

第二版

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

2018 年 11 月

日本 CCS 調査株式会社

報告書 目次

	頁
1 報告書要旨	1
2 苫小牧実証試験概要	
2.1 実証試験の目的と課題	2
2.2 実証試験のスケジュール	3
2.3 CO ₂ 貯留層と圧入状況	3
3 北海道胆振東部地震（概要）	
3.1 地震発生メカニズム	5
3.2 地震時の対応	7
4 今回の地震と実証試験におけるリスク対応	
4.1 地震前後の苫小牧 CCS 実証試験センター設備状態	8
4.2 危機管理に係るマニュアルの体系	8
4.3 地上設備のリスク対応と現状	9
4.4 CO ₂ 貯留層のリスク対応と現状	10
4.5 海洋汚染防止法との関係	10
5 地震との関係	
5.1 誘発地震メカニズム	11
5.1.1 CO ₂ 圧入が貯留層・遮蔽層中で引き起こす地震の検討	11
5.1.2 CO ₂ 圧入による震源断層への影響の検討	11
5.2 貯留層への影響	13
5.2.1 微小振動・自然地震モニタリング結果	13
5.2.2 温度・圧力モニタリング結果	16
6 今後の予定	20

1. 報告書要旨

本報告書は、北海道胆振東部地震（以下、本地震）発生時における「苫小牧における CCS 大規模実証試験（以下、実証試験）」の現地対応状況、ならびに日本 CCS 調査（株）（以下、JCCS）が開催した「苫小牧 CCS 実証試験に係わる課題検討会」（平成 30 年 10 月 19 日）の内容及び同検討会で委員の方からいただいた意見をまとめたものである。

JCCS は、事業開始当初から取り組んでいる、情報を広く公開するとの考えに則り、本報告書を作成し公開する。

JCCS は本事業開始前に CO₂ 地中貯留に関して、地層への影響をシミュレーションなどで検証した。本地震の発生を踏まえ、地震による影響、地震との関係を議論し、改めて専門家の意見を聴き、その結果を報告する。

（1） 苫小牧実証試験概要

実証試験は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO、昨年度までは経済産業省）が JCCS に委託し、実施されている事業である。本事業の目的は、引き続きエネルギー基本計画（最新は平成 30 年 7 月 3 日閣議決定）に沿って、CCS 技術（CO₂ 分離・回収、圧入・貯留）の 2020 年頃の実用化を目指し、日本初の CCS 一貫システムを安全かつ安心に実証することである。苫小牧沖合約 3km、海底からの深さ約 1.0~1.2km の貯留層（萌別層）への CO₂ 圧入を 2016 年 4 月に開始し、CO₂ 累計圧入量が本年 8 月中旬に 20 万トンを超えた。また、同沖合約 4km 同深さ約 2.4~3.0km の貯留層（滝ノ上層）への試験圧入を本年 2 月に開始し、98 トンの CO₂ を圧入した。

（2） 北海道胆振東部地震（概要）

2018 年 9 月 6 日 3 時 7 分に胆振地方中東部の深さ 37km で M6.7 の地震が発生（気象庁発表）し、北海道厚真町で震度 7、苫小牧における大規模 CCS 実証試験センターで震度 5 弱（158gal）を観測した。国の地震調査委員会は、本地震に関して「胆振地方東部・日高地方から浦河沖の周辺では、陸域で通常発生する地殻内の地震よりも深い場所の地震が多く発生し、今回の地震活動はこのような地域で発生した。」旨の見解を発表している。このように、本地震は当地域で想定される地震活動の範囲を超えるものではないと考えられる。

（3） 今回の地震と実証試験におけるリスク対応

実証試験センターでは、150gal 以上の地震の揺れを検知した場合、CO₂ 分離・回収／圧入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、CO₂ 供給元の都合により 9 月 1 日から CO₂ 含有ガスの供給が停止しており、地震発生時には地上設備の操業及び圧入は既に停止中であったため、今回の地震による緊急停止は生じなかった。JCCS は、地震直後から緊急時対応の社内規程に従い、同センターの設備・機器類に異常がないことを確認するとともに、委託者と地元関係先への連絡を行った。一方、地震発生 18 分後に停電が発生し、無停電電源（UPS）が 1 時間半程度稼働の後、全電源喪失となり、復電までの約 55 時間は全停電となった。停電時でも圧入井のデータの常時取得を可能とするため、今後、同センターに非常用発電機を設置し最低限設備稼働させるとともに、圧入井の測定連続データ記録機器にもバッテリーを設置する 2 重の停電対応による改善対策をまず実施する。

(4) 地震との関係

CO₂圧入開始前の2011年に、圧入量75万トン(年間25万トンで3年間圧入)を実施した場合の地層の圧力上昇の計算に基づき、CO₂圧入による貯留層・遮蔽層中の岩盤亀裂への影響を評価し、岩盤亀裂などに沿ったすべりが生じる(微小地震が発生する)可能性がないことを確認した。

今回CO₂圧入による震源断層への影響を検討するため、圧入実績に基づき更新された貯留層モデルと圧入量(2018年7月時点)から、圧入終了時に想定される累計圧入量(萌別層へ30万トン、滝ノ上層へ750トン)によるCO₂挙動シミュレーションを実施した。圧入圧力の増加(滝ノ上層約5MPa、萌別層0.7MPa)による地層の圧力上昇は、滝ノ上層の場合で圧入井周辺50mで2MPaとなり1km離れると約0.25MPa以下に減少し、震央距離約30km離れた震源位置での応力^{*1}変化は、地球潮汐力による地殻への圧力の変化(数kPa)の1/1,000程度と計算された。また、苫小牧の圧入地点では微小振動を常にモニタリングしており、圧入開始以来、CO₂圧入地点近傍での微小振動は検出されていない。このため、CO₂の地中貯留と、約30km離れた場所で発生した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委員の間で得られた。

貯留層の圧力と温度データは、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、過去の停止時と同様である。また、本地震直後に、CO₂貯留層(滝ノ上層)において坑内圧の上昇(1.8kPa)が一時的に観測されたが、この値は、震源において生じた断層活動に伴う応力変化の理論解(1.9kPa)と整合的であり、CO₂貯留層の異常を示すものではない。したがって、今回の地震によりCO₂の漏洩があったとは認められないとの共通認識が委員の間で得られた。

^{*1}物体に力を加えた結果、物体の内部で生ずる力。圧力はその物体に加わる力。

(5) 今後の予定

今後は、CO₂供給元からのCO₂含有ガスの供給の開始を待つとともに、圧入の再開には、圧入設備・坑井の健全性、復旧作業、地元関係先への説明、余震の傾向を見ながら行うことを委員にご理解いただいた。

2. 苫小牧実証試験概要

実証試験は、NEDO(昨年度までは経済産業省)がJCCSに委託し、実施されている事業である。

2.1. 実証試験の目的と課題

実証試験では、地球温暖化対策の一つとして、引き続きエネルギー基本計画(最新は平成30年7月3日閣議決定)に沿って、CCS技術の2020年頃の実用化を目指して、実用化に対応できる技術レベルで安全かつ安定的にCCSが実施できることを実証する。そのために、日本初の一貫したCCSシステムとして年間10万トン規模でCO₂を分離・回収、圧入・貯留し、地下でのCO₂の挙動をモニタリングする。

CCS の各ステップ（CO₂の分離・回収、圧入・貯留、及びモニタリング）で必要となる要素技術のほとんどは各種産業で既に使用されているものであるが、さらに各要素技術を組み合わせた全体が一体システムとして機能することを実証する。

2.2. 実証試験のスケジュール

図1に実証試験の全体スケジュールを示す。実証試験の2016～2018年度の3年間はCO₂の圧入を行う計画で、圧入を2016年4月に開始した。



図1 実証試験全体スケジュール
(2018年11月現在)

