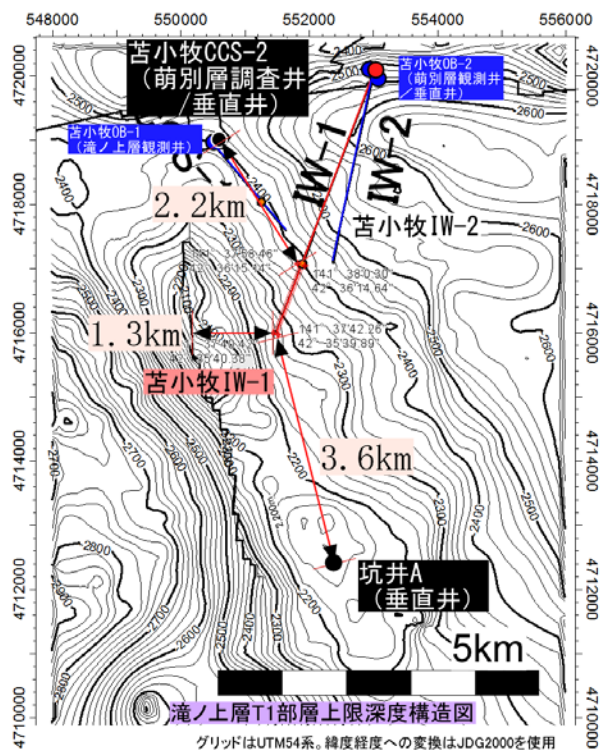


2)および3)に関しては、次の理由により漏出経路とはならない。

- ・ 滝ノ上層圧入井周辺には、滝ノ上層を切る断層が解釈されている。CO₂プルームから断層までの距離は、1.3kmとなる。また、周辺に存在が知られる廃坑井は、苫小牧 CCS-2 と坑井 A の 2 坑井があり、CO₂プルームからの距離は、それぞれ 2.2km、3.6km の距離が確保されている（第 3.2-2 図）。
- ・ 萌別層圧入井周辺には、萌別層を切る断層は解釈されていない。また、廃坑井である苫小牧 CCS-2 および坑井 A それぞれとの CO₂プルームからの距離は、1.3km、4.3km の距離が確保されている（第 3.2-3 図）



第 3.2-2 図 滝ノ上層圧入井周辺の圧入した CO₂の分布予測範囲と、周辺の断層および廃坑井との位置関係



第 3.2-3 図 萌別層圧入井周辺の圧入した CO₂の分布予測範囲と、周辺の廃坑井との位置関係

4)に関しては、圧入した CO₂が移動する可能性がある区間には、耐 CO₂素材のケーシングを用いている。また、ケーシングと地層との間を、耐 CO₂セメントを用いて遮水（セメンチング）している。よって、圧入井の外側からの漏洩の危険はないと考えられる。

(2) CO₂漏出要因に関する検討のまとめ

上記の想定される漏出経路 1)～4)について検討した結果のまとめは、以下のとおりである。

1) 遮蔽層の毛細管圧を超えて移動

滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層の圧入圧力は、それらの遮蔽層のスレシヨルド圧力（毛細管圧）を超えることはなく、CO₂は遮蔽層には浸透しない。

2) 断層を通じた移動

シミュレーションによる CO₂長期挙動予測の結果、圧入後 200 年程度で CO₂の広がりに変化は見られなくなり、1,000 年を経ても CO₂は断層に到達しないことから、断層は CO₂の漏出要因にならないと考える。

3) 廃坑井を通じた移動

シミュレーションによる CO₂長期挙動予測の結果、圧入後 200 年程度で CO₂の広がりに変化は見られなくなり、1,000 年を経ても CO₂は廃坑井に到達しないことから、廃坑井は CO₂の漏出要因にならないと考える。

4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

圧入井等の構造物の設計・建設では、CO₂が接触する鋼材やセメント等を耐 CO₂仕様にし、これら構造物に起因した CO₂の漏洩は防止される。

以上から、圧入井等の構造物を耐 CO₂仕様にするにより、基本的には、CO₂の漏出は生じないものとする。

4 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスの地層内での空間的な広がり及び特定二酸化炭素ガスの推定廃棄可能量に係る事項

4.1 海底下投棄された特定二酸化炭素ガスの地層内での空間的な広がり

特定二酸化炭素ガスの地層内の広がりについては、平成 24 年度ならびに平成 27 年度 CO₂ 挙動予測シミュレーションに基づいて検討した。

(1) 滝ノ上層 T1 部層中での空間的広がり

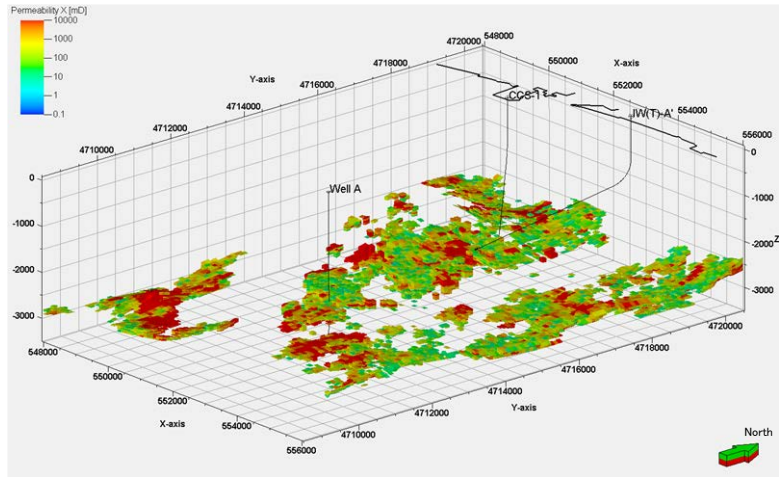
① 地質モデル

滝ノ上層 T1 部層への滝ノ上層圧入井の圧入（廃棄）位置を選定するあたり、三次元弾性波探査データおよび、苫小牧 CCS-1（調査井）、坑井 A（既存民間井）のデータを地質統計学的に解析し、100 通りの不均質な物性を有する地質モデル（平成 24 年度地質モデル）を作成した。地層境界深度や入力した物性値については平成 23 年度シミュレーション（第 2.2 節）と同様の値を使用している。作成した地質モデルを用い、CO₂を 20 万トン/年のレートで 3 年間圧入するシミュレーションを実施した^{注1}。圧入終了時の貯留層上限における地層圧の上昇量を序列化し、100 個のモデルの累積確率分布を作成した。平成 23 年度シミュレーションと同様に、P10、P50、P90 を設定した。

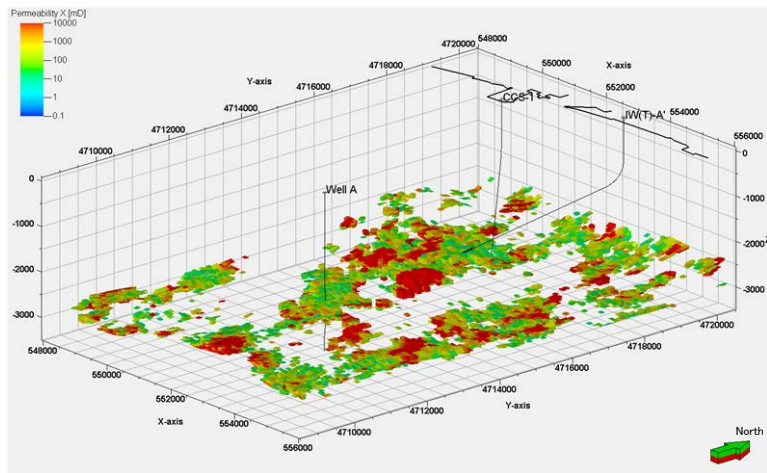
また、平成 24 年度地質モデルは、時間ドメインである弾性波探査記録に基づく地質構造解釈により作成したことから、深度ドメインの地質モデルに変換する必要がある。平成 24 年度シミュレーションでは当該地域で見込まれる±88m の深度変換誤差を考慮した地質モデルを作成した。ベースとなる深度モデルを Base 深度モデルとし、誤差の振れ幅から Deep 深度モデルと Shallow 深度モデルを設定し、そのそれぞれの P10、P50、P90 のケースに対しシミュレーションを実施している。

