

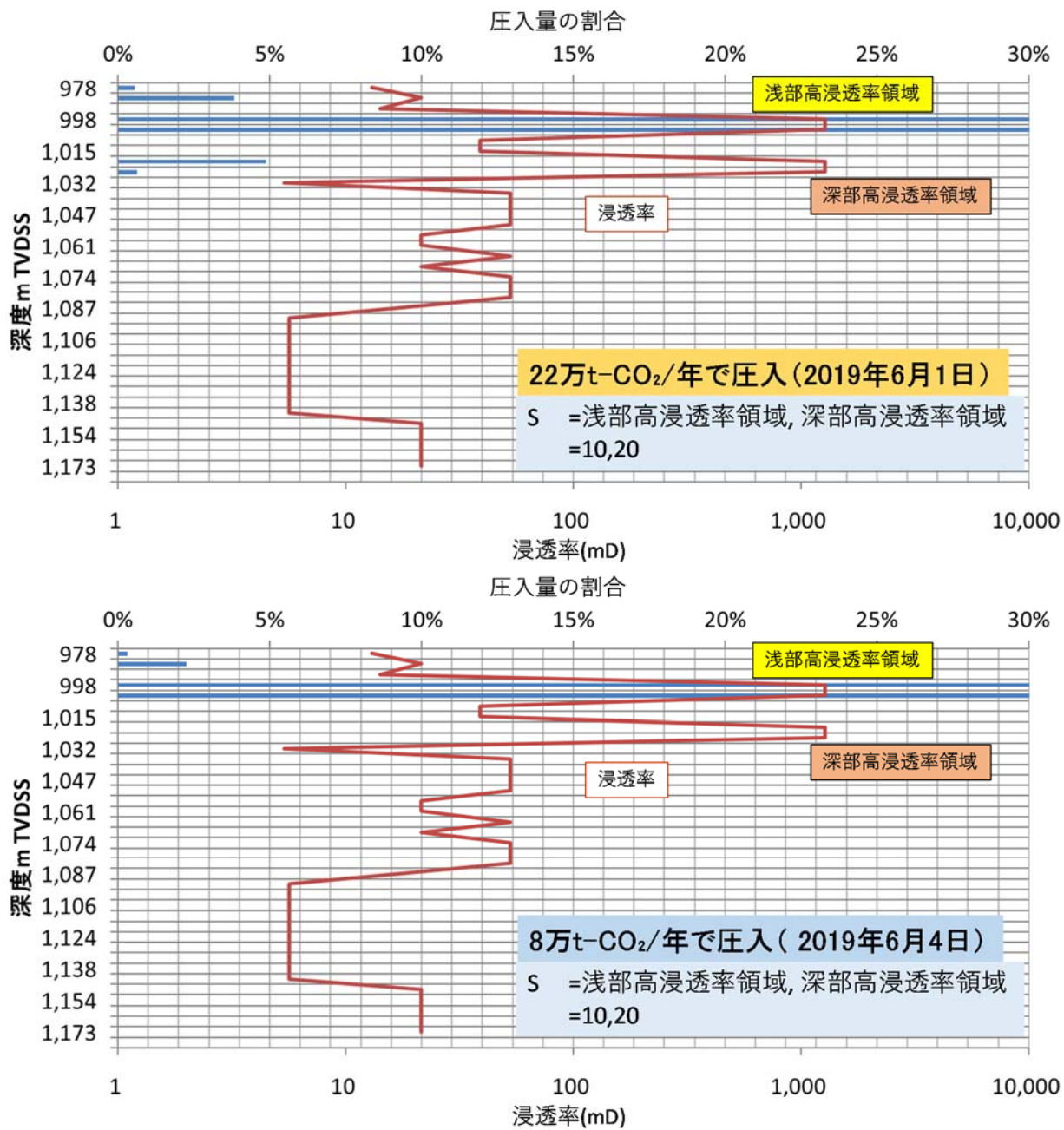
目的関数の悪化は、FOT9後に何らかの原因によって、圧入により上昇する仕上げ区間上端深度における坑内圧力が上昇したことを意味する。明確な調査方法はないが、現状では、圧入井の仕上げ区間において出砂等の影響により、圧入性が阻害される傾向にあるものと仮定し、スキんファクターを設定することとした。スキんファクターは、式(4.5-8)の流量と圧力差の関係式における、式(4.5-9)に示す Well Injectivity Index(以下、「WI」と称する。)中のSで示される。出砂などにより坑井近傍で圧入が阻害されるとプラスとなる。

$$Q = \sum WI \lambda (P_{bh} - P_o) \quad \text{式(4.5-8)}$$

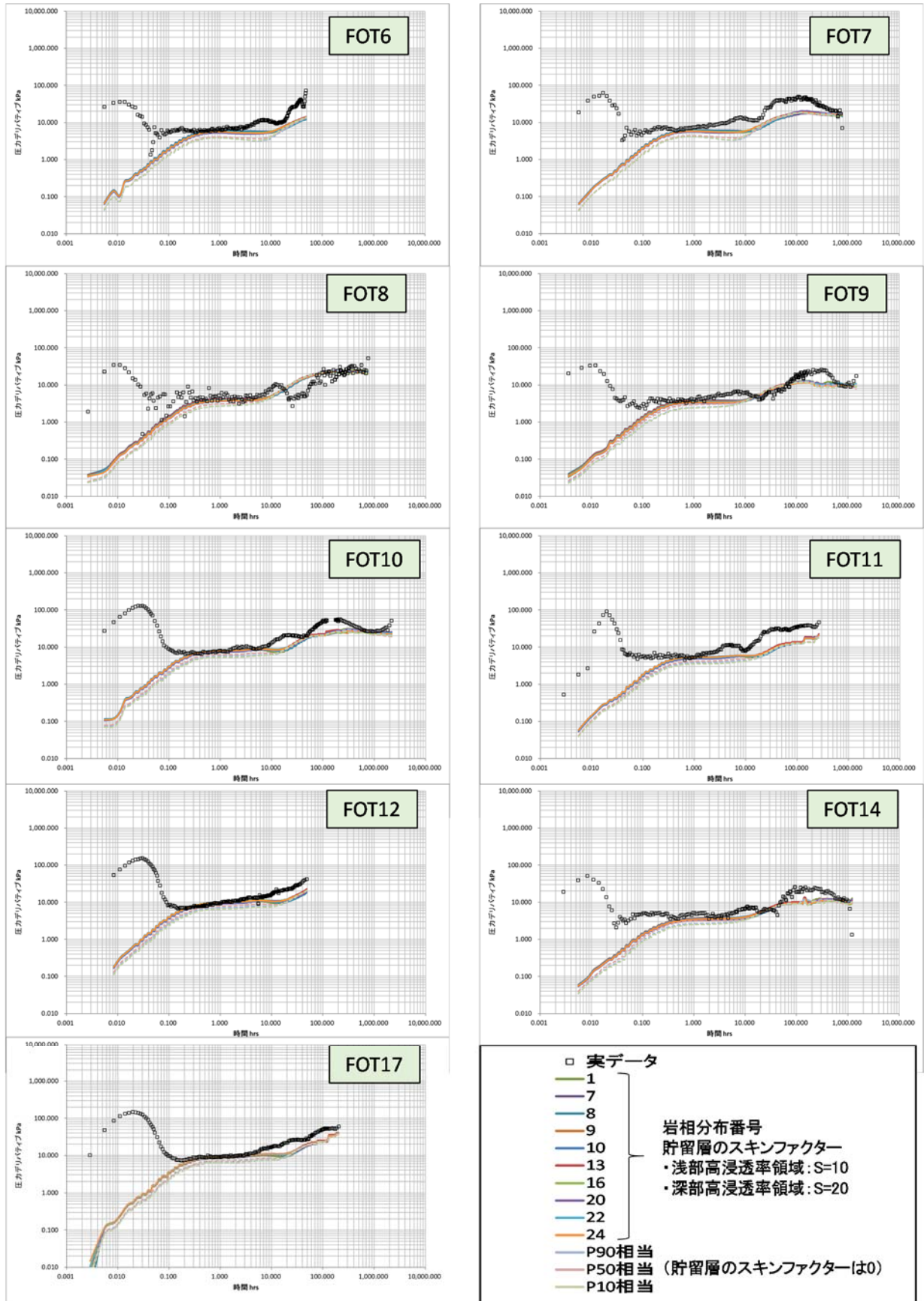
$$WI = \frac{2\pi kh}{\ln(r_e/r_w) + S} \quad \text{式(4.5-9)}$$

注) Q: 流量, P_{bh}: 流動坑底圧力, P_o: 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), r_w: 坑井半径, r_e: 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4.5-37図に示すような浸透率分布をモデルに与えた上で圧入井の仕上げ区間にスキんファクターモデルを構築している。浅部高浸透率領域および深部高浸透率領域のスキんファクターについて、幾つかの組み合わせで検討を行った結果、浅部高浸透率領域で10、深部高浸透率領域で20の値をそれぞれ選択することで圧入時の状況を再現することができた。また、第4.5-38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 4.5-37 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 4.5-38 図 FOT デリバティブカーブの再現状況

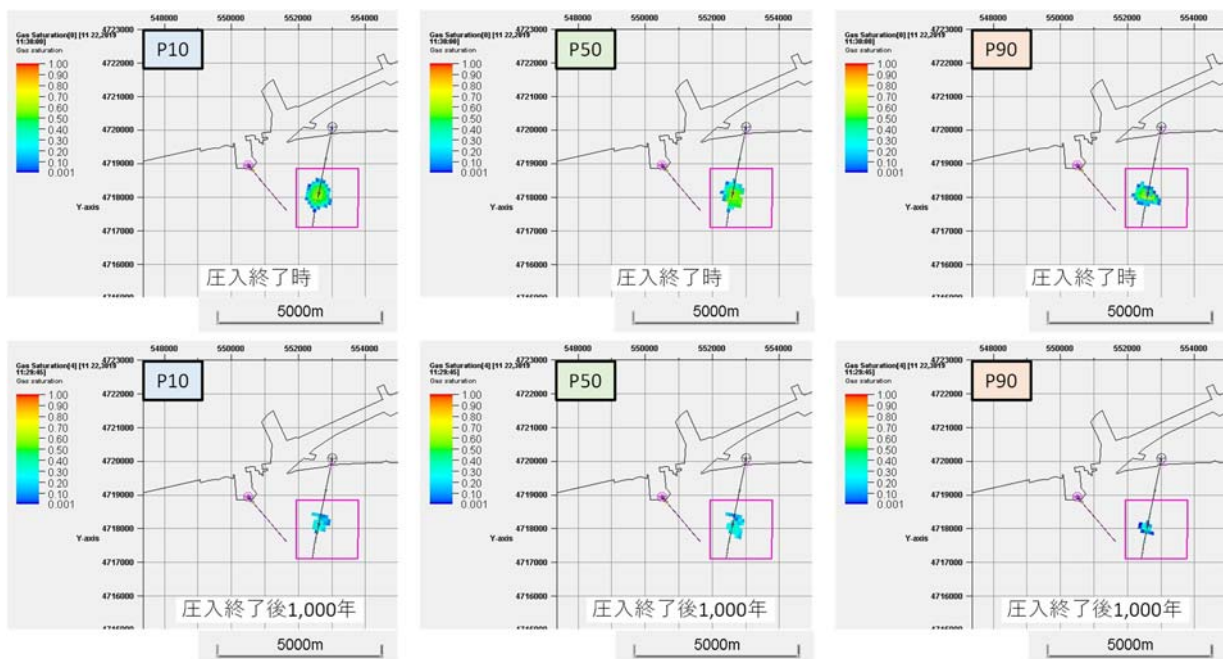
③ 圧入した CO₂ の平面的な分布範囲

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 4.5-39 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 4.5-40 図)。第 4.5-40 図に示す座標は、2019 年 3 月 28 日付けにて許可済みである、変更許可申請書に示した CO₂ 飽和度分布範囲を示す。2019 年度シミュレーションにより予測される CO₂ 飽和度分布範囲はその範囲に含まれるため、本申請においても同座標を CO₂ 飽和度分布範囲とする。

