

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廃棄をされていると推定される特定二酸化炭素の数量	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廃棄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) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成 (圧入井掘削前)	17
a. 岩相分布・性状分布の推定	17
b. 構造モデルの作成	18
c. 属性モデルの作成	22
イ) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成 (圧入井掘削結果を踏まえた更新モデル)	23
a. 滝ノ上層圧入井掘削結果	23
b. 掘削時のブラインによる圧入テスト等の貯留層に係るテスト結果とその見直し	24
i) 掘削時の貯留層に係るテスト	24
ii) 貯留層に係るテスト結果の見直し	25
c. 岩相分布・性状分布推定の更新	25
d. 構造モデルの更新	29
e. 属性モデルの更新	29

② CO ₂ 挙動予測シミュレーション	30
ア) 滝ノ上層 T1 部層における CO ₂ 挙動予測（圧入井掘削前）	30
a. 概要	30
b. パラメータ	31
c. CO ₂ 圧入時の挙動	32
イ) 滝ノ上層 T1 部層における CO ₂ 挙動予測（圧入井掘削結果を踏まえた予測）	33
a. 概要	33
b. パラメータ	35
③ 圧入した CO ₂ の平面的な分布範囲	36
④ 圧入した CO ₂ の垂直的な分布範囲	39
(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	41
① 検討に使用した地質モデル	41
ア) 平成 23 年度地質モデルの作成	41
a. 岩相分布・性状分布の推定	41
b. 構造モデルの作成	41
c. 属性モデルの作成	44
イ) 平成 24 年度地質モデルの作成	45
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	46
ア) 平成 23 年度シミュレーション	46
a. 概要	46
b. パラメータ	46
c. ケーススタディ	47
イ) 平成 24 年度シミュレーション	49
③ 圧入した CO ₂ の平面的な分布範囲	50
④ 圧入した CO ₂ の垂直的な分布範囲	52
⑤ 遮蔽性能検討	60
⑥ CO ₂ の貯留形態ごとの割合	66
(3) 海域での位置	67
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	69
5. 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の方法	70
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	70
(1) 概要	70
(2) PSA オフガス圧縮設備	72
(3) CO ₂ 分離・回収設備	73
(4) CO ₂ 圧縮設備	75
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	77

(1) 基本圧入計画	77
(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	78
① 圧入圧力	79
② 圧入速度	80
③ 圧入温度	83
(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速度並びに圧入時の温度等の圧入条件	83
① 圧入圧力	83
② 圧入速度	85
③ 圧入温度	86
(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	88
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	91
(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	91
(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	93
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	97
5.5 特定二酸化炭素ガスの圧入井の封鎖方法	101
5.6 他の法令の遵守状況	102
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	105
6.1 海洋環境の保全上の障害が生じる恐れについて	105
6.2 海洋環境の保全上の障害が生じる恐れの見通しについて	108
6.3 関連法規に基づく保安計画等について	110
6.4 異常発生時の対応について	111

1. 海底下廃棄実施期間

平成 28 年 4 月 1 日から平成 33 年 3 月 31 日までの 5 年間。

うち、特定二酸化炭素ガスの圧入期間は、滝ノ上層：平成 29 年 1 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日、萌別層：平成 28 年 4 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日。

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、圧カスイング吸着（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）。

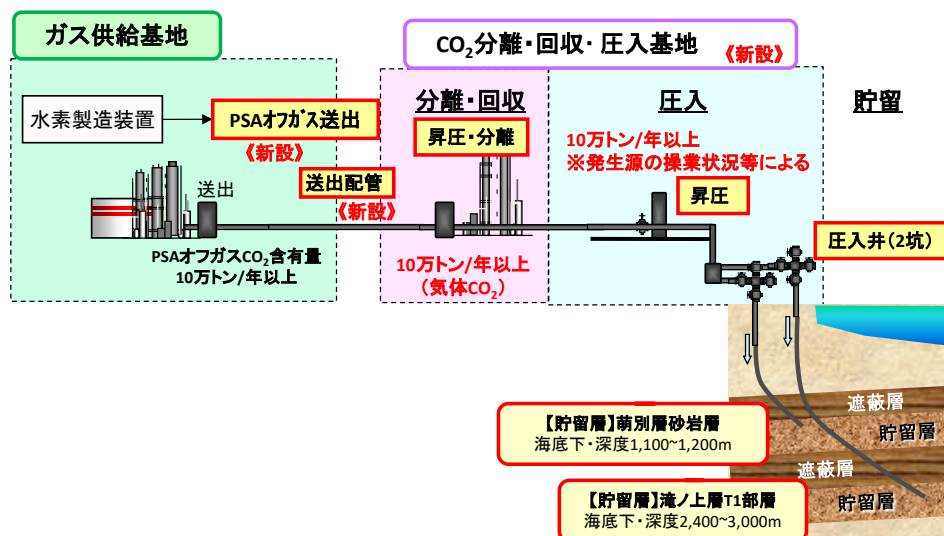
本計画では、このPSA オフガスから分離・回収したCO₂ガスを特定二酸化炭素ガスとする予定である。

第2.1-1表 PSA オフガスの概略組成

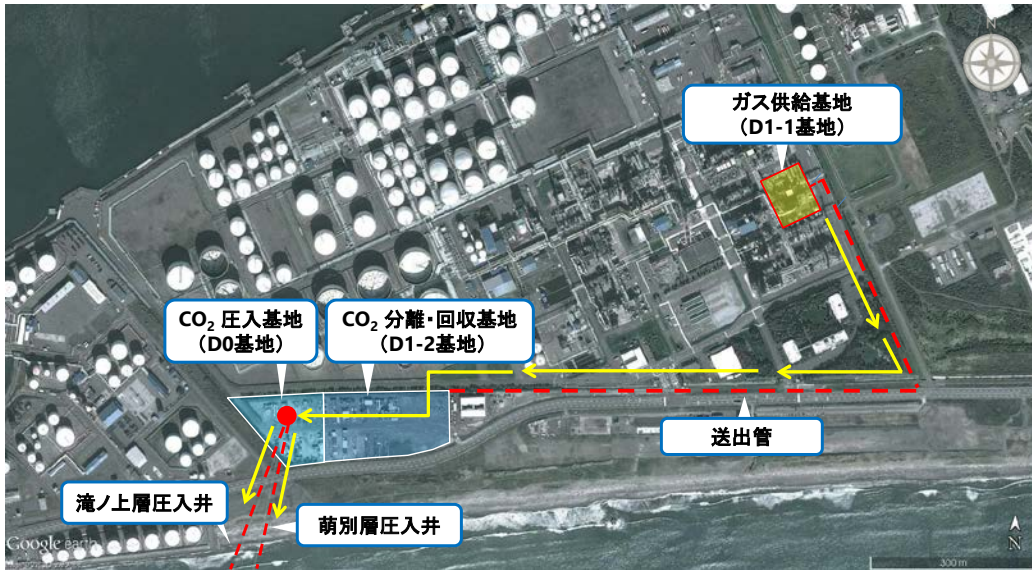
	ガス組成（体積百分率：%）
CO ₂	51.6
CO	2.3
H ₂	38.8
CH ₄	6.6
H ₂ O	0.7
合計	100.0

