

添付書類- 4

当該海底下廃棄をする海域が、海底下廃棄許可省令第2条において定める基準に適合し、かつ、当該海底下廃棄をする海域の海洋環境の保全に障害を及ぼすおそれがないものであることを説明する書類

目 次

1. 海底下廃棄をする海域の海底下廃棄許可省令第2条において定める基準への適合	1 -
1.1 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	- 2 -
1.2 将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる海域	- 4 -
1.3 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する海域（延長申請時（2020年8月））	- 6 -
1.4 海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視をすることができる海域	- 7 -
1.5 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合において、当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずることができる海域	- 10 -
1.6 当該海域及びその周辺における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在に関する知見が得られている海域	- 11 -
2. 地層の特徴に係る事項	- 12 -
2.1 広域の地層・地質の特徴	- 12 -
(1) テクトニクス概要	- 12 -
(2) 北海道周辺の地殻応力分布	- 13 -
(3) 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動	- 13 -
(4) 苫小牧周辺の活断層	- 16 -
2.2 廃棄海域とその近傍の地層/地質の特徴	- 17 -
(1) 周辺地域の地質概要	- 17 -
(2) 周辺地域の地層水塩分濃度解析による水理地質評価	- 18 -
① 萌別層～荷菜層	- 19 -
② 滝ノ上層	- 19 -
(3) 当該海域の地質	- 21 -
① 当該地域で実施した調査の概要	- 21 -
ア) 三次元弾性波探査	- 22 -
イ) 調査井	- 22 -
ウ) 圧入井	- 22 -
エ) CO ₂ 挙動予測シミュレーション	- 22 -
② 当該地域で取得したデータおよびその解析結果	- 24 -
ア) 三次元弾性波探査結果解釈の概要	- 24 -
イ) 苫小牧 CCS-1 の解析結果の概要	- 29 -
ウ) 苫小牧 CCS-2 の解析結果の概要	- 32 -
エ) 圧入井の解析結果の概要	- 32 -

④	CO ₂ 貯留飽和度の最大値.....	- 152 -
⑤	貯留状態での平均CO ₂ 密度.....	- 152 -
⑥	収容量.....	- 154 -
⑦	期間内計画圧入量が適切であることの確認.....	- 155 -
ア)	収容量.....	- 155 -
イ)	期間内推定圧入可能量.....	- 155 -
ウ)	期間内計画圧入量.....	- 155 -
(2)	萌別層砂岩層.....	- 155 -
①	CO ₂ の貯留領域面積（CO ₂ 貯留領域の水平投影面積）.....	- 155 -
②	孔隙容量.....	- 155 -
③	CO ₂ 貯留飽和度の最大値.....	- 156 -
④	貯留状態での平均CO ₂ 密度.....	- 156 -
⑤	収容量.....	- 157 -
⑥	期間内計画圧入量が適切であることの確認.....	- 158 -
ア)	収容量.....	- 158 -
イ)	期間内推定圧入可能量.....	- 158 -
ウ)	期間内計画圧入量.....	- 158 -
5.	海底下廃棄をする海域の海洋環境の特徴に係る事項.....	- 159 -

1. 海底下廃棄をする海域の海底下廃棄許可省令第2条において定める基準への適合

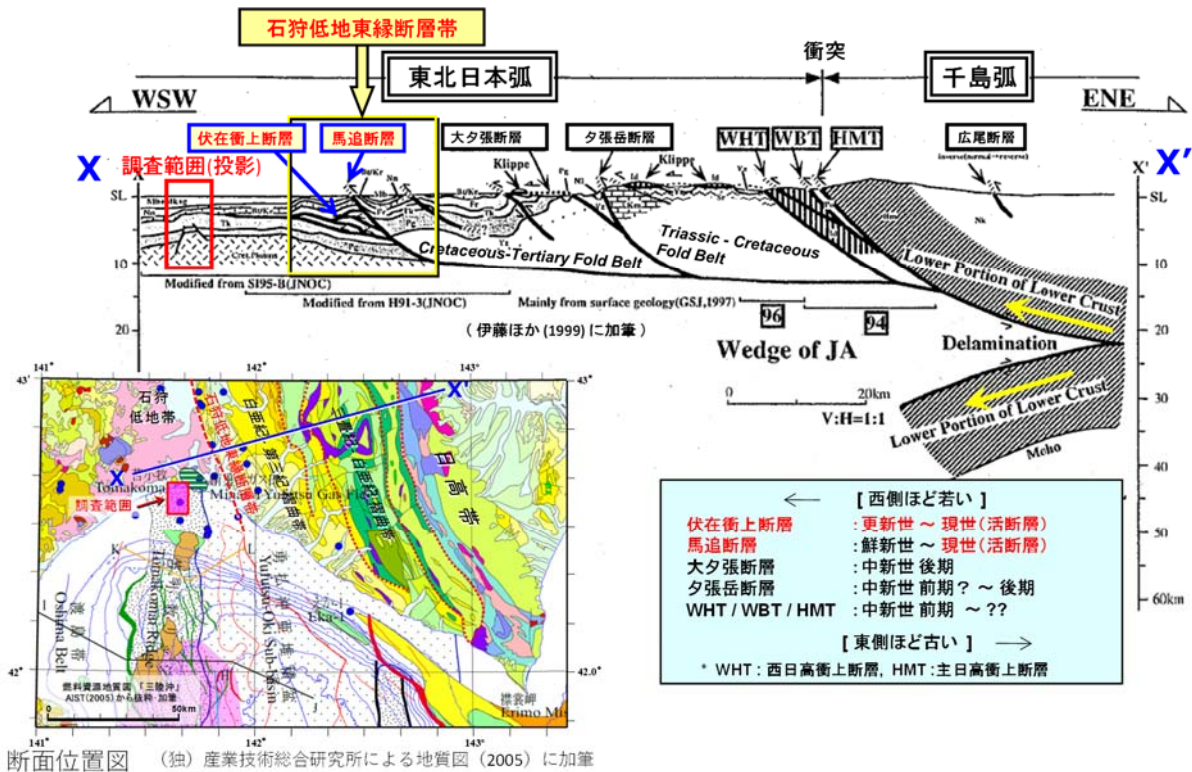
環境省令第二十三号（特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令）の第二条に定める基準は、以下の6項目である。

- 一 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
- 二 将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる海域
- 三 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する海域
- 四 海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視をすることができる海域
- 五 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合において、当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずることができる海域
- 六 当該海域及びその周辺における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在に関する知見が得られている海域

以下、これら6項目の基準への適合について記載する。

1.1 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

第 1.1-1 図に、苫小牧周辺のテクトニクス概要を示す。



第 1.1-1 図 苫小牧周辺のテクトニクス概要

特定二酸化炭素ガスの圧入想定域は、北海道の石狩-日高地域に属する(第 1.1-1 図左下の断面位置図)。地質構造的には、西方に向かって前進する北北西-南南東方向の褶曲・衝上断層帯で特徴づけられる(第 1.1-1 図上段)。同褶曲・衝上断層帯は、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成された日高衝突帯の西側の前縁部に形成されている^[1]。

広域の地質構造的な特徴は、以下のとおり要約できる。

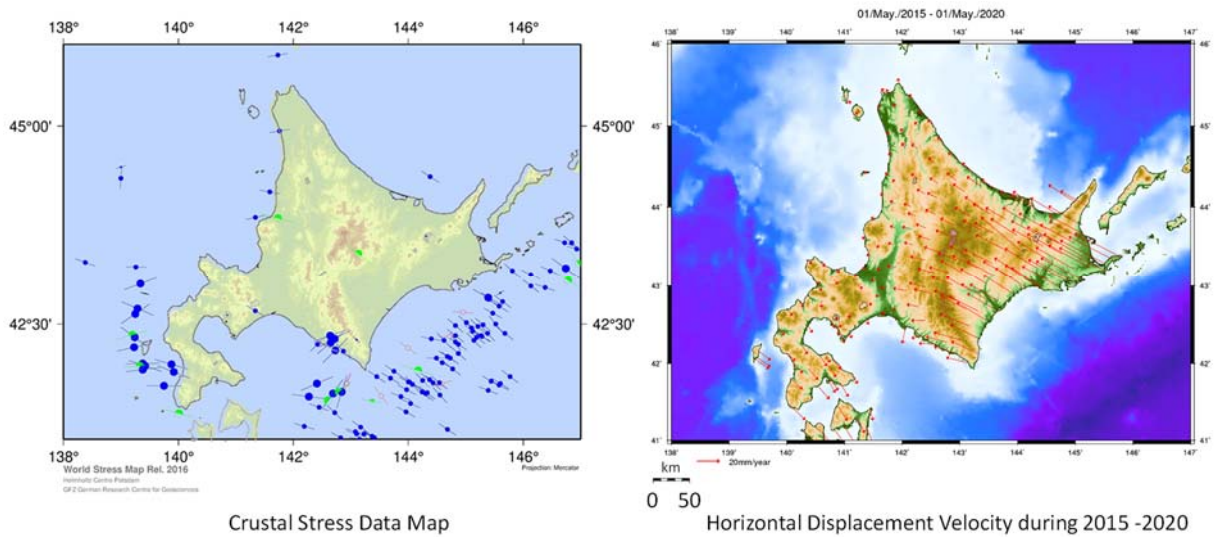
- ・西方に向かって前進する複数の褶曲・衝上断層帯が発達する。これらは、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成されたもので、中新世に始まったものである。
- ・褶曲・衝上断層帯にはいくつかの断層が認められ、地表に現れている最も西側の断層は馬追断層で代表される断層群である。
- ・既往の弾性波探査データから、馬追断層の西側にはいくつかの伏在衝上断層が推定される。
- ・馬追断層およびその西側の伏在衝上断層は、南北に延びる活断層である「石狩低地東縁断層帯」を形成している。

国土地理院による GPS 観測点網 (GEONET) による年間平均変位速度ベクトルと、地殻応力データベースである World Stress Map^[2] (WSM) を利用して応力分布について調査した。第 1.1-2 図

[1] 伊藤ほか. 1999. 日高衝突帯におけるデラミネーション-ウェッジ構造. 月刊地球, 21(3), pp.130-136.

