

第 2.2-11 図 苦小牧 CCS-1 の地温勾配解析結果

ウ) 苦小牧 CCS-2 の解析結果の概要

- 本井は平成 23 年 5 月 4 日から 6 月 15 日までの 43 日間で、苦小牧 CCS-1 の北東 37m の位置において深度 1,218m まで掘削した（垂直井）。
- 深度 993～1,218m の萌別層泥岩層および砂岩層において、直径 8cm のコア試料を連続採取した。
- 調査終了後は、耐 CO₂セメントを用いて埋め立てて廃坑した。
- 深度 989～993m の萌別層泥岩層下部において、リークオフテストを実施した。

エ) 圧入井の解析結果の概要

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

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

カ) 解析結果

- ・滝ノ上層 T1 部層への圧入：苫小牧 CCS-1 および滝ノ上層圧入井の取得データの解析で得られた滝ノ上層 T1 部層の貯留岩性状のまとめを，第 2.2-3 表に示す。また，振老層の遮蔽層性状に係る結果のまとめを，第 2.2-4 表に示す。滝ノ上層 T1 部層の遮蔽層は直上の振老層泥岩であるが，さらに上位に平取+軽舞の泥質岩，その上位に荷葉層の泥質岩が累重することから，3 重の遮蔽層層準が分布するといえる。
- ・萌別層砂岩層への圧入：苫小牧 CCS-1，苫小牧 CCS-2 および萌別層圧入井の取得データの解析により得られた，萌別層砂岩の貯留岩性状に係る結果のまとめを，第 2.2-5 表に示す。また，萌別層泥岩の遮蔽層性状に係る結果のまとめを，第 2.2-6 表に示す。萌別層砂岩層に対する遮蔽層は萌別層泥岩であるが，圧入対象域では 100m 程度以上の層厚を有すると推定される（第 2.2-12 図）。

第 2.2-3 表 貯留層性状一覧（滝ノ上層 T1 部層）

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

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

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

第 2.2-4 表 滝ノ上層 T1 部層に対する遮蔽層性状一覧

項目	
層序	振老層および平取+軽舞層
岩相	泥岩
層厚	約 1,100m
孔隙率	12.4~18.0% (苫小牧 CCS-1 コア試験：封圧下)
浸透率	$8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6} \text{mD}$ (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) ^注 11.72MPa 以上 (苫小牧 CCS-1 コア試験：CO ₂ -水系段階昇圧法) ^注
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))

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

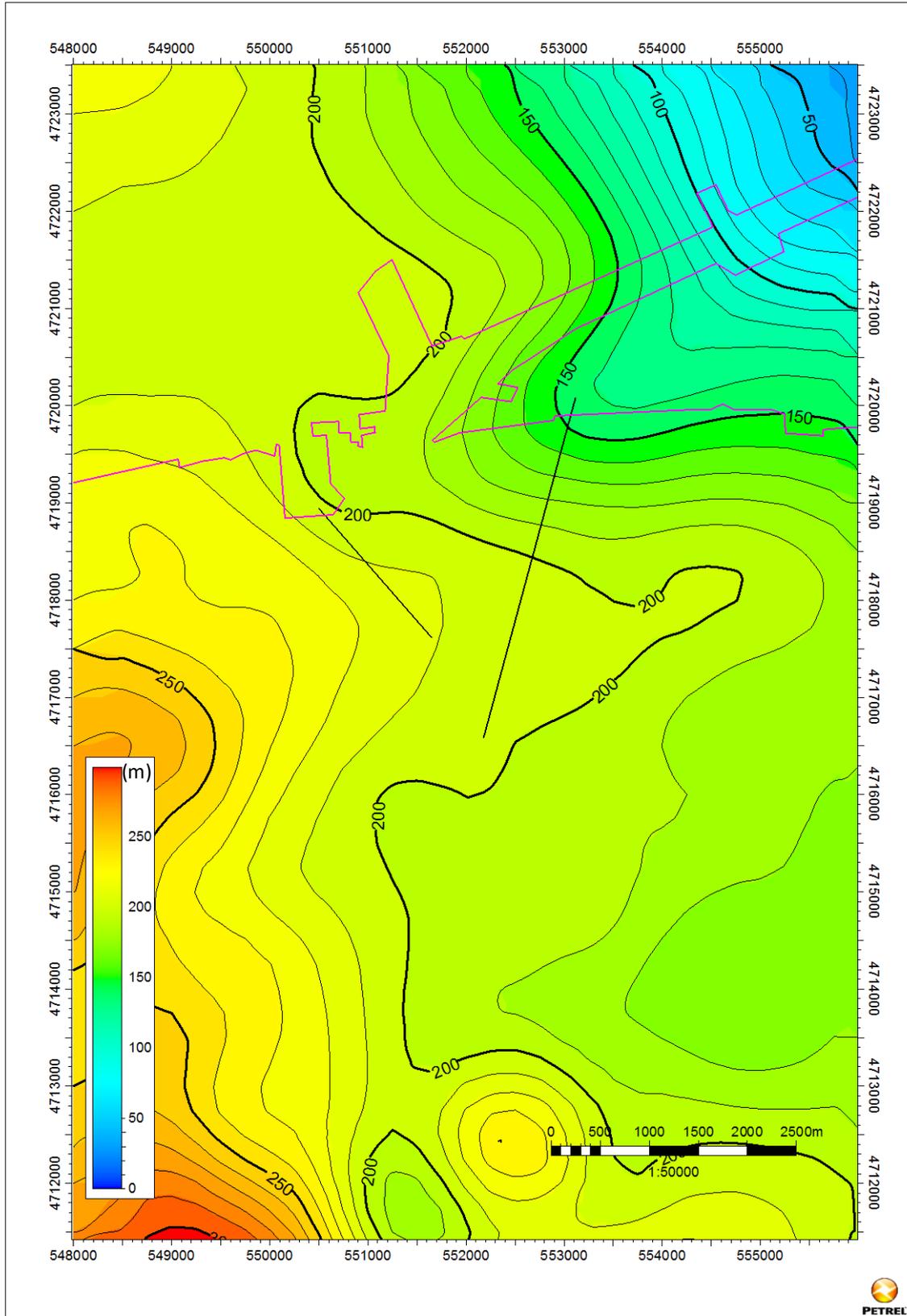
第 2.2-5 表 貯留層性状一覧 (萌別層砂岩層)

項目	
対象深度	約 1,100m~1,200m (垂直深度)
層厚	約 100m
岩相	砂岩 (礫質砂岩, シルト岩を伴うファンデルタ堆積物)
孔隙率	20~40% (苫小牧 CCS-1 コア試験：封圧下) 20~40% (物理検層解析結果) 12~42% (萌別層圧入井 NMR 検層解析結果)
浸透率	9~25mD (苫小牧 CCS-1 圧入テスト解析結果) 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) 370mD (萌別層圧入井フォールオフテスト解析結果)
ブライン圧入テスト (苫小牧 CCS-1)	最大 1,200kL/d (掘削深度 1,077~1,217m のうち 57.5m)

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

第 2.2-6 表 遮蔽層性状一覧 (萌別層泥岩層)

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



第 2.2-12 図 萌別層泥岩層の等層厚線図 (等層厚線間隔 : 10m)

③ 地質モデルの作成

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。以下、圧入対象層ごとに概要を示す。

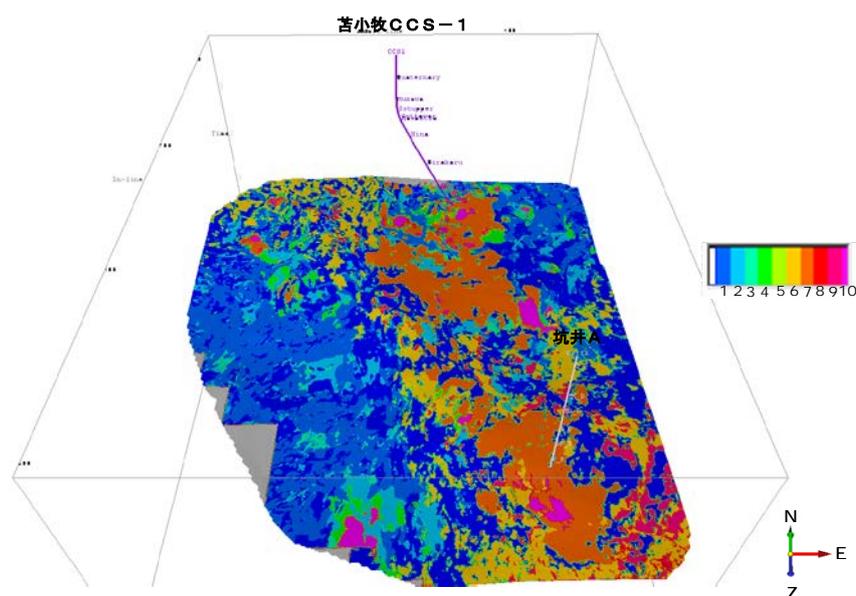
なお、以下のア)およびイ)で示す地質モデルは、平成 23 年度地質モデルである。イ)で示すモデルは、滝ノ上層圧入井の掘削結果を考慮し、ア)を修正したモデルである。

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

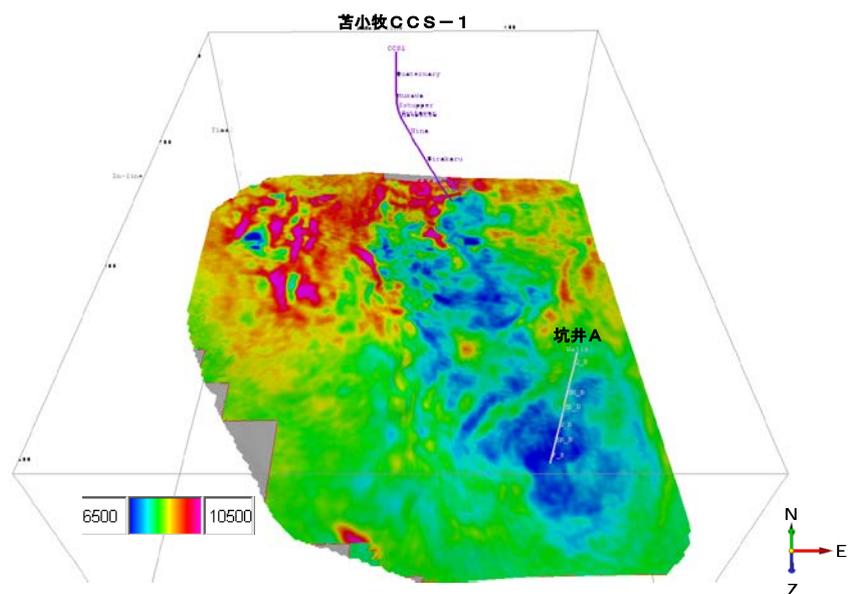
- ・ 滝ノ上層は、火山岩起源であり不均質性が高いため三次元弾性波探査データを活用した岩相分布・性状分布を推定した不均質モデルを作成した。
- ・ スケルトン・アトリビュート解析にて弾性波形の特徴を強調
- ・ SOM (Self-organizing Maps : 自己組織化マップ) 解析による波形分類を行い、
- ・ クラスタ解析 (K-means 法) により各分類の境界を決定
- ・ 坑井 A における溶岩～凝灰角礫岩（良好な貯留岩）との比較により、この岩相を示す弾性波形を決定し、三次元弾性波探査データ上で溶岩～凝灰角礫岩の分布領域を推定。
- ・ コア試料と物理検層データの解析から、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

例として、第 2. 2-13 図に滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index) を、第 2. 2-14 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）。苫小牧 CCS-1 は、貯留層性状が良好ではない場所に掘削された。

第 2. 2-13 図 滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index)