*CO₂を圧入し、圧入したCO₂の地下での状態や、周辺の海中や海底の状況などを調査し、CO₂圧入を適切に管理する情報を得ること。

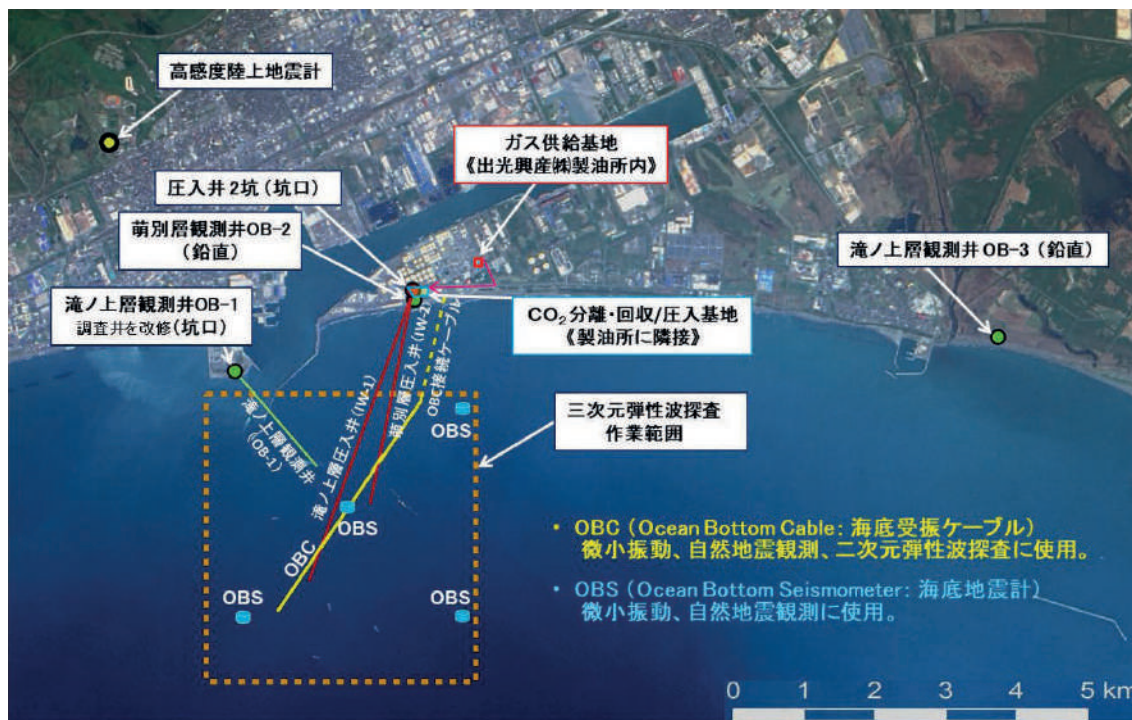
2.3. CO₂貯留層と圧入状況

実証試験におけるCO₂源は、他の事業者から供給されるCO₂含有ガスであり、CO₂の分離・回収量は、CO₂含有ガス供給者からのCO₂量に依存することになる。99%以上のCO₂濃度で最大約22万トン/年（約600トン/日）の分離・回収能力を有することを確認している。その全量は、苫小牧沖の海底下の貯留層（萌別層と滝ノ上層）へ圧入される。2016年4月より苫小牧沖合約3km、海底下1.0~1.2kmのCO₂の浸透性が高いと評価を得ている萌別層に圧入を開始し、2018年9月1日時点の累計圧入量は、207,209トンとなっている。一方、同沖合約4km、海底下2.4~3.0kmの滝ノ上層の試験圧入も2018年2月より開始して98トン圧入した。この2層へ同時に圧入する実証試験も行っている。

圧入に際しては安全性を重視し、貯留層を覆う遮蔽層のリークオフ圧力（実際に地層が破壊される圧力ではなく、破壊前に割れ目が形成され始める圧力）を事前に計測し、その圧力の90%を地層の圧力上限圧に設定し、安全に圧入を開始するとともに、モニタリングシステムを構築した。CCSを安全かつ安定的に実施するためには、貯留したCO₂の挙動（移動、拡がり等）を把握するとともに、貯留層外部への漏洩・漏出のモニタリングを継続的に行う必要がある。このために、地下でのCO₂の分布状況把握のための探査、地層圧力・地層温度などのモニタリングを行っている（図2）。また、自然地震及び地下での微小振動のモニタリングを連続して実施している。さらに、日本ではCO₂の海底下貯留に関し、「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）」が適用され、実証試験では同法に係わる「監視計画」に則して、海洋環境調査（年4回の四季調査）を実施している。

貯留したCO₂の挙動に関しては、2017年に三次元弾性波探査を実施し、CO₂圧入前の探査記録と比較することで、探査実施時の萌別層CO₂累積圧入量約6.5万トンの圧入に伴う弾性波の変化を検出した（図3）。この変化は、CO₂貯留分布範囲を示していると考えられ、事前に実施した想定圧入量61,238トンのCO₂挙動シミュレーションによる分布予

測結果と類似の傾向を示している。この予測と実測の比較は、貯留層モデルを実績に合うようモデルの精度を向上させ、将来のCO₂分布の予測に役立つことが期待できる。



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

図2 実証試験設備の位置関係

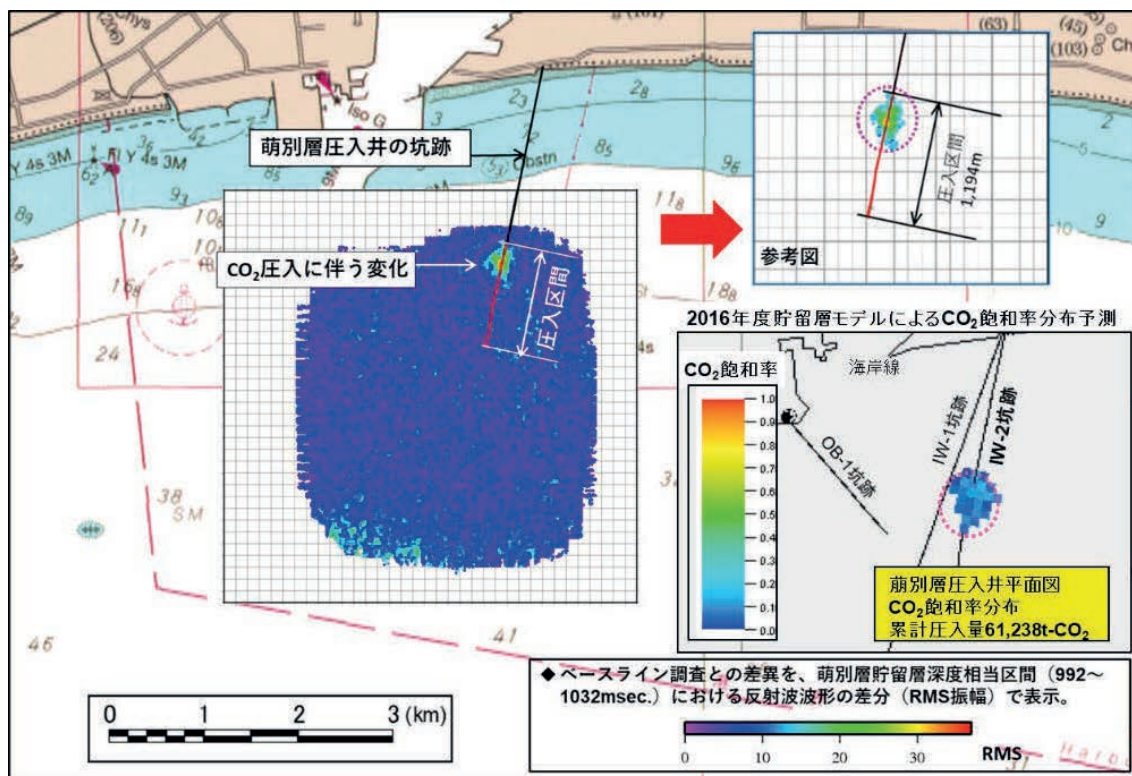


図3 三次元弾性波探査によるモニタリング結果

3. 北海道胆振東部地震（概要）

3.1. 地震発生のメカニズム

2018年9月6日3時7分に胆振地方中東部の深さ37kmでM6.7の地震が発生（気象庁発表）し、北海道厚真町で震度7、実証試験センターで震度5弱（158gal）を観測した。気象庁発表資料によれば、1997年10月以降の地震活動をみると、本地震の震源付近では、M4.0程度以上の地震が時々発生し、2017年7月1日には、深さ27kmでM5.1の地震が発生している（図4）。公表文献によれば、本地域周辺の地下構造は、太平洋プレートが千島海溝に斜めに沈み込み、引きずられた千島列島の地殻（千島弧）が東から押し寄せ東北日本弧に衝突していると考えられている（図5）。この時、千島弧の端は、地殻の上部が衝上して日高山脈を形成し、地殻の下部はプレートに沈み込み、東北日本弧も引きずられて沈み込み日高山脈付近とその西方では、地殻が厚くなっていると考えられている（図5）。

