ｲ) 苫小牧 CCS-1 の解析結果の概要

本井は,平成 22 年 11 月 5 日から平成 23 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）の傾斜井として掘削した。確認層序を，第 2.2-2 表に示す。

第 2.2-2 表　調査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	未固結砂礫等。
鵡川層	458	-	873	砂礫岩を主体とし，シルト岩を伴う。
萌別層泥岩	873	-	1,076 (1,071)	上部はシルト岩～泥岩主体とする。
萌別層砂岩	1,076 (1,071)	-	1,230 (1,211)	砂岩を主体とする。
荷菜層	1,230 (1,211)	-	1,638 (1,524)	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	1,638 (1,524)	-	2,289 (2,006)	泥岩を主体とし，シルト岩，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	2,289 (2,006)	-	2,826 (2,404)	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	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。第 2.2-10 図に，物理検層結果の事例を記す。

・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，勾配を求めた（第 2.2-11 図)。

・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 毎に採取した。

・コア試料（直径約 10cm）を振老層泥岩で 2 回（合計 16m)，滝ノ上層 T1 部層で 7 回（合計 115.9m）採取した。

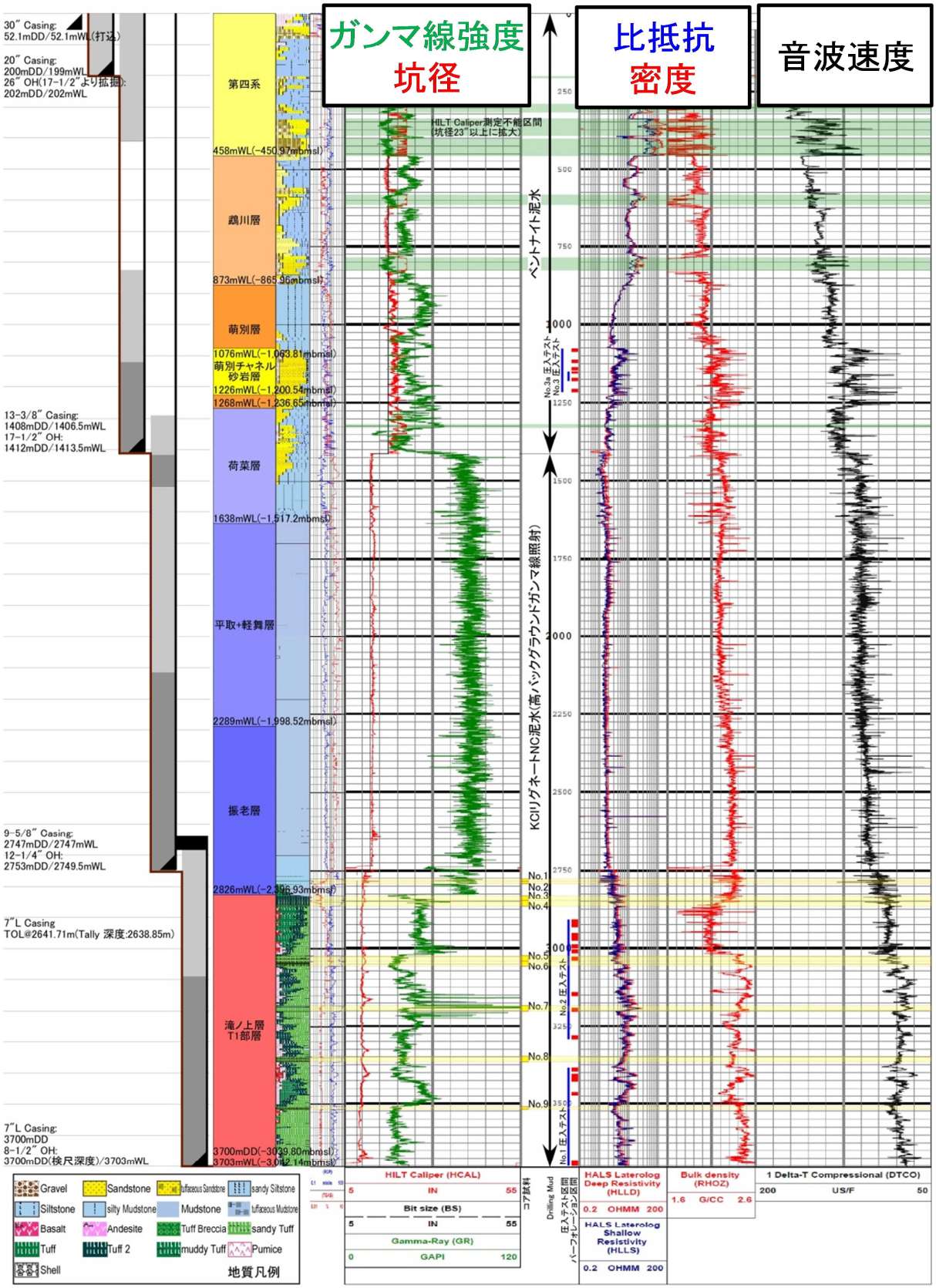
・これらの試料に関し，微化石分析（有孔虫および珪藻化石分析)，岩石鉱物分析（X 線分析および薄片鑑定）および岩石物性分析（孔隙率，浸透率，スレショルド圧力分析等）を実施した。