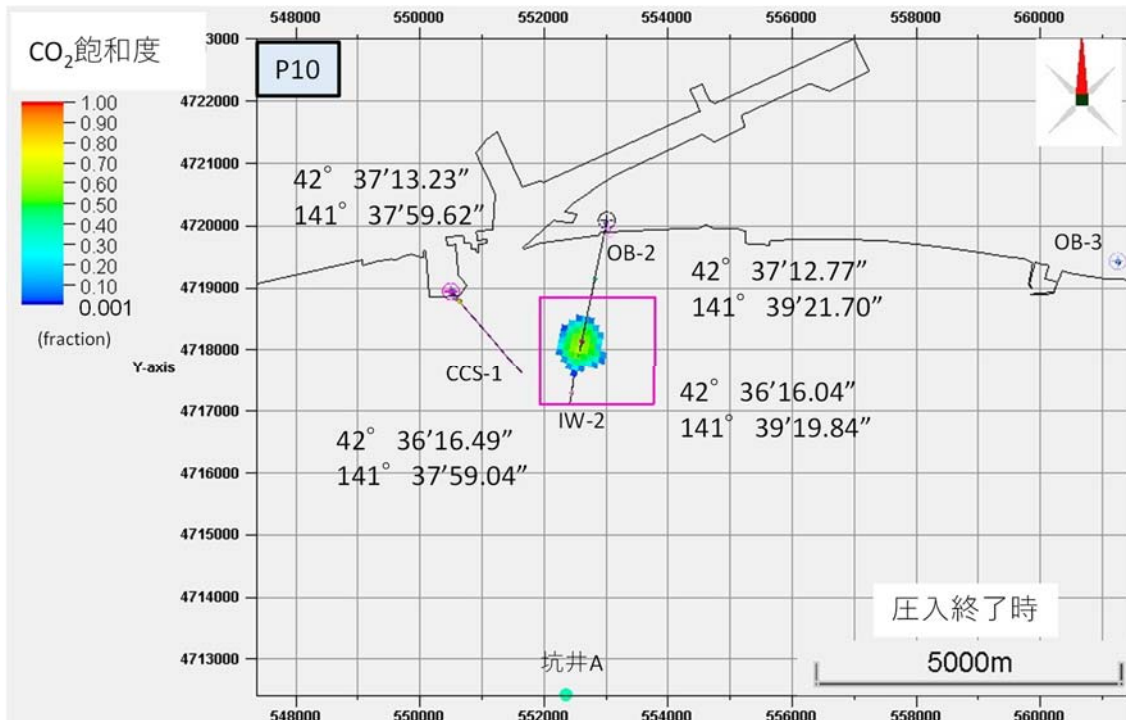
第 4.5-41 図に萌別層での P10, P50, P90 の各モデル (具現像) における圧入終了後 1,000 年時点における最大となる溶解 CO₂ 量分布範囲を示す。溶解 CO₂ 量は CO₂ 飽和度分布で示される CO₂ が地層水に溶解することにより生じるため、圧入停止からの経過時間が長い方がより広範囲に分布する傾向があるため、圧入終了後 1,000 年時点を考慮した。その結果、P10 モデルにより予測された圧入終了時の溶解 CO₂ 量分布範囲を、萌別層での最大となる溶解 CO₂ 量分布範囲とした (第 4.5-42 図)。第 4.5-42 図に示す座標は、2019 年 3 月 28 日付けにて許可済みである、変更許可申請書に示した溶解 CO₂ 量分布範囲を示す。2019 年度シミュレーションにより予測される溶解 CO₂ 量分布範囲はその範囲に含まれるため、本申請においても同座標を溶解 CO₂ 量分布範囲とする。

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



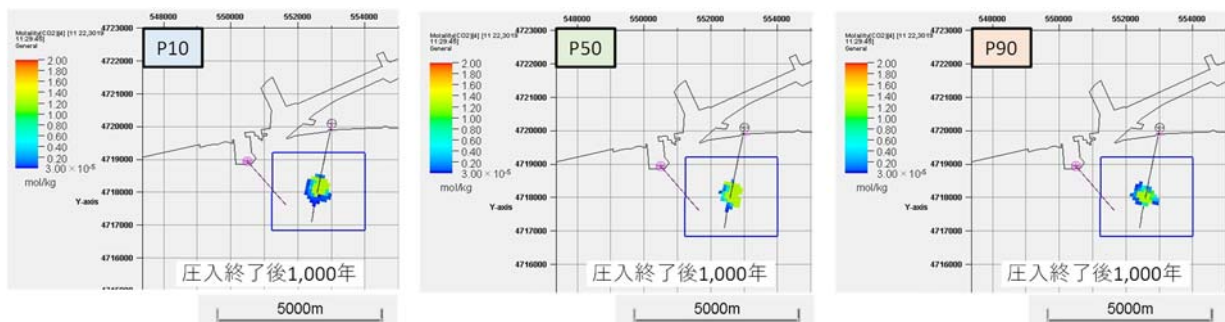
注：各図の赤枠は、本申請以前の申請で CO₂ 飽和度分布範囲とした範囲を示す。

第 4.5-39 図 萌別層砂岩層 (P10, P50, P90 モデル) での CO₂ 分布範囲 (CO₂ 飽和度)

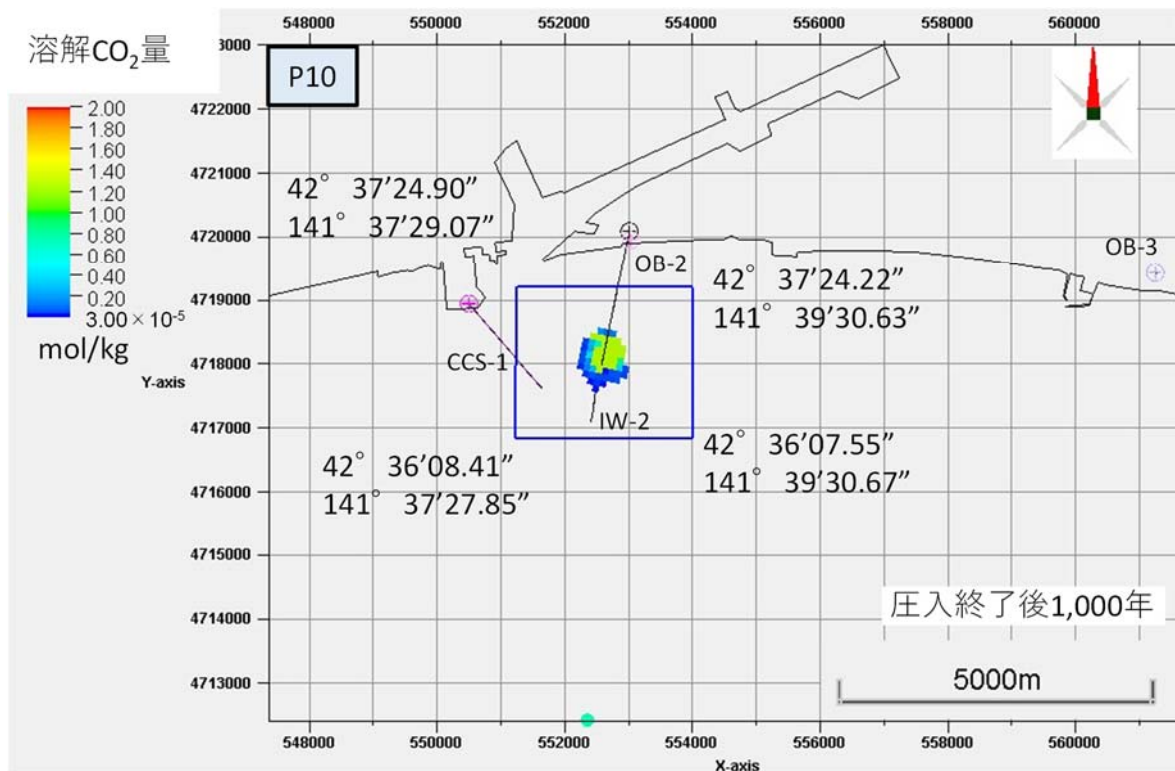


注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より圧入終了後1,000年後までに予想される最大のCO₂飽和度分布範囲を示す。

第 4.5-40 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 4.5-41 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 4.5-42 図 萌別層砂岩層での CO₂ 分布範囲 (P10 モデル溶解 CO₂ 量分布)

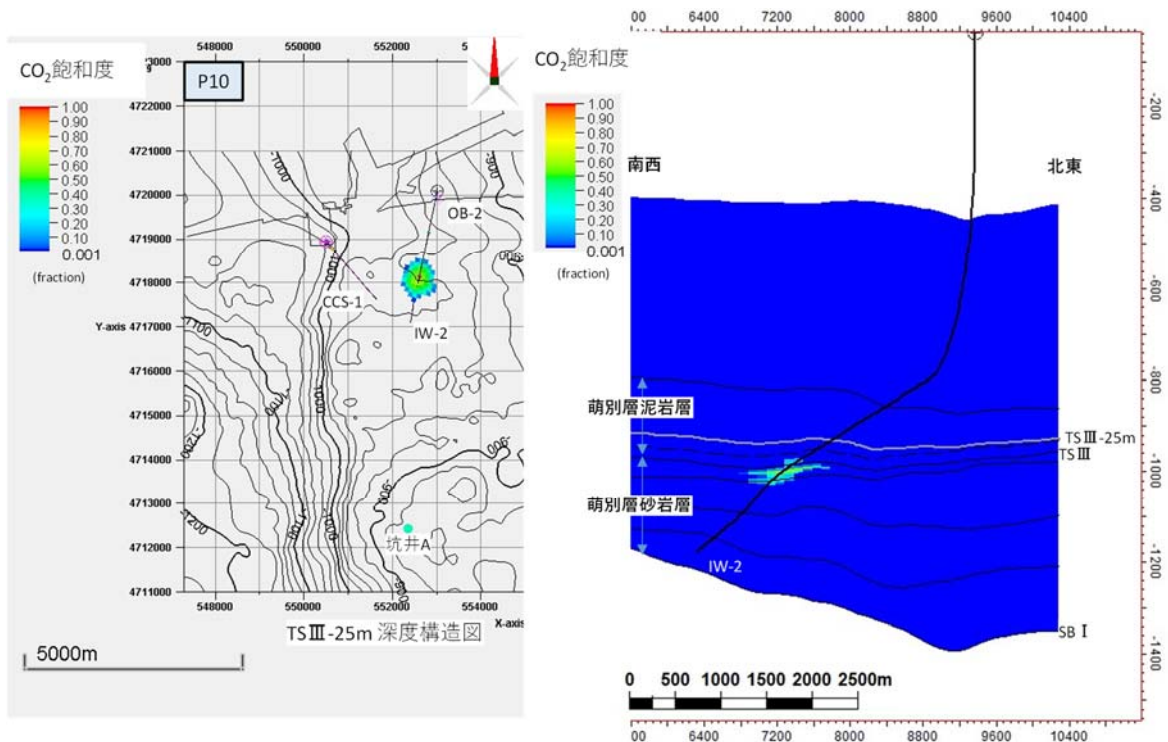
第 4.5-15 表 海底下廃棄した CO₂ の平面的な分布範囲 (萌別層砂岩層)