それぞれの深度モデルで作成した P10、P50、P90 ケースに対する不均質モデル（浸透率）を例として、第 4.1-1 図～第 4.1-3 図に示す。

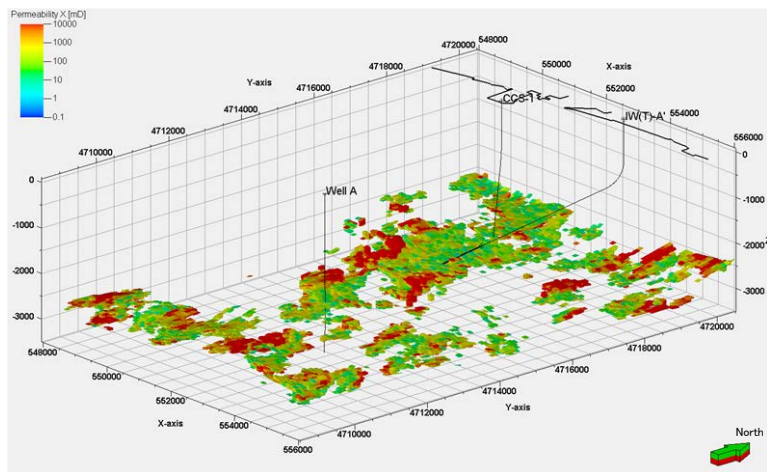
^{注1} 平成 23 年度シミュレーションは 25 万トン/年の圧入レート、平成 24 年度シミュレーションは 20 万トン/年の圧入レートであるのは、CO₂の供給量の見直しにより計画変更したことによる。また、保守・点検の都合、モニタリング計画との関連、貯留層の状況等により、一時的に、あるいは長期的に一方の貯留層だけに圧入するケースも想定されることから、それぞれに圧入する最大値として、圧入レートを設定している。



Base深度モデル/P10ケース地質モデル（浸透率， $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング）

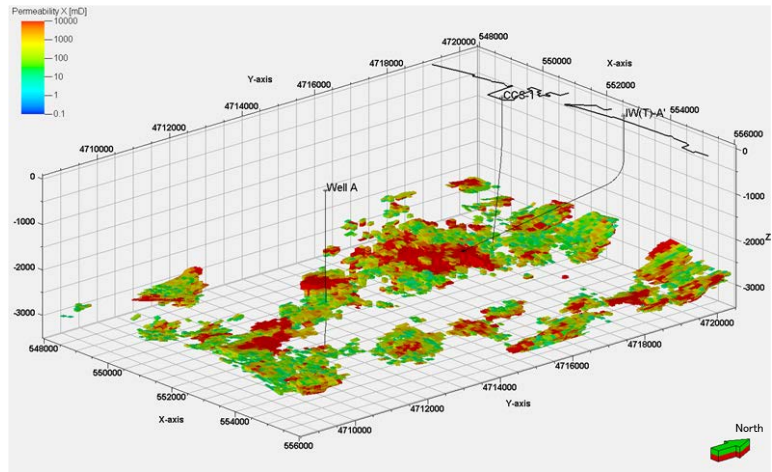


Base深度モデル/P50ケース地質モデル（浸透率， $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング）

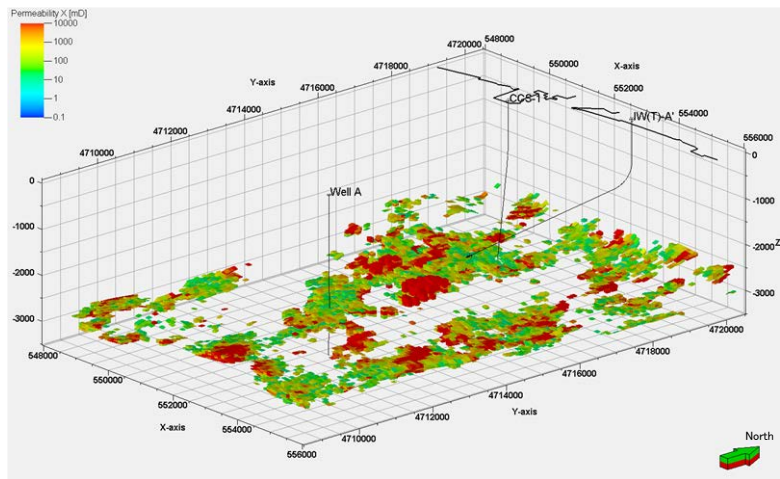


Base深度モデル/P90ケース地質モデル（浸透率， $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング）

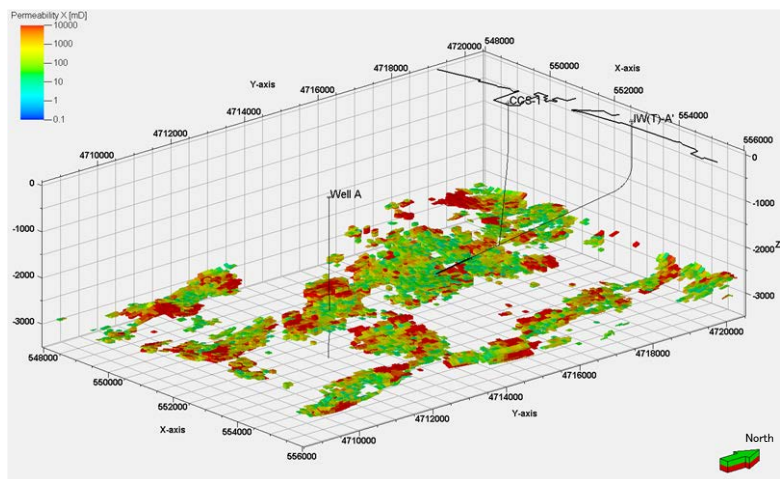
第 4. 1-1 図 滝ノ上層 T1 部層の不均質モデルの浸透率分布：Base 深度モデル/P10, P50, P90 ケース（平成 24 年度地質モデル）



Deep深度モデル/P10ケース地質モデル（浸透率， $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング）

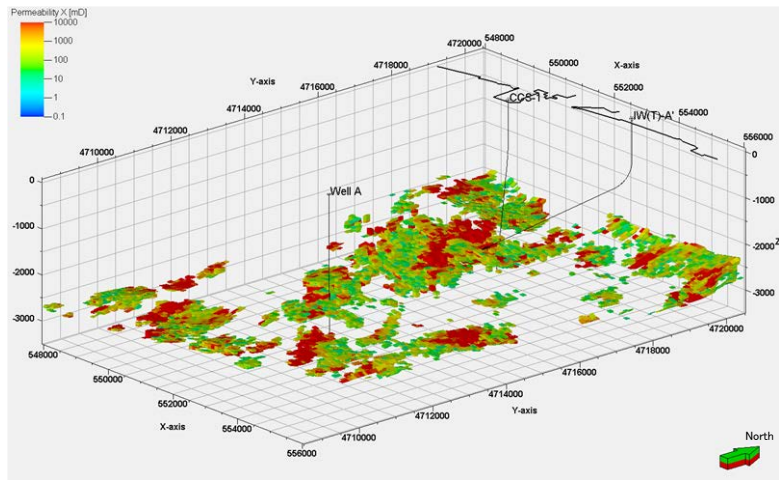


Deep深度モデル/P50ケース地質モデル（浸透率， $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング）

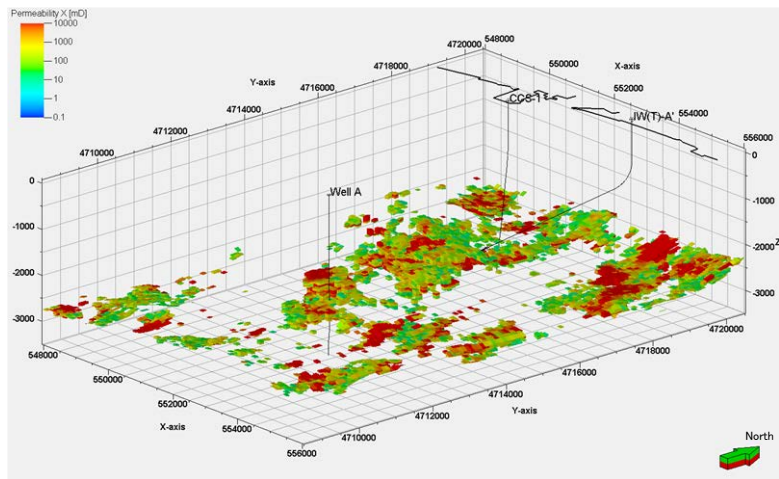


Deep深度モデル/P90ケース地質モデル（浸透率， $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング）

