

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	7
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	9
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	11
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	12
2. 地層の特徴に係る事項	13
2.1 広域の地層・地質の特徴	13
(1) テクトニクス概要	13
(2) 北海道周辺の地殻応力分布	14
(3) 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動	14
(4) 苫小牧周辺の活断層	17
2.2 廃棄海域とその近傍の地層/地質の特徴	18
(1) 周辺地域の地質概要	18
(2) 周辺地域の地層水塩分濃度解析による水理地質評価	19
① 萌別層～荷菜層	20
② 滝ノ上層	20
(3) 当該海域の地質	22
① 当該地域で実施した調査の概要	22
ア) 三次元弾性波探査	24
イ) 調査井	24
ウ) 圧入井	24
エ) CO ₂ 挙動予測シミュレーション	24
② 当該地域で取得したデータおよびその解析結果	25
ア) 三次元弾性波探査結果解釈の概要	25
a. 滝ノ上層	25
b. 萌別層	26
c. 地質構造	26
イ) 苫小牧 CCS-1 の解析結果の概要	31

ウ)	苦小牧 CCS-2 の解析結果の概要	33
エ)	圧入井の解析結果の概要	33
オ)	解析結果	34
③	地質モデルの作成	37
ア)	滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成 (圧入井掘削前)	37
a.	岩相分布・性状分布の推定	37
b.	構造モデルの作成	38
c.	属性モデルの作成	42
イ)	滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成 (圧入井掘削結果を踏まえた更新モデル)	42
a.	滝ノ上層圧入井掘削結果	42
b.	掘削時のブラインによる圧入テスト等の 貯留層に係るテスト結果とその見直し	44
i)	掘削時の貯留層に係るテスト	44
ii)	貯留層に係るテスト結果の見直し	45
c.	岩相分布・性状分布推定の更新	45
d.	構造モデルの更新	49
e.	属性モデルの更新	49
ウ)	萌別層砂岩層用の地質モデルの作成	50
a.	岩相分布・性状分布の推定	50
b.	構造モデルの作成	51
c.	属性モデルの作成	54
④	CO ₂ 挙動予測シミュレーション	55
ア)	滝ノ上層 T1 部層における CO ₂ 挙動予測 (圧入井掘削前)	55
a.	概要	55
b.	パラメータ	55
c.	CO ₂ 圧入時の挙動	56
d.	貯留層圧力分布	60
e.	シミュレーションによる貯留 CO ₂ の長期挙動予測	62
f.	圧入に伴う貯留層内の CO ₂ 分布予測	62
イ)	滝ノ上層 T1 部層における CO ₂ 挙動予測 (圧入井掘削結果を踏まえた予測)	69
a.	概要	69
b.	パラメータ	70
c.	CO ₂ 圧入時の挙動	71
d.	貯留層圧力分布	72
e.	圧入に伴う貯留層内の CO ₂ 分布予測 (貯留 CO ₂ の長期挙動予測)	73
f.	CO ₂ の貯留形態ごとの割合	76

ウ) 萌別層砂岩層における CO ₂ 挙動予測	76
a. 概要	76
b. パラメータ	77
c. ケーススタディ	79
d. CO ₂ 圧入時の挙動	80
e. 貯留層圧力分布	82
f. 圧入に伴う貯留層内の CO ₂ 分布予測	85
g. 遮蔽性能検討	93
h. CO ₂ の貯留形態ごとの割合	99
2.3 鉱業権の設定または出願の状況について	100
3. 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスの潜在的な移動及び	
漏出の経路の推定結果に係る事項	101
3.1 特定二酸化炭素ガスと地層やシール層の成分との相互作用	101
(1) 滝ノ上層 T1 部層	101
(2) 萌別層砂岩層	104
3.2 CO ₂ 漏出の可能性検討	107
(1) CO ₂ 漏出要因の洗い出し	107
(2) CO ₂ 漏出要因に関する検討のまとめ	109
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	111
4.1 海底下廃棄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	111
(1) 滝ノ上層 T1 部層中での空間的な広がり	111
① 地質モデル	111
② CO ₂ の平面的な分布範囲	115
③ CO ₂ の垂直的な分布範囲	118
(2) 萌別層砂岩中での空間的な広がり	119
① 地質モデル	119
② CO ₂ の平面的な分布範囲	122
③ CO ₂ の垂直的な分布範囲	124
4.2 特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項	132
(1) 滝ノ上層 T1 部層	132
① CO ₂ の貯留領域面積 (CO ₂ 貯留領域の水平投影面積)	132
② 平均層厚 (CO ₂ 貯留領域の鉛直方向の平均長)	133
③ 有効孔隙率	133
④ CO ₂ 貯留飽和度の最大値	133
⑤ 貯留状態での平均 CO ₂ 密度	133
⑥ 収容量	134
⑦ 期間内計画圧入量が適切であることの確認	135

ア) 収容量	135
イ) 期間内推定圧入可能量	135
ウ) 期間内計画圧入量	135
(2) 萌別層砂岩層	136
① CO ₂ の貯留領域面積 (CO ₂ 貯留領域の水平投影面積)	136
② 平均層厚 (CO ₂ 貯留領域の鉛直方向の平均長)	136
③ 有効孔隙率	137
④ CO ₂ 貯留飽和度の最大値	137
⑤ 貯留状態での平均CO ₂ 密度	138
⑥ 収容量	138
⑦ 期間内計画圧入量が適切であることの確認	140
ア) 収容量	140
イ) 期間内推定圧入可能量	140
ウ) 期間内計画圧入量	141
5. 海底下廃棄をする海域の海洋環境の特徴に係る事項	142

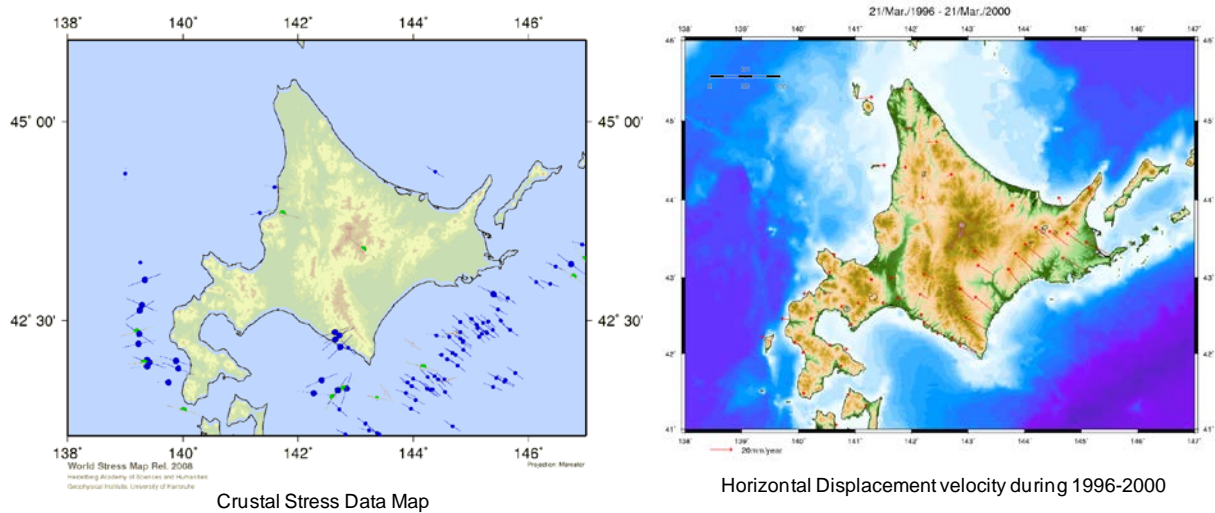
1. 海底下廃棄をする海域の海底下廃棄許可省令第2条において定める基準への適合

環境省令第23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。

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 1. 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 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—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 20mm 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、地殻変位速度ベクトルと調和的である。

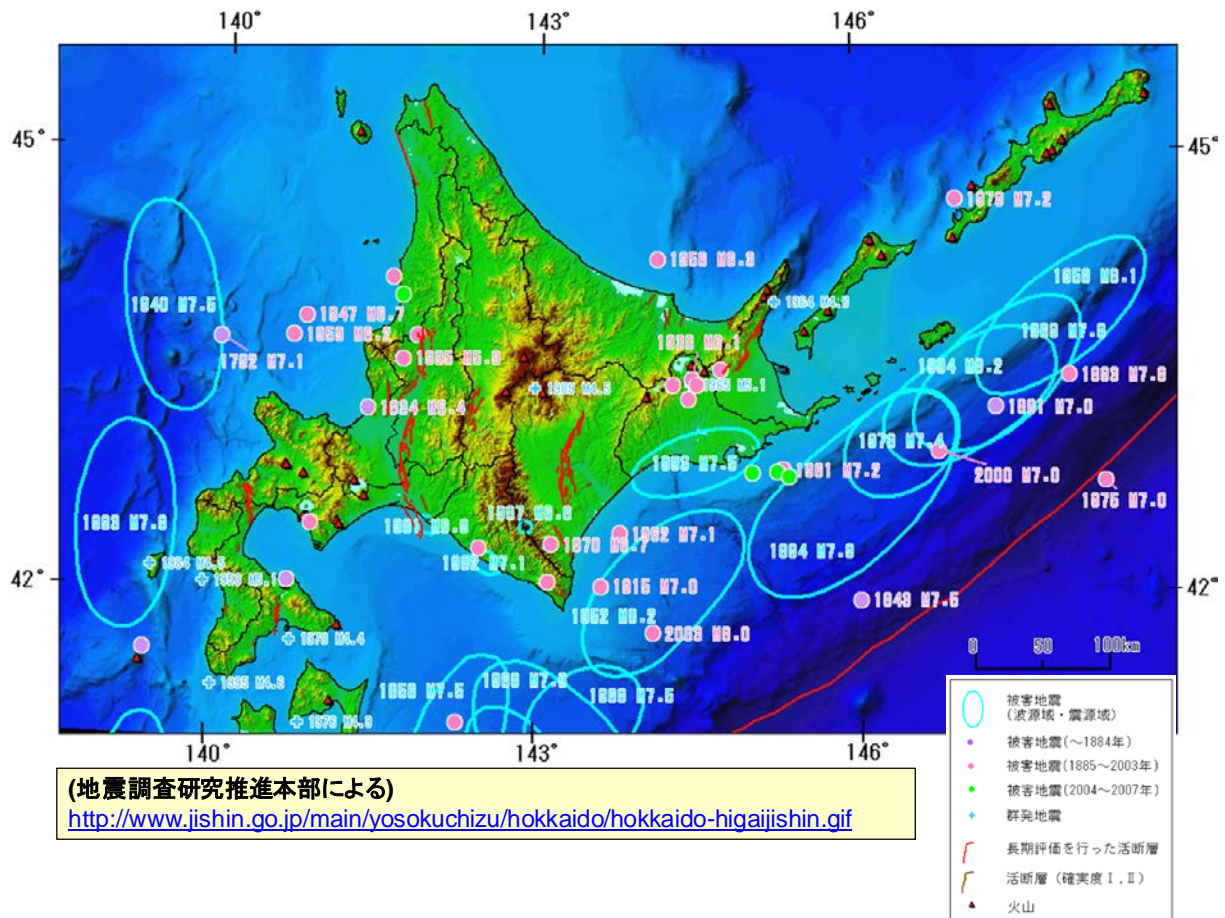
石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧—室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。