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。

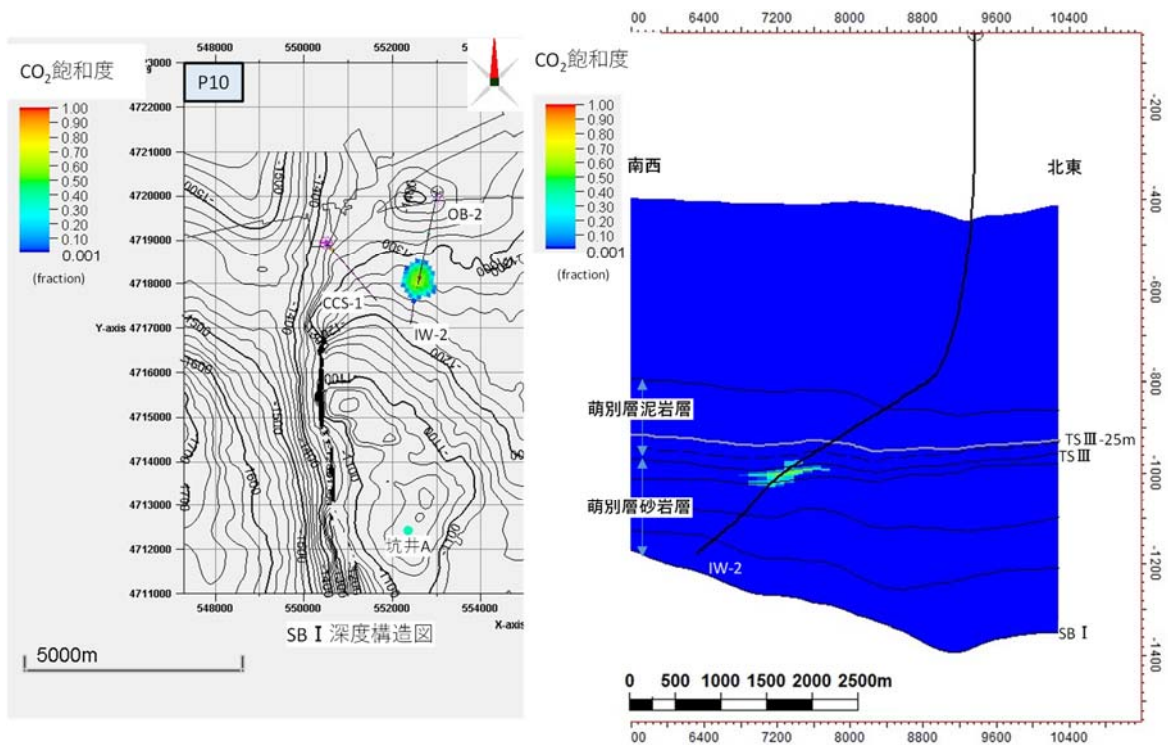
④ 圧入した CO₂ の垂直的な分布範囲

上記で検討した平面的な CO₂ の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影して、CO₂ の垂直的な分布範囲を推定した (第 4.5-43~第 4.5-46 図)。推定結果を、第 4.5-16 表に示す。



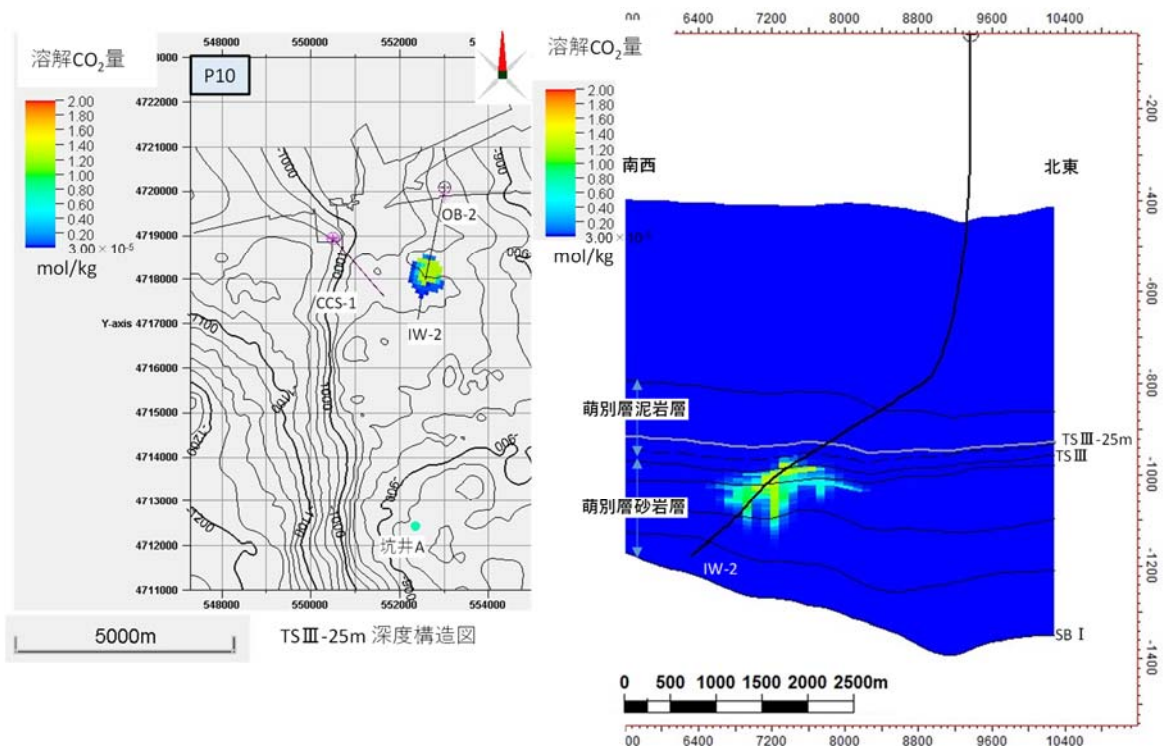
注:1. 断面図(右図)より, CO₂飽和度の上昇は, TSIIIよりも25mほど上位まで認められるため, TSIIIよりも25m浅い深度で構造図を作成し, CO₂分布が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時のCO₂分布状況を投影した。
2. 最も浅い深度で, 海面下950m程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-43 図 萌別層砂岩層での CO₂ の分布範囲の上限 (CO₂ 飽和度)



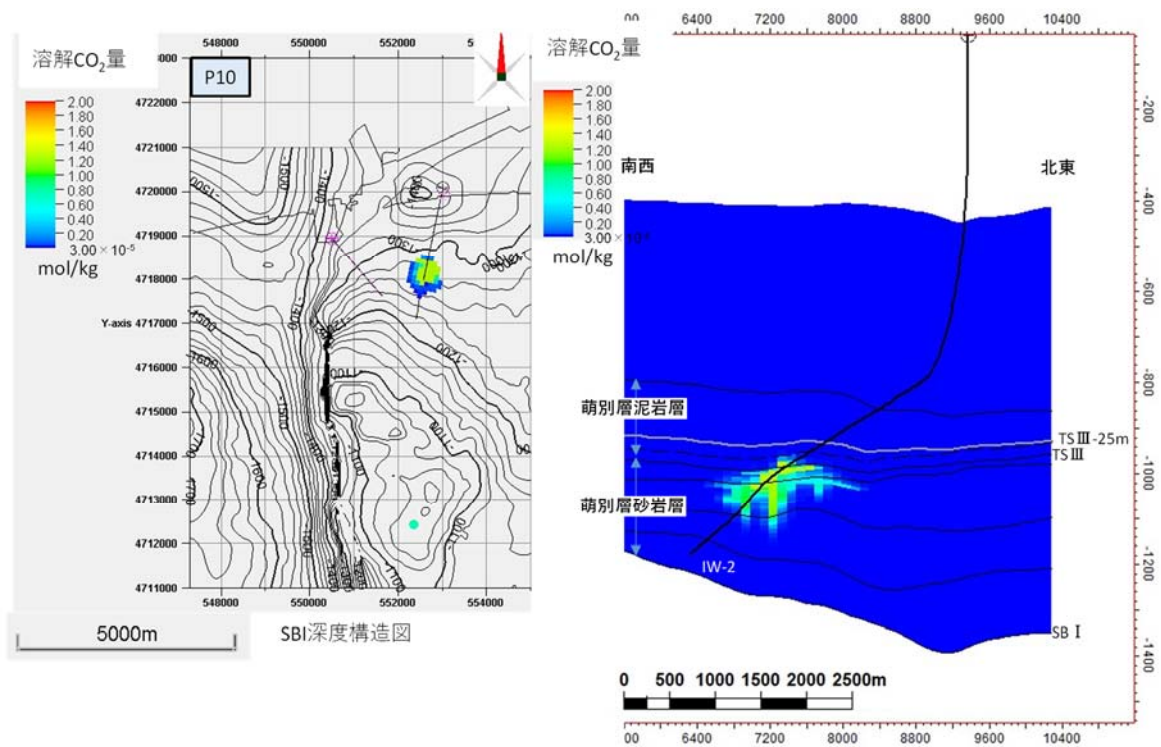
注: 1. CO₂分布域 (CO₂飽和度) を, 萌別層砂岩層下限 (SB I) 構造図に投影した。
2. CO₂分布 (CO₂飽和度) が最も広範囲に及ぶと予想される圧入終了時のCO₂分布状況 (CO₂飽和度) を投影した。
3. 海面下1,280m程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-44 図 萌別層砂岩層での CO₂ の分布範囲の下限 (CO₂ 飽和度)



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

第 4.5-45 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 4.5-46 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

