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	F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	也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	チ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	寺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	或(当初申請時(平成 28 年 2 月 22 日))	6 -
	1.4	寺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	或(変更申請時(平成 31 年 2 月 18 日))	7 -
	1.5	毎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	5
	とがで	きる海域	8 -
	1.6	寺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	こた場合において、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	ぶできる海域1	1 -
	1.7	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	Ł
	のの所	Eに関する知見が得られている海域1	2 -
2.	地層	D特徴に係る事項1	3 -
	2.1	広域の地層・地質の特徴1	3 -
	(1)	テクトニクス概要1	3 -
	(2)	北海道周辺の地殻応力分布1	4 -
	(3)	北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動1	4 -
	(4)	- 苫小牧周辺の活断層	7 -
	2.2	蓬莱海域とその近傍の地層/地質の特徴	8 -
	(1)		8 -
	(2)	周辺地域の地層水塩分濃度解析による水理地質評価1	9 -
	(1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	0 -
	(2)		0 -
	(3)		2 -
	(]	当該地域で美施した調査の概要	2 -
) 二伙元弾性波探查	3-
		J	ა- ი
		J 江八井	ა- ი
	()	J UU2 宇期 『 側 ン ミュ レーンヨン	ა- 1
	2	→ 小地域で取付した/ 一クねよいての胜性症未	4 - 5
		/	J -

イ)	苫小牧 CCS-1 の解析結果の概要	30 -
ウ)	苫小牧 CCS-2 の解析結果の概要	33 -
I)	圧入井の解析結果の概要	33 -
才)	苫小牧 OB-2 解析結果の概要	34 -
カ)	解析結果	34 -
3	地質モデルの作成	37 -
7)	滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成(圧入井掘削前)	37 -
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 -
ウ)	滝ノ上層 T1 部層用の地質モデル作成(変更申請時)	50 -
エ)	萌別層砂岩用の地質モデルの作成 (当初申請時)	50 -
才)	萌別層砂岩用の平成 30 年度(暫定)地質モデルの作成(変更申請時	宇) 55 -
4	CO2 挙動予測シミュレーション	59 -
7)	滝ノ上層 T1 部層における CO2 挙動予測(圧入井掘削前)	60 -
4)	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) -
74	-	
ל)	滝ノ上層 T1 部層における CO2 挙動予測(暫定的な圧入実績を踏ま	えたシミ
ュし	~ーション/変更申請時)	81 -
エ)	萌別層砂岩層における CO2 挙動予測(当初申請時)	89 -
オ)	萌別層砂岩層における CO₂ 挙動予測(変更申請時)	113 -
2.3 鉱業	養権の設定または出願の状況について	126 -
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.		127 -
3.1 特定	官二酸化炭素ガスと地層やシール層の成分との相互作用	127 -
(1) 消	竜ノ上層 T1 部層	127 -
(2) 甫	有別層砂岩層	130 -
3.2 CO	2 漏出の可能性検討	134 -
(1) C	CO2 漏出要因の洗い出し	134 -
(2) (2)	CO2 漏出要因に関する検討のまとめ	136 -
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ひ	*特定二酸
化炭素ガスの	D推定廃棄可能量に係る事項	138 -
4.1 海區	ま下投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	138 -
(1) 消	竜ノ上層 T1 部層中での空間的広がり(当初申請時)	138 -
\bigcirc	地質モデル	138 -
2	CO2の平面的な分布範囲	142 -
3	CO2の垂直的な分布範囲	145 -
(2) 消	竜ノ上層 T1 部層中での空間的広がり(変更申請時)	146 -
\bigcirc	検討に使用した地質モデル	146 -

7)	圧入実績	146 -
イ)	CO2 圧入時の挙動とパラメータの調整	147 -
2	CO2の平面的な分布範囲	149 -
3	CO2の垂直的な分布範囲	152 -
(3) 萌	刮層砂岩層中での空間的広がり(当初申請時)	152 -
	地質モデル	152 -
2	CO2の平面的な分布範囲	155 -
3	CO2の垂直的な分布範囲	157 -
(4) 萌	刮層砂岩層中での空間的広がり(変更申請時)	164 -
\bigcirc	地質モデル	164 -
7)	平成 30 年度(暫定)地質モデルの作成	164 -
2	萌別層砂岩層における CO2 挙動予測シミュレーション	170 -
7)	平成 30 年度(暫定) シミュレーション	170 -
3	CO2の平面的な分布範囲	184 -
4	CO2の垂直的な分布範囲	186 -
4.2 特定	三酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項	190 -
(1)	近ノ上層 T1 部層(当初申請時)	190 -
(1)	CO2の貯留領域面積(CO2貯留領域の水平投影面積)	190 -
2	平均層厚(CO2貯留領域の鉛直方向の平均長)	191 -
3	有効孔隙率	191 -
4	CO2 貯留飽和度の最大値	191 -
5	貯留状態での平均 CO2 密度	192 -
6	収容量	193 -
\overline{O}	期間内計画圧入量が適切であることの確認	194 -
7)	収容量	194 -
イ)	期間内推定圧入可能量	194 -
ל)	期間内計画圧入量	194 -
(2) 滝	适ノ上層 T1 部層(変更申請時)	195 -
\bigcirc	CO2の貯留領域面積(CO2貯留領域の水平投影面積)	195 -
2	平均層厚(CO2 貯留領域の鉛直方向の平均長)	195 -
3	有効孔隙率	195 -
4	CO2 貯留飽和度の最大値	195 -
5	貯留状態での平均 CO2 密度	196 -
6	収容量	197 -
$\overline{\mathcal{O}}$	期間内計画圧入量が適切であることの確認	197 -
7)	収容量	197 -
1)	期間内推定圧入可能量	198 -
ウ)	期間内計画圧入量	198 -

(3)	萌別層砂岩層(当初申請時)	198 -
(1)	CO2の貯留領域面積(CO2貯留領域の水平投影面積)	198 -
2	平均層厚(CO2貯留領域の鉛直方向の平均長)	199 -
3	有効孔隙率	199 -
4	CO2 貯留飽和度の最大値	200 -
(5)	貯留状態での平均 CO2 密度	200 -
6	収容量	201 -
$\overline{7}$	期間内計画圧入量が適切であることの確認	202 -
7)	収容量	202 -
イ)	期間内推定圧入可能量	202 -
ウ)	期間内計画圧入量	203 -
(4)	萌別層砂岩層(変更申請時)	203 -
(1)	CO2の貯留領域面積(CO2貯留領域の水平投影面積)	203 -
~		
(2)	孔隙容量	203 -
(2) (3)	孔隙容量 CO2貯留飽和度の最大値	203 - 204 -
2) 3) 4)	孔隙容量 CO2 貯留飽和度の最大値 貯留状態での平均 CO2 密度	- 203 -
 (2) (3) (4) (5) 	孔隙容量 CO2貯留飽和度の最大値 貯留状態での平均 CO2密度 収容量	203 - 204 - 204 - 205 -
 (2) (3) (4) (5) (6) 	 孔隙容量 CO2 貯留飽和度の最大値 貯留状態での平均 CO2 密度 収容量 期間内計画圧入量が適切であることの確認 	- 203 - - 204 - - 204 - - 204 - - 205 - - 205 -
2 3 4 5 6 7)	 孔隙容量 CO2 貯留飽和度の最大値 貯留状態での平均 CO2 密度 収容量 期間内計画圧入量が適切であることの確認 収容量 	- 203 - - 204 - - 204 - - 204 - - 205 - - 205 - - 206 - - 206 -
2 3 4 5 6 7) 1	 孔隙容量 CO2 貯留飽和度の最大値 貯留状態での平均 CO2密度 収容量 期間内計画圧入量が適切であることの確認 収容量 期間内推定圧入可能量 	- 203 - - 204 - - 204 - - 204 - - 205 - - 205 - - 206 - - 206 - - 206 -
2 3 4 5 6 7) 1) 7)	 孔隙容量 CO2 貯留飽和度の最大値 貯留状態での平均 CO2密度 収容量 期間内計画圧入量が適切であることの確認 収容量 期間内推定圧入可能量 期間内計画圧入量 	- 203 - - 204 - - 204 - - 204 - - 205 - - 205 - - 206 - - 206 - - 206 - - 206 - - 206 -

5.

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

^[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.

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。

^[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)および平成30年北海道胆振東部地 震(2018/9/6,M6.7)の震源は,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 地東縁断層帯より西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。



第1.2-1 図 北海道周辺の地震活動

^[1] 地震調查研究推進本部

https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/hokkaido/hokkaido-higaijishin.gif(参照 2019-02-01)



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

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 (当初申請時(平成28年2月22日))

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 8.2×10⁻⁶~36.7×10⁻⁶mD,萌別層砂岩層に対しては 100m 以上および 0.80×10⁻³~1.73×10⁻³mD 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 CO₂ 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 CO₂ 挙動予測は次のとおりであり、CO₂ 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 CO₂および溶解 CO₂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 CO₂の広がりは、水平方向に東西 400m 程度、南北 600m 程度。また、溶解 CO₂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 CO₂の状態で CO₂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 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 (変更申請時(平成31年2月18日))

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 1.4-1 図)。



第1.4-1 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 8.2×10⁻⁶~36.7×10⁻⁶mD,萌別層砂岩層に対しては 100m 程度および 0.80×10⁻³~1.73×10⁻³mD 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 CO₂ 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 CO₂ 挙 動予測は次のとおりであり、CO₂ 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 CO₂および溶解 CO₂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 CO₂の広がりは,水平方向に東西 1,870m 程度,南北 2,400m 程度。また,溶解 CO₂の 広がりは,東西 2,370m 程度,南北 2,800m 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。

1.5 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1.5-1 図に示す。





注)海上保安庁発行の海図(W1034)に加筆

第1.5-1 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: 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。

1.6 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。

1.7 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^{[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/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^[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。





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、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/, 2015/1/28 アクセス)



地震調査研究推進本部[1]

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50km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 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。

^[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 2019-02-01)



注: 2010 年~2018 年, M>1

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。



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^{たぎの うえ}

^{& htatil} 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」^[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。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、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(http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001_s01.pdf, 2015/1/28 アクセス)

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。

圧入開始後の平成29年度には、平成21年度調査に三次元弾性波探査を実施した範囲にお いて、繰り返し三次元弾性波探査を実施した。

- () 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」^[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

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

- ・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。



第2.2-6 図 調査範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。

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	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

第2.2-1表 貯留層評価の使用データー覧

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, スレショ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	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、苫小牧 OB-2)
	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, 滝ノ
	坑底圧力(貯留層および地層破壊圧力)決定	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	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	

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」「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2.2-7 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 2.2-10 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2.2-10図)。



第2.2-7 図 三次元弾性波探査結果解釈断面図(南北断面)



第2.2-8 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2.2-9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。等深度線間隔は10m。 第2.2-10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。

わ 4.4 4 例 且 / 1 ~ 03 1 / 3 1 旧 心 旧 げ こ 石 1	第 2. 2-2 表	調査井における確認層序と岩相
--	------------	----------------

地層名	掘肖 (垂西	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	$ \begin{array}{r} 1, 638 \\ (1, 524) \end{array} $	_	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,	826	泥岩を主体とし、シルト岩を伴う。稀に凝灰質シル
-------	---------	------	------	-------------------------
	(2,006)	(2,	404)	ト岩、砂岩、マールを伴う。
滝ノ上層	2,826	- 3,	700	火山角礫岩・凝灰岩等の火山岩再堆積相を主体と
T1 部層	(2,404)	(3,	046)	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()「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)^[1]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。

オ) 苫小牧 0B-2 解析結果の概要

- ・本井は平成25年1月6日から2月27日までの52日間で, 圧入井の南南東に約140mの 位置において萌別層観測井(苫小牧0B-2)を掘削した。垂直井で掘削深度は1,200mと した。
- ・深度 967~991m、1,057~1,084.5mの萌別層泥岩層および砂岩層において,直径約8cmの コア試料を連続的に採取した。
- ・深度949~965m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。

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, 苫小牧 OB-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2.2-16 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)

第2.2-3表 貯留層性状一覧(滝ノ上層 T1 部層)

^[1] 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.