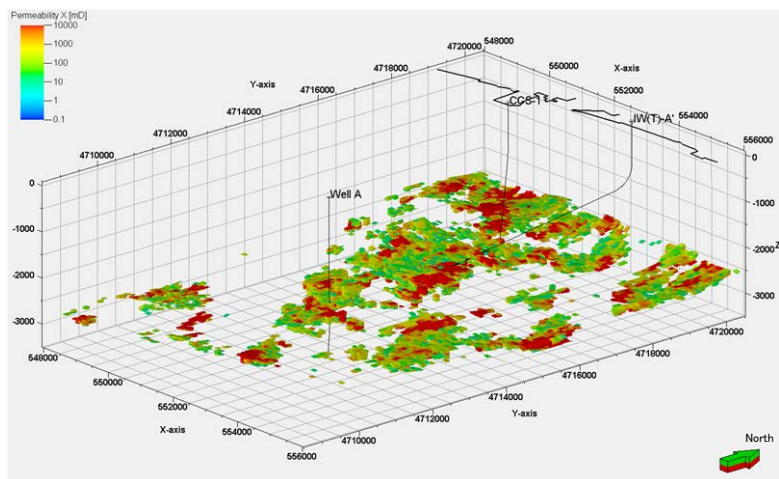
第 4.1-2 図 滝ノ上層 T1 部層の不均質モデルの浸透率分布：Deep 深度モデル/P10, P50, P90 ケース（平成 24 年度地質モデル）



Shallow深度モデル/P10ケース地質モデル (浸透率, $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング)



Shallow深度モデル/P50ケース地質モデル (浸透率, $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング)



Shallow深度モデル/P90ケース地質モデル (浸透率, $k > 10\text{mD}$ でフィルタリング)

第 4. 1-3 図 滝ノ上層 T1 部層の不均質モデルの浸透率分布 : Shallow 深度モデル/P10, P50, P90 ケース (平成 24 年度地質モデル)

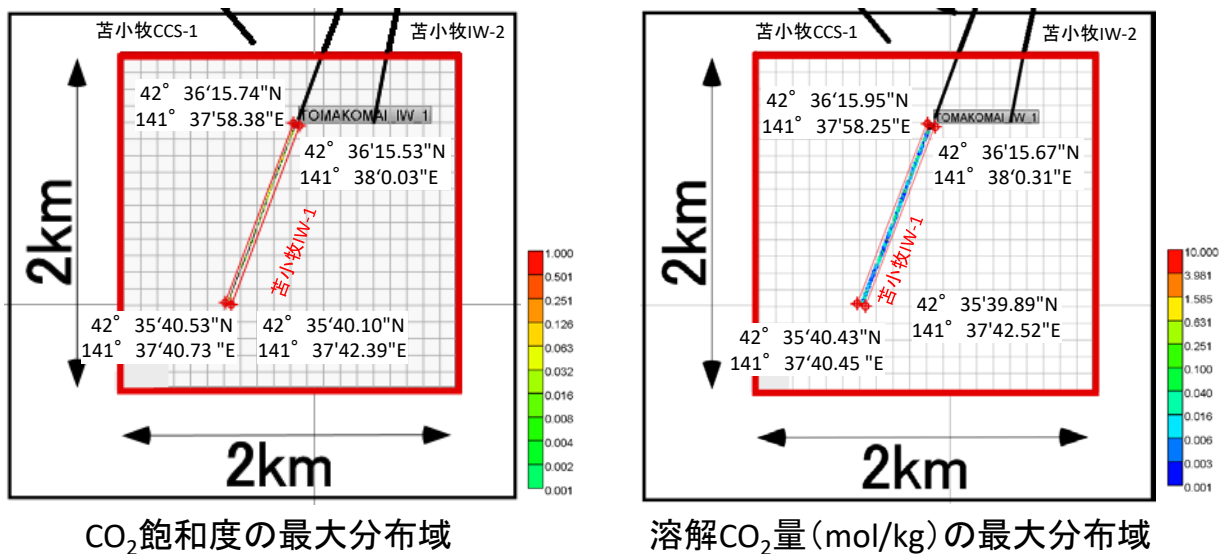
上記平成 24 年度地質モデルを、滝ノ上層圧入井の掘削実績に合わせて修正した。

その修正した地質モデルを用いて、平成 27 年度に CO₂ 圧入シミュレーションを実施した。その際、圧入井掘削時に得た遮蔽層の破壊圧に係るデータを参照して、坑底圧力の上限により圧入レートを変化させて、CO₂ を 3 年間圧入するシミュレーションを実施した。なお、圧入井掘削の結果から、圧入井の極近傍以外で岩相や属性を地球統計学的推定することは困難と判断し、P50 モデルの 1 ケースのみを修正した属性モデルによりシミュレーションを実施した。

しかしながら、圧入井の掘削データだけで貯留層全体を正確に評価するには限界がある。圧入井の掘削結果を新たに既存の評価データに加えることで、より現実に近い貯留層の評価が可能となると考えられるが、厳密な意味での正確な貯留層評価は容易ではない。実際に CO₂ を圧入する際にも、適宜圧力挙動の観測やフォールオフテストを実施して貯留層に係るデータを増やし、より正確な貯留層性状を把握する。

② CO₂ の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲を考慮し、圧入した CO₂ の平面的な分布範囲を推定した（第 4.1-4 図）。



- 注：1. 図中の滝ノ上層圧入井、萌別層圧入井および苫小牧 CCS-1 は、坑井の坑跡を上面に投影したもの。
 2. 滝ノ上層圧入井の仕上げ区間全体から、CO₂ が滝ノ上層中に圧入される。圧入に際し予想される CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布を、階調をつけて色表示した。
 3. 図中の座標は、シミュレーションにより予想される、CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布域を考慮して想定した圧入した CO₂ の分布範囲を平面に投影したもの。シミュレーションは三次元的にグリッド化した地質モデルを用いて実施したため、分布自体もグリッドを反映した形（四角）となる。
 4. 圧入した CO₂ の分布範囲は限定的となるため、圧入井の圧入区間から、CO₂ 飽和度では 20m、溶解 CO₂ 量では 25m までの範囲とした。

