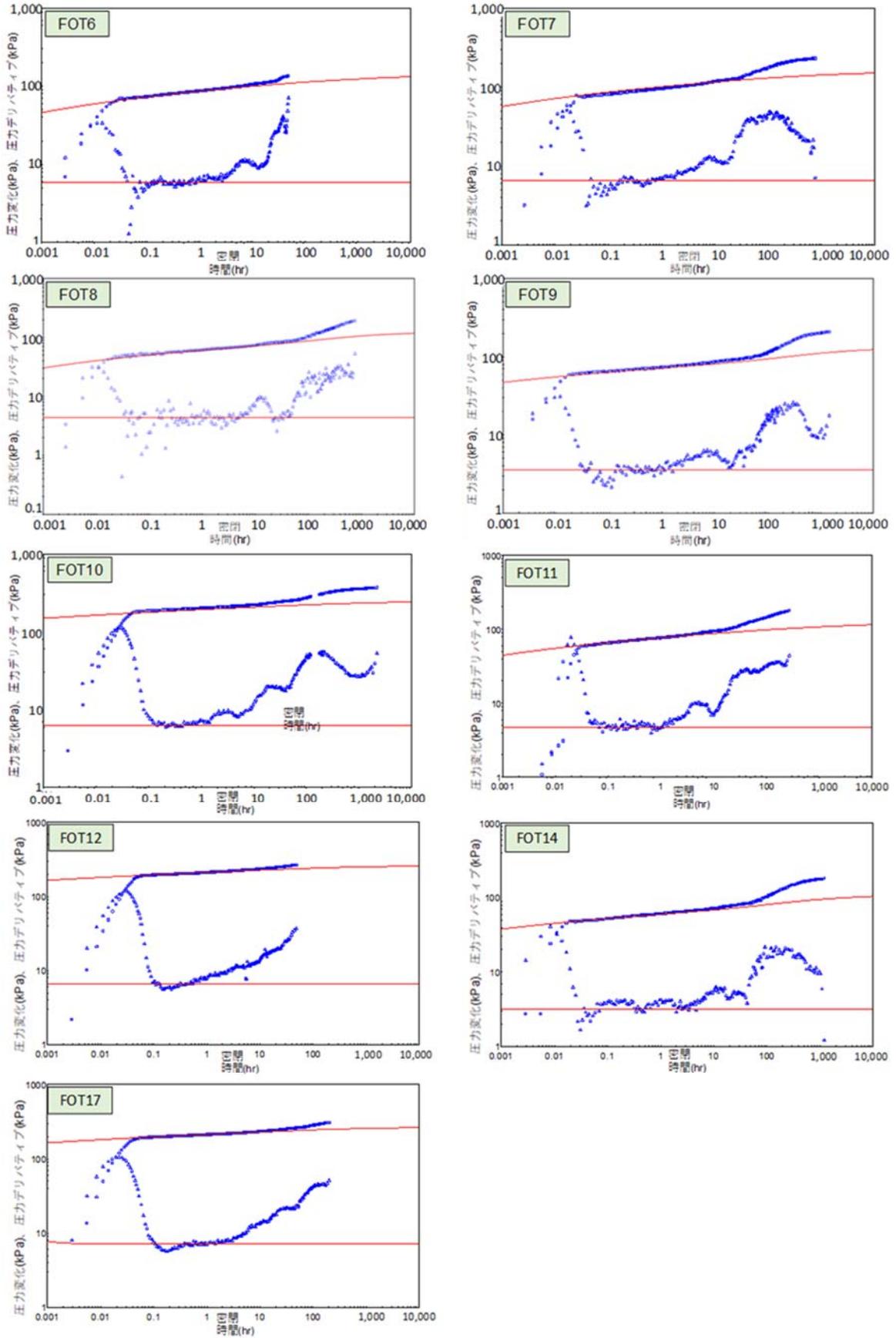


第 2.2-16 表 CO₂ 領域ラジアルフロー解析の入力値と結果 (FOT6~12, 14, 17)

	単位	FOT6	FOT7	FOT8	FOT9	FOT10	備考欄	
圧入	m ³ /日	129,623	146,691	124,766	128,502	277,785	圧入停止	
レート	t-CO ₂ /年	88,474	100,124	85,159	87,709	189,602	直前のレート	
累計圧入量	t-CO ₂	65,793	69,070	109,250	188,136	207,209		
有効層厚	m	19						CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028						9.82MPaG/37.8°C
CO ₂ 粘性	cP	0.0521						
孔隙率		0.28						検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8						高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵						9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷						
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵						
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶						コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,000	3,078	3,900	4,950	6,000	解析結果	
浸透率	mD	158	162	205	261	316		

	単位	FOT11	FOT12	FOT14	FOT17	備考欄	
圧入	m ³ /日	122,509	319,403	115,063	317,189	圧入停止	
レート	t-CO ₂ /年	83,618	218,008	78,536	216,498	直前のレート	
累計圧入量	t-CO ₂	217,425	233,438	261,632	300,012		
有効層厚	m	19					CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028					9.82MPaG/37.8°C
CO ₂ 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8°C
孔隙率		0.28					検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8					高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵					9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷					
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵					
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶					コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,600	6,650	4,940	6,080	解析結果	
浸透率	mD	190	350	260	320		



第 2.2-49 図 ラジアルフロー解析マッチング状況 (FOT6~12, 14, 17)

FOT10 までは、圧入レートが高いほどかつ累計圧入量が多いほど浸透率×有効層厚の値を増加する傾向認められた。前者の原因は圧入レートが上がるほど流動坑底圧が上昇するため圧入区間が増大するため、後者の原因は累計圧入量の増加と圧入井周辺の貯留層の平均 CO₂飽和度が上昇により、CO₂の相対浸透率が向上するためであると考えられる。FOT11 以降は、それ以前の傾向とは若干異なり、異なり累計圧入量の増加が浸透率×有効層厚の向上につながる相関が不明瞭となっている。

2) ホーナープロット解析

密閉後 10 時間以降のレイトタイムで見られたデリバティブの傾斜 0 を対象にホーナープロット解析を実施した。ホーナープロット解析ではラジアルフローと考えられる領域で直線を引き、その傾きから式 (2.2-2) を用いて浸透率を推定し、その切片(ホーナータイム=1)から貯留層平均圧力を算出した。

$$k \times h = \frac{162.6 \cdot q \cdot B \cdot \mu}{m} \quad \text{式 (2.2-2)}$$

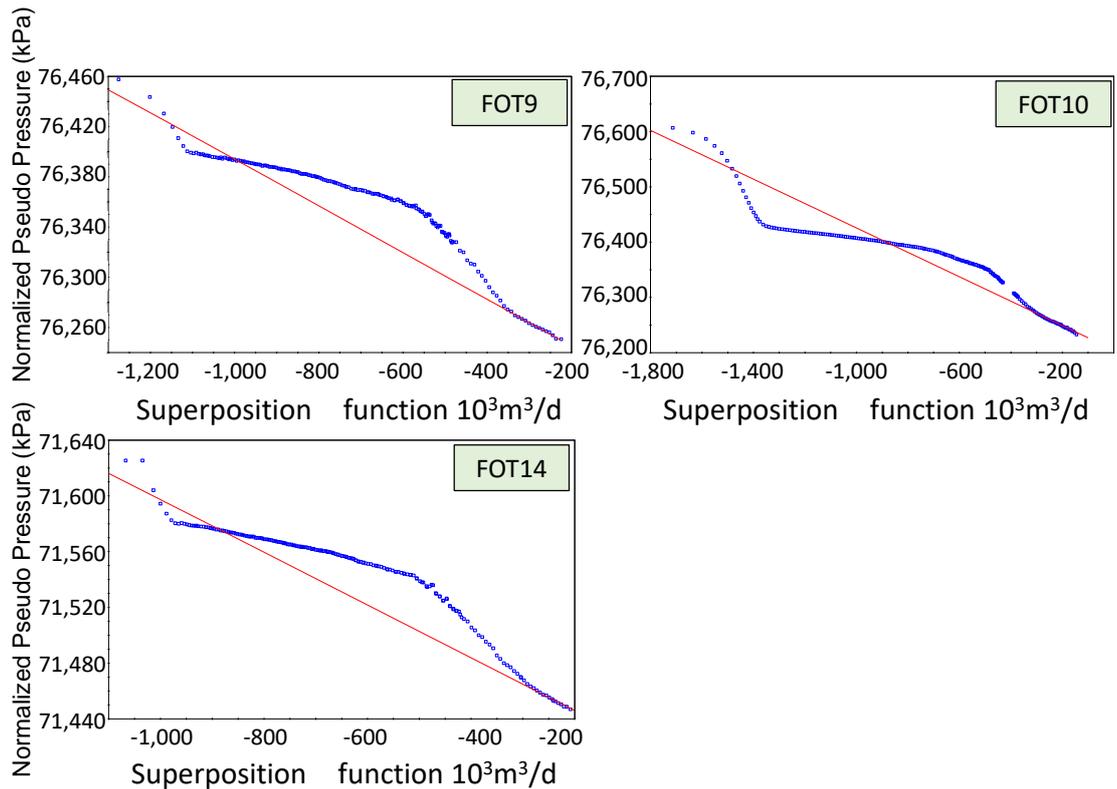
注) k:浸透率, h:有効層厚, q:流量, B:容積係数, μ :粘性, m:ホーナープロットにおける傾きを示す。

圧力解析ソフト「Interpret」によるホーナープロット法では、Superposition function 式 (2.2-3) を横軸に、Normalized Pseudo Pressure 式 (2.2-1) を縦軸にとり、式 (2.2-2) の傾き m を求め、k×h (浸透率×有効層厚) を算出する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式 (2.2-3)}$$

注) f: Superposition function, t_{sp} : Superposition time, q:レート, n:n 番目を示す。

ホーナープロット解析でのマッチング状況を第 2.2-50 図に、解析結果を第 2.2-17 表に示す。浸透率×有効層厚は、ラジアルフロー解析でよりも小さい。これはラジアルフローの解析で対象とした CO₂が到達した領域の浸透率よりも、ホーナープロットで対象とした貯留層全体の浸透率の方が低いことを示している。CO₂が圧入された領域が局所的であることや、水平方向に不均質に圧入されていることなどが理由として挙げられる。



第 2.2-50 図 ホーナープロット解析状況 (FOT9, FOT10, FOT14)

第 2.2-17 表 ホーナープロット解析結果

		FOT9	FOT10	FOT14
圧入レート	m ³ /D	128,502	277,785	115,063
浸透率×有効層厚	mD*m	1,691	1,425	1,662
浸透率	mD	9	8	9
貯留層平均圧力	MPaG	9.82	9.82	9.83

3) 探査半径の推定結果

レイトラジアルフローは探査半径（圧力伝搬が及んだ範囲）が坑井長（圧入区間長）を上回った時に検知される。IW-2 の仕上げ区間長は、水平方向距離 1,140m 程度となるため、レイトラジアルフローは探査半径が 1,140m を超えているはずである。また、CO₂ を深部塩水層に圧入する場合、貯留層内での流体の動きやすさの指標となるモビリティ（浸透率/粘性）は CO₂ 領域と地層水領域およびその中間であるショックフロントの 3 領域で異なるものと考えられる。この考えに基づき、探査半径を式 (2.2-4) ～式 (2.2-6) (Rahman et al. (2014) ^[1]) を用いて算出した。ここで、FOT9, FOT10, FOT14 のそれぞれにおいて、デリバティブカーブが上側に凸とな

^[1] Rahman, N. M. A., Al-Thawad, F. M., BinAkresh S. A., “ SYSTEM FOR COMPUTING THE RADIUS OF INVESTIGATION IN A RADIAL, COMPOSITE RESERVOIR SYSTEM” U.S Patent Application Publication (2013)

る挙動（ショックフロント）が、密閉後 600 時間で修了していると仮定した。第 2.2-18 表に CO₂ 領域およびショックフロント領域の探査半径の推定結果を示す。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3} \left(\sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right)} + R_2 \left(1 - \sqrt{\frac{M_3 F_2}{F_3 M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (2.2-4)}$$

$$R_2 = R_1 \left(1 - \sqrt{\frac{M_2 F_1}{F_2 M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (2.2-5)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t} \quad \text{式 (2.2-6)}$$

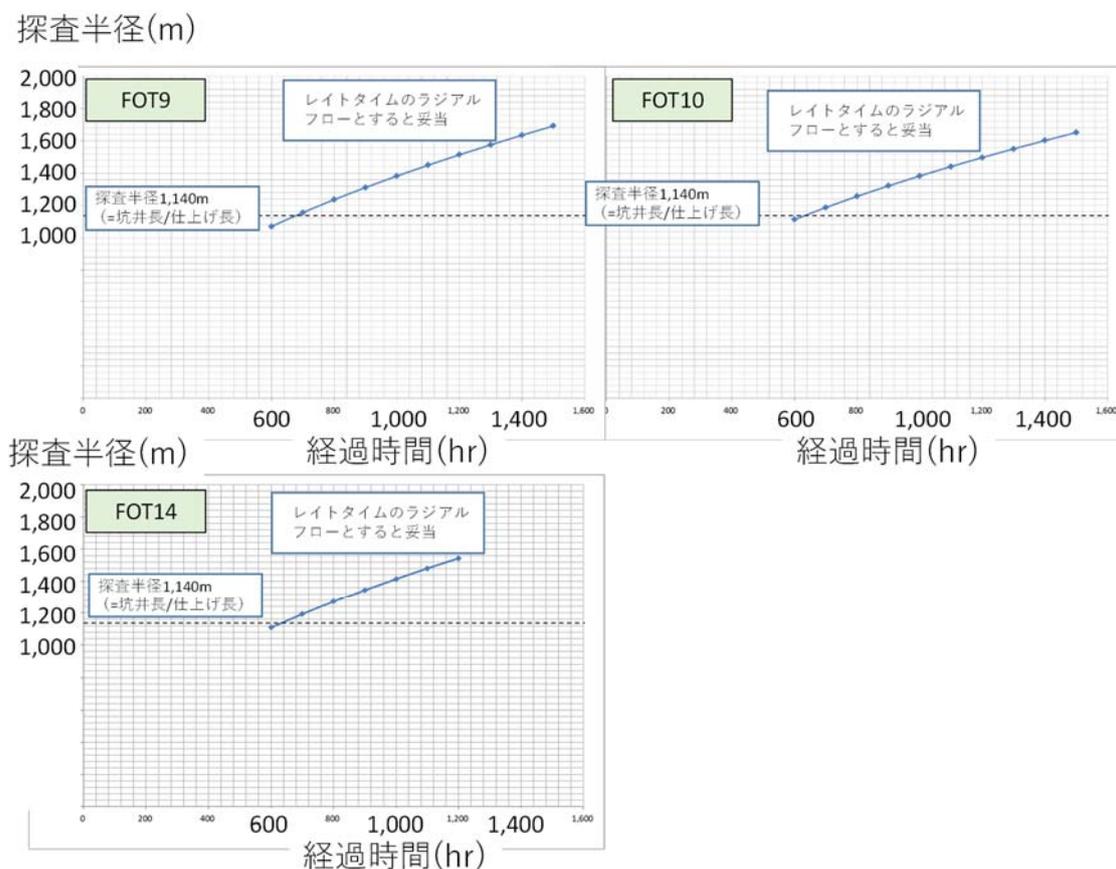
注) R:半径, M:モビリティ (浸透率/粘性), F:ストラティビティ (孔隙率×総合圧縮率), k:浸透率, φ:孔隙率, μ:粘性, ct:総合圧縮率, Δt:密閉時間, 下付き番号 1: CO₂ 領域, 下付き番号 2: ショックフロント領域, 下付き番号 3: 塩水領域を示す。