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) 12~19%(滝ノ上層圧入井 コア試験:封圧下)
浸透率	0.68~1.18mD(苫小牧CCS-1 圧入テスト解析結果) ^進 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 ⁻⁴ 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) ^注 滝ノ上層圧入井:最大 35kL/d (安定レートでは,7.5、5.5、3.5kL/d 掘削深度 4,624~5,800m)

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2.2-4表 滝ノ上層T1部層に対する遮蔽層性状一覧

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 ⁻⁶ ~36.7×10 ⁻⁶ 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 ₂ -水系残差圧力法) ^注 11.72MPa 以上(苫小牧 CCS-1 コア試験:CO ₂ -水系段階昇圧法) ^注
リークオフ圧力	42.5MPa(等価泥水比重 1.82)
(滝ノ上層圧入井リークオフテスト)	(振老層(滝ノ上層圧入井)2,385mVD(垂直深度))

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) ^{注)}
词沃应	1~1,000mD(苫小牧 CCS-2 コア試験 : 封圧下,空気)
反迈平	1~120mD(萌別層圧入井検層結果)
	370mD(萌別層圧入井フォールオフテスト解析結果)
ブライン圧入テフト	苫小牧 CCS-1:最大 1,200kL/d(掘削深度 1,077~1,217m のうち 57.5m
	萌別層圧入井:150、300、450、600kL/Dの4段階ステップレート圧入

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 ⁻³ ~1.73×10 ⁻³ mD(苫小牧 CCS-2 コア試験:水浸透率) 1.73×10 ⁻³ 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 ₂ -水系段階昇圧法) 0.37MP, 0.42MPa(苫小牧 OB-2 コア試験:CO ₂ -水系段階昇圧法)
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,等価泥水 比重1.51)



第2.2-16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

CO₂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2.2-17 図に滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布(K-means Index)を,第2.2-18 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2.2-17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。



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2.2-19 図に,主要な 層準の東西断面(地質モデル断面)を第2.2-20 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2.2-19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2.2-20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2.2-21 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2.2-21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,CO₂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、CO₂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 2.2-22 図に示す。



注:図中右下の矢印は、北を示す。

第 2. 2-22 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 (垂西	间深度 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	$ \begin{array}{r} 1,870 \\ (1,539) \end{array} $	-	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2.2-23 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。



注) 貯留層区間以外では、比抵抗イメージ検層、音波検層、NMR 検層は実施していない。

第2.2-23図 滝ノ上層圧入井の物理検層結果事例

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

i) 掘削時の貯留層に係るテスト

滝ノ上層圧入井掘削時に予定掘削深度に到達後,1週間程度の排泥を実施し,低下 した貯留層圧力の回復(上昇)の度合いから貯留層性状を解析するビルドアップテス トを実施した。その結果,貯留層の浸透率は,5.25×10⁻⁵mDと解析された(第2.2-9

第2.2-9表 滝ノ上層圧入井におけるビルドアップテストの解析結果

	解析結果	単位
kh(浸透率×貯留層厚)	0.030	mD • m
k (浸透率)	5. 25×10^{-5}	mD
スキンファクター	-1.72	_
ri (探査半径)	1	m

注) 貯留層層厚(h)は,570mと仮定した。

その後、ブラインによる圧入テストを実施し、24 時間で 7kL のブラインを圧入した。なお、圧入時の貯留層上限の圧力は、遮蔽層の破壊圧の 90%を上限とした。 ブラインによる圧入テストの実施後、上昇した貯留層圧力の低下の度合いの解析から貯留層性状を解析するフォールオフテストを 12 時間の密閉時間により実施した。その結果、貯留層の浸透率は、1.48×10⁻⁴mD と解析された。

ii) 貯留層に係るテスト結果の見直し

地質モデルの修正にかかり,貯留層の浸透性を評価するために圧入井のテスト結 果を見直した。フォールオフテストよりもビルドアップテストの方が解析に係る貯 留層への圧力変化を与えた要因の時間(ビルドアップテスト:1週間の排泥,フォー ルオフテスト:24時間の圧入)が長いため,貯留層の性状をより正確に表現してい ると考え,ビルドアップテストの結果を見直すこととした。

現場での解析では顕著な割れ目の寄与が認められない状況下においてスキンファ クターをマイナスと解析していたが、スキンファクターを0として再解析した結果, 第2.2-10表のような解析結果を得た。

		解析結果	単位
_	kh(浸透率×貯留層厚)	0.28	mD • m
	k (浸透率)	7.7 $\times 10^{-4}$	mD
	スキンファクター	0	_
	ri (探査半径)	2	m

第2.2-10表 滝ノ上層圧入井におけるビルドアップテストの解析結果の見直し

注) 貯留層層厚(h) は, 圧入井の仕上げ深度区間(垂直深度) である 363m と仮定した。

c. 岩相分布・性状分布推定の更新

滝ノ上層圧入井の掘削により確認した滝ノ上層の岩相は、凝灰岩主体(凝灰岩:溶岩・ 凝灰角礫岩 = 96:4) であった。したがって、地質モデルの岩相は凝灰岩として地質モデ ルを更新した。 上記7)において地質モデルを作成する際に,調査井や周辺坑井から得られた孔隙率と三次元弾性波探査データから,坑井における AI 値 (Acoustic Impedance:音響インピーダンス:密度×弾性波速度)を解析し,坑井での孔隙率との関係をクロスプロットで作成した。 滝ノ上層圧入井において NMR 検層により測定した孔隙率と,検層データから求めた AI 値 との対応関係をオーバーレイした (第2.2-24 図)。



注:1. 赤は貯留岩として期待した溶岩・凝灰角礫岩,青は凝灰岩のAI値と孔隙率の関係を示す。緑は、滝ノ上層圧入井により 解析したAI値とその深度に対応する NMR 孔隙率のプロットを示す。

2. 修正モデルにおける AI 値と孔隙率の関係は、「孔隙率=0.0303×AI 値+0.3879」を用いた。

第2.2-24図 AI 値と孔隙率の関係

凝灰岩主体であった滝ノ上層圧入井の結果と、掘削前に想定した凝灰岩の回帰線の傾き はほぼ一致するものの切片が異なるので、滝ノ上層圧入井の結果を用いて地質モデルの修 正を行うこととした。

滝ノ上層圧入井掘削前には,調査井および周辺坑井のコアデータを参照し孔隙率と浸透率の相関を考察した。滝ノ上層圧入井で採取したコアサンプルの分析結果および NMR 検層の結果解析された孔隙率と浸透率の関係を同一の図にプロットした(第2.2-25 図)。



- 注:1. 苫小牧周辺坑井とは,民間会社が掘削した坑井A。守秘義務があるため岩相の区分は公表できないが,回帰線を作成する 際には使用した。K_NMRは,滝ノ上層圧入井で取得した NMR 検層の結果から解析された浸透率と孔隙率のプロットである が,浸透率が滝ノ上層圧入井のコア実測値よりも概して高い値を示す。これは,火山岩で NMR 検層結果から浸透率を算出 する適切な式がないことが原因と考えられる。
 - 2. 地質モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「浸透率=0.000028952×e^{32.1823×孔隙率}」を用いた。
 - CCS1:苫小牧 CCS-1(現苫小牧 0B-1)、Mst:泥岩、lap-Tf:火山礫凝灰岩、vc-Sltst:火山岩質シル岩、vc-Sst:火山岩質 砂岩、An lava:安山岩質溶岩、vc-Cgl、火山岩質礫岩、sdy-Tf:砂質凝灰岩、K_NMR:核磁気共鳴検層による浸透率

第2.2-25 図 孔隙率と浸透率の関係

滝ノ上層圧入井の貯留層は掘削前に期待した溶岩・凝灰角礫岩がほとんどなく,96%が凝 灰岩であったため,孔隙率と浸透率の相関は凝灰岩の相関式(青実線)に類似するものと 仮定した。圧入井掘削前の推定では,凝灰岩の平均浸透率は,平均孔隙率12.7%に対し7.2 ×10⁻³mD 程度と考えていたが,滝ノ上層圧入井のビルドアップテストの結果から,凝灰岩 からなる滝ノ上層の浸透率は7.7×10⁻⁴mD と解析された。滝ノ上層圧入井で採取したコア の分析結果から得られた浸透率と孔隙率の関係を考慮し,圧入井掘削前に想定した凝灰岩 の回帰線を下方にシフトさせ,滝ノ上層の凝灰岩における孔隙率と浸透率の相関式とした。

ここで求めた孔隙率と浸透率の関係と第2.2-24 図で求めた AI 値と孔隙率の関係から, 地質モデルを修正した(第2.2-26 図)。なお,相対浸透率曲線および毛細管圧曲線につい ては,修正前と同様のものを使用した(第2.2-27 図)。三次元弾性波探査データから解析 された AI 値に対応した形で,地質モデル中で細分された各セルにこれらの属性値を入力 した。



第2.2-26 図 地質モデルにおける孔隙率および浸透率分布の更新



注:1. 上:相対浸透率曲線,下:毛細管圧曲線。

第 2.2-27 図 修正モデルで用いた貯留層(凝灰岩)の相対浸透率曲線と毛細管圧曲線およびそれ らの導出手法

d. 構造モデルの更新

構造モデルは、滝ノ上層圧入井の掘削実績に合わせて深度データを更新した。

e. 属性モデルの更新

b. の手法により地質モデルの属性を更新した。更新した属性モデルの例を,第2.2-24図に示す。

圧入井掘削前のモデルは地球統計学的に 50 種類のモデルを作成したが,圧入井の掘削の結果,圧入井の極近傍以外で岩相や属性を地球統計学的に推定することは困難と判断し, 1ケース(P50モデル。第2.2節(3)④ア) c.参照)の属性モデルを作成した。実際に CO₂を 圧入開始後には,定期的なフォールオフテストの実施や繰り返し弾性波探査の実施を計画

経済産業省(2011),「苫小牧地点における貯留層総合評価 補足説明資料」から引用。 http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004_s02_00.pdf
 相対浸透率曲線および毛細管圧曲線については、採取したコアの浸透性が低く、新たな相対浸透率のデータを取得できな かったため、圧入前の地質モデルと同様のものを使用した。

^[1] Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, p8

^[2] van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892-898

^[3] Akaku, K. 2008. Feasibility Study of Residual CO₂ Trapping. In "Nano-Mega Scale Flow Dynamics in Energy System": Tohoku University Press, Sendai.

しており、それらの結果を踏まえたうえで属性モデルを修正する。



注:浸透率>0.05mDでフィルタリング

第2.2-28 図 更新した属性モデルの例(浸透率)

り) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデル作成(変更申請時)

a. 検討に使用した地質モデル

当初申請時に使用した H27 年度地質モデルを基準とし、圧入実績に基づいてパラメータ(浸 透率、孔隙率)を修正した地質モデルを使用した。

I) 萌別層砂岩用の地質モデルの作成(当初申請時)

a. 岩相分布・性状分布の推定

三次元弾性波探査の解析から, 萌別層砂岩層は, 沖合に前進しながら陸棚に堆積したフ アンデルタが発達していると推定される。ファンデルタは, 砂岩を主体とした粗粒堆積物 が発達する。緩やかな西傾斜を示し, 層厚は約 100m である。北東部を中心に砂礫岩層の発 達も示唆され, 堆積物は主に北東側から供給されたと推定されている。

本層陸棚上の浅い海底で堆積したものと考えられる。砂岩の分布範囲を,苫小牧 CCS-1 および三次元弾性波探査データを用いて,堆積学的検討により推定した。

萌別層砂岩層は、シーケンス層序学上、高海水準期堆積体(HST)に相当し、ファンデル タ、陸棚(Shelf)および斜面(Slope)の3つに分類でき(第2.2-29図)、砂岩の発達が 最も期待できるのはファンデルタである。当該地域には少なくとも5つのファンデルタが 北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈できる。堆積物の供給源は北東側と推定 され,北東側程粗粒相が発達し,南西に向かって泥岩が多くなる傾向にあると考えられる。



注: 図の上部の方角は、北。暖色系は負の高い振幅値、寒色系は負の低い振幅値を示す。正の振幅は、非表示。 第 2. 2-29 図 萌別層 HST 区間の堆積相解釈図

b. 構造モデルの作成

地質モデルを作成するため,三次元弾性波探査データの解釈により作成した各層準の時 間構造図を深度構造図へ変換した。

構造モデル構築には、地質構造解釈で作成されたホライゾン(上位より、鵡川層上限、 萌別層上限、萌別層海進期堆積体(TST)上限、萌別層高海水準期堆積体(HST)上限、萌 別層 HST デルタ上部基底、萌別層 HST 基底、荷菜層上部基底)を用いた。深度変換された 萌別層砂岩層上限(萌別層 HST 上限)のモデル断面位置図を第2.2-26 図に、主要な層準 の東西モデル断面を第2.2-27 図に示す。



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2.2-30 図 モデル断面位置図(構造図は萌別層砂岩層(HST)上限)



