

目次

第1章 事業の背景、目的および結果概要	1-1
1.1 本事業の目的	1-1
1.2 年間約10万トン規模でのCO ₂ 分離・回収設備の運転(第2章)	1-2
1.2.1 設備運転および性能検証	1-3
1.2.2 日常保全および定期保全	1-9
1.2.3 安全・環境管理	1-9
1.2.4 CCSコストの推算	1-10
1.2.5 設備の信頼性検討	1-14
1.3 年間約10万トン規模でのCO ₂ 圧入、貯留試験(第3章)	1-14
1.3.1 圧入実績	1-15
1.3.2 圧入区間	1-16
1.3.3 圧入指数	1-17
1.4 貯留したCO ₂ のモニタリング(第4章)	1-18
1.4.1 観測井を利用したモニタリング	1-20
1.4.2 陸上設置地震計によるモニタリング	1-23
1.4.3 常設型OBCによるモニタリング	1-23
1.4.4 OBSによるモニタリング	1-24
1.4.5 総合モニタリングシステムの運用	1-25
1.4.6 繰り返し弾性波探査(第4回モニター調査)	1-29
1.4.7 圧入井を利用したモニタリング	1-31
1.5 貯留層等総合評価(第5章)	1-33
1.5.1 IW-2におけるフォールオフテスト解析	1-34
1.5.2 IW-2およびOB-2の圧力予実績	1-36
1.5.3 ヒストリーマッチ	1-38
1.5.4 IW-2長期挙動予測シミュレーション	1-39
1.6 海洋環境調査(第6章)	1-45
1.6.1 海洋環境調査	1-46
1.6.2 海水中放射性炭素分析	1-48
1.7 CCSに関する法規制・他プロジェクトの動向調査(第7章)	1-49
1.7.1 CCSに関する法規制等の動向調査	1-49
1.7.2 CCSのアカウントティングに関する調査	1-51

1.7.3	海外における CCS 事業全般についての調査業務	1-53
1.7.4	我が国における CCS のための CO ₂ 輸送検討に必要な基礎的調査	1-53
1.8	国内における社会的受容性の醸成に向けた情報収集発信活動	1-56
1.8.1	2019 年度の活動の概要	1-56
1.8.2	社会的受容性の醸成活動についての外部評価	1-58
1.9	海外への情報発信ならびに情報収集	1-59
1.9.1	海外からの現場見学者対応・意見交換の実施	1-59
1.9.2	海外における国際会議や、国内外セミナー、展示会等における成果発表と 情報交換、フィールドツアー参加による情報収集	1-59
1.9.3	Global CCS Institute との情報交換、協力	1-60
1.9.4	CSLF アジア・太平洋地域ステークホルダーチャンピオンとしての活動	1-60
1.9.5	情報発信、情報収集の機会拡充を見据えた海外政府や海外 CCUS 事業者、 研究者との協力、共同事業、共同研究の実施	1-60
1.9.6	外国語ツール、ホームページ、メディアを通じた情報発信についての検討 および情報発信ツールの維持、更新	1-61
1.10	社外有識者による技術指導	1-61
1.11	将来計画の検討・準備等	1-61

第1章 事業の背景、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調査株式会社の3者は、2012年度から2019年度の8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事業（以下、「本事業」と称する。）を実施している。

本事業は、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実証試験であり、CO₂の圧入、貯留とモニタリングを実施し、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等を目的としている。

実証試験設備の設計・建設・坑井掘削等を2012年度から2015年度に行い、2016年度からCO₂の貯留、貯留したCO₂のモニタリング等を実施している。なお、2019年11月にCO₂圧入量が目標の30万tに達したことにより、以降はCO₂の圧入は停止している。

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、海外への情報発信並びに情報収集等についても実施している。

本報告書は、2018年度から当社が受託しているNEDO「CCUS研究開発・実証関連事業／苫小牧におけるCCUS大規模実証試験／苫小牧におけるCCUS大規模実証試験」について2019年度の成果をとりまとめたものである。

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うえ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) 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 年間約10万トン規模でのCO₂分離・回収設備の運転（第2章）

2016年4月の操業開始から2019年11月の累積圧入量30万t達成までの期間、1,329日（44箇月）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8項目の課題を全て実証することができた。主な内容を以下に要約する。

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：Emergency Shut Down）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した。分離・回収エネルギーは、目標値1.22 GJ/t-CO₂をクリアする値（1.16～1.20 GJ/t-CO₂）を達成し、良好な結果となった。また、プロセス構成をさらに改善すれば0.73 GJ/t-CO₂の可能性のあることをシミュレーションによって確認した。

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、高圧の滝ノ上層では一定小流量の圧入運転ができること、萌別層と滝ノ上層への同時圧入運転が可能であることを検証した。また、圧縮機制御システムを改善して、圧入の完全自動化を達成した。

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停止（ESD）システム作動の実績データを解析し、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。2019年度は2件の故障、2件の不調が生じたが、迅速かつ適切に対処した。

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した。また、数件の突発的補修業務を迅速に実行して、圧入運転を再開した。さらに、2019年11月以降の設備の休止に対する適切な対応を実施した。

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。

8) CCS コストの推算

年間 100 万 t 圧入を想定した実用化モデルの CCS コストを試算した結果、6,186 円/t-CO₂ (Captured)、7,261 円/t-CO₂ (Avoided) となった。さらに、低回収率採用（95%）やプロセス構成改善を勘案すると、5,580 円/t-CO₂ (Captured)、6,360 円/t-CO₂ (Avoided) までのコスト低減が期待できる。

カナダ Quest CCS の運転が稼働し（年間 110 万 t 圧入実績）、設備費用および運転費用が公表されているため、実用化モデルと比較した。実用化モデルのスコープに合わせて 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。

1.2.1 設備運転および性能検証

(1) 供給設備の運転検証

本事業では、CO₂ 供給源である出光興産株式会社北海道製油所（以下、「製油所」と称する。）内に設置した D1-1 基地から、当社苫小牧 CCS 実証試験センター（以下、「当センター」と称する。）に設置した D1-2/D0 基地に PSA^{*1)}オフガス^{*2)}を送気している。

2019 年度は、PSA オフガス送気量は 67,255 kNm³/年、PSA オフガス代表組成（CO₂ 濃度 51.6 mol%）から算出した CO₂ 送気量は、68,124 t/年であった。なお、2019 年 11 月 22 日に累積圧入量 30 万 t を達成し、送気を完了させた。

(2) 分離・回収設備の運転検証

D1-2/D0 基地の分離・回収プロセスは、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 段吸収法である（図 1.2-1 参照）。

*1) Pressure Swing Adsorption（圧カスイング吸着装置）：製油所では、ナフサ等の脱硫・改質により製造したガスから、PSA 装置による分離・精製によって高純度水素を製造し、石油製品の脱硫工程で利用している。高純度水素を分離した残りのガスは、CO₂ 濃度が約 50% で他に可燃性ガス（CH₄, CO, H₂）を含有している。

*2) 石油精製・石油化学等の工場において、生産の過程で発生する製品に利用できない副生ガス。本事業では PSA オフガスを原料として、圧入試験に使用する CO₂ を製造した。

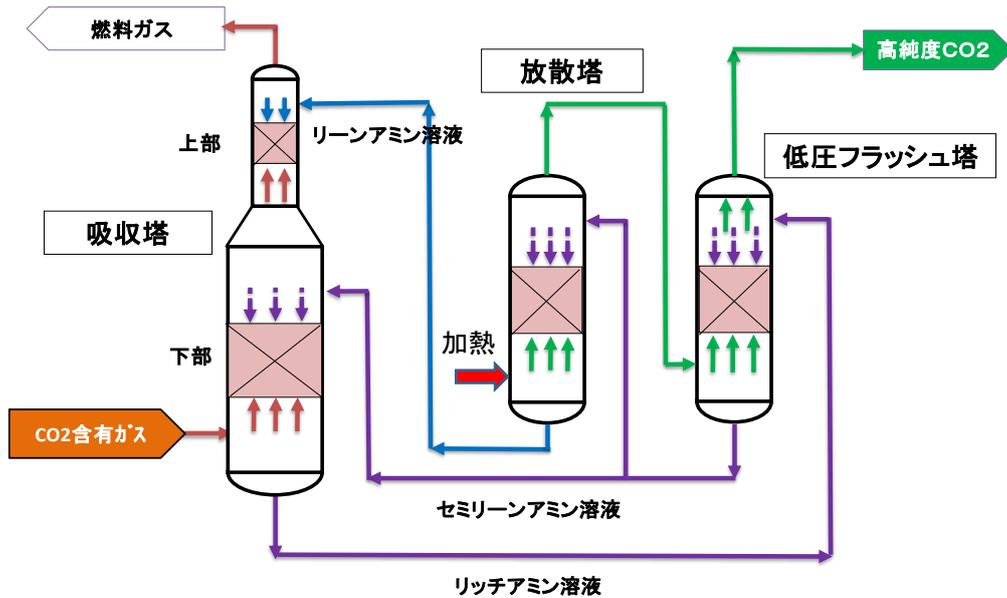


図 1.2-1 分離・回収設備（OASE 2 段吸収法）

分離・回収設備は、吸収塔、放散塔および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 オフガスは吸収塔に供給され、下部充填層でセミリーンアミン溶液（以下、「SLA」と称する。）により CO₂供給量の 60～70%が吸収される。次に、ガスは吸収塔上部充填層で、残存 CO₂がリーンアミン溶液（以下、「LA」と称する。）によって吸収される。

吸収塔底から排出される CO₂を高濃度に吸収したリッチアミン溶液（以下、「RA」と称する。）は低圧フラッシュ塔に送られる。RAは、低圧フラッシュ塔での減圧効果と放散塔頂からの 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 SLA となる。一部の SLA 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 LA となる。この LA は、吸収塔上部充填層へと循環される。

この 2 段吸収法により、放散塔で再生する SLA 量が大幅に減るので、アミンリボイラー熱量を大幅に低減することができる。

① 分離・回収エネルギーの検証

44 箇月の実証試験期間中に 3 回の分離・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目標値（設計値）近傍とした。分離・回収設備における 3 回の性能確認試験結果を表 1.2-1 にまとめた。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。分離・回収エネルギーの評価に当たって、リボイラーsteamの入口/出口のエンタルピー差には、運転圧力でのsteam蒸発潜熱(2,100 kJ/kg)を使用して計算した。

表 1.2-1 分離・回収設備性能確認試験の結果

項目	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
LA (t/h)	111	100	118	100*
SLA (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***
ポンプ電力量 (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、LAが設計値の118%と過剰となったので(製油所側の調整が変動)、100%LA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(0.862 GJ/t-CO₂)と算出したケース(0.949 GJ/t-CO₂)の値を示した。

アミンリボイラーへの供給熱量は目標値上限よりも小さい0.882~0.923 GJ/t-CO₂となった。アミンリボイラー加熱用steamを製造するsteamボイラーの熱効率(90%)とアミン溶液循環ポンプ電力消費(熱量に換算)を加算した分離・回収エネルギーの目標値は、表 1.2-1 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、熱損失がある実証試験の性能確認試験では目標値1.22 GJ/t-CO₂をクリアする値(1.16~1.20 GJ/t-CO₂)を達成した。

この性能試験結果において、2段吸収法により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。

実用化に向けた検討のために、本事業の目標値(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 1.2-1 に低圧フラッシュ塔(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 1.2-2 に示す。

表 1.2-2 分離・回収設備 画期的プロセスの分離・回収エネルギー

プロセス構成		実証試験	画期的プロセス
		目標値	計算値
CO ₂ 回収量	t/h	25.3	26.4
LA*	t/h*	100	49.4
SLA*	t/h*	100	99.8
リボイラー熱量	GJ/t	0.862	0.487
ポンプ電力量	kWh/t	19.2	22.1
分離・回収エネルギー	GJ/t	1.13	0.73

*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。

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。

また、回収率を99.9%から95%に減少させた場合の試算では、分離・回収エネルギーを約9.5%低減できることを確認している。

分離・回収設備は2019年11月末に3年半の運転を終えて停止した。停止前の11月の100%負荷における分離・回収設備のプロセス性能も満足できるものであった。

② アミン溶液の安定性等の検証

本分離・回収設備でのCO₂吸収プロセスでは、吸収液としてアミン溶液を使用している。アミン溶液は化学的に安定であるが、PSAオフガスとの連続的な接触、長期的な加熱・冷却の繰り返し等により劣化を生じる。アミン濃度が低下すると、pH値の低下による腐食リスクの増大、CO₂吸収容量の低下、アミン溶液循環量の増加、再生エネルギーの増加等の現象を招くため、定期的な溶液分析による管理が必要である。

運転開始から30万t圧入達成までの3年半を経過した2019年11月時点では、アミン溶液の濃度の低下およびその組成の経年変化は小さく、CO₂の吸収性能にも変化は見られなかった。また、吸収液の損失もほとんど認められず、11月22日の運転終了までの間、新たなメイクアップや取替を行わず、当初充填した吸収液をそのまま使用することができた。

③ 機器、配管等の運転検証

2017年10月初めからセミリーンアミン溶液/リーンアミン溶液熱交換器（11E-001）の圧力損失が徐々に増加したため、12月5日に11E-001を解体したところ、SLA側（出口高温側）に炭酸鉄のスケール膜が全面に付着している状況であった。一方、11E-001のLA側（入口高温側）は、スケールの付着はなく清浄な状態であった。2018年1月から5

月にかけて 11E-001 に再び炭酸鉄による汚れが進行し、6月の定期保全業務（SDM: Shut Down Maintenance）において開放清掃した。アミン溶液中では鉄イオンは主として炭酸水素鉄として存在している。11E-001のSLA側（出口高温側）は、高温にさらされることで溶液中に溶解している炭酸水素鉄が、高温になるほど溶解度が低くなる炭酸鉄として析出したと考えられた。なお、LA側（入口高温側）は、溶解している炭酸水素鉄濃度が低いので、炭酸鉄の析出は無なつたと考えられる。

2019年10月9日にSLAラインで、流量制御弁の一部（弁下流の弁本体、その下流配管のレデューサー部：炭素鋼製）に局部的エロージョン・コロージョンによる孔食が発生しアミン溶液が漏洩したので、分離・回収設備を停止して損傷部を補修し10月29日に運転を再開した。アミン溶液中の鉄イオン濃度の分析は、2週間おきにLAで実施していたが、大きな変化はなく（最大20ppm）、局部的腐食を検知できなかった。

局部的エロージョン・コロージョンが発生した一部配管は、炭素鋼からステンレス鋼に変更することを検討している。

2019年3月26日および8月23日には、PSAオフガス圧縮機（10C-001）の計画外停止が発生したが、運転中の分離・回収設備は緊急停止（ESD）システムにより安全に停止した。

(3) 圧入設備の運転検証

CO₂原料ガス源である製油所水素製造装置のPSAユニットは不純物（CO₂等）を吸着・脱圧・再生・昇圧するステップを短時間で繰り返すため、PSAオフガス量とそのCO₂濃度は安定状態においても±4%程度変動する。このため、分離・回収したCO₂量は安定状態においてもおおよそ30分間隔で±5%程度変動する。

2016年度の圧入設備の運転では、回収CO₂の変動が第1および第2低压CO₂圧縮機の流量・圧力にも変動を与えたため、圧入設備の運転条件（特に、No.2低压圧縮機第1段スビルバック弁UV-305の開度）を頻繁に変更しなければならなかったため、2018年1月に圧縮設備に運転における「CO₂回収量変動への追従性システム」の改造を行った。

萌別層の圧入量変動については圧入制御システムでの効率的な運転により、回収したCO₂ガスを大気中に放出することなく、回収CO₂ガス全量を圧入した。萌別層への圧入井入口圧力は、圧入設備後段の圧力調整弁を用いて貯留層の圧力に応じて設定するが、これを圧縮機吐出口の圧力調整弁とカスケードすることによって、安定的に自動制御することができた。なお、2019年度は滝ノ上層への圧入は行っていない。

また、圧入井坑底と貯留層間の過度の差圧ならびに急激な圧力変化を避けることで出砂

等の危険性を低下させる必要がある。圧力変動に対応した圧入制御システムで圧入を行うことにより、滝ノ上層および萌別層の坑底圧力に大きな変動はなく、安定した状態であった。

2019年度は延べ113日（2,712時間）にわたって、低負荷運転（40%）から高負荷運転（103%）までの広範囲で自動化運転を継続でき、回収CO₂が大気に放出されることはなくなり、圧縮機の完全自動化を検証できた。

(4) 運用システムの検証

分離・回収設備の運用システムには緊急遮断システムが組み込まれているが、2019年度は低圧圧縮機の緊急停止の発生はなかった。

2019年3月、8月に、PSAオフガスの供給に急激な変動を生じた。この変動によって、PSAオフガス圧縮機がサージングの危険領域に近づいたため、D1-2/D0基地の緊急遮断システムが作動し、自動遮断や開放および機器の運転停止が行われて、安全と機器健全を確保した。

その後も回収CO₂全量を萌別層に圧入する運転を継続し、2019年11月に30万t圧入を達成して運転終了したが、CO₂の蓄熱式燃焼装置による放出量^{*3)}は殆ど無く、非常に良好な制御を維持することができた。

(5) 保安設備の運転検証

保安設備の管理実績を以下に示す。

- ・安全計装システム：主要設備の緊急停止のためのシステムとして構築したものであり、SDM（2019年6月）で作動確認を実施し、問題なく作動することを確認した。
- ・ガス検知警報設備、火災報知器：日常保全の定期点検項目として、年2回の作動点検を行い、正常に作動することを確認した。
- ・防火ポンプ設備：防災資機材定期点検として、年2回の外観点検および年1回の運転作動確認を行い、異常がないことを確認した。
- ・アース設備：アースの接地抵抗を測定し異常がないことを確認した。
- ・防災資材管理結果：消火器、消防資機材、固定式洗顔設備、携帯用ガス検知器等の資機材について、年2回～4回程度の外観点検、動作点検を行い、異常のないことを確認した。

*3) 運転条件の変動が大きい場合は、一時的に回収CO₂の一部を蓄熱式燃焼装置に放出する場合もある。

1.2.2 日常保全および定期保全

2019年度の日常保全業務および定期保全業務（SDM）ならびに突発補修業務は以下のとおりであった。

日常保全業務とは、計画に基づく日常的な点検・保全作業、および現場巡回において当社社員が確認した設備等の不具合や故障・作動不良について、当社が発行する工事指図書および工事指示書に基づき行う保全作業をいう。

SDMとは、設備を停止して毎年実施する定期点検検査および定期保全作業をいい、法定点検、検査を含む。

日常保全における2019年度の工事指図書の発行は80件、工事指示書の発行は3件であった。問題なく作業は実施された。

2019年度のSDMは、原料ガスの受け入れが停止する製油所の定期保全時期に合わせて実施した。2019年度のSDMにおける法定点検検査は、高圧ガス保安法に基づく機器開放検査、配管肉厚検査、安全弁分解点検検査、配管気密検査、窒素製造設備検査の実施、労働安全衛生法に基づく第1種圧力容器検査および低圧ボイラー設備検査の実施、電気事業法に基づく高圧ボイラー検査であった。その他の検査として、計装空気設備、監視用カメラ（ITV: Industrial Television）、放送設備、地震計、DCS^{*4}設備、純水設備、循環冷却水冷却塔設備、排水処理設備、フレアー、防消火設備、CO₂の蓄熱式燃焼装置等について実施した。

また、現場巡回や運転監視において当社社員が確認した設備等の不具合や故障・作動不良の保全作業において要員や資機材等の動員が必要な主要な突発補修業務として、セミリーンアミン流量調節弁取替、電気トレースケーブル損傷整備、セミリーンアミンポンプチェックバイパス弁取替、高圧ボイラー給水ポンプミニマムフロー配管補修を実施した。

当初、30万t圧入完了後は地上設備の撤去を計画していたが、その後既設設備を活用したカーボンリサイクル事業の実証試験計画が策定され、当該実証試験が実施されるまでの間、既設地上設備を休止して保管するための維持管理を行うこととなった。

