

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に関する実施計画に係る事項

目次

1. 海底下廃棄実施期間1-1-
<ol> <li>海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性</li></ol>
2.1 ガス等の発生源及び当該ガス等からの特定二酸化炭素ガスの回収の方法 2 -
(1) ガス等の発生源 2 -
(2) 当該ガスからの特定二酸化炭素ガスの回収方法 当該ガスからの特定二酸化炭素ガスの回収方法
2.2 当該特定二酸化炭素ガスに含有される物質ごとの当該特定二酸化炭素ガス中に占める割合又は
濃度 - 7 -
3 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量及び特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする
海域において当該海底下廃棄をする以前に海底下廃棄をされていると推定される特定二酸化炭素ガスの数
量 - 8 -
3.1 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量
3.2 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をしようとする海域において当該海底下廃棄をする以前に海
底下廃棄をされていると推定される特定二酸化炭素ガスの数量

4 4.1 4.2 海域の水深及び海底下廃棄をする深度.....-14 - 14 -4.3 陸域の主な施設等との位置関係.....- 14 -海底下廃棄をする海域及びその周辺に設置された特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の用に供す 4.4 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲 ..... - 16 -4.5 (1)滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(当初申請時)..........- 17 -① 検討に使用した地質モデル .....- 17 -滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成(圧入井掘削前) ..... - 17 -7) 岩相分布・性状分布の推定 ..... - 17 a. 構造モデルの作成.....--18 - 18 b. 属性モデルの作成.....- 22 с. 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/H27 地質 亻) 滝ノ上層圧入井掘削結果.....- 23 - 23 a. 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....- 24 b.

	с.	岩相分布・性状分布推定の更新 25 -	-
	d.	構造モデルの更新 29 -	-
	e.	属性モデルの更新 29 -	-
2	CO <sub>2</sub>	挙動予測シミュレーション 30 -	-
T)	)	滝ノ上層 T1 部層における CO2 挙動予測(圧入井掘削前) 30 -	-
	a.	概要30 -	-
	b.	パラメータ 31 -	-
	с.	CO <sub>2</sub> 圧入時の挙動 32 -	-

1	)	滝ノ上層 T1 部層における CO <sub>2</sub> 挙動予測(圧入井掘削結果を踏まえた予測).	33 -
	a.	概要	33 -
	b.	パラメータ	35 -
3	圧ノ	くした CO2の平面的な分布範囲	36 -
4	圧ノ	、した CO2の垂直的な分布範囲	39 -
(2)	滝ノ	ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(変更申請時)	41 -
$\bigcirc$	検診	対に使用した地質モデル	41 -
2	CO <sub>2</sub> =	挙動予測シミュレーション	41 -
T	)	暫定的な圧入実績を踏まえた CO2 挙動予測	41 -
	a.	压入実績	41 -
	b.	CO2 圧入時の挙動とパラメータの調整	42 -
3	圧ノ	Nした CO2の平面的な分布範囲	44 -
4	圧ノ	Nした CO2の垂直的な分布範囲	47 -
(5)	C0 <sub>2</sub>	の貯留形態ごとの割合	47 -
(3)	萌別	J層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(当初申請時)	48 -
$\bigcirc$	検診	対に使用した地質モデル	48 -
P	)	平成 23 年度地質モデルの作成	48 -
	a.	岩相分布・性状分布の推定	48 -
	b.	構造モデルの作成	49 -
	с.	属性モデルの作成	52 -
1	)	平成 24 年度地質モデルの作成	53 -
2	萌別	川層砂岩層における CO₂挙動予測シミュレーション	54 -
T	)	平成 23 年度シミュレーション	54 -
	a.	概要	54 -
	b.	パラメータ	54 -
	с.	ケーススタディ	55 -
イ	)	平成 24 年度シミュレーション	57 -
3	圧ノ	へした CO₂の平面的な分布範囲	58 -
4	圧ノ	くした CO2 の垂直的な分布範囲	60 -
5	遮蔽	<b>ស性能検討</b>	68 -
6	CO <sub>2</sub>	の貯留形態ごとの割合	74 -
(4)	萌別	J層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(変更申請時)	75 -
(1)	検診	対に使用したモデル	75 -
T	)	平成 30 年度(暫定)地質モデルの作成	75 -
	a.	岩相分布・性状分布の推定	75 -
	b.	構造モデルの作成	77 -
	с.	属性モデルの作成	79 -
2	萌另	刂層砂岩層における CO₂挙動予測シミュレーション	81 -
T	)	平成 30 年度(暫定)シミュレーション	81 -

		a. 概要	81 -
		b. パラメータ	81 -
		c. 圧入実績	82 -
		d. 圧入実績から推定される圧入区間	83 -
		e. 圧入実績を考慮したパラメータの調整	85 -
	3	圧入した CO2の平面的な分布範囲	96 -
	4	圧入した CO2の垂直的な分布範囲	98 -
	5	CO2の貯留形態ごとの割合	102 -
	(5)	H29 繰り返し3D 探査の差分解析結果とCO2の位置	103 -
	(6)	海域での位置	109 -
Z	4.6 淮	毎底下廃棄をする海域及びその周辺の海域における,海洋環境の保全上特に保護	を図る必要があ
	るものの	つ所在	111 -
5	特定	2二酸化炭素ガスの海底下廃棄の方法	112 -
Ę	5.1	ガスの発生源から海底下廃棄をする位置までにおいて特定二酸化炭素ガスの回り	又及び輸送並び
l	に圧入等	等に用いる設備及び機材等	112 -
	(1)	概要	112 -
	(2)	PSA オフガス圧縮設備	114 -
	(3)	CO <sub>2</sub> 分離·回収設備	115 -
	(4)	CO2 圧縮設備	117 -
Ę	5.2	特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の温度等の圧入条件に関す	-る詳細- 119
-	-		
	(1)	基本圧入計画	119 -
	(2)	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時	寺の温度等の圧
	(2) 入条作	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入 ‡	寺の温度等の圧 120 -
	(2) 入条件 ①	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入 + 圧入圧力	寺の温度等の圧 120 - 121 -
	(2) 入条件 ① ②	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li>キ</li> <li>圧入圧力</li> <li>圧入速度(当初申請時)</li> </ul>	寺の温度等の圧 120 - 121 - 122 -
	<ul><li>(2)</li><li>入条件</li><li>①</li><li>②</li><li>③</li></ul>	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li>キ</li> <li>圧入圧力</li> <li>圧入速度(当初申請時)</li> <li>圧入速度(変更申請時)</li> </ul>	寺の温度等の圧 120 - 121 - 122 - 125 -
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>②</li> <li>③</li> <li>④</li> </ul>	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li>キ</li> <li>圧入圧力</li> <li>圧入速度(当初申請時)</li> <li>圧入速度(変更申請時)</li> <li>圧入温度(当初申請時)</li> </ul>	寺の温度等の圧 
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>②</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> </ul>	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li> <ul> <li></li></ul></li></ul>	寺の温度等の圧 
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>②</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> </ul>	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時         井         圧入圧力         圧入速度(当初申請時)         圧入速度(変更申請時)         圧入温度(当初申請時)         圧入温度(変更申請時)         正入温度(変更申請時)         町別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の活	寺の温度等の圧 120 - 121 - 122 - 125 - 126 - 126 - 晶度等の圧入条
	<ol> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>②</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> </ol>	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li> 上入圧力 正入速度(当初申請時) 正入速度(変更申請時) 正入温度(当初申請時) 正入温度(当初申請時) 正入温度(変更申請時) 正入温度(変更申請時) 二 二 127 -</li></ul>	寺の温度等の圧 
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>②</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> <li>①</li> </ul>	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li> 上、 二、 二、&lt;</li></ul>	寺の温度等の圧 
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> <li>①</li> <li>②</li> </ul>	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li>キ</li> <li>庄入正力</li> <li>正入速度(当初申請時)</li> <li>正入湿度(変更申請時)</li> <li>正入温度(変更申請時)</li> <li>正入温度(変更申請時)</li> <li>萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の約</li> <li>- 127 -</li> <li>正入圧力</li> <li>正入正度(当初申請時)</li> </ul>	寺の温度等の圧 120 - 121 - 122 - 125 - 126 - 品度等の圧入条 127 - 129 -
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> <li>①</li> <li>②</li> <li>③</li> <li>③</li> </ul>	<ul> <li>滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時</li> <li>床入圧力</li> <li>床入速度(当初申請時)</li> <li>床入速度(変更申請時)</li> <li>床入温度(変更申請時)</li> <li>店入温度(変更申請時)</li> <li>萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の約</li> <li>- 127 -</li> <li>圧入圧力</li> <li>圧入速度(当初申請時)</li> <li>正入速度(当初申請時)</li> </ul>	寺の温度等の圧 
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>④</li> </ul>	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時         上         圧入圧力         圧入速度(当初申請時)         圧入速度(変更申請時)         圧入温度(当初申請時)         匠入温度(変更申請時)         町別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の         - 127 -         圧入速度(当初申請時)         圧入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)	寺の温度等の圧 
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>④</li> <li>⑤</li> </ul>	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時         正入圧力         圧入速度(当初申請時)         圧入速度(変更申請時)         正入温度(当初申請時)         店入温度(変更申請時)         萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の約         - 127 -         圧入正度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(変更申請時)         正入速度(変更申請時)         正入速度(変更申請時)         正入速度(変更申請時)         正入温度(変更申請時)         正入温度(変更申請時)	寺の温度等の圧 120 - 121 - 122 - 125 - 126 - 126 - 基度等の圧入条 127 - 129 - 132 - 133 - 133 -
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(4)</li> </ul>	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時         上         正入圧力         正入速度(当初申請時)         正入速度(変更申請時)         正入温度(当初申請時)         正入温度(変更申請時)         店入温度(変更申請時)         市別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の         - 127 -         圧入正度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(変更申請時)         正入速度(変更申請時)         正入速度(変更申請時)         正入速度(変更申請時)         正入速度(変更申請時)         年入速度(変更申請時)         年入速度(変更申請時)         年入速度(変更申請時)         年入速度(変更申請時)         年入速度(変更申請時)         年入速度(変更申請時)         年入速度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年前時)         年前時)         年前時)         年前時)         年前時)         年前時)         年前時         年前時         年前時         年前時	寺の温度等の圧 120 - 121 - 122 - 125 - 125 - 126 - 温度等の圧入条 127 - 129 - 132 - 133 - 133 - 134 -
	<ul> <li>(2)</li> <li>入条件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(3)</li> <li>件</li> <li>①</li> <li>③</li> <li>④</li> <li>⑤</li> <li>(4)</li> <li>(5)</li> </ul>	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時         上         圧入正力         圧入速度(当初申請時)         圧入速度(変更申請時)         正入温度(当初申請時)         正入温度(変更申請時)         店入温度(変更申請時)         店入温度(変更申請時)         正入温度(変更申請時)         正入温度(変更申請時)         正入正定(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(当初申請時)         正入速度(空更申請時)         正入速度(空更申請時)         正入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年入温度(変更申請時)         年、         年、         年、         年、         年、         年、         年、         年、         年、         日、	寺の温度等の圧 

	(1)	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の
	見通	通し(当初申請時) 138 -
	(2)	滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の
	見通	通し(変更申請時) 140 -
	(3)	萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通
	L()	当初申請時)-143-
	(4)	萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通
	し(2	変更申請時)-147-
5	.4	特定二酸化炭素ガスの圧入井の維持管理の方法の概要 148 -
5	. 5	特定二酸化炭素ガスの圧入井の封鎖方法 153 -
5	.6	他の法令の遵守状況 154 -
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
当詞	亥障害	『の拡大又は発生を防止するために講ずる措置
6	.1	海洋環境の保全上の障害が生じる恐れについて
6	.2	海洋環境の保全上の障害が生じる恐れの監視体制について 160 -
6	.3	関連法規に基づく保安計画等について 162 -
6	.4	異常発生時の対応について 163 -

