第 1 回に引き続き今年度は 4 回開催し、
CCS の安全性、経済性に係る情報交流、意見交換を実施し、CCS の社会受容性向上に係
る要件等について情報共有を図った。以下、その活動概要である。

① 第 2 回 CCS フォーラム

<日時> 2018 年 5 月 10 日 (木) 13:30~15:30

<会場> Learning Square 新橋 セミナールーム 4-AB

(東京都港区新橋 4-21-3 新橋東急ビル 4F)

<参加者数> 43 名 (委員並びにオブザーバーなど)

<プログラム>

- ・日本における CO₂ 分離・回収～輸送のコスト試算 (早稲田大学教授 中垣隆雄)
- ・CO₂ 分離回収技術の開発 (化学吸収法、固体吸収法、膜分離法) (RITE 化学研究グル
ープ主任研究員 山田秀尚)
- ・CO₂ 輸送システムの概念設計 (RITE 企画調査グループ主幹 清水淳一)

<概要>

- ・CO₂ 分離・回収方法として、CANSOLV 方式を適用した 550MW 超臨界微粉炭火力発
電所の Avoided コストは 6,866 円/t-CO₂ と試算され、CO₂ を 500km 船輸送する場合
の輸送コストは 5,710 円/t-CO₂ となり、液化の電力コストが 40% を占める。
- ・NEDO ゼロエミ FS 結果 (2015 年)、7,300 (新設石炭火力) ~12,400 円/t-CO₂ を見直
し、併せて船輸送価格も見直しを行った。その結果、2017 年ベースで CO₂ の船輸送
コストは 15~25% 低減した。また、パイプライン輸送は距離に応じてコストが増加す
るが、船輸送の場合、距離によるコストの増加はわずかであった。

② 第 3 回 CCS フォーラム

<日時> 2019 年 7 月 27 日 (金) 13:30~15:30

<会場> AP 新橋虎ノ門 B ルーム

港区西新橋 1-6-15NS 虎ノ門ビル (日本酒造虎ノ門ビル)

<参加者数> 43 名 (委員並びにオブザーバーなど)

<プログラム>

- ・福米沢フラクチャリングプロジェクトについて (JAPEX 技術フェロー 横井悟、(株))

物理計測コンサルタント 代表取締役社長 手塚和彦)

<概要>

- ・国内では前例のなかった水平井でのフラクチャによるシェールオイル・ガスを生産する福米沢プロジェクトのため、鉱山保安法下でのリスクアセスメントを実施し、結果として、作業中断となる事象は起きなかった。CCUS に対しても鉱山保安法をベースとした実用的な規制の方が望ましいとのコメントがあった。
- ・微小振動観測には、エンジニアリング目的と、環境対策目的の 2 つの目的があり、本プロジェクトでは同一のモニタリングシステムで、両方の機能を持たせているが、場合によっては、エンジニアリングとしての微小振動モニタリングと、振動誘発リスク低減のための環境モニタリングは分けて考えることも必要であるとのコメントがあった。

③ 第 4 回 CCS フォーラム

<日時> 2019 年 10 月 12 日 (金) 13:30~15:30

<会場> AP 虎ノ門 A ルーム

港区西新橋 1-6-15NS 虎ノ門ビル (日本酒造虎ノ門ビル)

<参加者数> 37 名 (委員並びにオブザーバーなど)

<プログラム>

- ・第 5 次エネルギー基本計画と CCS (RITE システム研究グループ グループリーダー 秋元圭吾)
- ・RITE エネルギー・温暖化対策評価モデルの概要と各種シナリオ下での CCS の経済性評価 (RITE システム研究グループ主任研究員 佐野史典)

<概要>

- ・エネルギー多消費産業でカーボンリーケージが起きやすいということを考えると、50 ドル/tCO₂ にスレッシュホールドのような感じがあり、CCS も 50 ドル/tCO₂ 位に入ってくると政策的余地が出てくるのではないかという印象。
- ・CCS は、2°C 目標のような大幅な排出削減を達成するために、費用効率的で重要な対策技術の 1 つとして評価されるが、現実には、CO₂ 限界削減費用が 100\$/tCO₂ を超えるような政策を継続して取ることは困難であるため、大規模展開のためには R&D による一層のコスト低減が重要である。

④ 第 5 回 CCS フォーラム

<日時> 2019 年 12 月 25 日 (火) 13:30~15:30

<会場> AP 虎ノ門 A ルーム

港区西新橋 1-6-15NS 虎ノ門ビル (日本酒造虎ノ門ビル)

<参加者数> 40 名 (委員並びにオブザーバーなど)

<プログラム>

- ・英国の CCUS 普及戦略（案）（RITE CO₂ 貯留研究グループ主任研究員 田中良三）
- ・J-POWER の CCS 技術開発への取組状況（J-POWER 開発計画部 部長 野口嘉一）

<概要>

- ・英国タスクフォースが CCUS 発展支援のための戦略計画の報告書を公表。報告書から得られる日本への示唆として、苫小牧実証、適地調査を最大限に活用したポスト苫小牧の展開や苫小牧の貯留ハブ化の検討の必要性、日本に適したビジネスモデル・リスク分担や国内での CCS コミュニティと金融セクターのコミュニケーションの必要性等。
- ・日本では、輸送は貯留サイトに柔軟に対応できる船舶輸送が適しており、船舶或いは浮体設備から CO₂ を地層に注入する技術実証が必要であるとともに、貯留が課題で、今後国内で CCS の展開を図っていくために、適地調査により選定された海域サイトでの大規模実証が必要であるとした。

4.4.2 一般向け PO 教材（H30 年度版）の作成

CCS を普及させていくには、地元関係者だけではなく、国民全体の CCS の認知度向上と理解促進が欠かせない。CCS の認知向上・理解促進のためには、教育や一般社会人向けセミナーなどの場で使える標準的な PO 教材があることが望ましい。PO 教材の対象は、あらゆる国民層であるが、対象者の理解レベルに合った内容にする必要があり、昨年度はまず小中高生を対象として、試作、試用、評価を行った。今年度は昨年度の成果をベースにしつつ、対象を一般の大人として、PO 教材の開発を行った。

日本国民全体の現状を考えた場合、再生可能エネルギーが地球温暖化の対策技術として広く認識されているものの、CCS についてはその必要性への理解度は必ずしも高くない。そこで、ここで作成する PO 教材の内容は、地球温暖化対策として再生可能エネルギーだけではカバーしきれない部分があることを示し、そのための対策技術として CCS が必要であることの説明に力点を置くとともに、CCS の技術や課題、取り組みについて分かりやすく解説するものとした。

具体的な教材の構成は、次のとおりとした。

- I. CCS の必要性について
 - I-1 地球温暖化の概要
 - I-2 温暖化対策と CCS の必要性
- II. CCS の技術について
 - II-1 CCS 技術の概要
 - II-2 CCS の現状
 - II-3 CCS の課題と取り組み

各項目内の説明内容を表 4.4.2-1 に示す。

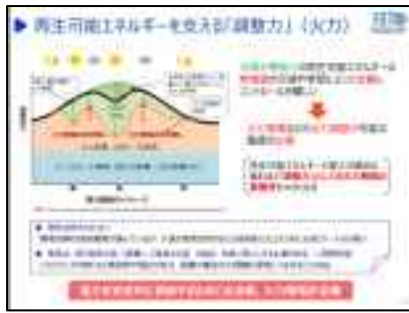
教材はセミナーや配布資料としても活用できるパワーポイントのスライドとし、CO₂貯留のメカニズムについて理解を助けるために、簡単な実験デモを合わせて行う形式としている。教材のイメージを図 4.4.2-1 に示す。

CCS の必要性については、CO₂の大規模排出源である電力部門と産業部門のそれぞれにおいてその必要性に言及している。電力部門では、温暖化の主要な対策として再生可能エネルギーの導入を増やした場合、その出力不安定性をカバーする役割を担うものとして火力発電が必要であり、そこからの CO₂発生があること、産業部門では、鉄鋼やセメント等の生産プロセスにおいて、原料に由来する CO₂発生があり、これらの CO₂を処理する技術として CCS が必要となることを説明している。

CCS 技術そのものや課題、取り組みについての説明としては、分離回収・貯留技術の概要に加えて、実際に CCS を推進するために必要となるモニタリングなどの安全管理技術の説明や、貯留ポテンシャルやコストなど推進の課題となる事項についても解説を加えることとした。

表 4.4.2-1 教材の説明内容

説明事項			
I. CCS の 必 要 性 に つ い て	I-1 地球温暖化の概要 <ul style="list-style-type: none"> ・温暖化の状況（世界の平均気温の推移） ・長期の気温変動と現在の温暖化の違い ・1次エネルギー構成と化石燃料起源CO₂の増加 ・温室効果のメカニズム 	II. CCS の 技 術 に つ い て	II-1 CCS技術の概要 <ul style="list-style-type: none"> ・CCSの全体概要 ・分離回収技術の概要 ・貯留技術の概要（地層構造） <ul style="list-style-type: none"> - 【実験】地層コアサンプルを使ったデモ ・ガスの地中貯蔵・圧入技術の実績
	I-2 温暖化対策とCCSの必要性 <ul style="list-style-type: none"> ・今後の気温上昇の見通し（IPCCのデータ） ・国際的な取り組み（COP） ・日本の現状と排出削減目標 ・発電部門の対策 ・再生可能エネルギーと火力発電の調整力 ・CCSの必要性 ・温暖化対策技術の構成（IEAのシナリオ） 		II-2 CCSの現状 <ul style="list-style-type: none"> ・世界のCCSプロジェクト ・世界の貯留ポテンシャル ・日本のCCSプロジェクト ・CCSの安全な実施のための技術 ・長岡のモニタリングデータ ・貯留時のCO₂の形態
			II-3 CCSの課題と取り組み <ul style="list-style-type: none"> ・日本の貯留ポテンシャル ・CCSのコスト ・我が国のCCSに係る取り組み ・主要国の戦略



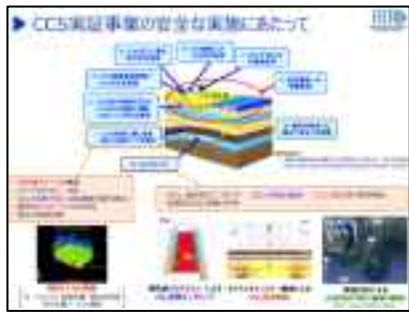
火力発電の重要性



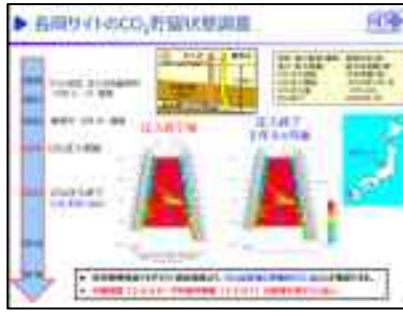
CCS の必要性



コアサンプルを用いたデモ
～地層の浸透性の比較～



CCS の安全管理技術



長岡サイトにおける調査

図 4.4.2-1 作成した教材のスライド（抜粋）とデモ実験

開発した教材を評価するため、試験的に CCS 教育（セミナー）を行った。



図 4.4.2-2 教材を用いた試験的なセミナー

セミナーの終了後に行ったアンケートでは、セミナーで用いたスライドおよびデモ実験について全体の 9 割以上の参加者が「わかり易かった」と回答し、また、CCS 技術の理解度については全員から「よくわかった」または「概ねわかった」との回答が得られた。加えて、CCS の普及についての意見も「積極的に普及させるべき」、「ある程度普及させるべき」を合わせると、9 割以上の参加者が「普及させるべき」と回答し、今回開発した教材が、CCS の技術概要とその必要性について理解を得る要件を備えた内容となっているものと考えられた。

ただし、セミナーは 3 回行ったが、各回の CCS の認知度（「よく知っていた」と「ある程度知っていた」の合計）を事前に調べたところ 1 回目：57%、2 回目：75%、3 回目：6%と 1、2 回目と 3 回目とでかなりの違いが見られ、認知度の低かった 3 回目の参加者が

らは、教材に対して「単語が耳慣れないものが多く、スケールの想像が難しい」、「前提となる基礎知識が自身に不足しているためか、情報量に圧倒された」等の意見も聞かれた。CCSを初めて聞く人たちにとっては、一応の理解はできる内容ではあったものの、やや専門的な説明もあり、消化しきれない部分が残った可能性がある。そのほか、各回のセミナー後に CCS に対する更なる疑問や知りたいことを尋ねたところ、1 回目の参加者からは、地球温暖化・CO₂削減、CCS 技術の概要に関する質問が多く、2 回目の参加者からは、コストなどの CCS の実用化に向けた課題に関する質問が多かった。1 回目の参加者は、大学の化学系研究室の学生であり、2 回目の参加者は、ジャンルは様々だが研究組織の役職員であったが、このように対象者によって、持っている知識のレベルや疑問を持つポイントが異なる傾向が認められた。

今年度の教材開発では、前述のアンケート結果の通り、CCS について一定の理解を得るための要件を備えた教材を開発することができた。一方で、対象者に合わせて、説明の力点を変えたり、補足や逆に簡素化などの工夫をすることも必要と考えられ、次年度以降、更に対象を広げて CCS 教育を行い、詳細な意見を収集、分析して、対象者別に適切な教材となるように改良を図って行くこととする。

4.4.3 日本版 P0 マニュアルの整備

将来、日本で CCS を実用化規模で展開していく場合、CO₂ を貯留する地元地域の方々の理解を得ることが必須である。CCS 事業者、とりわけ貯留事業者が、その対応として参照することを想定して PO (Public Outreach) マニュアルを作成する。PO マニュアル作成に当たっては、過去の事例を参照し、実例に基づく情報やノウハウを組み入れる必要があるが、我が国には CCS の先行事例が少ないのが実情である。一方、世界では CO₂ 貯留の実証試験数が増加しつつあり、周辺住民の理解促進や温暖化対策としての認知度の向上に向け社会科学的な研究や調査も進んでいる。

そこで、我が国に適した PO マニュアルの作成に向け、まずは世界の先進事例を調査し、その内容を分析した。その結果、米国エネルギー省 (DOE) が実施している地域炭素隔離パートナーシップ (RCSP) プログラムから得た成果や教訓を、DOE 傘下の国立エネルギー技術研究所 (NETL) が事業者向けにまとめたベストプラクティスマニュアル (以下、BPM) は、事業者の立場に立った PO 活動の心構えを整理しており、日本版 PO マニュアルの骨子として参照することとした。骨子には表 4.4.3-1 に示す内容を設定した。

表 4.4.3-1 日本版 P0 マニュアルの骨子

目的	地中貯留事業の円滑な導入と透明性の高い運営に資する
対象	プロジェクト管理者と P0 チーム
構成	本文 (P0 活動指針) と添付資料 (共通内容や具体事例)
使用イメージ	事業者が候補地を想定しながら参照する

このように、PO マニュアルは、CO₂ 地中貯留事業を実施する場所および周辺地域の地元住民や自治体などの関係者に事業内容を伝えたり、双方向コミュニケーションを通して透明性の高い事業の運営を行ったりするにあたっての基本的な考え方や実施方法について取りまとめるものとする。海外事例の中には、CCS の法整備への係わりも PO 活動の対象としているものもあったが、法整備は事業者の本来業務には含まれないので、ここでは対象外とした。

さらに、海外プロジェクトや苫小牧実証試験の事例を比較検討するうちに、従来研究では PO 活動の概念的な側面が強調されていたが、より実践的な PO マニュアルにするためには、CO₂ 地中貯留事業の時系列展開に合わせた具体的な構成・内容とすることが重要と考えられた。CCS 事業展開と PO 活動との関係性を鑑みると、PO 活動は次の 3 段階に大きく分けられる（図 4.4.3-1）。

- A. CO₂ 圧入に至るまでの PO 活動：圧入許可が得られるまで。地元との友好的な関係作りが大部分を占める。貯留地点が複数候補ある場合には、候補地自治体への事前の打診が重要となる。候補地が絞られれば、自治体と周辺住民、近隣事業者が重要となる。
- B. CO₂ 圧入・モニタリング中：圧入を開始してからは、圧入量やモニタリング結果をホームページで見える化することにより、事業の透明性を高める。
- C. 施設の撤去とその後：施設を撤去すると、事業者と地元との物理的な距離が遠くなる。心理的な距離が遠くならないよう、貯留された CO₂ の管理者の明確化は欠かせない。

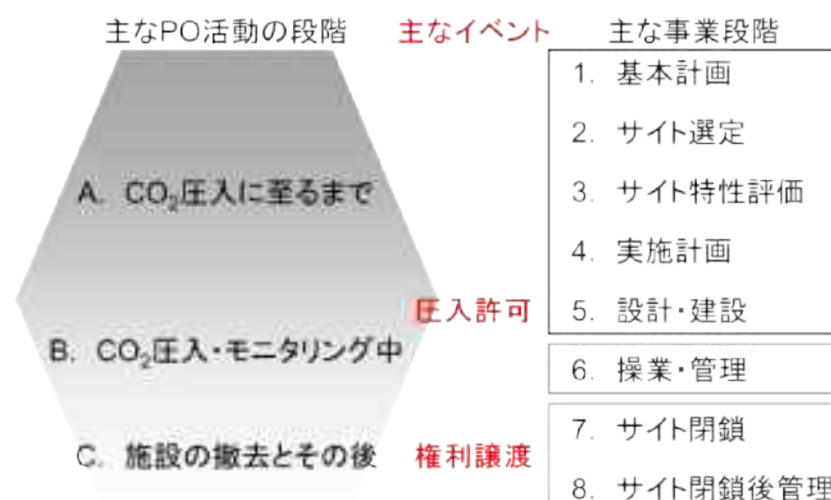


図 4.4.3-1 PO 活動と CCS 技術事例集による事業段階の関係

また、我が国で CCS を実施する場合は、沿岸域の海底下地中貯留が有望と考えられているので、湾内や一般海域での漁業活動や船舶航行への配慮が必要である。検討の結果、次の 3 点が日本版 PO マニュアル本文の基本構成の要件として整理された（表 4.4.3-2）。

表 4.4.3-2 日本版 PO マニュアルの基本構成

要件	概要
① CCS プロジェクトの進行に応じた PO の一連の活動が網羅されている。	PO 経験者も漏れ防止や活動方針の整理のためのチェックリストとして活用する。
② 対象とすべき関係者の特徴が整理されている。	関係者の抽出についてはリスクコミュニケーションやステークホルダー分析などの基礎理論を考慮して共通事項を添付資料にまとめる。地元固有の要素が多いため対象範囲を広げすぎず、貯留対象地域に特化する。
③ 漁協対応など、個別・実践的な対応方法を参照できる。	地元説明事例などを添付資料にまとめる。例えば、OBC 観測や海洋調査の実例など。

以上を踏まえ、日本版 PO マニュアルの目次案を表 4.4.3-3 に示す。

表 4.4.3-3 日本版 PO マニュアル目次案

はじめに
1. 地中貯留事業の全体像と PO 活動
1.1. PO 活動の必要性
1.2. 組織的な PO 活動の実施体制作り
1.3. PO 活動計画概要の策定
2. サイト選定に係る PO 活動
2.1. 地中貯留事業の紹介
2.2. 貯留候補地の抱える課題や状況の把握
2.3. コミュニケーションの対象・方法の検討
2.4. 具体的な PO 活動計画の策定と実施
3. 立地（サイト特性評価、実施計画、設計・建設）に係る PO 活動
3.1. 地中貯留事業の紹介
3.2. 貯留地周辺の抱える課題や状況の把握
3.3. コミュニケーションの対象・方法の検討
3.4. 具体的な PO 活動計画の策定と実施
4. CO ₂ 圧入およびモニタリングに係る PO 活動
4.1. 事業に対する地元意識の経過観察と PO 活動内容の検証
4.2. CO ₂ 圧入量・圧入期間の情報提供
4.3. CO ₂ 監視計画とその結果の情報提供
4.4. 問い合わせ窓口の一元化と対外周知
5. CO ₂ 圧入施設の撤去とその後の PO 活動
5.1. 施設閉鎖に係る地元説明
5.2. 貯留された CO ₂ の管理者の明確化
おわりに
添付資料
A1. 共通事例集（ステークホルダー分析、住民説明会、施設見学会、情報発信など）
A2. 具体事例集（OBC や海洋調査の事例など）

4.4.4 国際標準に準拠したリスクコミュニケーション手法の要件分析

(1) はじめに

CCS のリスクマネジメントにおいて、リスクコミュニケーションの必要性が認識されており、国際的にも検討が進んでいる。例えば CO₂ 地中貯留技術に関する国際標準技術委員会 (ISO/TC265) が制定した CCS に関する国際標準では、関係者とのリスクコミュニケーションの重要性が強調されている。そこで本項では、CCS に関連した事例等のリスクコミュニケーション手法も調査し、国際動向を踏まえた上での日本の CCS におけるリスクコミュニケーションの要件について検討した。

(2) CCS に関する国際標準の求めるリスクマネジメントとリスクコミュニケーション

CCS のリスクマネジメントに係る国際標準の関係を図 4.4.4-1 に示す。また、発行済の CCS 国際標準のリスクコミュニケーションについての要求事項を表 4.4.4-1 および表 4.4.4-2 に示す。

図 4.4.4-1 に示したように、CO₂ 地中貯留では ISO 27914 が規定するリスクマネジメントの要求事項を満足しつつ、ISO 31000 の示すリスクマネジメントのプロセスを実施することが求められている。また、CCS 事業全般については、ISO/TR 27919 を参考にして ISO 31000 のリスクマネジメントプロセスを実施する必要がある。なお、ISO/TR 27919 を基に技術仕様の開発が始まっており、出版後は ISO/TS 27924 が CCS 全般のリスクマネジメントの規範となる予定である。

リスクコミュニケーションは、図 4.4.4-1 に示した国際標準の中でリスクマネジメントのプロセスに内包される要素として位置付けられている。またリスクマネジメントのプロセスには事業者とステークホルダーとの良好な関係の形成も含まれる。その点については ISO 26000 の社会的責任に関する手引きの利用が推奨されている。

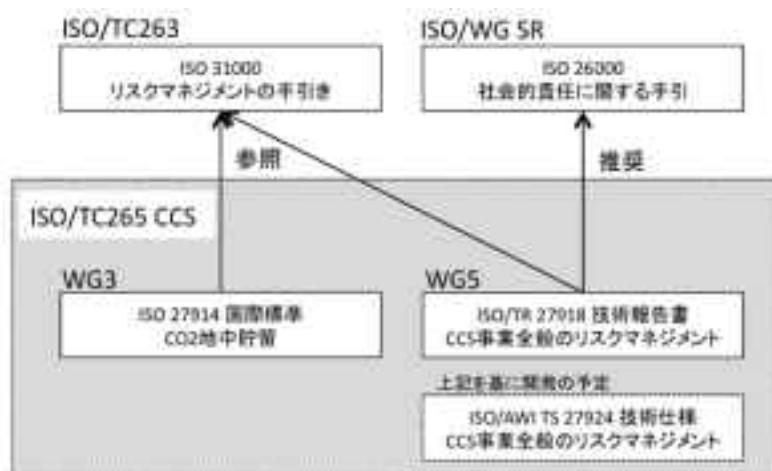


図 4.4.4-1 CCS のリスクマネジメントに関わる国際標準

表 4.4.4-1 ISO 27914 が CO₂ 地中貯留事業者に求めるコミュニケーションの概要

プロジェクトのマネジメント	<ul style="list-style-type: none"> ・ステークホルダーとの理解構築 ・公衆とのコミュニケーション ・プロジェクト内部コミュニケーション
リスクマネジメント	<p>【対象】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクトの内部および外部 <p>【考慮の範囲】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・認可申請や見直しの際の規制当局とのオープンで効果的な対話の促進 ・ステークホルダーや公衆とのオープンで効果的な対話の促進 ・貯留層の挙動が予測と乖離した場合の対応について、オープンで効果的な対話の促進
操業中のコミュニケーション	<p>【対象】</p> <p>CO₂地中貯留プロジェクト内部、（回収・輸送を含む）全 CCS プロジェクト内のオペレーター、規制当局、ステークホルダー、コントロールセンターの職員</p>

表 4.4.4-2 ISO 27918 の CCS 全般のリスクコミュニケーションの要約

リスク要因	エンゲージメント
理由	プロジェクトから影響を受けるかも知れないステークホルダーに対して、効果的なリスクコミュニケーションを行うことは、プロジェクトの成功のために極めて重大
推奨する対応	ISO 26000（2010）社会的責任に関する手引の活用
具体例	CO ₂ 輸送のためのパイプラインの敷設や運用に関するステークホルダーマネジメント

(3) CCS リスクコミュニケーションの要件

国際標準が求める CCS リスクコミュニケーションの要件とは、前述した国際標準のプロセスの実施である。それには、コミュニケーション相手の理解、CCS のフェーズ別のリスクシナリオの構築とそれに対応できるコミュニケーションの準備が必要となる。そのため、これまで相当の努力が払われ、CCS リスクコミュニケーションに関するベスト・プラクティス・ガイド（DOE/NETL，2017）、CCS のステークホルダー・エンゲージメント用マニュアル（Ashworth, 2011；Jammes, 2013）、CCS 教育ツール（Lucquiaud, 2018）などの成果が共有されてきた。

日本の CCS 実証事業には非常に良好なリスクコミュニケーションの実績がある。今後、国際標準に対応しうるリスクマネジメントシナリオを構築し、これまで国内で得られた知見を整理して日本の社会に適合するリスクコミュニケーションの手引きを形成すれば、今後より一層効果的に CCS 事業化を進められるものと考えられる。

4.4.5 研究成果海外展開時のライセンス契約枠組み研究

(1) はじめに

国際学会、テクニカルワークショップ他、海外研究員との交流を通して、技術研究組合の研究成果の紹介を進めてきており、高い注目を得るようになってきている。将来的には、研究成果の海外展開を通して我が国の CCS 技術の海外展開を図っていく計画である。

そこで、本項ではまず、技術研究組合の研究成果の普及活動実績を紹介し、特に具体的なビジネス展開の引き合いのあった事例について報告する。さらに、その事例について、どのように海外展開を行うべきか、具体的なビジネスモデルを検討する。

ビジネスモデルを具現化するには、相手国の技術ニーズに合っていることはもちろん、その国の制度や法律に即した取り決めを行う必要がある。その具体的手段となるのが、研究成果の国際ライセンス契約となるが、その基本的な要件・留意点をまず調査・分析する。さらには、研究成果の展開先として有望な中国を対象として、制度や法的な特徴を分析したうえで、ライセンス契約作成時の実務的な留意点を整理する。以上により、今後の研究成果展開の普及促進面での貢献を図ることとする。

(2) 海外への組合研究成果の普及展開活動実績

今年度、技術研究組合として、研究成果の海外への普及活動を積極的に行った。特に、学会参加や技術交流のための海外出張時には、各担当者の専門分野を中心に、研究成果の紹介・PRに努めた。以下は、海外出張の実績である。

- ・海城 CO₂ 貯留ワークショップ（ノルウェー, 2018 年 5 月）
 - ：CO₂ 貯留の海城モニタリングと漏出検出に関する発表と情報収集
- ・中国石油との CCS-EOR 打合せ（中国, 2018 年 5 月）
 - ：中国でのマイクロバブル CO₂-EOR での普及展開に関する検討
- ・IEAGHG CCS 夏季スクール（ノルウェー, 2018 年 6 月）
 - ：坑井健全性、地層安定性評価に関する情報収集・意見交換
- ・IEAGHG モデリングとリスクマネジメントネットワーク会議（米国, 2018 年 6 月）
 - ：CO₂ 圧入の安全管理に関する地質モデリング技術とリスクマネジメント手法に関する情報収集・意見交換
- ・CO₂ 地中貯留技術レクチャーコース（オーストラリア, 2018 年 6 月）
 - ：CCUS ワークフローに関する情報収集・意見交換
- ・米国 CCS プロジェクトのレビュー会議（DOE/NETL 主催）（米国, 2018 年 8 月）
 - ：CCS リスクマネジメント手法の情報収集と意見交換
- ・SPE ワークショップ：光ファイバー計測技術（米国, 2018 年 8 月）
 - ：光ファイバーによる地層安定性と坑井健全性監視システムに関する情報収集と意見交換
- ・CaMI 実証試験打合せ（カナダ, 2018 年 8 月）
 - ：CaMI 実証試験場での光ファイバー試験方法・結果の打合せ
- ・GHGT-14 での研究成果発表・情報収集・意見交換（オーストラリア, 2018 年 10 月）
 - ：CO₂ 地中貯留技術に関する発表、情報収集、意見交換
- ・メキシコ湾海城 CO₂ 貯留プロジェクト会合（米国, 2019 年 2 月）
 - ：CCS 実施海城の海洋環境影響調査に関する情報収集
- ・国際 CCUS ラウンドテーブル（米国, 2019 年 2 月）
 - ：CO₂-EOR など CCUS に関する海外動向の情報収集

(3) 海外展開ビジネスモデルの検討

上記の海外出張、国内における海外研究者との技術交流、さらにはテクニカルワークショップ（4.4.1 項参照）などの機会を通じて、第 2 章、第 3 章で説明した研究成果を海外技術者に紹介してきた。それぞれの技術は海外から高い評価を得たが、特に、マイクロバブル CO₂ 圧入技術、光ファイバー計測技術については、具体的なビジネス展開の引き合いが多く、将来の海外事業展開に有望な技術であることが分かった。

それぞれの技術を活用するビジネスモデルには、多様なパターンがあるが、標準的なビジネスモデルを以下の図 4.4.5-1 に示す。

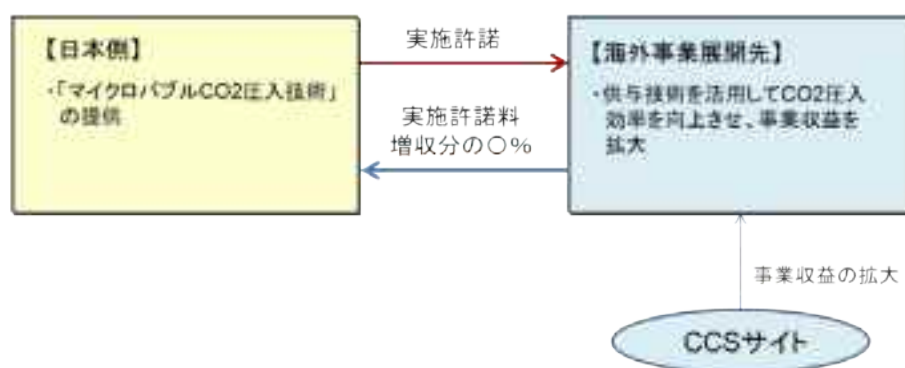


図 4.4.5-1 ビジネスモデル事例

上記のビジネスモデルは、マイクロバブル CO₂ 圧入技術を CO₂ 貯留の効率化に適用するもので、CCS 事業者は CO₂ 貯留量増大による収益拡大が図れ、技術提供者としての組合は、当該技術の提供対価を得ることとなる。

また、光ファイバー計測技術についても、様々なビジネスモデルが考えられるが、事業展開の基本としては、上記のモデルを応用可能である。

(4) 国際ライセンス契約の留意点と基本構成

ビジネスモデルを具現化するには、相手国の技術ニーズに合っていることはもちろん、その国の制度や法律に即した取り決めを行う必要がある。その具体的手段となるのが研究成果のライセンス契約であるが、その基本的な留意点と構成について調査したので以下に紹介する。

① 国際ライセンス契約の留意点

国際ライセンス契約においては、国内契約とは異なり、以下のような国際取引特有の内容や条項規定があり、留意が必要となる。

a) 契約の詳細性

国内契約において、「契約書に規定のない事項は、信義・誠実の原則に基づき、交渉合意する」といった規定を設定するのが通常であるが、英米法においては、未決定条項を多く含む合意書は、契約としての効果に問題が残る。また、最終契約は、それ以前の口頭や

書面合意に優先する。

b) 準拠法規定

国際契約においては、日本国内法が適用されるとは限らない。契約準拠法は、一般的に当事者同士の合意による指定が認められており、契約書に契約準拠法を規定するケースが多い。

c) 紛争処理規定

当該契約に関連して発生した、トラブル、紛争を裁判で解決する場合、管轄裁判所を当事者間であらかじめ定める「合意管轄条項」を規定することが多い。また、最終的紛争処理手段には裁判の他に仲裁がある。仲裁は、仲裁に関する国際条約加盟国同士の場合は、その判断に国際的強制力もあり、裁判よりもよく活用される。仲裁を利用するには仲裁合意が必要であり、契約書に仲裁合意の規定を設けることが多い。ただし、特許権の有効性自体に関わる最終判断については仲裁機関の紛争解決能力に限界があるので注意を要する。

② 国際ライセンス契約の基本構成

国際ライセンス契約において、以下が標準的な構成となる。

- 1) 標題
- 2) 前文
- 3) 定義規定
- 4) 実施権の許諾
- 5) 実施料の支払い
- 6) ライセンサーの義務
- 7) ライセンシーの義務
- 8) 契約期間
- 9) 一般条項
- 10) 準拠法
- 11) 仲裁条項または裁判管轄条項
- 12) 末尾文言、署名

このうち、4)、5)、6)、7)が国際ライセンス契約の主要条件規定である。図 4.4.4-1 において、4)の実施権の許諾では、「マイクロバブル CO₂ 圧入技術」のうち、実施を許諾する知的財産（特許、ノウハウなど）、実施権の種別（独占的実施権、通常実施権など）などを規定する。また、5)の実施料の支払いでは、「マイクロバブル CO₂ 圧入技術」の実施許諾対価を取り決める。図 4.4.4-1 は、CCS 事業者の増収分の一定割合とする事例であるが、CCS 事業自体の請負額の一定割合とする取り決めなど、実情に応じて、様々な手法が考えられる。

6)のライセンサーの義務では、実施許諾した特許などの知的財産権の利用を妨げないことが第一であり、他に知的財産権の維持義務、許諾した技術の有効性保証などが規定される。また、7)のライセンシーの義務では、実施許諾料の支払いが主となるほか、技術改良を行った場合の通知義務などが規定される。

(5) 中国におけるライセンス契約の特徴と留意点

研究成果の展開先として欧米に加え、中国も有望である。中国とのライセンス契約を締結する場合、上記(4)①で記した留意点に加え、中国固有の制度や法律を遵守する必要がある。以下、その概要と特に契約実務上重要な点について整理する。

① 中国とのライセンス契約の留意点概説

中国とライセンス契約を締結する場合、まず「技術輸出入管理条例」に基づき、実施許諾権、ロイヤルティへの課税、ロイヤルティの外貨送金管理などを考慮し、契約書の作成・管理をする必要がある。また、中国専利法に基づき、締結したライセンス契約の中国国家知識産権局への登録が義務付けられている。

さらには、対外貿易法、契約法、最高人民法院の解釈が契約条項規定に影響を与える関係法となっており、これらの規制、制約に応じた契約書の作成が必要となる。

② 実務上重要な法律・条例

a) 中国専利法

中国の企業・機関と実施許諾契約を締結した場合、その契約内容を中国国家への登録が必要となる。また、契約書には以下の事項が記載されていることが要件となる。

- 1) 当事者の名称、住所
- 2) 特許権の数、各特許権の名称、特許権番号、出願日、登録公告日
- 3) 特許の種類（独占、排他、通常、分実施、クロス）、期限
- 4) 費用（人民元あるいは米ドル）および支払い方法
- 5) 許諾の領域、範囲

b) 技術輸出入管理条例と輸入登録手続

技術輸出入管理条例は、技術の輸出入管理を規範化し、技術輸出入を維持し、中国国民経済と社会の発展促進を目的に 2002 年に施行された条例である。

当条例のもと、技術内容は、1)輸入禁止技術、2)輸入制限技術、3)輸入自由技術に分類されるが、ほとんどが 3)の輸入自由技術に相当する。ただし、輸入自由技術であっても、商務部または地方政府の対外経済貿易主管部門に、締結した契約内容を登録する必要がある。ライセンス料の送金の際に、当登録が要件となるので非常に重要な手続きである。

4.4.6 まとめ

本節では、CCS の広報活動を通じた社会受容性向上方策として実施している

- 1) CCS の技術開発状況の社会への情報発信
- 2) PO およびリスクコミュニケーションに関わる研究開発
- 3) 研究成果の海外への紹介状況と展開方策検討

についてその成果を取りまとめた。

1)については、テクニカルワークショップやフォーラムの開催などにより、CCS 関係者に適切な情報発信を行なっている。その結果、社会受容性向上に貢献していることがアンケート結果により確認されていることを報告した。

2)については、PO 教材やマニュアルの開発、さらにはリスクコミュニケーションの手法の検討結果を報告した。特に PO 教材については、一般人向けのものを開発・試用し、

CCS の理解促進に貢献していることを紹介した。

3)については、技術研究組合の成果を海外に紹介し、マイクロバブル CO₂ 圧入技術や光ファイバー計測技術などに高い関心を集めていることを紹介した。また、研究成果を海外展開するためのビジネスモデルやライセンス契約の枠組みについて検討、報告した。

参考文献

- 1) 国際技術ライセンス契約 大貫雅晴著、同文館出版
- 2) 英文ライセンス契約実務の基礎 小高壽一著、民事法研究会
- 3) JETRO 北京事務所知的財産部（2015年2月）中国技術輸出入管理条例に関する技術供与者のリスク低減のための契約条項案と契約スキームの検討
- 4) JETRO 中国進出における委託加工貿易、技術ライセンスの契約、商標に関する Q&A 集

2. 成果

(1)

発表者	王 璐琛
フリガナ:	オウロシン
連絡先:	wang@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Application of sequentially discounting autoregressive (SDAR) on seismic event detection for CO ₂ injection safety management
発表先	JpGU Joint Meeting 2018
発表年月日	2018/5/23
発表区分	国内学会・学術会議

(2)

発表者	中島 崇裕
フリガナ:	ナカジマタカヒロ
連絡先:	tnak06@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	貯留層評価のための検層イメージデータの解析:長岡貯留サイトへの適用事例
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(3)

発表者	内本圭亮
フリガナ:	ウチモトケイスケ
連絡先:	uchimoto@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Update on leakage detection
発表先	3rd international workshop on offshore geologic CO ₂ storage
発表年月日	2018/05/03
発表区分	国際学会・学術会議

(4)

発表者	Shunsuke Nishimura
フリガナ:	ニシムラシュンスケ
連絡先:	uchimoto@rite.or.jp
所属:	東京大学
発表内容	Classification of pCO ₂ -DO Correlations of Seawater off Tomakomai
発表先	OCEANS' 18 MTS/IEEE Kobe / Techno-Ocean 2018
発表年月日	2018/05/31
発表区分	国際学会・学術会議

(5)

発表者	Yankun Sun
フリガナ:	ソンヤンクン
連絡先:	sun@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Fiber optic distributed sensing technology for real-time monitoring water jet test: implications for wellbore integrity diagnostics
発表先	Journal of Natural Gas Science & Engineering
発表区分	査読論文

(6)

発表者	朴 赫
フリガナ:	パクヒョク
連絡先:	psrk@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Detection CO ₂ flooding by optical fiber; Example of a long core specimen
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(7)

発表者	伊藤拓馬
フリガナ:	イトウタクマ
連絡先:	t-itou@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	CO ₂ 地中貯留に向けた坑井地質調査におけるカッティングス分析の有効性: 長岡サイトの例
発表先	日本地球惑星科学連合大会 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(8)

発表者	伊藤拓馬
フリガナ:	イトウタクマ
連絡先:	t-itou@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Seismic and strain detection of heterogeneous spatial distribution of CO ₂ in high-permeable sandstone
発表先	International Journal of Greenhouse Gas Control
発表区分	査読論文

(9)

発表者	内本 圭亮
フリガナ:	ウチモトケイスケ
連絡先:	uchimoto@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Thresholds of anomalous pCO ₂ in sea water
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(10)

発表者	西村 真
フリガナ:	ニシムラマコト
連絡先:	nishimura@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Detection of CO ₂ bubbles in shallow sea using side-scan sonar (SSS)
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(11)

発表者	中島 崇裕
フリガナ:	ナカジマタカヒロ
連絡先:	tnak06@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Geophysical monitoring at the Nagaoka pilot-scale CO ₂ injection site in Japan
発表先	Active Monitoring, 2 nd ed., Elsevier
発表区分	投稿 その他:学術書

(12)

発表者	小林 佑輝
フリガナ:	コバヤシユウキ
連絡先:	yuki.kobayashi@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (国際石油開発帝石株式会社)
発表内容	新潟陸域で取得した DAS-VSP データの QC 処理結果および周辺データとの比較
発表先	石油技術協会平成 30 年度春季講演会
発表年月日	2018/06/14
発表区分	国内学会・学術会議

(13)

発表者	小林 佑輝
フリガナ:	コバヤシユウキ
連絡先:	yuki.kobayashi@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(国際石油開発帝石株式会社)
発表内容	コイルドチュービング内に設置した光ファイバーを用いた本邦初の大規模 DAS-VSP 実証試験
発表先	石油技術協会平成 30 年度春季講演会シンポジウム
発表年月日	2018/06/13
発表区分	国内学会・学術会議

(14)

発表者	海藤 佑太郎
フリガナ:	カイトウユウタロウ
連絡先:	yutaro.kaito@japex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(石油資源開発株式会社)
発表内容	マイクロバブル CO2 による掃攻効率改善メカニズムに関する検討
発表先	石油技術協会 平成 30 年度春季講演会
発表年月日	2018/6/13
発表区分	国内学会・学術会議

(15)

発表者	上田 良
フリガナ:	ウエダリョウ
連絡先:	ryo.ueda@japex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(石油資源開発株式会社)
発表内容	CO2 貯留効率向上におけるマイクロバブル圧入効果のメカニズム検討
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/5/20-2018/5/24
発表区分	国内学会・学術会議

(16)

発表者	宮城 充宏
フリガナ:	ミヤギミツヒロ
連絡先:	mygath00@pub.taisei.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(:大成建設)
発表内容	CO2 地中貯留における坑井配置の最適化支援ツールの開発
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/20
発表区分	国内学会・学術会議

(17)

発表者	戸田 数馬
フリガナ:	トダカズマ
連絡先:	kazuma.toda@japex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(石油資源開発株式会社)
発表内容	CO ₂ 地中貯留のための地質モデル構築における堆積学的アプローチ
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/5/20-2018/5/24
発表区分	国内学会・学術会議

(18)

発表者	木村 恒久
フリガナ:	キムラツネヒサ
連絡先:	yuki.kobayashi@inpex.co.jp
所属:	シュルンベルジェ
発表内容	光ファイバーと DAS テクノロジーを使った坑井内での地震観測
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(19)

発表者	小林 佑輝
フリガナ:	コバヤシユウキ
連絡先:	yuki.kobayashi@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(国際石油開発帝石株式会社)
発表内容	コイルドチュービング内に設置した光ファイバーによる国内初の DAS-VSP 実証試験
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(20)

発表者	宮城 充宏
フリガナ:	ミヤギミツヒロ
連絡先:	mygath00@pub.taisei.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(大成建設)
発表内容	井戸配置の高速最適化
発表先	土木学会
発表年月日	2018/08/
発表区分	国内学会・学術会議

(21)

発表者	上田 良
フリガナ:	ウエダリョウ
連絡先:	ryo.ueda@japex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(石油資源開発株式会社)
発表内容	マイクロバブル技術の EOR 適用可能性
発表先	平成 30 年度春期講演会 開発・生産部門シンポジウム
発表年月日	2018/6/13-2018/6/14
発表区分	国内学会・学術会議

(22)

発表者	徂徠 正夫
フリガナ:	ソライマサオ
連絡先:	m.sorai@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産業技術総合研究所)
発表内容	空隙構造および界面状態の変化に注目したキャップロックの長期遮蔽性能評価
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(23)

発表者	藤井 孝志
フリガナ:	フジイタカシ
連絡先:	takashi.fujii@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産業技術総合研究所)
発表内容	CCUS 技術における軟岩のき裂浸透モデリングに関する研究
発表先	日本地球惑星科学連合 2018 年大会
発表年月日	2018/05/23
発表区分	国内学会・学術会議

(24)

発表者	徂徠 正夫
フリガナ:	ソライマサオ
連絡先:	m.sorai@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産業技術総合研究所)
発表内容	Field Experiments on the Effect of Carbonate Dissolution on Rock's Sealing Performance
発表先	15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society AOGS2018
発表年月日	2018/6/4
発表区分	国際学会・学術会議

(25)

発表者	雷 興林
フリガナ:	レイコウリン
連絡先:	xinglin-lei@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産業技術総合研究所)
発表内容	Advantages of Distributed Deformation Monitoring by Fiber-Optic Sensor in Geomechanical Modelling
発表先	15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society AOGS2018
発表年月日	2018/6/5
発表区分	国際学会・学術会議

(26)

発表者	藤井 孝志
フリガナ:	フジイタカシ
連絡先:	takashi.fujii@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産業技術総合研究所)
発表内容	xperimental Investigation of Permeability Change with Shear Fracturing in Low-Permeable Caprocks for CCUS Technology
発表先	15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society AOGS2018
発表年月日	2018/6/5
発表区分	国際学会・学術会議

(27)

発表者	成瀬 涼平
フリガナ:	ナルセ リョウヘイ
連絡先:	ryohei.naruse@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(国際石油開発帝石株式会社)
発表内容	Inside CT-DAS-VSP acquisition using a highly-deviated deep well, onshore Japan
発表先	Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 88th Annual Meeting
発表年月日	2018/10/16
発表区分	国際学会・学術会議

(28)

発表者	上田 良
フリガナ:	ウエダリョウ
連絡先:	ryo.ueda@japex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(石油資源開発株式会社)
発表内容	マイクロバブル技術の EOR 適用可能性
発表先	石油技術協会誌 2018 Vol.83 No.6
発表年月日	
発表区分	査読論文

(29)

発表者	薛 自求
フリガナ:	セツジキユウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	CO ₂ 地中貯留技術開発の現状と実用化への課題
発表先	未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西
発表年月日	2018/09/26
発表区分	国内学会・学術会議

(30)

発表者	小林 佑輝
フリガナ:	コバヤシユウキ
連絡先:	yuki.kobayashi@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(国際石油開発帝石株式会社)
発表内容	坑井内に展開した光ファイバーを用いての地震観測の可能性について — 本邦初のDAS計測で観測された自然地震を例として —
発表先	物理探査
発表年月日	2018/秋
発表区分	査読論文

(31)

発表者	田中 敦子
フリガナ:	タナカアツコ
連絡先:	m.sorai@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産業技術総合研究所)
発表内容	CO ₂ の回収・輸送・貯留(CCS)に関する国際標準化の動向
発表先	資源・素材学会 2018
発表年月日	2018/9/10
発表区分	国際学会・学術会議

(32)

発表者	薛 自求
フリガナ:	セツジキユウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	地中ひずみ分布測定の現場試験から見た岩盤工学への光ファイバー測定技術の実用化
発表先	資源・素材学会 2018
発表年月日	2018/09/10
発表区分	国内学会・学術会議

(33)

発表者	後藤 宏樹
フリガナ:	ゴトウ ヒロキ
連絡先:	h.goto@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産総研)
発表内容	Laboratory Measurement of Submicrogal Gravity Change in Time Domain Using a Portable Superconducting Gravimeter without a Cryogenic Refrigerator
発表先	Geophysical Research Letters
発表年月日	2018/08/24
発表区分	査読論文

(34)

発表者	後藤 宏樹
フリガナ:	ゴトウ ヒロキ
連絡先:	h.goto@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産総研)
発表内容	地下水面の潮汐応答に起因する重力変化に関する予察的検討
発表先	日本測地学会第130回講演会
発表年月日	2018/10/16~2018/10/18
発表区分	国内学会・学術会議

(35)

発表者	Anindityo Patmonoaji
フリガナ:	アナディーティ パトモアアジ
連絡先:	patmonoaji.a.aa@m.titech.ac.jp
所属:	東京工業大学
発表内容	Two Dimensional Numerical Simulation of CO ₂ Injection into Brine Saturated Berea Sandstone with Normal Bubble and Micro Bubble Injection Modules
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(36)

発表者	張 毅
フリガナ:	チョウ キ
連絡先:	zhangyi@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	Can we detect CO ₂ plume by distributed fiber optic strain measurements?
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(37)

発表者	王 璐琛
フリガナ:	オウ ロシン
連絡先:	wang@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Micro-seismic monitoring data analysis system based on sequentially discounting autoregressive and its application to offshore CO ₂ storage safety operation
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(38)

発表者	中島 崇裕
フリガナ:	ナカジマ タカヒロ
連絡先:	Tnak06@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Utilization of wave attenuation in time-lapse sonic logging data for the monitoring of CO ₂ migration along the well
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(39)

発表者	中島 崇裕
フリガナ:	ナカジマ タカヒロ
連絡先:	Tnak06@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Advanced well log analyses using image data at the Nagaoka CO ₂ injection site
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(40)

発表者	三戸 彩絵子
フリガナ:	ミトサエコ
連絡先:	mito@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Gas-tight pH measurements to assess an effect of CO ₂ on groundwater
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(41)

発表者	孫 艶坤
フリガナ:	ソン エンコン
連絡先:	sun@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Field measurement using distributed fiber-optic sensing technology and numerical simulation of geomechanical deformation caused by CO ₂ injection
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(42)

発表者	伊藤 拓馬
フリガナ:	イトウタクマ
連絡先:	t-itou@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	地質試料の主要元素分析のための SEM-EDX の利用とその定量精度 Measurement of major elements in sedimentary rocks by SEM-EDX for geological applications
発表先	第 54 回 X 線分析検討会 54 th X-ray analysis conference
発表年月日	2018/10/25
発表区分	国内学会・学術会議

(43)

発表者	朴 赫
フリガナ:	パク ヒョク
連絡先:	park-h@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Experimental study of microbubble CO ₂ flooding in heterogeneous sedimentary rock
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(44)

発表者	薛自求
フリガナ:	セツジキューウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Microbubble CO ₂ injection for Enhanced Oil Recovery and Geological Sequestration in Heterogeneous and Low Permeability Reservoirs
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(45)

発表者 フリガナ： 連絡先： 所属：	内本圭亮 ウチモトケイスケ uchimoto@rite.or.jp 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	A preliminary experiment on the detection of bubbles in the sea with side-scan sonar
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22～2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(46)

発表者 フリガナ： 連絡先： 所属：	青木好範 アオキヨシノリ aoki@rite.or.jp 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Development of Educational Materials and Programs for Public Outreach of CCS
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22～2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(47)

発表者 フリガナ： 連絡先： 所属：	徂徠 正夫 ソライ マサオ m.sorai@aist.go.jp 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (産総研)
発表内容	Rock reaction experiments in CO ₂ -dissolved hot spring waters to evaluate effects of carbonate dissolution on caprock's sealing performance
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22～2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(48)

発表者 フリガナ： 連絡先： 所属：	加野 友紀 カノ ユキ y.kano@aist.go.jp 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (産総研)
発表内容	Numerical Study on the Effects of Contact Angle Change on Capillary trapping
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22～2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(49)

発表者	田中 敦子
フリガナ:	タナカ アツコ
連絡先:	a.tanaka@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産総研)
発表内容	Introduction to ISO Technical Report on Lifecycle Risk Management for Integrated CCS Projects
発表先	GHGT14
発表年月日	2018/10/22~2018/10/25
発表区分	国際学会・学術会議

(50)

発表者	薛 自求
フリガナ:	セツジキユウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	Fiber optic sensing for geomechanical monitoring: (1)-Distributed strain measurements of two sandstones under hydrostatic confining and pore pressure conditions
発表先	Applied Sciences
発表年月日	2018、in print
発表区分	査読論文

(51)

発表者	藤井 孝志
フリガナ:	フジイ タカシ
連絡先:	takashi.fujii@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(産総研)
発表内容	Modeling of fracture-permeability of low-permeable caprocks for CO ₂ geological storage
発表先	International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application
発表年月日	2018/11/14
発表区分	国際学会・学術会議

(52)

発表者	薛 自求
フリガナ:	セツジキユウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	CO ₂ 地中貯留の実用化に向けての圧入安全管理技術開発の取り組み
発表先	革新的環境技術シンポジウム 2018
発表年月日	2018/12/19
発表区分	国内学会・学術会議

(53)

発表者	内本圭亮
フリガナ:	ウチモトケイスケ
連絡先:	uchimoto@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	海水中 CO ₂ 気泡検知技術開発
発表先	革新的環境技術シンポジウム 2018
発表年月日	2018/12/19
発表区分	国内学会・学術会議

(54)

発表者	小林 佑輝
フリガナ:	コバヤシ ユウキ
連絡先:	yuki.kobayashi@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(国際石油開発帝石株式会社)
発表内容	DAS-VSP による Time-lapse subsurface monitoring 技術開発 —大深度・高傾斜井を用いた Inside CT Walk-away DAS-VSP 実証試験—
発表先	石油技術協会誌
発表年月日	2018/01/20(予定)
発表区分	査読論文

(55)

発表者	張 毅
フリガナ:	チョウ キ
連絡先:	zhangyi@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	Tracking CO ₂ plumes in clay - rich rock by distributed fiber optic strain sensing (DFOSS): a laboratory demonstration
発表先	Water Resource Research
発表年月日	2018/12/27
発表区分	査読論文

(56)

発表者	薛 自求
フリガナ:	セツジキユウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(RITE)
発表内容	Fiber optics Sensing for geomechanical monitoring (2) distributed strain measurements at a pumping test and geomechanical modeling of deformation of reservoir rocks
発表先	Applied Sciences
発表年月日	in press
発表区分	査読論文

(57)

発表者	宮城 充宏
フリガナ:	ミヤギ アツヒロ
連絡先:	mygath00@pub.taisei.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合(大成建設株式会社)
発表内容	Well Placement Optimization under Geological Statistical Uncertainty
発表先	Genetic and Evolutionary Computation Conference
発表年月日	2019/7/13~17
発表区分	国際学会・学術会議

(58)

発表者	Patmonoaji Anindityo
フリガナ:	アナディーティト パトモアアジ
連絡先:	patmonoaji.a.aa@m.titech.ac.jp
所属:	東京工業大学
発表内容	Experimental and numerical simulation of supercritical CO ₂ microbubbles injection into a brine saturated porous medium
発表先	International Journal of Greenhouse Gas Control
発表年月日	投稿中
発表区分	査読論文

契約管理番号	1 8 1 0 0 4 5 9 - 0
--------	---------------------

備考：様式の寸法は、日本工業規格 A 列 4 とし、左とじとすること。

2019年度

CCUS研究開発・実証関連事業／

安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発

2018年度～2020年度のうち

2019年度分中間年報

2020年3月

二酸化炭素地中貯留技術研究組合

1. 研究開発の内容及び成果など

目次

第1章 概要	3
1.1 事業目的	3
1.2 事業概要	3
1.3 実施体制	4
第2章 大規模 CO ₂ 圧入・貯留の安全管理技術の開発	7
2.1 要約	7
2.2 圧入安全管理システムの開発	9
2.3 CO ₂ 長期モニタリング技術の開発	29
2.4 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立	40
2.5 大規模貯留層に適した CO ₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立	47
2.6 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発	74
2.7 CO ₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築	97
2.8 リスクマネジメントツールをはじめとする日米 CCS 協力や海外機関との CCUS 技術開発の連携	110
第3章 大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立	120
3.1 要約	120
3.2 CO ₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立	121
3.3 マイクロバブル CO ₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上	134
第4章 CCS 普及条件の整備、基準の整備	142
4.1 要約	142
4.2 CO ₂ 貯留安全性管理プロトコルの整備	143
4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS 技術事例集の作成、国際標準化 (ISO TC265) との連携	154
4.4 CCS の広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討	189

第1章 概要

1.1 事業目的

本事業は、2020年度末までに、安全かつ経済的な実用化規模のCO₂地中貯留技術を確立するとともに、日本のCCS技術の海外展開、新産業創生の基盤作りを行うことを目的とする。

1.2 事業概要

上記目的を達成するため、大規模CO₂圧入貯留に係る安全管理技術の確立、大規模貯留層への有効圧入・利用技術の確立、およびCCSの普及に向けた環境整備を行っている。具体的には、以下の研究開発を実施している。

①大規模CO₂圧入・貯留の安全管理技術の確立

- ①-1. 圧入安全管理システムの開発
- ①-2. CO₂長期モニタリング技術の開発
- ①-3. 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立
- ①-4. 大規模貯留層に適したCO₂挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立
- ①-5. 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発
- ①-6. CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築
- ①-7. リスクマネジメントツールをはじめとする日米CCS協力や海外機関とのCCUS技術開発の連携

②大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立

- ②-1. CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立
- ②-2. マイクロバブルCO₂圧入技術の適用による貯留率の向上

③CCS普及条件の整備、基準の整備

- ③-1. CO₂貯留安全性管理プロトコルの整備
- ③-2. 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS技術事例集の作成、国際標準化（ISO TC265）との連携
- ③-3. CCSの広報活動を通じた社会受容性向上方策の検討

それぞれの研究課題の課題の実施目的と実適用イメージは以下の図1.2-1、図1.2-2に示すとおりである。



図1.2-1 事業全体概要図



図 1.2-2 事業内容イメージ図

1.3 実施・推進体制

①事業の実施体制

本事業の実施体制を図1.3-1に示す。

プロジェクトリーダーによる全体とりまとめや進捗管理を行うとともに、第三者の有識者委員会による「研究推進委員会」を設置し、進捗状況の確認と技術的な助言を得るなど、計画を適宜改善しながら事業を実施している。



図1.3-1 実施体制

②事業の推進体制

二酸化炭素地中貯留技術研究組合（以下、技術研究組合）は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）、国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）、石油資源開発株式会社（JAPEX）、国際石油開発帝石株式会社（INPEX）、大成建設株式会社、応用地質株式会社により構成される。それぞれの組合員が保有するCCS関連基礎・基盤技術、石油・天然ガスの探鉱・開発・生産技術、物理探査技術、地盤調査技術ならびに大規模数値シミュレーション技術を統合させて研究を進めるとともに、国内外の大学や研究機関等とも協力して推進するなど、総合力を発揮した研究開発を行っている（表1.3-1）。

表1.3-1 二酸化炭素地中貯留技術研究組合における役割分担

研究課題		実施組合員
(1)大規模CO ₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立	①圧入安全管理システムの開発	RITE、JAPEX、INPEX
	②CO ₂ 長期モニタリング技術の開発	AIST
	③大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立	RITE、JAPEX、応用地質
	④大規模貯留層に適したCO ₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立	RITE、AIST、大成建設、応用地質
	⑤光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発	RITE、AIST、JAPEX、INPEX
	⑥CO ₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築	RITE
	⑦リスクマネジメントツールをはじめとする日米CCS協力や海外機関とのCCUS技術開発の連携	RITE、大成建設
(2)大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立	① CO ₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立	RITE、大成建設
	② マイクロバブルCO ₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上	RITE、JAPEX
(3)CCS普及条件の整備、基準の整備	① CO ₂ 貯留安全管理プロトコルの整備	RITE
	② 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS技術事例集の作成、国際標準化(ISO TC265)との連携	RITE
	③ CCSの広報活動を通じた社会受容性向上の方策の検討	RITE

具体的技術課題解決に向けては、技術検討ワーキンググループを構成し、適宜学識経験者や産業界の助言を受けている。

また、CCS実用化に向けた課題を抽出・整理するため、CCSフォーラムを開催し、学識経験者や産業界等の意見を広く吸い上げつつ、実用化のための研究開発を進めている。

第2章 大規模 CO₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立

2.1 要約

本章では、「大規模 CO₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立」の進捗状況について、関連する開発テーマ別に報告する。本節では、それぞれの開発状況の要点を紹介する。

(1) 圧入安全管理システムの開発

圧入安全管理システムの開発として、操業情報を取り入れた ATLS (Advanced Traffic Light System) の構築と、操業情報を取り入れた信号切り替え判定基準の策定を行った。ATLS では観測した振動データから微小振動イベント位置を精度よく決定できるように、イベント検知手法の閾値設定の見直し、各観測システムのデータ統合方法の見直し、および観測振幅からのマグニチュード決定精度の確認を行った。さらに苫小牧サイトのデータを用いて各モジュールの動作検証を行い、ATLS の要素を完成させた。また信号切り替えに関しては、対象とするイベントの範囲とマグニチュード、および操業情報との関係も考慮した ATLS 信号の切り替え判定基準を策定した。

(2) CO₂ 長期モニタリング技術の開発

苫小牧実証試験サイトでの重力モニタリングを継続実施し、トラブル対処法を踏まえた長期連続重力データ取得法の検証、沿岸域設置時のノイズ除去方法の確立、および重力モニタリング運用方法の策定を行った。連続重力データ取得法の検証では、苫小牧サイトにおいて 2 台の超電導重力計での並行観測により、欠測なく良質なデータを取得できることを確認した。ノイズ除去法としては、水位変動の影響を除去することにより、通年観測での重力残差の標準偏差が 0.8 μ Gal に抑えられることを確認した。またこれらの観測事実に基づき、ノイズの大きい沿岸域での連続重力測定の実用方法を策定した。

(3) 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立

大規模貯留層を対象とした地質モデリングの要件と、地質モデルの不確実性評価方法について検討した。地質モデルの要件としては、CCS ライフサイクルの各ステージにおける地質モデルの使用目的と必要なデータ種別について整理した。さらに実際に取得できるデータ間のギャップを補完するためには、堆積学的な知見が重要であることを示した。一方、不確実性評価においては、苫小牧サイトの地質を例として、CCS ライフサイクルのステージが進むにつれて、貯留可能量の不確実性が減少していくことを示した。

(4) 大規模貯留層に適した CO₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立

長期挙動予測に必要な、挙動シミュレーション補助ツールの作成、シミュレーションに用いるマクロ物性に関する知見収集、および地化学—力学—水理連成解析のための基礎的な物性評価のための室内試験を行った。挙動シミュレーションの補助ツールとして、モデル構築とシミュレータをつなぐインターフェースについてまとめた。マクロ物性に関して

は、CO₂圧入から15年以上経過している長岡サイトでの検層結果を基に、トラッピングメカニズムと物性の関係について検討を行った。地化学—力学—水理連成解析としては、マクロな挙動に対するパラメータ値の評価を行った。また漏洩検知手法として、電磁探査の有効性評価のための電磁場シミュレーションも実施した。

(5) 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発

光ファイバーによるひずみ測定、および音響計測による地下イメージングに関する検討を行った。ひずみ計測に関しては、茂原地区サイトでの計測を通じ、感度の良いファイバーや設置方法に関する知見を得た。またひずみ観測システムの改良を行い、CO₂貯留のための長期観測システムとして完成させた。一方音響計測では、CO₂モニタリングへの適用性について検討し、苫小牧サイトのような大偏距坑井を用いたDAS/VSPによるモニタリングが可能であること、および走時差による地表—坑井間のトモグラフィー解析が可能であることを確認した。さらに、CO₂の吸着・膨潤を考慮したジオメカニクスモデリングに利用するため、室内実験結果からキャップロックの変形量に関する定式化を行った。

(6) CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

海洋へのCO₂漏出検出・環境影響評価総合システム構築のため、生物影響データベースの作成、漏出CO₂海中拡散シミュレーション、および大阪湾でのpCO₂・溶存酸素連続観測を行った。生物影響データベースでは、基本構造を完成させた。海中拡散シミュレーションでは、CO₂の拡散範囲が外力として適用する気象データに依存するかを確認した。その結果、生物影響の閾値を超える格子は漏洩発生個所のみで、気象データの違いによる影響は小さいと推定された。また、大阪湾での連続観測結果と既存の四季調査データとの対比により、一季節の変動幅評価のためには40回程度の観測が必要であることを見出した。

(7) リスクマネジメントツールをはじめとする日米 CCS 協力や海外機関との CCUS 技術開発の連携

リスクマネジメントツール開発の一環として、政策・投資判断に資するリスクマネジメント手法を検討した。具体的には、CO₂貯留性能の不確実性やCCS事業の選択肢を考慮した上で、リスク抑制と収益向上を図る基本的な考え方を提言した。

また、光ファイバー計測技術の日米共同実証研究として、ノースダコタ州立大学エネルギー・環境研究センターと共同研究内容や実証試験計画を立案した。さらに、マイクロバブルCO₂圧入技術の米国での潜在適用可能性について検討した。

2.2 圧入安全管理システムの開発

地熱利用やシェールガス・オイル開発等、地下への流体圧入を行っている分野では、圧入作業と誘発地震発生との関係を監視し、青、黄、赤の交通信号のようなシグナルを出し安全に圧入を実施するための管理システム（Traffic Light System：TLS）が導入されている。CCS においても同様な圧入管理システムが海外サイトにおいて導入されつつあるが、CO₂は水とは異なり圧縮性が大きいことと、地層水に溶け込むという特徴があるため、既存の TLS にこれらを考慮した機能を付加する必要がある。特に我が国で TLS を導入するためには、人為的活動が活発なため地動ノイズが大きいこと、および自然地震が多い中で微小振動観測を行うこととなるため、我が国独自の圧入安全管理システムが必要である。

本課題では、CO₂圧入に伴い発生する可能性のある微小振動を監視するため、CCS サイトでの微小振動モニタリングを CCS 操業側にフィードバックし、地中への CO₂圧入時の安全性確保を行うための圧入安全管理システム：Advanced TLS（ATLS）の開発を行う。このシステムでは、自然地震や微小振動の観測データだけでなく、CO₂挙動モニタリングおよび海洋環境モニタリングの評価結果、CO₂圧入関連データなどをも含めて総合的な評価を行う。

ATLS の開発においては、実サイトでの観測データとして日本 CCS 調査（株）が実証試験を行っている苫小牧サイトの地震観測データを利用した。観測データは日本 CCS 調査（株）の所有であり、利用に当たっては技術研究組合が無償で活用することを了承していただいている。

2.2.1 操業情報を取り入れた ATLS の完成

人為的活動が活発なため地動ノイズが大きく、また自然地震が多い我が国における圧入安全管理システムの要件としては、以下に示すものが考えられる。

- (1)準リアルタイムにデータ処理が行なえる
- (2)ノイズに強い振動イベント検出
- (3)できるだけ自動処理が可能
- (4)様々な観測モジュールのデータを統合して処理が可能
- (5)アラート表示機能
- (6)イベントの大きさ（マグニチュード）算出、位置の表示
- (7)イベントに対して操業へのフィードバックが可能
- (8)操業情報を取り入れたシステム

これらの要件のうち、(1)はシステムにおいて開発当初から目標としていたことであり、(2)はイベント検出手法として SDAR（Sequentially Discounting Auto Regressive model learning）法を採用することで、よりノイズに強いイベント検出を可能とした。

図 2.2.1-1 に開発した ATLS の概要を示す。図の①～③と記した部分が今年度実施した内容であり、上記の(3)～(6)に該当する。また、観測データおよび操業情報を基に圧入作業

と誘発地震発生の関係を監視し、信号の色として圧入作業に対する管理情報を発するが、これを操業に対しフィードバックするようになっており、上記の要件(7)、(8)に対応している。

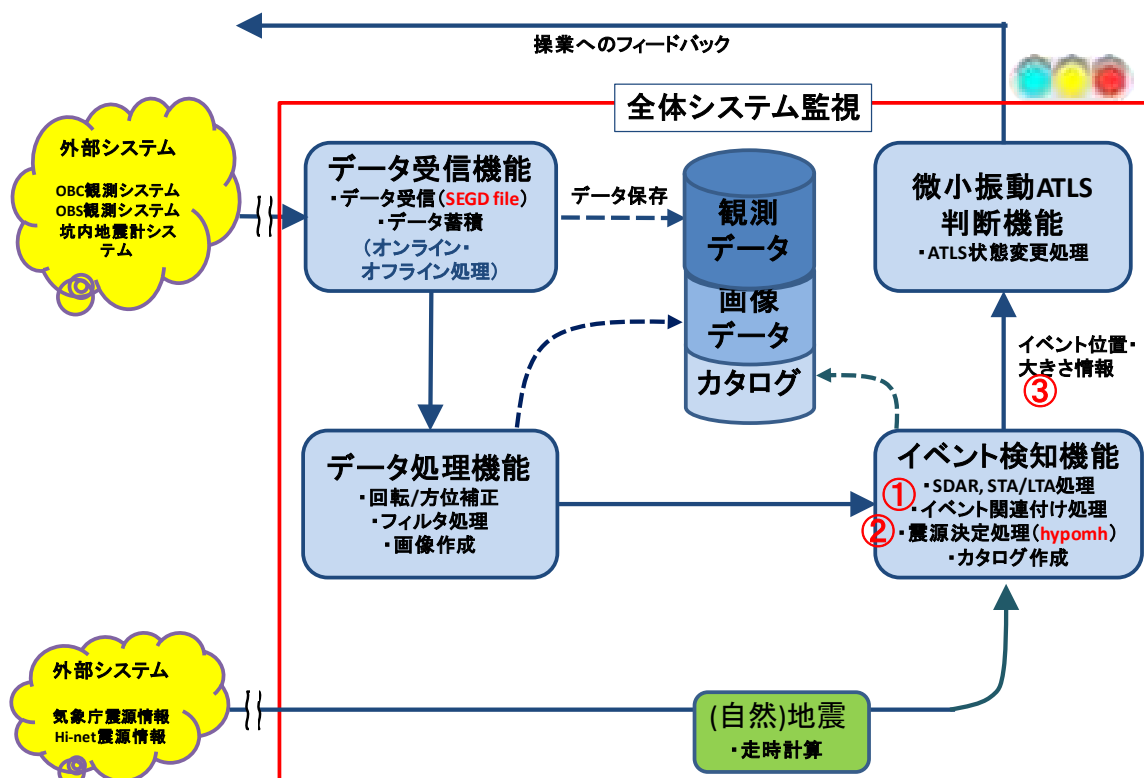


図 2.2.1-1 現在開発中の ATLS の概要

(1) 自動処理への対応

自動処理においては、観測データから自動的に正確にイベントを抽出しその時刻情報を得ることが求められる。イベントの抽出および時刻情報の取得は、観測データの SN 比の問題などから完全に自動化することは難しいと考えられるが、少しでも自動化に近づけるよう対応を行った。

① イベント抽出方法

観測データからイベントを抽出するために、時系列の観測データ自体が AR (Auto Regressive) 過程で表現できるとした場合に変化点を抽出する SDAR 法を用いた。一般に振動イベントの抽出で使われることの多い STA/LTA 法 (Short Term Averaging / Long Term Averaging : 短時間移動平均/長時間移動平均) と比べてノイズに強い特性が認められたため SDAR 法を採用したものである。

観測データに対し SDAR 法を適用して SDAR スコアを求めた例を、図 2.2.1-2 に示す。地震イベントのところでは SDAR スコアが大きくなっているのが判る。この例では SDAR スコアを際立たせるために、閾値を設けて閾値より小さい値はゼロとするようにしてある。

閾値を小さく設定すると小さいイベントまで抽出できるが、ノイズまで抽出する可能性がある。逆に閾値を大きく設定するとノイズは減らせるが、小さいイベントの場合には取り逃す可能性がある。試行錯誤で閾値を求める。

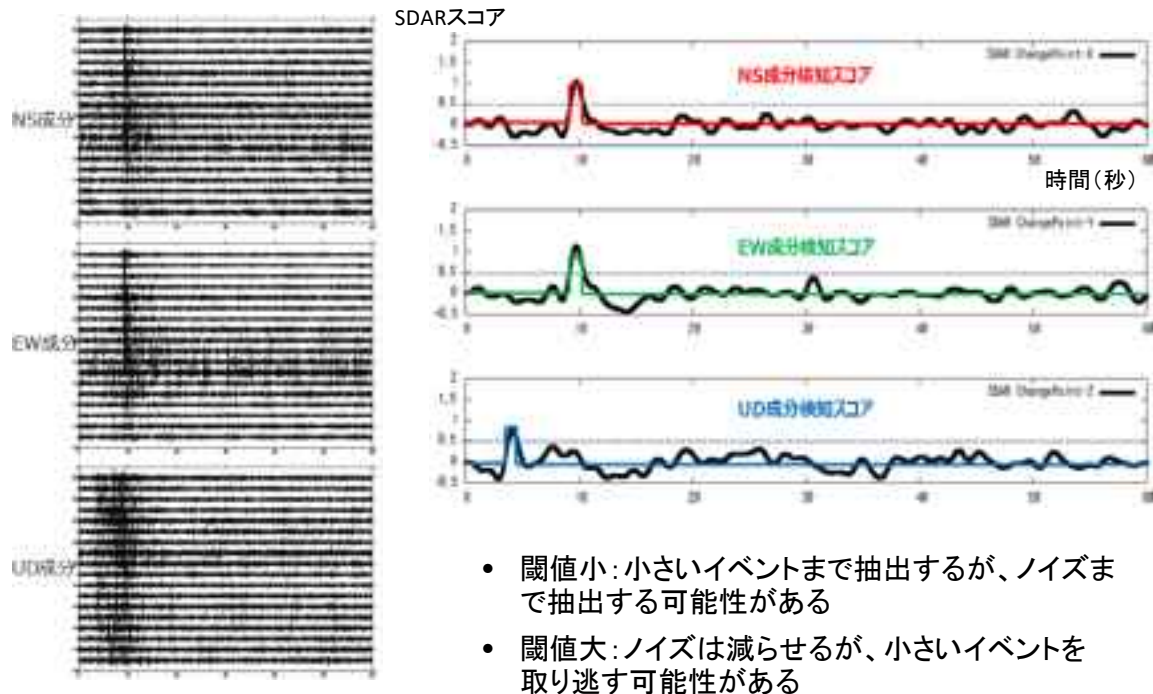


図 2.2.1-2 地震イベント観測データと SDAR 適用結果の例

イベント検出では、図 2.2.1-3 に示すように鉛直成分 (UD : P 波)、水平 2 成分 (NS、EW : S 波) に対して SDAR 法を適用した結果に閾値による 0/1 の 2 値化処理を行い SDAR スコアを求める。ここで SDAR スコアが 1 となる連続区間の間が 3 秒以内の場合は連続区間を結ぶスコアを 0.2 とする。さらに水平 2 成分を合成した水平成分検知スコア (値は 2 成分の平均とする) と鉛直成分検知スコアを合成し地震検知スコア (値は水平成分検知スコアと鉛直成分検知スコアの平均) とする。地震検知スコアにおいて 1 となる連続区間の間が 20 秒以内ならばその間の地震検知スコアを 0.2 とし、地震区間スコアを作成する。

地震区間スコアにおける平均値により確度 A~D のランク付けを行った (A : 1.0、B : 0.50 以上、C : 0.25 以上、D : 0 より大)。

イベントピックの現状把握として、真イベントデータと偽イベントデータを下記のように設定し、SDAR の閾値を 0.3、0.5、0.7 とした場合のイベント検出率を求めた。

・ 真イベントデータ :

期間 : 気象庁一元化震源リストのうち、2015 年 2 月~2018 年 12 月の期間

震源位置 : 苫小牧 CCS サイト (OBC の中心位置) から 50km 以内

マグニチュード : 2 以下

個数 : 苫小牧 CCS サイトから距離に近い順に 400 個の地震

データ区間: 上記 400 地震のイベント区間の 10 分前から 10 分後までのデータ
 ・偽イベントデータ:

気象庁一元化震源リストに情報の無い 2018 年 8 月 1 日 00:00~12:00 の 12 時間データに対し、坑内観測 OB-1 と海底設置の OBC のどちらかで、SDAR スコアの閾値を 0.3 とした時の地震区間スコアの確度が C 以上 (C~A) となった時間帯を偽のイベントとする

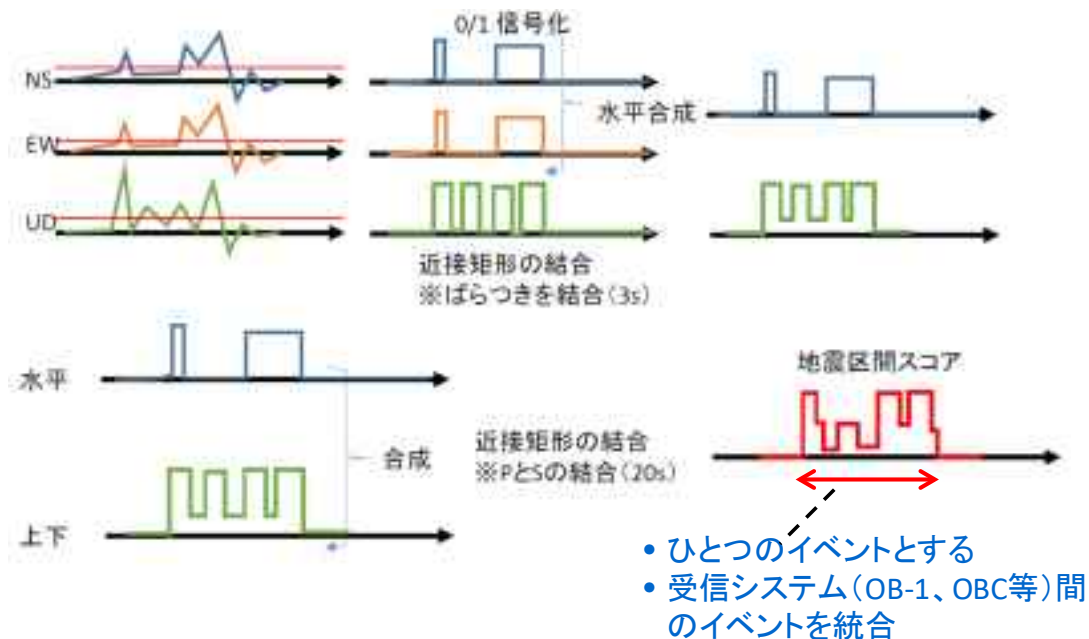


図 2.2.1-3 観測点単位での地震区間スコアの算出方法

表 2.2.1-1 に SDAR ランク B 以上の場合の検出率を示すが、真イベント検出率は値が高いほど真のイベントを検出しており、偽イベント検出率は値が低いほど偽イベントを検出しておらず良好な結果であることを示す。真イベント検出率は OB-1 の方が高い傾向にあり、偽イベント検出率は、閾値 0.5 以下では OB-1 の方が良好、閾値 0.7 では OBC の方が良好である。真イベントの検出率はいずれの場合もほぼ 90%以上である。

表 2.2.1-1 イベントピックの状況把握 (SDAR ランク B 以上の場合)

分類	SDAR 閾値	OB-1 データ	OBC データ
真イベント検出率	0.3	99.5%	97.9%
	0.5	97.4%	99.5%
	0.7	95.2%	88.9%
偽イベント検出率	0.3	60.0%	77.0%
	0.5	38.0%	62.0%
	0.7	17.0%	4.0%

② 時刻情報の取得

SDAR 法で抽出されたイベント区間に対し、到達時刻を取得する際には STA/LTA 法により求めた。これは、P 波初動時刻を求めるような場合には、STA/LTA 法によりシャープな結果を得られるからである。

(2) 観測モジュール間の結果統合方法

図 2.2.1-3 に示したように観測点単位での地震区間スコアを算出し、次に図 2.2.1-4 に示すように各モジュール内の判定結果を OR 演算で統合した後、モジュール間の判定結果を OR 演算と AND 演算の両方の手法で統合する。

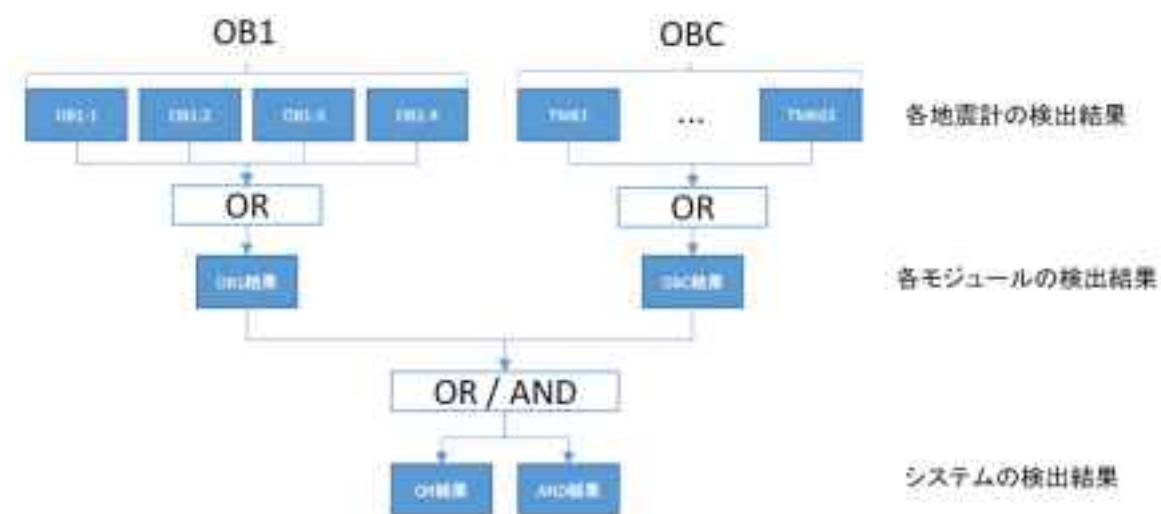


図 2.2.1-4 複数モジュール間の結果統合方法

複数モジュール間の結果統合方法について、閾値を変えた場合の検出率を機械学習で使われる評価指標（表 2.2.1-2）により評価した。表 2.2.1-3 に評価結果を示す。

表 2.2.1-2 機械学習で使われる評価指標

評価指標		特徴
適合率	$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$	正と予測したデータのうち、実際に正であるものの割合（誤検出回避を重視）
再現率	$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$	実際に正であるもののうち、正と予測されたものの割合（検出率を重視）
F 値	$F\text{値} = \frac{2 \text{Recall} \cdot \text{Precision}}{\text{Recall} + \text{Precision}}$	再現率と適合率の調和平均（バランス良く判別）

（表中の TP、FP、FN、TN は右による）

		真の結果	
		正	負
予測結果	正	TP	FP
	負	FN	TN

表 2.2.1-3 観測モジュール間の結果統合方法の評価結果 (SDAR ランク B 以上の場合)

SDAR閾値	評価指標	OB1	OBC	OB1 and OBC	OB1 or OBC
0.3	F値	0.767	0.712	0.800	0.687
0.5	F値	0.828	0.761	0.865	0.733
0.7	F値	0.897	0.922	0.925	0.895
0.3	Precision	0.624	0.560	0.679	0.524
0.5	Precision	0.719	0.616	0.782	0.578
0.7	Precision	0.848	0.957	0.978	0.835
0.3	Recall	0.995	0.979	0.974	1.000
0.5	Recall	0.974	0.995	0.968	1.000
0.7	Recall	0.952	0.889	0.878	0.983

