

2.5 苫小牧CCS-1掘削結果の概要

2.5.1 掘削作業概要

2010年11月5日から2011年2月21日までの109日間において、深度3,700m（垂直深度3,046m）の傾斜井を掘削した（図2.4-1）。

2.5.2 地質調査結果

掘削中は、カッティングス調査および物理検層により、層序および岩相を確認した。その結果を表2.5-1に記す。なお、萌別層砂岩層の上限は1,076m（垂直深度1,071m）である。

表 2.5-1 地質層序と岩相

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

各坑径掘り止め時に以下の種目の物理検層を実施し、岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は、坑径、比抵抗、自然電位、ガンマ線、見かけ密度、中性子孔隙率、音波速度、比抵抗画像、ディップメータ、核磁気共鳴である。図2.5-1に物理検層結果の事例を記す。

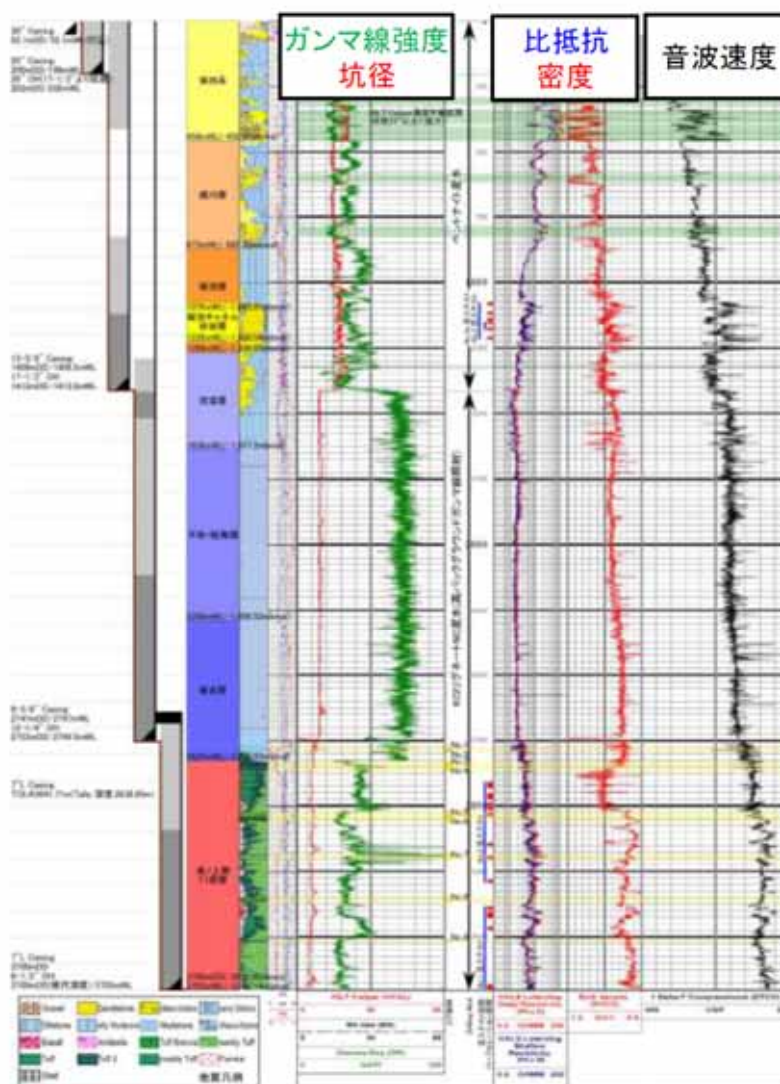


図 2.5-1 苫小牧 CCS-1 物理検層結果事例

物理検層作業で測定された温度のビルドアップ解析結果と取水井の揚水試験時に測定した温度から地温勾配を求めた（図 2.5-2）。第 1 次および第 2 次物理検層作業区間のビルドアップ温度が地温勾配より高く出ているのは、どちらも 17-1/2"（インチ）の

大坑径環境下で高粘度のペントナイト泥水を使用したため、検層作業中に掘削泥水の除熱が間に合わなかったためである。図中には、温度勾配の傾向を示すため、FMI・XPT・CMR・RCBLの測定温度もプロットした。

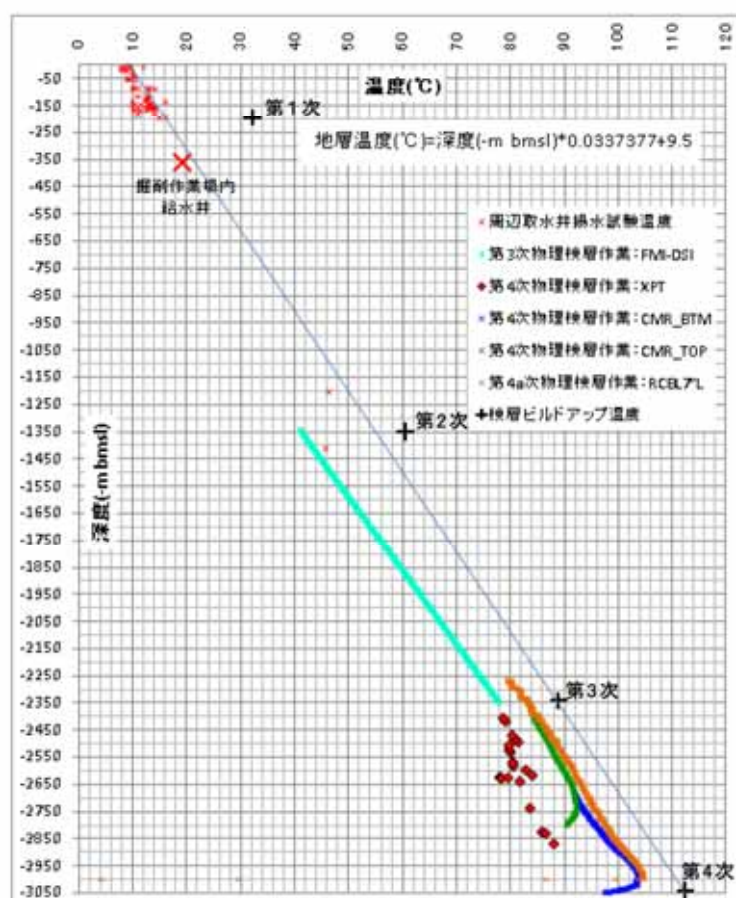


図 2.5-2 苫小牧 CCS-1 地温勾配解析結果

カッティングス試料を地表～深度 3,700m の間、分析項目により 20m～50m ごとに採取し、コア試料（直径約 10cm）を振老層泥岩で 2 回（合計 16m）、滝ノ上層 T 1 部層で 7 回（合計 115.9m）採取した。

これらの試料に関し、微化石分析（有孔虫および珪藻化石分析）、岩石鉱物分析（X線分析および薄片鑑定）および岩石物性分析（孔隙率、浸透率、スレシヨルド圧力分析など）を実施した。

有孔虫および珪藻化石分析により各地層の堆積時代を推定するとともに、周辺にある

既存坑井と対比することで地層名を確認した。有孔虫化石分析により堆積環境を推定し、振老層は中部半深海（500～1000m）、萌別層は中部半深海上部から上部半深海（200～500m）であることがわかった。

コア試料を用いた岩石物性分析により以下を確認した。

1) 滝ノ上層 T1 部層

- ・孔隙率：5～18%（封圧下）
- ・空気浸透率：0.001～0.01mD（封圧下）

2) 振老層泥岩層

- ・孔隙率：12.4～18.0%（封圧下）
- ・水浸透率： 8.2×10^{-6} ～ 36.7×10^{-6} ml
- ・スレシヨルド圧力

孔径分布からの推定（N₂-水系）：5.73～15.02MPa

段階昇圧法（N₂-水系）：水浸透率が低く長期間を要するため実施せず。

残差圧力法（N₂-水系）：1.29～12.3MPa 以上^注（4 試料）

段階昇圧法（CO₂-水系）：11.72MPa 以上^注（2 試料）

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

2.5.3 リークオフテスト結果

苫小牧 CCS-1 の深度 2,753～2,758m（垂直深度 2,350.1～2,354.8m）の振老層下部において、遮蔽層強度を測定することを目的として、リークオフテストおよびエクステンディッド・リークオフテストを実施した。その結果、加圧対象の中央深度 2,755.5m（垂直深度 2,352.0m）におけるリークオフ圧力は 45.3MPa であり、等価泥水比重で 1.96 であること、また閉合圧力が 44.55MPa、等価泥水比重で 1.93 であることがわかった。

2.5.4 VSP 結果

苫小牧 CCS-1 において、300～800m の間は 100m 間隔で、深度 850～3,265m は 25m 間隔で VSP 調査を実施することにより、深度-走時関係を取得するとともに、坑井近傍における弾性波データを取得したことから、苫小牧 CCS-1 と 3D データとの高精度な対比が可能となった（図 2.5-3）。

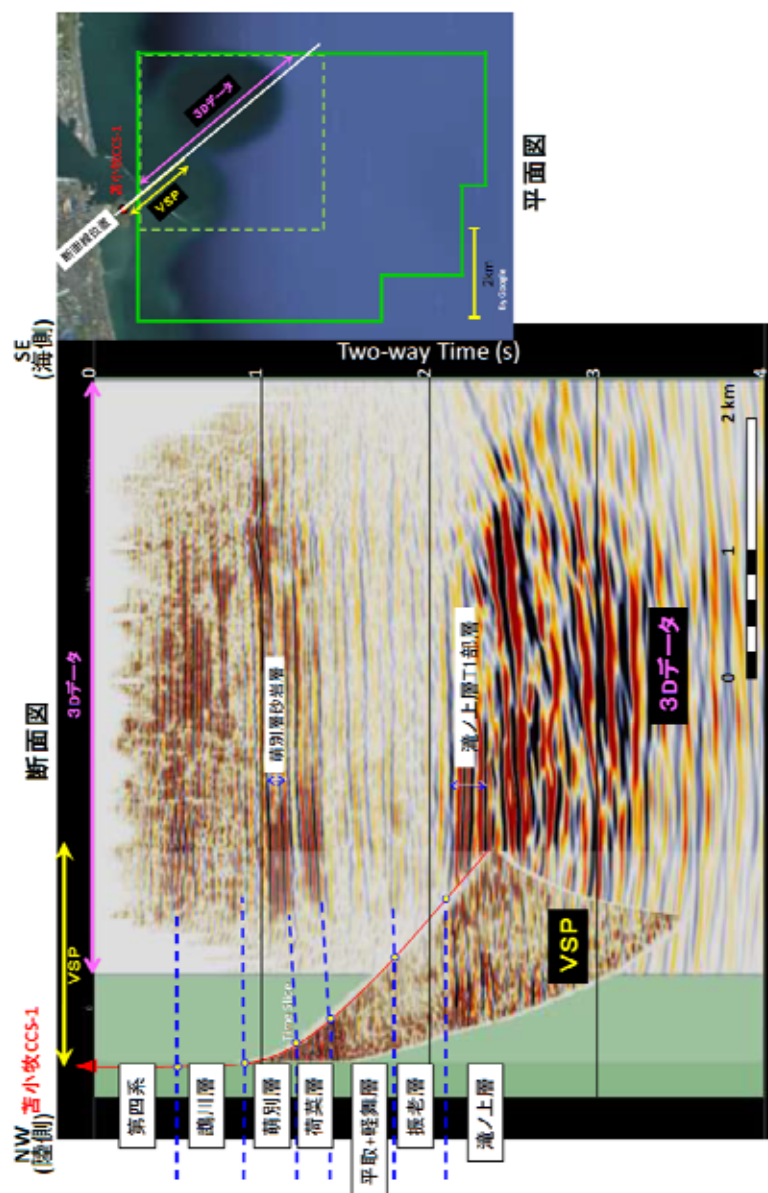


図 2.5-3 坑跡に沿う三次元断面図およびVSPイメージング断面図の対比（縦軸は往復走時）

2.5.5 圧入テスト結果

圧入テストは、 CO_2 の圧入性および貯留層評価に必要なパラメーター（圧入指数、浸透率）の把握を目的として、苫小牧CCS-1においては滝ノ上層T1部層で2回（No.1圧入テストおよびNo.2圧入テスト）、萌別層砂岩層で2回（No.3圧入テストおよびNo.3a圧入テスト）の水圧入テストを行った。

1) 滝ノ上層T1部層

ア) No.1圧入テスト（対象区間：掘削深度3,382～3,698mの区間内で66m分）

- ・産出能力テストおよび圧入能力テストを実施したが、産出が見られず、圧入も不可能であった。
- ・上記結果および産出・圧入後の坑底圧力の解析結果から、本坑井周辺では低浸透性でほとんど圧入性は無いと判断された。

イ) No.2圧入テスト（対象区間：掘削深度2,907～3,289mの区間内で120m分）：

- ・産出能力テストでは最大レート約400kl/日での産出を確認した。累計産出量は157.4klであった。地層水は泥水の影響を受けており、圧入井掘削時に地層水を採取する必要がある。
- ・圧入能力テストでは最大650kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は129.5klであった。
- ・産出・圧入後の坑底圧力の解析結果から、本坑井周辺での貯留層の浸透率は0.68～1.18mD程度であると推測された。また、坑井近傍の浸透率が改善していることを確認した。
- ・2.7.3項で述べる3Dデータを使用した岩相分布・性状分布の推定結果と比較すると、苫小牧CCS-1付近には高浸透性の岩相は存在しない可能性が高いという結果を得ている（苫小牧CCS-1の近傍は、図2.7-2における橙色の部分に当たっているが、図2.7-3における低A1（青色）の部分には当たっていない）。

2) 萌別層砂岩層

ア) No.3圧入テスト（対象区間：掘削深度1,150～1,182mの区間内で17.5m分）

- ・産出能力テストは、自噴しないことから実施しなかった。地層水は圧入井掘削時に採取する必要がある。
- ・圧入能力テストでは最大300kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は97.7klであった。

- ・圧入後の坑底圧力の解析結果から、貯留層の浸透率は25mD程度であると推測した。

i) No. 3a 圧入テスト (対象区間:掘削深度 1,077～1,217m の区間で 57.5m 分ⁱⁱⁱ⁾)

- ・圧入能力テストでは最大 1,200kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は 248.5kl であった。
- ・圧入後の坑底圧力の解析結果から、貯留層の浸透率は 9mD 程度であると推測した。

注) No. 3a 圧入テストの対象区間は、No3 圧入テスト対象区間に 40m 分の区間を加えて実施した。

2.6 苫小牧CCS-2調査結果の概要

2.6.1 掘削結果

2011年5月4日から6月15日までの43日間で、苫小牧CCS-1の北東37mの位置において深度1,218mまで掘削した。調査終了後は、耐CO₂セメントを用いて埋め立てた(廃坑作業を実施した)。

2.6.2 地質調査結果

苫小牧CCS-2の深度993～1,218mの萌別層泥岩層および砂岩層において、直径8cmのコア試料を連続採取した。掘削後は、苫小牧CCS-1との比較を目的として物理検層を実施した。