第 4.1-4 図 CO₂ の平面的な分布範囲（平成 27 年度シミュレーション結果）

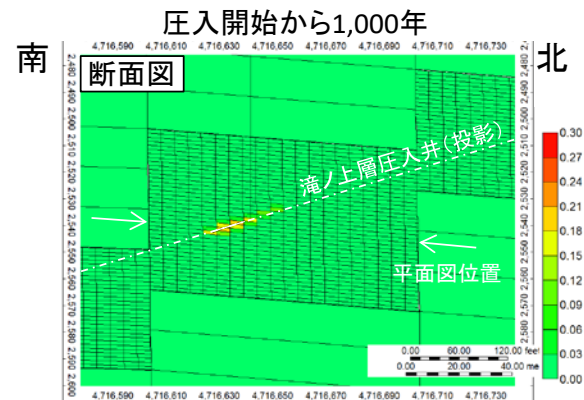
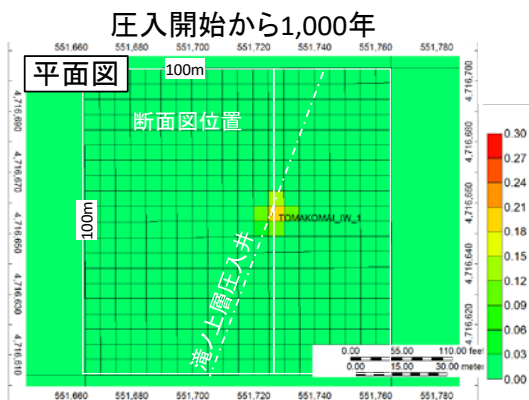
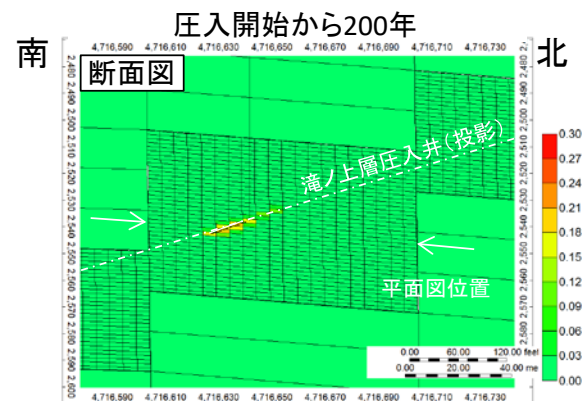
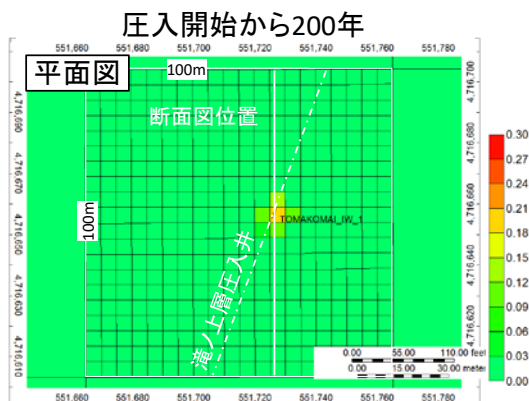
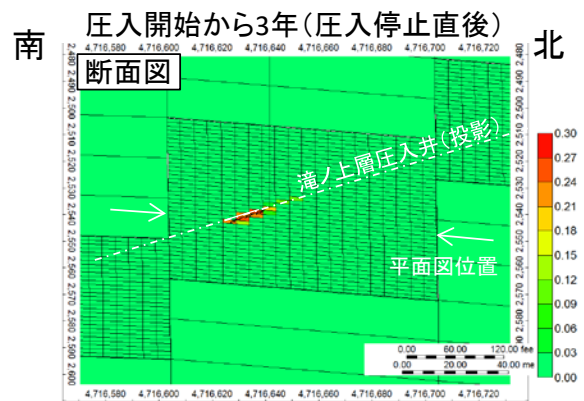
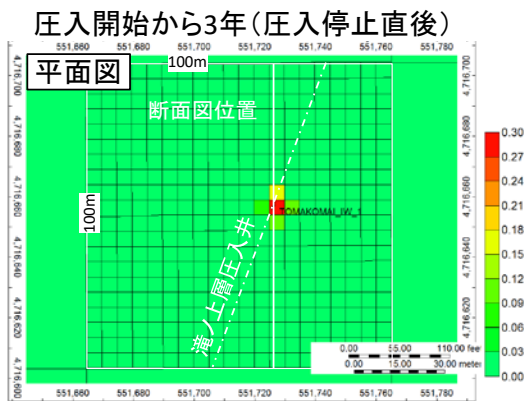
圧入した CO₂は深部塩水層に溶解し、溶解 CO₂になったとしても、第 2. 2-41 図に示す坑跡を通過する 100m×100m のグリッドを超えて移動することはないと考えられる。予想される CO₂飽和度の分布域は溶解 CO₂量の分布域に含まれるため範囲となるため、溶解 CO₂量の分布域を圧入した CO₂の分布範囲とした。

第 4. 1-1 表に、CO₂の平面的な分布範囲の座標を示す。

第 4. 1-1 表 海底下廃棄した CO₂の平面的な分布範囲（滝ノ上層 T1 部層）

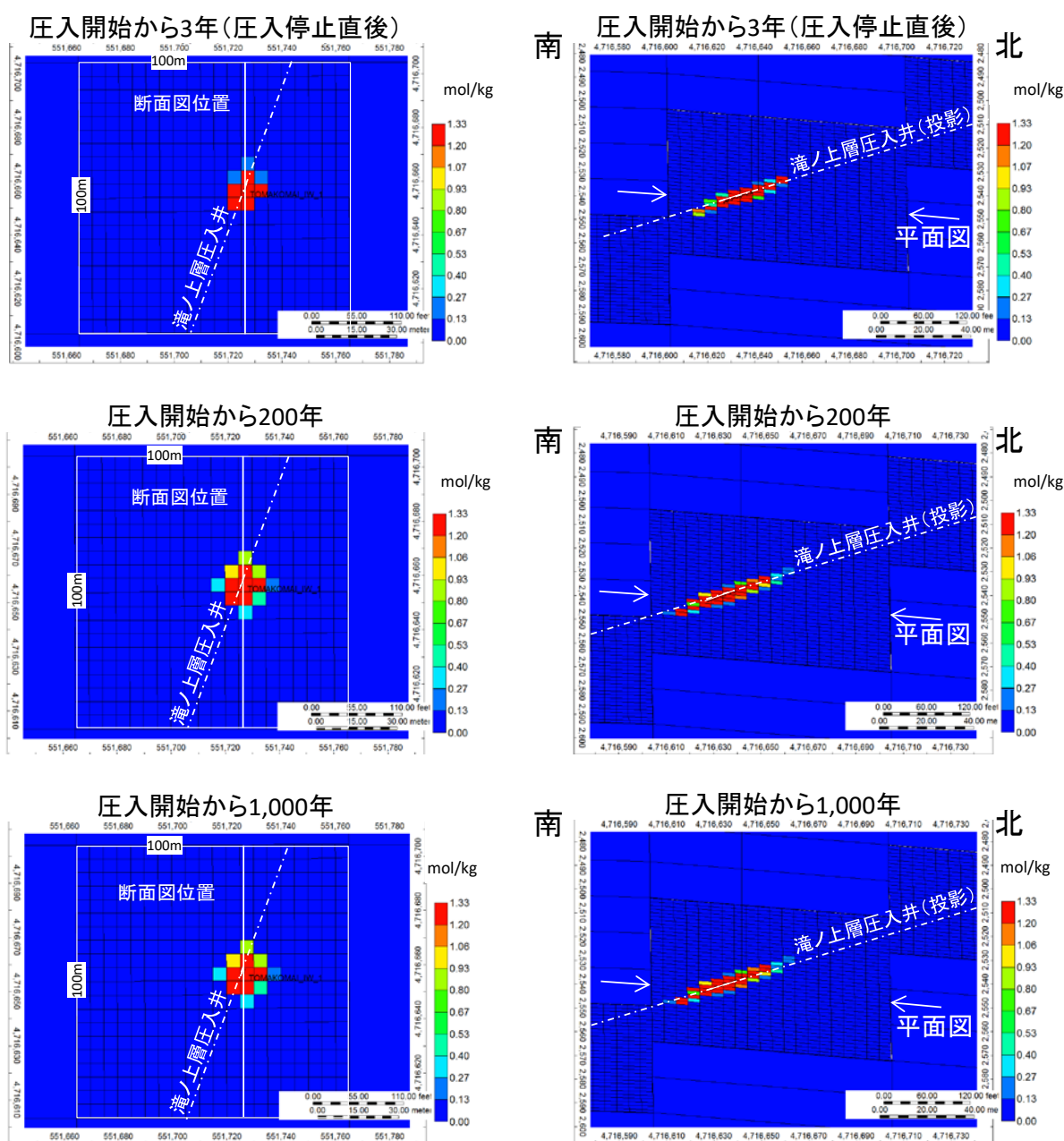
北限			南限			東限			西限		
度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
42	36	15. 95	42	35	39. 89	141	38	0. 31	141	37	40. 45

また、CO₂飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第 4. 1-5 図に、溶解 CO₂量の分布に対するシミュレーション結果を第 4. 1-6 図に示す。



- 注：1. 左：坑跡が通過する地点の平面図，右：その地点の南北方向の断面図。
 2. 上段：圧入開始から3年後（圧入停止直後），中段：圧入開始から200年後，下段：圧入開始から1,000年後。
 3. シミュレーションに使用する地質モデルを，圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために，地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第 4.1-5 図 CO₂飽和度の推移（平成 27 年度シミュレーション結果）



- 注：1. 左：坑跡が通過する地点の平面図，右：その地点の南北方向の断面図。単位は，mol/kg。
 2. 上段：圧入開始から3年後（圧入停止直後），中段：圧入開始から300年後，下段：圧入開始から1,000年後。
 3. シミュレーションに使用する地質モデルを，圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために，地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第4.1-6図 溶解CO₂量の推移（平成27年度シミュレーション結果）

③ CO₂の垂直的な分布範囲

圧入開始から1,000年後までのCO₂飽和度および溶解CO₂量の垂直的な分布範囲は，第4.1-5図および第4.1-6図に示すとおり，圧入井の坑跡に沿った上下10m以内となる。

第4.1-2表に，CO₂の垂直的な分布範囲の座標を示す。

なお，安全側に立ち，圧入井の貯留層区間の下50mとし，上限は遮蔽層深度としている。

第 4.1-2 表 海底下廃棄した CO₂の垂直的な分布範囲（滝ノ上層 T1 部層）

GL = 9.1m	掘削深度 (mMD)	垂直深度 (mVD)	レベル (mbmsl)	備考
滝ノ上層上限	4,624	2,390	2,381	
圧入井坑底深度	5,800	2,753	2,794	
CO ₂ 上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
CO ₂ 下限分布深度	—	—	2,819	坑底+25m
CO ₂ 飽和度上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
CO ₂ 飽和度下限分布深度	—	—	2,814	坑底+20m
溶解 CO ₂ 量上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
溶解 CO ₂ 量下限分布深度	—	—	2,819	坑底+25m

