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

3.1 特定二酸化炭素ガスと地層やシール層の成分との相互作用

滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層に CO₂を圧入し,それぞれの地層と CO₂との地化学反応 状況を推察するために,一次元地化学シミュレーションを実施した。

(1) 滝ノ上層 T1 部層

滝ノ上層 T1 部層の地層水は,苫小牧 CCS-1(滝ノ上層調査井)で採取した地層水を基に,第 3.1-1表に示す地層水組成を使用した。滝ノ上層 T1 部層の鉱物組成は,苫小牧 CCS-1の試料を 参照し,第3.1-2表に示す組成を採用した。

また、鉱物の熱力学データは、公開データベースである Thermoddem^[1]を参照した。

	滝ノ上層 T1 部層
	地層水組成
貯留層温度(℃)	90
рН	6.75
組成	濃度 (mg/kg)
C1-	20, 732. 00
SO_4^{2-}	63. 33
HCO_{3}^{-}	10. 23
HS⁻	4.89E-04
$SiO_2(aq)$	83.93
A1 ³⁺	8.78E-03
Ca^{2+}	8, 321. 83
Mg^{2^+}	2.06
Fe^{2^+}	9.24
K^+	11.69
Na^+	3, 893. 70
$\mathrm{NH_4}^+$	16.61
備考	黄鉄鉱,カルセドニー, 束沸石,カオリナイト, 方解石,サポナイト (Fe, Ca),イライト (A1) と化学平衡になるように地層水組成を熱力学 的に再構成 (Thermoddem を使用)。

第3.1-1表 地化学反応シミュレーションで使用した滝ノ上層 T1 部層の地層水組成

^[1] Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey:http://thermoddem.brgm.fr/, 2015年2月5日アクセス)

Class	和名	Name	Abbreviation	鉱物組成 (vo1%)
シリカ鉱物	玉髄	chalcedony	chalcedoby	8.61
長石	斜長石	albite/anorthite	ab0. 5an0. 5	16.04
長石	カリ長石	K-feldspar	microcline	10.85
炭酸塩鉱物	方解石	calcite	calcite	4.05
粘土鉱物	イライト	illite	illite(Al)	14.01
粘土鉱物	サポナイト	saponite	saponite(FeCa)	3.07
粘土鉱物	カオリン石	kaolinite	kaolinite	0.00
粘土鉱物	緑泥石	clinoclore/daphnite	c1c12.5dap2.5	5.07
粘土鉱物	黄鉄鉱	pyrite	pyrite	3.10
輝石	輝石	diopside/hedenbergite	diop0.8hed0.2	5.81
角閃石	角閃石	tremolite/actinolite	trem3act2	5.63
沸石	東沸石	stilbite	stilbite	8.24
炭酸塩鉱物	菱鉄鉱	siderite	siderite	0.00
炭酸塩鉱物	菱苦土鉱	magnesite	magnesite(Natur)	0.00
炭酸塩鉱物	ドーソン石	dawsonite	dawsonite	0.00
炭酸塩鉱物	苦灰石	dolomite	dolomite	0.00

第3.1-2表 地化学反応シミュレーションで使用した滝ノ上層 T1 部層の鉱物組成

シミュレーションの結果を、第3.1-1図および第3.1-2図に示す。



第3.1-1図 滝ノ上層 T1 部層に CO2を圧入した際の鉱物変化量の推定



第3.1-2 図 滝ノ上層 T1 部層に CO2 を圧入した際の鉱物固定化量の推定

CO₂ 圧入終了から 20 年程度は,ほとんど反応が起こらない。100 年程度以降から,カルセド ニー,方解石,苦灰石が析出し,緑泥石や角閃石,方解石が溶解するものと推定される。溶解 した鉱物も含め化学反応が進行し,数10 年後ごろから CO₂が鉱物として固定化される量が増加 する。10,000 年後には,圧入した CO₂のほぼすべてが鉱物として固定化される結果となった。 第3.1-3 表に,苫小牧 CCS-1 で採取したカッティング試料の X 線回折分析結果を示す。

第 3.1-3 表	苫小牧 CCS-1	で採取したカッティ	ィング試料の	X 線回折分析結果

深度	地層:	名	岩相						同定	さ	れ	た鉱	物					
(m)	累層	部層	(肉眼記載)	አ ሃሳዓイト	1511	緑泥石	斜プチロル沸石	モルデン沸石	スティルパ イト	オペールCT	石英	斜長石	加長石	方解石	ኑ' ወマイト	黄鉄鉱	赤鉄鉱	角閃石
900			砂質シルト岩	×		Δ					O	0		×		\triangle		Δ
950			砂質シルト岩	×	0	0					0	0	Δ	×		Δ		Δ
1000	苗则属泥岩		砂質シルト岩	×	0	0					O	0		×		\triangle		Δ
1050	明加眉泥石		砂質シルト岩	×	0	0					O	0				\triangle		Δ
1100			砂質シルト岩	×	0	0					0	0	Δ			х		Δ
1150			砂質シルト岩	×	\triangle	Δ	\triangle				0	0	0			×		Δ
1200	苏则屋顶出。		砂質シルト岩	×	0	0	\triangle				O	0	Δ			\triangle		Δ
1250	明別層砂石		砂質シルト岩	×	0	0					O	0				\triangle		Δ
1300	荷菜層		砂質シルト岩	×	0	0					O	0				\triangle		Δ
1350	荷菜層		砂質シルト岩	×	0	0					O	0	Δ			\triangle		Δ
1400	荷菜層		砂質シルト岩	×		Δ					0	O		×		\triangle		
1450	荷菜層		砂質シルト岩	×	0	0					0	0	Δ	×		×		0
1500	荷菜層		砂質シルト岩	×	0	0	Δ				O	0		×		×		Δ
1550	荷菜層		砂質シルト岩	×	0	Δ	\triangle				O	0		×		\triangle		Δ
1580	荷菜層		砂質シルト岩	×	0	Δ	0				0	0	Δ	×		Δ		Δ
1650	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0					0	0				Δ		Δ
1700	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	0			×	0	0				Δ		Δ
1750	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	0			×	0	0		×		Δ		Δ
1800	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	0			Δ	0	×	\triangle			Δ		Δ
1850	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	Δ			Δ	0	0	Δ			Δ		Δ
1900	平取+軽舞層		泥岩	×	0	Δ	0			Δ	0	0				\triangle		Δ
1950	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	Δ			\triangle	0	0				\triangle		Δ
2000	平取+軽舞層		泥岩		0	0	\triangle			Δ	O	0				Δ		
2050	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	\triangle			Δ	0	0				\triangle		×
2100	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	0			\triangle	Δ	0		×		\triangle		×
2150	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	\triangle			Δ	0	0				Δ		×
2200	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	Δ			Δ	O	0				Δ		×
2250	平取+軽舞層		泥岩	×	0	0	\triangle			×	O	0				Δ		×
2300			泥岩	×	0	0	\triangle				O	0				Δ		
2350			泥岩		0	0					O	0						
2400			泥岩	×	0	0					O	0		×				L
2450			凝灰質泥岩	×	0	0					O	0		×	-			
2500			泥岩	×	0	0					O	0		×	-			
2550	振老僧		凝灰質泥岩	×	0	0					O	0		×	×			
2600			泥岩	×	0	0					0	0		×	-	Δ		H
2650			凝灰質泥岩	×	0	0					0	0		×	х	Δ		I
2700			泥岩	×	0	0					0	0		×		Δ		
2750			泥岩	×	0	0	.				Ô	0		×				
2800		74	泥岩	×		0	Δ				Ø	0		×		0		
2900	滝ノ上層	11	火山礫凝灰岩	×				0			Δ	0				×		
2950	滝ノ上層	T1	火山礫凝灰岩	×				0				0						
3000	<u> 滝ノ上層</u>		<u>砂質凝火岩</u>	×			0	Ø				0						
3100	<u> 滝ノ上層</u>		<u>砂質凝火岩</u>				0				0	Ø		×				
3150	<u> 滝ノ上層</u>		<u>砂賀凝火岩</u>		×		6		Δ	ļ	Ú	0		×			Δ	
3250	<u> 滝ノ上層</u>		<u>砂質凝火岩</u>				©					Ø		×				
3300	<u> 滝ノ上層</u>		<u>砂質凝火岩</u>		Δ		0		0			0		×	-	Δ	•	×
3400	<u> 滝ノ上僧</u>		<u> </u>				6		0		Ú,	0		×	-		Δ	
3450	<u>滝ノ上層</u>		<u> </u>	×	×		Ø		0			0		×				
3500	<u> 滝ノ上層</u>		<u>砂質凝火岩</u>						© ^		0	0		×	-		•	
3550	<u> 滝ノ上層</u>		<u>砂賀 </u>						Δ		0	0		×				
3600	<u> 滝ノ上層</u>		砂質凝火岩	0							0	0		×			0	
3650	<u> 滝ノ上層</u>] 	<u>砂質凝火岩</u>	Ú Â		<u> </u>					0	0		×				
3700	滝ノ上僧		一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	Δ		0			0		0	O		×				,
				© :	多い	0	:中 🛆	: 少ない	× :	極めて	少ない							