[2] World Stress Map (<http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>, 2020/7/10 アクセス)

に、WSMによる応力データ分布および札幌観測点を固定した変位速度図を示す。



第 1.1-2 図 北海道地域の地殻応力データ分布図（左側）および水平変位速度分布図（右側）

これらの図に現れた応力分布を反映すると考えられる特徴を列記する。

北海道南東部一日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間 40mm 以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧一室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。

上記より、当該海域では、地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録はほぼ確認されなかった。

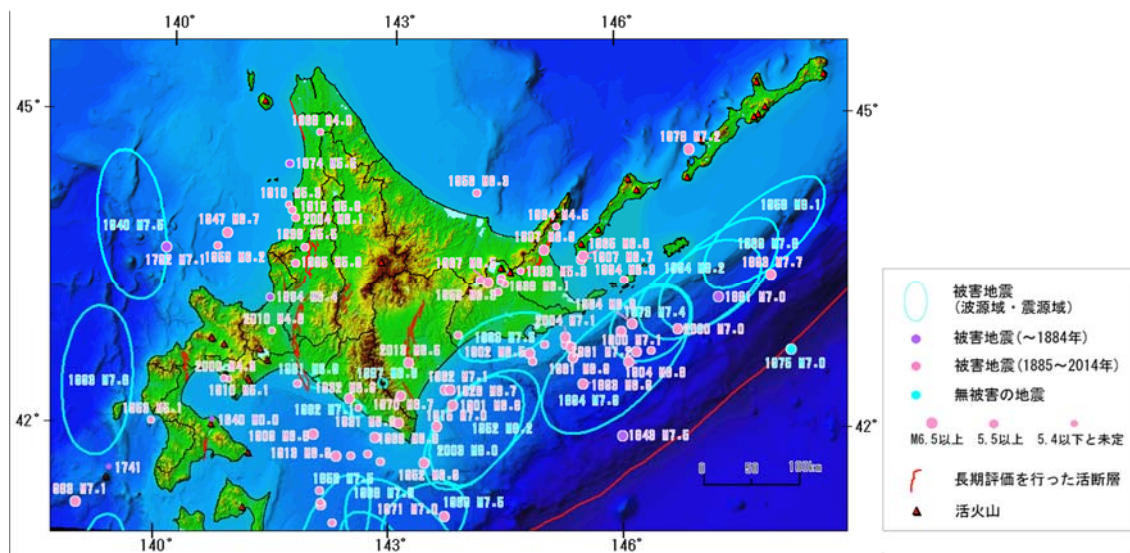
1.2 将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる海域

北海道周辺の地震活動としては、太平洋プレートの沈み込みに伴うプレート境界型地震の他、沈み込む太平洋プレート内で発生するプレート内地震、内陸の比較的浅部で発生する内陸型地震、十勝岳や樽前山等の火山活動に伴う火山性地震がある。これらのうちプレート境界型地震、プレート内地震、内陸型地震は、第 1.2-1 図に示すように、いずれも過去において被害を生じる地震を含んでいる。ただし、プレート境界型地震の震源域は苫小牧地点から南東に 100km 以上離れていること、プレート内地震の震源は深度約 50km 以上と非常に深いことから、苫小牧地点において二酸化炭素貯留対象層となる浅部の地層に著しい変動を生じ得るのは内陸型地震に限られる。

内陸型地震の震源として政府の地震調査研究推進本部が認定する活断層のうち、苫小牧地点に最も近いものは石狩低地東縁断層帯である。同断層帯は圧入地点から 20km 以上離れていることから、同断層帯を震源とする地震により貯留地点近傍の地層が著しい変動を受けることはなく、当該海域で実施した弾性波探査結果においても過去の同断層帯の活動に伴う地層変形は認められない（第 2.2 節(3)②参照）。

以上のことから、当該海域では、将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる。

なお、平成 29 年胆振地方中東部の地震（2017/7/1, M5.1）、平成 30 年北海道胆振東部地震（2018/9/6, M6.7）の震源および平成 31 年北海道胆振東部地震関連（2019/2/21, M5.8）は、第 1.2-2 図に示すように、いずれも苫小牧地点から見て石狩低地東縁断層帯より東側に離れて位置しており、これらの地震による貯留地点への影響は無いと考えられる。



地震調査研究推進本部^[1]

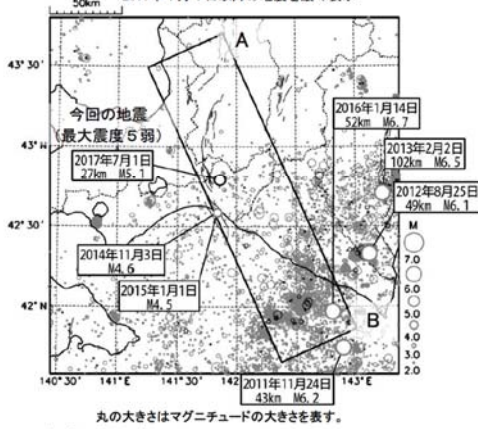
第 1.2-1 図 北海道周辺の地震活動

[1] 地震調査研究推進本部

https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/hokkaido/hokkaido-higaijishin.gif(参照 2020-08-02)

平成29年7月1日 胆振地方中東部の地震
(発生場所の詳細)

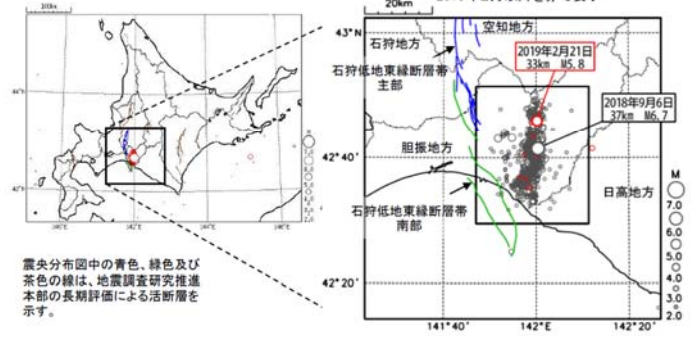
震央分布図
(1997年10月1日～2017年7月2日00時30分、深さ0～120km、M2.0以上)
2017年1月1日以降の地震を濃く表示



丸の大きさはマグニチュードの大きさを表す。
気象庁発表 (2017/7/2)

平成30年北海道胆振東部地震
地震活動の詳細 (2019年2月21日24時現在)

震央分布図
(2018年9月6日03時～2019年2月21日24時、
深さ60km以浅、M2.0以上)
2019年2月以降を赤で表示



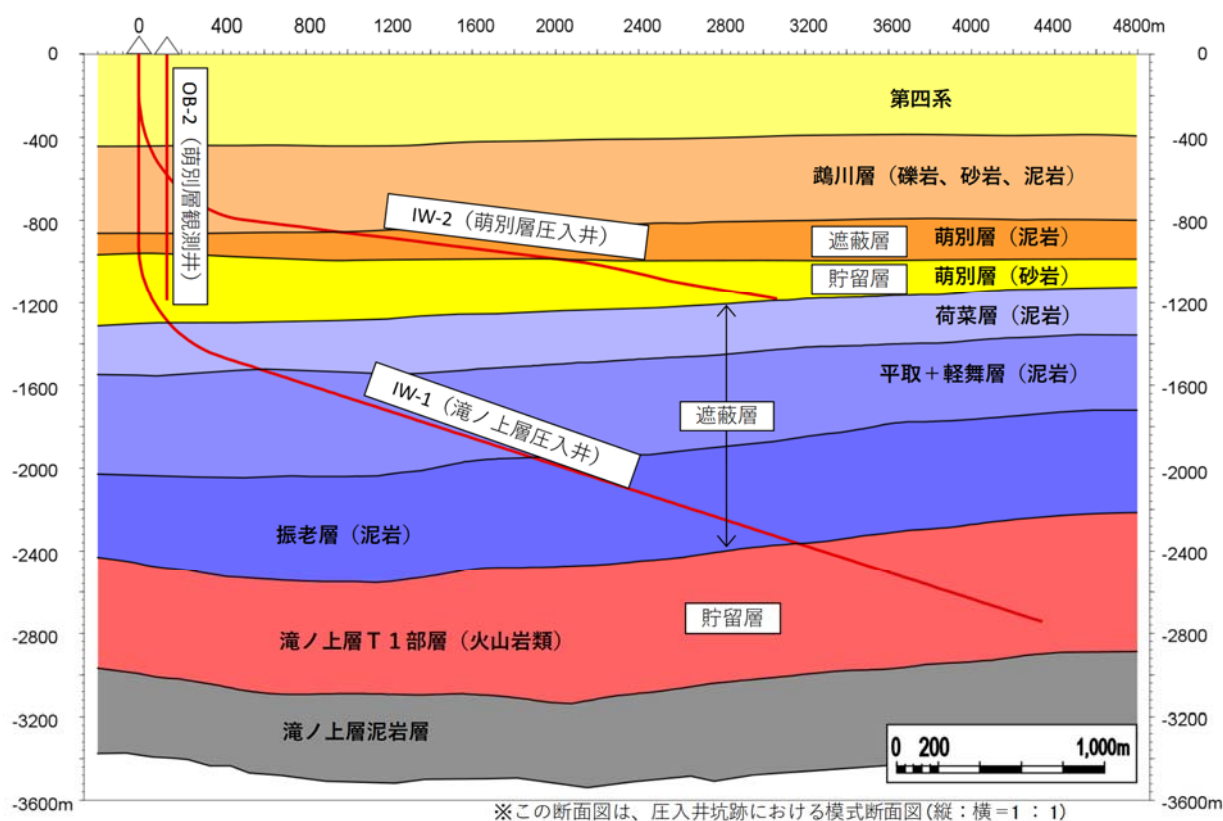
震央分布図中の青色、緑色及び
茶色の線は、地震調査研究推進
本部の長期評価による活断層を
示す。