・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（古水深 500～1,000m)，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。

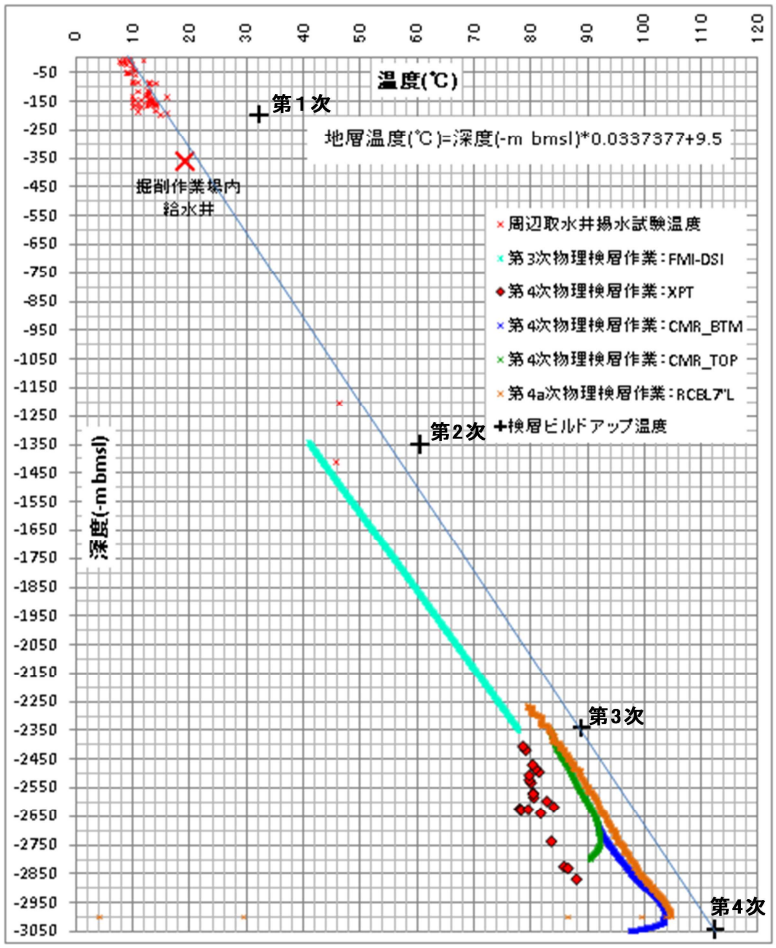
・深度 2,753～2,758m（垂直深度 2,350～2,355m）の振老層下部において，リークオフテストおよびエクステンディッド・リークオフテストを実施した。

・300～800m の間は 100m 間隔で，深度 850～3,265m は 25m 間隔で VSP 調査を実施し，苫小牧 CCS-1 と三次元弾性波探査データとの高精度な対比が可能となった。