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確認されなかった。

^[1] World Stress Map (<http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>, 2015/1/28 アクセス)

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

北海道周辺には、深部（100km以深）の海溝型（プレート境界型）と浅部（20～40km以浅）の内陸地震の2タイプの地震活動があり、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1.2-1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。



第1.2-1図 北海道周辺の地震活動

苫小牧周辺における現在の地震活動を、第1.2-2図に示す。

震源分布断面図からは、地下深部（100km以深）の海溝型（プレート境界型）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。平面分布図から、圧入想定地点周辺の地震活動度は、他の地域の活動度とほとんど差異はないことがわかる。

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ヵ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。

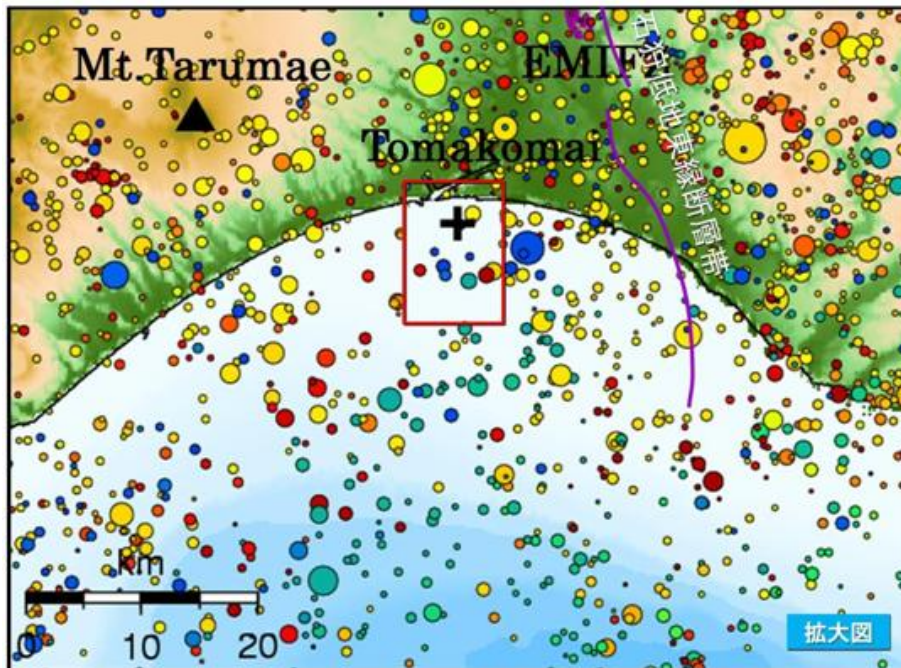
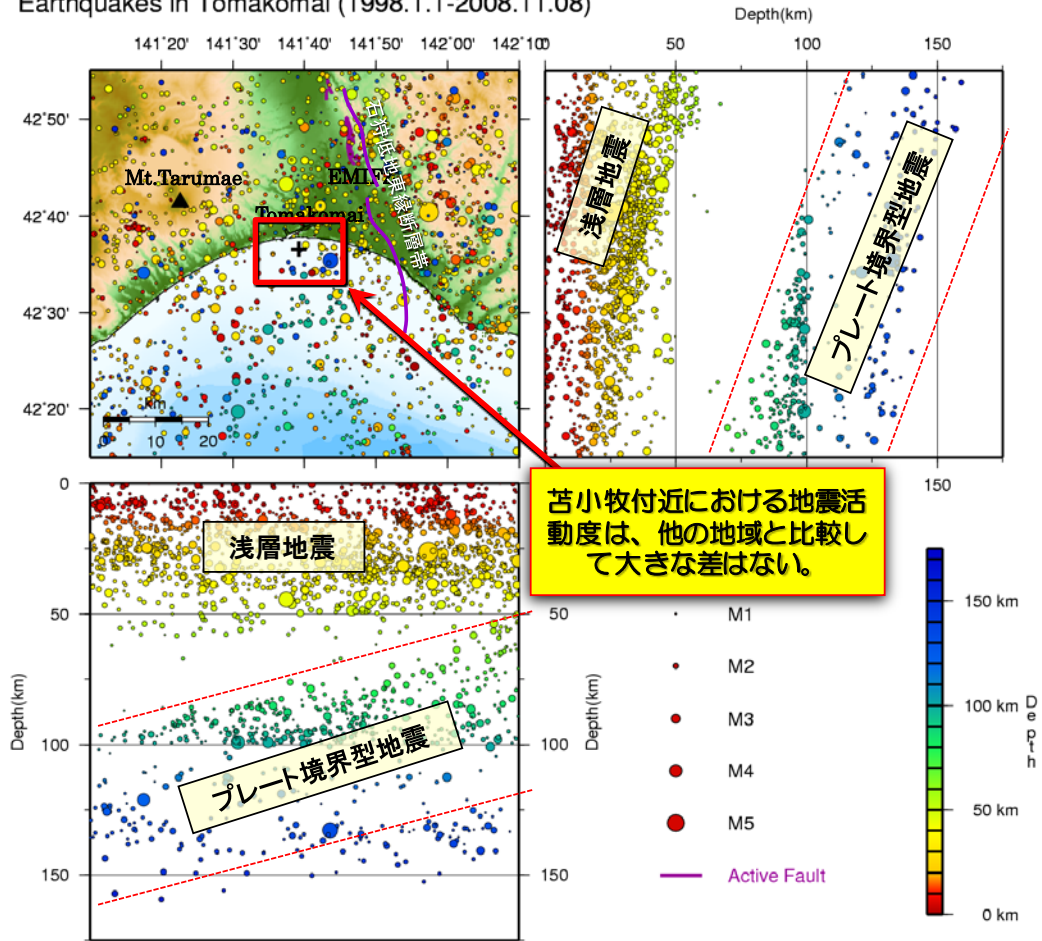
また、北海道地方の活断層のほとんどは逆断層であり、北海道の中央部がほぼ東西方向に圧

縮されている。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。

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。圧入地点からは20km以上あり、十分離れている（詳細については、第2.1節(4)参照）。

上記より、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た。

Earthquakes in Tomakomai (1998.1.1-2008.11.08)

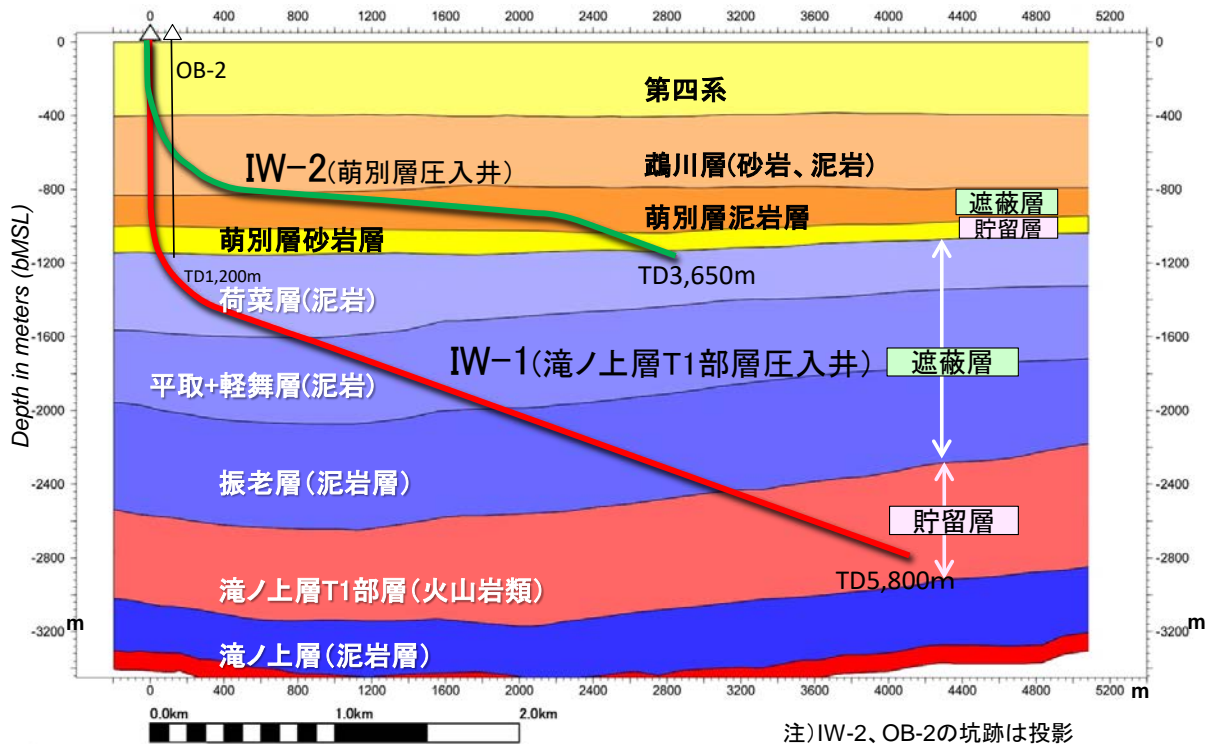


注：1998年～2008年，M>1。赤枠内は，調査範囲。

第 1.2-2 図 苫小牧周辺の最近の地震活動

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

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 以上および $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ 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 997 年間 (圧入開始から 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 CO_2 および溶解 CO_2 の広がり は 滝ノ上層圧入井 から 200m の区間。
- ・ CO_2 は, 遮蔽層へ到達しない。