気象庁発表 (2019/2/22)

第 1.2-2 図 平成 29 年胆振地方中東部の地震, 平成 30 年北海道胆振東部地震および平成 31 年北海道胆振東部地震関連の震源位置

1.3 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する海域 (延長申請時(2020年8月))

本計画においては、滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井を新たに掘削して、滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層の 2 つの貯留層に特定二酸化炭素ガスを圧入する。それぞれの貯留層の海面下深度の上限は、滝ノ上層 T1 部層で約 2,400m、萌別層砂岩層で約 1,000m であり、十分な深度を確保している(第 1.3-1 図)。



第 1.3-1 図 苫小牧地点の層序

また、それぞれの貯留層に対する遮蔽層の厚さおよび浸透率については、滝ノ上層 T1 部層に対しては 850m 程度および $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6} \text{mD}$ 、萌別層砂岩層に対しては 100m 程度および $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ であり、十分に特定二酸化炭素ガスを封じ込められ、海底下廃棄の安全性/完全性が確保されている。

本書類の「2.2 廃棄海域とその近傍の地層/地質の特徴」および「4. 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスの地層内での空間的な広がり及び特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項」において、地層/地質構造に係る調査結果およびそれらのデータを用いた CO_2 挙動予測シミュレーション結果を記載しており、それぞれの貯留層に対する圧入終了後 1,000 年間の CO_2 挙動予測は次のとおりであり、 CO_2 漏出の可能性が極めて小さいと判断できる。

1) 滝ノ上層 T1 部層

- ・気相（超臨界）CO₂および溶解CO₂の広がりには滝ノ上層圧入井から200mの区間。
- ・CO₂は、遮蔽層へ到達しない。

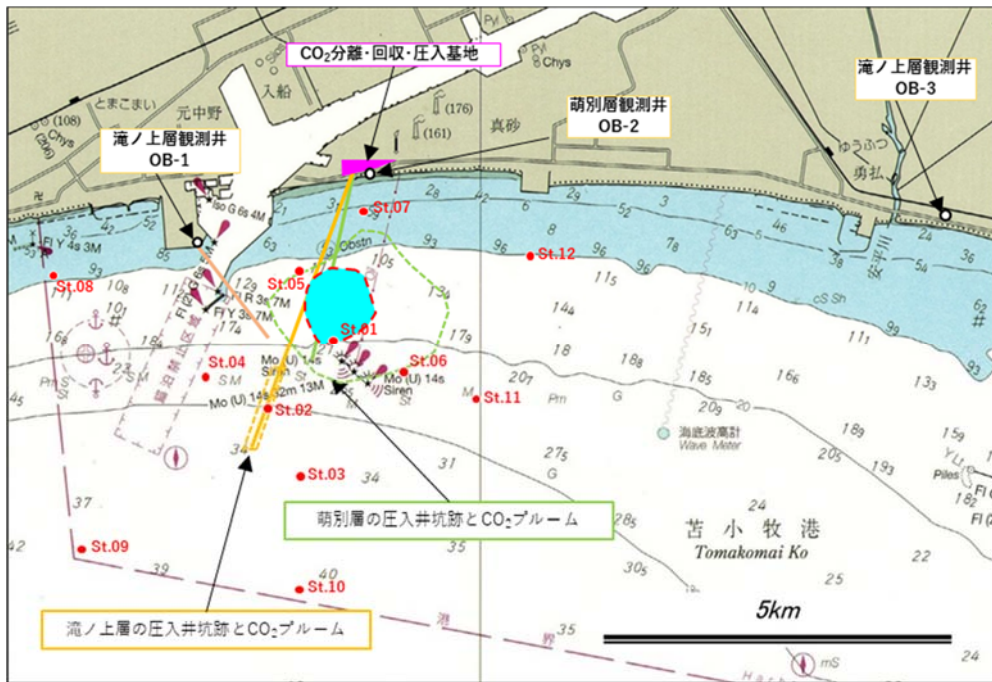
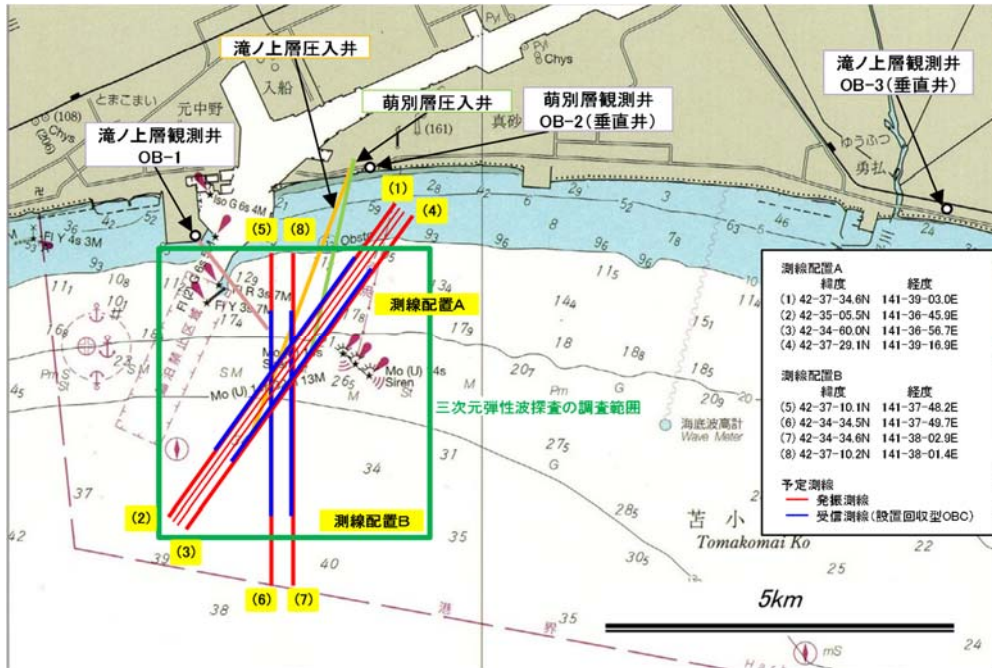
2) 萌別層砂岩層

- ・気相（超臨界）CO₂の広がりには、水平方向に東西780m程度、南北1,050m程度。また、溶解CO₂の広がりには、東西820m程度、南北1,100m程度。
- ・遮蔽層層準において砂質の岩相が発達する区間へのCO₂の移動は想定されるが、それより上位へは移動しない。

上記より、当該海域は、特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する。

1.4 海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視をすることができる海域

海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視のうち、海域で実施するのは、貯留層内のCO₂の広がりを確認する弾性波探査と、汚染状況を監視する海洋環境調査である。調査海域を第1.4-1図に示す。第1.4-1図の弾性波探査の調査位置と海水の化学的性状の調査海域と測点位置は、2016～2019年度の監視計画で調査を行った位置を示す。



注) 海上保安庁発行の海図(W1034)に加筆

 CO₂ プルーム : 60 万トン圧入 (1000 年後) ^[1]

 CO₂ プルーム : 30 万トン圧入 (1000 年後) ^[2]

第 1.4-1 図 弾性波探査の調査位置 (上図) と海水の化学的性状の調査海域と測点位置 (赤点 :

[1] 「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に関する実施計画に係る事項」の第 4.5-60 図 (20190130 産第 4 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「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に関する実施計画に係る事項」の第 4.5-86 図参照)

[2] 「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に関する実施計画に係る事項」の第 4.5-41 図 (溶解 CO₂ 量分布 (P10) モデル(圧力上昇量が高くなる確率が 10%以下のモデル))

St. 01～12) および CO₂分離・回収・圧入基地の位置 (下図)

当該海域でこれらの監視をすることができることは、特定二酸化炭素ガスの圧入前に行った海域のベースライン観測（平成 25～26 年に実施）において確認した。

なお、海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視のうち、圧入井の圧力・温度および観測井の圧力・温度については、圧入井の観測データは専用の光ケーブルによって、観測井の観測データは電話回線を利用して CO₂ 分離・回収・圧入基地内管理棟の坑井モニタリング監視システムに送信され、監視、記録される。これらの観測機器は既に設置され、ベースライン観測を実施しており、海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視が出来る状態にある。

1.5 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合において、当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずることができる海域

「特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合」は、通常時監視の確認調査で移行基準の超過が確認された場合が該当し、「当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずる処置」は、圧入の停止である。圧入の停止後は、環境省指示のもと適切な措置を実施する。

1.6 当該海域及びその周辺における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在に関する知見が得られている海域

苫小牧市および厚真町周辺海域の海洋生物について、浮遊生物の生息状況、魚類等遊泳動物の生息状況、海藻及び藻類の生育状況並びにさんご類の生息状況、および底生生物（メイオベントス、マクロベントスおよびメガロベントス）の生息状況を、現地調査と既存資料の整理により把握した。また、生態系について、藻場、干潟、さんご群集その他の脆弱な生態系の状態、重要な生物種の産卵場又は生育場その他の海洋生物の生育又は生息にとって重要な海域の状態、および熱水生態系その他の特殊な生態系の状態を、既存資料^{[1]-[9]}の整理により把握した。さらに、海中公園その他の自然環境の保全を目的として設定された区域としての利用状況を、既存資料の整理により把握した。これら調査の結果、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの存在は確認されなかった（「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をすることが海洋環境に及ぼす影響についての調査の結果に基づく事前評価に関する事項を記載した書類」の「3.2 海洋生物」、 「3.3 生態系」 および 「3.4 海洋の利用」）。

上記より、当該海域及びその周辺は、自然保護的観点から特別に保護すべき対象が存在していないことが把握されている場所である。

[1] 『日本の国立公園』（環境省自然環境局ウェブサイト：<http://www.env.go.jp/park/shikotsu/index.html>, 2019/10/23 アクセス）

[2] 『道内のラムサール条約登録湿地一覧』（北海道環境局生物多様性保全課ウェブサイト：<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/environ/wetland/ramsargaiyou.htm>, 2019/10/23 アクセス）

