

目次

第5章 貯留層等総合評価	1
5.1 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較	1
5.1.1 貯留層モデルの概要	1
5.1.2 グリッドモデル	3
5.1.3 IW-2 坑底圧力の予実績比較	5
5.1.4 OB-2 坑底圧力上昇値の予実績比較	8
5.1.5 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較まとめ	10
5.2 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析 (FOA)	10
5.2.1 FOT 一覧	10
5.2.2 FOT 解析に用いた密閉坑底圧力データ	12
5.2.3 圧カデリバティブに関する考察	13
5.2.4 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析のまとめ	15
5.3 制約条件の違いによる圧入可能量の比較	15
5.3.1 圧入可能量の算定条件	15
5.3.2 圧入可能量評価結果	19
5.3.3 岩相分布の不均質性が圧入可能量に与える影響に関する考察	26
5.3.4 圧入井の仕上げ区間上端における圧力推移	34
5.3.5 圧力変化分布	36
5.3.6 CO ₂ 飽和率分布	46
5.3.7 溶存 CO ₂ 量分布	55
5.3.8 750 mTVDSS 境界の制約条件に関する考察	64
5.3.9 制約条件の違いによる圧入可能量の比較のまとめ	70
5.4 まとめ	71

第5章 貯留層等総合評価

苫小牧地点は、2012年2月にCCS大規模実証試験の対象地点として選定され、2016年度4月より萌別層に、2018年度2月より滝ノ上層へのCO₂の圧入を開始し、2019年11月までに累計で萌別層には約30万t、滝ノ上層へは約100tの圧入を達成している。その後、現在に至るまで圧入を停止しているが、萌別層圧入井IW-2（以下、「IW-2」と称する。）の最終的な圧入実績に加えCO₂停止中に取得した圧力データや3D弾性波探査データに基づいた地質解釈の更新を行い、ヒストリーマッチングおよび貯留層モデルの更新等を実施している。2022度は海洋汚染防止法に基づく監視計画に沿ってCO₂の圧力や広がりの変化が事前の予測・評価の範囲にあることを確認するため、圧力データの実績と予測の比較やCO₂圧入および圧入停止後の貯留層圧力推移についてのデータ解析の更新を行った。また、総合検討として2021年度に更新した貯留層モデルを用いて2019年度に実施したケーススタディで、潜在的なリスクを考慮して設定した貯留範囲を規定する制約条件を緩和した場合の圧入可能量の増大およびリスクについて評価および検討を行った。

5.1 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較

萌別層の圧入井であるIW-2と萌別層の観測井OB-2（以下、「OB-2」と称する。）について、現在までの圧力・温度監視により得られたデータ（実績）と、2021年度貯留層等総合評価で更新した貯留層モデルでのシミュレーション結果（予測）より、萌別層貯留層の坑底圧力の予実績比較を実施した。

5.1.1 貯留層モデルの概要

圧力を予測するために用いた貯留層モデルは2021年度から特に変更しておらず、設定および入力値は表5.1-1のとおりである。なお、貯留層モデルの構築方法や各パラメータの設定根拠については、2021年度成果報告書の第5章貯留層等総合評価（以下、「2021年度貯留層等総合評価」と称する。）を参照されたい。

表 5.1-1 貯留層モデルの設定および入力値

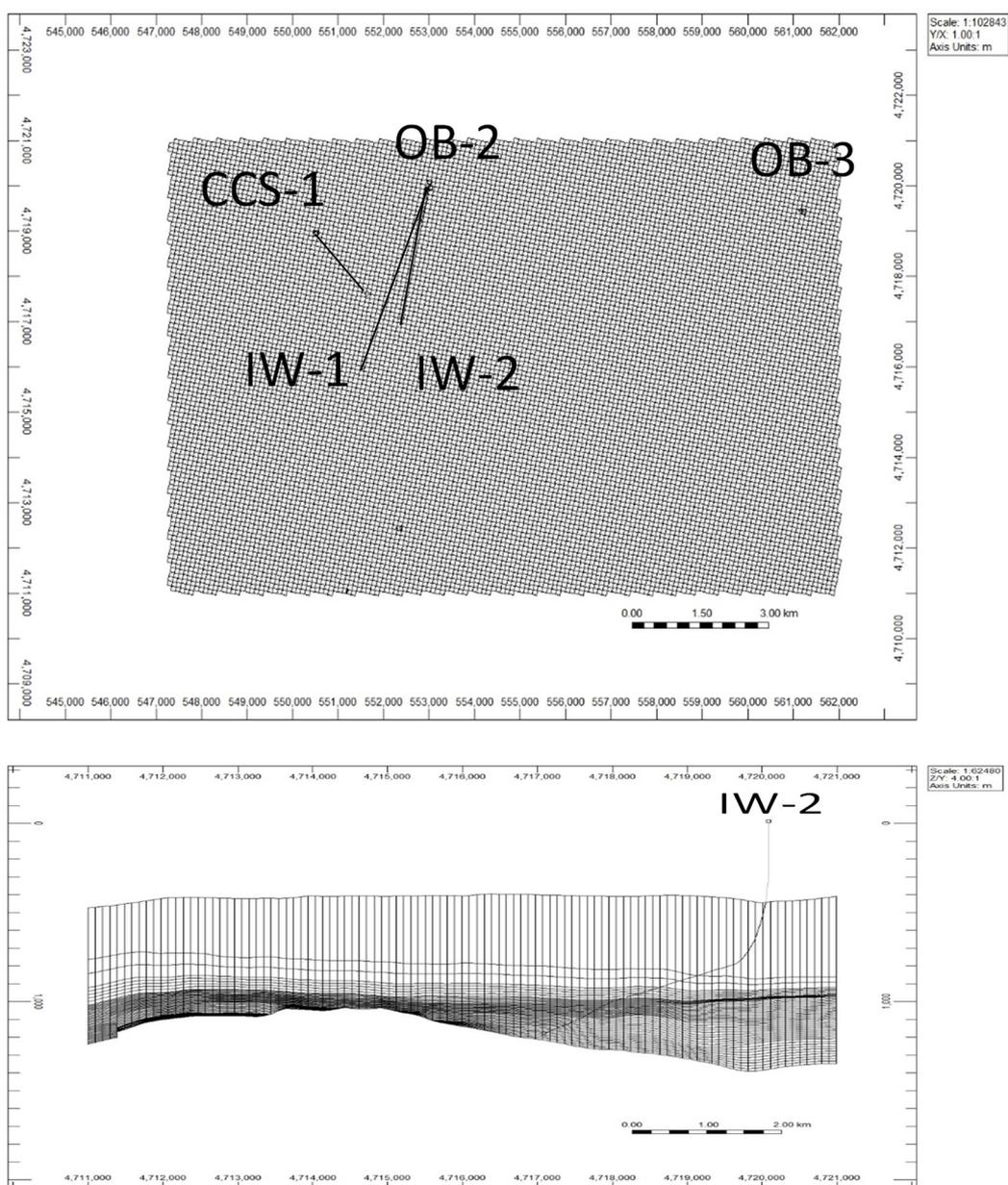
モデル	2021 年度モデル
サイズ	フィールドモデル : 15 km × 10 km × 1,700 m
	セクターモデル : 3 km × 3 km × 1,500 m
グリッド	フィールドモデル : 163 × 126 × 173
	セクターモデル : 31 × 31 × 48
アクティブ・グリッド数	フィールドモデル : 714,013
	セクターモデル : 861,753 (細分化後)
基準温度	36.2 °C@920.41 mTVDSS ¹⁾
基準圧力	9,290 kPa@920.41 mTVDSS
塩分濃度 (ppm NaCl)	3,150
境界条件	フィールドモデル : 開境界
	セクターモデル : 閉境界
貯留層	
孔隙率	岩相ごとに設定
浸透率 (mD)	岩相ごとに設定
ネットグロス比	岩相ごとに設定
岩石圧縮率 (1/kPa)	4.54×10^{-6}
相対浸透率曲線	岩相ごとに設定 岩相 10、11 : n=2.0 その他 : n=3.5
ガス相対浸透率 krg	岩相ごとに設定 岩相 10、11 : n =0.60 その他=0.143
水相対浸透率 krw	1.00
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05
不動水飽和率 Swir	浸透率と孔隙率より算出
ヒステリシス (Sgrmax)	Sgc+0.5 × (1-Swir-Sgc) GEM デフォルト式使用
毛細管圧力	CCS-2、OB-2、IW-2 コア試料より作成
孔隙容積 (m ³)	フィールドモデル : 2.4×10^{11}
	セクターモデル : 1.2×10^{10}
遮蔽層	
孔隙率	0.299
浸透率 (md)	0.0015
相対浸透率曲線	krg 曲線 : Corey ¹⁾ krw 曲線 : van Genuchten ²⁾
ガス相対浸透率 krg	1.00
水相対浸透率 krw	1.00
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05
不動水飽和率 Swir	0.638
ヒステリシス (Sgrmax)	なし

1) TVDSS : True Vertical Depth Subsea、海面下垂直深度

5.1.2 グリッドモデル

グリッドモデルは2021年度貯留層等総合評価を踏襲し、比較する項目によって2種類準備した。

一つ目のグリッドモデルは図5.1-1に示すフィールド用のグリッドモデル(以下、「フィールドモデル」と称する。)である。このモデルはOB-2を含んだ広域のモデルで、IW-2の坑底圧力およびOB-2の坑底圧力上昇値の予実績比較に使用した。なお、詳細については2021年度貯留層等総合評価を参照されたい。

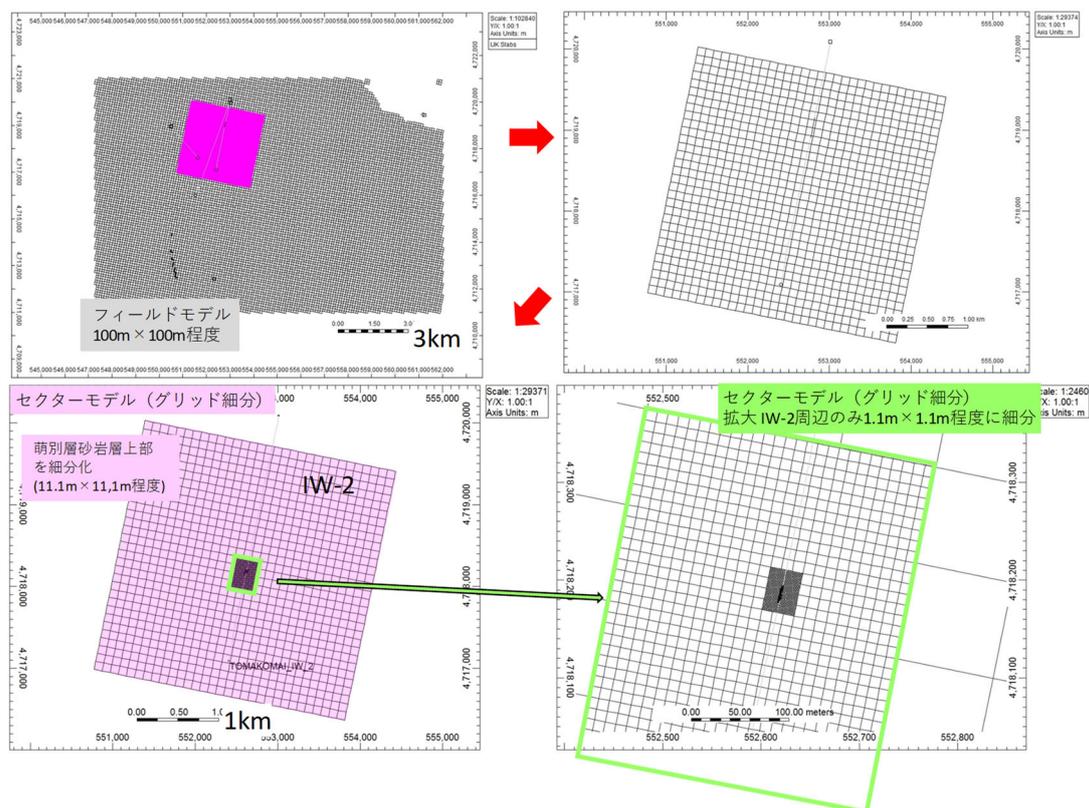


注) 上図：フィールドモデルの平面図 下図：フィールドモデルの坑井断面図

図 5.1-1 フィールドモデル

もう一つは IW-2 のフォールオフ解析の予実績比較で使用した坑井周辺を細分化した坑井近傍詳細モデル（以下、「セクターモデル」と称する。）である。このモデルはより正確な坑底圧力を計算するために Local Grid Refinement（以下、「LGR」と称する。）と呼ばれる該当するグリッドのみを細分化する手法を適用している。セクターモデルは図 5.1-2 のようにフィールドモデルから IW-2 の周辺部分を切り取っており、グリッドサイズは 2 回に分けて LGR を設定した。1 回目は坑井通過グリッド 100 m×100 m を 11.1 m×