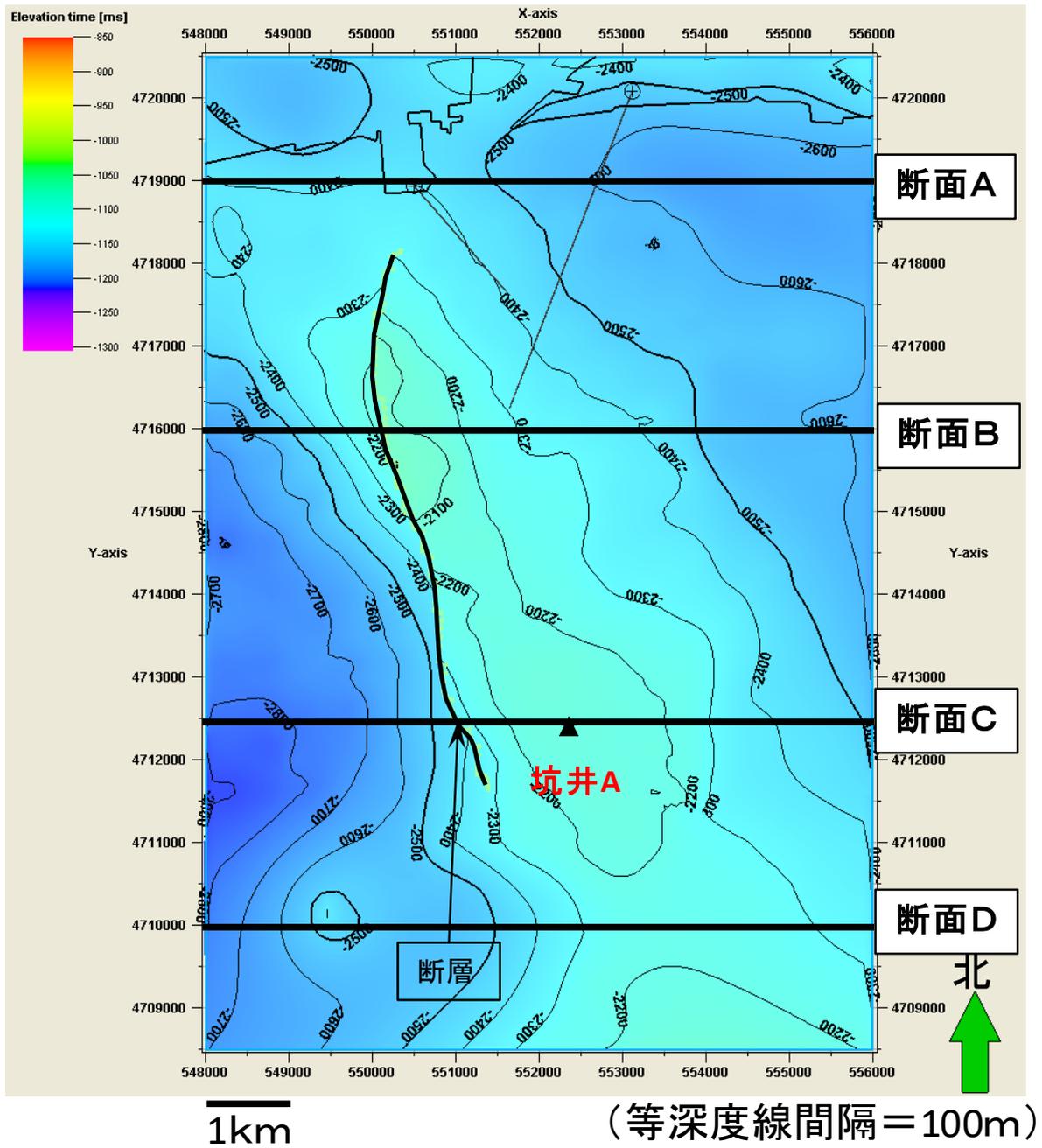


注：青色の部分が，低 AI で高孔隙率と考えられる箇所。高浸透率である可能性も高い。滝ノ上層圧入井は，低 AI 域に掘削した。

第 2.2-14 図 滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンス

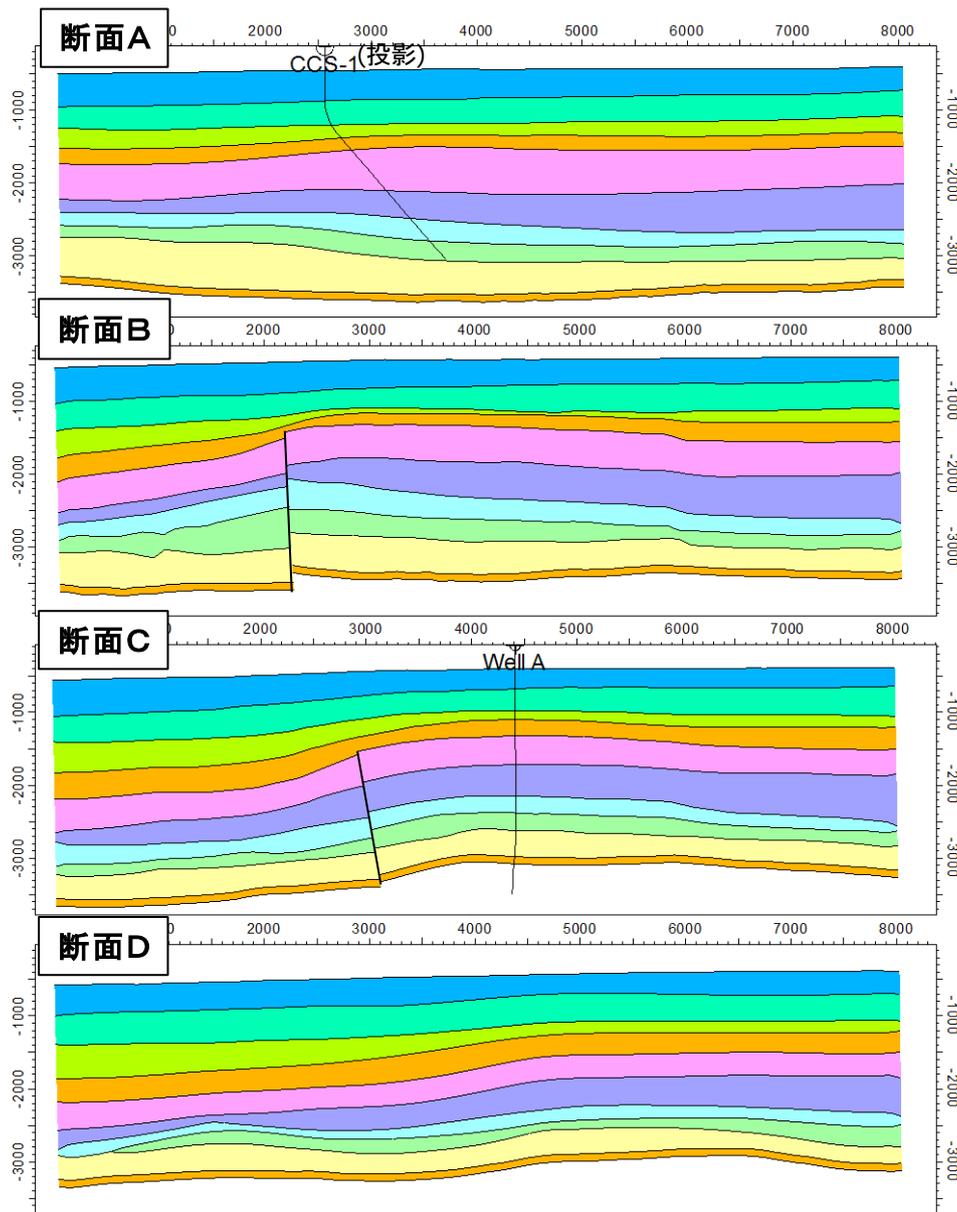
b. 構造モデルの作成

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 2.2-15 図に，主要な層準の東西断面（地質モデル断面）を第 2.2-16 図に，作成した構造モデルのグリidding情報を第 2.2-7 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 2.2-15 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】

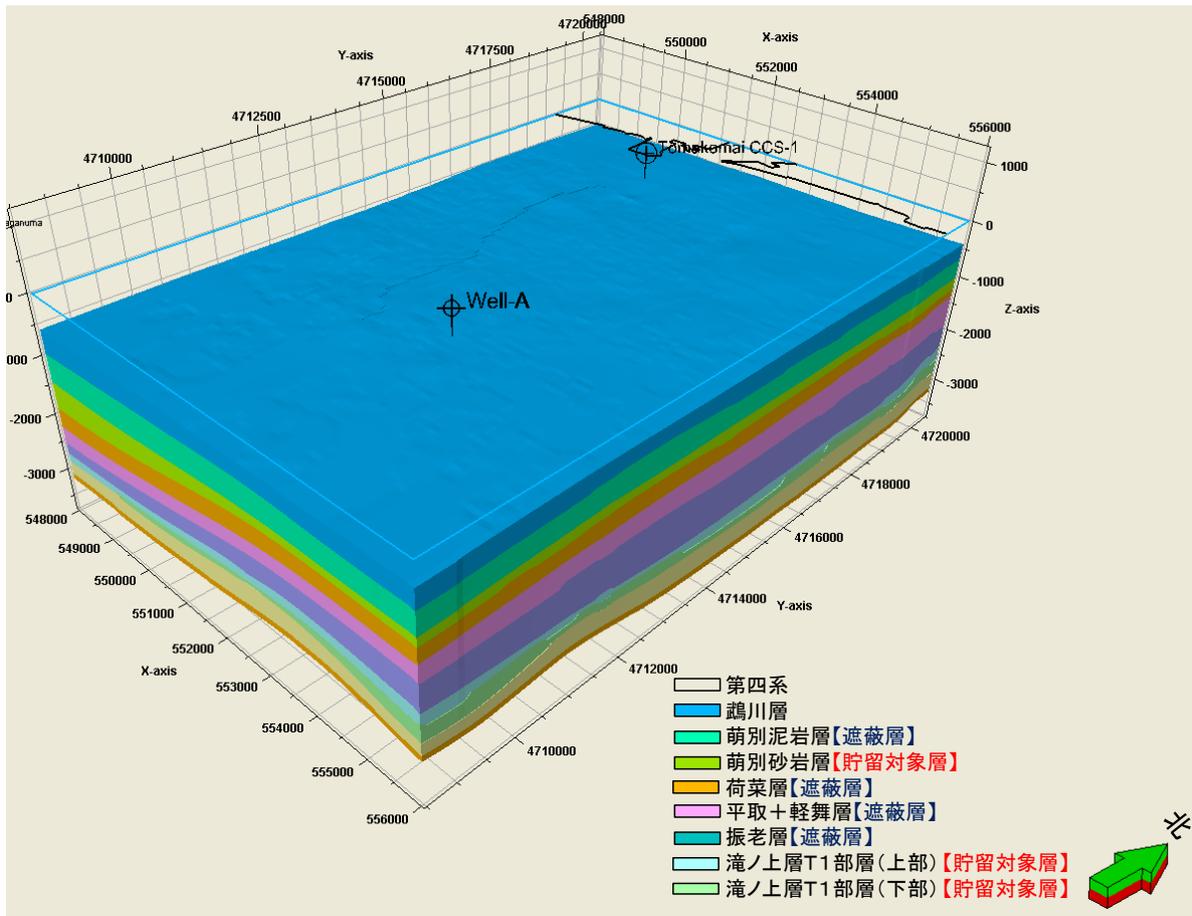
注：苫小牧 CCS-1 は、投影表示。

第 2.2-16 図 地質モデル断面

第 2.2-7 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 2.2-17 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な垂直方向サイズとなるようにした。

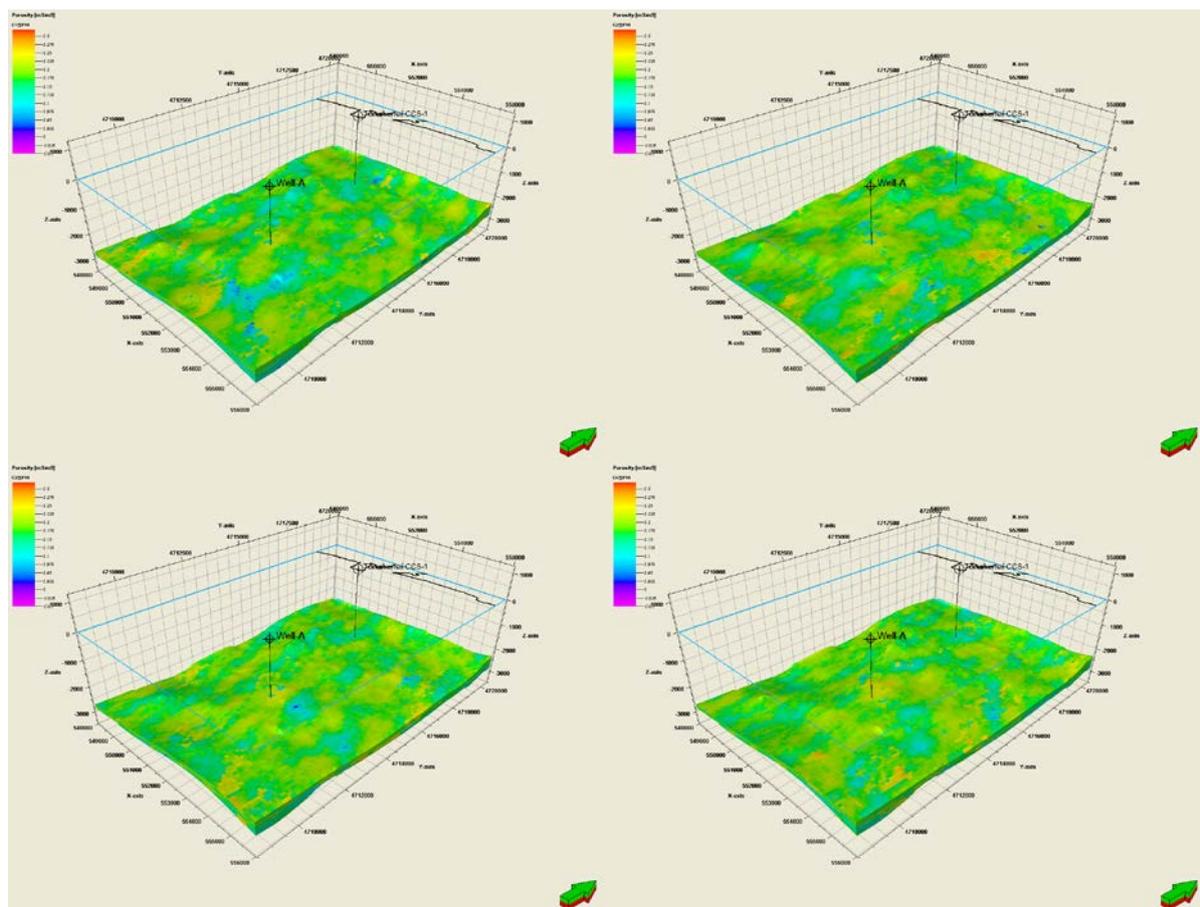


第 2.2-17 図 三次元地質モデル鳥瞰図

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 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 種類となる具現モデルを作成した。参考例として、50 個の内から 4 つの具現モデルにおける孔隙率分布を、第 2.2-18 図に示す。



注：図中右下の矢印は、北を示す。

第 2.2-18 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）

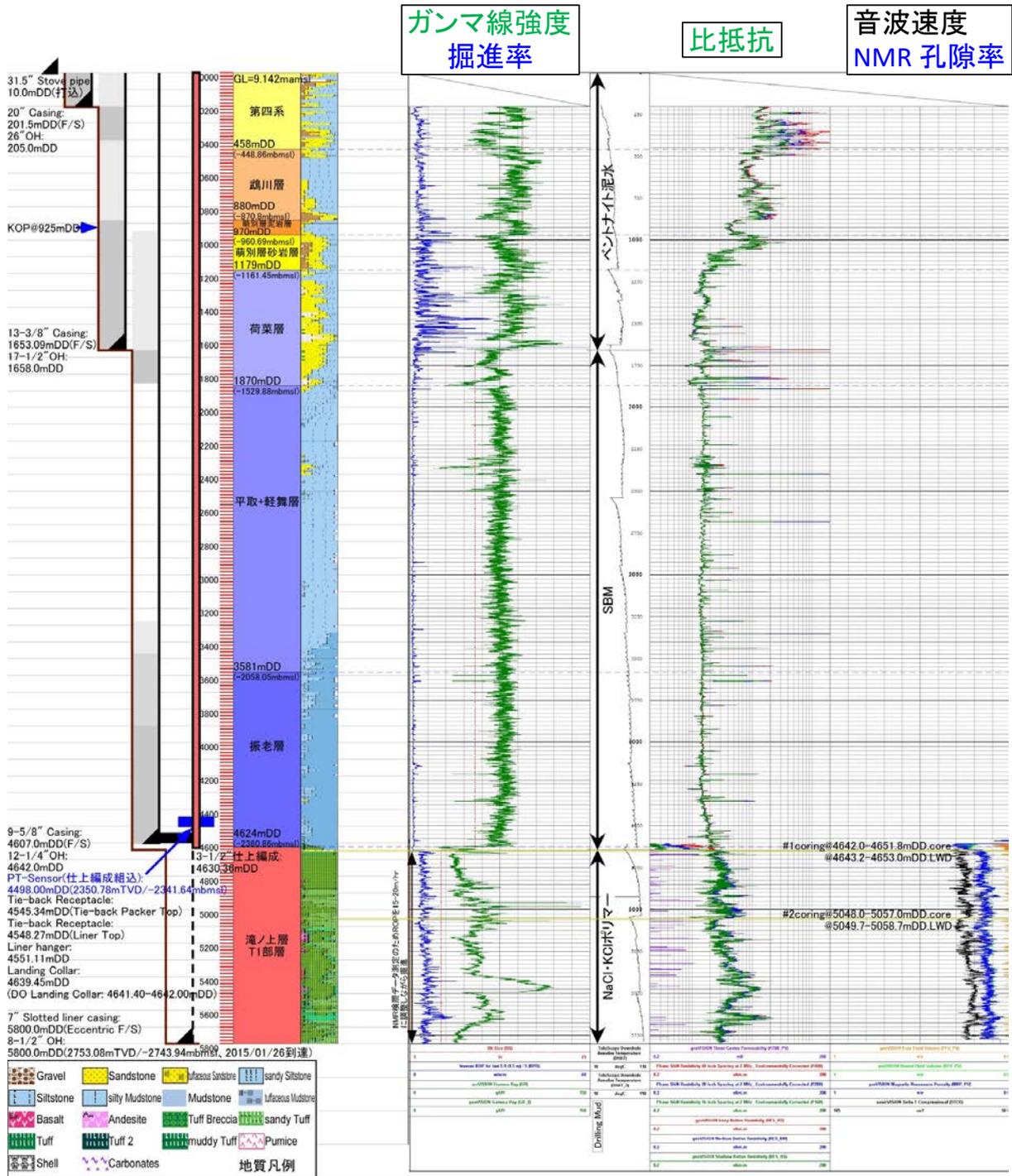
a. 滝ノ上層圧入井掘削結果

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 2.2-8 表に示す。

第 2.2-8 表 滝ノ上層圧入井における確認層序と岩相

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

- 掘進中に物理検層を実施 (LWD 検層) し, 岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は, 比抵抗, ガンマ線, 音波速度, 比抵抗画像, NMR である。第 2.2-19 図に, 物理検層結果の事例を記す。
- 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, 孔口半径分析等) 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), 荷菜層および平取+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 2.2-19 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