コア試料を用いて岩石物性分析により以下を確認した。

1) 萌別層砂岩層

- ・孔隙率：25～40% (封圧下)
- ・空気浸透率：1～1,000mD (封圧下)
- ・不動水飽和率：27～75% (平均 51.5%、遠心分離法、1.6MPa 相当)

2) 萌別層泥岩層

- ・孔隙率：32.4～37.2% (封圧下)
- ・水浸透率：0.80×10⁻³～1.73×10⁻³mD
- ・スレシヨルド圧力
 - 孔径分布からの推定：0.14～1.56MPa
 - 段階昇圧法 (CO₂-水系)：0.75～1.67MPa

2.6.3 リークオフテスト結果

深度 989～993m の萌別層泥岩層下部において、遮蔽層強度を測定することを目的としてリークオフテストを実施した。その結果、テスト区間の中央深度 991m におけるリークオフ圧力は 14.6MPa であり、等価泥水比重 1.50 であることがわかった。

2.7 滝ノ上層解析結果

2.7.1 貯留層

滝ノ上層は火山性碎屑物を含む火山岩層であり、火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層 T1 部層とその下部の泥岩層からなる。滝ノ上層 T1 部層（層厚が約 600m）は、さらに下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層と上部の凝灰岩卓越層とに分けられる。

図 2.7-1 は、調査地点周辺の既存坑井の滝ノ上層 T1 部層における溶岩～凝灰角礫岩および凝灰岩の孔隙率と浸透率の関係をプロットしたものである。本層では、溶岩～凝灰角礫岩相では良好な圧入性状が期待できることから圧入対象となると考えた（図 2.7-1 青い楕円部）。また、凝灰岩相全体としてはそれほど良好な性状は期待できないが、部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、圧入対象となると考えた（図 2.7-1 赤い楕円部）。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表 2.7-1 にまとめる。

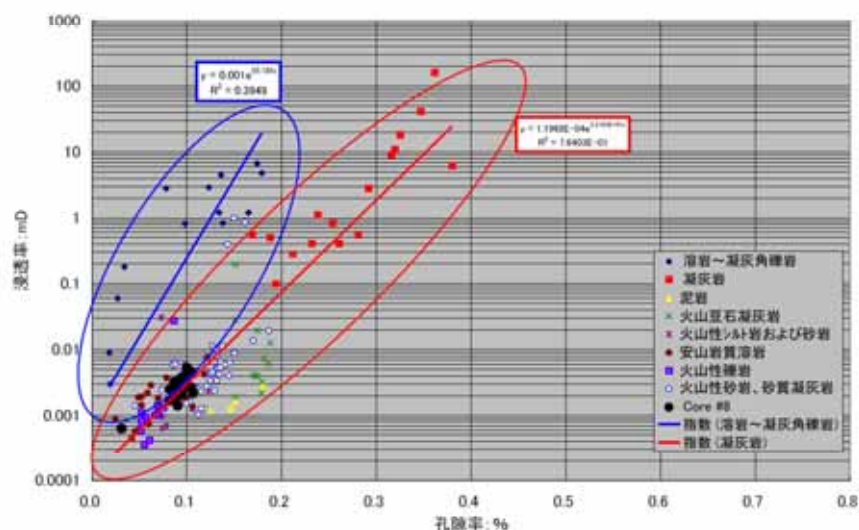


図 2.7-1 コア試料の孔隙率と浸透率のクロスプロット

表 2.7-1 滝ノ上層 T1 部層 貯留層性状一覧

項 目	
対象深度	約2,400～3,000m(垂直深度)
層厚	約600m
岩相	溶岩～凝灰角礫岩、凝灰岩
孔隙率	5～18%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) 3～19%(周辺坑井のコア試験:封圧下)
浸透率	0.68～1.18mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果)* 0.001～0.01mD(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) 0.002～7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) 0.01mD～2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果)
水圧入テスト (苫小牧CCS-1)	最大650kl/日(掘削深度2,907～3,698mのうち186m)*

*圧力・温度測定結果から圧入区間は2,907～2,931mのみと判断した。

2.7.2 遮蔽層

遮蔽対象層となる振老層および平取+軽舞層は、約1,100mの層厚を有する。苫小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部で等価泥水比重1.96の強度を持つことを確認した。

苫小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、過去に遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が 8.2×10^{-6} ～ 36.7×10^{-6} mD、スレシヨルド圧力が1.29MPa～15.02MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといった比較的低い分析値が得られているものの、CO₂貯留条件と同様の条件で分析をしたところ、11.72MPa以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取+軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表2.7-2にまとめる。

表 2.7-2 滝ノ上層 T1 部層に対する遮蔽層性状一覧

項 目	
層序	振老層および平取+軽舞層
岩相	泥岩
層厚	約1,100m
孔隙率	12.4～18.0% (苫小牧CCS-1コア試験:封圧下)
浸透率	$8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6} \text{mD}$ (苫小牧CCS-1コア試験:水浸透率)
スレシヨルド圧力	1.29～12.3MPa [*] 以上(苫小牧CCS-1コア試験: N ₂ -水系残差圧力法) 11.72MPa [*] 以上(苫小牧CCS-1コア試験: CO ₂ -水系段階昇圧法) ※ブレイクスルーしなかったことから測定値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断。
リークオフ圧力 (苫小牧CCS-1 リークオフテスト)	45.3MPa (等価泥水比重1.96) (振老層(苫小牧CCS-1)2,352mVD(垂直深度))

2.7.3 地質モデル構築

(1) 岩相分布・性状分布の推定

滝ノ上層は、火山岩起源であることから、砂岩などの堆積岩層と比較して不均質性が高く、CO₂挙動予測シミュレーションを実施するためには、空間的な岩相分布およびその性状分布の推定が特に重要となる。このため、3Dデータを活用した岩相分布・性状分布の推定を実施し、CO₂挙動予測シミュレーションの地質構造モデルへ反映させた。

具体的には、まずスケルトン・アトリビュート解析と呼ばれる手法を用いて弾性波形の特徴を強調し、次にSOM (Self-organizing Maps: 自己組織化マップ) 解析による波形分類を行い、さらにクラスター解析の代表的な手法であるK-means法により各分類の境界を決定し、最後に坑井Aにおける溶岩～凝灰角礫岩の区間との比較により、この岩相を示す弾性波形を決定することにより、3Dデータ上で溶岩～凝灰角礫岩の分布領域を推定した。

そして、溶岩～凝灰角礫岩についてはコア試料と物理検層データから、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から、3Dデータ上も溶岩～凝灰角礫岩の分布領域ではAIと孔隙率とが逆相関関係にあると考えた。

一例として、図2.7-2に滝ノ上層T1部層下部の岩相分布(K-means Index)を、図2.7-3に3D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。

なお、苫小牧CCS-1が掘削された場所周辺は、高AI領域(孔隙率・浸透率が低い)

であった。

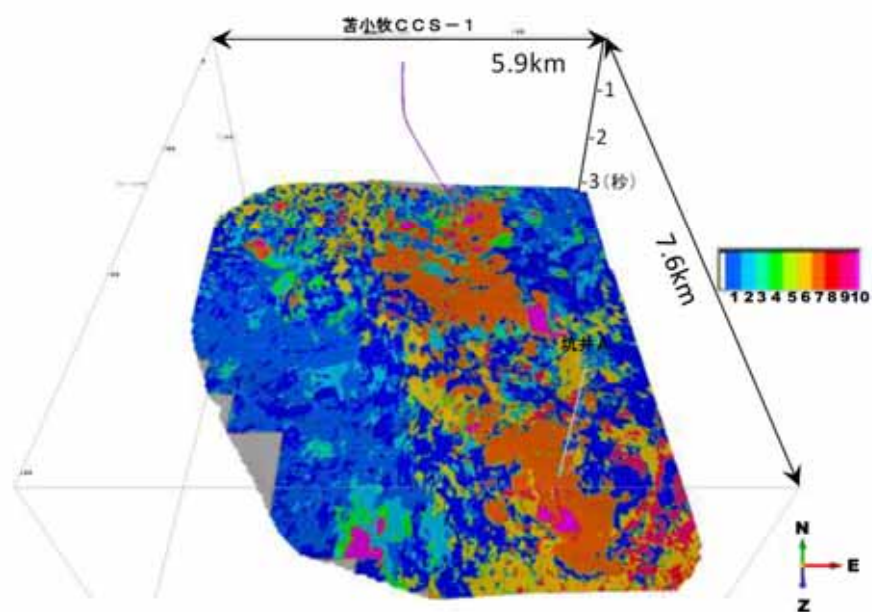


図 2.7-2 滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index)

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)

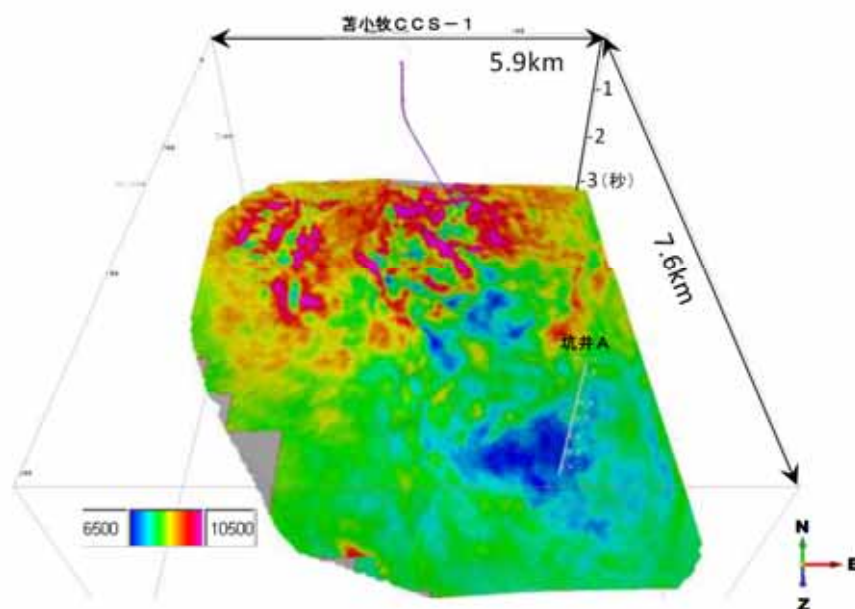


図 2.7-3 滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンス

注) 青色の部分が低 A I 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。

(2) 地質構造モデル構築

CO₂の挙動予測シミュレーションに必要な貯留層モデルを構築するため、3Dデータで解釈に用いた各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

地質構造モデルの構築には、構造地質解釈で作成された層準（上位より、第四系基底・鶴川層基底・萌別層基底・荷葉層上部基底・荷葉層下部基底・平取+軽舞層基底・滝ノ上層上限（振老層基底）・滝ノ上層 T1 部層上部基底・滝ノ上層 T1 部層基底・滝ノ上層基底）を用いた。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図 2.7-4 に、主要な層準の東西断面（地質モデル断面）を図 2.7-5 に各々示す。

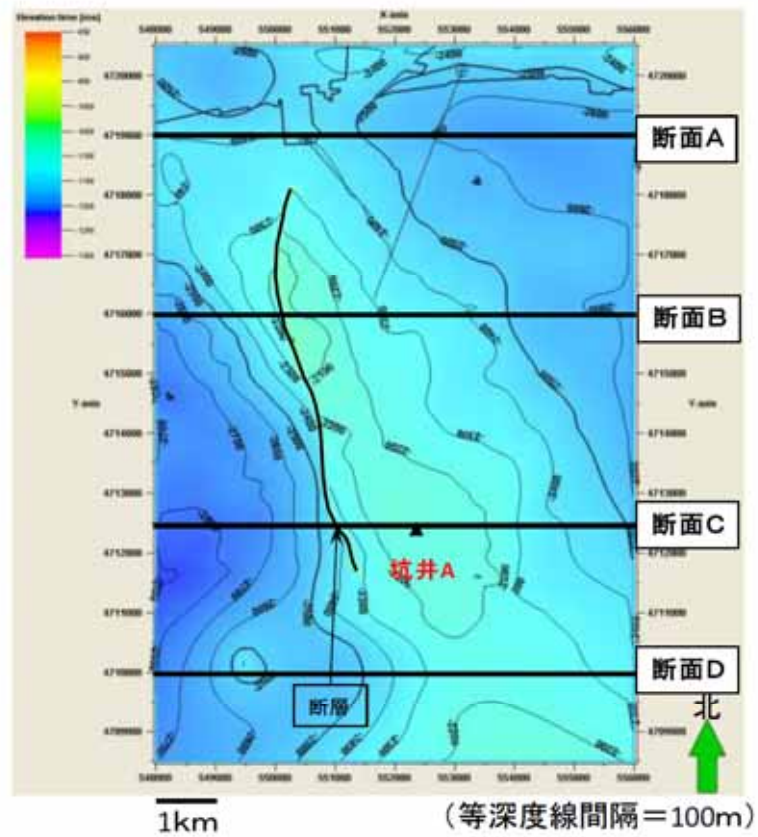


図 2.7-4 モデル断面位置（構造図は滝ノ上層 T1 部層上限）
（図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標）

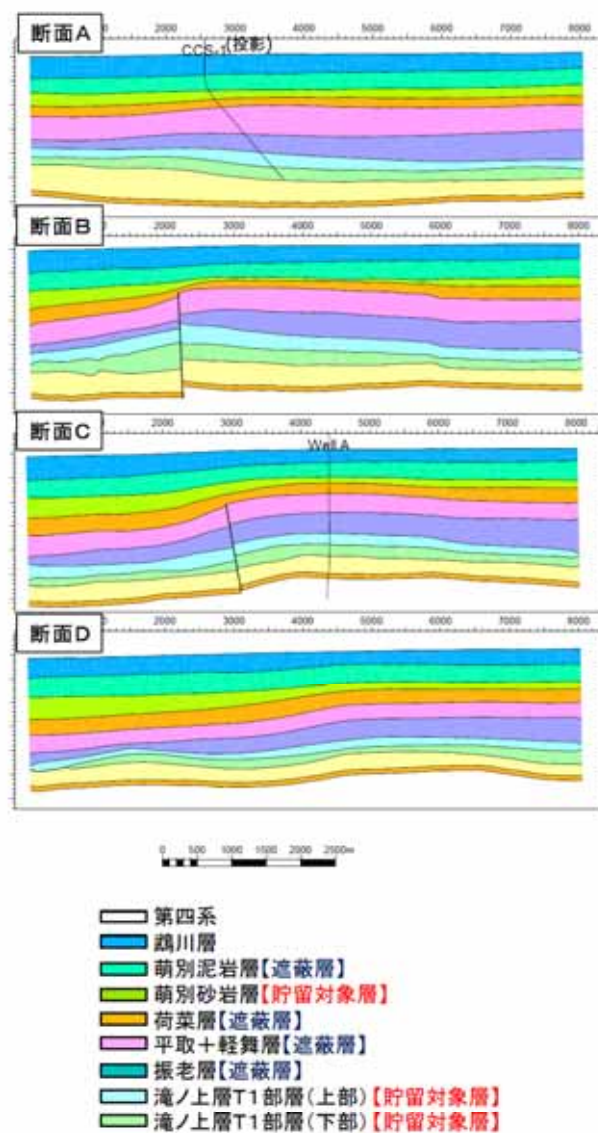


図 2.7-5 地質モデル断面
(苫小牧 CCS-1 は投影表示)