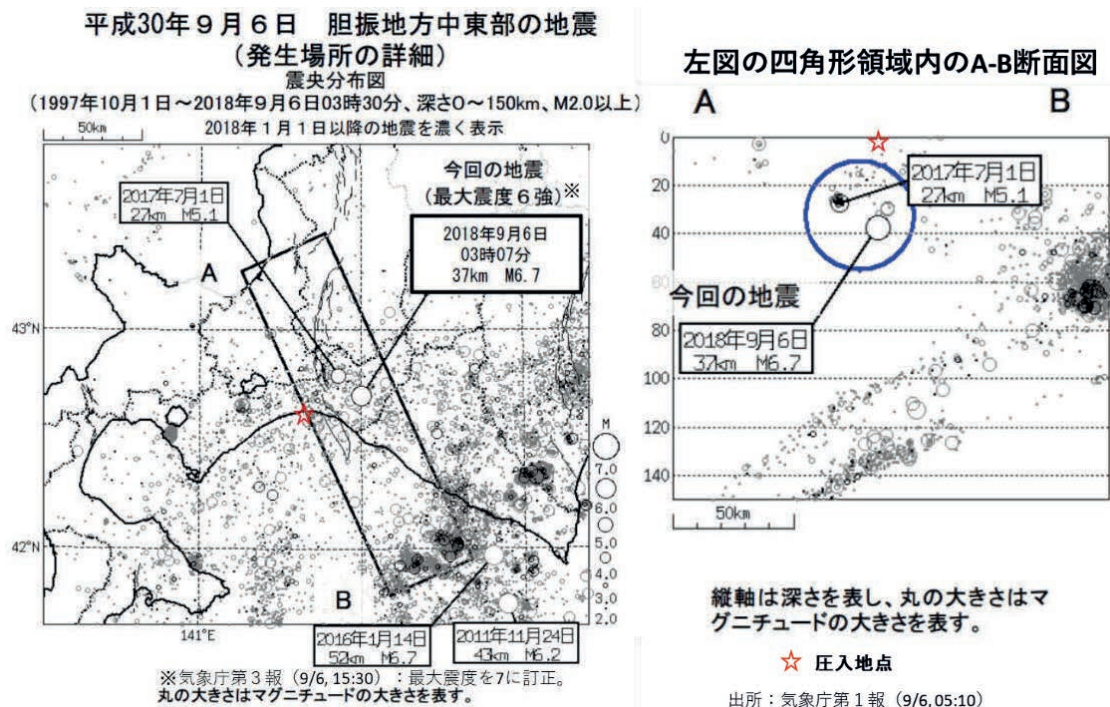


図4 北海道胆振東部地震の震源位置

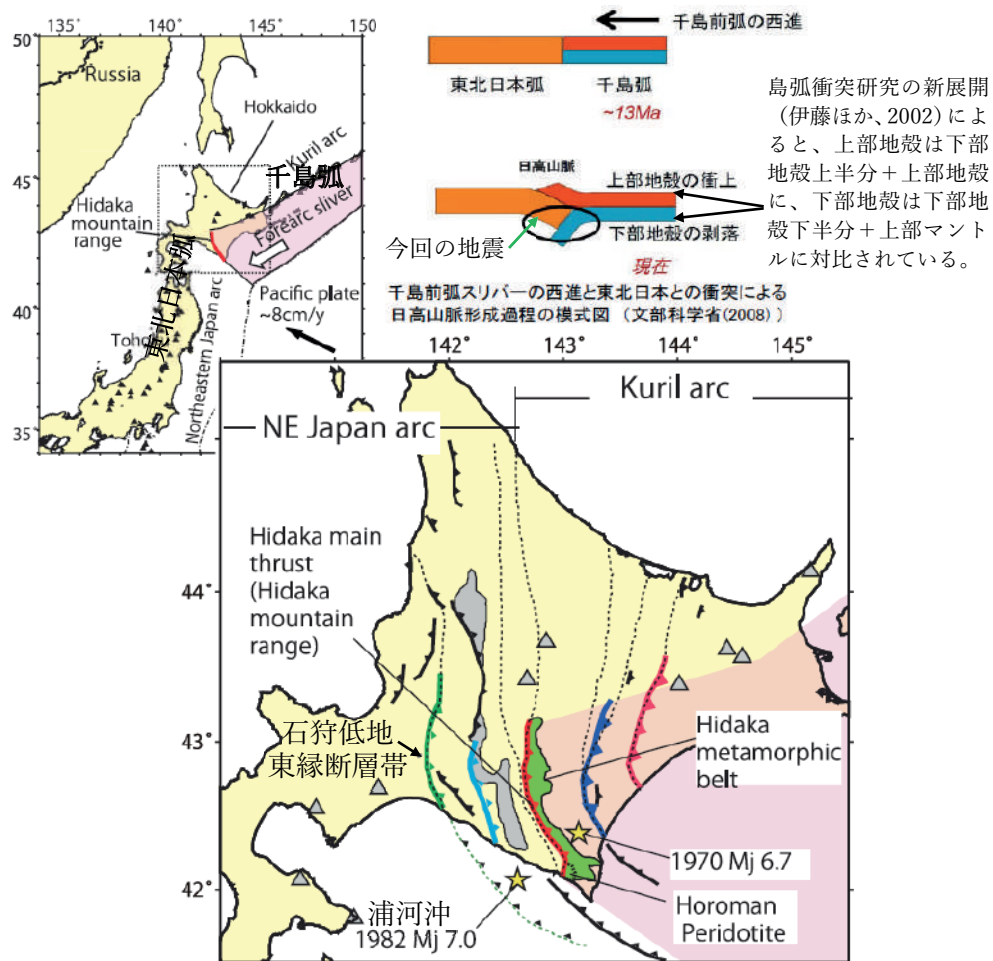


図5 北海道南部テクトニクスイメージ

出典：High-resolution seismic velocity structure beneath the Hokkaido corner, northern Japan (Saeko Kita et al., 2012)、プレート境界及びその周辺域の三次元地殻不均質構造の推定（文部科学省、2008）

本地震はこのような地殻の折れ曲がった付近で発生したと考えられ、9月6日の国の地震調査委員会では、「胆振地方東部・日高地方から浦河沖の周辺では、陸域で通常発生する地殻内の地震よりも深い場所でも地震が多く発生している特徴が見られ、今回の地震活動はこのような特徴がある地域で発生したものである。」との見解が示されている。このように、本地震は当地域で想定される地震活動の範囲を超えるものではないと考えられる。

また、気象庁公表の本地震の震源は、基盤岩中の深さ37kmにあり、CO₂を圧入している堆積層と本地震の震源のある基盤岩層とは連続性がない別の地層内である（図6）。

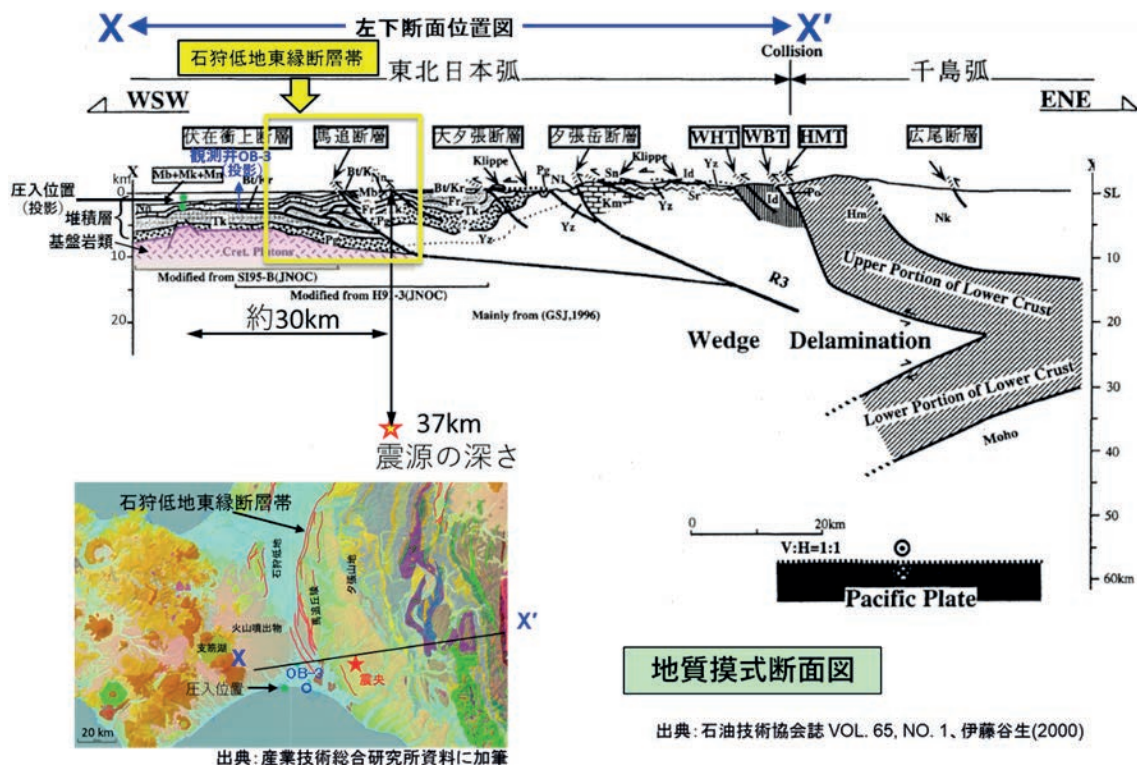


図6 北海道胆振東部地震震源位置と本地域の地質模式断面図

3.2. 地震時の対応

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、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、メールにて送付した。
- 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 苫小牧漁業協同組合、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 当社 HP のお知らせに地上設備に異常がないことを掲載した。
- 9:50 北海道経済産業局エネルギー対策課への報告は、停電による固定電話の不通、携帯電話の充電状況を鑑み、本社総務部より実施した。
- 人的、設備の物的被害、異常が認められないため、消防署、警察署への緊急通報は不要

と判断し、地震後の状況を報告。

9月12日(水) 北海道産業保安監督部電力安全課(報告者・プラント本部)

9月13日(木) 北海道胆振総合振興局産業振興部商工労働観光課(センター長)
道苫小牧地方環境監視室、市環境保全課(環境安全グループ長)
苫小牧消防署(環境安全グループ長)

- 9月12日(水) 19:40 当社HP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(木) 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、苫小牧漁業協同組合、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。

4. 今回の地震と実証試験におけるリスク対応

4.1. 地震前後の苫小牧 CCS 実証試験センター設備状態

分離・回収/圧入作業は、順調に実施されていたが、下記のようにCO₂含有ガス供給元の都合により送気停止し、それに伴い圧入が停止中であった。送気が再開されれば直ぐに圧入再開できるよう待機状態であったが、9月5日に同供給元から送ガス再開が遅れる見通しが示され、待機から停止状態に移行後に今回の地震が発生した。従って、地震発生により緊急停止基準となる150galを超える揺れを感知したが、全設備の緊急遮断は行われなかった。

9月1日(土) 2:25 CO₂含有ガス供給元の都合により送気停止・圧入停止
待機状態で維持

9月5日(水) 11:00 CO₂含有ガス供給元からの送ガス再開まで時間が必要と判明
17:00 待機から停止状態に移行

9月6日(木) 3:07 地震発生
3:08 地震感知(現地地震計158gal)、北海道電力(北電)特高停電
3:25 全停電
4:40 無停電電源装置(UPS)停止
5:37頃 モニタリング測定停止
8:00 設備異常がないことを確認

9月8日(土) 11:18 北電から特高受電再開
12:15 実証試験センター通電確認完了
14:50 地震前の停止状態に復旧(計装空気・窒素・工水運転)

9月9日(日) 15:00 インターネット環境復旧

9月10日(月) 11:45頃 モニタリング機器定期点検中の観測井OB-3を除き、モニタリング観測再開

4.2. 危機管理に係るマニュアルの体系

本実証試験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7) 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。

