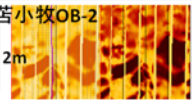
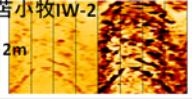
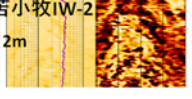



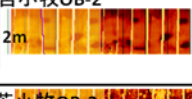
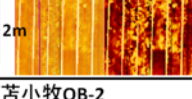



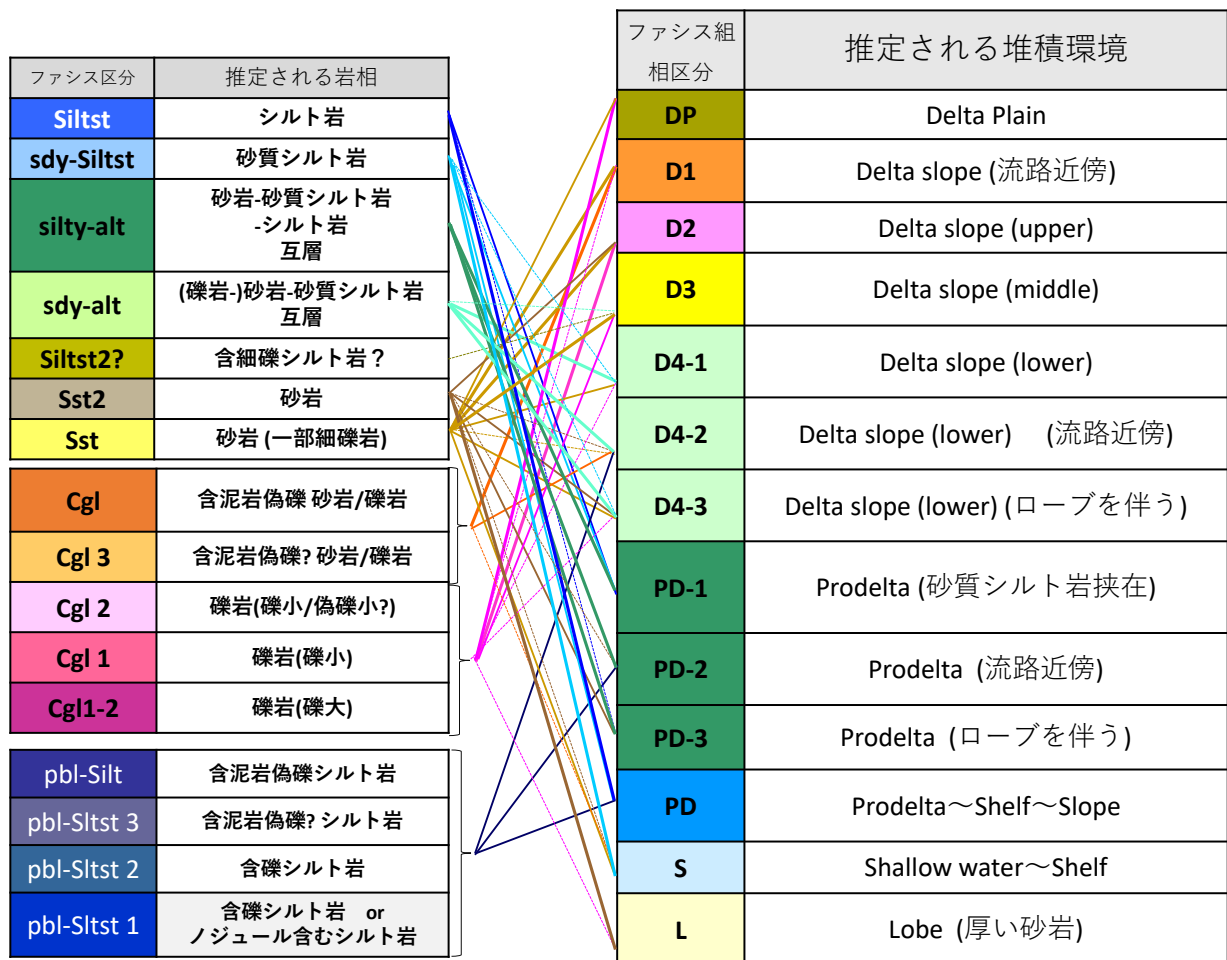
比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	検層データにおける特徴	ファシス区分	推定される岩相
暗色。 (生痕や炭質物が明暗の点で見えることもある。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色)。  比抵抗値<2, Vclay値>0.25, GR値 55~70	Siltst	シルト岩
やや暗色。 (コントラストの弱い互層状か混濁とした様相を示す。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い傾向。 - 比抵抗値がやや低い(イメージでやや暗色)。  比抵抗値 1~2, Vclay値 0.2~0.25, GR値 35~50	sdY-Siltst	砂質シルト岩
暗色とやや暗色(ときに明色)の互層を示す。	苦小牧CCS-1 	- GR, Vclay値高い傾向で振幅小さく変動。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色), 部分的に高い(イメージで明色)。  比抵抗値 1~3, Vclay値 0.2~0.4, GR値 30~60	silty-alt	砂岩-砂質シルト岩 -シルト岩 互層
やや暗色と明色の互層を示す。	苦小牧CCS-1 	- GR, Vclay値低い傾向で振幅小さく変動。 - 比抵抗がやや高い(イメージでやや明色)。  比抵抗値 2~4, Vclay値 < 0.3, GR値 45~60	sdY-alt	(礫岩-) 砂岩-砂質シルト岩 互層
比抵抗イメージではSstと同じくらい明色に見える。	苦小牧IW-2 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値は高い(イメージで明色)。  比抵抗値>3, Vclay値 > 0.25	Siltst?	含細礫シルト岩?
比抵抗イメージではSiltstやsdY-Siltstと同じく暗色に見える。 Siltstにはほとんど見られない葉理が見られることがある。	苦小牧IW-2 	- GR値, Vclay値が低い。 - 比抵抗値はやや低い(イメージでやや暗色)。  比抵抗値 < 2, Vclay値 < 0.2	Sst2	砂岩
明色。	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が低い。 - 比抵抗値が高い(明色)。  比抵抗値 2~4, Vclay値 < 0.2, GR値 < 45	Sst	砂岩 (一部細礫岩)

第 4.1-11 図 ファシス区分の例 (シルト岩~砂岩)

比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	ファシス区分	推定される岩相
含暗色角礫 背景は明色	苦小牧OB-2 	Cgl	含泥岩偽礫 砂岩/礫岩
含暗色円礫 背景は明色	苦小牧IW-2 	Cgl 3	含泥岩偽礫? 砂岩/礫岩 (礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明・暗色円礫(小) 背景は明色	苦小牧IW-2 	Cgl 2	礫岩(礫小/偽礫? 径数cm~数10cm) (暗色の礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明色円礫 背景は明色	苦小牧OB-2 	Cgl 1	礫岩(礫小 径数cm~数10cm)
含明色円礫(大) 背景は明色	苦小牧IW-2 	Cgl1-2	礫岩(礫大 径数10cm~1m)
含暗色角礫 背景は暗色	苦小牧OB-2 	pbl-Silt	含泥岩偽礫シルト岩 (礫は泥岩偽礫か 一部は炭質物の可能性も有?)
含暗色円礫 背景は暗色	苦小牧OB-2 	pbl-Sltst 3	含泥岩偽礫? シルト岩 (礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明・暗色円礫(小) 背景は暗色	苦小牧OB-2 	pbl-Sltst 2	含礫シルト岩 (暗色の礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明色円礫 背景は暗色	苦小牧OB-2 	pbl-Sltst 1	含礫シルト岩 or ノジュール含むシルト岩

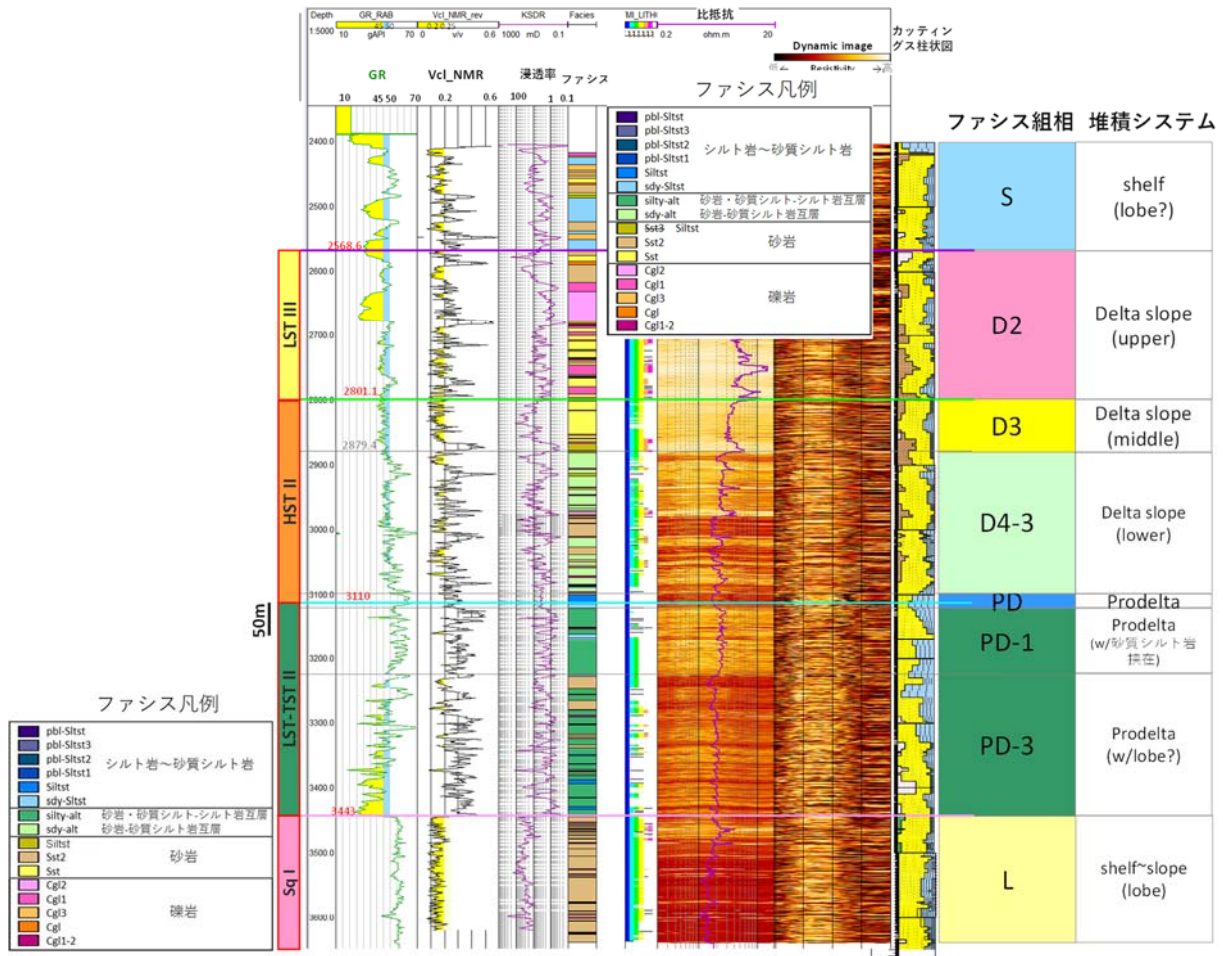
第 4. 1-12 図 ファシス区分の例 (礫岩など粗粒な岩相)

区分したファシスの組み合わせから、ファシス組相を認定し、堆積環境を推定した。ファシス区分とファシス組相、推定した堆積環境の関係を第 4. 1-13 図に示す。

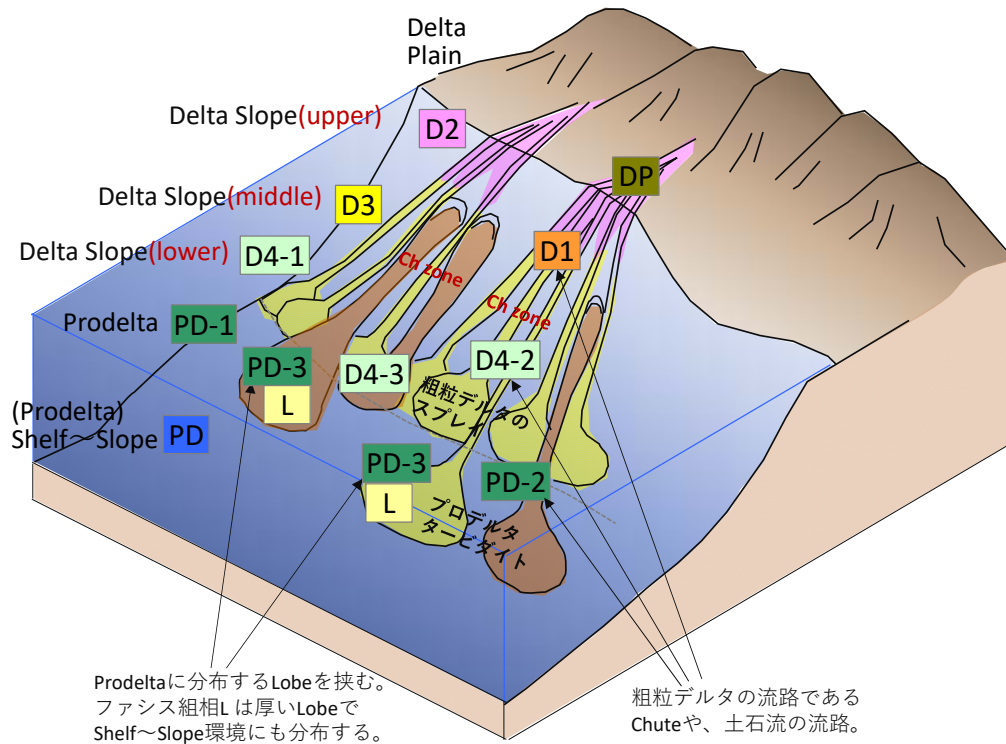


第 4.1-13 図 ファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

また，例として，萌別層圧入井(IW-2)におけるファシス，ファシス組相，堆積環境（システム）の推定結果を第 4.1-14 図に示す。ここで示されるファシス組相，堆積環境（システム）が該当する堆積環境の概念図を第 4.1-15 図に示す。本地域の萌別層で認識されたファシス組相，堆積環境（システム）は，河川～陸棚斜面(Slope)域での堆積を示唆するものであると判断された。