第3.1-3表に示すように,砕屑岩である振老層(遮蔽層)で同定された鉱物は,滝ノ上層T1 部層の火山岩類とは異なり,萌別層泥岩などに近い組成を示す。したがって,遮蔽層とCO₂の 化学的な反応は萌別層に近い反応が生じることになる。遮蔽層にはCO₂がほとんど浸透できな いと考えられ,化学的反応は遮蔽層とCO₂の接触部分でのみ生じることとなる。

(2) 萌別層砂岩層

萌別層砂岩層の地層水は,苫小牧 0B-2(萌別層観測井)で採取した地層水を基に,第3.1-4 表に示す地層水組成を使用した。萌別層砂岩層の鉱物組成は,苫小牧 0B-2 試料を参照し,第 3.1-5 表に示す組成を採用した。 また、鉱物の熱力学データは、公開データベースである Thermoddem^[1]を参照した。

	萌別層砂岩層
	地層水組成
貯留層温度(℃)	40
рН	7.17
組成	濃度 (mg/kg)
C1-	1, 864. 10
SO_4^{2-}	9.17
HCO ₃ ⁻	541.40
HS⁻	7.28E-05
$SiO_2(aq)$	156.00
A1 ³⁺	1.35E-04
Ca ²⁺	45.91
Mg^{2^+}	8.04
Fe ²⁺	0.45
K ⁺	11.02
Na ⁺	1, 321. 74
NH4 ⁺	2.69
	黄鉄鉱、非晶質シリカ、クリノプチロライト
	(Na),カオリナイト,菱鉄鉱,方解石,サポ
備考	ーナイト (Fe, Ca), 菱苦土石, イライト (A1)
	と化学平衡になるように地層水組成を熱力学
	的に再構成 (Thermoddem を使用)。

第3.1-4表 地化学反応シミュレーションで使用した萌別層砂岩層の地層水組成

第3.1-5表 地化学反応シミュレーションで使用した萌別層砂岩層の鉱物組成

Class	和名	Name	Abbreviation	鉱物組成 (vo1%)
シリカ鉱 物	石英	quartz	quartz,alpha	22. 34
シリカ鉱 物	非晶質シリカ	amorphous silica	amorphous silica	0.00
長石	斜長石	albite/anorthite	ab0. 5an0. 5	11.06
長石	カリ長石	K-feldspar	microcline	9.75
炭酸塩鉱	方解石	calcite	calcite	0.49
物				
粘土鉱物	イライト	illite	illite(Al)	9.40
粘土鉱物	サポナイト	saponite	saponite(FeCa)	3.50
粘土鉱物	カオリン石	kaolinite	kaolinite	1.71
粘土鉱物	緑泥石	clinoclore/daphnite	clc12.5dap2.5	8.65
粘土鉱物	黄鉄鉱	pyrite	pyrite	1.13
輝石	輝石	diopside/hedenbergite	diop0.8hed0.2	0.61
角閃石	角閃石	tremolite/actinolite	trem3act2	4.83

^[1] Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey:http://thermoddem.brgm.fr/, 2015年2月5日アクセス)

沸石	斜プチロル沸	Na-clinoptilolite	clinoptiloliteNa	19.03
	石			
炭酸塩鉱	菱鉄鉱	siderite	siderite	0.00
物				
炭酸塩鉱	菱苦土鉱	magnesite	magnesite(Natur)	0.00
物				
炭酸塩鉱	ドーソン石	dawsonite	dawsonite	0.00
物				
炭酸塩鉱	苦灰石	dolomite	dolomite	0.00
物				

シミュレーションの結果を, 第3.1-3 図および第3.1-4 図に示す。



第3.1-3図 萌別層砂岩層に CO2を圧入した際の鉱物量変化量の推定



第3.1-4 図 萌別層砂岩層に CO2 を圧入した際の鉱物固定化量の推定

CO2 圧入終了から 100 年程度は、ほとんど反応が起こらない。1,000 年程度以降から、非晶質

シリカ,菱鉄鉱,カオリナイトが析出し,緑泥石や斜プチロル沸石が溶解すると推定された。 溶解した鉱物も含め化学反応が進行し,400~500年ごろからCO₂が鉱物として固定化される量 が増加する。

萌別層砂岩および萌別層泥岩の堆積物の主な供給源は共通していると考えられ、鉱物組成も 類似している(第3.1-3表)。1,000年以降に溶解量が増加する角閃石や斜プチロル沸石の存 在量も同程度であることから、CO₂への化学的な反応は類似したものになるが、遮蔽層にはCO₂ がほとんど浸透できないと考えられ、化学的反応は遮蔽層とCO₂の接触部分でのみ生じること となる。

3.2 CO₂漏出の可能性検討

(1) CO₂漏出要因の洗い出し

貯留層から CO₂が漏出する要因として, IPCC 特別報告書^[1]において示されている潜在的な漏 洩経路は,下記のとおり分類されている(第3.2-1 図参照)。

- (A) CO₂のガス圧が遮蔽層の毛細管圧を超えて移動
- (B) 断層を通じて CO₂ が移動
- (C) キャップロックの局所的な不連続部分を通じた移動
- (D) CO2 貯留層圧の増加および断層の浸透率の増加によって生じる移動
- (E) プラグの状態が完全でない廃坑井を通じた移動
- (F) 地下水に溶解した CO2 が貯留層の外に移動
- (G) 地下水に溶解した CO2 が傾斜した地層を通じて地表に移動



第3.2-1 図 IPCC 特別報告書^[1]による潜在的な漏洩経路

苫小牧地点における貯留層総合評価の検討結果^[2]により,貯留後の CO₂ が貯留対象層から漏 出する要因の可能性として,以下の漏出経路が想定される。

- 1) 遮蔽層の毛細管圧を超えて移動
- 2) 断層を通じた移動
- 3) 廃坑井を通じた移動
- 4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

1)については、CO2挙動予測シミュレーションにより漏出経路とはならないとする結果を得

^[1] Benson, S., Cook, P., Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H.B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., Gale, J., von Goerne, G., Heidug, W., Holloway, S., Kamal, R., Keith, D., Lloyd, P., Rocha, P., Senior, B., Thomson, J., Torp, T., Wildenborg, T., Wilson, M., Zarlenga, F., and Zhou, D. 2005. Underground geological storage. In: Metz, B. et al. (Eds), IPCC Special Report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 195-276

 ^[2] 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 59-60 (http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001_s01.pdf, 2015/1/28 アクセス)

ている。

- 2)および3)に関しては、次の理由により漏出経路とはならない。
- 滝ノ上層圧入井周辺には、滝ノ上層を切る断層が解釈されている。CO₂プルームから 断層までの距離は、1.3km となる。また、周辺に存在が知られる廃坑井は、苫小牧 CCS-2 と坑井 A の 2 坑井があり、CO₂プルームからの距離は、それぞれ 2.2km、3.6km の距離が確保されている(第3.2-2 図)。
- ・ 萌別層圧入井周辺には、萌別層を切る断層は解釈されていない。また、廃坑井である苫小牧 CCS-2 および坑井 A それぞれとの CO₂プルームからの距離は、0.6km、4.0km の距離が確保されている(第3.2-3図)