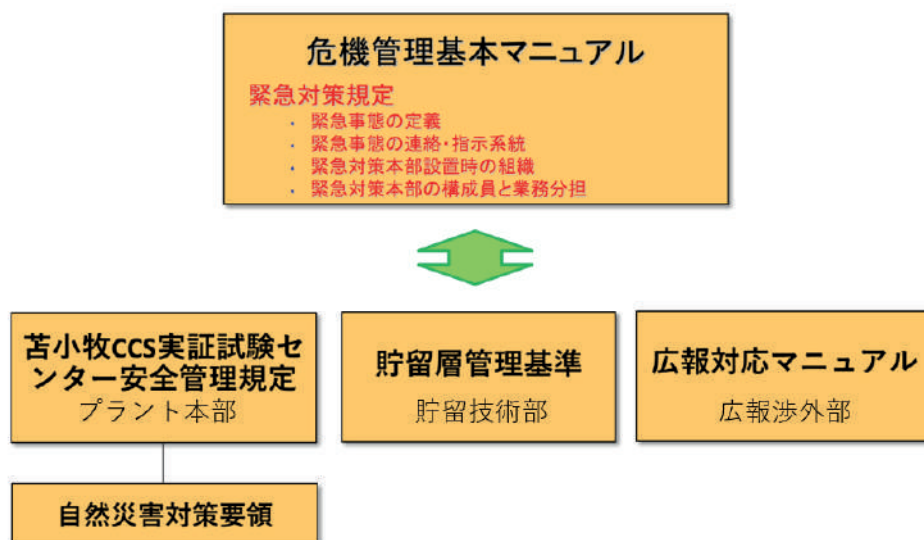


図7 危機管理のマニュアルの体系

4.3. 地上設備のリスク対応と現状

実証試験センターの安全管理規程体系は次のようになっている。地上設備は、基本的に各事業法が適用されており、関係省庁の許認可を得て CO₂ の分離・回収作業が開始されている。本地震に伴い、自然災害対策要領が適用され、各種対応がなされた (図8)。

地上設備では、本設備の運転時に、重篤な災害 (爆発、火災、環境被害、人的被害、重大な機器破損) あるいは、設備内で運転異常が発生する要因について、緊急遮断システム (ESD) を用いて安全に停止、遮断、隔離動作を行う独立のシステムを構築していた。今回、分離・回収設備が地震発生時停止していたが、通常の設定稼働状態であったとすれば、実際に設備の加速度センサは停止基準の 150gal を超える 158gal を感知したので、ESD が作動したことになる。

一方、保安設備については、巨大地震の発生を含む複数の異常想定項目を設け、保安設備に必要な機器の設置をする等の対応を実施していた。

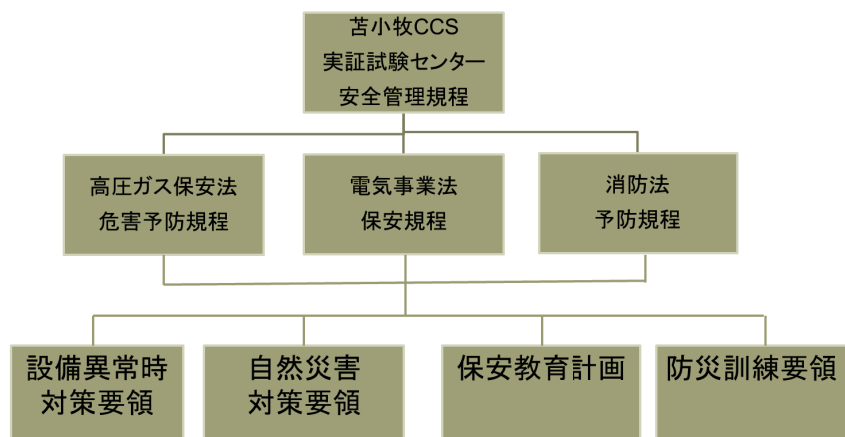


図8 実証試験センター安全管理規程体系

しかし、今回発生した長時間の停電やインターネット回線停止への対応は想定されていなかったため、停電に伴う圧入井、観測井、OBC（海底地震ケーブル）でのデータ測定の中断や観測井と陸上地震計からのデータ送信回線の不通によるデータ確認（総合モニタリングシステムへの伝送やメンテナンス拠点からの状況把握）不能が生じた。そこで、これらの問題へ対応する改善策として、次の検討を実施した。

□ 回避すべき課題

1. 実証試験センターでの停電

- 操業関連機器、事務機器及び通信機器が使用不能
- 圧入井の温度・圧力センサの測定記録の収録不能
- OBCの測定記録の収録不能
- OBS(有線型)の測定記録の受信不能

2. 観測井での停電

- 観測井の温度・圧力センサ及び地震計（モニタリング）の測定記録の収録不能

3. 観測井・陸上地震計からの通信回線の不通

- 観測井のモニタリング及び陸上地震計の測定記録のリアルタイムでの確認が不能

□ 改善案（新規導入設備）

1. 実証試験センター：非常用電源（80kVA）

2. 圧入井：バッテリー（12V、130Ah）

□ 概算費用 レンタル費：約810万円/年（上記改善案の項目1、2.）

□ 改善案適用時の残存課題

1. 観測井：モニタリング測定記録の中断が発生する可能性
2. 観測井・陸上地震計：回線不通時に測定記録をリアルタイムで確認できない可能性

上記改善案を実施することを提案し、改善案をとることにつき委員から特に異論はなかった。

4.4. CO₂貯留層のリスク対応と現状

CO₂貯留層には、JCCSが作成したCO₂圧入時の貯留層管理基準要領が適用されており、貯留層の管理基準として、異常の判断と対応が規定されている。

4.5. 海洋汚染防止法との関係

海洋汚染防止法の監視計画における地震発生時の位置付けは、「最大加速度150gal以上の地震が発生し、CO₂分離・回収・圧入設備が緊急停止した場合、圧入を停止して、地層内圧力・温度データを確認した後、採水調査を実施すること」とされている。

今回の地震においては、地震計で158galを計測したものの、9月1日よりCO₂含有ガス

供給元の都合によりプラントと CO₂ 圧入を停止状態にしていたことから、監視計画における上記要件には該当しない（経済産業省から環境省へ確認を 9 月 6 日に実施）。

5. 地震との関係

既に今回の地震に関して、国の地震調査委員会において地震の評価・検討は専門家によりなされているが、本実証事業での CO₂ 圧入と今回の地震との関連性は議論されていない。そこで今回の検討会を通じて、本実証試験において実際に取得されたモニタリングデータや CO₂ 挙動シミュレーションにより、CO₂ 圧入と今回の地震の関係について審議を行ったが、両者に因果関係があるとは考えられないとの共通認識が委員の間で得られた。

5.1. 誘発地震メカニズム

本事業開始前の 2011 年に、CO₂ 地中貯留を行った場合、断層を含む岩盤の亀裂に存在する流体の圧力変化によって亀裂面の摩擦力が低下し、蓄積された歪みが開放されて地震が誘発される可能性について検討がなされている。実証試験の CO₂ 圧入による今回の地震の震源断層への影響も新たに検討した。

5.1.1. CO₂ 圧入が貯留層・遮蔽層中で引き起こす地震の検討

2011 年、国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）により「CO₂ 圧入による地震誘発の可能性についての評価」が実施された。この中では、想定される CO₂ 総圧入量 75 万トン（年間 25 万トンで 3 年間圧入）により岩盤中の亀裂面がすべる可能性について、応力変化のシミュレーションによる検討・評価が行われた。

この検討では、地層水の圧力上昇とすべり傾向係数（すべり面上のせん断応力／すべり強度、1 を超えるとすべりが生じる）の空間分布の時間変化を見積もり、いつ・どこで地震が誘発される可能性が高くなるかが推定された。

萌別層と滝ノ上層におけるすべり傾向係数の空間分布の計算結果では、圧入地点では貯留層圧力が最大 2MPa 程度上昇するが、すべり傾向係数が 1 になるような場所は検出されず、本実証試験での CO₂ 圧入により、断層のすべりが生じる（微小地震が発生する）可能性はないと考えられた。

5.1.2. CO₂ 圧入による震源断層への影響の検討

CO₂ 圧入による震源断層への影響を検討するため、圧入実績に基づく更新された貯留層モデルと圧入量（2018 年 7 月時点）から、圧入終了時の想定累計圧入量（萌別層へ 30 万トン、滝ノ上層へ 750 トン）による CO₂ 挙動シミュレーションを実施し、貯留層における CO₂ の分布範囲（図 9）と貯留層の圧力上昇（図 10）を新たに推定した。貯留層の圧力上昇が最大となる滝ノ上層圧入井において、圧入上限圧力を考慮した約 5 MPa 程度増加させた場合でも圧入区間の周辺 50m 程度は 2MPa となり 1km 離れると約 0.25MPa 以下となる。萌別層圧入井の圧入上限圧力は、圧入実績から 0.7MPa 程度の増加となる。

さらに、圧入地点から 30km 以上離れた震源付近における CO₂ 圧入による応力変化は、数値計算の結果として、1Pa(1cm² あたり約 0.01g の力で押したのに等しい)程度*2 となっ

た。つまり、CO₂ 圧入による影響は、地球潮汐力により地殻に加わる応力変化である数 k Pa(数千 Pa)の 1/1,000 程度であり、地球潮汐力の影響に比べて無視できるものである。

