添付書類-3

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
	7) 三次元弾性波探査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
	<ol> <li>調査井・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	24
	ウ) 圧入井 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
	エ) CO2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
	<ol> <li>ざ小牧 CCS-1 の解析結果の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	31

ウ) 苫小牧 CCS-2 の解析結果の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33							
ェ) 圧入井の解析結果の概要・・・・・ 33								
<ul><li>が解析結果 ······</li></ul>	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 C02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 CO2挙動予測(圧入井掘削前) ・・・・・・・・・・・	55							
a. 概要 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	55							
b. パラメータ・・・・・	55							
c. CO <sub>2</sub> 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 CO2の長期挙動予測 ・・・・・・・・・・・・・・・	62							
f. 圧入に伴う貯留層内の CO <sub>2</sub> 分布予測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	62							
イ)滝ノ上層 T1 部層における CO₂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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 分布予測(貯留 CO <sub>2</sub> の長期挙動予測) ・・・・・・・	73							
f. CO2の貯留形態ごとの割合・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76							

ウ) 萌別層砂岩層における CO2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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 分布予測	· 85
g. 遮蔽性能検討 ·····	· 93
h. CO2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
<ol> <li>滝ノ上層 T1 部層・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	101
(2) 萌別層砂岩層 ······	104
3.2 CO <sub>2</sub> 漏出の可能性検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	107
<ol> <li>CO<sub>2</sub>漏出要因の洗い出し・・・・・</li> </ol>	107
(2) CO2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 部層中での空間的広がり・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	111
① 地質モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	111
<ol> <li>CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	115
<ol> <li>CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	118
(2) 萌別層砂岩中での空間的広がり・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	119
① 地質モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	119
<ol> <li>CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	122
<ol> <li>CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	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
<ol> <li>(1) 滝ノ上層 T1 部層····································</li></ol>	132
① CO <sub>2</sub> の貯留領域面積(CO <sub>2</sub> 貯留領域の水平投影面積)	132
② 平均層厚(CO2貯留領域の鉛直方向の平均長)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	133
③ 有効孔隙率	133
<ol> <li>CO<sub>2</sub>貯留飽和度の最大値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	133
⑤ 貯留状態での平均 CO2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
<ol> <li>         期間内推定圧入可能量······      </li> </ol>	••• 135
ウ) 期間内計画圧入量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••• 135
(2) 萌別層砂岩層 ···································	••• 136
① CO <sub>2</sub> の貯留領域面積(CO <sub>2</sub> 貯留領域の水平投影面積) ······	••• 136
② 平均層厚(CO2貯留領域の鉛直方向の平均長)	••• 136
③ 有効孔隙率 ······	••• 137
<ol> <li>C02貯留飽和度の最大値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ol>	••• 137
<ol> <li>5 貯留状態での平均 CO<sub>2</sub>密度 ······</li> </ol>	••• 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
<ol> <li>         期間内推定圧入可能量······      </li> </ol>	••• 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・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 142$

### 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<sup>[1]</sup>。

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

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> 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.

ータベースである World Stress Map<sup>[1]</sup> (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カデータ分布図(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 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。

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。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> 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。





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 8.2×10<sup>-6</sup>~36.7×10<sup>-6</sup>mD,萌別層砂岩層に対しては 100m 以上および 0.80×10<sup>-3</sup>~1.73×10<sup>-3</sup>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>挙動予測は次のとおりであり、CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>および溶解 CO<sub>2</sub>の広がり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 CO<sub>2</sub>の広がりは、水平方向に東西 400m 程度、南北 600m 程度。また、溶解 CO<sub>2</sub>の広が りは、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 CO<sub>2</sub>の状態で CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>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。





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 CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>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(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<sup>[1]-[8]</sup>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-1「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。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup>『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)

<sup>&</sup>lt;sup>[2]</sup>『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)

<sup>&</sup>lt;sup>[3]</sup>『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)

 <sup>&</sup>lt;sup>[4]</sup>『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)

<sup>[5] 『</sup>平成 25 年度鳥獣保護区等位置図』(北海道, 2013 年)

<sup>[6] 『</sup>第4回自然環境保全基礎調査』(環境庁, 1994年)

<sup>&</sup>lt;sup>[7]</sup>『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)

<sup>&</sup>lt;sup>[8]</sup>『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/XBRO/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<sup>[1]</sup>。

