

## 添付書類- 4

当該海底下廃棄をする海域が、海底下廃棄許可省令第2条において定める基準に適合し、かつ、当該海底下廃棄をする海域の海洋環境の保全に障害を及ぼすおそれがないものであることを説明する書類



## 目 次

1.	海底下廃棄をする海域の海底下廃棄許可省令第2条において定める基準への適合	- 1 -
1.1	地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がない海域	- 2 -
1.2	将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる海域	- 4 -
1.3	特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する海域（延長申請時（2020年8月））	- 6 -
1.4	海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視をすることができる海域	- 7 -
1.5	特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合において、当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずることができる海域	- 10 -
1.6	当該海域及びその周辺における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在に関する知見が得られている海域	- 11 -
2.	地層の特徴に係る事項	- 12 -
2.1	広域の地層・地質の特徴	- 12 -
(1)	テクトニクス概要	- 12 -
(2)	北海道周辺の地殻応力分布	- 13 -
(3)	北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動	- 13 -
(4)	苫小牧周辺の活断層	- 16 -
2.2	廃棄海域とその近傍の地層/地質の特徴	- 17 -
(1)	周辺地域の地質概要	- 17 -
(2)	周辺地域の地層水塩分濃度解析による水理地質評価	- 18 -
①	萌別層～荷菜層	- 19 -
②	滝ノ上層	- 19 -
(3)	当該海域の地質	- 21 -
①	当該地域で実施した調査の概要	- 21 -
ア)	三次元弾性波探査	- 22 -
イ)	調査井	- 22 -
ウ)	圧入井	- 22 -
エ)	CO <sub>2</sub> 挙動予測シミュレーション	- 22 -
②	当該地域で取得したデータおよびその解析結果	- 24 -
ア)	三次元弾性波探査結果解釈の概要	- 24 -
イ)	苫小牧 CCS-1 の解析結果の概要	- 29 -
ウ)	苫小牧 CCS-2 の解析結果の概要	- 32 -

エ)	圧入井の解析結果の概要.....	- 32 -
カ)	苫小牧 0B-2 解析結果の概要.....	- 33 -
カ)	解析結果.....	- 33 -
③	地質モデルの作成.....	- 36 -
ア)	滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成.....	- 36 -
イ)	萌別層砂岩層用の地質モデルの作成（2019 年度地質モデル）.....	- 47 -
ウ)	萌別層砂岩層用の地質モデルの作成（2021 年度地質モデル）.....	- 57 -
④	CO <sub>2</sub> 挙動予測シミュレーション.....	- 60 -
ア)	滝ノ上層 T1 部層における CO <sub>2</sub> 挙動予測（圧入実績を踏まえた予測）..	- 60 -
イ)	萌別層砂岩層における CO <sub>2</sub> 挙動予測（2019 年度モデルシミュレーション）	- 68 -
ウ)	萌別層砂岩層における CO <sub>2</sub> 挙動予測（2021 年度モデルシミュレーション）	- 98 -
2.3	鉱業権の設定または出願の状況について.....	- 106 -
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.....	- 107 -
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.....	- 107 -
(1)	滝ノ上層 T1 部層.....	- 107 -
(2)	萌別層砂岩層.....	- 111 -
3.2	CO <sub>2</sub> 漏出の可能性検討.....	- 114 -
(1)	CO <sub>2</sub> 漏出要因の洗い出し.....	- 114 -
(2)	CO <sub>2</sub> 漏出要因に関する検討のまとめ.....	- 116 -
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.....	- 118 -
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.....	- 118 -
(1)	滝ノ上層 T1 部層中での空間的広がり.....	- 118 -
①	検討に使用した地質モデル.....	- 118 -
ア)	圧入実績.....	- 118 -
イ)	CO <sub>2</sub> 圧入時の挙動とパラメータの調整.....	- 119 -
②	CO <sub>2</sub> の平面的な分布範囲.....	- 121 -
③	CO <sub>2</sub> の垂直的な分布範囲.....	- 123 -
(2)	萌別層砂岩層中での空間的広がり.....	- 123 -
①	地質モデル.....	- 123 -
ア)	2019 年度地質モデルの作成.....	- 123 -
イ)	2021 年度地質モデルの作成.....	- 134 -
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.....	- 137 -
ア)	2019 年度モデルシミュレーション.....	- 137 -
イ)	2021 年度モデルシミュレーション.....	- 165 -



4.2	特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項.....	- 175 -
(1)	滝ノ上層 T1 部層.....	- 175 -
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) .....	- 175 -
②	平均層厚 (CO <sub>2</sub> 貯留領域の鉛直方向の平均長) .....	- 176 -
③	有効孔隙率.....	- 176 -
④	CO <sub>2</sub> 貯留飽和度の最大値.....	- 176 -
⑤	貯留状態での平均 CO <sub>2</sub> 密度 .....	- 176 -
⑥	収容量 .....	- 178 -
⑦	期間内計画圧入量が適切であることの確認.....	- 179 -
ア)	収容量 .....	- 179 -
イ)	期間内推定圧入可能量.....	- 179 -
ウ)	期間内計画圧入量.....	- 179 -
(2)	萌別層砂岩層.....	- 179 -
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) .....	- 179 -
②	孔隙容量.....	- 179 -
③	CO <sub>2</sub> 貯留飽和度の最大値.....	- 180 -
④	貯留状態での平均 CO <sub>2</sub> 密度 .....	- 180 -
⑤	収容量 .....	- 181 -
⑥	期間内計画圧入量が適切であることの確認.....	- 182 -
ア)	収容量 .....	- 182 -
イ)	期間内推定圧入可能量.....	- 182 -
ウ)	期間内計画圧入量.....	- 182 -
5.	海底下廃棄をする海域の海洋環境の特徴に係る事項.....	- 183 -



## 1. 海底下廃棄をする海域の海底下廃棄許可省令第2条において定める基準への適合

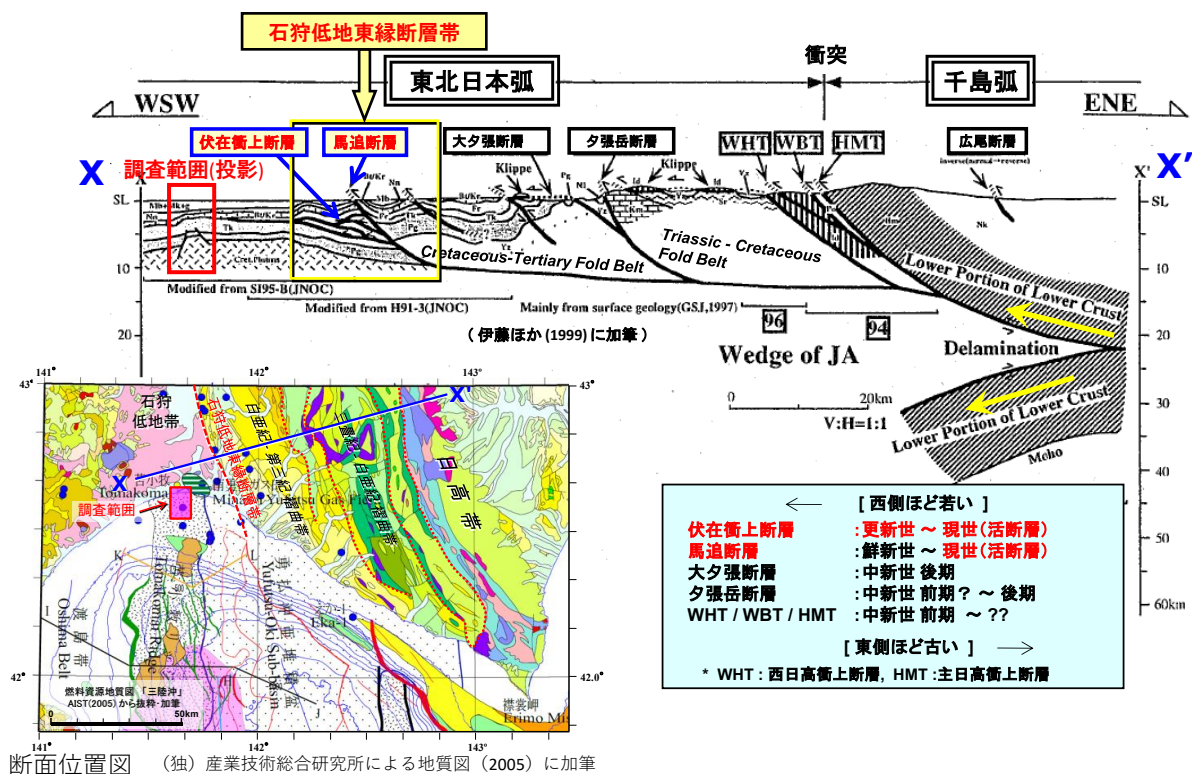
環境省令第二十三号（特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令）の第二条に定める基準は、以下の6項目である。

- 一 地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がない海域
- 二 将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる海域
- 三 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する海域
- 四 海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視をすることができる海域
- 五 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合において、当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずることができる海域
- 六 当該海域及びその周辺における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在に関する知見が得られている海域

以下、これら6項目の基準への適合について記載する。

## 1.1 地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がない海域

第 1.1-1 図に、苫小牧周辺のテクトニクス概要を示す。



特定二酸化炭素ガスの圧入想定域は、北海道の石狩-日高地域に属する(第 1.1-1 図左下の断面位置図)。地質構造的には、西方に向かって前進する北北西-南南東方向の褶曲・衝上断層帯で特徴づけられる(第 1.1-1 図上段)。同褶曲・衝上断層帯は、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成された日高衝突帯の西側の前縁部に形成されている<sup>[1]</sup>。

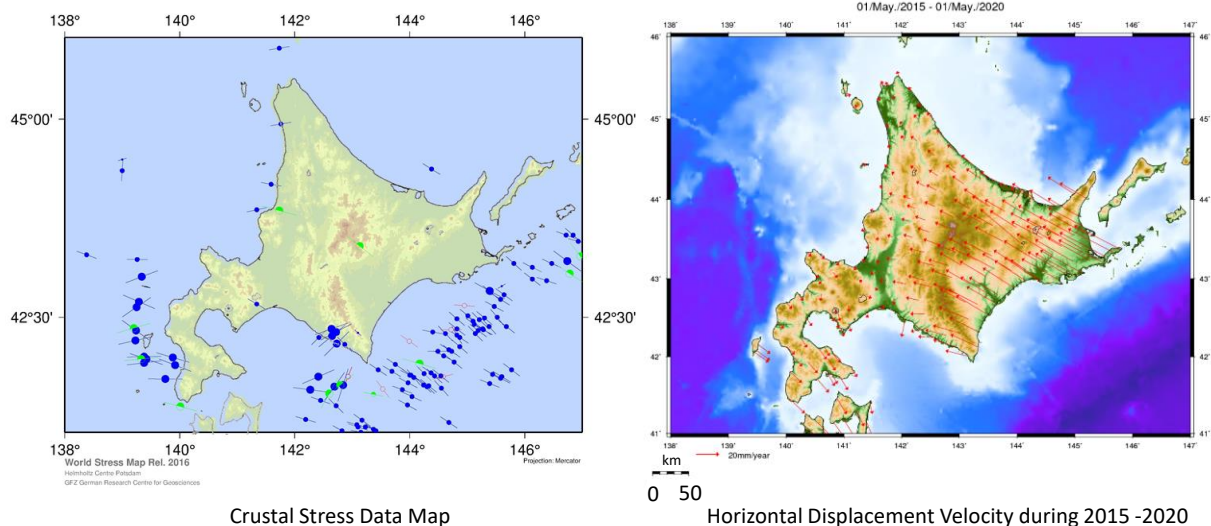
広域の地質構造的な特徴は、以下のとおり要約できる。

- ・西方に向かって前進する複数の褶曲・衝上断層帯が発達する。これらは、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成されたもので、中新世に始まったものである。
- ・褶曲・衝上断層帯にはいくつかの断層が認められ、地表に現れている最も西側の断層は馬追断層で代表される断層群である。
- ・既往の弾性波探査データから、馬追断層の西側にはいくつかの伏在衝上断層が推定される。
- ・馬追断層およびその西側の伏在衝上断層は、南北に延びる活断層である「石狩低地東縁断層帯」を形成している。

国土地理院による GPS 観測点網 (GEONET) による年間平均変位速度ベクトルと、地殻応力データベースである World Stress Map<sup>[2]</sup> (WSM) を利用して応力分布について調査した。第 1.1-2 図に、WSM による応力データ分布および札幌観測点を固定した変位速度図を示す。

[1] 伊藤ほか. 1999. 日高衝突帯におけるデラミネーション-ウェッジ構造. 月刊地球, 21(3), pp.130-136.

[2] World Stress Map (<http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>, 2026/1/20 アクセス)



第 1. 1-2 図 北海道地域の地殻応力データ分布図（左側）および水平変位速度分布図（右側）

これらの図に現れた応力分布を反映すると考えられる特徴を列記する。

北海道南東部一日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間 40mm 以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧―室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。

上記より、当該海域では、地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録はほぼ確認されなかった。

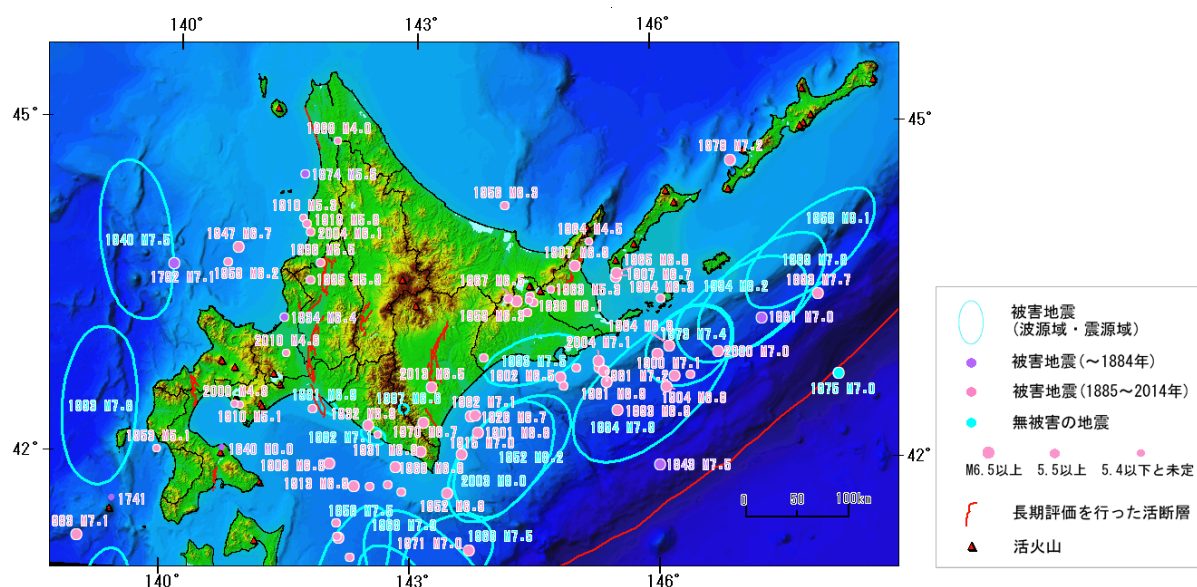
## 1.2 将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる海域

北海道周辺の地震活動としては、太平洋プレートの沈み込みに伴うプレート境界型地震の他、沈み込む太平洋プレート内で発生するプレート内地震、内陸の比較的浅部で発生する内陸型地震、十勝岳や樽前山等の火山活動に伴う火山性地震がある。これらのうちプレート境界型地震、プレート内地震、内陸型地震は、第 1.2-1 図に示すように、いずれも過去において被害を生じる地震を含んでいる。ただし、プレート境界型地震の震源域は苫小牧地点から南東に 100km 以上離れていること、プレート内地震の震源は深度約 50km 以上と非常に深いことから、苫小牧地点において二酸化炭素貯留対象層となる浅部の地層に著しい変動を生じ得るのは内陸型地震に限られる。

内陸型地震の震源として政府の地震調査研究推進本部が認定する活断層のうち、苫小牧地点に最も近いものは石狩低地東縁断層帯である。同断層帯は圧入地点から 20km 以上離れていることから、同断層帯を震源とする地震により貯留地点近傍の地層が著しい変動を受けることはなく、当該海域で実施した弾性波探査結果においても過去の同断層帯の活動に伴う地層変形は認められない（第 2.2 節(3)②参照）。

以上のことから、当該海域では、将来において地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる。

なお、平成 29 年胆振地方中東部の地震（2017/7/1, M5.1）、平成 30 年北海道胆振東部地震（2018/9/6, M6.7）の震源および平成 31 年北海道胆振東部地震関連（2019/2/21, M5.8）は、第 1.2-2 図に示すように、いずれも苫小牧地点から見て石狩低地東縁断層帯より東側に離れて位置しており、これらの地震による貯留地点及び海底下の CO<sub>2</sub>貯留域への影響は確認されていない。



地震調査研究推進本部<sup>[1]</sup>

第 1.2-1 図 北海道周辺の地震活動

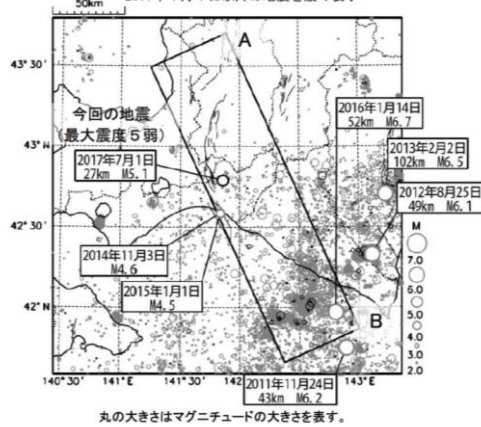
[1] 地震調査研究推進本部

[https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional\\_seismicity/hokkaido/hokkaido-higaijishin.gif](https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/hokkaido/hokkaido-higaijishin.gif), 2026/1/20 アクセス)



平成29年7月1日 胆振地方中東部の地震  
(発生場所の詳細)

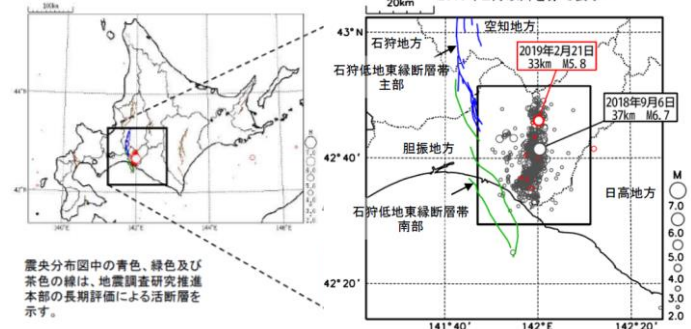
震央分布図  
(1997年10月1日～2017年7月2日00時30分、深さ0～120km、M2.0以上)  
2017年1月1日以降の地震を濃く表示



丸の大きさはマグニチュードの大きさを表す。  
気象庁発表 (2017/7/2)

平成30年北海道胆振東部地震～平成31年北海道胆振東部地震  
地震活動の詳細 (2019年2月21日24時現在)

震央分布図  
(2018年9月6日03時～2019年2月21日24時、  
深さ60km以下、M2.0以上)  
2019年2月以降の地震を赤で表示



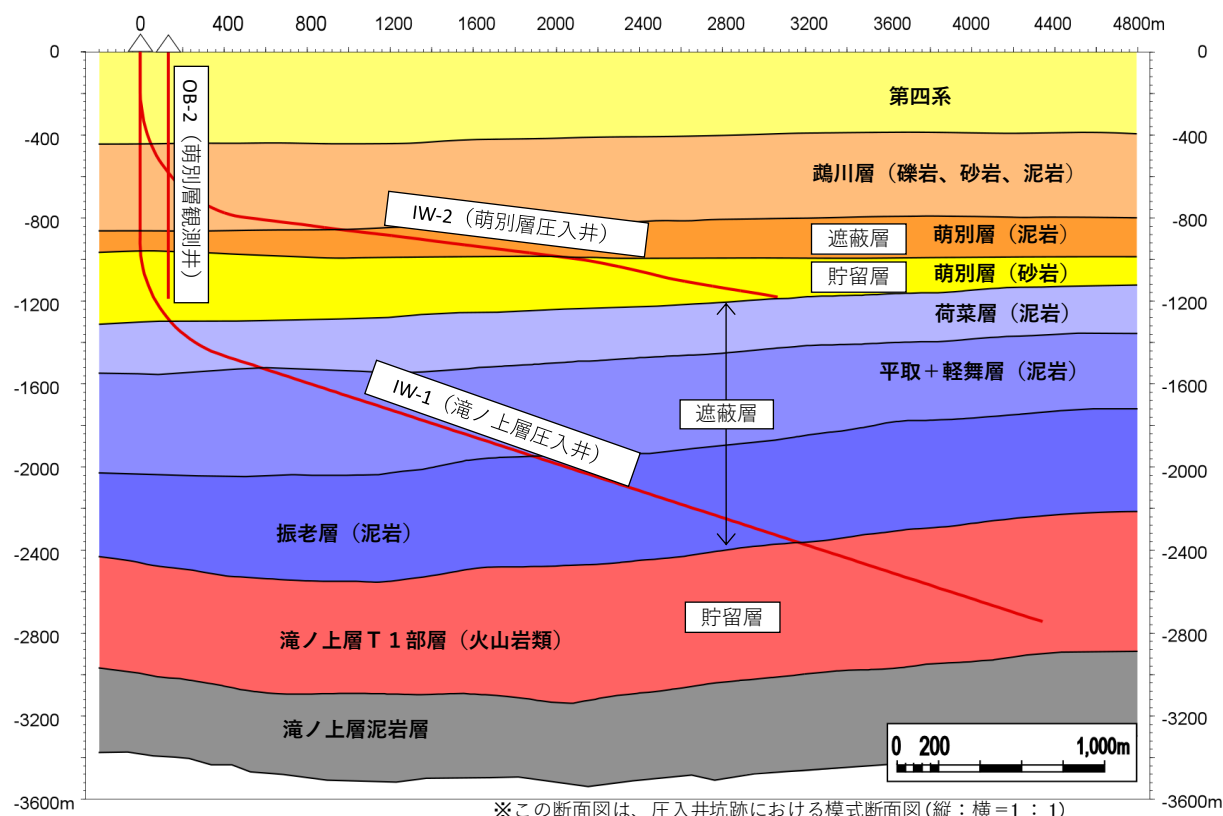
震央分布図中の青色、緑色及び  
茶色の線は、地震調査研究推進  
本部の長期評価による活断層を  
示す。

気象庁発表 (2019/2/22)

第 1.2-2 図 平成 29 年胆振地方中東部の地震，平成 30 年北海道胆振東部地震および平成 31 年北海道胆振東部地震関連の震源位置

### 1.3 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する海域 (延長申請時(2020年8月))

今回の計画においては、滝ノ上層および萌別層に掘削された圧入井から、滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層の 2 つの貯留層に 2019 年 11 月までに圧入した特定二酸化炭素ガスの貯留状態の監視をおこなう。それぞれの貯留層の海面下深度の上限は、滝ノ上層 T1 部層で約 2,400m, 萌別層砂岩層で約 1,000m であり、十分な深度を確保している(第 1.3-1 図)。



第 1.3-1 図 苫小牧地点の層序

また、それぞれの貯留層に対する遮蔽層の厚さおよび浸透率については、滝ノ上層 T1 部層に対しては 850m 程度および  $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6} \text{mD}$ , 萌別層砂岩層に対しては 100m 程度および  $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$  であり、十分に特定二酸化炭素ガスを封じ込められ、海底下廃棄の安全性／完全性が確保されている。

本書類の「2.2 廃棄海域とその近傍の地層/地質の特徴」および「4. 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスの地層内での空間的な広がり及び特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項」において、地層/地質構造に係る調査結果およびそれらのデータを用いた  $\text{CO}_2$  挙動予測シミュレーション結果を記載しており、それぞれの貯留層に対する圧入終了後 1,000 年間の  $\text{CO}_2$  挙動予測は次のとおりであり、 $\text{CO}_2$  漏出の可能性が極めて小さいと判断できる。



1) 滝ノ上層 T1 部層

- ・ 気相（超臨界）CO<sub>2</sub> および溶解 CO<sub>2</sub> の広がりとは滝ノ上層圧入井から 200m の区間。
- ・ CO<sub>2</sub> は、遮蔽層へ到達しない。

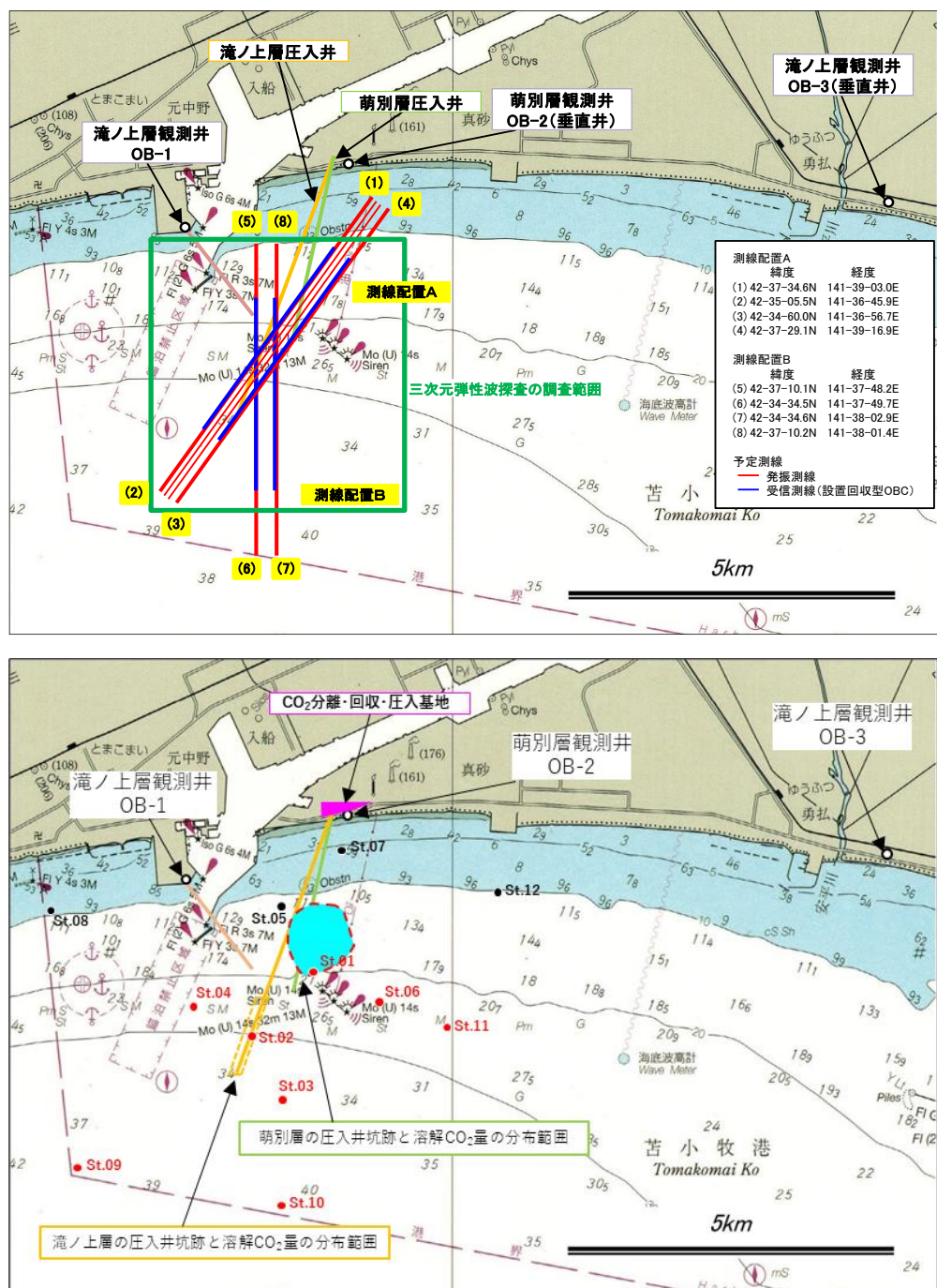
2) 萌別層砂岩層

- ・ 気相（超臨界）CO<sub>2</sub> の広がりとは、水平方向に東西 780m 程度、南北 1,050m 程度。また、溶解 CO<sub>2</sub> の広がりとは、東西 820m 程度、南北 1,100m 程度。
- ・ 遮蔽層層準において砂質の岩相が発達する区間への CO<sub>2</sub> の移動は想定されるが、それより上位へは移動しない。

上記より、当該海域は、特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害を防止する地質構造を有する。

**1.4 海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視をすることができる海域**

海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視のうち、海域で実施するのは、貯留層内の CO<sub>2</sub> の広がりを確認する弾性波探査と、汚染状況を監視する海洋環境調査である。調査海域を第 1.4-1 図に示す。第 1.4-1 図の弾性波探査の調査位置と海水の化学的性状の調査海域と測点位置は、2016～2024 年度の監視計画で調査を行った位置を示す。



なお、海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視のうち、圧入井の圧力・温度および観測井の圧力・温度については、圧入井の観測データは専用の光ケーブルによって、観測井の観測データは電話回線を利用して CO<sub>2</sub> 分離・回収・圧入基地内管理棟の坑井モニタリング監視システムに送信され、監視、記録される。これらの観測機器は既に設置され、ベースライン観測を実施しており、海底下廃棄をした特定二酸化炭素ガスの状態の監視及び汚染状況の監視が出来る状態にある。

1.5 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合において、当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずることができる海域

「特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合」は、通常時監視の確認調査で移行基準の超過が確認された場合が該当し、「当該障害の拡大又は発生を防止するために必要な措置を講ずる処置」は、圧入の停止である。圧入の停止後は、環境省指示のもと適切な措置を実施する。

## 1.6 当該海域及びその周辺における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在に関する知見が得られている海域

苫小牧市および厚真町周辺海域の海洋生物について、浮遊生物の生息状況、魚類等遊泳動物の生息状況、海草及び藻類の生育状況並びにさんご類の生息状況、および底生生物（メイオベントス、マクロベントスおよびメガロベントス）の生息状況を、現地調査と既存資料の整理により把握した。また、生態系について、藻場、干潟、さんご群集その他の脆弱な生態系の状態、重要な生物種の産卵場又は生育場その他の海洋生物の生育又は生息にとって重要な海域の状態、および熱水生態系その他の特殊な生態系の状態を、既存資料<sup>[1]-[9]</sup>の整理により把握した。さらに、海中公園その他の自然環境の保全を目的として設定された区域としての利用状況を、既存資料の整理により把握した。これら調査の結果、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの存在は確認されなかった（「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をすることが海洋環境に及ぼす影響についての調査の結果に基づく事前評価に関する事項を記載した書類」の「3.2 海洋生物」，「3.3 生態系」および「3.4 海洋の利用」）。

上記より、当該海域及びその周辺は、自然保護的観点から特別に保護すべき対象が存在していないことが把握されている場所である。

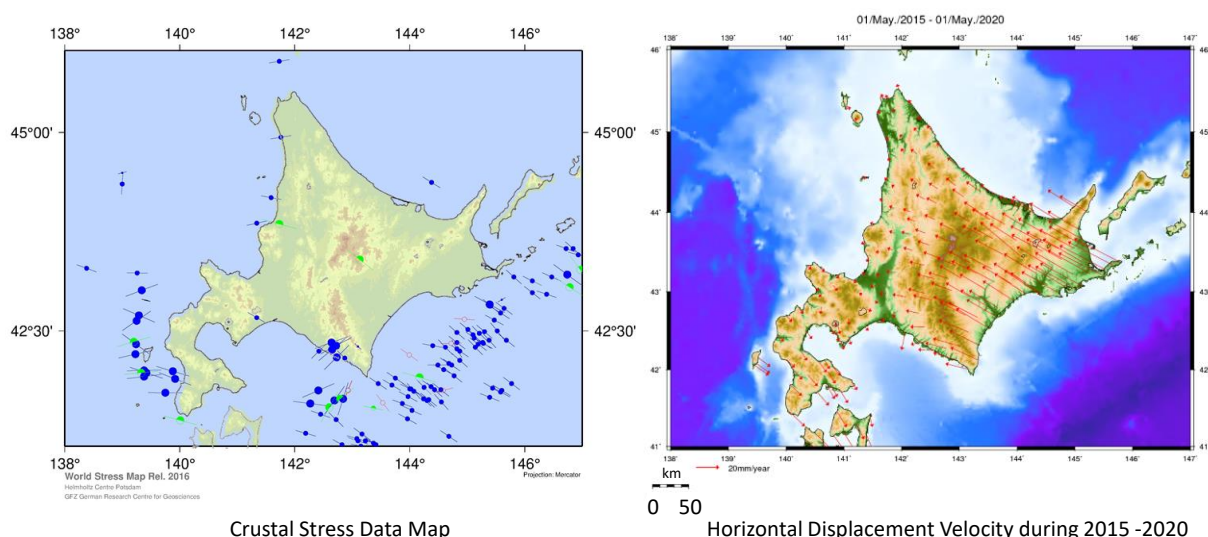
- 
- [1] 『日本の国立公園』（環境省自然環境局ウェブサイト：<https://www.env.go.jp/park/shikotsu/index.html>，2025/6/20 アクセス）
  - [2] 『ラムサール条約と条約湿地. ウトナイ湖.』（環境省自然環境局：[https://www.env.go.jp/nature/ramsar/conv/ramsarleaflet/12\\_Utonai-ko.pdf](https://www.env.go.jp/nature/ramsar/conv/ramsarleaflet/12_Utonai-ko.pdf)，2025/6/20 アクセス）
  - [3] 『自然環境保全地域等』（北海道環境局生物多様性保全課ウェブサイト：<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/kouen/hozen.html>，2025/5/27 アクセス）
  - [4] 『自然環境保全地区』（苫小牧市環境生活課自然保護係ウェブサイト：<https://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/shizen/shizenhogo/sizenkankyo/kakuhozenchiku.html>，2025/5/27 アクセス）
  - [5] 『2025 年度 鳥獣保護区等位置図』（北海道ウェブサイト：<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/syuryo/ichizu.html>，2025/5/27 アクセス）
  - [6] 『苫小牧市環境白書 令和 6 年度版（令和 5 年度実績）』（苫小牧市環境衛生部環境保全課ウェブサイト：<https://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/files/00043700/00043786/R6.%E5%85%A8%E9%A0%81.pdf>，2025/6/20 アクセス）
  - [7] 『第 4 回自然環境保全基礎調査』（環境庁，1994 年）
  - [8] 『サンゴの生態』（日本サンゴ礁学会ウェブサイト：[https://www.jcrs.jp/wp/?page\\_id=622](https://www.jcrs.jp/wp/?page_id=622)，2025/2/21 アクセス）
  - [9] 『西太平洋の化学合成生態系』（独立行政法人海洋研究開発機構ウェブサイト：<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/XBR0/eco/project/busshitsu/shinkai/onsen2.html#reiyusui>，2014/10/17 アクセス）





## (2) 北海道周辺の地殻応力分布

国土地理院による GPS 観測点網 (GEONET) による年間平均変位速度ベクトルと、地殻応力データベースである World Stress Map<sup>[1]</sup> (WSM) を利用して応力分布について調査した。第 2.1-2 図に、WSM による応力データ分布および札幌観測点を固定した変位速度図を示す。



第 2.1-2 図 北海道地域の地殻応力データ分布図 (左側) および水平変位速度分布図 (右側)

これらの図に現れた応力分布を反映すると考えられる特徴を列記する。

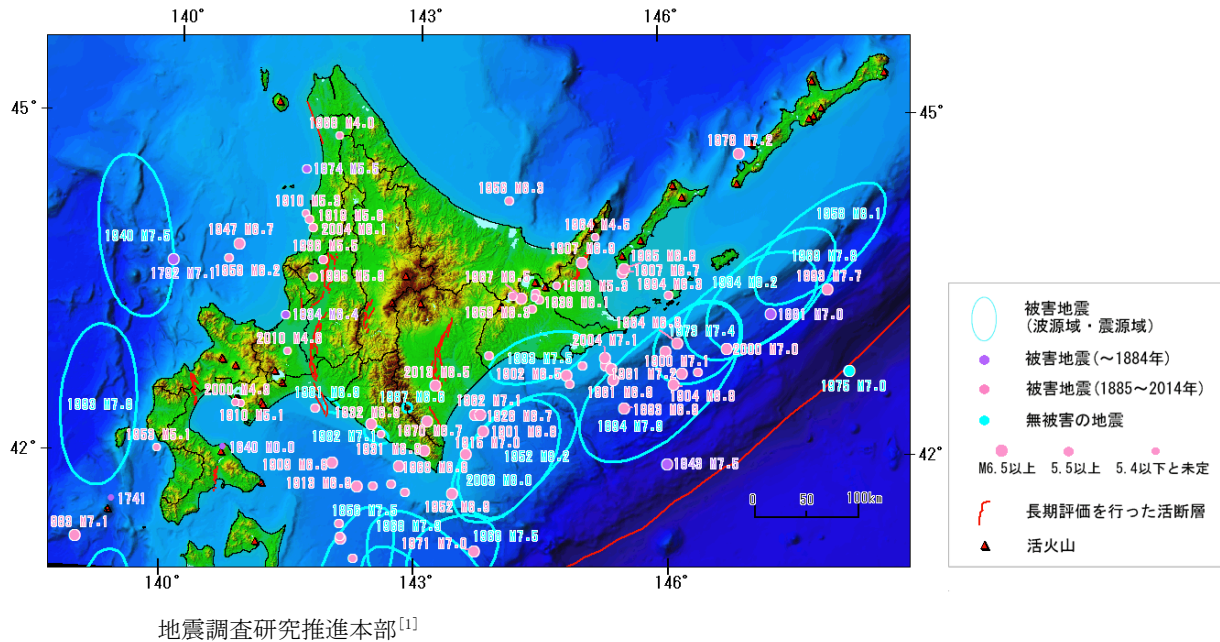
北海道南東部一日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間 40mm 以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧一室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。

## (3) 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動

北海道周辺には、太平洋プレートの沈み込みに伴うプレート境界型地震の他、深度約 50km 以深で発生するプレート内地震、内陸の比較的浅部で発生する内陸型地震の地震活動があり、千島海溝ー日本海溝に沿って、津波を伴うマグニチュード (M) 8 クラスの海溝型巨大地震が繰り返し発生している (第 2.1-3 図)。北海道では、古文書に記録された過去の地震は少ないが、津波堆積物の調査から、400~500 年周期で巨大津波を経験してきたことがわかっている。

<sup>[1]</sup> World Stress Map (<http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>, 2026/1/20 アクセス)



第 2. 1-3 図 北海道周辺の地震活動

苫小牧周辺における最近の地震活動を，第 2. 1-4 図に示す。

震源分布断面図からは，深度約 50 km 以深のプレート内地震と浅部（20～40km 以浅）の内陸地震の 2 タイプの地震活動があることがわかる。

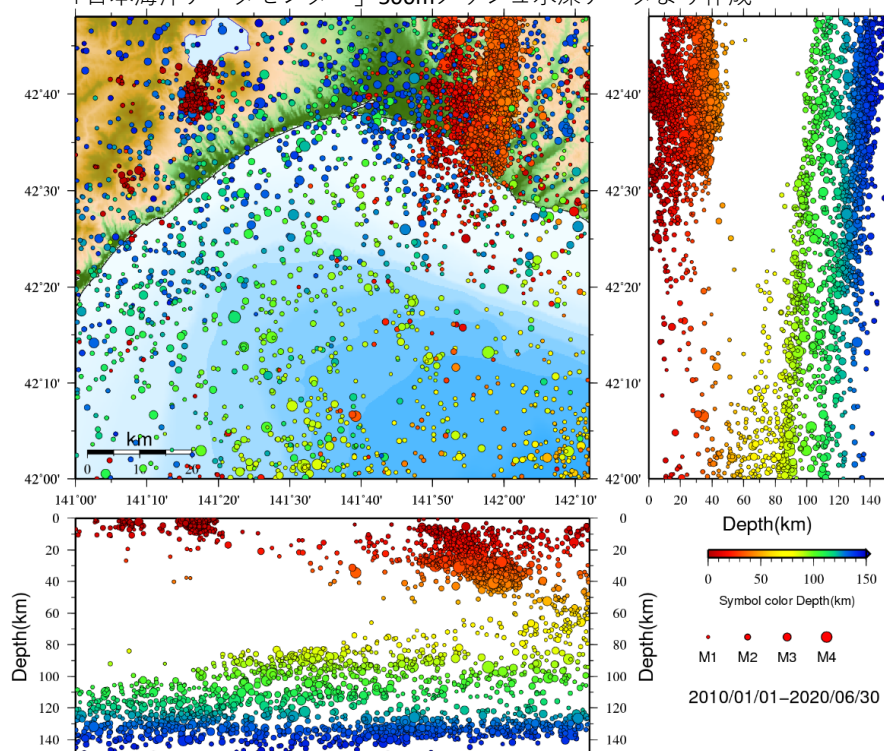
苫小牧市南西側には，樽前山などの活火山があり，群発地震が発生することがある。ほとんどの場合 M5 以下であるが，まれに M5 より大きくなり，局所的に被害が生じることがある。群発地震の活動期間は，多くは 1～3 ヶ月の比較的短い時間で収まるが，1 年を越えた例も知られている。

<sup>[1]</sup> 地震調査研究推進本部

[https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional\\_seismicity/hokkaido/hokkaido-higaijishin.gif](https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/hokkaido/hokkaido-higaijishin.gif) ,  
2026/1/20 アクセス)

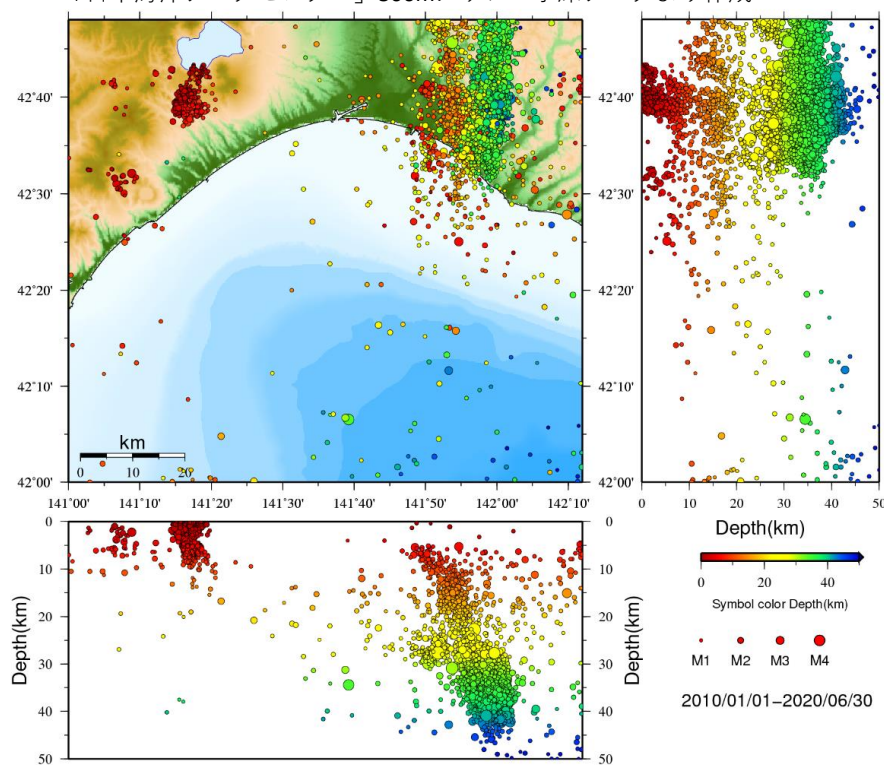


国土地理院数値地図250mメッシュ（標高）および海上保安庁  
「日本海洋データセンター」500mメッシュ水深データより作成



2010～2020年、深度150km未満、マグニチュード1以上を表示

国土地理院数値地図250mメッシュ（標高）および海上保安庁  
「日本海洋データセンター」500mメッシュ水深データより作成



2010～2020年、深度50km未満、マグニチュード1以上を表示

第 2.1-4 図 苫小牧周辺における最近の地震活動

#### (4) 苫小牧周辺の活断層

ここで、活断層とは、第四紀後期更新世（約 13 万年前）以降現在まで活動的である断層、と定義する。

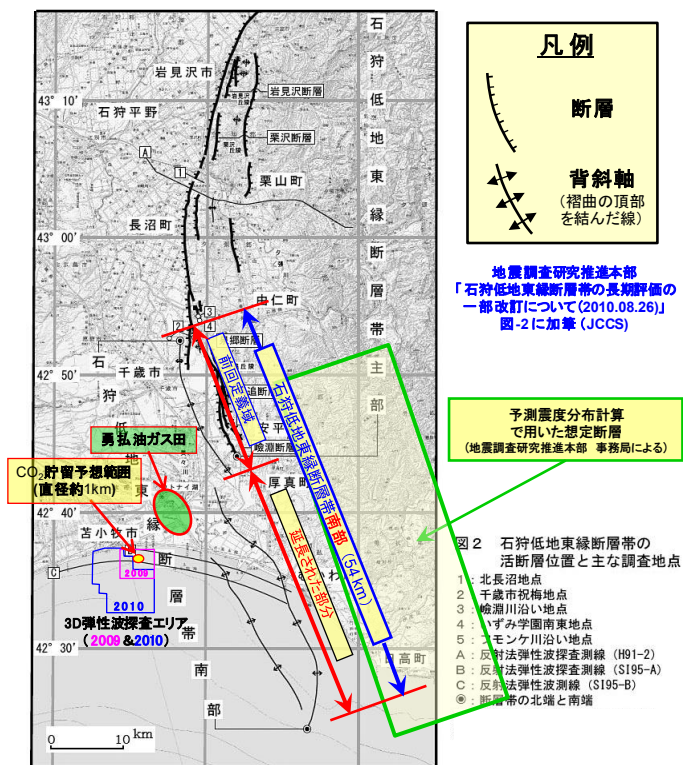
北海道地方の活断層のほとんどは逆断層であり、北海道の中央部がほぼ東西方向に圧縮されていることを示している。地殻変動観測からもおおむね西北西－東南東方向の圧縮場にあることがわかる（第 2.1-2 図）。

苫小牧周辺の活断層としては、石狩平野の東縁に沿って南北方向に走っている「石狩低地東縁断層帯」がある（第 2.1-1 図）。第 2.1-5 図は、地震調査研究推進本部による「石狩低地東縁断層帯」の分布図である。2010 年 8 月に改訂されて追加された南部延長部も含まれている。図中の南部延長部は、断層そのものではなく断層活動を伴う変形を表す背斜構造軸として表現されている。震度予測シミュレーションで用いられている断層は、背斜軸の 10～20km 東方に想定されており、圧入地点からは 20km 以上あり、十分離れているといえる。

**地震調査研究推進本部**  
「石狩低地東縁断層帯の評価の一部改定（2010.08.26）」  
＜南側の海域まで伸長＞

項目	評価	
断層の長さ	54km以上	○
断層の傾斜	東傾斜 (深さ約3km以深では低角度、約2.5kmでほぼ水平)	◎
1回のずれの量	4m程度以上	△
平均活動間隔	1万7千年程度以上	△
想定される地震の規模	M7.7程度以上	△
地震発生確率 (30年:ポアソン)	0.2%以下	d

信頼度 ⇒ ◎: 高い、○: 中程度、△: 低い  
発生確率 ⇒ a: 高い、b: 中程度、c: やや低い、d: 低い



第 2.1-5 図 石狩低地東縁断層帯

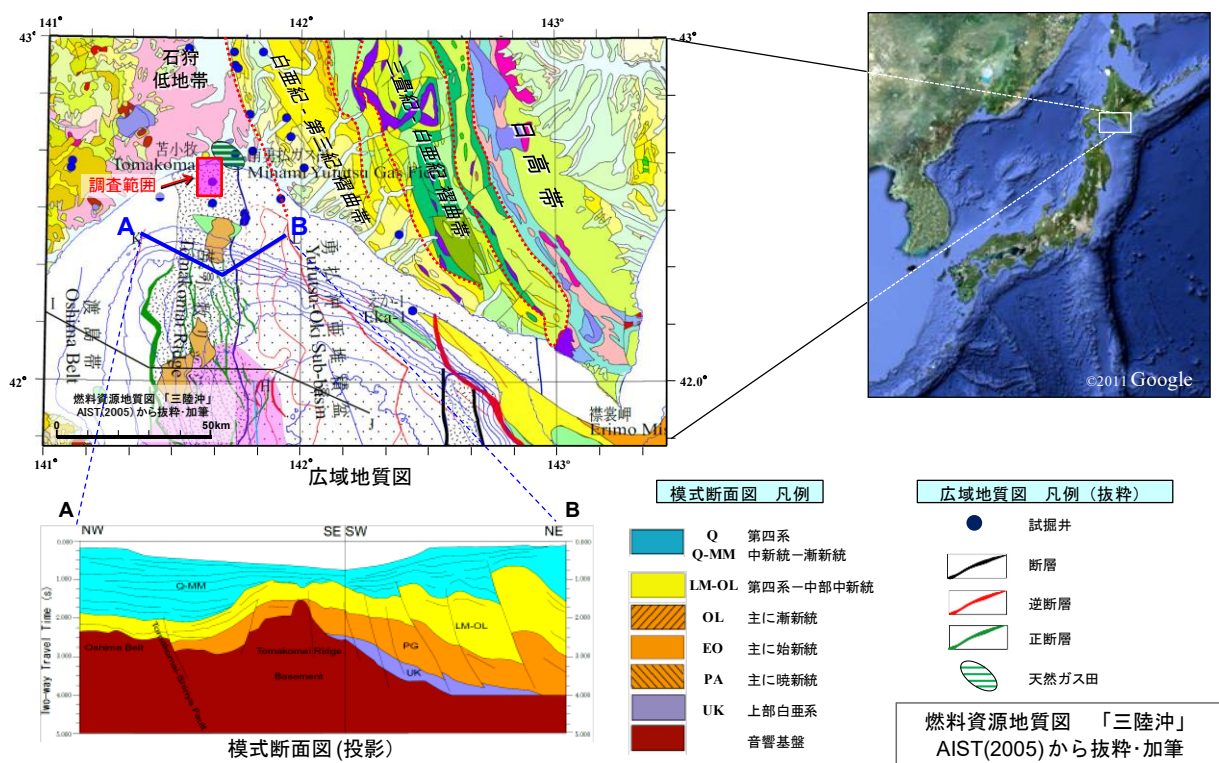
## 2.2 廃棄海域とその近傍の地層/地質の特徴

### (1) 周辺地域の地質概要

調査区域および周辺地域では、これまで国による基礎物理探査、民間企業による石油・天然ガスを対象とした探鉱活動により、地下の地質層序および地質構造が明らかになっている。

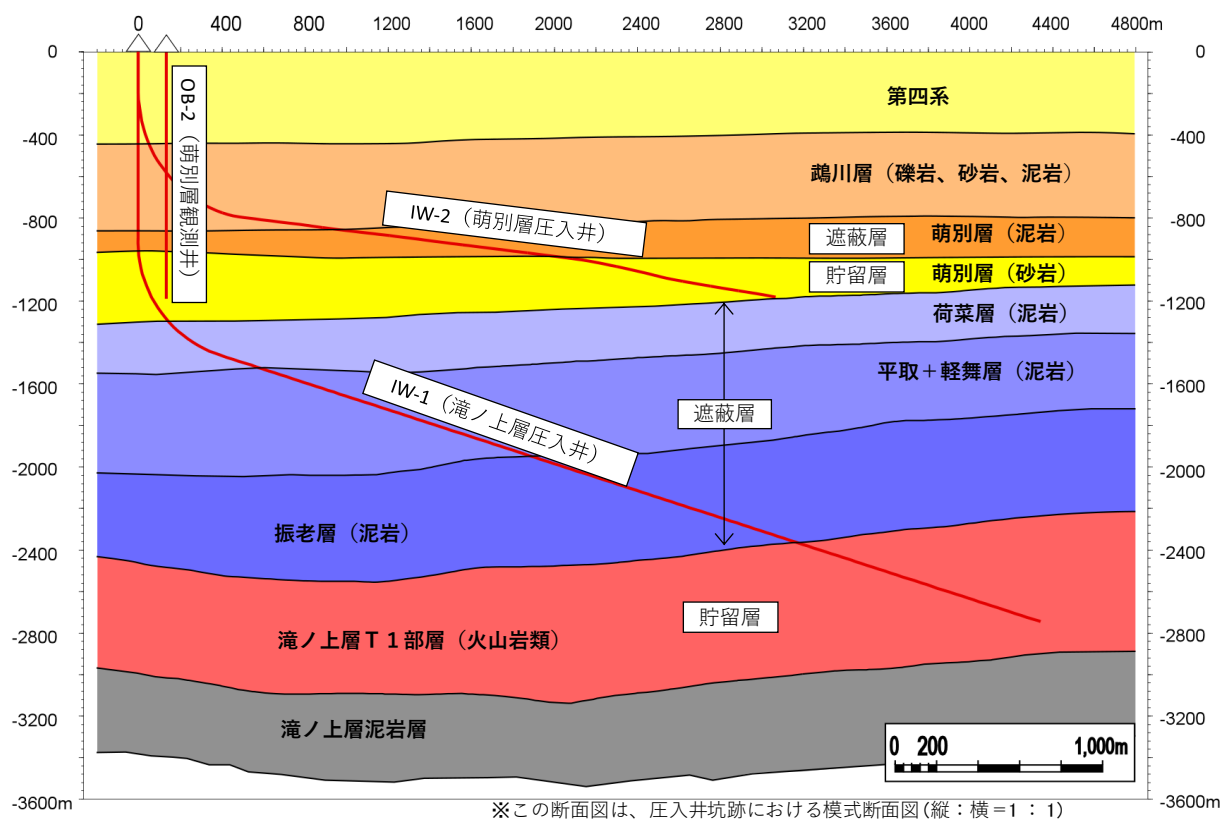
調査区域は、苫小牧リッジと呼ばれる中生代火山岩類の基盤岩の隆起帯に位置しており、基盤の上位の古第三紀以降の様々な構造場のもとで形成された堆積盆に、古第三系、新第三系および第四系が認められる（第 2.2-1 図）。調査区域では、古第三系の上位に、下位より滝ノ上層、<sup>たきのうえ</sup>振老層、<sup>ふれおい</sup>平取+<sup>びらとり</sup>軽舞層、<sup>かるまい</sup>荷葉層、<sup>に な</sup>萌別層、<sup>もえべつ</sup>鵠川層などの地層が堆積しており、滝ノ上層から荷葉層にかけては新第三系、萌別層と鵠川層は第四系に区分されている（第 2.2-2 図）。

調査区域から東方に向けては、波長が 10km 程度の褶曲構造が南北ないし北北西－南南東方向に並列して複数認められ、一般に東側の背斜構造群は逆断層を伴った変形を受けているが、調査区域を含めて西側の背斜構造群はいずれも比較的に弱い変形と考えられている。



第 2.2-1 図 苫小牧周辺の広域地質図と模式断面図



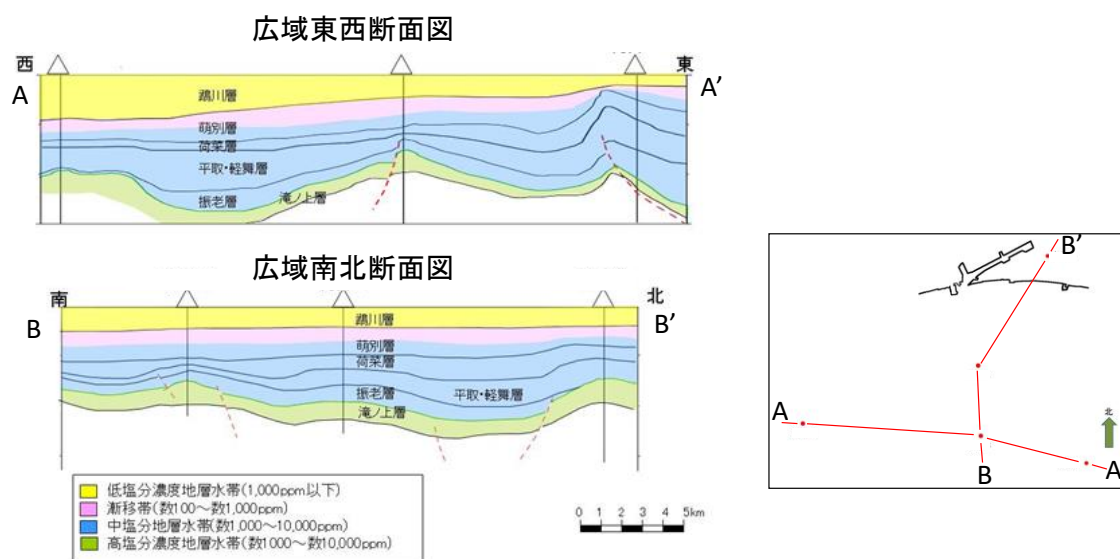


第 2.2-2 図 苦小牧地点の層序

## (2) 周辺地域の地層水塩分濃度解析による水理地質評価

「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」<sup>[1]</sup>においては、「CO<sub>2</sub>貯留層、キャップロック及びその上部の領域を含む水理地質及び地質構造の広域モデル（概念モデル）を、既存資料等を利用して構築する。」と記載されている。そこで、複数の周辺坑井における物理検層データおよび地層温度データを使用し、滝ノ上層以浅の地層水の塩分濃度を算出し、坑井ごとに深度分布を求め、地質層序と塩分濃度の対応関係を評価した（第 2.2-3 図）。

<sup>[1]</sup> 経済産業省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会. 2009. CCS 実証事業の安全な実施にあたって 2009 年 8 月, p.1 (<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90807a01j.pdf>, 2015/1/28 アクセス)



第 2.2-3 図 地層水の塩分濃度分布断面図

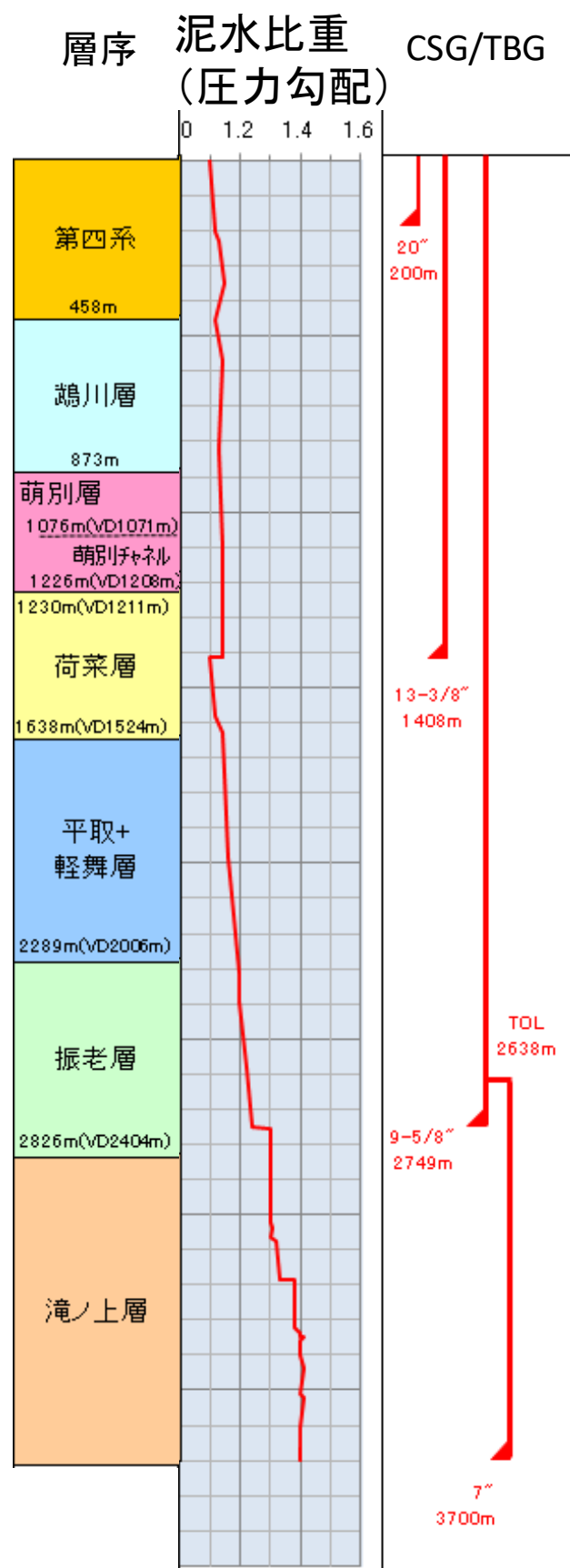
### ① 萌別層～苺菜層

表層から萌別層上部へは下位に向かって数 100～1,000ppm の範囲で次第に塩分濃度が上昇し、萌別層下部～苺菜層では数 1,000～10,000ppm の範囲で安定した値となり、検討範囲全体にわたって同様の傾向を示し、成層構造をなすことがわかった。鵜川層～萌別層上部の塩分濃度と萌別層下部～苺菜層のそれとは明らかに異なり、成層構造をなすことから、鵜川層と萌別層下部～苺菜層との間には垂直方向への地層水の移動はないと考えられる。

### ② 滝ノ上層

滝ノ上層の塩分濃度は数 1,000～数 10,000ppm を示し、その上位層の数 1,000～10,000ppm の塩分濃度よりも高く、上位層同様に検討範囲にわたって成層構造をなすことがわかった。

また、滝ノ上層とその上位層の地層圧力を比較するために、苫小牧 CCS-1 (第 2.2 節 (3)① で後述) の掘削時における泥水比重を対深度でプロットすると、上位層では比重 1.1 前後であるのに対し、滝ノ上層では比重 1.4～1.5 である。滝ノ上層とその上位層との泥水比重が異なるということは、滝ノ上層の地層圧力がその上位層とは異なっていることを示す。すなわち、滝ノ上層とその上位層とで圧力システムが異なり (第 2.2-4 図)、垂直方向の圧力伝播がなく、地層水の移動がないと考えられる。



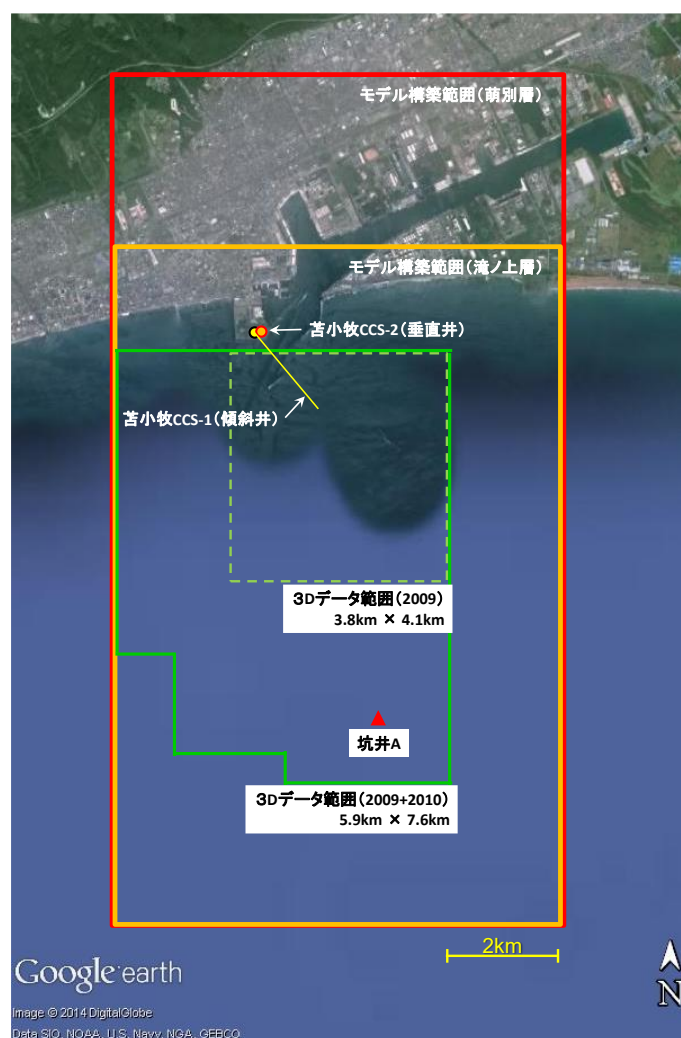
第 2. 2-4 図 苫小牧 CCS-1 における泥水比重の変化図

### (3) 当該海域の地質

#### ① 当該地域で実施した調査の概要

調査対象区域の苫小牧港西港区沿岸海域は、これまで石油・天然ガスの探査を目的とした弾性波探査による調査が多くなされており、周辺には深度 3,000m を越える天然ガス開発用の坑井が複数あることから、CO<sub>2</sub> 貯留対象となり得る深部塩水層として、海底面下約 1,000m ～約 3,000m に滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層が存在することが知られていた。

滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層を貯留対象層として本計画を実施するために、既存の地質データに加えて貯留対象地域における詳細な地質データを取得して地下の構造形態を詳細に把握した。これらのデータから地質モデルを構築し、そのモデルを用いたシミュレーションにて特定二酸化炭素ガスの貯留可能性や長期的な移動について評価することを目的として以下の調査を実施し（第 2.2-5 図）、当省において「苫小牧地点における貯留層総合評価書」<sup>[1]</sup>をまとめた。



第 2.2-5 図 調査範囲位置図

<sup>[1]</sup> 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，2011 年 10 月 26 日  
([https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11094748/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004\\_s01\\_00.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11094748/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004_s01_00.pdf) 2020/8/6 アクセス)

## 7) 三次元弾性波探査

- ・ 苫小牧港西港区沖合において、東西約 3.8km、南北約 4.1km の範囲（2009 年度調査）と、東西約 5.9km、南北約 7.6km の範囲（2010 年度調査）で三次元弾性波探査のデータを取得した。
- ・ 2009 年度に実施した三次元弾性波探査の調査範囲において、圧入開始後の 2019 年度に繰り返し三次元弾性波探査を実施した。これらの調査結果から、萌別層中での CO<sub>2</sub> の広がりを考慮した範囲において、2018 年度および 2019 年度に、繰り返し三次元弾性波探査を実施した。

## イ) 調査井

- ・ 2010 年度調査（苫小牧 CCS-1）：滝ノ上層および萌別層の調査を目的として苫小牧 CCS-1 を掘削し、物理検層、リークオフテスト（遮蔽層の強度測定）、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層の圧入テスト、垂直弾性波プロファイリング（Vertical Seismic Profiling; VSP）調査等を実施した。
- ・ 2011 年度調査（苫小牧 CCS-2）：萌別層の調査を目的として苫小牧 CCS-2 を掘削し、リークオフテストおよびコア試料の採取・分析を実施した。

## ロ) 圧入井

- ・ 2014 年 10 月から 2015 年 2 月にかけて、それまでの調査をもとに掘削位置を選定し、滝ノ上層 T1 部層への特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する滝ノ上層圧入井を掘削した。また、物理検層、リークオフテスト（遮蔽層の強度測定）、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層へのブラインによる圧入テスト等を実施した。
- ・ 2015 年 3 月から 2015 年 6 月にかけて、萌別層砂岩層への特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する萌別層圧入井を掘削した。また、遮蔽層および貯留層の調査を目的として、物理検層、リークオフテスト、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層の圧入テスト等を実施した。

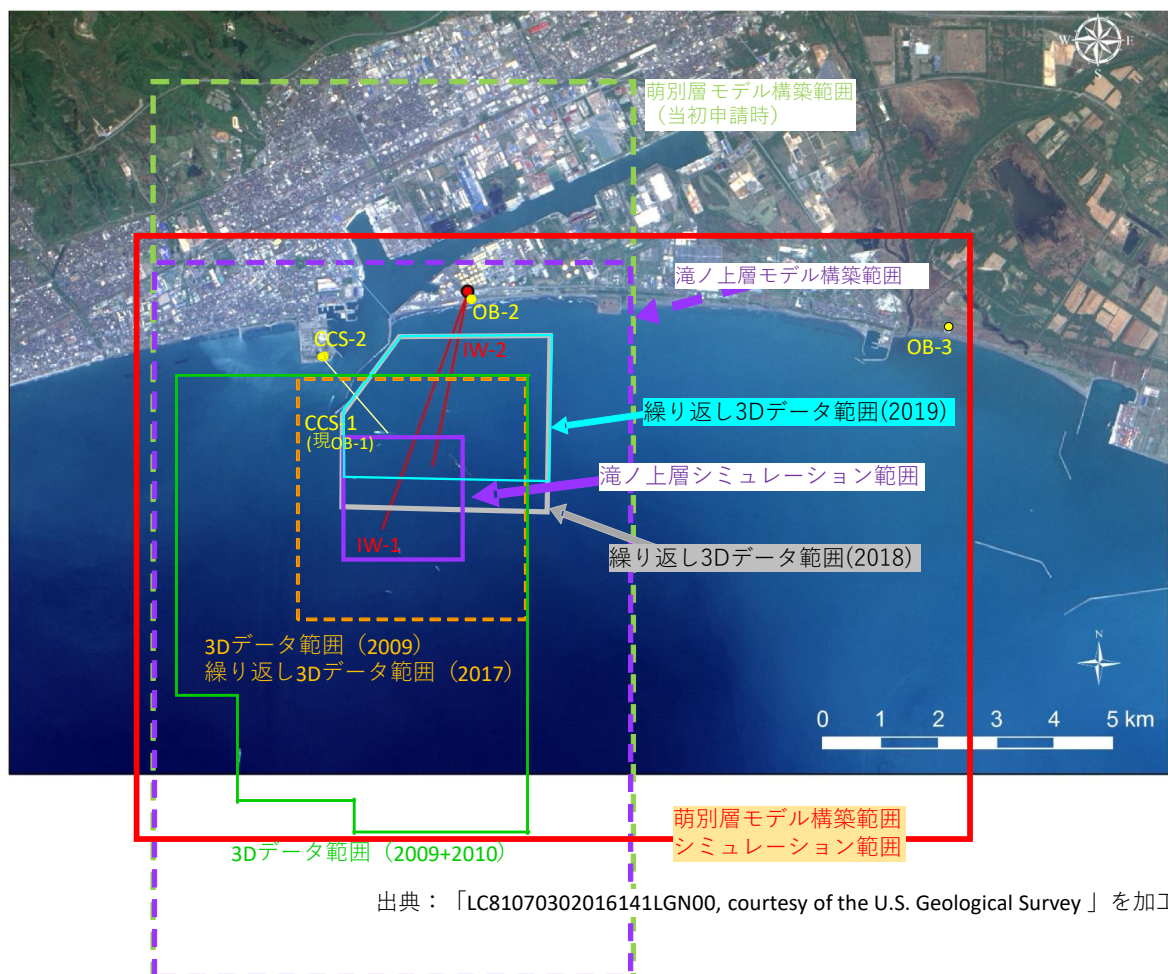
## エ) CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーション

- ・ 2010 年度シミュレーション：周辺の既存坑井データと二次元弾性波データおよび 2009 年度実施の三次元弾性波探査の結果に基づいて滝ノ上層 T1 部層を圧入対象層とした地質モデル構築と CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。
- ・ 2011 年度シミュレーション：2010 年度の弾性波探査の結果と、2010 年度から 2011 年度に得られた苫小牧 CCS-1 および苫小牧 CCS-2 での試験結果と試料分析の結果を加えて、滝ノ上層 T1 部層と萌別層砂岩層を圧入対象とした地質モデルを構築し、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。なお、「苫小牧地点における貯留層総合評価書」<sup>[1]</sup>におけるシミュレーション結果は、本シミュレーションに基づいて作成した。

<sup>[1]</sup> 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, 2011 年 10 月 26 日, pp. 第 3 章 4-20, pp. 第 3 章 27-48  
([https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11094748/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/04\\_s01\\_00.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11094748/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/04_s01_00.pdf) 2020/8/6 アクセス)



- 2012 年度シミュレーション：圧入井掘削予定位置から効率的に圧入井を掘削するための検討を目的として、既存の地質モデルをもとに CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを実施した。
- 2015 年度シミュレーション：滝ノ上層 T1 部層への圧入については、圧入井の掘削により、圧入井掘削位置における貯留層の圧入性が極めて低いことが確認された。圧入井で取得したデータをもとに地質モデルを修正し、CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを再実施した。
- 2018 年度（暫定）シミュレーション：CO<sub>2</sub> の圧入実績を加味した地質モデルを作成し、CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを再実施した。
- 2018 年度シミュレーション：2018 年末の CO<sub>2</sub> の圧入実績を加味した地質モデルを作成し、CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを再実施した。
- 2019 年度モデルシミュレーション：2019 年 11 月までの CO<sub>2</sub> の圧入実績を加味した萌別層砂岩層を圧入対象とした地質モデルを作成し、CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを再実施した。
- 2021 年度モデルシミュレーション：苫小牧沖 3D 弾性波探査データ（2020 年度）を用いて萌別層砂岩層を圧入対象とした地質モデルの構造解釈を更新し、CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを再実施した。



## 第 2.2-6 図 調査範囲および地質モデル作成範囲

### ② 当該地域で取得したデータおよびその解析結果

解釈・解析に使用したデータを、第 2.2-1 表に示す。

第 2.2-1 表 貯留層評価の使用データ一覧

使用データ	使用方法	データソース
三次元弾性波探査データ	地質構造解釈, 地積学的検討, 音響インピーダンス等の物性値推定, 繰り返し弾性波探査データに差分解析	三次元弾性波探査データ(リファレンスデータ: 坑井 A, 苫小牧 CCS-1, 滝ノ上層圧入井, 萌別層圧入井, 苫小牧 OB-2)
コア分析データ	岩石学的評価の他, 孔隙率, 浸透率, 相対浸透率, 毛細管圧, スレショルド圧等の基礎物性値の提供 浸透率-孔隙率相関	周辺坑井, 坑井 A, 苫小牧 CCS-1, 苫小牧 CCS-2, 滝ノ上層圧入井, 萌別層圧入井, 苫小牧 OB-2)
坑井速度測定データ	弾性波データの時間-深度変換	坑井 A, 苫小牧 CCS-1
物理検層データ	岩相区分の判定 インピーダンス推定 岩相分布・孔隙率分布の作成	坑井 A, 苫小牧 CCS-1, 滝ノ上層圧入井, 萌別層圧入井, 苫小牧 OB-2)
温度・圧力データ	地温勾配 坑底圧力(貯留層および地層破壊圧力)決定	坑井 A, 苫小牧 CCS-1, 苫小牧 CCS-2, 滝ノ上層圧入井, 萌別層圧入井, 苫小牧 OB-2)
二次元弾性波探査データ	地質構造解釈, 堆積学的検討, 音響インピーダンス等の物性値推定	陸海域の既存二次元弾性波探査データ

### 7) 三次元弾性波探査結果解釈の概要

取得した三次元弾性波探査データに加え, 民間企業が所有する周辺海域の弾性波探査断面と坑井資料を補助的に利用し, 層序のコントロールポイントとして坑井 A (既存の民間井: 廃坑済) および苫小牧 CCS-1 を使用して解析作業を実施した。

坑井 A および苫小牧 CCS-1 の層序に従って, 下位より「滝ノ上層泥岩層」「滝ノ上層 T1 部層下部」「滝ノ上層 T1 部層上部」「振老層」「平取+軽舞層」「荷菜層」「萌別層」「鵠川層」の計 8 層準に区分し, 三次元弾性波探査データにより各層準について岩相と反射波の特徴, 各地層境界や地層内における不整合, オンラップ, ダウンラップ等の堆積様式を確認した。

#### a. 滝ノ上層

滝ノ上層は火山岩/凝灰岩からなる上部の滝ノ上層 T1 部層と下部の泥岩層からなり, さらに滝ノ上層 T1 部層は上部の凝灰岩卓越層と下部の溶岩~凝灰角礫岩卓越層とに分けられる。滝ノ上層 T1 部層は周辺の既存坑井において, 浸透率の高い溶岩~凝灰角礫岩・凝灰岩として認められ, その上位には平取+軽舞層, 振老層の複数層準にわたる厚い遮蔽層が確認されている。

三次元弾性波探査データでは, 滝ノ上層 T1 部層下部の溶岩~凝灰角礫岩卓越層は全体的に強反射で水平方向の連続性が良く, 溶岩~凝灰角礫岩の粗粒堆積物が比較的安定して分布していると推定される(第 2.2-7 図および第 2.2-8 図)。滝ノ上層 T1 部層上限(振老層基底)は, 北北西~南南東の構造の高まり(背斜構造)を示し, その北端部(沖合約 3km)付近でドーム状の構造を形成している。この構造は火山の噴出口近傍を示している可能性

があり、周辺には孔隙率および浸透率が高い粗粒堆積物が堆積していることが期待される。滝ノ上層 T1 部層上限は、構造東翼部では約  $15^{\circ}$  で北東に傾斜している（第 2.2-8 図）。

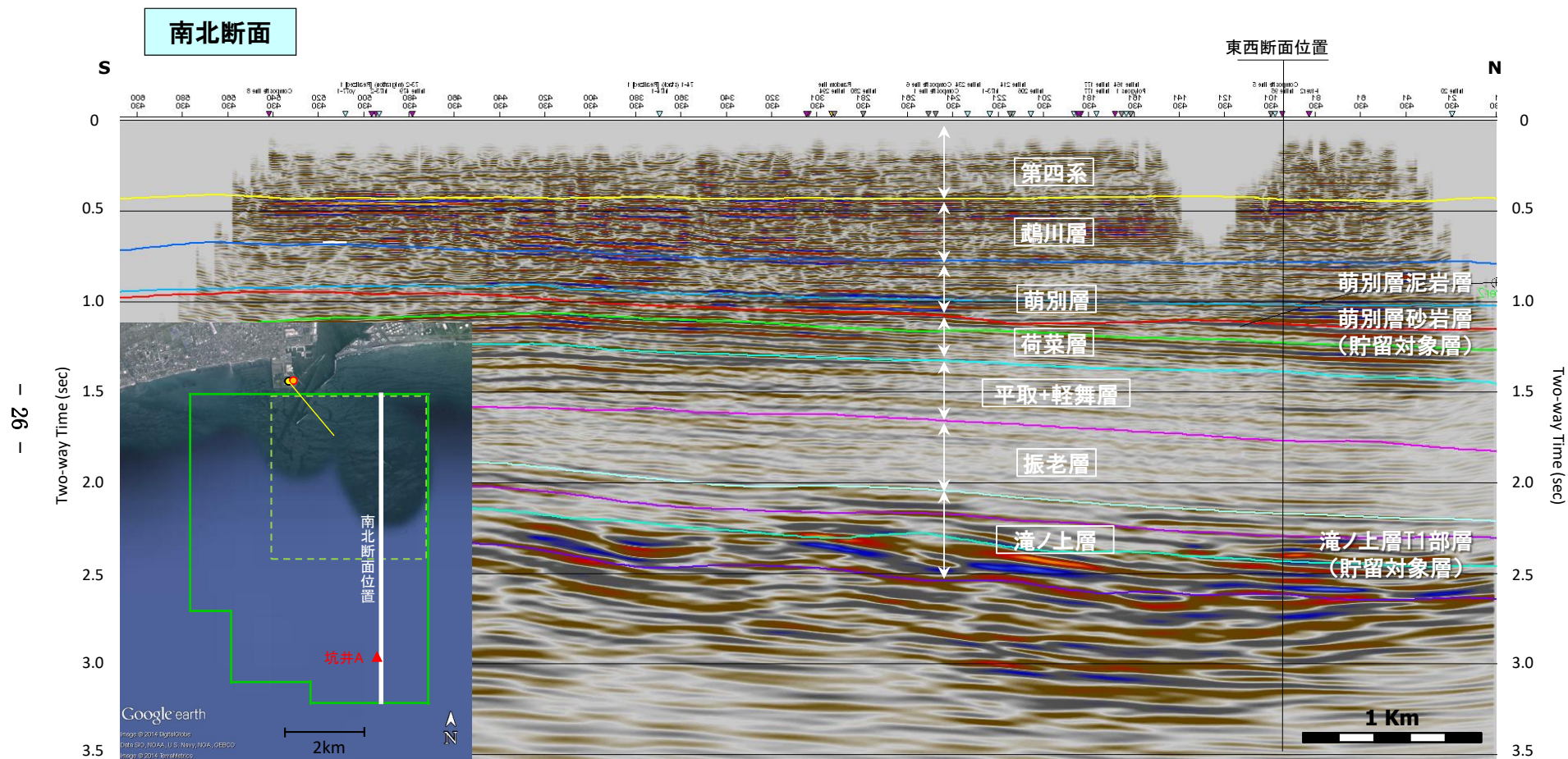
#### b. 萌別層

三次元弾性波探査データでは、本層の上部は連続性が良好ではない弱反射となっており、苫小牧 CCS-1 で確認されたシルト岩～泥岩が発達していると予想される。下部は連続性の良い強反射であることから、坑井 A や苫小牧 CCS-1 で確認された礫岩、砂岩のような粗粒堆積物（粗粒相）の発達予想される。この強反射は南西方向へ薄化して不明瞭になることから、粗粒相は検討海域の北東部を中心に発達していると考えられる。海底面から萌別層までの間では反射波はほぼ平行で、一連の堆積層として識別される（第 2.2-6 図および第 2.2-7 図）。粗粒相発達域（萌別層下部）の上面は、北西から西に約  $1\sim3^{\circ}$  で緩く傾斜している（第 2.2-10 図）。

#### c. 地質構造

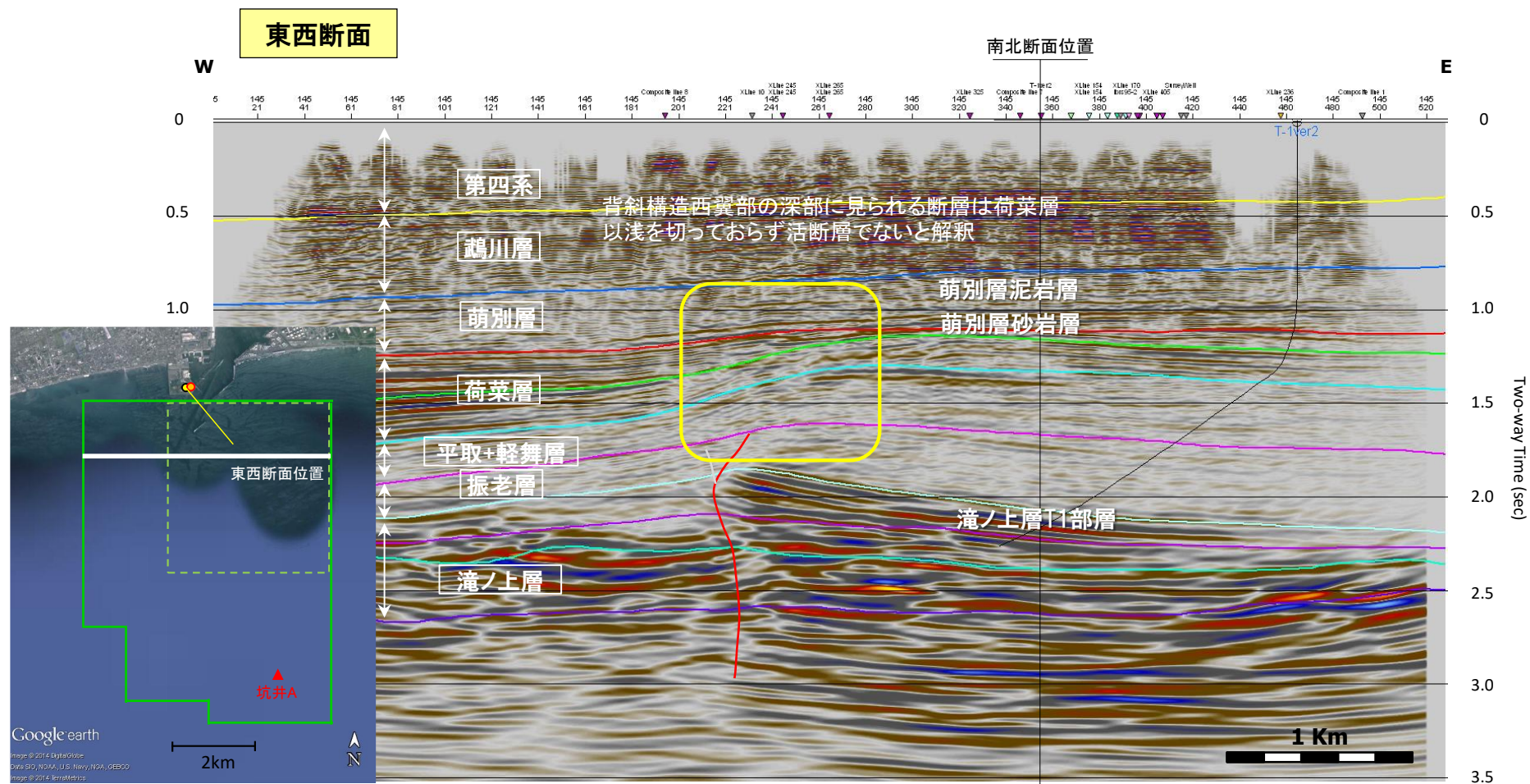
調査対象区域の地質構造は、滝ノ上層 T1 部層上限（振老層基底）構造図では北北西方向に延びた背斜構造となっている（第 2.2-9 図）。三次元弾性波探査データから、滝ノ上層上限の背斜構造に沿って北北東-南南西に延び、荷菜層にまで達する断層が存在すると解釈した。断層の落差は一樣ではなく、検討海域の中央付近では若干の落差が認められるが、北部や南部では落差は認められない。背斜頂部付近での削剥様式は振老層基底、平取+軽舞層基底および荷菜層中の傾斜不整合で認められ、振老層堆積前から荷菜層堆積時にかけて断層の活動と背斜構造の形成が断続的に繰り返されたと解釈した。また、萌別層基底にも背斜頂部から東部にかけて傾斜不整合が認められることから、断層の活動は萌別層堆積前まで続いていた可能性がある。

一方、萌別層から第四系にかけては一連の堆積層として認識されること、鵠川層上限の時間構造図では苫小牧沖構造の背斜構造が認められないことおよび鵠川層基底の時間構造図では東の高まりからの構造の張り出しとなっていることから、萌別層堆積時以降は背斜構造を形成するような構造運動はなかったと考えられる（第 2.2-10 図）。

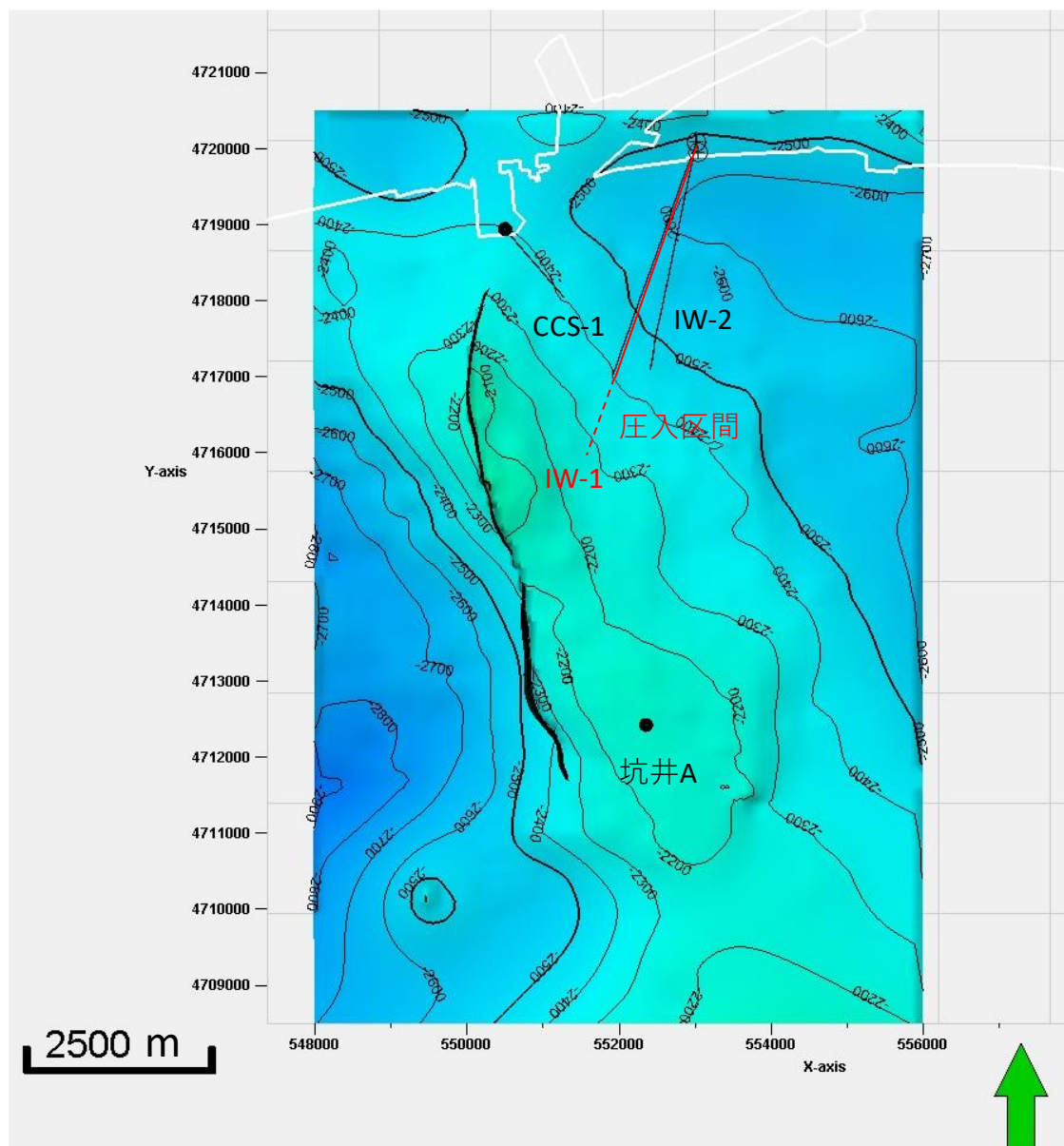


第 2. 2-7 図 三次元弾性波探査結果解釈断面図（南北断面）



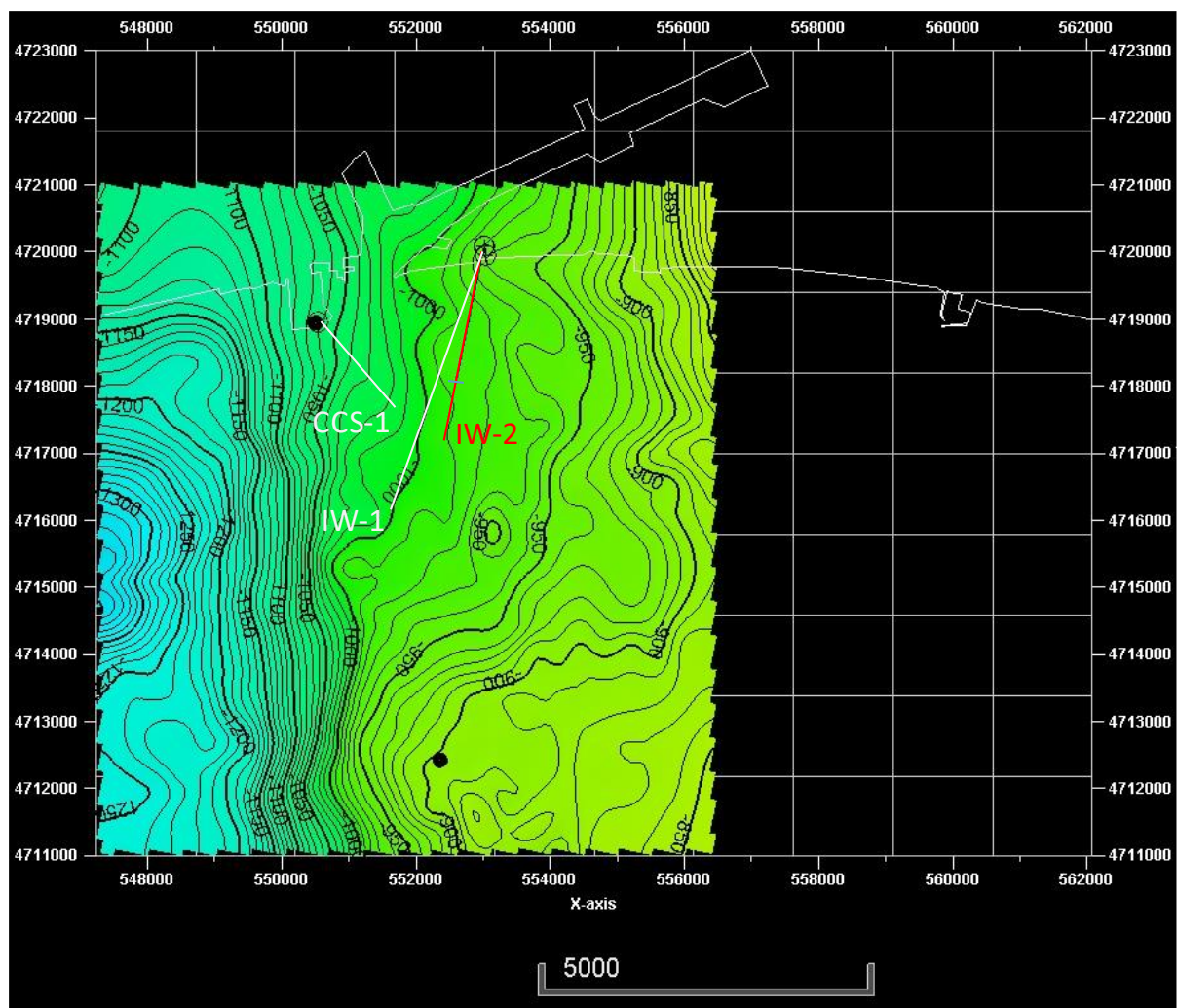


第 2. 2-8 図 三次元弾性波探査結果解釈断面図（東西断面）



注：図中の X 軸および Y 軸は、世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標。

第 2.2-9 図 滝ノ上層 T1 部層上限構造図



注：図中の X 軸および Y 軸は，世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標。等深度線間隔は 10m。

第 2.2-10 図 萌別層砂岩層上限構造図

#### イ) 苫小牧 CCS-1 の解析結果の概要

本井は，2010 年 11 月 5 日から 2011 年 2 月 21 日までの 109 日間において，深度 3,700m（垂直深度 3,046m）の傾斜井として掘削した。確認層序を，第 2.2-2 表に示す。

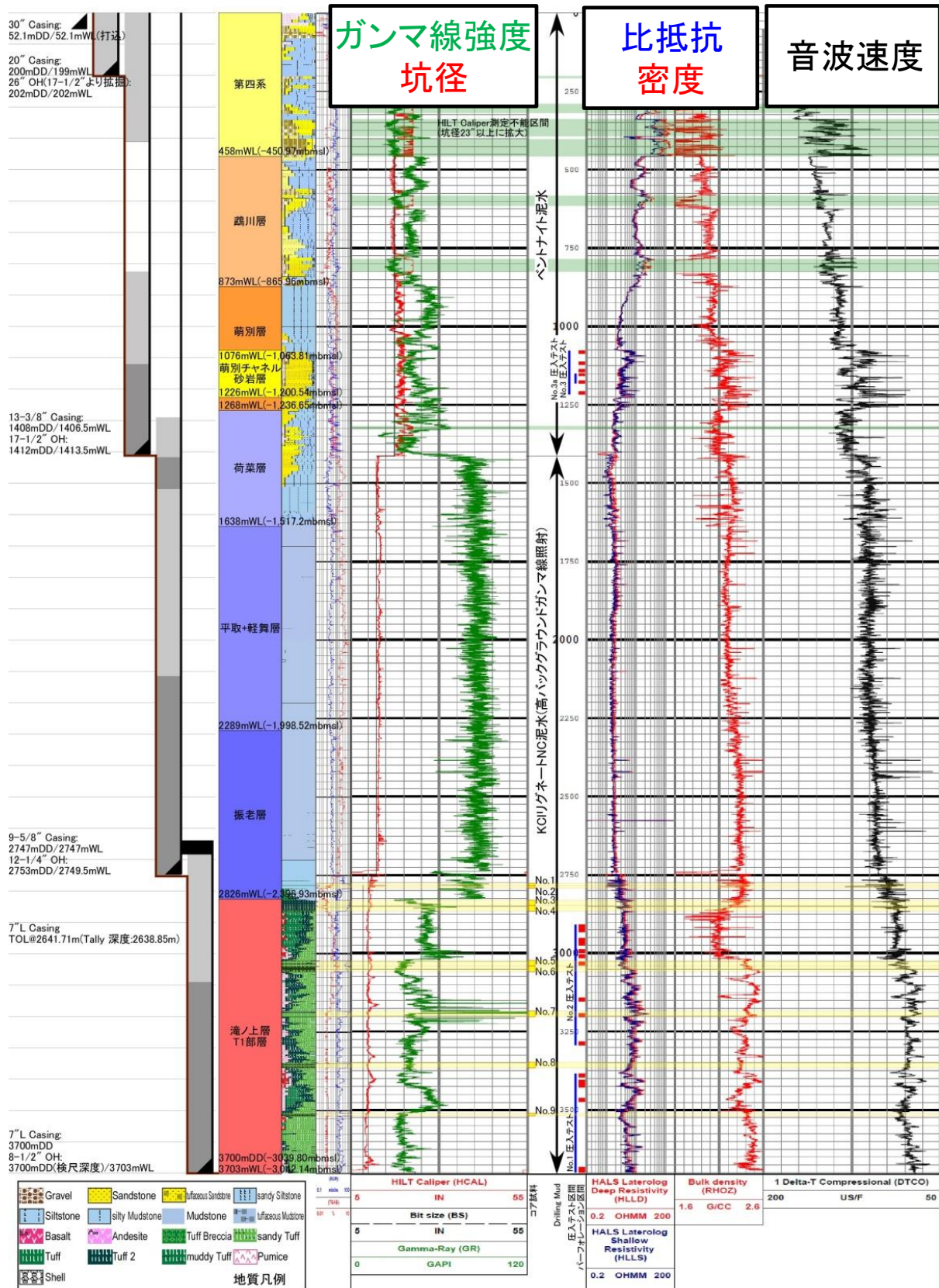


第 2.2-2 表 調査井における確認層序と岩相

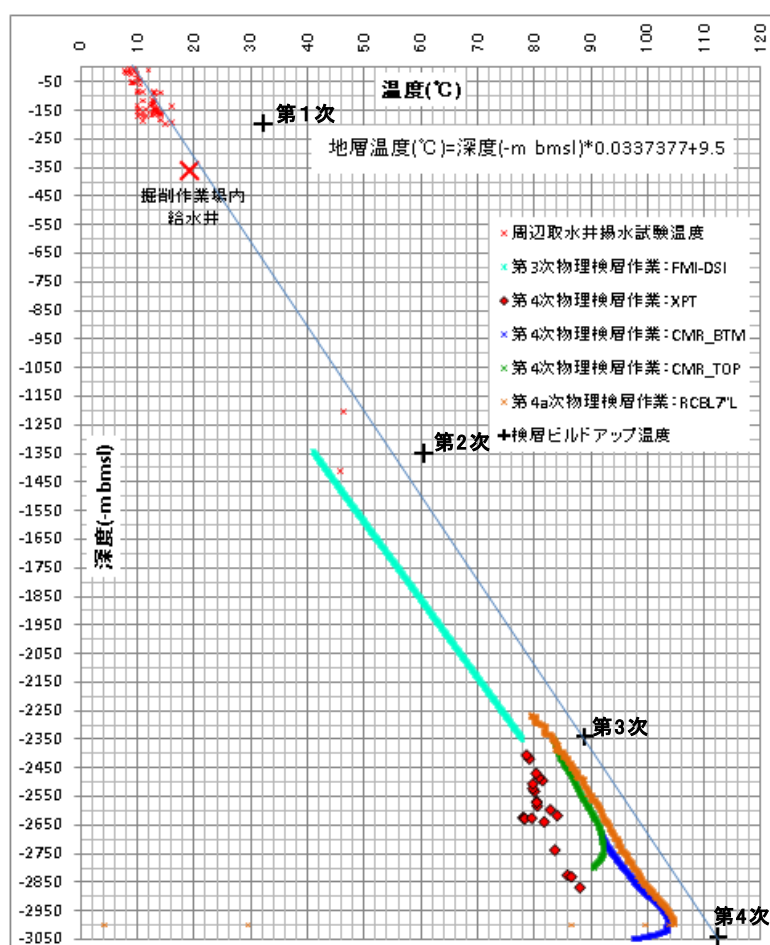
地層名	掘削深度 mMD (垂直深度 mVD)		岩 相
第四系	0	- 458	未固結砂礫等。
鵠川層	458	- 873	砂礫岩を主体とし、シルト岩を伴う。
萌別層泥岩	873	- 1,076 (1,071)	上部はシルト岩～泥岩主体とする。
萌別層砂岩	1,076 (1,071)	- 1,230 (1,211)	砂岩を主体とする。
荷菜層	1,230 (1,211)	- 1,638 (1,524)	砂岩、シルト岩を主体とし、細礫岩、凝灰岩を伴う。
平取+軽舞層	1,638 (1,524)	- 2,289 (2,006)	泥岩を主体とし、シルト岩、砂岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩、マールを伴う。
振老層	2,289 (2,006)	- 2,826 (2,404)	泥岩を主体とし、シルト岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩、砂岩、マールを伴う。
滝ノ上層 T1 部層	2,826 (2,404)	- 3,700 (3,046)	火山角礫岩・凝灰岩等の火山岩再堆積相を主体とし、一部に枕状溶岩を確認した。

- ・各坑径掘り止め時に物理検層を実施し、岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は、坑径、比抵抗、自然電位、ガンマ線、見かけ密度、中性子孔隙率、音波速度、比抵抗画像、ディップメータ、核磁気共鳴である。第 2.2-11 図に、物理検層結果の事例を記す。
- ・物理検層作業で測定された温度のビルドアップ解析結果と取水井の揚水試験時に測定した温度から、勾配を求めた（第 2.2-12 図）。
- ・カッティングス試料を地表～深度 3,700m の間、分析項目により 20m～50m 毎に採取した。
- ・コア試料（直径約 10cm）を振老層泥岩で 2 回（合計 16m）、滝ノ上層 T1 部層で 7 回（合計 115.9m）採取した。
- ・これらの試料に関し、微化石分析（有孔虫および珪藻化石分析）、岩石鉱物分析（X 線分析および薄片鑑定）および岩石物性分析（孔隙率、浸透率、スレシヨルド圧力分析等）を実施した。
- ・有孔虫および珪藻化石分析により各地層の堆積時代を推定するとともに、周辺にある既存坑井と対比することで地層名を確認した。有孔虫化石分析により堆積環境を推定し、振老層は中部半深海（古水深 500～1,000m）、萌別層は中部半深海上部から上部半深海（古水深 200～500m）との結論を得た。
- ・深度 2,753～2,758m（垂直深度 2,350～2,355m）の振老層下部において、リークオフテストおよびエクステンディッド・リークオフテストを実施した。
- ・300～800m の間は 100m 間隔で、深度 850～3,265m は 25m 間隔で VSP 調査を実施し、苫小牧 CCS-1 と三次元弾性波探査データとの高精度な対比が可能となった。
- ・滝ノ上層 T1 部層で 2 回（No. 1 圧入テストおよび No. 2 圧入テスト）、萌別層砂岩層で 2 回（No. 3 圧入テストおよび No. 3a 圧入テスト）のブライン圧入テストを実施した。





第 2.2-11 図 苫小牧 CCS-1 の物理検層結果事例



第 2.2-12 図 苫小牧 CCS-1 の地温勾配解析結果

#### ウ) 苫小牧 CCS-2 の解析結果の概要

- ・ 本井は 2011 年 5 月 4 日から 6 月 15 日までの 43 日間で、苫小牧 CCS-1 の北東 37m の位置において深度 1,218m まで掘削した（垂直井）。
- ・ 深度 993～1,218m の萌別層泥岩層および砂岩層において、直径 8cm のコア試料を連続採取した。
- ・ 調査終了後は、耐 CO<sub>2</sub> セメントを用いて埋め立てて廃坑した。
- ・ 深度 989～993m の萌別層泥岩層下部において、リークオフテストを実施した。

#### エ) 圧入井の解析結果の概要

- ・ 滝ノ上層圧入井の解析結果については、後述の第 2.2 節(3)③イ)「滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成（圧入井掘削結果を踏まえた更新モデル）」にて記載する。
- ・ 萌別層圧入井については、ブライン圧入テストにより上昇した貯留層の圧力が回復（低下）する過程を解析するフォールオフテストにより、貯留層の浸透率（貯留層区間の全体的な平均値）を取得した。なお、この浸透率については、垂直方向/水平方向の区別はない。

- ・ NMR 検層データにより、貯留層の孔隙率を取得した。なお、検層機器の解像度の問題もあり、貯留層以外の岩相も含んだ値となるため、採取したコアからのデータよりは過小評価している可能性がある。
- ・ 本井掘削時に遮蔽層においてエクステンデッドリークオフテストを実施し、リークオフ圧力を取得した。
- ・ 内田（1987）<sup>[1]</sup>によると、浸透率・スレシヨルド圧力は孔口半径と相関がある。そこで遮蔽層の浸透率・スレシヨルド圧力を調査するために、本井掘削時に採取した萌別層泥岩のカッティングス試料の孔口半径を測定し、調査井（苫小牧 CCS-2）および萌別層観測井で採取した萌別層泥岩の孔口半径を比較した。本井で出現した試料は、上記調査井および観測井で採取した萌別層泥岩と同程度であったことから、同程度の浸透率・スレシヨルド圧力を有することを推定した。
- ・ 遮蔽層層準のカッティングス試料の分析により、遮蔽層の孔隙率を取得した。

#### わ) 苫小牧 OB-2 解析結果の概要

- ・ 本井は 2013 年 1 月 6 日から 2 月 27 日までの 52 日間で、圧入井の南南東に約 140m の位置において萌別層観測井（苫小牧 OB-2）を掘削した。垂直井で掘削深度は 1,200m とした。
- ・ 深度 967～991m, 1,057～1,084.5m の萌別層泥岩層および砂岩層において、直径約 8cm のコア試料を連続的に採取した。
- ・ 深度 949～965m の萌別層泥岩層下部において、リークオフテストを実施した。

#### か) 解析結果

- ・ 滝ノ上層 T1 部層への圧入：苫小牧 CCS-1 および滝ノ上層圧入井の取得データの解析で得られた滝ノ上層 T1 部層の貯留岩性状のまとめを、第 2.2-3 表に示す。また、振老層の遮蔽層性状に係る結果のまとめを、第 2.2-4 表に示す。滝ノ上層 T1 部層の遮蔽層は直上の振老層泥岩であるが、さらに上位に平取+軽舞の泥質岩、その上位に荷葉層の泥質岩が累重することから、3 重の遮蔽層層準が分布するといえる。
- ・ 萌別層砂岩層への圧入：苫小牧 CCS-1、苫小牧 CCS-2、苫小牧 OB-2 および萌別層圧入井の取得データの解析により得られた、萌別層砂岩の貯留岩性状に係る結果のまとめを、第 2.2-5 表に示す。また、萌別層泥岩の遮蔽層性状に係る結果のまとめを、第 2.2-6 表に示す。萌別層砂岩層に対する遮蔽層は萌別層泥岩であるが、圧入対象域では 100m 程度以上の層厚を有すると推定される（第 2.2-13 図）。

<sup>[1]</sup> 内田 隆（1987）．貯留岩の浸透率と孔径分布について．石油技術協会誌．V. 52, n1, p1-11.

第 2.2-3 表 貯留層性状一覧（滝ノ上層 T1 部層）

項目	
対象深度	約 2,400m～3,000m（垂直深度）
層厚	約 600m
岩相	溶岩～凝灰角礫岩，凝灰岩（苫小牧 CCS-1） 凝灰岩主体（滝ノ上層圧入井）
孔隙率	5～18%（苫小牧 CCS-1 コア試験：封圧下） 3～19%（周辺坑井のコア試験：封圧下） 3～27%（滝ノ上層圧入井 NMR 検層解析結果） 12～19%（滝ノ上層圧入井 コア試験：封圧下）
浸透率	0.68～1.18mD（苫小牧 CCS-1 圧入テスト解析結果） <sup>注</sup> 0.001～0.01mD（苫小牧 CCS-1 コア試験：封圧下，空気） 0.002～7mD（周辺坑井のコア試験：封圧下） $7.7 \times 10^{-4}$ mD（滝ノ上層圧入井ビルドアップテスト再解析結果）
ブライン圧入テスト	苫小牧 CCS-1：最大 650kl/d（掘削深度 2,907～3,698m のうち 186m） <sup>注</sup> 滝ノ上層圧入井：最大 35kl/d（安定レートでは，7.5，5.5，3.5kl/d 掘削深度 4,624～5,800m）

注：圧力・温度測定結果から，圧入区間は 2,907～2,931m のみと判断した。

第 2.2-4 表 滝ノ上層 T1 部層に対する遮蔽層性状一覧

項目	
層序	振老層および平取+軽舞層
岩相	泥岩
層厚	約 1,100m
孔隙率	12.4～18.0%（苫小牧 CCS-1 コア試験：封圧下）
浸透率	$8.2 \times 10^{-6}$ ～ $36.7 \times 10^{-6}$ mD（苫小牧 CCS-1 コア試験：水浸透率）
スレシヨルド圧力	1.29～12.3MPa 以上（苫小牧 CCS-1 コア試験：N <sub>2</sub> -水系残差圧力法） <sup>注</sup> 11.72MPa 以上（苫小牧 CCS-1 コア試験：CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法） <sup>注</sup>
リークオフ圧力 （滝ノ上層圧入井リークオフテスト）	42.5MPa（等価泥水比重 1.82） （振老層（滝ノ上層圧入井）2,385mVD（垂直深度））

注：ブレイクスルーしなかったことから，測定値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断した。

第 2.2-5 表 貯留層性状一覧（萌別層砂岩層）

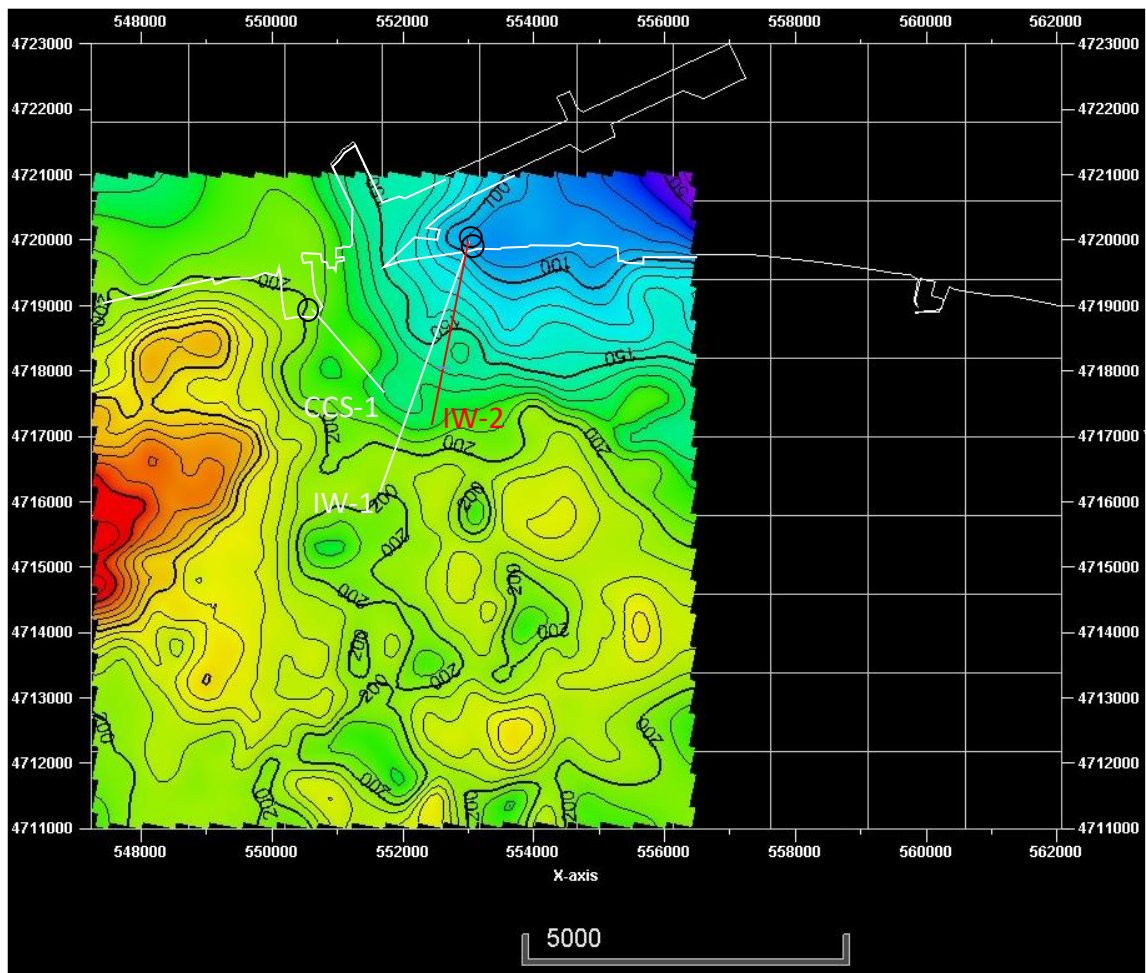
項目	
対象深度	約 1,100m～1,200m（垂直深度）
層厚	約 100m
岩相	砂岩（礫質砂岩，シルト岩を伴うファンデルタ堆積物）
孔隙率	20～40%（苫小牧 CCS-1 コア試験：封圧下） 20～40%（物理検層解析結果） 12～42%（萌別層圧入井 NMR 検層解析結果）
浸透率	9～25mD（苫小牧 CCS-1 圧入テスト解析結果） <sup>注</sup> 1～1,000mD（苫小牧 CCS-2 コア試験：封圧下，空気） 1～120mD（萌別層圧入井検層結果） 370mD（萌別層圧入井フォールオフ解析結果）
ブライン圧入テスト	苫小牧 CCS-1：最大 1,200kl/d（掘削深度 1,077～1,217m のうち 57.5m 萌別層圧入井：150，300，450，600kl/d の 4 段階ステップレート圧入

注：圧力・温度測定結果から，圧入区間は 2,907～2,931m のみと判断した。



第 2.2-6 表 遮蔽層性状一覧（萌別層泥岩層）

項目	
層序	萌別層泥岩層（萌別層上部）
岩相	シルト岩～泥岩
層厚	約 100m
孔隙率	32.4～37.2%（苫小牧 CCS-2 コア試験：封圧下） 30～37%（萌別層圧入井カッティングス試験）
浸透率	$0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ （苫小牧 CCS-2 コア試験：水浸透率） $1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ （萌別層圧入井カッティングス試験）
スレシヨルド圧力	0.75, 1.65, 1.67MPa（苫小牧 CCS-2 コア試験：CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法） 0.37MP, 0.42MPa（苫小牧 OB-2 コア試験：CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法）
リークオフ圧力	14.6MPa（苫小牧 CCS-2 リークオフテスト，等価泥水比重 1.50） （萌別層泥岩層（苫小牧 CCS-2）991mVD（垂直深度）） 14.37MPa（萌別層圧入井エクステンデットリークオフテスト，等価泥水比重 1.51） （萌別層泥岩層（萌別層圧入井）971mVD）



第 2.2-13 図 萌別層泥岩層の等層厚線図（等層厚線間隔：10m）



### ③ 地質モデルの作成

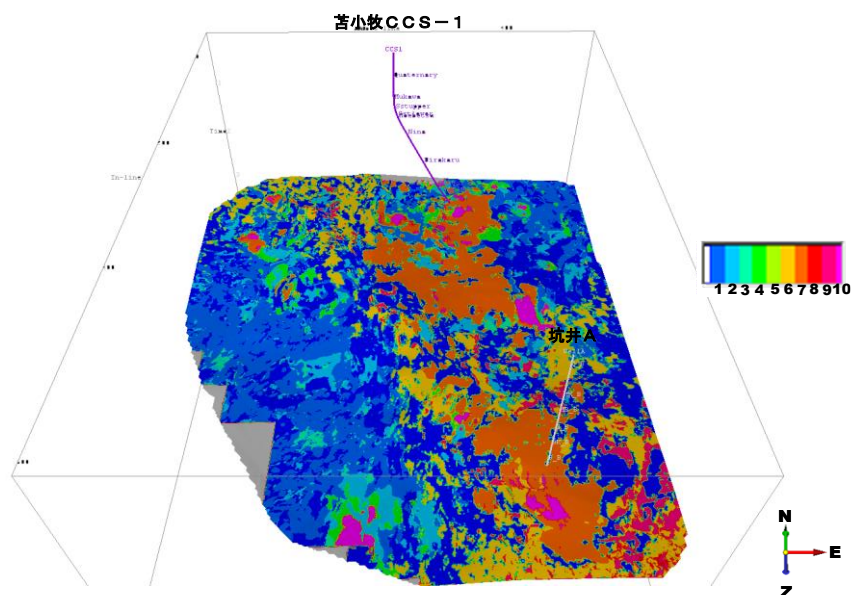
CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施するための地質モデルを作成した。以下、圧入対象層ごとに概要を示す。

#### 7) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成

##### a. 岩相分布・性状分布の推定

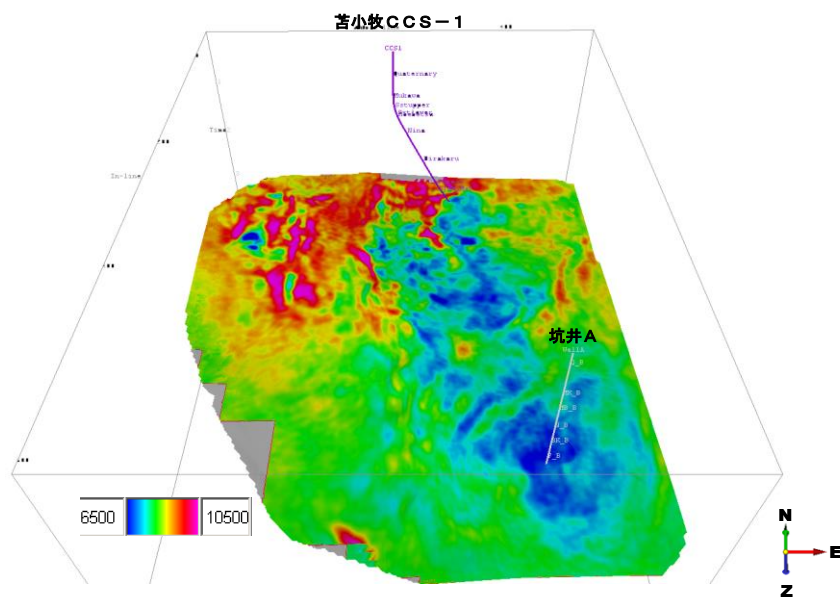
- ・ 滝ノ上層は、火山岩起源であり不均質性が高いため三次元弾性波探査データを活用した岩相分布・性状分布を推定した不均質モデルを作成した。
- ・ スケルトン・アトリビュート解析にて弾性波形の特徴を強調
- ・ SOM (Self-organizing Maps : 自己組織化マップ) 解析による波形分類を行い、
- ・ クラスター解析 (K-means 法) により各分類の境界を決定
- ・ 坑井 A (既存民間井) における溶岩～凝灰角礫岩 (良好な貯留岩) との比較により、この岩相を示す弾性波形を決定し、三次元弾性波探査データ上で溶岩～凝灰角礫岩の分布領域を推定。
- ・ コア試料と物理検層データの解析から、溶岩～凝灰角礫岩については、AI (Acoustic Impedance : 音響インピーダンス : 密度×弾性波速度) と孔隙率とが逆相関関係にあることを確認した。

例として、第 2.2-14 図に滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index) を、第 2.2-15 図に三次元弾性波探査データから取得した滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンスを示す。



注：オレンジの部分が、良好な貯留層性状が期待される岩相（溶岩～凝灰角礫岩相）。苦小牧 CCS-1（調査井）は、貯留層性状が良好ではない場所に掘削された。

第 2.2-14 図 滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index)



注：青色の部分が、低 AI で高孔隙率と考えられる箇所。高浸透率である可能性も高い。滝ノ上層圧入井は、低 AI 域に掘削した。

第 2.2-15 図 滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンス

#### b. 構造モデルの作成

3 次元弾性波探査記録を用いた地質構造解釈により作成した時間構造図を深度変換し深度構造図を作成し、構造モデルを作成した（2011 年度モデル）を元に、苫小牧 IW-1（滝ノ上層圧入井）の掘削により取得した層序データを考慮したうえで修正した構造モデルを使用した。

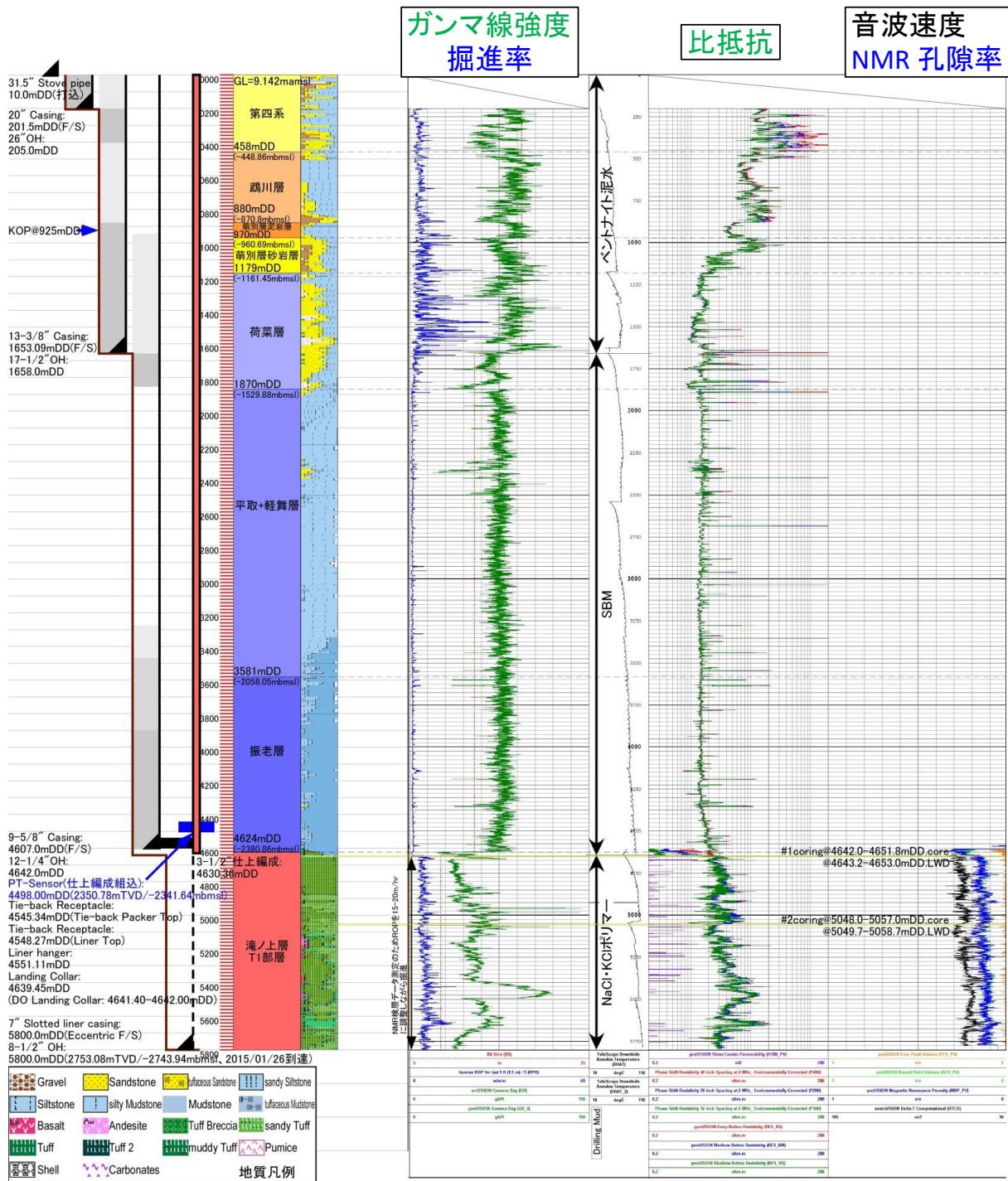
##### i) 圧入井掘削結果

特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する滝ノ上層圧入井は、深度 5,800m（垂直深度 2,753m）の傾斜井として掘削した。確認層序を、第 2.2-7 表および第 2.2-16 図に示す。

第 2.2-7 表 滝ノ上層圧入井における確認層序と岩相

地層名	掘削深度 mMD (垂直深度 mVD)		岩 相
第四系	0	458	未固結砂礫、シルト等。
鶴川層	458	880	砂礫岩およびシルト岩等。
萌別層泥岩	880	970	シルト岩～泥岩主体とし、砂岩、礫岩等を伴う。
萌別層砂岩	970	1,179 (1,171)	砂岩、礫岩を主体とし、砂質シルト岩、凝灰岩を伴う。
荷菜層	1,179 (1,171)	1,870 (1,539)	砂岩、シルト岩を主体とし、細礫岩、凝灰岩を伴う。
平取+軽舞層	1,870 (1,539)	3,581 (2,067)	シルト岩を主体とし、泥岩、砂岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩、マールを伴う。
振老層	3,581 (2,067)	4,624 (2,390)	泥岩を主体とし、シルト岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩、砂岩、マールを伴う。
滝ノ上層 T1 部層	4,624 (2,390)	5,800 (2,753)	凝灰岩の再堆積相を主体とし、凝灰角礫岩を伴う。稀に泥岩を伴う。

- ・掘進中に物理検層を実施（LWD 検層）し、岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は、比抵抗、ガンマ線、音波速度、比抵抗画像、NMR である。第 2.2-16 図に、物理検層結果の事例を示す。
- ・カッティングス試料を地表から滝ノ上層 T1 部層までの深度 5,800m の間、分析項目により 10m～50mVD ごとに採取した。
- ・コア試料（直径約 10cm）を、滝ノ上層 T1 部層で 2 回（合計 18.8m）採取した。
- ・これらの試料に関し、微化石分析（有孔虫分析）、岩石鉱物分析（X 線分析および薄片鑑定）および岩石物性分析（孔隙率、浸透率、孔口半径分析など）を実施した。
- ・有孔虫化石分析により各地層の堆積時代を推定するとともに、周辺にある既存坑井と対比することで地層名を確認した。有孔虫化石分析により堆積環境を推定し、振老層は中部半深海（古水深 500～1,000m）、荷葉層および平取+軽舞層は中部～上部半深海（古水深 200～1,000m）、萌別層は中部半深海上部から上部半深海（古水深 200～500m）との結論を得た。
- ・深度 4,607～4,612m（垂直深度 2,384～2,485m）の振老層下部において、エクステンディッド・リークオフテストを実施した。
- ・滝ノ上層 T1 部層を一括して仕上げ、ブラインによる圧入テストを実施した。ブラインによる圧入テストの前には、坑内洗浄を主な目的として排泥を実施し、その後貯留層圧力の回復状況を解析するビルドアップテストを実施した。また、ブラインによる圧入テストの後に、上昇した貯留層圧力の回復状況を解析するフォールオフテストを実施した。これらの結果から、貯留層の浸透率を推定した（ $5.25 \times 10^{-5}$ md）。なお、この浸透率については、垂直方向/水平方向の区別はない。