F 値の最大値 0.925 のケースは、『SDAR ランク B 以上の場合、SDAR 閾値 0.7、OB1 and OBC』の時であった。この評価から、観測モジュール間の結果統合方法としては AND が良いものと考えられ、閾値としては 0.7 程度で良いことを確認した。ATLS では OB1、OBC の複数モジュールを同時に処理する手法とし、基本は OB1 and OBC の結果を利用する判別方法を実装し、OB1 or OBC の結果や単独モジュールの結果も処理可能とするようにとした。

(3) イベント位置決定方法について

図 2.2.1-5 に、観測データから各モジュールの検出ファイル（到達時刻）を作成し、震源決定に使うマージデータセット（統合データセット）を作成、震源決定までの流れを示す。以下に説明を記す。

- ① 図の ATLSEventPickService から生成された地震区間ファイルを基に地震区間を特定し、モジュール間で地震区間が重なる区間を AND 演算で検出して、システム全体の同一イベントとして抽出する。
- ② 同一イベントに対する到達時刻の算出は、各モジュール毎に STA/LTA 法により到達時刻（検出データ）として求め、hypomh 用入力ファイルを作成する。
- ③ 各モジュールの同一イベントに対する hypomh 用入力ファイルを統合して、マージ済み hypomh 用入力ファイルを作成する。
- ④ このファイルを用いて、hypomh により震源計算を行う。震源計算では、入力ファイルから仮の震源位置を求め、その仮の震源に対して各モジュールの理論走時を計算し、理論走時と到達時間を比較して残差が小さくなるように震源位置を修正して、残差がリーゾナブルになった時点で震源位置として確定する。

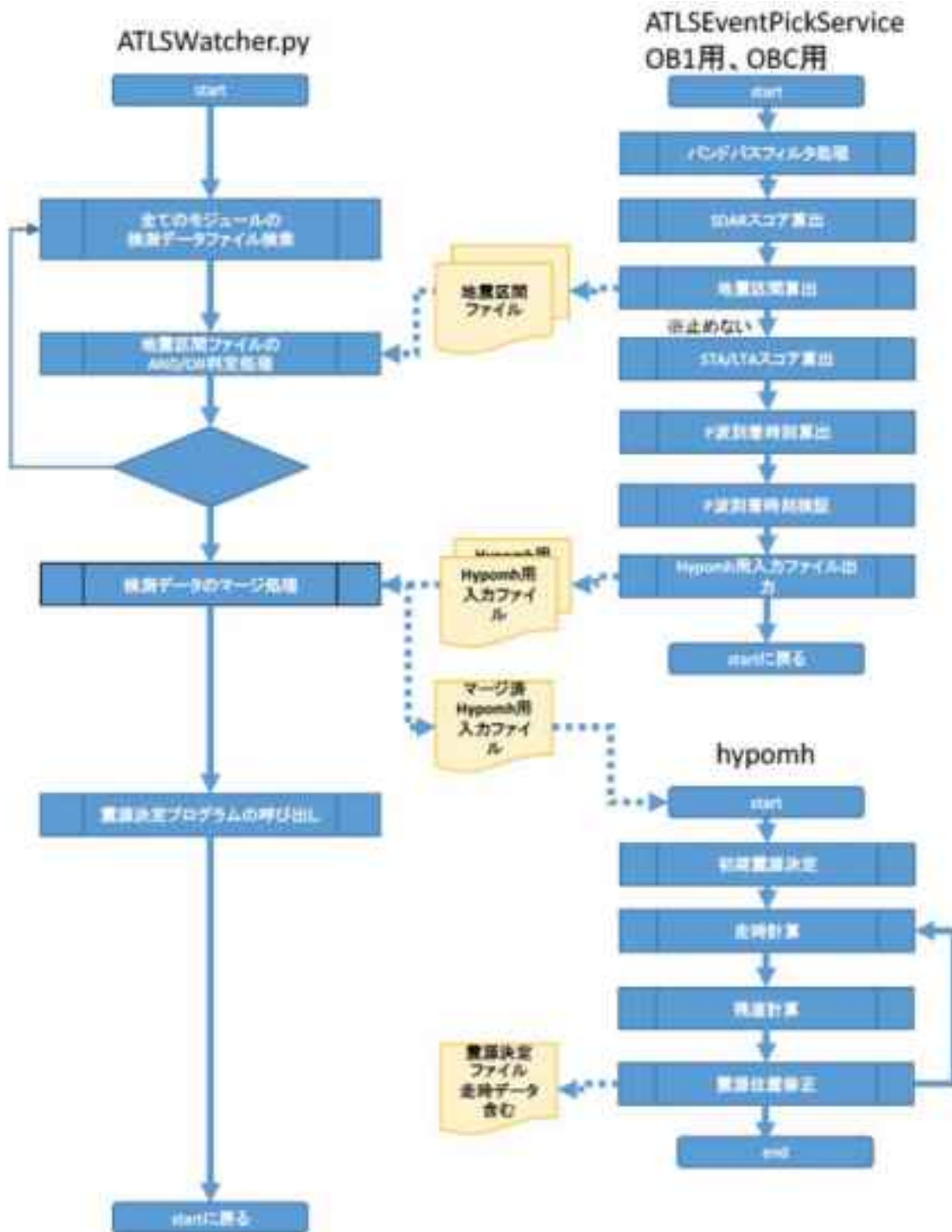


図 2.2.1-5 観測データから震源決定までの流れ

(4) マグニチュード算出方法

マグニチュードの算出は、観測データの上下動成分の最大速度振幅を用いて、微小地震のマグニチュード算出で使われる渡辺の式（上下動成分の最大速度振幅 $A_v(\text{cm/s})$ と震源距離 $r(\text{km})$ ）を用いて、 $0.85M - 2.50 = \log A_v + 1.73 \log r$ （渡辺, 1971）を使うものとし、気象庁マグニチュードと比較した場合の補正係数を求めた。

① 坑内観測点 OB-1 に対する補正值

坑内観測点 OB-1 の観測データを用いて SDAR による地震区間抽出を行い、気象庁震源情報との関連付けを行った。気象庁震源情報は震央距離 300km 以内（苫小牧設置 OBC のモジュール番号 36 からの距離）の震源情報を用いた。SDAR における変化点スコアの閾値は 0.5 とした。気象庁震源情報との関連付けは、SDAR で抽出された地震区間開始時刻 -1 秒から地震区間終了時刻 +1 秒の間に、気象庁走時表から計算される P 波到着時刻、S 波到着時刻の一方または両方が含まれる場合に対応しているものとした。すなわち、気象庁の震源決定の際の位置の誤差や観測点近傍の地下速度構造などのために、観測 P 波到着時刻および観測 S 波到着時刻が 1 秒以上ずれた場合には関連無しとされる。

坑内観測点 OB-1 には坑内の 4 深度に地震計が設置されているが、最大振幅としては各深度の地震計の上下動成分の地震区間内における最大振幅の平均値とし、その地震の気象庁震源情報から求められる震源距離 $r(\text{km})$ を用いて、渡辺の式によりマグニチュードを算出する。

気象庁震源情報は、2015 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 31 日とした。

算出した推定 M と気象庁 Mjma の散布図を、図 2.2.1-6 に示す。なお、気象庁 Mjma と推定 M との差が大きい上位 3% を外れ値として除外し、残りの 97% のデータに対して線形回帰をあてはめて補正係数を求めた。

推定 $M = 0.9023M_{jma} + 0.0428$ であるので、Mjma に補正する場合は、
 $M_{jma} = (\text{推定 } M - 0.0428) / 0.9023$ となる。

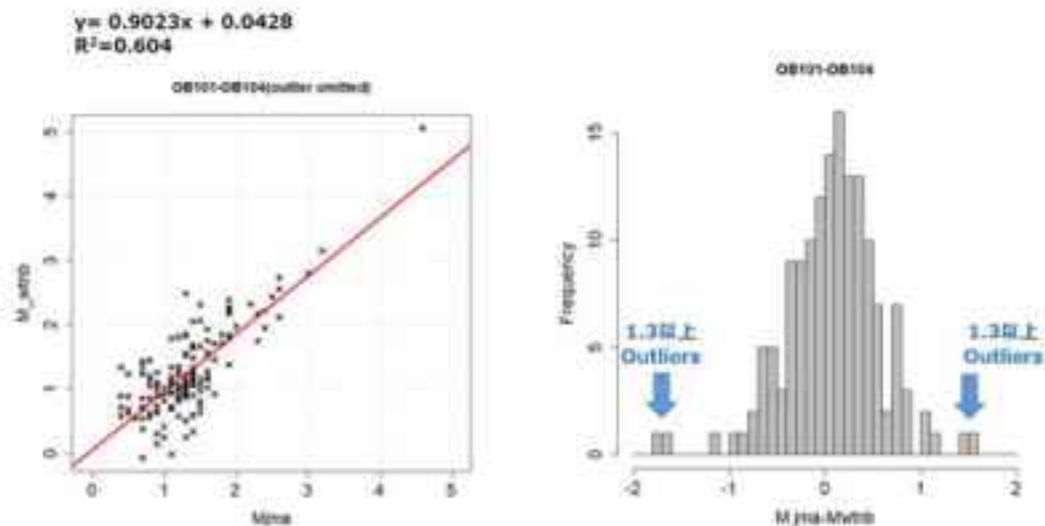


図 2.2.1-6 OB-1 の Mjma と推定 M の比較（上位 3% の外れ値を除外）

② 常設型 OBC に対する補正值

常設型 OBC に対しても OB-1 と同様にして推定 M を算出し、気象庁 Mjma と比較した。常設型 OBC では上下動成分の最大振幅として、4 モジュールの観測データをスタック処理し、各波形の地震区間内における最大振幅の平均値を用いた。

気象庁震源情報は、2015 年 2 月 1 日から 2016 年 8 月 31 日とした。

算出した推定 M と気象庁 Mjma の散布図を、図 2.2.1-7 に示す。

推定 $M = 0.6516M_{jma} + 0.806$ であるので、Mjma に補正する場合は、 $M_{jma} = (\text{推定 } M - 0.806) / 0.6516$ となる。

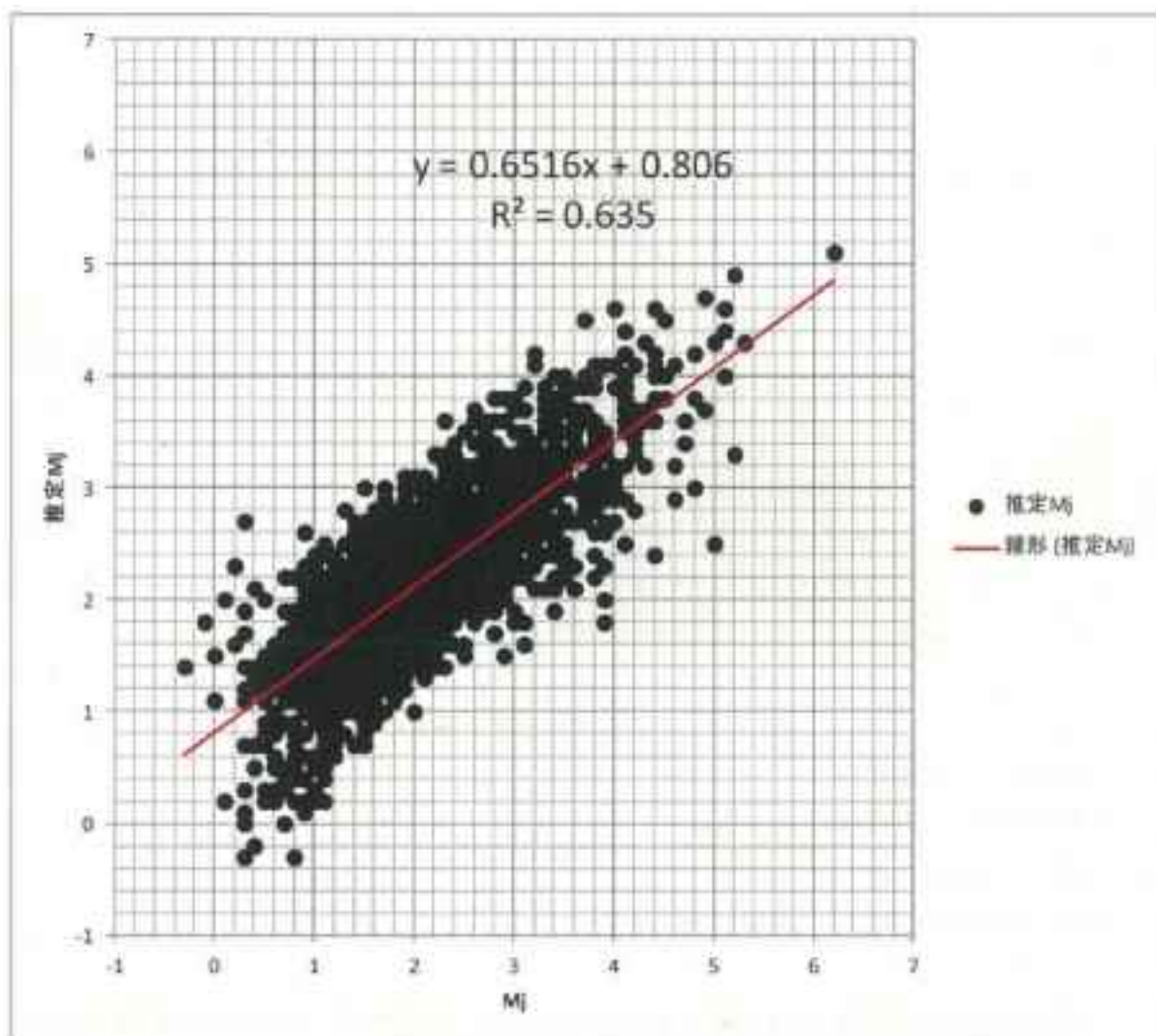


図 2.2.1-7 常設型 OBC の Mjma と推定 M の比較

(5) アラート表示機能

以下の項目に対してアラートを表示する機能を付加した。アラート表示は対応する地震カタログの該当箇所を黄色表示するとともに図化して示すものとする。

- ① 閾値を越える振幅を観測した場合（振幅の閾値は設定できるようにするが、デフォルト値は速度振幅で 0.1cm/s）

- ②震源位置が指定の範囲内に位置する場合(震央距離、深度を設定できるようにするが、デフォルト値は震央距離が OBC 中心 (N42.604°、E141.635°) (設定できるようにする) から半径 10km 以内、深度 20km 以内) : 観測結果から求めた震源位置および気象庁/Hi-net 震源情報に基づく
- ③観測データから算出したマグニチュードが、閾値を越えた場合 (マグニチュードの閾値は設定できるようにするが、デフォルト値は 1 とする)
- ④指定の範囲の地震発生頻度が変化した場合 (範囲は設定できるようにするが、デフォルト値で震央距離が OBC 中心 (N42.604°、E141.635°) (設定できるようにする) から半径 50km、深度 50km) : 気象庁/Hi-net 震源情報に基づく
- アラート表示の例を図 2.2.1-8 に示す。

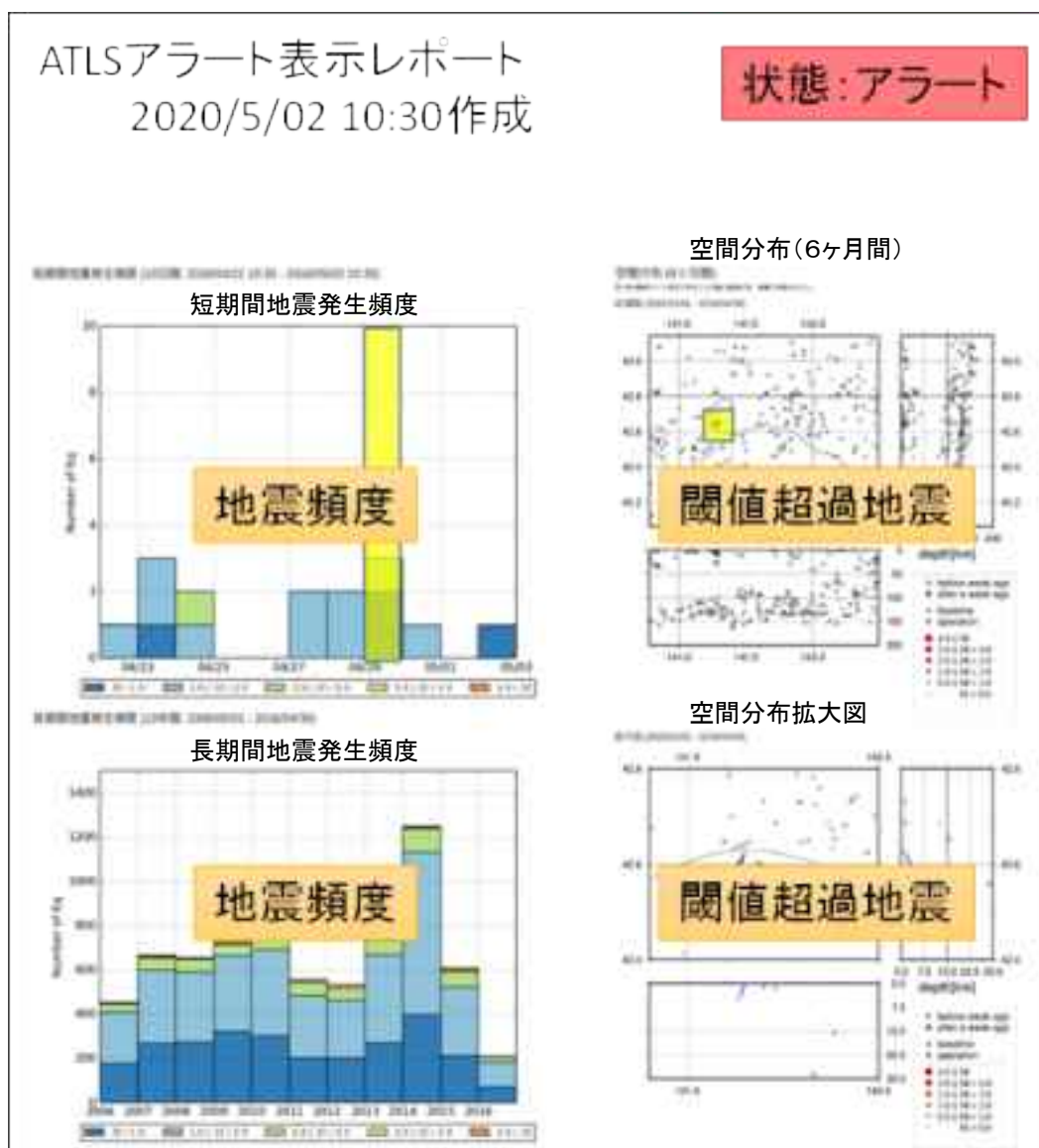


図 2.2.1-8 アラート表示機能の表示例

(6) 図化ツールの整備

図化ツールとして、以下の機能を有するツールを整備した。

- ①波形と SDAR 結果（スコア値）を重ね書きするツール
- ②波形と読み取り位置を重ね書きするツール
- ③算出した震源位置の 3 次元的な表示ツール

図 2.2.1-9 に観測波形に SDAR スコアを重ね書きした結果、観測波形に地震区間スコアを重ね書きした結果を示す。これらは上記の機能①に該当する。図 2.2.1-10 に観測波形に STA/LTA の値を重ね書きした結果、観測波形に該当する地震に対する理論走時を重ね書きした結果を示す。これらは機能②に該当する。

算出した震源位置の 3 次元的な表示は、科学技術可視化の並列化と対話操作のための、自由に利用できるオープンソースプログラムである Paraview を用いて行うものとした。図 2.2.1-11 に微小振動および自然地震イベント位置の 3 次元表示例を示す。これは機能③に該当するものである。

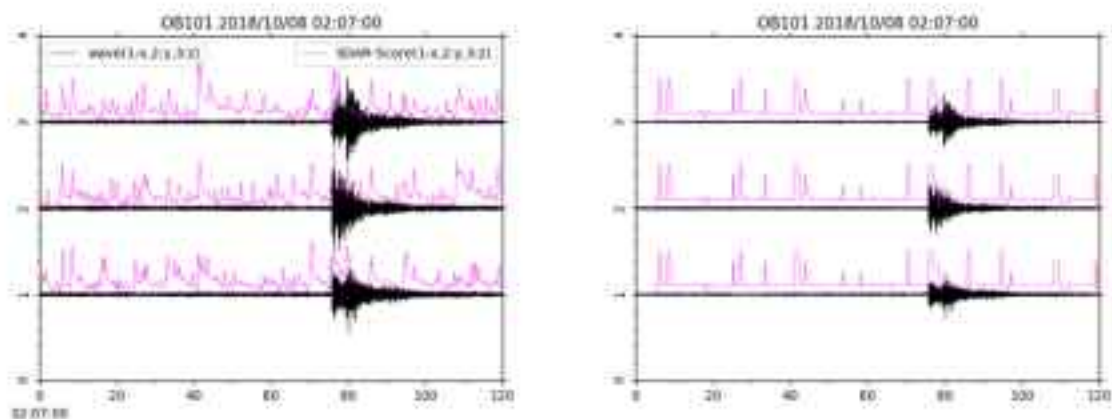


図 2.2.1-9 観測波形に左：SDAR スコア、右：地震区間スコアを重ね書きした結果

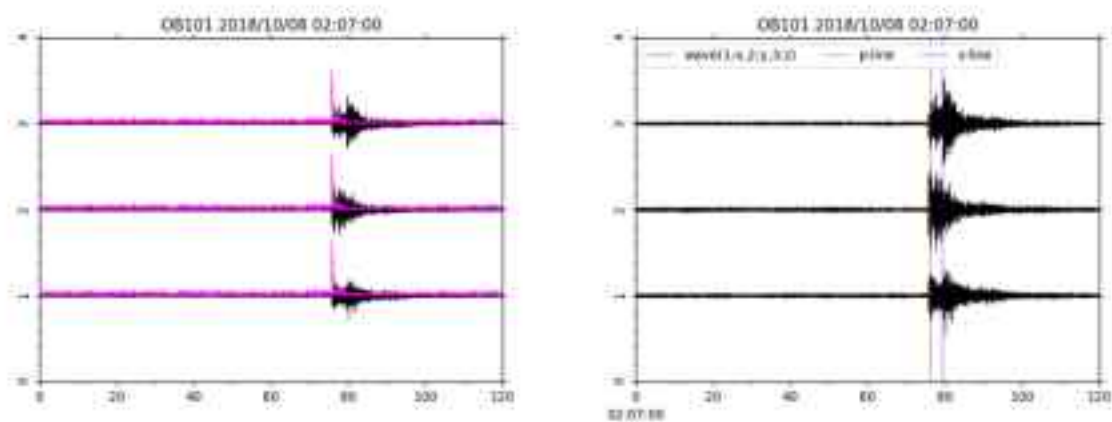


図 2.2.1-10 観測波形に左：STA/LTA、右：該当地震の理論走時を重ね書きした結果

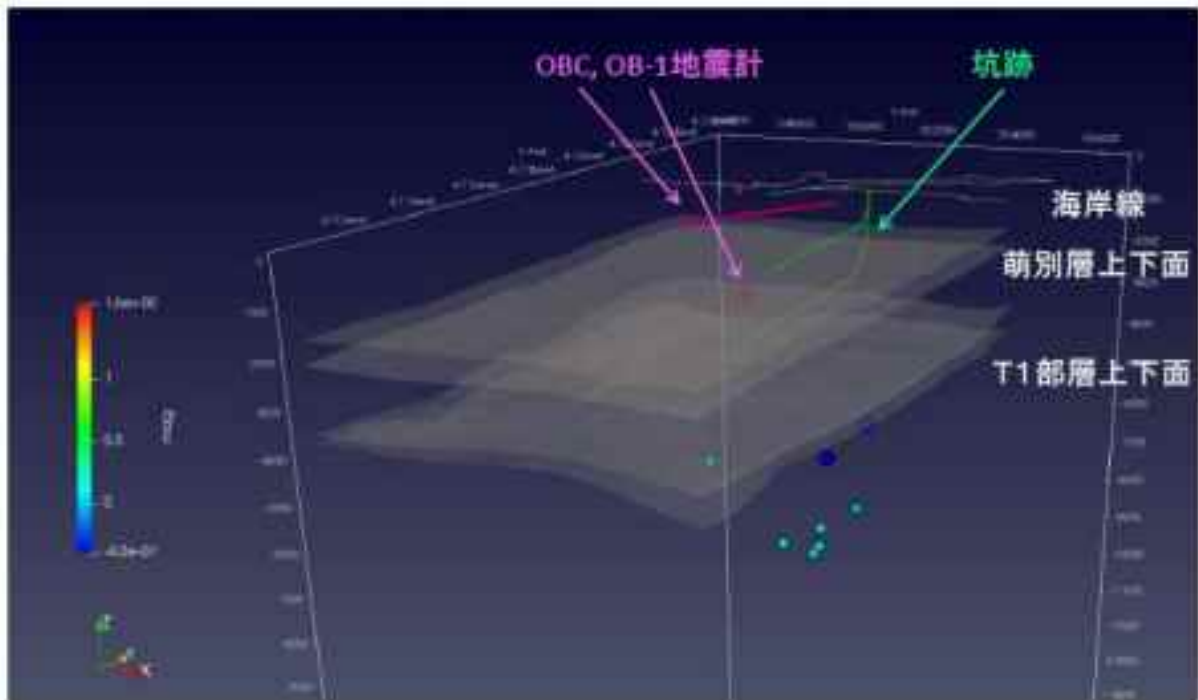


図 2.2.1-11 微小振動および自然地震イベント位置の 3 次元表示例
(CO₂ 圧入開始前 (2015/4~2015/8) に観測された微小振動イベントを示す)

2.2.2 操業情報を取り入れた信号切り替え判定基準の策定

信号切り替え判定基準を考える場合、まず圧入安全管理システムが対象とする範囲（平面的な範囲、深度）および対象とするマグニチュードを想定する必要がある。その想定の下に観測データを用いた ATLS 結果を評価することになるが、これまでは地震の大きさであるマグニチュードに焦点が当てられることが多かった。マグニチュードは信号切り替え判定基準の重要な要素であるが、このほかに圧入点と震源との位置関係、貯留層上部の遮蔽層と震源との位置関係、地震の頻度、地表での揺れ（速度または加速度）、および操業情報として圧入の際の坑底圧力、総圧入量と圧入レートなどが信号切り替え判定基準の要素になるものと考えられる。

(1) 対象とする範囲とマグニチュード

① 対象とする平面的な範囲

対象とする平面的な範囲としては、周辺の自然地震の発生等を考慮した広域範囲と CO₂ 貯留範囲を考慮した対象範囲の 2 通りが考えられる。広域範囲は CO₂ 貯留地点の周辺に既知の断層があればそれを含むように設定し、無い場合には CO₂ 貯留範囲を考慮した対象範囲の数倍～10 倍程度が目安になる。CO₂ 貯留範囲を厚さ 20m の円筒形と仮定し、貯留層の孔隙率 15%、貯留効率 5%、超臨界 CO₂ の密度 0.7t/m³ とすると、貯留量 50 万 t の場合で半径 1.23km となり、100 万 t の場合で半径 1.74km となる。CO₂ 圧入に伴う圧力伝搬

の範囲は貯留範囲より大きくなりモデリングによる検討が必要であるが、CO₂貯留範囲を考慮した対象範囲としては貯留範囲の数倍程度が目安になる。

例えば、苫小牧の場合、上記の地層条件を仮定すると貯留量 30 万 t に対し貯留範囲の半径は 0.95km となるが、日本 CCS 調査株式会社のモニタリング対象範囲としては、圧入点を中心に微小振動観測範囲として 6km×6km を設定し、自然地震観測範囲として石狩低地東縁断層帯南端部および樽前山周辺の地震頻発域を含むように東西 55km×南北 37km を設定している。

② 対象とする深度

米国の廃水注入で誘発地震が発生しているのは、注入層の下に分布する結晶質基盤までの距離が比較的小さい場合や基盤内に断層が分布し貯留層と基盤とが水理的に連通している可能性が推定される場合であり、誘発地震の震源深さは 6km 以内がほとんどである (GWPC and IOGCC, 2017)。したがって、誘発地震との関係では、貯留層の下に基盤岩が分布している場合には基盤岩中の十分な深さまでを対象とする必要があり、そうでない場合も含めて深度 6km 以上までを対象とする必要がある。自然地震の発生深度はその地域の断層分布状況、プレート境界深度などの地殻構造等に支配され、その地域で過去に発生している地震の深さ分布を参考とする必要がある。

苫小牧の場合、太平洋プレートと北米プレートの境界付近の地震（苫小牧周辺では約 100km）を除くと、ほとんどの地震が 50km 以浅で発生しており、2018 年 9 月 6 日に発生した胆振地方東部地震およびその余震（5～45km）を除けば多くは深さ 20km 以浅で発生している（室蘭地方気象台，2015，2016，2017，2018，2019）。

したがって苫小牧を例にすると、自然地震も対象とした広域範囲に対しては 20km 程度（安全を見れば 50km）、貯留範囲を考慮した対象範囲に対しては圧入深度の数倍程度（例えば 10km）を対象深度と想定するのが無難と思われる。

③ 対象とするマグニチュード

対象とするマグニチュードは、小さい地震としては観測ネットワークの検知限界となるが、過去の CCS における微小振動では、カナダ QUEST サイトでは平均マグニチュード-0.7、最大マグニチュード 0.1 であり、米国 Decatur サイトでは Mw で-1.91～+1.0 であり平均 Mw が-0.85 であった（二酸化炭素地中貯留技術研究組合，2019）。これらからマグニチュード-0.5 程度が下限になるものと考えられる。

ある地域で発生する可能性のある最大マグニチュードは、その地域の最大の活断層の大きさに基づいて評価できるが、全ての活断層の情報が判明していることは少ない。油ガス田開発や地熱開発における注水に伴う地震誘発リスクについて、総注入量と誘発された地震の最大マグニチュードの相関性が経験的に示されており理論的な説明がなされている（例えば、McGarr, 2014; van der Elst et al., 2016）。図 2.2.2-1 に、McGarr および van

der Elst et al. のモデルから求められる総注入量と最大マグニチュードの関係を表す線を示し、van der Elst et al. のデータをプロットして示す。van der Elst et al. のモデルは室内試験のスケールからフィールドスケールまで概ね説明できており、最大マグニチュードを評価する上では妥当と考えられる。ただし飽くまで想定される最大の値であることに注意が必要である。ちなみに 100 万 t の場合、最大マグニチュードは 3~5 程度となる。

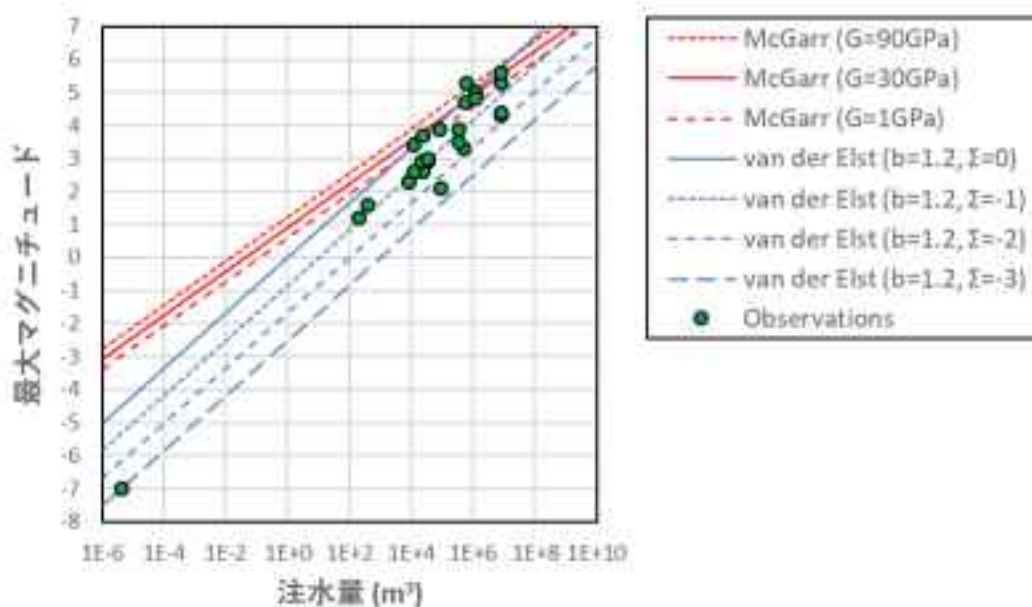


図 2.2.2-1 誘発地震事例の総注入量と最大マグニチュードの関係
(フィールドでの事例と室内試験のスケールを含む)

(2) 信号切り替え判定基準

① マグニチュード

昨年度の報告書（二酸化炭素地中貯留技術研究組合，2019）の TLS における閾値一覧表に GWPC and IOGCC（2017）に記載されている事例を追加したものを、表 2.2.2-1 に示す。

イギリスの例を除くと、多くの閾値は、

緑色： $M < 1.5 \sim 2.0$

黄色： $1.5 \sim 2.0 < M < 2.0 \sim 4.0$

赤色： $M > 2.0 \sim 4.0$

である。日本の場合はアメリカなどと違って国土が狭いことを考慮すると、緑色： $M < 0.5 \sim 1.0$ 、黄色： $0.5 \sim 1.0 < M < 2.0 \sim 2.5$ 、赤色： $2.0 \sim 2.5 < M$ が目安になるものと思われる。

表 2.2.2-1 海外の TLS における閾値

国、サイト	種別	緑色	橙色、黄色	赤色
イギリス DECC	Hydraulic Fracturing	$M_L \leq 0.0$: 計画通り圧入 継続	$0 < M_L \leq 0.5$: 注意して圧 入レートを下げて継 続、モニタリング強化	$M_L > 0.5$: 圧入を即座に 中止
カナダ・アルバータ州、 Fox Creek Subsurface Order #2	Hydraulic Fracturing	$M_L < 2.0$: 計画通りに操 業継続	$2 \leq M_L < 4$ (圧入井から 5km 以内): 関係機関に 即刻報告し軽減計画を 実施	$M_L \geq 4$ (圧入井から 5km 以内): 関係機関に即刻 報告し圧入作業を中止 実施
カナダ・ブリティッシュ コロンビア州、BCOGC	Hydraulic Fracturing	—	—	坑井から 3km 以内で M_L ≥ 4 、または有感: 操業 を中断する
米国イリノイ州 Administrative Code, Section 240.796		州当局がイリノイ州で $M < 2.0$ の振動発生 の通知を USGS または ISGS から受信した場 合	州当局がイリノイ州ま たは隣接の州境を接し た郡で $2.0 \leq M < 4.0$ の 振動発生 の通知を USGS または ISGS から 受信した場合	州当局がイリノイ州ま たは隣接の州境を接し た郡で $M \geq 4.0$ の振動 発生 の通知を USGS ま たは ISGS から受信し た場合
米国イリノイ州 Decatur	CCS	$M \leq 1.5$	黄色: 30 日以内に $1.5 < M \leq$ 2.0 の振動が 5 回以上 発生 ----- 橙色: $M > 1.5$ かつ有感または $M > 2.0$ かつ無感	マゼンタ: $M > 2.0$ かつ有感 ----- 赤色: $M > 2.0$ で有感、かつ地 表で被害報告あり または $M > 3.5$
米国オハイオ州 水平坑井対象 Ohio Revised Code Chapter 1501:0-3-06	Wastewater Disposal/ Hydraulic Fracturing	$M_L < 1.5$: 計画通り操業 継続	$M_L \geq 1.5$: 事業者と当局 の間で直接連絡開始 $2.0 \leq M_L \leq 2.4$: 事業者 と協力して操業内容の 提案または変更	$M_L \geq 2.5$: 水平坑井の一 時停止 $M_L \geq 3.0$: 承認された計 画が事業者から提出さ れるまで操業停止
米国オクラホマ州 SCOOP/STACK	Wastewater Disposal/ Hydraulic Fracturing	$M_L \geq 2.5$: 震源から半径 2km 以内のオペレータ 代表に連絡	$M_L \geq 3.0$: 6 時間以上の 操業一時停止、軽減策 を協議し改定内容で再 開	$M_L \geq 3.5$: 操業中断、作 業内容を変更して再開 の可否を検討
米国ペンシルバニア州	Wastewater Disposal/ Hydraulic Fracturing	—	$M_L > 1.0$: 坑井のパスか ら半径 6 マイル (9.6km) 以内のイベ ントを規制当局に連絡	$M_L \geq 2.0$: 坑井のパスか ら半径 3 マイル (4.8km) 以内のイベ ントを規制当局に連絡し 破碎作業を中断

② 圧入点と震源との位置関係

震源の深さは圧入点深度または同じ貯留層内である場合、および貯留層と震源との間に流体を導くような断層などの地質的特徴がある場合には、要注意となる。貯留範囲を考慮した対象範囲の項で述べたように、圧入深度の数倍程度（例えば 10km）を対象深度と想定するのが無難と思われるので、この範囲に位置する場合は要注意である。

平面的な位置関係については、CO₂圧入に伴う圧力伝搬範囲内に震源が位置する場合に要注意となるが、貯留範囲の数倍程度が目安になる。表 2.2.2-1 では黄色の基準として 5～9.6km、赤色の基準として 3～5km が示されており、日本の場合は安全側を取って黄色で 5km、赤色で 3km が目安になるものと思われる。

③ 貯留層上部の遮蔽層と震源との位置関係

CO₂圧入に伴い、貯留範囲を考慮した対象範囲（貯留範囲の数倍程度）内において遮蔽層内で振動が発生する場合には、遮蔽層の異常が想定されるので要注意である。

④ 地震の頻度

時系列的に CO₂圧入に伴って圧入点近傍で地震が発生した場合には、圧入により地震が誘発されたものと考えられる。また、CO₂圧入前のベースライン観測における地震発生頻度に対し、明らかに頻度が増した場合は要注意である。

⑤ 地表での揺れ（速度または加速度）

TLS においては地震の規模であるマグニチュードに焦点を当てられることが多いが、地震による地表の揺れ（速度または加速度）も重要なファクターである。GWPC and IOGCC (2017) において示されている American Exploration and Production Council (AXPC) が作成した TLS の例を元に、判定基準についてまとめて表 2.2.2-2 に示す。表には功刀(2000)に基づいて改正メルカリ震度から求めた気象庁震度を参考値として示した。

やや過大評価のようであり、気象庁震度で言えば緑色：震度 1 以下、黄色：震度 1～2、赤色：震度 2 以上程度が目安のなるものと思われる。

表 2.2.2-2 AXPC による TLS 基準の例（気象庁震度を併記）

	緑色	黄色	赤色
操業状態	操業継続	操業条件変更	操業停止
地動	地表で無感	地表で有感	地表で不安を感じる揺れ、構造物損傷
ピーク速度 (cm/s)	0.1 未満～1.1	1.1 以下～3.4	3.4 以上
マグニチュード	1～3.9	3.9 以下～4.4	4.5 以上
改正メルカリ震度	I～Ⅲ+	Ⅲ～Ⅳ+	V+
(参考) 気象庁震度	0～2	2～3	4 以上

⑥ 圧入の際の坑底圧力

CO₂圧入において地表における注入圧力を増加することで圧入率が増加するが、この時、坑底圧力は事前調査で把握されている地層の破壊圧力を越えないようにしなければならない。したがって、操業情報として圧入作業時の坑底圧力をモニターし破壊圧力を越えた場

合には、すぐに注入圧力を下げて坑底圧力を破壊圧力以下にする必要がある。その他、坑底圧力が急に変化した場合も要注意である。

⑦ 総圧入量と圧入レート

油ガス田開発や地熱開発における注水に伴う地震誘発リスクについて、2.2.2(1)③で記したように、総注入量と誘発される地震の最大マグニチュードの相関性が経験的に示されており理論的な説明がなされている。CCS については類似の技術として廃水注入が考えられ、これらにおいては高透水性の地層に圧入するため圧力上昇が緩和されるものと考えられるが、大量の流体を圧入するため最大マグニチュードとしては大きなものとなる可能性があるため、サイト選定、圧入層およびその付近の特性評価を行い、圧入時のモニタリングおよび万一誘発地震が発生した場合の対応計画を策定する必要がある（White and Foxall, 2016）。

また、Weingarten et al. (2015) によれば、廃水圧入により誘発される地震は高い注入率（30 万バレル(48,000m³)/月以上）の坑井の方が低い圧入率の坑井より地震と関係があり、累積圧入体積、月々の坑口圧力、注入深さ、結晶質基盤岩への近接は地震と強い関係は認められず、注入率を管理することが誘発地震の可能性を最小限にする有効なツールであると結論付けている。ただし、同じ程度の注入率で廃水圧入を行っていても地震の多い場所と少ない場所があり、注入率だけではなく地域的な応力状態、断層の大きさ、断層の方向、注入点と断層の間の流体経路の有無、および地質的要因を調査し注入と地震活動の可能性について評価する必要があるとしている。サイトにより異なるとは言え、Weingarten et al. が示した 15～30 万バレル/月以上の高い注入率、すなわち 24,000～48,000m³/月（29～58 万 m³/年、16,800～33,600t/月、20～40 万 t/年）以上の注入率の場合には地震を誘発する可能性が高くなることを考慮し、地震の発生状況を注意しながら圧入を行う必要がある。

操業情報として、⑥で記した坑底圧力の他に上記の総圧入量、圧入レートがあるが、ATLS の信号切り替え判定の際にはこれらを考慮することが必要と言える。

(3) ATLS の信号切り替え判定基準のまとめ

ATLS の判定基準の各要素の関係を図示すると、図 2.2.2-2 のようになる。すなわち、振動イベントが観測された場合、その振源位置、深度を把握し、圧入対象層または遮蔽層に位置するのか、下位層に位置するかどうかという貯留層との位置関係が問題となる。そして振動イベントの規模（マグニチュード）が ATLS 判定の重要な要素となる。その他、イベント発生の様態（クラスターを形成するか否か）、発生頻度も着目すべき要素であり、圧入の操業情報としては、坑底圧力、総圧入量、圧入レートに注意する必要がある。

また、本項で述べた ATLS 判定基準の各要素の基準をまとめると、表 2.2.2-3 のようになる。

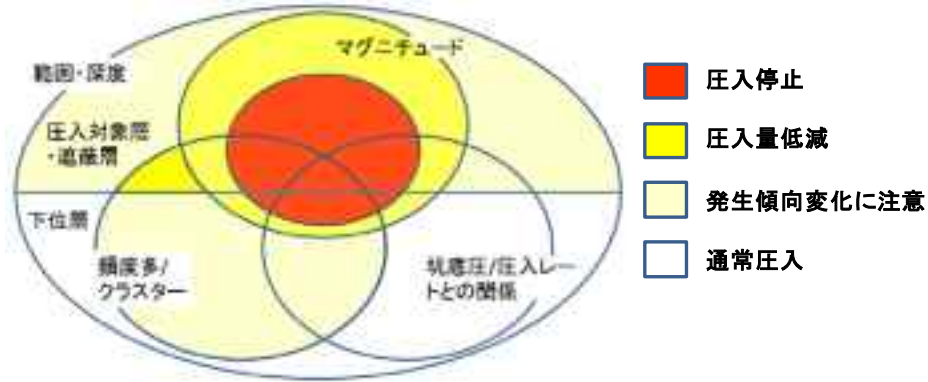


図 2.2.2-2 ATLS の判定基準の各要素の関係

表 2.2.2-3 ATLS の各要素の判定基準

	要素／項目	条件／判定基準
(1) 対象とする範囲	CO ₂ 貯留範囲を考慮した対象範囲	平面的には貯留範囲の数倍程度、圧入深度の数倍程度の深度まで（例えば半径数 km、深度 10km 程度）
	自然地震を考慮した対象範囲	CO ₂ 貯留範囲を考慮した対象範囲の数倍～10 倍程度、その地域で過去の発生した地震の深さ（例えば半径数 10km、深度 20km 程度）
(2) 対象とするマグニチュード		下限：-0.5 程度 上限：3～5 程度
(3) 信号切り替え判定基準	マグニチュード	目安として 緑色：M<0.5～1.0 黄色：0.5～1.0<M<2.0～2.5 赤色：2.0～2.5<M
	圧入点と震源との位置関係	・ 深度： 圧入深度または貯留層内、貯留層と震源との間に流体を導く地質的特徴がある、貯留範囲を考慮した対象範囲の対象深度（例えば深度 10km 以内）は要注意 ・ 平面的な位置関係： 圧力伝搬範囲内（貯留範囲の数倍程度） 黄色：5km 赤色：3km
	貯留層上部の遮蔽層と震源との位置関係	貯留範囲を考慮した対象範囲（貯留範囲の数倍程度）内で遮蔽層内
	地震の頻度	CO ₂ 圧入前のベースライン観測における地震発生頻度より明らかに増加した場合
	地表での揺れ	目安として 緑色：震度 1 以下 黄色：震度 1～2 赤色：震度 2 以上程度
	坑底圧力	坑底圧力が破壊圧力を越えた場合、すぐに注入圧力を下げて破壊圧力以下にする 坑底圧力が急に変化した場合も要注意
	総圧入量	総圧入量が大きいほど最大マグニチュードは大きくなる可能性がある
(4) その他	総圧入量	総圧入量が大きいほど最大マグニチュードは大きくなる可能性がある
	圧入レート	サイトにより異なるが Weingarten et al. が示した 15～30 万バレル/月以上の高い注入率、すなわち 24,000～48,000m ³ /月（29～58 万 m ³ /年、16,800～33,600t/月、20～40 万 t/年）以上の注入率の場合には地震を誘発する可能性が高くなることを考慮し、地震の発生状況を注意しながら圧入を行う必要がある

2.2.3 まとめ

本課題では、「圧入安全管理システムの開発」として、「操業情報を取り入れた ATLS の完成」、「操業情報を取り入れた信号切り替え判定基準の策定」を行った。

「操業情報を取り入れた ATLS の完成」では、以下の内容を行った。

- (1)自動処理への対応
- (2)観測モジュール間の結果統合方法の検討
- (3)イベント位置決定方法の検討
- (4)マグニチュード算出方法の検討
- (5)アラート表示機能の付加
- (6)図化ツールの整備

(1)では、観測データから自動的に正確にイベントを抽出しその時刻情報を得ることが求められるが、イベントを抽出する方法として SDAR 法を採用した。また時刻情報を得るためには、SDAR 法で抽出されたイベント区間に対し STA/LTA 法を適用した。

(2)では、SDAR 法により求めた各モジュールの地震区間スコア結果の統合について評価した結果、SDAR 法の閾値 0.7、モジュール間の統合方法としては AND 演算が良いものとなった。

(3)では、観測データから各モジュールの検出ファイル（到達時刻）を作成し、それらを統合したマージデータセットを作成し、hypomh により震源計算を行う。

(4)では、観測データの上下動の最大速度振幅から渡辺の式を使ってマグニチュードを求めるが、気象庁震源情報と比較して補正式を求めた。OB-1 の場合、Mjma に補正する場合は、 $Mjma = (\text{推定 } M - 0.0428) / 0.9023$ となった。

(5)では、観測データが設定した閾値を越える場合、震源位置が指定の範囲内に位置する場合、マグニチュードが閾値を越えた場合、指定の範囲の地震発生頻度が変化した場合にアラート表示を出す機能を付加した。

(6)では、波形と SDAR 結果（スコア値）や読み取り位置を重ね書きするツールを整備し、また、算出した震源位置の 3 次元的な表示は、科学技術可視化の並列化と対話操作のための、自由に利用できるオープンソースプログラムである Paraview を用いて行うものとした。

「操業情報を取り入れた信号切り替え判定基準の策定」では、以下の内容を行った。

- (1)対象とする範囲とマグニチュードの検討
- (2)信号切り替え判定基準の策定

(1)では、圧入安全管理システムが対象とする範囲（平面的範囲、深度）、マグニチュードについて検討、設定した。

(2)では、これまで中心として扱われてきた地震の規模を表すマグニチュードの他に、圧入点と震源との位置関係、貯留層上部の遮蔽層と震源との位置関係、地震の頻度、地表での揺れ（速度または加速度）、および操業情報として圧入の際の坑底圧力、総圧入量と圧入レートなどが信号切り替え判定基準の要素になるものと考え、これらについて主として文献資料を基に判定基準を策定した。

参考文献

- 1) Ground Water Protection Council (GWPC) and Interstate Oil and Gas Compact Commission (IOGCC) (2017) : Potential Injection-Induced Seismicity Associated with Oil & Gas Development: A Primer on Technical and Regulatory Considerations Informing Risk Management and Mitigation, Second Edition, 181 pages
- 2) McGarr, A. (2014) : Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, *Journal of Geophysical Research*, 119, 1008-1019
- 3) van der Elst, N. J., Page, P. T., Weiser, D. A., Goebel, T. H. W., Hosseini, S. M. (2016) : Induced earthquake magnitude are as large as (statistically) expected, *Journal of Geophysical Research*, 121, 4575-4590
- 4) Weingarten, M., Ge, S., Godt, J. W., Bekins, B. A., Rubinstein, J. L. (2015) : High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity, *Science*, 348 (6241), 1336-1340
- 5) White, J. A., Foxall, W. (2016) : Assessing induced seismicity risk at CO₂ storage projects: Recent progress and remaining challenges, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49, 413-424
- 6) 功刀卓(2000) : K-NET 強震計記録に基づく気象庁計測震度と計測改正メルカリ震度の関係, *地震*, 第 53 巻, 89-93
- 7) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合(2019) : 平成 30 年度成果報告書
- 8) 室蘭地方气象台(2015, 2016, 2017, 2018, 2019) : 胆振・日高地方の地震活動図, <http://www.jma-net.go.jp/muroran/document/news/2019jishinkatsudo.pdf>
- 9) 渡辺晃(1971) : 近地地震のマグニチュード, *地震*, 第 24 巻, 189-200

2.3 CO₂長期モニタリング技術の開発

CO₂圧入サイトでは、繰り返し弾性波探査（反射法）を中心に、CO₂モニタリングが実施されている。CCS実用化に向けては、高コストかつ地元負担の大きい弾性波探査の実施回数を、可能な限り低減させる必要がある。本課題では、弾性波探査を補完する長期的・連続的な監視手段として、現在最も高精度な重力計である超伝導重力計を用いた高精度微重力測定技術の開発を行う。苫小牧サイトを初めとして、我が国では主に海底下の貯留層へのCO₂地中貯留が想定されていることから、特に沿岸域における重力データ取得・解析技術の開発を目的とする。

具体的には、超伝導重力計を用いて苫小牧サイトにおけるCO₂圧入前および圧入後2年程度にわたる重力データを取得する。重力モニタリングでは、可能な限りCO₂貯留点に近い海岸近傍におけるデータの取得が望ましいが、そのような風雪、波浪、塩害等の影響を受ける過酷な環境下に超伝導重力計が設置された例はない。本課題では既存技術を利用しつつ沿岸域特有の課題を抽出し、その対処方法を検討する。また、得られた重力データに対しては、種々の自然現象（例えば、潮汐、気圧変化、降雨など）に起因する重力変化（ノイズ）を除去する処理が必要となる。このため、個々の自然現象の重力変化を見積もるとともに、重力データの実測値からこれらを除去するデータ解析の方法を開発する。特に、必ずしも定型的な方法が確立されていない降雨浸透および地下水位変動に伴う重力変化の見積もりについて、実用化を念頭に置いたデータ解析方法を検討する。

2.3.1 観測ノウハウおよびトラブル対処法を踏まえた長期連続重力データ取得法の検証

(1) はじめに

重力モニタリングでは、地下のCO₂プルーム内における質量変化に伴う重力変化をモニタリングの対象としている。コスト、保守性、沿岸漁業への影響などの観点から陸上における高精度モニタリングを目標としており、その場合は可能な限りCO₂圧入領域に近い海岸近傍の陸上において、現在最も高精度な重力計である超伝導重力計を用いた長期連続観測を実施することが必要となる。海岸近傍の観測点においては、海岸に打ち寄せる波浪と海からの強風による振動や、それらによって生じる空気中の海水飛沫による塩害等の発生が予想される。そのため、そのような過酷な観測環境に対応した超伝導重力計の運用方法の構築が必要となる。また、機器故障・寿命等のトラブルへの対処および予備機も含めた複数台の重力計の使用などの長期連続観測を可能とするための運用法の構築も必要となる。

今年度は、苫小牧サイトでの重力モニタリングを継続して実施し、特に前年度に実施した運用方法の効果を確認しつつ、連続稼働に伴う機器の状態監視および保守・点検作業を行った。具体的には、塩害や連続稼働に伴う機器の劣化・損傷などの情報の蓄積とそれらの解決方策の策定を行った。また、重力データの解析に必要な補助データについて、その選定を目標としつつ、新たに地下水位データの連続取得を開始した。

(2) 重力モニタリングの継続実施および機器状態監視・保守・点検作業

苫小牧サイトでは、産業技術総合研究所の iGrav017 (Ser. No. 17 の超伝導重力計 iGrav : 以下、Ser. No. 35、36 についても同様に表記) を用いて 2015 年 3 月 6 日から重力モニタリングを開始し、2018 年 1 月から苫小牧の新設観測基台に設置した iGrav035 と iGrav036 の並行観測に引き継いで現在まで継続している。なお、2017 年 11 月～2019 年 1 月まで iGrav017 の絶対重力基台に iGrav035 を仮設してこの 2 台での並行観測を実施しており、また、iGrav017 はこの 2 台の順調な観測継続を確認した後、2018 年 9 月 10 日に苫小牧における観測を終了して移設している。図 2.3.1-1 に、2019 年度に新設した地下水位観測井を含めた苫小牧サイトにおける機器配置を示す。

苫小牧サイトでのこれらの重力モニタリングの継続実施を通じて、海岸近傍での長期連続計測実現、塩害や連続稼働に伴う機器の劣化・損傷などの情報の蓄積とそれらの解決方策の策定を行い、必要となる補助データ選定、長期連続計測を可能とする運用法確立等も本研究開発では目標としている。その一環として、データ取得におけるトラブルを可能な限り回避し、トラブルが生じた際にはより早い回復を図るために製造元技術者による定期的な保守を実施している。今年度は 2019 年 11 月 19 日～21 日および 2020 年 1 月 13 日～15 日に定期的保守を実施し、塩害と連続稼働によるダメージについての点検と、必要に応じて補修・部品交換等を行った。また、連続稼働と共に消耗し、故障発生後では交換部品入手に長時間を要しうる部品について予備部品を準備した。さらに、メーカーの推奨保守期間を超えて使用していた 4K 冷凍機の予備機を準備し、定期保守の際に 1 台ずつ交換するとともに、使用していた冷凍機についてメーカーにおけるオーバーホールを行って消耗部品を交換した。4K 冷凍機は、iGrav のデュアー頂部に設置して、コンプレッサから供給された冷媒（高純度ヘリウム）を用いてデュアー内を冷却し、液体ヘリウムにより超伝導状態が維持できる 4.2K 程度にセンサ部分を保つ。交換作業を図 2.3.1-2 に示す。この他に、iGrav 内で各種データの取得とシステム制御のためのコントロール用ユニットとして使われている組込用 PC の OS の更新と、不凍液を循環させて iGrav 本体を入れたエンクロージャ内を適温に保つ温度制御システムの消耗部品の整備までを行った。

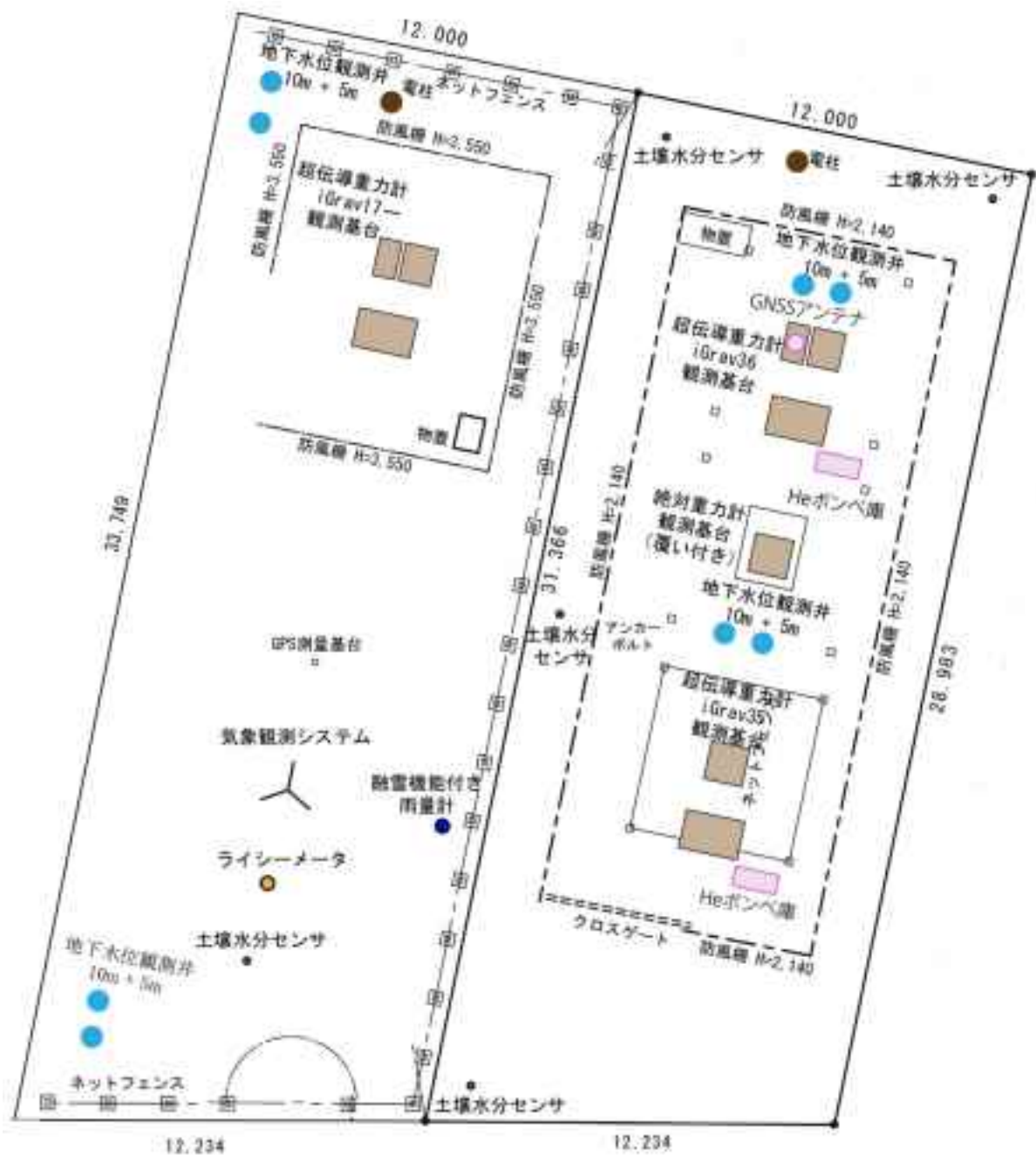


図 2.3.1-1 苫小牧重力モニタリングサイトの機器配置図

また、重力モニタリングの補助データとして、気圧・降水量・土壌水分量・地下水位等、および基台の上下変動を確認するための GNSS (Global Navigation Satellite System) 測量などを実施している。この補助データ収集に関連して、2019 年度は、2 台の iGrav の近傍の地下水位を測定するための地下水位観測井と地下水位観測システムの追加、故障した積雪センサの交換、GNSS 測量のデータ取扱の改良等を実施するとともに、気圧センサの精度確認のための高分解能大気圧測定装置を設置し、比較計測を開始した。



図 2.3.1-2 超伝導重力計 iGrav035 の冷凍機交換作業（左：新品の冷凍機；中：コンプレッサからの冷媒ライン 2 本と電源ケーブルを iGrav 上面で取外した状態；右：取外し直後の冷凍機）

(3) 重力データの取得状況

2019 年 4 月～12 月の期間、苫小牧サイトでは 2 台の超伝導重力計による良好な並行観測が維持されていた。2 台の超伝導重力計のうち iGrav035 は 9 月 11 日に 1 サンプルの欠測が生じただけだった。一方、iGrav036 は年度初日に欠測があったものの、それ以外の欠測は生じていない。並行計測状態にある 2 台の超伝導重力計の重力差からは、潮汐成分等は同相成分として除かれるので、高分解能の信号を検出できる。図 2.3.1-3 左図に 2019 年 11 月 16 日～21 日の 2 台の重力計の各々の記録と重力差を示した。重力差のパターンは滑らかな連続変化（図 2.3.1-3 左図 321 日付近）とステップ状変化（図 2.3.1-3 左図 322 日付近）に大別できる。前者はまとまった降雨時にしばしば認められる。2018 年度の報告書でもいくつか事例を示したが、基台の構造の違いに起因する降雨応答差の可能性がある。後者は重力計の点検に伴って生じたと思われるが、強震を伴う地震時にも生じることがある。後者のような不連続的变化は、重力計連続記録の解析の際に、障害になりうるが、ステップ補正を施すことで連続的な扱いが可能になる。並行計測データによって、高精度でステップ補正值を評価できる。図 2.3.1-3 右図には 2019 年 4 月～12 月の期間の重力差を示した。通算日 100 日、120 日付近で、重力差に顕著なステップが見られるが、いずれも有感地震に伴うものであった。図 2.3.1-3 右図に挿入図として図 2.3.1-3 左図の主要部を拡大表示したが、①重力差の分解能は $0.1\mu\text{Gal}$ で識別できること、②降雨に伴う重力差は $8.1\mu\text{Gal}$ であったこと、③定期点検作業で生じたオフセットは $1.1\mu\text{Gal}$ であったこと、が読み取れる。

なお、超伝導重力計には複数の動作モードがあり、通常は Run モードで計測されるが、Medium モードにすると分解能は落ちる代わりにダイナミックレンジは広がる。海岸に近いためノイズレベルが高い苫小牧サイトでは Medium モードでの計測が有利ではないかと考え、2016 年の試行を経て 2018 年 7 月から継続している。特に 2018 年 10 月以降は、

1台 (iGrav036) は Run モード、もう 1台 (iGrav035) は Medium モードに設定して並行計測を維持している。図 2.3.1-3 右図に見られるインパルス状ノイズの中には、遠地地震時に両者のダイナミックレンジに違いがあるために生じた事例が含まれる。最近は Medium モードでの連続計測が注目され、国内の別の 3 地点でも採用されている。苫小牧で蓄積されている良好な並行計測データは Medium モードによる計測データの評価という点でも価値がある。

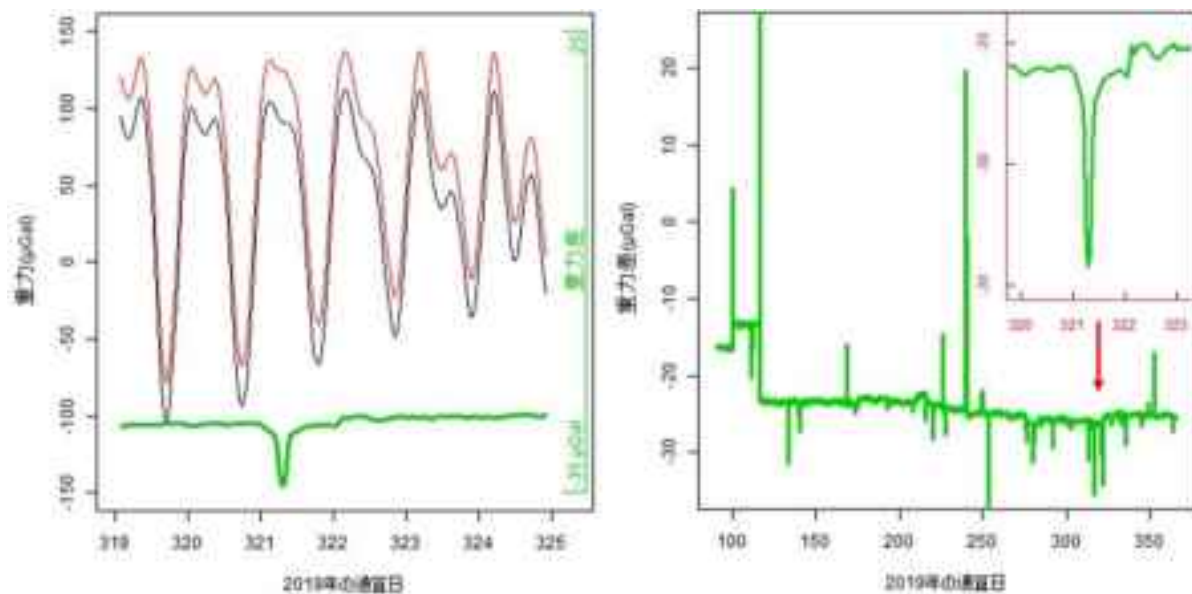


図 2.3.1-3 苫小牧サイトで並行計測中の 2 台の超伝導重力計の差 (左図：2019 年 11 月 16~21 日に iGrav035 (黒線) と iGrav036 (赤線) から得た記録；右図：2019 年 4~12 月の重力差の記録 (挿入図は 11 月 17~19 日を拡大表示したものである))

2.3.2 沿岸域設置時のノイズ除去方法の確立

(1) はじめに

重力測定点において得られる重力データには、測定点周辺における降雨浸透や地下水位変動による影響が含まれる。また、それらの大きさは、地下におけるCO₂の移動による重力変化よりも大きい可能性がある。そのため、重力モニタリングをCO₂地中貯留に適用するにあたっては、降雨浸透や地下水変動の影響を除去する必要がある。

今年度は、上述の地表水の移動に伴う重力変化の見積もりおよびそれらの重力データからの除去を行い、残差を評価した。さらに、降雨浸透過程の定量評価を目的として、自然電位の観測および解析を行うとともに、自然電位変動に関する予測の高精度化を目的としたプログラムの機能拡張を行った。また、地表面変動データを解析し、重力変化への影響を予察的に考察した。

(2) 地下水位変化の影響の除去

苫小牧サイトの重力観測点近傍に地下水位観測井を掘削し、前年度より地下水位の連続データを取得している。当該サイトにおいては、地表面（標高約7m）から深度約5mまでおよび深度約6mから深度10mまでの区間に砂層が、2つの砂層の間には厚さ数十cmの粘土質シルト層が確認されており、2つの砂層内にはそれぞれ地下水面が確認されている。現時点では、下層の地下水は海水と連続した不圧地下水であり、上層の地下水は宙水であると考えている。両方の水位変動ともに重力データに影響を及ぼすことが予想されたため、井戸底の深度が5mと10mの観測井を2地点にそれぞれ2本ずつ掘削し、宙水と不圧地下水の水位の連続データを取得している。観測は2018年6月上旬に開始し、現在に至るまで連続データの取得に成功している。

地下水変動の影響を除去する方法としては、以下の方法を採用している。すなわち、宙水と不圧地下水の水位変動をそれぞれ Δh_a と Δh_b とし、両方の水位変動に起因する重力変化 Δg_{est} を、 $\Delta g_{\text{est}} = a \times \Delta h_a + b \times \Delta h_b$ と表現している。ここで、 a と b は経験的に決定される係数であり、重力変化の観測値と Δg_{est} の二乗平均平方根誤差が最小となるように決定される。前年度は、この方法を3か月間の短期的な重力データからのノイズ除去に適用し、その結果、残差の標準偏差が $0.75\mu\text{Gal}$ の安定的な重力データの取得に至った。そこで、今年度は、当該手法をより長期のデータに対して適用し、その長期データに対する適用性を調べた。

図2.3.2-1に、潮汐、極潮汐、気圧応答成分および不規則ノイズを取り除いた重力の観測値に対して、当該補正手法を適用して地下水位変化の影響を除去した重力残差を示す。2018年7月2日～2019年11月19日までの508日間について、重力残差の標準偏差は $0.8\mu\text{Gal}$ であり、前年度に3か月間のデータに対して得た標準偏差と同等であった。このことは、当該手法が長期重力データに対しても適用可能であることを示している。なお、 a と b はそれぞれ $12.0\mu\text{Gal/m}$ 、 $5.7\mu\text{Gal/m}$ とした。

ここで用いた手法は簡便であるため、実用性が高い手法が確立されたと考えられる。一方、今年度は積雪センサの不調により積雪深データを取得することができなかった。現時点では、積雪・融雪の影響は明瞭ではないものの、今後、積雪量を計測し、積雪・融雪による重力への影響が認められる場合には、その影響を除去する方法を開発する必要がある。

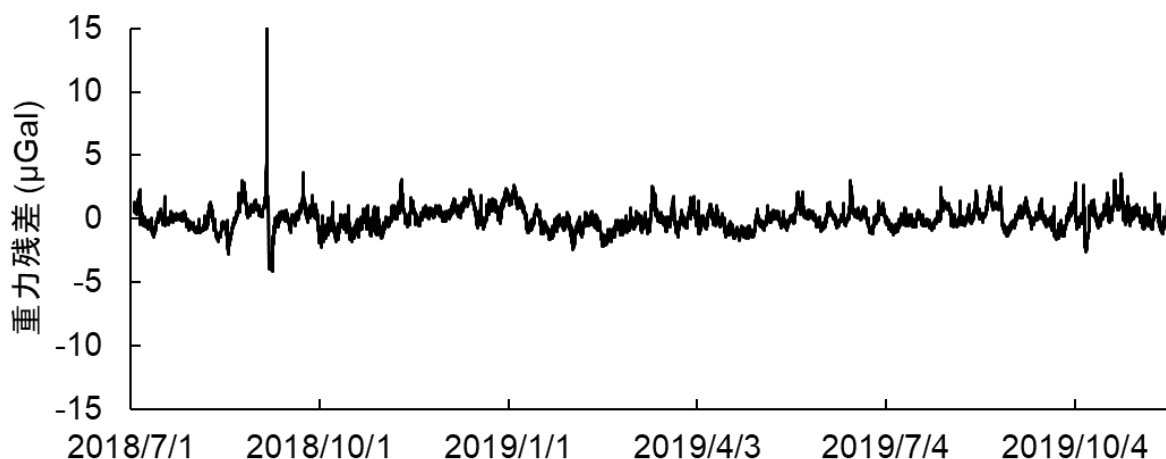


図 2.3.2-1 2018年7月2日から2019年11月19日までの508日間に苫小牧サイトで得た重力データから潮汐、極潮汐、気圧応答成分、不規則ノイズおよび地下水位変動に基づく補正値を除去した重力残差（2018年9月頃のデータの乱れは北海道胆振東部地震の影響による）

(3) 降雨浸透が自然電位・重力に及ぼす影響の定量解析

重力モニタリングにおいて、降水に伴う地下水位変動や土壌水分量の変化はノイズとなることから、降水の地下浸透過程を把握する目的で、2018年度より苫小牧サイトにおける自然電位モニタリングを実施している。その結果、降水が地下へ浸透する際に発生する流動電位が主要因と考えられる自然電位変化が捉えられており、これについては昨年度の中間年報でも報告した。今年度は、自然電位モニタリングを継続して行うとともに、降雨浸透シミュレーションにより得られた自然電位・重力の降雨応答を観測結果と比較した。以下では、解析手法と結果について詳細に述べる。

降雨浸透シミュレーションの実施にあたっては、可能な限り現実に即した水理地質モデルを用いることが望ましい。そこで、まず、苫小牧サイトのボーリングデータなどを参考に2次元地質モデルを作成した。次に、そのモデルを用いた降雨浸透シミュレーションにより地下水位の降雨応答を出力し、観測結果を再現する透水係数と間隙率を試行錯誤的に決定した。なお、地表面における境界条件は、同サイトで観測された降水量に基づき設定した。地下水位の降雨応答を再現する水理地質モデルを用いた降雨浸透シミュレーションに基づき、自然電位と重力の降雨応答を計算した結果、計算結果は観測結果と整合した。今後は、モニタリングの継続とともに、降水に伴う自然電位・重力の擾乱についてより正確な推定を行うためシミュレーションの高精度化を試みる必要がある。

(4) 地球物理データ変動のモデル化

2.3.2(3) で述べたように、降雨浸透の影響による重力データノイズ除去のため、坑井近傍で発生する自然電位変動の観測を実施するとともに、自然電位変動に関する予測の高精

度化を行った。数値シミュレーションにより計算される温度、圧力、CO₂飽和度等の変化量を、観測可能な物理量（理論計算値）に変換するプログラム（ポストプロセッサ）に関し、鋼管表面で発生する酸化還元反応において反応物質の拡散律速の及ぼす影響を取り扱えるよう機能拡張を行い、例題計算を行った。例題計算では拡散律速となる交換電流密度の上限についてケーススタディを行い、深度約 2,000m への 100 万 t/年×10 年の CO₂ 圧入により、坑口近傍で検出される自然電位変動に影響を及ぼすことを確認した。

このような機能拡張は、CO₂ 地中貯留において得られる自然電位変動データの予測技術の向上のみならず、モニタリングデータに対するノイズ除去や適切なモニタリング設計・運用に資するものと考えられる。

(5) 重力測定点の地表面変動

一般的に、測点の標高が 1 cm 変動すると約 3 μGal の重力変化を引き起こすことが知られているため (Torge, 1989)、長期間にわたる高精度な重力モニタリングにおいて測定点の地表面変動をモニタリングすることは重要である。産総研では 2019 年 2 月より苫小牧サイトにおいて、超電導重力計近傍に GNSS 受信機を設置し、重力測定点の地表面変動モニタリングを実施している。2019 年 2 月～2020 年 1 月までに得られた観測結果について、観測点から最も近い距離にある苫小牧清水町の電子基準点との間で基線解析を行い、電子基準点に対する観測点の標高差とその変動を求めた。その結果、観測期間を通じて標高差は概ね誤差範囲内の変化に収まったが、約 1cm/year の緩やかな上昇トレンドを示しているようにも見て取れた。高精度な重力モニタリングを維持するため、今後も地表面変動モニタリングを継続していく必要がある。

2.3.3 重力モニタリング運用方策の試案策定

(1) はじめに

これまでに、沿岸域での重力モニタリングを実施し、さまざまな観測のノウハウやトラブル対策などを蓄積してきた。また、沿岸域特有のノイズ除去方法を開発して、ノイズの大幅な低減にも成功している。一方、実用化に際しては、事業者の負担を可能な限り減らすため、最低限のコストと労力で実施できるような重力モニタリングの運用方策が必要となる。

今年度は、これまでに蓄積してきたノウハウや技術等を参照しつつ、重力モニタリングの解析に不可欠となるデータおよびプロセスの抽出、データ解析の簡便化の方法等の検討を行った。また、特に我が国の沿岸域を対象として、事業者が最低限の負担で実施できるような高精度重力モニタリングの運用方策について、観測・データ取得に関するハード的な側面および取得したデータの処理・利用方法というソフト的な側面からそれぞれ試案を作成した。

(2) 観測方法に関する運用方策

観測・データ取得に関する運用方策試案では、次のような項目を取り上げ、それぞれの項目について、今年度までに明らかとなったことをまとめるとともに今後の課題を挙げた。

- ・重力観測に関する項目：使用する重力計（種類・台数等）、観測設備（基台、観測小屋またはエンクロージャ、電源・Heボンベ等、保守等
- ・補助データに関する項目：補助データの種類、必要性、取得方法等
- ・その他の項目：耐環境性、特に沿岸域に設置することに伴う問題点とその対策

作成した試案に最終年度に得られた経験・知見を加えることで、本研究開発の成果としての運用方策をまとめる予定である。

(3) データ解析方法に関する運用方策

これまで苫小牧サイトにおいては、重力データからの各種ノイズの除去を目的として、さまざまな補助データ取得を行うとともに、データ解析方法の開発も行ってきた。以下に、現時点において最適と考えられるデータ解析の方法を整理する。

まず、超伝導重力計から得られる重力に相当する出力の単位は電圧であることから、これを重力に変換する必要がある。この際、変換係数は絶対重力計との並行測定の結果から得られる。次に、沿岸域においては波浪や強風に起因する短周期ノイズが卓越することから、ローパスフィルタを通すことにより短周期ノイズを除去する。その後、潮汐、気圧応答、極潮汐成分の除去が必要となる。ここでは、国内外で使用実績のある潮汐解析ソフトウェアBAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を用いており、沿岸域で取得した重力データに対する有効性は既に確認している。なお、BAYTAP-Gは気圧応答成分の推定も可能である。極潮汐は解析的な方法を用いる（例えば、Torge, 1989）。最後に、2.3.2(2) で示した地下水変動の影響を除去する方法を適用する。

2.3.4 まとめ

(1) 観測ノウハウおよびトラブル対処法を踏まえた長期連続重力データ取得法の検証

今年度は、苫小牧サイトでの重力モニタリングを継続して実施し、特に前年度に実施した運用方法の効果を確認しつつ、連続稼働に伴う機器の状態監視および保守・点検作業を行った。現時点においては、これまでに試行してきた運用方法により、塩害や連続稼働に伴う機器の劣化・損傷などを防ぎつつ、着実に重力及び補助データの蓄積ができており、今後もその適用性を検証していくとともに、必要に応じた課題解決を行う予定である。2台の超伝導重力計による並行観測により、データの質を良好な状態に保つことに成功しており、欠測も防ぐことができている。

(2) 沿岸域設置時のノイズ除去方法の確立

前年度に開発した重力データから地下水位変動の影響を除去する解析方法について、より長期間の重力データに対する適用性を調べた。その結果、重力残差の標準偏差は $0.8\mu\text{Gal}$ となり、前年度に3か月間のデータに対して得た標準偏差と同等であった。この結果は、当該手法が長期重力データに対しても適用可能であることを示している。ここで用いた手法は簡便であるため、実用性が高い手法であると言える。一方で、今年度は積雪センサの不調により積雪深データを取得することができなかった。そのため今後、積雪・融雪が重力に影響を与えているかを調べるとともに、その影響が大きい場合にはその影響を除去する方法を開発する必要がある。

また、降水過程が重力変化に与える影響を定量評価することを目指して、自然電位モニタリングを継続して行うとともに、降雨浸透シミュレーションにより得られた自然電位・重力の降雨応答を観測結果と比較した。地下水位の降雨応答を再現する水理地質モデルを用いた降雨浸透シミュレーションに基づき、自然電位と重力の降雨応答を計算した結果、計算結果は観測結果と整合した。今後は、モニタリングの継続とともに、降水に伴う自然電位・重力の擾乱についてより正確な推定を行うためシミュレーションの高精度化を試みる必要がある。これに関連して、数値シミュレーションにより計算される温度、圧力、 CO_2 飽和度等の変化量を、観測可能な物理量（理論計算値）に変換するプログラム（ポストプロセッサ）に関し、鋼管表面で発生する酸化還元反応において反応物質の拡散律速の及ぼす影響を取り扱えるよう機能拡張も行うとともに、例題計算によりその機能を確認した。

苫小牧サイトにおける地表面変動が重力変化に及ぼす影響を検討することを目的として、地表面標高観測を実施している。2019年2月～2020年1月までに得られた観測結果について、観測点から最も近い距離にある苫小牧清水町の電子基準点との間で基線解析を行い、電子基準点に対する観測点の標高差とその変動を求めた結果、観測期間を通じて標高差は概ね誤差範囲内の変化に収まった。高精度な重力モニタリングを維持するため、今後も地表面変動モニタリングを継続していく必要がある。

(3) 重力モニタリング運用方策の試案策定

これまでに蓄積してきたノウハウや技術等を参照しつつ、重力モニタリングの解析に不可欠となるデータおよびプロセスの抽出、データ解析の簡便化の方法等の検討を行った。また、特に我が国の沿岸域を対象とした高精度重力モニタリングの運用方策について、観測・データ取得に関するハード的な側面および取得したデータの処理・利用方法というソフト的な側面からそれぞれ試案を作成した。ハード面については、重力観測、補助データ取得、耐環境性等の3つの項目ごとにそれらの必要性を検討した。ソフト面については、これまでに行ってきた検討に基づき、現時点で最適な解析の手順を整理した。

参考文献

- 1) Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M., Ishiguro, M. (1991) : A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophysical Journal International*, 104, 507-516
- 2) Torge W. (1989) : *Gravimetry*, De Gruyter, pp.465

2.4 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立

CCSを事業として成立させるには、CO₂を貯留する地層を的確にモデリングし、CO₂の貯留量や性状を精度よく見極め、事業の不確実性を低減することが極めて重要である。この地質モデル構築のための基本的な技術は、石油天然ガス生産分野で開発されてきたものを利用できるものの、CO₂地中貯留に特有の課題が残されている。ひとつは、石油天然ガス田では坑井を掘削し石油を生産することにより収益が上がることで期待されるため、比較的多くの（サイトにより100本規模の）坑井が掘削されると同時に地層の物性値も検層により取得され、正確な地質情報が蓄積されていくのに対し、CO₂地中貯留では坑井掘削自体が貯留コスト増加につながるだけでなく、坑井それ自体がCO₂漏洩パスになるため、少ない（1本のみの場合もある）坑井で事業を進めざるを得ない可能性がある。そのためCO₂地中貯留においては、把握が難しい貯留層の広がりや、数少ない坑井からの情報を用いて地質モデルを構築する必要がある。

もう一つは、石油天然ガス田では密度の軽い流体が地下にある状態のモデリングを行うため、検出が比較的容易で反映しやすい一方、CO₂地中貯留では帯水層の広がりをモデリングし、性状の良い貯留層（帯水層）の判別が難しいことである。

正確な地質モデル構築は、貯留容量不足や、圧入性低下（地層破壊圧まで圧入井の圧力を増加させてもCO₂が地中に入っていくなくなる状態）といった事業リスクを低減すること、およびモニタリング範囲を決定するサイト設計において重要な位置を占めている。そこで本課題では、我が国のような構造が複雑で不均質性が大きい地層における大規模CO₂地中貯留を想定した、海域での地質モデル構築手法の確立を目指す。

技術研究組合の一員であるRITEは、陸上の長岡サイト（坑井4本、トータル1万トン）での地質モデル構築については知見がある。これに加え、海域の苫小牧実証サイト（主要な坑井3本、10万トン／年圧入）での地質モデル構築のノウハウを集約することは、1万トン／年、10万トン／年での知見から実用化規模の100万トン／年にスケールアップしていく上で有効である。また日本CCS調査（株）が構築した地質モデルは、苫小牧サイトに特化したものであるが、技術研究組合において様々な手法を検討することにより、日本の地質特性に適した地質モデル構築手法の洗い出しになる。なお、苫小牧サイトの検層・弾性波データは日本CCS調査（株）が取得したものであり、技術研究組合では初期のデータを借用し、我が国のサイトを対象とした地質モデル構築手法の一般化と、効率的なデータ取得種目等の検証、および大規模化が必要なモデリング技術を確立する。