# 1. 海底下廃棄実施期間

2016年(平成28年)4月1日から2021年3月31日までの5年間。

うち,特定二酸化炭素ガスの圧入期間は,滝ノ上層:2017年(平成29年)1月1日~2020年 3月31日,萌別層:2016年(平成28年)4月1日~2020年3月31日。

### 2 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性

#### 2.1 ガス等の発生源及び当該ガス等からの特定二酸化炭素ガスの回収の方法

### (1) ガス等の発生源

本計画における CO<sub>2</sub>発生源は、出光興産株式会社北海道製油所の水素製造装置である。

製油所では、ナフサ等の脱硫・改質により製造したガスから、圧力スイング吸着(以下、「PSA」 と称する: Pressure Swing Adsorption)装置による分離・精製によって高純度水素を製造し、 石油製品の脱硫工程で利用している。高純度水素を分離した残りのガス(以下、「PSAオフガ ス」と称する。)は、CO<sub>2</sub>濃度が約50%で他に可燃性ガス(CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>)を含有している(第 2.1-1表)。

本計画では、この PSA オフガスから分離・回収した CO<sub>2</sub> ガスを特定二酸化炭素ガスとする予 定である。

	ガス組成(体積百分率:%)
$CO_2$	51.6
CO	2.3
$H_2$	38.8
$CH_4$	6.6
$H_2O$	0.7
合計	100.0

第2.1-1表 PSA オフガスの概略組成

### (2) 当該ガスからの特定二酸化炭素ガスの回収方法

CO<sub>2</sub>発生源である製油所内にガス供給基地(以下,「D1-1 基地」と称する。)を建設した。 D1-1 基地は,製油所の既設水素製造装置からCO<sub>2</sub>含有量10万トン/年以上(設備仕様は最大20 万トン/年に対応)の PSA オフガスを分流し,製油所に隣接するCO<sub>2</sub>分離・回収・圧入基地(以 下,「D1-2・D0基地」と称する。)に送出する(第2.1-1図および第2.1-2図)。



第2.1-1図 本計画の設備概念



<sup>©</sup>Google © 2013 ZENRIN Image © 2013 DigitalGlobe

第2.1-2図 本計画設備の位置関係

第 2.1-3 図に CO<sub>2</sub>分離・回収・圧入基地の鳥瞰図を,第 2.1-4 図に CO<sub>2</sub>分離・回収・圧入基地プロセスフローを,第 2.1-5 図に D1-1 基地および D1-2・D0 基地の概要を示す。

PSA オフガスは、水素製造装置に付帯する PSA 設備下流配管から分岐し、PSA オフガスの一部(約 60%)を分流して送風機により送出することで行う。PSA オフガスの送出先は、D1-2 基地とする。



第2.1-3 図 CO<sub>2</sub>分離·回収·圧入基地鳥瞰図



第2.1-4 図 CO<sub>2</sub>分離・回収・圧入基地プロセスフロー

- 高圧ガス保安法(ガス設備)適用ライン
- 高圧ガス保安法(高圧ガス設備)適用ライン
- ガス事業法(準用設備)適用ライン
- ▶ 電気事業法適用ライン
- ▶ 消防法適用ライン



第2.1-5図 D1-1 基地および D1-2·D0 基地の概要

第2.1-6 図に, D1-2 基地における CO<sub>2</sub>分離・回収プロセスを示す。これは、以下のとおり、 海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令第十一条の五第一項に規定する「アミン類 と二酸化炭素との化学反応を利用して二酸化炭素を他の物質から分離する方法」である。



第2.1-6図 CO2分離・回収プロセス

この CO<sub>2</sub>分離・回収プロセスの特徴は、アミン吸収にBASF(ビーエーエスエフ)社の活性 アミンプロセス(OASEプロセス)を採用したことと、CO<sub>2</sub>吸収塔と CO<sub>2</sub>放散塔の中間に LPFD (Low Pressure Flash Drum:低圧 CO<sub>2</sub>放散塔)を設置し、CO<sub>2</sub>吸収塔では、リーンアミン溶液 (CO<sub>2</sub>放散塔で得られた再生度の高いアミン)に加え、セミリーンアミン溶液(LPFD での低圧 により得られた再生度が比較的低いアミン)を用いた 2 段吸収としたことである。OASEプ ロセスで使用するアミン溶液(第三級アミンを主成分とする水溶液)は腐食性が低く、劣化が 少ないことで知られている。また、LPFDを設置することで、低圧による CO<sub>2</sub>放散が可能となる ことに加え、CO<sub>2</sub>放散塔頂から CO<sub>2</sub>とともに供給される水蒸気熱を CO<sub>2</sub>の放散に利用することが できる。これにより、セミリーンアミン溶液の循環量が増えるものの、CO<sub>2</sub>放散塔で必要と なるアミンリボイラーによる再生熱が削減され、循環量の増を加えてもトータルエネルギー (熱+電気)を低減することができる。

なお,通常 PSA オフガス中の CO<sub>2</sub>の組成は変動するため,回収プロセスを経た後の CO<sub>2</sub> 濃度 が特定二酸化炭素ガスの濃度基準を満たすよう,CO<sub>2</sub>放散塔頂より回収した高純度 CO<sub>2</sub>ガスを, オンラインのプロセスガスクロマトグラフで常時(15~20分ごとに)組成分析し,その結果を 見て分離・回収プロセスの運転条件を調整する。CO<sub>2</sub>濃度の変動範囲は 99.1%以上とし,組成分 析の測定結果で CO<sub>2</sub>濃度が 99.1%を下回る場合は,2段吸収法を適用した CO<sub>2</sub>吸収塔のリーンア ミン溶液循環量(吸収塔上段)とセミリーンアミン溶液循環量(吸収塔下段)を調整すること により,回収 CO<sub>2</sub>純度の上昇を図る。これらの操作によっても純度の回復が図れず,海洋汚染 防止法施行令第 11条の5に規定する濃度基準(体積百分率 98パーセント以上)を満足しない 場合は,速やかに圧入を停止し,原因を調べ,対策を立案した後,その原因と対応策を環境省 に報告する。

なお、CO<sub>2</sub>ガス中に含まれる物質は、二酸化炭素、水素、酸素、窒素、炭化水素(メタン)、一酸 化炭素のみであり、プロセスガスクロマトグラフの分析条件は日本工業規格 K0114:2012 に従 う。また、オンラインの組成分析の他に、第三者機関による組成分析を年1回以上行い、結果 は環境省に報告する。許可期間中は、当該許可期間中の記録および当該許可期間以前の許可期 間中の記録を保管する。

CO<sub>2</sub>の圧入は、年度圧入計画、月間圧入計画および週間圧入計画に基づいて行い、24時間運転による所定期間の一定レート圧入を原則とする。CO<sub>2</sub>を分離・回収するための原料ガス (PSA オフガス)は、上記圧入計画に基づく必要量のみを D1-1 基地より受け入れ、定常運転時には全量圧入することを目標に運転するが、圧入計画の急な変更時、急な圧入中断時および圧入開始直後など貯留層の状況などを確認しながら圧入レートを制御する際には、高純度 CO<sub>2</sub>ガスに余剰が発生する。その余った高純度 CO<sub>2</sub>ガスは、CO<sub>2</sub>放散塔頂から通じるフレアースタックより大気放散する(第 2.1-4 図参照)。

なお、CO<sub>2</sub>回収後のガス(CO<sub>2</sub>吸収塔のオフガス)は次工程でボイラー燃料として利用し燃焼 処理するため、アミンやその誘導体がガスに同伴して大気へ放出されるおそれはない。

# 2.2 当該特定二酸化炭素ガスに含有される物質ごとの当該特定二酸化炭素ガス中に占める割合又 は濃度

海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの組成(乾きガス中の濃度,推算値)を,第 2.2-1表に示す。

ガス組成	濃度(体積百分率:%)
$CO_2$	99.70
$H_2$	0.22
$N_2$	_
$O_2$	_
$CH_4$	0.06
СО	0.02
合計	100.00

第2.2-1表 特定二酸化炭素ガスの組成(乾きガス中の濃度,推算値)

通常 PSA オフガス中の CO<sub>2</sub> の組成は変化するが, PSA オフガスの組成に係る実績データを用い,最も CO<sub>2</sub> 濃度が低いケースから最も CO2 濃度が高いケースについて昇圧後の特定二酸化炭素ガスの組成を検討したところ,第5.1-3表に示すように 99.6%以上であった (5.1(3)参照)。

上記推算値は、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令」(昭和 46 年政令第 201 号)第十一条の五第一項第二号において規定する基準を満たしている。また、当該ガスは、 石油の精製に使用する水素の製造工程から分離したガスよりアミン類と CO<sub>2</sub> との化学反応を利 用して CO<sub>2</sub>を分離したものであることから、本計画において適用する基準は、体積百分率 98 パ ーセント以上とする。

なお, 圧入開始以降, CO<sub>2</sub> 放散塔頂より回収した高純度 CO<sub>2</sub> ガスの組成分析を行っており, CO<sub>2</sub> 濃度及び当該ガスの組成を確認している。 3 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量及び特定二酸化炭素ガスの 海底下廃棄をする海域において当該海底下廃棄をする以前に海底下廃棄をされて いると推定される特定二酸化炭素ガスの数量

#### 3.1海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量

当該計画期間内に, 滝ノ上層に海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量は 750 トン,また萌別層に海底下廃棄しようとする特定二酸化炭素ガスの数量は 60 万トンである。

滝ノ上層の期間内推定圧入可能量は,圧入井掘削時の取得データをベースに行った平成27年度 CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションにおいて,3年間で1,000トンの圧入が可能であることを確認しており,3年間の値を27か月の期間に換算し,750トンとして当初申請を行ったが,変更許可申請を行い,圧入期間のみ39か月とする。

なお、CO2挙動予測シミュレーションは、圧入実績から得られるデータによる見直しを随時行 うが、それに合わせて滝ノ上層の期間内推定圧入可能量も見直す。この見直しにより滝ノ上層 の期間内推定圧入可能量を変更することが適切と考えられる場合は、海洋汚染防止法に基づく 変更許可に係る所要の手続きに従い、滝ノ上層の期間内推定圧入可能量と滝ノ上層の期間内計 画圧入量の変更を申請する。

萌別層の期間内推定圧入可能量は,平成23年度CO₂挙動予測シミュレーションにおいて年間 25万トン,3年間で75万トンの圧入が可能であることを確認したこと,さらにそれを上回る 量の圧入が可能であることが期待できるデータを圧入井掘削時に取得したことより,75万トン とする。

萌別層の期間内計画圧入量は,原料ガスの供給量や二酸化炭素の分離・回収設備の能力の制 約から,20万トン/年,3年間で60万トンとして当初申請を行ったが,変更許可申請を行い,圧 入期間のみ4年間とする。

収容量は,添付書類-4の第4.2節において算出している。滝ノ上層においては、当初申請時 (平成28年2月22日)の収容量は53万トン以上であったが、再推計の結果,変更申請時(平 成31年2月18日)の収容量は71万トンである。萌別層においては、当初申請時の収容量は 1,725万トン以上であったが,再推計の結果,変更申請時の収容量は3,846万トンである。

したがって, 滝ノ上層および萌別層それぞれの貯留層について,「収容量≧期間内推定圧入可 能量≧期間内計画圧入量」の関係が成立する。

# 3.2 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をしようとする海域において当該海底下廃棄をする以前に 海底下廃棄をされていると推定される特定二酸化炭素ガスの数量

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域において当該海底下廃棄をする以前に海底下廃 棄をされていると推定される特定二酸化炭素ガスは、0トン。

### 4 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の位置及び範囲

### 4.1 海域の緯度及び経度

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域は、苫小牧港港湾区域内(42°37'28″E:141° 35'21″E,42°34′49″E:141°35′43″E,42°32′41″E:141°51′13″E,42°35′13″ E:141°52′31″Eを結ぶ線と海岸線に囲まれた範囲)である(第4.1-1図)。