注: 上から順に, 断面 A~D。スケールは, m。

第2.2-31図 モデル断面

各層準内に第2.2-11表のようにグリッドセルを作成した。第2.2-28図に, グリッドセルの鳥瞰図を示す。

i方向(東西方向)セル数	200m	40 セル
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2.2-11 表 萌別層構造モデルのグリッディング



第2.2-32 図 グリッドセルの鳥瞰図

c. 属性モデルの作成

構造モデルの各セルに属性を与えた。属性は、堆積相解析で設定した堆積相区分として 与えた。属性モデルに与えた堆積相区分概念を、第2.2-29図に示す。



第2.2-33 図 堆積相区分概念図

萌別層 HST は,堆積環境により西よりスロープ(6),陸棚(7),デルタ上部(8),デル タ下部(9)の4つに区分される。また, 萌別層 TST は, 沖側(3: 泥岩層), 陸側上部(4: 砂岩層)ならびに陸側下部(5:泥岩層)に区分した。

オ) 萌別層砂岩用の平成 30 年度(暫定)地質モデルの作成(変更申請時)

a. 岩相分布・性状分布の推定

平成 24 年度地質モデルに加え, 苫小牧 OB-2(萌別層観測井),苫小牧 IW-2(萌別層圧入 井)の坑井データを用いて平成30年度(暫定)地質モデル(以下,「H30(暫定)地質モデ ル」と称する)を作成した。

三次元弾性波探査データを加味し、坑井データを用いたシーケンス層序学的検討により、 萌別層砂岩層(貯留層)~萌別層泥岩層(遮蔽層)を3つのシーケンスを認識した(第2.2-34 図)。シーケンス I は苫小牧 IW-2 の掘り止め深度付近で確認したシーケンスで,砂岩層 を含み苫小牧 IW-2 では下限を確認していない。この砂岩層を萌別層(+荷菜層)砂岩層と 称する。シーケンスⅡの海進期堆積体を萌別層(+荷菜層)砂岩泥岩互層と,高海水準期堆 積体を萌別層砂岩層下部と称する。平成 24 年地質モデルでは, シーケンスⅡ全体を萌別層 HST と称していた。シーケンスⅢの低海水準期堆積体を萌別層砂岩層上部と,海進期堆積体 を萌別層泥岩層と称している。