2.2-9 表)。

第 2.2-9 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 2.2-10 表のような解析結果を得た。

第 2.2-10 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

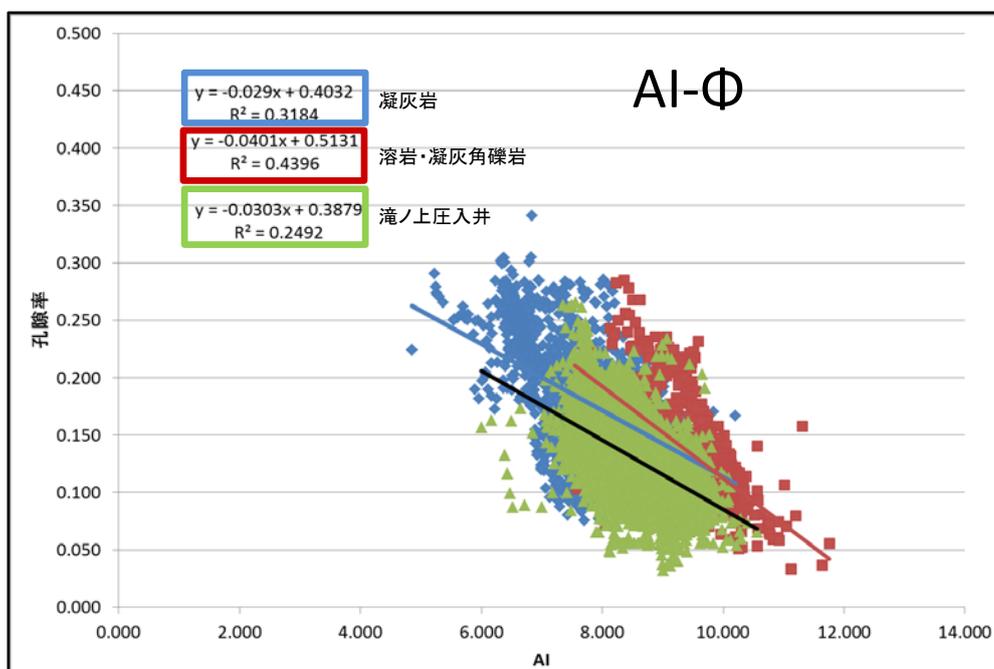
	解析結果	単位
kh (浸透率×貯留層厚)	0.28	mD・m
k (浸透率)	7.7×10^{-4}	mD
スキンファクター	0	—
ri (探査半径)	2	m

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 2. 2-20 図)。

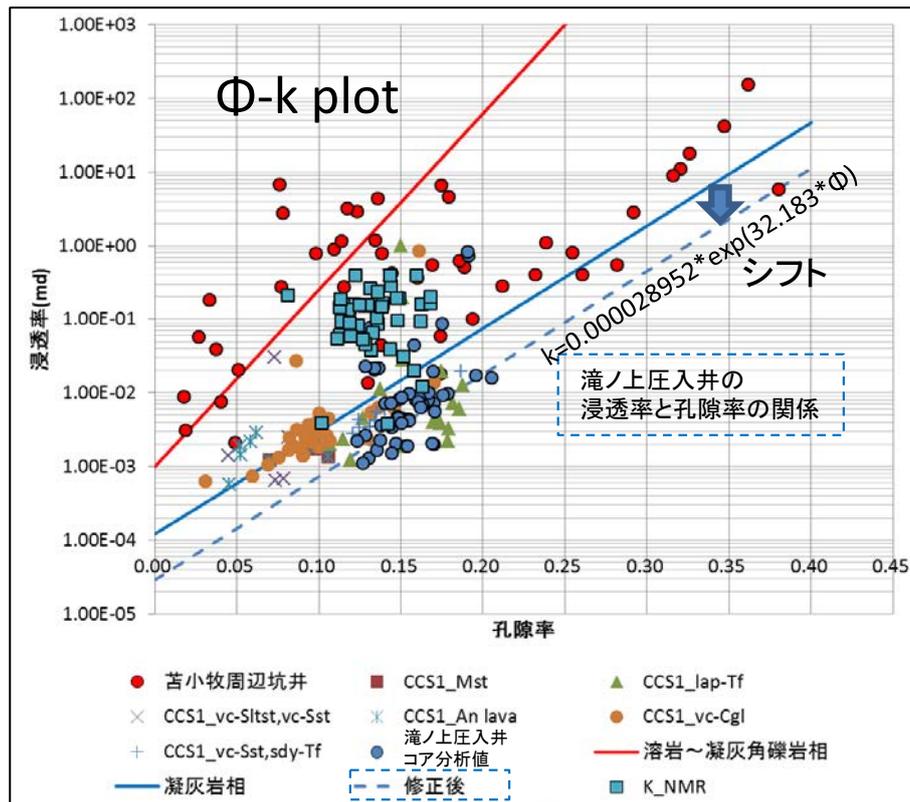


- 注：1. 赤は貯留岩として期待した溶岩・凝灰角礫岩、青は凝灰岩の AI 値と孔隙率の関係を示す。緑は、滝ノ上層圧入井により解析した AI 値とその深度に対応する NMR 孔隙率のプロットを示す。
2. 修正モデルにおける AI 値と孔隙率の関係は、「孔隙率=0.0303×AI 値+0.3879」を用いた。

第 2. 2-20 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 2. 2-21 図)。

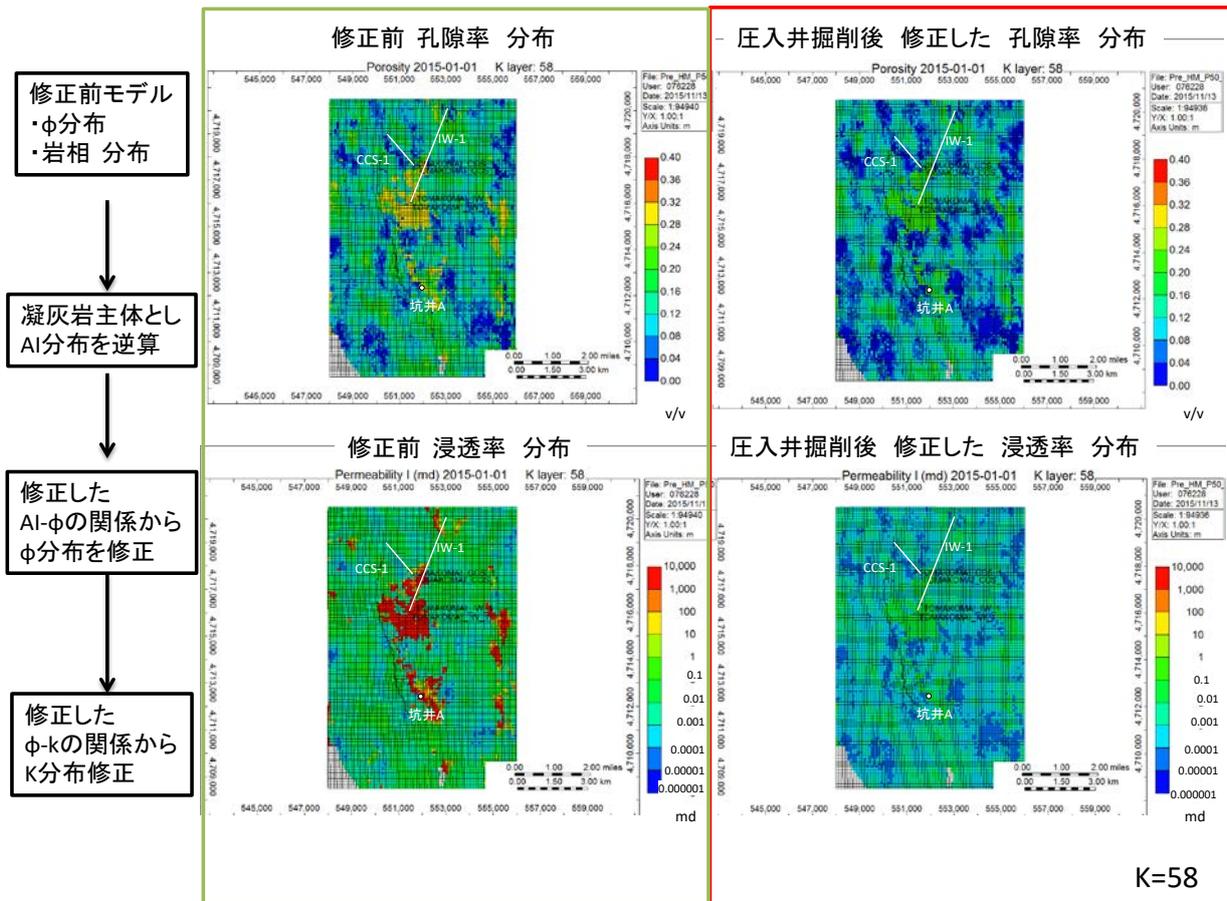


- 注：1. 苫小牧周辺坑井とは、民間会社が掘削した坑井 A。守秘義務があるため岩相の区分は公表できないが、回帰線を作成する際には使用した。K_NMR は、滝ノ上層圧入井で取得した NMR 検層の結果から解析された浸透率と孔隙率のプロットであるが、浸透率が滝ノ上層圧入井のコア実測値よりも概して高い値を示す。これは、火山岩で NMR 検層結果から浸透率を算出する適切な式がないことが原因と考えられる。
2. 修正モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「浸透率=0.000028952×e^{32.1823×孔隙率}」を用いた。

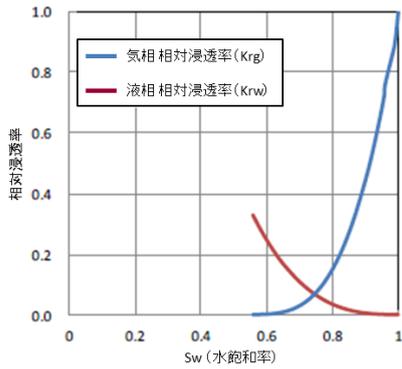
第 2.2-21 図 孔隙率と浸透率の関係

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 2.2-20 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 2.2-22 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 2.2-23 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。



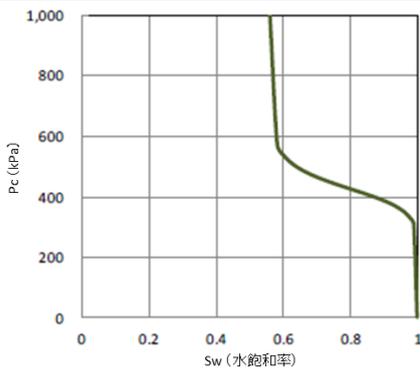
第 2. 2-22 図 地質モデルにおける孔隙率および浸透率分布の更新



f) Viking Sandstone		
CO2 Saturation Fraction	Krg	Krw
0.044	0.0007	0.7156
0.066	0.0018	0.5970
0.088	0.0037	0.4927
0.111	0.0067	0.4018
0.133	0.0110	0.3232
0.155	0.0168	0.2559
0.177	0.0244	0.1990
0.199	0.0339	0.1516
0.221	0.0457	0.1127
0.243	0.0599	0.0814
0.265	0.0767	0.0567
0.287	0.0964	0.0379
0.309	0.1191	0.0240
0.331	0.1451	0.0142
0.354	0.1747	0.0077
0.376	0.2079	0.0038
0.398	0.2451	0.0016
0.420	0.2863	0.0006
0.442	0.3319	0.0000

← Bennion (2005) [1]による測定値

$$S_w = 1 - (\text{CO}_2 \text{ Saturation Fraction})$$



• van Genuchten (1980) [2]による関数

毛細管圧曲線の導出

$$P_c = P_o \times \left([S^*]^{\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{(1-\lambda)} \quad S^* = \frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{wir}}$$

P_c : 毛細管圧力 (kPa), P_o : 置換圧力 (kPa),
 λ : 係数 ($\lambda = 0.91$), S_w : 水飽和率,
 S_{wir} : 残留水飽和率, S^* : 正規化された水飽和率

• Akaku (2008) [3]による経験式

$$\log P_o = -0.32931 \times \log k + 1.9259$$

• $k = 0.0072$ mD (平均浸透率) により, $P_o = 428.1$ kPa。

• $S_{wir} = 0.558$

注:1. 上: 相対浸透率曲線, 下: 毛細管圧曲線。

2. 経済産業省(2011), 「苫小牧地点における貯留層総合評価 補足説明資料」から引用。

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004_s02_00.pdf

3. 相対浸透率曲線および毛細管圧曲線については, 採取したコアの浸透性が低く, 新たな相対浸透率のデータを取得できなかったため, 圧入前の地質モデルと同様のものを使用した。

第 2.2-23 図 修正モデルで用いた貯留層(凝灰岩)の相対浸透率曲線と毛細管圧曲線およびそれらの導出手法

d. 構造モデルの更新

構造モデルは, 滝ノ上層圧入井の掘削実績に合わせて深度データを更新した。

e. 属性モデルの更新

b. の手法により地質モデルの属性を更新した。更新した属性モデルの例を, 第 2.2-24 図に示す。

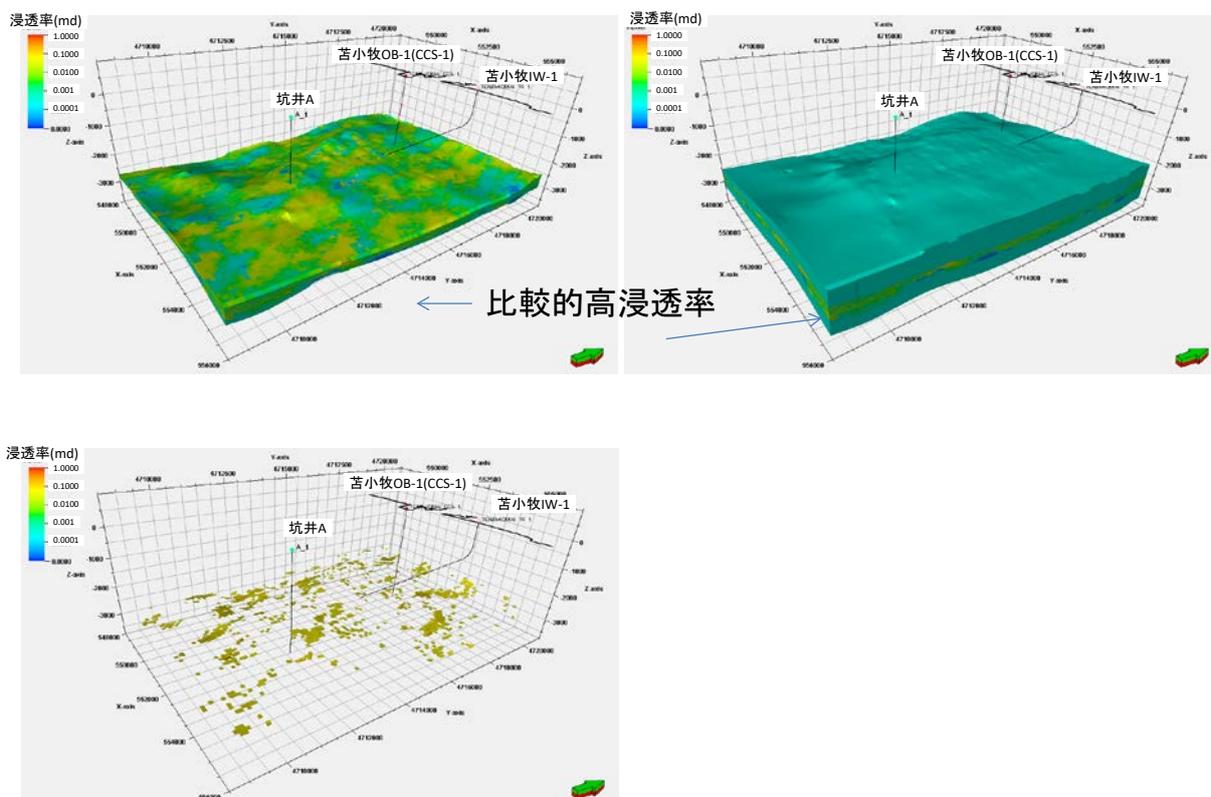
圧入井掘削前のモデルは地球統計学的に 50 種類のモデルを作成したが, 圧入井の掘削の結果, 圧入井の極近傍以外で岩相や属性を地球統計学的に推定することは困難と判断し, 1 ケース (P50 モデル。第 2.2 節(3)④7) c. 参照) の属性モデルを作成した。実際に CO₂ を圧入開始後には, 定期的なフォールオフテストの実施や繰り返し弾性波探査の実施を計

[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, p8

[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] Akaku, K. 2008. Feasibility Study of Residual CO₂ Trapping. In “Nano-Mega Scale Flow Dynamics in Energy System”: Tohoku University Press, Sendai.