第 2.2-18 表 探査半径の算出に用いた入力値と計算結果

	入力値		FOT9	FOT10	FOT14	適用
CO ₂ 領域	半径	m	422	464	421	式 (2.2-6) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	4,950	6,000	4,940	ラジアルフロー解析結果
	浸透率	mD	261	316	260	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	50	50	50	ショックフロント出現よりも手前
	粘性	cP	0.052	0.052	0.052	9.82MPaG, 37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	貯留層平均値
	総合圧縮率	1/kPa	0.00346	0.00346	0.00346	圧力解析の入力値
ショックフロント領域	半径	m	1,070	1,113	1,109	式 (2.2-5) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	CO ₂ 領域と同じと仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	760	760	855	ホーナープロット解析値
	浸透率	mD	40	40	45	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	600	600	600	ショックフロント終了時
	粘性	cP	0.052	0.052	0.052	CO ₂ 領域と同じと仮定
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	CO ₂ 領域と同じと仮定
	総合圧縮率	1/kPa	0.00136	0.00136	0.00136	相対浸透率曲線から導いたフラクショナルフロー曲線からショックフロントでの Sg=0.28 を算出して計算
塩水領域	有効層厚	m	181	181	181	層厚 220m に平均的なネットグロス比 0.78 を考慮
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	25,533	19,150	24,465	ホーナープロット解析値に塩水 (0.77cP) と CO ₂ (0.05cP) の粘性比を乗じたもの
	浸透率	mD	141	106	135	上記 2 つの値より計算
	粘性	cP	0.77	0.77	0.77	9.82MPaG, 37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	検層解析結果
	総合圧縮率	1/kPa	0.00024	0.00024	0.00024	9.82MPaG, 37.8°C

FOT9, 10, 14 のデリバティブカーブにおいて圧入停止時間 600 時間以降で認められたレイトラジアルフローに対し、式 (2.2-4) を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した (第 2.2-51 図)。FOT9, 10, 14 とともに圧入停止時間 600 時間付近から探

査半径が坑井の仕上げ長である 1,140m を超えることが予想された。FOT9, 10, 14 において密閉後 600 時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜 0 を、地層水領域におけるレイトラジアルフローと見なすことの妥当性が示された。



第 2.2-51 図 ホーナープロット解析状況 (FOT9, FOT10, FOT14)

4) フォールオフ解析のまとめ

FOT6～12, 14, 17 の 9 回の FOT のデリバティブカーブの傾斜 0 の挙動に対し、ラジアルフロー解析を実施した。その結果、FOT11 以降で、圧入レートと CO₂ の累計圧入量および解析される $k \times h$ 値の関係が異なる傾向があり、FOT11 以降に圧入性が低下した可能性が示唆された。

FOT9, 10, 14 の密閉時間 10 時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜 0 の挙動に対し、ホーナープロット法を適用した。その結果それぞれの FOT で推定された貯留層平均圧力は初期圧力の 9.82MPaG に近い値となり、圧力上昇の影響が及ばない領域の挙動を示している可能性が示唆された。

FOT9, 10, 14 の密閉時間 600 時間頃までに認められるショックフロント挙動以降に認められるので、デリバティブカーブの傾斜 0 の挙動は探査半径の解析からレイトラジアルフローの挙動を示していることが示唆された。

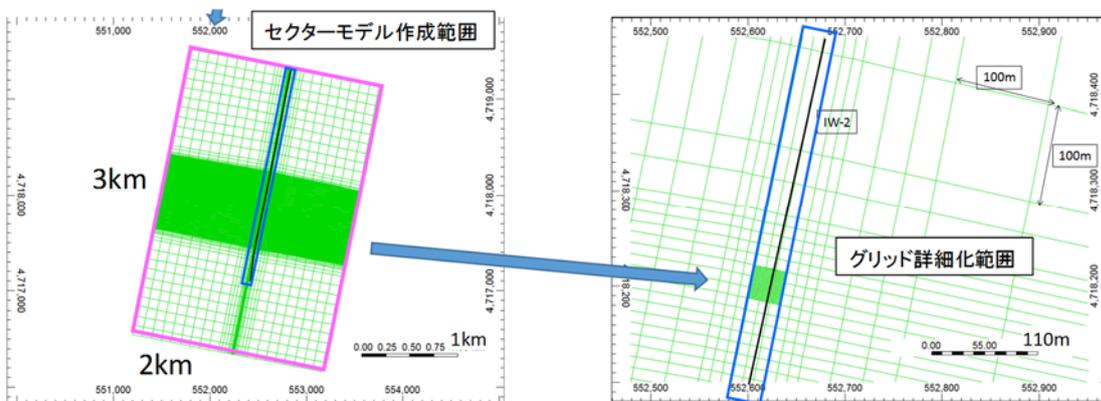
ii) ヒストリーマッチ

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。

ヒストリーマッチは、地質統計学的に作成した複数の異なる岩相分布を持った地質モデルを下記の手順により作成し、それぞれを用いて実施した。

- ・堆積相解析で設定した、16 個のファシス(岩相)を、坑井におけるファシスログをグリッドモデルに入力。
- ・堆積相解析で解釈した堆積システムを決定論的にグリッドモデルに入力。
- ・分布させた堆積システム毎に坑井におけるファシス組相の解釈結果をハードデータとして、地球統計学的にファシス組相を分布させる。
- ・分布させたファシス組相毎に坑井におけるファシス(岩相)分布をハードデータとして岩相を地球統計学的手法により 3 次元的に分布させる。

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 2.2-52 図)。また、グリッドに入力した物性値パラメータは第 2.2-19 表と同様とした。



第 2.2-52 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

地質モデルが適切であることを判断するために、仕上げ区間上端深度における圧入中の実績圧力と、複数の地質モデル(具現像)による予測値との乖離を評価する式(2.2-7)による目的関数を用いた。乖離が小さいほど適切な地質モデルであると考えられる。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \sqrt{(d_{sim}^i - d_{obs}^i)^2} \quad \text{式 (2.2-7)}$$

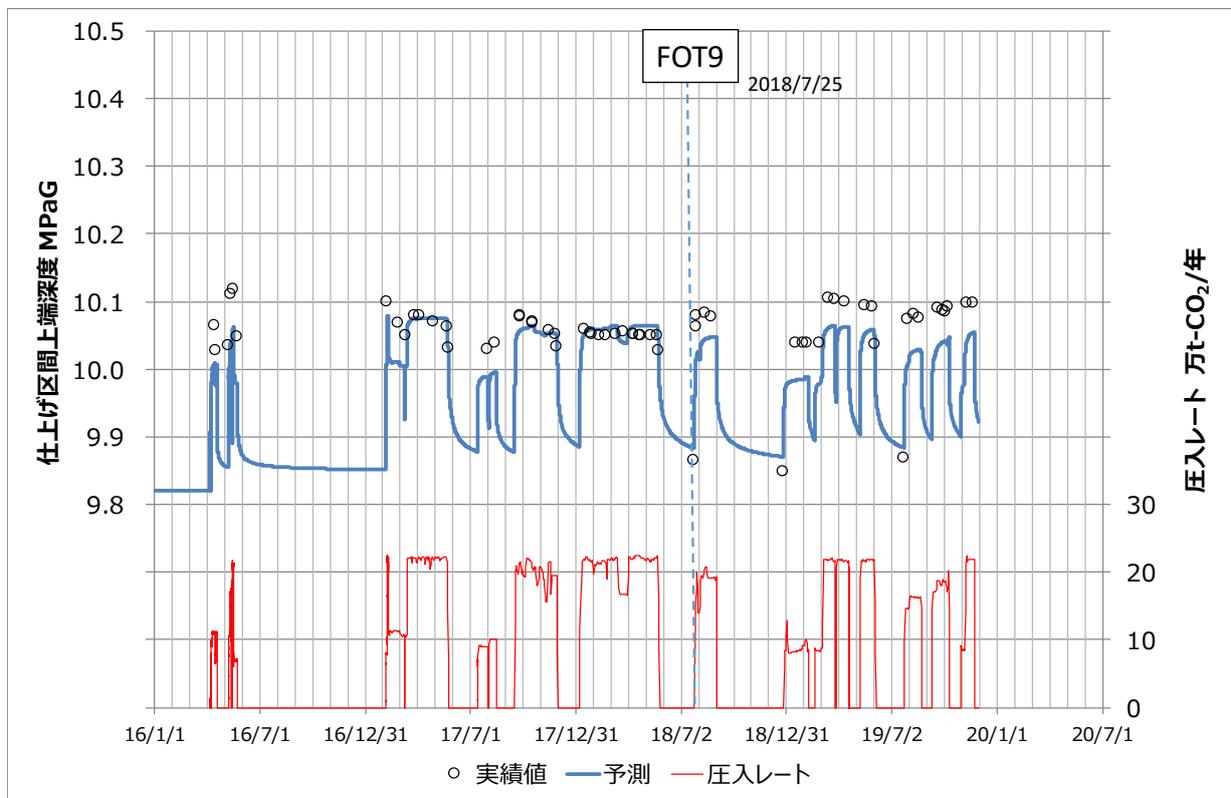
注) n_{obs} : 実績データ数, d_{sim} : シミュレーション計算値, d_{obs} : 実績データ

2018 年 7 月 25 日以前の圧入状況を目的関数 25kPa 以下で再現する地質モデル(具現像)を 30 個抽出し、そのパラメータのままで 2018 年 7 月 25 日以降の状況を再現すると、予測値と実績値の乖離が広がり目的関数が大きくなる(第 2.2-19 表)。具現像 24

による例を第 2.2-53 図に示す。FOT9 (2018/7/25) の前後で仕上げ区間上端深度による圧力実績が、シミュレーションによる予測値よりも高くなる傾向が認められた。

第 2.2-19 表 具現像ごとの目的関数一覧

具現像の番号	目的関数 kPa			具現像の番号	目的関数 kPa		
	全期間	2018年7月25日以前	2018年7月25日以後		全期間	2018年7月25日以前	2018年7月25日以後
1	30.2	21.6	43.1	16	31.3	22.1	45.2
2	31.1	21.8	45.1	17	30.4	23.9	40.3
3	29.8	21.9	41.9	18	27.5	21.5	36.6
4	29.9	23.1	40.3	19	26.2	20.4	35.1
5	30.8	21.6	45	20	30.5	22.2	43.2
6	31.6	22	46.2	21	29.4	21.6	41.2
7	28.9	22.2	39.1	22	29.5	24.4	37.3
8	27.5	24.6	32	23	29	22.8	38.5
9	31.6	21.8	46.6	24	31.1	22.5	44.2
10	30	21.8	42.4	25	31.7	22.4	45.9
11	30.6	23.1	41.9	26	31.4	22.2	45.4
12	30.8	20.9	45.7	27	30	22.9	40.8
13	30.7	22.5	43	28	28.2	20.4	40.2
14	32.5	21.3	49.4	29	30.6	22.2	43.4
15	31	21.3	45.9	30	29.5	23.2	39.1



注) 具現像 24 による例。

第 2.2-53 図 IW-2 における圧入レートと仕上げ区間上端圧力の予実績比較

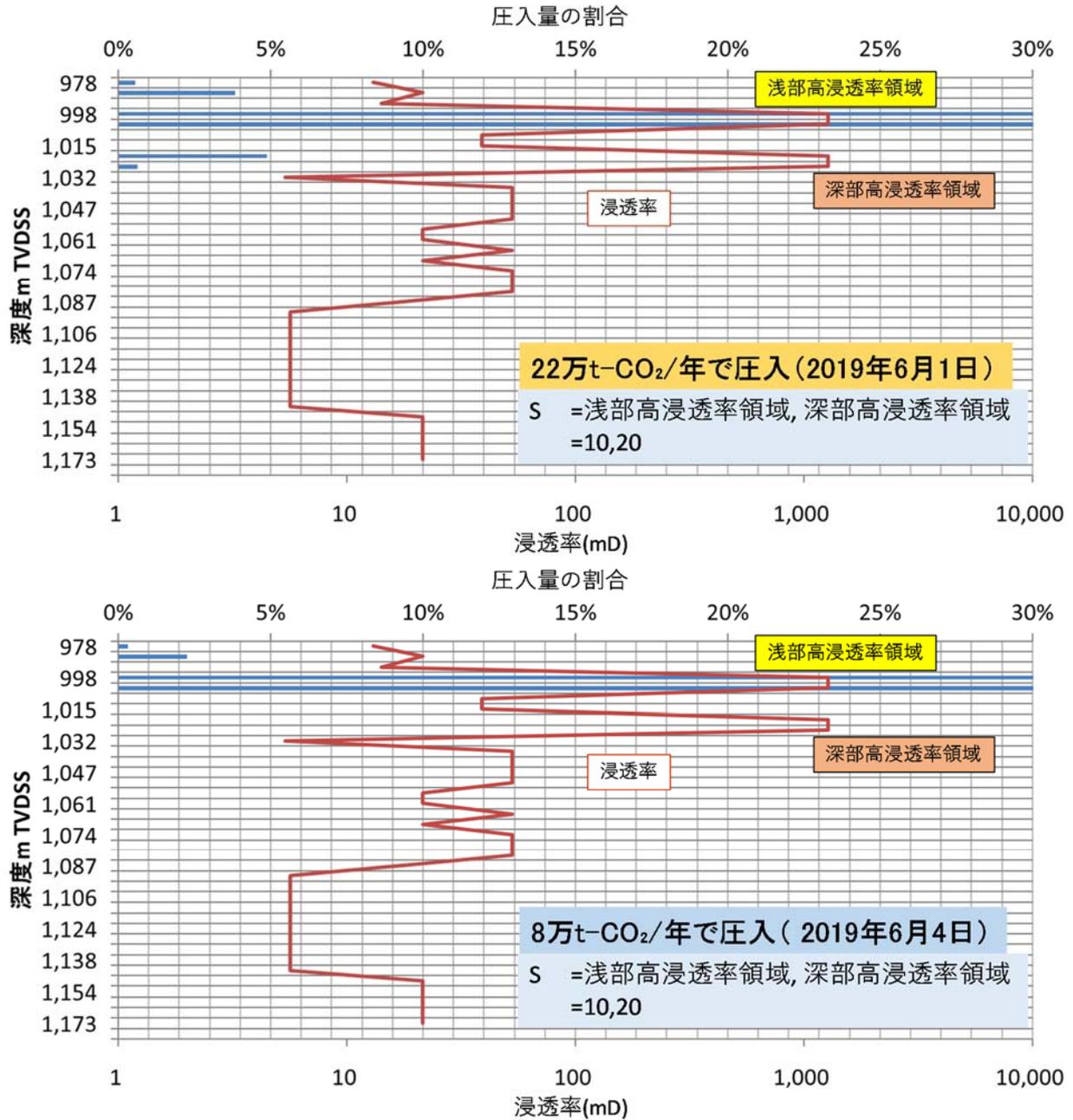
目的関数の悪化は、FOT9 後に何らかの原因によって、圧入により上昇する仕上げ区間上端深度における坑内圧力が上昇したことを意味する。明確な調査方法はないが、現状では、圧入井の仕上げ区間において出砂等の影響により、圧入性が阻害される傾向にあるものと仮定し、スキんファクターを設定することとした。スキんファクターは、式 (2.2-8) の流量と圧力差の関係式における、式 (2.2-9) に示す Well Injectivity Index (以下、「WI」と称する。) 中の S で示される。出砂などにより坑井近傍で圧入が阻害されるとプラスとなる。