[3] 『自然環境保全地域等』（北海道環境局生物多様性保全課ウェブサイト：<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/kouen/hozen.htm>, 2019/10/23 アクセス）

[4] 『自然環境保全地区』（苫小牧市環境生活課自然保護係ウェブサイト：http://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/shizen/shizenhogo/sizenkankyo/shinai_shizen/kakuhozenchiku.html, 2019/10/23 アクセス）

[5] 『2019年度 鳥獣保護区等位置図』（北海道ウェブサイト）
（<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/syuryo/ichizu.htm>, 2019/11/1 アクセス）

[6] 『苫小牧市環境白書 平成30年度版（平成29年度実績）』（苫小牧市環境衛生部環境保全課ウェブサイト）
（<http://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/files/00043700/00043786/20200220092152.pdf>, 2019/11/2 アクセス）

[7] 『第4回自然環境保全基礎調査』（環境庁, 1994年）

[8] 『サンゴの生態』（日本サンゴ礁学会ウェブサイト：http://www.jcrs.jp/wp/?page_id=622, 2019/10/21 アクセス）

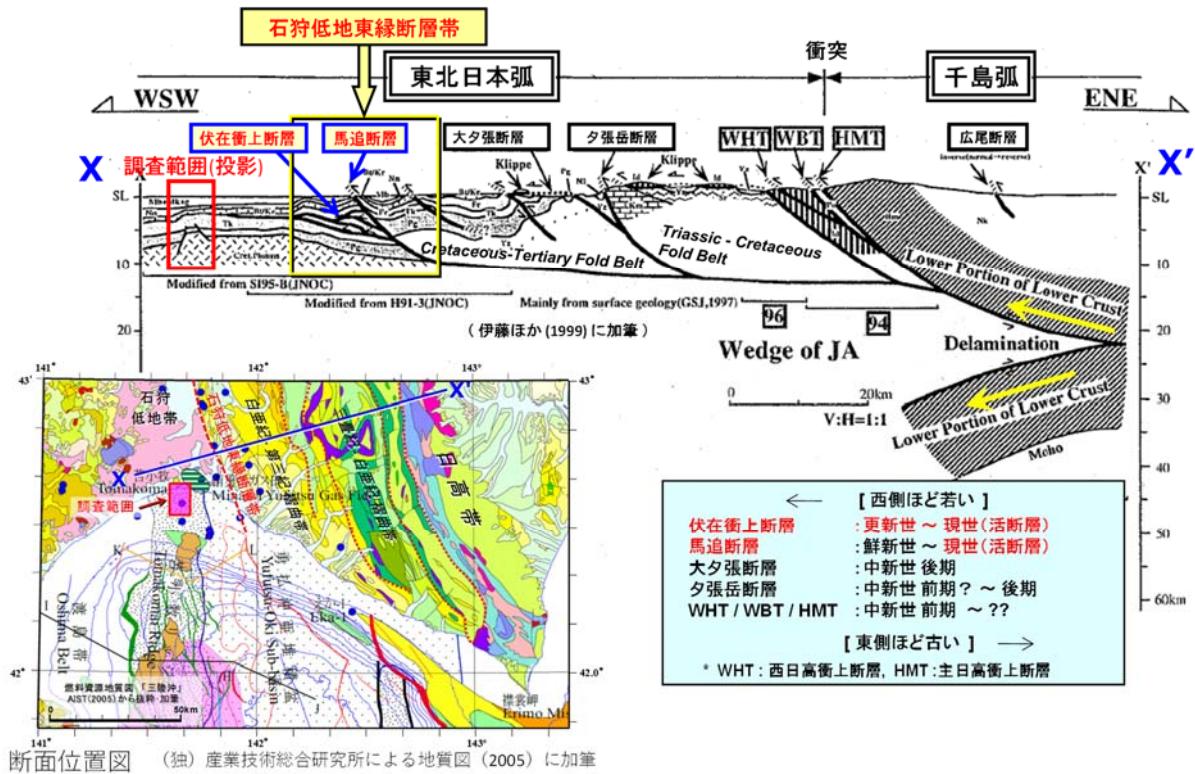
[9] 『西太平洋の化学合成生態系』（独立行政法人海洋研究開発機構ウェブサイト：<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/XBR0/eco/project/busshitsu/shinkai/onsen2.html#reiyusui>, 2014/10/17 アクセス）

2. 地層の特徴に係る事項

2.1 広域の地層・地質の特徴

(1) テクトニクス概要

第 2.1-1 図に、苫小牧周辺のテクトニクス概要を示す。



第 2.1-1 図 苫小牧周辺のテクトニクス概要

特定二酸化炭素ガスの圧入想定域は、北海道の石狩一日高地域に属する(第 2.1-1 図左下の断面位置図)。地質構造的には、西方に向かって前進する北北西-南南東方向の褶曲・衝上断層帯で特徴づけられる(第 2.1-1 図上段)。同褶曲・衝上断層帯は、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成された日高衝突帯の西側の前縁部に形成されている^[1]。

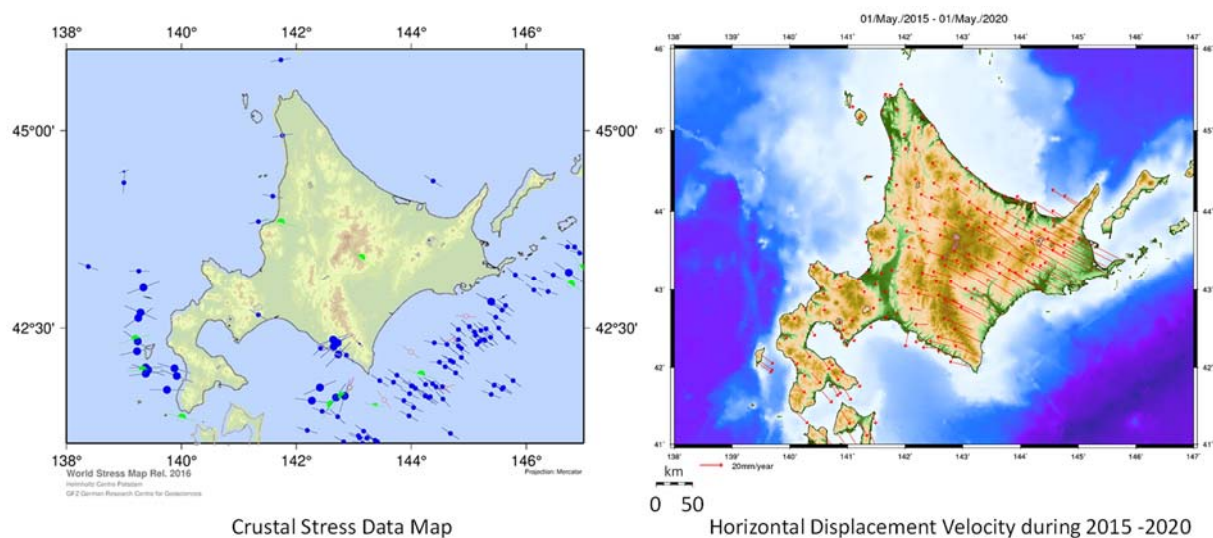
広域の地質構造的な特徴は、以下のとおり要約できる。

- ・西方に向かって前進する複数の褶曲・衝上断層帯が発達する。これらは、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成されたもので、中新世に始まったものである。
- ・褶曲・衝上断層帯にはいくつかの断層が認められ、地表に現れている最も西側の断層は馬追断層で代表される断層群である。
- ・既往の弾性波探査データから、馬追断層の西側にはいくつかの伏在衝上断層が推定される。
- ・馬追断層およびその西側の伏在衝上断層は、南北に延びる活断層である「石狩低地東縁断層帯」を形成している。

[1] 伊藤ほか. 1999. 日高衝突帯におけるデラミネーション-ウェッジ構造. 月刊地球, 21(3), pp. 130-136.

(2) 北海道周辺の地殻応力分布

国土地理院による GPS 観測点網 (GEONET) による年間平均変位速度ベクトルと、地殻応力データベースである World Stress Map^[1] (WSM) を利用して応力分布について調査した。第 2.1-2 図に、WSM による応力データ分布および札幌観測点を固定した変位速度図を示す。



第 2.1-2 図 北海道地域の地殻応力データ分布図 (左側) および水平変位速度分布図 (右側)

これらの図に現れた応力分布を反映すると考えられる特徴を列記する。

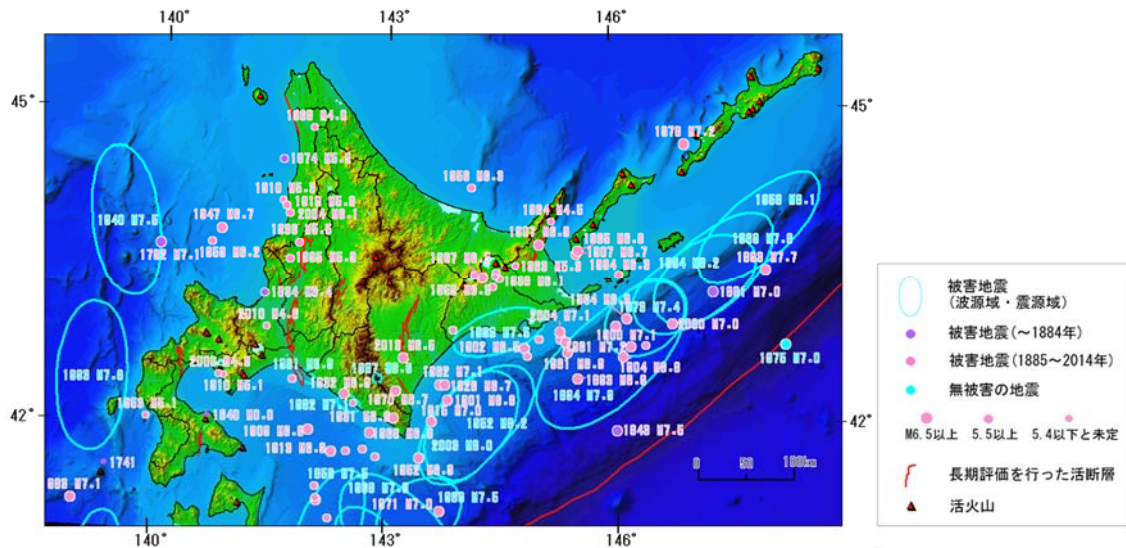
北海道南東部-日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間 40mm 以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧-室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。