したがって、今回の北海道胆振東部地震に CO₂ 圧入が関係しているとは考えられない。

*² 本検討会で委員より追加検討の提案があり、検討会後に産総研へ検討を依頼した結果。

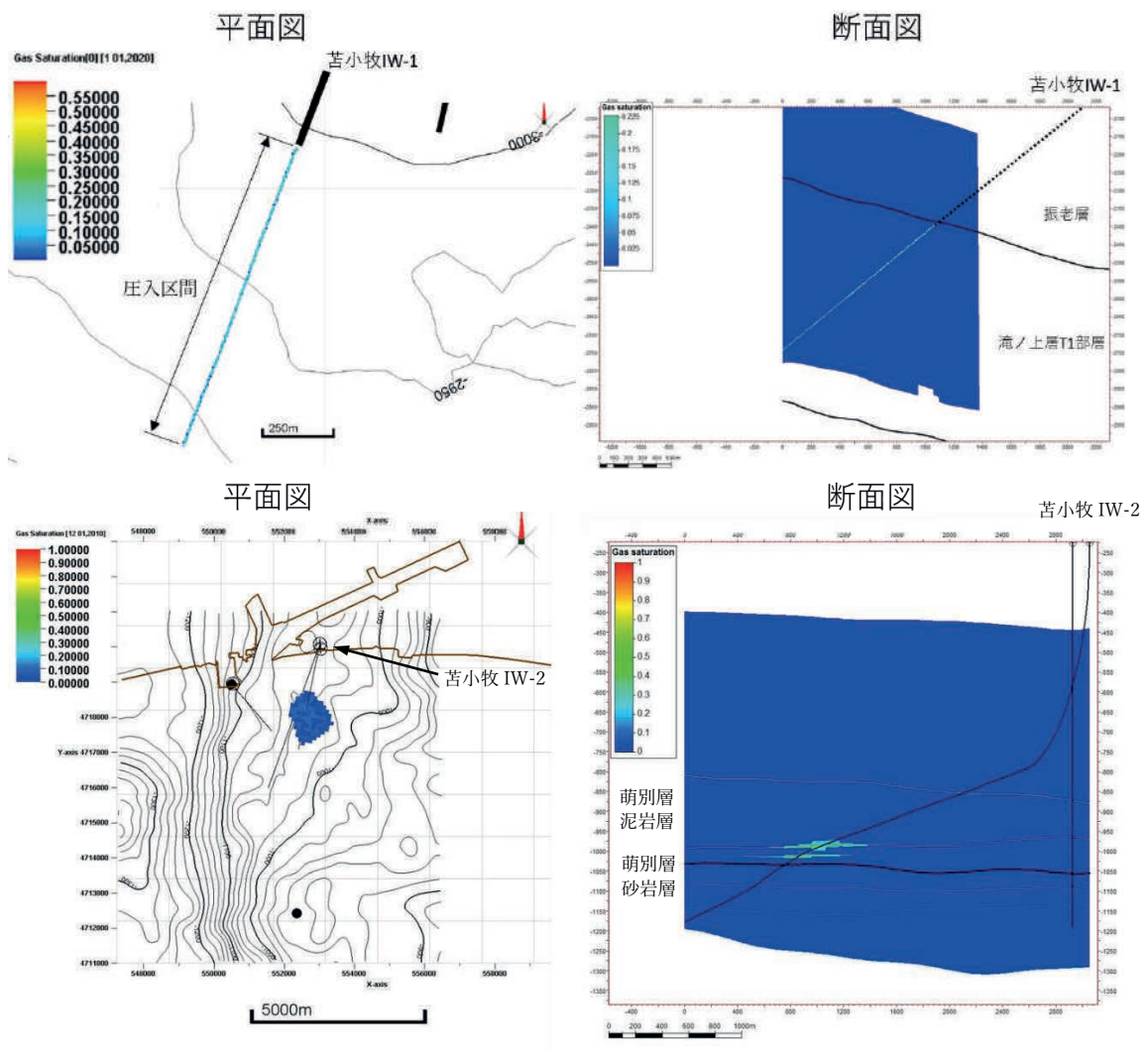


図9 貯留 CO₂ の挙動予測：CO₂ 飽和度（圧入終了時） 滝ノ上層（上）、萌別層（下）

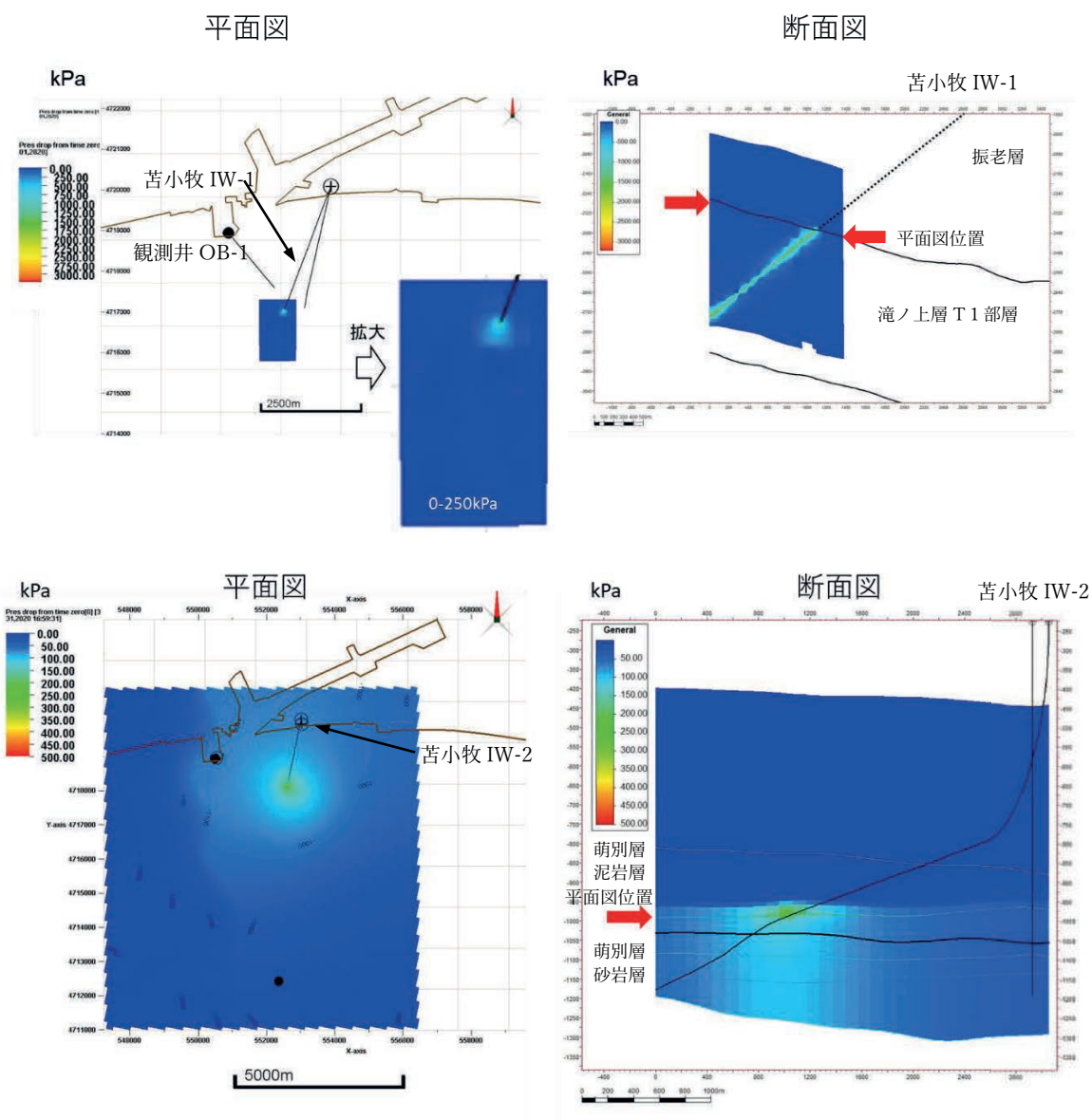


図 10 貯留 CO₂ の挙動予測：圧力変化（圧入終了時） 滝ノ上層（上）、萌別層（下）

5.2 貯留層への影響

5.2.1. 微小振動・自然地震モニタリング結果

本事業では、図 11 に示すように、圧入地点近傍の 2 地点及び東方約 10km 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、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 3.6km）、圧入区間直上近傍の 4 地点に設置した OBS、及び圧入地点の北西約 6km 地点に設置した陸上地震計を用いて地震観測を行っている。

ここで得られるデータに周辺の Hi-net 観測点 4 点のデータを加えて、同図に示す東西約 50km×南北約 38km×深さ約 50km の範囲を対象として地震活動をモニタリングしている。また、この範囲のうち圧入地点近傍の東西 6km×南北 6km×深さ約 15km の範囲を微小振動モニタリング範囲（モニタリング範囲）と定義し、圧入に関連して発生し得る微小な振動

を重点的に観測している。この観測では、貯留層相当深度付近（モニタリング範囲内）において発生したマグニチュードマイナス 0.5 以上の振動イベント*³を検知することが可能である。