11.1 m (水平方向に9等分ずつ)に細分化し、2回目は1回目に細分化したうち11.1 m×11.1 m×5 mの坑井通過グリッドにもLGRを適用し、最小グリッドサイズを1.23 m×1.23 m×1.25 m (水平方向に9等分ずつ、垂直方向に4等分)とした。なお、詳細については2021年度貯留層等総合評価を参照されたい。



注)ピンク色で示した部分がフィールドモデルから切り出した部分である。

図 5.1-2 フィールドモデルから切り出したセクターモデルの平面図

5.1.3 IW-2 坑底圧力の予実績比較

前述のフィールドモデルを用い、圧入開始の2016年4月6日から2022年11月30日までのCO₂圧入実績を入力し、IW-2の坑底圧力(仕上げ区間上端深度での圧力)を計算した。図5.1-3に坑底圧力の予実績比較を示す。なお、このグラフの予測値についても昨年より変えておらず、2021年度貯留層等総合評価にて実施した圧入可能量評価における圧入可能量のP90相当(具現像13)、P50相当(具現像3)、P10相当(具現像2)の3つを選択した。

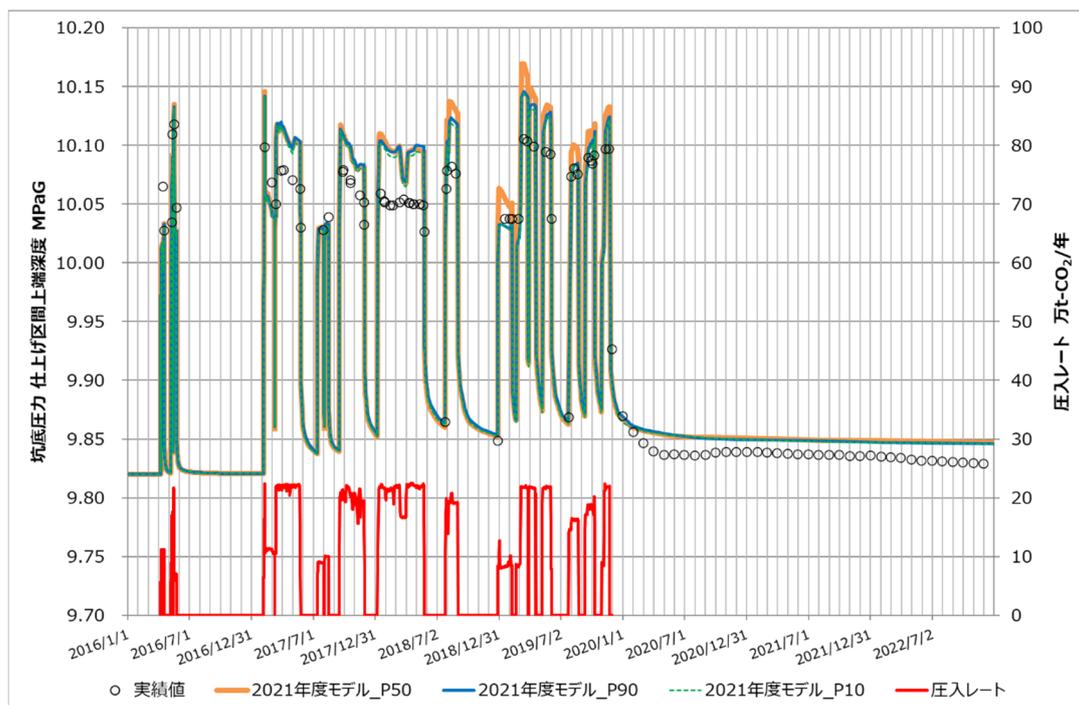


図 5.1-3(a) IW-2 坑底圧力（仕上げ区間上端深度での圧力）の予実績比較

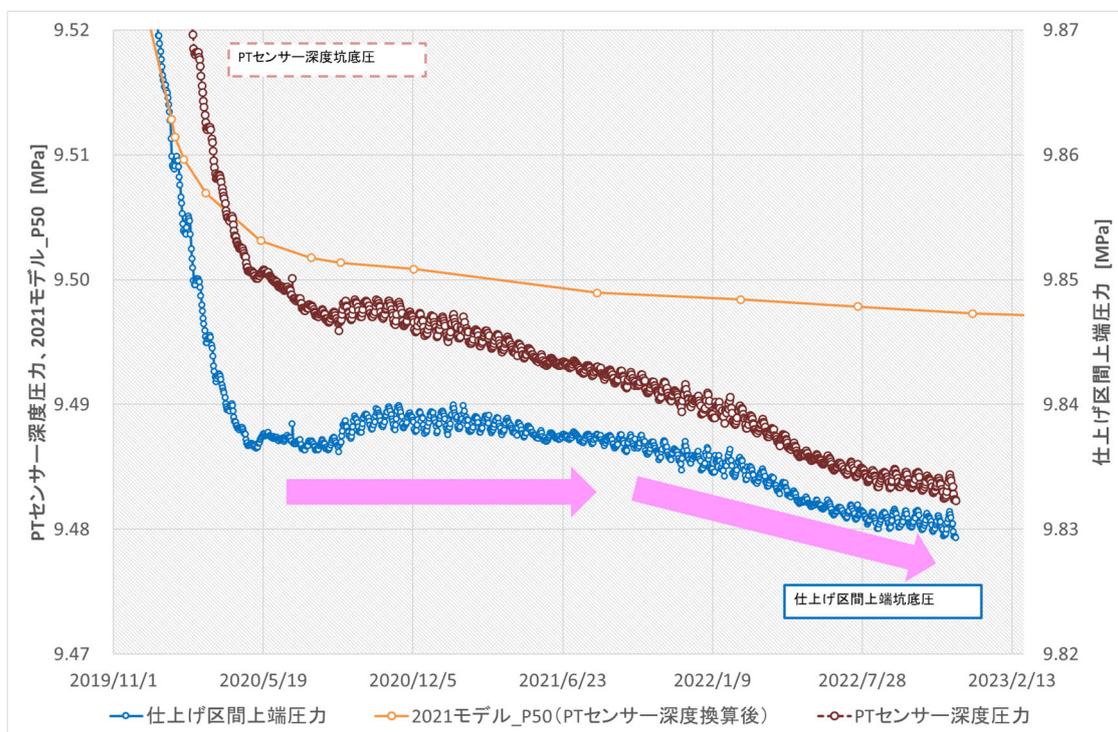


図 5.1-3(b) IW-2 坑底圧力の予実績比較（圧入を停止した 2019 年 11 月 22 日以降）

予実績比較にて使用した圧入中の坑底圧力実績値は、圧力・温度センサー（以下、「PTセンサー」と称する。）の深度での圧力値から仕上げ区間上端深度での圧力値に換算する際に管内流動のシミュレーションソフトウェアである「PIPESIM（Schlumberger社製）」を使用しており、PTセンサー深度の測定圧力および温度を基に、仕上げ区間上端深度での圧力を推定した値である。

また、圧入停止中の坑底圧力実績値は、2018年7月25日、2018年12月27日、2019年7月24日、および圧入終了後の2019年11月22日以降では、1か月おきに月末0時の密閉坑底圧力を使用した。なお、使用した密閉坑底圧力は、PTセンサー深度での測定圧力および温度におけるCO₂密度が、仕上げ区間上端まで続くと仮定した場合の外挿値である。CO₂密度の計算はフリーソフトウェアである「EOS-SCx Ver.0.2w」を使用しており、Span and Wagner³⁾によるCO₂の状態方程式に基づく値である。

図5.1-3(a)に示すとおりフィールドモデルによる予測値では、圧入停止した2019年11月22日以降、坑底圧力は低下し続けている。2022年11月30日時点では、坑底圧力が9.85 MPaGであった。

また、図5.1-3(b)は、圧入停止した2019年11月22日を始点として、PTセンサーの測定圧力およびPTセンサーでの測定圧力を仕上げ区間上端深度に深度換算した圧力値をそれぞれ示した。仕上げ区間上端深度に深度変換した圧力値は、2020年5月頃よりほぼ一定に転じたように見られたが、2021年10月頃より再び低下傾向を示し続けている。2022年11月30日時点では、坑底圧力が9.83 MPaGであった。

フィールドモデルによる予測値と仕上げ区間上端深度に深度換算した圧力値との差は、2020年11月30日から2022年11月30日まで20 kPa未満であり、2021年度貯留層等総合評価でのヒストリーマッチの基準である坑底圧力の目的関数が25 kPa以下を満たしている。したがって、モデル修正の必要はないと判断した。

この20 kPa程度の差について、まず現状のシミュレーションでは圧入井のクロスフローの計算ができず、仕上げ区間内の端液面を考慮した坑底圧力の計算までは実施していない。ただし、それらが考慮できたとしても長期的な圧入停止の場合における影響は軽微と考える。また、貯留層の毛細管圧力は、J-Functionを用いた浸透率と孔隙率による相関に基づき計算した値である。調査井CCS-2、OB-2、およびIW-2のコアデータにより取得された毛細管圧力データから得られるJ-Functionの値と振幅を図5.1-4に示す。この図に示すJ-Functionの振幅を毛細管圧力の振幅にすると-15 kPa～+5 kPa程度であり、近似による誤差を含む値である。