第3.2-2 図 滝ノ上層圧入井周辺の圧入した CO₂の分布予測範囲と,周辺の断層および廃坑井との 位置関係



第3.2-3 図 萌別層圧入井周辺の圧入した CO2の分布予測範囲と、周辺の廃坑井との位置関係

4)に関しては、圧入した CO₂が移動する可能性がある区間には、耐 CO₂素材のケーシングを 用いている。また、ケーシングと地層との間を、耐 CO₂セメントを用いて遮水(セメンチン グ)している。よって、圧入井の外側からの漏洩の危険はないと考えられる。

(2) CO2 漏出要因に関する検討のまとめ

上記の想定される漏出経路1)~4)について検討した結果のまとめは、以下のとおりである。

1) 遮蔽層の毛細管圧を超えて移動

滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層の圧入圧力は、それらの遮蔽層のスレショルド圧力(毛 細管圧)を超えることはなく、CO₂は遮蔽層には浸透しない。

2) 断層を通じた移動

シミュレーションによる CO₂長期挙動予測の結果, 圧入後 200 年程度で CO₂の広がりに変化は 見られなくなり, 1,000 年を経ても CO₂は断層に到達しないことから, 断層は CO₂の漏出要因に ならないと考える。

3) 廃坑井を通じた移動

シミュレーションによる CO₂長期挙動予測の結果, 圧入後 200 年程度で CO₂の広がりに変化は 見られなくなり, 1,000 年を経ても CO₂ は廃坑井に到達しないことから, 廃坑井は CO₂の漏出要 因にならないと考える。

4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

圧入井等の構造物の設計・建設では、CO2が接触する鋼材やセメント等を耐 CO2仕様にし、これら構造物に起因した CO2の漏洩は防止される。

以上から, 圧入井等の構造物を耐 CO₂仕様にすることにより, 基本的には, CO₂の漏出は生じ ないものと考える。

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

4.1 海底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

特定二酸化炭素ガスの地層内の広がりについては,平成24年度,平成27年度ならびに平成30年度(暫定) CO2挙動予測シミュレーションに基づいて検討した。

(1) 滝ノ上層 T1 部層中での空間的広がり(当初申請時)

① 地質モデル

滝ノ上層 T1 部層への滝ノ上層圧入井の圧入(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),坑井 A (既存民間井)のデータを地質統計学的 に解析し,100 通りの不均質な物性を有する地質モデル(平成 24 年度地質モデル)を作成し た。地層境界深度や入力した物性値については平成 23 年度シミュレーション(第 2.2 節)と 同様の値を使用している。作成した地質モデルを用い,CO₂を 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た^{注1}。圧入終了時の貯留層上限における地層圧の上昇量 を序列化し,100 個のモデルの累積確率分布を作成した。平成 23 年度シミュレーションと同 様に、P10、P50、P90 を設定した。

また,平成24年度地質モデルは,時間ドメインである弾性波探査記録に基づく地質構造解 釈により作成したことから,深度ドメインの地質モデルに変換する必要がある。平成24年度 シミュレーションでは当該地域で見込まれる±88mの深度変換誤差を考慮した地質モデルを 作成した。ベースとなる深度モデルをBase 深度モデルとし,誤差の振れ幅からDeep 深度モ デルとShallow 深度モデルを設定し,そのそれぞれのP10,P50,P90のケースに対しシミュ レーションを実施している。

それぞれの深度モデルで作成した P10, P50, P90 ケースに対する不均質モデル(浸透率) を例として,第4.1-1 図〜第4.1-3 図に示す。

^{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 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。



Base深度モデル/P10ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)



Base深度モデル/P50ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)



Base深度モデル/P90ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)

第4.1-1 図 滝ノ上層 T1 部層の不均質モデルの浸透率分布: Base 深度モデル/P10, P50, P90 ケース(平成 24 年度地質モデル)



Deep深度モデル/P10ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)



Deep深度モデル/P50ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)



Deep深度モデル/P90ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)

第4.1-2 図 滝ノ上層 T1 部層の不均質モデルの浸透率分布: Deep 深度モデル/P10, P50, P90 ケース(平成 24 年度地質モデル)



Shallow深度モデル/P10ケース地質モデル(浸透率,k>10mDでフィルタリング)



Shallow深度モデル/P50ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)



Shallow深度モデル/P90ケース地質モデル (浸透率, k>10mDでフィルタリング)

第 4.1-3 図 滝ノ上層 T1 部層の不均質モデルの浸透率分布: Shallow 深度モデル/P10, P50, P90 ケース(平成 24 年度地質モデル)

上記平成24年度地質モデルを、滝ノ上層圧入井の掘削実績に合わせて修正した。

その修正した地質モデルを用いて,平成27年度にCO₂ 圧入シミュレーションを実施した。 その際,圧入井掘削時に得た遮蔽層の破壊圧に係るデータを参照して,坑底圧力の上限によ り圧入レートを変化させて,CO₂を3年間圧入するシミュレーションを実施した。なお,圧入 井掘削の結果から,圧入井の極近傍以外で岩相や属性を地球統計学的推定することは困難と 判断し,P50モデルの1ケースのみを修正した属性モデルによりシミュレーションを実施し た。

しかしながら, 圧入井の掘削データだけで貯留層全体を正確に評価するには限界がある。 圧入井の掘削結果を新たに既存の評価データに加えることで,より現実に近い貯留層の評価 が可能となると考えられるが,厳密な意味での正確な貯留層評価は容易ではない。実際に CO₂ を圧入する際にも,適宜圧力挙動の観測やフォールオフテストを実施して貯留層に係るデー タを増やし,より正確な貯留層性状を把握する。

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 量の分布範囲を考慮し,圧入した CO₂の平面的な分布範囲を推定した(第4.1-4 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、CO2 飽和度および溶解 CO2 量の分布域を考慮して想定した圧入した CO2の分布範囲を平面に投影したもの。シミュレーション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 CO₂の分布範囲は限定的となるため, 圧入井の圧入区間から, CO₂飽和度では 20m, 溶解 CO₂量では 25m までの範囲とした。

第4.1-4 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)

圧入した CO₂は深部塩水層に溶解し,溶解 CO₂になったとしても,第2.2-51 図に示す坑跡 を通過する 100m×100m のグリッドを超えて移動することはないと考えられる。予想される CO₂飽和度の分布域は溶解 CO₂量の分布域に含まれるため範囲となるため,溶解 CO₂量の分布 域を圧入した CO₂の分布範囲とした。

第4.1-1表に, CO2の平面的な分布範囲の座標を示す。

第4.1-1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)

	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

また, CO₂飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第4.1-5 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4.1-6 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。

 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4.1-5 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300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4.1-6 図 溶解 CO2量の推移(平成27年度シミュレーション結果)

③ CO₂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4.1-5図および第4.1-6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4.1-2表に, CO2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 = 9.1 m	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

第4.1-2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 CO₂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、CO₂飽和度では 20m, 溶解 CO₂ 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 CO₂量の方がやや広範囲に分布するため、圧 入した CO₂の分布範囲は、溶解 CO₂量の分布範囲とした。

(2) 滝ノ上層 T1 部層中での空間的広がり(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。

7) 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 4.1-7 図)。問ず題対応等の後 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 4.1-8 図)。



第4.1-7図 滝ノ上層試験圧入記録(2018年2月)



第4.1-8 図 滝ノ上層試験圧入記録(2018 年 7 月~9 月)

イ) 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 4.1-9 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 4.1-10 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^{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4.1-9 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4.1-10 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)

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 量の分布範囲を考慮し,圧入した CO₂の平面的な分布範囲を推定した(第4.1-11 図)。



CO,ガス(飽和度)の最大分布域

溶解CO₂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 CO₂ 飽和度および溶解 CO₂量の分布域を考慮して想定した圧入した CO₂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4.1-11 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 CO₂ 飽和度の分布域は溶解 CO₂ 量の分布域に含まれるため,溶解 CO₂ 量の分布域 を圧入した CO₂ の分布範囲とした。

