

添付書類-1

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に関する実施計画に係る事項

目 次

1. 海底下廃棄実施期間	- 1 -
2. 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性	- 2 -
2.1 ガス等の発生源及び当該ガス等からの特定二酸化炭素ガスの回収の方法.....	- 2 -
(1) ガス等の発生源	- 2 -
(2) 当該ガスからの特定二酸化炭素ガスの回収方法	- 2 -
2.2 当該特定二酸化炭素ガスに含有される物質ごとの当該特定二酸化炭素ガス中に占める割合又は濃度	- 7 -
3. 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量及び特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域において当該海底下廃棄をする以前に海底下貯留をされていると推定される特定二酸化炭素ガスの数量	- 8 -
3.1 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量.....	- 8 -
3.2 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をしようとする海域において当該海底下廃棄をする以前に海底下貯留をされていると推定される特定二酸化炭素ガスの数量.....	- 8 -
4. 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の位置及び範囲	- 9 -
4.1 海域の緯度及び経度	- 9 -
4.2 海域の水深及び海底下廃棄をする深度.....	- 14 -
4.3 陸域の主な施設等との位置関係.....	- 14 -
4.4 海底下廃棄をする海域及びその周辺に設置された特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の用に供する設備の場所	- 16 -
4.5 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲.....	- 16 -
(1) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲	- 17 -
① 検討に使用した地質モデル	- 17 -
ア) 岩相分布・性状分布の推定	- 17 -
イ) 構造モデルの作成	- 18 -
a. 圧入井掘削結果	- 18 -
b. 圧入井掘削結果を反映した構造モデル	- 20 -
ウ) 属性モデルの作成	- 24 -
a. 圧入実績	- 25 -
b. CO ₂ 圧入時の挙動とパラメータの調整	- 26 -
② CO ₂ 挙動予測シミュレーション	- 28 -
ア) 圧入した CO ₂ の平面的な分布範囲.....	- 28 -
イ) 圧入した CO ₂ の垂直的な分布範囲.....	- 30 -
ウ) CO ₂ の貯留形態ごとの割合	- 30 -
(2) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲	- 31 -
① 検討に使用したモデル	- 31 -
ア) 2019 年度地質モデルの作成.....	- 31 -
a. 岩相分布・性状分布の推定	- 31 -

b.	構造モデルの作成	- 32 -
c.	属性モデルの作成	- 34 -
i)	2021 年度地質モデルの作成.....	- 41 -
a.	構造モデルの作成	- 41 -
b.	属性モデルの作成	- 43 -
②	萌別層砂岩層における CO ₂ 挙動予測シミュレーション	- 44 -
ア)	2019 年度モデルシミュレーション.....	- 44 -
a.	概要	- 44 -
b.	パラメータ	- 44 -
c.	圧入実績	- 45 -
d.	圧入実績から推定される圧入区間	- 46 -
e.	圧入実績を考慮したパラメータの調整	- 49 -
f.	圧入した CO ₂ の平面的な分布範囲.....	- 67 -
g.	圧入した CO ₂ の垂直的な分布範囲.....	- 69 -
h.	CO ₂ の貯留形態ごとの割合	- 72 -
イ)	2021 年度モデルシミュレーション.....	- 74 -
a.	概要	- 74 -
b.	パラメータ	- 74 -
c.	ヒストリーマッチ	- 76 -
d.	圧入した CO ₂ の平面的な分布範囲.....	- 79 -
e.	圧入した CO ₂ の垂直的な分布範囲.....	- 80 -
(3)	繰り返し 3D 探査の差分解析結果と CO ₂ の位置	- 82 -
①	2017 年度繰り返し 3D 探査	- 82 -
②	2018 年度繰り返し 3D 探査	- 87 -
③	2019 年度繰り返し 3D 探査	- 91 -
④	2020 年度繰り返し 3D 探査	- 94 -
⑤	2022 年度繰り返し 3D 探査	- 97 -
⑥	2024 年度繰り返し 3D 探査	- 101 -
⑦	繰り返し 3D 探査の解析結果と CO ₂ 長期挙動予測シミュレーション結果比較.....	- 105 -
(4)	海域での位置	- 106 -
4.6	海底下廃棄をする海域及びその周辺の海域における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在	- 107 -
5.	特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の方法	- 108 -
5.1	ガスの発生源から海底下廃棄をする位置までにおいて特定二酸化炭素ガスの回収及び輸送並びに圧入等に用いる設備及び機材等.....	- 108 -
(1)	概要	- 108 -
(2)	PSA オフガス圧縮設備.....	- 110 -
(3)	CO ₂ 分離・回収設備	- 111 -
(4)	CO ₂ 圧縮設備	- 113 -

5.2 特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の温度等の圧入条件に関する詳細	- 115 -
(1) 基本圧入計画	- 115 -
(2) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の温度等の圧入条件	- 116 -
① 圧入圧力	- 116 -
② 圧入温度	- 118 -
(3) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び圧入時の温度等の圧入条件	- 119 -
① 圧入圧力	- 119 -
② 圧入温度	- 121 -
(4) 特定二酸化炭素ガスの坑井内での相変化による影響について	- 123 -
5.3 特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通し	- 123 -
(1) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通し	- 123 -
(2) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通し	- 125 -
5.4 特定二酸化炭素ガスの圧入井の維持管理の方法の概要	- 132 -
5.5 特定二酸化炭素ガスの圧入井の封鎖方法	- 136 -
5.6 他の法令の遵守状況	- 137 -
6. 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合に当該障害の拡大又は発生を防止するために講ずる措置	- 140 -
6.1 海洋環境の保全上の障害が生じる恐れについて	- 140 -
6.2 海洋環境の保全上の障害が生じる恐れの見守り体制について	- 143 -
6.3 関連法規に基づく保安計画等について	- 145 -
6.4 異常発生時の対応について	- 146 -

1. 海底下廃棄実施期間

2026 年 4 月 1 日から 2031 年 3 月 31 日までの 5 年間^[1]。

なお，期間中に特定二酸化炭素ガスの圧入は実施しない。

^[1]2021 年 4 月 1 日から 2026 年 3 月 31 日までの 5 年間の許可申請の継続。

2. 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性

2.1 ガス等の発生源及び当該ガス等からの特定二酸化炭素ガスの回収の方法

(1) ガス等の発生源

本計画における CO₂ 発生源は、出光興産株式会社北海道製油所の水素製造装置である。

製油所では、ナフサ等の脱硫・改質により製造したガスから、圧力スイング吸着（以下、「PSA」と称する：Pressure Swing Adsorption）装置による分離・精製によって高純度水素を製造し、石油製品の脱硫工程で利用している。高純度水素を分離した残りのガス（以下、「PSA オフガス」と称する。）は、CO₂ 濃度が約 50% で他に可燃性ガス（CH₄, CO, H₂）を含有している（第 2.1-1 表）。

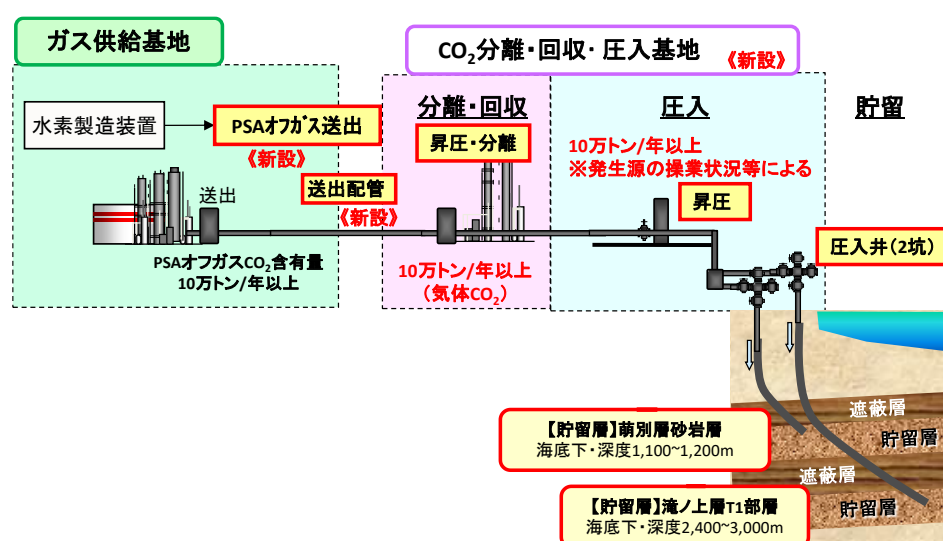
本計画では、この PSA オフガスから分離・回収した CO₂ ガスを特定二酸化炭素ガスとする予定である。

第 2.1-1 表 PSA オフガスの概略組成

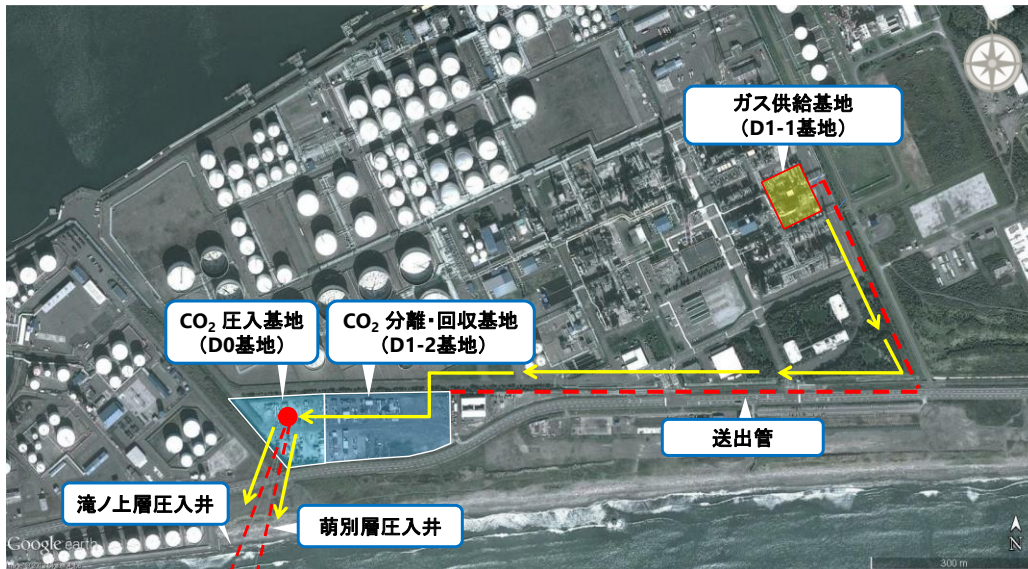
	ガス組成（体積百分率：％）
CO ₂	51.6
CO	2.3
H ₂	38.8
CH ₄	6.6
H ₂ O	0.7
合計	100.0

(2) 当該ガスからの特定二酸化炭素ガスの回収方法

CO₂ 発生源である製油所内にガス供給基地（以下、「D1-1 基地」と称する。）を建設した。D1-1 基地は、製油所の既設水素製造装置から CO₂ 含有量 10 万トン/年以上（設備仕様は最大 20 万トン/年に対応）の PSA オフガスを分流し、製油所に隣接する CO₂ 分離・回収・圧入基地（以下、「D1-2・D0 基地」と称する。）に送出する（第 2.1-1 図および第 2.1-2 図）。



第 2.1-1 図 本計画の設備概念

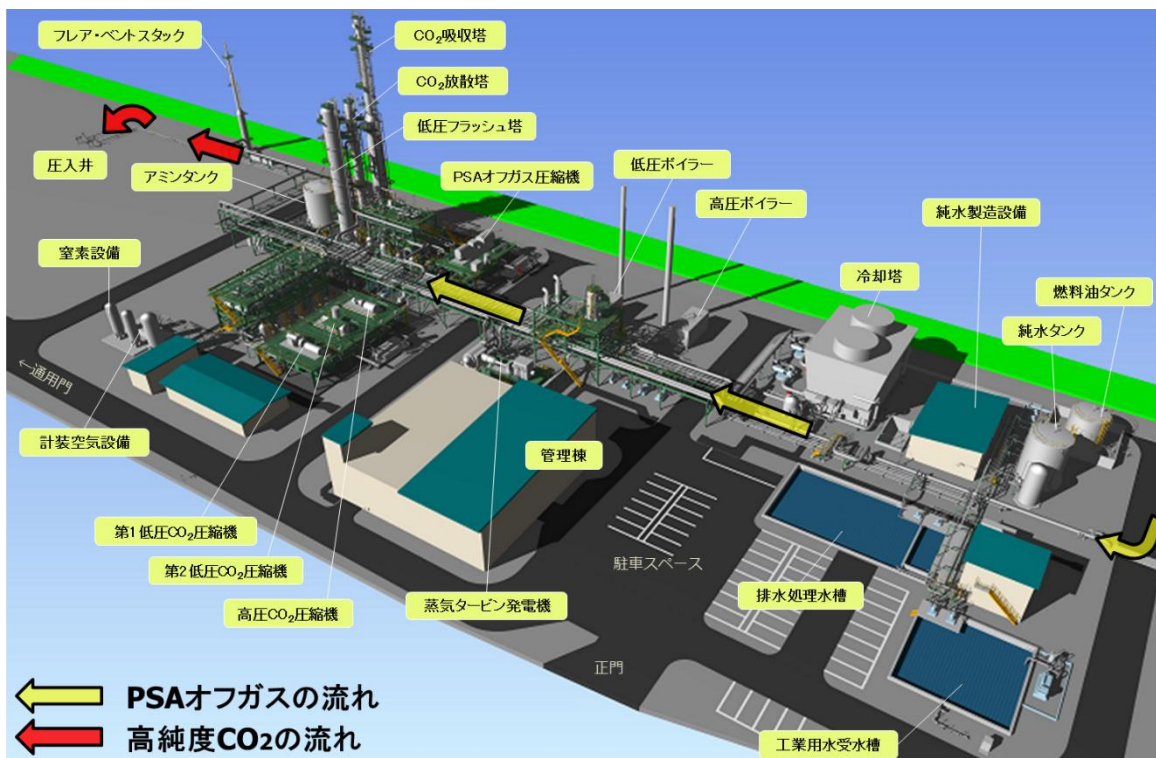


©Google © 2013 ZENRIN Image © 2013 DigitalGlobe

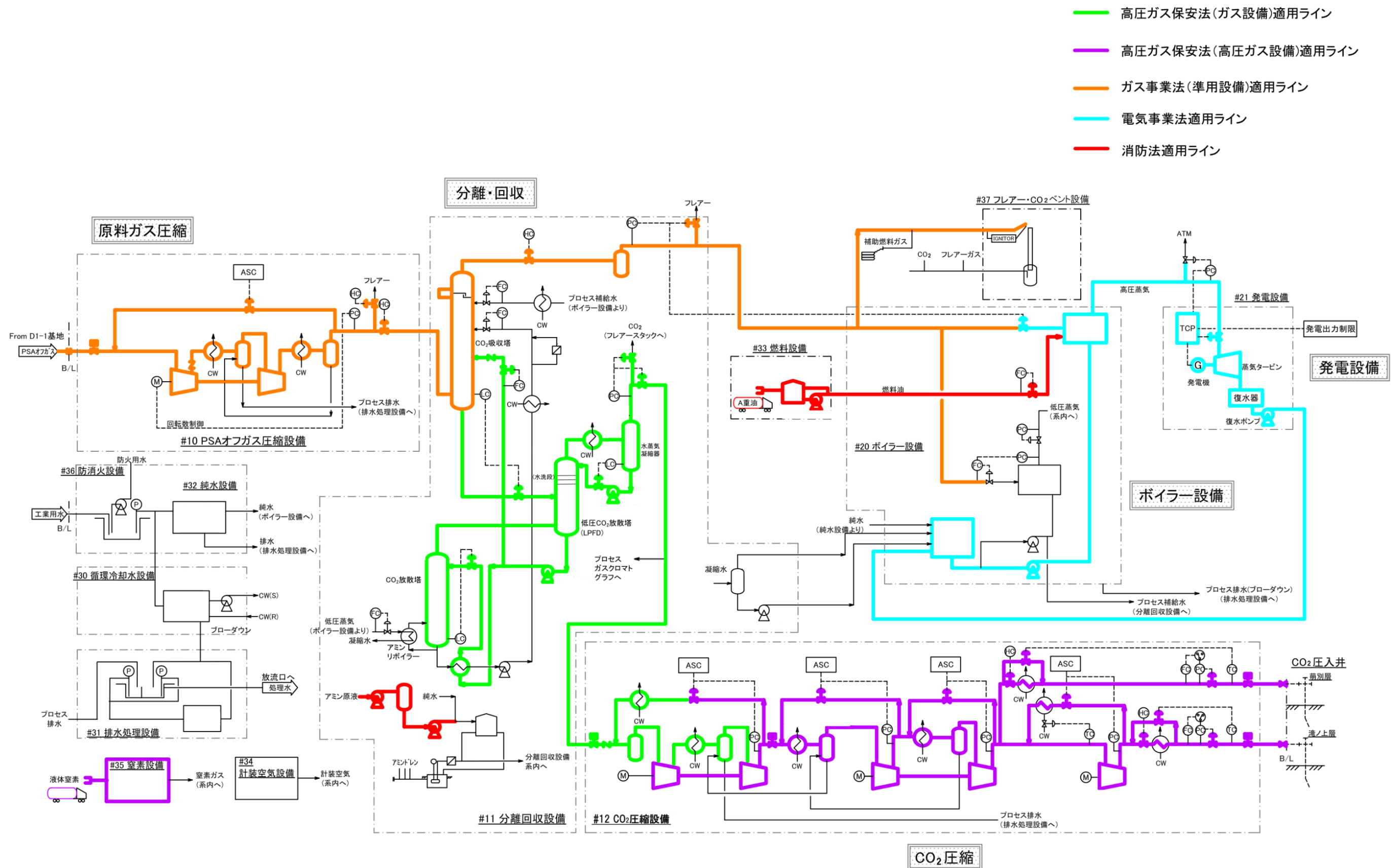
第 2.1-2 図 本計画設備の位置関係

第 2.1-3 図に CO₂ 分離・回収・圧入基地の鳥瞰図を，第 2.1-4 図に CO₂ 分離・回収・圧入基地プロセスフローを，第 2.1-5 図に D1-1 基地および D1-2・D0 基地の概要を示す。

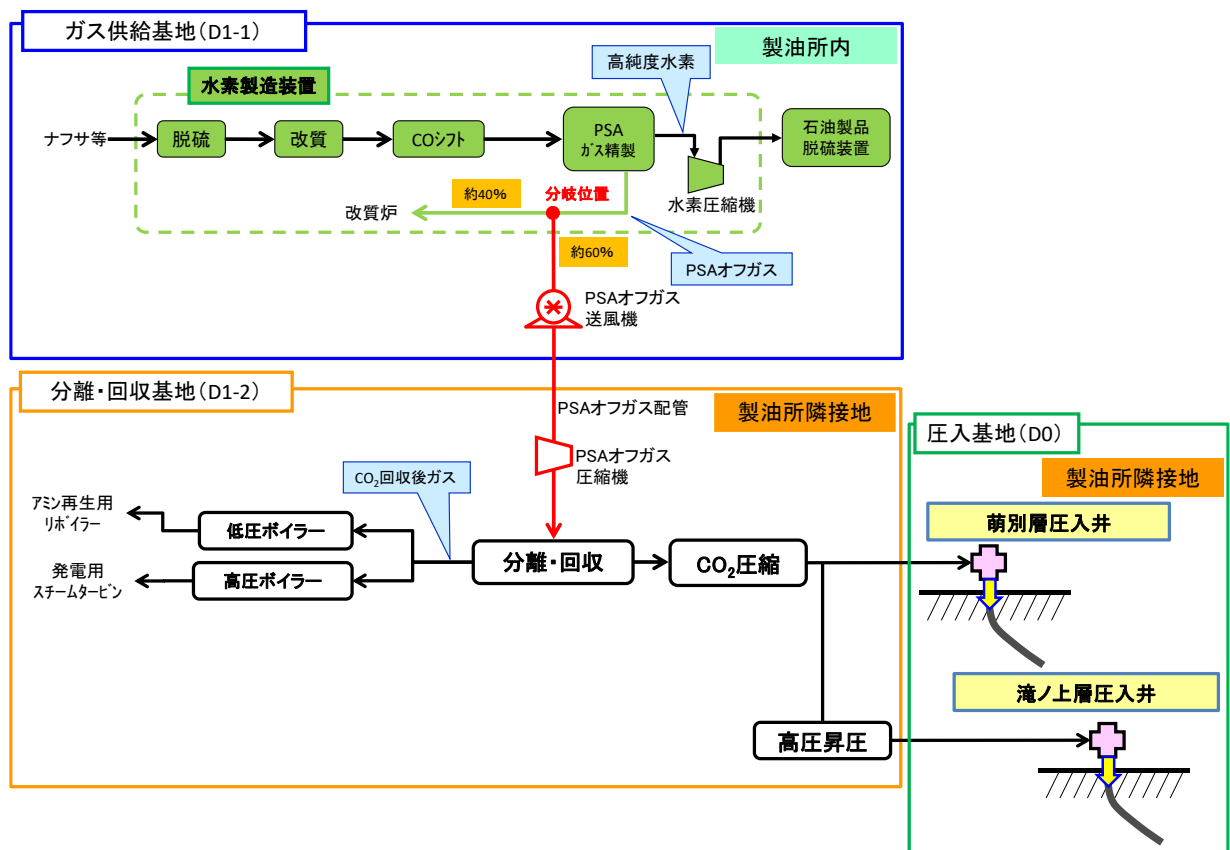
PSA オフガスは，水素製造装置に付帯する PSA 設備下流配管から分岐し，PSA オフガスの一部（約 60％）を分流して送風機により送出することで行う。PSA オフガスの送出先は，D1-2 基地とする。



第 2.1-3 図 CO₂ 分離・回収・圧入基地鳥瞰図

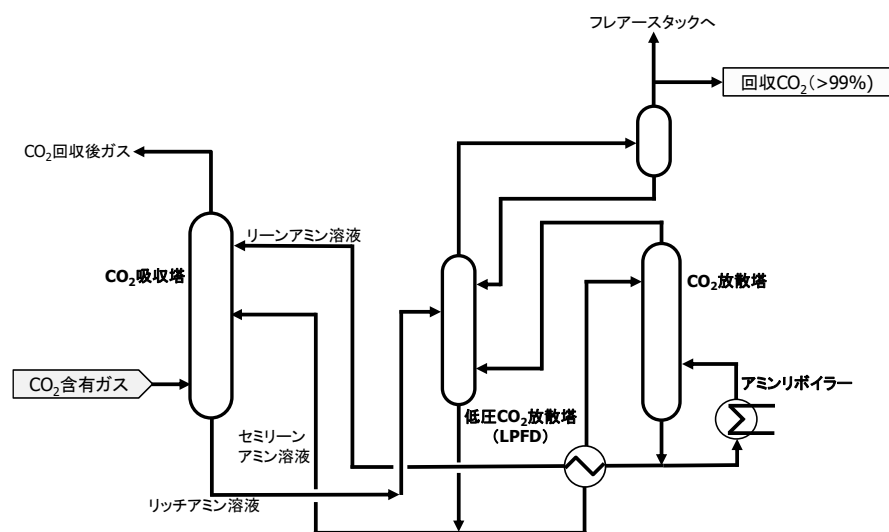


第 2.1-4 図 CO₂ 分離・回収・圧入基地プロセスフロー



第 2.1-5 図 D1-1 基地および D1-2・D0 基地の概要

第 2.1-6 図に、D1-2 基地における CO₂ 分離・回収プロセスを示す。これは、以下のとおり、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令第十一条の五第一項に規定する「アミン類と二酸化炭素との化学反応を利用して二酸化炭素を他の物質から分離する方法」である。



第 2.1-6 図 CO₂ 分離・回収プロセス

このCO₂分離・回収プロセスの特徴は、アミン吸収にBASF（ビーエーエスエフ）社の活性アミンプロセス（OASEプロセス）を採用したことと、CO₂吸収塔とCO₂放散塔の間にLPFD（Low Pressure Flash Drum：低圧CO₂放散塔）を設置し、CO₂吸収塔では、リーンアミン溶液（CO₂放散塔で得られた再生度の高いアミン）に加え、セミリーンアミン溶液（LPFDでの低圧により得られた再生度が比較的低いアミン）を用いた2段吸収としたことである。OASEプロセスで使用するアミン溶液（第三級アミンを主成分とする水溶液）は腐食性が低く、劣化が少ないことで知られている。また、LPFDを設置することで、低圧によるCO₂放散が可能となることに加え、CO₂放散塔頂からCO₂とともに供給される水蒸気熱をCO₂の放散に利用することができる。これにより、セミリーンアミン溶液の循環量が増えるものの、CO₂放散塔に供給されるCO₂量は減少するため、リーンアミン溶液のみで吸収する場合に比べて、CO₂放散塔で必要となるアミンリボイラーによる再生熱が削減され、循環量の増を加えてもトータルエネルギー（熱＋電気）を低減することができる。

なお、通常PSAオフガス中のCO₂の組成は変動するため、回収プロセスを経た後のCO₂濃度が特定二酸化炭素ガスの濃度基準を満たすよう、CO₂放散塔頂より回収した高純度CO₂ガスを、オンラインのプロセスガスクロマトグラフで常時（15～20分ごとに）組成分析し、その結果を見て分離・回収プロセスの運転条件を調整する。CO₂濃度の変動範囲は99.1%以上とし、組成分析の測定結果でCO₂濃度が99.1%を下回る場合は、2段吸収法を適用したCO₂吸収塔のリーンアミン溶液循環量（吸収塔上段）とセミリーンアミン溶液循環量（吸収塔下段）を調整することにより、回収CO₂純度の上昇を図る。これらの操作によっても純度の回復が図れず、海洋汚染防止法施行令第11条の5に規定する濃度基準（体積百分率98パーセント以上）を満足しない場合は、速やかに圧入を停止し、原因を調べ、対策を立案した後、その原因と対応策を環境省に報告する。

なお、CO₂ガス中に含まれる物質は、二酸化炭素、水素、酸素、窒素、炭化水素（メタン）、一酸化炭素のみであり、プロセスガスクロマトグラフの分析条件は日本工業規格K0114:2012に従う。また、オンラインの組成分析の他に、第三者機関による組成分析を年1回以上行い、結果は環境省に報告する。許可期間中は、当該許可期間中の記録および当該許可期間以前の許可期間中の記録を保管する。

CO₂の圧入は、年度圧入計画、月間圧入計画および週間圧入計画に基づいて行い、24時間運転による所定期間の一定レート圧入を原則とする。CO₂を分離・回収するための原料ガス（PSAオフガス）は、上記圧入計画に基づく必要量のみをD1-1基地より受け入れ、定常運転時には全量圧入することを目標に運転するが、圧入計画の急な変更時、急な圧入中断時および圧入開始直後など貯留層の状況などを確認しながら圧入レートを制御する際には、高純度CO₂ガスに余剰が発生する。その余った高純度CO₂ガスは、CO₂放散塔頂から通じるフレアースタックより大気放散する（第2.1-4図参照）。

なお、CO₂回収後のガス（CO₂吸収塔のオフガス）は次工程でボイラー燃料として利用し燃焼処理するため、アミンやその誘導体がガスに同伴して大気へ放出されるおそれはない。

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

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

第 2.2-1 表 特定二酸化炭素ガスの組成（乾きガス中の濃度，推算値）

ガス組成	濃度（体積百分率：％）
CO ₂	99.70
H ₂	0.22
N ₂	—
O ₂	—
CH ₄	0.06
CO	0.02
合計	100.00

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

上記推算値は，「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令」（昭和 46 年政令第 201 号）第十一条の五第一項第二号において規定する基準を満たしている。また，当該ガスは，石油の精製に使用する水素の製造工程から分離したガスよりアミン類と CO₂ との化学反応を利用して CO₂ を分離したものであることから，本計画において適用する基準は，体積百分率 98 パーセント以上とする。

なお，圧入開始以降，CO₂ 放散塔頂より回収した高純度 CO₂ ガスの組成分析を行っており，CO₂ 濃度及び当該ガスの組成を確認している。

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

3.1 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量

当該計画期間内に、滝ノ上層および萌別層に対する特定二酸化炭素ガスの圧入は実施しない。

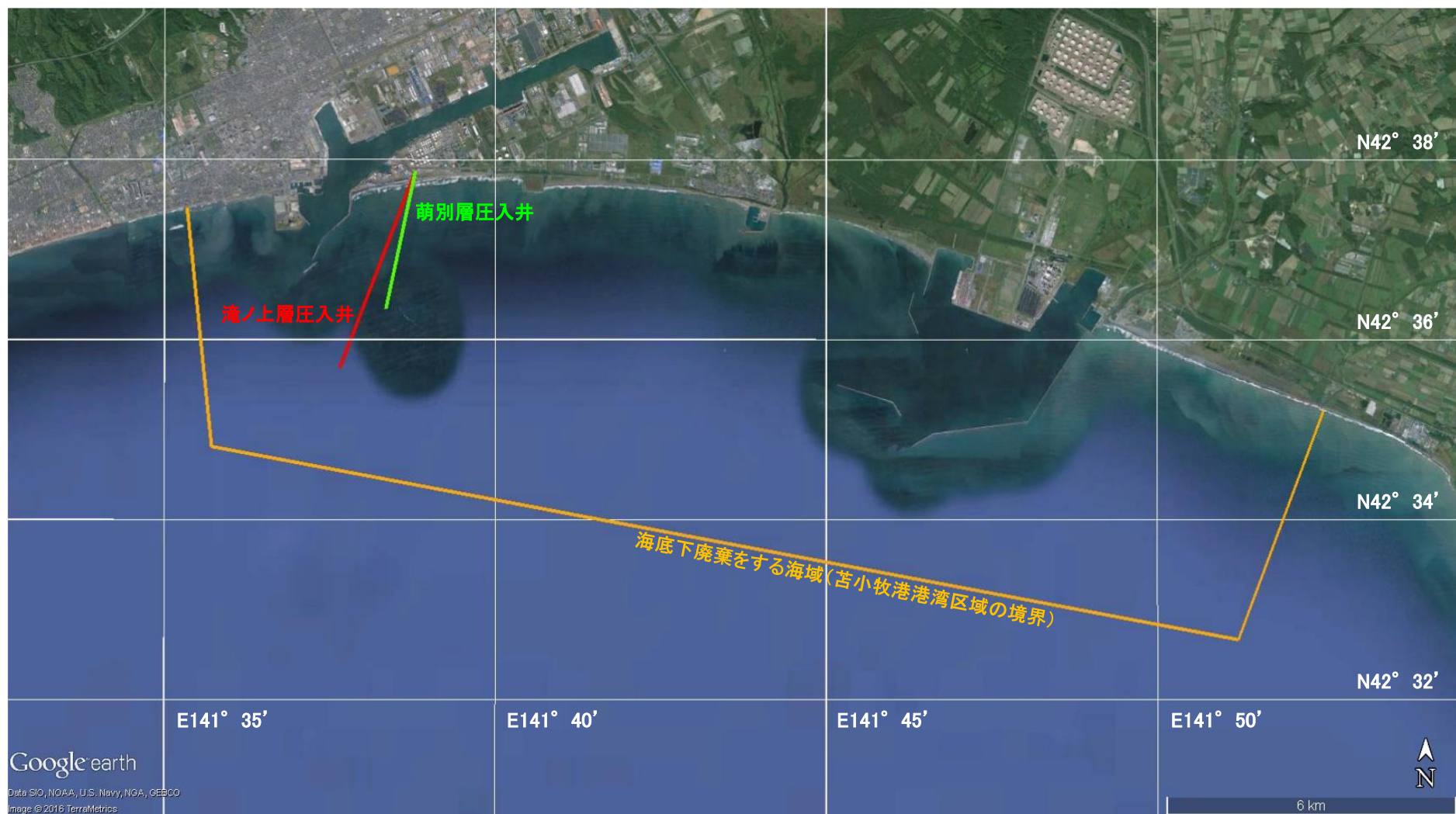
3.2 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をしようとする海域において当該海底下廃棄をする以前に海底下貯留をされていると推定される特定二酸化炭素ガスの数量

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域において当該海底下廃棄をする以前に海底下貯留をされている特定二酸化炭素ガスは、300,110 トンと推定される。2016 年 4 月 6 日～2019 年 11 月 22 日にかけて萌別層に 300,012 トン、滝ノ上層に 98 トンを圧入した。

4. 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の位置及び範囲

4.1 海域の緯度及び経度

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



注：©Google © 2013 ZENRIN Image © 2013 DigitalGlobe

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

本計画では、二坑の CO₂ 圧入井（滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井）を新たに掘削し、それぞれ異なる層準の貯留層に特定二酸化炭素ガスを圧入することにより海底下に廃棄する。二坑の圧入井は、苫小牧市真砂町の陸上（出光興産株式会社北海道製油所隣接の D0 基地）から南西に向かって掘削した。

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

第 4.1-1 表 滝ノ上層圧入井の諸元

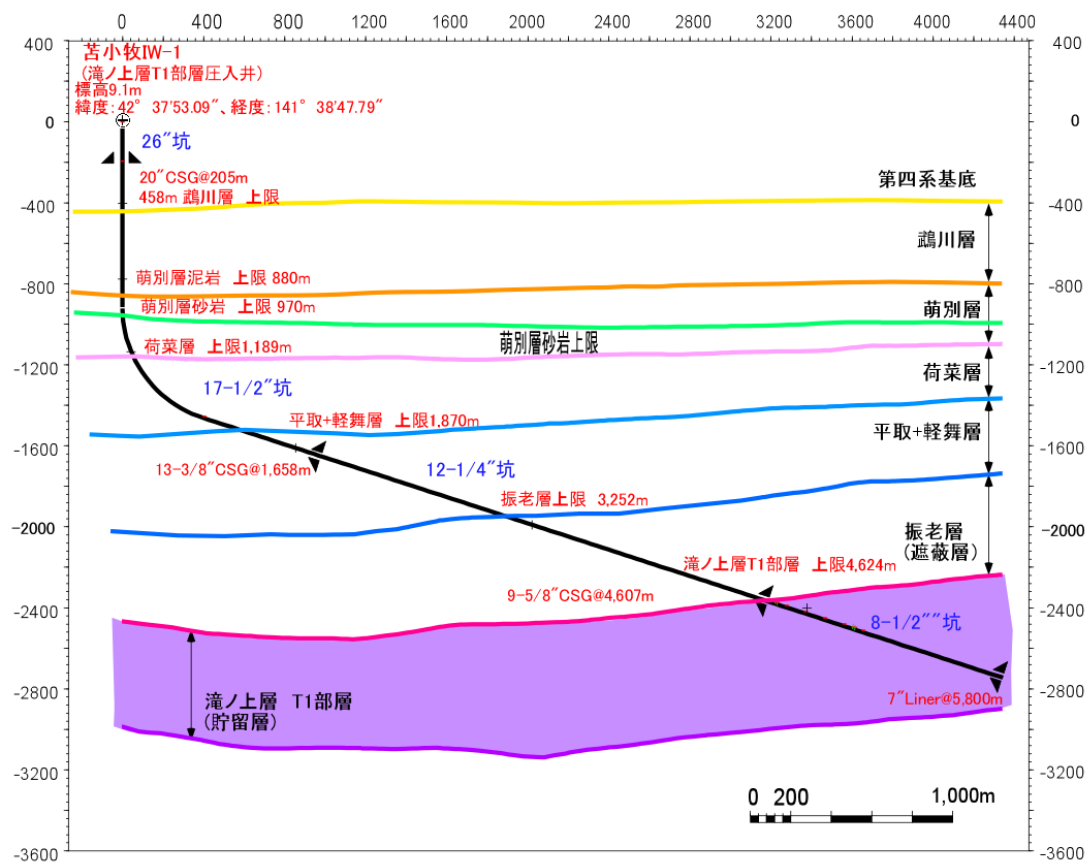
【坑口】	
座標（北緯）	42° 37' 53.09"
座標（東経）	141° 38' 47.79"
標高：m	9.1
【滝ノ上層 T1 部層上限】	
座標（北緯）	42° 35' 14.91"
座標（東経）	141° 37' 58.91"
掘削深度：m	4,624
海面下深度：m	2,381
坑口からの距離：m	3,228
【坑底】	
座標（北緯）	42° 35' 40.93"
座標（東経）	141° 37' 41.85"
掘削深度：m	5,800
海面下深度：m	2,744
坑口からの距離：m	4,346

第 4.1-2 表 萌別層圧入井の諸元

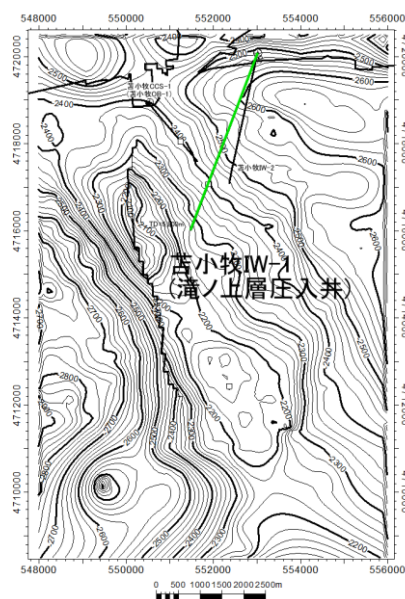
【坑口】	
座標（北緯）	42° 37' 53.09"
座標（東経）	141° 38' 47.55"
標高：m	9.1
【萌別層砂岩層上限】	
座標（北緯）	42° 36' 55.30"
座標（東経）	141° 38' 30.85"
掘削深度：m	2,395
海面下深度：m	961
坑口からの距離：m	1,823
【坑底】	
座標（北緯）	42° 36' 16.11"
座標（東経）	141° 38' 20.01"
掘削深度：m	3,650
海面下深度：m	1,179
坑口からの距離：m	3,058

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

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



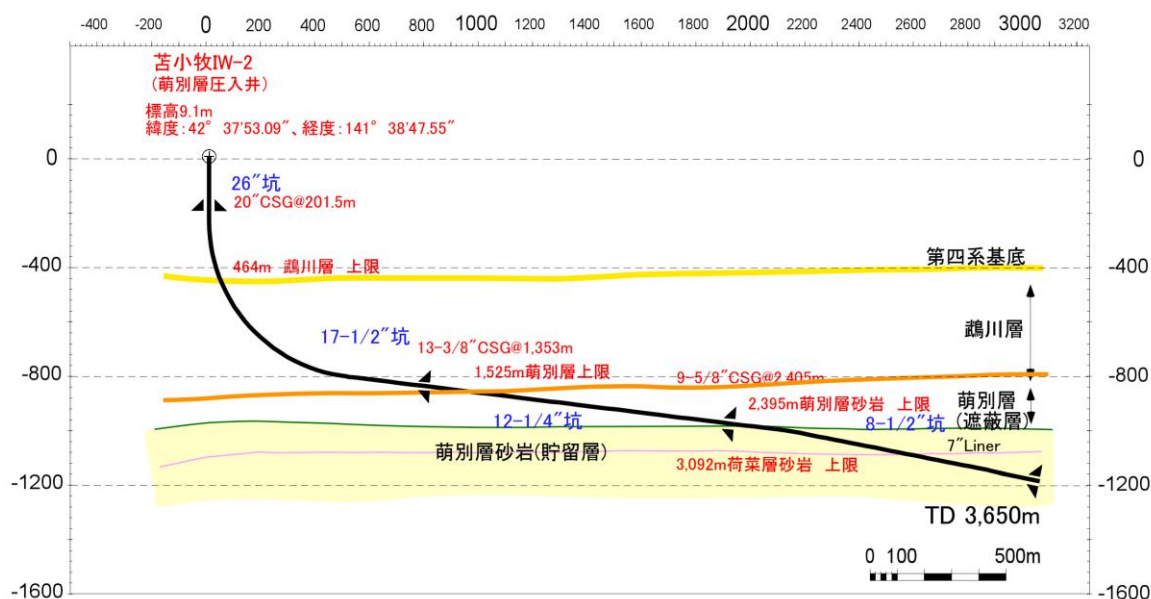
第 4. 1-2 図 滝ノ上層圧入井沿いの地質断面図



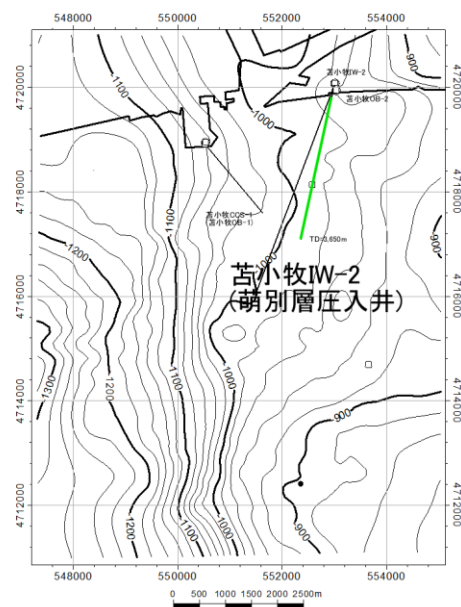
第 4. 1-3 図 滝ノ上層 T1 部層上限の地質構造

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

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



第 4.1-4 図 萌別層圧入井沿いの地質断面

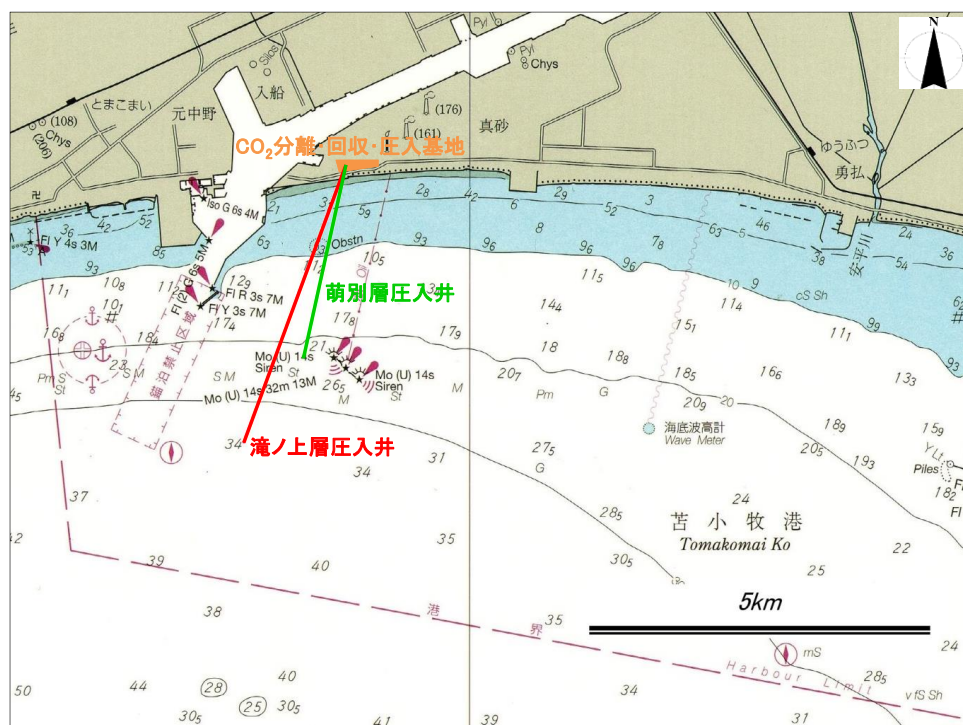


第 4.1-5 図 萌別層砂岩層上限の構造

4.2 海域の水深及び海底下廃棄をする深度

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の海図を、第4.2-1図に示す。

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



注：海上保安庁発行の海図（W1034）に加筆

第4.2-1図 本計画における海域の海図

第4.2-1表 各圧入井坑底の水深および海面下深度

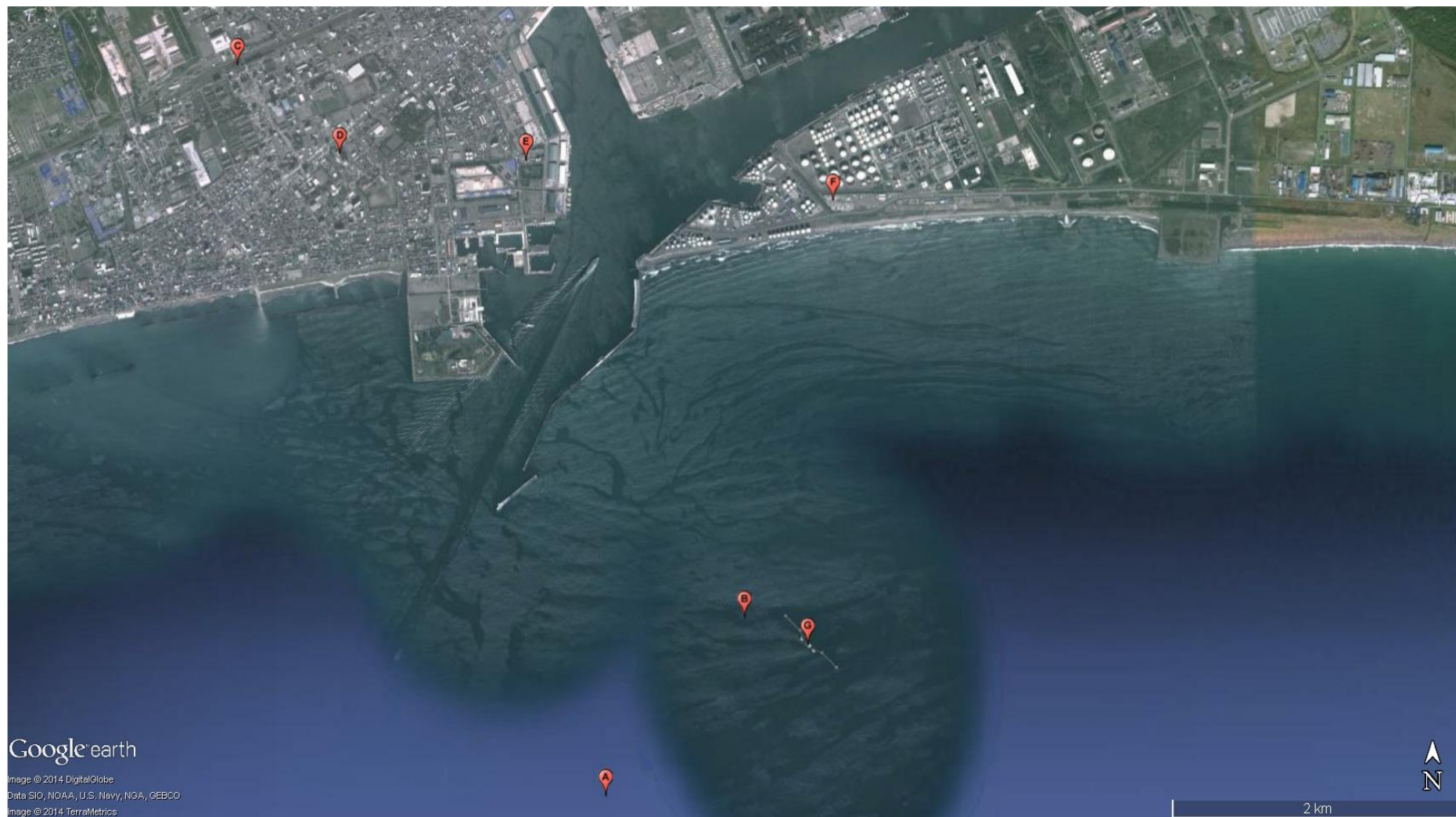
圧入井	水深 (m)	海面下深度 (m)
滝ノ上層圧入井	31	2,744
萌別層圧入井	20	1,179

4.3 陸域の主な施設等との位置関係

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

第4.3-1表 陸域の主な施設等との位置関係

	A：滝ノ上層圧入井	B：萌別層圧入井	備考
C：JR 苫小牧駅	5.6km	5.1km	苫小牧市表町 6-4-3
D：苫小牧市役所	4.7km	4.2km	苫小牧市旭町 4-5-6
E：苫小牧海上保安署	4.4km	3.5km	苫小牧市港町 1-6-15
F：CO ₂ 圧入井坑口	4.3km	2.9km	苫小牧市真砂町 12 番地
G：出光興産シーバース	1.7km	0.5km	苫小牧港港湾区域・港域内



第 4. 3-1 図 陸域の主な施設等の位置

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

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

また、CO₂分離・回収・圧入基地（D1-2・D0 基地）の詳細は、次のとおりである。

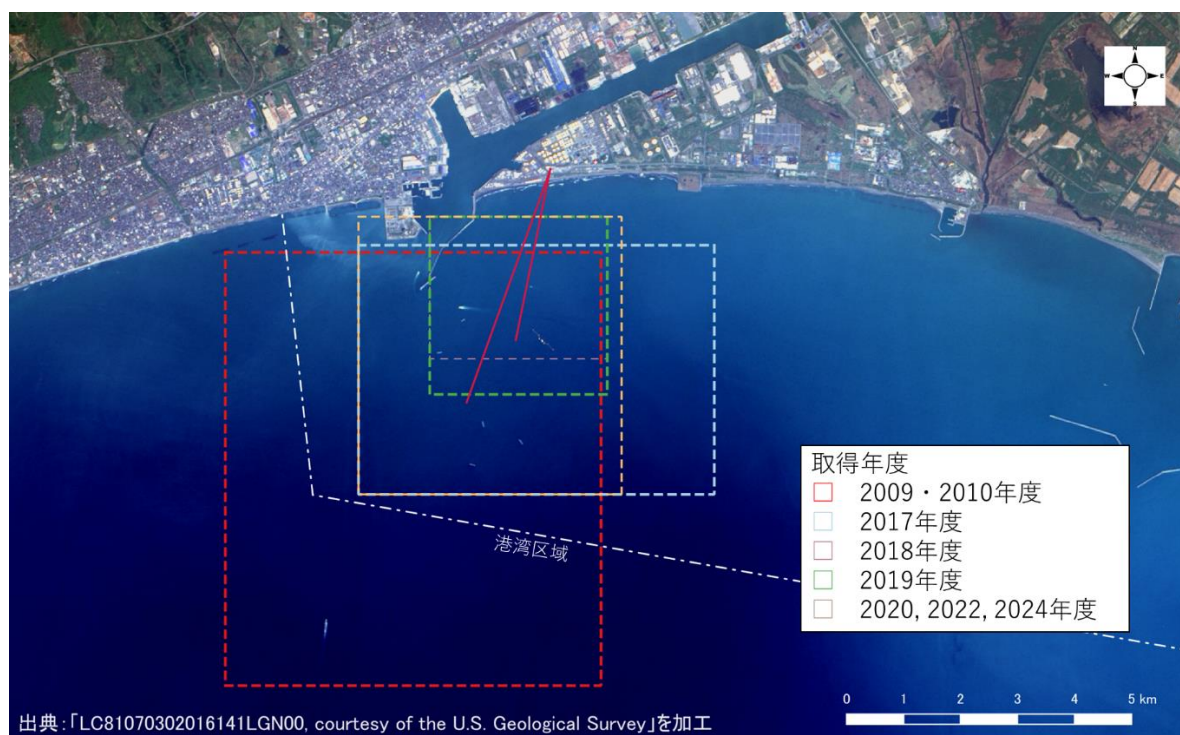
名称：日本 C C S 調査株式会社 苫小牧 C C S 実証試験センター

場所：苫小牧市真砂町 12 番地（出光興産株式会社北海道製油所隣接南用地）

なお、滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井は、CO₂圧入基地（D0 基地）より南西方向に掘削した。

4.5 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲

海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲を把握するために、第 4.5-1 図に示す対象海域において取得された三次元弾性波探査記録および既存坑井のデータを解析した。そして、CO₂を海底に圧入・廃棄した際の分布範囲をシミュレーションにより推定した。



注：Google Map に加筆

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

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

(1) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲

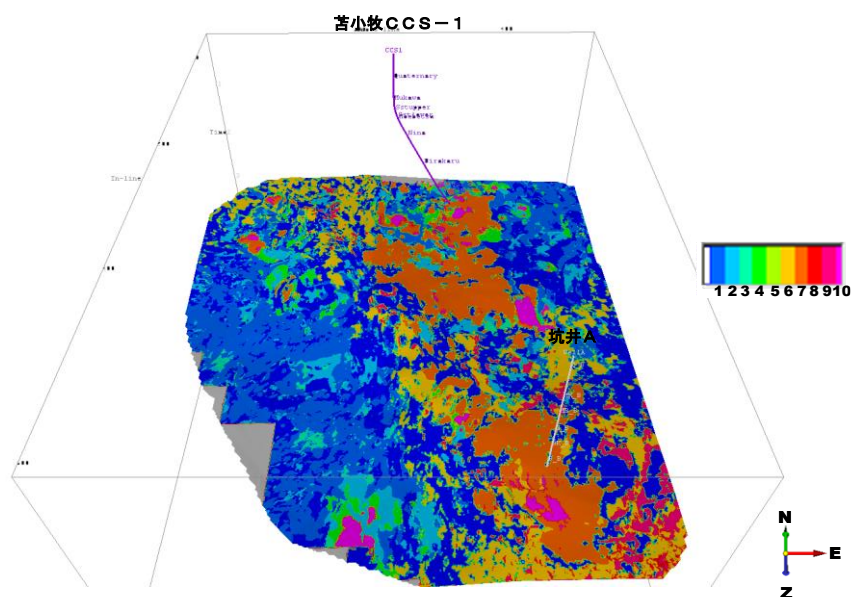
① 検討に使用した地質モデル

滝ノ上層圧入井の圧入（廃棄）位置を選定するあたり、CO₂挙動予測シミュレーションを実施するために作成した平成 23 年度地質モデルを基準とし、圧入井の掘削結果に基づき構造モデルを修正し、CO₂圧入実績に基づいて属性モデルを修正して作成した地質モデル（2018 年度モデル）を使用した。

7) 岩相分布・性状分布の推定

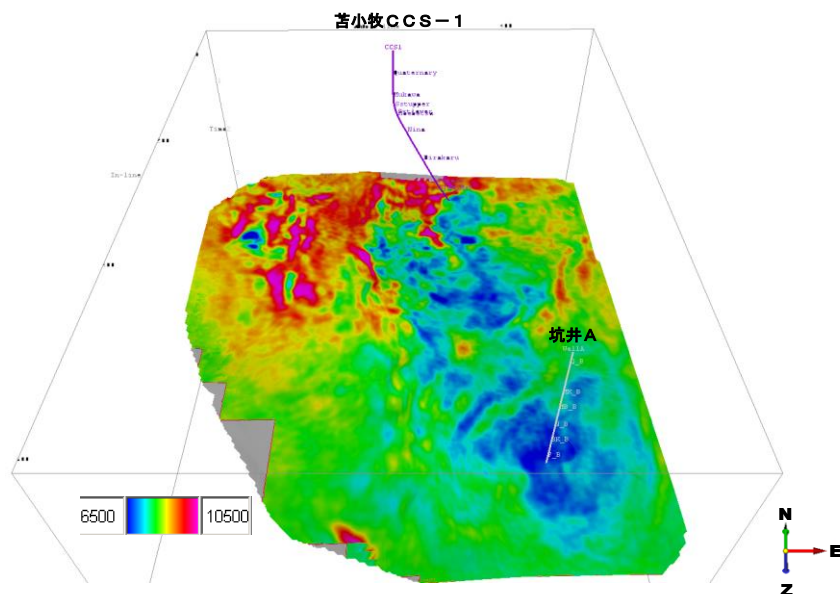
- ・滝ノ上層は、火山岩起源であり不均質性が高いため三次元弾性波探査データを活用した岩相分布・性状分布を推定した不均質モデルを作成した。
- ・スケルトン・アトリビュート解析にて弾性波形の特徴を強調
- ・SOM（Self-organizing Maps：自己組織化マップ）解析による波形分類を行い、
- ・クラスター解析（K-means 法）により各分類の境界を決定
- ・坑井 A（既存民間井）における溶岩～凝灰角礫岩（良好な貯留岩）との比較により、この岩相を示す弾性波形を決定し、三次元弾性波探査データ上で溶岩～凝灰角礫岩の分布領域を推定。
- ・コア試料と物理検層データの解析から、溶岩～凝灰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

例として、第 4.5-2 図に滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布（K-means Index）を、第 4.5-3 図に三次元弾性波探査データから取得した滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンスを示す。



注：オレンジの部分が、良好な貯留層性状が期待される岩相（溶岩～凝灰角礫岩相）。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 4.5-2 図 滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布（K-means Index）



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

第 4.5-3 図 滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンス

イ) 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（平成 23 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。

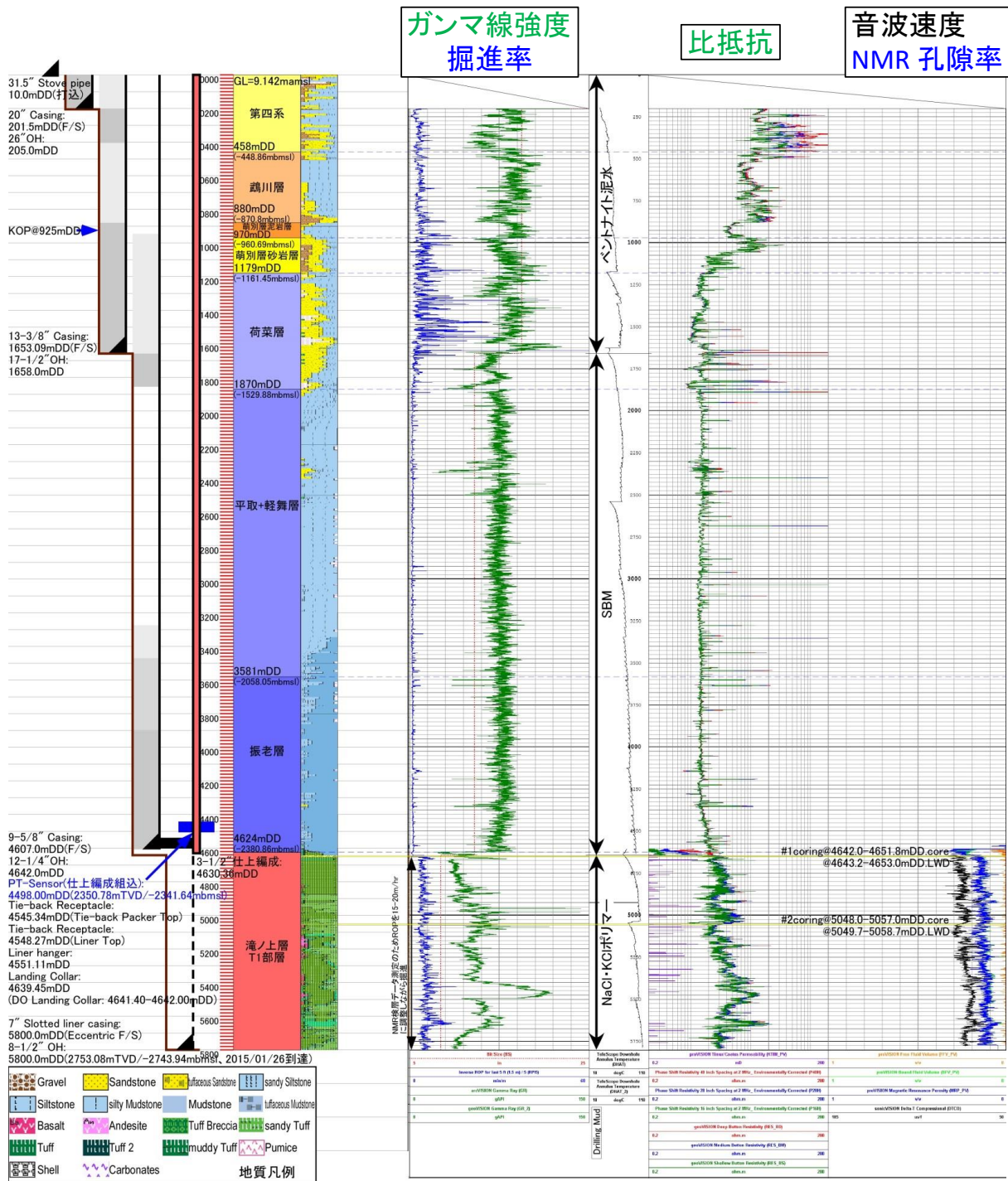
ア. 圧入井掘削結果

特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する滝ノ上層圧入井は、深度 5,800m（垂直深度 2,753m）の傾斜井として掘削した。確認層序を、第 4.5-1 表および第 4.5-4 図に示す。

第 4.5-1 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。
鵠川層	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 4.5-4 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（ $5.25 \times 10^{-5} \text{mD}$ ）。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。

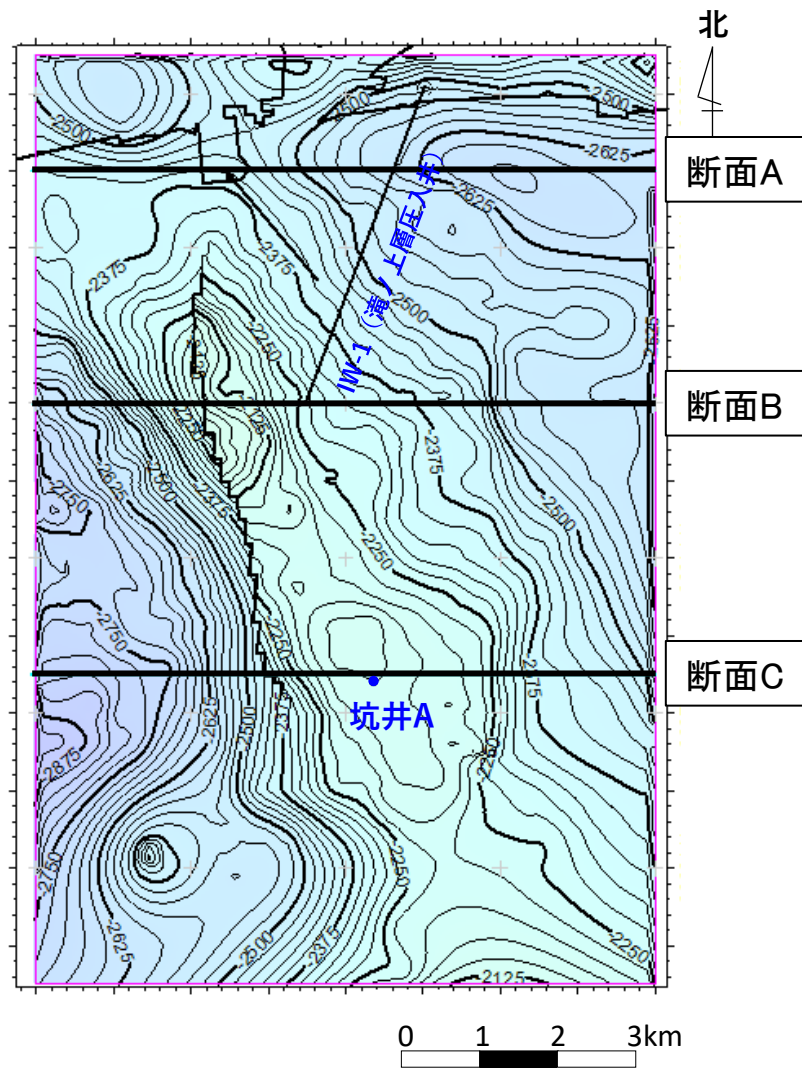


注：貯留層区間以外では、比抵抗イメージ検層、音波検層、NMR 検層は実施していない。

第 4.5-4 図 滝ノ上層圧入井の物理検層結果事例

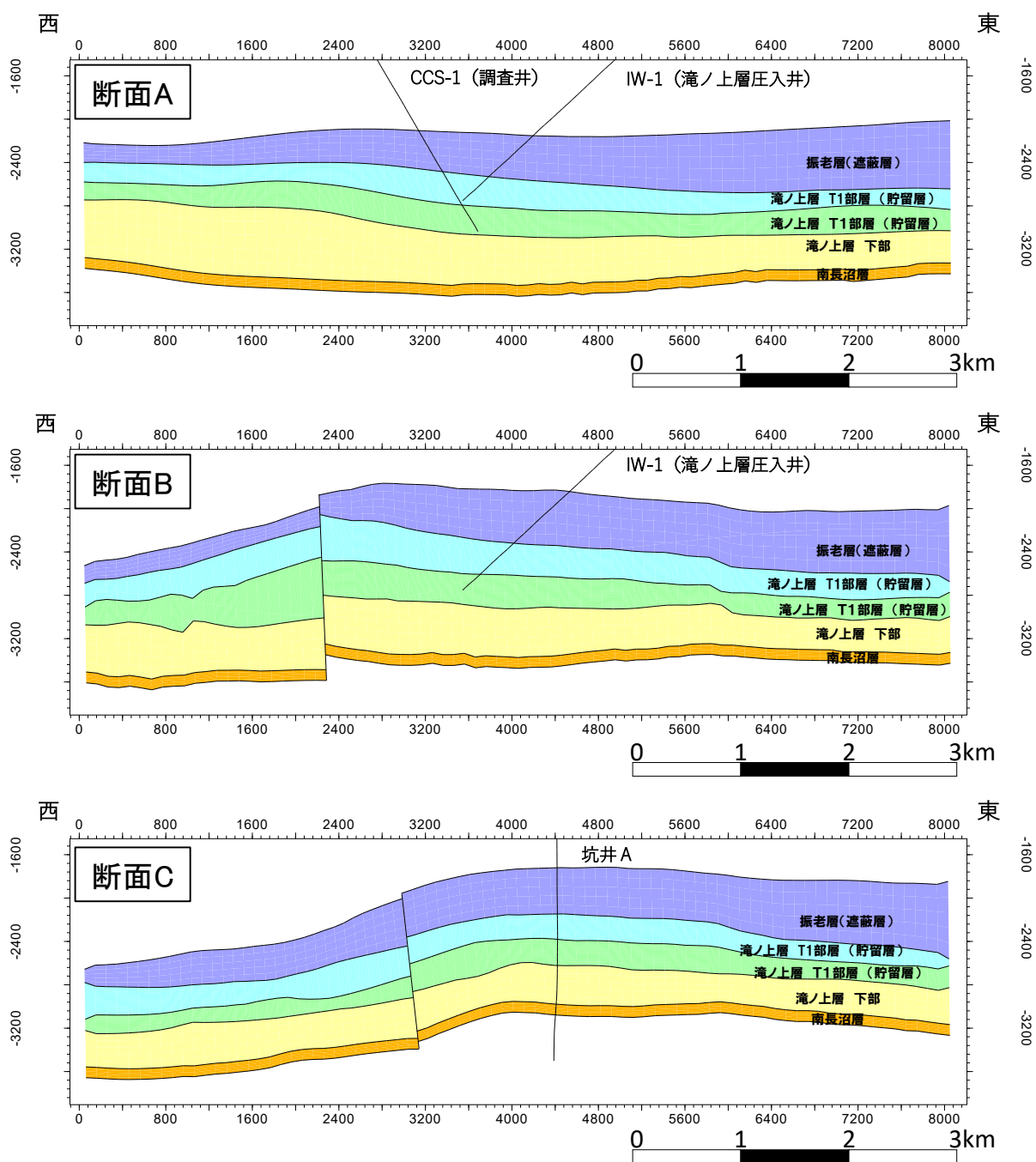
b. 圧入井掘削結果を反映した構造モデル

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 4.5-5 図に、主要東西断面図（地質モデル断面）を第 4.5-6 図に、作成した構造モデルのグリidding情報を第 4.5-2 表に示す。