(3) 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動

北海道周辺には、太平洋プレートの沈み込みに伴うプレート境界型地震の他、深度約 50km 以深で発生するプレート内地震、内陸の比較的浅部で発生する内陸型地震の地震活動があり、千島海溝-日本海溝に沿って、津波を伴うマグニチュード (M) 8 クラスの海溝型巨大地震が繰り返し発生している (第 2.1-3 図)。北海道では、古文書に記録された古い地震は少ないが、津波堆積物の調査から、400~500 年周期で巨大津波を経験してきたことがわかっている。

[1] World Stress Map (<http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>, 2020/7/10 アクセス)



第 2.1-3 図 北海道周辺の地震活動

苫小牧周辺における最近の地震活動を，第 2.1-4 図に示す。

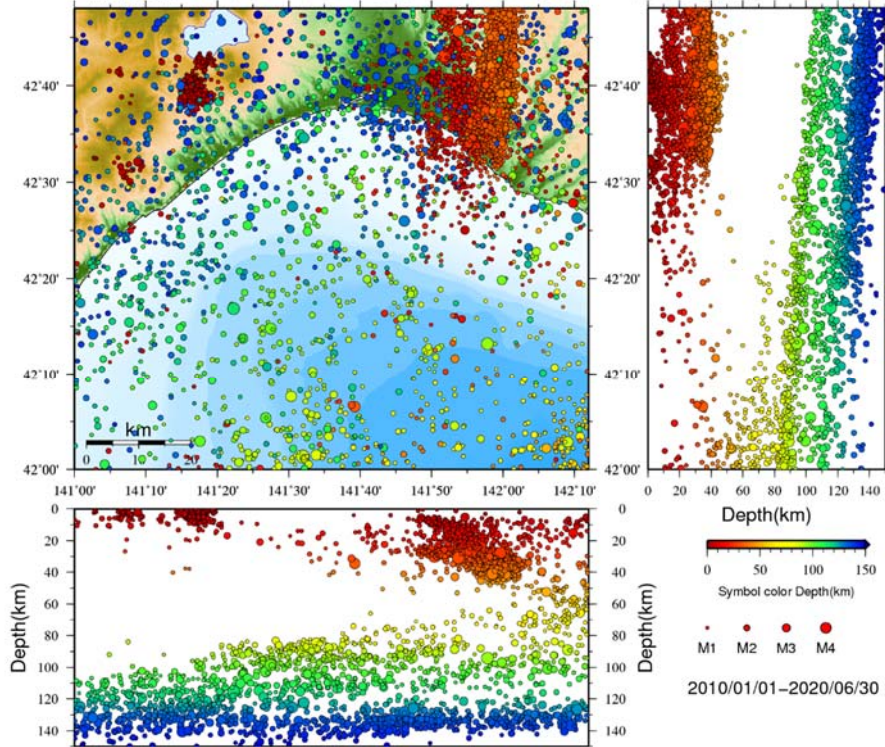
震源分布断面図からは，深度約 50 km 以深のプレート内地震と浅部（20～40km 以浅）の内陸地震の 2 タイプの地震活動があることがわかる。

苫小牧市南西側には，樽前山などの活火山があり，群発地震が発生することがある。ほとんどの場合 M5 以下であるが，まれに M5 より大きくなり，局所的に被害が生じることがある。群発地震の活動期間は，多くは 1～3 ヶ月の比較的短い時間で収まるが，1 年を越えた例も知られている。

^[1] 地震調査研究推進本部

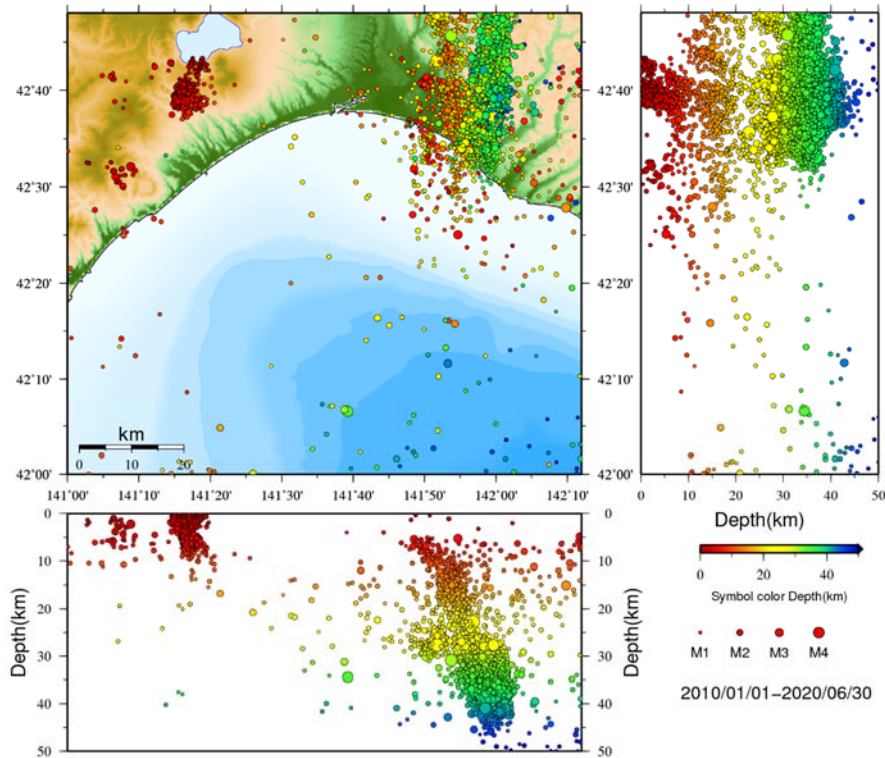
https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/hokkaido/hokkaido-higaijishin.gif(参照 2020-08-02)

国土地理院数値地図250mメッシュ（標高）および海上保安庁「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



2010～2020年、深度150km未満、マグニチュード1以上を表示

国土地理院数値地図250mメッシュ（標高）および海上保安庁「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



2010～2020年、深度50km未満、マグニチュード1以上を表示

第 2. 1-4 図 苫小牧周辺における最近の地震活動

(4) 苫小牧周辺の活断層

ここで、活断層とは、第四紀後期更新世（約 13 万年前）以降現在まで活動的である断層、と定義する。

北海道地方の活断層のほとんどは逆断層であり、北海道の中央部がほぼ東西方向に圧縮されていることを示している。地殻変動観測からもおおむね西北西－東南東方向の圧縮場にあることがわかる（第 2.1-2 図）。

苫小牧周辺の活断層としては、石狩平野の東縁に沿って南北方向に走っている「石狩低地東縁断層帯」がある（第 2.1-1 図）。第 2.1-5 図は、地震調査研究推進本部による「石狩低地東縁断層帯」の分布図である。平成 22 年 8 月に改訂されて追加された南部延長部も含まれている。図中の南部延長部は、断層そのものではなく断層活動を伴う変形を表す背斜構造軸として表現されている。震度予測シミュレーションで用いられている断層は、背斜軸の 10～20km 東方に想定されており、圧入地点からは 20km 以上あり、十分離れているといえる。

地震調査研究推進本部
「石狩低地東縁断層帯の評価の一部改定(2010.08.26)」
＜南側の海域まで伸長＞

項目	評価	
断層の長さ	54km以上	○
断層の傾斜	東傾斜 (深さ約3km以深では低角度、約2.5kmでほぼ水平)	◎
1回のずれの量	4m程度以上	△
平均活動間隔	1万7千年程度以上	△
想定される地震の規模	M7.7程度以上	△
地震発生確率 (30年:ポアソン)	0.2%以下	d