$$Q = \sum WI \lambda (P_{bh} - P_o) \quad \text{式 (2.2-8)}$$

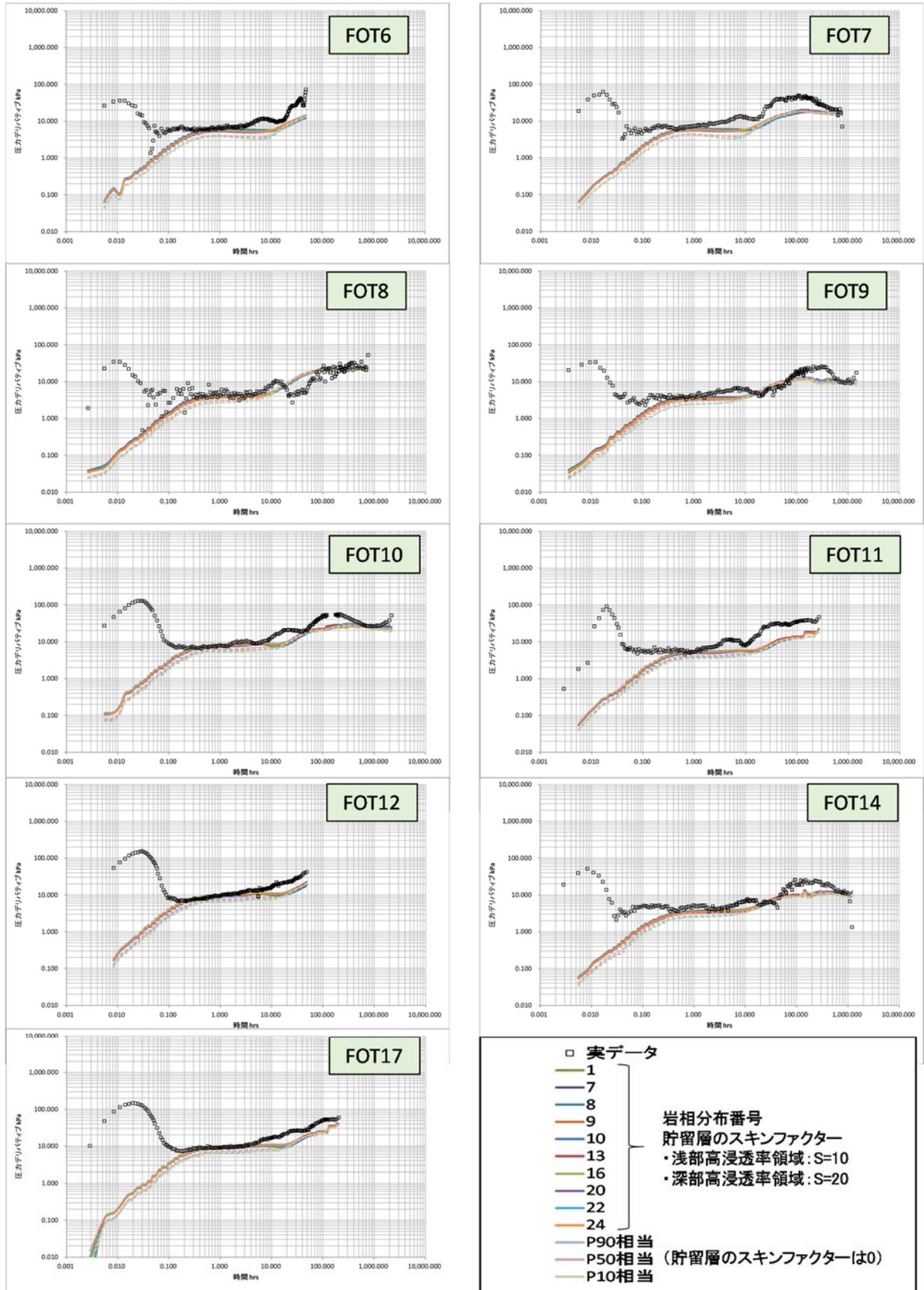
$$WI = \frac{2\pi kh}{\ln(r_e/r_w) + S} \quad \text{式 (2.2-9)}$$

注) Q: 流量, Pbh: 流動坑底圧力, Po: グリッドの圧力, WI: well injectivity index, k: 水平浸透率, h: グリッドの厚さ, λ: トータルモビリティ(ここでは CO₂ と水の相対浸透率をそれぞれの粘性で割り合計したもの), rw: 坑井半径, re: 有効半径(=0.37×(グリッド面積)^{0.5}), S: スキンファクター

圧入実績から、萌別層砂岩層上部に 2 層準に浸透性の良好な層準 (以下、「高浸透率領域」と称する。) があり、その層厚は合計 19m 程度 (第 2.2-16 表) であると考えられる。圧入井付近においては、第 2.2-54 図に示すような浸透率分布をモデルに与えた上で圧入井の仕上げ区間にスキんファクターモデルを構築している。浅部高浸透率領域および深部高浸透率領域のスキんファクターについて、幾つかの組み合わせで検討を行った結果、浅部高浸透率領域で 10、深部高浸透率領域で 20 の値をそれぞれ選択することで圧入時の状況を再現することができた。また、第 2.2-55 図に示すように FOT のデリバティブカーブの実績値を概ね再現すると考え、この設定を用いて、300,012 トンの圧入実績に即した長期挙動予測シミュレーションを実施した。



第 2.2-54 図 浅部高浸透率領域と深部高浸透率領域の圧入量の割合の再現



第 2.2-55 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

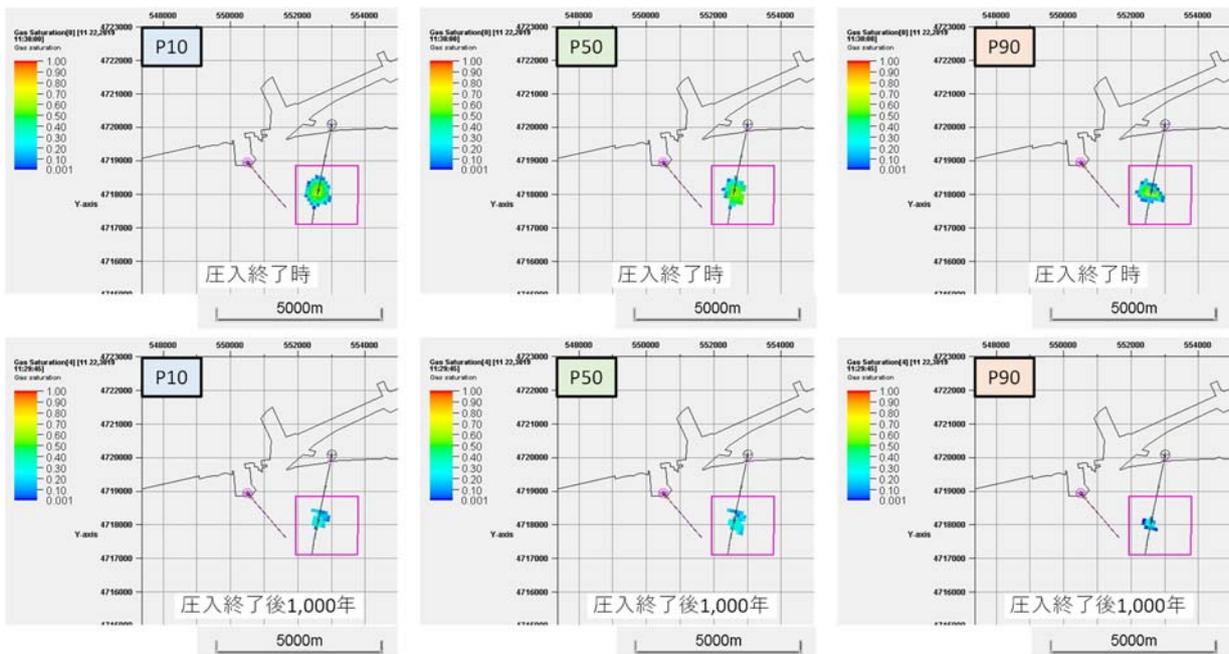
f. 圧入した CO₂ の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した CO₂ の平面的な分布範囲を推定した。

第 2.2-56 図に P10, P50, P90 の各モデル（具現像）における圧入終了時と圧入終了後 1,000 年時点における CO₂ 飽和度を示す。本検討においては、CO₂ 飽和度の分布範囲は圧入終了時が最大となり、圧入終了時に坑内圧力の低い P10 モデルによる分布が最大となる。したがって、P10 モデルにより予測された圧入終了時の CO₂ 分布範囲を、萌別層での最大となる CO₂ 飽和度分布範囲とした（第 2.2-57 図）。第 2.2-57 図に示す座標は、2019 年 3 月 28 日付けにて許可済みである、変更許可申請書に示した CO₂ 飽和度分布範囲を示す。2019 年度シミュレーションにより予測される CO₂ 飽和度分布範囲はその範囲に含まれるため、本申請においても同座標を CO₂ 飽和度分布範囲とする。

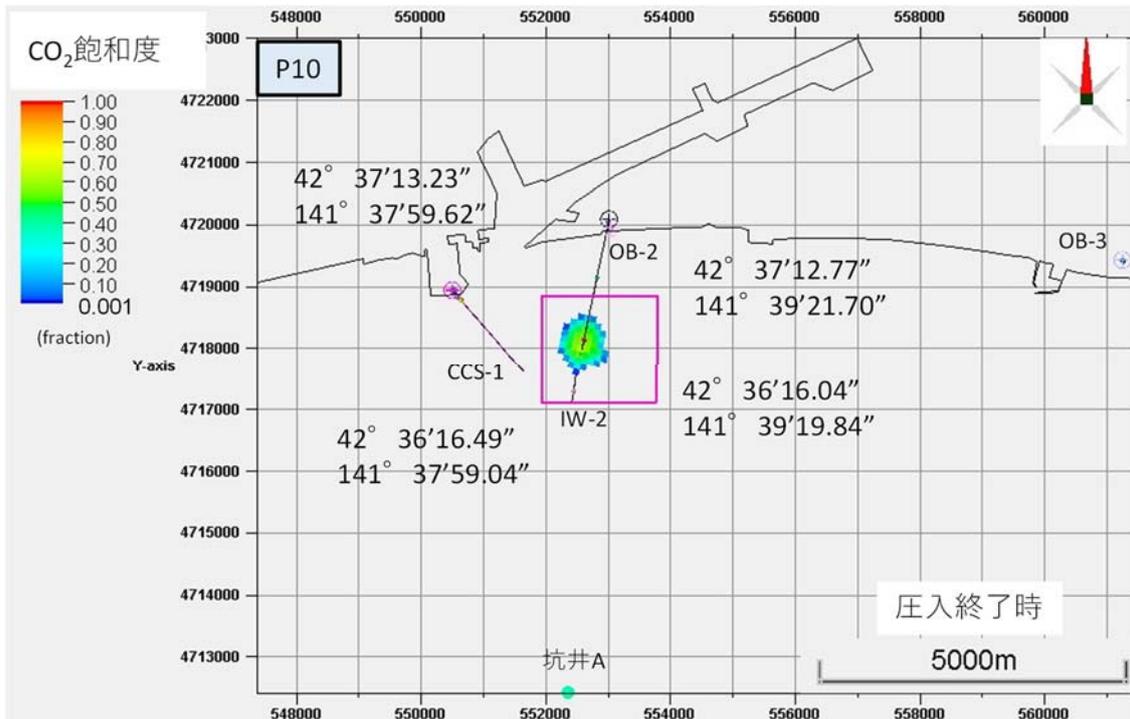
第 2.2-58 図に萌別層での P10, P50, P90 の各モデル（具現像）における圧入終了後 1,000 年時点における最大となる溶解 CO₂ 量分布範囲を示す。溶解 CO₂ 量は CO₂ 飽和度分布で示される CO₂ が地層水に溶解することにより生じるため、圧入停止からの経過時間が長い方がより広範囲に分布する傾向があるため、圧入終了後 1,000 年時点を考慮した。その結果、P10 モデルにより予測された圧入終了時の溶解 CO₂ 量分布範囲を、萌別層での最大となる溶解 CO₂ 量分布範囲とした（第 2.2-59 図）。第 2.2-59 図に示す座標は、2019 年 3 月 28 日付けにて許可済みである、変更許可申請書に示した溶解 CO₂ 量分布範囲を示す。2019 年度シミュレーションにより予測される溶解 CO₂ 量分布範囲はその範囲に含まれるため、本申請においても同座標を溶解 CO₂ 量分布範囲とする。

第 2.2-20 表に示す。萌別層における CO₂ の分布範囲をまとめる。CO₂ 飽和度よりもより広範囲におよぶ溶解 CO₂ 量の最大分布範囲を、CO₂ の分布範囲とする。



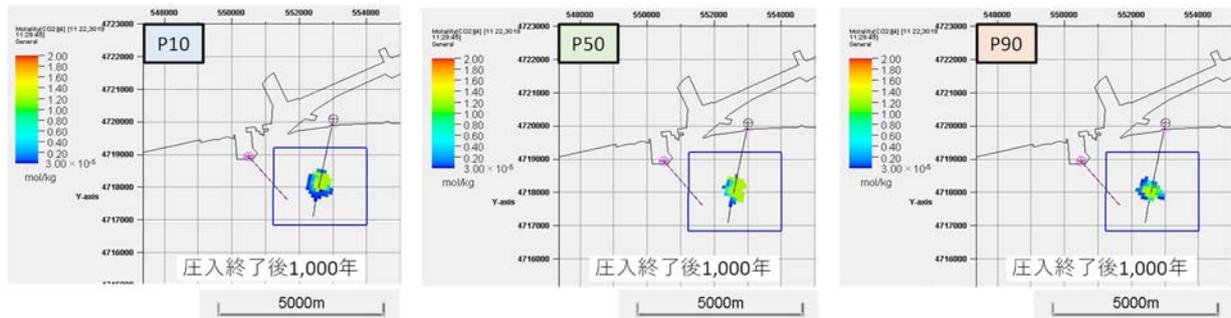
注：各図の赤枠は、本申請以前の申請で CO₂ 飽和度分布範囲とした範囲を示す。

第 2.2-56 図 萌別層砂岩層（P10, P50, P90 モデル）での CO₂ 分布範囲（CO₂ 飽和度）

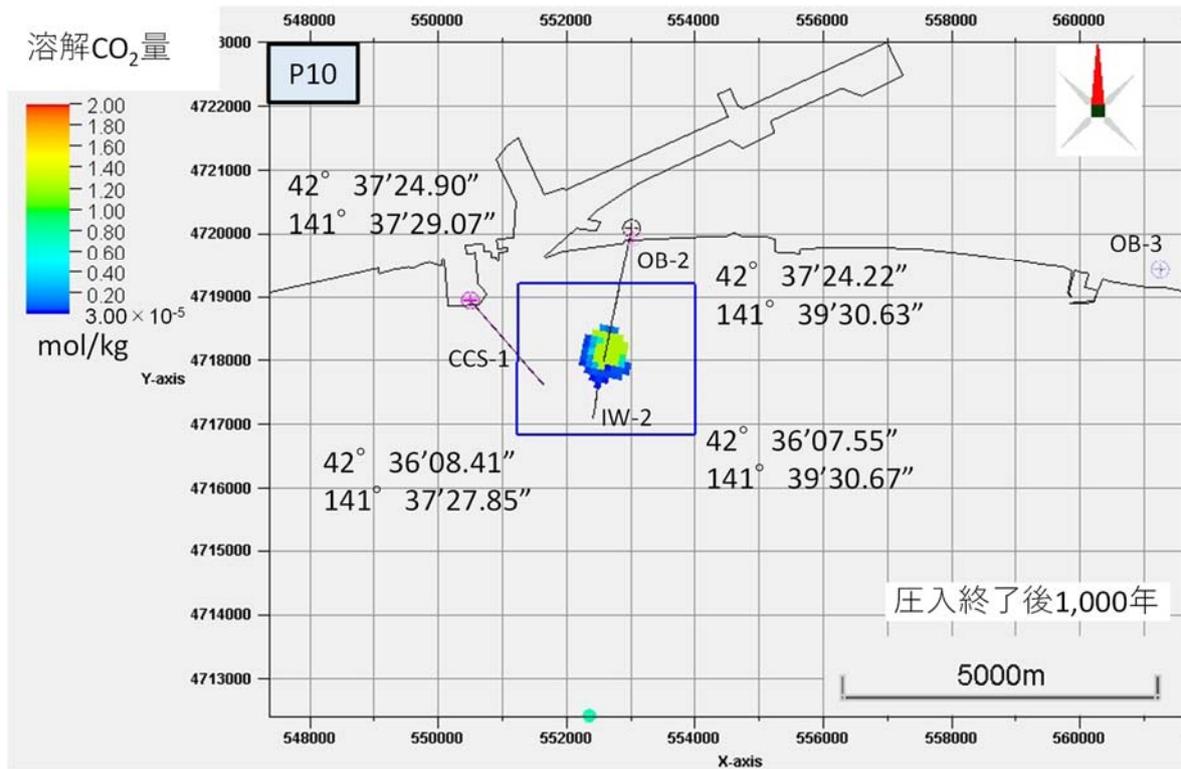


注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より圧入終了後1,000年後までに予想される最大のCO₂飽和度分布範囲を示す。