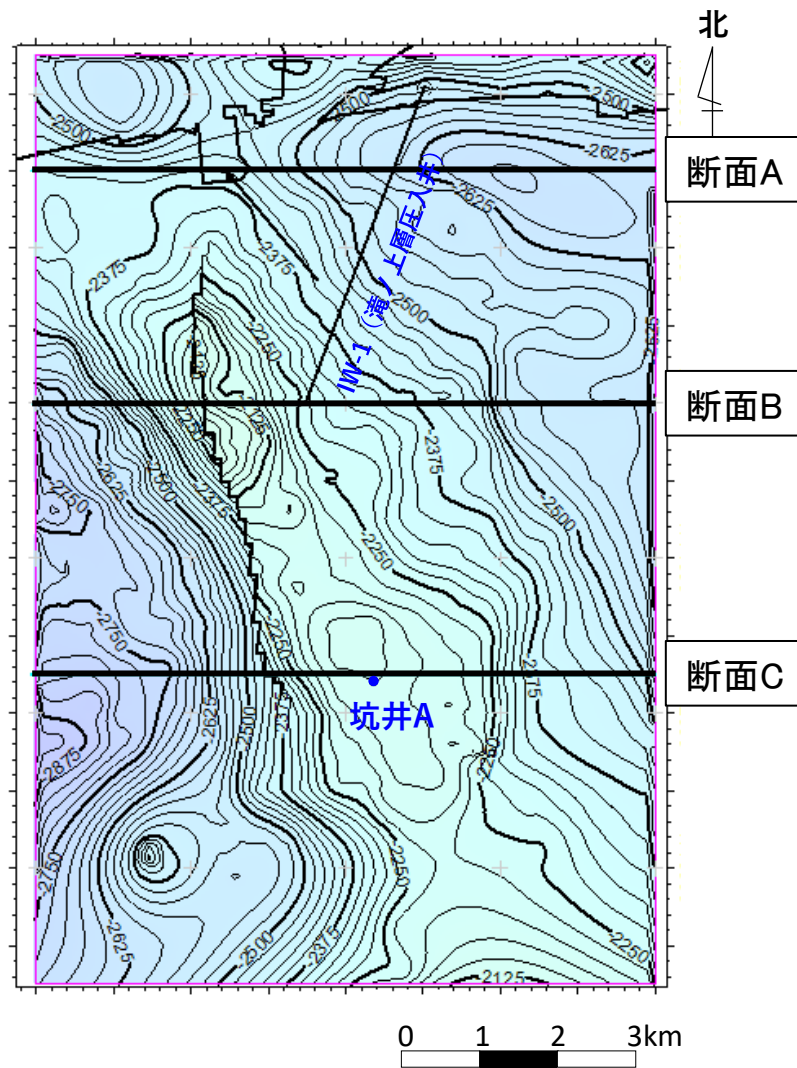


注：貯留層区間以外では、比抵抗イメージ検層、音波検層、NMR 検層は実施していない。

第 2.2-16 図 滝ノ上層圧入井の物理検層結果事例

## ii) 圧入井掘削結果を反映した構造モデル

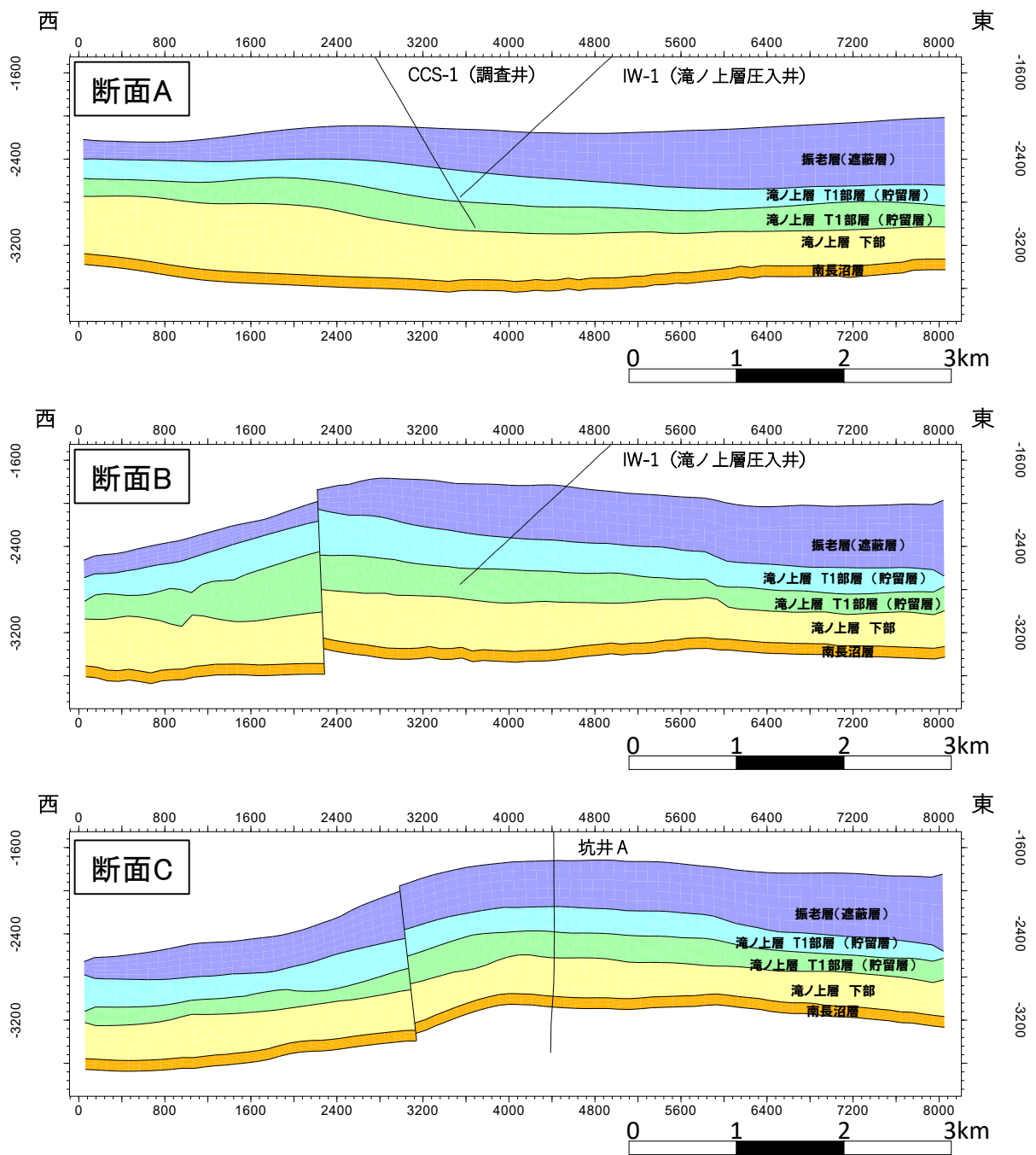
既存の構造モデルを滝ノ上層圧入井の掘削結果を反映させ、修正した。結果滝ノ上層 T1 部層上限の深度構造図とモデル断面位置を第 2.2-17 図に、主要東西断面図（地質モデル断面）を第 2.2-18 図に、作成した構造モデルのグリidding情報を第 2.2-8 表に示す。



注:世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標

第 2.2-17 図 モデル断面位置と深度構造図【滝ノ上層 T1 部層（貯留層）上限】





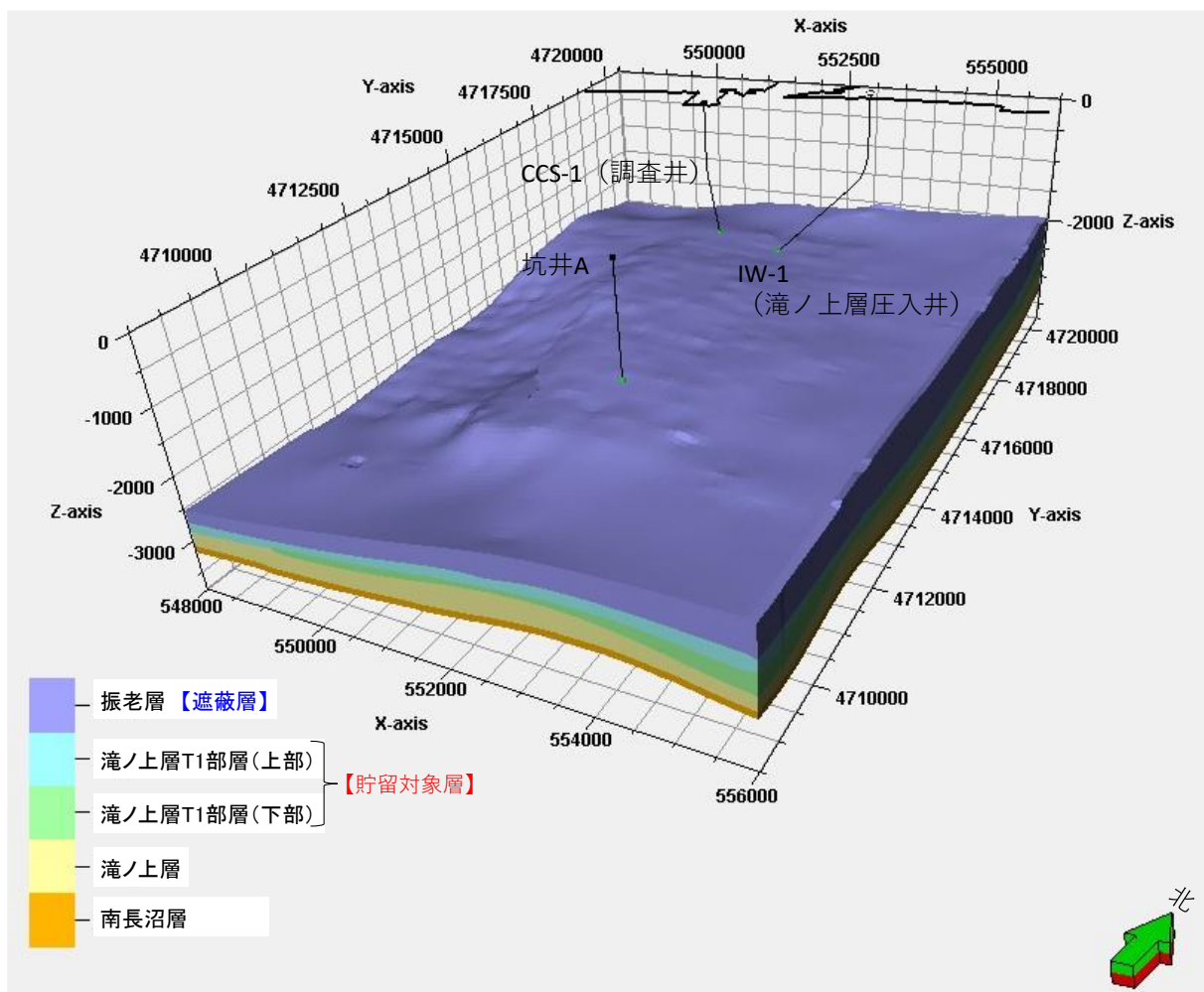
注) 坑跡は投影

第 2.2-18 図 地質モデル断面

第 2.2-8 表 滝ノ上層構造モデルのグリidding

i 方向（東西方向）セル数	100m	80 セル
j 方向（南北方向）セル数	100m	120 セル
k 方向（垂直）セル数		
振老層：	5 レイヤーに分割	
滝ノ上層 T1 部層上部：	15m ごとに分割	(33 レイヤー)
滝ノ上層 T1 部層下部：	15m ごとに分割	(39 レイヤー)
滝ノ上層下部：	5 レイヤーに分割	
南長沼層：	5 レイヤーに分割	

構造モデルの鳥瞰図を、第 2.2-19 図に示す。滝ノ上層 T1 部層は CO<sub>2</sub> 圧入対象層準であり、シミュレーションを詳細に行うため上下の地層よりも小さめの垂直方向サイズとなるようにした。



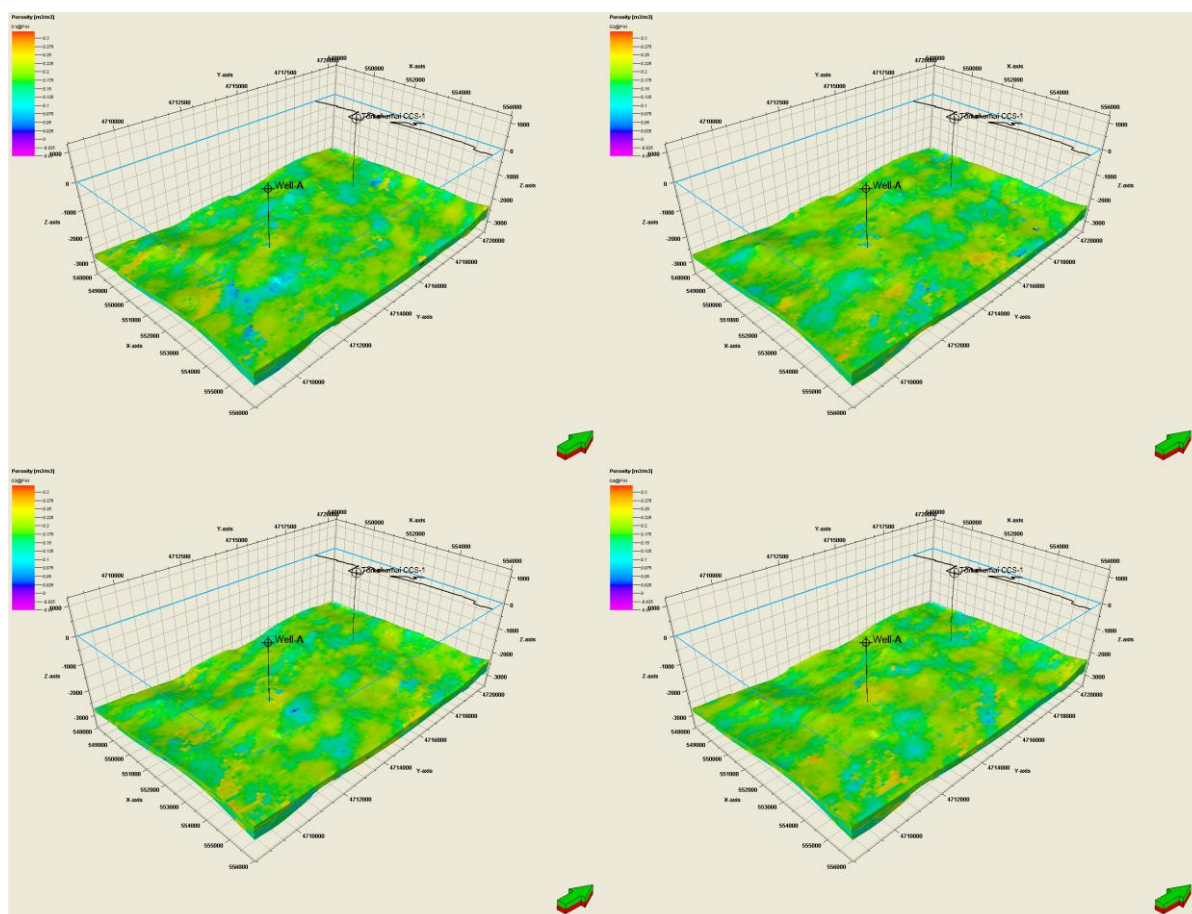
第 2.2-19 図 三次元地質モデル鳥瞰図

### c. 属性モデルの作成

作成した構造モデルの各セルに属性（岩相、孔隙率および浸透率）を与え、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションのための地質モデルを作成した。

#### i) 属性値の分布

CO<sub>2</sub>圧入対象層である滝ノ上層 T1 部層における属性値分布は、三次元弾性波探査データ、苫小牧 CCS-1（調査井）および坑井 A（既存民間井）のデータより、地球統計学的手法を用いて、岩相、孔隙率および浸透率の分布が確率的に 50 種類となる具現モデルを作成した。参考例として、50 個の内から 4 つの具現モデルにおける孔隙率分布を、第 2.2-20 図に示す。



注：図中右下の矢印は、北を示す。

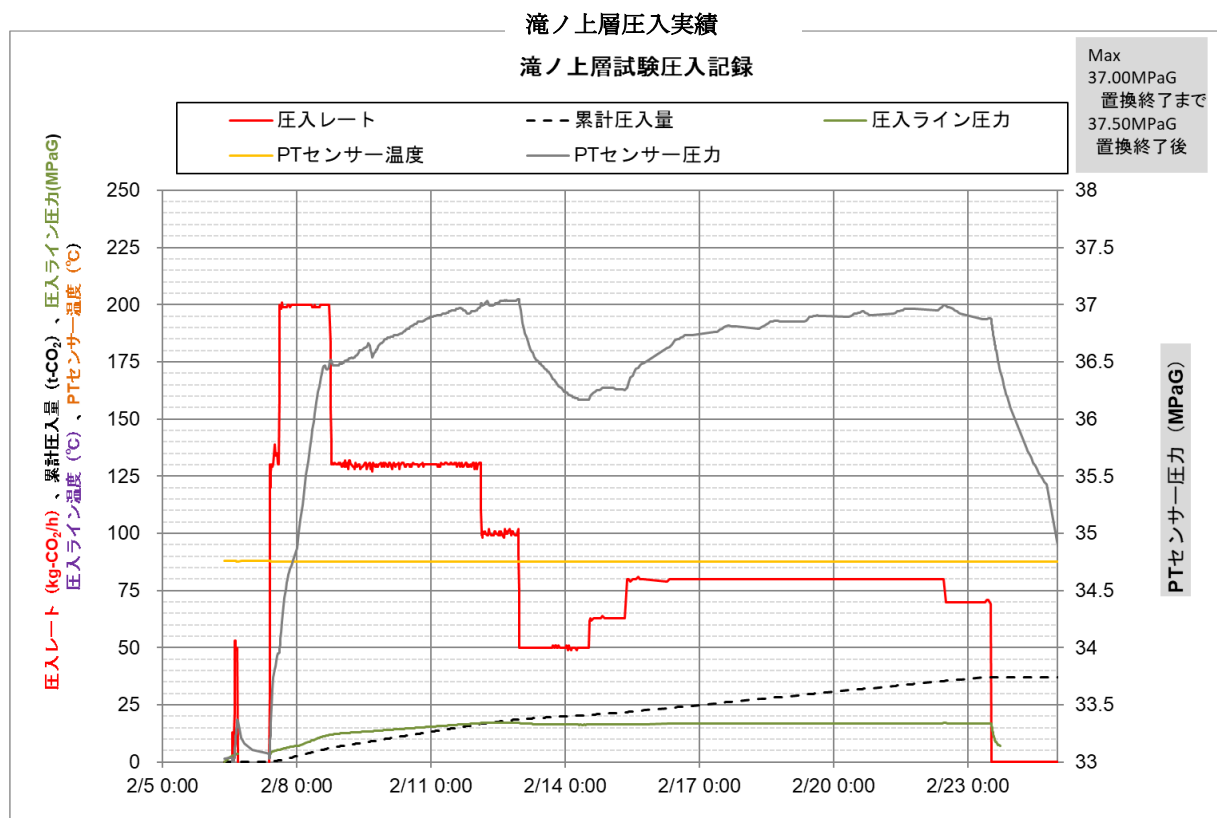
第 2.2-20 図 50 個の内 4 個の具現モデルの参考例：滝ノ上層 T1 部層の孔隙率分布（2011 年度地質モデル）

他の層準における属性値は、苫小牧 CCS-1 の振老層から採取されたコアの分析値を一樣に分布させた。圧入井掘削前のモデルは地球統計学的に 50 種類のモデルを作成したが、圧入井の掘削の結果、圧入井の極近傍以外で岩相や属性を地球統計学的に推定することは困難と判断し、1 ケース標準的な圧力挙動を示す属性モデル（P50 モデル）に対し圧入実績を考慮し、地質モデルを更新した。

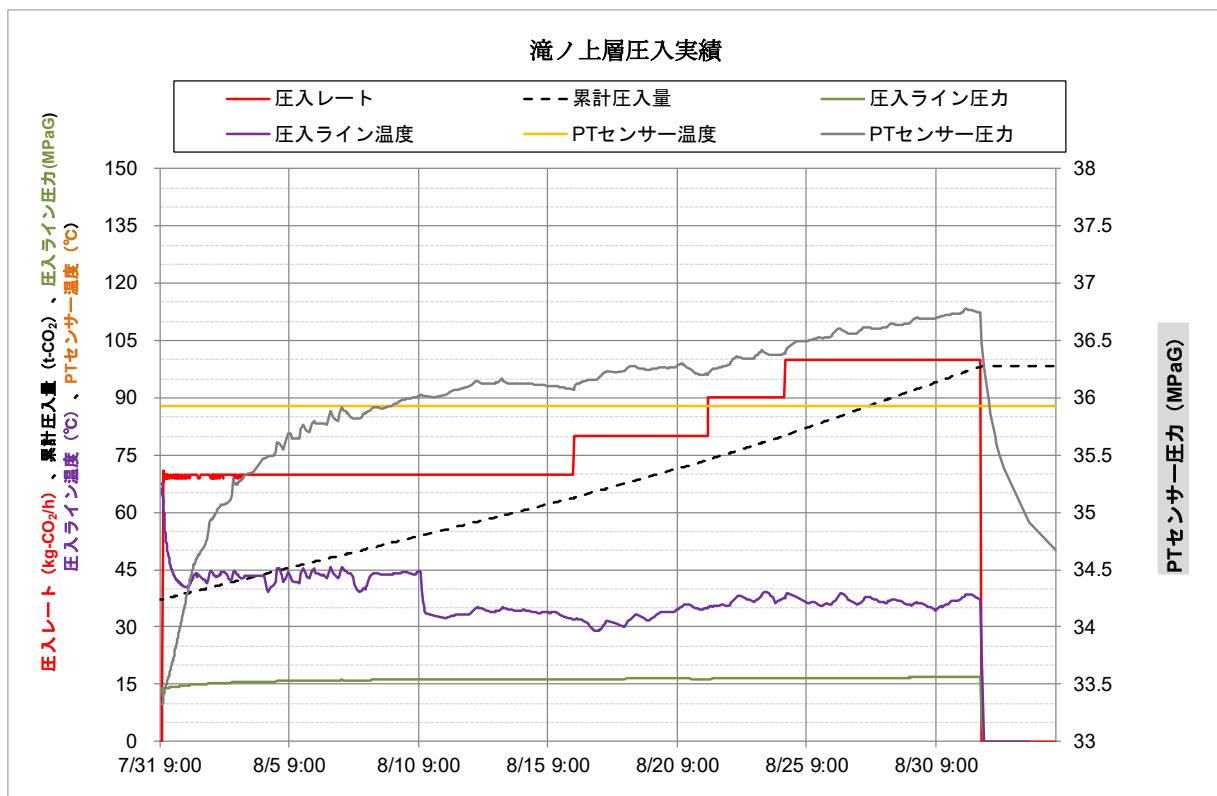
## ii) 圧入実績を反映した属性モデル

滝ノ上層へのCO<sub>2</sub>圧入は2018年2月6日に開始したが、2月26日に地上設備の不具合により圧入を停止した(第2.2-21図)。問題対応等の後7月31日に圧入を再開したが、PSA オフガス供給元の不具合により PSA オフガスの供給が途絶えたため、9月1日に圧入を停止し、累計圧入量は98t-CO<sub>2</sub>となった(第2.2-22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、圧入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。



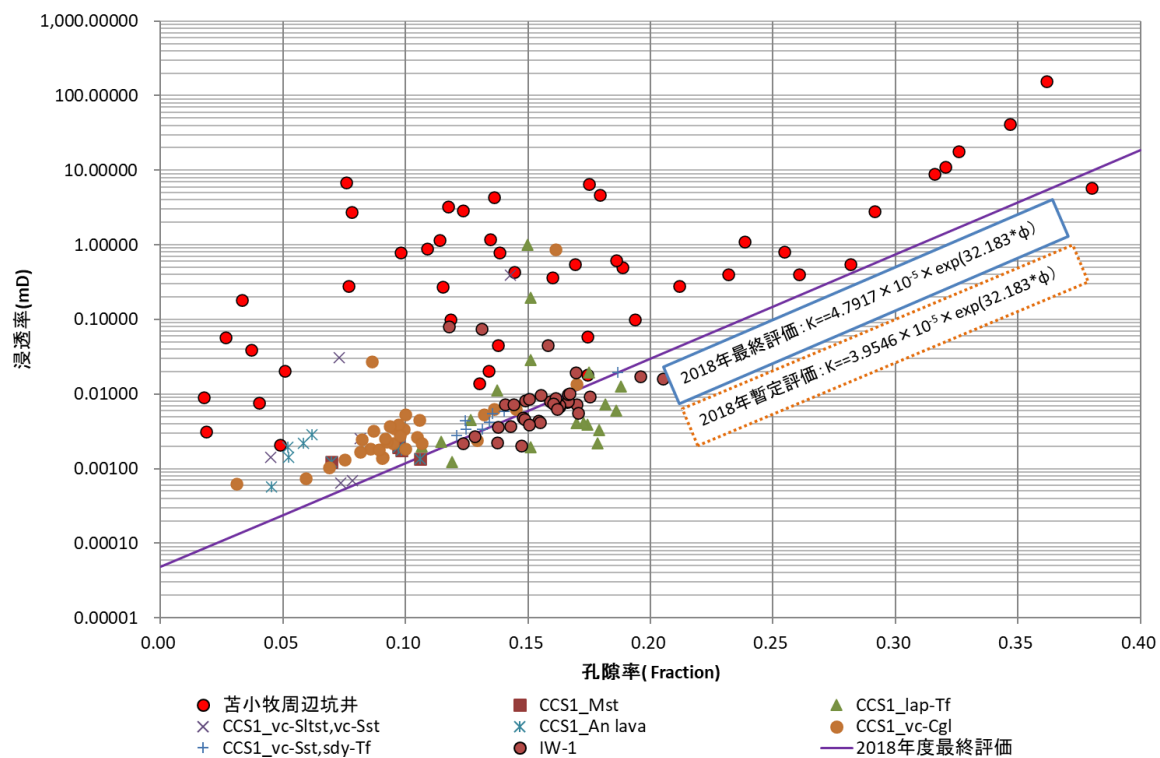
第 2.2-21 図 滝ノ上層圧入実績 (2018 年 2 月)



第 2.2-22 図 滝ノ上層圧入実績(2018 年 7 月～9 月)

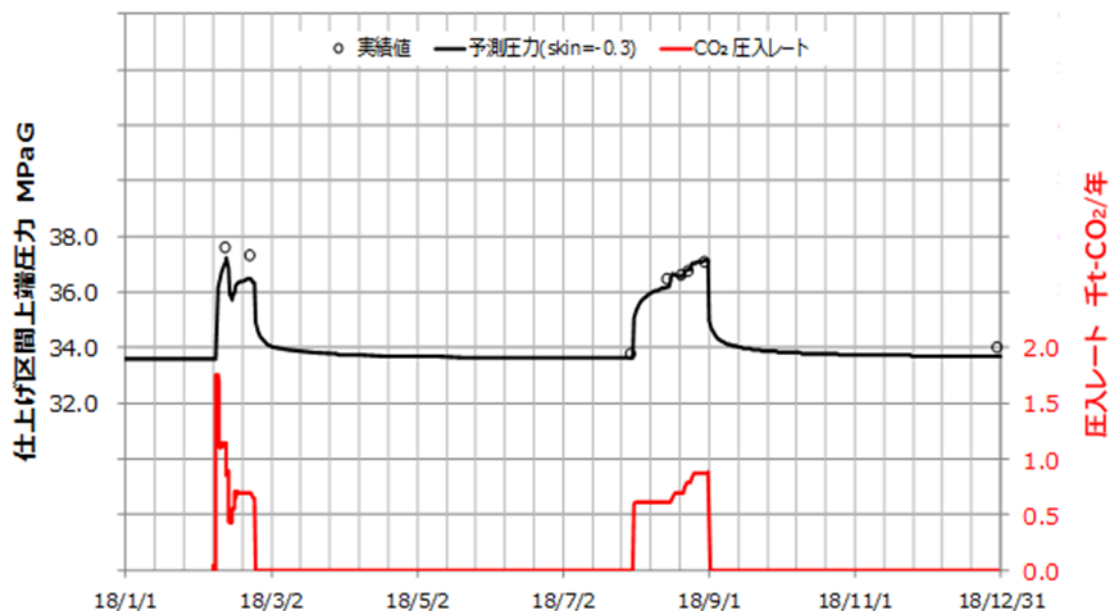
CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションは 2018 年 8 月 31 日までの圧入実績を反映し、圧入実績に即した 98 トンの CO<sub>2</sub> を圧入するシミュレーションを実施した。2018 年 8 月 31 日までの圧入中の仕上げ区間上端の圧力（坑底圧）を反映するように、フォールオフの解析結果をもとに地質モデルの孔隙率と浸透率の相関式を修正し、最終的に浸透率を暫定値の 1.2 倍程度とした（第 2.2-23 図）。その結果、モデルで想定される坑底圧力は 2018 年 7 月以降の圧入実績とほぼ一致するまで改善した（第 2.2-24 図）。





- 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 $=0.000039546 \times e^{32.1823 \times \text{孔隙率}}$ 」を用いた。
2. CCS-1: 苫小牧 CCS-1 (現苫小牧 0B-1), Mst: 泥岩, lap-Tf: 火山礫凝灰岩, vc-Sltst: 火山岩質シルト岩, 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
3. 圧入停止後の圧力挙動も考慮。

第 2.2-23 図 滝ノ上層 浸透率調整 (2018 年度シミュレーション)



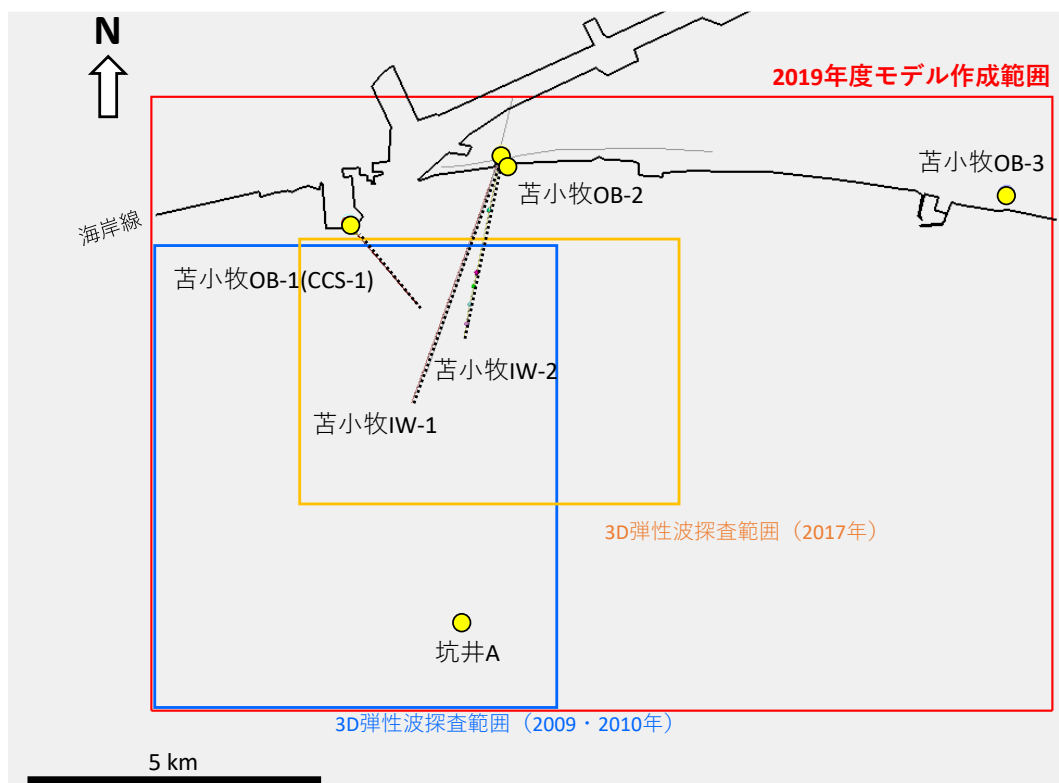
- 注) シミュレーションによる推定される圧力値と実績値の乖離について目的関数 (Objective function) を用いて検討し, SkinFactor=-0.3 とした。

第 2.2-24 図 滝ノ上層 CO<sub>2</sub> 挙動予測 (2018 年度シミュレーション)

イ) 萌別層砂岩層用の地質モデルの作成 (2019 年度地質モデル)

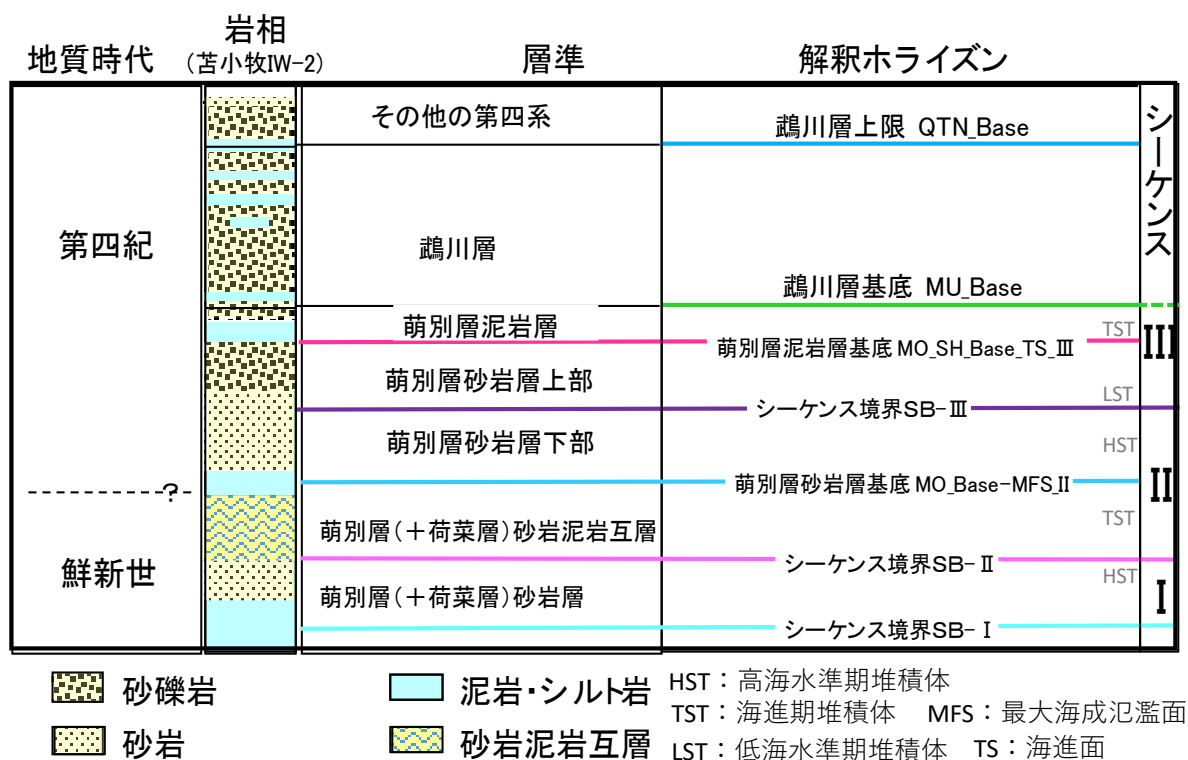
a. 岩相分布・性状分布の推定

第 2.2-25 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 2.2-25 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 2.2-26 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。

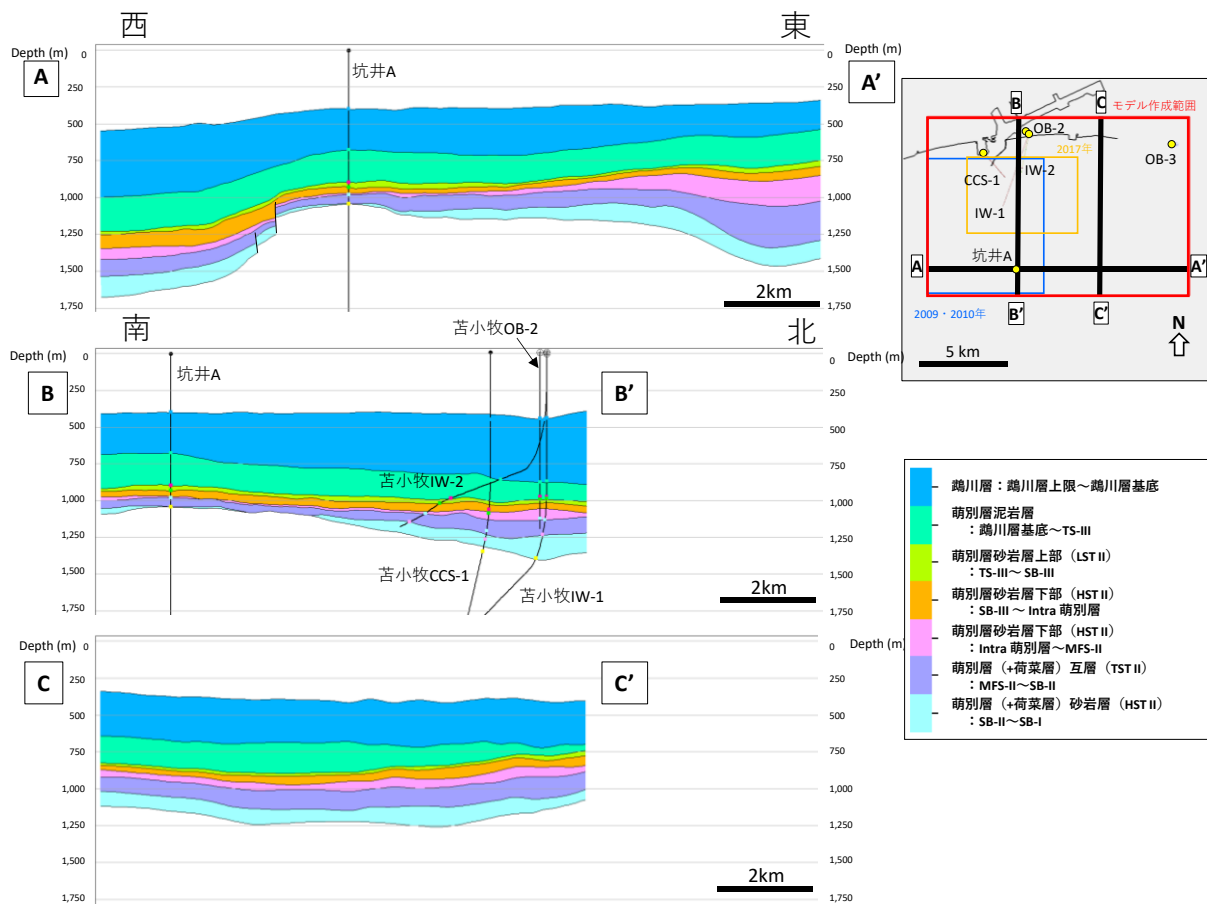


第 2. 2-26 図 萌別層の層序区分と解釈ホライズン

#### 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 2. 2-26 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 2. 2-27 図に示す。

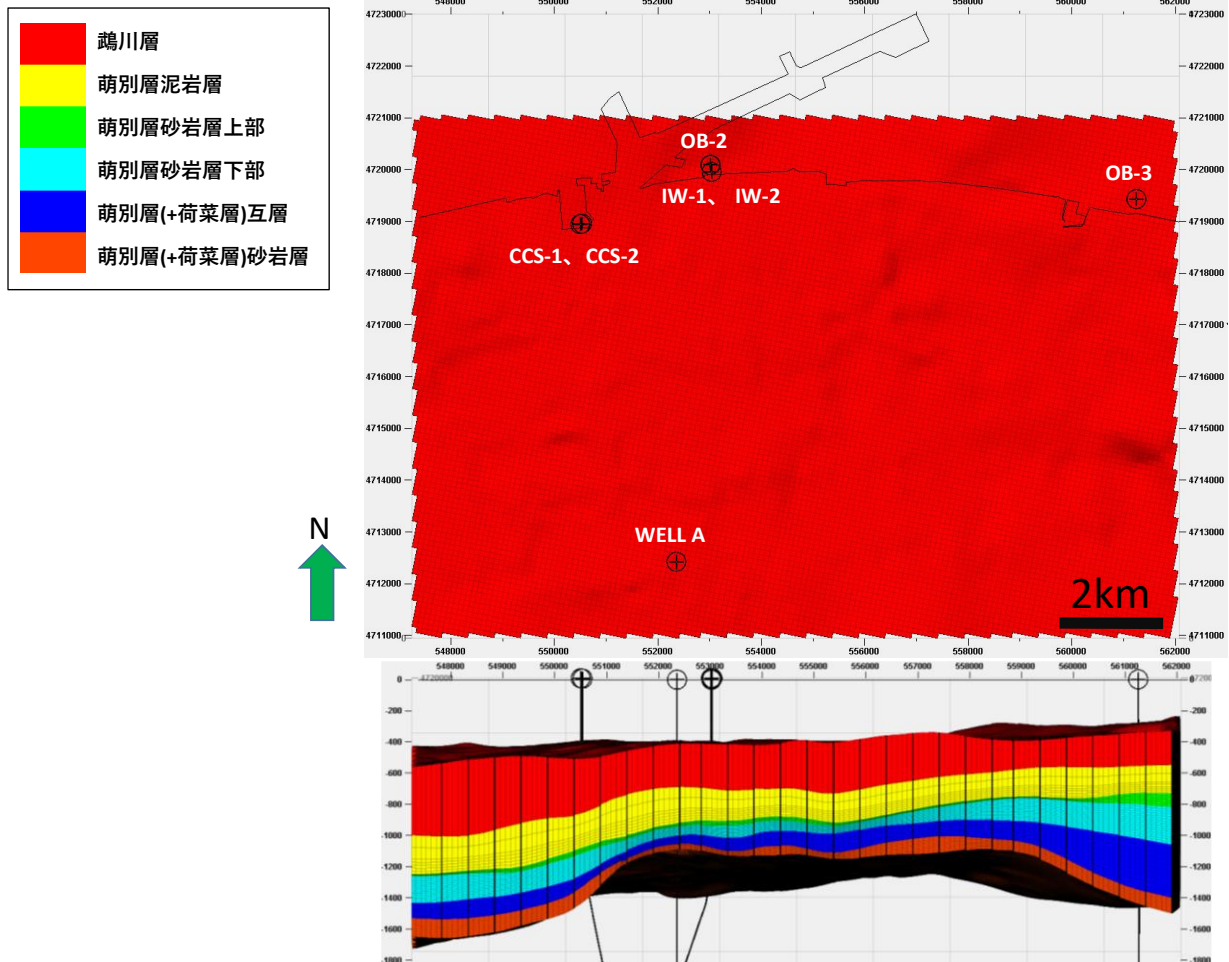


第 2.2-27 図 モデル断面

各層準内に第 2.2-9 表のようにグリッドセルを作成した。第 2.2-28 図に、グリッドセルの外観図を示す。

第 2.2-9 表 萌別層構造モデルのグリidding

層序区分 (Zone)	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
鵜川層 (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 2.2-28 図 グリッドセルの外観図

### c. 属性モデルの作成

萌別層（＋荷菜層）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。

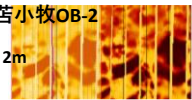

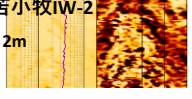
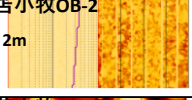

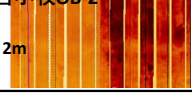
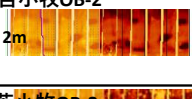
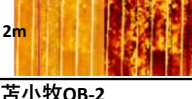
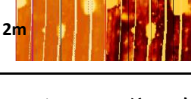
#### i) 坑井データを用いた堆積環境の推定

シーケンス層序区分（第 2.2-26 図）を基準として、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 2.2-29 図，第 2.2-30 図）。なお、ファシス（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。



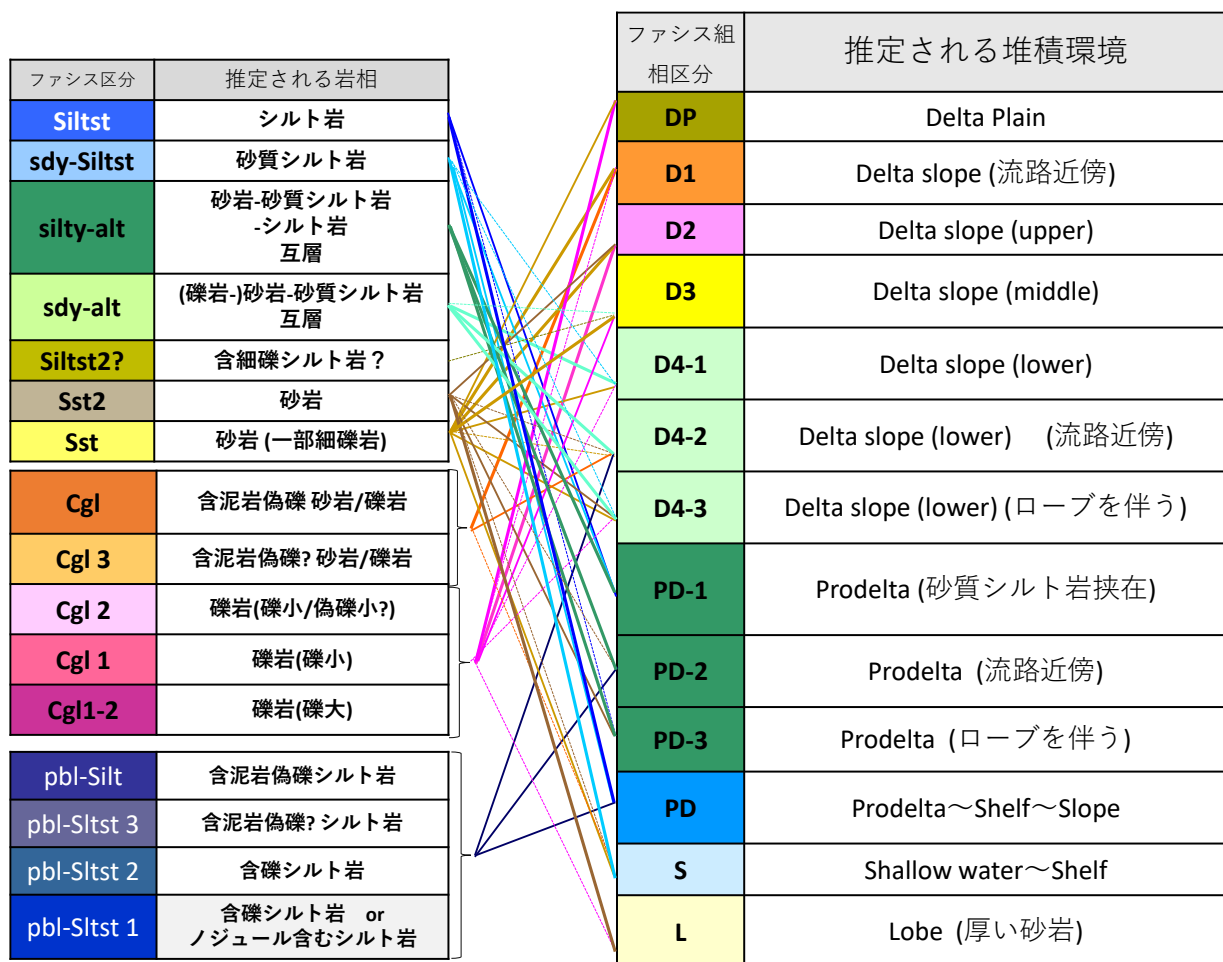
比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	検層データにおける特徴	ファシス区分	推定される岩相
暗色。 (生痕や炭質物が明暗の点で見えることもある。)	苦小牧CCS-1 	- GR値,Vclay値が高い。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色)。  比抵抗値<2, Vclay値>0.25, GR値 55~70	Siltst	シルト岩
やや暗色。 (コントラストの弱い互層状か混沌とした様相を示す。)	苦小牧CCS-1 	- GR値,Vclay値が高い傾向。 - 比抵抗値がやや低い(イメージでやや暗色)。  比抵抗値 1~2, Vclay値 0.2~0.25, GR値 35~50	sdv-Siltst	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値高い傾向で振れ幅小さく変動。 - 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値低い傾向で振れ幅小さく変動。 - 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	sdv-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sdv-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 2. 2-29 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

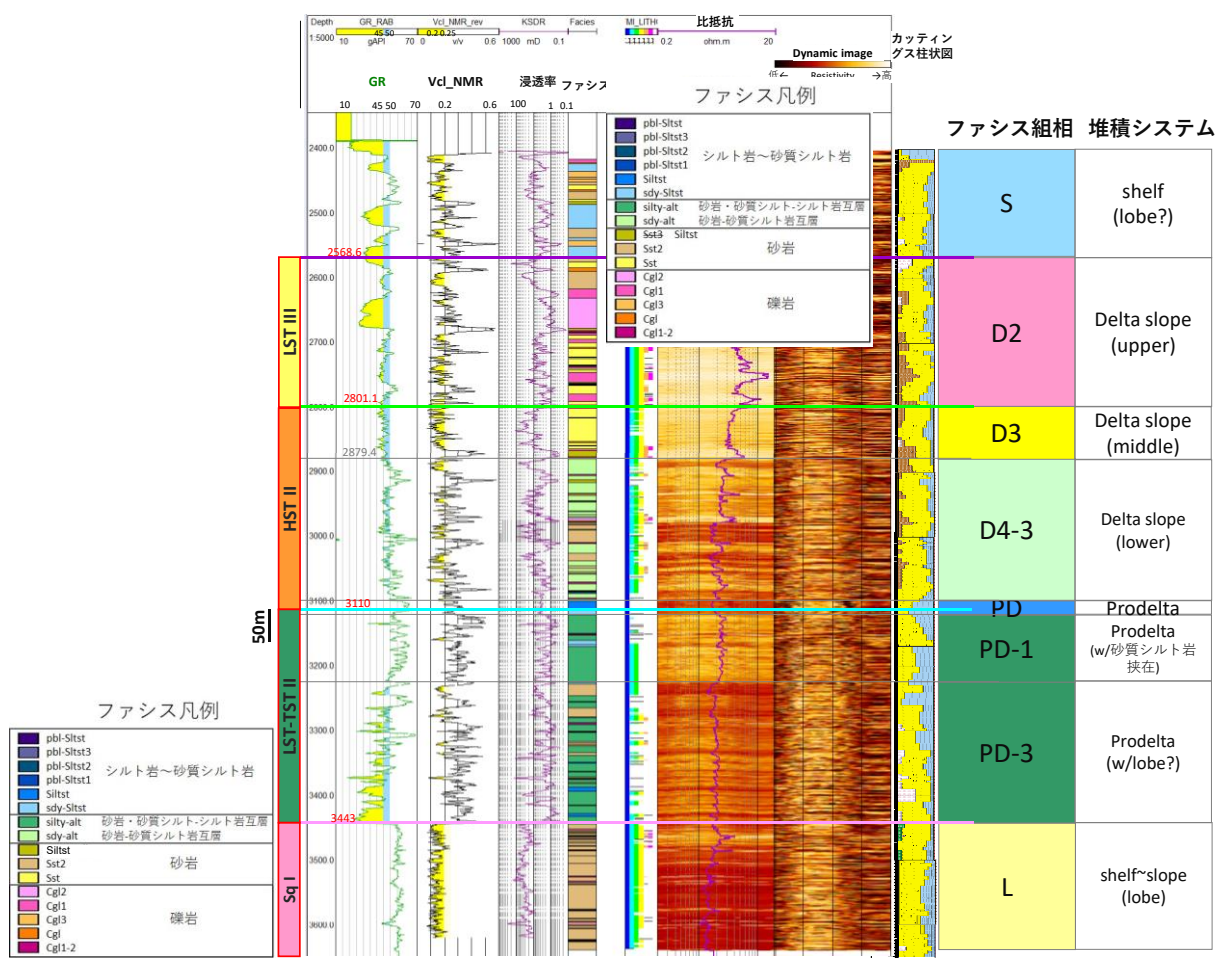
第 2. 2-30 図 ファシス区分の例（礫岩など粗粒な岩相）

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 2. 2-31 図に示す。

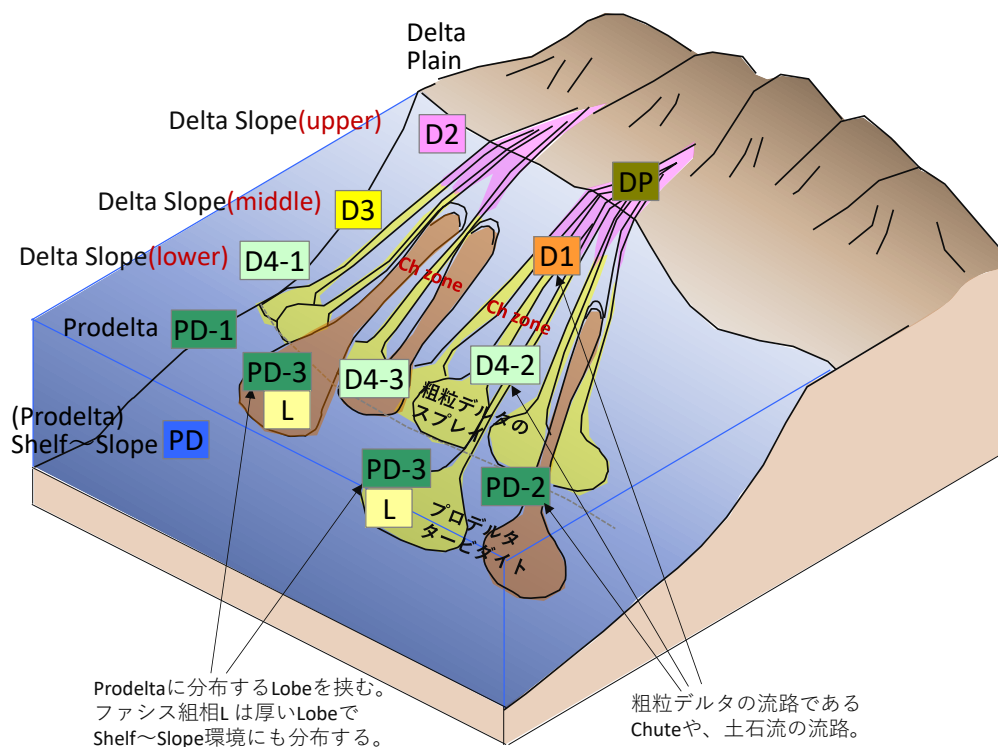


第 2. 2-31 図 ファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

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 2. 2-32 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 2. 2-33 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 2. 2-32 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 2. 2-33 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 2. 2-34 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、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 2.2-10 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

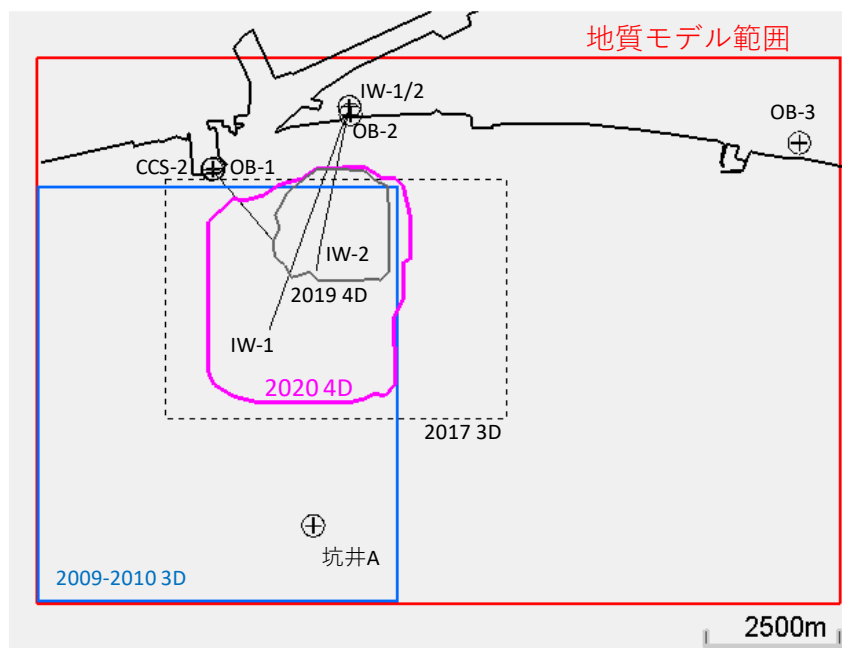
注：PHIT は全孔隙率，PHIE=PHIT×(1-Vcl)は有効孔隙率，Vcl はクレイボリューム（clay volume, 全孔隙に占める粘土鉱物による孔隙の割合）を表す。

#### ウ) 萌別層砂岩層用の地質モデルの作成（2021 年度地質モデル）

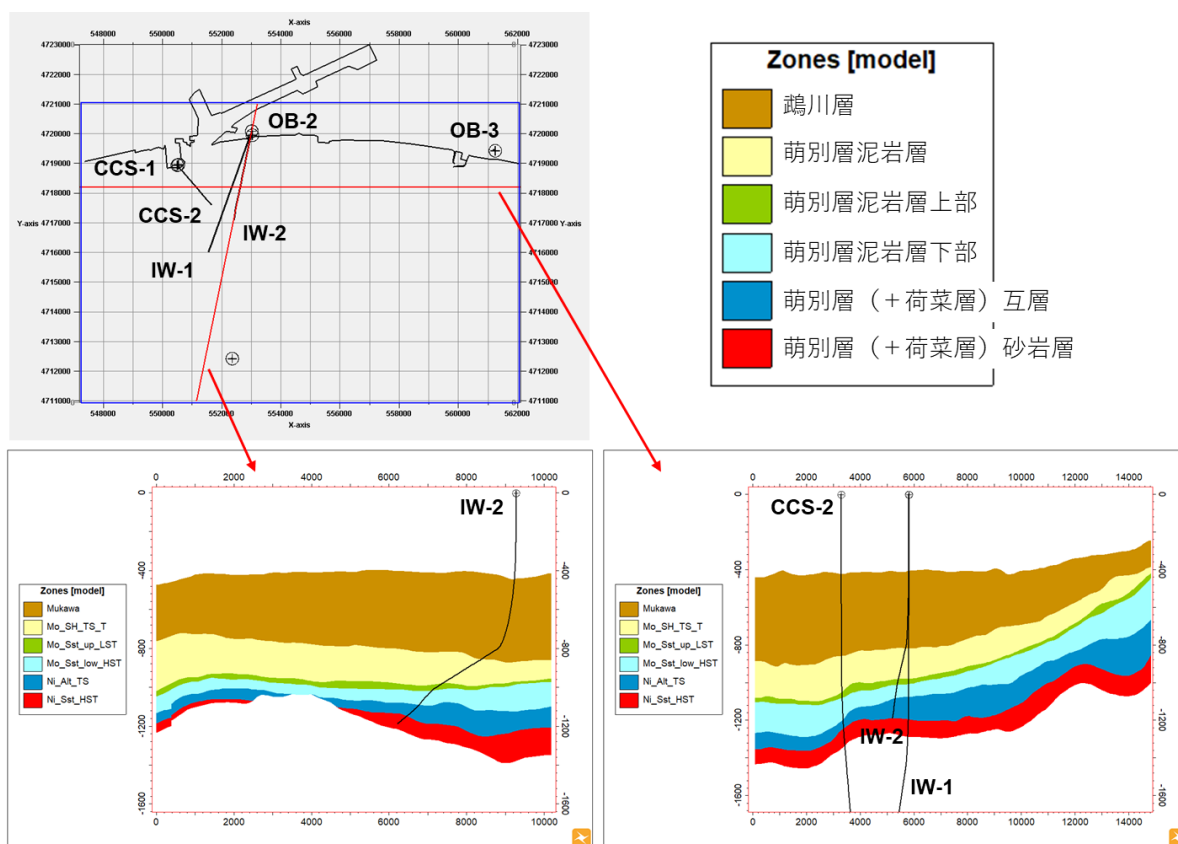
##### a. 構造モデルの作成

シーケンス解釈については，2019 年度地質モデルと同じ解釈を使用した。ホライズンについては，苫小牧沖 3D 弾性波探査データ（2020）の差分解析検討結果（2021 年）を用いて，萌別層貯留層の上限である萌別層泥岩基底ホライズンと，下限である SB-3 ホライズンの地質構造解釈を更新し，深度構造図も更新した。深度変換については，2019 年度地質モデルと同じ速度モデルを用いて変換を行った。

2021 年度地質モデルの作成に使用した坑井のデータ（圧入井，観測井，民間井），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第 2.2-35 図に示す。また深度変換された萌別層（+荷菜層）砂岩層～鵠川層の構造モデル断面を第 2.2-36 図に示す。第 2.2-36 図の平面図の赤線は断面の位置を示す。