第 4.1-14 図 坑井におけるファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

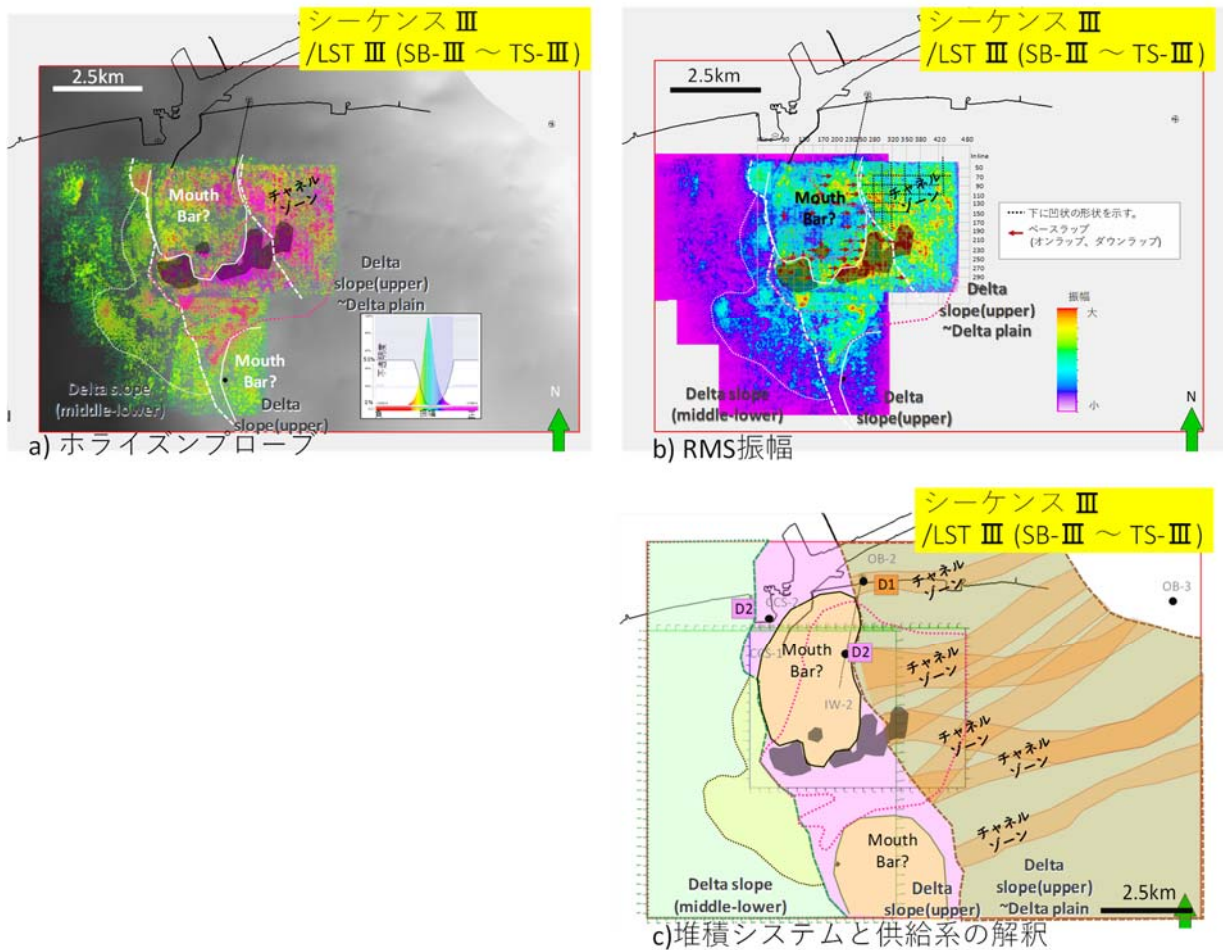


第 4.1-15 図 推定したファシス組相および堆積環境の概念図

## ii) 弾性波探査データの振幅値を用いた堆積環境の推定

シーケンス層序区分をもとにした層序区間に対し、3D 弾性波探査データを使用し、ホライズンプローブおよび RMS 振幅を用いたマッピングを実施し、堆積体の分布やその形態を把握し、坑井データを元にしたファシス組相や堆積環境の解釈を考慮し、堆積システムと堆積物の供給系を解釈した。後述するように萌別層圧入井からの圧入に際し、最も圧入に寄与する層準は萌別層砂岩層上部のシーケンスⅢである。例として、シーケンスⅢにおけるホライズンプローブと RMS 振幅および解釈により推定した堆積システムと供給系の解釈図を第 4.1-16 図に示す。

ホライズンプローブとは、3D 弾性波探査データにおける二つのホライズン区間の振幅値の大きさによりカラーリングし三次元表示する手法で、堆積体の分布・形態の把握に用いた。既存坑井の音波検層データから、正の振幅値がより高い方が礫岩の存在を、インピーダンスが低い面を示す負の振幅値が低い方が砂岩の存在を示すと推定した。色調・不透明度を調整し、正の振幅値が大きいエリア（礫岩が発達）を紫色系、負の振幅値が大きいエリア（砂岩が発達）を赤色系で示し、正と負の低い振幅値（シルト岩が発達）を透明となるように表示して使用した。RMS 振幅とは、3D 弾性波探査データにおける二つのホライズン区間の振幅値を二乗平均平方根（Root Mean Square : RMS）で表示したもので、正負を問わずに振幅の強弱を表示することができる。ホライズンプローブの表示と同様に、振幅値の分布の形態から、堆積体の分布を推定することに使用した。本解析では振幅値の大きさにより暖色系→寒色系で表示した。



第 4.1-16 図 シーケンス III におけるホライズンプローブと RMS 振幅および解釈により推定した堆積システムと供給系の解釈図

### iii) ファシス分布モデルの作成

坑井における堆積環境の推定結果と弾性波探査データの振幅値を用いた解析結果から推定した堆積システムと供給系の解釈図を基準とし、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ファシス組相を地球統計学的手法 (Sequential Indicator Simulation) により分布させた。さらにファシス組相の分布を基準とし、坑井毎に設定したファシス (岩相) をハードデータとして、ファシス (岩相) を地球統計学的手法 (Sequential Indicator Simulation) により分布させ、不均質なファシス分布モデルを作成した。物性値はファシスごとに決定した値を入力した (第 4.1-4 表)。作成した複数のファシス分布モデルを用いてそれぞれについて後述する CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを実施し、推定結果を確率論的に取り扱った。

第 4.1-4 表 それぞれのファシス（岩相）に入力した物性値の例

ファシス名	PHIT	PHIE	Vcl
muddy	0.34	0.25	0.27
sdv-silt	0.28	0.21	0.23
silty-alt	0.29	0.20	0.31
sdv-alt	0.28	0.22	0.20
silt2?	0.27	0.15	0.44
sst2	0.29	0.25	0.15
sst	0.26	0.21	0.18
cgl	0.24	0.19	0.21
cgl3	0.28	0.21	0.25
cgl2	0.24	0.18	0.22
cgl1	0.22	0.18	0.17
cgl1-2	0.23	0.17	0.24

## ② 萌別層砂岩層における CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーション

### ア) 2019 年度シミュレーション

#### 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ファシス（岩相）ごとに同一の値を入力した。

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>[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～2019 年 11 月 22 日までに実績値に基づき、累計圧入量が 300,012 トンとした。シミュレーションは地球統計学的に作成した、複数のファシス（岩相）分布モデル（具現像）を用いて複数回実施し、圧入終了時の坑内圧力値を統計的に考慮し、P10, P50, P90 モデルによる結果を考慮した。

#### b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧 CCS-2 および苫小牧 OB-2 および苫小牧 IW-2 で得られたデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など）および文献値から設定した（第 4.1-5 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。

<sup>[1]</sup> 圧入上限圧力の詳細は、「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」の 5.2(3)①を参照のこと。

第 4.1-5 表 シミュレーションパラメータ一覧 (2019 年度地質モデル)

モデル	2019 年度地質モデル	
サイズ	15km×10km×1,700m	
グリッド	163×126×173	
アクティブ・ブロック数	708,711	
基準温度	36.2°C@920.41m(TVDSS)	
基準圧力	9,290kPa@920.41m(TVDSS)	
CO <sub>2</sub> 圧入レート, 圧入期間	実績レート	
圧入圧力上限	12,930kPa (仕上げ区間上端深度) 12,600kPa (P/T Sensor 深度)	
孔隙容積(m <sup>3</sup> )	2.4×10 <sup>11</sup> m <sup>3</sup>	
岩石性状	砂岩	泥岩
平均孔隙率	ファシス毎	0.299
平均浸透率 : mD	ファシス毎	0.0015
圧縮率 : kPa <sup>-1</sup>	4.56×10 <sup>-6</sup>	
塩分濃度 : ppm (NaCl)	3,150mg/L	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 Krg	0.144	Corey (1954) <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
不動水飽和率 Swir	0.49	0.638
	測定値	Bennion (2007) <sup>[3]</sup>
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.275	—
	Holtz (2002) <sup>[4]</sup>	
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	測定値	van Genuchten (1980) <sup>[2]</sup>
Pc : kPa	4.04	370

### c. 圧入実績

萌別層への圧入は、2016 年 4 月 6 日に開始し、2019 年 11 月 22 日に累計圧入量が 300,012t-CO<sub>2</sub> に到達し圧入を停止した。萌別層への圧入実績を第 4.1-17 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) は 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。

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。

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

<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

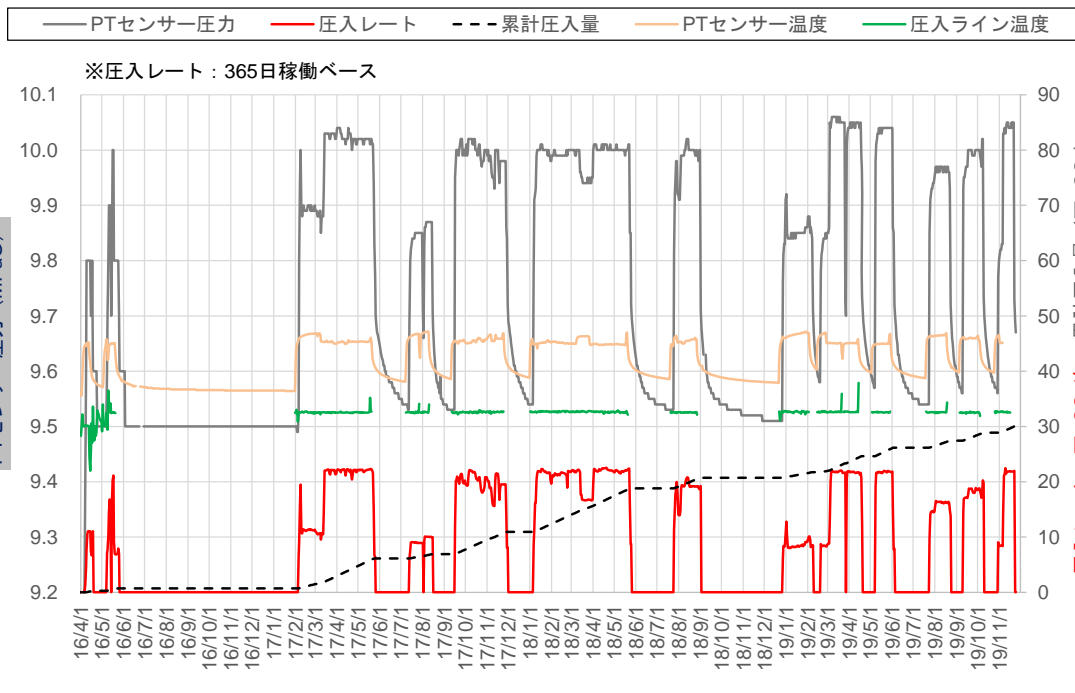
<sup>[3]</sup> Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

<sup>[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



記録 (2016/04/01~2019/11/30)

◆2016年4月6日~2019年11月30日



注) 坑底温度・坑底圧力は P/T Sensor の値

第 4.1-17 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。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 4.1-18 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 4.1-18 図) である。

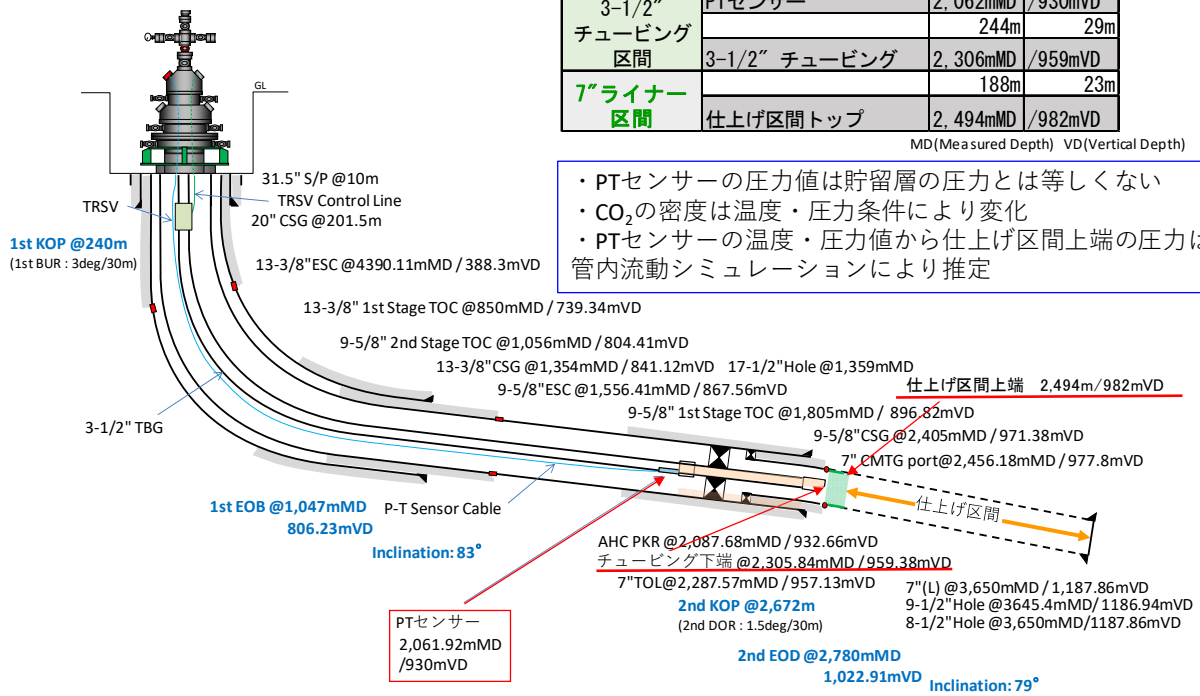
第 4.1-19 図および第 4.1-6 表は、貯留層圧力と各圧入レートで推定した圧入中に貯留層に加わる圧力 (流動坑底圧) との関係を示している。流動坑底圧が貯留層圧力 (第 4.1-19 図の黒線) を上回る深度区間が CO<sub>2</sub> の圧入される深度区間である。CO<sub>2</sub> が圧入された貯留層における深度区間は、圧入されていない区間と比較して CO<sub>2</sub> 飽和度が高くなることで流体粘性が低下して圧入性が高まるため、圧入時の流動坑底圧の上昇が抑制され、圧入区間は変化しない。検討した範囲において、圧入に寄与した深度の下端は 2019 年 3 月 15 日 (21.7 万 t-CO<sub>2</sub>/年) が最も深度が深く 1,037mVD までであり、2018 年 5 月 25 日 (8.9 万 t-CO<sub>2</sub>/年) が最も浅く 1,018mVD 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、1,018mVD~1,037mVD 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。