第 2.2-57 図 萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲 (P10 モデル CO₂ 飽和度分布)



第 2.2-58 図 萌別層砂岩層(P10, P50, P90 モデル) での CO₂ 分布範囲 (溶解 CO₂ 量分布)



第 2.2-59 図 萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲 (P10 モデル溶解 CO₂ 量分布)

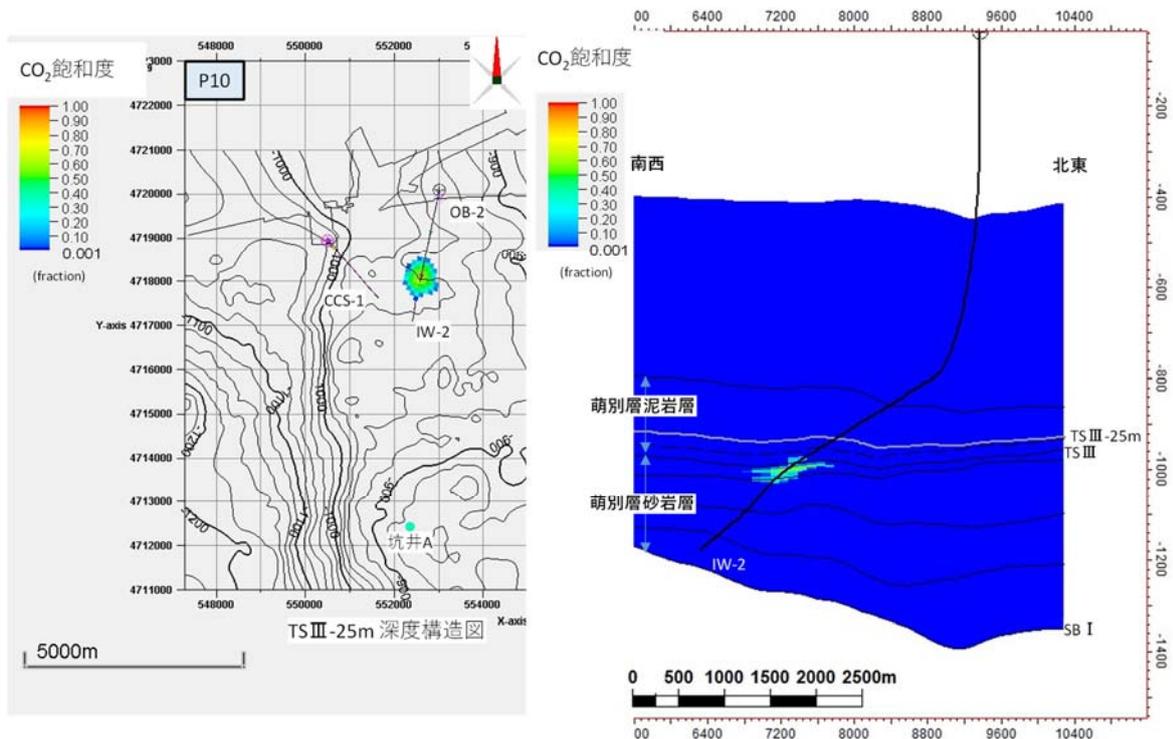
第 2.2-20 表 海底下廃棄した CO₂ の平面的な分布範囲 (萌別層砂岩層)

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	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85
CO ₂ 飽和度	42	37	13.23	42	36	16.04	141	39	21.70	141	37	59.04
溶解 CO ₂ 量	42	37	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85

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

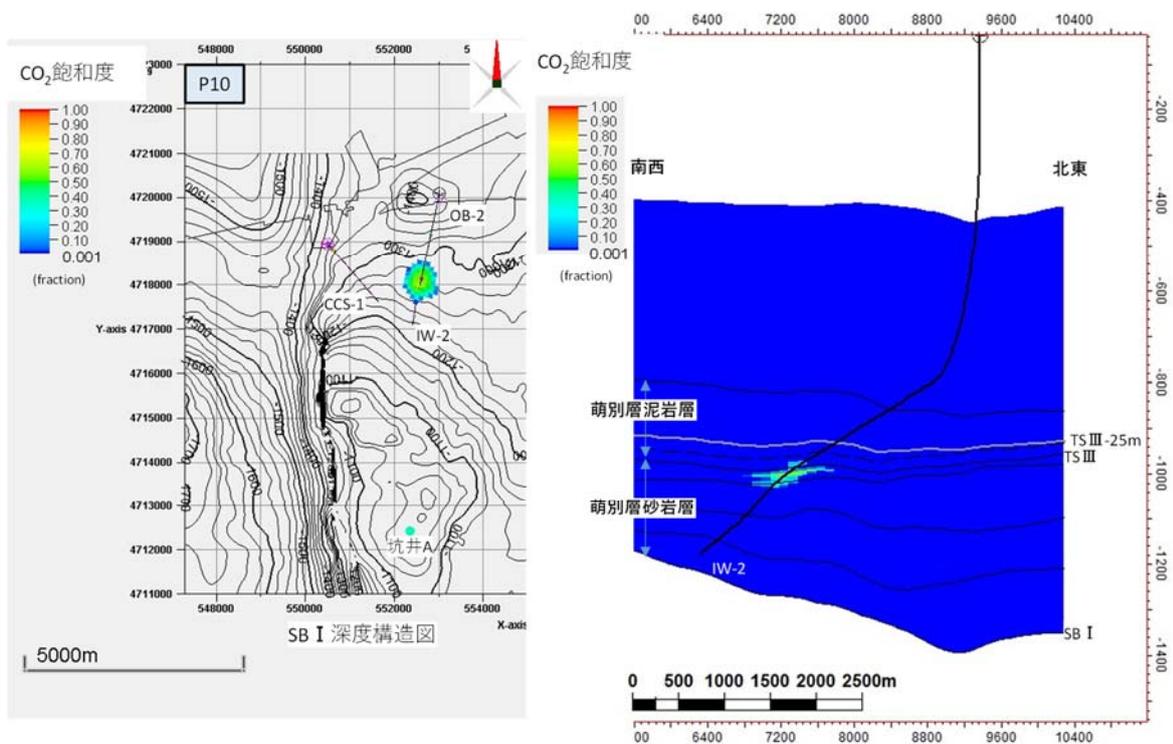
g. 圧入した CO₂ の垂直的な分布範囲

上記で検討した平面的な CO₂ の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影して、CO₂ の垂直的な分布範囲を推定した (第 2.2-60 図～第 2.2-63 図)。推定結果を、第 2.2-21 表に示す。



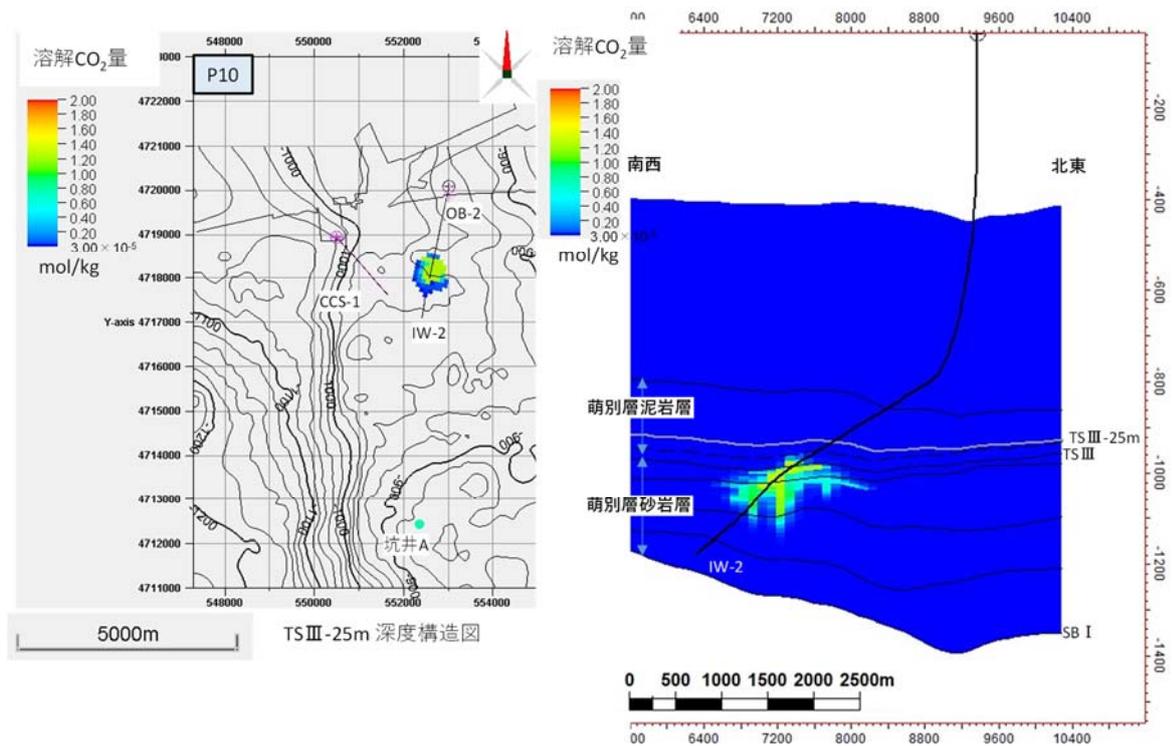
注:1. 断面図(右図)より,CO₂飽和度の上昇は,TSIIIよりも25mほど上位まで認められるため,TSIIIよりも25m浅い深度で構造図を作成し,CO₂分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時のCO₂分布状況を投影した。
 2. 最も浅い深度で,海面下950m程度まで分布するものと考えられる。

第 2. 2-60 図 萌別層砂岩層での CO₂ の分布範囲の上限 (CO₂ 飽和度)



注: 1. CO₂分布域(CO₂飽和度)を,萌別層砂岩層下限(SB I)構造図に投影した。
 2. CO₂分布(CO₂飽和度)が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時のCO₂分布状況(CO₂飽和度)を投影した。
 3. 海面下1,280m程度まで分布するものと考えられる。

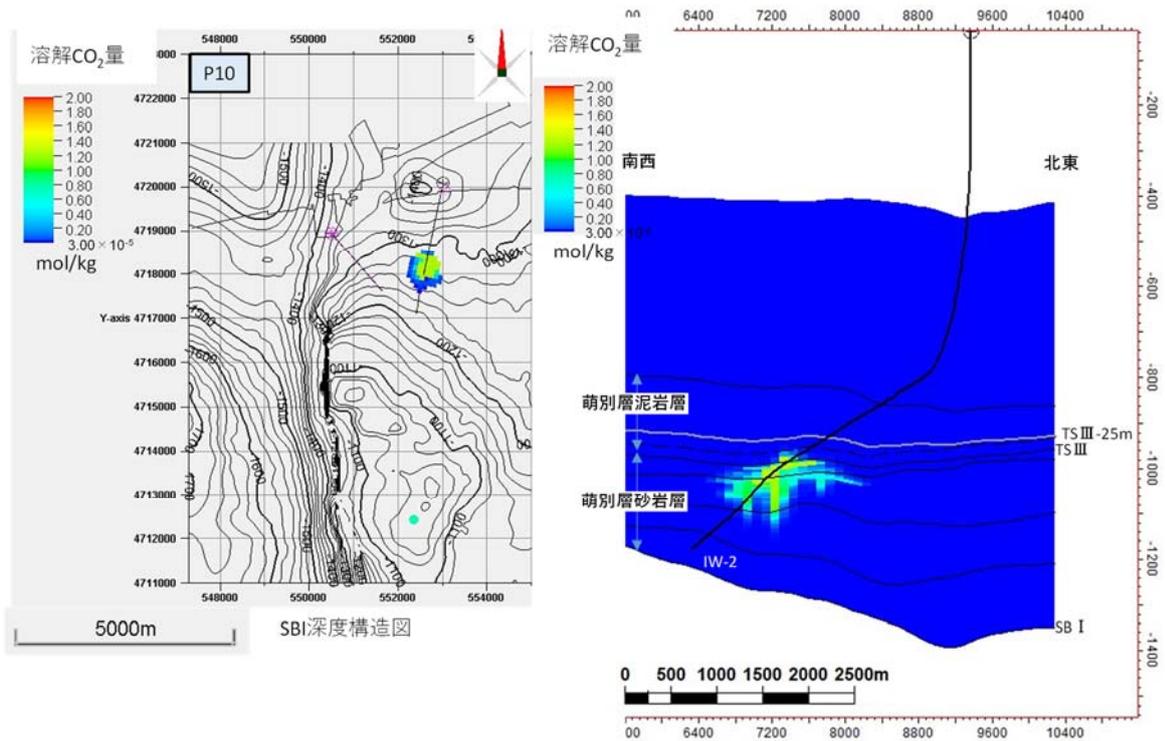
第 2. 2-61 図 萌別層砂岩層での CO₂ の分布範囲の下限 (CO₂ 飽和度)



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ため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950m程度まで分布するものと考えられる。

第 2.2-62 図 萌別層砂岩層でのCO₂の分布範囲の上限（溶解CO₂量）



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

第 2.2-63 図 萌別層砂岩層での CO₂ の分布範囲の下限（溶解 CO₂ 量）

第 2.2-21 表 海底下廃棄した CO₂ の垂直的分布範囲（萌別層砂岩層）

分布域	上限深度 (m)	下限深度 (m)
二酸化炭素	950	1,300
CO ₂ 飽和度	950	1,280
溶解 CO ₂ 量	950	1,300

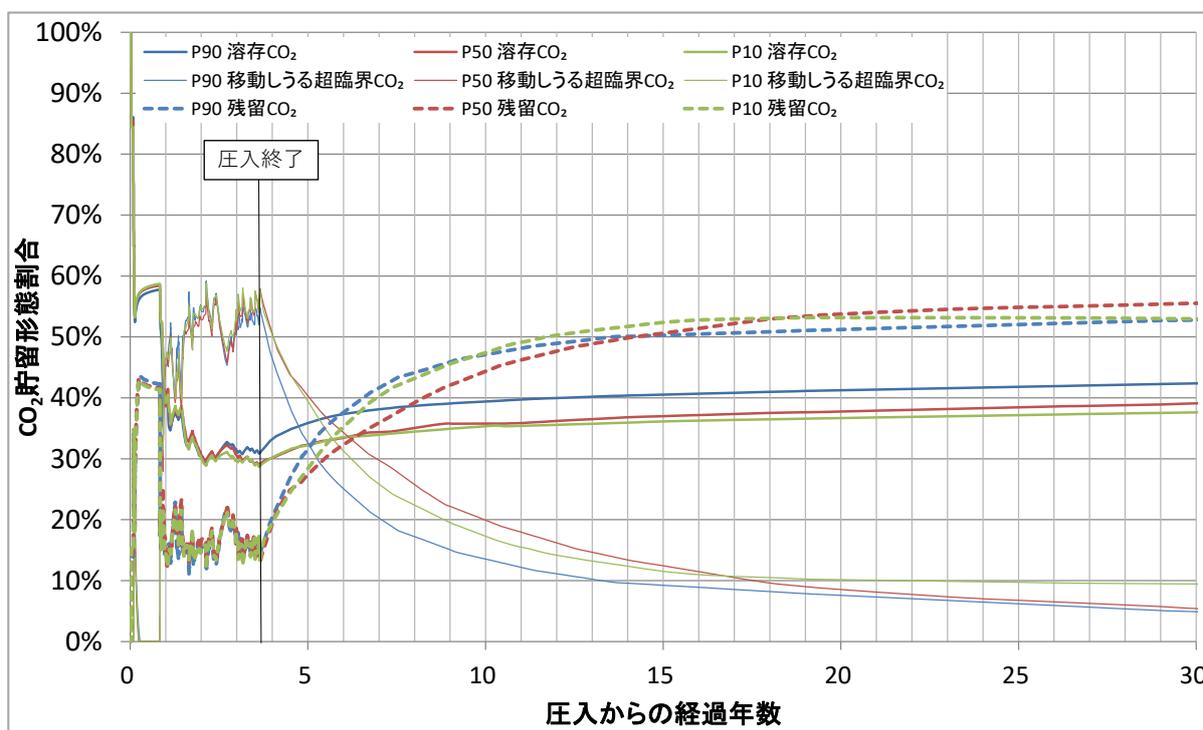
注：各モデルにおいて推定される CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の垂直的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