(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

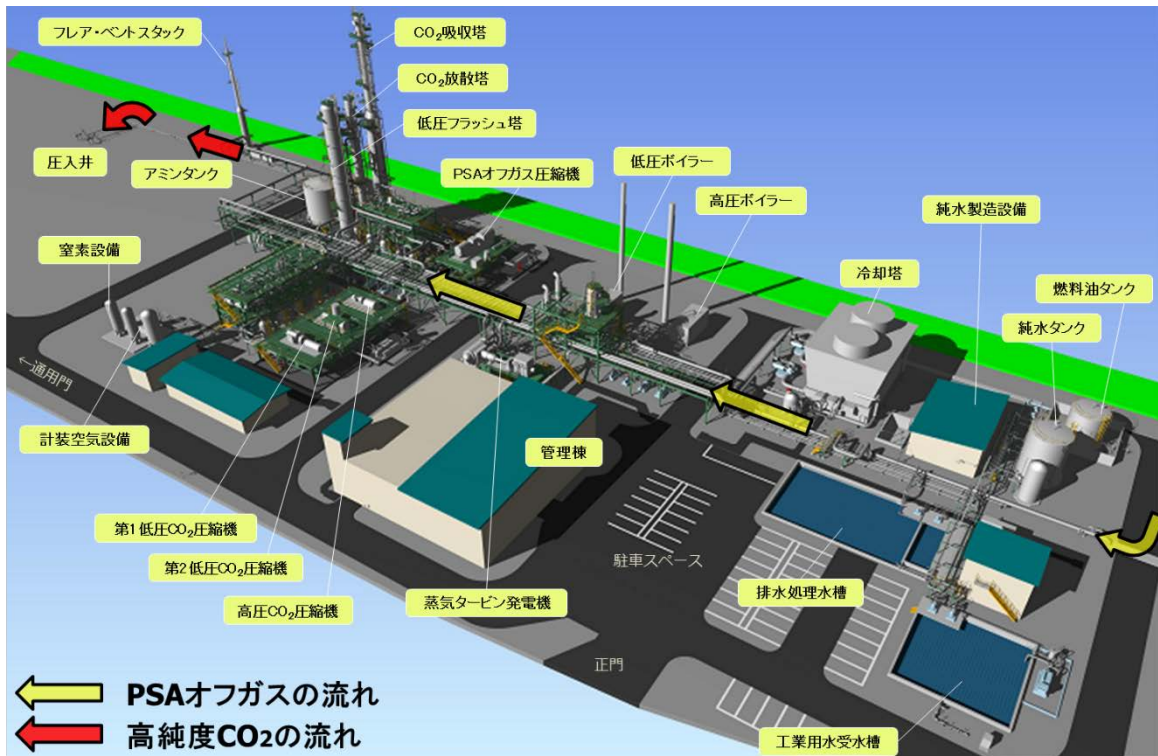


©Google © 2013 ZENRIN Image © 2013 DigitalGlobe

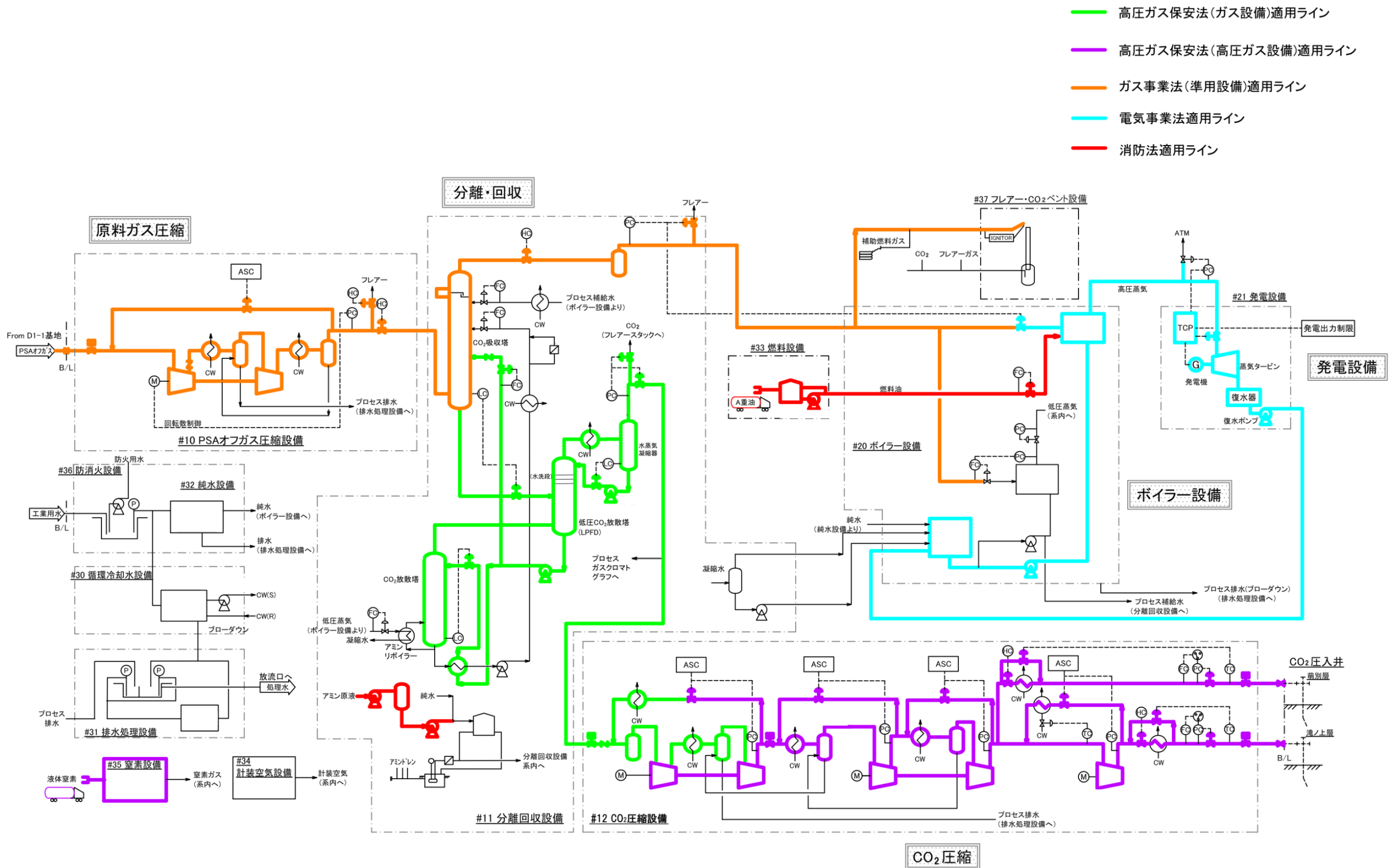
第 2. 1-2 図 本計画設備の位置関係

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。

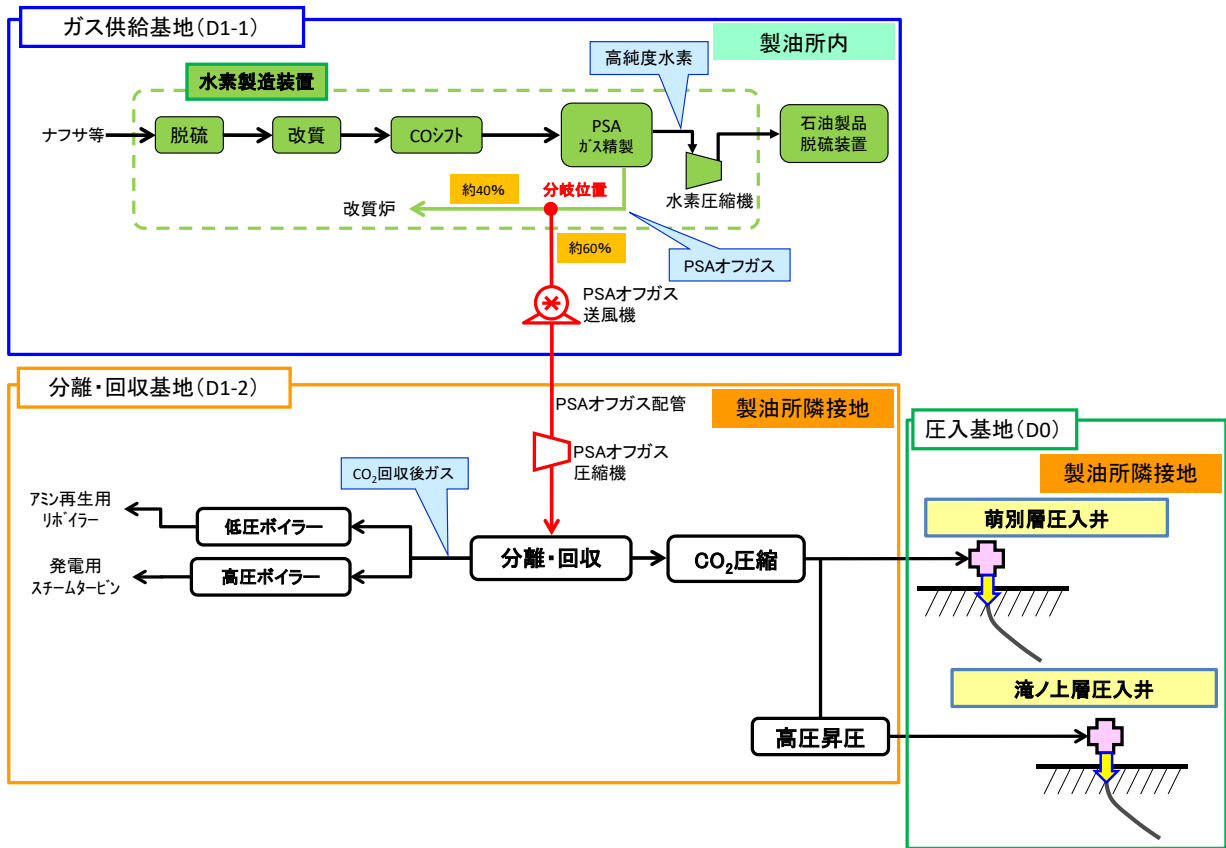
PSA オフガスは、水素製造装置に付帯する PSA 設備下流配管から分岐し、PSA オフガスの一部（約 60%）を分流して送風機により送出することで行う。PSA オフガスの送出先は、D1-2 基地とする。



第 2. 1-3 図 CO₂ 分離・回収・圧入基地鳥瞰図

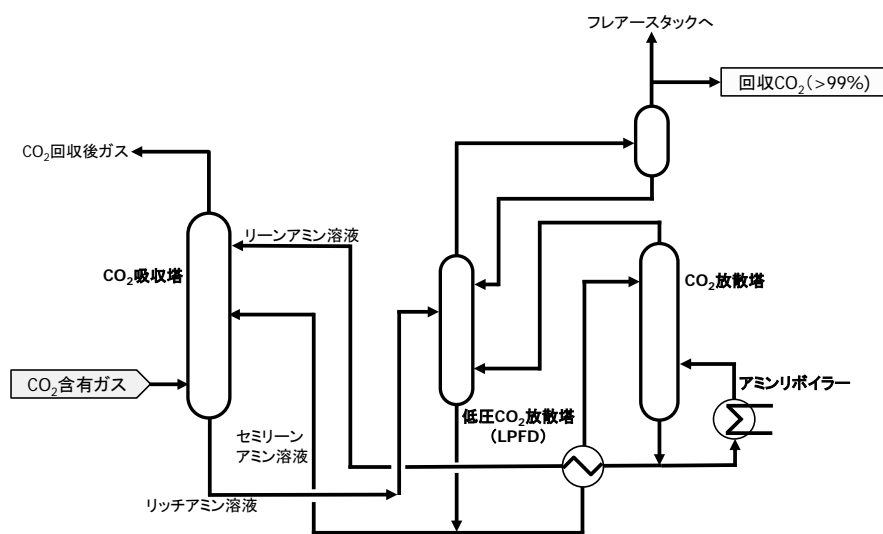


第 2.1-4 図 CO₂分離・回収・圧入基地プロセスフロー



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、「特定二酸化炭素ガスに含まれる二酸化炭素の濃度の測定の方法を定める省令（平成19年9月19日環境省令第22号）」に挙げられている物質のみであり、ガスクロマトグラフの分析条件は省令に従う。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。なお，圧入開始前に CO₂放散塔頂より回収した高純度 CO₂ガスの組成分析を行い，上記推算値に近似していることの確認を行う。なお，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（添付書類-1 の 1.2 節参照）。