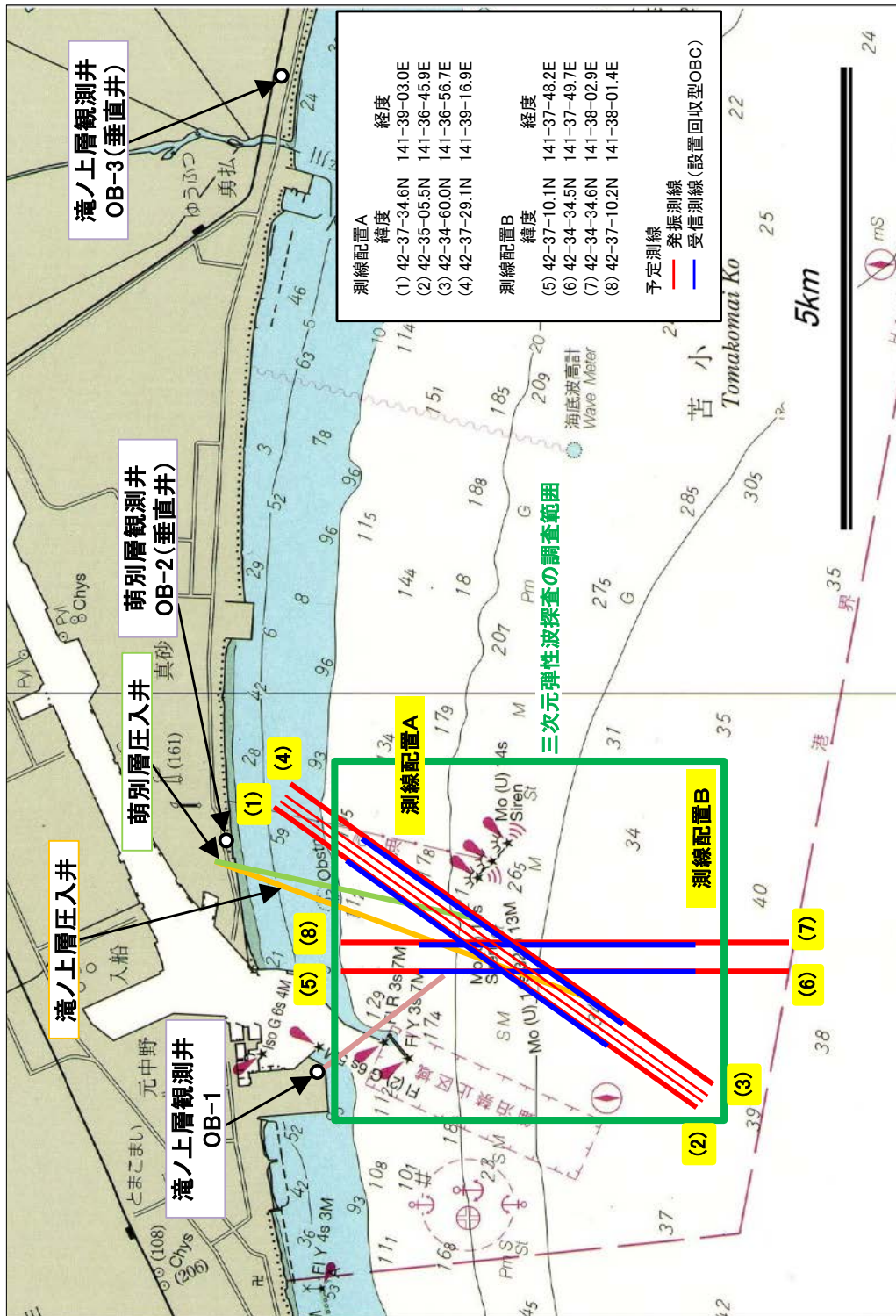
2) 萌別層砂岩層

- ・気相 CO₂の広がり、水平方向に東西 400m 程度、南北 600m 程度。また、溶解 CO₂の広がり、東西 400m 程度、南北 600m 程度。
- ・遮蔽層へは、遮蔽層の下限（のセル）には溶解 CO₂の状態では存在するが、それより上位へは移動しない。

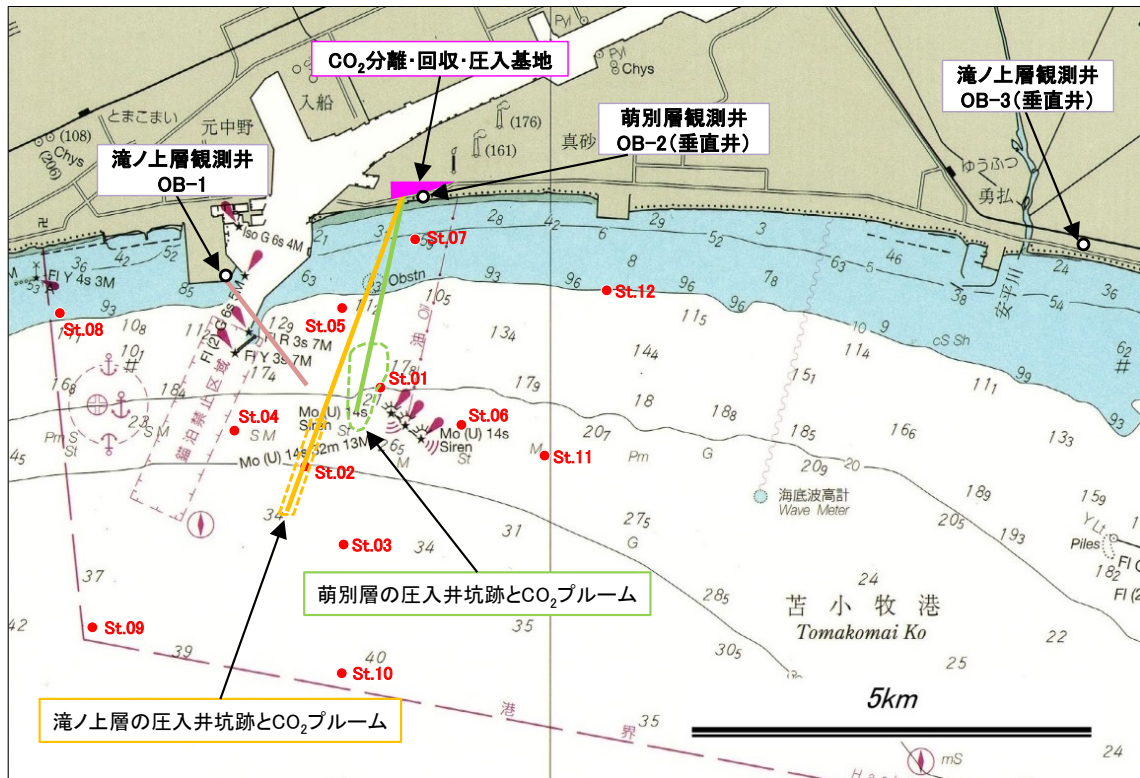
上記より、当該海域は、特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する。

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。それぞれの調査海域を第1.4-1図および第1.4-2図に示す。



注：海上保安庁発行の海図（W1034）に加筆
 第1.4-1図 弾性波探査（三次元と二次元）の調査位置



第 1.4-2 図 海水の化学的性状の調査海域と測点位置（赤点：St. 01～12）および CO₂分離・回収・圧入基地の位置

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、海草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（マイオベントス、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]-[8]}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（添付書類-3「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] 『国立公園』（環境省ウェブサイト：<http://www.env.go.jp/park/index.html>, 2014/10/17 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>, 2014/10/17 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>）

[4] 『苫小牧市自然環境保全地区』（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/yachohogo/hozenchiku/tomakomai_hozenchiku.html, 2014/10/17 アクセス）

[5] 『平成 25 年度鳥獣保護区等位置図』（北海道, 2013 年）

[6] 『第 4 回自然環境保全基礎調査』（環境庁, 1994 年）

[7] 『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#q3, 2014/10/17 アクセス）

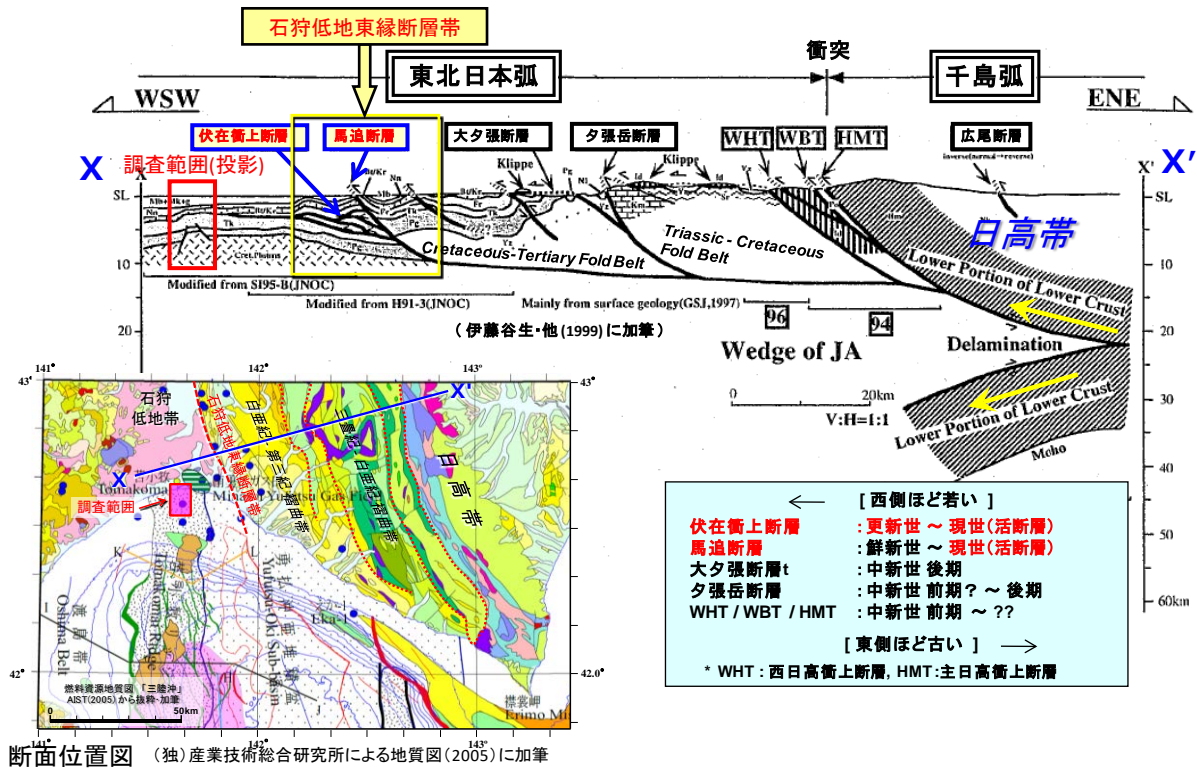
[8] 『西太平洋の化学合成生態系』（独立行政法人海洋研究開発機構ウェブサイト：<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/XBR0/eco/project/busshitsu/shinkai/onsen2.html>, 2014/10/17 アクセス）