2.4.1 地質モデリング手法の基本機能の確立

CO₂ 地中貯留のプロジェクトの CCS ライフサイクルは、サイト選定、圧入前評価、詳細設計・建設、CO₂ 圧入、サイト閉鎖後といったステージに分けられる。実用化を想定すると、プロジェクトの初期段階の限られたデータセットのみを用いた解析結果により最終投資決定 (Final Investment Decision) をしなければならず、石油天然ガス開発事業と比較して、データが少ない中での意思決定を強いられる。さらに、直接目視することが不可能な地下において、貯留可能量を定義する貯留層の分布・岩相・物性には空間的な不均質性があり、常に不確実性・リスクがつきまとう。したがって、各ステージで求められる地質モデルの精度とそれに見合う地質の不確実性を理解し、不確実性を低減させるために鍵となるデータセットを把握・整理し、それらを用いたモデリング手法を確立することは非常に重要である。

今年度は、苫小牧周辺データを借用し、各ステージにおける地質モデルの構築を実施することで一つのケーススタディとするとともに、地質モデリング手法の一般化に向けて必要な要件を整理した。

(1) CCS ライフサイクルにおける地質モデリング

CO₂ 地中貯留事業における地質モデルは、ステージごとに必要となる目的や精度が異なる。図 2.4.1-1 に CO₂ 圧入サイトの選定から CO₂ 圧入、サイト閉鎖後まで CCS ライフサイクルにおける地質モデルの果たす役割と、地質モデル構築に必要なデータの種類をまとめた。サイト選定時には、主として既存データを用いて広域的な地質概念モデルを作成する。そこで選定されたサイトに対して、新たに取得された 3D 弾性波探査データや坑井データを用いて圧入前評価を実施して事業の進行の可否を決定する。その上で、想定される貯留量が確保できると判断されれば、圧入井の配置やモニタリング計画を CO₂ 挙動シミュレーションによって詳細に検討し、詳細設計および設備の建設を行う。CO₂ 圧入が実施されると、圧入レートや圧入量、坑底圧力などの計測データや、圧入後の弾性波探査データによる CO₂ 広がりイメージングして、ヒストリーマッチング等の手法を用いて地質モデルのアップデートを行う。



図 2.4.1-1 CCS ライフサイクルの各ステージの目的と取得すべきデータ

(2) 大規模貯留層を対象とした地質モデリングのために必要な要件

大規模貯留層を対象とする場合には、空間的なデータのギャップを埋める技術が重要である。そのために、地球統計学的アプローチや少ないデータ間の関係を学習させる機械学習アプローチとともに、広い範囲の堆積学的な知見を用いたアプローチの利用が進められている。また、その他の要素技術として、地層の物性評価技術の高度化、シナリオ決定プロセスの高度化、低解像度モデル（Reduced Order Model）を用いた多数シミュレーションによる不確実性の定量的評価技術などに加えて、リスク評価と経済性評価の重要性が高い。CO₂地中貯留におけるリスクは、貯留可能量に関するリスク、潜在的な漏洩リスクなどの安全性に関わるリスク、およびコストに関するリスクに分けられる。貯留可能量を減ずるリスクとして、圧力上昇による圧入性の低下の可能性や、未評価の断層により貯留可能領域が減少することが挙げられる。また、高浸透性の断層では潜在的な漏洩パスとなることで遮蔽性能の低下が起きることも考慮しなくてはならない。その他、地層圧の変化によって引き起こされる微小振動も検討課題となる。これらのリスクを総合的に解釈して、リスクを低減することができるように圧入デザイン（圧入井や圧力緩和井の配置や圧入レートなど）等の設計を行うことが求められる。

また、米国石油技術者協会（SPE：Society for Petroleum Engineers）では、貯留量評価のためのガイドラインとして Storage Resource Management System（以下、SRMS）を提案し、地質モデルの構築における経済性評価の重要性を提唱した（SPE, 2016）。SRMSでは、CO₂貯留事業の計画段階からサイト閉鎖後に渡る全ての期間で統一された貯留量評価システムの利用と、経済性評価による貯留可能量の定義が大きな柱である。そのため、SRMSはCO₂地中貯留事業の実用化を進めるにあたって、経済性評価を加えた地質モデリングシステムの一つとして期待されている。

2.4.2 実用化規模の貯留層モデル構築手法の確立

CCS ライフサイクルのステージが進むことによるデータの増加を反映して、推定される貯留可能量の精度の向上・不確実性の低減を示すことを目的とし、苫小牧実証サイトで取得されたデータを用いて、3つの広域的な地質モデルを作成し、貯留可能量を算出した。これらの広域地質モデル構築作業により、100万トン/年クラスの大規模地中貯留を想定した地質モデリング手法が確立され、CCS ライフサイクルの各ステージで不確実性を低減させるために必要となる要件が整理されることが期待される。

(1) CCS ライフサイクルの各ステージにおけるデータおよび地質モデル精度の整理

苫小牧実証サイトを例として、CCS ライフサイクルのうち、①サイト選定时、②圧入前評価時および③CO₂圧入時の3ステージについて、以下のように、地質モデル構築のためのデータの選定を行った（図 2.4.2-1）。

- ① サイト選定：公開されている既存の坑井データおよび弾性波探査データ
- ② 圧入前評価：調査井 1 本（CCS-1）の坑井データおよび 3D 弾性波探査データの追加
- ③ CO₂ 圧入：調査井 2 本（OB-2、OB-3）と圧入井 1 本（IW-2）の坑井データの追加



図 2.4.2-1 CCS ライフサイクルにおけるステージと苫小牧サイトデータの一覧

(2) 苫小牧沖を例とした CCS ライフサイクルにおける地質モデルの作成

上記データを用いて、①～③の 3 ステージについて広域的な地質モデル（#1～#3）を作成した（図 2.4.2-1）。昨年度、3D 弾性波探査の範囲を陸域へわずかに拡張した 5km×7km のサイズで圧入シミュレーションを実施し、モデルの境界が結果に影響することがわかった。そこで地質モデル#1 では、大規模地中貯留を想定した上で、モデルの境界に影響されない圧入シミュレーションのために適切なモデル範囲を検討することを目的とし、モデルサイズを 80km×80km の広域な範囲とした。なお貯留層は 1 ゾーンで表現されている。本地質モデル#1 を用いて圧入シミュレーションを行った結果、20km×20km のサイズであれば圧力伝播を十分表現できる（結果に対する境界部分の影響が小さい）ことが確認され、これを地質モデル#2 および#3 のサイズとした。

次に、陸域に露出する地質情報に基づいた堆積学的検討により、貯留層の起源となる粗粒砕屑物の供給経路（当時の河川）を推定し、3D 弾性波探査データを加味してファンデルタシステムの広がり求めた（図 2.4.2-2）。推定した砂岩の分布域を考慮し、遮蔽層、貯留層上部それぞれにデルタ堆積物の分布範囲についてベースケースと悲観ケースを作成した。貯留層下部は 1 ケース、遮蔽層、貯留層上部についてはベースケースと悲観ケースの 2 ケースを組み合わせた 4 ケースの地質シナリオを反映させた地質モデル#2 を作成した（図 2.4.2-3）。

地質モデル#3 では、3D 弾性波探査範囲内に圧入井 IW-2 があることから、坑井データ

に基づき貯留層内を4つのゾーンに細区分し、礫質チャネルの分布は、昨年度作成の地質モデルと同じものとし、1ケースのみ作成した。

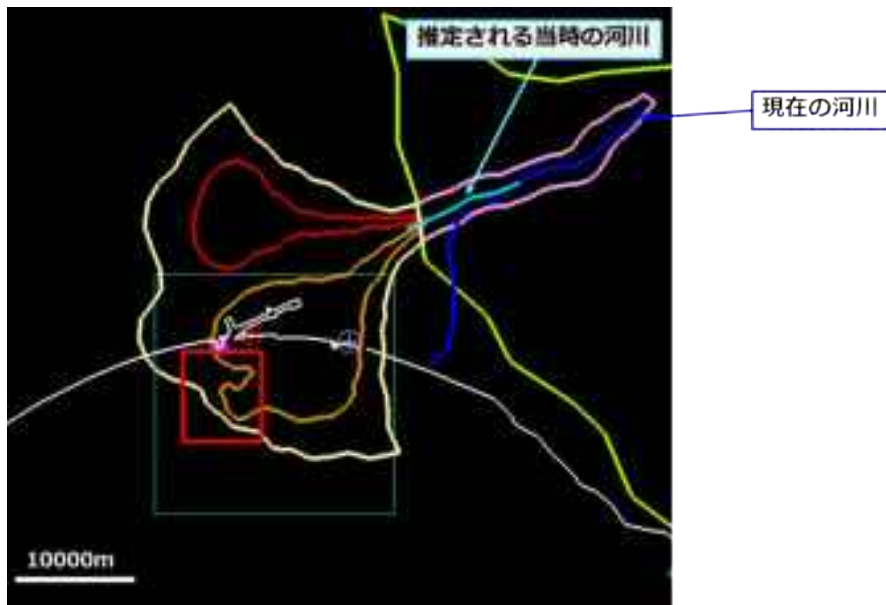


図 2.4.2-2 貯留層形成当時の堆積学的コンセプト（ファンデルタシステム）

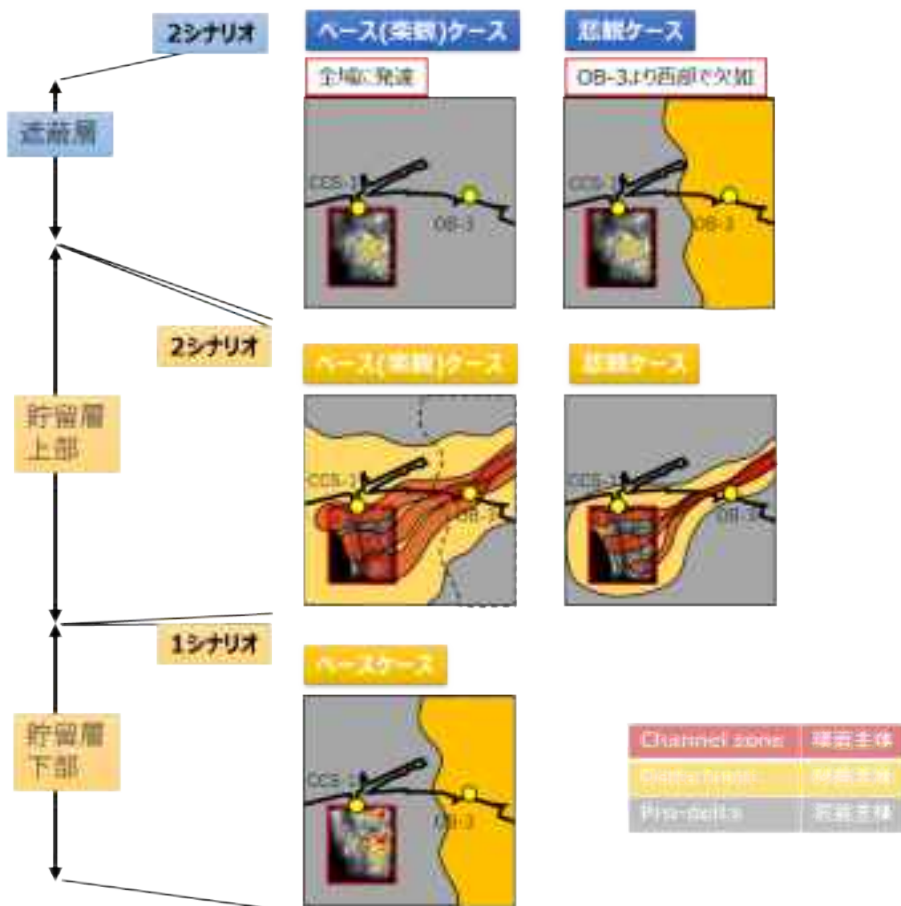


図 2.4.2-3 地質モデル#2 ケース分け概念図

(3) 不確実性の評価

上記作成の各地質モデルで CO₂ 貯留可能量の計算を行った。貯留可能量は以下の計算式にて求めた (RITE, 2006)。

CO₂ 貯留可能量 [kg]=

貯留可能エリア×有効孔隙率×貯留効率×超臨界 CO₂ 飽和率÷CO₂ 容積係数×CO₂ 密度

ここで、貯留効率：0.25、超臨界 CO₂ 飽和率：0.50、CO₂ 容積係数：0.00295、CO₂ 密度[kg/m³]：1.976 である。

各地質モデルにおける CO₂ 貯留可能量は、地質モデル#1 ではおよそ 8 億トン、地質モデル#2 ではおよそ 4 億トン～2 億トン、地質モデル#3 ではおよそ 2.8 億トンとなった(図 2.4.2-4)。CCS ライフサイクルのステージが進行するにしたがって、物性分布域の制限による地質モデル精度向上と貯留可能量が低減される結果が示された。また、地質シナリオを考慮した複数の地質モデルを作成し、悲観ケース～ベースケースの間の貯留可能量を推定するアプローチにより、取り得る貯留可能量の幅 (すなわち不確実性の幅) を定量的に推定することができることがわかった。

以上、苫小牧実証サイトのデータセットを用いて、年間 100 万トン/年クラスの大規模地中貯留を想定し、CCS ライフサイクルの 3 つのステージ (①サイト選定、②圧入前評価時、③CO₂ 圧入時) での広域的な地質モデルを構築し、貯留可能量を算出した。本検討により、ステージが進行するにしたがって、地質モデルの精度が向上し、モデル#2 では貯留可能量の範囲 (不確実性の幅) を推定し、モデル#3 においてその貯留可能量が実現されることを示した。本モデルは坑井データや弾性波探査データが欠如するエリアも含めた広域的な範囲を対象としており、データ間のギャップを補完するために堆積学的な概念を利用することが重要であることが明らかとなった。本作業結果および作業過程に得られた知見により、プロジェクトの目的を達成する貯留可能スペース・物性分布の推定精度の向上および不確実性の低減のために必要となる要件が整理されることが期待される。

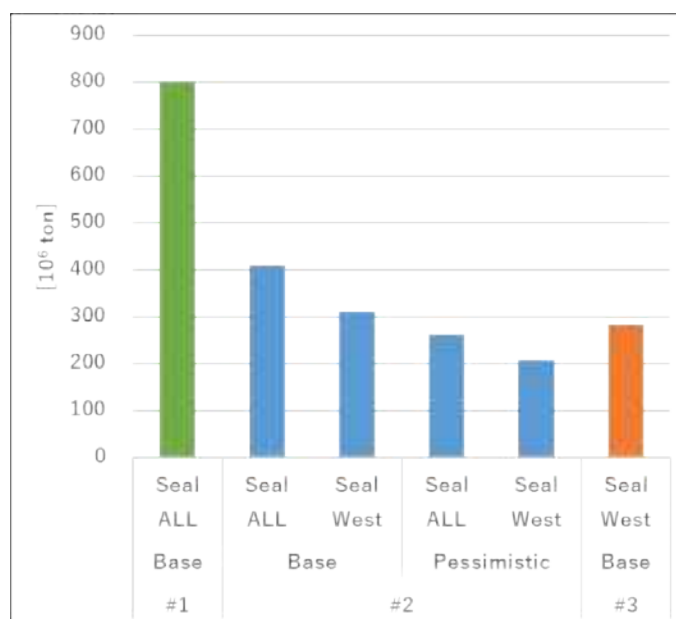


図 2.4.2-4 地質モデル#1～#3 における CO₂ 貯留可能量

2.4.3 まとめ

大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立として、今年度得られた研究成果を以下にまとめる。

1. 大規模貯留層を対象とした地質モデリングのために必要な要件として、CCS ライフサイクルの各ステージにおける地質モデルの使用目的とその構築のために必要なデータの種別について整理した。
2. 地質モデルの大規模化に際して、要素技術のみならずリスク評価と経済性評価が重要であり、SPE で提案されている SRMS の解釈と運用が今後の課題となる。
3. 苫小牧データを借用し、CCS ライフサイクルの 3 ステージについて地質モデルの構築を行い、地質モデリングにおけるデータ品質とその精度について検討した結果、データ間のギャップを補完するために堆積学的な概念を加えることで地質モデルの精度が向上されることを示した。
4. サイト選定、圧入前評価、CO₂ 圧入時の 3 種類の地質モデルに対して、貯留量評価を実施し、CCS ライフサイクルのステージが進むにつれて推定される貯留可能量が減少することを示した。
5. 堆積学的概念を使用して複数の地質シナリオを作成し貯留量評価を行うアプローチによって、不確実性の幅を定量的に推定可能であることを示した。

参考文献

- 1) Society of Petroleum Engineers (2016): CO₂ Storage Resources Management System, <https://www.spe.org/industry/docs/SRMS.pdf> (2018/12 アクセス)
- 2) RITE (2006): 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書

2.5 大規模貯留層に適した CO₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の確立

CCSを実用化するには、貯留したCO₂が長期にわたり、安全に貯留されることを担保する必要がある。地質モデルには不確実性が含まれるため、計算機上で挙動予測を行うCO₂挙動シミュレーションの役割が大きくなっている。CO₂挙動解析を行うシミュレータは、主に油層工学で開発されてきたツールにCO₂用の状態方程式を付加することによって実施されてきた。一般的にCO₂に圧入流体が変わっても大きな挙動変化はないと考えられてきた。しかし、岩石内での挙動が油層と同じではなく非常に薄い層にCO₂が入り込んでいくことがX線CTを用いた可視化で明らかになってきていること、およびCO₂が地層水に溶けると弱酸性水となるため地化学反応を考慮すべきであること、等が指摘されている。また海外のIn Salahサイトでは、CO₂圧入に伴い地表面の隆起が確認されている。これらの現象を説明する方程式には不明なパラメータも多い。

本課題では、CO₂挙動予測シミュレーションにおいて基礎となるマイクロとマクロなCO₂貯留メカニズムの解明、信頼性の高いCO₂挙動シミュレータの開発、それらの結果を活用したCO₂の長期挙動予測技術を確立する。コアスケールの挙動メカニズム把握ではX線CTを、フィールドスケールの挙動メカニズム把握には、圧入停止後12年間にわたる長期観測を実施している世界的にも例のない長岡サイトでの継続的なモニタリングデータの取得と解析を行う。信頼性の高いシミュレータとしては、マイクロとマクロなCO₂挙動の特徴を取り込むとともに、数百万格子のシミュレーション（数十km×100km程度の規模）が必要な実規模サイトにおいても短時間で計算結果を出せるような高速化の技術開発も行う。シミュレータとしてはLBNLで開発され、CO₂地中貯留においても各国で広く使われているTOUGH2をベースとした開発を行う。

2.5.1 長期挙動シミュレーション補助機能のツール化

(1) はじめに

挙動シミュレーション予測はCO₂地中貯留の様々なステージにおいて利用され、安全性評価技術の一つとして必要不可欠な要素である。技術研究組合では、国内外のCO₂貯留プロジェクトにおいて利用された実績があり、LBNLで開発されたTOUGH2系のシミュレータ（Pruess et al., 1999）を主に利用している。本項ではTOUGH2系のシミュレータを実際のプロジェクトに用いる際に、必要となる補助的な機能の充実化に関する内容を記す。

(2) TOUGH2系シミュレータの補助機能ツール

CO₂挙動シミュレータとしては、石油・天然ガスの貯留層評価のための商用ソフトウェアにCO₂計算用モジュールを付加したものが使われる一方、主に学術的な分野を中心にLBNLで開発されたTOUGH2系のシミュレータも国内外で広く利用されている。TOUGH2の利点は、ソースコードが明らかであり、どのような計算を行っているかが明確であることと、またユーザにより新たな機能を付加させることも自由に行えるところに

ある。しかし TOUGH2 は数値シミュレーションを行うだけであり、地質モデルの入力機能や結果の出力機能がないデメリットがある。

そのため TOUGH2 でのシミュレーションの入出力を補う補助機能ツールの開発を進めた。ただし地質モデルを構築するツールとしては、石油・天然ガス業界で広く使われ様々な機能を有している、Schlumberger 社の Petrel を使うものとした。その上で Petrel と TOUGH2 をつなぐインターフェースツールの開発を行った。

① Petrel のモデル出力フォーマット

Petrel で作成された地質モデルは、ASCII 形式で ECLIPSE Keyword File として入出力可能である (model pane において import/export)。このファイル内データを TOUGH2 への入力フォーマットに変換、または TOUGH2 の出力結果を ECLIPSE Keyword 形式のファイルに変換することにより、ソフトウェア間でのデータのやり取りが可能となる。まず ECLIPSE Keyword File のフォーマットを記す。ECLIPSE Keyword は、情報内容を示すキーワードとデータからなる。各キーワードは設定終了を示す"/" によって区切られる。主要なキーワードとその機能を表 2.5.1-1 に示す (格子は 6 面体とする)。

表 2.5.1-1 ECLIPSE Keyword File 形式での主要なキーワード

キーワード	機能	データ例
MAPAXES	原点・X 方向・Y 方向の設定	0. 0. 0. 1. 1. 1.
MAPUNITS	格子データの単位	METRES
SPECGRID	X, Y, Z 方向の格子数	25 30 6 1 F
COORD	格子の X, Y, Z 境界	図 2.5.1-1 参照
ZCORN	格子の Z 座標データ	図 2.5.1-2 参照
PORO	格子毎の孔隙率	0.3 0.3 ...
PERMX, PERMY, PERMZ	格子毎の浸透率 (X, Y, Z 方向)	10 10 ...
ACTNUM	アクティブセルの正否	0 0 1 1 ...

MAPAXES は最初の 2 つが X, Y の原点、3、4 番目が北向きの水平座標位置、5、6 番目が東向きの水平座標位置を示し、この設定により右手系と左手系の変換が可能である。また、SPECGRID は左から XYZ 軸の格子数 ($nx=25$, $ny=30$, $nz=6$) を示している。

COORD 部分には、格子の端点の位置を示す。ただし Z 座標は同じ XY 座標を持つ格子端点の最小値と最大値を記している。具体的な表記方法を図 2.5.1-1 に示す。この例では一行ごとに (X_i, Y_j, Z_{min}) 、 (X_i, Y_j, Z_{max}) の位置が記されている。さらに、X のソーティング、Y のソーティングの順にグリッド位置を変えて記している。COORD の行数は、 $(nx+1)*(ny+1)$ 行となり、格子の端点のデータを記している。


```

COORD
-500.00 -300.00 1000.00 -500.00 -300.00 900.00
-460.00 -300.00 1000.00 -460.00 -300.00 900.00
-440.00 -300.00 1000.00 -440.00 -300.00 900.00
...
460.00 300.00 1000.00 460.00 300.00 900.00
500.00 300.00 1000.00 500.00 300.00 900.00
/

```

図 2.5.1-1 ECLIPSE Keyword File の COORD 部分の表記例

次に ZCORN 部分は、COORD で記した XY 座標の位置での Z 座標を記す。具体的な表記方法を図 2.5.1-2 に示す。並びの順番は図 2.5.1-3 に示すように、隣接格子と接している点については 2 回表記し、全部で $8 \times nx \times ny \times nz$ 個のデータが並ぶことになる。この際、同じ数値が並ぶ場合には、図 2.5.1-2 の右側に示すように、個数*数値の形で示すことも可能である。この個数*数値の表記方法は、他のキーワードの数値に対しても有効である。

孔隙率、浸透率、アクティブセルに関しては、図 2.5.1-3 に示した順番に格子ごとに数値を記載していく。全部で $nx \times ny \times nz$ 個のデータが並ぶが、個数*数値の表現での設定も可能である。このうち、アクティブセルに関しては、1 となっているのがアクティブ（計算を行う）格子で、0 がノンアクティブ（非計算）格子となる。

TOUGH2 での計算結果も孔隙率・浸透率と同様な表記になる。計算結果の圧力、温度、CO₂ 飽和度、CO₂ 溶解量は、それぞれ、PRESSURE, TEMPERATURE, SGAS, XLCO2 などのキーワードに続けて数値を記載する。

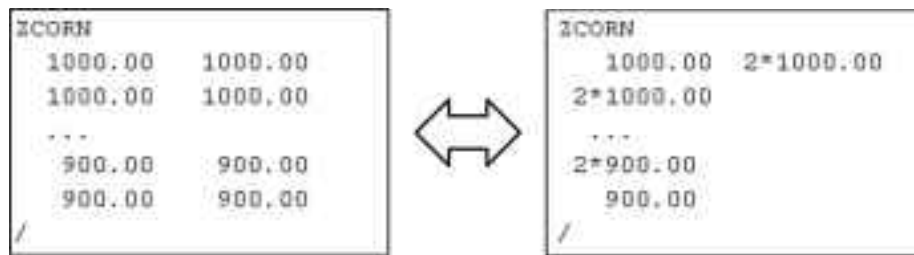


図 2.5.1-2 ECLIPSE Keyword File の ZCORN 部分の表記例

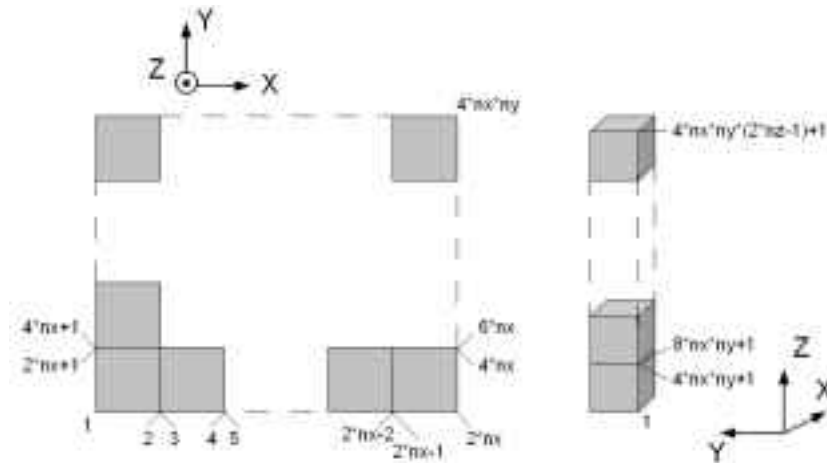


図 2.5.1-3 ECLIPSE Keyword File の ZCORN 部分の並び順

② TOUGH2'L BOX (T2B)

①で示したフォーマット変換機能を持ったツールのひとつとして、フランス地質調査所 (Bureau de Recherches Geologiques et Minerales: BRGM) において開発された TOUGH2'LBOX (以下 T2B と略する) がある。このツールは、Petrel で作成された地質モデルを TOUGH2 で用いる入力ファイルへの変換、および計算結果を Tecplot や Paraview で表示するファイルへと変換するプリ・ポスト処理用ツールである (Audigane et al., 2011)。Petrel の出力ファイルを TOUGH2 用に変換可能なだけでなく、TOUGH2 形式のファイル上で様々な変換を行うことも可能である。ただし、T2B における TOUGH2 の計算結果表示に関しては、簡便に使える表示用ソフトウェア (Tecplot や Paraview) での表示にのみ対応しており、より高機能な Petrel に取り込む機能はない。

(3) データベース構築

CO₂ 地中貯留を安全に進めるためには、統一されたデータを取扱い、サイトに対する共通した認識を持って事業を進めることが重要である。特に実規模貯留プロジェクトでは多数の関係者が関わるようになるため、情報と知識の共有 (Knowledge Shearing) が必要となる。このような情報の管理を維持するためには、アクセス許可を持った複数の管理者によって内容を更新していくデータベースが有効である。このような機能を有するソフトのひとつとして、Alfresco が存在する (Alfresco Software, 2019)。当該ソフトは、WEB ページを基にした様々な箇所からのアクセス、各種情報のアップロード/ダウンロード、各種検索機能、アクセス履歴の記録、アクセス権限の管理、といった機能を有するコンテンツ (ファイル) 管理システムである。

このソフトを技術研究組合の PC にインストールし、長岡サイトの CO₂ 圧入試験プロジェクト (図 2.5.1-4)、および茂原サイトでの光ファイバー現場試験等のプロジェクト情報を入力し、使い勝手や各種機能の検証を実施した。

図 2.5.1-4 のようなブラウザで閲覧するページは、“Wiki”と呼ばれる不特定多数のユーザがウェブブラウザ上から直接編集することで作成できるものである。図中の青字になっている部分にリンクが張られており、新たなページに飛んだり、図表、pdf、Word、PPT等のファイルを開いて閲覧したりすることができるようになっている。

このソフトは単純に共有ファイル置き場としても使え、アップしたファイルに対して、詳細検索やキーワード検索、タグ検索を実施するといった機能も有している。またアクセス権限として「マネージャ」「共同作業者」「投稿者」「利用者（閲覧のみ）」の設定が可能で、文書管理システムとして有望であることを確認した。

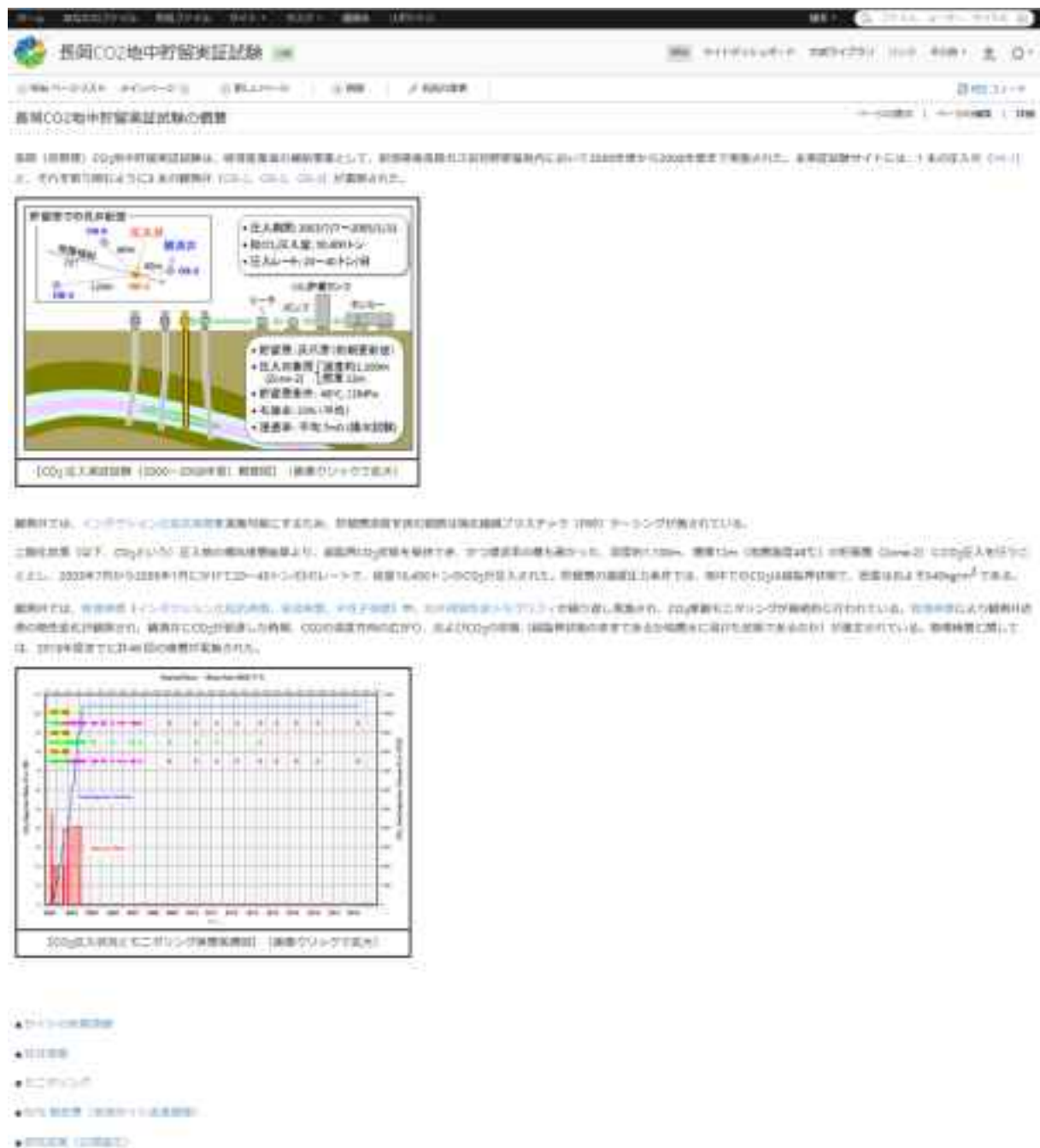


図 2.5.1-4 Alfresco 上に作成した長岡 CO₂ 圧入プロジェクトの概要ページ例

(4) まとめ

長期挙動予測シミュレーションの補助機能として、TOUGH2 系シミュレータへの入出力ファイル作成・表示のために Petrel で読み込み可能な ECLIPSE Keyword File 形式のフォーマットを明らかにした。この機能の一部を持つツールも開発されており、この形式変換を行うことにより、モデルの受け渡しや結果の共有に有効である。また、貯留サイト関連情報を関係各者で共有するための管理システムとして Alfresco を採用し、技術研究組合で現場試験を実施しているサイトの情報を用いた実証テストにより、文書管理ソフトとして有効であることを確認した。

参考文献

- 1) Alfresco Software (2019): <https://community.alfresco.com/welcome>
(2019/2/13にアクセス)
- 2) Audigane, P., Chiaberge, C., Mathurin, F., Lions, J., and Picot-Colbeaux, G. (2011) : A workflow for handling heterogeneous 3D models with the TOUGH2 family of codes: Applications to numerical modeling of CO₂ geological storage. Computers & Geosciences, 37, 610-620
- 3) Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G. (1999) : TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA, 1-198

2.5.2 マクロな CO₂ 挙動メカニズム評価の確立

(1) はじめに

地層中の CO₂ 挙動予測における物性値評価には、サイトから取得される試料を用いたコア試験結果を用いることが多い。しかしコア試験によって得られるのは、一般的にミクロな挙動メカニズムである。実際の圧入サイトではマクロスケールの CO₂ 挙動に基づいて長期挙動予測や安全管理が行われる。CO₂ 地中貯留の実証試験は海外でも実施されているが、圧入後（ポスト・インジェクション）の CO₂ の状態（超臨界または溶存態）と挙動を詳細にかつ約 15 年の長期に渡りモニタリングを実施しているのは長岡サイトだけであり、その成果は世界から注目されている。この様にして得られるマクロな CO₂ 貯留メカニズムは、CO₂ 挙動シミュレーションにおける流動特性として反映され、長期挙動予測の精度に大きく影響する。そのため、マクロな流動特性を把握することは、大規模貯留層での挙動シミュレーションの基礎的なパラメータを決めるために重要な作業となる。

この項では、フィールドスケールでの CO₂ 挙動メカニズム評価のために実施した、2019 年度の長岡サイトにおけるモニタリング検層結果、およびその結果から示唆される挙動メカニズムに関して報告する。

(2) 長岡サイトの検層作業と解析結果

長岡実証試験サイトでは、METI の補助事業として 2003 年 7 月から 2005 年 1 月にかけて総量約 1 万トンの CO₂ が圧入された（薛・松岡, 2008）。当サイトでは 3 つの観測井を用いた物理検層により、定期的にモニタリングが実施されている（図 2.5.2-1）。

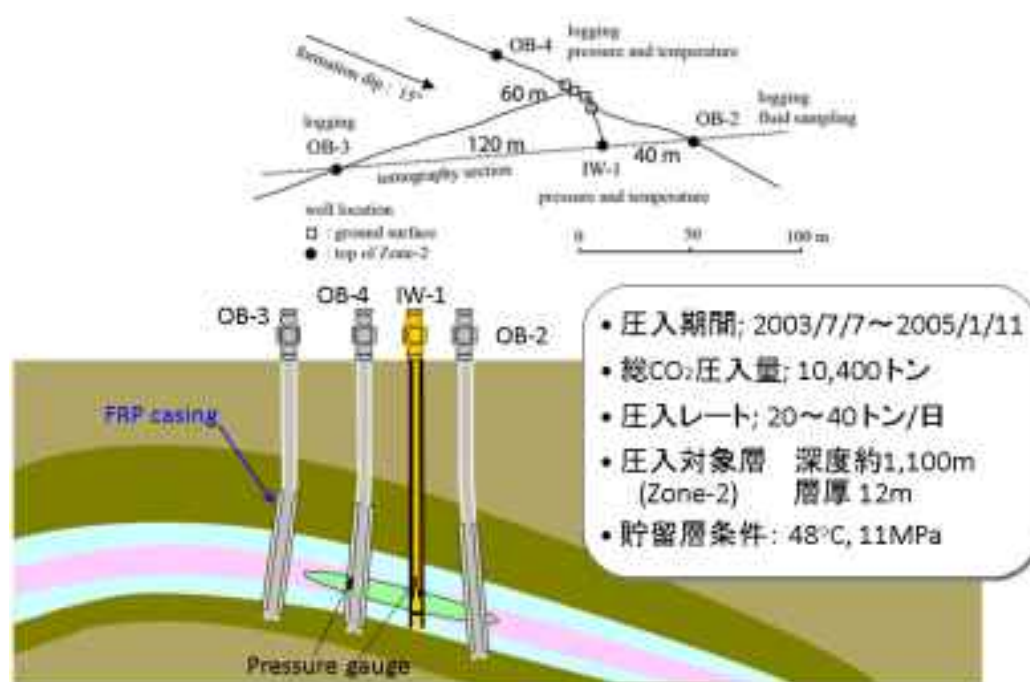


図 2.5.2-1 長岡 CO₂ 圧入試験の概要

今年度は圧入開始から 5,930 日後（圧入停止から 5,376 日後）のモニタリング結果として、観測井 OB-2 と OB-4 において、音波検層、インダクション比抵抗検層、中性子検層を、観測性 OB-3 においてインダクション比抵抗検層を実施した。OB-3 に関しては、これまで CO₂ 到達が確認されていなかったため、CO₂ に対する感度や測定精度の高い比抵抗検層のみを実施したが、今回の結果でも CO₂ の到達は確認されなかった。一方、OB-2 と OB-4 においては昨年度からの変化が少なく、安全に貯留されていることが確認された。

図 2.5.2-2 には、OB-2 において深度と時間とともに比抵抗がどのように変化してきたかをコンタ図で示す。超臨界 CO₂ が存在している部分では比抵抗は高くなるが、ポスト・インジェクションでは徐々に低下してきていることが分かる。またその範囲は浅部に移動していない。一方、比抵抗が減少している部分が広がってきていることが分かるが、これは CO₂ が水に溶けてイオンとなっていること、および弱酸性である CO₂ 溶解水が周囲の鉱物の一部を溶かす効果を表している（三戸ほか, 2008）。また、これらの範囲は、深度の大きい方へ拡散によって広がっていく現象も、検層から示唆される。これらの CO₂ 溶解水の移動は、地中貯留においてより安全な貯留に移行していることを示す。

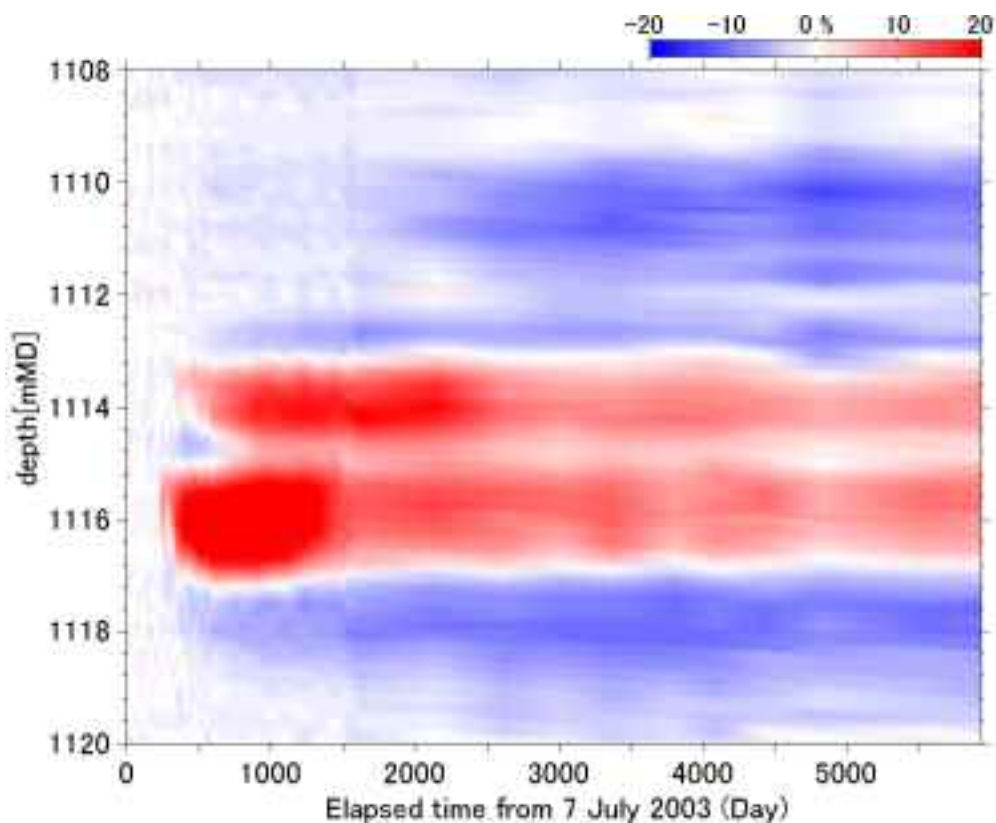


図 2.5.2-2 比抵抗の経時変化のコンタ図 (OB-2)

図 2.5.2-3 に超臨界 CO₂ の効果が最も大きかった深度での各検層結果の時系列を示す。OB-2 では、CO₂ 飽和度が最も高かった深度において、極大となったのちに、約 8 年間かけて徐々に一定値 (CO₂ 飽和度で約 0.15) に漸近していることが分かる。これらの現象、

およびコアでの測定結果も考慮すると、OB-2 ではほぼ残留ガストラッピング状態になっていると推定される。

一方 OB-4 では、ブレークスルー時に大きく変化したことは同じであるが、その後はばらつきが大きく、元の値に戻っていく現象はあまり明確ではなかった。これは、OB-4 の方がアップディップ側にあり、CO₂ 飽和度も 0.4 程度で安定しているため、まだ多くの可動 CO₂ が坑井周辺に存在していることを示唆している。

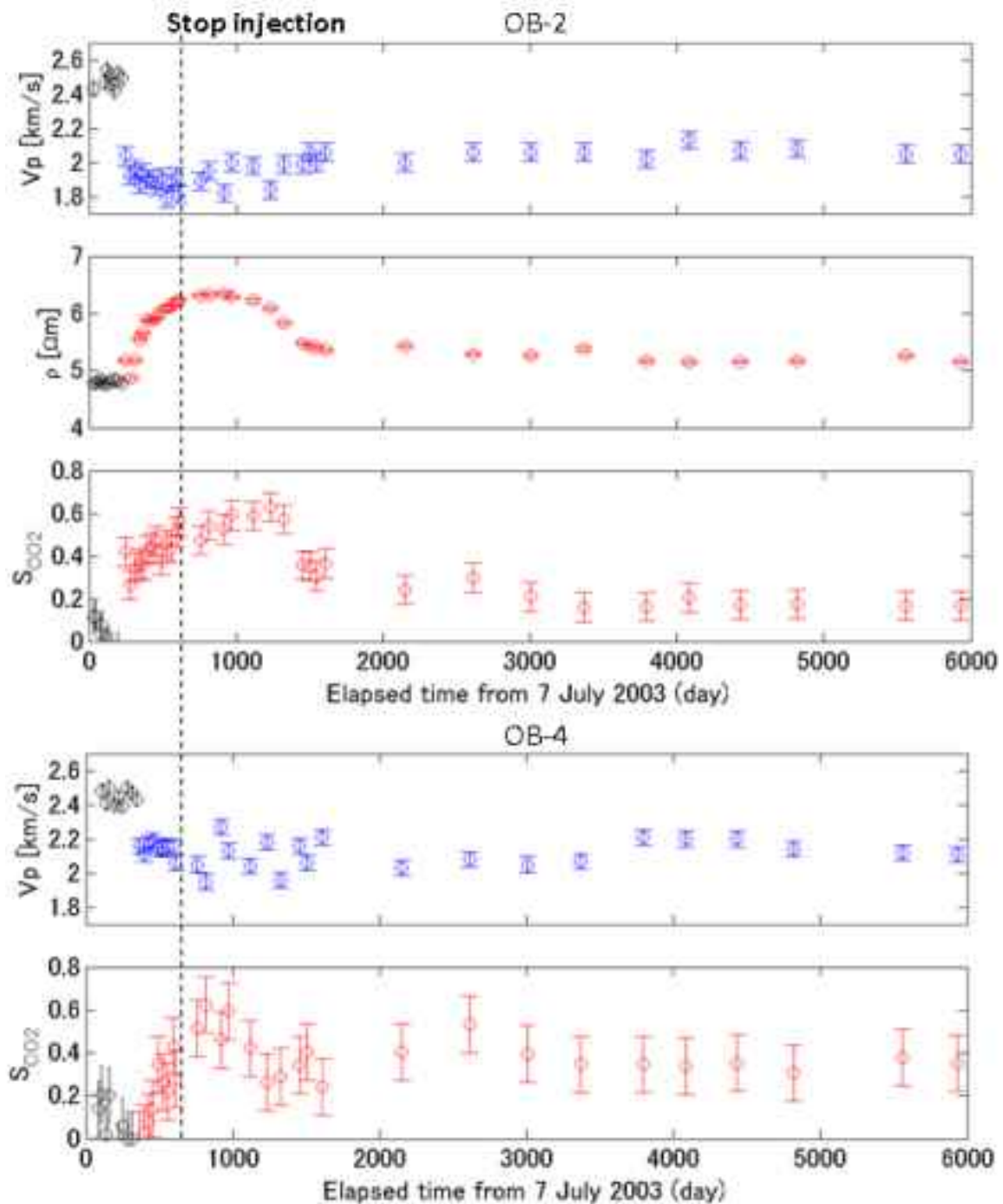


図 2.5.2-3 OB-2 深度 1,116m での検層値の経時変化

(3) フィールドスケールでの物性パラメータに関して

図 2.5.2-3 に示したように、中性子検層（CO₂ 飽和度）、比抵抗検層、音波検層の変化は同一ではなく、それぞれの特性を把握した上でモニタリングに適用すべきである。モニタリングに最もよく利用される弾性波探査は、音波検層結果と同等の特性（CO₂ の存在により約 20% 伝搬速度が遅くなる）を用いており、図 2.5.2-3 で示されているように地層水がわずかに CO₂ に置換されるだけでも変化が大きい、その後の CO₂ 飽和度変化に対する感度は小さいことが分かる。一方比抵抗検層は、CO₂ 飽和度の変化に対応した変化がみられる。また比抵抗検層では、溶存 CO₂ の効果もモニタリングできるという特徴もある。このような音波速度や比抵抗値等の物性値の結果は、弾性波探査や比抵抗探査によるモニタリングにおける可探範囲を知るうえで有用な情報となる。図 2.5.2-4 に、OB-2 坑砂岩部分でのブレイクスルー直後（△）、CO₂ 飽和度最大時（○）、物性値変化最大時（□）、最終観測時（◇）の 4 つの代表的な状態における物性値の変化を示す。この図より、音波速度変化に対しては、CO₂ 飽和度最大時と物性値変化最大時にずれがみられる。また、圧入時（ドレナージ過程）とポストインジェクション（インビジョン過程）では、変化が異なる傾向がみられる。この差異は、特に CO₂ 飽和度評価において大きく影響すると考えられる。一方比抵抗変化に関しては、ドレナージとインビジョン過程の違いは明確ではなく、ほぼリニアな関係で近似できることが示された。これらの関係については、岩相や坑井による違いに関して、より詳細な解析を実施中である。

また、フィールドスケールでの残留ガストラップ量を確認するために、最大 CO₂ 飽和度と最新観測値の関係を調べた (Nakajima and Xue, 2017)。この結果では、コア試験から予想されている Land (1968) の最大 CO₂ 飽和度と残留ガストラップ量の関係が、フィールド観測においても成立すること、および貯留層内でシルトが多い層ではこの関係が異なっていることが示されている。

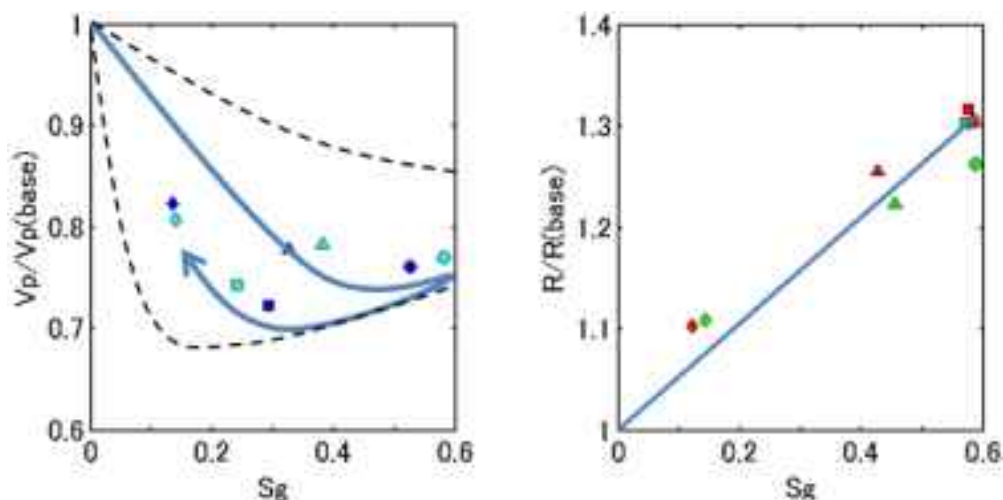


図 2.5.2-4 OB-2 坑での V_p (左) と比抵抗 (右) の CO₂ 飽和度に対する変化。

記号の色は異なる深度での結果であることを示す

(4) まとめ

フィールドスケールの CO₂ 長期挙動予測に関する基礎的な流動特性を把握するために、圧入開始から約 15 年経過している長岡サイトでのモニタリング検層を実施した。観測結果からは、圧入した CO₂ は安定的に貯留層内に留まっていることを確認したとともに、昨年度からの物性値の変化は非常に小さいことを確認した。CO₂ 圧入過程との関係に関しては、音波速度では変化が見られたものの、比抵抗値ではほとんど変化がなかったことが示された。また、コア試験から予想されている残留ガストラッピングに関する関係がフィールドスケールにおいても成立することを確認した。

参考文献

- 1) Land, C.S., (1968) : Calculation of imbibition relative permeability for two and three-phase flow from rock properties, *SPE Journal*, 8, 149–156.
- 2) 三戸彩絵子、薛自求、大隅多加志 (2008) : 二酸化炭素地中貯留における地球科学反応特性について—長岡実証試験サイトの地層水分析例—, *地学雑誌*, 117(4), 753-767.
- 3) Nakajima, T. and Xue, Z. (2017): Trapping mechanisms in field scale: Results from Nagaoka geologic CO₂ storage site. *Energy Procedia*, 114, 5015-5022.
- 4) 薛自求, 松岡俊文 (2008) : 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題, *地学雑誌*, 117(4), 734-752.

2.5.3 電磁探査有効性検証シミュレーションの実施と精度・性能比較

(1) はじめに

貯留した CO₂ のモニタリングする手法は弾性波探査が主流となっているが、別の地下物性情報である比抵抗を用いる電磁探査法は、それを補完する手法としての役割が期待されている (e.g., Zhdanov et al., 2013; Yang et al., 2014)。電磁探査手法は様々な手法 (時間領域・周波数領域)、システム (電場観測または磁場観測等) が考えられ、それぞれの手法で地下の状態把握性能が異なる。本項では、主に CO₂ 漏洩検知に関する課題において、周波数領域電磁探査法を想定したモニタリング手法についてシミュレーションにより精度・性能比較を行った。

(2) CO₂ 漏洩モデルの設定とシミュレーション方法

ここでは簡単のために一次元比抵抗構造を考える。また送受信は実フィールドで最も簡便に適用可能と考えられる鉛直磁場励起・3成分磁場観測の場合を検討する。そして漏洩してきた CO₂ が地下 250~300 m 付近まで上昇してきた場合に検知できるかについて検討した。その際、元々の地層の比抵抗は 100 Ω m、CO₂ を含む地層は 130 Ω m と仮定した。この地下モデルに対し、地表送信・地中受信の場合、地中送信・地表受信の場合、および地中送信・地中受信の配置において (図 2.5.3-1)、それぞれどこに送受信点を配置するのが良いかについて、シミュレーションにより検討を行った。電磁場シミュレーションに用いたのは、"em1d"である (Lee, 1988)。シミュレーションの際に、坑井のケーシングによる影響は無視できるものとした。



図 2.5.3-1 検討した地下比抵抗モデルと送受信点配置

(3) シミュレーション結果

CO₂の存在の有無に対する磁場の変化率をシミュレーションにより計算した。

① 地上送信・地中受信配置

図 2.5.3-2 に、地表送信点を原点として、地中の観測点位置を変えた場合の磁場変化率を示す。図中(a)が磁場 X 成分の絶対値、(b)が磁場 Z 成分の絶対値を示す。X 成分では、CO₂ プルーム上部に 10%程度の変化する領域があることが分かる。一方 Z 成分では CO₂ プルーム以下において 2%程度の変化する領域が存在する。

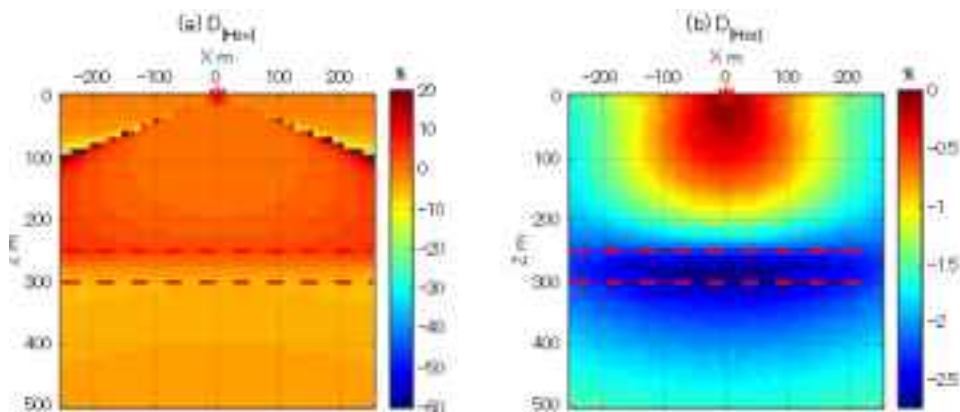


図 2.5.3-2 地表送信・地中受信時の赤点領域内の CO₂の有無に対する観測磁場の変化率

② 地中送信・地表受信配置

図 2.5.3-3 に、地中送信点を原点として、地表観測点位置を変えた場合の磁場変化率を示す。図中(a)が磁場 X 成分の絶対値、(b)が磁場 Z 成分の絶対値を示す。X 成分の方がわずかに変化率が大きいものの、Z 成分の方が変化幅は大きい。絶対値としては 2%程度の変化がある。

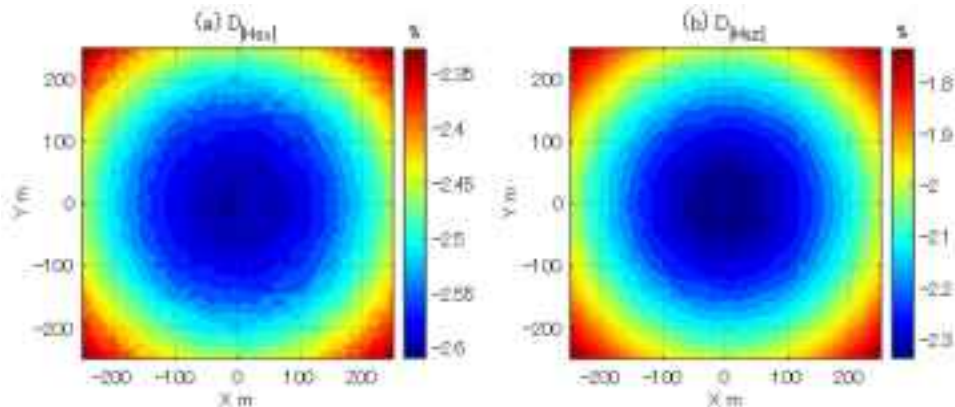


図 2.5.3-3 地中送信・地表受信時の CO₂の有無に対する観測磁場の変化率

③ 地中送信・地中受信配置

図 2.5.3-4 に、地中送信点を原点として、地中観測点位置を変えた場合の磁場変化率を示す。図中(a)が磁場 X 成分の絶対値、(b)が磁場 Z 成分の絶対値を示す。X 成分ではプルーム内で 30%程度の変化領域があるが、Z 成分では送信点から 50 m 程度まで近づかないと 10%程度の変化が観測されることが分かる。

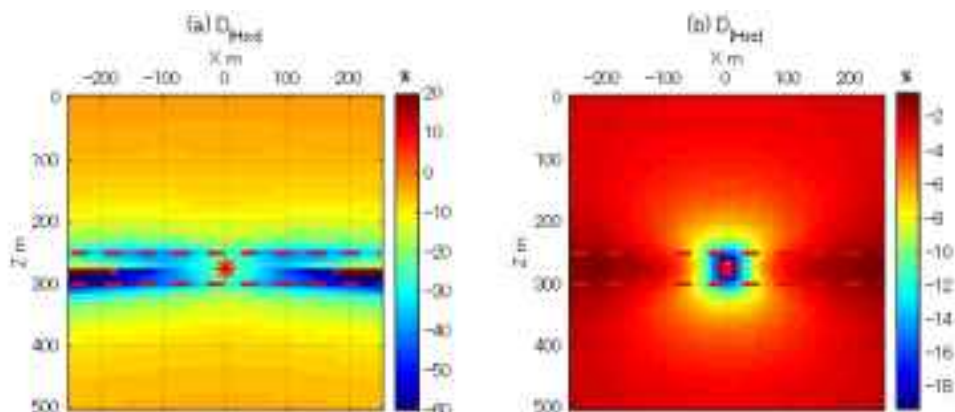


図 2.5.3-4 地中送信・地中受信時の赤点領域内の CO₂の有無に対する観測磁場の変化率

(4) 観測精度との比較

これまでの検討により、変化率が最も大きかったのは、地中送信・地中受信の組み合わせであった。この結果に対して、実際にモニタリングが可能であるかを検討するために、送受信にそれぞれ一般的な送信器・受信センサーを用いた場合に、観測可能な量となって

いるかについて検討した。送信器については最大送信モーメントを 260 Am^2 とした (Sakashita et al.,1994)。受信磁場センサーの計測精度については、鉛直方向 5 nT 、水平方向 1 nT とした(佐藤ほか, 1997)。つまり 260 Am^2 の磁気モーメントで送信した際に、鉛直成分 5 nT 、水平方向 1 nT 以上の変化範囲をモニタリング可能と考えた。この送受信性能を図 2.5.3-4 に重ねて表示したのが図 2.5.3-5 (拡大図: 2.5.3-6) である。図中(a)が磁場 X 成分の絶対値、(b)が磁場 Z 成分の絶対値である。

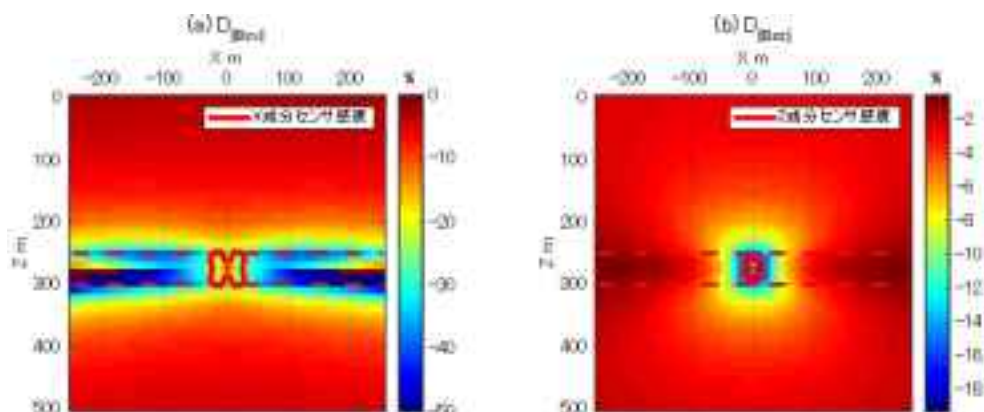


図 2.5.3-5 地中送信・地中受信時変化率との観測可能領域 (赤実線内)

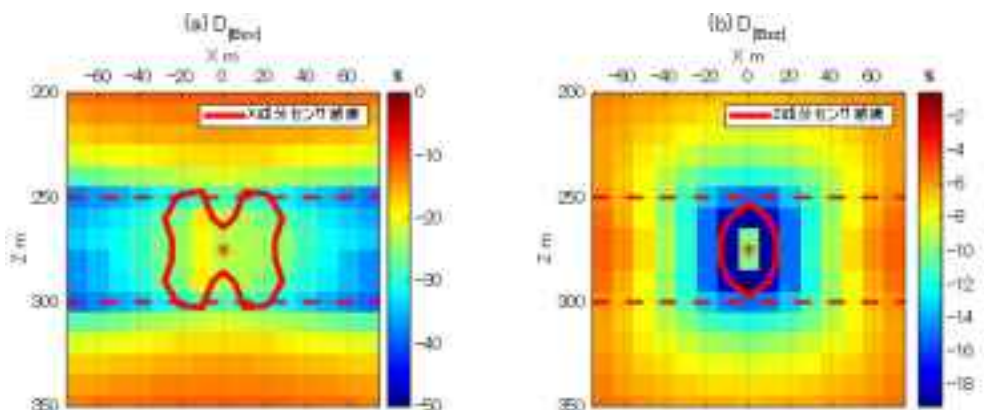


図 2.5.3-6 図 2.5.3-5 の拡大図

この結果より、電磁場探査で CO_2 漏洩を検知できる可能性があるのは、地中・地中（坑井間）の送受信点配置で、漏洩のある範囲から 40 m 程度であることが示された。ただしこの評価における磁場センサーの精度は比較的低い場合で設定したものであり、より高精度な MI センサー等を利用すれば、モニタリング範囲はもっと広げられるものと考えられる。また今回はセンサー精度評価のために周波数領域での探査に限定した評価を行ったが、時間領域での探査におけるモニタリング範囲は検討課題として残っている。また電磁場は、 CO_2 のある範囲で大きく乱されるため、その範囲において複数の送信点や受信点で挟むような配置を取ることができれば、モニタリング精度を高めることも可能であると考えられる。

(5) まとめ

本項では、漏洩 CO₂ が周波数領域での電磁場探査によってモニタリング可能かどうかの評価を行った。一次元比抵抗構造という限られたモデルではあるものの、必要な送受信点配置について検討を行った。さらに CO₂ の有無に対し、十分大きな変化が予想される送受信点配置において、観測機器精度を考慮した検出範囲について検討した。ここでの結果は、漏洩する CO₂ を検出するモニタリングにおいて、電磁場探査を検討する際の有効な資料となりうるものである。

参考文献

- 1) Lee, K. (1988): Computer code EM1D.
- 2) Sakashita, S., Shima, H. and Gasnier, S. (1994): Experimental studies on multifrequency and multicomponent electromagnetic tomography, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 418-421.
- 3) 佐藤龍也・大里和己・高杉真司・内田利弘 (1997) : マルチ周波数アレイ型インダクション検層 (MAIL) ツールの開発ー深部井における測定結果ー, 第4回地下電磁計測ワークショップ論文集, 57-64.
- 4) Yang, X., Chen, X. Carrigan, C. R., and Ramirez, A. L. (2014): Uncertainty quantification of CO₂ saturation estimated from electrical resistance tomography data at the Cranfield site, International Journal of Greenhouse Gas control, 27, 59-68.
- 5) Zhdanov, M. S., Endo, M., Black, N., Spangler, L., Fairweather, S., Hibbs, A., Eiskamp, G. A., and Will., R. (2013): Electromagnetic monitoring of CO₂ sequestration in deep reservoirs, First Break, 31, 71-78.

2.5.4 地化学—力学—水理連成データの取得

(1) はじめに

これまで主として地化学的な観点から、キャップロックが反応する際の遮蔽性能変化を定量的に評価する手法の開発を行ってきた。これに対して、実際には、CO₂の圧入が地層の安定性や遮蔽性を損なうことのないように、地層を構成する岩石の力学—水理特性を把握しておくことも不可欠である。そこで、今年度はこれまでの知見を適用して、両者の関係に長期的な化学反応が及ぼす影響を検証することで、力学—化学—水理連成データの取得を試みた。なお、これに先立ち、地化学反応の遮蔽性能への影響に関して追加のデータの取得とCO₂の炭酸塩化促進の方策のさらなる検討を行った。

(2) 地化学反応の遮蔽性能への影響評価

① 炭酸塩含有岩石の地化学影響評価

地化学反応により遮蔽性能に変化が生じる際には、キャップロック内部の空隙構造が変化するケースと、キャップロックの界面状態が変化するケースの2通りが想定される。前者に関して、昨年度の時点で反応性鉱物の量と遮蔽性能の関係が不明瞭であった。そこで、孔隙率 ϕ が2種類のシリカ粒子焼結体（粒径1 μ m）をベースとして、その間隙をカルサイト（CaCO₃）で充填した試料をそれぞれ2個作製し、一方を10 MPa、40°Cの超臨界CO₂—水系で168時間反応させた。未反応および反応後の試料の浸透率 k の比較を行ったところ、 ϕ が大きい（カルサイトが多い）試料では反応により k が若干（14%）低下したが、 ϕ が小さい（カルサイトが少ない）試料では k に有意な変化は認められなかった。 k の低下にはカルサイトの溶解—再沈殿が関係している可能性があるが、いずれにしろ k の変化量が少なかったことから、カルサイト量は遮蔽性能に特に影響しないと考えられる。

② 接触角評価手法の開発

界面状態の変化に関しては、これまでに考案した接触角 θ をスレッシュホールド圧 $P_{c^{th}}$ から算出する手法に基づいて、各種岩石・鉱物の θ の測定値の拡充を図った。今回対象としたのは、鉱物5種類（石英、曹長石、カルサイト、硬石膏、緑泥石）と岩石2種類（長崎泥岩および秋田泥灰岩）である。微細穴加工したこれらの試料について、10 MPa、40°Cの条件で超臨界CO₂のブレイクスルー実験を行い、得られた $P_{c^{th}}$ に基づいて θ を求めた。計算に際しては、10 MPa、40°CにおけるCO₂—水系の σ として、文献値に基づいて最小値と最大値の範囲を設定した。表2.5.4-1に、 $P_{c^{th}}$ の実測値および σ を最小値と最大値の平均値として算出した θ を示す。結果として、 θ が σ の値に敏感に応答することに起因して、曹長石、カルサイト、硬石膏以外の試料では $\cos\theta > 1$ となり θ の算出ができなかった。これについては、 σ のわずかな変動で θ の算出が可能とも言えるため、今後、 σ について再度データの精査を行う必要がある。いずれにしろ、表2.5.4-1では、 $\cos\theta$ の逆算値から各試料の θ の大小関係の推定が可能である。すなわち、ケイ酸塩鉱物である石英、曹長石、

緑泥石と粘土鉱物を主体とする泥灰岩や泥岩は相対的に θ が小さいのに対して (θ がほぼ 0°)、炭酸塩のカルサイトと硫酸塩の硬石膏は θ が相対的に大きくなる傾向が明らかとなった。

表 2.5.4-1 各種鉱物および岩石試料の θ の算出結果

	$d(\mu\text{m})$	$P_c^{\text{th}}(\text{kPa})$	$\cos\theta$ の逆算値	$\theta(^\circ)$
石英	20.5	8.01	1.24	—
曹長石	17.2	7.35	0.96	16.7
カルサイト	20.6	4.2	0.66	49.0
硬石膏	19.8	3.42	0.51	59.1
緑泥石	22.8	7.5	1.30	—
泥灰岩	22.2	12.0	2.02	—
泥岩	24.2	6.78	1.24	—

③ 地化学プロセスの活用に向けた検討

CO₂ 地中貯留の安全性向上に地化学プロセスを有効に活用する方策として、CO₂ の炭酸塩化による坑井周囲からの漏洩防止をこれまで提案してきた。これに関して、昨年度は水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) 水溶液 (石灰水) に CO₂ を注入することでカルサイトを沈殿させたが、Ca(OH)₂ の溶解度の低さとも関係して必ずしも有効な効果は見出されなかった。そこで今年度は固形物を炭酸塩に限定しないこととし、他の化学物質の検討を行った。

実験では、ベレア砂岩に温泉水を流通させ、流量 Q の変化を測定した。この際、元の温泉水に加えて、水酸化ナトリウム (NaOH) あるいはケイ酸ナトリウム (水ガラス: Na₂O · nSiO₂) 溶液 (約 38%) を添加した計 3 種類の温泉水を用意し、それぞれ CO₂ 注入の有無の効果を調べた。いずれの溶液についても時間の経過とともに Q の低下がみられ、かつ CO₂ を注入した方が Q は低下した。NaOH では、CO₂ を注入することで炭酸塩の生成が促進したと考えられる。水ガラスについては、CO₂ の添加後ただちに配管内で固形物が生成し、完全な遮蔽効果により流動が停止した。当該物質はこれまで Ito et al. (2014) により提案され、その後も他の研究者により検討が進められているが、天然の温泉水においても改めてその効果が検証されたと言える。

実験後の試料について、X 線 CT により試料空隙の閉塞状況を調べた。多くの場合、溶液の流入側 (上端部) が厚さ 1 mm 程度変色 (変質) していたが、上端部、中央部、下端部、それぞれの ϕ に有意な差は認められなかった。むしろ、NaOH のケースでみられた炭酸塩は試料の上端面上に付着していた。したがって、遮蔽プロセスを正確に模擬するためには、試料内部で反応が起こるように実験方法の改良が必要である。なお、X 線 CT 像からはベレア砂岩自体の不均質性も無視できないことが示されており、同一の ϕ を有する試料をあらかじめ選定しておくことも重要である。

(3) 地化学反応のキャップロック力学特性への影響評価

本研究では、鉱物の溶解や沈殿などの長期的な地化学反応が、地層を構成する岩石の力学特性（応力、ひずみ）と水理特性（浸透率）の関係に及ぼす影響を検証するために、鉱物組成の異なる各種岩石について地化学-力学-水理連成データの取得を試みた。今回対象とした岩石は、振老層、双葉層、別所層から採取した3種類の泥岩である。これらの岩石を直径50mm、高さ20mmの円筒状に加工し、10MPa、40°Cの超臨界CO₂-水系で168時間反応させた。次に、反応後の試料について、昨年度と同様に特殊せん断・透水用治具を用いて、せん断と同時に k の測定を行った（Fujii et al., 2015）。ここでは、有効圧条件下で岩石をセットした後、軸力を载荷し（ピストン载荷率：0.3m/hours）、岩石の変形、せん断破壊、すべりの3つの過程を観測した。最終的に、これまでに報告した未反応試料の実験データとの比較を行った。

例として、図2.5.4-1に、双葉層泥岩における体積ひずみと応力の関係、ならびに体積ひずみと k/k_0 （ k を初期浸透率 k_0 で規格化）の関係を示す。図2.5.4-1aに示すように、未反応の試料は、体積ひずみの増加に伴い応力が単調に増加して最大値に達したが、反応後の試料は、より早い段階で一旦応力が低下した後、最大応力に達する傾向が見られた。このとき、反応後試料における最大応力の値は、未反応試料から約16%低下した。また、最大変位を加えた反応後の試料の体積ひずみは、反応前に比べ増加した。一方で、反応の有無に関わらず同じ体積ひずみを加えたときに k/k_0 が急激に増加する傾向が見られたが、反応後の試料ではその増加量が未反応と比較しておよそ1桁大きく、浸透性が増すことがわかった（図2.5.4-1b）。

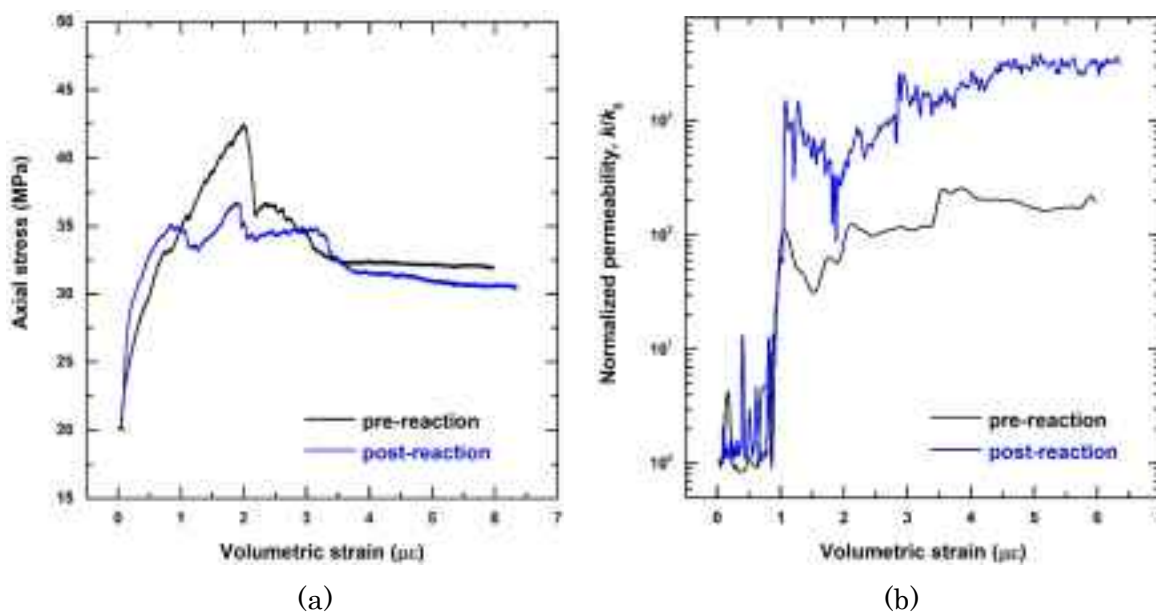


図2.5.4-1 反応前後の双葉層泥岩における

(a) 軸応力と体積ひずみの関係、および (b) 体積ひずみと規格化された浸透率の関係

以上の結果からは、地化学反応により岩石の力学－水理特性の關係に影響が生じたことが示唆される。これに関しては、双葉層泥岩の基質に多量の炭酸塩鉱物（モード組成で60%以上）が含まれていることから、反応に際して炭酸塩鉱物の一部が溶解し、岩石強度が低下するとともに、 k が増加したものと考えられる。なお、振老層泥岩では、 k は双葉層泥岩同様に反応後に増加したが、最大応力値も反応後に増加し、双葉層泥岩とは逆の傾向となった。この原因については今後の詳細な検討が必要であるが、一つの解釈として、反応により何らかの鉱物が溶解して k が増加する一方、一部でセメント物質が形成して岩石の強度が増加した可能性がある。

参考文献

- 1) Ito, T., Xu, T., Tanaka, H., Taniuchi, Y., Okamoto, A. (2014) : Possibility to remedy CO₂ leakage from geological reservoir using CO₂ reactive grout, International Journal of Greenhouse Gas Control, 20, 310–323
- 2) Fujii, T., Funatsu, T., Oikawa, Y., Sorai, M., Lei, X. (2015) : Evolution of permeability during fracturing processes in rocks under conditions of geological storage of CO₂, Materials Transactions, 56(5), 679-686

2.5.5 化学的浸透現象と遮蔽性能の関係分析

(1) はじめに

CO₂ 地中貯留では、圧入された CO₂ が地下に長期間安全に貯留されるために、低浸透性泥岩などでできた遮蔽層の存在が必要である。貯留された CO₂ の浮力など物理的な影響のほか、CO₂ の化学的性状が要因となり、遮蔽性能に影響を及ぼすことが懸念されている。たとえば、一部の泥岩は半透膜性を持ち、濃度の異なる間隙水の移動（化学的浸透）によって異常間隙水圧を発生させることが報告されている。特に濃度勾配が狭い領域に集中している場合、化学的浸透により局所的に岩石が大きく変形することが想定される。

技術研究組合では、低浸透性泥岩の遮蔽性能評価手法として、泥岩中で見られる化学的浸透現象によって生じるひずみ変化の光ファイバー計測システムの開発を行っている。今年度は、室内実験に加えて、数値シミュレーションによるアプローチによって、化学的浸透現象によるひずみ変動に影響を及ぼす因子の抽出を行った。

(2) 泥岩の化学的浸透現象によるひずみ変動の計測

本実験では、低浸透性泥岩の一つである秩父泥岩から作成したコア試料（高さ 35 mm、直径 50 mm）に対して、光ファイバーを螺旋状に巻きつけた後、側面と上面をシリコンゴムで不透水処理して、高濃度塩水中に浸して化学的浸透現象を生じさせ、約 240 時間にわたってひずみ変動を連続観測した。高濃度塩水で満たされた水槽内に、ビニール袋で隔離された低濃度塩水域を設け、試料を数日間放置し平衡状態に達した後に、ビニール袋を取り除くことで、濃度差による化学的浸透現象を生じさせた。

高濃度塩水に接する下面からの距離の異なる二点（9.5 mm と 24.5 mm）で測定された、光ファイバー方向のひずみ変化を図 2.5.5-1(a)に示す。下面に近い 9.5 mm 地点でのひずみ変化は大きく早く進むのに対して、上面に近い 24.5 mm 地点でのひずみ変化はゆるやかである。また、図 2.5.5-1(b)は、実験開始からの経過時間ごとのひずみ変化の空間分布を表している。

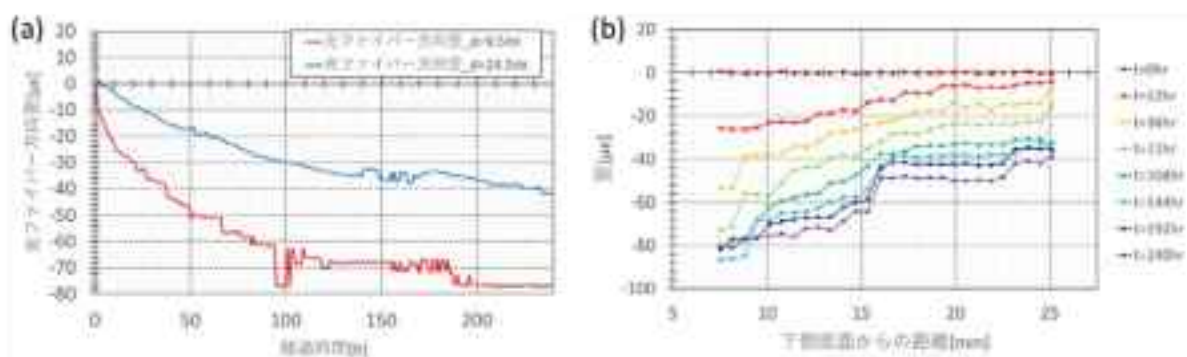


図 2.5.5-1 光ファイバー計測結果：

(a) 経過時間に対するひずみ変化、(b) 底面からの距離に対するひずみ変化

(3) 化学的浸透現象の数値シミュレーション

化学的浸透現象による岩石変形の数値シミュレーションを行うため、化学的浸透現象と多孔質弾性体理論を同時に解く数理モデルを構築した。構築した数理モデルは軸対称モデルとし、境界条件として実験のシリコン塗布された面を、圧力・濃度について流れなし境界、変形に関しては自由変形境界とした。また高濃度溶液と接する下面は、圧力を大気圧、濃度一定の境界として、変形に関しては自由変形境界とした。汎用物理シミュレーションソフトウェアである COMSOL Multiphysics を用いて、(2)の実験条件を模擬した数値シミュレーションを行った。

数値シミュレーションでは、化学的浸透現象によるひずみ変化に影響を及ぼす因子として、浸透率、有効拡散係数、岩石試料のヤング率を対象として感度解析を実施した。表 2.5.5-1 に感度解析に用いたパラメータを示す。

表 2.5.5-1 感度解析に用いたパラメータセット

	浸透率(k) m ²	有効拡散係数 m ² /s	ヤング率 GPa	間隙率 -	ポアソン比 -	Biot-Willis 係数 -	Skempton の B 値 -	反射係数 -
case1	1.0E-19							
case2	1.0E-20	3.0E-10	0.8	0.2	0.01	0.95	0.6	0.05
case3	1.0E-21							
case4		3.0E-10						
case5	1.0E-20	3.0E-11	0.8	0.2	0.01	0.95	0.6	0.05
case6		3.0E-12						
case7		3.0E-10						
case8	1.0E-18	3.0E-11	0.8	0.2	0.01	0.95	0.6	0.05
case9		3.0E-12						
case10			0.5					
case11	1.0E-20	3.0E-10	0.8	0.2	0.01	0.95	0.6	0.05
case12			1.0					
case13			0.5					
case14	1.0E-18	3.0E-10	0.8	0.2	0.01	0.95	0.6	0.05
case15			1.0					

* 太字は比較したいパラメータを表す

浸透率に対する感度解析として、case1~3 のシミュレーション結果を図 2.5.5-2 に示す。岩石の浸透率 (k) が小さくなるにつれてひずみのピークも小さくなり、ひずみ変化の緩和が遅くなることがわかる。また、高濃度側と低濃度側を比べると浸透率が小さくなるにつれてピークが生じる時間の差が大きくなることがわかった。同様に、case4~9 では有効拡散係数に対する感度解析、case10~15 ではヤング率に対する感度解析を実施した。その結果、有効拡散係数はひずみのピーク発生後の緩和時間に強く影響を与え、ヤング率はひずみピークの大きさに影響を与えることがわかった。

さらに、室内実験結果と数値シミュレーション結果の比較を図 2.5.5-3 に示す。高濃度側である下面に近い地点で良好なフィッティングを得ることができたが、低濃度側では数理モデルの改良が必要であることがわかった。また、実験後半に現れる試料の下面から 15 mm 付近に見られる大きなひずみ変動は、岩石の不均質性に起因することが考えられ、本検討で用いたシミュレーションモデルでは組み込まれていない。