地質時代(古旧 苫小牧IW-	2) 層準	解釈ホライズン	
		その他の第四系	鵡川層上限 QTN_Base	シ
	5355555 1000000			 ケ
第四紀		鵡川層		ンス
			鵡川層基底 MU_Base	
	teletetet			TTT
		萌別層砂岩層上部	明別唐泥石唐基底 MO_SH_Base_15_皿	111
		萌別層砂岩層下部	─── シークノス境介58-Ⅲ	
	~~~~~		—— 萌別層砂岩層基底 MO_Base−MFS_II	
		萌別層(+荷菜層)砂岩泥岩互層		
鮮新世		萌別層(+荷菜層)砂岩層	シーケンス境界SB-11	Ι
			シーケンス境界SB-I	
<b>医</b> 砂礫岩	 岩	泥岩・シルト岩		

	岩相	
115	石旧	

◎◎◎ 砂岩

」泥宕・ンルト宕

🔤 砂岩泥岩互層

## 第2.2-34 図 萌別層の層序区分と解釈ホライズン

萌別層(+荷菜層)砂岩泥岩互層~萌別層砂岩層下部は、ファンデルタ、陸棚(Shelf) および斜面 (Slope) の 3 つに分類でき (第 2.2-35 図), この中で砂岩の発達が最も期待で きるのはファンデルタである。当該地域には少なくとも5つのファンデルタが北東から南 西へ向かって前進しながら堆積したものと解釈している。堆積物の供給源は北東側と推定 され,より北東側程粗粒相が発達し,南西に向かって泥岩が多くなる傾向が認められる。 萌別層砂岩層上部は陸棚(Shelf)~陸域の河川(Fluvial)で堆積したと考えられる粗粒な 堆積物から形成されている。



萌別層(+荷菜層)砂岩泥岩互層~萌別層砂岩層下部

萌別層砂岩層上部

- 注: 図の上部は北。暖色系はより粗粒な堆積物を示すものと考えられる。 第 2.2-35 図 萌別層(+荷菜層)砂岩泥岩互層~萌別層砂岩層上部の堆積相解釈図
  - a. 構造モデルの作成

地質モデルを作成するため,三次元弾性波探査データおよび二次元弾性波探査データの 解釈により作成した各層準の時間構造図を深度構造図へ変換した。

構造モデル構築には,第2.2-34 図に示す地質構造解釈で作成した解釈ホライズンを用いた。深度変換された萌別層(+荷菜層)砂岩層〜鵡川層のモデル断面を第2.2-36 図に示す。



各層準内に第2.2-12表のようにグリッドセルを作成した。第2.2-37図に、グリッドセルの鳥瞰図を示す。

東西方向	垂直方向	水平方向	垂直方向セル番号
鵡川層	1 レイヤーに分割		1
萌別層泥岩層	7 レイヤーに分割		2~8
萌別層砂岩層上部	4 レイヤーに分割	$100\mathrm{m} imes$	9~12
萌別層砂岩層下部	5 レイヤーに分割	100m	13~17
萌別層(+荷菜層)砂岩泥岩互層	6 レイヤーに分割		18~23
萌別層(+荷菜層)砂岩層	10m		$24{\sim}43$

第2.2-12表 萌別層構造モデルのグリッディング



## b. 属性モデルの作成

構造モデルの各セルに,堆積相解析で設定した堆積相区分をもとに属性を与えた。粗粒 相が発達する東側は苫小牧 IW-2 を参照し,細粒相が発達する西側に対しては苫小牧 CCS-1 を参照して堆積相を入力した。堆積相区分の概念を第2.2-38 図に示す。



貯留層をなす萌別層(+荷菜層)砂岩~萌別層砂岩層下部は主に陸棚で堆積した。萌別 層(+荷菜層)砂岩層,萌別層(+荷菜層)砂岩泥岩互層,萌別層砂岩層下部にはファンデ ルタが認められ,下位よりFD-1a/b,FD-2,FD-3,FD-4,FD-5と区分した(第2.2-39図)。萌別 層砂岩層上部は,陸棚~河川で堆積したと考えられる。第2.2-35図右図に示すように,当 該地地域には砂礫を含む粗粒な岩相が発達する。対象層準の砕屑物は対象地域の北東から 供給され,圧入地点周辺の陸棚環境では粗粒相が発達するが,供給源から離れた西側の大 陸棚斜面~堆積盆底では細粒相が発達するものと解釈している。遮蔽層をなす萌別層泥岩 層は海進期に圧入地点周辺が斜面~堆積盆底となり堆積した細粒相である。下限を海侵面 (Transgressive Surface)として定義しているため,萌別層泥岩の下部には海進の過程で堆 積した砂岩層が夾在される。



第2.2-39図 萌別層(+荷菜層)砂岩層~萌別層砂岩層下部の堆積モデル

## ④ CO2 挙動予測シミュレーション

作成した地質モデルを用いて、CO2挙動予測シミュレーションを実施し、CO2 圧入時の圧力 挙動のほか、貯留層内での移動・到達範囲を推定した。CO2の圧入レートは25万トン/年で、 3年間の連続圧入(計75万トン圧入)とした^{注1}。

^{注1} 平成 23 年度シミュレーションは 25 万トン/年の圧入レート,平成 24 年度シミュレーションは 20 万トン/年の 圧入レートであるのは、CO₂ の供給量の見直しにより計画変更したことによる。また、保守・点検の都合、モニ タリング計画との関連、貯留層の状況等により、一時的に、あるいは長期的に一方の貯留層だけに圧入するケー

なお、後述のインで示す滝ノ上層圧入井の掘削結果を踏まえた予測では、圧入レートを坑底 圧の規定上限圧力で制限するため、圧入は1,500トン/年程度の圧入レートで開始するが、圧 入開始直後に坑底圧の規定上限圧力に到達するため圧入レートを下げ、その後概ね300トン /年程度の圧入レートで推移する。3年間の累計圧入量は、1,000トン程度となる。

#### 7) 滝ノ上層 T1 部層における CO2 挙動予測(圧入井掘削前)

#### a. 概要

Computer Modelling Group Ltd. 社の GEM (ver2010.12) を使用し、シミュレーションで 考慮した貯留メカニズムは、以下の3種類である

- ・泥岩の毛細管圧力と低浸透性による物理的トラッピング
- ・残留ガス飽和率とガス相対浸透率のヒステリシスによる残留 CO2 トラッピング
- ・CO2の地層水への溶解による溶解トラッピング

圧入位置については、陸上から掘削可能な圧入井の仕様に応じて設定した。圧入井にお
 ける滝ノ上層 T1 部層の全区間に対して CO₂ を圧入した。最終坑径を 8.5 インチ(半径
 0.10795m)、チュービング径を 3.5 インチ(内半径 0.038m)とした。

圧入時に許容される最大坑底圧力については,苫小牧 CCS-1の振老層下部でのリークオ フ圧力の結果から,地層破壊圧力の90%(41,853kPa)とした^{注1}。

## b. パラメータ

シミュレーションパラメータは,苫小牧 CCS-1 のデータ(圧入テスト,コア分析値,物 理検層測定値等)および文献値により,第2.2-13表に示す値を用いた。

スも想定されることから、それぞれに圧入する最大値として、圧入レートを設定している。

注1 苫小牧 CCS-1 の遮蔽層におけるリークオフテストで確認したリークオフ圧力は、その深度(垂直深度 2,352m) で、45.3MPa(461.6kg/cm²)であった。これは等価泥水比重で 1.96g/cm³となる。この等価泥水比重から、滝ノ上 層圧入井の遮蔽層深度(垂直深度 2,418m)におけるリークオフ圧力を求め(473.9kg/cm²)、その 90%の値 (426.5kg/cm²=41,853kPa)をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。

			A	
モデル	滝ノ上層 T1 部層 2011 モデル			
サイズ	8km×12km×4km (ideal volume:24km×24km×4km)			
グリッド	80×120×106 グリッド			
アクティブ・ブロック数	384, 050			
基準温度	91.0°C (2,419.4m)			
基準圧力	34,370kPa (2,419.4m)			
CO2 圧入レート, 圧入期間	250,000 トン/年×3 年			
圧入圧力上限	41, 853kPa			
岩石性状	溶岩(貯留層)	凝灰岩(貯留層)	泥岩(遮蔽層)	
亚 齿 ጊ 附 索	0.125	0 127	0.15	
十均化原平	Bennion(2005) ^[1]	0.121	0.15	
平均浸透率:mD	2.7	0.0072	0.000035	
圧縮率:kPa ⁻¹	8.073×10-7(測定値)			
塩分濃度:ppm (NaC1)	35,100 (Cl ⁻ = 21,300ppm)			
相対浸透率	溶岩(貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)	
気相 相対浸透率 Krg	Bennion (2005) ^[1]		Corey (1954) ^[2]	
液相 相対浸透率 Krw			van Genuchten (1980) ^[3]	
臨界ガス飽和率 Sgc	0.04 Bennion (2005) ^[1]		0.05	
不動水飽和率 Swir	0.558 Bennion (2005) ^[1]		0.8	
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.	241		
	from default value of GEM			
毛细签工力曲纳	溶岩(貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩(遮蔽層)	
七种官庄刀曲禄	Bennion (2006) ^[4] , v	an Genuchten (1980) ^[3]	測定值	

第2.2-13表 シミュレーションパラメーター覧(平成23年度地質モデル)

#### c. CO2 圧入時の挙動

50 個のモデルに対して、25 万トン/年×3 年間の挙動予測シミュレーションを行ったと ころ、全てのモデルにおいて 25 万トン/年×3 年間の圧入が可能であった。なお、実際の CO₂圧入の際に挙動予測シミュレーション結果から大きく外れる場合には、圧入対象層が 2 層準あるので、両層の圧入性を考慮したうえで、圧入量を振り分け、安全に圧入可能な範 囲内で CO₂を圧入する予定である。

圧入終了時の坑底圧力(貯留層上限深度での坑内圧力)の圧力上昇量を序列化して,50 個のモデルの累積確率分布を作成した。圧力上昇量が当該モデル以下になる確率をそれぞ れ P10, P50, P90のパーセンタイル値として設定した(第2.2-40図)。

^[1] Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, pp. 7-9, p. 12

^[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 38-41

^[3] van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

^[4] Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-Brine systems. paper SPE 99325, p. 9



第 2.2-40 図 50 個のモデルの 3 年間の圧入による圧力上昇量の累積確率分布(平成 23 年度地質 モデル)

これらの3つのモデルについて CO2 挙動予測シミュレーションを行った。

- a) P10 モデル: 圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 10%
- b) P50 モデル: 圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 50%
- c) P90 モデル: 圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 90%

3 つのモデルに与えられた浸透率分布の例を,第2.2-41 図に示す。また,3 つの貯留層 モデル(P10 モデル,P50 モデル,P90 モデル)における圧入期間(3 年間)の CO₂圧入に 伴う坑底圧力,圧入レート,累計圧入量および坑口圧力の経時変化を,第2.2-42 図に示 す。

いずれのモデルにおいても設定した圧入圧力上限(41,853kPa)には達せずに,25万トン/年×3年間のCO₂を全量圧入が可能である。また、いずれのモデルにおいても貯留層圧力は圧入終了後に速やかに低下し、圧入終了5年後にはほぼ初期貯留層圧力に近い約35,000kPa(∠P = 700kPa)まで低下している。



JCCS T1 2011 STUDY





注: 上から順に P10 モデル, P50 モデル, P90 モデル。単位は, mD。

## 第2.2-41 図 浸透率分布 (平成23年度地質モデル)



注:上から順にP10モデル,P50モデル,P90モデル。

## 第2.2-42図 各モデルにおける圧入時の挙動(平成23年度シミュレーション結果)

## d. 貯留層圧力分布

3年間の CO₂ 圧入終了時点における深部塩水層圧力の変化(圧入前の初期圧力からの変化量)を,第2.2-43図~第2.2-45図に示す。いずれのモデルにおいても圧力の広がりについては圧入井を中心にほぼ南北に長軸をもつ楕円状に広がる。



注: 左側: 圧入終了時(3年後),右側: 50年後。上段: 平面分布(k方向セル38),下段: 東西断面(位置は 平面分布の点線の位置)。単位は,kPa。

# 第 2.2-43 図 CO2 圧入前からの圧力変化量の推移(P10 モデル) (平成 23 年度シミュレーション 結果)



注: 左側: 圧入終了時(3年後),右側: 50年後。上段: 平面分布(k方向セル38),下段: 東西断面(位置は 平面分布の点線の位置)。単位は, kPa。

第 2. 2-44 図 CO₂ 圧入前からの圧力変化量の推移(P50 モデル)(平成 23 年度シミュレーション 結果)


注: 左側: 圧入終了時(3年後),右側: 50年後。上段: 平面分布(k 方向セル38),下段: 東西断面(位置は 平面分布の点線の位置)。単位は, kPa。

# 第 2.2-45 図 CO₂ 圧入前からの圧力変化量の推移(P90 モデル)(平成 23 年度シミュレーション 結果)

#### e. シミュレーションによる貯留 CO2の長期挙動予測

3 つの貯留層モデル (P10 モデル, P50 モデル, P90 モデル) について, 圧入開始から 1,000 年間 (圧入 3 年間, 圧入終了後 997 年間)の CO₂の挙動予測シミュレーションを実 施した。以下にモデルごとの結果の比較を示す。

#### f. 圧入に伴う貯留層内の CO₂ 分布予測

圧入終了時点(圧入開始から3年後), 圧入開始から200年後および1,000年後におけるCO2飽和度の推移を,第2.2-46図~第2.2-48図に示す。また,CO2が地層水に溶解した状態の溶解CO2量の推移を,第2.2-49図~第2.2-51図に示す。なお,いずれのケースにおいても,遮蔽層(振老層,平取+軽舞層)へはCO2は広がらない。



第2.2-46 図 P10 モデルにおける CO2 飽和度の推移(平成23 年度シミュレーション結果)



段:東西断面(位置は平面分布の点線の位置)。

第2.2-47図 P50 モデルにおける CO2 飽和度の推移(平成23 年度シミュレーション結果)



第2.2-48 図 P90 モデルにおける CO2 飽和度の推移(平成23 年度シミュレーション結果)



段:東西断面(位置は平面分布の点線の位置)。単位は,mol/kg。

第2.2-49図 P10 モデルにおける溶解 CO2 量の推移(平成23 年度シミュレーション結果)



段:東西断面(位置は平面分布の点線の位置)。単位は, mol/kg。

第2.2-50 図 P50 モデルにおける溶解 CO2 量の推移(平成23 年度シミュレーション結果)



段:東西断面(位置は平面分布の点線の位置)。単位は, mol/kg。

第2.2-51 図 P90 モデルにおける溶解 CO2 量の推移(平成23 年度シミュレーション結果)

a) P10 モデル

CO₂は、高浸透率な滝ノ上層 T1 部層上部に選択的に圧入される。圧入された CO₂は西方 向に伸長して広がり、圧入終了時点で気相 CO₂^{注1}は滝ノ上層圧入井から水平的に約 600m 先 まで、溶解 CO₂は約 800m 先まで広がる。圧入終了後は、気相 CO₂はほとんど移動せず溶解 により CO₂飽和度が減少する。溶解 CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、 やや下方へ移動する。

b) P50 モデル

CO₂は,比較的高浸透率な滝ノ上層 T1 部層上部に大部分が圧入されるものの,滝ノ上層 T1 部層下部にもある程度は圧入される。P10 モデル同様,圧入された CO₂ は西方向に伸長 して広がり,圧入終了時点で気相 CO₂ は圧入井から水平的に約 450m 先まで,溶解 CO₂ は約 700m 先まで広がる。圧入終了後は,気相 CO₂ は殆ど移動せず,溶解により CO₂ 飽和度が減 少する。溶解 CO₂は, CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため,やや下方へ移動する。