注:世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標

第 4.5-5 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】



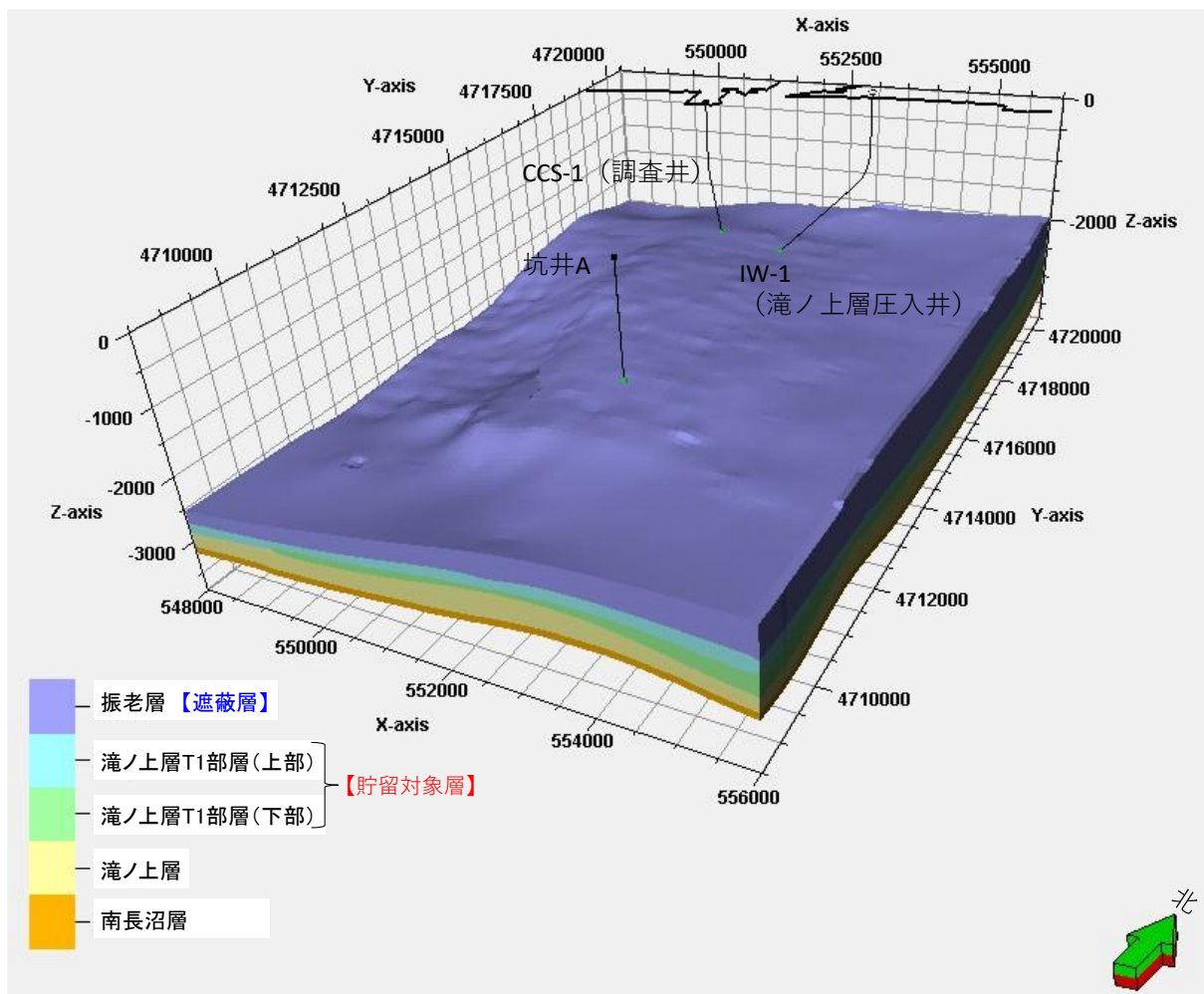
注) 坑跡は投影

第 4.5-6 図 地質モデル断面

第 4.5-2 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 4.5-7 図に示す。滝ノ上層 T1 部層は CO₂ 圧入対象層準であり、シミュレーションを詳細に行うため上下の地層よりも小さめの垂直方向サイズとなるようにした。

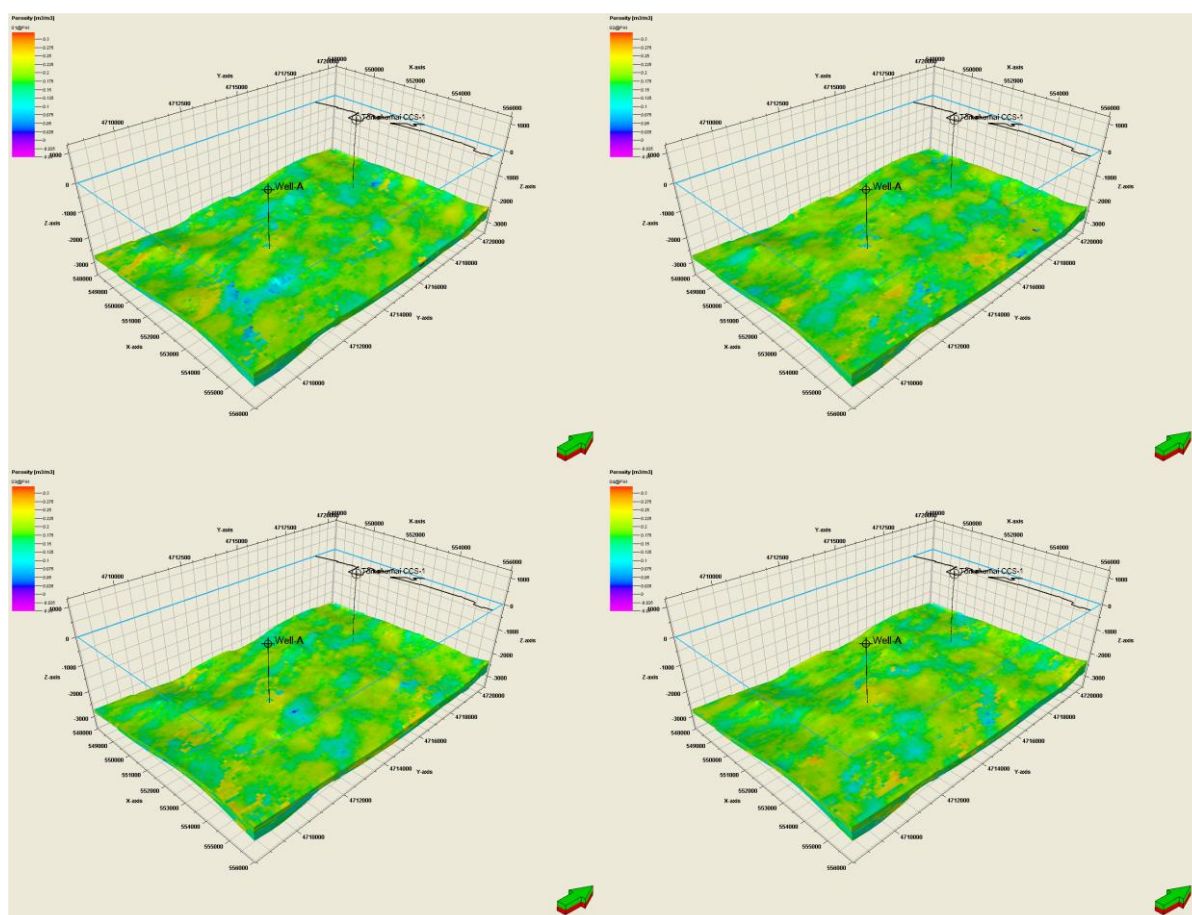


第 4.5-7 図 三次元地質モデル鳥瞰図

ウ) 属性モデルの作成

作成した構造モデルの各セルに属性（岩相、孔隙率および浸透率）を与え、CO₂挙動予測シミュレーションのための地質モデルを作成した。

まず、CO₂圧入対象層である滝ノ上層 T1 部層における属性値分布は、三次元弾性波探査データ、苫小牧 CCS-1（調査井）および坑井 A（既存民間井）のデータより、地球統計学的手法を用いて、岩相、孔隙率および浸透率の分布が確率的に 50 種類となる具現モデルを作成した。参考例として、50 個の内から 4 つの具現モデルにおける孔隙率分布を、第 4.5-8 図に示す。



注：図中右下の矢印は、北を示す。

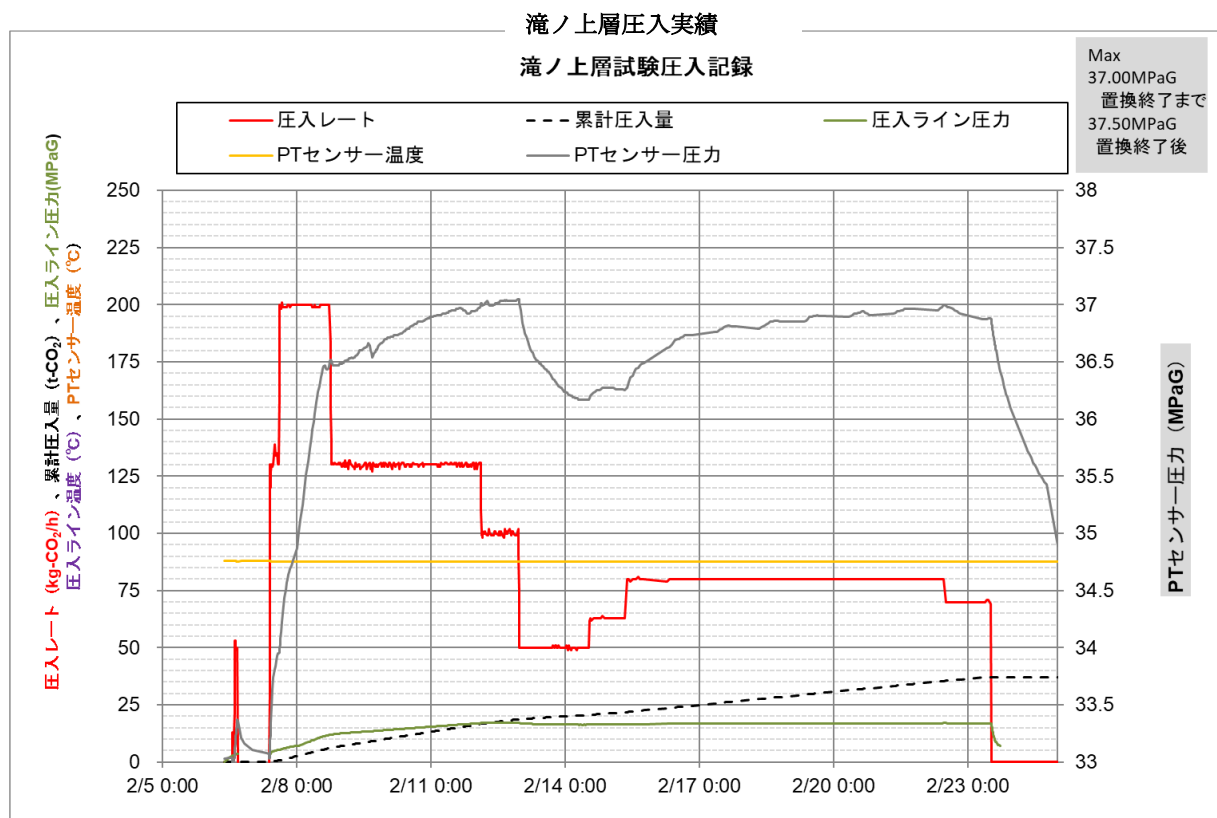
第 4.5-8 図 50 個の内 4 個の具現モデルの参考例：滝ノ上層 T1 部層の孔隙率分布（平成 23 年度地質モデル）

他の層準における属性値は、苫小牧 CCS-1 の振老層から採取されたコアの分析値を一様に分布させた。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。

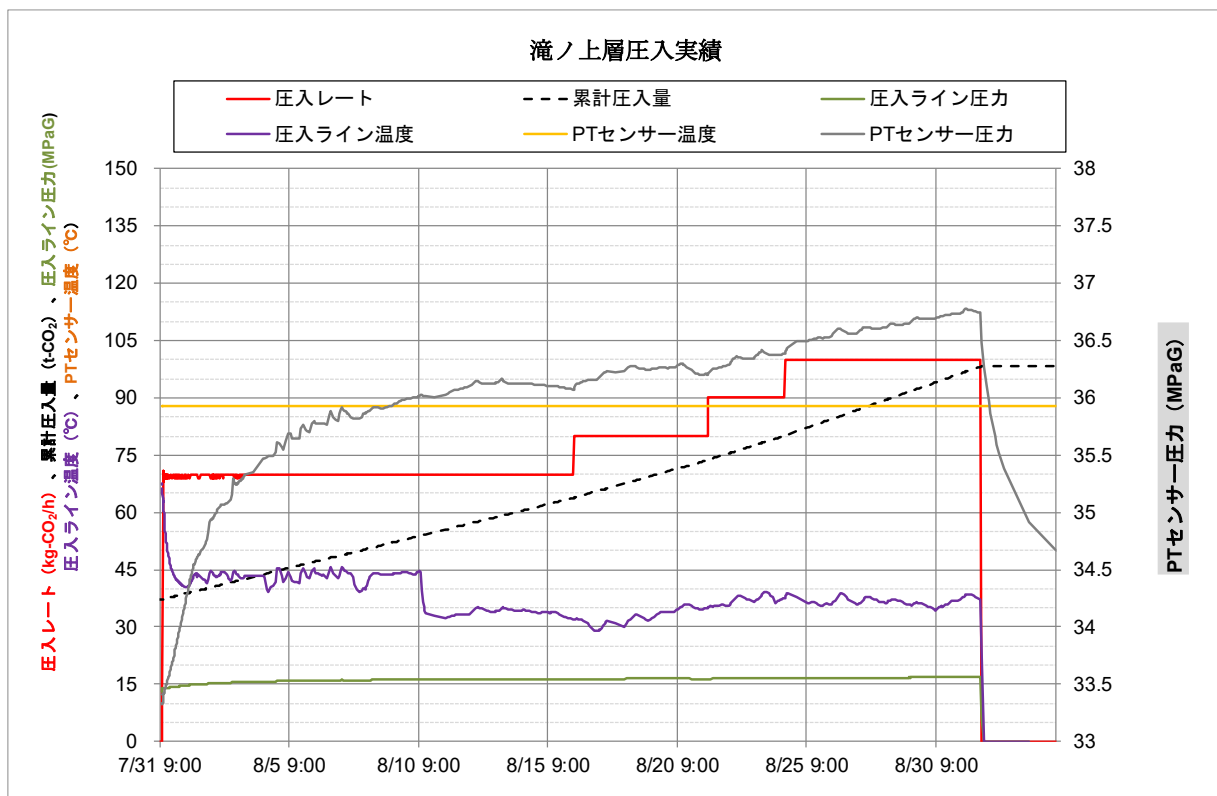
a. 圧入実績

滝ノ上層へのCO₂圧入は2018年2月6日に開始したが、2月26日に地上設備の不具合により圧入を停止した(第4.5-9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-CO₂となった(第4.5-10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。



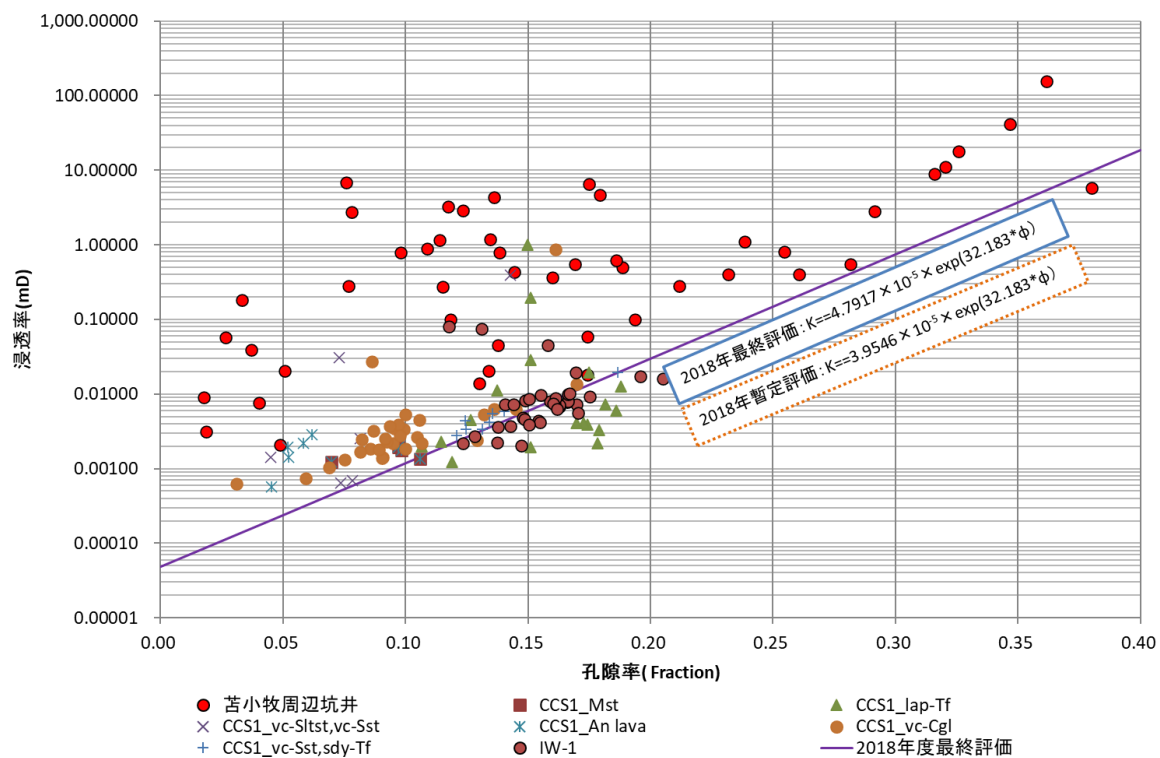
第 4.5-9 図 滝ノ上層圧入実績(2018 年 2 月)



第 4.5-10 図 滝ノ上層圧入実績(2018 年 7 月～9 月)

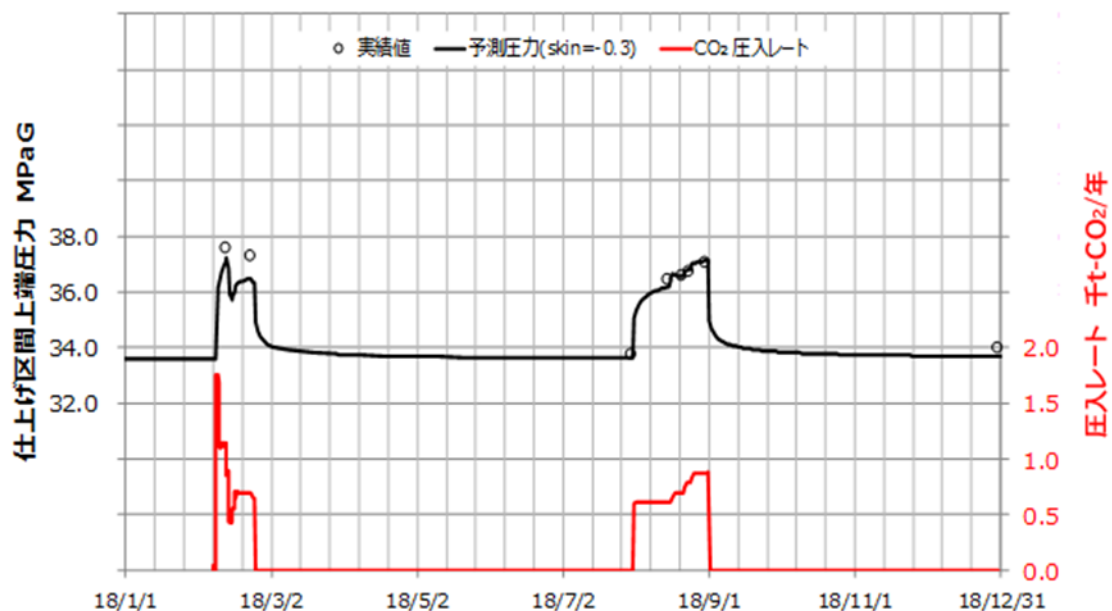
b. CO₂ 圧入時の挙動とパラメータの調整

CO₂ 挙動予測シミュレーションは 2018 年 8 月 31 日までの圧入実績を反映し、圧入実績に即した 98 トンの CO₂ を圧入するシミュレーションを実施した。2018 年 8 月 31 日まで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 4.5-11 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 4.5-12 図）。



- 注：1. 地質モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「 $\text{浸透率} = 0.000039546 \times e^{32.1823 \times \text{孔隙率}}$ 」を用いた。
2. CCS-1: 苦小牧 CCS-1 (現苦小牧 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, scy-Tf: 砂質凝灰岩, IW-1: 苦小牧 IW-1
3. 圧入停止後の圧力挙動も考慮。

第 4.5-11 図 滝ノ上層 浸透率調整 (2018 年度シミュレーション)



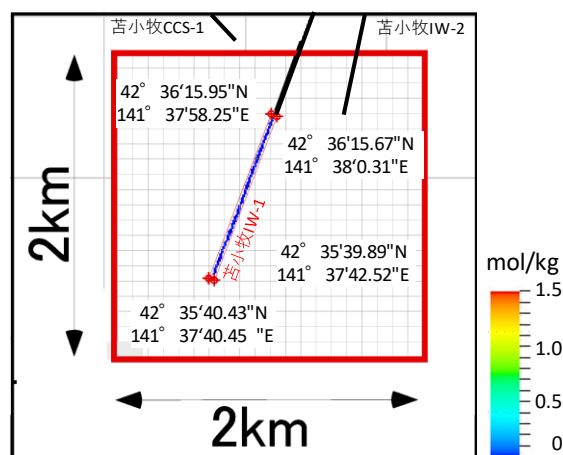
- 注) シミュレーションによる推定される圧力値と実績値の乖離について目的関数 (Objective function) を用いて検討し, SkinFactor=-0.3 とした。

第 4.5-12 図 滝ノ上層 CO₂ 挙動予測 (2018 年度シミュレーション)

② CO₂挙動予測シミュレーション

7) 圧入した CO₂ の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの溶解 CO₂ 量の分布範囲を考慮し、圧入した CO₂ の平面的な分布範囲を推定した（第 4.5-13 図）。圧入した CO₂ 量が少ないため、CO₂ 飽和度の分布域を示すことができない。



溶解CO₂量の最大分布域

- 注：1. 図中の滝ノ上層圧入井、萌別層圧入井および苦小牧 CCS-1 は、坑井の坑跡を上面に投影したもの。
2. 滝ノ上層圧入井の仕上げ区間全体から、CO₂が滝ノ上層中に圧入される。圧入に際し予想される溶解 CO₂ 量の分布を、階調をつけて色表示した。CO₂ 圧入量が少ないため、CO₂ 飽和度分布を示すことができない。
3. 図中の座標は、シミュレーションにより予想される溶解 CO₂ 量の分布域を考慮して想定した圧入した CO₂ の分布範囲を平面に投影したもの。シミュレーション結果は、三次元的にグリッド化した地質モデルを用いて実施したため、分布自体もグリッドを反映した形（四角）となる。
4. 溶解 CO₂ 量の下限值は、 3×10^{-6} mol/kg（約 1ppm）。

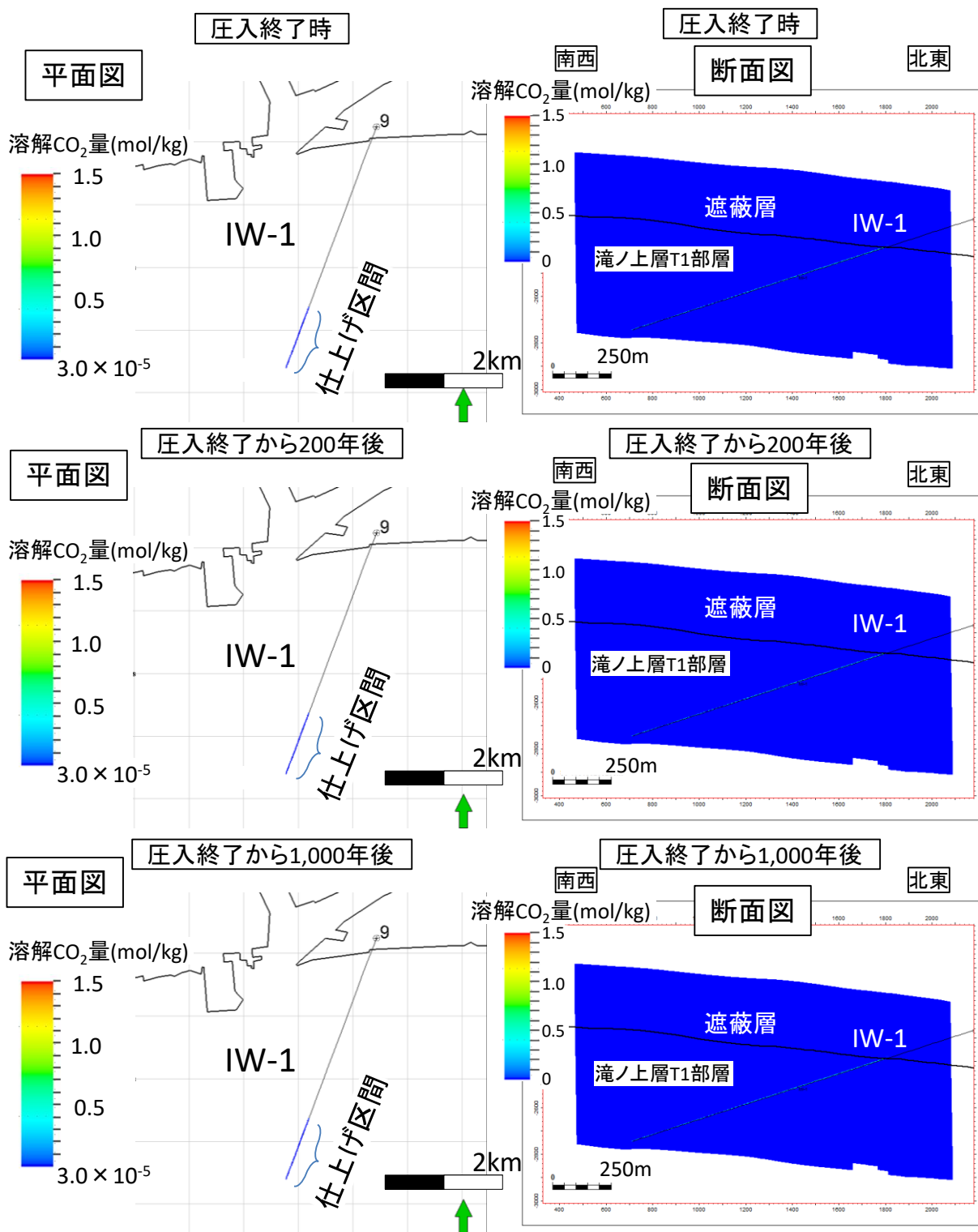
第 4.5-13 図 CO₂ の平面的な分布範囲 (2018 年度シミュレーション結果)

予想される CO₂ の分布域として、溶解 CO₂ 量の分布域の平面的な座標範囲を示す（第 4.5-3 表）。

第 4.5-3 表 海底下廃棄した CO₂ の平面的な分布範囲（滝ノ上層 T1 部層）

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

また、溶解 CO₂ 量の分布に対するシミュレーション結果を第 4.5-14 図に示す。圧入した CO₂ が地層水に溶解して生じる溶解 CO₂ の分布範囲は圧入井の極近傍に限定される。



- 注：1. 左：上方から俯瞰した平面図，右：坑跡に沿った断面図。
 2. 上段：圧入終了時，中段：圧入終了から200年後，下段：圧入終了から1,000年後。
 3. シミュレーションに使用する地質モデルを，CO₂圧入時の圧力挙動と整合させるために，地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第4.5-14図 溶解CO₂量分布の推移（2018年度シミュレーション）

イ) 圧入した CO₂ の垂直的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の垂直的な分布範囲は、第 4.5-14 図に示すとおり、圧入井の坑跡に沿って限定的となると考えられる。

第 4.5-4 表に、CO₂ の垂直的な分布範囲の座標を示す。なお、安全側に立ち、下限は圧入井の貯留層区間の下 25m とし、上限は遮蔽層深度とした。

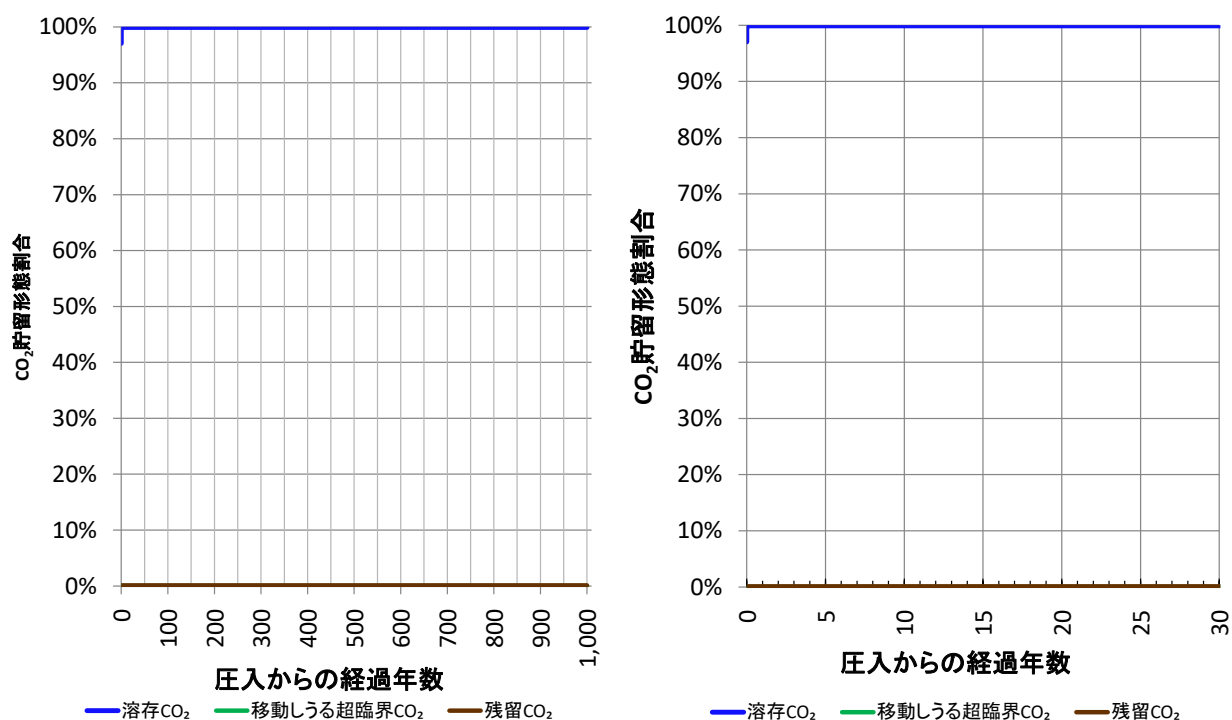
第 4.5-4 表 海底下廃棄した CO₂ の垂直的な分布範囲（滝ノ上層 T1 部層）

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

注：CO₂ の圧入量が少なすぎるため、圧入した CO₂ は圧入後直ちに溶解するため、CO₂ 飽和度の分布範囲は示すことができない。圧入した CO₂ の分布範囲は限定的となるため、下限は圧入井の坑底（圧入区間の最深部）から、溶解 CO₂ 量では 25m までの範囲とした。また、上限については、遮蔽層までとした。

ロ) CO₂ の貯留形態ごとの割合

貯留 CO₂ の 3 つの貯留形態を、Movable（移動する可能性がある気相 CO₂）、Dissolved（溶解 CO₂）および Trapped（孔隙等に残留トラップされ動かない気相 CO₂）の 3 つに表現し、CO₂ 圧入量に対する割合の経時変化を、第 4.5-15 図に示す。圧入した CO₂ は全量溶解し溶解 CO₂ としてトラップされる。



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 4.5-15 図 CO₂ の貯留フォーム（割合）の変化（2018 年度シミュレーション）

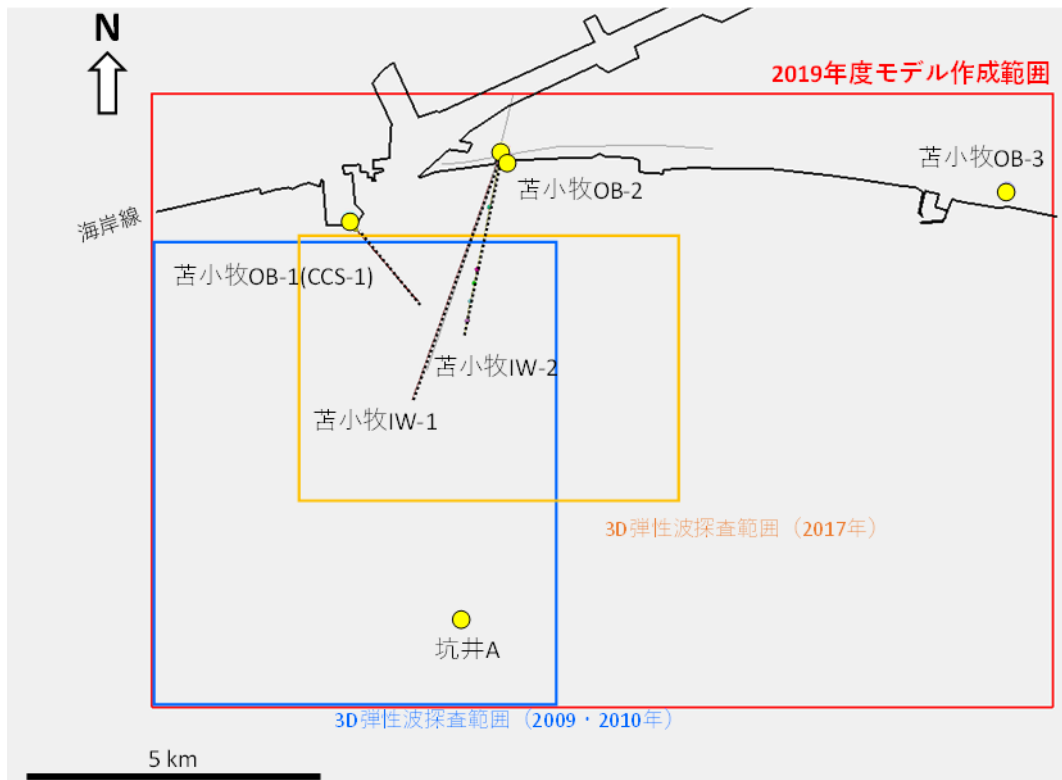
(2) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲

① 検討に使用したモデル

7) 2019 年度地質モデルの作成

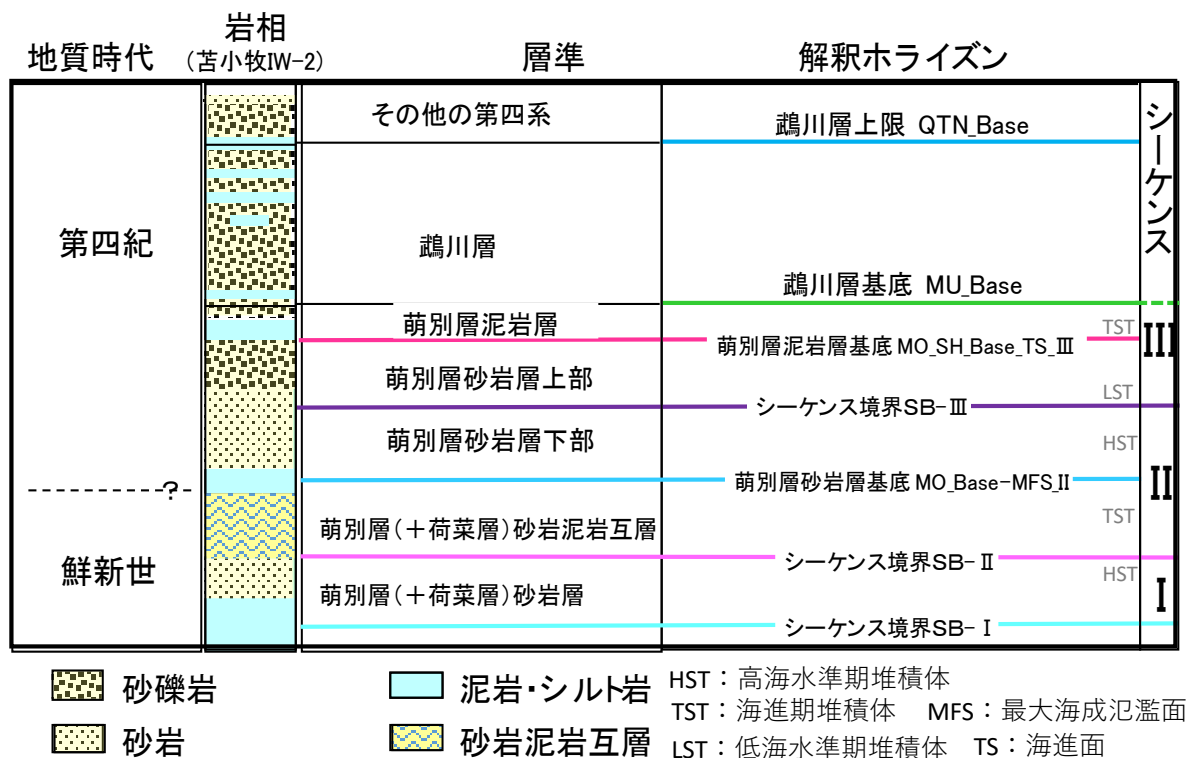
a. 岩相分布・性状分布の推定

第 4.5-16 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 4.5-16 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 4.5-17 図）。シーケンスⅠは苦小牧 IW-2 の掘り止め深度付近で確認したシーケンスで，砂岩層を含み苦小牧 IW-2 では下限を確認していない。この砂岩層を萌別層（+荷菜層）砂岩層と称する。シーケンスⅡの海進期堆積体を萌別層（+荷菜層）砂岩泥岩互層と，高海水準期堆積体を萌別層砂岩層下部と称するシーケンスⅢの低海水準期堆積体を萌別層砂岩層上部と，海進期堆積体を萌別層泥岩層と称している。

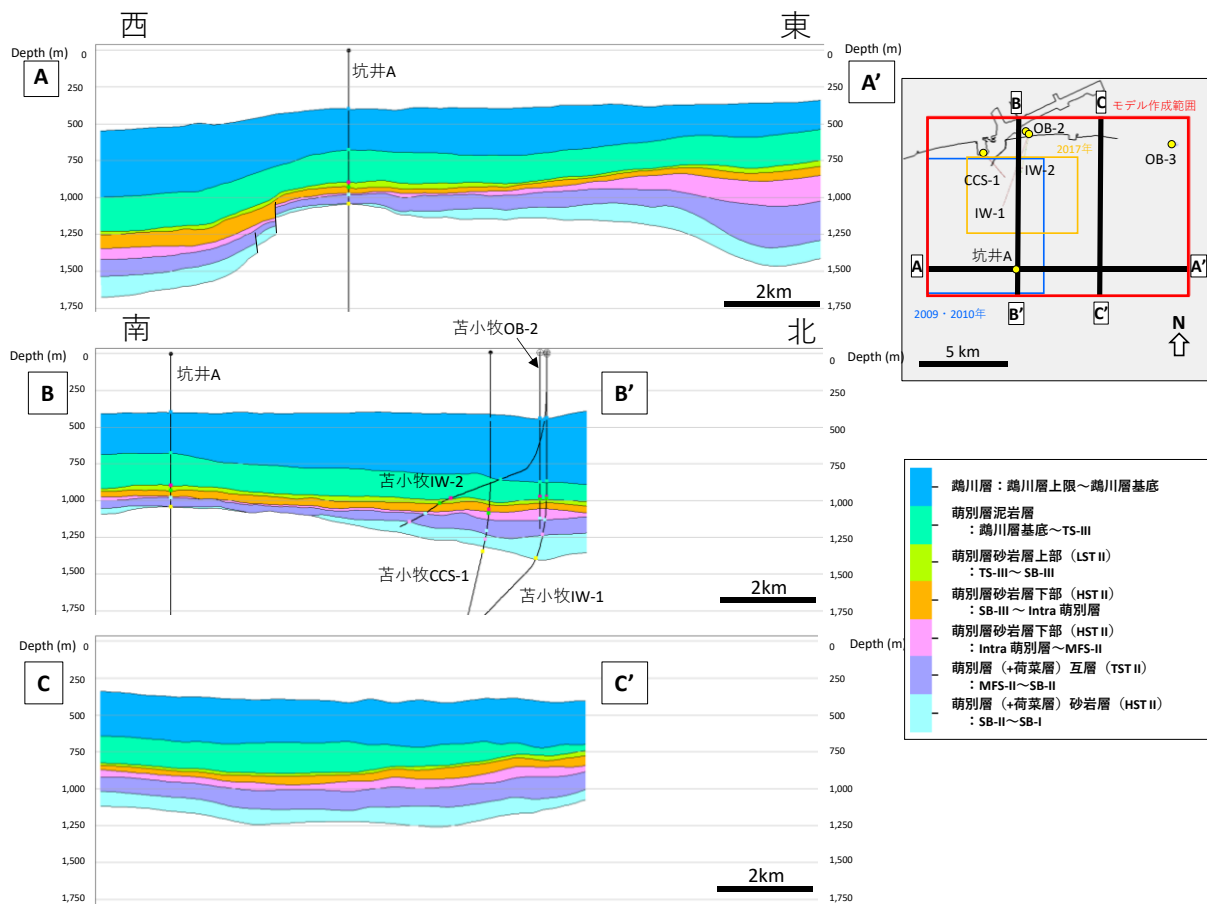


第 4.5-17 図 萌別層の層序区分と解釈ホライズン

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 4.5-17 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 4.5-18 図に示す。

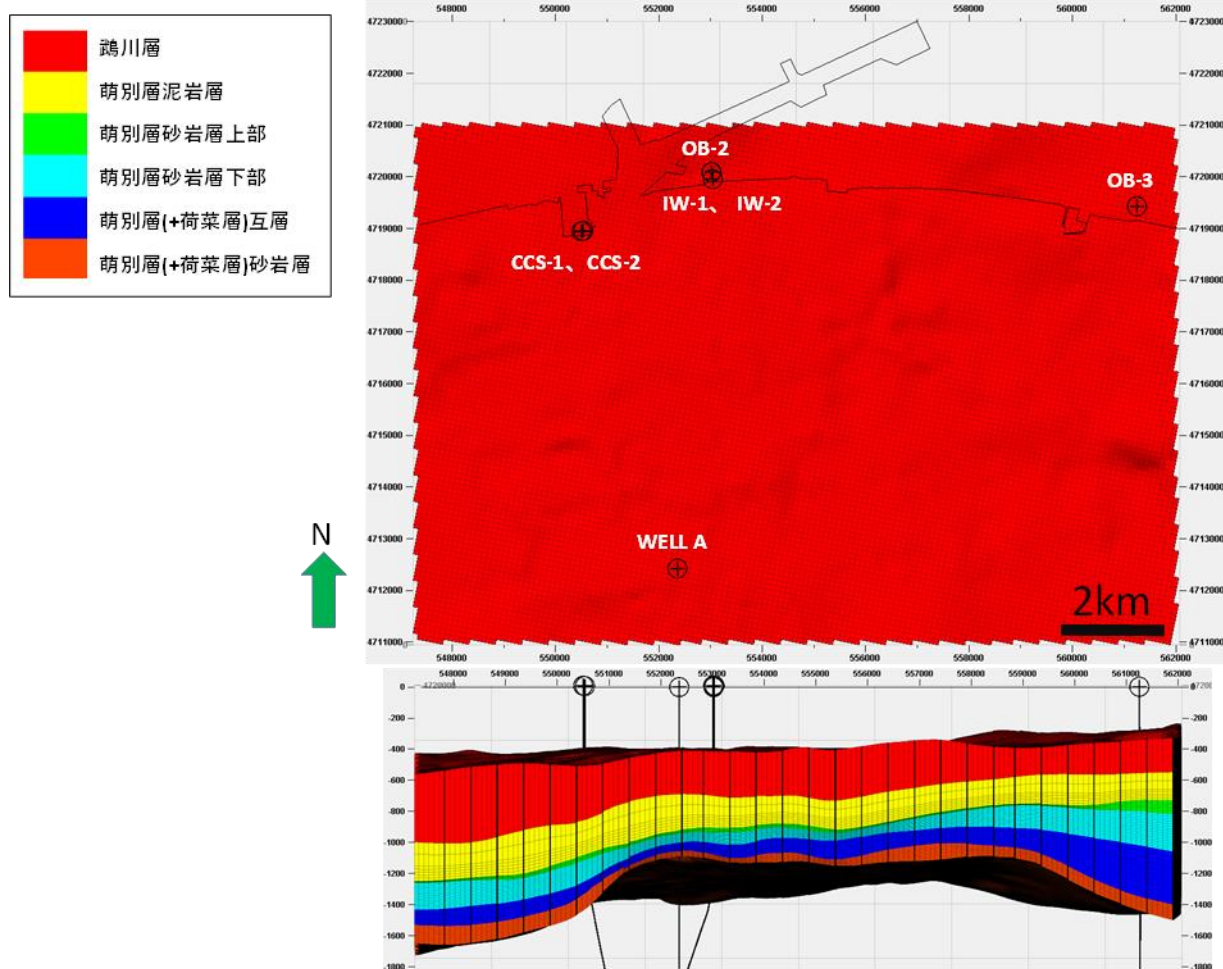


第 4.5-18 図 モデル断面

各層準内に第 4.5-5 表のようにグリッドセルを作成した。第 4.5-19 図に、グリッドセルの外観図を示す。

第 4.5-5 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 4.5-19 図 グリッドセルの外観図

c. 属性モデルの作成

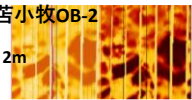

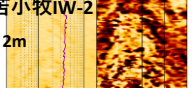
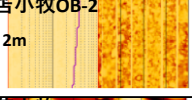

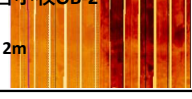
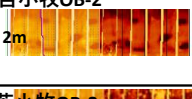
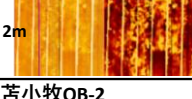
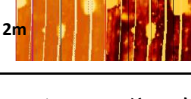
萌別層（＋荷葉層）砂岩層～萌別層砂岩層の分布を推定するために、CCS-1, IW-2, OB-2, OB-3 の 4 坑井のデータおよび 3D 弾性波探査データ, 2D 弾性波探査データを用いて堆積相解析を実施し、堆積環境について推定した。

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 4.5-17 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 4.5-20 図, 第 4.5-21 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。

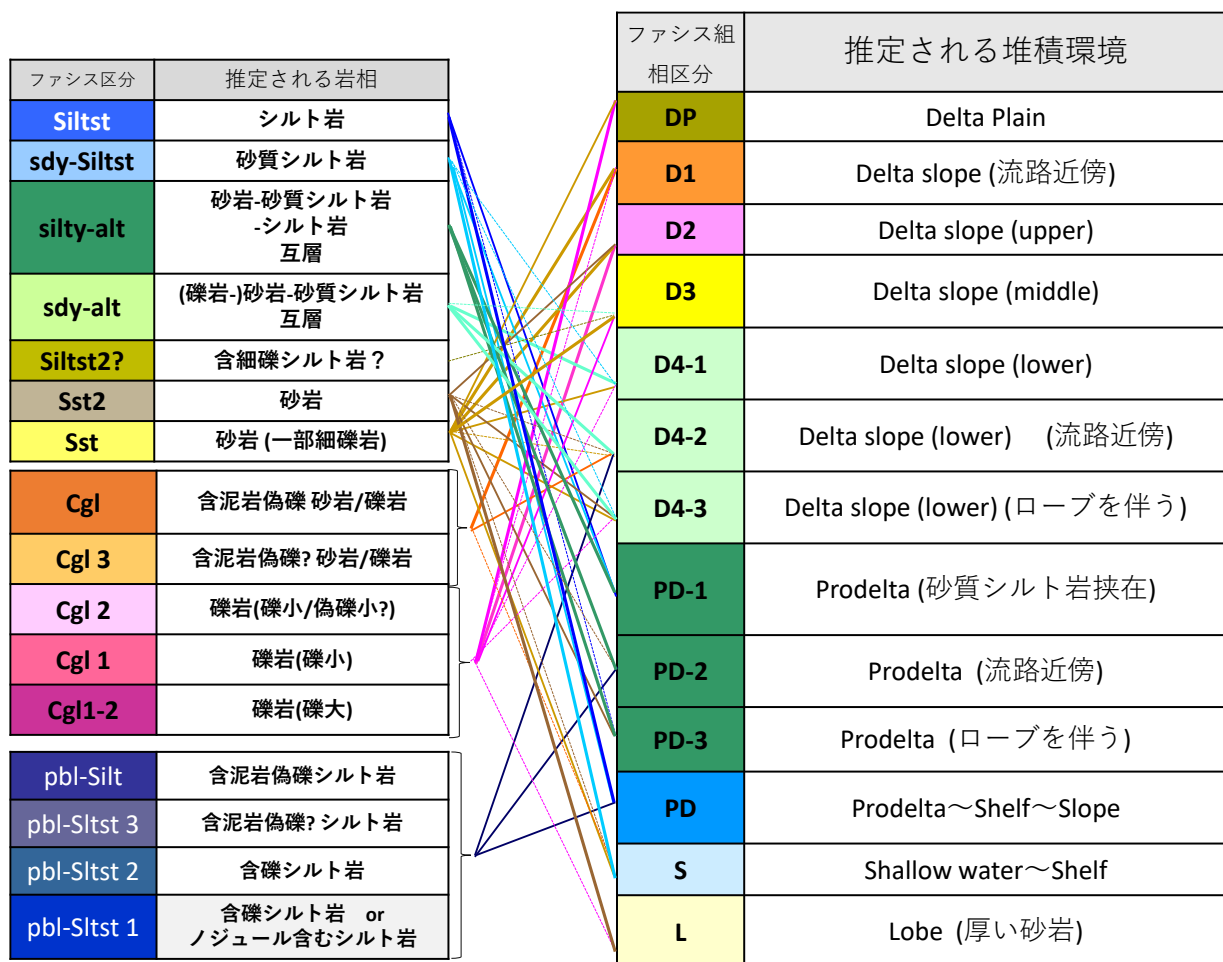
比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	検層データにおける特徴	ファシス区分	推定される岩相
暗色。 (生痕や炭質物が明暗の点で見えることもある。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色)。 比抵抗値<2, Vclay値>0.25, GR値 55~70	Siltst	シルト岩
やや暗色。 (コントラストの弱い互層状か混沌とした様相を示す。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い傾向。 - 比抵抗値がやや低い(イメージでやや暗色)。 比抵抗値 1~2, Vclay値 0.2~0.25, GR値 35~50	sdv-Siltst	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. 5-20 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

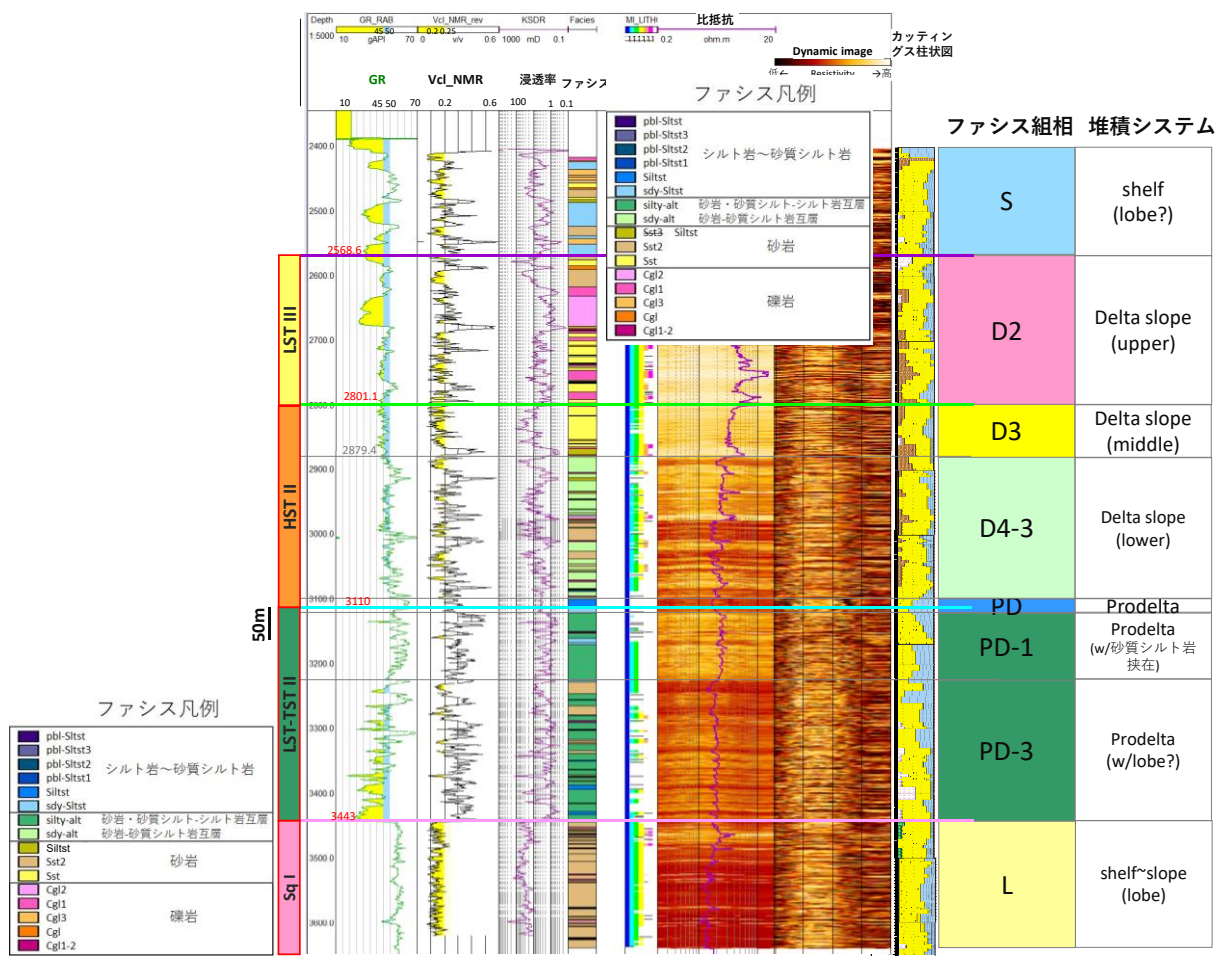
第 4.5-21 図 ファシス区分の例（礫岩など粗粒な岩相）

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 4.5-22 図に示す。

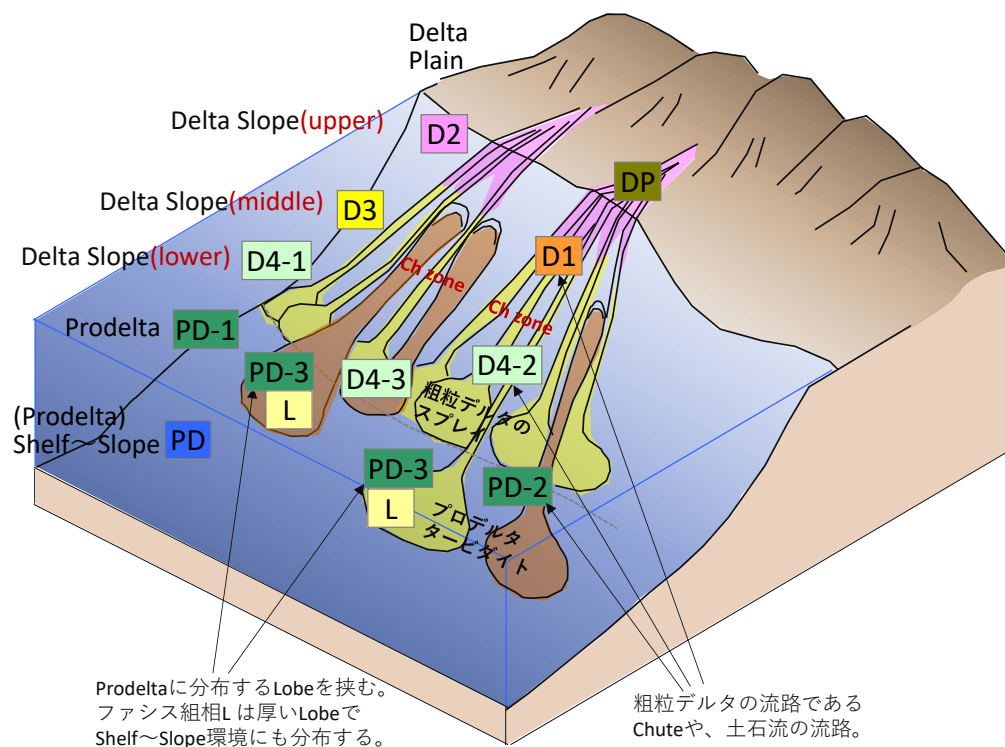


第 4.5-22 図 ファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

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 4.5-23 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 4.5-24 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 4.5-23 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 4.5-24 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 4.5-25 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 4.5-6 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

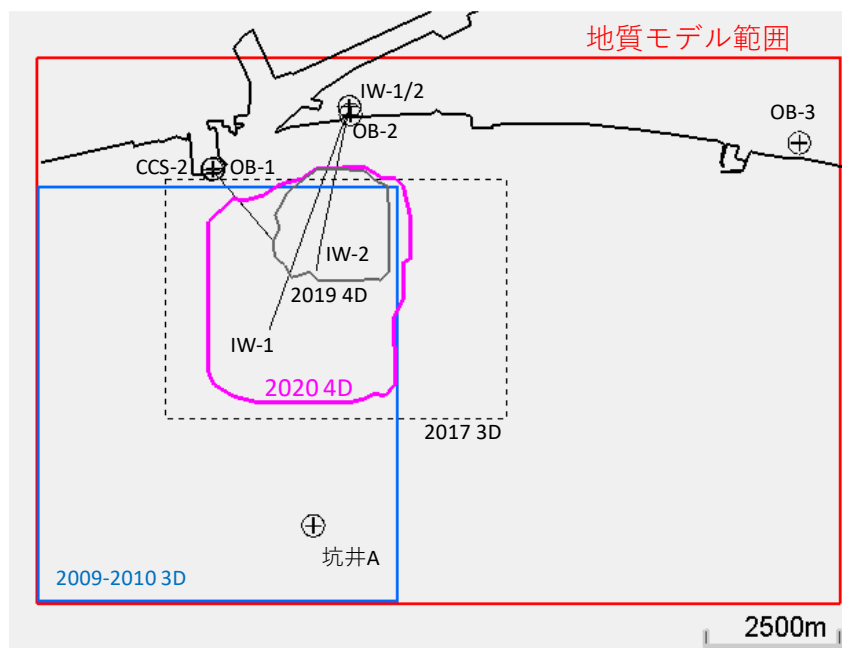
注：PHIT は全孔隙率，PHIE＝PHIT×(1-Vcl)は有効孔隙率，Vcl はクレイボリューム（clay volume, 全孔隙に占める粘土鉱物による孔隙の割合）を表す。

イ) 2021 年度地質モデルの作成

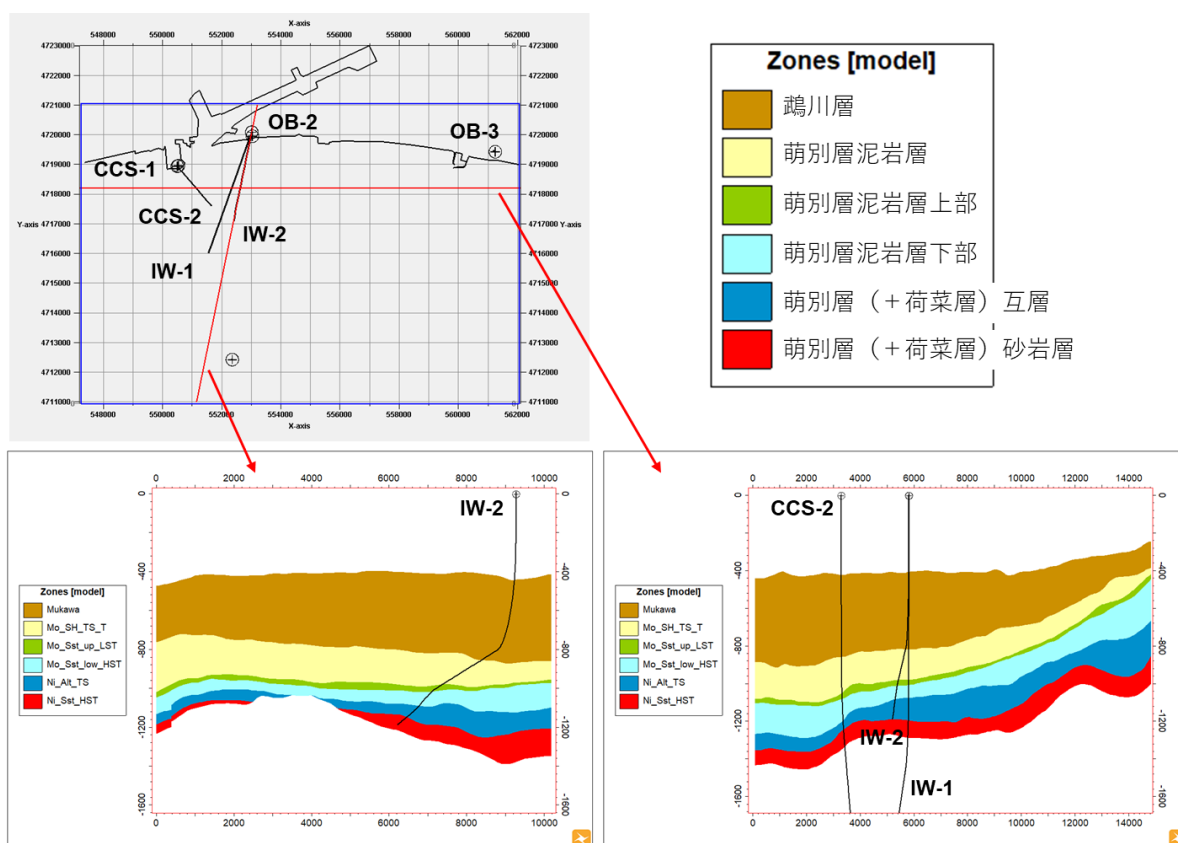
a. 構造モデルの作成

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 4.5-26 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 4.5-27 図に示す。第 4.5-27 図の平面図の赤線は断面の位置を示す。



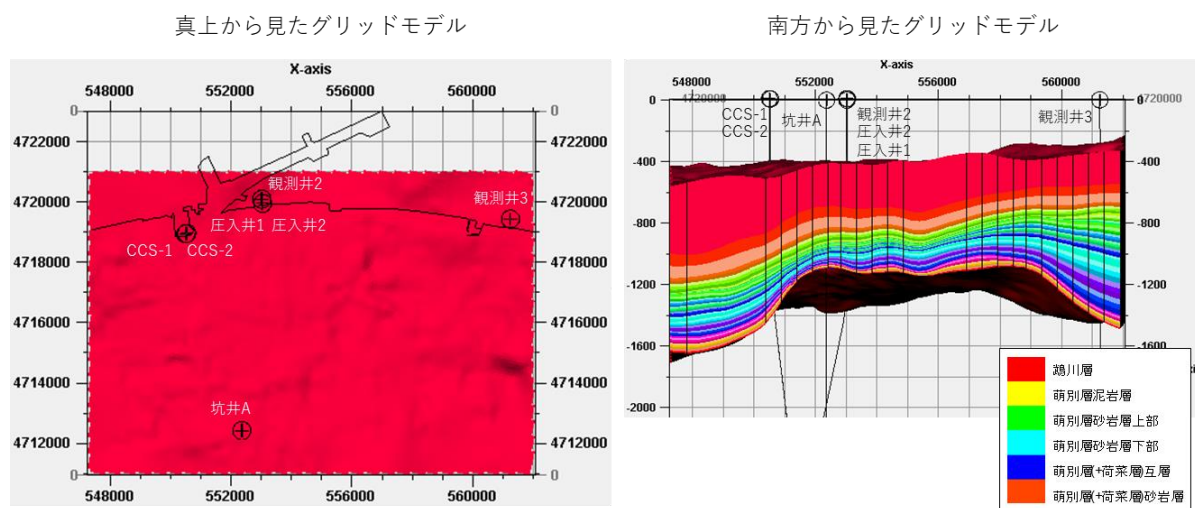
第 4.5-26 図 2021 年度地質モデル作成範囲



第 4.5-27 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 4.5-5 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