画しており，それらの結果を踏まえたうえで属性モデルを修正する。



注：浸透率 > 0.05mD でフィルタリング

第 2.2-24 図 更新した属性モデルの例（浸透率）

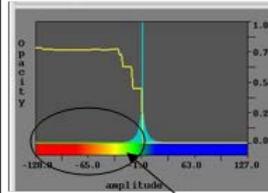
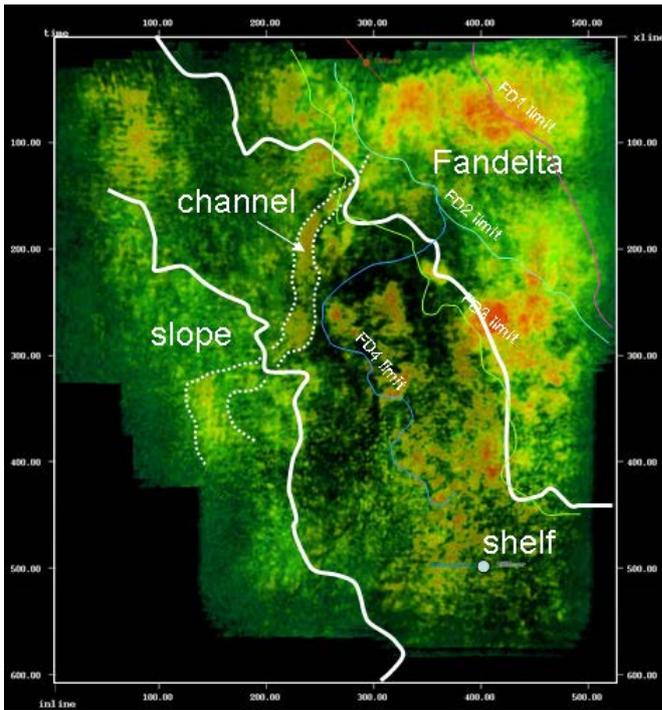
ウ) 萌別層砂岩用の地質モデルの作成

a. 岩相分布・性状分布の推定

三次元弾性波探査の解析から，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が発達していると推定される。ファンデルタは，砂岩を主体とした粗粒堆積物が発達する。緩やかな西傾斜を示し，層厚は約 100m である。北東部を中心に砂礫岩層の発達も示唆され，堆積物は主に北東側から供給されたと推定されている。

本層陸棚上の浅い海底で堆積したものと考えられる。砂岩の分布範囲を，苦小牧 CCS-1 および三次元弾性波探査データを用いて，堆積学的検討により推定した。

萌別層砂岩層は，シーケンス層序学上，高海水準期堆積体（HST）に相当し，ファンデルタ，陸棚（Shelf）および斜面（Slope）の 3 つに分類でき（第 2.2-25 図），砂岩の発達が可能なのはファンデルタである。当該地域には少なくとも 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できる。堆積物の供給源は北東側と推定され，北東側程粗粒相が発達し，南西に向かって泥岩が多くなる傾向にあると考えられる。



この範囲のアンプリチュード値のみを表示。

マップの色凡例
黄色い線はopacity curveで、表示したいアンプリチュード値の不透明度を高めて可視化する。

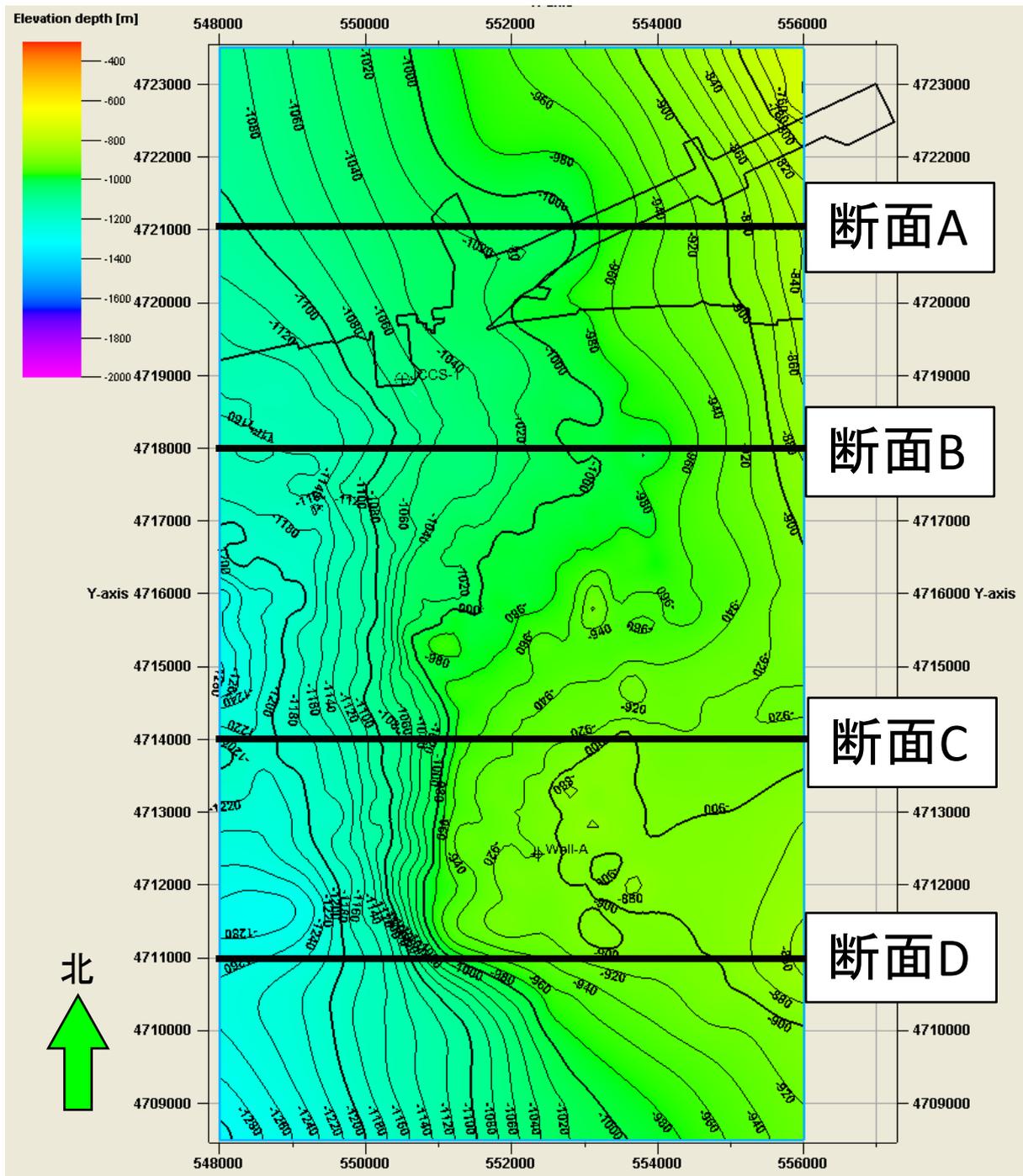
注：図の上部の方角は、北。暖色系は負の高い振幅値、寒色系は負の低い振幅値を示す。正の振幅は、非表示。

第 2. 2-25 図 萌別層 HST 区間の堆積相解釈図

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。

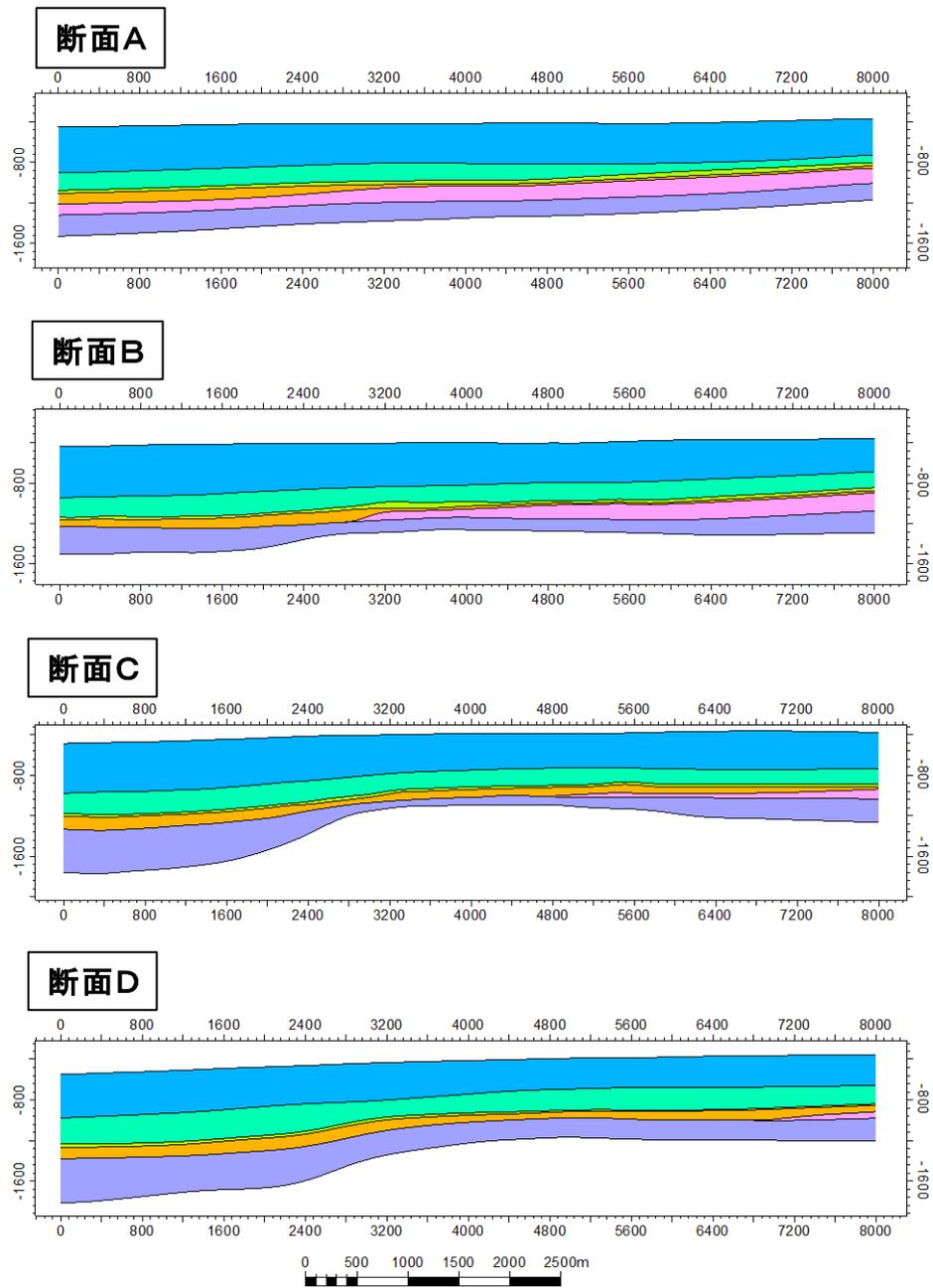
構造モデル構築には、地質構造解釈で作成されたホライゾン（上位より、鶴川層上限、萌別層上限、萌別層海進期堆積体（TST）上限、萌別層高海水準期堆積体（HST）上限、萌別層 HST デルタ上部基底、萌別層 HST 基底、荷菜層上部基底）を用いた。深度変換された萌別層砂岩層上限（萌別層 HST 上限）のモデル断面位置図を第 2. 2-26 図に、主要な層準の東西モデル断面を第 2. 2-27 図に示す。



1km (等深度線間隔=20m)

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

第 2.2-26 図 モデル断面位置図 (構造図は萌別層砂岩層 (HST) 上限)



- 第四系
- 鷓川層
- 萌別層上部【遮蔽層】
- 萌別層上部TST【遮蔽層】
- 萌別層下部HST【貯留対象層】
- 萌別層下部HSTデルタ下部【貯留対象層】
- 荷葉層