第4.1-3表に, CO2の平面的な分布範囲の座標を示す。

-	•1-							=			
	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	38.89	141	38	0.31	141	37	40.45

第4.1-3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, CO₂ 飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第 4.1-12 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 4.1-13 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。
 - 2. 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。
 - 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4.1-12 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4.1-13 図 溶解 CO2量の推移(平成 30 年度(暫定)シミュレーション)

CO₂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4.1-12図および第4.1-13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4.1-4表に,CO₂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。

第4.1-4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 CO2 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, CO2 飽和度では 20m, 溶解 CO2 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 CO2 量の方がやや広範囲に分布するため,圧入した CO2 の分布範囲は,溶解 CO2 量の分布範囲とした。

(3) 萌別層砂岩層中での空間的広がり(当初申請時)

① 地質モデル

萌別層砂岩層への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,苫小牧 CCS-2,坑井A(民間井)のデータを解析した。その結 果,当該海域の萌別層砂岩層には下位から FD1~FD5 の5 枚のファンデルタの分布を認識し た(第4.1-14 図)。

また,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。



第4.1-14図 萌別層砂岩層に認識された5枚のファンデルタおよび貯留層ターゲット

萌別層砂岩層での CO₂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4.1-5表)。ケース区分の基準は,苫小牧 CCS-1(調査井) および苫小牧 CCS-2(調査井)の萌別層砂岩層の解析結果に基づいている(第4.1-15図)。

第4.1-5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



第4.1-15 図 萌別層砂岩層での CO2 圧入長期挙動シミュレーションのケース分け(平成24 年度シ ミュレーション結果)

CO₂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4.1-16図)。その推定結果を、第4.1-6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(第 2.2-5 表)。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CO₂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。



- 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 CO₂飽和度および溶解 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年後の分 布を示す。
- 第 4.1-16 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲(上段:CO₂飽和度,下段:溶解 CO₂量)(平成 24 年度シミュレーション結果)

分布域	北限			南限			東限			西限		
	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	43
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	43

第4.1-6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。

③ 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, CO₂の垂直的な分布範囲を推定した(第4.1-17図)。その推定結果を,第4.1-7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(第2.2-5表)。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(第2.2-16表)、貯留層の上限には遮 蔽層があるため、圧入したCO2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、CO2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(第2.2-2表)、CO2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CO2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: 上段:CO₂ 飽和度,下段:溶解CO₂量。左側:分布上限,右側:分布下限。廃棄の対象層である萌別層砂岩層の 上限および下限を示す地下構造図にCO₂の分布域を重ね,貯留層中でのCO₂の分布範囲を推定した。

第 4.1-17 図 萌別層砂岩層における CO₂の垂直的な分布範囲(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4.1-7表	海底下廃棄し	.t- CO ₂ の垂直的分布範囲	(苗別層砂岩層)
	「西心」元末し		

また,それぞれのケースにおける CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布を,第4.1-18 図~第4.1-23 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4.1-18 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(M₀₀₂>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4.1-19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4.1-20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(M_{c02}>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4.1-21 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4.1-22 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(M_{c02}>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4.1-23 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)

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(第2.2-5表)。しかしながら、第4.1-18図~第4.1-23図において浸 透率による大きな差は見られないことから、本計画を実施しても同様な挙動をとると予測さ れる。

- (4) 萌別層砂岩層中での空間的広がり(変更申請時)
 - ① 地質モデル
 - ア) 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 H30(暫定)地質モデルを作成した。

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4.1-24 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。



第4.1-24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4.1-25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。



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4.1-25 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4.1-24 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4.1-26 図に示す。



第4.1-26 図 モデル断面

各層準内に第 4.1-8 表のようにグリッドセルを作成した。第 4.5-58 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 100m ×		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		24~43

第4.1-8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4.1-28 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4.1-29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4.1-25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4.1-29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^{注1}。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

^{注1} 圧入上限圧力の詳細は, 5.2(3)①を参照のこと。

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4.1-9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。

モデル		
サイズ	$10 \mathrm{km} imes$	10km×1,500m
グリッド	110	$0 \times 116 \times 118$
アクティブ・ブロック数		981, 711
基準温度	42.	3°C@982mVD
基準圧力	9,82	20kPa@982mVD
CO ₂ 圧入レート, 圧入期間	実績およひ	「予定レート,4年間
压入压力上限	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	4.56×10^{-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) ^[1]
液相 相対浸透率 Krw	1.00	van Genuchten (1980) ^[2]
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05	0.05
不動水的和來 Smin	0.49	0.638
个到小起和平 5W11	測定値	Bennion (2007) ^[3]
島大産のガス的和索 Sarmay	0.275	_
取八次面为八起相半 Sgi max	Holtz (2002) ^[4]	
	砂岩	泥岩
毛洲管圧力	測定値	van Genuchten (1980) ^[3]
Pc : kPa	4.04	370

第4.1-9表 シミュレーションパラメータ一覧(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2018年9月末までの萌別 層への圧入実績を第4.1-30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 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。

^[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



注)坑底温度・坑底圧力は圧力・温度センサー(P/T Sensor)の値

第4.1-30 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4.1-31 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4.1-31図)である。

第4.1-32 図および表4.1-10 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。

第4.1-32 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	CO ₂ 圧入 ⁻	下端深度
	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

表 4.1-10 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

a) 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4.1-33 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。

FOT No.	開始時刻	終了時刻	測定時間 (時間 分)	密閉前 平均圧入レート (t-CO ₂ /年)	密閉前 累計圧入量 (t-CO ₁)
FOT1	2016年4月8日6時14分	2016年4月8日17時1分	10:47	58,800	81
FOT2	2016年4月17日22時16分	2016年5月7日15時15分	472.58	109,351	2,558
FOT3	2016年5月13日1時0分	2016年5月14日14時19分	37:19	139,056	4,330
FOT4	2016年5月24日9時0分	2017年2月5日17時35分	6176:34	71,079	7,163
FOT5	2017年5月26日9時47分	2017年7月13日16時15分	1182.28	64,861	61,239
FOT6	2017年8月1日10時0分	2017年8月3日9時57分	47:57	88,474	65,793
FOT7	2017年8月15日9時0分	2017年9月16日12時0分	771:00	100,124	69.070
FOT8	2017年11月30日9時27分	2018年1月6日11時50分	890.23	85,159	109.250



注) FOT2, FOT4, FOT6, FOT7, FOT8 の 5 回を解析対象とした。 第 4. 1-33 図 FOT 解析を実施したタイミング

b) 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4.1-34 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 CO2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 CO2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 4.1-34 図 ログ-ログプロット

第4.1-35 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4.1-34 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4.1-34 図の FOT4, FOT6, FOT7, FOT8 で確認でき たと考えている。



注) 島本(1995)^[1]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4.1-35 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

¹ 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)¹⁾ 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4.1-11 表に入力値と解析結果を示す。