・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）のブライン圧入テストを実施した。



第 2.2-10 図　苫小牧 CCS-1 の物理検層結果事例



第 2.2-11 図　苫小牧 CCS-1 の地温勾配解析結果

ｳ) 苫小牧 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，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（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 CO_2 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。

ｵ) 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，その上位に荷菜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 降（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	8.2×10^{-6}～36.7×10^{-6}mD（苫小牧 CCS-1 コア試験：水浸透率）
スレショルド圧力	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：ブレークスルーしなかったことから，測定値以上のスレショルド圧力を有すると判断した。

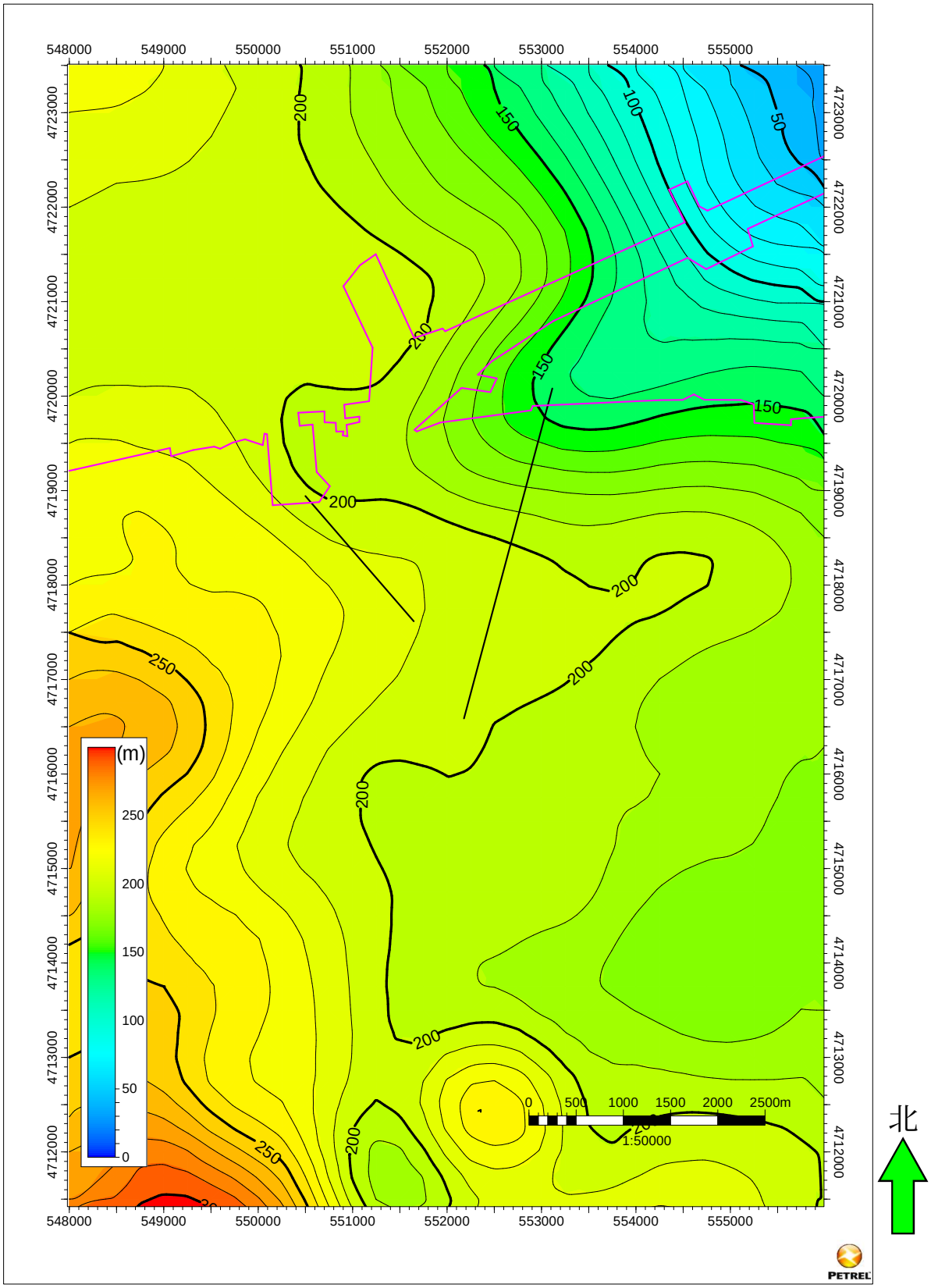
第 2.2-5 表　貯留層性状一覧（萌別層砂岩層）

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	0.80×10^{-3}～1.73×10^{-3}mD（苫小牧 CCS-2 コア試験：水浸透率） 1.73×10^{-3}mD（萌別層圧入井カッティングス試験）
スレショルド圧力	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

CO_2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)およびｳ)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

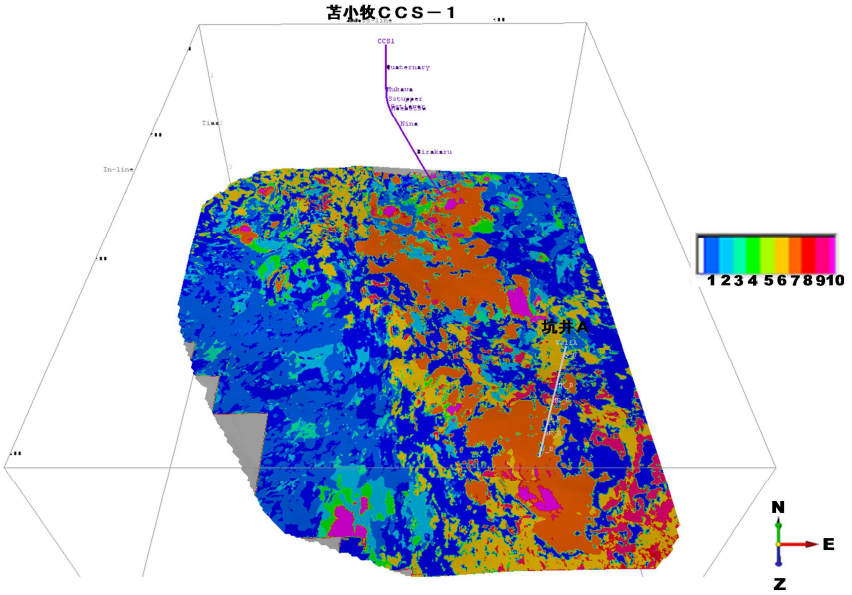
・SOM（Self-organizing Maps：自己組織化マップ）解析による波形分類を行い，

・クラスター解析（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。

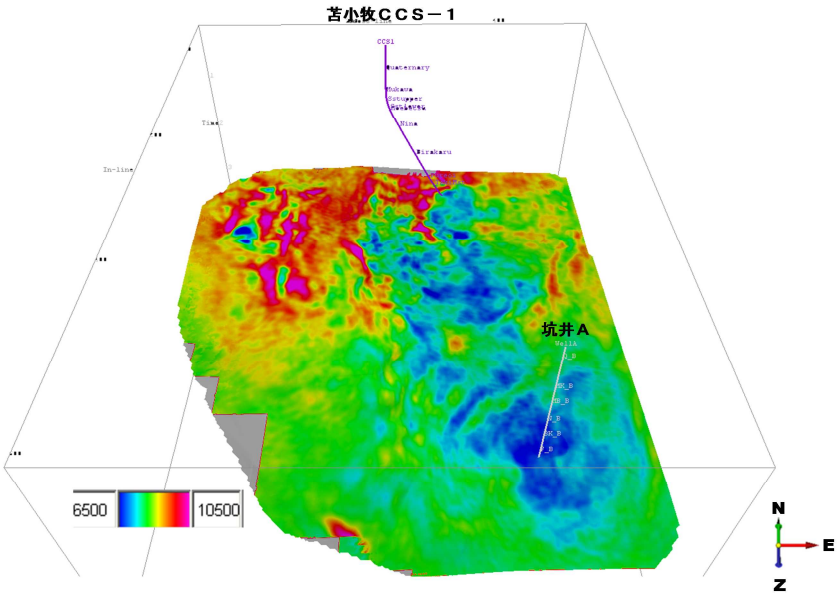
・コア試料と物理検層データの解析から，溶岩～凝灰角礫岩については，AI（Acoustic Impedance：音響インピーダンス：密度×弾性波速度）と孔隙率とが逆相関関係にあることを確認した。