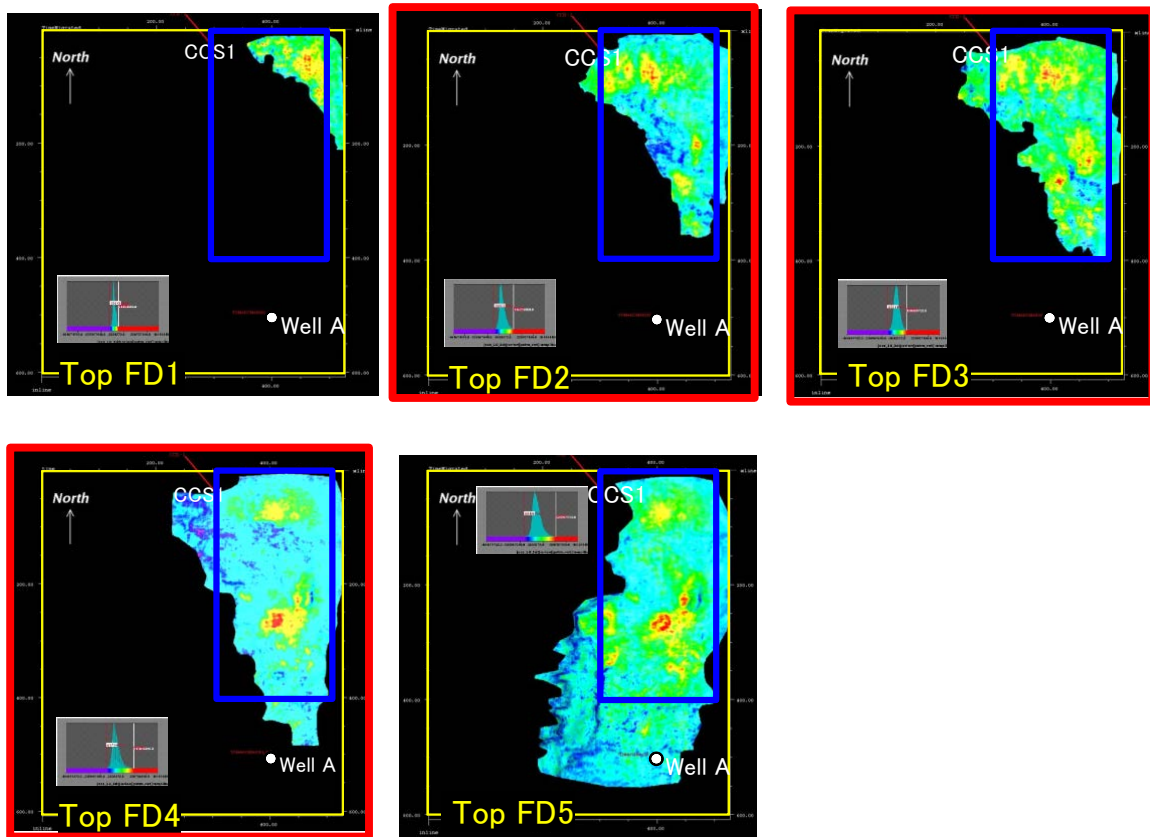
注：圧入した CO₂の分布範囲は限定的となるため、下限は圧入井の坑底（圧入区間の最深部）から、CO₂飽和度では 20m、溶解 CO₂量では 25m までの範囲とした。また、上限については、遮蔽層までとした。溶解 CO₂量の方がやや広範囲に分布するため、圧入した CO₂の分布範囲は、溶解 CO₂量の分布範囲とした。

(2) 萌別層砂岩層中での空間的広がり

① 地質モデル

萌別層砂岩層への萌別層圧入井の圧入（廃棄）位置を選定するあたり、三次元弾性波探査データおよび、苫小牧 CCS-1、苫小牧 CCS-2、坑井 A（民間井）のデータを解析した。その結果、当該海域の萌別層砂岩層には下位から FD1～FD5 の 5 枚のファンデルタの分布を認識した（第 4.1-7 図）。

また、弾性波探査データを解析した結果、FD2, FD3, FD4 には粗粒堆積物が埋積するチャネルの発達が認識され、その重複箇所をターゲットとして萌別層圧入井の掘削位置を選定した。

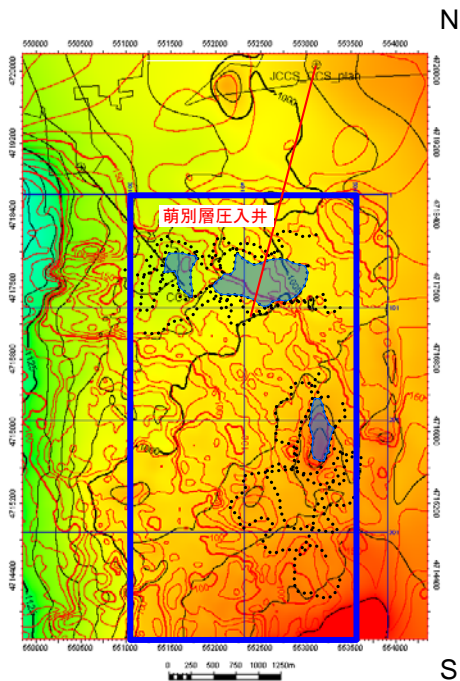


第 4.1-7 図 萌別層砂岩層に認識された 5 枚のファンデルタおよび貯留層ターゲット

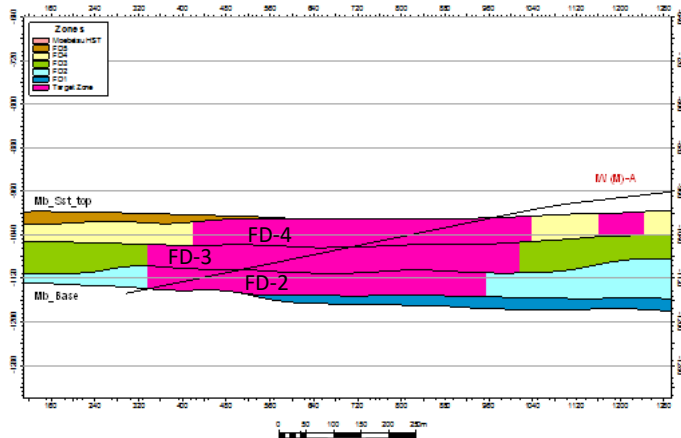
萌別層砂岩層での CO₂ 圧入長期挙動予測シミュレーションでは、FD2, FD3, FD4 に発達するチャンネル堆積物の物性値を基準に、ベースケース、高浸透率ケース、低浸透率ケースによるシミュレーションを実施した（第 4.1-3 表）。ケース区分の基準は、苫小牧 CCS-1（調査井）および苫小牧 CCS-2（調査井）の萌別層砂岩層の解析結果に基づいている（第 4.1-8 図）。