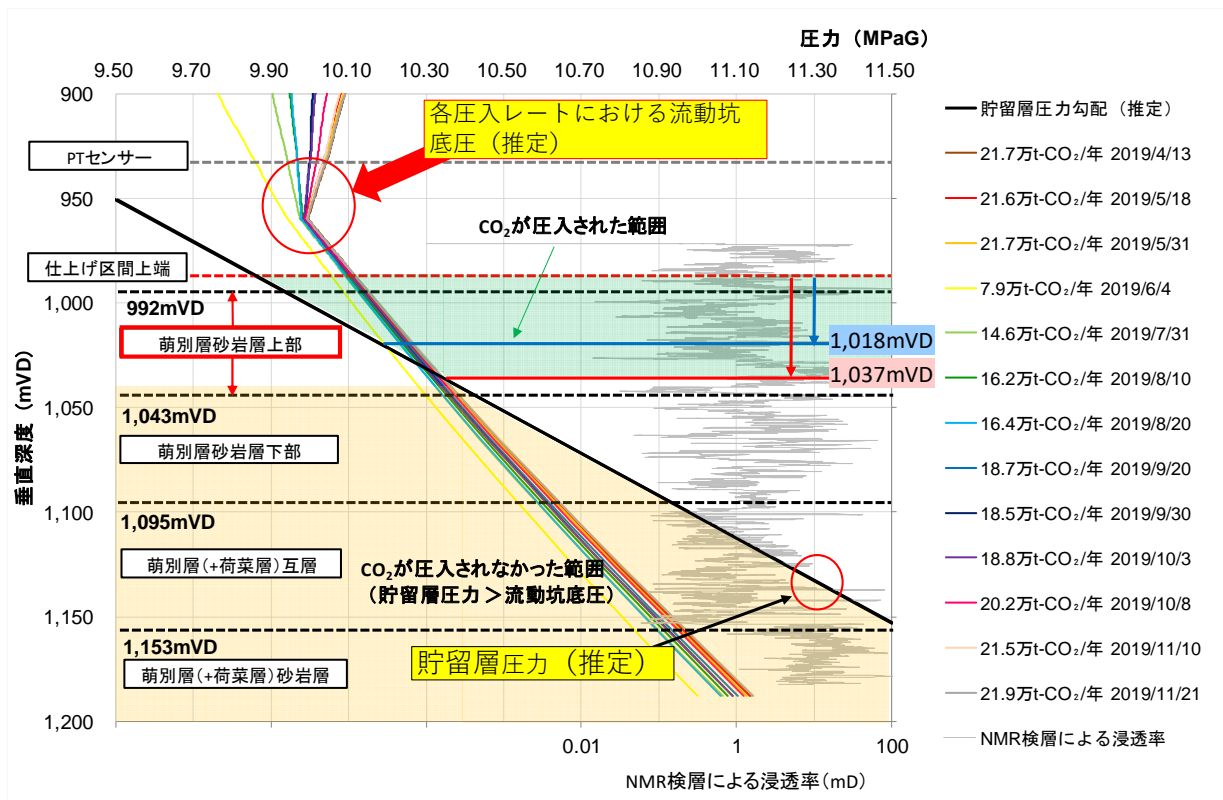
PTセンサーから仕上げ区間上限までの状況

3-1/2" チュービング区間	PTセンサー	2,062mMD / 930mVD
		244m 29m
7"ライナー区間	3-1/2" チュービング	2,306mMD / 959mVD
		188m 23m
	仕上げ区間トップ	2,494mMD / 982mVD

MD(Measured Depth) VD(Vertical Depth)



第 4.1-18 図 苦小牧 IW-2 仕上げ坑内図



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ルド圧力は無視。

第 4.1-19 図 苫小牧 1W-2 による萌別層への圧入実績から推定される圧入区間

第 4.1-6 表 CO<sub>2</sub> が圧入された貯留層区間の下端深度

日時	圧入レート (万t-CO <sub>2</sub> /年)	CO <sub>2</sub> の圧入区間下端深度		日時	圧入レート (万t-CO <sub>2</sub> /年)	CO <sub>2</sub> の圧入区間下端深度	
		垂直深度 (mVD)	坑井長 (mMD)			垂直深度 (mVD)	坑井長 (mMD)
17/9/26	21.3	1,033	2,775	19/1/18	8.4	1,019	2,701
10/18	20.2	1,030	2,760	1/31	9.1	1,020	2,701
11/16	21.3	1,028	2,750	2/7	8.5	1,018	2,692
11/27	19.5	1,026	2,740	2/27	8.3	1,017	2,686
11/28	8.2	1,020	2,704	3/15	21.7	1,037	2,798
18/1/16	21.8	1,029	2,756	3/25	21.6	1,036	2,794
1/28	21.8	1,027	2,745	4/13	21.7	1,035	2,789
2/12	21.2	1,027	2,741	5/18	21.6	1,034	2,785
2/21	21.3	1,027	2,743	5/31	21.7	1,034	2,780
3/12	22.1	1,028	2,749	6/4	7.9	1,019	2,699
3/25	16.8	1,025	2,734	7/31	14.6	1,027	2,744
4/11	22.0	1,027	2,745	8/10	16.2	1,029	2,755
4/23	22.1	1,027	2,745	8/20	16.4	1,028	2,747
5/11	21.9	1,027	2,743	9/20	18.7	1,032	2,770
5/22	22.4	1,027	2,742	9/30	18.5	1,031	2,765
5/25	8.9	1,018	2,693	10/3	18.8	1,030	2,762
7/28	17.8	1,031	2,767	10/8	20.2	1,033	2,777
7/30	20.0	1,035	2,788	11/10	21.5	1,035	2,790
8/14	20.7	1,033	2,779	11/21	21.9	1,035	2,789
8/25	19.1	1,032	2,774				

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。

なお、得られている坑底圧を使った FOT 解析については CO<sub>2</sub> の圧入停止が「フォールオフテスト」を実施する目的で行われておらず、解析は条件をある程度満たすものを選択して行っていることに加え、流体物性は超臨界 CO<sub>2</sub> で均一と仮定した解析であり、ある程度の誤差を前提としている。

第 4.1-7 表、第 4.1-20 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。圧入停止は計画外の停止ケースが多く、第 4.1-8 表に示すように、圧入停止時に PT センサーにおける温度圧力条件が安定しなかったため、取得したデータが解析に不向きケースも多い。本検討では、解析条件を満たすと判断した、FOT6～12, 14, 17 について解析を実施した。解析に使用した圧力は、Meunier et al. (1987)<sup>[1]</sup>の手法により、以下に示す Normalized Pseudo Pressure を

<sup>[1]</sup> Meunier, D.F., Kabir, C.S., Wittmann, M.J., “Gas Well Test Analysis: Use of Normalized Pseudovariabiles” SPE13082 (1987)

用いた。

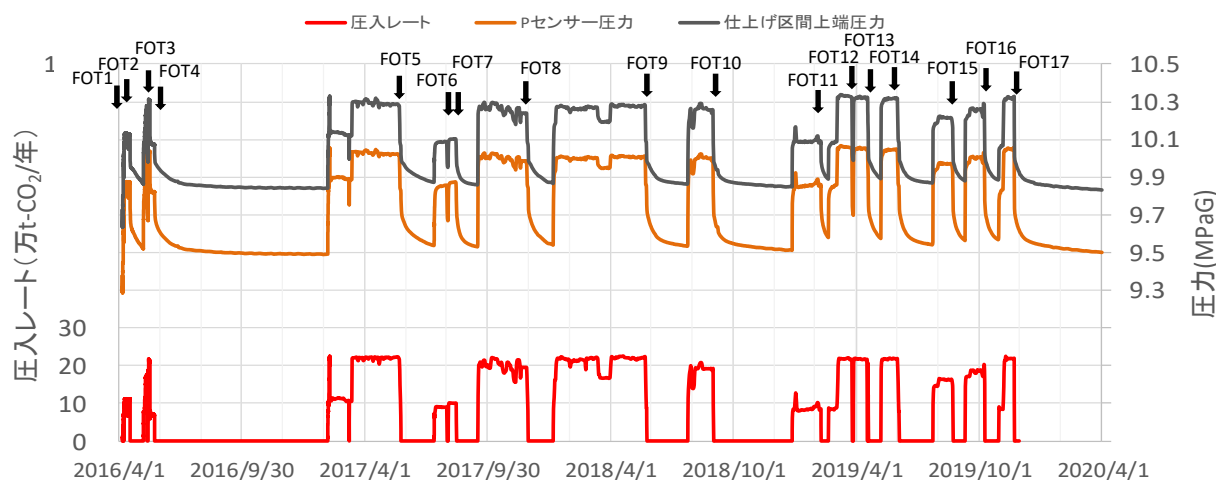
$$m(p) = \left(\frac{\mu z}{2p}\right) \int_{\bar{p}}^p \frac{2p dp}{\mu z} \quad \text{式 (4.1-1)}$$

$m(p)$ : Normalized Pseudo Pressure,  $\bar{P}$ : 貯留層平均圧力

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。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。第 4.1-21 図にそれぞれのログーログプロットを示す。

第 4.1-7 表 FOT 実績

FOT	開始時刻	終了時刻	停止種類	測定時間	密閉前平均圧入レート	累計圧入量
				時間	t-CO <sub>2</sub> /年	t-CO <sub>2</sub>
	2016 年					
FOT1	4 月 8 日 6 時 14 分	4 月 8 日 17 時 1 分	予定外停止	11	58,800	81
FOT2	4 月 17 日 22 時 16 分	5 月 7 日 15 時 15 分	予定外停止	473	109,351	2,558
FOT3	5 月 13 日 1 時 0 分	5 月 14 日 14 時 19 分	予定外停止	37	139,056	4,330
		2017 年				
FOT4	5 月 24 日 9 時 0 分	2 月 5 日 17 時 35 分	計画停止	6,177	71,079	7,163
FOT5	5 月 25 日 9 時 47 分	7 月 13 日 16 時 15 分	計画停止	1,183	64,861	61,239
FOT6	8 月 1 日 10 時 0 分	8 月 3 日 9 時 57 分	計画停止	48	88,474	65,793
FOT7	8 月 15 日 9 時 0 分	9 月 16 日 12 時 0 分	予定外停止	771	100,124	69,070
FOT8	11 月 30 日 9 時 27 分	1 月 6 日 11 時 50 分	計画停止	890	85,159	109,250
	2018 年					
FOT9	5 月 25 日 9 時 20 分	7 月 25 日 11 時 36 分	計画停止	1,466	87,709	188,136
FOT10	9 月 1 日 2 時 25 分	12 月 27 日 13 時 28 分	予定外停止	2,819	189,602	207,209
	2019 年					
FOT11	2 月 8 日 8 時 33 分	2 月 19 日 11 時 18 分	予定外停止	267	83,620	217,425
FOT12	3 月 26 日 10 時 37 分	3 月 28 日 11 時 3 分	予定外停止	48	218,008	233,438
FOT13	4 月 19 日 13 時 31 分	5 月 8 日 11 時 28 分	予定外停止	454	108,463	246,354
FOT14	6 月 4 日 8 時 49 分	7 月 24 日 17 時 10 分	予定外停止	1,208	78,536	261,632
FOT15	8 月 23 日 5 時 19 分	9 月 10 日 11 時 48 分	予定外停止	438	137,885	274,342
FOT16	10 月 9 日 18 時 20 分	10 月 30 日 11 時 8 分	予定外停止	497	80,592	288,874
FOT17	11 月 22 日 11 時 30 分	停止中	計画停止		216,498	300,012

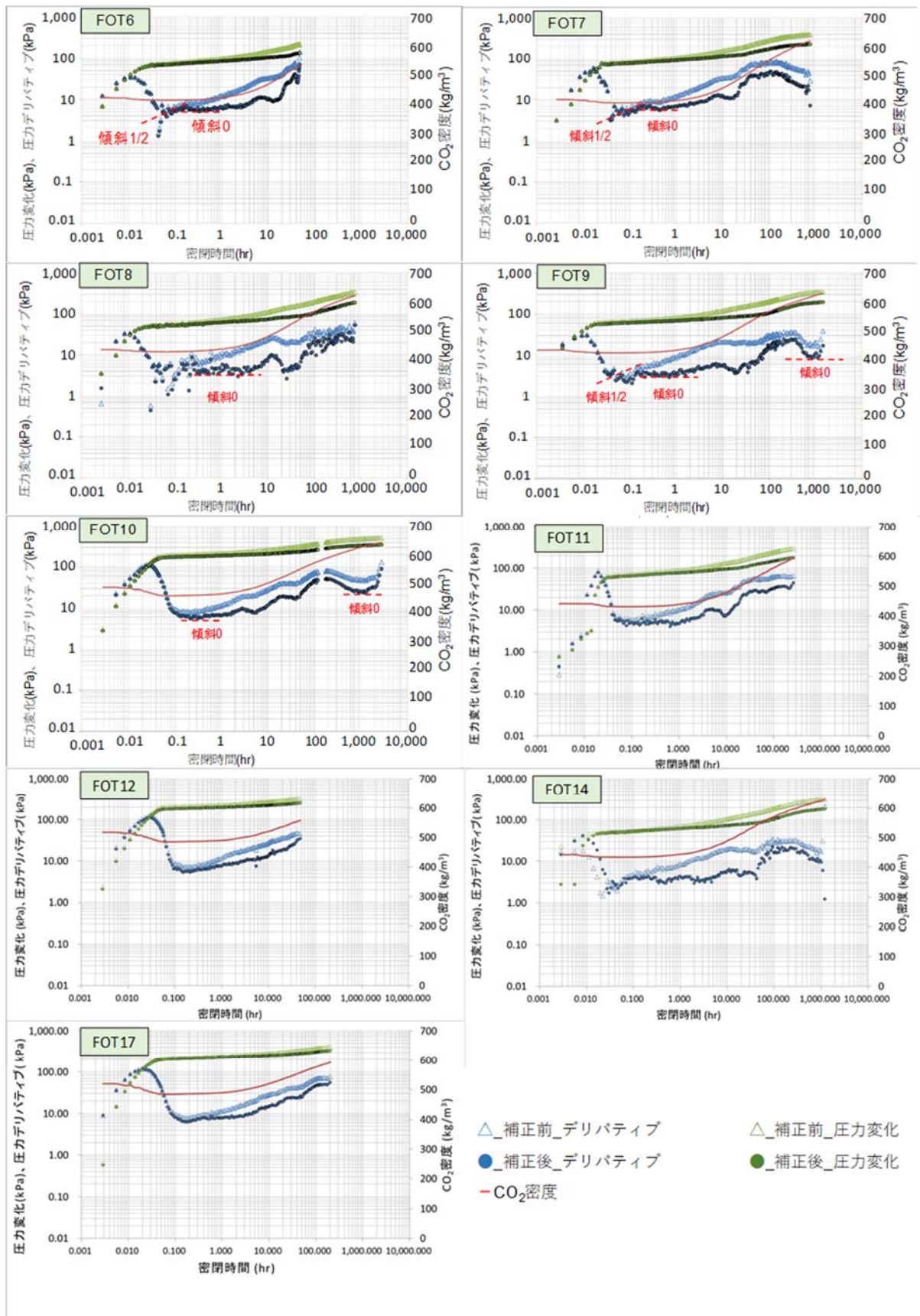


第 4.1-20 図 FOT 解析を実施したタイミング

第 4.1-8 表 FOT 一覧(解析の有無)