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）

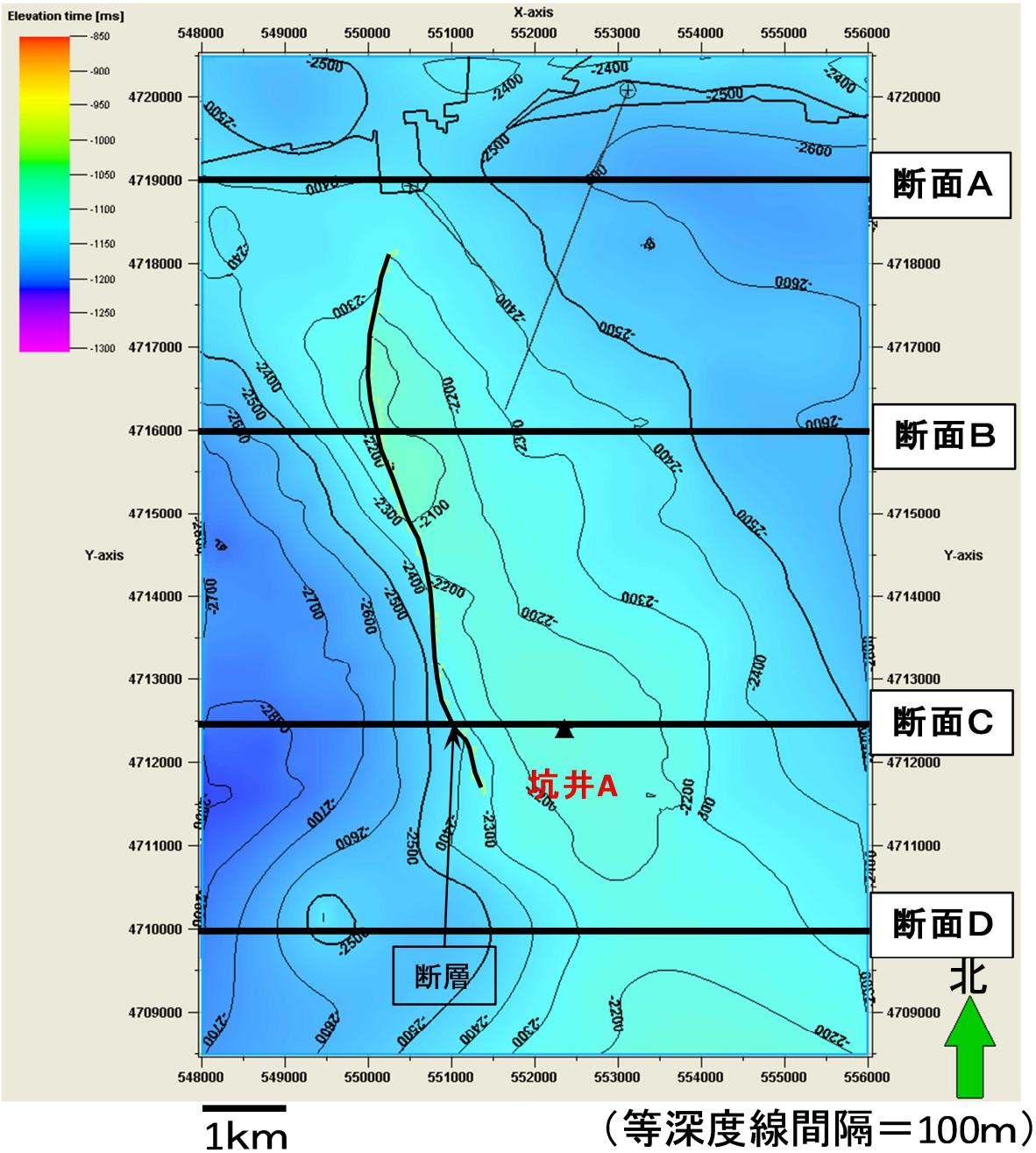


注：青色の部分が，低 AI で高孔隙率と考えられる箇所。高浸透率である可能性も高い。滝ノ上層圧入井は，低 AI 域に掘削した。

第 2.2-14 図　滝ノ上層 T1 部層下部の音響インピーダンス

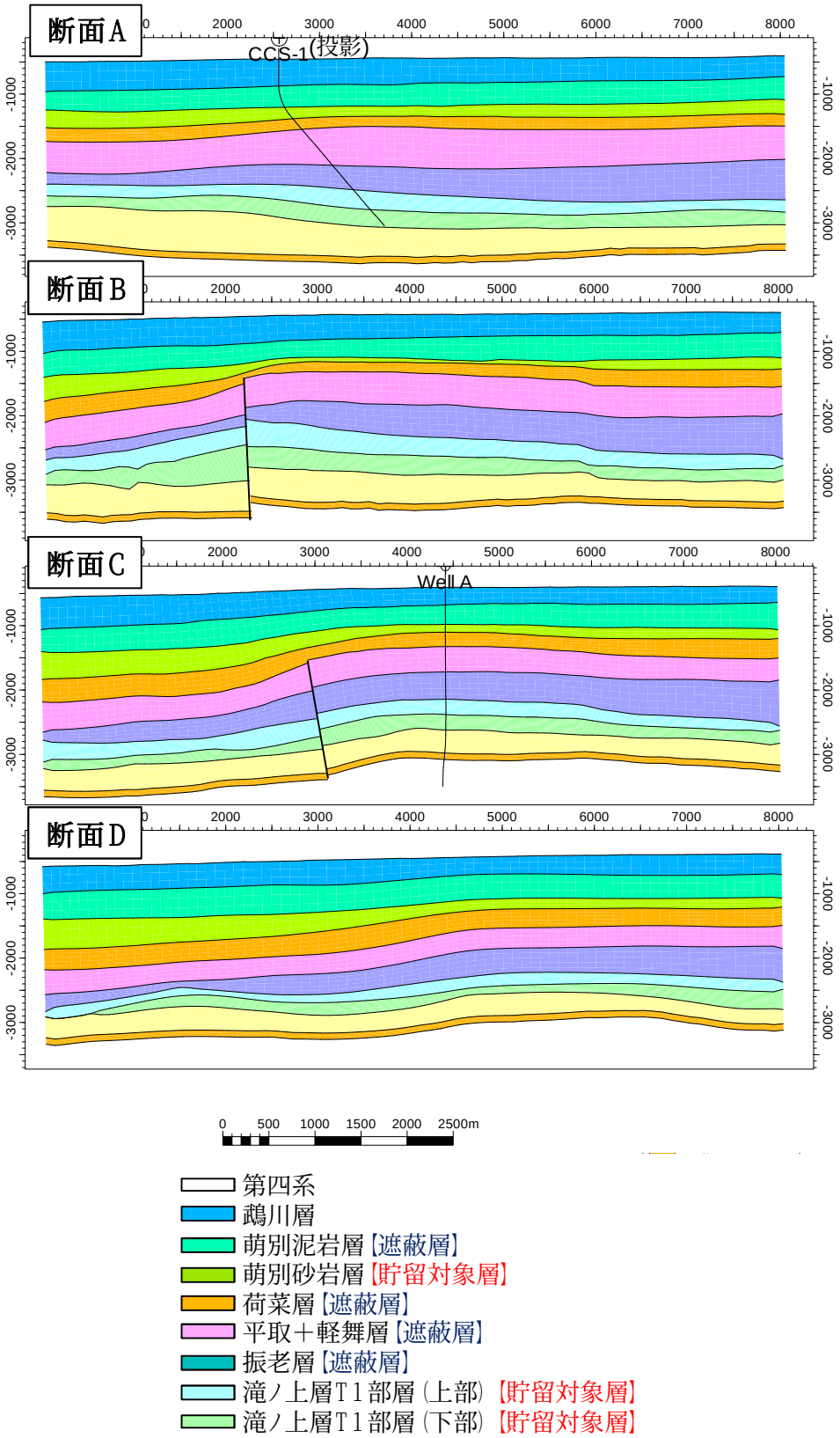