さらに、CO₂挙動予測シミュレーションを行うにあたり、各層準内に以下のようにグリッドセルを作成した。

・水平方向のグリッドセルサイズ

東西方向 (i) および南北方向 (j) : 100m

(i 方向セル数: 80 セル、j 方向セル数: 120 セル)

・垂直 (k) 方向のグリッドセルサイズ

鵜川層:	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図 2.7-6 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。

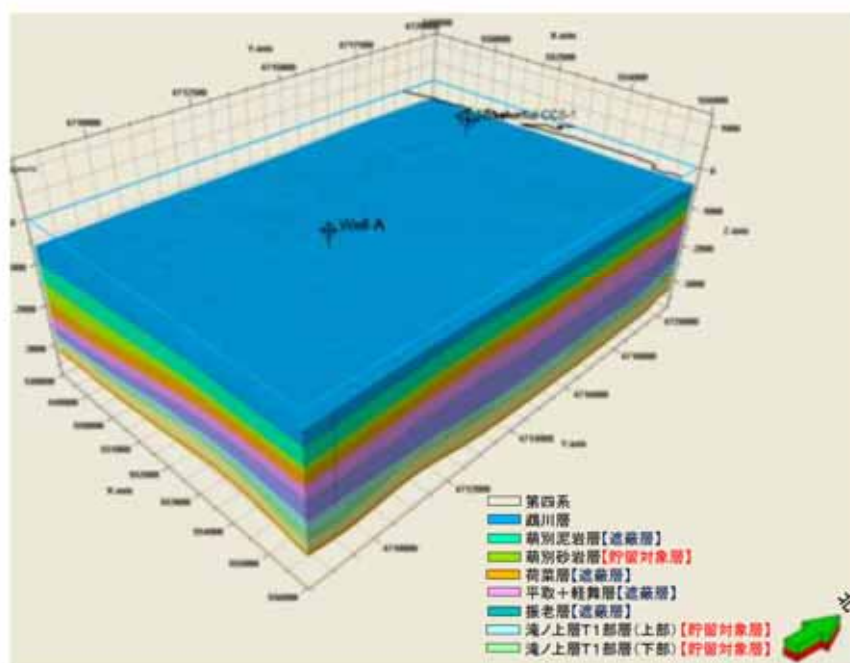


図 2.7-6 三次元地質モデル鳥瞰図

(3) 属性モデル構築

作成した構造モデルの滝ノ上層T1部層とそれ以外の層準に属性（岩相、孔隙率および浸透率）をそれぞれ与え、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、3Dデータ、苫小牧CCS-1および坑井A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個の具現モデルを作成した。図2.7-7に作業フロー図を示す。

まず、図2.7-2に示した3Dデータの解析により求められた3D範囲（図2.1-1）内の岩相分布を溶岩～凝灰角礫岩相（図中の橙色）と凝灰岩相（図中の橙色以外）として、構造モデルへ与えた（図2.7-7のFacies-①）。また、図2.7-3に示した音響インピーダンス（AI）の分布から岩相ごとにAIと孔隙率の関係式を用いて3D範囲内の孔隙率分布を構造モデルへ与えた。（図2.7-7のΦ-②）。また、苫小牧CCS-1および坑井Aの検層データより求められた孔隙率から坑井孔隙率（図2.7-7のΦ-③）を作成した。

次に、Facies-①から逐次インディケータシミュレーション（Sequential Indicator

Simulation: SIS)を用いて、モデル構築範囲(図2.1-1)全体に拡張した岩相分布(図2.7-7のFacies-④)を作成した。Facies-④が具現モデルの岩相分布となる。この岩相ごとに逐次ガウシアンシミュレーション(Sequential Gaussian Simulation: SGS)を用いて、モデル構築範囲全体に拡張した孔隙率分布(図2.7-7のΦ-⑤)を作成した。

具現モデルの孔隙率分布(図2.7-7のΦ-⑥)は、孔隙率分布Φ-⑤および坑井孔隙率Φ-③を使用してSGSにて作成した。なお、本SGSのパラメータはΦ-⑤作成時と同じ値を使用し、2つの岩相における孔隙率の出現確率は3D範囲内での出現確率(図2.7-8)とした。

具現モデルの浸透率分布(k-⑦)は孔隙率分布(Φ-⑥)に対して、苫小牧CCS-1の周辺坑井と苫小牧CCS-1のコア分析結果から得られた以下の岩相別の孔隙率-浸透率関係式(図2.7-1)を用いて作成した。

$$\text{凝灰岩相} \quad ; k = 0.00011968e^{32.193\phi}$$

$$\text{溶岩～凝灰角礫岩相} \quad ; k = 0.001e^{55.195\phi}$$

ここで、k: 浸透率[mD]、 ϕ : 孔隙率[frac]である。

本属性モデルでは孔隙率はAIより求めたが、浸透率とAIの関係については考察されていないため、10,000mDを超える浸透率が導き出されることがある。そのため、上記関係式により求められた浸透率分布に対して、10,000mD以上の浸透率を10,000mDとする補正を行った。

以上の作業を1フローとして、岩相分布(Facies-④)、孔隙率分布(Φ-⑥)、浸透率分布(k-⑦)の作成を繰り返すことにより、岩相分布・孔隙率分布・浸透率分布について確率的に50個の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図2.7-9に示す。

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。

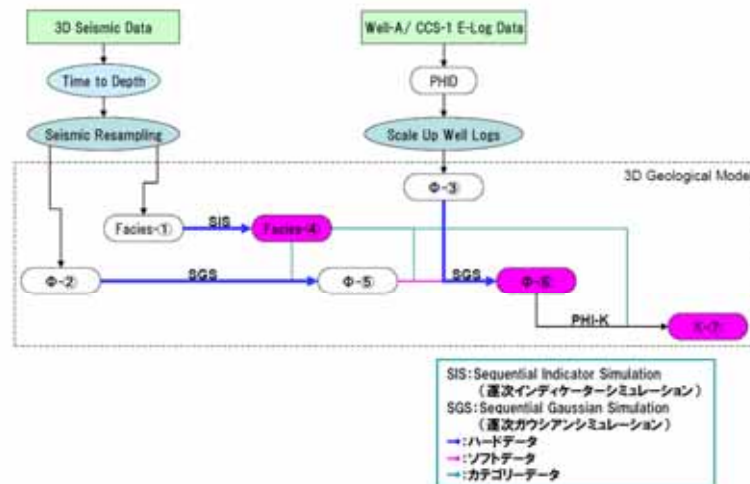


図 2.7-7 滝ノ上層 T1 部層内の属性値分布作成における作業フロー

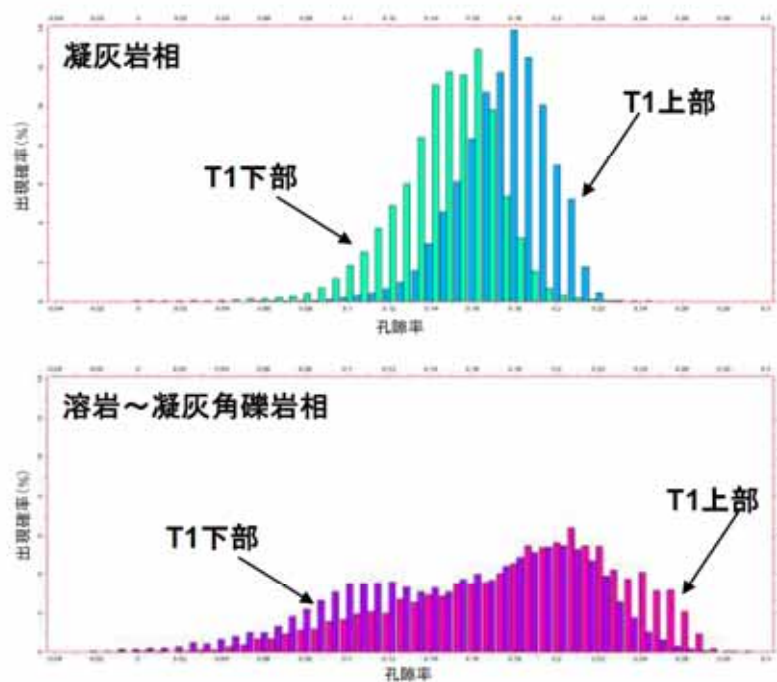


図 2.7-8 3D 探査範囲内で取得された孔隙率の出現確率

■: 滝ノ上層 T1 部層上部溶岩～凝灰角礫岩相、■: 滝ノ上層 T1 部層上部凝灰岩相、
■: 滝ノ上層 T1 部層下部溶岩～凝灰角礫岩相、■: 滝ノ上層 T1 部層下部凝灰岩相)

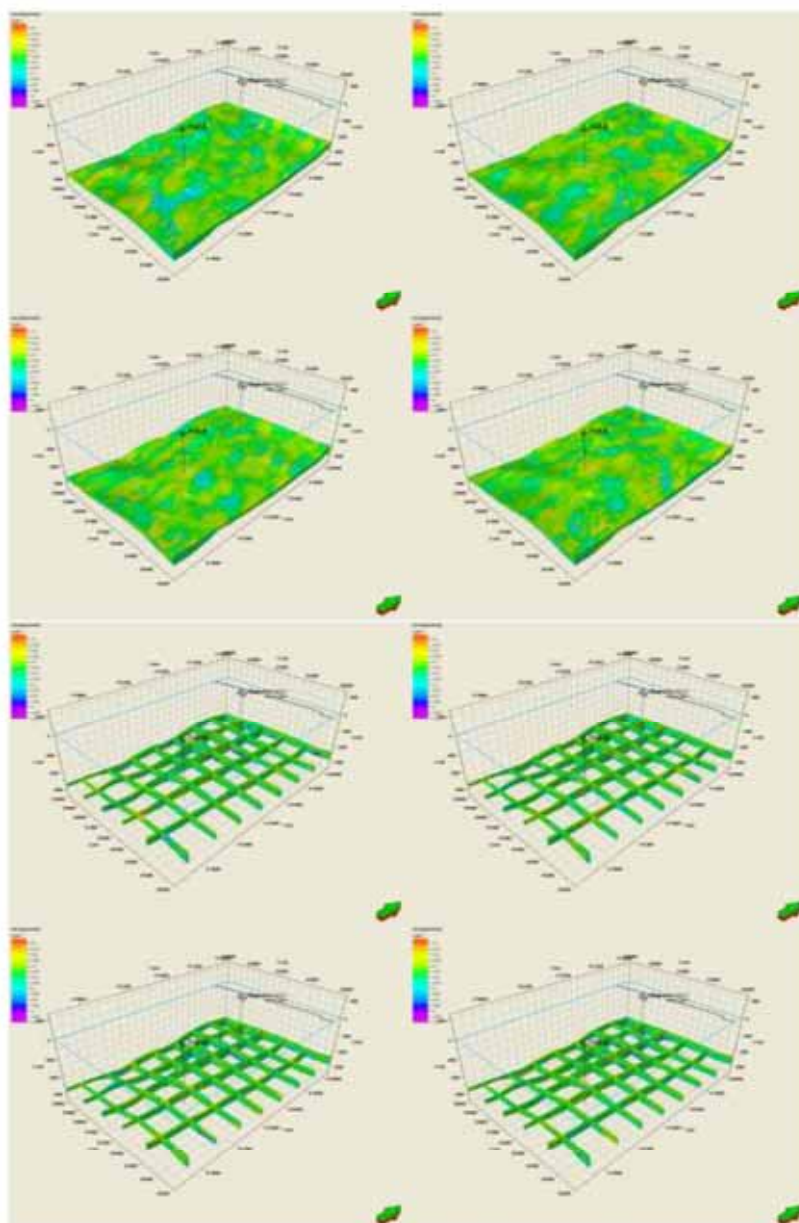


図 2.7-9 50 個の内 4 個の具現モデルの参考例：淹ノ上層 T 1 部層の孔隙率分布
(上図：全体表示、下図：格子状に断面を表示、図中の矢印は北を示す)

2.7.4 CO₂挙動予測シミュレーション

構築した50個の地質モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを行い、貯留層および遮蔽層の性能評価を実施した。シミュレーションでは、CO₂を25万トン/年×3年間圧入し、圧入期間中の圧入性やその後の貯留CO₂の挙動予測等を行った。CO₂挙動予測シミュレーションの結果および評価については、第3章に示す。

2.7.5 弾性波探査シミュレーション

CO₂挙動予測シミュレーションで得られたCO₂の拡がりの予測結果から、弾性波探査によるCO₂賦存範囲の検出可能性等を検討することを目的として、弾性波探査シミュレーションを行った。シミュレーションでは、作成した二次元速度構造モデルを入力として差分法による二次元弾性波探査シミュレーション(P波)を実施し、合成弾性波記録を作成した。

CO₂圧入前後の貯留層の変化による反射断面での応答を見るため、CO₂累積圧入量12.5万トン、25万トン、50万トン、75万トンの各場合において、CO₂圧入開始前の記録との差を求めた。これにより、12.5万トン圧入の時点でCO₂の拡がりは認識可能であり(図2.7-10)、25万トン圧入の時点ではCO₂の拡がりを明確に検知できることがわかった(図2.7-11)。これにより滝ノ上層T1部層においては、累積CO₂圧入量20万トン、25万トン、30万トンという圧入過程で弾性波探査を繰り返し実施することにより、CO₂の挙動(拡がっていく様子)が検知可能と判断した。