注:©Google © 2013 ZENRIN Image © 2013 DigitalGlobe

## 第4.1-1 図 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の位置および範囲

本計画では、二坑の CO<sub>2</sub> 圧入井(滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井)を新たに掘削し、そ れぞれ異なる層準の貯留層に特定二酸化炭素ガスを圧入することにより海底下に廃棄する。二 坑の圧入井は、苫小牧市真砂町の陸上(出光興産株式会社北海道製油所隣接の DO 基地)から 南西に向かって掘削した。

また、二坑の CO2 圧入井の諸元を、第4.1-1 表および第4.1-2 表に示す。

【坈口】	
座標(北緯)	$42^{\circ} \ 37' \ 53.09''$
座標(東経)	$141^{\circ} \ 38' \ 47.\ 79''$
標高:m	9.1
【滝ノ上層 T1 部層上限】	
座標(北緯)	$42^{\circ} \ 35' \ 14.91''$
座標(東経)	$141^{\circ} \ 37' \ 58.91''$
掘削深度:m	4,624
海面下深度:m	2, 381
坑口からの距離:m	3, 228
【坑底】	
座標(北緯)	$42^{\circ} \ 35' \ 40.\ 93''$
座標(東経)	$141^{\circ} \ 37' \ 41.85''$
掘削深度:m	5, 800
海面下深度:m	2,744
坑口からの距離:m	4, 346

第4.1-1 表 滝ノ上層圧入井の諸元

【坑口】	
座標(北緯)	$42^{\circ} \ 37' \ 53.09''$
座標(東経)	$141^{\circ} \ 38' \ 47.55''$
標高:m	9.1
【萌別層砂岩層上限】	
座標(北緯)	$42^{\circ} \ 36' \ 55.\ 30''$
座標(東経)	$141^{\circ} \ 38' \ 30.85''$
掘削深度:m	2, 395
海面下深度:m	961
坑口からの距離:m	1,823
【坑底】	
座標(北緯)	$42^{\circ} \ 36' \ 16.11''$
座標(東経)	$141^{\circ} \ 38' \ 20.01''$
掘削深度:m	3,650
海面下深度:m	1,179
坑口からの距離:m	3,058

第4.1-2表 萌別層圧入井の諸元

滝ノ上層圧入井は,海面下2,000m 程度以深に分布する滝ノ上層 T1 部層の火山岩類を貯留層 ターゲットとし,坑口(D0 基地)からの貯留層上限までの水平距離は3,228m,坑底までの距離 は4,346m である(第4.1-2 図および第4.1-3 図)。

坑底深度 TD (Total Depth) は掘削深度 DD (Drilling Depth) :5,800m, 垂直深度 TVD (True Vertical Depth) :2,753m, KOP (Kick off Point) は DD および TVD :925m, EOB (End of Buildup) は DD : 1,618m, TVD : 1,461m である。また,最大坑芯傾斜は 72°,偏距は 4,346m である。



第4.1-2図 滝ノ上層圧入井沿いの地質断面図



第4.1-3図 滝ノ上層 T1 部層上限の地質構造

萌別層圧入井は,海面下1,100~1,200m 程度に分布する萌別層砂岩層を貯留層ターゲットとした坑井で,坑口から貯留層上限までの水平距離は1,823m,坑底までの距離は3,025m である(第4.1-4 図および第4.1-5 図)。

TD は DD: 3,650m, TVD:1,188m, 1st KOP は DD および TVD: 240m, 1st EOB は DD: 1,047m, TVD: 806m, 2nd KOP は DD: 2,672m, TVD: 1,018m, 2nd EOB は DD: 2,780m, TVD: 1,023m であ る。また,最大坑芯傾斜は 83°,偏距は 3,058m である。



第4.1-4図 萌別層圧入井沿いの地質断面



第4.1-5 図 萌別層砂岩層上限の構造

### 4.2海域の水深及び海底下廃棄をする深度

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の海図を,第4.2-1図に示す。

また,滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井の坑底の水深および海面下深度を,第4.2-1表に示す。



第4.2-1 図 本計画における海域の海図

圧入井	水深 (m)	海面下深度(m)
滝ノ上層圧入井	31	2,744
萌別層圧入井	20	1,179

第4.2-1表 各圧入井坑底の水深および海面下深度

### 4.3 陸域の主な施設等との位置関係

第4.3-1 図に示す陸域の施設から滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井の坑底までの地表面直線距離を,第4.3-1表に示す。

第4.51 夜 陸攻の王な施設寺との位置国际				
	A:滝ノ上層圧入井	B: 萌別層圧入井	備考	
C: J R 苫小牧駅	5.6km	5.1km	苫小牧市表町 6-4-3	
D:苫小牧市役所	4.7km	4.2km	苫小牧市旭町 4-5-6	
E:苫小牧海上保安署	4.4km	3.5km	苫小牧市港町 1-6-15	
F:CO2 圧入井坑口	4.3km	2.9km	苫小牧市真砂町 12 番地	
G:出光興産シーバース	1.7km	0.5km	苫小牧港港湾区域·港域内	

第4.3-1表 陸域の主な施設等との位置関係



第4.3-1図 陸域の主な施設等の位置

# 4.4 海底下廃棄をする海域及びその周辺に設置された特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の用に供

### する設備の場所

海底下廃棄をする海域及びその周辺に設置された特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の用に 供する設備の場所は,第4.2-1 図に示されるとおりである。

また、CO<sub>2</sub>分離・回収・圧入基地(D1-2・D0基地)の詳細は、次のとおりである。

名称:日本CCS調査株式会社 苫小牧CCS実証試験センター

場所:苫小牧市真砂町12番地(出光興産株式会社北海道製油所隣接南用地)

なお、滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井は、CO<sub>2</sub>圧入基地(DO 基地)より南西方向に掘削 した。

### 4.5 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲

海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲を把握するために,第4.5-1 図に示す 対象海域において取得された三次元弾性波探査記録および既存坑井のデータを解析した。そし て, CO<sub>2</sub>を海底に圧入・廃棄した際の分布範囲をシミュレーションにより推定した。



### 第4.5-1 図 対象地域における三次元弾性波探査記録の取得範囲および既存坑井の位置

滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲について,以 下に記す。

- (1) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(当初申請時)
- ① 検討に使用した地質モデル

滝ノ上層圧入井の圧入(廃棄)位置を選定するあたり, 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。なお,以下のア)で示す地質モデルは,平成23年度地質 モデルである。()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 (既存民間井) 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4.5-2 図に滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布(K-means Index)を,第4.5-3 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(調査井)は,貯留層性状が良好ではない場所に掘削された。



第4.5-2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4.5-3 図 滝ノ上層 T1 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4.5-4 図に、主要な 層準の東西断面(地質モデル断面)を第4.5-5 図に、作成した構造モデルのグリッディン グ情報を第4.5-1 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4.5-4 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。



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4.5-1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4.5-6 図に示す。滝ノ上層 T1 部層は CO<sub>2</sub> 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4.5-6 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、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(調査井)および坑井A(既存民間井)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4.5-7 図に示す。



注:図中右下の矢印は、北を示す。

# 第4.5-7 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/H27 地質 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4.5-2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	$1, 179 \\ (1, 171)$	_	$   \begin{array}{r}     1,870 \\     (1,539)   \end{array} $	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。
<ul><li>滝ノ上層</li><li>T1 部層</li></ul>	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4.5-2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4.5-8 図に,物理検層結果の事例を示す。
- ・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,孔口半径分析など)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4.5-8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<sup>-5</sup>mDと解析された(第4.5-3

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

第4.5-3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

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<sup>-4</sup>mD 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4.5-4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4.5-4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4.5-9 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4.5-9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4.5-10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. 修正モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「浸透率=0.000028952×e32.1823×孔隙率」を 用いた。
  - 3. 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4.5-10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<sup>-3</sup>mD 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<sup>-4</sup>mD 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4.5-9 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4.5-11 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4.5-12 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4.5-11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。

- 2. 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
- 3. 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。

# 第4.5-12 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4.5-13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4.5節(1)②7) c.参照)の属性モデルを作成した。実際に CO<sub>2</sub>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 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4.5-13 図 更新した属性モデルの例(浸透率)

### 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<sup>注1</sup>。

なお、後述の小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

<sup>&</sup>lt;sup>注1</sup> 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,CO<sub>2</sub>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。
・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 CO<sub>2</sub> 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<sup>注1</sup>。

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4.5-5表に示す値を用いた。

<sup>&</sup>lt;sup>注1</sup> 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/cm<sup>2</sup>)であった。これは等価泥水比重で 1.96g/cm<sup>3</sup>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/cm<sup>2</sup>)、その 90%の値 (426.5kg/cm<sup>2</sup>=41,853kPa)をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2011 モデル							
サイズ	$8$ km $\times$ 12km $\times$ 4km (ideal volume: 24km $\times$ 24km $\times$ 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)					
亚均可购卖	0.125	0 197	0.15					
平均扎原举	Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	0. 127	0.15					
平均浸透率:mD	2.7	0.000035						
圧縮率:kPa <sup>-1</sup>		8.073×10 <sup>-7</sup> (測定値)						
塩分濃度:ppm (NaCl)		35,100 (C1 <sup>-</sup> = 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	Dannian	(2005) [1]	Corey (1954) <sup>[2]</sup>					
液相 相対浸透率 Krw	Bennion	(2005)	van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>					
臨界ガス飽和率 Sgc	0.04 Bennic	on (2005) <sup>[1]</sup>	0.05					
不動水飽和率 Swir	0.558 Benni	0.8						
具十碳のガス約和本 C	0.2							
取八残笛刀へ起相举 Sgrillax	from default							
毛细签工力曲组	溶岩 (貯留層)	凝灰岩(貯留層)	泥岩 (遮蔽層)					
七神官にノノ王禄	Bennion (2006) <sup>[4]</sup> , va	n Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>	測定値					

第4.5-5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。

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4.5-14図)。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO<sub>2</sub> displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, pp. 7-9, p. 12

<sup>&</sup>lt;sup>[2]</sup> Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 38-41

<sup>&</sup>lt;sup>[3]</sup> 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

<sup>&</sup>lt;sup>[4]</sup> 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



第4.5-14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4.5-15図に示す。

#### 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 CO<sub>2</sub> 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@ P/T Sensor 深度)と設定した。



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 4.5-15 図 浸透率分布(平成 23 年度地質モデル)

### 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、 物理検層測定値など)および文献値により、第4.5-6表に示す値を用いた。

モデル							
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°C (2,351m/ P/T Sensor	深度)					
基準圧力	32,600kPa (2,351m/ P/T Senso	r 深度)					
CO <sub>2</sub> 圧入レート, 圧入期間	200,000 トン/年×3 年(設定最大	マレート)					
压入圧力上限	38,000kPa(P/T Sensor 深)	要)					
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 <sup>-1</sup>	8.073×10 <sup>-7</sup> (測定値)						
塩分濃度:ppm (NaC1)	35,100 (C1 <sup>-</sup> = 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		Corey (1954) <sup>[2]</sup>					
液相 相対浸透率 Krw	Bennion (2005)	van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>					
臨界ガス飽和率 Sgc	0.04 Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	0.05					
不動水飽和率 Swir	0.558 Bennion (2005 <sup>) [1]</sup>	0.8					
- 早十成初ガス約和索 Satamon	0.241						
取八残笛刀へ起相举 Sgrillax	from default value of GEM	_					
毛细管厂力曲组	凝灰岩(貯留層)	泥岩(遮蔽層)					
七种官儿儿田稼	Bennion (2006) <sup>[4]</sup> , van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>	測定値					

第4.5-6表 シミュレーションパラメーター覧(H27地質モデル)

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4.5-16 図)。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO<sub>2</sub> displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, pp. 7-9, p. 12

<sup>&</sup>lt;sup>[2]</sup> Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 38-41

<sup>&</sup>lt;sup>[3]</sup> 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

<sup>&</sup>lt;sup>[4]</sup> Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO<sub>2</sub> relative permeability at reservoir condition in CO<sub>2</sub>-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。

## ③ 圧入した CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を考慮し,圧入した CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲を推定した(第4.5-17 図)。