第 4.1-3 表 萌別層砂岩層で実施した CO₂ 圧入長期挙動予測シミュレーションのケース分け

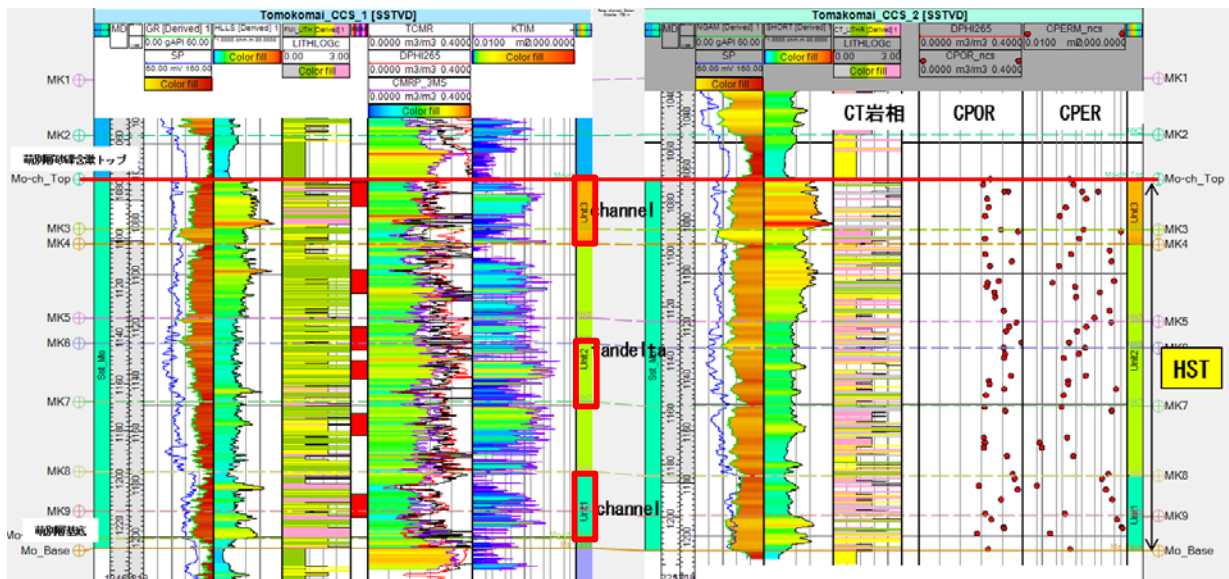
シミュレーション	孔隙率	浸透率：mD	根拠
ベースケース	0.281	17	CCS-1 および CCS-2 の Unit2 の平均値
高浸透率ケース	0.3	27.7	CCS-1 および CCS-2 の Unit1 の平均値
低浸透率ケース	0.3	10.2	CCS-1 および CCS-2 の Unit3 の平均値



注：FD2, FD3, FD4 のチャンネル堆積物の重複部が、ターゲット。



注：FD2, FD3, FD4 のチャンネル堆積物の物性値を変えてシミュレーション。

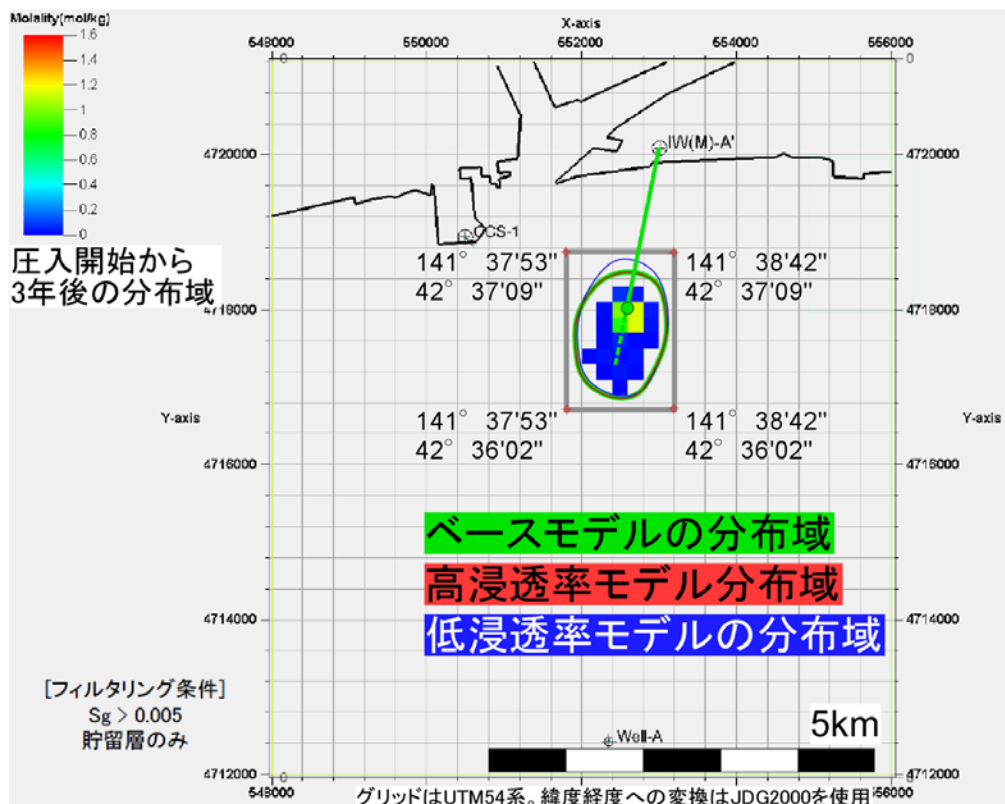
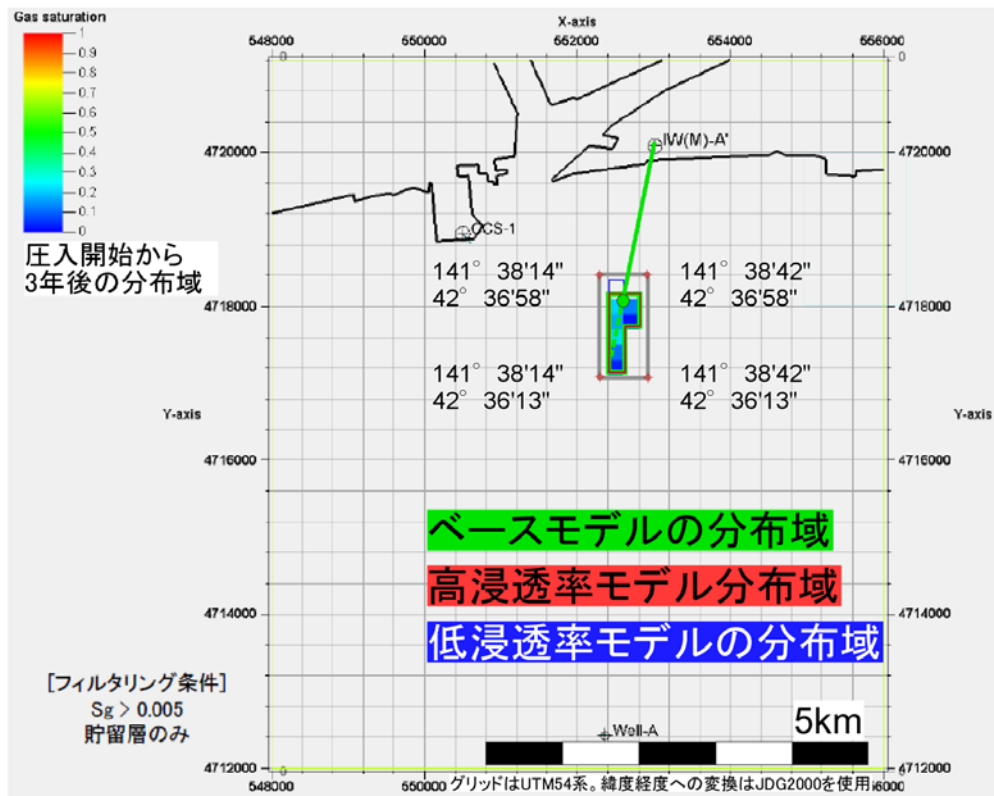


第 4.1-8 図 前別層砂岩層での CO₂ 圧入長期挙動シミュレーションのケース分け (平成 24 年度シミュレーション結果)

② CO₂の平面的な分布範囲

作成した3つのケースモデルについて、CO₂を20万トン/年のレートで3年間圧入するシミュレーションを実施し、圧入から3年後（圧入終了時）および圧入開始から1,000年後の貯留層中でのCO₂の分布状況を検討した。それぞれのケースごとに、圧入開始から1,000年後までのCO₂飽和度および溶解CO₂量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入したCO₂の平面的な分布範囲を推定した（第4.1-9図）。その推定結果を、第4.1-4表に示す。

なお、掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は、ブラインによる圧入試験後のフォーロフテストの解析から370mDと試算されており、平成24年度シミュレーションの予測より高くなっている（第2.2-5表）。しかしながら、本井のNMR検層から得られた貯留層の孔隙率（12～42%程度）は平成24年度シミュレーションの予測と同程度であることから、本計画を実施した場合のCO₂の平面的な分布範囲は、平成24年度シミュレーション結果と大きく変わることはないと予測される。



注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より 1,000 年後までのすべてのモデル（ベースケース、高浸透率ケース、低浸透率ケース）の CO₂飽和度および溶解 CO₂量の分布域を包括する範囲を示す。着色箇所は、ベースケースにおける圧入開始から 3 年後の分布を示す。

第 4.1-9 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲（上段：CO₂飽和度，下段：溶解 CO₂量）（平成 24 年度シミュレーション結果）