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廃棄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、滝ノ上層に海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの数量は 750 トン、また萌別層に海底下廃棄しようとする特定二酸化炭素ガスの数量は 60 万トンである。

滝ノ上層の期間内推定圧入可能量は、圧入井掘削時の取得データをベースに行った平成 27 年度 CO₂挙動予測シミュレーションにおいて、3 年間で 1,000 トンの圧入が可能であることを確認しており、3 年間の値を 27 か月の期間に換算し、750 トンとする。

なお、CO₂挙動予測シミュレーションは、圧入実績から得られるデータによる見直しを随時行うが、それに合わせて滝ノ上層の期間内推定圧入可能量も見直す。この見直しにより滝ノ上層の期間内推定圧入可能量を変更することが適切と考えられる場合は、海洋汚染防止法に基づく変更許可に係る所要の手続きに従い、滝ノ上層の期間内推定圧入可能量と滝ノ上層の期間内計画圧入量の変更を申請する。

萌別層の期間内推定圧入可能量は、平成 23 年度 CO₂挙動予測シミュレーションにおいて年間 25 万トン、3 年間で 75 万トンの圧入が可能であることを確認したこと、さらにそれを上回る量の圧入が可能であることが期待できるデータを圧入井掘削時に取得したことより、75 万トンとする。

萌別層の期間内計画圧入量は、原料ガスの供給量や二酸化炭素の分離・回収設備の能力の制約から、20 万トン/年、3 年間で 60 万トンとする。

収容量は、添付書類-2 の第 4.2 節において算出している。その結果、滝ノ上層の収容量は 53 万トン以上、萌別層の収容量は 1,725 万トン以上である。

したがって、滝ノ上層および萌別層それぞれの貯留層について、「収容量 \geq 期間内推定圧入可能量 \geq 期間内計画圧入量」の関係が成立する。

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廃棄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廃棄をされていると推定される特定二酸化炭素ガスは、0 トン。

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（ $42^{\circ} 37' 28'' E : 141^{\circ} 35' 21'' E$, $42^{\circ} 34' 49'' E : 141^{\circ} 35' 43'' E$, $42^{\circ} 32' 41'' E : 141^{\circ} 51' 13'' E$, $42^{\circ} 35' 13'' E : 141^{\circ} 52' 31'' E$ 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

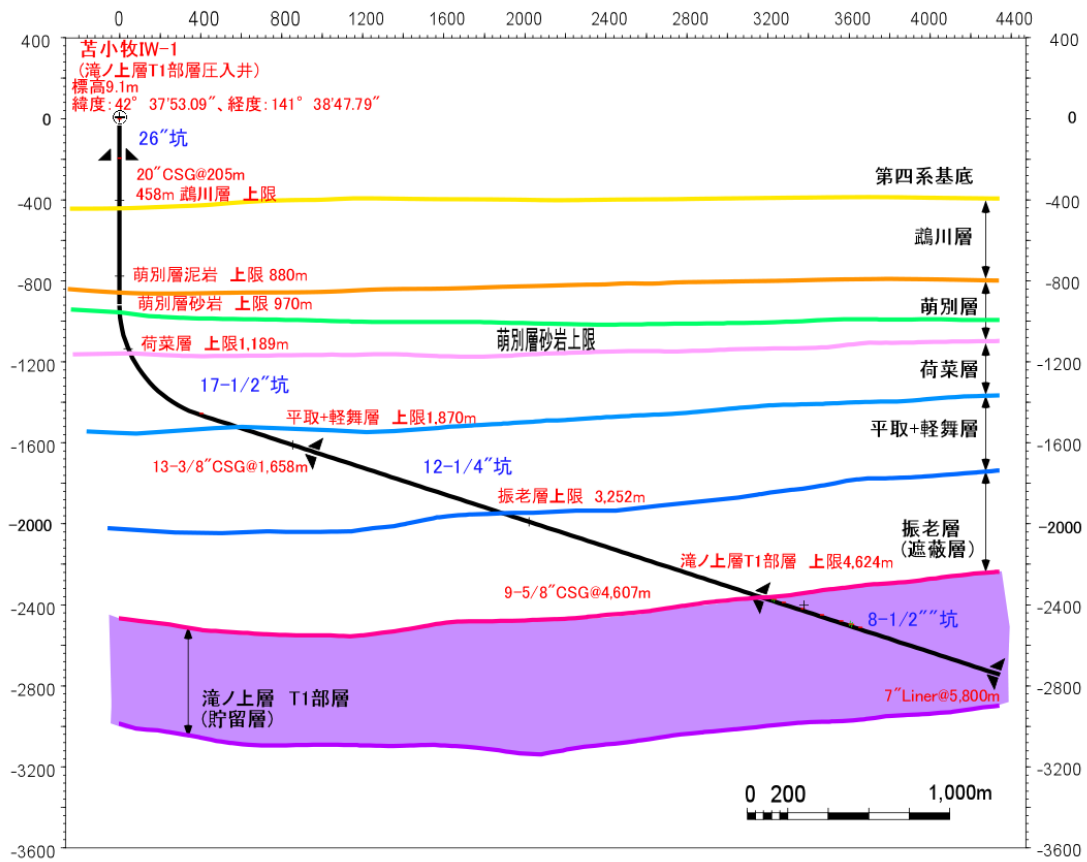
【坑口】	
座標（北緯）	42° 37' 53.09"
座標（東経）	141° 38' 47.79"
標高：m	9.1
【滝ノ上層 T1 部層上限】	
座標（北緯）	42° 35' 14.91"
座標（東経）	141° 37' 58.91"
掘削深度：m	4,624
海面下深度：m	2,381
坑口からの距離：m	3,228
【坑底】	
座標（北緯）	42° 35' 40.93"
座標（東経）	141° 37' 41.85"
掘削深度：m	5,800
海面下深度：m	2,744
坑口からの距離：m	4,346

第 4.1-2 表 萌別層圧入井の諸元

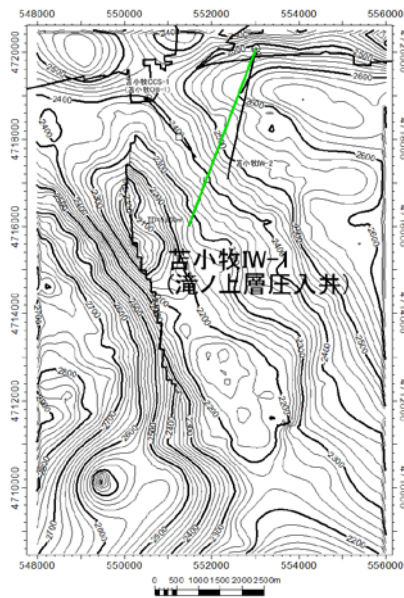
【坑口】	
座標（北緯）	42° 37' 53.09"
座標（東経）	141° 38' 47.55"
標高：m	9.1
【萌別層砂岩層上限】	
座標（北緯）	42° 36' 55.30"
座標（東経）	141° 38' 30.85"
掘削深度：m	2,395
海面下深度：m	961
坑口からの距離：m	1,823
【坑底】	
座標（北緯）	42° 36' 16.11"
座標（東経）	141° 38' 20.01"
掘削深度：m	3,650
海面下深度：m	1,179
坑口からの距離：m	3,058