2019年11月に30万tの圧入を完了した後、同11月下旬から設備休止のため、設備各部への仕切り板の挿入、窒素封入管理等の各種対応作業を行った。

1.2.3 安全・環境管理

安全管理においては、安全衛生および環境に関する管理規程および要領に従い、安全管理（安全衛生会議、安全事前評価委員会、安全パトロール、保安教育及び防災訓練等）を

*4) DCS（Distributed Control System：分散制御システム）

実施し、2019年度も無事故・無災害を達成することができた。無事故・無災害は当センター開業（2016年2月10日）以来継続している。

また、環境管理においては、北海道、苫小牧市、当社の三者で締結した「公害防止協定書」（2014年5月13日締結、以下「協定書」と称する。）に基づき、環境保全対策を実施し、環境汚染につながる公害の発生はなかった。

なお、実証試験設備の休止に伴い、協定書は関係者との協議の上で廃止とした。

1.2.4 CCSコストの推算

本事業の設備能力（年間20万t）をもとに、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（Engineering, Procurement, and Construction）実績および2016年度の操業費を基準とした。

(1) 設備コスト試算の仮定（年間20万t-CCS）

本事業の設備構成から、本事業の制約条件に対応するために設置した高圧ボイラー、発電機等の付帯設備を除外して、水素製造、アンモニア製造およびIGCC（Integrated coal Gasification Combined Cycle：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1.2-2）、年間20万tを分離・回収／圧入する設備コストを推算した。

表1.2-3(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。貯留層は萌別層のみとし、モニタリングも一部見直した。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。

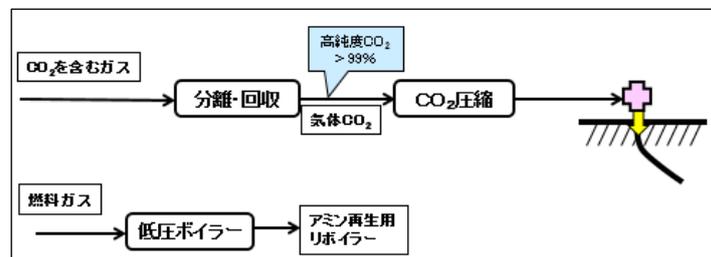


図 1.2-2 実用化モデルのプロセスフロースキーム（分離・回収／圧入設備の構成）

表 1.2-3 (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 1.2-3 (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) 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 1.2-4 にまとめた。なお、設備コストの試算では耐用年数等、運転コストの試算では用役単価等、様々な仮定を設定している。

表 1.2-4 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	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ドコスト（Cost of CO₂ Captured）であり、圧入した CO₂ 量（単位は t）当たりの値である。

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、正味の CO₂ 削減量、すなわち「（圧入した CO₂ 量；単位は t）－（CCS で発生した CO₂ 量；単位は t）」当たりの値である。

(3) 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。また、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。

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 1.2-5 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。

表 1.2-5 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

さらに、1.2.1 (2)①で述べた、回収率の低減による分離・回収エネルギーの低減（9.5% 低減）および「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) までの減少が期待できる。

(4) 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（カナダ、アルバータ州）の CCS コストが公表されている。当該プロジェクトは 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いる。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。

Quest CCS Project は 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。そのコストは、比較のために CO₂ パイプラインと運転労務費を除外した結果、5,501 円^{*5}/t-CO₂ (Captured)、6,946 円/t-CO₂ (Avoided) と算定された。

国内での実用化モデルと Quest プロジェクトでは、燃料単価や電力単価が 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

*5) @85 円/Canadian\$

の適用等で運転費用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。

1.2.5 設備の信頼性検討

将来CCS技術を実用化する際のCCS設備の計画・設計時の指針を得ることを当初の目的とした。そのため、運転終了後に、設備の内部異常や腐食状況、スケール等の付着物の付着状況を把握し、設備劣化状況を評価した。

2019年度は、D1-2/D0設備について、PSAオフガス圧縮機、分離回収設備（CO₂放散塔、CO₂吸収塔、低压フラッシュ塔、低压フラッシュ塔塔頂受槽、アミンリボイラー）、CO₂圧縮機の設備開放点検検査および内部付着物の分析（量、組成）等を実施した。以下に概要を示す。

(1) PSAオフガス圧縮機の開放点検

当該機器は、PSAオフガスを受け入れて分離・回収設備に送り込む機能を有するため、実証試験設備の操業中は常時稼働している設備である。ラビリンスについてクリアランス基準値外または破損が2箇所を確認されたが、安定した稼働状況であったと判断した。

(2) 分離回収設備の開放点検

当該設備は、CO₂吸収塔、CO₂放散塔、低压フラッシュ塔、低压フラッシュ塔塔頂受槽、アミンリボイラーの各塔槽機器から構成される。内部状況および各所計測において設備の腐食は見られなかったことから、健全に稼働していたと判断した。

(3) CO₂圧縮機の開放点検

当該機器のうち、低压CO₂圧縮機は、萌別層へのCO₂圧入を実証した圧縮機であり、圧入量300,012tの実績が示す通り、長時間稼働した設備である。一方、高压CO₂圧縮機は、滝ノ上層へのCO₂圧入を実証した圧縮機であるが、圧入量98.19tの実績に留まり、稼働時間は短かった。

開放点検結果、低压CO₂圧縮機は、内部機器のクリアランス基準値を超え破損している部品が多く、再稼働に際しオーバーホールを必要とし、また高压CO₂圧縮機も、設備稼働時間が短い割には、クリアランス基準値を超え破損している箇所が多く、やはり再稼働時にはオーバーホールを必要とすることが判明した。

1.3 年間約10万トン規模でのCO₂圧入、貯留試験（第3章）

苫小牧CCS実証試験のCO₂圧入は、本圧入への移行前に貯留層能力を評価する試験圧

入、複数回のフォールオフテスト（Fall-Off Test。以下、「FOT」と称する。）により貯留層状況の把握に努める本圧入初期段階、CCS 実用化段階での CO₂ 圧入に準じて可能な限り高レートで圧入を継続する本圧入継続段階と、目的別に三つの段階がある。

表 1.3-1 に各年度の各層の圧入量を示す。萌別層への圧入は 2016 年 4 月 6 日から 5 月 24 日の試験圧入、2017 年 2 月 5 日から 9 月 15 日の本圧入初期段階を経て、2017 年 9 月 16 日より本圧入継続段階に移行した。

滝ノ上層への圧入は、2018 年 2 月 6 日から 2 月 23 日、7 月 31 日から 9 月 1 日まで試験圧入を実施し 98 t-CO₂ を圧入した。

2019 年度は、萌別層に対し、その時々で可能な最大レートでの圧入を継続した。製油所の常圧蒸留装置の定期補修等による圧入停止、分離・回収設備のセミリーンアミン配管で生じたピンホールの補修のため圧入停止があったものの、11 月 22 日に本実証試験における累計圧入量 30 万 t-CO₂ を達成し、圧入を終了した。

圧入終了時の累計圧入量は萌別層が 300,012 t-CO₂、滝ノ上層が 98 t-CO₂、両層の合計が 300,110 t-CO₂ であった。

表 1.3-1 各年度の各層の圧入量

年度	萌別層(t-CO ₂)		滝ノ上層(t-CO ₂)		両層の合計(t-CO ₂)	
	単年度合計	累計	単年度合計	累計	単年度合計	累計
2016	29,222	29,222	0	0	29,222	29,222
2017	126,763	155,986	37	37	126,801	156,023
2018	79,514	235,499	61	98	79,575	235,598
2019	64,513	300,012	0	0	64,513	300,110

1.3.1 圧入実績

2019 年度の圧入は、CO₂ 供給上の制約、分離・回収設備のセミリーンアミン配管および流量制御バルブ交換等の事由により 4 回の圧入停止があった。本圧入継続段階の方針に準じ、その時々で可能な最大レートでの圧入を継続し、萌別層および滝ノ上層の累計圧入量の合計が 30 万 t-CO₂ に到達した 11 月 22 日に圧入を終了した。期間中の PT（圧力・温度）センサー圧力は 9.53～10.06 MPaG であり、上限圧力である 12.63 MPaG 未満であった。PT センサー温度も 38.48～47.01℃であり正常な範囲内であった。2019 年度の萌別層への圧入量は 64,513 t-CO₂、圧入を開始した 2016 年 4 月 6 日から圧入を終了した 2019 年 11 月 22 日までの累計圧入量は 300,012 t-CO₂ であった。なお、2019 年度の滝ノ上層への圧入実績はない。

1.3.2 圧入区間

萌別層の仕上げ区間では、坑内圧力が貯留層圧力を上回る区間でCO₂が貯留層へと圧入される。そこで、圧入区間は双方の圧力を比較することで推定した。しかしながら、管内流動シミュレーションの計算範囲は坑口から仕上げ区間上端までであり、仕上げ区間は範囲外である。そのため、仕上げ区間の圧力、温度は外挿により求めた。仕上げ区間を九つに区分し、最も浅い区間の圧力、温度から密度を決定し、下の区分の圧力を算出する。同様に各区分と、坑底まで順次圧力を決定した。なお、圧入中の仕上げ区間の温度を推定できないこと、前提を簡潔にする等の理由から仕上げ区間の温度は仕上げ区間上端の温度に等しいと仮定した。

図 1.3-1 に仕上げ区間の推定結果を示す。緑色でハイライトした範囲は坑内圧力（各色の線グラフ）が貯留層圧力（黒線グラフ）を上回る範囲であり圧入区間である。2019年度においても、圧入レートが増加するほど圧入区間が深部へ拡大する傾向が見られた。仕上げ区間上端は 2,494 mMD（MD: Measured Depth、掘削深度）/982.79 mVD（VD: Vertical Depth、垂直深度）であり、圧入区間は 2,699～2,790 mMD/1,019～1,035 mVD であった。最大圧入レートでも圧入区間が萌別層砂岩層上部（2,569～2,879 mMD/983～1,043 mVD）のみに限定されると推定された。圧入井掘削時に取得した核磁気共鳴検層データから推定される萌別層砂岩層上部の浸透率は 0.01～153 mD 程度であるが、本検討から CO₂ の圧入に対し十分な浸透性があることが示唆された。

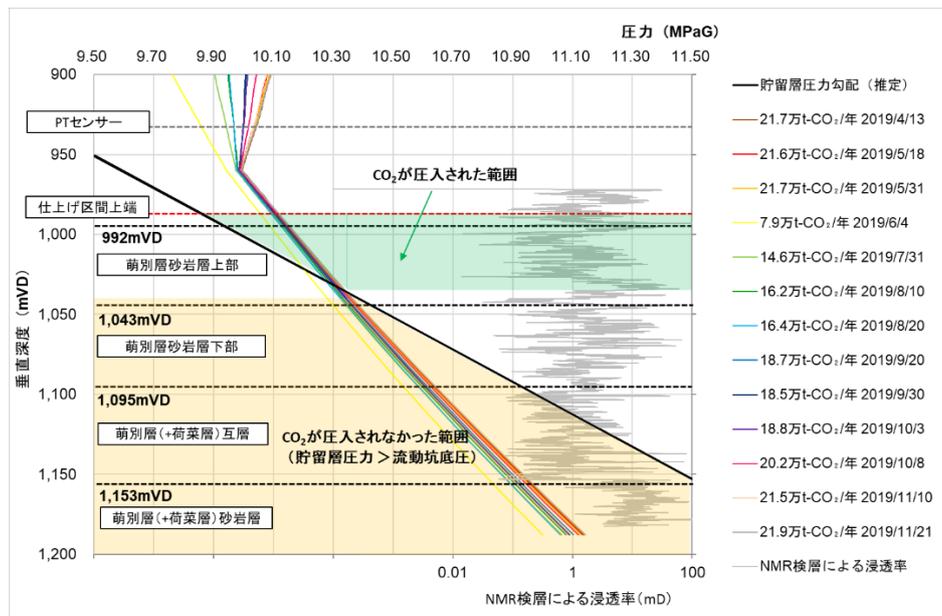


図 1.3 1 CO₂が圧入された区間の推定（2019年度）

1.3.3 圧入指数

流動坑底圧力から算出した圧入指数と圧入レートとのクロスプロットを図 1.3-2 に示す。ひし形は仕上げ区間上端の圧入指数を示している。白色のひし形が試験圧入、赤色のひし形が本圧入初期段階、青色のひし形が本圧入継続段階における圧入指数をそれぞれ示している。

CO₂ 圧入開始以降、圧入レートが増加するほど圧入指数が増加する傾向が見られる。圧入レートを上げるほど流動坑底圧力が上昇し貯留層圧力以上となる区間が広がる。このように圧入区間が拡大するため圧入指数が増加すると考えられる。

同図の緑色の丸は、PT センサー圧力から求めた圧入指数である。仕上げ区間上端の圧入指数と絶対値は一致しないものの、圧入レートの増加に伴い上昇する傾向が一致している。PT センサー圧力から求めた圧入指数により貯留層の変化を推測できる可能性を示唆する。

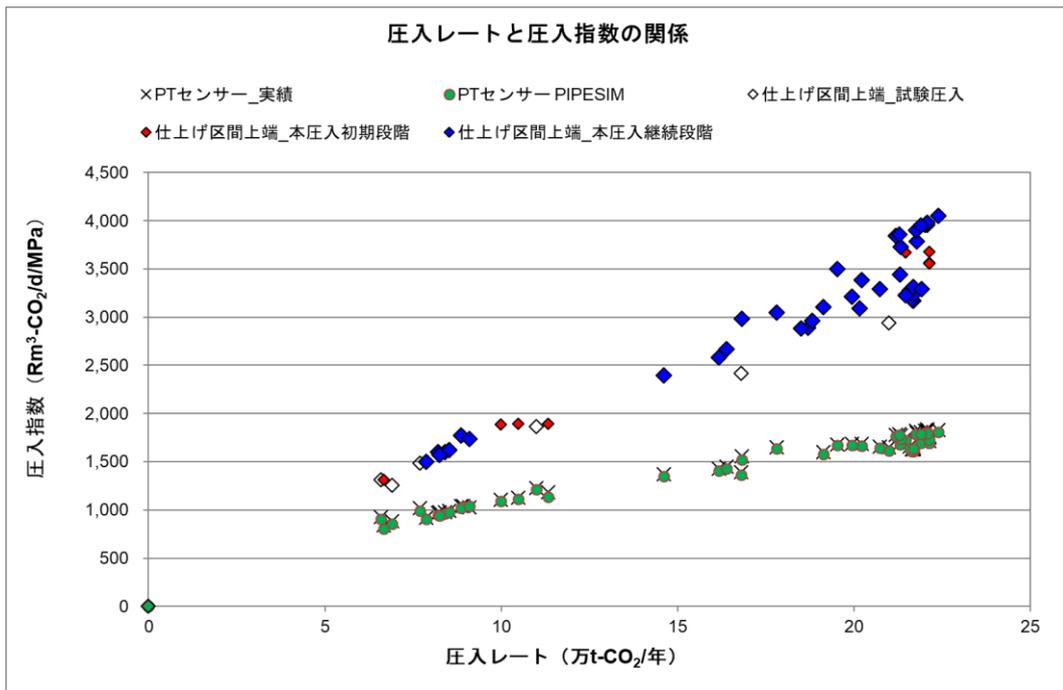


図 1.3-2 圧入レートと圧入指数の関係

図 1.3-3 に本圧入開始における圧入指数の経時変化を示す。赤色のひし形は圧入レート 20 万 t-CO₂/年以上の圧入指数であり、本圧入開始以降、連続圧入中は累計圧入量が増加するほど圧入指数が増加する傾向が見られた。

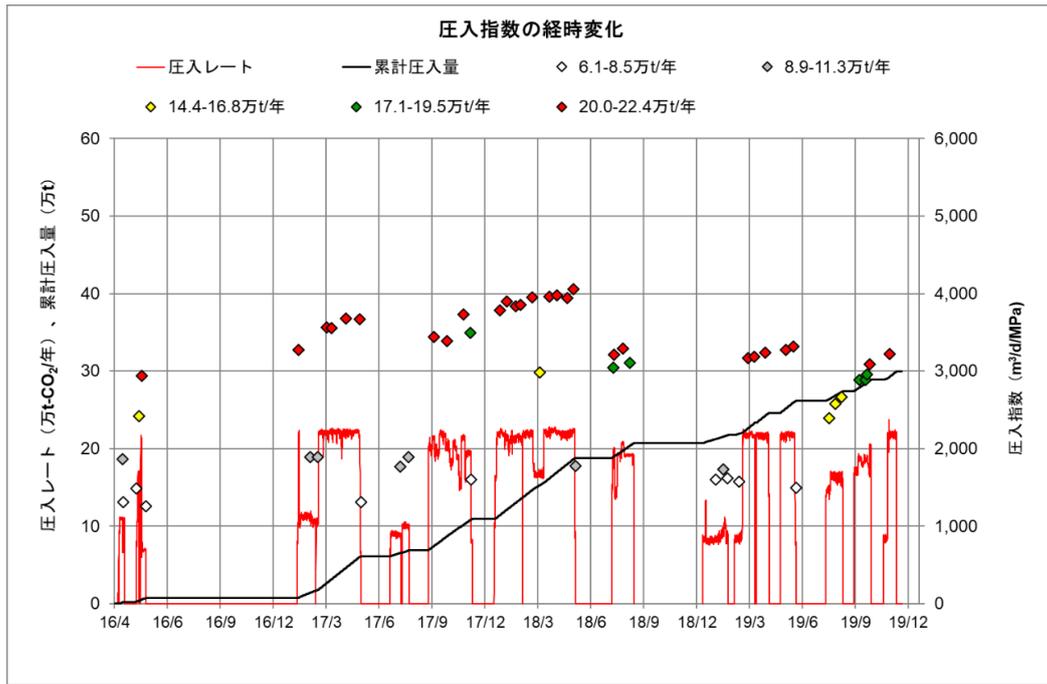


図 1.3-3 本圧入における圧入指数の経時変化

連続圧入による圧入指数の増加傾向が見られた一方で、長期的な圧入停止による一時的な圧入指数の減少も見られた。ただし、一時的に指数が減少しても連続圧入により指数は再び上昇する。長期的な圧入停止による圧入指数減少の原因としては圧入区間近傍のCO₂飽和率が減少した可能性が考えられる。

圧入を停止すると仕上げ区間近傍の貯留層圧力が初期圧力に向かい低下をはじめ、同時に坑内圧力も低下する。最も長期的に圧入を停止した2016年5月25日～2017年2月5日ではPTセンサー圧力が9.51 MPaGまで低下した。この時、仕上げ区間上端の圧力が9.89 MPaG（初期圧力）まで低下していたと仮定すると、PTセンサー～仕上げ区間上端間の圧力差から、PTセンサー～チュービング先端まではCO₂、チュービング先端より深部は水で満たされていたと推定される。圧入中は坑内圧力が上昇しCO₂が坑内の水を押し下げているが、圧入停止後は坑内の圧力低下が進むにつれて深部の高圧層から水が供給され、坑内の水位が上昇すると考えられる。その場合、CO₂が圧入された領域に水が浸入し、その領域のガス飽和率が減少、圧入指数も低下すると考えられる。

1.4 貯留したCO₂のモニタリング（第4章）

本事業では、圧入井、観測井による温度、圧力の計測、地震観測システムおよび弾性波探査を用いた微小振動と自然地震の発生状況および地下の状態変化を把握している。

2015年度までに3本の観測井OB-1*6)、OB-2*7)およびOB-3*8)内に設置した地震計、FBG*9)センサー（温度・圧力を計測）、半導体圧力センサー、DTS*10)、萌別層砂岩層と滝ノ上層T1部層の圧入地点の直上を横切る海底に敷設した受振測線長3.6kmの常設型OBC（Ocean Bottom Cable）、萌別層圧入地点直上とその近傍の海底に設置した4台のOBS*11)（Ocean Bottom Seismometer）、CO₂の圧入地点の北西の陸域（に設置した地震計（以下、「陸上設置地震計」と称する。）および圧入井IW-1*12)とIW-2*13)に設置した温度・圧力計からなる観測システムを構築した。図1.4-1に各モニタリングの実施位置を示す。上記の観測システムによるモニタリングを継続している。また、総合モニタリングシステムの諸機能を利用し、CO₂圧入地点近傍（CO₂圧入地点を中心とする東西6km×南北6kmの範囲）における微小振動の発生状況*14)と本実証試験の周辺地域（CO₂圧入地点を中心とする東西50km×南北38kmの範囲）での自然地震の発生状況*15)を把握した。