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。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> 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<sup>[1]</sup>(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カデータ分布図(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,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。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> 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。





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。



#### 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 たき の うえ 滝 ノ 上層、振 老 層、平取 +軽舞 層、荷 菜 層、萌 別 層、鵡川 層などの地層が堆積してお り、滝ノ 上層から荷菜層にかけては新第三系、萌別層と鵡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」<sup>[1]</sup>においては、「CO<sub>2</sub>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)。

 <sup>[1]</sup> 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。鵡川層~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, 鵡川層と萌別層下部~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。

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 苫小牧 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、CO<sub>2</sub>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」<sup>[1]</sup>をまとめた。

 <sup>[1]</sup> 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) 三次元弾性波探查

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。

#### () 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。

#### か) 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。
- I) 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」<sup>[1]</sup>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CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> 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

<sup>(</sup>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、C02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。

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	三次元弾性波探査データ(リファレンスデ
	ス等の物性値推定	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,	周辺坑井, 坑井 A, 苫小牧 CCS-1, 苫小牧
	毛細管圧、スレショルド圧等の基礎物性値の提供	CCS-2,滝ノ上層圧入井,萌別層圧入井
	浸透率-孔隙率相関	
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	坑井 A, 苫小牧 CCS-1, 滝ノ上層圧入井,
	インピーダンス推定	萌別層圧入井
	岩相分布・孔隙率分布の作成	
温度・圧力データ	地温勾配	坑井 A, 苫小牧 CCS-1, 苫小牧 CCS-2
	坑底圧力(貯留層および地層破壊圧力)決定	
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	陸海域の既存二次元弾性波探査データ
	ス等の物性値推定	

第2.2-1表 貯留層評価の使用データー覧

#### ア)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」「鵡川層」 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)の発達が予想される。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。断層の落差は一様ではなく、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, 鵡川層上限 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鵡川層基底の時間 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)

- 28 -



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



注: 図中のX軸およびY軸は,世界測地系WGS84のUTM54系の座標。



#### 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。

地層名	掘削 (垂回	削深度 直深度	mMD mVD)	岩相
第四系	0	_	458	未固結砂礫等。
鵡川層	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。

第2.2-2表 調査井における確認層序と岩相

- ・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,スレショルド圧力分析等)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



第2.2-11図 苫小牧 CCS-1 の地温勾配解析結果

- ウ) 苫小牧 CCS-2 の解析結果の概要
  - ・本井は平成23年5月4日から6月15日までの43日間で,苫小牧CCS-1の北東37mの 位置において深度1,218mまで掘削した(垂直井)。
  - ・深度 993~1,218m の萌別層泥岩層および砂岩層において, 直径 8cm のコア試料を連続 採取した。
  - ・調査終了後は、耐CO2セメントを用いて埋め立てて廃坑した。
  - ・深度 989~993m の萌別層泥岩層下部において、リークオフテストを実施した。
- I) 圧入井の解析結果の概要
  - ・滝ノ上層圧入井の解析結果については、後述の第 2.2 節(3)③(1)「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)」にて記載する。
  - ・萌別層圧入井については、ブライン圧入テストにより上昇した貯留層の圧力が回復(低下)する過程を解析するフォールオフテストにより、貯留層の浸透率(貯留層区間の 全体的な平均値)を取得した。なお、この浸透率については、垂直方向/水平方向の区 別はない。

- ・NMR 検層データにより, 貯留層の孔隙率を取得した。なお, 検層機器の解像度の問題も あり, 貯留層以外の岩相も含んだ値となるため, 採取したコアからのデータよりは過 小評価している可能性がある。
- ・本井掘削時に遮蔽層においてエクステンデットリークオフテストを実施し、リークオフ圧力を取得した。
- ・内田(1987)<sup>[1]</sup>によると,浸透率・スレショルド圧力は孔口半径と相関がある。そこ で遮蔽層の浸透率・スレショルド圧力を調査するために,本井掘削時に採取した萌別 層泥岩のカッティングス試料の孔口半径を測定し,調査井(苫小牧 CCS-2)および萌別 層観測井で採取した萌別層泥岩の孔口半径を比較した。本井で出現した試料は,上記 調査井および観測井で採取した萌別層泥岩と同程度であったことから,同程度の浸透 率・スレショルド圧力を有することを推定した。
- ・遮蔽層層準のカッティングス試料の分析により、遮蔽層の孔隙率を取得した。