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。



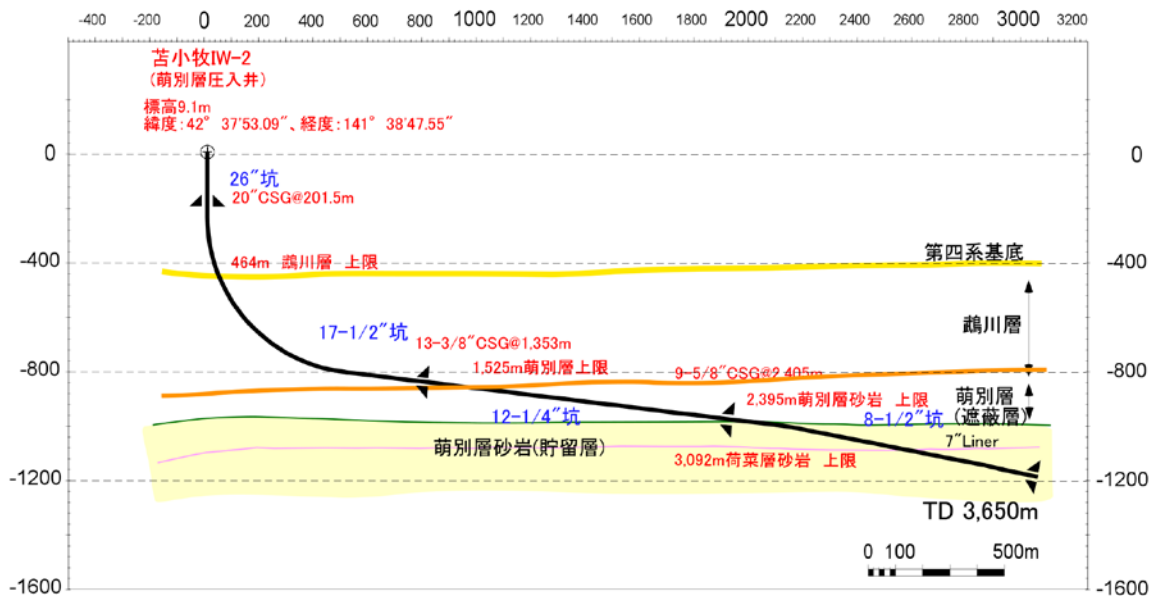
第 4. 1-2 図 滝ノ上層圧入井沿いの地質断面図



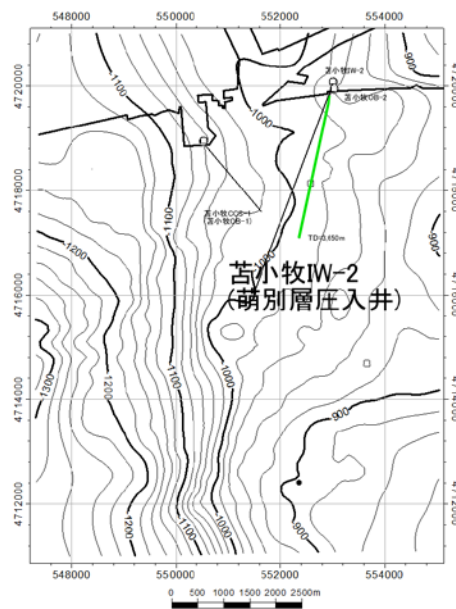
第 4. 1-3 図 滝ノ上層 T1 部層上限の地質構造

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

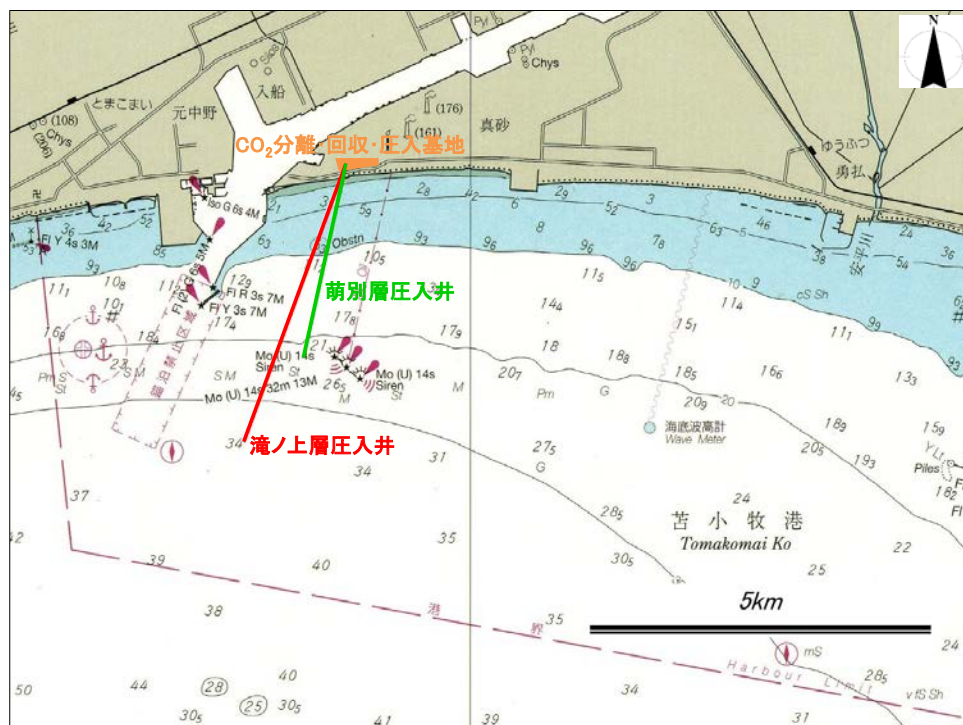


第 4.1-5 図 萌別層砂岩層上限の構造

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

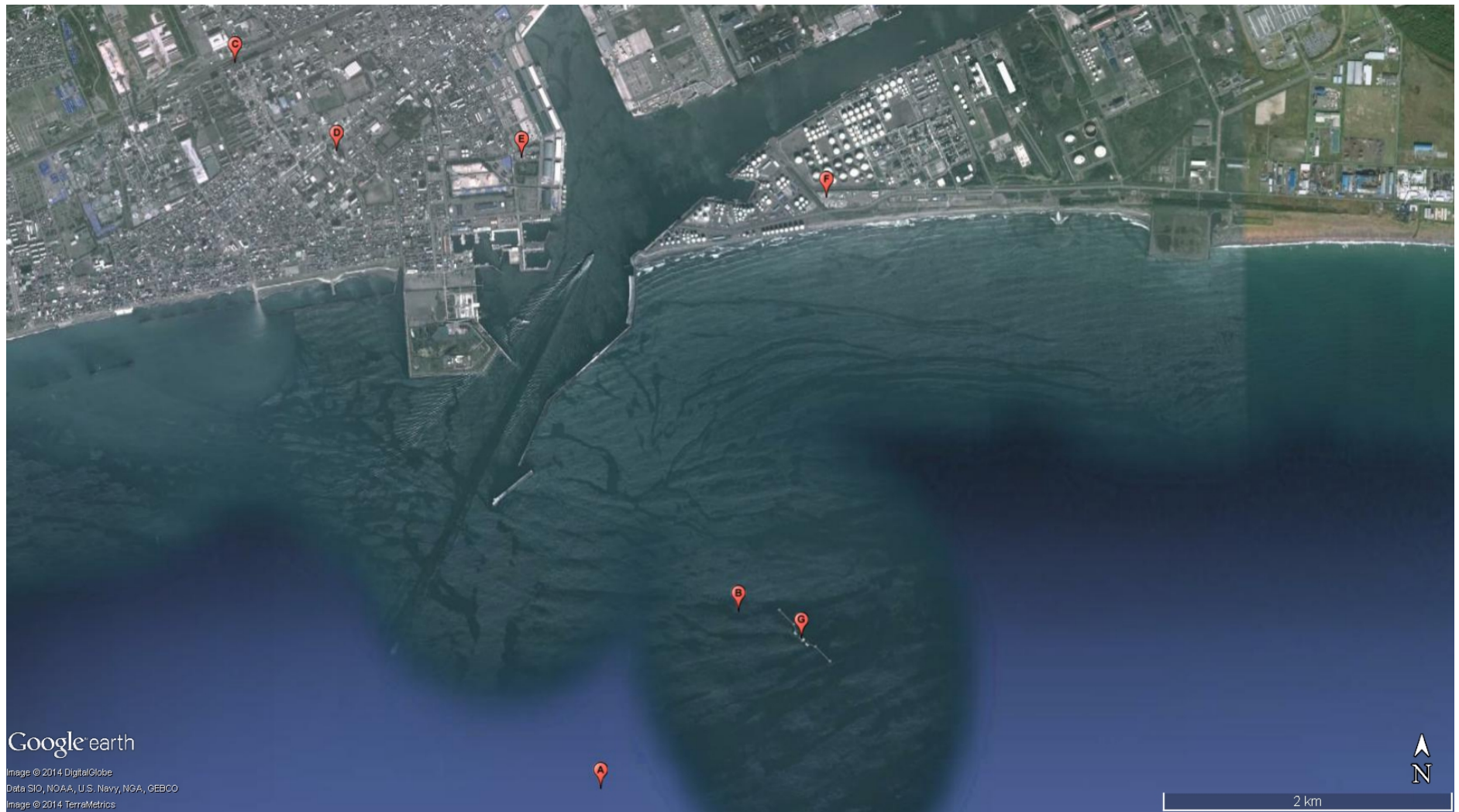
圧入井	水深 (m)	海面下深度 (m)
滝ノ上層圧入井	31	2,744
萌別層圧入井	20	1,179

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CCS調査株式会社 苫小牧CCS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。



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

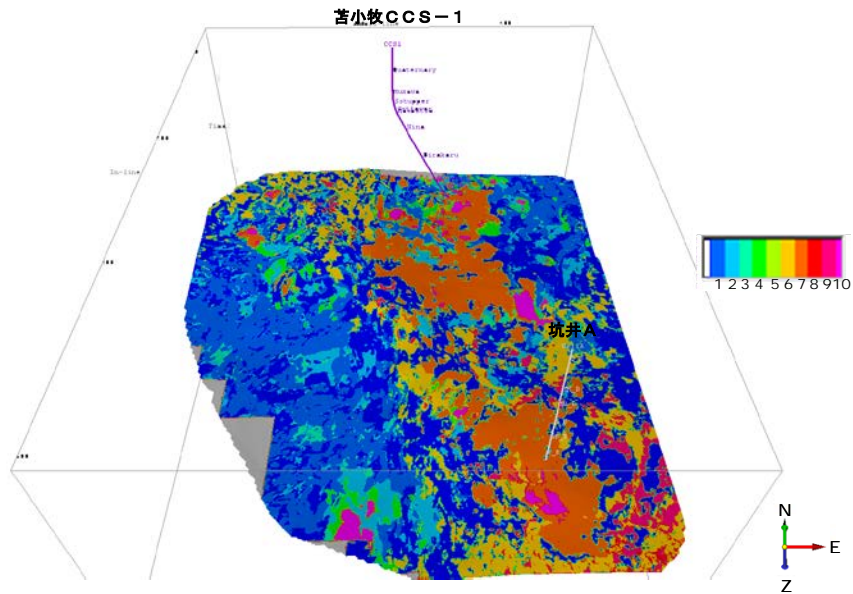
滝ノ上層圧入井の圧入（廃棄）位置を選定するあたり、CO₂挙動予測シミュレーションを実施するための地質モデルを作成した。なお、以下のア)で示す地質モデルは、平成23年度地質モデルである。イ)で示すモデルは、滝ノ上層圧入井の掘削結果を考慮し、ア)を修正したモデルである。