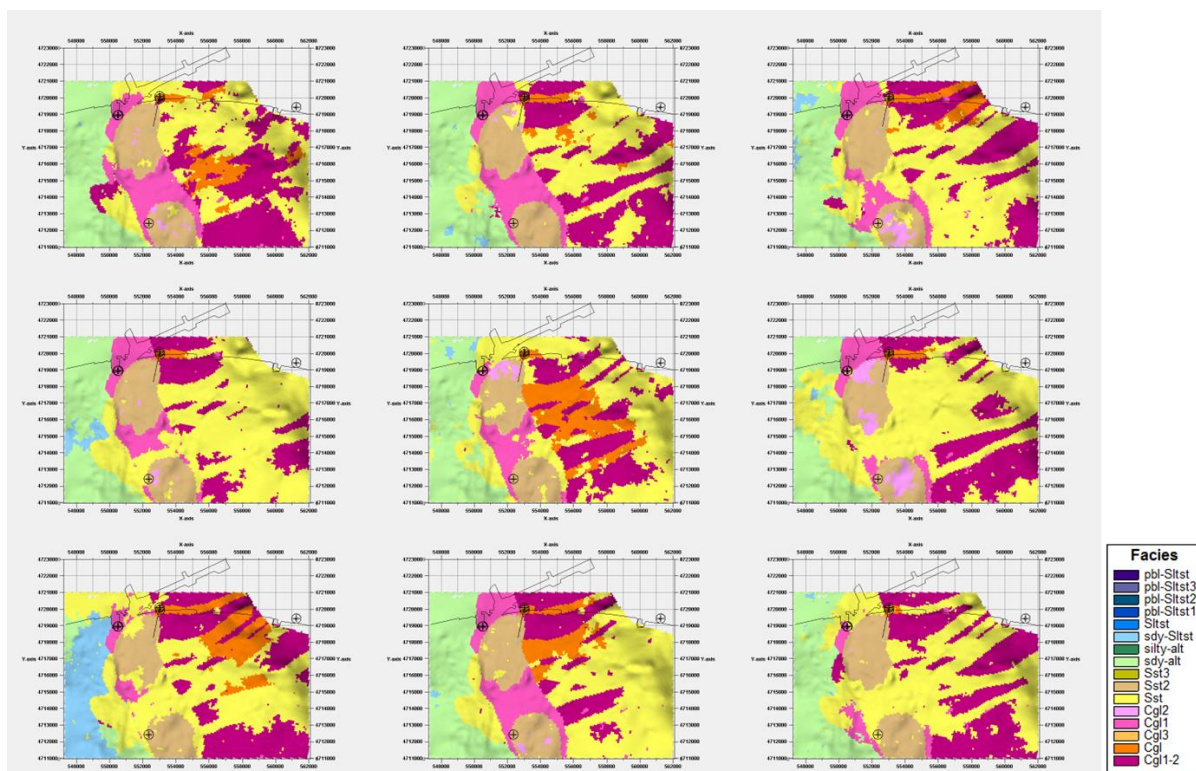
部および下部ゾーンのレイヤー等分方法を変更した。また遮蔽層層準のアップスケールファシスを検層ログファシスと整合させるために、萌別層泥岩層ゾーンのレイヤー等分方法を変更した。第 4.5-28 図に、グリッドセルの外観図を示す。



第 4.5-28 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 CO₂ 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 4.5-29 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 4.5-29 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 CO₂ 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^[1]。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^[2]。

b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧 CCS-2 および苫小牧 OB-2 および苫小牧 IW-2 で得られたデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など）および文献値から設定した（第 4.5-7 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

^[1] 圧入上限圧力の詳細は、5.2(3)①を参照のこと。

^[2] 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。

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、平成 27 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 4.5-17 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、CO₂ 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プクターを調整（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）してシミュレーションを実施した。

第 4.5-7 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 ₂ 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 ³)	2.4×10 ¹¹ m ³	
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 ⁻¹	4.56×10 ⁻⁶	
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 K _{rg}	0.60（ファシス 10,11） 0.144（その他ファシス）	Corey (1954) ^[1]
液相 相対浸透率 K _{rw}	1.00	van Genuchten (1980) ^[2]
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.05	0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.49	0.638
	測定値	Bennion (2007) ^[3]
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.275	—
	Holtz (2002) ^[4]	
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	測定値	van Genuchten (1980) ^[2]
P _c ：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-CO₂ に到達し圧入を終了した。萌別層への圧入実績を第 4.5-30 図に示す。この

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

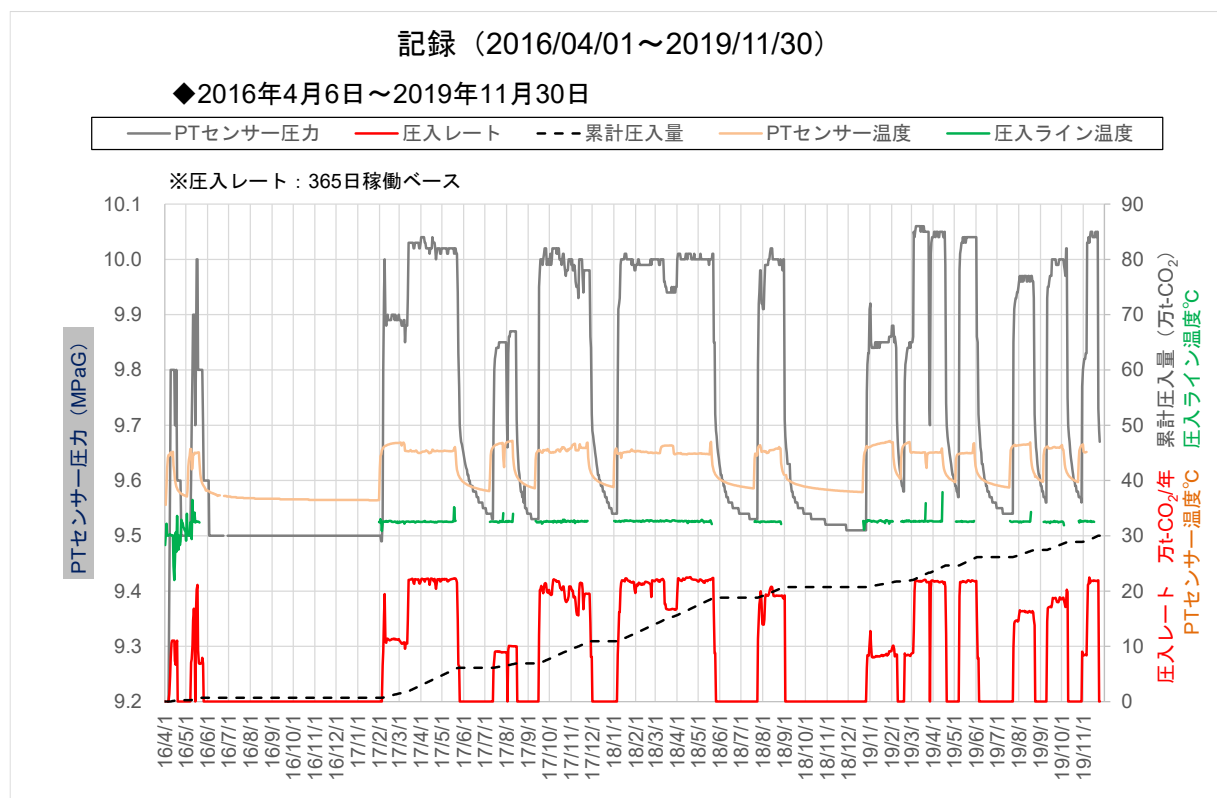
^[2] van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

^[3] Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO₂-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

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

間の最大圧入レートは約 22 万トン/年であり,最大坑底圧(圧力・温度センサーP/T Sensor)が 10.1MPaG に満たない。P/T Sensor 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。



注) 坑底温度・坑底圧力は P/T Sensor の値

第 4.5-30 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績

d. 圧入実績から推定される圧入区間

貯留層内の温度圧力を推定するために,圧入井の坑内には圧力・温度センサー (P/T Sensor) を設置している。P/T Sensor から貯留層の仕上げ区間上端までは,チュービングとライナーを介し計 432m ほど離れている(第 4.5-31 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 CO₂ を圧入可能な構造(第 4.5-31 図)である。

第 4.5-32 図および第 4.5-8 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 4.5-28

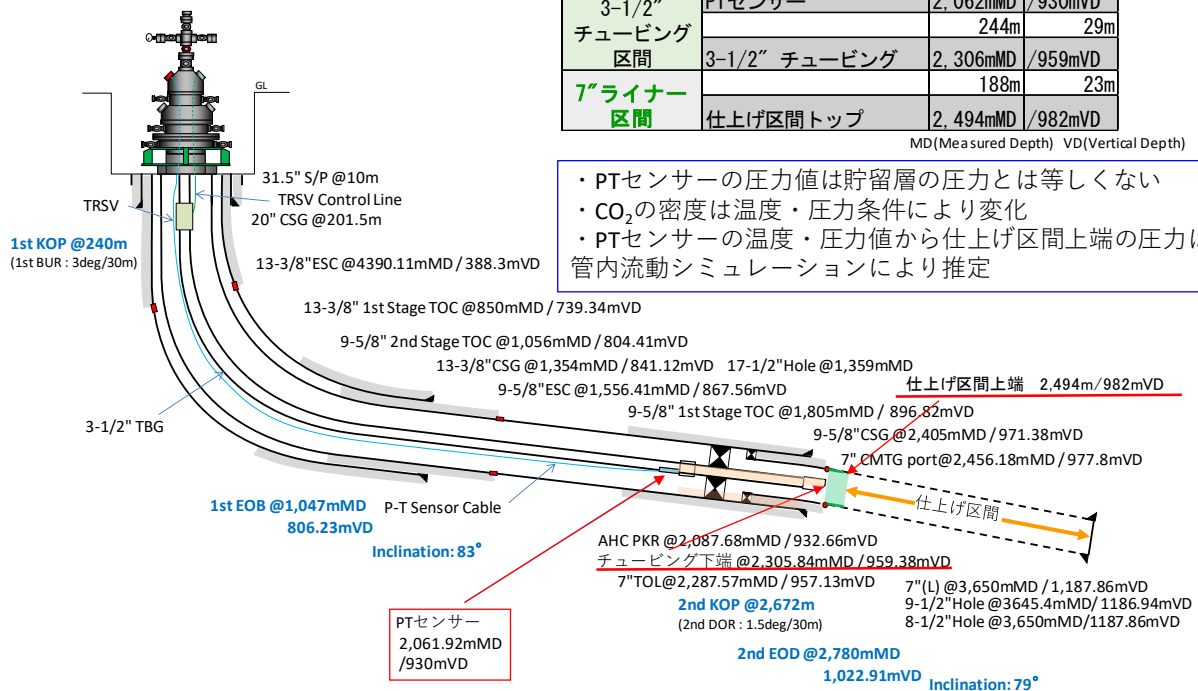
図の黒線)を上回る深度区間がCO₂の圧入される深度区間である。CO₂が圧入された貯留層における深度区間は、圧入されていない区間と比較してCO₂飽和度が高くなることで流体粘性が低下して圧入性が高まるため、圧入時の流動坑底圧の上昇が抑制され、圧入区間は変化しない。検討した範囲において、圧入に寄与した深度の下端は2019年3月15日(21.7万t-CO₂/年)が最も深度が深く1,037mVDまでであり、2018年5月25日(8.9万t-CO₂/年)が最も浅く1,018mVD付近までであったと推定される。圧入レートを大きく変化させても流動坑底圧の上昇が少ないことから、1,018mVD～1,037mVD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

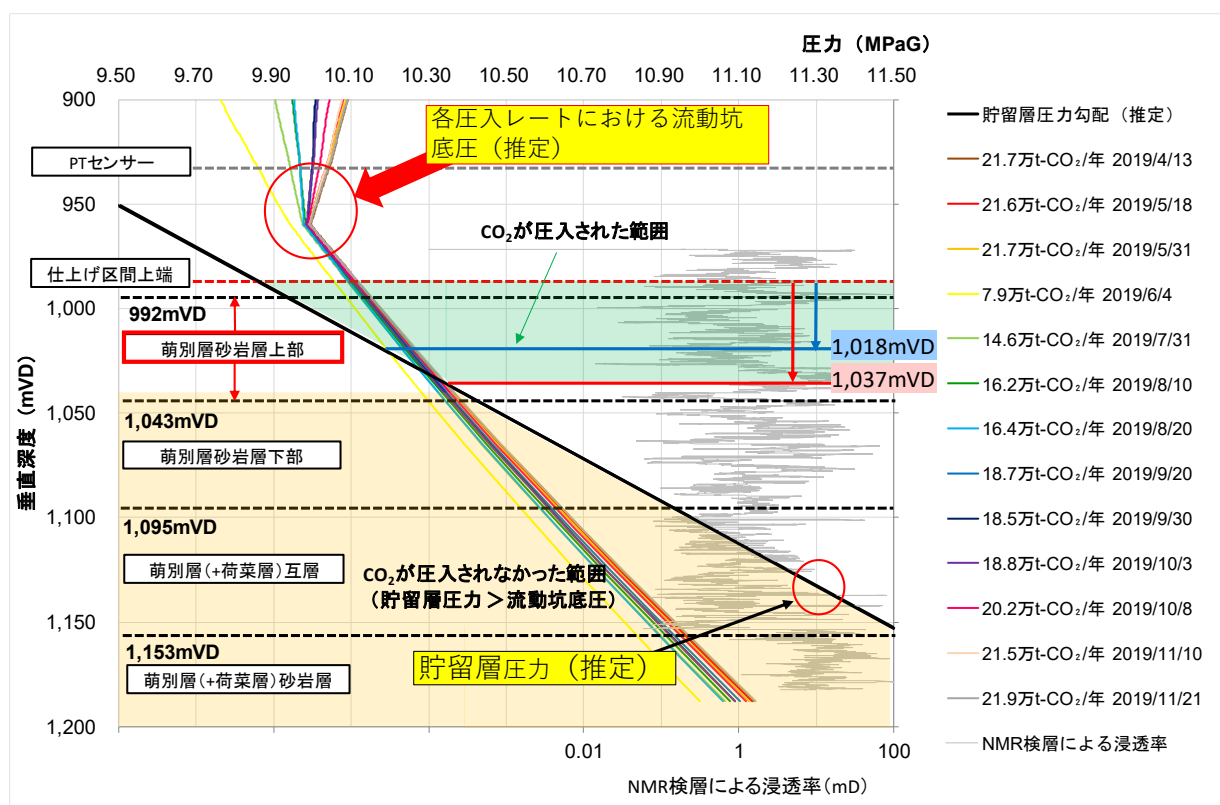
3-1/2" チュービング区間	PTセンサー	2,062mMD / 930mVD
		244m 29m
7"ライナー区間	3-1/2" チュービング	2,306mMD / 959mVD
		188m 23m
	仕上げ区間トップ	2,494mMD / 982mVD

MD(Measured Depth) VD(Vertical Depth)

- ・PTセンサーの圧力値は貯留層の圧力とは等しくない
- ・CO₂の密度は温度・圧力条件により変化
- ・PTセンサーの温度・圧力値から仕上げ区間上端の圧力は管内流動シミュレーションにより推定



第 4.5-31 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ールド圧力は無視。

第 4.5-32 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績から推定される圧入区間

第 4.5-8 表 CO₂ 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 ₂ /年)	CO ₂ の圧入区間下端深度		日時	圧入レート (万t-CO ₂ /年)	CO ₂ 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 CO₂ 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解析していることに加え、流体物性は超臨界 CO₂ 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 4.5-9 表、第 4.5-33 図は 2016 年 4 月 6 日の圧入開始以降の主な圧入停止のタイミングと、FOT 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 4.5-10 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)^[1]の手法により, 以下に示す Normalized Pseudo Pressure を用いた。

$$m(p) = \left(\frac{\mu z}{2p} \right) \int_{p_0}^p \frac{2p dp}{\mu z} \quad \text{式 (4.5-1)}$$

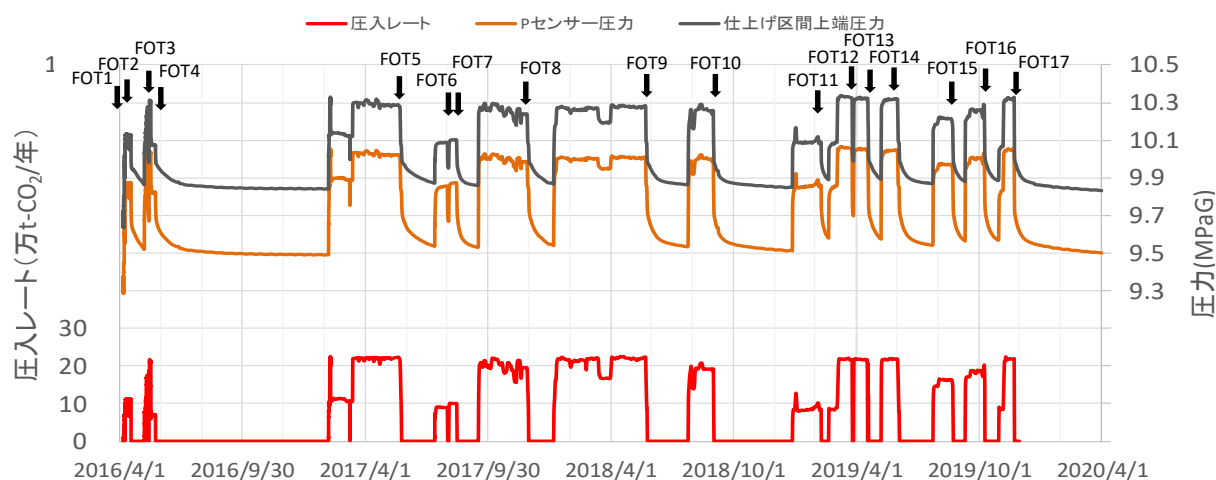
$m(p)$: Normalized Pseudo Pressure, \bar{p} : 貯留層平均圧力

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 CO₂ 密度を推定し, その密度をもとに PT センサーから離れた位置にあたる仕上げ区間上端における圧力挙動を推定したカーブ (補正) も示した。また, PT センサーの圧力・温度条件から推定される CO₂ の密度の変化も示した。解析には Paradigm 社製の圧力解析ソフト「Interpret」を使用した。第 4.5-34 図にそれぞれのログーログプロットを示す。

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

第 4.5-9 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 ₂ /年	t-CO ₂
	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

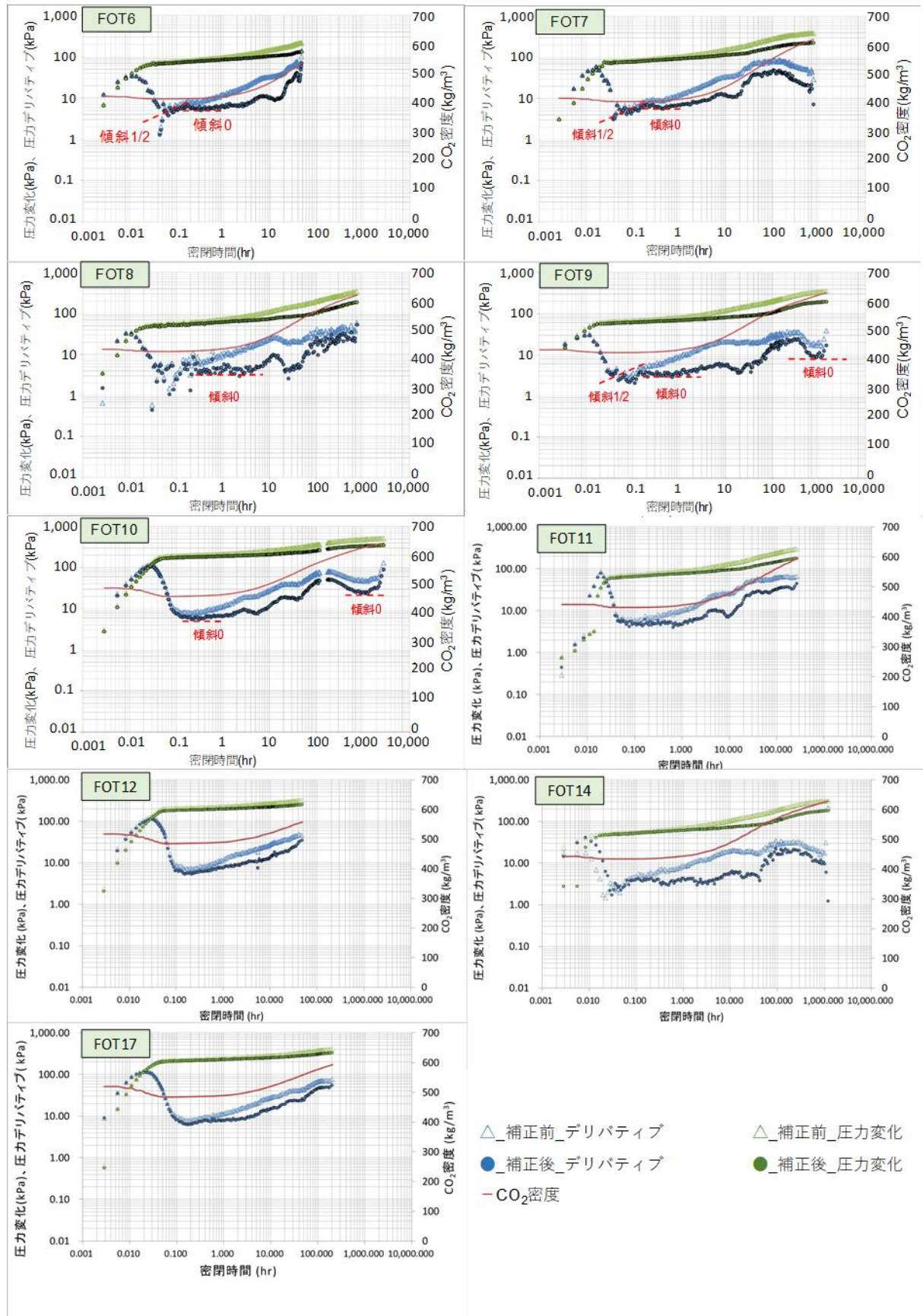


第 4.5-33 図 FOT を実施したタイミング

第 4.5-10 表 FOT 一覧(解析の有無)

FOT	圧入 停止 方法	CO ₂ 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×。CO₂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。



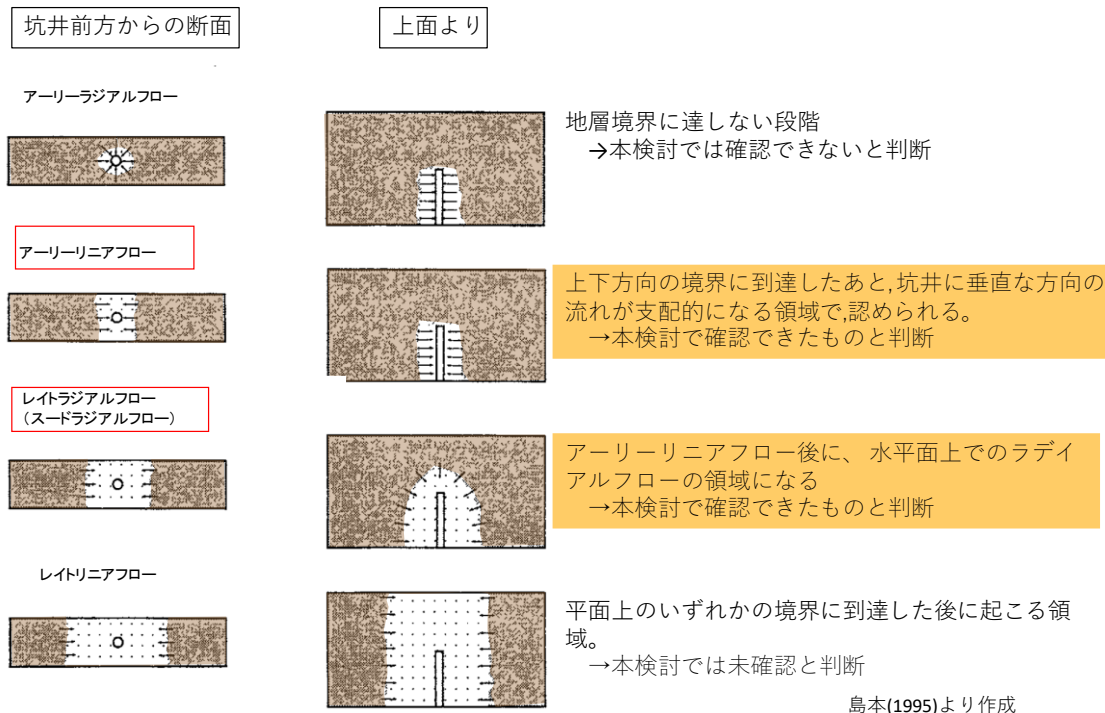
第 4.5-34 図 FOT のログ-ログプロット (FOT6~10, 11, 12, 14, 17)

参考のため、第 4.5-35 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° 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 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 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) ^[1]より作成. ログ-ログプロットにおいて, アーリーリニアフローは 1/2 傾斜のデリバティブカーブとして認識され, レイトラジアルフロー (スードラジアルフロー) は 0 傾斜のデリバティブカーブとして認識される。

第 4.5-35 図 水平井で予想される圧力挙動

1) CO₂ 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, CO₂ 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。

$$t \frac{dP}{dt} = \frac{70.6qB\mu}{kh} \quad (\text{式 4.5-2})$$

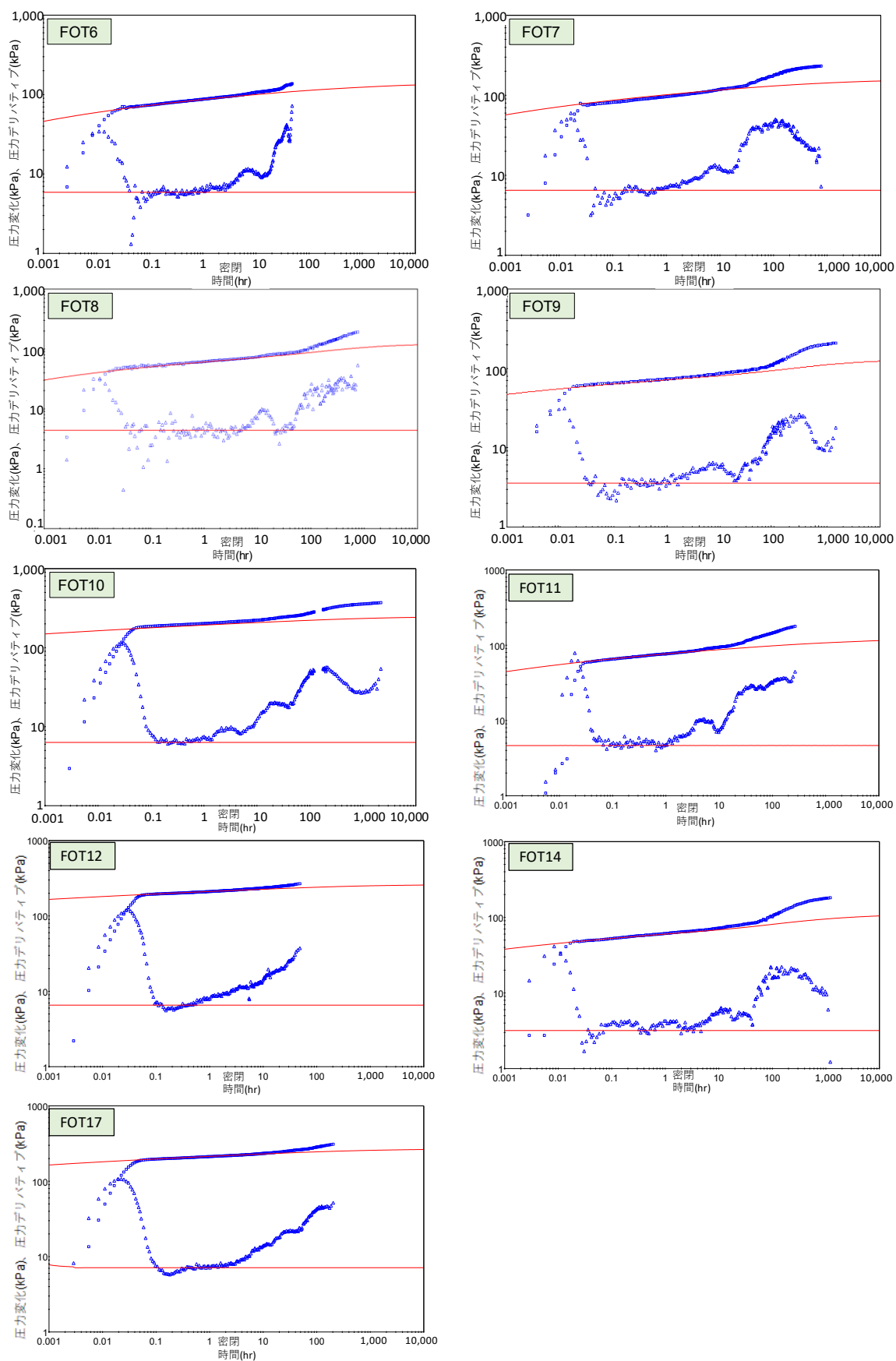
注) k : 浸透率、h : 有効層厚、q : 流量、B : 容積係数、μ : 粘度

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 4.5-11 表に、マッチング状況を第 4.5-36 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 4.5-11 表 CO₂ 領域ラジアルフロー解析の入力値と結果 (FOT6~12, 14, 17)

	単位	FOT6	FOT7	FOT8	FOT9	FOT10	備考欄
圧入	m ³ /日	129,623	146,691	124,766	128,502	277,785	圧入停止
レート	t-CO ₂ /年	88,474	100,124	85,159	87,709	189,602	直前のレート
累計圧入量	t-CO ₂	65,793	69,070	109,250	188,136	207,209	
有効層厚	m	19					CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028					9.82MPaG/37.8℃
CO ₂ 粘性	cP	0.0521					
孔隙率		0.28					検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8					高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵					9.82MPaG/37.8℃
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷					
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵					
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶					コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,000	3,078	3,900	4,950	6,000	解析結果
浸透率	mD	158	162	205	261	316	
	単位	FOT11	FOT12	FOT14	FOT17		備考欄
圧入	m ³ /日	122,509	319,403	115,063	317,189		圧入停止
レート	t-CO ₂ /年	83,618	218,008	78,536	216,498		直前のレート
累計圧入量	t-CO ₂	217,425	233,438	261,632	300,012		
有効層厚	m	19					CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028					9.82MPaG/37.8℃
CO ₂ 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8℃
孔隙率		0.28					検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8					高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵					9.82MPaG/37.8℃
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷					
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵					
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶					コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,600	6,650	4,940	6,080		解析結果
浸透率	mD	190	350	260	320		



第 4.5-36 図 ラジアルフロー解析マッチング状況 (FOT6~12, 14, 17)

F0T10 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×有効層厚の値が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 CO₂ 飽和率が上昇することで、CO₂ の相対浸透率が増加するためであると考えられる。F0T11 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(4.5-3)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。

$$k \times h = \frac{162.6 \cdot q \cdot B \cdot \mu}{m} \quad \text{式(4.5-3)}$$

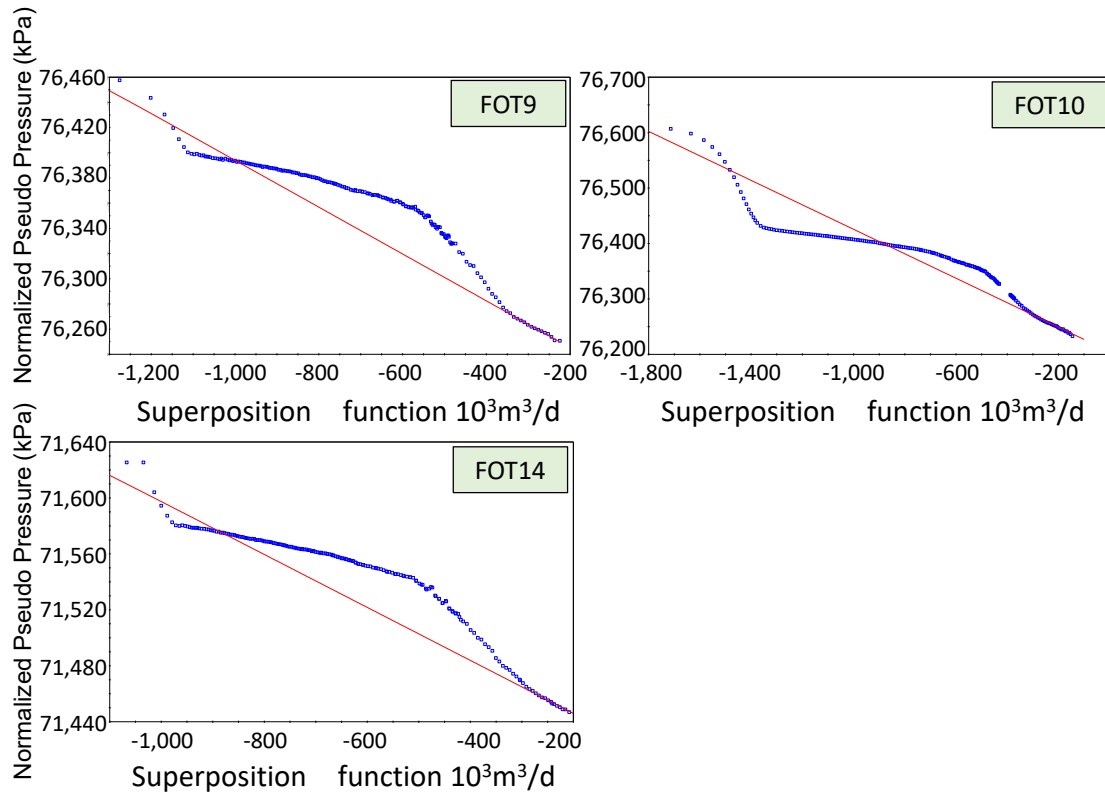
注) k: 浸透率, h: 有効層厚, q: 流量, B: 容積係数, μ : 粘性, m: ホーナープロットにおける傾きを示す。

圧力解析ソフト「Interpret」によるホーナープロット法では、Superposition function 式(4.5-4)を横軸に、Normalized Pseudo Pressure 式(4.5-1)を縦軸にとり、式(4.5-3)の傾き m を求め、k×h (浸透率×有効層厚)を算出する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式(4.5-4)}$$

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 4.5-37 図に、解析結果を第 4.5-12 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 CO₂ が到達した領域の浸透率よりも、ホーナープロットで対象とした貯留層全体の浸透率の方が低いことを示している。CO₂ が圧入された領域が局所的であることや、水平方向に不均質に圧入されていることなどが理由として挙げられる。



第 4.5-37 図 ホーナープロット解析状況 (FOT9, FOT10, FOT14)

第 4.5-12 表 ホーナープロット解析結果

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

3) 探査半径の推定結果

レイトラジアルフローは探査半径（圧力伝搬が及んだ範囲）が坑井長（圧入区間長）を上回った時に検知される。IW-2 の仕上げ区間長は、水平方向距離 1,140m 程度となるため、レイトラジアルフローは探査半径が 1,140m を超えているはずである。また、CO₂ を深部塩水層に圧入する場合、貯留層内での流体の動きやすさの指標となるモビリティ（浸透率/粘性）は CO₂ 領域と地層水領域およびその中間であるショックフロントの 3 領域で異なるものと考えられる。この考えに基づき、探査半径を式 (4.5-5) ～式 (4.5-7) (Rahman et al. (2014) ^[1]) を用いて算出した。ここで、FOT9, FOT10, FOT14 のそれぞれにおいて、デリバティブカーブが上側に凸となる挙動（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 4.5-13 表に CO₂ 領域およびショックフロン

^[1] 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)

ト領域の探査半径の推定結果を示す。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3}} \left(\sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right) + R_2 \left(1 - \sqrt{\frac{M_3}{F_3} \frac{F_2}{M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (4.5-5)}$$

$$R_2 = R_1 \left(1 - \sqrt{\frac{M_2}{F_2} \frac{F_1}{M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (4.5-6)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t} \quad \text{式 (4.5-7)}$$

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, ϕ :孔隙率, μ :粘性, c_t :総合圧縮率, Δt :密閉時間, 下付き番号 1: CO₂ 領域, 下付き番号 2: ショックフロント領域, 下付き番号 3: 塩水領域を示す。

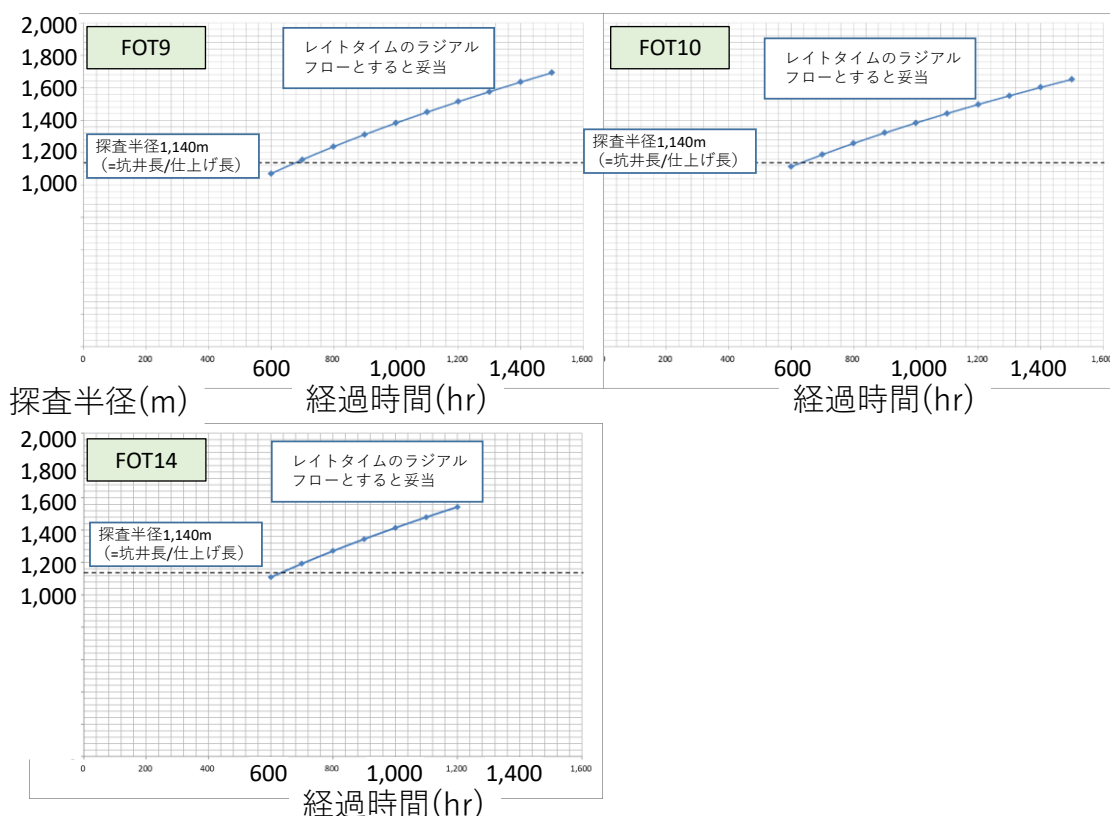
第 4.5-13 表 探査半径の算出に用いた入力値と計算結果

	入力値		FOT9	FOT10	FOT14	適用
CO ₂ 領域	半径	m	422	464	421	式 (4.5-7) 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 (4.5-6) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	CO ₂ 領域と同じと仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	760	760	855	ホーナープロット解析値
	浸透率	mD	40	40	45	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	600	600	600	ショックフロント終了時
	粘性	cP	0.052	0.052	0.052	CO ₂ 領域と同じと仮定
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	CO ₂ 領域と同じと仮定
	総合圧縮率	1/kPa	0.00136	0.00136	0.00136	相対浸透率曲線から導いたフラクショナルフロー曲線からショックフロントでの Sg=0.28 を算出して計算
塩水領域	有効層厚	m	181	181	181	層厚 220m に平均的なネットグロス比 0.78 を考慮
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	25,533	19,150	24,465	ホーナープロット解析値に塩水 (0.77cP) と CO ₂ (0.05cP) の粘性比を乗じたもの
	浸透率	mD	141	106	135	上記 2 つの値より計算
	粘性	cP	0.77	0.77	0.77	9.82MPaG, 37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	検層解析結果
	総合圧縮率	1/kPa	0.00024	0.00024	0.00024	9.82MPaG, 37.8°C

FOT9, 10, 14 のデリバティブカーブにおいて圧入停止時間 600 時間以降で認められたレイトラジアルフローに対し, 式 (4.5-5) を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した

(第 4.5-38 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 4.5-38 図 ホーナープロット解析状況 (FOT9, FOT10, FOT14)

4) フォールオフ解析のまとめ

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

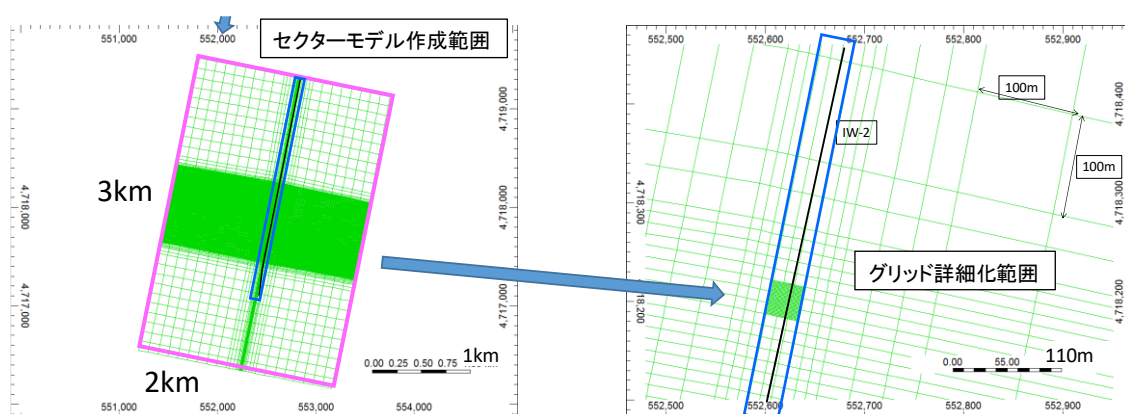
FOT9, 10, 14 の密閉時間 10 時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜 0 の挙動に対し、ホーナープロット法を適用した。その結果それぞれの FOT で推定された貯留層平均圧力は初期圧力の 9.82MPaG に近い値となり、圧力上昇の影響が及ばない領域の挙動を示している可能性が示唆された。

FOT9, 10, 14 において、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、FOA に際して作成したログ-ログプロットの挙動とシミュレーションにより再現される挙動が近づくように貯留層モデルのパラメータを調整することによりヒストリーマッチングを実施した。

ヒストリーマッチングでは、貯留層モデルから部分的にセクターモデルを切り出し、坑井が通過するグリッドの周辺を 1 m×1 m 程度の詳細なグリッドに細分化したモデルを用いた（第 4.5-39 図）。また、グリッドに入力した物性値パラメータは第 4.5-14 表と同様とした。



第 4.5-39 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（4.5-8）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。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \sqrt{(d_{sim}^i - d_{obs}^i)^2} \quad \text{式 (4.5-8)}$$

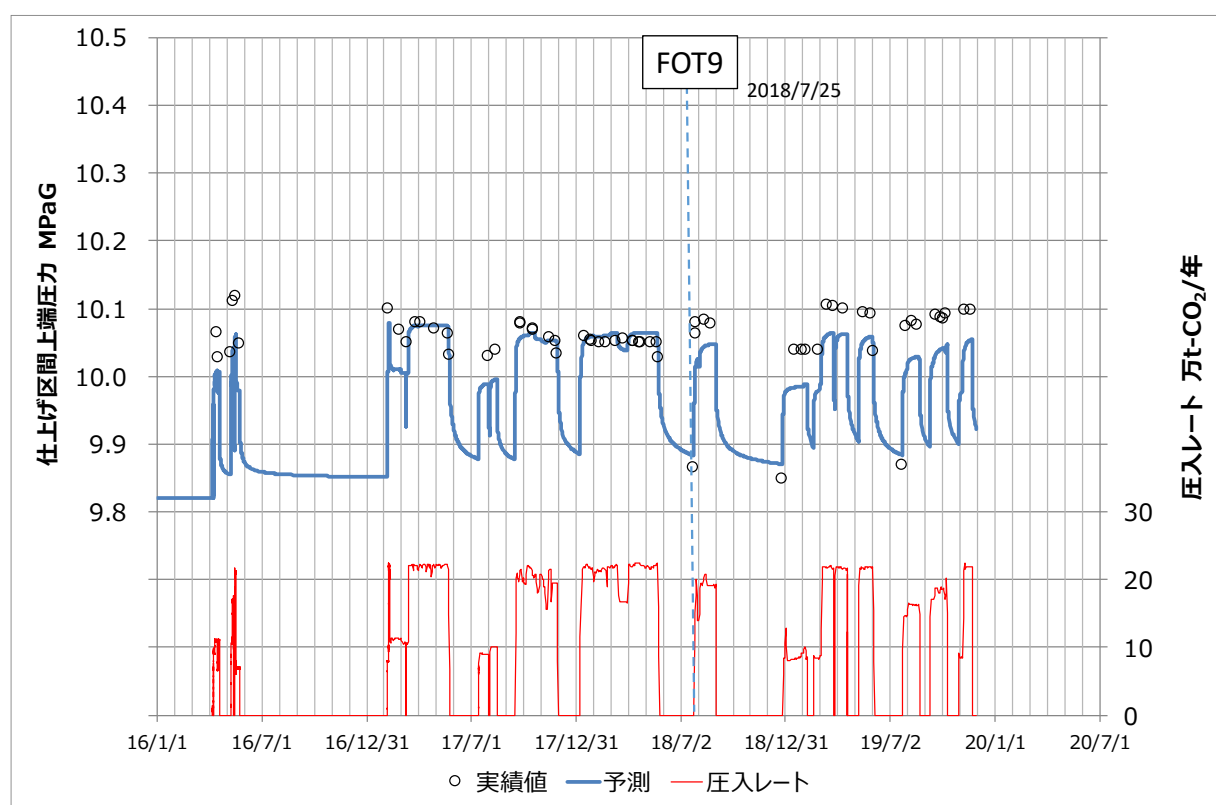
注) nobs:実績データ数, dsim:シミュレーション計算値, dobs:実績データ

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 4.5-14 表）。具現像 24 による例を第 4.5-40 図に示す。FOT9（2018/7/25）の前後で仕上げ区間上端深度による圧力実績が、シミュレーションによる予測値よりも高くなる傾向が認められた。

第 4.5-14 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 4.5-40 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

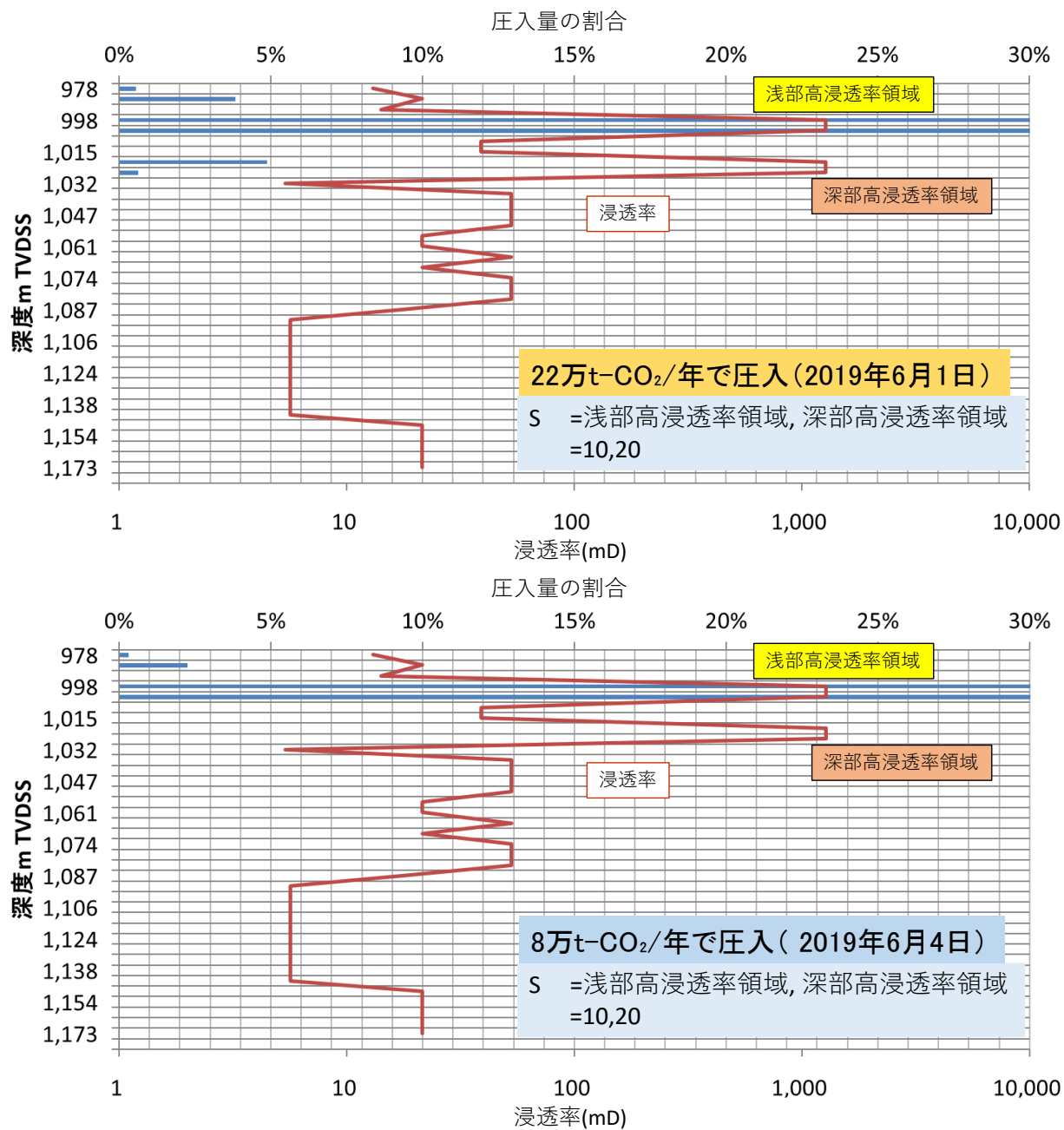
(4.5-9)の流量と圧力差の関係式における、式(4.5-10)に示す Well Injectivity Index(以下、「WI」と称する。)中のSで示される。出砂などにより坑井近傍で圧入が阻害されるとプラスとなる。

$$Q = \sum WI \lambda (P_{bh} - P_o) \quad \text{式(4.5-9)}$$

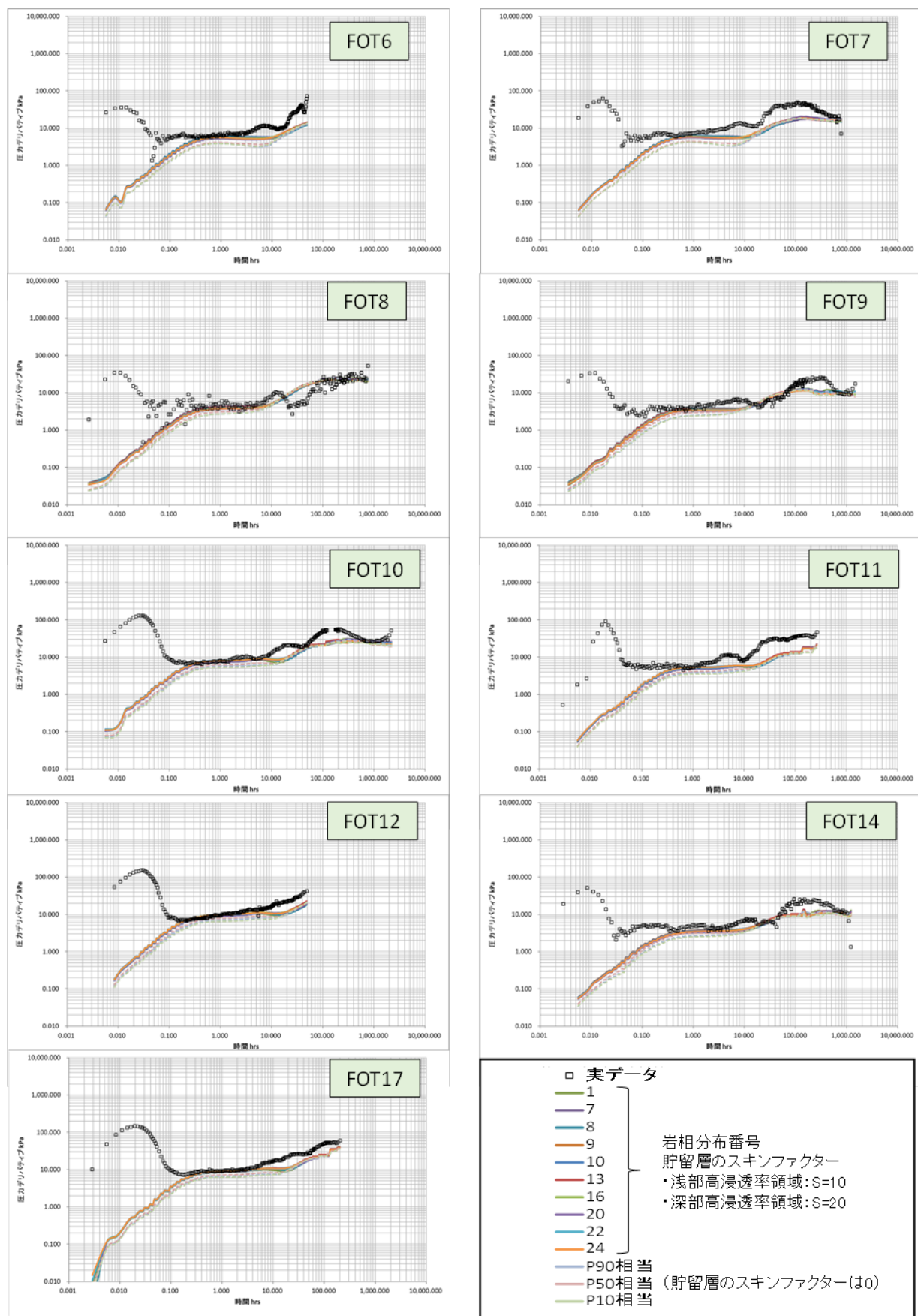
$$WI = \frac{2\pi kh}{\ln(r_e/r_w) + S} \quad \text{式(4.5-10)}$$

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CO₂と水の相対浸透率をそれぞれの粘性で割り合計したもの), rw: 坑井半径, re: 有効半径(=0.37×(グリッド面積)0.5), S: スキンファクター

圧入実績から、萌別層砂岩層上部に2層準に浸透性の良好な層準(以下、「高浸透率領域」と称する。)があり、その層厚は合計19m程度(第4.5-11表)であると考えられる。圧入井付近においては、第4.5-41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ファ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ファクターについて、幾つかの組み合わせで検討を行った結果、浅部高浸透率領域で10、深部高浸透率領域で20の値をそれぞれ選択することで圧入時の状況を再現することができた。また、第4.5-42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 4.5-41 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 4.5-42 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

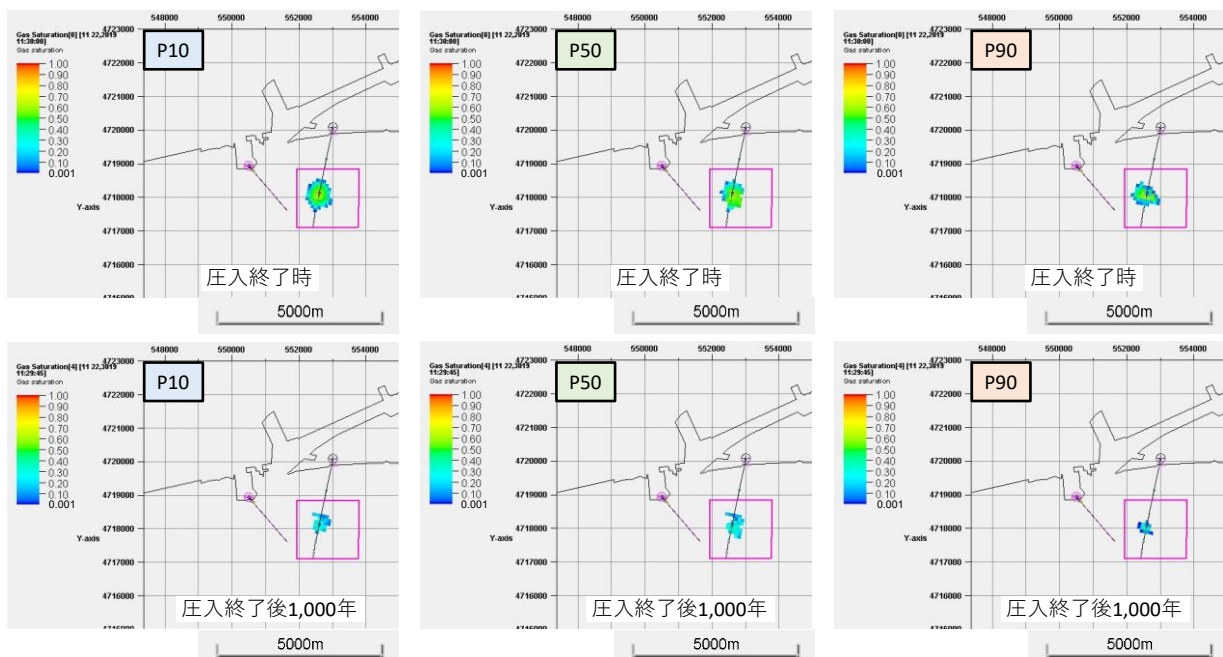
f. 圧入した CO₂ の平面的な分布範囲

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

第 4.5-43 図に P10, P50, P90 の各モデル（具現像）における圧入終了時と圧入終了後 1,000 年時点における CO₂ 飽和度を示す。本検討においては、CO₂ 飽和度の分布範囲は圧入終了時が最大となり、圧入終了時に坑内圧力の低い P10 モデルによる分布が最大となる。したがって、P10 モデルにより予測された圧入終了時の CO₂ 分布範囲を、萌別層での最大となる CO₂ 飽和度分布範囲とした（第 4.5-44 図）。第 4.5-44 図に示す座標は、2019 年 3 月 28 日付けにて許可済みである、変更許可申請書に示した CO₂ 飽和度分布範囲を示す。2019 年度モデルシミュレーションにより予測される CO₂ 飽和度分布範囲はその範囲に含まれるため、本申請においても同座標を CO₂ 飽和度分布範囲とする。

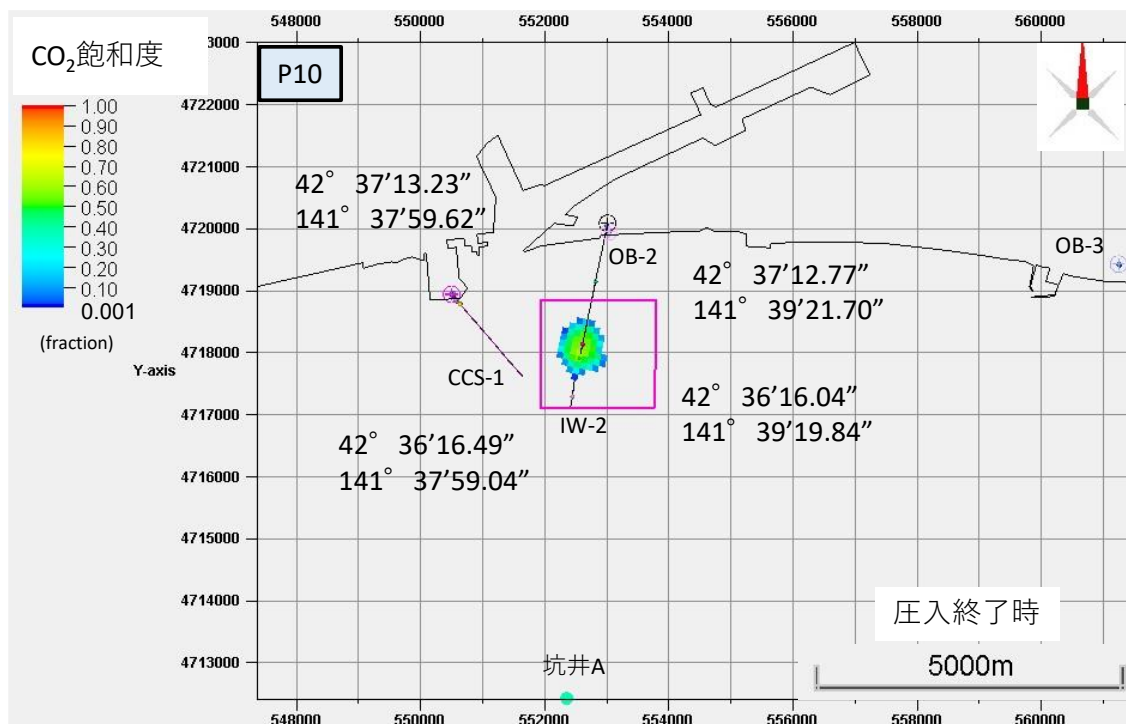
第 4.5-45 図に萌別層での P10, P50, P90 の各モデル（具現像）における圧入終了後 1,000 年時点における最大となる溶解 CO₂ 量分布範囲を示す。溶解 CO₂ 量は CO₂ 飽和度分布で示される CO₂ が地層水に溶解することにより生じるため、圧入停止からの経過時間が長い方がより広範囲に分布する傾向があるため、圧入終了後 1,000 年時点を考慮した。その結果、P10 モデルにより予測された圧入終了時の溶解 CO₂ 量分布範囲を、萌別層での最大となる溶解 CO₂ 量分布範囲とした（第 4.5-46 図）。第 4.5-46 図に示す座標は、2019 年 3 月 28 日付けにて許可済みである、変更許可申請書に示した溶解 CO₂ 量分布範囲を示す。2019 年度モデルシミュレーションにより予測される溶解 CO₂ 量分布範囲はその範囲に含まれるため、本申請においても同座標を溶解 CO₂ 量分布範囲とする。

第 4.5-15 表に萌別層における CO₂ の分布範囲をまとめた。CO₂ 飽和度よりもより広範囲におよぶ溶解 CO₂ 量の最大分布範囲を、CO₂ の分布範囲とする。



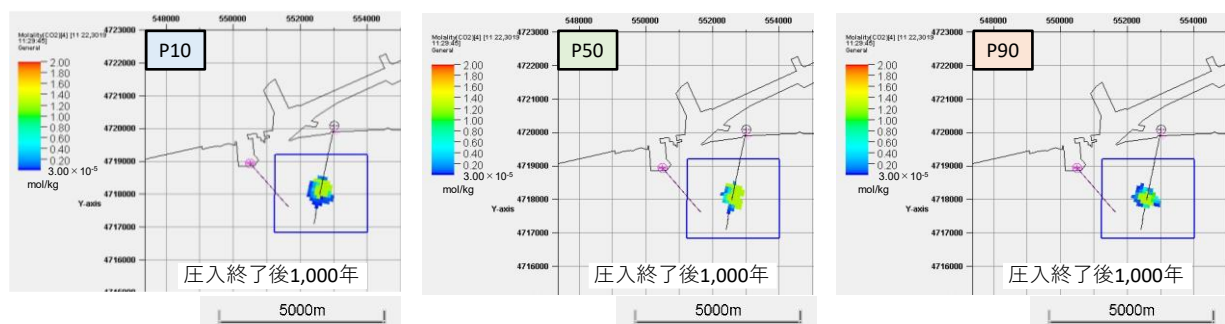
注：各図の赤枠は、本申請以前の申請で CO₂ 飽和度分布範囲とした範囲を示す。

第 4.5-43 図 萌別層砂岩層（P10, P50, P90 モデル）での CO₂ 分布範囲（CO₂ 飽和度）

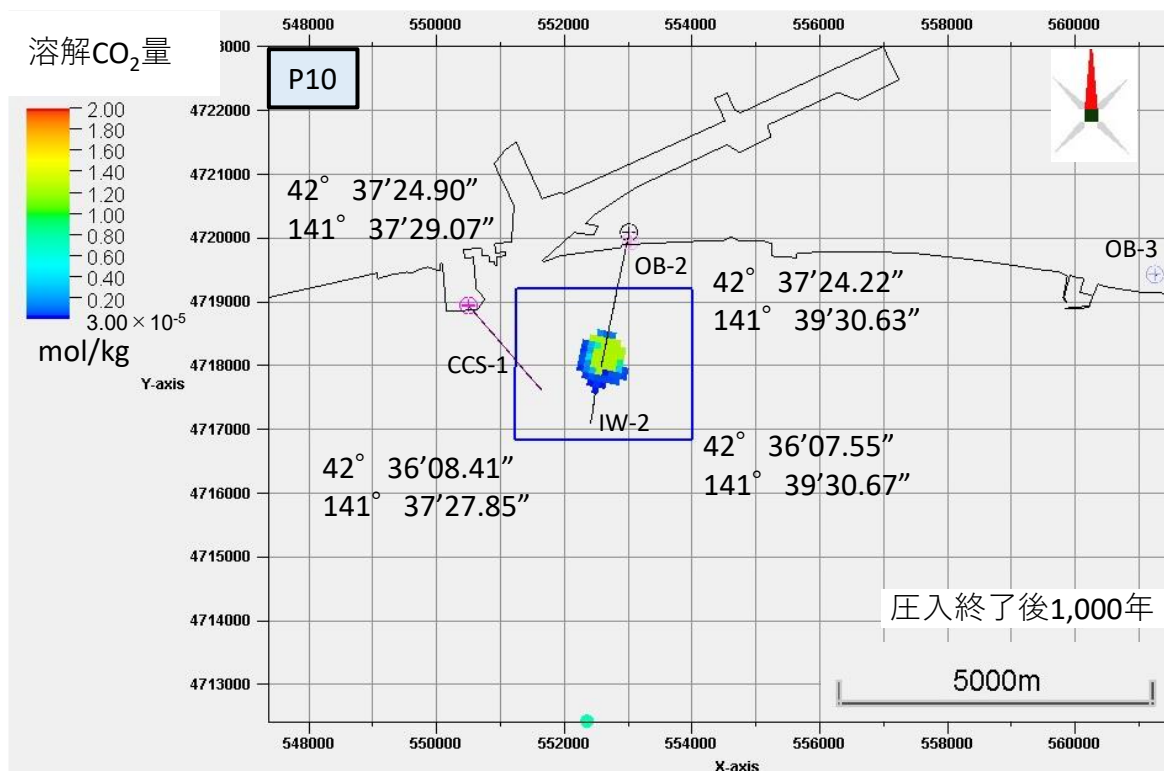


注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より圧入終了後1,000年後までに予想される最大のCO₂飽和度分布範囲を示す。