#### **1**) 解析結果

- ・滝ノ上層 T1 部層への圧入: 苫小牧 CCS-1 および滝ノ上層圧入井の取得データの解析で 得られた滝ノ上層 T1 部層の貯留岩性状のまとめを,第2.2-3 表に示す。また,振老層 の遮蔽層性状に係る結果のまとめを,第2.2-4 表に示す。滝ノ上層 T1 部層の遮蔽層は 直上の振老層泥岩であるが,さらに上位に平取+軽舞の泥質岩,その上位に荷菜層の泥 質岩が累重することから,3重の遮蔽層層準が分布するといえる。
- ・萌別層砂岩層への圧入: 苫小牧 CCS-1, 苫小牧 CCS-2 および萌別層圧入井の取得データ の解析により得られた, 萌別層砂岩の貯留岩性状に係る結果のまとめを, 第 2.2-5 表 に示す。また, 萌別層泥岩の遮蔽層性状に係る結果のまとめを, 第 2.2-6 表に示す。 萌別層砂岩層に対する遮蔽層は萌別層泥岩であるが, 圧入対象域では 100m 程度以上の 層厚を有すると推定される(第 2.2-12 図)。

項目	
対象深度	約 2,400m~3,000m(垂直深度)
層厚	約 600m
岩相	溶岩~凝灰角礫岩,凝灰岩(苫小牧 CCS-1) 凝灰岩主体(滝ノ上層圧入井)
孔隙率	5~18%(苫小牧 CCS-1 コア試験:封圧下) 3~19%(周辺坑井のコア試験:封圧下) 3~27%(滝ノ上層圧入井 NMR 検層解析結果)
浸透率	0.68~1.18mD(苫小牧CCS-1 圧入テスト解析結果) <sup>進</sup> 0.001~0.01mD(苫小牧CCS-1 コア試験:封圧下,空気) 0.002~7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) 7.7×10 <sup>-4</sup> mD(滝ノ上層圧入井ビルドアップテスト再解析結果)
ブライン圧入テスト(苫小牧 CCS-1)	最大 650kL/d(掘削深度 2,907~3,698m のうち 186m) <sup>注</sup>

第2.2-3表 貯留層性状一覧(滝ノ上層 T1 部層)

注: 圧力・温度測定結果から, 圧入区間は 2,907~2,931mのみと判断した。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> 内田 降(1987). 貯留岩の浸透率と孔径分布について. 石油技術協会誌. V.52, n1, p1-11.

項目	
層序	振老層および平取+軽舞層
岩相	泥岩
層厚	約 1,100m
孔隙率	12.4~18.0%(苫小牧 CCS-1 コア試験:封圧下)
浸透率	8.2×10 <sup>-6</sup> ~36.7×10 <sup>-6</sup> mD(苫小牧 CCS-1 コア試験:水浸透率)
スレショルド圧力	1.29~12.3MPa 以上(苫小牧 CCS-1 コア試験:N <sub>2</sub> -水系残差圧力法) <sup>注</sup> 11.72MPa 以上(苫小牧 CCS-1 コア試験:CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法) <sup>注</sup>
リークオフ圧力	45.3MPa(等価泥水比重 1.96)
(苫小牧 CCS-1 リークオフテスト)	(振老層(苫小牧 CCS-1)2,352mVD(垂直深度))

第2.2-4表 滝ノ上層 T1 部層に対する遮蔽層性状一覧

注:ブレークスルーしなかったことから、測定値以上のスレショルド圧力を有すると判断した。

# 第2.2-5表 貯留層性状一覧(萌別層砂岩層)

項目		
対象深度	約 1,100m~1,200m(垂直深度)	
層厚	約 100m	
岩相	砂岩(礫質砂岩,シルト岩を伴うファンデルタ堆積物)	
	20~40%(苫小牧 CCS-1 コア試験:封圧下)	
孔隙率	20~40%(物理検層解析結果)	
	12~42%(萌別層圧入井 NMR 検層解析結果)	
	9~25mD(苫小牧 CCS-1 圧入テスト解析結果)	
泊沃卒	1~1,000mD(苫小牧 CCS-2 コア試験:封圧下,空気)	
反迈平	1~120mD(物理検層解析結果)	
	370mD(萌別層圧入井フォールオフテスト解析結果)	
ブライン圧入テスト(苫小牧 CCS-1)	最大 1, 200kL/d(掘削深度 1, 077~1, 217m のうち 57. 5m)	