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

第 4.1-11 表 ELF 解析

					F0 T2					F0 T4			備者
	F1	m ³ /D			160,210					104,137			FOT宝施直前
	圧人レート	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	
	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∕cycke			56.50					26.92			
	В	rm 3,⁄m 3			0.003					0.003			
	μ	сP			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			
	Сg	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	級拆結里
	kg*h	m D ∗m	1,029	1,029	1,029	1,097	1,883	811	811	811	811	813	所们和不
	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	
					FOTO					E0 T7			
		3.0			F0 T6				Į	F0 T7	Į		備考
	圧入レート	m ³ /D			F0 T6 129,623					F0 T7 146,691			備考 FOT実施直前
	圧入レート	m ³ /D tC 0 ₂ /年			F0 T6 129,623 88,474					F0 T7 146,691 100,124			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 ³ /D tC0 ₂ /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
	 圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 	m ³ /D tC0 ₂ /年 m	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20	131 25	157 30	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20	131 25	157 30	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定
	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 tSelf	m ³ /D tCO ₂ /年 m 時間	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07	131 25	157 30	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07	131 25	157 30	備考 FOT実施直前 の圧入レート 仮定 ログ-ログ プロット
	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 tSelf tEelf	m ³ /D tC0 ₂ /年 m 時間	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20	131 25	157 30	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20	131 25	157 30	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 住上げ区間長 有効層厚 Self Eelf 式 5.1-1の傾き	m ³ /0 tC0 ₂ /年 m 時間 時間 kPa/cyck	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86	131 25	157 30	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85	131 25	157 30	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 Self モelf 式 5.1-1)の傾き B	m ³ /0 tC0 ₂ /年 m 時間 時間 kPa/cyce m ³ /n ³	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003	131 25	157 30	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003	131 25	157 30	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 む e if モ e if 式 5.1-1)の傾き B μ	m ³ /D tC0 ₂ /年 m 時間 時間 kPa/cycle m ³ /m ³ cP	53 10	79 15	F0 T6 129,623 88,474 105 20 0.07 0.20 31.86 0.003 0.05	131 25	157 30	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 30	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 ³ /D tC0 ₂ /年 m 時間 時間 kPa/cycle m ³ /m ³ 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	131 25	157 30	53 10	79 15	F0 T7 146,691 100,124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25	131 25	157 30	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 15 e lf 式 (5.1-1)の傾き 8 μ φ C t	m ³ /D tC 0 ₂ /年 m 時間 時間 kP a/cyc le m ³ /m ³ cP	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	131 25 2.53E-05	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 15 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	131 25 2.96E-05	157 30 1.24E-05	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
入力値	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 15 e lf 15 e lf 式 (5.1-1)の傾き 8 μ ¢ C t C t	m ³ /0 せC0 ₂ /年 m 時間 時間 kPa/cycb m ³ /n ³ cP 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	131 25 2.53E-05	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 15 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	131 25 2.96E-05	157 30 1.24E-05	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
入力值	圧入レート 住上げ区間長 有効層厚 1Self Eelf 式(5.1-1)の傾き B の 低 Ct Cw Cg	m ³ /0 せC0 ₂ /年 m 時間 時間 kPa/cycb m ³ /n ³ cP 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	131 25 2.53E-05	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 15 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 25 2.96E-05	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 15 e lf 15 (5.1-1)の傾き 8 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	m ³ /0 せC0 ₂ /年 m 時間 時間 KPa/cyck m ³ /n ³ cP 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	131 25 2.53E-05	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 15 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	131 25 2.96E-05	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
入力值	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 B	m ³ /0 tC02/年 m 時間 時間 kPa/cyc b m ³ /n ³ cP 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	131 25 2.53E-05	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05	79 15 9.90E-05	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	131 25 2.96E-05	157 30 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 ゆ Ct Cw Cg Cr 水平浸透率 垂直浸透率 重 i、	m ³ /0 tC02/年 m 時間時間 時間 時間 に す。 の で り に り に り に の の (本 の の の の の の の の の の の の の の の の	53 10 8.47E-05 181 53	79 15 8.47E-05 121 35	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	131 25 2.53E-05 72 21	157 30 1.06E-05	53 10 9.90E-05 211 62	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 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 31	131 25 2.96E-05 85 25	157 30 1.24E-05 95 28	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
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 ゆ Ct Cw Cg Cr 水平浸透率 垂直浸透率 kv/kh	m ³ /0 tC02/年 m 時間 時間 kPa/cyck m ³ /n ³ cP 1/kPa 1/kPa 1/kPa 1/kPa	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 4.54E-06 90 26 0.29	131 25 2.53E-05 72 21 0.29 2.20	157 30 1.06E-05 94 28 0.29	53 10 9.90E-05 211 62 0.29	79 15 9.90E-05 141 41 0.29	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 0.241	131 25 2.96E-05 85 25 0.29	157 30 1.24E-05 95 28 0.29	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 ル く て て て て て て て で 、 マ で で 、 で で の で の で の で の で の で の で の で の	m ³ /D tC 0 2/年 m 時間 時間 kP a/cyc b m ³ /n ³ cP 1/kP a 1/kP a 1/kP a 1/kP a 1/kP a 1/kP a	53 10 8.47E-05 8.47E-05 181 53 0.29 1.809	79 15 8.47E-05 8.47E-05 121 35 0.29 1.809	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 0.29 1.809 20 20	131 25 2.53E-05 72 21 0.29 1.809	157 30 1.06E-05 94 2.8 0.29 2.828	53 10 9.90E-05 211 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 0.05 0.25 9.90E-05 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 31 0.29 2.114	131 25 2.96E-05 85 25 0.29 2.114	157 30 1.24E-05 95 28 0.29 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
入力值	圧入レート 仕上げ区間長 有効層厚 Self 毛elf 式5.1-1)の傾き B μ ¢ Ct Cw Cg Cr 水平浸透率 垂直浸透率 kv/kh kg ^{wh} kave ^x /μ	m ³ /D tC 0 2/年 m m 時間 時間 kP a, cyc b m ³ /n ³ cP 1, kP a 1, kP a 1, kP a 1, kP a 1, kP a 1, kP a 1, kP a	53 10 8.47E-05 8.47E-05 181 53 0.29 1.809 120.795	79 15 8.47E-05 8.47E-05 121 35 0.29 1.809 120.795 120.795	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 4.29E-07 4.54E-06 90 26 0.29 1.809 120,795	131 25 2.53E-05 72 21 0.29 1.809 120.795	157 30 1.06E-05 94 28 0.29 2.828 189.067	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	F0 T7 146.691 100.124 105 20 0.07 0.20 30.85 0.003 0.05 0.25 0.25 0.25 0.003 4.29E-07 8.52E-05 4.54E-06 105 31 0.29 2.114 141.158	131 25 2.96E-05 85 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。

c) 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4.1-36 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4.1-36 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、CO₂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4.1-12表 に示すように、8.2 万 t-CO₂/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、O20 mVD 程度となる一方で、20 万 t-CO₂/年程度の高レート圧入時には、1、O30 mVD 程度ま で圧入区間が拡大するものと推定される。この 10mVD 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 m³/d/MPaA 程度から 5、000 m³/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 ₂ /年)		CO₂の圧入区間下端		
	())(002/17/	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4.1-12 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4.1-32 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4.1-32 図右赤色)が、仕上げ区間上端付 近の高浸透率区間(第4.1-32 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4.1-37 図に浸透率分布を変えた設定で再現した FOT のログー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 のログーログプロットには 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4.1-37 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4.1-38図)。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。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4.1-39図)。全体によく一致して いると判断し,第4.1-38図の設定を用いて流動シミュレーションによるCO₂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4.1-38 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4.1-39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 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 4.1-40 図および第 4.1-41 図)。その推定結果を, 第 4.1-13 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 4.1-40 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。



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 4.1-41 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。



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4.1-41 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)

八五寸	北限		南限		東限			西限				
万和域	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

第4.1-13 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 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4.1-42~第4.1-45図)。推定結果を,第4.1-14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。



(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. CO₂分布(CO₂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CO₂分布状況(CO₂量飽和度)を投影。 3. 海面下1,280m程度まで分布するものと考えられる。

第4.1-43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4.1-44 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C02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4.1-45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4.1-14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4.1-46 図~ 第4.1-47 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4.1-46 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 4.1-47 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)

4.2 特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項

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ことを担保するため、 「収容量≧期間内推定圧入可能量≧期間内計画圧入量」の関係が成立することを確認する。 各用語は、本申請書において以下の通り定義する。

- ・収容量(貯蔵可能容量):貯留層に貯蔵可能な CO₂の最大量(単位:ton)
 予想される CO₂の貯留領域面積(m²) ×その領域の平均層厚(m) ×有効孔隙率×CO₂ 貯 留飽和度の最大値×貯留状態での平均 CO₂ 密度(ton/m³)
- ・期間内推定圧入可能量: 圧入実施予定期間内に安全に圧入可能と推定された CO₂の最大量 (単位:ton)
- ・期間内計画圧入量: 圧入実施予定期間内に圧入することを計画している CO₂の量(単位: ton)
- (1) 滝ノ上層 T1 部層(当初申請時)
 - ① CO₂の貯留領域面積(CO₂貯留領域の水平投影面積)