c) P90 モデル

CO₂は、貯留層の比較的高浸透率な滝ノ上層 T1 部層上部に大部分が圧入されるものの、 滝ノ上層 T1 部層下部にもある程度は圧入される。P10 モデル、P50 モデル同様、圧入され た CO₂は坑井を中心として広がり、圧入終了時点で気相 CO₂は圧入井から水平的に約 400m 先まで、溶解 CO₂は約 500m 先まで広がる。圧入終了後は、気相 CO₂はほとんど移動せず、 溶解により CO₂飽和度が減少する。溶解 CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加する ため、やや下方へ移動する。

#### 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)

a. 概要

Computer Modelling Group Ltd. 社の GEM (ver2014.10) を使用し、シミュレーションで 考慮した貯留メカニズムは、以下の3種類である

- ・泥岩の毛細管圧力と低浸透性による物理的トラッピング
- ・残留ガス飽和率とガス相対浸透率のヒステリシスによる残留 CO2 トラッピング
- ・CO2の地層水への溶解による溶解トラッピング

圧入井における滝ノ上層の仕上げ全区間に対して CO₂を圧入する設定とした。最終坑径 を 8.5 インチ(半径 0.10795m), チュービング径を 3.5 インチ(内半径 0.038m)とした。

圧入時に許容される最大坑底圧力については、滝ノ上層圧入井の振老層下部泥岩(遮蔽 層)で実施したエクステンデットリークオフテストで取得したリークオフ圧力を地層の破 壊圧と仮定し、その 90% (38,000kPa@PT センサー深度)と設定した。

b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、滝ノ上層圧入井のデータ(圧入テスト、コア分析値、 物理検層測定値等)および文献値により、第2.2-14表に示す値を用いた。

^{注1} CO₂は,温度圧力条件により液体と気体の性状を合わせ持った状態となるが,シミュレータの中では「気相」 として取り扱われるため,ここでは「気相」と称する。

滝ノ上層の貯留岩性状が予想以上に低かったため、地質モデルの一部分を切出した 2km × 2km のセクターモデルを作成した。さらにより正確なシミュレーションを実施するため に、100m×100m のセクターモデルとし、滝ノ上層圧入井が通過するグリッドを 5m×5m の グリッドに細分の上、シミュレーションを実施した(第 2.2-52 図)。

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2015 モテ	デル					
サイズ	8km×12km×4km ⇒ 2km×2km×1km (セクターモデル)						
グリッド	80×120×106 グリッド ⇒ 20×20×62(セクターモデル)						
アクティブ・ブロック数	24,800(セクターモデル)	)					
基準温度	88.3℃(2,340m/PT センサー深度)						
基準圧力	32,600kPa(2,340m/PT センサー深度)						
CO ₂ 圧入レート, 圧入期間	200,000 トン/年×3 年(設定最大レート)						
圧入圧力上限	38,000kPa(PT センサー深度)						
岩石性状	凝灰岩(貯留層)	泥岩 (遮蔽層)					
平均孔隙率	滝ノ上層圧入井 AI 分布から推定	0.15					
平均浸透率:mD	滝ノ上層圧入井ビルドアップテスト結果等 から推定	0.000035					
圧縮率:kPa ⁻¹	8.073×10⁻7(測定値)						
塩分濃度:ppm (NaCl)	35, 100 (C1 ⁻ = 21, 300ppm)						
相対浸透率	凝灰岩(貯留層)	泥岩(遮蔽層)					
気相 相対浸透率 Krg 液相 相対浸透率 Krw	Bennion (2005) ^[1]	Corey (1954) ^[2] van Genuchten (1980) ^[3]					
臨界ガス飽和率 Sgc	0.04 Bennion (2005) ^[1]	0.05					
不動水飽和率 Swir	0.558 Bennion (2005 ^{) [1]}	0.8					
長十確のガス的和索 Sarmay	0. 241	_					
取八次亩ルヘ砲和半 Sgrmax	from default value of GEM						
毛細管圧力曲線	凝灰岩(貯留層)	泥岩(遮蔽層)					
	Bennion (2006) ^[4] , van Genuchten (1980) ^[3]	測定値					

第2.2-14表 シミュレーションパラメーター覧(平成27年度地質モデル)

^[1] Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, pp. 7-9, p. 12

^[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 38-41

^[3] van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892-898

^[4] Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on  $CO_2$  relative permeability at reservoir condition in  $CO_2$ -Brine systems. paper SPE 99325, p. 9



注:全域で作成した地質モデルからセクターモデル(2km×2km)を切出し,その中を100m×100mに分割した。 そのうちの圧入井が通過するグリッドをさらに 5m×5m に分割してシミュレーションを実施した。

第2.2-52 図 平成27年度シミュレーションに用いたセクターモデルとグリッド

#### c. CO2 圧入時の挙動

E入中の坑底圧, 圧入レート, 累計圧入量および圧入開始から 50 年後までの圧入井に おける坑底圧変化の関係を, 第2.2-53 図に示す。

圧入は 1,500 トン/年程度の圧入レートで開始するが,シミュレーションの設定上,圧 入開始直後に坑底圧の規定上限圧力 (38MPa) に到達するため,圧入レートを下げる必要が あり,約1年後には 300 トン/年程度の圧入レートとなる。圧入開始から 1.5 年程度経過 したころから,圧入井近傍の CO₂ 濃度が高まるため,地層水に対する CO₂ の浸透性が増す ことから,若干圧入レートが上昇するものと考えられる。

3年間での累計圧入量は、1,000トン程度と推定される。



第2.2-53 図 CO2 圧入時の挙動(平成27 年度シミュレーション結果)

# d. 貯留層圧力分布

CO2 圧入終了時からの貯留層圧力分布の推移を,第2.2-54 図に示す。

3年間の CO₂ 圧入により上昇した圧力は, 圧入井の周辺約 50m 程度まで伝播する(第 2.2-54 図上段)。また, 垂直方向には, 上下 20~30m の範囲の圧力が上昇する。

その後圧力は低下し,200年後には坑跡に沿ってわずかな影響を残す程度まで圧力は低下する。しかしながら,それ以降ほとんど圧力は下がらず,1,000年たってもその影響はほとんど変わらない(第2.2-54図の中段および下段)。



注:1. 左:坑跡が通過する地点の平面図,右:その地点の南北方向の断面図。単位は,kPa。

2. 上段: 圧入開始から3年後(圧入停止直後),中段: 圧入開始から200年後,下段: 圧入開始から1,000年後。

- 3. 圧力の上昇はマイナスで示され、寒色ほど圧力の上昇量が高い。
- 4. シミュレーションに使用する地質モデルを、圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために、地質モデルの グリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは 100m×100m のグリッドであるが、圧入井が通過するグリッドは 5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した(平面図では 5m×5m のグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリッ ドは、垂直方向は約 2mに分割した。

# 第2.2-54 図 CO2 圧入終了時からの圧力変化量の推移(平成27 年度シミュレーション結果)

# e. 圧入に伴う貯留層内の CO₂分布予測(貯留 CO₂の長期挙動予測)

CO2 飽和度の推移を, 第2.2-55 図に示す。

3年間の CO₂ 圧入により CO₂が分布する範囲は, 圧入井が通過するセルとそのセルに隣接 するセル程度のごく狭い範囲となる。水平方向に半径 10m 程度, 垂直方向に上下~4m 程度 と推定される(第 2.2-55 図上段)。 圧入停止後に CO₂濃度は低下するが, 圧入井周辺の CO₂濃度が 20%程度となって以降はほ とんど低下せず, 200 年後と 1,000 年後の状況にほとんど変化はない(第 2.2-55 図の中段 および下段)。



注:1. 左:坑跡が通過する地点の平面図、右:その地点の南北方向の断面図。

 上段: 圧入開始から3年後(圧入停止直後),中段: 圧入開始から200年後,下段: 圧入開始から1,000年後。
 シミュレーションに使用する地質モデルを,圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために,地質モデル のグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが,圧入井が通過するグリッドは 5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した(平面図では5m×5mのグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリ ッドは,垂直方向は約2mに分割した。

#### 第2.2-55図 CO2 飽和度の推移(平成27年度シミュレーション結果)



注:1. 左: 坑跡が通過する地点の平面図,右: その地点の南北方向の断面図。単位は, mol/kg。

上段: 圧入開始から3年後(圧入停止直後),中段: 圧入から300年後,下段: 圧入終了から1,000年後。
 シミュレーションに使用する地質モデルを,圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために,地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが,圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した(平面図では5m×5mのグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリッドは,垂直方向は約2mに分割した。

### 第2.2-56 図 溶解 CO2 量の推移(平成27年度シミュレーション結果)

3年間の CO₂ 圧入により溶解 CO₂は、滝ノ上層圧入井が通過するセルとそのセルに隣接する 1~2 セル程度のごく狭い範囲に分布する。溶解 CO₂ 量の分布は、水平方向に半径 10~15m 程度、垂直方向に上下 4~6m 程度と推定される(第 2.2-56 図上段)。

圧入停止後にはさらに周辺の溶解 CO₂ 量の増加域は拡大するが、水平方向に半径 15m 程度、垂直方向に 4~5m 程度の範囲に影響を与えるものと推定される。浸透性が低いために 影響範囲はそれ以上拡大せず、200 年後と1,000 年後の状況にほとんど変化はない(第2.2-56 図の中段および下段)。

#### f. CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留 CO₂の3つの貯留形態を, Movable (移動する可能性がある気相 CO₂), Dissolved (溶 解 CO₂), Trapped (孔隙等にトラップされ動かない気相 CO₂)の3つに表現し, CO₂ 圧入量 に対する割合の経時変化を, 第2.2-57 図に示す。



注) 左図:時間スケールが0~30年。右図:時間スケールが0~1,000年

第 2. 2-57 図 CO2の貯留フォーム(割合)の変化(平成 27 年度シミュレーション結果)

圧入開始初期には圧入した CO₂のほとんどは溶解するが、貯留層の浸透性が低いために 影響範囲が広がらず、すぐに溶解しきれなくなり、Movable CO₂の割合が増加する。

圧入停止後に徐々に溶解 CO₂量が増加するが,圧入停止後 50 年程度で安定する。圧入終 盤より圧入井から徐々に周辺に移動した Movable CO₂がトラップされ,約 200 年でその割 合はほとんど 0 となる。

圧入停止から 200 年程度以降では, Movable, Dissolved および Trapped の割合は安定する。

- ウ) 滝ノ上層 T1 部層における CO2 挙動予測(暫定的な圧入実績を踏まえたシミュレーション/ 変更申請時)
  - a. 概要

圧入実績を踏まえ、当初申請時の地質モデルを修正し、2018 年 2 月~2020 年 3 月まで
 に、750 トンの CO₂を滝ノ上層 T1 部層に圧入する CO₂挙動予測シミュレーションを実施し
 た。

### b. 圧入実績

滝ノ上層への CO₂ 圧入は 2018 年 2 月 6 日に開始したが, 2 月 26 日に地上設備の不具合に より圧入を停止した(第 2.2-58 図)。問題対応等の後 7 月 31 日に圧入を再開したが, PSA オ フガス供給元の都合により PSA オフガスの供給が途絶えたため, 9 月 1 日に圧入を停止し た。9 月 1 日時点での累計圧入量は 98.2t-CO₂ となる(第 2.2-59 図)。



第2.2-58 図 滝ノ上層試験圧入記録(2018年2月)



第2.2-59図 滝ノ上層試験圧入記録(2018年7月~9月)

### c. CO2 圧入時の挙動とパラメータの調整

CO₂挙動予測シミュレーションは2018 年 8 月 31 日までの圧入実績を考慮し,2018 年 2 月 ~2020 年 3 月までに累計750 トンのCO₂を圧入するシミュレーションを実施した。2018 年 8 月 31 日までは圧入中の仕上げ区間上端の圧力(坑底圧)を反映するように,平成27 年度 モデルのパラメータを修正した(第 2.2-60 図)。2018 年 7 月以降の圧入実績と良好に一致 させることができた(第 2.2-61 図)。

なお,本シミュレーションは,フォールオフテストによる圧力解析結果などは反映でき ていない 2018 年度の暫定的な結果である。



注:1. 第2.2-25 図を修正して使用。

2. 地質モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「浸透率=0.000039546×e^{32.1823×孔隙率}」を用いた。

3. CCS1: 苫小牧 CCS-1(現苫小牧 OB-1)、Mst: 泥岩、lap-Tf: 火山礫凝灰岩、vc-Sltst: 火山岩質シルト岩、vc-Sst: 火山岩 質砂岩、An lava: 安山岩質溶岩、vc-Cgl、火山岩質礫岩、sdy-Tf: 砂質凝灰岩、IW-1: 苫小牧 IW-1



第2.2-60図 滝ノ上層 平成30年度(暫定)シミュレーションによるヒストリーマッチ

第2.2-61 図 滝ノ上層 CO2 挙動予測(平成 30 年度(暫定)シミュレーション)

### d. 貯留層圧力分布

圧力変化に関するシミュレーション結果を第2.2-62 図に示す。第2.2-61 図に示すように、 シミュレーションでは圧入圧力が上限圧力に達している。そのため、圧入時および圧入終了 直後の圧入井の近傍では、初期圧から最大 5MPa 程度の貯留層圧力の上昇が生じている。圧入 終了後、速やかに圧力上昇は解消され、圧入終了から2 年後には、圧力上昇範囲は広がるが、 圧力上昇が1,000kPa(1MPa)を超える箇所は消滅する。圧入終了から200 年後には圧力上昇範 囲がさらに拡大するが、坑井のごく近傍以外は100kPa に満たない低い圧力上昇となる。

# e. 圧入に伴う貯留層内の CO₂分布予測(貯留 CO₂の長期挙動予測)

CO₂ 飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第 2.2-63 図に,溶解 CO₂ 量の分布に対 するシミュレーション結果を第 2.2-64 図に示す。