h. CO₂の貯留形態ごとの割合

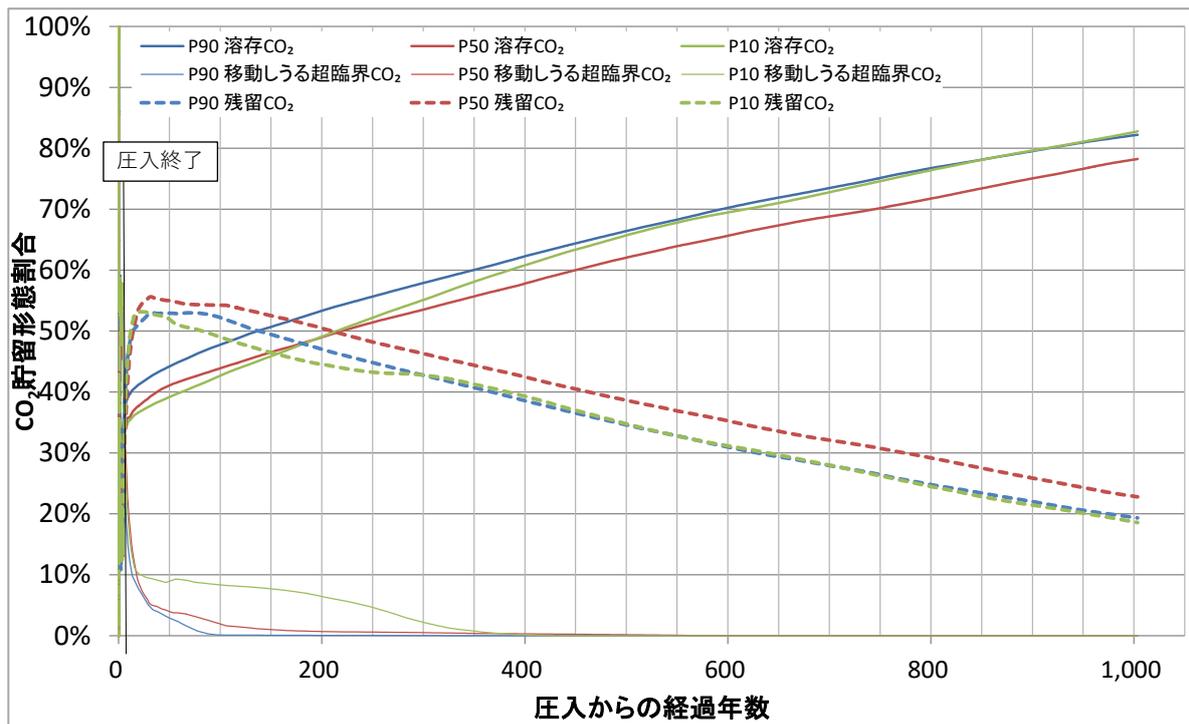
貯留 CO₂ の 3 つの貯留形態を移動しうる超臨界 CO₂、深部塩水層に溶解した溶存 CO₂ および孔隙に残留トラップされた残留 CO₂ と表現し、P10、P50、P90 モデルの貯留形態の割合の経時変化を、シミュレーションにより精査した（第 2.2-64 図および第 2.2-65 図）。P10、P50、P90 モデルのいずれもが類似した挙動を示す。

圧入停止後に、残留トラップされる CO₂ の割合が急速に増加し、溶存トラップの割合が急速に現状する。残留トラップは、孔隙に圧入された CO₂ が圧入停止後に周辺の深部塩水層に再置換される際に、ヒステリシスにより一部の CO₂ が置換されることなく残留する現象である。CO₂ の溶解量は CO₂ が移動する間は周辺の深部塩水層と触れることにより微増を続ける。圧入停止から 8 年後頃（圧入開始から 12 年後頃）までは、CO₂ が貯留層内の移動や周辺からの深部塩水層の流入で活発であると推定され、CO₂ 貯留割合の変化が急速に進行すると予測される（第 2.2-64 図）。

圧入停止後 100～400 年後にはいずれのモデルにおいても移動しうる超臨界 CO₂ はほぼ消滅するものと予測される。残留トラップされていた超臨界 CO₂ を含め、徐々に CO₂ の深部塩水層への溶解が進み、溶存 CO₂ の割合が増加し、圧入開始 200 年後頃には残留トラップの割合を上回る。圧入開始 1,000 年後頃には圧入した CO₂ の 80%程度は溶解するものと予測される。



第 2.2-64 図 CO₂貯留形態割合の変化（圧入開始から 30 年後まで）



第 2.2-65 図 CO₂ 貯留形態割合の変化

2.3 鉱業権の設定または出願の状況について

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

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

萌別層砂岩層については、特に鉱物資源の胚胎は知られていない。

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。

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

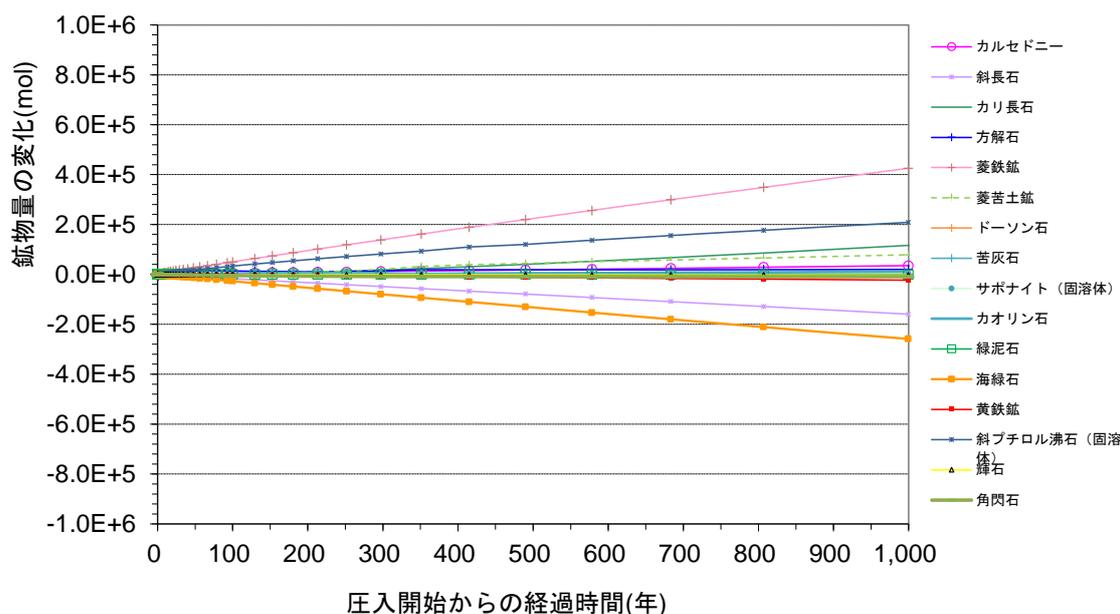
滝ノ上層 T1 部層 地層水組成	
貯留層温度 (°C)	90
pH	6.72
組成	濃度 (mg/kg)
Cl ⁻	20,775.00
SO ₄ ²⁻	63.40
HCO ₃ ⁻	7.50
HS ⁻	4.79×10 ⁻⁴
SiO ₂ (aq)	83.00
Al ³⁺	1.43×10 ⁻³
Ca ²⁺	8,321.00
Mg ²⁺	1.56
Fe ²⁺	9.25
K ⁺	68.00
Na ⁺	3,899.00
NH ₄ ⁺	16.60
備考	黄鉄鉱, カルセドニー, 東沸石, カオリナイト, 方解石, サポナイト (Fe, Ca), イライト (Al) と化学平衡になるように地層水組成を熱力学的に再構成 (Thermoddem を使用)。

[1] Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey : <http://thermoddem.brgm.fr/>, 2020/7/25 アクセス)

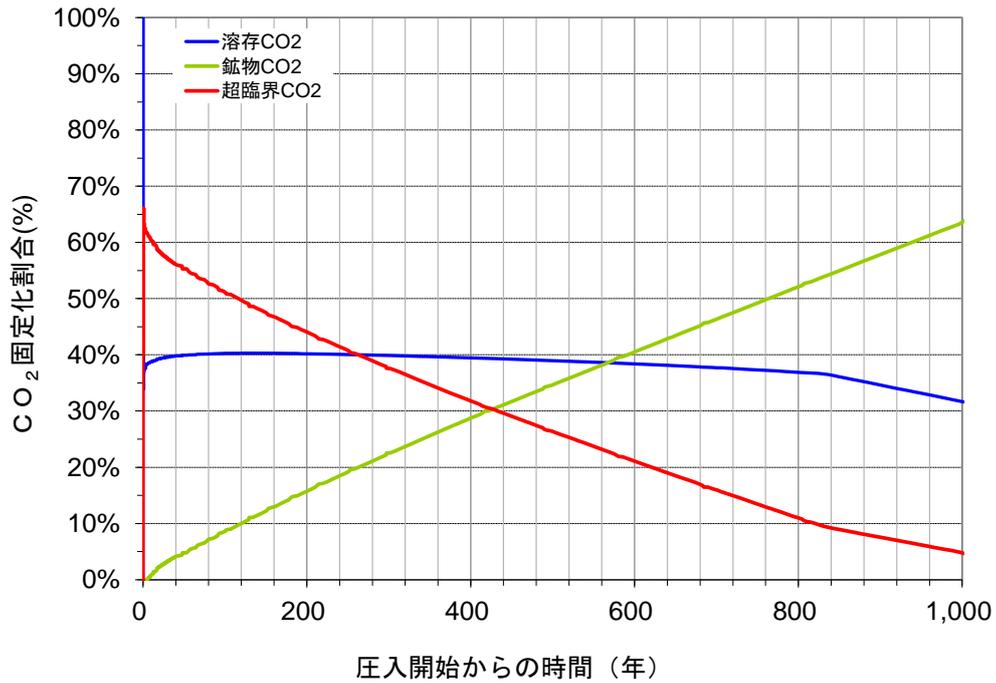
第 3. 1-2 表 地化学反応シミュレーションで使した滝ノ上層 T1 部層の鉱物組成

group	和名	Name	鉱物組成 vol%
シリカ鉱物	カルセドニー	chalcedony	11.16
長石	斜長石	albite/anorthite	35.29
	カリ長石	K-feldspar	2.24
炭酸塩鉱物	方解石	calcite	1.55
	菱鉄鉱	siderite	0.00
	菱苦土鉱	magnesite	0.00
	ドーソン石	dawsonite	0.00
	苦灰石	dolomite	0.00
粘土鉱物	サポナイト(固溶体)	SS-saponite	17.67
	カオリン石	kaolinite	0.00
	緑泥石	clinocllore/daphnite	0.09
	海緑石	glauconite	16.39
硫化鉱物	黄鉄鉱	pyrite	0.17
沸石	斜プチロル沸石(固溶体)	SS-clinoptilolite	14.26
輝石	輝石	diopside/hedenbergite	1.09
角閃石	角閃石	tremolite/actinolite	0.09

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。滝ノ上層圧入井(IW-1)からは、98.2 トンの CO₂ を地表から地下に圧入したが、圧入井の管内容量を考慮すると実際は 35 トン程度の CO₂ が貯留層に圧入されたものと考えられることから、シミュレーションでは、35 トンの CO₂ を貯留層に圧入する想定とした。なお、シミュレーションは 1D で実施した。



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 圧入開始直後から、カルセドニー、斜プチロル沸石、カリ長石、苦灰石などが徐々に析出し、海緑石、斜長石、黄鉄鉱など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、1,000 年後には圧入した CO₂ の 60%以上が鉱物として固定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ング試料の X 線回折分析結果

深 度 (m)	地 層 名		岩 相 (肉眼記載)	同 定 さ れ た 鉱 物															
	累層	部層		スファライト	石英	緑泥石	斜方沸石	斜方沸石	斜方沸石	斜方沸石	石英	斜長石	斜長石	方解石	方解石	黄鉄鉱	赤鉄鉱	角閃石	
900	萌別層泥岩		砂質シルト岩	×	△	△						◎	○		×		△		△
950			砂質シルト岩	×	○	○						○	○	△	×		△		△
1000			砂質シルト岩	×	○	○						◎	○		×		△		△
1050			砂質シルト岩	×	○	○						◎	○				△		△
1100			砂質シルト岩	×	○	○						◎	○	△		×		△	△
1150			砂質シルト岩	×	△	△	△					◎	○	○		×		△	△
1200	萌別層砂岩		砂質シルト岩	×	○	○	△					◎	○	△			△		△
1250			砂質シルト岩	×	○	○						◎	○				△		△
1300	荷葉層		砂質シルト岩	×	○	○					◎	○				△		△	
1350	荷葉層		砂質シルト岩	×	○	○					◎	○	△			△		△	
1400	荷葉層		砂質シルト岩	×	△	△					◎	◎		×		△		△	
1450	荷葉層		砂質シルト岩	×	○	○					○	○	△	×	×		○	△	
1500	荷葉層		砂質シルト岩	×	○	○	△				◎	○		×	×		△	△	
1550	荷葉層		砂質シルト岩	×	○	△	△				◎	○		×	×	△		△	
1580	荷葉層		砂質シルト岩	×	○	△	○				○	○	△	×		△		△	
1650	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○					○	○				△		△	
1700	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			×	○	○				△		△	
1750	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			×	○	○		×		△		△	
1800	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			△	◎	○	×	△		△		△	
1850	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○	△			△		△	
1900	平取+軽舞層		泥岩	×	○	△	○			△	○	○				△		△	
1950	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○				△		△	
2000	平取+軽舞層		泥岩		○	○	△			△	◎	○				△			
2050	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○				△		×	
2100	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			△	△	○		×		△		×	
2150	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○				△		×	
2200	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	◎	○				△		×	
2250	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			×	◎	○				△		×	
2300	振老層		泥岩	×	○	○	△				◎	○				△			
2350			泥岩		○	○	△				◎	○				△			
2400			泥岩	×	○	○					◎	○		×		△			
2450			凝灰質泥岩	×	○	○					◎	○		×		△			
2500			泥岩	×	○	○					◎	○		×		△			
2550			凝灰質泥岩	×	○	○					◎	○		×	×	△			
2600			泥岩	×	○	○					◎	○		×		△			
2650			凝灰質泥岩	×	○	○					◎	○		×	×	△			
2700			泥岩	×	○	○					◎	○		×		△			
2750			泥岩	×	○	○					◎	○		×		△			
2800			泥岩	×	△	○	△				◎	○		×		○			
2900		滝ノ上層	T1	火山礫凝灰岩	×	△				◎		△	○			×			
2950	滝ノ上層	T1	火山礫凝灰岩	×	△				◎		△	○							
3000	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	×	△		○		◎		△	○							
3100	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	△		○				○	◎		×					
3150	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	×				△		○	◎		×			△		
3250	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	△			◎			△	◎		×					
3300	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	△		○			○	△	◎		×		△		×	
3400	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△					○		○	◎		×			△		
3450	滝ノ上層	T1	凝灰岩	×	×		◎			○	△	○		×					
3500	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△					◎		○	◎		×					
3550	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△					△		○	◎		×			△		
3600	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	○							○	◎		×			○		
3650	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	○							○	◎		×					
3700	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△		○			○		○	◎		×					

◎：多い ○：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。流動シミュレーションの結果、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。