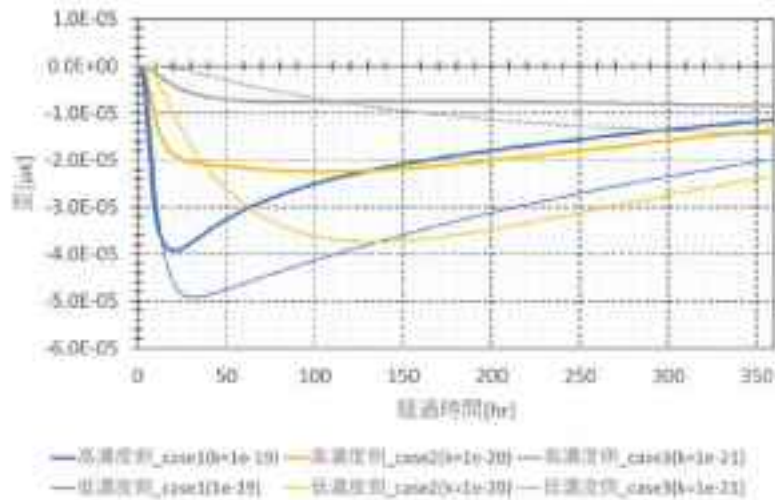


図 2.5.5-2 浸透率に対する感度分析結果

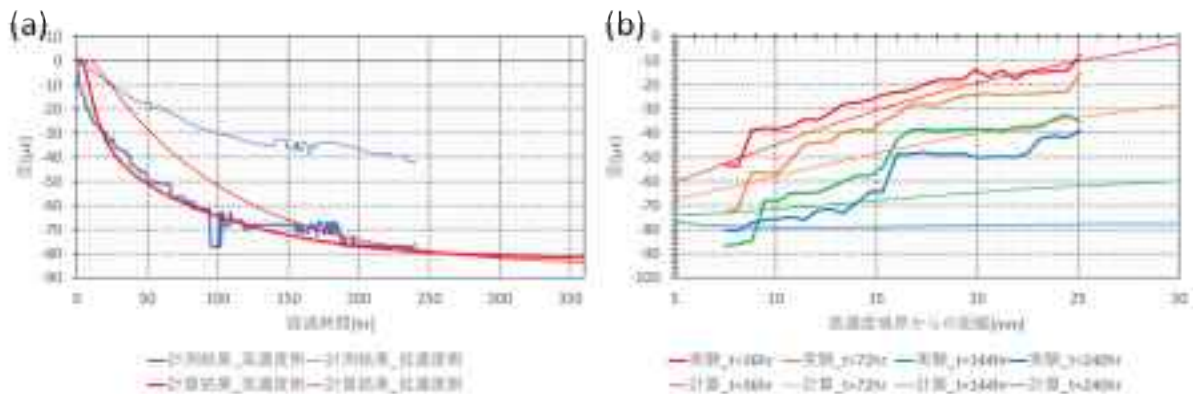


図 2.5.5-3 室内実験結果と数値シミュレーションの比較

(4) まとめ

光ファイバーを用いた室内計測システムによって、低浸透性泥岩で生じる化学的浸透現象に起因する岩石変形を空間的に連続したひずみ変化として捉えることができた。また、同現象の数値シミュレーションを実施するための数理モデルを構築し、ひずみ変動に影響を及ぼす因子の感度解析を行った。その結果、浸透率、有効拡散係数、ヤング率の大小によって、生じるひずみ変化挙動が異なり、特に浸透率が及ぼす影響が大きいことがわかった。さらに、室内実験結果と数値シミュレーション結果のフィッティングを行い、良好な結果が得られた。これにより、CO₂ 地中貯留における遮蔽層安定性評価手法の一つとして、化学的浸透現象による岩石変形挙動に対する室内実験システムと数理解析システムを構築することができた。

2.5.6 地化学反応や力学応答、化学的浸透現象を考慮したシミュレータの完成

(1) はじめに

技術研究組合では、これまで地層中の多成分・多相系流体計算に加え、CO₂ 溶解水=岩石鉱物間の化学的特性や、ひずみなどの力学的特性を取り入れたシミュレータの開発を進めてきた。本項ではそれらシミュレータの開発の状況について説明する。

(2) 地化学反応を考慮した流動シミュレータ

流体流動と化学反応を連成解析するシミュレータとして、商用のソフトウェアもあるものの、技術研究組合では LBNL が開発した TOUGHREACT (Xu et al., 2004) を主に用いている。TOUGHREACT は鉱物種や溶存イオン種が増えても計算が安定しているという特徴があるだけでなく、ソースコードから使えるため、計算過程が明らかなこととユーザー側で改良が行える。ただし流動計算に加え地化学計算を行うため、計算時間がかかるという問題があった。このため、TOUGHREACT V2.0 に並列化機能を付加した TOUGHREACT V2 MP が開発されている (RITE, 2016)。このソフトの利点は、プロセッサが独立となる MIMD (Multiple Instruction stream, Multiple Data Stream) 型の大規模計算機にもそのまま適用できることである。

技術研究組合では、このソフトウェアを用いて、長岡サイトでの地化学反応を考慮した長期挙動シミュレーションを実施した (図 2.5.6-1)。このシミュレーションの際、流動特性に関しては、検層等で得られているマクロな物性値を利用している。この計算において、プロセッサの並列数を増やせば実計算時間が短縮していくことも確認され、地化学反応を考慮した大規模 CO₂ 挙動シミュレータは、十分実用化に対応できることを確認した。

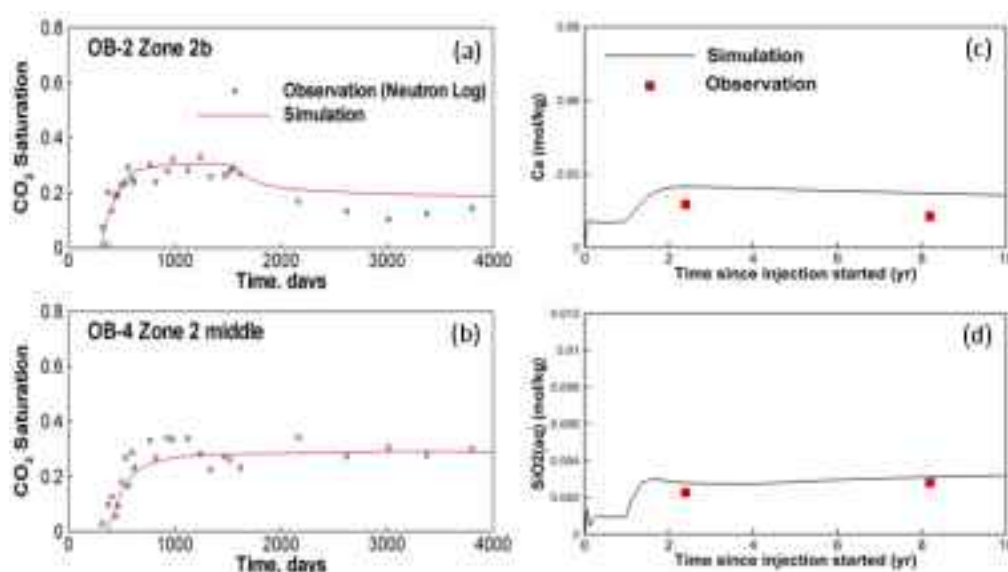


図 2.5.6-1 地化学反応を考慮したシミュレータでの長岡サイトデータのマッチング結果

(a) OB-2 での CO₂ 飽和度の比較、(b) OB-4 での CO₂ 飽和度の比較

(c) OB-2 での Ca イオンの経時変化、(d) OB-2 での溶存二酸化ケイ素の経時変化

(3) 力学的変形を考慮した流動シミュレータ

貯留層に CO₂ を圧入すると、貯留層およびその周辺の地層の孔隙に存在する地層水の圧力、地層の変形、浸透率などが連想して変化し、岩盤の応力分布を変化させる。このような、熱-水理-岩石力学 (THM) 連成シミュレーションを基本とするジオメカニクモデリングは、CO₂ 圧入に伴う岩盤変形や断層活動などのリスク管理にも有益なツールとなる。この THM 連成を扱えるシミュレータはまだ少なく、商用の ECLIPSE=VISAGE による計算においても課題が残っている。技術研究組合では、TOUGH2=FRAC3D によるシミュレータの開発を行った (Lei et al., 2019)。このシミュレータを用い、千葉県茂原地区で実施した農業用水揚水時の光ファイバーによるひずみ計測結果のマッチングを行った。地層の浸透率、孔隙圧縮率については軸対称解析解と揚水試験結果から一次近似解を求め、弾性定数等の未知パラメータはシミュレーション結果と観測結果をマッチングさせることにより求めた。最もマッチングの良かった時のシミュレーション結果と観測結果の比較を図 2.5.6-2 に示す。この解析では、比較的単純な地層モデルでシミュレーションを実施したものであるが、シミュレータ自体の性能としては、より複雑なモデルにも適用可能であり、実用化可能なレベルに達していると言える。

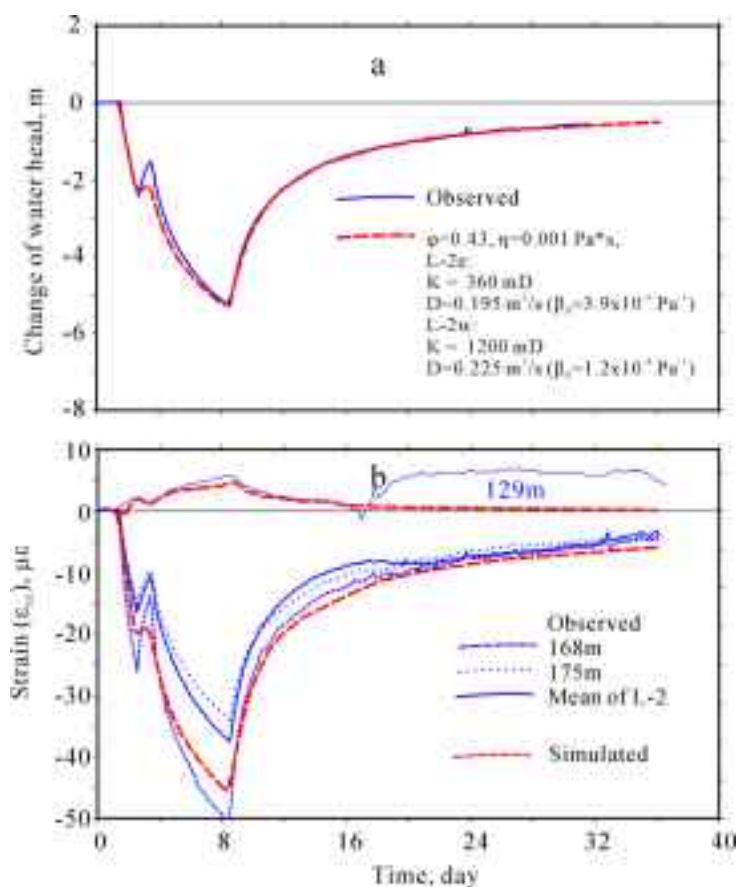


図 2.5.6-2 力学的変形を考慮したシミュレータでの茂原地区揚水試験でのひずみの比較

a 水頭変化、b ひずみの変化量

青線：光ファイバーでの観測結果、赤線：シミュレーション結果

(4) 化学的浸透現象を考慮した挙動シミュレーション

シール層と貯留層の境界では CO₂ 濃度が極端に異なるため、化学的浸透現象が発生するとともにひずみが発生することが考えられる。この現象を検討するためには、化学的浸透—物質移行—圧力差駆動流を連成させたモデルを考える必要がある。これまでこれらの現象を同時に扱った事例はないため、シミュレータも独自に開発する必要があった。

開発したシミュレータに対し、化学的浸透—物質移行—圧力差駆動流の連成のうち一部を取り扱っていない複数の既知問題に当てはめて、数値計算の妥当性を評価した。この比較より化学的浸透—物質移行—圧力差駆動流の連成シミュレーションが正常に動作していることを確認した。さらに実際の室内実験結果の比較に、このシミュレータでの計算結果を用いた検討も行っている。詳細については 2.5.5 項に記す。

(5) まとめ

本項では、長期 CO₂ 挙動シミュレータの開発状況についてまとめた。これまでに、地化学反応を考慮したシミュレータ、力学的変形を考慮したシミュレータ、および化学的浸透現象を考慮したシミュレータの開発が行われ、それぞれ正常に動作することを確認した。今後これらのシミュレータを任意の地質モデルに対応可能なようにインターフェースの充実を図り、CO₂ 挙動シミュレータツールセットとして仕上げる予定である。

参考文献

- 1) Lei, X., Xue, Z. and Hashimoto, T. (2019): Fiber optic sensing for geomechanical monitoring: (2)- Distributed strain measurements at a pumping test and geomechanical modeling of deformation of reservoir rocks. Applied Science, 417; doi:10.3390/app9040417
- 2) RITE (2016): 平成27年度 二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 成果報告書.
- 3) Xu, T. Sonnenthal, E., Spycher, N., and Pruess, K/ (2004): TOUGHREACT User's Guide: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-55460.

2.5.7 まとめ

本節では、大規模貯留層に適した CO₂ 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法についての開発状況を報告した。

長期挙動シミュレーションの補助機能ツールとしては、地質モデルを構築する Petrel と挙動シミュレーションを実施する TOUGH2 の間をつなぐインターフェースのために、Petrel の出力データフォーマットを明らかにした。また複数の技術者の共同作業が必要な地質モデル構築の際の情報共有ツールとして、Alfresco が有望であることを明らかにした。

マクロな CO₂ 挙動メカニズム評価に関しては、圧入停止から 15 年経過している長岡サイトにおいてモニタリング検層を実施したとともに、その観測データを用いて、流動特性とモニタリング時の物性値評価に係る情報を取得し、挙動シミュレーションに必要なパラメータ設定の根拠となるデータを得た。

また、CO₂ 漏洩監視手法として、弾性波探査を補完する電磁場探査精度をフォワードシミュレーションにより明らかにした。このシミュレーションにより、漏洩検知を行うために必要な送受信点配置を明らかにした。

ここまでの内容は、主に地化学反応を考慮した CO₂ 挙動シミュレーションに関わる内容であるが、CO₂ 地中貯留で想定される、より複雑な連成解析に関しても検討を行った。地化学—力学—水理連成では、地化学反応に伴い遮蔽性能が変化する現象に着目し、その現象理解のためのコア試験を行い、地化学反応に伴う浸透率変化量評価のための基礎的データを収集した。また遮蔽層・貯留層境界に発生する CO₂ 量の大きな変化によって想定される、化学的浸透現象とひずみ発生に係るコア試験と、その現象を説明するシミュレータの開発を行った。この開発により、高濃度領域の試験結果を概ね説明するシミュレータを構築することができたことと、化学的浸透現象によって発生するひずみの大きさにはヤング率が強く起因するというメカニズムの理解に貢献した。

最後に本研究で取り扱ってきたシミュレータ開発全体の現状をまとめた。地化学反応を考慮したシミュレータ、力学的変化を考慮したシミュレータ、および化学的浸透現象を考慮したシミュレータはほぼ完成しており、今後地質モデルを適用すること、および結果表示のためのインターフェースを整備することにより、大規模 CO₂ 挙動シミュレータのツールセットはほぼ完了できる見通しとなった。

2.6 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発

CCS事業を安全に実施するためには、地層変形や坑井を通じた漏洩といったリスク評価を行う必要がある。光ファイバーを用いた計測技術が近年目覚ましく進歩しており、光ファイバーの一端から光パルスを入射し、ファイバーの各地点からの後方散乱光を連続的に計測する。光ファイバーに変形や温度変化が発生すると、後方散乱光に変化が生じるため、その発生個所と変化量の推定が可能となる。光ファイバーを地中に設置すると、空間的・時間的に連続した計測を行えるという特徴を持っている。これまで、連続的温度センサーとしての利用は進んでいるが、ひずみセンサーとしての利用は、光ファイバーの適切な補強方法、坑井への施工方法、データの解析手法等の様々な課題がある。また2010年以降データ処理技術の向上により、分布型音響センサー（DAS：Distributed Acoustic Sensing）の技術開発が行われるようになってきている。これらの手法では、光ファイバーを設置した坑井を受信センサーとして半永久的に利用できるため、モニタリングコストの削減につながることを期待されている。

本課題では、光ファイバーのひずみセンサーとしての利用方法と、音響センサーとしての利用方法に関して、大規模地中貯留での実用化を目指した技術開発を行う。ひずみセンサーとしての利用に関しては、CO₂圧入等による地層の変形（ひずみ）を深度方向に連続して把握することを可能とする光ファイバーの設計・製作、坑井への設置工法の検討、連続モニタリングのための機器等を開発し、地層安定性・廃坑井健全監視システムを構築する。一方、音響センサーとしての利用に関しては、CO₂挙動把握のための垂直・傾斜井対応の弾性波探査（VSP：Vertical Seismic Profiling）に用い、光ファイバー測定手法特有のデータ処理および解析技術を確立する。

2.6.1 廃坑井への光ファイバー設置・適用手法の確立

(1) はじめに

技術研究組合では、光ファイバーを用いた地層安定性や坑井健全性に関する評価技術の開発を進めてきた。これまで、室内試験ならびに現場での実証試験を通して、光ファイバーケーブルの仕様や設置方式によって計測結果に影響を及ぼすことがわかってきた。

ひずみ計測では計測結果から温度の影響を排除することが重要であり、温度計測用の光ファイバーケーブルを用いてこの影響を取り除くか、レイリーとブルリアンのハイブリッド計測を行って温度とひずみを分離する方法について検討を進めている。そのような計測方法に適した光ファイバーの選定と設置方式について検討した。

光ファイバーのひずみ計測以外の利用方法として、光ファイバーが音響・弾性波にも感度を有することから、貯留層内に圧入されたCO₂ブルームを把握するための繰り返し弾性波探査の受振センサーとしての利用が進められている。垂直または傾斜坑井を使用する弾性波探査（VSP：Vertical Seismic Profiling）では対象地層の近傍でデータを取得できるため、地表からの弾性波探査に比べて高分解能なイメージングが可能であるが、坑内への受振器の昇降に時間を要する。坑井に設置された光ファイバーを受振センサーとして使用することで、作業時間の短縮と繰り返し探査時のコスト低減を図ることができる。一方で、従来型の受振器のジオフォン記録に対して、光ファイバーケーブルの記録は一般的には感度が劣ることが知られている。そこで技術研究組合では、複数の光ファイバーケーブルに対してDAS/VSP記録の感度評価を行い、高品質なデータを得ることが可能な光ファイバーの設置方式について検討を行った。

加えて、注水・揚水試験を行うことで、地層変形監視技術の坑井への適用性の検討を行った。本年度はサイトに水圧入坑（深度250 m）を掘削し、本坑から注水を行った際に生じる地層変形について光ファイバーを用いて計測し、光ファイバーの種類や設置位置とひずみ感度について対比を行った。また、これまで詳しく検討されていなかった注水試験による地層変形と地質学的要因との比較を行った。

(2) 光ファイバーの仕様および設置方法の検討

① ひずみ計測

茂原地区試験サイト1に設置されたひずみ計測用光ファイバーの仕様を表2.6.1-1に、その設置方式の概要を図2.6.1-1にまとめた。CO₂地中貯留では深度1,000 m～数1,000 mまで坑井を掘削するため、設置する光ファイバーケーブルは計測感度のみならず、耐強度、耐熱性を備える必要がある。鋼線アーモードケーブルは、耐熱・耐荷重性に優れており、大深度坑井への設置に適しているが、アーモード層の増加によって感度が低下する。対して、エンボスケーブルは、全てのファイバーケーブルの中で最も感度が良く、かつ取り回しも容易であるが、大深度への設置にはファイバーを断線・損傷させないための工夫が必要である。

新規に坑井を掘削して光ファイバーを設置する場合、高品質なデータを得るためには坑井ケーシング背面に設置すること（例えばH24 光ファイバー設置坑の方式）が望ましいが、既存坑井の閉鎖時にはケーシング内にファイバーを降下してセメンチングすることも想定される。H29やH30光ファイバー設置坑では、ケーシングを模したガス管の内部に光ファイバーケーブルを設置しセメント固定した。計測の結果から、3層アーマードケーブルでは1~2メートルの範囲に渡るひずみ変化は捉えられるが、0.5 m程度の範囲のひずみ変化を捉えられないことがわかった。また、ケーシング背面セメント固定ファイバーと比較すると、ガス管内設置のファイバーは感度が低下するものの、ひずみ計測が可能なことが認められた。

表2.6.1-1 茂原地区試験サイト1に設置された主たる光ファイバーの仕様

種類	3層アーマードケーブル (温度用FIMT内蔵)	1層アーマードケーブル	ひずみ用ファイバー (エンボスケーブル)	ひずみ用ファイバー 太径(スクアマケーブル)	FIMT
構造図					
被覆	鋼線×39本	鋼線×6本	難燃ホリエチレン	ホリオレフィンエラストマー	ホリアミド
外径	φ7.3mm	φ2.3mm	3.8(W)×2.0(H)mm	φ7.5mm	φ3.8mm
心線数	2	1	2	2	2
計測対象	温度/ひずみ	ひずみ	ひずみ	ひずみ	温度/ひずみ
引張強度	700kgf	—	78kgf	117kgf	152kgf
耐熱温度	200℃	—	80℃	80℃	85℃
設置坑井	OF1/OF2	OF1	OF2/OF3	OF2	OF3

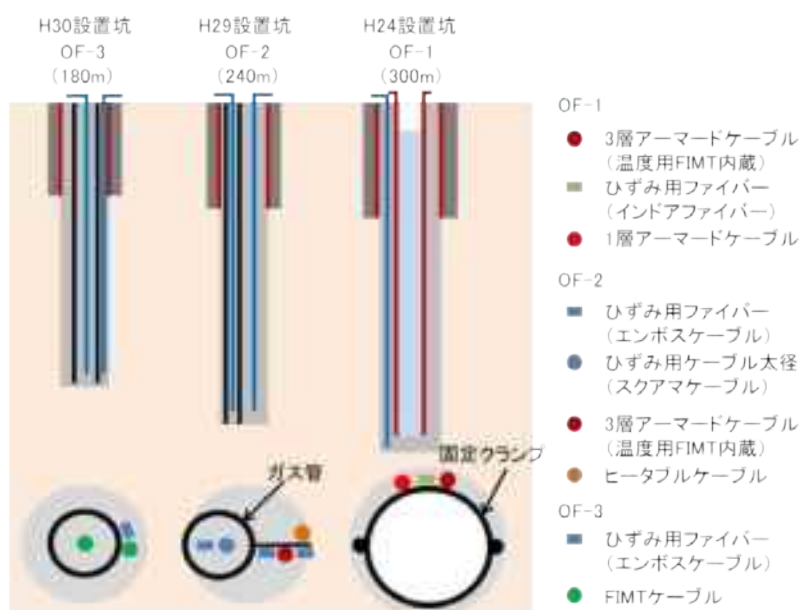


図2.6.1-1 茂原地区試験サイト1の光ファイバー設置方式の概要

② 音響（DAS）計測

茂原地区試験サイト 2 に設置された光ファイバーとその設置方式の概要を表 2.6.1-2 および図 2.6.1-2 に示す。CO₂ プルームの挙動把握に有効な VSP 探査を行って、従来型受振器であるジオフォンと様々な設置方式による光ファイバーの波形記録を対比した。

ジオフォンとロギング方式は、深度 880 m 坑井ケーシング内にツールを降下して計測を行う。ケーシング背面セメンチング方式では、880 m 坑井のケーシング背面アニュラス内にひずみ測定用ファイバーをセメント固定した。対して、250 m 坑井では、ケーシング背面と同じひずみ測定用ファイバーに加えてヘリカルファイバーケーブルをチュービングに這わせて降下して後セメント固定した。振動源として P 波インパクターを用い、坑口付近で発振した。

表 2.6.1-2 茂原地区試験サイト 2 の光ファイバー設置方式

	ファイバー種別	設置方式	坑井名
(1) ジオフォン	(ジオフォン)	坑内	880m 坑井
(2) ケーシング背面	ひずみ計測用エンボスファイバー	ケーシング背面セメンチング	
(3) ロギング	温度計測用ファイバー	坑内水中宙吊り（ワイヤー内）	
(4) 坑内ストレート	ひずみ計測用エンボスファイバー	坑内セメンチング	250m 坑井
(5) 坑内ヘリカル	音響計測用ヘリカルファイバー	坑内セメンチング	

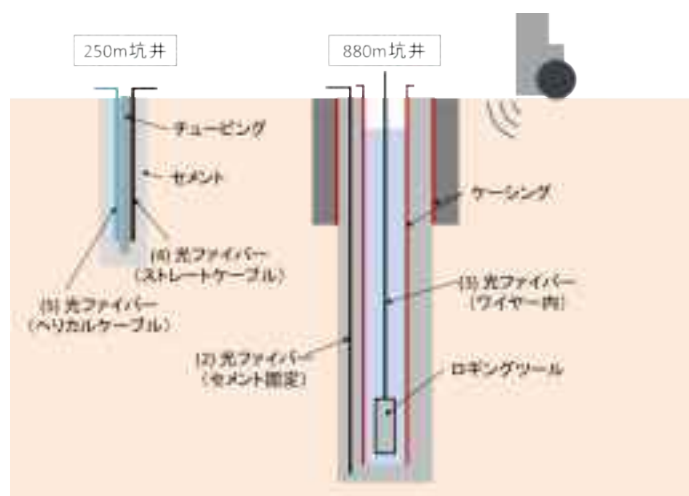


図 2.6.1-2 茂原地区試験サイト 2 の坑井配置と試験概要

図 2.6.1-3 に、5 種類の設置方式による VSP 記録を示す。セメント固定されたファイバー全てで、ジオフォンで計測される P 波と S 波を計測することができた。坑内水中にあるロギング方式のワイヤーケーブルでは、ワイヤーケーブルを伝わる振動が大きいため、有意な信号を得ることができなかった。地層とのカップリングを得るのが困難な鉛直坑井では、ロギング方式での記録取得は難しいことがわかった。また、光ファイバー芯線が、ケーブル内で螺旋状に配置されているヘリカルファイバーケーブルは、ストレートファイ

バーで見られるケーブルに垂直な方向に入射する波の感度低下を抑制することができる。坑口付近で生じた弾性波は坑井に沿って伝播するが、伝播方向と垂直な方向に振動する S 波シグナルについて、ヘリカルファイバーケーブルでより良好に計測できることがわかった。

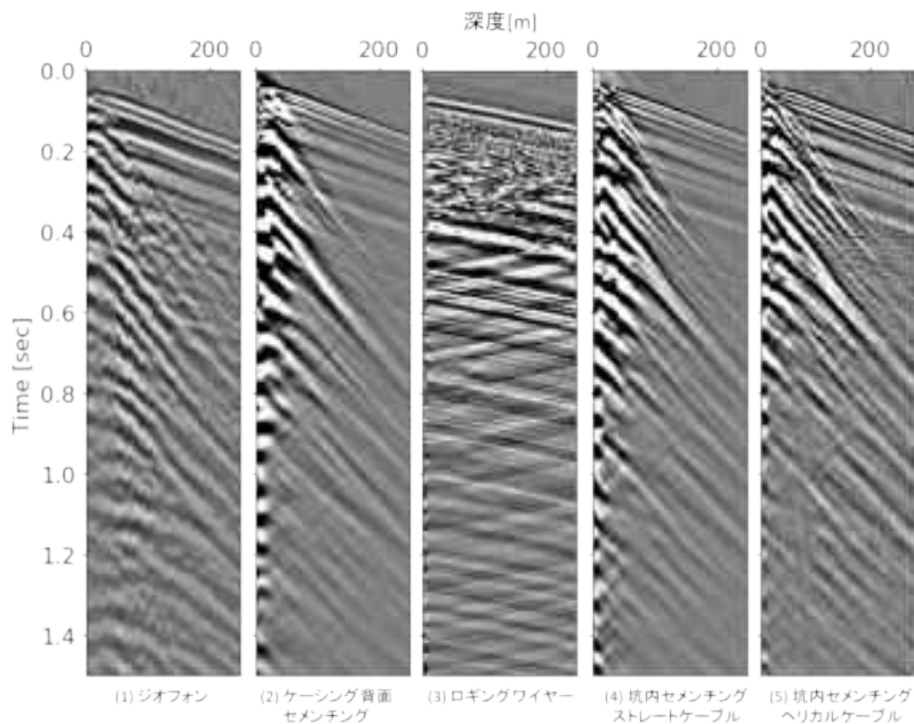


図 2.6.1-3 設置方式ごとの DAS/VSP 記録とジオフォン記録の比較

(3) 注水にともなう地層変形の光ファイバー計測

注水試験では、水圧入坑からの注水で生じる地層変形を光ファイバー設置坑で計測する。これまでの注水試験では、地層変形が生じることが確認されているものの、注水による地層変形と対象層の地質性状の比較は未検討であった。そこで、コアによる地質特性把握とともに、注水試験による地層変形データと地質特性との関連について検討を行った。

注水試験では、深度 186.8～188.8 m と深度 204.4～206.4 m の狭範囲（2 m 区間）を対象とした注水試験が行われ、地層膨張が計測された。図 2.6.1-4 には、上記区間に生じた地層変形と対象層の粒度組成や淘汰度と密接に関連する粒度分布の測定結果を示す。粒度分布の累積頻度曲線は、急な傾きほど淘汰良好であり、緩い傾きほど淘汰不良であることを示す。これらの結果から、ひずみ量と粒度特性とは関連性があり、対象層が粗粒かつ淘汰良好な性状を示す砂岩ではひずみ量が大きくなる傾向があることが分かった。これは、粗粒かつ淘汰良好な砂岩では、水の圧入性が高く、選択的に多量の水が浸入し、地層の有効間隙圧が上昇することで、その上下よりも地層膨張が著しくなることを示すと考えられる。このことは、光ファイバーによるひずみ計測技術と注水試験の併用により、地層の圧入性などの性状評価に活用できることを示す。

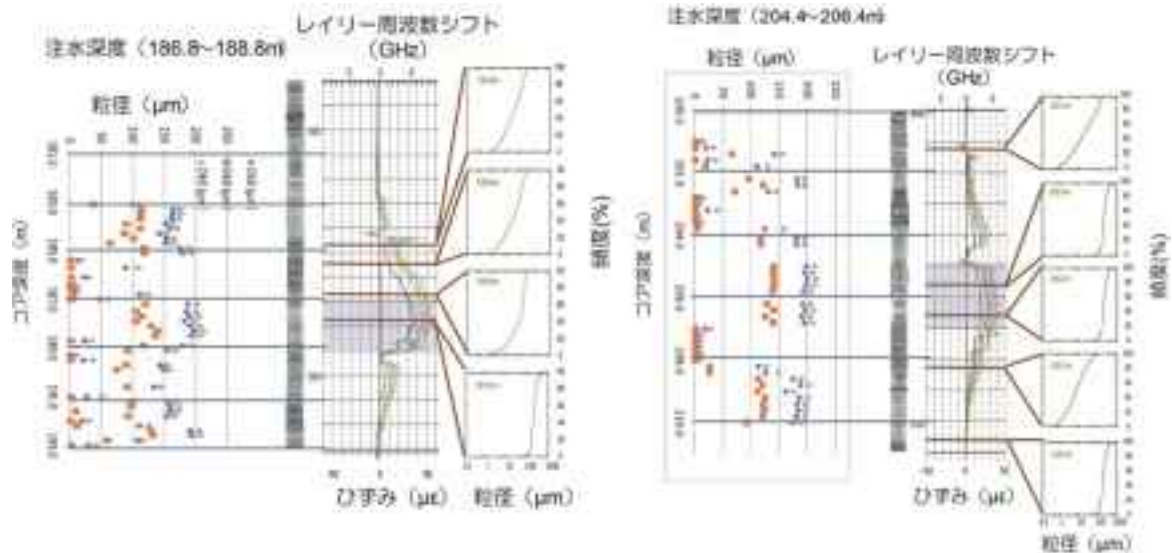


図 2.6.1-4 狭範囲 (2 m 区間) における注水によるひずみ変動と粒径分布の比較

また、深度 169~196 m の広範囲 (27 m 区間) を対象とした注水試験では、特定深度の地層膨張が計測された。この現象は地質要因と密接に関連する。図 2.6.1-5 では、コアの粒度分析と地層変形結果を比較した。この図から、中央粒径値は深度変化を示し、グラフで番号を付した深度 (①~⑤) は粗粒となることが判明した。特に、②の深度近傍でひずみが集中している。さらに、ひずみは深度 190 m 付近で 2 つの膨張層に分かれるが、その境界ではひずみ量は小さい。この境界部は泥岩が発達しており、ひずみ量の小さな部分は泥岩に対応する。上記結果は、広範囲に注水する際には選択的に透水性の高い部分に通水し、通水した地層の有効間隙圧が上昇し、地層変形が生じることを表す。このことは、光ファイバーを用いた地層安定監視技術に注水試験を併用すれば、水理地質学的性状の良好な地層選定にも貢献することを示す。

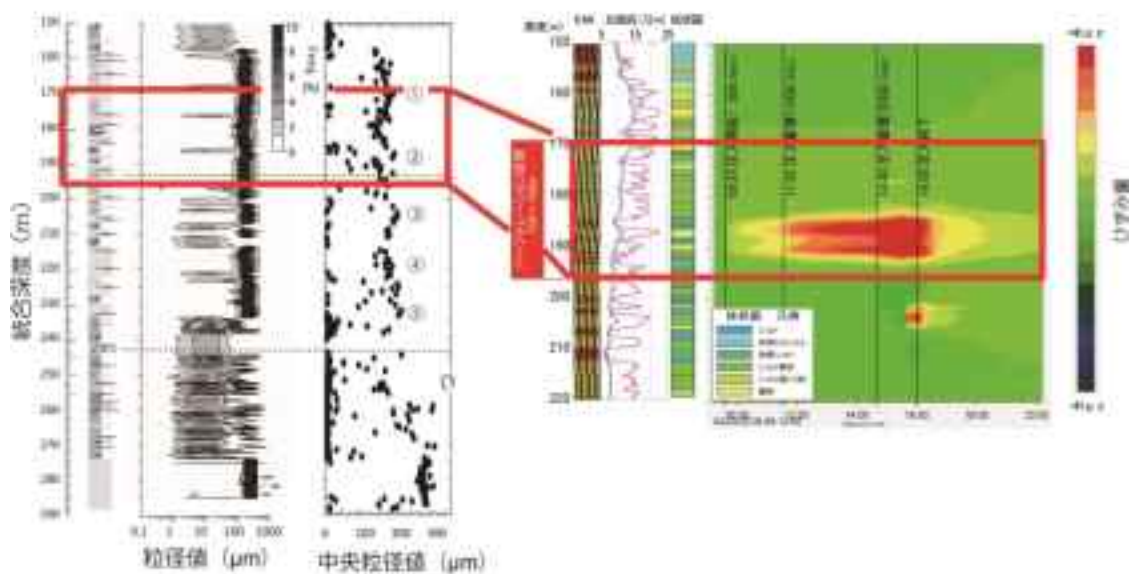


図 2.6.1-5 広範囲 (27 m 区間) におけるひずみ変動と粒径値の比較

(4) まとめ

CO₂地中貯留のモニタリングに向けた光ファイバーの坑井への設置方法を検討した。大深度を想定する場合には、鋼線アーマードで保護された光ファイバーの使用が望ましいが、0.5 m程度の範囲に渡るひずみ変化を捉えることができないことがわかった。エンボスファイバーケーブルはひずみに対する感度が良く取り回しも容易であるが、浅い深度での利用が主体となる。また、光ファイバーの坑井内の設置位置に関しては、ケーシング背面への設置がもっともよい感度を得ることができるが、ガス管内部に設置した光ファイバーケーブルでもひずみ計測が可能なことから、廃坑井において光ファイバー計測の利用可能性が高まった。

音響（DAS）計測では、地層とのカップリングが良好な坑井背面セメント固定型の光ファイバーが最も感度がよいことを確認した。鉛直坑井におけるロギング方式では、坑壁とのカップリングの向上に課題が残ることがわかった。ヘリカルファイバーケーブルでは、一般のストレートケーブルに比べてケーブルと垂直方向の振動にも感度があることが確かめられた。

狭範囲を対象とした注水試験結果は、粗粒・淘汰良好な砂岩で膨張ひずみ量が大きくなる傾向を把握できた。一方、広範囲を対象とした注水試験結果では、地層膨張は特定深度に集中して起こったが、それは対象層の地質性状の深度変化と密接な関連があることを把握できた。上記注水試験の結果は、光ファイバーを用いた地層安定監視を目的とする際には、注水試験を併用すれば圧入性や水理地質学的性状の良好な地層の選定に有効であることを示している。

2.6.2 光ファイバー長期観測システムの完成

(1) はじめに

CO₂地中貯留において、CO₂圧入に伴う地層の変形を地下深部から地表まで空間的に連続して計測することは、地層の安定性評価の上で重要である。技術研究組合では分布式光ファイバー計測技術を用いた地層変形（ひずみ）モニタリング技術の開発を進めてきた。CO₂地中貯留のモニタリングは、CO₂圧入前のベースライン観測から、圧入期間中、圧入停止後まで含めると10数年に渡って観測を続けることが求められている。このような長期間の分布式光ファイバーを用いたひずみ観測では、観測データ量が膨大となることから任意の区間および期間における観測データの即時取得が課題として挙げられる。そのためには、観測サイトに常駐または作業の都度アクセスすることなく、リモートからのコントロールが可能となる観測システムが有効であり、過年度までに長期観測システムの構築を行ってきた。

今年度は、ひずみ測定用光ファイバーによる長期観測として、2018年度に開発した長期観測システムの長期運用を通して、システムの問題点の洗い出し、確認された問題点の改善を行った。特に、課題として残っていたウェブインターフェイス機能の充実を図った。

(2) 長期観測システムの概要

ひずみ測定用光ファイバーによる長期観測システムは、(1) 計測室に設置された光ファイバー計測装置を用いて、地下に埋設された光ファイバーケーブルに対して光パルスを送信し、散乱光データを収集し、(2) パソコンにインストールされた自動データ計測・処理・解析用ソフトウェアを通じてデータ収集・解析・結果の可視化・データベース化を行い、(3) インターネット回線を通じて外部からのアクセスを可能とするシステムである。

光ファイバーを用いたひずみ計測では、計測に用いる周波数帯域や平均化の回数などのパラメータ調整が結果の良否に大きな影響を与えるため、パラメータ変更機能が備わっている。可視化機能を使用することで、任意の計測区間および観測期間のひずみ変化の表示とデータのダウンロードが可能となり、この結果を精査することで今後の計測パラメータの変更を図ることができる。また、データの取得間隔などのスケジューリング機能によって、計測期間の初期には密なデータ取得を行い、変化の小さい期間においては疎なデータ取得を行うなど柔軟な計測デザインにも対応可能である。サイト情報の機能からは、浅層部のひずみ変化に影響を与える可能性のあるサイト周辺の状況を天候データおよびウェブカメラ映像を通してモニタリングすることが可能である。

(3) 長期観測システムの課題とツールの改良

今年度は長期観測システムの運用結果を踏まえて、インターネットブラウザを用いたウェブアクセス機能の改善と充実を図った。図 2.6.2-1 に構築したウェブインターフェイスのスナップショットを示す。上段左図に示したトップページから計測データ表示、システ

ム設定、およびサイト情報表示の各機能へのアクセスが可能である。計測データ表示では、自動計測およびデータ処理済みのデータに対して、深度—時間軸におけるひずみ変化のコンター表示機能に加えて、任意の深度および時間におけるひずみ変化プロファイルの表示ができるように改良を行った。計測データの可視化と計測パラメータの変更を充実させたことによって、リモートコントロールで地層のひずみ変化を最適な方法で記録し、可視化することができるようになった。



図2.6.2-1 長期観測システムのウェブインターフェイス

(4) まとめ

光ファイバー長期観測システムに関して、外部からの接続・コントロール機能であるウェブインターフェイス機能の充実を図るとともに、長期間の観測を安定的に行えることを確認した。この改良により、光ファイバーを用いた長期ひずみ観測システムが完成し、CO₂地中貯留サイトへの実装が可能となった。

2.6.3 DAS/VSP を用いた Time-Lapse (T/L) モニタリング手法の確立

実フィールドにおいて DAS/VSP を含む物理探査的手法による T/L モニタリングを行う場合、地下の経時変化が有意に検出可能かを事前に検討することが重要となる。本年度の研究では、DAS/VSP を用いた T/L モニタリングの有効性評価手法として、T/L シグナルと T/L ノイズを個別に評価し、それらの強度を比較するワークフローを確立した。また、反射波を用いたイメージングによるモニタリングだけでなく、直達波走時を用いる速度トモグラフィでのモニタリング有効性についての検討も実施した。さらに、Full Waveform Inversion (以下、FWI) や Joint Migration Inversion (以下、JMI) といった最新技術についての動向調査を行い、DAS/VSP データへの適用可能性について調査した。以下、(1) 反射波による DAS/VSP モニタリング有効性評価手法、(2)直達波走時による DAS/VSP モニタリング手法の検討、(3)FWI および JMI 技術動向調査、について報告する。

(1) 反射波による DAS/VSP モニタリング有効性評価手法

T/L 弾性波探査を行った場合、ベースラインサーベイとモニターサーベイ間で観察されるデータの違いは、地下地層の孔隙流体の変化に起因する弾性波動場の変化 (T/L シグナル) と、サーベイ間でデータ取得条件が異なることによって生じる見かけの記録の変化 (T/L ノイズ) に分けることができる。モニタリングを成功させるため、すなわち、流体変化による微小な波動場の変化を検出するためには、T/L シグナルが十分に大きいこと (High Detectability) と同時に、T/L ノイズが十分小さいこと (High Repeatability) が必要となる。T/L ノイズと T/L シグナルは、式 2.6.3-1 で表される Normalized Root Mean Square (以下、NRMS) という指標を用いて比較することができる。

$$NRMS = \frac{2 \times RMS_{2-1}}{RMS_1 + RMS_2} \quad (\text{式 2.6.3-1})$$

NRMS は T/L シグナルや T/L ノイズの強度を 0 から 2 の値で標準化する指標である (Kragh and Christie, 2002)。

以下では、T/L シグナル量と T/L ノイズ量の評価手法について述べる。本年度はケーススタディとして、苫小牧実証サイトを想定した T/L シグナルの評価と、2017 年度研究で収録した DAS/VSP の実データを用い、CT 法で光ファイバーを展開した場合の T/L ノイズを評価した。

① T/L シグナルの評価

T/L DAS/VSP サーベイを実施した際の T/L シグナルは、CO₂ を圧入する前後の地下弾性体モデルを用いた弾性波動シミュレーションによって得られる疑似 DAS/VSP ショットギャザーを処理することによって評価できる。

まず、反射法弾性波探査データ・坑井データ、流体挙動シミュレーションの結果から、CO₂ 圧入前後の地下弾性体モデルを作成する。本研究では、より現実に即した地下弾性体

モデルを作成するため、（公財）地球環境産業技術研究機構、石油資源開発（株）、大成建設（株）が作成した苫小牧実証サイトの貯留層モデルから地下弾性体モデルを作成した（二酸化炭素地中貯留技術研究組合，2019）。CO₂の圧入量による結果の違いを比較するため、複数の圧入量シナリオについて地下弾性体モデルを作成した。なお、CO₂圧入によるP波速度低下はGassmannの関係式（Gassmann, 1951）に従い、また、CO₂は孔隙内に均質に存在すると仮定した。図2.6.3-1の上段にベースラインサーベイのシナリオとCO₂を50万トン圧入したシナリオについてのP波速度モデルを示す。CO₂分布域はP波速度が低下していることが分かる。

続いて、有限差分法を用いて弾性波動シミュレーションを実施し、各地下弾性体モデルに対する疑似ショットギャザーを作成する。シミュレーション条件としては、海上エアガン発振、および、IW-2孔に受振器を設置することによるDAS/VSPを想定し、発振点間隔50m、受振点間隔10mとした。疑似ショットギャザーは、DASがひずみセンサーであることを考慮し、光ファイバーの展開方向と波動伝搬の方向の関係から振幅値を補正している（二酸化炭素地中貯留技術研究組合，2017）。

その後、作成した疑似ショットギャザーを二酸化炭素地中貯留技術研究組合（2019）で示した処理フローを参考に、処理、イメージングを実施する。図2.6.3-1の下段は各シナリオに対応するイメージング結果である。単一サーベイのイメージング結果から、浅層・高傾斜井という条件下でも、DAS/VSPにより、十分に地下地層境界がイメージングできることが分かる。また、ベースラインサーベイではピークで現れていた貯留層上限のイベントが、50万トン圧入シナリオではCO₂分布域に対応する領域でトラフを示しており、CO₂の圧入がイメージングに影響を与えていることがわかる。

最後に、CO₂圧入前後でのイメージング結果を比較し、T/Lシグナルの強度をNRMSで評価する。図2.6.3-2は、ベースラインと50万トン圧入シナリオ、および、150万トン圧入シナリオの振幅差（上段）と、それらから計算されたNRMS値（下段）を示している。両シナリオとも、圧入CO₂の分布域では振幅異常値が観察され、NRMSでは1.3~1.7の値を示していることがわかる。加えて、CO₂の圧入量増加によって、振幅異常を示す範囲が広がることもわかる。

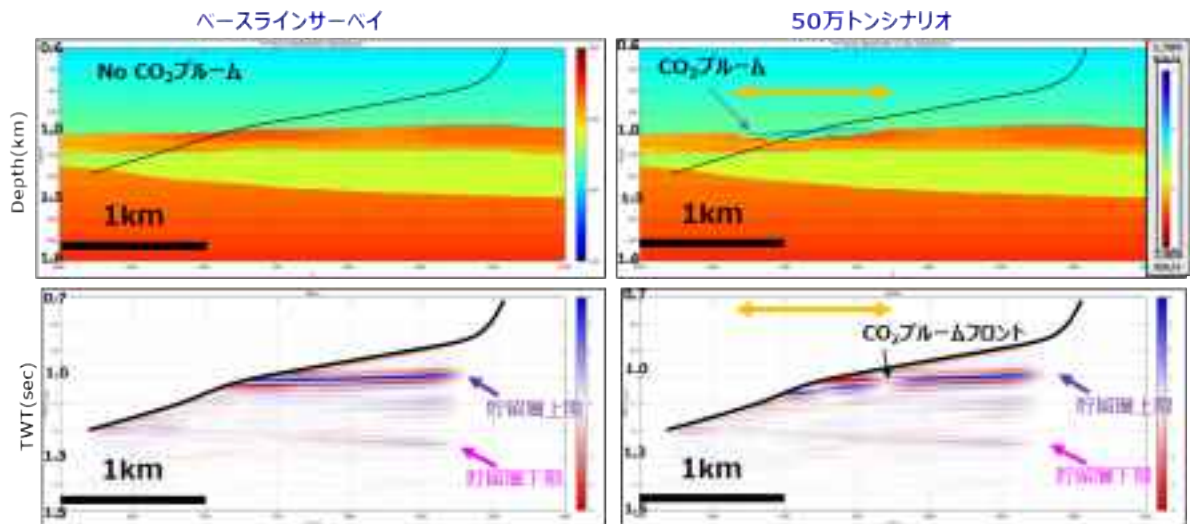


図 2.6.3-1 (上段) ベースラインサーベイおよび CO₂ を 50 万トン圧入した場合の P 波速度モデル。(下段) 速度モデルから作成疑似ショットギャザーを処理して得られるイメージング結果。

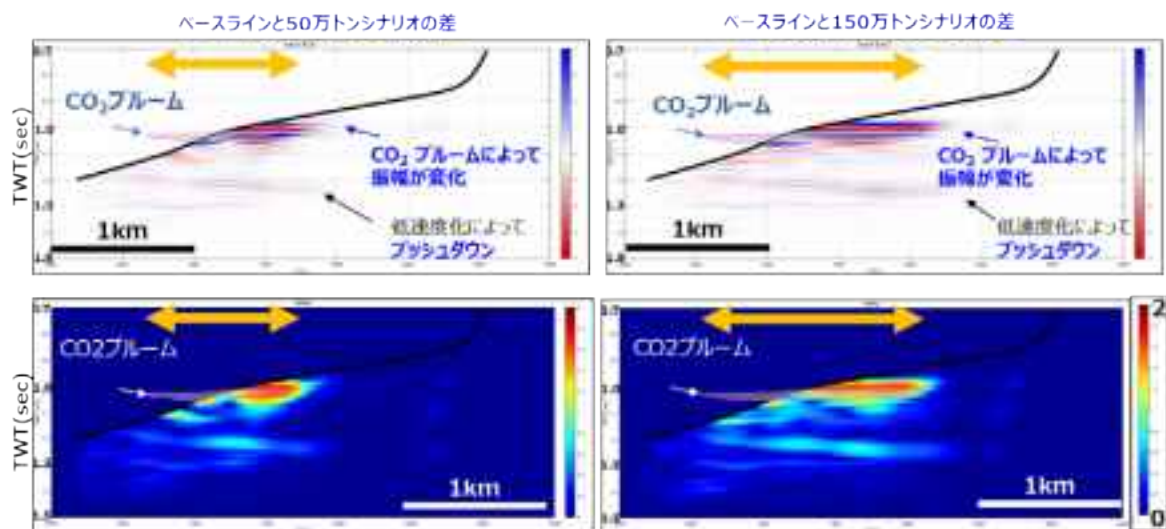


図 2.6.3-2 (上段) ベースラインと 50 万トン圧入シナリオ、および、150 万トン圧入シナリオの振幅差。(下段) 各シナリオで計算された NRMS 値。

② T/L ノイズの評価

T/L ノイズの評価として、2017 年度に収録した DAS/VSP データ（二酸化炭素地中貯留技術研究組合, 2018）を用いた Repeatability 評価を実施した。本検討では、まず DAS/VSP データのスweep記録を分割することで、疑似 T/L データとなる 2 つのデータセットを作成した。作成したそれぞれのデータセットに対して、DAS/VSP 処理フローを適用することで得られる反射波断面図を用いて、NRMS を計算した。なお、処理フローには 2018 年度研究の DAS/VSP データ処理で確立した処理フローを用い、パラメータも同じものを使

用した。

図 2.6.3-3 にそれぞれのデータセットから得られた地下断面図およびその差分、NRMS の計算結果を示す。NRMS 値は想定される貯留層付近（図中 白波線で囲んだ範囲）で 0.2~0.4 となっており、本データが比較的ノイズレベルの高い CT 法を用いた DAS/VSP データであること等を考慮しても十分良好な値であるといえる。一方、深部や坑跡以浅では NRMS が比較的高くなっているが、これは深部での SN 比がよくないこと、坑跡以浅では収録ジオメトリと VSP サーベイの原理的境界により、そもそも十分な重合数が得られずイメージング品質が確保できていないことが原因と推察される。

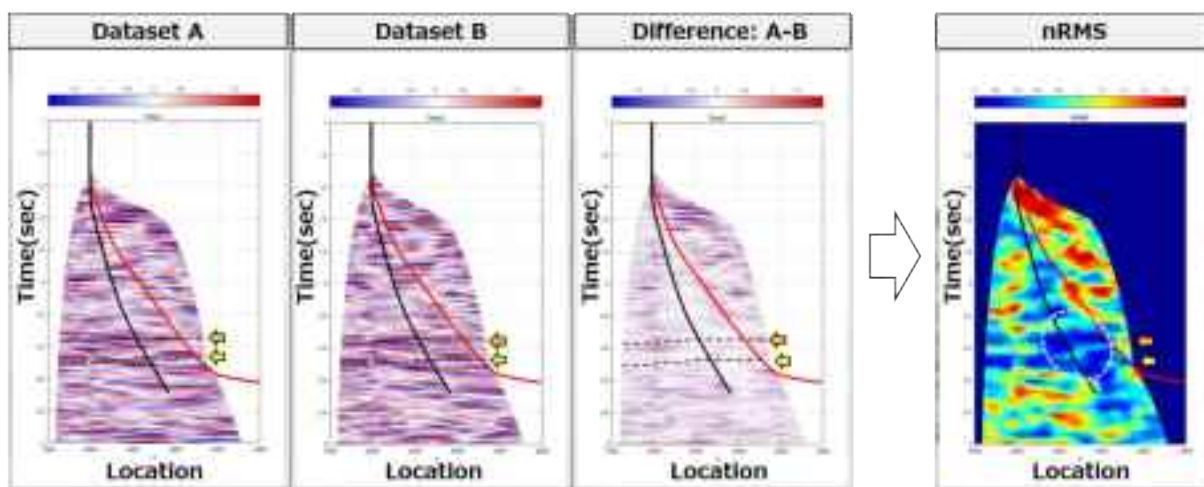


図 2.6.3-3 左から Dataset A を用いた断面図、Dataset B を用いた断面図、2つの断面図の差分、nRMS 計算結果（断面図中の赤実線が観測井、黒実線がリファレンス井、黒波線および矢印でハイライトしたイベントが想定される貯留対象層）

③ T/L シグナルおよび T/L ノイズ評価のまとめ、および、実用化への提言

DAS/VSP を用いた T/L モニタリングの有効性評価として、弾性波動シミュレーションによる疑似ショットギャザーから T/L シグナルを、また、実データの解析から T/L ノイズを評価する手法を確立した。それらの NRMS を計算すると、苫小牧実証サイトを想定した T/L シグナルは 1.3~1.7、CT 法で展開した光ファイバーを用いる場合の T/L ノイズは 0.2~0.4 であった。よって、苫小牧実証サイトでの DAS/VSP モニタリングでは、T/L シグナルが T/L ノイズより十分大きくなり、同手法が有効であると評価できる。

本年度確立した一連のワークフローは、他の地域でも十分に適用可能である。今後モニタリングを実施するフィールドへも適用することが期待される。実用化の際は下記の 3 点が重要となるため、今後の提言として記載する。

- ✓ T/L シグナル・T/L ノイズの強度は対象層の地質やデータ収録の手法によって異なるため、各フィールドに本ワークフローを適用し、モニタリングが実現可能か事前検討することが必要である。

- ✓ 特に、T/L ノイズ量は収録ジオメトリや光ファイバーの展開方法に依存するため、実際の収録コンディション下で取得したデータでの評価が重要であり、ベースラインサーベイを実施し、同データで評価することが重要である。

(2) 直達波走時による DAS/VSP モニタリング手法の検討

DAS/VSP によるイメージングでは把握することが難しい、圧入区間よりも浅部の構造を把握することを目的として、初動走時トモグラフィの解析を実施した。今年度は検討対象サイトとして苫小牧実証サイトを選定し、DAS 設置孔として IW-2 孔を考えた。

① 起振・受振ジオメトリの検討

初動走時トモグラフィによって調査地の速度モデルを構築するための最良の起振・受振ジオメトリを検討した。速度モデルは検層データを基に作成した水平成層モデルとした。検討した起振・受振ジオメトリは以下の通りである。

- ・起振間隔：100m、200m、500m（受振間隔：10m）
- ・受振間隔：5m、10m、20m（起振間隔：100m）

格子サイズは 20m とした。各々のジオメトリで観測走時を計算し、得られた走時データを用いて BPT (Back Projection Technique) によって初期モデルを作成した。速度修正は改良型 SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) により行い、イタレーション回数は 100 回とした。

各起振配置で得られた結果を比較したところ、坑井近傍ではすべての起振配置で概ね速度モデルが再現できた。しかし、起振間隔が 200m、500m の場合は波線密度の低下によりやや傾斜した速度モデルとなったため、起振間隔は 100m 程度必要であることを確認した。一方で、受振間隔は今回試行したジオメトリでは得られた結果に差がみられなかったため、受振間隔 20m で十分な速度構造を得られると判断した。得られた速度モデル結果から、貯留層となる深度 1,000m 周辺の坑井近傍において与えた速度モデルをよく再現しており、CO₂ 圧入に伴って速度が低下する領域で十分な分解能を有しているものと判断できる。

② 低速度領域の検知可能性の検討

CO₂ 圧入に伴って生じる速度低下領域が、走時トモグラフィによるタイムラプスモニタリングによって把握できるかどうかを検討した。本検討では、貯留層シミュレーション結果を用いて作成した圧入前の結果（ベースライン）（図 2.6.3-4）、および貯留層の圧力条件下における CO₂ 飽和度を基に推定した圧入開始 5 年後、15 年後、30 年後のモデルを使用して格子サイズ 20m の速度モデルを作成した。推定されたモデルでは、30 年後に最大で 26% 程度の速度低下がみられた（図 2.6.3-5）。測定ジオメトリは、①で得られた結果から起振間隔 100m で起振点数 44 点、受振間隔 10m で受振点数 184 点とした。

合計 4 つのモデルにおいて観測走時を計算し、得られた走時データを用いて BPT により初期モデルを作成した。イタレーション回数は①と同様 100 回とした。得られた速度モデルから圧入開始 5 年後、15 年後、30 年後の速度変化率を求めた結果、CO₂ 圧入に伴って速度が低下する領域周辺において初動走時トモグラフィによる解析結果で速度低下が生じており、時間経過とともに徐々に速度低下領域が拡大していることを確認できた。このことから、今回使用した苫小牧実証サイトをモデルにした測定ジオメトリにおいて、初動走時トモグラフィによって CO₂ 圧入に伴う速度低下領域を検知できるとことが確認できた。一方、圧入開始 30 年後の速度モデルにおいて速度低下率は最大 7% 程度であり、実際の速度低下率と比較して小さい結果となった。この原因として、速度低下領域によって生じる走時差が逆解析の際に異なる箇所にも走時差を配分し偽像を生じていることが考えられる。偽像を抑制するためには、走時データや波線分布を詳細に分析し、速度低下領域を制限する解析を行うことで改善できる可能性がある（例えば、斎藤ほか、2008）。

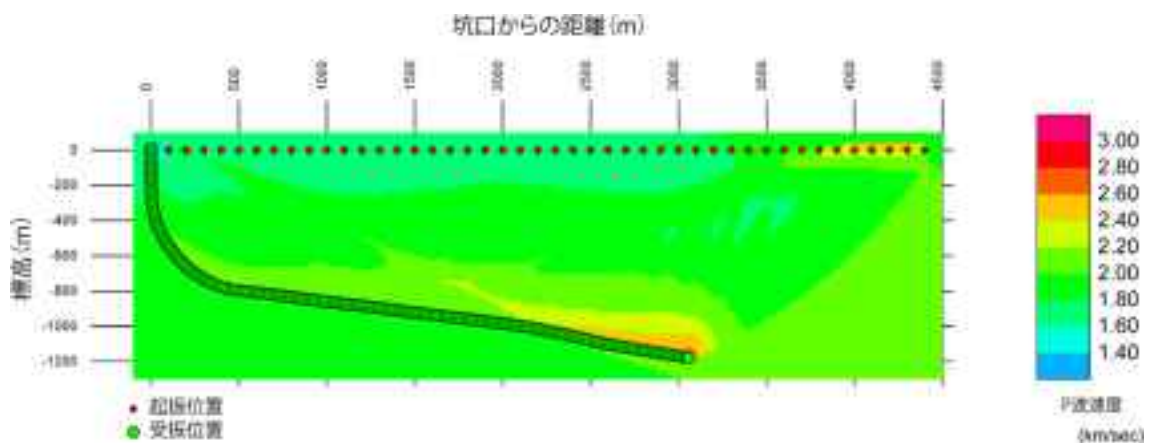


図 2.6.3-4 ベースラインモデルの逆解析結果

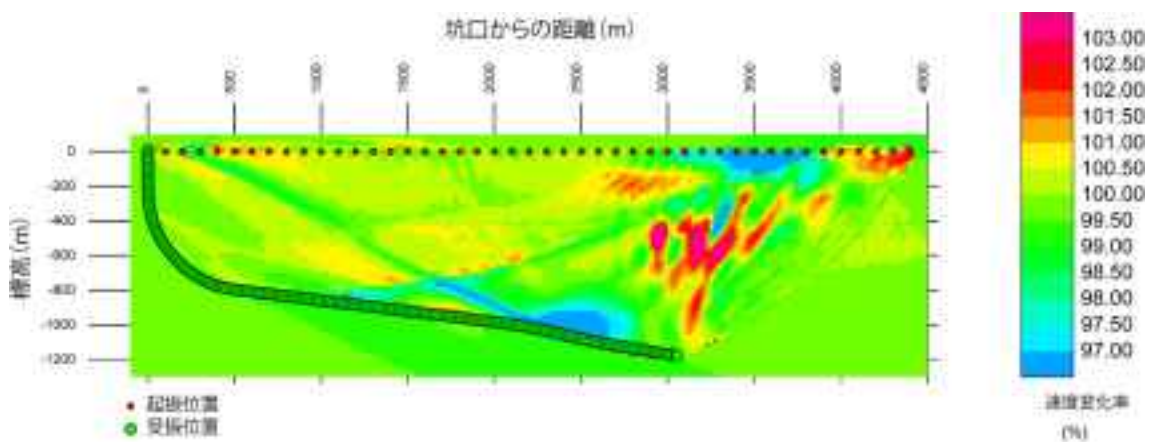


図 2.6.3-5 ベースラインからの速度変化率（30 年後）

(3) FWI および JMI 技術動向調査

① Full Waveform Inversion

Full Waveform Inversion (以下、FWI) は地震探査における全波形情報を利用することにより、地下の物性情報を高分解能に推定するためのデータ解析技術である。これまでに報告された FWI に関する文献を簡単に分類すると図 2.6.3-6 のようになる。

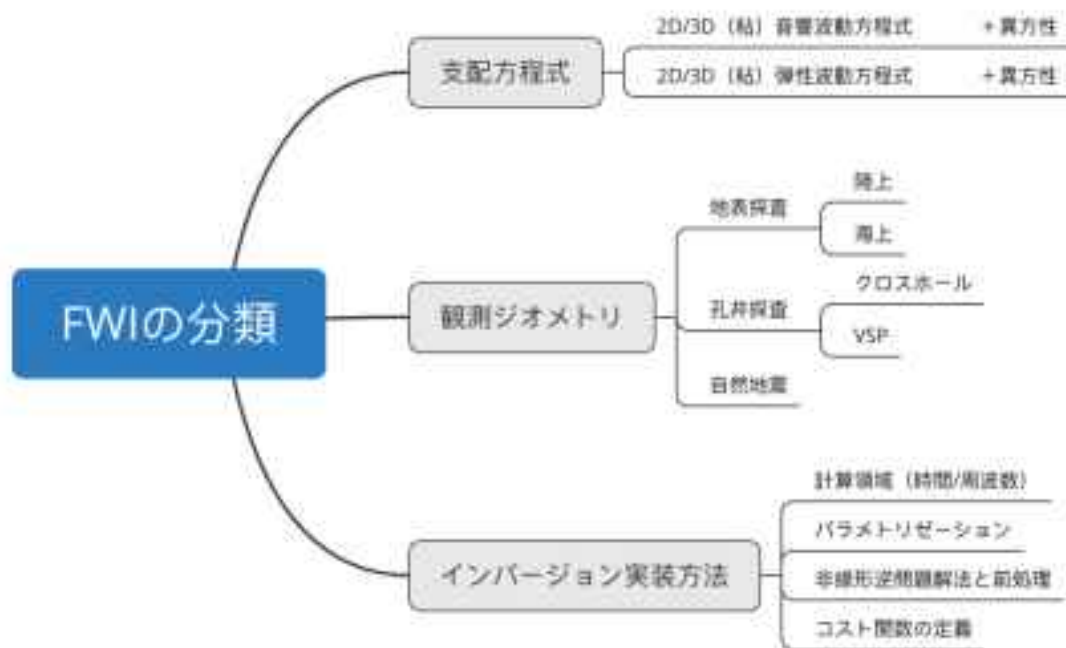


図 2.6.3-6 FWI 文献の分類

FWI は観測データと計算データから定義されるコスト関数を最小化する地盤パラメータを推定する非線形逆問題として定式化される。FWI は、観測データと計算データの残差の関数を震源として逆伝播させる順計算を行うことで、コスト関数の勾配を効率良く計算する点に特徴がある。取り扱う不均質性の程度や順計算手法に制約はなく、任意の不均質モデルを計算できる手法 (FDTD 法、境界要素法、スペクトル法など) のうち、計算精度や考慮したい物理パラメータ、計算速度などを考慮して選択する。

孔井を利用した観測ジオメトリにおける弾性場 FWI も数は少ないが増加傾向にある。Owusu et al. (2016) は、エアガンによるウォークアウェイ VSP データ (最大オフセット 2,400m) を利用して弾性場 FWI を行っている。3 成分ジオフォンのデータを回転し、上下成分と水平成分の 5Hz から 60Hz を利用した。推定された V_p と V_s の構造は音波検層結果と良く対応している (図 2.6.3-7)。また、Pan et al. (2018) は VSP 弾性場 FWI のマルチパラメタインバージョンにおいて、 V_p 、 V_s 、密度、P 波インピーダンス、S 波インピーダンスなどの様々なパラメトリゼーションによる結果を実データを用いて比較している。

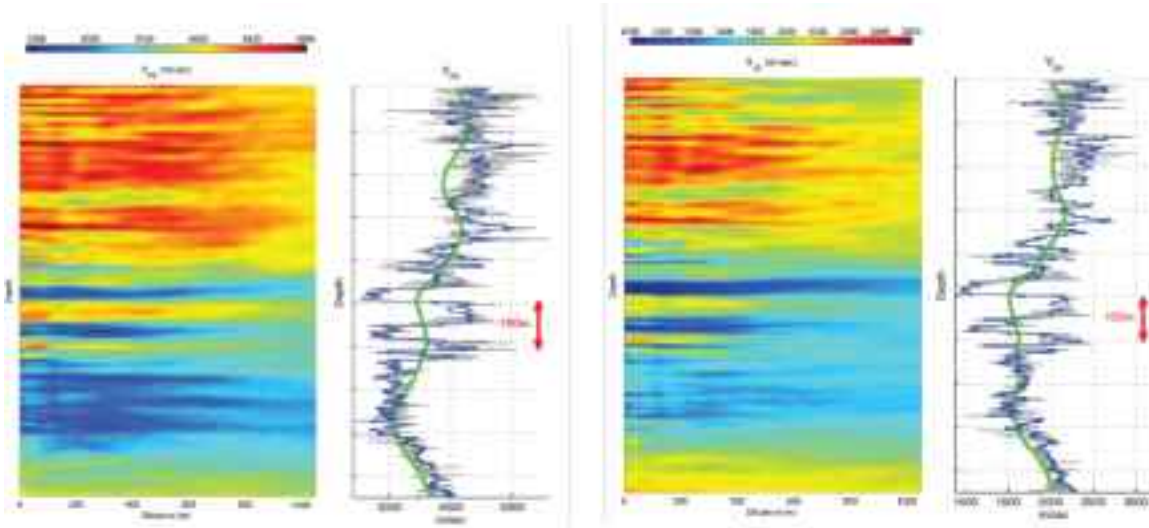


図 2.6.3-7 VSP による弾性場 FWI (Owusu et al., 2016)

緑線は初期モデル、青線は FWI モデル、グレーの線は音波検層結果を示す。

FWI をモニタリングに利用する研究が増えつつある。Anton et al. (2017) は、深度 1.5km の帯水層に注入された CO₂ を VSP でモニタリングしている。VSP の 3 成分データをポラリゼーション解析によって回転し、2D 弾性場 FWI を使って、V_p、V_s、および密度を同時に推定し、CO₂ の注入に伴って V_p が 100-150 m/s (3-5%) 程度変化したことを発見したことを報告している。Kamei et al. (2017) は深度 60m までの堆積層におけるクロスホールジオメトリで、マイクロバブルを含む水の注入をモニタリングしている。再現性の高い震源とハイドロフォン、および音響場 FWI によって、1%以下の P 波速度変化を発見したと報告されている。

② Full Waveform Migration および Joint Migration Inversion

多重反射をノイズとして除去するのではなく、処理へのインプットとして利用する技術の研究開発が、大学研究機関や石油・天然ガス開発業界などで進められており、その代表的な技術のひとつが、デルフト工科大学の DELPHI コンソーシアムなどが進める Full Waveform Migration (以下、FWM)、および、Joint Migration Inversion (以下、JMI) である。

FWM は、Berkhout and Veschuur (2011) によって提唱された波動方程式に基づくイメージング手法の一種である。イメージング処理の過程で波動場を外挿する際に、各深度レベルにおいて多重散乱 (multiple scattering) を考慮しながら上方伝搬波 (upgoing wavefield) と下方伝搬波 (downgoing wavefield) を更新する。このため、downgoing wavefield には downward multiple scattering が含まれていくこととなり、ある地下の反射面で下方に反射した地層内多重反射 (internal multiple) をその反射面以深のイメージングに利用することができる。

他方で、JMIはBerkhout (2012)によって提唱され、前述のFWI同様、地下速度構造の最適解を推定する手法であるが、多重反射もインプットデータとして使用する点がFWIと大きく異なる。JMIのアルゴリズムの大枠はFWMと同様であるが、マイグレーション処理の過程で反射係数列と共に、速度モデルの更新も行う。つまり、現在の速度モデルと真実の速度モデルの差によるscattering wavefieldを考慮することによって、波動場のフォワードモデリングによって得られるデータと観測されたデータとの誤差を反射係数列の誤差だけではなく、速度モデルの誤差にも起因させるアルゴリズムである。

現在メキシコ湾などの海上データを対象にVSPへの適用が進んでおり、特に、明瞭な多重反射の発生源となる海底多重反射を有効に使うことによって、イメージングや速度を推定する領域が坑井周辺に限定されるというVSPの欠点を克服できる可能性を示している(例えば、Soni, 2014 ; Mateeva et al., 2017)。

参考文献

- 1) Anton, E., Roman, P., Andrej, B., Stanislav, G., Vladimir, P., Konstantin, T. & Boris, G. (2017): Time-lapse full waveform inversion of vertical seismic profile data: Workflow and application to the CO2CRC Otway project, *Geophysical Research Letters* 44(14), 7211-7218.
- 2) Berkhout A.J. and Verschuur D.J.(2011) : Full wavefield migration, utilizing surface and internal multiple scattering, The 74th SEG Annual Meeting, San Antonio, Texas
- 3) Berkhout A.J. (2012) : Combining full wavefield migration and full waveform inversion, a glance into the future of seismic imaging, *GEOPHYSICS*, 77, 2, S43-S50
- 4) Gassmann, F. (1951) : Über die Elastizität poröser Medien. *Viertel. Naturforsch. Ges. Zürich*, 96, 1 – 23.
- 5) Kamei, R., Jang, U. G., Lumley, D., Takanashi, M., Nakatsukasa, M., Mouri, T. & Kato, A. (2017), Time-lapse full-waveform inversion for cross-well monitoring of microbubble injection, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017*, 1439-1443.
- 6) Kragh, E., Christie, P., (2002) : Seismic repeatability, normalized RMS, and predictability. *Lead. Edge* 21, no.7, 640-647.
- 7) Mateeva, A., Lopez, J., Chalenski, D., Tatanova, M., Zwartjes, P., Yang, Z., Bakku, S., de Vos, K., and Potters, H. (2017) : 4D DAS VSP as a tool for frequent seismic monitoring in deep water: *The Leading Edge*, 36, no. 12, 995-1000
- 8) Owusu, J. C., Podgornova, O., Charara, M., Leaney, S., Campbell, A., Ali, S., Borodin, I., Nutt, L. & Menkiti, H. (2016) : Anisotropic elastic full-waveform

inversion of walkaway vertical seismic profiling data from the Arabian Gulf, *Geophysical Prospecting* 64(1), 38-53.