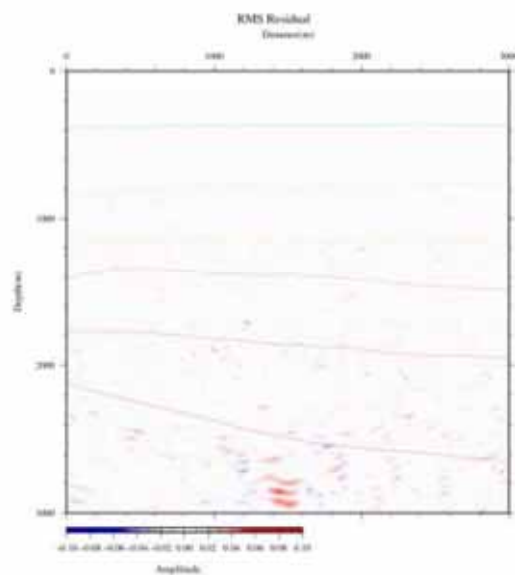


図 2.7-10 差分（深度断面、滝ノ上層 T1 部層、CO₂ 圧入 12.5 万トン圧入後）

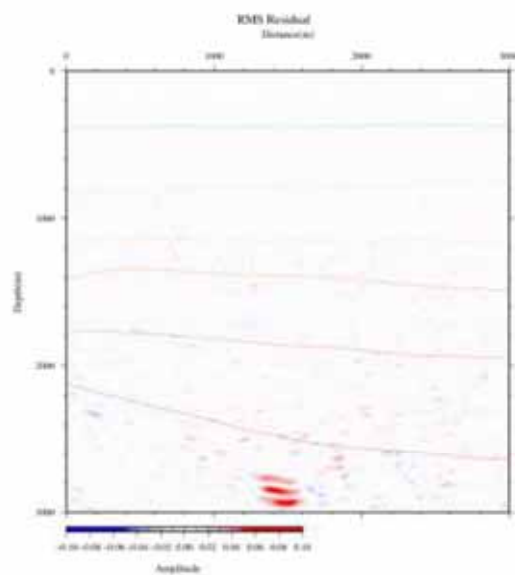


図 2.7-11 差分（深度断面、滝ノ上層 T1 部層、CO₂ 圧入 25 万トン圧入後）

2.8 萌別層解析結果

萌別層はシルト岩～泥岩からなる上部（萌別層泥岩層）と主に砂岩からなる下部（萌別層砂岩層）に分けられる。萌別層砂岩層を貯留層とし、萌別層泥岩層を遮蔽層と想定した。

2.8.1 貯留層

萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約100mである。三次元弾性波探査では、萌別層下部に連続の良い強反射が認められることから砂礫岩層の発達を示唆される。この強反射は検討地域の北東部で顕著であり、南および西に向かって減衰するため、砂礫岩層は北東部を中心に発達していると解釈される。

本層準は比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられることから、砂岩の分布範囲については注意が必要である。そこで、苫小牧CCS-1および3Dデータを用いて、堆積学的検討を行った。その結果は以下の通りである。

萌別層砂岩層は、シーケンス層序学という高海水準期堆積体（HST）に相当し、ファンデルタ・陸棚（Shelf）・斜面（Slope）の3つに分類できる（図2.8-1）。このうち砂岩の発達が最も期待できるのがファンデルタで、陸棚、斜面と砂岩の割合が少なくなっていく。少なくとも5つのファンデルタが北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈した。ファンデルタは、堆積物供給源である北東側がより砂岩が多く、南西に向かって泥岩が多くなる傾向にあると推定した。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表2.8-1にまとめる。

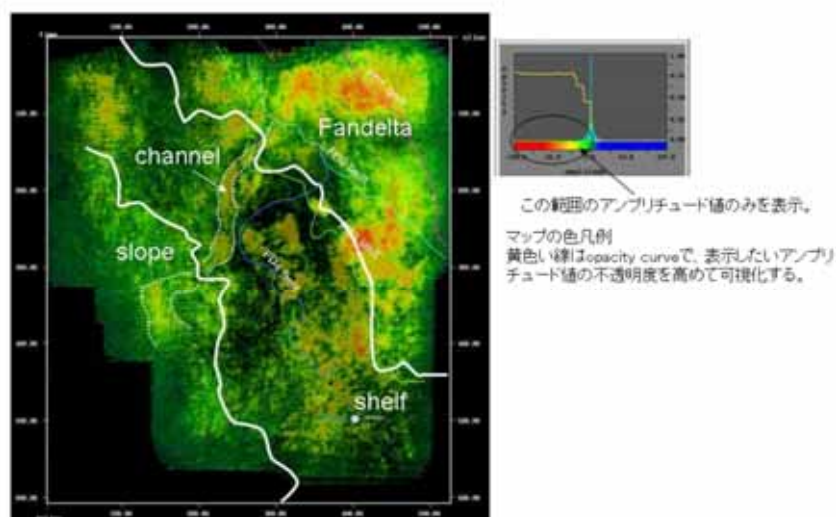


図 2.8-1 萌別層HST区間の堆積相解釈図（図の上部の方角は北）
（暖色系は負の高い振幅値、寒色系は負の低い振幅値を示す。正の振幅は非表示。）

表 2.8-1 萌別層砂岩層 貯留層性状一覧

項 目	
対象深度	約1,100～1,200m(垂直深度)
層厚	約100m
岩相	砂岩(礫質砂岩、シルト岩を伴うファンデルタ堆積物)
孔隙率	25～40%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) 20～40%(物理検層解析結果)
浸透率	9～25mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) 1～1,000mD(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下、空気) 1～120mD(物理検層解析結果)
水圧入テスト (苫小牧CCS-1)	最大1,200kl/日(掘削深度1,077～1,217mのうち57.5m)

2.8.2 遮蔽層

萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数 100m の比較的浅い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さがあり(図 2.8-2)、コア試験結果からは水浸透率が $0.8 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-3}$ mD、スレシヨルド圧力が 0.75MPa、

1.65MPa、1.67MPaの結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で1.50の強度を確認している。

以上の調査、分析結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表2.8-2にまとめる。

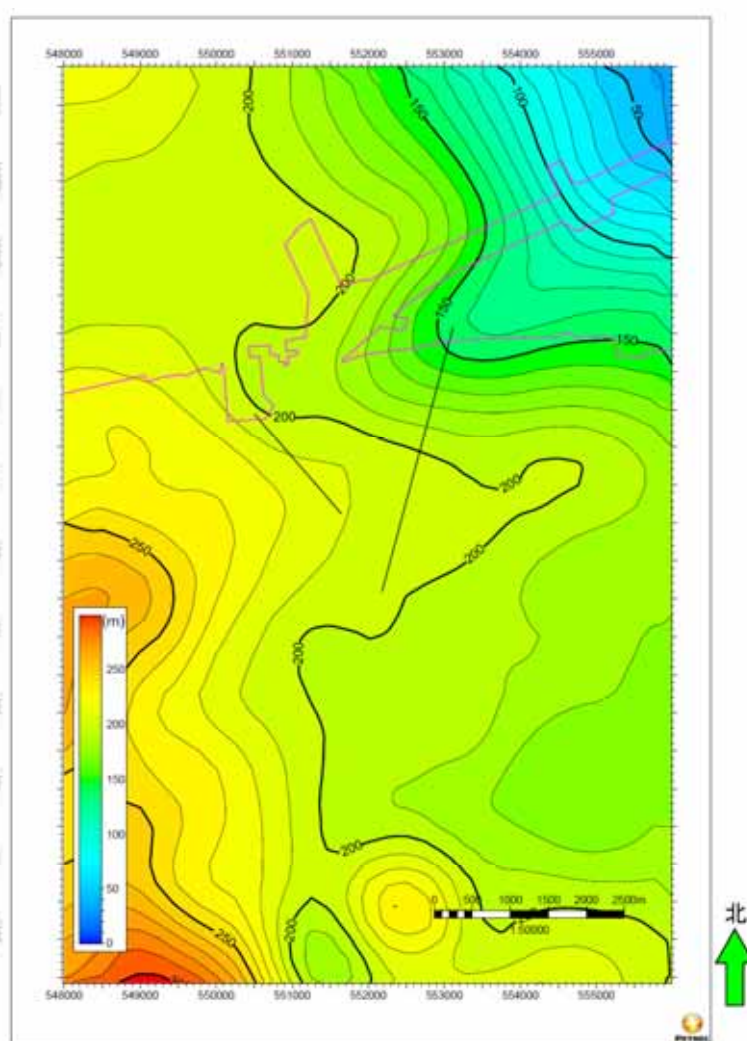


図 2.8-2 萌別層泥岩層の等層厚線図 (等層厚線間隔: 10m)

表 2.8-2 萌別層泥岩層 遮蔽性状一覧

項 目	
層序	萌別層泥岩層(萌別層上部)
岩相	シルト岩～泥岩
層厚	約200m
孔隙率	32.4～37.2%(苦小牧CCS-2コア試験:封圧下)
浸透率	$0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ (苦小牧CCS-2コア試験:水浸透率)
スレショルド圧力	0.75, 1.65, 1.67MPa(苦小牧CCS-2コア試験:CO ₂ -水系段階昇圧法)
リークオフ圧力 (苦小牧CCS-2 リークオフテスト)	14.6MPa(等価泥水比重:1.50) (萌別層泥岩層(苦小牧CCS-2)991mVD(垂直深度))

2.8.3 地質モデル構築

(1) 構造モデル構築

シミュレーションを実施する際に必要な地質モデルを構築するため、苦小牧3Dデータで解釈された各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

構造モデル構築には、地質構造解釈で作成されたホライゾン(上位より、鶴川層上限、萌別層上限、萌別層海進期堆積体(TST)上限、萌別層高海水準期堆積体(HST)上限、萌別層HSTデルタ上部基底、萌別層HST基底、荷葉層上部基底)を用いた。深度変換された萌別層砂岩層上限(萌別層HST上限)のモデル断面位置図を図2.8-3、主要な層準の東西モデル断面を図2.8-4に各々示す。

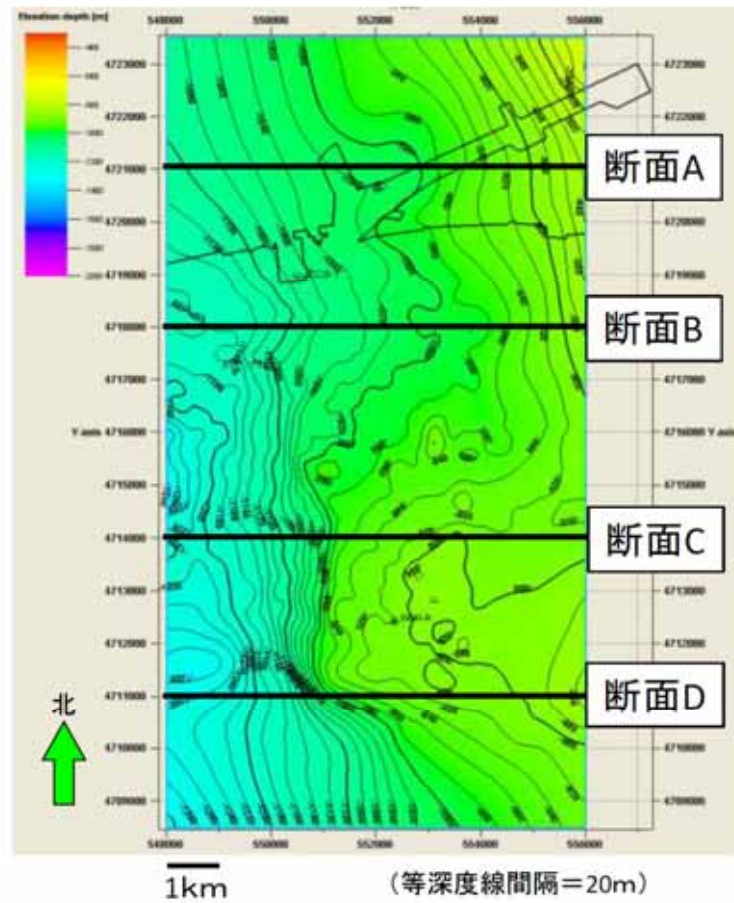


図 2.8-3 モデル断面位置図（構造図は萌別層砂岩相（HST）上限）
（図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標）

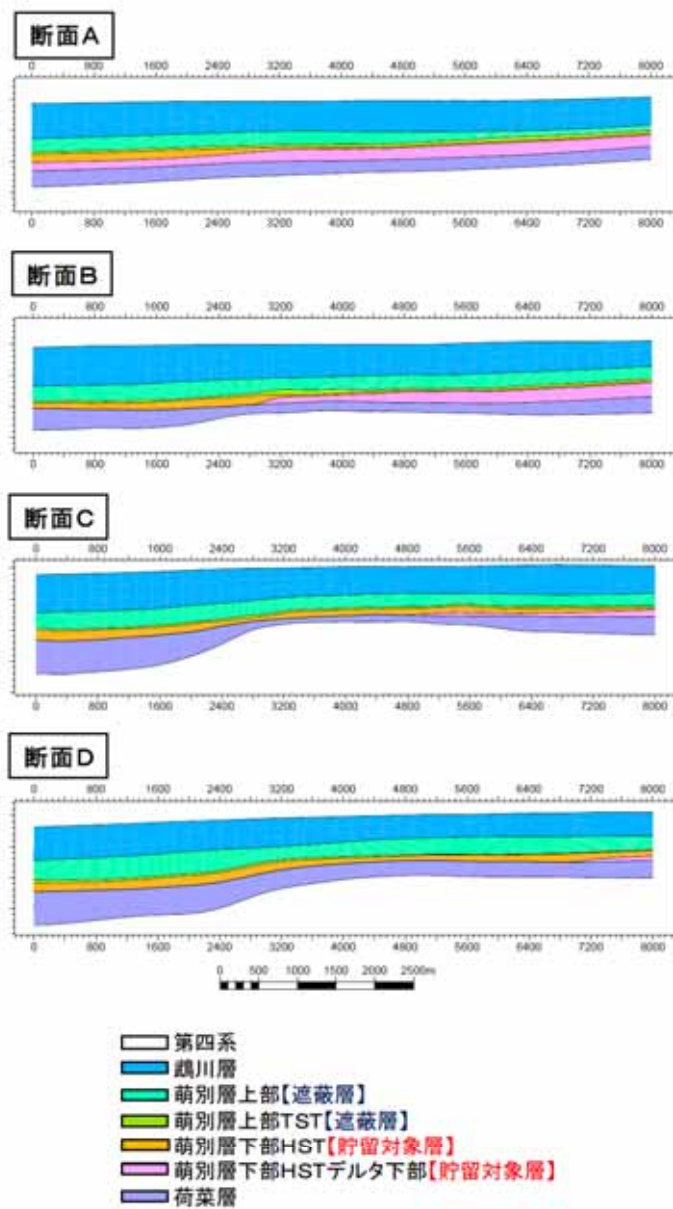


図 2.8-4 モデル断面図（上から順に断面 A～D、スケールは m）

CO₂挙動予測シミュレーションを行うため、各層準内に以下のようにグリッドセルを作成した。

・水平方向のグリッドセルサイズ

X方向 (i) およびY方向 (j) : 200m 8km×15km

(i 方向セル数: 40 セル、j 方向セル数: 75 セル)

・垂直 (k) 方向のグリッドセルサイズ

鵜川層 : 3 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 1~3)

萌別層上部 : 10 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 4~13)

萌別層TST : 2 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 14~15)

萌別層HST上部 : 15m ごとに分割 (k 方向セル番号: 16~25)

萌別層HST下部 : 15m ごとに分割 (k 方向セル番号: 26~38)

荷葉層 : 5 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 39~43)

主たる遮蔽層である萌別層上部は、CO₂貯留対象領域では十分な厚さがあり良好な遮蔽性能が期待できる。ただし、北東部の陸域では遮蔽層が徐々に薄化していく傾向が確認されていることから、北東部陸域においては薄い遮蔽層を設定した。

萌別層TSTについては便宜上遮蔽層と呼んでいるが、苫小牧CCS-1では上部に砂岩層、下部に泥岩層が認められたため、その両層を表現するためにレイヤー数を2とした。

萌別層HSTは、CO₂圧入対象層準の萌別層砂岩相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のセルサイズとなるようにした。なお堆積物の堆積方向を加味して、萌別層HST上部はFollow Baseと呼ばれる手法で、萌別層HST下部はFollow Topと呼ばれる手法でレイヤーを作成した(図2.8-5)。