b．構造モデルの作成

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ッディング情報を第 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）



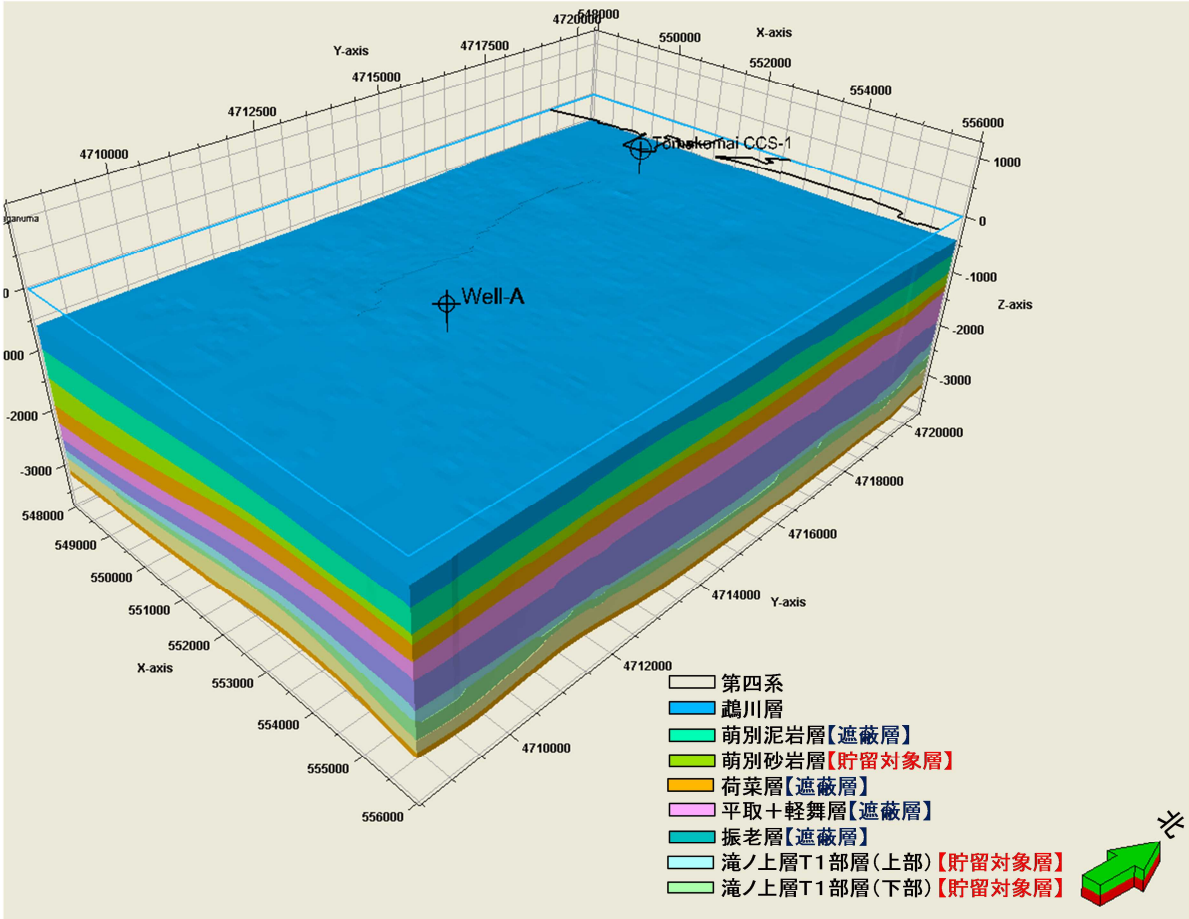
注：苫小牧 CCS-1 は，投影表示。

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ッディング

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		
鵡川層：	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 CO_2 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。