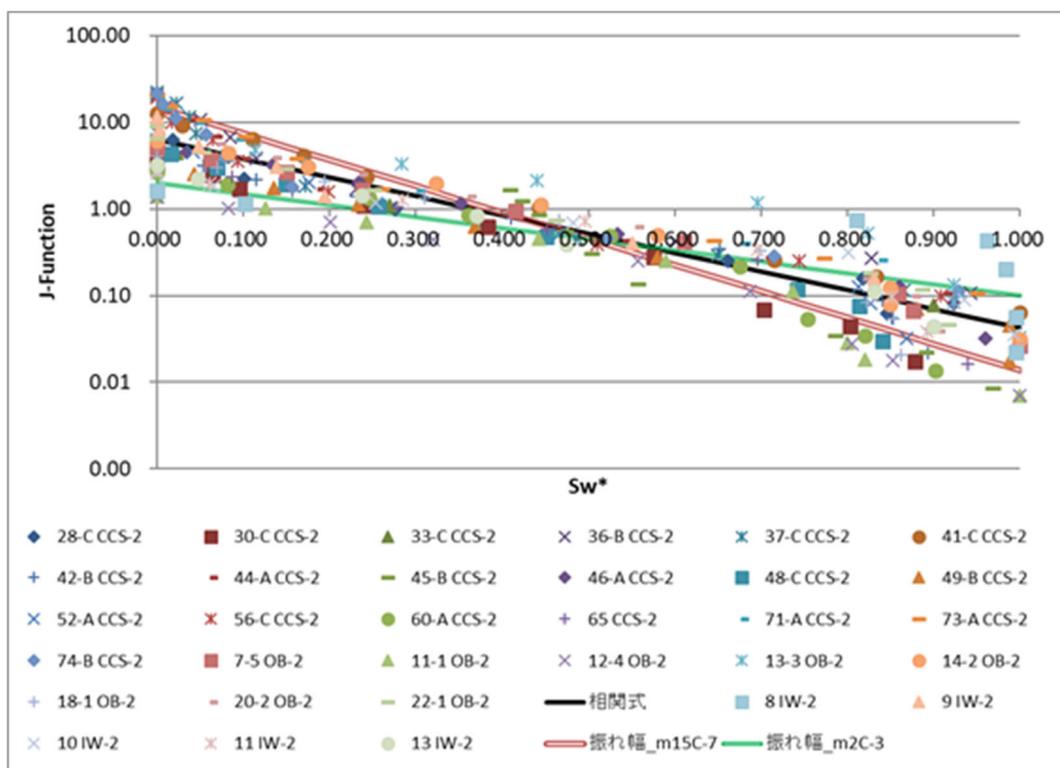


図 5.1-4 J-Function の相関

また、実測値は仕上げ区間上端深度の圧力値が PT センサー深度の圧力・温度条件から計算した密度から求めた外挿値であり、誤差を含む値である。PT センサー深度から仕上げ区間上端深度までの温度勾配が地温勾配で分布する場合や、初期の地温勾配に戻っている場合を想定して圧力換算すると、換算圧力の振れ幅は±3 kPa 程度である。さらに、実測値は、潮汐現象による圧力変動の影響を受けている。このように、予測値も実測値も誤差を含むため、現状のデータからの両者の差異の更なる検討はミスリードを引き起こす可能性がある。仕上げ区間上端深度の圧力推移をより精度良く把握するためには、PT センサーから仕上げ区間上端までの坑内圧力・温度を深度に対し連続測定する必要があると考える。

5.1.4 OB-2 坑底圧力上昇値の予実績比較

フィールドモデルを用い、圧入開始の 2016 年 4 月 6 日から圧入終了の 2019 年 11 月 22 日までの CO₂ 圧入実績を入力し、OB-2 の坑底圧力を計算した。2019 年 11 月 1 日以降における予実績比較は図 5.1-5 のとおりである。なお、モデル上での坑底圧力の上昇値は圧入開始時点、つまり初期圧力をゼロとしている。初期圧力の設定方法は 2021 年度貯留層

等総合評価のとおりで、キャリブレーション作業以降で圧入停止期間である2018年6月26日から7月25日までの1か月間の坑底圧力の平均値とし、実績値はそれ以降の測定結果を表示している。

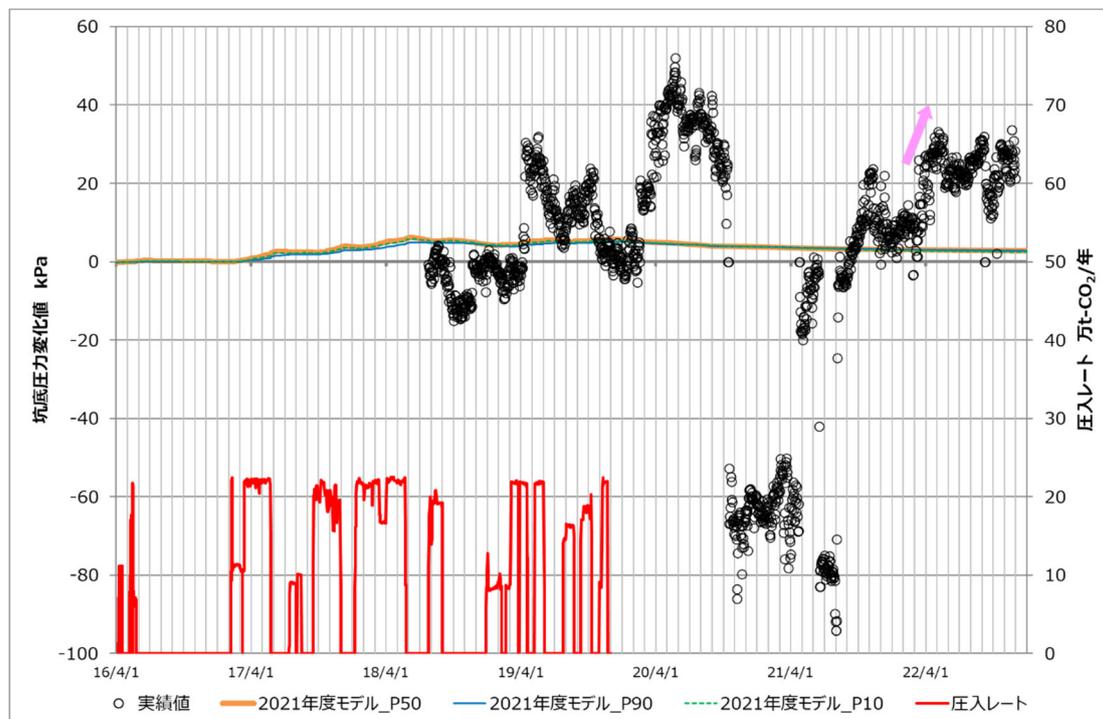


図 5.1-5 IW-2 の圧入レートと OB-2 の坑底圧力の予実績比較

図 5.1-5 に示すとおり、モデル上の坑底圧力は2019年12月頃に6 kPa程度から緩やかに低下を続け、2022年11月30日時点では3 kPa程度である。

一方、実測の坑底圧力は測定器の定期点検に伴う機器の回収・再設置や測定器の不具合等の影響により、2020年2月18日や2020年10月16日、2021年4月23日、2021年6月17日に圧力上昇値の急変が生じていると考えており、絶対値の傾向をシミュレーションと比較して考察することが難しい。また、圧入停止期間である2022年3月から4月にかけて、圧力上昇値が20 kPa程度増大しトレンドが変化しているが、明確な原因は分かっておらずこちらも測定器の不具合と推測している。なお、圧入停止以降のその他の時期においても測定器の回収・再設置や測定器の不具合による圧力上昇値の急変は生じているが、数日あたりの変動幅は大きくとも上下に20 kPa程度である。これらの圧力上昇値の急変は、貯留層の異常を示す事象とは考えていない。

5.1.5 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較まとめ

2021年度に構築した貯留層モデルを用いて、新たに取得されたデータを含むIW-2およびOB-2の坑底圧力データの実績値と比較した。長期密閉中のIW-2のPTセンサー深度における坑底圧力は、圧入停止後から現在まで継続して低下傾向を示している。PTセンサーで取得した圧力・温度データに基づくCO₂密度を用いて、PTセンサーで取得された圧力データを仕上げ区間上端深度に深度換算した圧力値は、2020年5月頃～2021年10月頃に一定となる期間を除き、低下傾向を示した。モデルによる予測値は、圧入停止以降、低下傾向が継続している。圧入停止後の予測値と実績値の差は20 kPa未満であり、ヒストリーマッチの基準を満たすことから、モデル修正の必要はないと判断する。

5.2 苫小牧IW-2 フォールオフ解析(FOA)

IW-2ではこれまでに合計17回のフォールオフテスト(以下、「FOT」と称する。)を実施しており、本節では圧入終了後のFOTについて実測値および流動シミュレーションに基づく予測値を基に圧力デリバティブ(圧力変化を微分し、時間変化を乗じたもの)を作成し、流動様式と貯留層性状を推定した。

5.2.1 FOT一覧

表5.2-1にFOTについての概要と解析の有無を示す。なお、圧入停止期間中のFOTにはFOT1、2・・・のように通し番号を付けた。また、2017年3月9日の圧入停止時については、坑口装置点検に伴う短期密閉であったことからFOTそのものから除外した。

FOT17は、2019年度に坑井密閉以降、データ取得を継続中である。

表 5.2-1 FOT 一覧 (概要)

FOT	開始時刻	終了時刻	停止要因	測定時間	密閉前平均圧入レート	累計圧入量
				時間	t-CO ₂ /年	t-CO ₂
FOT1	2016年 4月8日 6時14分	2016年 4月8日 17時1分	外圧上昇	11	58,800	81
FOT2	2016年 4月17日 22時16分	2016年 5月7日 15時15分	圧縮機停止	473	109,351	2,558
FOT3	2016年 5月13日 1時0分	2016年 5月14日 14時19分	安全弁不具合	37	139,056	4,330
FOT4	2016年 5月24日 9時0分	2017年 2月5日 17時35分	計画密閉	6,177	71,079	7,163
FOT5	2017年 5月25日 9時47分	2017年 7月13日 16時15分	計画密閉	1,183	64,861	61,239
FOT6	2017年 8月1日 10時0分	2017年 8月3日 9時57分	計画密閉	48	88,474	65,793
FOT7	2017年 8月15日 9時0分	2017年 9月16日 12時0分	点検・修理	771	100,124	69,070
FOT8	2017年 11月30日 9時27分	2018年 1月6日 11時50分	計画密閉	890	85,159	109,250
FOT9	2018年 5月25日 9時20分	2018年 7月25日 11時36分	計画密閉	1,466	87,709	188,136
FOT10	2018年 9月1日 2時25分	2018年 12月27日 13時28分	圧縮機停止	2,819	189,602	207,209
FOT11	2019年 2月8日 8時33分	2019年 2月19日 11時18分	点検・修理	267	83,620	217,425
FOT12	2019年 3月26日 10時37分	2019年 3月28日 11時3分	供給側トラブル	48	218,008	233,438
FOT13	2019年 4月19日 13時31分	2019年 5月8日 11時28分	供給側トラブル	454	108,463	246,354
FOT14	2019年 6月4日 8時49分	2019年 7月24日 17時10分	計画密閉	1,208	78,536	261,632

FOT	開始時刻	終了時刻	停止要因	測定時間	密閉前平均圧入レート	累計圧入量
				時間	t-CO ₂ /年	t-CO ₂
FOT15	2019年8月23日5時19分	2019年9月10日11時48分	供給側トラブル	438	137,885	274,342
FOT16	2019年10月9日18時20分	2019年10月30日11時8分	供給側トラブル	497	80,592	288,874
FOT17	2019年11月22日11時30分	測定中	計画密閉		216,498	300,012

注) FOT17の密閉時間は報告書作成段階でも測定中であるため、空白とした。また、密閉前平均圧入レートは、圧入レートの変更(オフガス供給量変更)時間を基準に算出した。