注:1. 図中の滝ノ上層圧入井, 萌別層圧入井および苫小牧 CCS-1 は, 坑井の坑跡を上面に投影したもの。

- 2. 滝ノ上層圧入井の仕上げ区間全体から、CO2が滝ノ上層中に圧入される。圧入に際し予想される CO2 飽和度および溶解 CO2 量の分布を、階調をつけて色表示した。
- 3. 図中の座標は、シミュレーションにより予想される CO<sub>2</sub>飽和度および溶解 CO<sub>2</sub>量の分布域を考慮して想定した圧入した CO<sub>2</sub> の分布範囲を平面に投影したもの。シミュレーション結果は、三次元的にグリッド化した地質モデルを用いて実施したた め、分布自体もグリッドを反映した形(四角)となる。
- 4. 圧入した CO<sub>2</sub>の分布範囲は限定的となるため、滝ノ上層圧入井の圧入区間から、CO<sub>2</sub>飽和度では 20m, 溶解 CO<sub>2</sub>量では 25m までの範囲とした。
- 5. CO2 飽和度の下限値は、0.001 (0.1%)。溶解 CO2 量の下限値は、0.001mol/kg。

第4.5-17図 CO2の平面的な分布範囲(平成27年度シミュレーション結果)

第4.5-16 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

予想される CO<sub>2</sub> 飽和度の分布域は溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布域に含まれるため,溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布域 を圧入した CO<sub>2</sub>の分布範囲とした。

第4.5-7表に, CO2の平面的な分布範囲の座標を示す。

	北限			南限			東限			西限	
度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
42	36	15.95	42	35	39.89	141	38	0.31	141	37	40.45

第4.5-7表 海底下廃棄した CO2の平面的な分布範囲(滝ノ上層 T1 部層)

また, CO<sub>2</sub>飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第4.5-18 図に, 溶解 CO<sub>2</sub>量の分 布に対するシミュレーション結果を第4.5-19 図に示す。



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。

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. 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4.5-18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。

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. 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4.5-19図 溶解 CO2量の推移(平成27年度シミュレーション結果)

## ④ 圧入した CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲

圧入開始から1,000年後までのCO2飽和度および溶解CO2量の垂直的な分布範囲は,第4.5-18 図および第4.5-19 図に示すとおり,圧入井の坑跡に沿った上下10m以内となる。

第4.5-8表に, CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲の座標を示す。なお,安全側に立ち,圧入井の貯留 層区間の下 25m とし,上限は遮蔽層深度としている。

GL = 9.1m	掘削深度(mMD)	垂直深度 (mVD)	レベル (mbms1)	備考
滝ノ上層上限	4,624	2, 390	2, 381	
圧入井坑底深度	5,800	2, 753	2, 744	
CO <sub>2</sub> 上限分布深度	—	_	2, 381	遮蔽層深度
CO2下限分布深度	—	_	2,769	坑底+25m
CO2飽和度上限分布深度	—		2, 381	遮蔽層深度
CO2飽和度下限分布深度	_	_	2,764	坑底+20m
溶解 CO2 量上限分布深度	_		2, 381	遮蔽層深度
溶解 CO2 量下限分布深度	-	_	2, 769	坑底+25m

第4.5-8表 海底下廃棄した CO2の垂直的な分布範囲(滝ノ上層 T1 部層)

注: 圧入した CO<sub>2</sub>の分布範囲は限定的となるため、下限は圧入井の坑底(圧入区間の最深部)から、CO<sub>2</sub>飽和度では 20m, 溶解 CO<sub>2</sub> 量では 25m までの範囲とした。また、上限については、遮蔽層までとした。溶解 CO<sub>2</sub>量の方がやや広範囲に分布するため、圧 入した CO<sub>2</sub>の分布範囲は、溶解 CO<sub>2</sub>量の分布範囲とした。

貯留 CO<sub>2</sub>の3つの貯留形態を, Movable(移動する可能性がある気相 CO<sub>2</sub>), Dissolved(溶 解 CO<sub>2</sub>) および Trapped(孔隙等にトラップされ動かない気相 CO<sub>2</sub>)の3つに表現し, CO<sub>2</sub> 圧入 量に対する割合の経時変化を, 第4.5-20 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4.5-20図 CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>の割合が増加する。

圧入停止後に徐々に溶解 CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>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。

- (2) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(変更申請時)
- ① 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。。

- CO2 挙動予測シミュレーション
- 7) 暫定的な圧入実績を踏まえた CO2 挙動予測
  - a. 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 4.5-21 図)。問題対応等の後 7 月 31 日に圧入を再開したが, PSA オ フガス供給元の不具合により 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 4.5-22 図)。



第4.5-21図 滝ノ上層圧入実績(2018年2月)



第4.5-22図 滝ノ上層圧入実績(2018年7月~9月)

### b. CO2 圧入時の挙動とパラメータの調整

CO<sub>2</sub>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反映し,2018 年 2 月 ~2020 年 3 月までの約 2 年間で累計 750 トンの CO<sub>2</sub>を圧入するシミュレーションを実施し た。2018 年 8 月 31 日までの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 地質モデルのパラメータを修正した結果(第 4.5-23 図)、2018 年 7 月以降の圧入 実績と良好に一致した(第 4.5-24 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4.5-10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<sup>32.1823×孔隙率</sup>」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4.5-23 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4.5-24 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)

# ③ 圧入した CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を考慮し,圧入した CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲を推定した(第4.5-25 図)。



# CO,ガス(飽和度)の最大分布域

# 溶解CO<sub>2</sub>量の最大分布域

- 注:1. 図中の滝ノ上層圧入井, 萌別層圧入井および苫小牧 CCS-1 は, 坑井の坑跡を上面に投影したもの。
  - 2. 滝ノ上層圧入井の仕上げ区間全体から、CO2が滝ノ上層中に圧入される。圧入に際し予想される CO2 飽和度および溶解 CO2 量の分布を、階調をつけて色表示した。
    - 3. 図中の座標は、シミュレーションにより予想される CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布域を考慮して想定した圧入した CO<sub>2</sub> の分布範囲を平面に投影したもの。シミュレーション結果は、三次元的にグリッド化した地質モデルを用いて実施したた め、分布自体もグリッドを反映した形(四角)となる。
    - 4. CO2 飽和度の下限値は、0.001 (0.1%)。溶解 CO2 量の下限値は、0.001mol/kg。

第4.5-25図 CO2の平面的な分布範囲(平成30年度(暫定)シミュレーション結果)

予想される CO<sub>2</sub> 飽和度の分布域は溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布域に含まれるため,溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布域 を圧入した CO<sub>2</sub> の分布範囲とした。

第4.5-9表に, CO2の平面的な分布範囲の座標を示す。

	北限			南限			東限			西限	
度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
42	36	15.95	42	35	39.89	141	38	0.31	141	37	40.45

第4.5-9表 海底下廃棄した CO2の平面的な分布範囲(滝ノ上層 T1 部層)

また, CO<sub>2</sub> 飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第 4.5-26 図に, 溶解 CO<sub>2</sub> 量の分 布に対するシミュレーション結果を第 4.5-27 図に示す。



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4.5-26 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4.5-27 図 溶解 CO2量の推移(平成 30 年度(暫定)シミュレーション)

#### ④ 圧入した CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲

圧入開始から1,000年後までのCO<sub>2</sub>飽和度および溶解CO<sub>2</sub>量の垂直的な分布範囲は,第4.5-25図および第4.5-26図に示すとおり,圧入井の坑跡に沿って限定的となると考えられる。
 第4.5-10表に,CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲の座標を示す。なお,安全側に立ち,下限は圧入井の貯留層区間の下25mとし,上限は遮蔽層深度としている。

第4.5-10表 海底下廃棄した CO2の垂直的な分布範囲(滝ノ上層 T1 部層)

GL = 9.1m	掘削深度(mMD)	垂直深度 (mVD)	レベル (mbms1)	備考
滝ノ上層上限	4,624	2, 390	2, 381	
圧入井坑底深度	5,800	2, 753	2,744	
CO2 上限分布深度	-	-	2, 381	遮蔽層深度
CO2下限分布深度	-	—	2, 769	坑底+25m
CO2 飽和度上限分布深度	—	—	2, 381	遮蔽層深度
CO2 飽和度下限分布深度	_	_	2,764	坑底+20m
溶解 CO2 量上限分布深度	-	_	2, 381	遮蔽層深度
溶解 CO2 量下限分布深度	_	_	2,769	坑底+25m

注: 圧入した CO<sub>2</sub>の分布範囲は限定的となるため,下限は圧入井の坑底(圧入区間の最深部)から, CO<sub>2</sub>飽和度では 20m,溶解 CO<sub>2</sub> 量では 25m までの範囲とした。また,上限については,遮蔽層までとした。溶解 CO<sub>2</sub>量の方がやや広範囲に分布するため,圧 入した CO<sub>2</sub>の分布範囲は,溶解 CO<sub>2</sub>量の分布範囲とした。

#### ⑤ CO2の貯留形態ごとの割合

貯留 CO<sub>2</sub>の3つの貯留形態を、Movable(移動する可能性がある気相 CO<sub>2</sub>)、Dissolved(溶
 解 CO<sub>2</sub>)および Trapped(孔隙等にトラップされ動かない気相 CO<sub>2</sub>)の3つに表現し、CO<sub>2</sub> 圧入
 量に対する割合の経時変化を、第4.5-28 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4.5-28 図 CO<sub>2</sub>の貯留フォーム(割合)の変化(平成 30 年度(暫定)シミュレーション)

圧入開始初期には圧入した CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>の割合が増加する。圧入停止後

に徐々に Movable  $CO_2$ が溶解し, 圧入開始後 320 年程度にはほぼ全ての Movable  $CO_2$ が溶解もしくはトラップされ消滅する。

#### (3) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(当初申請時)

① 検討に使用した地質モデル

### ア) 平成 23 年度地質モデルの作成

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4.5-29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。



### 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4.5-30 図に、主要な層準 の東西モデル断面を第4.5-31 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4.5-30図 モデル断面位置図(構造図は萌別層砂岩層(HST)上限)



各層準内に第4.5-11表のようにグリッドセルを作成した。第4.5-32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4.5-11 表 萌別層構造モデルのグリッディング



第4.5-31 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4.5-33 図に示す。



第4.5-33 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) および 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)および陸側下部(5:泥岩層)に区分した。

### () 平成24年度地質モデルの作成

萌別層圧入井の圧入(廃棄)位置を選定するあたり,三次元弾性波探査データおよび苫小牧 CCS-1(調査井),苫小牧 CCS-2(調査井),坑井A(既存民間井)のデータを解析した。そして,当該海域の萌別層砂岩層には下位から FD1~FD5 の 5 枚のファンデルタシステムの分布を認識した(第4.5-34図)。



第4.5-34 図 萌別層砂岩層に認識された5枚のファンデルタシステムおよび貯留層ターゲット

弾性波探査データを解析した結果, FD2, FD3, FD4 には粗粒堆積物が埋積するチャネルの 発達が認識され,その重複箇所をターゲットとして萌別層圧入井の掘削位置を選定した。

- ② 萌別層砂岩層における CO2 挙動予測シミュレーション
- ア) 平成 23 年度シミュレーション
  - 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4.5-33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 CO<sub>2</sub>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(CO<sub>2</sub>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<sup>注1</sup>。

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、物理検層測定値など)および文献値から設定した(第4.5-12 表)。