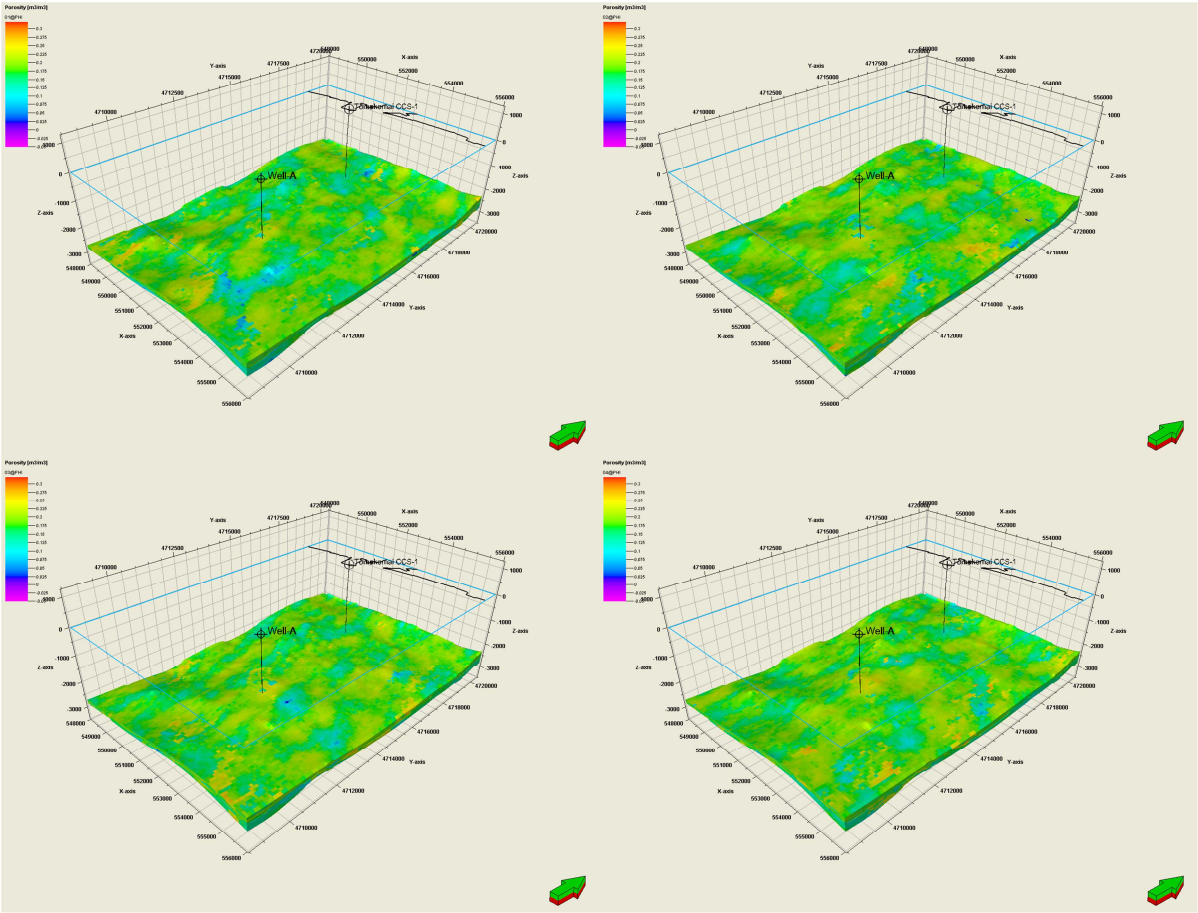


第 2.2-17 図　三次元地質モデル鳥瞰図

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，CO_2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，CO_2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様に分布させた。

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。