ア) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成（圧入井掘削前）

a. 岩相分布・性状分布の推定

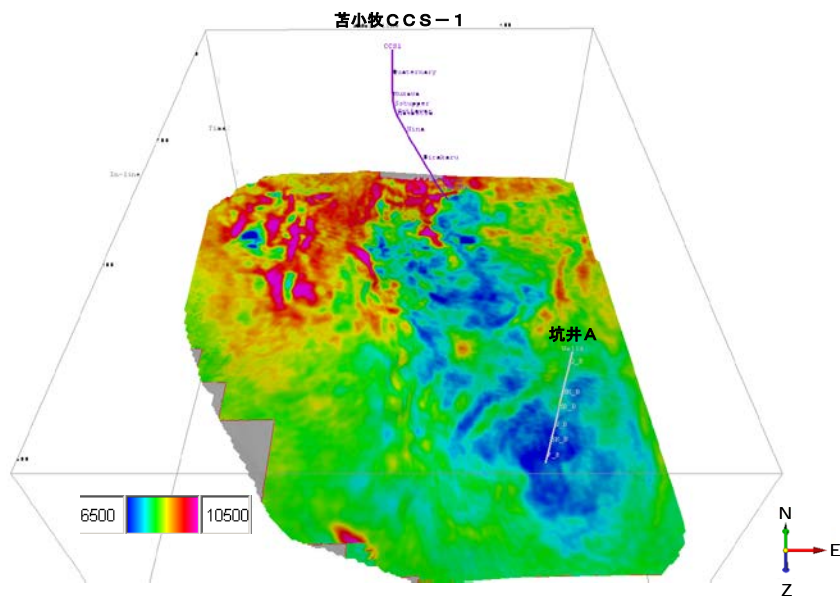
- ・ 滝ノ上層は、火山岩起源であり不均質性が高いため三次元弾性波探査データを活用した岩相分布・性状分布を推定した不均質モデルを作成した。
- ・ スケルトン・アトリビュート解析にて弾性波形の特徴を強調
- ・ SOM (Self-organizing Maps : 自己組織化マップ) 解析による波形分類を行い、
- ・ クラスタ解析 (K-means 法) により各分類の境界を決定
- ・ 坑井 A (既存民間井) における溶岩～凝灰角礫岩 (良好な貯留岩) との比較により、この岩相を示す弾性波形を決定し、三次元弾性波探査データ上で溶岩～凝灰角礫岩の分布領域を推定。
- ・ コア試料と物理検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、良好な貯留層性状が期待される岩相（溶岩～凝灰角礫岩相）。苫小牧 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）

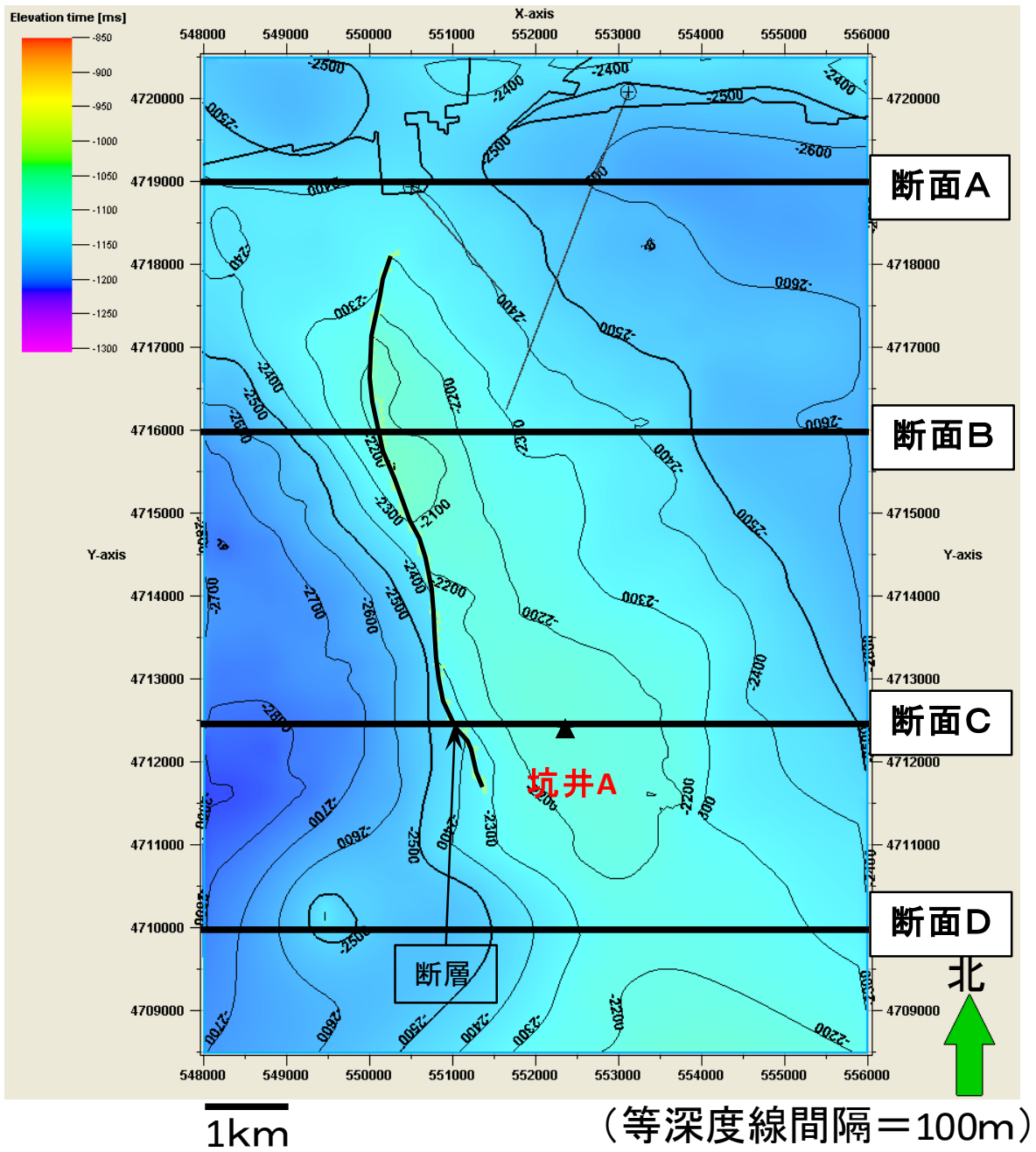


注：青色の部分が、低 AI で高孔隙率と考えられる箇所。高浸透率である可能性も高い。滝ノ上層圧入井は、低 AI 域に掘削した。

第 4.5-3 図 滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンス

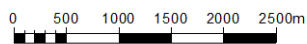
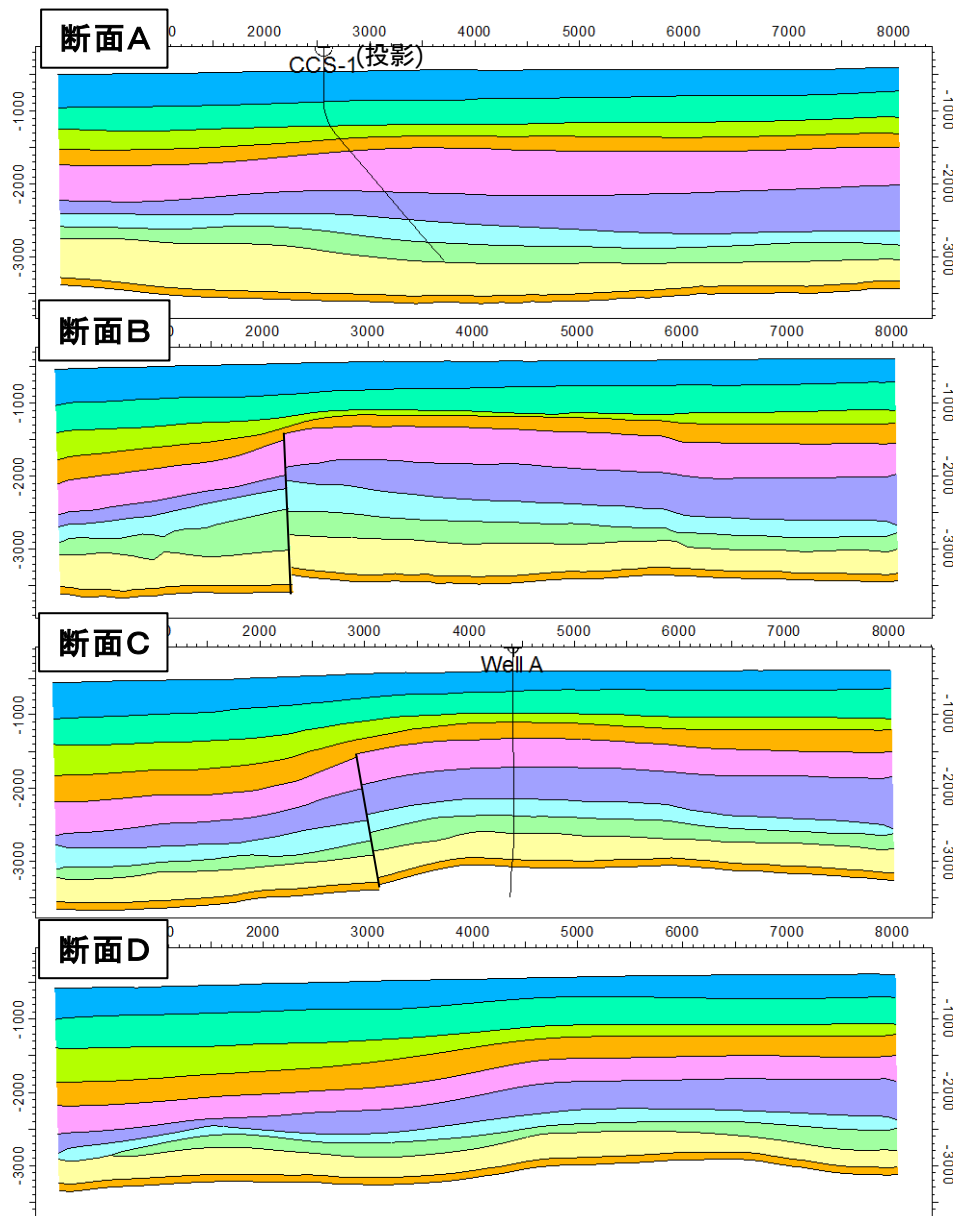
b. 構造モデルの作成