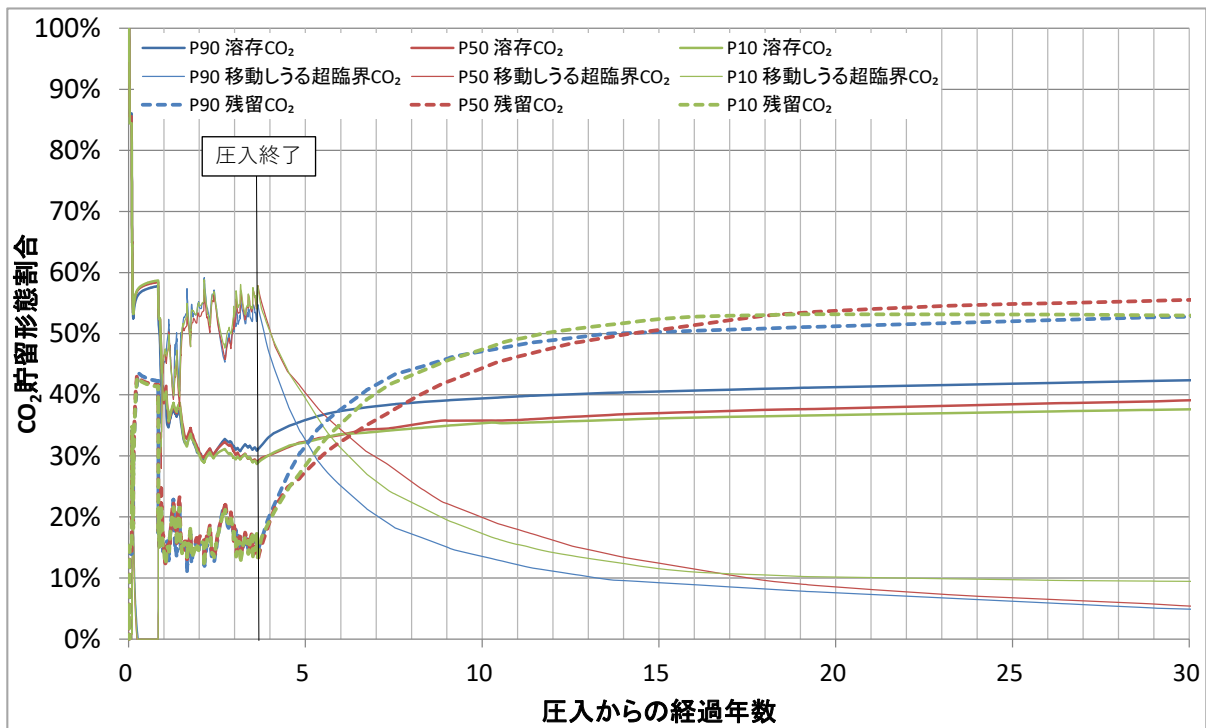
注：各モデルにおいて推定される CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の垂直的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

⑤ CO₂の貯留形態ごとの割合

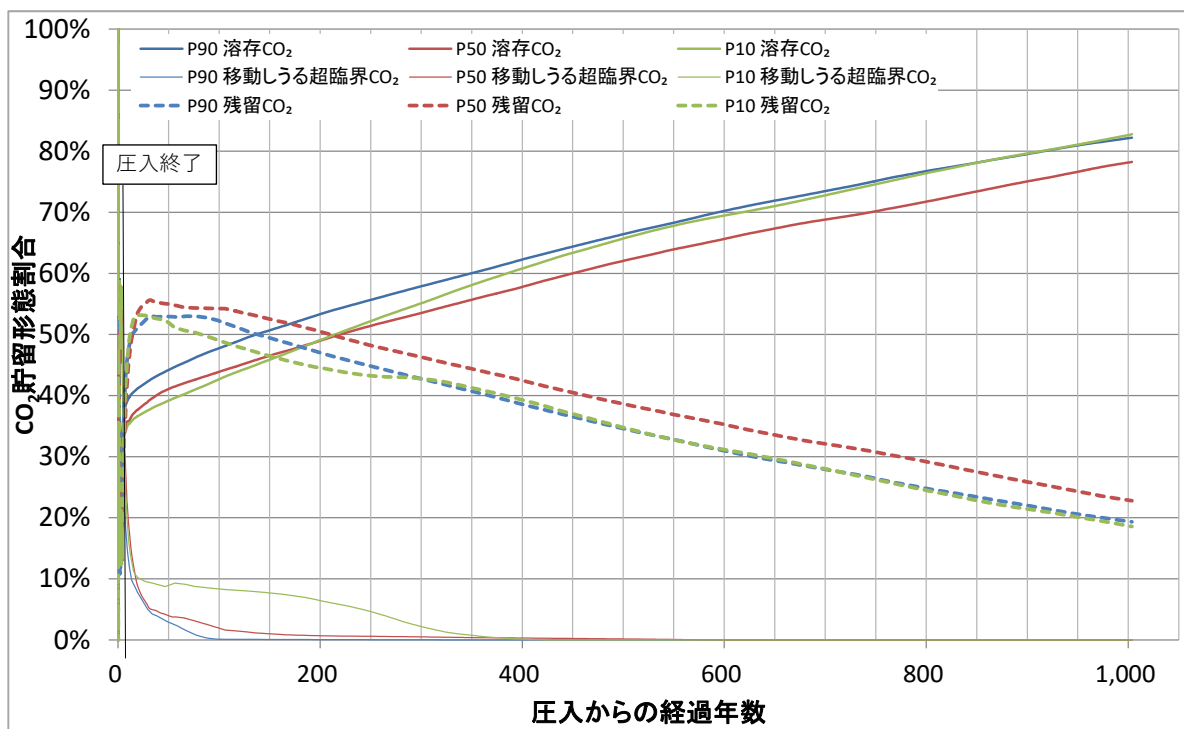
貯留 CO₂ の 3 つの貯留形態を移動しうる超臨界 CO₂、深部塩水層に溶解した溶存 CO₂ および孔隙に残留とラップされた残留 CO₂ と表現し、P10、P50、P90 モデルの貯留形態の割合の経時変化を、シミュレーションにより精査した（第 4.5-47 図および第 4.5-48 図）。P10、P50、P90 モデルのいずれもが類似した挙動を示す。

圧入停止後に、残留トラップされる CO₂ の割合が急速に増加し、溶存トラップの割合が急速に現状する。残留トラップは、孔隙に圧入された CO₂ が圧入停止後に周辺の深部塩水層に再置換される際に、ヒステリシスにより一部の CO₂ が置換されることなく残留する現象である。CO₂ の溶解量は CO₂ が移動する間は周辺の深部塩水層と触れることにより微増を続ける。圧入停止から 8 年後頃（圧入開始から 12 年後頃）までは、CO₂ が貯留層内の移動や周辺からの深部塩水層の流入で活発であると推定され、CO₂ 貯留割合の変化が急速に進行すると予測される（第 4.5-47 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。残留と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 4.5-47 図 CO₂貯留形態割合の変化（圧入開始から 30 年後まで）



第 4.5-48 図 CO₂貯留形態割合の変化

(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

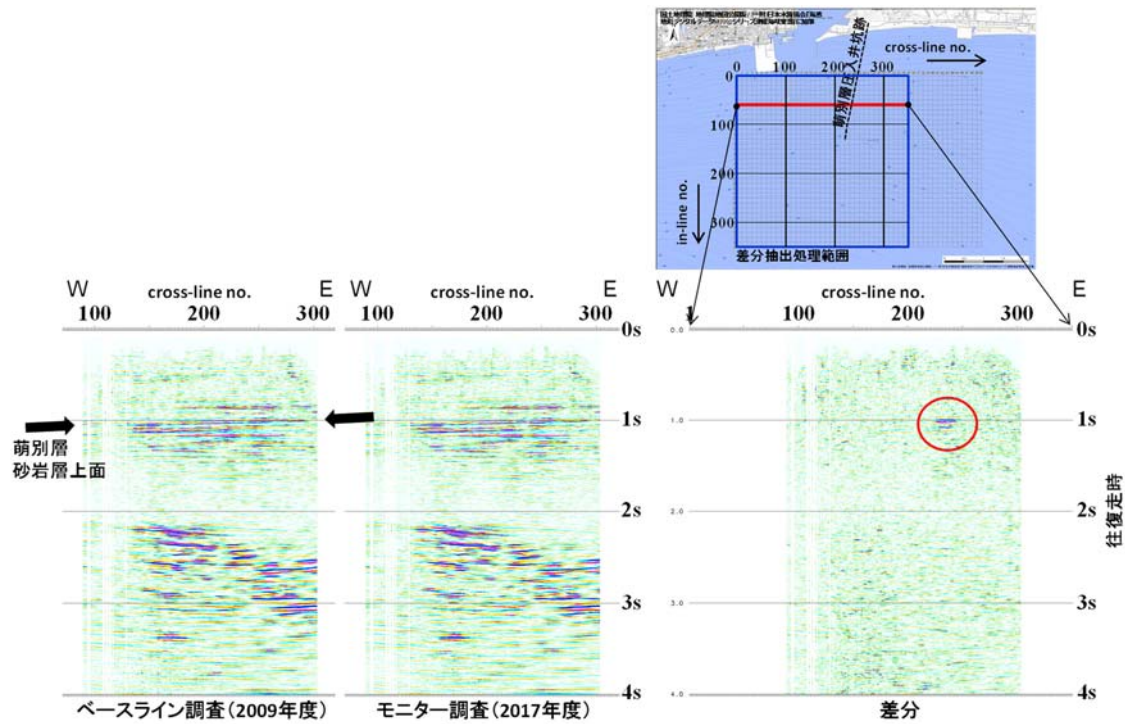
調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-17 表に示す。

第 4.5-17 表 2017 年度繰り返し 3D 探査の実施時期と圧入状況

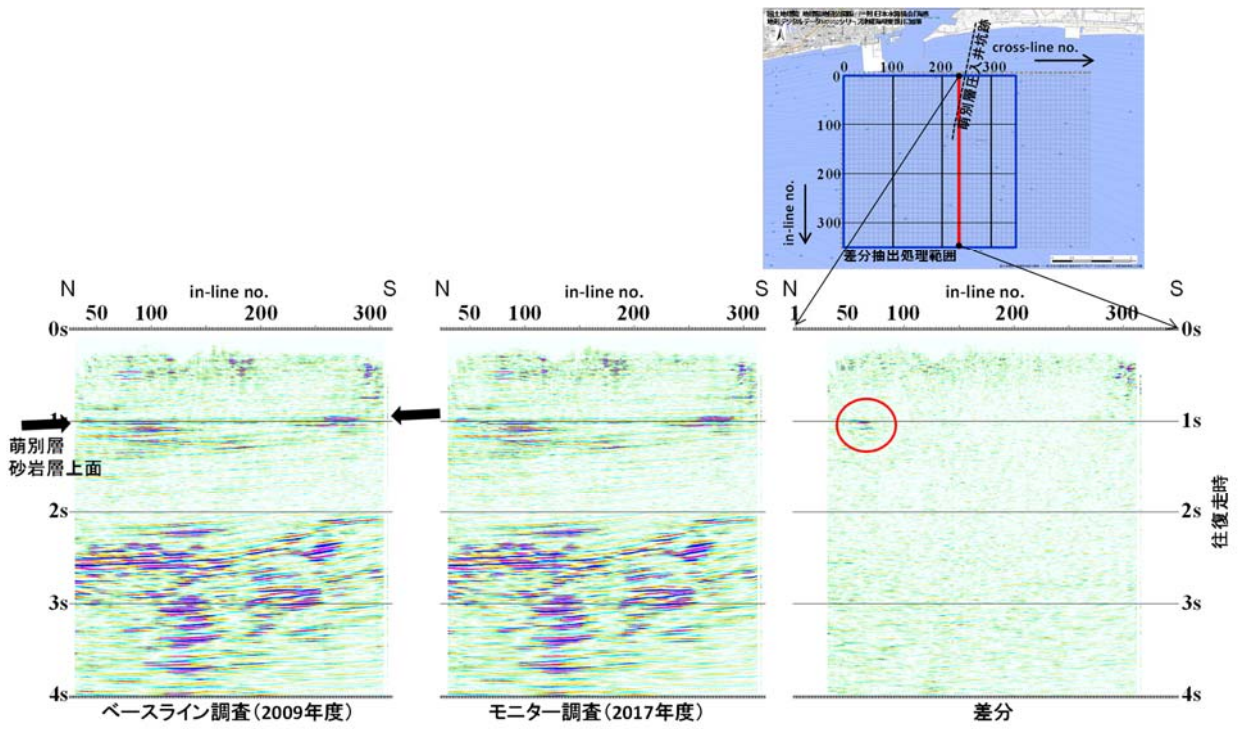
	観測開始日 2017 年 7 月 9 日	観測終了日 2017 年 8 月 17 日
萌別層貯留層 CO ₂ 圧入量	61,238.9t	69,070.0t
滝ノ上層貯留層 CO ₂ 圧入量	0t	0t