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－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]。

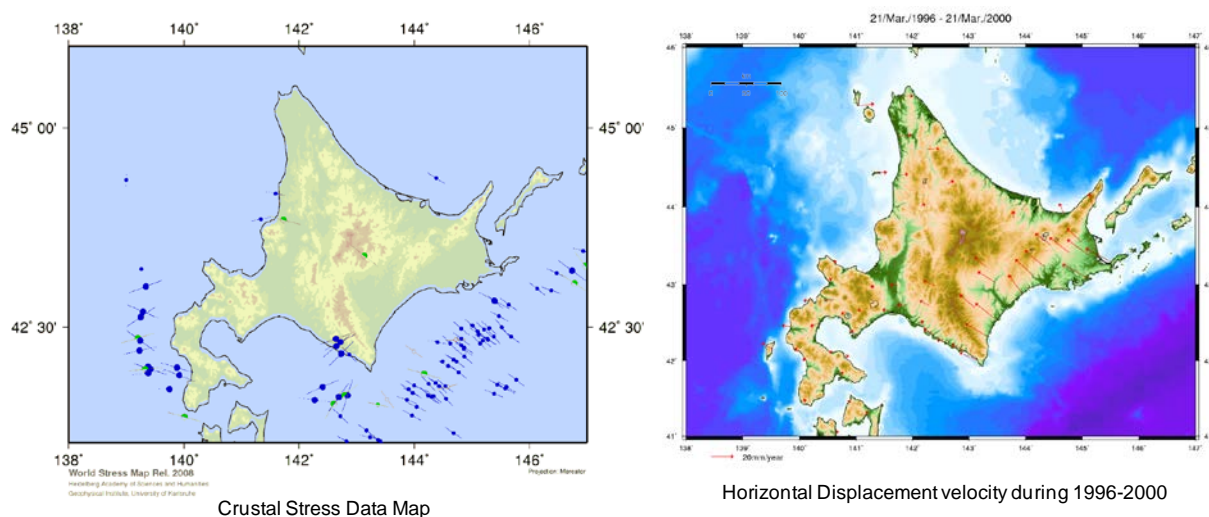
広域の地質構造的な特徴は、以下のとおり要約できる。

- ・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。

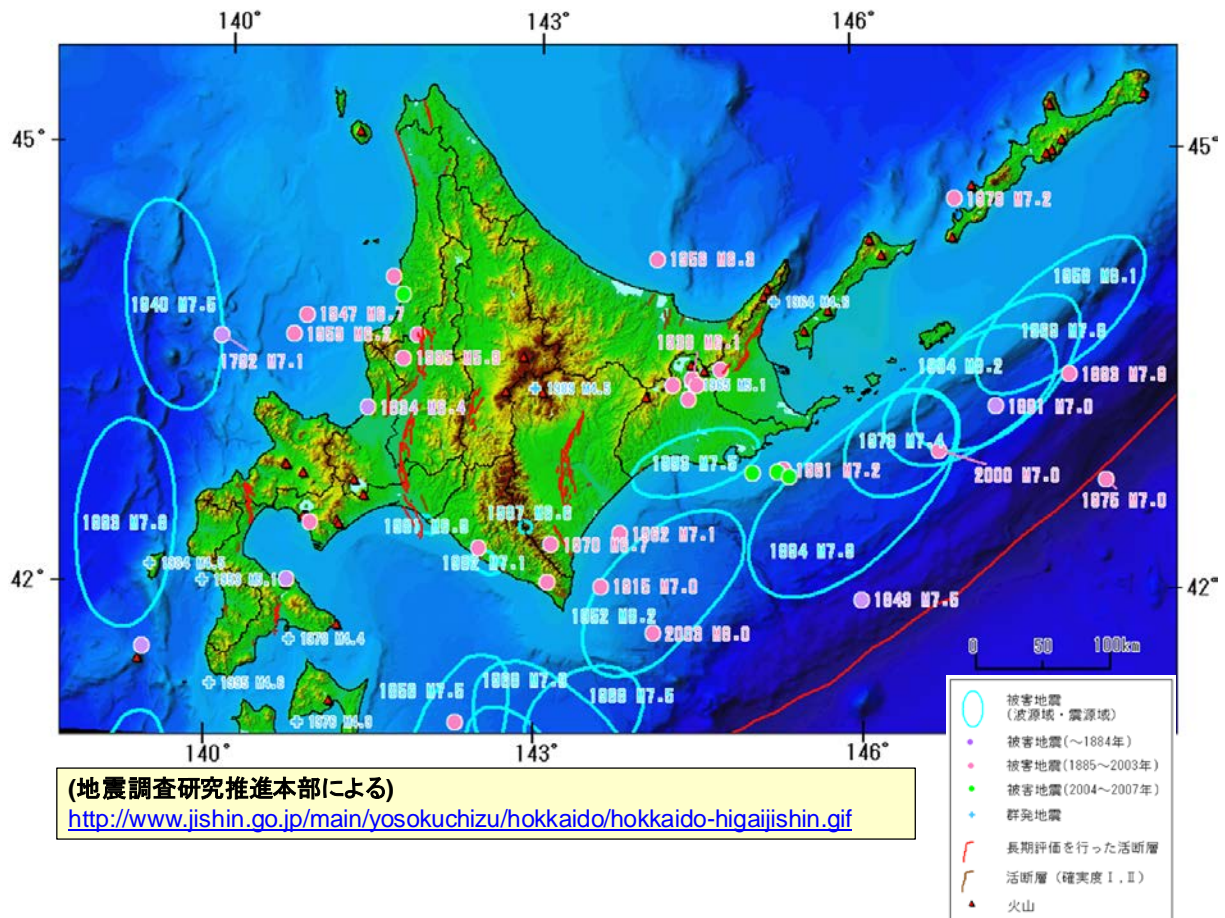
北海道南東部一日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間 20mm 以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

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。

(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、深部 (100km 以深) の海溝型 (プレート境界型) と浅部 (20~40km 以浅) の内陸地震の 2 タイプの地震活動があり、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/>, 2015/1/28 アクセス)



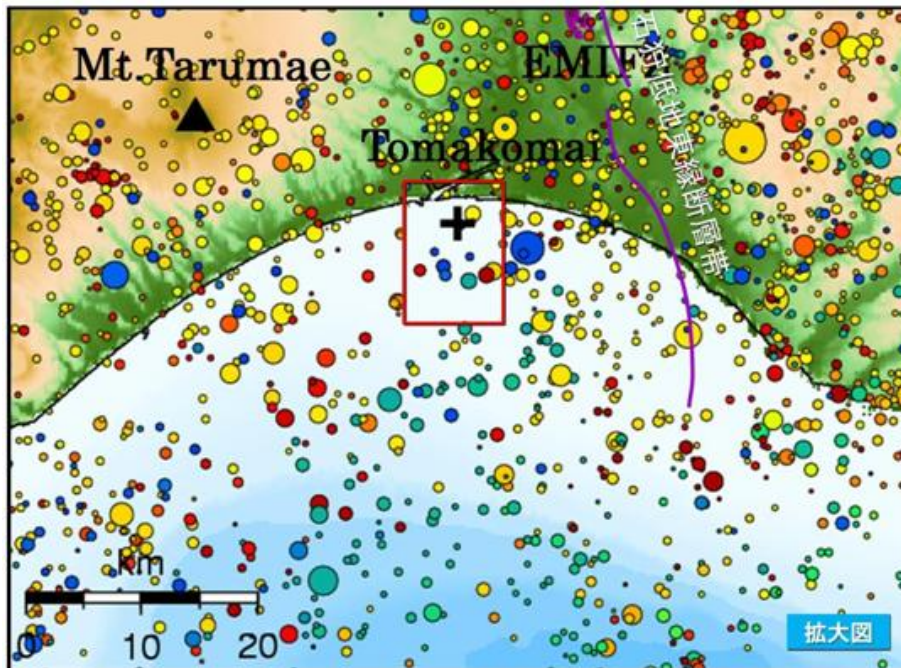
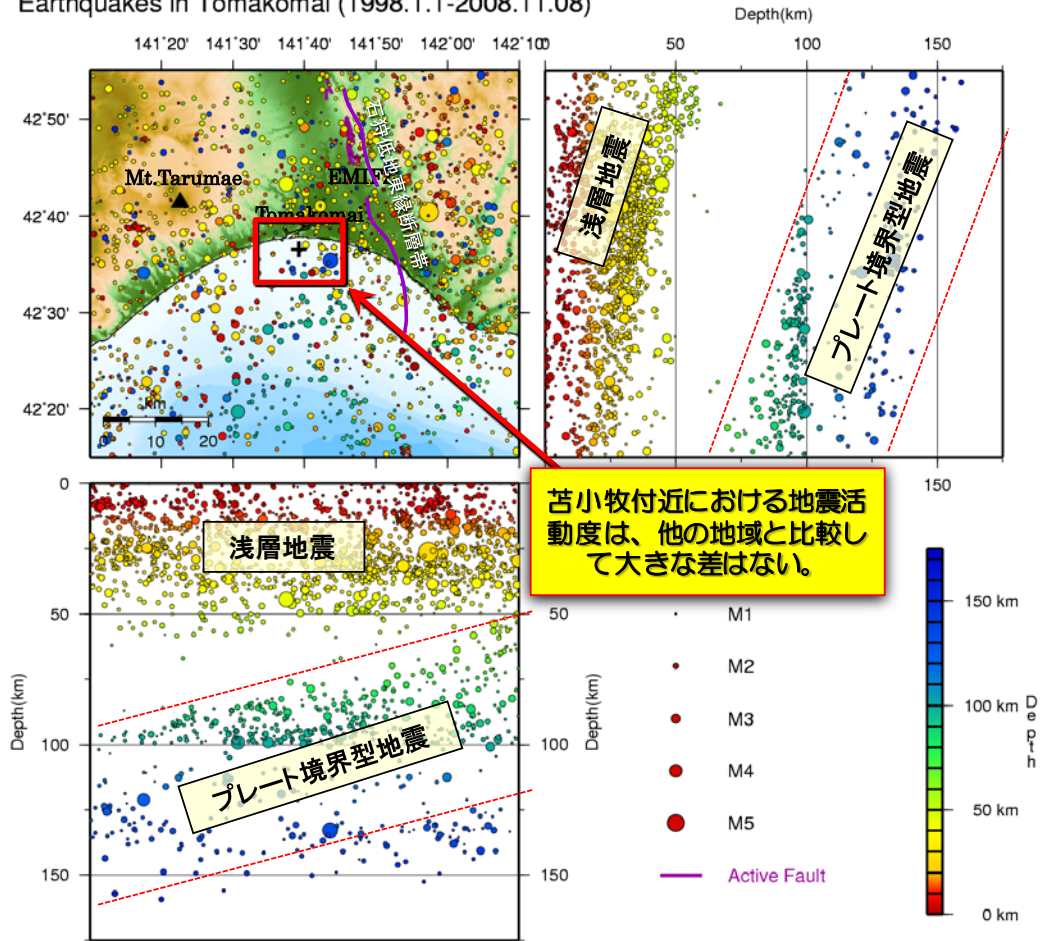
第 2.1-3 図 北海道周辺の地震活動