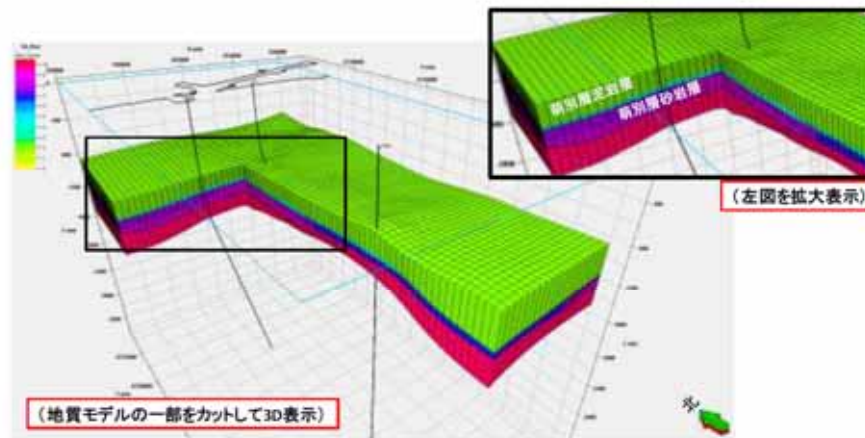


図 2.8-5 グリッドモデル概観

(2) 属性モデル構築

構築した構造モデルを基に、各セルに属性を与えた。属性は、堆積相解析で設定した堆積相区分として与えた。属性モデルに与えた堆積相区分概念を図 2.8-6 に示す。萌別層 HST は堆積環境により西よりスロープ (6)、陸棚 (7)、デルタ上部 (8)、デルタ下部 (9) の 4 つに区分される。

萌別層 TST は、沖側 (3: 泥岩層)、陸側上部 (4: 砂岩層) ならびに陸側下部 (5: 泥岩層) に区分した。

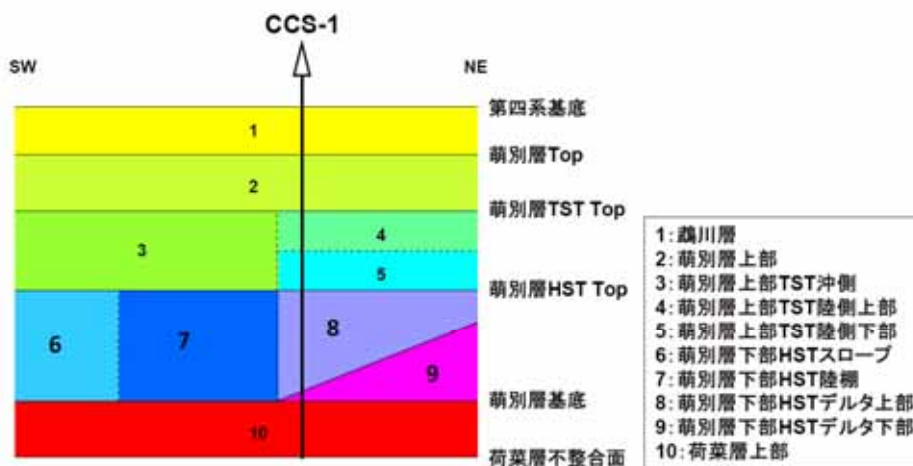


図 2.8-6 堆積相区分概念図

2.8.4 CO₂挙動予測シミュレーション

構築した貯留層モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを行い、貯留層および遮蔽層の性能評価を実施した。シミュレーションでは、CO₂を25万トン/年×3年を目途に圧入し、圧入期間中およびその後の長期間にわたって貯留CO₂の挙動予測等を行っている。CO₂挙動予測シミュレーションの結果および評価については、第3章で示す。

2.8.5 弾性波探査シミュレーション

滝ノ上層T1部層と同様に、CO₂挙動予測シミュレーションで得られたCO₂の拡がりの予測結果から、弾性波探査によるCO₂賦存範囲の検出可能性等を検討することを目的として、弾性波探査シミュレーションを行った。

萌別層砂岩層ではCO₂累積圧入量12.5万トンの時点で、CO₂の拡がりは明確に検出できることがわかった(図2.8-7)。このため萌別層砂岩層においては、累積CO₂圧入量10万トン、12.5万トン、15万トンというCO₂圧入過程で弾性探査を繰り返し実施することにより、CO₂挙動(拡がっていく様子)が検出可能と判断した。CO₂累積圧入量25万トン時点の結果を図2.8-8に示す。

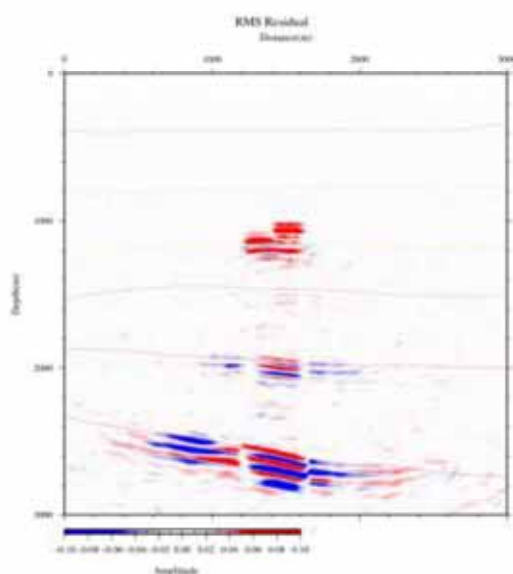


図 2.8-7 差分(深度断面、萌別層砂岩層、CO₂圧入12.5万トン圧入後)

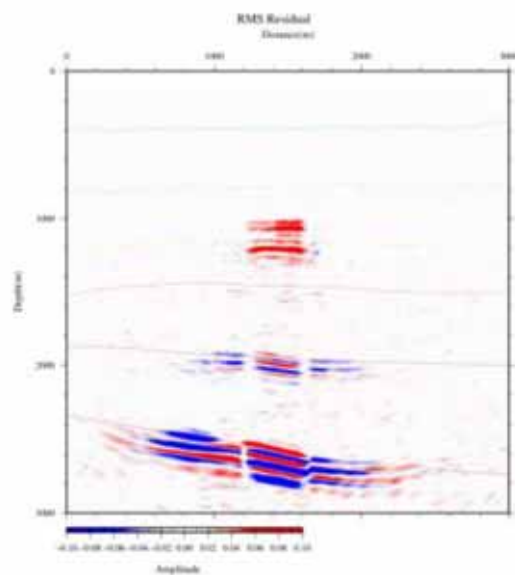


図 2. 8-8 差分（深度断面、萌別層砂岩層、CO₂圧入 25 万トン圧入後）

第3章 貯留層総合評価

3.1 貯留層の総合評価

貯留層総合評価においては、第2章で構築した貯留層モデルを用いてCO₂挙動予測シミュレーションを実施し、その結果を基に計画通りのCO₂圧入が可能か、貯留層からのCO₂の漏出は生じていないか、長期間にわたって計画通りの範囲にとどまっているかを評価した。以下、滝ノ上層および萌別層の評価結果について示す。

3.1.1 滝ノ上層評価結果

(1) 貯留層評価

2.7.1で記載の通り、滝ノ上層は火山性砕屑物を含む火山岩層であり、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。滝ノ上層T1部層（層厚が約600m）は、さらに上部の凝灰岩卓越層と下部の火山岩卓越層に分けられる。

溶岩～凝灰角礫岩相では良好な圧入性状が期待できることから全体が圧入対象となり、凝灰岩相は部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、一部が圧入対象となり得ると考えられる。

(2) 遮蔽層評価

2.7.2で記載の通り、遮蔽対象層となる振老層および平取・軽舞層は、約1,100mの層厚を有する。苫小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部でリークオフ圧力が等価泥水比重1.96の強度を持つことを確認した。

苫小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取・軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないものと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$ mD、スレシヨルド圧力が1.29MPa～12.3MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといった比較的低い分析値が得られているものの、CO₂-水系の条件で分析した場合には、11.72MPa以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取・軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。

(3) シミュレーション概要

① 概要

構築した貯留層モデルを用いて、 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレータは、Computer Modelling Group Ltd.社のGEM (ver2010.12)を使用した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛管圧力と低浸透性による物理的トラッピング、残留ガス飽和率とガス相対浸透率のヒステリシスによる残留 CO_2 トラッピング、 CO_2 の地層水への溶解による溶解トラッピングである。

圧入位置については、陸上から掘削可能な圧入井の仕様に応じて設定した。すなわち、 CO_2 圧入井は陸上から南西方向に掘削すると仮定し、圧入井における滝ノ上層T1部層の全区間に対して CO_2 を圧入した。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最大坑底圧力については、苫小牧CCS-1の振老層下部でのリークオフ圧力が等価泥水比重で1.96であるので、貯留層上限深度での地層破壊圧力を計算し、その90%を圧入圧力上限とした。すなわち、 CO_2 圧入井において、グリッドモデルでの貯留層最上位での垂直深度2,419.4mから地層破壊圧力を求め、この90%（41,853kPa）を CO_2 圧入時に許容される最大坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）とした。

CO_2 の圧入目標量は25万トン/年×3年として、第2章で述べた50個のモデルに対してシミュレーションを実施した。

② パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧CCS-1のデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など）および文献値により、表3.1-1に示す値を用いた。

表 3.1-1 シミュレーションパラメーター一覧

モデル	滝ノ上層 T 1 部層 2011 モデル		
サイズ	8km × 12km × 4,000m (ideal volume 24km × 24km × 4,000m)		
グリッド	80 × 120 × 106 Grid		
アクティブ・ブロック数	384,050		
基準温度	91.0°C (2,419.4m)		
基準圧力	34,370kPa (2,419.4m)		
CO ₂ 圧入レート、圧入期間	250,000 トン/年 × 3 年		
圧入圧力上限	41,853kPa		
岩石性状	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
平均孔隙率	0.125 Bennion(2005) ¹⁾	0.127	0.150
平均浸透率 (mD)	2.7	0.0072	0.000035
圧縮率 (kPa ⁻¹)	8.073 × 10 ⁻⁷ 測定値		
塩分濃度 (ppm NaCl)	35,100 ([Cl ⁻]=21,300ppm)		
相対浸透率	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
気相 相対浸透率 K _{rg}	Bennion(2005) ¹⁾		Corey (1954) ²⁾
液相 相対浸透率 K _{rw}			van Genuchten(1980) ³⁾
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.04 Bennion(2005) ¹⁾		0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.558 Bennion(2005) ¹⁾		0.8
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.241 from default value of GEM		—
毛管圧力曲線	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
	Bennion(2006) ⁴⁾ , van Genuchten(1980) ³⁾		測定値
P _c (kPa)	28.8	428.1	469

【参考文献】

- 1) Bennion, B., 2005, Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin: *paper SPE 95547*.
- 2) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly*, November, 38-41.
- 3) van Genuchten, M. Th., 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- 4) Bennion, B., 2006 The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-Brine systems: *paper SPE 99325*.

(4) シミュレーションによるCO₂の圧入挙動① CO₂圧入時の挙動

50 個のモデルに対して、25 万トン/年×3 年間の挙動予測シミュレーションを行ったところ、全てのモデルにおいて 25 万トン/年×3 年間の圧入が可能であった。

そこで、このシミュレーションの結果において圧入終了時における坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）の圧力上昇量で序列をつけ、50 個のモデルの累積確率分布を作成し、圧力上昇量が当該モデル以下になる確率をそれぞれ P10、P50、P90 のパーセンタイル値として設定した（図 3.1-1）。これらの 3 つのモデルについて CO₂ 挙動予測シミュレーションを行った。

- 1) P10 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 10%
- 2) P50 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 50%
- 3) P90 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 90%

これらのモデルに与えられた浸透率は図 3.1-2 のようになっている。

図 3.1-3～図 3.1-5 に 3 つの貯留層モデル（P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル）における圧入期間（3 年間）の CO₂ 圧入に伴う坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的变化を示す。なお、3 年間の CO₂ 飽和率分布および溶解 CO₂ 分布については、3.1.1 (5) において述べる。

3 つのシミュレーションモデルにおける、圧入終了直前の坑底圧力は P10 モデルで 36,180kPa（ $\Delta P=1,800\text{kPa}$ ）、P50 モデルで 36,580kPa（ $\Delta P=2,200\text{kPa}$ ）、P90 モデルで 37,660kPa（ $\Delta P=3,290\text{kPa}$ ）であり、いずれのモデルにおいても設定した圧入圧力上限（41,853kPa）を大きく下回って、25 万トン/年×3 年間の CO₂ を全量圧入が可能である。また、いずれのモデルにおいても貯留層圧力は圧入終了後に速やかに低下し、圧入終了 5 年後にはほぼ初期貯留層圧力に近い約 35,000kPa（ $\Delta P=700\text{kPa}$ ）まで低下している。

なお、2.7.3 で述べた通り、滝ノ上層 T1 部層は堆積岩と比較して不均質性・異质性が

高く、掘削後の解析結果から、苫小牧CCS-1を掘削した領域は、滝ノ上層T1部層の高A1（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層T1部層の低A1（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

② 貯留層圧力分布

3年間のCO₂圧入終了時点における帯水層圧力の変化（圧入前の初期圧力からの変化量）を図3.1-6～図3.1-8に示す。いずれのモデルにおいても圧力の拡がりは圧入井を中心にほぼ南北に長軸をもつ楕円状となる。