*6) OB-1：苫小牧 CCS-1（調査井）を、滝ノ上層を対象とする観測井として改修、名称変更

*7) OB-2：萌別層を対象とする観測井（2012年度に掘削）

*8) OB-3：滝ノ上層を対象とする観測井（2013年度に掘削）

*9) FBG（Fiber Bragg Grating）：光ファイバーのコア部に周期的な屈折率変化を形成した光ファイバー型デバイス。屈折率変化は回折格子（グレーティング）として働き、回折格子の周期が作るブラッグ反射条件を満たす波長の光のみを反射させるため、ブラッグ波長を観測することによりFBGに加えられた歪（圧力）と温度を観測することができる。

*10) DTS（Distributed Temperature Sensor）：光ファイバーを用いた温度センサー。温度分布を深度方向に連続的に計測できる。

*11) 耐圧ガラス球内に組み込まれた地震計、原子時計、レコーダおよび電源装置等の関連機器一式をOBSと称する。

*12) IW-1：滝ノ上層へのCO₂圧入井（2015年度に掘削）

*13) IW-2：萌別層へのCO₂圧入井（2015年度に掘削）

*14) 3本の観測井に設置した地震計、常設型OBCおよびOBSの観測データから振源を推定している

*15) 陸上設置地震計の観測データに加え、(国研)防災科学技術研究所(NIED)から本実証試験地域周辺にあるHi-net(High Sensitivity Seismograph Network Japan)の10観測点(大滝、室蘭、白老、千歳、追分、厚真、西平取、門別西、門別東、静内)のデータの提供を受け、独自に自然地震の震源解析を実施している。なお、Hi-netは、日本各地、地域ごとの地震の特徴を詳しく把握するために約20km間隔で設置された無人で微弱な揺れの感知が可能な24時間連続稼働の高感度地震観測網であり、1996年に観測が開始され、2011年時点で日本全国に約800箇所の観測点が配置されている。観測データは常時、中央局(データセンター)に送られ、気象庁による緊急地震速報や地震発生後の震源決定、地震調査委員会による地震活動の現状把握、高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)等、様々に利用されている。



図 1.4-1 モニタリング設備の配置図

CO₂ 圧入開始前と圧入後の弾性波探査の結果を比較することにより地下の状態の変化を把握するため、弾性波探査のベースライン調査とモニター調査を表 1.4-1 の通り実施した。2019 年度は、第 4 回モニター調査（小規模三次元弾性波探査および二次元弾性波探査）を実施した。

各観測井の温度・圧力等のモニタリング結果、微小振動・自然地震の発生状況および海洋環境調査結果等は、情報公開システムを利用して発信した。

表 1.4-1 繰り返し弾性波探査の実施実績

年度	調査	実施時期
2009 年度	三次元弾性波探査ベースライン調査	2009 年10～11月
2010 年度	三次元弾性波探査追加ベースライン調査	2010 年7～9 月
2013 年度	二次元弾性波探査ベースライン調査	2013 年8 月
2016 年度	第 1 回モニター調査（二次元弾性波探査）	2017 年1 月
2017 年度	第 2 回モニター調査（三次元弾性波探査）	2017 年7～8 月
2018 年度	第 3 回モニター調査（二次元弾性波探査） 圧入地点北側ベースライン調査（小規模三次元弾性波探査）	2018 年9～10 月
2019 年度	第 4 回モニター調査（小規模三次元弾性波探査および二次元弾性波探査）	2020 年1～2 月

1.4.1 観測井を利用したモニタリング

3 本の観測井（OB-1、OB-2 および OB-3）に設置した坑内地震計、温度計および圧力

計によるモニタリングを実施した。以下に特記事項を示す。

(1) 坑内機器の回収・点検

OB-1、OB-2およびOB-3の坑口圧力計の校正、坑口装置の保守点検、坑内機器の回収・点検および坑内地震計設置後のチェックショットを累積圧入量30万t達成後に実施した。ただし、OB-1については、前年度の回収・点検後、観測値の上昇がみられたため、観測値が安定するまでの経過を観察することとして、回収・点検の対象から除外した。

坑内機器の回収・点検では、DTSの深度・温度キャリブレーションもあわせて行っている。また、2020年2月5日にOB-2とOB-3の坑口圧力計の校正および点検作業を実施した。OB-3の信号ケーブルに不具合がみられたため、新品に交換した。

OB-2とOB-3内に設置した地震計の方位を推定するためのチェックショットを実施した。発振作業では、大型油圧インパクトと発振制御装置（IO SSS Encoder）を用いた。

(2) OB-1における坑内圧力値

OB-1のFBGセンサー圧力値は、点検・再設置後に下降傾向にあることが確認されていた（図1.4-2）。このため、ケーブルヘッド内に組み込まれたFBGセンサーやアーマードケーブルを交換したが、センサー圧力値は同様に下降傾向にあった。

FBG地上機は頻繁に故障が発生していたこともあり、2018年度にFBG地上機を共和電業(株)製のEFOX-1000B-4EVと予備FBGセンサーに交換し、2018年12月より運用を開始したが、FBGセンサー圧力値の低下が確認された。

なお、半導体圧力センサーにより取得されるデータはノイズが大きいため、今後、改良した坑内圧力センサーシステムを導入することを計画している。

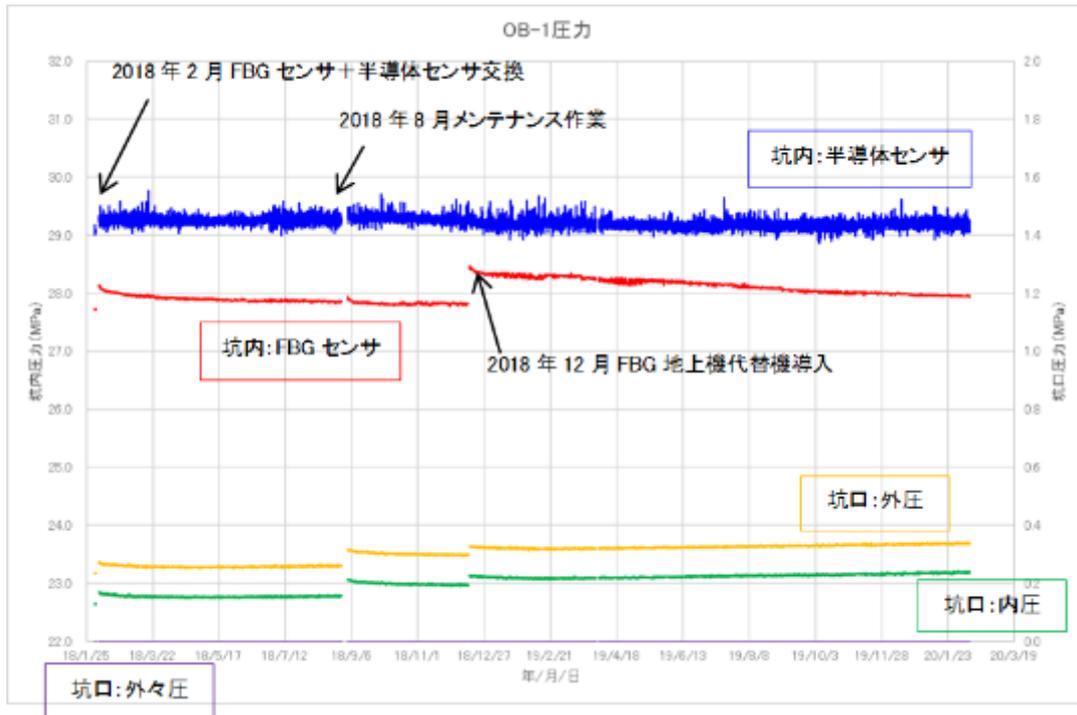


図 1.4-2 OB-1 坑内および坑口圧力値（2018年2月1日～2019年1月31日）

(3) OB-2における微小振動・自然地震観測データのバックグラウンドノイズ

2018年12月22日17:11頃からOB2のNo.1微小振動・自然地震観測データX成分のバックグラウンドノイズレベルが上昇する現象が確認されていた。微小振動・自然地震観測ツールのケーシングパイプ内壁へのカップリングはマグネットクランプを利用している。OB-2は垂直井であり、マグネットクランプが何らかの原因で不安定になり、カップリング状況が悪くなることが推察される。そのため、微小振動・自然地震観測ツールのクランプ機構について検討する必要がある。

(4) 温度モニタリング

温度データはFBG温度センサーとDTSにより取得した。各観測井で取得した温度データとして、OB-1のFBGセンサー（深度2294.6m）およびDTS（深度2200m、1900m、1700m、1500m、1300m、1100m、900m、700m、500m、300mおよび100m）の2019年10月のデータを図1.4-3に示す。

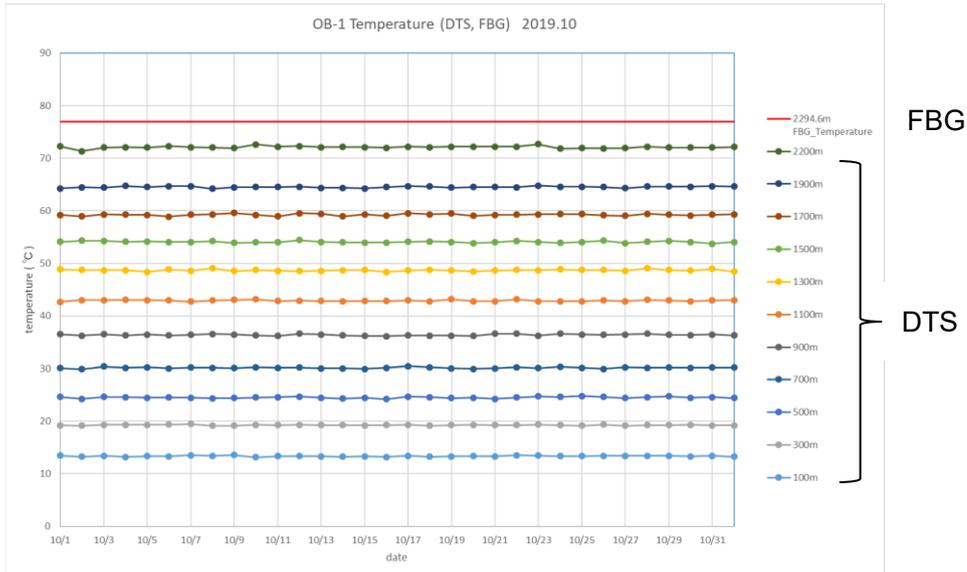


図 1.4-3 OB-1 で観測された温度データの例（2019年10月）

1.4.2 陸上設置地震計によるモニタリング

苫小牧市内に掘削した観測孔に地震計を設置している（図 1.4-1）。地震計の観測データは、実証試験センターのデータ収録サーバに伝送される。現地観測施設、実証試験センターに設置された機器および VPN^{*16}全体を「陸上設置地震計観測システム」と称する。

陸上設置地震計観測システムにより捕捉した月ごとの自然地震^{*17}の数を表 1.4-2 に示す。

表 1.4-2 陸上設置地震計観測システムで観測した自然地震

年	2019年										2020年			計
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
回数	25	22	26	22	21	20	23	16	20	14	18	18	245	
	4	5	1	1	1	1	1	—	—	—	1	—	15	

注) 回数欄の下段は、胆振東部地震の余震とみられる地震。上段の内数。

1.4.3 常設型 OBC によるモニタリング

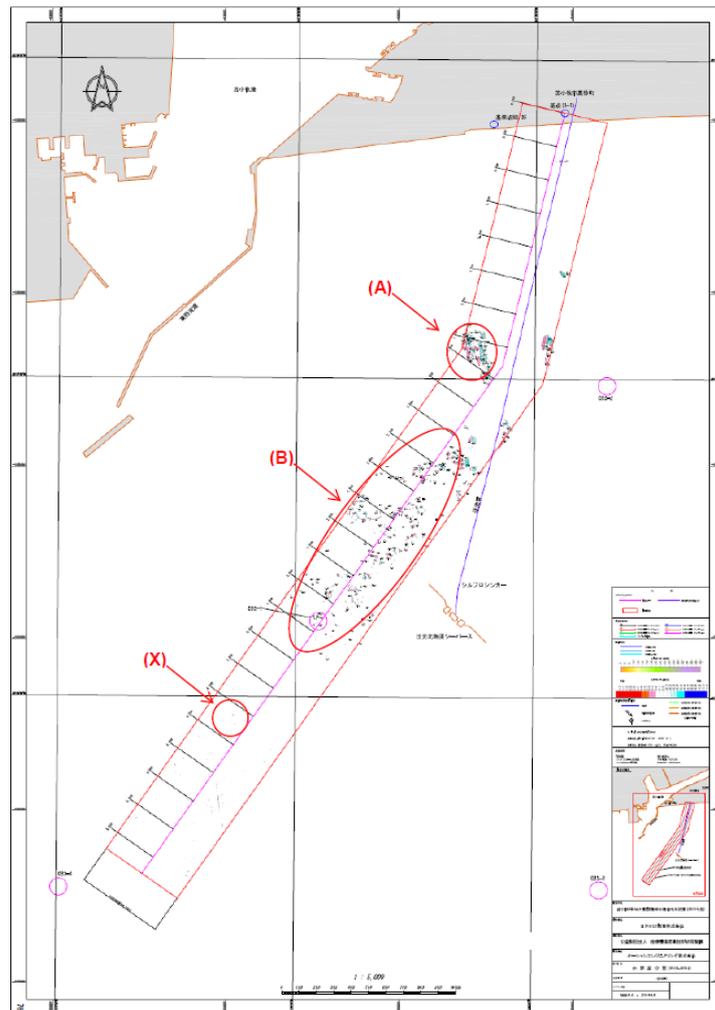
常設型 OBC 観測システム（図 1.4-1）によるデータ取得を継続実施した。常設型 OBC 観測システム（米国 Geospace 社製）は、センサーケーブル部、データ収録部およびセンサーケーブル部とデータ収録部を繋ぐデータ伝送ケーブル部により構成される。

*16) Virtual Private Network の略。VPN は、通信事業者の公衆回線を経由して構築された仮想的な組織内ネットワークである。企業内ネットワークの拠点間接続などに使われ、あたかも自社ネットワーク内部の通信のように遠隔地の拠点との通信が可能である。

*17) 気象庁が HP で公開している苫小牧の震度 1 以上の地震が、本観測システムで観測されているかを確認し、地震波形が目視で読み取れるものをイベントとして抽出している。

常設型 OBC と海域部データ伝送ケーブルの埋設状況の確認として、2013 年度、2016 年度、2017 年度および 2018 年度に続いて、埋設ルートを中心とする長さ 5.1 km×幅 500 m の海域を対象として海底地形測量を実施した。

2019 年度の測量結果と 2018 年度の測量結果から求めた水深の差分図を図 1.4-4 に示す。A 海域のケーブルラインの西側に最大 50 cm 程度の侵食域が、また、B 海域にも局所的に最大 40 cm 程度の堆積、最大 60 cm 程度の侵食域が見られるが、全体的な 1 年間の水深変化は比較的小さい。



注) 出典：海上保安庁 平成 22 年 6 月 3 日刊行「海図 W1033A 苫小牧港西部」を加工して作成

図 1.4-4 水深差分図（2018 年度測量結果－2019 年度測量結果）

1.4.4 OBS によるモニタリング

苫小牧沖に設置した 4 台の OBS（Ocean Bottom Seismometer、以下、「OBS-1」「OBS-2」「OBS-3」および「OBS-4」と称する。図 1.4-1）から構成される OBS 観測シ

システムによるモニタリングを実施している。

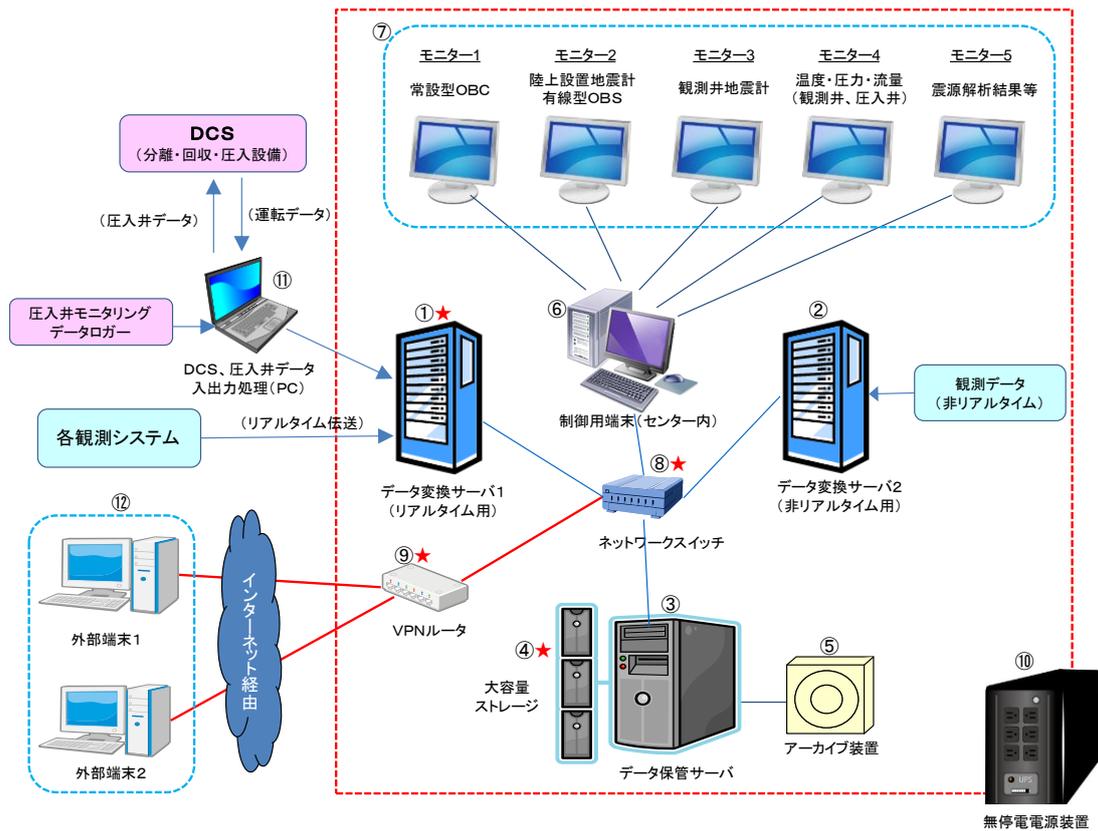
OBS-1は、リアルタイムで観測データを伝送する有線型OBSである。OBS-2、OBS-3およびOBS-4は、海底に単独で設置され、取得した波形記録は内部の記録媒体に連続収録される独立型OBSであり、4箇月ごとにデータ回収と整備を実施した。

また、OBC埋設ルート周辺の海底地形測量実施時に各OBS設置地点（4地点）を中心とする20m×20mの正方形の範囲に対し、マルチビームによる海底地形測量を実施した。その結果、OBS-2設置容器の周囲では侵食傾向がみられ少しずつ洗堀が進んでいると考えられるものの、それ以外の場所では水深の変化はほとんどないことが確認された。

1.4.5 総合モニタリングシステムの運用

総合モニタリングシステムは、すべての観測データの一元的管理、観測データの表示と異常の監視および各種解析機能を備えたシステムである。図1.4-5に総合モニタリングシステムのハードウェア構成図を示す。総合モニタリングシステムは、各観測システムで取得される観測データ、CO₂分離・回収／圧入設備のDCS^{*18}から受け取る操業データおよびHi-netデータを一元管理する。

*18) DCS (Distributed Control System : 分散制御システム)