CO2 飽和度の上昇域および溶解 CO2 量の分布は、圧入井のごく近傍に限定される。



注:1. 左: 貯留層上面の平面図,右: 坑跡に沿った断面図。

- 2. 上段: 圧入終了時,中段: 圧入終了から2年後,下段: 圧入終了から200年後。
- 3. シミュレーションに使用する地質モデルを, 圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために, 地質モデルの グリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは 100m×100m のグリッドであるが, 圧入井が通過するグリッドは 5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した(平面図では 5m×5m のグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリ ッドは, 垂直方向は約 2m に分割した。

第2.2-62図 圧力変化のの推移(平成30年度(暫定)シミュレーション)



注:1. 左:上方から俯瞰した平面図,右:坑跡に沿った断面図。

 上段: 圧入終了時,中段: 圧入終了から 200 年後,下段: 圧入終了から 1,000 年後。
 シミュレーションに使用する地質モデルを,圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために,地質モデルの グリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは 100m×100m のグリッドであるが,圧入井が通過するグリッドは 5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した(平面図では 5m×5m のグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリ ッドは,垂直方向は約 2m に分割した。

第2.2-63 図 CO2 飽和度の推移(平成30 年度(暫定)シミュレーション)



- 注:1. 左:上方から俯瞰した平面図,右:坑跡に沿った断面図。
  - 上段: 圧入終了時,中段: 圧入終了から 200 年後,下段: 圧入終了から 1,000 年後。
     シミュレーションに使用する地質モデルを,圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために,地質モデルの グリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは 100m×100m のグリッド,圧入井が通過するグリッドは 5m×5m(1/20) としてシミュレーションを実施した(平面図では 5m×5m のグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリッドは,垂直 方向は約 2m に分割した。

第2.2-64 図 溶解 CO2 量の推移(平成 30 年度(暫定)シミュレーション)

### f. CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留 CO₂の3つの貯留形態を、Movable(移動する可能性がある気相 CO₂)、Dissolved(溶
 解 CO₂)および Trapped(孔隙等にトラップされ動かない気相 CO₂)の3つに表現し、CO₂ 圧入
 量に対する割合の経時変化を、第2.2-65 図に示す。



注: 左図;時間スケールが0~30年。右図;時間スケールが0~1,000年。



圧入開始初期には圧入した CO₂のほとんどは溶解するが, 貯留層の浸透性が低いために影響範囲が広がらず, すぐに溶解しきれなくなり, Movable CO₂の割合が増加する。圧入停止後に徐々に Movable CO₂が溶解し, 圧入開始後 320 年程度にはほぼ全ての Movable CO₂が溶解もしくはトラップされ消滅する。

#### I) 萌別層砂岩層における CO2 挙動予測(当初申請時)

a. 概要

シミュレータとして GEM (ver. 2010. 12) を使用した。属性モデルにおいて分類した堆積 相区分(第 2. 2-29 図)を,以下の 2 種類に整理し,それぞれに岩相を設定した。

砂岩:堆積相区分4・8・9

泥岩:堆積相区分1・2・3・5・6・7・10

萌別層圧入井(圧入位置)は、萌別層砂岩層を対象とした AI バージョン結果をもとに、 貯留 CO₂の広がりが三次元弾性波探査の範囲内に留まるようにすることも考慮して、想定 する陸上基地(CO₂圧入基地)からの掘削方位を設定し、仕上げ区間は圧入井の萌別層砂岩 層にあたる全区間とした。また, 萌別層砂岩層における坑井の最終坑径を 8.5 インチ(半径 0.10795m), チュービング径を 3.5 インチ(内半径 0.038m)とした。

圧入時に許容される最大坑底圧力は,苫小牧 CCS-2の萌別層泥岩層下部のリークオフ圧 力から,予測される地層破壊圧の90%(13,410kPa)とした^{注1}。

#### b. パラメータ

シミュレーションパラメータは,苫小牧 CCS-1 および苫小牧 CCS-2 で得られたデータ (圧入テスト,コア分析値,物理検層測定値等)および文献値から設定した(第2.2-15表)。

^{注1} 苫小牧 CCS-2 の遮蔽層におけるリークオフテストで確認したリークオフ圧力は、その垂直深度(991m)において、 14.6MPa(148.6kg/cm²)であった。これは等価泥水比重で 1.50g/cm³となる。この等価泥水比重から、萌別層圧入 井の遮蔽層下限深度(垂直深度 1,012.2m)のリークオフ圧力を求め(151.8kg/cm²)、その 90%の値 (136.65kg/cm²=13,410kPa)をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。

モデル	萌別層砂岩層 2011 モデル					
サイズ	$8$ km $\times$ 15km $\times$ 1.5km					
グリッド	40×75×43 グリッド					
アクティブ・ブロック数	97, 024					
基準温度	44.78°C (1,046.835mVD)					
基準圧力	10,669.4kPa (1,046.835mVD)					
CO2 圧入レート, 圧入期間	250,000 トン/年×3 年					
圧入圧力上限	13, 410kPa					
深部塩水層容積(面積×層厚×孔隙率)	$49 imes10^9 { m Rm}^3$					
岩石性状	砂岩	泥岩				
平均孔隙率	0.281	0.342				
平均浸透率:mD	17	0.00173				
圧縮率:kPa ⁻¹	1.532×10 ⁻⁶ (測定値)					
塩分濃度:ppm (NaCl)	18,000 (Cl ⁻ = 10,350mg/L)					
相対浸透率	砂岩	泥岩				
気相 相対浸透率 Krg	測定値	Corey (1954) ^[1]				
液相 相対浸透率 Krw	測定値	van Genuchten (1980) $^{[2]}$				
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05	0.05				
不動水的和來 Swin	0.49	0.638				
	測定値	Bennion (2007) ^[3]				
是十疋のガス的和恋 Saman	0.275	_				
取八残笛》不起相学 Sgrillax	Holtz (2002) ^[4]					
毛细管压力	砂岩	泥岩				
	van Genu	uchten (1980) ^[2]				
Pc : kPa	4.04	750				

第2.2-15 表 シミュレーションパラメーター覧(平成23年度地質モデル)

^[1] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 38-41

^[2] van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

^[3] Bennion, D. B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO₂-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p. 5

^[4] Holtz, M.H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx : A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction. paper SPE 75502, p.7

#### c. ケーススタディ

以下のケーススタディを実施し、各パラメータがシミュレーションの結果に与える影響 を検討した。各ケースの概要を,第2.2-16表に示す。

第 2.2-16 表 ケーススタディにおいて使用した各岩相に与えたパラメータ (平成 23 年度地質モ デル)

	砂岩層			泥岩層			深部		
ケース名	水平浸 透率 kh (mD)	垂直浸 透率 kv (mD)	垂直浸透率 /水平浸透率	堆積相	水平浸 透率 kh (mD)	垂直浸 透率 kv (mD)	スレショ ルド圧力 (MPa)	堆積相	塩水層 容積 (Rm ³ )
1)ベースケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^{9}$
2)低浸透率ケース	9	0.9	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^{9}$
3)高浸透率ケース	25	2.5	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^{9}$
4)高 kv/kh ケース	17	11. 475	0.675	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^{9}$
5)遮蔽性能(低)ケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.007	0.007	0.012	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^{9}$
6) 萌別層砂岩層上限変更ケース	17	1.7	0.1	4, 5, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 6, 7, 10	$49 \times 10^9$
7)深部塩水層容積(小)ケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$3 \times 10^{9}$

1) ベースケース

苫小牧 CCS-1 圧入テストにおける圧力解析結果 (No.3 圧入テスト: 25mD, No.3a 圧入 テスト: 9mD) の平均値 kw = 17mD を,水平浸透率 (kh) として設定した。垂直浸透率は,水平浸透率の 1/10 (kv/kh = 0.1) とした。

 (低浸透率ケース 砂岩層の浸透率を,kh = 9mD として設定した。垂直浸透率は、水平浸透率の1/10 とした。

3) 高浸透率ケース

砂岩層の浸透率を, kh = 25mD として設定した。垂直浸透率は, 水平浸透率の 1/10 とした。

4) 高 kv/kh ケース

砂岩層の水平浸透率/垂直浸透率を変化させて設定した(kv/kh = 0.675:kv = 11.475mD)。

5) 遮蔽性能(低)ケース

苫小牧 CCS-2 コア試料の残差圧力測定で正しい測定ができなかった試料の測定値を使用し, 泥岩層の水平浸透率がベースケースより高く, スレショルド圧力が極端に低いケースを想定した。

6) 萌別層砂岩層上限変更ケース

泥岩層のパラメータを与えている堆積相区分5(第2.2-13図参照)に砂岩層のパラメ ータを設定した。

7) 深部塩水層容積(小)ケース

深部塩水層容積を貯留層の分布域・三次元弾性波探査データの範囲内に限定したケー スを想定した。

d. CO2 圧入時の挙動

ベースケースにおける圧入挙動を,第2.2-66 図に示す。想定圧入レートおよび期間で ある25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO2を圧入可能である ことを確認した。ベースケースでは,坑底圧力が,圧入圧力上限(13.4MPa)以下で圧入 することができ,圧入終了時点での坑底圧力は13.2MPaとなった。圧入終了後には坑内 圧力は大きく低下し,圧入終了5年後には10.6MPaとなり,以後ゆっくりと圧入前の地 層圧(10.3MPa)に近づいていく。



注: 萌別層圧入井の掘削により確認した萌別層の浸透率は、本シミュレーションの設定値よりも高いことが確認された。よって、CO2 圧入時の圧力上昇は、本シミュレーション結果よりも低くなることが予想される。

低浸透率ケースにおける圧入挙動を,第2.2-67図に示す。低浸透率ケースでは,圧入開 始後すぐに坑底圧力が圧入圧力上限(13.4MPa)に達して,圧入レートが11~16万トン/ 年,累計圧入量が45.2万トンとなった。ベースケースと同様に圧入終了後に坑底圧力は

第2.2-66 図 ベースケースにおける圧力挙動(平成23年度シミュレーション結果)

大きく低下し, 圧入終了 5 年後には 10.7MPa 程度となり, 以後ゆっくりと圧入前の圧力 (10.3MPa) に近づいていく。



注: 萌別層圧入井の掘削により確認した萌別層の浸透率は、本シミュレーションの設定値よりも高いことが確認された。よって、CO₂圧入時の圧力上昇は、本シミュレーション結果よりも低くなることが予想される。

高浸透率ケースにおける圧入挙動を,第2.2-68 図に示す。想定圧入レートおよび期間 である25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO2を圧入可能である ことを確認した。高浸透率ケースでは坑底圧力が,圧入圧力上限(13.4MPa)以下の圧力で 圧入することができ,圧入終了時点では12.5MPaとなった。他のケースと同様に坑底圧力 は圧入終了後に圧力は大きく低下し,圧入終了5年後には10.6MPa程度となり,以後ゆっ くりと圧入前の圧力(10.3MPa)に近づいていく。

以上より, 貯留層の浸透率が高くなるにつれて坑底圧力の最大値は低くなることがわかる。

掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は 370mD と解析されている(第 2.2-5 表)。な お、萌別層圧入井掘削後に実施したフォールオフテストより得られたデリバティブプロッ トにおいて断層を示唆する挙動が認められなかったことから、この大きな値は断層に寄与 するものではない。

本計画を実施した場合,坑底圧力の上昇が大きくない高浸透率ケースに近い挙動をとる と予測される。したがって,圧入中に貯留層の圧力が遮蔽層の破壊圧に近づく可能性が低

第2.2-67図 低浸透率ケースにおける圧力挙動(平成23年度シミュレーション結果)

くなり、より安全に特定二酸化炭素ガスを圧入できると考えられる。なお、圧入中に貯留 層の圧力が遮蔽層破壊圧の90%となった場合、圧入を停止する。

本計画における遮蔽層の破壊圧の基準は、安全性を重視し、実際に地層が破壊される圧 力(Formation Breakdown)ではなく、リークオフ圧力を基準に採用し、その90%を圧入の 上限圧と規定している。萌別層圧入井掘削時に実施したエクステンデットリークテストの 解析から、遮蔽層の下限におけるリークオフ圧力は14.37MPaであり(第2.2-6表)、本計 画における実際の圧入圧力の上限は12.93MPa(=0.9×14.37MPa)となり、平成23年度シ ミュレーションにおいて予測していた圧入圧力上限13.4MPaよりも低くなる。なお、高浸 透率ケースにおける圧力挙動から、圧入圧力の上限が12.93MPaであっても安全に特定二 酸化炭素ガスを圧入できることがわかる。

また、平成 23 年度シミュレーションにおいては、25 万トン/年の圧入レートで3 年間 (累計圧入量 75 万トン)の CO₂圧入を想定しているが、本計画においては、原料ガスの供 給量や CO₂分離・回収設備の能力の制約から、20 万トン/年、3 年間で 60 万トンが上限であ り、この上限量に変更はない。このことからも、坑底圧の上昇は平成 23 年度シミュレーシ ョン結果よりも下回ると判断できる。



注: 萌別層圧入井の掘削により確認した萌別層の浸透率は、本シミュレーションの設定値よりも高いことが確認された。よって、CO2 圧入時の圧力上昇は、本シミュレーション結果よりも低くなることが予想される。