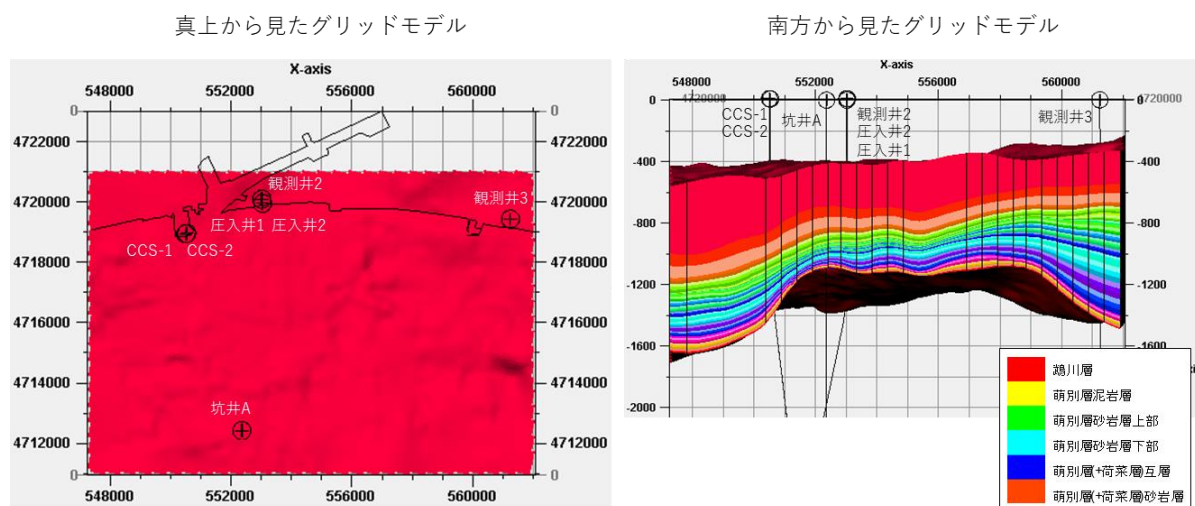


第 2. 2-35 図 2021 年度地質モデル作成範囲



第 2. 2-36 図 構造モデル断面

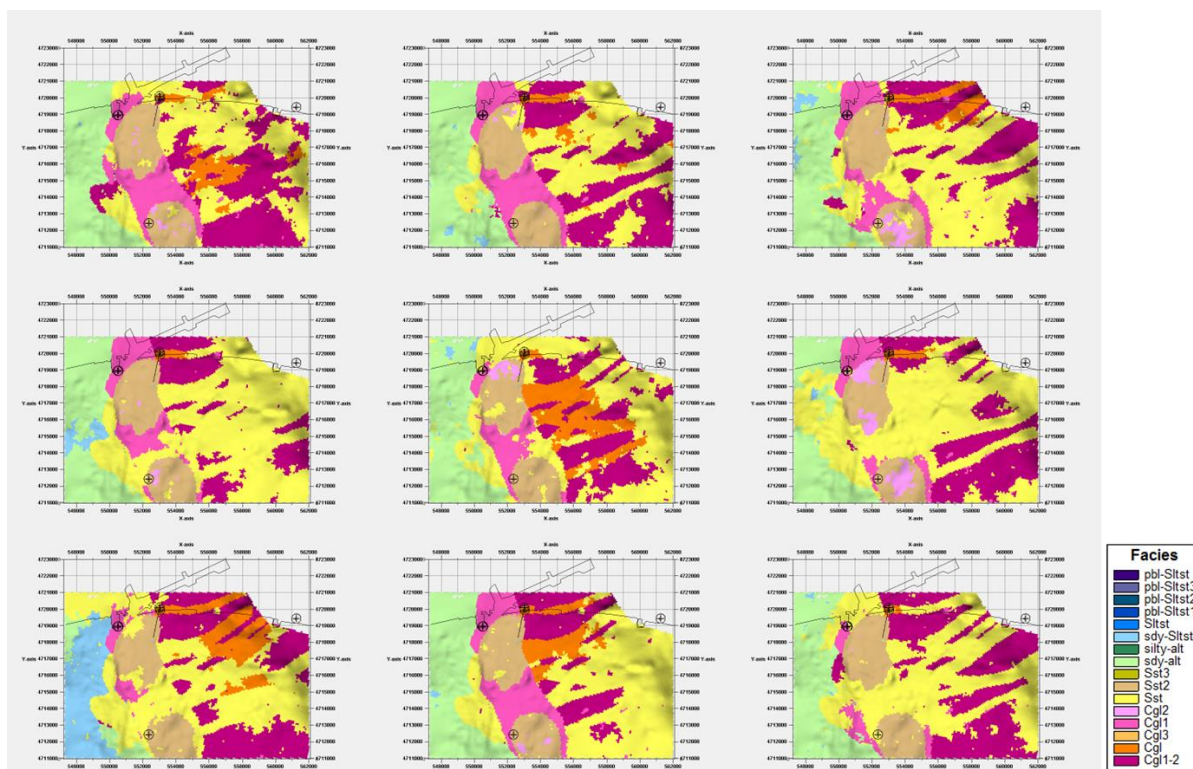
2019 年度地質モデルと同様に、各層準内に第 2.2-9 表のようにグリッドセルを作成した。検層で確認される高浸透領域をより正確にモデルに反映するために、萌別砂岩層上部および下部ゾーンのレイヤー等分方法を変更した。また遮蔽層層準のアップスケールファシスを検層ログファシスと整合させるために、萌別層泥岩層ゾーンのレイヤー等分方法を変更した。第 2.2-37 図に、グリッドセルの外観図を示す。



第 2.2-37 図 グリッドセルの外観図

## b. 属性モデルの作成

2021 年度地質モデルの作成において、堆積相解析および断層解釈は更新せず、2019 年度地質モデルと同じものを使用した。2019 年度地質モデルと同様に、SIS を用いて地球統計学的にファシス組相およびファシスを分布させ、具現像を作成した。作成した複数の具現像それぞれについて、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 2.2-38 図に、作成した具現像の萌別層貯留層上部のファシス分布を示す。



第 2.2-38 図 萌別層貯留層上部のファシス分布

#### ④ CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーション

作成した地質モデルを用いて、圧入実績に即した CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施し、CO<sub>2</sub>圧入時の圧力挙動のほか、貯留層内での移動・到達範囲を推定した。

#### 7) 滝ノ上層 T1 部層における CO<sub>2</sub>挙動予測（圧入実績を踏まえた予測）

##### a. 概要

既存の地質モデルを修正し、圧入実績を踏まえ、2018 年 2 月および、2018 年 7 月～9 月にかけて、累計 98 トンの CO<sub>2</sub>を滝ノ上層 T1 部層に圧入する CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。

##### b. パラメータ

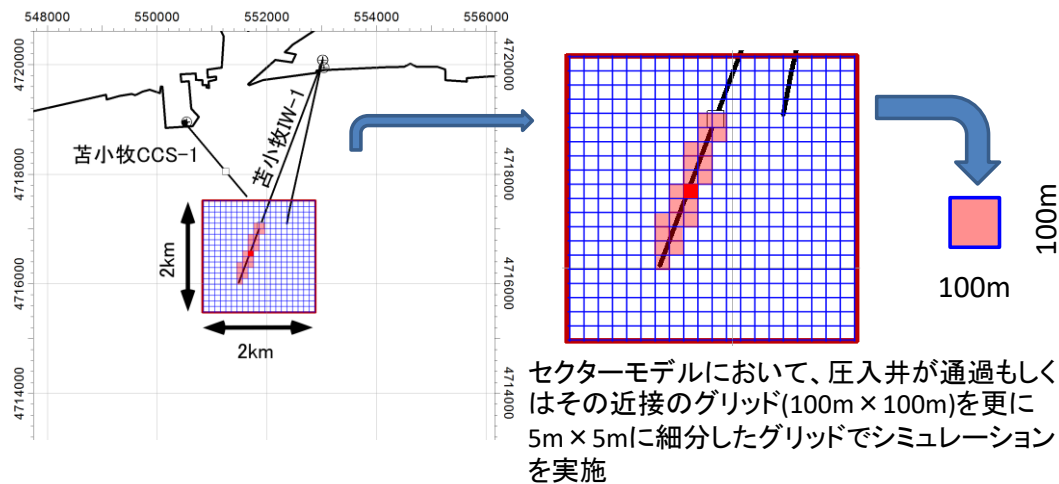
シミュレーションパラメータは、滝ノ上層圧入井のデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等）および文献値により、第 2.2-11 表に示す値を用いた。

滝ノ上層の貯留岩性状が予想以上に低かったため、地質モデルの一部分を切出した 2km×2km のセクターモデルを作成した。さらにより正確なシミュレーションを実施するために、100m×100m のセクターモデルとし、滝ノ上層圧入井が通過するグリッドを 5m×5m のグリッドに細分の上、シミュレーションを実施した（第 2.2-39 図）。



第 2.2-11 表 シミュレーションパラメーター一覧

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2018 モデル	
サイズ	8km×12km×4km ⇒ 2km×2km×1km (セクターモデル)	
グリッド	80×120×106 グリッド ⇒ 20×20×62 (セクターモデル)	
アクティブ・ブロック数	24,800 (セクターモデル)	
基準温度	89.2℃ (2,386mVD/仕上げ区間上端深度)	
基準圧力	33,600kPa (2,386mVD/仕上げ区間上端深度)	
CO <sub>2</sub> 圧入レート, 圧入期間	実績に基づく	
圧入圧力上限	38,000kPa (PT センサー深度)	
岩石性状	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
平均孔隙率	滝ノ上層圧入井 AI 分布から推定	0.19
平均浸透率: mD	フォールオフ解析の結果等から推定	0.000043
圧縮率: kPa <sup>-1</sup>	6.79×10 <sup>-7</sup> (測定値)	
塩分濃度: ppm (NaCl)	35,100 (Cl <sup>-</sup> = 21,300ppm)	
相対浸透率	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
気相 相対浸透率 K <sub>rg</sub>	Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	Corey (1954) <sup>[2]</sup>
液相 相対浸透率 K <sub>rw</sub>		van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>
臨界ガス飽和率 S <sub>gc</sub>	0.04 Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	0.05
不動水飽和率 S <sub>wir</sub>	0.558 Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	0.8
最大残留ガス飽和率 S <sub>grmax</sub>	0.241	—
	from default value of GEM	
毛細管圧力曲線	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
	Bennion (2006) <sup>[4]</sup> , van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>	測定値



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

第 2.2-39 図 シミュレーションに用いたセクターモデルとグリッド

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

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

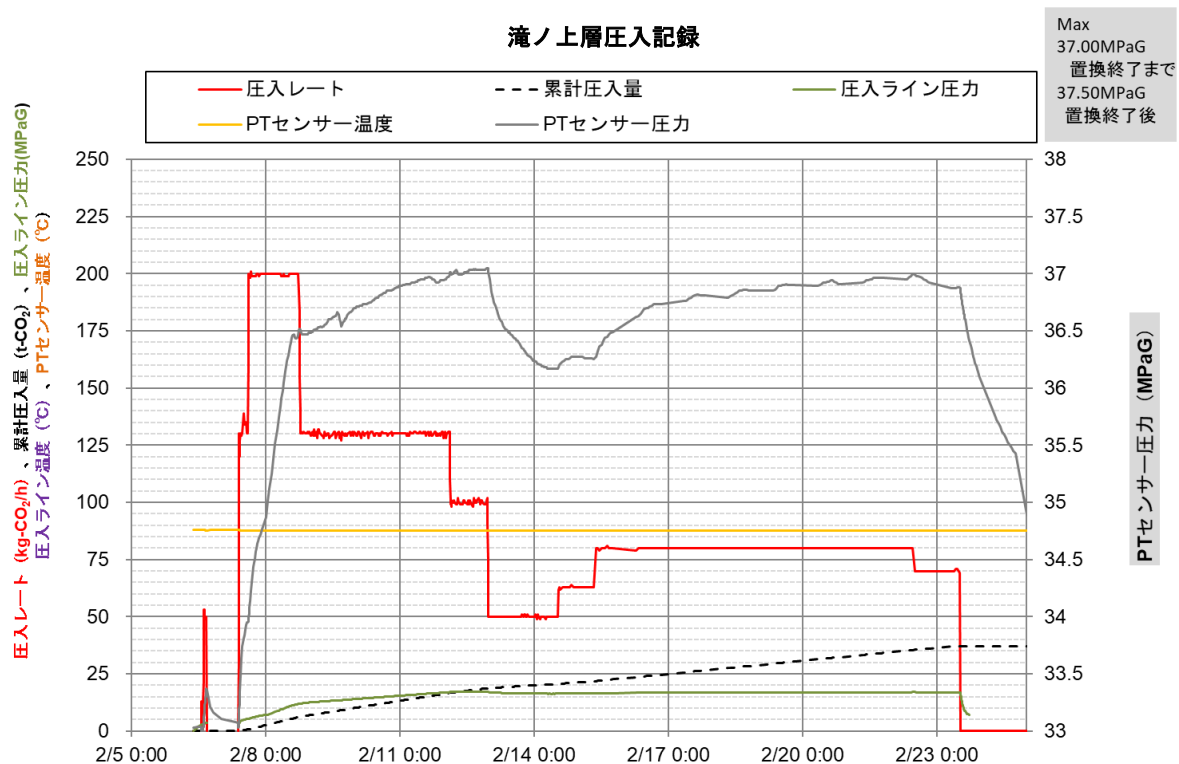
<sup>[3]</sup> van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

<sup>[4]</sup> Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO<sub>2</sub> relative permeability at reservoir condition in CO<sub>2</sub>-Brine systems. paper SPE 99325, p.9

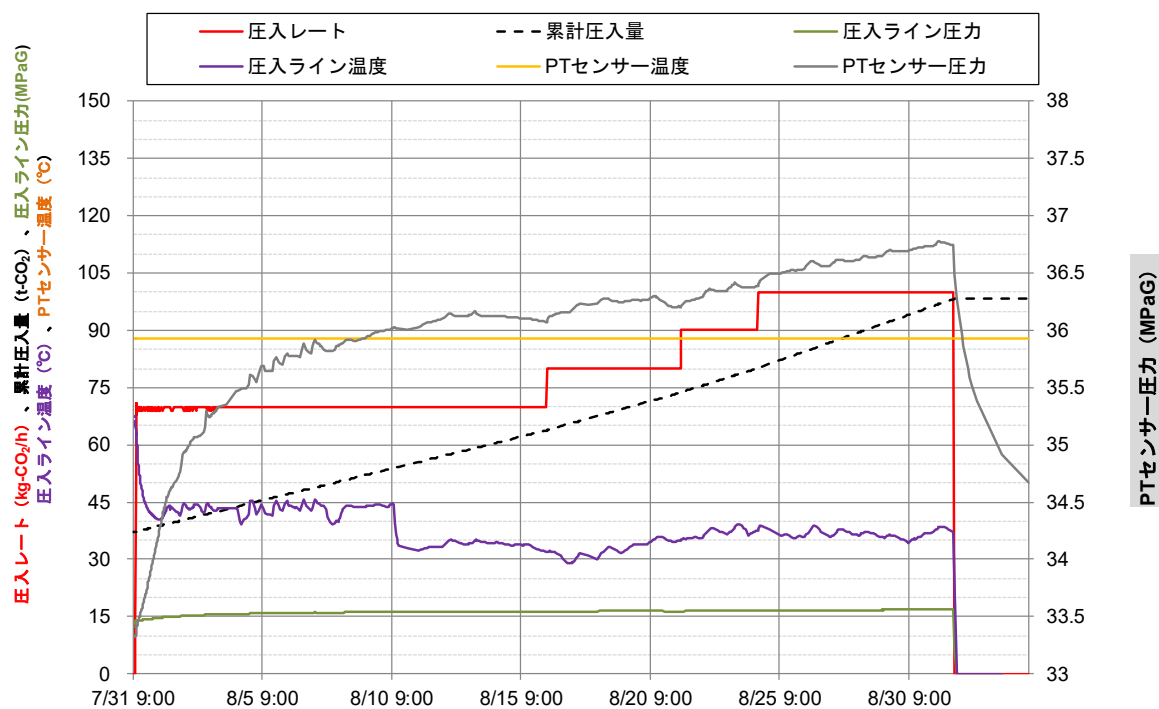
### c. 圧入実績

滝ノ上層へのCO<sub>2</sub>圧入は2018年2月6日に開始したが、2月26日に地上設備の不具合により圧入を停止した(第2.2-40図)。問題対応等の後7月31日に圧入を再開したが、PSAオフガス供給元の都合によりPSAオフガスの供給が途絶えたため、9月1日に圧入を停止した。9月1日時点での累計圧入量は98t-CO<sub>2</sub>となる(第2.2-41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、圧入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。



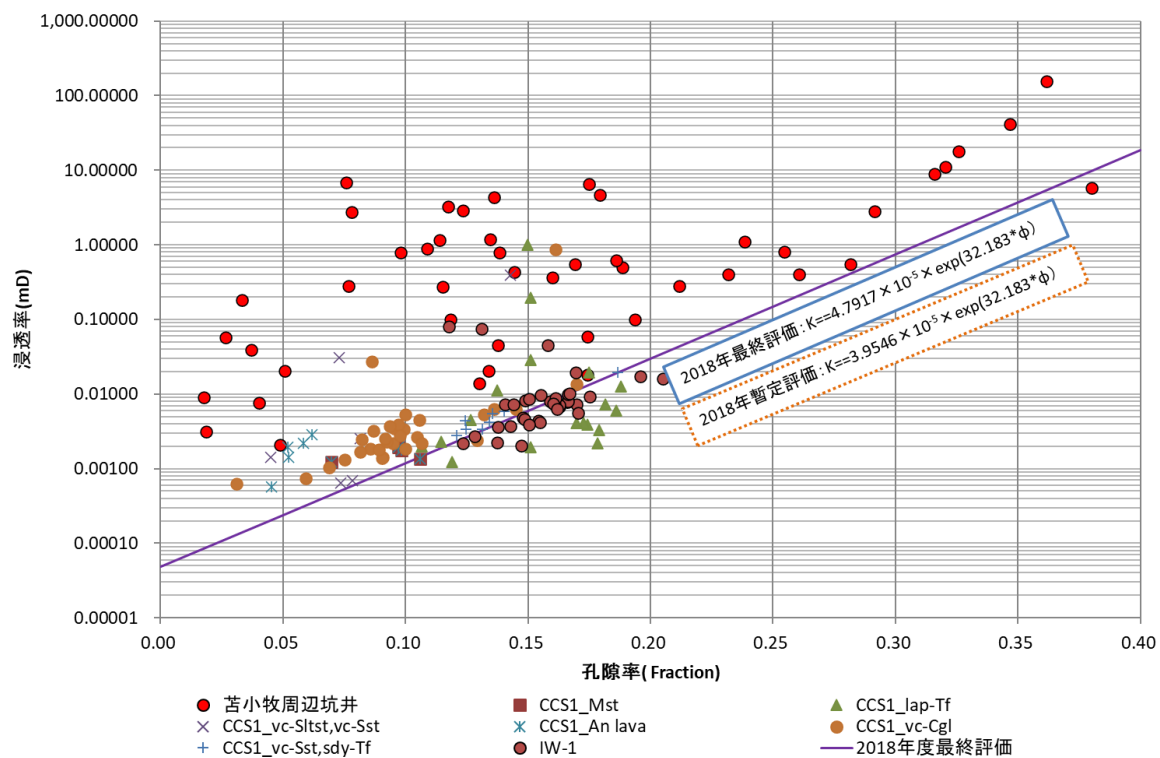
第 2.2-40 図 滝ノ上層圧入記録(2018 年 2 月)



第 2. 2-41 図 滝ノ上層圧入記録(2018 年 7 月～9 月)

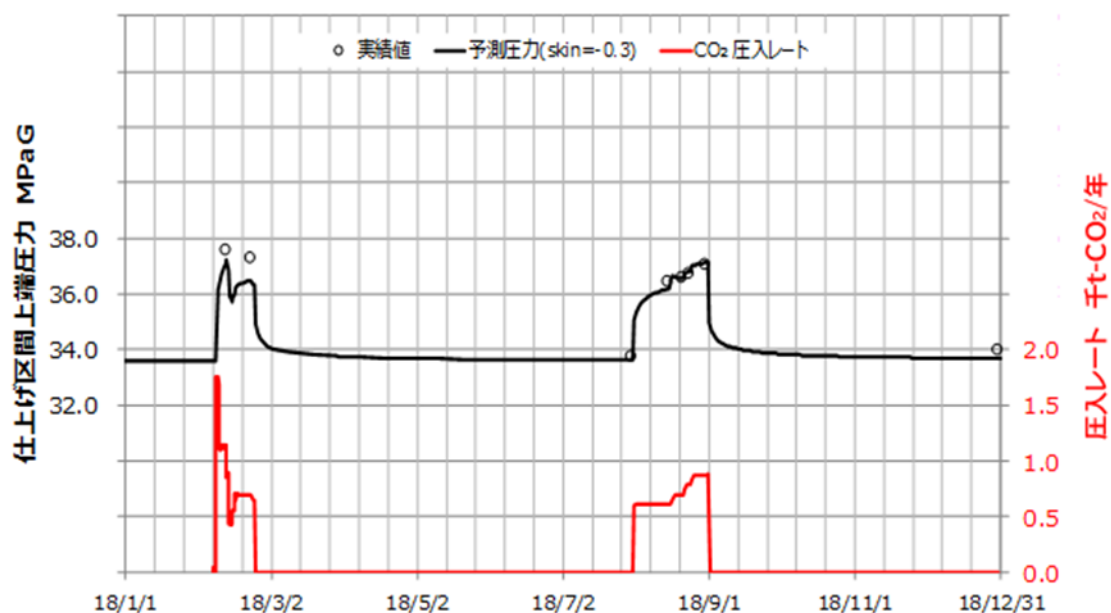
#### d. CO<sub>2</sub> 圧入時の挙動とパラメータの調整

CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションは圧入実績に即した, 2018 年 2 月および 2018 年 7 月～9 月に累計 98 トンの CO<sub>2</sub> を圧入ものとして実施した。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 2. 2-42 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 2. 2-43 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 $=0.000047917 \times e^{32.182 \times \text{孔隙率}}$ 」を用いた。  
 2. CCS1: 苫小牧 CCS-1 (現苫小牧 OB-1), Mst: 泥岩, lap-Tf: 火山礫凝灰岩, vc-Sltst: 火山岩質シルト岩, vc-Sst: 火山岩質砂岩, An lava: 安山岩質溶岩, vc-Cgl, 火山岩質礫岩, sdy-Tf: 砂質凝灰岩, IW-1: 苫小牧 IW-1

第 2.2-42 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 2.2-43 図 滝ノ上層 CO<sub>2</sub> 挙動予測 (2018 年度シミュレーション)

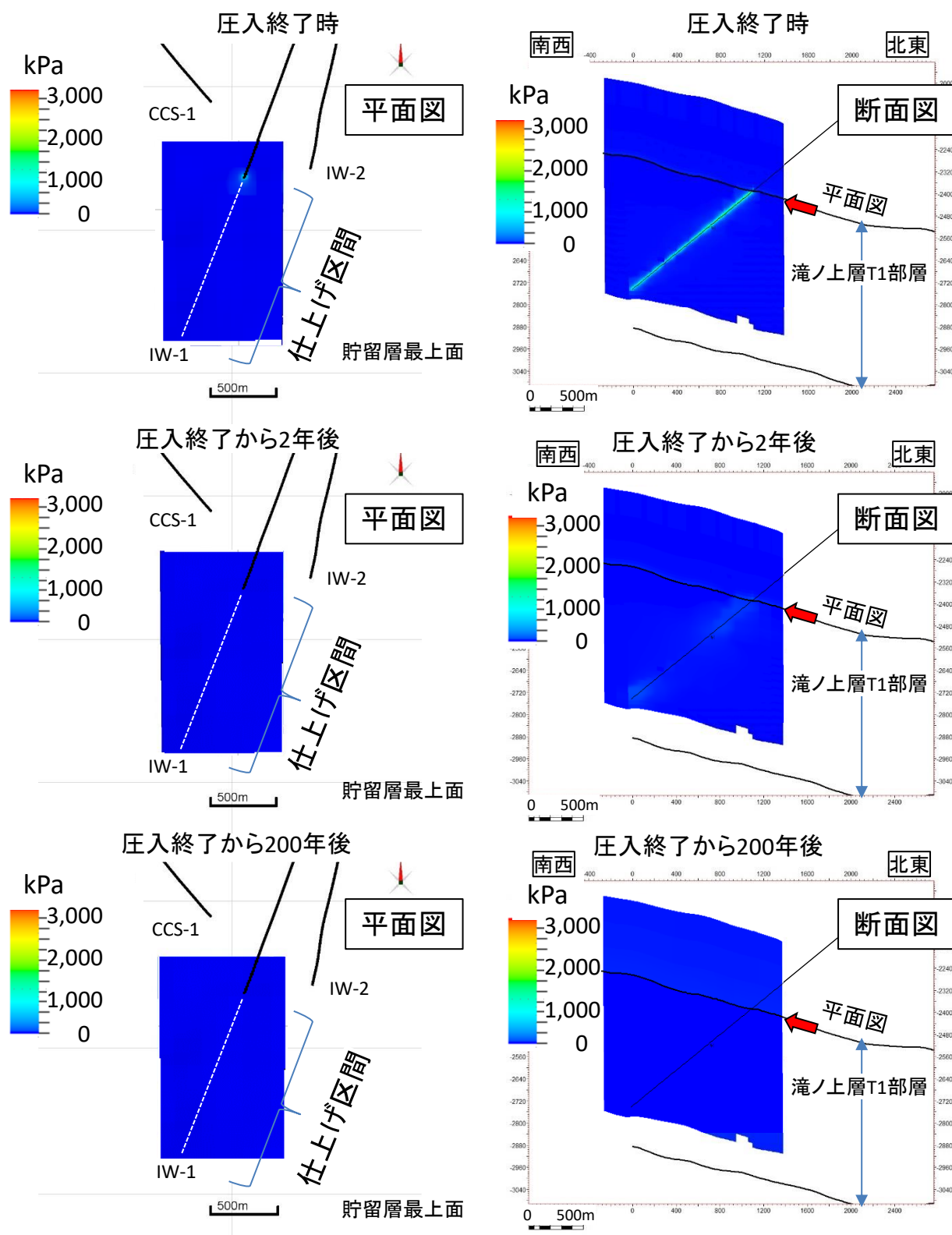
**e. 貯留層圧力分布**

圧力変化に関するシミュレーション結果を第 2.2-44 図に示す。第 2.2-43 図に示すように、シミュレーションでは圧入圧力が上限圧力付近に達している。そのため、圧入時および圧入終了直後の圧入井の近傍では、初期圧から最大 5MPa 程度の貯留層圧力の上昇が生じている。圧入終了後、速やかに圧力上昇は解消され、圧入終了から 2 年後には、圧力上昇範囲は広がるが、圧力上昇が 1,000kPa (1MPa) を超える箇所は消滅する。圧入終了から 200 年後には圧力上昇範囲がさらに拡大するが、坑井のごく近傍以外は 100kPa に満たない低い圧力上昇となる。

**f. 圧入に伴う貯留層内の CO<sub>2</sub> 分布予測（貯留 CO<sub>2</sub> の長期挙動予測）**

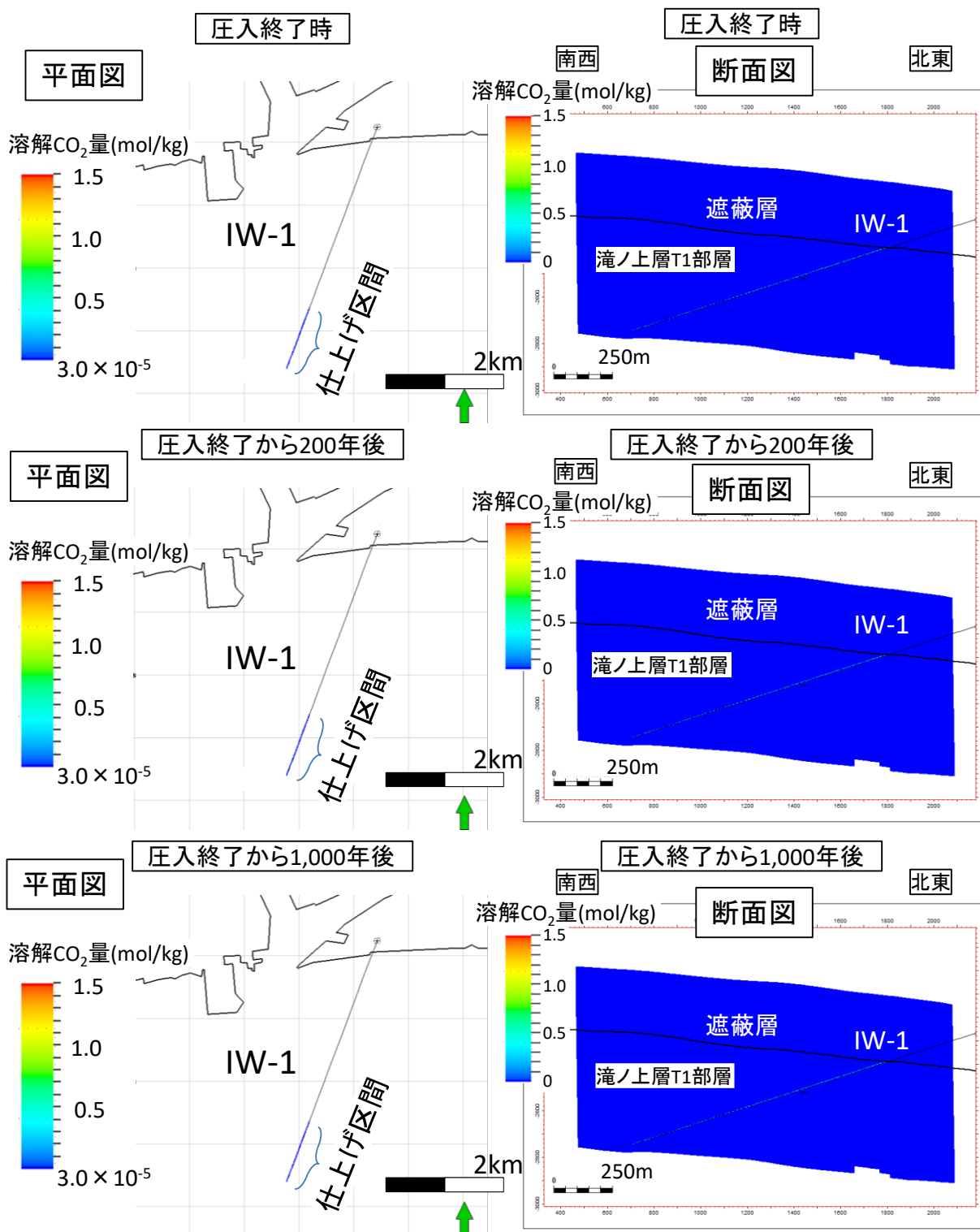
圧入した実績 CO<sub>2</sub> 量が少ないため、CO<sub>2</sub> 飽和度の分布域を示すことができない。溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布に対するシミュレーション結果を第 2.2-45 図に示す。





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

第 2.2-44 図 圧力変化の推移



注：1. 左：上方から俯瞰した平面図，右：坑跡に沿った断面図。

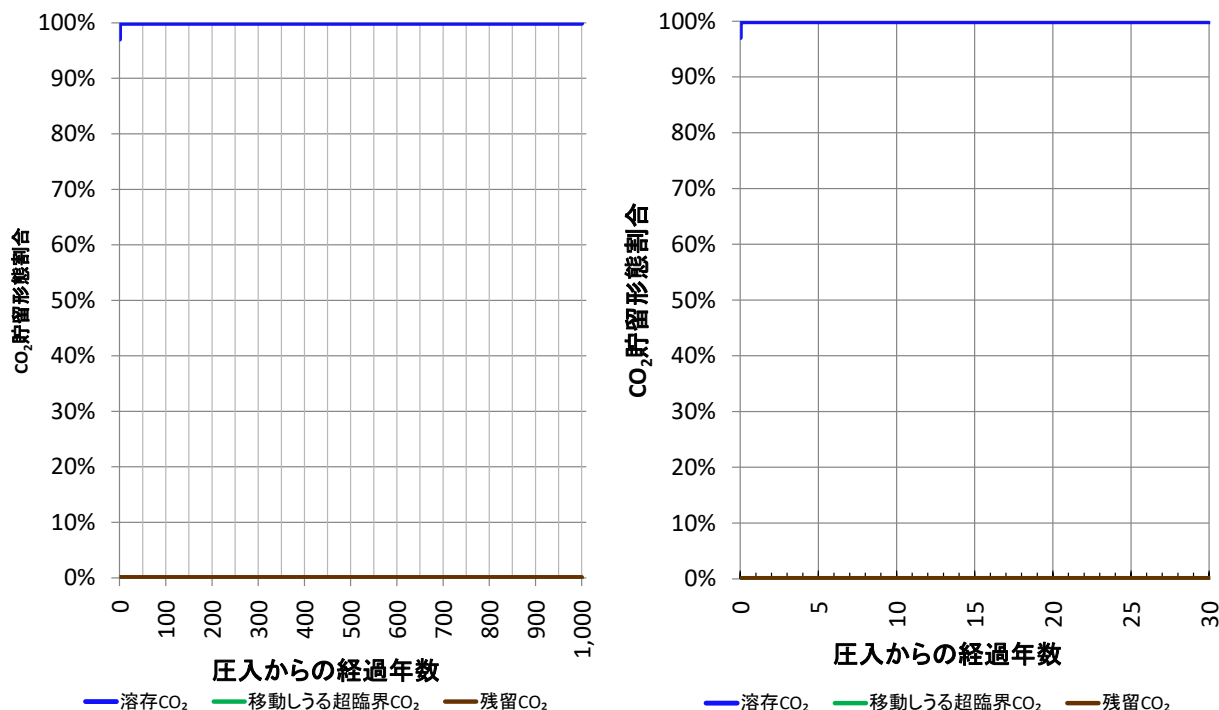
2. 上段：圧入終了時，中段：圧入終了から200年後，下段：圧入終了から1,000年後。

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，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第 2-45 図 溶解 CO<sub>2</sub> 量の推移

#### g. CO<sub>2</sub>の貯留形態ごとの割合

貯留 CO<sub>2</sub> の 3 つの貯留形態を, Movable (移動する可能性がある気相 CO<sub>2</sub>), Dissolved (溶解 CO<sub>2</sub>) および Trapped (孔隙等にトラップされ動かない気相 CO<sub>2</sub>) の 3 つに表現し, CO<sub>2</sub> 圧入量に対する割合の経時変化を, 第 2.2-46 図に示す。実績圧入量が少なく, 圧入した CO<sub>2</sub> の全量が, 圧入後即座に地層水に溶解するため, 圧入したすべての CO<sub>2</sub> は溶存 CO<sub>2</sub> として貯留層中にトラップされる。



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

第 2.2-46 図 CO<sub>2</sub>の貯留フォーム（割合）の変化

#### イ) 萌別層砂岩層における CO<sub>2</sub>挙動予測（2019 年度モデルシミュレーション）

##### 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 日までの実績値に基づいた数値とし、また、累計圧入量は 300,012 トンとした。地球統計学的手法である SIS によって生成した複数の不均質なファシス分布モデル（具現像）を用いたシミュレーションを複数回実施し、圧入終了

<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。

時の坑内圧力の予測値の統計的累積分布に基づいて P10, P50, P90 と名付けたモデルの抽出を行った<sup>[1]</sup>。

## b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧 CCS-2 および苫小牧 OB-2 および苫小牧 IW-2 で得られたデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など）および文献値から設定した（第 2.2-12 表）。孔隙率については、各坑井の全孔隙率の検層解析結果を岩相ごとに平均した値を与えた。浸透率については、岩相ごとに各坑井の全孔隙率と NMR 浸透率の近似式を作成した後、2015 年度に実施したブライン圧入テストから得られた坑井の仕上げ区間全体の浸透率×有効層厚に合うように高浸透率領域のファシス（後述の第 2.2-22 表で示す岩相 11）の孔隙率と浸透率の相関式のパラメータを調整し、各岩相の孔隙率から浸透率を計算し与えた。これらを入力した属性モデルを基本とし、CO<sub>2</sub> 圧入実績（流量と圧力）に整合するように圧入井の圧入区間と周辺地層の間の流量抵抗を決めるスキンプアクターを調整（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> 各モデルにより計算された値を確率の低い順に並べ、10 パーセンタイル、50 パーセンタイル、90 パーセンタイルに当たる値を出力するモデルをそれぞれ P10 モデル、P50 モデル、P90 モデルと呼ぶ。

第 2.2-12 表 シミュレーションパラメーター一覧 (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℃@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 (温度圧力センサー深度)	
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	0.60 (ファシス 10,11) 0.144 (その他ファシス)	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>に到達し圧入を終了した。萌別層への圧入実績を第 2.2-47 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 が設置された貯留層深度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、圧入実績や圧入終了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

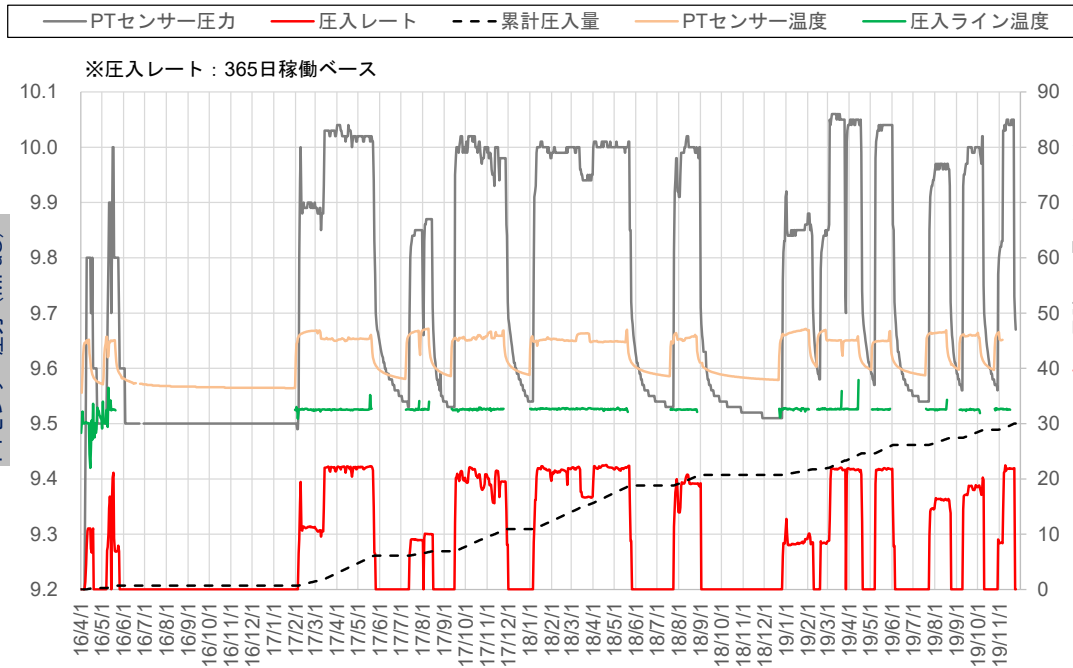
<sup>[3]</sup> Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

<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 2.2-47 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績

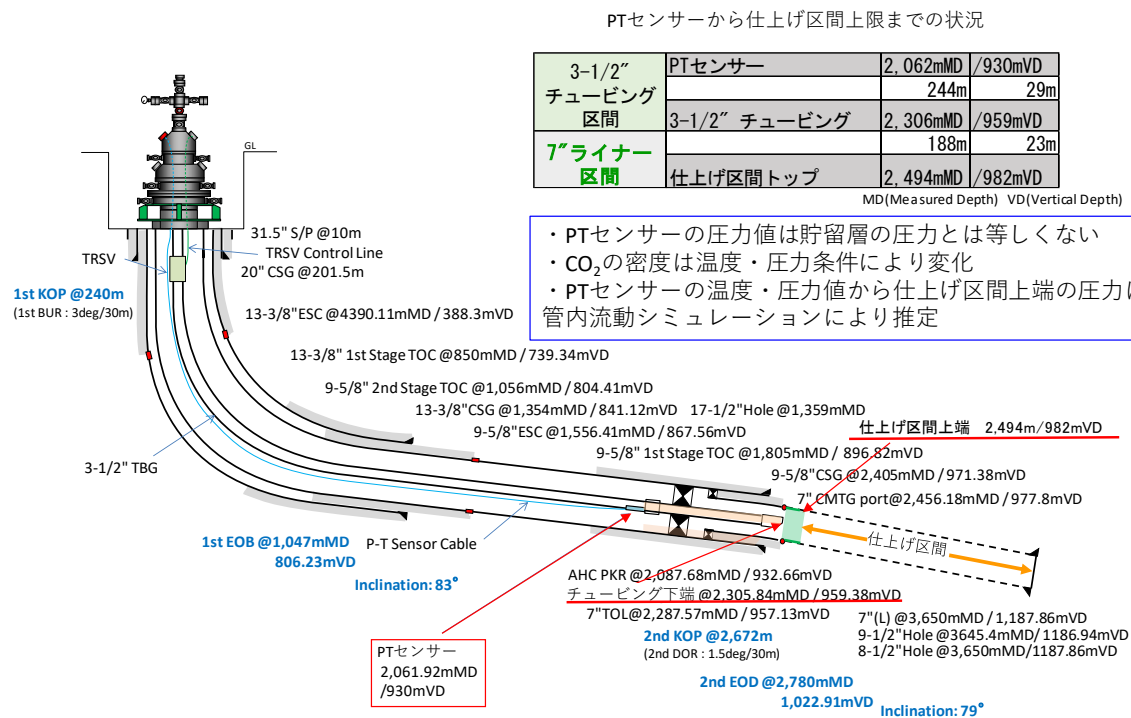
### d. 圧入実績から推定される圧入区間

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 2.2-48 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、管内流動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。

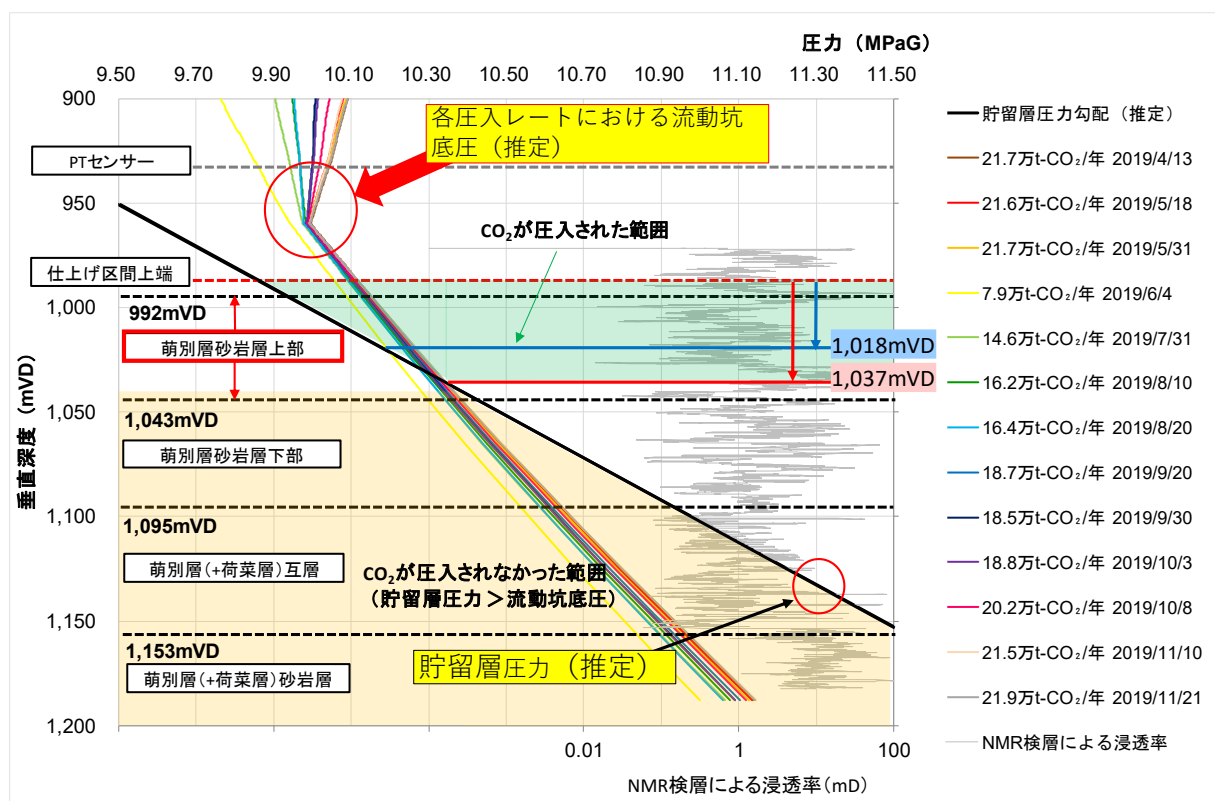
苫小牧 IW-2 は掘削した貯留層区間の全てを孔明管により仕上げているため、仕上げ区間の全てから CO<sub>2</sub> を圧入可能な構造 (第 2.2-48 図) である。

第 2.2-49 図および第 2.2-13 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 2.2-49 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。



第 2. 2-48 図 苫小牧 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 2.2-49 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

第 2.2-13 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、「FOA」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、FOAを実施した。

FOAを実施するために計画的に圧入を停止するテストのことを「フォールオフテスト」（以下、「FOT」と称する。）と呼ぶ。第2.2-47図に示されている複数回のCO<sub>2</sub>の圧入停止は、FOTを目的として行ったものではないが、以下では疑似的にFOTとして扱う。各FOTで得られた坑底圧を使ったFOAについては、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2.2-14表、第2.2-50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2.2-15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なケースも多い。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を用いた。

$$m(p) = \left( \frac{\mu z}{2p} \right) \int_{p_0}^p \frac{2p dp}{\mu z} \quad \text{式 (2.2-1)}$$

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

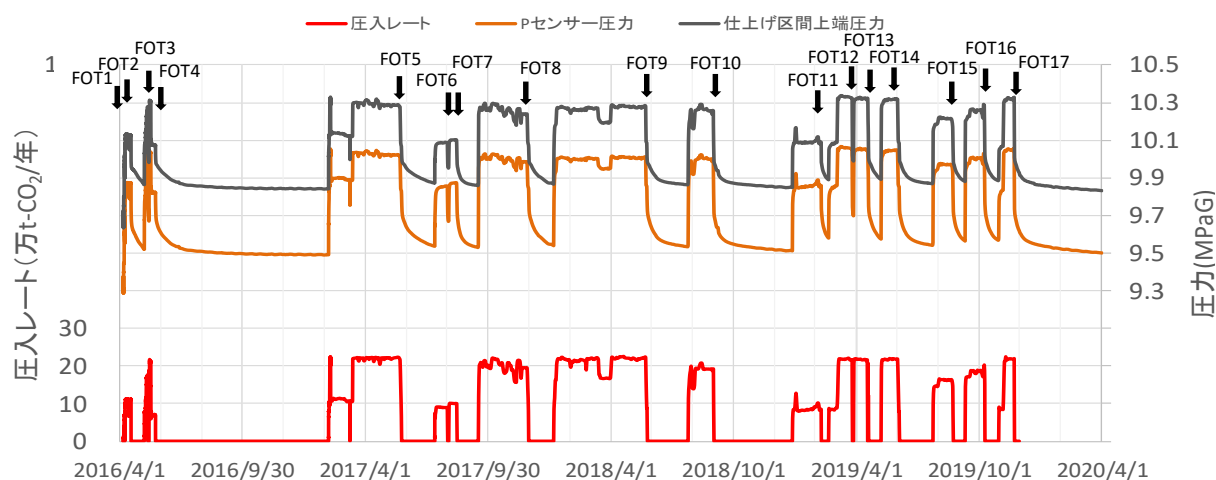
FOAでは横軸に時間、縦軸に圧力変化と圧力デリバティブ（圧力変化を微分、以下、「デリバティブカーブ」と称する）を共に対数スケールでプロットし、解析モデルにより貯留層性状を解析解により推定した。各ロガーログプロットには、PTセンサーが記録した圧力データを直接解析したカーブ（PT）と、PTセンサーの圧力・温度データからセンサー位置でのCO<sub>2</sub>密度を推定し、その密度をもとにPTセンサーから離れた位置にあたる仕上げ区間上端における圧力挙動を推定したカーブ（補正）も示した。また、PTセンサーの圧力・温度条件から推定されるCO<sub>2</sub>の密度の変化も示した。解析にはParadigm社製の圧力解析ソフト「Interpret」を使用した。第2.2-51図にそれぞれのロガーログプロットを示す。

---

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

第 2.2-14 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



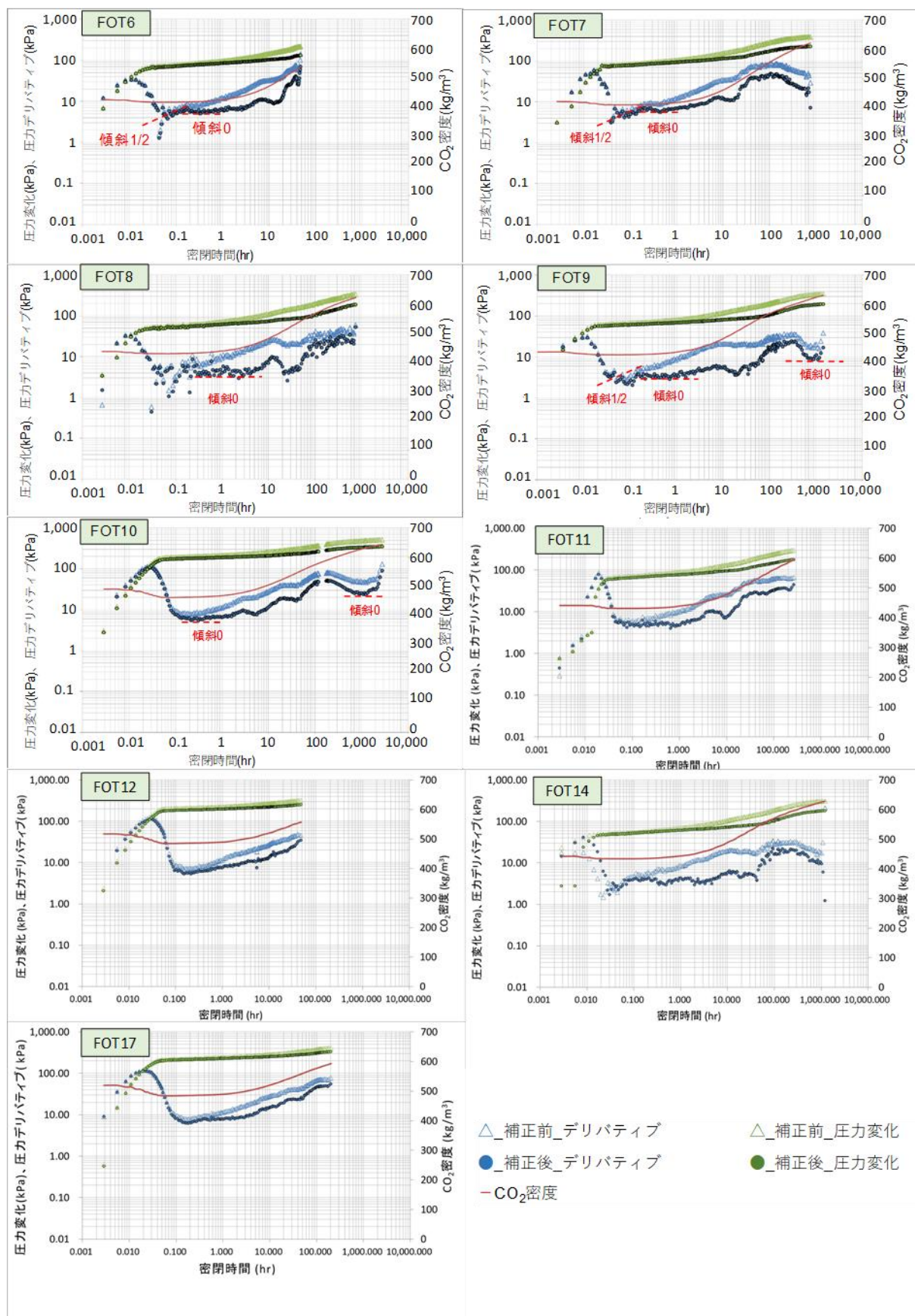
第 2.2-50 図 FOT を実施したタイミング

第 2.2-15 表 FOT 一覧(解析の有無)

FOT	圧入 停止 方法	CO <sub>2</sub> 領域の ラディアル フロー (ERF)	地層水領域の ラディアル 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
FOT6	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT7	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT8	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT9	○	○	○	
FOT10	○	○	○	
FOT11	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT12	○	○	×	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
FOT14	○	○	○	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
FOT17	○	○	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。





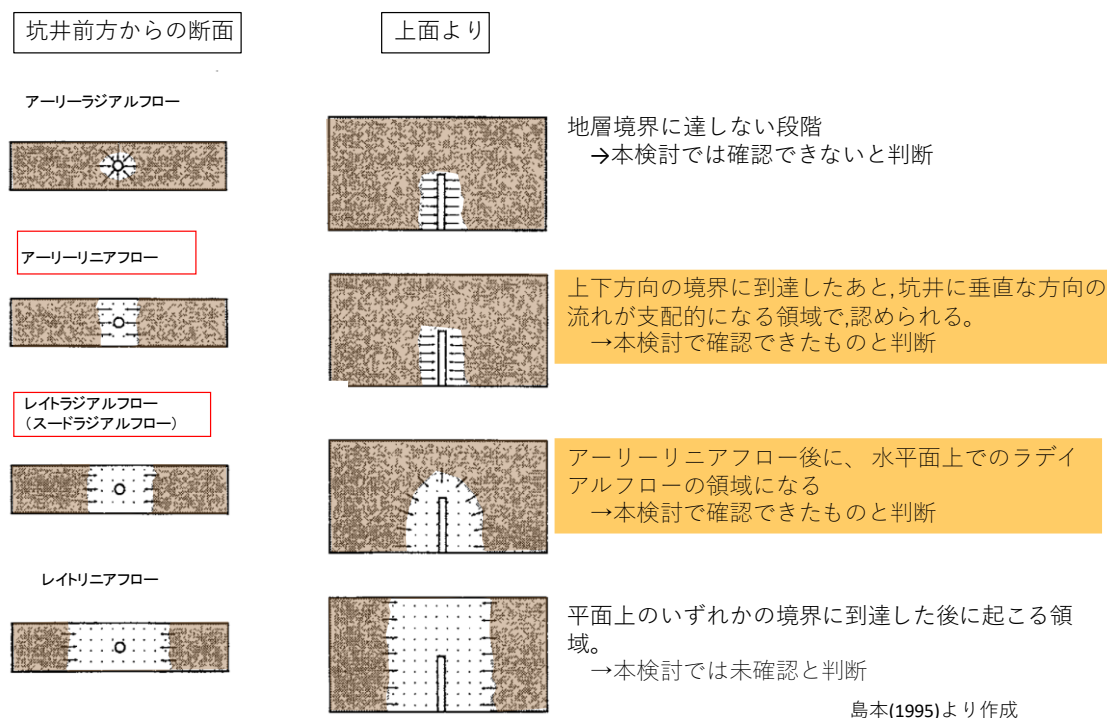
第 2.2-51 図 FOT のログ-ログプロット (FOT6~10, 11, 12, 14, 17)

参考のため、第 2.2-52 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。2018 年度までの検討では、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、2019 年度以降の検討では、ELF の認識が誤りである可能性を考慮し、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（以下、「LRF」と称する。）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 2.2-52 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。

均質かつ無限遠の貯留層においてラジアルフローとなっているとき, 圧力のデリバティブは一定であり次式であらわされる。

$$t \frac{dP}{dt} = \frac{70.6qB\mu}{kh} \quad (\text{式 2.2-2})$$

注) k: 浸透率, h: 有効層厚, q: 流量, B: 容積係数,  $\mu$ : 粘度

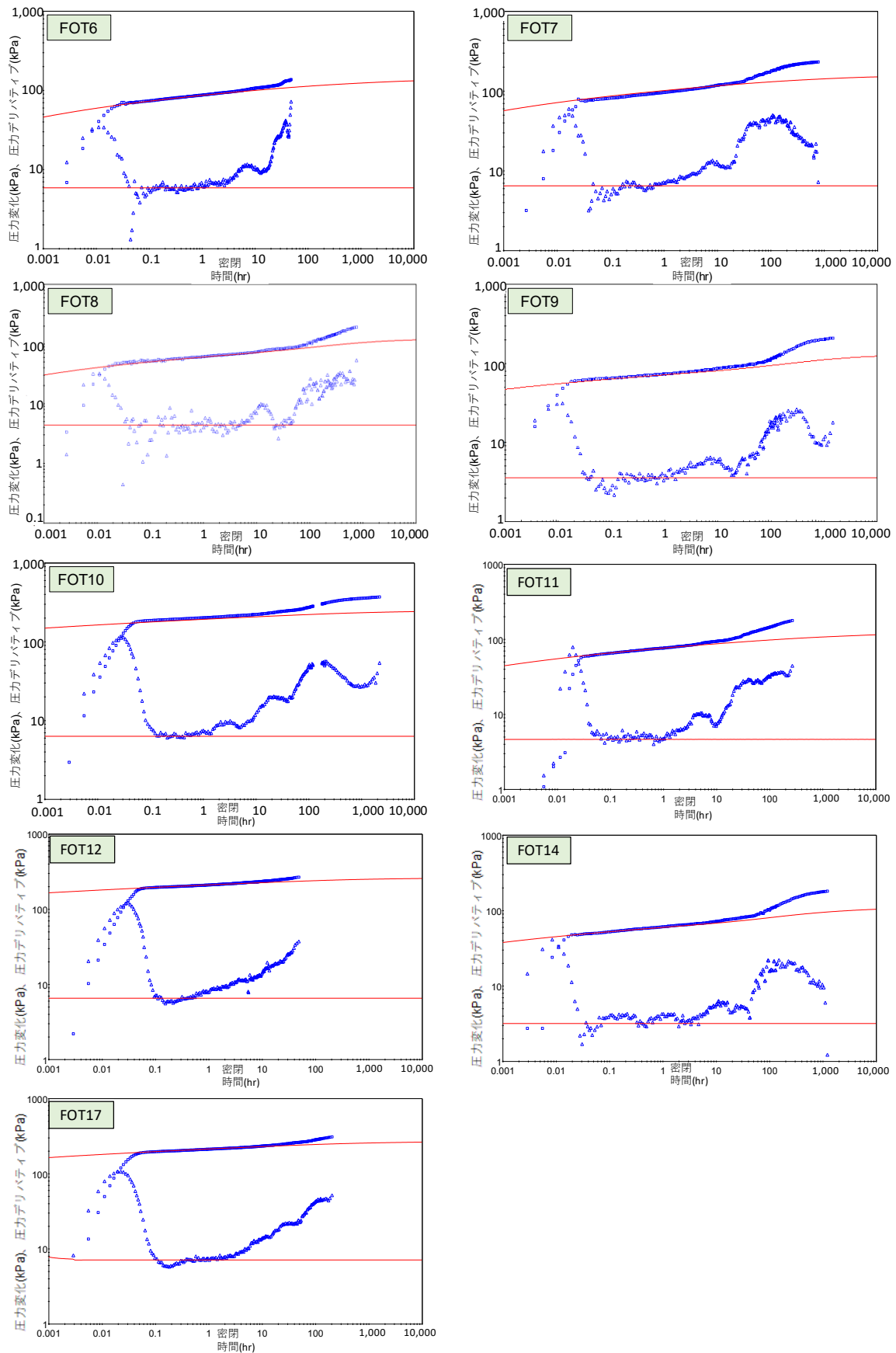
デリバティブの傾斜 0 の区間の値を用いて, 上式から浸透率×有効層厚(kh)を計算した。解析に用いた入力値と解析結果を第 2.2-16 表に, マッチング状況を第 2.2-53 図に示す。

[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)

第 2.2-16 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					
CO <sub>2</sub> 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8℃
孔隙率		0.28					
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℃
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					
CO <sub>2</sub> 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8℃
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℃
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 2.2-53 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が認められた。これは圧入レートが上がるほど流動坑底圧が上昇して圧入区間すなわち有効層厚が増加し、かつ累計圧入量の増加により圧入井周辺の貯留層の平均 CO<sub>2</sub> 飽和率が上昇することで、CO<sub>2</sub> の相対浸透率が増加するためであると考えられる。FOT11 以降は、それ以前とは異なり、累計圧入量が増加しても浸透率×有効層厚が増加する傾向はみられない。

## 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 (2.2-3) 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。

$$k \times h = \frac{162.6 \cdot q \cdot B \cdot \mu}{m} \quad \text{式 (2.2-3)}$$

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。

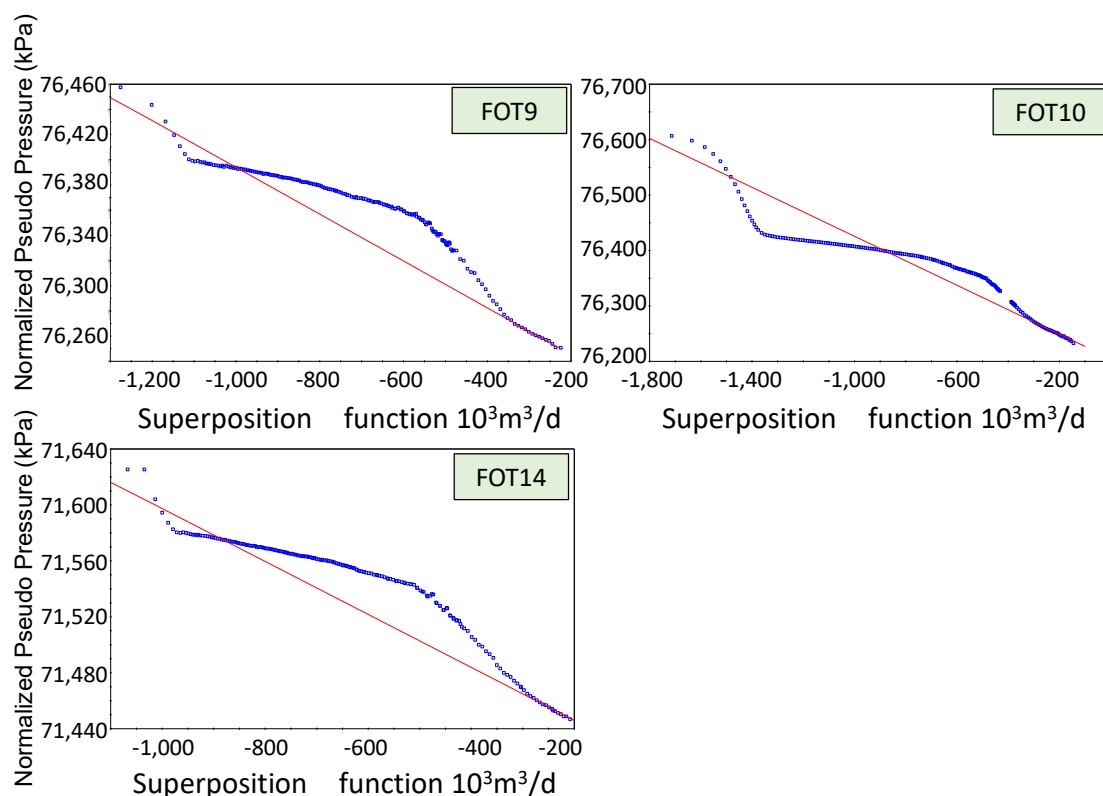
圧力解析ソフト「Interpret」によるホーナープロット法では、Superposition function 式 (2.2-4) を横軸に、Normalized Pseudo Pressure 式 (2.2-1) を縦軸にとり、式 (2.2-3) の傾き m を求め、k×h (浸透率×有効層厚) を算出する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式 (2.2-4)}$$

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 2.2-54 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の値よりも小さい。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 2.2-54 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 <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 (2.2-5) ～式 (2.2-7) (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る挙動（ショックフロント）

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

が、密閉後 600 時間で終了していると仮定した。第 2.2-18 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。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3} \left( \sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right)} + R_2 \left( 1 - \sqrt{\frac{M_3}{F_3} \frac{F_2}{M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (2.2-5)}$$

$$R_2 = R_1 \left( 1 - \sqrt{\frac{M_2}{F_2} \frac{F_1}{M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (2.2-6)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t} \quad \text{式 (2.2-7)}$$

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,  $\phi$ :孔隙率,  $\mu$ :粘性,  $c_t$ :総合圧縮率,  $\Delta t$ :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。