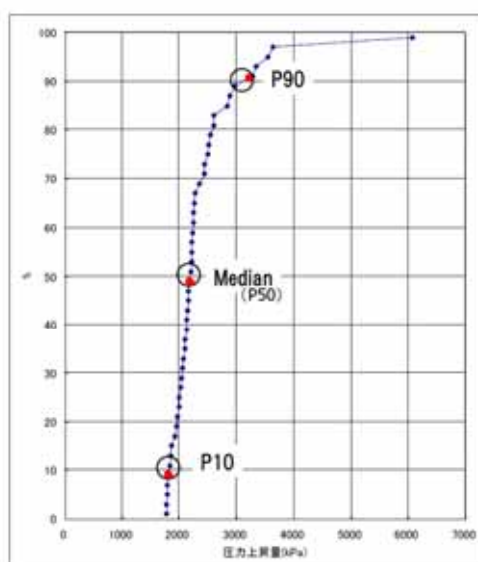


図 3.1-1 50 個のモデルの 3 年間の圧入による圧力上昇量の累積確率分布

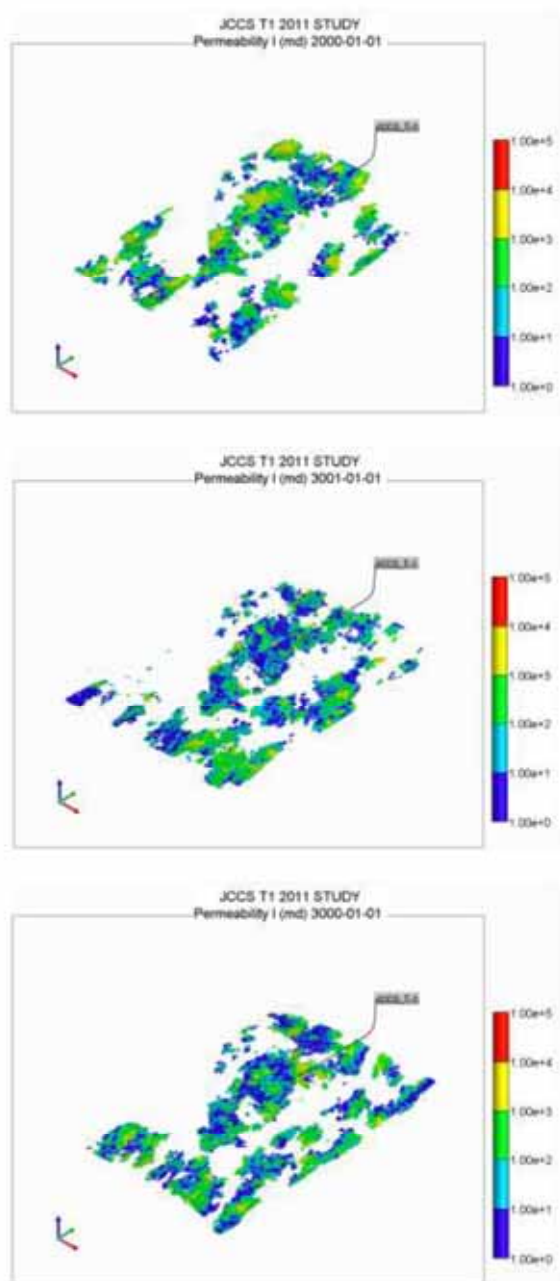


図 3. 1-2 浸透率(単位 : mD)分布 (P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル)

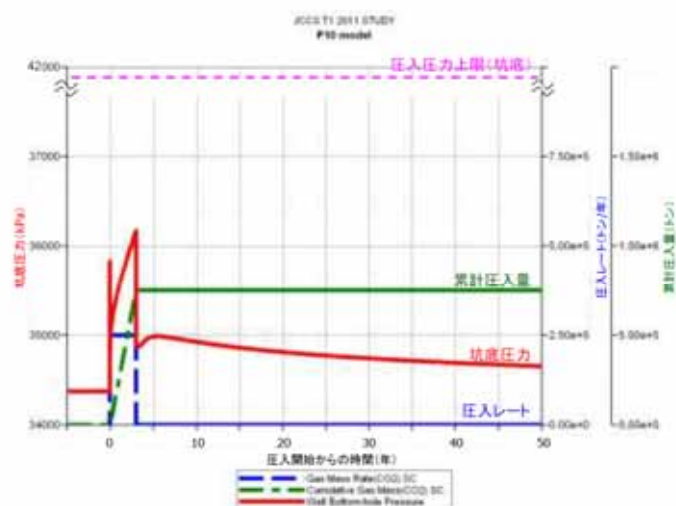


図 3.1-3 P10 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

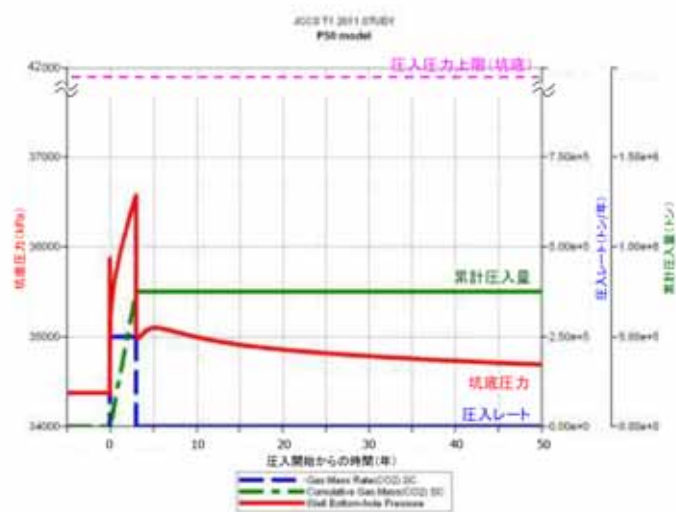


図 3.1-4 P50 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

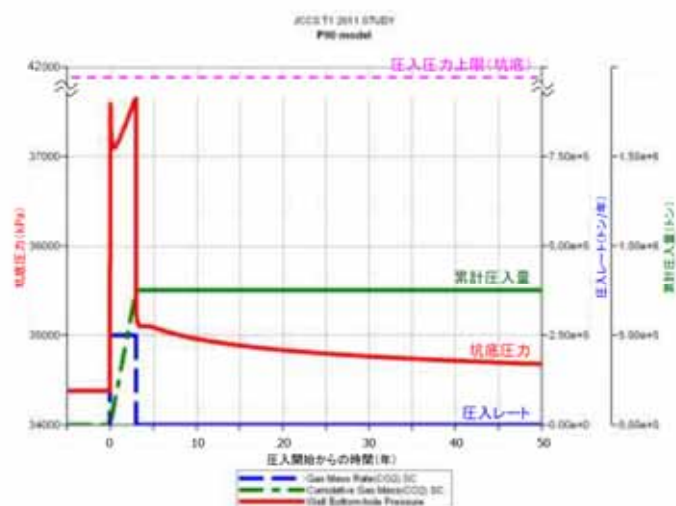


図 3.1-5 P90 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

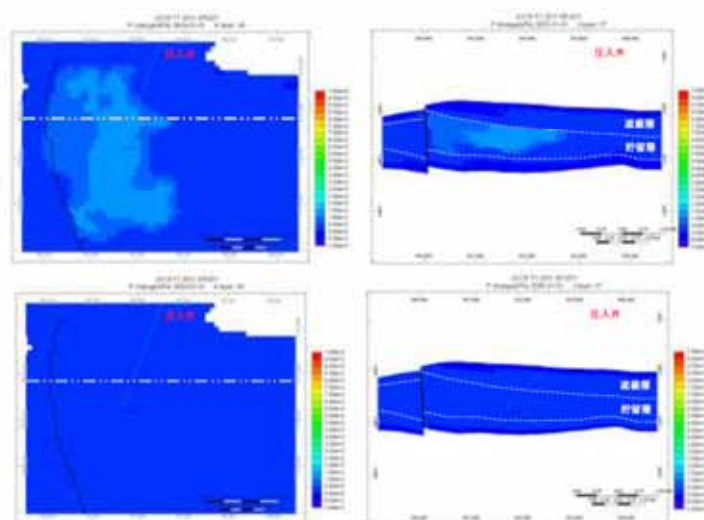


図 3.1-6 CO₂ 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（P10 モデル）

（上：圧入終了時（3 年後） 下：50 年後）

（左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

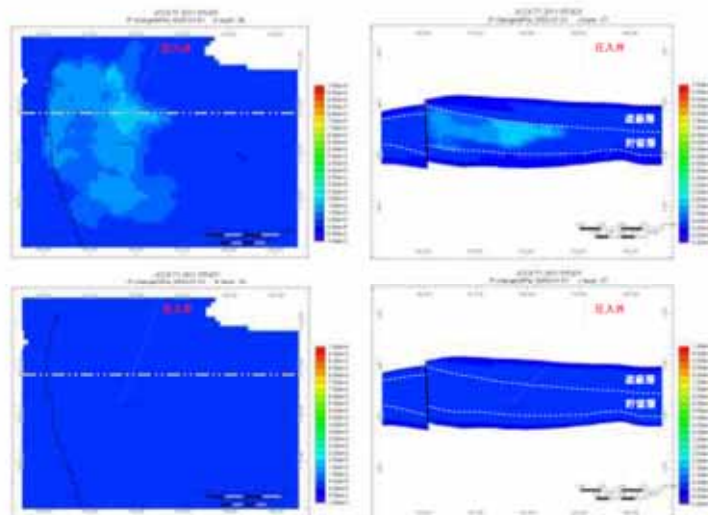


図 3.1-7 CO_2 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（P50 モデル）
 （上：圧入終了時（3 年後） 下：50 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

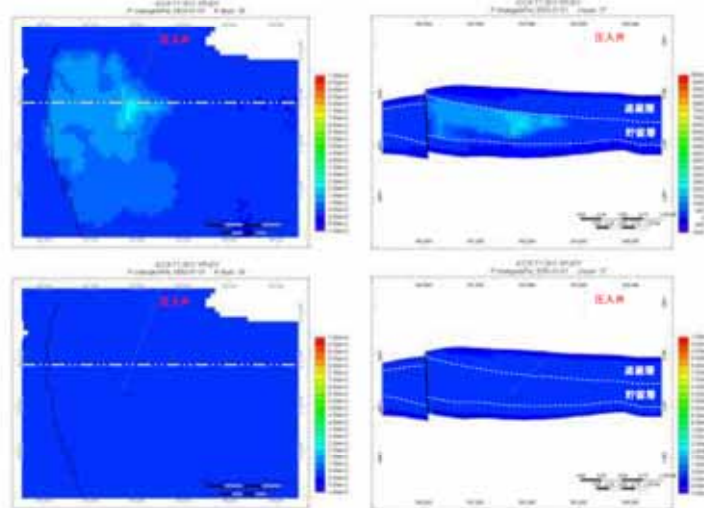


図 3.1-8 CO_2 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移
 （P90 モデル）（上：圧入終了時（3 年後） 下：50 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

(5) シミュレーションによる貯留CO₂の長期挙動予測

3つの貯留層モデル(P10モデル、P50モデル、P90モデル)について、圧入開始から1,000年間(圧入3年間、圧入終了後997年間)のCO₂の挙動予測シミュレーションを実施した。以下に長期的な挙動に関する各モデルの比較を示す。

① 圧入に伴う貯留層内のCO₂分布予測

圧入終了時点(圧入開始から3年後)、圧入開始から200年後および1,000年後におけるCO₂飽和率分布を図3.1-9～図3.1-11に示す。また、CO₂が地層水に溶解した状態の溶解CO₂濃度の分布を図3.1-12～図3.1-14に示す。

1) P10モデル

CO₂は、高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に選択的に圧入される。圧入されたCO₂は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相^{注)}CO₂は圧入井から水平的に約600m先まで、溶解CO₂は約800m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂はほとんど移動せず溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO₂は拡がらない。

注) CO₂は、温度圧力条件により液体と気体の性状を合わせ持った状態となるが、シミュレータの中では「気相」として取り扱われることから、本書では「気相」と称する。

2) P50モデル

CO₂は、比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル同様、圧入されたCO₂は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相CO₂は圧入井から水平的に約450m先まで、溶解CO₂は約700m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂は殆ど移動せず、溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO₂は拡がらない。

3) P90モデル

CO₂は貯留層の比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル、P50モデル同様、圧入されたCO₂は坑井を中心として拡がり、圧入終了時点で気相CO₂は圧入井から水平的に約400m先まで、溶解CO₂は約500m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂はほとんど移動せず、溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解

CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。
遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）へはCO₂は拡がらない。

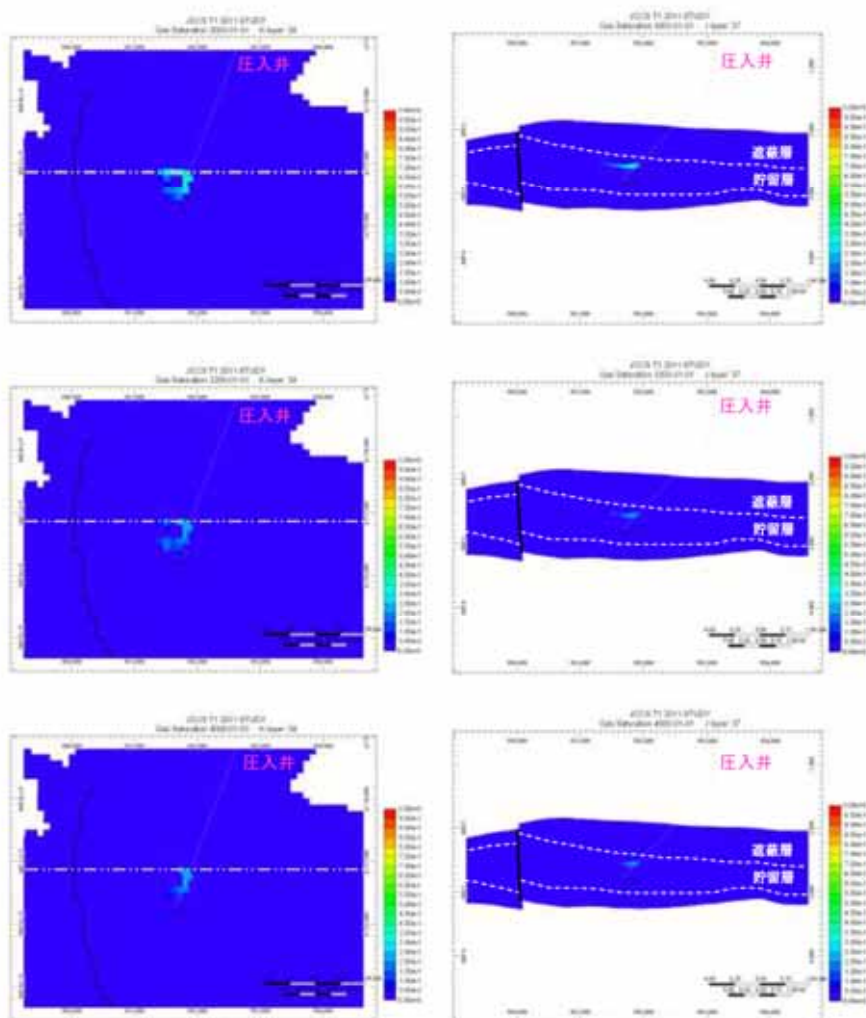


図 3.1-9 P10 モデルにおけるCO₂飽和率の推移

（上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）

（左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

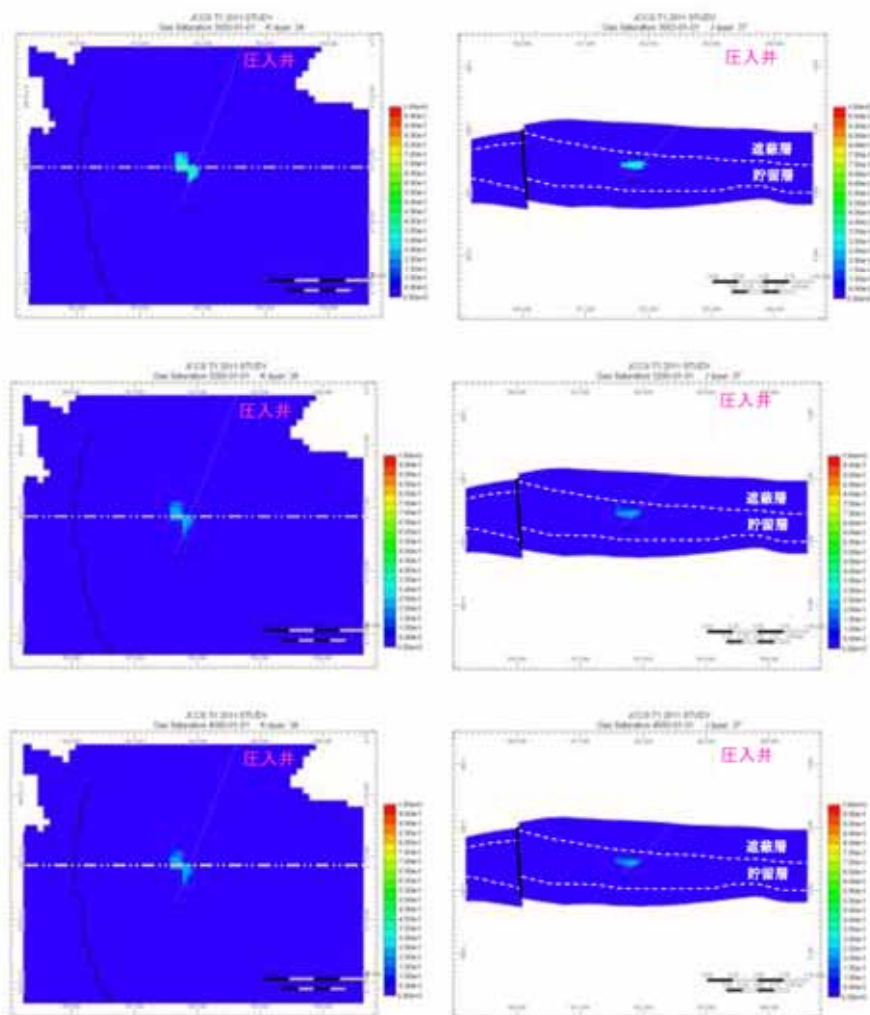


図 3.1-10 P50 モデルにおけるCO₂飽和率の推移

(上：圧入終了時 (3 年後) 中：200 年後 下：1,000 年後)