5.2.2 FOT解析に用いた密閉坑底圧力データ

図 5.2-1 は、PT センサー深度における坑底圧力と坑底温度、その値から求めた CO₂ 密度の推移である。

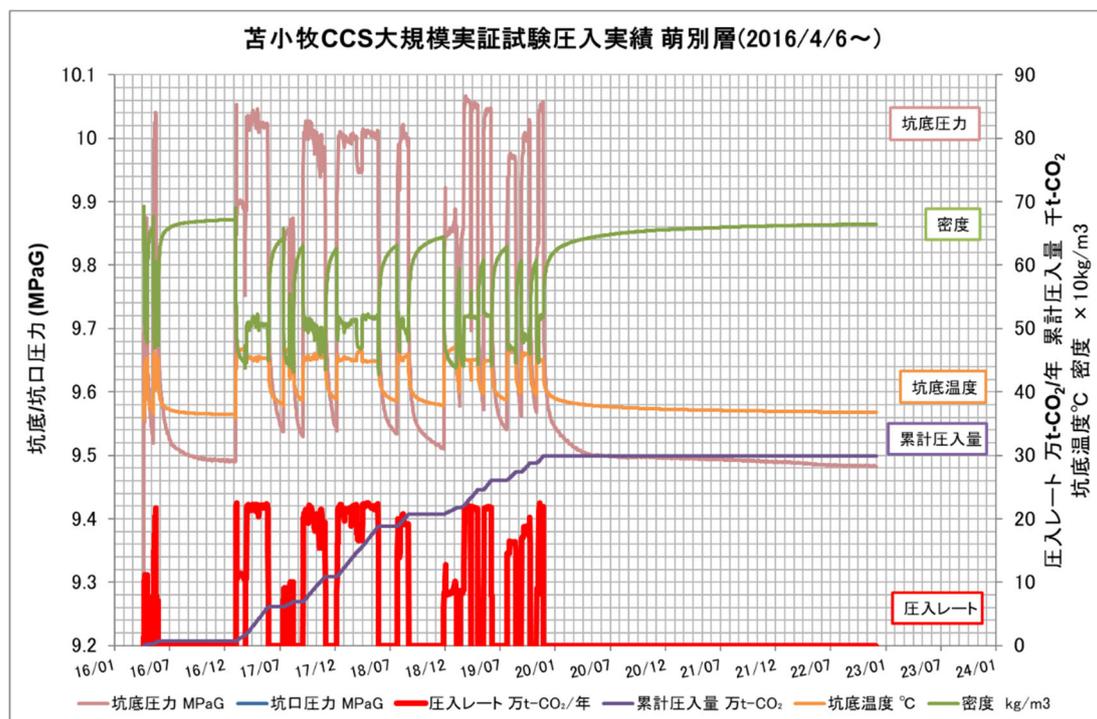


図 5.2-1 PT センサー深度における坑底圧力と坑底温度の推移

圧入中にはPTセンサー深度での坑底温度が上昇し、逆に密閉中には坑底温度が低下する事象が確認された。CO₂圧入時に坑底温度が上昇する現象は、地層との熱交換とCO₂の圧縮、CO₂の位置エネルギー低下によって発生することが知られており⁴⁾、貯留層深度(ここでは仕上げ区間上端深度)でも温度変化がある。

CO₂密度は、密閉中には圧力・温度変化に伴い、PTセンサー深度においては470 kg/m³から670 kg/m³と大きく変化する。PTセンサー深度は921 mTVDS、仕上げ区間上端深度は973 mTVDSであり、垂直深度で53 mの差がある。圧力・温度変化による密度変化を考慮しない場合、密度差が最大で200 kg/m³あるため、PTセンサー深度から推定する仕上げ区間上端の圧力には最大100 kPa程度の差が生じることとなる。

FOTでは、kPa単位の小さな圧力変化から流動様式や貯留層性状を推定するため、PTセンサー深度での坑底圧力で解析を実施すると上記の密度変化や垂直深度差の影響により大きな誤差を含んだ結果になるので、PTセンサー深度での坑底圧力を仕上げ区間上端深度での値に換算することとした。流動坑底圧力の換算には「PIPESIM」を使用しているが、同ソフトウェアは流動時の定常状態における圧力・温度プロファイルを計算する坑内流動シミュレーションソフトであるため、坑井密閉時の圧力遷移状態には適用できない。そこで、PTセンサー深度での坑底圧力・温度でのCO₂密度を用い水頭圧力を求め、仕上げ区間上端深度での坑底圧力に換算することとした。

この手法ではPTセンサー深度から仕上げ区間上端深度までの区間をPTセンサーの圧力・温度と同じと仮定しており、圧力勾配の計算ためのCO₂密度に誤差が生じ、時間が経過するにつれて精度が低下する。この課題解決においても仕上げ区間での深度に対する坑底圧力・温度の連続測定が最も有効であると考えられる。

5.2.3 圧力デリバティブに関する考察

FOTの解析では両対数グラフの横軸に密閉時間、縦軸に圧力変化と圧力デリバティブをプロットし利用する(以下、「ロガーログプロット」と称する。)。同プロットを利用することで流動形態(線形流・放射状流・球状流など)およびその領域を識別することが容易となる。また、タイプカーブ(解析解)と観測データを照合することで貯留層性状を推定することができる。

図5.2-2は、FOT17について坑底圧力データをParadigm社製の圧力解析ソフトである「Interpret」に入力して作成したロガーログプロットである。使用した坑底圧力は、実績値に加え、仕上げ区間上端深度に換算した坑底圧力データ、前述のセクターモデルを用いて圧入開始の2016年4月6日から2019年11月30日までのCO₂圧入実績を入力し、シ

シミュレーションによりフォールオフ測定を再現し得られた坑底圧力データである。このシミュレーション結果は、密閉後 124,872 時間 (2030 年 3 月 31 日時点) までを表示している。

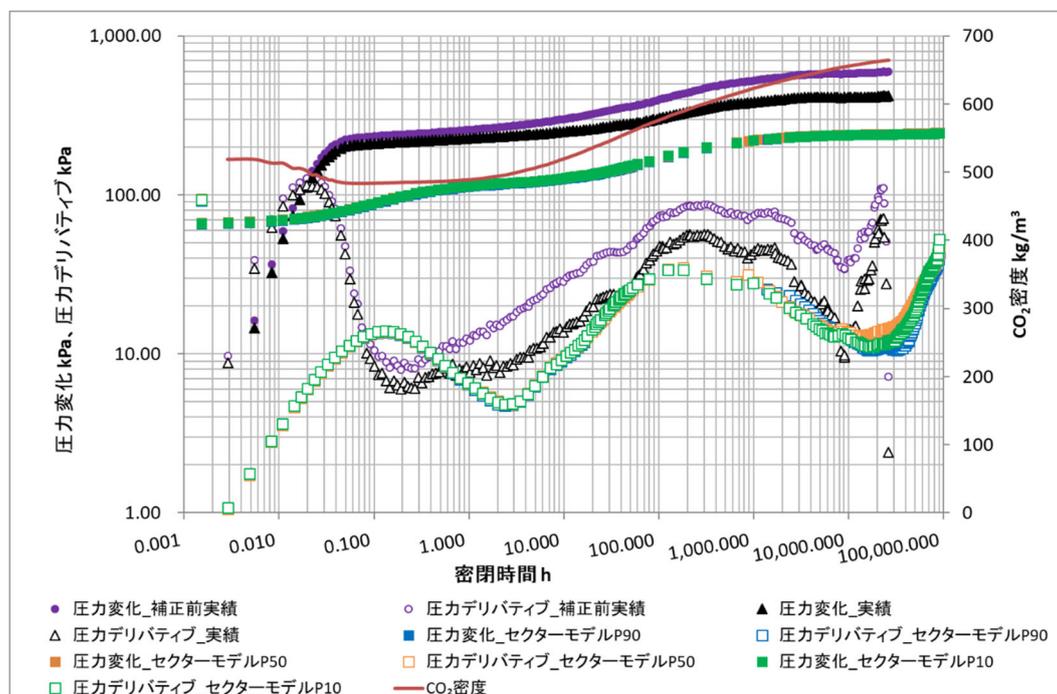


図 5.2-2 FOT17 におけるローグログプロット

実測値および仕上げ区間上端深度に換算した坑底圧力値に基づく圧力デリバティブは、密閉後 2,000 時間あたりで値が下がり、密閉後 8,000 時間あたりで傾き 1 よりも大きく上昇に転じており、圧力変化が小さくなった後、圧力低下がより大きくなったことを示す。

まず、圧力デリバティブが低下したことについては、実測値がいったんは一定になり、あたかも定圧力境界のような挙動を示したものと考えられる。次に圧力デリバティブが上昇した点については、レイトタイムにおける挙動の一例として No flow boundary を示す Slope=1 の挙動が見られる場合はあるが、圧入停止後の圧力がほぼ初期圧に戻っているため閉境界とは判断できないことや周辺に境界となるような地質条件がないこと、圧力デリバティブの傾きが 1 よりも大きいことから、そのような境界を示す挙動ではないと考えられた。この貯留層挙動以外での坑底圧力が低下していく原因としては以下のような要因が考えられる。

1) 坑内圧力勾配の変化

2) CO₂の溶解が進むことによる圧力低下

3) 超臨界CO₂飽和率の減少による毛細管圧力の低下による影響

以上のように、2022年度取得したデータを追加したものの、貯留層性状が推定できるSlope=0のような挙動や境界を示す挙動は確認できず、貯留層モデルの修正に資するような知見は得られなかったと判断した。

一方、数値解により作成した圧力デリバティブは、密閉後1,000時間あたりから値が低下し、P90相当具現像で密閉後30,000時間、P50相当具現像で密閉後10,000時間、P10相当具現像で密閉後20,000時間に上昇に転じている。これは数値モデルにおける管内圧力勾配は密閉300時間以降上昇し、一方でPTセンサーでの圧力の低下は継続しているものの緩やかになるため、この度合いの変化が反映している影響だと考える。しかし、このような挙動が実際に起こるかどうかについては、PTセンサー以深から仕上げ区間上端深度までの圧力勾配測定を実施するといったことで検証は可能であるが、IW-2のような高傾斜井での圧力勾配測定は測定器の抑留等のリスクが非常に高く、現在のところ実施が困難である。

5.2.4 苫小牧IW-2 フォールオフ解析のまとめ

FOT17についてログ-ログプロットを作成したところ、実測値および数値解の両方において、レイトタイムにおける圧力デリバティブの降下と上昇を確認した。圧力デリバティブの上昇の傾きが1よりも大きいことや閉境界と判断できる要素がないことから、境界条件を示唆するものではなく、坑内の圧力勾配の変化などによるものと考えられる。貯留層挙動を示唆するデータとしては、密閉後8,000時間程度までを解析対象とするのが適当であり、2022年度新たに取得したデータからは、モデル更新に資するような新たな知見は得られなかった。また、数値解で見られる圧力デリバティブの上昇は、管内の圧力勾配変化を反映していると考えられるが、このような挙動が実際に発生しているかについては、PTセンサー以深の圧力勾配を測定する必要があるが、IW-2のような高傾斜井での圧力勾配測定は測定器の抑留等のリスクが非常に高く、現在のところ実施が困難である。

5.3 制約条件の違いによる圧入可能量の比較

5.3.1 圧入可能量の算定条件

既存のIW-2を使って、圧入レート20万t/年での圧入再開を仮定し、さらに萌別層貯留層にどの程度CO₂を圧入できるか、圧入可能量の検討を行った。2021年度貯留層等総合

評価では、構築した30個の具現像を用いて、表5.3-1の条件1、2、3、4、5を制約条件として圧入可能量評価を実施している。

この制約条件では、北側の海岸線に溶存CO₂が到達すること(条件2)で圧入可能量が制限される具現像が最も多く、かつそれらの圧入可能量が小さいため、30個の具現像の圧入可能量の平均値は417万t-CO₂であった。そこで、北部海岸線の境界条件(条件2)を撤廃し、さらに北側にあるモデル境界へと制約条件を緩和し(表5.3-1の条件2′)、P90相当、P50相当、P10相当具現像の圧入可能量評価を実施したところ、3つの具現像とも約500万t-CO₂の圧入可能量の増大が見込まれた。ここで圧入可能量を制限したのは、溶存CO₂が750mTVDSS境界または断層周辺境界に到達することであったが、これらの制約条件は潜在的なリスクを考慮して設定した条件であり、緩和に向けた再検討の余地があると考える。2022年度は、各制約条件を撤廃した場合、期待される圧入可能量の増大および想定される懸念事項等を整理した。