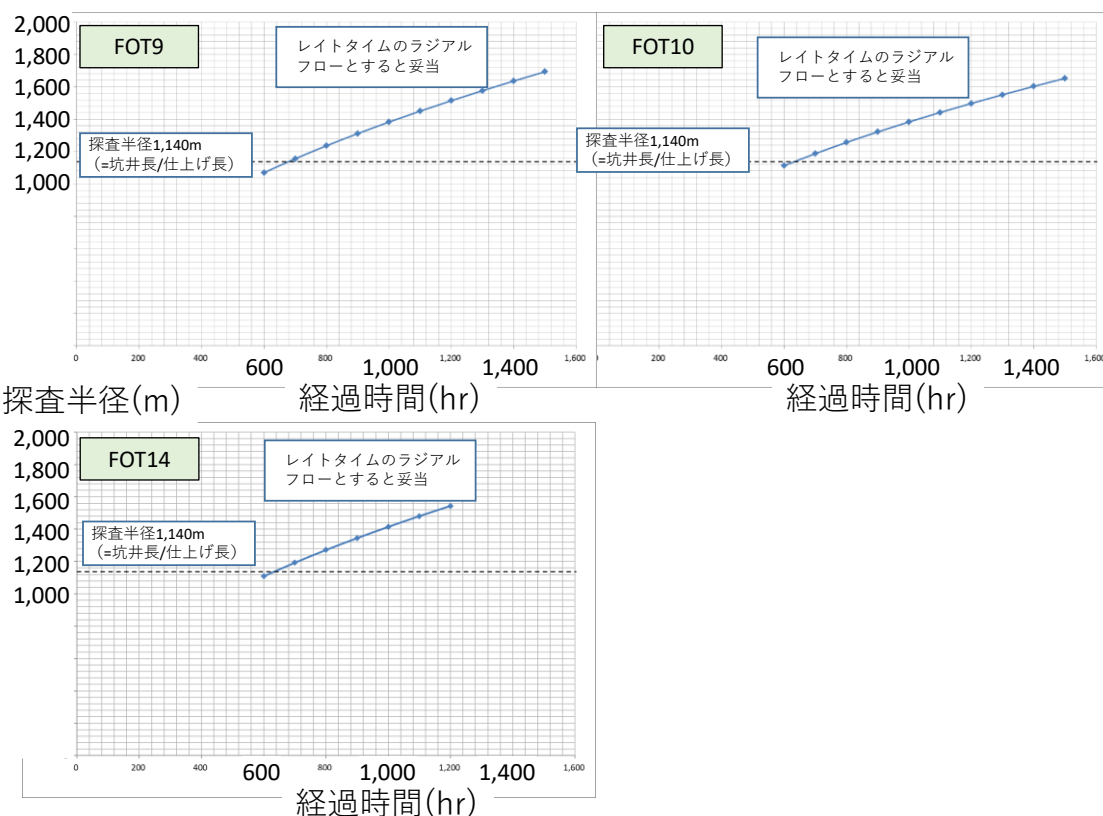
第 2.2-18 表 探査半径の算出に用いた入力値と計算結果

	入力値		FOT9	FOT10	FOT14	適用
CO <sub>2</sub> 領域	半径	m	422	464	421	式 (2.2-7) 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 (2.2-6) 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 S <sub>g</sub> =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 (2.2-5) を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した (第 2.2-55 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。

探査半径(m)



第 2.2-55 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。

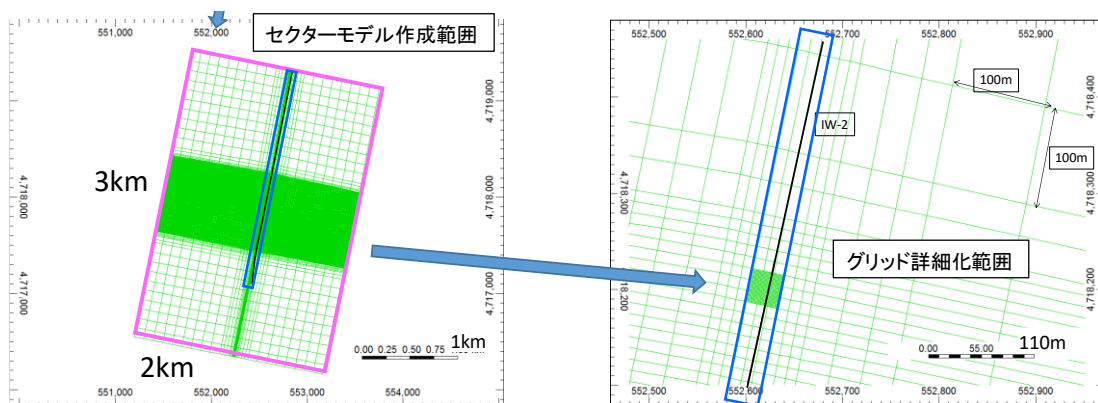
FOT9, 10, 14 の密閉時間 10 時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜 0 の挙動に対し、ホーナープロット法を適用した。その結果それぞれの FOT で推定された貯留層平均圧力は初期圧力の 9.82MPaG に近い値となり、圧力上昇の影響が及ばない領域の挙動を示している可能性が示唆された。

FOT9, 10, 14 の密閉時間 600 時間頃までのショックフロントを示すデリバティブカーブが上に凸となる挙動の後に認められる、デリバティブカーブが傾斜 0 となる挙動は、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、F0A 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 2.2-56 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 2.2-56 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（2.2-8）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。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \sqrt{(d_{sim}^i - d_{obs}^i)^2} \quad \text{式 (2.2-8)}$$

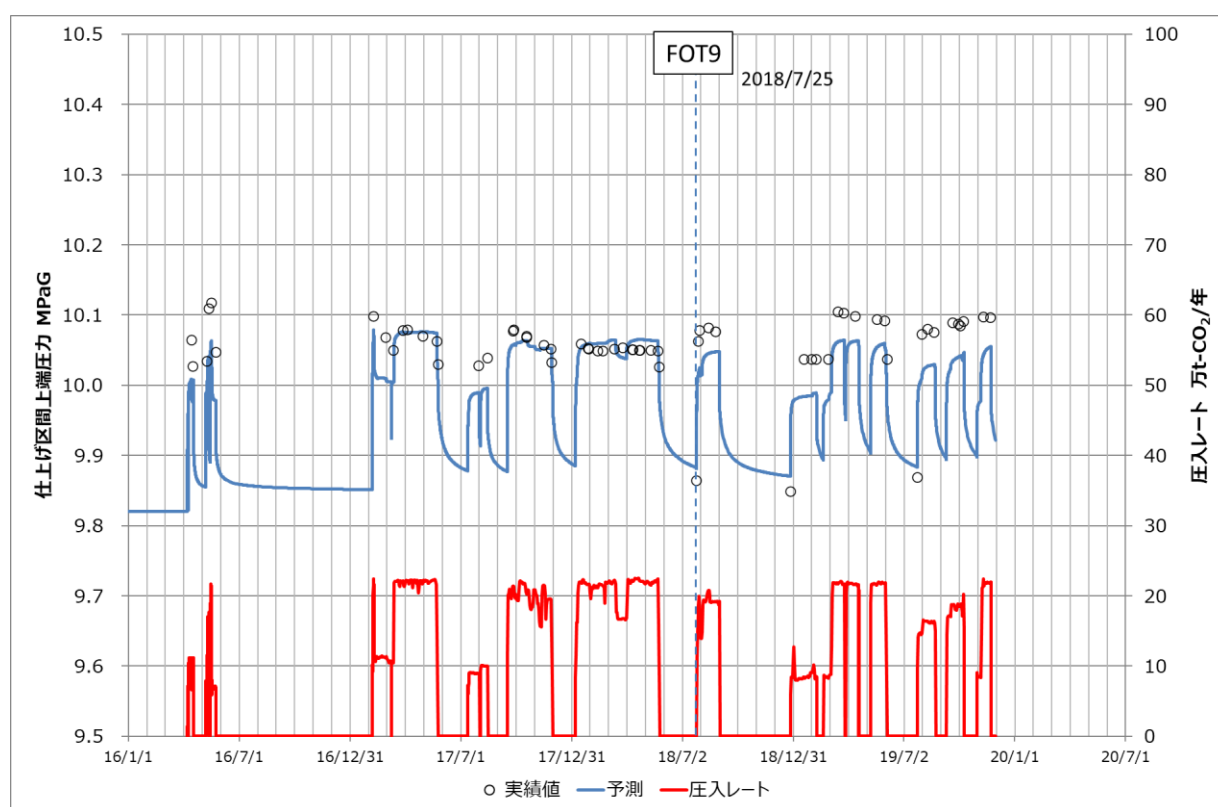
注) nobs:実績データ数, dsim:シミュレーション計算値, dobs:実績データ

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 2.2-57 図に示す。F0T9（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		
	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
2	31.1	21.8	45.1
3	29.8	21.9	41.9
4	29.9	23.1	40.3
5	30.8	21.6	45
6	31.6	22	46.2
7	28.9	22.2	39.1
8	27.5	24.6	32
9	31.6	21.8	46.6
10	30	21.8	42.4
11	30.6	23.1	41.9
12	30.8	20.9	45.7
13	30.7	22.5	43
14	32.5	21.3	49.4
15	31	21.3	45.9

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
16	31.3	22.1	45.2
17	30.4	23.9	40.3
18	27.5	21.5	36.6
19	26.2	20.4	35.1
20	30.5	22.2	43.2
21	29.4	21.6	41.2
22	29.5	24.4	37.3
23	29	22.8	38.5
24	31.1	22.5	44.2
25	31.7	22.4	45.9
26	31.4	22.2	45.4
27	30	22.9	40.8
28	28.2	20.4	40.2
29	30.6	22.2	43.4
30	29.5	23.2	39.1



注) 具現像 24 による例。

第 2.2-57 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、スキンプアクターを設定することとした。スキンプアクターは、式 (2.2-9) の流量と圧力差の関係式における、式 (2.2-10) 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。

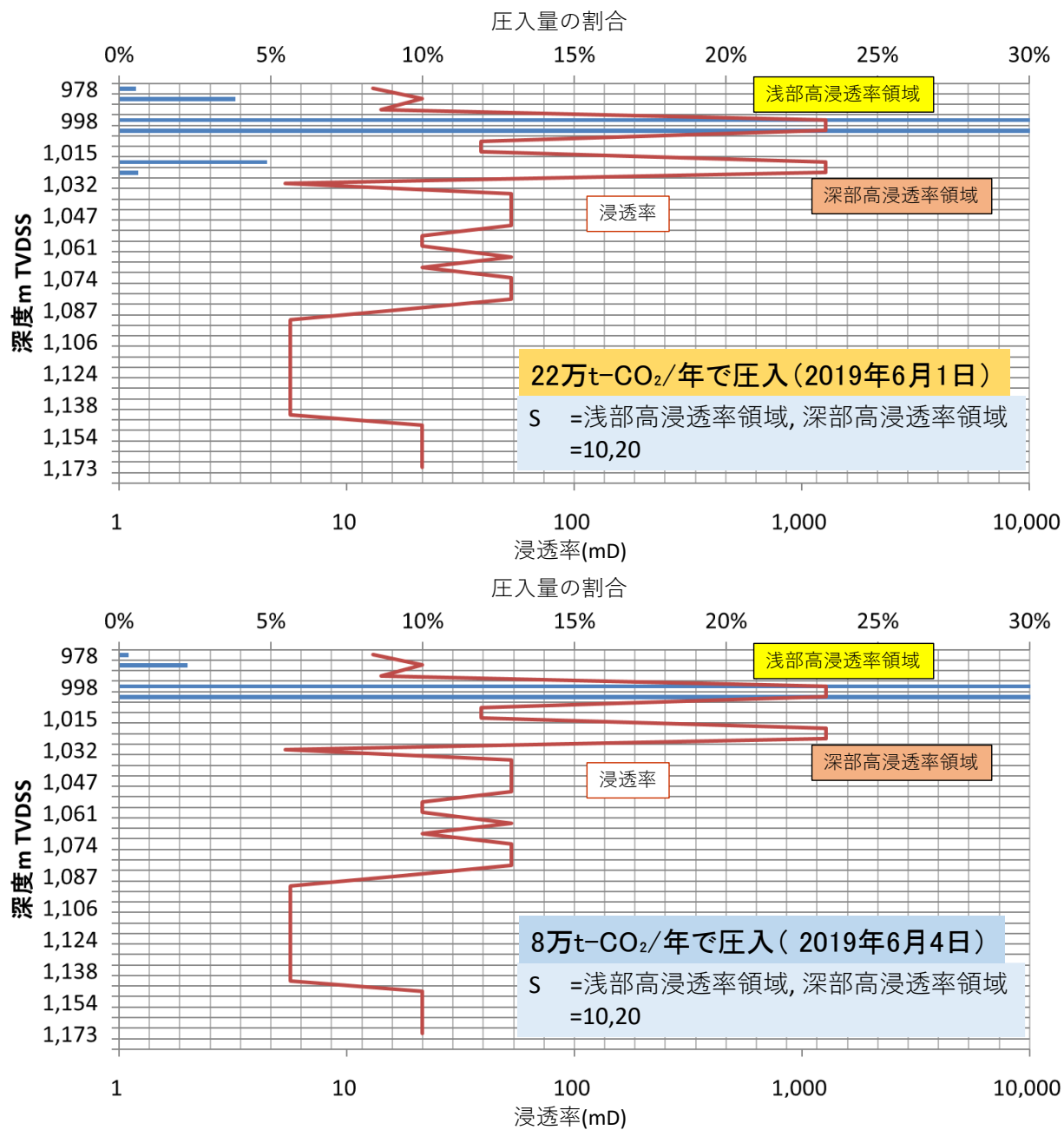
$$Q = \sum WI \lambda (P_{bh} - P_o) \quad \text{式 (2.2-9)}$$

$$WI = \frac{2\pi k h}{\ln(r_e/r_w) + S} \quad \text{式 (2.2-10)}$$

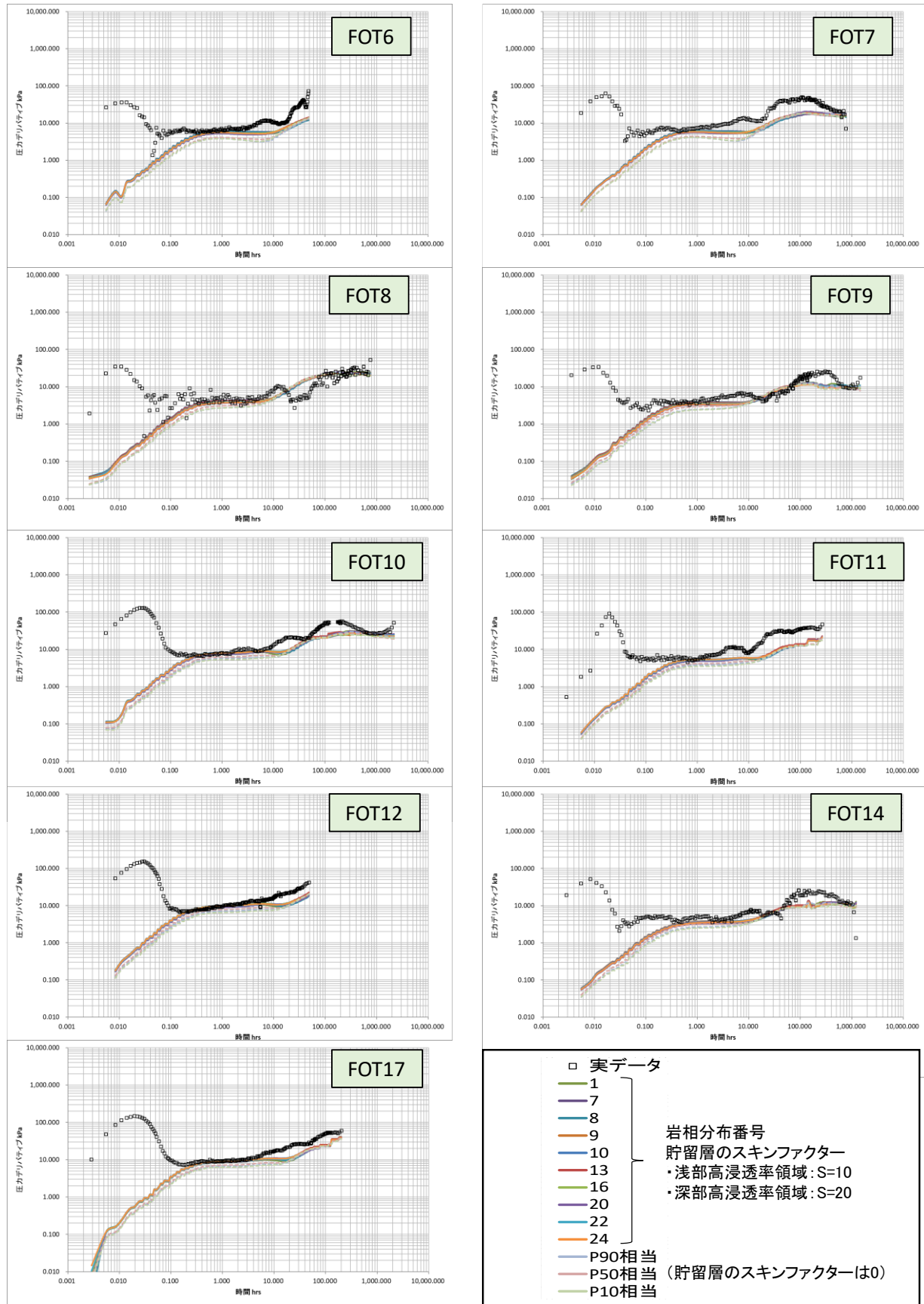
注) Q: 流量, Pbh: 流動坑底圧力, Po: グリッドの圧力, WI: well injectivity index, k: 水平浸透率, h: グリッドの厚さ,  $\lambda$ : トータルモビリティ (ここでは CO<sub>2</sub> と水の相対浸透率をそれぞれの粘性で割り合計したもの), rw: 坑井半径, re: 有効半径 (=0.37×(グリッド面積)<sup>0.5</sup>), S: スキンプアクター

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 2.2-58 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ンプアクターを与えている。浅部高浸透率領域および深部高浸透率領域のスキンプアクターについて、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 2.2-59 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 2.2-58 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 2.2-59 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

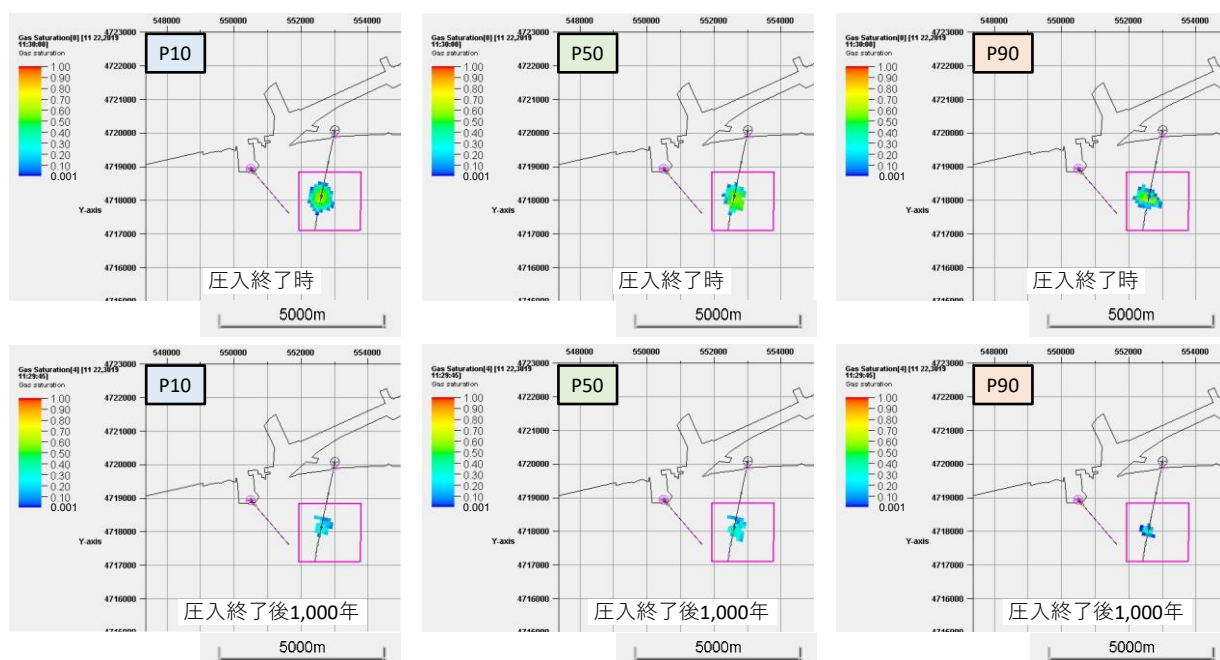
#### f. 圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲を推定した。

第 2.2-60 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 2.2-61 図）。第 2.2-61 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 年度モデル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。

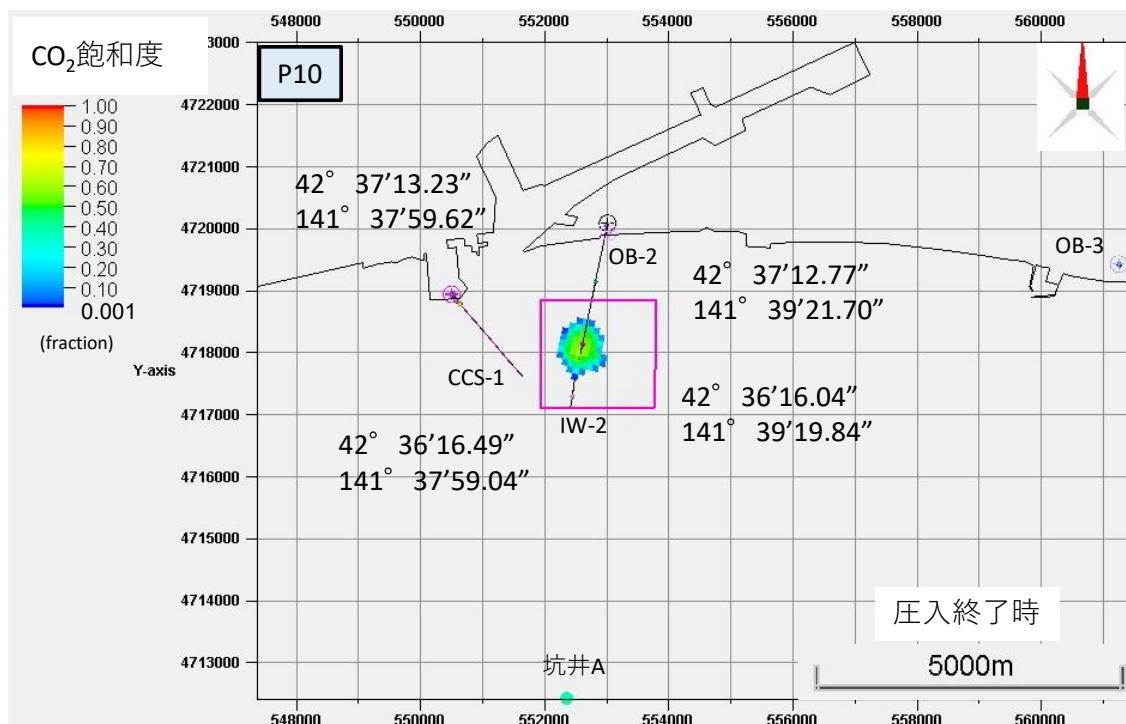
第 2.2-62 図に萌別層での P10, P50, P90 の各モデル（具現像）における圧入終了後 1,000 年時点における最大となる溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲を示す。溶解 CO<sub>2</sub> 量は CO<sub>2</sub> 飽和度分布で示される CO<sub>2</sub> が地層水に溶解することにより生じるため、圧入停止からの経過時間が長い方がより広範囲に分布する傾向があるため、圧入終了後 1,000 年時点を考慮した。その結果、P10 モデルにより予測された圧入終了時の溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲を、萌別層での最大となる溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲とした（第 2.2-63 図）。第 2.2-63 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 年度モデル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 2.2-20 表に萌別層における CO<sub>2</sub> の分布範囲をまとめた。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。



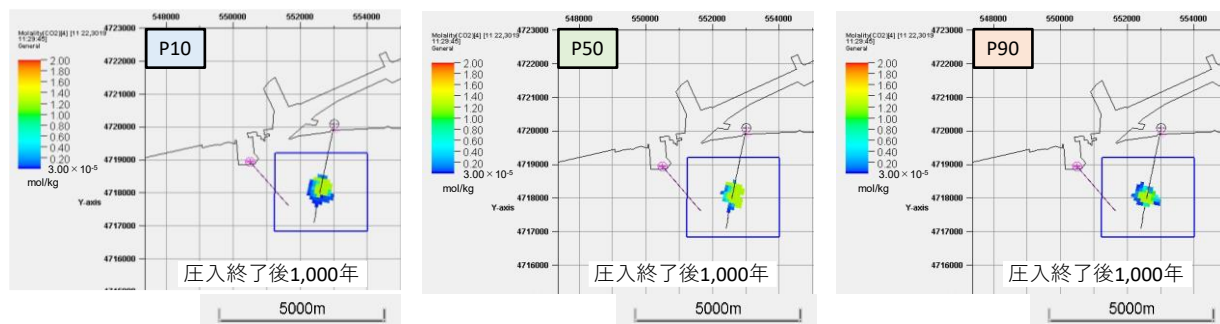
注：各図の赤枠は、本申請以前の申請で CO<sub>2</sub> 飽和度分布範囲とした範囲を示す。

第 2.2-60 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）

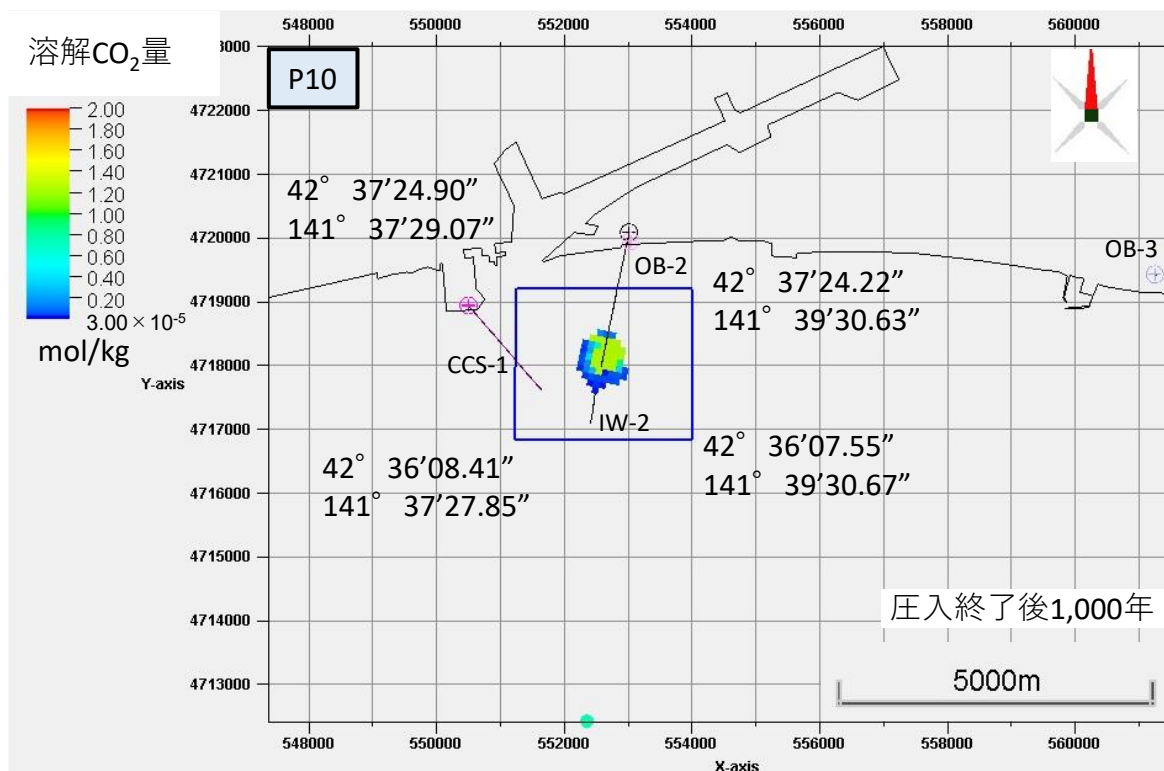


注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より圧入終了後 1,000 年後までに予想される最大の CO<sub>2</sub> 飽和度分布範囲を示す。

第 2.2-61 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 2.2-62 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 2.2-63 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 2.2-20 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)

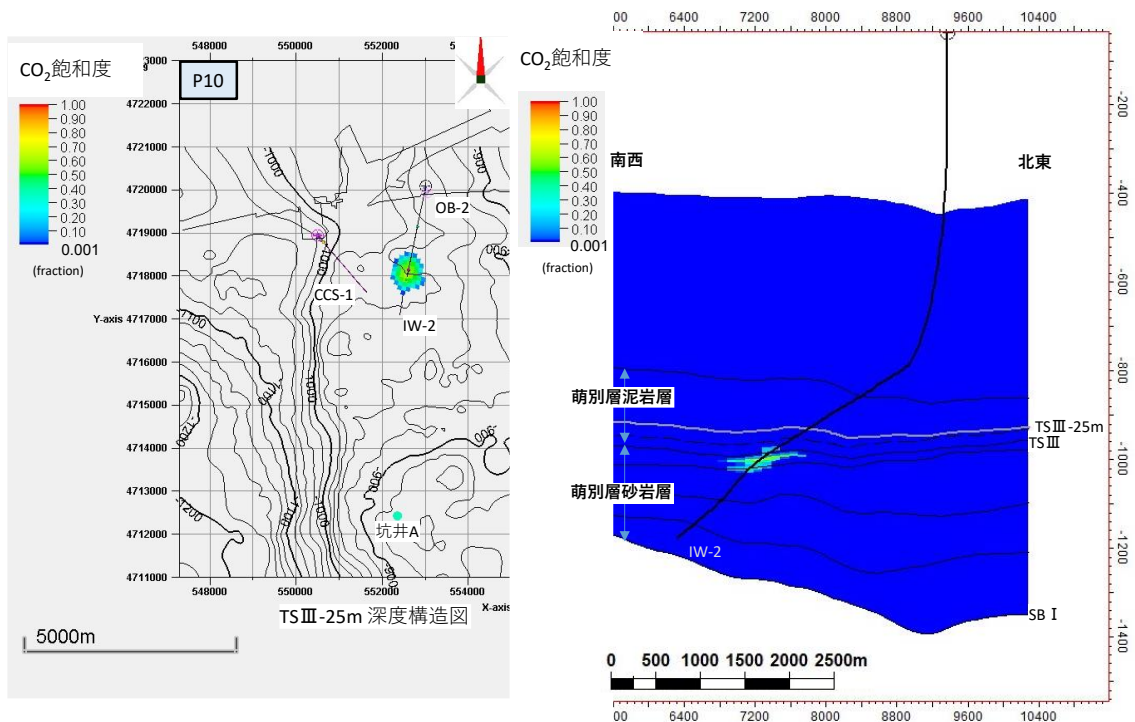
分布域	北限			南限			東限			西限		
	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
二酸化炭素	42	37	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85
CO <sub>2</sub> 飽和度	42	37	13.23	42	36	16.04	141	39	21.70	141	37	59.04
溶解 CO <sub>2</sub> 量	42	37	24.90	42	36	07.55	141	39	30.67	141	37	27.85

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。

#### g. 圧入した CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲

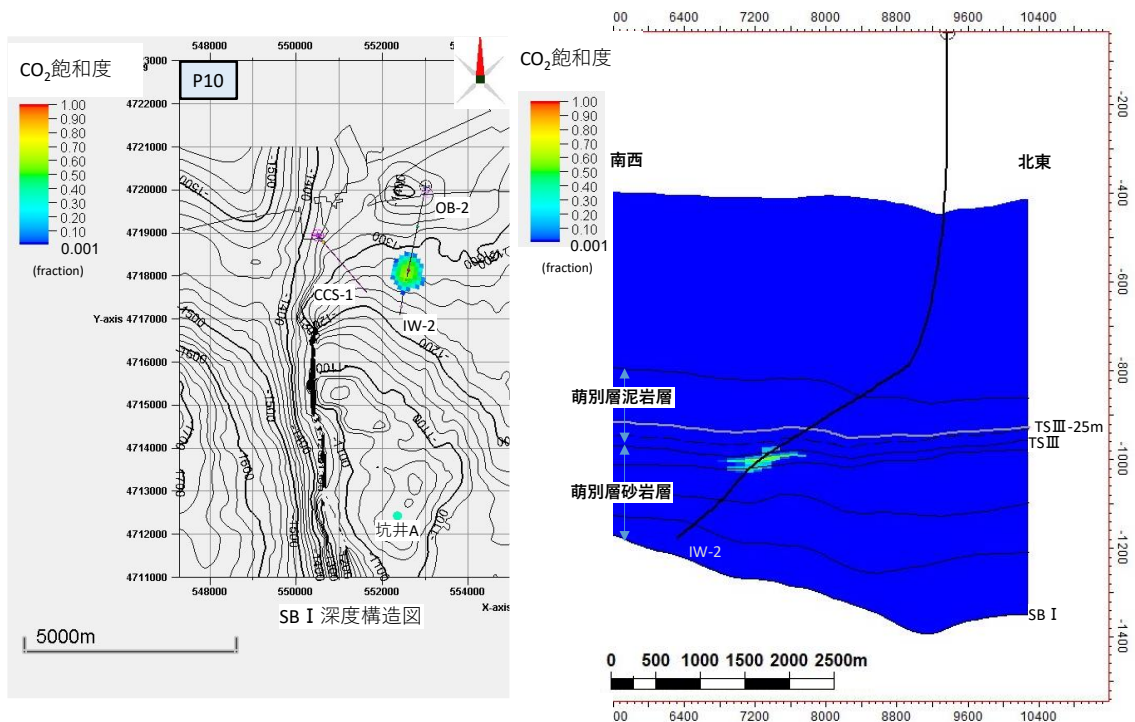
前項で検討した CO<sub>2</sub> の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影して、CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲を推定した (第 2.2-64 図～第 2.2-67 図)。推定結果を、第 2.2-21 表に示す。





注: 1. 断面図 (右図) より,  $\text{CO}_2$  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,  $\text{CO}_2$  分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時の  $\text{CO}_2$  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。

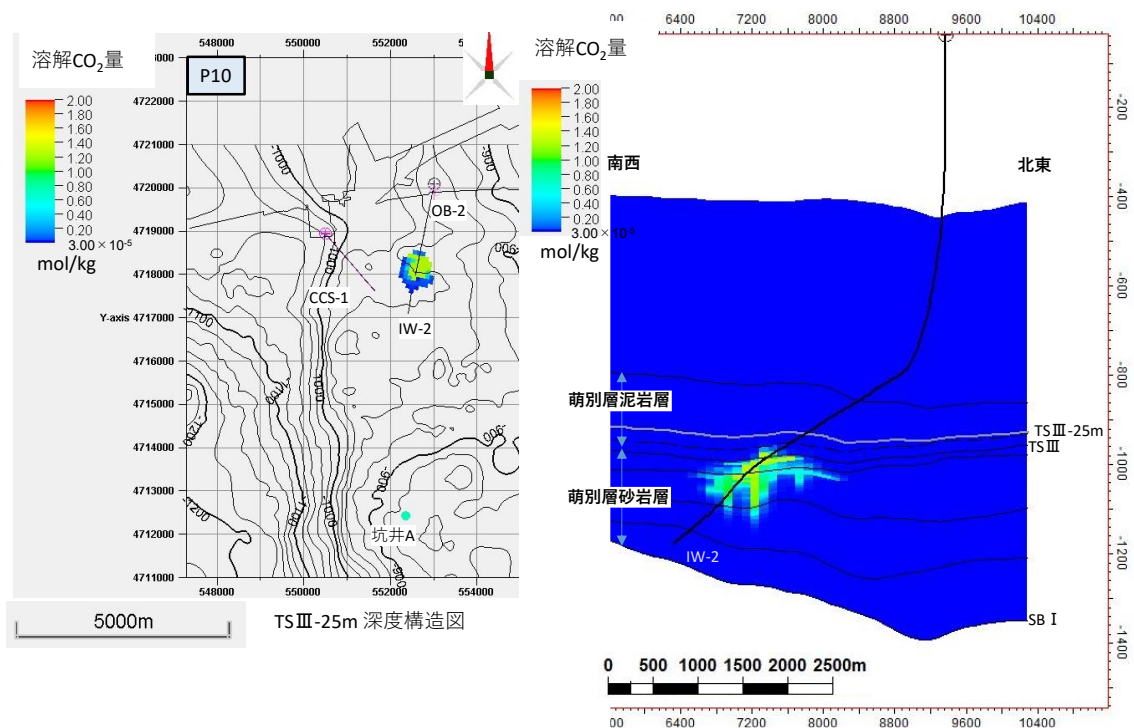
第 2.2-64 図 萌別層砂岩層での  $\text{CO}_2$  の分布範囲の上限 ( $\text{CO}_2$  飽和度)



注: 1.  $\text{CO}_2$  分布域 ( $\text{CO}_2$  飽和度) を, 萌別層砂岩層下限 (SB I) 構造図に投影した。  
2.  $\text{CO}_2$  分布 ( $\text{CO}_2$  飽和度) が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時の  $\text{CO}_2$  分布状況 ( $\text{CO}_2$  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 2.2-65 図 萌別層砂岩層での  $\text{CO}_2$  の分布範囲の下限 ( $\text{CO}_2$  飽和度)

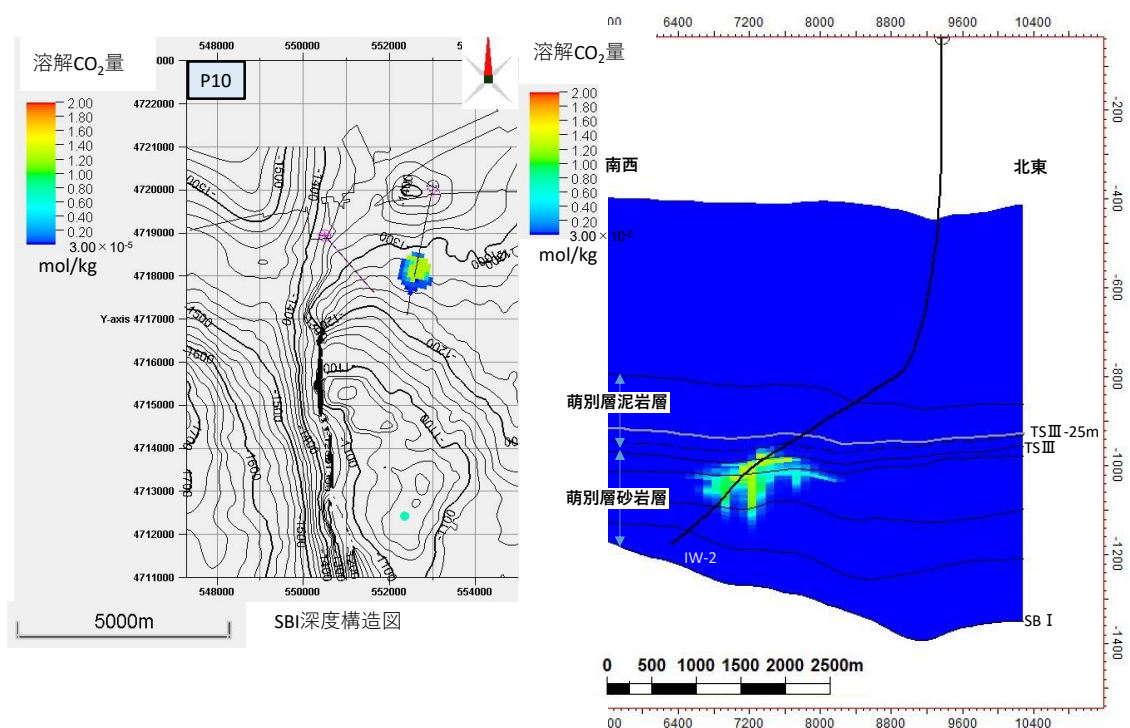




注：1. 断面図（右図）より、溶解  $\text{CO}_2$  量の分布範囲は TS III よりも 25m ほど上位まで認められるため TS III よりも 25m 浅い深度で構造図を作成し、 $\text{CO}_2$  分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了後 1,000 年後の  $\text{CO}_2$  分布状況（溶解  $\text{CO}_2$  量）を投影した。

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 2.2-66 図 萌別層砂岩層での  $\text{CO}_2$  の分布範囲の上限（溶解  $\text{CO}_2$  量）



注：1.  $\text{CO}_2$  分布域（溶解  $\text{CO}_2$  量）を、萌別層砂岩層下限（SB I）構造図に投影した。

2.  $\text{CO}_2$  分布（溶解  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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 2.2-67 図 萌別層砂岩層での  $\text{CO}_2$  の分布範囲の下限（溶解  $\text{CO}_2$  量）

第 2.2-21 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

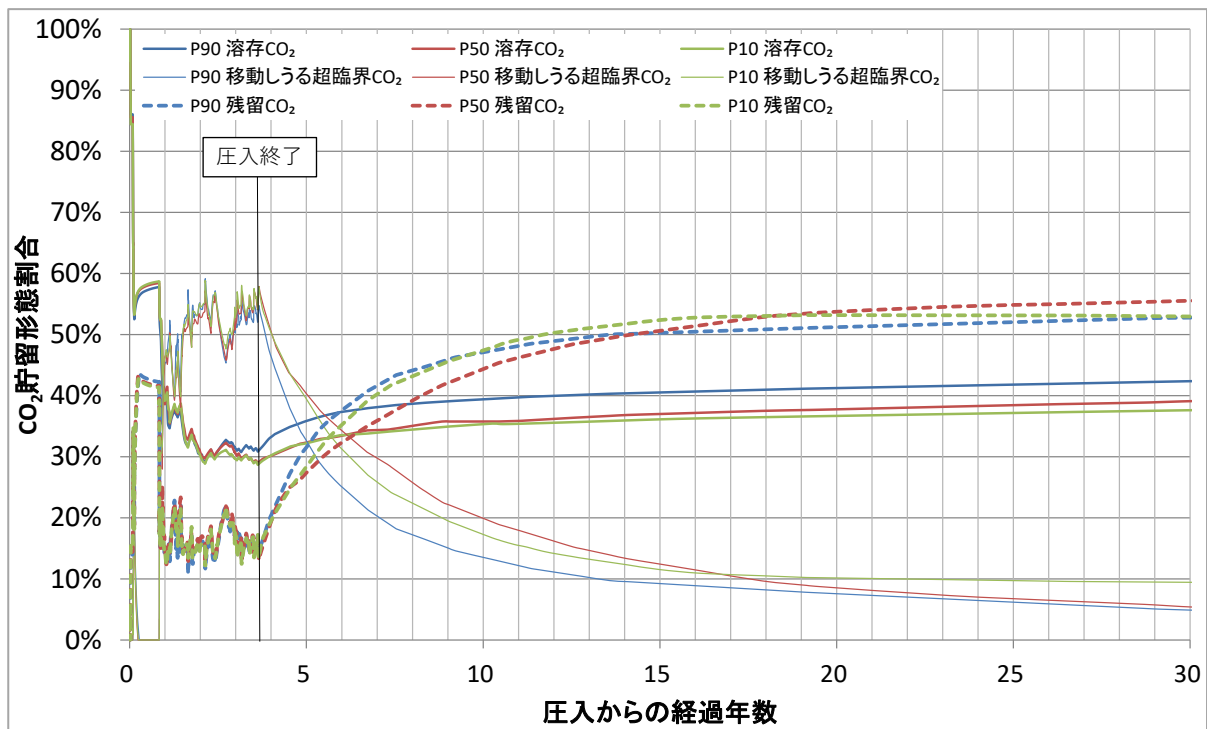
注：各モデルにおいて推定される CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の垂直的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

#### h. CO<sub>2</sub> の貯留形態ごとの割合

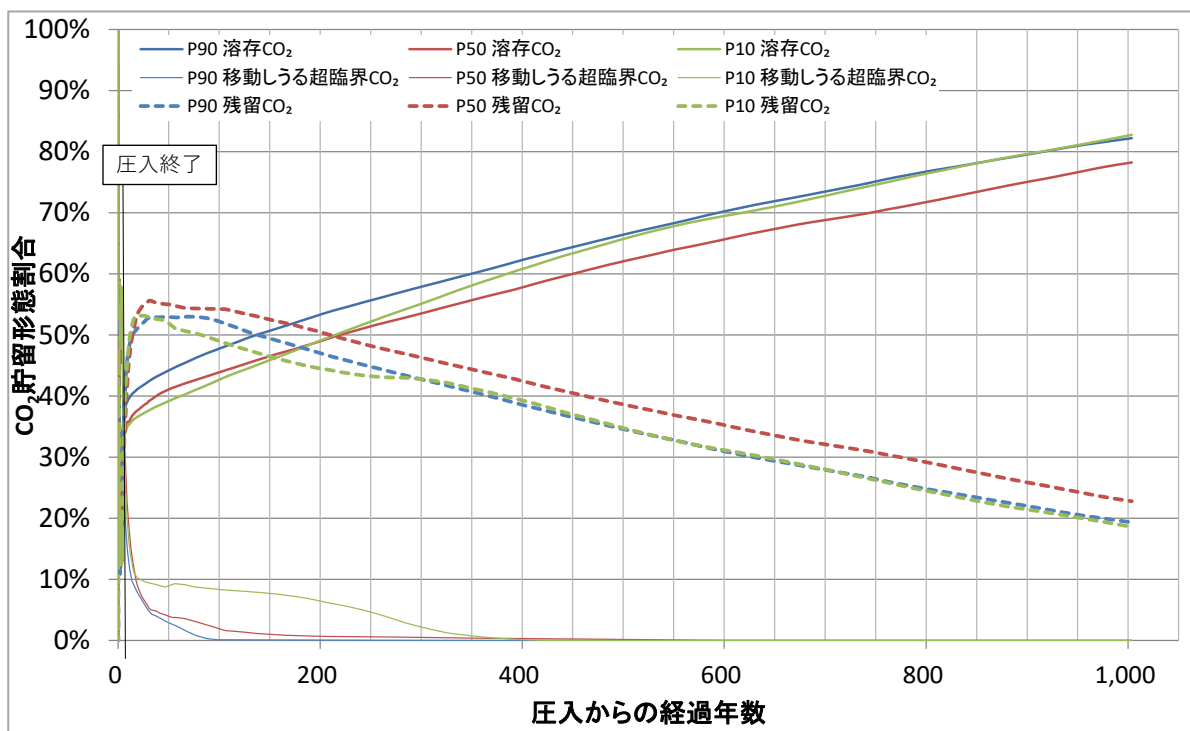
貯留 CO<sub>2</sub> の 3 つの貯留形態を移動しうる超臨界 CO<sub>2</sub>、深部塩水層に溶解した溶存 CO<sub>2</sub> および孔隙に残留トラップされた残留 CO<sub>2</sub> と表現し、P10, P50, P90 モデルの貯留形態の割合の経時変化を、シミュレーションにより精査した（第 2.2-68 図および第 2.2-69 図）。P10, P50, P90 モデルのいずれもが類似した挙動を示す。

圧入停止後に、残留トラップされる CO<sub>2</sub> の割合が急速に増加し、移動しうる超臨界 CO<sub>2</sub> の割合が急速に減少する。残留トラップは、孔隙に圧入された CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> が置換されることなく残留する現象である。CO<sub>2</sub> の溶解量は CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 貯留割合の変化が急速に進行すると予測される（第 2.2-68 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> を含め、徐々に CO<sub>2</sub> の深部塩水層への溶解が進み、溶存 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> の 80%程度は溶解するものと予測される。



第 2. 2-68 図 CO<sub>2</sub>貯留形態割合の変化（圧入開始から 30 年後まで）



第 2. 2-69 図 CO<sub>2</sub>貯留形態割合の変化

㊦ 萌別層砂岩層における CO<sub>2</sub> 挙動予測（2021 年度モデルシミュレーション）

a. 概要

2021 年度地質モデルを元にして、2019 年度モデルシミュレーションと同様に各ファシスに一つの孔隙率、浸透率等のプロパティを与えて貯留層モデルを作成し、流動シミュレーションを行った。シミュレータには GEM を使用した。坑井の最終坑径、チュービング径、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、圧入レートおよび圧入期間については、2019 年度モデルシミュレーションと同じ値を用いた。各具現像に対してシミュレーションを行い CO<sub>2</sub> 圧入可能量を求め、その累積分布関数から P10、P50、P90 に相当する具現像を抽出した。

b. パラメータ

各岩相に与えたパラメータを第 2.2-22 表に、貯留層モデルに与えたその他のパラメータを第 2.2-23 表に示す。

第 2.2-22 表 岩相毎のパラメータ

岩相番号	岩相名	孔隙率	水平浸透率 (mD)	kv/kh	ネットグロス比
1	pbl-sltst	0.35	2	0.72	0.76
2	pbl-sltst3	0.35	2	0.72	0.76
3	pbl-sltst2	0.35	2	0.72	0.76
4	pbl-sltst1	0.35	2	0.72	0.76
5	sltst	0.35	9	0.72	0.76
6	sdv-sltst	0.28	13	0.72	0.77
7	slty-alt	0.29	11	0.59	0.69
8	sdv-alt	0.28	11	0.62	0.80
9	sst3	0.27	2	0.77	0.56
10	sst2	0.29	43	0.67	0.85
11	sst	0.26	1,308	0.68	0.82
12	cgl2	0.24	3	0.75	0.78
13	cgl1	0.22	19	0.75	0.83
14	cgl3	0.28	8	0.52	0.75
15	cgl	0.23	4	0.82	0.79
16	cgl1-2	0.23	4	0.39	0.76

第 2.2-23 表 シミュレーションパラメーター一覧（2021 年度貯留層モデル）

モデル	2021 年度貯留層モデル	
サイズ	15km×10km×1,700m	
グリッド	163×126×173	
アクティブ・ブロック数	714,082	
基準温度	36.2℃@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（温度圧力センサー深度）	
孔隙容積：m <sup>3</sup>	2.4×10 <sup>11</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）	3,150	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 K <sub>rg</sub>	0.60（ファシス 10, 11） 0.143（その他ファシス）	Corey（1954） <sup>[1]</sup>
液相 相対浸透率 K <sub>rw</sub>	1.00	van Genuchten（1980） <sup>[2]</sup>
臨界ガス飽和率 S <sub>gc</sub>	0.05	0.05
不動水飽和率 S <sub>wir</sub>	孔隙率と浸透率より算出	0.638 Bennion（2007） <sup>[3]</sup>
最大残留ガス飽和率 S <sub>grmax</sub>	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>
P <sub>c</sub> ：kPa	4.04	370

<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

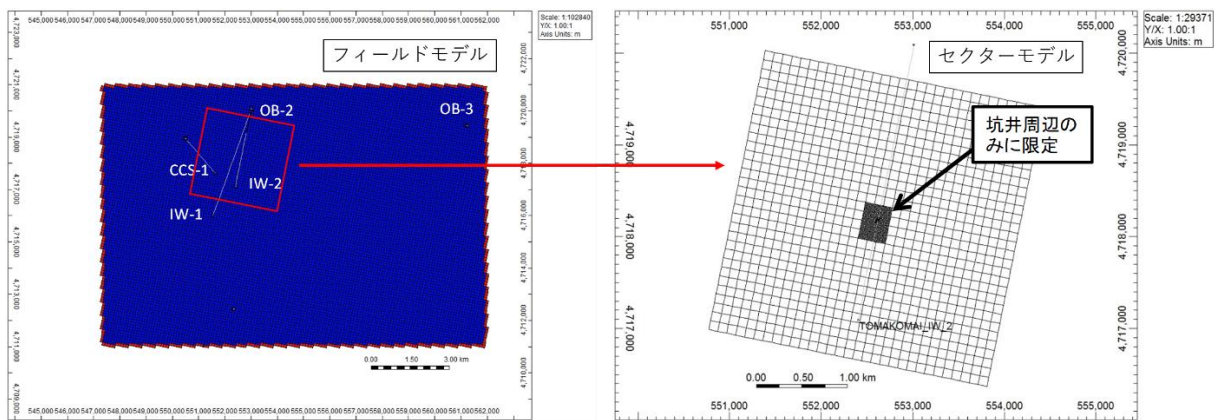
<sup>[3]</sup> Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

<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

### c. ヒストリーマッチ

2019 年度モデルシミュレーションの圧入実績についての考察をもとに、2021 年度貯留層モデルのヒストリーマッチングでは、萌別層の浅部・深部高浸透率領域の絶対浸透率とスキンファクターをマッチングパラメータとし、2019 年度モデルシミュレーションと同様に坑底圧力の目的関数が 25kPa 以下となる具現像を 30 個抽出した。

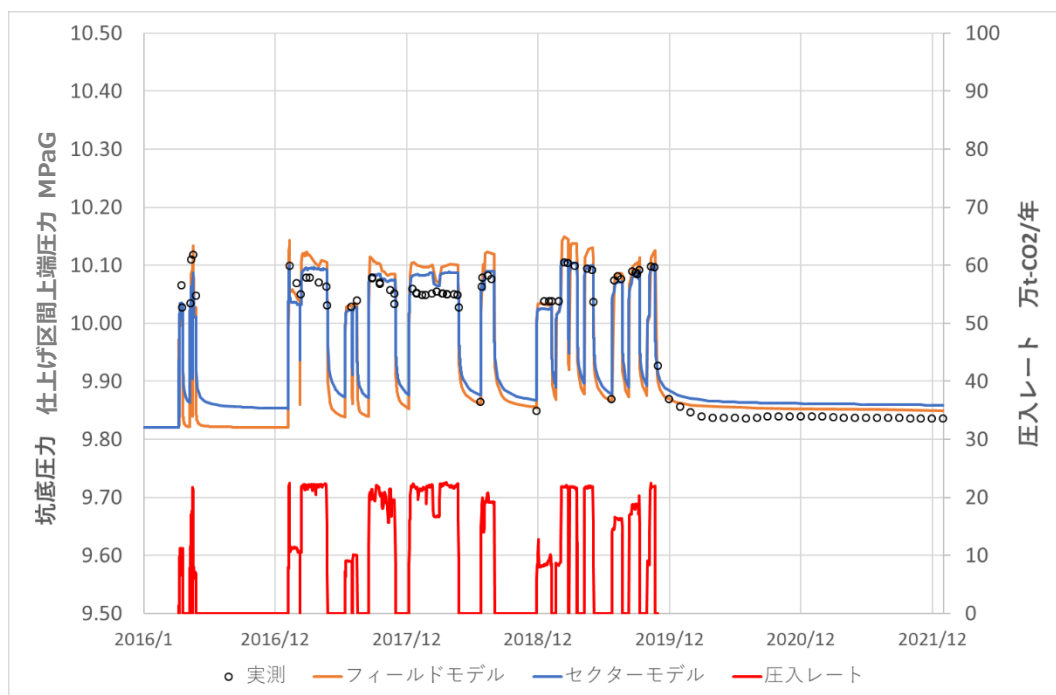
グリッドモデルについては、2019 年度モデルシミュレーションと同様にフィールドモデルからセクターモデルを切り出し、坑井が通過するグリッドの周辺を 1 m×1 m 程度の詳細なグリッドに細分化したモデルを用いた（第 2.2-70 図）。セクターモデルの有効孔隙がフィールドモデルと一致するように、セクターモデルの境界グリッドの有効孔隙を 30～150 倍して調整した。



第 2.2-70 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

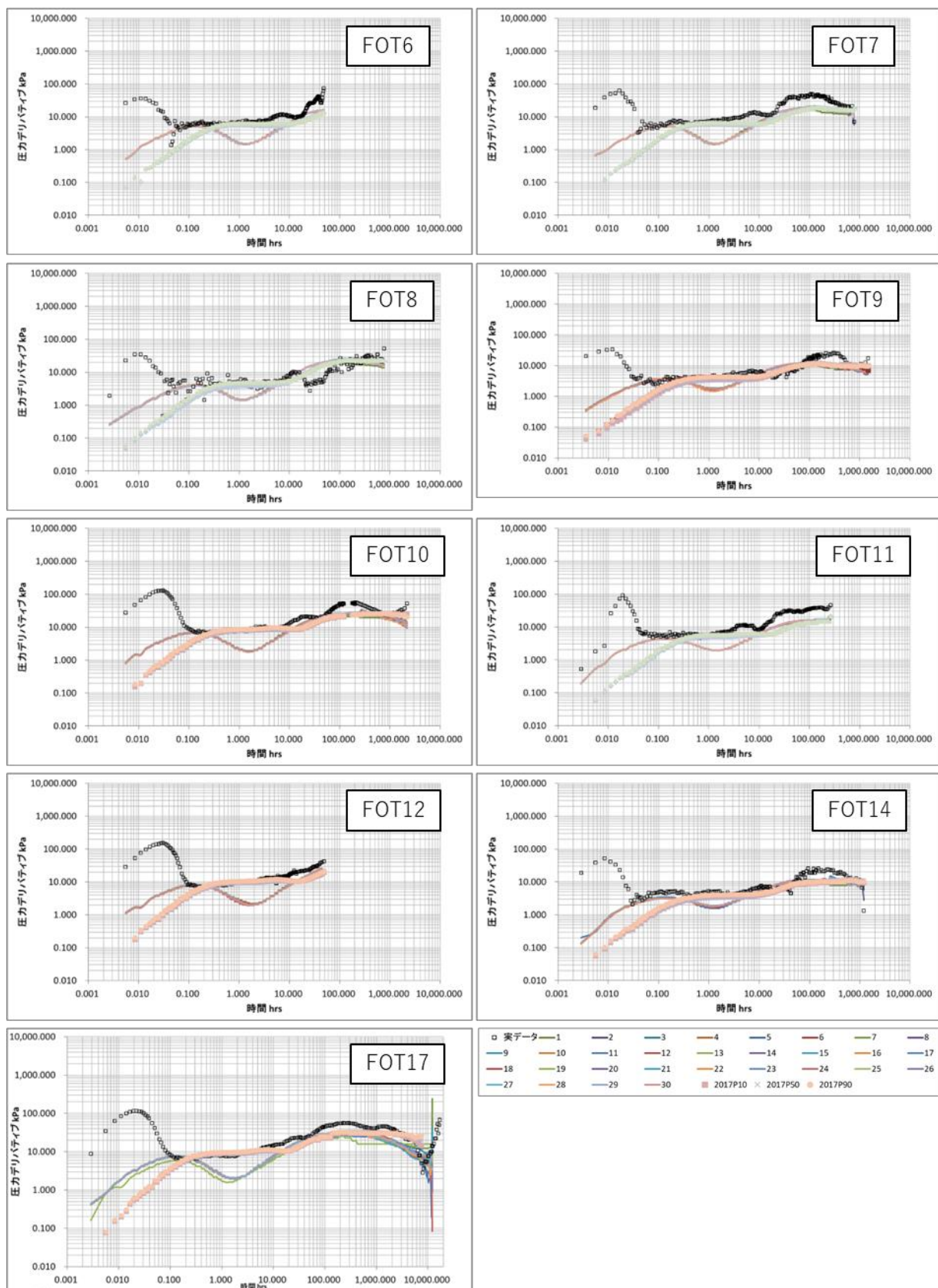
P90, P50, P10 に相当する具現像による仕上げ区間上端における圧力の予実績を第 2.2-71 図に示す。2019 年度モデルシミュレーションでは、FOT9（2018/7/25）以降において仕上げ区間上端深度の圧力の実績値がシミュレーションによる予測値よりも高くなる傾向が認められたが、2021 年度モデルシミュレーションではパラメータを調整することでマッチングしている。





第 2.2-71 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

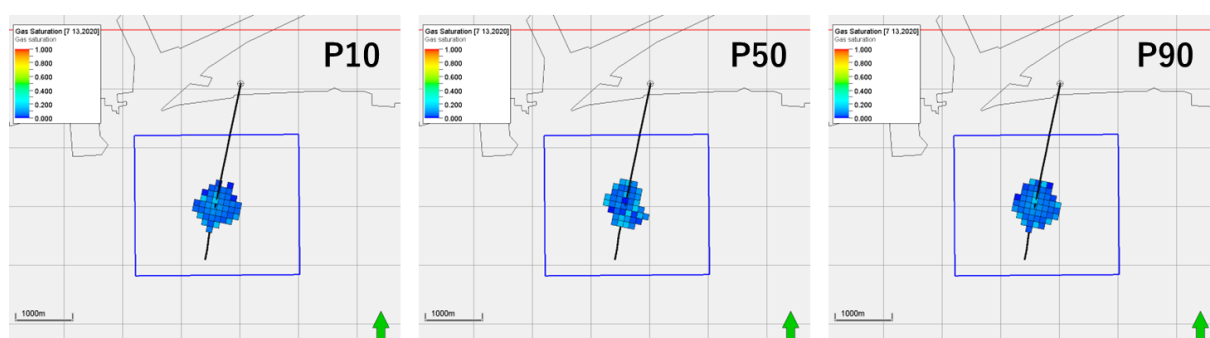
第 2.2-72 図に、FOT のデリバティブカーブの実績値と 30 個の具現像を用いたシミュレーションの予測値を示す。抽出された具現像は FOT のデリバティブカーブを概ね再現できており、この設定を用いて長期の CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを実施した。



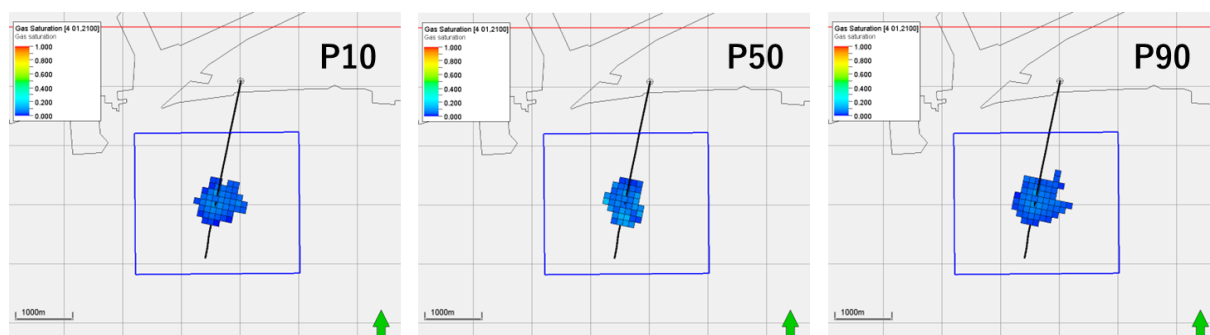
第 2.2-72 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

#### d. 圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲

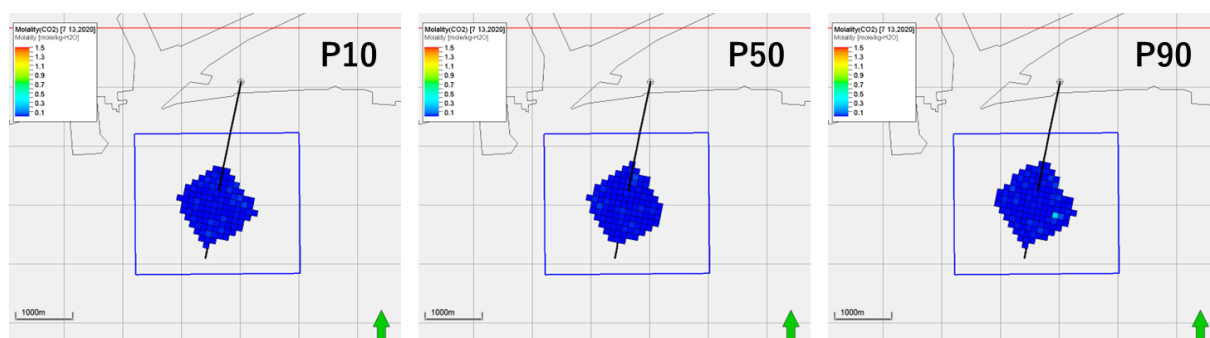
圧入終了時および 2100 年（圧入終了後 80 年）の CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲を推定した。第 2.2-73 図および第 2.2-74 図それぞれに、P10、P50、P90 モデルにおける圧入終了時および 2100 年における CO<sub>2</sub> 飽和度を示す。また第 2.2-75 図および第 2.2-76 図それぞれに、P10、P50、P90 モデルにおける圧入終了時および 2100 年における溶解 CO<sub>2</sub> 量を示す。図に示す青線は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> 分布範囲である（座標については第 2.2-20 表を参照）。いずれのモデルにおいても、CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> 分布範囲に含まれているため、今回申請する CO<sub>2</sub> 分布範囲は前回の申請と同一とする。