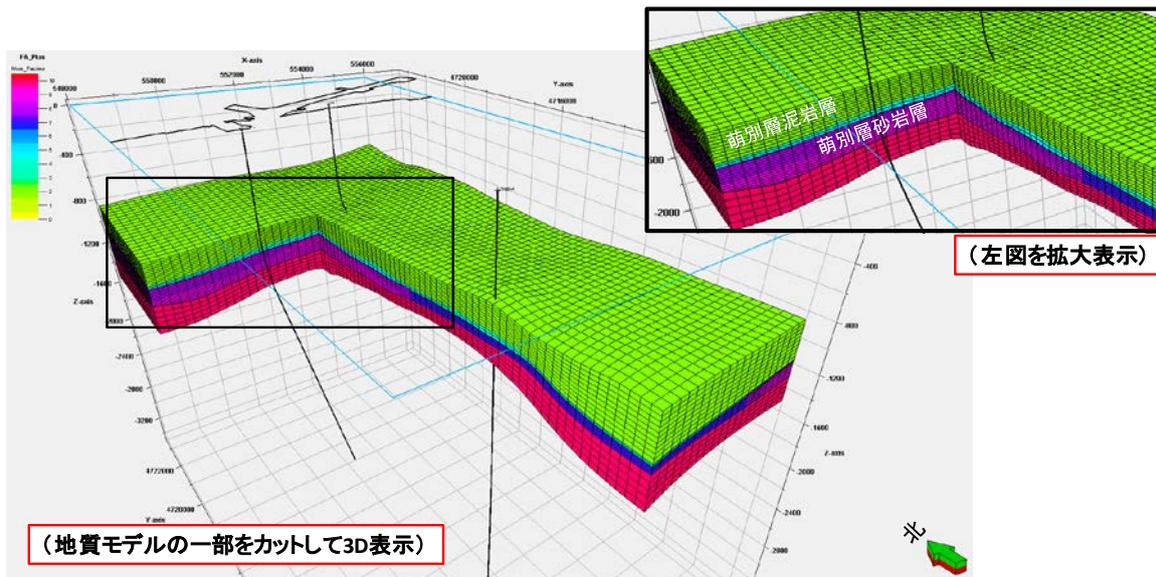
注：上から順に，断面A～D。スケールは，m。

第 2.2-27 図 モデル断面

各層準内に第 2.2-11 表のようにグリッドセルを作成した。第 2.2-28 図に，グリッドセルの鳥瞰図を示す。

第 2. 2-11 表 萌別層構造モデルのグリidding

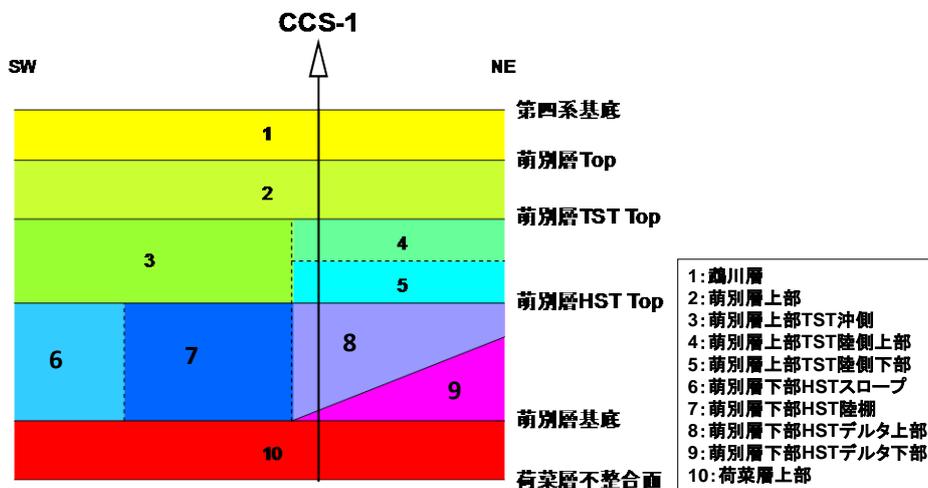
i 方向 (東西方向) セル数	200m	40 セル
荷葉層上部 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 7~9)
荷葉層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 10~14)
平取+軽舞層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 15~19)
振老層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 20~24)
滝ノ上層 T1 部層上部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 25~57)
滝ノ上層 T1 部層下部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 58~96)
滝ノ上層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 97~101)
南長沼層	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 102~106)



第 2. 2-28 図 グリッドセルの鳥瞰図

c. 属性モデルの作成

構造モデルの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、第 2. 2-29 図に示す。



第 2. 2-29 図 堆積相区分概念図

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。また、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。

④ CO₂挙動予測シミュレーション

作成した地質モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを実施し、CO₂圧入時の圧力挙動のほか、貯留層内での移動・到達範囲を推定した。CO₂の圧入レートは 25 万トン/年で、3 年間の連続圧入 (計 75 万トン圧入) とした^{注1}。

なお、後述のイ) で示す滝ノ上層圧入井の掘削結果を踏まえた予測では、圧入レートを坑底圧の規定上限圧力で制限するため、圧入は 1,500 トン/年程度の圧入レートで開始するが、圧入開始直後に坑底圧の規定上限圧力に到達するため圧入レートを下げ、その後概ね 300 トン/年程度の圧入レートで推移する。3 年間の累計圧入量は、1,000 トン程度となる。

7) 滝ノ上層 T1 部層における CO₂挙動予測 (圧入井掘削前)

a. 概要

Computer Modelling Group Ltd. 社の GEM (ver2010.12) を使用し、シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、以下の 3 種類である

- ・ 泥岩の毛細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 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

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依りて設定した。圧入井における滝ノ上層 T1 部層の全区間に対して CO₂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の結果から、地層破壊圧力の 90% (41,853kPa) とした^{注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-1 のデータ (圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等) および文献値により、第 2.2-12 表に示す値を用いた。

^{注1} 平成 23 年度シミュレーションは 25 万トン/年の圧入レート、平成 24 年度シミュレーションは 20 万トン/年の圧入レートであるのは、CO₂の供給量の見直しにより計画変更したことによる。また、保守・点検の都合、モニタリング計画との関連、貯留層の状況等により、一時的に、あるいは長期的に一方の貯留層だけに圧入するケースも想定されることから、それぞれに圧入する最大値として、圧入レートを設定している。

^{注2} 苫小牧 CCS-1 の遮蔽層におけるリークオフテストで確認したリークオフ圧力は、その深度 (垂直深度 2,352m) で、45.3MPa (461.6kg/cm²) であった。これは等価泥水比重で 1.96g/cm³ となる。この等価泥水比重から、滝ノ上層圧入井の遮蔽層深度 (垂直深度 2,418m) におけるリークオフ圧力を求め (473.9kg/cm²)、その 90% の値 (426.5kg/cm²=41,853kPa) をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。

第 2. 2-12 表 シミュレーションパラメーター一覧 (平成 23 年度地質モデル)

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2011 モデル		
サイズ	8km×12km×4km (ideal volume : 24km×24km×4km)		
グリッド	80×120×106 グリッド		
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. 15
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 Krg	Bennion (2005) ^[1]		Corey (1954) ^[2]
液相 相対浸透率 Krw			van Genuchten (1980) ^[3]
臨界ガス飽和率 Sgc	0. 04 Bennion (2005) ^[1]		0. 05
不動水飽和率 Swir	0. 558 Bennion (2005) ^[1]		0. 8
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0. 241 from default value of GEM		—
毛細管圧力曲線	溶岩 (貯留層) Bennion (2006) ^[4]	凝灰岩 (貯留層) van Genuchten (1980) ^[3]	泥岩 (遮蔽層) 測定値

c. 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。なお、実際の CO₂ 圧入の際に挙動予測シミュレーション結果から大きく外れる場合には、圧入対象層が 2 層準あるので、両層の圧入性を考慮したうえで、圧入量を振り分け、安全に圧入可能な範囲内で CO₂ を圧入する予定である。

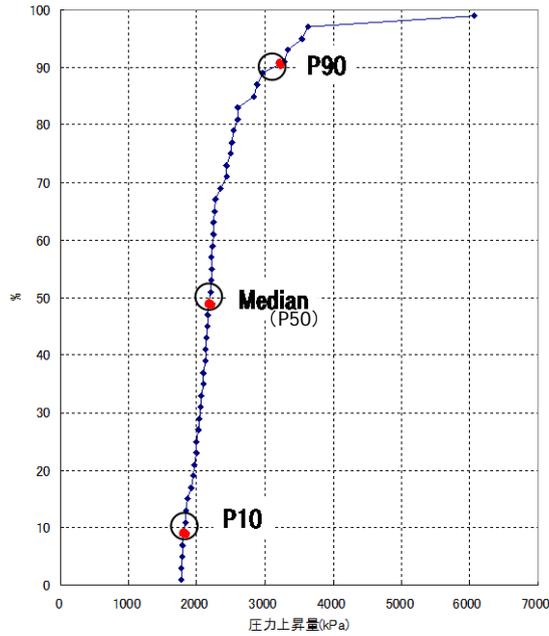
圧入終了時の坑底圧力 (貯留層上限深度での坑内圧力) の圧力上昇量を序列化して、50 個のモデルの累積確率分布を作成した。圧力上昇量が当該モデル以下になる確率をそれぞれ P10, P50, P90 のパーセンタイル値として設定した (第 2. 2-30 図)。

[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, pp. 7-9, p. 12

[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 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, pp.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, p. 9



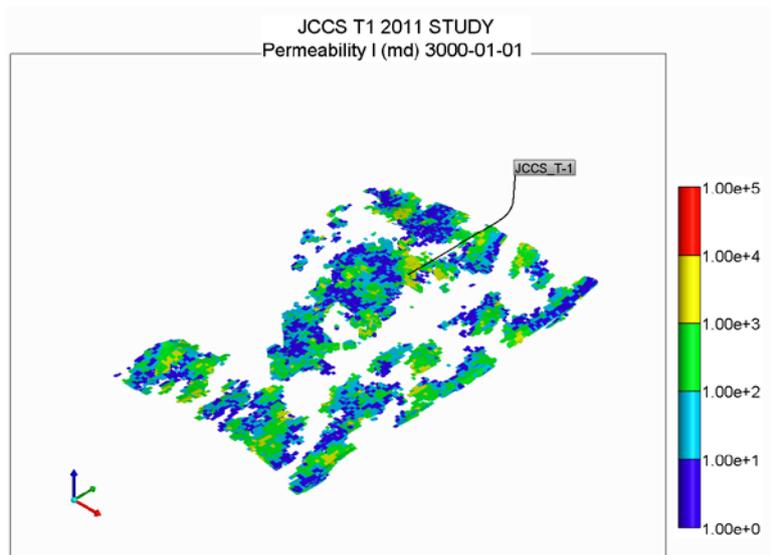
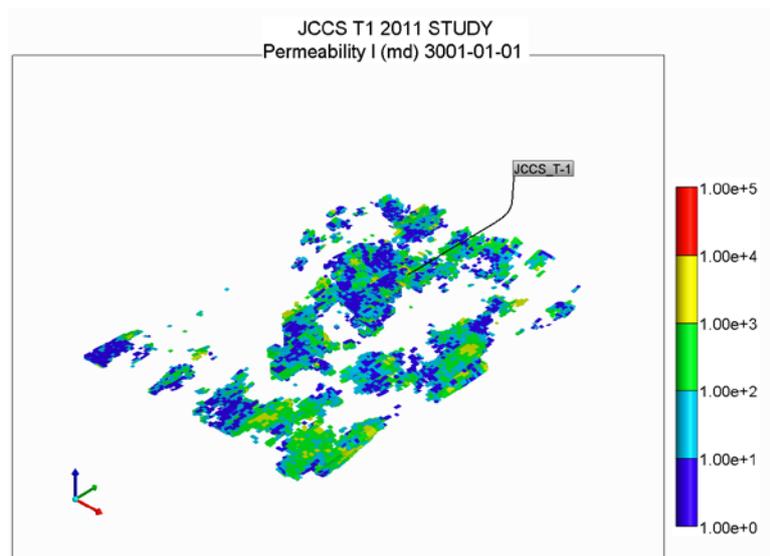
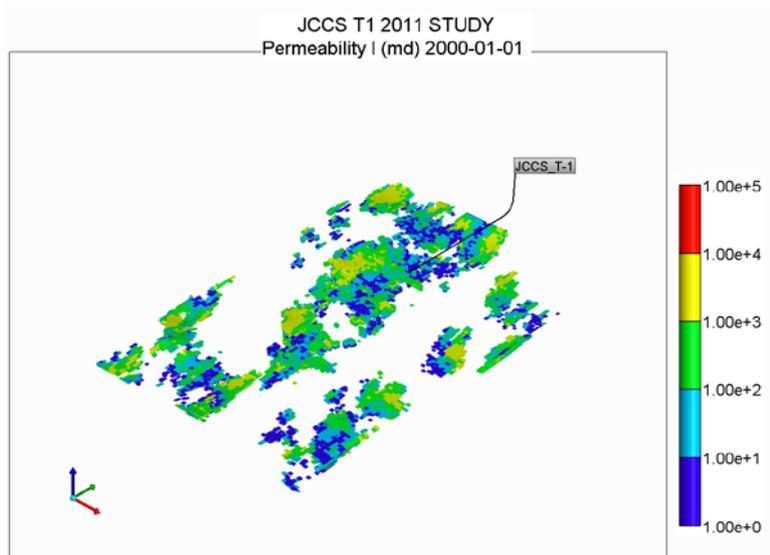
第 2.2-30 図 50 個のモデルの 3 年間の圧入による圧力上昇量の累積確率分布 (平成 23 年度地質モデル)

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。

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

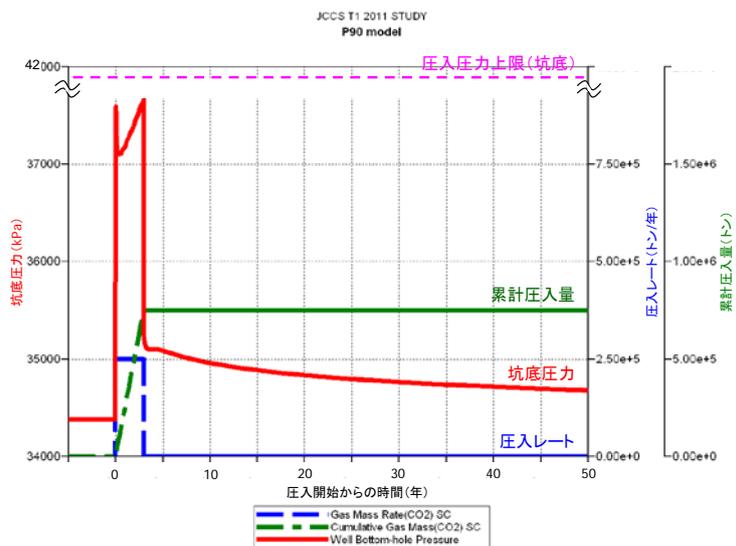
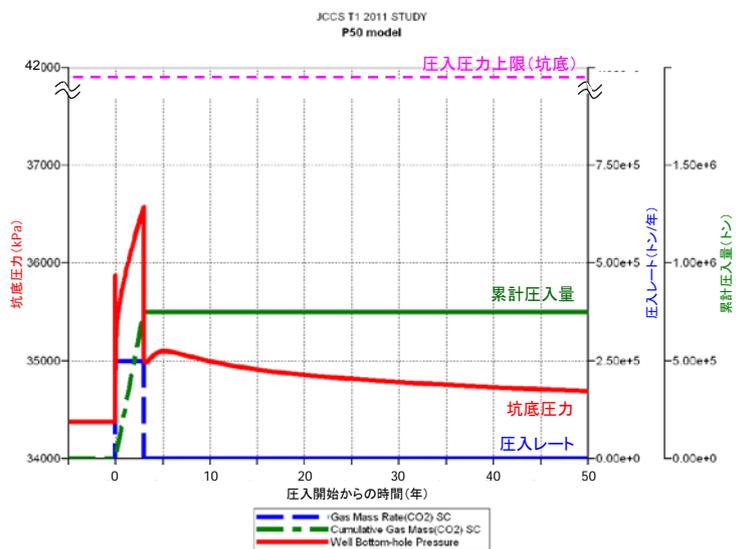
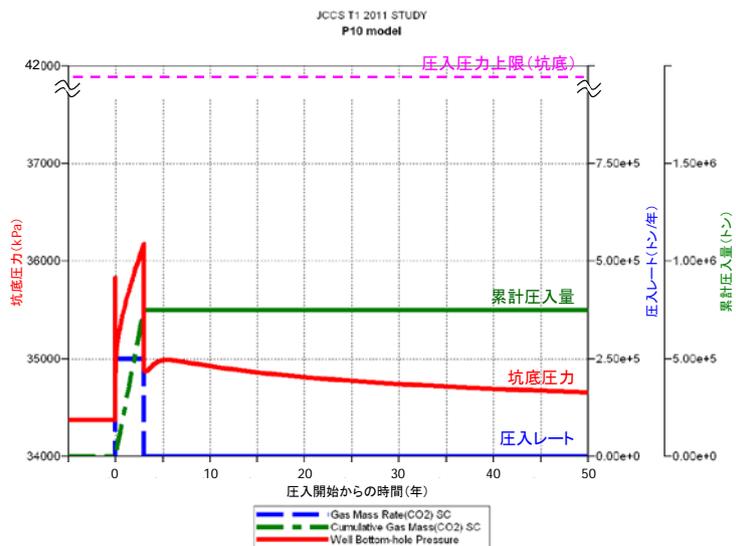
3 つのモデルに与えられた浸透率分布の例を、第 2.2-31 図に示す。また、3 つの貯留層モデル (P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル) における圧入期間 (3 年間) の CO₂圧入に伴う坑底圧力、圧入レート、累計圧入量および坑口圧力の経時変化を、第 2.2-32 図に示す。