注) 2018年度に更新した機器を★で示す。

図 1.4-5 総合モニタリングシステムのハードウェア構成図

総合モニタリングシステムが有する主な機能は次のとおりである。

- 1) データ管理機能、2) データの時系列表示機能、3) 異常検出機能、4) 振源・震源^{*19)}決定機能、5) 振源・震源分布等表示機能

2019年度も2018年度に引き続き、圧入時および圧入後の微小振動・自然地震モニタリングを実施した。対象データは、2019年4月1日～2020年3月31日の期間中に観測されたモニタリングデータおよびモニタリング対象領域周辺のHi-netデータである。対象領域は図1.4-6に示す微小振動モニタリング範囲、および図1.4-7に示す自然地震モニタリング範囲とした。振源・震源推定には総合モニタリングシステムを用いて、対象領域内かつマグニチュード-0.5以上、深度50km以浅と推定されたイベントを最終的なモニタリング対象とした。

2018年度と同様、基本となる作業期間を1週間として、期間中に自動検知したイベント候補（振幅異常）について、ノイズイベントの除外、各波形の初動時刻読み取り値の確認

*19) 本実証試験の観測データを用いて決定した微小振動の振源と自然地震の震源をあわせて「振源・震源」と称する。

および調整を経て、振源・震源位置を推定した。推定した振源・震源情報は総合モニタリングシステムのデータベースに逐次登録した。これらの結果を1箇月単位で集約して月報形式で取り纏めた。月ごとに集計されたイベントのうち、予め設定した以下の条件を満たす振源・震源情報を、苫小牧市役所2階の市民ギャラリーに設置したモニターおよび当社Webサイトで公開した。

- 1) 振源・震源位置が微小振動モニタリング範囲内かつ深度50 km以浅
- 2) マグニチュード-0.5以上

さらに、4箇月ごとに実施する独立型OBSの交換およびデータ回収にあわせて、同データを加えた振源・震源再推定を行い、再推定前後の振源・震源分布を比較した。

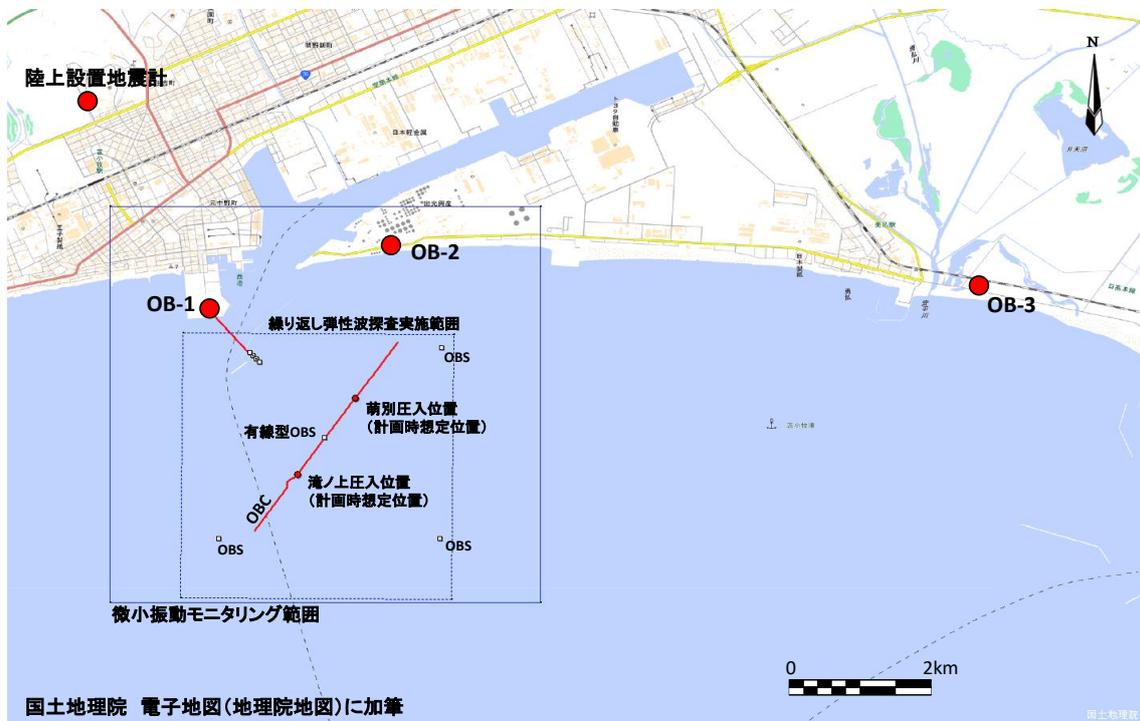


図 1.4-6 微小振動モニタリング対象範囲

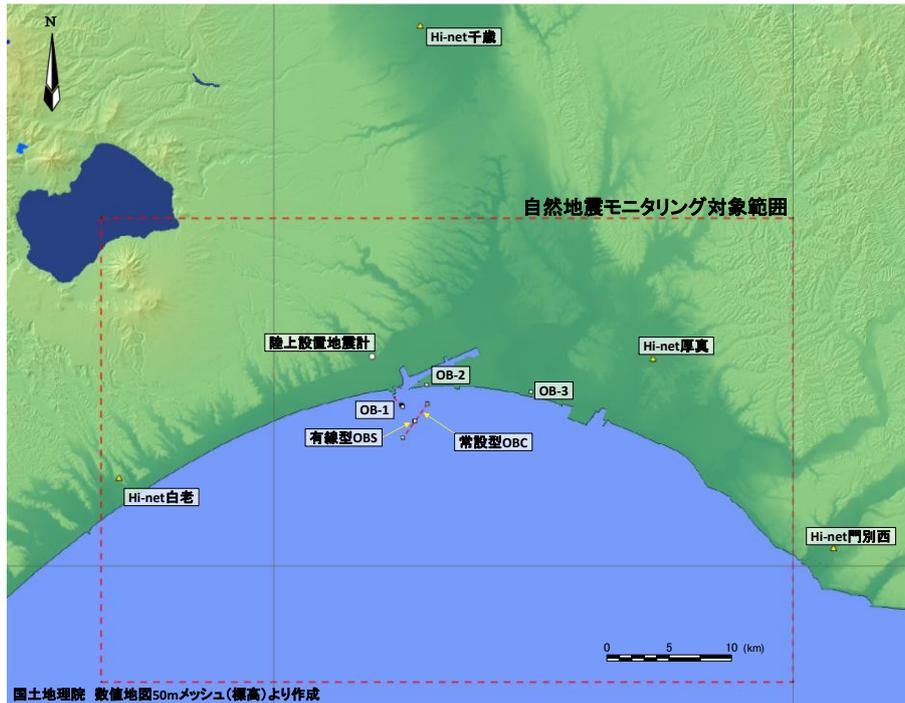


図 1.4-7 自然地震モニタリング対象範囲

図 1.4-8 に、2019 年度中（2019 年 4 月 1 日～2020 年 3 月 31 日）に検知したマグニチュード-0.5 以上のイベントのうち、自然地震モニタリング範囲内の深度 50 km 以浅に震源が推定されたイベントの震源分布図を示し、次のようにまとめた。

- 1) 微小振動モニタリング範囲内においてイベントは検知されなかった。
- 2) 気象庁が検知したイベント数 388 件に対して実証試験では 880 件のイベントを検知した。
- 3) 2018 年 9 月 6 日の平成 30 年北海道胆振東部地震の余震が多く観測されており、自然地震観測範囲の東縁からやや西側にかけて余震の推定震源が南北に分布していることを確認した。
- 4) 実証試験にて推定された余震震源は、気象庁一元化震源リスト記載の震源分布に比して、西寄りまたやや浅く推定される傾向を確認した。これらの系統的な違いは、解析に用いる観測点および速度モデルが異なることによると考えられる。
- 5) OB-3 の周辺において、気象庁一元化震源リストにはほぼ記載がない小規模イベントを推定した。OB-1 および OB-3 ではノイズレベルが低い大深度にて地震観測を行っているため、イベントの検知能力が高く、深度方向の震源推定精度を高める上で有用である。貯留地点近傍では、観測点密度も高く、震源推定結果の信頼性は高いと考えられる。

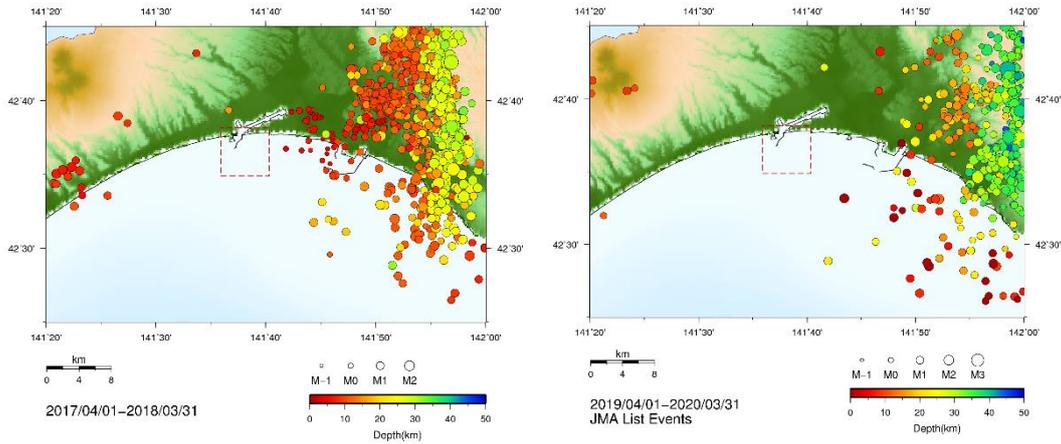


図 1.4-8 2019 年度期間中に自然地震モニタリング範囲内で検知した振源・震源分布
 (左：本事業モニタリング結果、右：気象庁一元震源リスト)

1.4.6 繰り返し弾性波探査（第 4 回モニター調査）

繰り返し弾性波探査の第 4 回モニター調査（以下、「本調査」と称する。）として、小規模三次元弾性波探査（以下、「小規模三次元調査」と称する。）および二次元弾性波探査（以下、「二次元調査」と称する。）を実施した。2019 年度は、小規模三次元調査および二次元調査のデータ取得と標準的な反射法データ処理のみを行い、二酸化炭素分布域推定を目的とする差分抽出処理は 2020 年度に実施する予定である。

本調査は 2020 年 1 月 14 日から同年 2 月 12 日までの 30 日間に実施した。図 1.4-9 に小規模三次元調査の受発振測線位置図を示す。図 1.4-10 に二次元調査の受発振測線位置図を示す。小規模三次元調査は、萌別層貯留層の想定二酸化炭素分布域周辺およびその北側を対象として、三次元弾性波探査ベースライン調査（以下、「三次元ベースライン調査」と称する。）と一部重複する北側の領域で実施した。二次元調査は、萌別層貯留層を対象とする平行測線配置（測線配置 A）および滝ノ上層貯留層を対象とする平行測線配置（測線配置 B）の 2 つの測線配置に対して実施した。

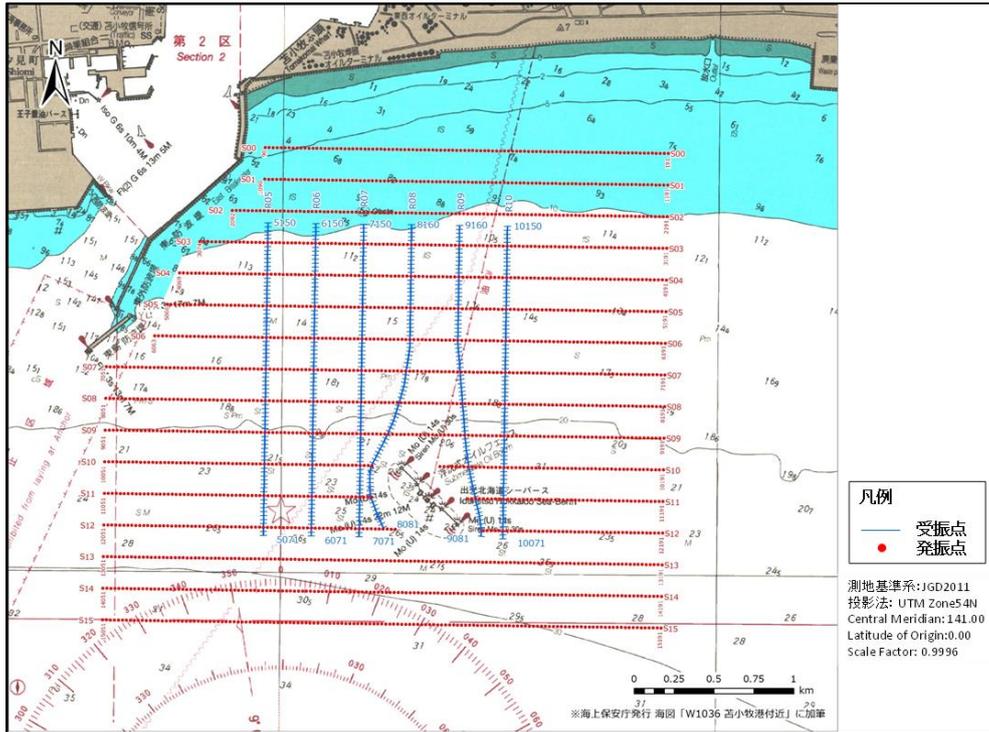


図 1.4-9 受発振測線位置図（小規模三次元調査）

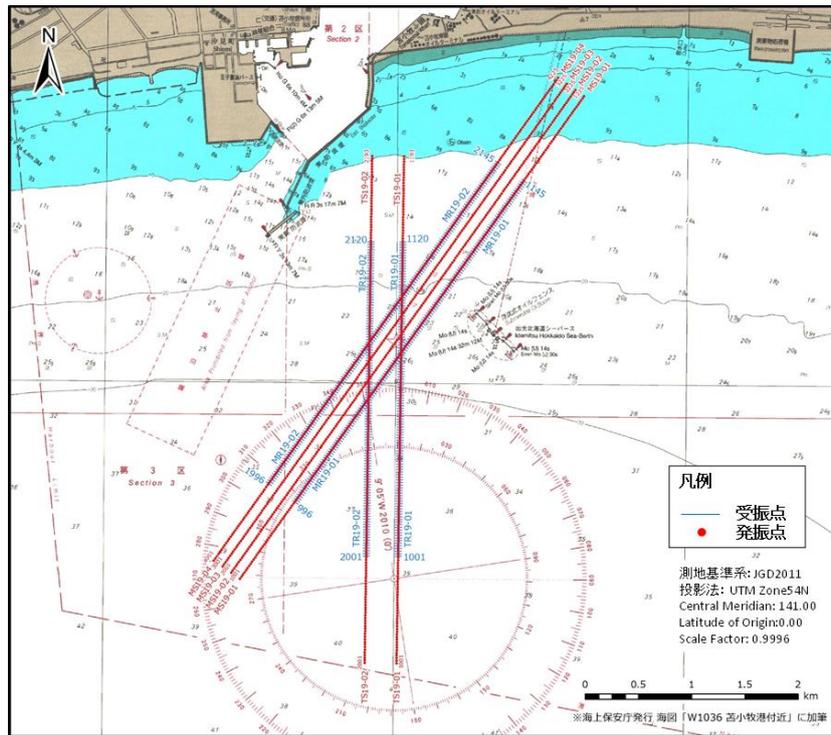


図 1.4-10 受発振測線位置図（二次元調査）

小規模三次元調査のデータ取得は、常設型 OBC による受振測線を 3 ラインずつの二区域に分割して実施した。

二次元調査では、萌別層貯留層を対象とする平行測線配置（測線配置 A）および滝ノ上層貯留層を対象とする平行測線配置（測線配置 B）の二つの測線配置に対して実施した。このうち測線配置 A では、受振測線として、同測線配置に沿って埋設されている常設型 OBC と、本調査実施時に設置および回収する設置回収型 OBC を併用した。測線配置 B では、設置回収型 OBC のみを使用した。

本調査で取得した発振記録には時折、自然地震や大型船舶による一過性ノイズの混入が認められるもののおおむね良好な品質の記録が得られた。2019 年度に実施したモニター調査とベースライン調査との比較解析は 2020 年度に実施する予定である。

1.4.7 圧入井を利用したモニタリング

IW-2 および IW-1 圧入井の温度・圧力を連続的に計測するために、坑内に PT（圧力・温度）センサーを設置している（図 1.4-11）。IW-2 の PT センサーは、パッカーよりも上位の 3-1/2” チュービングに設置（掘削深度 2,062m、垂直深度 930m）しており、この位置は仕上げ区間の上端よりも掘削深度で 432 m、垂直深度で 52 m ほど浅い深度となる。

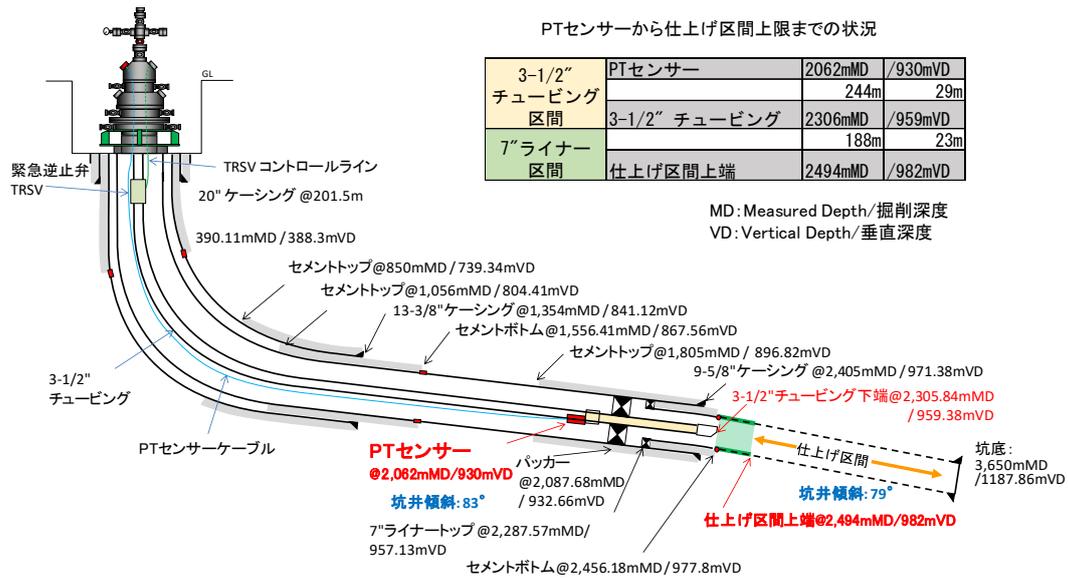
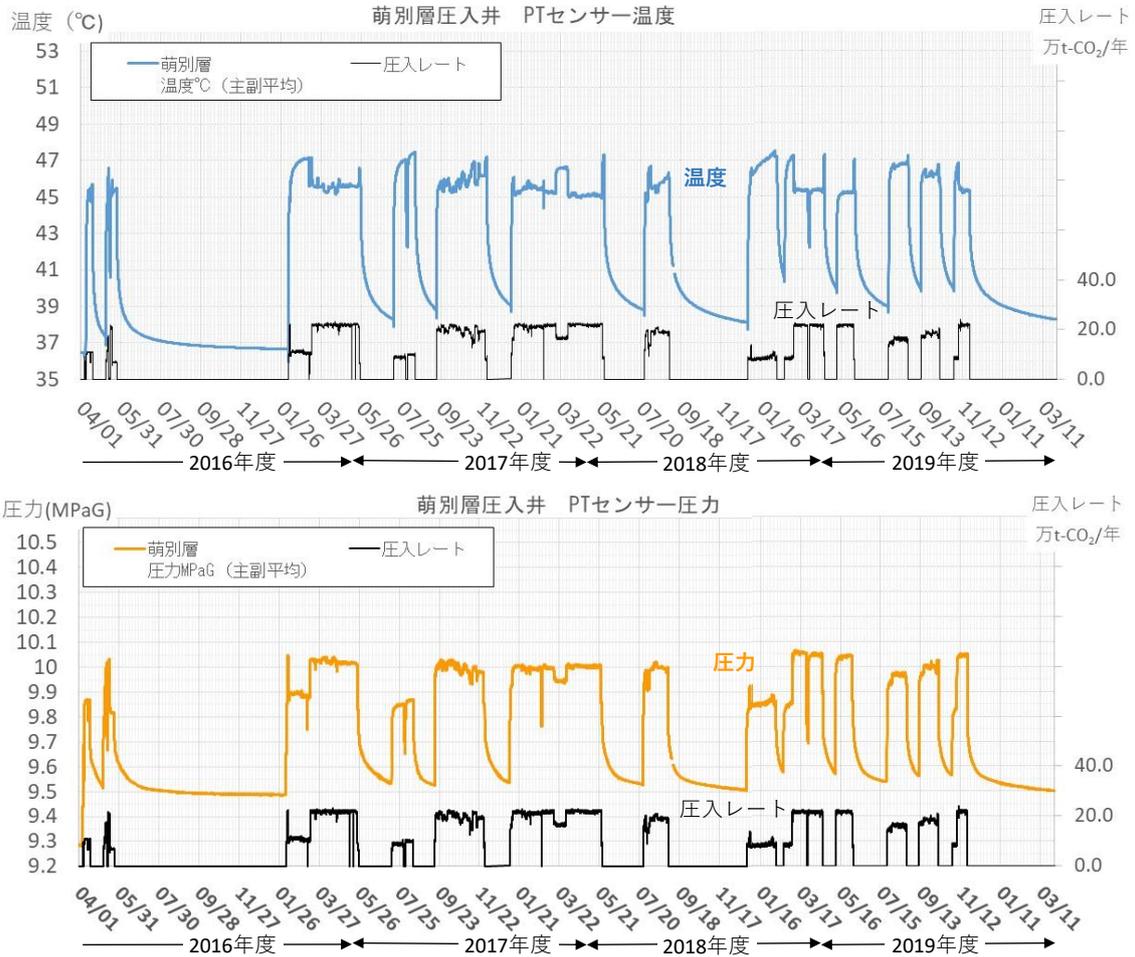