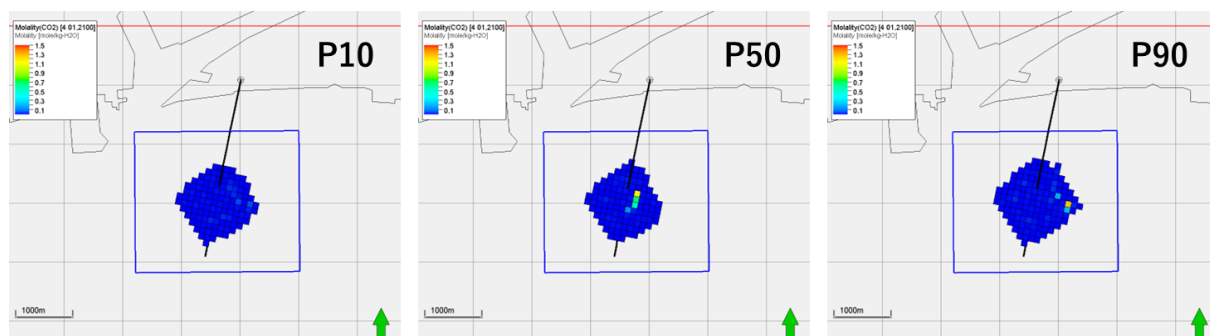
第 2.2-73 図 圧入終了時における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（CO<sub>2</sub> 飽和度分布）



第 2.2-74 図 2100 年における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（CO<sub>2</sub> 飽和度分布）



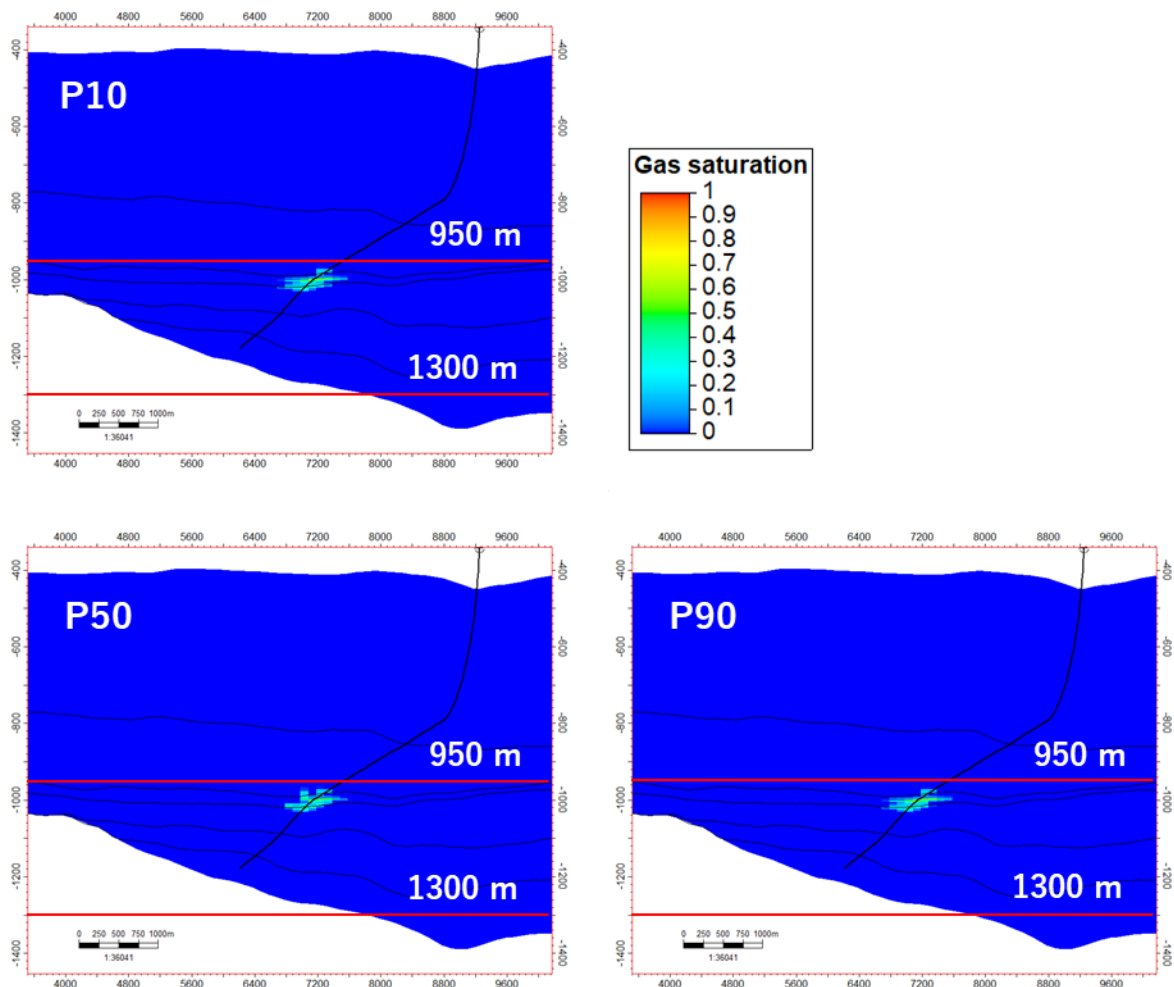
第 2.2-75 図 圧入終了時における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（溶存 CO<sub>2</sub> 量）



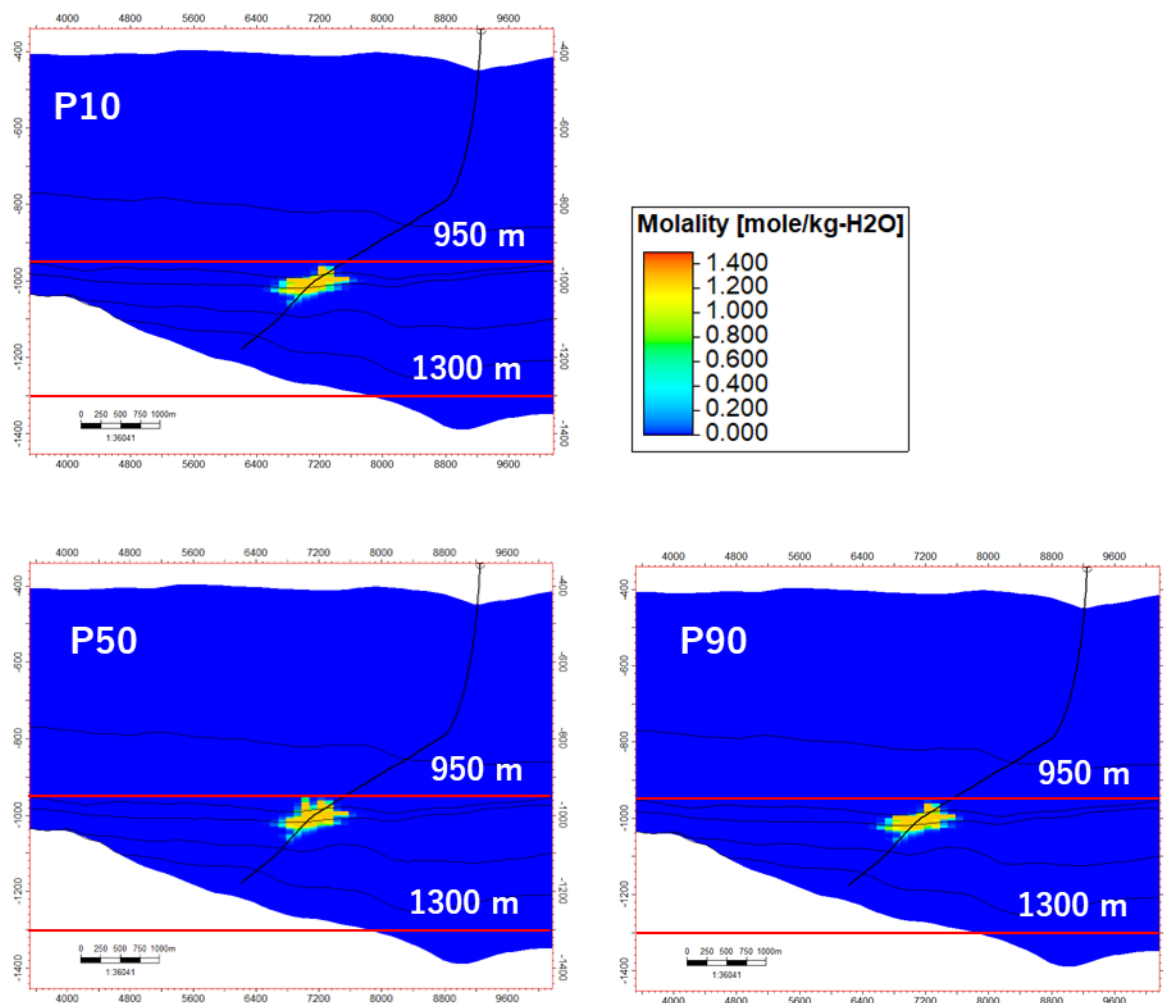
第 2.2-76 図 2100 年における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（溶存 CO<sub>2</sub> 量）

#### e. 圧入した CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲

前項で検討した 2100 年における CO<sub>2</sub> の分布範囲を坑跡断面に対して投影し、CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲を推定した（第 2.2-77～第 2.2-78 図）。図に示す赤線は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> の垂直分布範囲の上下限深度である（第 2.2-21 表を参照）。いずれのモデルにおいても、CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲に含まれているため、今回申請する CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲は前回の申請と同一とする。



第 2. 2-77 図 2100 年における萌別砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲 (CO<sub>2</sub> 飽和度)



第 2. 2-78 図 2100 年における萌別砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（溶解 CO<sub>2</sub> 量）

### 2. 3 鉱業権の設定または出願の状況について

二酸化炭素の貯留事業に関する法律（CCS 事業法）に基づき、2025 年 2 月に経済産業大臣が北海道苫小牧市沖の一部区域を特定区域として指定した。当該特定区域は海防汚染等防止法に基づく本許可申請で示す「海底下廃棄をする海域の位置及び範囲」（添付書類-1、第 4. 1-1 図（P. 10））と概ね重複する。当該特定区域には石油資源開発株式会社（JAPEX）から試掘許可申請があり、2025 年 9 月に試掘の許可が与えられ、同年 11 月より試掘に向けた工事が開始されている。

本許可申請区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 CO<sub>2</sub> を圧入し、それぞれの地層と CO<sub>2</sub> 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<sup>[1]</sup>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

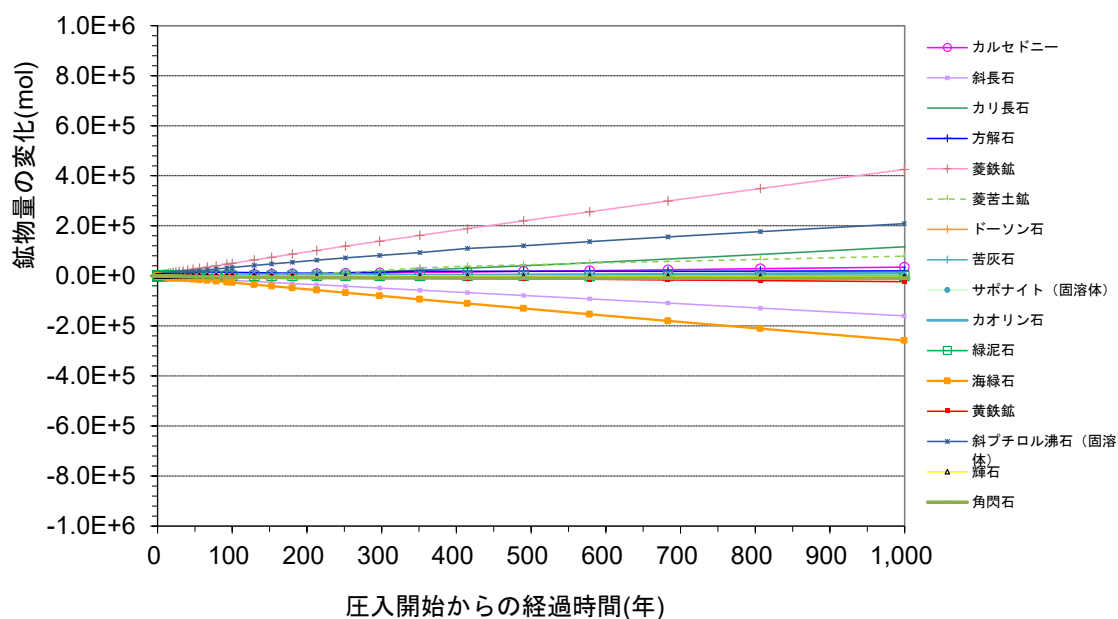
	滝ノ上層 T1 部層 地層水組成
貯留層温度 (°C)	90
pH	6.72
組成	濃度 (mg/kg)
Cl <sup>-</sup>	20,775.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	63.40
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7.50
HS <sup>-</sup>	4.79×10 <sup>-4</sup>
SiO <sub>2</sub> (aq)	83.00
Al <sup>3+</sup>	1.43×10 <sup>-3</sup>
Ca <sup>2+</sup>	8,321.00
Mg <sup>2+</sup>	1.56
Fe <sup>2+</sup>	9.25
K <sup>+</sup>	68.00
Na <sup>+</sup>	3,899.00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	16.60
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 (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)。

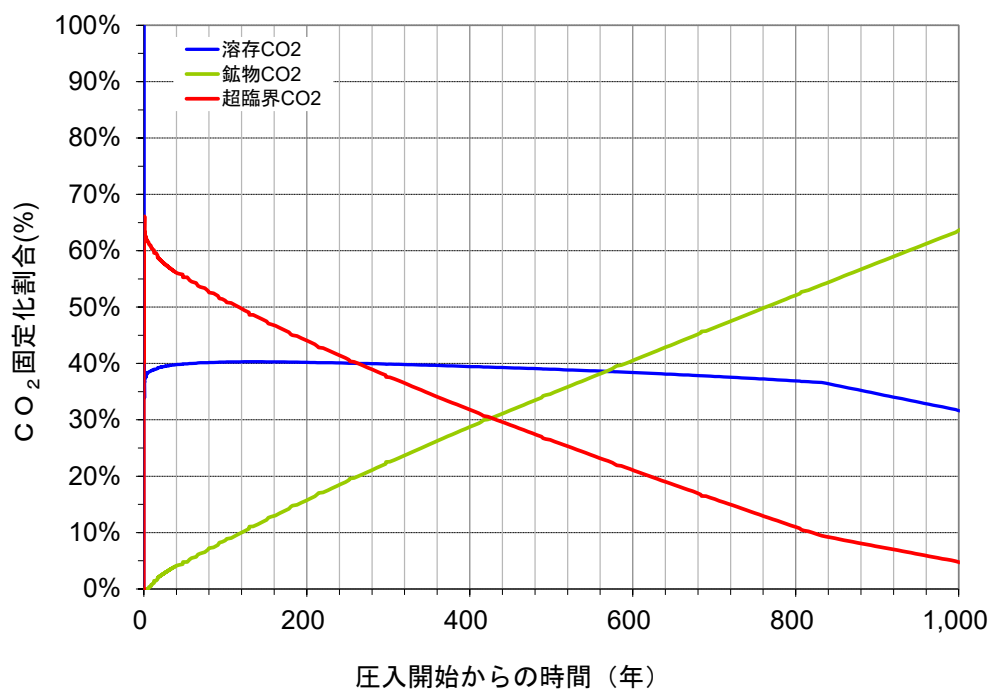
<sup>[1]</sup> Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey : <http://thermoddem.brgm.fr/>, 2026/1/20 アクセス)

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	clinoclore/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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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. 1-2 図 滝ノ上層 T1 部層に CO<sub>2</sub> を圧入した際の鉱物固定化量の推定

CO<sub>2</sub> 圧入開始直後から、カルセドニー、斜プロチロル沸石、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 CO<sub>2</sub> 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 苦小牧 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	イライト	緑泥石	斜方沸石	モナシ沸石	スファライト	ホルムスト	石英	斜長石	角長石	方解石	ドロマイト	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	荷菜層		砂質シルト岩	×	○	○					◎	○				△		△
1350	荷菜層		砂質シルト岩	×	○	○					◎	○	△			△		△
1400	荷菜層		砂質シルト岩	×	△	△					○	◎		×		△		
1450	荷菜層		砂質シルト岩	×	○	○					○	○	△	×		×		○
1500	荷菜層		砂質シルト岩	×	○	○	△				◎	○		×		×		△
1550	荷菜層		砂質シルト岩	×	○	△	△				◎	○		×		△		△
1580	荷菜層		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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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  $2.97 \times 10^{-3}$  mD を与え、遮蔽層には孔隙率は 19%，浸透率は  $4.3 \times 10^{-5}$  mD を与えた。シミュレーションでは、圧入した CO<sub>2</sub> は、溶解 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 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<sup>[1]</sup>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

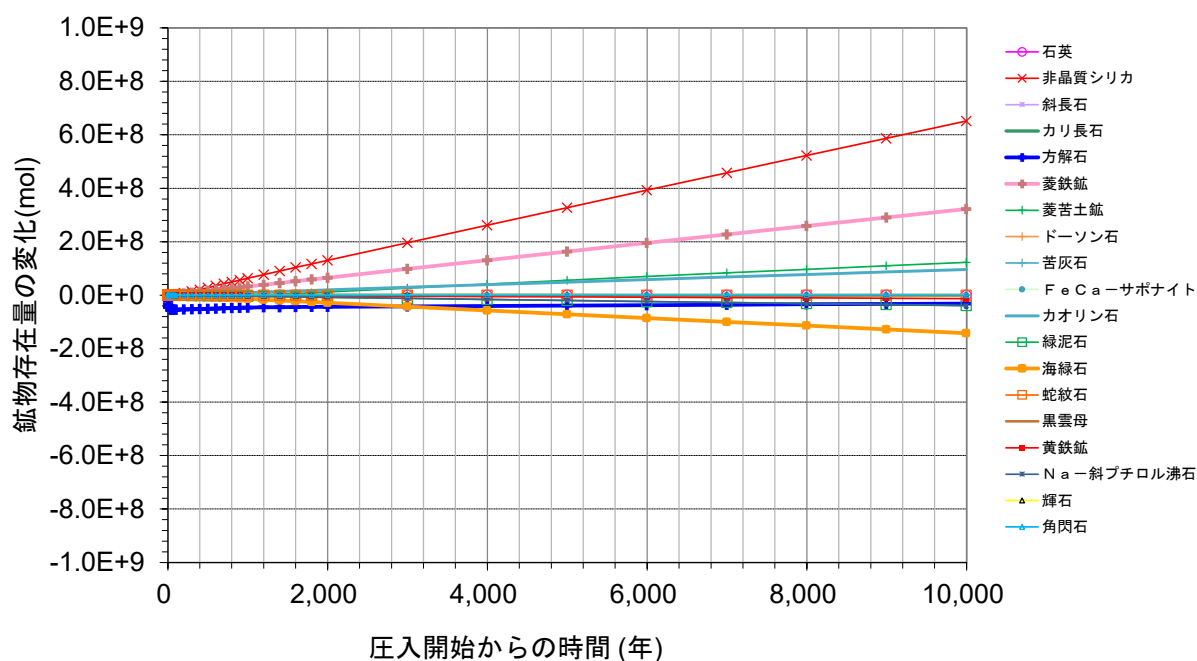
	萌別層砂岩層 地層水組成
貯留層温度 (°C)	40
pH	7.11
組成	濃度 (mg/kg)
Cl <sup>-</sup>	1,780.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	9.20
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	809.00
HS <sup>-</sup>	$1.29 \times 10^{-4}$
SiO <sub>2</sub> (aq)	168.00
Al <sup>3+</sup>	$4.01 \times 10^{-5}$
Ca <sup>2+</sup>	30.10
Mg <sup>2+</sup>	4.94
Fe <sup>2+</sup>	0.44
K <sup>+</sup>	26.70
Na <sup>+</sup>	1,370.00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.70
備考	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)。

<sup>[1]</sup> Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey : <http://thermoddem.brgm.fr/>, 2026/1/20 アクセス)

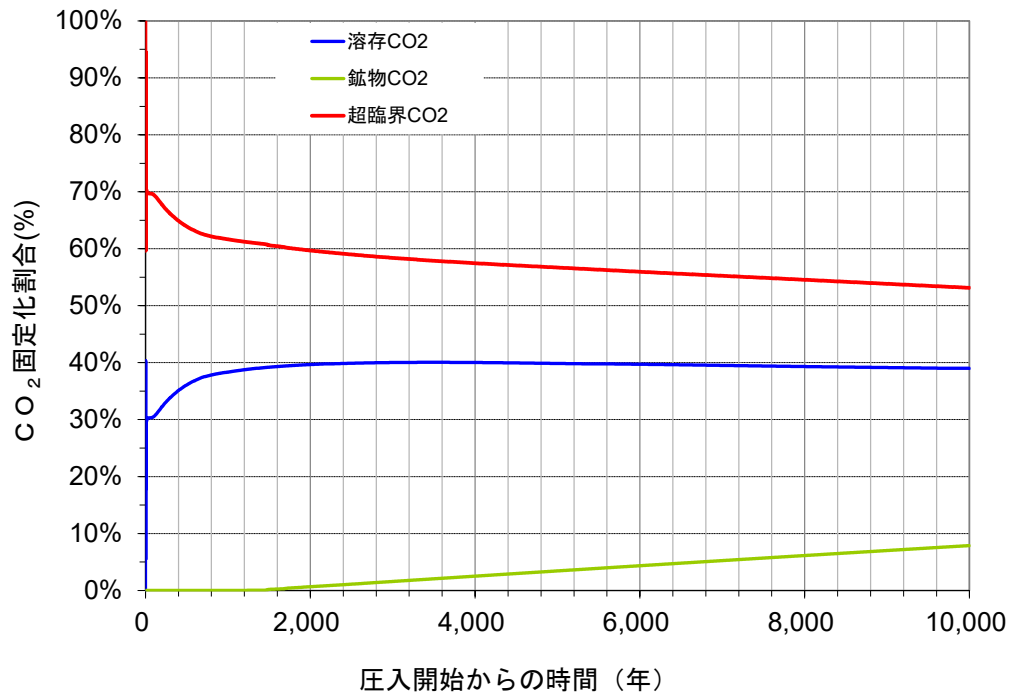
第 3. 1-5 表 地化学反応シミュレーションで使した萌別層砂岩層の鉱物組成

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 3.1-4 図 萌別層砂岩層に CO<sub>2</sub> を圧入した際の鉱物固定化量の推定

CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> を圧入する想定とした。

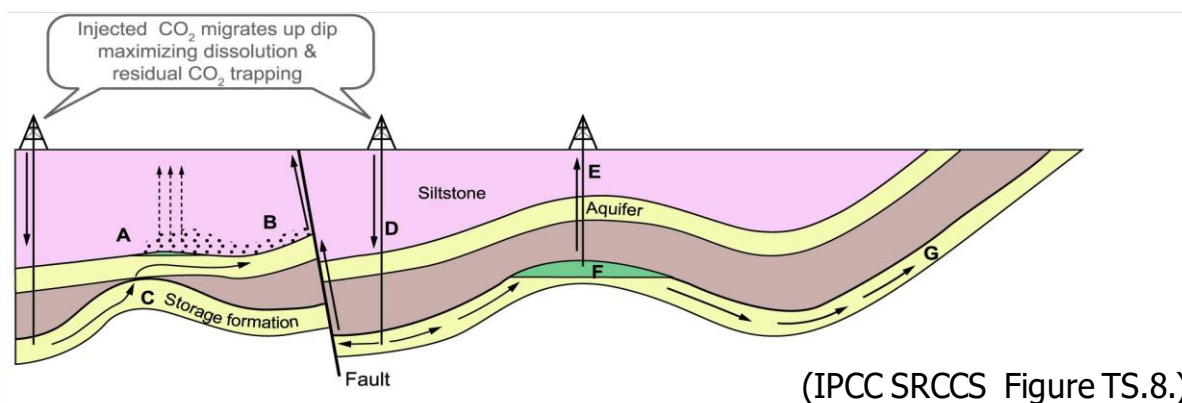
萌別層砂岩および萌別層泥岩の堆積物の主な供給源は共通していると考えられ、鉱物組成も類似している（第 3.1-3 表）。主に溶解する鉱物と考えている海緑石や方解石の存在量も同程度であることから、遮蔽層と貯留層の CO<sub>2</sub> への化学的な反応は類似したものになるが、流動シミュレーションの結果、遮蔽層には CO<sub>2</sub> がほとんど浸透できないと考えられるため、化学的反応は遮蔽層と CO<sub>2</sub> の接触部分でのみ生じることとなる。

### 3.2 CO<sub>2</sub>漏出の可能性検討

#### (1) CO<sub>2</sub>漏出要因の洗い出し

貯留層から CO<sub>2</sub> が漏出する要因として、IPCC 特別報告書<sup>[1]</sup>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) CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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) CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> が貯留層の外に移動
- (G) 地下水に溶解した CO<sub>2</sub> 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<sup>[1]</sup>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<sup>[2]</sup>により、貯留後の CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub>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

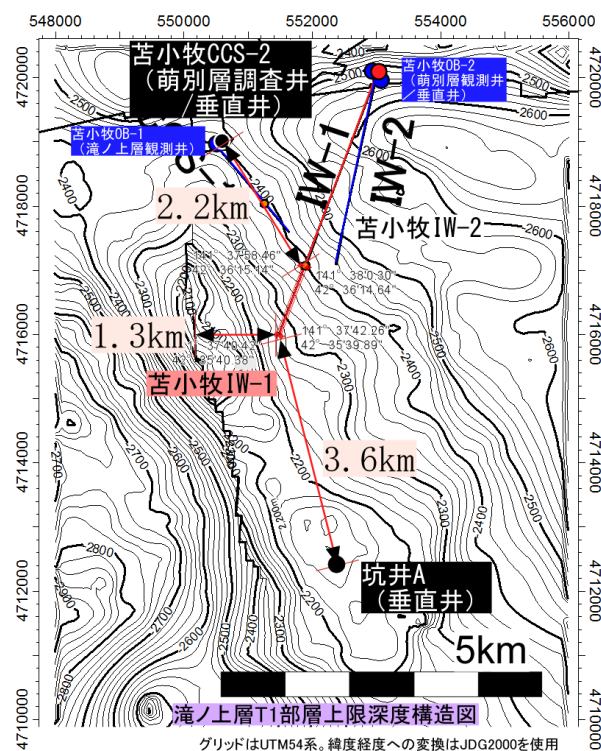
<sup>[1]</sup> Benson, S., Cook, P., Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H.B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., Gale, J., von Goerne, G., Heidug, W., Holloway, S., Kamal, R., Keith, D., Lloyd, P., Rocha, P., Senior, B., Thomson, J., Torp, T., Wildenborg, T., Wilson, M., Zarlenga, F., and Zhou, D. 2005.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

<sup>[2]</sup> 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, 2011 年 10 月 26 日, pp. 第 3 章 59-60  
([http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report\\_001\\_s01.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001_s01.pdf), 2015/1/28 アクセス)

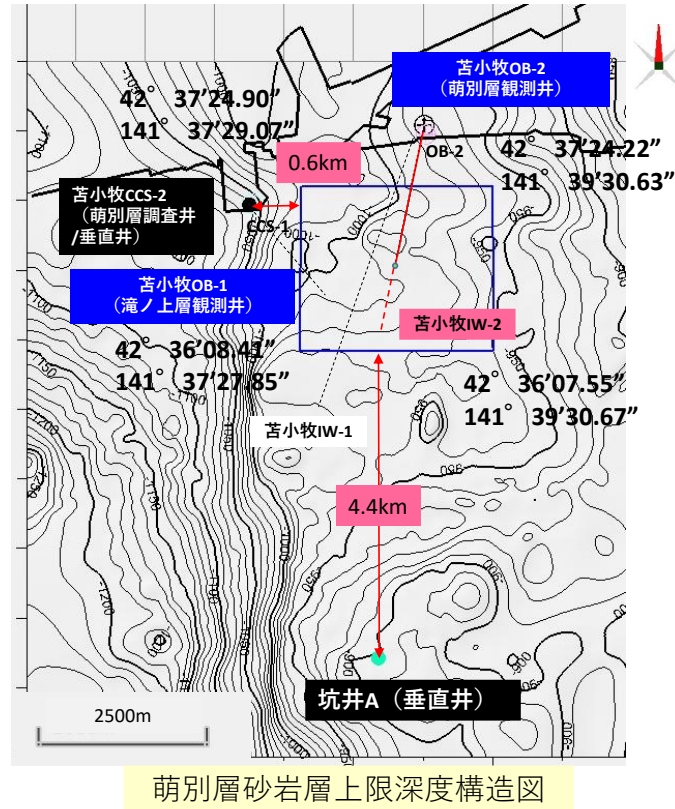
ている。

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。CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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



萌別層砂岩層上限深度構造図

第 3. 2-3 図 萌別層圧入井周辺の圧入した CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> が移動する可能性がある区間には、耐 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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) CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 長期挙動予測の結果、圧入後 200 年程度で CO<sub>2</sub> の広がりに変化は見られなくなり、1,000 年を経ても CO<sub>2</sub> は断層に到達しないことから、断層は CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 長期挙動予測の結果、圧入後 200 年程度で CO<sub>2</sub> の広がりに変化は見られなくなり、1,000 年を経ても CO<sub>2</sub> は廃坑井に到達しないことから、廃坑井は CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub>が接触する鋼材やセメント等を耐CO<sub>2</sub>仕様にし、これら構造物に起因したCO<sub>2</sub>の漏洩は防止される。

以上から、圧入井等の構造物を耐CO<sub>2</sub>仕様にするにより、基本的には、CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> 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

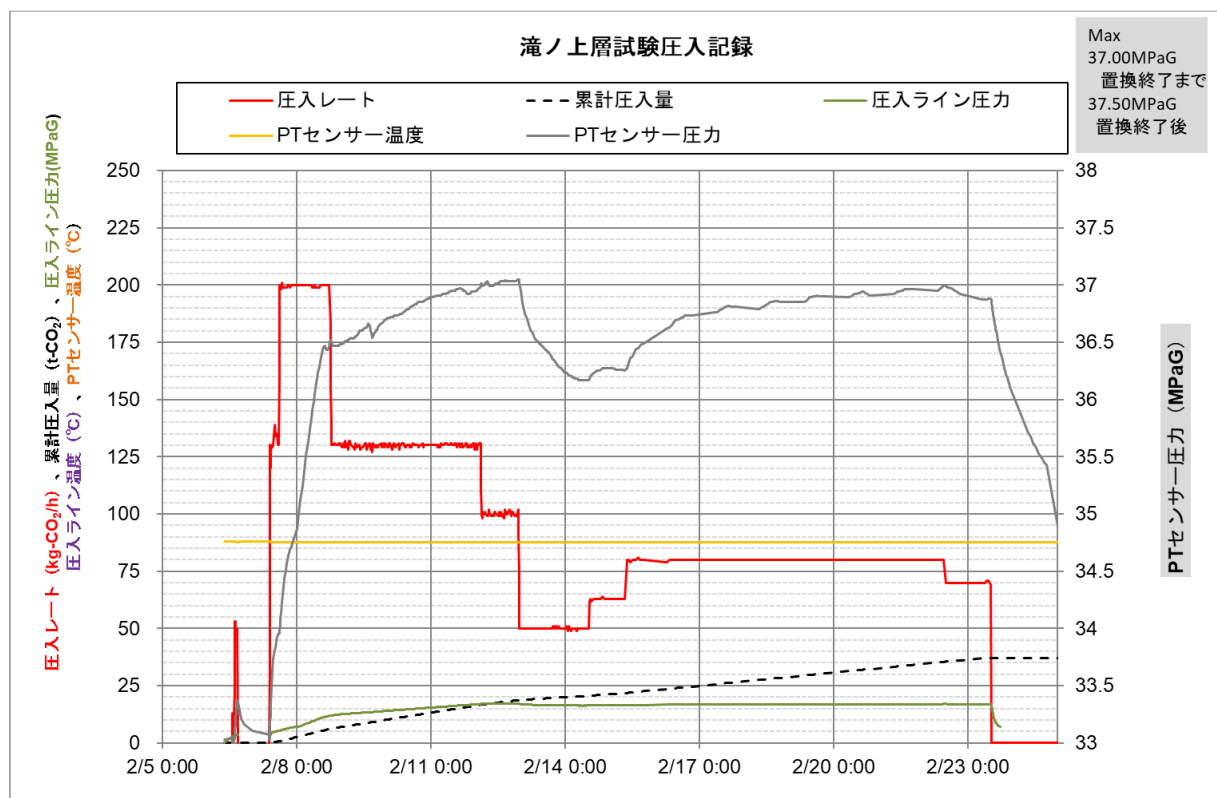
##### ① 検討に使用した地質モデル

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。

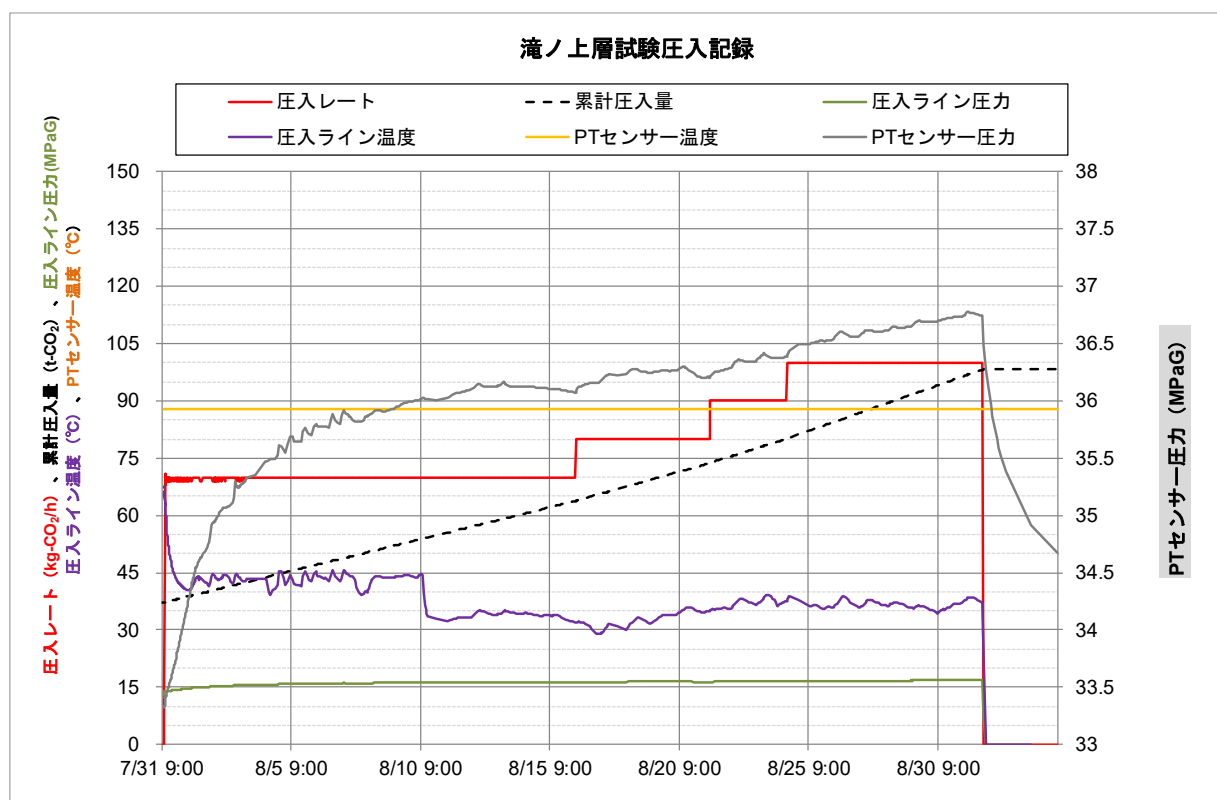
##### 7) 圧入実績

滝ノ上層への CO<sub>2</sub> 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-CO<sub>2</sub> 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、圧入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。



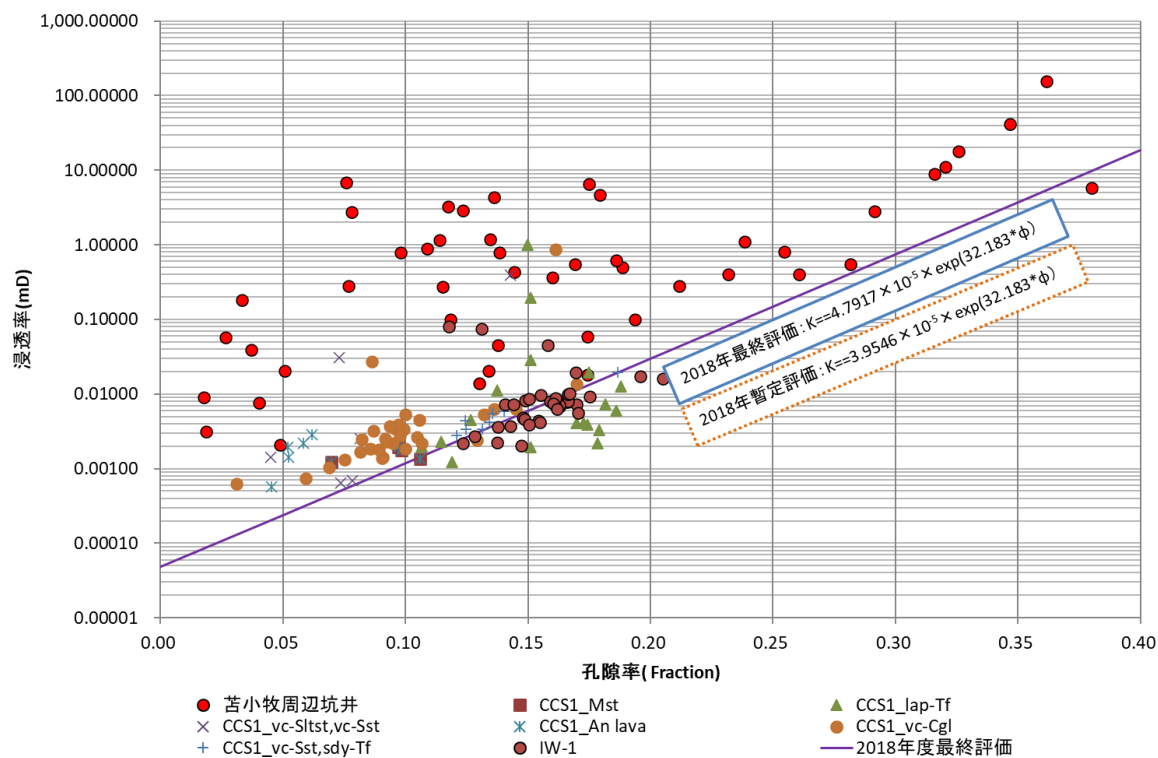




第 4. 1-2 図 滝ノ上層試験圧入記録 (2018 年 7 月～9 月)

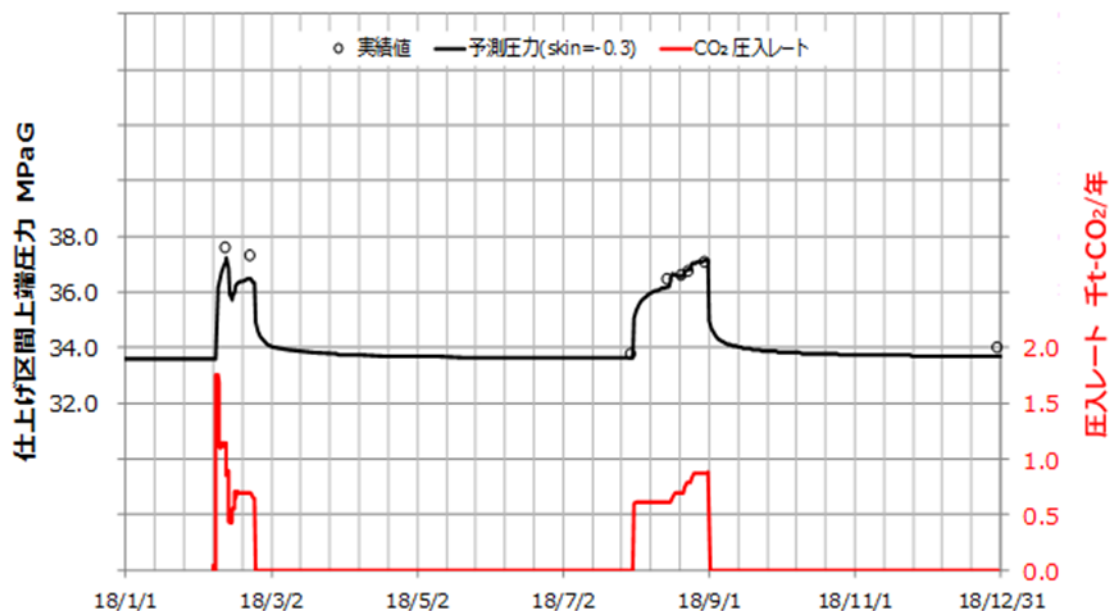
#### イ) CO<sub>2</sub> 圧入時の挙動とパラメータの調整

CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションは圧入実績に即した，2018 年 2 月および 2018 年 7 月～9 月に累計 98 トンの CO<sub>2</sub> 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 $=0.000047917 \times e^{32.182 \times \text{孔隙率}}$ 」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)

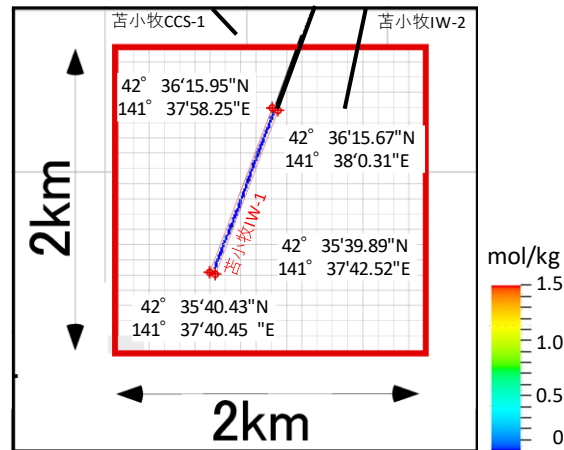


注) シミュレーションによる推定される圧力値と実績値の乖離について目的関数 (Objective function) を用いて検討し, SkinFactor=-0.3 とした。

第 4.1-4 図 滝ノ上層 CO<sub>2</sub>挙動予測 (2018 年度シミュレーション)

## ② CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を考慮し、圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲を推定した（第 4.1-5 図）。



溶解CO<sub>2</sub>量の最大分布域

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

第 4.1-5 図 CO<sub>2</sub>の平面的な分布範囲

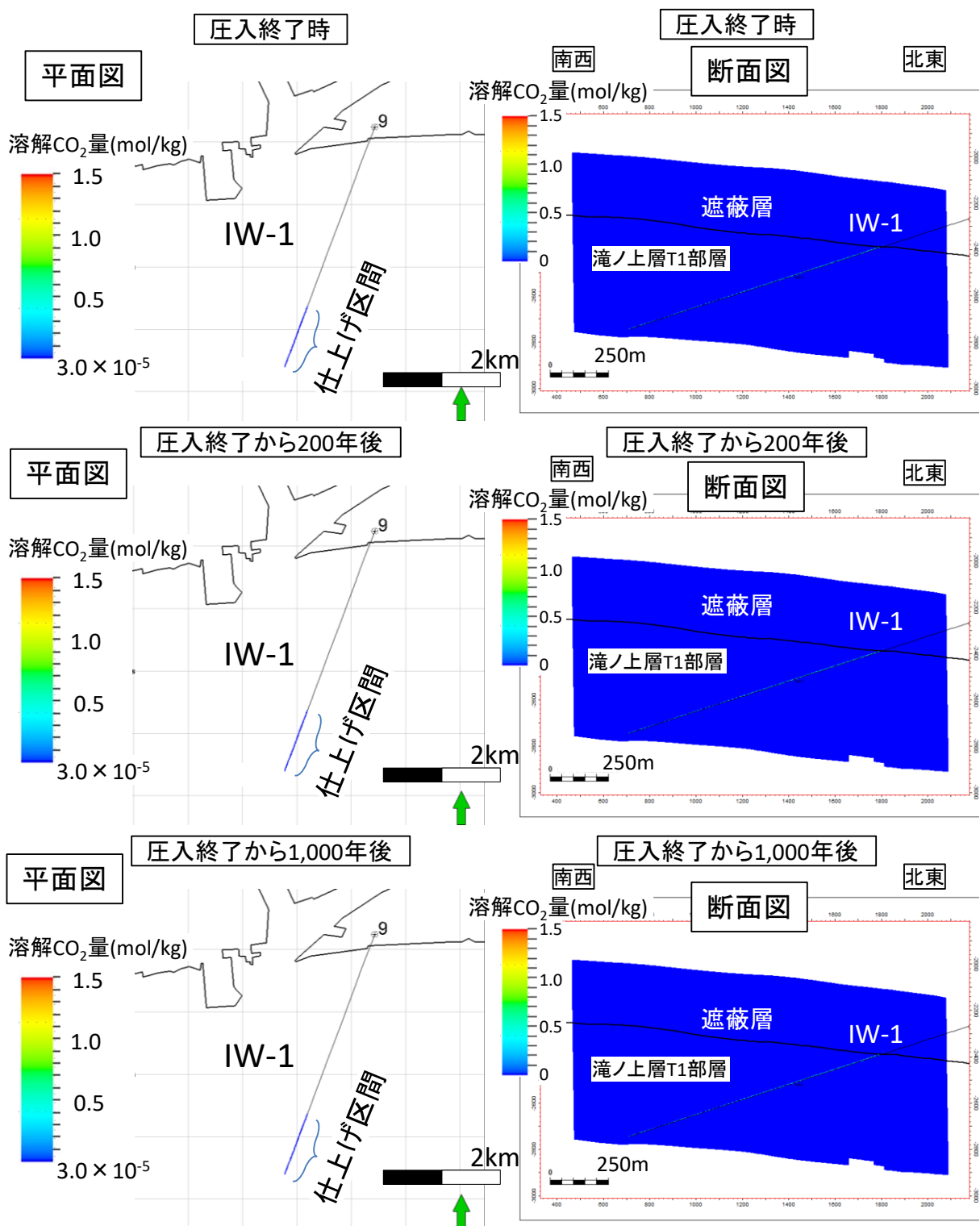
予想される CO<sub>2</sub> 飽和度の分布域は溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布域に含まれるため，溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布域を圧入した CO<sub>2</sub> の分布範囲とした。

第 4.1-1 表に，CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 量の分布に対するシミュレーション結果を第 4.1-6 図に示す。圧入した CO<sub>2</sub> が地層水に溶解して生じる溶解 CO<sub>2</sub> 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，CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>量の推移

### ③ CO<sub>2</sub>の垂直的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの溶解 CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲の座標を示す。なお、安全側に立ち、圧入井の貯留層区間の下 25m とし、上限は遮蔽層深度としている。

第 4.1-2 表 海底下廃棄した CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
CO <sub>2</sub> 下限分布深度	—	—	2,769	坑底+25m
溶解 CO <sub>2</sub> 量上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
溶解 CO <sub>2</sub> 量下限分布深度	—	—	2,769	坑底+25m

注：CO<sub>2</sub> の圧入量が少なすぎるため、圧入した CO<sub>2</sub> は圧入後直ちに溶解するため、CO<sub>2</sub> 飽和度の分布範囲は示すことができない。圧入した CO<sub>2</sub> の分布範囲は限定的となるため、下限は圧入井の坑底（圧入区間の最深部）から、溶解 CO<sub>2</sub> 量では 25m までの範囲とした。また、上限については、遮蔽層までとした。

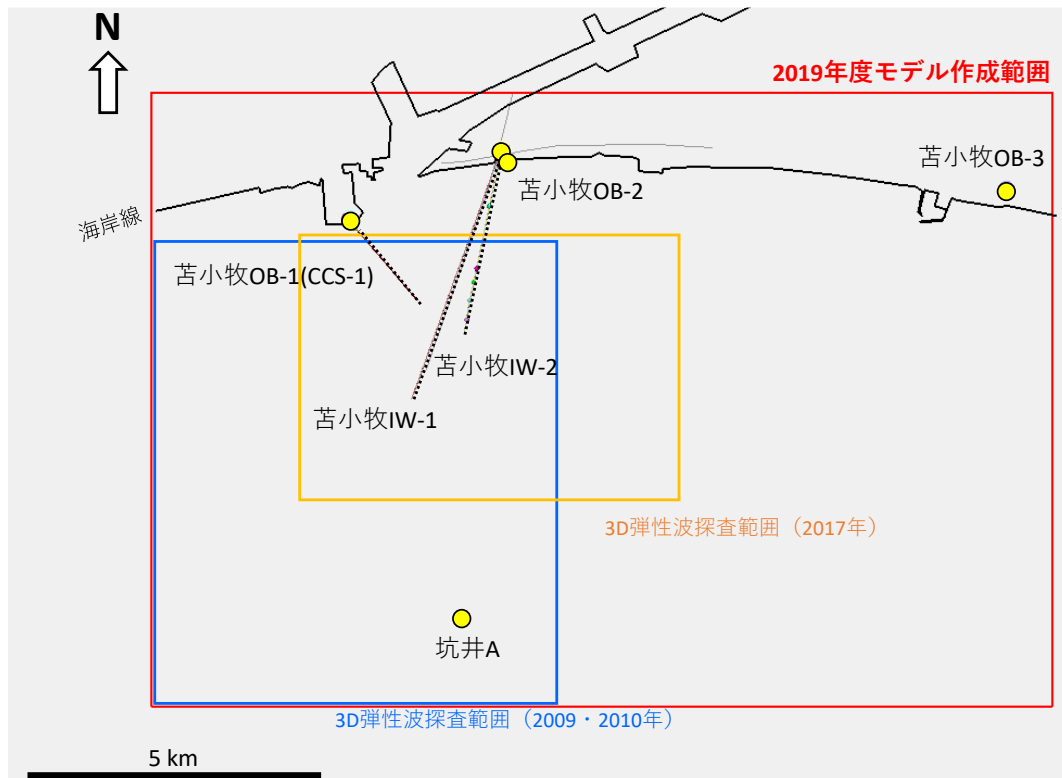
## (2) 萌別層砂岩層中での空間的広がり

### ① 地質モデル

#### 7) 2019 年度地質モデルの作成

##### a. 岩相分布・性状分布の推定

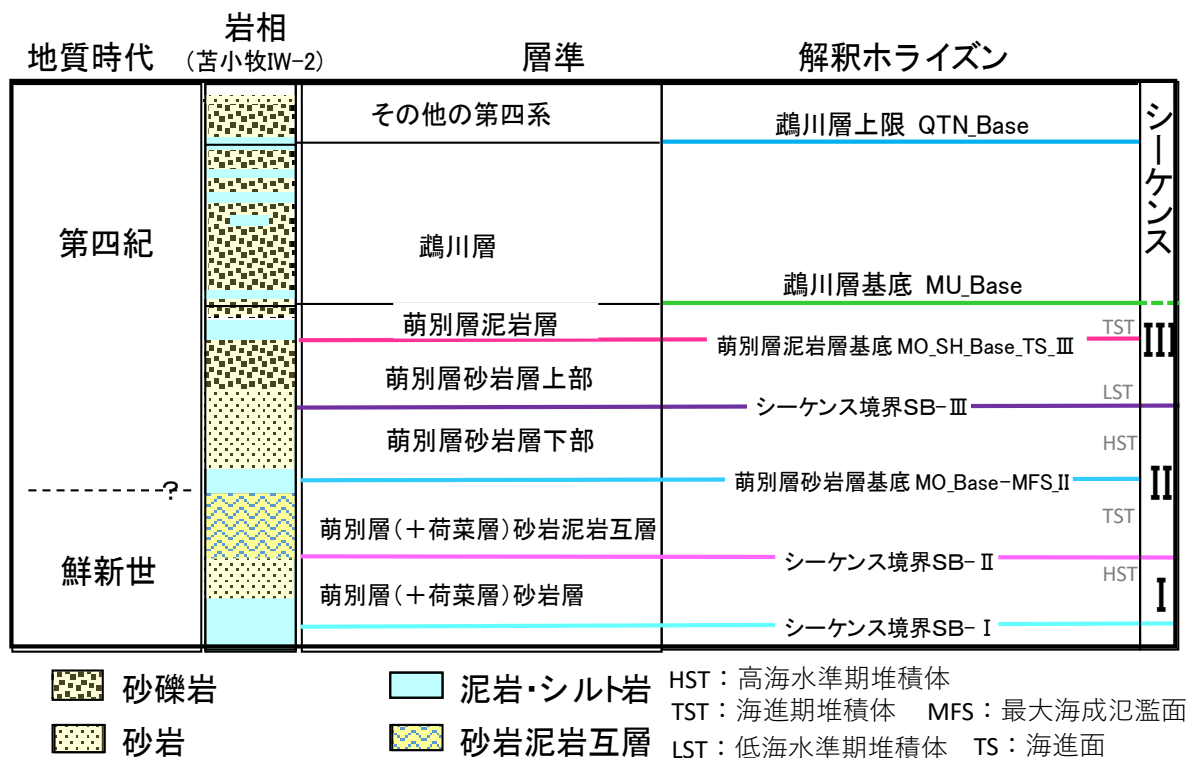
第 4.1-7 図に示す、坑井のデータ（圧入井、観測井、民間井）と 3D 弾性波探査データおよび、民間会社所有の 2D 弾性波探査データを用いて 2019 年度地質モデルを作成した。



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は苫小牧 IW-2 の掘り止め深度付近で確認したシーケンスで、砂岩層を含み苫小牧 IW-2 では下限を確認していない。この砂岩層を萌別層（＋荷菜層）砂岩層と称する。シーケンスⅡの海進期堆積体を萌別層（＋荷菜層）砂岩泥岩互層と、高海水準期堆積体を萌別層砂岩層下部と称するシーケンスⅢの低海水準期堆積体を萌別層砂岩層上部と、海進期堆積体を萌別層泥岩層と称している。



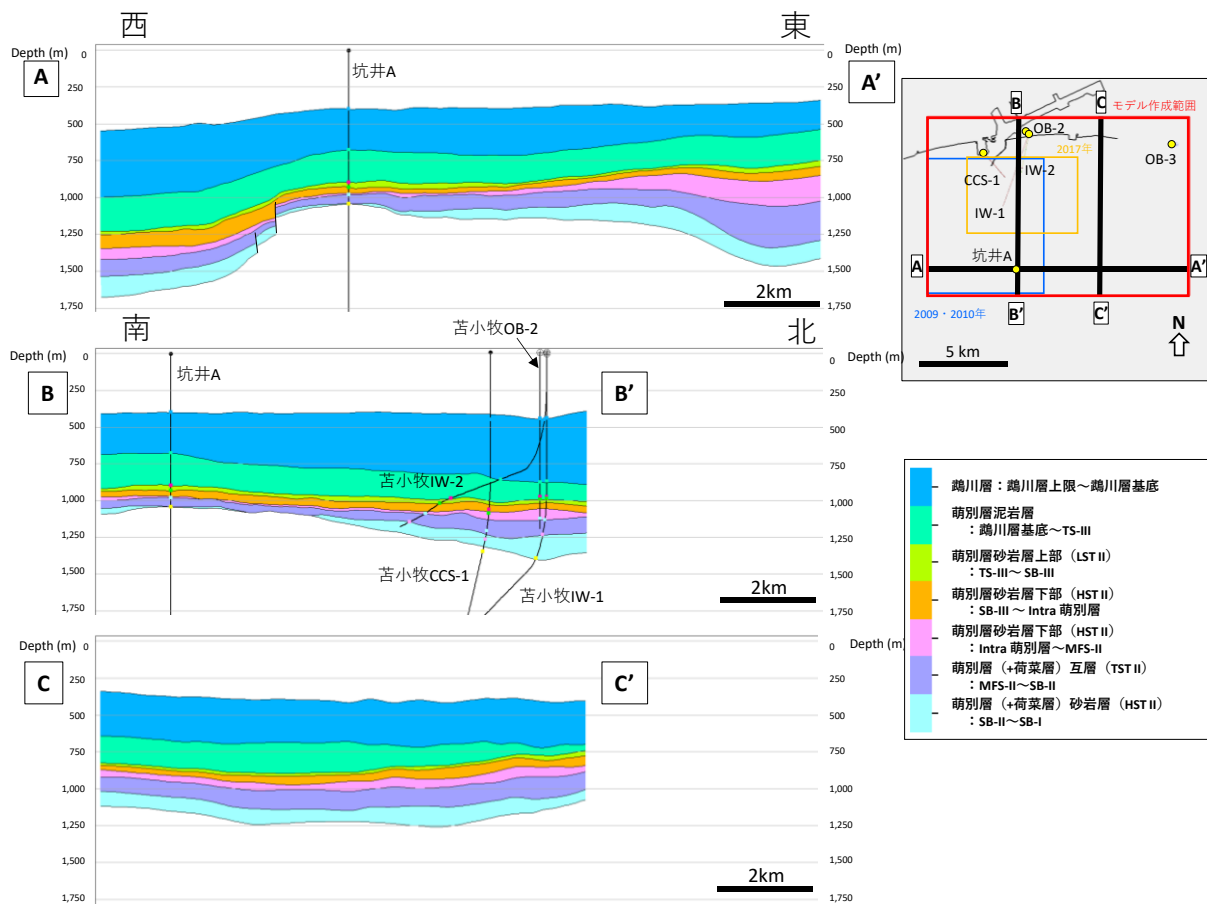


第 4. 1-8 図 萌別層の層序区分と解釈ホライズン

#### 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。

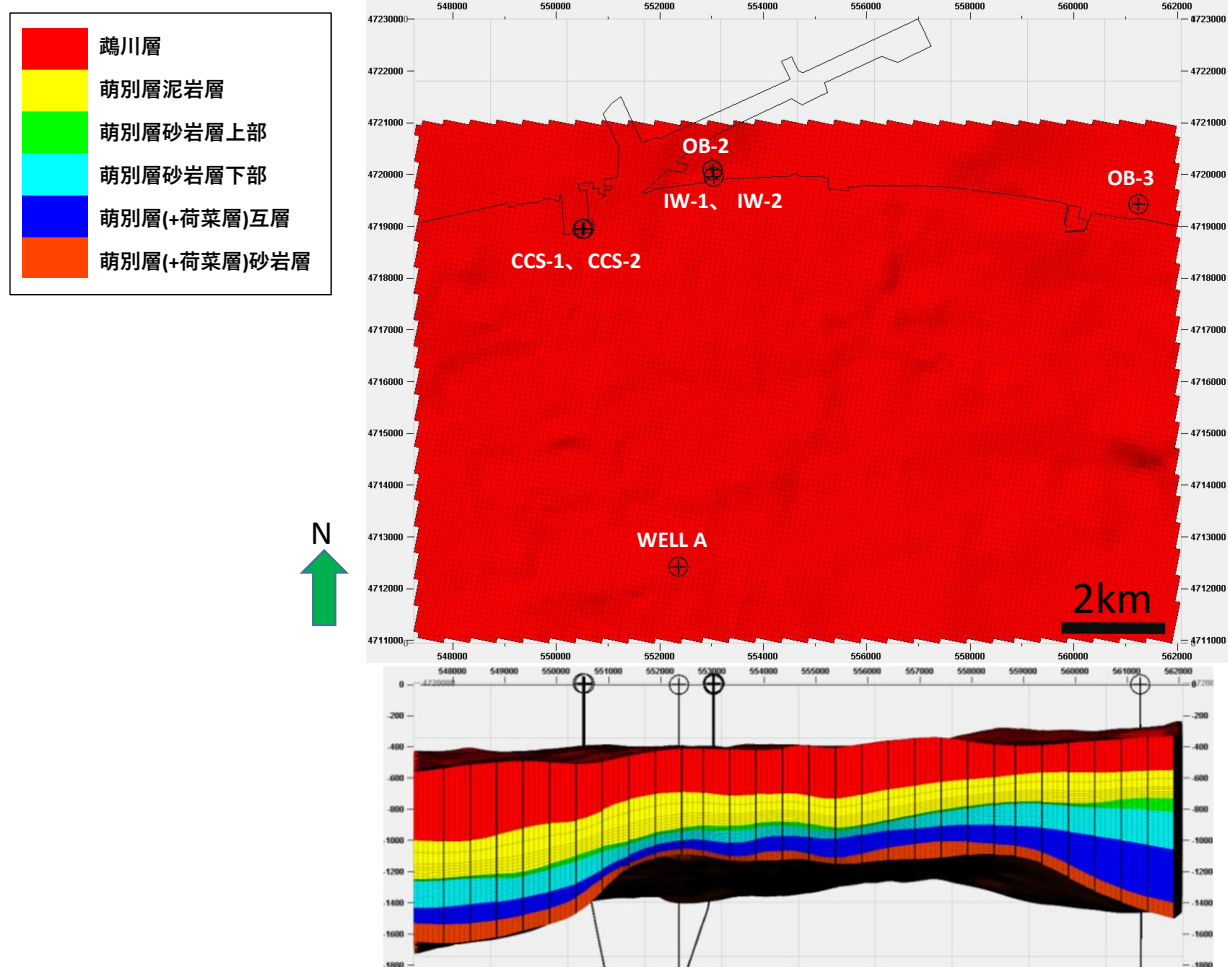


第 4.1-9 図 モデル断面

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
鷗川層 (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

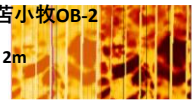

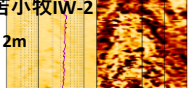
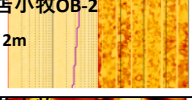

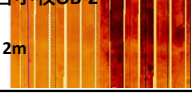
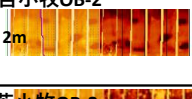
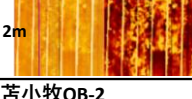
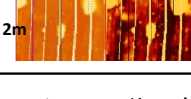
萌別層（＋荷葉層）砂岩層～萌別層砂岩層の分布を推定するために、CCS-1, IW-2, OB-2, OB-3 の 4 坑井のデータおよび 3D 弾性波探査データ, 2D 弾性波探査データを用いて堆積相解析を実施し、堆積環境について推定した。