いずれのモデルにおいても設定した圧入圧力上限 (41,853kPa) には達せず、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。



注：上から順に P10 モデル，P50 モデル，P90 モデル。単位は，mD。

第 2.2-31 図 浸透率分布（平成 23 年度地質モデル）

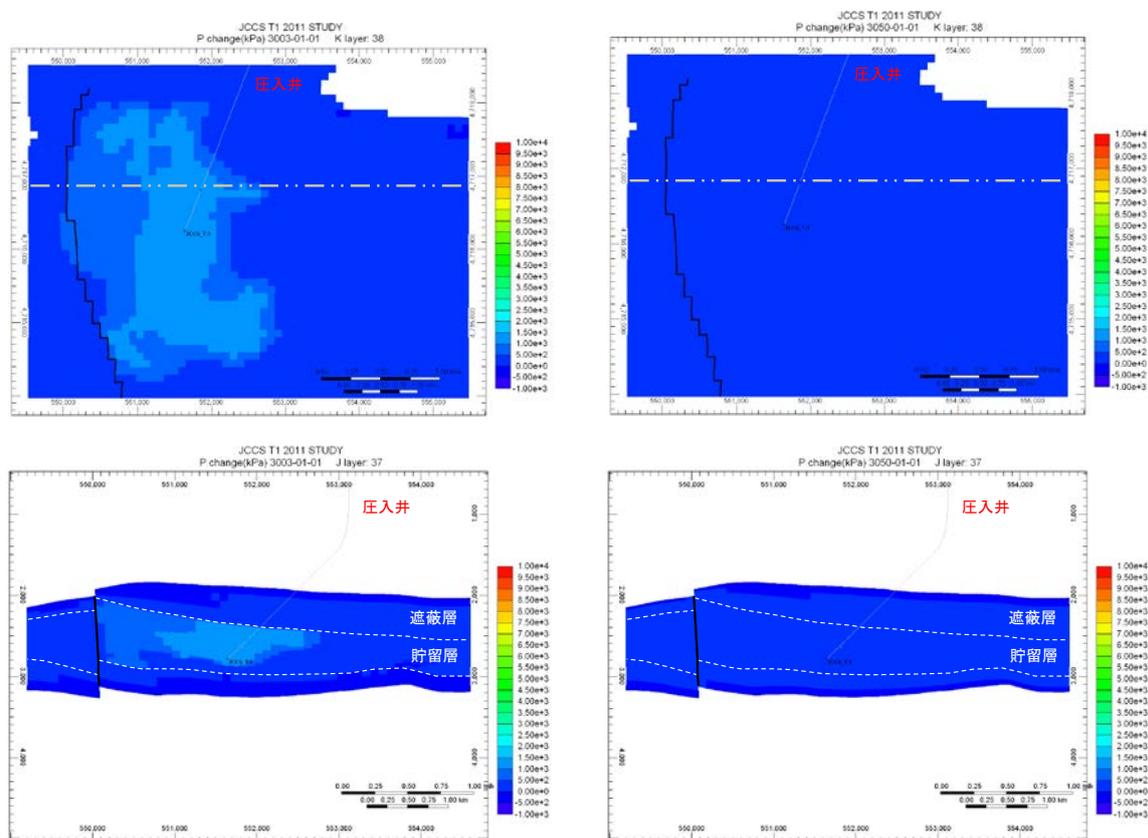


注：上から順に P10 モデル，P50 モデル，P90 モデル。

第 2. 2-32 図 各モデルにおける圧入時の挙動（平成 23 年度シミュレーション結果）

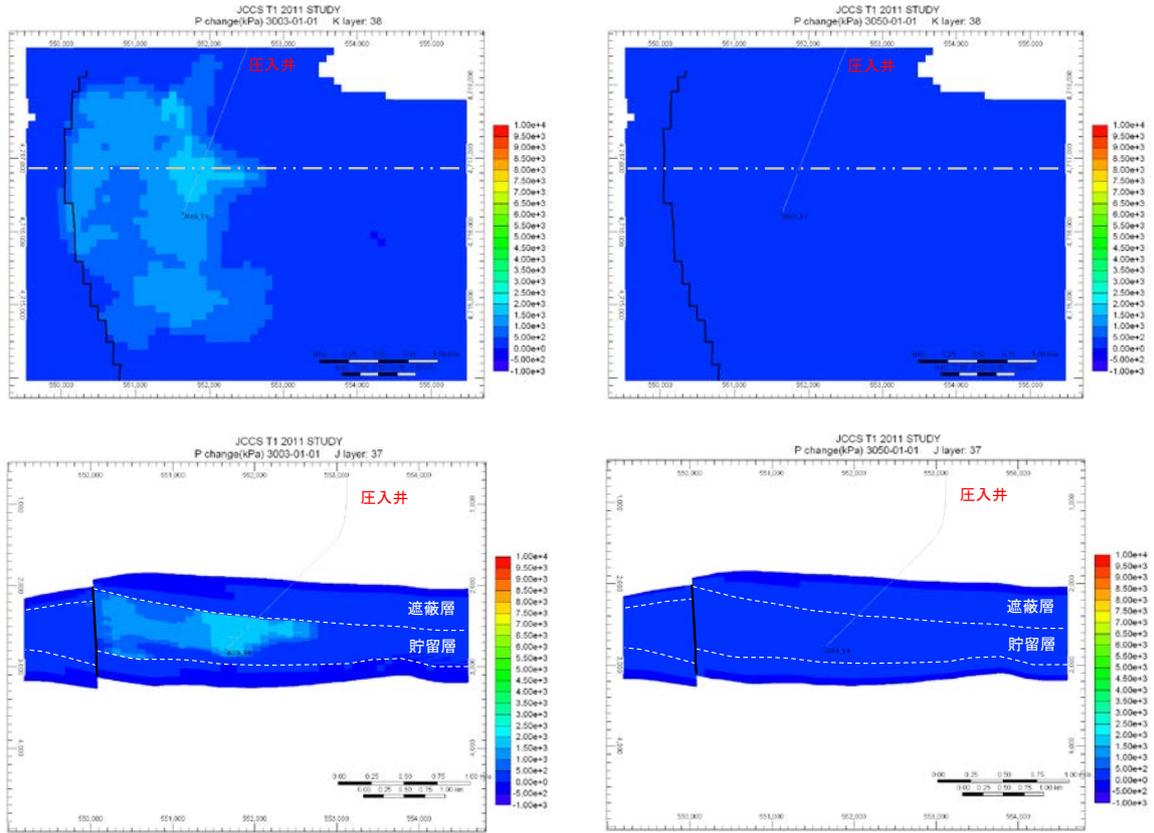
d. 貯留層圧力分布

3年間のCO₂圧入終了時点における深部塩水層圧力の変化（圧入前の初期圧力からの変化量）を、第2.2-33図～第2.2-35図に示す。いずれのモデルにおいても圧力の広がりについては圧入井を中心にほぼ南北に長軸をもつ楕円状に広がる。



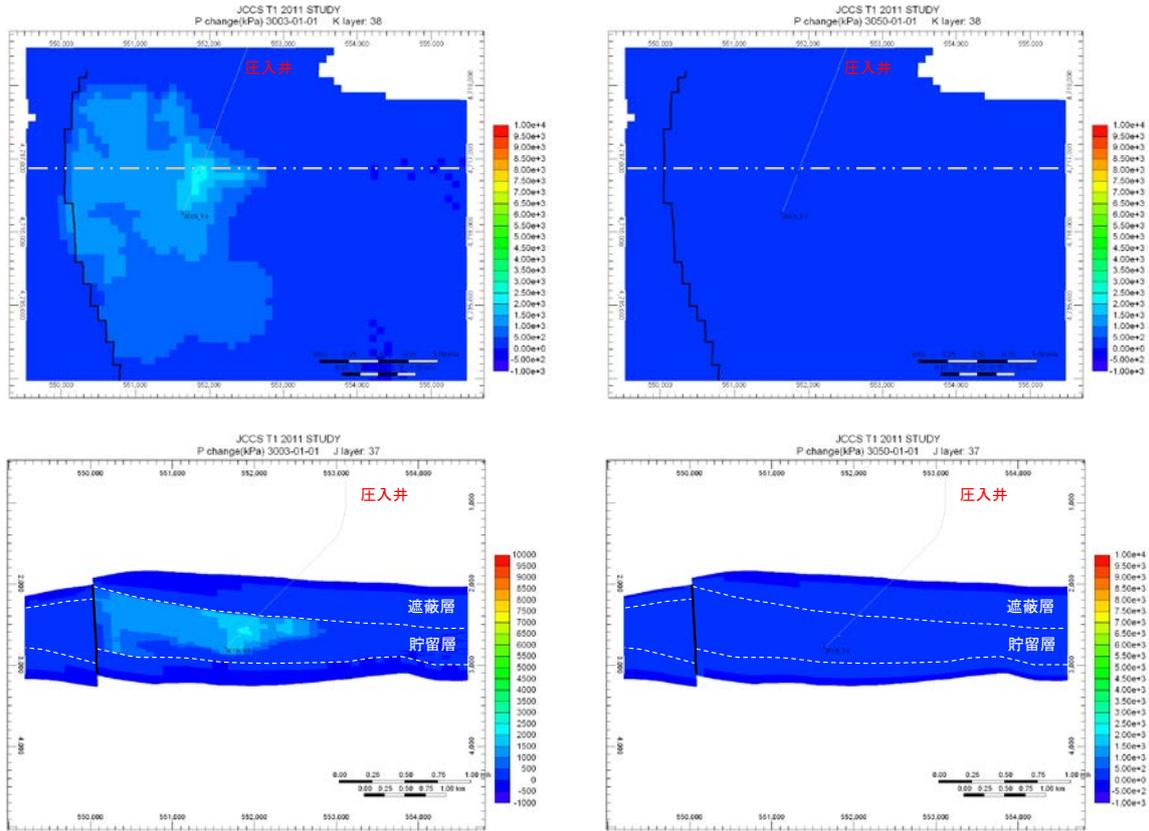
注：左側：圧入終了時（3年後），右側：50年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。単位は，kPa。

第2.2-33図 CO₂圧入前からの圧力変化量の推移（P10モデル）（平成23年度シミュレーション結果）



注：左側：圧入終了時（3年後），右側：50年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線的位置）。単位は，kPa。

第 2.2-34 図 CO₂圧入前からの圧力変化量の推移（P50 モデル）（平成 23 年度シミュレーション結果）



注：左側：圧入終了時（3年後），右側：50年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。単位は、kPa。

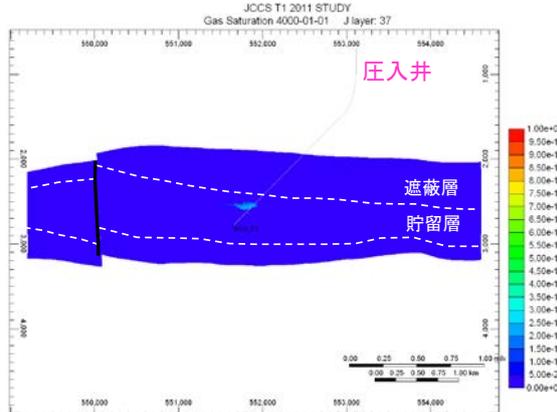
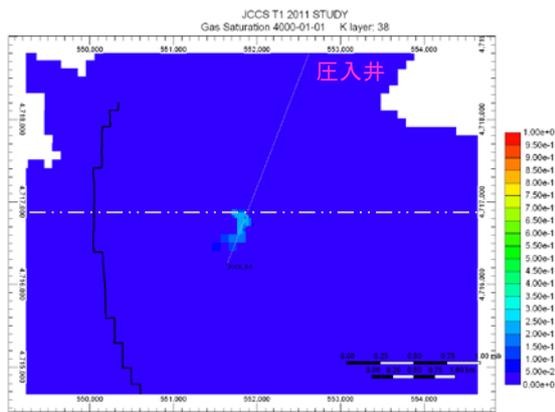
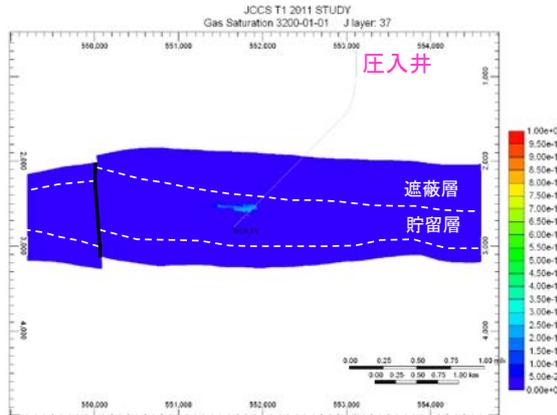
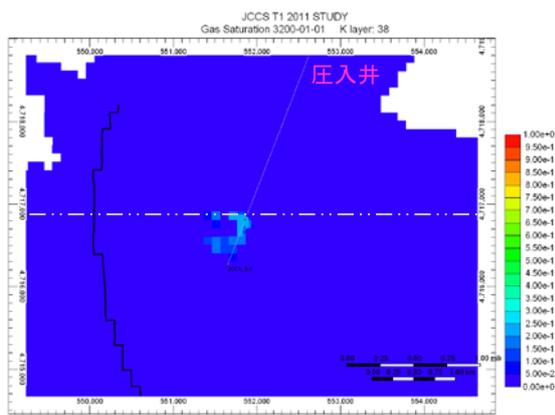
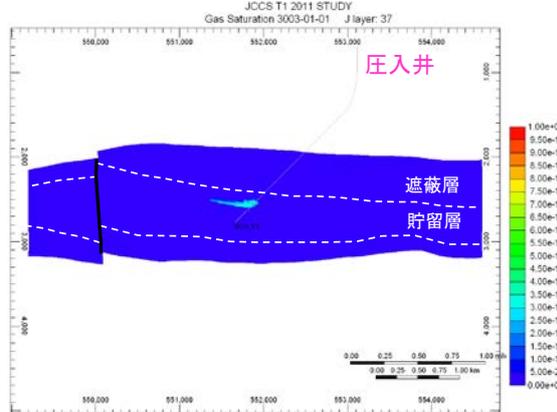
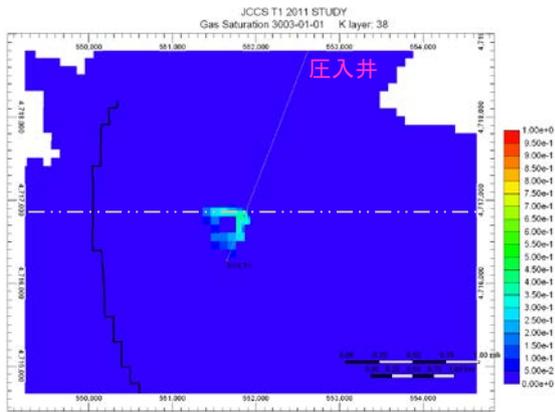
第 2.2-35 図 CO₂圧入前からの圧力変化量の推移（P90 モデル）（平成 23 年度シミュレーション結果）