滝ノ上層で想定される CO₂の貯留領域は,浸透性が低いものの十数%の有効孔隙率を有す る貯留層が連続するため,圧入時間を考慮しなければ,第4.2-1 図(左図)に示す地質モデ ル作成範囲の全体を貯留領域と考えることも可能である。しかし,圧入井の掘削により確認 された滝ノ上層の浸透性を考慮すると現実的ではないため,予測される CO₂の貯留領域面積 は、3年間の CO₂ 圧入で CO₂ が分布する範囲を参照し,圧入井の坑跡から半径 25m の範囲に あたる 64,400m²とした。なお、第4.2-1 図(右図)に示す 1,000 トンの CO₂圧入後の CO₂の 分布範囲予測は,圧入井の坑跡に沿った数十mの範囲に限定される。



第4.2-1 図 滝ノ上層 T1 部層における孔隙率の分布予測と地質モデル作成範囲および予測される

CO2の貯留領域面積

平均層厚(CO2貯留領域の鉛直方向の平均長)

滝ノ上層で作成した地質モデルにおける滝ノ上層 T1 部層の平均層厚を,450mとした。

③ 有効孔隙率

第 4.2-1 図に示す貯留層モデルの孔隙率は、滝ノ上層圧入井掘削時に取得した物理検層 データ(NMR 検層)による孔隙率の平均値を用いている。物理検層データのエラーと考えら れる数値を除いた平均値から、有効孔隙率を 13.2%とした。

④ CO2 貯留飽和度の最大値

CO₂ 貯留飽和度の最大値は、下記に示す流動シミュレータの推奨の式を用いて算出した最 大残留ガス飽和度(Sgrmax)を採用し、0.241 とした。

Sgrmax=Sgr+0.5×(1-Swir-Sgr) Swir(残留水飽和率)=0.558 Sgr(残留ガス飽和率)=0.04

⑤ 貯留状態での平均 CO₂ 密度

貯留層深度での温度は90℃程度,圧力は圧入上限圧力である約38MPaとなる。

第4.2-2 図に示す圧入層準(滝ノ上層)での CO₂の密度から, 貯留状態での平均 CO₂密度 は、0.770ton/m³とした。



第4.2-2図 圧入層準(滝ノ上層)でのCO₂の密度

⑥ 収容量

上記の①~⑤の数値を用いて収容量を算出した結果を,第4.2-1表に示す。 収容量は,71万トンとなった。

貯留領域面積 (m ²)	64,400	m^2
その領域の平均層厚(m)	450	m
有効孔隙率	0.132	
CO2 貯留飽和度の最大値	0.241	
貯留状態での平均 CO2 密度 (ton/m ³)	0.770	ton/m^3
収容量(ton)	71	万 ton

第4.2-1表 滝ノ上層 T1 部層の収容量の算出

なお,現在経済産業省と環境省が実施する『二酸化炭素貯留適地調査事業』では,貯蔵 可能容量の算出に(財)地球環境産業技術機構(2006)による下記の式^[2]を使用し,地中 貯留量としている。予想される CO₂の貯留領域の地中貯留量を算出した結果,63 万トンと なった(第4.2-2表)。

^[1] 超臨界流体 NET(http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/PropertyW.htm, 2016/1/28 アクセス)

^{[2] (}財)地球環境産業技術機構. 2006. 平成 17 年度 二酸化炭素固定化·有効利用技術等対策事業 二酸化炭素 地中貯留技術研究開発 成果報告書.

地中貯留量=Sf × A × h × ϕ × Sg / BgCO₂ × ρ

Sf: 貯留率 (50%または 25%)

A:面積

- h:有効層厚
- ϕ : 孔隙率
- Sg: 超臨界 CO₂ 飽和度(20-50%-80%)
- BgCO2: 超臨界 CO2の容積係数(約0.003m³/m³)
- ρ:CO2密度(1.976kg/m³ 標準状態)
- 注:『二酸化炭素貯留適地調査事業』では、Sf および Sg は 50%を使用。

第4.2-2表 滝ノ上層 T1 部層の地中貯留量の算出

Sf:貯留率 (50%)	0.5	-
A:面積	64,400	m^2
h:有効層厚(m)	450	m
φ:孔隙率	0.132	
Sg:超臨界 CO2 飽和度(50%)	0.5	
BgCO ₂ :超臨界 CO ₂ の容積係数(約 0.003m ³ /m ³)	0.003	m^3/m^3
ρ : CO ₂ 密度(1.976kg/m ³ 標準状態)	0.001976	ton/m^3
地中貯留量	63	万 ton

⑦ 期間内計画圧入量が適切であることの確認

7) 収容量

上記⑥で算出した収容量は、1,000 トンの CO₂ 圧入後の CO₂ の分布範囲予測から算出した ものである。期間内計画圧入量の 750 トンでは、予測される CO₂ の貯留領域の貯留層の収容 量は、少なくとも 53 万トン以上と推定される。

() 期間内推定圧入可能量

平成 27 年度 CO₂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 CO₂を安全に 圧入できることを確認している。圧入期間は 27 か月であり、期間内推定圧入可能量は、750 トンとする。

り) 期間内計画圧入量

750 トンとする。

以上より, 滝ノ上層について「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。

(2) 滝ノ上層 T1 部層(変更申請時)

① CO₂の貯留領域面積(CO₂貯留領域の水平投影面積)

滝ノ上層で想定される CO₂の貯留領域は,浸透性が低いものの十数%の有効孔隙率を有す る貯留層が連続するため,圧入時間を考慮しなければ,第4.2-3 図(左図)に示す地質モデ ル作成範囲の全体を貯留領域と考えることも可能である。しかし,圧入井の掘削により確認 された滝ノ上層の浸透性を考慮すると現実的ではないため,予測される CO₂の貯留領域面積 は、3年間の CO₂ 圧入で CO₂ が分布する範囲を参照し,圧入井の坑跡から半径 25m の範囲に あたる 64,400m²とした。なお、第4.2-1 図(右図)に示す 1,000 トンの CO₂圧入後の CO₂の 分布範囲予測は,圧入井の坑跡に沿った数十mの範囲に限定される。



注:右図は、1,000トンのCO2 圧入後のCO2の分布範囲予測(第4.1-1表に示す範囲)。

第4.2-3 図 滝ノ上層 T1 部層における孔隙率の分布予測と地質モデル作成範囲および予測される CO2の貯留領域面積

平均層厚(CO2貯留領域の鉛直方向の平均長)

滝ノ上層で作成した地質モデルにおける滝ノ上層 T1 部層の平均層厚を,450m とした。

③ 有効孔隙率

第 4.2-3 図に示す貯留層モデルの孔隙率は、滝ノ上層圧入井掘削時に取得した物理検層 データ(NMR 検層)による孔隙率の平均値を用いている。物理検層データのエラーと考えら れる数値を除いた平均値から、有効孔隙率を 13.2%とした。

④ CO2 貯留飽和度の最大値

CO₂ 貯留飽和度の最大値は、下記に示す流動シミュレータの推奨の式を用いて算出した最 大残留ガス飽和度(Sgrmax)を採用し、0.241 とした。 Sgrmax=Sgr+0.5×(1-Swir-Sgr) Swir(残留水飽和率)=0.558 Sgr(残留ガス飽和率)=0.04

⑤ 貯留状態での平均 CO2 密度

貯留層深度での温度は90℃程度,圧力は圧入上限圧力である約38MPaとなる。 第4.2-4 図に示す圧入層準(滝ノ上層)でのCO2の密度から,貯留状態での平均CO2密度

は、0.770ton/m³とした。



注:超臨界流体 NET^[1]より引用・加筆 第4.2-4図 圧入層準(滝ノ上層)での CO₂の密度

^[1] 超臨界流体 NET(http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/PropertyW.htm, 2016/1/28 アクセス)

仮容量

上記の①~⑤の数値を用いて収容量を算出した結果を,第4.2-3表に示す。 収容量は,71万トンとなった。

貯留領域面積(m ²)	64, 400	m^2
その領域の平均層厚 (m)	450	m
有効孔隙率	0.132	
CO2 貯留飽和度の最大値	0.241	
貯留状態での平均 CO2 密度 (ton/m ³)	0.770	ton/m^3
収容量 (ton)	71	万 ton