図 1.4-11 IW-2 の坑内に設置した PT センサーの位置

温度・圧力データの観測結果を図 1.4-12 に示す。圧入を開始した 2016 年 4 月から 2020 年 3 月末までの温度と圧入レート（上図）、圧力と圧入レート（下図）を示している。温度圧力ともに、圧入中に上昇し、圧入を停止後は徐々に低下する状況が示されている。上限圧力は 12.63 MPaG であるが、十分余裕をもった圧力で圧入が実施できており、

定レート圧入時における急激な温度や圧力の変動は認められない。したがって、坑底温度・圧力の観測からは、圧入中の異常を示す事象は観察されていない。



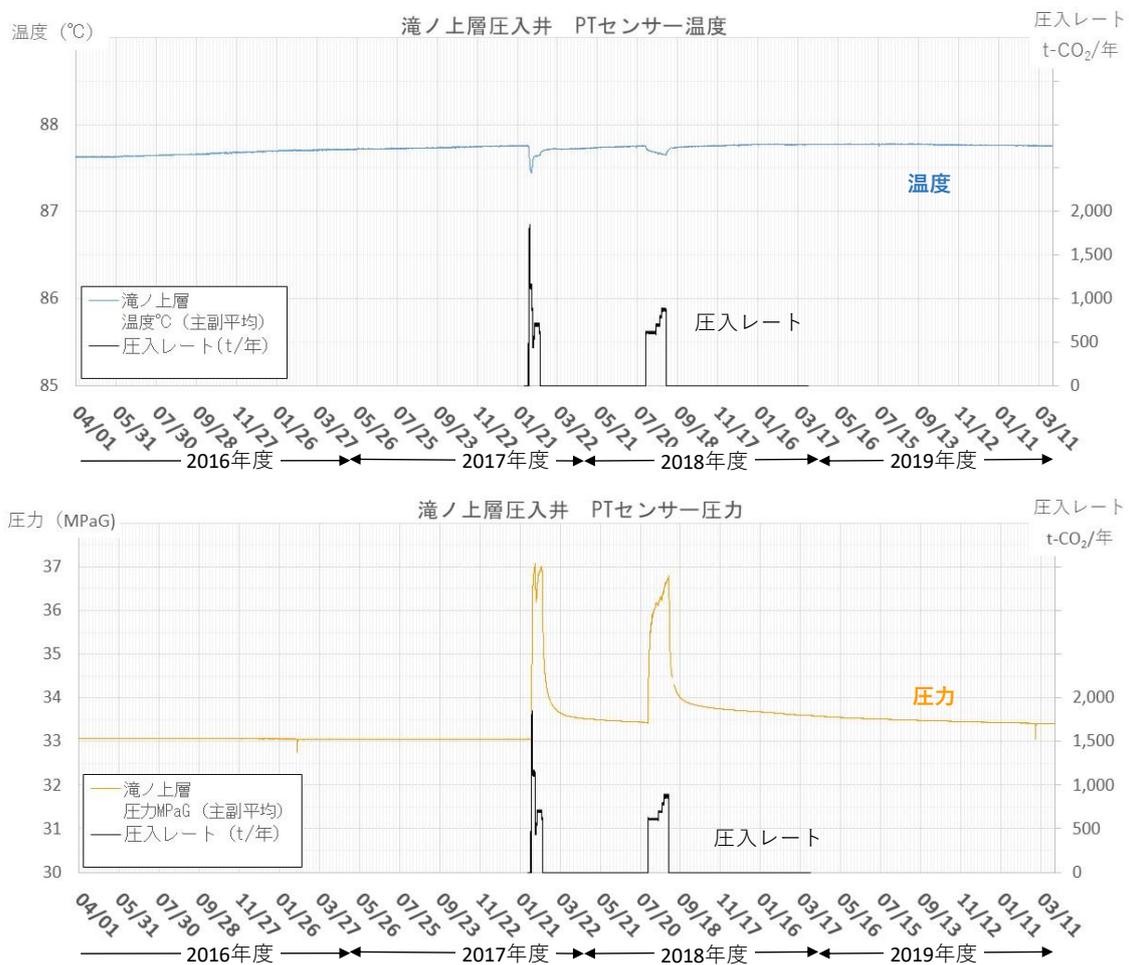
注 1) 同一深度に 2 基の PT センサー（主副）を設置している。グラフは主副平均値を示している。
 注 2) 1 年は 365 日として圧入レートを算出。

図 1.4-12 IW-2 の坑内に設置した PT センサーの圧力・温度データ

IW-1 の PT センサーは、パッカーよりも上位の 3-1/2” チュービングに設置（掘削深度 4,498m、垂直深度 2,395m）しており、この位置は仕上げ区間の上端よりも掘削深度で 142 m、垂直深度で 44 m ほど浅い深度となる。

温度・圧力データの観測結果を図 1.4-13 に示す。萌別層に圧入を開始した 2016 年 4 月から、2020 年 3 月末までの温度と圧入レート（上図）、圧力と圧入レート（下図）を示している。滝ノ上層への圧入は、2018 年 2 月 6 日～2 月 23 日および同年 7 月 31 日～9 月 1 日に実施した。圧入上限圧力の設定については、坑内のブラインを CO₂ で置換するまでは 37 MPaG、置換後には 37.5 MPaG とした。坑内圧力は、圧入中に上昇し、圧入を停止後

は徐々に低下する状況が示されている。圧入レートを注意深く調節することにより、上限圧力を超過せずに圧入を実施できており、圧入時における急激な圧力の変動は認められなかった。一般に、地層温度は地温勾配に応じ深度とともに上昇する。滝ノ上層の分布深度は深いため、PTセンサー位置では88℃弱に達する。地表から低圧入レートにて、CO₂を圧入することにより、PTセンサーよりも浅い深度から、より低温度の管内流体がPTセンサーを通過するため、圧入中にPTセンサーの計測温度は低下した。圧入停止後には迅速に元の温度に回復した。したがって、坑底温度・圧力の観測からは、圧入中の異常を示す事象は観察されていない。



注) 同一深度に設置した2基のPTセンサーの指示値を平均した値を示している。

図 1.4-13 IW-1の坑内に設置したPTセンサーの温度・圧力データ

1.5 貯留層等総合評価（第5章）

2018年度業務において修正した萌別層の貯留層モデルを元に、圧入停止時の圧力解析

（フォールオフテスト）や圧入実績に基づいて貯留層パラメータを修正することにより、貯留層モデルの更新を行った。

萌別層に対しては、圧入中断時の貯留層圧力変化や圧入中の圧力変化に基づき、貯留層性状の変化の有無、坑井の健全性を推定した。また、2018年度に作成した地質モデルによる流動シミュレーション結果と実際の圧力挙動とのずれを修正した上で、圧入停止1,000年後までの圧入したCO₂や圧力の貯留層内での分布状況を予測した。あわせて流動・地化学連成シミュレーションを実施し、CO₂の鉱物化を考慮した長期挙動予測を実施した。滝ノ上層に対しては、継続して坑内温度・圧力の挙動をモニタリングした。

1.5.1 IW-2におけるフォールオフテスト解析

圧入中に上昇した貯留層圧力は圧入を停止すると低下する。低下状況を解析することにより坑井や貯留層の状況のある程度把握することが可能であり、この解析はフォールオフテスト解析（以下、「FOT解析」と称する。）と呼ばれている。

図1.5-1は2016年4月6日の圧入開始以降の主な圧入停止と、FOT解析を試みたタイミングを示している。圧入井坑内のPTセンサーにより、圧力（橙色線）データを取得している。センサーより深部に位置する仕上げ区間上端の圧力（灰色線）はセンサー設置深度のCO₂密度と深度差から推定した。FOT解析は推定した仕上げ区間上端圧力を用いた。圧力解析にはParadigm社製の圧力解析ソフト「Interpret」を使用した。

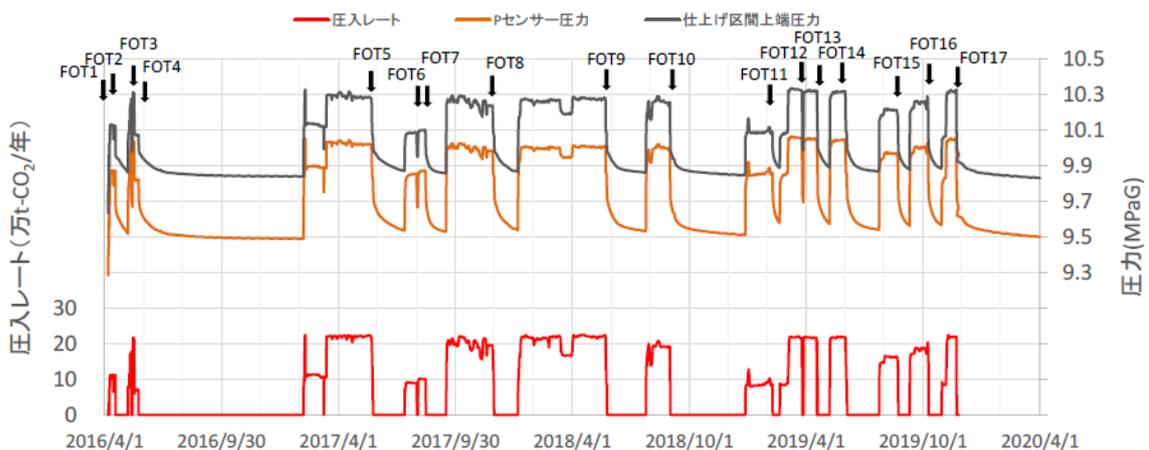


図 1.5-1 FOT 実績

FOT解析では、横軸に圧入を停止してからの経過時間、縦軸に圧入停止後の圧力変化と圧力変化を微分した値（以下、「デリバティブカーブ」と称する。）を共に対数スケール

でプロットする（以下、「ロガーログプロット」と称する。）。ロガーログプロットを利用することで流動形態（線形流・放射状流・球状流等）等の識別が容易となる。また、解析ソフトのタイプカーブ（解析解）と観測データを照合することで貯留層性状を推定した。使用した解析モデルには、IW-2のようなほぼ水平な高傾斜井に対するCO₂圧入結果に対応したタイプカーブが存在しないため、ここでの解析結果は参考値となる。

圧入停止時にPTセンサーにおける温度圧力条件が安定しない等、解析に不向きなケースもあり、FOT6～12、14、17について解析を実施した。

解析対象とした各FOTにおけるデリバティブの傾斜0を、CO₂領域のラジアルフローと仮定して解析した。圧力解析ソフト「Interpret」にて、貯留層性状が均質で、半無限円（ある境界での圧力が初期から変わらない）を想定した物理モデル（Homogenous, Infinite Lateral）を使用した。解析に際しては、貯留層性状が均質かつ無限に広がるものと仮定した。解析に用いた入力値と解析結果を表1.5-1に示す。

表 1.5-1 CO₂領域ラジアルフロー解析の入力値と結果（FOT6～12、14、17）

項目	FOT6	FOT7	FOT8	FOT9	FOT10	FOT11	FOT12	FOT14	FOT17	備考欄
圧入(m ³ /日)	129,623	146,691	124,766	128,502	277,785	122,509	319,403	115,063	317,189	圧入停止
レート(t-CO ₂ /年)	88,474	100,124	85,159	87,709	189,602	83,618	218,008	78,536	216,498	直前のレート
累計圧入量(t-CO ₂)	65,793	69,070	109,250	188,136	207,209	217,425	233,438	261,632	300,012	
有効層厚(m)	19									CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数(rm ³ /m ³)	0.0028									9.82MPaG/37.8°C
CO ₂ 粘性(cP)	0.0521									
孔隙率	0.28									検層解析結果
CO ₂ 飽和率	0.8									高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率(1/kPa)	7.28 × 10 ⁻⁵									9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率(1/kPa)	4.29 × 10 ⁻⁷									
CO ₂ 圧縮率(1/kPa)	8.52 × 10 ⁻⁵									
岩石圧縮率(1/kPa)	4.54 × 10 ⁻⁶									コア試験データより
浸透率x有効層厚(mD x m)	3,000	3,078	3,900	4,950	6,000	3,600	6,650	4,940	6,080	解析結果
浸透率(mD)	158	162	205	261	316	190	350	260	320	

FOT10までは、圧入レートが高いほどかつ累計圧入量が多いほど浸透率×有効層厚の値が増加する傾向が認められた。前者の原因は圧入レートが上がるほど流動坑底圧が上昇して圧入区間が増大するため、後者の原因は累計圧入量の増加と圧入井周辺の貯留層の平均CO₂飽和度が上昇により、CO₂の相対浸透率が向上するためであると考えられる。FOT11以降は、それ以前の傾向とは若干異なり、累計圧入量の増加が浸透率×有効層厚の向上につながる相関が不明瞭となっている。

密閉後10時間以降のレイトタイムで見られたデリバティブの傾斜0を対象にホーナープロット解析を実施した。ホーナープロット解析ではラジアルフローと考えられる領域で

直線を引き、その傾きから浸透率を推定し、その切片（ホーナータイム=1）から貯留層平均圧力を算出した。解析結果を表 1.5-2 に示す。浸透率×有効層厚は、ラジアルフロー解析よりも小さい。これはラジアルフローの解析で対象とした CO₂が到達した領域の浸透率よりも、ホーナープロットで対象とした貯留層全体の浸透率の方が低いことを示している。CO₂が圧入された領域が局所的であることや、水平方向に不均質に圧入されていること等が理由としてあげられる。

表 1.5-2 ホーナープロット解析結果

	FOT9	FOT10	FOT14
圧入レート (m ³ /D)	128,502	277,785	115,063
浸透率×有効層厚 (mD*m)	1,691	1,425	1,662
浸透率 (mD)	9	8	9
貯留層平均圧力 (MPaG)	9.82	9.82	9.83

FOT6～12、14、17の9回のFOTのデリバティブカーブの傾斜0の挙動に対し、ラジアルフロー解析を実施した。その結果、FOT11以降で、圧入レートとCO₂の累計圧入量および解析される「浸透率×有効層厚」値の関係が異なる傾向があり、FOT11以降に圧入性が低下した可能性が示唆された。

FOT9、10、14の密閉時間10時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜0の挙動に対し、ホーナープロット法を適用した。その結果それぞれのFOTで推定された貯留層平均圧力は初期圧力の9.82 MPaGに近い値となり、圧力上昇の影響が及ばない領域の挙動を示している可能性が示唆された。

FOT9、10、14の密閉時間600時間頃までに認められるショックフロント挙動以降に認められるデリバティブカーブの傾斜0の挙動は、探査半径の解析からレイトラジアルフローの挙動を示していることが示唆された。

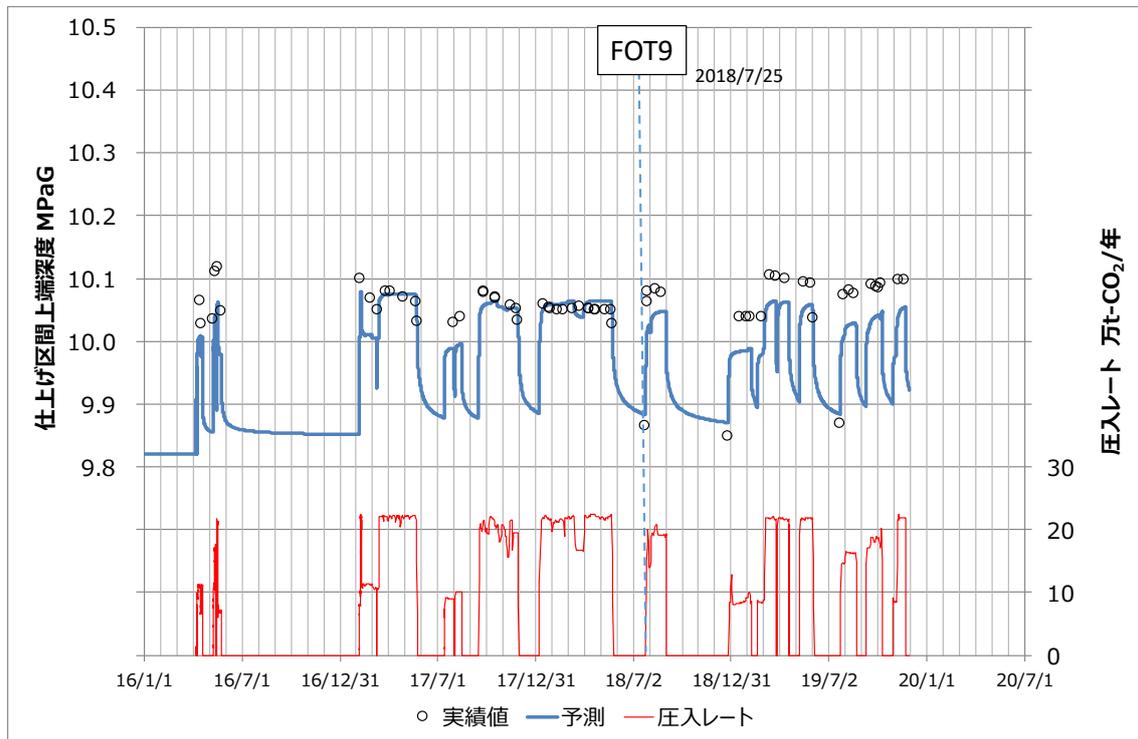
1.5.2 IW-2 および OB-2 の圧力予実績

2018年度に作成した貯留層評価モデル（30個の具現像モデル）の、再現性を確認するために、IW-2とOB-2の坑底圧力とロガーログプロットの予実績比較を実施した。基本的なパラメータは2018年度の貯留層評価モデルと同様とした。本検討において予実績比較に用いるモデルを便宜上、予実績確認モデルと称する。

予実績比較では目的に応じて2018年度に作成したフィールドモデルとセクターモデルを使用した。

- 1) フィールドモデル：OB-2 までを含めた広域のモデルであり、OB-2 の坑底圧力推定に用いた。水平方向のグリッドサイズは 100 m×100 m、垂直方向が 5 m 程度、セル数は 163×126×173 とした。
- 2) セクターモデル：フィールドモデルから坑井周辺を切り出し、グリッドサイズを細分化したモデル。対象範囲は限定されるが予測精度が向上する。31×31×48 のモデルを切り出し、坑井周辺を水平方向に 11.1 m×11.1 m（9×9 分割）、さらに坑井通過グリッドとその隣接グリッドを最小 1.1 m×1.1 m（9×9 分割）に細分化している。IW-2 の仕上げ区間上端圧力および ロガーログプロットの予実績比較には本モデルを用いた。