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 4.5-49 図および第 4.5-50 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 4.5-51 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本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。

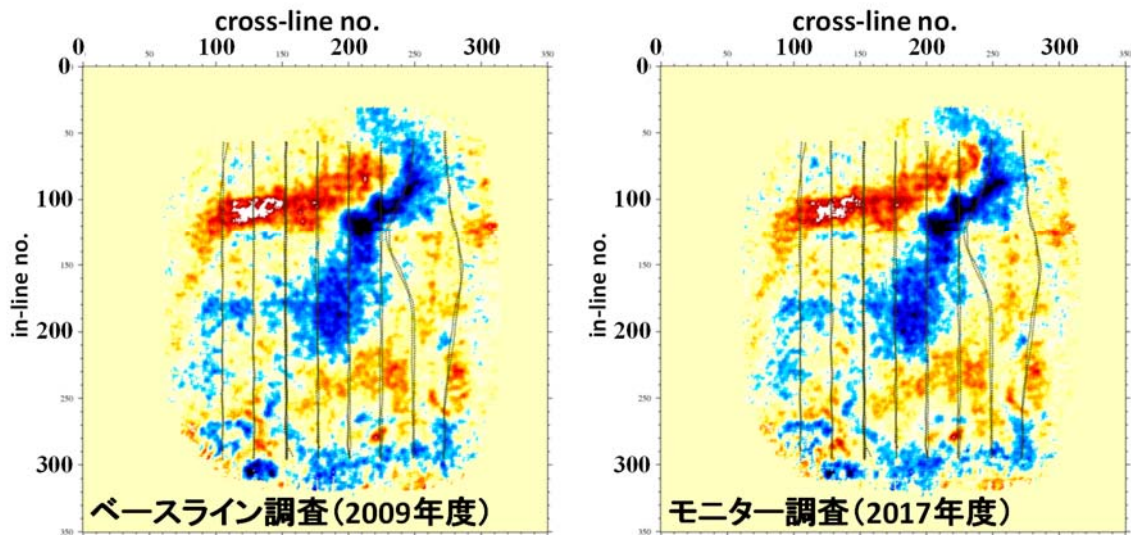
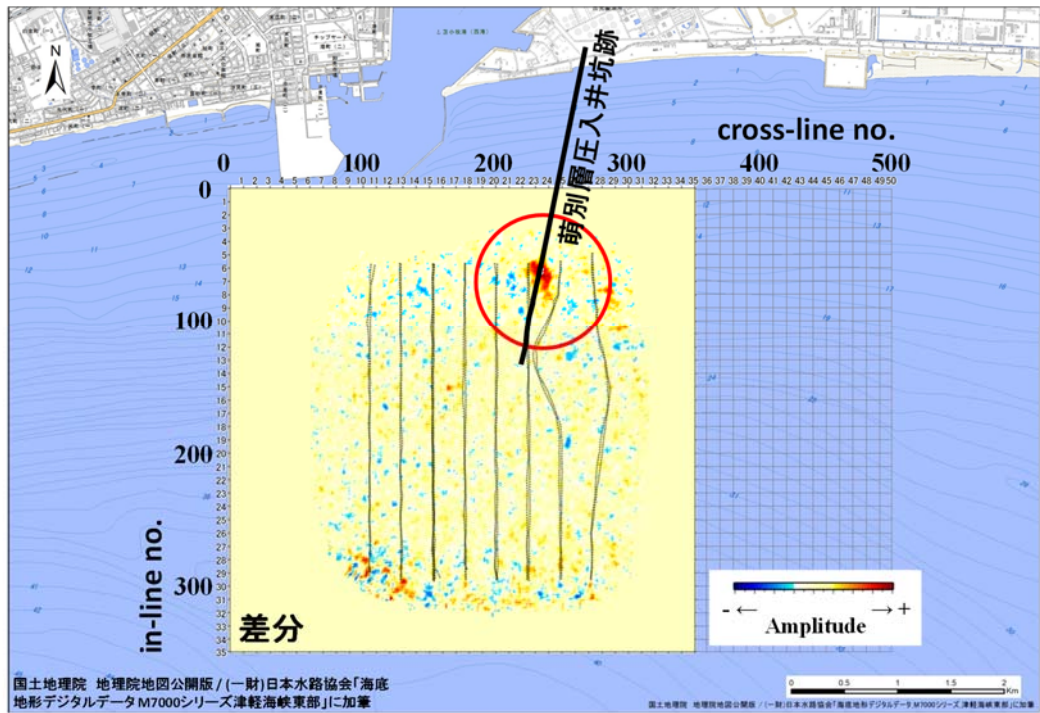
なお、時間スライス断面（第 4.5-51 図）の南西側縁辺部に認められる振幅異常は観測時のノイズによるものである。調査領域の南西側は苫小牧港西港出入口航路上にあたるため、南西側の受振記録には航行船舶ノイズが多く混入する。加えて、領域縁辺部は重合数が少ないために重合効果によるノイズ抑制効果が低下し、結果として領域南西側縁辺部ではベースライン調査、モニター調査ともに処理結果の S/N が低下する。このため、両者の差分である差分ボリュームでは、当該領域においてノイズに起因する見かけ上の振幅異常を生じている。



第 4.5-49 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）

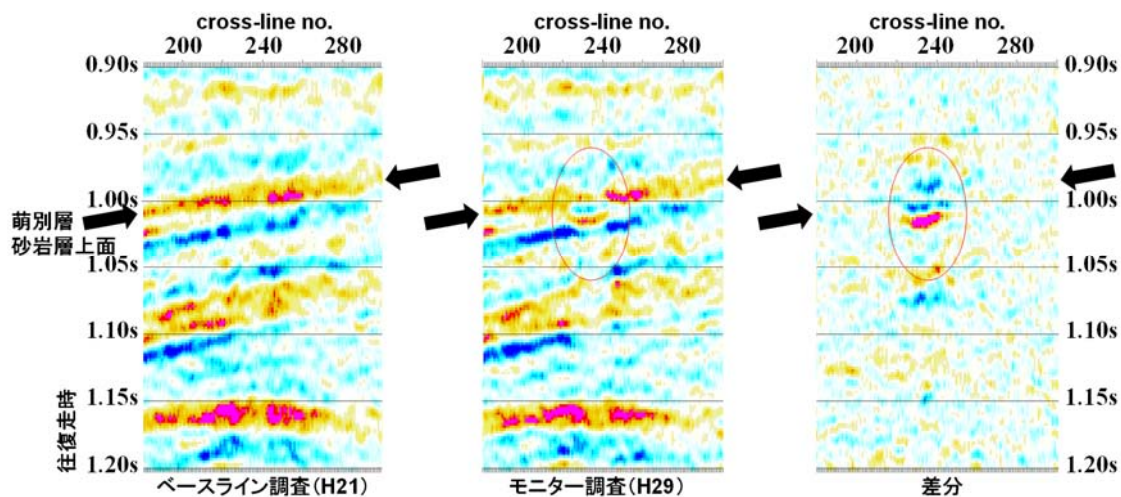


第 4.5-50 図 差分ボリューム鉛直時間断面例（南北方向断面：クロスライン 235）



第 4.5-51 図 差分ボリューム時間スライス断面例 (1,020ms)

第 4.5-52 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。



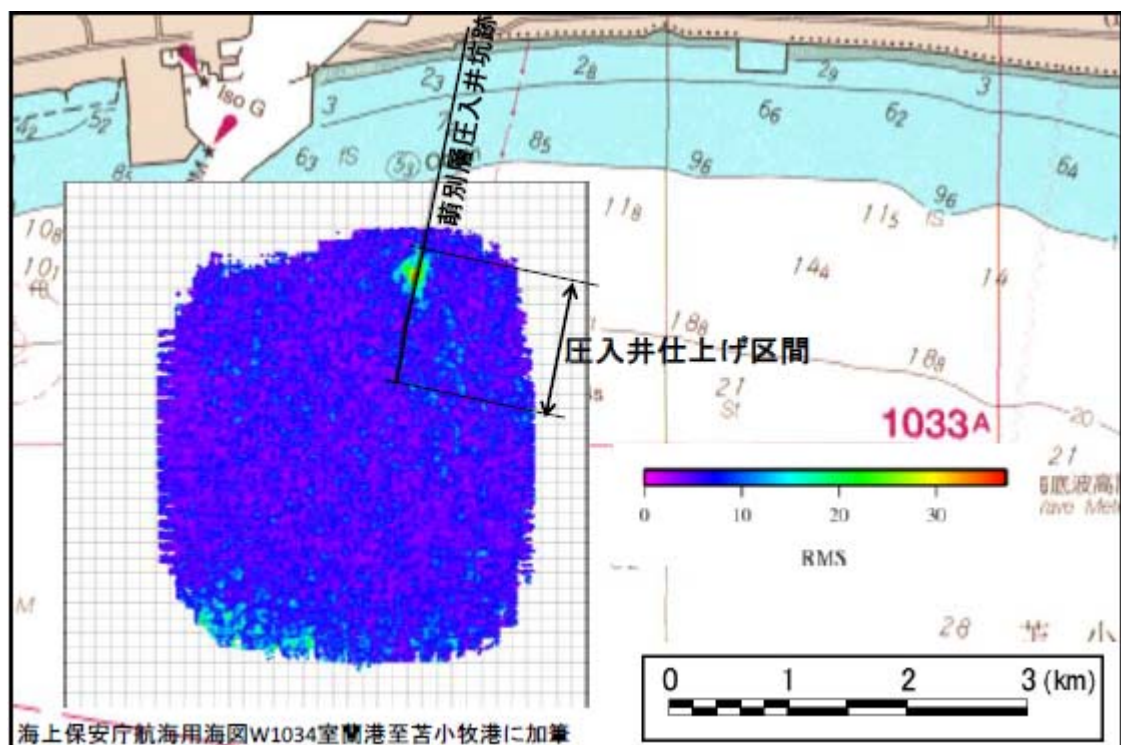
第 4.5-52 図 差分ボリューム鉛直時間断面拡大図（東西方向断面：インライン 60）

第 4.5-53 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 4.5-51 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 4.5-53 図 差分ボリュームの RMS 振幅水平分布（時間ウィンドウ：992ms～1,032ms）と同時期の CO₂ 飽和度分布予測