第4.2-3表 滝ノ上層 T1 部層の収容量の算出

なお,現在経済産業省と環境省が実施する『二酸化炭素貯留適地調査事業』では,貯蔵 可能容量の算出に(財)地球環境産業技術機構(2006)による下記の式^[1]を使用し,地中 貯留量としている。予想される CO₂の貯留領域の地中貯留量を算出した結果,63 万トンと なった(第4.2-4表)。

地中貯留量=Sf × A × h × ϕ × Sg / BgCO₂ × ρ Sf:貯留率(50%または25%) A:面積

- h:有効層厚
- ♦ : 孔隙率
- Sg: 超臨界 CO₂ 飽和度(20-50%-80%)
- BgCO₂: 超臨界 CO₂の容積係数(約0.003m³/m³)
- ρ:CO₂密度(1.976kg/m³ 標準状態)

注:『二酸化炭素貯留適地調査事業』では,SfおよびSgは50%を使用。上記式では温度や圧力を考慮 せず、BgCO₂を0.003m³/m³で一律に扱う。

Sf:貯留率 (50%)	0.5	-
A:面積	64,400	m^2
h:有効層厚(m)	450	m
φ:孔隙率	0.132	
Sg:超臨界 CO2 飽和度(50%)	0.5	
BgCO ₂ :超臨界 CO ₂ の容積係数(約 0.003m ³ /m ³)	0.003	m^3/m^3
ρ : CO ₂ 密度 (1.976kg/m ³ 標準状態)	0.001976	ton/m^3
地中貯留量	63	万 ton

第4.2-4表 滝ノ上層 T1 部層の地中貯留量の算出(参考)

⑦ 期間内計画圧入量が適切であることの確認

7) 収容量

^{[1] (}財)地球環境産業技術機構. 2006. 平成 17 年度 二酸化炭素固定化·有効利用技術等対策事業 二酸化炭素 地中貯留技術研究開発 成果報告書.

上記⑥で算出した収容量は、1,000 トンの CO₂ 圧入後の CO₂ の分布範囲予測から算出した ものである。750 トン圧入時に予想される CO₂ の分布範囲予測面積は 1,000 トン圧入時と同 等であるが、貯留層の収容量は、圧入量比を考慮して 53 万トン以上と推定する。

() 期間内推定圧入可能量

平成 30 年度(暫定) CO₂挙動予測シミュレーションにおいて,約2年間で 750 トンの CO₂ を安全に圧入できることを確認している。圧入期間は 25 か月であり,期間内推定圧入可能 量は,750 トンとする。

ウ) 期間内計画圧入量

750 トンとする。

以上より, 滝ノ上層について「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) 萌別層砂岩層(当初申請時)

① CO₂の貯留領域面積(CO₂貯留領域の水平投影面積)

予測される CO₂の貯留領域面積は,60 万トンの CO₂を圧入した際に予測される貯留層内で の CO₂の分布範囲と,圧入井から海岸までの距離を勘案し,3 年間の CO₂ 圧入において地下 で CO₂が広がる範囲とする。なお,萌別層の評価に用いた地質モデルでは,萌別層砂岩層を 堆積層 4,8 および 9 の 3 層準の堆積層に分類しており,第4.2-5 図にそれぞれ堆積層の地 質モデル作成範囲内での分布と予測される CO₂の貯留領域面積の投影図を,第4.2-5 表に予 測される CO₂の貯留領域面積を示す。



注:1. 図中でほぼ南北に伸びる直線は、萌別層圧入井が当該層準に到達するまでの坑跡を上方から投影したもの。

- 2. 図中のマス (グリッド) は, 500m×500m。
- 3. 堆積層6および7は,泥岩層。
- 4. 図中の四角形は, 第4.1-6表に示した, 60万トンの CO₂圧入後の貯留層内での CO₂の分布予測範囲。
- 第4.2-5 図 萌別層砂岩層(堆積層4,8および9)の分布域と予測される CO2の貯留領域面積の投

影図
堆積層	予想される CO ₂ の貯留領域面積
堆積層 4	$2,780,276m^2$
堆積層 8	$2,780,276m^2$
堆積層 9	$2,780,276m^2$

第4.2-5表 萌別層砂岩層で予想される CO2の貯留領域面積

② 平均層厚(CO2貯留領域の鉛直方向の平均長)

3 層準(堆積層 4,8 および 9) に分類した萌別層砂岩のそれぞれについて,第4.2-6 図に 地質モデルの鳥瞰図上での代表的な層厚を,第4.2-6 表にその層厚の範囲と推定される平 均層厚を示す。



第4.2-6 図 萌別層砂岩(堆積層4,8および9)の分布鳥瞰図と層厚

第4.2-6表 萌別層砂岩層の層厚

堆積層	層厚範囲	平均層厚
堆積層 4	15~30m	20m
堆積層 8	$20\sim 95 \mathrm{m}$	30m
堆積層 9	$0\sim 160 \mathrm{m}$	60m

③ 有効孔隙率

コア分析は孔隙にヘリウムを押し込むことにより実施されたため,測定された孔隙率は有

効孔隙率である。これらの分析値から、有効孔隙率の平均を28.1%[1]とした。

④ CO2 貯留飽和度の最大値

CO₂ 貯留飽和度の最大値は, Holts (2002) による式^[2]により算出した最大残留ガス飽和度 (Sgrmax) を採用し, 0.275 とした。

Sgrmax= $-0.9696 \times \phi + 0.5473$

φ (平均孔隙率) =0.281

5 貯留状態での平均 CO2 密度

貯留層深度での温度は 41℃程度, 圧力は圧入上限圧力である約 13MPa となる。

第4.2-7 図に示す圧入層準(萌別層砂岩層)でのCO₂の密度から,貯留状態での平均CO₂ 密度は、0.730ton/m³とする。



第4.2-7図 圧入層準(萌別層砂岩層)でのCO2の密度

^[1] 石油資源開発(株) 2011. 苫小牧地点における調査・検討 地質モデル構築・CO₂長期挙動シミュレーション 作業実施報告書.日本CCS調査(株)社内資料. p.118

^[2] Holtz, M.H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx: A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction. SPE-75502.

^[3] 超臨界流体 NET(http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/PropertyW.htm, 2016/1/28 アクセス)

⑥ 収容量

上記の①~⑤の数値を用い3層準(堆積層4,8および9)のそれぞれについて収容量を 算出した結果を,第4.2-7表に示す。

収容量の総計は1,725万トンとなった。

なお、『二酸化炭素貯留適地調査事業』で採用する式における地中貯留量は、1,415 万ト ンであった(第4.2-8表)。

第4.2-7表 萌別層砂岩層の収容量の算出

堆積層4

CO2の貯留領域面積	2, 780, 276	m^2
平均層厚	20	m
有効孔隙率	0.281	
CO2 貯留飽和度の最大値	0.275	
貯留状態での平均 CO2 密度	0.730	ton/m^3
収容量	314	万 ton

堆積層 8

CO2の貯留領域面積	2, 780, 276	m^2
平均層厚	30	m
有効孔隙率	0.281	
CO2 貯留飽和度の最大値	0.275	
貯留状態での平均 CO2 密度	0.730	ton/m^3
収容量	470	万 ton

堆積層9

CO2の貯留領域面積	2, 780, 276	m^2
平均層厚	60	m
有効孔隙率	0.281	
CO2 貯留飽和度の最大値	0.275	
貯留状態での平均 CO2 密度	0.730	ton/m^3
収容量	941	万 ton
収容量(萌別層全体)	1,725	万 ton

第4.2-8表 萌別層砂岩層の地中貯留量の算出

堆積層4

Sf:貯留率 (50%)	0.5	
A: 面積	2, 780, 276	m^2
h:有効層厚	20	m
↓ : 孔隙率	0.281	
Sg:超臨界 CO2 飽和度(50%)	0.5	
BgCO ₂ :超臨界 CO ₂ の容積係数(約 0.003m ³ /m ³)	0.003	m^3/m^3
ρ : CO ₂ 密度(1.976kg/m ³ 標準状態)	0.001976	ton/m^3
地中貯留量	257	万 ton