構造地質解釈で作成した時間構造図を深度変換により深度構造図とし、構造モデルを作成した。深度変換された滝ノ上層 T1 部層上限のモデル断面位置を第 4.5-4 図に、主要な層準の東西断面（地質モデル断面）を第 4.5-5 図に、作成した構造モデルのグリidding情報を第 4.5-1 表に示す。



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

第 4.5-4 図 モデル断面位置（構造図は滝ノ上層 T1 部層上限）



- 第四系
- 鷓川層
- 萌別泥岩層【遮蔽層】
- 萌別砂岩層【貯留対象層】
- 荷葉層【遮蔽層】
- 平取+輕舞層【遮蔽層】
- 振老層【遮蔽層】
- 滝ノ上層T1部層(上部)【貯留対象層】
- 滝ノ上層T1部層(下部)【貯留対象層】

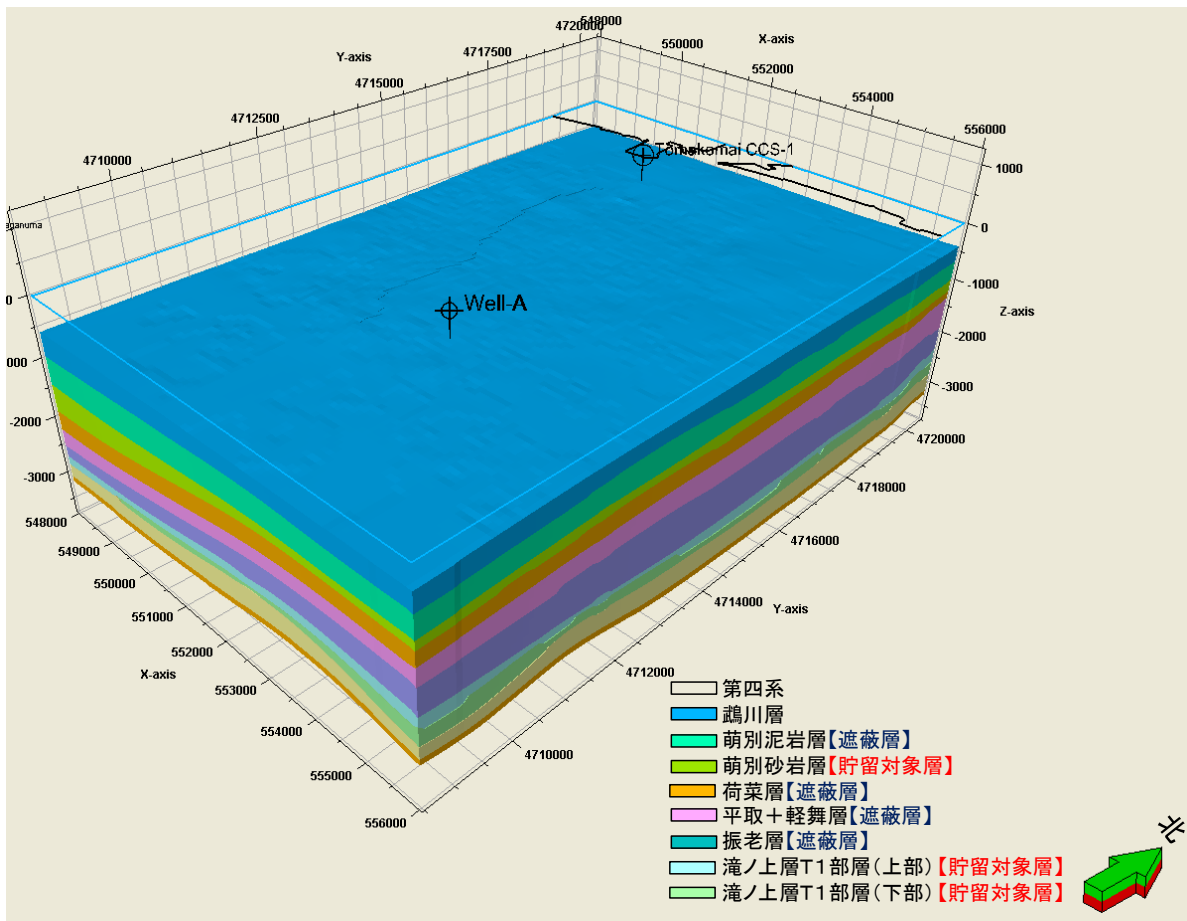
注：苫小牧 CCS-1 は、投影表示。

第 4.5-5 図 地質モデル断面

第 4.5-1 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		
鷓川層 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 1~3)
萌別層 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 4~6)
荷菜層上部 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 7~9)
荷菜層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 10~14)
平取+軽舞層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 15~19)
振老層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 20~24)
滝ノ上層 T1 部層上部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 25~57)
滝ノ上層 T1 部層下部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 58~96)
滝ノ上層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 97~101)
南長沼層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 102~106)

構造モデルの鳥瞰図を、第 4.5-6 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。

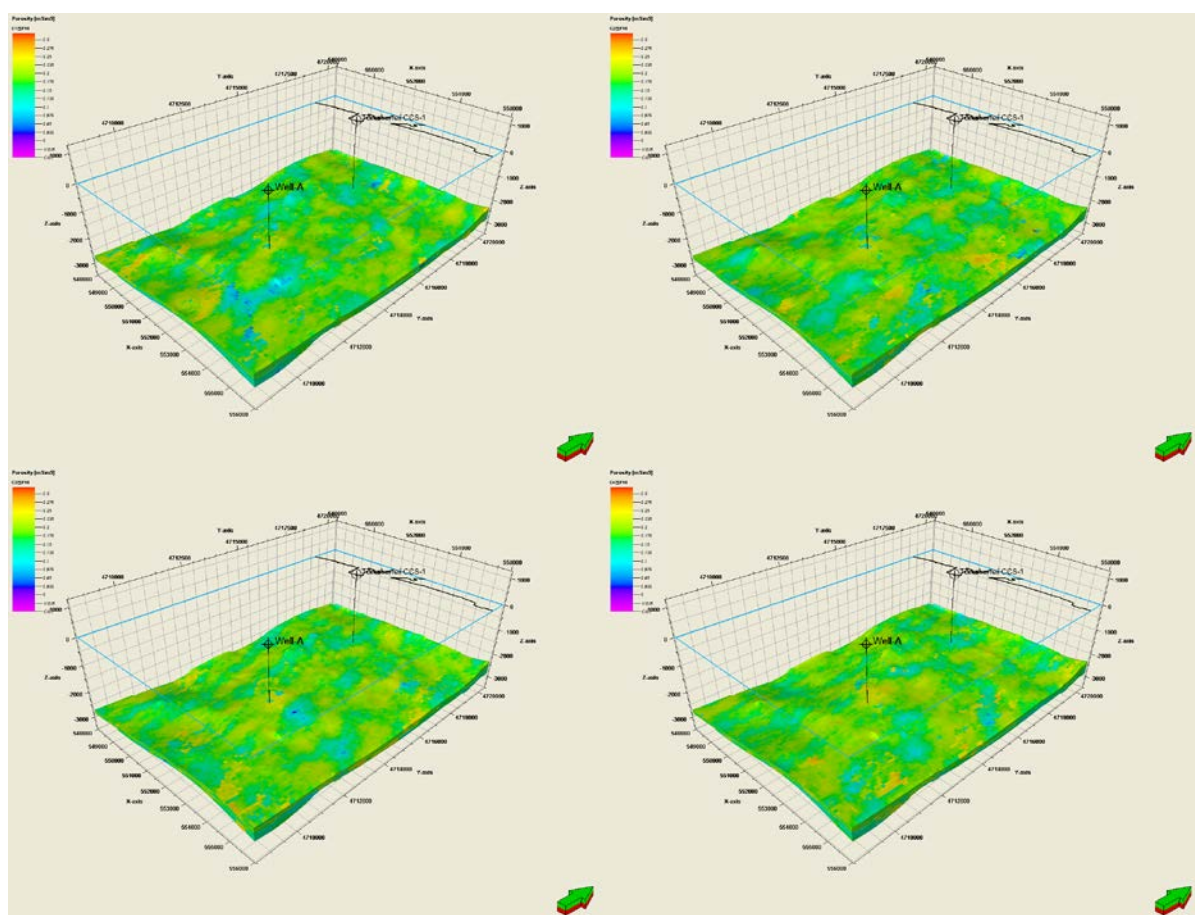


第 4.5-6 図 三次元地質モデル鳥瞰図

c. 属性モデルの作成

作成した構造モデルの各セルに属性（岩相、孔隙率および浸透率）を与え、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 4.5-7 図に示す。