なお、流動シミュレーションのモデルは、滝ノ上層で採取したコアの孔隙率-浸透率の関係をベースとし、実際の CO₂ 圧入実績を考慮しており、遮蔽層の浸透率とは異なった値を使用している。貯留層の孔隙率の平均は 13.4%、その孔隙率に対応する浸透率は 2.97×10⁻³mD を与え、遮蔽層には孔隙率は 19%、浸透率は 4.3×10⁻⁵mD を与えた。シミュレーションでは、圧入した CO₂ は、溶解 CO₂ を含め遮蔽層への浸透は認められていない。貯留層内でさえ垂直方向への CO₂ の移動は数 m 規模であり、遮蔽層の浸透率を勘案すればシミュレーション結果は妥当であると判断している（「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」第 4.5-14 図参照）。

(2) 萌別層砂岩層

萌別層砂岩層の地層水は、苫小牧 OB-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 OB-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。

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

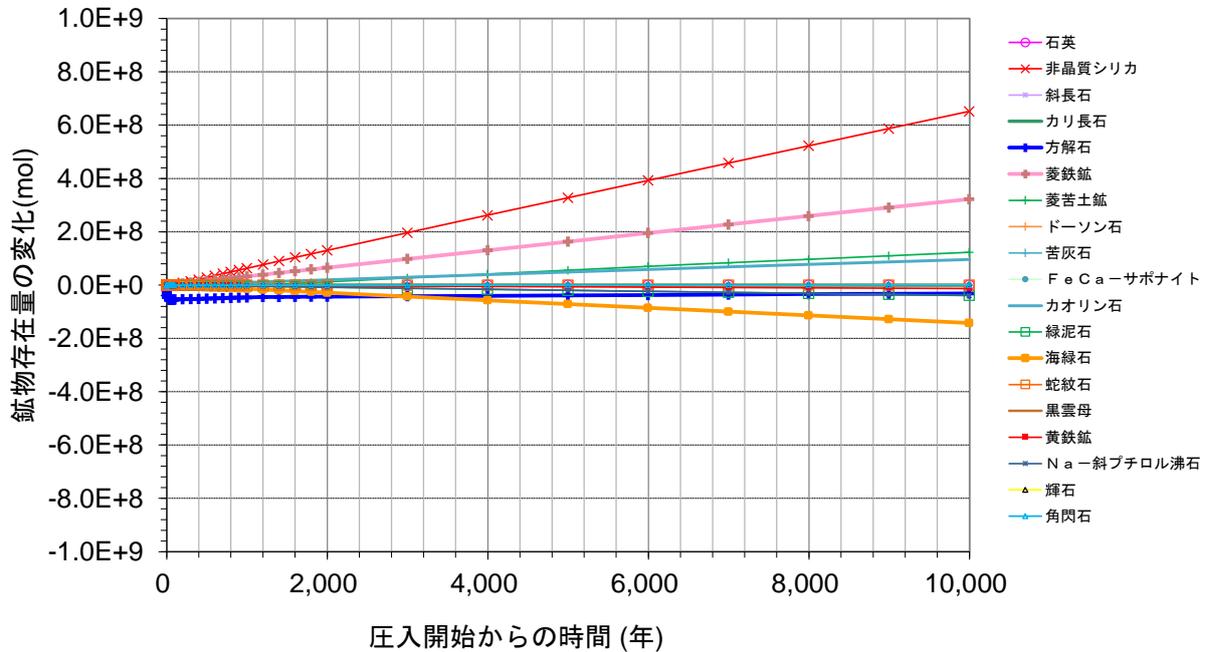
	萌別層砂岩層 地層水組成
貯留層温度 (°C)	40
pH	7.11
組成	濃度 (mg/kg)
Cl ⁻	1,780.00
SO ₄ ²⁻	9.20
HCO ₃ ⁻	809.00
HS ⁻	1.29×10 ⁻⁴
SiO ₂ (aq)	168.00
Al ³⁺	4.01×10 ⁻⁵
Ca ²⁺	30.10
Mg ²⁺	4.94
Fe ²⁺	0.44
K ⁺	26.70
Na ⁺	1,370.00
NH ₄ ⁺	2.70
備考	黄鉄鉱，非晶質シリカ，クリノプロチロライト (Na)，カオリナイト，菱鉄鉱，方解石，サポナイト (Fe, Ca)，菱苦土石，イライト (Al) と化学平衡になるように地層水組成を熱力学的に再構成 (Thermoddem を使用)。

^[1] Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey : <http://thermoddem.brgm.fr/>, 2020/7/25 アクセス)

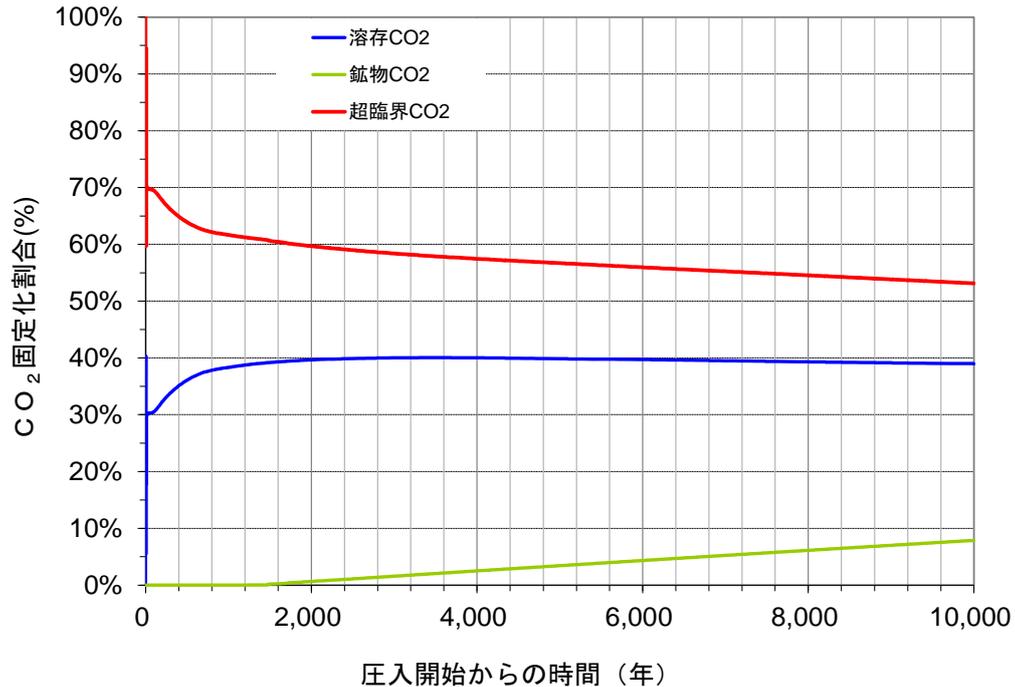
第 3.1-5 表 地化学反応シミュレーションで使用した萌別層砂岩層の鉱物組成

group	和名	Name	鉱物組成 vol%
シリカ鉱物	石英	quartz	36.11
	非晶質シリカ	amorphous silica	0.00
長石	斜長石	albite/anorthite	25.84
	カリ長石	K-feldspar	2.36
炭酸塩鉱物	方解石	calcite	0.10
	菱鉄鉱	siderite	0.00
	菱苦土鉱	magnesite	0.00
	ドーソン石	dawsonite	0.00
	苦灰石	dolomite	0.00
粘土鉱物	FeNa-サポナイト	FeNa-saponite	0.09
	カオリン石	kaolinite	6.34
	緑泥石	clinochlore/daphnite	0.95
	海緑石	glauconite	12.42
	黒雲母	Siderophyllite/Eastonite	9.51
硫化鉱物	黄鉄鉱	pyrite	0.27
沸石	Na-斜プチロル沸石	Na-clinoptilolite	2.74
輝石	輝石	diopside/hedenbergite	0.33
角閃石	角閃石	tremolite/actinolite	0.69

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 圧入開始直後から、非晶質シリカ、菱鉄鉱、菱苦土鉱、カオリナイトが析出し、海緑石や方解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、2,000 年後には圧入した CO₂ の数%が鉱物として固定化される。その後徐々に鉱物固定化は増加し、10,000 年後には圧入した CO₂ の 8%程度が鉱物として固定化されるものと推定された。なお、シミュレーションは 1D にて、圧入実績に即した 30 万トンの CO₂ を圧入する想定とした。

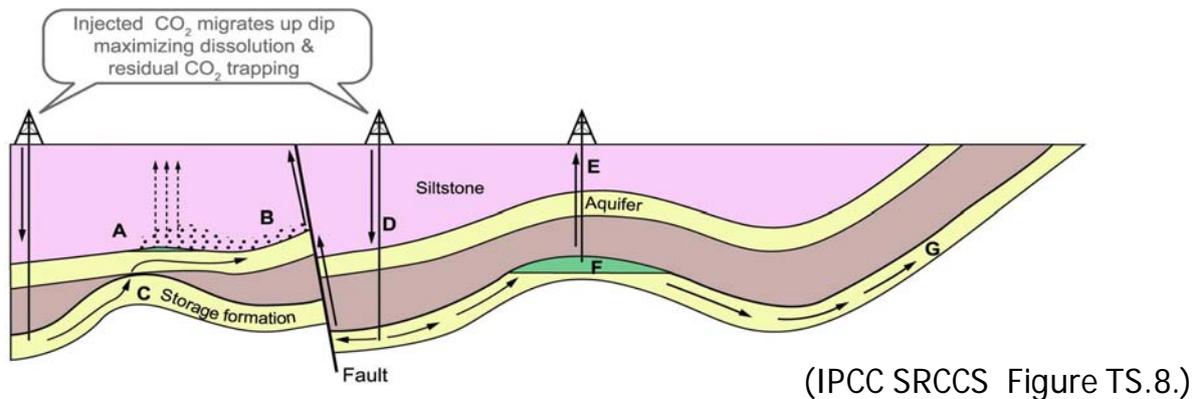
萌別層砂岩および萌別層泥岩の堆積物の主な供給源は共通していると考えられ、鉱物組成も類似している（第 3.1-3 表）。主に溶解する鉱物と考えている海緑石や方解石の存在量も同程度であることから、遮蔽層と貯留層の CO₂ への化学的な反応は類似したものになるが、流動シミュレーションの結果、遮蔽層には CO₂ がほとんど浸透できないと考えられるため、化学的反応は遮蔽層と CO₂ の接触部分でのみ生じることとなる。

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

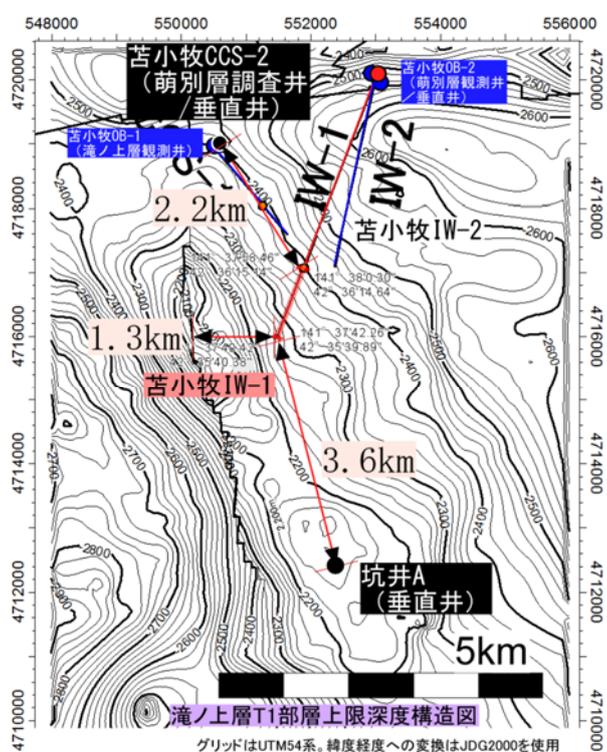
^[1] Benson, S., Cook, P., Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H.B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., Gale, J., von Goerne, G., Heidug, W., Holloway, S., Kamal, R., Keith, D., Lloyd, P., Rocha, P., Senior, B., Thomson, J., Torp, T., Wildenborg, T., Wilson, M., Zarlenga, F., and Zhou, D. 2005. Underground 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)

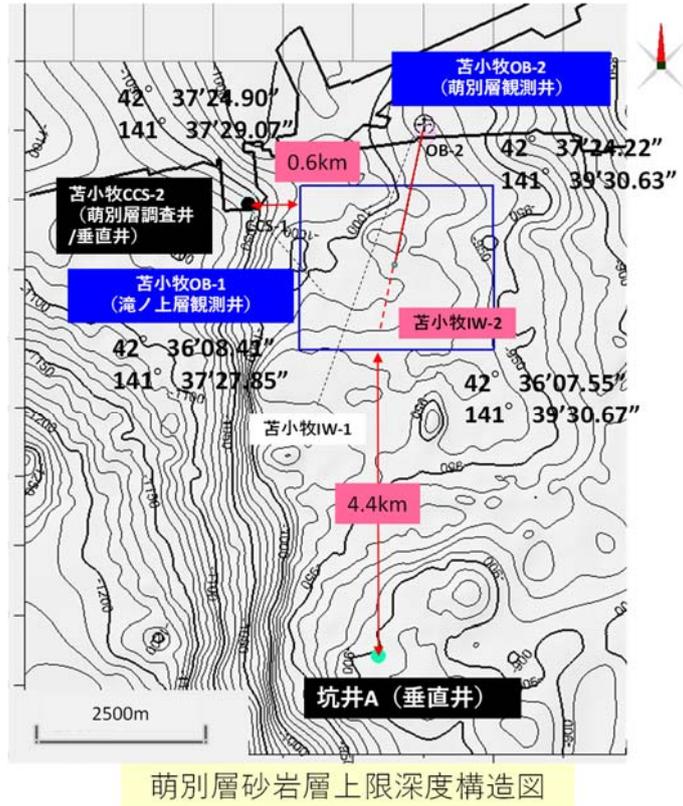
ている。

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、苦小牧 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、廃坑井である苦小牧 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, 4.4km 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ヨルド圧力（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仕様にするにより、基本的には、CO₂の漏出は生じないものとする。

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、2018年度ならびに2019年度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 部層中での空間的な広がり