FOT	圧入停止方法	CO <sub>2</sub> 領域のラジアルフロー (ERF)	地層水領域のラジアルフロー (LRF)	備考欄
FOT1	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT2	○	×	×	ERF 確認不可
FOT3	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT4	○	×	×	ERF 確認不可
FOT5	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
<b>FOT6</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT7</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT8</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT9</b>	○	○	○	
<b>FOT10</b>	○	○	○	
<b>FOT11</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT12</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT13	×	—	—	直前でレートダウンした後に圧入停止
<b>FOT14</b>	○	○	○	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT15	×	—	—	圧入停止前に何度かレート変更した後に圧入停止
FOT16	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
<b>FOT17</b>	○	○	確認中	

注) 圧入停止方法: 圧入停止直前に 2 日程度以上の定レートで圧入後に停止したケースは○, 圧入レートが安定しないまま停止した場合は×。CO<sub>2</sub>領域のラジアルフロー, 地層水領域のラジアルフロー: ログ-ログプロットの圧力デリバティブカーブから認識されたケースは○, 認識できなかったケースは×。青色は解析を実施。



第 4.1-21 図 FOT のログ-ログプロット (FOT6~10, 11, 12, 14, 17)

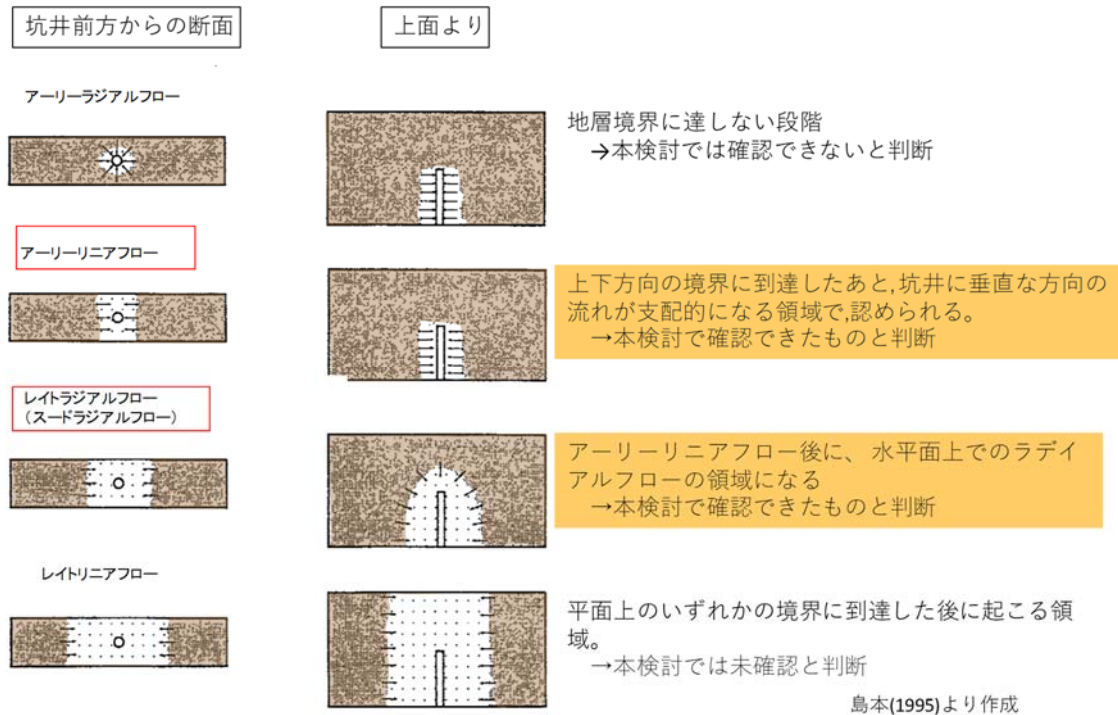


参考のため、第 4.1-22 図はガスの生産井（水平井）において生産を中断した直後に想定される圧力挙動を示す。IW-2 は最大傾斜  $83^{\circ}$  の高傾斜井であるため、水平井における圧力挙動と類似した挙動が認識されるものと仮定した。

アーリーリニアフロー（以下、「ELF」と称する。）は圧入井からの流れが上下の地層境界などに到達し、坑井に垂直な方向に線形で広がる流れであり、デリバティブカーブの傾斜が  $1/2$  となる。本年度以前の検討では、アーリータイムの領域において認められたデリバティブカーブの  $1/2$  傾斜を ELF とみなして、ELF 解析を実施し、坑井近傍の浸透率および  $\text{CO}_2$  飽和率を推定していたが、圧入停止条件などが適切であっても ELF が認識できないケースがあることから、本検討では、昨年度以前の検討での ELF の認識が誤りで有る子可能性を考慮し、ELF 解析は実施していない。

アーリーラジアルフローは地層境界に達しない段階で認識される挙動で、本検討では認識できていないと考えている。

レイトラジアルフロー（スードラジアルフロー）は坑井と水平な面に放射状に広がる流れであり、デリバティブカーブの傾斜は  $0$  となる。本検討では、圧入停止後  $0.3$  時間程度以降に認識されたデリバティブカーブの傾斜が  $0$  となる挙動をレイトラジアルフローの挙動と考え、ショックフロントの挙動（デリバティブカーブで上方向に凸の形状）が認められる以前のラジアルフローの挙動を  $\text{CO}_2$  領域のラジアルフロー、それ以降のラジアルフローを地層水領域のラジアルフロートと見なして解析した。



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. 1-22 図 水平井で予想される圧力挙動

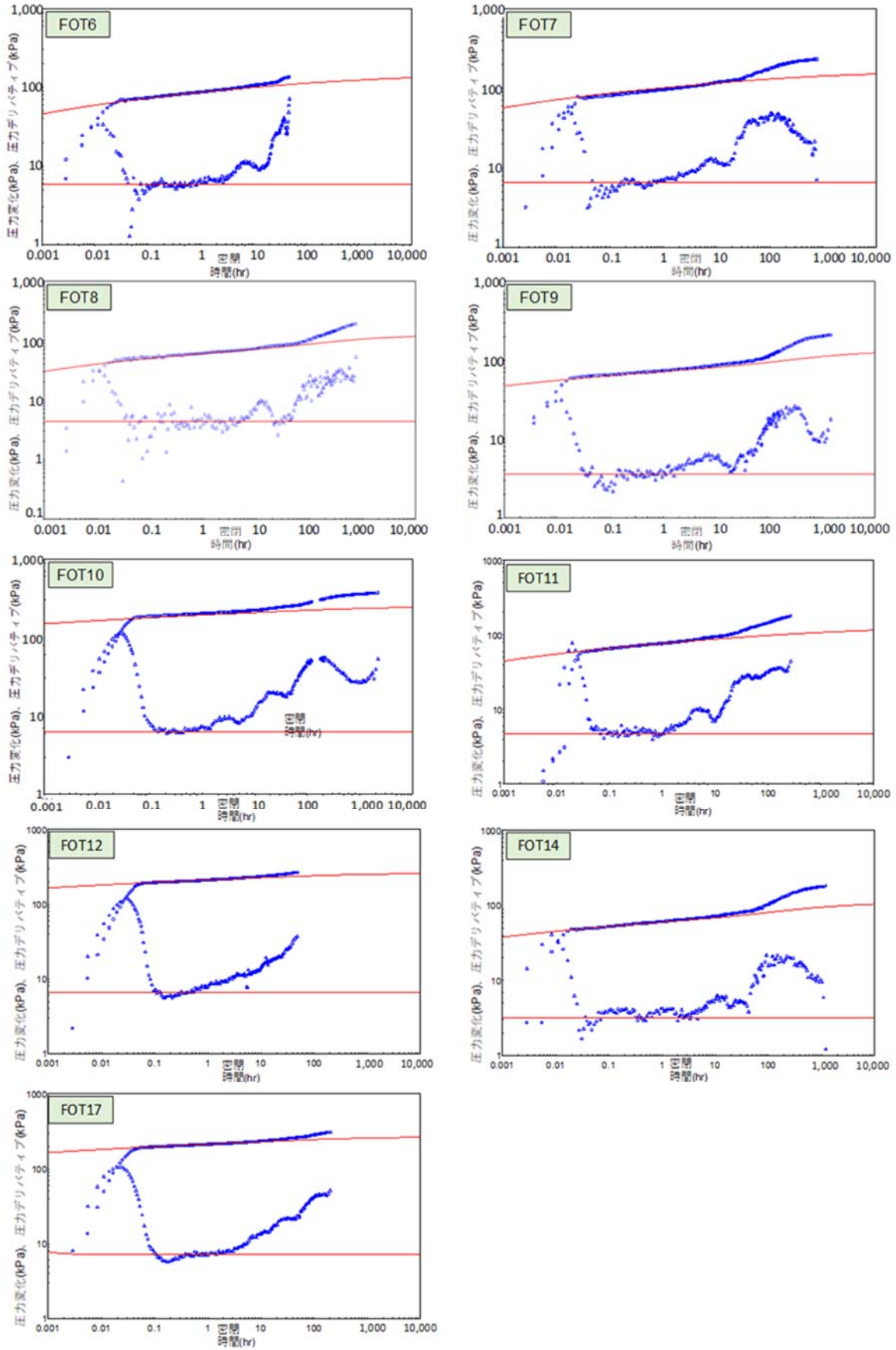
##### 1) CO<sub>2</sub> 領域のラジアルフロー解析

解析対象とした各 FOT におけるデリバティブの傾斜 0 を、CO<sub>2</sub> 領域のラジアルフローと仮定して解析した。圧力解析ソフト「Interpret」にて、貯留層性状が均質で、半無限円(ある境界での圧力が初期から変わらない)を想定した物理モデル (Homogenous, Infinite Lateral) を使用した。解析に際しては、貯留層性状が均質かつ無限に広がるものと仮定した。解析に用いた入力値と解析結果を第 4. 1-9 表に、マッチング状況を第 4. 1-23 図に示す。

<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)

第 4.1-9 表 CO<sub>2</sub> 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 <sup>3</sup> /日	129,623	146,691	124,766	128,502	277,785	圧入停止
レート	t-CO <sub>2</sub> /年	88,474	100,124	85,159	87,709	189,602	直前のレート
累計圧入量	t-CO <sub>2</sub>	65,793	69,070	109,250	188,136	207,209	
有効層厚	m	19					CO <sub>2</sub> が主に圧入されていると考える層厚
CO <sub>2</sub> 容積係数	rm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.0028					9.82MPaG/37.8°C
CO <sub>2</sub> 粘性	cP	0.0521					
孔隙率		0.28					検層解析結果
CO <sub>2</sub> 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 <sup>-5</sup>					9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 <sup>-7</sup>					
CO <sub>2</sub> 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 <sup>-5</sup>					
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 <sup>-6</sup>					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 <sup>3</sup> /日	122,509	319,403	115,063	317,189		圧入停止
レート	t-CO <sub>2</sub> /年	83,618	218,008	78,536	216,498		直前のレート
累計圧入量	t-CO <sub>2</sub>	217,425	233,438	261,632	300,012		
有効層厚	m	19					CO <sub>2</sub> が主に圧入されていると考える層厚
CO <sub>2</sub> 容積係数	rm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.0028					9.82MPaG/37.8°C
CO <sub>2</sub> 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8°C
孔隙率		0.28					検層解析結果
CO <sub>2</sub> 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 <sup>-5</sup>					9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 <sup>-7</sup>					
CO <sub>2</sub> 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 <sup>-5</sup>					
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 <sup>-6</sup>					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 4.1-23 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 CO<sub>2</sub>飽和度が上昇により、CO<sub>2</sub>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(4.1-2)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。

$$k \times h = \frac{162.6 \cdot q \cdot B \cdot \mu}{m} \quad \text{式(4.1-2)}$$

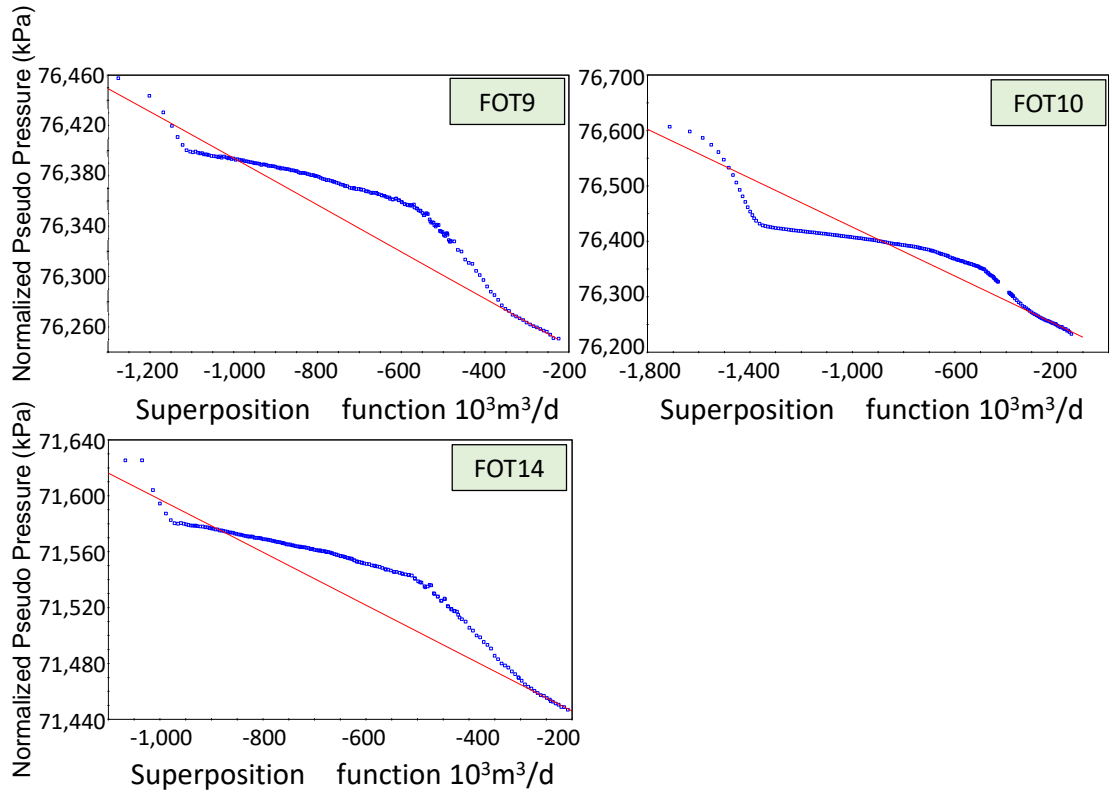
注) k:浸透率, h:有効層厚, q:流量, B:容積係数,  $\mu$ :粘性, m:ホーナープロットにおける傾きを示す。

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(4.1-3)を横軸に、Normalized Pseudo Pressure 式(4.1-1)を縦軸にとり、式(4.1-2)の傾き m を求め、k×h(浸透率×有効層厚)を算出する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式(4.1-3)}$$

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 4.1-24 図に、解析結果を第 4.1-10 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 CO<sub>2</sub>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。CO<sub>2</sub>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 4.1-24 図 ホーナープロット解析状況 (FOT9, FOT10, FOT14)