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、地下深部（100km 以深）の海溝型（プレート境界型）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。平面分布図から、圧入想定地点周辺の地震活動度は、他の地域の活動度とほとんど差異はないことがわかる。

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。

Earthquakes in Tomakomai (1998.1.1-2008.11.08)



注：1998年～2008年，M>1。赤枠内は，調査範囲。

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。

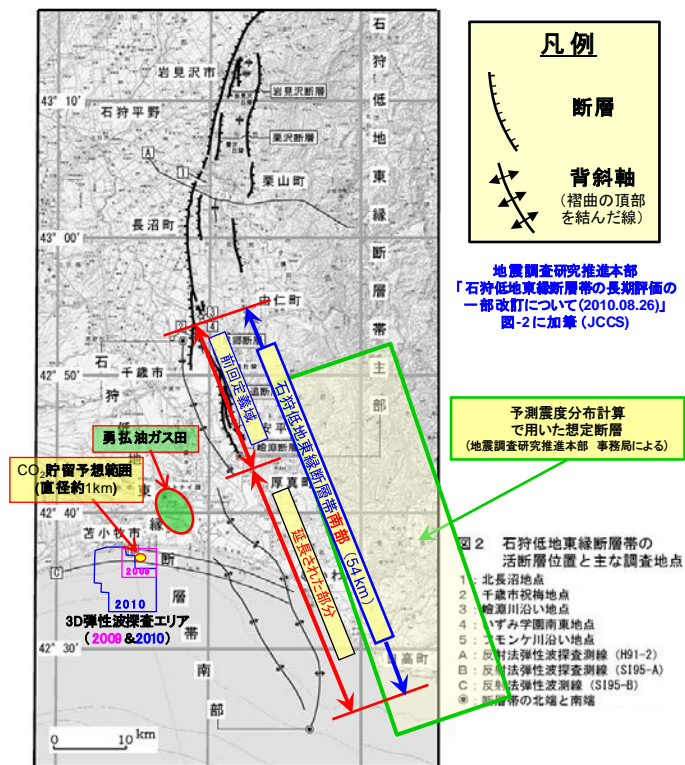
北海道地方の活断層のほとんどは逆断層であり、北海道の中央部がほぼ東西方向に圧縮されていることを示している。地殻変動観測からもおおむね西北西－東南東方向の圧縮場にあることがわかる（第 2.1-2 図）。

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

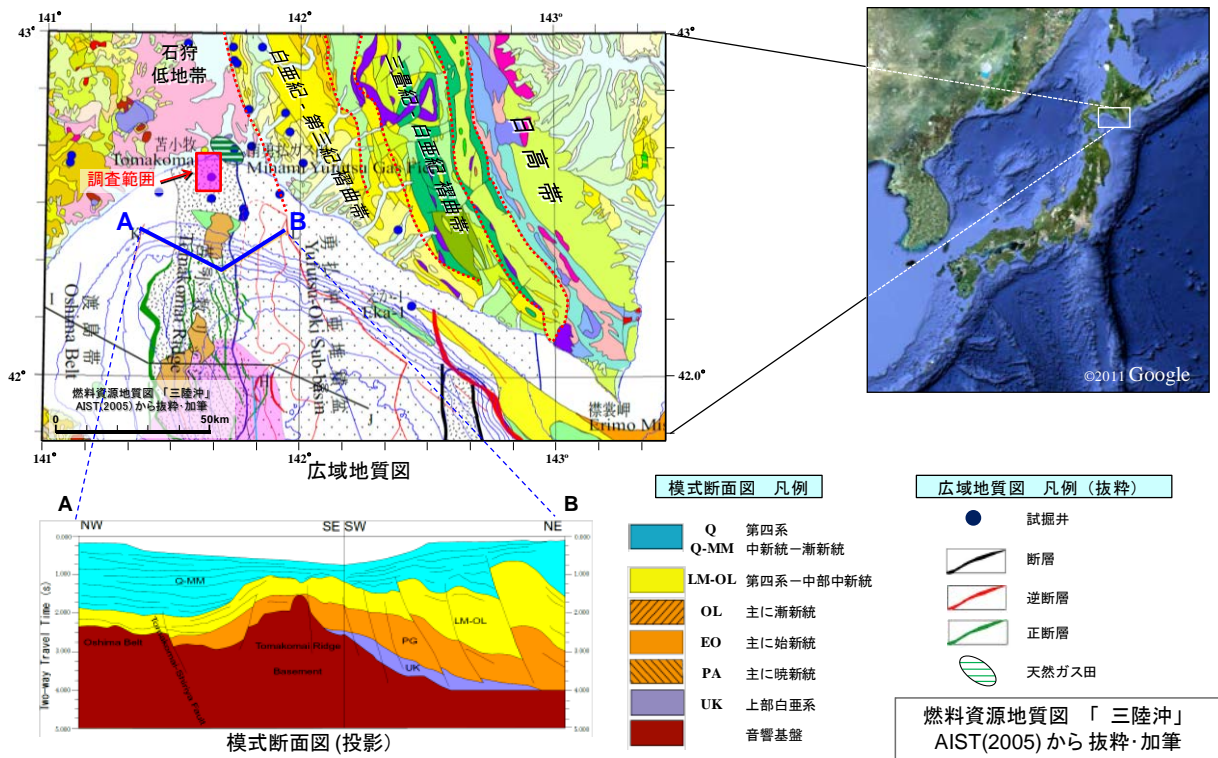
(1) 周辺地域の地質概要

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。

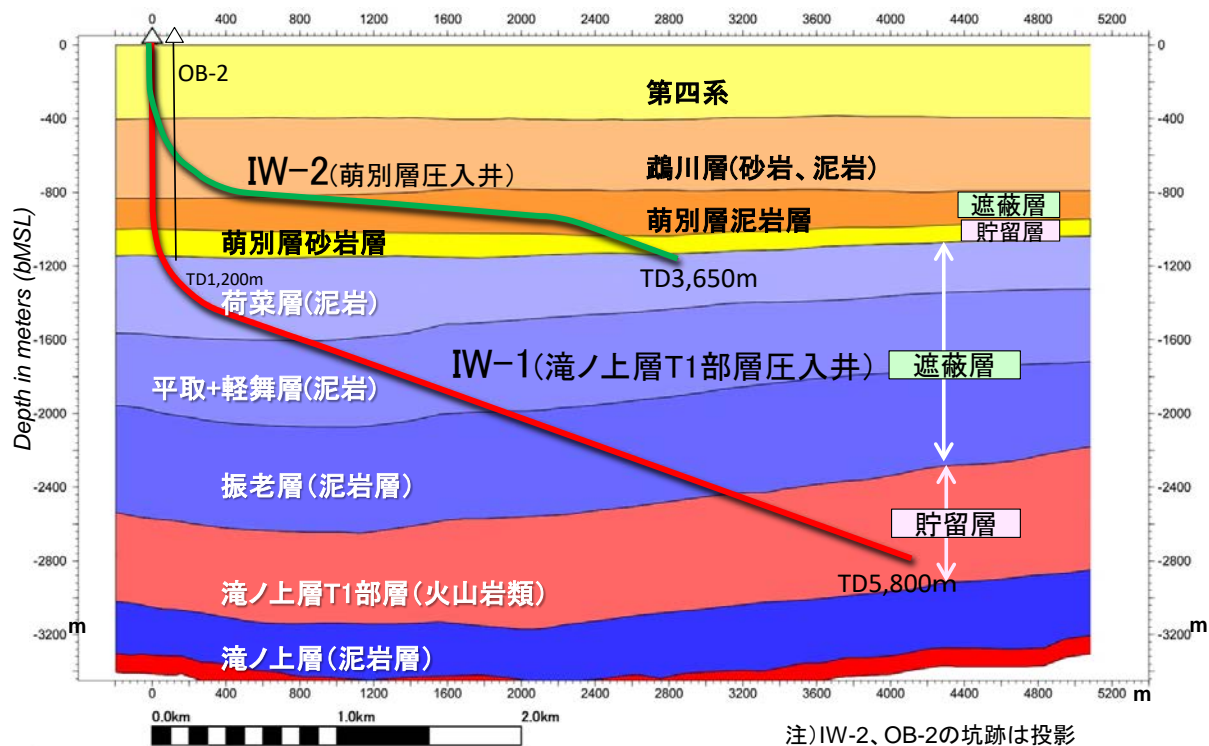
調査区域は、苫小牧リッジと呼ばれる中生代火山岩類の基盤岩の隆起帯に位置しており、基盤の上位の古第三紀以降の様々な構造場のもとで形成された堆積盆に、古第三系、新第三系および第四系が認められる（第 2.2-1 図）。調査区域では、古第三系の上位に、下位より