第 4.5-44 図 萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲 (P10 モデル CO₂ 飽和度分布)



第 4.5-45 図 萌別層砂岩層(P10, P50, P90 モデル) での CO₂ 分布範囲 (溶解 CO₂ 量分布)



第 4.5-46 図 萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲 (P10 モデル溶解 CO₂ 量分布)

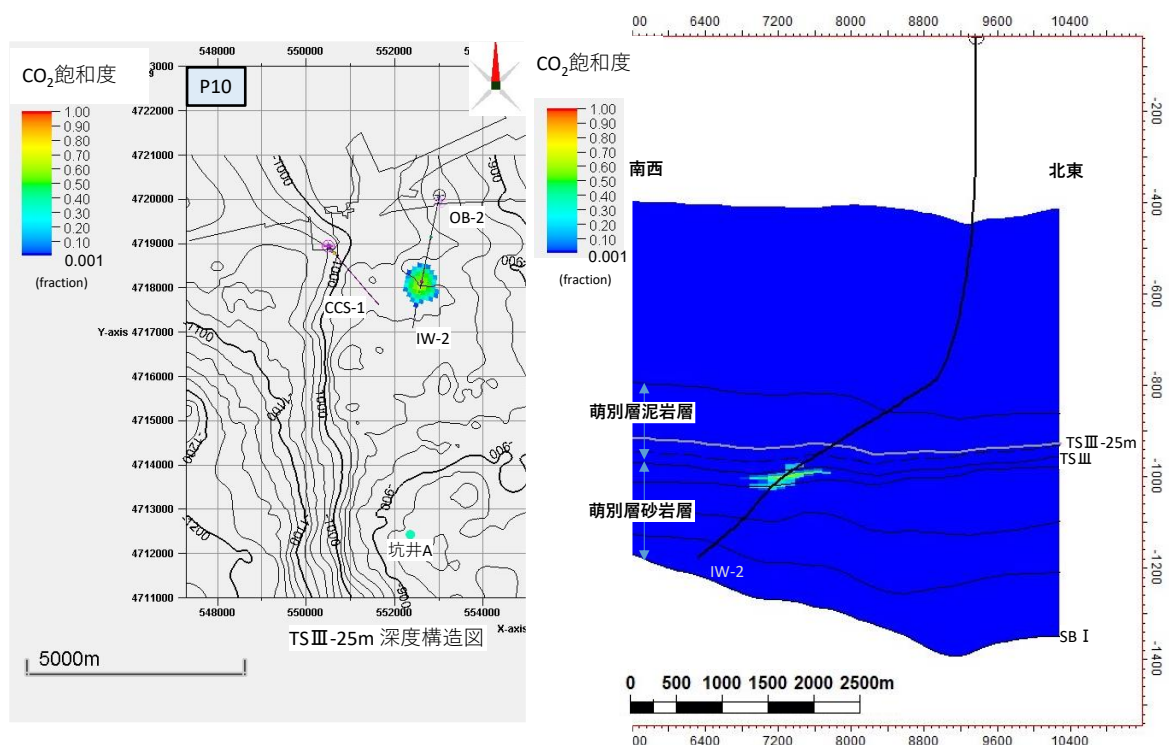
第 4.5-15 表 海底下廃棄した CO₂ の平面的な分布範囲 (萌別層砂岩層)

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

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

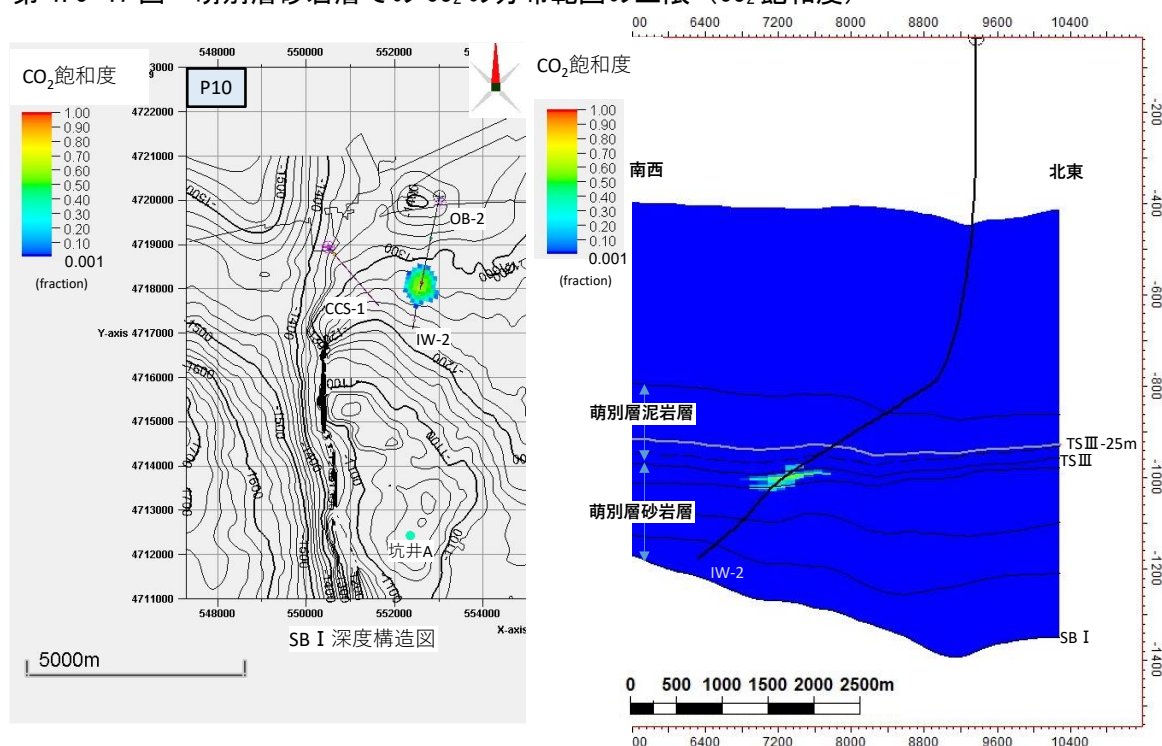
g. 圧入した CO₂ の垂直的な分布範囲

前項で検討した CO₂ の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影して、CO₂ の垂直的な分布範囲を推定した (第 4.5-47～第 4.5-50 図)。推定結果を、第 4.5-16 表に示す。



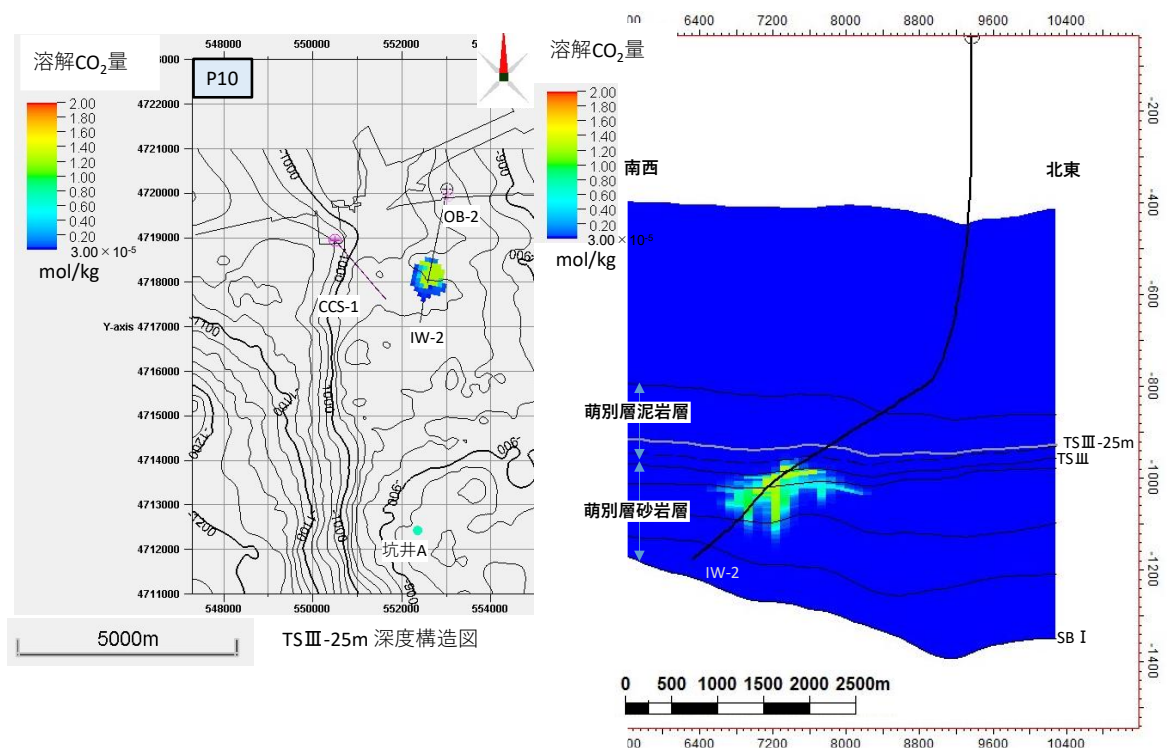
注: 1. 断面図 (右図) より, CO_2 飽和度の上昇は, TS III よりも 25m ほど上位まで認められるため, TS III よりも 25m 浅い深度で構造図を作成し, CO_2 分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時の CO_2 分布状況を投影した。
2. 最も浅い深度で, 海面下 950m 程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-47 図 萌別層砂岩層での CO_2 の分布範囲の上限 (CO_2 飽和度)



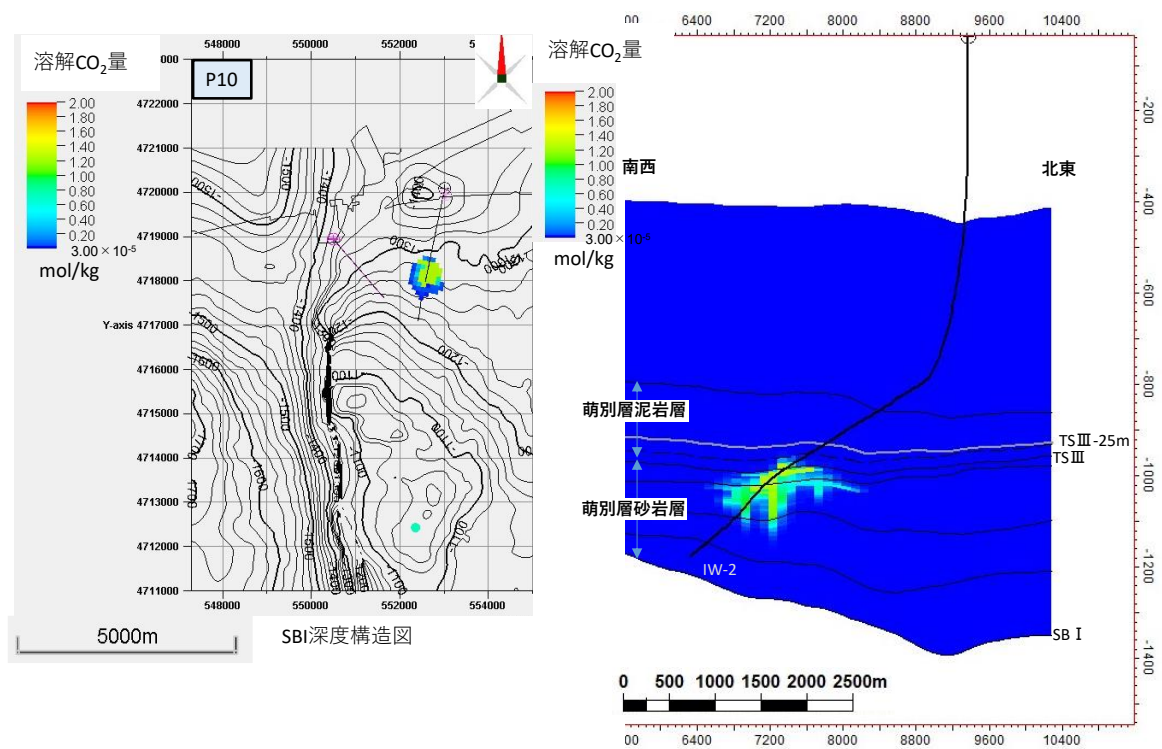
注: 1. CO_2 分布域 (CO_2 飽和度) を, 萌別層砂岩層下限 (SB I) 構造図に投影した。
2. CO_2 分布 (CO_2 飽和度) が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時の CO_2 分布状況 (CO_2 飽和度) を投影した。
3. 海面下 1,280m 程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-48 図 萌別層砂岩層での CO_2 の分布範囲の下限 (CO_2 飽和度)



注：1. 断面図（右図）より，溶解CO₂量の分布範囲はTSIIIよりも25mほど上位まで認められるためTSIIIよりも25m浅い深度で構造図を作成し，CO₂分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了後1,000年後のCO₂分布状況（溶解CO₂量）を投影した。
2. 最も浅い深度で，海面下950m程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-49 図 萌別層砂岩層での CO₂ の分布範囲の上限（溶解 CO₂ 量）



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

第 4.5-50 図 萌別層砂岩層での CO₂ の分布範囲の下限（溶解 CO₂ 量）

第 4.5-16 表 海底下廃棄した CO₂ の垂直的分布範囲（萌別層砂岩層）

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

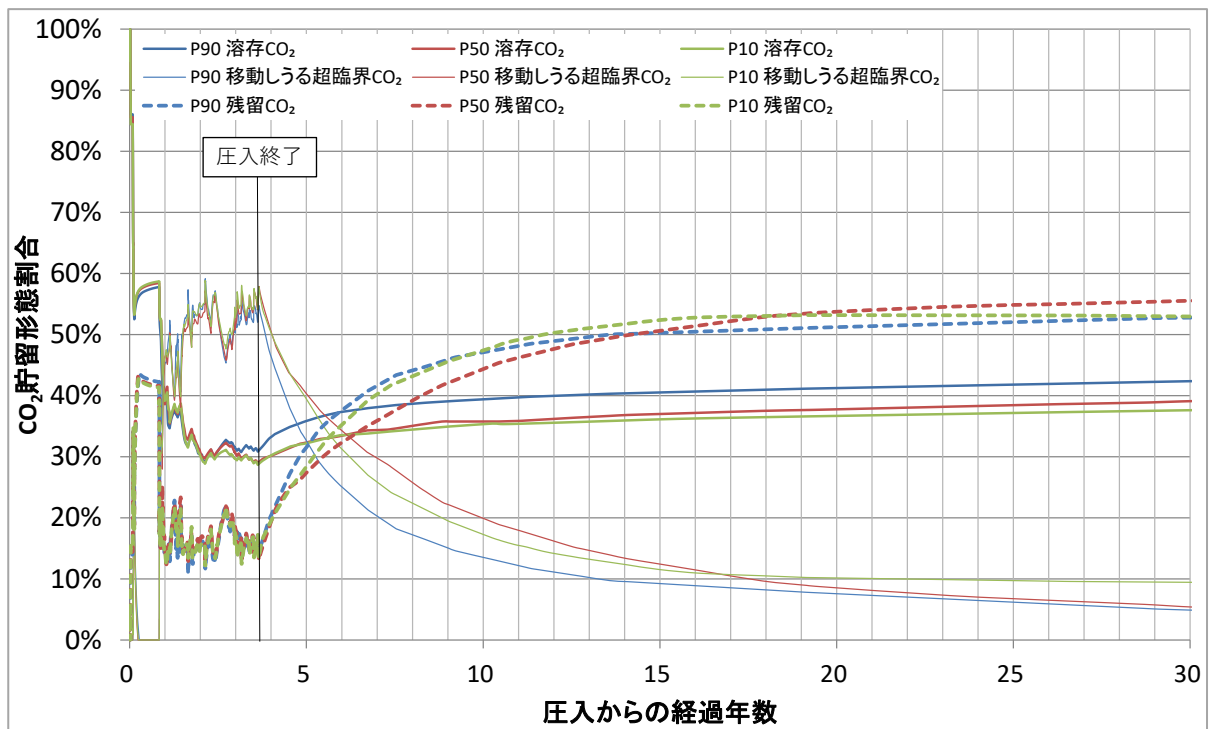
注：各モデルにおいて推定される CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の垂直的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

h. CO₂ の貯留形態ごとの割合

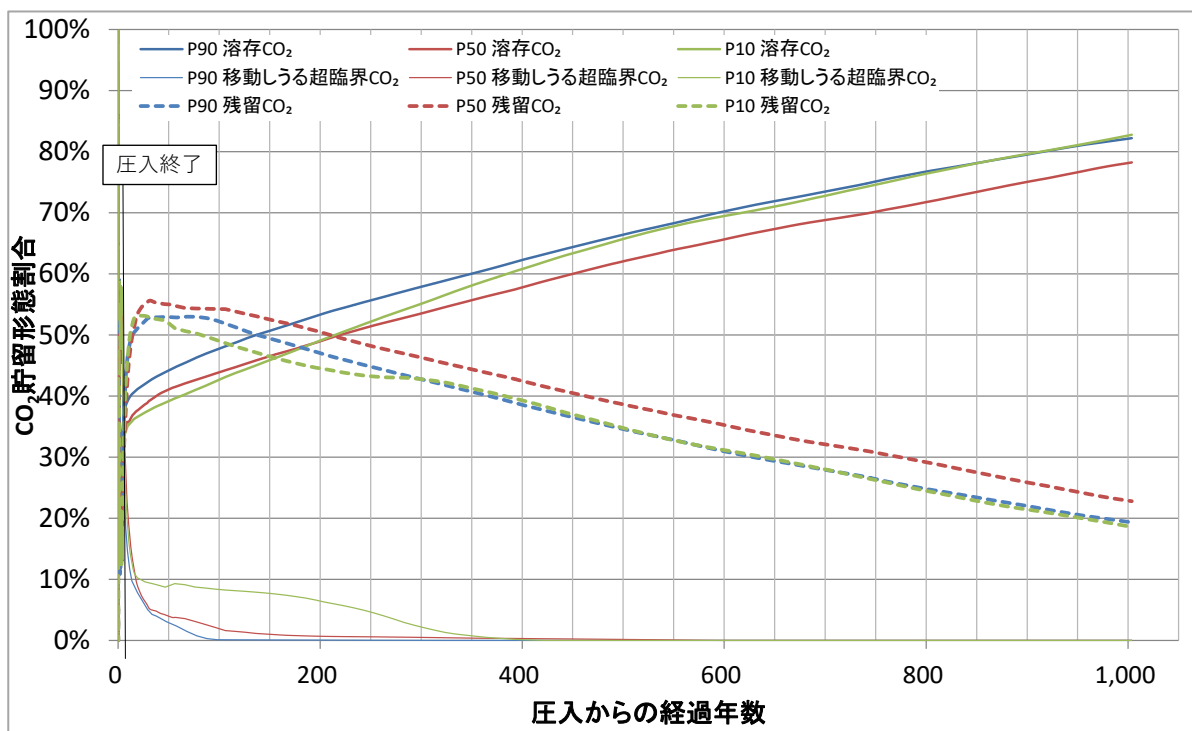
貯留 CO₂ の 3 つの貯留形態を移動しうる超臨界 CO₂、深部塩水層に溶解した溶存 CO₂ および孔隙に残留トラップされた残留 CO₂ と表現し、P10, P50, P90 モデルの貯留形態の割合の経時変化を、シミュレーションにより精査した（第 4.5-51 図および第 4.5-52 図）。P10, P50, P90 モデルのいずれもが類似した挙動を示す。

圧入停止後に、残留トラップされる CO₂ の割合が急速に増加し、移動しうる超臨界 CO₂ 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 CO₂ が圧入停止後に周辺の深部塩水層に再置換される際に、ヒステリシスにより一部の CO₂ が置換されることなく残留する現象である。CO₂ の溶解量は CO₂ が移動する間は周辺の深部塩水層と触れることにより微増を続ける。圧入停止から 8 年後頃（圧入開始から 12 年後頃）までは、CO₂ が貯留層内の移動や周辺からの深部塩水層の流入で活発であると推定され、CO₂ 貯留割合の変化が急速に進行すると予測される（第 4.5-51 図）。

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



第 4.5-51 図 CO₂貯留形態割合の変化（圧入開始から 30 年後まで）



第 4.5-52 図 CO₂貯留形態割合の変化

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 CO₂ 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 4.5-17 表に、貯留層モデルに与えたその他のパラメータを第 4.5-18 表に示す。

第 4.5-17 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 4.5-18 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 ₂ 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 ³	2.4×10 ¹¹	
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 ⁻¹	4.56×10 ⁻⁶	
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 _{rg}	0.60（ファシス 10,11） 0.143（その他ファシス）	Corey（1954） ^[1]
液相 相対浸透率 K _{rw}	1.00	van Genuchten（1980） ^[2]
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.05	0.05
不動水飽和率 S _{wir}	孔隙率と浸透率より算出	0.638 Bennion（2007） ^[3]
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.275	—
	Holtz（2002） ^[4]	
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	測定値	van Genuchten（1980） ^[2]
P _c ：kPa	4.04	370

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

^[2] van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

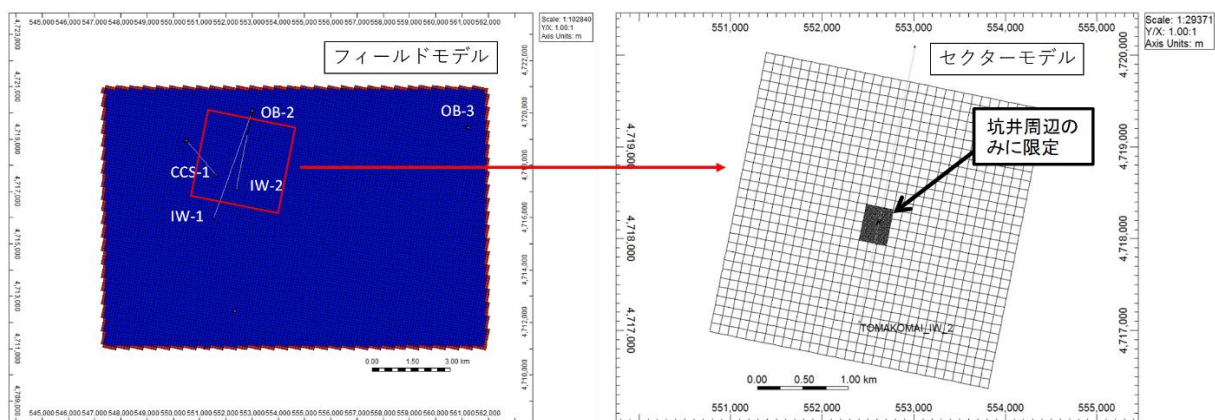
^[3] Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO₂-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

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

c. ヒストリーマッチ

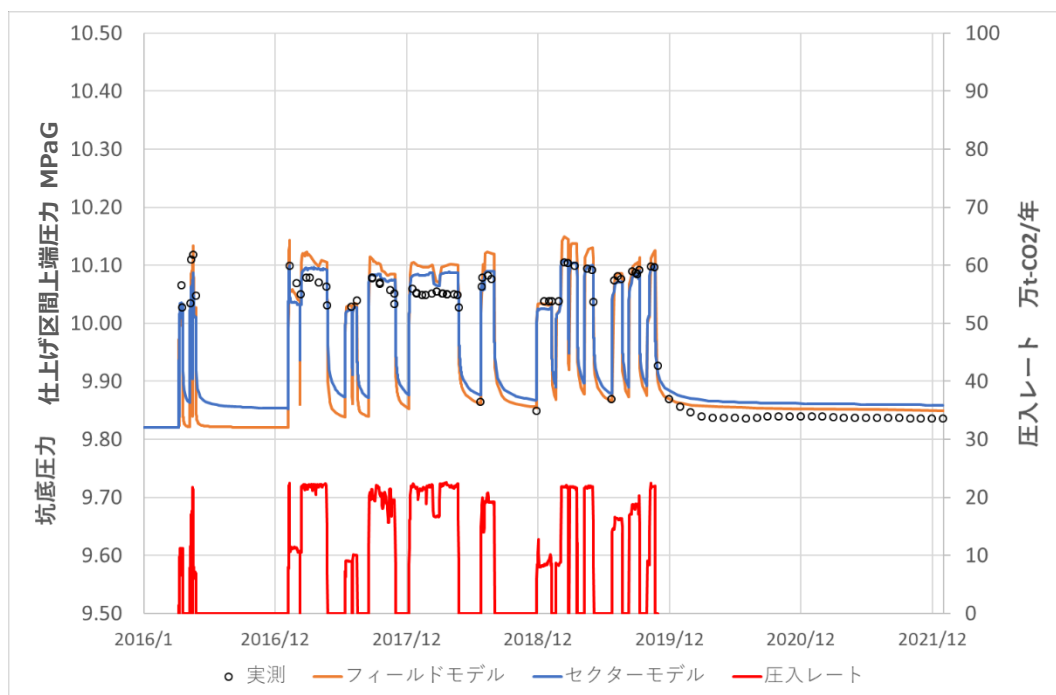
2019 年度モデルシミュレーションの圧入実績についての考察をもとに、2021 年度貯留層モデルのヒストリーマッチングでは、萌別層の浅部・深部高浸透率領域の絶対浸透率とスキンファクターをマッチングパラメータとし、2019 年度モデルシミュレーションと同様に坑底圧力の目的関数が 25kPa 以下となる具現像を 30 個抽出した。

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 4.5-53 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。



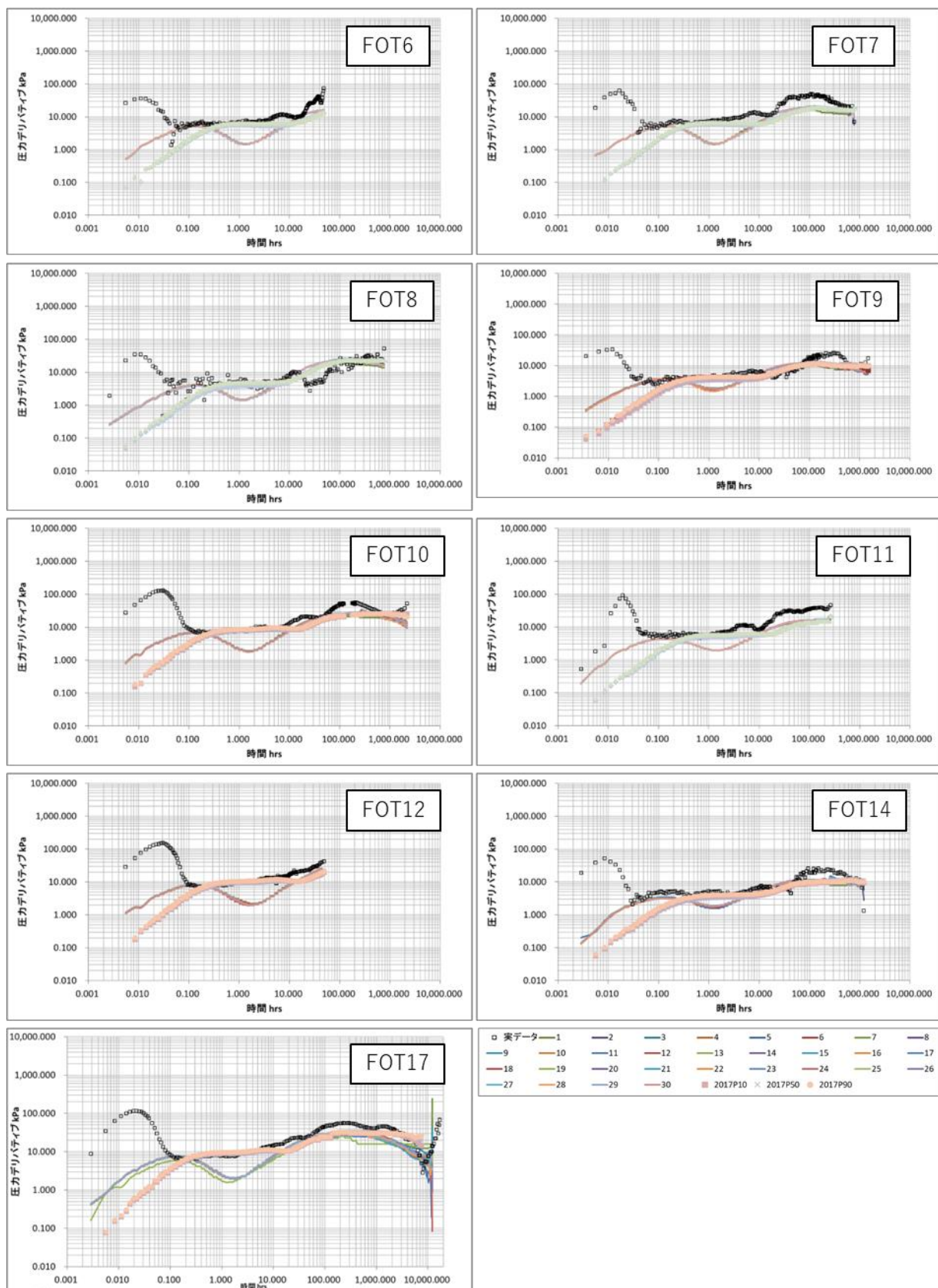
第 4.5-53 図 ヒストリーマッチングに用いたモデルのグリッドシステム

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 4.5-54 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 4.5-54 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

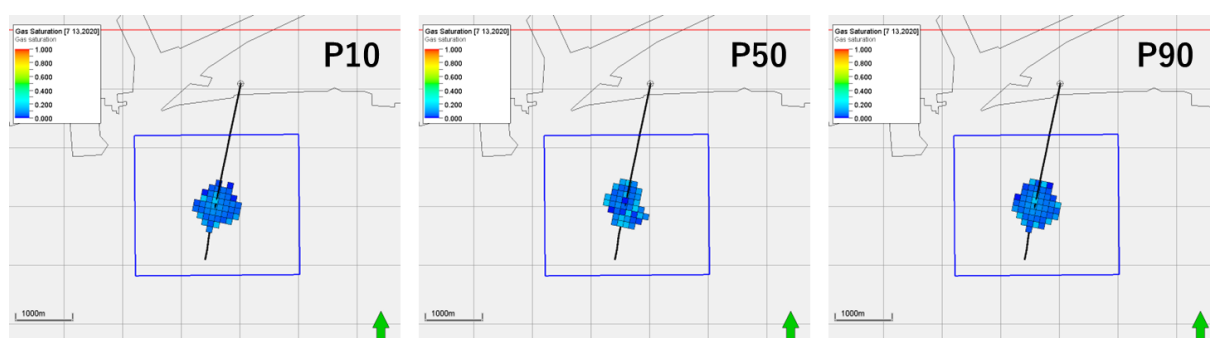
第 4.5-55 図に、FOT のデリバティブカーブの実績値と 30 個の具現像を用いたシミュレーションの予測値を示す。抽出された具現像は FOT のデリバティブカーブを概ね再現できており、この設定を用いて長期の CO₂ 挙動予測シミュレーションを実施した。



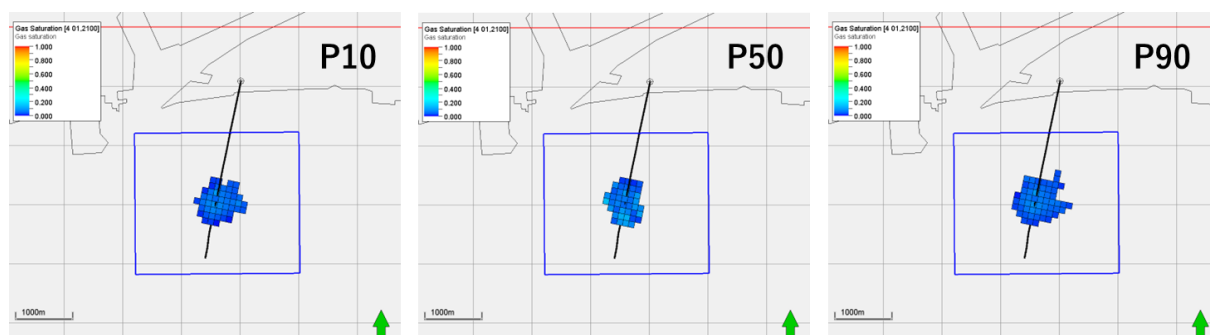
第 4.5-55 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

d. 圧入した CO₂ の平面的な分布範囲

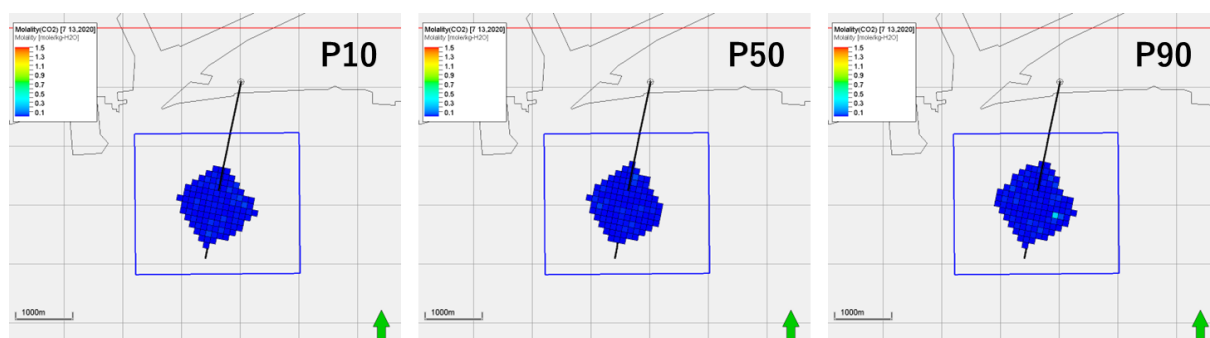
圧入終了時および 2100 年（圧入終了後 80 年）の CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した CO₂ の平面的な分布範囲を推定した。第 4.5-56 図および第 4.5-57 図それぞれに、P10, P50, P90 モデルにおける圧入終了時および 2100 年における CO₂ 飽和度を示す。また第 4.5-58 図および第 4.5-59 図それぞれに、P10, P50, P90 モデルにおける圧入終了時および 2100 年における溶解 CO₂ 量を示す。図に示す青線は、2020 年度に申請した CO₂ 分布範囲である（座標については第 4.5-15 表を参照）。いずれのモデルにおいても、CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲は、2020 年度に申請した CO₂ 分布範囲に含まれているため、今回申請する CO₂ 分布範囲は前回の申請と同一とする。



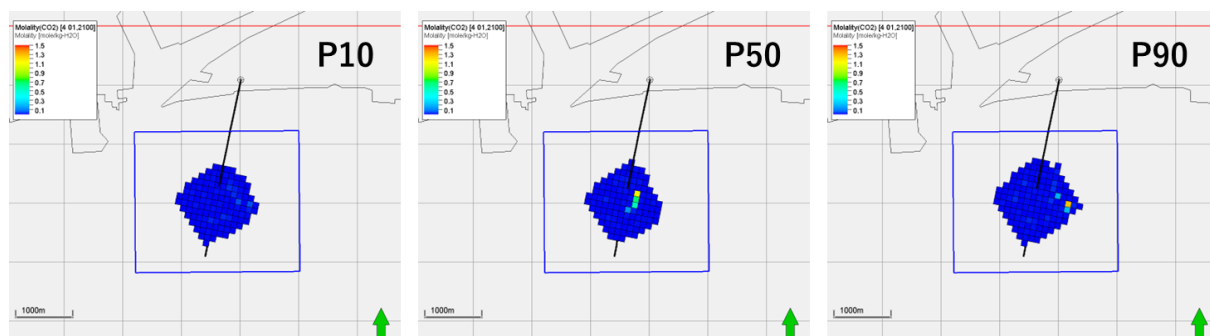
第 4.5-56 図 圧入終了時における萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲（CO₂ 飽和度分布）



第 4.5-57 図 2100 年における萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲（CO₂ 飽和度分布）



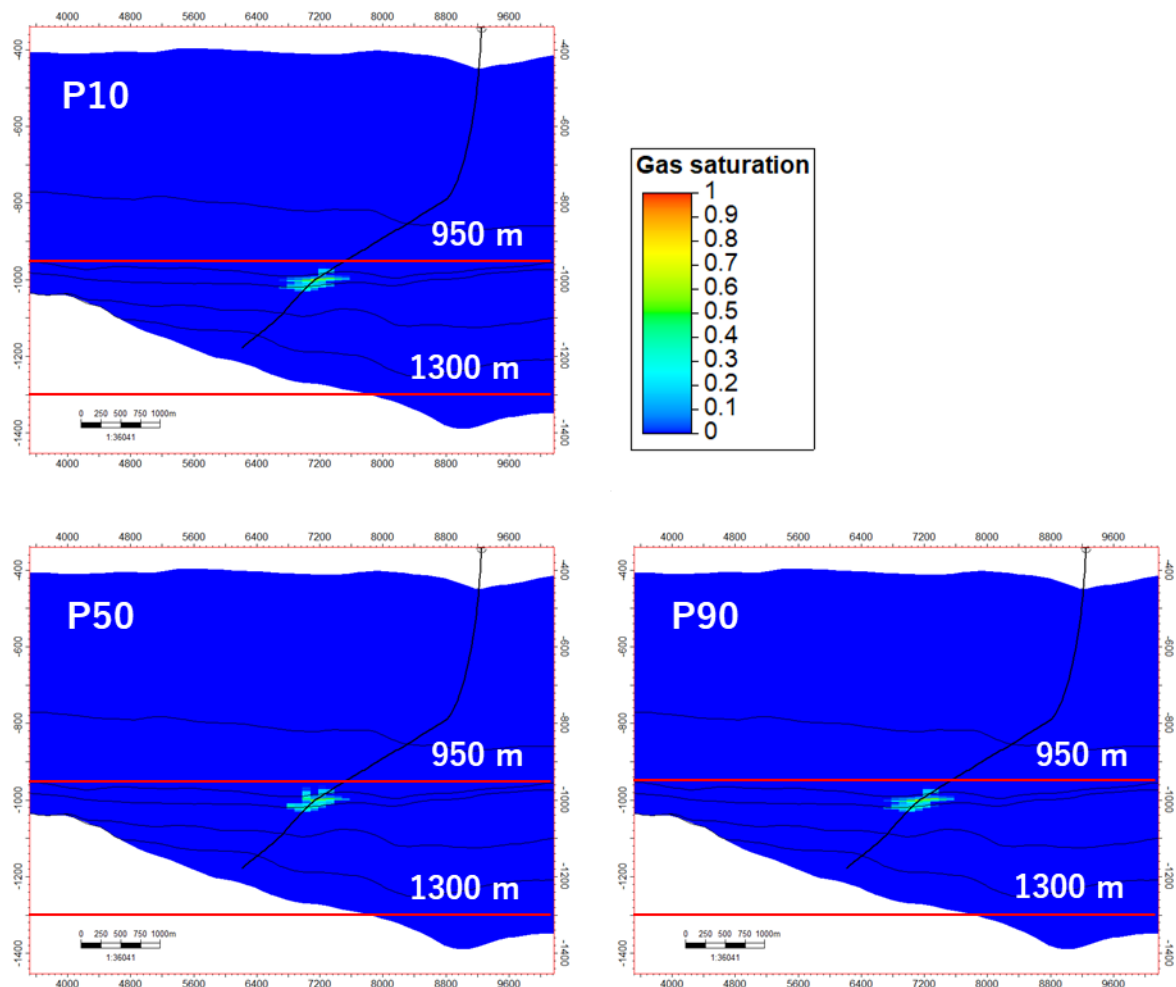
第 4.5-58 図 圧入終了時における萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲（溶存 CO₂ 量）



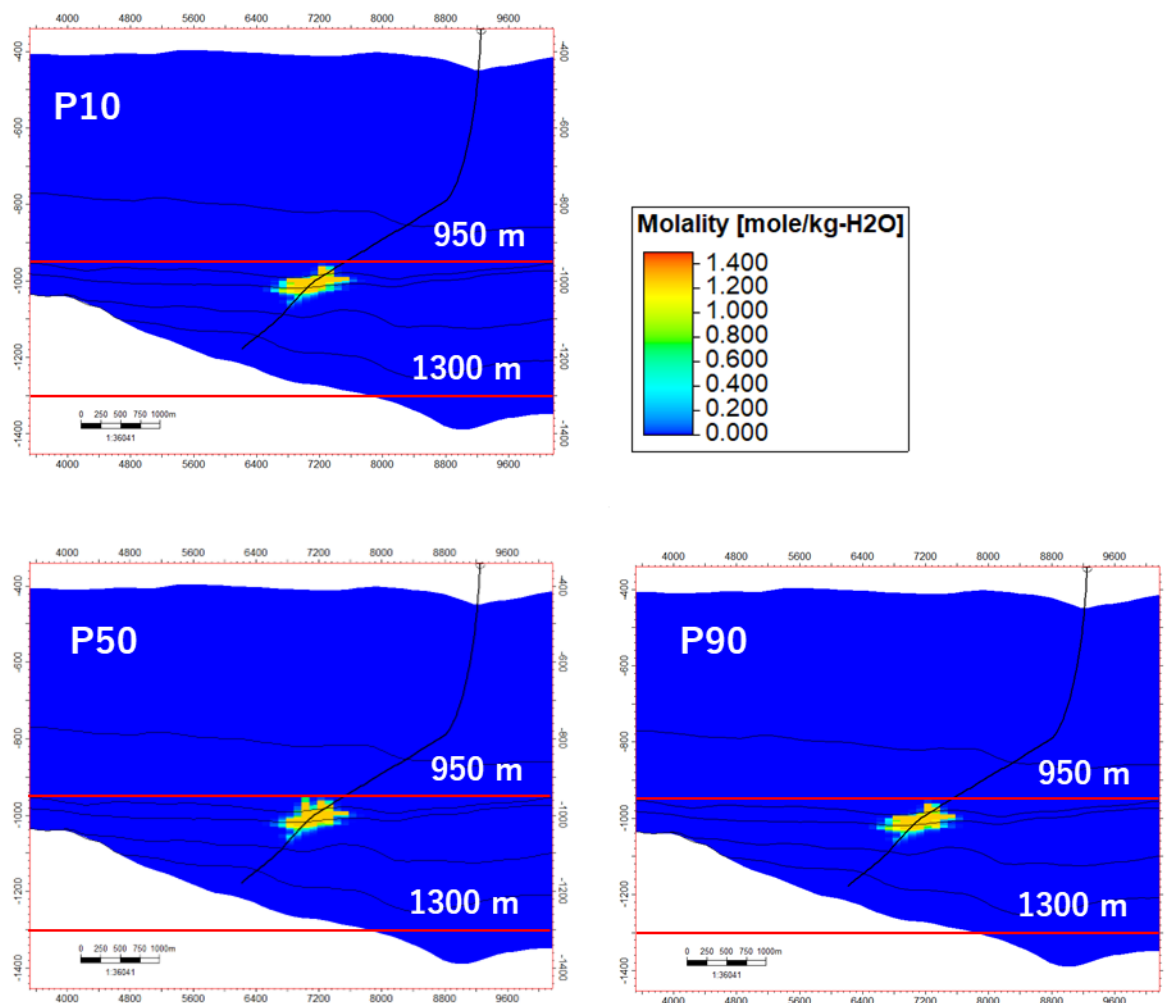
第 4.5-59 図 2100 年における萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲（溶存 CO₂ 量）

e. 圧入した CO₂ の垂直的な分布範囲

前項で検討した 2100 年における CO₂ の分布範囲を坑跡断面に対して投影し、CO₂ の垂直的な分布範囲を推定した（第 4.5-60～第 4.5-61 図）。図に示す赤線は、2020 年度に申請した CO₂ の垂直分布範囲の上下限深度である（第 4.5-16 表を参照）。いずれのモデルにおいても、CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲は、2020 年度に申請した CO₂ の垂直的な分布範囲に含まれているため、今回申請する CO₂ の垂直的な分布範囲は前回の申請と同一とする。



第 4.5-60 図 2100 年における萌別砂岩層での CO₂ 分布範囲 (CO₂ 飽和度)



第 4.5-61 図 2100 年における萌別砂岩層での CO₂ 分布範囲（溶解 CO₂ 量）

(3) 繰り返し 3D 探査の差分解析結果と CO₂ の位置

三次元繰り返し弾性波探査モニター調査を実施し、二酸化炭素圧入開始前の 2009 年度に実施したベースライン調査の記録を用いて、二酸化炭素分布状況の把握を目的とする差分抽出処理を実施した。

① 2017 年度繰り返し 3D 探査

調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-19 表に示す。

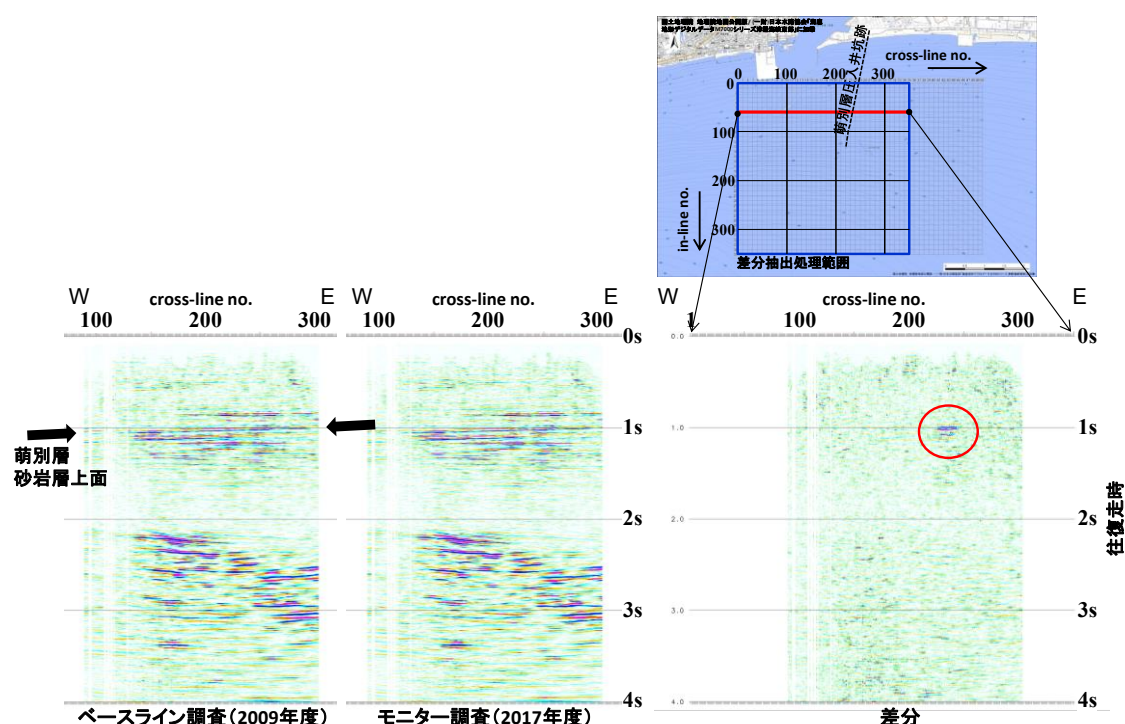
第 4.5-19 表 2017 年度繰り返し 3D 探査の実施時期と圧入状況

	観測開始日 2017 年 7 月 9 日	観測終了日 2017 年 8 月 17 日
萌別層貯留層 CO ₂ 圧入量	61,238.9t	69,070.0t
滝ノ上層貯留層 CO ₂ 圧入量	0t	0t

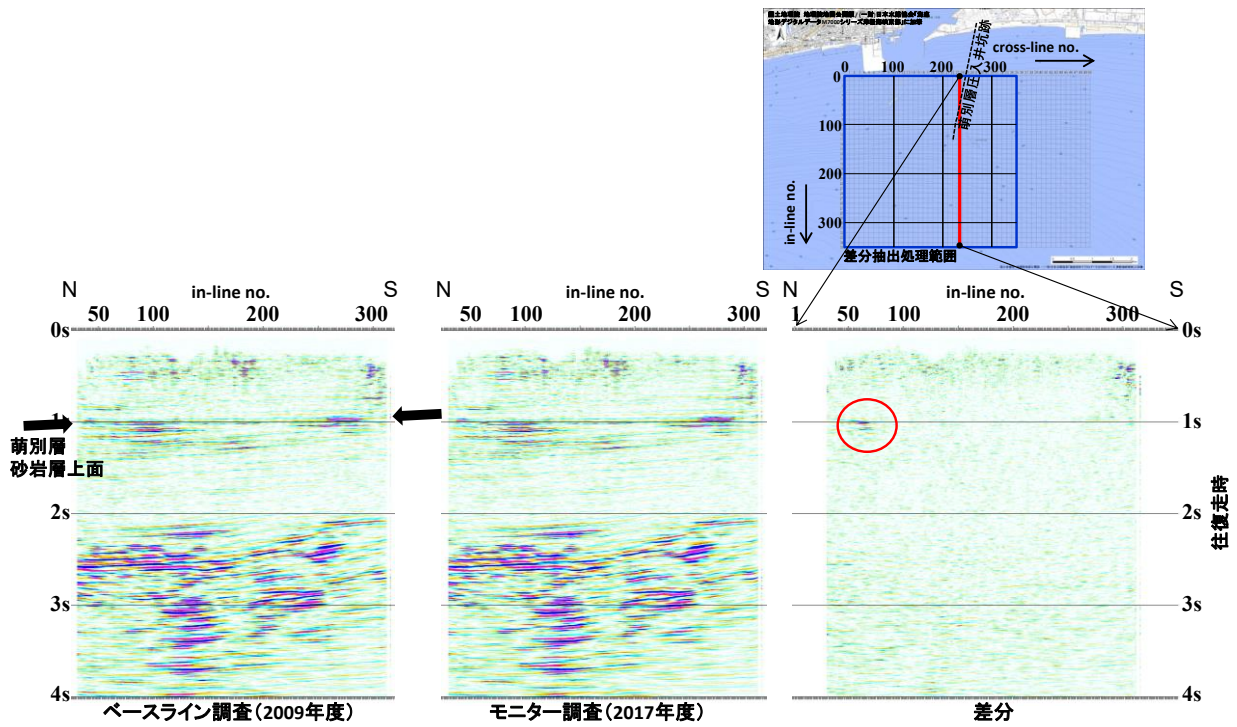
データ処理の結果、差分ボリューム上で二酸化炭素圧入に伴う変化を検出した。第 4.5-62 図および第 4.5-63 図に差分ボリュームの東西鉛直時間断面および南北鉛直時間断面の例を、

第 4.5-64 図に時間スライス断面の例をそれぞれ示した。ここで示した断面は、調査領域のうち、萌別層貯留層への二酸化炭素圧入に伴って変化が認められた領域を含む代表例である。圧入井坑跡周辺の萌別層砂岩層上面深度付近（往復走時 1 秒付近に対応）において明瞭な振幅異常が認められる。これらは、二酸化炭素の圧入に伴い、ベースライン調査時点と 2017 年度モニター調査時点との間で地下物性が変化したことを示している。

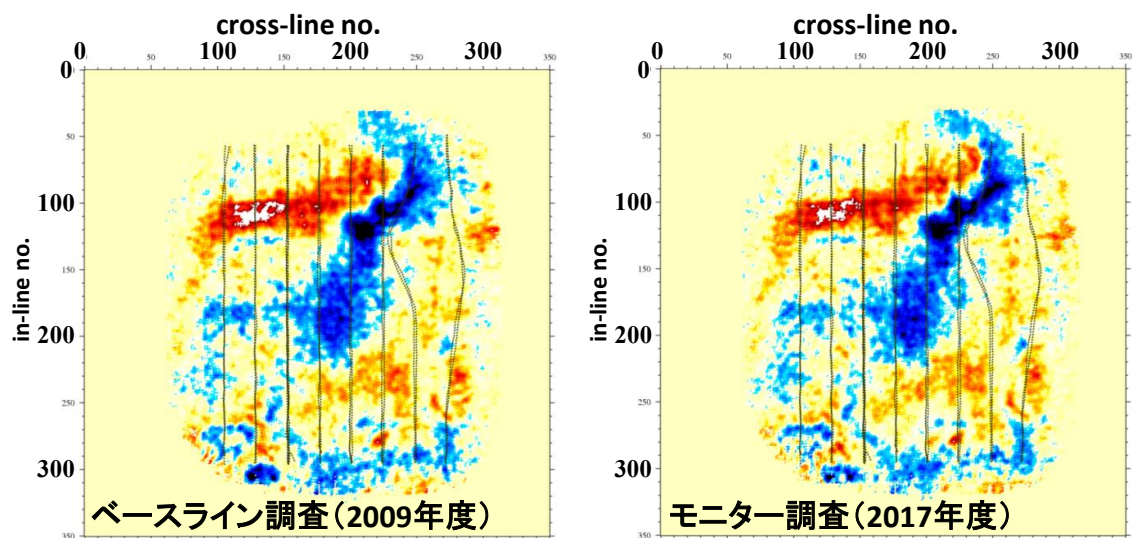
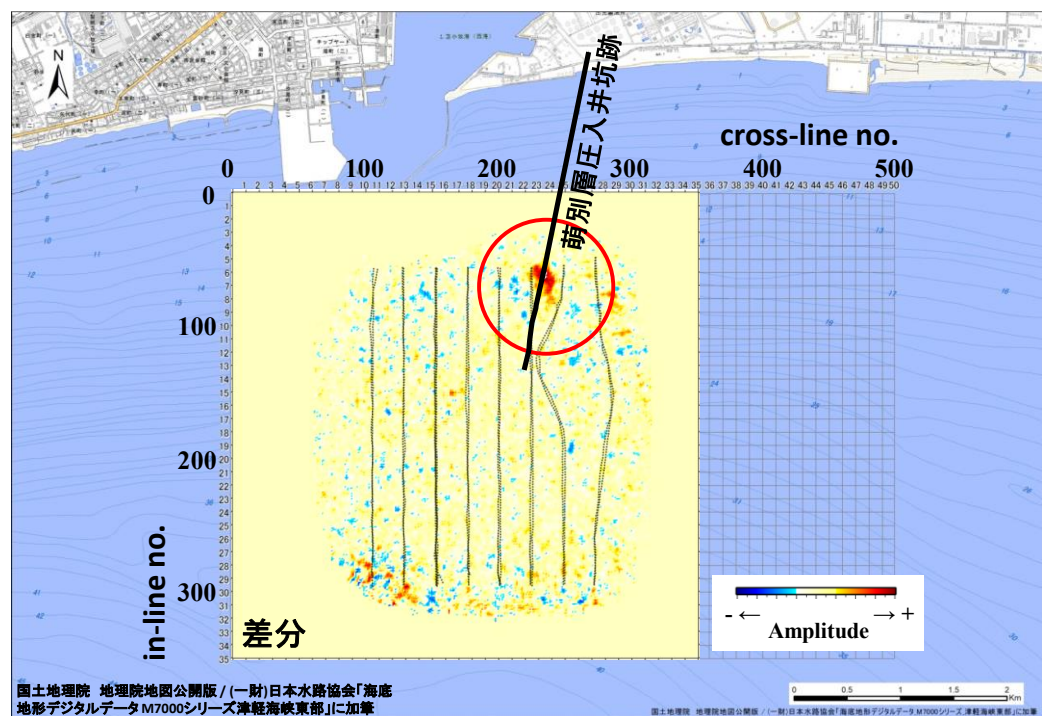
なお、時間スライス断面（第 4.5-64 図）の南西側縁辺部に認められる振幅異常は観測時のノイズによるものである。調査領域の南西側は苫小牧港西港出入口航路上にあたるため、南西側の受振記録には航行船舶ノイズが多く混入する。加えて、領域縁辺部は重合数が少ないために重合効果によるノイズ抑制効果が低下し、結果として領域南西側縁辺部ではベースライン調査、2017 年度モニター調査ともに処理結果の S/N が低下する。このため、両者の差分である差分ボリュームでは、当該領域においてノイズに起因する見かけ上の振幅異常を生じている。



第 4.5-62 図 差分ボリューム鉛直時間断面例（東西方向断面：インライン 60）

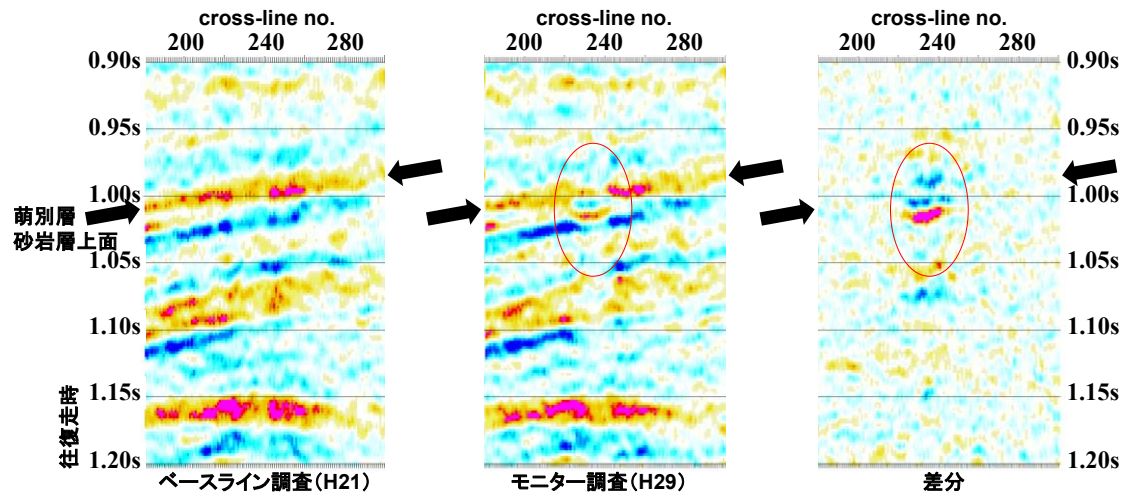


第 4.5-63 図 差分ボリューム鉛直時間断面例（南北方向断面：クロスライン 235）



第 4.5-64 図 差分ボリューム時間スライス断面例 (1,020ms)

第 4.5-65 図に東西鉛直時間断面の拡大図を示す。時間断面上の振幅異常域は萌別層砂岩層上面付近に位置しており、圧入した二酸化炭素が萌別層砂岩層最上部、およびその直上の萌別層泥岩層最下部に狭在する砂岩層内に貯留されていることがわかる。



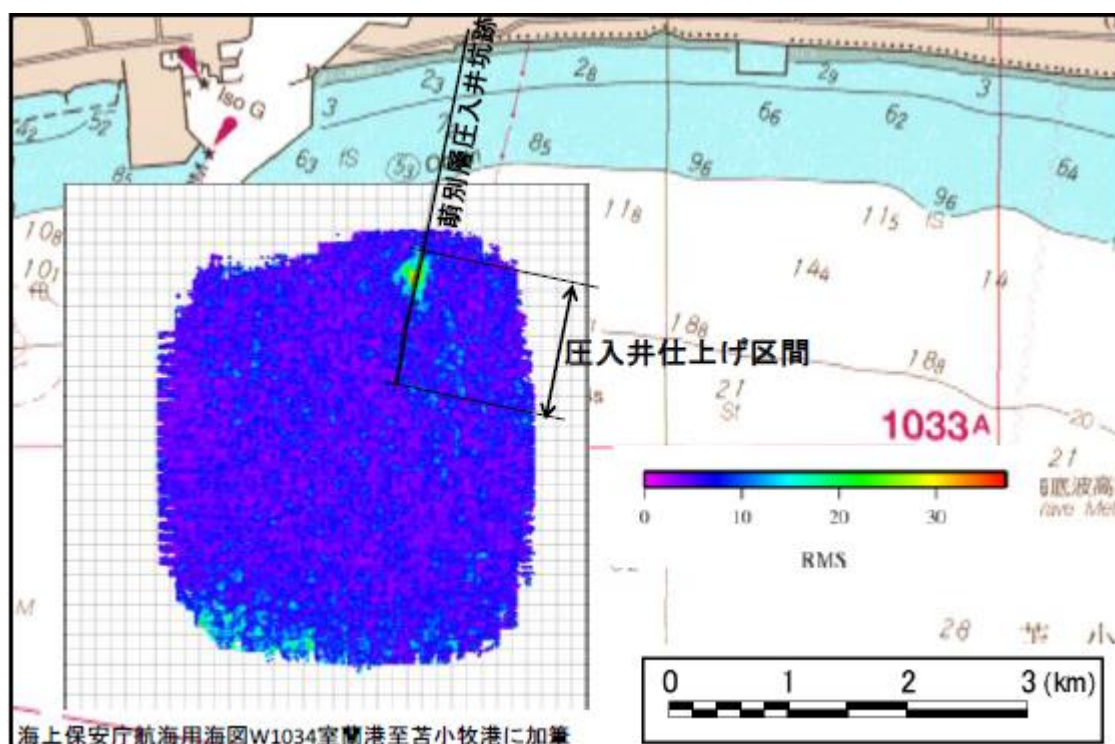
第 4.5-65 図 差分ボリューム鉛直時間断面拡大図（東西方向断面：インライン 60）

第 4.5-66 図に、鉛直時間断面上で顕著な変化を生じている 992ms から 1,032ms までの時間ウィンドウ内で RMS 振幅^[1]を計算し、平面表示した。合わせて同時期の CO₂ 飽和度分布予測を示した。同図には萌別層圧入井（IW-2）坑跡の平面投影位置をあわせて示した。

投影平面上では圧入井坑跡を中心として RMS 振幅の大きい領域が分布しており、二酸化炭素が圧入井から周囲に浸透していることを示している。この高振幅領域の中心部付近において RMS 振幅は最大値を示しており、当該位置は投影平面上で圧入井坑跡上に位置している。坑跡上の当該位置の深度は約 1,010m であり、圧入仕上げ区間の上部区間に相当する。なお、同図の南西側縁辺部に認められる高振幅異常は、時間スライス断面の例（第 4.5-64 図）と同様、観測時のノイズによるものである。

RMS 振幅値の変化は定性的には貯留層内の物性変化の程度に対応しているものと考えられ、圧入した二酸化炭素は深度約 1,010m 付近を中心として貯留層内に浸透しているものと推測される。

^[1] RMS (Root Mean Square) 振幅：ある時間ウィンドウ内における信号の平均二乗値の平方根。波動の強度（実効値）を表す際に用いられる。



第 4.5-66 図 差分ボリュームの RMS 振幅水平分布（時間ウインドウ：992ms～1,032ms）

② 2018 年度繰り返し 3D 探査

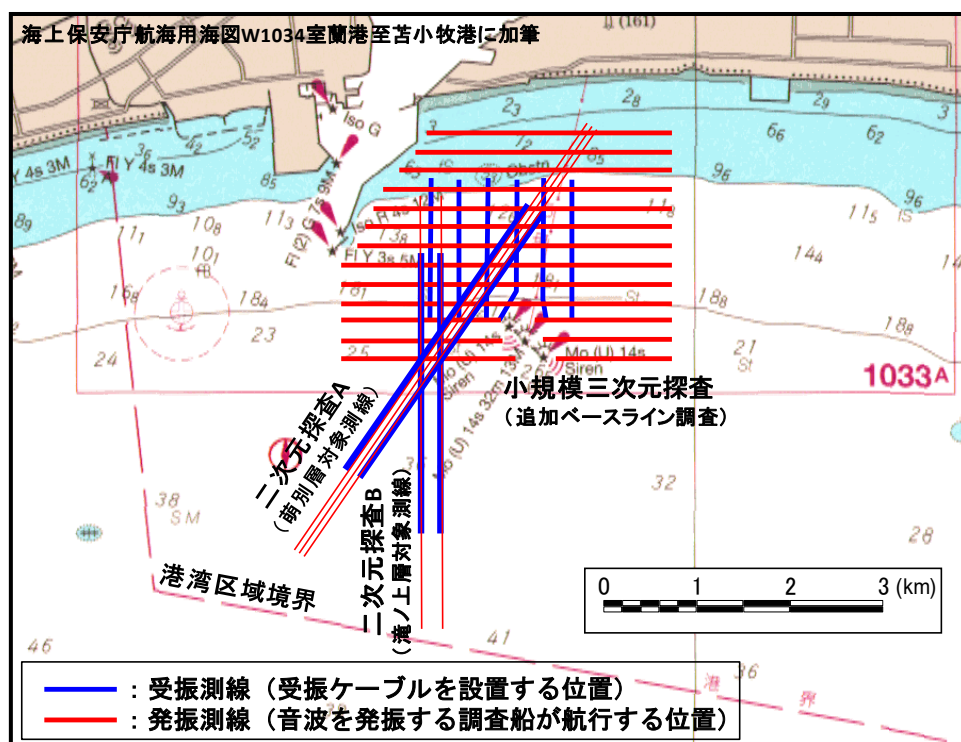
調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-20 表に示す。

第 4.5-20 表 2018 年度繰り返し 3D 探査の実施時期と圧入状況

	観測開始日 2018 年 9 月 26 日	観測終了日 2018 年 10 月 18 日
萌別層貯留層 CO ₂ 圧入量	207, 208.9t	207, 208.9t
滝ノ上層貯留層 CO ₂ 圧入量	98.2t	98.2t