第 4.1-4 表 海底下廃棄した CO₂の平面的な分布範囲（萌別層砂岩層）

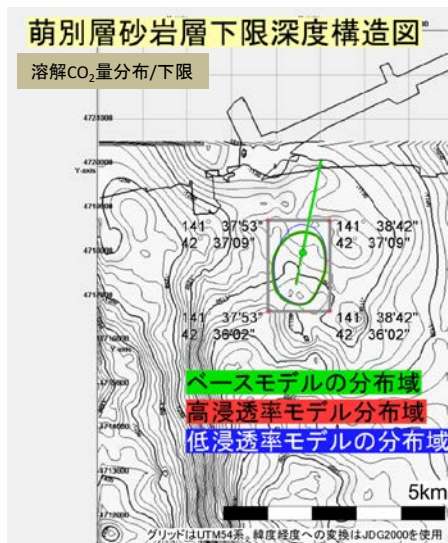
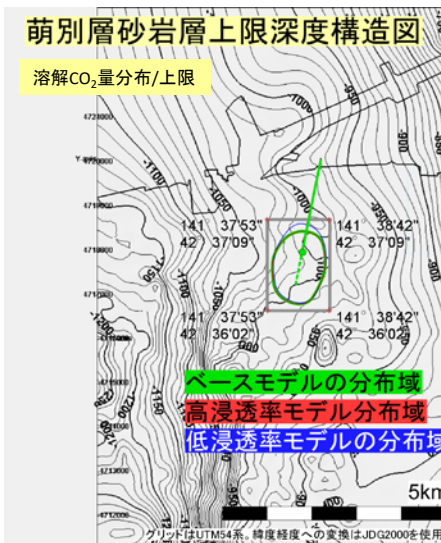
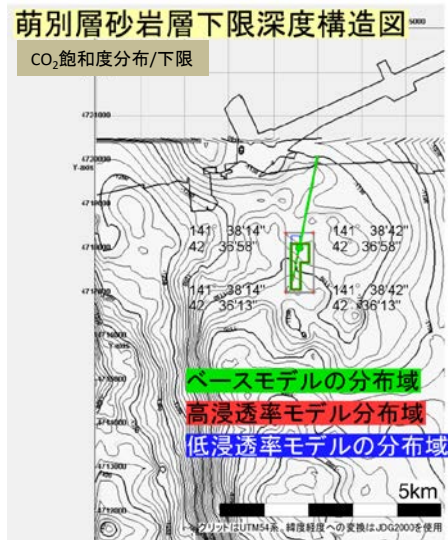
分布域	北限			南限			東限			西限		
	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
二酸化炭素	42	37	09	42	36	02	141	38	42	141	37	43
CO ₂ 飽和度	42	36	58	42	36	13	141	38	42	141	38	13
溶解 CO ₂ 量	42	37	09	42	36	02	141	38	42	141	37	43

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

③ CO₂の垂直的な分布範囲

上記で検討した平面的な CO₂の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影し、CO₂の垂直的な分布範囲を推定した（第 4.1-10 図）。その推定結果を、第 4.1-5 表に示す。

なお、掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は、平成 24 年度シミュレーションの予測より高くなっている（第 2.2-5 表）。平成 24 年度シミュレーションにおいては、基本的に浸透率の垂直方向/水平方向を 0.1 と仮定しているものの（第 2.2-15 表）、貯留層の上限には遮蔽層があるため、圧入した CO₂の上方への分布は浸透率の鉛直/水平比率の影響は受けにくいものと判断される。また、下方への移動の影響に関しては、鉛直方向に広がりやすくなるとは考えられないが、CO₂が貯留層下限まで移動した場合は、その下層の地層が遮蔽層として機能するため（第 2.2-2 表）、CO₂の下方への移動は制限される。よって、本計画を実施した場合の CO₂の垂直的な分布範囲は、平成 24 年度シミュレーション結果と大きく変わることはないと予測される。



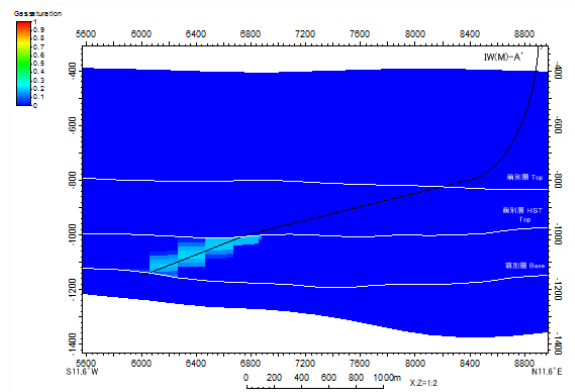
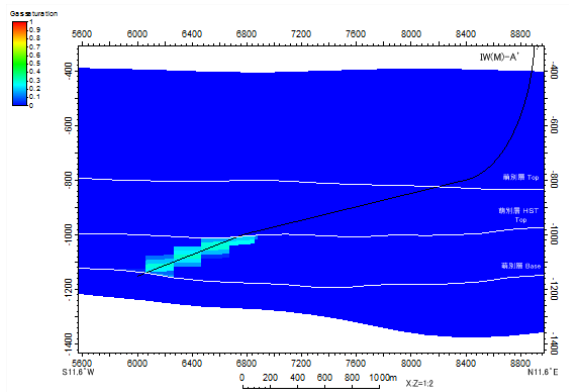
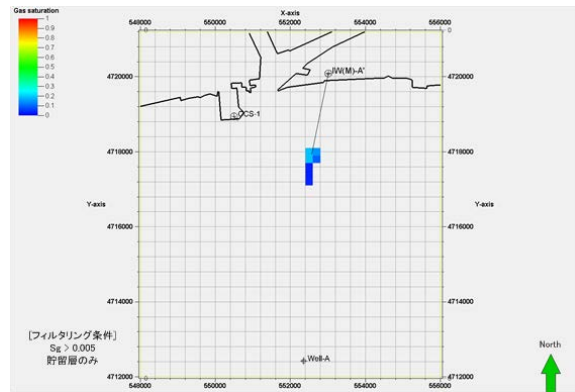
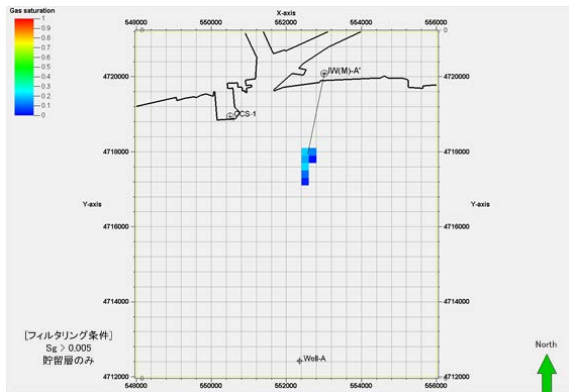
注：上段：CO₂飽和度，下段：溶解CO₂量。左側：分布上限，右側：分布下限。廃棄の対象層である萌別層砂岩層の上限および下限を示す地下構造図にCO₂の分布域を重ね、貯留層中でのCO₂の分布範囲を推定した。