第 2. 2-68 図 高浸透率ケースにおける圧力挙動(平成 23 年度シミュレーション結果)

e. 貯留層圧力分布

ベースケースにおける圧入終了時点の圧力分布を,第2.2-69 図に示す。南北に約800m, 東西約800mの範囲に1,000kPa(圧入前の地層圧の約10%)以上に上昇した領域が,南北 に約6km,東西約6kmの範囲に100kPa(圧入前の地層圧の約1%)以上に圧力が上昇した領 域が確認された。20年後までには圧力上昇の影響は見られなくなる。



注:1. 左側: 圧入終了時(3年後),右側:20年後。上段: 平面分布(k方向セル28),下段右: 東西断面(位置は平面分布の点線の位置)。単位は,kPa。

2. 萌別層圧入井の掘削により確認した萌別層の浸透率は、本シミュレーションの設定値よりも高いことが確認された。よって、CO₂圧入時の圧力分布は、本シミュレーション結果よりも低くなることが予想される。

# 第 2. 2-69 図 CO₂ 圧入前からの圧力変化量の推移(ベースケース)(平成 23 年度シミュレーション結果)

低浸透率ケースにおける圧入終了時点の圧力分布を,第2.2-70図に示す。南北に約600m, 東西約400mの範囲に1,000kPa(圧入前の地層圧の約10%)以上に上昇した領域が,南北 に約4km,東西約4kmの範囲に100kPa(圧入前の地層圧の約1%)以上に圧力が上昇した領 域が確認される。20年後までには圧力上昇の影響は見られなくなる。



注:1. 左側: 圧入終了時(3年後),右側:20年後。上段: 平面分布(k方向セル28),下段右: 東西断面(位置は平面分布の点線の位置)。単位は,kPa。

2. 萌別層圧入井の掘削により確認した萌別層の浸透率は、本シミュレーションの設定値よりも高いことが確認された。よって、C02圧入時の圧力分布は、本シミュレーション結果よりも低くなることが予想される。

# 第 2.2-70 図 CO₂ 圧入前からの圧力変化量の推移(低浸透率ケース)(平成 23 年度シミュレーション結果)

高浸透率ケースにおける圧入終了時点の圧力分布を,第2.2-71図に示す。南北に約800m, 東西約800mの範囲に1,000kPa(圧入前の地層圧の約10%)以上に上昇した領域が,南北 に約6.5km,東西約4kmの範囲に100kPa(圧入前の地層圧の約1%)以上に圧力が上昇した 領域が確認された。20年後までには圧力上昇の影響は見られなくなる。



注:1. 左側:圧入終了時(3年後),右側:20年後。上段:平面分布(k方向セル28),下段右:東西断面(位置は平面分布の点線の位置)。単位は,kPa。

2. 萌別層圧入井の掘削により確認した萌別層の浸透率は、本シミュレーションの設定値よりも高いことが確認された。よって、CO₂圧入時の圧力分布は、本シミュレーション結果よりも低くなることが予想される。

# 第 2.2-71 図 CO₂ 圧入前からの圧力変化量の推移(高浸透率ケース)(平成 23 年度シミュレーション結果)

圧入された特定二酸化炭素ガスは,貯留層(砂岩)の孔隙の地層水を押し出しながら広 がる。掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は370mDと解析されており,平成23年度シ ミュレーションの設定値より高くなっているが,地層に占める孔隙の割合(孔隙率)の予 実績が同程度であるため(第2.2-5表),貯留層圧力分布は平成23年度シミュレーション 結果と大きく変わることはない。よって,本計画を実施した場合には,高浸透率ケースと ほぼ同様の挙動を示すと予想される(第2.2-72図)。また,浸透率が平成23年度シミュレ ーションの設定値より高くなったことにより,圧入時の貯留層圧力は,第2.2-69図~第 2.2-71図で示す結果よりは低くなると予想され,安全上は問題がないと判断される。

#### f. 圧入に伴う貯留層内の CO₂分布予測

圧入終了時点(圧入開始から3年後), 圧入開始から200年後および1,000年後におけ る気相のCO2飽和度の分布を, 第2.2-65図~第2.2-67図に示す。また, 溶解CO2量の分 布を第2.2-68図~第2.2-70図に示す。 ベースケースでは、気相 CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約 400m、南北約 600m に高い CO₂飽和度の範囲が広がっている。同様に、溶解 CO₂は圧入井近傍において圧 入終了直後で東西約 400m、南北約 600m の範囲に広がる。その後、CO₂は水平方向にはほと んど動かなくなるが、貯留層内での上方への移動があり、遮蔽層下限までの移動が見られ る。20 年後以降、1,000 年後まではほとんど動かない。溶解 CO₂は、1,000 年後まで主に垂 直方向に分布を広げる。

低浸透率ケースでは、気相 CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約 200m、南北 約 200m に高い CO₂飽和度の範囲が広がっている。一方、溶解 CO₂は圧入井近傍において圧 入終了直後で東西約 400m、南北約 600m に広がっている。その後、CO₂は 1,000 年後までほ とんど動かない。溶解 CO₂は、1,000 年後まで分布を広げる。



注: 上段:3年後,中段:20年後,下段:1,000年後。左側:平面分布(k方向セル28),右側:東西断面(位置 は平面分布の点線の位置)。

第2.2-73 図 CO2 飽和度の推移(ベースケース)(平成23 年度シミュレーション結果)



注: 上段:3年後,中段:20年後,下段:1,000年後。左側:平面分布(k方向セル28),右側:東西断面(位置 は平面分布の点線の位置)。

第2.2-74図 CO2 飽和度の推移(低浸透率ケース)(平成23年度シミュレーション結果)



注:上段:3年後,中段:20年後,下段:1,000年後。左側:平面分布(k方向セル28),右側:東西断面(位置 は平面分布の点線の位置)。

第2.2-75図 CO2 飽和度の推移(高浸透率ケース)(平成23年度シミュレーション結果)


注: 上段:3年後,中段:20年後,下段:1,000年後。左側:平面分布(k方向セル28),右側:東西断面(位置 は平面分布の点線の位置)。単位は,mol/kg。

第2.2-76 図 溶解 CO2 量の推移 (ベースケース) (平成23 年度シミュレーション結果)



注: 上段:3年後,中段:20年後,下段:1,000年後。左側:平面分布(k方向セル28),右側:東西断面(位置 は平面分布の点線の位置)。単位は,mol/kg。

第2.2-77図 溶解 CO2量の推移(低浸透率ケース)(平成23年度シミュレーション結果)



注: 上段:3年後,中段:20年後,下段:1,000年後。左側:平面分布(k方向セル28),右側:東西断面(位置 は平面分布の点線の位置)。単位は,mol/kg。

第2.2-78 図 溶解 CO2量の推移(高浸透率ケース)(平成23年度シミュレーション結果)

高浸透率ケースでは、気相 CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約 400m、南北約 600m に高い CO₂飽和度の範囲が広がる。一方、溶解 CO₂は圧入井近傍において圧入終了 直後で東西約 600m、南北約 800m に広がる。その後、CO₂は水平方向にはほとんど移動しな くなり、貯留層内で上方方向に分布を広げる。20 年後以降、1,000 年後までには安定する が、溶解 CO₂は 1,000 年後まで主に垂直方向に分布を広げる。

圧入された特定二酸化炭素ガスは,貯留層(砂岩)の孔隙の地層水を押し出しながら広 がる。掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は370mDと解析されており,平成23年度シ ミュレーションの設定値より高くなっている(第2.2-5表)。しかしながら,第2.2-65図 ~第2.2-70図において浸透率による大きな差は見られないこと,また本計画における特定 二酸化炭素ガスの圧入量は平成23年度シミュレーションの予測よりも20%減であることか ら, C02圧入に伴う貯留層内のC02分布は,平成23年度シミュレーション結果と大きく変 わることはないと予測される。

## g. 遮蔽性能検討

遮蔽性能評価として,遮蔽層と貯留層の境界付近の鉛直に並んだ3つのセルにおけるCO₂ 飽和度と溶解CO₂量を精査した。圧入井が通るセルで最も圧力が上昇するので,このセル を選択し,貯留層上限のセル(堆積相区分8)を貯留層C,その直上の遮蔽層下限のセル (堆積相区分5)を遮蔽層B,さらにその直上の遮蔽層のセル(堆積相区分4)を遮蔽層A とした(上位から遮蔽層A,遮蔽層B,貯留層Cの順。第2.2-29図および第2.2-71図)。



注: 黄色:砂岩,青色:泥岩。

## 第2.2-71 図 萌別層の地質モデル断面図(平成23年度シミュレーション結果)

コア試料の分析結果では,堆積相区分2(遮蔽層Aよりも上部の泥岩)ではスレショル ド圧力0.75MPa,遮蔽層Bではスレショルド圧力1.65~1.67MPa が得られている。圧入終 了時における貯留層上限での圧力(貯留層C:12.1MPa)が,圧入終了時における遮蔽層下 限の圧力(遮蔽層B:10.9MPa)にスレショルド圧力(1.65MPa)を加えた圧力(12.55MPa) を超えていないことを確認した(第2.2-72図)。



第2.2-72図 遮蔽層Bと貯留層Cの圧力の時間変化(平成23年度シミュレーション結果)

なお、シミュレーションにおけるスレショルド圧力について、より安全サイドの設定と してコア試験で得られている最低値(0.75MPa)を採用して遮蔽性能の検討を行った。ベー スケースにおけるそれらのセルの CO₂飽和度および溶解 CO₂量の時間変化を、第 2.2-73 図 に示す。

圧入中は、遮蔽層Bと貯留層Cのセルの圧力差(約1.2MPa)が遮蔽層Bに設定したスレショルド圧力(0.75MPa)を越えるために、貯留層Cから遮蔽層Bへ  $CO_2$ の流れがあるが、遮蔽層Bにおける  $CO_2$  飽和度はほとんど変化がない。遮蔽層Bにおける溶解  $CO_2$  量は、圧入開始 1,000 年後に 0.16mol/kg-地層水だけ増加する。さらに、遮蔽層Aの溶解  $CO_2$  量は 圧入開始 1,000 年後でも  $3.4 \times 10^{-4}$ mol/kg-地層水と非常に低い。また、遮蔽層である泥岩は 1.73×10⁻³mD の非常に小さい浸透率を有している。

以上より、ベースケースにおいては圧入中に CO₂ が貯留層から遮蔽層へとわずかに移動 するものの、泥岩内の水に溶解して安定した状態となる。萌別層泥岩層は、所定量の CO₂ を貯留層するのに十分な遮蔽性能を有していると判断する。



注:上段:CO2飽和度,下段:溶解CO2量。上位から遮蔽層A,遮蔽層B,貯留層Cの順。

第 2.2-73 図 遮蔽層・貯留層境界付近での CO₂ 飽和度と溶解 CO₂ 量の時間変化 (ベースケース) (平成 23 年度シミュレーション結果)

遮蔽層性状が劣る場合(第 2.2-16 表の 5))の  $CO_2$  挙動を評価した。スレショルド圧力 を 0.012MPa,水平浸透率を  $7 \times 10^{-3}$ mD と、ベースケースよりも遮蔽層性状としては劣る値 を設定した。

ベースケースと同様に,遮蔽層と貯留層の境界付近の鉛直に並んだ3つのセルにおける CO₂ 飽和度と溶解 CO₂ 量を精査した。第2.2-74 図に,それらのセルの CO₂ 飽和度および溶 解 CO₂ 量の時間変化を示す。

ベースケースと同様に,遮蔽層Aと遮蔽層Bにおける CO₂ 飽和度は,ほとんど変化がない。遮蔽層Bにおける溶解 CO₂量は,0.55mol/kg-地層水(圧入開始1,000 年後)とベースケースより多い。また,遮蔽層Aの溶解 CO₂量は圧入開始1,000 年後で2.6×10⁻³mol/kg-地層水と非常に低い。

以上のことから,遮蔽性能が極端に劣るケースを想定した場合でもベースケースと同様 に遮蔽層内の水に溶解した CO₂ のわずかな上昇は認められるが,溶解して安定した状態で あると判断できる。

萌別層圧入井の掘削結果を踏まえて、遮蔽性能を検討した。

本書類の第 2.2 節(3)②x)において、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することから、遮蔽層の浸透率(1.73×10⁻³mD)・スレショルド圧 力(0.75MPa)を推定した(第 2.2-6 表)。また、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(30~37%)を取得した。

上記より,平成23年度シミュレーションは,安全側の浸透率・スレショルド圧力で実施 されているため,本井における掘削結果を勘案しても,安全側の評価ができていると考え られる。



注:上段:CO2飽和度,下段:溶解CO2量。上位から遮蔽層A,遮蔽層B,貯留層Cの順。

第2.2-74 図 遮蔽層・貯留層境界付近での CO₂ 飽和度と溶解 CO₂量の時間変化(遮蔽性能(低)ケ ース)(平成 23 年度シミュレーション結果)

#### h. CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留 CO₂の3つの貯留形態を Movable(移動する可能性がある気相 CO₂), Dissolved(溶 解 CO₂), Trapped(孔隙などにトラップされ動かない気相 CO₂)と表現し,各モデルの CO₂ 圧入量に対する割合の経時変化を,第2.2-74 図~第2.2-76 図に示す。

いずれのケースにおいても圧入終了後すぐに Movable CO₂は減少し,約50年でその割合 は9~10%程度となり,さらに減少を続ける。また,Trapped CO₂と Dissolved CO₂の割合は ゆっくりと変化する。その割合については,圧入開始後1,000年後においては,ベースケ ースでは Dissolved CO₂は約44%, Trapped CO₂は約55%,低浸透率ケースでは Dissolved CO₂は48%, Trapped CO₂は49%,高浸透率ケースでは Dissolved CO₂は45%, Trapped CO₂は 54%となった。この差については,圧入終了までのCO₂の広がり方による地層水との接触面 積の違い,CO₂が溶解し密度が大きくなった地層水の貯留層内での移動のしやすさ,貯留層 内の圧力状態が原因であると考えられる。

なお, 萌別層圧入井の掘削結果において貯留層の浸透率に大きな値が解析されているが (第2.2-5表), 孔隙率が同程度であるため, 平成23年度シミュレーション結果と大きく 変わることはなく, ほぼ同等のCO₂の貯留形態ごとの割合となると予測される。



第 2. 2-75 図 ベースケースにおける CO₂ の貯留フォーム(割合)の変化(平成 23 年度シミュレー ション結果)



第 2. 2-76 図 低浸透率ケースにおける CO₂の貯留フォーム(割合)の変化(平成 23 年度シミュレ ーション結果)



第 2. 2-77 図 高浸透率ケースにおける CO₂の貯留フォーム(割合)の変化(平成 23 年度シミュレ ーション結果)

オ) 萌別層砂岩層における CO2 挙動予測(変更申請時)

a. 概要

シミュレータは GEM を使用した。貯留層の孔隙率や浸透率などの属性値は苫小牧 IW-2 および苫小牧 CCS-1 で求めた属性値を堆積モデルに対応するように与えた。陸棚~陸域で 堆積した苫小牧 IW-2 の属性値は貯留層として良好な属性値が入力され,苫小牧 CCS-1 の同 層準の地層は斜面~堆積盆底で堆積したため東側よりもやや劣る属性値を入力した。

また, 萌別層砂岩層における坑井の最終坑径を 8.5 インチ(半径 0.10795m), チュービ ング径を 3.5 インチ(内半径 0.038m)とした。圧入時に許容される仕上げ区間上端におけ る最大坑底圧力は, 苫小牧 IW-2 の掘削時に取得した萌別層泥岩層下部のリークオフ圧力 を地層破壊圧と仮定し, その 90% (12.93MPa)とした^{注1}。圧入レートおよび圧入期間につい

注1 圧入上限圧力の詳細は,5.2(3)①を参照のこと。

ては,2016年4月6日~2018年3月31日までは実績値に基づき,それ以降は推定レートで 圧入を継続し,2020年3月31日までは累計圧入量が60万トンとなるように設定した。

b. パラメータ

シミュレーションパラメータは, 苫小牧 CCS-2 および苫小牧 OB-2 および苫小牧 IW-2 で 得られたデータ(圧入テスト, コア分析値, 物理検層測定値など)および文献値から設定 した(第 2.2-17 表)。これらを入力した属性モデルを基本とし,圧入実績と整合するよう に圧入区間のパラメータを妥当な値に修正して流動シミュレーションを実施した。