e. 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。以下にモデルごとの結果の比較を示す。

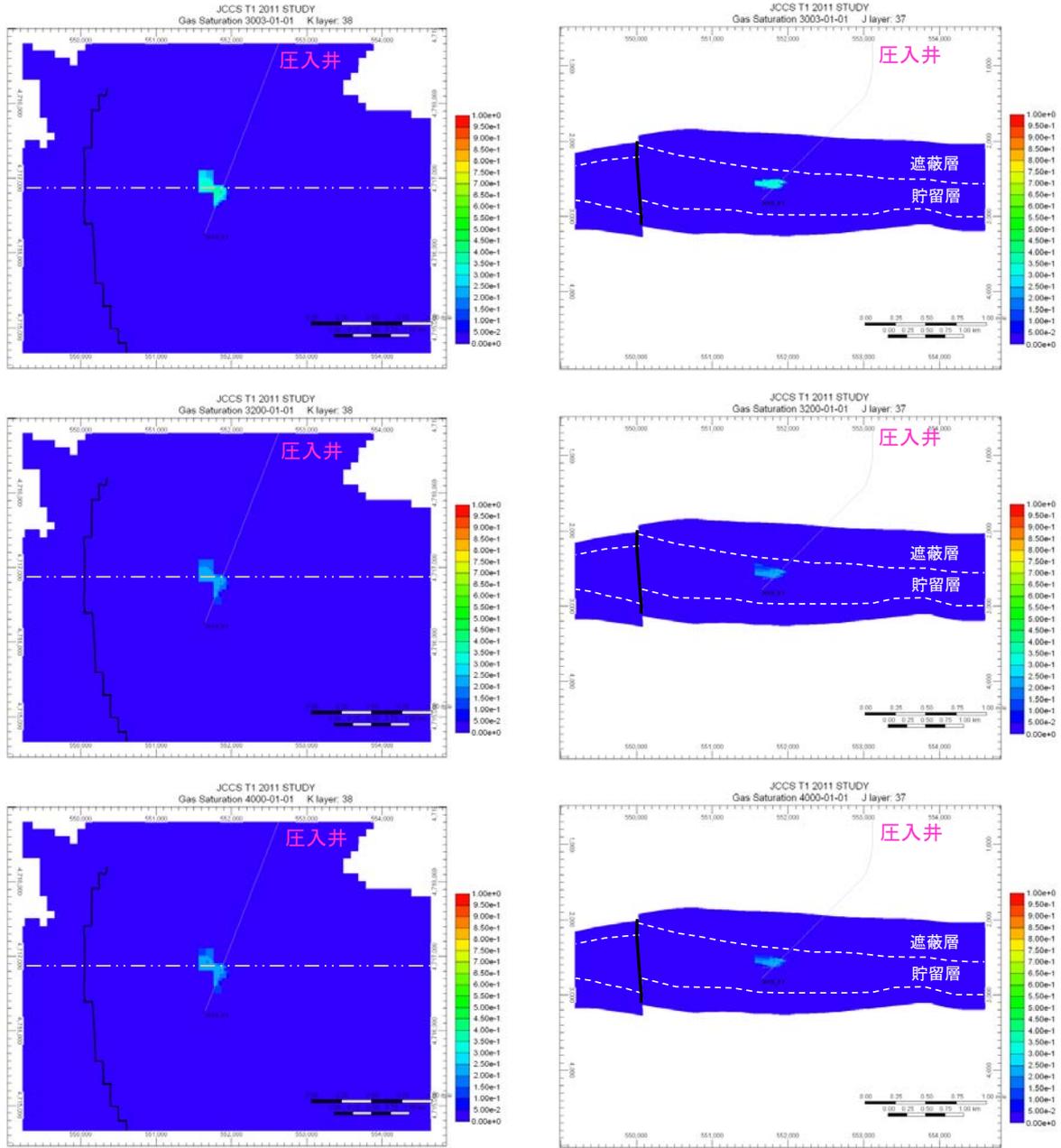
f. 圧入に伴う貯留層内のCO₂分布予測

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飽和度の推移を、第2.2-36図～第2.2-38図に示す。また、CO₂が地層水に溶解した状態の溶解CO₂量の推移を、第2.2-39図～第2.2-41図に示す。なお、いずれのケースにおいても、遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）へはCO₂は広がらない。



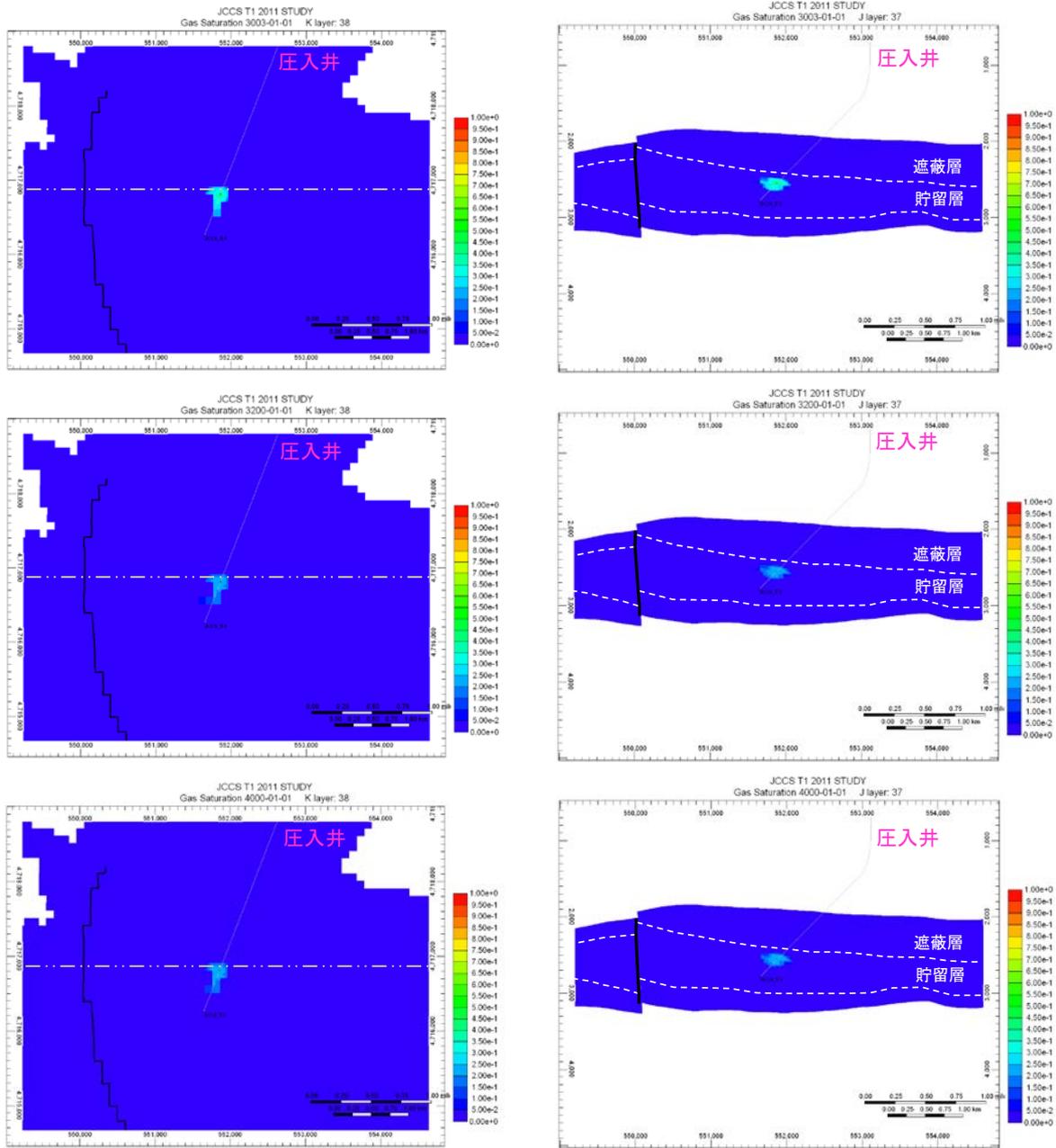
注：上段：圧入終了時（3年後），中段：200年後，下段：1,000年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。

第 2.2-36 図 P10 モデルにおける CO₂飽和度の推移（平成 23 年度シミュレーション結果）



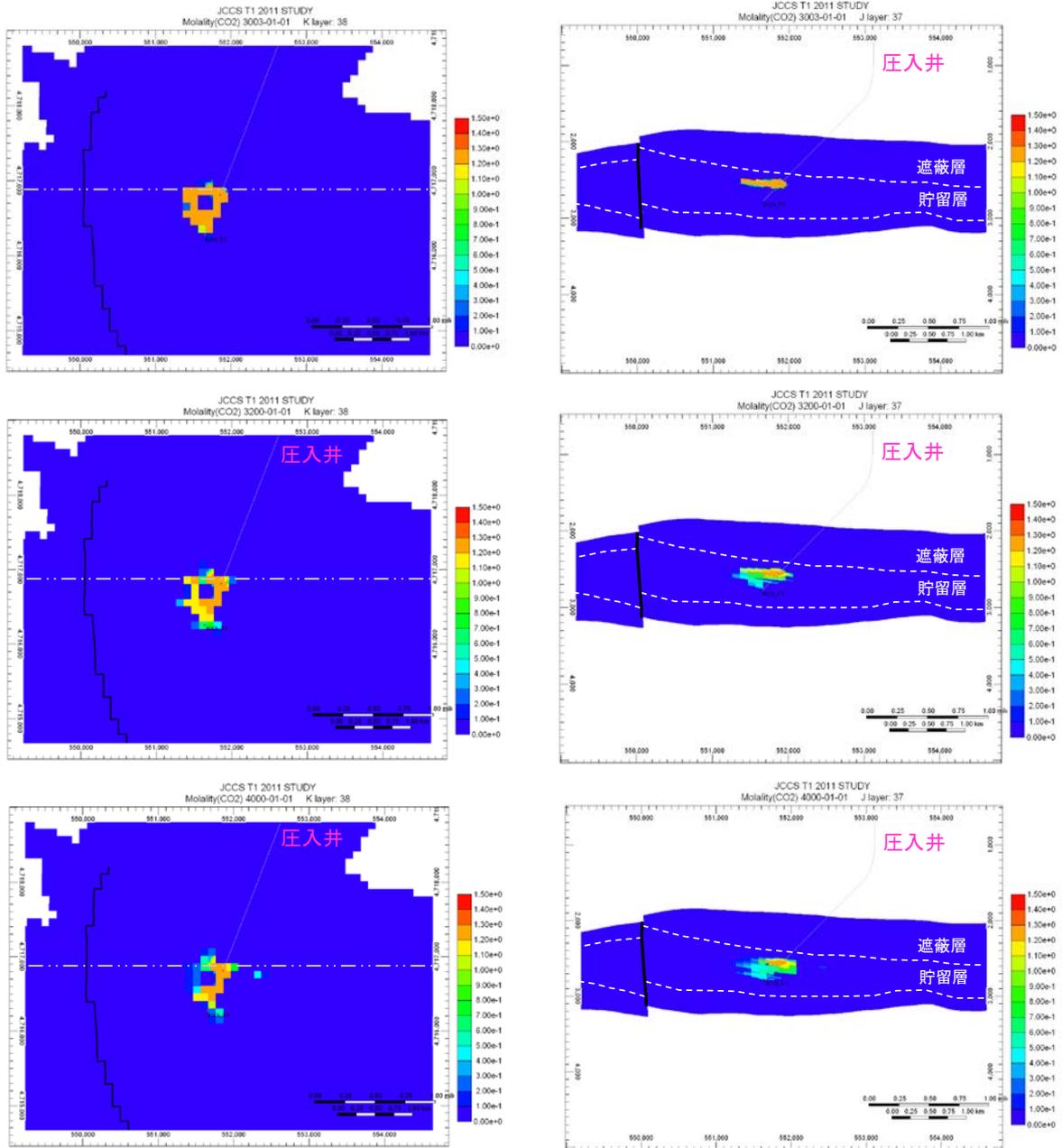
注：上段：圧入終了時（3年後），中段：200年後，下段：1,000年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。

第 2.2-37 図 P50 モデルにおける CO₂飽和度の推移（平成 23 年度シミュレーション結果）



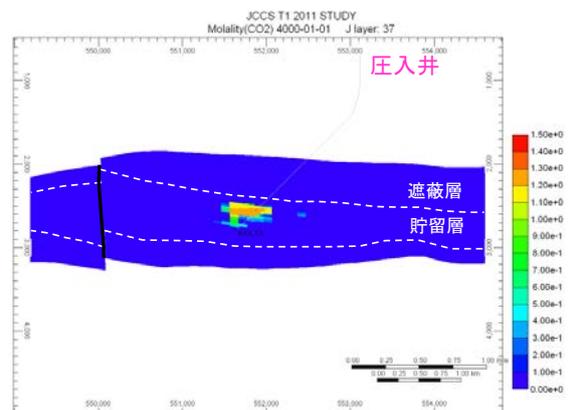
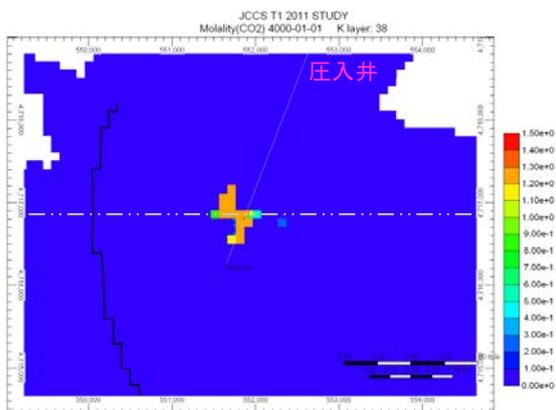
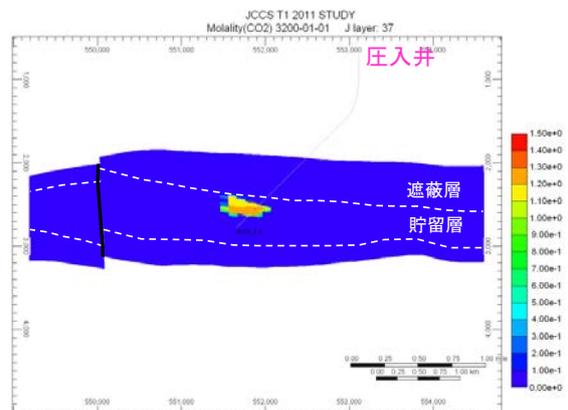
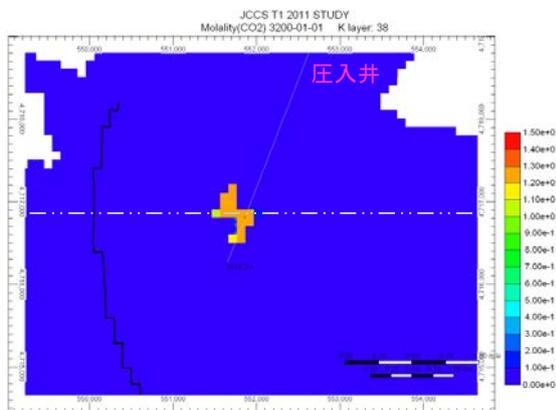
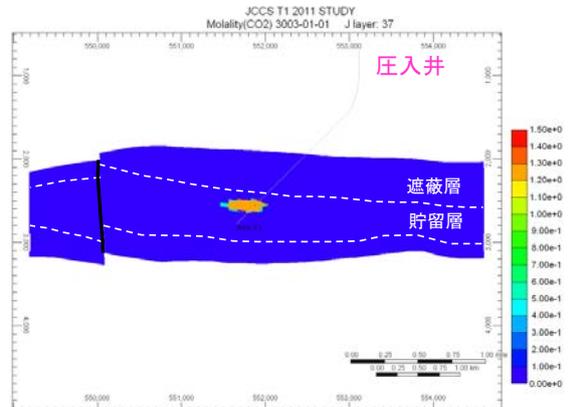
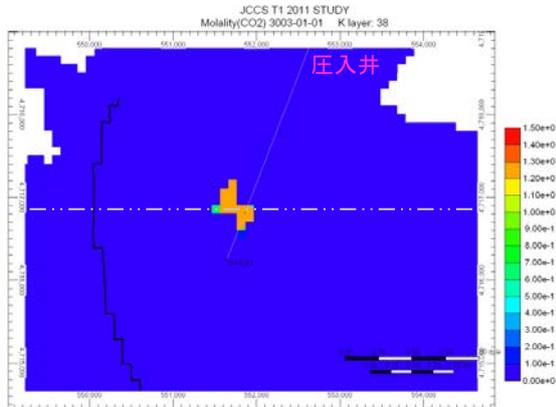
注：上段：圧入終了時（3年後），中段：200年後，下段：1,000年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。