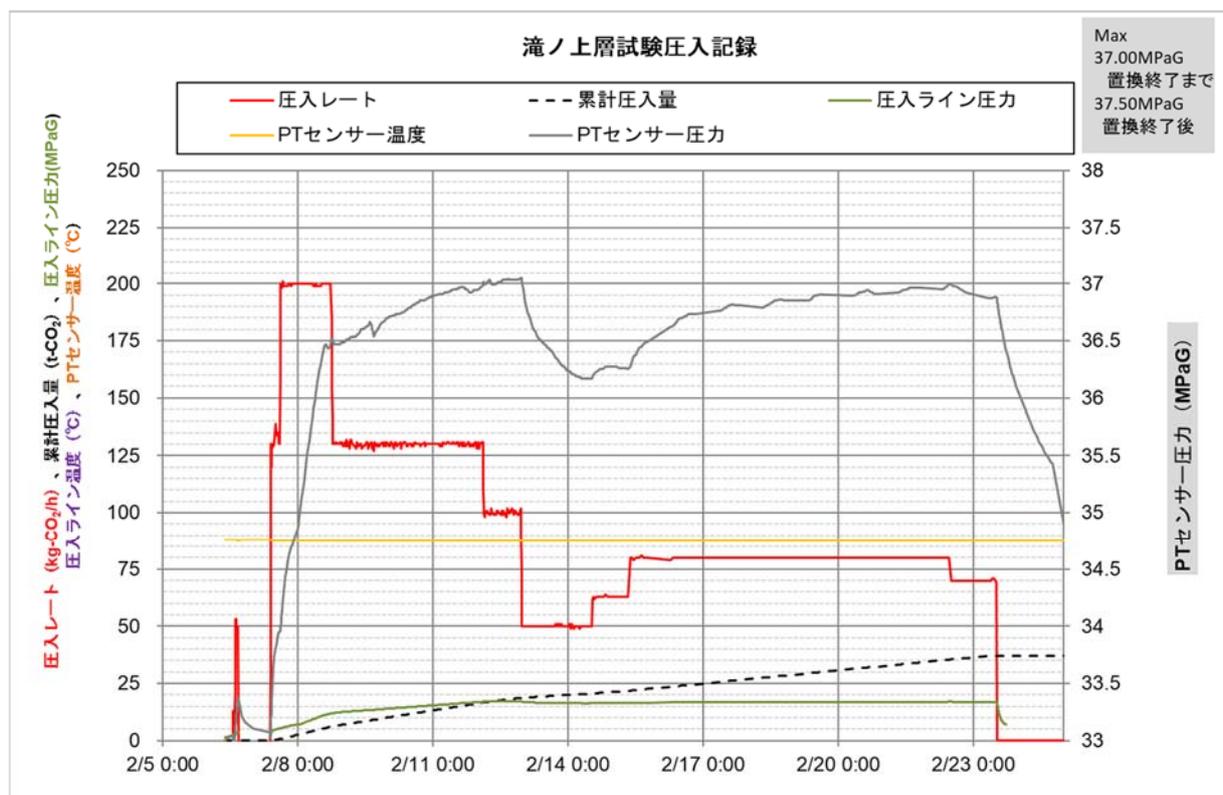
① 検討に使用した地質モデル

既存の地質モデル基準とし、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。

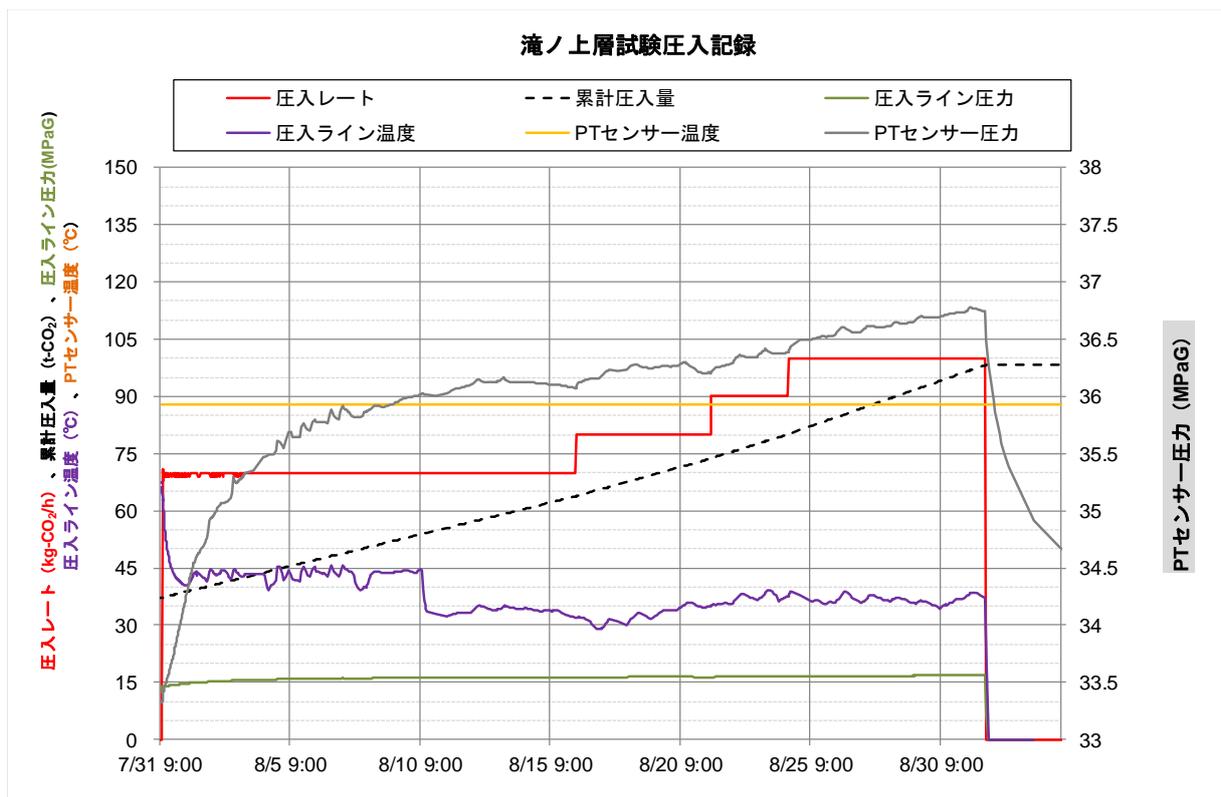
ア) 圧入実績

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4.1-1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、9月1日時点での累計圧入量は98t-CO₂となった(第4.1-2図)。

なお、圧入レートに対する圧入圧力および圧入温度は当初の想定内にあり、生産実績や圧入停止後のデータをもとに更新を行った最新のモデルを適用することにより今後の挙動予測は可能である。



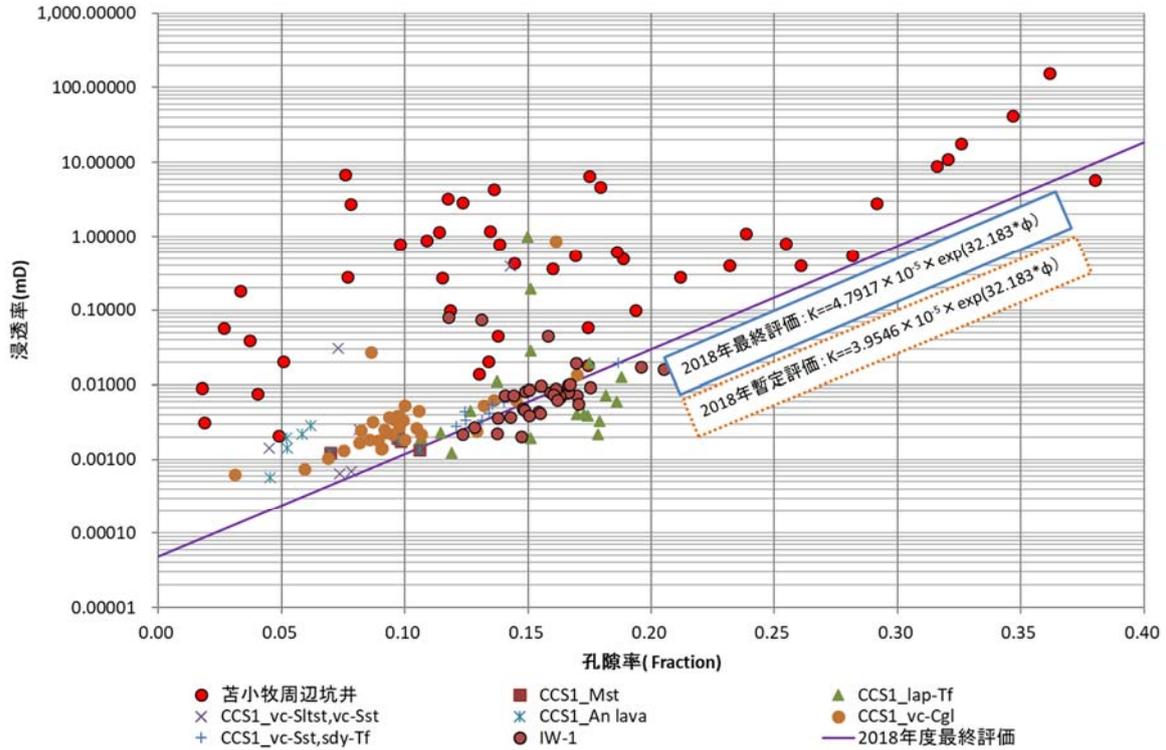
第 4.1-1 図 滝ノ上層試験圧入記録(2018年2月)



第 4.1-2 図 滝ノ上層試験圧入記録 (2018 年 7 月～9 月)

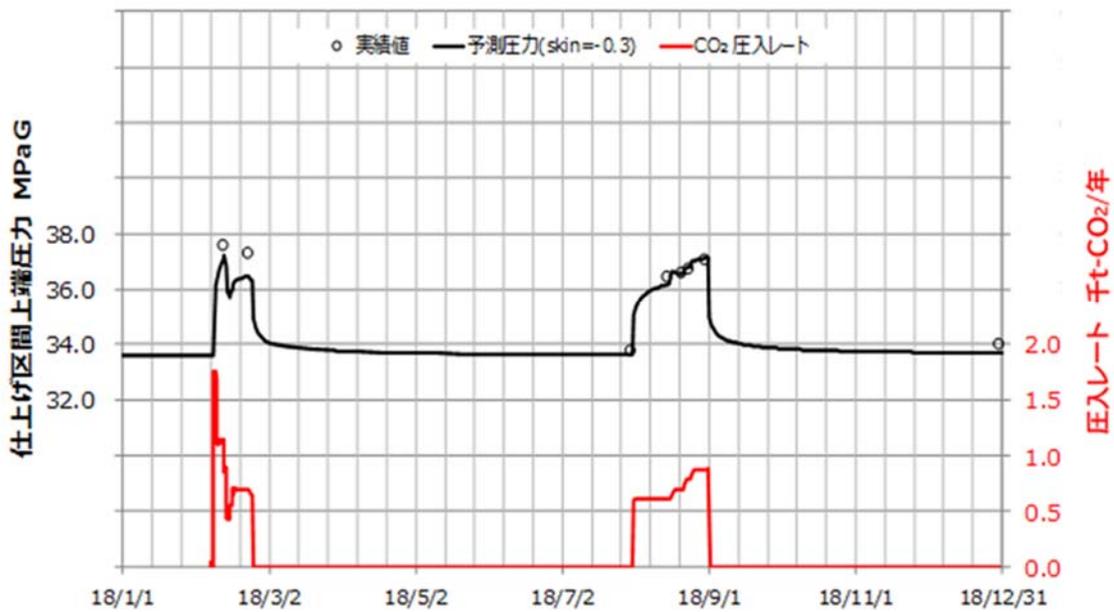
イ) CO₂ 圧入時の挙動とパラメータの調整

CO₂ 挙動予測シミュレーションは圧入実績に即した、2018 年 2 月および 2018 年 7 月～9 月に累計 98 トンの CO₂ を圧入について実施した。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、フォールオフの解析結果をもとに地質モデルの孔隙率と浸透率の相関式を修正し、最終的に浸透率を暫定値の 1.2 倍程度とした（第 4.1-3 図）。その結果、モデルで想定される坑底圧力は 2018 年 7 月以降の圧入実績とほぼ一致するまで改善した（第 4.1-4 図）。



注：1. 地質モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「浸透率=0.000047917×e^{32.182}×孔隙率」を用いた。
 2. CCS1: 苦小牧 CCS-1(現苦小牧 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: 苦小牧 IW-1

第 4.1-3 図 滝ノ上層 浸透率調整 (2018 年度シミュレーション)

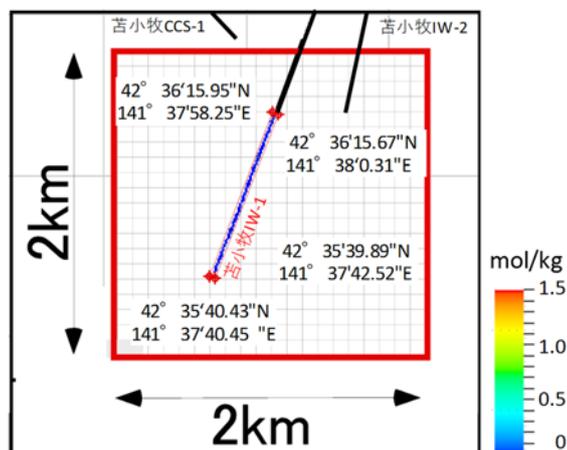


注) シミュレーションによる推定される圧力値と実績値の乖離について目的関数(Objective function)を用いて検討し, SkinFactor=-0.3 とした。

第 4.1-4 図 滝ノ上層 CO₂挙動予測 (2018 年度シミュレーション)

② 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 4.1-5 図）。



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溶解 CO₂ 量の分布を、階調をつけて色表示した。CO₂圧入量が少ないため、CO₂飽和度分布を示すことができない。
 3. 図中の座標は、シミュレーションにより予想される溶解 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。

第 4.1-5 図 CO₂の平面的な分布範囲

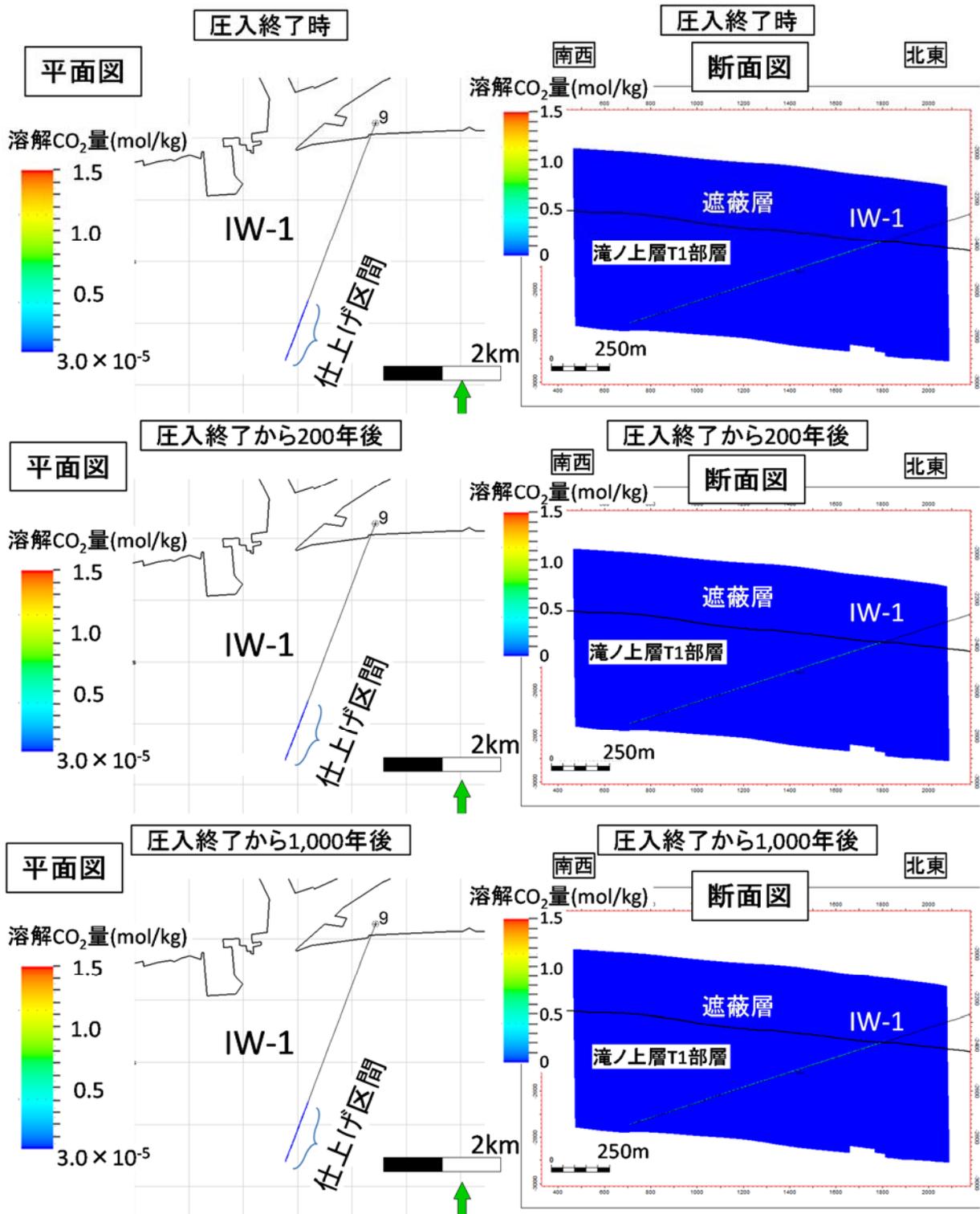
予想される CO₂ 飽和度の分布域は溶解 CO₂ 量の分布域に含まれるため、溶解 CO₂ 量の分布域を圧入した CO₂ の分布範囲とした。