*³検出した振動の素性を特定していない段階ではイベントと称する。

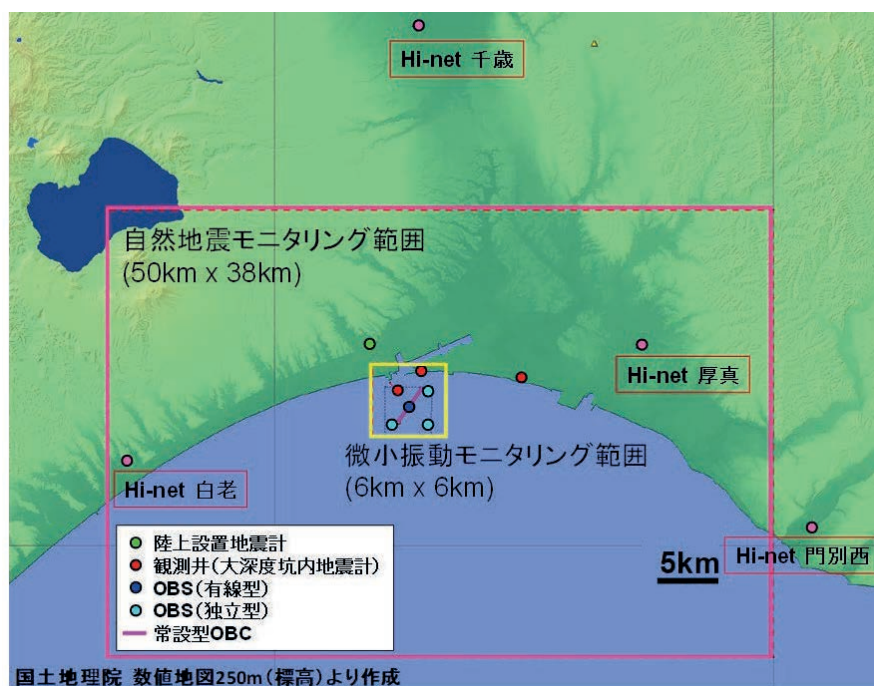


図 11 地震観測点配置及びモニタリング対象範囲

図 12 に、2015 年 2 月から 2018 年 9 月末までの期間にモニタリング範囲内で発生し、検知された微小振動イベントの回数及び推定震源位置を示す。圧入開始前の 2015 年 4 月から同年 8 月にかけて 9 回、圧入開始後の 2017 年 8 月に 3 回の微小振動イベントをモニタリング範囲内に検知している。これらの微小振動イベントはいずれも深度約 6km 以深で発生しており、当地域で通常発生し得る極小規模の自然地震に対する振動を捉えたものである。2017 年 8 月の 3 回の微小振動イベント以降は、平成 30 年北海道胆振東部地震の発生前後を含めてモニタリング範囲内で発生した微小振動イベントは検知されていない。

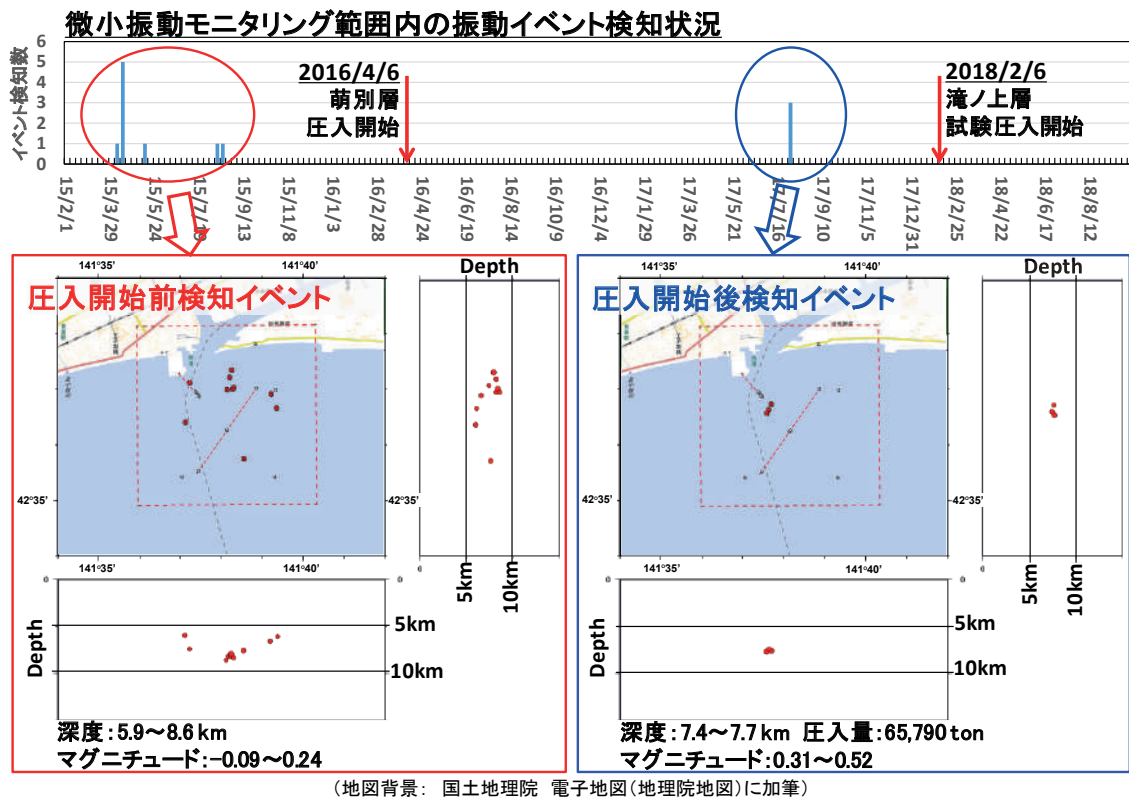
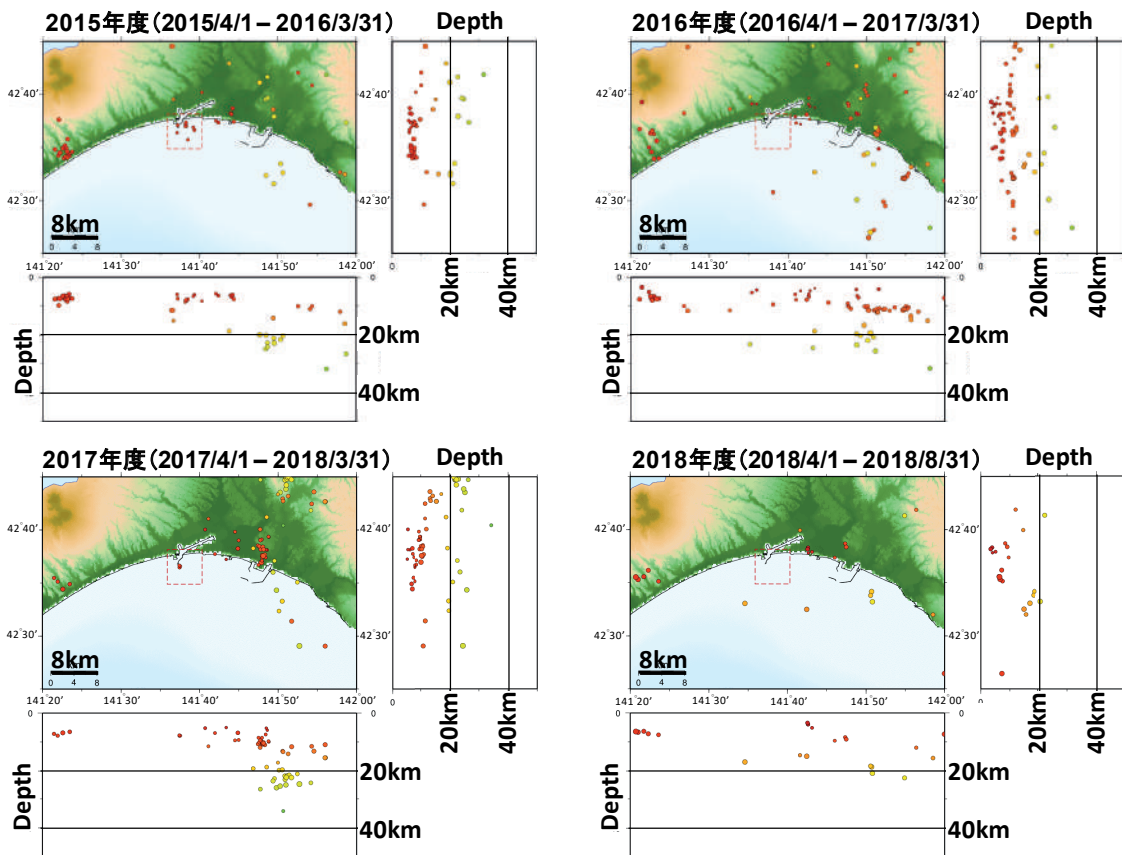


図 12 微小振動モニタリング範囲におけるイベント検知状況

図 13 に、2015～2018 年度の年度毎（2018 年度は 8 月末分まで）の自然地震モニタリング結果を示す。いずれの年度においても、樽前山南方周辺及び石狩低地東縁断層帯南部及び同延長部周辺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延長部周辺では、2017 年度に苫小牧港東港区付近で微小地震、極微小地震が集中して検知されている点が特徴として挙げられるものの、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、圧入前後で顕著な時系列的変動は認められない。また、今回の地震発生の直前においても活動に目立った変化は認められない。

今回の地震発生以降、2018 年 9 月末までの自然地震モニタリング結果は、本震の直後の停電及び定期点検に伴って観測データの欠測が生じているが、今回の地震の震源域近傍では膨大な数の余震が発生しているため、暫定的処置として、震源近傍の余震はモニタリング対象から除外している。

本震後、震源域周辺の全体的な地震活動の活発化に伴って、苫小牧港東港区付近でも多数の微小地震、極微小地震を検知している。既に述べたように、この周辺は今回の地震以前より微小地震、極微小地震を多く観測していることから、これらは本震の後の余震活動の一部と考えられる。また発生数は顕著に増加しているものの、震源位置は今回の地震以前の震源分布範囲を外れるものではない。一方、貯留地点近傍（微小振動モニタリング範囲）においては、今回の地震に伴う地震活動領域の変化は確認できない。



(背景：国土地理院数値地図 250m メッシュ (標高) 及び
海上保安庁「日本海洋データセンター」500m メッシュ水深データより作成)