② 2018 年度繰り返し 3D 探査

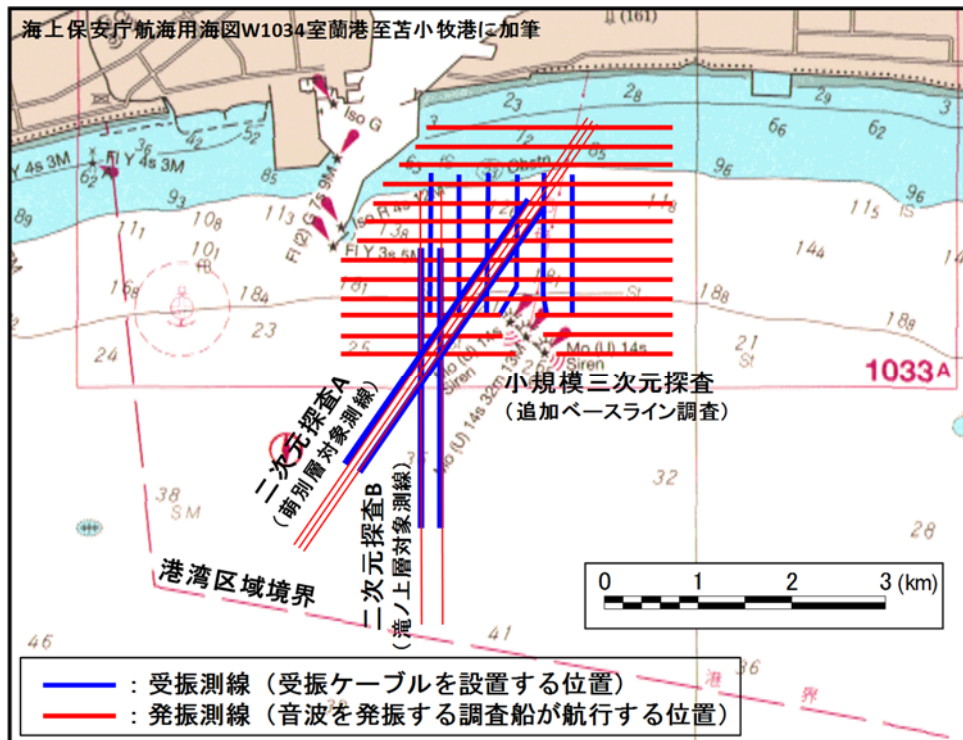
調査実施時期と圧入状況との関係を第 4.5-18 表に示す。

第 4.5-18 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 4.5-54 図)。

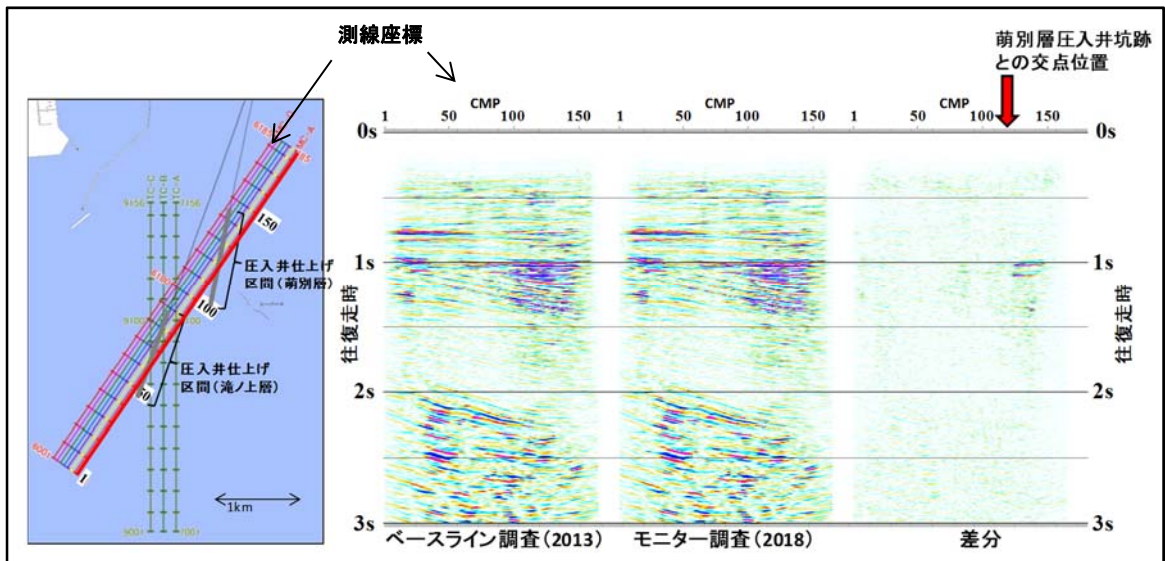


第 4.5-54 図 2018 年度二次元弾性波探査および小規模三次元弾性波探査 調査測線図

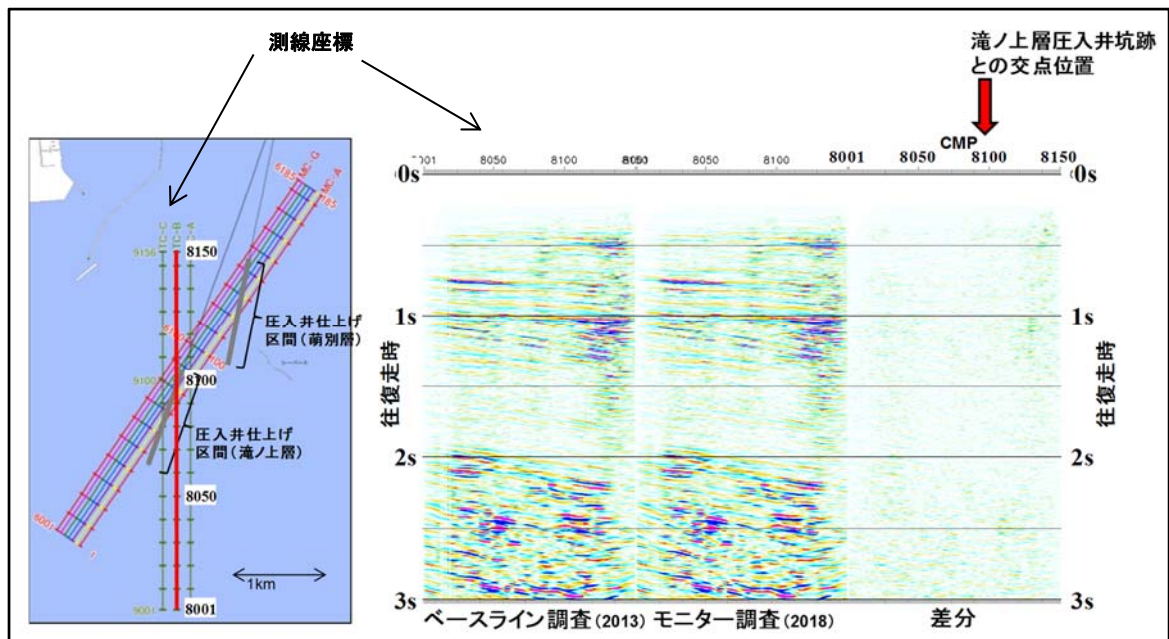
二次元弾性波探査の測線配置 A では計 7 本の重合測線上で、測線配置 B では計 3 本の重合測線上でそれぞれ二次元鉛直時間断面を得た。

第 4.5-55 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、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、本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 4.5-56 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、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、本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。本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。

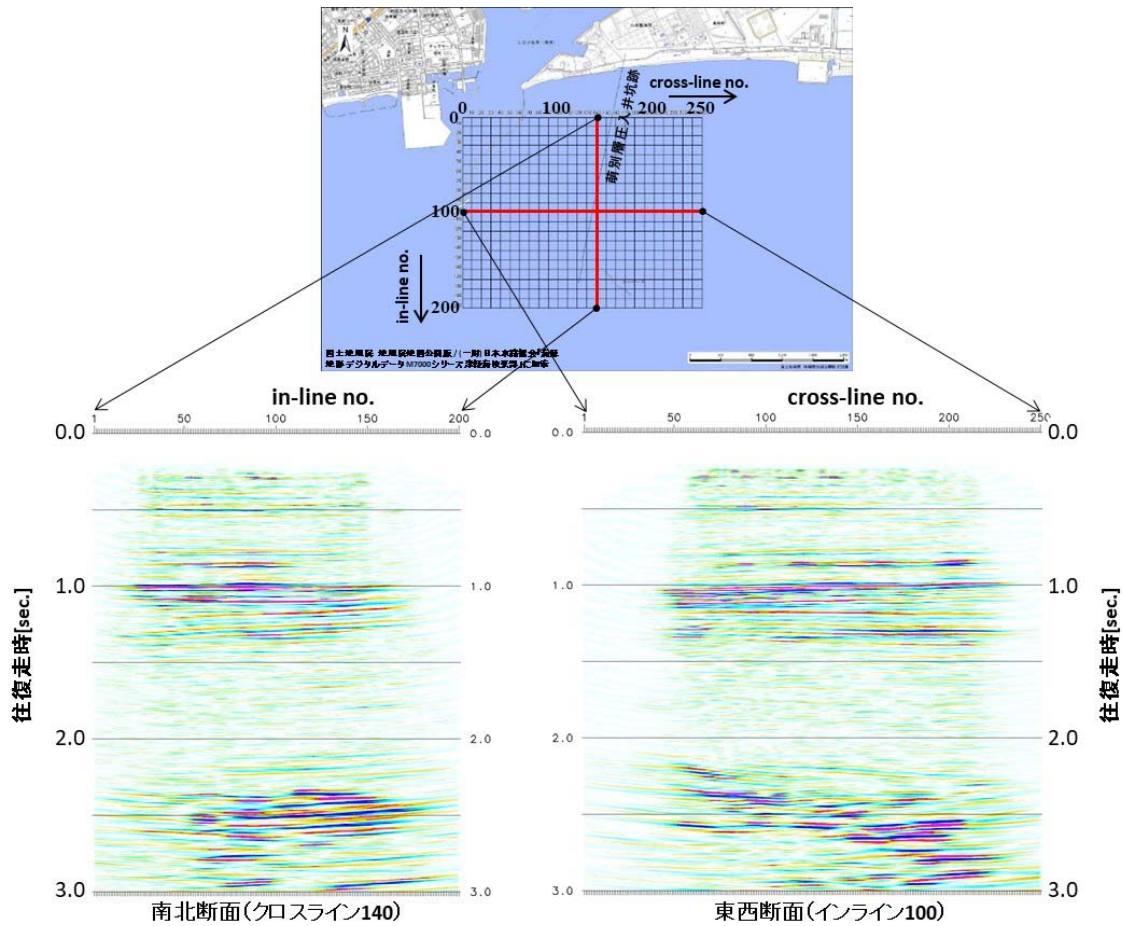


第 4.5-55 図 2018 年度二次元弾性波探査 鉛直断面例 (測線配置 A)



第 4.5-56 図 2018 年度二次元弾性波探査 鉛直断面例 (測線配置 B)