信頼度 ⇒ ◎:高い、○:中程度、△:低い
発生確率 ⇒ a:高い、b:中程度、c:やや低い、d:低い



第 2.1-5 図 石狩低地東縁断層帯

2.2 廃棄海域とその近傍の地層/地質の特徴

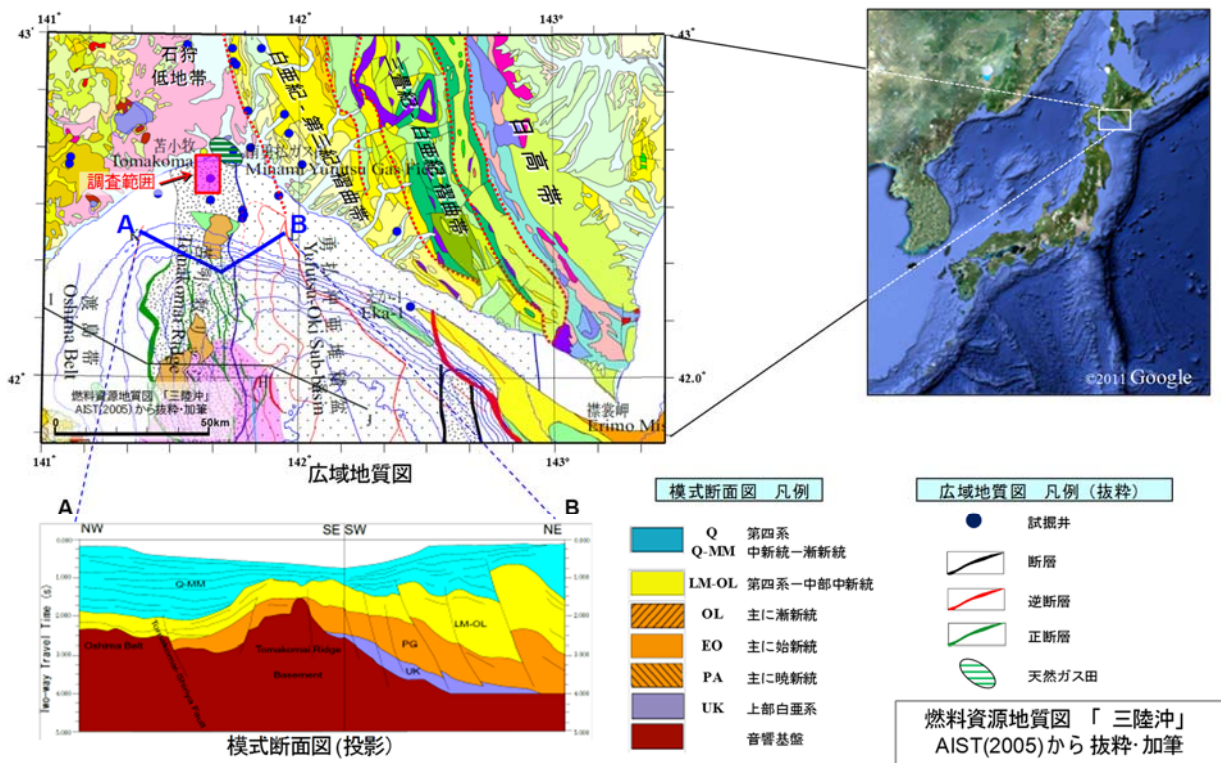
(1) 周辺地域の地質概要

調査区域および周辺地域では、これまで国による基礎物理探査、民間企業による石油・天然ガスを対象とした探鉱活動により、地下の地質層序および地質構造が明らかになっている。

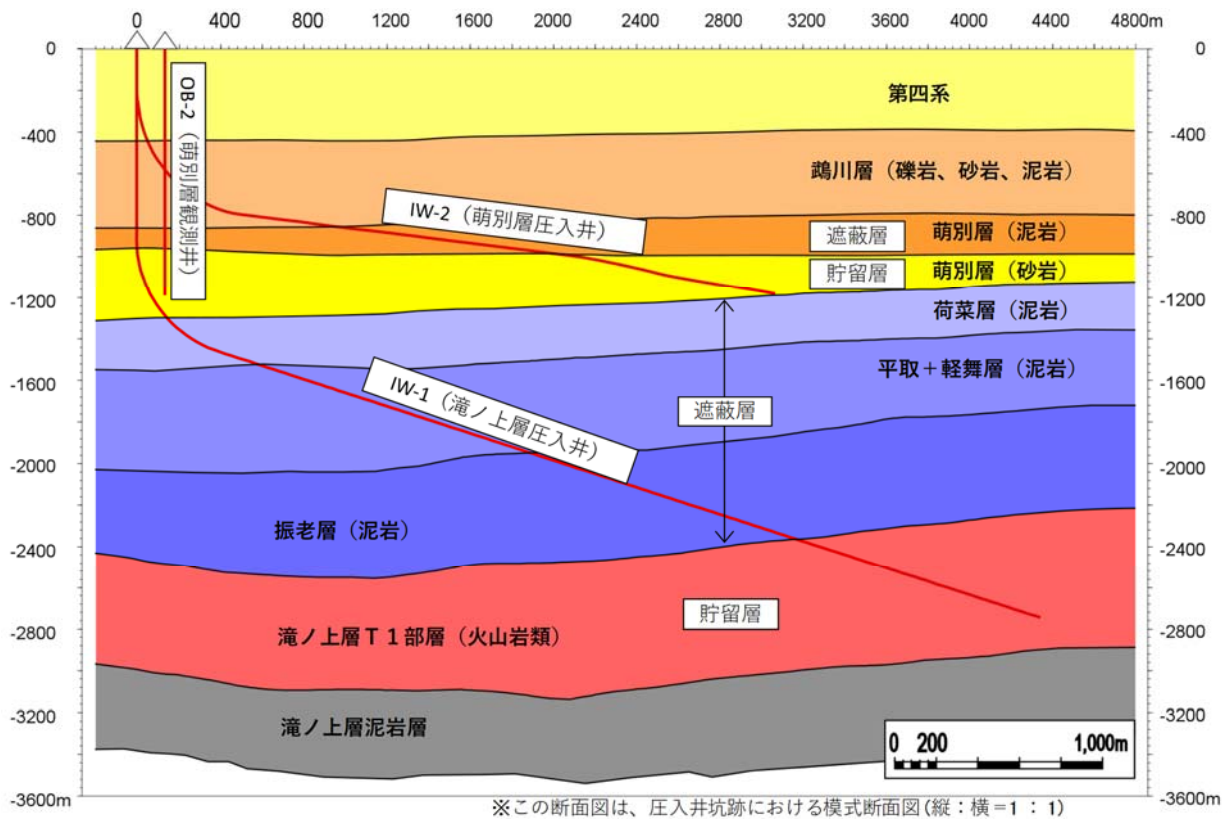
調査区域は、苫小牧リッジと呼ばれる中生代火山岩類の基盤岩の隆起帯に位置しており、基盤の上位の古第三紀以降の様々な構造場のもとで形成された堆積盆に、古第三系、新第三系および第四系が認められる（第 2.2-1 図）。調査区域では、古第三系の上位に、下位より滝ノ上層、

振老層、平取+軽舞層、荷葉層、萌別層、鶴川層などの地層が堆積しており、滝ノ上層から荷葉層にかけては新第三系、萌別層と鶴川層は第四系に区分されている（第 2.2-2 図）。

調査区域から東方に向けては、波長が 10km 程度の褶曲構造が南北ないし北北西-南南東方向に並列して複数認められ、一般に東側の背斜構造群は逆断層を伴った変形を受けているが、調査区域を含めて西側の背斜構造群はいずれも比較的弱い変形と考えられている。



第 2.2-1 図 苫小牧周辺の広域地質図と模式断面図

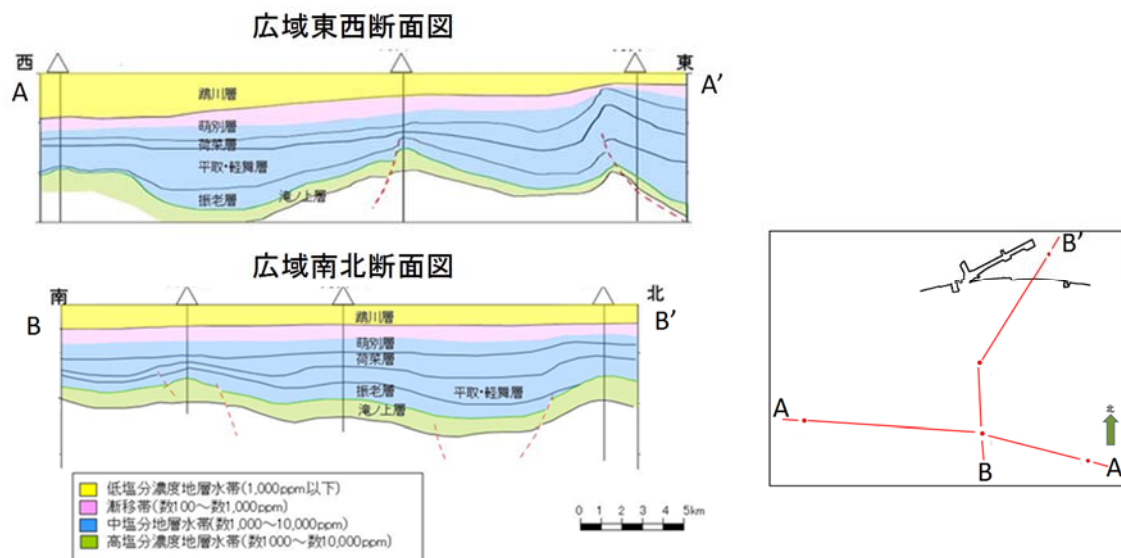


第 2.2-2 図 苦小牧地点の層序

(2) 周辺地域の地層水塩分濃度解析による水理地質評価

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」^[1]においては、「CO₂貯留層、キャップロック及びその上部の領域を含む水理地質及び地質構造の広域モデル(概念モデル)を、既存資料等を利用して構築する。」と記載されている。そこで、複数の周辺坑井における物理検層データおよび地層温度データを使用し、滝ノ上層以浅の地層水の塩分濃度を算出し、坑井ごとに深度分布を求め、地質層序と塩分濃度の対応関係を評価した(第2.2-3図)。

^[1] 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, 平成21年8月, p.1 (<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90807a01j.pdf>, 2015/1/28 アクセス)