注: 圧力・温度測定結果から, 圧入区間は 2,907~2,931mのみと判断した。

第2.2-6表 遮蔽層性状一覧(萌別層泥岩層)

項目			
層序	萌別層泥岩層(萌別層上部)		
岩相	シルト岩〜泥岩		
層厚	約 100m		
孔隙率	32.4~37.2%(苫小牧 CCS-2 コア試験:封圧下) 30~37%(萌別層圧入井カッティングス試験)		
浸透率	0.80×10 <sup>-3</sup> ~1.73×10 <sup>-3</sup> mD(苫小牧 CCS-2 コア試験:水浸透率) 1.73×10 <sup>-3</sup> mD(萌別層圧入井カッティングス試験)		
スレショルド圧力	0.75, 1.65, 1.67MPa(苫小牧 CCS-2 コア試験:CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法) 0.75MPa(萌別層圧入井カッティングス試験)		
リークオフ圧力	14. 6MPa(苫小牧 CCS-2 リークオフテスト, 等価泥水比重 1.50) (萌別層泥岩層(苫小牧 CCS-2) 991mVD(垂直深度))14. 37MPa(萌別層圧入井エクステンデットリークオフテスト) (萌別層泥岩層(萌別層圧入井) 971mVD)		



第2.2-12図 萌別層泥岩層の等層厚線図(等層厚線間隔:10m)

#### ③ 地質モデルの作成

CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施するための地質モデルを作成した。以下, 圧入対象 層ごとに概要を示す。

なお,以下のア)およびウ)で示す地質モデルは,平成23年度地質モデルである。イ)で示す モデルは,滝ノ上層圧入井の掘削結果を考慮し,ア)を修正したモデルである。

#### 7) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成(圧入井掘削前)

#### a. 岩相分布・性状分布の推定

- ・滝ノ上層は、火山岩起源であり不均質性が高いため三次元弾性波探査データを活用した岩相分布・性状分布を推定した不均質モデルを作成した。
- ・スケルトン・アトリビュート解析にて弾性波形の特徴を強調
- ・SOM (Self-organizing Maps: 自己組織化マップ) 解析による波形分類を行い,
- ・クラスター解析(K-means法)により各分類の境界を決定
- ・坑井Aにおける溶岩〜凝灰角礫岩(良好な貯留岩)との比較により、この岩相を示 す弾性波形を決定し、三次元弾性波探査データ上で溶岩〜凝灰角礫岩の分布領域を 推定。
- ・コア試料と物理検層データの解析から,溶岩~凝灰角礫岩については,AI (Acoustic Impedance:音響インピーダンス:密度×弾性波速度)と孔隙率とが逆相関関係にあることを確認した。

例として,第2.2-13 図に滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布(K-means Index)を,第2.2-14 図に三次元弾性波探査データから取得した滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンスを 示す。



注: オレンジの部分が,良好な貯留層性状が期待される岩相(溶岩〜凝灰角礫岩相)。苫小牧 CCS-1 は,貯留層 性状が良好ではない場所に掘削された。

第 2. 2-13 図 滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index)



注: 青色の部分が,低 AI で高孔隙率と考えられる箇所。高浸透率である可能性も高い。滝ノ上層圧入井は,低 AI 域に掘削した。

# 第2.2-14 図 滝ノ上層 11部層下部の音響インピーダンス

# b. 構造モデルの作成

構造地質解釈で作成した時間構造図を深度変換により深度構造図とし、構造モデルを 作成した。深度変換された滝ノ上層 T1 部層上限のモデル断面位置を第 2.2-15 図に、主 要な層準の東西断面(地質モデル断面)を第 2.2-16 図に、作成した構造モデルのグリッ ディング情報を第 2.2-7 表に示す。



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2.2-15図 モデル断面位置(構造図は滝ノ上層T1部層上限)



注: 苫小牧 CCS-1 は,投影表示。

第2.2-16図 地質モデル断面

i 方向(東西方向)セル数	100m	80 セル
j方向(南北方向)セル数	100m	120 セル
k 方向(垂直)セル数		
鵡川層:	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号:1~3)
萌別層:	3 レイヤーに分割	(k方向セル番号:4~6)
荷菜層上部:	3 レイヤーに分割	(k方向セル番号:7~9)
荷菜層下部:	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号:10~14)
平取+軽舞層:	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号:15~19)
振老層:	5 レイヤーに分割	(k方向セル番号:20~24)
滝ノ上層 T1 部層上部:	15m ごとに分割	(k方向セル番号:25~57)
滝ノ上層 T1 部層下部:	15m ごとに分割	(k方向セル番号:58~96)
滝ノ上層下部:	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号: 97~101)
南長沼層:	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号:102~106)