注：図中右下の矢印は、北を示す。

第 4.5-7 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樣に分布させた。

イ) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成 (圧入井掘削結果を踏まえた更新モデル)

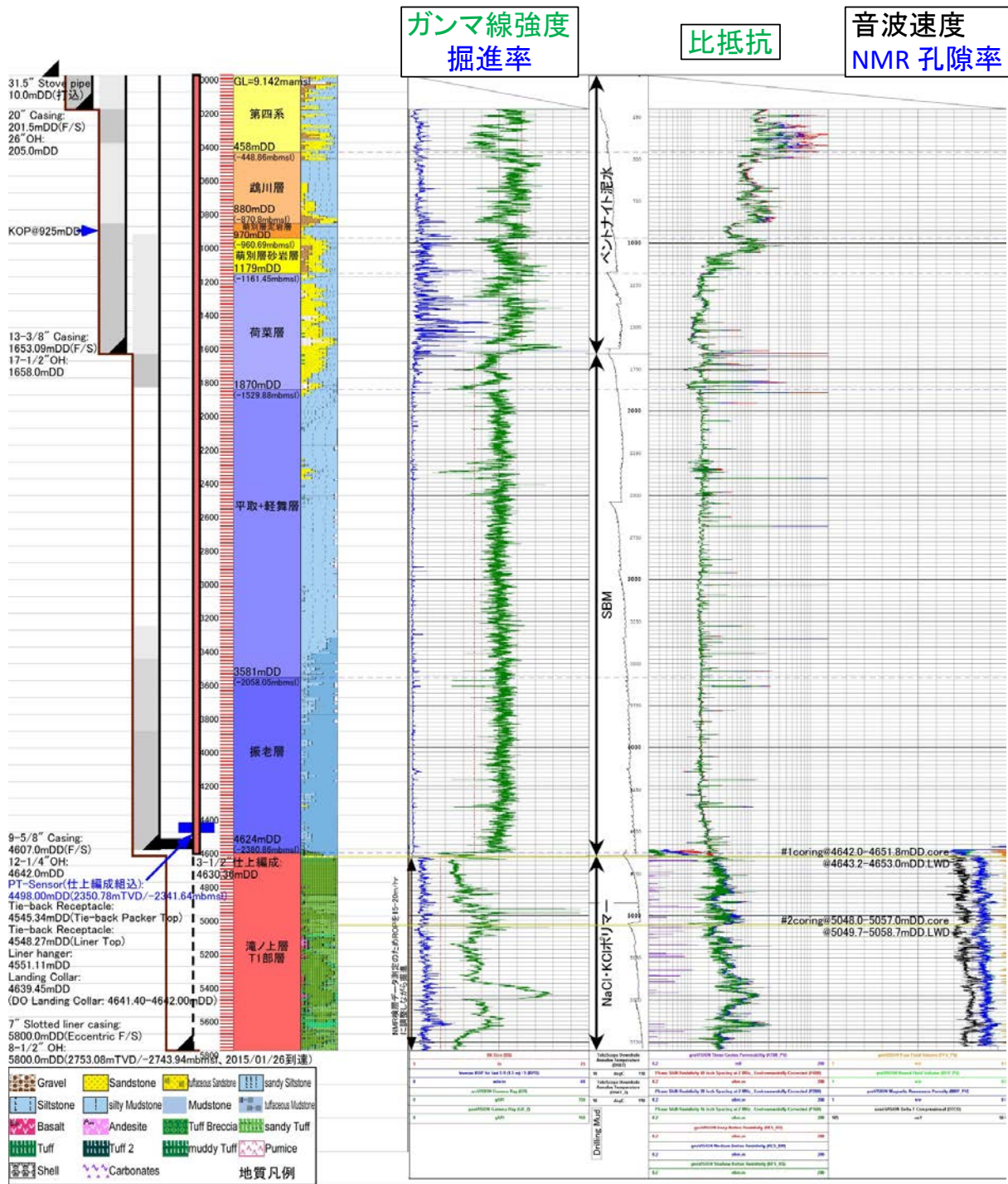
a. 滝ノ上層圧入井掘削結果

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 4.5-2 表に示す。

第 4.5-2 表 滝ノ上層圧入井における確認層序と岩相

地層名	掘削深度 mMD (垂直深度 mVD)		岩相
第四系	0	- 458	未固結砂礫, シルト等。
鶴川層	458	- 880	砂礫岩およびシルト岩等。
萌別層泥岩	880	- 970	シルト岩～泥岩主体とし, 砂岩, 礫岩等を伴う。
萌別層砂岩	970	- 1,179 (1,171)	砂岩, 礫岩を主体とし, 砂質シルト岩, 凝灰岩を伴う。
荷葉層	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 4.5-8 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。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 4.5-8 図 滝ノ上層圧入井の物理検層結果事例

b. 掘削時のブラインによる圧入テスト等の貯留層に係るテスト結果とその見直し

i) 掘削時の貯留層に係るテスト

滝ノ上層圧入井掘削時に予定掘削深度に到達後、1 週間程度の排泥を実施し、低下した貯留層圧力の回復（上昇）の度合いから貯留層性状を解析するビルドアップテストを実施した。その結果、貯留層の浸透率は、 $5.25 \times 10^{-5} \text{mD}$ と解析された（第

4.5-3 表)。

第 4.5-3 表 滝ノ上層圧入井におけるビルドアップテストの解析結果

	解析結果	単位
kh (浸透率×貯留層厚)	0.030	mD・m
k (浸透率)	5.25×10^{-5}	mD
スキンファクター	-1.72	—
ri (探査半径)	1	m

注：貯留層層厚 (h) は、570m と仮定した。

その後、ブラインによる圧入テストを実施し、24 時間で 7kL のブラインを圧入した。なお、圧入時の貯留層上限の圧力は、遮蔽層の破壊圧の 90% を上限とした。

ブラインによる圧入テストの実施後、上昇した貯留層圧力の低下の度合いの解析から貯留層性状を解析するフォールオフテストを 12 時間の密閉時間により実施した。その結果、貯留層の浸透率は、 1.48×10^{-4} mD と解析された。

ii) 貯留層に係るテスト結果の見直し

地質モデルの修正にかかり、貯留層の浸透性を評価するために圧入井のテスト結果を見直した。フォールオフテストよりもビルドアップテストの方が解析に係る貯留層への圧力変化を与えた要因の時間（ビルドアップテスト：1 週間の排泥、フォールオフテスト：24 時間の圧入）が長いため、貯留層の性状をより正確に表現していると考え、ビルドアップテストの結果を見直すこととした。

現場での解析では顕著な割れ目の寄与が認められない状況下においてスキンファクターをマイナスと解析していたが、スキンファクターを 0 として再解析した結果、第 4.5-4 表のような解析結果を得た。

第 4.5-4 表 滝ノ上層圧入井におけるビルドアップテストの解析結果の見直し

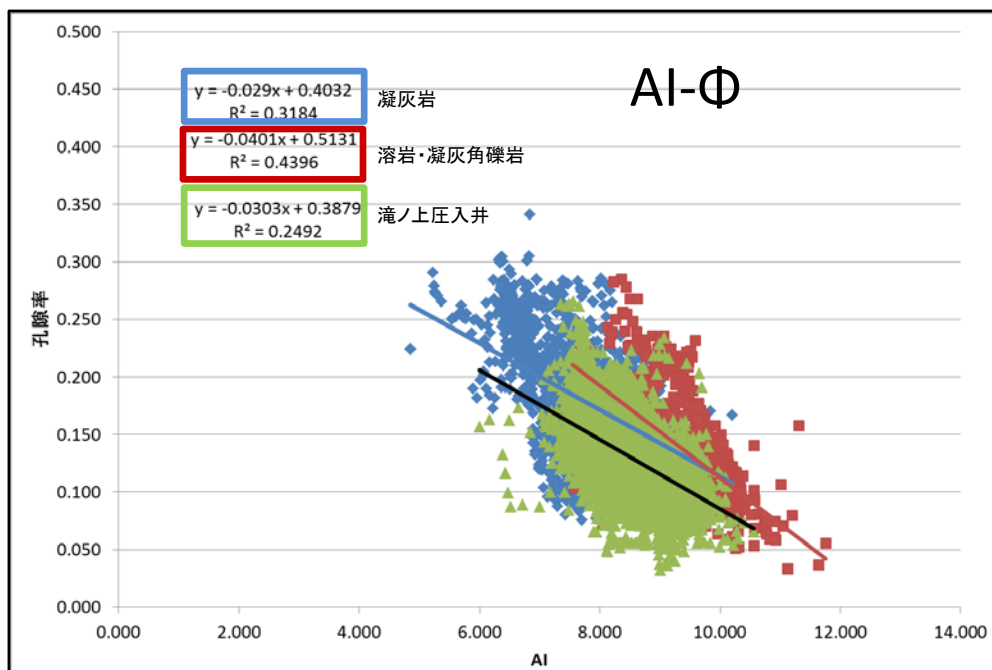
	解析結果	単位
kh (浸透率×貯留層厚)	0.28	mD・m
k (浸透率)	7.7×10^{-4}	mD
スキンファクター	0	—
ri (探査半径)	2	m

注：貯留層層厚 (h) は、圧入井の仕上げ深度区間（垂直深度）である 363m と仮定した。

c. 岩相分布・性状分布推定の更新

滝ノ上層圧入井の掘削により確認した滝ノ上層の岩相は、凝灰岩主体（凝灰岩：溶岩・凝灰角礫岩 = 96：4）であった。したがって、地質モデルの岩相は凝灰岩として地質モデルを更新した。