第 4.5-57 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。



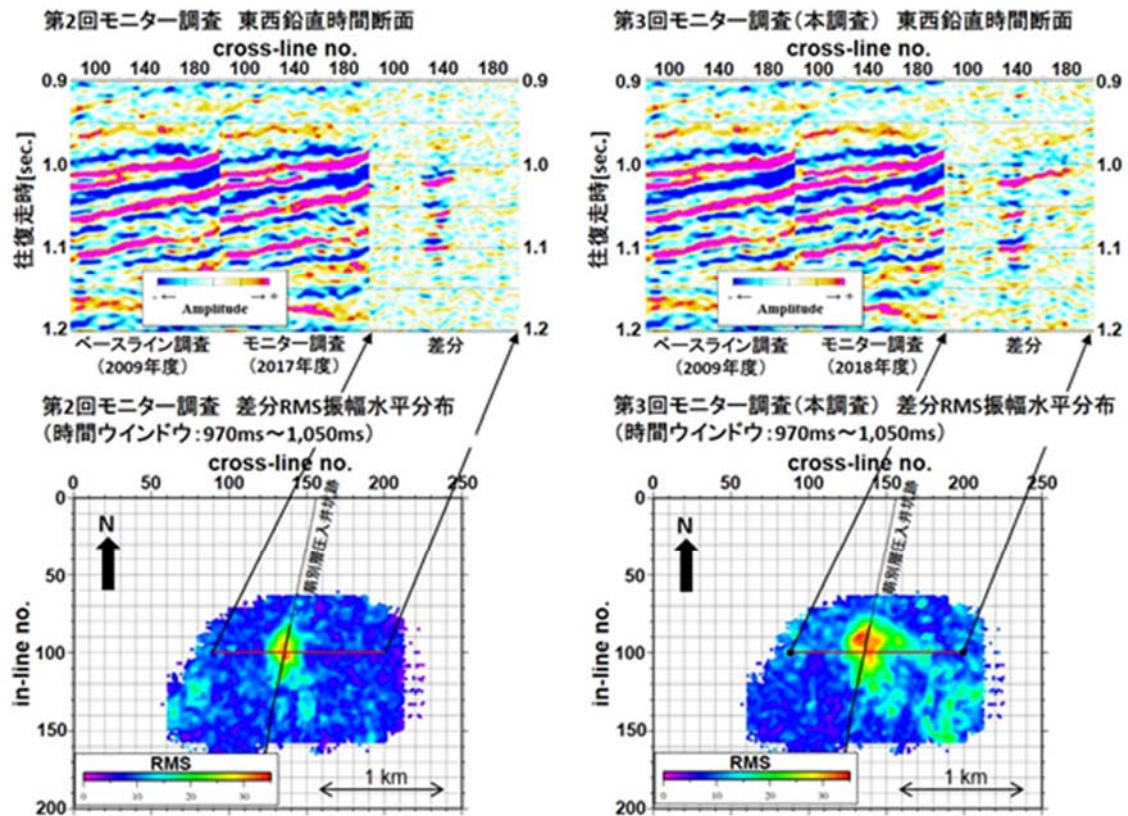
第 4.5-57 図 小規模三次元弾性波探査による鉛直時間断面例（東西断面および南北断面）

第 4.5-58 図に本調査記録と 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（本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、本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。

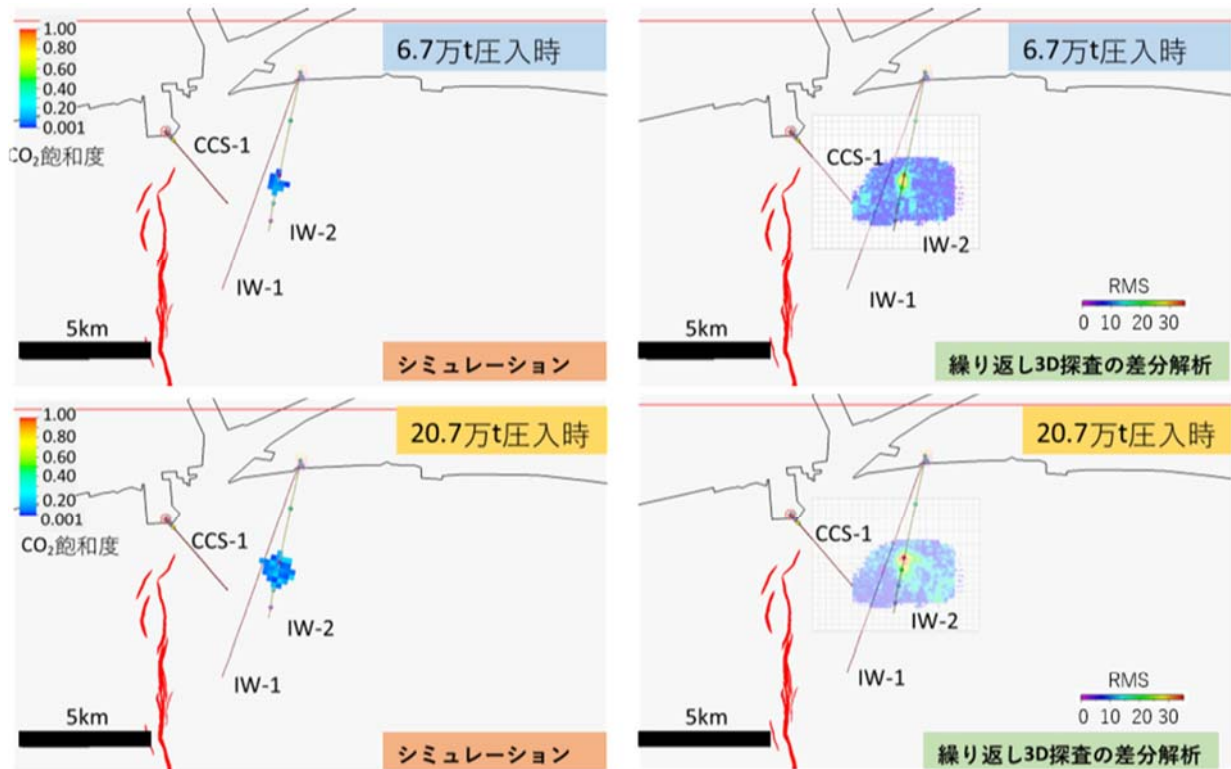


注) 2018 年度に実施した小規模三次元弾性波探査は、将来の圧入進展に伴って CO₂ 分布域が当初想定範囲の北側に拡大した場合に備えたベースライン調査を想定して実施したものであり、縁辺部における S/N の低下によって、得られた差分記録には圧入した CO₂ とは無関係のノイズが含まれる点に注意する必要がある。

第 4.5-58 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 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

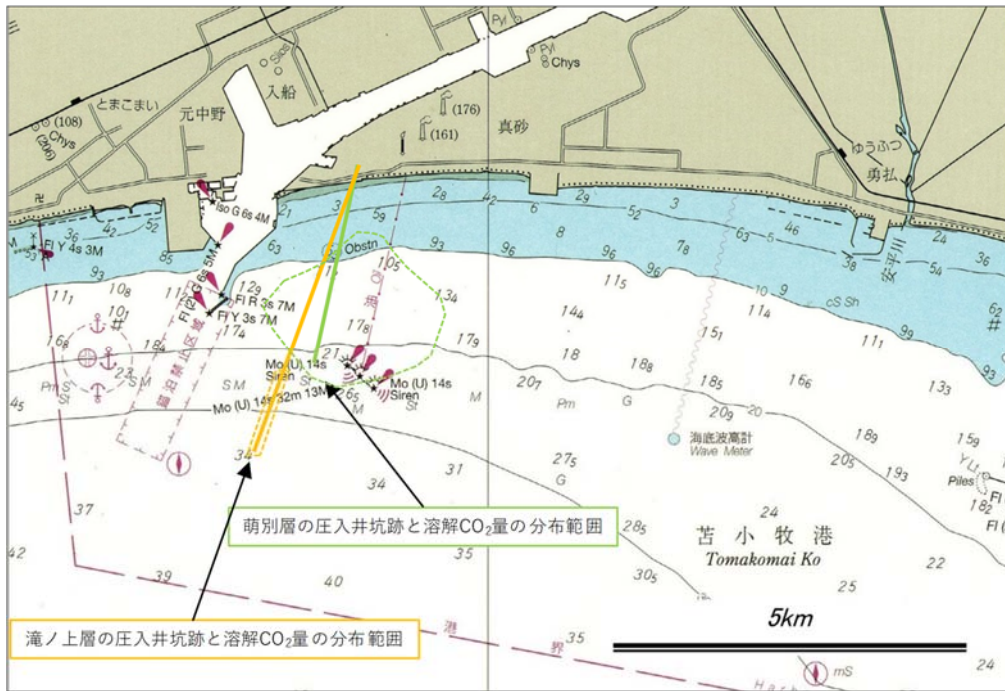
第 4.5-59 図に 2017 年度および 2018 年度に実施した 3D 繰り返し弾性波の差分解析結果と、弾性波探査記録を取得した時点の圧入量に対応した長期挙動予測シミュレーションによる CO₂ 飽和度分布予測の比較を示す。おおむね整合的な結果を得た。



第 4.5-59 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ごと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 H27 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を、萌別層砂岩層については CO₂ 圧入実績に基づいて作成したモデル（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 4.5-60 図）。



注：海上保安庁発行の海図（W1034）に加筆

第 4.5-60 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（冷湧水生態系、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：<http://www.env.go.jp/park/shikotsu/index.html>, 2019/10/23 アクセス）

[2] 『道内のラムサール条約登録湿地一覧』（北海道環境局生物多様性保全課ウェブサイト：<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/environ/wetland/ramsargaiyou.htm>, 2019/10/23 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：<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/kouen/hozen.htm>, 2019/10/23 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：http://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/shizen/shizenhogo/sizenkankyo/shinai_shizen/kakuhozenchiku.html, 2019/10/23 アクセス）

[5] 『2019年度 鳥獣保護区等位置図』（北海道ウェブサイト）
（<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/syuryo/ichizu.htm>, 2019/11/1 アクセス）

[6] 『苫小牧市環境白書 平成30年度版（平成29年度実績）』（苫小牧市環境衛生部環境保全課ウェブサイト）
（<http://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/files/00043700/00043786/20200220092152.pdf>, 2019/11/2 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：http://www.jcrs.jp/wp/?page_id=622, 2019/10/21 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

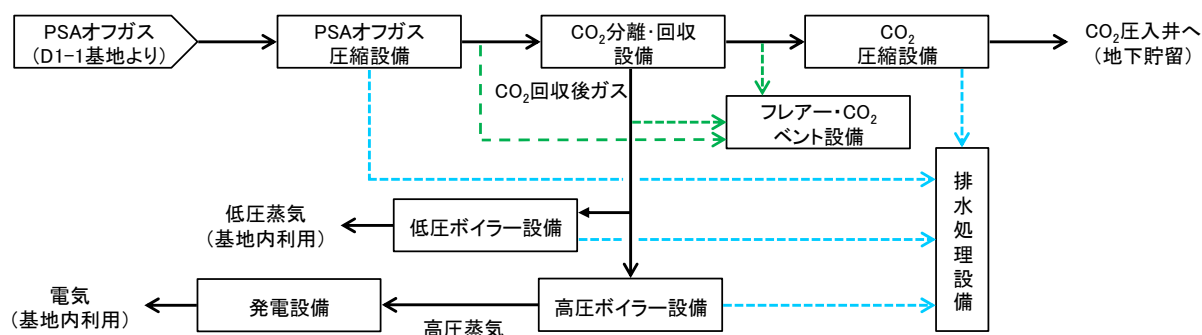
5.1 ガスの発生源から海底下廃棄をする位置までにおいて特定二酸化炭素ガスの回収及び輸送並びに圧入等に用いる設備及び機材等