#### 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、ファシス（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。

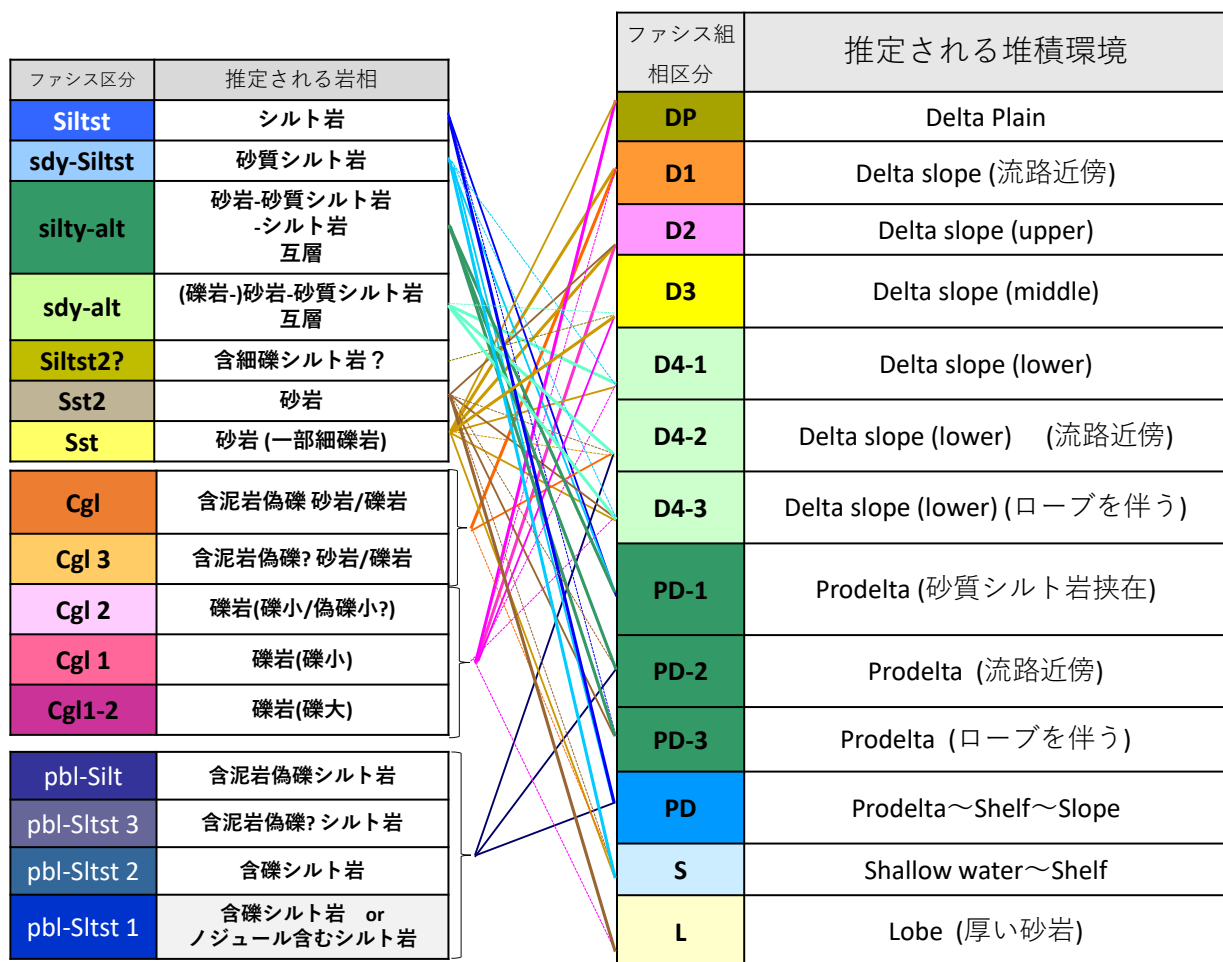
比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	検層データにおける特徴	ファシス区分	推定される岩相
暗色。 (生痕や炭質物が明暗の点で見えることもある。)	苦小牧CCS-1 	- GR値,Vclay値が高い。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色)。  比抵抗値<2, Vclay値>0.25, GR値 55~70	Siltst	シルト岩
やや暗色。 (コントラストの弱い互層状か混沌とした様相を示す。)	苦小牧CCS-1 	- GR値,Vclay値が高い傾向。 - 比抵抗値がやや低い(イメージでやや暗色)。  比抵抗値 1~2, Vclay値 0.2~0.25, GR値 35~50	sdv-Siltst	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値高い傾向で振れ幅小さく変動。 - 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値低い傾向で振れ幅小さく変動。 - 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	sdv-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sdv-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）

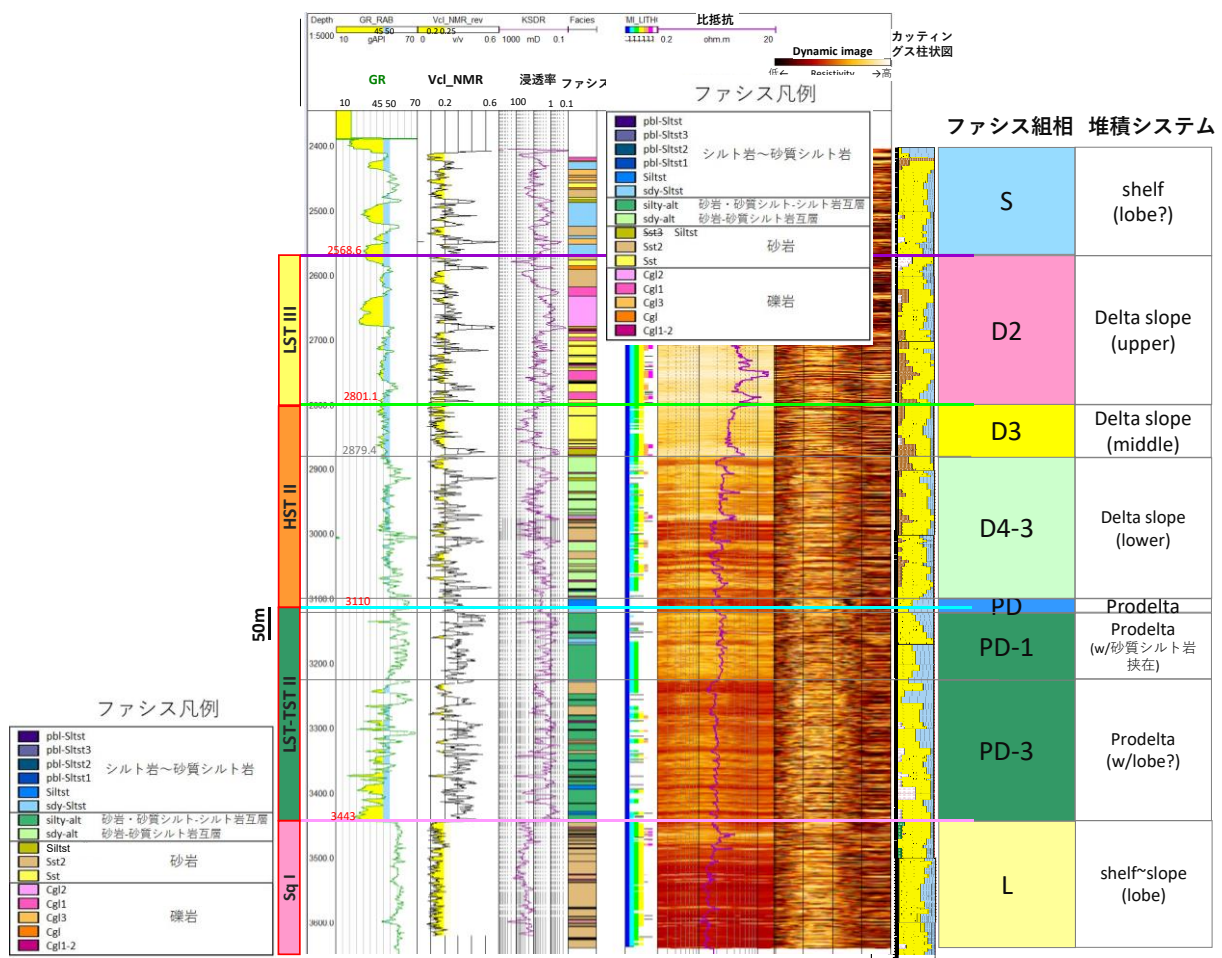
区分したファシスの組み合わせから、ファシス組相を認定し、堆積環境を推定した。ファシス区分とファシス組相、推定した堆積環境の関係を第 4. 1-13 図に示す。



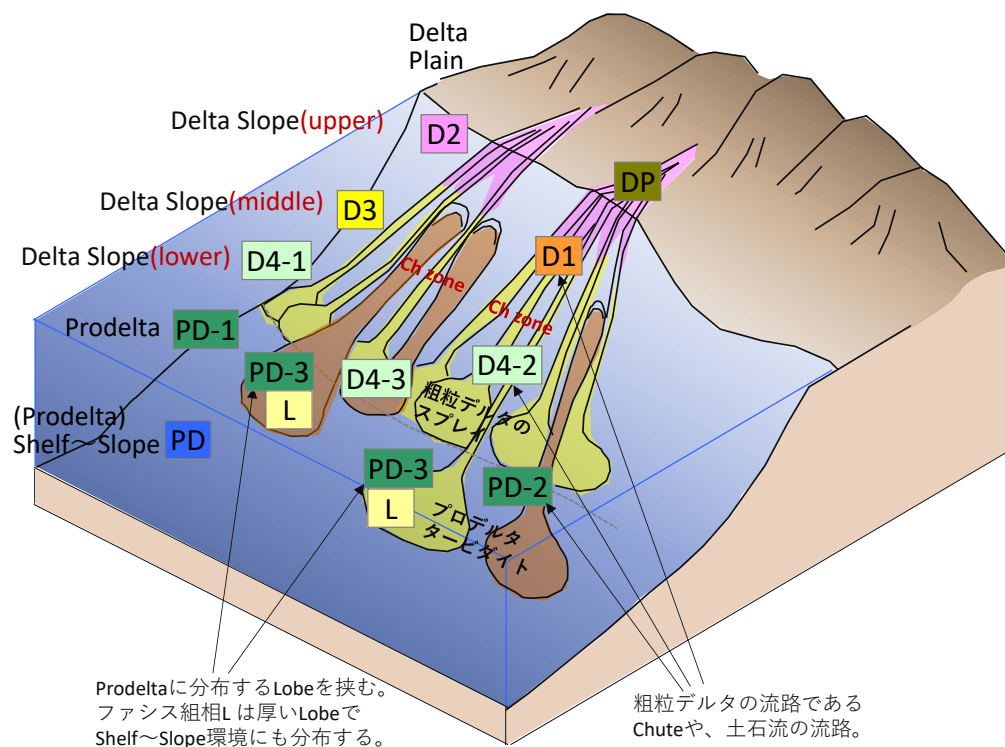
第 4. 1-13 図 ファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

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 4.1-4 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

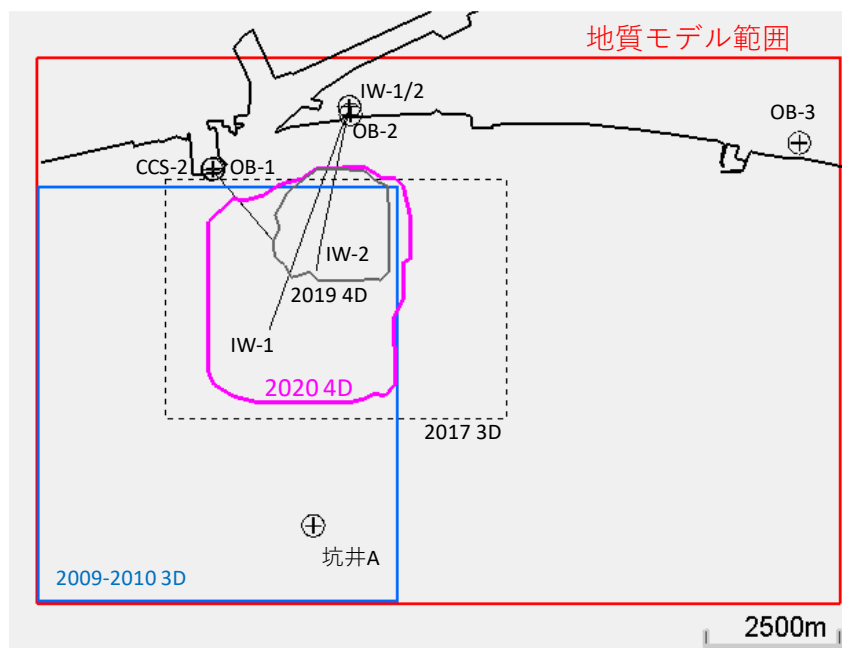
注：PHIT は全孔隙率，PHIE=PHIT×(1-Vcl)は有効孔隙率，Vcl はクレイボリューム（clay volume，全孔隙に占める粘土鉱物による孔隙の割合）を表す。

#### イ) 2021 年度地質モデルの作成

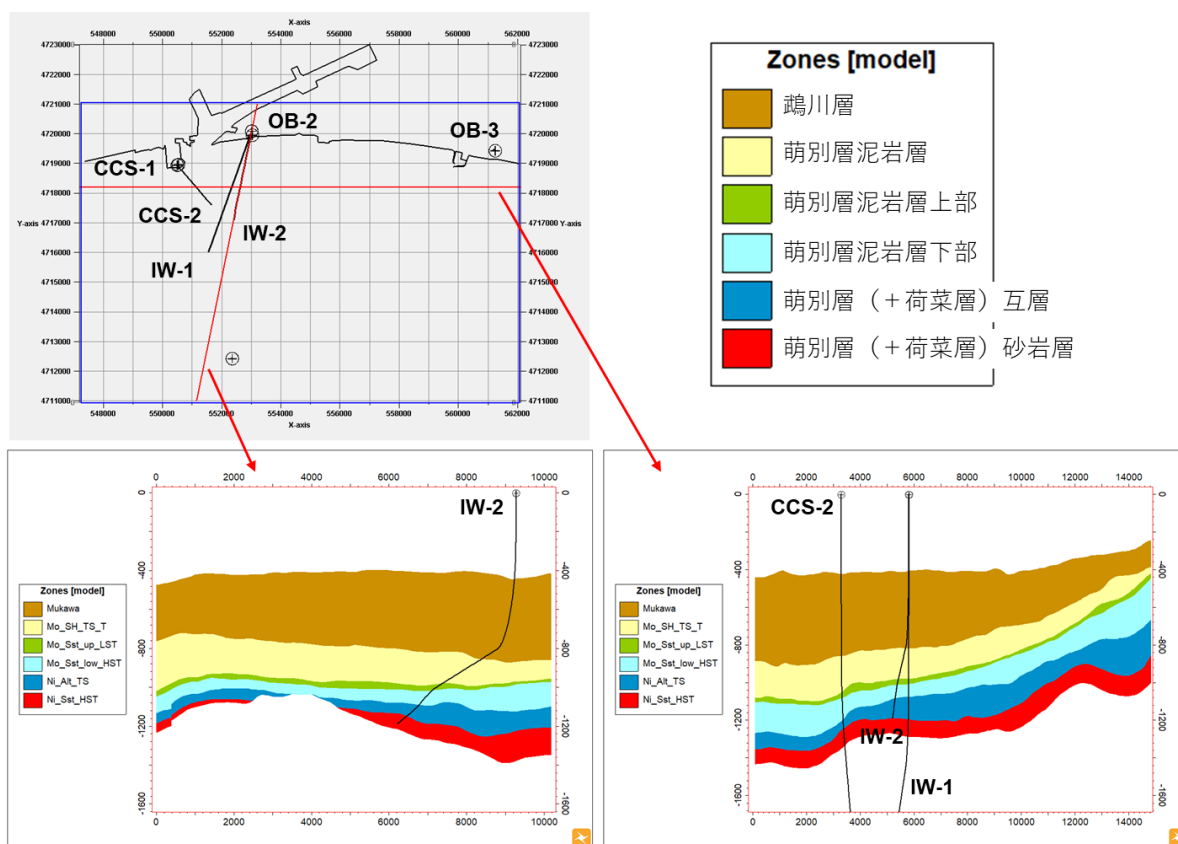
##### a. 構造モデルの作成

シーケンス解釈については，2019 年度地質モデルと同じ解釈を使用した。ホライズンについては，苫小牧沖 3D 弾性波探査データ（2020）の差分解析検討結果（2021 年）を用いて，萌別層貯留層の上限である萌別層泥岩基底ホライズンと，下限である SB-3 ホライズンの地質構造解釈を更新し，深度構造図も更新した。深度変換については，2019 年度地質モデルと同じ速度モデルを用いて変換を行った。

2021 年度地質モデルの作成に使用した坑井のデータ（圧入井，観測井，民間井），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第 4.1-17 図に示す。また深度変換された萌別層（+荷菜層）砂岩層～鵠川層の構造モデル断面を第 4.1-18 図に示す。第 4.1-18 図の平面図の赤線は断面の位置を示す。

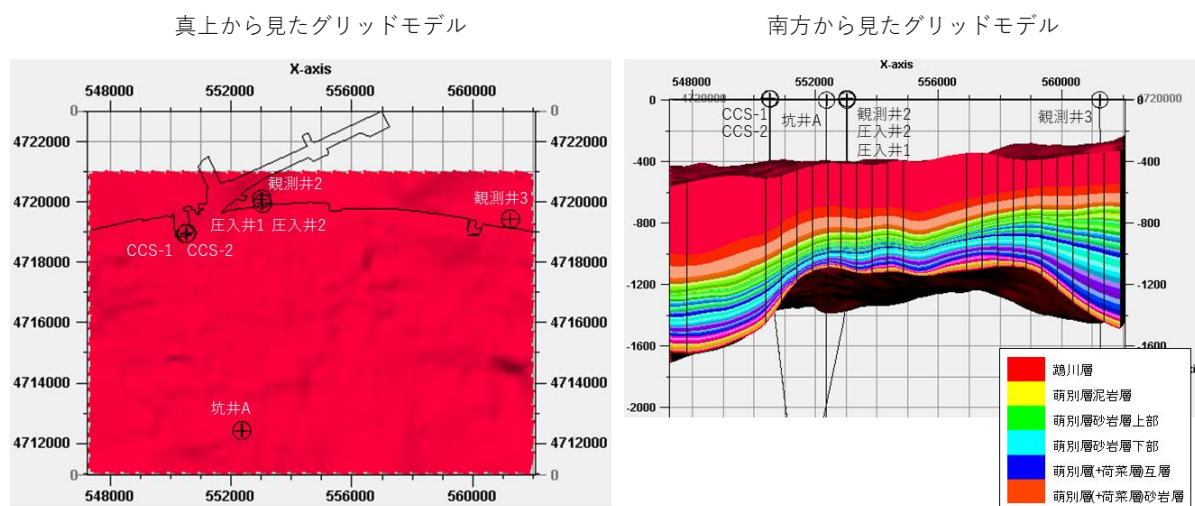


第 4.1-17 図 2021 年度地質モデル作成範囲



第 4.1-18 図 構造モデル断面

2019 年度地質モデルと同様に、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。検層で確認される高浸透領域をより正確にモデルに反映するために、萌別砂岩層上部および下部ゾーンのレイヤー等分方法を変更した。また遮蔽層層準のアップスケールファシスを検層ログファシスと整合させるために、萌別層泥岩層ゾーンのレイヤー等分方法を変更した。第 4.1-19 図に、グリッドセルの外観図を示す。

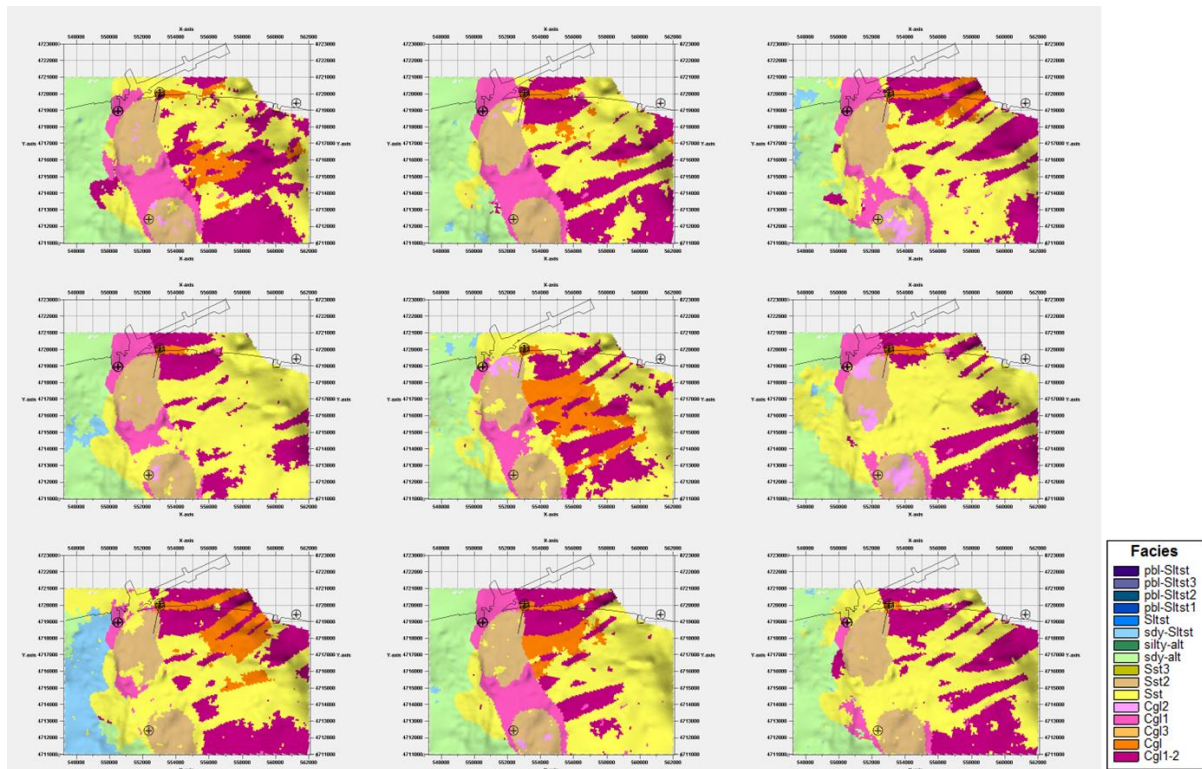


第 4.1-19 図 グリッドセルの外観図

## b. 属性モデルの作成

2021 年度地質モデルの作成において、堆積相解析および断層解釈は更新せず、2019 年度地質モデルと同じものを使用した。2019 年度地質モデルと同様に、SIS を用いて地球統計学的にファシス組相およびファシスを分布させ、具現像を作成した。作成した複数の具現像それぞれについて、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 4.1-20 図に、作成した具現像の萌別層貯留層上部のファシス分布を示す。





第 4.1-20 図 萌別層貯留層上部のファシス分布

## 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 年度モデルシミュレーション

#### 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 日までの実績値に基づいた数値とし、また、累計圧入量は 300,012 トンとした。地球統計学的手法である SIS によって生成した複数の不均質なファシス分布モデル（具現像）を用いたシミュレーションを複数回実施し、圧入終了時の坑内圧力の予測値の統計的累積分布に基づいて P10, P50, P90 と名付けたモデルの抽出を行った。

#### b. パラメータ

<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。

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）。孔隙率については、各坑井の全孔隙率の検層解析結果を岩相ごとに平均した値を与えた。浸透率については、岩相ごとに各坑井の全孔隙率と NMR 浸透率の近似式を作成した後、2015 年度に実施したブライン圧入テストから得られた坑井の仕上げ区間全体の浸透率×有効層厚に合うように高浸透率領域のファシス（後述の第 4.1-15 表で示す岩相 11）の孔隙率と浸透率の相関式のパラメータを調整し、各岩相の孔隙率から浸透率を計算し与えた。これらを入力した属性モデルを基本とし、CO<sub>2</sub> 圧入実績（流量と圧力）に整合するように圧入井の圧入区間と周辺地層の間の流動抵抗を決めるスキンファクターを調整（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。

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℃@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 (温度圧力センサー深度)	
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	0.60 (ファシス 10, 11) 0.144 (その他ファシス)	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

<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

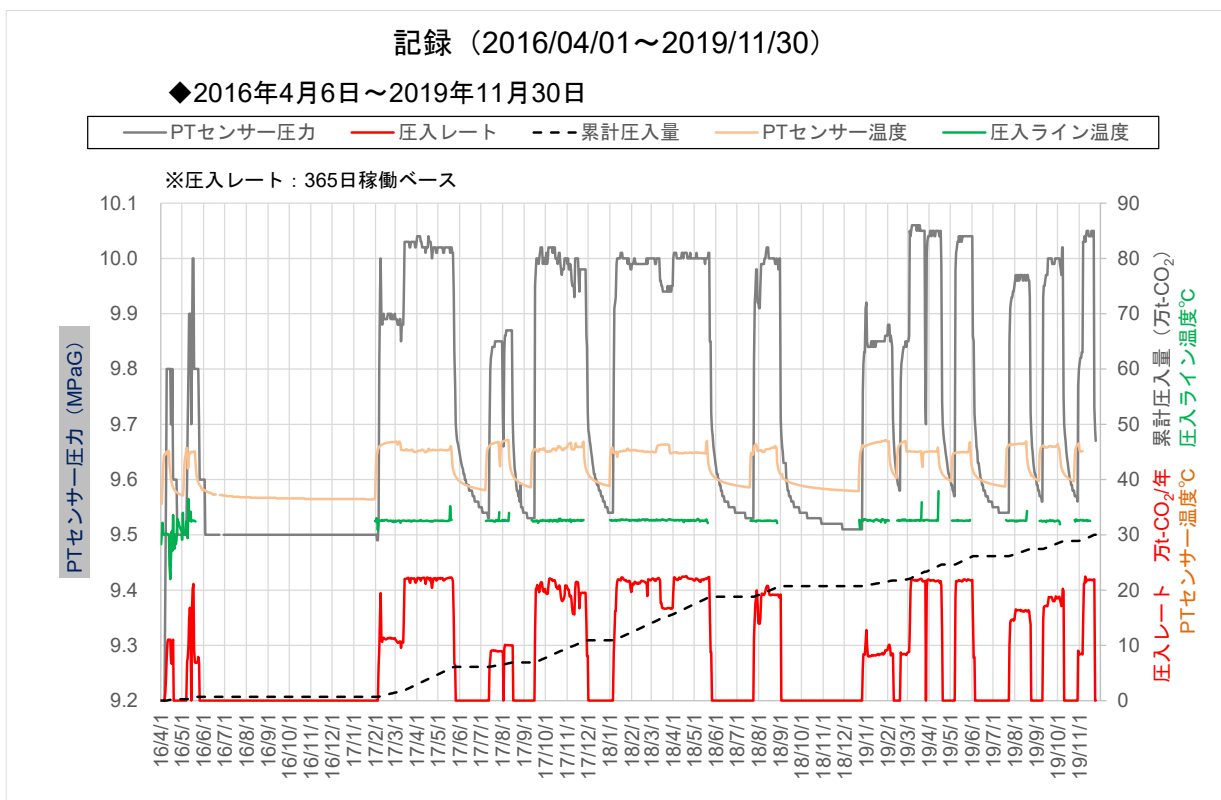
<sup>[3]</sup> Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

<sup>[4]</sup> Holtz, M.H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx: A Calculation Method for 3-D

### 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> に到達し圧入を終了した。萌別層への圧入実績を第 4.1-21 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 が設置された貯留層深度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、圧入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。



注) 坑底温度・坑底圧力は P/T Sensor の値

第 4.1-21 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

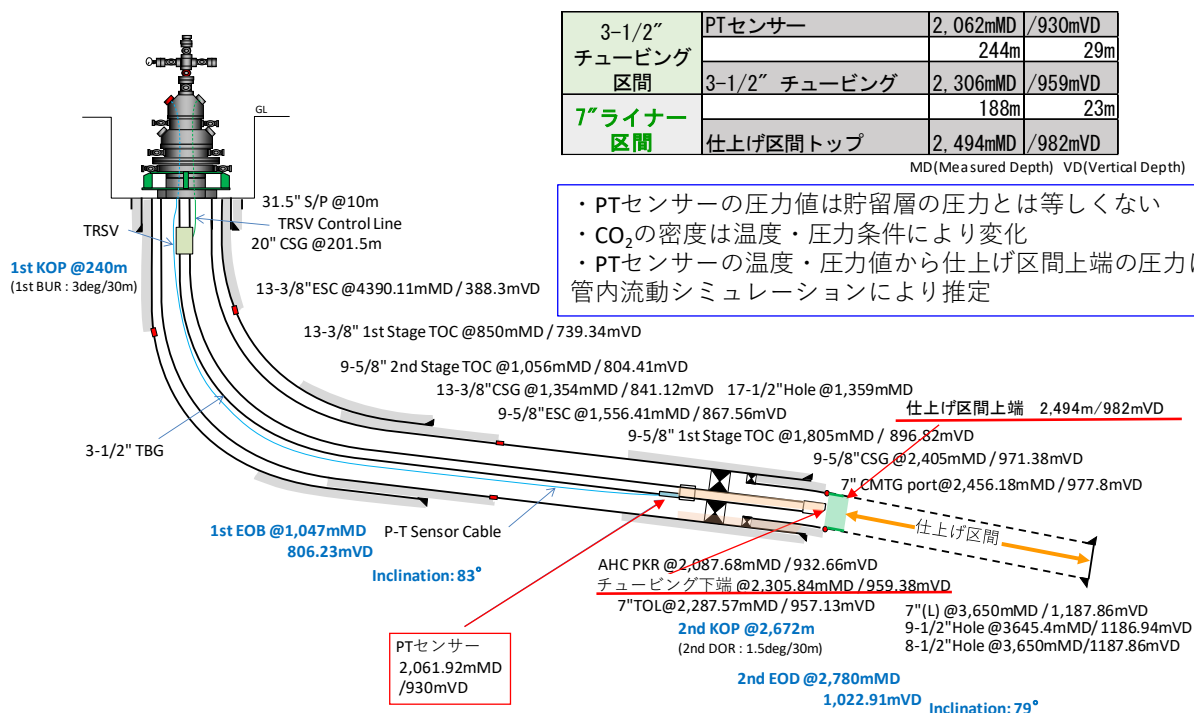
貯留層内の温度圧力を推定するために、圧入井の坑内には圧力・温度センサー (P/T Sensor) を設置している。P/T Sensor から貯留層の仕上げ区間上端までは、チュービングとライナーを介し計 432m ほど離れている(第 4.1-22 図)ため、P/T Sensor で計測した温度・圧力値を用いて、管内流動シミュレーションにより貯留層(仕上げ区間上端)に加わ

る圧力を推定した。なお、管内流動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 4.1-22 図）である。

第 4.1-23 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 4.1-23 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



第 4.1-22 図 苫小牧 IW-2 仕上げ坑内図



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の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、「FOA」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、FOA を実施した。

FOA を実施するために計画的に圧入を停止するテストのことを「フォールオフテスト」（以下、「FOT」と称する。）と呼ぶ。第 4.5-30 図に示されている複数回の CO<sub>2</sub> の圧入停止は、FOT を目的として行ったものではないが、以下では疑似的に FOT として扱う。各 FOT で得られた坑底圧を使った FOA については、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 4.1-24 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 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

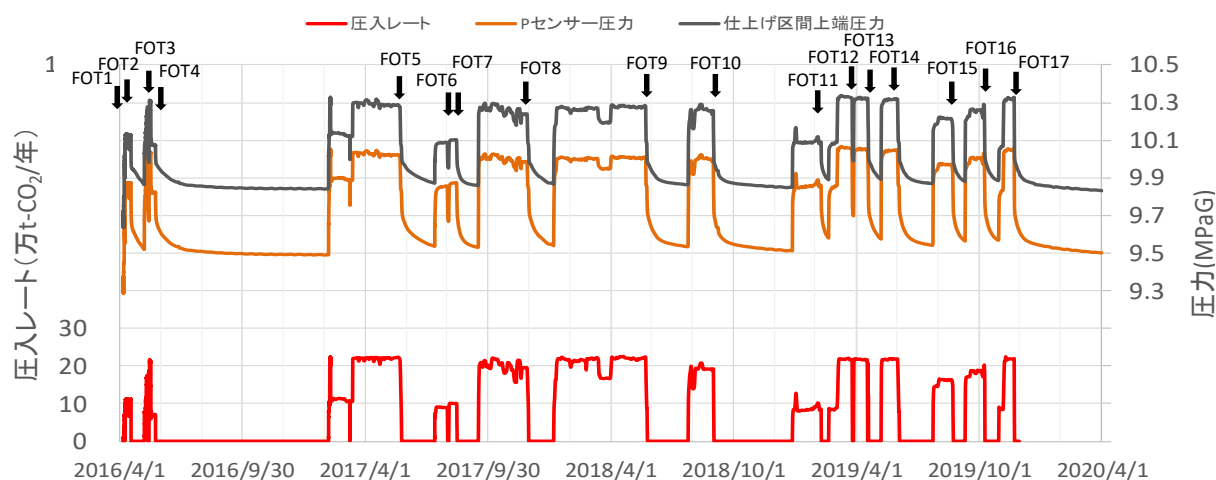
FOA では横軸に時間, 縦軸に圧力変化と圧力デリバティブ (圧力変化を微分, 以下, 「デリバティブカーブ」と称する) を共に対数スケールでプロットし, 解析モデルにより貯留層性状を解析解により推定した。各ログーログプロットには, PT センサーが記録した圧力データを直接解析したカーブ (PT) と, PT センサーの圧力・温度データからセンサー位置での CO<sub>2</sub> 密度を推定し, その密度をもとに PT センサーから離れた位置にあたる仕上げ区間上端における圧力挙動を推定したカーブ (補正) も示した。また, PT センサーの圧力・温度条件から推定される CO<sub>2</sub> の密度の変化も示した。解析には Paradigm 社製の圧力解析ソフト「Interpret」を使用した。第 4.1-25 図にそれぞれのログーログプロットを示す。

---

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

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

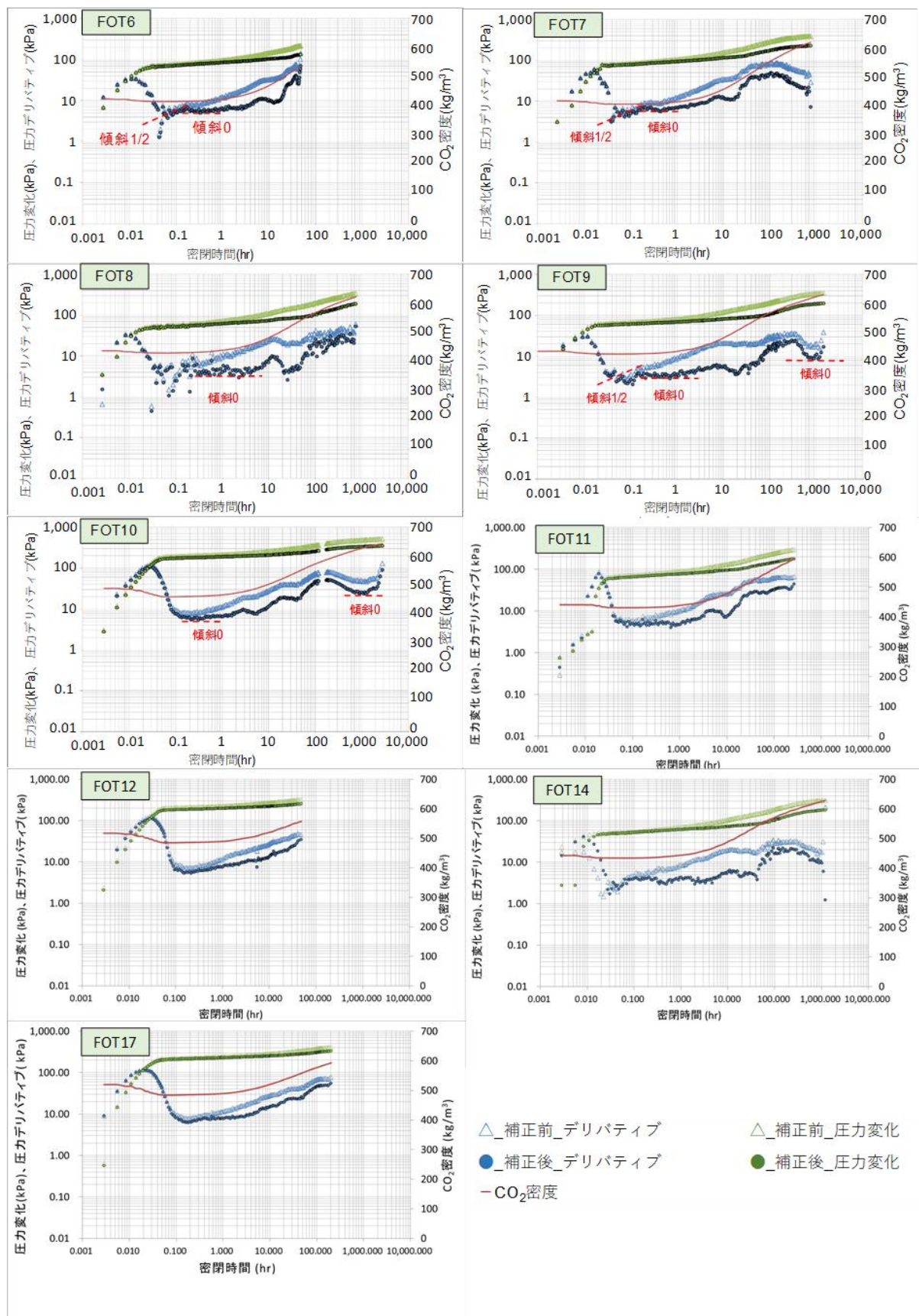


第 4.1-24 図 FOT を実施したタイミング

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 ラディアル フロー (ERF)	地層水領域の ラディアル 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
FOT6	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT7	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT8	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT9	○	○	○	
FOT10	○	○	○	
FOT11	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT12	○	○	×	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
FOT14	○	○	○	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
FOT17	○	○	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。



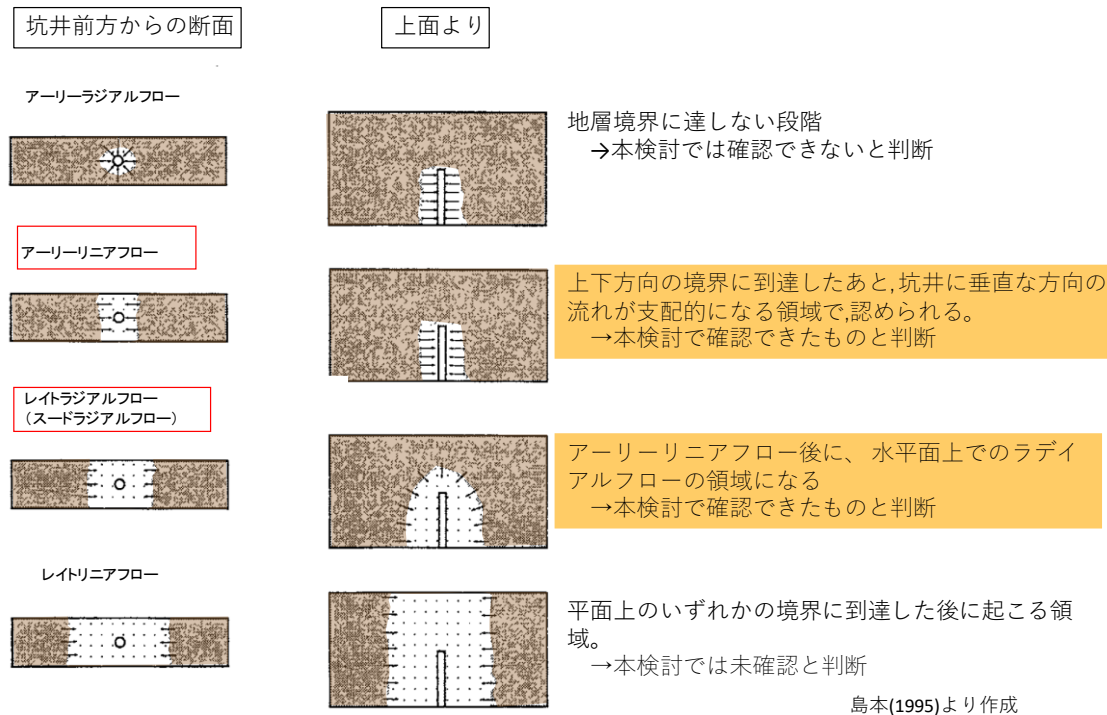
第 4.1-25 図 FOT のログ-ログプロット (FOT6~10, 11, 12, 14, 17)

参考のため、第 4.1-26 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。2018 年度までの検討では、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、2019 年度以降の検討では、ELF の認識が誤りである可能性を考慮し、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（以下、「LRF」と称する。）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. 1-26 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。

均質かつ無限遠の貯留層においてラジアルフローとなっているとき、圧力のデリバティブは一定であり次式であらわされる。

$$t \frac{dP}{dt} = \frac{70.6qB\mu}{kh} \quad (\text{式 4.1-2})$$

注) k : 浸透率、h : 有効層厚、q : 流量、B : 容積係数、μ : 粘度

デリバティブの傾斜 0 の区間の値を用いて、上式から浸透率×有効層厚(kh)を計算した。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. 1-27 図に示す。

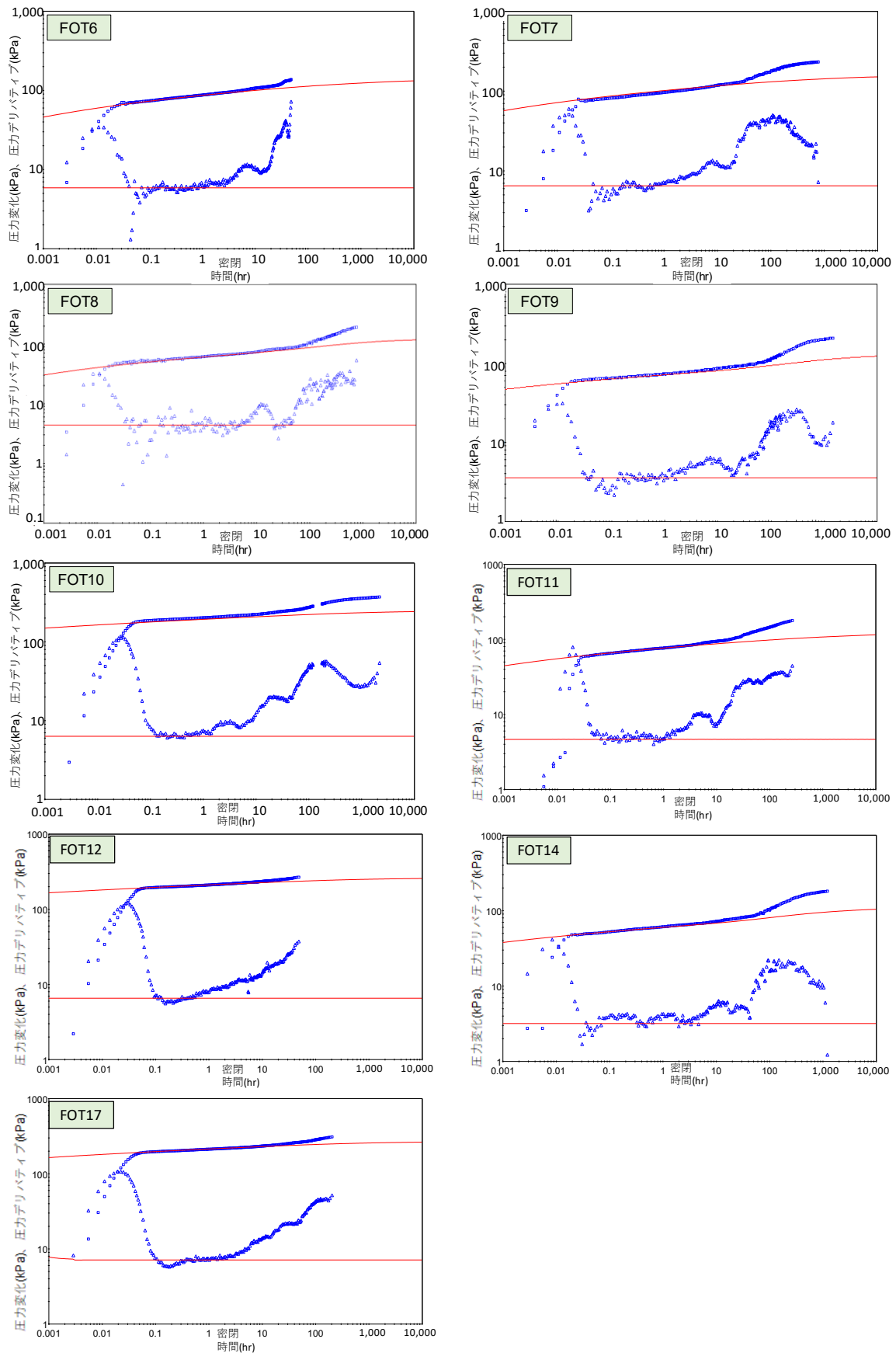
<sup>[1]</sup> 島本辰夫: 水平坑井の圧力解析と生産予測, 石油技術協会誌 60(6), 462-473(1995)



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					
CO <sub>2</sub> 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8℃
孔隙率		0.28					
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℃
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					
CO <sub>2</sub> 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8℃
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℃
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 4.1-27 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が認められた。これは圧入レートが上がるほど流動坑底圧が上昇して圧入区間すなわち有効層厚が増加し、かつ累計圧入量の増加により圧入井周辺の貯留層の平均 CO<sub>2</sub> 飽和率が上昇することで、CO<sub>2</sub> の相対浸透率が増加するためであると考えられる。FOT11 以降は、それ以前とは異なり、累計圧入量が増加しても浸透率×有効層厚が増加する傾向はみられない。

## 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(4.1-3)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。

$$k \times h = \frac{162.6 \cdot q \cdot B \cdot \mu}{m} \quad \text{式(4.1-3)}$$

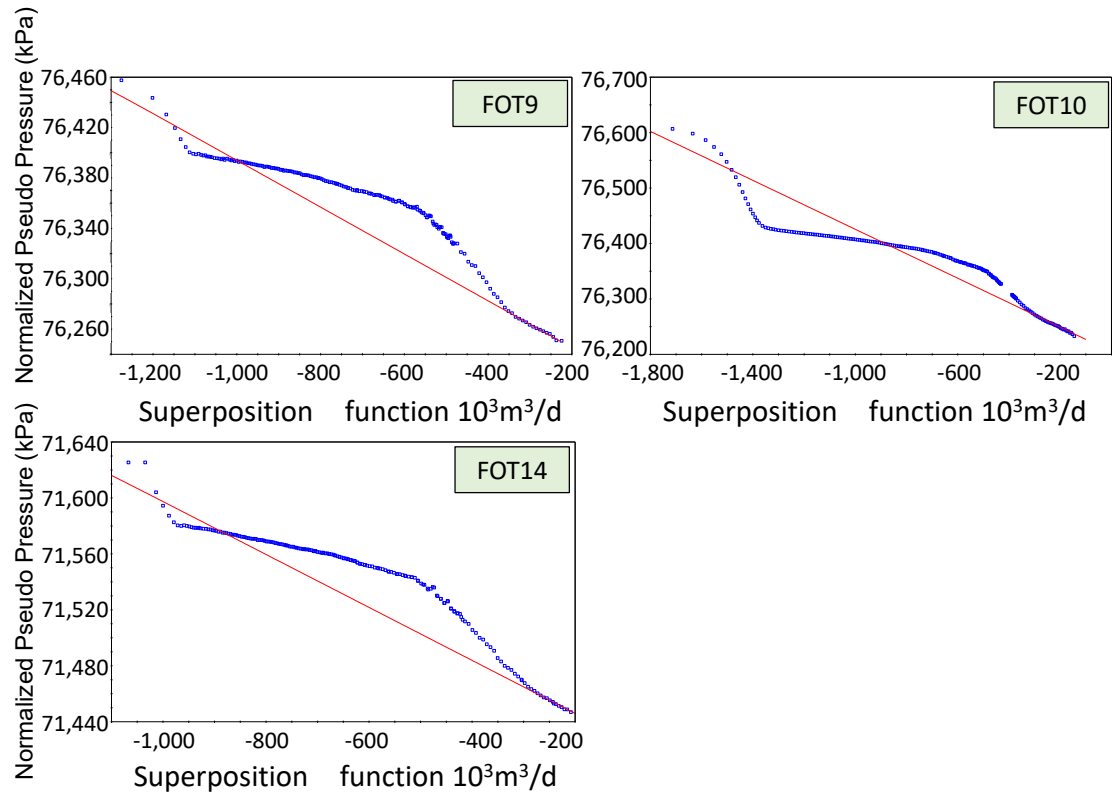
注) k: 浸透率, h: 有効層厚, q: 流量, B: 容積係数,  $\mu$ : 粘性, m: ホーナープロットにおける傾きを示す。

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(4.1-4)を横軸に、Normalized Pseudo Pressure 式(4.1-1)を縦軸にとり、式(4.1-3)の傾き m を求め、k×h (浸透率×有効層厚)を算出する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式(4.1-4)}$$

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 4.1-28 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の値よりも小さい。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 4.1-28 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 (4.1-5) ～式 (4.1-7) (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 COMPTUING 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 時間で終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。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3}} \left( \sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right) + R_2 \left( 1 - \sqrt{\frac{M_3 F_2}{F_3 M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (4.1-5)}$$

$$R_2 = R_1 \left( 1 - \sqrt{\frac{M_2 F_1}{F_2 M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (4.1-6)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t}} \Delta t \quad \text{式 (4.1-7)}$$

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,  $\phi$ :孔隙率,  $\mu$ :粘性,  $c_t$ :総合圧縮率,  $\Delta t$ :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。

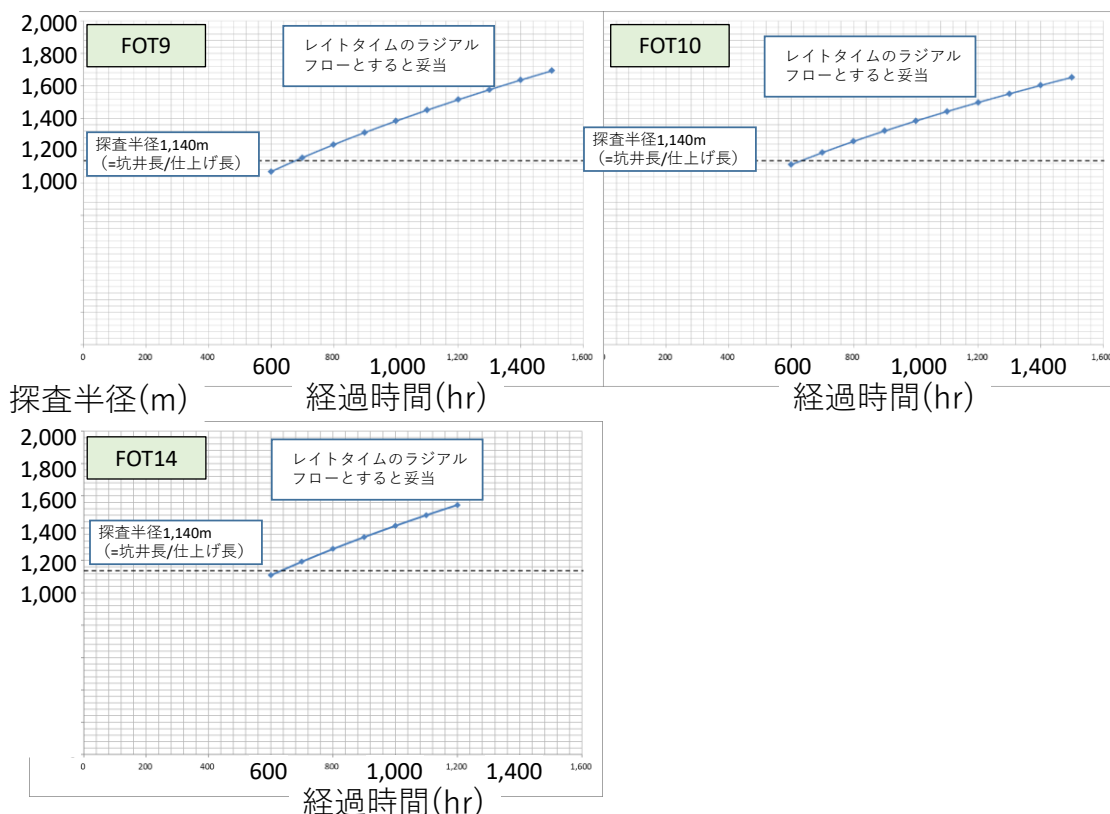
第 4.1-11 表 探査半径の算出に用いた入力値と計算結果

	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℃
	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℃
	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℃

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 (4.1-5) を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した

(第 4.1-29 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。

探査半径(m)



第 4.1-29 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。

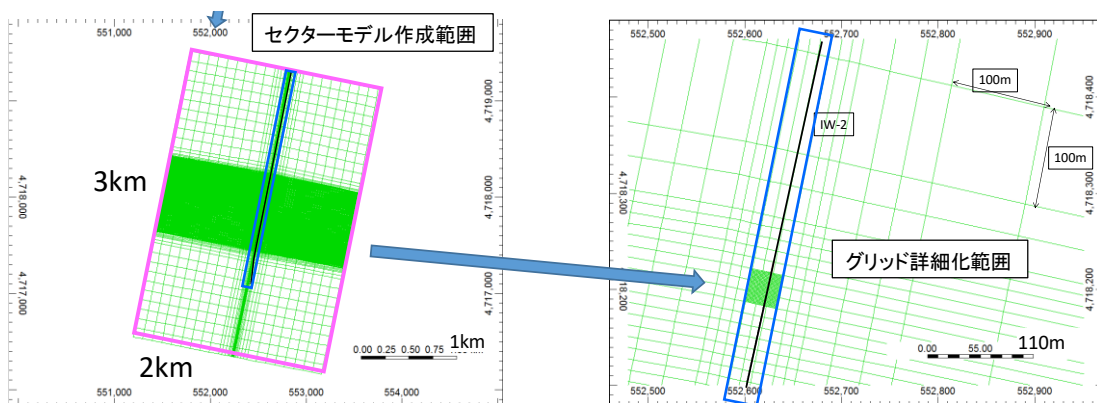
FOT9, 10, 14 の密閉時間 600 時間頃までのショックフロントを示すデリバティブカーブが上に凸となる挙動の後に認められる、デリバティブカーブが傾斜 0 となる挙動は、探査半径の解析からレイトラジアルフローの挙動を示していることが示唆された。



## ii) ヒストリーマッチ

圧入中に記録した坑内圧力や、F0A 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 4.1-30 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 4.1-30 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（4.1-8）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。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \sqrt{(d_{sim}^i - d_{obs}^i)^2} \quad \text{式 (4.1-8)}$$

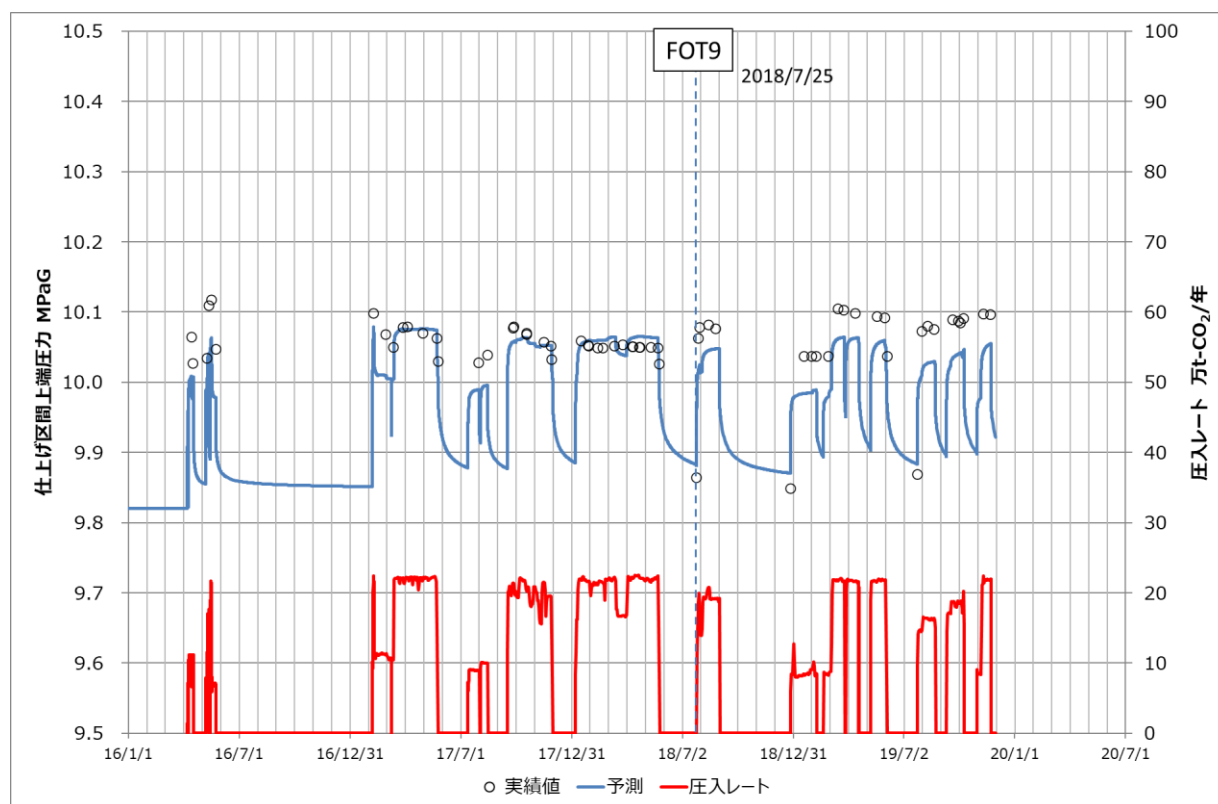
注) nobs:実績データ数, dsim:シミュレーション計算値, dobs:実績データ

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 4.1-31 図に示す。F0T9（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		
	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
2	31.1	21.8	45.1
3	29.8	21.9	41.9
4	29.9	23.1	40.3
5	30.8	21.6	45
6	31.6	22	46.2
7	28.9	22.2	39.1
8	27.5	24.6	32
9	31.6	21.8	46.6
10	30	21.8	42.4
11	30.6	23.1	41.9
12	30.8	20.9	45.7
13	30.7	22.5	43
14	32.5	21.3	49.4
15	31	21.3	45.9

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
16	31.3	22.1	45.2
17	30.4	23.9	40.3
18	27.5	21.5	36.6
19	26.2	20.4	35.1
20	30.5	22.2	43.2
21	29.4	21.6	41.2
22	29.5	24.4	37.3
23	29	22.8	38.5
24	31.1	22.5	44.2
25	31.7	22.4	45.9
26	31.4	22.2	45.4
27	30	22.9	40.8
28	28.2	20.4	40.2
29	30.6	22.2	43.4
30	29.5	23.2	39.1



注) 具現像 24 による例。

第 4.1-31 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

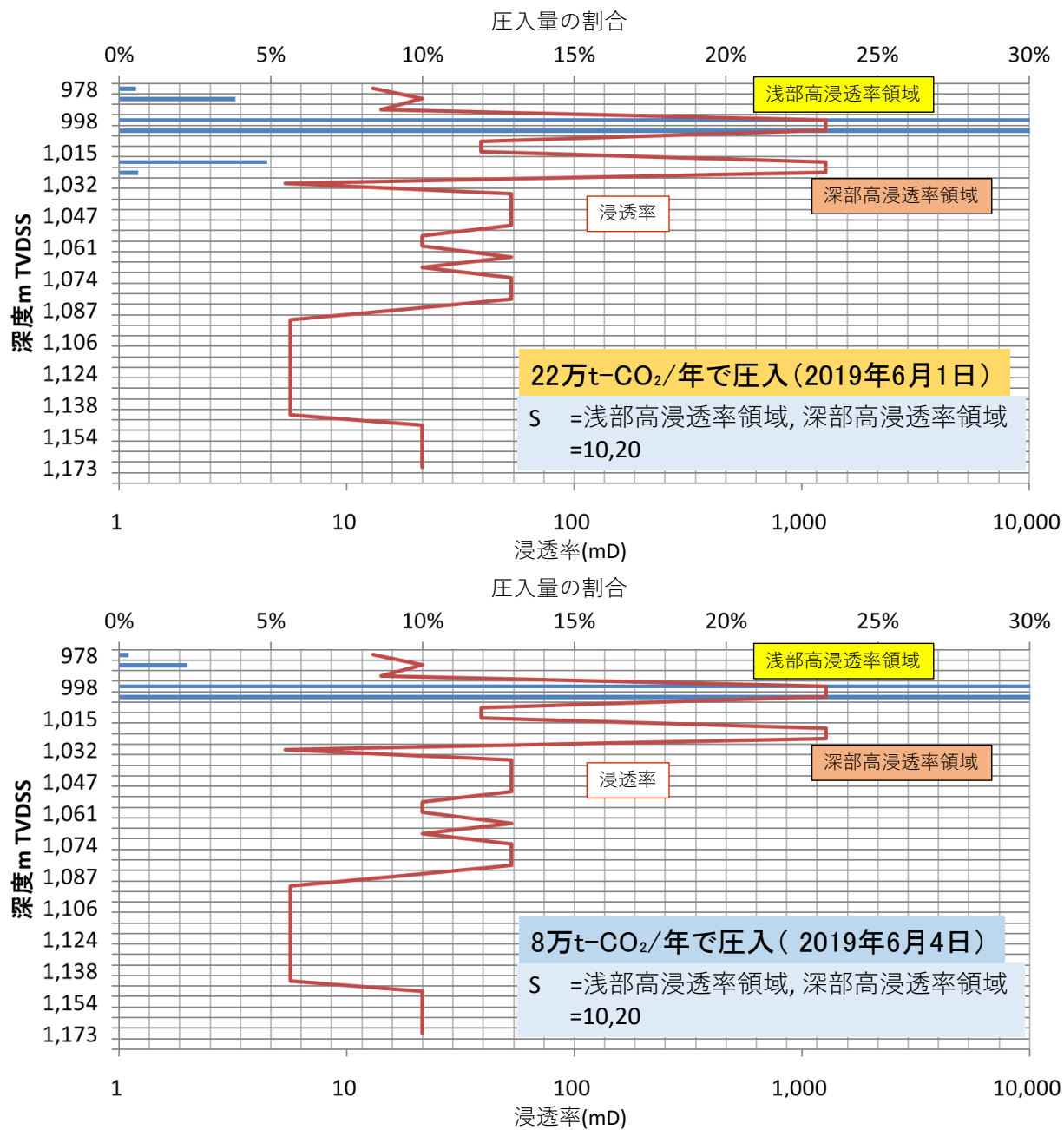
では、圧入井の仕上げ区間において出砂等の影響により、圧入性が阻害される傾向にあるものと仮定し、スキnfアクターを設定することとした。スキnfアクターは、式(4.1-9)の流量と圧力差の関係式における、式(4.1-10)に示す Well Injectivity Index(以下、「WI」と称する。)中の S で示される。出砂などにより坑井近傍で圧入が阻害されるとプラスとなる。

$$Q = \sum WI \lambda (P_{bh} - P_o) \quad \text{式(4.1-9)}$$

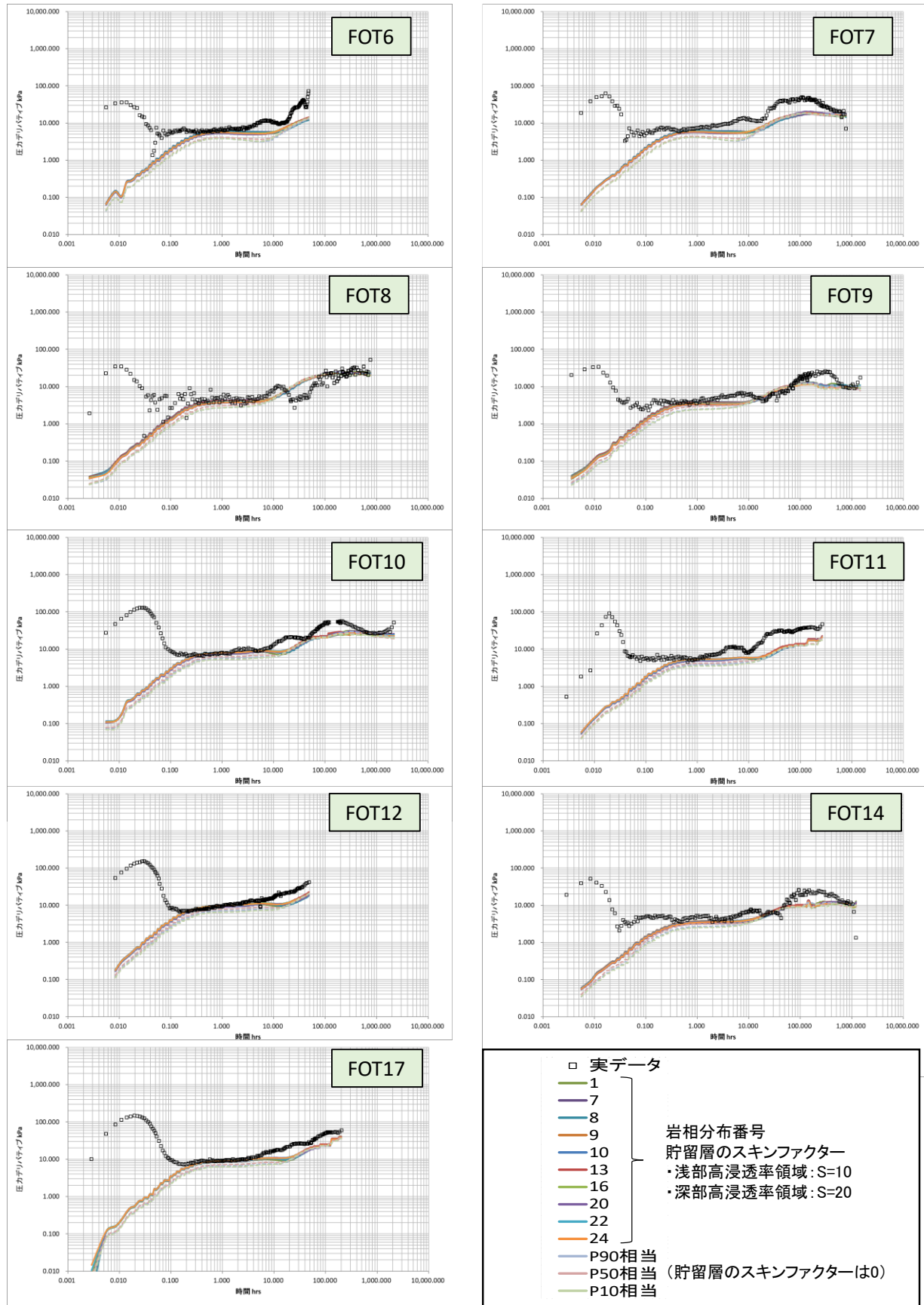
$$WI = \frac{2\pi k h}{\ln(r_e/r_w) + S} \quad \text{式(4.1-10)}$$