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

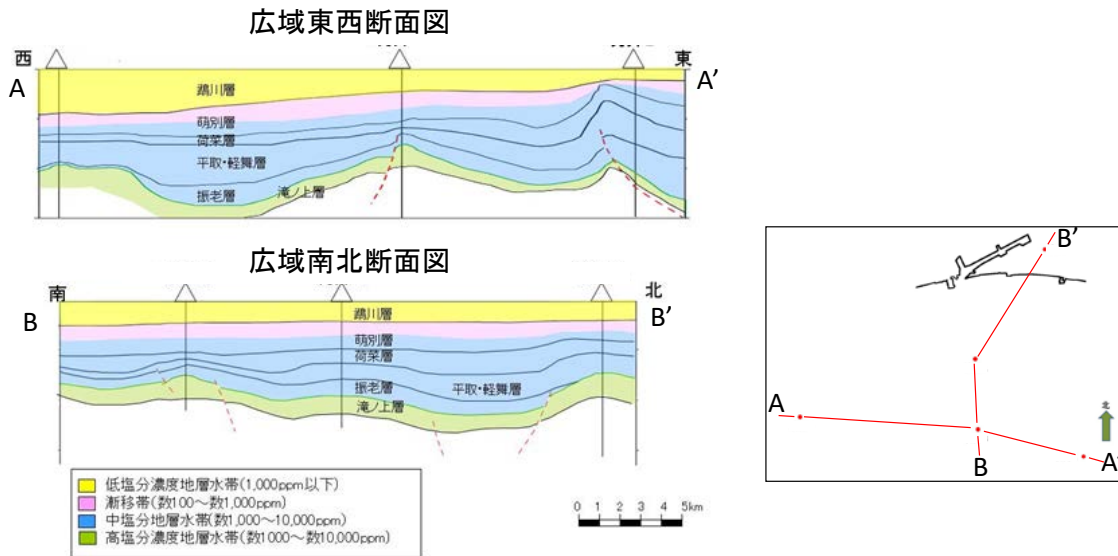


第 2. 2-2 図 苫小牧地点の層序

(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

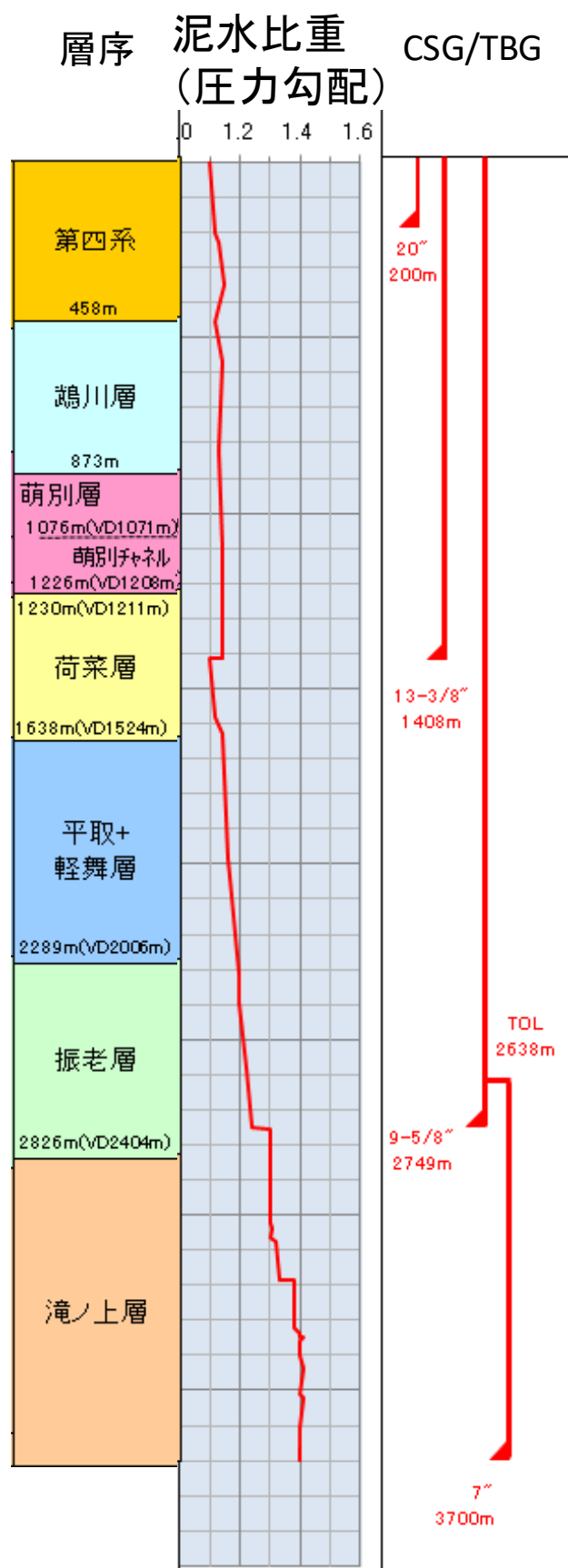
① 萌別層～苜菜層

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～苜菜層では数 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～苜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～苜菜層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

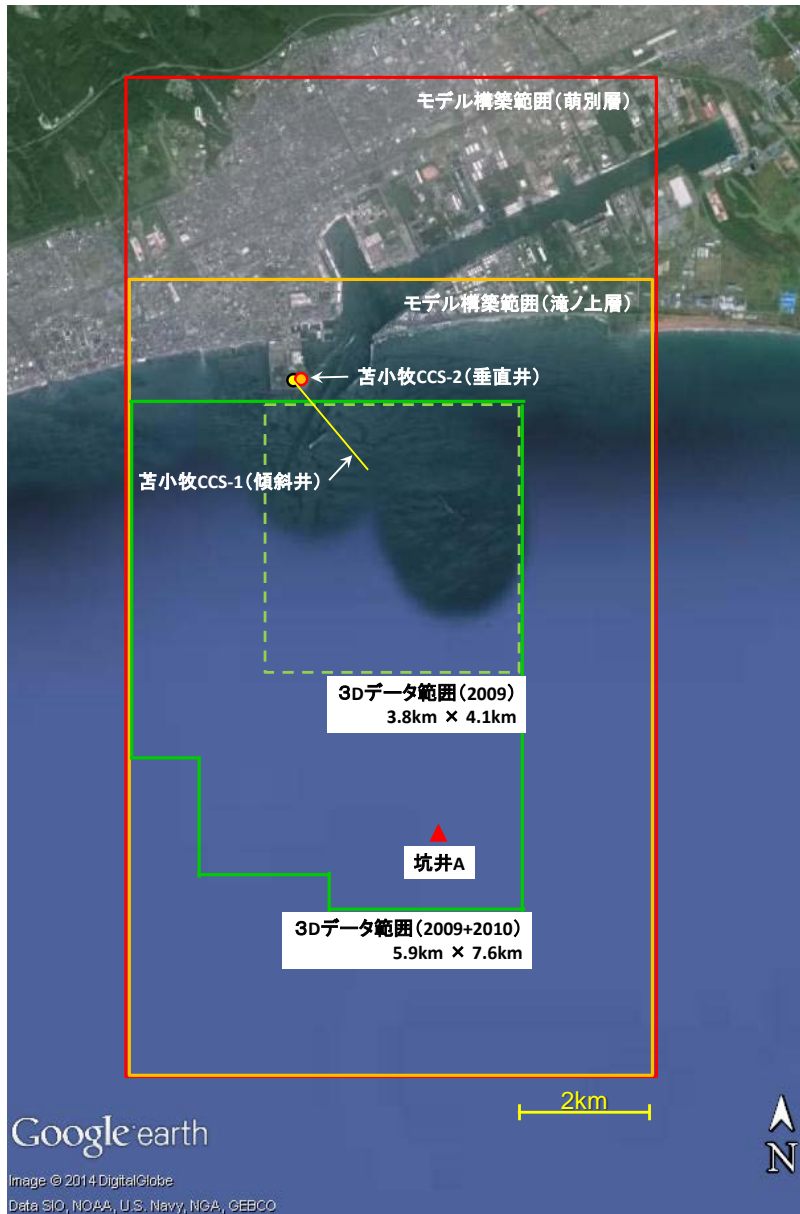
(3) 当該海域の地質

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。

^[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 (http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001_s01.pdf, 2015/1/28 アクセス)



第 2. 2-5 図 調査範囲位置図

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。

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。

ロ) 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。

イ) 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。
- ・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。

^[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
(http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001_s01.pdf, 2015/11/16 アクセス)

- 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。

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	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）
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
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
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
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 2.2-6 図および第 2.2-7 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）。

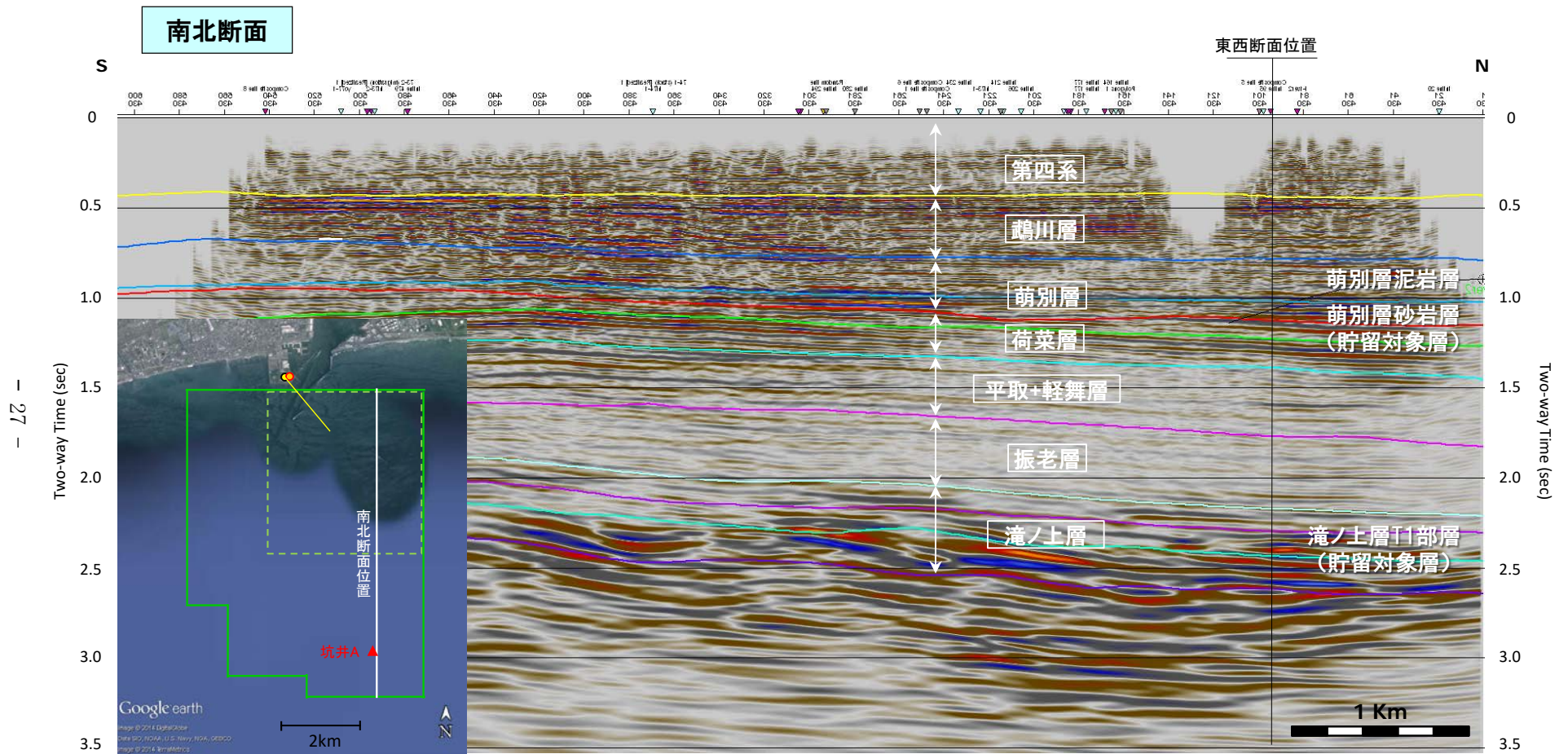
b. 萌別層

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）の発達と予想される。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 1～3° で緩く傾斜している（第 2.2-9 図）。