第 2.2-3 図 地層水の塩分濃度分布断面図

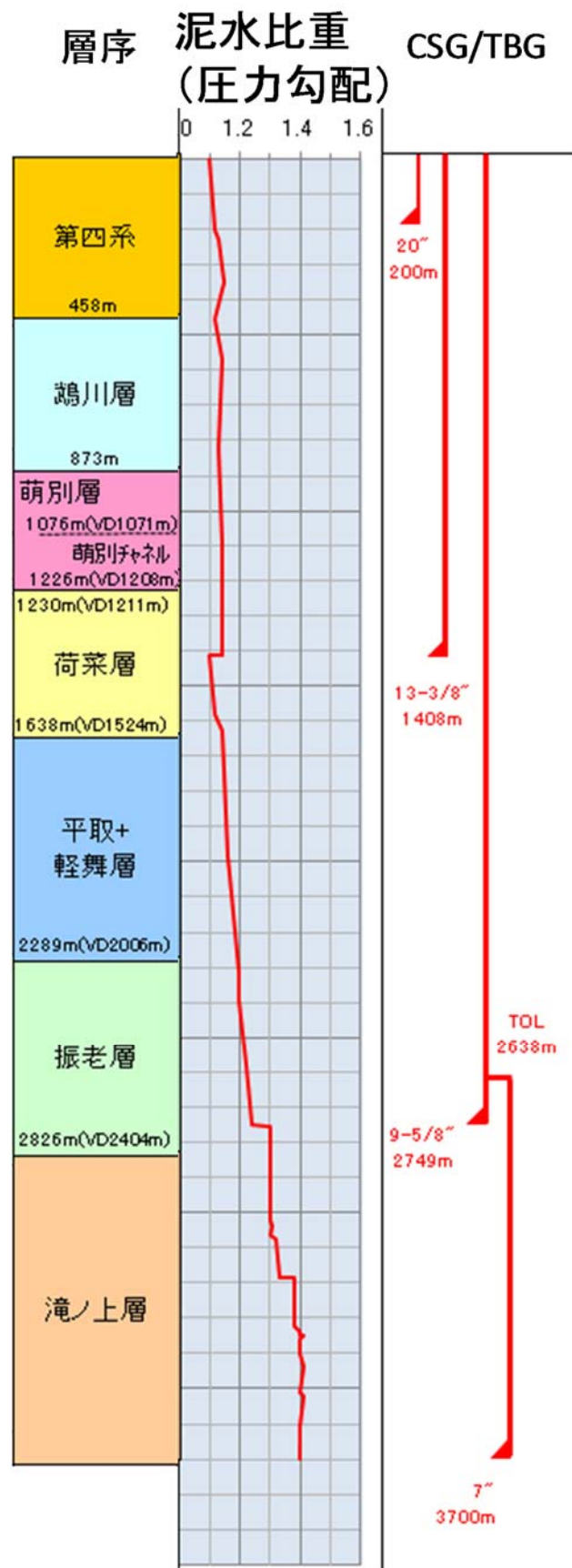
① 萌別層～荷菜層

表層から萌別層上部へは下位に向かって数 100～1,000ppm の範囲で次第に塩分濃度が上昇し、萌別層下部～荷菜層では数 1,000～10,000ppm の範囲で安定した値となり、検討範囲全体にわたって同様の傾向を示し、成層構造をなすことがわかった。鵜川層～萌別層上部の塩分濃度と萌別層下部～荷菜層のそれとは明らかに異なり、成層構造をなすことから、鵜川層と萌別層下部～荷菜層との間には垂直方向への地層水の移動はないと考えられる。

② 滝ノ上層

滝ノ上層の塩分濃度は数 1,000～数 10,000ppm を示し、その上位層の数 1,000～10,000ppm の塩分濃度よりも高く、上位層同様に検討範囲にわたって成層構造をなすことがわかった。

また、滝ノ上層とその上位層の地層圧力を比較するために、苫小牧 CCS-1 (第 2.2 節 (3) ① で後述) の掘削時における泥水比重を対深度でプロットすると、上位層では比重 1.1 前後であるのに対し、滝ノ上層では比重 1.4～1.5 である。滝ノ上層とその上位層との泥水比重が異なるということは、滝ノ上層の地層圧力がその上位層とは異なっていることを示す。すなわち、滝ノ上層とその上位層とで圧力システムが異なり (第 2.2-4 図)、垂直方向の圧力伝播がなく、地層水の移動がないと考えられる。



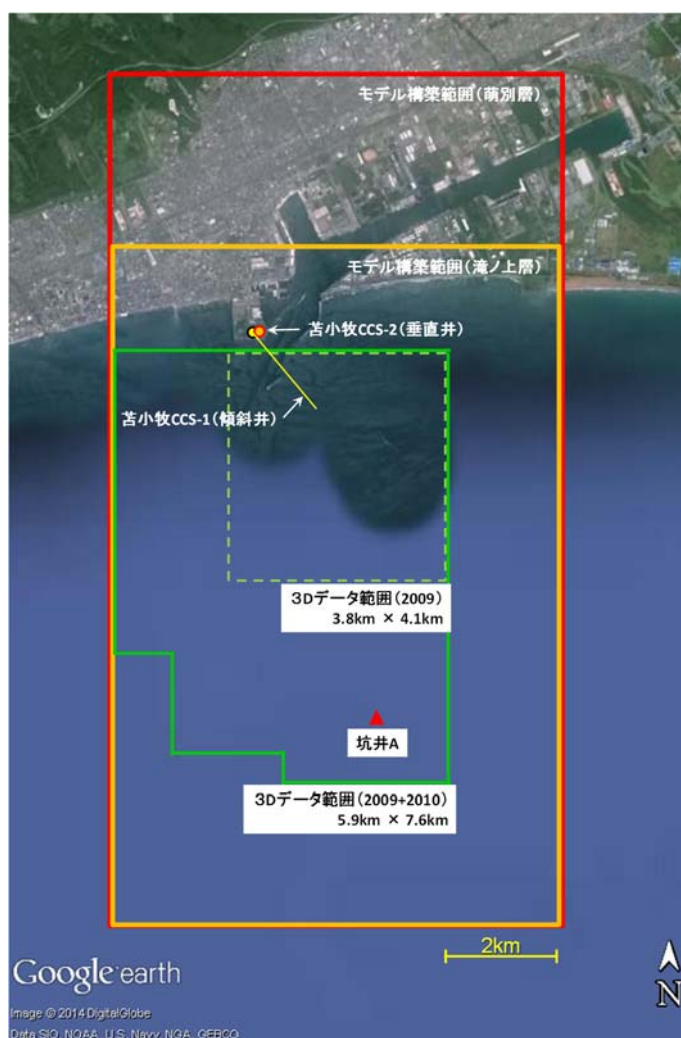
第 2. 2-4 図 苦小牧 CCS-1 における泥水比重の変化図

(3) 当該海域の地質

① 当該地域で実施した調査の概要

調査対象区域の苫小牧港西港区沿岸海域は、これまで石油・天然ガスの探査を目的とした弾性波探査による調査が多くなされており、周辺には深度 3,000m を越える天然ガス開発用の坑井が複数あることから、CO₂ 貯留対象となり得る深部塩水層として、海底面下約 1,000m ～約 3,000m に滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層が存在することが知られていた。

滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層を貯留対象層として本計画を実施するために、既存の地質データに加えて貯留対象地域における詳細な地質データを取得して地下の構造形態を詳細に把握した。これらのデータから地質モデルを構築し、そのモデルを用いたシミュレーションにて特定二酸化炭素ガスの貯留可能性や長期的な移動について評価することを目的として以下の調査を実施し（第 2.2-5 図）、当省において「苫小牧地点における貯留層総合評価書」^[1]をまとめた。



第 2.2-5 図 調査範囲位置図

[1] 経済産業省. 2011. CCS 実証試験実施に向けた専門検討会-とりまとめ, 苫小牧地点における貯留層総合評価, 平成 23 年 10 月 26 日
(https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11094748/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004_s01_00.pdf 2020/8/6 アクセス)

7) 三次元弾性波探査

- ・ 苫小牧港西港区沖合において、東西約 3.8km、南北約 4.1km の範囲（平成 21 年度調査）と、東西約 5.9km、南北約 7.6km の範囲（平成 22 年度調査）で三次元弾性波探査のデータを取得した。
- ・ 平成 21 年度に実施した三次元弾性波探査の調査範囲において、圧入開始後の平成 29 年度に繰り返し三次元弾性波探査を実施した。これらの調査結果から、萌別層中での CO₂ の広がりを考慮した範囲において、平成 30 年度および令和元年度に、繰り返し三次元弾性波探査を実施した。

イ) 調査井

- ・ 平成 22 年度調査（苫小牧 CCS-1）：滝ノ上層および萌別層の調査を目的として苫小牧 CCS-1 を掘削し、物理検層、リークオフテスト（遮蔽層の強度測定）、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層の圧入テスト、垂直弾性波プロファイリング（Vertical Seismic Profiling; VSP）調査等を実施した。
- ・ 平成 23 年度調査（苫小牧 CCS-2）：萌別層の調査を目的として苫小牧 CCS-2 を掘削し、リークオフテストおよびコア試料の採取・分析を実施した。

ウ) 圧入井

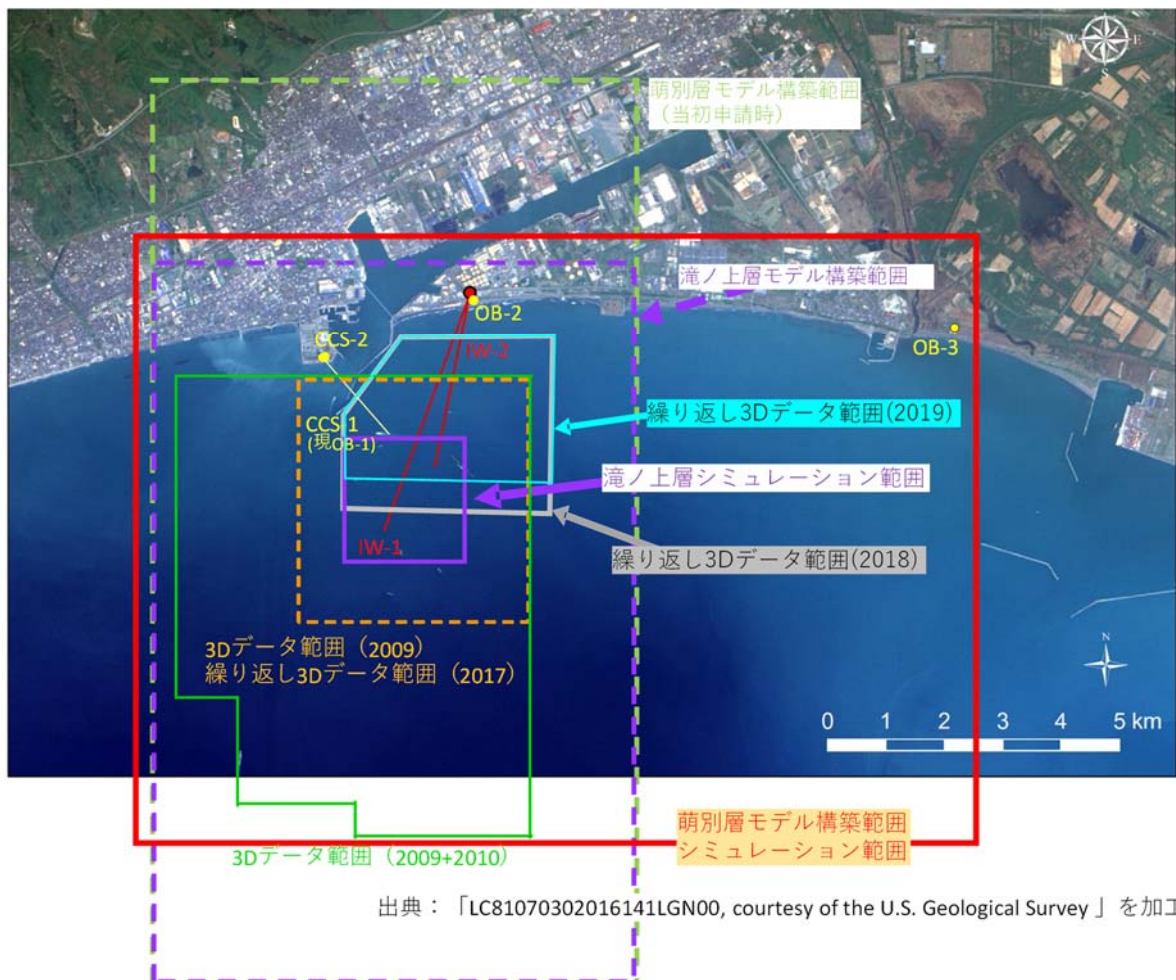
- ・ 平成 26 年 10 月から平成 27 年 2 月にかけて、それまでの調査をもとに掘削位置を選定し、滝ノ上層 T1 部層への特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する滝ノ上層圧入井を掘削した。また、物理検層、リークオフテスト（遮蔽層の強度測定）、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層へのブラインによる圧入テスト等を実施した。
- ・ 平成 27 年 3 月から平成 27 年 6 月にかけて、萌別層砂岩層への特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する萌別層圧入井を掘削した。また、遮蔽層および貯留層の調査を目的として、物理検層、リークオフテスト、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層の圧入テスト等を実施した。