第 2. 2-38 図 P90 モデルにおける CO₂飽和度の推移（平成 23 年度シミュレーション結果）



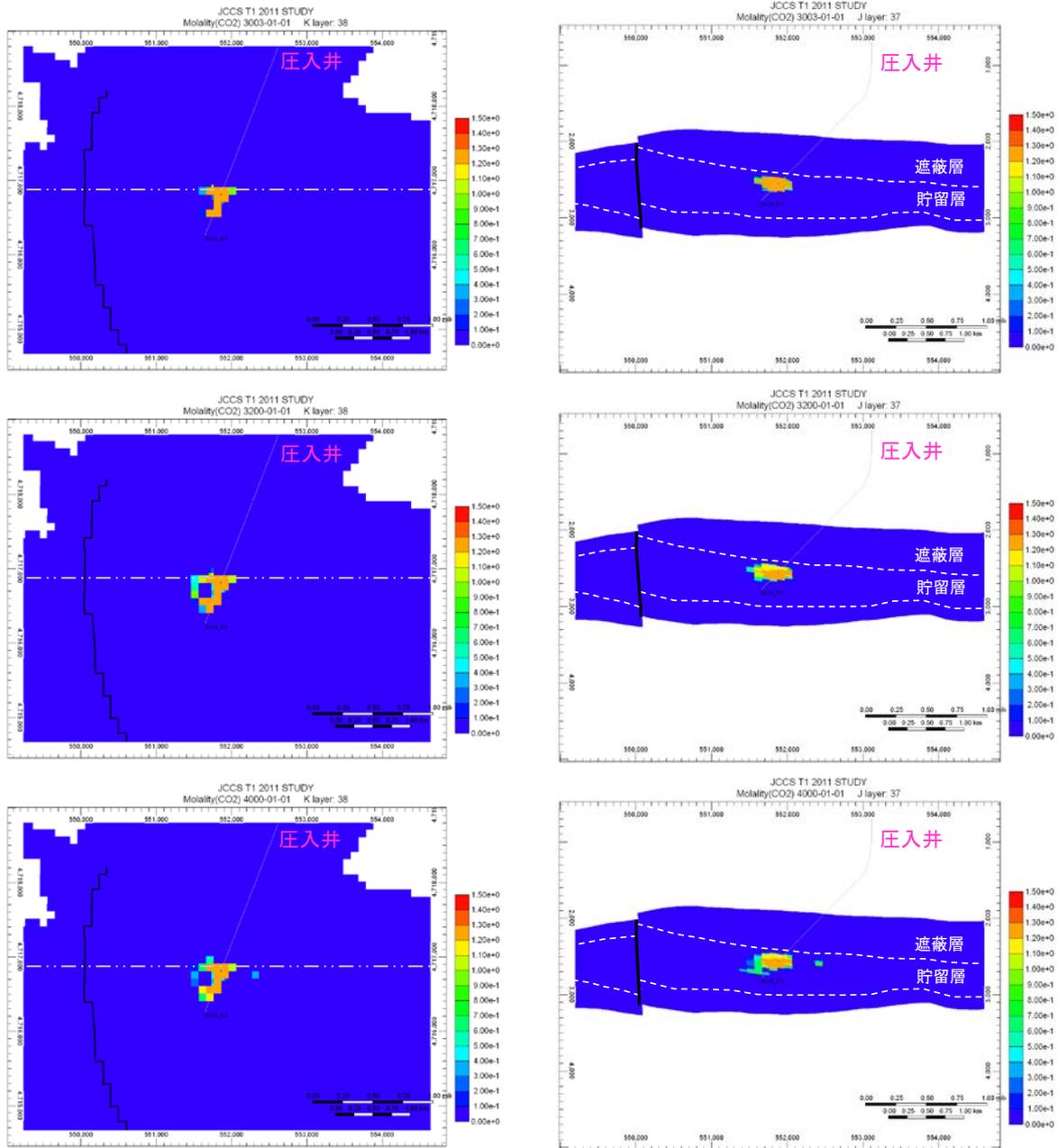
注：上段：圧入終了時（3年後），中段：200年後，下段：1,000年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。単位は，mol/kg。

第 2.2-39 図 P10 モデルにおける溶解 CO₂ 量の推移（平成 23 年度シミュレーション結果）



注：上段：圧入終了時（3年後），中段：200年後，下段：1,000年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。単位は，mol/kg。

第 2. 2-40 図 P50 モデルにおける溶解 CO₂ 量の推移（平成 23 年度シミュレーション結果）



注：上段：圧入終了時（3年後），中段：200年後，下段：1,000年後。上段：平面分布（k方向セル38），下段：東西断面（位置は平面分布の点線の位置）。単位は，mol/kg。

第 2.2-41 図 P90 モデルにおける溶解 CO₂ 量の推移（平成 23 年度シミュレーション結果）

a) 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広がり、圧入終了時点で気相 CO₂^{注1}は滝ノ上層圧入井から水平的に約 600m 先まで、溶解 CO₂は約 800m 先まで広がる。圧入終了後は、気相 CO₂はほとんど移動せず溶解により CO₂飽和度が減少する。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。

b) 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広がり、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 先まで広がる。圧入終了後は、気相 CO₂は殆ど移動せず、溶解により CO₂飽和度が減少する。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。

c) 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広がり、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 先まで広がる。圧入終了後は、気相 CO₂はほとんど移動せず、溶解により CO₂飽和度が減少する。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。

イ) 滝ノ上層 T1 部層における CO₂挙動予測（圧入井掘削結果を踏まえた予測）

a. 概要

Computer Modelling Group Ltd. 社の GEM (ver2014.10) を使用し、シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、以下の 3 種類である

- ・ 泥岩の毛細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 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

圧入井における滝ノ上層の仕上げ全区間に対して CO₂を圧入する設定とした。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、滝ノ上層圧入井の振老層下部泥岩(遮蔽層)で実施したエクステンデットリークオフテストで取得したリークオフ圧力を地層の破壊圧と仮定し、その 90% (38,000kPa@PT センサー深度) と設定した。

^{注1} 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ため、ここでは「気相」と称する。

b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、滝ノ上層圧入井のデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等）および文献値により、第 2. 2-13 表に示す値を用いた。

滝ノ上層の貯留岩性状が予想以上に低かったため、地質モデルの一部分を切出した 2km×2km のセクターモデルを作成した。さらにより正確なシミュレーションを実施するために、100m×100m のセクターモデルとし、滝ノ上層圧入井が通過するグリッドを 5m×5m のグリッドに細分の上、シミュレーションを実施した（第 2. 2-42 図）。

第 2. 2-13 表 シミュレーションパラメーター一覧（平成 27 年度地質モデル）

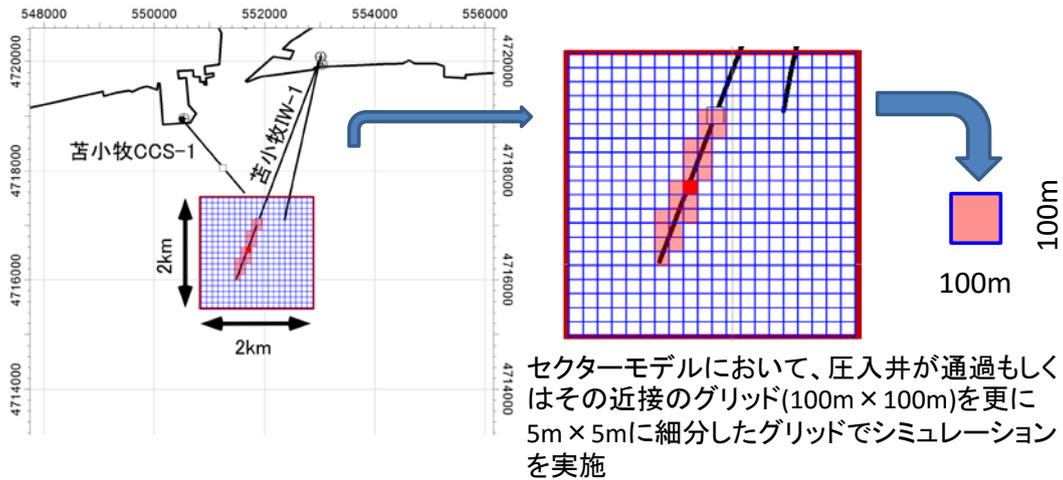
モデル	滝ノ上層 T1 部層 2015 モデル	
サイズ	8km×12km×4km ⇒ 2km×2km×1km（セクターモデル）	
グリッド	80×120×106 グリッド ⇒ 20×20×62（セクターモデル）	
アクティブ・ブロック数	24,800（セクターモデル）	
基準温度	88.3°C（2,340m/PT センサー深度）	
基準圧力	32,600kPa（2,340m/PT センサー深度）	
CO ₂ 圧入レート, 圧入期間	200,000 トン/年×3 年（設定最大レート）	
圧入圧力上限	38,000kPa（PT センサー深度）	
岩石性状	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
平均孔隙率	滝ノ上層圧入井 AI 分布から推定	0.15
平均浸透率：mD	滝ノ上層圧入井ビルドアップテスト結果等から推定	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	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
気相 相対浸透率 Krg	Bennion (2005) ^[1]	Corey (1954) ^[2]
液相 相対浸透率 Krw		van Genuchten (1980) ^[3]
臨界ガス飽和率 Sgc	0.04 Bennion (2005) ^[1]	0.05
不動水飽和率 Swir	0.558 Bennion (2005) ^[1]	0.8
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.241 from default value of GEM	—
毛細管圧力曲線	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
	Bennion (2006) ^[4] , van Genuchten (1980) ^[3]	測定値

^[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, pp.7-9, p.12

^[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp.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, pp.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, p.9



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

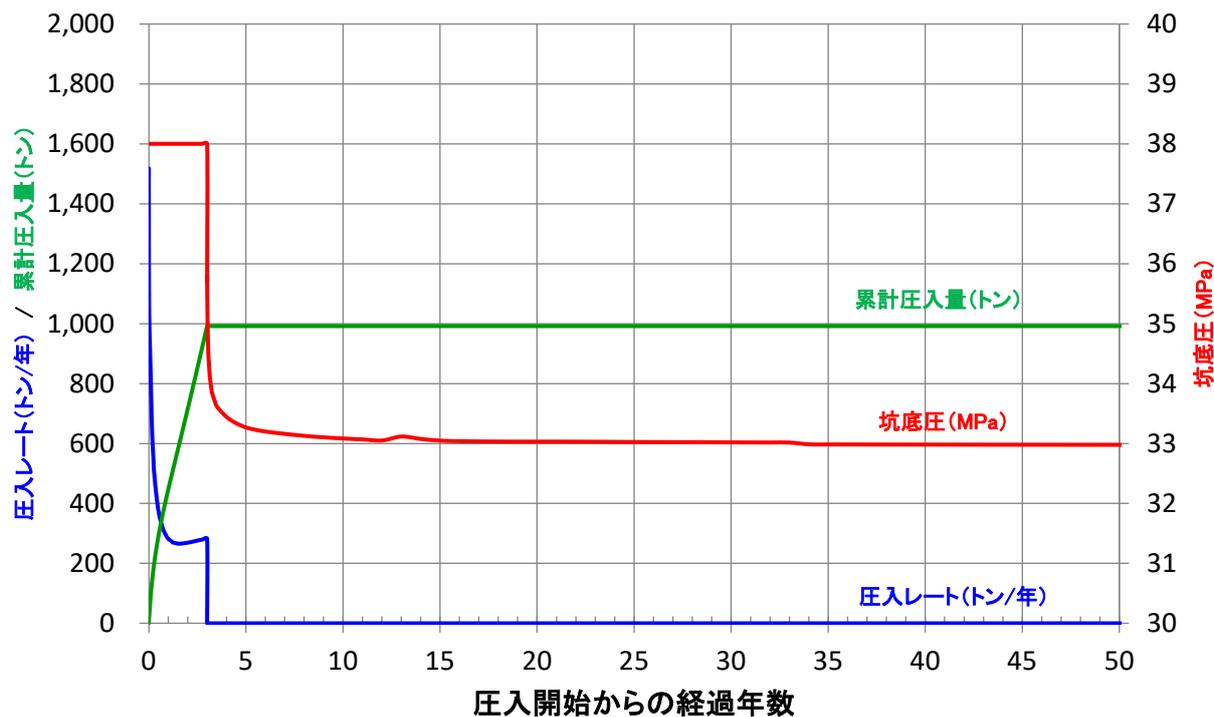
第 2.2-42 図 平成 27 年度シミュレーションに用いたセクターモデルとグリッド

c. CO₂ 圧入時の挙動

圧入中の坑底圧，圧入レート，累計圧入量および圧入開始から 50 年後までの圧入井における坑底圧変化の関係を，第 2.2-43 図に示す。

圧入は 1,500 トン/年程度の圧入レートで開始するが，シミュレーションの設定上，圧入開始直後に坑底圧の規定上限圧力（38MPa）に到達するため，圧入レートを下げる必要がある，約 1 年後には 300 トン/年程度の圧入レートとなる。圧入開始から 1.5 年程度経過したころから，圧入井近傍の CO₂ 濃度が高まるため，地層水に対する CO₂ の浸透性が増すことから，若干圧入レートが上昇するものと考えられる。

3 年間での累計圧入量は，1,000 トン程度と推定される。



第 2.2-43 図 CO₂圧入時の挙動（平成 27 年度シミュレーション結果）

d. 貯留層圧力分布

CO₂圧入終了時からの貯留層圧力分布の推移を、第 2.2-44 図に示す。

3 年間の CO₂圧入により上昇した圧力は、圧入井の周辺約 50m 程度まで伝播する（第 2.2-44 図上段）。また、垂直方向には、上下 20~30m の範囲の圧力が上昇する。

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。しかしながら、それ以降ほとんど圧力は下がらず、1,000 年たってもその影響はほとんど変わらない（第 2.2-44 図の中段および下段）。