注) 圧入停止中に調査を実施

本調査では当初計画した二次元弾性波探査に加えて、今後の圧入進展に伴って北方に CO₂ 分布域が拡大する場合に備えたベースライン記録を取得するために、三次元弾性波探査ベースライン調査領域の北端部および同北側領域を対象とした小規模三次元弾性波探査を実施した(第 4.5-67 図)。

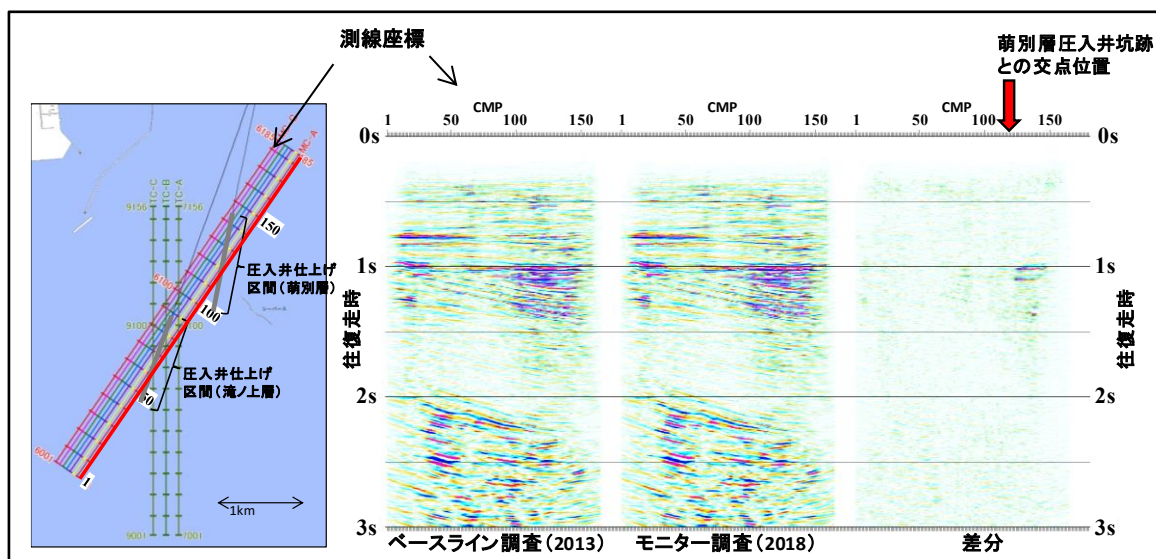


第 4.5-67 図 2018 年度二次元弾性波探査および小規模三次元弾性波探査 調査測線図

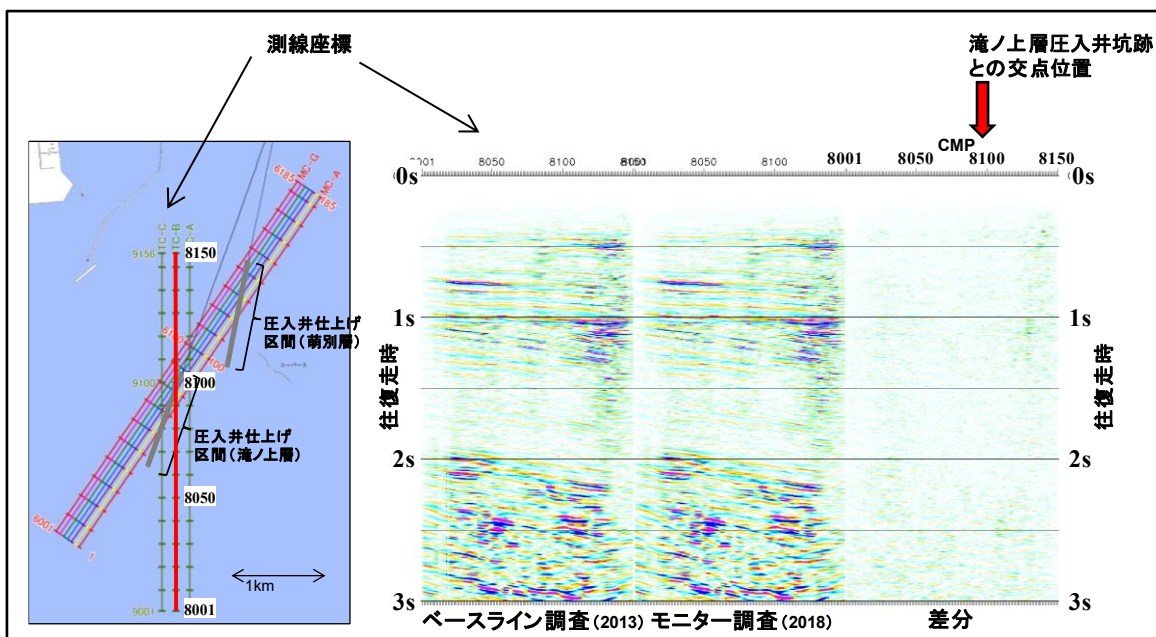
二次元弾性波探査の測線配置 A では計 7 本の重合測線上で、測線配置 B では計 3 本の重合測線上でそれぞれ二次元鉛直時間断面を得た。

第 4.5-68 図に、測線配置 A の 7 本の二次元鉛直時間断面のうち最も南東側の断面（ベースライン調査，2018 年度モニター調査の各断面および両者の差分断面）を示す。萌別層砂岩層深度付近（往復走時 1～1.2 s 付近に対応）において，2018 年度モニター調査時点とベースライン調査時点との間に振幅異常が明瞭に認められた。三次元弾性波探査とは異なって，二次元弾性波探査結果からは詳細な空間分布を求めることはできないものの，2017 年度調査時点に引き続いて地下の CO₂ 分布状況が確認され，CO₂ は想定どおりに貯留層内に留まっていると考えられた。

第 4.5-69 図に，測線配置 B の 3 本の二次元鉛直時間断面のうち中央の断面（ベースライン調査，2018 年度モニター調査の各断面および両者の差分断面）を示す。滝ノ上層深度付近（往復走時 2～2.5 s 付近に対応）において，2018 年度モニター調査時点とベースライン調査時点との間に明瞭な変化を認めることはできなかった。2018 年度モニター調査実施時の滝ノ上層への CO₂ 累計圧入量は 98 t であり，圧入による地下物性変化が，繰り返し弾性波探査の検知限界未満であったためと考えられる。

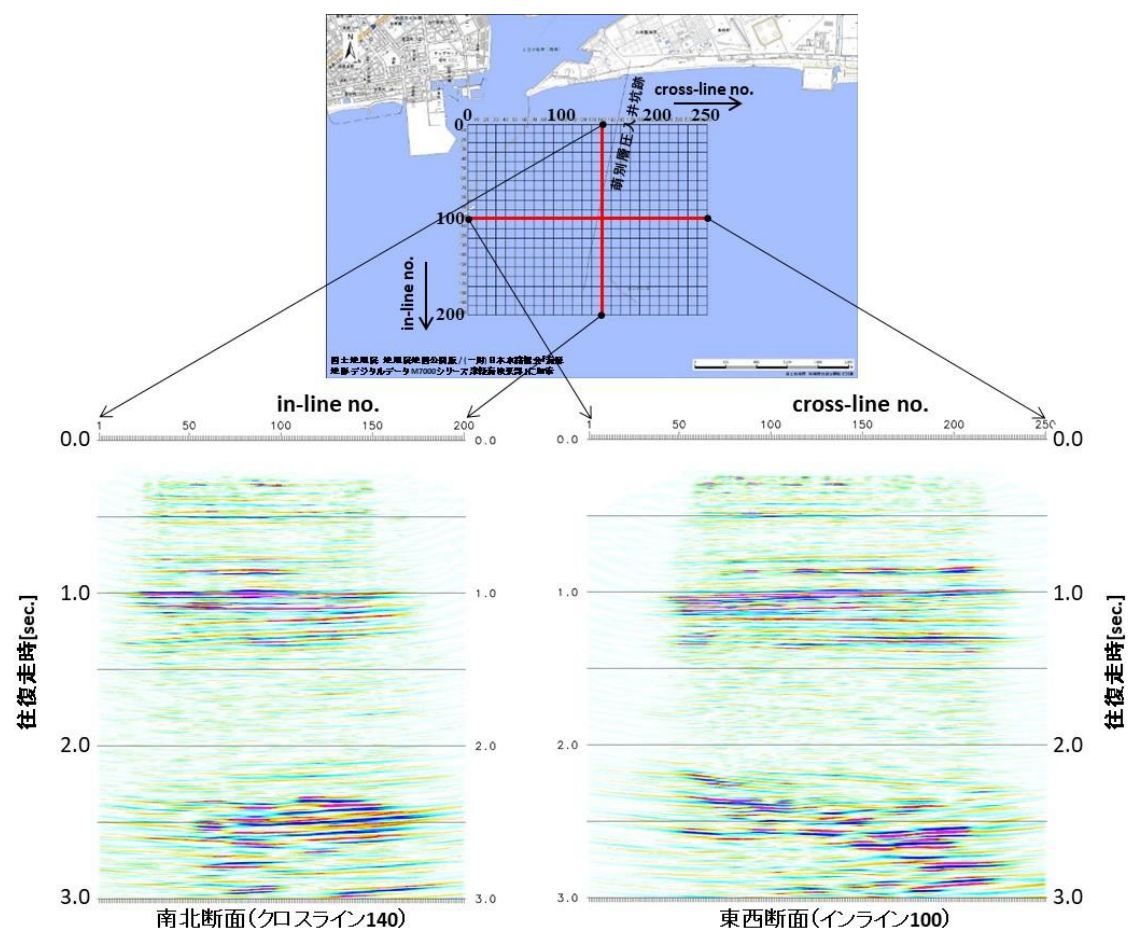


第 4.5-68 図 2018 年度二次元弾性波探査 鉛直断面例（測線配置 A）



第 4.5-69 図 2018 年度二次元弾性波探査 鉛直断面例（測線配置 B）

第 4.5-70 図に小規模三次元弾性波探査で得られた三次元反射法ボリュームの東西鉛直時間断面および南北鉛直時間断面の例を示した。弾性波探査では地層境界等の構造変化を地震波の伝搬速度で把握するが、萌別層貯留層深度に相当する往復走時 1 s 前後の反射面およびこれ以深の地層による反射面が明瞭に捉えられており、ベースライン記録を補間するためのデータとして十分な品質が確保されている。



第 4.5-70 図 小規模三次元弾性波探査による鉛直時間断面例（東西断面および南北断面）

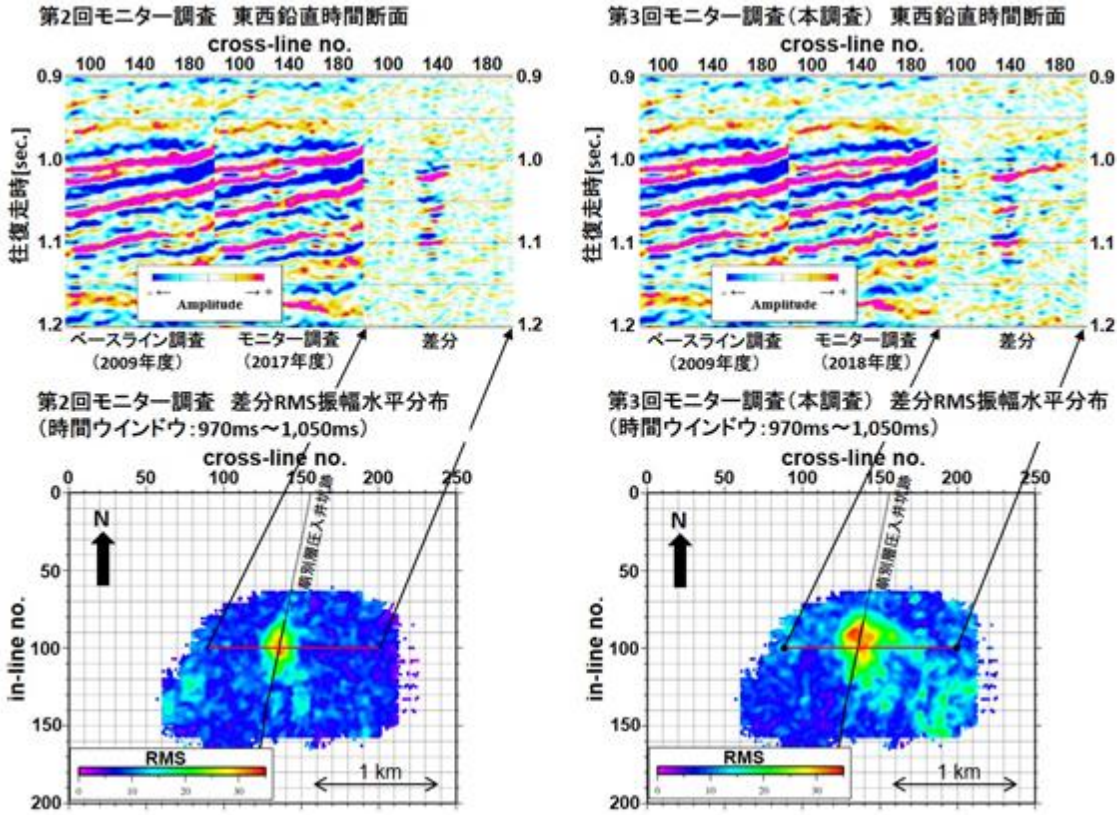
第 4.5-71 図に 2018 年度モニター調査記録と 2009 年度の三次元弾性波探査ベースライン調査記録による差分抽出処理結果を示す。差分抽出処理は両調査の重複領域（2018 年度モニター調査範囲の概ね南半分）に共通して存在する受振点と発振点の組み合わせによる限られたデータのみを用いて実施するため、重合数の低下に伴って特に縁辺部における S/N が低下し、得られた差分記録には圧入した CO₂ とは無関係のノイズが含まれる点に注意を要する。

同図には、作成した差分記録のうち、2017 年度調査において CO₂ 圧入に伴う振幅異常を示した領域のほぼ中心を通る東西鉛直断面（拡大図）および萌別層砂岩層上面付近に対応する往復走時 970 ms から 1,050 ms の範囲で計算した RMS 振幅の平面分布を示した。また、比較のため 2017 年度調査の結果も併せて示した。

2017 年度調査時点と比較して振幅異常の領域が拡大しており、圧入の進展に伴い CO₂ 貯留範囲が拡大していた。その北側への拡大範囲は 50 m 程度と小さく、当初計画の繰り返し三次元弾性波探査で捕捉可能な範囲に収まっているため、2018 年度モニター調査で取得したデータのうち 2009 年度の三次元弾性波探査ベースライン調査と重複しない受振測線北側区間で取得したデータには、これまでに圧入した CO₂ の影響を受けていないデータが十分に含まれており、三次元ベースライン調査記録と併用することが可能である。

これらのことから、同図に示した 2009 年度の三次元弾性波探査ベースライン調査と重複し

ない領域において取得されたデータは、今後の弾性波探査データを比較するためのベースライン記録として参照に資するデータであると判断した。



注) 2018 年度に実施した小規模三次元弾性波探査は、将来の圧入進展に伴って CO₂ 分布域が当初想定範囲の北側に拡大した場合に備えたベースライン調査を想定して実施したものであり、縁辺部における S/N の低下によって、得られた差分記録には圧入した CO₂ とは無関係のノイズが含まれる点に注意する必要がある。

第 4.5-71 図 2018 年度小規模三次元弾性波探査と 2017 年度調査との比較
(差分記録の鉛直時間断面および RMS 振幅水平分布の例)

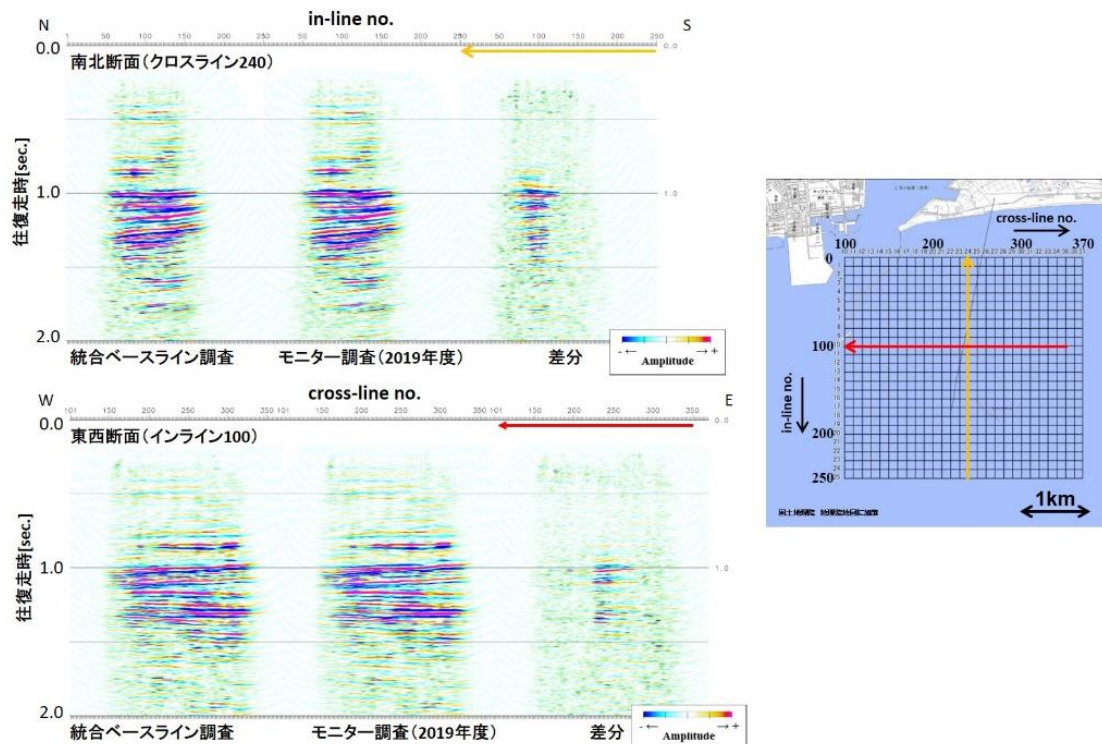
③ 2019 年度繰り返し 3D 探査

調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-21 表に示す。

第 4.5-21 表 2019 年度繰り返し 3D 探査の実施時期と圧入状況

	観測開始日 2020 年 1 月 21 日	観測終了日 2020 年 2 月 9 日
萌別層貯留層 CO ₂ 圧入量	300,012t	300,012t
滝ノ上層貯留層 CO ₂ 圧入量	98.2t	98.2t

2019 年度小規模三次元モニター調査記録、三次元統合ベースライン調査記録、および両者の差分記録の例として、反射法ボリュームの南北および東西鉛直断面図を第 4.5-72 図に示す。ベースライン調査記録と 2019 年度モニター調査記録を比較すると、どちらも同程度の品質を有しており、また、差分記録上では、萌別層砂岩層上面深度付近（往復走時約 1 秒に対応）に明瞭な振幅異常が認められ、二酸化炭素の圧入に伴い地下の物性が変化したことを示している。



第 4.5-72 図 2019 年度小規模三次元弾性波探査の鉛直断面図例（東西および南北断面）

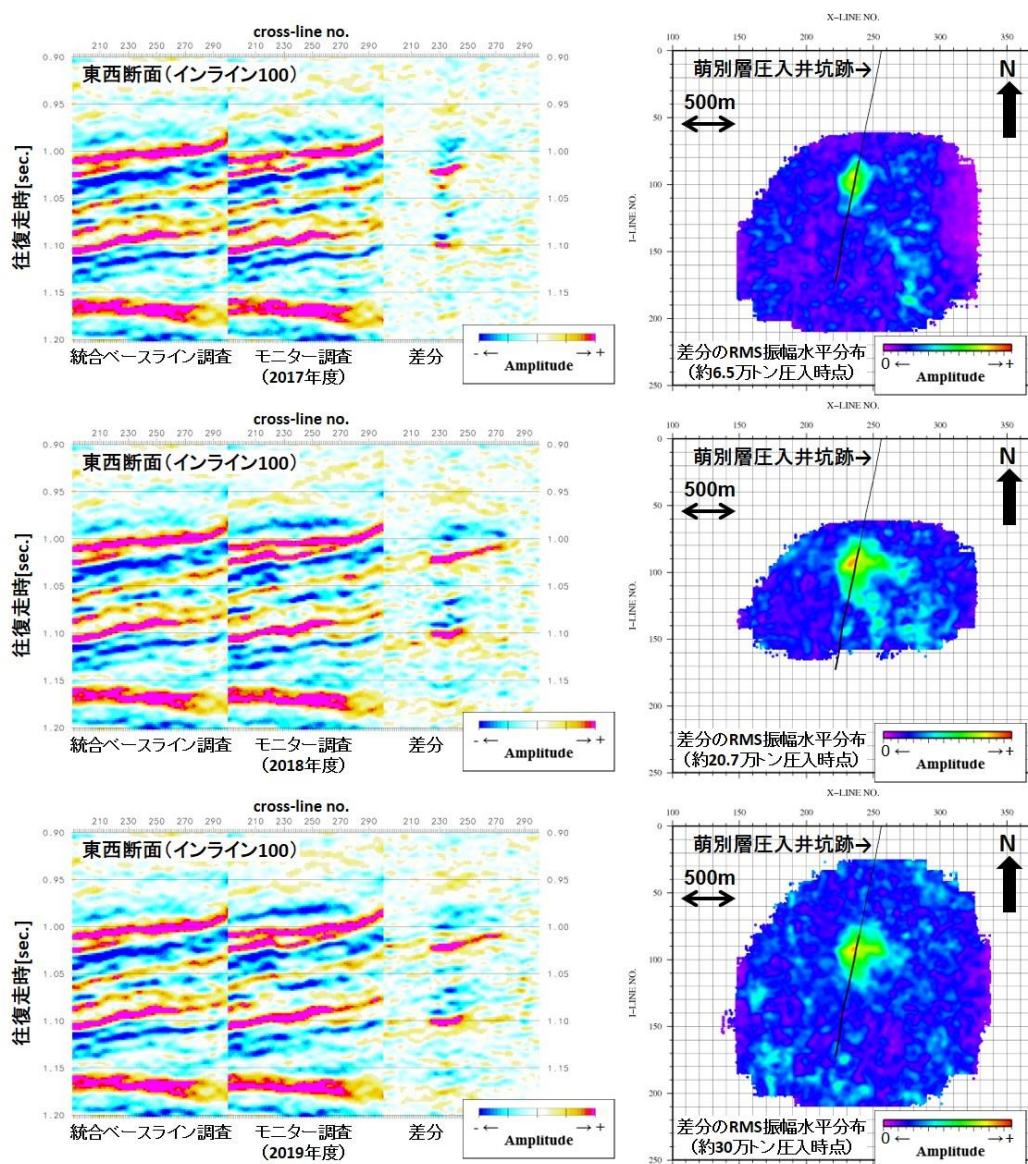
第 4.5-73 図に、2017 年度モニター調査（第 2 回）と 2018 年度モニター調査（第 3 回）と 2019 年度モニター調査（第 4 回）それぞれの差分抽出処理結果の比較として、東西鉛直断面の拡大図および差分記録の振幅変化の水平分布を示す。水平分布は前節と同様に差分記録の RMS 振幅とした。鉛直断面では、いずれのモニター調査記録においても、往復走時約 1.02 秒においてベースライン調査記録上にない反射面が認められ、差分記録上で明瞭な振幅異常を確認できる。2017 年度（約 6.5 万トン圧入時点）と 2018 年度（約 20.7 万トン圧入時点）の処理結果を比較すると、2018 年度の方がやや深部まで変化が及んでおり、圧入量が増えたことにより速度低下が顕著になったものと考えられる。一方で、2018 年度（約 20.7 万トン圧入時点）と 2019 年度（約 30 万トン圧入時点）の処理結果を比較すると、圧入量が増えたにもかかわらず顕著な変化は確認できないが、これは二酸化炭素の飽和率が大きくなるに従い弾性波の速度低下が緩やかになる（例えば、Rami Eid et al., 2014^[1]）ためと考えられる。水平分布では、圧入の進展に伴い変化領域が広がる様子が確認できる。ただし、2018 年度は調査仕様が不十分であり、限られたデータのみを用いている。そのため、差分抽出処理結果には二酸化炭素以外のノイズを多く含んでおり変化領域が広く見積もられている点に注意を要する。

第 4.5-74 図に、2019 年モニター調査による差分抽出処理結果と 30 万トンの貯留層シミュレーション結果との比較として、南北鉛直断面の拡大図と差分記録の RMS 振幅水平分布を示す。鉛直断面上で連続する往復走時約 0.97 秒から同 1.05 秒の振幅異常を圧入による影響であると考え、二酸化炭素は萌別層砂岩層最上部（往復走時約 1.0 秒から同 1.05 秒）、およびその直上の萌別層泥岩層最下部に狭在する砂岩層内（往復走時約 0.97 秒から同 1.0 秒）に貯留されていると判断できる。なお、二酸化炭素圧入中のモニター調査記録では、下方進行波

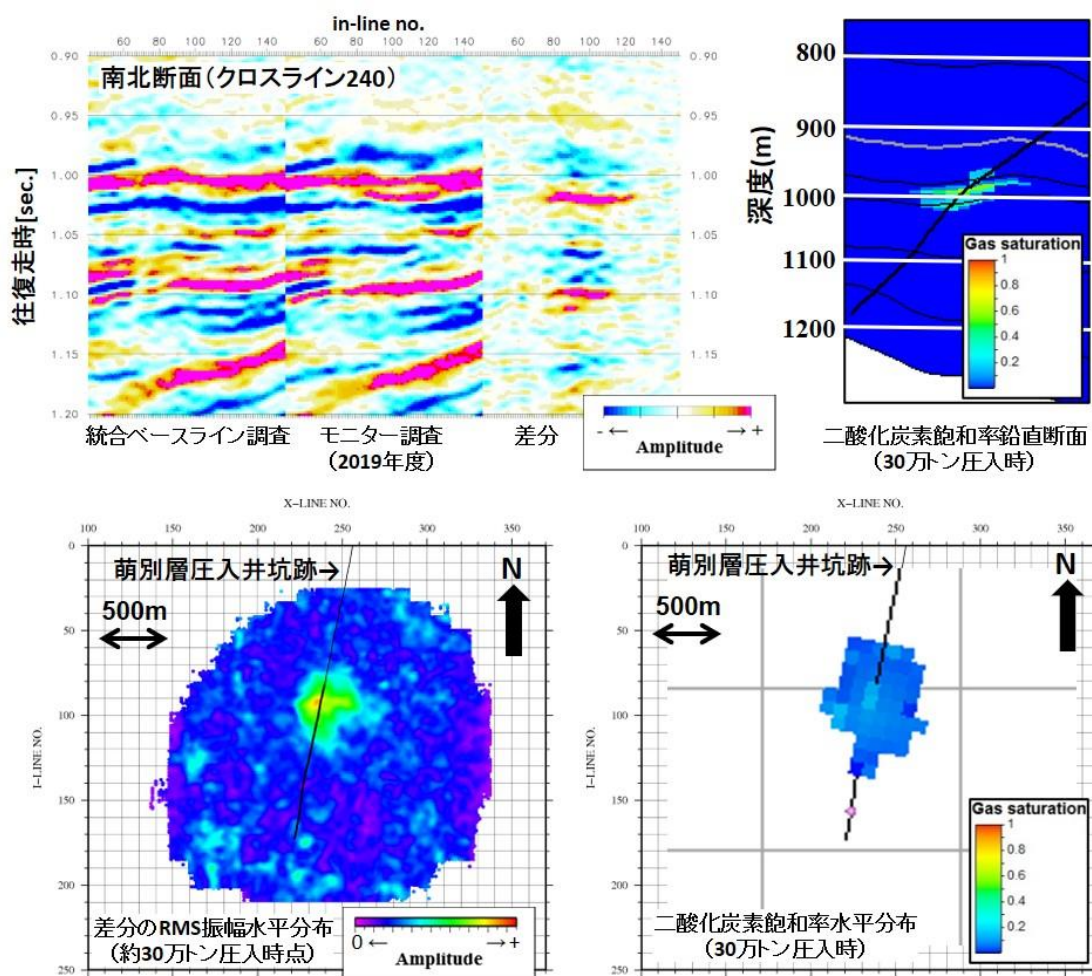
^[1] Rami Eid et al./Energy Procedia 63 (2014) 4449–4458

が二酸化炭素貯留領域で上方に反射し見かけ上減衰すること、二酸化炭素貯留領域で地震波速度が低下し下位の反射面の時間が遅れることにより、ベースライン調査記録との差分に偽像が生じる。2019 年度モニター調査結果においては、上述した貯留領域と連続性がなく、かつ貯留層シミュレーション結果において認められない往復走時約 1.06 秒や同 1.1 秒の振幅異常が該当し、これらは下部の地層に物性変化が生じたことを示すものではない。よって、圧入した二酸化炭素は貯留層の上部付近に限定して存在しており、鉛直断面上で新たな亀裂等による漏洩経路の存在は確認されないことから貯留層区間外への漏洩等は生じていないと考えられる。また、差分記録の RMS 振幅水平分布は、シミュレーションにより予想される二酸化炭素飽和率の分布範囲と整合的な結果を示しており、圧入した二酸化炭素が想定通りに貯留層内に存在していると考えられる。

以上のことから 2019 年度モニター調査結果は、圧入した二酸化炭素が想定通りに貯留層内に存在しており、想定範囲を超えて二酸化炭素が拡散する等の異常が生じていないことを示している。



第 4.5-73 図 2017 年度、2018 年度、2019 年度のモニター調査における差分抽出結果の比較



第 4.5-74 図 2019 年度モニター調査結果（左上図及び左下図）と
貯留層シミュレーション結果（右上図および右下図）との比較

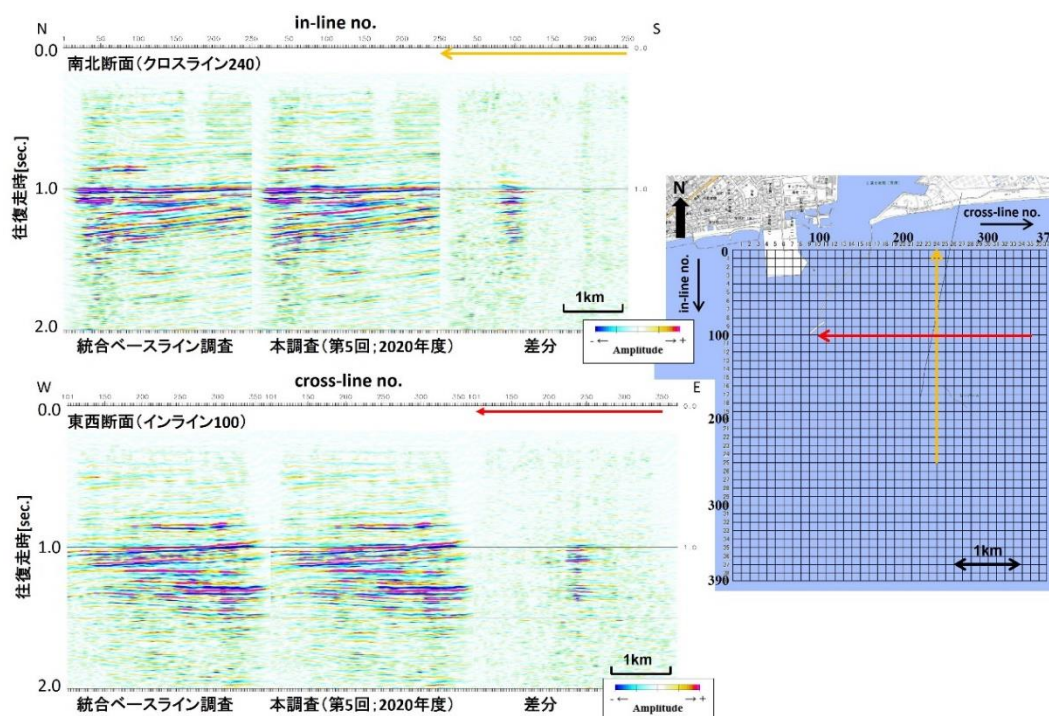
④ 2020 年度繰り返し 3D 探査

調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-22 表に示す。

第 4.5-22 表 2020 年度繰り返し 3D 探査の実施時期と圧入状況

	観測開始日 2020 年 7 月 13 日	観測終了日 2020 年 8 月 6 日
萌別層貯留層 CO ₂ 圧入量	300,012t	300,012t
滝ノ上層貯留層 CO ₂ 圧入量	98.2t	98.2t

2020 年度モニター調査記録，統合ベースライン調査記録，および両者の差分記録の例として，反射法ボリュームの南北および東西鉛直断面図を第 4.5-75 図に示す。統合ベースライン調査記録と 2020 年度モニター調査記録を比較すると，どちらも同程度の品質を有しており，また，差分記録上では，萌別層砂岩層上面深度付近（往復走時約 1 秒に対応）に明瞭な振幅異常が認められ，二酸化炭素の圧入に伴い地下の物性が変化したことを示している。

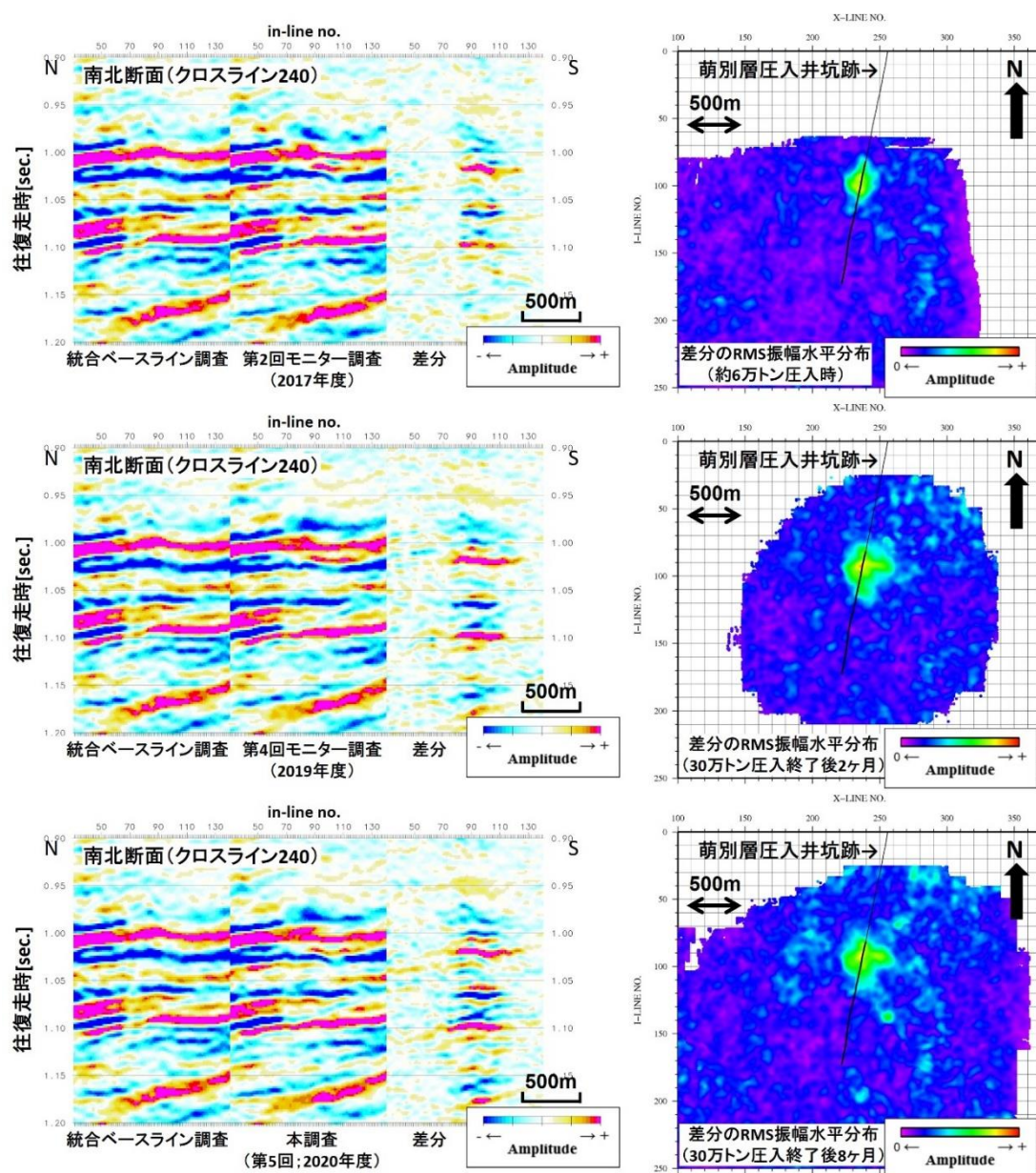


第 4.5-75 図 2020 年度三次元弾性波探査の鉛直断面図例（東西および南北断面）

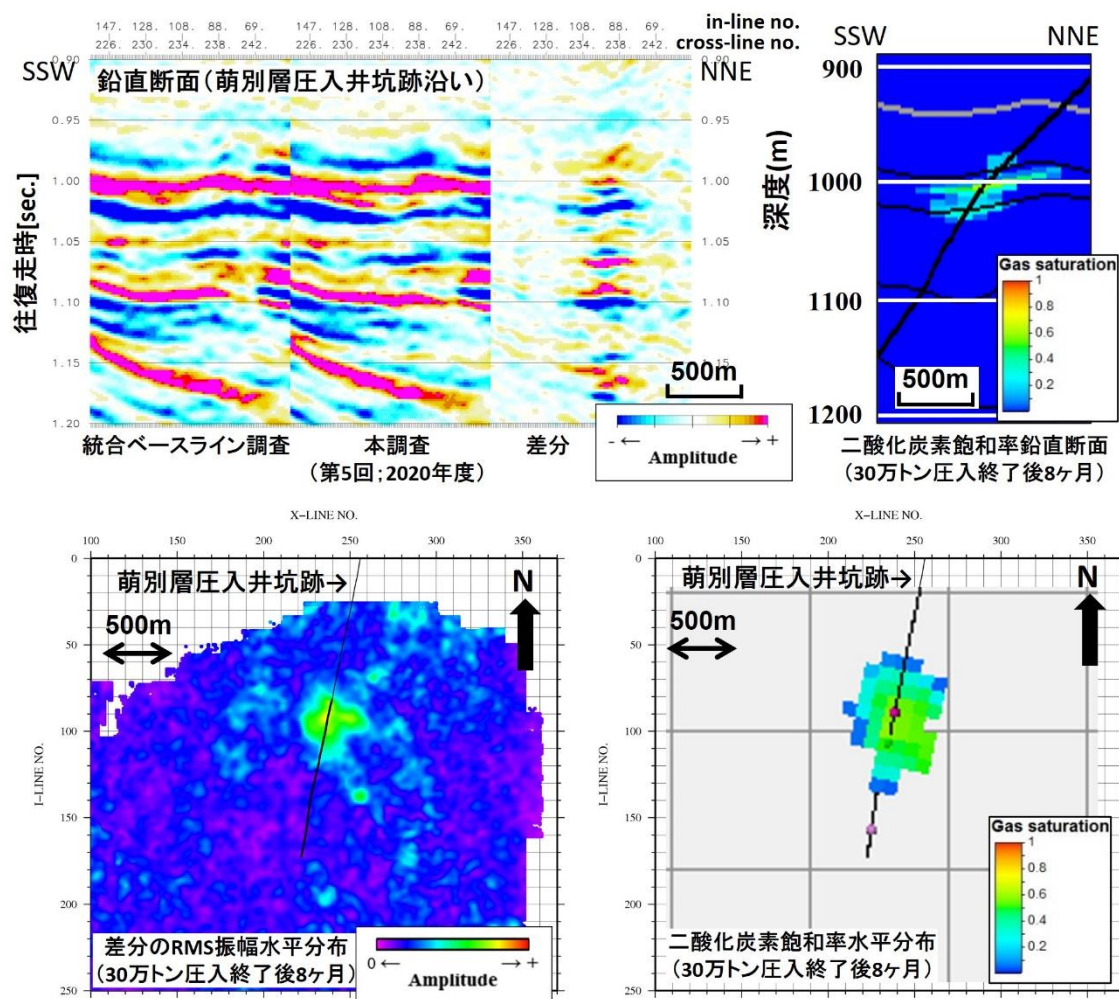
第 4.5-76 図に、2017 年度モニター調査（第 2 回）、2019 年度モニター調査（第 4 回）、および 2020 年度モニター調査（第 5 回）それぞれの差分抽出処理結果の比較として、南北鉛直断面の拡大図および差分記録の振幅変化の水平分布を示す。振幅変化の水平分布は、差分記録に対してトレース毎に RMS 振幅を計算し、各重合測線上のトレース位置に平面表示したものである。圧入により貯留層内の地震波速度が変化すれば、弾性波探査の振幅値が変化するので、RMS 振幅は定性的に貯留層内の物性変化の程度に対応すると考えられる。RMS 振幅の計算に用いた時間ウインドウは、萌別層に相当する深度として、鉛直断面上で顕著な変化を生じている 0.97 秒から 1.05 秒までとした。鉛直断面では、いずれのモニター調査記録においても、往復走時約 1.02 秒において統合ベースライン調査記録上にない反射面が認められ、差分記録上で明瞭な振幅異常を確認できる。水平分布では、概ね圧入坑跡を中心として RMS 振幅の大きい領域が分布しており、二酸化炭素が圧入井から周囲に浸透していると考えられる。2017 年度モニター調査（約 6.5 万トン圧入時点）と 2019 年度モニター調査（約 30 万トン圧入時点）の処理結果を比較すると、圧入の進展に伴い、鉛直断面ではより深部まで、水平分布ではより遠方まで変化領域が広がる様子が確認できる。一方で、2019 年度モニター調査（圧入終了後約 2 か月後）と 2020 年度モニター調査（圧入終了後約 8 か月後）の処理結果を比較すると、圧入中の変化と比べて両者の差異は非常に小さく、圧入終了後は顕著な変化が生じていないと考えられる。

第 4.5-77 図に、2020 年度モニター調査による差分抽出処理結果と 30 万トン圧入終了後 8 ヶ月の貯留層シミュレーション結果との比較として、萌別層圧入井坑跡に沿った鉛直断面の拡大図と差分記録の RMS 振幅水平分布を示す。水平分布を見ると、RMS 振幅の強振幅異常領域は、貯留層シミュレーション結果により予想される二酸化炭素飽和率の分布範囲と良く整合している。また、鉛直断面においても、圧入による変化と考えられる往復走時約 0.97 秒から同 1.05

秒の振幅異常分布は貯留層シミュレーション結果による二酸化炭素飽和率の分布と整合的である。これより下部に認められる往復走時約 1.06 秒や同 1.1 秒の振幅異常は、下方進行波が二酸化炭素貯留領域で上方に反射し見かけ上減衰すること、二酸化炭素貯留領域で地震波速度が低下し下位の反射面の時間が遅れることにより、ベースライン調査記録との差分に偽像が生じたものであり、二酸化炭素の圧入により下部の地層に物性変化が生じたことを示すものではない。よって、二酸化炭素は萌別層砂岩層最上部（往復走時約 1.0 秒から同 1.05 秒）、およびその直上の萌別層泥岩層最下部に狭在する砂岩層内（往復走時約 0.97 秒から同 1.0 秒）に貯留されていると判断できる。また、鉛直断面上で新たな亀裂等による漏洩経路の存在は確認されないことから貯留層区間外への漏洩等は生じておらず、圧入した二酸化炭素が想定通りに貯留層内に存在していると考えられる。



第 4.5-76 図 2017 年度、2019 年度、2020 年度のモニター調査における差分抽出結果の比較



第 4.5-77 図 2020 年度モニター調査結果（左上図及び左下図）と
貯留層シミュレーション結果（右上図および右下図）との比較

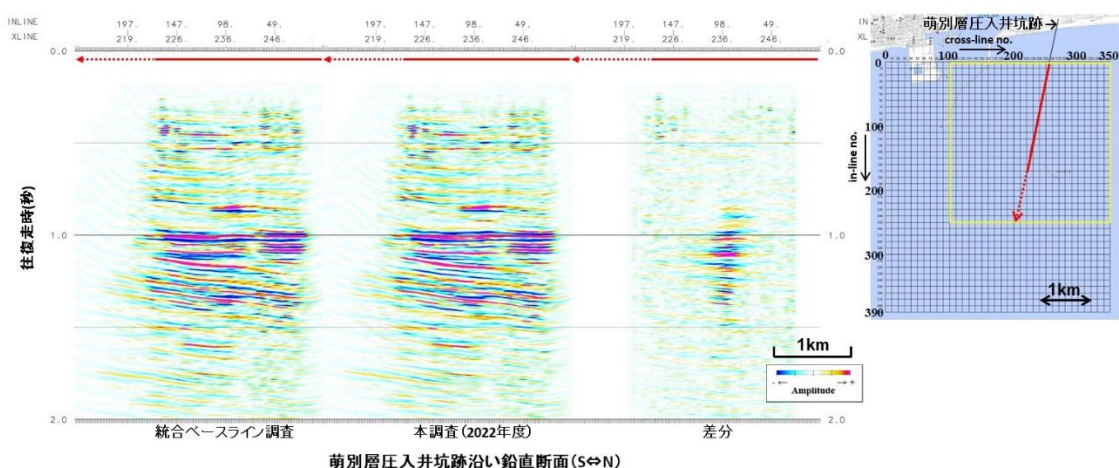
⑤ 2022 年度繰り返し 3D 探査

調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-23 表に示す。

第 4.5-23 表 2022 年度繰り返し 3D 探査の実施時期と圧入状況

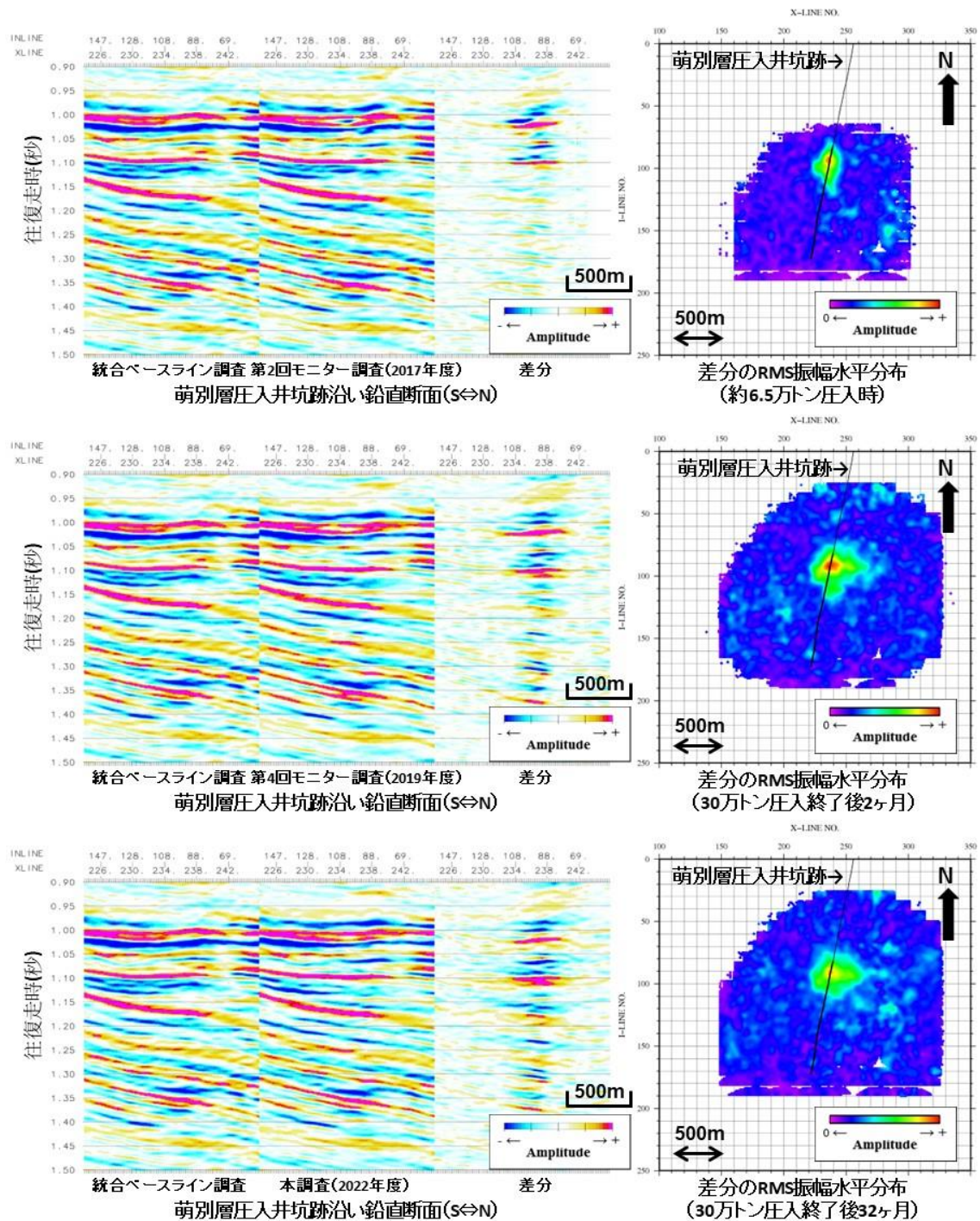
	観測開始日 2022 年 7 月 11 日	観測終了日 2022 年 7 月 21 日
萌別層貯留層 CO ₂ 圧入量	300,012t	300,012t
滝ノ上層貯留層 CO ₂ 圧入量	98.2t	98.2t

2022 年度モニター調査記録，統合ベースライン調査記録，および両者の差分記録の例として，反射法ボリュームのうち，萌別層圧入井の坑跡に沿った鉛直断面図を第 4.5-78 図に示す。統合ベースライン調査記録と 2022 年度モニター調査記録を比較すると，どちらも同程度の品質を有しており，また，差分記録上では，萌別層砂岩層上面深度付近（往復走時約 1 秒に対応）に明瞭な振幅異常が認められ，二酸化炭素の圧入に伴い地下の物性が変化したことを示している。

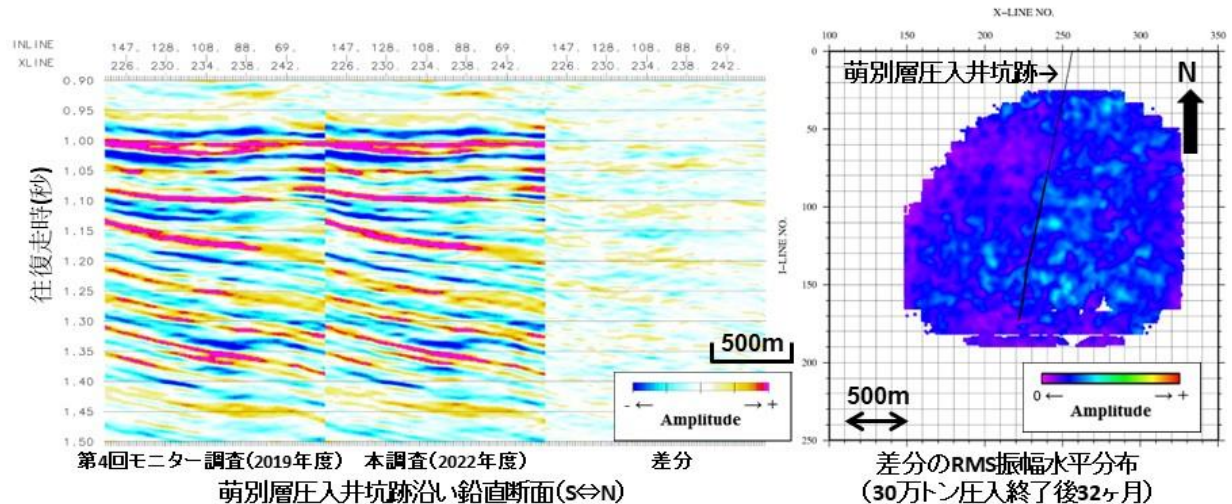


第 4.5-78 図 2022 年度三次元調査の鉛直断面図例（萌別層圧入井坑跡沿い）

第 4.5-79 図に， 2017 年度モニター調査（第 2 回）， 2019 年度モニター調査（第 4 回）， および 2022 年度モニター調査（第 6 回）それぞれの差分抽出処理結果の比較として，萌別層圧入井の坑跡に沿った鉛直断面の拡大図および差分記録の振幅変化の水平分布を示す。振幅変化の水平分布は，差分記録に対してトレース毎に RMS 振幅を計算し，各重合測線上のトレース位置に平面表示したものである。圧入により貯留層内の地震波速度が変化すれば，弾性波探査の振幅値が変化するので，RMS 振幅は定性的に貯留層内の物性変化の程度に対応すると考えられる。RMS 振幅の計算に用いた時間ウィンドウは，萌別層に相当する深度として，鉛直断面上で顕著な変化を生じている 0.97 秒から 1.05 秒までとした。鉛直断面では，いずれのモニター調査記録においても，往復走時約 1.02 秒において統合ベースライン調査記録上にない反射面が認められ，差分記録上で明瞭な振幅異常を確認できる。水平分布では，概ね圧入坑跡を中心として RMS 振幅の大きい領域が分布しており，二酸化炭素が圧入井から周囲に浸透していると考えられる。2017 年度モニター調査（約 6.5 万トン圧入時点）と 2019 年度モニター調査（約 30 万トン圧入時点）の処理結果を比較すると，圧入の進展に伴い，鉛直断面ではより深部まで，水平分布ではより遠方まで変化領域が広がる様子が確認できる。一方で， 2019 年度モニター調査（圧入終了後約 2 か月後）と 2022 年度モニター調査（圧入終了後約 32 か月後）の処理結果を比較すると，圧入中の変化と比べて両者の差異は非常に小さい。第 4.5-80 図に示す 2019 年度モニター調査と 2022 年度モニター調査，両モニター調査間における差分抽出処理結果によれば，振幅異常は認められない。以上より，圧入終了後は貯留層内に顕著な物性変化は生じていないと考えられる。

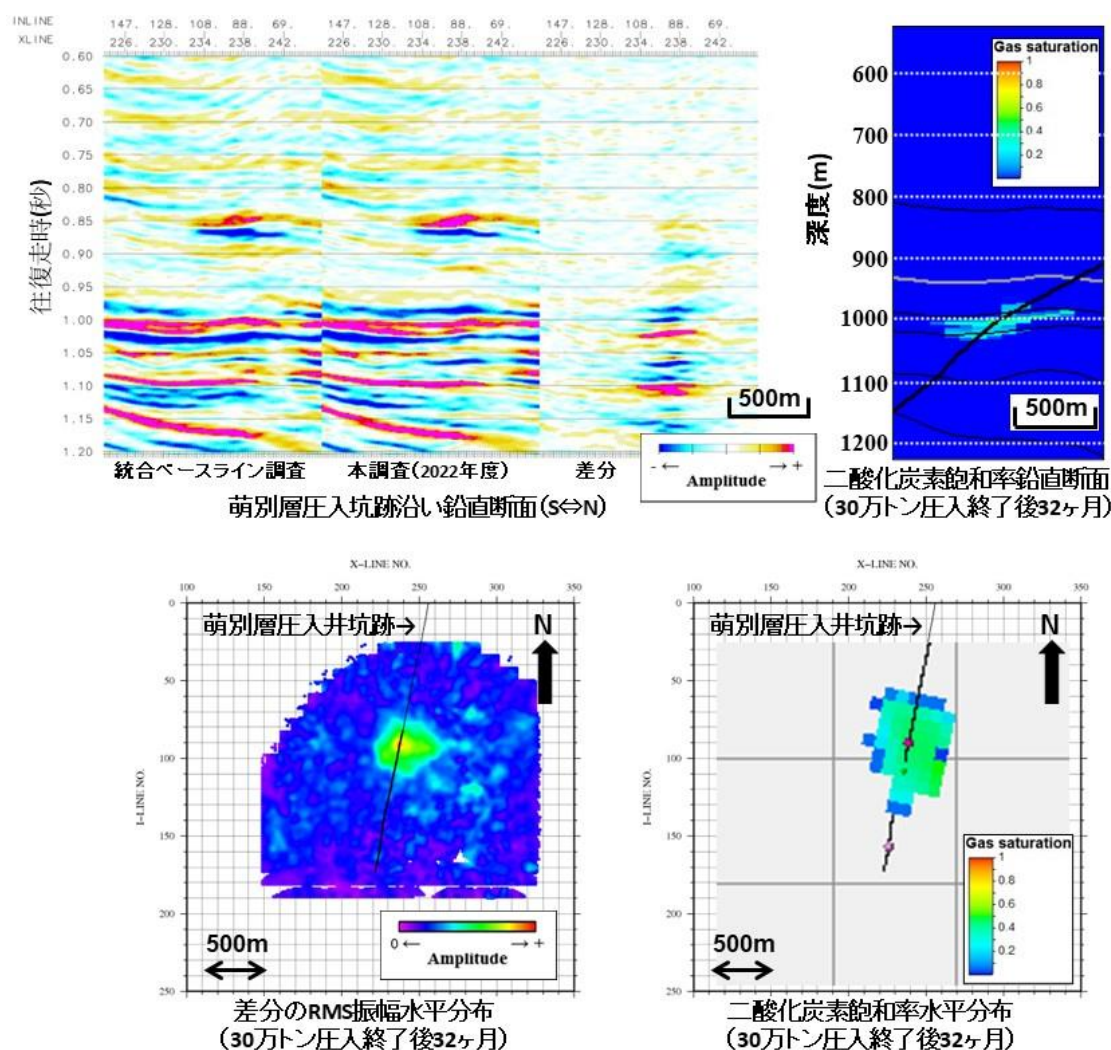


第 4.5-79 図 2017 年度，2019 年度，2022 年度のモニター調査における差分抽出結果の比較



第 4.5-80 図 2019 年度と 2022 年度調査における、モニター調査間の差分抽出処理結果の比較

第 4.5-81 図に、2022 年度モニター調査による差分抽出処理結果と 30 万トン圧入終了後 32 ヶ月の貯留層シミュレーション結果との比較として、萌別層圧入井坑跡に沿った鉛直断面の拡大図と差分記録の RMS 振幅水平分布を示す。水平分布を見ると、RMS 振幅の強振幅異常領域は、貯留層シミュレーション結果により予想される二酸化炭素飽和率の分布範囲と良く整合している。また、鉛直断面においても、圧入による変化と考えられる往復走時約 0.97 秒から同 1.05 秒の振幅異常分布は貯留層シミュレーション結果による二酸化炭素飽和率の分布と整合的である。これより下部に認められる往復走時約 1.06 秒や同 1.1 秒の振幅異常は、下方進行波が二酸化炭素貯留領域で上方に反射し見かけ上減衰すること、二酸化炭素貯留領域で地震波速度が低下し下位の反射面の時間が遅れることにより、ベースライン調査記録との差分に偽像が生じたものであり、二酸化炭素の圧入により下部の地層に物性変化が生じたことを示すものではない。よって、二酸化炭素は萌別層砂岩層最上部（往復走時約 1.0 秒から同 1.05 秒）、およびその直上の萌別層泥岩層最下部に狭在する砂岩層内（往復走時約 0.97 秒から同 1.0 秒）に貯留されていると判断できる。また、鉛直断面上で新たな亀裂等による漏洩経路の存在は確認されないことから貯留層区間外への漏洩等は生じておらず、圧入した二酸化炭素が想定通りに貯留層内に存在していると考えられる。



第 4.5-81 図 2022 年度モニター調査結果（左上図及び左下図）と
貯留層シミュレーション結果（右上図および右下図）との比較

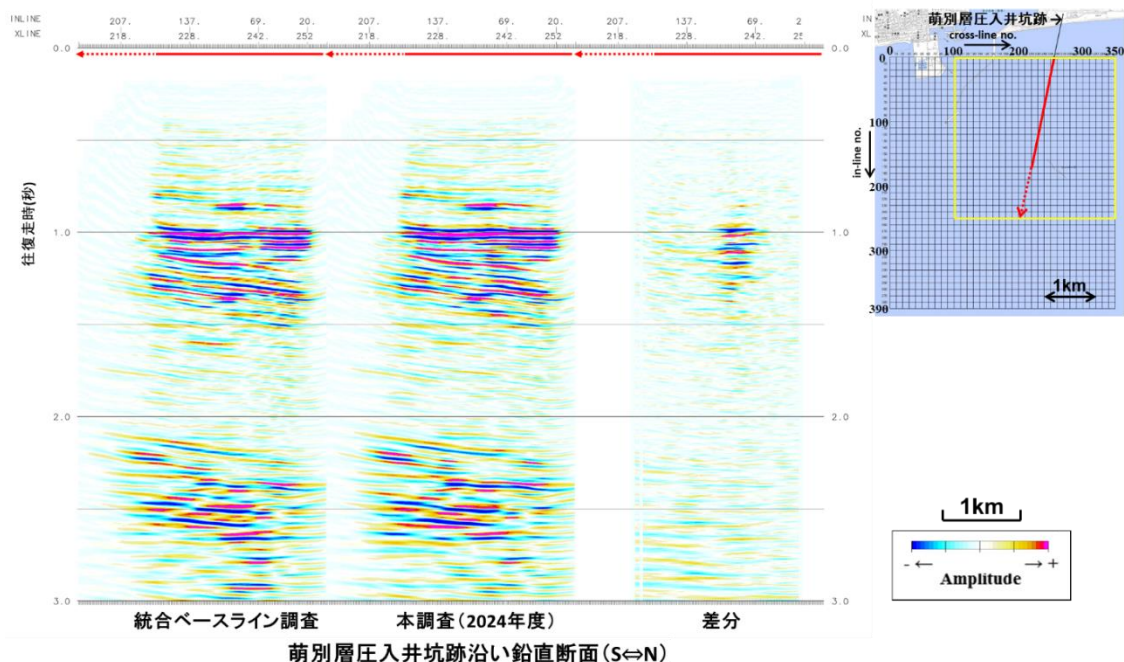
⑥ 2024 年度繰り返し 3D 探査

調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-24 表に示す。

第 4.5-24 表 2024 年度繰り返し 3D 探査の実施時期と圧入状況

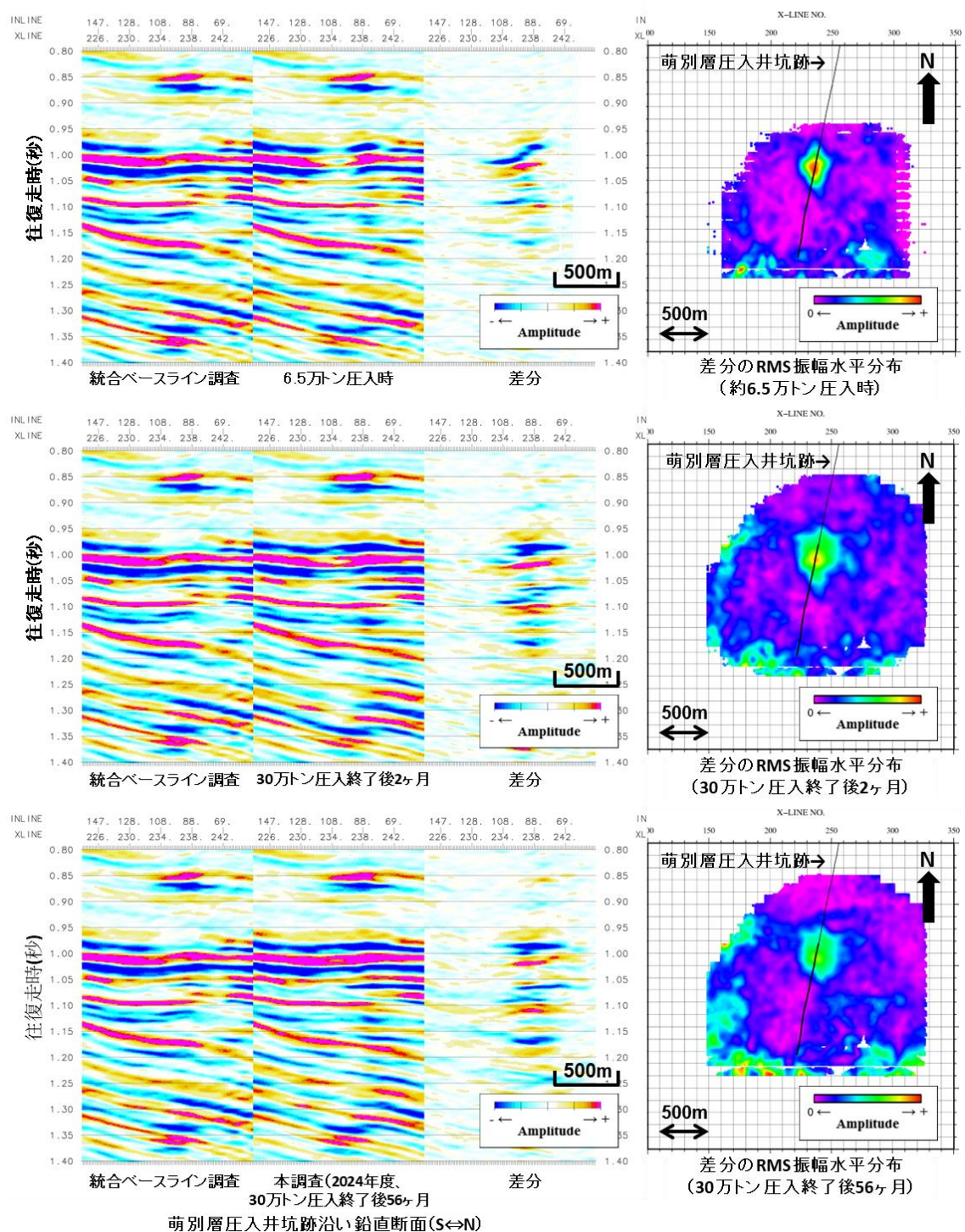
	観測開始日 2024 年 7 月 14 日	観測終了日 2024 年 7 月 21 日
萌別層貯留層 CO ₂ 圧入量	300,012t	300,012t
滝ノ上層貯留層 CO ₂ 圧入量	98.2t	98.2t