<sup>&</sup>lt;sup>注1</sup> 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/cm<sup>2</sup>)であった。これは等価泥水比重で 1.50g/cm<sup>3</sup> 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/cm<sup>2</sup>), その 90%の値 (136.65kg/cm<sup>2</sup>=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	8km×	<15km×1.5km				
グリッド	40×75	5×43 グリッド				
アクティブ・ブロック数		97, 024				
基準温度	44. 78℃	(1,046.835mVD)				
基準圧力	10, 669. 4kF	Pa (1,046.835mVD)				
CO2 圧入レート, 圧入期間	250,00	0 トン/年×3 年				
圧入圧力上限	1	.3, 410kPa				
深部塩水層容積(面積×層厚×孔隙率)	4	$9 \times 10^9 \mathrm{Rm}^3$				
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 <sup>-1</sup>	1.532×10 <sup>-6</sup> (測定値)					
塩分濃度:ppm(NaCl)	18,000 (C	1 <sup>-</sup> = 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) <sup>[1]</sup>				
液相 相対浸透率 Krw	測定値	van Genuchten (1980) <sup>[2]</sup>				
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05	0.05				
不動水的和來 Swir	0.49	0. 638				
	測定値	Bennion (2007) <sup>[3]</sup>				
島士建図ガス的和索 Sarmay	0.275	_				
取八次首次八起柏平 Sgi max	Holtz (2002) <sup>[4]</sup>					
毛细管正力	砂岩	泥岩				
	van Genuchten (1980) <sup>[2]</sup>					
Pc : kPa	4.04	750				

第4.5-12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. 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4.5-13表に示す。

<sup>&</sup>lt;sup>[1]</sup> Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 38-41

<sup>&</sup>lt;sup>[2]</sup> 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

<sup>&</sup>lt;sup>[3]</sup> Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

<sup>&</sup>lt;sup>[4]</sup> 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

第4.5-13 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)

		石	沙岩層			ĩ	尼岩層		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 <sup>3</sup> )
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	49×10 <sup>9</sup>
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	49×10 <sup>9</sup>
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	49×10 <sup>9</sup>
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4.5-32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。

() 平成24年度シミュレーション

平成 24 年度の萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 圧入長期挙動予測シミュレーションでは, FD2, FD3, FD4 に発達するチャネル堆積物の物性値を基準に,ベースケース,高浸透率ケース,低浸透率ケースによるシミュレーションを実施した(第4.5-14表)。ケース区分の基準は,苫小牧 CCS-1 および苫小牧 CCS-2 の萌別層砂岩層の解析結果に基づいている(第4.5-35 図)。

なお, 萌別層砂岩層における圧入圧力挙動および萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧 力変化に関するシミュレーション結果は, それぞれ第 5.2-3 図および第 5.3-4 図~第 5.3-6 図に示した。

第4.5-14表 萌別層砂岩層で実施した CO2 圧入長期挙動予測シミュレーションのケース分け

シミュレーション	孔隙率	浸透率:mD	根拠
ベースケース	0.281	17	CCS-1 および CCS-2 の Unit2 の平均値
高浸透率ケース	0.3	27.7	CCS-1 および CCS-2 の Unit1 の平均値
低浸透率ケース	0.3	10.2	CCS-1 および CCS-2 の Unit3 の平均値



FD2, FD3, FD4 のチャネル堆積物の 重複部が, ターゲット。

FD2, FD3, FD4 のチャネル堆積物の 物性値を変えてシミュレーション



シミュレーション結果)

# ③ 圧入した CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲

作成した 3 つのケースモデルについて、 $CO_2 & 20$  万トン/年のレートで 3 年間圧入するシ ミュレーションを実施し、圧入から 3 年後(圧入終了時)および圧入開始から 1,000 年後の 貯留層中での  $CO_2$ の分布状況を検討した。それぞれのケースごとに、圧入開始から 1,000 年 後までの  $CO_2$ 飽和度および溶解  $CO_2$ 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した  $CO_2$ の平面的な分布範囲を推定した(第4.5-36 図および第4.5-37 図)。その推定結果を、第 4.5-15 表に示す。 なお,掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は,ブラインによる圧入試験後のフォール オフテストの解析から 370mD と試算されており,平成 24 年度シミュレーションの予測より 高くなっている。しかしながら,本井の NMR 検層から得られた貯留層の孔隙率(12~42%程 度)は平成 24 年度シミュレーションの予測と同程度であることから,本計画を実施した場合 の CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲は,平成 24 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。



CO2飽和度分布範囲

注:分布範囲を示す座標は、圧入開始より1,000 年後までのすべてのモデル(ベースケース,高浸透率ケース,低浸透率ケース)の C02 飽和度の分布域を包括する範囲を示す。着色箇所は、ベースケースにおける圧入開始から3年後の分布を示す。

第4.5-36 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>の分布範囲(CO<sub>2</sub> 飽和度)(平成 24 年度シミュレーション結

果)



グリッドはUTM54系。緯度程度への変換はJDG2000を使用

第 4.5-37 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>の分布範囲(溶解 CO<sub>2</sub>量)(平成 24 年度シミュレーション結果)

八本城	北限		南限			東限			西限			
刀们域	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
二酸化炭素	42	37	09	42	36	02	141	38	42	141	37	53
CO2飽和度	42	36	58	42	36	13	141	38	42	141	38	13
溶解 CO2 量	42	37	09	42	36	02	141	38	42	141	37	53

第4.5-15表 海底下廃棄した CO2の平面的な分布範囲(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 量の平面的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

## ④ 圧入した CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲

上記で検討した平面的な CO<sub>2</sub>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, CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲を推定した(第4.5-37~第4.5-40図)。その推定した結果を, 第4.5-16表に示す。

なお、掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は、平成24年度シミュレーションの予測よ り高くなっている。平成24年度シミュレーションにおいては、基本的に浸透率の垂直方向/ 水平方向を0.1と仮定しているものの、貯留層の上限には遮蔽層があるため、圧入した CO<sub>2</sub> の上方への分布は浸透率の鉛直/水平比率の影響は受けにくいものと判断される。また、下方 への移動の影響に関しては、鉛直方向に広がりやすくなるとは考えられないが、CO<sub>2</sub>が貯留層 下限まで移動した場合は、その下層の地層が遮蔽層として機能するため、CO<sub>2</sub>の下方への移動 は制限される。よって、本計画を実施した場合の CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲は、平成24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。

注:分布範囲を示す座標は,圧入開始より1,000年後までのすべてのモデル(ベースケース,高浸透率ケース,低浸透率ケース)の溶解CO2量の分布域を包括する範囲を示す。着色箇所は,ベースケースにおける圧入開始から3年後の溶解CO2量の分布を示す。



注: 1. C0<sub>2</sub>分布域を,構造図に投影した。2. 最も浅い深度で,海面下940m程度まで分布するものと考えられる。

第4.5-38 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>の分布範囲の上限(CO<sub>2</sub>飽和度)(平成 24 年度シミュレーション結果)



- 2. 最も深い深度で,海面下1,175m程度まで分布するものと考えられる。
- 第4.5-39 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>の分布範囲の下限(CO<sub>2</sub>飽和度)(平成 24 年度シミュレーション結果)



注: 1. C0₂分布域を,構造図に投影した。
 2. 最も浅い深度で,海面下980m程度まで分布するものと考えられる。

第4.5-40 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>の分布範囲の上限(溶解 CO<sub>2</sub>量)(平成 24 年度シミュレーション結果)



第 4.5-41 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>の分布範囲の下限(溶解 CO<sub>2</sub>量)(平成 24 年度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	980	1,180
CO2飽和度	980	1,175
溶解 CO2 量	980	1, 180

第4.5-16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,それぞれのケースにおける CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布に対するシミュレー ション結果を第 4.5-42 図~第 4.5-47 図に示す。





注: 1. 左側: 圧入開始から3年後,右側: 圧入開始から1,000年後。 2. 上段: 平面図 (Sg>0.005 でフィルタリング),下段: 萌別層圧入井に沿った断面図。

# 第4.5-42 図 ベースケースにおける CO2 飽和度の分布(平成24 年度シミュレーション結果)



注: 1. 左側: 圧入開始から3年後,右側: 圧入開始から1,000年後。 2. 上段: 平面図 (MC02>0.005 でフィルタリング),下段: 萌別層圧入井に沿った断面図。

第4.5-43 図 ベースケースにおける溶解 CO2 量の分布(平成24 年度シミュレーション結果)



注: 1. 左側: 圧入開始から3年後,右側: 圧入開始から1,000年後。 2. 上段: 平面図(Sg>0.005でフィルタリング),下段: 萌別層圧入井に沿った断面図。

第4.5-44 図 高浸透率ケースにおける CO2 飽和度の分布(平成24 年度シミュレーション結果)



注: 1. 左側: 圧入開始から3年後,右側: 圧入開始から1,000年後。 2. 上段: 平面図 (MC02>0.005 でフィルタリング),下段: 萌別層圧入井に沿った断面図。

第4.5-45 図 高浸透率ケースにおける溶解 CO2 量の分布(平成24 年度シミュレーション結果)


注: 1. 左側: 圧入開始から3年後,右側: 圧入開始から1,000年後。 2. 上段: 平面図(Sg>0.005でフィルタリング),下段: 萌別層圧入井に沿った断面図。

第4.5-46 図 低浸透率ケースにおける CO2 飽和度の分布(平成24 年度シミュレーション結果)



注: 1. 左側: 圧入開始から3年後,右側: 圧入開始から1,000年後。
2. 上段: 平面図(MC02>0.005でフィルタリング),下段: 萌別層圧入井に沿った断面図。

# 第4.5-47 図 低浸透率ケースにおける溶解 CO2 量の分布(平成24 年度シミュレーション結果)

# ⑤ 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,平成23年度シミュレーションにより精査した。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 4.5-48図)。



注:黄色;砂岩,青色;泥岩。

# 第4.5-48 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4.5-49図)。



第4.5-49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4.5-50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<sub>2</sub>の流れがあるが、遮蔽層Bにおける CO<sub>2</sub> 飽和度はほとんど変化がない。遮蔽層Bにおける溶解 CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sup>-3</sup>mD 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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; CO<sub>2</sub>飽和度,下段;溶解CO<sub>2</sub>量。上位から遮蔽層A,遮蔽層B,貯留層Cの順。

第4.5-50 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 4.5-13 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 CO<sub>2</sub> 飽和度と溶解 CO<sub>2</sub> 量を精査した。第4.5-51 図に,それらのセルの CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>飽和度は, ほとんど変化がない。 遮蔽層Bにおける溶解 CO<sub>2</sub>量は, 0.55mo1/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 CO<sub>2</sub>量は圧入開始 1,000 年後で 2.6×10<sup>-3</sup>mo1/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 CO<sub>2</sub> 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<sup>-3</sup>mD)・スレショルド圧力(0.75MPa)を推定した。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年度圧入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4.5-51 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)

#### ⑥ CO<sub>2</sub>の貯留形態ごとの割合

貯留 CO<sub>2</sub>の3つの貯留形態を Movable(移動する可能性がある気相 CO<sub>2</sub>), Dissolved(溶解 CO<sub>2</sub>)および Trapped(孔隙などにトラップされ動かない気相 CO<sub>2</sub>)と表現し,各モデルの CO<sub>2</sub> 圧入量に対する割合の経時変化を,平成 23 年度シミュレーションにより精査した。その結 果を,第4.5-52 図~第4.5-54 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> と Dissolved CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> は約 44%, Trapped CO<sub>2</sub> は約 55%,低浸透率ケースでは Dissolved CO<sub>2</sub> は 48%, Trapped CO<sub>2</sub> は 49%,高浸透率ケースでは Dissolved CO<sub>2</sub> は 45%, Trapped CO<sub>2</sub> は 54%となった。 この差については,圧入終了までの CO<sub>2</sub>の広がり方による地層水との接触面積の違い, CO<sub>2</sub> 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 370mD と大きな値が解析されて いるが, 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 CO<sub>2</sub>の貯留形態ごとの割合となると予測される。



第 4.5-52 図 ベースケースにおける CO<sub>2</sub>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4.5-53 図 低浸透率ケースにおける CO<sub>2</sub>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4.5-54 図 高浸透率ケースにおける CO<sub>2</sub>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)

- (4) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲(変更申請時)
  - ① 検討に使用したモデル
  - 7) 平成 30 年度(暫定) 地質モデルの作成
  - 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0B-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4.5-55 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。なお,。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。



第4.5-55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4.5-56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 堆積物から構成されている。



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4.5-56 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

# 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4.5-55 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4.5-56 図に示す。