第 4.1-10 図 萌別層砂岩層における CO₂の垂直的な分布範囲（平成 24 年度シミュレーション結果）

第 4.1-5 表 海底下廃棄した CO₂の垂直的分布範囲（萌別層砂岩層）

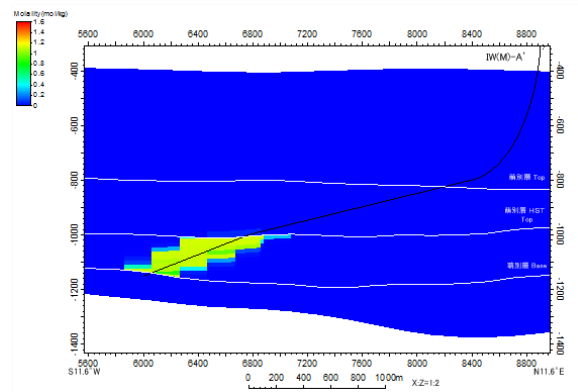
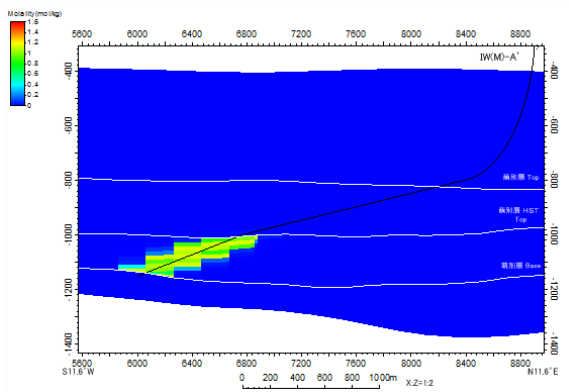
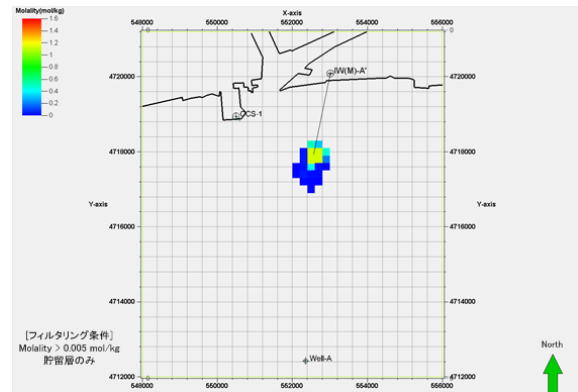
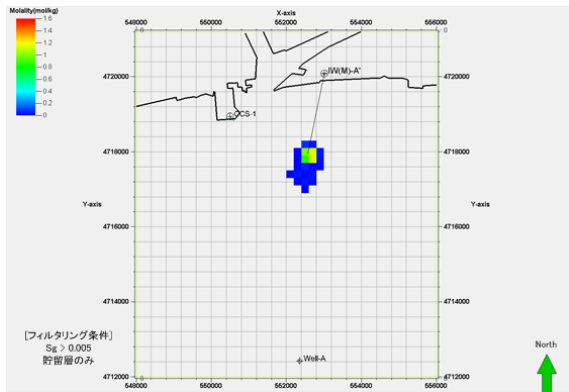
分布域	上限深度：m	下限深度：m
二酸化炭素	980	1,180
CO ₂ 飽和度	980	1,175
溶解CO ₂ 量	980	1,180

また、それぞれのケースにおけるCO₂飽和度および溶解CO₂量の分布を、第 4.1-11 図～第 4.1-16 図に示す。



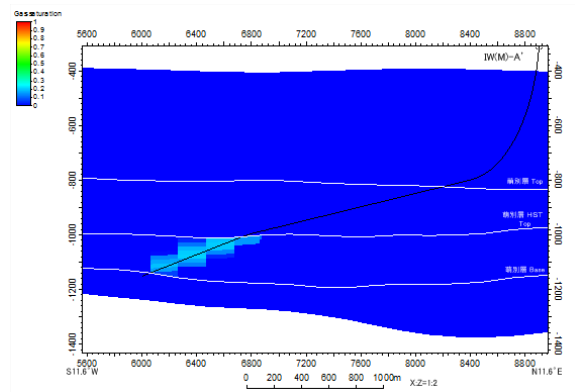
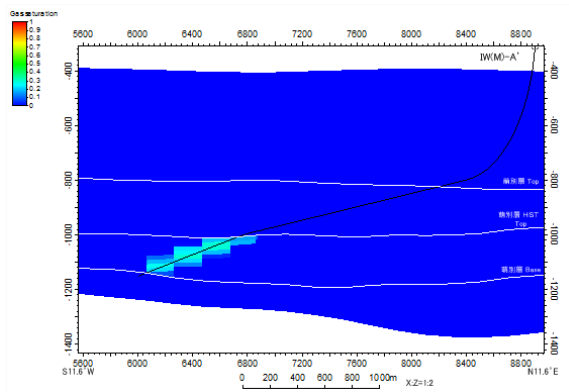
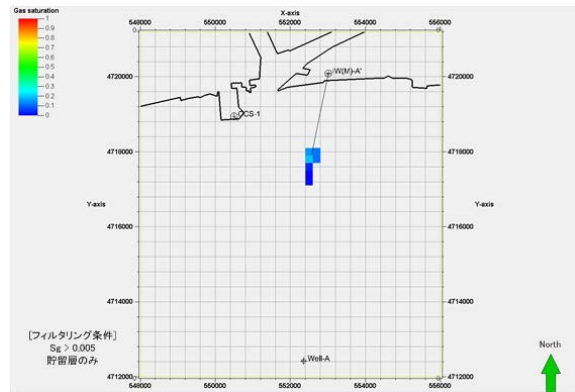
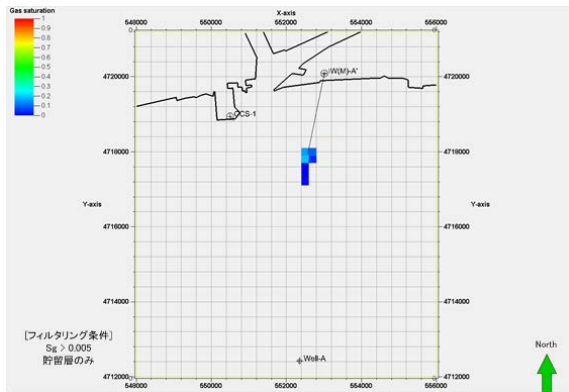
- 注：1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
 2. 上段：平面図（ $S_g > 0.005$ でフィルタリング），下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第 4.1-11 図 ベースケースにおける CO_2 飽和度の分布（平成 24 年度シミュレーション結果）



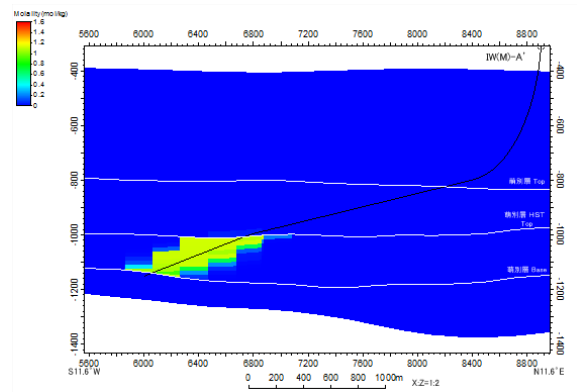
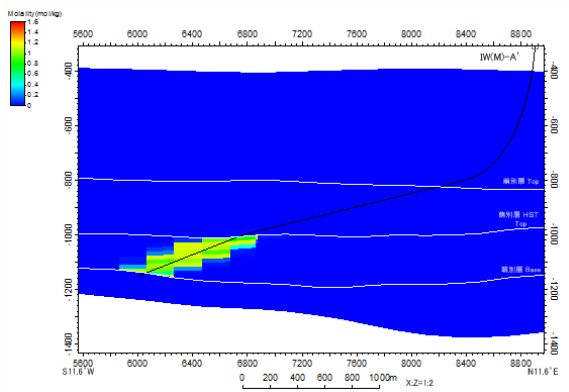
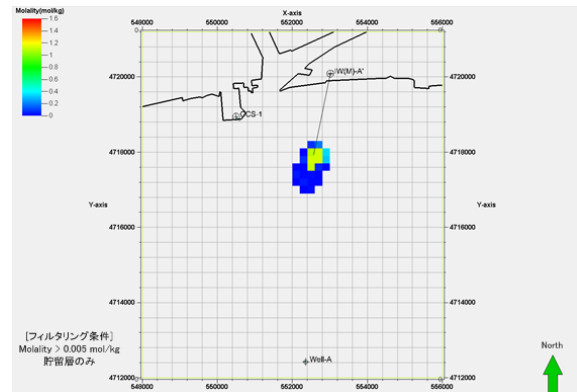
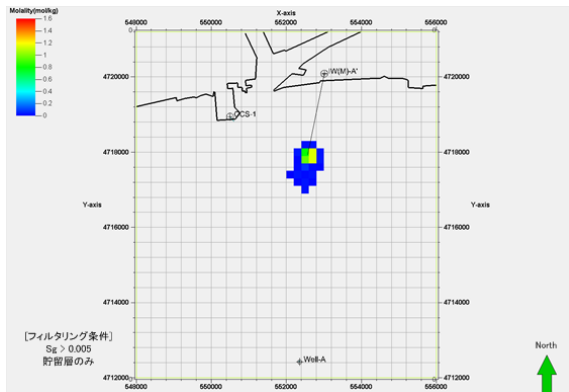
注：1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
 2. 上段：平面図 ($M_{CO_2} > 0.005$ でフィルタリング)，下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第4.1-12図 ベースケースにおける溶解CO₂量の分布（平成24年度シミュレーション結果）



- 注： 1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
 2. 上段：平面図（ $S_g > 0.005$ でフィルタリング），下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第 4.1-13 図 高浸透率ケースにおける CO_2 飽和度の分布（平成 24 年度シミュレーション結果）



- 注：1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
 2. 上段：平面図 ($M_{CO_2} > 0.005$ でフィルタリング)，下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第 4.1-14 図 高浸透率ケースにおける溶解 CO_2 量の分布 (平成 24 年度シミュレーション結果)