第2.2-7表 滝ノ上層構造モデルのグリッディング

構造モデルの鳥瞰図を,第2.2-17図に示す。滝ノ上層T1部層はCO2圧入対象層準であり、シミュレーションを詳細に行うため上下の地層よりも小さめの垂直方向サイズとなるようにした。



第2.2-17図 三次元地質モデル鳥瞰図

#### c. 属性モデルの作成

作成した構造モデルの各セルに属性(岩相,孔隙率および浸透率)を与え,CO<sub>2</sub>挙動予 測シミュレーションのための地質モデルを作成した。

まず, CO<sub>2</sub>圧入対象層である滝ノ上層 T1 部層における属性値分布は,三次元弾性波探 査データ,苫小牧 CCS-1 および坑井 A のデータより,地球統計学的手法を用いて,岩相, 孔隙率および浸透率の分布が確率的に 50 種類となる具現モデルを作成した。参考例とし て,50 個の内から 4 つの具現モデルにおける孔隙率分布を,第 2.2-18 図に示す。



注: 図中右下の矢印は、北を示す。

第2.2-18 図 50 個の内4 個の具現モデルの参考例:滝ノ上層 T1 部層の孔隙率分布(平成23 年 度地質モデル)

他の層準における属性値は, 苫小牧 CCS-1 の振老層から採取されたコアの分析値を一様に分布させた。

#### 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)

#### a. 滝ノ上層圧入井掘削結果

特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する滝ノ上層圧入井は,深度5,800m(垂直深度2,753m) の傾斜井として掘削した。確認層序を,第2.2-8表に示す。

地層名	掘肖 (垂直	川深度 直深度	mMD mVD)	岩相
第四系	0	-	458	未固結砂礫,シルト等。
鵡川層	458	-	880	砂礫岩およびシルト岩等。
萌別層泥岩	880	-	970	シルト岩〜泥岩主体とし、砂岩、礫岩等を伴う。
萌別層砂岩	970	-	$1, 179 \\ (1, 171)$	砂岩,礫岩を主体とし,砂質シルト岩,凝灰岩を伴 う。
荷菜層	$1,179 \\ (1,171)$	-	1,870 (1,539)	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	$1,870 \\ (1,539)$	-	3, 581 (2, 067)	シルト岩を主体とし,泥岩,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	3, 581 (2, 067)	-	4,624 (2,390)	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	4,624 (2,390)	_	5,800 (2,753)	凝灰岩の再堆積相を主体とし、凝灰角礫岩を伴う。 稀に泥岩を伴う。

第2.2-8表 滝ノ上層圧入井における確認層序と岩相

- ・掘進中に物理検層を実施(LWD 検層)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,比抵抗,ガンマ線,音波速度,比抵抗画像,NMR である。第2.2-19 図に,物理検層結果の事例を記す。
- ・カッティングス試料を地表から滝ノ上層 T1 部層までの深度 5,800m の間,分析項目により 10m~50mVD ごとに採取した。
- ・コア試料(直径約10cm)を、滝ノ上層T1部層で2回(合計18.8m)採取した。
- ・これらの試料に関し、微化石分析(有孔虫分析),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,孔口半径分析等)を実施した。
- ・有孔虫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)、荷菜層および平取+軽舞層は中部~上部半深海(古水深 200 ~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 4,607~4,612m(垂直深度 2,384~2,485m)の振老層下部において、エクステンディッド・リークオフテストを実施した。
- ・滝ノ上層 T1 部層を一括して仕上げ、ブラインによる圧入テストを実施した。ブラインによる圧入テストの前には、坑内洗浄を主な目的として排泥を実施し、その後貯留層圧力の回復状況を解析するビルドアップテストを実施した。また、ブラインによる圧入テストの後に、上昇した貯留層圧力の回復状況を解析するフォールオフテストを実施した。これらの結果から、貯留層の浸透率を推定した。なお、この浸透率については、垂直方向/水平方向の区別はない。