上記ア) において地質モデルを作成する際に、調査井や周辺坑井から得られた孔隙率と三次元弾性波探査データから、坑井における AI 値 (Acoustic Impedance : 音響インピーダンス : 密度×弾性波速度) を解析し、坑井での孔隙率との関係をクロスプロットで作成した。滝ノ上層圧入井において NMR 検層により測定した孔隙率と、検層データから求めた AI 値との対応関係をオーバーレイした (第 4.5-9 図)。

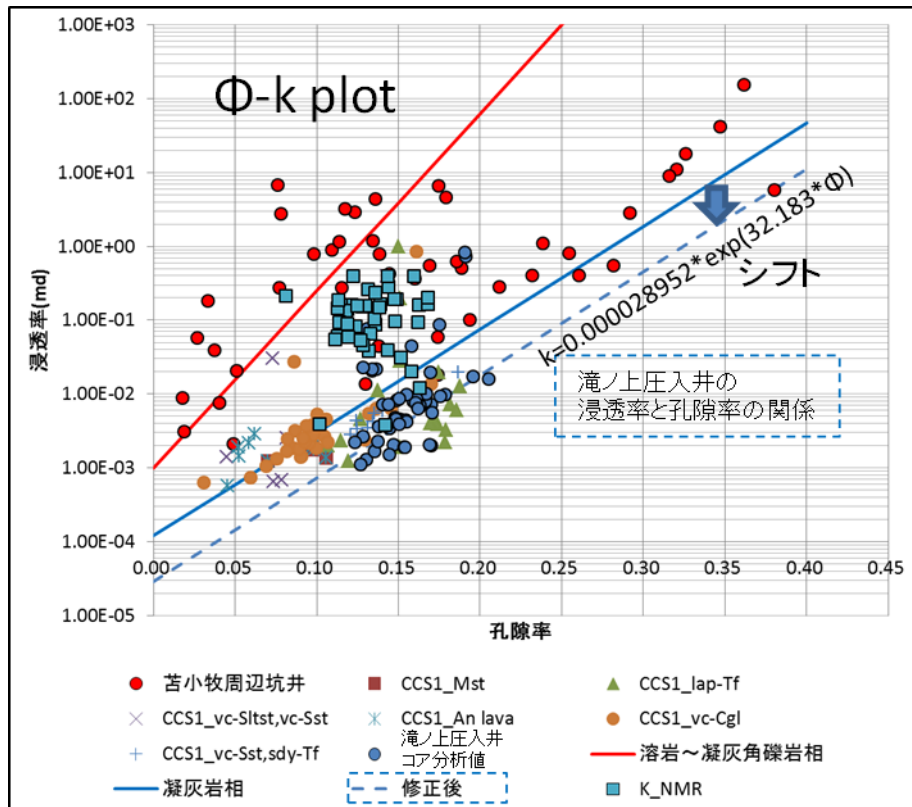


- 注：1. 赤は貯留岩として期待した溶岩・凝灰角礫岩、青は凝灰岩の AI 値と孔隙率の関係を示す。緑は、滝ノ上層圧入井により解析した AI 値とその深度に対応する NMR 孔隙率のプロットを示す。
2. 修正モデルにおける AI 値と孔隙率の関係は、「孔隙率=0.0303×AI 値+0.3879」を用いた。

第 4.5-9 図 AI 値と孔隙率の関係

凝灰岩主体であった滝ノ上層圧入井の結果と、掘削前に想定した凝灰岩の回帰線の傾きはほぼ一致するものの切片が異なるので、滝ノ上層圧入井の結果を用いて地質モデルの修正を行うこととした。

滝ノ上層圧入井掘削前には、調査井および周辺坑井のコアデータを参照し孔隙率と浸透率の相関を考察した。滝ノ上層圧入井で採取したコアサンプルの分析結果および NMR 検層の結果解析された孔隙率と浸透率の関係を同一の図にプロットした (第 4.5-10 図)。

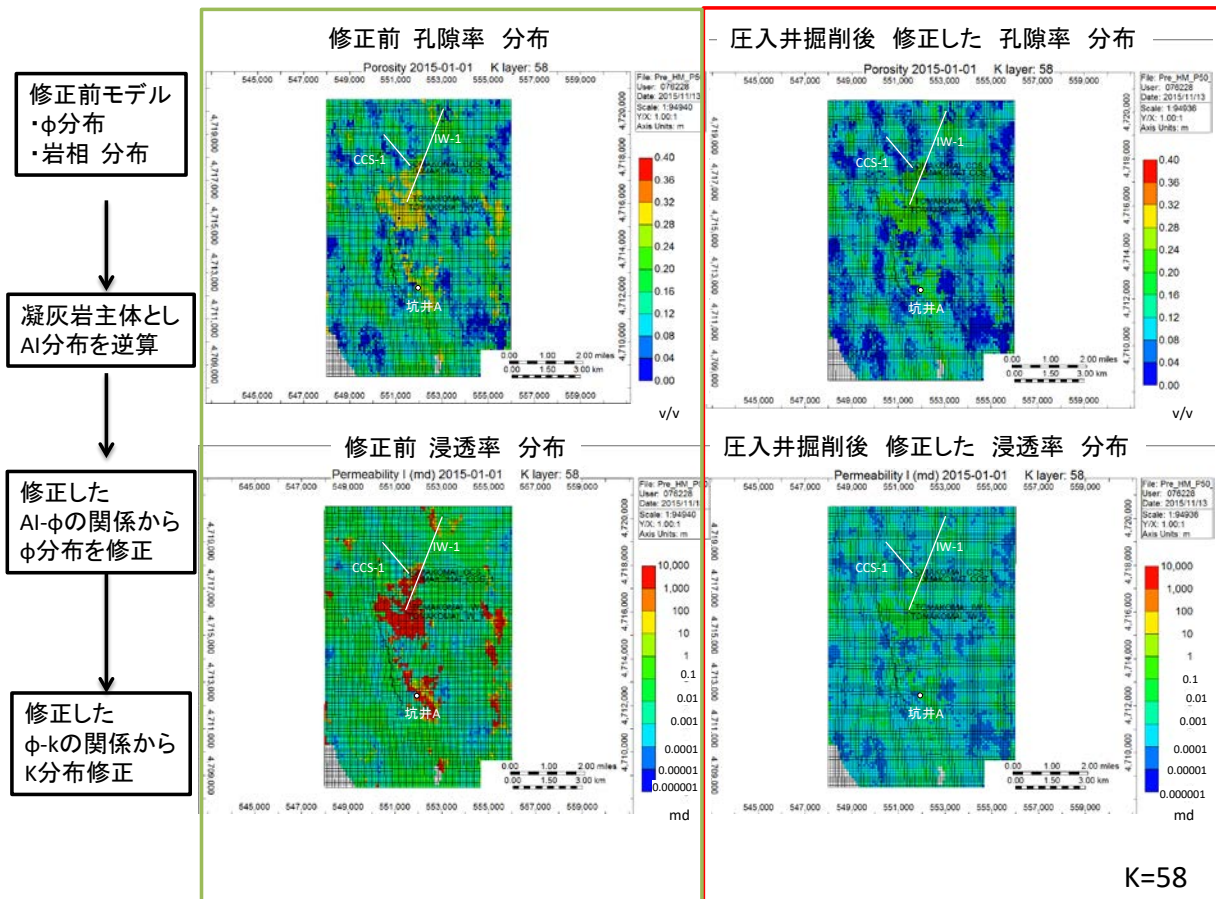


- 注：1. 苫小牧周辺坑井とは、民間会社が掘削した坑井 A。守秘義務があるため岩相の区分は公表できないが、回帰線を作成する際には使用した。K_NMR は、滝ノ上層圧入井で取得した NMR 検層の結果から解析された浸透率と孔隙率のプロットであるが、浸透率が滝ノ上層圧入井のコア実測値よりも概して高い値を示す。これは、火山岩で NMR 検層結果から浸透率を算出する適切な式がないことが原因と考えられる。
2. 修正モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「浸透率 = $0.000028952 \times e^{32.1823 \times \text{孔隙率}}$ 」を用いた。

第 4.5-10 図 孔隙率と浸透率の関係

滝ノ上層圧入井の貯留層は掘削前に期待した溶岩・凝灰角礫岩がほとんどなく、96%が凝灰岩であったため、孔隙率と浸透率の相関は凝灰岩の相関式（青実線）に類似するものと仮定した。圧入井掘削前の推定では、凝灰岩の平均浸透率は、平均孔隙率 12.7%に対し 7.2×10^{-3} mD 程度と考えていたが、滝ノ上層圧入井のビルドアップテストの結果から、凝灰岩からなる滝ノ上層の浸透率は 7.7×10^{-4} mD と解析された。滝ノ上層圧入井で採取したコアの分析結果から得られた浸透率と孔隙率の関係を考慮し、圧入井掘削前に想定した凝灰岩の回帰線を下方にシフトさせ、滝ノ上層の凝灰岩における孔隙率と浸透率の相関式とした。

ここで求めた孔隙率と浸透率の関係と第 4.5-9 図で求めた AI 値と孔隙率の関係から、地質モデルを修正した（第 4.5-11 図）。なお、相対浸透率曲線および毛細管圧曲線については、修正前と同様のものを使用した（第 4.5-12 図）。三次元弾性波探査データから解析された AI 値に対応した形で、地質モデル中で細分された各セルにこれらの属性値を入力した。



第 4.5-11 図 地質モデルにおける孔隙率および浸透率分布の更新