2024 年度モニター調査記録，統合ベースライン調査記録，および両者の差分記録の例として，反射法ボリュームのうち，萌別層圧入井の坑跡に沿った鉛直断面図を第 4.5-82 図に示す。統合ベースライン調査記録と 2024 年度モニター調査記録を比較すると，どちらも同程度の品質を有しており，また，差分記録上では，萌別層砂岩層上面深度付近（往復走時約 1 秒に対応）に引き続き明瞭な振幅異常が認められ，二酸化炭素の圧入に伴い地下の物性が変化したことを示している。

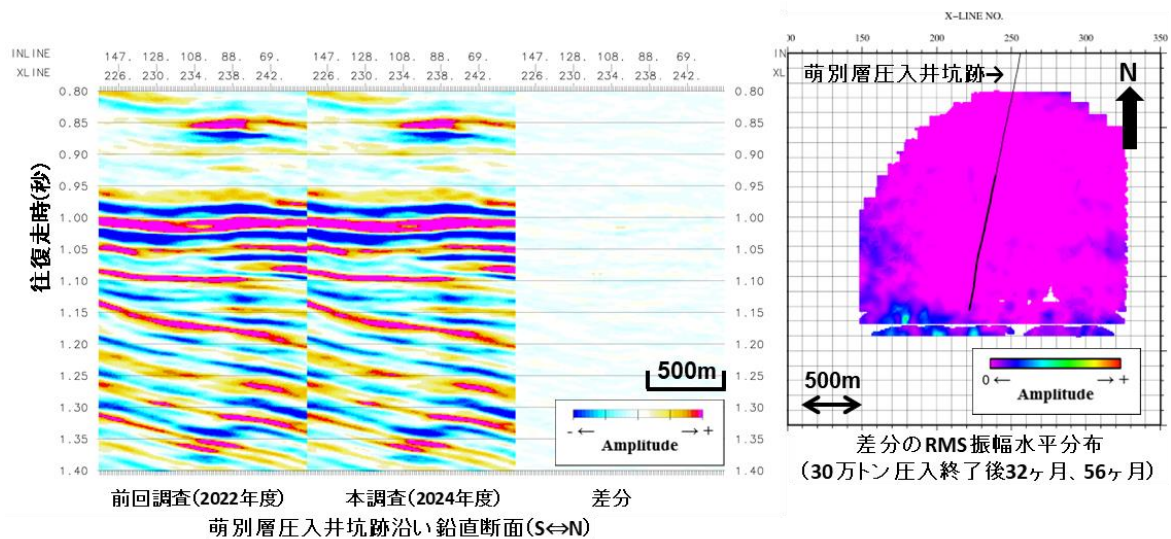


第 4.5-82 図 2024 年度三次元調査の鉛直断面図例（萌別層圧入井坑跡沿い）

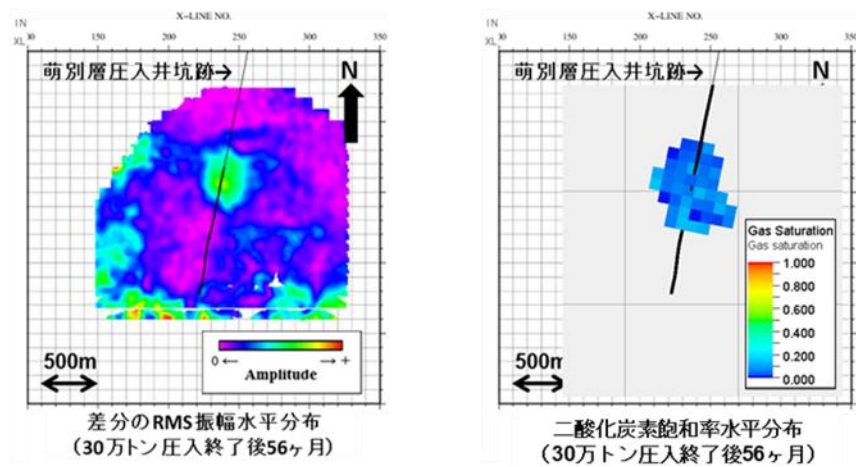
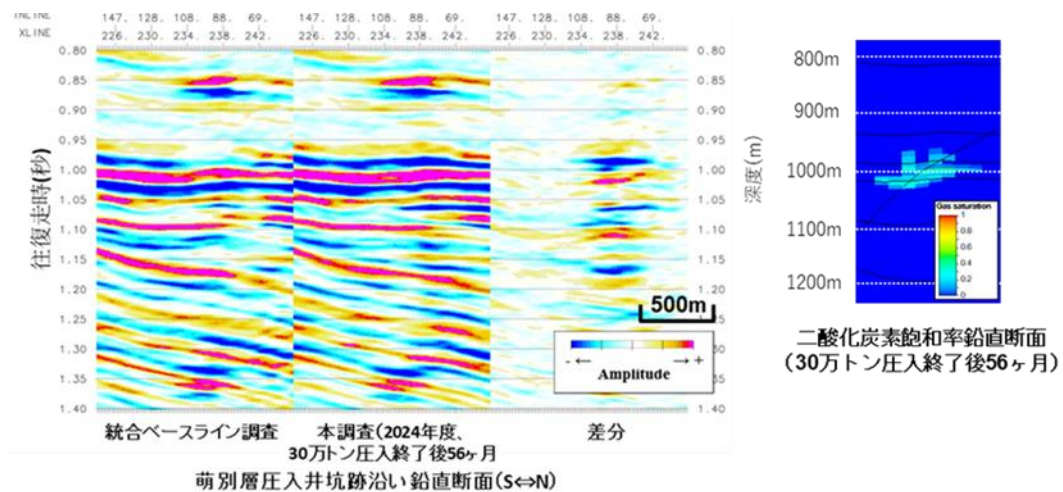
第 4.5-83 図に、2017 年度モニター調査（6.5 万トン圧入時）、2019 年度モニター調査（30 万トン圧入終了後 2 ヶ月）、および 2024 年度モニター調査（30 万トン圧入終了後 56 ヶ月）それぞれの差分抽出処理結果の比較として、萌別層圧入井の坑跡に沿った鉛直断面の拡大図および差分記録の振幅変化の水平分布を示す。振幅変化の水平分布は、差分記録に対してトレース毎に RMS 振幅を計算し、各重合測線上のトレース位置に平面表示したものである。圧入により貯留層内の地震波速度が変化すれば、弾性波探査の振幅値が変化するので、RMS 振幅は定性的に貯留層内の物性変化の程度に対応すると考えられる。RMS 振幅の計算に用いた時間ウィンドウは、萌別層に相当する深度として、鉛直断面上で顕著な変化を生じている 0.97 秒から 1.05 秒までとした。鉛直断面では、いずれのモニター調査記録においても、往復走時約 1.02 秒において統合ベースライン調査記録上にない反射面が認められ、差分記録上で明瞭な振幅異常を確認できる。水平分布では、概ね圧入坑跡を中心として RMS 振幅の大きい領域が分布しており、二酸化炭素が圧入井から周囲に浸透していると考えられる。2017 年度モニター調査（約 6.5 万トン圧入時点）と 2019 年度モニター調査（約 30 万トン圧入終了後 2 ヶ月）の処理結果を比較すると、圧入の進展に伴い、鉛直断面ではより深部まで、水平分布ではより遠方まで変化領域が広がる様子が確認できる。一方で、2019 年度モニター調査（圧入終了後 2 ヶ月）と 2024 年度モニター調査（圧入終了後約 56 ヶ月後）の処理結果を比較すると、圧入中の変化と比べて両者の差異は非常に小さい。第 4.5-84 図では、2022 年度モニター調査（圧入終了後 32 ヶ月）と 2024 年度モニター調査（圧入終了後 56 ヶ月）における差分抽出処理結果の垂直断面と水平断面を示している。これらの図面からは、前回 2022 年度の調査以降の振幅異常は認められないこと。したがって、最近 2 年の貯留層内の変化はほぼないと考えられる。



第 4.5-83 図 2017 年度 (6.5 万トン圧入時), 2019 年度 (30 万トン圧入終了後 2 ヶ月),
2024 年度調査 (30 万トン圧入終了後 56 ヶ月) における差分抽出結果の比較



第 4.5-84 図 2022 年度と 2024 年度モニター調査における、
モニター調査間の差分抽出処理結果の比較

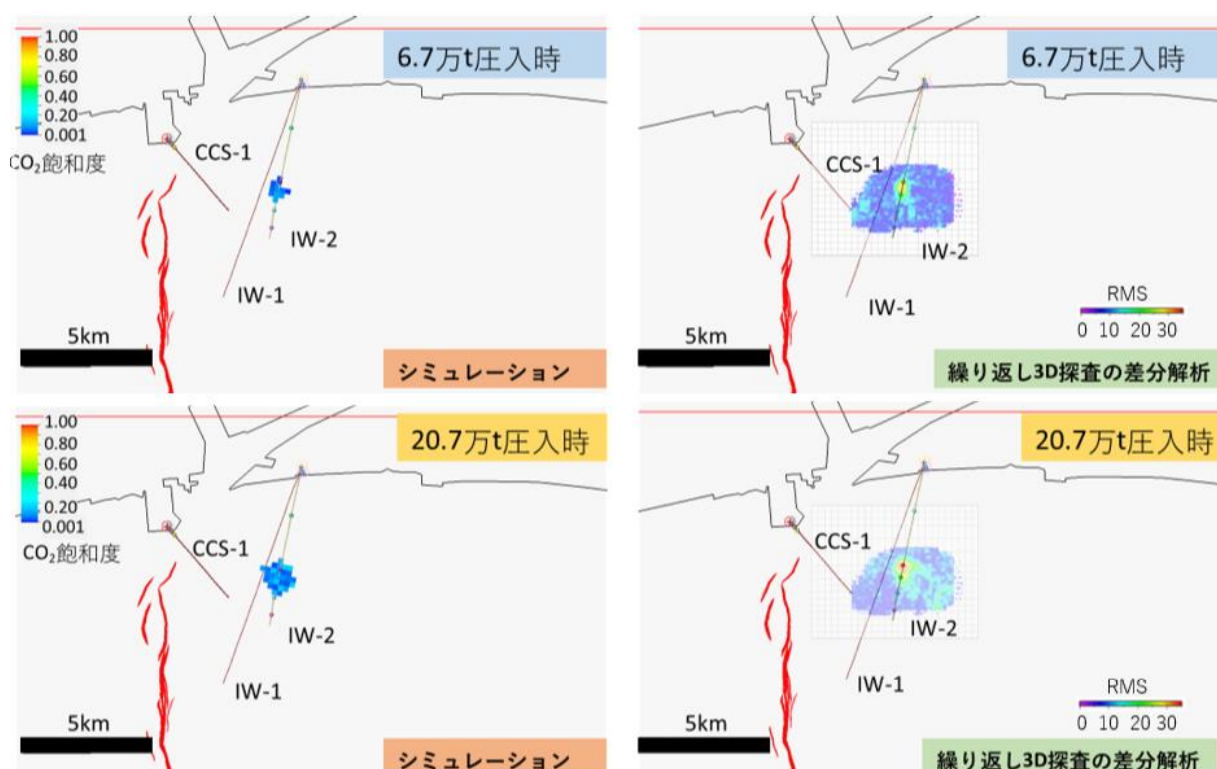


第 4.5-85 図 2024 年度モニター調査結果（左上図及び左下図）とシミュレーション結果（右上図および右下図）との比較

第 4.5-85 図に、2024 年度モニター調査による差分抽出処理結果と 30 万トン圧入終了後 56 ヶ月の貯留層シミュレーション結果との比較を示す。萌別層圧入井坑跡に沿った鉛直断面の拡大図と差分記録の RMS 振幅水平分布によれば、RMS 振幅の強振幅異常領域は、貯留層シミュレーション結果により予想される二酸化炭素飽和率の分布範囲と良く整合している。また、鉛直断面においても、圧入による変化と考えられる往復走時約 0.97 秒から同 1.05 秒の振幅異常分布は貯留層シミュレーション結果による二酸化炭素飽和率の分布と整合的である。これより下部に認められる往復走時約 1.06 秒や同 1.1 秒の振幅異常は、下方進行波が二酸化炭素貯留領域で上方に反射し見かけ上減衰すること、二酸化炭素貯留領域で地震波速度が低下し下位の反射面の時間が遅れることにより、ベースライン調査記録との差分に偽像が生じたものであり、二酸化炭素の圧入により下部の地層に物性変化が生じたことを示すものではない。よって、二酸化炭素は萌別層砂岩層最上部（往復走時約 1.0 秒から同 1.05 秒）、およびその直上の萌別層泥岩層最下部に挟在する砂岩層内（往復走時約 0.97 秒から同 1.0 秒）に貯留されていると判断できる。また、鉛直断面上で新たな亀裂等による漏洩経路の存在は確認されないことから貯留層区間外への漏洩等は生じておらず、圧入した二酸化炭素が想定通りに貯留層内に存在していると考えられる。

⑦ 繰り返し 3D 探査の解析結果と CO₂ 長期挙動予測シミュレーション結果比較

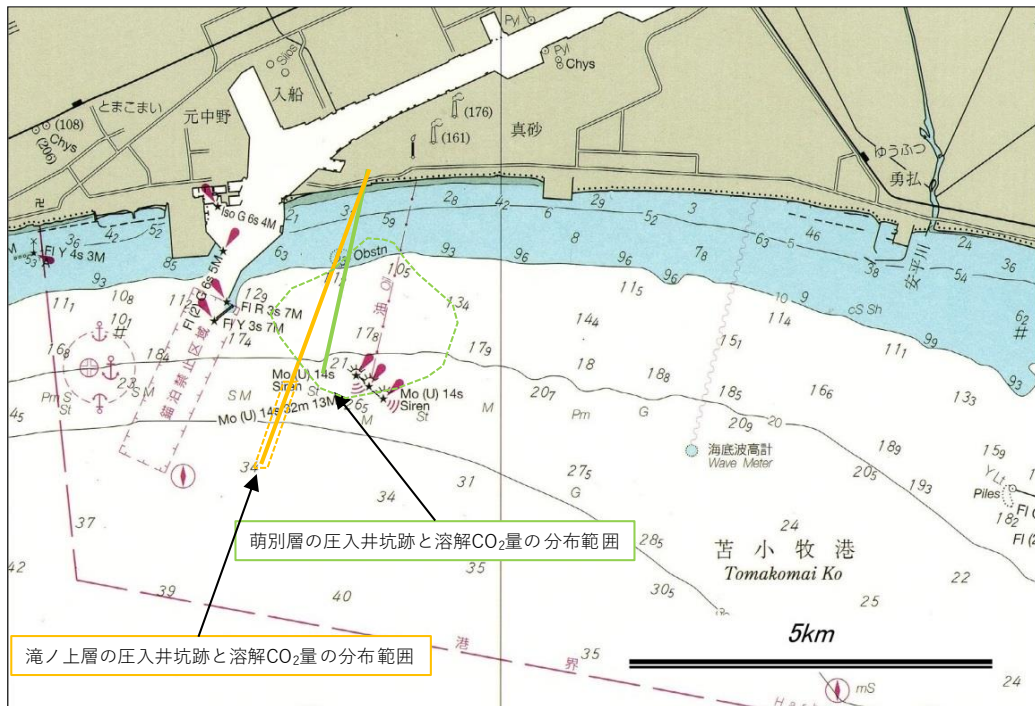
第 4.5-86 図に 2017 年度および 2018 年度に実施した 3D 繰り返し弾性波の差分解析結果と、弾性波探査記録を取得した時点の圧入量に対応した長期挙動予測シミュレーションによる CO₂ 飽和度分布予測の比較を示す。おおむね整合的な結果を得た。



第 4.5-86 図 繰り返し 3D 探査の解析結果と CO₂ 長期挙動予測シミュレーション結果比較

(4) 海域での位置

海底下廃棄された特定二酸化炭素ガスが広がる範囲について、それぞれの圧入対象層のモデルケースでシミュレーションを行った。滝ノ上層 T1 部層については平成 23 年度 (2011 年度) 地質モデルをベースに圧入井の圧入実績に基づいて修正した地質モデル (2018 年度地質モデル) を、萌別層砂岩層については 2018 年度地質モデルをベースに CO₂ 圧入実績に基づいて修正したモデル (2019 年度地質モデル) を用いてシミュレーションを実施した。シミュレーションにより予想される CO₂ プルーム (溶解 CO₂ 量) の平面的な分布範囲は、2019 年 3 月 28 日付けで許可発給された変更許可申請書に記載されている溶解 CO₂ 量分布範囲を含むため、本計画では許可済みの CO₂ プルーム (溶解 CO₂ 量) を踏襲する (第 4.5-87 図)。



注：海上保安庁発行の海図（W1034）に加筆

第 4.5-87 図 二酸化炭素ガスの海底下廃棄をする海域の位置及び範囲

4.6 海底下廃棄をする海域及びその周辺の海域における、海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在

苫小牧市および厚真町周辺海域において、海中公園、自然公園（国立公園、国定公園、道立自然公園）、ラムサール条約登録湿地、鳥獣保護区、藻場、さんご礁、特殊な生態系（冷水生態系、熱水生態系、鯨骨生物群集）等の海洋環境の保全上特に保護を図る必要があるものの所在について、既存資料^{[1]-[9]}を用いて調査した結果、これらの存在は確認されなかった。

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

^[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，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=622，2025/2/21 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）

5. 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の方法

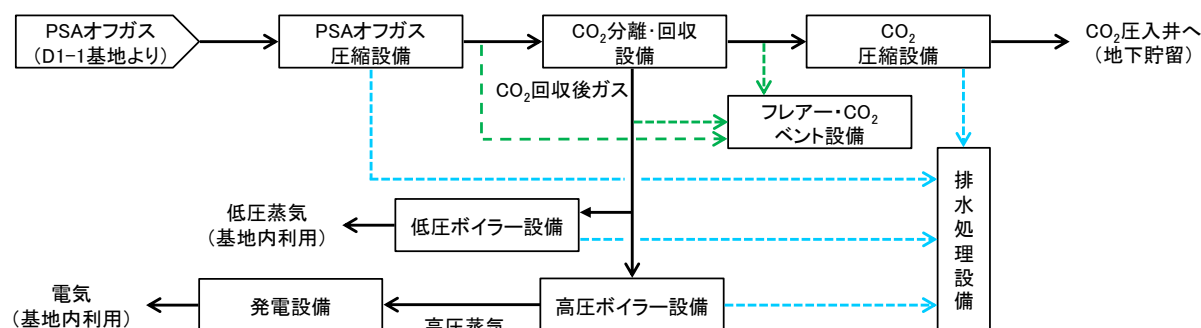
5.1 ガスの発生源から海底下廃棄をする位置までにおいて特定二酸化炭素ガスの回収及び輸送並びに圧入等に用いる設備及び機材等

(1) 概要

第 5.1-1 表に CO₂ 分離・回収・圧入基地の主要設備構成を、第 5.1-1 図に主な設備の配置の概略を、第 5.1-2 図に各種設備の配置図を示す。

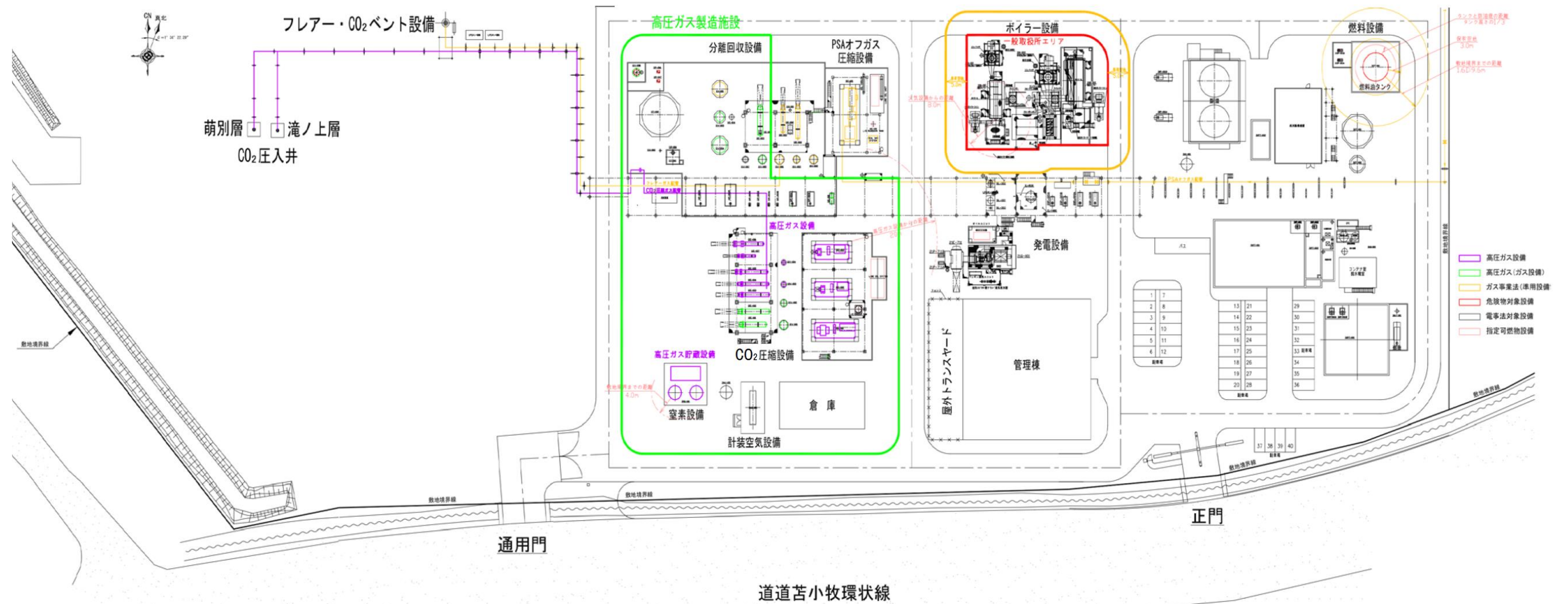
第 5.1-1 表 主要設備構成

設備名称	能力・諸元	基数	備考
PSA オフガス圧縮設備	遠心式圧縮機（原動機出力：4,100kW）	1 基	
CO ₂ 分離・回収設備	CO ₂ 吸収塔、CO ₂ 放散塔、LPFD	各 1 基	
CO ₂ 圧縮設備	遠心式圧縮機（原動機出力：2,800 1,350 1,100kW 各 1 台）	3 基	
発電設備	高圧蒸気発電機（定格出力：12.4MW）	1 式	
ボイラー設備	1) 高圧ボイラー設備（蒸気発生能力：61t/h） 注：燃料ガスならびに補助燃料 A 重油と混焼	1 基	1) 発電ボイラー
	2) 低圧ボイラー設備（蒸気発生能力：30t/h）	1 基	2) 熱源用ボイラー
循環冷却水設備	冷却水循環設備、冷却塔（循環水量：3,400t/h）	1 式	
排水処理設備	油水分離設備、加圧浮上設備（処理能力：15m ³ /h）	1 式	
純水設備	イオン交換式純水製造設備（純水製造能力：20 t/h）	1 式	
窒素設備	液体窒素気化設備（蒸発器能力：250Nm ³ /h ×2）	1 式	
計装空気設備	空気圧縮機、空気乾燥設備（能力：450Nm ³ /h）	1 式	
フレアー・CO ₂ ベント設備	高さ 30m	1 式	
防火設備	エンジン駆動式防火ポンプ（容量：96m ³ /h）	1 台	
管理棟	事務管理、運転管理用建屋（延床面積：1,580m ² ）	1 棟	電気室兼用



第 5.1-1 図 主な設備の配置の概略

CO₂ 分離・回収・圧入基地（D1-2・D0 基地）は、出光興産株式会社北海道製油所の隣接地（南用地）に設置した。D1-2 基地では、D1-1 基地から配管で受入れた PSA オフガスを昇圧した後、分離・回収設備で高純度の CO₂（体積百分率で 99 パーセント以上）を回収し、同一敷地内にある D0 基地へ構内配管で移送する。分離・回収装置で CO₂ を分離した後のガスは、H₂、CH₄、CO 等からなる可燃性ガスであるため、D1-2 基地内に設置するボイラーでスチームを発生させて CO₂ 放散塔リボイラーの熱源として利用するとともに、スチームタービンにより発電して、CCS に係る設備への電力の一部として供給する。



第 5.1-2 図 CO₂ 分離・回収・圧入基地における各種設備の配置

(2) PSA オフガス圧縮設備

D1-1 基地から低圧で受け入れた PSA オフガスを昇圧して、CO₂分離・回収設備内の CO₂ 吸収塔に 0.81MPaG、40℃の条件で供給することを目的とするガス圧縮設備である。D1-1 基地から温度 40℃±10℃、圧力 0.04MPaG 条件で受け入れる最大流量（29,500Nm³/h）のオフガスに対応する能力となっている。

PSA オフガス送気量は、CO₂ 量を一定とするため、ガス組成のうち CO₂ の比率が変化することにより異なる。PSA オフガスの組成に係る実績データから、設計条件として、最も CO₂ 濃度が低いケース（最大処理量ケース）、最も CO₂ 濃度が高いケース（最小処理量ケース）、CO₂ 濃度の代表組成ケースの三条件を想定し、設計条件としては代表組成ケースを採用している（単位は、体積百分率：％）。

1) 最低 CO₂ 濃度ケース（最大処理量ケース）

CO₂ : 43.86, H₂ : 43.50, CH₄ : 8.03, CO : 3.99, H₂O : 0.62

2) 最高 CO₂ 濃度ケース（最小処理量ケース）

CO₂ : 58.74, H₂ : 30.12, CH₄ : 6.81, CO : 3.53, H₂O : 0.80

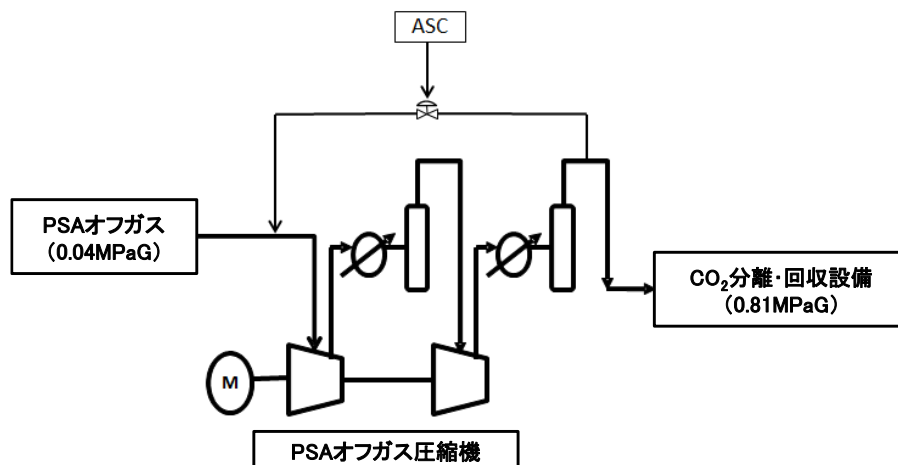
3) 代表 CO₂ 濃度ケース（代表組成ケース）

CO₂ : 51.60, H₂ : 38.80, CH₄ : 6.60, CO : 2.30, H₂O : 0.70

年間 20 万トン（25.3 トン/h）の CO₂ 送出を、PSA オフガス送気量の上限基準とする。圧力・温度は、0.03MPaG・30℃（代表値）とする。

PSA オフガス設備は、第 5.1-3 図に示すように、PSA オフガス第 1 段圧縮機、PSA オフガス圧縮機第 1 段冷却器、PSA オフガス圧縮機第 1 段気液分離槽、PSA オフガス第 2 段圧縮機、PSA オフガス圧縮機第 2 段冷却器、および PSA オフガス圧縮機吐出気液分離槽で構成される。

PSA オフガスは組成および流量が大きく変動するため、PSA オフガス圧縮機は回転数を制御し吸い込み圧力を一定に保つ。また、ターンダウン時にはサージ領域に入る可能性があるのでスピルバックラインを併用して、サージ領域に入らないようにアンチサージコントロール（Anti-Surge Control; ASC）を行う。



第 5.1-3 図 PSA オフガス圧縮設備構成

(3) CO₂分離・回収設備

アミン水溶液を用いた化学吸収プロセスの中でも特にCO₂の吸収性能に優れかつ商業規模での運転実績のあるプロセスを採用し、装置コスト・運転コストを低く抑えることを目的とした分離・回収の設備構成としている。

さらに、石油精製（水素製造）、アンモニア・肥料製造、天然ガス精製（LNG含む）、石炭ガス化複合発電（Integrated coal Gasification Combined Cycle; IGCC）等の分離・回収と類似のプロセス条件（CO₂分圧、CO₂回収率等）を選定することにより、将来的に商業化CCSが期待されるこれら分野の設備設計において、省エネルギー、低コスト化の基準データを提供できることを目的とした。

PSA オフガスは、水素製造装置の運転変動によって第 5.1-2 表に示す範囲でガス組成の変動を生じるが、各ガス組成において特定二酸化炭素ガスの濃度基準に適合した回収CO₂ガスを年間 20 万トン分離・回収できる設備仕様となっている（第 5.1-3 表）。

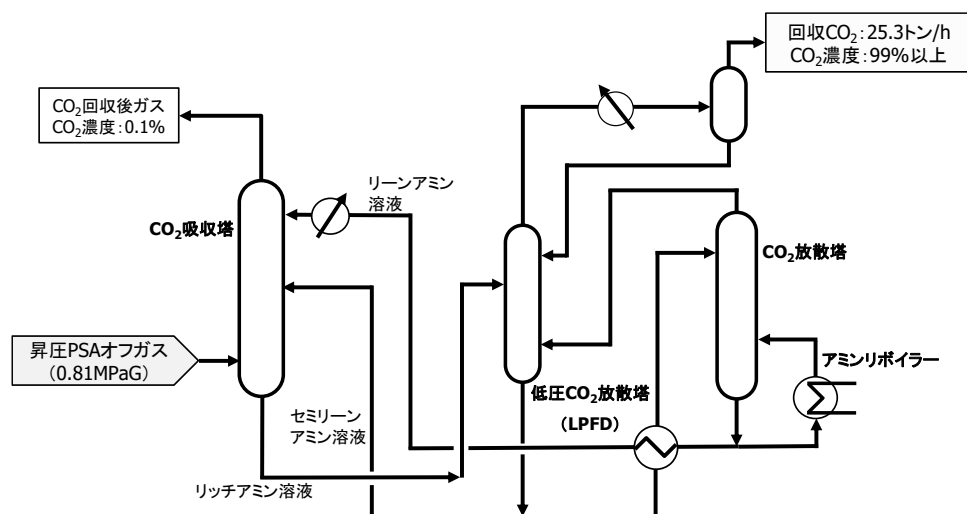
分離・回収プロセスには活性アミンを使用したOASEプロセス（ドイツBASF社のライセンス）の省エネルギー効果の高いプロセスフローを採用している（第 5.1-4 図）。このプロセスは、商品名OASEホワイト（第三級アミンを主成分とする水溶液）をアミン溶液として使用し、LPFDと2段吸収法で構成され、分離・回収エネルギー（アミンリボイラー熱量＋アミン循環ポンプエネルギー量）を低減する。

第 5.1-2 表 PSA オフガスの組成

PSA オフガス	最低 CO ₂ 濃度 (最大処理量) ケース	代表 CO ₂ 濃度 (代表組成) ケース	最高 CO ₂ 濃度 (最小処理量) ケース
オフガス処理量 (トン/h)	29.9	28.2	28.2
オフガス組成 (体積百分率 : %)			
CO ₂	43.86	51.60	58.74
H ₂	43.50	38.80	30.12
CH ₄	8.03	6.60	6.81
CO	3.99	2.30	3.53
H ₂ O	0.62	0.70	0.80
合計	100	100	100
分離・回収入口でのオフガス圧力 (MPaG)	0.81	0.81	0.81
オフガス温度 (°C)	40	40	40

第 5.1-3 表 回収 CO₂ の組成

回収 CO ₂ ガス	最低 CO ₂ 濃度 (最大処理量) ケース	代表 CO ₂ 濃度 (代表組成) ケース	最高 CO ₂ 濃度 (最小処理量) ケース
ガス流量 (トン/h)	26.3	26.2	26.3
ガス組成 (体積百分率：%)			
CO ₂	91.42	91.50	91.55
H ₂	0.25	0.20	0.14
CH ₄	0.07	0.05	0.05
CO	0.03	0.02	0.03
H ₂ O	8.23	8.23	8.23
合計	100	100	100
圧力 (MPaG)	0.05	0.05	0.05
温度 (℃)	50	50	50
乾式基準の CO ₂ 濃度 (%)	99.62	99.70	99.76



第 5.1-4 図 CO₂ 分離・回収設備構成

LPFD は加圧下の吸収塔で CO₂ を吸収したアミン水溶液（リッチアミン溶液）を低圧とし，さらに CO₂ 放散塔頂の余剰熱（水蒸気）で加熱して CO₂ を放散することにより，大量の熱量を必要とする CO₂ 放散塔での熱負荷を低減する。

2 段吸収法では，LPFD 塔底のセミアミン溶液（少量の CO₂ を含有）を吸収塔下段に循環して原料 CO₂ を粗吸収し，残りを高熱再生されたリーンアミン溶液（CO₂ をほとんど含まない）により吸収塔上段で仕上吸収する。

主なプロセス性能を示す。

- 1) 回収 CO₂ 純度：体積百分率 99 パーセント以上
- 2) 吸収塔出口 CO₂ 濃度：体積百分率 0.1 パーセント以下（乾式基準）。

すなわち CO₂ 吸収率は，99.9%となる（推算値）。

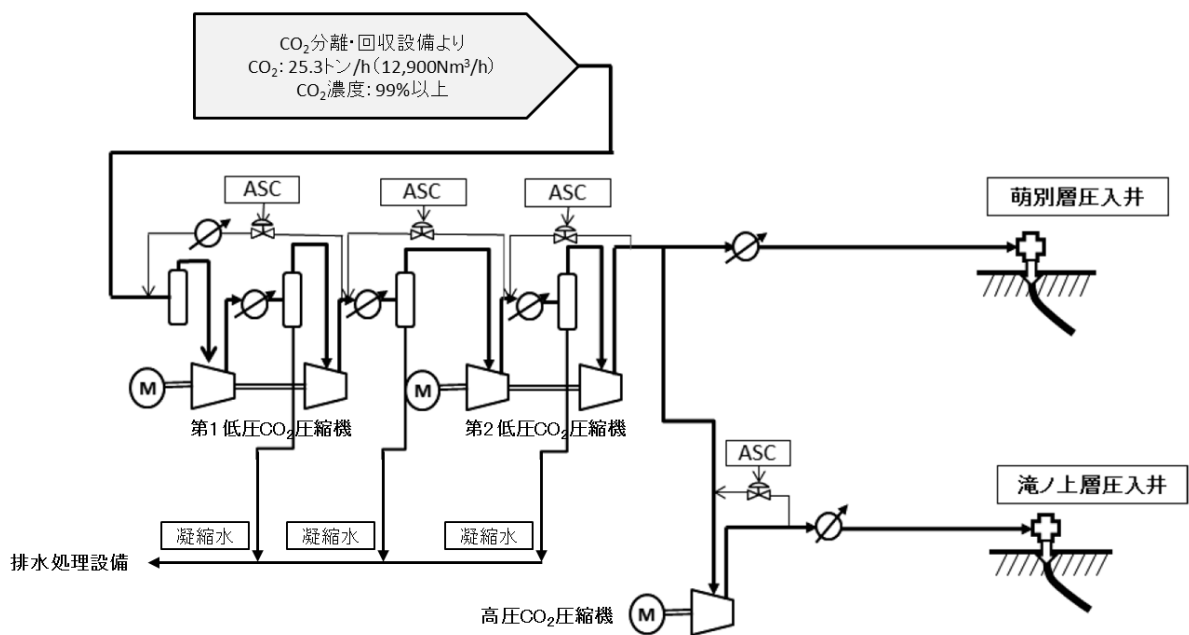
分離・回収した特定二酸化炭素ガスは，パイプラインを通じ，隣接する CO₂ 圧入設備へ送気される。

(4) CO₂ 圧縮設備

PSA オフガスから分離・回収した高純度 CO₂ を大気圧から昇圧し、滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井に輸送・圧入する設備である。圧入井入口（坑口）での取り合い条件は、以下のとおりとしている。

- ・ 温度 : 31.1～40℃
- ・ 流量 : 0～25.3 トン/h
- ・ 圧力（滝ノ上層圧入井） : 14.4～22.8MPaG
- ・ 圧力（萌別層圧入井） : 4.0～9.3MPaG

CO₂ 圧縮設備は第 5.1-5 図に示すように、第 1 低压 CO₂ 圧縮機、第 2 低压 CO₂ 圧縮機および高压 CO₂ 圧縮機、冷却器、気液分離槽などから構成される。



第 5.1-5 図 CO₂ 圧縮設備構成

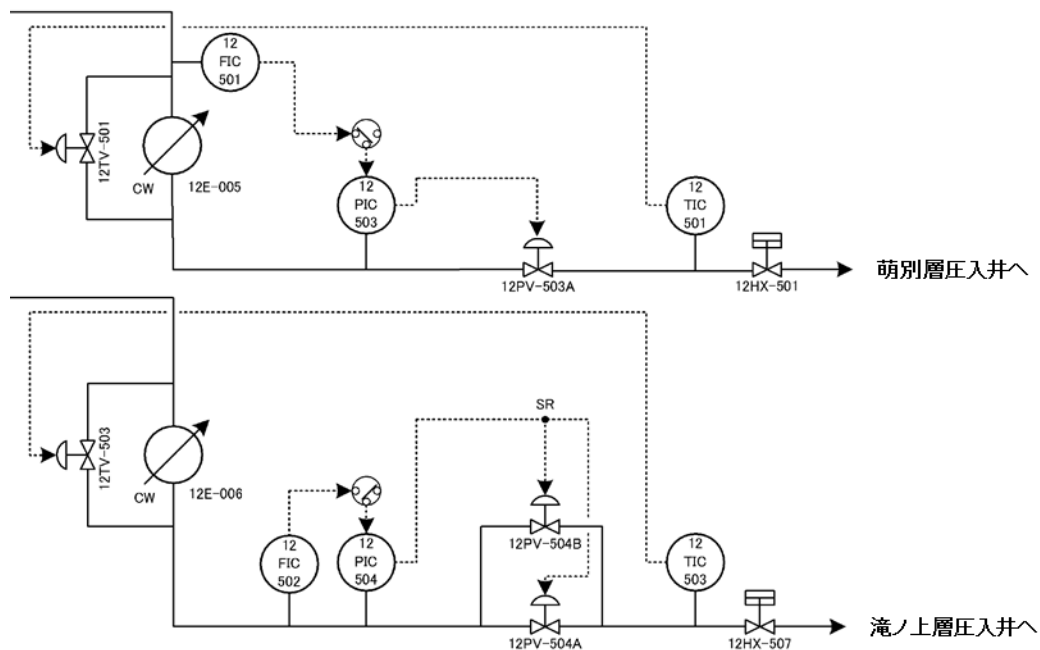
圧縮機は、将来の CCS の実用化を想定し大規模化に対応できるよう遠心式を採用した。また、圧縮機の各段の出口圧力が一定となるようスピルバック（圧縮機の各段の吐出側の CO₂ の一部を吸い込み側にリサイクルさせる）により制御する。

圧縮機により昇圧した CO₂ は、圧入井での水分の凝縮を防止するため、CO₂ の水分は第 2 低压 CO₂ 圧縮機の気液分離槽で、CO₂ の圧力変化に伴う含水率が極小（変曲点）となる 6.0MPaG、40℃ の条件で気液分離し、それ以上の圧力（滝ノ上層圧入井：6.0～22.8MPaG、萌別層圧入井：6.0～9.3MPaG）では水が凝縮しない条件とした。

滝ノ上層圧入井には、第 2 低压 CO₂ 圧縮機で昇圧した CO₂ ガスをさらに高压 CO₂ 圧縮機で昇圧し、40℃に冷却した後、坑口に移送、圧入する。

萌別層圧入井には、第 2 低压 CO₂ 圧縮機で昇圧した CO₂ ガスを 40℃に冷却した後、坑口に移送、圧入する。移送には電気トレースによる保温配管を使用し、40℃の維持を図る。

CO₂ 圧入量の制御方式を、第 5.1-6 図に示す。



第 5.1-6 図 CO₂ 圧入量の制御方式

滝ノ上層および萌別層への圧入量は、主たる圧入を流量制御（FC）とし、従たる圧入を圧力制御（PC）とすることができる。滝ノ上層および萌別層の圧入井坑口での流量、圧力、温度は、各圧入井で単独に変更できる制御システムになっている。例えば、滝ノ上層は坑口圧力 14.4～22.8MPaG から選定した圧力制御によって CO₂ を圧入することができ、萌別層は 0～25.3 トン/時から選定した流量制御ができる。

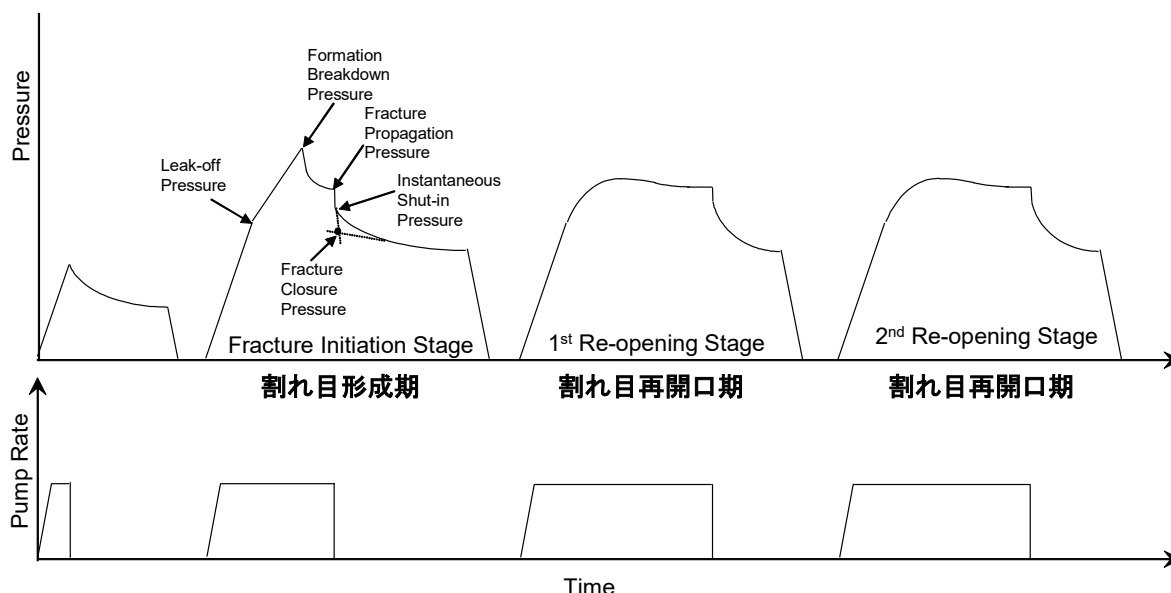
なお、圧入井の坑口設備については、5.4 節にて詳述する。

5.2 特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の温度等の圧入条件に関する詳細

(1) 基本圧入計画

特定二酸化炭素ガスの圧入にあたっては、坑底圧力を常にモニタリングし、遮蔽層の破壊圧を基に算出した圧入圧力の上限值を超えないように運転する。

遮蔽層の破壊圧は、圧入井掘削時に実施したエクステンデットリークオフテストにより確認した。エクステンデットリークオフテストは、圧入井掘削時に遮蔽層最下部付近だけを坑内で露出させた状態で加圧し、その部分に局所的な割れ目を発生させることにより、遮蔽層に割れ目が発生し始める圧力（リークオフ圧力）や割れ目が継続的に成長する圧力（Formation Breakdown 圧力）などを計測するものである（第 5.2-1 図）。加圧を断続的に複数回繰り返すことにより、より正確に地層の破壊圧を推定する。安全側にたち、割れ目が継続的に成長する圧力よりも低い圧力であるリークオフ圧力を遮蔽層の破壊圧とし、その 90% 値を圧入圧力の上限值とした。なお、このテストにより生じた割れ目はごく局所的なものであり、遮蔽層の能力に影響するものではない。



- 注：1. Leak-off Pressure（リークオフ圧力）：加圧することにより、地層に割れ目が入り始める圧力。Formation Breakdown Pressure（Formation Breakdown 圧力）：圧入中のピーク圧力で、地層が破壊されて割れ目が安定的に成長する圧力。Fracture Propagation Pressure（フラクチャー伸展圧力）：フラクチャーが開き続け、成長を続ける圧力。Instantaneous Shut-in Pressure（ISIP）：フラクチャーが開き続け、成長を続ける圧力。Fracture Closure Pressure（フラクチャー閉合圧力）：シャットイン後、圧力勾配が再び変化した点、または曲率が最大となった点と定義される。フラクチャーが閉合した際の圧力と考えられる。
2. 1 回目の加圧（左端）は、ポンプなどのテストであり、十分な加圧をしない。
3. 加圧によりリークオフ圧力において坑井近傍のごく一部に割れ目が入り始めるが、繰り返し加圧することによりこの割れ目再開口圧力を計測する。
4. リークオフ圧力は、地層が継続的に破壊する圧力である Formation Breakdown 圧力よりも低い。

第 5.2-1 図 エクステンデットリークオフテストの概念

CO₂ 圧入再開前の圧入レートの計画は、CO₂ 圧入後に改定した貯留層モデルによるシミュレーションにより計画する。

また、CO₂ 圧入再開後は圧入性を確認しながら適宜圧入計画を見直す。

圧入計画では、PSA オフガスの最大供給量可能量に対応した最大圧入レート（圧入流量）までの圧入を行う。圧入計画では、以下の詳細を規定する。

- ・圧入再開および停止の手順
- ・定常圧入へ向けての圧入ステップ（圧入レート・圧力・時間）
- ・最大圧入レートおよび圧力
- ・その他貯留層性状の把握のための非定常運転等

なお、本圧入計画における圧入量は、PSA オフガス供給可能量に対応する最大量の CO₂ を、滝ノ上層および萌別層に対して継続圧入することを原則とする。そのため、PSA オフガス供給可能量に対応して、継続圧入のレートは変動する。

また、圧入計画では、貯留層性状の把握のため、圧入停止によるフォールオフ解析を計画的（年数回）に実施する。正常圧入時のフォールオフ解析の結果を定期的に取得し、圧入時のモニタリングで貯留層の異常が懸念された場合に実施するフォールオフ解析の結果と比較することで、貯留層の異常を検知できる可能性がある。

貯留層における CO₂ の状況と挙動の把握は、連続的に実施する各貯留層の温度・圧力観測（圧入井および観測井）に加えて、CO₂ の分布状況や挙動を把握するための適切な探査により実施する。

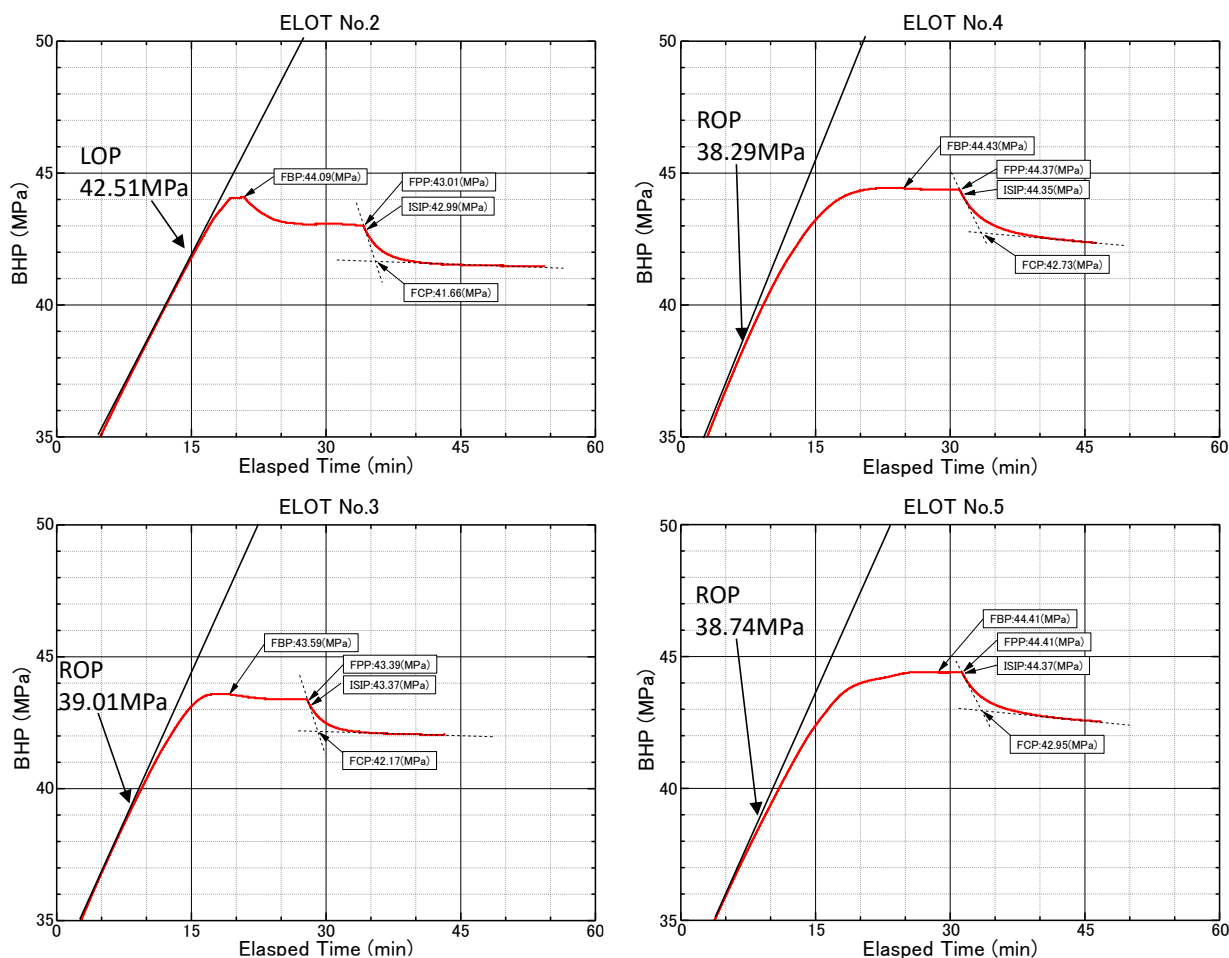
観測により把握された CO₂ の状況と挙動は、定期的に直近の予測結果と比較して、貯留層の地質モデルのパラメータを見直して更新し（ヒストリーマッチング）、新たな CO₂ 挙動予測を行う。

なお、CO₂ の貯留層への圧入性改善が必要とされ、かつ圧入井から坑井刺激剤を注入することによって坑井周辺の圧入性を改善する処置が有効であると判断された場合には、坑井刺激剤を使用することがある。この場合には、許可申請時の圧入性の現状値および想定される改善の程度（把握できる場合）、使用する物質、使用量、使用方法および使用による貯留層およびその上部の遮蔽層への影響について事前に環境省に連絡し、許可を得るべきか確認し、必要に応じて所定の手続きを行う。

(2) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び速度並びに圧入時の温度等の圧入条件

① 圧入圧力

滝ノ上層圧入井掘削時に実施したエクステンデットリークオフテストの結果を、第 5.2-2 図に示す。この結果より、遮蔽層の破壊圧（リークオフ圧力）を 42.51MPa、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）での圧入圧力の上限値を 38.26MPa（リークオフ圧力の 90%）とした。



- 注：1. 対象層：振老層（泥岩）。対象深度：4,607m～4,612m。ケーシング Shoe 深度：4,607m（2,385mVD）。対象区間における坑井の傾斜：72°。坑内泥水比重：1.39。
2. LOP: Leak-off Pressure, FBP: Formation Breakdown Pressure, FPP: Fracture Propagation Pressure, ISIP: Instantaneous Shut-in Pressure, FCP: Fracture Closure Pressure, ROP: Re-Opening Pressure（再開口圧力）。
3. Formation Breakdown 圧力（44.09MPa）は、リークオフ圧力（42.51MPa）よりも約 4% 高かった。

第 5.2-2 図 滝ノ上層圧入井における遮蔽層でのエクステンデットリークオフテスト結果

海洋汚染防止法では、適切な圧力で圧入するため、「坑底圧」と「圧入上限圧力」に対し、「圧入上限圧力 \geq 坑底圧」の関係が成立している必要がある。

【用語の定義】

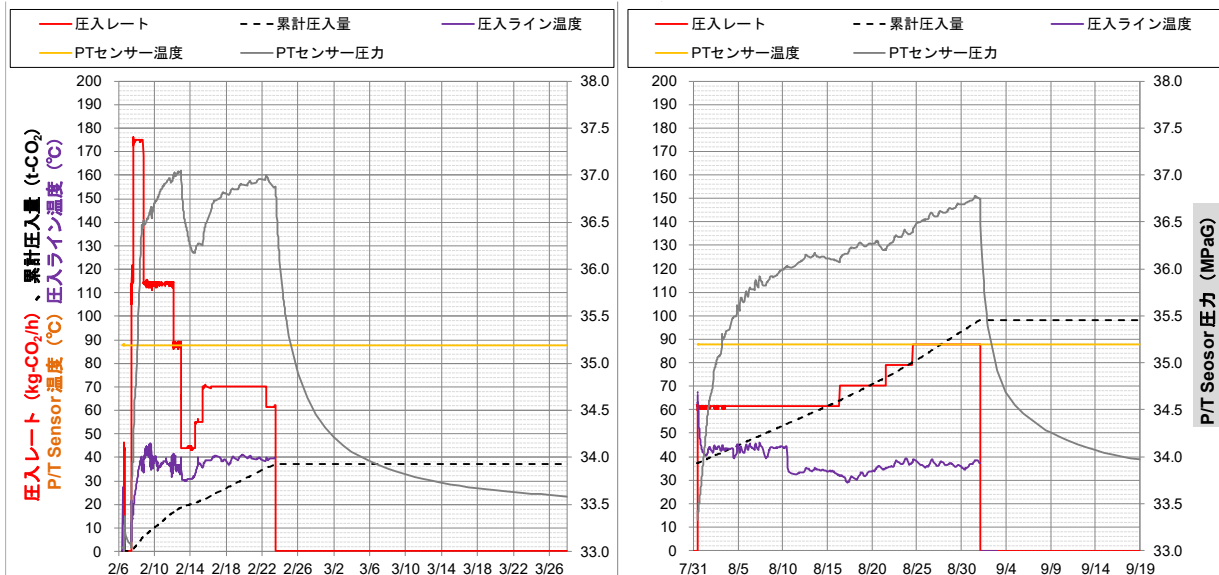
- ・ 坑底圧：圧入井ヒール側の貯留層に接している圧入孔における圧力（単位：MPa）
- ・ 圧入上限圧力：遮蔽層を破壊しないように設定した上限圧力（単位：MPa）

坑底圧は、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）での圧力とする。圧入上限圧力は、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）において 38.26MPa（リークオフ圧力の 90%）である。滝ノ上層圧入井の坑内圧力は、第 5.4-1 図に示す圧入井の遮蔽層最下部付近に設置した圧力・温度センサー（P/T Sensor）により監視するが、それは遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）よりも垂直深度で 33.71m 浅い位置にある。圧力センサーと貯留層の最上部との深度差に対応する圧力差は、その間を満たす超臨界 CO₂ の密度（0.8g/cm³）から算出でき、0.22MPa となる。坑底圧が圧入上限圧力を超えないようにするため、圧力センサーの読み値の上限を 38.04MPa とし、この上限を超えないように圧入圧力と圧入レートを制御し、圧入センサーの

読み値が上限に達した場合は、CO₂ の圧入レートを調整する。ここで、これまでの圧入実績においては、実際に CO₂ の圧入レートの調整を行ったことで、対処した（第 5.2-3 図）。

よって、「圧入上限圧力≧坑底圧」の関係が成立している。

なお、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）での貯留層の初期圧力は 32.82MPa であり、実際の坑底圧は、32.82～38.26MPa の範囲となる。



注：圧入上限圧力は 38MPaG

第 5.2-3 図 滝ノ上層への圧入実績（2018 年 2 月～3 月および 2018 年 7 月～9 月）

② 圧入温度

圧縮機により昇圧した CO₂ は、定常圧入時には 40℃に冷却した後、坑口に移送する。移送には電気トレースによる保温配管を使用し、40℃程度の維持を図る。なお、これまでの圧入実績では、圧縮開始初期において、圧縮機で昇圧した CO₂ がより低圧の圧入ラインに流入した際の断熱膨張による温度低下により、ハイドレート化することが懸念されたため、ハイドレート化による圧入ラインの閉塞対策として、圧入ライン温度を 60℃以上まで昇温して対応したケースがある（第 5.2-3 図）。気象条件（雨，風，雪など）による降温も想定されるが、定常圧入時には、坑口において CO₂ の超臨界状態を保つための温度（31.1℃以上）を維持することを目標としており、ほぼすべての期間でこの目標を達成した（第 5.2-3 図）。

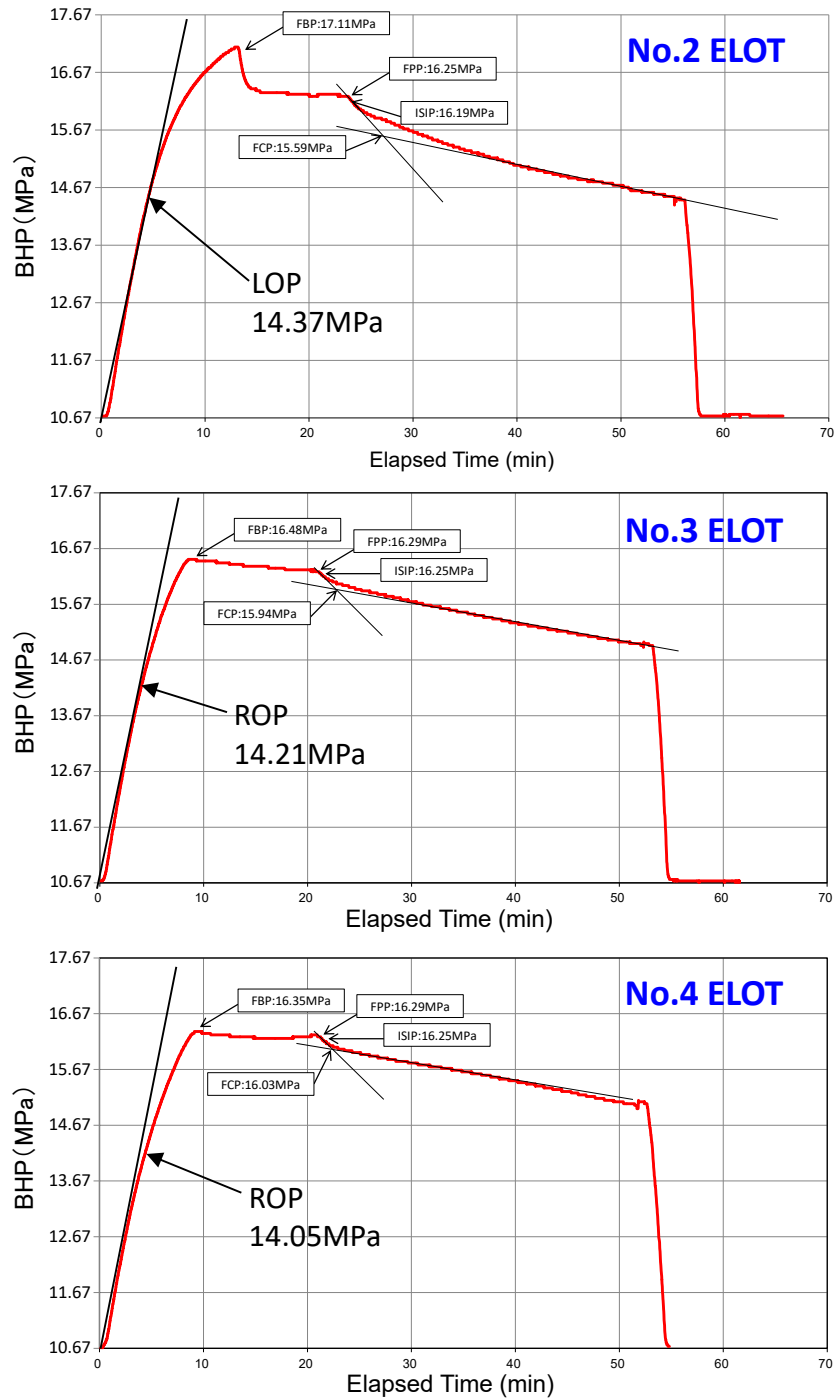
坑口から貯留層までの区間の CO₂ 温度については、ほぼ各地層温度に近くなるものと推定される。滝ノ上層圧入井の坑内温度は、第 5.4-1 図に示す圧入井の遮蔽層最下部付近に設置した圧力・温度センサー（P/T Sensor）により監視している。第 5.2-3 図に示すように、圧入中の坑底温度は 87～88℃程度で安定していた。P/T Sensor から、貯留層の仕上げ区間上端部までの深度差は垂直深度で 42m となる。地温勾配は 3.37℃/100m（「当該海底下廃棄をする海域が、海底下廃棄許可省令第 2 条において定める基準に適合し、かつ、当該海底下廃棄をする海域の海洋環境の保全に障害を及ぼすおそれがないものであることを説明する書類」第 2.2-12 図）であるため、貯留層の仕上げ区間上端部における CO₂ 圧入温度は 88.4～

89.4℃程度であったと考えられる。

(3) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入圧力及び圧入時の温度等の圧入条件

① 圧入圧力

萌別層圧入井掘削時に実施したエクステンデットリークオフテストの結果を、第 5.2-4 図に示す。この結果より、遮蔽層の破壊圧（リークオフ圧力）を 14.37MPa、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）での圧入圧力の上限値を 12.93MPa（リークオフ圧力の 90%）とした。



- 注：1. 対象層：萌別層。対象深度：2,405m～2,408m。ケーシング Shoe 深度：2,405m (971mVD)。坑内泥水比重：1.12。
 2. LOP：Leak-off Pressure, FBP：Formation Breakdown Pressure, FPP：Fracture Propagation Pressure, ISIP：Instantaneous Shut-in Pressure, FCP：Fracture Closure Pressure, ROP：Re-Opening Pressure (再開口圧力)。
 3. Formation Breakdown 圧力 (17.11MPa) は、リークオフ圧力 (14.37MPa) よりも約 19% 高かった。

第 5.2-4 図 萌別層圧入井における遮蔽層でのエクステンデットリークオフテストの結果

海洋汚染防止法では、適切な圧力で圧入するため、「坑底圧」と「圧入上限圧力」に対し、「圧入上限圧力 ≥ 坑底圧」の関係が成立している必要がある。

【用語の定義】

- 坑底圧：圧入井ヒール側の貯留層に接している圧入孔における圧力（単位：MPa）

- ・ 圧入上限圧力：遮蔽層を破壊しないように設定した上限圧力（単位：MPa）

坑底圧は、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）での圧力とする。圧入上限圧力は、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）において 12.93MPa（リークオフ圧力の 90%）である。萌別層圧入井の坑内圧力は、第 5.4-2 図に示す圧入井の遮蔽層最下部付近に設置した温度・圧力センサー（P/T Sensor）により監視するが、それは遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）よりも垂直深度で 41.54m 浅い位置にある。圧力センサーと貯留層の最上部との深度差に対応する圧力差は、その間を満たす超臨界 CO₂ の密度（0.74g/cm³）から算出でき、0.30MPa である。坑底圧が圧入上限圧力を超えないようにするため、圧力センサーの読み値の上限を 12.63MPa とし、この上限を超えないように圧入圧力と圧入レートを制御し、圧入センサーの読み値が上限に達した場合は、CO₂ の圧入レートで調整する。

よって、「圧入上限圧力 \geq 坑底圧」の関係が成立している。

なお、遮蔽層下部（ケーシング Shoe 深度）での貯留層の初期圧力は 9.67MPa であり、実際の坑底圧は、9.67～12.93MPa の範囲となる。

② 圧入温度

圧縮機により昇圧した CO₂ は、定常圧入時には 40℃に冷却した後、坑口に移送する。移送には電気トレースによる保温配管を使用し、40℃程度の維持を図る。気象条件（雨、風、雪など）による降温も想定されるが、定常圧入時には、坑口において CO₂ の超臨界状態を保つための温度（31.1℃以上）を維持することを目標とする。なお、第 5.2-5 図に示すとおり、ほぼ目標通りの圧入を実施している。