本章では、2021年度貯留層等総合評価にて実施した圧入可能量評価をフェーズ1と呼び、フェーズ1で圧入可能量を制限した制約条件一つを撤廃し、新たな制約条件を設定して貯留可能領域を拡張し、これをフェーズ2とした。またフェーズ2において圧入可能量を制限した制約条件一つを撤廃し、新たな制約条件を設定して貯留可能領域を拡張し、これをフェーズ3とした。このまとめを表5.3-2に示す。なお、フェーズごとに緩和する条件は1つとし、例えばフェーズ1の圧入可能量を制限する条件が2つある場合、フェーズ1とフェーズ2の圧入可能量は等しく、フェーズ3にて条件2つを緩和した場合の圧入可能量の増大を評価した。条件2、4、5を撤廃する場合、新たに設定する制約条件はそれぞれ、シミュレーションの北側境界(表5.3-1の条件2′)、シミュレーションの西側境界(表5.3-1の条件4′)、遮蔽層の層厚が20m以下となる境界(条件3)とした。

表 5.3-1 制約条件

条 件	内 容
条件1	萌別層圧入井における仕上げ区間上端の圧力が12.93 MPaGに達する
条件2	溶存CO ₂ 量の分布が海岸線に到達する
条件2 [~]	溶存CO ₂ 量の分布がシミュレーションの北側境界に到達する
条件3	溶存CO ₂ 量の分布が遮蔽層層準の層厚が20 m以下となるエリアに到達する
条件4	溶存CO ₂ 量の分布がモデルエリア西側の断層周辺に到達する
条件4 [~]	溶存CO ₂ 量の分布がシミュレーションの西側境界に到達する
条件5	溶存CO ₂ 量の分布が深度750 mTVDSSに到達する

表 5.3-2 フェーズの設定

フェーズ	内 容
フェーズ1	全ての制約条件を適用する評価段階
フェーズ2	最初に制限を受けた制約条件のみを撤廃する評価段階
フェーズ3	圧入量を増やし、最初および2番目に制限を受けた制約条件を撤廃する評価段階

(1) フェーズ1の算定条件

条件1は貯留層の圧入性が十分良好で、かつ開境界のモデル設定のため、圧入レート20万t/年では上限圧力に到達することはなく、溶存CO₂量の分布が条件2~5が示す境界に到達しないことを確認すればよいことになる。

条件2、3、4、5については、図5.3-1に示すとおりである。表5.3-1の条件2は黒線(海岸線)で示している。表5.3-1の条件3は緑線で示しており、緑線境界内における遮蔽層層準の層厚が20m以下となるエリアである。表5.3-1の条件4は、西側の断層に関するもので、断層をオレンジ線、条件4を青線で示した。本断層は主要圧入領域と推定される萌別層砂岩層上部には到達していないが、南北方向の断層の西側と断層によって構造が変位した断層周辺を圧入可能量評価の対象から外した。表5.3-1の条件5は、主要圧入領域である萌別層砂岩層上部の深度が750mTVDSSに到達する境界として紫線で示した。これは、超臨界CO₂を維持するための条件として設定されており、条件3よりもさらに沖合になる。よって、図5.3-2に示す条件2、4、5に囲まれた範囲が圧入可能量評価のための範囲となり、溶存CO₂量がこの範囲を超えないことがフェーズ1の条件となる。

なお、条件のラインとグリッドラインは完全に合っているわけではないことやグリッド

の数値はそのグリッド1個分の中での平均値を示しているため、明らかに溶存CO₂が条件を超えた場合や超える可能性があるとは判断した場合には累計圧入量を100万t-CO₂ずつ減らして圧入可能量の評価を行うこととした。

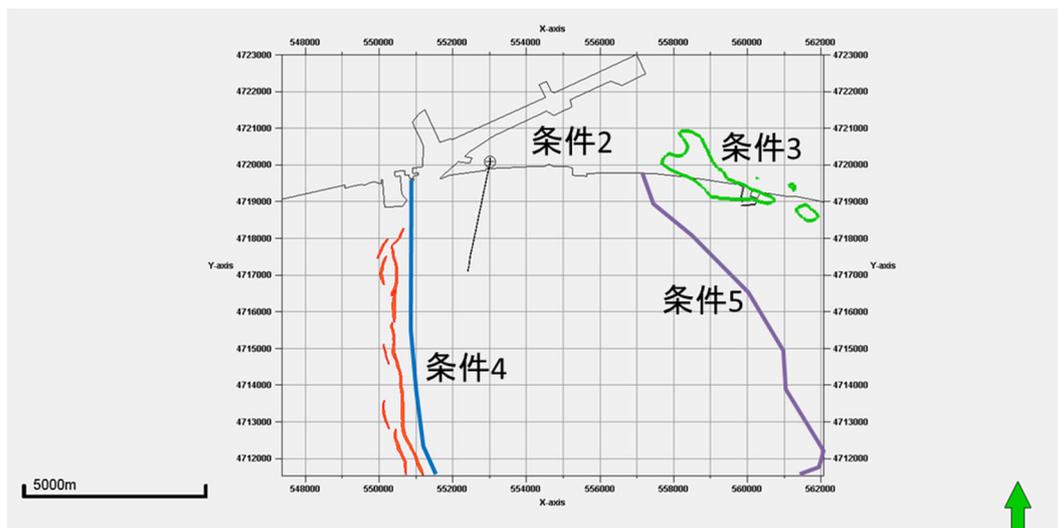


図 5.3-1 圧入可能量評価における条件 2、3、4、5 の範囲

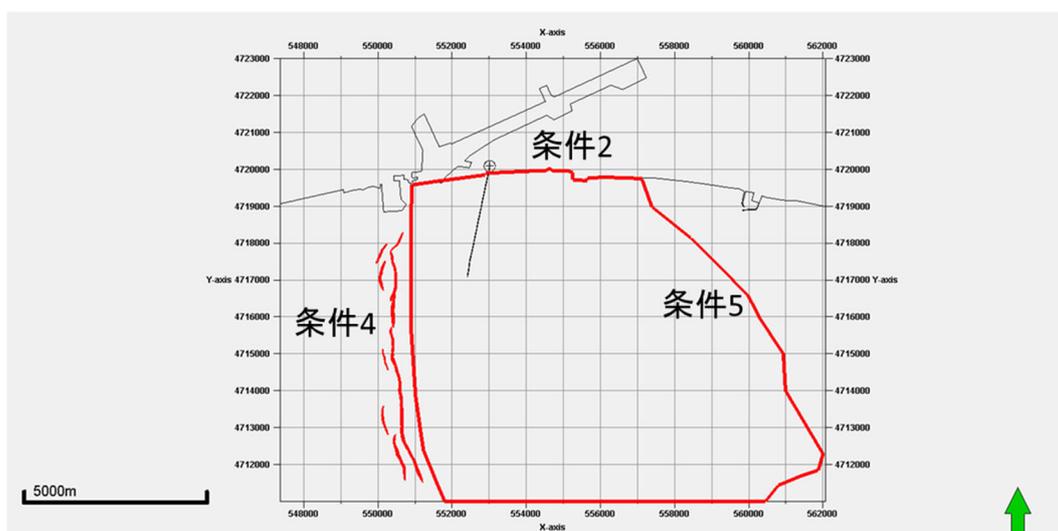


図 5.3-2 フェーズ 1 圧入可能量評価に使用する条件の範囲

(2) フェーズ 2 の算定条件

フェーズ 1 において圧入可能量を制限した制約条件一つを緩和し、拡張した領域において圧入可能量評価を実施した。具体的には、フェーズ 1 において圧入可能量を制限した制約条件が、海岸線(条件 2) だった場合、シミュレーションの北側境界(条件 2') へ拡

張した。また、フェーズ1において圧入可能量を制限した制約条件が、西側の断層周辺(条件4)だった場合、シミュレーションの西側境界(条件4')へ拡張した。

(3) フェーズ3の算定条件

フェーズ2において圧入可能量を制限した制約条件一つを緩和し、拡張した領域において圧入可能量評価を実施した。具体的には、フェーズ2において圧入可能量を制限した制約条件が、海岸線(条件2)だった場合、シミュレーションの北側境界(条件2')へ拡張した。また、フェーズ2において圧入可能量を制限した制約条件が、西側の断層周辺(条件4)だった場合、シミュレーションの西側境界(条件4')へ拡張した。また、フェーズ2において圧入可能量を制限した制約条件が、750 mTVDS境界(条件5)だった場合、遮蔽層厚が20 m以下の境界(条件3)へ拡張した。

5.3.2 圧入可能量評価結果

前項で説明した方法を30の具現像に適用し、フェーズ1、2、3における各具現像の圧入可能量を算定した。

各フェーズにおける具現像の数を徐々に増やしたときの累積分布関数の推移と各具現像数でのP90、P50、P10(それぞれ累積分布関数の値が0.1、0.5、0.9)の圧入可能量の推移を図5.3-3と図5.3-4にそれぞれ示す。フェーズ1、2、3全てにおいて、具現像数が15個以上のとき、累積分布関数の形状やP90、P50、P10の数値は収束することから、具現像数が30個あれば十分と判断している。

また、表5.3-3には評価結果および制限を受けた制約条件の一覧を示す。具現像10、18、23は、フェーズ1で適用される制約条件が2つあり、フェーズ1からの圧入可能量の増大が見込めないため、フェーズ2の圧入可能量評価は実施しなかった。具現像20は、フェーズ2で適用される制約条件が北側のシミュレーションモデル境界であり、さらに圧入量を増やしシミュレーションすることはできないため、フェーズ3の圧入可能量は実施しなかった。