図 13 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)

5.2.2 温度・圧力モニタリング結果

本事業では、圧入井坑内においてシリコン発振素子を用いた高精度センサによる温度・圧力観測を実施している。図 14 に、2018 年 7 月 1 日から同年 9 月 30 日までの 3 か月間の圧入井坑内温度・圧力観測結果を示す。滝ノ上圧入井 (IW-1) では同年 7 月 30 日に試験圧入を、萌別層圧入井 (IW-2) では同年 7 月 25 日に本圧入をそれぞれ再開していたが、今回の地震前の同年 9 月 1 日にガス供給元の送ガス停止に伴い圧入を停止しており、圧入井坑内圧力は、圧入停止に伴う低下途上にあった。今回の地震発生時の坑内温度は、IW-1 では圧入 CO₂ の温度が地層温度よりも低いために上昇途上にあった。一方、IW-2 では圧入 CO₂ の温度が地層温度よりも高いために下降途上にあった。図 14 に示すように、今回の地震の本震前後でこれらの傾向に変化は認められない。

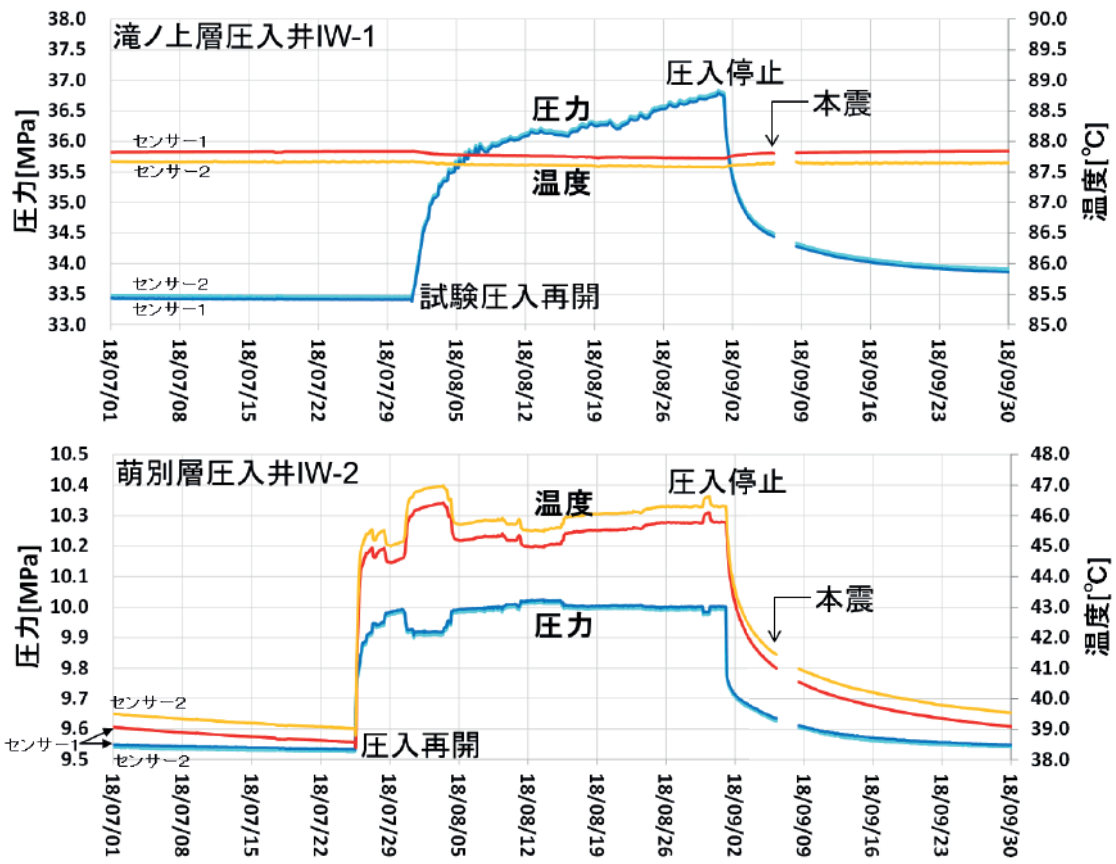


図 14 平成 30 年北海道胆振東部地震前後の圧入井坑内温度・圧力観測結果

なお、IW-1 の圧入中の圧力上昇は、圧入量と圧力の上昇等の関係調べるため、圧入上限圧 (38MPa) より低い 37MPa まで圧力を試験的に上げていたことによる。

巨視的には温度、圧力ともに地震による挙動変化は認められなかったが、図 15 に示すように、IW-1 では本震の直後に坑内圧力のわずかな上昇が認められた。坑内圧力は、本震による振動を記録した後に本震直前と比べて約 1.8kPa*4 上昇し、その後時間の経過とともに下降し、本震直前の圧力低下傾向に漸近している。地震前 3 時間の圧力低下率は約 3.8kPa/h であった。停電により今回の地震発生から 95 分後にデータ収録を停止しているため正確な状況はわからないものの、その漸近傾向から、数時間のうちに元の下降トレンド上に回復したと推測される。

*4 当該変動があった直前の圧力は約 34.49MPa であり、1.8kPa はその約 2 万分の 1。

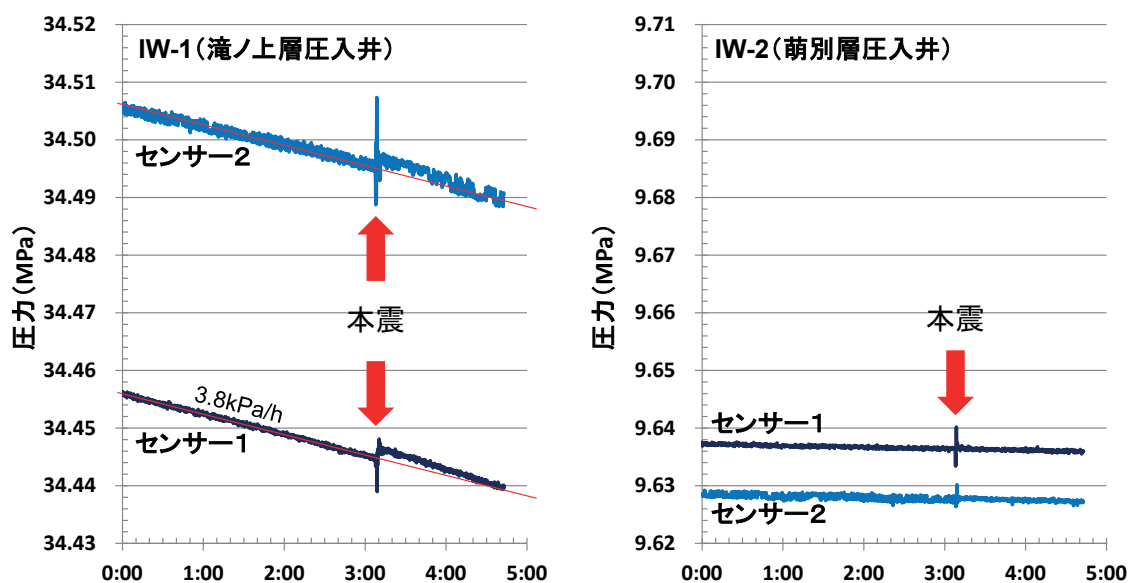


図 15 平成 30 年北海道胆振東部地震直後の圧入井坑内圧力の微細変化

(縦軸のスケールは、1 目盛 0.01MPa に統一)

ここで観測された圧力上昇は一種のコサイスミック変動^{*5}とみなすことができるが、コサイスミックな圧力変動の要因としては、断層変位に伴う静的地殻変動による体積歪変化が挙げられる。

この静的地殻変動について、東北大学災害科学国際研究所の遠田教授に依頼し、今回の地震の初期余震分布を考慮し震源断層モデルを作成し、観測地点で想定される圧力変化を計算した。作成された震源断層モデルを図 16 に示す。また図 17 にこの震源断層モデルによって計算された体積歪分布を示す。これによると圧入地点は収縮場に位置し、地震後には地層圧が上昇する。図 18 に、ここで得られた体積歪分布に対して N45° W/10° NE の走向傾斜を仮定して計算した法線応力変化^{*6}を示す。滝ノ上層圧入地点では、約 1.9kPa の上昇となる。

これは、モデルによる計算結果は観測結果（約 1.8kPa の上昇）と整合しており、観測された圧力上昇が断層変位に伴う静的地殻変動で説明可能であることがわかる。

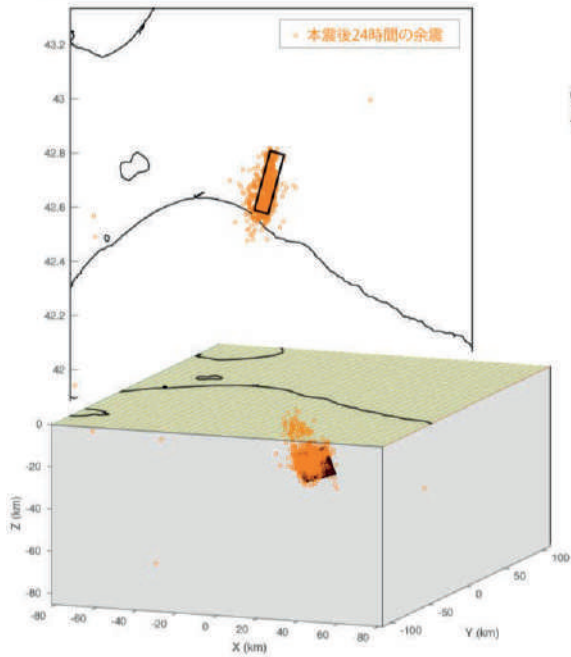
したがって、モデル計算結果は観測事実を合理的に説明することが可能と考えられること、また変動幅が 1.8kPa と極めて小さく、観測された圧力変動は貯留層の異常（CO₂ の漏洩につながるような地層の破壊など）を示すものではない。