各層準内に第4.5-17表のようにグリッドセルを作成した。第4.5-57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	$100 \mathrm{m}  imes 100 \mathrm{m}$	9~12
萌別層砂岩層下部	5 レイヤーに分割		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4.5-17表 萌別層構造モデルのグリッディング



c. 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4.5-58 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)砂岩泥岩五層, 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4.5-59 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4.5-55 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 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4.5-59 図 萌別層(+荷菜層)砂岩層~萌別層砂岩層下部の堆積モデル

- ② 萌別層砂岩層における CO2 挙動予測シミュレーション
- 7) 平成 30 年度(暫定) シミュレーション
  - 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<sup>注1</sup>。圧入レートおよび圧入期間につい 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

注1 圧入上限圧力の詳細は、5.2(3)①を参照のこと。

した(第4.5-18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(詳細については, e. 圧入実績を考慮したパ ラメータの調整 に記載)して流動シミュレーションを実施した。

モテル					
サイズ	10km $ imes$ 10km $ imes$ 1, 500m				
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℃@982mVD			
基準圧力	9, 82	20kPa@982mVD			
CO <sub>2</sub> 圧入レート, 圧入期間	実績および	予定レート,4年間			
圧入圧力上限	12,930kPa 12,600kPa(温	(仕上げ区間上端) 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 <sup>-1</sup>	$4.56  imes 10^{-6}$				
塩分濃度:ppm(NaC1)	3,150mg/L				
相対浸透率	砂岩	泥岩			
気相 相対浸透率 Krg	0.144	Corey (1954) <sup>[1]</sup>			
液相 相対浸透率 Krw	1.00	van Genuchten (1980) <sup>[2]</sup>			
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05	0.05			
不動水的和索 Swin	0.49	0. 638			
小動小胞和平 5W11	測定値	Bennion (2007) <sup>[3]</sup>			
島大残留ガス韵和率 Sormay	0.275	_			
	Holtz (2002) <sup>[4]</sup>				
	砂岩	泥岩			
毛細管圧力	測定値	van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>			
Pc : kPa	4.04	370			

第4.5-18表 シミュレーションパラメーター覧(H30(暫定)地質モデル)

### 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2017年3月末までの萌別 層への圧入実績を第4.5-60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)が10.1MPaGに満たない。P/T Sensorにお ける圧入上限圧力(遮蔽層のリークオフ圧力の90%)の12.63MPaGに対し,十分余裕を持っ た安全な圧入がなされた。

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

<sup>&</sup>lt;sup>[2]</sup> 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

<sup>&</sup>lt;sup>[3]</sup> Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

<sup>&</sup>lt;sup>[4]</sup> 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



注)坑底温度・坑底圧力は P/T Sensor の値

# 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。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4.5-61 図) ため, 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 CO<sub>2</sub>を圧入可能な構造(第4.5-61図)である。

第4.5-62 図および表4.5-19 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。流動坑底圧が深度と共に増加する貯 留層圧力(第4.5-62 図の黒線)を上回る深度区間は流動坑底圧が貯留層圧力を上回る深 度区間である。CO<sub>2</sub>が圧入されている貯留層区間は, 貯留層の圧入性が良好であることから, 圧入中に流動坑底圧が上がらないため(第4.5-62 図において流動坑底圧を示す線が右側 にシフトしないため), 圧入区間は下位方向に及びにくく, 圧入される深度区間が限定的と 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-CO<sub>2</sub>/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-CO<sub>2</sub>/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

第4.5-60 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績

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。



PTセンサーから仕上げ区間上限までの状況

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。

# 第4.5-62 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

口時	圧入レート	CO₂圧入⁻	下端深度
니며	万t-CO <sub>2</sub> /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4.5-19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

### i) フォールオフテストデータの解析

圧入中に上昇した貯留層圧力は圧入を停止すると低下する。低下状況を解析すること
 により貯留層や坑井の健全性をある程度把握することが可能であり、この解析はフォール
 オフ解析(以下、「FOT解析」と称する)と呼ばれている。圧入井では、坑内に設置した
 PT センサーにより、常時圧力・温度データを取得しており、この圧力・温度データを用い
 て貯留層での圧力の変化状況を推定し、FOT解析を実施した。

第4.5-63 図は2016年4月6日の圧入開始以降の主な圧入停止のタイミングと,FOT 解 析を実施したタイミングを示している。試験圧入中のFOT2およびFOT4,本圧入中の FOT6,FOT7,FOT8の計5回で取得したデータは解析に耐えうると判断し,解析を実施し た。しかし,FOT1,FOT3,FOT5では解析に足るデータが取得できなかったため,解析対象か ら除外した。緩やかに圧入を停止したことが原因であると推定される。



注) FOT2, FOT4, FOT6, FOT7, FOT8 の5回を解析対象とした。

第4.5-63 図 FOT 解析を実施したタイミング

## ii) 圧力デリバティブに関する考察

FOT 解析では横軸に時間,縦軸に圧力変化と圧力デリバティブ(圧力変化を微分,以下, 「デリバティブカーブ」と称する)を共に対数スケールでプロットし,解析モデルにより 貯留層性状を解析解により推定した。第4.5-64 図は,解析対象とした5回の解析用プロ ット(以下,「ログーログプロット」と称する)を示す。各ログーログプロットには,PT センサーが記録した圧力データを直接解析したカーブ(PT)と,PT センサーの圧力・温 度データからセンサー位置での CO<sub>2</sub>密度を推定し,その密度をもとに PT センサーから離 れた位置にあたる仕上げ区間上端における圧力挙動を推定したカーブ(補正)も示し た。また,PT センサーの圧力・温度条件から推定される CO<sub>2</sub>の密度の変化も示した。解析 には Pradigm 社製の圧力解析ソフト「Interpret」を使用した。



注) (PT)は PT センサーの圧力値を直接使用したカーブ。(補正)は PT センサーの圧力・温度データをもと,仕上げ 区間上端の圧力を推定して求めたカーブ。CO2密度は PT センサーの圧力・温度値から求めた CO2の密度。

第4.5-64 図 ログ-ログプロット

第4.5-65 図は油・ガスの生産井(水平井)において生産を中断した直後に想定される 圧力挙動を示している。IW-2 号井はほぼ水平な圧入井であり,圧入停止直後に想定され る坑井近傍での圧力挙動は,油・ガスの生産井と流れの方向が逆ではあるが,同様の挙動 となる。

アーリーラジアルフローは圧入停止直後に観察される可能性があるが,本検討では確認 できていない。

アーリーリニアフローは, 圧入井からの流れが上下の地層境界などに到達し, 坑井に垂 直な方向の流れが支配的になる領域で認められる。ログ-ログプロットにおいてしめすデ リバティブカーブにおいて, 1/2 傾斜となるとされ, 第4.5-64 図の FOT2, FOT4, FOT6, FOT7 で確認できたと考えている。

また,レイトラジアルフロー (スードラジアルフロー) はアーリーリニアフローの後に 水平面でのラジアルフローが支配的となる領域で生じ,ログ-ログプロットのデリバティ ブカーブでは0傾斜となるはずである。第4.5-64 図の FOT4, FOT6, FOT7, FOT8 で確認でき たと考えている。



注) 島本(1995)<sup>[1]</sup>より作成. ログ-ログプロットにおいて, アーリーリニアフローは 1/2 傾斜のデリバティブカーブ として認識され, レイトラジアルフロー(スードラジアルフロー)は0傾斜のデリバティブカーブとして認識 される。

# 第4.5-65図 水平井で予想される圧力挙動

アーリーリニアフロー(以下,「ELF」と称する)を認識できた FOT2, FOT4, FOT6, FOT7

<sup>1</sup> 島本辰夫:水平坑井の圧力解析と生産予測,石油技術協会誌 60(6), 462-473(1995)

の4ケースについて, Goode et. al (1987)<sup>1)</sup> が示す式を解くことにより ELF 解析を実施した。

$$\Delta P = \frac{8.128qB}{hL} \sqrt{\frac{\mu\Delta t}{k\varphi c}} + \gamma$$
$$t_{Self} = \frac{1,800D^2 \varphi \mu c}{k_z}$$

$$t_{Eelf} = \frac{160L^2\varphi\mu c}{k}$$

ここで、ΔP:圧力変化、φ: 孔隙率、μ:粘性,c:総合圧縮率,k:水平浸透率,kz:垂直浸透 率 t:時間,Z:圧縮係数,q:流量,B:容積係数,h:層厚,L:仕上げ区間長,γ:切片,D:仕上げ 区間と下部境界との距離(有効層厚の1/2と仮定),tSelf:ELF 開始時間,tEelf:ELF 終 了時間をそれぞれ示す。第4.5-20表に入力値と解析結果を示す。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> P.A. Goode, "Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotoropic media", SPE Formation Evaluation, December, p. 683-697(1987)