予実績比較モデルを用いて、2016年4月6日～2019年11月30日間の圧入実績にもとづいた仕上げ区間上端の圧力推移を推定し、実績値と比較した（図 1.5-2）。FOT9 の前後でシミュレーションによる坑内の圧力予測と、実測値との乖離が大きくなる傾向が示された。FOT9 前後で貯留層や圧入井に何らかの変化が生じ、地質モデル（2018年度モデル）の貯留層パラメータ等の調整が必要となった。



注) 実績値は、1.3 節において圧入能力評価に用いた坑内流送シミュレーションで推定した仕上げ区間上端圧力。圧入停止時の実績値は PT センサーの圧力からの推定値。予測圧力は予実績確認モデルによるシミュレーションで予測した仕上げ区間上端における圧力推移を示す（例として具現像 24 のみを表示）。

図 1.5-2 IW-2 における圧入レートと仕上げ区間上端圧力の予実績比較

セクターモデルを用い、圧入開始の2016年4月6日から2019年11月30日までのCO₂圧入実績を入力してフォールオフテストを再現し、得られた坑底圧力データからFOT6～12と14、17についてローグログプロットを作成した。実測値によるデリバティブカーブとシミュレーションによるデリバティブカーブの傾向はおおむね一致したため、妥当なモデルであると判断した。

予実績確認モデルを用いた予実績比較では、FOT9以降（2018年7月25日）IW-2の坑内圧力が十分に再現できなくなったことが示唆され、貯留層パラメータの見直し等、モデルの修正が必要であると判断した。

予実績確認モデルを用いて再現したFOTのローグログプロットの傾向は、実測値の傾向とおおむね一致するため、予実績確認モデルは妥当であると判断した。

また、OB-2におけるIW-2の圧入に応答した坑底圧の上昇傾向をシミュレーションで再現できていると判断した。

1.5.3 ヒストリーマッチ

FOT9実施の前後で圧力の予実績値の乖離が大きくなった。出砂等による貯留層の一部でスキnfactorが上昇したことが原因であると仮定して検討を行った。萌別層の貯留層モデルでは、萌別層砂岩層の上部に二層の高浸透率領域の存在を解釈しており、主にCO₂はその高浸透率領域から圧入されているものと考えられる。本検討では、試行錯誤的に二層の高浸透率領域に与えるスキnfactorの値を考察することで、仕上げ区間上端圧力の予実績値の乖離を減少させるヒストリーマッチを実施した。

FOT9以前の仕上げ区間上端圧力の予実績にかかる目的関数が25 kPa以下となる岩相分布モデルにより、圧入した全期間とFOT9以降の仕上げ区間上端圧力の予実績にかかる目的関数を算出し、目的関数が25 kPaを下回る岩相分布モデルを10モデル抽出した。これらを用いて圧入指数の再現値と実測値とを比較したところ、FOT9前後共に抽出したすべての岩相モデルにおいて実測値をおおむね再現できているものと判断される。

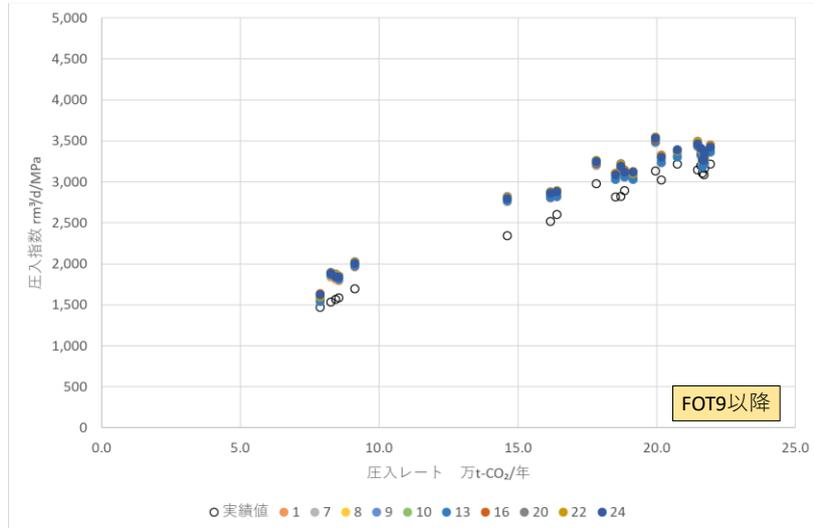


図 1.5-3 圧入指数の実測値と抽出岩相モデルによる再現値との比較（FOT9 以降）

FOT9 以降で圧入性が低下した原因を、スキんファクターが生じたことと仮定し、浅部浸透率領域と浅部高浸透率領域のスキんファクターを試行錯誤的に求めた。その設定に、実際の圧入や圧入停止時の状況をシミュレーションにより再現し、圧入指数や FOT によるデリバティブカーブを再現し実データと比較した。その結果、試行錯誤的に求めたスキんファクターの設定で、実際の圧入指数や FOT の状況を再現できることが示された。

1.5.4 IW-2 長期挙動予測シミュレーション

(1) ケース 1（実績ケース：2019 年 11 月 22 日に圧入を停止）

圧入停止後 1,000 年間の挙動を予測した。CO₂ 飽和度の分布範囲は最大 1 km×1 km 程度、溶解 CO₂ 量の分布範囲（1 ppm 相当以上）は、2 km×2 km 程度となることが予想された。また圧入により上昇した貯留層圧力は、圧入停止 2 年後頃までにはほぼ解消されると考えられる。

圧入停止から 1,000 年後の CO₂ 飽和度の分布は岩相分布の違いによる顕著な差異は認められない。ほぼ坑井周辺に均等に広がっており、岩相の不均質性による CO₂ 飽和度の影響は少ないものと考えられる。また、CO₂ 飽和度の分布範囲は遮蔽層には及んでいない。

圧入停止から 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布は岩相分布の違いによる顕著な差異は認められない。時間の経過とともに溶解 CO₂ 量は地質構造的に低い周辺部分や下方へと分布を広げる。

貯留層の圧力変化には岩相分布の違いによる顕著な差異は認められない。圧入停止時には IW-2 周辺でおよそ 100 kPa～150 kPa の圧力変化（上昇）が認められる。その時点にお

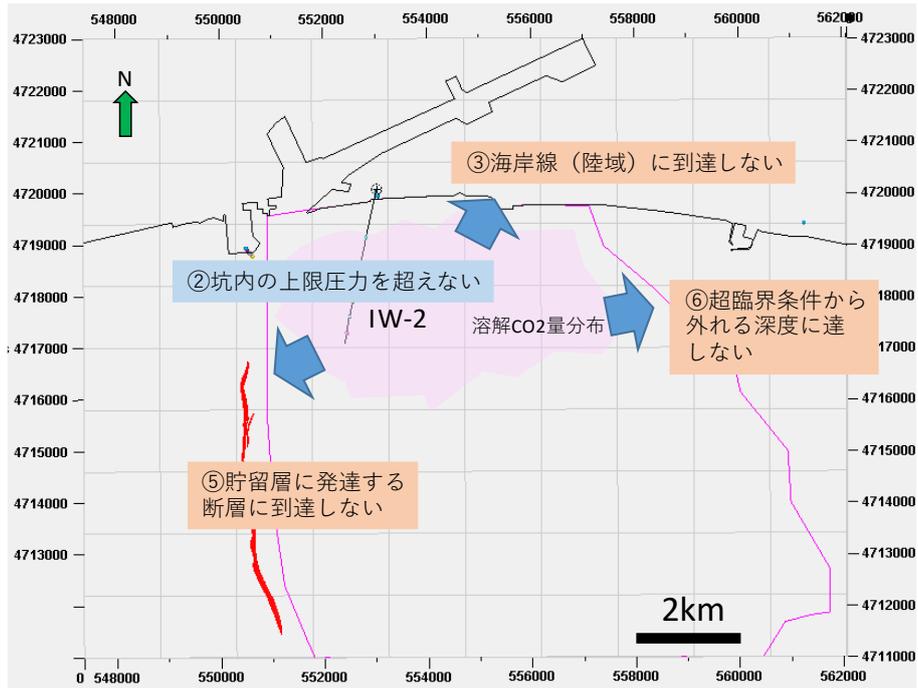
る西側の断層付近における圧力上昇値は10 kPa以下と予想される。圧入停止後、貯留層圧力の変化は迅速に解消され、圧入停止1,000年後にはほぼ圧力変化は回復する。

(2) ケース2（現状設備による最大貯留（圧入）可能量／独自基準による想定）

ケース1の圧入停止期間を2021年3月31日までとし、それ以降22万t-CO₂/年で圧入を継続（6月の1箇月は圧入停止）し、圧入量が100万t増加するごとに、1,000年間の監視期間を設け、その監視期間中に所定の条件を満たす限り100万t単位の圧入を繰り返すことで、最大貯留（圧入）可能量を推定した（表1.5-3、図1.5-4）。

表 1.5-3 圧入を継続する条件

番号	対象期間	条件
①	圧入中	ケース1の圧入シナリオに追加して、2021年4月1日以降、22万t-CO ₂ /年で圧入（6月の1か月間は圧入停止）。
②	圧入中	IW-2 仕上げ区間上端圧力が12.93MPaG以下。
③	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が海岸線に到達しない。
④	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が、遮蔽層層厚が20m以下となるエリアに到達しない。
⑤	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が、西部断層に到達しない。
⑥	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が、深度750mに到達しない（超臨界条件を満たす）。



注) 監視期間中の溶解 CO₂ 量分布が、東西および北限はピンク色の線、図面の南限を超えないことを確認する。弾性波探査解析の結果から断層は遮蔽層に到達していないと考えている。

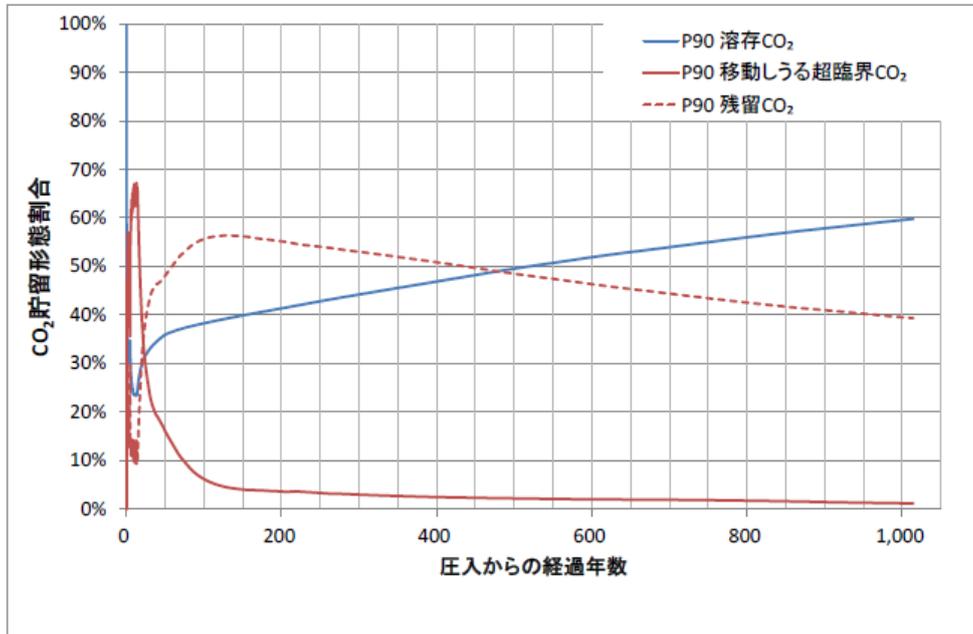
図 1.5-4 最大貯留可能量算定のための監視期間中の条件

その結果、標準的なモデル（P50 具現像）による予測では 500 万 t-CO₂ 程度の圧入が可能であると推定された。同モデルによる予測では、CO₂ 飽和度の分布範囲は 2.5 km×2.5 km 程度、溶解 CO₂ 量の分布範囲(1 ppm 相当以上)は、4 km×4 km 程度の範囲となることが予測された。

代表具現像（P90）における IW-2 井の仕上げ区間上端圧力は圧入終了後速やかに圧力が低下する。長期挙動予測結果として P90 具現像では、400 万 t-CO₂ 圧入時の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。また 300 万 t-CO₂ 圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。200 万 t-CO₂ の圧入に際しては、全て表 1.5-4 および図 1.5-10 に示す圧入の条件を満たすため、P90 具現像では 200 万 t-CO₂ の圧入が可能であると判断した。

代表具現像（P90）における貯留形態変化の挙動予測は、圧入した超臨界状態の CO₂ は周辺の貯留層の孔隙に存在する地層水（深部塩水）に溶解し、溶解 CO₂ の割合が増加する。溶解していない超臨界 CO₂ は貯留層中を移動する過程で、貯留層の孔隙中に毛細管圧力のため移動できない状態となる（残留 CO₂）。残留 CO₂ の一部も移動できない状態で溶解 CO₂ となる。圧入した CO₂ の貯留形態の変化予測を図 1.5-5 に示す。圧入期間中は、移動しうる状態の CO₂ の割合が最も高い。圧入を停止後しばらくの間は、圧入による流れと浮力により貯留層内を移動する CO₂ が残留トラップされるため、残留 CO₂ の割合が高ま

る。貯留層内でのCO₂の移動が収束し、新たに残留トラップされるCO₂の割合が減少すると、残留CO₂と移動しうるCO₂の地層水への溶解が進み、溶存CO₂の割合が増加する。圧入開始から1,000年後ころに圧入したCO₂の99%程度が溶存トラップと残留トラップにより貯留層内で移動しない状態になるものと推定される。

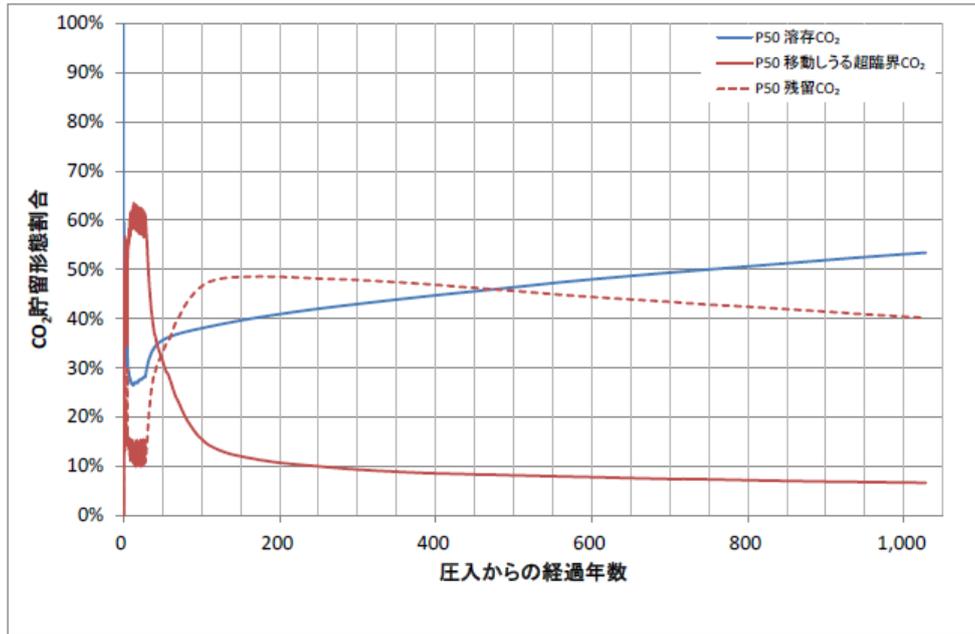


注) 圧入期間は14年間。

図 1.5-5 ケース 3 P90 具現像におけるにおける貯留形態の変化

代表具現像 (P50) における IW-2 井の仕上げ区間上端圧力は圧入終了後速やかに圧力が低下する。長期挙動予測結果として P50 具現像では 600 万 t-CO₂ 圧入時の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。500 万 t-CO₂ の圧入に際しては、全て表 1.5-3 および図 1.5-4 に示す圧入の条件を満たす。以上より、P50 具現像では 500 万 t-CO₂ の圧入が可能であると判断した。

代表具現像 (P50) における圧入した CO₂ の貯留形態の変化予測を図 1.5-6 に示す。圧入期間中は、移動しうる状態の CO₂ の割合が最も高い。圧入を停止後しばらくの間は、圧入による流れと浮力により貯留層内を移動する CO₂ が残留トラップされるため、残留 CO₂ の割合が高まる。貯留層内での CO₂ の移動が収束し、新たに残留トラップされる CO₂ の割合が減少すると、残留 CO₂ と移動しうる CO₂ の地層水への溶解が進み、溶存 CO₂ の割合が増加する。圧入開始から 1,000 年後ころに圧入した CO₂ の 93% 程度が溶存トラップと残留トラップにより貯留層内で移動しない状態になるものと推定される。



注) 圧入期間は 29 年間。

図 1.5-6 ケース 2 P50 具現像におけるにおける貯留形態の変化

(3) 萌別層流動-地化学連成シミュレーションモデルの作成

地層水組成は、OB-2 掘削時に萌別層砂岩層より採取した地層水試料をベースに、地層水の熱力学的再構成を行って設定した。鉱物組成は、調査井や圧入井で採取したコアおよびカッティングス試料に対する岩石学的な分析や検討に基づいて決定した。

鉱物の反応表面積は反応速度を左右するため、地化学反応モデルを構築するうえで極めて重要なパラメータであるが、不確実性が非常に大きく、正確に把握することは現在の科学技術では不可能である。自然界の観察結果から得られる風化速度は室内実験で測定される反応速度に比べ小さいことが報告されており、これは鉱物表面のコーティング、被覆、表面状態、反応表面積、反応時間、物質移動様式等が関与している可能性が想定されるが、明確な理由はわかっていない。本検討では、2015 年度業務と同様に鉱物として細粒砂岩(0.2 mm)を念頭に置き、砂岩を対象とした反応表面積を基準として用いた（表 1.5-4 設定①）。表 1.5-4 の設定②～設定⑤の様に貯留層を構成する鉱物の反応表面積を調整し、CO₂ を圧入しない状態で地層水と貯留層岩石間のバッチ反応速度シミュレーションを実施し、10,000 年間の地層水組成および初生鉱物組成の安定性を確認した。その結果の概要を表 1.5-5 に示す。反応表面積の設定を調整した設定③と設定⑤のケースの pH および溶液化学種濃度が 10,000 年間にわたり安定しているため、設定③と設定⑤の設定が妥当であると判断し、この設定を用いて 3D 流動-地化学連成シミュレーションを実施した。

表 1.5-4 実施ケースの反応表面積の設定

実施ケース		設定①	設定②	設定③	設定④	設定⑤
基準	標準	9.1				
反応表面積	黄鉄鉱	12.9				
(cm ² /g)	粘土鉱物	108.7				
反応表面積	石英	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
(cm ² /g)	非晶質シリカ	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	斜長石	9.1	9.1 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁵	9.1 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁵
	カリ長石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	方解石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	シデライト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	マグネサイト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	ドーナイト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	ドロマイト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	FeNa-サポナイト	108.7	108.7	108.7	108.7	108.7
	カオリナイト	108.7	108.7	108.7	108.7	108.7
	緑泥石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	海緑石	9.1	9.1	9.1	9.1 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁴
	蛇紋石	108.7	108.7 × 10 ⁻³	108.7 × 10 ⁻⁴	108.7 × 10 ⁻³	108.7 × 10 ⁻⁴
	黒雲母	108.7	108.7 × 10 ⁻³	108.7 × 10 ⁻⁴	108.7 × 10 ⁻³	108.7 × 10 ⁻⁴
	黄鉄鉱	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
	Na-斜方沸石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	輝石	9.1	9.1 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁵	9.1 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁵
	角閃石	9.1	9.1 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁵	9.1 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁵
析出しなぬ鉱物	緑泥石	緑泥石	緑泥石	緑泥石	緑泥石	緑泥石
	カリ長石	カリ長石	カリ長石	カリ長石	カリ長石	カリ長石
	石英	石英	石英	石英	石英	石英
	文献 (基準値)	著しく未飽和鉱物の 反応表面積を 低下	著しく未飽和鉱物の 反応表面積を さらに低下	stap-MN2に加え 海緑石の反応表 面積を低下	stap-MN3に加え 海緑石の反応表 面積を低下	