第 4.1-10 表 ホーナープロット解析結果

		FOT9	FOT10	FOT14
圧入レート	m <sup>3</sup> /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、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 (4.1-4) ～式 (4.1-6) (Rahman et al. (2014) <sup>[1]</sup>) 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

<sup>[1]</sup> 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 4.1-11 表に CO<sub>2</sub> 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。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3} \left( \sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right)} + R_2 \left( 1 - \sqrt{\frac{M_3 F_2}{F_3 M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (4.1-4)}$$

$$R_2 = R_1 \left( 1 - \sqrt{\frac{M_2 F_1}{F_2 M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (4.1-5)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t} \quad \text{式 (4.1-6)}$$

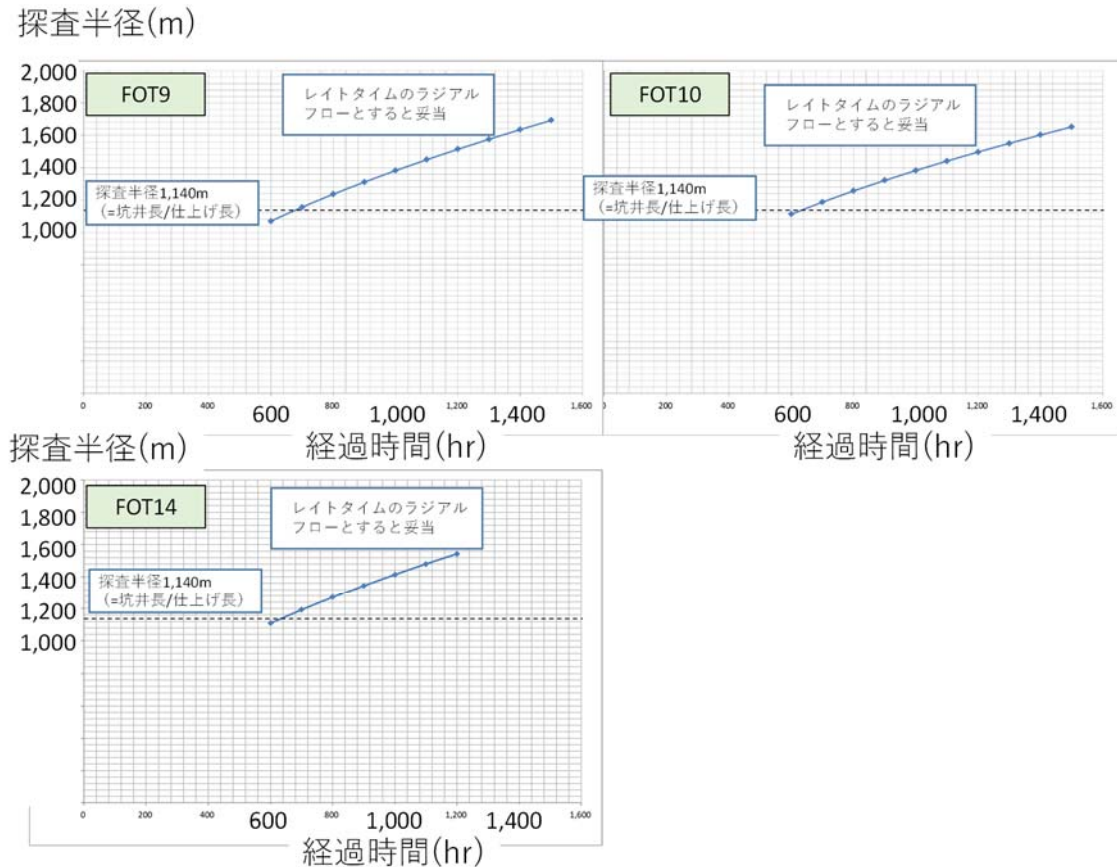
注) R:半径, M:モビリティ (浸透率/粘性), F:ストラティビティ (孔隙率×総合圧縮率), k:浸透率, φ:孔隙率, μ:粘性, ct:総合圧縮率, Δt:密閉時間, 下付き番号 1: CO<sub>2</sub> 領域, 下付き番号 2: ショックフロント領域, 下付き番号 3: 塩水領域を示す。

第 4.1-11 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 <sub>2</sub> 領域	半径	m	422	464	421	式 (4.1-6) 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 (4.1-5) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 領域と同じと仮定
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> (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 (4.1-4) を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した

(第 4.1-25 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 4.1-25 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 CO<sub>2</sub> 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。



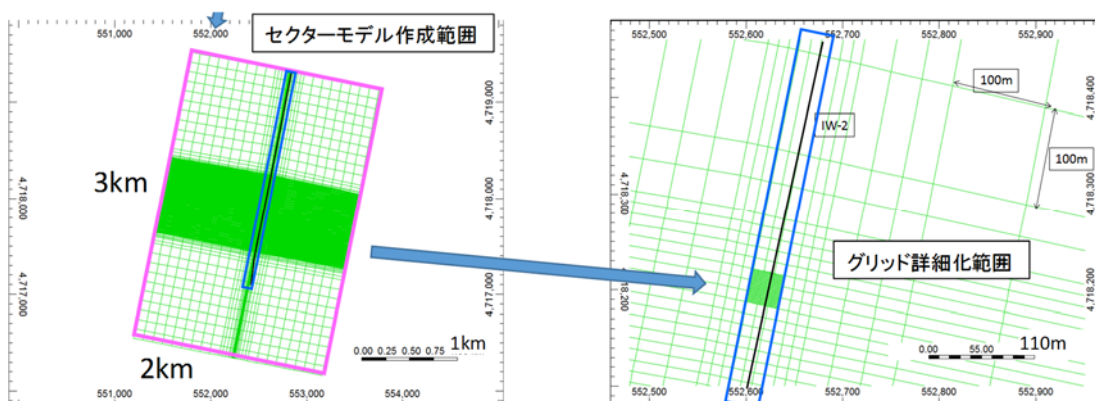
## ii) ヒストリーマッチ

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 4.1-26 図)。また、グリッドに入力した物性値パラメータは第 4.1-12 表と同様とした。



第 4.1-26 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(4.1-7)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。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \sqrt{(d_{sim}^i - d_{obs}^i)^2} \quad \text{式 (4.1-7)}$$

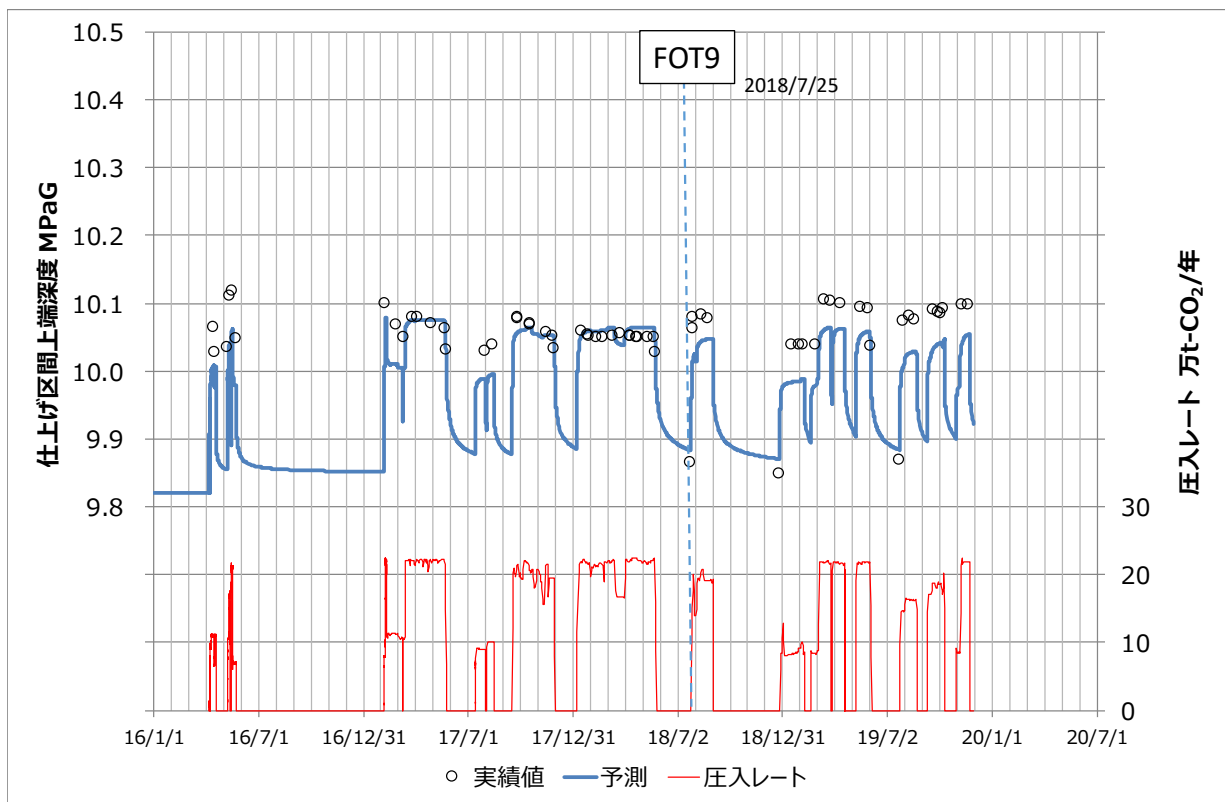
注)  $n_{obs}$ : 実績データ数,  $d_{sim}$ : シミュレーション計算値,  $d_{obs}$ : 実績データ

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 4.1-12 表)。具現像 24

による例を第 4.1-27 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 4.1-12 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 4.1-27 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

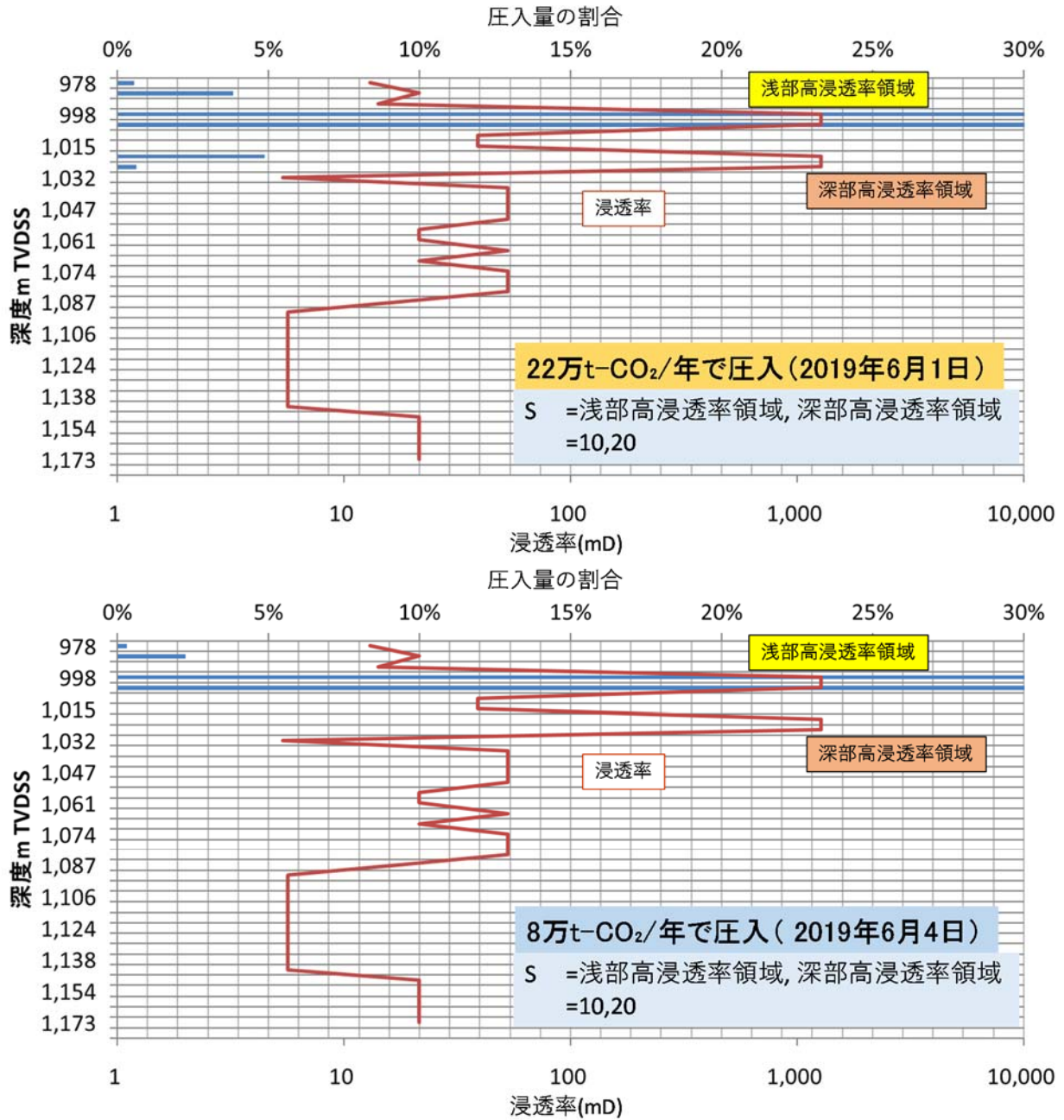
目的関数の悪化は、FOT9 後に何らかの原因によって、圧入により上昇する仕上げ区間上端深度における坑内圧力が上昇したことを意味する。明確な調査方法はないが、現状では、圧入井の仕上げ区間において出砂等の影響により、圧入性が阻害される傾向にあるものと仮定し、スキんファクターを設定することとした。スキんファクターは、式(4.1-8)の流量と圧力差の関係式における、式(4.1-9)に示す Well Injectivity Index(以下、「WI」と称する。)中の S で示される。出砂などにより坑井近傍で圧入が阻害されるとプラスとなる。