- 9) Pan, W., Innanen, K. A. & Geng, Y. (2018) : Elastic full-waveform inversion and parametrization analysis applied to walk-away vertical seismic profile data for unconventional (heavy oil) reservoir characterization, *Geophysical Journal International* 213(3), 1934-1968.
- 10) Soni A.K. (2014) : Full Wavefield Migration of Vertical Seismic Profiling data, Ph.D Thesis, Lab. of Acoustical Wavefield Imaging, Department of Imaging Physics, Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- 11) 斎藤秀樹, 信岡大, 東宏幸, 棚瀬大爾, 薛自求 (2008) : 長岡実証試験サイトにおける二酸化炭素圧入実験の坑井間弾性波トモグラフィによるモニタリング, *Journal of MMIJ*, 124, 78-86
- 12) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (2017) : 二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業 成果報告書
- 13) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (2018) : 安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発 成果報告書
- 14) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (2019) : 安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発 成果報告書

2.6.4 CO₂吸着・膨潤を考慮したジオメカニクスモデリングの試行結果の把握

CO₂地中貯留において、貯留層へのCO₂の圧入は、もともとの地中の応力均衡を崩す一つの要因となる。そのため、キャップロック中にき裂や断層が存在する場合には、応力均衡の崩れに伴い、き裂の更なる進展や断層面同士のすべり現象が生じやすくなることが予測される。その結果、それらはより大きな流路になると同時に、CO₂の漏出経路にもなり得ると考えられる。一方、キャップロックを構成する主として粘土鉱物を対象として、CO₂の吸着とそれに起因した膨潤が起こることにより、キャップロックが変形する可能性が近年指摘されている。このような状況に鑑み、今年度は前年度の水理-力学連成解析をさらに発展させ、CO₂の吸着膨潤も考慮したジオメカニクスモデリングを試行するとともに、苫小牧サイトを含めた実試験サイトへの適用性の検討を行った。

(1) 軟岩のCO₂吸着・膨潤実験

一般的に、キャップロック中には、スメクタイト、イライト等の粘土鉱物が含まれるが、これらは地層水との相互作用により化学的膨潤を引き起こすことが知られている。一例として、深度最大2kmでのCO₂地中貯留を想定した有効圧条件下において、モンモリロナイトへのCO₂吸着に伴う膨潤挙動が確認されている(Zhang et al., 2018など)。したがって、実際のCO₂地中貯留においても膨潤現象が生じることが予想される。しかしながら、これまでCO₂による膨潤現象は主に粘土鉱物を対象とした研究例がほとんどであり、キャップロックそのものへの影響はほとんど考慮されていないのが現状である。

本研究では、地下1kmに相当する模擬CO₂地中貯留条件下(封圧:20MPa、間隙圧10MPa)において、岩石へのCO₂吸着に起因した膨潤挙動に伴う力学特性(体積ひずみ、軸応力など)の変化を調べた。今年度は第一段階として、岩石中の粘土鉱物にCO₂を効率的に吸着させることを意図して、粘土鉱物を含む浸透性の高い砂岩を用いた。この際には、CO₂による膨潤効果を明確化させるため、膨潤性の小さい窒素(N₂)ガスを間隙圧として使用し、基準となるひずみ、応力の計測を行った。具体的な手順として、圧力セルにセットした岩石に軸力約40kNと封圧20MPaを載荷し、N₂ガスで岩石内の間隙を飽和させた。次に、ひずみが安定したのを確認した後、岩石中のN₂ガスを超臨界CO₂で掃攻させながら、ひずみと軸応力の変化を測定した。なお、CO₂がN₂ガスを掃攻し、岩石内をブレイクスルーするまでに要した時間は約6時間であった。

図2.6.4-1aに示すように、CO₂がブレイクスルーしてから10時間経った後に、急激な体積ひずみの増加が見られ、20時間近傍で定常に達した。その後、緩やかに減少し、約80時間以降、再度増加と減少が繰り返された。一方で、図2.6.4-1bの軸応力は、ひずみの増加に応じて不規則に増加し、約60時間後に定常に達した。その後は、ひずみの結果と同様に、応力が減少し再び増加する反復傾向が見られた。このように、CO₂圧入に伴い、応力とひずみが増加するような岩石の膨潤が起きるとともに、その過程において両者が減少するような応力緩和の傾向が生じることが明らかとなった。

以上の結果から、CO₂地中貯留条件下では、岩石へのCO₂吸着に伴うひずみの変化と、それに応じた応力変化が生じると言える。観測された応力やひずみの値は、基準値（N₂ガス）に比べ優位な差がみられたことから、CO₂地中貯留における膨潤・緩和現象は岩盤の体積変化に影響を及ぼし得るものと予想される。したがって、CO₂地中貯留のより厳密な評価を行うためには、これまで開発してきたジオメカニクスモデリング手法に対して当該現象を新たに考慮すべきことが重要である。

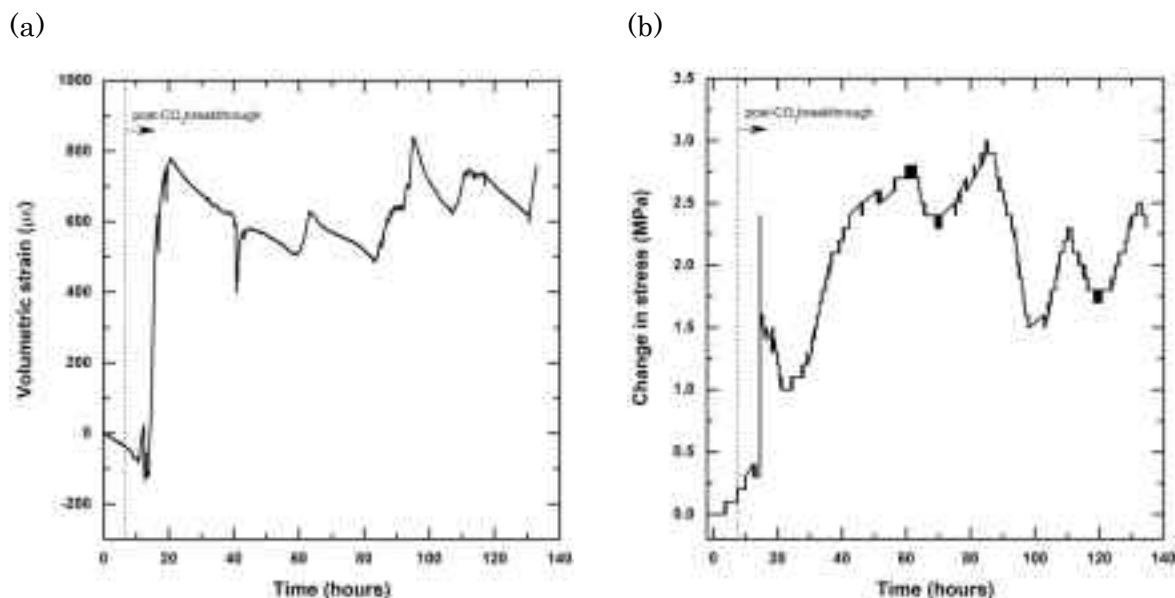


図2.6.4-1 粘土鉱物を含む砂岩中へのCO₂圧入に伴う
(a)体積ひずみ、および(b)軸応力の変化

(2) CO₂吸着・膨潤を考慮した軟岩の亀裂、断層モデリング

本研究ではこれまで、ランダムな不均質分布のアップスケーリング手法の開発と、軟岩の亀裂・断層モデルのプロトタイプを追加を行ってきた。今年度は、力学-水理連成解析に軟岩のCO₂吸着・膨潤の影響を取り込むため、上記(1)の実験結果を検討して、モデリング要素を抽出した。モデリングで考慮すべき要素としては、膨潤の影響による岩石の浸透率低下と、膨潤による応力変化が挙げられる。これら2点の取り込みを可能にするため、新規インターフェースの作成とプログラムの改良を行い、膨潤プロトタイプを実装した。次に、実験データを再現するため、改良したプログラムを用いて室内実験スケールでのモデリングを試行した。その結果、膨潤を考慮すると、断層帯やキャップロックの遮蔽性能が向上するが、膨潤応力の発生により、断層のすべり傾向（Slip-tendency）が高くなり得ることが示唆された。室内実験スケールでのひずみのモデリング結果をベースに、苫小牧証試験サイトの圧入条件での適用性を検討したところ、大規模圧入サイトでの最大注入圧をより正確に設定するためには、CO₂吸着・膨潤の効果を考慮する必要があることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Zhang, M., de Jong, S. M., Spiers, C. J., Busch, A., Wentinck, H. M. (2018) : Swelling stress development in confined smectite clays through exposure to CO₂, International Journal of Greenhouse Gas Control. 74, 49-61

2.6.5 まとめ

本節では、光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発として、ひずみ測定と DAS 計測によるイメージングおよびトモグラフィ手法について報告した。

まず、光ファイバーの選定、および設置方法による違いを確認するために、茂原地区サイトでの現場試験を行った。ひずみ感度としてはエンボスファイバーケーブルが最も良好であることを確認できたが、大深度への適用に課題が残った。またひずみ、DAS 計測ともに、坑内セメント固定設置でもある程度の感度を有することから、光ファイバー計測の廃坑井健全性監視への有効性が確認された。さらに、圧入性状を確認するために光ファイバーによるひずみ測定が有効であることを確認した。

長期観測システムに関しては、リモートコントロールする機能を拡充するとともに、計測地点・時刻の設定を任意に設定できるようにシステムを改良し、CO₂貯留サイトへ適用可能なシステムとして完成した。

一方、Time-Lapse (T/L) モニタリングとして、苫小牧サイトのような沿岸域での CO₂貯留を行う場合に、坑井に設置した光ファイバーを用いた DAS/VSP 解析と直達波走時のトモグラフィ解析についても検討を行った。DAS/VSP では T/L シグナルと T/L ノイズの評価のワークフローを確立し、苫小牧サイトのような大偏距坑井を用いた DAS/VSP においても、CO₂挙動のモニタリングが可能であることを明らかにした。また直達波走時トモグラフィでは、DAS/VSP とは異なり坑井と地表間の CO₂挙動のモニタリングが可能であることを明らかにした。さらに、これらのイメージング技術に使われる Full Waveform Inversion や Joint Migration Inversion の最新動向調査を行い、より高い精度でのモニタリングや VSP 探査の欠点を補える手法であることを確認した。

また、CO₂の吸着膨潤を考慮したジオメカニクスモデリングとして、これまで考えていたき裂のあるような地層において、粘土鉱物が膨潤することによりキャップロックが変形する現象について検討を進めた。コア試験によりこの現象を定量評価するとともに、定式化を行い、水理-力学連成シミュレータに取り入れるための準備を行った。

2.7 CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

我が国では主に海底下の貯留層へのCO₂地中貯留が想定されている。万一のCO₂漏出に備え、海域でのCO₂漏出検出技術が必要である。漏出検出としては、CO₂気泡の検出（物理的手法）と海水のCO₂濃度上昇の検出（化学的手法）がある。海水中のCO₂の濃度は自然環境により変動するため、化学的手法でCO₂の漏出を検知するには、もともとのCO₂の濃度変動（ベースライン）を明らかにしておく必要がある。苫小牧実証試験においては、1年間の四季調査のみでベースラインを設定しているが、様々なCO₂自然変動要因を考慮した場合、それで十分なのか検討する必要がある。

そこで、海水中のCO₂濃度の1年間の連続観測を大阪湾で行う。大阪湾では、過去9年分の四季観測データを技術研究組合として整理しており、今回実施する連続観測データと合わせて解析することにより、ベースライン検討を的確に実施できる。

また漏出が起きた場合のCO₂の拡散範囲や生物など環境への影響を評価する必要がある。このため、漏出CO₂の海中拡散シミュレーション、および生物影響評価手法を開発するとともに、これらを統合化し、分析・評価するCO₂漏出検出・環境影響評価総合システムを開発する。

2.7.1 生物影響評価データベースの構造の設定

昨年度は検討したデータセットの構成に従い、データベース（DB）構造を設計した。今年度は、亜致死情報の有意差検定処理など内容の追加を考慮した結果、対照区DBを廃止して致死DBと生物影響DBに含める構成の変更を行った。さらに、設計を変更して各DBファイルを作成するとともに、検索用のクエリーテーブルファイルを作成し、基本構造を完成させた。

(1) データベースファイルの構成

昨年度に検討したDB構造案では、データ重複を削減するために対照区のデータをDBとして独立させることにしていたが、対照区データを致死DBあるいは生物影響DBに含める構成に変更した（表2.7.1-1）。これは、生物影響DBに登録する亜致死情報データの指標や有意差検定情報の追加にあたって、DBへの入力前に対照区情報を用いた計算前処理が必要となったためである。

表2.7.1-1 生物影響データベースの構成変更

当初の構成案		確定した構成	
文献DB	著者、タイトル等	文献DB	著者、タイトル等
生物情報DB	種名、生息域等	生物情報DB	種名、生息域等
致死DB	致死曝露区の情報	致死DB	致死曝露区の情報 (対照区情報を含む)
生物影響DB	亜致死曝露区の情報	生物影響DB	亜致死曝露区の情報 (対照区情報を含む)
対照区DB	対照区の情報		

(2) 亜致死影響の指標と有意差検定

致死以外の亜致死生物影響の対象は、成長、代謝速度や石灰化など多様であり、また測定単位が異なるため、記載された測定値だけでは統一的に比較することは困難である。そのため、昨年度に亜致死データの評価指標には対数リスク比 (LnRR) を提案した。しかし、LnRRは曝露区において初期よりも低下する測定値が出現した場合には数値が得られないため、新たにHedges'd指標を追加した。

また、生物影響があると判断する危険率は事業により異なると考えられるため、有意差検定情報をDBとして提供することが必要である。生物影響データの採用選択を可能とするために、DBに入力するデータは検定の確率(p)とした。以下に、採用した指標と有意差検定手法について記す。

①LnRR

対照区とCO₂高濃度区の影響指標測定結果の比について対数処理したもので、対数反応比Log Response Ratio (LnRR、あるいはLnR)と称する(Koricheva et al., 2013)。

$$\text{LnRR} = \ln\left(\frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}_2}\right) = \ln\bar{Y}_1 - \ln\bar{Y}_2 \quad (\text{式2.7.1-1})$$

ここで、 \bar{Y}_1, \bar{Y}_2 はそれぞれCO₂高濃度区と対照区の測定値平均を示す。

②Hedges'd

CO₂の影響指標を測定した場合、CO₂高濃度区の測定値が負の値となる場合が想定される。例えば、初期体重からの変化量を指標としていた場合、体重変化量 $\Delta W = W_t - W_0$ となり、 ΔW は負の値を示すこととなる。この場合、LnRRは求めることができない。このため、新に対照区と比較できる指標としてHedges'dを採用した。Hedges'dは、各群の平均値の差を評価する指標で、測定値が負の場合においても算出できる。この指標dは、以下の式により求められる(Koricheva et al., 2013)。

$$d = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}} \quad (\text{式2.7.1-2})$$

$$J = 1 - \frac{3}{4(n_1+n_2-2)-1} \quad (\text{式2.7.2-3})$$

ここで、 \bar{Y}_1, \bar{Y}_2 はそれぞれCO₂高濃度区と対照区の測定値平均、 n_1, n_2 はそれぞれのサンプルサイズ、 s_1, s_2 はそれぞれの標準偏差を示す。

また、集約したCO₂影響はしきい値として利用されることが予想されるため、測定結果が有意であることが重要となる。有意差検定は文献内において実施されていることが期待されるが、実施されていない場合も想定して有意差検定を実施することとした。有意差検定手法としては、測定結果が生残数のような二項分布型データの場合にはFisher正確確率検定を、測定結果が成長率や呼吸速度などのように順位・間隔・比率データの場合にはノンパラメトリック法であるMann-WhitneyのU検定を採用し、得られた危険率p値をDBに登録する。危険率p値に登録することにより、事業者が必要とする危険率でしきい値を選択できることになる。

(3) 検索処理

解読した文献情報の入力是个々のデータファイルに行われるが、必要な条件をあてはめて特定の情報を抽出するには、各データベースファイルの内容を関連付ける必要がある。そこで、文献番号と生物種名を共通項目としてクエリーテーブルファイルを作成し、テストデータを用いて基本的な検索ができることを確認した。

(4) 今後の課題

基本的なデータベースの構成のファイルは完成したが、データベースとして活用するためには、今後文献データを解読、指標算出を進めてデータベースに登録することが必要である。また、現在は基本的な検索処理は可能であるが、汎用に用いるにはユーザーインターフェースの整備が必要である。将来的には、蓄積されたデータベースをもとにメタ解析を行い、分類群による影響の特徴などを比較検討する。

参考文献

- 1)Koricheva, J., Gurevitch, J., Mengersen, K. (eds.) (2013): Handbook of Meta-analysis in ecology and evolution, Princeton University Press, New Jersey, USA, pp.498

2.7.2 気象が海中の CO₂ 拡散に及ぼす影響評価

(1) はじめに

万が一、海底下に貯留した CO₂ が海底から海に漏出すると、どのような範囲でどのような生物影響が生じ得るのかをあらかじめ評価する必要がある。本事業では、海洋モデルを用いて漏出 CO₂ (溶存態) の海中での濃度や分布を計算し、その結果からどのような範囲にどんな生物に影響を及ぼし得るかを推定する手法を構築している。漏出した CO₂ は海の流れによって移流・拡散される。海の流れや成層構造などの海洋の状態は基本的には気象条件(風、気温、降水など)によって作られる。しかし、同じ季節でも年によって気象条件が異なり、海洋の状態が異なり得る。したがって、シミュレーションに用いる気象データ(駆動データ)をどの年のデータにするかで漏出 CO₂ の濃度や分布が異なることも考えられる。そこで、2011 年の気象データと 2013 年の気象データを使って海洋モデルを駆動し、漏出 CO₂ とみなしたトレーサーを海底から放出するトレーサー実験を行い、その分布を求めた。

(2) モデルおよび計算

トレーサー実験は、広域モデルと狭域モデルを用いて行った。広域モデルは、電力中央研究所(電中研)が海洋モデルの一つである Regional Ocean Modeling System (ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005) をベースにして開発した日本近海の領域モデル(坪野ほか、2010; 津旨ほか、2011)を用いている。広域モデルの領域は、東西が東経 140 度から 147 度まで、南北が北緯 38.5 度から 43.2 度までであり、水平解像度は 1/120 度(約 930 m×約 680 m)で、鉛直 45 層である。狭域モデルは、非静水圧モデル kinaco (Matsumura and Hasumi, 2008) を用いたモデルで、苫小牧沖の東経 141.2628 度から 142.0622 度まで、北緯 42.47109 度から 42.63464 度までの領域をモデル領域とする。水平解像度は、東西、南北とも 1/(120×16)度(約 0.000521 度)であり、これは東西が 42.6~42.7m、南北が 57.9m に相当する。鉛直解像度は 3m である。南境界は開境界になっており、この開境界の開境界条件として、広域モデルの計算結果の水温、塩分、流速南北成分を用いている。

広域モデルについては、2011 年の駆動力で駆動した場合と 2013 年の駆動力で駆動した場合の 2 ケースの 1 年分のデータを解析した。CO₂ とみなしたトレーサーは苫小牧実証試験が行われている苫小牧沖の東経 141.633 度、北緯 42.608 度の点の最下層格子に一定率で与えられている。狭域モデルは、開境界条件に 2011 年のデータを用いた場合と 2013 年のデータを用いた場合の 2 通り、モデル領域に与える風のデータを 2011 年のデータの場合、2013 年のデータの場合、風を与えない場合の 3 通り行った。したがって、開境界条件と風データの組合せで計 6 通りの計算を行った。CO₂ とみなしたトレーサーは苫小牧沖の東経 141.62 度、北緯 42.60 度の最下層格子とした。計算期間は 8 月 9 日 0:00 から 9 月 3 日 0:00 までの 25 日間とした。結果は、CO₂ 漏出率を 2,622 トン/年と仮定し、トレー

サー濃度を ΔDIC とみなし、 ΔpCO_2 に換算した。

(3) 結果

① 広域モデル

鉛直および月平均したトレーサー濃度分布を 2011 年ケースと 2013 年ケースで比較した。大まかな傾向として、2011 年ケースと 2013 年ケースの分布の特徴は一致した。夏は東西両方向に分布するのが特徴で、西は噴火湾まで到達している。一方、秋以降は西への広がりは弱く、東へ広がる傾向が見られる。ただし、このようなトレーサーの広がりは、漏出による溶存態 CO_2 の増加量に換算すると極めて小さな値となることに注意が必要である。最も高い濃度になる漏出格子において、1 万トン/年の漏出率を仮定して、トレーサー濃度を ΔpCO_2 (CO_2 漏出による海水の二酸化炭素分圧の増分) に換算すると、最も ΔpCO_2 が高くなる夏季で $300\mu\text{atm}$ 程度であった。

② 狭域モデル

6 ケースのシミュレーションの漏出格子におけるトレーサー濃度の時系列を比較した。シミュレーション期間の 25 日間の間には、濃度が高く変動が大きい時期と濃度が低く変動が非常に小さい時期が混在するが、それらの時期を決めているのは開境界条件であった。すなわち、開境界条件が同じで風のデータが異なる 3 ケースは同じ時期に濃度が高くなり、同じ時期に濃度が低くなる。また、濃度が低く変動が非常に小さい時期は風のデータによらず濃度がほぼ一致し、濃度が高く変動が大きい時期は風のデータによって変動の仕方が異なっている。この結果から、漏出点のトレーサー濃度の変動のうち、数日以上の時間スケールの変動は主として開境界条件によって決まり、数日以下の時間スケールの変動は主としてモデル領域に与えた風データによって決まると考えられる。 ΔpCO_2 に換算すると、2011 年開境界条件ケース、2013 年開境界条件ケースのいずれも値が高いときで $8,000\mu\text{atm}$ 程度であった。しかし、このような高い値はごく短時間の間に生じるだけで、25 時間移動平均すると、値が高いときで $2,500\mu\text{atm}$ 程度となる。

空間的な広がりは、計算期間中の最大 ΔpCO_2 の分布範囲で比較を行った。生物への影響閾値の一つは $200\mu\text{atm}$ である (RITE, 2016)。そこで、シミュレーション期間の最大値が $\Delta\text{pCO}_2 > 200\mu\text{atm}$ となる範囲を調べた。2011 年開境界条件ケースの方に比べて 2013 年開境界条件ケースの方が若干その範囲は狭めで、特に 2013 年開境界条件で風無しケースが他に比べて東への広がりがやや小さかったものの、 $\Delta\text{pCO}_2 > 200\mu\text{atm}$ となる範囲は、トレーサー放出点 (漏出点) を中心として、概ね東西 1.3km、南北 0.6km の範囲に収まる程度であった。生物影響は ΔpCO_2 の値だけでなく曝露時間にもより、 $\Delta\text{pCO}_2 > 200\mu\text{atm}$ に約 100 時間以上曝露されたときに生物影響が見られる (RITE, 2014, 2016)。そこで、連続して $\Delta\text{pCO}_2 > 200\mu\text{atm}$ となる時間数を調べた。その結果、全 6 ケースのいずれにおいても、100 時間を超えるのは漏出格子のみで、漏出格子の隣接格子では最も長いケースでも 53 時間であった。

(4) まとめ

海洋モデルの駆動データである気象データや開境界条件データの年が異なると、漏出 CO₂ の拡散に影響があるのかどうかを調べる目的で、2011 年と 2013 年の条件でトレーサー放出シミュレーションを行った。トレーサーの分布が全く同じになるわけではないが、分布の傾向は一致するという結果が得られた。また生物影響の閾値とされている「 $\Delta p\text{CO}_2 > 200 \mu\text{atm}$ に約 100 時間以上曝露」となるのは、2,622 トン/年の漏出率の場合には、漏出格子のみであった。したがって、2,622 トン/年程度の漏出であれば、漏出 CO₂ の拡散に対する気象データの年の違いの影響は小さいと考えられる。

参考文献

- 1) Matsumura, Y., Hasumi, H. (2008) : A non-hydrostatic ocean model with a scalable multigrid Poisson solver, *Ocean Modelling*, 24, 15-28
- 2) RITE (2014) : 平成 25 年度 二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 成果報告書
- 3) RITE (2016) : 平成 27 年度 二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 成果報告書
- 4) Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. (2005) : The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modelling*, 9(4), 347-404
- 5) 津旨大輔, 坪野考樹, 青山道夫, 廣瀬勝巳 (2011) : 福島第一原子力発電所から漏洩した ¹³⁷Cs の海洋拡散シミュレーション, 電力中央研究所 研究報告書, V11002
- 6) 坪野考樹, 津旨大輔, 三角和弘, 吉田義勝 (2010) : 地域海洋モデル ROMS を用いた物質拡散の計算法, 電力中央研究所 研究報告書, V09040

2.7.3 ベースライン調査における観測期間と頻度の設定に関わるデータ・知見の蓄積

海底からの漏出を検知する手法の一つとして、海水中の CO_2 分圧(pCO_2)と溶存酸素飽和度(DO%)の関係を用いた異常値検出手法が提案されている (Uchimoto et al., 2018)。しかし、この手法はベースライン調査の結果に依存しており、大阪湾のデータを用いた場合には四季調査で十分なデータを得るには4-6年の調査が必要であることが示唆された(平成30年度中間年報)。しかし、実際には四季調査よりも短い変動も存在するため、大阪湾において連続観測を行い、ベースライン調査の観測期間と頻度について適切な設定条件を検討することとした。また、 pCO_2 とDO%を用いた検出手法とは別に、昨年度に溶存態無機炭素(DIC)を用いた異常値判定指標の可能性を示した。今年度は、判定指標のばらつきを補正するために総アルカリ度の基準化の効果を検討した。

(1) 大阪湾での海水中 CO_2 濃度の長期観測

① 方法

pCO_2 センサーと多項目水質計(水温、塩分、pH、溶存酸素(DO))の係留系を設置して連続観測を行った。観測地点は特性の異なる神戸港と関空沖の2か所とした。観測海域および観測地点を図2.7.3-1に示す。

神戸港は2018年7月から2019年10月まで、関空沖は2018年7月から2019年7月まで観測を実施した。方法の詳細については平成30年度中間年報で報告した。

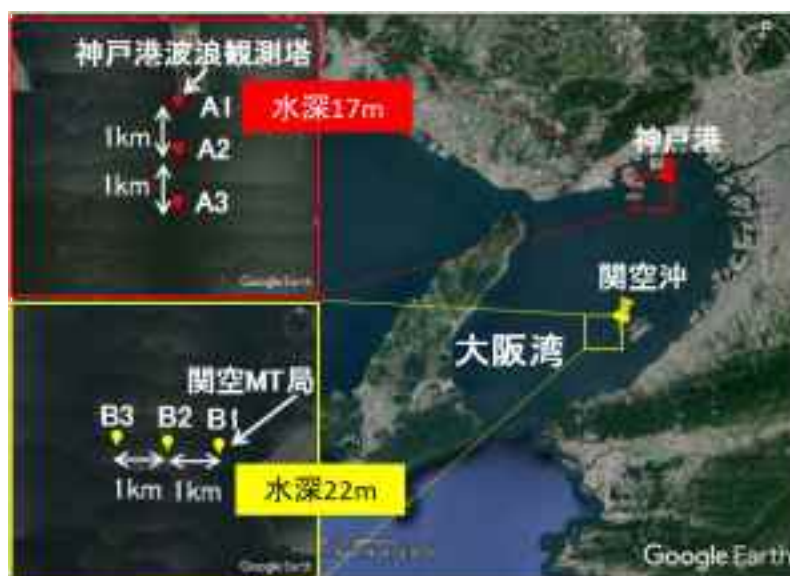


図 2.7.3-1 観測海域および観測地点

② 結果

a) pCO_2 、DO%および水温の季節変化

ここでは観測データの品質評価が終了した2019年6月(神戸港)あるいは7月(関空沖)

までの結果について報告する。pCO₂は夏季に高く、冬季に低くなった。神戸港と関空沖では冬季のpCO₂は大気のパCO₂（約440μatm）（藤井，2017）を下回ったが、夏季には神戸港で最大1,627μatm、関空沖では最大706μatmと高くなった。また、夏季の神戸港は関空沖に比べてpCO₂が高く、かつ大きな変動を示した。一方、DO%はpCO₂と逆に冬季に高く、夏季に低かった。変動はpCO₂と同じく、夏季に大きく冬季は小さかった。DO%は冬季に100前後の値を示し、大気と平衡に達していた。

連続観測データにおける潮汐の影響を評価するために、時間間隔が一定であるDO%について調和解析を行った。15日間以上の観測期間データについて主要4分潮（O1、K1、M2、S2）成分を算出し、主要4分潮を除いた残差を求めた。神戸港については9期間、関空沖については6期間について算出した結果、DO%の変化に占める主要4分潮の成分の割合は相対的に小さく、潮汐の影響は小さいことが示された。

b) pCO₂とDO%

pCO₂とDO%は負の相関関係を示すことが知られており（Uchimoto et al., 2018）、苫小牧CCS実証試験では、その相関関係を利用してpCO₂の異常値判定指標が設定されている（経済産業省，2016）。連続観測で得られたpCO₂とDO%においても、神戸港、関空沖ともに負の相関関係が認められた。また、通年の変化をみると季節変化がみられた。pCO₂-DO%散布図において回帰直線と個々のデータの位置を比較すると、冬季と夏季のデータはほぼ回帰直線を挟んで分布するが、春季のデータは回帰直線より下に、秋季のデータは回帰直線より上に位置することが多かった。すなわち、大阪湾においてはpCO₂-DO%散布図上でデータは季節的に時計回りに分布位置が移動する。

c) 観測回数の推定

苫小牧CCS実証試験の海洋調査で採用されている採水分析は、連続観測で見られるような変動の中から、ある瞬間的な状態をみていることになる。このような採水分析で自然変動を把握するためには複数回の調査が必要となる。必要な調査回数を推定するために連続観測データを用いた抽出実験を行った。使用したデータは、自然変動が大きかった神戸沖の夏季、2018年7月24日からの係留観測データとした。連続観測で得られたpCO₂は800–1,600μatmの範囲で変動していた。これらのデータ集団から、n個（1 ≤ n ≤ 100）のデータを無作為抽出することを100回繰り返し、最大値と最小値を求めた。これを500回繰り返して最大値と最小値の平均値を求めた。抽出数が増加するにつれて最大値と最小値の差は急激に小さくなった。差が小さくなることは観測の代表性が高くなることを示している。nがおよそ40回以上ではnが増加したときの最大値と最小値の差の減少が小さい。このことから、少なくとも40回の観測数が必要であると考えられる。同じ変動特性を持つ複数の観測点で無作為に観測すれば、1測点当たりの必要な観測回数は少なくなり、例えば測点数が8点の場合には各測点で5回の観測が必要ということになる。

d) 既存データとの比較

連続観測ではpCO₂とDO%に負の相関が認められたが、データの分布にはばらつきがみられたため、大阪湾の四季調査（9年間の浅海定線調査データ）の変動幅と連続調査データを比較した。

浅海定線調査では20点の観測点で採水分析が実施されている。連続観測データと比較する適切な観測点の選択を行うために、9年間（2002-2009）の水質データ（pCO₂、DO%、pH、塩分、NO₃、PO₄および水温）を用いてクラスター解析を行った。その結果、大阪湾はおもに東部沿岸、東部沖合および西部の3海域に区分された。神戸港は東部沿岸を、関空沖は西部を比較対象とした。

浅海調査のDO%とpCO₂について直線回帰を行い、99%予測区間を求めた。得られた予測区間を連続観測のDO%とpCO₂と比較したところ、連続観測の値は浅海調査の予測区間とほぼ重なった。さらに、連続観測データについて浅海定線調査の直線回帰による予測値との残差を求め、その季節変化をみたところ、神戸港と関空沖のいずれにおいても夏季から秋季に正の残差を示し、冬季から春季にかけては負の残差を示した。これは、前述のようにpCO₂-DO%の散布図において、データが時計回りに季節変動することを反映したものである。そのような自然変動があると、通年を一つの回帰式を基にして異常値判定の基準値を設定すると夏季と秋季は異常値判定が出やすく、春季は異常値を検出しにくくなる。

(2) DICを指標とする手法の検討

昨年度は、DICにDOがすべて消費された場合に増加するDIC濃度を加えたDIC+0.722DOという指標を提案し、水温の関数としてあらわせることを示した（平成30年度中間年報）。昨年度は総アルカリ度の補正を塩分と総アルカリ度の相関をもとに実施したが、今年度は、総アルカリ度の補正をpHから理論式により算出し、基準化した総アルカリ度による補正を試みた。

Hoffert et al. (1979) が示した総アルカリ度の式を並べ替えると、DICは式2.7.3-1で表される。

$$\text{DIC} = \frac{[\text{H}^+]^2 + K_1([\text{H}^+] + K_2)}{K_1([\text{H}^+] + K_2)} \left(\text{TA} - \text{B} \frac{K_B}{K_B + [\text{H}^+]} - \frac{K_W}{[\text{H}^+]} + [\text{H}^+] \right) \quad (\text{式 2.7.3-1})$$

ここで、TA は全アルカリ度、K1 と K2 は炭酸の電離定数（Millero, 2010）を示す。さらに、B を式 2.7.3-2 と定義する。

$$\beta = \frac{[\text{H}^+]^2 + K_1([\text{H}^+] + K_2)}{K_1([\text{H}^+] + K_2)} \quad (\text{式 2.7.3-2})$$

測定された TA による式 2.7.3-1 に、基準化した TA'(2,290 $\mu\text{mol/kg}$) での DIC ($n(\text{TA})\text{DIC}$) による式 2.7.3-1 を代入すると、ホウ素 (B) の影響が消去され、基準化した $n(\text{TA})\text{DIC}$ と DIC の関係が求められる。これに DO の補正を加えると、 $n(\text{TA})\text{DIC}+0.722\text{DO}$ 指標が次式のように得られる。

$$n(\text{TA})\text{DIC}+0.722\text{DO}=\text{DIC}+\beta(\text{TA}'-\text{TA})+0.722\text{DO} \quad (\text{式 } 2.7.3-3)$$

新たな指標 $n(\text{TA})\text{DIC}+0.722\text{DO}$ の有効性を検証するために、公開されている海洋調査データ (NOAA) を用いて $n(\text{TA})\text{DIC}+0.722\text{DO}$ を計算したところ、いずれの海域でも $n(\text{TA})\text{DIC}+0.722\text{DO}$ 指標は水温に対して負の相関を示し、この指標が多くの海域に適用できることが示された。

参考文献

- 1) Uchimoto, K., Nishimura, M., Kita, J., Xue, Z.(2018) : Detecting CO₂ leakage at offshore storage sites using the covariance between the partial pressure of CO₂ and the saturation of dissolved oxygen in seawater, International Journal of Greenhouse Gas Control, 72, 130–137
- 2) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合(2019) : 平成 30 年度中間年報
- 3) 藤井智康(2017) : 沿岸域における大気及び海水中の二酸化炭素濃度の変動, 日本水文学会誌, 47, 107–118
- 4) 経済産業省(2016) : 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄許可新選書、別紙-2 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄する海域の特定二酸化炭素ガスに起因する汚染状況の監視に関する計画に係る事項
- 5) Hoffert, M.I., Wey, Y.-C., Callegari, A.J., Broecker, W.S. (1979) : Atmospheric response to deep-sea injection of fossil-fuel carbon dioxide. Climatic Change 2:53–68
- 6) Millero, F. J. (2010) : Carbonate constants for estuarine waters. Marine and Freshwater Research 61:139-142
- 7) NOAA NCEI OADS (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA National Centers for Environmental Information, Ocean Carbon and Acidification Data Portal) :
https://www.nodc.noaa.gov/oads/stewardship/data_portal.html (2020/3 アクセス)

2.7.4 CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

貯留サイト、貯留層が適切に選定されれば、貯留されたCO₂が漏出することは起こらないと考えられている。しかし、万が一の漏出に備えるという意味において、漏出監視や漏出による環境影響の評価は不可欠である。しっかりとした漏出監視や科学的根拠に基づいた環境影響評価は社会受容性向上に寄与するものと考えられ、また、法令としても実施することが規定されている。本事業では、これまで漏出を仮定した環境影響評価と漏出監視に必要な個々の技術・手法の開発を中心に行ってきた。しかし、各要素は単独で存在するわけではなく、それぞれが有機的に関連するため、それを統合化したCO₂漏出検出・環境影響評価総合システムとして取りまとめることに狙いを定めた。

CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムは、CCSにおけるステップを考慮したベースライン調査、海洋環境影響評価、漏出監視という3つの要素を考えた（図2.7.4-1）。



図 2.7.4-1 CO₂漏出検出・環境影響評価総合システム概念図

例えば、ベースライン調査の結果が環境影響評価に提供され、また監視における漏出懸念の判定基準の設定に利用される。しかし、ベースライン調査の実施内容は、環境影響評価の手法や監視方法を踏まえて検討する必要がある。監視の手法や時空間の設定条件は、環境影響評価の結果をもとに設定することになる。このように、図2.7.4-1においては時間的な流れで示しているため、一方通行の矢印で示されているが、各要素間の内容は相互に関連しているという認識が必要である。

さらに、監視により万が一の漏出が生じた場合には、漏出により生じる環境への影響を観測し、環境影響予測結果との整合性をみる必要がある。その結果、整合性に齟齬が認められれば、環境影響予測の補正が行われ、その結果により監視計画の見直しへとつながる流れが考えられる。

このように、システムとしてまとめることにより、CCS事業者が各要素の作業計画を立てる際に、項目や頻度の決定を容易にするとともに取得データの漏れをなくす効果につながる。法的な指針だけをもとに計画を行うことの危険性は、苫小牧実証試験での監視例からも示唆されている。苫小牧実証試験では、結果的に漏出懸念の判定基準を一義的な基準から総合的な判断基準へと見直しがなされた。

CO₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの各要素に必要な技術・手法の開発が終わり、システムの構成を作成した。来年度、生物影響データベースにデータの蓄積をすすめて、生物影響データベースを完成させるとともに、各要素および相互の関連性の細部をつめて、CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムを完成させる。

2.7.5 まとめ

生物影響データベース（DB）は、基本構造を完成させた。最終形として、昨年度検討したリレーショナル DB の構成案について、対照区データを致死 DB また生物影響 DB に加え、対照区 DB のない構成にした。また、生物影響評価指標の追加見直しを行うとともに、必要な情報を抽出できるように検索用クエリーテーブルファイルの作成を行った。

漏出 CO₂ 海中拡散シミュレーションは、モデルを駆動する気象データの年の違いが海水中の漏出 CO₂ の拡散に影響するかどうかを検討した。2011 年の条件と 2013 年の条件でシミュレーションを行い、2,622 トン/年の漏出率を仮定して検討した結果、生物影響の閾値を超える格子はいずれの場合も漏出格子のみであり、気象データの年の違いは小さいと考えられた。

大阪湾での pCO₂、溶存酸素などの連続観測は、予定通り一年以上行い、秋に完了した。連続観測で得られたデータを既存の四季観測データと合わせて解析した結果、1 季節の pCO₂ の変動幅を抑えるためには、少なくとも 40 回の観測が必要と考えられた。1 季節に 1 回の観測を 8 測点で行うのであれば 5 年のベースライン調査が必要ということになる。また DIC を用いた異常値判定の指標についても検討を行った。

CO₂ 漏出検出・環境影響評価総合システムの要素となるベースライン調査、海洋環境影響評価、漏出監視に係る技術の開発が終わり、システムの構成を作成できた。

2.8 リスクマネジメントツールをはじめとする日米 CCS 協力や海外機関との CCUS 技術開発の連携

安全かつ効率的な CCS を実用化させるには、CO₂ 地中貯留に関わる問題点（環境影響など）を抽出し、それによる影響や不確実性によるリスクを評価し、事業者、地元住民、投資家、規制機関などのステークホルダーが理解・納得できる形で説明する必要がある。

そこで、米国 DOE が開発したリスク評価ツール（NRAP: National Risk Assessment Partnership）などを活用し、我が国に適した CCS の定量的なリスクマネジメント手法を構築する。

また、経済産業省—米国 DOE 間の日米 CCS 協力に基づき、光ファイバーを利用した CO₂ 地中貯留のモニタリング技術の共同研究を進めており、実際の CO₂ 貯留サイトでその有効性を検証する。さらには CCUS 技術（CCS + CO₂ 利用技術）についても、米国を含め海外連携を図っていく。

2.8.1 CCS 実施の政策・投資判断に係るリスクマネジメント手法の策定

(1) 米国におけるリスクマネジメントと NRAP

CO₂ 地中貯留の実用化および普及のためには、その安全性を担保すると共に、懸念されるリスク事象に対し、事業者、規制機関、地元住民などの共通理解を熟成し、社会受容性を高めていくことが不可欠である。CCS の事業化が先行している米国では、NRAP と呼ばれている研究事業の中でリスク評価手法の開発を行っている。

NRAP ツールでは、対象とするリスクごとに定量化されたリスクプロファイルを構築していくこととなる。2016 年に公開された Version 1 では、表 2.8.1-1 で示された 2～10 の個別ツールと、全体評価を行う NRAP-IAM-CS ツールの 10 個のツール群からなる。個々のツールでは、主にモンテカルロシミュレーションを中心とした不確実性評価を行う。計算負荷軽減の目的から Reduced Order Model (ROM) と呼ばれる簡略化されたプロセスの計算を実施し、フルの計算に対しおよそ 1/1000 のオーダーの計算時間で結果が得られるように工夫されている。

表2.8.1-1 NRAP tools (2016年公開版) のツール群

番号	名称	対象	具体的機能
1	NRAP Integrated Assessment Model-Carbon Storage (NRAP-IAM-CS)	全体	圧入～漏洩～環境中拡散までの要素を統合するリスク評価を行う
2	Reservoir Evaluation & Visualization (REV)	貯留層	圧力および CO ₂ ブルームサイズの経時変化を図示
3	Reservoir Reduced-Order Model-Generator (RROM-Gen)		貯留層解析結果より IAM-CS に入力できるファイルを作成
4	Wellbore Leakage Analysis Tool (WLAT)	漏洩評価	既存坑井からの CO ₂ 漏洩を評価
5	Nrap Seal barrier Reduced-order model (NSealR)		遮蔽層の亀裂や浸透による CO ₂ の漏洩を評価
6	Aquifer Impact Model (AIM)	環境評価	CO ₂ およびブラインが地下水に与える影響を評価
7	Multiple Source Leakage Reduced-order model (MSLR)		大気中に漏洩した高濃度 CO ₂ ガスの挙動を評価
8	Short-Term Seismic Forecasting (STSF)	地震関連	CO ₂ 圧入の効果を考慮して誘発地震の頻度を確率的に評価
9	Ground Motion Prediction applications to potential Induced Seismicity (GMPIS)		誘発地震による地表の地震動強度を評価
10	Designs for Risk Evaluation And Management (DREAM)	モニタリング	地下の CO ₂ 挙動解析結果に基づいて観測井の最適配置を決定

(2) 我が国に適したリスクマネジメント要件と対応

我が国は地震多発国であり、上記のうち、特に地震に対するリスクマネジメントが重要である。さらには、地層が不均質であり、また一般的にCCSでは坑井情報が限定されることから貯留性能の分析に不確実性が生じる。さらに、我が国のCCSは沿岸域で実施することから海洋環境についても考慮が必要である。

一方、CCSの建設・運用には、地元住民のほか、幅広いステークホルダーの理解が欠かせない。つまり社会受容性の確保・向上も重要なリスクマネジメント要件となる。

本事業においては、これらのリスクマネジメント要件への対応を実施しており、以下の表2.8.1-2はそれを整理したものである。

表2.8.1-2 リスク項目と本事業での対応

リスク項目	本事業での対応テーマ	リスクマネジメント
地震・自然災害	<ul style="list-style-type: none"> ・ ATLS ・ IRP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震カタログの整備により、不要な停止を排除し、CCS全体の稼働率を向上させる。 ・ 大規模地震など自然災害発生時に適切な地域対応を行い、CCSに対する不安払しょくを図る。
貯留性能の不確実性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地質モデル構築 ・ 長期シミュレーション ・ NRAP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯留可能量を推定するとともに、不確実性やリスクも定量評価し、適切な坑井配置や圧入方法を立案する。
設備・運用上で想定されるトラブル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 光ファイバーセンサー ・ CO₂漏出検知 ・ 超伝導重力計、電磁探査 ・ 長期シミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 重力計と光ファイバーセンサーにより、CO₂圧入後のモニタリング頻度と期間を短縮する。 ・ サイドスキャンソナーにより海域におけるCO₂漏出監視を効率化する。 ・ 長期シミュレーションにより、CO₂挙動安定時期を明確にし、超長期のモニタリングを不要にする。
国民・地元住民のCCSに対する不安	<ul style="list-style-type: none"> ・ PO/PA 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国民・住民の理解を得ることで、CCS促進や適切な貯留地点の選定が可能となる。 ・ 国内外の適切な先例を的確に把握することにより、CCS立地計画を効率化する。

(3) 政策・投資判断に係るリスクマネジメント

以上のリスクマネジメントは、主にCCS事業者がCCS設備を適切に操業するためのものである。一方、CCSの実施に係る政策判断や投資戦略立案のためには、CCSのコストや不確実性を分析し、さらには様々な事業の選択肢を考慮した上で、最大の収益が得られるマネジメントを行う必要がある。

以下の①～④はのそれに対応した分析である。分析モデルや評価手法は非常に単純化したものであるが、具体的な数値を示すことで、定性的になりがちなリスク分析が定量化され、投資判断に係るリスクマネジメントを的確・実践的に行うことが可能となる。

① CCS事業のコスト構造

CCSのコストは、「分離・回収」、「輸送」、「貯留」のコストから構成されるが、以下、それぞれのコスト構造を分析する。コスト分析に当たっては、図2.8.1-1に示すようなCCSチェーンを想定し、以下の条件を仮定している（RITE, 2006）。

<試算条件>

➤ 回収：新設の石炭火力発電所

アミン吸収法、回収量100万t-CO₂/年、回収率90%、稼働率85%

➤ 輸送：陸上パイプライン20km、輸送圧力7MPa、再昇圧力10MPa

➤ 貯留：事前3D探査（5km×5km）、調査井1本

深度1km、大偏距掘削（ERD）

圧入レート10万t-CO₂/坑・年×10本

圧入量100万t-CO₂/年×15年

モニタリング3D探査×4回（圧入前1回、圧入中2回、圧入後1回）

- 総事業期間：20年
- コストベース：2001年（H13年）、年経費率9%+修繕3%

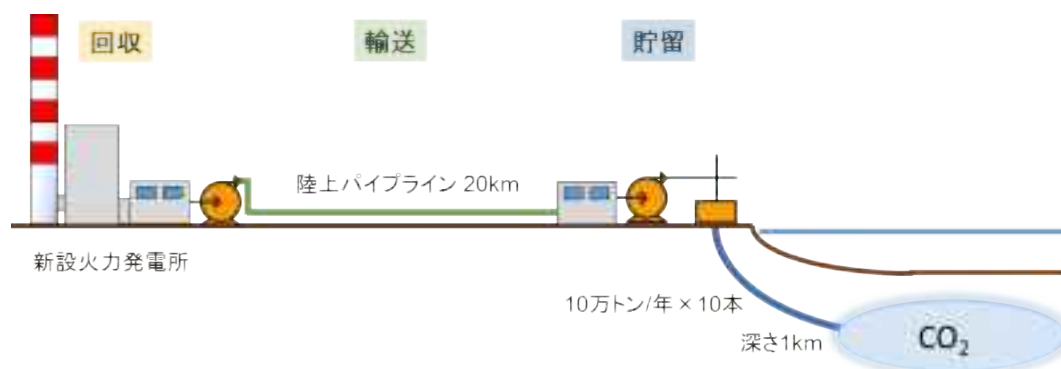


図2.8.1-1 コスト試算評価のイメージ

a) 分離・回収に係るコスト構造

以上の仮定で計算した場合、分離・回収年間コストは3,100円となる。その項目と項目ごとのコストは表2.8.1-3の通りである。また、各項目について、固定費、可変費の区分も行う。項目によっては、区分が難しいケースもある（例えば、修繕費は、固定的な部分と設備稼働に依存する部分がある）が、各種分析を単純化するため、どちらかに一方に分類することとした。

表2.8.1-3 分離・回収に係る年間コスト

項目	費用（円/トンCO ₂ /年）	割合	区分
1) 回収設備費	937	30%	固定費
2) 回収設備修繕費	335	11%	固定費
3) 吸収液費	572	19%	可変費
4) エネルギー消費（熱）	1,030	34%	可変費
5) エネルギー消費（動力）	188	6%	可変費

b) 輸送・昇圧に係るコスト構造

輸送・昇圧に係る年間コスト1,900円の項目と項目ごとのコストは表2.8.1-4の通りである。

表2.8.1-4 輸送・昇圧に係る年間コスト

項目	費用（円/トンCO ₂ /年）	割合	区分
1) 昇圧設備費（コンプレッサー）	252	14%	固定費
2) 昇圧設備修繕費	84	4%	固定費
3) 昇圧エネルギー（動力）	759	41%	可変費
4) パイプライン設備費	568	31%	固定費
5) パイプライン設備修繕費	189	34%	固定費

c) 貯留に係るコスト構造

貯留に係る年間コスト2,300円の項目と項目ごとのコストは表2.8.1-5の通りである。

表2.8.1-5 貯留に係る年間コスト

項目	費用（円/トンCO ₂ /年）	内訳	区分
1) 事前探査	103	4%	固定費
2) 坑井費	1,403	60%	固定費
3) 機械設備費	147	6%	固定費
4) 圧入設備修繕費	551	24%	固定費
5) モニタリング費用	131	6%	固定費

② 不確実性の影響評価とマネジメント手法

実際のCCS事業を想定した場合、表2.8.1-2に示したリスクがあり、操業稼働率や貯留性能の不確実性を考慮したコスト評価が必須となる。以下、それぞれの不確実性がコストに与える影響を分析する。

a) 操業稼働率の影響評価

操業稼働率とコストは、以下の関係にある。

$$\text{コスト} = \text{固定費} / \text{標準稼働率比} + \text{可変費}$$

この関係から、標準稼働率比と「分離・回収コスト」、「輸送・昇圧コスト」、「貯留コスト」との関係をグラフ化したのが、下記図2.8.1-2である。

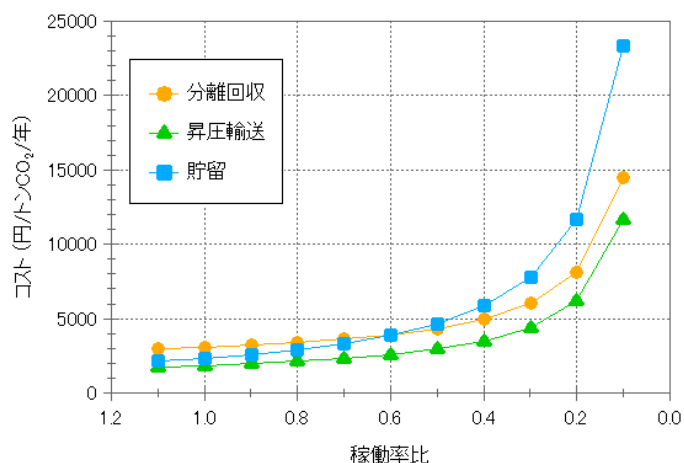


図2.8.1-2 標準稼働率比1.1~0.1に対する各コスト

この中で、固定費割合が大きい「貯留コスト」は、操業稼働率に大きな影響を受けることがわかる。貯留コストを低減させるには、表2.8.1-2に示す操業リスクマネジメントを確実に実施し、適切な操業稼働率を確保することが重要となる。

「分離・回収コスト」、「輸送・昇圧コスト」についても、CO₂圧入が止まれば、操業を停止せざるを得なくなり、本コスト低減においても貯留に係るリスクマネジメ

ントは重要である。ただし、日本全体で複数個所の貯留層があり、CO₂輸送船がある場合、あるいはCO₂パイプライン網が整備されている場合は、他の貯留層を活用でき、CO₂の分離・回収と輸送は継続できるため、CO₂貯留の操業に係る影響は極小化可能となる。

b) CO₂貯留量の不確実性の影響評価

CCS全体の経済性を向上させるには、期待されるCO₂貯留量が大きな貯留層を選定することが必要となる。その一方、CO₂貯留量の不確実性を低減させることも重要である。

下記図2.8.1-3は、不確実性の低減効果を単純化して説明したものである。

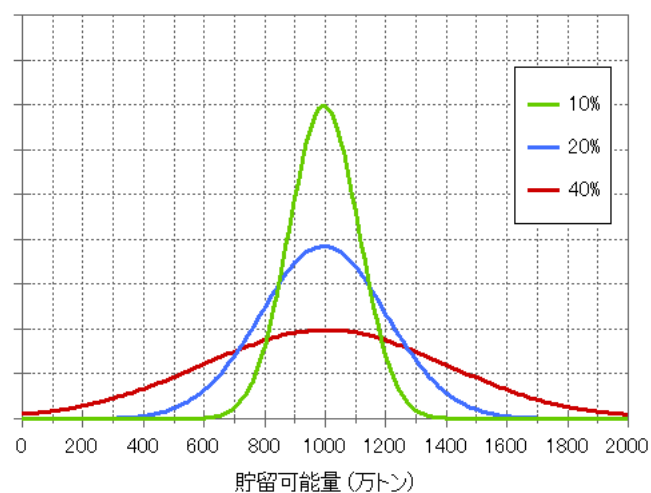


図2.8.1-3 期待貯留可能量の不確実性の例（正規分布表現）

ある貯留事業で、合計800万トンのCO₂の貯留を10,000円/CO₂-トンで請け負ったケースを想定する。標準偏差が貯留可能期待量1,000万トンの10%（100万トン）の緑ケースにおいては、当該事業をほぼ確実に実施可能であるが、不確実性が20%の青ケースでは17万トン、不確実性が40%と大きな赤ケースでは、80万トンのCO₂貯留ができなくなる計算となる。その分を他貯留事業者へ同額で再委託できた場合でも、それぞれ17億円、80億円の事業損失が見込まれる。

つまり、期待貯留量が同じであっても、不確実性が大きいほど事業リスクは高くなるため、事前モニタリングにより、貯留量の予測精度を向上させることが重要となる。

③ CCSの事業進展と適切な選択権の行使

実際のCCSの事業展開は多様なパターンが考えられるが、一般的なケースとしては「FS～試験圧入」、「小規模商用化」、「大規模商用化」の順で事業が進んでいく。ここでは、最終的に500万トン-CO₂/年規模とする貯留事業において、「FS～試験圧入」、「小規模商用化」、「大規模商用化」の期間、投資額をそれぞれ、3年間で100億円、5

年間で500億円、10年間で5,000億円と仮定し、選択権の価値の分析を行う。

当該事業の成功確率を80%と想定すると、初期に一括して5,600億円を投資した場合、期待損失額は、5,600億円×0.2=1,120億円となる。

一方、小規模商用化段階で、大規模商用化の成否を確実に判断できる場合は、期待損失額は、そこまでの投資額600億円×0.2=120億円にとどまる。

以上は非常に単純化された分析であるが、ポイントとなるのは、事業実施者に投資パターンを選択権があるということである。この選択権を活かし、初期投資額を抑えつつ、将来の投資への不確実性を低減させ、収益性の高いCCS事業を実現するという、投資リスクマネジメントが極めて重要である。

また、貯留地点が2か所ある場合、貯留地点Aが何らかのトラブルで運用停止となった場合でも、貯留地点Bを利用でき、分離・回収とCO₂輸送の稼働を維持できる効果がある。船舶輸送のコスト評価をする場合、輸送に係るコストの他に、分離回収設備と輸送設備の期待操業稼働率の向上も加味すべきである。

④ ファイナンスによるリスクマネジメント

上述のリスクマネジメントを適切に実施しても、リスクが完全になくなるわけではない。また、リスクを極小化しようとした場合、それに関わる設備投資や調査費は膨大となり、経済的にCCS事業の実施が困難になる。

そのため、リスクが残るのは当然と考え、その残存リスクについては、保険などのリスクファイナンスで対応すべきである。

リスクファイナンスの概念や実現するための保険スキーム等は、多くの文献で紹介されているが、ここでは、キャプティブの適用可能性について考察する。

キャプティブは企業自身の保険の引受を目的として設立されたその企業の保険子会社のことをいい、その基本スキームは図2.8.1-4の通りである。

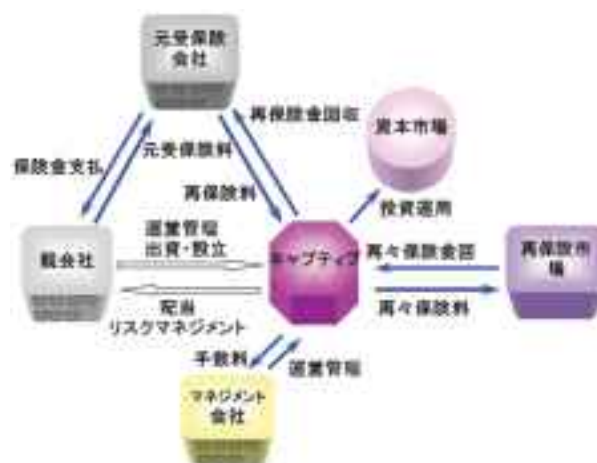


図2.8.1-4 キャプティブの基本スキーム
(経済産業省リスクファイナンス研究会, 2006)

また、保険としての特長は、以下の通りである。

- 1) 一般保険会社では情報格差が大きく保険引き受けが困難なリスクでも、子会社であることで情報格差を排除することができ、保険化の可能性が広がる。
- 2) 再保険市場に直接アプローチすることで、より効率的な付保が可能となるほか、リスクマネジメントセンターとして、グループ企業を一元管理し、より戦略的なリスクファイナンスを達成し、リスクマネジメントの機能度を高めることもできる。

CCSは、我が国では商用化経験のない事業であり、リスク分析ではCCS事業者が圧倒的に情報優位の立場にあるため、1)の特長が十分に生かせる。さらに、リスク抑制により、事業者自身の収益向上を図れるため、事業者のリスクマネジメント意識の向上につながる効果もある。

CCS事業のリスクマネジメントをファイナンス面で行う場合、キャプティブは一つの有効なスキームと考えられる。

2.8.2 光ファイバー計測技術の日米実証試験

日米研究協力は2015年4月に米国エネルギー省と経済産業省の間で締結した「二酸化炭素回収・貯留分野に係る協力文書（MOC）」からスタートしたものである。これに基づき、2016年1月に日米ワークショップを開催し、具体的な協力テーマについて協議し、光ファイバー技術の応用も1つの重要な柱として設定された。

その後、日本側が光ファイバーによる坑井健全性監視技術やDAS-VSP技術等の成果を紹介し、その有効性を確認した米国側が、ノースダコタ州立大学エネルギー・環境研究センター（以下、EERC）をカウンターパートとし、共同研究を進めることとなった。以下、共同研究およびCCSサイトでの実証試験について紹介する。

(1)日米共同研究

EERCは、CCSのモニタリング技術に実績があり、特に衛星による地表変形監視に高い技術力を持っている。そこで、日米それぞれの強みを生かす形で以下の共同研究を開始した。

- ・光ファイバーによるひずみ計測と衛星による地層隆起モニタリングの統合化研究
- ・CO₂圧入による地下圧力変化の広がりやを推定するための岩盤力学モデルの構築とCO₂地下挙動シミュレーション

(2)日米共同実証試験

さらに、光ファイバー計測技術の有効性を確認したEERCは、実際のCCSサイトを実証用に提供することとなった。当該実証サイトでは、地層安定性監視やCO₂挙動モニタリングを行う予定であり、現在、その実証試験計画の詳細化と現場での準備作業

を日米が協力して進めている。

2.8.3 日米共研テーマの拡充検討：CO₂利用技術について

以上のように、リスクマネジメント技術、および、光ファイバー計測実証試験において、日米の協力が進んでいる。

また、マイクロバブル CO₂ 圧入技術（3.3 節参照）について、米国から高い期待が寄せられており、新たな日米共研テーマとして有力な候補となると考えられる。当技術は、CO₂ 貯留の効率化のみでなく、CO₂-EOR における石油増産をもたらす有力な CO₂ 利用技術でもある。

以下、米国での潜在的な活用力を示すため、米国における CO₂-EOR に係る技術開発の状況と、CO₂-EOR の大型プロジェクトであるツンドラプロジェクトについて紹介する。

(1)米国における CO₂-EOR 技術開発の状況

米国エネルギー省（DOE）およびその傘下のエネルギー技術研究所（NETL）は、CO₂ 利用技術の研究を支援・実践している。バイオ、化学分野での CO₂ 利用を研究しているほか、EOR も CO₂ 利用の大きな柱として位置付けている。

DOE は、CO₂-EOR は、

- ・バイオなどと比較して CO₂ を大量に利用する
- ・すでに基本的な技術は確立されている

などの特長があるとの認識のもと、EOR 適用地点拡大と CO₂ 排出量削減を狙い、人為的な CO₂ を利用することを志向し、研究開発を進めている。具体的には、

- ・EOR の効率や経済性を高める CO₂ の圧入方法の開発や地層の状況を把握するためのモニタリング技術等の技術開発
- ・これらの技術の実用化を目指した、多地点で実証プログラムの推進

等を図っている。

(2)ツンドラプロジェクト概要

光ファイバー計測実証試験のカウンターパートである EERC は、DOE の支援を受け、CO₂ 貯留や CO₂-EOR の実証プロジェクトを進めているが、ツンドラプロジェクトはその代表的事例である。当プロジェクトは石炭火力発電所から排出される年間約 400 万トンの CO₂ を分離・回収し、地中貯留するとともに、CO₂-EOR にも利用するものである。現在、関連する研究開発や設計を進め、順調にいけば 2022 年に CO₂ の分離・回収・貯留を開始する予定である。

当プロジェクトにおいて、CO₂ 貯留や CO₂-EOR の効率化が実証されれば、人為的な排出源からの CO₂ 利用技術として価値ある成果となる。

2.8.4 まとめ

本節では、リスクマネジメント手法の策定、光ファイバー計測技術の日米実証試験、およびCO₂利用への展開検討を行った。

リスクマネジメント手法については、昨年度までに米国DOEが開発したNRAPの応用や操業リスクマネジメントを中心に検討を進めてきた。本年度は、政策・投資判断に係るリスクマネジメントとして、CCSのコストや不確実性、さらには様々な選択肢を考慮した上で、リスク抑制と収益向上を図る基本的な手法を提言した。

光ファイバー計測技術の日米実証研究については、実施に至った経緯と背景を説明した上で、ノースダコタ州立大学エネルギー・環境研究センターとの共同研究や実証試験の計画について紹介した。

さらに、マイクロバブルCO₂圧入技術がCO₂貯留の効率化のみでなく、CO₂-EORでの石油増産効果があることを説明した上で、米国での潜在適用可能性について紹介した。

参考文献

- 1) DOE (2016) : NRAP Phase I Tool Development and Quality Assurance Process, NRAP-TRS-II-021-2016
- 2) RITE (2006) : 平成17年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書
- 3) 経済産業省リスクファイナンス研究会 (2006) : リスクファイナンス研究会報告書～リスクファイナンスの普及に向けて～,
https://www.meti.go.jp/policy/economy/keiei_innovation/sangyokinyu/jinzai/jinzai04.pdf (2020年3月アクセス)
- 4) RITE (2018) : RITEプレスリリース, 中国君倫 (ジュンルン) 石油へのマイクロバブルCO₂特許技術の提供について,
http://www.rite.or.jp/news/press_releases/pdf/press20181128.pdf (2020年3月アクセス)
- 5) Project TUNDRA : ホームページ, <https://www.projecttundrand.com/> (2020年3月アクセス)

第3章 大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立

3.1 要約

本章では、「大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立」として、「CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立」および「マイクロバブル CO₂圧入技術の適用による貯留率の向上」の研究進捗状況を報告する。本節では、それぞれの開発状況の要点を紹介する。

(1) CO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立

圧入井最適配置技術の開発として、坑井配置のためのワークフローおよび最適配置ツールの試作、複数坑井配置シミュレーションの有効性評価を行った。圧入井本数に関しては、Quest サイトでの手法を参考に初期圧力との差圧により決定することとした。さらに苫小牧サイトの地質モデルを用い、貯留が最大となる場合、または一定圧入レートでの坑底圧力が最小となる場合、それぞれの最適坑井配置解を探索できるツールが完成した。

坑底圧力が最小となるケースにおいて、圧入圧力緩和井設置の効果を検証し、アクティブまたはパッシブタイプの圧力緩和井のどちらでも、貯留層の圧力を効果的に抑制できることを確認した。さらに圧力緩和井に光ファイバーを設置すれば地層のひずみ計測と組み合わせ、地盤沈下等の懸念に対応した運用シナリオを検討した。

また、地下の不確実性を効果的に低減するために、モニタリングによって得られる情報の価値に基づいた評価方法を検討し、この方法が汎用的に利用可能なアプローチであることを確認した。

(2) マイクロバブル CO₂圧入技術の適用による貯留率の向上

国内油田でマイクロバブル CO₂圧入の現場実証試験を行い、CO₂貯留率の向上および溶解促進の効果を検証した。現場試験では同一坑井において Huff'n Puff 法を実施し、マイクロバブルとノーマルバブルの圧入試験結果を比較した。その結果、マイクロバブルのほうが圧入レート、圧入指数、CO₂貯留率が大きいことが確認された。

この現場試験結果をマッチングするシミュレーションを実施することにより、マイクロバブルとノーマルバブルの CO₂浸透メカニズムの差異を検討した。マイクロバブルの場合には、相対浸透率の上昇、残留ガス飽和度の上昇、毛細管圧力の低下で表現することにより、狭い孔隙への浸入や掃攻効率向上といった現象を説明できることが示された。

3.2 CO₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立

実用化規模（100 万 t/年程度）の大規模貯留サイトでは、複雑な地層構造や貯留層の不均質性に対応して、複数の圧入井や、CO₂ 圧入に伴う圧力上昇を抑える圧力緩和井を設けることが考えられている。複数の圧入井とは、同一サイトにおいて複数の坑井から地中に CO₂ 圧入を行うことを示し、個々の圧入井での圧力を低下できるメリットがあるだけでなく、万一ある坑井の圧入性能が低下した際のバックアップとして使えるメリットがある。圧力緩和井は、地層水を積極的に揚水、あるいは深度の異なる他の貯留層へ逃すことにより地層圧力の上昇を抑え、CO₂ 貯留量を増やすことにつながる。しかしどちらの手法も坑井掘削が必要なことから、追加のコストがかかるデメリットがある。これらの手法のリスクを低減するためには、あらかじめどこに坑井を掘削すればよいか、または最適な坑井配置はどこか、に関して事前に評価することが重要である。

先行事例としては、カナダの Quest プロジェクトやオーストラリアの Gorgon サイトで実施されているが、坑井位置の決定プロセスがオープンにされていない点も多い。しかし、実サイトの事例として貴重な知見を含んでいると考えられる。

本課題では、複数の CO₂ 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立のために、先行事例調査を行うとともに、最適化問題としての解法の検討を行う。一般的に最適化問題では、多数（1,000 個程度）の計算が必要となるため、効率のよい探索手法と、高速計算技術が必要であり、それらの検討を行う。さらに、開発した最適配置決定アルゴリズム（最適化する目的関数）を実際の大規模圧入サイトの地層モデルに対し適用する。また、圧力緩和井は圧入井からの CO₂ が到達した時点から、廃坑または CO₂ 圧入井への転用が必要となるが、この転用にも対応する機能を持った複数坑井の最適配置ツールの開発・確立を行う。

3.2.1 複数坑井の最適配置ツールの試作

最適な坑井配置は、貯留サイト固有の地質条件や地政学的諸条件に大きく依存する。特に CCS においては、事前の限られた評価井の地質情報に基づいて地質モデルを構築し、坑井配置を検討せざるを得ない。したがって、地質モデルの不確実性に十分配慮することが重要となる。以上の背景のもとに、大規模 CO₂ 地中貯留における複数坑井の配置決定ツールとして、複数坑井配置のワークフローを試作した。

複数坑井配置のワークフローとして、図 3.2.1-1 に示すようなものが考えられる。これは、坑井調査や地震探査データに基づいて作成された貯留層モデルに対し、シミュレーションスタディから坑井配置を決定する大まかな手順であり、油ガス開発の手順と大きく変わらないものである。なお、詳細な手順や手法の選択は、プロジェクトの成熟度あるいは地質技術者の判断等によって異なるものになる。

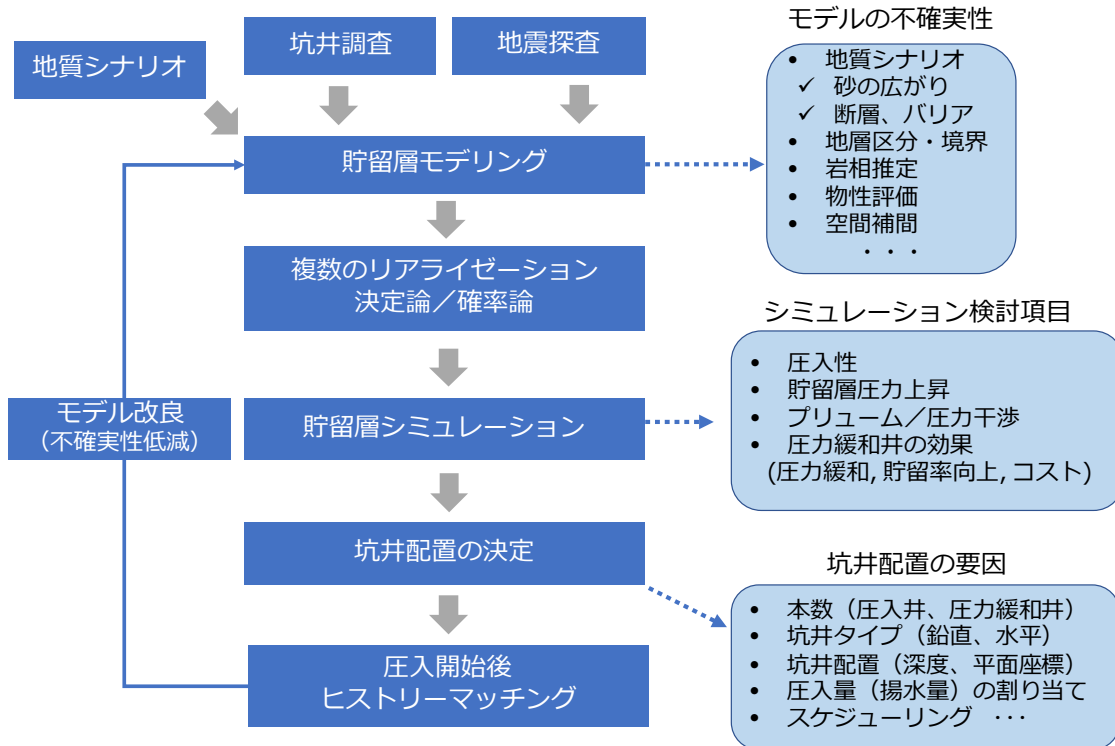


図 3.2.1-1 坑井配置のワークフロー

3.2.2 複数坑井配置シミュレーションの有効性の把握

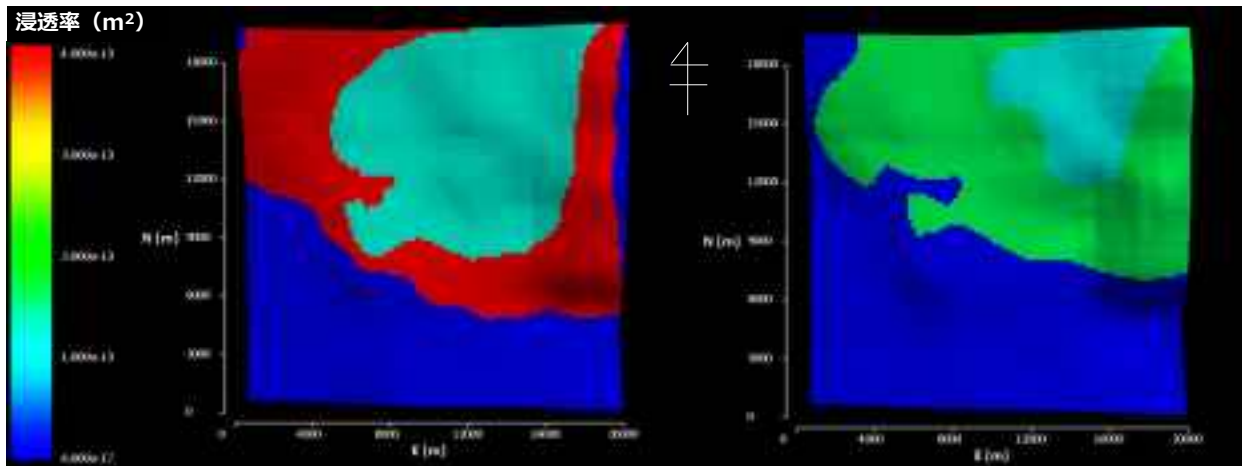
今年度は、図 3.2.1-1 に示したワークフローの中の貯留層モデリングから坑井配置の検討までを実施した。ここでは、主に坑井配置の検討について記す。

不均質な貯留層において様々な可能性の中から坑井配置を決定することは容易ではない。適切な配置を探索するためには、膨大な数の貯留シミュレーションを要する場合も考えられる。そこで、坑井配置の探索を最適化問題として捉え、解探索を自動化したツールの開発も行ってきた。

昨年度は、実証規模の貯留層モデルを用いて、操業で要求される所定圧入量の安全な貯留と貯留した CO₂ の長期的な安定性を指標とした目的関数を提案し、最適解探索を実施した。今年度は、商業プロジェクトの CO₂ 貯留条件として、圧入期間 20 年間で CO₂ 総圧入量 50Mt を想定した検討を実施する。

(1) 貯留層モデル

大規模貯留プロジェクトで問題となる広域的な圧力上昇を検討するため、80km×65km の広域モデルを作成し、予察シミュレーション結果において圧力上昇域をカバーできる 20km×20km モデルを抽出した (図 3.2.2-1)。このモデルの格子分割数は 100,000 (100×100×10) である。貯留層 (萌別層と荷菜層) は上部と下部に分かれており、地質はチャンネル部、砂質部、泥質部に各々区分されている。貯留層の温度は 40℃ で一定とした。



貯留層上部 貯留層下部
 図 3.2.2-1 貯留層モデルの浸透率分布

(2) 圧入井本数の設定

上記のモデルにおいて、圧入期間 20 年間で総圧入量 50Mt の CO₂ を圧入するために必要となる圧入井の本数を設定する。ここでは、カナダの大規模 CO₂ 貯留プロジェクト Quest での手法を参考とした。まず、式 3.2.2-1 により水の圧入性(Injectivity)を求める。

$$\text{Injectivity} = \frac{\rho \times K \times h}{\mu \times \left(\ln \frac{re}{rw} - \frac{3}{4} + S \right)} \quad (\text{式 3.2.2-1})$$

ここで、式 3.2.2-1 中のパラメータは表 3.2.2-1 にまとめた通りである。次に、求めた圧入性に許容圧力と初期圧力との差圧 ΔP を乗じ、水の圧入可能レート q_w を式 3.2.2-2 で概算する。

$$q_w = \text{Injectivity} \times \Delta P \quad (\text{式 3.2.2-2})$$

表3.2.2-1 圧入性の算定に用いたパラメータ

パラメータ	数値	備考
ρ (水の密度)	980 kg/m ³	40℃における水の密度
K (貯留層の平均浸透率)	94.3 mD	各地質区分の体積比を用いて平均化
h (貯留層厚)	260 m	調査井による貯留層区間
μ (水の粘性)	0.65 mPa・s	40℃における水の粘性
re (CO ₂ 圧入の有効半径)	3,200 m	Kusakinの式より算出
rw (坑井の半径)	0.05 m	
S (スキン効果)	0	

許容圧力は、リークオフ試験から得られる等価泥水比重などから設定される。今回は、苫小牧貯留層総合評価を参考に、等価泥水比重1.5の90%として1.35を用いた。調査井にお

ける貯留層表面深度である約1,060mにおける許容圧力は約13.7MPaとなり、 ΔP は約3.5MPaとなる。以上より、水の圧入可能レート q_w は式3.2.2-2より0.482Mt/年となる。この水圧入可能レートをCO₂の圧入可能レートに換算するにあたり、Questプロジェクトでは、超臨界CO₂と水との密度や粘性の比ならびに相対浸透率の効果を考慮し、CO₂の圧入可能レートは水圧入可能レートの概ね1.5～3倍としている(Quest CCS project, 2011)。上記で求めた水の圧入可能レートから、CO₂圧入可能レート q_{CO_2} を換算すると、1本あたりの圧入可能レートが0.723Mt/年～1.446Mt/年となる。これより20年間で50MtのCO₂を圧入するために必要な圧入井の数を求めると2本から4本となる。今回は4本の圧入井を用いる。

(3) 最適化シミュレーション

ここでは、上述で設定した4本の圧入井の配置を最適化シミュレーションによって検討する。最適化にあたっては、次の2つの目的関数を選定して検討した。

最適化問題1：貯留可能なCO₂量の最大化問題

目的関数① = CO₂ 圧入可能量/50Mt → 最大化

※目的関数値が1以上であれば実行可能解となる

最適化問題2：規定CO₂圧入レートにおける坑底圧力の最小化問題

目的関数② = 坑底圧力の最大値/初期圧力 → 最小化

※目的関数値が1.35以下であれば実行可能解となる

上記のいずれの問題においても制約条件として、圧入されたCO₂が平面図上で陸域に到達しないことを加えた。なお、圧入条件に関し、最適化問題1では、CO₂圧入量を最大化できる坑井配置を探索するため、坑底圧力を許容圧力で固定する。最適化問題2では、一定の規定レートでCO₂を圧入する。

(4) 最適化結果

① 最適化問題1

最適解探索の結果から得られた実行可能解（目的関数値が1以上）の分布を圧入井毎に▽印で、最適解をピンクの○印で各々図3.2.2-2(a)に示した。図中背景は式3.2.2-2より算出した水の圧入レートで、黄色の長方形で囲われた領域が解探索領域を示している。図から、実行可能解が広域にわたって分布していることがわかり、4本の圧入井で十分であることがわかる。

② 最適化問題2

最適解探索の結果は最適化問題1と同様に図3.2.2-2(b)に示す。ただし、実行可能解は目的関数値が1.35以下の解であり、圧入井毎に▽印で図に示している。最適解における目

的関数値は 1.34 で、実行可能解として算出された。最適解および実行可能解は水の圧入レートが高い位置が選定されており、解探索が妥当であったことがわかる。

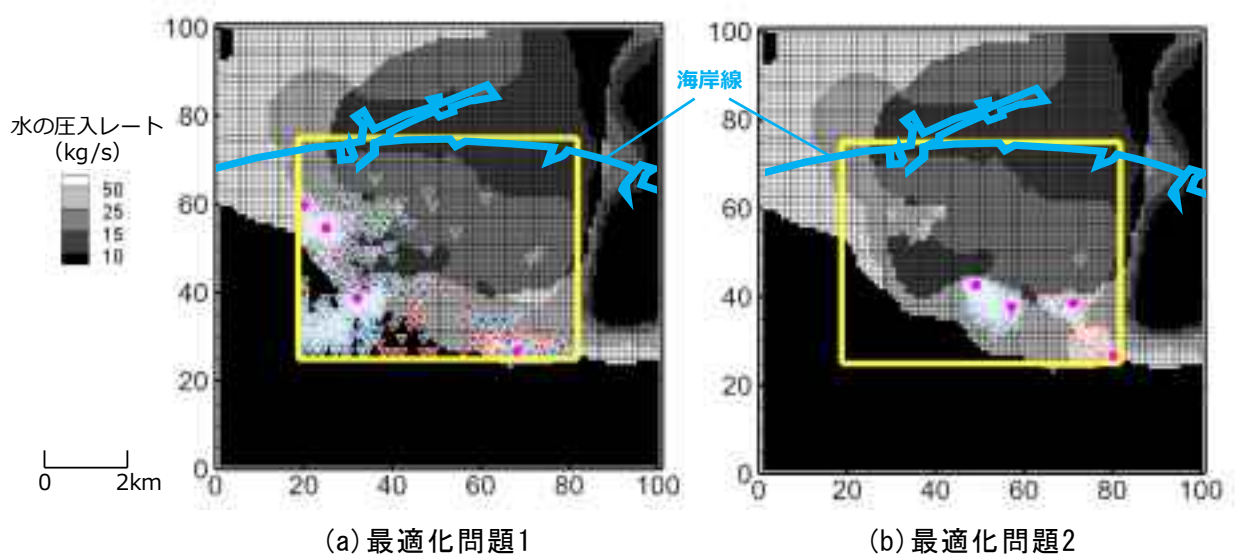


図 3. 2. 2-2 許容される解の分布と最適解の位置

3. 2. 3 圧力緩和井の設置効果の検証

大規模貯留層に対する CO₂ 地中貯留では、貯留効率や圧入性の向上のために圧力緩和井の設置が有効であるとされる。圧力緩和井を設置することで、圧入に伴う地層圧の上昇を抑えることができる。また、地層水生産にともなって地層変形が生じることが報告されており、光ファイバーを用いたひずみの現場計測によって捉えることが可能となってきた。ここでは、CO₂ 流動シミュレーションを通して、圧力緩和井の設置効果の検証を行うとともに、光ファイバー計測による地層水生産に伴う地層変形の計測結果を示す。

(1) CO₂ 流動シミュレーションによる設置効果の検証

CO₂ 圧入に伴う貯留層内圧力の緩和策として圧力緩和井の設置が考えられる。圧力緩和井の種類を図 3.2.3-1 に示す。圧力緩和井には 2 タイプが考えられる。1 つはボーリング孔からポンプなどを用いて揚水するアクティブタイプである。2 つ目は、貯留層を地表や海底面あるいは別の帯水層をボーリング孔で水理的に連結し、自然流動により貯留層内圧力上昇を緩和するパッシブタイプである。

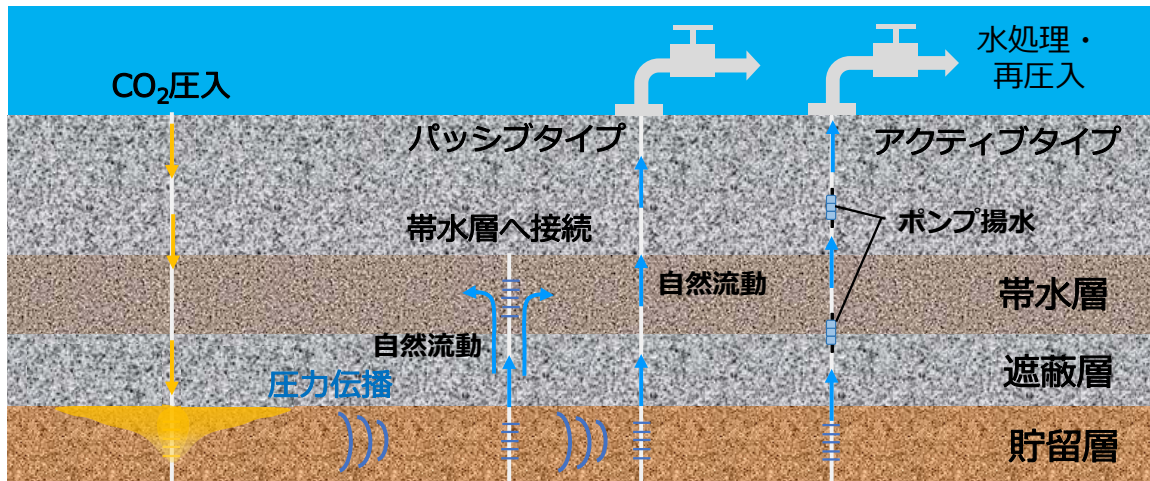
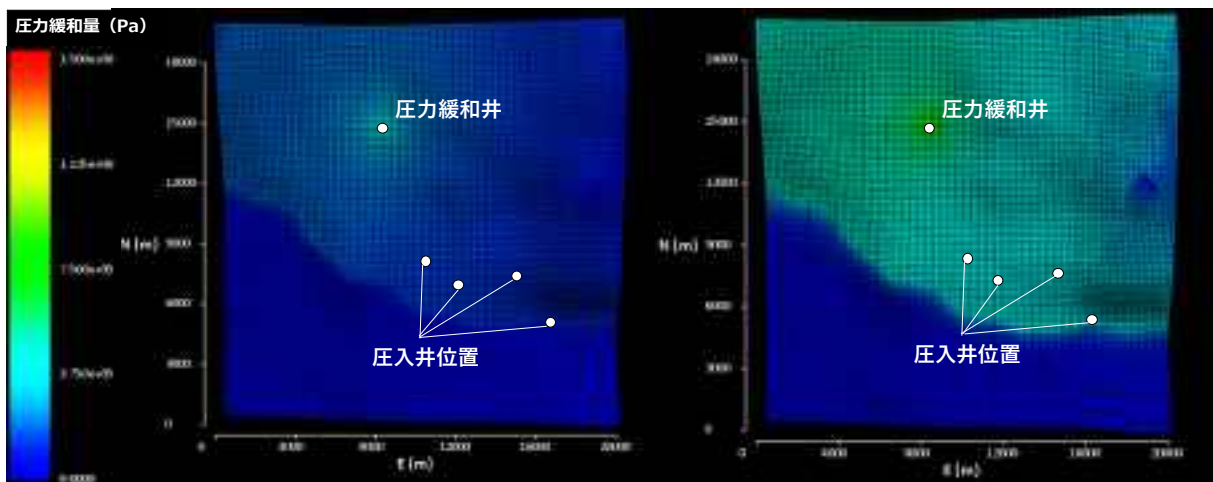


図 3.2.3-1 圧力緩和井の種類

今回は、3.2.2 項の最適化問題 2 で求めた圧入井配置を採用し、パッシブタイプとアクティブタイプの圧力緩和井を設置した場合の効果を検討した。パッシブタイプは CO₂ 圧入に伴う圧力上昇により、地層水が自然流動により揚水されるとした。アクティブタイプの圧力緩和井では年間 1Mt の揚水レートを設定した。

シミュレーション結果を図 3.2.3-2 に示す。図中には、圧力緩和井を設置しないケースと圧力緩和井を設置したケースにおける圧入開始から 20 年後の圧力の差分の分布を示している。すなわち、暖色系の領域は、圧力緩和井を設置しないケースと比較して、圧力上昇が緩和されている領域である。図より、圧力緩和井を設置することで、貯留層全体の圧力上昇を緩和できることがわかる。特に、アクティブタイプの圧力緩和井を設置することで、圧力緩和井を設置しないケースに比べて、ほぼ貯留層全域にわたる圧力上昇の緩和が可能であることがわかる。



(a) パッシブタイプ

(b) アクティブタイプ

図 3.2.3-2 圧力緩和井の設置による広域圧力の低減

(2) 地層水生産による地層変形の光ファイバー計測

地層水生産によって地層変形が生じることが報告されているが、地下で発生するひずみ変化を高精度に捉えることは困難であるとされてきた。技術研究組合では千葉県茂原地区光ファイバー現場試験サイトにおいて長期間のひずみ計測を行うことで、周辺の農業用水井での揚水作業にともなう地層変形を捉えることができた。図 3.2.3-3(a)に示した光ファイバー設置坑井から 1,160m 離れた 8 号井、730m 離れた 7 号井、280m 離れた 3 号井、940m 離れた 2 号井において、420~500L/分で揚水を行った。その際の光ファイバー設置坑井で計測されたひずみ変化を図 3.2.3-3(b)および(c)に示す。これらの結果から、480L/分程度の揚水によって生じる地層変形を、約 1km 遠方での $10\mu\varepsilon$ 程度のひずみとして光ファイバーケーブルによって計測できることが示された。

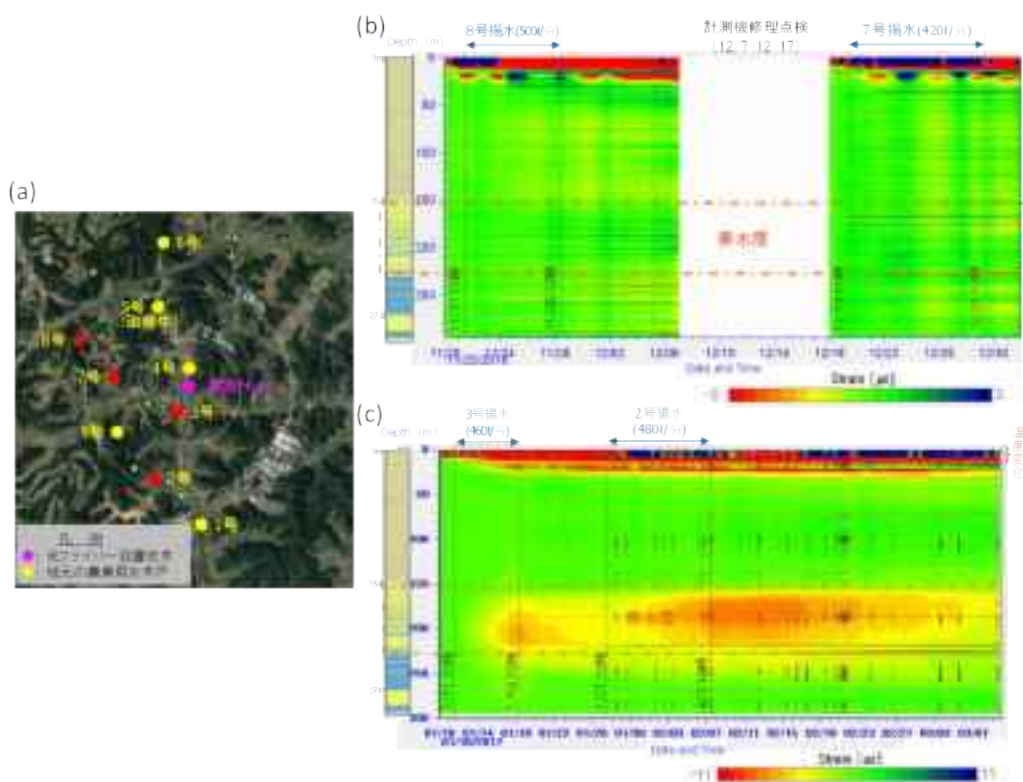


図 3.2.3-3 地層水生産に伴うひずみ計測結果

このような光ファイバーによるひずみ計測は、圧力緩和井による地層水生産において懸念される地盤沈下を監視することにつながる。すなわち、光ファイバーによるひずみ計測と圧力緩和技術を組み合わせることにより、地層変形の許容範囲内の圧力緩和井の活用の検討が可能となる。図3.2.3-3の例では問題となるものではないが、年間1Mtの地層水を揚水するようなアクティブタイプの圧力緩和井を導入する場合には、ひずみ計測およびジオメカニクス解析を組み合わせた統合的な評価に基づいた生産シナリオを検討する必要がある。

3.2.4 CO₂貯留性能を規定する評価関数の整理と情報価値計算

深部塩水層をCO₂貯留層として有効活用するためには、不確実性が大きい貯留性能をいかに的確に評価するかが重要となる。地下探査や調査井掘削は、貯留性能の不確実性を低減させる効果が大きいものの、多大な費用と労力が必要となる。そのため、探査等によって獲得できる情報量と価値を分析し、効果的な手法を選択する必要がある。すなわち、限られたコストの中でいかに「情報の価値」を高められるかが技術的課題となる。

本項ではCO₂貯留性能を規定する変数と評価関数を整理するとともに、不確実性を伴うCO₂貯留層モデルに対し、期待獲得情報量を具体的に計算し、どこで情報を獲得するのが効果的であるかについて検討した内容を記す。

(1) 貯留性能を規定する変数・評価関数の整理

検討する対象は、深部塩水層へのCO₂圧入とする。また、構造・層位トラッピング（遮蔽性能）は有効に働く地層を対象とするものとする（貯留のみを対象とする）。

① 貯留性能を規定する変数

物性パラメータとその影響を示す。

- ・ 孔隙率：CO₂プルームサイズに影響
- ・ 浸透率：圧力分布に大きく影響し、圧入圧力制限にも影響が及ぶことがある
- ・ 相対浸透率曲線：不動水飽和率はプルームサイズに影響し、残留ガス飽和率は残留トラッピング量評価に影響
- ・ 地層圧・温度：CO₂の状態・貯留量に影響
- ・ 地層厚：CO₂貯留量に影響
- ・ 地層境界：プルームの広がり、CO₂貯留量に影響

② 貯留性能を規定する評価関数例

評価関数は、目的とCO₂圧入における時間軸によって異なるが、以下が使われることが多い。

- ・ 貯留可能量
- ・ 対象とする地層に留まっているCO₂の割合
- ・ 圧入停止後の不動CO₂割合

(2) 不確実性の尺度と定量評価手法

不確実性を評価したいパラメータの集合を θ とし、モニタリング実施前の θ は確率密度関数 $p(\theta)$ で表すものとする。ここで、不確実性を評価するための指標として情報論的エントロピー（式3.2.4-1）を考える。

$$H_{\theta}[\theta] = \mathbb{E}_{\theta}[-\log p(\theta)] \quad (\text{式 3.2.4-1})$$

これが大きいほど不確実性が高いと考える。

また θ に関するモニタリングデータ Y に関して、

$$Y = g(\theta) + \epsilon \quad (\text{式 3.2.4-2})$$

という「順モデル」が与えられているものとする。ここで ϵ は測定誤差を表す。従ってここでの問題は、データ Y を取得することにより、 θ の不確実性がどれほど低減されるか、という問題に帰着する。データ Y を取得した後の θ の条件付き情報論的エントロピーは、

$$H_{\theta|Y}[\theta|Y] = \mathbb{E}_{\theta|Y}[-\log p(\theta|Y)] \quad (\text{式 3.2.4-3})$$