表 5.1-5 反応表面積の設定にかかるバッチ反応速度シミュレーション結果の概要

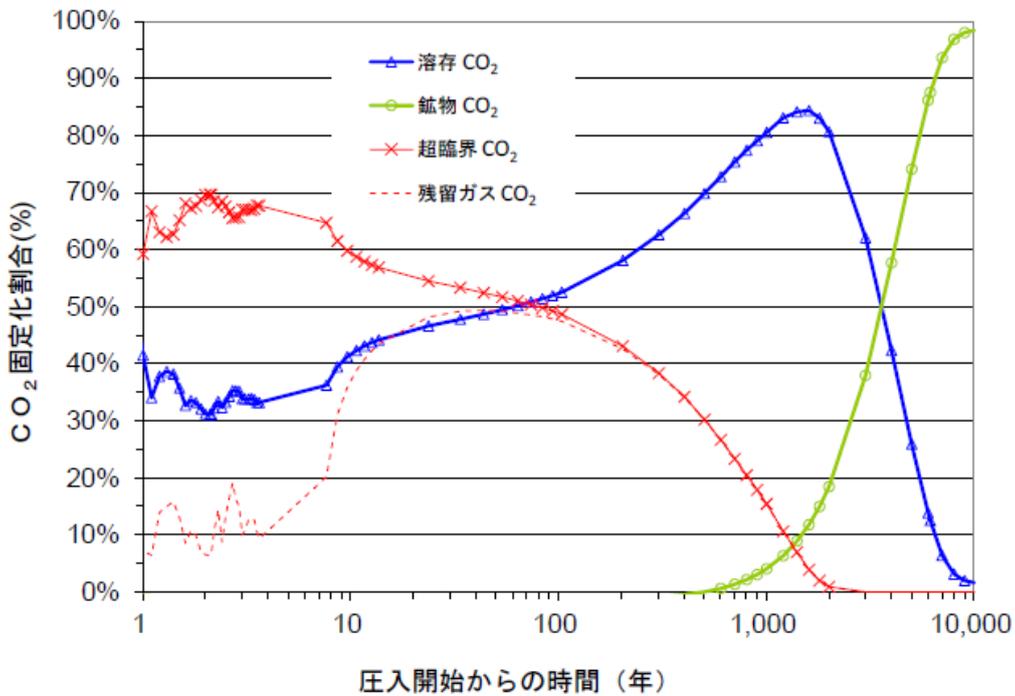
	反応表面積の設定	pHおよび溶液化学種濃度 の経時変化	鉱物溶解・沈殿量 の経時変化	判定
設定①	文献のまま	短期間に変化	短期間に未飽和な鉱物(斜長石、蛇紋石、海緑石等)の溶解が進行	×
設定②	未飽和鉱物の反応表面積を 10 ⁻³ ~10 ⁻⁴ に低下	1,000年ころから大きく変化	海緑石と斜長石の溶解が徐々に進み、サ ポナイトと斜方沸石が沈殿	×
設定③	設定②よりさらに、未飽和と鉱 物の反応表面積を低下	10,000年で0.3以下の変化	海緑石の溶解が徐々に進み、サポナイトと 斜方沸石が沈殿。海緑石溶解のタイ ミングがstap-MN2よりも早まる。	○
設定④	設定②よりさらに、海緑石の 反応表面積を低下	1,000年ころから大きく変化	海緑石と斜長石の溶解が徐々に進み、サ ポナイトと斜方沸石が沈殿	×
設定⑤	設定③よりさらに、海緑石の 反応表面積を低下	10,000年で0.4程度の変化	海緑石の溶解およびシデライトの沈殿がよ り遅くなり	○
萌別層岩石サン ブルの観察結果	斜長石の溶脱、海緑石の溶解、斜方沸石とスメクタイトの自生			

(4) 萌別層 3D 流動-地化学連成シミュレーションの実施

3D 流動-地化学連成シミュレーションは TOUGHREACT を用いて実施した。3D 流動シミュレーションは GEM を用いたため、TOUGHREACT による 3D 流動-地化学連成シミュレーションに先行し、セクターモデルを用いて、GEM と TOUGH 系のシミュレーター (TOUGH2) による 3D 流動シミュレーション結果の整合性を確認したうえで、TOUGHREACT による 3D 流動-地化学連成シミュレーションを、表 1.5-5 の設定

③および設定⑤を3Dモデルに組み込み実施した。ここでは設定⑤の結果について記載する。

モデル全体のCO₂固定化量割合の変化を図1.5-7に示す。貯留層内のCO₂は、圧入中は移動し得る超臨界CO₂（可動）と溶存CO₂の割合がほとんどとなる。圧入停止後より残留CO₂の割合が増加する。鉱物として固定されるCO₂は圧入開始から700年後ころから認められ、時間の経過とともに徐々に割合を増し、10,000年後には圧入したCO₂の90%程度となる。1,000年後ころまでにはすべてのCO₂が移動しない状態となり、超臨界CO₂（可動）は消滅する。萌別層砂岩層にCO₂を圧入した際には、海緑石が溶解することによりFe²⁺やMg²⁺が供給され、地層水に溶解したCO₂と反応し、シデライトやマグネサイトとして固定される反応が想定される基本的な反応となる。



注) 計算結果は検討で仮定したパラメータを用いた計算結果としては正確であるが、反応性に大きな影響を持つ反応表面積を正確に把握することが不可能であることから、計算結果は参考値とする。

図 1.5-7 モデル全体のCO₂固定化量の経時変化（設定⑤）

1.6 海洋環境調査（第6章）

海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（海洋汚染防止法）では、許可を受けた事業者は、特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄許可申請書類の別紙-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」（以下、「監視計画」と称する。）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。

経済産業省は、2016年3月31日に環境省より許可を受けた監視計画について、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」に基づく見直しを行い、2016年12月28日にこの監視計画の変更申請を届出、環境省より2017年2月1日に監視計画の変更を許可され、2017年2月の2016年度冬季海洋環境調査以降は、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ていた。

一方、監視計画において、本申請書で示した溶存酸素飽和度（DO）と二酸化炭素分圧（ $p\text{CO}_2$ ）との関係による移行基準は、通常時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、毎年見直しすることとされており、上述の2016年度冬季海洋環境調査以降、2017年度四季調査を行いデータが得られたことから、2018年7月19日に同データを追加して移行基準を見直した監視計画の変更申請を届出し、環境省より2018年8月31日に監視計画の変更が許可された。

2018年度と同様に2019年度も確認調査への移行基準を超過することはなかった。また通常時監視時には、海水の化学的性状に及ぼす生物影響の検討としてクロロフィルaおよび栄養塩類の採水調査を、自然変動の動向に関する調査として多項目センサーおよびpHセンサーを用いた係留系装置による水質連続観測を実施して、異常のないことを確認した。

さらに、ベースラインデータ取得のために採水試料の ^{14}C 分析を実施するとともに、生態系および海洋の利用の状況について、ベースライン調査時からの変化についての調査（既往文献による調査）を実施した。具体的な調査内容を以下に記載する。

1.6.1 海洋環境調査

監視計画に記載した海域の状況に関する事項のうち、海水の化学的性状、海洋生物および生態系ならびに海洋の利用の状況、その他特定二酸化炭素ガスの状況および海域の状況を把握するために必要な項目の現地調査を「海洋環境調査」と称する。上記現地海洋環境調査に含まれる項目のうち「海水の化学的性状」「海洋生物の状況」「気泡発生の有無の状況」調査を、図1.6-1に示す12地点において実施した。

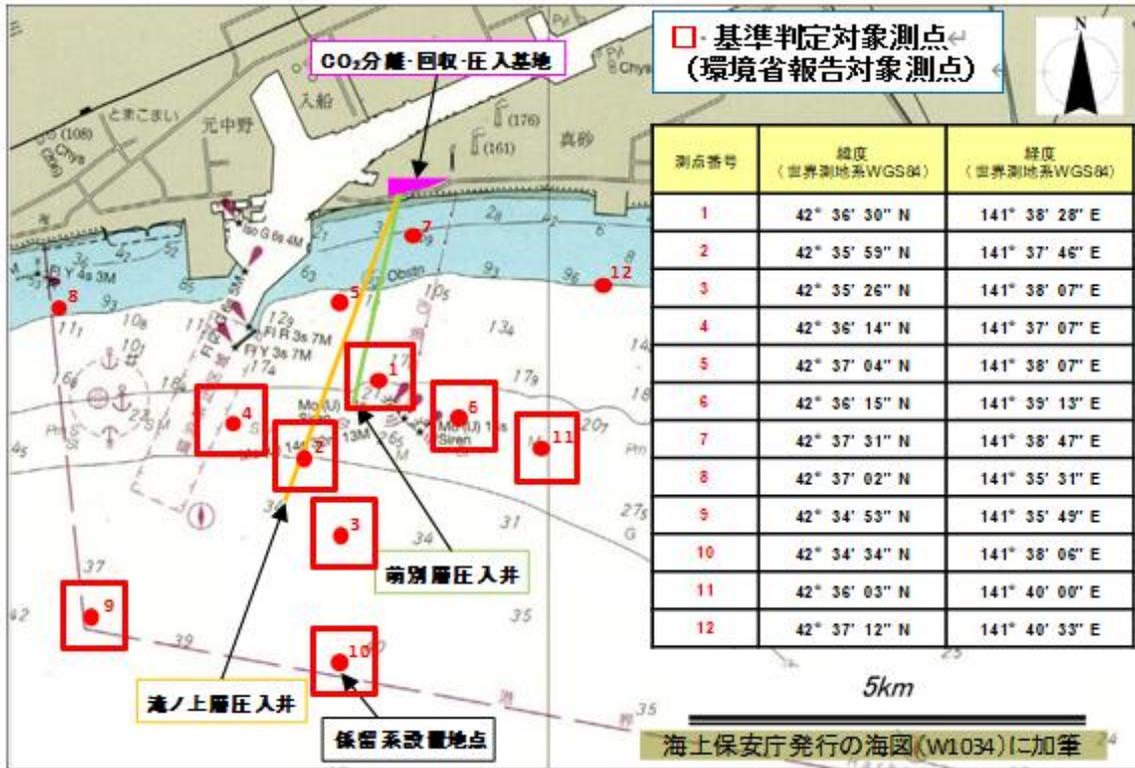


図 1.6-1 海洋環境調査測点の位置（赤字 12 点）

海水の化学性状は、「採水による水質分析：水温、塩分、溶存酸素(DO)、水素イオン濃度(pH)、全炭酸、アルカリ度、硫化物イオン濃度および二酸化炭素分圧(pCO₂)の分析」、「多項目水質センサーによる鉛直観測：水温、塩分、DO および pH の鉛直分布の観測と温度躍層/塩分躍層の有無の確認」および「採泥による底質分析：泥色観察、pH、酸化還元電位(ORP)、全有機炭素、無機炭素、硫化物、粒度組成、含水率および空隙率の測定・分析」の調査で構成されている。

海洋生物の状況は「植物プランクトン調査」、「動物プランクトン調査」、「メイオベントス」、「マクロベントス」、「メガロベントス：ROVによる調査および貝けた網による調査」により構成されている。

気泡発生の有無と状況は各調査測点における海面上の気泡の有無の目視確認と水中カメラを用いた海底面からの気泡発生の船上カメラによる目視確認を行っている。

その他、海洋汚染防止法対応に係る支援業務に関する調査として「クロロフィル a および栄養塩類の採水分析」および「係留系による水質連続観測」を行っている。

なお、「貝けた網による調査」は毎年 1 回夏季に行い、「貝けた網による調査」以外の調査項目は年 4 回（春、夏、秋、冬）行うことになる。

2019年度に実施した海洋環境調査の結果は以下の通りであった。

海水の化学的性状は、春季、夏季、秋季および冬季の各調査とも各水質分析項目の分析値について特記するような異常値は認められなかった。

海水の化学性状以外の調査項目のうち海洋生物の状況は、春季、夏季、秋季、冬季とも植物プランクトンおよび動物プランクトンの出現個体数に異常は認められなかった。また夏季に行われた貝けた網による調査の結果、ウバガイの分布密度に経年的な変化は認められなかった。

その他、4回の調査いずれにおいても、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において、気泡の発生は確認されなかった。

1.6.2 海水中放射性炭素分析

監視計画では、海底下からのCO₂漏出検知のために、海水の放射性炭素（¹⁴C）分析を用いる方法が記載されている。海水の自然バックグラウンド値を基準にすれば、化石燃料燃焼起源のCO₂が海水へ漏出した場合、海水中の¹⁴Cを分析することで、海底下廃棄CO₂の海水への漏出の程度を技術的に判断できる可能性がある。しかしながら、苫小牧海域における¹⁴Cの自然変動の程度は把握されていないため、海水中の¹⁴C分析を行いベースラインデータとするとともに、自然変動の把握を目的として実施した。

放射性炭素同位体 $\Delta^{14}\text{C}$ の推移（2016年度冬季～2019年度冬季）を図1.6-2に示した。



図 1.6-2 放射性炭素同位体平均 $\Delta^{14}\text{C}$ の推移

2017年度～2019年度までの約3年間の海洋環境調査（四季調査）において取得した全12調査測点の平均の $\Delta^{14}\text{C}$ は、約-47‰から約14‰で推移していた。また、2019年度の四季調査の測定データは、ばらつきを考慮すると2017年度および2018年度の測定データのばらつきの範囲内と考えられ、自然変動を反映したベースラインデータを取得できたものと判断する。

1.7 CCSに関する法規制・他プロジェクトの動向調査

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」への適切な対応に資するため、海外のCCS規制および技術基準・ガイドライン等に関する最新情報を入手・解析し、国内法規制の在り方を検討するための資料として、「先行的にCCSを実施あるいは研究している国や地域の法規制の調査」と「各国のCO₂排出量およびCO₂削減量のアカウンティング」に関する調査を実施した。

また、日本における将来的なCCSの実用化に向けた環境整備や政策立案に資する情報を得ることを目的として、CCS関連のビジネスモデルや法規制や制度設計の検討、インセンティブの検討および導入が先行する「海外におけるCCS事業全般についての調査業務」を行った。

我が国におけるCCSの実用化にあたっては、CCSコストの低減、十分なポテンシャルを有する貯留適地および輸送手段の確保、CCSに対する国民の理解といった課題が存在している。これを受けて、これまで我が国で行なわれたCO₂輸送に関する調査検討資料を基に、「我が国におけるCCSのためのCO₂輸送検討に必要な基礎的調査」を実施した。さらに、CO₂分離・回収設備にて分離・回収したCO₂を液化し、船舶で輸送するために必要な「CO₂排出源関連設備フイージビリティスタディ」を実施した。

1.7.1 CCSに関する法規制等の動向調査

CCSの規制および技術基準等に係る公表資料の調査を行った（表1.7-1）。

表 1.7-1 各法律の規制内容の比較

		米国	オーストラリア	EU	英国	ノルウェー
法体系	根拠法の目的	地下水保護	石油・ガス開発	CCS実施	石油・ガス開発	石油・ガス開発 または CCS 実施
許可プロセス	探査許可	不要	要	要	要	要
	貯留許可	要	要	要	要	要
サイト選定条件	選定の主眼点	飲料水源の保全	貯留層の安定性	周辺環境・人の健康への悪影響防止		
圧入するCO ₂ の性状	CO ₂ 濃度およびCO ₂ 以外の物質の扱い	CO ₂ 濃度に関する言及なし(付随物質やトレーサーの含有は許容)	「極めて高い割合 (overwhelmingly) のCO ₂ 濃度」 定量的な基準はなし (付随物質やトレーサーの含有は許容)			
モニタリングの要件	モニタリング計画	貯留許可申請時に策定(5年ごとに見直し)				
	要求事項	項目等を規定	具体的な項目等の詳細な規定はない			
サイト閉鎖の要件	閉鎖までの期間	原則 50 年	5 年以内	サイト閉鎖の申請が承認され次第		
	閉鎖後のモニタリング	不要	連邦政府が実施	事業者が実施		
圧入後の責任移転	責任移転の有無	無	有(政府)	有(政府)		
	閉鎖後, 移転までの期間	—	最低 15 年	原則 20 年		

各国の法規制は、米国は地下飲料水源保護のための法律（環境法）であるが、それ以外の多くは石油ガス開発のための法律（事業法）であり、CCSを資源開発に近い行為として規制している。一方で、我が国におけるCCSを規制する法的枠組みは「海洋汚染防止法」であり、CCSは、CO₂を海底下に廃棄する行為とみなされ、他の廃棄物の海洋投棄と同様の枠組みが適用されており、CCSに対する見方が大きく異なる。本項においては、他国と比較して、現行の法規制の課題や改善策等について、CCS促進のための観点で整理を行う。

- ① 法体系：各国では主に石油ガス開発のための事業法を基にしているが、海洋汚染防止法は海洋環境の保全を目的としている環境法である点が特徴として挙げられる。米国は飲用地下水源の保護を目的としており、海洋汚染防止法と近い部分も存在する。
- ② 許可プロセス：探査や掘削、圧入といった行為は、その規制の中で許認可を取得する必要がある。海洋汚染防止法は、廃棄物を海底下ではなく海洋に投棄する行為を規制する法律であるため、CCSのように海底下への廃棄（流体の圧入）に必要な要素を網羅できておらず、例えば、掘削等の行為に関する詳細な基準は存在しない。
- ③ サイト選定条件：他国の規制では、安全な貯留のために貯留層の健全性をはじめ

とする様々な条件が定められており、日本も同様である。日本では地震が多く発生するため、海洋汚染防止法では将来の著しい地層の変動という不確実性の高いリスクについても考慮することが求められている。

- ④ 圧入するCO₂の性状：圧入するCO₂に関する定量的な濃度基準や、CO₂回収方法に関する規制は確認されなかった。海洋汚染防止法では、海底下廃棄を行うCO₂は、アミン等を用いた化学吸収法で回収し、CO₂濃度が原則99%以上（水素製造の場合は98%以上）であることが求められている。
- ⑤ モニタリングの要件：海洋汚染防止法のモニタリング要件の特徴としては、海水の化学的性状をモニタリング項目としている点が挙げられる。他国では、海底への漏出モニタリングを求める例があるが、手段の規定はない。
- ⑥ サイト閉鎖の要件：海洋汚染防止法では、圧入井の閉鎖方法を許可申請時の実施計画に含むこととなっているが、それ以外の要件や許可はない。EUでは、サイト閉鎖に伴いモニタリング項目が変更される等の要件の見直しがある。サイトの閉鎖により、一般的に漏出等のリスクは低減していくものであり、適宜モニタリングの要件を見直すことが必要であると考えられる。
- ⑦ 圧入後の責任移転：海洋汚染防止法では圧入終了後の長期的責任の移転に関する記載はなく、事業者は圧入終了後も貯蔵（CO₂が地下に存在する状態）を継続するための許可申請を行うこととされている。一方で、EU、英国、ノルウェーはサイト閉鎖から20年間、オーストラリアは15年間のモニタリングの後に政府へ責任の移転が可能である例や、米国では責任移転の考え方は存在せず、サイト閉鎖後も責任は事業者にあり続けるものの、モニタリングをはじめとする管理義務はなくなるとされている例もある。

1.7.2 CCSのアカウントティングに関する調査

アカウントティングとは、事業活動におけるCO₂または温室効果ガス（GHG）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できる。前者としては、気候変動に関する政府間パネル（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（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る。一方後者は、クリーン開発メカニズム（CDM）に代表されるように、削減に伴うクレジット取得が算定の主な目的であり、それぞれのクレジット制度に即した手法で算定することとなる。