堆積層8

Sf:貯留率 (50%)	0.5	-
A:面積	2, 780, 276	m^2
h:有効層厚	30	m
 	0.281	
Sg:超臨界 CO ₂ 飽和度(50%)	0.5	
BgCO ₂ :超臨界 CO ₂ の容積係数(約 0.003m ³ /m ³)	0.003	m^3/m^3
ρ : CO ₂ 密度(1.976kg/m ³ 標準状態)	0. 001976	ton/m^3
地中貯留量	386	万 ton

堆積層9

Sf:貯留率 (50%)	0.5	
A:面積	2, 780, 276	m^2
h:有効層厚	60	m
 	0.281	
Sg:超臨界 CO ₂ 飽和度(50%)	0.5	
BgCO ₂ :超臨界 CO ₂ の容積係数(約 0.003m ³ /m ³)	0.003	m^3/m^3
ρ : CO ₂ 密度(1.976kg/m ³ 標準状態)	0.001976	ton/m^3
地中貯留量	772	万 ton
地中貯留量	772	万 ton

地中貯留量(萌別層全体)	1,415 万 ton
--------------	-------------

⑦ 期間内計画圧入量が適切であることの確認

7) 収容量

予測される CO₂の貯留領域の貯留層の収容量は、少なくとも 1,725 万トン以上と推定される。

() 期間内推定圧入可能量

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。

り) 期間内計画圧入量

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60万トンとする。

以上より, 萌別層について「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。

(4) 萌別層砂岩層(変更申請時)

① CO₂の貯留領域面積(CO₂貯留領域の水平投影面積)

予測される CO₂の貯留領域面積は,60 万トンの CO₂を圧入した際に予測される貯留層内で の CO₂の分布範囲と,圧入井から海岸までの距離を勘案し,4 年間の CO₂ 圧入において地下 で CO₂が広がる範囲とする(**第 4. 2-8 図**)。貯留領域の面積は、約 3. 3km²(1. 75km×1. 86km) となる。



第4.2-8 図 萌別層砂岩層における貯留領域(CO₂60 万トン圧入時)

2 孔隙容量

貯留領域範囲における、貯留層中の孔隙容量を地質モデルから計算した結果、孔隙容量は 258×10⁶ m³となる。(**第4.2-9 図**)。

同様に地質モデルより求めた貯留領域内の貯留層の平均孔隙率は29.9%となった。

その他の第四系	鵡川層上限 QTN_Base	シ	孔隙容量
		 ケ	総計 (1+2+3+4)
鵡川層	趙川國其府 MII Base	ンス	<u>258</u>
			<u>~ 10° m°</u>
萌別層砂岩層上部	■ 萌別層泥岩層基底 MO_SH_Base_TS_Ⅲ	111	(1) $40 \times 10^{6} \text{ m}^{3}$
萌別層砂岩層下部	- シーケンス境齐SB-皿		(2) $55 \times 10^{6} \text{ m}^{3}$
萌別層(+荷菜層) 砂岩泥岩互層	- 萌別層砂岩層基底 MO_Base-MFS_II-	11	$3 47 \times 10^6 \text{ m}^3$
萌別層(+荷菜層) 砂岩層	シーケンス境界SB-Ⅱ	Ι	④ 116 × 10 ⁶ m ³
	シーケンス境界SB-I		

第4.2-9図 貯留領域(CO260万トン圧入時)における貯留層の孔隙容量

CO2 貯留飽和度の最大値

CO₂貯留飽和度の最大値は, Holts (2002) による式^[1]により算出した最大残留ガス飽和度 (Sgrmax) を採用し, 0.257 とした。

Sgrmax= $-0.9696 \times \phi + 0.5473$

φ (平均孔隙率) =0.299

④ 貯留状態での平均 CO2 密度

C02は44~48℃程度で圧入されるが、最終的には、貯留層深度での貯留層温度である42.3℃ 程度で安定すると考えられる。貯留層で予想される圧力は10MPa 程度となる。

第 4.2-9 図に示す圧入層準(萌別層砂岩層)での CO₂の密度から,貯留状態での平均 CO₂ 密度は,580kg/m³とする。

^[1] Holtz, M.H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx: A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction. SPE-75502.



注:超臨界流体 NET^[1]より引用・加筆

超臨界流体 NETより引用・加筆http://www5c.biglobe.ne.jp /~cassia/SCF_HP/PropertyW.htm

第4.2-9図 圧入層準(萌別層砂岩層)でのCO2の密度

⑤ 収容量

上記の①~④の数値を用い収容量を算出した結果を,第4.2-9表に示す。 収容量の総計は3,846万トンとなった。

なお、『二酸化炭素貯留適地調査事業』で採用する式における地中貯留量は、4,248 万ト ンであった(第4.2-10表)。

第4.2-9表 萌別層	砂岩層の収容量の算出
-------------	------------

萌別層砂岩層

CO2の貯留領域面積	3, 255, 000	m^2
孔隙容量 (孔隙率×岩石量)	$258 imes 10^{6}$	m^3
平均孔隙率	0.27	
CO2 貯留飽和度の最大値	0.257	
貯留状態での平均 CO2 密度	0. 580	ton/m^3
収容量	3, 846	万 ton

^[1] 超臨界流体 NET(http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/PropertyW.htm, 2016/1/28 アクセス)

第4.2-10表 萌別層砂岩層の地中貯留量の算出(参考)

Sf:貯留率 (50%)	0.5	
孔隙容量	258×10^6	m ³
=面積×有効層厚×孔隙率		
Sg:超臨界 CO2 飽和度(50%)	0.5	
BgCO ₂ :超臨界 CO ₂ の容積係数(約 0.003m ³ /m ³)	0.003	m^3/m^3
ρ : CO ₂ 密度(1.976kg/m ³ 標準状態)	0.001976	ton/m^3
地中貯留量	4,248	万 ton

⑥ 期間内計画圧入量が適切であることの確認

7) 収容量

予測される CO₂の貯留領域の貯留層の収容量は、3,846 万トン以上と推定される。

() 期間内推定圧入可能量

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。

り)期間内計画圧入量

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/年程度,4 年間で60万トンとする。

以上より, 萌別層について「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。

5. 海底下廃棄をする海域の海洋環境の特徴に係る事項

海底下廃棄をする海域の海洋環境の特徴は、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」(海底下廃棄事前評価書)において記載した内容から、次のようにまとめることがで きる。

- ・対象海域は、水深 6~42m、海底は砂泥質の緩傾斜面で、一部に砂礫域がある。水塊構造としては、夏季を中心として鉛直的な成層が形成されて明瞭な温度躍層がみられる。この成層構造は、冬季を中心として鉛直混合が起こると解消される。また、この海域は、親潮と津軽暖流の勢力の季節的変化の影響下にある。これらに加えて、冬季には低温、低塩分の沿岸親潮の影響や、春季には雪解けによる流入河川水の増加の影響が認められる。
- ・海水の温度,塩分,溶存酸素等の分布や、プランクトンの出現状況は、水塊構造の季節変化を 反映したものとなる。
- ・底生生物の出現状況には、ほとんど季節性が認められず、調査測点の水深や底質の状況を反映したものとなる。海藻草類については、人工構造物等に数種の海藻が着生しているが、漁獲はされていない。魚等の遊泳動物では、魚類、水産動物、貝類、海棲哺乳類の生息があり、漁獲対象となっている種類が含まれている。
- ・脆弱な生態系および特殊な生態系としては,調査海域近傍の厚真川河口に干潟がみられるが, 藻場やサンゴ群落,熱水生態系等は確認されていない。
- ・調査海域および近傍海域における海域利用としては,漁業や海上交通としての利用があり,漁 場や港湾区域が設定され,中長距離フェリーや RORO 船,コンテナ船等の航路がある。

当該海域では,海底下廃棄した特定二酸化炭素は基本的に漏出しないと結論したが,添付書類 -3において漏出させるシナリオを設定し,海洋環境への影響を検討した。この結果,万が一の漏 出が起こった場合でも,生物影響は極めて軽微であると評価できた。