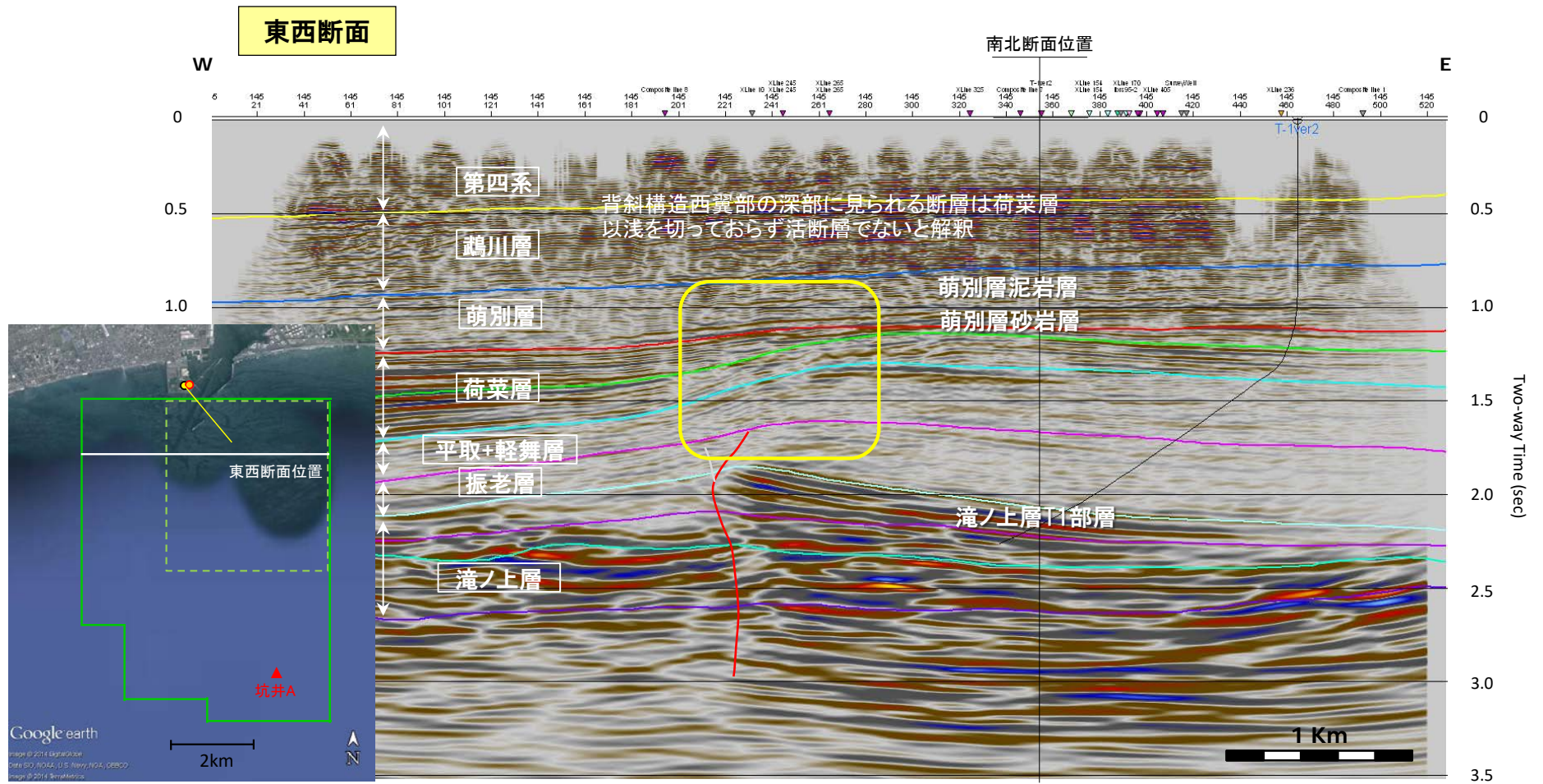
c. 地質構造

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 2.2-8 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。

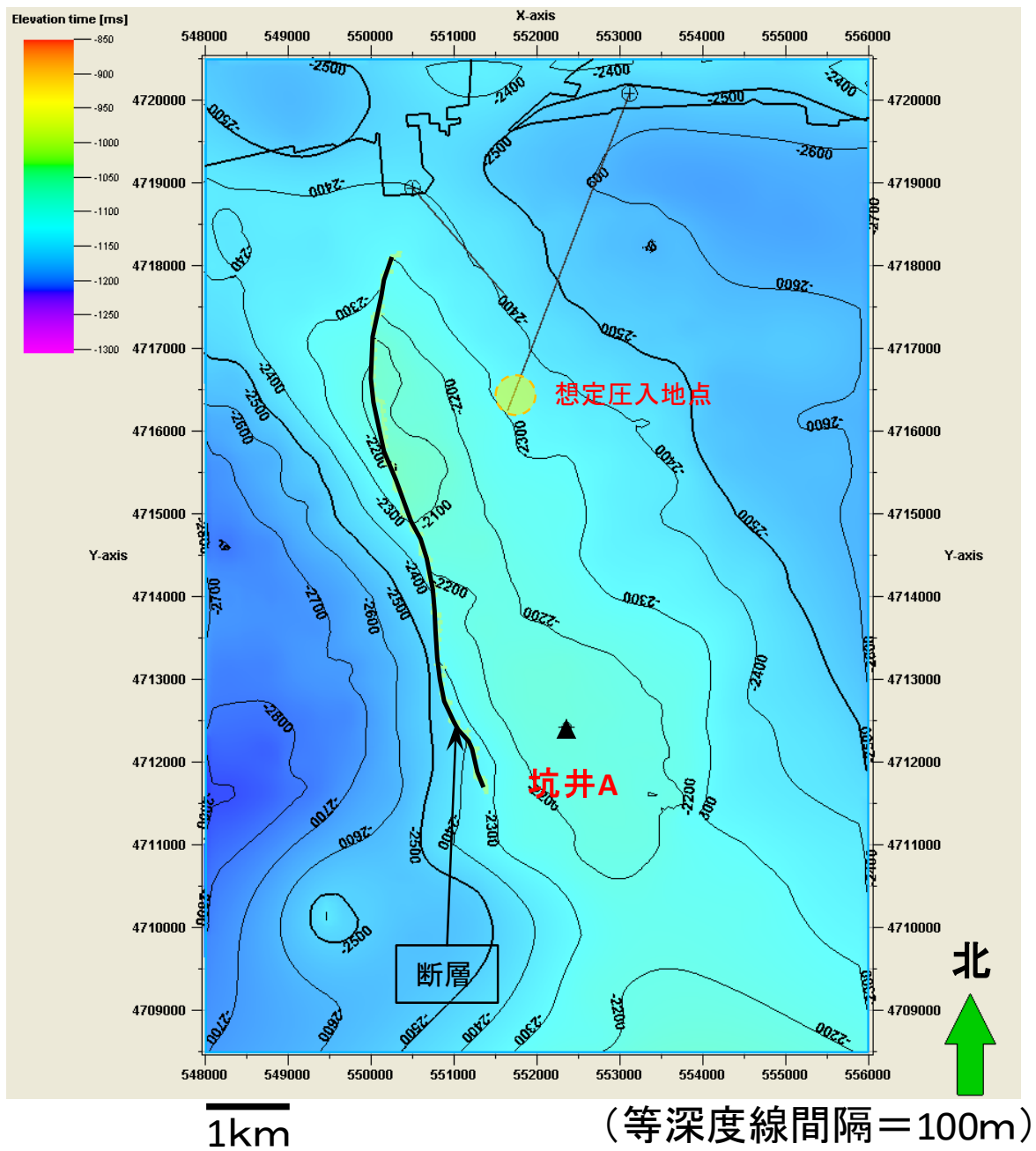
一方、萌別層から第四系にかけては一連の堆積層として認識されること、鵜川層上限の時間構造図では苫小牧沖構造の背斜構造が認められないことおよび鵜川層基底の時間構造図では東の高まりからの構造の張り出しとなっていることから、萌別層堆積時以降は背斜構造を形成するような構造運動はなかったと考えられる（第 2.2-9 図）。