(1) アカウンティングにおける CCS の取り扱い

アカウンティング手法について、その特徴を表 1.7-2 にまとめた。

表 1.7-2 各アカウンティング手法の特徴

アカウンティング手法	IPCC インベントリガイドライン	米国 EPA GHGRP	EU-ETS	SHK 制度 (貯留に関する記載なし)	CDM	アルバータ州 CCS/EOR プロトコル	カリフォルニア州 CCS プロトコル
アカウンティング単位	国家	プロジェクト (CO ₂ 回収および貯留を含む)	設備 (CO ₂ 回収、輸送、貯留はそれぞれ別に計上)	設備	プロジェクト	プロジェクト	プロジェクト
目的	排出量	排出量	排出量	排出量	削減量	削減量	削減量
算定期間	1年	1年および累計	1年	1年	クレジット取得期間による	1年	1年
プロジェクトバウンダリ	国家、地域、セクター	回収・貯留システム	CCS システムの構成要素	構成要素	CCS システム	CCS システム	CO ₂ 回収から圧入および漏洩を含めた CCS システム
対象となる GHG	京都議定書対象 GHG	CO ₂	CO ₂	京都議定書対象 GHG	京都議定書対象 GHG	CO ₂	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , CO, VOC
対象となる排出源	直接排出源	直接排出源	直接排出源	直接排出源および間接排出源	直接排出源および間接排出源	直接排出源および間接排出源	直接排出源および間接排出源

IPCC インベントリガイドライン：2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

米国 EPA GHGRP：GHG Reporting Program

SHK 制度：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル（環境省、経済産業省）

CDM：京都議定書における制度

(2) CDP や TCFD における CO₂ 排出量および CCS/EOR への言及

CDP (Carbon Disclosure Project) は、機関投資家が連携して企業の温暖化対策や水戦略、森林への対応等環境に関わる情報公開を進めるプロジェクトである。CCS については、石油・天然ガスセクター向けの質問書の中で、CCS の実施の有無、CO₂ 貯留量についての質問が行われている。

気候関連財務情報開示タスクフォース (TCFD) は、世界の中央銀行総裁が集まる金融安定理事会 (FSB) の傘下で気候変動が与え得る財務リスクの開示を企業に求めるプロジェクトである。CCS については、シナリオ分析を行う上での考慮するパラメータの一つとして言及されているが、開示方法等の具体的な取り扱いについては示されていない。

(3) CCS/EOR 実施者における、CCS/EOR による CO₂ 削減量の取り扱い

CCS プロジェクトのオペレータ等対象とした 17 社個別に Annual Report および Sustainability Report 等の公開情報を調査し、その企業における CCS/CO₂-EOR の位置づ

けを調査した。今回調査した Annual Report および Sustainability Report においては、全般的に CCS や CO₂-EOR に関する記載は少なかった。また、調査したレポート内には CCS に関する記載があっても、CO₂削減対策の一つとして位置づけられていないケースも多くあった（例：研究開発分野として投資対象とするような位置づけ）。

GHG・CO₂削減対策の一つとなっている場合でも、実際に削減量に占める CCS/CO₂-EOR による寄与が分かるような記載となっているものは、ほとんどなかった。唯一、ExxonMobil が、エネルギー効率向上・コージェネレーションやフレアリング削減と並び、CO₂回収による CO₂排出削減への重要性を定量的に示していた。ConocoPhillips は、CO₂削減量への寄与を数値で示しているが、CO₂利用のための売却という項目であった。Shell は、カーボンフットプリントの計算には CCS による削減分を含めている（2016年～2018年まで 79 gCO₂e/MJ で一定）。ただし、2017年から2018年のCO₂排出量の変化の報告では、Quest CCS プロジェクトによる100万トンのCO₂回収量を含めていない。また、Equinor では、CO₂の回収・貯留量（2018年：140万t）の方が、CO₂排出削減量（2018年：26.4万t）よりも多くなっており、CCSが同社のCO₂排出削減量に含まれていないことが推測される。

1.7.3 海外における CCS 事業全般についての調査業務

日本における将来的な CCS の実用化に向けた環境整備や政策立案に資する情報を得ることを目的として、CCS 関連のビジネスモデルの構築、法規制や制度設計の検討、インセンティブの検討・導入で先行している海外の CCS 事業全般に関する情報について調査を行い、報告書として委託者に提出した。

国際社会が2018年11月に公開された IPCC 1.5°C 特別報告書の所見や、パリ協定の運用に向けた温室効果ガスの野心的削減目標引き上げへの呼びかけに対応するため、エネルギー転換の一環で CCS、CCUS の導入検討を進めていることが、本調査で得た15箇国の温暖化対策等に関する政策の動向等から理解できた。特に米国、欧州、中国においては、CCS を促すインセンティブ等の制度の確立、運用、あるいは検討プロセスに進展が見られ、今後の日本における CCS 導入に向けた制度設計等の検討に向け、参考となる情報を得ることができた。

1.7.4 我が国における CCS のための CO₂ 輸送検討に必要な基礎的調査

我が国の「2016年6月次世代火力発電所に係る技術ロードマップ」によれば、2030年度以降を見据えた取組として、CCUS 等について、戦略的に技術開発を進めていくことが述べられている。

2018年度に「CCSの実証および調査事業のあり方に向けた有識者検討会」が開催され、この検討結果を今後のCCS事業に活用するとされている。その中では、「CCSの導入にあたり、パイプラインと船舶を組み合わせることが有効だが、CO₂の大規模長距離輸送にあたっての船舶輸送にかかる技術的リスク、法関係リスク、システム最適化等の諸課題にどのように対応していくべきか」が議論検討され、「必ずしも排出源と貯留適地が近接しているとは限らず、長距離輸送手段の検討が必要となるとされた。従って、貯留適地調査においては、貯留可能量の観点のみならず、地域の理解や経済性や土地制約も踏まえ、船舶輸送を含む長距離輸送手段を検討することが課題となる。」と指摘されたところである。

本調査業務では、これを受けて、これまで我が国で行なわれたCO₂輸送に関する調査検討資料を基に、下記に示す2点を調査・整理した。

- 1) CCS関連の文献の収集および整理
- 2) 輸送手段間の課題整理

(1) CCS関連の文献の収集および整理

船舶（コンテナおよび専用船）、パイプライン、鉄道・ローリーによるCO₂の国内長距離輸送の調査検討にあたって、CCS関連の既存成果報告書として8文献を収集した（表1.7-3）。

表 1.7-3 収集文献の概要整理の一覧

文献	各報告書の概要	コスト情報	安全性	法規制	社会的受容性	国内輸送での課題
①	貯留4地点の概念設計	貯留の事前調査、設備建設、圧入運転、廃坑の概算費用の算出	×	×	×	×
②	輸送船・パイプライン等の輸送の概念設計	実証船・商用船の概念設計、船体・タンク構造、荷役設備。パイプライン輸送	○	○	○	○
③	輸送関連はCO ₂ 輸送の現況・国際的な規格および基準・R&Dプロジェクトが記載。	×	×	○	○	×
④	②や③結果を踏まえ、高効率石炭火力実現に向けた経済性検討	液化CO ₂ 輸送の経済性として、4ケースに関して輸送のみのコスト試算	×	×	×	○
⑤	土木分野における技術課題を抽出すべくとりまとめた報告書	コスト試算の事例調査(②を含む)	○	○	×	○
⑥	CO ₂ の船舶輸送コストや技術仕様についての動向調査とCCS事業の経済波及効果に関して評価	②のCO ₂ 船のコスト見直し	×	×	×	○
⑦	CCS技術の動向調査、シャトルシップ輸送・貯蔵技術	IPCCやRITEの既存資料をまとめ	×	○	○	○
⑧	CO ₂ の船舶輸送でのコスト算出とパイプライン輸送との比較	複数の排出源から英国または他の貯留層への船舶コスト	×	×	×	×

現状の国内CO₂輸送は、食品用や溶接に使用するCO₂ガスを点在する液化CO₂工場よりタンクローリーで輸送することが主体である。長距離輸送では、パイプラインや船舶による輸送は行われていない。

CCSでのCO₂輸送は、期待される貯留層が排出源から離れた海域に多く存在するとされていることを考慮すると、船舶による長距離輸送が最適と考えられる。

(2) 輸送手段間の課題整理

CO₂の輸送方法には、鉄道・タンクローリー、パイプライン、船舶（コンテナ）、船舶（専用船）が考えられる。

コンテナによる鉄道輸送・船舶輸送やタンクローリーによるCO₂輸送は、大量のCO₂を輸送することはできず、関連法令等で制約も厳しい。パイプライン輸送は海外では実績があるが、我が国では長距離輸送の実績がなく、また、都市周辺にパイプラインを埋設することは困難である。専用船による船舶輸送は、大量のCO₂を輸送でき、各種排出源からCO₂を輸送することができるメリットがある。

このような点から、幾つかの排出源からの長距離CO₂輸送には、船舶輸送を考えることが有効である。ただし、CO₂の長距離船舶輸送は国内では実績がないため、十分な検討を実施して、各課題を検討・解決することが重要で、また実証試験を行って課題の検証を行う必要がある。

(3) CO₂排出源関連設備フイージビリティスタディ

CO₂分離・回収設備にて分離・回収したCO₂を液化し、船舶で輸送するために必要な排出源関連設備に関し、フイージビリティスタディを実施した。本設備におけるCO₂の分離・回収方法は固体吸収材およびアミン吸収液によるものとした。

石炭火力発電所に本設備を設置するケースを想定し、一般的な石炭火力発電所をモデルに本設備の構成設備の配置について調査した。

調査の結果、石炭火力発電所でCO₂ガスを液化、貯蔵、充填をすることは可能であるが、実現に向けた計画地点の選定をはじめ、詳細な調査が必要であることが判明した。

1.8 国内における社会的受容性の醸成に向けた情報収集発信活動

苫小牧CCS実証試験事業は、各産業分野の技術を統合した日本で初めて行われる本格的なCCSであり、本事業を円滑に推進し、国民の理解と信頼を得るためには、積極的な情報発信活動が必要である。そこで、地球温暖化対策としてのCCSの認知度を高め、CCSの目的・意義・技術・安全性を理解してもらうことを目的に、下記4点を重点項目として情報発信活動に取り組んだ。

- 1) 実証試験地である苫小牧市民との信頼関係の維持強化が重要であり、これまでと同様苫小牧市と周辺地域への情報発信および意思疎通に重点を置く。
- 2) 事業の長期性を踏まえ、地元の個別事情に沿いながら、より丁寧で分かりやすく正確な説明を行い、良好なコミュニケーションを確保し、信頼関係を築く。
- 3) 事実に基づいた、適切かつ広範囲に亘るCCSに関する情報を速やかに提供する。
- 4) 環境関連の展示会への出展や雑誌への寄稿等により、全国的な理解を深める。

1.8.1 2019年度の活動の概要

2019年度の活動の概要を表1.8-1に示す。

表 1.8-1 国内における社会的受容性の醸成に向けた情報収集発信活動

苫小牧市およびその周辺地域における情報収集発信活動		
地元市民向け現場見学会 (バスツアー)	市民／子ども／シニア向け現場見学会	7回、216名
パネル展の開催	北海道庁パネル展、とまこまいStyle!!2019 Spring、環境広場さっぽろ他	8回、1,896名
北海道における講義・講演の実施、CCS講演会の開催	大学、高専、CCS講演会	4回
子ども実験教室／夏休み宿題教室の開催	児童センター等	4回、140名
苫小牧市との連携	市庁舎に情報公開モニターの設置等	—
国内他地域における情報発信活動		
現場見学会	企業、大学、研究機関、一般等	206件、2,168名
講義・講演の実施	大学、学協会、商工会議所他	24回、1,288名
展示会、シンポジウム、学会へのブース出展	地球温暖化防止展 2022、エコプロ 2022 他	10回、7,028名 ^{*1}
その他の情報発信活動		
メディア対応	プレスリリース、新聞報道、雑誌・書籍掲載等	115件
寄稿および発表	電気硝子工業会誌	1件

*1 JCCS ブース来訪者数

情報発信活動にあたっては、技術一般に日頃馴染みのない人にも理解できるように、平易に伝えること、情報の透明性を確保して十分な情報を速やかに提供することが重要である。また、これまでの活動の成果を踏まえて、当社からの一方的な情報発信に留まらず、相互コミュニケーションの場を提供することによって双方向での意見交換を行うことにより、本事業の必要性について理解を深めることを意識して取り組んだ。

2020年に入ってから新型コロナウイルス感染症の影響が生じたが、その影響が大きくなるまでは、全国の企業、大学、研究機関、その他一般の団体、個人等から積極的に現場見学の受け入れを行った。見学者はCCSについての知識が全くない人からCCSに詳しい技術者や研究者まで多岐にわたり、また世代も若年層から高齢者まで幅広いことから、見

学者の知識・年代・興味等に合わせたプレゼンテーションを行い、理解促進に努めた。

見学者数の増加とともに見学者の関心や専門分野も多方面に拡大し、専門的な質問の数も増え、以前よりも活発な質疑応答が行われるようになった。一般の見学者には丁寧な説明や不安の払拭に努め、また技術者や研究者にはその専門性が高い関心事項にも応えることで、事業の透明性の確保と理解促進を図った。

当センターにおいて現場見学を開始した2012年度から2019年度までの見学件数、および見学者数の推移を図1.8-1に示す。8年間における総件数は900件、総数は10,833人に達した。



図 1.8-1 現場見学件数と見学者数の推移（2012年度 - 2019年度）

1.8.2 社会的受容性の醸成活動についての外部評価

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を2020年1月31日から3月25日に実施した。

- 1) JCCSによる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年2月13日開催）の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通りである。

海外の大規模CCSプロジェクト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のように情報提供・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・目標が達成できたか否かを確認するため、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。

1.9 海外への情報発信ならびに情報収集

持続可能な産業の実現に向けた一つの画期的技術として、CO₂回収・利用・貯留（CCUS）への関心が世界的に高まっていることを受け、本事業について海外へも情報発信を行った。主な取り組みとして、国内外での発表（25件）、出展（7件）、論文投稿（6件）、海外からの視察対応（33件）等を行い、本事業の取り組みや日本のCCS技術の安全性等に対する理解促進を図った。

1.9.1 海外からの現場見学者対応・意見交換の実施

2019年度は、海外からの視察対応として計34件、約400名の来訪者に本事業の説明を行った。視察者は海外政府関係者、産業関係者、大学、研究者等、大手石油・ガス産業関係者等であり、視察に合わせて、既にCCSに関する見識の深い海外組織と、今後の国際協力に向けた知見の共有や意見交換等も実施した。

1.9.2 海外における国際会議や、国内外セミナー、展示会等における成果発表と情報交換、フィールドツアー参加による情報収集

海外におけるCCSに関する国際会議での情報発信、情報収集、出展のほか、日本政府（経済産業省）の国際会議対応への支援として会議への同行を行った。累計圧入量30万tを達成した2019年度は、圧入やモニタリングの課題と成果のほか、日本のCCSの将来計画や政策的な位置づけについてCOP25の開催地となったスペインを含む欧米諸国（米国、イタリア、スペイン）、アジア太平洋地域（中国、オーストラリア等）等で合計19件の発表を実施した。

また情報発信の一環として、国内外における国際会議にも参加し、本事業の概要や、本事業を通じた日本のCCSに関する取り組みを紹介した。また情報収集として、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情報収集を行った。参加した会議では主にCCSの分離・回収、圧入、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情報として整理した。

1.9.3 Global CCS Institute との情報交換、協力

オーストラリアを拠点とする Global CCS Institute（GCCSI）は、各国の CCS 研究者や事業者、メディアとのネットワークを持つ国際的な CCS のシンクタンクであり、当社は GCCSI を通じて海外の主要な CCS 事業の最新動向を入手しているほか、日本事務所との連携により、本事業の成果についての国際的な情報発信の機会を拡充している。2019 年度は同組織のホームページを通じて本事業の圧入目標の達成等のニュースを発信した。また、GCCSI が主催する「Japan CCS Forum 2019」を後援し、サイドイベントとして実施した「苫小牧 CCS 実証試験センター見学会」を共催した。

1.9.4 CSLF アジア・太平洋地域ステークホルダーチャンピオンとしての活動

2019 MGSC（Midwest Geological Sequestration Conference）Annual Meeting、2019 CSLF Technical Group Midyear Meeting に出席し、米国を中心に CCS の状況につき情報収集するとともに、本事業について情報発信を行った。また、CCS 業界の中心的なイニシアチブである CSLF の Technical Group（TG）の年 2 回の定例会議の内、年度後半に開かれる Annual Meeting（年次会合）である 2019 CSLF Technical Group Annual Meeting、Hydrogen Production with CCS Workshop、CCUS with Energy Intensive Industries Workshop に出席し、CCUS 業界の動向を幅広い見地から把握した。

1.9.5 情報発信、情報収集の機会拡充を見据えた海外政府や海外 CCUS 事業者、研究者との協力、共同事業、共同研究の実施

当社は日豪政府間の協力を支援するため「Japan-Australia CCUS/CR Workshop」（9 月 30 日、主催：オーストラリア連邦政府、経済産業省）に参加し、本事業の成果について発表した。また、日米政府が主導する日米協力を支援するため、「US-Japan CCUS and Carbon Recycling Workshop」（10 月 27 日、主催：米国エネルギー省、経済産業省）に経済産業省 とともに出席し、本事業のモニタリングの成果について、日本側代表として当社が発表を行った。

政府主導の多国籍枠組協力である Clean Energy Ministerial の会合にも、経済産業省の活動を支援するために参加した。このほか、IEAGHG、英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省（Bioenergy with Carbon Capture and Storage）、テキサス大学、イリノイ大学との連携や英国地質調査所への協力等、国際協力の拡充を図った。

1.9.6 外国語ツール、ホームページ、メディアを通じた情報発信についての検討および情報発信ツールの維持、更新

当社の英語版ホームページに、本実証試験のマイルストーンとなるイベントについてニュースリリースを掲載したほか、海外出展、海外発表の成果等について、ホームページのお知らせ欄への掲載を実施した。海外出展等については国内のステークホルダー向けのフィードバックを行うため、記録映像等の動画を掲載した。

1.10 社外有識者による技術指導

外部有識者から構成される「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いる。2019年度は、第12回課題検討会を2019年6月、第13回課題検討会を2019年11月に実施した。課題検討会では、萌別層の圧入結果やアミン溶液の長期安定性、海水の化学的性状の評価手法等のほか、本事業の圧入終了時点までの総括について技術指導と助言を得た。

1.11 将来計画の検討・準備等

2021年度以降のモニタリング計画について検討を実施した（表1.11-1）。2020年度には、観測井等を用いたモニタリングシステムによりこれまでに得られた観測結果等に基づき、観測システムの構成に関する改善について、合理化策を含めて、検討する予定である。弾性波探査による地下の状態調査に関しては、2019年度に第4回モニター調査として小規模三次元弾性波探査と二次元弾性波探査を実施した。この解析および比較評価の結果は2020年度に得られる予定である。また、2020年度には第5回モニター調査として萌別層と滝ノ上層の貯留地点を対象とした三次元弾性波探査を実施する予定である。

表 1.11-1 2019～2021年度のモニタリング計画

観測システム	対象	2019	2020	2021
常設型 OBC	微小振動、自然地震	■	■	■
OBS	微小振動、自然地震	■	■	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
陸上設置地震計	自然地震	■	■	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
観測井モニタリング	微小振動、自然地震	■	■	■
	温度・圧力	■	■	■
圧入井モニタリング	温度・圧力	■	■	■
弾性波探査モニター調査	地下の状態	M3D+2D	3D	実施しない

また、CCS事業の将来計画として、船舶やパイプライン等により他地域から苫小牧にCO₂を輸送し、圧入する技術について検討を行った。CO₂輸送に関する既存の調査検討資料を基にCO₂輸送手段間の経済性・安全性等の比較調査を実施し、大規模長距離CO₂輸

送における船舶輸送の優位性を確認するとともに実施する場合の課題を検討した。今後検討すべきCO₂船舶輸送の基本的技術課題を以下に示す。

- 1) 三重点近傍において液化CO₂を船舶輸送する際の温度・圧力制御、安全性確保
- 2) 船舶輸送時のスロッシング
- 3) 船舶航行中および荷役時の管内流速