(左：平面分布 (k 方向セル 38) 右：東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

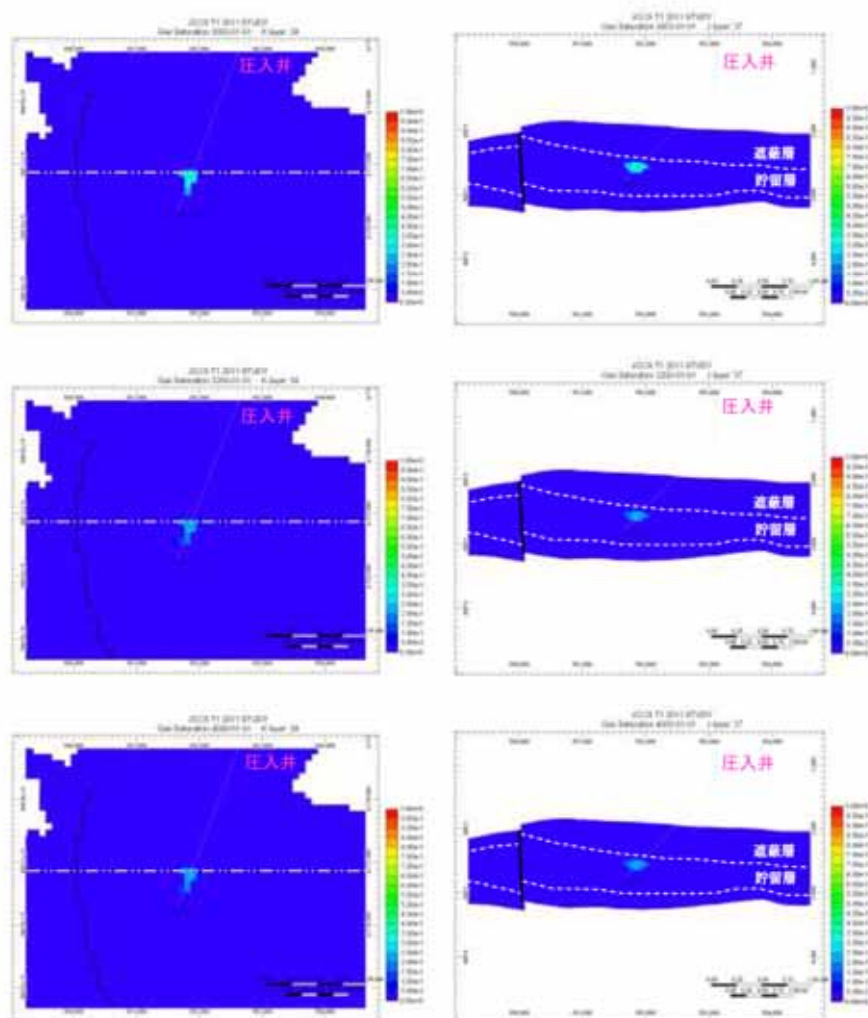


図 3.1-11 P90 モデルにおけるCO₂飽和率の推移

(上：圧入終了時 (3 年後) 中：200 年後 下：1,000 年後)

(左：平面分布 (k 方向セル 38) 右：東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

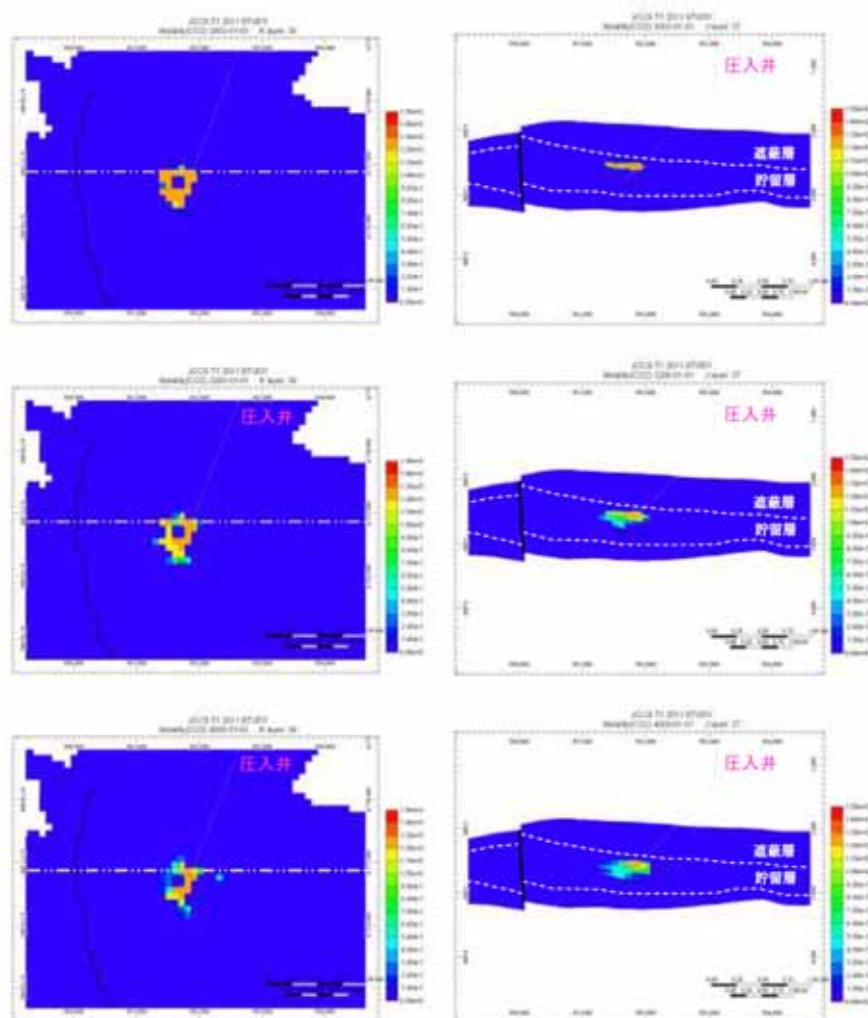


図 3.1-12 P10 モデルにおける溶解 CO_2 濃度（単位：mol/kg）の推移
 （上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

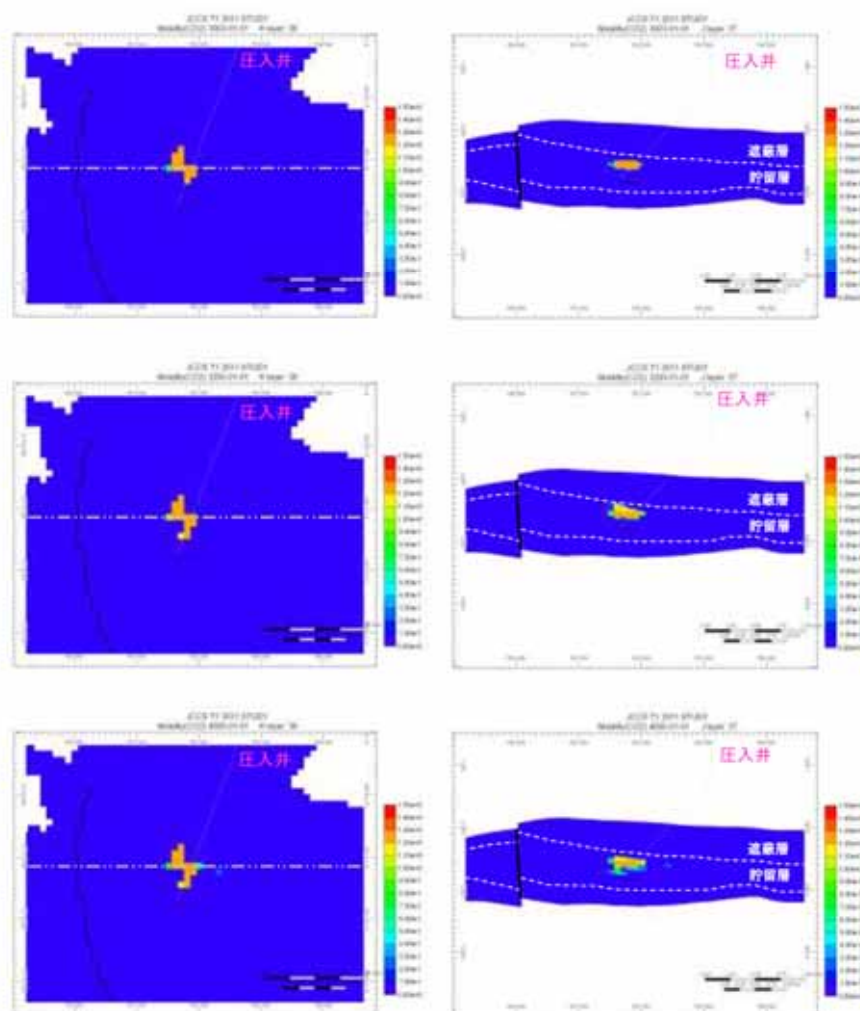


図 3.1-13 P50 モデルにおける溶解 CO_2 濃度（単位：mol/kg）の推移
 （上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

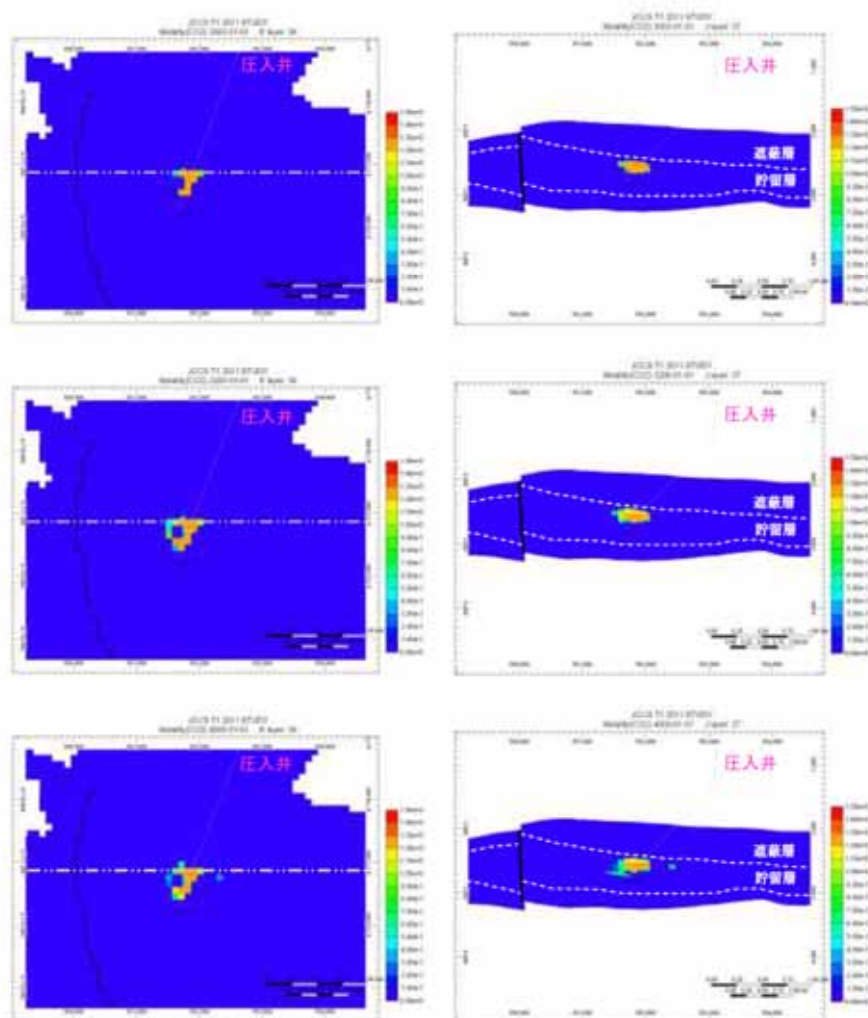


図 3.1-14 P90 モデルにおける溶解 CO_2 濃度（単位：mol/kg）の推移
 （上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

② 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（孔隙などにトラップされ動かない気相CO₂）で表現し、各モデルにおける3種類の貯留形態のCO₂圧入量に対する割合について、その経時変化を図3.1-15～図3.1-17に示す。いずれのモデルにおいても圧入終了後すぐにMovableCO₂量は減少し、約200年でその割合は殆ど0となる。その後、残留ガス飽和率によりトラップされたCO₂が地層水に溶解することで、Trapped CO₂とDissolved CO₂の割合が変化していく。その割合については、1,000年後にはP10モデルにおいてはDissolved CO₂量が約70%に達するのに対して、P90モデルにおいては約45%となる。この差については、圧入終了までのCO₂の拡がり方による地層水との接触面積の違い、CO₂が溶解し密度が大きくなった地層水の貯留層内での移動のしやすさ、貯留層内の圧力状態が原因であると考えられる。