$$Q = \sum WI \lambda (P_{bh} - P_o) \quad \text{式(4.1-8)}$$

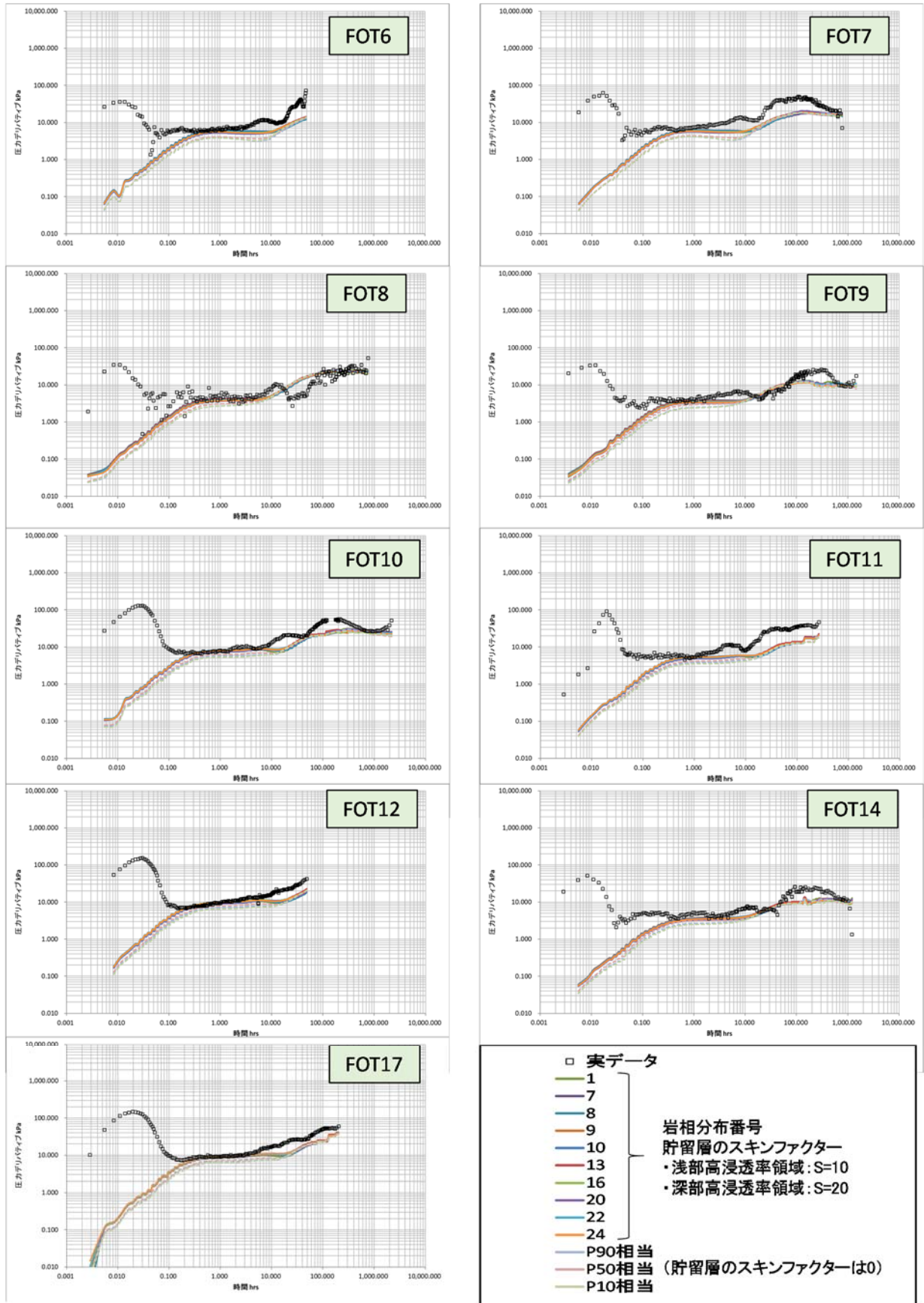
$$WI = \frac{2\pi kh}{\ln(r_e/r_w) + S} \quad \text{式(4.1-9)}$$

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 CO<sub>2</sub>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)<sup>0.5</sup>), 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4.1-9表)であると考えられる。圧入井付近においては、第4.1-28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4.1-29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 4.1-28 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 4.1-29 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

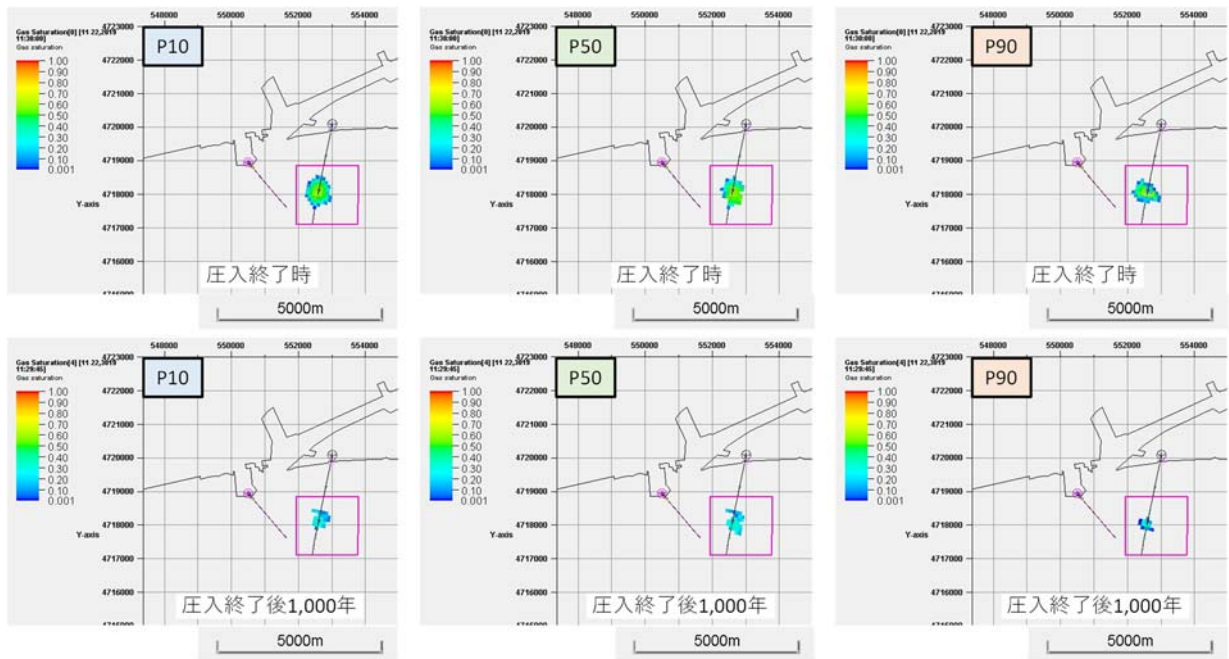
### ③ CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲

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 4.1-30 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 CO<sub>2</sub> 飽和度を示す。本検討においては、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 分布範囲を、萌別層での最大となる CO<sub>2</sub> 飽和度分布範囲とした（第 4.1-31 図）。第 4.1-31 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 飽和度分布範囲とする。

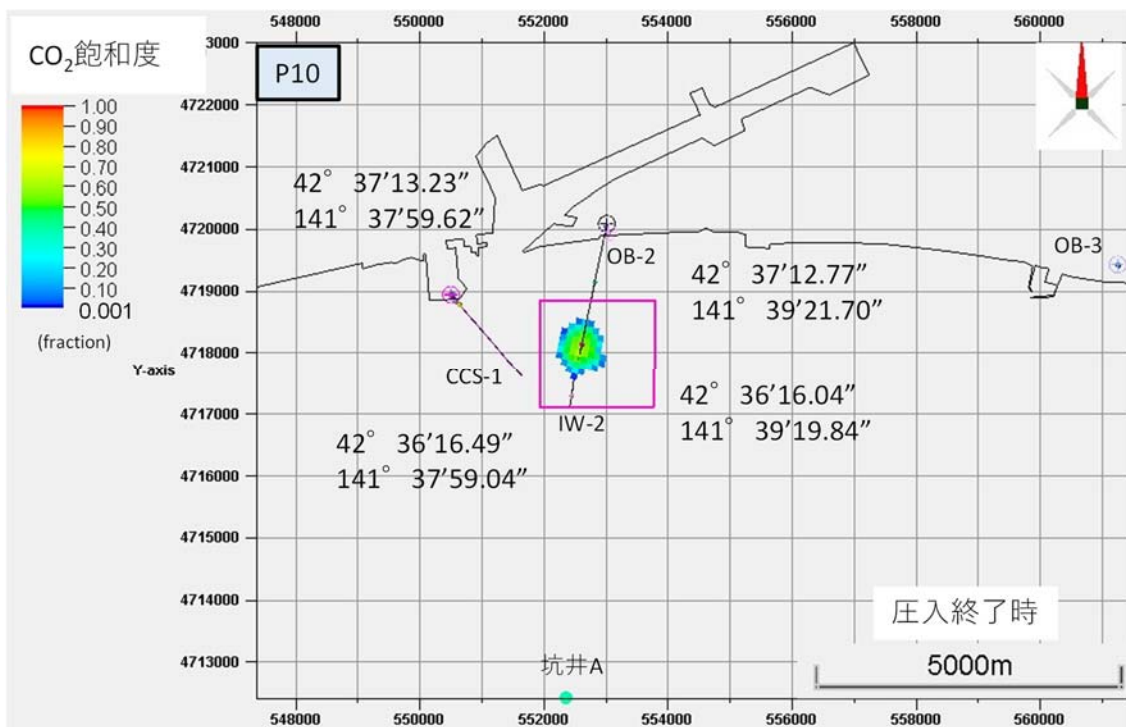
第 4.1-32 図に萌別層での P10, P50, P90 の各モデル（具現像）における圧入終了後 1,000 年時点における最大となる溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲を示す。溶解 CO<sub>2</sub> 量は CO<sub>2</sub> 飽和度分布で示される CO<sub>2</sub> が地層水に溶解することにより生じるため、圧入停止からの経過時間が長い方がより広範囲に分布する傾向があるため、圧入終了後 1,000 年時点を考慮した。その結果、P10 モデルにより予測された圧入終了時の溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲を、萌別層での最大となる溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲とした（第 4.1-33 図）。第 4.1-33 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 量分布範囲とする。

第 4.1-13 表に示す。萌別層における CO<sub>2</sub> の分布範囲をまとめる。CO<sub>2</sub> 飽和度よりもより広範囲におよぶ溶解 CO<sub>2</sub> 量の最大分布範囲を、CO<sub>2</sub> の分布範囲とする。



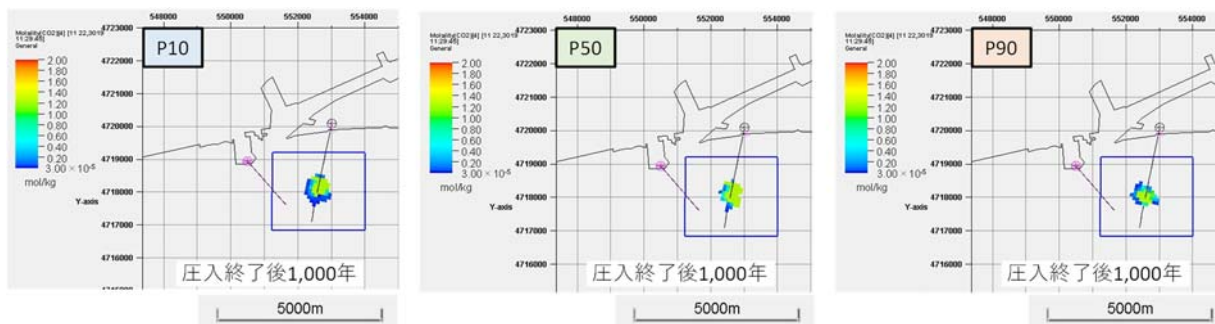
注：各図の赤枠は、本申請以前の申請でCO<sub>2</sub>飽和度分布範囲とした範囲を示す。

第 4.1-30 図 萌別層砂岩層 (P10, P50, P90 モデル) での CO<sub>2</sub> 分布範囲 (CO<sub>2</sub> 飽和度)

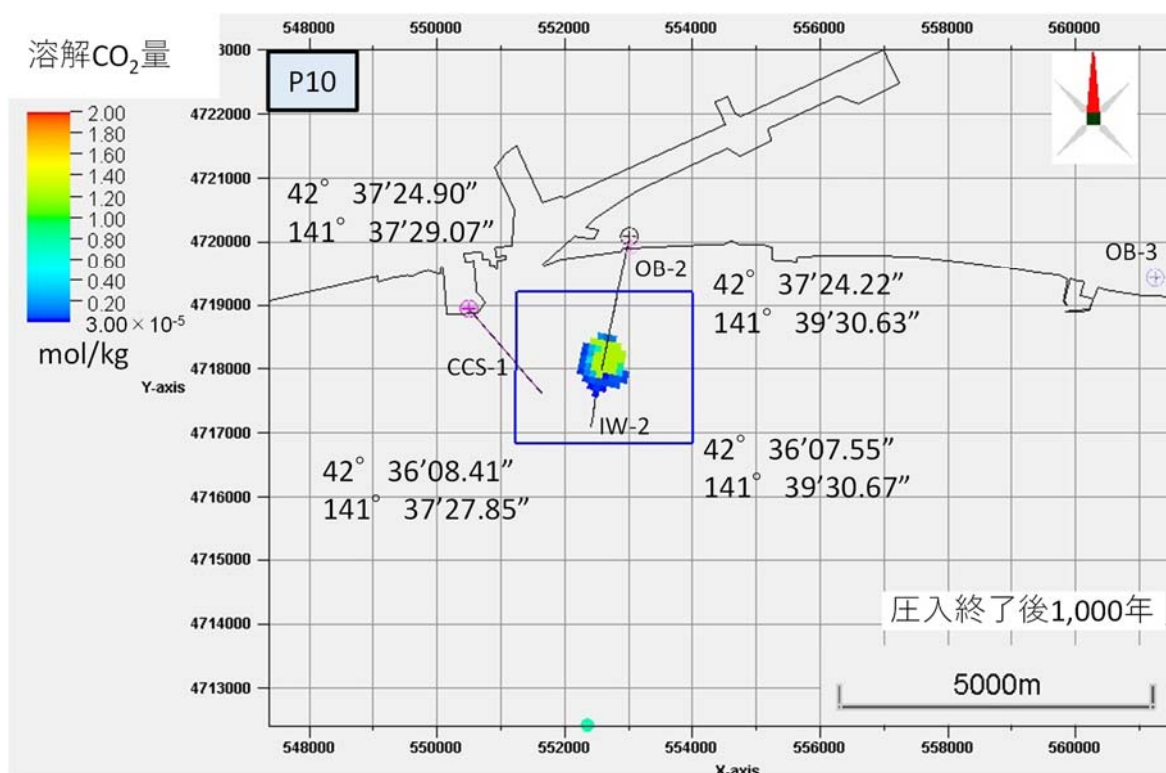


注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より圧入終了後 1,000 年後までに予想される最大の CO<sub>2</sub> 飽和度分布範囲を示す。

第 4.1-31 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲 (P10 モデル CO<sub>2</sub> 飽和度分布)



第 4.1-32 図 萌別層砂岩層(P10, P50, P90 モデル)での CO<sub>2</sub>分布範囲 (溶解 CO<sub>2</sub>量分布)



第 4.1-33 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub>分布範囲 (P10 モデル溶解 CO<sub>2</sub>量分布)

第 4.1-13 表 海底下廃棄した CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲 (萌別層砂岩層)