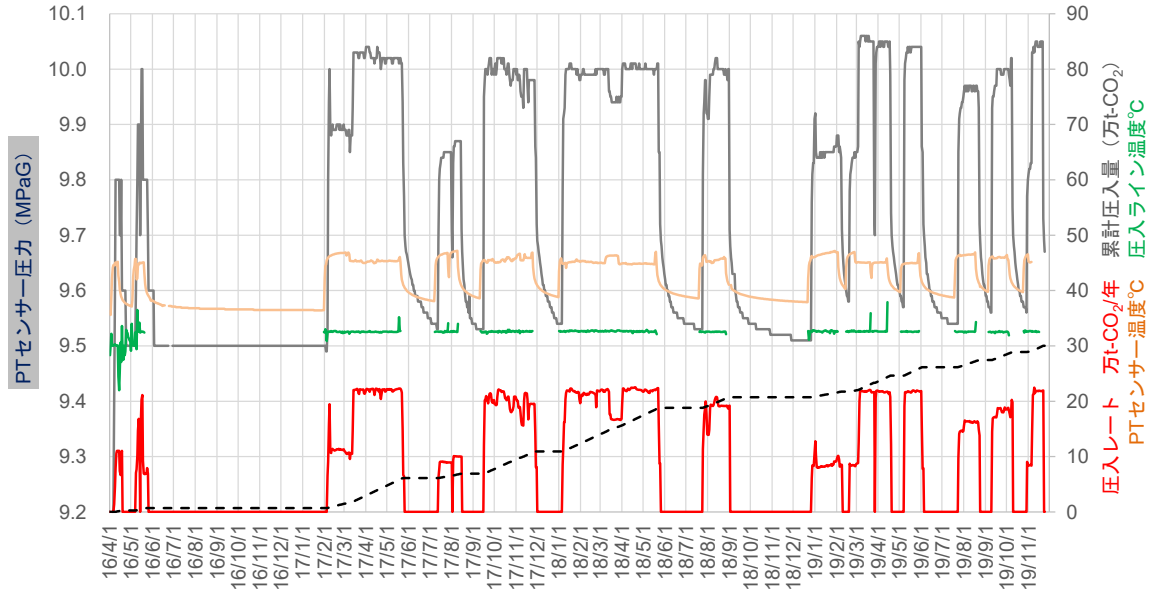
坑口から貯留層までの区間の CO₂ 温度については、圧入レートに応じた圧入井管内の圧力損失や断熱変化により変化すると考えられる。萌別層圧入井の坑内温度は、第 5.4-2 図に示す圧入井の遮蔽層最下部付近に設置した圧力・温度センサー（P/T Sensor）により監視している。この圧力・温度実測値を参照し、管内流動シミュレーションにより、仕上げ区間上端における流動坑底温度を推定した。第 5.2-5 図に示すように、圧入中の P/T Sensor 深度における温度は 44～48℃程度である。管内流動シミュレーションにより推定した様々な圧入レートにおける仕上げ区間上端の流動坑底温度は、第 5.2-6 図に示すとおり P/T Sensor 深度において計測された温度とほぼ同等の 44～48℃程度であったと推定される。今後もこれまでと同様の条件で圧入するため、貯留層に圧入する CO₂ の温度は 44～48℃程度となると考えられる。

記録 (2016/04/01~2019/11/30)

◆2016年4月6日~2019年11月30日

— PTセンサー圧力 圧入レート - - - 累計圧入量 PTセンサー温度 圧入ライン温度

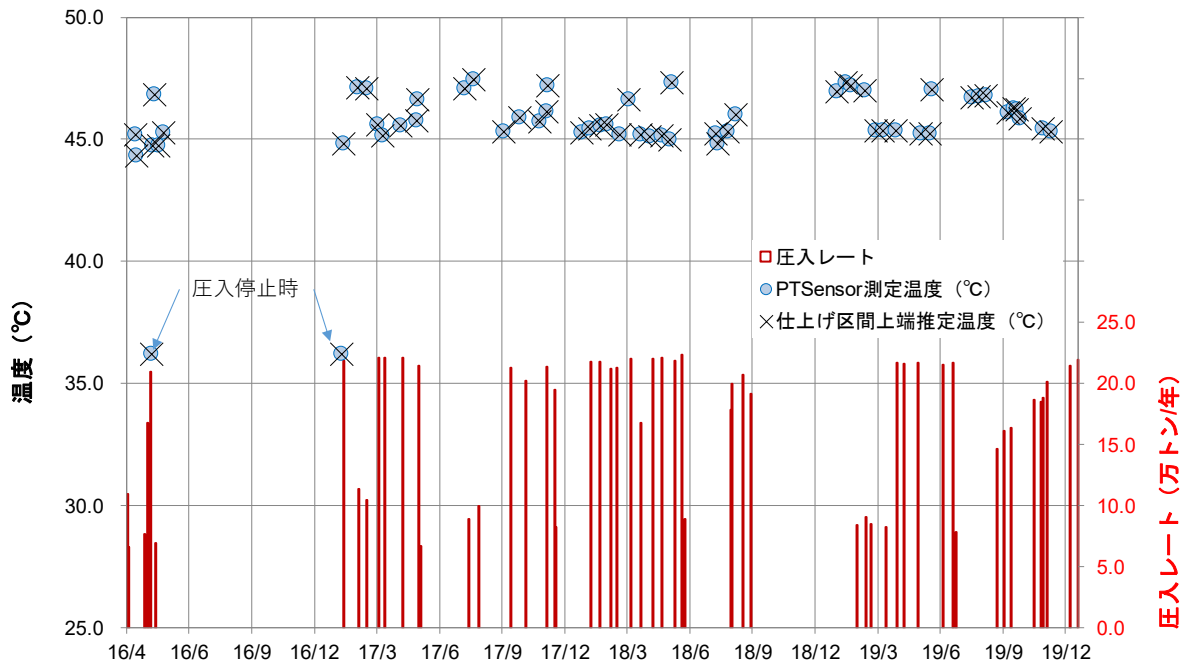
※圧入レート：365日稼働ベース



注) 2019 年 11 月 22 日に、累計圧入量 300,012 トンに達し、圧入を停止。

第 5. 2-5 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績

PTセンサー温度と仕上げ区間上端推定温度の比較



第 5. 2-6 図 圧入中の P/T Sensor 測定温度と仕上げ区間上端で推定される圧入温度

(4) 特定二酸化炭素ガスの坑井内での相変化による影響について

CO₂ による配管腐食は、超臨界、液相、気相いずれにおいても水が介在した場合に酸性腐食の恐れが生じる可能性がある。そのため、圧入井のチュービングには、貯留層の温度・圧力条件を再現した環境での CO₂ の飽和した塩水による腐食試験で高い耐食性を確認したステンレス鋼（萌別層は 13Cr、滝ノ上層は 13Cr-5Ni-2Mo）を使用している。13Cr 鋼は炭酸腐食対策として開発された坑井用の金属材料であり、100℃以下では非常に高い耐食性を示すことが知られ、坑井用材料として汎用的に使われている。

圧入する CO₂ には水分が 0.3%程度含まれ、遊離水が生成すれば炭酸腐食環境となる。しかし、チュービング内で遊離水が生成する条件となることはなく、仮に遊離水が生成したとしても、上記試験および 13Cr 鋼の炭酸腐食耐性・産業界での実績に基づけば、坑底よりも低温である坑口付近で、液相、気相、超臨界相を問わず CO₂ による配管腐食が起こる可能性はなく、今後も安全に圧入を継続できると考えている。

坑口においても超臨界の条件で圧入を行うことを目指すが、圧入開始や圧入再開の極初期をはじめ、また定常圧入時においても、圧入速度によっては坑口における圧入圧力が超臨界条件（7.38MPa）未満となり、気液二相状態を生じた可能性がある。しかしながら、2016 年 4 月 6 日以降の圧入実績において、管内で気液二相領域が発生したことにより、坑底の圧力制御に問題が生じたことはなかった。今後も同様の条件で圧入を継続する計画であるため、圧力制御御問題が生じるとは考えていない。なお、圧力・温度センサー（P/T Sensor）で観測される温度・圧力値は全て超臨界条件を満たしており、貯留層に圧入した CO₂ は全て超臨界状態であった。

5.3 特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通し

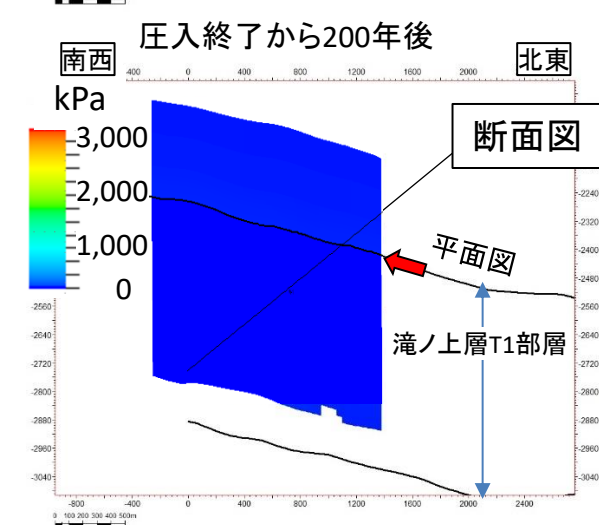
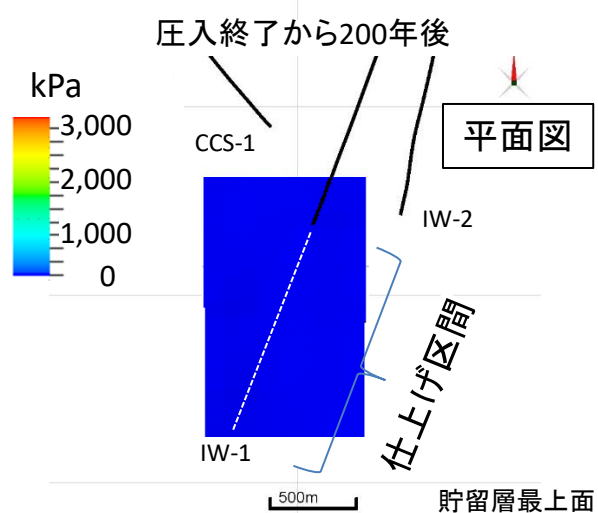
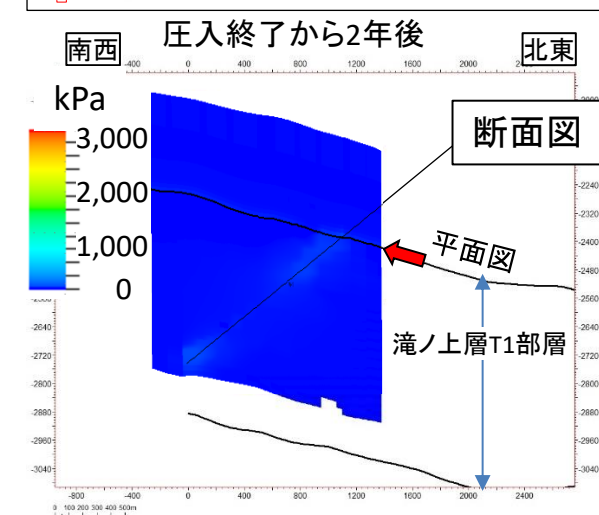
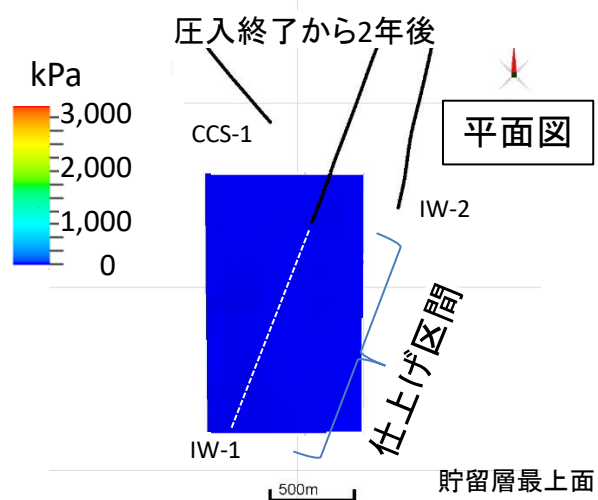
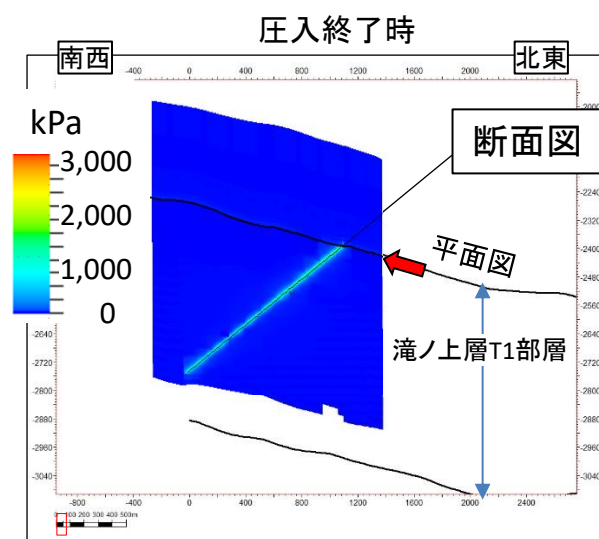
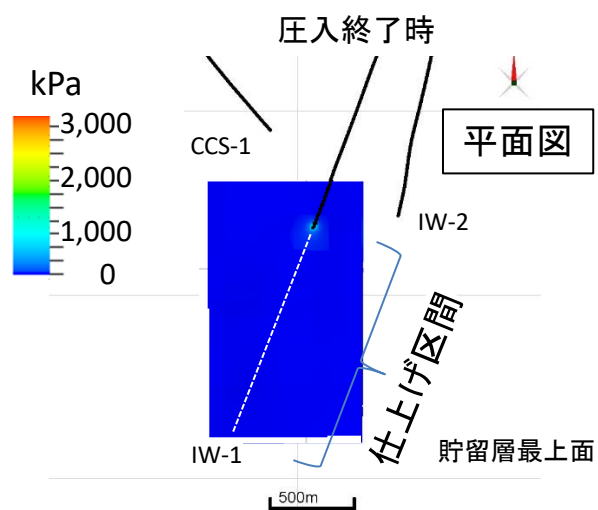
前述の「4.5 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが広がる範囲」で用いたシミュレーションにより、特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び変化等の見通しについて検討した。以下、滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層それぞれについて記す。

(1) 滝ノ上層 T1 部層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通し

CO₂ を滝ノ上層 T1 部層に圧入実績に即して 98 トン圧入した直後、および圧入終了から 2 年後および 200 年後の貯留層内での圧力変化を、シミュレーションにより予測した。その結果を、第 5.3-1 図に示す。

98 トンの圧入により、圧入井の周辺では圧入上限圧力程度（5MPa 弱）まで上昇する。坑井から半径 150m 程度までは、100kPa 程度の圧力上昇が見込まれる。圧入終了から 2 年後に、上昇した圧力は低下するが、影響範囲が広がり、坑井から半径 300m 程度の範囲で 100kPa 以上の圧力上昇が見込まれる。その後圧力は低下し、200 年後には坑跡に沿ってわずかな影響を残す程度まで圧力は低下する。

圧入による貯留層内の温度分布については、一時的に温度が変化することはいえるものの、圧入した CO₂ の温度は、貯留層深度での地温に支配されと考えられることから、貯留層の初期温度からほとんど変化しないと予想された。なお、貯留層の温度は 88℃（海面下 2,340m）としてシミュレーションを実施した。



注：上段：圧入停止時，中段：圧入停止から2年後，下段：圧入停止から200年後。

第 5. 3-1 図 CO₂ 圧入終了時からの圧力変化量の推移/坑跡沿の断面図と貯留層最上部の平面図

(2) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の見通し

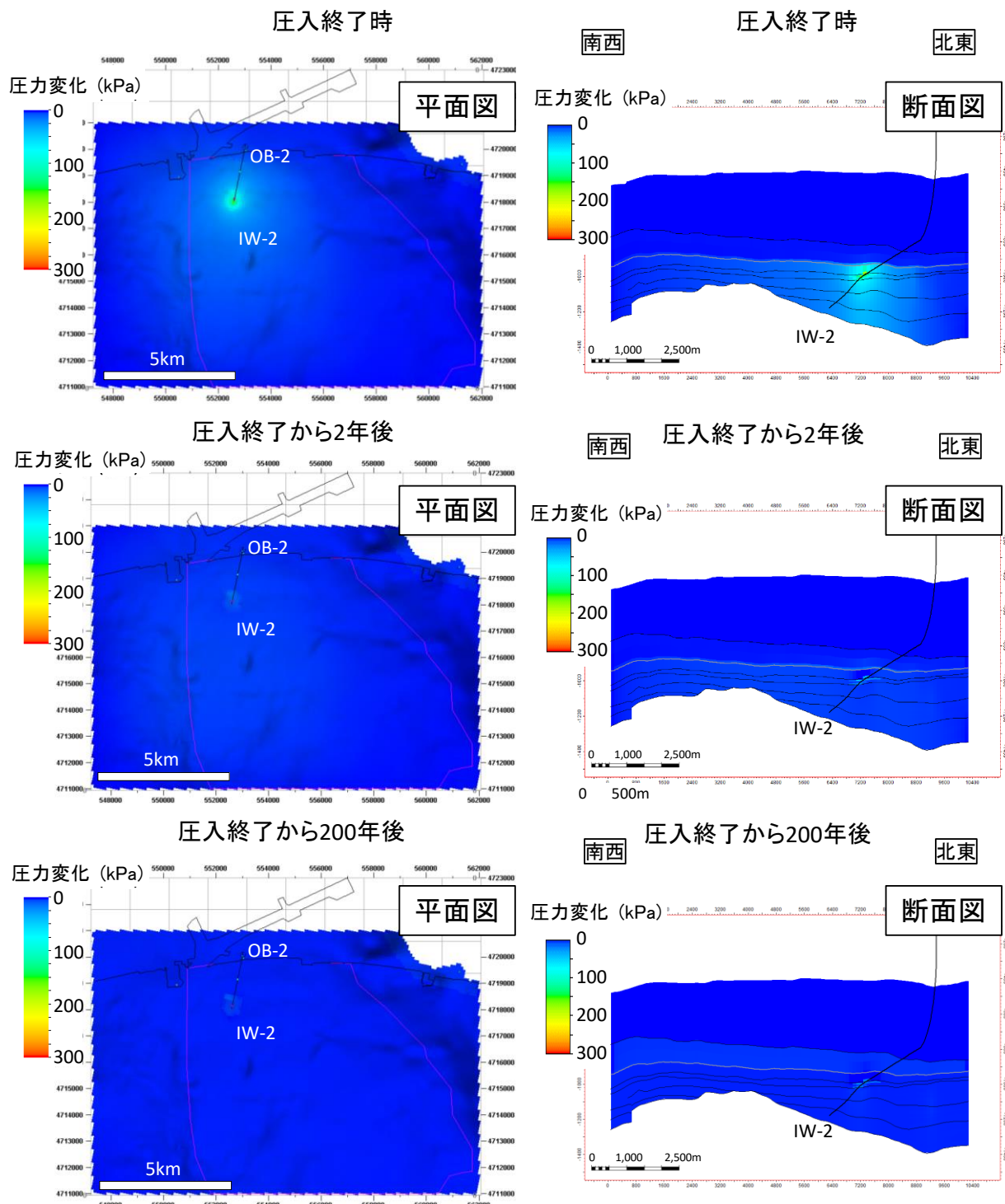
圧入実績に即し、特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度変化等の見通しについて、2019 年度地質モデル、及び 2021 年度地質モデルによるシミュレーションを行い予測した。

2019 年度モデルシミュレーションでは、CO₂を萌別層砂岩層に 300,012 トン圧入した直後、および圧入終了から 2 年後および 200 年後の貯留層内での圧力変化を、シミュレーションにより予測した。その結果を、第 5.3-2 図～第 5.3-4 図に示す。圧入期間は圧入実績を踏まえ、2016 年 4 月 6 日～2019 年 11 月 22 日までの約 3 年 7 ヶ月間とした。

萌別層圧入井の近傍においては、圧入時には初期圧と比較して約 550kPa の圧力上昇値を示したが（第 5.2-5 図）、圧入終了直後はその圧力上昇が数 100kPa 程度まで低下する。また、圧入終了時では、圧入井から離れるに従い数 10kPa から数 kPa の小さな圧力上昇が広範な領域に伝搬する。一方で、圧入終了時から 2 年経過後には圧力変化はほとんど認められず、貯留領域の圧力はほぼ安定しているとみられる（第 5.3-2 図～第 5.3-4 図）。

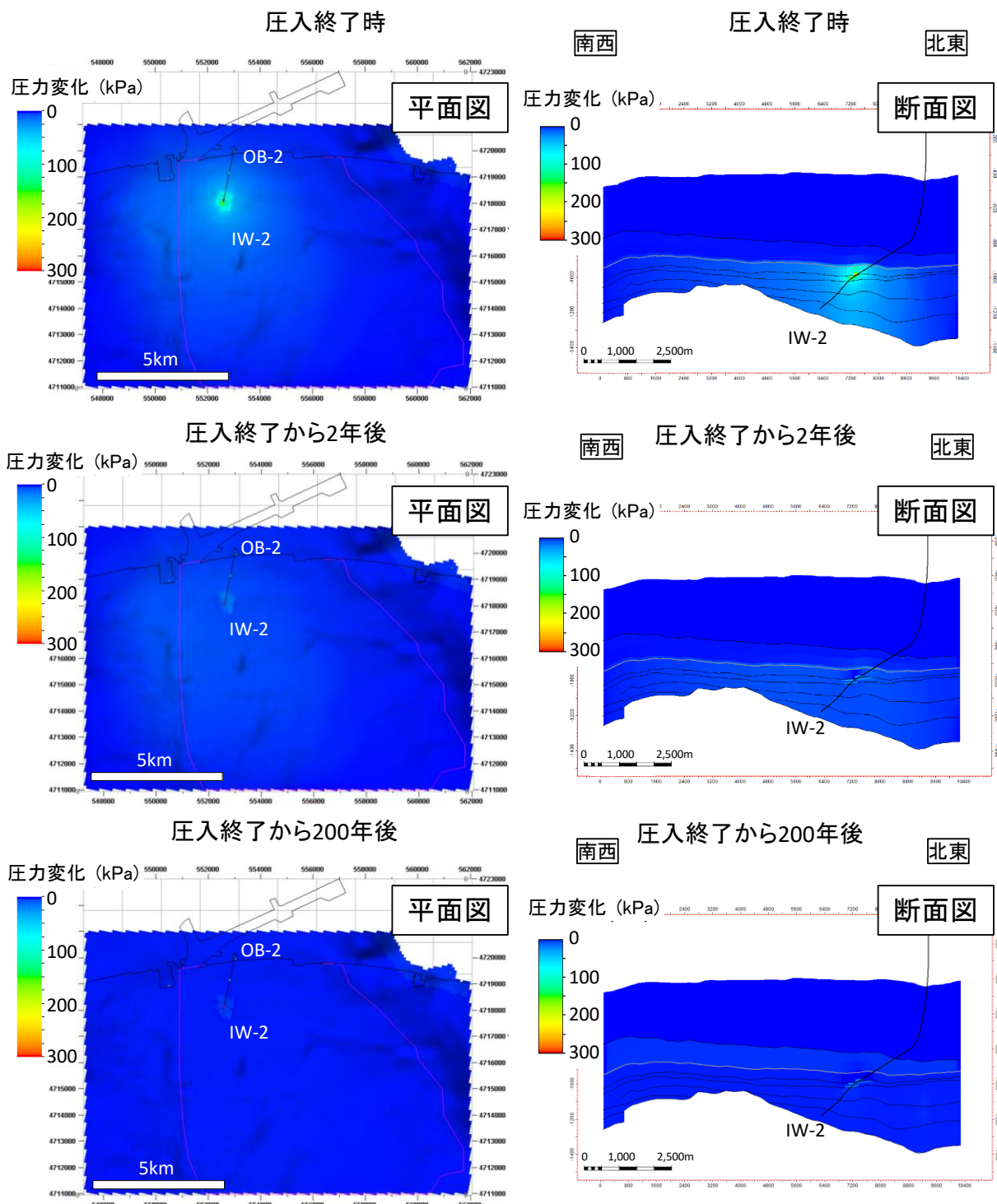
一方、2021 年度モデルシミュレーションでは、CO₂を萌別層砂岩層に 300,012 トン圧入終了してから 8 カ月後、2 年後、および 80 年後の貯留層内での圧力変化を、シミュレーションにより予測した。その結果を、第 5.3-5 図～第 5.3-7 図に示す。圧入期間は圧入実績を踏まえ、2016 年 4 月 6 日～2019 年 11 月 22 日までの約 3 年 7 ヶ月間とした。圧入終了から 8 カ月後において、萌別層圧入井の近傍で初期圧に比べ 50kPa 程度の圧力上昇が認められ、また広範囲に 10kPa 程度圧力が上昇する。坑井近傍を除くと、圧入終了から 2 年経過後には初期圧からの圧力上昇は 5kPa 程度まで低下し、80 年後には貯留層圧力は初期圧に戻ると予測される（第 5.3-5 図～第 5.3-7 図）。

圧入による貯留層内の温度分布については、一時的に温度が変化することはいえるものの、圧入した CO₂の温度は貯留層深度での地温に支配されと考えられることから、貯留層温度は初期温度からほとんど変化しないと考え、貯留層の温度を 42.3℃（海面下 973m）一定として 2019 年度モデルシミュレーションおよび 2021 年度モデルシミュレーションを実施した。



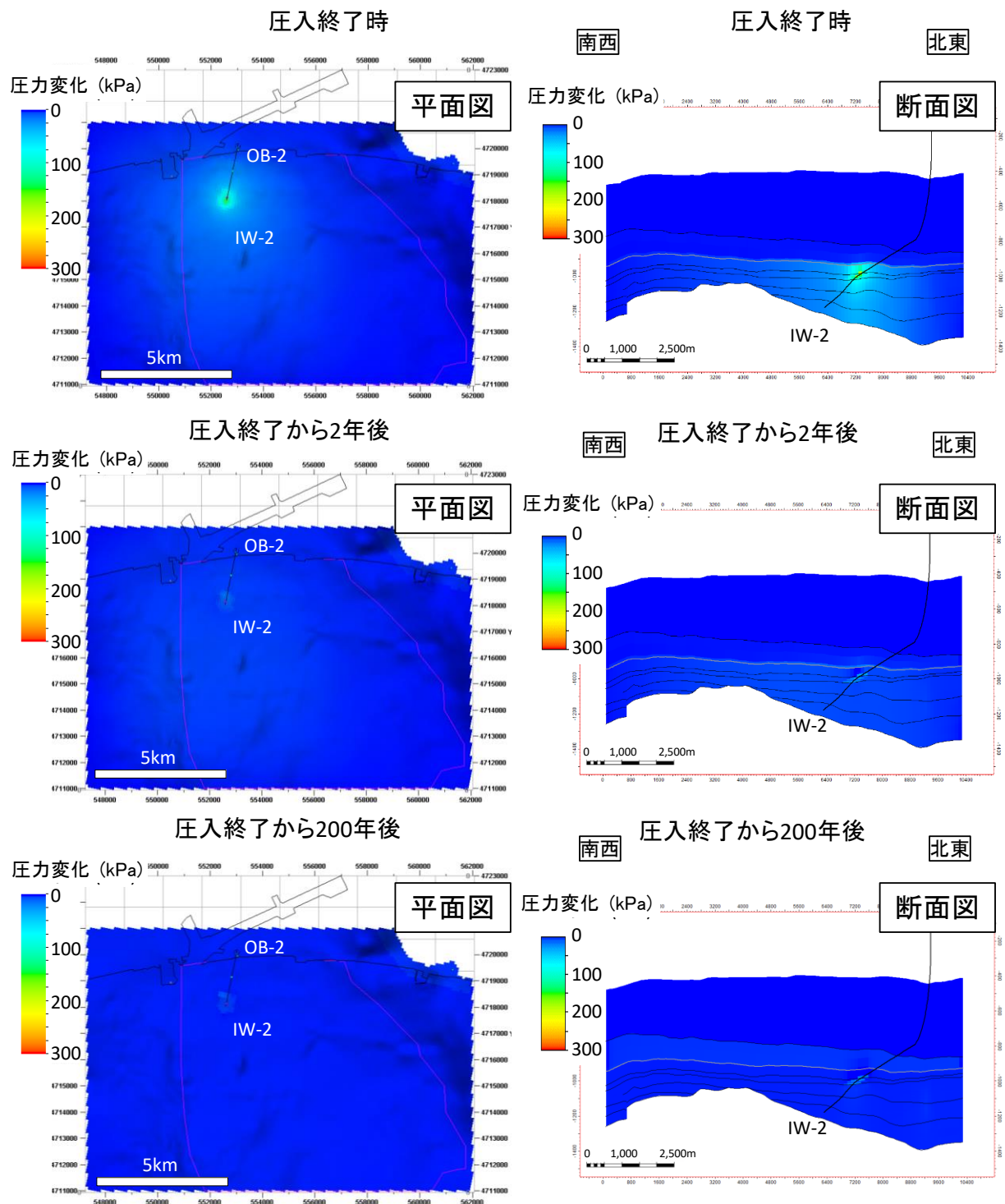
注：上段：圧入停止時，中段：圧入停止から2年後，下段：圧入停止から200年後。

第 5.3-2 図 萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧力変化/萌別層砂岩層最上部 (P10 モデル)



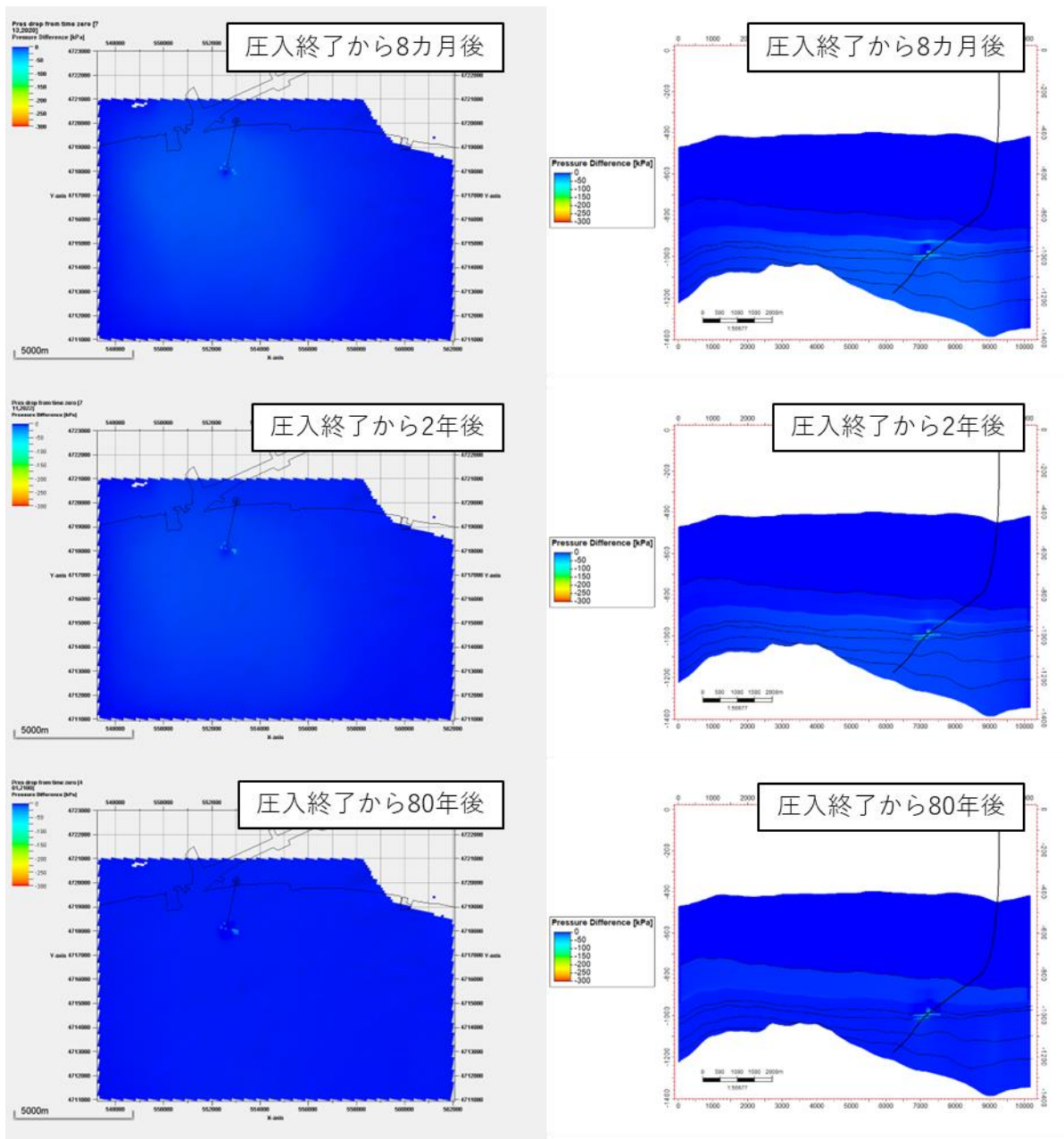
注：上段：圧入停止時，中段：圧入停止から2年後，下段：圧入停止から200年後。

第 5.3-3 図 萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧力変化/萌別層砂岩層最上部 (P50 モデル)



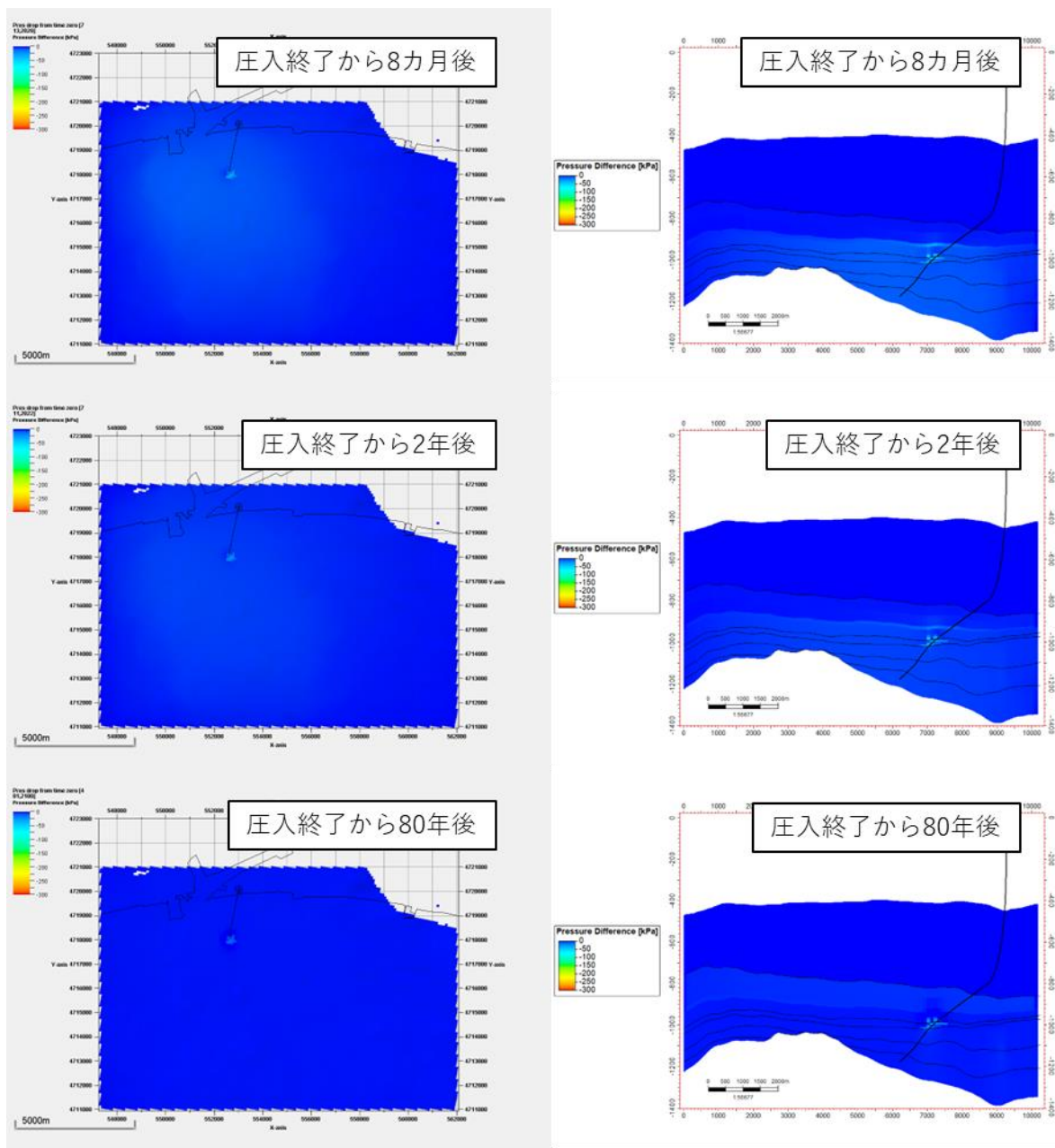
注：上段：圧入停止時，中段：圧入停止から2年後，下段：圧入停止から200年後。

第 5.3-4 図 萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧力変化/萌別層砂岩層最上部 (P90 モデル)



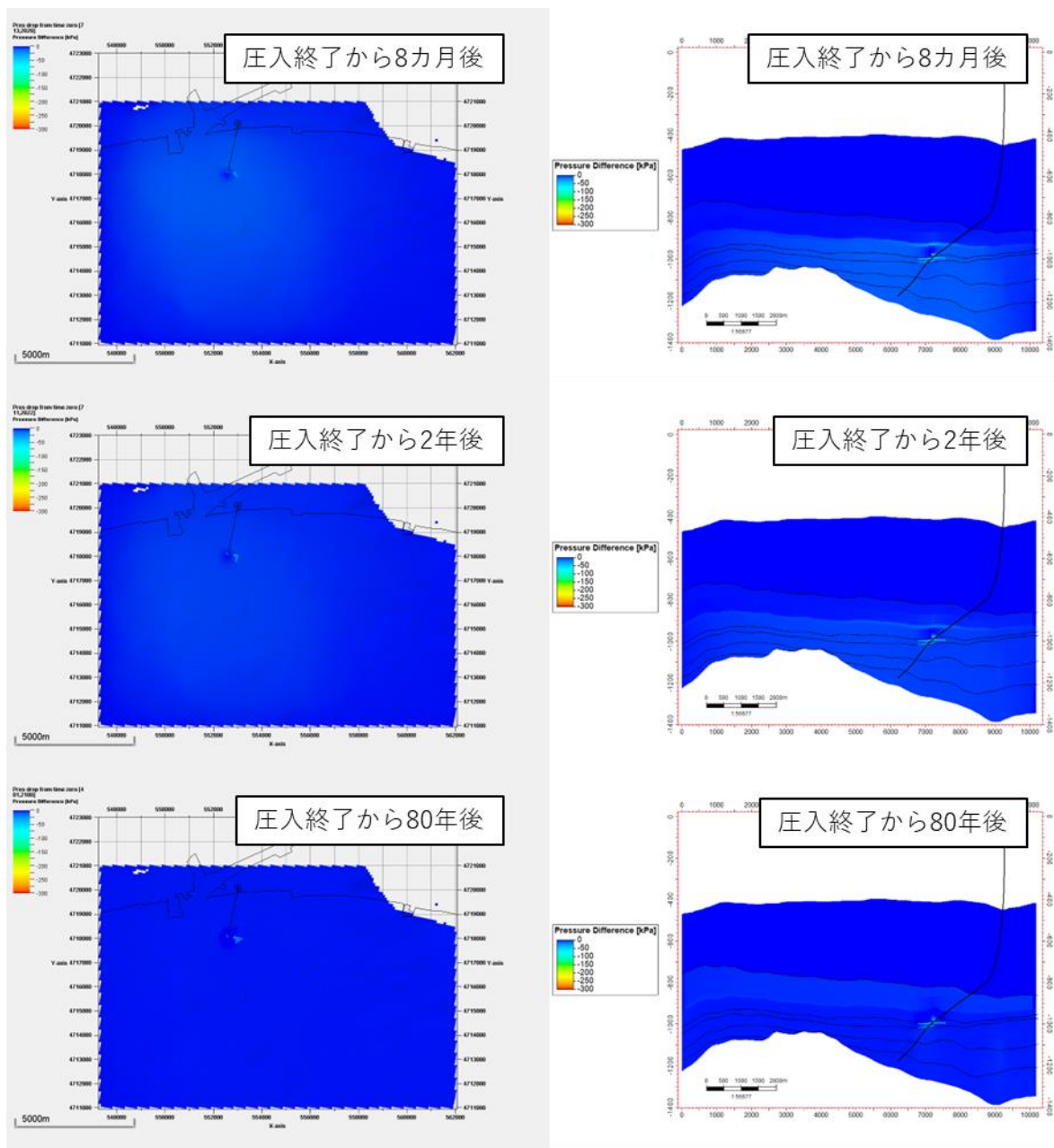
注：上段：圧入終了から8カ月後，中段：圧入停止から2年後，下段：圧入停止から80年後，左列：平面図，右列：IW-2 坑跡断面図

第 5. 3-5 図 萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧力変化/萌別層砂岩層最上部（P10 モデル）



注：上段：圧入終了から8カ月後，中段：圧入停止から2年後，下段：圧入停止から80年後，左列：平面図，右列：IW-2 坑跡断面図

第 5. 3-6 図 萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧力変化/萌別層砂岩層最上部（P50 モデル）



注：上段：圧入終了から8カ月後，中段：圧入停止から2年後，下段：圧入停止から80年後，左列：平面図，右列：IW-2 坑跡断面図

第 5. 3-7 図 萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧力変化/萌別層砂岩層最上部（P90 モデル）

5.4 特定二酸化炭素ガスの圧入井の維持管理の方法の概要

滝ノ上層圧入井および萌別層圧入井の概念図を、第 5.4-1 図および第 5.4-2 図に示す。

圧入井はあらかじめ地層の構造と深度に対する地層圧の変化を分析し、必要に応じた多段のケーシングを設置した。ケーシングと坑壁間は必要区間をセメントで固めていて地層を保護すると同時に地層間の圧力移動が起きないように措置を取った。特に CO₂ 貯留対象層を直接遮蔽する区間については CO₂ に対する腐食性、耐久性を考慮した材質のケーシング、特殊セメントを使用した。

地下に圧入された CO₂ はチュービングを介して貯留層に圧入されることになるが、圧入層直上にはパッカーを設置し、地表部と遮蔽している。また、チュービング内には緊急遮断弁を設置し、非常時には地表部と圧入部を遮蔽する構造としている。

チュービング内部、外部、また、各段のケーシングごと（ケーシングとケーシングとの間ごと）に地表坑口装置に圧力監視装置を取り付け、圧力変化の有無を常時測定し、圧入している CO₂ 漏洩の兆候について監視する。また、圧入層直上のパッカー付近に設置した P/T センサーにより、温度および圧力変化を常時監視する。

鉱山保安法では、掘削時に使用する機器に対しての安全の考え方は存在するものの、坑井自体の設計・仕様は、当該分野の先駆者であるアメリカや英国の考え方が基本となっており、それに石油会社各社が自社の考え方（例えば、安全係数をいくら取るか、など）を上乗せし設計する。石油会社各社では、掘削作業中とその後の作業（ここでは圧入実施）にかかる最大限の負荷を十分に耐える設計とするのが通常であり、圧入井のセメンチングもこの考え方に基づいて設計した。なお、高压ガス保安法は地上設備に対するものであり、坑井には適用されない。

セメンチング加圧テストはセメンチング管内のセメント浚い時に、ある深度までセメントを切削した後、セメント屑を完全に除去して、地表にある暴噴防止装置（Blow Out Preventor）を閉めて、泥水ポンプで加圧する方法を取るのが一般的である。なお、坑井の修繕が必要となるケースとして、①セメントの破損、②セメンチングおよびチュービングなどパイプ類の破損など坑井自体が壊れるケース、③出砂などによる坑井（セメンチングおよびチュービング）の閉塞などが考えられる。

①については、本計画においては世界的に実績のある CO₂ 耐性を有するセメントを使用し、設置後にその評価と耐圧試験（セメント浚い時に泥水を使用して 24MPa の加圧テストを実施し、圧力の漏れがないことを確認）を実施し、問題がないことを確認している。なお、加圧テスト圧力は、CO₂ 圧入作業時において発生する可能性が想定される最悪ケースのシナリオの最大圧力をもって加圧テスト圧力としている。CO₂ 圧入作業で当該セメンチングに最も負荷がかかるのは、CO₂ 圧入中にチュービングの地表付近において漏洩が発生し、セメンチング下端にその圧力がかかったケースである。24MPa は、それを想定した最大圧力であり、それ以上の圧力がかかることはない。根拠のない過剰な圧力で加圧テストを実施することは無駄にセメンチング外側のセメントを破壊することにつながるので実施されない。よって、24MPa の圧力で耐圧試験を行うことで十分確認できる。

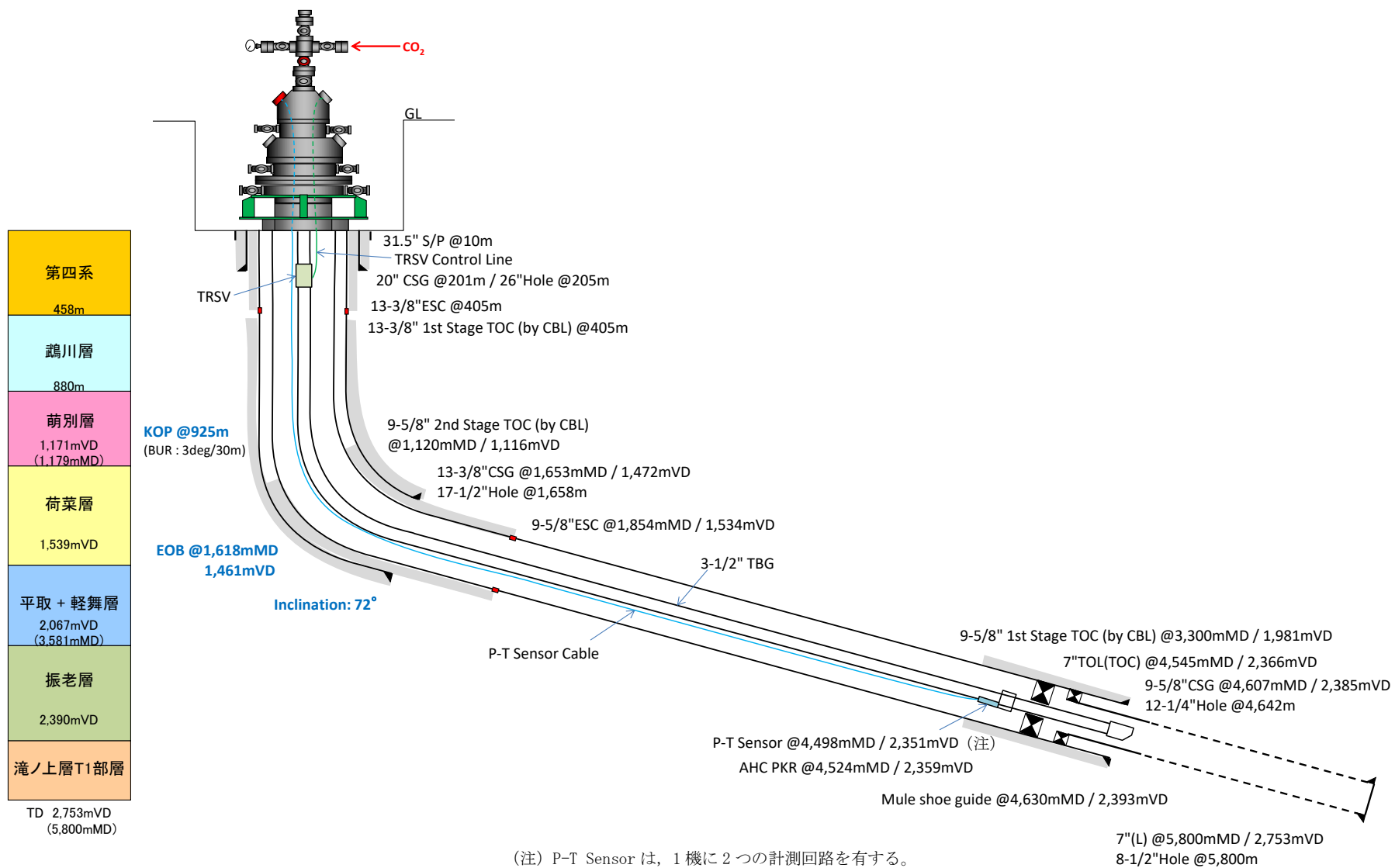
②については、事前に CO₂ による腐食試験（オートクレーブを使用して坑内を模擬した条件を作り、その中に試料片を 30 日間設置して腐食の有無を確認）を実施して、より腐食しにくい材質のパイプを選定し、設置後に 24MPa の耐圧試験を実施して問題がないことを確認してい

る。なお、鋼管メーカーにより実施されている腐食試験は通常 4 日から 14 日であり、30 日間の腐食試験は非常に長い試験であることから、確認には十分であると考ええる。

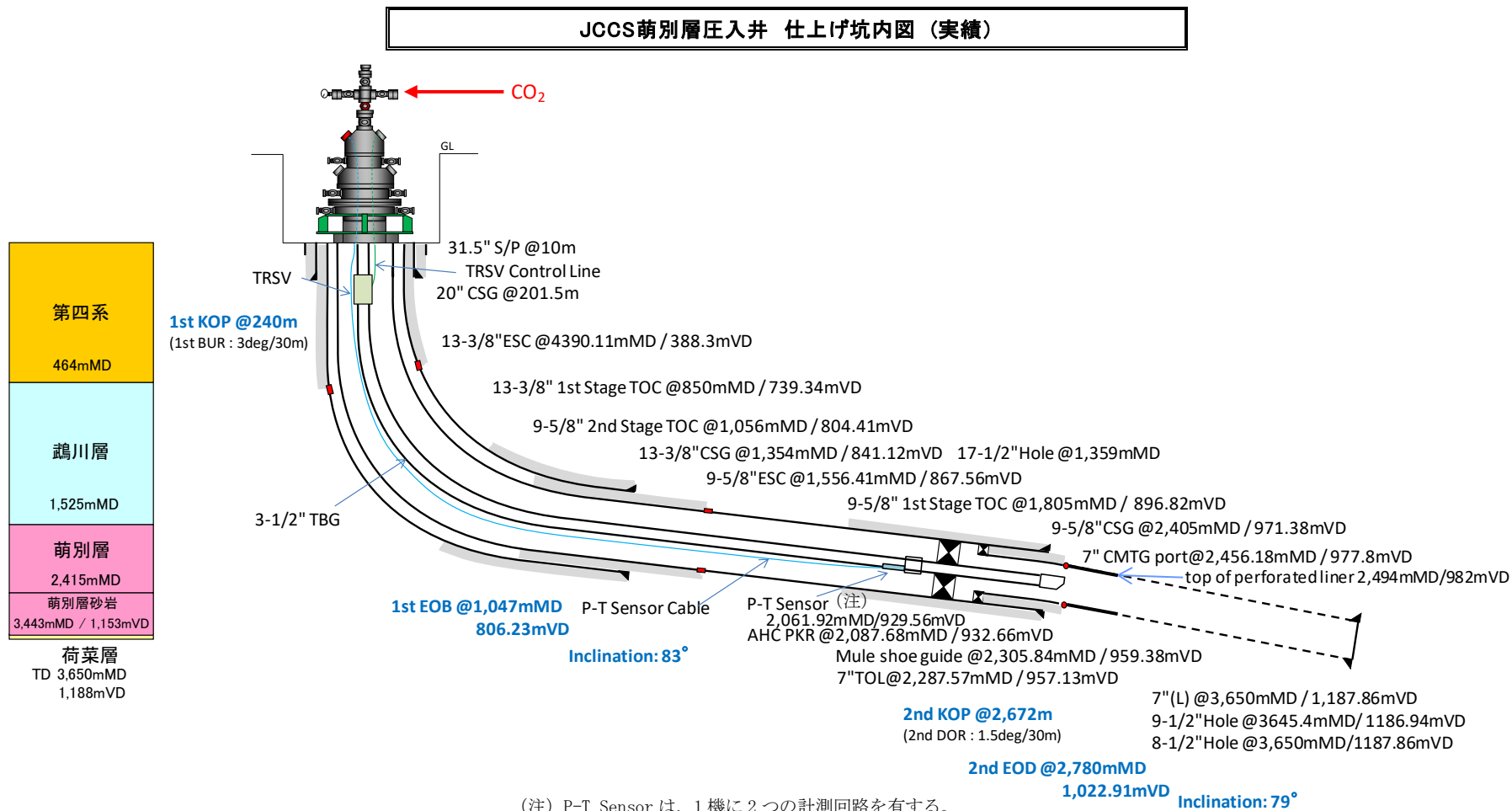
③については、事前にコアなどを用いて、粒度分析、一軸圧縮試験、硬度測定などの実測データから孔の安定性を解析して、パイプにスクリーンを取り付けるなどの対策処置を施している。

以上のことから、圧入・監視期間における修繕の必要性はほぼないものと考えられる。なお、万が一補修が必要になった場合には、損傷の内容に応じて当該箇所を交換もしくは補強（例えば、セメントを押し込む、パッチを充てるなどが考えられる。）して対処する。

さらに、本計画においては、圧入井の機能の改善のために化学物質を使用する予定はない。



第 5. 4-1 図 滝ノ上層圧入井の坑内



第 5.4-2 図 萌別層圧入井の坑内

5.5 特定二酸化炭素ガスの圧入井の封鎖方法

特定二酸化炭素ガスの圧入終了後 2 年間は、圧入井坑底および坑口での温度および圧力の監視を継続するため、圧入井は封鎖しない。

2021 年 4 月以降の圧入井の封鎖については、その後のモニタリング継続の方法と内容を、必要性和有効性の見地から検討の上、決定する。

なお、封鎖する場合は、当省が作成した「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」^[1]および日本 CCS 調査株式会社が作成した基準^[2]より抜粋した以下の技術基準に準拠し、封鎖方法を立案する。

【坑井の封鎖に係る技術基準】

- 1) CO₂ と接触するおそれがある箇所のセメントプラグ性状については、CO₂ に対する耐久性が高い特殊セメント/セメント添加剤を使用する。
- 2) 原則として坑井内にチュービング、パッカーがある場合の封鎖作業は、坑内からこれらを回収して行うものとする。チュービング等の回収前には地層圧力に相当する静水圧力を発生させるのに足る比重を持った流体で坑内を満たし、暴噴防止装置（Brow Out Preventer : BOP）設置等の噴出防止対策を行った後、坑内作業を実施する。
- 3) 坑井近傍に残留する CO₂ を減少させる目的で、抑圧流体またはセメントを圧入層へ圧入することを試みる。
- 4) 圧入区間の封鎖は、鉱山保安法の廃坑基準に加え、世界的に最も厳しいとされる、ノルウェーの石油井に対する法規制を参考に、以下の基準に従う。
 - i) 原則として圧入区間の閉塞は、これの上端および下端から、少なくとも各 50m 先までセメントプラグが達するように行う。なお、圧入区間が複数ある場合には各圧入区間に対して、それらの上端および下端から、少なくとも各 50m 先までセメントプラグが達するように行うが、圧入区間の上下端に 50m のスペースが無い場合にはこれに限らない。

なお、坑井条件等の理由で坑内のチュービング、パッカー等の回収が不可能で圧入区間周りにセメントプラグを設置できない場合は、回収不能なパッカー上部より圧入層へセメントを圧入するなどの処置を施すとともに、パッカー直上に少なくとも 100m 以上のセメントコラムを置くこととする。
 - ii) 圧入区間をセメントで閉塞出来ないような状況が発生した場合には、圧入区間の直上にブリッジプラグをセットした上で 100m 以上のセメントコラムを施す。
 - iii) 一番深くセットしたケーシングの下方に裸坑がある場合には、ケーシングシューの上方および下方の少なくとも各 50m 先まで達するように、セメントプラグをセットする。
 - iv) ライナーをセットしている場合には、セメントプラグがライナートップの上方および下方に各 50m まで達するように、セメントをセットする。

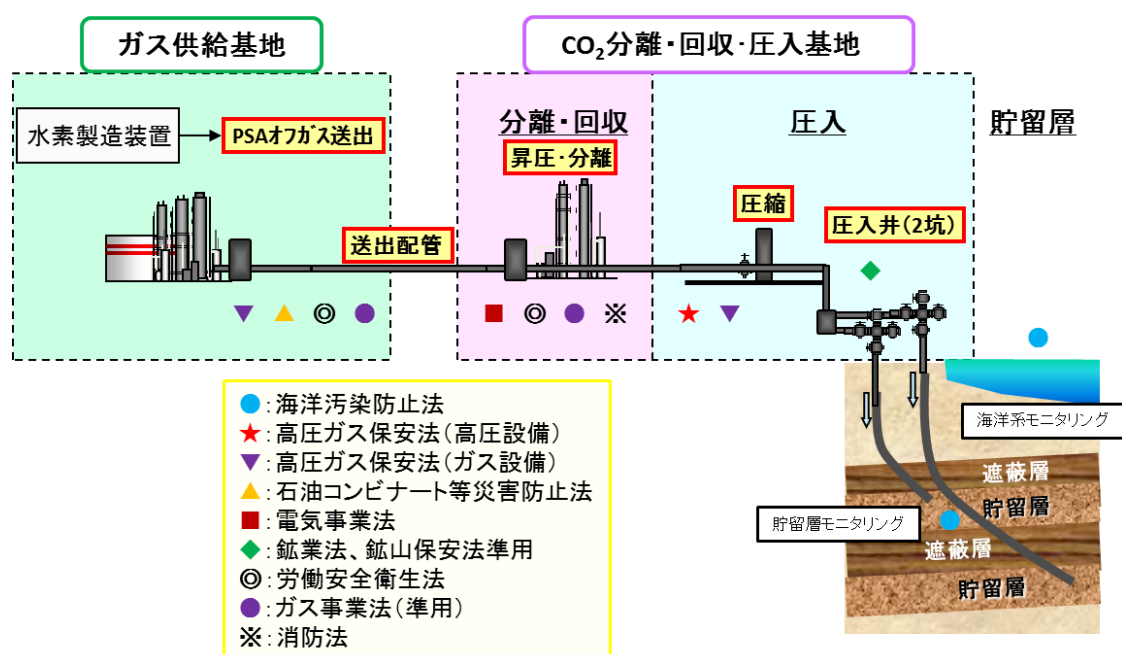
^[1] 『CCS 実証事業の安全な実施にあたって』（経済産業省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会，2009 年，p. 18，p. 20）

^[2] 『CO₂ 地中貯留を目的とした坑井の掘削・閉鎖の技術基準』（日本 CCS 調査株式会社，2012 年，pp. 5-7）

- 5) 圧入区間を封鎖した後に、管内圧力テストを実施しセメントプラグの健全性を確認する。
- 6) 圧入区間の閉塞終了後は、地表部まで残っているケーシング区間にセメントプラグ（100～200m 程度）を1 箇所以上設置する。
- 7) 地表部分（坑井の最上部）については、地表まで達している最小径のケーシングの地表付近に長さ 50m 以上のセメントプラグを設置し、坑井を密閉する。なお、最小ケーシングのアニュラス部の地表付近に充填されたセメントがない場合には、当該ケーシングの一部を切断・抜管の上、ケーシング切断部にセメントまたはブリッジプラグ設置した後に、地表付近に長さ 50m 以上のセメントプラグを設置し、坑井を密閉する。

5.6 他の法令の遵守状況

本計画の各設備に係る主な適用法規を、第 5.6-1 図に示す。



第 5.6-1 図 各設備に係る主な適用法規

本計画における他の法令の適用状況を、第 5.6-1 表に示す。

第 5.6-1 表 他の法令の遵守状況

番号	対象法令	条 項	対象・内容	許可・届出等	実績
1	土壌汚染対策法	第 4 条：土壌汚染のおそれがある土地の形質変更	建設用地全体での土地の形質の変更行為をするため	届出	届出：平成 26 年 3 月 28 日
2	大気汚染防止法	第 6 条：ばい煙施設の設置の届出 第 10 条：実施の制限	一定規模以上のボイラーを設置するため	届出	届出：平成 26 年 4 月 25 日
3	公害防止条例	第 40 条：騒音発生施設等の設置の届出 第 44 条：騒音発生施設等の実施の制限	・騒音はボイラーの送風機等 ・振動は圧縮機等	届出	届出：平成 26 年 4 月 25 日
4	公害防止協定	第 16 条：環境への負荷の低減に関する協定の締結等	ボイラー等大気要件での三者協定	協定 届出 回答	協定締結：平成 26 年 5 月 13 日 協議願：令和元年 12 月 23 日 廃止回答 ¹⁾ ：令和 2 年 1 月 21 日
5	港湾法	第 37 条：港湾区域内の工事等の許可等 第 38 条：港湾区域内の行為の届出等	廃物投棄許可，構築物の建設許可， 工事等行為の届出	許可 届出	届出：平成 26 年 4 月 4 日 許可：平成 26 年 4 月 21 日
6	海岸法	第 7 条：海岸保全区域の占用許可 第 8 条：海岸保全区域の行為の制限	施設設置に伴う区域の占用許可 施設の新設許可等	申請 許可	申請：平成 25 年 11 月 28 日 許可：平成 25 年 12 月 9 日
7	建築基準法	第 6 条：建築物の建築等に関する申請 及び確認	管理棟等の建築物確認申請	申請 許可	申請：平成 26 年 4 月 22 日 許可：平成 26 年 6 月 18 日
8	景観法	第 16 条：届出及び勧告等	景観計画区域内での建築等法律で定める行為	届出	届出：平成 26 年 4 月 25 日
9	ガス事業法	第 38 条：準用 第 39 条：事業の開始等の届出	自ら製造したガスを使用する準用事業者として	届出 届出 受理	届出：平成 27 年 12 月 1 日 廃止届 ²⁾ ：令和元年 12 月 2 日 受理：令和元年 12 月 3 日
10	高圧ガス保安法 ³⁾	第 5 条：製造の許可等	1 日 100m ³ 以上のガス容積を処理する設備を 設置製造する	申請 許可 届出 受理	申請：平成 26 年 5 月 22 日 許可：平成 26 年 6 月 10 日 休止届：令和元年 12 月 16 日 受理：令和元年 12 月 17 日
11	電気事業法	第 48 条：工事計画	事業用電気工作物を設置するため	届出 申請 承認	届出：平成 26 年 5 月 26 日 検査時期変更申請：令和元年 11 月 25 日 承認：令和元年 12 月 4 日
12	消防法	第 10 条：危険物の貯蔵・取扱の制限等 第 11 条：製造所等の設置，変更等	危険物貯蔵所・一般取扱所を設置するため	申請 許可 届出 受理	申請：平成 26 年 5 月 29 日 許可：平成 26 年 6 月 27 日 休止届：令和元年 12 月 18 日 受理：令和元年 12 月 23 日
13	労働安全衛生法	第 88 条：計画の届出等	低圧ボイラー，圧力容器等適用範囲に該当する ため	届出 報告 受理	届出：平成 26 年 5 月 29 日 休止報告：令和元年 12 月 10 日 受理：令和元年 12 月 10 日
14	道路法	第 24 条：道路施工承認 第 32 条：道路の占用の許可	工業用水道や排水管等を道路内に設置するた め	申請 許可	申請：平成 25 年 3 月 8 日 許可：平成 25 年 4 月 4 日
15	道路交通法	第 77 条：道路の使用の許可	道路において工事もしくは作業等をするため	申請 許可	申請：平成 25 年 4 月 24 日 許可：平成 25 年 4 月 26 日
16	国有財産法	第 18 条の 2：処分等の制限	国の行政財産である土地を借用するため	契約	契約締結：平成 26 年 4 月 8 日

1) 再稼働時には、北海道、苫小牧市と再度協議。

2) 再開時は「設備設置報告書」，「準用事業開始届」を，北海道に提出。

3) 高圧ガス保安法の危害予防規程：体制変更による保安管理組織図の変更（届出：令和 2 年 4 月 1 日，受理：令和 2 年 4 月 3 日），大規模地震に係る防災および減災対策，および津波対策の追記（届出：令和 2 年 6 月 1 日，受理：令和 2 年 6 月 8 日）。

CCS を直接対象とした適用法規として、海底下の CO₂ の地下貯留を規制する海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律があるが、坑井の掘削及び閉鎖に係わる技術基準は対象とされていない。また、CCS は鉱業と見なされていないため、鉱業法、鉱山保安法は適用されていない。

しかしながら、坑井掘削作業中や圧入後の安全確保と CO₂ 漏洩による環境への影響を防止することを目的とし、鉱業法・鉱山保安法を準用し、米国 UIC Class VI など海外における CCS 規制動向を参考にした上で作成した当省の技術指針「C C S 実証事業の安全な実施にあたって」^[1]に沿い安全確保に努める。

労働安全衛生法等の一般法規については当然のことながら遵守するものである。

^[1] 『C C S 実証事業の安全な実施にあたって』（経済産業省産業技術環境局 二酸化炭素回収・貯留（C C S）研究会，2009 年，pp.17-20）<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90807a01j.pdf>（2015/1/26 アクセス）

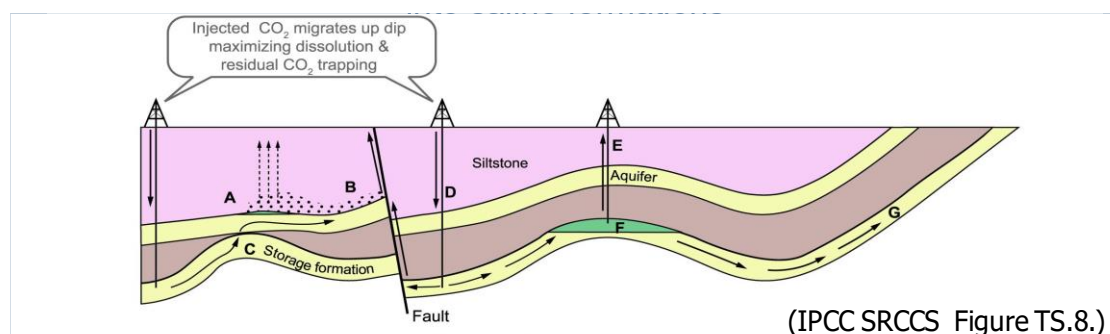
6. 特定二酸化炭素ガスに起因する海洋環境の保全上の障害が生じ、又は生ずるおそれが生じた場合に当該障害の拡大又は発生を防止するために講ずる措置

6.1 海洋環境の保全上の障害が生じる恐れについて

CCS で主として想定される異常事態は、大きくは施設からの漏出ケースと廃棄した地層からの漏出ケースに分類されるが、本計画（実証試験）では、特定二酸化炭素ガスの分離・回収・圧入設備は全て陸上に設置するため、海洋環境の保全上の障害を生じさせるおそれがあるのは地層からの漏出ケースのみとなる。