(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。

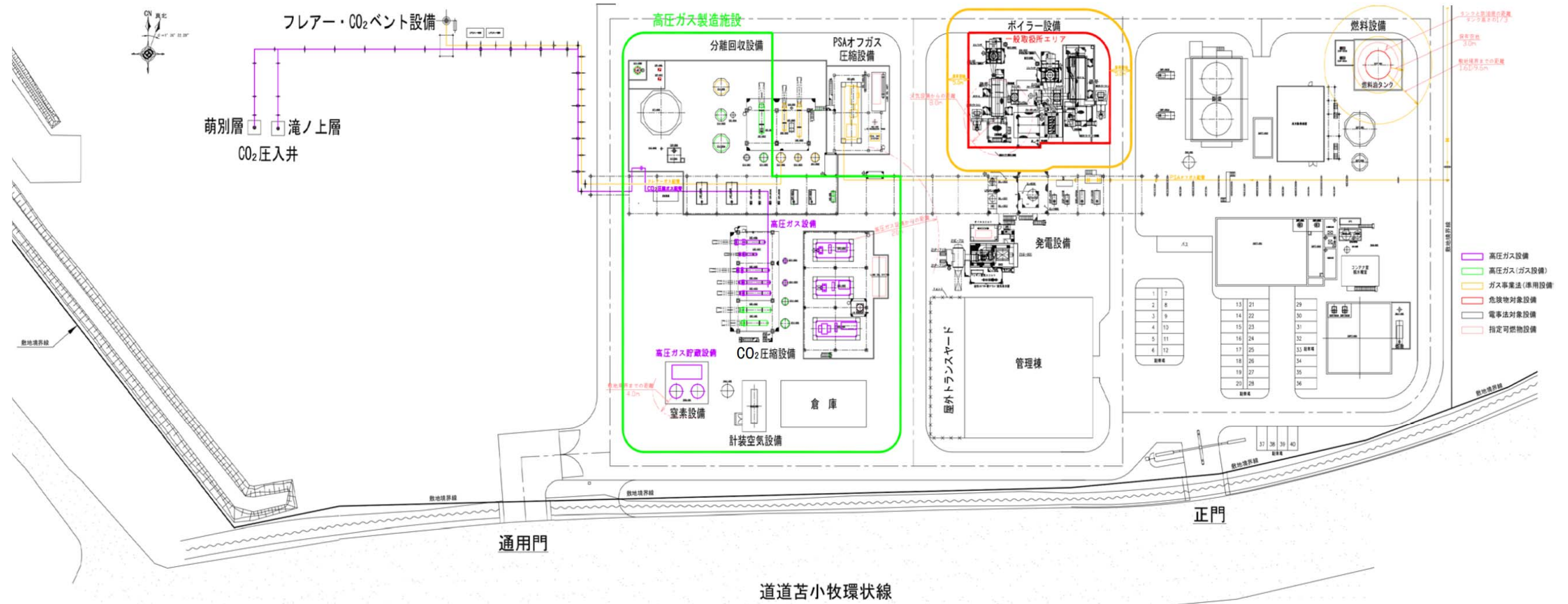
第 5.1-1 表 主要設備構成

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	
防消火設備	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

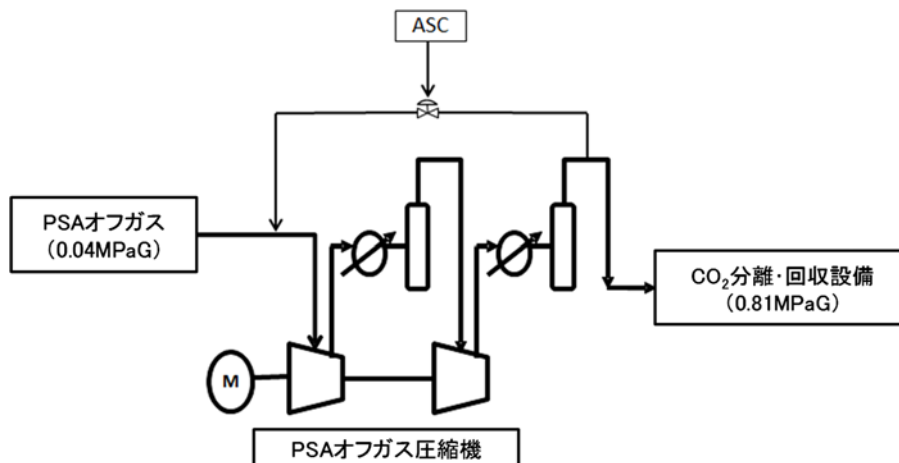
3) 代表 CO₂ 濃度ケース (代表組成ケース)

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）。

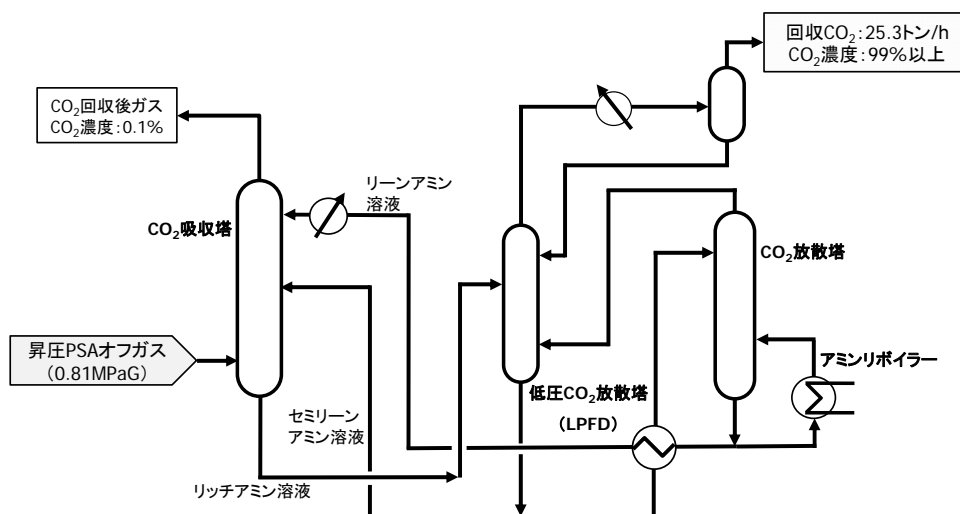
分離・回収プロセスには活性アミンを使用したOASEプロセス（ドイツBASF社のライセンス）の省エネルギー効果の高いプロセスフローを採用している（第 5.1-4 図）。このプロセスは、商品名OASEホワイト（第三級アミンを主成分とする水溶液）をアミン溶液として使用し、LPFDと2段吸収法で構成され、分離・回収エネルギー（アミンリボイラー熱量+アミン循環ポンプエネルギー量）を低減する。

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 (°C)	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 塔底のセミリーンアミン溶液 (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)。

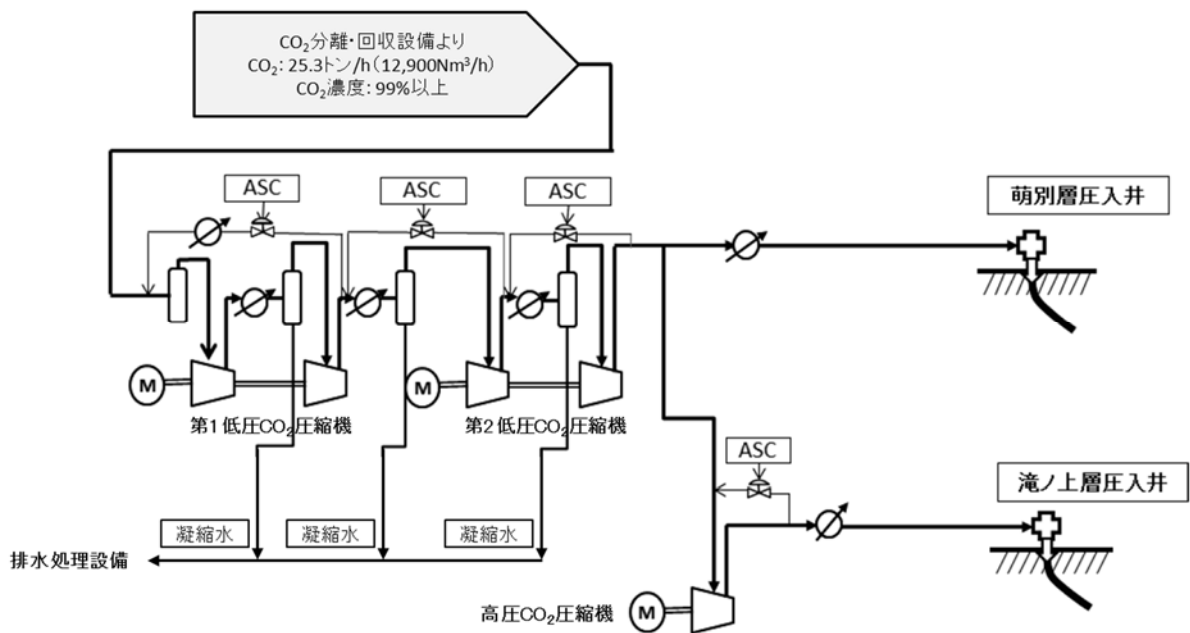
分離・回収した特定二酸化炭素ガスは、パイプラインを通じ、隣接する CO₂ 圧入設備へ送気される。

(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 低圧 CO₂ 圧縮機、第 2 低圧 CO₂ 圧縮機および高圧 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

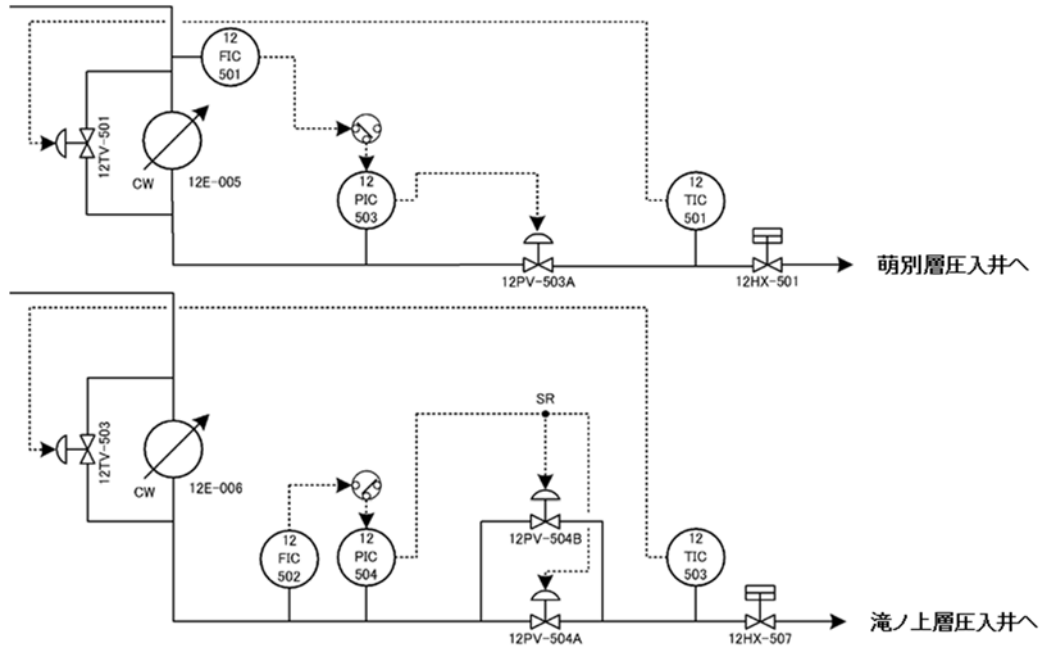
圧縮機は、将来の CCS の実用化を想定し大規模化に対応できるよう遠心式を採用した。また、圧縮機の各段の出口圧力が一定となるようスピルバック（圧縮機の各段の吐出側の CO₂ の一部を吸い込み側にリサイクルさせる）により制御する。

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 低圧 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 低圧 CO₂ 圧縮機で昇圧した CO₂ ガスをさらに高圧 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 低圧 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。