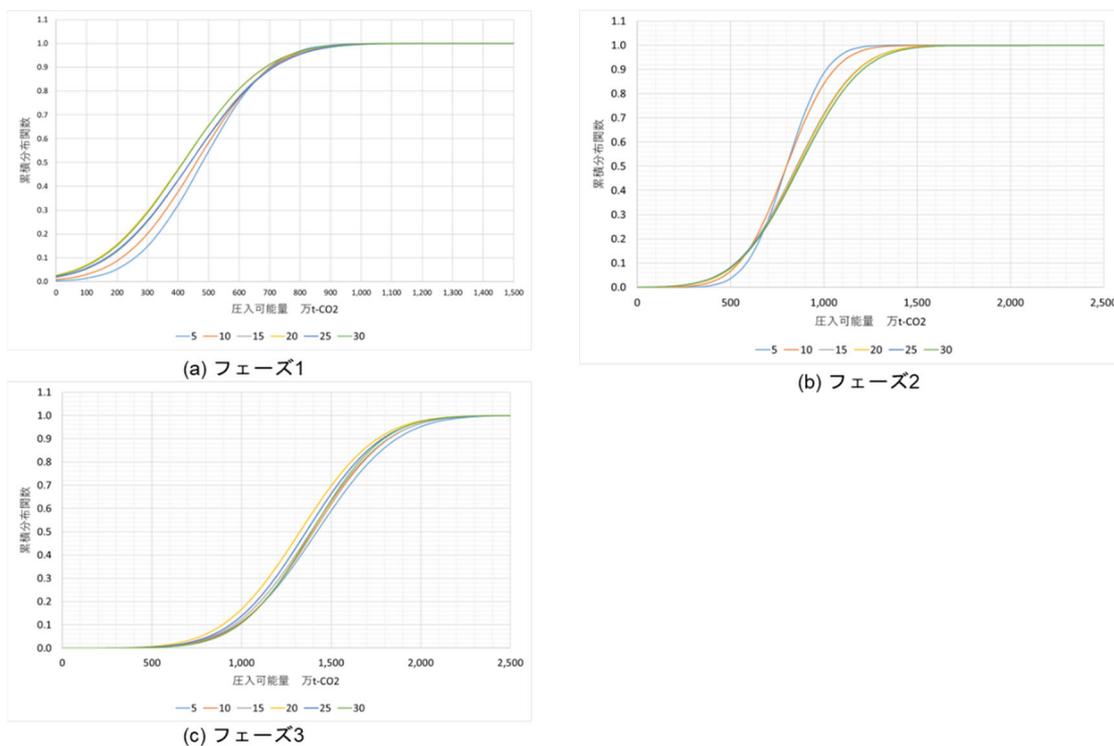


図 5.3-3 各フェーズにおける具現像数ごとの圧入可能量の累積分布関数

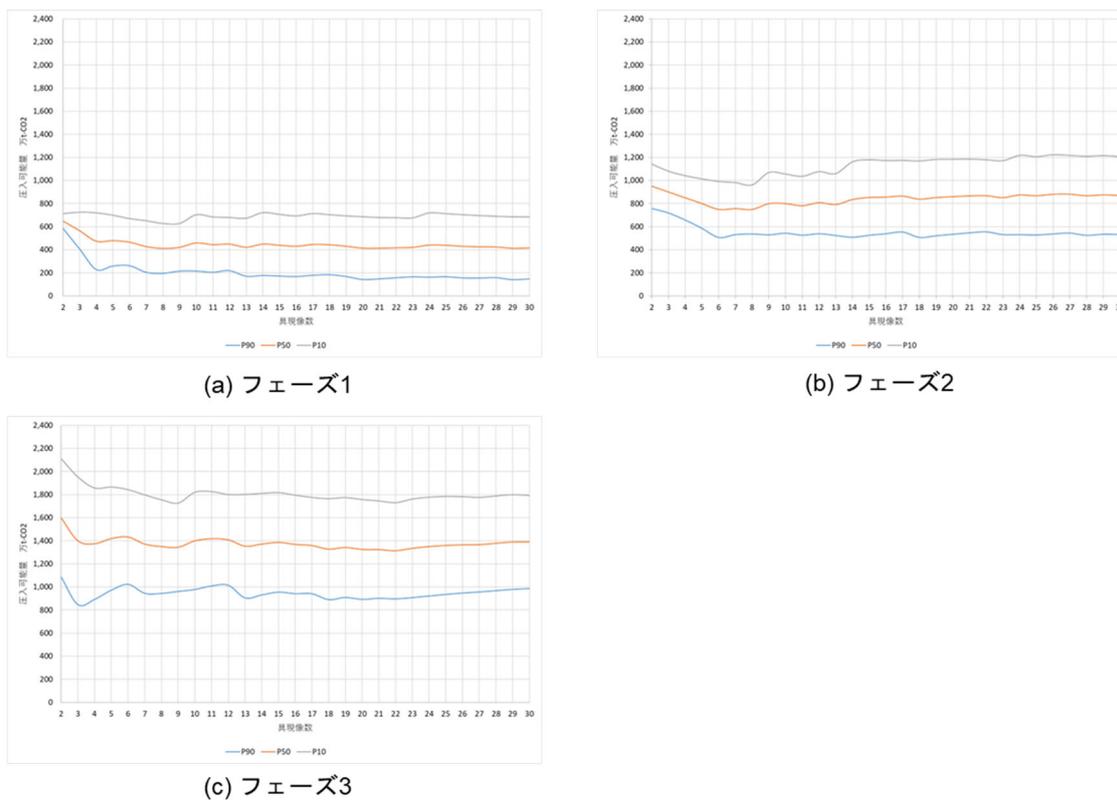


図 5.3-4 各フェーズにおける具現像数ごとのP90、P50、P10の圧入可能量評価値

表 5.3-3 圧入可能量と制約条件評価結果一覧

具現像 ナンバー	フェーズ1 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	制約 条件	フェーズ2 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	制約 条件	フェーズ3 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	制約 条件
1	600	4	800	2	1,200	5
2	700	2	1,100	4	2,000	5
3	400	2	800	5	1,000	3
4	200	2	700	2	1,300	5
5	500	4	600	2	1,600	5
6	400	2	500	4	1,500	5
7	200	2	800	5	1,000	2', 4
8	300	2	700	4	1,200	5
9	500	2	1,200	5	1,300	4
10	800	2', 4	-		1,900	5
11	300	2	600	4	1,600	5
12	500	2	1,100	4	1,300	5
13	100	2	600	5	700	4
14	800	2	1,400	5	1,600	3, 4
15	300	2	1,100	4	1,600	5
16	300	2	900	4	1,100	5
17	700	2	1,000	4	1,200	5
18	400	2, 4	-		800	5
19	200	2	1,100	4	1,600	5
20	100	2	1,000	2'	-	
21	400	2	1,000	4	1,300	5
22	500	2	900	4	1,100	5
23	500	2, 4	-		1,800	5
24	900	2	1,400	5	1,700	3
25	400	2	700	4	1,600	5
26	200	2	1,200	5	1,500	3
27	300	2	900	4	1,400	5
28	400	2	500	4	1,700	5
29	100	2	1,100	4	1,700	5
30	500	2	700	4	1,400	5

※具現像 10、18、23 は、フェーズ 1 で適用される制約条件が 2 つあり、フェーズ 1 からの圧入可能量の増大が見込めないため、フェーズ 2 の圧入可能量評価は実施しなかった。具現像 20 は、フェーズ 2 で適用される制約条件が北側のシミュレーションモデル境界であり、さらに圧入量を増やしシミュレーションすることはできないためフェーズ 3 の圧入可能量は実施しなかった。
 ※制約条件の数字は、2：海岸線、2'：シミュレーションの北側境界、3：遮蔽層層厚が 20 m 以下の境界、4：断層周辺、5：750 mTVDSS、に対応する。

表 5.3-4 に各フェーズの圧入可能量結果比較を示す。具現像ごとの振れ幅はあるものの、平均値で見た場合にはフェーズ 1 から 2、フェーズ 2 から 3 への圧入可能量の増大はそれぞれ 500 万 t-CO₂ 程度であった。

表 5.3-4 圧入可能量評価の比較

	フェーズ 1 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	フェーズ 2 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	フェーズ 3 圧入可能量 [万 t-CO ₂]
平均	417	870	1,390
標準偏差	210	264	314
P90	148	532	987
P50	417	870	1,390
P10	686	1,208	1,793

表 5.3-5 は、各フェーズおよび制約条件ごとに、圧入可能量を制限づける条件として当てはまった具現像の個数を示す。なお、ある累計圧入量に到達後、圧入停止してから 1,000 年後の溶存 CO₂ 分布が 2 つの制約条件に当てはまる場合があったため、各フェーズの合計が 30 個ではない。表 5.3-5 に示すとおり、フェーズ 1 においては条件 2 の海岸線境界に溶存 CO₂ が到達して圧入可能量が決定される具現像は 28 個と最も多い。フェーズ 2 では、条件 4 の断層周辺境界へ溶存 CO₂ が到達する具現像が 17 個と一番多く、7 個の具現像が 750 mTVDSS 境界へ溶存 CO₂ が到達し、圧入可能量が決定された。フェーズ 3 では、750 mTVDSS 境界へ到達する具現像が 22 個と最も多く、さらに遮蔽層層厚が 20 m 以下境界にまで到達する具現像が 4 個、断層周辺境界へ到達する具現像が 4 個あった。

表 5.3-5 30 具現像における適用した制約条件の個数

	条件 2： 海岸線	条件 2'： 北側 モデル境界	条件 4： 断層周辺	条件 4'： 西側 モデル境界	条件 5： 750 mTVDSS	条件 3：遮 蔽層層厚 20 m
フェーズ 1	28	0	5	0	0	0
フェーズ 2	2	1	17	0	7	0
フェーズ 3	0	1	4	0	22	4

※フェーズ 1 では、3 個の具現像が同時に条件 2 と条件 4 の制約を受けた。フェーズ 3 では、1 個の具現像が同時に条件 2' と条件 4 の制約を受け、1 個の具現像が同時に条件 4 と条件 3 の制約を受けた。

結果として、圧入量を増やすと海岸線の次に西側の断層付近までは溶存CO₂が到達する具現像が多いものの、さらなる圧入量の増加に伴ってCO₂が進展しやすいのは東側である具現像が多く、750 mTVDSS境界や遮蔽層層厚が20 m以下境界にまで溶存CO₂が到達する可能性があることを確認した。750 mTVDSS境界の内側ではCO₂が超臨界状態だが、750 mTVDSS境界の外側ではCO₂の相変化が起こり気相または液相状態になっていると考える。この検討については後述する。

表 5.3-6 に、制約条件緩和によるフェーズ 1 に対する圧入可能量の増大を示す。フェーズ 2 では、圧入可能量を制限する制約条件として該当する具現像の数が多く、かつ条件緩和後の圧入可能量平均が大きい条件である海岸線条件を緩和することで、より圧入可能量増大が見込める可能性があることが示唆された。フェーズ 3 では、海岸線条件と断層周辺境界の条件 2 つを緩和すると、最も大きな圧入可能量の増大が見込める可能性があることを示している。これは、海岸線条件および断層周辺境界の 2 つの条件が、圧入可能量を制限する制約条件として該当する具現像の数多く、かつ条件緩和後の圧入可能量平均が大きいことが影響している。

表 5.3-6(a) フェーズ 2 における条件緩和による圧入可能量の増大

緩和した制約条件	該当した具現像数	緩和した具現像のみの平均			30 具現像の平均	
		緩和後圧入可能量 [万 t-CO ₂]	フェーズ 1 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	圧入可能量の増大 [万 t-CO ₂]	緩和後圧入可能量 [万 t-CO ₂]	圧入可能量の増大 [万 t-CO ₂]
海岸線	25	920	388	532	860	443
西側断層	2	700	550	150	427	10

表 5.3-6(b) フェーズ 3 における条件緩和による圧入可能量の増大

緩和した制約条件	該当した具現像数	緩和した具現像のみの平均				30 具現像の平均	
		緩和後圧入可能量 [万 t-CO ₂]	フェーズ 1 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	フェーズ 2 圧入可能量 [万 t-CO ₂]	圧入可能量の増大 [万 t-CO ₂]	緩和後圧入可能量 [万 t-CO ₂]	圧入可能量の増大 [万 t-CO ₂]
海岸線・断層	22	1,450	427	805	645	1,343	926
海岸線・750mTVDSS	7	1,257	388	1,057	200	907	490

また表 5.3-7 は、該当する具現像の多い順番に、圧入量の増加に伴い各フェーズで適用された制約条件の組合せを示している。各フェーズにおいて適用された制約条件の組合せとして、表 5.3-7(c)に示す計 8 通りに分けることができる。表 5.3-7(a)に示すフェーズ 1 で

は、溶存CO₂が海岸線境界に一番初めに到達する具現像が25個と最も多く、西側へもCO₂が広がった組合せ2や3の具現像よりも圧入可能量が低くなった。つまり、海岸線条件を緩和することで、さらなる圧入可能量増加が見込める可能性を示唆している。さらに圧入量を増やすと、表5.3-7(b)に示すように、西側に位置する断層周辺境界へ溶存CO₂が到達する具現像が17個と最も多く、7個の具現像は東部に位置する深度750 mTVDSS境界に溶存CO₂が到達する。組合せ5を例外として、組合せ1や3や4などの東側へCO₂が広がりにくい組合せの方が、組合せ2の東へCO₂が広がりやすい組合せよりも圧入可能量が少ない。つまり、断層周辺境界の条件を緩和することで、更なる圧入可能量増加が見込めることを示唆している。フェーズ3の規模まで圧入量を増やすと、海岸線、西側に位置する断層周辺境界、東側に位置する深度750 mTVDSS境界、の順に溶存CO₂が広がる具現像が17個と最も多いことが分かる。