貯留層から CO₂ が漏出する要因として、IPCC 特別報告書^[1]によると、第 6.1-1 図において示される潜在的な漏洩経路があり、下記のとおり分類されている。

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



第 6.1-1 図 IPCC 特別報告書^[1]による潜在的な漏洩経路

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

- (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

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] 『IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage 』（IPCC, 2005, pp.34-35）
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf（2015/1/26 アクセス）

^[2] 『苫小牧地点における貯留層総合評価、平成 23 年 10 月 26 日』（経済産業省, 2011, pp. 第 3 章 59-60）
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001_s01.pdf（2015/1/26 アクセス）

(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、それらの遮蔽層の毛細管圧（スレシヨルド圧力）を超えることはなく、CO₂は遮蔽層には浸透しない。

(2) 断層を通じた移動

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

(3) 廃坑井を通じた移動

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

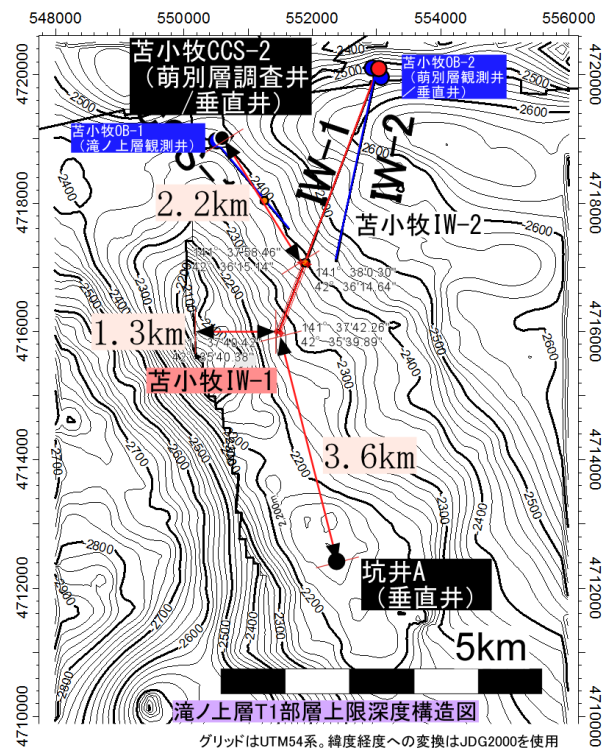
(4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

圧入井等の構造物の設計・設置では，CO₂ が接触する鋼材やセメント等を耐 CO₂ 仕様にする等の対策を施すことで，これら構造物に起因した CO₂ の移動を防止する。

(2) および (3) について，CO₂ プルームが断層および廃坑井に到達しないことについて検討した。

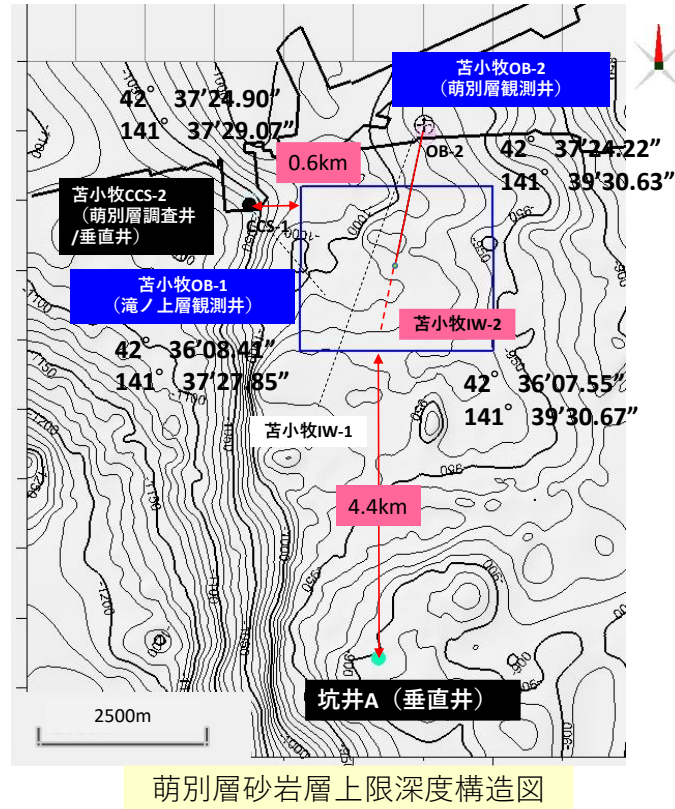
滝ノ上層圧入井（第 6.1-2 図）周辺には，滝ノ上層を切る断層が解釈されている。CO₂ 分布予測範囲から断層までの距離は，1.3km であった。また，周辺に存在が知られる廃坑井は苫小牧 CCS-2 および坑井 A の 2 坑井があり，CO₂ 分布予測範囲からの距離は，それぞれ 2.2km，3.6km であった。

^[1] 滝ノ上層のシミュレーションに関しては 28～29 ページ参照，萌別層のシミュレーションに関しては 67～69 ページ参照。



第 6.1-2 図 滝ノ上層圧入井周辺の圧入した CO₂ の分布予測範囲と、周辺の断層および廃坑井との位置関係

萌別層圧入井（第 6.1-3 図）周辺には、萌別層を切る断層は解釈されていない。また、廃坑井である苫小牧 CCS-2 および坑井 A それぞれとの CO₂ プルームからの距離は、0.6km、4.4km であった。



第 6.1-3 図 苫別層圧入井周辺の圧入した CO₂ の分布予測範囲と、周辺の廃坑井との位置関係

上記 (4) の検討結果を踏まえ、CO₂ 貯留対象層を直接遮蔽する区間については、CO₂ に対する腐食性、耐久性を考慮した材質のケーシング（13%Cr ステンレス鋼）、特殊セメント（Schlumberger 社：EverCRETE CO₂-Resistant Cement）の仕様とした。

以上の検討結果および対策の実施により、漏出のおそれが生じる可能性のある想定ケースから特定二酸化炭素ガスの漏洩は生じないと判断する。したがって、「想定ケースごとの漏出防止のための措置内容」と「漏出を未然に防止する、あるいは最小に留めるための安全設備等の説明」の記載は不要と判断する。

6.2 海洋環境の保全上の障害が生じる恐れ of 監視体制について

CCS を安全かつ安定的に実施するためには、万一の事態を想定して、貯留した CO₂ の挙動の把握や貯留層外部への漏出・漏洩検知を継続的に行う必要がある。

本計画（実証試験）では、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律に加えて、「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」^[1]の内容も踏まえて、CO₂ の圧入開始前、圧入中、圧入後において適切な場所および頻度でモニタリングを実施する。本計画（実証試験）におけるモニタリングの目的は、以下のとおりである。

^[1] 『CCS 実証事業の安全な実施にあたって』（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 年，pp.14-15，pp.25-31）<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90807a01j.pdf>（2015/1/26 アクセス）

(1) CO₂ の漏洩，貯留層圧力の異常の検知

- ・ 圧入された CO₂ が計画通りに安全に貯留層内に留まっていることを確認する。
- ・ 貯留層から CO₂ の漏洩を検知する。

(2) 圧入された CO₂ の貯留層内での挙動把握（貯留層モニタリング）

- ・ CO₂ の圧入および貯留が計画通り安定的に行われていることを確認する。
- ・ CO₂ の圧入後も安定して貯留されていることを確認する。

(3) 微小振動と自然地震の観測

- ・ CO₂ の圧入に起因する微小振動の有無を確認する。
- ・ 本計画（実証試験）地点を含む広い範囲の自然地震活動を把握する。

本計画（実証試験）におけるモニタリングの項目は，以下のとおりである。

(1) 圧入井における連続測定・観測項目

- ・ 圧入井坑口における温度・圧力，アニュラス圧力，CO₂ 圧入量測定
- ・ 圧入井坑底における温度・圧力測定

(2) 観測井における連続測定・観測項目

- ・ 観測井坑口における温度・圧力，アニュラス圧力測定
- ・ 観測井坑底における温度・圧力測定
- ・ 観測井内における微小振動，自然地震観測

(3) 特定二酸化炭素ガスの分布状況や挙動を把握するための適切な探査

本計画（実証試験）では，地下に圧入した CO₂ の分布状況や挙動を把握するための手段としては，定期的に適切な探査を実施する。適切な探査を実施し，解析を行うことにより，CO₂ の分布範囲を把握し挙動を確認する。弾性波探査を実施する場合は観測されたデータとベースライン観測データを比較し，差分の抽出を行うことで，CO₂ の分布範囲を把握する。

(4) 海洋系のモニタリング

海洋系のモニタリングは，CO₂ 漏出を想定した海洋環境への事前影響評価を踏まえた上で，圧入前に実施したベースライン調査における調査範囲，調査項目，調査頻度等を基本として実施する。海洋系のモニタリングは，通常時監視，懸念時監視および異常時監視に区分され，海水中への CO₂ 漏出のおそれの度合いによってより詳細な監視段階に移行する。

(5) 微小振動，自然地震観測

以下の観測態勢で微小振動，自然地震の観測を実施する。

- ・ 坑井内受振器（観測井 OB-1, OB-2, OB-3）

それぞれの観測システムで観測されたデータをもとに，いつ，どこで，どの程度のマグニチュード（振動規模）の微小振動，自然地震が発生したかを解析，発生位置や発生頻度等を統計的に分析し，CO₂ の圧入との微小振動との関連性の検証に資する。

通常時監視または自然災害等により，海洋環境の保全上の障害が生じるおそれが生じた場合，直ちに懸念時監視を実施する。懸念時監視の結果は，集計/解析の後，直ちに環境大臣に報告する。監視の結果が海洋環境の保全上の障害が生じるおそれが生じていないことが環境省により

判断された場合、通常時監視に戻り圧入を再開する。懸念時監視の結果では海洋環境の保全上の障害が生じるおそれが否定できないと判断された場合は、引き続き異常時監視を実施する。異常時監視は、海洋環境の保全上の障害が生じるおそれが無いと判断されるまで継続し、監視結果は、直ちに環境大臣に報告する。

上記の監視計画については、「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄する海域の特定二酸化炭素ガスに起因する汚染状況の監視に関する計画に係る事項」で詳述する。

なお、「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生じさせるおそれがある程度の地層内圧力の変化が認められた場合」は、通常時監視における坑内圧力の監視で、あらかじめ設定する範囲から外れた場合や事前に予測した挙動から外れた急な変化が観測された場合が該当し、「実施する措置」は、圧入の停止となる。また「特定二酸化炭素ガスが海洋に漏出した場合」は、通常時監視の確認調査（現地概況調査及び現地詳細調査）を実施し、海水または気泡の ^{14}C 分析の結果により特定二酸化炭素ガスの漏出またはそのおそれが生じていると判断された場合が該当し、「海洋環境の保全上の障害を除去又は緩和するために実施する措置」は、圧入の停止となる。圧入の停止後は、直ちに環境省に報告した上で、環境省指示のもと適切な措置を実施する。

6.3 関連法規に基づく保安計画等について

本計画（実証試験）の実施にあたっては、以下に示す保安に関連する法令を遵守し、また、「CCS実証事業の安全な実施にあたって」^[1]の内容を踏まえ、安全を確保し、事故・災害の発生を未然に防ぐように努める。

- ・海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律
- ・高圧ガス保安法
- ・労働安全衛生法

また、CO₂の圧入運転、設備、周辺環境、人命あるいは人の健康等に多大な影響を与える事象である異常事態の発生に備え、圧入作業開始以前に異常事態発生時の対処を準備しておく必要があり、以下に取り組む。

(1) 異常事態の想定とその対処方法の確立（保安規程の策定）

発生が予見される異常事態をリストアップし、それら異常が発生した場合にとるべき措置や異常発生を未然に防ぐために準備する内容を規定し（保安規程）、同規程の中で、保安管理体制の整備、保安に携わる人員の選任とその職務範囲の決定、異常事態の判別方法とその対処方法に関することを取り決める。

(2) 保安設備の設置

遵守すべき関連法令を満たし、策定した保安規程に即した保安設備を設ける。その際は、異常事態の規模や頻度、影響度を考慮し、必要に応じて遠隔操作が可能な保安設備や、複数のバックアップ設備の設置等の措置を講じる。

^[1] 『CCS実証事業の安全な実施にあたって』（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年、pp.32-36）<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90807a01j.pdf>（2015/1/26 アクセス）

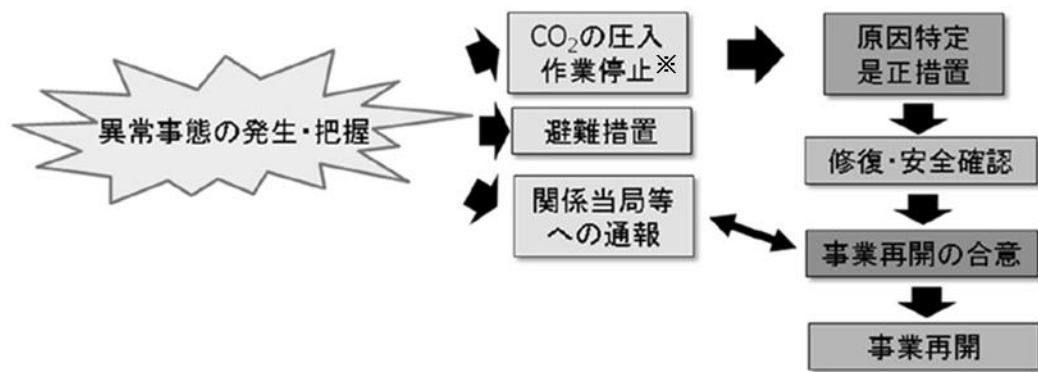
(3) 保安訓練の実施

異常事態が発生した際に、策定した保安規程に即して関係者が迅速に対応できるように、定期的に保安訓練を実施する。また、訓練を通じて問題点の抽出、および必要な改善措置をとる。

想定される異常事態としては、主に以下が挙げられる。

- ・ CO₂の大規模な漏洩，漏出
- ・ 大規模な地震，津波の発生
- ・ 関係施設の事故や火災の発生

異常事態が発生した際には、第 6. 3-1 図に示す対応が求められる。



※ CO₂圧入を行っている場合の対応

第 6. 3-1 図 異常事態発生時の基本的対応

ここに示した手順と関係法令を踏まえて保安規程を策定し、取り決めた保安規程の内容通りに関係者の迅速な対応が実践されるように、定期的な保安訓練を実施し、訓練を通じて問題点の抽出、および必要な改善措置をとる。

関連法規に基づく保安計画等として、本書類末に、参考資料-1：高圧ガス保安法に基づく「危害予防規程」および参考資料-2：消防法に基づく「予防規程」を示す。

6. 4 異常発生時の対応について

実証試験実施中に異常事態が発生・検知された場合は、人的被害の回避のための避難や設備に対する被害拡大防止の措置（火災時の消火活動等）を講ずる。また、同時に関係当局等に対して異常事態発生の通報を行い、周辺環境への影響拡大を防止する。

異常事態への対処終了後は、被害状況の把握、異常事態の原因特定および環境大臣をはじめとした関係当局への情報提供を行い、必要な修復を実施する。修復後は、安全確認を十分に行い、関係当局等との間で事業再開に関する合意を得たのち、実証試験を再開する。

特別規程

01-01

危 害 予 防 規 程

日本CCS調査株式会社
苫小牧CCS実証試験センター

改定経歴表

(要 領 名 称)

(所 管)

危害予防規程

苫小牧CCS実証試験センター

制定・改定・廃止・ 定期見直し 年 月 日	目的	主 要 事 項	承認者 印	点検者 印	作成者 印
2015 年 10 月 1 日	制定	届出のため新規作成	澤田	小島	下江
2016 年 3 月 1 日	改定	試運転終了および組織変更等による改定	小島	下江	下江
2018 年 3 月 26 日	改定	図 11 安管理組織図変更による差替え	小島	下江	下江
2018 年 7 月 1 日	改定	図 2 「災害発生時緊急連絡体制」の連絡先に NEDO 環境部を追加	小島	下江	川崎
2019 年 7 月 1 日	改定	図 2 「災害発生時緊急連絡体制」の経済産業省連絡先の変更	小島	下江	川崎
2019 年 10 月 1 日	改定	図 11 安管理組織図変更による差替え	小島	下江	川崎
2019 年 12 月 16 日	改定	プラント休止に伴い①②の変更 ①図 1 安管理組織図 ②図 2 災害発生時緊急連絡体制	小島	下江	川崎
2020 年 4 月 1 日	改定	体制変更及び人事異動により 図-1 保安管理組織図の変更	田澤	山岸	川崎
2020 年 6 月 1 日	改定	大規模な地震に係る防災及び 減災対策及び津波対策について 追記	田澤	山岸	川崎
2021 年 5 月 1 日	改定	センター長交代に伴い保安管理 組織の変更	石和田	山岸	川崎
2021 年 9 月 15 日	改定	経済産業省の CCS 所管部署変更 に伴う連絡体制の変更	石和田	山岸	川崎
2022 年 4 月 1 日	改定	人事異動に伴う保安管理組織の 変更	石和田	山岸	川崎

目 次

第1章 総則

- 1.1 目的
- 1.2 適用範囲
- 1.3 用語の定義
- 1.4 危害予防規程の目的等

第2章 保安管理体制

- 2.1 保安管理組織
- 2.2 保安に関する協定
- 2.3 規定類の管理
- 2.4 保安管理の記録
- 2.5 保安査察

第3章 保安統括者等の職務

- 3.1 保安統括者及び代理者
- 3.2 保安技術管理者及び代理者の職務
- 3.3 保安係員及び代理者の職務

第4章 運転、操作等に関する保安管理

- 4.1 運転及びその管理を行う者
- 4.2 運転、操作等に関する規定類の作成及び実施
- 4.3 交替勤務の引継
- 4.4 夜間及び休日の運転開始及び運転停止
- 4.5 運転、操作等の記録

第5章 施設に関する保安管理

- 5.1 法令に定められた製造施設の技術基準

- 5.2 設備管理の規定類の作成及び実施
- 5.3 設備管理の記録
- 5.4 施設の検査
- 5.5 工事を行うときの保安管理
- 5.6 施設を新增設するときの保安管理

第6章 異常状態に対する措置

- 6.1 不調・故障に対する措置
- 6.2 事故・災害に対する措置
- 6.3 人身事故に対する処置
- 6.4 異常状態に関する記録
- 6.5 関係事業所、協力会社等との関連
- 6.6 大規模な地震及び津波に対する措置

第7章 保安教育及び規定類の周知

- 7.1 保安教育の計画及び実施
- 7.2 危害予防規程及び規定類の周知及び活用
- 7.3 事故・災害対策訓練
- 7.4 改善提案等
- 7.5 危害予防規程等に違反した者の措置

第8章 協力会社の保安管理

- 8.1 管理監督の方法
- 8.2 保安教育

第9章 危害予防規程の制定及び変更

- 9.1 作成、制定及び変更の方法
- 9.2 届出
- 9.3 経過の記録

第1章 総 則

1.1 目的

高圧ガス保安法(以下、法という)に基づき、日本CCS調査株式会社苫小牧CCS実証試験センター(以下、当センターという)の保安維持に必要な事項を定め、もって人的及び物的損傷を防止し、公共の安全を確保することを目的とする。

1.2 適用範囲

この規程は、当センターを対象とする。

1.3 用語の定義

この規程に用いる用語の定義は、コンビナート等保安規則、一般高圧ガス保安規則及び液化石油ガス保安規則において使用する用語の例によるほか、次による。

1.3.1 保安規則等

一般高圧ガス保安規則、液化石油ガス保安規則、コンビナート等保安規則、容器保安規則、特定設備検査規則及びこれらに基づく告示、例示基準及び法及び関係政省令の運用及び解釈について(内規)(平成19年7月1日付 平成19・06・18 原院第2号)

1.3.2 特別規程

法により制定することが義務付けられた規程等。

1.3.3 規定類

会社又は事業所が制定した規定、規則、基準、規格等。

1.3.4 協力会社

製造、工事、輸送等に関連する作業を行う請負会社、外注会社等

1.3.5 異常状態

異常の原因、程度及び被害の状況により区分される1.3.5.1～1.3.5.4の不調、故障、事故及び災害を総称したもの。

1.3.5.1 不調

正常でない乱れた状態であるが、運転を停止することなく、正常に戻しうる状態。

1.3.5.2 故障

設備を正常な手順により停止して、補修等の措置を要するが、人員に損傷なく、また、その設備以外には損害を及ぼさない状態。

1.3.5.3 事故

破壊、漏えい、火災又は爆発等が起こり、緊急措置を必要とし、設備に若干の損害を生ずるが、事務所自らの措置により、人身に損傷なく、かつ、第三者に脅威を及ぼさない状態。

1.3.5.4 災害

大きい事故又は自然災害等により人身、設備等に損傷を及ぼし、第三者に脅威を与え、あ

るいは外部に援助を要するような状態。

1.4 危害予防規程の位置づけ等

1.4.1 位置づけ

危害予防規程は、当センターの特別規程として明確に位置づける。

1.4.2 保安教育計画との関連

危害予防規程は、別に定める保安教育計画と一体のものとする。なお、危害予防規程と不可分の関係にある保安教育計画についても当センターの特別規程として位置付ける。

第2章 保安管理体制

2.1 保安管理組織

2.1.1 当センター内の組織

保安統括者は、保安管理の全般を統括する最高責任者とする。保安技術管理者は、技術事項全般を統括管理する。保安係員は、製造施設の保安管理を行う。

保安管理組織を図1に示す。

2.1.2 センター外の組織との関連

当センターの保安管理組織と、本社、協力会社、関係事業所の保安管理組織との関連を図2に示す。

2.1.3 保安統括者等の選任

社長は、当センターのセンター長を保安統括者として、また、副センター長をその代理者として任命する。

センター長は当センターの技術事項全般を管理できる者を保安技術管理者及びその代理者として任命する。

保安技術管理者、保安係員及びそれらの代理者は製造保安責任者免状を有し、かつ、保安に関する十分な知識及び経験を有するものとする。

2.2 保安に関する協定

2.2.1 事業所外との協定

高圧ガス地域防災協議会に関する協定を、必要に応じて協定する。

2.2.2 従業員代表との協議

労働争議及び事故・災害の発生時における保安に関する体制を明確にするため、従業員代表と必要な事項について協議する。

2.2.3 協力会社との協定

事故・災害の発生時の防災体制に協力会社の応援を求める場合には、協力会社と必要な事項について協定する。

2.3 規定類の管理

2.3.1 関連する規定類

危害予防規程の細部を明らかにするために、関連する規定類を十分に整備する。また、規定類相互の関連、対象者及び重点を明確にする。

2.3.2 制定の方法等

規定類は標準化して作成し、管理責任者を定めて必要の都度改正と整備を行う。また、作成、制定、変更等に関する決裁の方法を明確に定める。

2.4 保安管理の記録

保安に関する必要事項は、それぞれの責任者が記録し、保安技術の向上に資する。

重要な記録は、関係する責任者の検印を受け、保存期間及び廃棄に関する事項を定めて保存する。

2.5 保安査察

社長は、定期的に当センターの保安状況を査察し、保安統括者等の意見を聞き、保安確保に関し指導する。

第3章 保安統括者等の職務

3.1 保安統括者及び代理者の職務

当センター全般の保安に関する業務を統括管理する。

社長に対し、当センターの保安に関する報告及び提案を行い、その指示を受ける。

代理者は保安統括者が旅行、疾病その他の事故によってその職務を行うことができない場合に、その職務を代行する。

3.2 保安技術管理者及び代理者の職務

保安技術管理者は、保安に関する技術的事項全般を統括管理し、保安統括者を補佐し、保安係員を指揮する。また、保安教育を実施する。

代理者は、保安技術管理者が旅行、疾病その他の事故によってその職務を行うことができない場合に、その職務を代行する。

3.3 保安係員及び代理者の職務

保安係員は、保安に関する技術的事項を管理し、部下を直接指揮監督する。

代理者は、保安係員が旅行、疾病その他の事故によってその職務を行うことができない場合に、その職務を代行する。

保安係員及びその代理者の製造施設に関する具体的な職務は、次のように定める。

3.3.1 製造施設及び製造の方法の管理

製造施設の位置、構造及び設備並びに製造の方法が保安規則等で定められた技術上の基準及び規定類で定められた基準に適合するように監督する。

3.3.2 製造設備の運転管理

運転基準類の作成に関し助言を行い、部下に周知させる。

安全な運転及び操作を行うよう部下を訓練し、監督する。

運転管理について記録し、必要なものは保存する。

3.3.3 製造施設の維持及び管理

製造の為の設備、保安設備、測定機器等に関する管理基準の作成に関し助言を行い、正常な機能を維持する。

工事及び修理に際しては、基準に従い保安を確認する。

3.3.4 製造施設の巡視点検及び検査

製造施設の巡視点検及び定期自主検査を、基準に従って実施又は監督し、かつ、記録する。また、その結果に基づく措置を行う。

北海道知事等が行う保安検査に立会い、必要な対策を行う。

3.3.5 協力会社の保安管理

協力会社の作業基準の作成及び保安管理について指導する。

3.3.6 異常状態に対する措置

異常状態に対する措置基準の作成に関し助言を行い、措置基準を関係者に周知させる。また、異常状態が発生した場合に、応急措置及び対策を実施する。

3.3.7 保安の計画及び実施

保安教育計画の作成に関し助言を行い、実施計画を作成する。

関係者に対し、施設に関する保安教育訓練を実施する。

第4章 運転、操作等に関する保安管理

4.1 運転及びその管理を行う者

保安係員は運転を管理し、部下の運転及び操作を監督する。

保安上重要な運転及び操作は熟練者が行い、また、未経験者が従事するときは、熟練者が直接監督する。

運転操作員が欠員するときの補勤者を定め、必要に応じて欠員をカバーする。

4.2 運転、操作等に関する規定類の作成及び実施

4.2.1 作成及び整備

規定類は可能な限り標準化して作成し、関係者に周知する。

規定類はプロセス又は設備の変更等に応じて改定整備する。

4.2.2 運転基準

正常な運転、始動及び停止、停電、通常行わない作業、特別危険な作業等に関する運転基準を定める。また、運転基準において、用役不足、過負荷、低負荷等に際しての運転限界を定める。

4.2.3 巡視点検基準

製造施設及び製造の方法についての巡視点検の基準を定める。

巡視点検基準に従って、製造設備の使用開始及び使用終了時に、かつ、1日に1回以上高

圧ガスの種類及び製造設備の態様に応じて頻繁に施設を巡視点検して保安の確認を行い、その結果を記録し、必要な対策をとる。

4.2.4 清掃基準

設備の補修、工事等の前後における系内のパージ清掃の基準を定める。

パージ清掃の実施は、全系列と設備の区分ごとに分けて行い、保安を確認する。

4.2.5 用役等の管理基準

電気、水、蒸気、不活性ガス、制御用空気等の用役は基準を定めて管理する。

4.3 交替勤務の引継

交替勤務の引継は、関係者立会いのもとに各直の運転操作員が対面引継を実施する。また、必要な引継事項は記録する。

4.4 夜間及び休日の運転開始及び運転停止

夜間及び休日における施設の計画的な運転開始及び運転停止は、原則として、平日の保安体制と同様な体制を確保した場合に限り実施する。

4.5 運転、操作等の記録

運転、操作等製造に関する保安上必要な事項を記録し関係者に閲覧し、期間を定めて保存する。

第5章 施設に関する保安管理

5.1 法令に定められた製造施設の技術基準

保安係員は法第8条第1号に定められた製造施設の技術基準に関し、所管の製造施設が保安規則等に適合するように監督する。

その内容は次の各項に示す事項を網羅するものとする。

5.1.1 製造施設の位置及び距離並びに建造物の構造等

製造施設の保安距離、設備間距離等

計器室等の建造物の構造、材料の種類等

5.1.2 製造設備の構造等

定置式製造設備、貯槽についての機能、構造、材料の種類等

5.1.3 保安設備、測定機器等

安全弁、破裂板、除害、緊急遮断、防爆、防消火、散水、保安電力、非常照明、ガス漏えい検知警報、静電気除去、不活性ガス等に関する保安設備及び温度計、圧力計、流量計等測定機器の位置、機能、構造、数量等

これらの設備の取扱いは定められた基準に従って行い、常に正しく作動するよう維持する。

5.2 設備管理の規定類の作成及び実施

設備管理の規定類は、次のような内容を網羅するものを作成し、常に整備して関係者に周

知らせる。

保全工事管理、定期自主検査、保安設備の取扱い、測定機器取扱い、火気取扱い、工具防具取扱い、立入制限等

5.3 設備管理の記録

施設の履歴、保全等に関する必要事項は記録し、重要な記録は保安統括者等の検印を受け保存する。

5.4 施設の検査

定期自主検査に関する検査方法、検査頻度及び検査箇所の選定方法は、検査基準として具体的に定め、保安係員が実施又は監督し、必要な対策を行う。その結果は記録する。

北海道知事等が行う保安検査に際しては、検査方法等について事前に北海道知事等の承認を得るとともに、保安係員等関係者が立会い、その指示に基づいて対策を行う。

5.5 工事を行うときの保安管理

施設の補修工事を行うときは、保安管理基準を保安規則等に従って定め、あらかじめ計画を立て関係者と協議し、次のように措置する。

5.5.1 工事責任者

工事全般に関する責任者を定め、関係者に対し、引火、爆発、ガス中毒又は酸欠に関する教育を行い、責任者の監視の下で工事を行う。

5.5.2 工事前後の保安措置

保安係員は、工事着手前にパージ清掃その他の保安措置を確認し、また、工事完了及び運転開始に際しても保安措置を確認する。

5.5.3 設備内作業に関する保安措置

設備内で作業を行う場合は、系内を完全に空気置換し、ガス中毒及び酸欠の防止を確保する。

5.5.6 施設を新增設するときの保安管理

施設を新增設するときは、保安係員を早い時期に決定し、運転基準、設備管理基準等を定め、かつ、プロセスの保安に関する重点を明確にして、関係者に周知させる。

第6章 異常状態に対する措置

6.1 不調・故障に対する措置

運転又は用役が不調又は故障のときの発見方法、処置、対策及び関係者への通報連絡に関する措置基準を定め、関係者を教育訓練する。また、その原因を調査し、対策を検討する。

6.2 事故・災害に対する措置

各種の事故・災害を想定し、高圧ガスの種類及び事故・災害の程度に対応する応急措置、防災活動、当センター内外の関係者への通報連絡、退避の方法及び指揮、原因の調査及び対策等に関する措置基準を定め、関係者を教育訓練する。

6.3 人身事故に対する処置

人身事故が発生したときの救急体制を定め、救急箱、担架、保護具及びその他作業場の状況に応じて必要な緊急設備及び用具を配備し、関係者を教育訓練する。

6.4 異常状態に関する記録

異常の状況、時期、措置、対策等を記録し保存する。また、その結果を検討し、保安技術の向上に資する。

6.5 関係事業所、協力会社等との関連

事故・災害の発生時における関係事業所、協力会社等への通報連絡及び援助に関し必要事項を定め、関係者を教育訓練する。

6.6 大規模な地震及び津波に対する措置

大規模な地震及び津波による災害を想定し、対応の考え方、情報の入手手段、関係者への通報・連絡、初期行動、避難、製造施設の緊急停止、設備点検、緊急時の体制、食料等必需品の確保、防災活動等について定め、関係者に周知すると共に定期的に対応訓練を行う。

第7章 保安教育及び規定類の周知

7.1 保安教育の計画及び実施

保安教育計画に基づき、関係する従業員に対し、保安意識の高揚、必要な規定類の周知徹底、保安技術の向上、異常状態に対する措置等について教育及び訓練を行う。

実施した結果は記録し活用する。

7.2 危害予防規程及び規定類の周知及び活用

危害予防規程は関係する従業員に教育して周知徹底させ、規定類は対象者別に必要な規定を重点に教育訓練し活用する。

7.3 事故・災害対策訓練

事故・災害の発生に備え、防災訓練、及び夜間休日の防災訓練を定期的に計画し、実施する。

7.4 改善提案等

広く従業員に対し、保安に関する改善提案を求め、優秀なものは表彰し、保安意識の高揚と保安レベルの向上を図る。

7.5 危害予防規程等に違反した者の措置

危害予防規程及び規定類に違反した者があった場合は、教育及び訓練を繰り返し実施し違反防止に努める。

第8章 協力会社の保安管理

8.1 管理監督の方法

協力会社の保安上の責任範囲を具体的に定め、保安係員は協力会社の作業基準の作成を指導し、その従業者が基準を遵守するよう監督する。また当センターの規定類のうち協力会社に必要なものを抜粋して与え、遵守するよう監督する。

8.2 保安教育

協力会社の従業者には、保安教育計画に従い教育を実施し、また、協力会社の行う教育を指導し、保安を確保する。

第9章 危害予防規程の制定及び変更

9.1 作成、制定及び変更の方法

危害予防規程は、センター長が関係者と協議して作成し、センター長が制定する。また、変更する時も同様に行う。

9.2 届出

社長は、制定又は変更した危害予防規程を北海道知事に届け出る。

9.3 経過の記録

危害予防規程の制定及び変更の経過を明らかにするため、制定又は変更年月日、目的、主要事項等の事項を改定経歴表に記録する。

9.3.1 届出受理年月日 平成27年10月27日

図-1

日本CCS調査株式会社 苫小牧CCS実証試験センター

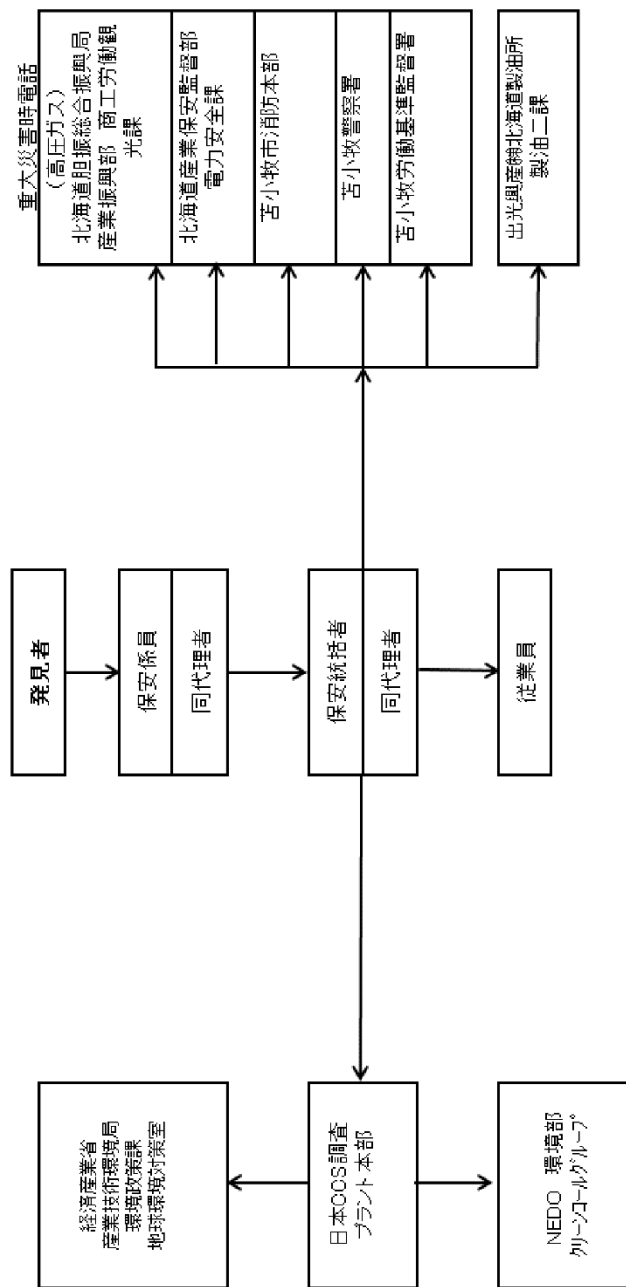
高圧ガス保安法 保安管理組織図

令和2年4月1日 改定



図-2

苫小牧CCS実証試験センター
高圧ガス保安法 保安管理組織関連図
災害発生時緊急連絡体制



特別規程

01-02

消防法 予 防 規 程

(所 在 地) 北海道苫小牧市真砂町 12 番地

(会 社 名) 日本 C C S 調査株式会社

(事 業 所 名) 苫小牧 C C S 実証試験センター

苫小牧ＣＣＳ実証試験センター予防規程

第１章 総則

（目的）

第１条 この規程は、消防法第１４条の２に基づき、苫小牧ＣＣＳ実証試験センター（以下、「当センター」という。）における危険物の取扱作業その他保安管理に関する必要な事項について定め、もって火災、危険物の流出、震災等の災害を防止することを目的とする。

（適用範囲）

第２条 この規程は、当センターの全域及び当センターに勤務し又は出入りするすべての者に適用する。

（遵守の義務）

第３条 当センターの従業員（以下「センター員」という。）は、この規程を遵守しなければならない。

（告知の義務）

第４条 センター員は、当センターに出入りする者に対して、必要に応じてこの規程の内容を告知し、遵守させなければならない。

（規程の変更）

- 第５条 センター長は、この規程を変更しようとするときは、危険物保安監督者及び危険物取扱者の意見を尊重し、火災予防上支障のないように変更しなければならない。
- ２ センター長は、規程の変更を行ったときは苫小牧市長に変更の申請をして、認可を受けなければならない。但し、個人名等の変更については、この限りでない。

第２章 保安の役割分担

（組織）

- 第６条 当センターにおける保安管理を円滑かつ効果的に行うため、「別様式－１」の通り役割分担を定め、当センター内の見やすい箇所に保安管理任務分担表を掲示すること。また、交代時は、業務日誌の記載内容を相互に確認し、業務を確実に引き継ぐこと。
- ２ センター長は、危険物保安監督者が、旅行、疾病その他の事故により、不在となることを考慮し、あらかじめその職務を代行する者を危険物取扱者の中から指定しておかなければならない。

(センター長の責務)

第7条 センター長または代行者は、危険物保安監督者以下を指揮し、保安上必要な業務を適切に行うとともに施設が適切に維持管理されるよう努めなければならない。

(危険物保安監督者の責務)

第8条 危険物保安監督者は、消防法令に定められた業務を行うほか、この規程の定めるところにより、保安の維持の確保に努めなければならない。

(危険物取扱者の責務)

第9条 危険物取扱者は、消防法令に定められた業務を行うほか、この規程に定める危険物の貯蔵及び取扱作業の安全を確保しなければならない。

- 2 危険物取扱者の氏名等は、在、不在の別をセンター内の見やすい箇所に掲示しなければならない。(「別様式-1」参照)

(従業員の遵守事項)

第10条 センター員は、消防法令及びこの規程を遵守するとともに、危険物保安監督者及び危険物取扱者の指示に従い、適正な危険物取扱作業及び危険物施設の維持に努めなければならない。

第3章 危険物の貯蔵及び取扱いの基準等

(貯蔵及び取扱基準)

第11条 危険物を貯蔵し又は取り扱う場合においては消防法令に定めるところによるほか、特に次の事項に留意しなければならない。

- (1) 危険物取扱者以外の者が危険物を取り扱う場合は、甲種又は乙種危険物取扱者が必ず立ち会うこと。
- (2) 危険物取扱者が不在となる場合は、危険物取扱業務は行わない。
- (3) みだりに火気及び火花を発生させるおそれのある機械器具等は使用しないこと。
- (4) 危険物を移動タンク貯蔵所から屋外タンク貯蔵所に荷卸しする場合は、当センターの危険物取扱者が必ず立会い、危険物の種類、数量を確認し、作業中は、危険物のもれ、あふれ、又は飛散しないように監視すること。
- (5) 危険物を屋外タンク貯蔵所へ注入する場合、アースに接続するとともに油種、注入量の確認をすること。

(設備機器の運転操作の基準)

第12条 当センターの設備等の運転及び操作に当たっては、作業する者はその設備等の構造及び運転操作要領を熟知するとともに、誤操作のないよう確認して行うこと。

(駐車)

第13条 センター内に自動車等を駐車させる場合は、あらかじめ指定された駐車場所に駐車しなければならない。

第4章 点検及び検査その他の安全管理

(危険物施設の点検)

- 第14条 危険物施設の構造及び施設等を適正に維持管理するため、別に定めるところにより点検を実施しなければならない。
- なお、地震時等の災害により当該施設に影響があると認められる場合にも点検を実施する。
- 2 危険物施設の点検の責任者（以下「点検責任者」という。）は危険物取扱者の中から指名する。
 - 3 点検は毎日点検、定期点検、臨時点検とし、点検責任者の下に行う。
 - 4 点検を実施し、構造、設備等に異常を発見した場合は、点検責任者は使用禁止等の適切な処置を行い、その旨をセンター長に報告しなければならない。
 - 5 センター長は、前項の報告を受けたときには、当該異常個所の修理等を行わせなければならない。
 - 6 センター長は、第1項の規定により点検を実施したときは、点検記録簿に点検結果を記録し、3年間保存しなければならない。

第5章 改修、補修等

(改修、補修)

- 第15条 危険物施設の改修、補修工事等を行う場合は、その内容に応じて必要な手続きを行わなければならない。
- 2 センター長は、前項の工事を行う場合、工事が安全かつ適正に行われるよう必要に応じて立ち会い、工事関係者に対して指示する等監視監督を行うとともに、工事終了後、当該工事に係る設備の点検・検査を実施し安全性を確認しなければならない。
 - 3 センター長は、当センターの位置、構造、設備を明示した書類及び図面の整備、保管について、適正に整理及び管理するものとする。

(工事責任者)

- 第16条 工事請負業者は工事責任者を定め、センター長に報告しなければならない。

(連絡)

- 第17条 工事責任者は、センター長と綿密な連携を保ち作業を行わなければならない。

(工事責任者の責務)

- 第18条 工事責任者は、この規程を遵守し工事の監督にあたるとともに、作業員に周知徹底を図り、作業の安全を確保しなければならない。

(作業工程)

- 第19条 工事請負業者は、作業工程表を作成し、センター長の承認を受け、工程表に従って作業を行わなければならない。

(火気使用許可)

第20条 作業上、火気等の使用を必要とする場合は、あらかじめセンター長の許可を受けなければならない。

(火気使用の一時禁止)

第21条 センター長は、風力、風向、気温、湿度、その他の気象条件により、火災予防上必要であるときは、火気の使用を制限し、又は停止させることができる。

(危険物の取扱工程又は設備等の変更管理)

第22条 危険物の取扱工程又は設備等を変更する場合は、計画段階から想定される危険要因に対して、設備工程計画部署の管理者および担当部署による事前検討を行い、必要な安全対策を講じなければならない。また、危険物施設担当者に対して当該危険要因を把握させるための保安教育を実施する。

第6章 火災、地震、津波及びその他の災害時の措置

(自衛の防災組織)

第23条 センター長を自衛防災隊長とし、全センター員を隊員とした自衛防災隊を編成して火災等災害時の即応体制を整えておくものとし、その編成及び責務分担は、「別様式-2」のとおりとする。

- 2 自衛防災隊長は、災害時において隊員を指揮して、初期消火その他災害の拡大防止の措置を行い、また、公設消防隊が到着したときは火災等の概要について報告するものとする。
- 3 隊員は、自衛防災隊長の指揮を受け、初期消火その他災害の拡大防止に努めなければならない。
- 4 自衛防災隊長は、地震、津波、台風時等の異常気象時には別に定める「自然災害対策要領」に基づき、人員及びセンター内の施設について、安全を確保するための必要な対策を講じなければならない。
 - (1) 自衛防災隊長は、津波襲来の情報を収集し、センター員および構内の作業者等に対し、的確に情報を提供すること。
 - (2) 避難誘導班は、構内のセンター員に対し、津波浸水予想区域内からの速やかな避難誘導をすること。
 - (3) 自衛防災隊長は、施設の施錠、外部電源の遮断その他安全措置を図り、直ちにセンター員とともに、あらかじめ指定した場所へ避難すること。
 - (4) 外出、出張等により当センター外にいたセンター員は、あらかじめ指定した場所へ避難し、津波浸水予測図内へは立ち入らないこと。
 - (5) (1) から (4) については、津波襲来予想時間に応じた対応とすること。
- 5 自衛防災隊長は、地震、津波、台風等の異常気象時、直ちにセンター内施設の点検を実施し、安全を確認しなければならない。

(緊急時の連絡網)

第24条 当センターに火災等災害が発生したときに備え、「別様式—4—1及び2」の連絡網を作成しておかなければならない。

- 2 災害を覚知したときは、前項の連絡網により全センター員に連絡し、連絡を受けたセンター員は当センターに参集しなければならない。

(消火活動等)

第25条 消火活動等は次により行わなければならない。

- (1) 火災、危険物の流出等が発生した場合には、自衛防災隊長の指揮の下に直ちに初期消火、外来者等の避難・誘導、消防機関への通報、危険物の流出防止等の応急措置を講ずること。
- (2) 危険物が所外に流出し、または可燃性蒸気が拡散するおそれがあるときは、周辺地域住民、通行人及び車両の運転者等に対して火気使用の禁止、その他必要な協力を求めるとともに、危険物の流出拡大防止、回収等の応急措置を講ずること。

(地震及び津波の被害予防)

第26条 地震及び津波時の災害を防止するため、次の事項を行わなければならない。

- (1) 当センターの建物、その他付随する施設及び設備の倒壊、転倒、落下物の有無等の点検
- (2) 消火設備、警報設備の作動状況及びその他の設備の安全装置の作動状況の点検

(地震及び津波の発生時の措置)

第27条 地震及び津波が発生したときは、直ちに危険物の取扱作業及び火気設備・器具の使用を中止しなければならない。

- 2 センター内に被害が発生した場合は、応急措置により二次災害の発生防止を図るとともに、設備・機器の使用禁止等の措置をとる。
- 3 再開する場合は、地震・津波の規模に拘わらず危険物施設並びに建物及びこれに付随する設備の点検を行い、安全を確認してから再開すること。
- 4 隊員は、外来者への必要な指示及び混乱防止のための措置を講じるとともに、安全な場所に避難誘導しなければならない。

(地震及び津波の発生後の措置)

第28条 地震及び津波が発生した場合、点検責任者は、地震の規模にかかわらず、(又は基地内への浸水が認められた場合も含む)建物及び設備の点検、検査を別添の点検項目に従って行い、異常があった場合は速やかにセンター長に報告するとともに、必要に応じて消防機関等に通報しなければならない。

- 2 センター長は、点検責任者から前項の規定により報告を受けた場合は、直ちに異常を確認するとともに、必要に応じて補修、取替え及び改修の工事を実施しなければならない。

(地震及び津波に備えての準備品)

第29条 地震に備え、次の物品を常に持ち出せるよう準備しておかなければならない。

- (1) 救急医薬品 (2) 懐中電灯 (3) 貴重品 (4) その他必要なもの

第7章 教育及び訓練

（保安教育）

第30条 センター長はセンター員に対し、「別様式－6」により保安教育を実施しなければならない。

2 保安教育を実施した時は、その内容を記録し3年間保存しなければならない。

（訓練）

第31条 訓練は、総合訓練、部分訓練及び震災訓練とし、総合訓練にあつては年1回、部分訓練にあつては年2回、震災訓練にあつては総合訓練、部分訓練に含めて「別様式－6」により実施しなければならない。

2 訓練を実施したときは、その訓練結果を記録し、3年間保存しなければならない。

第8章 予防規程に違反した者の措置

第32条 センター長はこの規程に違反する行為を行った者に対して、直ちにその作業を停止させるとともに、厳重注意その他必要な措置をとるものとする。

付則

（施行期日）

第1条 本規程は平成27年9月1日制定し、実施する。平成27年10月1日より実施する。

（作成、制定及び変更の方法）

第2条 本規程は、安全環境グループ長が関係者と協議して作成し、センター長が制定する。
また、変更する時も同様に行う。

（届出）

第3条 センター長は、制定又は変更した予防規程を苫小牧市に届け出る。

（経過の記録）

第4条 本規程の制定及び変更経緯を明らかにするため、次の事項を記録する。

- ①制定又は変更年月日及び届出受理年月日
- ②変更経緯
- ③届出受理番号、届出受理年月日

改 定 経 歴 表

(規 程 名 称)

消防法予防規程

(所 管)

安全環境グループ

制定・改定・廃止・ 定期見直し 年月日	目的	主 要 事 項	承認者 印	点検者 印	作成者 印
2015 年 9 月 1 日	制定	新規作成	澤田	小島	本間
2016 年 3 月 25 日	改定	組織変更に伴う見直し等	小島	山岸	本間
2018 年 7 月 17 日	改定	別様式 4-1「緊急連絡網」に NEDO 環境部追加	小島	山岸	川崎
2020 年 1 月 7 日	改定	圧入停止による体制変更等により改訂	小島	山岸	川崎
2020 年 4 月 1 日	改定	体制・組織変更等による改定	田澤	山岸	川崎
2021 年 4 月 1 日	改定	センター長交代に伴う自衛消防組織等の変更	田澤	山岸	川崎
2021 年 6 月 23 日	改定	プラント本部廃止に伴う連絡体制改定	石和田	山岸	川崎
2021 年 9 月 15 日	改定	経済産業省の CCS 所管部署変更に伴い緊急連絡体制の変更	石和田	山岸	川崎
2022 年 4 月 1 日	改定	人事異動による「自衛消防組織」「夜間休日の緊急連絡網」の改定	石和田	山岸	川崎
2023 年 3 月 1 日	改定	この規程に「自然災害対策要領」を紐づける 改定	石和田	山岸	川崎
2023 年 4 月 1 日	改定	人事異動による「自衛消防組織」「夜間休日の緊急連絡網」の改定	石和田	高橋	高橋
2023 年 8 月 1 日	改定	「夜間休日の緊急連絡網」の改定（連絡手段 SMS 追加）			

別様式－1

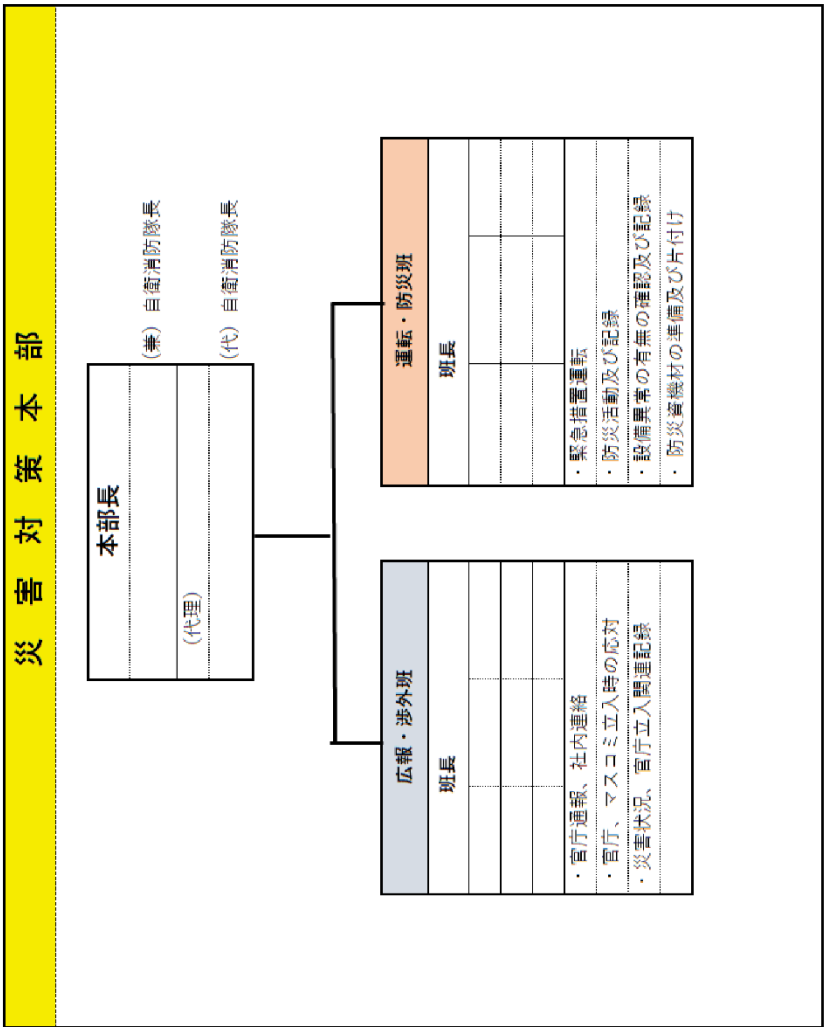
保安全管理任務分担表

役務担当	氏 名	備 考
セ ン タ ー 長		
危険物保安監督者		
代行者		

別様式ー2

自衛消防組織

2020.7.1



別様式-3

▼自然災害発生時の対応要領▼

①情報収集及び周知・連絡

正確な津波情報等の
周知・連絡を確実に
実施する。

情報の収集

- 津波情報伝達システム
- ラジオ、TV等
- 携帯電話



情報の周知・連絡

- 構内一斉緊急放送
- 無線ページング等で
当センター内にいる
外来者・センター員等
へ津波情報等を周知・
連絡

②作業中止及び安全措置

津波等による二次災
害の防止に努める。

全ての作業を中止

- A 重油の受入中止
- 液体窒素の受入中止
- その他薬品類の充填
作業等の中止



安全措置

- ポンプ等電源の停止
- 危険物漏洩防止措置
- 建物等の施錠
- その他安全措置

③外来者及びセンター員の避難

迅速に津波浸水予想
区域から状況に応じ
た避難をする。

外来者等の避難

- 「津波からの避難の
手引き」等避難経路
の周知。
- 外来者を津波浸水予
想域外へ避難誘導
(管理棟への避難)



センター員等の避難

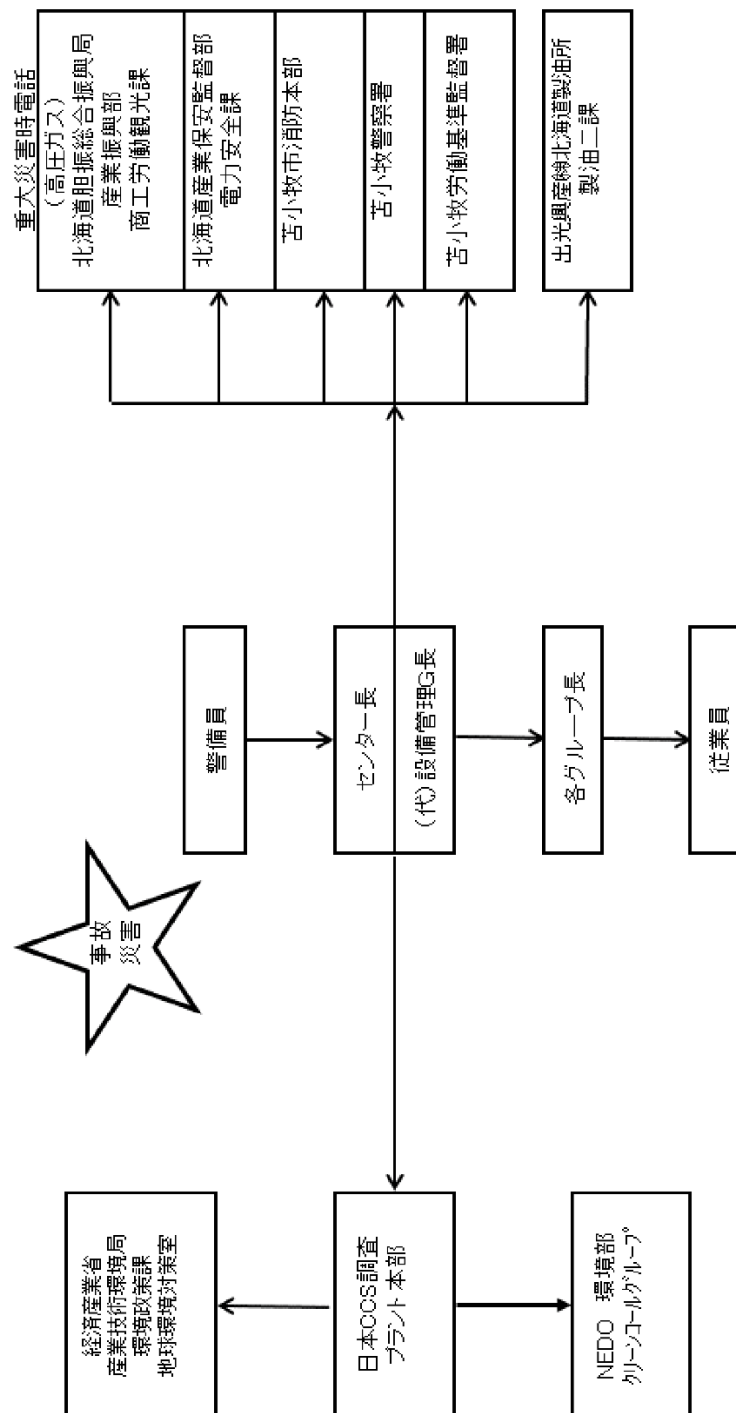
- 非常用持出し品等の
確認
- 全センター員は管理
棟へ避難誘導する。
- 避難後は津波浸水予
想区域へ戻らない。

津波警報発令時：津波襲来予想時間を考慮し、慌てずに対応する！

別紙様式 4-1

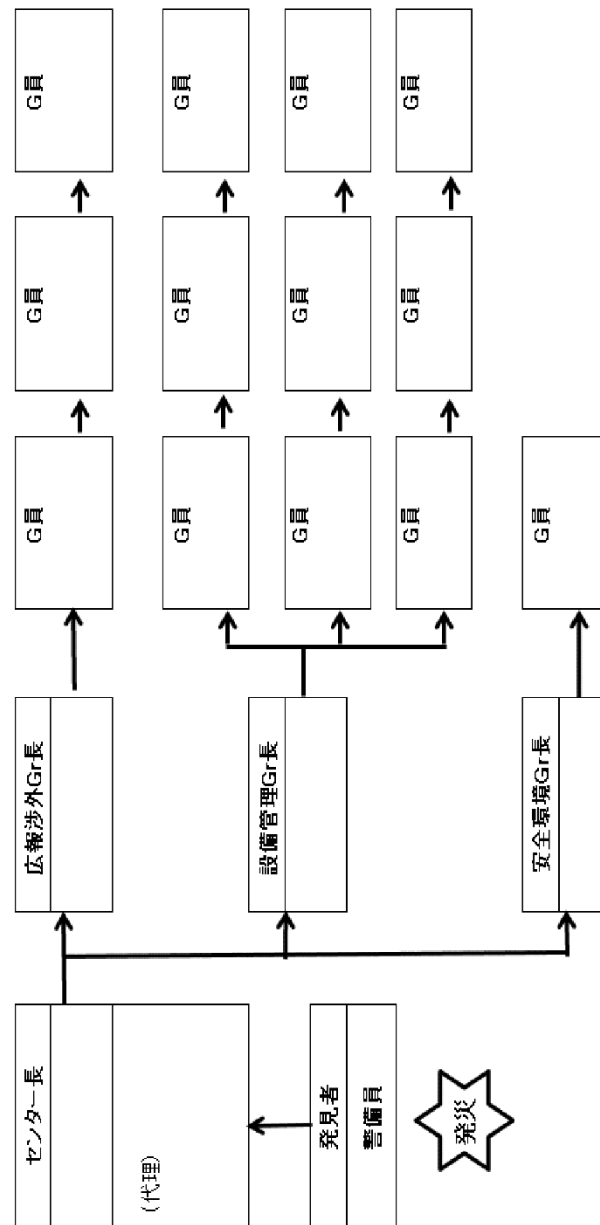
2020.4.1

苫小牧CCS実証試験センター 緊急連絡網



別紙様式4-2

夜間休日の緊急連絡網（携帯電話）



- ※
- ① 連絡先の方に連絡がとれない場合は次の方に連絡のこと。
 - ② 連絡先の方の電話番号は各自確認しておいて下さい。

別様式-5

一般取扱所及び屋外タンク貯蔵所

地震および津波発生時の設備点検表

点検項目		点検内容	点検方法	点検結果	措置年月日及び措置内容
燃焼装置等	基礎、架台、支柱	変形、亀裂、損傷の有無	目視		
		沈下の有無	目視		
		支柱取付け部損傷の有無	目視		
		ボルト等の緩みの有無	目視		
	本体部	変形、亀裂、損傷の有無	目視		
		ボルト等の緩みの有無	目視		
		保温材の損傷、脱落等の有無	目視		
	バーナー等燃焼設備	漏洩の有無	目視		
		取付け部の緩み等の有無	目視		
		機能の適否	作動確認		
	安全装置	機能の適否	作動確認		
	計測装置	温度計	損傷の有無	目視	
			取付け部の緩み等の有無	目視	
			作動、指示状況の適否	目視	
		圧力計	損傷の有無	目視	
			取付け部の緩み等の有無	目視	
			作動、指示状況の適否	目視	
	熱源監視装置	損傷の有無	目視		
		取付け部の緩み等の有無	目視		
		機能の適否	作動確認		
	火災を防止するための付帯設備	損傷の有無	目視		
		固定状況の適否	目視		
		機能の適否	作動確認		
屋外タンク貯蔵所	基礎	大回り、コンクリートリング損傷の有無	目視		
	防油堤等	亀裂、損傷等の有無	目視		
		目的地の脱落等の有無	目視		
		波打ち、傾斜の有無	目視		
		基礎部分の洗掘の有無	目視		
		階段の変形、損傷の有無	目視		
	タンク本体	漏洩の有無	目視		
		側板および覆板の変形、亀裂、損傷の有無	目視		
		ボルト等の緩みの有無	目視		
		底板張り出し部の変形の有無	目視		
		通気管、安全装置の損傷の有無	目視		
	ノズル、マンホール等	漏洩の有無	目視		
		変形、損傷の有無	目視		
		取付けボルトの折損等の有無	目視		
		通気管、安全装置の損傷の有無	目視		
	液量自動表示装置	損傷の有無	目視		
		取付け部の緩み等の有無	目視		

別様式-5

一般取扱所及び屋外タンク貯蔵所

地震および津波発生時の設備点検表

点検項目		点検内容	点検方法	点検結果	措置年月日及び措置内容
屋外タンク貯蔵所	計測装置		作動、指示状況の適否	作動確認	
		温度計	損傷の有無	目視	
			取付け部の緩み等の有無	目視	
			作動、指示状況の適否	作動確認	
		圧力計	損傷の有無	目視	
			取付け部の緩み等の有無	目視	
			作動、指示状況の適否	作動確認	
	配管、バルブ等（含むボイラー・図リ）	配管（可換部を含む）	漏洩の有無	目視	
			変形、損傷の有無	目視	
			地盤との距離状況	目視	
		バルブ、フランジ等	漏洩の有無	目視	
			変形、損傷の有無	目視	
			バルブ開閉機能の適否	目視	
			フランジボルトのゆるみ等の有無	目視	
		ラック、サポート	固定状況の適否	目視	
			変形、損傷の有無	目視	
	ポンプ設備	ポンプ	漏洩の有無	目視	
			変形、損傷の有無	目視	
			異音、異常振動、異常発熱の有無	目視	
			ポンプ基盤の亀裂、損傷の有無	目視	
			固定ボルトの緩み等の有無	目視	
			アース断線の有無	目視	
		床、油分離装置	変形、亀裂、損傷の有無	目視	
			漏油の有無	目視	
	配電盤、遮断器、コンセント、配線等		変形、損傷の有無	目視	
			固定状況の適否	目視	
			機能の適否	目視及び作動確認	

別様式-5

一般取扱所及び屋外タンク貯蔵所

地震および津波発生時の設備点検表

点検項目		点検内容	点検方法	点検結果	措置年月日及び措置内容
電気設備	照明機器及びその他の電気機器	変形、損傷の有無	目視		
		固定状況の適否	目視		
		配線結合部の緩み等の有無	目視		
		機能の適否	作動確認		
	アース、避雷設備	断線の有無	目視		
		配線結合部の緩み等の有無	目視		
		接地抵抗値の適否	接地抵抗計による測定		
制御装置等		制御系計器の損傷の有無	目視		
		制御盤の固定状況の適否	目視		
		制御系の機能の適否	作動確認またはシーケンス試験による		
		監視設備の機能の適否	作動確認		
		警報設備の機能の適否	作動確認		
消火設備		位置、設置数、外観異常の有無	目視		
警報設備		損傷の有無	目視		
		機能の適否	作動確認		
管理棟及びその他建屋		基礎部分の亀裂、沈下等の有無	目視		
		外壁、窓、屋根部等の損傷の有無	目視		
		建屋内への浸水による異常の有無	目視		
その他					

別様式－6

教育・訓練計画表

教 育	対象者	実 施 時 期	教 育 の 内 容
	全センター員	・ 危険物安全週間中 ・ 防災週間中	(1)予防規程の内容 (2)火災予防上の遵守事項 (3)安全作業等に関する基本的事項
訓 練	新入社員 (アルバイト も含む)	入社時	(4)各自の任務、責任等の周知徹底 (5)地震・津波対策に関する事項 (6)その他
	訓練別	実 施 時 期	訓 練 の 内 容
訓 練	総合訓練	危険物安全週間中	部分訓練を有機的に連携させて総合的に 行う訓練
	部分訓練	春の火災予防週間中	消火・通報訓練、初動措置訓練
		防災週間中	消火・通報訓練、避難・誘導訓練 流出油防除訓練、応急救護訓練
	震災訓練	総合訓練及び部分訓 練に含めて実施	周辺事業所等との連携 訓練、帰宅困難者対応訓練 応急措置訓練、設備・機器の使用可否判断訓練

教育・訓練記録表								
		<table border="1"> <tr> <td>センタ ー長</td> <td colspan="2">担 当</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	センタ ー長	担 当				
センタ ー長	担 当							
教育・訓練名	教育・訓練区分	<input type="checkbox"/> 教 育 <input type="checkbox"/> 訓 練						
	教育・訓練名							
実施年月日	実施年月日	令和 年 月 日 ()						
	時 間	時 分 ～ 時 分						
講 師	社 内							
	社 外							
参 加 者		計 名						
【内 容】								
【所 感】								
【上司コメント】								