であり、事前のエントロピーからの差：

$$I[Y] = H_{\theta}[\theta] - \mathbb{E}_Y [H_{\theta|Y}[\theta|Y]] \quad (\text{式 3.2.4-4})$$

が大きいほど不確実性が低減されたことになる。この差を期待獲得情報量（Expected Information Gain: EIG）と呼ばれる（Lindley, 1956）。

一般に、この式を直接解くことはできないため、不確実性を導入した数値モデルで評価を行うことになる。統計的な特性評価のためには非常に多数の場合の計算が必要となるが、解析解が得られない場合の計算法（例えば Ryan, 2003）や、計算コストを低減するアルゴリズム（例えば Goda et al., 2020）が検討されている。

(3) CO₂ 圧入モデルにおける不確実性評価

① 地層中の CO₂ 流動・圧力モデルの設定

Nordbotten et al. (2005) および Nordbotten and Celia (2006) にならい、CO₂ 圧入過程における CO₂ 流動に関する解析的モデル（図 3.2.4-1）において、不確実性評価を検討した。彼らの論文では CO₂ 相の厚さ $h(r, t)$ を求める解析解を求めていたが、ここでは圧力 $p(r, t)$ を求める解析解（順モデル）を導出し、圧力を観測量として取得するものとした。

次に、この水平成層貯留層モデルにおける不確実なパラメータとして、孔隙率 ϕ 、浸透率 k 、水との置換率（一定値） S_c 、水・CO₂ の易動度 λ_w, λ_c を選択し、それぞれ確率密度関数を設定した（図 3.2.4-2）。各変数は互いに独立であるものと仮定し、それぞれの分布から得られるパラメータごとに順モデルで圧力を計算し、期待獲得情報量を求めた。

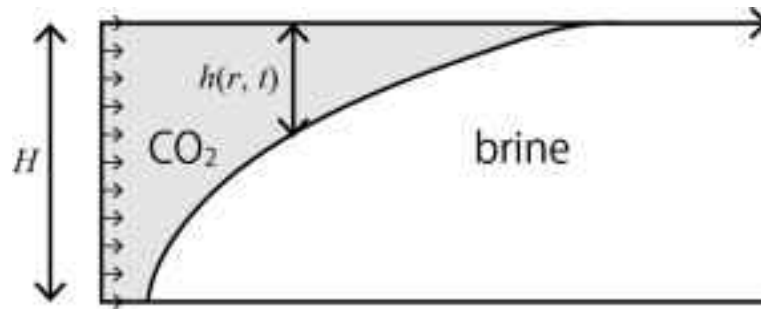


図 3.2.4-1 水平成層貯留層モデル

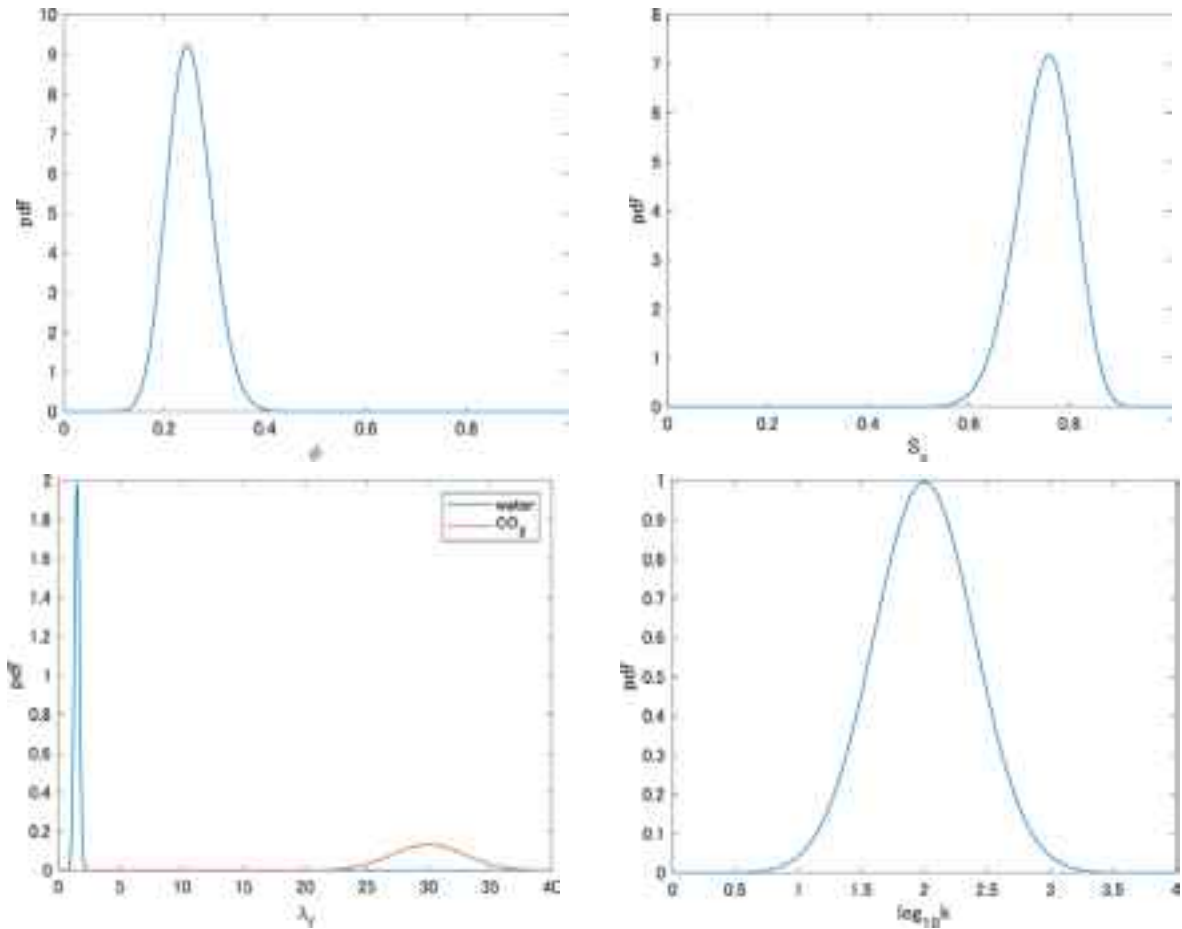


図 3.2.4-2 物性パラメータの不確実性の分布

左上：孔隙率、右上：CO₂飽和度、左下：水・CO₂の易動度、右下：log₁₀k（浸透率）

② 期待獲得情報量の大局的变化

上記の設定に対し、距離 r^* に観測点を設けた時の時間 t における期待獲得情報量が計算できる。ここでは例として $t = 15$ 年の時に得られる期待獲得情報量の距離依存性を図 3.2.4-3 に示す。これより距離 2 km までは期待獲得情報量が高いものの、それより遠方になると急激に期待獲得情報量が減少することが分かる。これは観測井に CO₂ プルームの先端が届いていない箇所での観測していることに相当し、そのような遠方での観測は、貯留パラメータの不確実性を低減する効果がないことを示している。これは CO₂ 挙動予測におい

ては、もっともらしい解である。

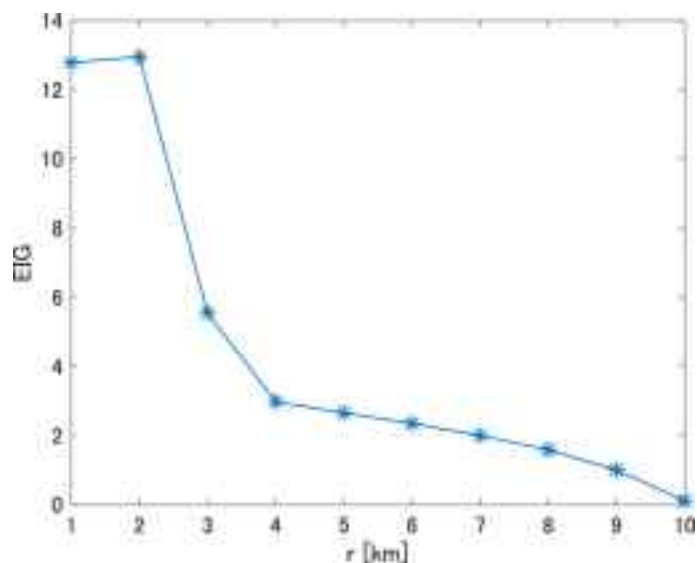


図 3.2.4-3 観測井までの距離 r^* による期待獲得情報量の大局的变化

③ 観測井配置の最適化

上記の大局的变化をより詳しく調べるため、 $t = 15$ 年までの観測回数 J に対する依存性と期待獲得情報量が極大になる地点について詳しく調べた (図 3.2.4-4)。まず観測回数依存性であるが、観測回数増加とともに期待獲得情報量が大きくなる。しかし等距離での観測に対し、 J に大きく依存しないことから、 J を大きくしすぎる必要がないと言える。これは期待獲得情報量の推定において計算の安定性と収束性を担保する上で有用な知見である。また観測回数 J を固定した場合には、 $r^* = 1.8$ km 付近にピークとなり、この地点が最適観測地点となる。

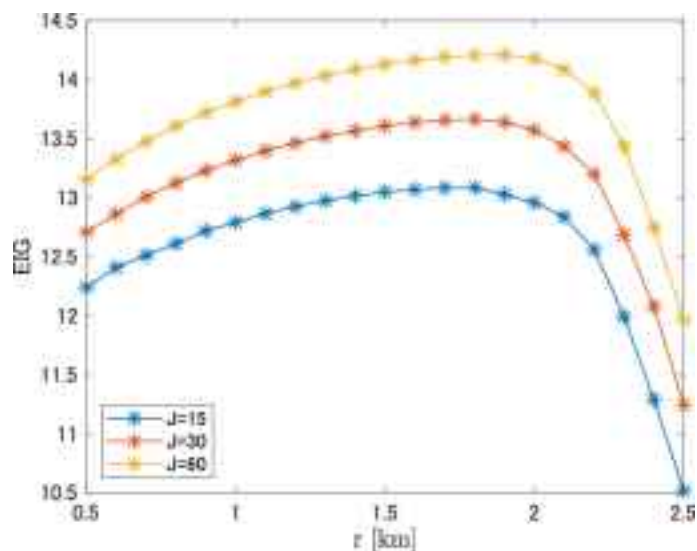


図 3.2.4-4 測定回数 J による期待獲得情報量の変化

以上、CO₂地中貯留における貯留性能の不確実性低減のためのモニタリングシステム構築を目的として、特に期待獲得情報量を尺度とするアプローチについて検討した。モニタリング実施前の不確実性と、モニタリング実施によって期待される（低減された）不確実性の差を見ることによって、モニタリングによって得られる情報の価値を評価した。この方法を検証するため、比較的単純な地層モデルにおいて、不確実性をもつ貯留層パラメータを想定し、期待獲得情報量を求めた。この結果、期待獲得情報量は最適なモニタリングシステム構築に資する尺度であるとともに、情報量を用いた評価方法は汎用的に展開可能なアプローチであると結論付けられる。

3.2.5 まとめ

本節で得られたCO₂圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立に関する成果を以下にまとめらる。

1. 大規模 CO₂ 地中貯留における複数坑井の配置決定ツールとして、ワークフローを試作した。作成したワークフローを用いて、実用規模サイトにおける坑井配置を検討した。
2. これまで開発してきた最適な坑井配置探索ツールを実用規模モデルの坑井配置最適化問題に適用した。目的関数としては、CO₂ 圧入量の最大化と圧力上昇量の最小化を考えた。水の圧入可能レートのマップと解探索結果をみると、最適解及び実行可能解は水の圧入レートが高い位置が選定されており、効率的に解探索できることを確認した。
3. 目的関数として圧力上昇量を最小化する解探索から得られた最適な坑井配置を用いて、圧力緩和井の設置効果について検討した。本ケーススタディーでは、アクティブタイプまたはパッシブタイプの圧力緩和井を設置することで、ほぼ貯留層全域にわたって圧力上昇を緩和できる結果となり、圧力緩和井の設置効果が検証できた。
4. 水生産にともなう地層変形は光ファイバー計測によって捉えられるため、圧力緩和井の活用シナリオ検討のための準備が整った。
5. 不確実性低減のためのモニタリングシステム構築を目的として、情報の価値の定量化を行うアプローチを検討し、期待獲得情報量は最適なモニタリングシステム構築に資する尺度であり、情報量を用いた評価方法は汎用的に展開可能であることがわかった。

参考文献

- 1) Quest CCS project (2011): Quest Storage Development Plan, 07-0-AA-5726-0001,Rev02, 2011-10-06, 303.
- 2) Goda, T., Hironaka, T., Iwamoto, T. (2020): Multilevel Monte Carlo estimation of expected information gains. Stochastic Analysis and Applications, pp.1-20.
- 3) Lindley, D. V. (1956): On a measure of the information provided by an experiment. The Annals of Mathematical Statistics, 27, 986-1005.
- 4) Nordbotten, J. M., Celia, M. A., Bachu, S. (2005): Injection and storage of CO₂ in

deep saline aquifers: analytical solution for CO₂ plume evolution during injection. *Transport in Porous Media*, 58, 339-360.

- 5) Nordbotten, J. M. and Celia, M. A. (2006): Similarity solutions for fluid injection into confined aquifers. *Journal of Fluid Mechanics*, 561, 307-327.
- 6) Ryan, K. J. (2003): Estimating expected information gains for experimental designs with application to the random fatigue-limit model. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 12, 585-603.

3.3 マイクロバブル CO₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上

地中に圧入された CO₂ がより多くの孔隙に浸透できれば、CO₂ 貯留率を高めることができ CCS のコスト削減（経済性向上）に寄与する。また、CO₂ 圧入に伴う貯留層の圧力上昇を抑えることができれば CCS の安全性向上につながる。

CO₂ をマイクロバブル（微細気泡）化し貯留層に圧入すると、地層水との接触面積の増加によって CO₂ を素早く溶解させることから、貯留層の圧力増加の抑制効果が期待でき、CO₂ 圧入時の安全性確保に貢献できる。また、マイクロバブル CO₂ は、地層の狭い孔隙に入り込む特性を有するため、従来の圧入方法に比べて貯留層に含まれる孔隙の利用効率が高くなり、CO₂ 貯留率向上につながる。

そこで、マイクロバブル CO₂ 圧入技術について、コア試料を用いた室内実験の知見を基に現場適用手法の検討を行う。文献資料を基に既存坑井や地下情報等を調査した上で、現場適用試験のサイトを選定する。そのサイトの所有者、監督官庁および地元住民との調整後、現場試験を実施する。この実フィールド試験では、マイクロバブル方式と従来方式でそれぞれ CO₂ 圧入を行い、マイクロバブル方式の CO₂ 貯留効率向上、および貯留層の圧力抑制効果を検証する。

3.3.1 実フィールドでの、マイクロバブル CO₂ 圧入による CO₂ 貯留率向上効果の検証

2019 年度のサイト選定、試験計画策定、CO₂ 圧入設備設置やマイクロバブル（MB）ツールなどの各種機材の準備、フィールドシミュレーションモデルでの予備検討を経て、秋田県男鹿市にある石油資源開発（株）（JAPEX）申川油田の一部を使用し、現場適用試験を行った（図 3.3.1-1）。



図 3.3.1-1 実証試験サイト概要

試験手法は Huff'n Puff 法を採用し、CO₂ 圧入後に再生産（フローバック）を行うことで圧入圧力などの CO₂ 圧入挙動やフローバック時の CO₂ 排出量などの生産挙動を確認した。MB 圧入を 2019 年 5 月～6 月に、MB 圧入効果を確認するため従来方式の CO₂ 圧入（NB 圧入）を同年 10 月～11 月にそれぞれ実施した。圧入、生産期間、圧入位置などの試験スケジュール、デザインはできるだけ 2 つの試験で同条件とした（図 3.3.1-2）。

MB圧入:5～6月

	1～10日 (5/7-5/16)	11～20日 (5/17-5/26)	21～30日 (5/27-6/5)	31～35日 (6/6-6/10)
資機材搬入・設置	■			
事前着脱試験	■			
MBツール降下・設置	■			
CO ₂ 圧入		■	■	
ソキグ		■	■	
フローバック		■	■	
ツール巻上・回収			■	
資機材解体・搬出				■

NB圧入:10～11月

	1～10日 (10/7-10/16)	11～20日 (10/17-10/26)	21～30日 (10/27-11/5)	31～40日 (11/6-11/15)
資機材搬入・設置	■			
事前フロー	■			
NBツール降下・設置		■		
CO ₂ 圧入		■	■	
ソキグ		■	■	
フローバック		■	■	
ブライン圧入				■
ツール巻上・回収				■
資機材解体・搬出				■

図 3.3.1-2 実証試験スケジュール

(1) MB ツールの実用性

① MB ツール編成

2018 年度の試作ツールを基に本試験用に図 3.3.1-3 に示す MB フィルター内蔵の MB ツールを製作した。ツール編成は図 3.3.1-4 の通り 18m 分の MB ツールを組立、仕上げ区間（873-885m, 887-889m）を覆う形で設置した。また、設置深度調整用に配管（1.315”TBG）を 64m、再生産での坑内流路確保のためのチェックバルブ、坑内圧力・温度測定用のメモリー式測定器を編成に組み込んだ。なお、従来方式での圧入（NB 圧入）でも同条件での試験を行う考えの下、MB フィルターを外す以外は MB と同じ編成とした。



図 3.3.1-3 MB ツールとフィルター

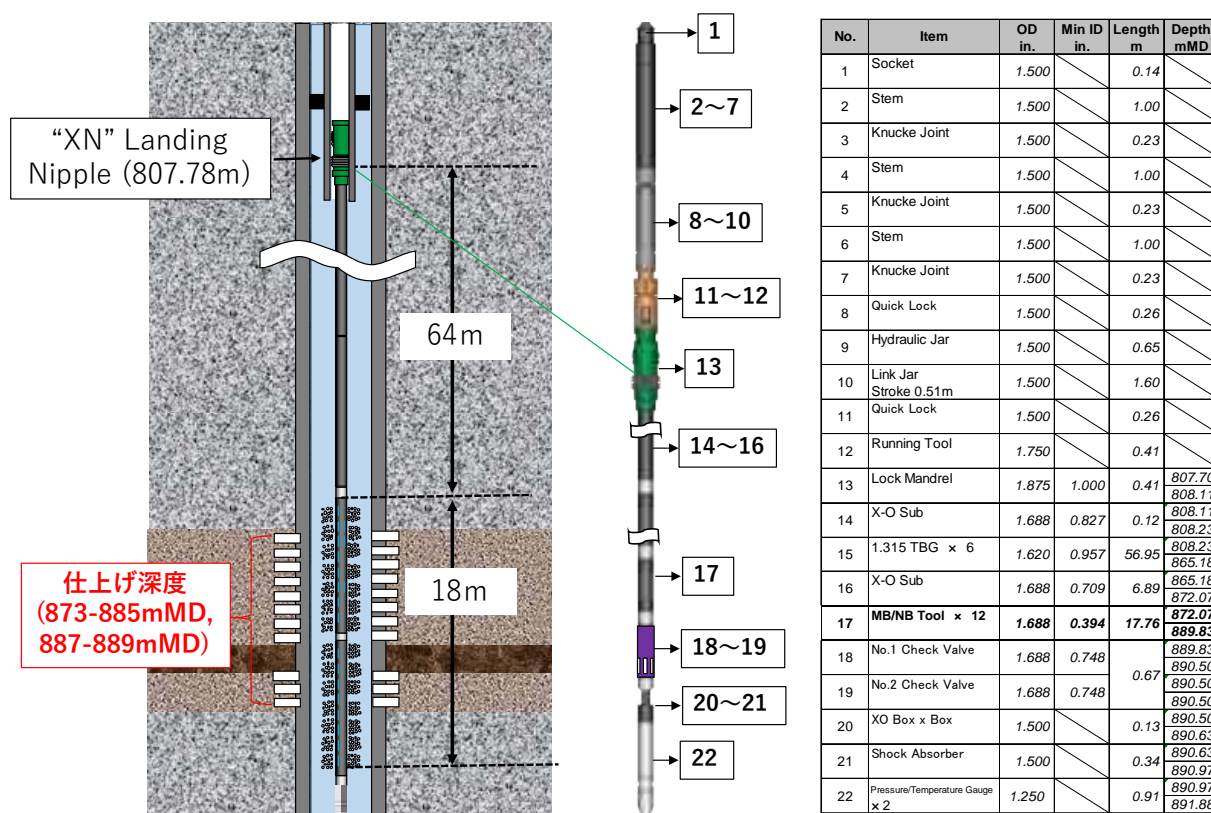


図 3.3.1-4 MB ツール坑内設置およびツール編成

② MB ツールの坑内着脱

MB ツールは地上で編成を組み立て後、スリックラインおよびワイヤーラインを使用して坑内への降下・設置・巻上・回収を行った。TBG 先端への設置・回収は 2018 年度の試作ツールでの坑内試験で実施したが本試験ではツール編成の全長が約 85m と長大であり、設置深度も 800m と深いことから本設置前に事前着脱試験を実施した。TBG 内への降下や TBG 先端 (XN-L/N) での設置では支障となる事象は起こらず予定通り実施することができた。設置部でのシール性確認試験より、圧入 CO₂ が坑内でリークすることなく MB ツール編成まで到達する機能を有していることを確認した。

事前着脱試験後の本設置も支障なく実施し、試験項目である CO₂ 圧入、再生産へ移行した。再生産終了後、MB ツール編成の巻上・回収を実施した。MB ツール設置後 20 日程度時間が経過していること、圧入・生産過程で坑内に障害物が生じ巻上・回収に支障が及ぶ懸念があったことから、より荷重をかけることができるワイヤーラインを使用し、支障なく作業を行うことができた。MB 圧入試験だけでなく NB 圧入試験でも支障なくツール着脱ができており、本方式での着脱が十分に実用に資することが確認された。

③ MB ツールの機能

CO₂ 圧入量は日量 10 トン×10 日の全量 100 トンを想定し、MB を連続的に発生させるため圧入（圧入層）条件で CO₂：水＝9：1 の体積比で水も同時圧入する計画としたが、試験井の圧入性が想定以上に良くなく、実際には MB 圧入試験で 20 トン程度であった。しかしながら、日量 2 トン程度の安定したレートで連続的に圧入でき、ツール内に微量の堆積物が確認されたもののツールやフィルターが圧入の妨げになる事象は見られず、後述の通り MB 圧入による CO₂ 圧入性向上が確認されたことから、本ツールは実フィールドでも機能することが確認された。

(2) 実証試験結果

CO₂ 圧入は、2019 年度に試験現場に設置した CO₂ 圧入設備を使用し、フラクチャーを開口させない最大圧力（坑底圧約 15MPa）を上限として連続圧入を行った。MB と NB それぞれの圧入状況を比較したグラフを図 3.3.1-5 に示す。MB 圧入では 10 日間の累計 CO₂ 圧入量が 20.1 トン、平均 CO₂ 圧入レートが 2.1 トン/日であり NB 圧入の累計 CO₂ 圧入量 5.8 トン、平均 CO₂ 圧入レート 0.56 トン/日と比較し、高い数値であった。また、圧入指数は、MB 圧入で 0.36t/D/MPa、NB 圧入で 0.09t/D/MPa と MB 圧入で高い圧入性を示した。

CO₂ 圧入後は 3 日間試験井を密閉（ソーキング）した。3 日間の坑井密閉で MB、NB いずれの試験でも坑底圧力が 15MPa から 12MPa まで低下したが、密閉直後の圧力低下は MB で大きくなった。この現象は MB 圧入後に CO₂ の貯留層流体（水、油）への溶解が促進され、CO₂ 相の体積がより早く減少したことを示唆していると推定される。

ソーキング後は試ガス装置と呼ばれる仮設の生産設備を使用し、フローバック（産出）を実施した。フローバック後に貯留層内に留まった CO₂ 量（貯留量）は MB で 16.3 トン、NB で 3.7 トンであり、圧入量に対する貯留量の割合（CO₂ 貯留率）は MB で 80.2%、NB で 62.5%と MB で高い貯留性を示した。

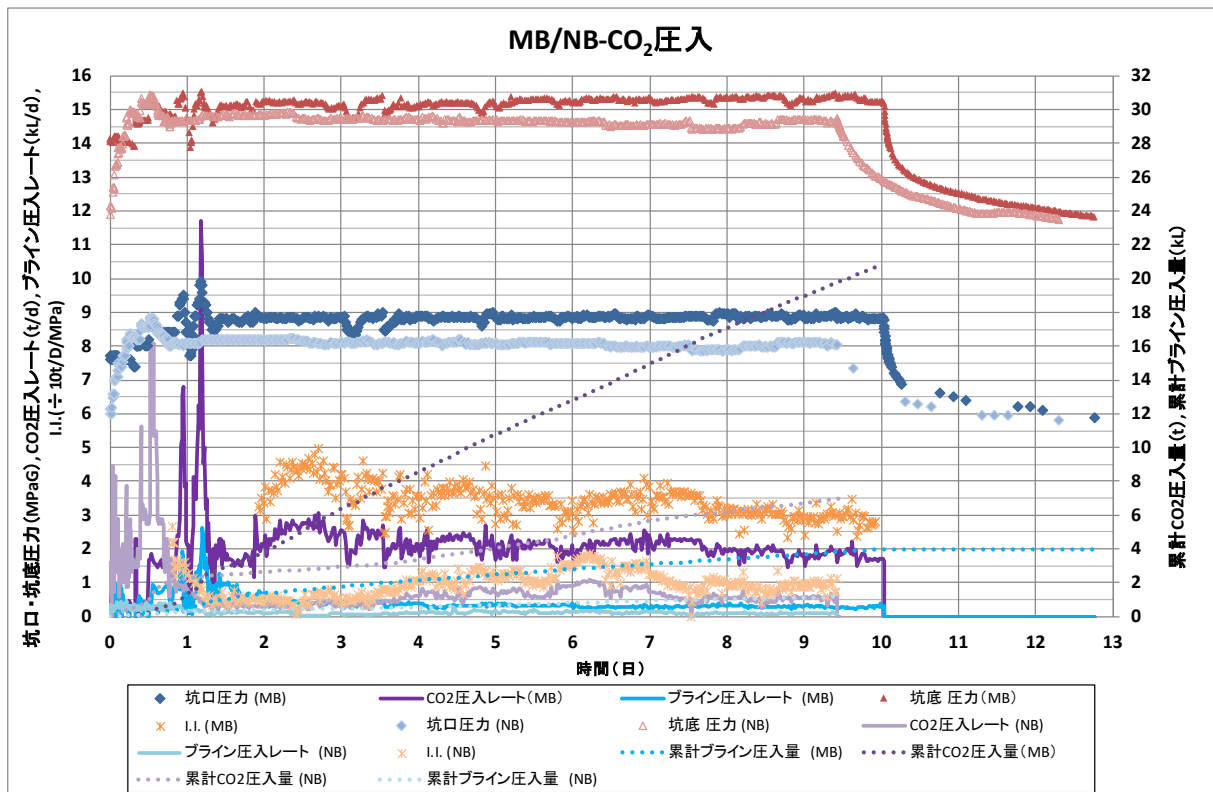


図 3.3.1-5 CO₂ 圧入状況

3.3.2 マイクロバブルによる溶解促進・貯留率向上メカニズムの解明

実証試験結果からマイクロバブル圧入効果として、CO₂ 圧入性向上、CO₂ 貯留性向上、CO₂ 溶解促進の3点が示唆された。これらのメカニズムを考察するにあたり、試験井近傍のフィールドシミュレーションモデルを構築し、実証試験を再現することでマイクロバブル圧入効果を評価した (図 3.3.2-1)。

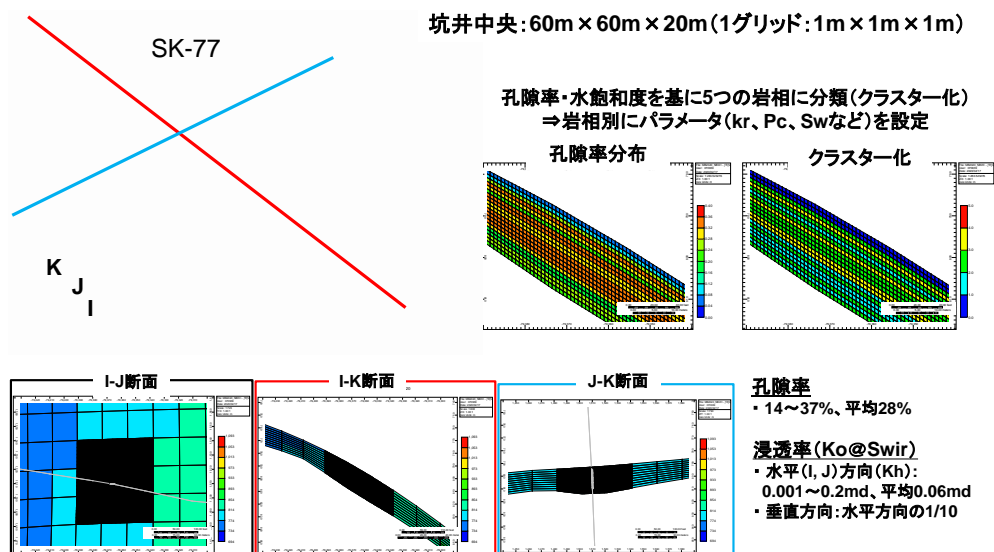


図 3.3.2-1 実証試験評価 シミュレーションモデル

CO₂ 圧入メカニズムとして、主に 2 つの理由が考えられる。一つは孔隙への浸入であり、MB 化することで CO₂ の気泡が微細となり、より小さい孔隙にも入りやすくなると考えられる。この現象についてはこれまでの室内実験や実験を基にしたシミュレーションから検証しており、毛細管圧力の低下で表現できる知見を得ている。本検討でも踏襲し、MB では NB より毛細管圧力を 30% 低下させた。もう一つは孔隙内の流動であり、MB では浸入領域が拡大することから、CO₂ が掃攻する領域も大きくなる。さらに MB は同時圧入した水と一緒に孔隙内を移動し、NB 圧入のように CO₂ 相として貯留層内の水と接触する場合と比べ水の抵抗が軽減されたと考えられる。これら 2 つの現象を表すために CO₂、液体それぞれの相対浸透率を上昇させた (図 3.3.2-2)。

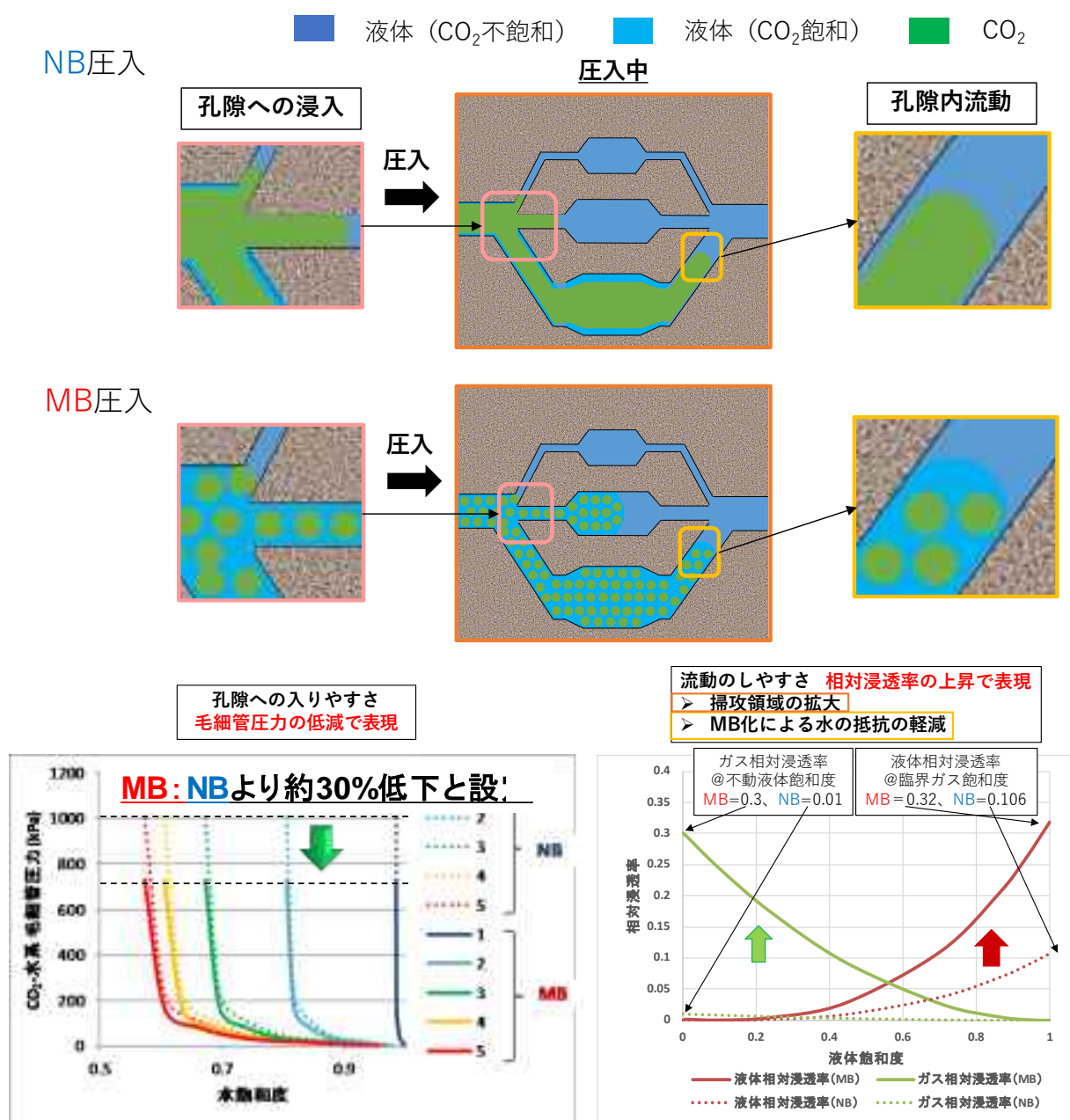


図 3.3.2-2 CO₂ 圧入メカニズムとシミュレーションでの表現

MBのCO₂貯留メカニズムとしては、NBでは浸入が難しい小さい孔隙にCO₂が貯留され、フローバック後も孔隙内に留まるため、また掃攻領域の拡大に伴いCO₂の貯留層流体への溶解領域、量が増加するためと考えられる。この現象を表すためにMBではCO₂圧入後の残留ガス飽和度をNBより高く設定した(図3.3.2-3)。

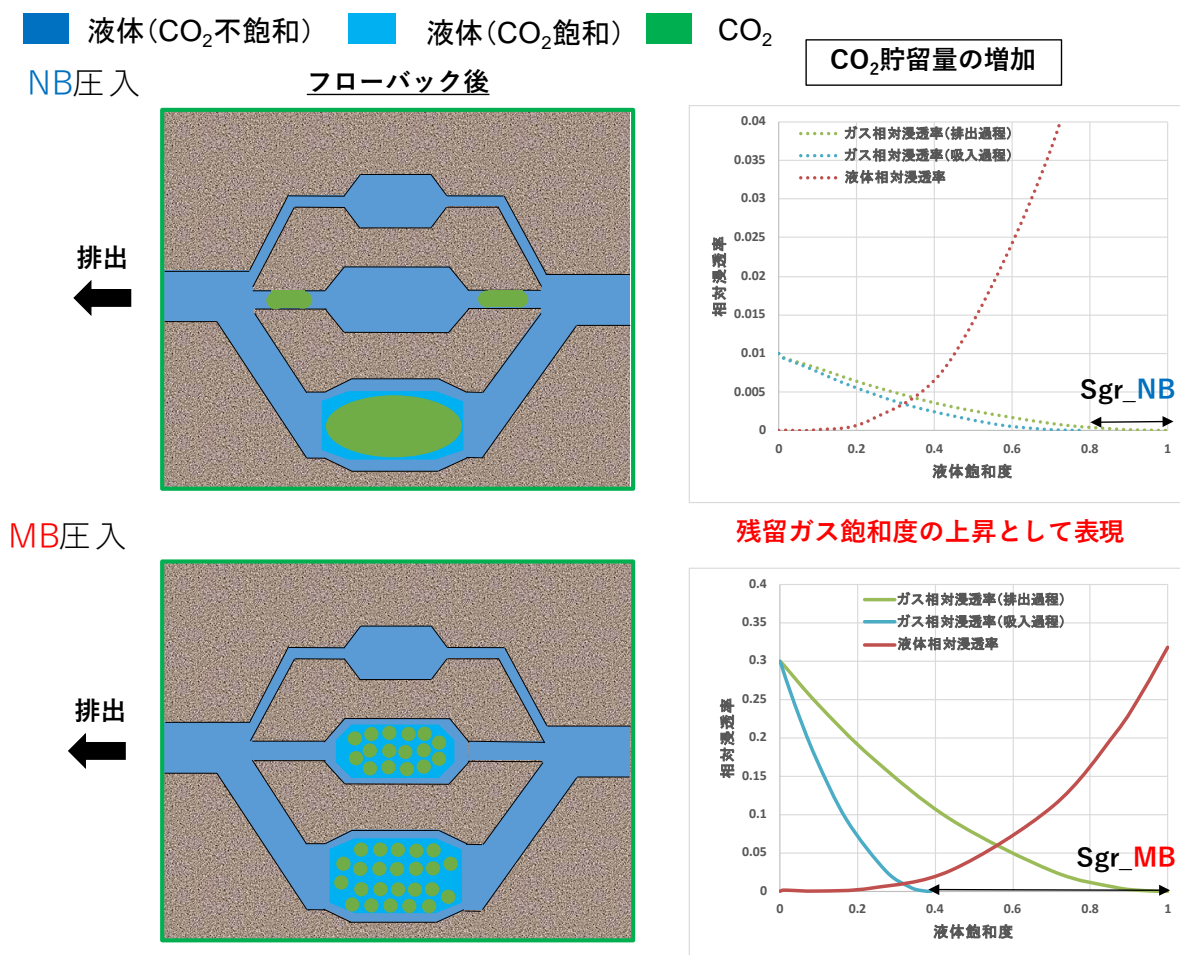


図 3.3.2-3 CO₂貯留メカニズムとシミュレーションでの表現 (上:NB、下:MB)

上記の条件で実証試験を模擬したフローシミュレーションを実施した。表3.3.2-1に実証試験での実績とシミュレーション結果を示す。圧入量は入力値であるため、実績とシミュレーションで同じだが出力値となる圧入圧力も実績に対して概ね表現できた。CO₂産出量も実績値と近い値となり、シミュレーションでのCO₂貯留率はMBで79.1%と実績の80.2%とほぼ一致し、NBでは70.8%と実績値の62.5%よりやや高いが、MBでより貯留率が高くなる結果が得られた。シミュレーション結果は実証試験での実績結果を概ね表現しており、上記の圧入・貯留メカニズムの考え方および表現方法は整合的であると言える。

表 3.3.2-1 実証試験およびシミュレーション結果

		圧入量		産出量			CO ₂ 貯留	
		CO ₂	水	CO ₂	水	油	量	率
		トン	L	トン	L	L	トン	%
MB 実証	実績	20.1	4,000	3.9	1,200	600	16.3	80.2
	Sim	20.1	4,000	4.2	771	669	16.0	79.1
NB 実証	実績	5.8	3,211	2.1	351	0	3.7	62.5
	Sim	5.8	3,211	1.7	302	9	4.1	70.8

3.3.3 まとめ

今年度のマイクロバブル CO₂ 圧入技術の適用による貯留率の向上にかかる研究に関し、国内油田の一部を使用した Huff'n Puff 法での現場試験において、本技術の実用化を促す成果が得られた。MB ツール開発の点では、スリックラインやワイヤーラインを使用した坑内への着脱作業、坑内設置後の安定した CO₂ 圧入の状況から着脱可能、フィルターを使用した MB 発生ツールとしてフィールドでも十分な機能を有することを確認した。フィールドでの MB 圧入効果の点では、MB での圧入レート・圧入指数上昇や CO₂ 貯留率の上昇が確認され、圧入・産出挙動から CO₂ 圧入性向上、CO₂ 貯留性向上、CO₂ 溶解促進の 3 点が示唆された。さらにシミュレーションを通じたメカニズム検討から、MB の場合には流動特性を示すパラメータにおいて、相対浸透率の上昇、残留ガス飽和度の上昇、毛細管圧力の低下で表現することにより、孔隙への浸入や掃攻効率向上等の孔隙内流動の差異を説明できることが示された。

第4章 CCS普及条件の整備、基準の整備

4.1 要約

本事業では、「大規模 CO₂ 圧入・貯留の安全管理技術の確立」や「大規模貯留層の有効圧入・利用技術の確立」等の技術開発とともに、「CCS 普及条件の整備、基準の整備」として、CO₂ 貯留安全管理プロトコル (IRP) の整備、技術事例集の作成、CCS の広報活動を通じた社会受容性向上策の検討を行った。本年度の研究成果は、「4.2 CO₂ 貯留安全管理プロトコル (IRP) の整備」、「4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS 技術事例集の作成、国際標準化 (ISO TC265) との連携」、「4.4 CCS の広報活動を通じた社会受容性向上策の検討」として取りまとめた。

本章ではまず「4.2 CO₂ 貯留安全管理プロトコル (IRP) の整備」として IRP の研究成果を紹介する。IRP は、CO₂ 貯留事業を遅滞または中断させる可能性がある事象、すなわち、インシデントが生じた際の対応手順をまとめることを目的としている。

本年度は、昨年度に整理したインシデントのレベル分けやその技術的および社会的な対応を再検討したうえで、日本版 IRP を策定した。また、ATLS の情報を IRP に取り込み、連携を図る方法について考察した。さらに、「地震による貯留サイトへの影響に対する疑問」と「貯留事業による誘発地震に対する疑問」に関する質疑応答集 (QA 集) を作成した。

次に、「4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS 技術事例集の作成、国際標準化 (ISO TC265) との連携」として技術事例集の成果を報告する。技術事例集は、国内の事業者が CO₂ 地中貯留事業実施の参考となるよう、事業工程別に、第1章「基本計画」、第2章「サイト選定」、第3章「サイト特性評価」、第4章「実施計画」、第5章「設計・建設」、第6章「操業・管理」、第7章「サイト閉鎖」、第8章「閉鎖後管理」としてまとめている。2018年度ドラフトに最新情報を追加し、第1章「基本設計」から第8章「閉鎖後管理」までの全体ドラフト版を作成した。また、技術事例集は海外展開を視野に入れていることから、CO₂ 地中貯留の国際規格の動向にも注目しており、その整合確認を行った。

最後に、「4.4 CCS の広報活動を通じた社会受容性向上策の検討」について報告する。主な内容は、

- 1) CCS の技術開発状況の社会への情報発信
- 2) PO およびリスクコミュニケーションに関わる研究開発
- 3) 研究成果の海外への紹介状況と展開方策検討

であり、1)については、テクニカルワークショップやフォーラムの開催、2)については、PO 教材やマニュアルの作成、社会受容性向上策の海外動向調査と我が国への適用要件分析、3)については、海外研究協力に係る契約や MOU の要件、研究成果のビジネス展開のためのライセンス契約の枠組みについて検討した。

4.2 CO₂貯留安全性管理プロトコルの整備

CO₂貯留事業の安全確保、緊急時対応に加え、CCSの社会受容性を確保するため、CO₂地中貯留事業を遅滞または中断させる可能性のある事象(インシデント: Incident)が生じた際のプロトコル(手順・計画)を明確にしておくことが必要となる。この対応をとりまとめ、我が国固有の特徴を盛り込んだ日本版CO₂貯留安全性管理プロトコル(IRP: Incident Response Protocol)および、それを補完する科学的根拠に基づいたQA集を作成する。本年度は、日本版IRPと市民の懸念のうち「地震による貯留サイトへの影響」と「貯留事業による誘発地震」に係るQA集を策定した。

4.2.1 日本版 IRP の作成

CO₂貯留安全管理プロトコル(IRP)は、CO₂地中貯留事業に関して、地元ステークホルダーの関心が高いと想定されるインシデントが生じた際のCCS事業者の技術的および社会的な対応手順を取りまとめたものである。したがって、CO₂地中貯留の安全性確保のための取り組みであるとともに、CCSプロジェクトの社会受容性の向上に寄与するものである。本事業では、海外サイトの事例の調査を通じて、日本でのCCS事業に特化したIRP(以下、日本版IRP)の構築を目指していた。

本年度は、昨年度に整理したインシデントのレベル分けやその技術的および社会的な対応を再検討したうえで、日本版IRPを策定した。

(1) インシデント対応の流れと対応レベル

日本版IRPの作成において採用したインシデント対応の流れを図4.2.1-1に示す。モニタリング値の異常検知や地震の発生、外部からのCO₂漏出の可能性の指摘といったインシデントが発生した場合、初動として、取得済みのモニタリングや試験のデータ、インシデントの発生直後に実施した緊急点検の結果等から状況の確認、または推定を行うことになる。この確認または推定された状況のうち、外部環境への影響がある場合、すなわちステークホルダーへの影響がある場合を「緊急事態」と定義し、3レベルに分類した。「インシデント」は事業者が「緊急事態」の発生を認識するきっかけとなる事象という位置づけとなっている。緊急事態の3レベルは、外部環境への影響の程度を尺度として、①影響が生じるおそれがない場合、②状況が悪化した場合に影響が生じるおそれがある場合、③影響が生じている、または生じるおそれがある場合としている。緊急事態に対する体制と対応は、これらのレベルごとに整理される。

緊急事態対応の2つの側面のうちの1つである技術的な対応においては、CO₂地中貯留事業で想定される異常が、貯留層の異常と坑井等の圧入設備の異常の2つであることから、貯留層、坑井等のどちらか、または両方の異常への対応、CO₂漏洩などの異常発生部分の近傍で生じる影響への対応、また、異常を生じさせた原因への対応が一連の対応として必要となる。この一連の対応に加えて、異常による近傍への影響が拡大

することによって、海洋や大気、地下水などのCO₂漏出、地表変形、誘発地震といった外部環境への影響が生じた場合には、外部影響に対する対応が必要となってくる。技術的対応において、よりの確な判断や決定を可能とするためには、外部有識者やコンサルタント会社などの知見を活用することも必要である。

緊急事態対応のもう一つの側面は社会的対応であり、外部とのコミュニケーションを意味する。その主な対象として、規制当局などの政府機関、自治体や警察・消防といった地域公的機関、一般市民、外部環境へ影響が及んだ場合にその影響を受ける近隣ステークホルダー、さらにはメディアが想定される。

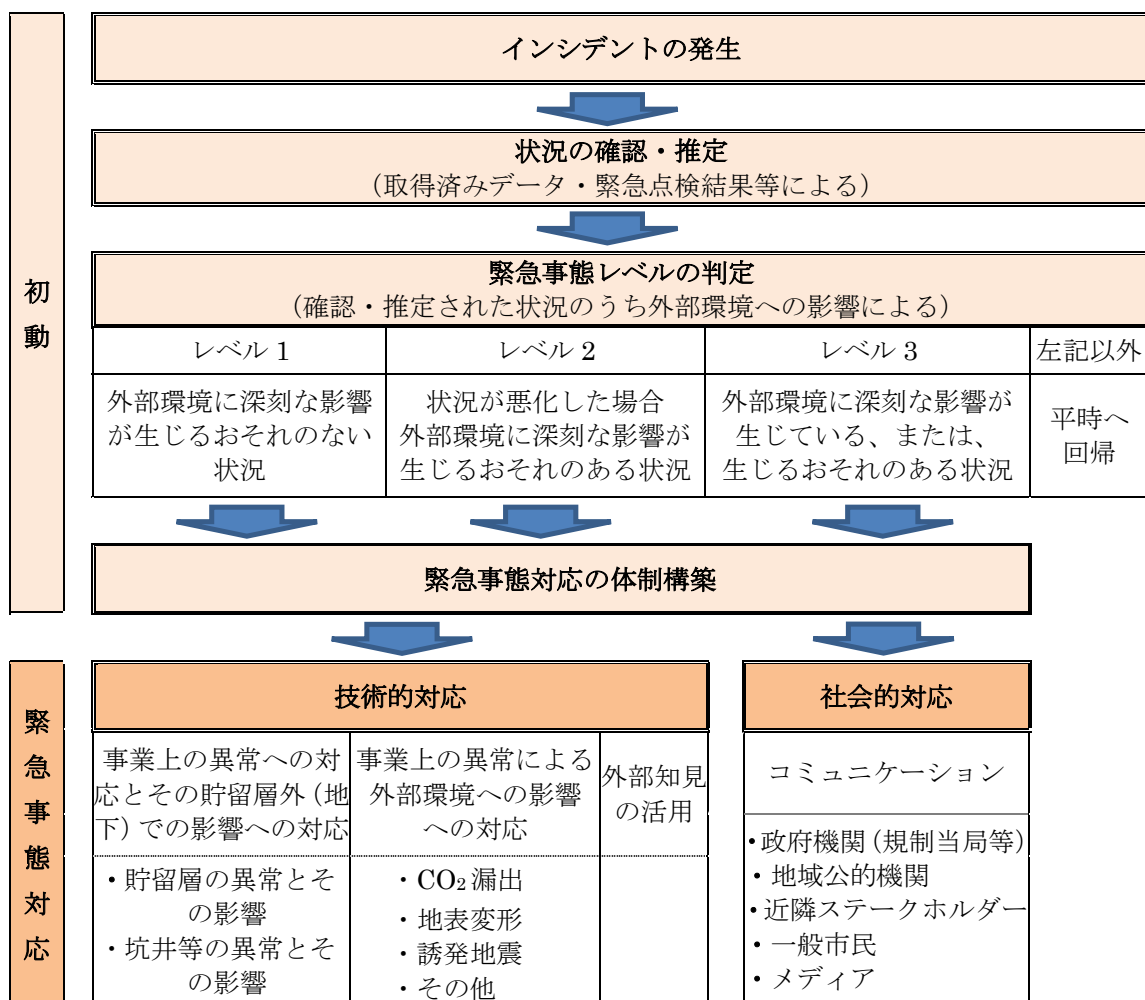


図4.2.1-1 インシデント対応の流れ

(2) 緊急事態に対する技術的対応と社会的対応

(1)で示した3段階の緊急事態レベルごとの対応体制と技術的対応および社会的対応を表4.2.1-1に示す。技術的対応のうち「外部知見の活用」以外の対応は、具体的な状況と緊急事態レベルとの対応と共に図4.2.1-2～3にまとめている。

体制、技術的対応、社会的対応とも、外部環境へのリスクが高いレベル2および3ではほぼ同様となるが、対応のレベルや頻度が異なってくる。

外部知見の活用以外の技術的な対応の一般的な整理を図4.2.1-2に示している。事業上の問題となる事象のプロセスを(i) 事業上の異常の発生要因となり得る事象の発生、(ii) 事業上の異常の発生、(iii) 事業上の異常による貯留層外（地下）での影響の発生、(iv) 事業上の異常による外部環境での影響の発生の4つに整理したうえで、フェーズの進展状況に応じたフェーズごとの対応をまとめている。問題事象がどのフェーズまで進行しているかが、緊急事態のレベル分けに対応している。例えば、(iv)のフェーズに達した場合がレベル3であり、(iii)のフェーズに達した場合がレベル2となる。これらの整理は、海防法で定められている「異常時監視」や「懸念時監視」の概念とも整合している。海防法では、海洋へのCO₂漏出が発生している、または発生するおそれがある場合は「異常時監視」が求められるが、ここではレベル3に分類されている。CO₂漏出が発生しているおそれがある場合は「懸念時監視」が求められ、ここでの分類は1段階低いレベル2として位置づけられている。

図4.2.1-3では、日本として重要なケースと言える大地震が発生した場合と、事業との因果関係が不明な、海洋での異常なCO₂濃度の検出や誘発地震発生の疑念が起きた場合などの緊急事態レベルと各フェーズでの技術的対応の基本的な整理を示している。いずれもレベル2となっており、「懸念時監視」との整合性が確保されている。

作成した日本版IRPでは、事業上の異常への対応とその貯留層外（地下）での影響への対応について、貯留層と坑井等のそれぞれに異常が発生した場合の対応例をまとめ、また、事業上の異常による外部環境への影響への対応として、CO₂漏出、地表変形、誘発地震を対象として対応例をまとめた。

表4.2.1-1 緊急事態における体制と技術的対応および社会的対応

緊急事態 レベル		レベル 1	レベル 2	レベル 3
		外部環境に深刻な影響が生じるおそれのない状況	状況が悪化した場合 外部環境に深刻な影響が生じるおそれのある状況	外部環境に深刻な影響が生じている、または生じるおそれのある状況
緊急事態対応の体制		担当部署中心	組織横断的	組織横断的
技術的 対応	事業上の異常への対応とその貯留層外（地下）での影響への対応	＜図 4.2.1-2～3 を参照＞		
	事業上の異常による外部環境への影響への対応	—	外部専門家の協力	外部専門家の協力・第3者独立評価
社会的 対応	外部知見の活用	—	外部専門家の協力	外部専門家の協力・第3者独立評価
	政府機関（規制当局等）	適宜報告	密な報告・適宜協議	緊密な連携
	地域公的機関	適宜報告	密な報告	緊密な連携
	近隣 ステークホルダー	通常時の情報発信	主要なステークホルダーとの双方向コミュニケーション	広範なステークホルダーとの双方向コミュニケーション
	一般市民	通常時の情報発信	速報と定期的な情報発信	速報と定期的な情報発信（頻回）
	メディア	受動的対応（問合せ対応中心）	能動的対応（地元メディア中心）	能動的対応（メディア全般）

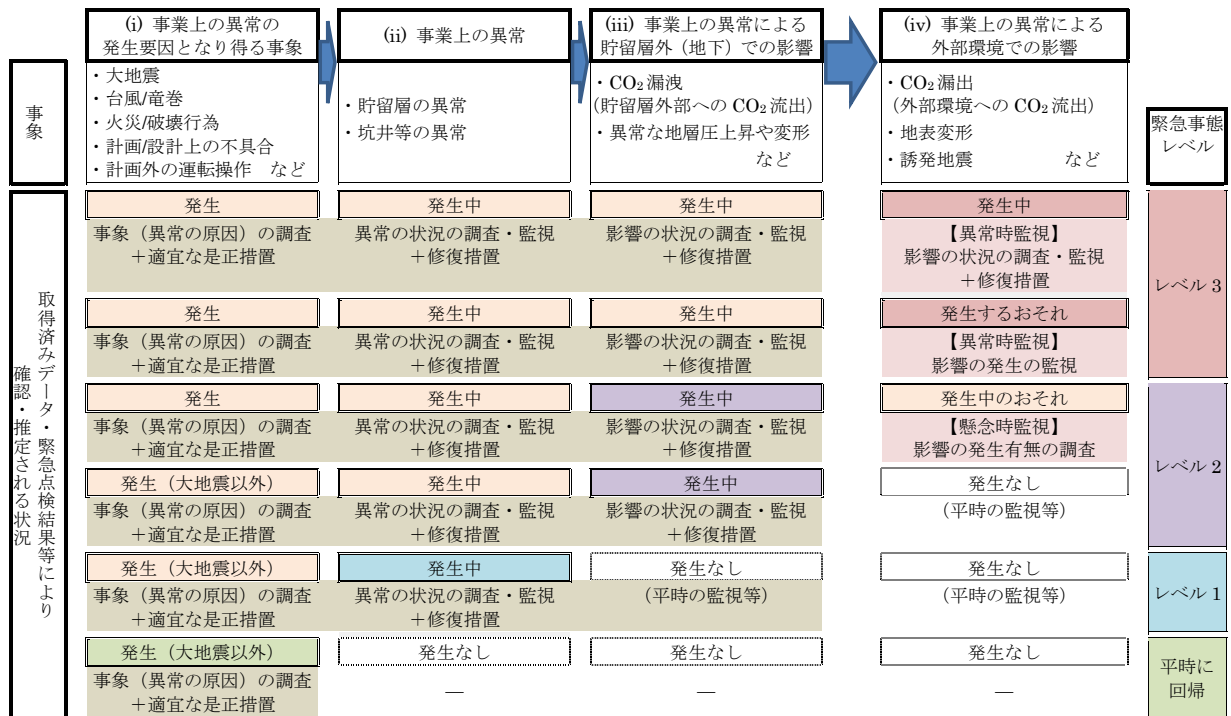


図4.2.1-2 各種状況の緊急事態レベルとその技術的対応（基本的な体系）

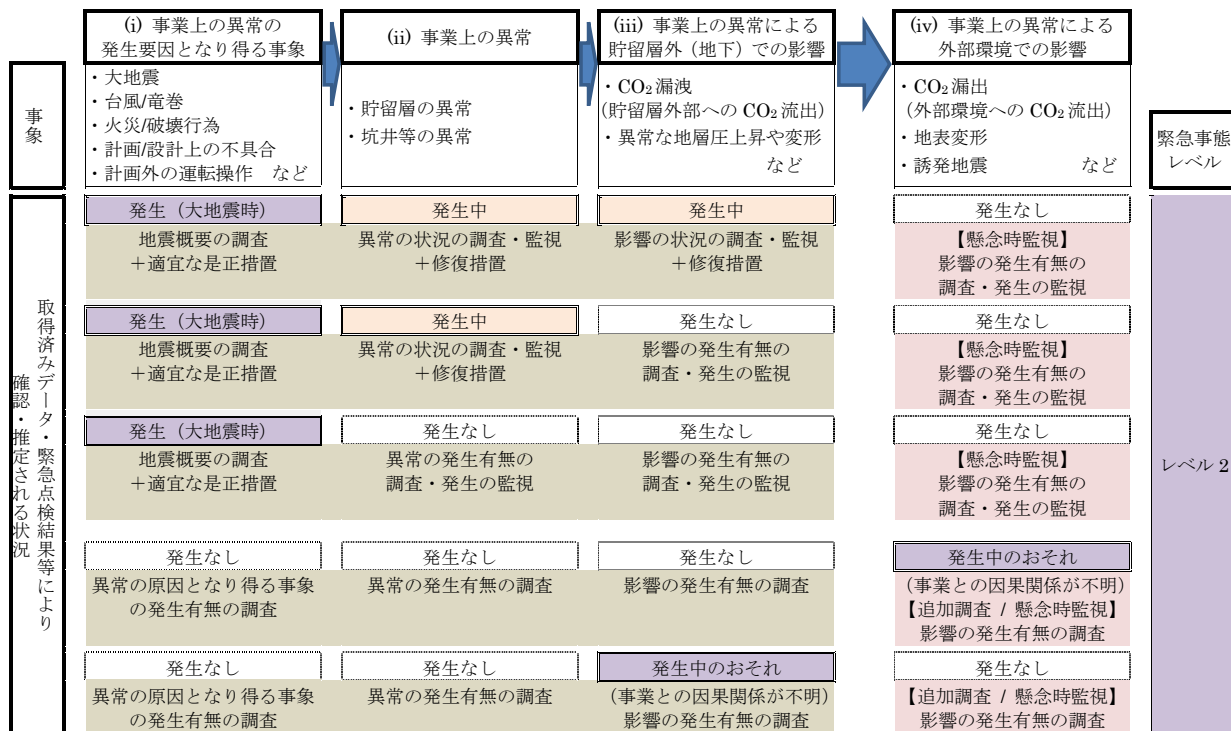


図4.2.1-3 各種状況の緊急事態レベルとその技術的対応
(大地震時と事業との因果関係が不明な場合)

4.2.2 ATLS 情報と IRP との連携

(1) ATLS からの地震・操業情報の取り込み

IRP の想定インシデントの中の地震情報と圧力等操業情報は ATLS から常時取得するようにする。特に、ATLS の信号が青以外となった場合には、IRP 担当者に緊急通知が届く仕組みが必要である。

(2) ATLS 信号と IRP 担当者の対応

ATLS の信号判定は、地震のマグニチュードなど、予め決められた基準により自動に行われる。当該結果や関連情報は、外部の専門家会議等で審議され、誘発地震の懸念評価、設備への影響評価、CCS 事業の再稼働の可否判定などを行う。

当該活動において、IRP 担当者は、ATLS 担当者と協力し、専門家会議の招集・運営などを担当するとともに、規制当局、監督当局、自治体への連絡および協議を行う。さらに、地元住民へ状況説明を行うとともに、住民の方々の意見、要望などを専門家会議へフィードバックし、再稼働の判断に資するようにする。

4.2.3 科学的根拠に基づいた QA 集（2019 年度版）の作成

科学的根拠に基づいた QA 集について、前年度までに以下の表に示す QA の枠組みを作成した。Q1~Q4 は、質問の大きな柱であり、A11 以下は、回答のポイントを示している。

表 4.2.3-1 QA 集の一覧

<p>Q1. 貯留層の安全性・健全性（地震関連以外）に対する疑問 A11: CO₂ 地中貯留の原理の説明（遮へい層やトラップメカニズムなど）の説明。 A12: 安全な CO₂ 地中貯留事業の実施を目的とした法規制（責任の所在を含む）のほか、ロンドン議定書や CCS 技術の国際標準（ISO）の説明。 A13: サイトの選定と性能調査による科学的に適した貯留サイトの選定プロセスの説明 A14: CO₂ 圧入オペレーションでの安全性確保、圧入した CO₂ プリュームの確認、圧入井などの CO₂ 貯留インフラの健全性の確認などを目的としたモニタリング実施の説明 A15: 数値シミュレーションによる CO₂ プリュームの挙動予測の説明。 A16: CCS における CO₂ 地中貯留の実績（Sleipner 等）のほか、EOR における CO₂ 圧入の実績（北米等）や CO₂ 地中貯留の類似事例（油ガスの埋蔵、天然ガス地下貯蔵など）の説明</p>
<p>Q2. 地震による貯留サイトへの影響に対する疑問 A21: 貯留サイトは、断層を避けて選定されることの説明 A22: 一般的な震源深さと貯留層の深度の差異を説明 A23: 地下の揺れが地上の揺れよりも小さいといった事実の説明 A24: 中越地震および中越沖地震による長岡サイトへの影響の説明</p>
<p>Q3. 貯留事業による誘発地震に対する疑問 A31: 誘発地震が発生したシェールガス開発などと CO₂ 圧入との違いの説明 A32: 誘発地震の発生を監視するためのモニタリング（孔底圧力や微小振動など）実施の説明</p>
<p>Q4. CO₂ 漏出時の人や生物、環境等への影響 A41: CO₂ の一般的な特性（不燃焼など）の説明 A42: （人体への影響）CO₂ の人体への影響が限定的であることを示す致死量などの説明 A43: （海洋環境・海洋生物への影響）CO₂ の海洋環境・海洋生物への影響が限定的であることを示す実験データや CO₂ の自然放出サイトでの生物の存在の説明 A44: （地下水への影響）CO₂ 貯留層の深度と利用される地下水として利用される深度が一般的に大きく異なること、貯留層内の地層水は一般的に利用価値が小さい塩水であることの証明</p>

本年度は、「地震による貯留サイトへの影響に対する疑問」と「貯留事業による誘発地震に対する疑問」に関する回答のポイント（A21～A24、および、A31～A32）について具体化を図った。以下、その内容を紹介する。

Q2:「地震による貯留サイトへの影響に対する疑問」

A21:貯留サイトは、断層を避けて選定されることの説明

内容: CCS を行う場合、事前に地震の調査や評価を行い、安定した地層を選定し、その地層が破壊されない条件を把握する¹。このような準備を行い、CO₂貯留が断層に影響を与えることのないように断層帯を避けて貯留サイトを選定する。一般的には、貯留地候補地点において、地下構造等に関するより詳細な調査を実施する。具体的には、地震探査、調査井の掘削、取得した地質データ解析・応力調査、環境影響・安全性評価検証に係る調査等である²。

A22:一般的な震源深さと貯留層の深度の差異を説明

内容: 一般的に日本で起こる地震には深さ数 km～20km 程度の「断層運動による陸域の浅い地震」、もしくは日本列島の下に沈み込んだ「海のプレート活動により引き起こされる地震」（深さ数 10 km～150km）が考えられている³。一方、CO₂圧入は断層を避けた地下約 1km～3km である。以下では、北海道胆振東部地震と苫小牧 CCS 実証試験の深さの差異を例としてあげる。

北海道胆振東部地震の例：

2018年9月6日3時7分に北海道胆振東部の深さ37kmでM6.7の地震が発生し、北海道厚真町で震度7、日本 CCS 調査（株）の実証試験センターで震度5弱（158gal）を観測した。一方、苫小牧 CCS 実証試験の圧入地点は深さ約1.0～1.2kmである。2018年10月に開催された「苫小牧 CCS 実証試験に係わる課題検討会」において、北海道胆振東部地震による影響や地震との関係などについて広く外部有識者の方々から意見をいただいたうえで、地震との関連性はないと結論づけられた⁴。

1 RITE、ホームページ、<http://www.rite.or.jp/>

2 経済産業省産業技術環境局環境調和産業・技術室、2015、二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業、第一回平成27年度二酸化炭素回収・貯留分野 評価検討会
https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H27/150421_co2/co2_siryu6.pdf

3 政府地震調査研究推進本部、2014、「地震がわかる」

https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/wakaru_shiryo2.pdf

4 日本 CCS 株式会社[JCCS]、2018、「北海道胆振東部地震の CO₂貯留層への影響等に関する検討報告書」

A23:地震時の地下の揺れが地上の揺れよりも小さいといった事実の説明

内容: 揺れの大きさは地層によって異なるが、一般的に、規模の大きな地震の時に地表と地下の揺れの大きさを比べると、地下では半分程度である⁵。地表付近は地層が軟らかいため地中深くと比較して振幅が大きくなる⁶。

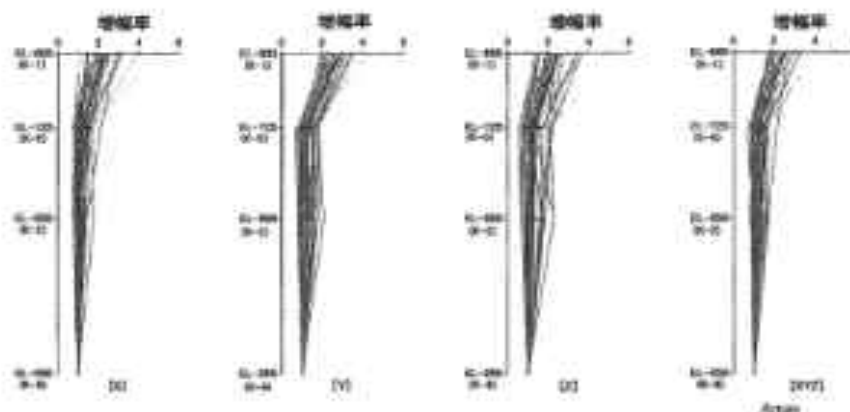


図 4.2.3-1 鉛直アレー観測における最大加速度の増幅特性 (JAEA ホームページ)

A24:中越地震および中越沖地震による長岡サイトへの影響の説明

内容: RITE が行った長岡プロジェクト (図 4.2.2-2) では、新潟県長岡市郊外において 1 万 t の CO₂ を地下 1,100m の帯水層に 20-40t/日で圧入した。貯留した CO₂ の観測に成功し、そのデータから CO₂ は 1,000 年間安全に貯留されることがシミュレーションによって予測された。この実証試験中および終了後に約 20km 離れた地点で新潟県中越地震 (M6.8/2004 年) と新潟県中越沖地震 (M6.8/2007 年) が発生したが、CO₂ は安全に貯留されていることが観測されている。弾性波探査の結果、CO₂ を貯留している帯水層は健全で CO₂ も想定された範囲内に留まっていることが確認された。また井戸に沿って調査 (セメントボンド検層) を行った結果、CO₂ の漏洩が生じていないことも確認された。圧入終了から 5 年 9 か月後に行われた坑井間 (OB-2 と OB-3) 弾性波トモグラフィ測定結果より、CO₂ が安全に貯留されていることが確認されている (図 4.2.2-3)⁷。以上から、中越地震および中越沖地震による長岡サイトへの影響はないと示されている。

5 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) .地質環境の長期安定性に関する研究、東濃地科学センター、https://www.jaea.go.jp/04/tono/antei/jisin_010.html

6 政府地震調査研究推進本部、2014、「地震がわかる」

https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/wakaru_shiryo2.pdf

7 RITE、ホームページ、<http://www.rite.or.jp/>

中越地震および中越沖地震と長岡サイトの位置

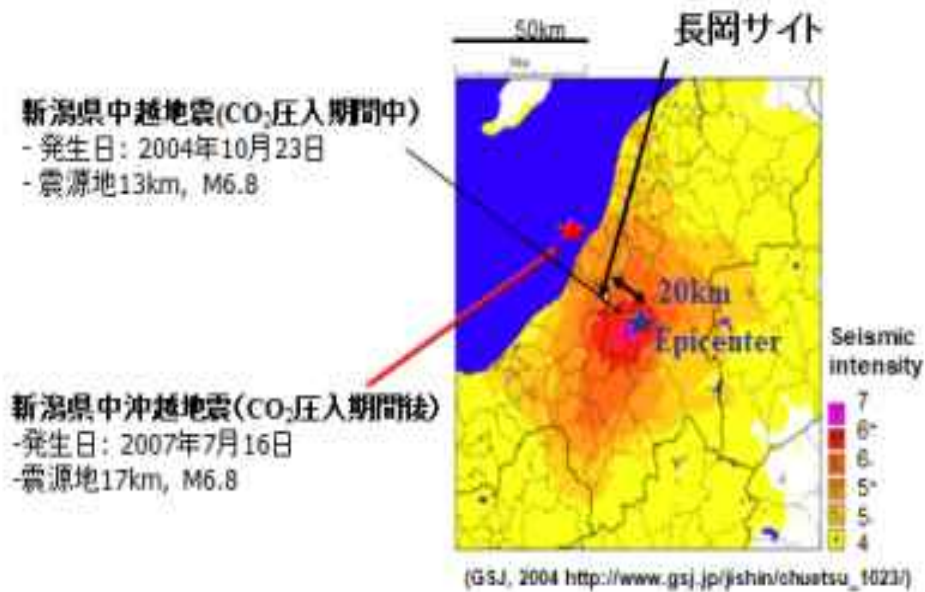


図 4.2.3-2 中越地震および中越沖地震と長岡サイトの位置 (CO₂ 地中貯留試験)
(METI, 2012)

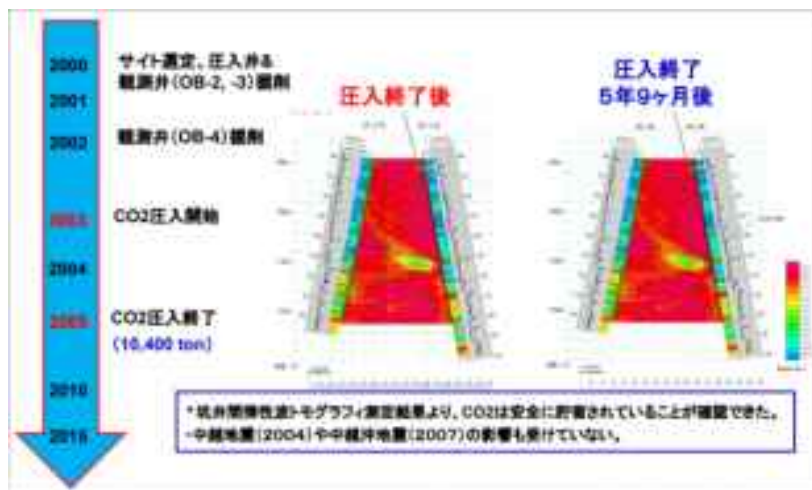


図 4.2.3-3 長岡サイトの CO₂ 貯留状況 (薛, 2012)

Q3:「貯留事業による誘発地震に対する疑問」

A31:誘発地震が発生したシェールガス開発などと CO₂ 圧入との違いの説明

内容: CO₂ 地下貯留やシェールガスフラッキングは、地下深部に高压流体を圧入する必要があるため、圧力による亀裂の発生や断層の再活動が地震を誘発する恐れもあるといわれている。CO₂ 貯留とシェールガス開発の圧入方法、適地、注入

圧は異なる。CO₂ 貯留はシェールガス開発に比べ大きな誘発地震は観測されておらず、潜在的リスクが少ない⁸。

シェールガスの圧入方法では、シェールガス生産を目的としたシェールガスフラッキング（水圧破砕法）を用い、坑井内に化学物質を含む水を高圧注入して地層に人工的に割れ目を作り、地下資源を採取するための流路を確保する手法である⁹。水圧破砕では大きな地震は起きておらず、排水圧入で（基盤岩に近い、基盤岩中の道の断層）で大きい地震が発生している。圧入適地は限定的であり、注入圧力は約 50～100MPa(約 500～1,000 気圧)で流体量が約 3,000～10,000m³程である¹⁰。

一方、CO₂ 貯留はシェールガス開発に比べ、より柔軟に断層を避けた安全な圧入事業を行うことが可能である。また貯留方法は油田やガス田と同じような井戸を地下深部の貯留層に達するまで掘削し、貯留層内に存在している地下水やガス等の天然の流体よりも高い圧力に加圧して注入する。CO₂ 貯留の圧力は約 10～30MPa となっており、CO₂ 貯留はシェールガスに比べ注入圧力が非常に小さく、その分断層への影響が少ない¹¹。

近年、地熱開発・シェールガス開発・廃水注入など地下貯留層に流体を圧入したことに起因すると見られる誘発地震が急増し、事業が中止された事例もある（例：オクラホマ州、テキサス州）が¹²、CO₂ 貯留ではシェールガス開発のような誘発地震は観測されていない¹³。また、カナダ、アルバータ州サスカチエワンで実施された Quest CCS プロジェクトの誘発地震のモニタリング調査では、CO₂ 圧入による誘発地震の潜在的リスクが少なく、貯蔵された CO₂ への影響もないと示している¹⁴。

A32:誘発地震の発生を監視するためのモニタリング(孔底圧力や微小振動など)実施の説明

内容： 前述したとおり、CCS 圧入ではこれまでに大きな誘発地震は発生していないが、

8 Petroleum Technology Research Centre[PTRC]、2015、「CO₂を地中に貯留すると、何が起こるか：IEAGHG Weyburn-Midale CO₂ モニタリング・貯留プロジェクトについての Q&A」、グローバル CCS インスティテュート

9電力土木技術協会、ホームページ、<http://www.jepoc.or.jp/>

10伊原賢、2010、「シェールガスのインパクト」石油・天然ガスレビューアナリシス、Vol.44 No.3

11 Petroleum Technology Research Centre[PTRC]、2015、「CO₂ を地中に貯留すると、何が起こるか：IEAGHG Weyburn-Midale CO₂ モニタリング・貯留プロジェクトについての Q&A」。グローバル CCS インスティテュート

12 伊原賢、2010、「シェールガスのインパクト」石油・天然ガスレビューアナリシス、Vol.44 No.3；
Deichmann, N. and D. Giardini 2009. Earthquakes induced by the stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland), Seismological Research Letters, 80, 5, 784-798, doi: 10.1785/gssrl.80.5.784

13 日本 CCS 株式会社[JCCS]、2018、「北海道胆振東部地震の CO₂ 貯留層への影響等に関する検討報告書」

14 O'Brien, S., Halladay, A., Bacci, O.V., 2018. Quest CCS facility: Microseismic Observations. 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. 21st-25th October 2018, Melbourne, Australia

万が一に備え、誘発地震を監視するためのモニタリングを行っている。CO₂ 貯留では、たとえば微小振動観測に基づく CO₂ 圧入管理手法 (ATLS) など様々なモニタリング手法および技術の改善、最適化が検討されている¹⁵。

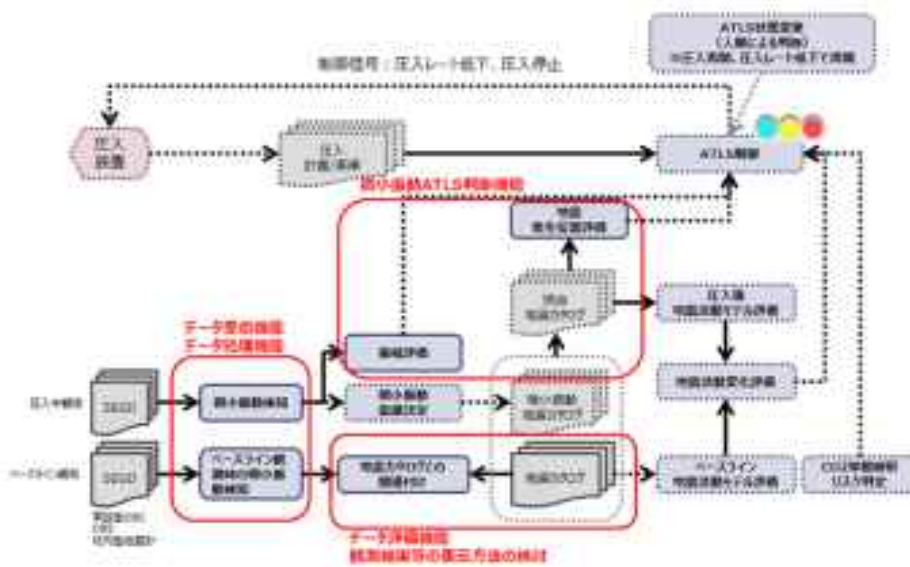


図 4.2.3-4 ATLS の概要 (RITE ホームページ)

なお、それぞれの QA 詳細は別途 QA 集にまとめた。

4.2.4 まとめ

本年度は、昨年度に整理したインシデントのレベル分けやその技術的および社会的な対応を再検討したうえで、日本版IRPを策定した。また、ATLSの情報をIRPに取り込み、連携を図る方法について考察した。

また、「地震による貯留サイトへの影響に対する疑問」と「貯留事業による誘発地震に対する疑問」に関する QA 集を作成した。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) : 地質環境の長期安定性に関する研究, 東濃地科学センター
https://www.jaea.go.jp/04/tono/antei/jisin_010.html (2020年3月アクセス)
- 2) 伊原賢 (2010) : シェールガスのインパクト, 石油・天然ガスレビューアナリシス, Vol.44 No.3
- 3) 政府地震調査研究推進本部 (2014) : 地震がわかる

15 METI、経済産業省産業技術環境局環境調和産業・技術室、2015、二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業、第一回平成27年度二酸化炭素回収・貯留分野 評価検討会
https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H27/150421_co2/co2_siryoku6.pdf

https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/wakaru_shiryo2.pdf
(2020年3月アクセス)

- 4) 薛自求 (2012) : CO₂ 地中貯留技術の実用化に向けての課題と RITE の取組み, 革新的環境技術シンポジウム 2012
- 5) 電力土木技術協会: ホームページ, <http://www.jepoc.or.jp/> (2020年3月アクセス)
- 6) Deichmann, N. and D. Giardini(2009) : Earthquakes induced by the stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland), *Seismological Research Letters*, 80(5):784-798, doi: 10.1785/gssrl.80.5.784
- 7) 日本 CCS 株式会社 (2017) : CCS 実証プロジェクト、
<http://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2012/12/CCS%E5%AE%9F%E8%A8%BC%E3%83%97%E3%83%AD%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%82%AF%E3%83%881.pdf> (2020年3月アクセス)
- 8) 日本 CCS 株式会社 (2018) : 北海道胆振東部地震の CO₂ 貯留層への影響等に関する検討報告書
- 9) Petroleum Technology Research Centre[PTRC] (2015) : CO₂ を地中に貯留すると、何が起こるか IEAGHG Weyburn-Midale CO₂ モニタリング・貯留プロジェクトについての Q&A, グローバル CCS インスティテュート
- 10) O'Brien, S., Halladay, A., Bacci, O, V. (2018) : Quest CCS facility: Microseismic Observations. 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. 21st-25th October 2018, Melbourne, Australia
- 11) RITE (2006) : CO₂ 貯留テクノロジー, 工業調査会
- 12) RITE : ホームページ, <http://www.rite.or.jp/> (2020年3月アクセス)
- 13) METI [経済産業省] (2012) : Update on Nagaoka CO₂ Storage Project, <https://www.cslforum.org/cslf/sites/default/files/documents/perth2012/Hachiyama-NagaokaProjectUpdate-PGTG-Perth1012.pdf> (2020年3月アクセス)
- 14) 経済産業省産業技術環境局環境調和産業・技術室 (2015) : 二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業, 第一回平成 27 年度二酸化炭素回収・貯留分野 評価検討会
https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H27/150421_co2/co2_siryu6.pdf (2020年3月アクセス)

4.3 苫小牧実証試験サイトや海外プロジェクトの成果や情報を用いた、CCS 技術事例集の作成、国際標準化（ISO TC265）との連携

CCSの事業化の促進に向けては、多くのCCS関連情報を取りまとめ、CCS事業の基本計画から閉鎖後の管理に係る技術事例およびコスト評価について取りまとめた「CCS技術事例集」を作成することが重要となる。また、国内ではCCS関連法規が未整備であるため、「CCS技術事例集」の内容と、CCSの国際規格 ISO/TC265の議論において、整合性を確保することが必要である。このため、国際規格とも整合をとりつつ、「CCS技術事例集」を作成する。作成にあたっては、学識経験者や産業界の意見を反映させるため、CCS技術事例集検討ワーキンググループにより、助言・指導を受けつつ進める。

4.3.1 CCS 技術事例集（全体ドラフト編集の完了）

(1) 概要

この技術事例集は、CCS 全体工程のうちの輸送の一部と、貯留サイトにおいて CO₂ を貯留層に圧入し、操業を終えた後、坑井を封鎖してサイトを閉鎖し、さらには閉鎖後の管理に至るまでの全工程を対象として、基本計画、サイト選定、サイト特性評価、実施計画、設計建設、操業管理、サイト閉鎖、閉鎖後管理に至るまでの 8 段階に分けている。そして、それぞれを、第 1 章から第 8 章までに対応させて「第 1 章 基本計画」、「第 2 章 サイト選定」、「第 3 章 サイト特性評価」、「第 4 章 実施計画」、「第 5 章 設計・建設」、「第 6 章 操業・管理」、「第 7 章 サイト閉鎖」、「第 8 章 閉鎖後管理」として、構成されている。

2015 年度までに「第 1 章 基本計画」から「第 4 章 実施計画」までのドラフトを作成し、2018 年度までに「第 5 章 設計建設」から「第 8 章 閉鎖後管理」までのドラフトを作成した。今年度は第 1 章から第 4 章について最新情報を取り込んで追補版として作成するとともに、第 5 章から第 8 章までを結合し、第 1 章から第 8 章までの統合版ドラフトを作成した。