表 5.3-7(a) フェーズ1で適用した制約条件、具現像数、圧入可能量平均

組合せ	フェーズ1 制約条件	該当する 具現像の個数	圧入可能量 平均 [万 t-CO ₂]
1	海岸線	25	388
2	海岸線・西側断層	3	567
3	西側断層	2	550

表 5.3-7(b) フェーズ2までに適用した制約条件の組合せ、具現像数、圧入可能量平均

組合せ	フェーズ1 制約条件	フェーズ2 制約条件	該当する 具現像の個数	圧入可能量 平均 [万 t-CO ₂]
1	海岸線	西側断層	17	859
2	海岸線	深度750 m	7	1,057
3	西側断層 海岸線	海岸線	2	700
4	海岸線・西側断層	—	3	567
5	海岸線	北側モデル境界	1	1,000

※組合せ5における制約条件である「北側モデル境界」は、更なる条件緩和ができないため、フェーズ3の圧入可能量評価は実施していない。

表 5.3-7(c) フェーズ 3 までに適用した制約条件の組合せ、具現像数、圧入可能量平均

組合せ	フェーズ 1 制約条件	フェーズ 2 制約条件	フェーズ 3 制約条件	該当する具現像の個数	圧入可能量平均 [万 t-CO ₂]
1	海岸線	西側断層	深度 750 m	17	1,447
2	海岸線	深度 750 m	遮蔽層層厚 20 m	3	1,400
3	海岸線・西側断層	—	深度 750 m	3 2	1,500
4	海岸線	深度 750 m	西側断層	2	1,000
5	西側断層	海岸線	深度 750 m	2	1,400
6	海岸線	深度 750 m	北側モデル境界・西側断層	1	1,000
7	海岸線	深度 750 m	遮蔽層層厚 20 m・西側断層	1	1,600
8	海岸線	北側モデル境界	—	1	1,000

ここで圧入可能量評価に影響を及ぼす要素として、地層傾斜、圧入地点の中心から各制約条件までの距離、浸透率分布があげられる。全ての具現像に見られる特徴として、圧入量の増加に伴い、特に東側へ溶存 CO₂ が分布する傾向を示すのは、主要圧入領域である萌別層砂岩層上部の地層傾斜が東に向かって浅くなっていることが原因と考える。しかし、圧入中心から海岸線境界や断層周辺境界までの距離は 2 km 程度であるのに対し、圧入地点の中心から 750 mTVDSS 境界までの距離は 5 km である。フェーズ 3 において最も多い組合せは、海岸線境界、断層周辺境界、750 mTVDSS 境界の順に溶存 CO₂ が到達するパターンであったことから、地層傾斜の影響で CO₂ は東側へ向かって進展しやすいものの、圧入中心から各制約条件までの距離が影響し、750 mTVDSS 境界よりも断層周辺境界へ溶存 CO₂ が先に到達しやすい傾向を示したのではないかという仮説を立てた。

一方、浸透率分布は具現像ごとに異なる要素である。圧入可能量が岩相ごとに大きな振れ幅を持つのは、主要圧入領域である高浸透率領域の岩相分布が CO₂ の移動に大きな影響を与えているため、圧入可能量評価は地層傾斜や圧入中心から制約条件までの距離に加えて岩相分布の不均質性を反映した結果であると考えられる。岩相分布の不均質性を取り除き、具現像に共通した特徴の把握および CO₂ の挙動に対する地層傾斜の影響の評価ため、次項に示すとおり新たに不均質性の影響を除いたモデル用いた検討を追加した。

5.3.3 岩相分布の不均質性が圧入可能量に与える影響に関する考察

(1) 均質モデル

岩相分布の不均質性を取り除き、具現像に共通した特徴の把握およびCO₂の挙動に対する地層傾斜の影響の評価のため、同一レイヤーは等しい物性を持つような水平方向に均質な岩相分布とし、鉛直方向にパラメータのコントラストを設定したモデルを作成した。ここでは、前項で使用した具現像を「不均質モデル」、上記の水平方向に均質な岩相分布を持つモデルを「均質モデル」と呼ぶ。

均質モデルのレイヤーの設定値を表5.3-8に、浸透率分布の平面図と坑井断面図を図5.3-5に示す。

表 5.3-8 レイヤーごとのパラメータ

k レイヤー	孔隙率	水平浸透率 mD	鉛直浸透率 mD	ネットグ ロス比	不動水飽和率
1	0.290	10	6	1	0.59
2~4	0.299	0.0015	0.0015	1	0.638
5~8	0.285	13	9	0.765	0.568
9~10	0.269	12	8	0.758	0.6
11~12	0.262	1,308	888	0.816	0.2
13~14	0.269	12	8	0.758	0.6
15~16	0.262	1,308	888	0.816	0.2
17~65	0.269	12	8	0.758	0.6

※k:1~4 は遮蔽層岩相、k:5~8 は岩相 6、k:9~10、13~14、17~65 は岩相 11 以外の岩相の平均、k:11~12、15~16 は岩相 11 のパラメータを用いた。

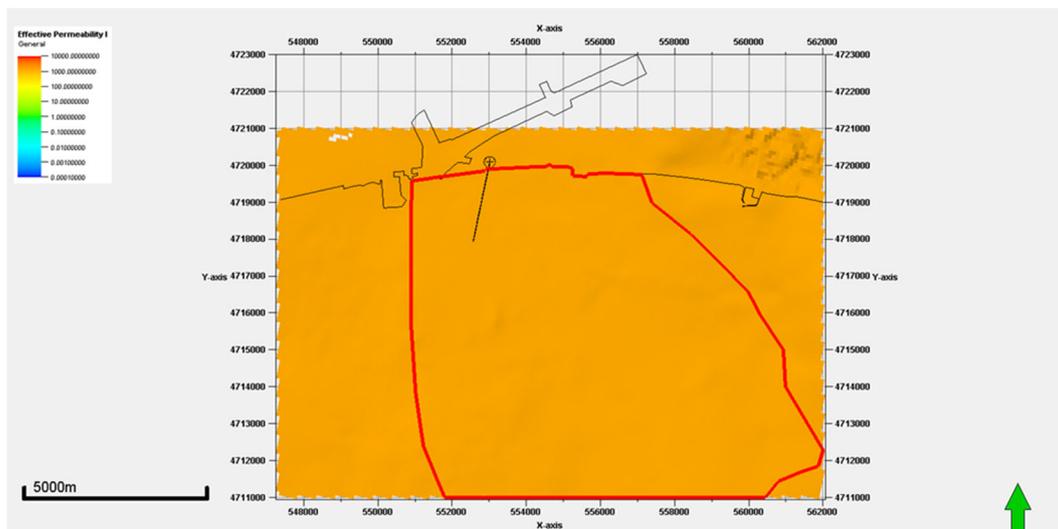


図 5.3-5(a) 浸透率分布 平面図 (一例としてk=11 を表示)

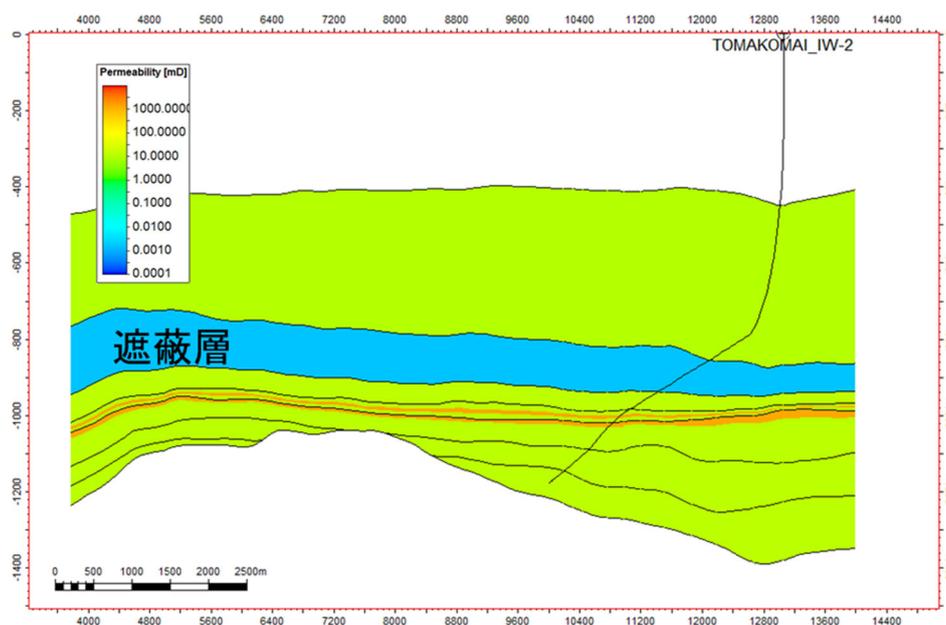


図 5.3-5(b) 浸透率分布 坑井断面図

(2) 圧入可能量結果の比較

前項の方法を用いて、均質モデルにおいてもフェーズ 1、2、3 における圧入可能量を算定した。その結果、フェーズ 1 における圧入可能量は 400 万 t-CO₂、フェーズ 2 における圧入可能量は 700 万 t-CO₂であった。フェーズ 3 における圧入可能量評価においては、均質モデルにした場合、900 万 t-CO₂までの計算は問題なく評価できたが、1,000 万 t-CO₂

および1,100万t-CO₂圧入後1,000年後の計算は収束計算がうまくいかず、途中で止まってしまう事象が発生し、評価ができなかった。一方で、1,200万t-CO₂圧入後1,000年後には溶存CO₂が西側に位置する断層周辺境界および遮蔽層層厚が20m以下となる境界に到達していることが確認できた。したがって、フェーズ3の圧入可能量は多くとも1,100万t-CO₂程度と見込み、1,000万t-CO₂あるいは1,100万t-CO₂と評価した。

表5.3-9に示すとおり、不均質モデルのP50圧入可能量と均質モデルの圧入可能量とを比較すると、全フェーズにおいて均質モデルの方が圧入可能量は小さい。

表 5.3-9 均質／不均質モデルの圧入可能量評価の比較

	均質モデル	不均質モデル			
		P90	P50	P10	標準偏差
フェーズ1	400	148	417	686	210
フェーズ2	700	532	870	1,208	264
フェーズ3	1,000または1,100	987	1,390	1,793	314

図5.3-6は、均質モデルおよび不均質モデルにおける、400万t-CO₂圧入停止後および1,000年後のCO₂飽和率分布であり、図5.3-7は、溶存CO₂量分布である。なお、不均質モデルは、フェーズ1におけるP50相当である具現像3について図示した。均質モデルにおける圧入直後のCO₂飽和率分布の形状は、不均質モデルよりも東側への広がりが抑えられており南側へ広がっている様子が見られるが、圧入停止1,000年後には東側に向かって局所的に広がる様子が見られた。溶存CO₂分布も同様に、不均質モデルにおいても圧入停止1,000年後には特に東側へ延びる様子が見られるが、均質モデルの方がその傾向は顕著に見られており東側への延びが大きい。

ここで、萌別層砂岩層上部の深度コンターマップを図5.3-8に、萌別層砂岩層上部の地層傾斜角度と均質モデルにおける400万t-CO₂圧入1,000年後のCO₂飽和率分布を重ねて表示したものを図5.3-9に示す。超臨界状態のCO₂は浮力と浸透率の影響を受けながら坑井を中心に広がり、鉛直方向には砂岩層上部まで移動しながら、地層傾斜が浅くなる方向へ進展する。400万t-CO₂圧入直後にCO₂が分布している領域付近の地層傾斜は、特に東へ向かって緩やかに傾斜が浅くなっており、小さなお椀のような凹凸が存在しているため、その領域付近に到達したCO₂は地層傾斜の影響を受けて特に東側へ進展すると考えられる。均質モデルはその様子を反映した結果を示している。一方、低浸透率岩相が分布する領域では超臨界CO₂の流動が抑えられるため、不均質モデルでも特に東側へ溶存CO₂が進展する現象は見られるものの、均質モデルの方がその傾向が顕著に現れた。