第 4.5-20 表 ELF 解析

			F0 T2							F0 T4			
		m <sup>3</sup> /D		160,210				104,137				FOT実施直前	
		tC02/年			109,351					71,079			の圧入レート
	仕上げ区間長	m	53	79	105	131	157	53	79	105	131	157	<u> </u>
	有効層厚	m	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	仮定
	tS e lf	時間			0.05					0.15			ログーログ プロット
	tEelf	時間			0.30					0.90			からの読み値
入力値	式(5.1-1)の傾き	kPa∕cyc e			56.50					26.92			
	В	rm 3,⁄m 3			0.003					0.003			
	μ	cP			0.05					0.05			
	φ				0.25					0.25			
	Ct	1/kPa	7.23E-05	7.23E-05	7.23E-05	2.16E -05	9.04E-06	1.71E-04	1.71E-04	1.71E-04	5.11E-05	2.14E-05	入力値
	Cw	1/kPa			4.29E-07					4.29E-07			
	Cg	1/kPa			8.52E-05					8.52E-05			
	Cr	1,/kPa			4.54E-06					4.54E-06			
	水平浸透率	m D	103	69	51	44	63	81	54	40	32	27	
	垂直浸透率	m D	63	42	32	27	39	50	33	25	20	17	
解析結果	kv/kh		0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	解析結果
	kg*h	m D*mn	1,029	1,029	1,029	1,097	1,883	811	811	811	811	813	<b>万</b> 十7/1 741 不
	kave*L/µ	m D ≄m /cP	88,017	88,017	88,017	93,884	161,255	69,338	69,338	69,338	69,338	69,498	
	Sg		0.79	0.20	0.05	0.00	0.00	1.96	0.54	0.19	0.07	0.02	
					FO T6					EO T7			/# <b>#</b>
					F0 T6					F0 T7		L	備考
	圧入レート	m <sup>3</sup> /D			F0 T6 129,623				<u>.</u>	F0 T7 146,691	<u>.</u>		備考 FOT実施直前
	圧入レート	m <sup>3</sup> /D tC 0 <sub>2</sub> /年	50	70	F0 T6 129,623 88,474	101	457	50		F0 T7 146,691 100,124	101	157	備考 FOT実施直前 の圧入レート
	圧入レート 仕上げ区間長	m <sup>3</sup> /D t-C 0 <sub>2</sub> /年 m	53	79	F0 T6 129,623 88,474 105	131	157	53	79	F0 T7 146,691 100,124 105	131	157	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定
	<ul> <li>         圧入レート         仕上げ区間長         有効層厚         10-15     </li> </ul>	m <sup>3</sup> /0 tC0 <sub>2</sub> /年 m	53 <b>10</b>	79 <b>15</b>	F0 T6 129,623 88,474 105 20	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	53 <b>10</b>	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定
	<ul> <li>圧入レート</li> <li>仕上げ区間長</li> <li>有効層厚</li> <li>15 elf</li> </ul>	m <sup>3</sup> /0 t-C0 <sub>2</sub> /年 m 時間	53 <b>10</b>	79 <b>15</b>	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	53 <b>10</b>	79 15	<b>F0 T7</b> 146,691 100,124 105 <b>20</b> 0.07	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定 ログーログ プロット よこのますまた
	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 15 e lf モ e lf	m <sup>3</sup> /D tC0 <sub>2</sub> /年 m 時間 時間	53 10	79 <b>15</b>	F0 T6 129,623 88,474 105 <b>20</b> 0.07 0.20 21 86	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	53 <b>10</b>	79 15	F0T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 20 %	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	<ul> <li>備考</li> <li>FOT実施直前 の圧入レート</li> <li>仮定</li> <li>ログーログ プロット からの読み値</li> </ul>
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 Self モelf 式 5.1-1)の傾き	m <sup>3</sup> /0 tC0 <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cyce	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85	131 25	157 <b>30</b>	<ul> <li>備考</li> <li>FOT実施直前 の圧入レート</li> <li>仮定</li> <li>ログーログ プロット からの読み値</li> </ul>
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 Self モelf 式 5.1-1)の傾き B	m <sup>3</sup> ,0 tC0 <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cycb m <sup>3</sup> ,m <sup>3</sup>	53 10	79 <b>15</b>	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003	131 25	157 <b>30</b>	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定 ログ-ログ プロット からの読み値
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 15 e lf モ e lf 式 5.1-1)の傾き B μ		53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.25	131 <b>25</b>	157 <b>30</b>	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05	131 25	157 <b>30</b>	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定 ログーログ プロット からの読み値
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 15 e lf モ e lf 式 5.1-1)の傾き B μ φ	m <sup>3</sup> /D tC0 <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cycb m <sup>3</sup> /n <sup>3</sup> cP	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.25 0.475 05	131 25	157 <b>30</b>	53 10	79 15	F0 T7 146.691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25 0.005	131 25	157 <b>30</b>	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定 ログーログ プロット からの読み値
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 15 e lf モ e lf 式 5.1-1)の傾き B μ φ C t	m <sup>3</sup> /0 tC0 <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cycb m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> cP	53 10 8.47E-05	79 <b>15</b> 8.47E-05	F0 T6 129.623 88.474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.25 8.47E-05 8.47E-05	131 <b>25</b> 2.53E-05	157 <b>30</b> 1.06E -05	53 10 9.90E-05	79 <b>15</b> 9.90E-05	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25 9.90E-05 4.20E-05	131 <b>25</b> 2.96E-05	157 <b>30</b> 1.24E-05	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ プロット からの読み値       入力値
入力値	圧入レート 住上げ区間長 有効層厚 15 e lf 15 e lf 15 e lf 式 (5.1-1)の傾き 8 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	m <sup>3</sup> /D +CO <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cycb m <sup>3</sup> /n <sup>3</sup> cP	53 10 8.47E-05	79 <b>15</b> 8.47E-05	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.25 8.47E-05 4.29E-07 9.52E-07	131 <b>25</b> 2.53E-05	157 <b>30</b> 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 <b>15</b> 9.90E-05	F0 T7 146.691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25 9.90E-05 4.29E-05	131 <b>25</b> 2.96E-05	157 <b>30</b> 1.24E-05	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ プロット からの読み値       入力値
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 15 e lf モ e lf 式 5.1-1)の傾き B ル の C t C w C g	m <sup>3</sup> /D +CO <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cycb m <sup>3</sup> /n <sup>3</sup> cP 1.kPa 1.kPa	53 10 8.47E-05	79 <b>15</b> 8.47E-05	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.25 8.47E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-05	131 <b>25</b> 2.53E-05	157 <b>30</b> 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 <b>15</b> 9.90E-05	F0 T7 146.691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05	131 <b>25</b> 2.96E-05	157 <b>30</b> 1.24E-05	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ プロット からの読み値       入力値
入力値	圧入レート 住上げ区間長 有効層厚 15 e lf 15 e lf	m <sup>3</sup> /D +CO <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cyck m <sup>3</sup> /n <sup>3</sup> cP 1.kPa 1.kPa 1.kPa	53 10 8.47E-05	79 <b>15</b> 8.47E-05	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.25 8.47E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-05	131 <b>25</b> 2.53E-05	157 <b>30</b> 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 <b>15</b> 9.90E-05	F0 T7 146.691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-05	131 25 2.96E-05	157 <b>30</b> 1.24E-05	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ プロット からの読み値       入力値
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 15 e lf モ e lf 式 5.1-1)の傾き B 単 の C t C w C g C r 水平浸透率 	m <sup>3</sup> /D +CO <sub>2</sub> /年 m 時間 時間 kPa/cyck m <sup>3</sup> /n <sup>3</sup> cP 1.kPa 1.kPa 1.kPa 1.kPa 1.kPa	53 10 8.47E-05	79 15 8.47E-05	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.25 8.47E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 90 26	131 25 2.53E-05	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 <b>15</b> 9.90E-05	F0 T7 146.691 100.124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 21	131 25 2.96E-05 85	157 30 1.24E-05	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定 ログ-ログ ブロット からの読み値 入力値
入力値	圧入レート 住上げ区間長 有効層厚 15 e lf モ e lf 式 (5.1-1)の傾き 8 ゆ C t C w C g C r 水平浸透率 重 にした	m <sup>3</sup> /D t C O 2/年 m 時間 時間 時間 時間 に に の の の の の の の の の の の の の	53 10 8.47E-05 181 53 0.20	79 15 8.47E-05 121 35 0.20	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.005 0.25 8.47E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 90 26	131 25 2.53E-05 72 21 0.20	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05 211 62 0.20	79 15 9.90E-05 141 41	F0 T7 146.691 100.124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 31	131 25 2.96E-05 85 25	157 <b>30</b> 1.24E-05 95 28	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ ブロット からの読み値       入力値
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 Self 低elf てもlf 式5.1-1)の傾き B ゆ Ct Cw Cg Cr 水平浸透率 垂直浸透率 kvkh とのわ	m <sup>3</sup> /D t-C 0 2/年 m 時間 時間 時間 時間 に に に に に に に に に に に に に	53 10 8.47E-05 181 53 0.29	79 15 8.47E-05 121 35 0.29	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 8.47E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.52E-05 4.54E-06 90 26 0.29	131 25 2.53E-05 72 21 0.29	157 30 1.06E-05 94 28 0.29 2.928	53 10 9.90E-05 2111 62 0.29 2.114	79 15 9.90E-05 141 41 0.29 2.114	F0 T7 146.691 100.124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.003 0.025 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 31 0.2114	131 25 2.96E-05 85 25 0.29 2.114	157 30 1.24E-05 95 28 0.29 2 241	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ プロット からの読み値       入力値
入力值	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 Self モelf 式 5.1-1)の傾き B	m <sup>3</sup> /0 t-C 0 2/年 m 時間 時間 kPa/cyc b m <sup>3</sup> /n <sup>3</sup> cP 1 /kPa 1 /kPa 1 /kPa 1 /kPa 1 /kPa 1 /kPa	53 10 8.47E-05 8.47E-05 181 53 0.29 1.809 1.90,76E	79 15 8.47E-05 121 35 0.29 1.809 1.20,705	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 8.47E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 90 26 0.29 1.809 1.809	131 25 2.53E-05 72 21 0.29 1.809 1.20,70E	157 30 1.06E-05 94 2.8 0.29 2.828 100.067	53 10 9.90E-05 211 62 0.29 2.114 141 150	79 15 9.90E-05 141 41 2.114 141 140	F0 T7 146.691 100.124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 31 0.29 2.114 2.214	131 25 2.96E-05 85 25 0.29 2.114 141 150	157 30 1.24E-05 95 28 0.29 2.841 2.841	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ プロット からの読み値       入力値
入力値	圧入レート 住上げ区間長 有効層厚 Self Eelf 式5.1-1)の傾き B	m <sup>3</sup> /D せC 0 2/年 m 時間 時間 ドP a/cyc b m <sup>3</sup> /n <sup>3</sup> cP 1.½P a 1.½P a 1.½P a 1.½P a 1.½P a 1.½P a 1.½P a 1.½P a 1.½P a m m m m m m m m m m m m m	53 10 8.47E-05 8.47E-05 181 53 0.29 1.809 120.795	79 15 8.47E-05 121 35 0.29 1.809 120.794	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05 0.05 8.47E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 90 26 0.29 1.809 120,095	131 25 2.53E-05 72 21 0.29 1.809 120.795 0.01	157 30 1.06E-05 94 28 0.29 2.828 189.067 0.00	53 10 9.90E-05 211 62 0.29 2.114 141.158	79 15 9.90E-05 141 41 0.29 2.114 141,158 0.20	F0 T7 146.691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.05 0.05 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 31 0.29 2,114 141,158	131 25 2.96E-05 25 0.29 2.114 141,158	157 30 1.24E-05 95 28 0.29 2.841 189,916	備考       FOT実施直前 の圧入レート       仮定       ログーログ プロット からの読み値       入力値

試験圧入時に実施した FOT2 と FOT4, および本圧入時に実施した FOT6 と FOT7 の解析結 果を比較した場合, それぞれにおいて, 圧入レートが高いケースの方が浸透率に係る解析 結果の数値(水平浸透率, 垂直浸透率, kg\*h, kave\*L/µ)が高い値を示している。これ は, 圧入レートと貯留層の浸透性が比例関係にあることを示している。第3章圧入におい て検討した圧入レートと圧入指数の関係と整合的な結果となった。

また,現状では圧入中の  $CO_2$  が圧入されている貯留層の層厚を正確に測定することがで きないため,有効層厚を 10 m~30 m まで 5 m 刻みに変化させて解析した。ELF は圧入井 周辺の  $CO_2$  濃度が高い領域で確認された挙動であると推定されるため,期待される  $CO_2$  飽 和率 (Sg) は高値であるが 1.0以下のはずである。有効層厚 10 m の解析結果では,FOT4 と FOT7 では, $CO_2$  飽和率 (Sg) が 1.0 を超え,有効層厚 20 m では,FOT2,FOT6,FOT7 の  $CO_2$ 飽和率 (Sg) は 0.1 未満となる。したがって, $CO_2$ の圧入に大きく寄与している層準, $CO_2$ 飽和率 (Sg) が 0.2~0.54 と評価される層準の有効層厚は 15m 程度が妥当であると推定 した。

iii) ヒストリーマッチ

圧入中に記録した坑内圧力や,FOT 解析に際して作成したログ-ログプロットの挙動と

シミュレーションにより再現される挙動が近づくように貯留層モデルのパラメータを調 整することによりヒストリーマッチングを実施した。ヒストリーマッチングでは、貯留層 モデルから部分的にセクターモデルを切り出し、坑井が通過するグリッドの周辺を1 m× 1 m程度の詳細なグリッドに細分化したモデルを用いた(第4.5-66 図)。また、グリッ ドに入力した物性値パラメータは第4.5-18 表と同様である。。



第4.5-66 図 ヒストリーマッチングに用いたモデルのグリッドシステム

圧入実績から、CO<sub>2</sub>は萌別砂岩層上部に圧入されていると考えられる。また、第4.5-21 表 に示すように、8.2 万 t-CO<sub>2</sub>/年程度の比較的低レートの圧入では、圧入区間の下端深度は 1,020 mVD 程度となる一方で、20 万 t-CO<sub>2</sub>/年程度の高レート圧入時には、1,030 mVD 程度ま で圧入区間が拡大するものと推定される。この 10 mVD 程度の圧入区間の増加により推定さ れる仕上げ区間上端における圧入指数が、2,400 m<sup>3</sup>/d/MPaA 程度から 5,000 m<sup>3</sup>/d/MPaA へと 2 倍以上増加することから、この 10 mVD ほどの区間に高浸透率の貯留層が存在するものと 推定される。

日時	圧入レート (万t-CO <sub>2</sub> /年)	圧入 rm³/D	指数 /MPaA	CO <sub>2</sub> の圧入区間下端			
		PTセンサー	仕上げ区間上端	垂直深度 (mVD)	坑井長(mMD)		
2017/9/26	21.3	2,307	4,691	1,033	2,775		
2017/10/18	20.2	2,320	4,680	1,030	2,760		
2017/11/16	21.3	2,399	5,114	1,028	2,750		
2017/11/27	19.5	2,376	4,924	1,026	2,740		
2017/11/28	8.2	1,508	2,414	1,020	2,704		
2018/1/16	21.8	2,398	5,062	1,029	2,756		
2018/1/28	21.8	2,433	5,281	1,027	2,745		