また、CCS 事業の推進において CCS 全体システムとしてのコスト評価も必要不可欠であることから、CO₂ の大規模発生源となる火力発電を対象とした CCS 全体システムのコスト計算の標準事例の提示を試みた。

(2) 基本計画

ここでは、CCS 事業に対する理解を深めるため、上記の 8 フェーズについて各概要を説明するとともに、過去および現在の CO₂ 地中貯留に関する国内外の事例を紹介し、将来の CCS 事業化に資することを目的としている。

- ・基本計画……CO₂ 事業の概要を示す基本構想
- ・サイト選定……基本計画に適合する貯留サイトの抽出、ランキング、選定
- ・特性評価……選定サイトの CO₂ 貯留能力等の把握、社会受容性等の検討

- ・実施計画……設計建設、操業管理、サイト閉鎖、閉鎖後管理の各工程における計画の検討
- ・設計建設……サイト規模に対応した各種施設の設計、建設、試運転
- ・操業管理……圧入管理、設備の維持管理、モニタリング
- ・サイト閉鎖……坑井の健全性検証、封鎖、閉鎖後管理計画の策定
- ・閉鎖後管……モニタリング、安全な貯留の検証

なお、本事例集を作成するにあたり、国内での知見、情報源として、2000年度から2007年度に亘って実施された長岡サイトでのCO₂圧入実証試験の概要、および2009年に経済産業省「二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会」がまとめた「CCS実証事業の安全な実施にあたって」（経済産業省産業技術環境局，2009）を参考とした。なお、海外においてはノルウェーのSleipnerプロジェクトをはじめ、近年に商業規模として進められているカナダのQuest、Boundary Dam Carbonプロジェクト、米国のDecaturといった年間100万トン以上のCO₂を圧入するという商用プロジェクトが進められており、これらの成果や、その他多くのCCS関連のマニュアルやガイドライン等を参考にしている。

① 基本計画の目的と構成要素

基本計画の目的は、事業実施者（共同実施者、出資者を含む）に対し、想定される事業の基本的な全体像を示し、事業に対する理解を得ることである。したがって、基本計画は、当該CO₂地中貯留事業の概要を明示した上で、事業を成功させるために基本計画以降のフェーズでの検討・作業やスケジュールに関する基本的な考え方を述べる。また、事業実施の可否を決定する要因として、コスト（経済性）、リスク、不確実性、社会受容性についても触れており、入門編的な位置づけを示している。

NETL(2017b)によるCO₂地中貯留事業を決定づける基本的要素は以下の通りである。

- ・貯留サイトが地中貯留にとって満足できる地質条件であり、事業者がそこで地中貯留を実施できる技術的能力を有すること
- ・CO₂地中貯留を実施するための資金が確保されていること
- ・CO₂地中貯留事業に対して地域住民を含む利害関係者の賛同・支持が得られること

このような要素を貯留事業当初に明らかにしつつ、システムティックに事業進捗が可能になるようにするための指針が基本計画である。

地中貯留事業のライフサイクルは非常に長く、数十年に達することから、コスト、リスク対応、社会受容性等を視野にいれ、長期的視点に立って事業を遂行する必要がある、事業全体にわたっての指針を決定する基本計画が持つ意味は非常に大きい。

② 基本計画の内容

基本計画は、貯留サイトの選定に先立つ、CO₂貯留事業の最初の重要なフェーズであり、フェーズの進展に伴い、改訂されるべきものである。基本計画策定において、事業者は事業の展望、範囲、事業全体に対するマネジメント方針を確立する。さらに次のフェーズに移行するガイドとしての技術的、経済的基準も確立しなければならない (NETL,2017a)。基本計画で検討、立案、確立されるべき内容は以下の通りである。

- ・ CO₂地中貯留事業の全体像を明らかにする。
- ・ CO₂源と貯留サイトのおおよその範囲、目標とする貯留量、圧入レートを確認する。
- ・ CO₂源の位置、貯留量、供給レート、目標とする圧入レートを確認する。
- ・ 基本的圧入施設、CO₂輸送方法、輸送ルートなどに関して机上検討を行う。
- ・ サイト選定から FEED を経て FID に至る各フェーズでの評価方針と基準を確立する。
- ・ 時間軸とともに事業スケジュールを策定する。
- ・ 事業の不確実性、CO₂圧入、貯留に係るリスクを確認する。
- ・ ステークホルダーの確認を行い、環境的、社会的な問題点を把握する。
- ・ CO₂地中貯留事業に関する規制面の問題点、許認可手続きを把握する。
- ・ 経済性に関する目標値を設定し、基本的経済検討を行う。

基本計画は CO₂地中貯留事業の全体計画であり、排出源の位置、圧入想定量や事業概要、基本的な考え方を明示し、かつ、事業を成功させるためにそれ以降のフェーズでどのような検討、作業をどのようなスケジュールで実施するかを記載するものである。事業者や、出資者にとって重要事項となる事業実施の可否を決定する要因とその決定のタイミングも基本計画書にまとめている。また、早期に開始しなければならない PO (Public Outreach=社会的理解促進) の活動方針を決定し、CO₂地中貯留の認知度向上に努める。それらは基本計画書としてまとめられ、事業者側関係者、出資者に明らかにされるべきものである。

(3) 第2章 サイト選定

① 概要

サイト選定フェーズは、基本計画の枠組みの中で、長期的に安全性を確保し、かつ経済性を満たして圧入、貯留することが可能なサイト候補を選定する。CO₂貯留サイトとしての地質的要件は多岐にわたるが、地理的要件、社会的要件も含めて適切に選定されたサイトでは、貯留量、貯留レートの達成に係る不確実性、CO₂の漏洩と誘発地震といったリスクの軽減、更には経済性も含めた事業の不確実性の根本的な軽減が可能である。したがって、このサイト選定から特性評価に至る一連の作業は、CO₂地中貯留事業の成功にとって極めて重要なプロセスである。

貯留サイトは堆積盆地内に限られるが、堆積盆地は広大であり、地質状況も場所によって大きく異なるため、1つの堆積盆地内でも CO₂地中貯留にとって好ましい地域とそうでは

ない地域がある。既存データのコンパイル、あるいは既存広域地質評価レポートを利用し、CO₂地中貯留にとって望ましい条件を備えた地域、あるいはその可能性が高い地域を有望地域として抽出する広域評価を先に行う。その後、既存データを評価し、その有望地域内で、貯留サイトとしての条件を備えた地点をいくつか選び出し、その中から各種要素を比較し、あるいはランキングによってサイト候補を1つあるいは複数選定する。

② 広域評価

サイト選定における初期の段階は、広域的に地質条件などを評価し、堆積盆地の中のどの部分がサイト選定の対象になるかを決定する。いくつかのCO₂地中貯留ガイドラインでは、貯留サイト選定前のスクリーニングと位置づけている。この段階では、多くの地域で無償、ないし有償で入手できる広域地質評価レポートを利用することが、効率的、かつ経済的である。その精度や対象範囲は様々であるが、世界の多くの国、地域でこのような広域地質評価に関するレポートが入手可能である。広域地質レポートは少なくとも層序、岩相、各層準の地下構造、各層準の厚さの変化などを示す図面によって構成されているものが一般的である。このような広域地質評価レポートが入手できない場合は、事業者が坑井データや弾性波探査データなどの既存資料を収集し、以下の点について検討することができる広域的資料を作成する必要がある。

- ・ 層序、岩相
- ・ 貯留層、遮蔽層を含む各層準の厚さと広がり
- ・ 貯留層、遮蔽層の深度と構造
- ・ トラップ

③ 広域評価事例

広域評価では、多様な地質資料が必要となるが、CO₂地中貯留事業のためにこれらの広域的資料を作り始める、という状況はあまり現実的とは言い難い。各国の公的地質調査機関、例えば米国の場合は U.S. Geological Survey や各州の地質調査所、オーストラリアの場合は Geoscience Australia などの公的機関が公表している地質情報を利用することになる。広域評価の事例としてオーストラリア、Vlaming 亜堆積盆地の評価例を紹介する（図 4.3.1-1）。石油天然ガスの探鉱、開発で得られた広範なデータを解釈、評価し、本亜盆地中の CO₂ 地中貯留範囲を抽出し、一般公開している（Borissova et al., 2015）。

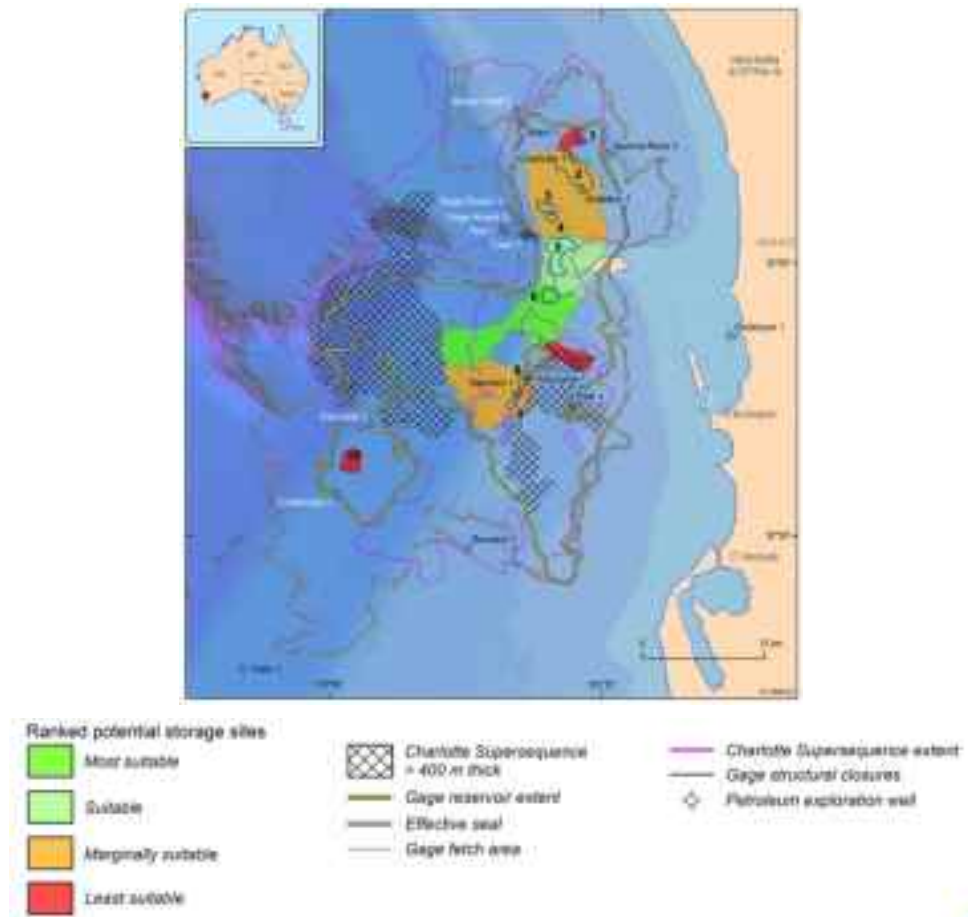


図 4.3.1-1 地質モデリングと CO₂ 移動経路分析による適合性評価に基づく
Vlaming 亜堆積盆地における貯留適地 (Borissova et al., 2015)

④ CO₂ 貯留サイトの選定

CO₂ 地中貯留サイト選定では、広域評価によって得られた対象地域の中から、CO₂ 貯留システムを構成する以下の要素が揃っている場所を適切な貯留サイトとして選定する。

- ・ CO₂ を安全に圧入、貯留できる貯留層が存在する
- ・ CO₂ の上方移動を防ぐ遮蔽層が存在する
- ・ CO₂ の長期地下滞留を可能にするトラップが存在する

ここでは、原則として新規データ取得を伴わない段階と定義しており、下記に示す既存の資料を駆使して、上記 CO₂ 貯留システムが最も有効に機能し、基本計画で定められた想定 CO₂ 貯留量を安全に貯留できるサイトを複数抽出し、さらに比較評価ないしランキングを行うことによりサイト候補を選定する。

- ・ 石油天然ガス生産記録
- ・ 坑井記録（掘削記録、物理検層、リークオフテスト、生産テスト、圧入テスト）
- ・ ラボ試験（コア鉱物分析、コア孔隙率、コア浸透率、コア毛細圧、スレッショルドなど）
- ・ 物理探査（弾性波探査）

a) サイト選定のための地質的評価項目

ア) 貯留層と遮蔽層

貯留層の厚さ、広がりに関しては、圧入量、貯留層の物性にもよるが、少なくともグロスで数 10m 以上、ネットで 10m 以上の厚さは必要と思われる。貯留層が厚ければ、CO₂ が貯留層内を垂直方向に上昇する間に、より多くの CO₂ が残留することが期待される。ネット層厚は、近傍に坑井が掘削されていない場合、把握するのが困難である。広がりに関しては当然、平面的広がりが大きい方が望ましい。CO₂ 地中貯留では、トラッピングつまり CO₂ を地下に封じ込めるメカニズムが複合的に機能することで、CO₂ は貯留層に確実に貯留されるが、どのようなトラップでも、良好な遮蔽層の存在が不可欠である。遮蔽層に関しては、複数層準に発達すること、良好な水平的連続性が重要である。

イ) 貯留可能量

貯留可能量の算定には、大きく「静的評価」と「動的評価」方法があり、「動的評価」とは、対象サイトの地質モデルと CO₂ の挙動に関するシミュレーションを基に貯留可能量を算定する手法である。しかし、サイト選定フェーズにおける貯留可能量は、使用できる地質的情報の量と質が限定されており、十分な精度を有する地質モデル構築やシミュレーション・パラメータ設定が困難であることから、「静的評価」つまり、容積法といわれる手法を用いることが多い。

ロ) トラップと構造的位置

圧入された CO₂ が貯留層中を上位方向に向かって移動し、最終的に構造的、層位的にトラップされると安全性が高まることから、構造的、層位的トラップの存在が望ましい。移動する間に残留、溶解、鉱物化が進行することから、CO₂ 貯留の安全性向上が期待できる。地質構造的には、地層傾斜が緩く、CO₂ の以降経路が長いことが望ましい。

エ) 断層

貯留サイトの想定 CO₂ プルームの範囲内や、その周囲に断層があり、貯留層、遮蔽層を切っている場合、漏洩/漏出のリスク評価が重要となる。また、誘発地震、活断層、断層の再活動の検討も必要であり、可能な限りサイト候補は断層近傍を避けることが望ましい。

b) サイト選定のための非地質的評価項目

経済性と事業実施可能性を評価するために、排出源からの距離、圧入サイトの立地条件、社会受容性、歴史的背景、気候/気象、自然災害、産業構造、社会基盤、人口動態、各種既存施設) などの状況を調査する必要がある。また、石油天然ガス田がサイト近傍に存在する場合は、既存地質データが豊富で、高い精度地質評価が可能となり、関連インフラが CO₂ 地中貯留事業に再利用できコスト的に有利となる反面、既存の坑井による漏洩/漏出リスクが増大する、という点に注意が必要である。既存坑井が利用できる場合は、大きなコスト削減に結びつくが、その場合は、坑井健全性の評価を十分な慎重さをもって実施しなければならない。ZEP (2011) は、6 ケースに対して地中貯留コスト (CO₂ 1 トン当たり

のコスト)のレンジを示している(図 4.3.1-2)。CO₂地中貯留のコストを左右する要素は、サイトの立地条件とタイプ(入手可能情報、利用可能なインフラ)と貯留層の貯留能力と質であり、一般に以下のような傾向がある(ZEP,2011)。

- ・サイトが陸域のほうが海域より低コスト
- ・深部塩水層より枯渇油ガス田のほうが低コスト

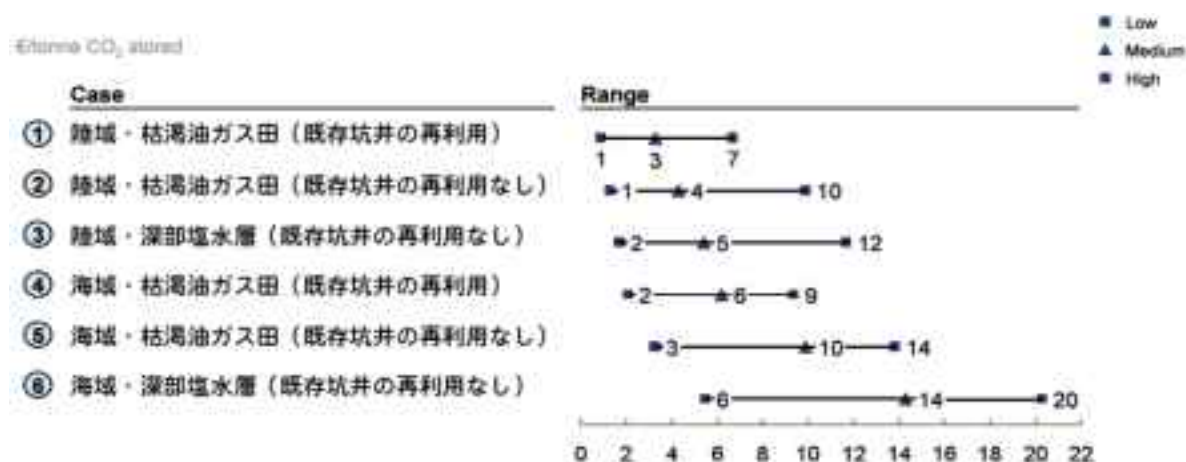


図 4.3.1-2 6 ケースの CO₂ 1 トン当たりの地中貯留コスト(ZEP, 2011)

⑤ 法律、規制

CO₂地中貯留に係る法律や規制の整備状況は国や州、地域によって多様である。オーストラリアやノルウェーのCO₂地中貯留関連法は、長年施行されてきた従来の石油天然ガス関係法に組み込まれる形で成り立っており、地下を取り扱う事業としての両事業の整合性が特徴的である。一方、未だCO₂地中貯留に関係する法律、規制が整備されていない国も多く、CO₂地中貯留事業の不確実性の要因となり得る点でもあり、サイト選定にあたっては、サイト候補地における法律、規制の面での事業へのインパクトを長いライフサイクルを考慮して評価する必要がある。

(4) 第3章 サイト特性評価

① 概要

この章では、サイト選定フェーズで選定された候補サイトの特性評価を実施し、CO₂地中貯留事業の目的・目標に適合するサイトであるか否かを、貯留能力(CO₂貯留量、圧入性等)、安全性(遮蔽性、連続性、断層等)、実現性(技術面、地域社会の受容等)等の観点から評価する過程、手法を示している。

サイト特性に関する情報の不備や欠落は、貯留事業に重大な影響を与える場合もあるため、細心の注意を払ってサイト特性を評価する必要がある。

② サイト特性評価

サイトの特性評価では「貯留能力評価」、「リスク管理」、および「自然環境ならびに

社会経済的要件の考察」の3項目の評価について記載する。

a) 貯留能力評価

想定される量のCO₂を最小のリスクで貯留可能かと言う貯留能力を評価するもので、弾性波探査データ、近傍の坑井データ、石油天然ガス田で得られた生産履歴・記録を含む貯留層評価結果等を総合して実施される。

ア) データ取得

地質、貯留層モデルを構築して、貯留可能量の見積り、リスクの抽出・評価、およびCO₂の長期挙動予測などの実施に際し、必要に応じて空間把握能力の高い弾性波探査データと、1次元データながら高い分解能を持つ坑井データを新規に取得する。

イ) 地質評価

既存、新規取得の諸データを総合的に用いて、候補サイト貯留層システムの定性的地質枠組みを作成する。新規掘削調査井と周辺既存坑井間の層序対比等を元に貯留システムの層序を確認し、地層や部層の境界、特に貯留層、遮蔽層の上・下限、化石帯、あるいは鍵層を結びつけて対比図を作成する。

坑井間対比によって決まった貯留層、遮蔽層の境界深度等を元に、弾性波探査記録を利用して、貯留層、遮蔽層、あるいは鍵層各々の深度構造図を作成する。なお、断層は深度構造図上、ギャップとして表現される。これによって貯留システムの地質構造が把握され、地質モデルの枠組みが組み上げられる。

図 4.3.1-3 は、以上のような地質評価によって構築された3次元地質モデルの例 (Takahashi, 2010) である。

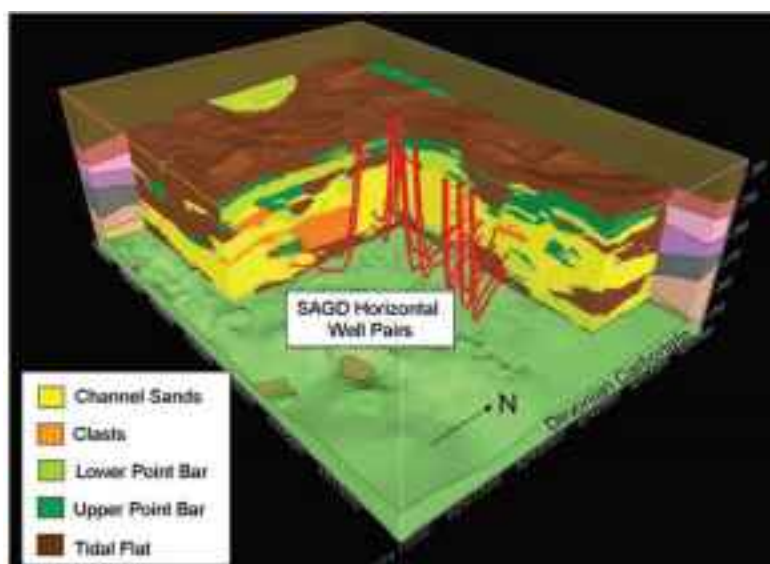


図 4.3.1-3 コア、物理検層、3次元弾性波探査による堆積相を示した3次元モデル (Takahashi, 2010)

赤線はモデルを参考にして掘削されたビチューメン生産用水平井の坑跡

り) 貯留層評価

特性評価において地層圧に関する情報は非常に重要であり、水理地質学的モデリング、圧入性調査、遮蔽能力推定、シミュレーションによる貯留可能量評価、貯留層内での導通性の推定等に利用される。さらに岩石力学特性を組み込んだ地質力学モデリングと連動して貯留層に対する CO₂ 貯留の力学的影響を評価し、CO₂ 貯留の安全性を確保しなければならない。特に最大圧入圧力は、貯留層の破壊圧力を超えないように設計され、実施計画フェーズでの圧入計画策定上、極めて重要である。

え) 遮蔽層評価

圧入された超臨界 CO₂ はそれ自体に圧力が作用していることに加えて、水よりも密度が低く、浮力により上向きに駆動されるため、貯留システムにおける遮蔽層の存在はシステムを機能させるために不可欠の要素であり、十分な評価が必要である。

貯留システムの遮蔽性能を規定する物性には、完全に静止した状態で作用する静的シールとしてスレッショルド圧力と、動的シールとしての浸透率がある。これらの遮蔽性能に加えて、遮蔽層の厚さやその枚数の認定、分布を把握することは重要度が高い。

わ) 地質モデル構築とシミュレーションの実施

貯留サイト候補の地質評価を通して、貯留システムの枠組み形成と定性的モデル特性の設定を行なった後、貯留層・遮蔽層評価によって、貯留システムの内容（貯留層、遮蔽層の分布や特性など）の定量的記述を行って地質モデルを構築する。

この地質モデルをベースとして、CO₂ 挙動を予測するための流動シミュレーションを行う貯留層モデル、CO₂ が貯留サイトに及ぼす化学的影響を評価するための地化学モデル、CO₂ の圧入によって発生する応力変動の貯留サイトへの影響を評価するための地質力学モデル等を構築し、各々シミュレーションを実施する。

か) 貯留可能量評価

実際の CO₂ 圧入では、貯留層特性や圧入 CO₂ と地層との化学反応の結果、圧入性（貯留孔隙の連続性、導通性）が動的に変化し、必ずしも **Static model** で計算された容積法による貯留可能領域である孔隙全てに CO₂ が圧入される保証がなく、実質の貯留ポテンシャルの評価には **Dynamic model** に基づく動的貯留可能量の計算が必要である。

き) 総合評価

主にシミュレーション結果に基づく最適圧入レート、圧入圧力などの操業上の運用パラメータを検討し、圧入施設の概念設計を実施して貯留能力を総合的に評価するとともに、事業コストを概算する。

b) リスク管理

安全な CO₂ 地中貯留の実現は、CCS 事業にとって最重要事項であり、貯留システムの健全性は、上述のような貯留能力評価作業によって示される。しかしながら地下を対象とする事業では、不確実な要素を完全に排除することは不可能であり、潜在的リスクへの対応を検討しておく必要がある。全体のリスク管理プロセスの中で、本フェーズで扱うのは

リスクアセスメントであり、これはリスク特定、リスク分析、およびリスク評価から成っている（図 4.3.1-4）。

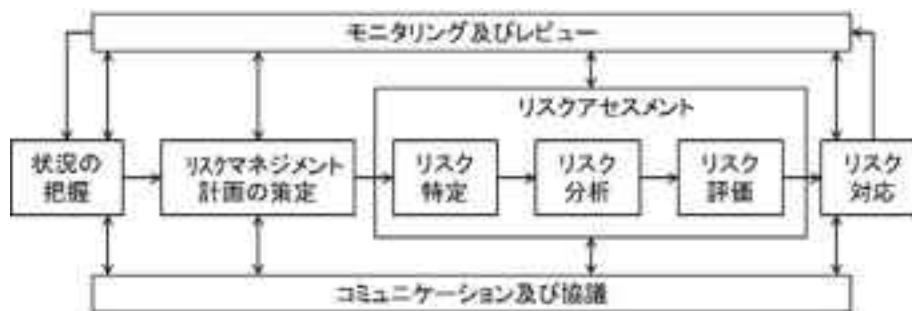


図 4.3.1-4 リスク管理プロセス

本事例集では、CCS 事業における重大な潜在的リスクとして「CO₂の漏洩」と「圧入に伴う誘発地震」の発生を取り上げている。

漏洩に対するリスクアセスメントとしては、まず潜在経路となる既存坑井、断層、あるいは貯留層・遮蔽層自体の弱体化部分の特定を行なった上（リスク特定）で、サイトで構築された地質、シミュレーションモデルを用いて計算される CO₂貯留可能量、圧入された CO₂プルームの変化、あるいは貯留層内での地層圧変化とその影響範囲を検討する（リスク分析）。この結果を用いて漏洩が生態系や周辺環境に及ぼす影響の大きさと漏洩の発生し易さを評価する（リスク評価）。

誘発地震に対するリスクアセスメントとしては、広域も含めた周辺の地質情報をもとに発生源となる断層の認定を行う（リスク特定）。地殻応力分布および地殻歪状態の把握、Slip tendency の計算、断層および地震活動の評価、数値モデリングによる間隙圧の計算・評価等を通して「誘発地震の起こり易さ」と「被害想定」を見積もる（リスク特定）。その上で、誘発地震が生態系や周辺環境に及ぼす影響の大きさと漏洩の発生し易さを評価する（リスク評価）。

リスクと同時に、実施期間の長い CCS 事業においては、環境の変化に伴う多様な「不確実性」も存在している。不確実性の実体と分類、それらの相互関係は、図 4.3.1-5 のように整理されている。ここでは CCS の開発・普及に対する不確実性の要素を示しつつ、それらが互いに関係しあって CCS 普及の障壁になることを示している。個々の CCS 事業に関しては、右側の「スケールアップと開発・普及のスピード」と「システムの統合化」を除く五つの不確実性の要素が重要である。

技術的要素と非技術的要素は密接に関係、連動して事業の不確実性を構成し、CCS 事業の進捗を左右することを事業者は十分理解しておくことが必要である。一例として、安全性に係る技術の充実は、社会的受容性に影響し、さらには政策に波及する。更には CCS の普及や CO₂ 価格、国の補助にも影響すると言ったことが挙げられる。

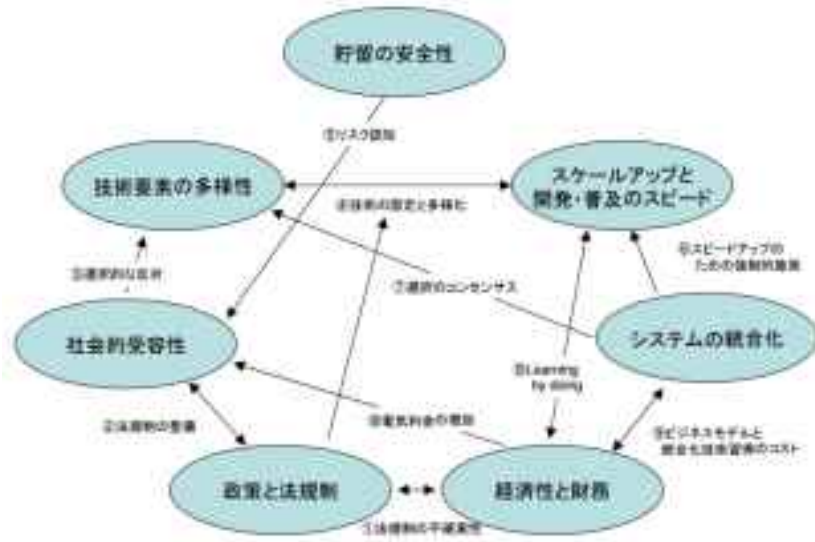


図 4.3.1-5 CCSに係る不確実性の相互関係 (Markusson et al., 2011)

c) 自然環境ならびに社会経済的要件

詳細なサイト特性評価の最終段階では、経済性検討を含んだ社会経済的要件や、地域社会による CCS の受容性も、非常に重要な要件である。さらに CO₂ 地中貯留事業が自然環境および社会環境に及ぼす影響も考慮しなければならない。

(5) 第 4 章 実施計画

① 概要

ここでは、CO₂ 圧入井掘削・仕上げ作業、CO₂ 圧入作業、モニタリング等の技術的な作業の実実施計画を策定するとともに、サイト内での輸送施設、圧入施設等の基本設計を行う。このフェーズで策定される実施計画では、プロジェクトのライフサイクル全般に亘って、事業実施計画が策定され、それを基にプロジェクトの最終投資判断（FID）の可否が決定される。したがって、このフェーズにおいては、コストの精度、社会受容性活動およびリスク管理計画が特に重要となってくる。プロジェクトの FID がなされた場合、本実施計画書を基に、事業の許認可申請、施設建設の詳細設計および請負業者の入札等に進む。

② 事前調査

実施計画の策定を開始する前に、CCS 事業に関連する法規・ガイドラインを調査する。海外における CCS 関連法規としては、米国 EPA (Environmental Protection Agency) による UIC (Underground Injection Control) プログラムと EU による CCS 指令 (Directives) が主流となっている。また、豪州およびカナダにおいて、法規の整備が進められている。

一方、日本では、CCS 事業のための法令は未だ整備されていない。このため、長岡実証試験では、鉱業権の設定については、石油天然ガスの探鉱・開発・生産に関する鉱業法に

準拠し、また保安関係では、鉱山保安法に則って実施された。海底下の CCS 事業に係る法律としては、環境省が定めた、海防法（海洋汚染等および海上災害の防止に関する法律）が参照されている。また、経済産業省「二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会」は 2009 年に大規模 CCS 実証試験実施に対するガイドライン「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」（経済産業省産業技術環境局，2009）を発表している。

③ 圧入井掘削・仕上げ計画

圧入井の掘削・仕上げ計画を策定する際には、すでに、サイト特性評価および圧入井の掘削候補地の選定が完了しているため、掘削候補地点に特化した掘削・仕上げ計画が検討される。掘削・仕上げ計画を策定する際には、掘削方式（垂直井、または傾斜井）、ケーシング・セメンチング計画、掘削に関する法的規則等が考慮される。

日本には、CCS 事業における掘削に関する規則は存在しないが、通常の石油天然ガス対象の坑井と同様、掘削計画、掘削方法、保安計画等の項目に関する計画を策定し文書化しておくことが望ましい。

CO₂ 地中貯留の場合、CO₂ 漏洩に係る懸念に対応した圧入井の掘削計画を付加すべきであり、特に、ケーシング・チュービングの腐食に対する対応、およびセメントに関する材質、種類、サイズ等の諸元を考慮する必要がある。また、閉鎖後管理では、長期に渡る監視が非常に重要であり、圧入井・観測井に各種モニタリング機器の設置が計画される。

圧入された CO₂ の挙動把握に関するデータ収集のため、モニタリング機器・パッカー等の坑内設備との適合性等を慎重に検討の上、掘削・仕上げ計画を策定する。

④ 基本設計、建設計画

CO₂ 圧入計画が策定される段階で、ほぼ並行して、地上施設の基本設計と建設計画の策定が行われる。その後の詳細設計の基本的な枠組みを構成するもので、同時に、安全かつ効率的な CO₂ 地中貯留が実施可能であることの検証および合理的なコスト削減策が検討されるとともに、機器類、人件費等の最新情報に基づくコスト積算が行われる。

⑤ 圧入計画

実際に圧入される CO₂ に関し、圧入する CO₂ の特性総圧入量、日圧入レート、想定地層圧する以下の項目は、CO₂ 地中貯留実施計画の中でも特に重要であり、慎重に設定する必要がある。また、CO₂ 圧入時には、圧入レート等の記録保存が必要となる。米国 CIU 規定のように、CO₂ 地中貯留事業では管理当局への報告が義務付けられることが予想されるため、実施計画段階で記録の仕様を決定し文書化しておく。

⑥ モニタリング計画

モニタリングは、当該貯留事業の安全性を実証するために、CO₂ の漏洩・漏出がないことを確認し、さらに、CO₂ 貯留の有効性を立証するため、貯留層での CO₂ 挙動を監視するために、CO₂ 地中貯留事業において非常に重要な項目である。

この CCS では、坑井健全性、浅部漏洩 CO₂ 挙動の重要なモニタリングが計画され、詳細は、第 6 章の操業管理にて、説明する。

⑦ 地質モデル、シミュレーションモデル修正計画

本計画は、CO₂地中貯留操業（CO₂圧入および挙動監視）を通じて取得される各種データを反映させて、効率的かつ効果的に、地質モデルを更新・修正することを目途に立案される。地質モデルの更新・修正に伴うシミュレーションモデルの更新・修正を含む。

⑧ 社会受容性

CO₂地中貯留事業の実施に際して、CCS事業サイト周辺地域の利害関係者（ステークホルダー）と事業者との友好的な関係の構築は、CCS事業の成否に直結する重要な課題である。CCS事業に係るPO活動やコミュニケーション構築のための活動は、地域社会の特性を考慮して、また参加する利害関係者に対応した適切なテーマやレベルを設定し、事業計画に盛り込むことが必要である。

苫小牧実証試験事業では、2012年度から地元・国内地域への情報発信として、子供から高齢者まで広範囲を対象に多数回にわたる見学会、説明会などを実施し、地元理解に努めている。

⑨ リスク管理計画、および圧入終了後の管理計画

CCSの利害関係者にとって、万一不測の事態が発生した場合に、どの程度の損害が想定されるのか、またどのように修復できるのか大きな関心事である。リスク対応に関する計画は、CCS事業の許認可申請においても確実に要求されるものであり、また、社会受容性活動の場で公表しなければならない重要な情報である。サイト特性評価段階で、想定されるリスクの特定とおおよその分析評価を行い、実施計画段階では、抽出されたリスク要素に対してランク付けを行い、それぞれのリスク要素に対する対応を計画する。

CO₂圧入が終了した後に、坑井の封鎖、圧入設備の撤去、サイト現状復帰などが実施される。サイト閉鎖・閉鎖後管理計画は、CO₂地中貯留実施許可申請時の申請書とともに、当局へ提出する必要があるため、実施計画策定段階においても十分な検討が行われなければならない。

⑩ FID（Final Investment Decision；最終投資判断）に必要な情報

事業者は、これまで述べてきた各種計画を総合的に検討し、本格的な事業投資の可否を判断するFIDを行う。FIDの基準は、事業者の経営判断、および事業を取り巻く環境により異なるものの、FIDに必要な情報は、以下に述べるようなものである。

技術的情報：地質学的情報（貯留能力、最終貯留可能量、達成可能な圧入レート等）

経済的情報：コスト算定根拠（必要資機材費、請負費、労働者の人件費等）

社会的等情報：地域住民、利害関係者の理解、環境保全に関する動向等

不確実性：漏洩、誘発地震、法規制など。

⑪ 事業申請

実施計画フェーズが完了しFIDが実行された後には、監督官庁または地元行政局へ事業申請を行い、事業実施許可を得る必要がある。苫小牧実証試験事業の場合、坑井・モニタリング関係およびプラント建設関係の許認可申請において、北海道知事、港湾管理者、労

働基準監督署長、苫小牧市長、海上保安庁長官などに対して、事業実施許可申請を行った。

⑫ まとめ

CCS 地中貯留において、圧入サイトが決定された後の実施計画の策定は、FID のベースとなり、極めて重要なステップである。CCS 事業の実施には当局による許可が必要であるが、許可申請には、必ずプロジェクト全体を網羅する詳細な実施計画書の添付が必要であり、想定量の CO₂ 量が貯留可能であるという技術的立証だけでなく、環境面、資金面での見直しを含む実施計画が要求される。また、社会受容性の面でも、十分な説得力を持つ実施計画の提示が求められる。

(6) 第 5 章 設計・建設

① 概要

本章では、CCS 事業のうち、地中貯留に関わる地上設備および坑井の設計、建設について国内外の実績、ガイドラインを参考に規制法規や作業を実施する上で要求される手続きの概略などを併せて紹介する。

② 概念設計、基本設計、詳細設計の概要

地上設備の建設には土地利用や建設、安全基準に係る多くの許認可が必要である。CCS 事業の各フェーズに応じた種類の設計が逐次実施され、事業計画策定に資する。

設計作業からの事業実施のアプローチとして、事業計画から圧入に必要な設備設計・建設までの工程において概ね以下のように定めている。

- 基本計画フェーズ、サイト選定フェーズ、サイト特性評価フェーズ
⇒ 概念設計 (Conceptual Design)、実現可能性調査 (Feasibility Study)
- 実施計画フェーズ
⇒ 基本設計 (Preliminary Study)、FEED (Front-End Engineering Design)
- 実施計画フェーズ後
⇒ 事業許可申請および事業最終決定 (License Application & Final Investment Decision)
- 設計・建設フェーズ
⇒ 詳細設計・資機材調達建設 (Engineering, Procurement & Construction)、設備建設・完成・試運転 = 検収 (Commissioning)

概念設計では主に地上設備の稼働率や操業人員構成に対する検討を行い、設備全体の能力、予備系列、設備全体の監視項目の設計や人員採用計画を把握して事業の概算費用およびスケジュールを見積もる。

基本設計は、CCS 事業の経済性を検討するための高い精度の地上設備の工事費を見積もることが大きな目的の一つである。一旦地上設備の施工が開始されると総額数十～数百億円クラスの設計工事費が見込まれるため、資金管理の観点から工事費見積精度の幅を狭めることが重要となる。

FEED では、設備工事費、操業費が一定水準で算定可能になるレベルまでのエンジニアリング業務が行われる。通常エンジニアリング会社に外注され、CO₂の圧入量が100万t/年規模の場合、期間は1年程度であるが、追加検討がある場合は2年程度かかることがある。また、見積コストの単価や算定方法は調達機器の見積引き合いのほか、エンジニアリング会社独自のデータベースとノウハウに基づく。

事業許可承認後には、概念設計を基に地上設備（CO₂輸送、貯蔵タンク、加温装置、昇圧装置等）、圧入井およびモニタリング関連設備の詳細、建設が行われる。詳細設計に際しては、それまで実施された概念設計、実現可能性調査、基本設計の結果に対する再評価を行い、設計に問題がないことを最終的に確認した後に実際の建設が行われる。

FEED 作業自体のコストを含め、CCS プロジェクト全体の CAPEX（設備工事費）や OPEX（操業費）の FEED での見積概算を公開している事例は数少ないが存在する。図 4.3.1-6 に、海域（Peterhead）と陸域（Quest）の CCS プロジェクト全体の設備工事費と年間操業費の概算を示す。一般に陸域に比べて海域ではかなりのコスト増となる傾向がある。



図 4.3.1-6 海域貯留と陸域貯留におけるコスト概算比較

③ 地表設備の設計・建設

地上設備の各機器に目を向けると、回収された CO₂ を圧入井経由で地中貯留するためには CO₂ を輸送する設備、CO₂ を昇圧する設備、その他付帯設備が必要である。

CO₂ の輸送手段はトラック輸送、パイプライン輸送、船舶輸送があり通常は経済性検討により決定される。小規模プロジェクトではトラック～パイプライン、大規模プロジェクトではパイプラインが主流となっているが、輸送距離が長い場合は船舶もあり得る。

CO₂ 昇圧は、地中貯留を効率的に行うために超臨界圧力まで昇圧するケースが主流である。コンプレッサーまたはポンプにて昇圧する。配管腐食防止のため除湿も行われる。

④ 日本における実証試験での設備例

a) 長岡実証試験

2001年に経済産業省より実証試験の委託を受けた RITE は、地上設備の施工管理を INPEX（旧:帝国石油）に業務委託した。2年間で圧入設備（長岡鉱場岩野原基地）および監視設備（長岡鉱場親沢プラント）の設計・建設を行い、2004年より運転開始、1年6か月の間に累計 10,480 トンの CO₂ を地中貯留した。現在モニタリング中である。

適用法規は鉱業法ならびに鉱山保安法、その他設備設置のための関連法規である。

圧入 CO₂ は同油ガス田からの分離回収ではなく製品液化 CO₂ を購入し、液化 CO₂ 貯槽タンクを経由して圧入した。昇圧は液化 CO₂ をポンプ経由後加温気化させ圧入貯留した。

設計に際し、最大圧入圧力は圧入井 IW-1 坑口圧力で 12.94MPa、最大圧入レートは 48ton/日、圧入温度はヒーター出口で 32±2℃とした。ポンプは 2 段昇圧とし、1 段目と 2 段目の間にコリオリ式質量流量計を設置した。

完成された設備のシステム模式図を図 4.3.1-7 に示す。

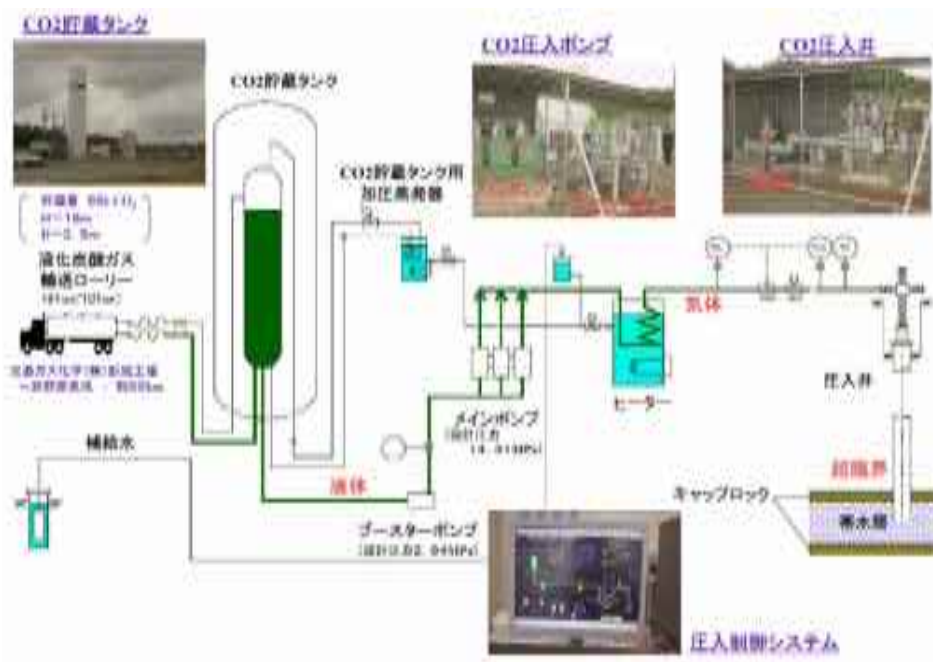


図 4.3.1-7 長岡実証試験 完成設備システム模式図（大関・嘉納，2006）

b) 苫小牧実証試験

JCCS は 2012 年に経済産業省より実証試験の委託を受け、年間 10 万トンの CO₂ 圧入を目途として CO₂ 分離回収設備（出光興産北海道製油所内）、圧入設備（JCCS 基地）および監視設備（同）の設計・建設を行い、2016年4月から2019年11月まで約3年7か月運転し累計約 30 万トンの CO₂ を地中貯留した。現在は圧入を停止し、モニタリング中である。

圧入井は陸上にあるが、貯留層が海底下のため適用法規は海防法となる。地上設備に関してはガス事業法や電気事業法、港湾法等の法規が適用されている。

対象となる CO₂ は製油所の水素製造装置で発生する約 50mol% の可燃性ガスを含むガスをパイプラインで JCCS 基地まで輸送し、そこでアミン法により CO₂ を分離回収した後、コンプレッサーで 4 段昇圧して萌別層圧入井坑口で最大 10MPa（下部の滝ノ上層は 5 段昇圧で 23MPa）程度にまで昇圧する。最大圧入レートは 25.3 トン/時（20 万トン/年）とする。

CO₂ の水分は配管腐食・ハイドレート生成対策として、6.0MPa、40℃ の条件で気液分離し、気液分離槽で除去する。圧入される CO₂ レートはコリオリ式（萌別層）および超音波式（滝ノ上層）で計測される。

分離回収設備で分離した可燃性ガスはボイラー燃料ガスとして利用される。

苫小牧実証試験地上設備のプロセスフローを図 4.3.1-8 に示す。

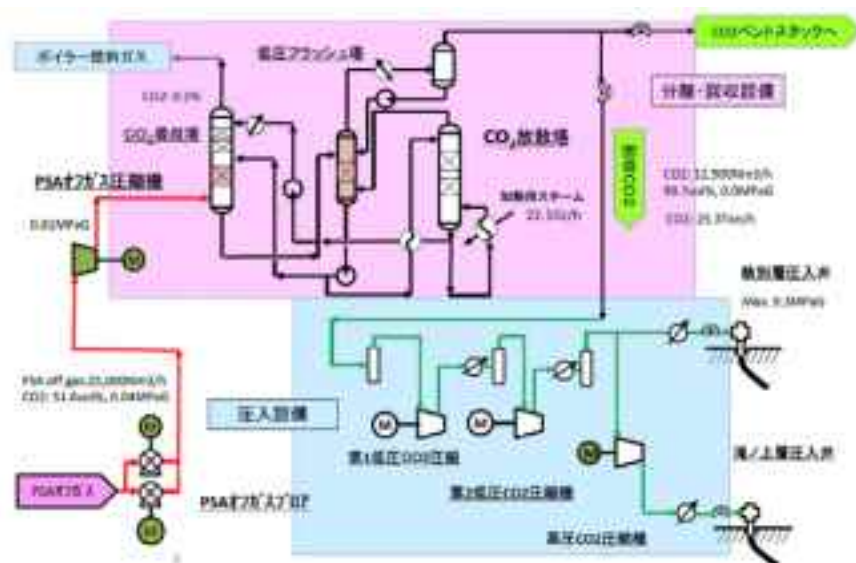


図 4.3.1-8 苫小牧実証試験地上設備プロセスフロー（経済産業省，2016）

⑤ 圧入井・観測井の建設

坑井の掘削に関しては、石油天然ガス坑井掘削の豊富な実績から特に問題はないが、CO₂ 圧入に係る坑井特有の問題として CO₂ による金属の腐食とセメント劣化への懸念がある。不適切な坑井建設は、坑井健全性の欠如につながり、CO₂ 圧入やモニタリングでの不都合、圧入された CO₂ や CO₂ が溶解した地層水の漏洩、漏出の導管となり得るというリスクもはらんでいる。圧入井は CO₂ 圧入終了後に、観測井はサイト管理期間終了後に封鎖されることになるが、封鎖後も CO₂ の漏洩/漏出を長期間にわたって防ぐためには坑井封鎖作業が非常に重要であるが、計画時にそれ以前に掘削、仕上げ時における適切な資機材使用や、適切な掘削、仕上げ計画の立案、計画に沿った作業の確実な実施が基本である。

⑥ コミッショニング

建設を終えた設備が設計仕様通りの性能であることを確認するため、実際に設備を稼働する作業全般を一般にコミッショニングと呼ぶ。コミッショニングでは、建設請負工事の契約に基づいて事業者～請負工事業者間で作業時・完了後における設備の責任分担・権限

移譲が定められている。設備受け渡しの所有権移転手続きや設備の受け渡し後に瑕疵が生じた場合の担保責任明確化のほか、融資を受ける際の条件に所定の性能試験合格が定められていることがあり、コミッショニング作業は重要である。

(7) 第6章 操業管理

① 概要

CO₂地中貯留事業のライフサイクルは一般に非常に長く、基本計画立案からサイト閉鎖後管理までの長期間となるが、中でも圧入操業フェーズの継続期間は重要な期間であり、CO₂漏洩・漏出、誘発地震といったCO₂地中貯留に伴うリスクが最も高く、リスクを最小限にとどめるといふ安全性が強く求められる。

このフェーズでは、上記の構成要素により、CO₂圧入操業、モニタリング（CO₂漏洩、漏出、および誘発地震リスクに係る）、モニタリングデータによる圧入CO₂の挙動予測ヒストリーマッチング、圧入CO₂量の計測およびリスク管理などが実施される。

② 圧入操業

通常のCO₂圧入操業は、排出源から回収、圧入サイトに輸送されたCO₂を、圧力・温度を再調整したうえで、計画されたレートで圧入井を通して貯留層に圧入するプロセスであり、様々な理由に基づく圧入停止・遮断作業も含まれる。CO₂圧入仕様はそれぞれの圧入サイトに固有であり、事業の要求事項と目的とに基づいて計画されるが、基本要件は貯留量の最大化と安全性確保である。

計画された圧入操業開始に先立って、システムが設計仕様通りの適切な動作条件を満たしていることを確認・検証するためにシステムの始動、および試運転の手順を経なければならない。

③ 圧入圧力、温度と圧入レート

貯留層、遮蔽層を破壊することなく安全に圧入を実施するため、アメリカEPA、UICクラスVI規制では、圧入圧力が圧入層の破砕圧力の90%を超えてはならないと定めており、圧入井のチュービングやケーシングに設置した圧力センサーによって常時モニタリングされる。圧入層の破砕を防止し、また遮蔽層の破損によって圧入流体が貯留層外部へと漏洩、漏出する可能性を低減するための重要な要件である。また、チュービングに欠陥があり漏洩が生じていた場合でもCO₂がチュービングから漏洩しないように、チュービングとケーシング間のアニュラス圧力を圧入圧力よりも高く維持することを求めている(EPA, 2013)。

④ 計量

CO₂圧入に使用される流量計は、流量または圧力のいずれかに基づいて作動し、正確に流量を測定して実施計画に示された圧入レートを算出する必要がある。計量機器の校正は、メーカーの推奨基準の指定に沿うように定期的に行われるが、国、地域によっては規制機関が指定している場合もある。また、多くの国、地域では圧入システム内の特定のポイントでの流量の記録と報告を規制当局から要求される。CO₂流量測定のための測定装置には、

超音波流量計、オリフィスマーター、タービンメーターなどがある（DOE/NETL,2017）。

⑤ モニタリング

圧入操作中のモニタリングは操業に係る各設備を含む貯留システムが実施計画通りに稼働しているかを把握し、地下におけるCO₂の挙動を知り、CO₂圧入に伴うリスクの監視を行うことを目的にしている。これらは計画された量のCO₂を圧入し、安全に長期間にわたって貯留するための極めて重要な要因である。

a) 坑井健全性モニタリング

圧入操作中および、圧入終了後の長期的安全性を確保するために、圧入井の健全性には、十分な配慮が必要である。圧入されたCO₂が坑井の欠陥部分を通して地層浅部、あるいは地表、海底、最終的に大気中にまで漏洩/漏出することは、CO₂地中貯留にとって、最も慎重に配慮しなければならないリスクのひとつである。例えば、セメントがケーシングに沿ってチャネリングを生じ、これを流路として流体が移動する際、流路での不規則性によって何らかの乱流が生じ、音響が生じることが多いことから、これを感度の高いマイクロフォンを使って検出するのがノイズ検層である（図 4.3.1-9）。

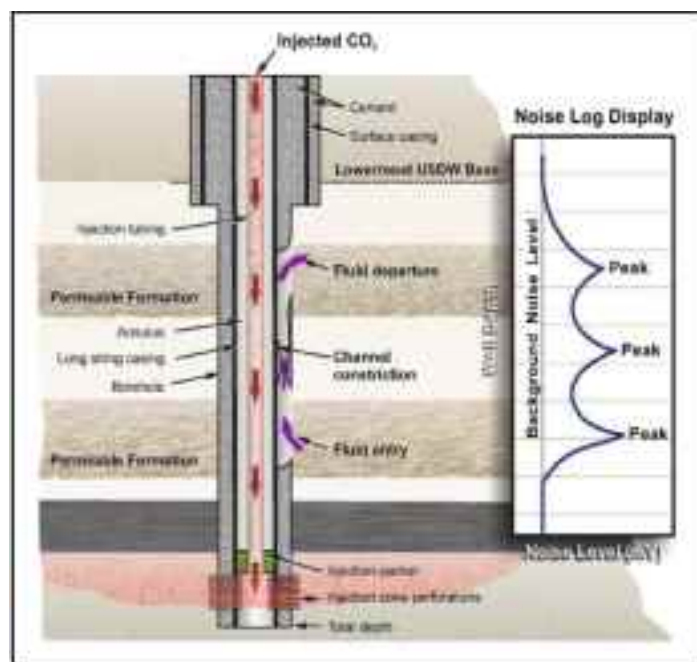


図 4.3.1-9 セメントでの流路を通じたCO₂漏出とそれに対応するノイズ検層（EPA, 2013）

b) 浅部漏洩モニタリング

浅部漏洩モニタリングは、地表、浅部表土または海底、そして最終的には海水や大気中へと漏出するCO₂を検知・測定することを目的としている。漏洩モニタリングには、地下（飲用水用の深部塩水層、土壌、海底地下）のCO₂を検知・測定する方法や、海水や大気中のCO₂を実際に測定する方法が含まれる。圧入前のベースライン調査は圧入前の状態と圧入後の変化を知るためのモニタリング戦略の根幹であり、浅部漏洩を対象としたモニタ

リングでも同様なことがいえる。

c) CO₂ 挙動モニタリング

圧入された CO₂ により、貯留層圧力は増加、CO₂ は圧力差、浮力によって移動し、ブルームは拡大する。貯留層の地層圧や温度がどのように変化したか、また貯留層内での CO₂ の挙動を把握するために圧入開始以後、長期間のモニタリングを行う。CO₂ 挙動モニタリングの目的は以下の通りである。

- 地質モデルの修正とヒストリーマッチング
- 圧入された CO₂ の検証により、CO₂ 地中貯留が計画通り実施されていることの証明
- CO₂ 漏出の早期警告

挙動モニタリングの例－繰り返し弾性波探査

間接的モニタリングの代表的な手法で、CO₂ 圧入前後の貯留層の音響インピーダンスを比較することで、圧入によって生じた貯留層内の物性変化ならびにその空間的広がりを捉えるものである。苫小牧実証試験でのモニタリング事例を図 4.3.1-10 に示す。

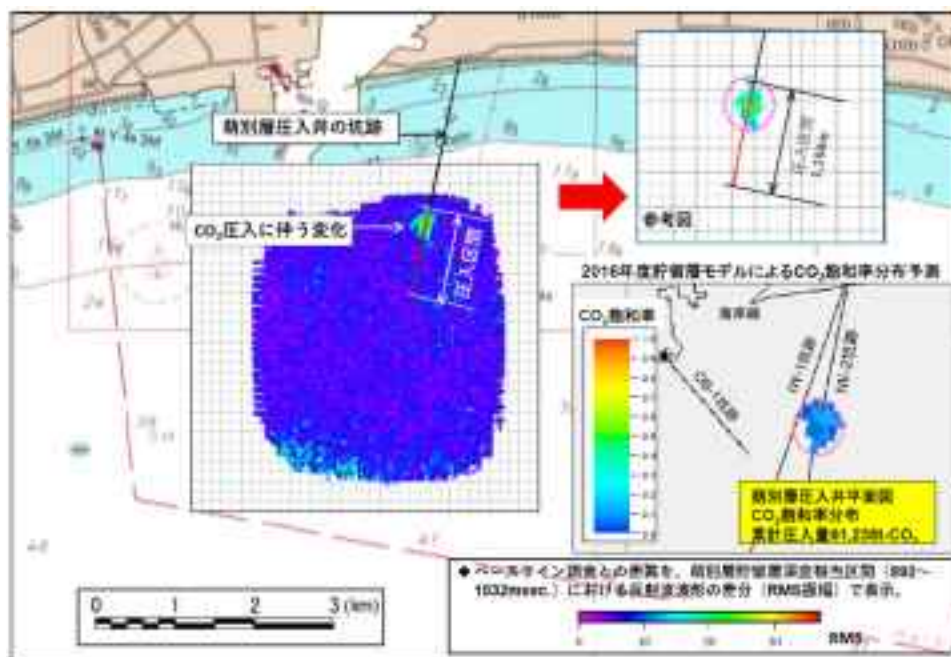


図 4.3.1-10 2017 年実施の三次元弾性波探査で認められた反射波形の変化
(経済産業省, 2019)

⑥ ヒストリーマッチングとモデルの修正

ヒストリー・マッチングとは入手しうる最良のデータを用いて CO₂ の挙動を計算し、この計算結果と実際の CO₂ 挙動とを比較することである。良好なマッチング結果が得られるまで種々のパラメータを変えることによって計算を繰り返す。これによって最も適切な地質モデルが確認されたら、これを使って将来の CO₂ 挙動予測を行う。CO₂ 地中貯留事業の実施計画に記載される貯留層の貯留ポテンシャルや圧入された CO₂ の挙動は、サイト特性

評価の段階までに取得されたデータに基づいて構築された地質モデルによって予測されている。予測が正確であるためにはこれらのモデルがサイトの実態を正しく表現している必要がある。圧入開始後には、圧入操作中に取得された坑井テストや圧入操作データ、各種モニタリングデータとモデルに使用された各種パラメータを比較、サイトの実際の挙動をモデルが再現できるか否かを検証し、必要に応じて地質モデルを修正し、今後の圧入計画策定や精度の高い長期挙動予測を行わなければならない。

⑦ 社会受容性

CO₂地中事業における圧入操作は、石油天然ガス業界の生産操作と類似しており、技術的な課題は少ないと考えられる。しかし、石油天然ガスの生産がすでに100年の歴史を持つものに対して、CO₂地中貯留の実績はごく限られており、一般社会の認知度も高くない。従って事業の透明性が強く求められ、行政と住民との意見交換、合意形成を行うことが必要である。CO₂地中貯留事業のライフサイクル全期間における利害関係者との良好な関係を維持が不可欠であるが、圧入操作中は、特にその活動を推し進める必要がある。

(8) 第7章 サイト閉鎖

① 概要

CCS事業のライフサイクルは非常に長く、数十年に及ぶのが一般的であるが、サイト閉鎖のフェーズはその中では短期間であり、閉鎖前後の各種作業を含めてもせいぜい数か月から2年程度である。このフェーズ以降、CO₂の圧入操作は行われませんが、サイト閉鎖後も閉鎖後管理の期間が場合によっては数十年継続し、CO₂地中貯留事業者は少なくともその間の管理、賠償責任を有する。したがってサイト閉鎖においては関連施設や地中貯留されたCO₂による地下浅部や地表の環境悪化、地域住民の健康被害、地域の経済活動などへの影響が全くない状況を確認することが必要となる。

CO₂地中貯留では圧入が終了し、サイトが閉鎖された後も、地下にCO₂とCO₂が溶解した地層水が存在し、また、地層圧が圧入開始前と比較して上昇している状態にあり、サイト閉鎖後も漏洩/漏出リスクが存在する可能性がある。

② サイト閉鎖における坑井封鎖

CO₂地中貯留の歴史は浅く、実際に貯留されたCO₂の地表、海底などへの漏出や浅部の飲料水用帯水層の汚染といった例は知られていない。しかし、今後ライフサイクルが長期間にわたるCCS事業が普及した際、圧入済みCO₂やCO₂を含んだ流体の地下浅部や地表、海底への漏洩/漏出は、CO₂地中貯留事業で考えられるリスクのうち、最も注意を払うべきリスクである。

Qualitative Likelihood	Leakage Scenario	Events per Item per 1000 yrs
Highly Probable	Undocumented Wells Exploration Wells Production Wells	0.1
Possible	Local Overpressurisation Well Blowout/Well Head Equipment Rupture	0.01
Unlikely	Injection Wells	0.001
Very Unlikely	Existing Faults through Seals	0.0001
Highly Improbable	Regional Overpressurisation	0.00001
Almost Impossible	Permeable Zones in Seals Exceeding the Reservoir Spill Point	0.000001

図 4.3.1-11 漏洩/漏出シナリオの可能性についての定性的評価
(IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2008)

石油天然ガス業界で地層流体漏洩の原因を統計的に処理し、CO₂ 地中貯留において想定できる CO₂ 漏洩シナリオを定性的に評価した例を図 4.3.1-11 に示す (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2008)。これによれば、可能性が高い漏洩シナリオの上位を坑井からの漏洩が占めている。CO₂ 地中貯留で使用する坑井は、CO₂ の腐食性と地層圧の上昇という、特殊な環境に晒された上、CO₂ 貯留層と上位の遮蔽層を貫通し、貯留された CO₂ の上位層や地表、海底面に漏洩/漏出する経路となるリスクを有するため、きわめて慎重な坑井封鎖が要求される。CO₂ 圧入井の封鎖に求められることは、貯留層の流体が地下浅部、地表、海底への漏洩することを確実に防御することである。坑井に沿った漏洩経路は図 4.3.1-12 のように考えられ、このために重要な点は、耐久性のあるケーシングやセメントを使用すること、プラグ・セメント/ケーシング、ケーシング/ケーシング背後のセメント、ケーシング背後のセメント/地層の接着を確実なものにすることである。

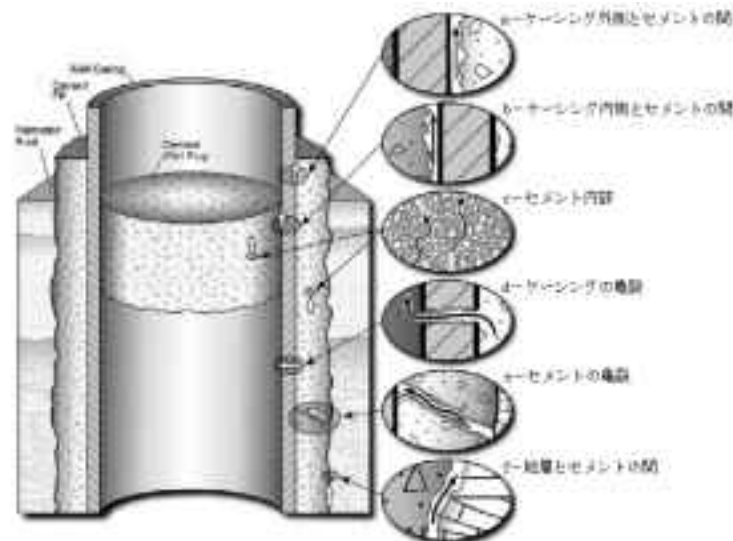


図4.3.1-12 既存坑井に沿っての漏洩で考えられる経路(Celia et al., 2004)

③ 圧入井の封鎖方法

CO₂圧入井の封鎖が実際に実施された例は世界的にほとんどない。したがって、他の産業界、特に石油天然ガス井、放射性廃棄物地層処分井、工業廃液地下圧入井、酸性ガス圧入井などの作業例が重要な参考例となる。

ア) プラグ

坑井封鎖で最も重要な作業は、主にケーシングとセメントを対象に健全性を評価した後実施する、坑井内での流体移動に対するバリアであるプラグの設置である。このため、封鎖のためのプラグは、以下のような性質を有することが求められる(CO₂CARE, 2013)。

- ・非浸透性
- ・長期にわたって健全性を有する
- ・非収縮性
- ・延性を有し（脆性でない）、機械的な荷重や衝撃に耐性がある
- ・H₂S、CO₂や炭化水素に対し、化学的に耐性がある
- ・鋼鉄や坑井周囲の地層に対し、確実に接着、固着する

●機械的プラグ

機械的プラグとして多くの場合、ブリッジ・プラグが使用され、圧入層の上位やパッカーなど撤去できない機器の上位に設置される。

●セメント・プラグ

坑井閉鎖の目的で坑井内の必要箇所へセメント・スラリーをスポット的に送入して坑井を埋め立てるプラグである。

●プラグの位置

設置するプラグの種類と数量、上限と下限の位置は封鎖計画で重要な部分である。しかし坑底から地表まで連続的にセメントを設置することはなく、圧入層とその上位の注意す

べき地層との導通を防ぐために必要な数箇所に設置することになる。

④ サイト閉鎖でのその他の作業

陸域での CO₂ 地中貯留の場合、地上施設の撤去には特に問題はないが、敷地返還前に土壌汚染が確認されれば、完全な浄化を実施することが必要である。一方、海域での CO₂ 地中貯留、特にプラットフォーム上に各種施設が設置され、パイプラインで CO₂ が輸送される場合、それらの撤去に関しては、事業計画策定時に十分検討し、計画を策定しておく必要がある。また、海域での施設撤去には巨額のコストが発生するため、コスト評価と密接なリンクが必要である。

(9) 第 8 章 サイト閉鎖後管理

① 概要

CO₂ 地中貯留事業において、予定された量の CO₂ が地中貯留された場合、あるいは何らかの理由で地中貯留を終了することになった場合、貯留サイトは第 7 章で記載されたような手順、手続きで閉鎖される。パイプラインなど、CO₂ 輸送のための諸施設は撤去、あるいは残置などの方法で処置され、圧入井は封鎖、圧入にかかわる諸施設も閉鎖後必要とされるモニタリング施設以外は撤去される。それ以降は閉鎖後管理フェーズに入り、CO₂ 地中貯留事業者が圧入操業時に引き続き貯留サイトの管理責任を持つ期間に移行する。

CO₂ 圧入が終了し貯留サイトが閉鎖されても、リスク管理の重要性に変化はない。CO₂ の圧入が終了した後は、貯留層の圧力は低下し、相対的には圧入操業時よりリスクは低下するが、長期にわたり圧入された CO₂ や溶解 CO₂ を含む地層流体の浅部や地表、海底への漏出、CO₂ 圧入による誘発地震の発生の可能性は、極めて小さいながらも依然として存在し、そのモニターが必要である。また、各種手段による貯留層中の CO₂ 挙動モニタリング、そしてその結果を利用した貯留層モデルの修正、ヒストリーマッチング、挙動将来予測も長期的安全性確保にとって極めて重要な作業である。

一般に CO₂ 地中貯留事業のライフサイクルは長期にわたり、国などの管轄当局に責任が移譲されるまでの閉鎖後管理期間は場合によっては数 10 年以上になる。サイト閉鎖後の実施作業と管理責任に関する模式図を図 4.3.1-13 に示す。

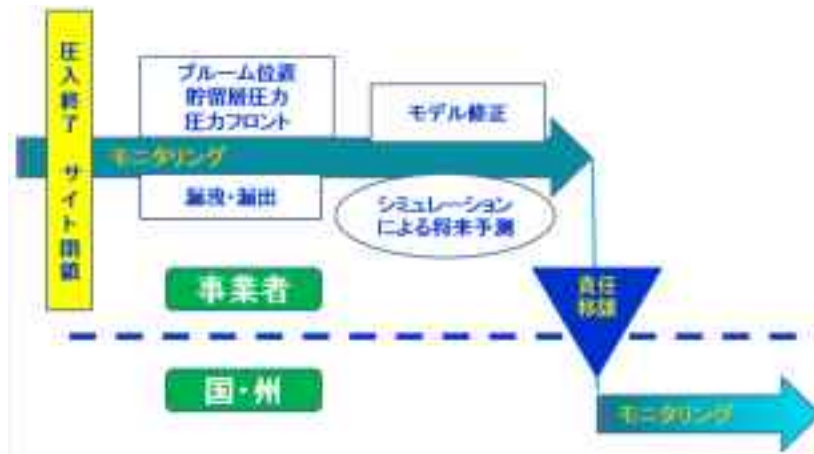


図 4.3.1-13 サイト閉鎖後の作業と責任の所在

(ただし、すべての国、地域で責任移譲が定められているわけではない)

② 閉鎖後管理期間の規制に係る各国の現状

各国で CCS の重要性が認識されつつある状況にあるが、CO₂ 地中貯留に関する法規制の未整備は、CCS 普及に対する障壁の一つとして重要な課題となっている。しかし、CO₂ 地中貯留サイトが閉鎖された後、責任が移譲されるまでのモニタリングを含む管理と万が一、事故が発生した場合の修復などに関する責任は事業者が負うことにおいては、各国、各地域とも共通している。

アメリカの EPA, UIC Class VI 規定では、事業開始時に提出されたサイト閉鎖後管理 (EPA の定義によれば、Post Injection Site Care=PISC) 計画に従い、CO₂ 圧入が停止 (本事例集でのサイト閉鎖) されてから事業者によるモニタリングなどの義務が終了 (EPA 定義ではサイト閉鎖=closure) するまでの期間 (原則 50 年間)、事業者は、飲料水地下水 (Underground Source of Drinking Water=USDW) を危険から保護するため、モニタリングを継続しなければならない、とされている。

EU CCS 指令では、サイト閉鎖後管理期間における義務として、事業者は貯留サイトの責任が管轄当局に移譲されるまでは (原則 20 年間)、CCS 指令で記述される要件に従ったモニタリング、報告および修復に対し依然として責任を負うとともに、漏洩の場合の排出権返却と予防手段、修復措置に関するすべての義務を負うものとされている。

③ サイト閉鎖後管理期間における実施作業

この期間に CO₂ 地中貯留事業者が実施しなければならないのは基本的には以下の二つである。

- ・ 加圧プロセスの主たる動力である圧入が停止されているため、CO₂ の漏洩や予想外の移動のリスクが減少しているはずである。しかし、リスク管理の一環として漏洩、漏洩モニタリング、微小振動モニタリングを継続し、安全性を確認する。
- ・ CO₂ が想定された貯留層に保持されていること、CO₂ プルームの位置や圧力変化、圧力フロントの位置といった挙動が予測とおりであることを確認する。また、将来

の漏洩/漏出のリスク評価、挙動予測のためにシミュレーションを実施する。

a) モニタリング

CO₂ 地中貯留事業の各フェーズ（圧入作業前、圧入作業中、サイト閉鎖、サイト閉鎖後管理期間）で各種モニタリングが実施される。サイト閉鎖後管理期間におけるモニタリングの目的は以下の通りである。

- ・圧入された CO₂ が貯留され続けていることを検証すること。
- ・圧入された CO₂ が、地下浅部、海洋や大気中に漏出していないか検知する。また、漏出していれば、その量を検証すること。
- ・サイト周辺の衛生、安全、環境（HSE）性能基準を満たすことを検証すること。
- ・圧入された CO₂ の地下における挙動（ブルームの動き）をモニターし、地質モデルと CO₂ 挙動予測シミュレーションの正確さを検証すること。
- ・貯留層における圧力フロントを追跡し、圧力の影響範囲を特定し、将来予測をすること。
- ・坑井が CO₂ 漏洩/漏出に結びつかない健全性を維持していることを検証すること。

b) 地質モデル修正と CO₂ 挙動シミュレーション

圧入が開始されると、圧入中のモニタリング結果、例えば貯留層圧力の上昇状況、CO₂ ブルームの拡大状況などを参考にして、いわゆるヒストリーマッチングを実施、静的地質モデル（貯留層パラメータ、非均質性、異方性の把握などを含む）を修正、何回か CO₂ 挙動シミュレーションを行い、リスク評価見直しやそれぞれの時点での将来予測を実施することになる。

④ 閉鎖後管理期間におけるリスク

サイト閉鎖後も、漏洩/漏出を含む各種モニタリングを継続実施し、万が一の場合に備えるのは当然であり、規制当局からも強く要求されている。しかし、多数のシミュレーション実施例を評価すれば、図 4.3.1-14～図 4.3.1-16 に示すように、貯留層特性によっては圧入終了後も圧入地点での貯留層圧力増大が圧力フロントやブルームを拡大させる時期があるものの、短期間のうちに圧力フロントは縮小に転じ、ブルームの拡大はほとんど停止することが示される。また、貯留層圧力値は圧入終了とともに急激に低下する（Bromhal et al., 2014）。この結果、圧入終了後、CO₂ 貯留に係るリスクは大幅に低減する。また、その他の要因として、圧入終了後、時間の経過とともに溶解トラッピングや鉱物化トラッピングの寄与が増大するという点もリスク低下を補強する。更に長年のデータ蓄積により、CO₂ 挙動シミュレーションの信頼度が向上するという理由もあって、圧入が終了すると CO₂ 貯留に係るすべてのリスクが漸次、低減すると考えられる。

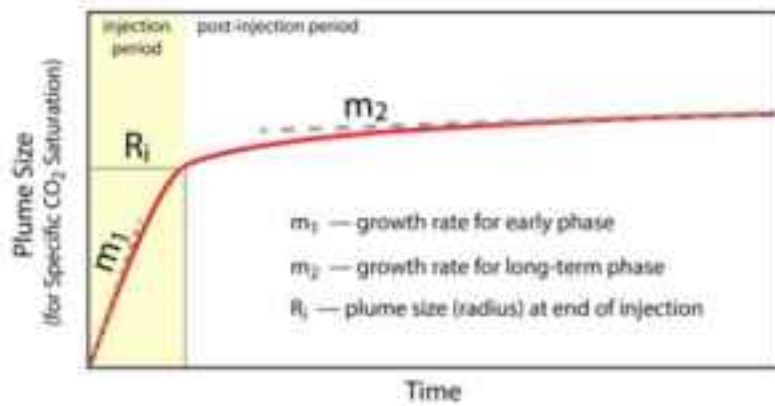


図4.3.1-14 特定のCO₂飽和率閾値に基づくCO₂プルームのサイズ変化プロファイル模式図 (Bromhal et al., 2014, Provided by the US Department of Energy's National Energy Technology Laboratory)

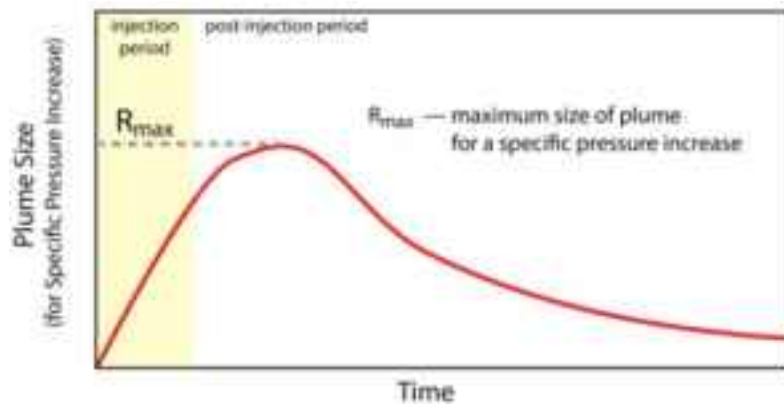


図4.3.1-15 特定の閾値に基づく圧カプルーム（圧カフロント）変化プロファイル模式図 (Bromhal et al., 2014, Provided by the US Department of Energy's National Energy Technology Laboratory)

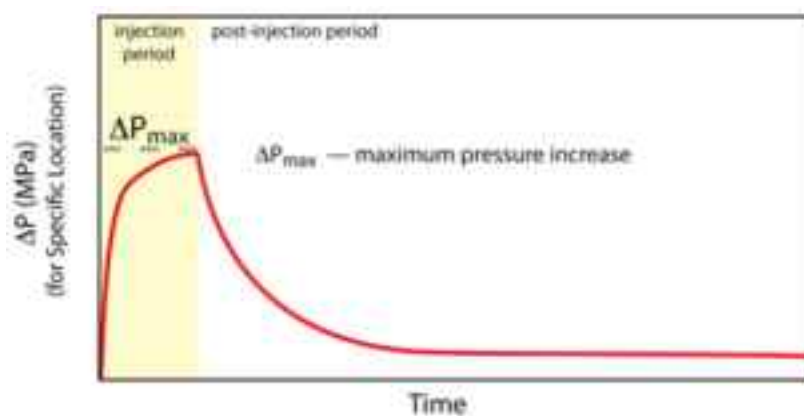


図4.3.1-16 貯留層圧力変化プロファイル模式図 (Bromhal et al., 2014, Provided by the US Department of Energy's National Energy Technology Laboratory)

⑤ 閉鎖後管理終了後の長期的責任

CO₂貯留での長期的責任の取り扱いは、今後大規模なCCS事業を展開してゆく上で、重要な課題である。IEA（2010）はCCS実施における法規制の課題のうち、貯留サイトの閉鎖後管理期間終了後における長期的責任の主体、国、地方自治体あるいは事業者の財政負担に係る問題が特に重要であると報告している。CO₂地中貯留における長期的責任は「CO₂地中貯留事業における貯留サイト閉鎖後管理期間が終了した後の貯留サイト管理責任」である。長期的な責任の取り扱いはCO₂貯留活動の規制に関しての最も難しく、複雑な問題の1つとみなされてきた。このため現在、関係各国で関連法規制の整備が進行中である。

現状では、一定期間、ないしCO₂地中貯留での将来的安全性を規制当局が納得するまでの期間は事業者が管理責任を持ち、その後、国、州などの公的機関に管理責任が移譲されるケースが多い。アメリカではEPA, UIC-Class VI規定においてPISC(Post Injection Site Care) 期間終了後の責任移譲についての記載は存在しないが、州によっては州政府への責任移譲が規定されている。EU CCS指令では、貯留されたCO₂が完全かつ恒久的に封じ込められることが示されており、財務的義務が満たされているなどの条件を満たせば、CO₂貯留サイトに係るすべての法的責任を加盟国当局<CA =Competent Authority or Competent Authorities（法的資格を有する当局）>に移譲できるとされている。

(10) コスト計算

① 概要

CCS全体システムのコスト計算事例として、石炭火力発電所からのCO₂回収、輸送について、標準的なシステムを対象としたコスト試算手順を提示する。また、LNG火力を対象とした場合、あるいは、石炭火力発電所にCCS設備をレトロフィットした場合のCO₂回収の計算例についても説明する。さらには、貯留方式以外の処理方法として注目を集める鉱物固定化のコスト試算事例も紹介する。

② CO₂回収コスト試算事例

a) CO₂回収コスト評価用基本モデルの設定

石炭火力発電の規模は500MW～1000MWを想定するのが標準的である。モデル例としては、米国のNational Energy Technology Laboratory（NETL）が、550MW級の超臨界石炭火力発電所の基本モデルを公開している。

b) 発電およびCO₂回収シミュレーション

発電条件やCO₂回収条件により、発電効率等が基本モデルから異なってくる。その状況を把握するため、発電・回収条件に即したシミュレーションを行う必要がある。

具体的には、発電モデルのブロック図とシミュレーションフローについて、CCSなしの

ものとCCSありのものを設定しシミュレーションを行う。シミュレーションにはプロセスシミュレータとして実績のあるAspen Plusの活用が推奨される。

c) 発電コスト、CO₂回収コスト、CO₂回収回避可能コストの計算式

発電コスト、CO₂回収コスト、CO₂回収回避可能コストは以下の式4.3.1-1~4により求める。

$$\text{発電コスト (COE) [円/kWh]} = \frac{\text{資本費[円]} + \text{運転維持費[円]} + \text{燃料費[円]} + \text{社会的費用[円]}}{\text{発電電力量[kWh]}} \quad (\text{式 4.3.1-1})$$

$$\text{発電電力量[kWh]} = \sum_{t=1}^T \frac{E}{(1+r)^t} \quad (\text{式 4.3.1-2})$$

t : 稼働年数 (T=30年)、 E : 年間発電量 (発電端出力 550MW、設備稼働率 85%)、
 r : 割引率 (3%)

$$\text{CO}_2 \text{回収コスト [円/t-CO}_2\text{]} = \frac{(\text{COE}_{\text{CCSあり}} - \text{COE}_{\text{CCSなし}}) [\text{円/kWh}]}{\text{CO}_2 \text{回収量 [t-CO}_2\text{/kWh]}} \quad (\text{式 4.3.1-3})$$

$$\text{CO}_2 \text{回収回避可能コスト} = \frac{(\text{COE}_{\text{CCSあり}} - \text{COE}_{\text{CCSなし}}) [\text{円/kWh}]}{(\text{CO}_2 \text{排出量}_{\text{CCSなし}} - \text{CO}_2 \text{排出量}_{\text{CCSあり}}) [\text{t-CO}_2\text{/kWh}]} \quad (\text{式 4.3.1-4})$$

d) コスト評価のための数値の設定

上述の各式に具体的な数値を設定し、コストを計算するが、数値設定は以下により行う。

ア) シミュレーション結果の反映

発電電力量、燃料費、CO₂回収量、CO₂排出量は、(2)シミュレーション結果を反映して設定する。

イ) 資本費、運転維持費

サイト固有のデータとなるが、標準値として、NETLのデータ、あるいは国内の発電コストワーキンググループが公表しているデータの採用などが考えられる。社会的費用については考慮しないことを検討のベースとしてもよいと考える。

③ CCS 設備構成と CO₂ 回収コスト

a) LNG 火力の CO₂ 回収コスト

LNG火力発電は、石炭火力発電と比較すると排ガス中のCO₂濃度が約4%と低いため(石炭火力発電は約12~13%)、同じ量のCO₂を回収するためには、より多量の排ガスをCO₂回収設備へ導入する必要がある。また、LNGは燃料に硫黄分がないため排ガス処理用の主な環境設備は脱硝設備である。この他に排熱回収ボイラーの後流には特に排ガス処理用の設備は必要がなく、通常は100℃近い温度の排ガスが煙突からは排出される(排ガスの温度が高いほど排ガスの拡散効果を大きくとれる)。一方、LNG火力発電にCO₂回収設備に導入すると、CO₂回収設備は湿式であるためCO₂が分離された後の排ガス温度は飽和温度(40℃程度)にまで温度が低下した状態となる。そのため、CO₂回収設備を導入