第 4.1-1 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、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。圧入した CO₂ が地層水に溶解して生じる溶解 CO₂ の分布範囲は圧入井の極近傍に限定される。



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，CO₂圧入時の圧力挙動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

③ CO₂の垂直的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの溶解 CO₂ 量の垂直的な分布範囲は、第 4.1-6 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 4.1-2 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。

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）

GL = 9.1m	掘削深度 (mMD)	垂直深度 (mVD)	レベル (mbmsl)	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 ₂ 上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
CO ₂ 下限分布深度	—	—	2,769	坑底+25m
溶解 CO ₂ 量上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
溶解 CO ₂ 量下限分布深度	—	—	2,769	坑底+25m

注：CO₂の圧入量が少なすぎるため、圧入した CO₂は圧入後直ちに溶解するため、CO₂飽和度の分布範囲は示すことができない。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、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。

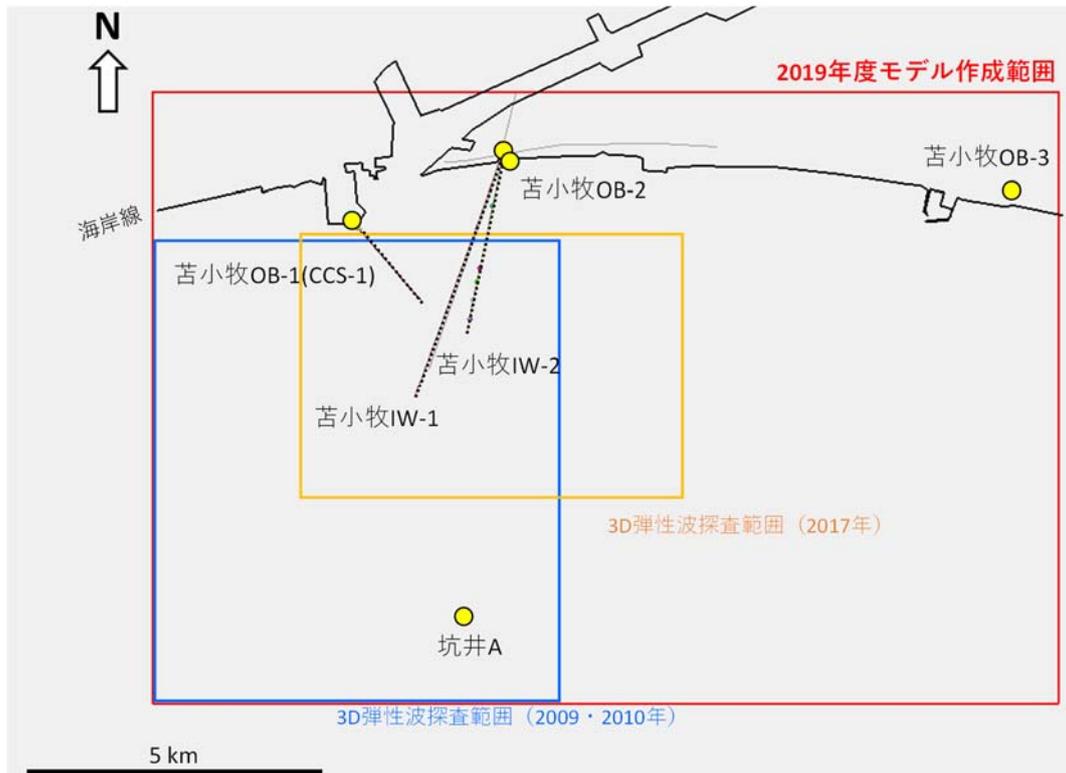
(2) 萌別層砂岩層中での空間的広がり

① 地質モデル

ア) 2019 年度地質モデルの作成

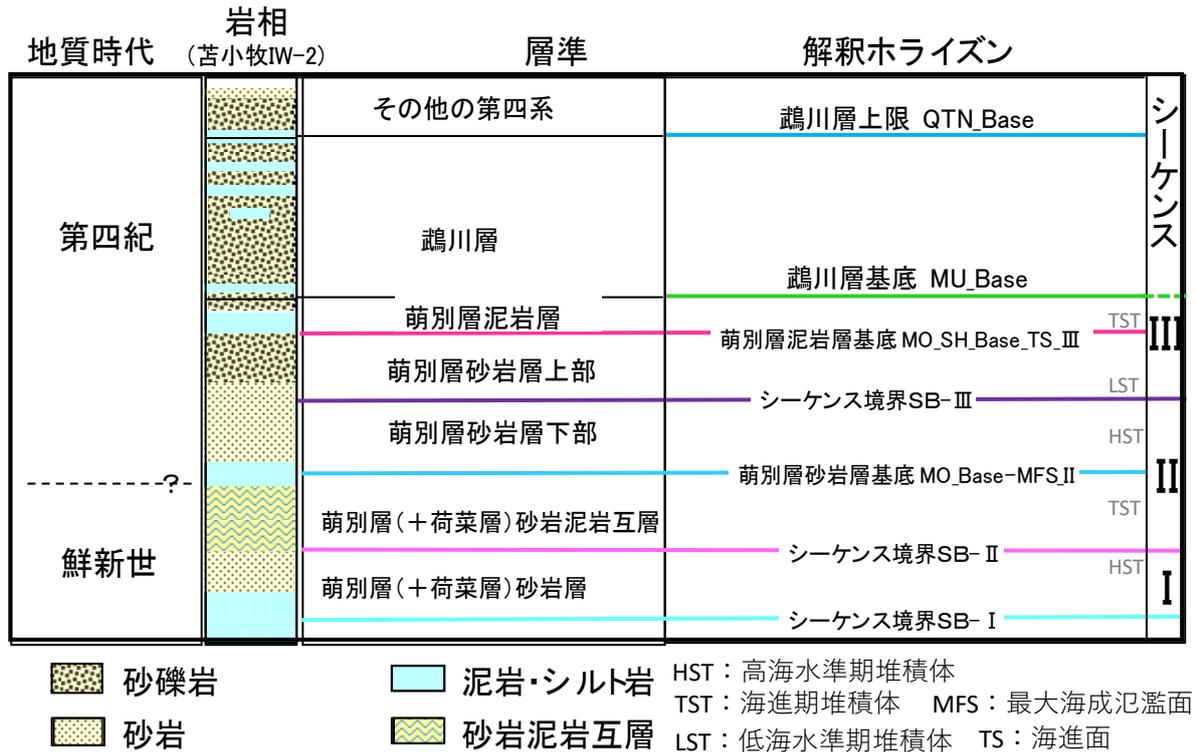
a. 岩相分布・性状分布の推定

第 4.1-7 図に示す、坑井のデータ（圧入井、観測井、民間井）と 3D 弾性波探査データおよび、民間会社所有の 2D 弾性波探査データを用いて 2019 年度地質モデルを作成した。



第 4.1-7 図 2019 年度 地質モデル作成範囲

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）をシーケンスⅠ～Ⅲの3つのシーケンスに区分した（第 4.1-8 図）。シーケンスⅠは苦小牧 IW-2 の掘り止め深度付近で確認したシーケンスで，砂岩層を含み苦小牧 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。

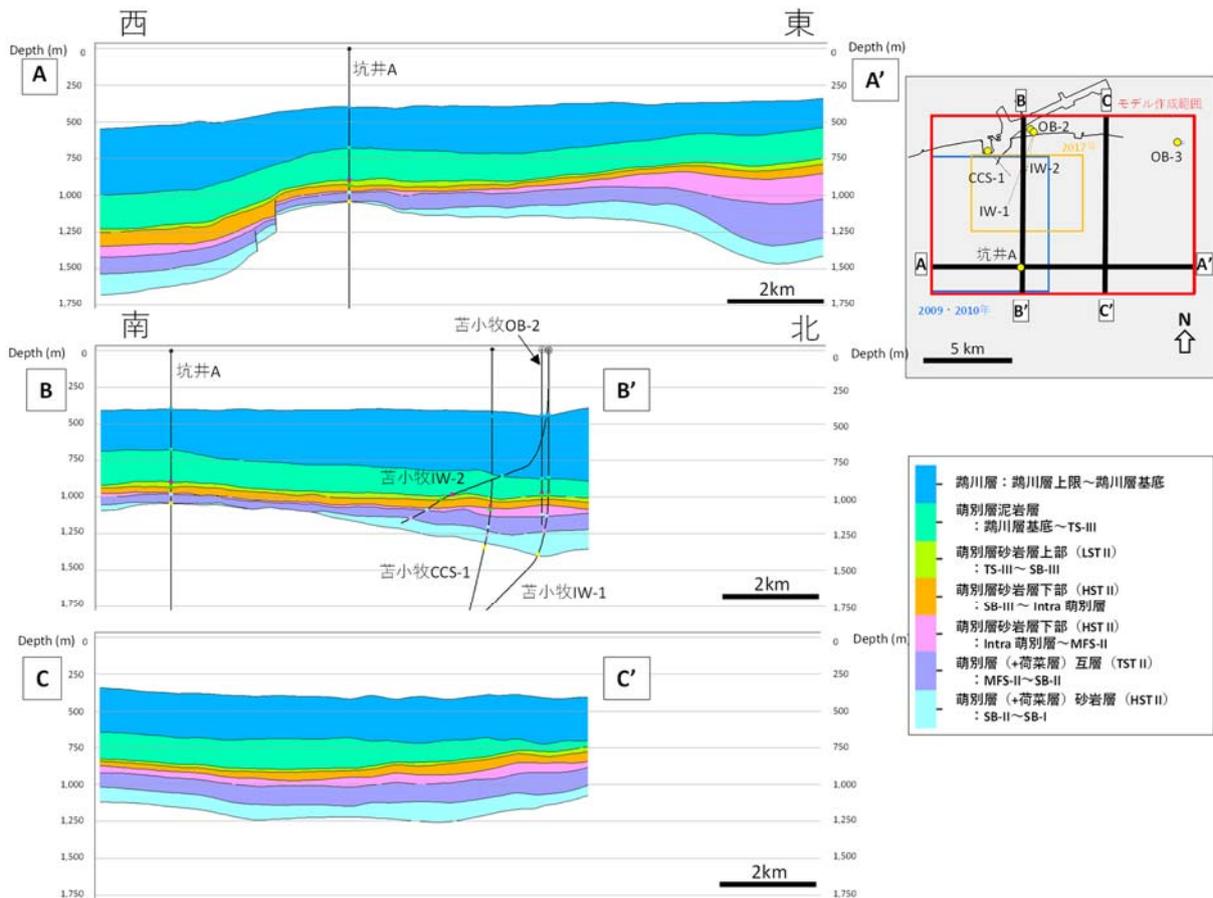


第 4. 1-8 図 萌別層の層序区分と解釈ホライズン

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. 1-8 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(+荷葉層)砂岩層～鵠川層のモデル断面を第 4. 1-9 図に示す。

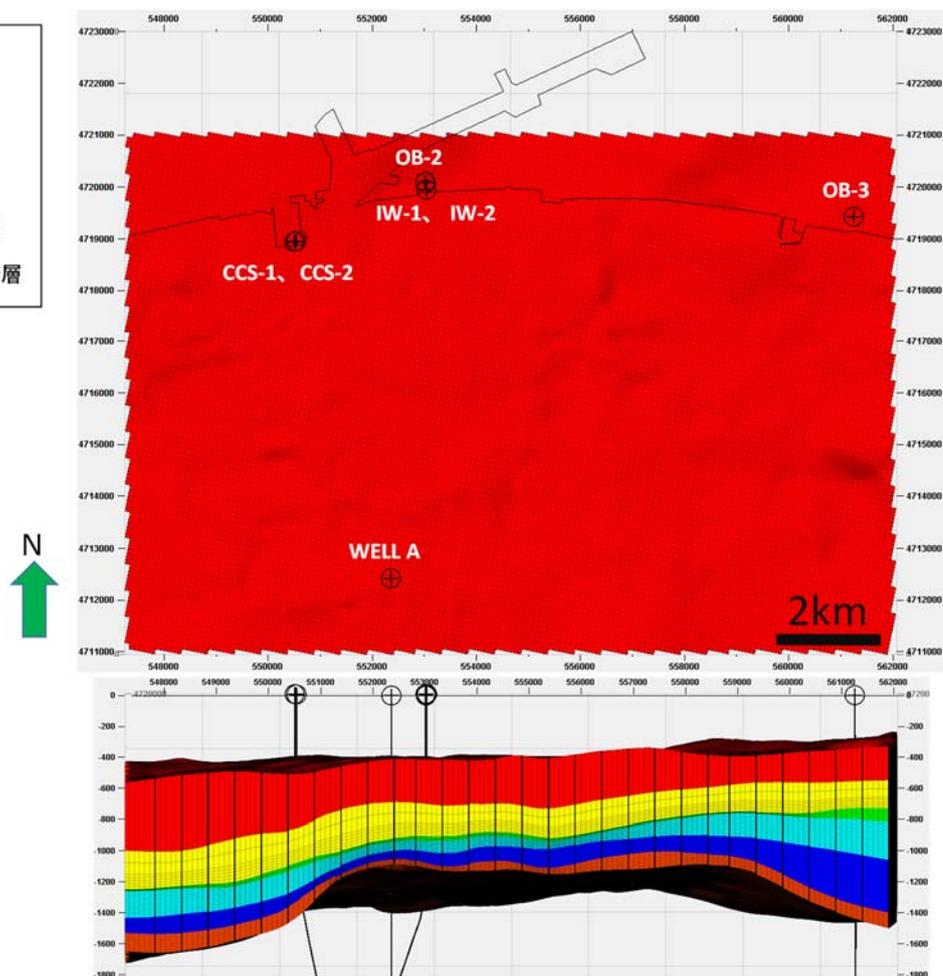
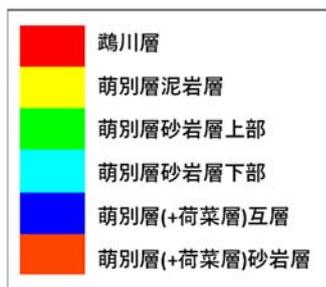


第 4.1-9 図 モデル断面

各層準内に第 4.1-3 表のようにグリッドセルを作成した。第 4.1-10 図に、グリッドセルの外観図を示す。

第 4.1-3 表 萌別層構造モデルのグリidding

層序区分 (Zone)	Zone 区間 Zone 区間 (解析ホライズン名)	垂直方向 レイヤー数	水平方向	垂直方向 セル番号
鶺川層 (Mukawa)	QTN_Base ~MU Base	1	100m × 100m	1
萌別層泥岩層 (Mo_SH_TST)	MU Base ~MO_SH_Base_TS_III	7		2~8
萌別層砂岩層上部 (Mo_Sst_up_LST)	MO_SH_Base_TS_III ~SB-III	6		9~14
萌別層砂岩層下部 (Mo_Sst_low_HST)	SB-III ~MO_Base-MFS-II	15		15~29
萌別層(+荷葉層)互層 (Ni_Alt_TS)	MO_Base-MFS-II ~SB-II	10		30~39
萌別層(+荷葉層)砂岩層 (Ni_Sst_HST)	SB-II ~SB-I	10		40~49



第 4.1-10 図 グリッドセルの外観図

c. 属性モデルの作成

萌別層（+荷葉層）砂岩層～萌別層砂岩層の分布を推定するために、CCS-1、IW-2、OB-2、OB-3 の 4 坑井のデータおよび 3D 弾性波探査データ、2D 弾性波探査データを用いて堆積相解析を実施し、堆積環境について推定した。

i) 坑井データを用いた堆積環境の推定

シーケンス層序区分（第 4.1-8 図）基準として、坑井毎にカッティングス・コアのデータや検層データから岩相を区分した（第 4.1-11 図、第 4.1-12 図）。なお、岩相の区分には主に検層ログを使用したため、ここではファシス区分と称している。