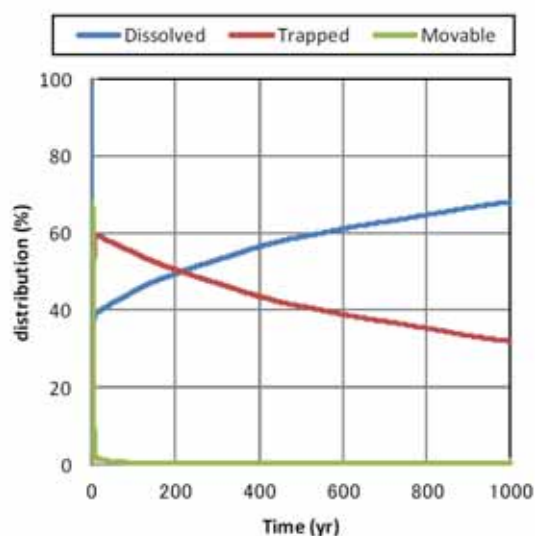


図3.1-15 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P10モデル）

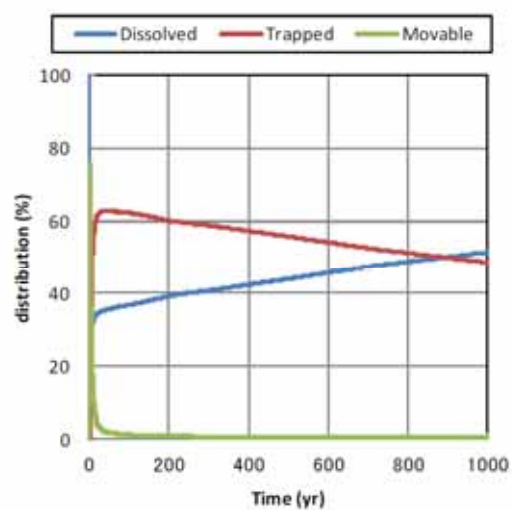


図 3.1-16 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P50 モデル）

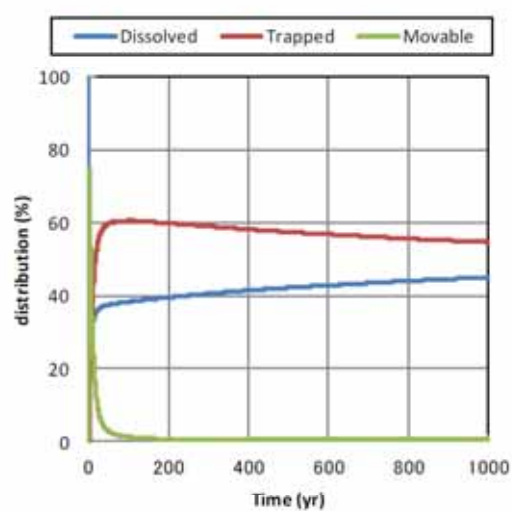


図 3.1-17 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P90 モデル）

(6) 総合評価

① 滝ノ上層評価のまとめ

滝ノ上層について行った貯留層および遮蔽層の評価ならびに CO_2 挙動予測シミュレーションの結果を以下の記述および表 3.1-2 にまとめる。

- 1) 滝ノ上層は、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層 T1 部層と下部の泥岩層からなる。本層の圧入対象層は、溶岩～凝灰角礫岩相と凝灰岩相とに大別され、凝灰岩相では、貯留層としてそれほど良好な性状は期待できないが、溶岩～凝灰角礫岩相では良好な性状が期待できる。
- 2) 滝ノ上層 T1 部層の上位には、主に泥岩からなる層厚約 1,100m の振老層および平取+軽舞層が分布する。調査データから、苫小牧沖構造の西翼を通る断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は良好な遮蔽性能を有する地層であると期待できる。
- 3) 貯留層の性能、遮蔽層の健全性を評価するため、25 万トン/年×3 年間の CO_2 を圧入し、圧入終了後 997 年間（圧入開始から 1,000 年間）の CO_2 挙動を予測するシミュレーション実施した。シミュレーションの結果をまとめると、以下の通りである。
 - ・作成した 50 個の貯留層モデルの全てにおいて 25 万トン/年×3 年間の圧入は可能であった。
 - ・気相 CO_2 の拡がりは圧入終了時点で、圧入井から水平に P10 モデルで約 600m 程度、P50 モデルで 450m 程度、P90 モデルで約 400m 程度であった。
 - ・溶解 CO_2 の拡がりは圧入終了時点で、P10 モデルで約 800m 程度、P50 モデルで 700m 程度、P90 モデルで約 500m 程度であった。
 - ・3 つのモデルでは遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）への CO_2 の到達は、圧入開始から 1,000 年後においても確認されなかった。
- 4) 滝ノ上層は堆積岩と比較して不均質性・異方性が高く、掘削後の解析結果から苫小牧 CCS-1 を掘削した領域は滝ノ上層の高 A I（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層の低 A I（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

② 総合評価

滝ノ上層への 25 万トン/年×3 年間の CO_2 圧入を行った場合、滝ノ上層への CO_2 の圧入は可能であり、遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）への CO_2 の拡がりはないと評価する。

表 3.1-2 滝ノ上層 T1 部層貯留層総合評価のまとめ

項目	
貯留層	構造 ●北北西-南南東に延びる背斜構造(苫小牧沖構造)の北東翼部。 ●圧入想定ポイントから2km程度西側に滝ノ上層下位から荷葉層に達する断層の存在が推定される。
	対象深度・層厚 ●垂直深度:約2,400~3,000m ●層厚:約600m
	岩相 ●溶岩~凝灰角礫岩、凝灰岩
	物性 圧入対象岩相は滝ノ上層T1部層下部の溶岩~凝灰角礫岩相で孔隙率・浸透率が高いことが期待される岩相。 ●孔隙率:5~18%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下)、孔隙率:3~19%(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.68~1.15mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) ●浸透率:0.001~0.01mD(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) ●浸透率:0.002~7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.01mD~2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果)
遮蔽層	圧入・貯留性能 ●【貯留層評価】3Dデータなどの能折で良好と想定している岩相を調査井(苫小牧CCS-1)では未確認。 ●【シミュレーション】貯留性能が良好な岩相に圧入することで、25万トン/年×3年圧入可能。
	岩相 ●泥岩(振老層~平取+軽舞層)
	層厚 ●層厚:約1,100m
	物性 ●孔隙率:12.4~18.0%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) ●浸透率: $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$ mD(苫小牧CCS-1コア試験:水浸透率) ●スレシヨルド圧力:1.29~12.3 [※] MPa以上(苫小牧CCS-1コア試験:N ₂ -水系残差圧力法) ●スレシヨルド圧力:11.72MPa [※] 以上(苫小牧CCS-1コア試験:CO ₂ -水系段階昇圧法) ※ブリークスルしなかった。 ●リークオフ圧力:45.3MPa(等価泥水比重:1.96)(振老層(苫小牧CCS-1)2,352m)
坑井掘削難易度	遮蔽性能 ●【シミュレーション】遮蔽層へのCO ₂ の到達は確認されなかった。
	大深度の高傾斜井となる。
	圧入後CO ₂ の挙動(シミュレーション結果) ●(3年圧入後)気相CO ₂ の拡がりは400m×600m程度。溶解CO ₂ は550m×700m程度(P50モデル)。 ●圧入終了後は地層水への溶解等による下方への移動が認められる。 ●200年程度で、気相CO ₂ の拡がりに変化は見られなくなる。

3.1.2 萌別層評価結果

(1) 貯留層評価

2.8.1 で記載のとおり、萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約 100m である。

萌別層砂岩層は、比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられる。シーケンス層序学という高海水準期堆積体 (HST) に相当し、ファンデルタ・陸棚 (Shelf)・斜面 (Slope) の 3 つに分類できる。少なくとも 5 つファンデルタが北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈した。ファンデルタは北東部を中心に発達し、砂礫岩層は堆積物供給源である北東側がより粗粒で、南西に向かって細粒になる傾向にあると推定した。

以上のことから、ファンデルタと解釈した北東部に存在する砂礫岩層が圧入対象となり得ると考えられる。

(2) 遮蔽層評価

2.8.2 で記載のとおり、萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数 100m の比較的深い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さが分布する。コア試験結果からは水浸透率が $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3}$ md、スレシヨルド圧力が 0.75MPa、1.65MPa、1.67MPa の結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で 1.50 の強度を確認している。

以上の結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。

(3) シミュレーション概要

① 概要

シミュレータとして GEM (ver. 2010.12) を使用し、CO₂ 挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛管圧力と低浸透性による物理的トラッピング、ガス相対浸透率のヒステリシスによる残留 CO₂ トラッピング、CO₂ の地層水への溶解による溶解トラッピングである。

第 2 章にて作成した属性モデルにおいて分類した堆積相区分について、シミュレーションモデルでは以下の通り大きく 2 種類に整理し、それぞれに岩相を設定した。

砂岩：堆積相区分4・8・9

泥岩：堆積相区分1・2・3・5・6・7・10

CO₂圧入井（圧入位置）は、萌別層砂岩層を対象としたAIバージョン結果を基に、貯留CO₂の拡がり三次元弾性波探査の範囲内に留まるようにすることも考慮して、想定する陸上基地からの掘削方位を設定し、仕上げ区間は圧入井の萌別層砂岩層にあたる全区間とした。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最大坑底圧力については、苫小牧CCS-2の萌別層泥岩層下部のリークオフ圧力が等価泥水比重で1.50であるので、貯留層上限深度でのリークオフ圧力を計算し、その90%を最大坑底圧力とした。すなわち、CO₂圧入井において、グリッドモデルでの貯留層最上位での垂直深度が1,011.93mであることからリークオフ圧力を求め、この90%（13,410kPa）をCO₂圧入時に許容される最大坑底圧力とした。

シミュレーションでは、CO₂の圧入目標量を25万トン/年×3年として、表3.1-4で示す各ケースに対してシミュレーションを実施した。

② パラメータ

シミュレーションパラメータは苫小牧CCS-1および苫小牧CCS-2で得られたデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等）および文献値により表3.1-3に示す値を用いた。

表 3.1-3 萌別層砂岩層 シミュレーションパラメータ

モデル	萌別層砂岩層 2011 モデル	
サイズ	8km×15km×1,500m	
グリッド	40×75×43 Grid	
アクティブ・ブロック数	97,024	
基準温度	44.78℃ (1,046.835 mVD)	
基準圧力	10,669.4kPa (1,046.835mVD)	
CO ₂ 圧入レート、圧入期間	250,000 トン/年×3 年	
圧入圧力上限	13,410kPa	
帯水層容積 (面積×層厚×孔隙率)	49×10 ⁹ Rm ³	
岩石性状	砂岩	泥岩
平均孔隙率	0.281	0.342
平均浸透率 (mD)	17.0	0.00173
圧縮率 (kPa ⁻¹)	1.532×10 ⁻⁶ 測定値	
塩分濃度 (ppm NaCl)	18,000 (Cl ⁻ =10,350mg/L)	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 K _{rg}	測定値	Corey (1954) ¹⁾
液相 相対浸透率 K _{rw}	測定値	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 測定値	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
	van Genuchten (1980) ²⁾	
P _c (kPa)	4.04	750

【参考文献】

- 1) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly*, November, 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, 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*.
- 4) Holtz, M. H., 2002, Residual Gas Saturation to Aquifer Influx : A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction: *paper SPE 75502*.

③ ケーススタディ

以下のケーススタディを実施し、各パラメータがシミュレーションの結果に与える影響を検討した。各ケースの概要を表 3.1-4 にまとめる。

a. ベースケース (表 3.1-4 におけるケース①)

水平浸透率は苫小牧 CCS-1 圧入テストにおける圧力解析結果 (No. 3 圧入テスト: 25md, No. 3a 圧入テスト: 9md) の平均値 $k_h=17\text{md}$ をベースケースにおける水平浸透率 (k_h) として設定した。垂直浸透率は水平浸透率の 1/10 ($k_v/k_h=0.1$) として設定した。

b. 砂岩層の浸透率の影響 (表 3.1-4 におけるケース②～④)

砂岩の浸透率 (水平浸透率) について浸透率に振れ幅があった場合の圧入挙動について把握することを目的として、ベースケースに対して、高浸透率ケース ($k_h=25\text{md}$) および低浸透率ケース ($k_h=9\text{md}$) として検討した。

水平浸透率/垂直浸透率 (k_v/k_h) 比についても、ベースケースの 0.1 に対して圧入テストにおける解析結果の平均値 ($k_v/k_h=0.675$; $k_v=11.475\text{md}$) を与えることでその影響について検討した。

c. 遮蔽層性状の影響 (表 3.1-4 におけるケース⑤)

遮蔽層性状が劣る場合の CO₂ 挙動を把握することを目的として、苫小牧 CCS-2 コア試料の残差圧力測定 (N₂-水系) で正しい測定ができなかった試料の測定値 (著しく低い測定値) を使用し、水浸透率がベースケースより高く ($k_w=7\times 10^{-3}\text{md}$)、スレシヨルド圧力が極端に低い ($P_c(\text{CO}_2)=0.012\text{MPa}$ (水-N₂系スレシヨルド圧力: $P_c(\text{N}_2)$ 系 $=0.028\text{MPa}$ から換算)) ケースを想定して検討した。

d. 萌別層砂岩層上限の変更 (表 3.1-4 におけるケース⑥)

図 2.8-4 に示すように、ベースケースにおいて堆積相区分 5 (萌別層下部 TST-陸側下部) については、堆積相解釈において対象地域全体に広がっていると仮定しているため、本来、砂礫岩層である堆積相区分 4 に CO₂ は移動することはない。しかしながら、もし何らかの理由で堆積相区分 4 にも CO₂ が貯留された場合にどのような挙動を見せるかを

把握するために、堆積相区分4のトップが萌別層砂岩層トップとなるように本来は泥岩からなる堆積相区分5に砂岩のパラメータを設定したシミュレーションを実施した。

ただし、堆積相区分4、5は圧入対象とはしないため、パーフォレーションを設定せず、圧入圧力の上限もベースケースなど他のケースと同様にした。

e 帯水層容積の影響（表3.1-4におけるケース⑦）

周辺部を含めた既存地質データから、萌別層砂岩層は、地質モデル構築範囲外側への拡がりが確認されている。ケース①～⑥では、外側の帯水層容積についても外周部セルの孔隙容積に反映させている。ケース⑦では帯水層容積を、貯留層の分布域が3Dデータの範囲内に限られるケース（シミュレーションモデルの外周グリッドのVolume Modifyを行わない）を想定した。

表 3.1-4 ケーススタディにおいて使用した各岩相に与えたパラメータ

ケース名	砂岩相				泥岩相				岩水層容積 (Pm^3)
	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	垂直浸透率/ 水平浸透率	堆積相	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	スリット圧力 (MPa)	堆積相
①ベースケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10
②低浸透率	9	0.9	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10
③高浸透率	25	2.5	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10
④高kv/kh	17	11.475	0.675	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10
⑤選鉱性能(低)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.00173	0.012	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10
⑥単引簡砂岩層上層変更	17	1.7	0.1	4, 5, 8, 9	0.00173	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10
⑦岩水層容積(小)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10