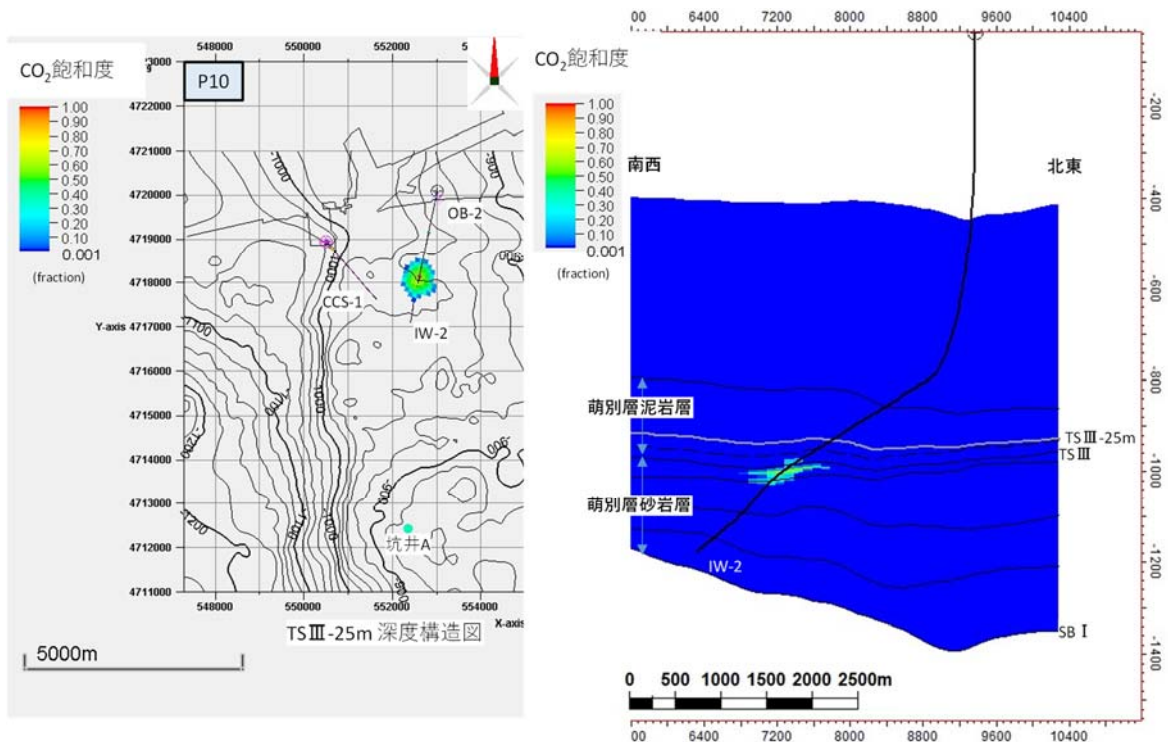
分布域	北限			南限			東限			西限		
	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
二酸化炭素	42	37	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85
CO <sub>2</sub> 飽和度	42	37	13.23	42	36	16.04	141	39	21.70	141	37	59.04
溶解 CO <sub>2</sub> 量	42	37	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85

注: 各モデルにおいて推定される CO<sub>2</sub>飽和度および溶解 CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲

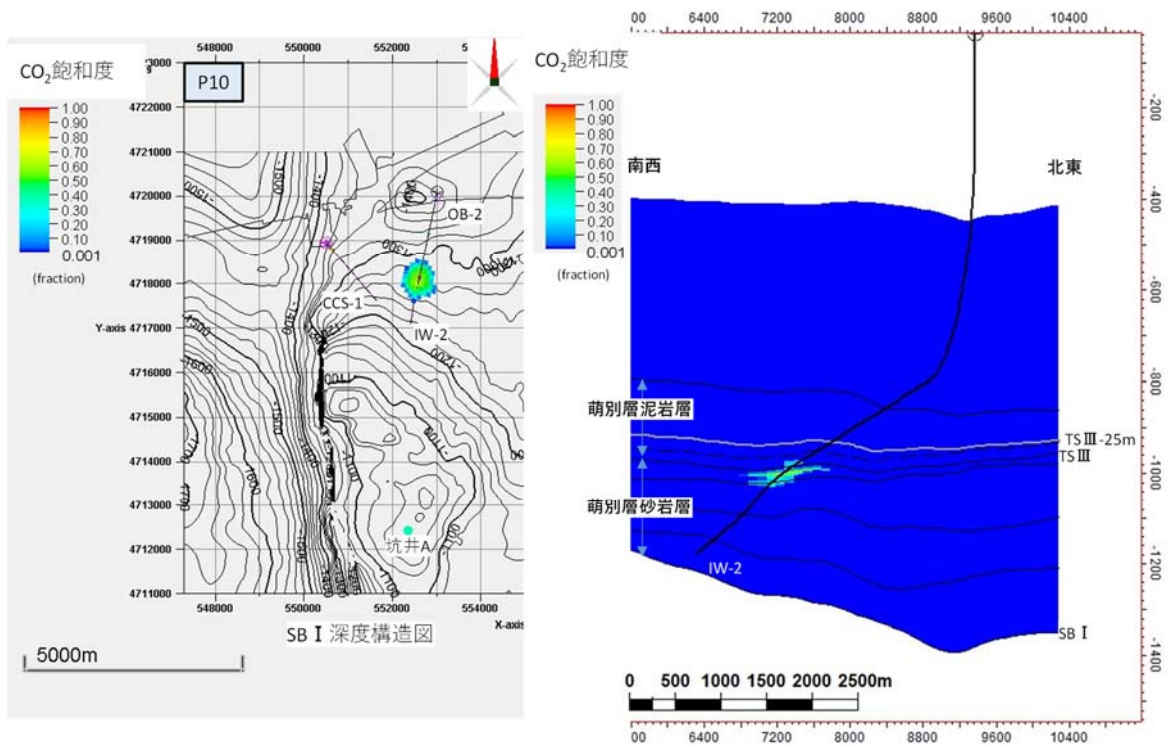
上記で検討した平面的な CO<sub>2</sub>の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影して、CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲を推定した (第 4.1-34 図～第 4.1-37 図)。推定結果を、第 4.1-14 表に示す。





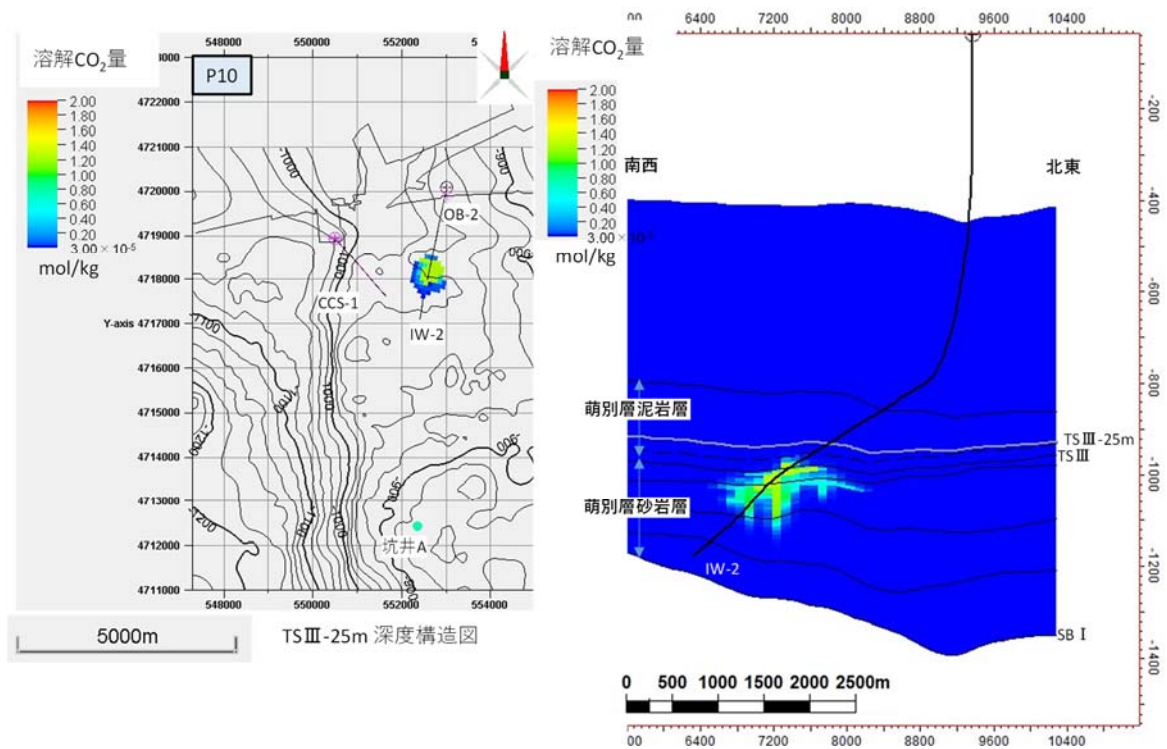
注: 1. 断面図(右図)より, CO<sub>2</sub>飽和度の上昇は, TS IIIよりも25mほど上位まで認められるため, TS IIIよりも25m浅い深度で構造図を作成し, CO<sub>2</sub>分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時のCO<sub>2</sub>分布状況を投影した。  
 2. 最も浅い深度で, 海面下950m程度まで分布するものと考えられる。

第 4. 1-34 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)



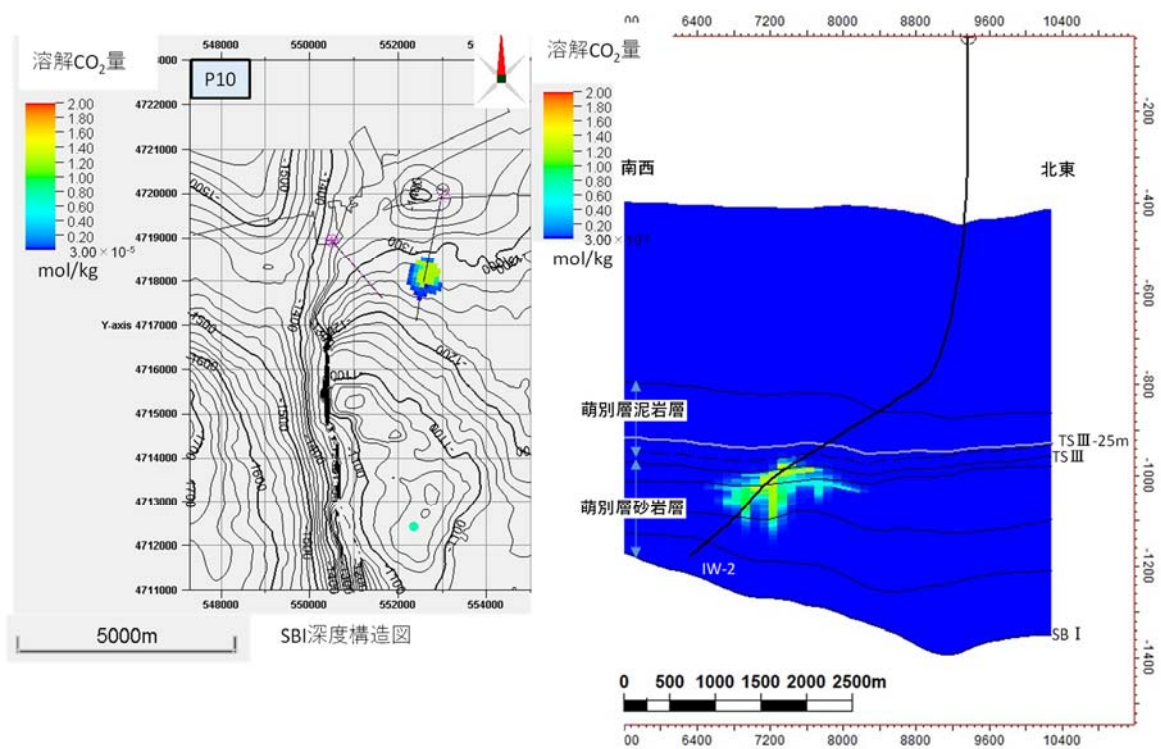
注: 1. CO<sub>2</sub>分布域 (CO<sub>2</sub>飽和度) を, 萌別層砂岩層下限 (SB I) 構造図に投影した。  
 2. CO<sub>2</sub>分布 (CO<sub>2</sub>飽和度) が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時のCO<sub>2</sub>分布状況 (CO<sub>2</sub>飽和度) を投影した。  
 3. 海面下1,280m程度まで分布するものと考えられる。

第 4. 1-35 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)



注: 1.断面図(右図)より, 溶解CO<sub>2</sub>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, CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>分布状況(溶解CO<sub>2</sub>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 4.1-36 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)



注: 1. CO<sub>2</sub> 分布域 (溶解 CO<sub>2</sub> 量) を, 萌別層砂岩層下限 (SB I) 構造図に投影した。  
2. CO<sub>2</sub> 分布 (溶解 CO<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 CO<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 4.1-37 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)

第 4.1-14 表 海底下廃棄した CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 飽和度	950	1,280
溶解 CO <sub>2</sub> 量	950	1,300

注：各モデルにおいて推定される CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の垂直的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

## 4.2 特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項

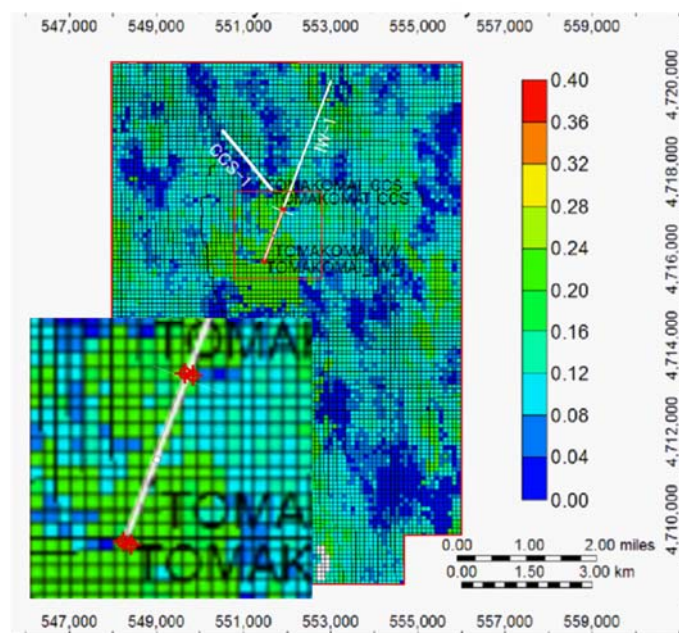
海底下廃棄をする海域の海洋環境の保全に障害を及ぼすおそれがないことを担保するため、「収容量 $\geq$ 期間内推定圧入可能量 $\geq$ 期間内計画圧入量」の関係が成立することを確認する。各用語は、本申請書において以下の通り定義する。

- ・収容量（貯蔵可能容量）：貯留層に貯蔵可能なCO<sub>2</sub>の最大量（単位：ton）  
予想されるCO<sub>2</sub>の貯留領域面積（m<sup>2</sup>）×その領域の平均層厚（m）×有効孔隙率×CO<sub>2</sub>貯留飽和度の最大値×貯留状態での平均CO<sub>2</sub>密度（ton/m<sup>3</sup>）
- ・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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>の量（単位：ton）

### (1) 滝ノ上層 T1 部層

#### ① CO<sub>2</sub>の貯留領域面積（CO<sub>2</sub>貯留領域の水平投影面積）

滝ノ上層で想定されるCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>の貯留領域面積は、2016年以降のCO<sub>2</sub>圧入でCO<sub>2</sub>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64,400m<sup>2</sup>とした。なお、現状では滝ノ上層に追加で圧入する予定はない。