第2.2-17表 シミュレーションパラメーター覧(平成30年度(暫定)地質モデル)

モデル	平成 30 年度(暫定)地質モデル				
サイズ	$10 \text{km} \times 10 \text{km} \times 1$ , $500 \text{m}$				
グリッド	$110 \times 116 \times 118$				
アクティブ・ブロック数	981, 711				
基準温度	42.3°C@982mVD				
基準圧力	9,820kPa@982mVD				
CO ₂ 圧入レート, 圧入期間	実績および予定レート,4年間				
<b>F</b> 入 F 力 上 限	12,930kPa(仕上げ区間上端)				
	12,600kPa(温度圧力センサー位置)				
深部塩水層容積(面積×層厚×孔隙率)	5. $1 \times 10^{9} \text{Rm}^{3}$				
岩石性状	砂岩	泥岩			
平均孔隙率	0.27	0.299			
平均浸透率:mD	152 0.0015				
圧縮率:kPa ⁻¹	4. 56 $ imes 10^{-6}$				
塩分濃度:ppm (NaCl)	3,150mg/L				
相対浸透率	砂岩	泥岩			
気相 相対浸透率 Krg	0.144	Corey (1954) ^[1]			
液相 相対浸透率 Krw	1.00 van Genuchten (1980				
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05 0.05				
不動水的和來 Swin	0.49	0.638			
个到小跑和平 3w11	測定値	Bennion $(2007)$ ^[3]			
島十建四ガス的和索 Sarmay	0.275	_			
取八次由从八起市中 Ugrimax	Holtz (2002) ^[4]				
	砂岩	泥岩			
毛紲官圧力	測定値	van Genuchten (1980) ^[3]			
Pc : kPa	4.04	370			

# c. 圧入実績

萌別層への圧入は、2016年4月6日に開始した。圧入開始から2018年9月末までの萌別 層への圧入実績を第2.2-78図に示す。この間の最大圧入レートは約22万トン/年であり、 最大坑底圧(圧力・温度センサー(P/T Sensor))10.1MPaGに満たない。遮蔽層を破壊し

^[1] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 38-41

^[2] van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

^[3] Bennion, D. B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO₂-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p. 5

^[4] Holtz, M. H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx : A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction. paper SPE 75502, p.7

ない最大坑底圧(圧力・温度センサー(P/T Sensor))の12.63MPaGに対し十分余裕を持っ た安全な圧入がなされた。



注) 坑底温度・坑底圧力は圧力・温度センサー (P/T Sensor) の値 第 2.2-78 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績

## d. 圧入実績から推定される圧入区間

貯留層内の温度圧力を推定するために, 圧入井の坑内には圧力・温度センサー (P/T Sensor)を設置している。圧力・温度センサー (P/T Sensor)から貯留層の仕上げ区間上 端までは, チュービングとライナーを介し計 432m ほど離れている (第2.2-79 図)ため, 圧 力・温度センサー (P/T Sensor)で計測した温度・圧力値を用いて, 管内流動シミュレーシ ョンにより貯留層(仕上げ区間上端)に加わる圧力を推定した。なお, シミュレーション による仕上げ区間上端の圧力推定は, 圧入レートを変化させた後, 坑内の温度・圧力が安定 した時点において実施している。

苫小牧 IW-2 は掘削した貯留層区間の全てを孔明管により仕上げているため,仕上げ区間の全てから CO₂を圧入可能な構造(第2.2-79図)である。

第 2.2-80 図および第 2.2-18 表は, 貯留層圧力と各圧入レートで推定した圧入中に貯留 層に加わる圧力(流動坑底圧)との関係を示している。流動坑底圧が貯留層圧力を上回る 区間でのみ CO2 が圧入されることとなるが, 貯留層の圧入性が良好であり, 圧入中の貯留 層圧力の上昇が緩慢であり,圧入区間は限定的となる。検討した範囲において,圧入に寄与した深度の下端は2017年9月26日(21.3万t-CO₂/年)が最も深度が深く1,033mVDまでであり,2017年11月28日(8.2万t-CO₂/年)が最も浅く1,020mVD付近までであったと推定される。圧入レートを大きく変化させても流動坑底圧の上昇が少ないことから,1,020mVD~1,033mVD付近が圧入に大きく寄与する層準であると考えられる。この深度区間にはNMR 浸透率で高浸透率を示す2層準が認められるており,この2層準が圧入性に大きく寄与しているものと推定される。







注:1. 貯留層の孔隙は全て密度が 1.02g/cc の地層水で満たされ, 圧入中に貯留層圧力は変化しないと仮定。 2. 貯留層の浸透性が高いため,貯留層の毛管スレショールド圧力は無視している。

口哇	圧入レート	CO2 圧入下端深度			
Ш н/ј	万t-CO ₂ /年	垂直深度(mVD)	坑井長(mMD)		
2017/9/26	21.3	1,033	2,775		
2017/10/18	20.3	1,030	2,760		
2017/11/16	21.3	1,028	2,750		
2017/11/27	19.5	1,026	2,740		
2017/11/28	8.2	1,020	2,704		
2018/1/16	21.8	1,029	2,756		
2018/1/28	21.8	1,027	2,745		

第2.2-18表 CO2が圧入された貯留層区間の下端深度

## e. 圧入実績を考慮したパラメータの調整

実際に CO₂が圧入されている貯留層区間は萌別層砂岩層上部のみであると考えられる。 また, 萌別層砂岩層上部の中でも 2 層準(第2.2-81 図桃色着色部)が大きく圧入に寄与し ているものと推定される。この推定に基づき, 貯留層パラメータの設定を試行錯誤するこ とにより圧入実績を再現できる浸透率分布を第2.2-81 図のように設定した。この浸透率 設定において,約8万t-CO₂/年および22万t-CO₂/年でCO₂を圧入するシミュレーションを 実施したところ,8万t-CO₂/年で圧入した際には高浸透率領域1にのみ圧入され, 圧入レー トを22万t-CO₂/年とした場合には, 高浸透率領域1と2の双方に圧入される状況を再現で きた。実際の圧入状況を再現できていると判断し, この浸透率設定を用いて流動シミュレ ーションを実施した。

第2.2-80 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績から推定される圧入区間



注: K はシミュレーションモデルでの垂直方向のグリッドナンバー

第2.2-81 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績から推定される最適な浸透率分布

#### f. 圧入した CO₂の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲を平面図に投影す ることにより, 圧入した CO₂の平面的な分布範囲を推定した(第 2.2-82 図および第 2.2-83 図)。その推定結果を, 第 4.5-19 表に示す。

CO₂飽和度の平面的な最大分布範囲は,南北方向に 2,400m,東西方向に 1,870m 程度の範囲 予想される(第 2.2-79 図)。H24 年度シミュレーションに比べ平面的な分布範囲が広がった ことの原因は,圧入される垂直方向の深度区間が貯留層の上部に限定的となることが判明し たことが最大の要因であると考えられる。



注:分布範囲を示す座標は,圧入開始より圧入終了後1,000 年後までに予想される最大の CO₂飽和度分布範囲を示す。 第 2.2-82 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲(CO₂飽和度) (平成 30 年度(暫定)シミュレーション結果)

溶解 CO₂ 量の平面的な最大分布範囲は,南北方向に 2,800m,東西方向に 2,370m 程度と予想 される(第 2.2-83 図)。H24 年度シミュレーションに比べ平面的な分布範囲が広がったこと の原因は,CO₂ 飽和度の分布と同様と考えられる。



5000m

注:分布範囲を示す座標は、圧入開始より圧入終了後1,000年後までに予想される最大の溶解CO2量の分布範囲を示す。

第 2. 2-83 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲(溶解 CO₂量) (平成 30 年度(暫定)シミュレーション結果)

第22-19表	海底下廃棄した CO	の平面的な分布範囲	(苗別層砂岩層)
XJ L. L 10 1			

八大坛		北限	Ę		南阳	Ę		東阳	Ę		西阳	Į
万重或	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
二酸化炭素	42	37	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85
CO2飽和度	42	37	13.23	42	36	16.04	141	39	21.70	141	37	59.04
溶解 CO2 量	42	37	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85

注: 各モデルにおいて推定される CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の平面的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

# g. 圧入した CO2 の垂直的な分布範囲

上記で検討した平面的な CO₂ の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影して, CO₂ の垂直的な分布範囲を推定した(第2.2-84 図~第2.2-87 図)。推定結果を, 第2.2-20 表に示す。



注: 1. 断面図(右図)より, CO₂飽和度の上昇は、TSⅢよりも25mほど上位まで認められる。したがってTSⅢよりも25m浅い 深度で構造図を作成し、CO₂分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了後1,000年後のCO₂分布状況を投影した。 2. 最も浅い深度で、海面下930m程度まで分布するものと考えられる。

第2.2-84 図 萌別層砂岩層でのCO₂の分布範囲の上限(CO₂飽和度) (平成30年度(暫定)シミュレーション結果)



注: 1.CO2分布域(CO2量飽和度)を, 萌別層砂岩層下限(SBI)構造図に投影した。

2. C0₂分布(C0₂量飽和度)が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了後1,000年後のC0₂分布状況(C0₂量飽和度)を投影した。

3. 海面下 1,280m 程度まで分布するものと考えられる。

第2.2-85図 萌別層砂岩層でのCO2の分布範囲の下限(CO2飽和度)

(平成 30 年度(暫定)シミュレーション結果)



- 注: 1. 断面図(右図)より,溶解CO2量の分布範囲はTSⅢよりも25mほど上位まで認められる。したがってTSⅢよりも25m浅い深度 で構造図を作成し,CO2分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了後1,000年後のCO2分布状況(溶解CO2量)を投影し た。
  - 2. 最も浅い深度で、海面下 930m 程度まで分布するものと考えられる。

第 2.2-86 図 萌別層砂岩層での CO2の分布範囲の上限(溶解 CO2量) (平成 30 年度(暫定) シミュレーション結果)



注: 1.C02分布域(溶解CO2量)を, 萌別層砂岩層下限(SBI)構造図に投影した。 2. CO2分布(溶解 CO2量)が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了後1,000年後の CO2分布状況を投影した 3. 海面下1,300m程度まで分布するものと考えられる。

第2.2-87図 萌別層砂岩層でのCO2の分布範囲の下限(溶解CO2量)

(平成30年度(暫定)シミュレーション結果)

分布域	上限深度(m)	下限深度(m)
二酸化炭素	930	1,280
CO2飽和度	930	1,300
溶解 CO2 量	930	1,300

第2.2-20表 海底下廃棄した CO2の垂直的分布範囲(萌別層砂岩層)

注:各モデルにおいて推定される CO2 飽和度および溶解 CO2 量の垂直的分布の限界を二酸化炭素の分布 範囲とした。

また, CO₂飽和度および溶解 CO₂量の分布に対するシミュレーション結果を第 2.2-88 図~ 第 2.2-89 図に示す。



注:1. 左側: 圧入開始から4年後(圧入終了時),右側: 圧入終了から1,000年後。

2. 上段:平面図 (Sg>0.001 でフィルタリング),下段:萌別層圧入井に沿った断面図。

第2.2-88 図 CO2 飽和度の分布(平成30年度(暫定)シミュレーション結果)



注: 1. 左側: 圧入開始から4年後(圧入終了時),右側: 圧入終了から1,000年後。 2. 上段: 平面図(溶解 CO₂ 量>0.001mol/kg でフィルタリング),下段: 萌別層圧入井に沿った断面図。

第2.2-89 図 溶解 CO2 量の分布(平成 30 年度(暫定)シミュレーション結果)

#### h. CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留 CO₂の 3 つの貯留形態を Movable(移動する可能性がある超臨界 CO₂), Dissolved(溶 解 CO₂) および Trapped(孔隙などにトラップされ動かない超臨界 CO₂)と表現し,各モデル の CO₂ 圧入量に対する割合の経時変化を,平成 30 年度(暫定)シミュレーションにより精査 した。その結果を,第 2.2-90 図および第 2.2-91 図に示す。

圧入中には Movable  $CO_2$ の割合が増加し 70%程度となり, Dissolved  $CO_2$ の割合は 30%程度 まで減少する。圧入停止後には, Movable  $CO_2$ の溶解の進行とトラップ(残留トラップ)割合 の増加から, Movable  $CO_2$ の割合が減少し, 圧入開始から 30 年後には 15%程度まで低下する。 300 年後には Movable  $CO_2$ はほとんど消滅し, 圧入した  $CO_2$ は Dissolved  $CO_2$ と Trapped  $CO_2$ となる。Trapped  $CO_2$ も溶解するため, Dissolved  $CO_2$ の割合が増加し, Trapped  $CO_2$ の割合は 減少する。圧入開始から 1,000 年後には Dissolved  $CO_2$ と 63%程度, Trapped  $CO_2$  が 37%程 度の割合となる。



第2.2-90図 CO2 貯留形態割合の変化(圧入界しから30年後まで)



第2.2-91図 CO2 貯留形態割合の変化

# 2.3 鉱業権の設定または出願の状況について

当該海域には、民間会社による試掘権の設定はなく、当該区域において、現時点で公開され ている開発計画はない。

当該地域の北方に位置する勇払油・ガス田において, 滝ノ上層 T1 部層中に油・ガスの胚胎が 知られていることから, 滝ノ上層 T1 部層中には油・ガスが胚胎する可能性はあるが, 同一構 造における構造的上位で掘削された坑井 A (第2.2-5 図参照) において, 稼行に足る油・ガス の発見がなされなかったことから, 当該海域における油・ガスの胚胎の可能性は低いものと判 断される。

萌別層砂岩層については、特に鉱物資源の胚胎は知られていない。