エ) CO₂挙動予測シミュレーション

- ・ 平成 22 年度シミュレーション：周辺の既存坑井データと二次元弾性波データおよび平成 21 年度実施の三次元弾性波探査の結果に基づいて滝ノ上層 T1 部層を圧入対象層とした地質モデル構築と CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。
- ・ 平成 23 年度シミュレーション：平成 22 年度の弾性波探査の結果と、平成 22 年度から平成 23 年度に得られた苫小牧 CCS-1 および苫小牧 CCS-2 での試験結果と試料分析の結果を加えて、滝ノ上層 T1 部層と萌別層砂岩層を圧入対象とした地質モデルを構築し、CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。なお、「苫小牧地点における貯留層総合評価書」^[1]におけるシミュレーション結果は、本シミュレーションに基づいて作成した。

^[1] 経済産業省. 2011. CCS 実証試験実施に向けた専門検討会-とりまとめ, 苫小牧地点における貯留層総合評価, 平成 23 年 10 月 26 日, pp. 第 3 章 4-20, pp. 第 3 章 27-48
(<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11094748/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/00>)

- 平成 24 年度シミュレーション：圧入井掘削予定位置から効率的に圧入井を掘削するための検討を目的として、既存の地質モデルをもとに CO₂ 挙動予測シミュレーションを実施した。
- 平成 27 年度シミュレーション：滝ノ上層 T1 部層への圧入については、圧入井の掘削により、圧入井掘削位置における貯留層の圧入性が極めて低いことが確認された。圧入井で取得したデータをもとに地質モデルを修正し、CO₂ 挙動予測シミュレーションを再実施した。
- 平成 30 年度（暫定）シミュレーション：CO₂ の圧入実績を加味した地質モデルを作成し、CO₂ 挙動予測シミュレーションを再実施した。
- 平成 30 年度シミュレーション：平成 30 年末の CO₂ の圧入実績を加味した地質モデルを作成し、CO₂ 挙動予測シミュレーションを再実施した。
- 令和元年度(2019 年度)シミュレーション：令和元年 11 月までの CO₂ の圧入実績を加味した地質モデルを作成し、CO₂ 挙動予測シミュレーションを再実施した。



第 2.2-6 図 調査範囲および地質モデル作成範囲

② 当該地域で取得したデータおよびその解析結果

解釈・解析に使用したデータを、第 2.2-1 表に示す。

第 2.2-1 表 貯留層評価の使用データ一覧

使用データ	使用方法	データソース
三次元弾性波探査データ	地質構造解釈，地積学的検討，音響インピーダンス等の物性値推定，繰り返し弾性波探査データに差分解析	三次元弾性波探査データ（リファレンスデータ：坑井 A，苫小牧 CCS-1，滝ノ上層圧入井，萌別層圧入井，苫小牧 OB-2）
コア分析データ	岩石学的評価の他，孔隙率，浸透率，相対浸透率，毛細管圧，スレシヨルド圧等の基礎物性値の提供 浸透率－孔隙率相関	周辺坑井，坑井 A，苫小牧 CCS-1，苫小牧 CCS-2，滝ノ上層圧入井，萌別層圧入井，苫小牧 OB-2）
坑井速度測定データ	弾性波データの時間－深度変換	坑井 A，苫小牧 CCS-1
物理検層データ	岩相区分の判定 インピーダンス推定 岩相分布・孔隙率分布の作成	坑井 A，苫小牧 CCS-1，滝ノ上層圧入井，萌別層圧入井，苫小牧 OB-2）
温度・圧力データ	地温勾配 坑底圧力（貯留層および地層破壊圧力）決定	坑井 A，苫小牧 CCS-1，苫小牧 CCS-2，滝ノ上層圧入井，萌別層圧入井，苫小牧 OB-2）
二次元弾性波探査データ	地質構造解釈，堆積学的検討，音響インピーダンス等の物性値推定	陸海域の既存二次元弾性波探査データ

7) 三次元弾性波探査結果解釈の概要

取得した三次元弾性波探査データに加え，民間企業が所有する周辺海域の弾性波探査断面と坑井資料を補助的に利用し，層序のコントロールポイントとして坑井 A（既存の民間井：廃坑済）および苫小牧 CCS-1 を使用して解析作業を実施した。

坑井 A および苫小牧 CCS-1 の層序に従って，下位より「滝ノ上層泥岩層」「滝ノ上層 T1 部層下部」「滝ノ上層 T1 部層上部」「振老層」「平取+軽舞層」「荷菜層」「萌別層」「鶴川層」の計 8 層準に区分し，三次元弾性波探査データにより各層準について岩相と反射波の特徴，各地層境界や地層内における不整合，オンラップ，ダウンラップ等の堆積様式を確認した。

a. 滝ノ上層

滝ノ上層は火山岩/凝灰岩からなる上部の滝ノ上層 T1 部層と下部の泥岩層からなり，さらに滝ノ上層 T1 部層は上部の凝灰岩卓越層と下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層とに分けられる。滝ノ上層 T1 部層は周辺の既存坑井において，浸透率の高い溶岩～凝灰角礫岩・凝灰岩として認められ，その上位には平取+軽舞層，振老層の複数層準にわたる厚い遮蔽層が確認されている。

三次元弾性波探査データでは，滝ノ上層 T1 部層下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層は全体的に強反射で水平方向の連続性が良く，溶岩～凝灰角礫岩の粗粒堆積物が比較的安定して分布していると推定される（第 2.2-7 図および第 2.2-8 図）。滝ノ上層 T1 部層上限（振老層基底）は，北北西～南南東の構造の高まり（背斜構造）を示し，その北端部（沖合約 3km）付近でドーム状の構造を形成している。この構造は火山の噴出口近傍を示している可能性があり，周辺には孔隙率および浸透率が高い粗粒堆積物が堆積していることが期待される。滝ノ上層 T1 部層上限は，構造東翼部では約 15° で北東に傾斜している（第 2.2-8 図）。

b. 萌別層

三次元弾性波探査データでは、本層の上部は連続性が良好ではない弱反射となっており、苫小牧 CCS-1 で確認されたシルト岩～泥岩が発達していると予想される。下部は連続性の良い強反射であることから、坑井 A や苫小牧 CCS-1 で確認された礫岩、砂岩のような粗粒堆積物（粗粒相）の発達予想される。この強反射は南西方向へ薄化して不明瞭になることから、粗粒相は検討海域の北東部を中心に発達していると考えられる。海底面から萌別層までの間では反射波はほぼ平行で、一連の堆積層として識別される（第 2.2-6 図および第 2.2-7 図）。粗粒相発達域（萌別層下部）の上面は、北西から西に約 $1\sim 3^\circ$ で緩く傾斜している（第 2.2-10 図）。

c. 地質構造

調査対象区域の地質構造は、滝ノ上層 T1 部層上限（振老層基底）構造図では北北西方向に延びた背斜構造となっている（第 2.2-9 図）。三次元弾性波探査データから、滝ノ上層上限の背斜構造に沿って北北東-南南西に延び、荷菜層にまで達する断層が存在すると解釈した。断層の落差は一樣ではなく、検討海域の中央付近では若干の落差が認められるが、北部や南部では落差は認められない。背斜頂部付近での削剥様式は振老層基底、平取+軽舞層基底および荷菜層中の傾斜不整合で認められ、振老層堆積前から荷菜層堆積時にかけて断層の活動と背斜構造の形成が断続的に繰り返されたと解釈した。また、萌別層基底にも背斜頂部から東部にかけて傾斜不整合が認められることから、断層の活動は萌別層堆積前まで続いていた可能性がある。

一方、萌別層から第四系にかけては一連の堆積層として認識されること、鵜川層上限の時間構造図では苫小牧沖構造の背斜構造が認められないことおよび鵜川層基底の時間構造図では東の高まりからの構造の張り出しとなっていることから、萌別層堆積時以降は背斜構造を形成するような構造運動はなかったと考えられる（第 2.2-10 図）。