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)0.5)，S：スキnfアクター

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4.1-32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nfアクターを与えている。浅部高浸透率領域および深部高浸透率領域のスキnfアクターについて、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4.1-33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 4.1-32 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 4.1-33 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

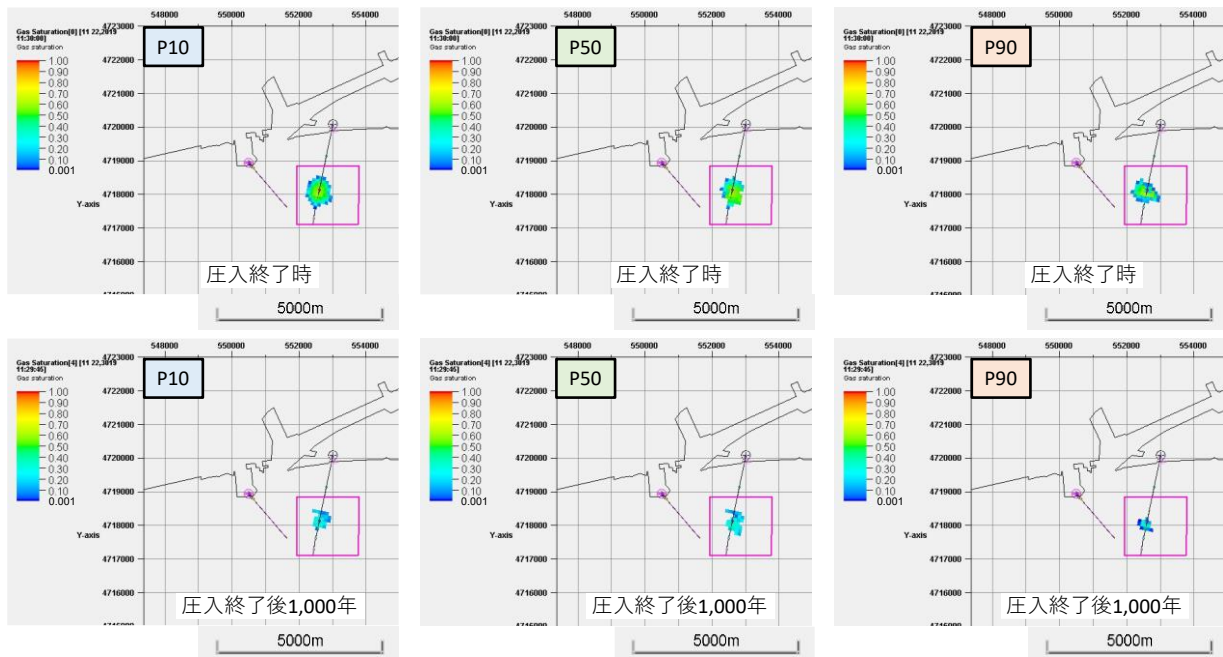
#### f. 圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲を推定した。

第 4.1-34 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 4.1-35 図）。第 4.1-35 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 年度モデル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。

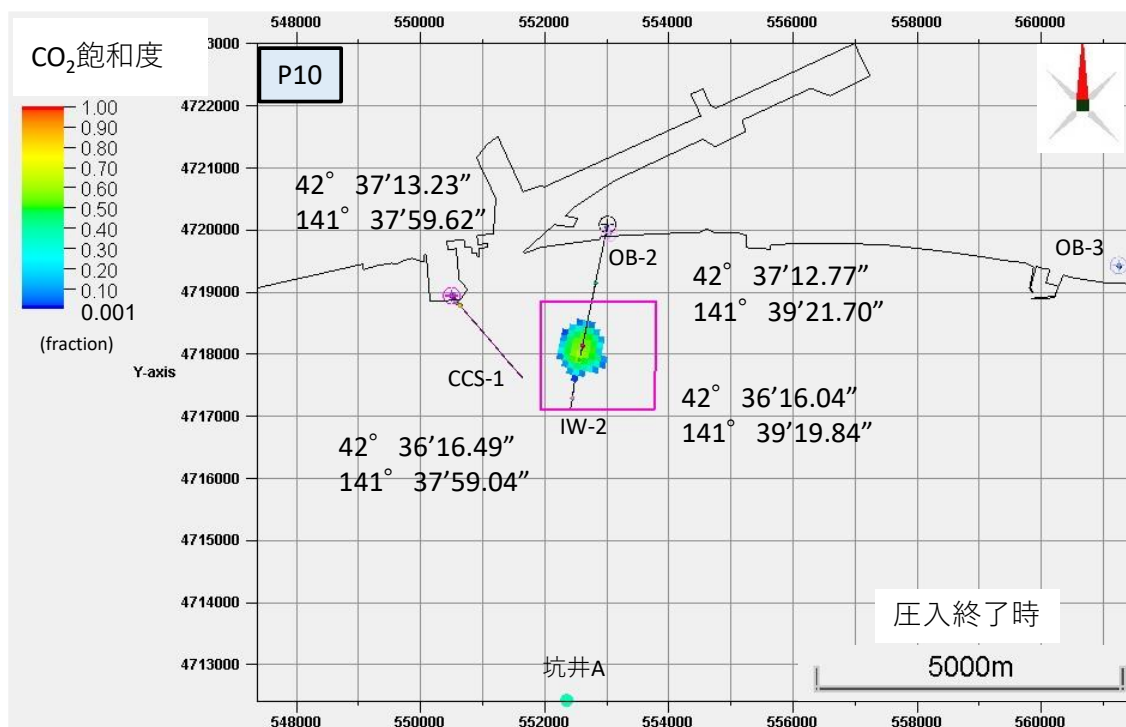
第 4.1-36 図に萌別層での P10, P50, P90 の各モデル（具現像）における圧入終了後 1,000 年時点における最大となる溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲を示す。溶解 CO<sub>2</sub> 量は CO<sub>2</sub> 飽和度分布で示される CO<sub>2</sub> が地層水に溶解することにより生じるため、圧入停止からの経過時間が長い方がより広範囲に分布する傾向があるため、圧入終了後 1,000 年時点を考慮した。その結果、P10 モデルにより予測された圧入終了時の溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲を、萌別層での最大となる溶解 CO<sub>2</sub> 量分布範囲とした（第 4.1-37 図）。第 4.1-37 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 年度モデル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 表に萌別層における CO<sub>2</sub> の分布範囲をまとめた。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。

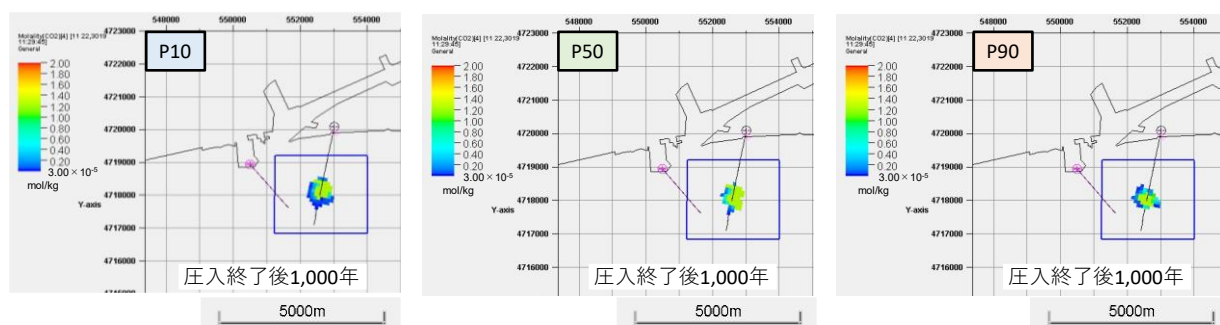
第 4.1-34 図 萌別層砂岩層 (P10, P50, P90 モデル) での CO<sub>2</sub> 分布範囲 (CO<sub>2</sub> 飽和度)



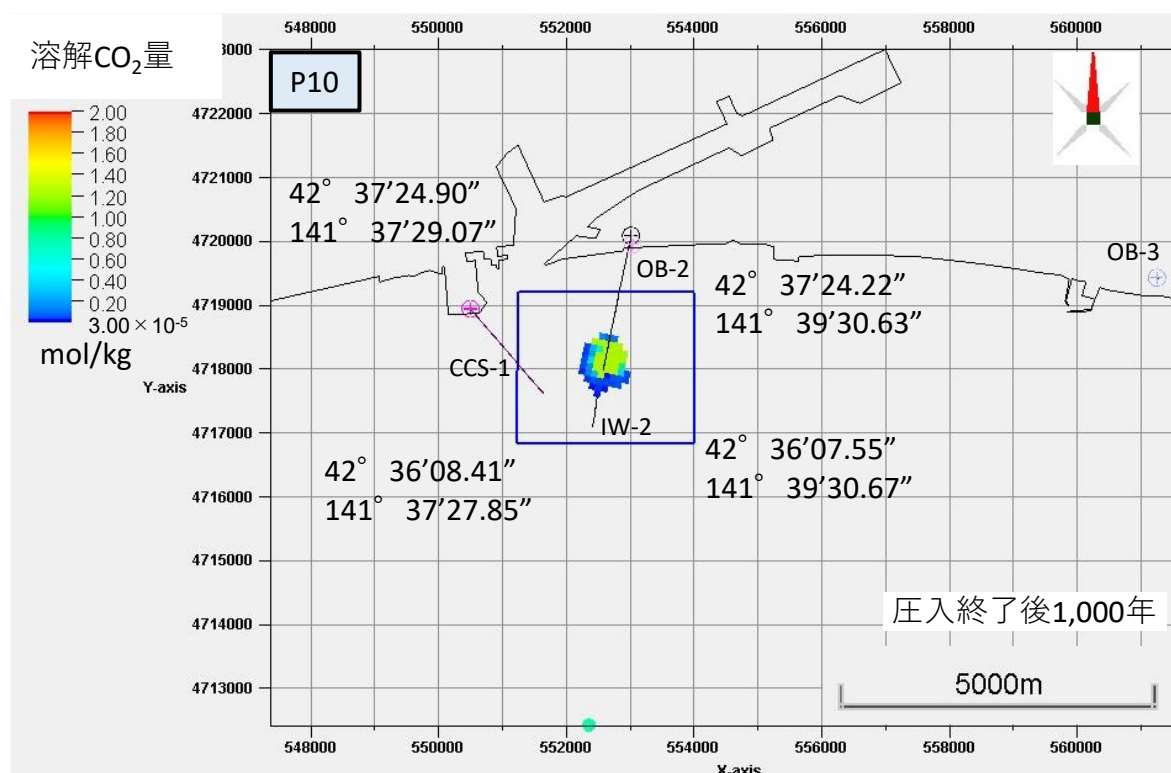
注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より圧入終了後 1,000 年後までに予想される最大の CO<sub>2</sub> 飽和度分布範囲を示す。

第 4.1-35 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 4.1-36 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 4.1-37 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)

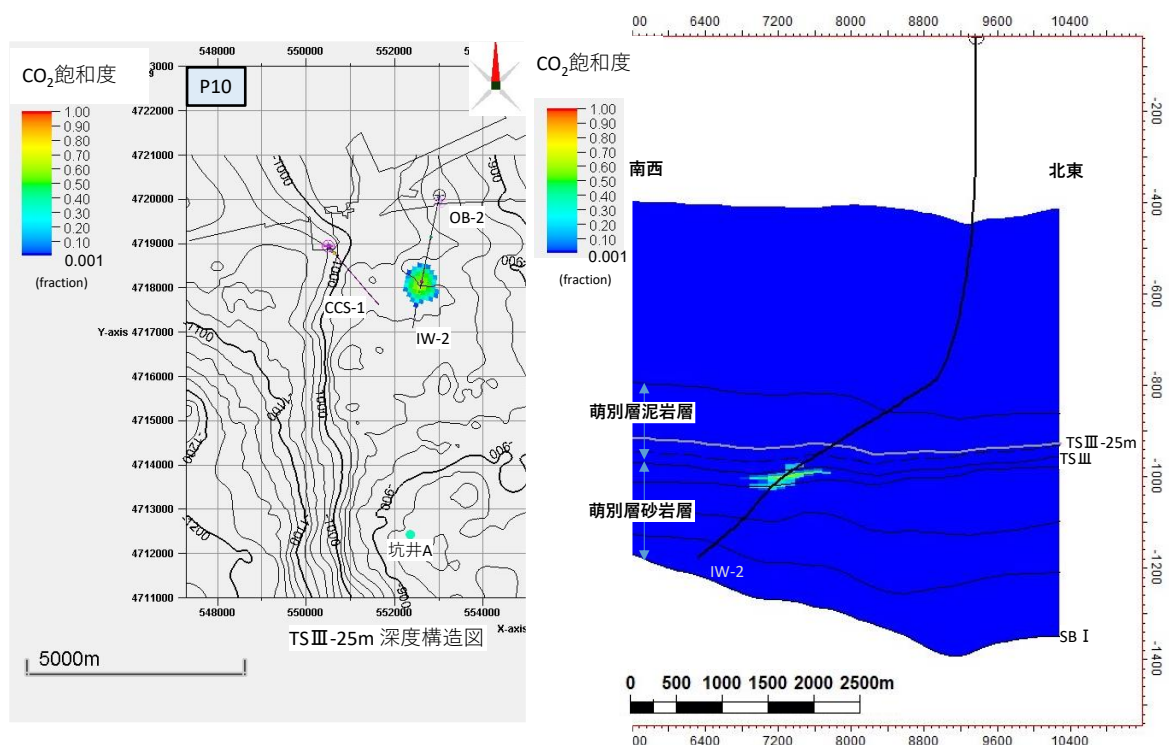
第 4.1-13 表 海底下廃棄した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲 (萌別層砂岩層)

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。

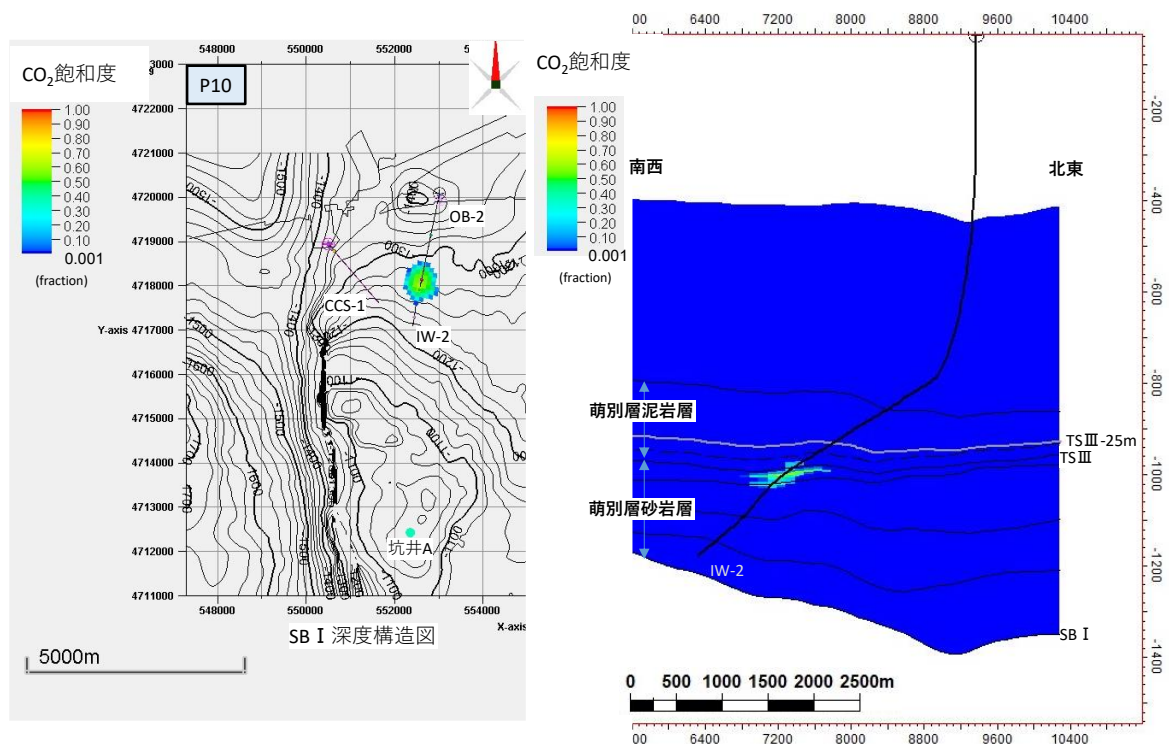
#### g. 圧入した CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲

前項で検討した 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 4.1-38 図～第 4.1-41 図)。推定結果を、第 4.1-14 表に示す。



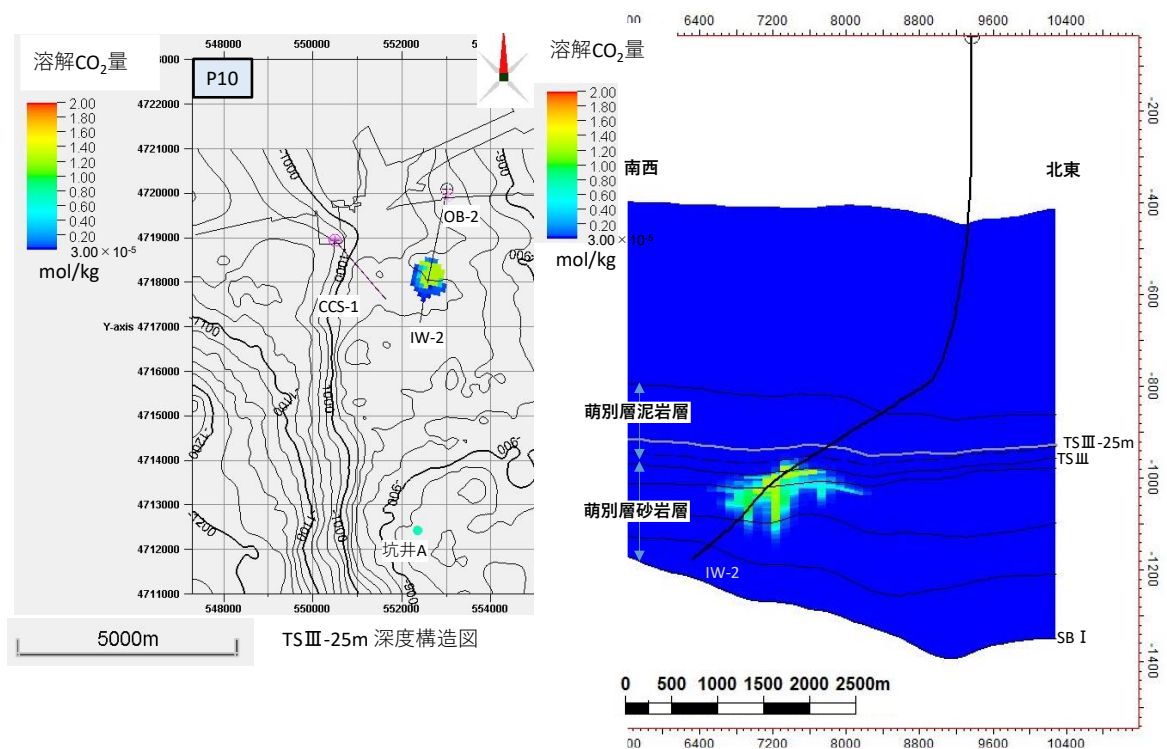
注: 1. 断面図 (右図) より,  $\text{CO}_2$  飽和度の上昇は, TSⅢよりも 25m ほど上位まで認められるため, TSⅢよりも 25m 浅い深度で構造図を作成し,  $\text{CO}_2$  分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時の  $\text{CO}_2$  分布状況を投影した。  
2. 最も浅い深度で, 海面下 950m 程度まで分布するものと考えられる。

第 4.1-38 図 萌別層砂岩層での  $\text{CO}_2$  の分布範囲の上限 ( $\text{CO}_2$  飽和度)



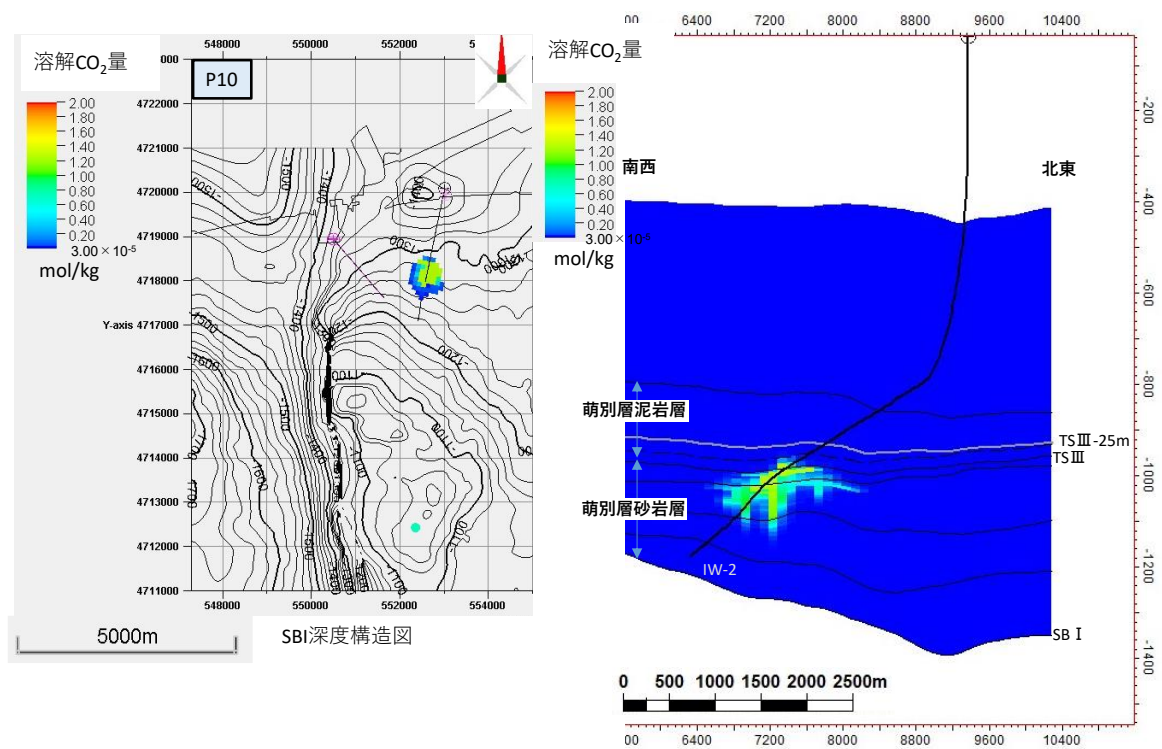
注: 1.  $\text{CO}_2$  分布域 ( $\text{CO}_2$  飽和度) を, 萌別層砂岩層下限 (SB I) 構造図に投影した。  
2.  $\text{CO}_2$  分布 ( $\text{CO}_2$  飽和度) が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時の  $\text{CO}_2$  分布状況 ( $\text{CO}_2$  飽和度) を投影した。  
3. 海面下 1,280m 程度まで分布するものと考えられる。

第 4.1-39 図 萌別層砂岩層での  $\text{CO}_2$  の分布範囲の下限 ( $\text{CO}_2$  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 4.1-40 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> の分布範囲の上限 (溶解 CO<sub>2</sub> 量)



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 4.1-41 図 萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> の分布範囲の下限 (溶解 CO<sub>2</sub> 量)

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。

#### イ) 2021 年度モデルシミュレーション

##### a. 概要

2021 年度地質モデルを元にして、2019 年度モデルシミュレーションと同様に各ファシスに一つの孔隙率、浸透率等のプロパティを与えて貯留層モデルを作成し、流動シミュレーションを行った。シミュレータには GEM を使用した。坑井の最終坑径、チュービング径、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、圧入レートおよび圧入期間については、2019 年度モデルシミュレーションと同じ値を用いた。各具現像に対してシミュレーションを行い CO<sub>2</sub> 圧入可能量を求め、その累積分布関数から P10、P50、P90 に相当する具現像を抽出した。

##### b. パラメータ

各岩相に与えたパラメータを第 4.1-15 表に、貯留層モデルに与えたその他のパラメータを第 4.1-16 表に示す。

第 4. 1-15 表 岩相毎のパラメータ

岩相番号	岩相名	孔隙率	水平浸透率 (mD)	kv/kh	ネットグロス比
1	pbl-sltst	0.35	2	0.72	0.76
2	pbl-sltst3	0.35	2	0.72	0.76
3	pbl-sltst2	0.35	2	0.72	0.76
4	pbl-sltst1	0.35	2	0.72	0.76
5	sltst	0.35	9	0.72	0.76
6	sdv-sltst	0.28	13	0.72	0.77
7	slty-alt	0.29	11	0.59	0.69
8	sdv-alt	0.28	11	0.62	0.80
9	sst3	0.27	2	0.77	0.56
10	sst2	0.29	43	0.67	0.85
11	sst	0.26	1,308	0.68	0.82
12	cgl2	0.24	3	0.75	0.78
13	cgl1	0.22	19	0.75	0.83
14	cgl3	0.28	8	0.52	0.75
15	cgl	0.23	4	0.82	0.79
16	cgl1-2	0.23	4	0.39	0.76

第 4.1-16 表 シミュレーションパラメーター一覧（2021 年度貯留層モデル）

モデル	2021 年度貯留層モデル	
サイズ	15km×10km×1,700m	
グリッド	163×126×173	
アクティブ・ブロック数	714,082	
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（温度圧力センサー深度）	
孔隙容積：m <sup>3</sup>	2.4×10 <sup>11</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）	3,150	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 K <sub>rg</sub>	0.60（ファシス 10, 11） 0.143（その他ファシス）	Corey（1954） <sup>[1]</sup>
液相 相対浸透率 K <sub>rw</sub>	1.00	van Genuchten（1980） <sup>[2]</sup>
臨界ガス飽和率 S <sub>gc</sub>	0.05	0.05
不動水飽和率 S <sub>wir</sub>	孔隙率と浸透率より算出	0.638 Bennion（2007） <sup>[3]</sup>
最大残留ガス飽和率 S <sub>grmax</sub>	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>
P <sub>c</sub> ：kPa	4.04	370

<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

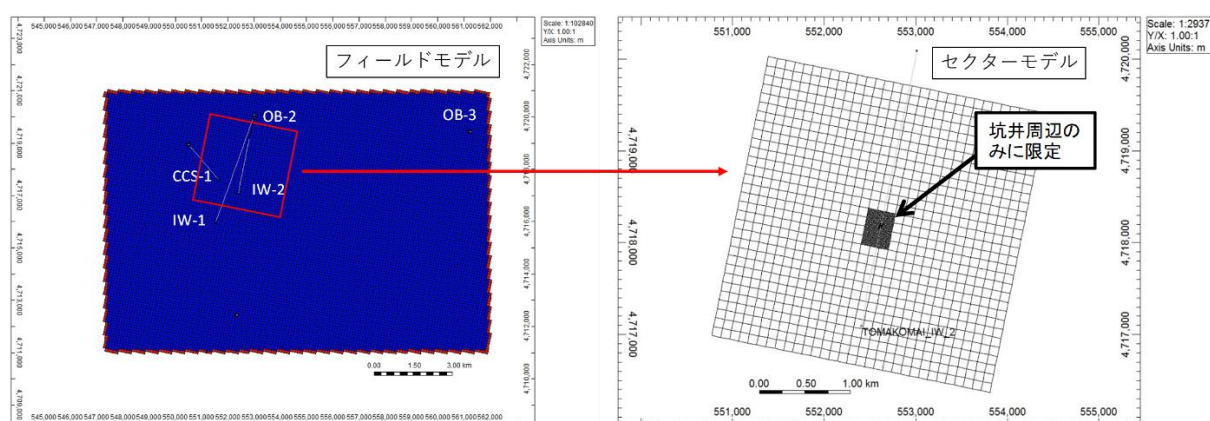
<sup>[4]</sup> Holtz, M.H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx : A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction. paper SPE 75502, p.7



### c. ヒストリーマッチ

2019 年度モデルシミュレーションの圧入実績についての考察をもとに、2021 年度貯留層モデルのヒストリーマッチングでは、萌別層の浅部・深部高浸透率領域の絶対浸透率とスキンファクターをマッチングパラメータとし、2019 年度モデルシミュレーションと同様に坑底圧力の目的関数が 25kPa 以下となる具現像を 30 個抽出した。

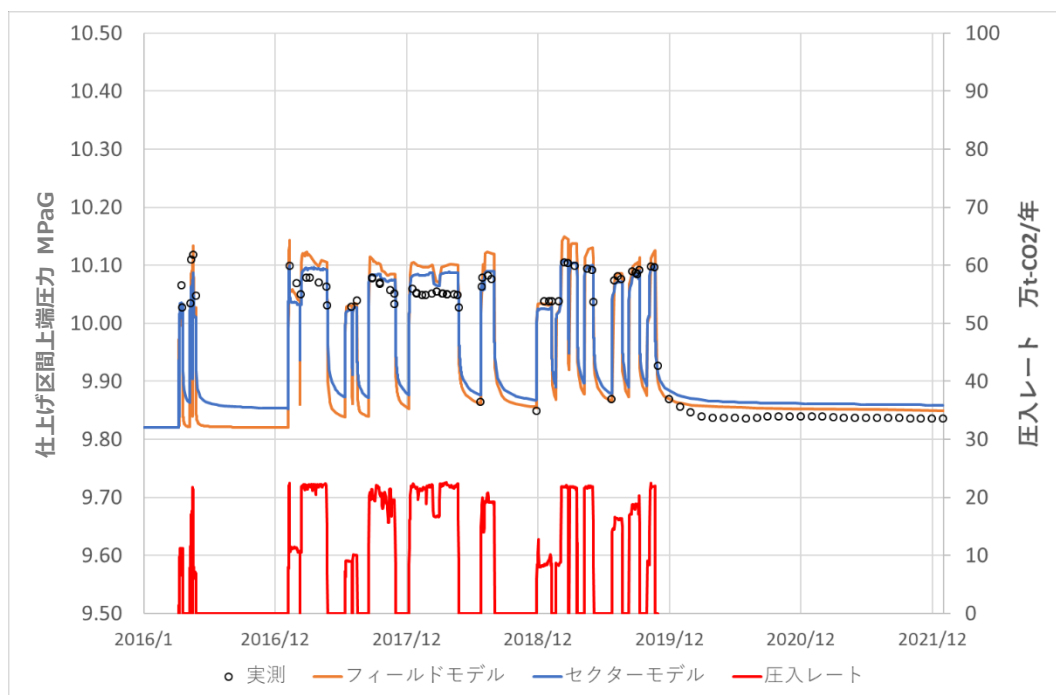
グリッドモデルについては、2019 年度モデルシミュレーションと同様にフィールドモデルからセクターモデルを切り出し、坑井が通過するグリッドの周辺を 1 m×1 m 程度の詳細なグリッドに細分化したモデルを用いた（第 4.1-42 図）。セクターモデルの有効孔隙がフィールドモデルと一致するように、セクターモデルの境界グリッドの有効孔隙を 30～150 倍して調整した。



第 4.1-42 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

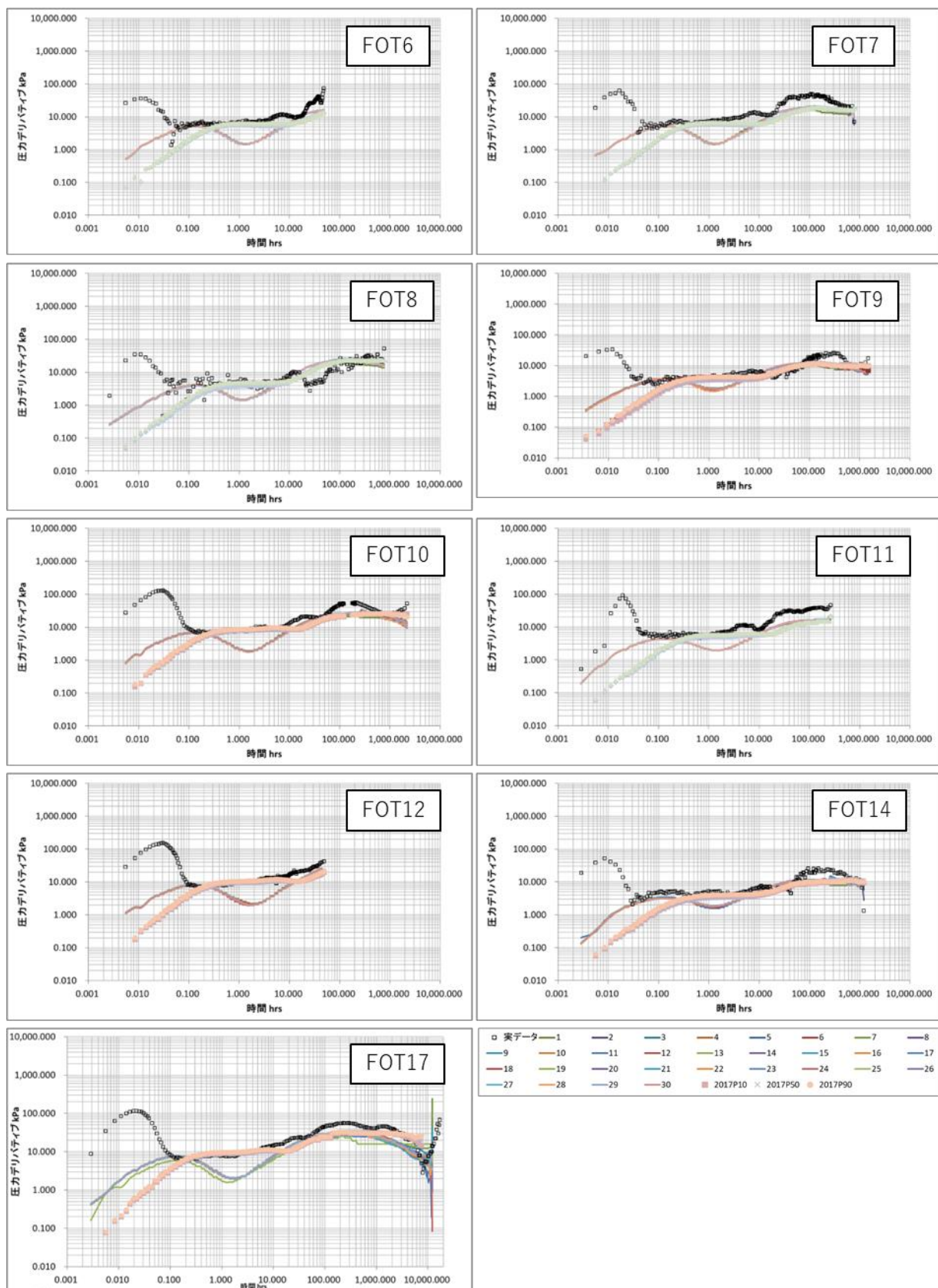
P90, P50, P10 に相当する具現像による仕上げ区間上端における圧力の予実績を第 4.1-43 図に示す。2019 年度モデルシミュレーションでは、FOT9（2018/7/25）以降において仕上げ区間上端深度の圧力の実績値がシミュレーションによる予測値よりも高くなる傾向が認められたが、2021 年度モデルシミュレーションではパラメータを調整することでマッチングしている。





第 4.1-43 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

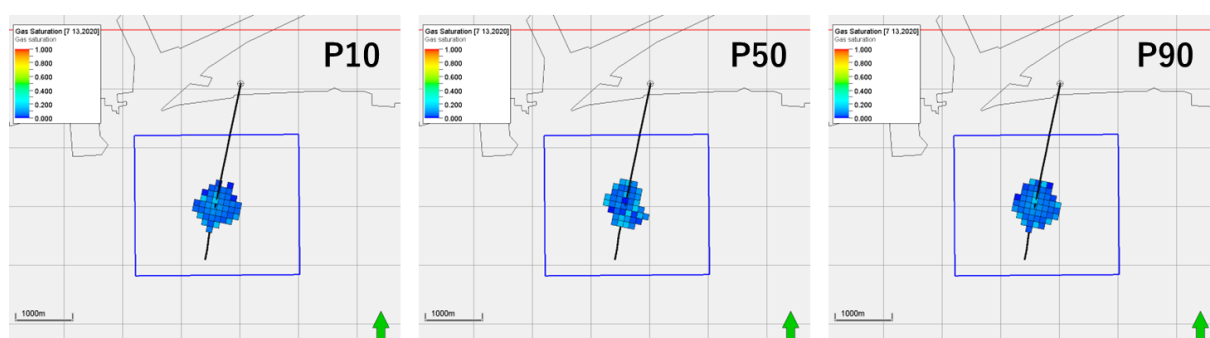
第 4.1-44 図に、FOT のデリバティブカーブの実績値と 30 個の具現像を用いたシミュレーションの予測値を示す。抽出された具現像は FOT のデリバティブカーブを概ね再現できており、この設定を用いて長期の CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを実施した。



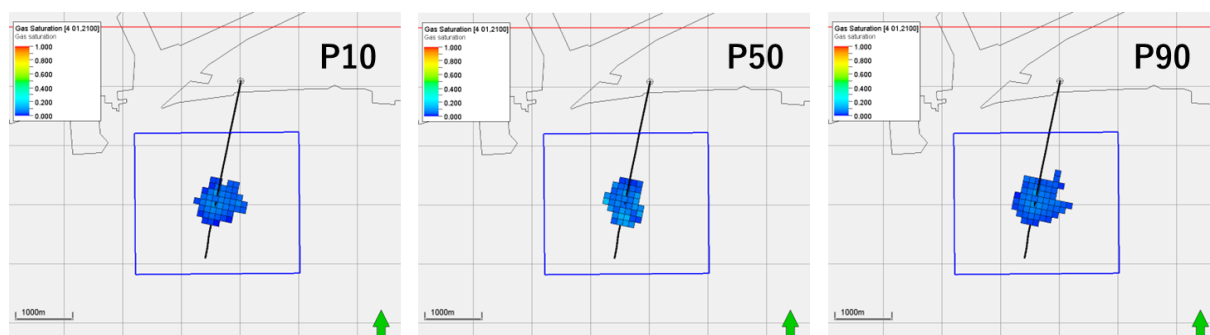
第 4.1-44 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

#### d. 圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲

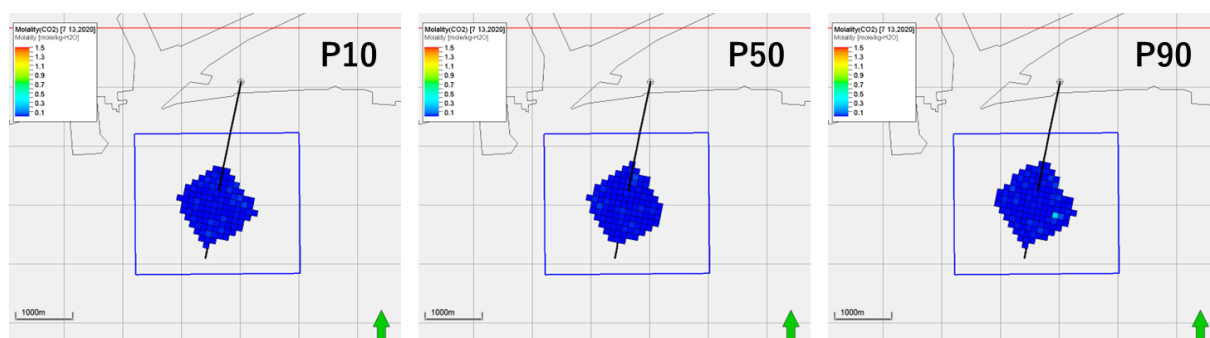
圧入終了時および 2100 年（圧入終了後 80 年）の CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した CO<sub>2</sub> の平面的な分布範囲を推定した。第 4.1-45 図および第 4.1-46 図それぞれに、P10、P50、P90 モデルにおける圧入終了時および 2100 年における CO<sub>2</sub> 飽和度を示す。また第 4.1-47 図および第 4.1-48 図それぞれに、P10、P50、P90 モデルにおける圧入終了時および 2100 年における溶解 CO<sub>2</sub> 量を示す。図に示す青線は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> 分布範囲である（座標については第 4.1-13 表を参照）。いずれのモデルにおいても、CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> 分布範囲に含まれているため、今回申請する CO<sub>2</sub> 分布範囲は前回の申請と同一とする。



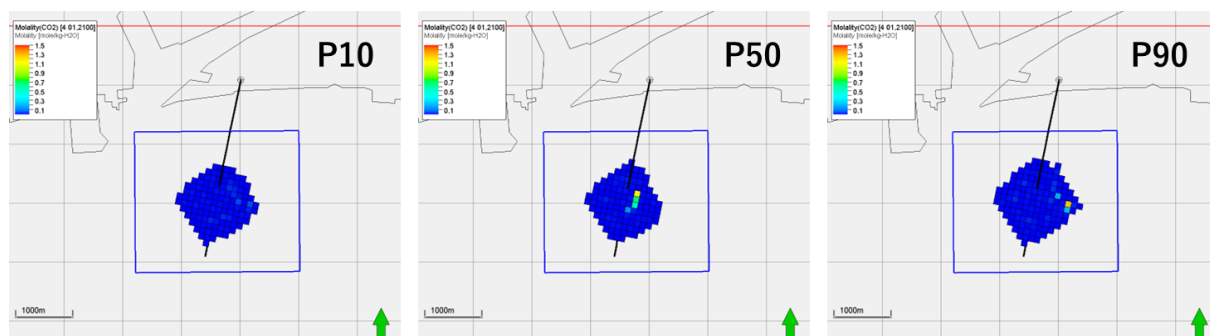
第 4.1-45 図 圧入終了時における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（CO<sub>2</sub> 飽和度分布）



第 4.1-46 図 2100 年における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（CO<sub>2</sub> 飽和度分布）



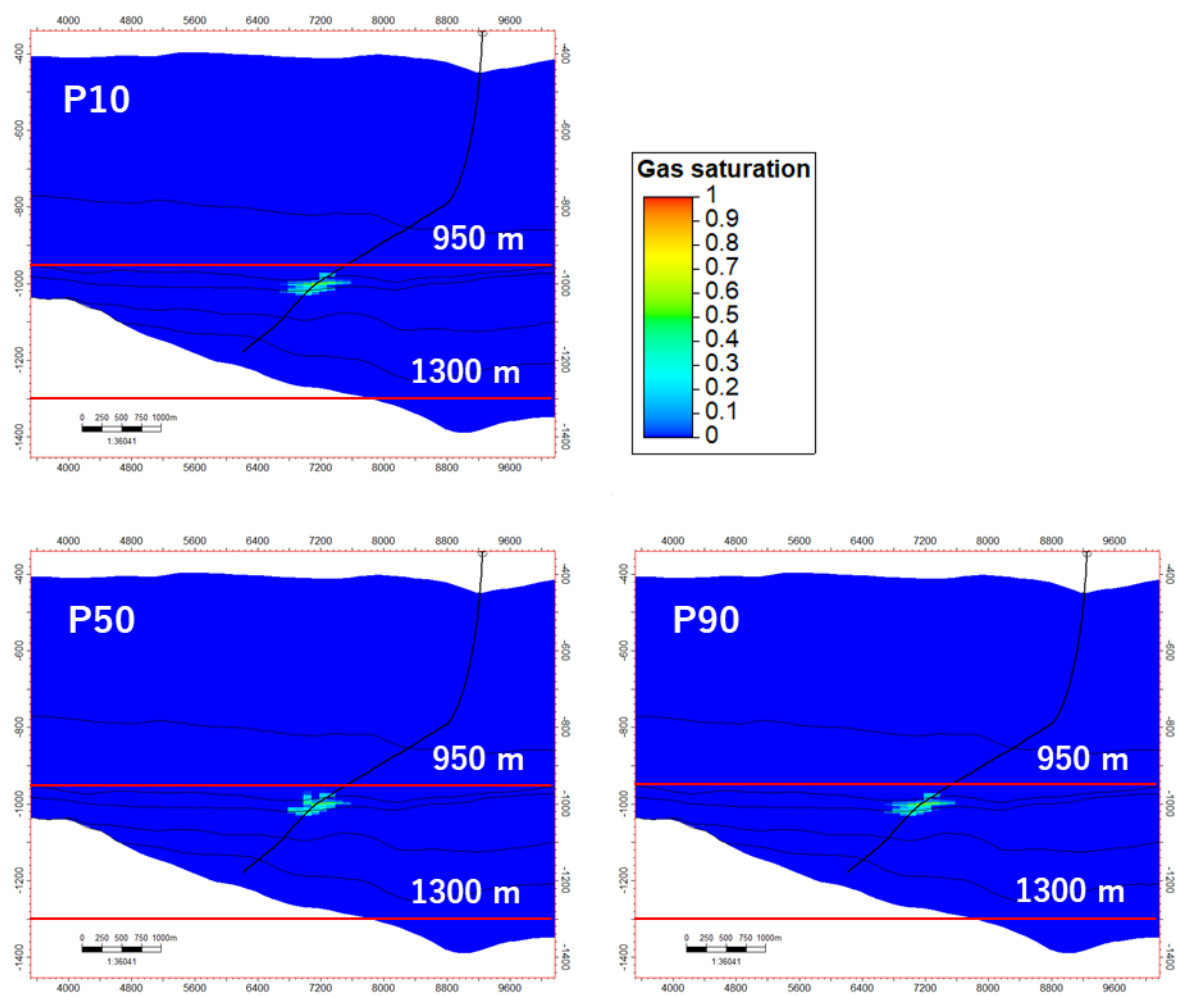
第 4.1-47 図 圧入終了時における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（溶存 CO<sub>2</sub> 量）



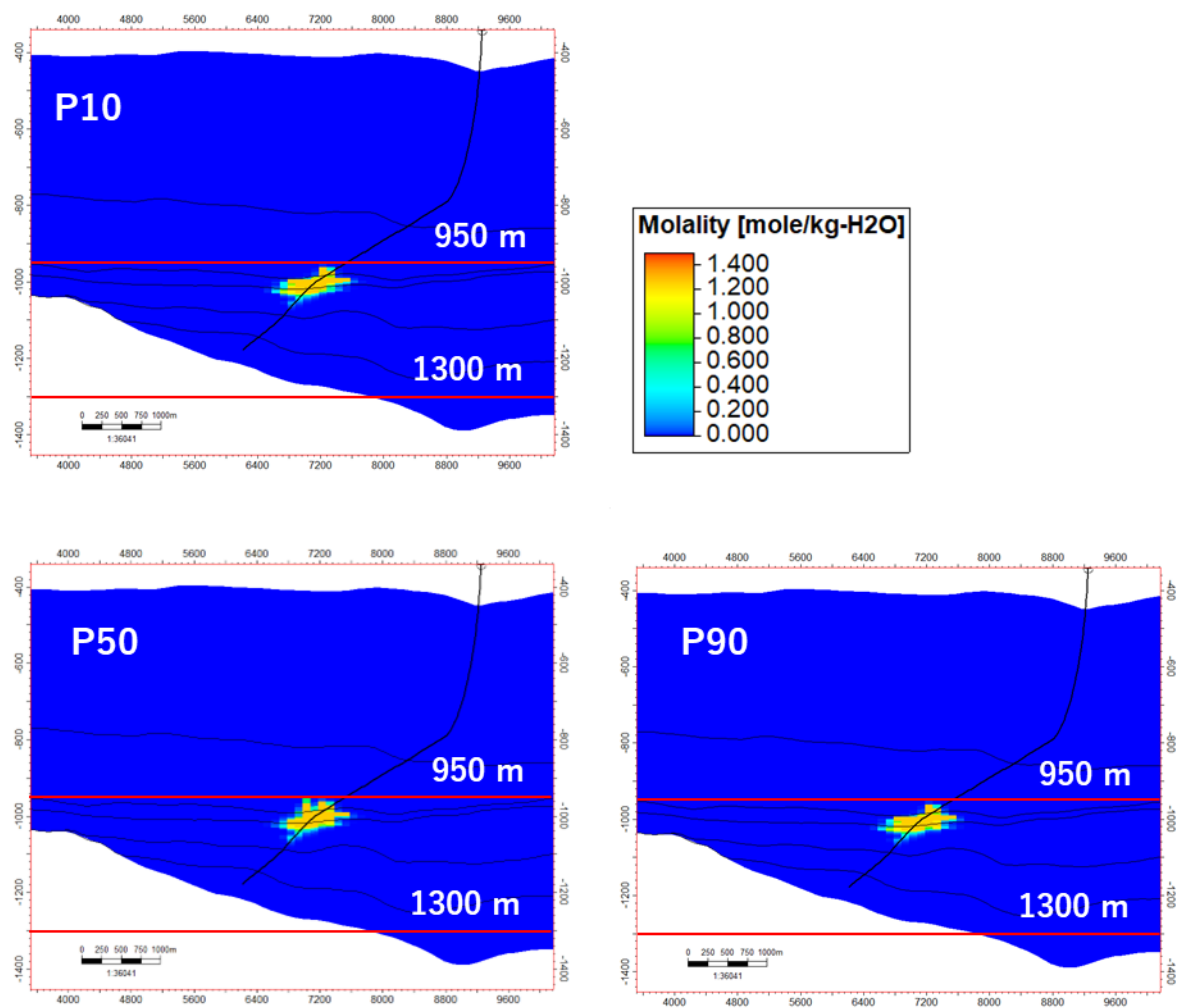
第 4.1-48 図 2100 年における萌別層砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（溶存 CO<sub>2</sub> 量）

#### e. 圧入した CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲

前項で検討した 2100 年における CO<sub>2</sub> の分布範囲を坑跡断面に対して投影し、CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲を推定した（第 4.1-49～第 4.1-50 図）。図に示す赤線は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> の垂直分布範囲の上下限深度である（第 4.1-14 表を参照）。いずれのモデルにおいても、CO<sub>2</sub> 飽和度および溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布範囲は、2020 年度に申請した CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲に含まれているため、今回申請する CO<sub>2</sub> の垂直的な分布範囲は前回の申請と同一とする。



第 4.1-49 図 2100 年における萌別砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲 (CO<sub>2</sub> 飽和度)



第 4. 1-50 図 2100 年における萌別砂岩層での CO<sub>2</sub> 分布範囲（溶解 CO<sub>2</sub> 量）



## 4.2 特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能性に係る事項

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。

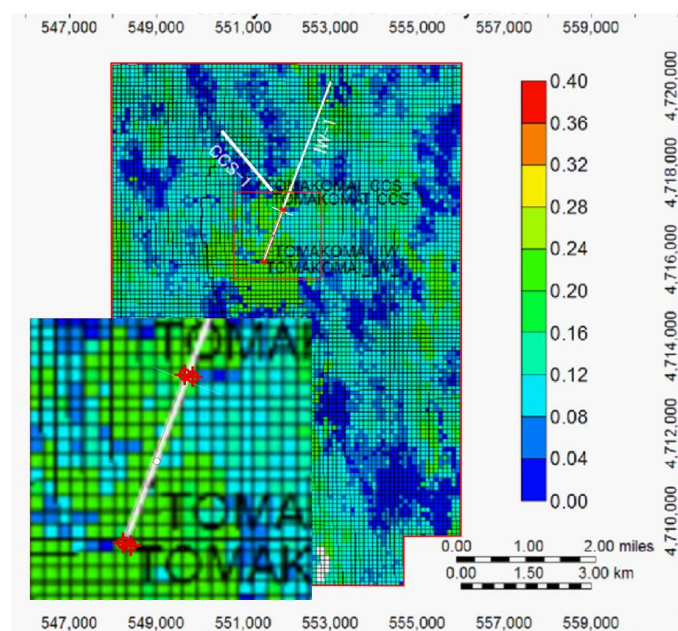
各用語は、本申請書において以下の通り定義する。

- ・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。

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

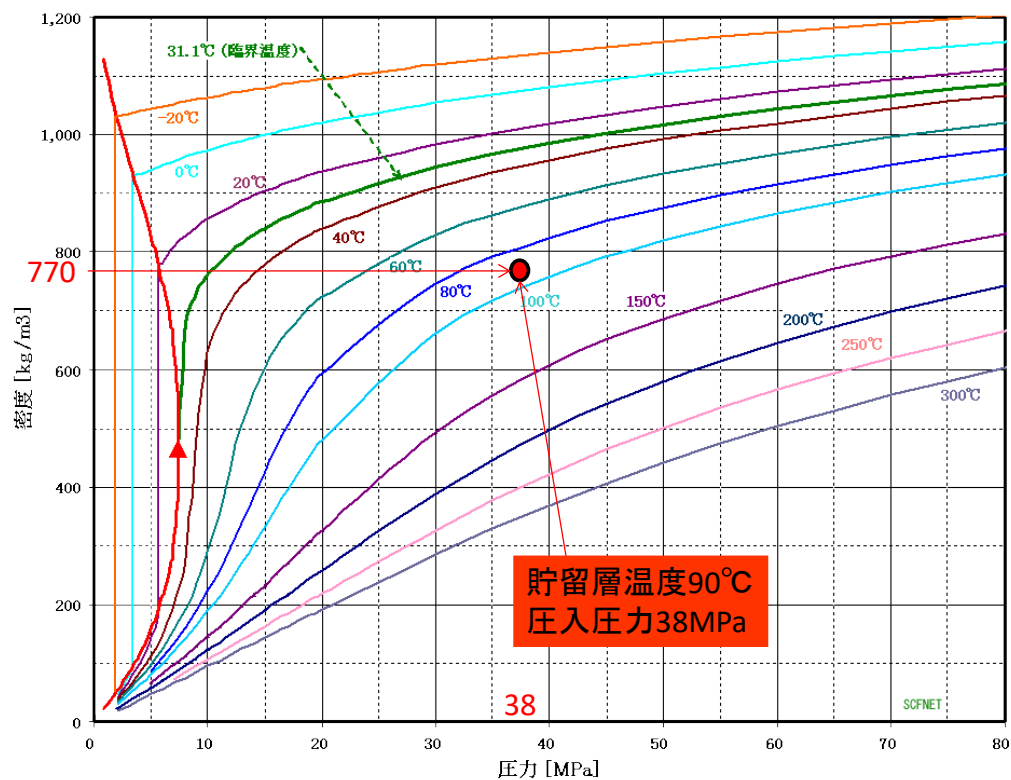
$$Swir (\text{残留水飽和率}) = 0.558$$

$$Sgr (\text{残留ガス飽和率}) = 0.04$$

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

<sup>[1]</sup> 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), 2026/1/20 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)。

$$\text{地中貯留量(kg)} = S_f \times A \times h \times \phi \times S_g / BgCO_2 \times \rho$$

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%)

BgCO<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、BgCO<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
BgCO <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>

<sup>[1]</sup> (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

7) 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。

1) 期間内推定圧入可能量

本申請前の 10 年間に於いて圧入した CO<sub>2</sub> 量の実績から 98 トンと推定される。

7) 期間内計画圧入量

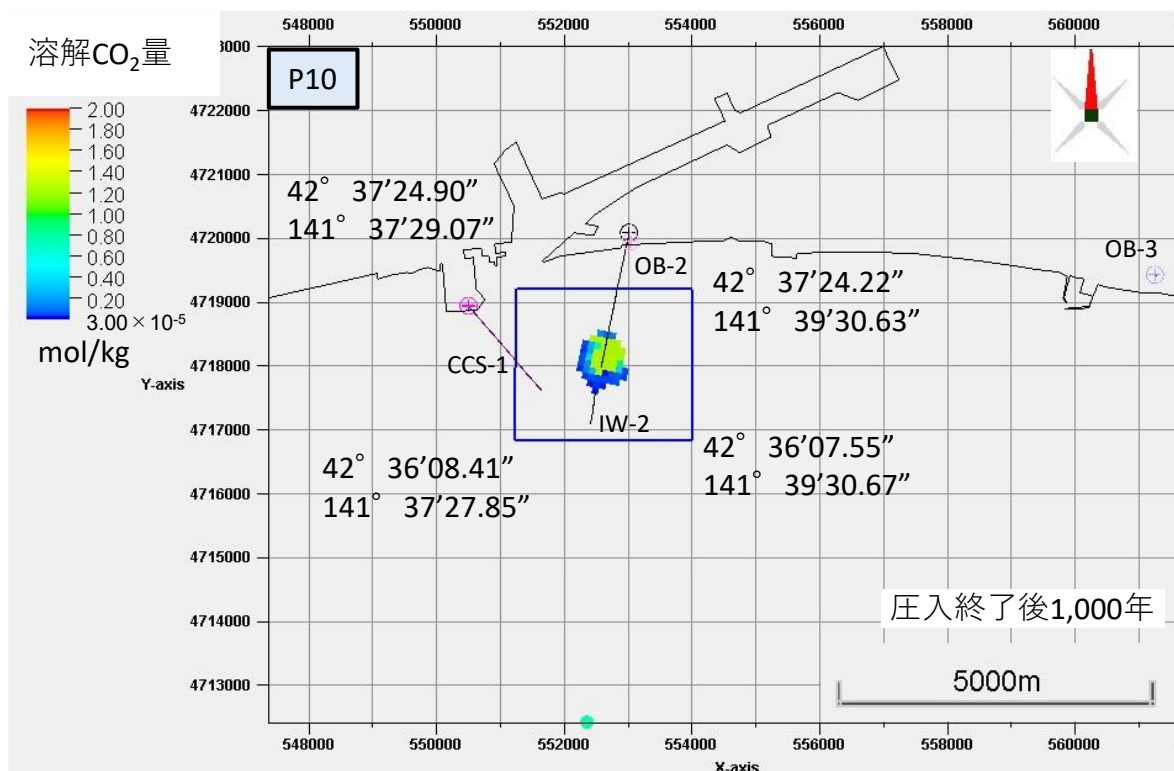
本申請による 5 年間に於いて、圧入は実施しない。

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  $258 \times 10^6 \text{ m}^3$  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) <u>258</u> $\times 10^6 \text{ m}^3$
萌別層泥岩層	萌別層泥岩層基底 MO_SH_Base_TS_III	III	① $40 \times 10^6 \text{ m}^3$
萌別層砂岩層上部	シーケンス境界SB-III		② $55 \times 10^6 \text{ m}^3$
萌別層砂岩層下部	萌別層砂岩層基底 MO_Base-MFS_II	II	③ $47 \times 10^6 \text{ m}^3$
萌別層(+荷葉層)砂岩泥岩互層	シーケンス境界SB-II		④ $116 \times 10^6 \text{ m}^3$
萌別層(+荷葉層)砂岩層	シーケンス境界SB-I	I	

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, Holts (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。

$$S_{grmax} = -0.9696 \times \phi + 0.5473$$

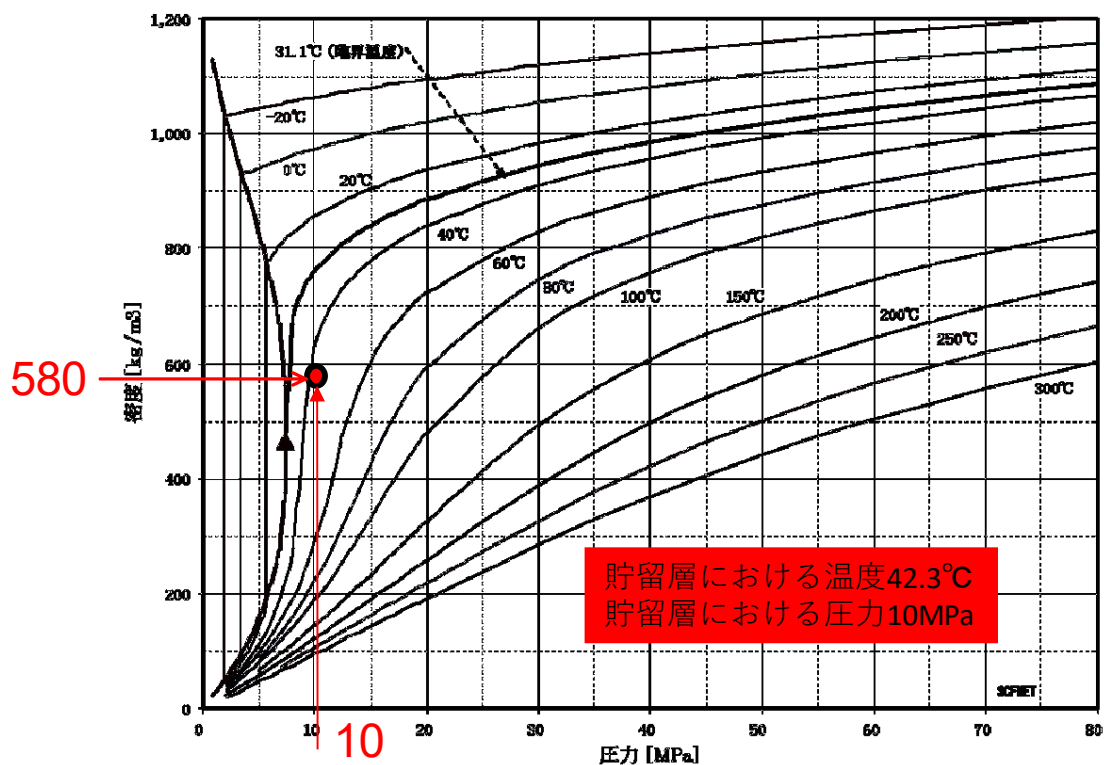
$$\phi \text{ (平均孔隙率)} = 0.299$$

### 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.html](http://www5c.biglobe.ne.jp/~cassia/SCF_HP/PropertyW.html)

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>
収容量	3,846 万 ton

<sup>[1]</sup> 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), 2026/1/20 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	$258 \times 10^6 \text{ m}^3$
=面積×有効層厚×孔隙率	
Sg：超臨界 CO <sub>2</sub> 飽和度（50%）	0.5
BgCO <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>
$\rho$ ：CO <sub>2</sub> 密度（1.976kg/m <sup>3</sup> 標準状態）	0.001976 ton/m <sup>3</sup>
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 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> を圧入可能で有ると判断する。

ロ) 期間内計画圧入量

本申請による 5 年間に於いて、圧入は実施しない。

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。