第4.5-21 表本圧入継続段階における圧入指数および CO2 が圧入された貯留層区間

第4.5-62 図に示すように萌別層砂岩層の上部には大別するとNMR 検層による浸透率カ ーブから、3 か所の高浸透率区間が推定できる(第4.5-62 図右赤色)が、仕上げ区間上端付 近の高浸透率区間(第4.5-62 図右緑色)は、圧入区間としての寄与は少ないものと判断し た(理由は後述)。 第4.5-67 図に浸透率分布を変えた設定で再現した FOT のログ-ログプロットを示す。仕 上げ区間上端付近の浸透率を強調したモデルで再現される FOT のログ-ログプロットには スフェリカルフローを示唆する挙動(-1/2 傾斜)が認められ実績値と合わないが,仕上げ 区間上端付近における浸透率の強調を排除した設定では,スフェリカルフローを示唆する 挙動が認められない。この結果から図 5.1-7 右緑色が圧入に寄与していないと判断し,ヒ ストリーマッチングは,仕上げ区間上端付近の高浸透率区間を考慮せず,萌別層砂岩上部 中の 1,015~1,020 m 付近と 1,030 m 付近を高浸透率区間と仮定した設定とした。ELF 解析 より,C02 が圧入されている有効層厚を 15 m 程度としてヒストリーマッチングを実施した。



注) ベースケースでは NMR 検層結果を参照し, 萌別層砂岩層の全体にわたる範囲で浸透率を強調したケース。ケースAでは, 仕上げ区間上端付近の浸透率の強調を排除した萌別層砂岩層上部区間の浸透率を強調したケース。 両方ケースにおいて, 浸透率×区間長は両設定において等しい。

第4.5-67図 ログーログプロットにおける仕上げ区間上端付近の浸透性の影響

圧入区間に推定される高浸透率区間の層厚や浸透率分布を試行錯誤することで,現状で 妥当と考えられる浸透率分布(貯留層パラメータ)を設定した(第4.5-68図)。この浸透 率設定において,約8万t-CO<sub>2</sub>/年および22万t-CO<sub>2</sub>/年でCO<sub>2</sub>を圧入するシミュレーション を実施したところ,8万t-CO<sub>2</sub>/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-CO<sub>2</sub>/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。また,高浸透率区間の浸透率の値を変化させ,圧入中の仕上げ区間上端圧力と,シ ミュレーションにより再現される同圧力を比較した(第4.5-69図)。全体によく一致して いると判断し,第4.5-68図の設定を用いて流動シミュレーションによるCO<sub>2</sub>圧入長期挙動 予測を実施した。



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4.5-68 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



注)高浸透率領域2の浸透率を変化させた。 第4.5-69図 苫小牧 IW-2による浸透率設定と仕上げ区間上端にかかる圧力の再現性

③ 圧入した CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を平面図に投影す ることにより, 圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲を推定した(第 4.5-70 図および第 4.5-71 図)。その推定結果を, 第 4.5-21 表に示す。

CO<sub>2</sub>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 4.5-71 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。



5-70 図 明別 層砂 右 層 ぐの 502 の 分 布 範 囲 (502 胞 和 度)

(平成 30 年度(暫定)シミュレーション結果)

溶解 CO<sub>2</sub> 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 4.5-71 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,CO<sub>2</sub> 飽和度の分布と同様と考えられる。



圧入終了後1,000年

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4.5-71 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>の分布範囲(溶解 CO<sub>2</sub>量) (平成 30 年度(暫定)シミュレーション結果)

第4.5-21表	海底下廃棄し	.t= C02の	平面的なら	↑布範囲	(萌別層砂岩層)
			1	,	

八左ば		北降	艮		南	限		東阻	Į		西限	:
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。

# ④ 圧入した CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲

上記で検討した平面的な CO<sub>2</sub>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, CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲を推定した(第4.5-72~第4.5-75図)。推定結果を, 第4.5-22 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。





注: 1. CO<sub>2</sub>分布域(CO<sub>2</sub>飽和度)を, 萌別層砂岩層下限(SBI)構造図に投影した。 2. CO<sub>2</sub>分布(CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>分布状況(CO<sub>2</sub>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4.5-73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 4.5-74 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. C0<sub>2</sub>分布域(溶解C0<sub>2</sub>量)を, 萌別層砂岩層下限(SBI)構造図に投影した。 2. C0<sub>2</sub>分布(溶解C0<sub>2</sub>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C0<sub>2</sub>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4.5-75 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, 300
CO2飽和度	930	1,280
溶解 CO2 量	930	1, 300

第4.5-22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, CO<sub>2</sub>飽和度および溶解 CO<sub>2</sub>量の分布に対するシミュレーション結果を第4.5-76 図~ 第4.5-77 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4.5-76 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CO<sub>2</sub>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 4. 5-77 図 溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布(平成 30 年度(暫定)シミュレーション結果)

#### ⑤ CO<sub>2</sub>の貯留形態ごとの割合

貯留 CO<sub>2</sub>の3 つの貯留形態を Movable(移動する可能性がある超臨界 CO<sub>2</sub>), Dissolved(溶 解 CO<sub>2</sub>) および Trapped(孔隙などにトラップされ動かない超臨界 CO<sub>2</sub>)と表現し,各モデル の CO<sub>2</sub> 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4.5-78 図および第4.5-79 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4.5-78 図 CO<sub>2</sub> 貯留形態割合の変化(圧入開始から 30 年後まで)


第4.5-79図 CO2 貯留形態割合の変化

## (5) H29 繰り返し 3D 探査の差分解析結果と CO2 の位置

三次元繰り返し弾性波探査モニター調査を実施し,二酸化炭素圧入開始前の 2009 年度に実施したベースライン調査の記録を用いて,二酸化炭素分布状況の把握を目的とする差分抽出処理を実施した。調査実施時期と圧入状況との関係を第4.5-23表に示す。

	観測開始日 2017 年 7 月 9 日	観測終了日 2017 年 8 月 17 日
萌別層貯留層 CO2 圧入量	61,238.9t	69,070.0t
滝ノ上層貯留層 CO <sub>2</sub> 圧入量	Ot	Ot

第4.5-23表 繰り返し3D 探査の実施時期と圧入状況

データ処理の結果,差分ボリューム上で二酸化炭素圧入に伴う変化を検出した。第4.5-80 図 および第4.5-81 図に差分ボリュームの東西鉛直時間断面および南北鉛直時間断面の例を,第 4.5-82 図に時間スライス断面の例をそれぞれ示した。ここで示した断面は,調査領域のうち, 萌別層貯留層への二酸化炭素圧入に伴って変化が認められた領域を含む代表例である。圧入井 坑跡周辺の萌別層砂岩層上面深度付近(往復走時1秒付近に対応)において明瞭な振幅異常が 認められる。これらは、二酸化炭素の圧入に伴い、ベースライン調査時点と本調査時点との間で 地下物性が変化したことを示している。

なお,時間スライス断面(第4.5-82図)の南西側縁辺部に認められる振幅異常は観測時のノ イズによるものである。調査領域の南西側は苫小牧港西港出入口航路上にあたるため,南西側 の受振記録には航行船舶ノイズが多く混入する。加えて,領域縁辺部は重合数が少ないために 重合効果によるノイズ抑制効果が低下し,結果として領域南西側縁辺部ではベースライン調査, モニター調査ともに処理結果の S/N が低下する。このため,両者の差分である差分ボリューム では,当該領域においてノイズに起因する見かけ上の振幅異常を生じている。



第4.5-80 図 差分ボリューム鉛直時間断面例(東西方向断面:インライン 60)



第4.5-81 図 差分ボリューム鉛直時間断面例(南北方向断面:クロスライン235)



第4.5-82図 差分ボリューム時間スライス断面例(1,020ms)

第4.5-83 図に東西鉛直時間断面の拡大図を示す。時間断面上の振幅異常域は萌別層砂岩層上面 付近に位置しており, 圧入した二酸化炭素が萌別層砂岩層最上部, およびその直上の萌別層泥岩層 最下部に狭在する砂岩層内に貯留されていることがわかる。



第4.5-83 図 差分ボリューム鉛直時間断面拡大図(東西方向断面:インライン 60)

第4.5-84 図に, 鉛直時間断面上で顕著な変化を生じている 992ms から 1,032ms までの時間ウイ ンドウ内で RMS 振幅\*1)を計算し, 平面表示した。合わせて同時期の CO<sub>2</sub> 飽和度分布予測を示した。 同図には萌別層圧入井(IW-2) 坑跡の平面投影位置をあわせて示した。

投影平面上では圧入井坑跡を中心として RMS 振幅の大きい領域が分布しており,二酸化炭素が圧 入井から周囲に浸透していることを示している。この高振幅領域の中心部付近において RMS 振幅 は最大値を示しており,当該位置は投影平面上で圧入井坑跡上に位置している。坑跡上の当該位置 の深度は約1,010m であり,圧入仕上げ区間の上部区間に相当する。なお,同図の南西側縁辺部に認 められる高振幅異常は,時間スライス断面の例(第4.5-82 図)と同様,観測時のノイズによるもの である。

RMS 振幅値の変化は定性的には貯留層内の物性変化の程度に対応しているものと考えられ, 圧入 した二酸化炭素は深度約 1,010m 付近を中心として貯留層内に浸透しているものと推測される。第 第 4.5-85 図に, 圧入履歴に基づく圧力解析結果から得られた最新の貯留層モデルに対する貯留層 シミュレーション結果を第 4.5-84 図と並列して示す。同図には 2018 年 8 月 1 日時点の累積圧入 量に相当する 65,793 トン圧入時の二酸化炭素飽和度分布を示した。シミュレーション結果は, 繰 り返し弾性波探査から推定される二酸化炭素分布域と整合しており, 圧入した二酸化炭素が想定通 りに貯留層内に存在していることを示している。

<sup>\*&</sup>lt;sup>1</sup>) RMS (Root Mean Square) 振幅:ある時間ウインドウ内における信号の平均二乗値の平方根。波動の強度(実 効値)を表す際に用いられる。



第4.5-84 図 差分ボリュームの RMS 振幅水平分布(時間ウインドウ:992ms~1,032ms)と同時期の CO2 飽和度分布予測



注)構造図は SBⅢ深度構造図

第4.5-85 図 貯留層シミュレーション結果(65,793トン圧入時)

## (6) 海域での位置

海底下廃棄された特定二酸化炭素ガスが広がる範囲について,それぞれの圧入対象層ごとの モデルケースでシミュレーションを行った。滝ノ上層 T1 部層については H27 地質モデルをベ ースに圧入井の圧入実績に基づいて修正した地質モデルを,萌別層砂岩層については CO<sub>2</sub> 圧入 実績に基づいて作成したモデル(H30(暫定)地質モデル)を用いてシミュレーションを実施 した。本計画における海域の海図(第4.2-1 図)に CO<sub>2</sub> プルーム(溶解 CO<sub>2</sub> 量)の平面的な分 布範囲を投影した結果を,第4.5-86 図に示す。



注:海上保安庁発行の海図(W1034)に加筆

第4.5-86 図 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の位置及び範囲

## 4.6 海底下廃棄をする海域及びその周辺の海域における、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

苫小牧市および厚真町周辺海域において,海中公園,自然公園(国立公園,国定公園,道 立自然公園),ラムサール条約登録湿地,鳥獣保護区,藻場,さんご礁,特殊な生態系(冷 湧水生態系,熱水生態系,鯨骨生物群集)等の海洋環境の保全上特に保護を図る必要がある ものの所在について,既存資料<sup>[1]-[8]</sup>を用いて調査した結果,これらの存在は確認されなかっ た。

なお、干潟については、10km以上離れた厚真川河口に小規模な干潟が確認されている。

<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>[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>[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>[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)