以上のことから、今回の地震により CO₂ の漏洩があったとは認められないとの共通認識が委員の間で得られた。

*5 地震（発生）時（Coseismic）の変動現象。地震による地下水位の変動などがある。

*6 断層面に対し垂直に働く応力の変化

断層モデル	経度 [°]	緯度 [°]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	レイク [°]	すべり量 [m]	Mw
余震分布モデル	141.920	42.591	30.0	25.0	13.9	15	65	90	0.9	6.6



Okada (BSSA, 1992)の一樣均質半無限弾性体を使用。
 仮定したヤング率は80GPa*, ポアソン比は0.25

*一般的に地震学で用いられている、剛性率32GPaを採用し、
 剛性率をE、ヤング率をPRとしたとき、ヤング率Gは
 $G = E / (2(1 + PR)) = 80 \text{GPa}$

初期余震分布を考慮したモデル(震源断層モデル)

図 16 震源断層モデル

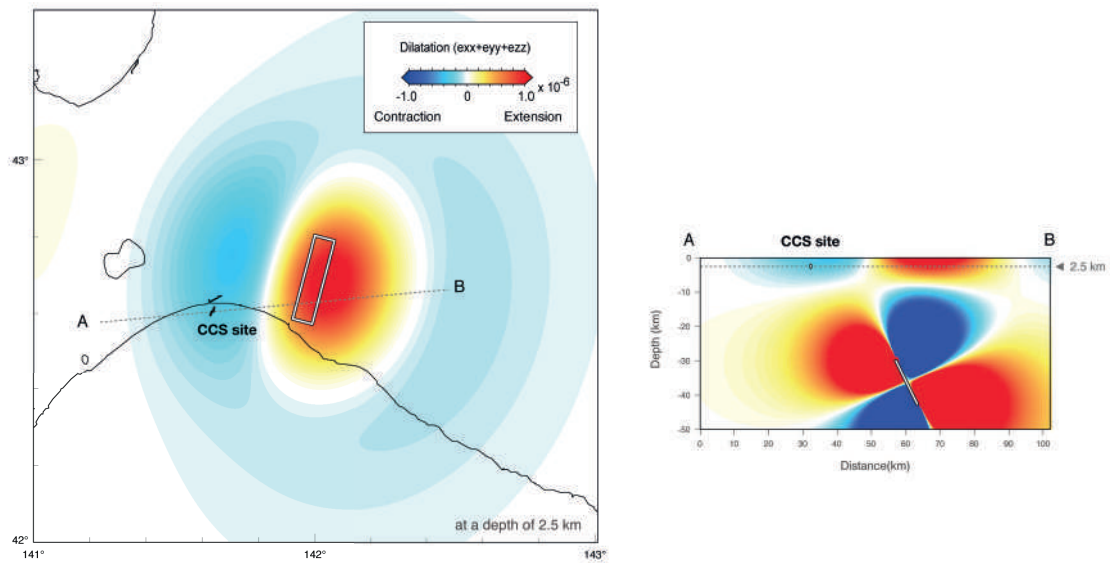


図 17 体積歪計算結果

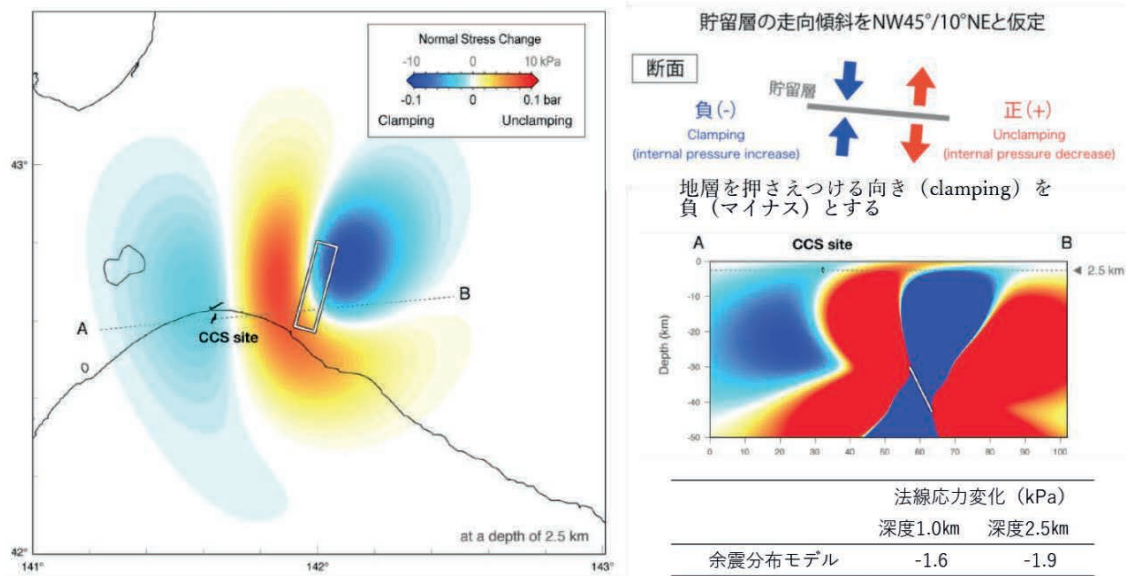


図 18 法線応力計算結果

6. 今後の予定

本実証事業の実施に関しては、「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」(平成 21 年 8 月)に基づく対応を実施している。この中で、今回のような大規模地震が発生した場合を想定した項目として、「異常事態の収束に対応した対応等」が、記載されている。しかし、今回は地震による設備への被害もなく、緊急停止も行われず、異常事態ではなかったが、地震発生後の対応として参考にした。

この指針を踏まえての具体的な対応は、次の通りである。

(1) 関係者による対応の協議

「苫小牧 CCS 実証試験に係わる課題検討会」^(注)を 2018 年 10 月 19 日に開催した。

(注) J CCS 社内に設置される、社外有識者による委員会

(2) 地震影響の調査

- 余震の傾向把握
- 分離・回収/圧入設備等の復旧作業の確認 (地上設備・圧入設備)
- モニタリング機器点検 (各機器の正常な作動)
- 圧入井の健全性確認 (坑底の温度・圧力の観測)
- 貯留層の状況把握 (微小振動の発生、各観測井の坑底の温度・圧力の観察)
- モニタリングデータ検討 (地震による圧入井での応力計算実施)
- 弾性波調査 (CO₂貯留状況の確認)
- 海洋環境調査 (夏季終了、秋季：11 月実施予定)
- CO₂含有ガス供給状況 (ガス供給元の状況把握、供給開始時期の確認)
- 対応した措置等の見直し
- 停電時の電源確保

(3) 地元関係先^{*7}への説明

検討会結果等報告・説明を実施(10月末までに説明開始)、理解を得るよう努める。

^{*7} 苫小牧市役所、苫小牧漁協、北海道漁連など

今後、対応を行っていくにあたっては、「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」の記載内容を踏まえて対応していく。CO₂ 含有ガス供給元の各装置の稼働が進めば、CO₂ 含有ガスが供給される見通しであり、圧入の再開は、実証試験センターの分離・回収／圧入設備／坑井の健全性、復旧作業、余震の傾向をみながら、まずは地元関係先の理解を得るよう努めて行う事を説明し、委員にご理解いただいた。

さらに、今回の検討会の内容に関して、速やかに報告書を作成し、本年度末の成果報告書にも含めることとする方針を J C C S は示し、委員に了解を頂いた。

以上

<検討会委員名簿>

【委員】

東京大学大学院 工学系エネルギーフロンティアセンター
システム創成学専攻 教授 佐藤 光三氏 (欠席)
二酸化炭素地中貯留技術組合 技術部 部長
兼 地球環境産業技術研究機構 CO₂貯留研究グループ
主席研究員 薛 自求氏
産業技術総合研究所 CO₂地中貯留研究グループ
グループ長 徂徠 正夫氏
東京大学大学院新領域創成学研究科 教授 徳永 朋祥氏 (欠席)
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 中垣 隆雄氏
東京工業大学 物質理工学院 応用化学系
准教授 瀧野 哲郎氏
東京大学人工物工学研究センター社会の中の人工物工学研究部門
教授 増田 昌敬氏 (欠席)
深田地質研究所 理事長
兼 京都大学 名誉教授 松岡 俊文氏

【臨時委員】

北海道大学 名誉教授 池田 隆司氏
東北大学 名誉教授 今泉 俊文氏
東京大学 地震研究所 災害科学系研究部門
教授 瀨瀬 一起氏
電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域
上席研究員 末永 弘氏
九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学部門
教授 辻 健氏
東北大学 災害科学国際研究所 教授 遠田 晋次氏
産業技術総合研究所 地質調査総合センター
研究戦略部長 中尾 信典氏 (欠席)
京都大学 防災研究所 地震発生機構研究分野
教授 James Jiro Mori氏
名古屋大学大学院 環境学研究科
地震火山研究センター 教授 山岡 耕春氏
(日本地震学会 会長)

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

2018 年 11 月 21 日 初版発行 2019 年 8 月 30 日 第 2 版第 1 刷発行

<お問合せ先> 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21F

TEL 03-6268-7610 FAX 03-6268-7385 URL: <https://www.japanccs.com>

この資料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(N E D O)の委託事業の一環で、日本CCS調査株が作成したものです。

* 本資料の無断転載・複写を禁じます。