第 2. 2-6 図 三次元弾性波探査結果解釈断面図（南北断面）

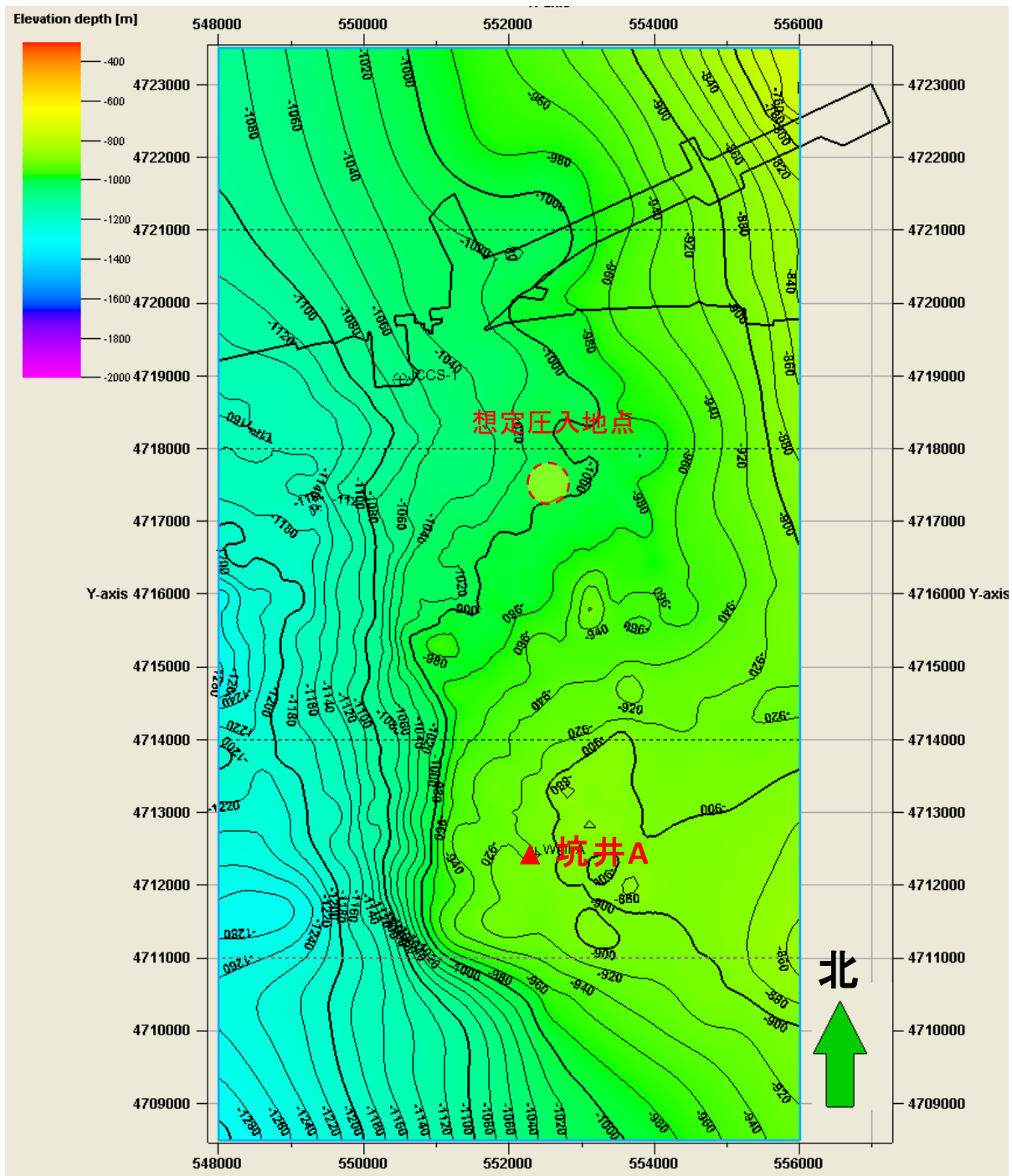


第 2.2-7 図 三次元弾性波探査結果解釈断面図（東西断面）



注：図中の X 軸および Y 軸は、世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標。

第 2.2-8 図 滝ノ上層 T1 部層上限構造図



1km (等深度線間隔=20m)

注: 図中の X 軸および Y 軸は, 世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標。

第 2.2-9 図 萌別層砂岩層上限構造図

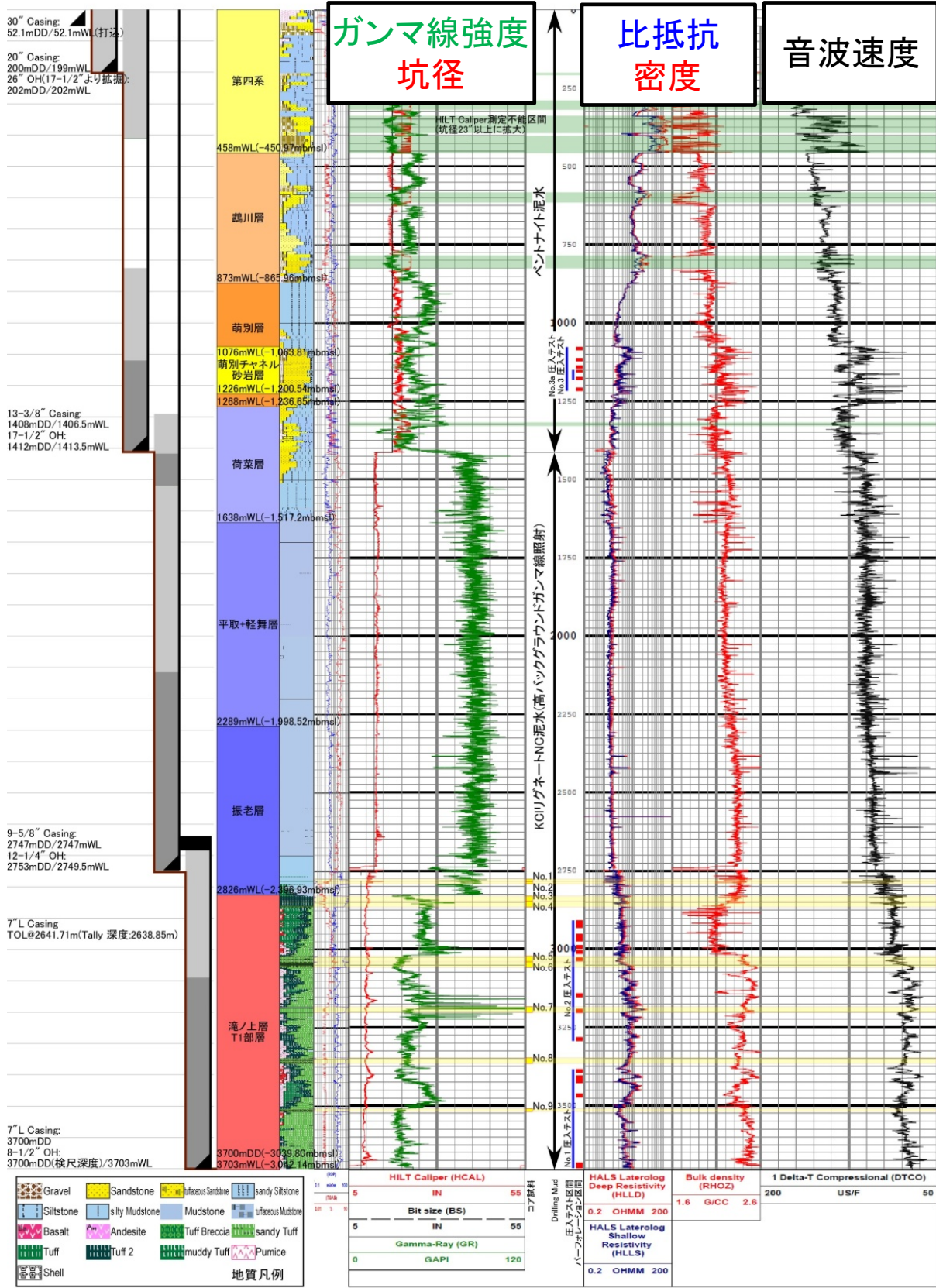
イ) 苫小牧 CCS-1 の解析結果の概要

本井は、平成 22 年 11 月 5 日から平成 23 年 2 月 21 日までの 109 日間において、深度 3,700m (垂直深度 3,046m) の傾斜井として掘削した。確認層序を、第 2.2-2 表に示す。

第 2.2-2 表 調査井における確認層序と岩相

地層名	掘削深度 mMD (垂直深度 mVD)		岩 相
第四系	0	- 458	未固結砂礫等。
鵜川層	458	- 873	砂礫岩を主体とし、シルト岩を伴う。
萌別層泥岩	873	- 1,076 (1,071)	上部はシルト岩～泥岩主体とする。
萌別層砂岩	1,076 (1,071)	- 1,230 (1,211)	砂岩を主体とする。
荷菜層	1,230 (1,211)	- 1,638 (1,524)	砂岩、シルト岩を主体とし、細礫岩、凝灰岩を伴う。
平取+軽舞層	1,638 (1,524)	- 2,289 (2,006)	泥岩を主体とし、シルト岩、砂岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩、マールを伴う。
振老層	2,289 (2,006)	- 2,826 (2,404)	泥岩を主体とし、シルト岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩、砂岩、マールを伴う。
滝ノ上層 T1 部層	2,826 (2,404)	- 3,700 (3,046)	火山角礫岩・凝灰岩等の火山岩再堆積相を主体とし、一部に枕状溶岩を確認した。

- ・各坑径掘り止め時に物理検層を実施し、岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は、坑径、比抵抗、自然電位、ガンマ線、見かけ密度、中性子孔隙率、音波速度、比抵抗画像、ディップメータ、核磁気共鳴である。第 2.2-10 図に、物理検層結果の事例を記す。
- ・物理検層作業で測定された温度のビルドアップ解析結果と取水井の揚水試験時に測定した温度から、勾配を求めた (第 2.2-11 図)。
- ・カッティングス試料を地表～深度 3,700m の間、分析項目により 20m～50m 毎に採取した。
- ・コア試料 (直径約 10cm) を振老層泥岩で 2 回 (合計 16m)、滝ノ上層 T1 部層で 7 回 (合計 115.9m) 採取した。
- ・これらの試料に関し、微化石分析 (有孔虫および珪藻化石分析)、岩石鉱物分析 (X 線分析および薄片鑑定) および岩石物性分析 (孔隙率、浸透率、スレシヨルド圧力分析等) を実施した。
- ・有孔虫および珪藻化石分析により各地層の堆積時代を推定するとともに、周辺にある既存坑井と対比することで地層名を確認した。有孔虫化石分析により堆積環境を推定し、振老層は中部半深海 (古水深 500～1,000m)、萌別層は中部半深海上部から上部半深海 (古水深 200～500m) との結論を得た。
- ・深度 2,753～2,758m (垂直深度 2,350～2,355m) の振老層下部において、リークオフテストおよびエクステンディッド・リークオフテストを実施した。
- ・300～800m の間は 100m 間隔で、深度 850～3,265m は 25m 間隔で VSP 調査を実施し、苫小牧 CCS-1 と三次元弾性波探査データとの高精度な対比が可能となった。
- ・滝ノ上層 T1 部層で 2 回 (No. 1 圧入テストおよび No. 2 圧入テスト)、萌別層砂岩層で 2 回 (No. 3 圧入テストおよび No. 3a 圧入テスト) のブライン圧入テストを実施した。



第 2.2-10 図 苫小牧 CCS-1 の物理検層結果事例