する前と同様に、排ガスの拡散効果を維持するには、熱交換器（ガスガスヒーター）や蒸気による加熱器（スチームヒータ）の追設も必要となる。

次に、年間100万トンのCO₂を回収する場合の新設石炭火力と新設LNG火力のCO₂回収の年間費用（百万円／年）を比較する。LNG火力では扱う排ガス量が多いことから設備容量が大きくなることと、回収のためのエネルギー消費が多くなり、石炭火力に比べ、年間あたりの費用は増加する。以下は、ある標準的な条件下での試算であり、全体で約1.76倍のCO₂回収コストとなる。

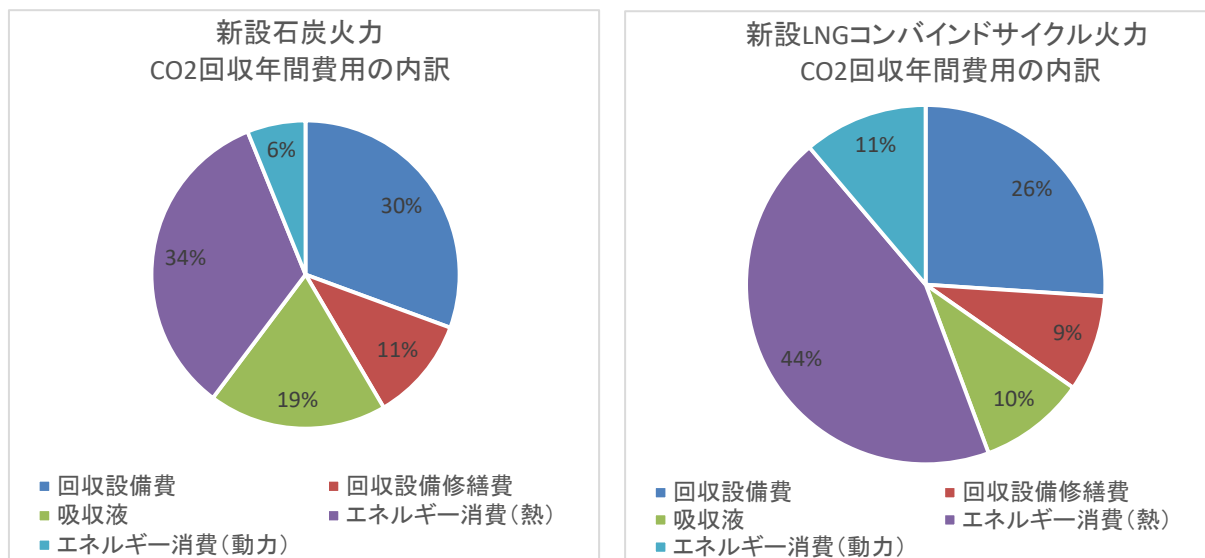


図4.3.1-17 新設石炭火力と新設LNG火力のコスト内訳の比較

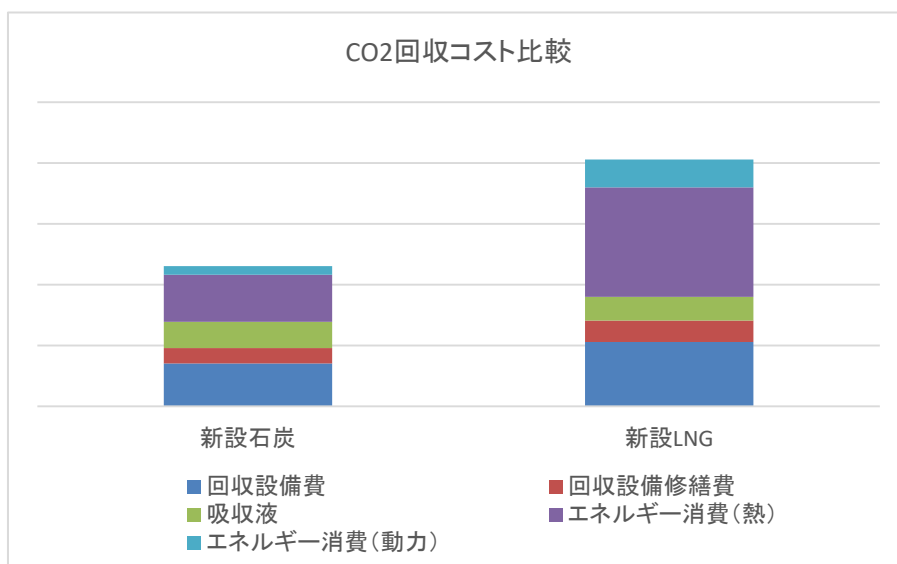


図4.3.1-18 新設石炭火力と新設LNG火力のコスト比較

b) レトロフィットを想定した CO₂回収コスト

CCSの本格展開を考えた場合、新設の火力にあらかじめCCS設備を組み込むCCSレディ

のみでなく、既存の石炭火力発電所にCCS設備を設置するレトロフィットも検討すべきである。新設の場合はCO₂回収に必要な蒸気量を予め考慮したボイラー設計が可能であるが、レトロフィットの場合は、CO₂回収のために必要な蒸気量を確保するため、補助ボイラーの追設が行われる。

次に、年間100万トンのCO₂を回収する場合の新設石炭火力と既設石炭火力のCO₂回収の年間費用（百万円／年）を比較する。既設石炭火力では、補助ボイラーを追設することで、設備費とともに補助ボイラーの変動費（主に燃料代）によって、年間の費用が増加する。以下は、ある標準的な条件下での試算であり、全体で約1.85倍のCO₂回収コストとなる。

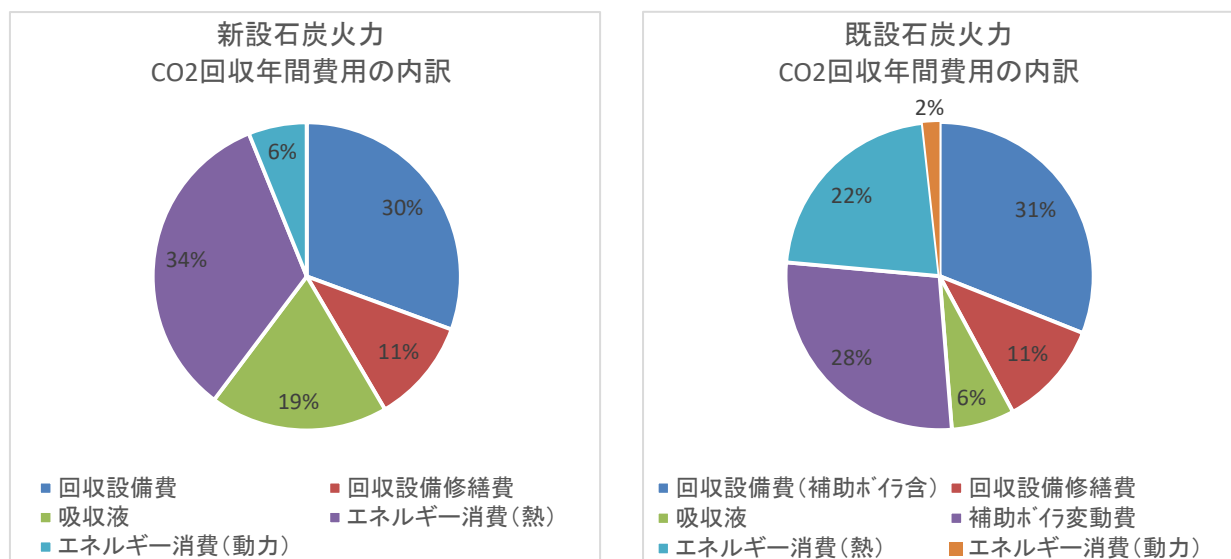


図4. 3. 1-19 新設石炭火力と既設石炭火力のコスト内訳の比較

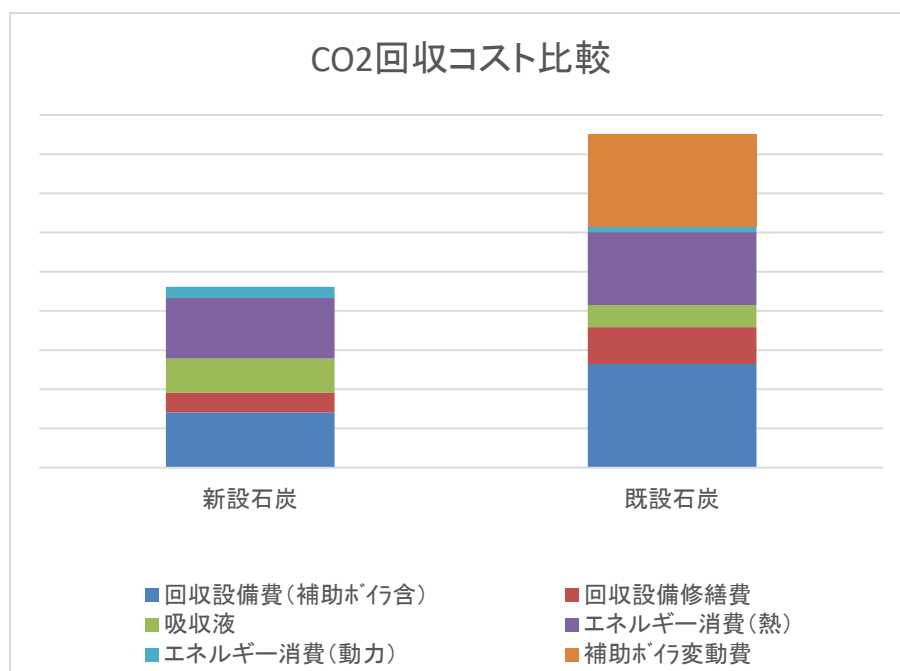


図4. 3. 1-20 新設石炭火力と既設石炭火力のコスト比較

④ CO₂ 輸送費用コスト試算事例

CO₂船舶輸送コストを評価するにあたっては、CO₂液化、一時貯留、荷積み、船舶輸送、船内におけるCO₂調整、荷下ろし、荷下ろし後のCO₂調整についてそれぞれのCAPEX、OPEXを求めてから、それらの総額を正味CO₂輸送量で割り、CO₂輸送単価を評価する（式4.3.1-5）。

$$\text{輸送コスト [円/t・CO}_2\text{]} = \frac{\sum_i(\text{CAPEX}_i \div \text{減価償却年数}_i) + \sum_i(\text{OPEX}_i) \text{ [円/年]}}{\text{CO}_2\text{輸送量} - \text{CO}_2\text{排出量 [t/年]}} \quad (\text{式 4.3.1-5})$$

パイプライン輸送コストについても上記の式4.3.1-5で算出される。上記の1)から7)に相当する諸元は、1)回収後のCO₂引受け、2)CO₂圧縮、3)パイプライン輸送、4)CO₂圧入設備への引き渡しとなる。

⑤ 鉱物固定化による CO₂ 処理コスト試算事例

地中貯留以外のCO₂処理方法として、鉄鋼スラグ利用固定化が注目を集めている。当該コスト算出にあたっては、製鉄製鋼プロセスのスラグ固定化効率データを設定の上、固定量とコスト計算を行う。一方、鉄鋼スラグはコンクリート骨材に利用できるため、その利益分を処理コストから差し引くこととなる。

(11) まとめ

CCS 事業では、地下の不確実性にもかかわらず、安全性が確保されることが絶対条件である。あらゆる事態を想定したリスク評価と、万が一異変が生じた場合の対応策を実施計画に盛り込み、事業者、規制当局、地元住民等の理解を得ることが不可欠である。

4.3.2 ISO 情報の技術事例集への反映と整合確認

技術事例集と世界各地のガイドラインとは、下表 4.3.2-1 のとおり、各々に含まれる項目はほぼ一致している。CCS プロジェクトは、一般的に、基本計画（プロジェクト分析）から始まり、サイト選定・評価、実施計画・許可申請、設計・建設、操業・管理、圧入終了、閉鎖、圧入後管理、権利移譲と連続的にフェーズが繋がっていく。

CCS 技術の国際標準化は、国際標準化機構（ISO）の下に、2011 年 8 月に設置された TC265 と呼ばれる専門委員会（Technical Committee）で進められている。具体的には、回収、輸送、貯留、Q&V（定量化と検証）、クロスカッティングイシュー、EOR の 6 つのワーキンググループで標準化作業が行われている。このうち、技術事例集と最も密接な関連にあるのが、貯留ワーキンググループであり、陸域、海域貯留の国際規格を担当し、2017 年 10 月に ISO27914（Carbon dioxide capture, transportation and geological

storage – Geological storage) を発行した。さらに、ISO27914 を補完するために、現在 TR27923 (Technical report on geological storage of carbon injection operation and infrastructure requirement) を作成中である。この TR27923 では、CCS プロジェクトにおける圧入井および観測井の設計、地上処理施設の設計、操業・維持計画、圧入操業の停止、モニタリング施設、施設の撤去および圧入停止後の管理等を網羅している。これらの内容は、技術事例集の第 5 章（設計・建設）、第 6 章（操業・管理）、第 7 章（サイト閉鎖）、第 8 章（閉鎖後管理）と対応している。また、TR27923 においては、世界の CCS 事例の一例として、日本の長岡プロジェクトおよび苫小牧実証試験事業が紹介されている。

表 4.3.2-1 CCS 技術事例集と CCS ガイドライン等と国際規格原案の対応

Stage	I				II		III			
Phase	1	2	3	4	5	6	7	8		
CCS技術事例集、RITE	基本計画	サイト選定	サイト特性評価	実施計画	設計・建設	操業・管理	閉鎖	閉鎖後管理	責任移譲	移譲後
DOE/NETL	プロジェクト分析	スクリーニング サイト選定 初期評価	サイト特性評価	許可申請	(設計・建設)	操業・管理	圧入終了	圧入後 サイト管理	閉鎖	閉鎖後 スチュワード シップ
	-	0.5~1年	3年強	2年強	-	30~50年		10~50年後		
EPA	プロジェクト計画		サイト特性評価	許可申請	坑井掘削・ 施設設計/ 建設	操業	圧入終了	圧入後 サイト管理	閉鎖	閉鎖後 スチュワード シップ
EU	-	評価	特性解析	-	開発	操業	閉鎖	閉鎖後管理	責任移譲	移譲後
	-	0.5~2年	2~11年	-	1~3年	5~50年		~20年		
DNV	-	スクリーニング 評価		許可申請	設計/建設	操業	圧入終了		閉鎖	
ISO (Under development)	Clause1 Scope Clause2 Reference publications Clause3 Definitions Clause4 Management systems	Clause5 Site screening, selection, characterization			Clause7 Well infrastructure development	Clause8 CO2 injection operations	Clause10 Closure			
	Clause6 Risk assessment Clause9 Monitoring and Validation									

※1 プロジェクトの管理のほか、PO / PA、文書管理等を含む。

また、ISO/TC265 の EOR ワーキンググループでは、2019 年 1 月に油・ガス田への CO₂ 圧入による EOR（増進原油回収）事業の国際標準 ISO27916 (Carbon dioxide capture, transportation and geological storage – Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO₂-EOR)) を発行した。この ISO27916 は、CO₂-EOR における長期的な安全圧入操業の実証および関連する貯留 CO₂ 量の記録を主眼に記述されている。さらに、現在、CO₂-EOR から CCS に移行するための技術的、法律的条件を標準化するための TR (Technical Report) を作成すべく検討中であるが、この TR の内容も、技術事例集で取り上げている諸技術、規則等の検討項目と整合するものになると思われ、今後ともこの TR の情報を入手し、技術事例集との整合性を検討していく予定である。

4.3.3 まとめ

CCS の事業化促進に向けて、CCS 事業の基本計画から閉鎖後の管理までを網羅する「CCS 技術事例集」を作成するため、国内外 CCS 事業者・研究機関との連携を通じた海

外のプロジェクト及び苫小牧実証試験サイトの情報収集を行い、2019年度までに作成したドラフトに最新情報を付加し、技術事例集第1章「基本計画」から第8章「閉鎖後管理」までの全体ドラフトを作成した。特に、これまでの課題であった苫小牧実証試験サイトの情報を入手・整理し、サイト選定、特性評価、設計建設、操業管理について、作成済みの技術事例集へ反映させた。

また、我が国においては、CCS 関連法規が未整備であり、日本の CCS 技術の海外展開もにらみ、CCS の国際標準化機構（ISO）の技術委員会（TC265）での議論との整合性を確保することも必要であることから、国際標準化の動向調査および CCS 技術事例集と ISO 内容の整合確認も実施した。

参考文献

- 1) 経済産業省産業技術環境局環境調和産業・技術室（2009）： CCS 実証事業の安全な実施にあたって, pp.41
- 2) NETL(2017a): BEST PRACTICES:Site Screening, Site Selection, and Site Characterization for Geologic Storage Projects, 2017 REVISED EDITION, NETL (National Energy Technology Laboratory), DOE/NETL-2017/1844
- 3) NETL(2017b): BEST PRACTICES:Operations for Geologic Storage Projects, 2017 REVISED EDITION, NETL (National Energy Technology Laboratory), DOE/NETL-2017/1848
- 4) Borissova, I., Lech, M.E., Jorgensen, D.C., Southby, C., Wang, L., Bernardel, G., Nicholas, W.A., Lescinsky, D.L. and Johnston, S.(2015): An Integrated Study of the CO₂ Storage Potential in the Offshore Vlaming Sub-Basin, Results of the study undertaken as part of the NCIP program, GEOSCIENCE AUSTRALIA RECORD 2015/09
- 5) ZEP (2011): The Costs of CO₂ Storage—Post-demonstration CCS in the EU, ZEP(Zero Emissions Platform)/IEAGHG
- 6) Takahashi, A. (2010) : 17.Oil-sands reservoir characterization for optimization of field development Heavy Oils、 227-234
- 7) Markusson, N., Kern, F., Watson, J. (2011) : Assessing CCS viability - A socio-technical framework, Energy Procedia, 4, 5744-5751
- 8) 経済産業省（2019）： CCS 研究開発・実証関連事業、複数課題プログラム中間評価補足資料, 経済産業省 HP, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/kenkyu_innovation/hyoka_wg/pdf/047_h01_02.pdf, (2020年3月アクセス)
- 9) 大関真一, 嘉納康二(2006) : 「二酸化炭素地中貯留」事業の実現に向けて～石油・天然ガス上流技術への期待～、JOGMEC石油・天然ガスレビュー 2006.7 Vol.40 No.4、

- 10) 経済産業省(2016) : 二酸化炭素削減技術実証試験事業(中間評価)事業成果(詳細版), 産業技術環境局環境調和産業・技術室,第30回評価ワーキンググループ資料3-3, 経済産業省
- 11) DOE/NETL (2017): BEST PRACTICES: Operations for Geological Storage Projects, 2017 REVISED EDITION, DOE/NETL-2017/1848
- 12) EPA (2013): Geologic Sequestration of Carbon Dioxide, Underground Injection Control (UIC) Program on Class VI Well Testing and Monitoring Guidance, EPA
- 13) Celia, M.A., S. Bachu, J.M. Nordbotten, S.E. Gasda, and H.K. Dahle, (2004) Quantitative Estimation of CO₂ Leakage from Geological Storage : Analytical Models, Numerical Models, and Data Needs. in Proceedings of the Seventh Gas technologies, GHGT-7,Conference on Greenhouse.
- 14) CO2CARE (2013): D1.2 Report on the current site abandonment methodologies in relevant industries, CO2CARE (CO2 Site Closure Assessment Research)
- 15) EPA(2013) : Geologic Sequestration of Carbon Dioxide, Draft Underground Injection Control(UIC) Program Guidance on Class VI Well Plugging, Post-Injection Site Care, and Site Closure, EPA (U.S. Environmental Protection Agency)
- 16) IEA Greenhouse Gas R&D Programme(2008) : Assessment of Sub Sea Ecosystem Impact, IEA GHG Technical Study Report No.2008/8
- 17) Smyth,R.C., Hovorka, S.D.(2017): Best Management Practices for Offshore Transportation and Sub-Seabed Geologic Storage of Carbon Dioxide Sterling (VA): US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. OCS Study BOEM 2018-004.
- 18) Bromhal,G., Bastidas,D.A., Birkholzer,J., Cihan, A., Dempsey,D., Fathi,E., King,S., Guthrie,G. (2014) Use of Science-Based Prediction to Characterize Reservoir Behavior as a Function of Injection Characteristics, Geological Variables, and Time, NRAP-TRS-I-005-2014 Level I Technical Report Series 12 November 2014.
- 19) IEA (2010): Carbon Capture and Storage, Model Regulatory Framework, International Energy Agency, Information Paper.
- 20) RITE (2006) : 平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書, 第 3 章 有効性評価
- 21) RITE (2007) : 平成 18 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書, 第 3 章 有効性評価

4.4 CCSの広報活動を通じた社会受容性向上策の検討

CCSの実用化には、国民全体や地元住民の理解が不可欠である。そこでワークショップ等の開催を通して、CCSの理解促進を図るとともに、参加者からのフィードバックや海外専門家との情報交換を通して、社会受容性向上策の検討や研究協力テーマの抽出を行う。また、国内外のCCSのPO（Public Outreach）や教育活動を調査・分析した上で、日本の社会特性に適したCCSの社会受容性向上の考え方や有効な手法を策定し、CCS技術事例集に反映させる。また、日本のCCS技術の普及展開のため、海外研究者等への紹介と研究協力等の条件整備を図る。

4.4.1 CCSテクニカルワークショップおよびCCSフォーラム

(1) テクニカルワークショップ

① 開催概要

技術研究組合では、経済産業省とNEDOの共催により「大規模CO₂地中貯留の事業化への取り組み」をテーマとするCCSテクニカルワークショップ2020を開催した。



図 4.4.1-1 ワークショップ風景

<日時> 2020年1月23日（木） 10:00～17:15

<会場> 虎ノ門ヒルズフォーラム 5F メインホール（東京都港区虎ノ門 1-23-3）

<参加者数> 378名（省庁、企業、大学、研究機関など）

<プログラム> （敬称略）

モデレーター：佐藤光三

（東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティア
センター教授）

10:00 開会挨拶 山地憲治（二酸化炭素地中貯留技術研究組合 理事長）

10:05 共催者挨拶 川口征洋（経済産業省 産業技術環境局 地球環境対策室長）

10:10 共催者挨拶 田中秀明

（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構環境部長）

- 10:15 趣旨説明 佐藤光三モデレーター
- 10:20 “Scaling up to industrial CCUS projects – A regional perspective North Dakota, USA” (CCUS 商用化プロジェクトに向けた大規模化:ノースダコタ州の取り組み)
John Hamling , Assistant Director, Integrated Projects, Energy & Environment Research Center, University of North Dakota (米国)
- 11:00 “Red Trail Energy (RTE) Carbon Capture and Storage (CCS) Project”
(RTE 社の CCS プロジェクト)
Dustin Willett, Chief Operating Officer, RTE, North Dakota (米国)
- 11:40 昼食休憩 & ポスターセッション
- 13:00 “Creating Value from CO₂ Monitoring” (CO₂ 貯留モニタリングからの価値創造)
Sally M.Benson, Co-Director, Precourt Institute for Energy, Professor, EnergyResources Engineering Department, Stanford University (米国)
- 13:50 “CarbonSAFE Illinois” (イリノイ州 CarbonSAFE プロジェクト)
Steven Whittaker, Director, Energy & Minerals, Illinois State Geological Survey, University of Illinois at Urbana-Champaign (米国)
- 14:40 コーヒーブレイク & ポスターセッション
- 15:10 “CO₂ storage technology and pathway to global scale-up”
(CO₂ 貯留技術とその大規模化への道)
Phillip Ringrose, Adjunct Professor, NTNU (ノルウェー)
- 16:05 「二酸化炭素地中貯留技術研究組合における安全管理技術開発の取り組み」
薛自求 (二酸化炭素地中貯留技術研究組合 技術部長)
- 17:00 総括 佐藤光三モデレーター
- 17:15 閉会挨拶 今村聡 (二酸化炭素地中貯留技術研究組合 理事)

② 講演概要

講演に先立ち、モデレーターの東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター佐藤教授から、最近 10 年間のワークショップのテーマの変遷の紹介があった。当初は要素技術の開発の報告が主体であったが、最近では CCS の大規模化、事業化がキーワードとなっており、本日も「大規模 CO₂ 地中貯留の事業化の取り組み」として、国内外の具体的事例が報告される旨、説明があった。さらに、経済性も加味した大規模 CO₂ 地中貯留の事業化について議論を深めることも狙いであることが紹介された。

最初の講演として、EERC John Hamling 副所長より、「CCUS 商用化プロジェクトに向けた大規模化：ノースダコタ州の取り組み」について報告がなされた。EERC は、世界 53 か国、1,300 以上の顧客と連携を持ち、エネルギー・環境分野で世界をリードすることを目的に研究活動を進めていることが紹介された後、CO₂ 貯留や EOR を行う具体的なプロジェクト計画が説明された。また、CO₂ 貯留層のマネージメント技術や費用対効果の高

いモニタリング技術の開発状況が報告され、さらには、CCUSの開発のインセンティブとなる税制についても紹介された。

次に、Red Trail Energy (RTE) 社の Dustin Willet 操業部長より、「RTE 社の CCS プロジェクト」について報告された。RTE 社は、とうもろこしを原料にエタノールを製造しているが、収益の拡大のため、カリフォルニア燃料基準 (LCFS) や CO₂ 隔離による税額控除 (45Q) などに着目し、CCS のプロジェクトも進めていることが紹介された。当プロジェクトは、すでに坑井掘削の許可を得ており、2020 年度には CO₂ の圧入を開始する見通しであるなど、その進捗状況が報告された。さらに、地域との円滑なコミュニケーションがプロジェクトの成功の鍵である点も講演の中で強調された。

米国スタンフォード大学の Sally M. Benson 教授からは、「CO₂貯留モニタリングからの価値創造」について報告があった。世界でのCO₂貯留量の増加率は、現在年10%程度であるが、2°Cシナリオを満たすには年率20%程度まで加速する必要がある、これには高い安全性と経済性を持つCCSの実現が必須であるとの説明があった。また、その鍵となるのは優れたCO₂監視技術の開発であり、目的に応じたモニタリング方法の組み合わせや、リアルタイムでの情報収集・分析技術の実現が重要である旨の提言がなされた。

イリノイ州立地質研究所 (Illinois State Geological Survey) の Steve Whittaker 所長からは、「イリノイ州 CarbonSAFE プロジェクト」として、米国イリノイ州における CO₂ 地中貯留プロジェクトの変遷と、現在計画中的の大規模圧入プロジェクトである CarbonSAFE Illinois の概要について報告がなされた。Decatur プロジェクト (2011～2014、計 100 万トン圧入)、IL-CCS Industrial プロジェクト (年間 100 万トン規模を圧入中) の後継事業である、CarbonSAFE Illinois プログラムでは、CO₂ 排出源として複数の産業を対象とし、30 年で 5,000 万トン規模のプロジェクトの事業化を目指して進行中である旨が示された。

ノルウェー、NTNUのPhilip Ringrose客員教授からは、「CO₂貯留技術とその大規模化への道」として、ノルウェーのスノービットとスレイプナーのCCS事業の概要とCO₂のモニタリング等で得られた知見、さらには、CO₂の船舶輸送を含む大規模CCS実証計画について紹介がなされた。また、世界的には膨大なCO₂潜在貯留量があるものの、その本格活用には、圧力管理技術と大規模貯留の設計最適化が重要であることが説明された。さらに、2°Cシナリオを満たすためには、2050年までに12,000本ものCO₂圧入井の掘削が必要であるが、今まで人類が掘削した石油生産井数に比べればごくわずかであることも紹介された。

二酸化炭素地中貯留技術組合の薛技術部長からは、NEDO 事業「安全な CCS 実施のための CO₂ 貯留技術の研究開発」の全体像と、光ファイバー計測技術およびマイクロバブル CO₂ 圧入技術の具体的成果の報告がなされた。光ファイバー計測技術では、日本国内の実証試験により、地層のひずみ計測や音響測定の有効性を確認するとともに、海外での実証試験も計画している。また、マイクロバブル圧入技術開発については、室内実験で CO₂ 貯留効率向上を確認するとともに、申川での実証試験によりその有効性を検証しつつあるこ

とが紹介された。また、社会受容性の向上、ビジネスモデルや法体系の検討、人材育成など、技術開発以外の取り組みも重要である旨の説明がなされた。

最後にモデレーターの佐藤教授から、CCSの実施によりコストもリスクも増加するという見方があるが、実際には、CCSには気候変動の被害を抑えるという大きなメリットがあり、社会全体に利益をもたらすものであることが説明された。今後、CCSの社会的価値を発信するとともに、多くの事業者が参加できるような政策を作っていくことが重要であることを表明し、本ワークショップの総括とした。

③ ポスターセッション

以下の10件の研究成果についてポスターセッションの場で発表を行い、参加者との間で意見交換、質疑応答を行った。

- 1) 長岡サイト長期モニタリング検層で得られた地層中音波速度とCO₂飽和度の関係における履歴性
- 2) Real-time hydromechanical responses during well drilling recorded by distributed strain sensing.
- 3) A preliminary experiment on the detection of bubbles in the sea with side-scan sonar.
- 4) CO₂漏出がないにもかかわらず高pCO₂値が得られるメカニズムに関する一考察
- 5) CCSの国際標準化 – CCSの普及を目指して –
- 6) Evaluation of SP and gravity perturbation in response to rainfall.
- 7) Evaluation of DAS-VSP repeatability: a case study with CT-DAS-VSP at a deep and highly deviated well.
- 8) A feasibility study of time-lapse seismic signals for a DAS-VSP survey at a CO₂ storage site in Japan.
- 9) 地層の不確実性を考慮した坑井配置の最適化ツールの開発
- 10) マイクロバブル圧入技術の適用による貯留効率向上~フィールド実証試験での検証~

④ アンケートの実施と分析

ワークショップ参加者に対して、毎年以下のアンケートを実施し、参加者の理解度、CCSに対する意見・コメントなどを収集するようにしている。

- Q1. 「CCSの関心分野」
- Q2. 「CCS実施の必要性」
- Q3. 「日本国内でCCSの実用化を実現するための取組み」
- Q4. 「今回のワークショップテーマへの理解度」
- Q5. 「今回のプログラムで特に関心のある講演」
- Q6. 「今回のポスターセッションで特に関心のあったテーマ」

- Q7. 「次回の CCS ワークショップの開催時期」
- Q8. 「次回の CCS ワークショップの開催時間」
- Q9. 「意見、感想、開催テーマの希望」
- Q10. 「技術事例集への反映を希望する項目」
- Q11. 「回答者の所属機関が保有・開発中の CCS 関連技術・サービス」
- Q12. 「「二酸化炭素地中貯留技術研究組合」の活動等に対する意見」

アンケート項目のうち、Q2. 「CCS 実施の必要性」と Q4. 「今回のワークショップテーマへの理解度」の結果を図 4.4.1-2 に示す。

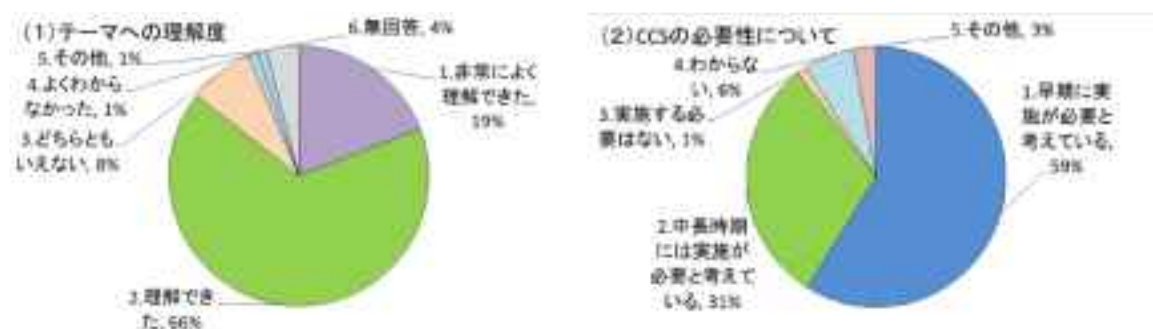


図 4.4.1-2 アンケート結果：テーマへの理解度と CCS の必要性

また、アンケート Q9. 「意見、感想、開催テーマの希望」などについて、参加者から多くのコメントがなされている。以下はその主なものである。

- ・世界の CCS 関連の動向や各国政府の考え方について知りたい。
- ・CCS 導入に当たって、その具体的なコスト等の経済性について紹介して欲しい。
- ・日本における CCS を進める上での法的問題について知りたい。
- ・日本国内の CCS の検討状況について知りたい。
- ・モニタリング等の個別技術の現状と将来展望について知りたい。
- ・CO₂の取得コスト、圧入コスト等トータルでの比較表について説明して欲しい。数量目標、その削減貢献度等の考察など。
- ・日本における商業 CCS の計画もしくは見通しと課題。
- ・米国、ノルウェーなどで CCS が進んでいる事に驚いた。
- ・大変参考になる講演が多かった。継続的に実施してほしい。
- ・社会的合意形式のあり方、課題について知りたい。
- ・海外の事例がきけて大変勉強になった。
- ・ポスターセッションの時間をもう少し増やしてほしい。
- ・大変興味深い内容でした。今後も最新動向の紹介をして頂けると幸いです。

これらのアンケート結果を参照し、参加者の CCS の理解向上策、社会受容性向上策の検討を行い、次回以降のワークショップのテーマの設定や運用の改善につなげている。

アンケート Q2、Q4 の結果から判断して、CCS の実用化に対する期待は高く、またワークショップを通して CCS の理解度向上につながっており、この社会受容性向上策が有効に機能していると評価できる。

(2) 海外専門家との意見交換

テクニカルワークショップの翌日、海外招待講演者と技術研究組合研究員との間で、CCS 実証試験に関する知見・情報交換と社会受容性向上策に関する意見交換を行った。以下、その概要である。

① CCS 実証試験に関する知見・情報交換

- ・日本においては、長岡実証試験、苫小牧実証試験を通して基盤技術が構築された。一方、実用化・商用化に向けては、さらなる大規模化に対応した技術開発が必要である。さらに、経済性の評価、法整備、社会受容性の向上が重要となる。
- ・米国の Decatur の CCS プロジェクトを通して、関連する技術開発に加えて、法整備や許認可制度への対応の重要性を認識した。たとえば、ADM イリノイプロジェクトでは、「CO₂ 圧入後の貯留層の圧力低下」、「CO₂ プルームの安定化」などの評価を基に、圧入後サイト管理期間を 10 年間に短縮する認可を EPA から取得した。このような対応が的確に行われるようにするため、CO₂ 監視技術の高度化が重要である。
- ・ノルウェーには、20 年以上におよぶ CCS の建設・運用の経験がある。現在、米国と共同して、経済的な CO₂ 貯留適地の探索手法の研究をしている。また、経済的 MVA の確立や坑井の掘削方法や新材料の研究も進めている。

② 社会受容性向上策に関する意見交換

- ・北海道胆振東部地震では、CO₂ 圧入との関連性が一部で議論となったが、科学的な解析により、関連性がないことが明らかになった。また、長岡実証プロジェクトでは、2 回の大地震を経験したが、CO₂ 貯留の安全性に問題は生じなかった。技術者が科学的知見に基づき、正しい情報発信をすることが、CCS の社会受容向上につながる。
- ・事業者や担当技術者の科学的根拠に基づく情報発信は非常に重要である。一方、それだけでは、国民や地域住民の理解を完全には得られないケースもある。その意味で、専門家や有識者からなる第三者委員会を設け、事業者からは独立した形で情報発信することも重要である。

(3) CCS フォーラム

CCS の専門家によるフォーラムを昨年度に引き続き実施した(昨年度までに 5 回開催)。今年度は 4 回開催し、CCS の技術的動向、普及のための枠組み、社会受容性向上策等について情報共有を図った。以下、その活動概要である。

① 第6回 CCS フォーラム

<日時> 2019年4月17日 10:00～11:45

<会場> AP 虎ノ門 B ルーム

<参加者数> 55名（委員並びにオブザーバーなど）

<プログラム>

- ・ G20 に向けた CCUS の国際協力強化に関する提言とその背景について

(C2ES : Fatima Maria Ahmad)

(敬称略、以下同様)

<概要>

- ・ 北米は多くの貯留適地の特定、性能評価を実施しているが、その他の地域（アジア・ヨーロッパ・アフリカなど）は更なる実施が必要。世界各地域とも、CCUS に関する法的及び政策的な枠組みを作る必要があるが、人的リソースの制約も多い。
- ・ 地下貯留する CO₂ の所有権や責任の問題については、それほど取り決めが行われておらず、対応策として CO₂ の貯留に関する信託基金を作ることが考えられ、更に貯留地点の財産権、所有権の問題にも対応しなければならない。
- ・ 民間部門や組織を巻き込むことは非常に重要であるが、民間からの投資拡大に対する大きな問題として、法規制の枠組みの欠如や、風評上のリスクが挙げられる。
- ・ CCUS 国際ラウンドテーブルにおいて、CCUS の価値を軽井沢の関係閣僚会合と G20 のサミットの声明で強調すること、CCUS を G20 の行動計画に統合すること、およびカーボンリサイクルの推進に関する提言が出された。

② 第7回 CCS フォーラム

<日時> 2019年7月19日 13:30～15:30

<会場> AP 新橋虎ノ門 B ルーム

<参加者数> 53名（委員並びにオブザーバーなど）

<プログラム>

- ・ 海洋汚染防止法とロンドン議定書の比較 (RITE 渡辺雄二)
- ・ 金融機関の CCS プロジェクトへの対応について (GCCSI 村上泰郎)

<概要>

- ・ 適用水域について、基本的にロンドン条約・議定書は内水（領海基線の内側）を除く全ての水域が対象であるが、条項の中に、内水においても一般海域と同じような制度を設けて可能な限り管理するようという項目があるため、実質的には全ての海域が対象。一方、海洋汚染防止法は、法の趣旨から言うと、EEZ 内に限定されていないが、相手国の EEZ は相手国の法律が優先されるため、実質上は適用されない。
- ・ グリーン投資銀行（GIB）で CCS を対象分野として明記しているのは、英国の UK Green Investment Bank のみ。国際金融機関として、世界銀行が運用を担う CCS

Trust Fund および ADB が運用を担う CCS Trust Fund のいずれも、CCUS に係る Capacity Building やパイロットプロジェクトへの支援を実施。

- ・プロジェクト・ファイナンスの場合は、融資が 6～7 割となることが多いが、EOR プロジェクトは銀行側としてはリスクが高いことから、Petra Nova ではスポンサーの出資が多くなっている。ただし、石油増産効果の高い CO₂-EOR であることに加え、スポンサーの強いコミット、DOE のグラント、税制支援が組み合わさった上で、JBIC およびみずほ銀行の融資が成立した特殊なケースと言える。
- ・CCS に ESG の観点からプラス価値を与えるためには、CCS に対する政策支援が整いプロジェクトの採算性が向上する必要があるとの銀行等の見解。

③ 第 8 回 CCS フォーラム

<日時> 2019 年 10 月 15 日 14:00～16:00

<会場> TKP 新橋カンファレンスセンター ホール 14E

<参加者数> 55 名（委員並びにオブザーバーなど）

<プログラム>

- ・環境配慮型 CCS 実証事業 輸送技術について（日揮 大河内春夫）
- ・CCS の社会的受容性に関する国内外状況（電力中央研究所 窪田ひろみ）

<概要>

- ・日本では陸域の貯留ポテンシャルが少なく、一方で周辺海域にポテンシャルが存在すること、また、火力発電所等の主要排出源は沿岸部に集中していることを考慮すると、海域貯留が合理的と考える。しかし、海域貯留を目的とした分離回収、海上輸送、圧入までの一連のシステムは未だ国内で実績が無いため、商用段階に至る前に技術的成立性、安全性、経済性の観点から、実際の貯留サイトを対象とした試験による実証が必要である。
- ・近距離ではパイプラインの方がコストは小さいが、遠距離では船舶輸送が有利となる。また、パイプラインは固定設備のため貯留サイトの変更などへの柔軟な対応が難しいのに対し、船舶では対応可能であるなど、船舶輸送が有利な点が多い。
- ・陸上設備は、海上輸送能力に合わせて設備容量の最適化を行い、合理的なコストでの建設を検討する必要がある。また、港湾設備は、回収設備の近隣で出荷場所を確保の上、設計・建造を検討する必要がある。さらに CO₂ 輸送船と圧入船は、既存の LPG 内航船の建造技術に基づき建造できる見通しである。
- ・Social License とは、企業が社会貢献や環境対策への投資などを継続的に行うことで地域がこの事業に対して心理的な受け入れを与えるというものである。Social License は、ベースとなる「経済的正当性」に加え、「社会的-政治的正当性」・「相互信頼」の要素を積み上げ、最後に「制度的信頼」と分類される。各要素の状況を確認することでプロジェクトの acceptance 度合いが推測できる。

④ 第9回 CCS フォーラム

<日時> 2019年12月24日 13:30～15:30

<会場> AP 虎ノ門 A ルーム

<参加者数> 47名（委員並びにオブザーバーなど）

<プログラム>

- ・影響が拡大する金融イニシアティブ ～課題と今後の展望～

（三井物産戦略研究所 本郷尚）

- ・超臨界 CO₂ サイクル発電システムの開発 （東芝エネルギーシステムズ 高橋武雄）

<概要>

- ・気候変動に係る国際的な枠組みが決まらず、各国の政策が弱い状況下で出てきたのが金融イニシアティブである。政策が確立していれば、金融イニシアティブは不要。
- ・企業は気候変動に対する目標設定が重要であるが、単に目標のみでなく、そこに至る道筋についても提示する方向になっており、「移行」(Transition)がキーワード。
- ・金融イニシアティブには様々な種類があり、投融資側主導のものか第三者によるものか（更に適格要件を示すものと情報開示を求めるものとの区分）と、それぞれ民間主導か政府主導かで分類できる。また互いに競合関係のものもある。評価のクライテリアとして、数値基準や技術リストがある。
- ・金融イニシアティブによる情報開示は今後一層進む。なお、投資家は比較や評価に活用するため、情報開示の範囲や定量化の手法などの共通化、ルール化が必要。
- ・金融と産業との対話が必要と認識。
- ・超臨界 CO₂ サイクル発電は、炭化水素系燃料を酸素燃焼させた燃焼ガス（CO₂と水）を、タービンでの仕事後に汽水分離することにより、一般的な CO₂ 分離回収設備を必要とせず、サイクルの中で自動的に純粋な CO₂ が取り出せるメリットがある。
- ・超臨界 CO₂ サイクルの仕様は高温かつ高圧であり、蒸気タービンとガスタービンの特性を併せ持つようなタービンが必要となるため、設計においては、ガスタービンの冷却技術や燃焼技術、蒸気タービンの高圧技術や大型材料技術をうまく組み合わせている。

4.4.2 学生向け、一般向け PO 教材改訂版の構築

CCS を普及させていくには、地元関係者だけではなく、国民全体の CCS の認知度向上と理解促進が欠かせない。したがって CCS の認知向上・理解促進のためには、教育や一般社会人向けセミナーなどの場で使える標準的な PO 教材があることが望ましい。また PO 教材の対象は、あらゆる国民層であるが、対象者の理解レベルに合った内容にする必要があり、2017 年度はまず小中高生を対象として、試作、試用、評価を行った。そして 2018 年度は対象を一般の大人として、PO 教材の開発を行った。一方で、実際の CCS 教育の中で対象者の理解度に合わせて、説明の力点の変更や補足や逆に簡素化などの工夫をすることも必要と考えられる。そのためには PO 教材を重要点（地球温暖化・CO₂削減方法・電力バランスと CCS の位置づけ）を理解する部分を補強した上での簡略化が 2018 年度の課題として残った。そこで 2019 年度は 2018 年度教材を実際の CCS 教育で活用、詳細な意見を収集分析して、課題を解決する適切な教材となるように改良した。

教材はセミナーや配布資料としても活用できるパワーポイントのスライドとし、CO₂貯留のメカニズムについて理解を助けるために、簡単な実験デモを合わせて行う形式としている。改良した教材の構成は、表 4.4.2-1 のとおりとした。

表 4.4.2-1 教材の構成

1. 地球温暖化と温暖化抑制の取り組み (CCS の必要性)	2. CCS (CO ₂ 回収・貯留)技術
1. 1. 地球温暖化の概要 ・温暖化の状況 ・一次エネルギー構成と化石燃料期限の CO ₂ の増加 ・温暖化の原因	2. 1. 電力バランスと CCS の必要性 ・再生可能エネルギーと火力発電 ・火力発電の重要性（調整力）
	2. 2. CCS の全体概要 ・ CCS の全体概要 ・分離回収技術の概要 ・貯留技術の概要
1. 2. 温暖化対策 ・今後の気温上昇の見通し（IPCC データ） ・国際的な取り組み ・日本の現状と排出削減目標 ・二酸化炭素を減らす方策	2. 3. CCS プロジェクト 世界/日本 ・世界の CCS プロジェクト ・日本の CCS プロジェクト
	2. 4. CCS 実用化に向けた技術と取り組み ・ CCS の安全な実施のための技術 ・日本の貯留ポテンシャル ・長岡のモニタリングデータ

具体的な補強点を表 4.4.2-2 および図 4.4.2-1 に示す（別途各種データ・情報の最新化実施等）。なお追加した『温暖化の状況（2100 年未来の天気予報）』、『電力バランスゲーム』はインターネット上で公開されているため、セミナー実施の場合、受講者に対して事前に確認してもらうよう依頼も始めた。

表 4.4.2-2 教材の追加ページ

	追加ページ	狙い
1. 1	温暖化の状況(2100年 未来の天気予報)(環境省 HP)	温暖化理解を深めるため紹介
1. 1	気温上昇と降水量の世界分布	温暖化に対する楽観的な見解に対して、地球規模での温度ばらつきや降水量ばらつきデータを提示
1. 1	世界のエネルギー消費量(この200年の変化)	人口増加もグラフに加えて、産業革命以降の変化の理解を促進
1. 2	気候変動に関する IPCC の報告書	IPCC 説明の補強
1. 2	二酸化炭素(CO ₂)を減らすために(削減イメージ)	温暖化対策技術の構成(IEA シナリオ)を補足するために作成。温暖化は多くの対策の積み重ねで実現させることを説明。
1. 2	省エネについて(資源エネルギー庁 HP)	アンケート結果(私は何ができますか)の反映
2. 1	発電方式の移行	日本の電源構成(過去・現在・将来)を理解のために追加。安易な再生可能志向に対して、コストについても記載
2. 1	電力バランスゲーム(資源エネルギー庁 HP)	火力発電による調整力の重要性を理解のため、資源エネルギー庁の HP を紹介
2. 2	実験 ～ 二酸化炭素の液化 ～	過去の実験で最も関心の高かった二酸化炭素の液化実験を標準化
2. 4	実験 ～ 光ファイバー ～	『CCS の安全な実施のための技術』の理解度を高めるために実施
参考資料	各種 HP へのリンク	アンケート結果(自分でも調べてもう少し詳しく理解したい)の反映
参考資料	【参考資料】CO ₂ の分離・回収技術	図を用いて、分離回収技術開発の必要性を説明
参考資料	【参考資料】温暖化の原因(CO ₂ 分子の性質)	二酸化炭素が赤外線を吸収する理由を説明



図 4.4.2-1 追加したページ(抜粋)

なお2018年度の教材において、より高い専門的な知識が必要と思われる以下の内容は、参考資料として教材最後に添付し、全体の流れをより理解しやすいように簡略化した。

- ・長期の気温変動と現在の温暖化の違い
- ・ガスの地中貯留・圧入技術の実績
- ・世界の貯留ポテンシャル
- ・貯留時のCO₂の形態

- ・ CCS のコスト
- ・ 主要国の戦略（各国の電源別電力構成）

以上の改良を行い、2019 年度は 17 回 365 名（一般 7 回 134 名、小中高生 10 回 231 名）に対して CCS 教育を行い、実施後にアンケートを行った（図 4.4.2-2）。



図 4.4.2-2 教材を用いた CCS 教育

アンケート結果として、CCS の認知度（「よく知っていた」と「ある程度知っていた」の合計）は全体で 20.8%と 2018 年度（3 回実施で各 57%、75%、5%）よりもおおむね低い。一般的な CCS の認知度の 10%程度（第 8 回 CCS フォーラム資料「CCS の社会的受容性に関する国内外状況（窪田ひろみ氏）」）と比べて若干高めとなっている。これは教育受講者の環境問題への関心度の高さを考慮すれば妥当な値と思われる。それでも認知度は低く、引き続き認知活動が必要である。

次に CCS 技術の理解度（「よくわかった」または「だいたいわかった」）は 97.2%と、2018 年度の水準（2018 年度は 100%であるが対象は 40 名）を維持した上で改良が行われたことがわかる。

CCS の普及の是非は、肯定的な意見が（「積極的に広めるべき」または「ある程度広めるべき」）90.5%（2018 年度結果（9 割以上）に近い）と 2018 年度と同水準であった。しかし表 4.4.2-3 のような否定的な回答理由があり、理解から許容へのステップアップを図る上で更なる実践・改訂を行い課題を精査する必要がある。

表 4.4.2-3 CCS 普及に関して否定的な理由例

CCS 普及に関して否定的な理由	
優先度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出さない事も重要である。 ・ 問題を先送りしているだけで打開策ではない。 ・ CCS は貯める技術なので減らす技術と並行しておこなっていくべき。 ・ 地面を掘るのに膨大なお金がかかるから。
地震等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地層変化が心配（長期化による自然破壊）である（口頭で地震への不安コメントもあり）。
慎重論	<ul style="list-style-type: none"> ・ まだ進行中の技術のためどこにデメリットが隠れているか分からないから。 ・ いい方法なのかもしれないが、本当に安全か不安ではある。数百年単位とかで見たときに。 ・ 原子力発電の時も安全と言われていたけれど事故が起きたから、どちらとも言えない。 ・ 地中に住む生物や地盤に全く影響がないとはいえないから。 ・ リスク計算が難しいから。

4.4.3 日本版 PO マニュアルの整備

本年度は日本版 PO (Public Outreach) マニュアルの第一版を作成した。CCS 事業のうちでも特に CO₂ 貯留業務について、貯留地周辺の方々の事業に対する理解を得るための PO 活動の基本的手順をまとめたものである。下記の表にマニュアルの構成を示す。

表 4.4.3-1 日本版 PO マニュアルの構成

構成	本文および添付資料
本文の構成	【準備段階】 1. PO 活動の準備 【PO 活動の実施】 2. 立地に係る PO 活動 3. CO ₂ 圧入およびモニタリング段階の PO 活動 4. サイト閉鎖と閉鎖後管理に係る PO 活動
添付資料の構成	① CCS 説明資料 ② PO 活動実施用テンプレート集 ③ PO 活動事例集 ④ QA 集

(1) PO マニュアル本文の概要

CCS 事業は、一般的に、基本計画、サイト選定、サイト特性評価、実施計画、設計・建設、操業・管理、サイト閉鎖、閉鎖後管理と展開される（本報告書 4.3.1 参照）が、本マニュアルでは PO 活動が特に必要となる設計・建設以降の事業段階を対象とした。なお、地元の方々への対応という視点で、その活動をイメージしやすくするよう、設計・建設を「立地」、操業・管理を「CO₂ 圧入およびモニタリング」と称し、サイト閉鎖と閉鎖後管理は一つの段階にまとめ「サイト閉鎖と閉鎖後管理」とした。

内容的には、自治体との連携方法、説明会の開催手順、説明会実施時の留意点などを記し、一般論ではなく、具体的な手順書として活用できることを重視した。

上記の PO 活動を展開するにあたり、PO 活動の組織作りなど、準備活動が必要となるが、その活動内容も本マニュアルの対象とし、冒頭にその手順を記載している。

(2) 添付資料の概要

マニュアル本文の手順に従って、PO 活動を進めて行くが、共通して利用する参考資料や情報を整理したのが添付資料である。

- ① CCS 説明資料は、地元説明会等において、CCS の意義・目的や概要を紹介するものである。その内容は、前項で紹介した「学生向け、一般向け PO 教材」の内容を活用

するものであり、当教材に合わせて、その内容をアップデートしていく。

- ② PO 活動実施用テンプレート集は、説明会の開催案内、プレスリリース、問い合わせ対応など、いずれの PO 活動段階においても利用されるような資料について、テンプレートとして整理したものである。
- ③ PO 活動事例集は、PO 活動の先行事例や PO 活動で使用されるコミュニケーション手法をとりまとめまとめたものである。特に、昨年度までに調査した米国のベストプラクティスマニュアル（DOE/NETL, 2017）の内容を参考にして作成した。
- ④ QA 集は、PO 活動で想定される質疑応答用のものである。基本的には、本書 4.2.3 項の「科学的根拠に基づいた QA 集」をそのまま利用するようにし、その内容が拡充されるたびに、本添付資料もアップデートさせる。

参考文献

- 1) DOE/NETL (2017) : Best Practices for Public Outreach and Education for Carbon Storage Projects

4.4.4 国際動向を踏まえた社会受容性向上のための要件整理

(1) はじめに

CO₂ 地中貯留技術に関する国際標準技術委員会（ISO/TC265）が整備を進める CCS に関する国際標準は、CCS 事業の円滑なマネジメントのため、社会受容性の構築と維持を重視している。そこで、今年度は、国際動向を踏まえた上での社会受容向上のための要件について検討した。

(2) CCS 国際標準の求める社会受容性向上策

CCS 事業の社会受容性を扱う国際標準としては ISO/TC265 による ISO 27914 CO₂ 地中貯留(2017)が存在する。ISO 27914 の社会受容性形成に関連する要求事項を整理して表 4.4.4-1 に示した。CCS 事業の円滑なマネジメントを目的として、ISO 27914 ではまずステークホルダーの同定を行い、事業者とステークホルダーそれぞれとの相互理解を促進し得るステークホルダーエンゲージメント計画を策定するとともに、何らかの事態の際にオープンで効果的なステークホルダーとの対話を可能にするリスクコミュニケーション計画を準備し、また、操業中のコミュニケーション計画を準備することを求めている。

表 4.4.4-1 ISO 27914 ステークホルダーエンゲージメントの要請

項目	概要
ステークホルダー同定	対象：意思決定者、従業員、シェアホルダー、学会、保険会社、銀行、地域住民、業者、消費者、NGO、政府、自治体、規制当局、労働組合、その他の個人やグループなど。
ステークホルダーエンゲージメント計画	プロジェクト開始前にステークホルダー別にエンゲージメントプランを策定 相互理解と信頼の確立が目的。CCS 事業の便益について明確なメッセージを準備
リスクコミュニケーション計画	オープンで効果的な対話の促進。公衆の不信を招かない。 事業所従業員にコミュニケーションの方針を徹底 貯留層の挙動が予測と乖離した場合の対応について、オープンで効果的な対話
操業中	回収・輸送・貯留を含む全 CCS プロジェクト内のオペレーター、規制当局、ステークホルダー、コントロールセンターの職員を対象に、コミュニケーション計画を策定

(3) CCS 事業の社会受容性向上のための要件

現在、日本国内にはCO₂海底下廃棄に関係する法律が存在するが、CCS事業そのものを規制する法規は存在しない。したがってISO 27914の求めるステークホルダーエンゲージメントが、CCSの社会受容性向上についての規範となる。

これまで日本ではステークホルダーエンゲージメントという観点での社会受容の形成は

行っていない。しかし、苫小牧CCS実証試験では地域社会とのコミュニケーションに注力し、良好な相互理解を形成してきた実績がある。今後、日本のCCS技術を海外に展開するには、社会受容性の形成の経験を活用するとともに、CCS国際標準の求めるステークホルダーエンゲージメントに留意した方向で対応できるようにすべきである。なお、ステークホルダーエンゲージメント計画の策定にあたっては、CCSのステークホルダーエンゲージメント用マニュアル（Ashworth, 2011 ; Jammes, 2013）等が参考となる。

参考文献

- 1) ISO/TC265 (2017) : ISO 27914 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage -- Geological storage, pp.59
- 2) Ashworth,P. et al. (2011) : Communication/engagement toolkit for CCS projects, CSIRO EP105893, pp.50
- 3) Jammes,L. et al. (2013): Social Site characterization & stakeholder engagement, GCCSI, pp.132

4.4.5 研究成果の海外展開普及条件整備

(1) はじめに

国際学会、テクニカルワークショップ他、海外研究員との交流を通して、技術研究組合の研究成果の紹介を進めてきており、高い注目を得るようになってきている。将来的には、研究成果の海外展開を通して我が国の CCS 技術の海外展開を図っていく計画である。

そこで、本項ではまず、技術研究組合の研究成果の普及活動実績を紹介するとともに、研究成果の海外への普及条件整備について分析・整理する。

(2) 海外への研究成果の普及展開活動実績

今年度、技術研究組合として、研究成果の海外への普及活動を積極的に行った。特に、学会参加や技術交流のための海外出張時においては、各担当者の専門分野を中心に、研究成果の紹介・PR に努めた。以下は、海外出張の実績である。

- ・光ファイバーセンシング技術実用化シンポジウム（中国, 2019 年 4 月）
：光ファイバーによる音響測定 of 発表と光ファイバーセンシング技術の情報収集
- ・ノースダコタ大学 EERC との技術打ち合わせ（米国, 2019 年 5 月）
：ノースダコタ州の CCS 実証試験サイトで実施予定の光ファイバー測定試験の計画について、ノースダコタ大学 EERC (Energy and Environmental Research Center) 関係者との技術打ち合わせ
- ・アジアオセアニア地球科学学会（シンガポール, 2019 年 8 月）
：光ファイバーを用いた地層変形モニタリングに関する発表と情報収集
- ・IEAGHG モニタリングと環境研究のネットワークミーティング(カナダ, 2019 年 8 月)
：CO₂の海洋漏出検出・環境影響評価に関する発表と情報収集
- ・米国 CCS プロジェクトのレビュー会議（DOE/NETL 主催）(米国, 2019 年 8 月)
：米国プロジェクトで用いられている地質モデリング手法およびモニタリング手法に関する情報収集
- ・世界石油工学技術者協会（SPE）ワークショップ（米国, 2019 年 8 月）
：光ファイバー構内設置手法・光ファイバーによる音響測定や坑井健全性評価手法の情報収集
- ・米国ノルウェー二国間ミーティング（米国, 2019 年 8 月）
：大規模圧入サイトにおける CO₂モニタリングの情報収集
- ・世界石油工学技術者協会（SPE）年次技術会議（米国, 2019 年 10 月）
：坑井健全性調査、ジオメカニクス解析の情報収集
- ・日英 CCUS ワークショップ（英国, 2019 年 10 月）
：英国の CCS プロジェクト動向に関する情報収集
- ・CCUS シンポジウム（オーストラリア, 2019 年 11 月）
：オーストラリア 温室効果ガス技術・共同研究センター（CO₂CRC）のシンポジウム

において、光ファイバー測定技術およびマイクロバブル CO₂ 圧入技術に関する発表と情報収集、海域 CO₂ 圧入プロジェクト動向の情報収集

- ・ テキサス大学 CCS コンファレンス（オーストラリア, 2020 年 1 月）
： リスク管理やアウトリーチなどについての情報収集
- ・ 海域 CO₂ 貯留ワークショップ、NGI との技術打ち合わせ（ノルウェー, 2020 年 2 月）
： 海域貯留と海洋環境影響評価に関する発表と情報収集、ノルウェー地盤工学研究所（NGI）との光ファイバー測定によるジオメカニクスモニタリング等についての技術打ち合わせ
- ・ ローレンス リバモア国立研究所（LLNL）との技術打ち合わせ（米国, 2020 年 3 月）
： 微小振動観測、光ファイバーによる DAS 計測に関する情報収集

(3) 海外展開普及条件整備

海外との研究協力が進展すると、技術開発ばかりでなく、研究成果の普及展開のための条件整備も重要となる。具体的には、海外展開普及に関する契約締結や法規制への対応などである。

海外展開の方法、流れは様々であるが、研究交流から始まり、共同試験を行い、さらに、ビジネスを意識したライセンス契約へ展開するという流れが一般的である。その流れを念頭に置き、当研究事業で得た実践的なノウハウも踏まえ、研究成果の海外展開に資する契約のあり方、法対応などを調査・分析し、以下に取りまとめた。

① 海外機関が主導するプロジェクトへの参加

海外との研究協力として、海外の研究機関が主導するプロジェクトに参加し、技術交流や情報収集を行うというケースも多い。その場合、参加に係る契約はあらかじめ用意されており、その契約条件下で参加することが一般的である。

当然、プロジェクトごとに契約内容は異なってくるが、標準的な要素が多い事例として、**Horizon 2020 Model Consortium Agreement** について調査した。以下、その構成・概要、留意点について整理する。

a) 構成・概要

Horizon 2020 は全欧州規模で実施される、研究および革新的技術開発促進のための枠組みである。その傘下で、数多くのプロジェクトが実施され、複数の機関がコンソーシアムを形成し、研究開発を推進することとなる。

そこへの参加条件等を定めた標準的な契約形式が **Horizon 2020 Model Consortium Agreement** であり、以下で構成されている。

- ・ 序文
- ・ コンソーシアム契約

Section1: 定義 Section2: 目的 Section3: 効力の発生、実施期間

Section4: 参加者の義務 Section5: 他機関への責任 Section6: 管理体制
Section7: 費用分担 Section8: 成果の取扱い Section9: 成果へのアクセス権
Section10: 秘密保持 Section11: 催促 Section12: 署名

b) 留意点

Horizon 2020 の枠組下でプロジェクトを組成する場合、標準契約をベースにしつつ、プロジェクトの特徴や参加機関の意見を反映し、個別の契約書を作成する。

プロジェクトの情報収集が主体で、貢献度が少ない場合は、当該機関の意見反映は難しく、参加契約書の内容を確認し、問題ないことを確認した上で、契約書に署名することが一般的な流れである。

一方、研究成果の提供、多大な費用負担など、プロジェクトへの貢献度が大きい場合は、契約書の内容に適切な意見出しをすべきである。特に、費用分担、成果の取扱い、成果へのアクセス権、秘密保持については、当該機関の貢献度に応じた主張をすべきであり、その内容を契約書に反映させることが重要となる。

② 海外共同実証試験に関する契約・MOU

研究が進み、研究開発品の性能試験を行うため、実証サイト持つ海外研究機関と共同研究を行うケースもある。その場合、まず、包括的な覚書（MOU）を締結し、具体的な実証試験計画が定まった段階で、作業・費用分担、知財、責任範囲などを明記した契約を締結する流れが一般的である。以下、包括的 MOU と実証試験のための個別の契約について、その内容に盛り込むべきポイントを説明する。

a) 包括的 MOU

包括的 MOU は、対象とする研究機関と研究協力の基盤を築くためのものであり、研究協力に必要な一般的な取り決めをしておけばよい。具体的には、「序文」、「目的」、「研究協力範囲」、「運営」、「秘密保持」、「知的財産の扱い」、「輸出制限情報」、「紛争解決・責任範囲」、「条項・解約・修正」、「譲渡」などを包括的に定めておけば十分である。

例えば、「研究協力の範囲」は、研究の目的・概要などを取り決めておき、実証試験の内容が具体化した段階で、互いの分担等を追加していけばよい。

研究協力の初期段階で、詳細な取り決めをしようとした場合、協議に時間がかかり、肝心の研究協力自体が進まなくなる恐れがある。

b) 実証試験に係る契約

包括的 MOU に基づき、研究協力が進み、具体的な実証試験へとつながった場合、互いの責任範囲を明確にする必要が生じる。特に、大規模な現場作業を伴う場合は、作業分担、費用分担、トラブル発生時の責任分担を明確に定める必要がある。この取り決めは、包括的 MOU に追記する形式で行うか、別途契約を締結するかによる。

また、互いに保有する技術、ノウハウが第三者に流出しないよう、自己が保有する技術等を明確にしたうえで、秘密保持契約を結ぶことも重要である。

さらに、管轄裁判所の取り決めも重要である。相手方の海外機関が契約案を提示する場合、管轄裁判所を相手国機関の所在地（つまり外国）とするケースが多い。当案を受諾すると、相手方が安易に裁判を起こすリスクが生じる。一般的なルールでは、管轄裁判所は被告側の所在地となっており、少なくとも当ルールにそって、管轄裁判所を設定するよう交渉することが重要である。

③ ライセンス契約

研究開発成果が実証され、実用に資する段階になると、当該成果の活用を希望する海外機関へのライセンス契約に進むこととなる。

国際ライセンス契約の留意点と基本構成について、当事業の 2018 年度報告書に記載したが、以下、その概要を紹介する。

a) 国際ライセンス契約の留意点

国際ライセンス契約においては、国内契約とは異なり、以下のような国際取引特有の内容や条項規定があり、留意が必要となる。

ア) 契約の詳細性

国内契約において、「契約書に規定のない事項は、信義・誠実の原則に基づき、交渉合意する」といった規定を設定するのが通常であるが、英米法においては、未決定条項を多く含む合意書は、契約としての効果に問題が残る。また、最終契約は、それ以前の口頭や書面合意に優先する。

イ) 準拠法規定

国際契約においては、日本国内法が適用されるとは限らない。契約準拠法は、一般的に当事者同士の合意による指定が認められており、契約書に契約準拠法を規定するケースが多い。

ウ) 紛争処理規定

当該契約に関連して発生した、トラブル、紛争を裁判で解決する場合、管轄裁判所を当事者間であらかじめ定める「合意管轄条項」を規定することが多い。また、最終的紛争処理手段には裁判の他に仲裁がある。

b) 国際ライセンス契約の基本構成

国際ライセンス契約において、以下が標準的な構成となる。

- 1) 標題
- 2) 前文
- 3) 定義規定
- 4) 実施権の許諾
- 5) 実施料の支払い
- 6) ライセンサーの義務
- 7) ライセンシーの義務
- 8) 契約期間
- 9) 一般条項
- 10) 準拠法
- 11) 仲裁条項または裁判管轄条項
- 12) 末尾文言、署名

このうち、4)、5)、6)、7)が国際ライセンス契約の主要条件規定である。4)の実施権の許諾では、実施を許諾する知的財産（特許、ノウハウなど）、実施権の種別（独占的实施権、通常実施権など）などを規定する。また、5)の実施料の支払いでは、実施許諾対価を取り

決める。6)のライセンサーの義務では、実施許諾した特許などの知的財産権の利用を妨げないことが第一であり、他に知的財産権の維持義務、許諾した技術の有効性保証などが規定される。また、7)のライセンサーの義務では、実施許諾料の支払いが主となるほか、技術改良を行った場合の通知義務などが規定される。

参考文献

- 1) DESCA : Horizon 2020 Model Consortium Agreement
<http://www.desca-2020.eu/> (2020年3月アクセス)
- 2) 大貫雅晴 (2015) : 国際技術ライセンス契約, 同文館出版
- 3) 小高壽一 (2012) : 英文ライセンス契約実務の基礎, 民事法研究会

4.4.6 まとめ

本節では、CCSの広報活動を通じた社会受容性向上方策として実施している

- 1) CCSの技術開発状況の社会への情報発信
- 2) POおよびリスクコミュニケーションに関わる研究開発
- 3) 研究成果の海外への紹介状況と展開方策検討

についてその成果を取りまとめた。

1)については、テクニカルワークショップやフォーラムの開催などを通し、CCS関係者へ適切な情報発信をしていることを紹介するとともに、CCSの社会受容性向上に貢献していることを報告した。

2)については、PO教材やマニュアルの作成をしたが、その構成、概要について報告するとともに、社会受容性向上策の海外動向と我が国への適用要件について紹介した。

3)については、光ファイバー計測技術などを中心に、技術研究組合の成果を海外に積極的に紹介している状況を報告した。また、研究成果を海外展開するための海外研究協力に係る契約やMOUの枠組みについて紹介するとともに、研究成果をビジネス展開するためのライセンス契約の要件について報告した。

2. 成果

(1)

発表者	薛自求
フリガナ:	セツジキユウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	CO ₂ 地中貯留技術開発の動向 Research and Development of Geological Storage of CO ₂ in Deep Saline Aquifers
発表先	エネルギー・資源
発表年月日	2019年5月
発表区分	投稿 学会誌・学術誌

(2)

発表者	木村 恒久
フリガナ:	キムラ ツネヒサ
連絡先:	tsune@slb.com
所属:	シュルンベルジェ
発表内容	DAS VSP Acquisition Through Coiled Tubing Fiber-Optic Cable
発表先	European Association of Geoscientists and Engineers, London, UK
発表年月日	2019/06/03 (予定)
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(3)

発表者	王 璐琛
フリガナ:	オウ ロシン
連絡先:	wang@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	坑井における地震モニタリングのための DAS 使用現場比較試験 DAS field comparison test for seismic monitoring in wells
発表先	中国光ファイバセンシング会議と工業化フォーラム 2019、武漢、中国 OFSC2019, Wuhan, China
発表年月日	2019年4月29日
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(4)

発表者	佐藤 徹
フリガナ:	サトウ トオル
連絡先:	sato-t@k.u-tokyo.ac.jp
所属:	東京大学大学院新領域創成科学研究科
発表内容	Proposal of a New Standard of CO ₂ Concentration in Seawater
発表先	2019 Carbon Management Technology Conference
発表年月日	2019/07/15-18
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(5)

発表者	中川 和則
フリガナ	ナカガワ カズノリ
連絡先	kazunori.nakagawa@japex.co.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (JAPEX)
発表内容	マイクロバブル CO ₂ 圧入フィールドパイロット試験 -計画と準備- Pilot test for microbubble CO ₂ injection to reservoir in oil field - Test planning and preparation -
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(6)

発表者	徂徠 正夫
フリガナ	ソライ マサオ
連絡先	m.sorai@aist.go.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (産総研)
発表内容	炭酸塩反応に伴うキャップロック模擬岩石の遮蔽性能変化 Changes in sealing performance of artificial caprocks caused by carbonate reactions
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/5/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(7)

発表者	藤井 孝志
フリガナ	フジイ タカシ
連絡先	takashi.fujii@aist.go.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (産総研)
発表内容	Relationship between rock deformation and permeability evolution during fracturing in rocks for CCUS technology
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(8)

発表者	後藤 宏樹
フリガナ	ゴトウ ヒロキ
連絡先	h.goto@aist.go.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (産総研)
発表内容	Gravity monitoring using superconducting gravimeters near the seashore at the Tomakomai CCS demonstration site
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/5/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(9)

発表者	内本 圭亮
フリガナ	ウチモト ケイスケ
連絡先	uchimoto@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	How many data are necessary to make a suitable threshold for anomalous pCO ₂ owing to CO ₂ leakage?
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(10)

発表者	渡辺雄二
フリガナ	ワタナベ ユウジ
連絡先	Yuji-wt@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Mechanisms inducing anomalously high pCO ₂ without CO ₂ leakage in coastal environment
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(11)

発表者	朴 赫
フリガナ	パク ヒョク
連絡先	park-h@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Strain detection by optical fiber for CO ₂ injected core specimen
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(12)

発表者	廣田 翔伍
フリガナ	ヒロタ ショウゴ
連絡先	s.hirota@envsys.k.u-tokyo.ac.jp
所属	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
発表内容	光ファイバーセンシング技術およびひずみゲージを用いた泥岩中の化学的浸透による岩石の変形の定量化と計測された歪挙動の比較
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(13)

発表者	孫 艶坤
フリガナ:	ソン エンコン
連絡先:	sun@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Field Testing of Hybrid Brillouin-Rayleigh Distributed Sensing System for Subsurface Water Injection Monitoring
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(14)

発表者	伊藤 拓馬
フリガナ:	イトウ タクマ
連絡先:	t-itou@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	光ファイバーにより計測された地層変形とその堆積学的解釈: 房総半島砂泥互層帯水層の例 Bed deformation measured by distributed optical fiber and its sedimentological interpretation: alternated sandstone and mudstone aquifer, Boso Peninsula, Japan
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(15)

《 概 要 》 (以下に必要事項を記入、□へチェックください。)	
発表者	中島 崇裕
フリガナ:	ナカジマ タカヒロ
連絡先:	tnak06@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	貯留層中の超臨界 CO ₂ 影響評価のための繰り返し音波検層における振幅減少情報の利用 Utilization of wave attenuation in time-lapse sonic logging data to evaluate the effect of super-critical CO ₂ in the reservoir
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(16)

発表者	王 璐琛
フリガナ	オウ ロシン
連絡先	wang@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	苫小牧 CO2 圧入サイトの地震イベント震源決定精度の評価：数値シミュレーション研究 Evaluation of seismic event location accuracy of Tomakomai CO2 injection site: a numerical simulation case study
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(17)

発表者	張 毅
フリガナ	チョウ キ
連絡先	zhangyi@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Monitoring hydromechanical responses in aquifer by distributed fiber-optic strain sensing from lab to field
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(18)

発表者	翟 鴻宇
フリガナ	テキ コウウ
連絡先	zhai@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	CO2 migration characteristics of microbubble and conventional sequestration in Berea sandstone revealed by X-ray CT imaging
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(19)

発表者	三善 孝之
フリガナ	ミヨシ タカユキ
連絡先	miyoshi@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	機械学習による孔隙率分布推定の技術的課題：長岡 CCS サイトの例 Technical challenges of machine learning approach for porosity estimation in Nagaoka CCS site
発表先	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 Japan Geoscience Union Meeting 2019
発表年月日	2019/05/29
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(20)

発表者	田中 良三
フリガナ	タナカリョウゾウ
連絡先	rtanaka@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Microbubble CO ₂ Injection for Geological CO ₂ Storage and CO ₂ -EOR
発表先	CEM10/MI-4 Innovation Showcase
発表年月日	2019/05/27-29
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(21)

発表者	田中 良三
フリガナ	タナカリョウゾウ
連絡先	rtanaka@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Monitoring of Dynamic Stability of Geological Formations using Fiber-Optic Sensing
発表先	CEM10/MI-4 Innovation Showcase
発表年月日	2019/05/27-29
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(22)

発表者	内本 圭亮
フリガナ	ウチモトケイスケ
連絡先	uchimoto@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Bubble detection with side-scan sonar in shallow sea for future application to marine monitoring at offshore CO ₂ storage sites
発表先	American Journal of Marine Science
発表区分	査読論文

(23)

発表者	中島 崇裕
フリガナ	ナカジマ タカヒロ
連絡先	tnak06@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Utilization of wave attenuation in the time-lapse sonic logging at the Nagaoka site for a near well monitoring of CO ₂ migration
発表先	International Journal of the Greenhouse Gas Control
発表年月日	2019/10
発表区分	査読論文

(24)

発表者	上田 良
フリガナ:	ウエダ リョウ
連絡先:	ryo.ueda@japex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (JAPEX)
発表内容	CCS、EOR におけるマイクロバブル技術の実用化に向けて Study for the application of microbubble technology to CCS and EOR
発表先	石油技術協会 探鉱技術委員会 JAPT Exploration Technology Committee
発表区分	発表 その他の各種講演会

(25)

発表者	宮城 充宏
フリガナ:	ミヤギ アツヒロ
連絡先:	mygath00@pub.taisei.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (大成建設株式会社)
発表内容	二酸化炭素地中貯留における圧入井の配置最適化ツールの高速化 Speed-up of optimization tool for well placement in Carbon dioxide Capture and Storage
発表先	大成建設株式会社 技術センター報 Report of Taisei Technology Center
発表年月日	2019年 12月頃
発表区分	投稿 その他

(26)

発表者	伊藤 拓馬
フリガナ:	イトウ タクマ
連絡先:	t-itou@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	房総半島中東部の上総層群から掘削されたボーリングコアの層序と堆積サイクル Stratigraphy and depositional cycles in sediment core taken from Kazusa Group, Central Eastern Boso Peninsula, Japan
発表先	日本第四紀学会
発表年月日	2019/8
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(27)

発表者	後藤 宏樹
フリガナ:	ゴトウ ヒロキ
連絡先:	h.goto@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (産総研)
発表内容	Continuous gravity observation with a superconducting gravimeter at the Tomakomai CCS demonstration site, Japan: Applicability to ground-based monitoring of offshore CO ₂ geological storage
発表先	Greenhouse Gases: Science and Technology
発表年月日	2019年
発表区分	査読論文

(28)

発表者	徂徠 正夫
フリガナ	ソライ マサオ
連絡先	m.sorai@aist.go.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（産総研）
発表内容	炭酸塩含有キャップロックの遮蔽性能変化 Change in sealing performance of carbonate-containing artificial caprocks
発表先	16th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society AOGS2019
発表年月日	2019/8/1
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(29)

発表者	堀川 卓哉
フリガナ	ホリカワ タクヤ
連絡先	t.horikawa@aist.go.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（産総研）
発表内容	Observation of changes in vertical Sp gradient using shallow wells at the seashore test site, Japan
発表先	16th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society AOGS2019
発表年月日	2019/8/1
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(30)

発表者	孫 艶坤
フリガナ	ソン エンコン
連絡先	sun@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（RITE）
発表内容	Geomechanical Footprint for Downhole Water Injection via Distributed Optic Fiber Sensing Integrating hybrid Brillouin-Rayleigh Backscattering
発表先	16th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS 2019)
発表年月日	2019/08/01
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(31)

発表者	宮城 充宏
フリガナ	ミヤギ アツヒロ
連絡先	mygath00@pub.taisei.co.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（大成建設株式会社）
発表内容	Development of a high speed optimization tool for well placement in Geological Carbon dioxide Sequestration
発表先	International Society for Rock Mechanics & Rock Engineering YSRM: Young Scholars Symposium on Rock Mechanics
発表年月日	2019年 12月頃
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(32)

発表者	内本 圭亮
フリガナ:	ウチモトケイスケ
連絡先:	uchimoto@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	A comprehensive experiment to reveal the ability of Side-Scan Sonar to detect CO ₂ bubbles in shallow sea
発表先	IEAGHG Monitoring & Environmental Research – Combined Networks Meeting
発表年月日	2019/08/21-8/22
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(33)

発表者	田中 敦子
フリガナ:	タナカ アツコ
連絡先:	a.tanaka@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (産総研)
発表内容	CO ₂ 地中貯留の社会受容について Carbon-dioxide capture and storage (CCS) and social acceptance
発表先	資源・素材 2019(京都) 【企画講演】 低炭素社会構築のための CCS Resources and Materials 2019 (Kyoto), Special session: CCS for a low carbon society
発表年月日	2019/9/24
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(34)

発表者	内本 圭亮
フリガナ:	ウチモトケイスケ
連絡先:	uchimoto@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	日本沿岸域海底下貯留 CO ₂ の漏出を想定したパッシブトレーサーシミュレーション Simulated passive tracer regarded as CO ₂ leaked from sub-seabed reservoir
発表先	日本海洋学会 2019 年度秋季大会 The Oceanographic Society of Japan Fall meeting in 2019
発表年月日	2019/09/27
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(35)

発表者	小林 佑輝
フリガナ:	コバヤシ ユウキ
連絡先:	yuki.kobayashi@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (国際石油開発帝石株式会社)
発表内容	A field experiment of walkaway DAS-VSP in a deep and deviated onshore well in Japan using a fibre optic cable deployed inside coiled tubing
発表先	European Association of Geoscientists and Engineers (Geophysical Prospecting)
発表年月日	2019/11/1 (予定)
発表区分	査読論文

(36)

発表者	植松 祐仁
フリガナ:	ウエマツ ユウト
連絡先:	yuto.uematsu@inpex.co.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（国際石油開発帝石株式会社）
発表内容	Improving Subsurface Images for Better Reservoir Management by CT-DAS-VSP in a Production Well Onshore Japan
発表先	Fifth EAGE Workshop on Borehole Geophysics
発表年月日	2019/11/19
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(37)

発表者	堀川 卓哉
フリガナ:	ホリカワ タクヤ
連絡先:	t.horikawa@aist.go.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（産総研）
発表内容	降雨浸透が重力およびSPモニタリングに及ぼす影響について Influence of rainwater infiltration on gravity and self-potential monitoring
発表先	日本地熱学会 令和元年学術講演会（熊本大会）
発表年月日	2019/11/20
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(38)

発表者	薛自求
フリガナ:	セツジキユウ
連絡先:	xue@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（RITE）
発表内容	CO ₂ 地中貯留技術実用化に向けての安全管理技術開発の取り組み
発表先	革新的環境技術シンポジウム 2019
発表年月日	2019/12/18
発表区分	発表 国内学会・学術会議

(39)

発表者	伊藤 拓馬
フリガナ:	イトウ タクマ
連絡先:	t-itou@rite.or.jp
所属:	二酸化炭素地中貯留技術研究組合（RITE）
発表内容	房総半島中東部の上総層群から掘削されたボーリングコア試料の層序とイベント起源堆積物に見出された堆積サイクル Stratigraphy and depositional cycles recognized in event deposits in sediment core taken from the Kazusa Group, Central Eastern Boso Peninsula, Japan
発表先	第四紀研究
発表年月日	2019 年
発表区分	査読論文

(40)

発表者	内本 圭亮
フリガナ	ウチモトケイスケ
連絡先	uchimoto@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Does CO ₂ concentration in seawater continue to rise during CO ₂ leakage?
発表先	4th International Workshop on Offshore Geologic CO ₂ Storage
発表年月日	2020/02/11
発表区分	発表 国際学会・学術会議

(41)

発表者	宮城 充宏
フリガナ	ミヤギ アツヒロ
連絡先	mygath00@pub.taisei.co.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (大成建設株式会社)
発表内容	二酸化炭素地中貯留における坑井配置のメタヒューリスティクス最適化ツールの開発 Development of an optimization tool for well placement optimization in geological carbon dioxide sequestration by metaheuristics
発表先	土木学会論文集 Journal of Japan Society of Civil Engineering
発表年月日	2020 年
発表区分	査読論文

(42)

発表者	翟 鴻宇
フリガナ	テキ コウウ
連絡先	xue@rite.or.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (RITE)
発表内容	Migration characteristics of supercritical CO ₂ microbubble flow in the Berea sandstone revealed by voxel-based X-ray computed tomography imaging analysis
発表先	Journal of Natural Gas Science & Engineering
発表年月日	2020 年予定
発表区分	査読論文

(43)

発表者	宮城 充宏
フリガナ	ミヤギ アツヒロ
連絡先	mygath00@pub.taisei.co.jp
所属	二酸化炭素地中貯留技術研究組合 (大成建設株式会社)
発表内容	二酸化炭素地中貯留における地質の不確実性を考慮した圧入井の配置最適化 Injection well optimization for carbon dioxide geological sequestration under geological uncertainty
発表先	土木学会 第 75 回年次学術講演会 Journal of Japan Society of Civil Engineering
発表年月日	2020 年 9 月 9 日
発表区分	発表 国内学会・学術会議

契約管理番号	1 8 1 0 0 4 5 9 - 0
--------	---------------------

備考：様式の寸法は、日本工業規格 A 列 4 とし、左とじとすること。