注：右図は、98トンのCO<sub>2</sub>圧入後のCO<sub>2</sub>の分布範囲予測（第4.1-1表に示す範囲）。

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CO<sub>2</sub>の貯留領域面積

② 平均層厚 (CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 貯留飽和度の最大値

CO<sub>2</sub> 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。

$$Sgrmax = Sgr + 0.5 \times (1 - Swir - Sgr)$$

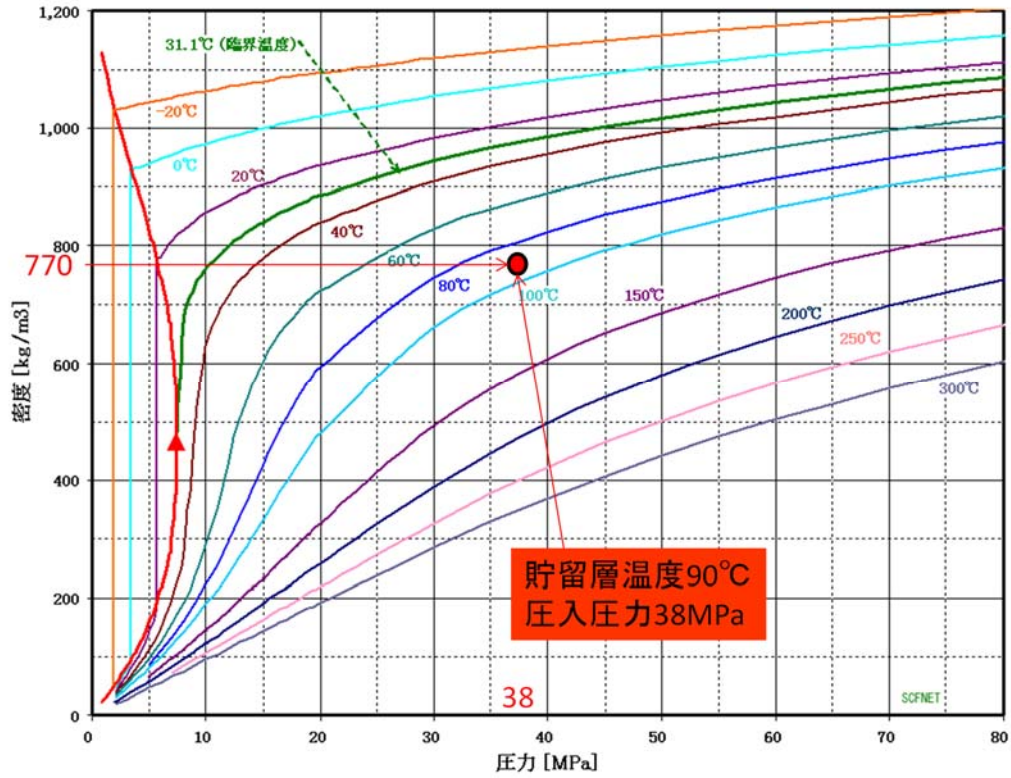
$$Swir (\text{残留水飽和率}) = 0.558$$

$$Sgr (\text{残留ガス飽和率}) = 0.04$$

⑤ 貯留状態での平均 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> の密度から、貯留状態での平均 CO<sub>2</sub> 密度は、0.770ton/m<sup>3</sup> とした。



注：超臨界流体 NET<sup>[1]</sup>より引用・加筆

第 4.2-2 図 圧入層準（滝ノ上層）での CO<sub>2</sub> の密度

[1] 超臨界流体 NET ([http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF\\_HP/scfnet.html](http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/scfnet.html), 2020/8/11 アクセス)

## 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。

第4.2-1表 滝ノ上層 T1 部層の収容量の算出

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

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<sup>[1]</sup>を使用し、地中貯留量としている。予想されるCO<sub>2</sub>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)。

$$\text{地中貯留量} = S_f \times A \times h \times \phi \times S_g / B_g\text{CO}_2 \times \rho$$

S<sub>f</sub> : 貯留率 (50%または25%)

A : 面積

h : 有効層厚

φ : 孔隙率

S<sub>g</sub> : 超臨界CO<sub>2</sub>飽和度 (20-50%-80%)

B<sub>g</sub>CO<sub>2</sub> : 超臨界CO<sub>2</sub>の容積係数 (約0.003m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

ρ : CO<sub>2</sub>密度 (1.976kg/m<sup>3</sup> 標準状態)

注：『二酸化炭素貯留適地調査事業』では、S<sub>f</sub>およびS<sub>g</sub>は50%を使用。上記式では温度や圧力を考慮せず、B<sub>g</sub>CO<sub>2</sub>を0.003m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>で一律に扱う。

第4.2-2表 滝ノ上層 T1 部層の地中貯留量の算出 (参考)

S <sub>f</sub> : 貯留率 (50%)	0.5
A : 面積	64,400 m <sup>2</sup>
h : 有効層厚 (m)	450 m
φ : 孔隙率	0.132
S <sub>g</sub> : 超臨界CO <sub>2</sub> 飽和度(50%)	0.5
B <sub>g</sub> CO <sub>2</sub> : 超臨界CO <sub>2</sub> の容積係数 (約0.003m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.003 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
ρ : CO <sub>2</sub> 密度 (1.976kg/m <sup>3</sup> 標準状態)	0.001976 ton/m <sup>3</sup>
<b>地中貯留量</b>	<b>63 万 ton</b>

[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.

⑦ 期間内計画圧入量が適切であることの確認

ア) 収容量

上記⑥で算出した収容量(63万トン)は、98トンのCO<sub>2</sub>圧入後のCO<sub>2</sub>の分布範囲予測から算出したものである。

イ) 期間内推定圧入可能量

本延長申請前の5年間において圧入したCO<sub>2</sub>量の実績から98トンと推定される。

ロ) 期間内計画圧入量

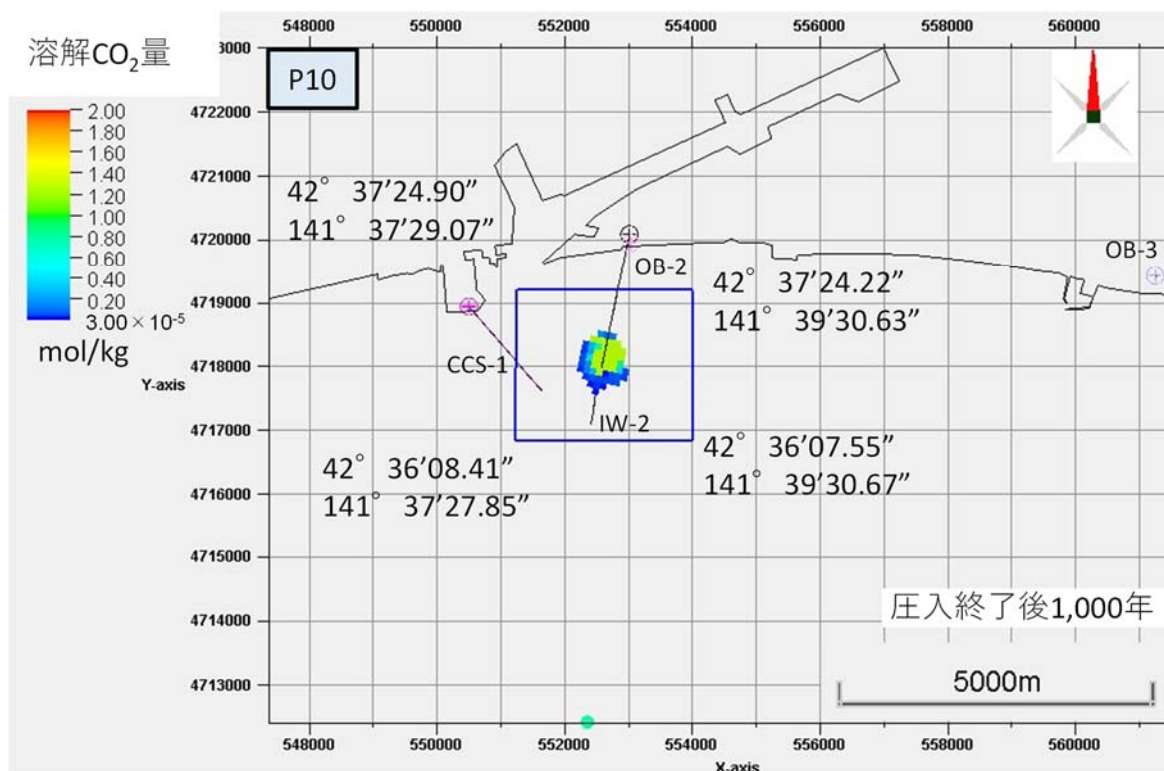
本延長申請で申請する5年間において、計画する圧入量は0トンとする。

以上より、滝ノ上層について「収容量 $\geq$ 期間内推定圧入可能量 $\geq$ 期間内計画圧入量」の関係が成立する。

(2) 萌別層砂岩層

① CO<sub>2</sub>の貯留領域面積 (CO<sub>2</sub>貯留領域の水平投影面積)

予測されるCO<sub>2</sub>の貯留領域面積は、300,012トンのCO<sub>2</sub>を圧入した実績から予測される貯留層内でのCO<sub>2</sub>の分布範囲とする(第4.2-3図)。貯留領域の面積は、約3.3km<sup>2</sup>(1.75km $\times$ 1.86km)となる。



第 4. 2-3 図 萌別層砂岩層における貯留領域 (CO<sub>2</sub>300,012 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 $\times$ 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>となる。(第4.2-4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	鵜川層上限 QTN_Base	シーケンス	孔隙容量
鵜川層	鵜川層基底 MU_Base		総計 (①+②+③+④)
萌別層泥岩層	萌別層泥岩層基底 MO_SH_Base_TS_III	III	<u>258</u> × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
萌別層砂岩層上部	シーケンス境界SB-III		① 40 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
萌別層砂岩層下部	萌別層砂岩層基底 MO_Base-MFS_II	II	② 55 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
萌別層(+荷葉層)砂岩泥岩互層	シーケンス境界SB-II		③ 47 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
萌別層(+荷葉層)砂岩層	シーケンス境界SB-I	I	④ 116 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>

第 4.2-4 図 貯留領域 (CO<sub>2</sub>300,012 トン圧入時) における貯留層の孔隙容量

### ③ CO<sub>2</sub>貯留飽和度の最大値

CO<sub>2</sub>貯留飽和度の最大値は、Holtz (2002) による式<sup>[1]</sup>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。

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

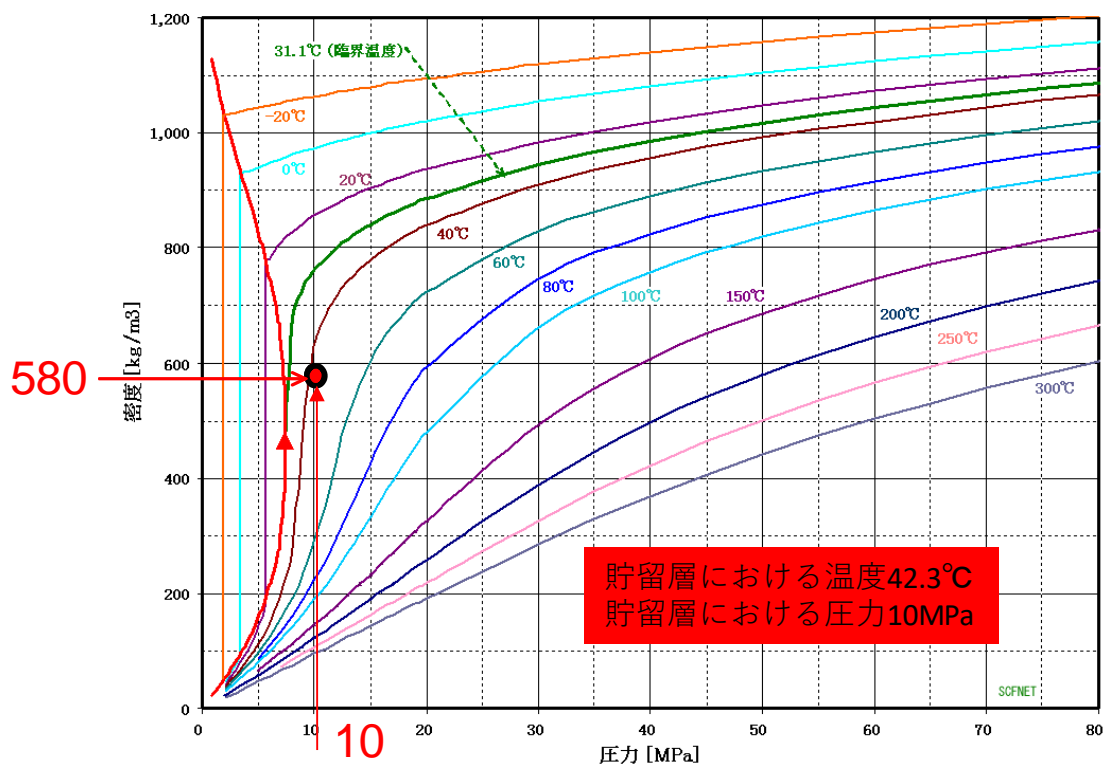
$$\phi \text{ (平均孔隙率)} = 0.299$$

### ④ 貯留状態での平均 CO<sub>2</sub>密度

CO<sub>2</sub>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 4.2-5 図に示す圧入層準 (萌別層砂岩層) での CO<sub>2</sub>の密度から、貯留状態での平均 CO<sub>2</sub>密度は、580kg/m<sup>3</sup>とする。

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



超臨界流体 NETより引用・加筆[http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF\\_HP/PropertyW.htm](http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/PropertyW.htm)

注：超臨界流体 NET<sup>[1]</sup>より引用・加筆

第 4.2-5 図 圧入層準（萌別層砂岩層）での CO<sub>2</sub> 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 4.2-3 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 4.2-4 表）。

第 4.2-3 表 萌別層砂岩層の収容量の算出

萌別層砂岩層

CO <sub>2</sub> の貯留領域面積	3,255,000 m <sup>2</sup>
孔隙容量（孔隙率×岩石量）	258×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
平均孔隙率	0.27
CO <sub>2</sub> 貯留飽和度の最大値	0.257
貯留状態での平均 CO <sub>2</sub> 密度	0.580 ton/m <sup>3</sup>
<b>収容量</b>	<b>3,846 万 ton</b>

[1] 超臨界流体 NET ([http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF\\_HP/scfnet.html](http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/scfnet.html), 2020/8/11 アクセス)

第 4.2-4 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 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
=面積×有効層厚×孔隙率	
Sg：超臨界 CO <sub>2</sub> 飽和度（50%）	0.5
B <sub>g</sub> CO <sub>2</sub> ：超臨界 CO <sub>2</sub> の容積係数（約 0.003m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ）	0.003 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
ρ：CO <sub>2</sub> 密度（1.976kg/m <sup>3</sup> 標準状態）	0.001976 ton/m <sup>3</sup>
<b>地中貯留量</b>	<b>4,248 万 ton</b>

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 CO<sub>2</sub> 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。

イ) 期間内推定圧入可能量

2016 年 4 月 6 日より 2019 年 11 月 22 日までの約 3.5 年間で 300,012 トンの CO<sub>2</sub> を圧入した実績を考慮し、本延長申請による 5 年間で、少なくとも 30 万トンの CO<sub>2</sub> を圧入可能であると判断する。

ウ) 期間内計画圧入量

本延長申請による 5 年間で、圧入の計画は未定である。よって、0 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、「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 6～44m、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变化の影響下にある。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、「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」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。