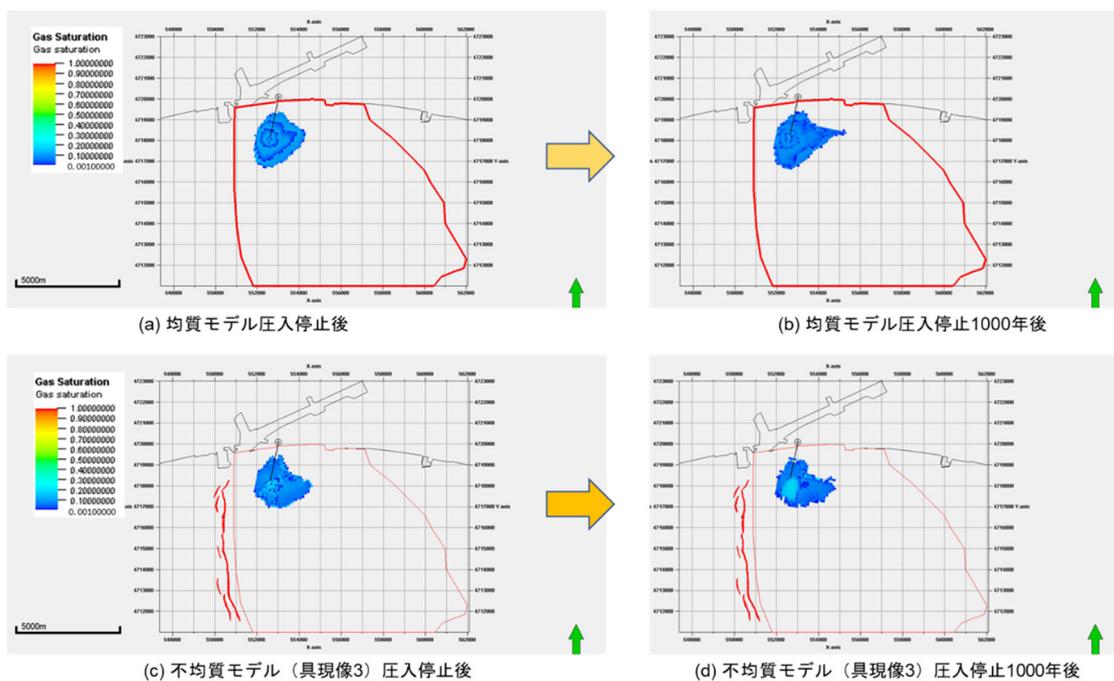


図 5.3-6 累計圧入量 400 万 t-CO₂ 圧入後の CO₂ 飽和率分布

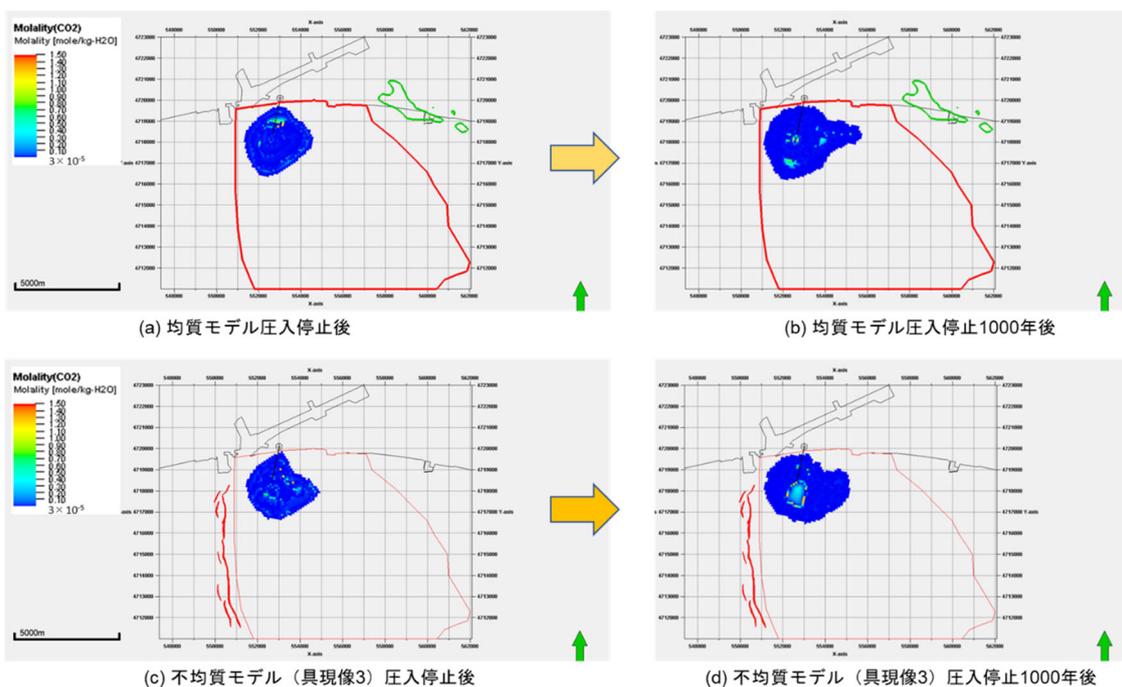


図 5.3-7 累計圧入量 400 万 t-CO₂ 圧入後の溶存 CO₂ 量分布

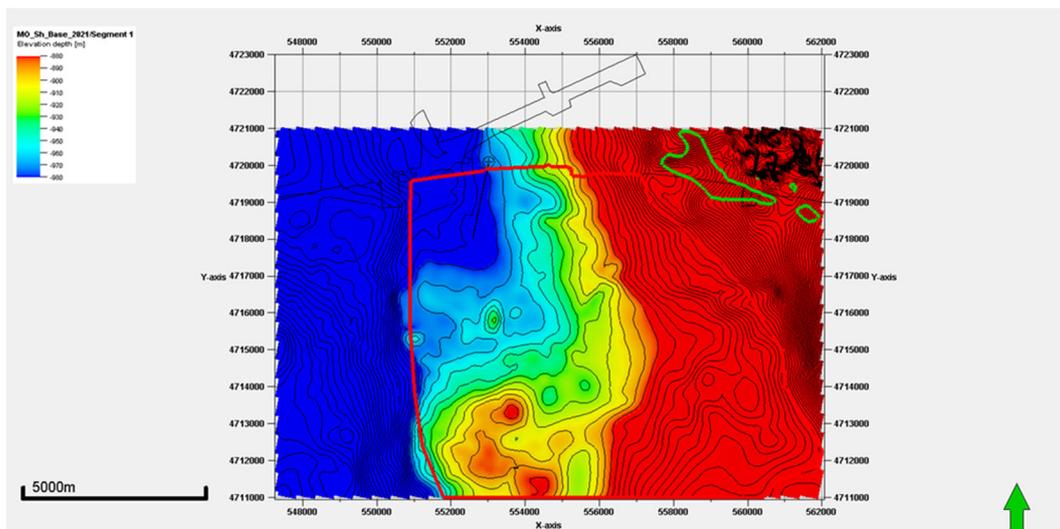


図 5.3-8 萌別層砂岩層上部での深度コンターマップ

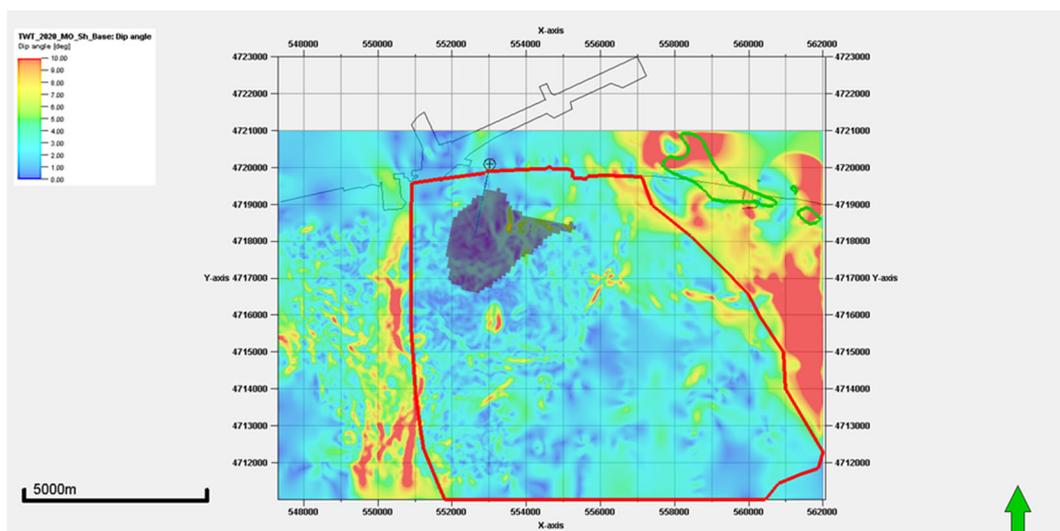


図 5.3-9 萌別層砂岩層上部の地層傾斜角度と均質モデルにおける 400 万 t-CO₂ 圧入 1,000 年後の CO₂ 飽和率分布

図 5.3-10 は、均質モデルおよび不均質モデルにおける、900 万 t-CO₂ 圧入後および 1,000 年後の CO₂ 飽和率分布であり、図 5.3-11 は、溶存 CO₂ 量分布である。なお、不均質モデルは、フェーズ 2 における P50 相当である具現像 16 について図示した。均質モデルにおける圧入直後の CO₂ 飽和率分布の形状は、不均質モデルと比べて北側へ広がっており、東側への広がりと同程度である。しかし、圧入停止 1,000 年後には東側に向かって局所的に細く長く延びる様子が見られた。圧入直後の溶存 CO₂ 分布は、均質モデルと不均質モデルとで形状に大きな違いは見られないものの、圧入停止 1,000 年後には両モデルとも

南側および東側への延びが進むものの、均質モデルの方が東側へ筋状に延びる様子が顕著に見られた。図 5.3-12 は、萌別層砂岩層上部の地層傾斜角度と均質モデルにおける 900 万 t-CO₂ 圧入 1,000 年後の CO₂ 飽和率分布を重ねたものである。均質モデルのフェーズ 2 において東側へ分布した超臨界 CO₂ は、東に向かって浅くなる緩やかな傾斜に沿ってさらに東側へ拡大し、750 mTVDSS 境界付近に存在する地層傾斜が 10 度程度ついている領域まで進展が進む様子を示している。

全フェーズにおいて、溶存 CO₂ 分布は特に東側へ延びる傾向にあり、その傾向は均質モデルの方がより顕著であった。またフェーズ 2 における制限条件に関して、不均質モデルで最も多かったのは西側に位置する断層周辺境界への溶存 CO₂ の到達であったのに対し、均質モデルでは東側に位置する 750 mTVDSS 境界に溶存 CO₂ が到達することが制限となった。均質モデルと不均質モデルの大きな違いは、水平方向に不均質な岩相が分布することであり、岩相分布が溶存 CO₂ 分布の形状つまり圧入可能量に大きな影響を与えていることを改めて確認した。特に、東側に高浸透率岩相が途切れる領域が存在する具現像の場合、750 mTVDSS 境界の制約条件に到達せず CO₂ が広範に広がるため、圧入可能量が増大する。その結果、不均質モデルの方が均質モデルよりも圧入可能量平均が大きい値を示すと考えられるため、特に東側の浸透率分布が圧入可能量に与える影響は大きく、東側の岩相分布の推定精度向上を図るため、坑井掘削およびデータ取得を行うことが望ましい。

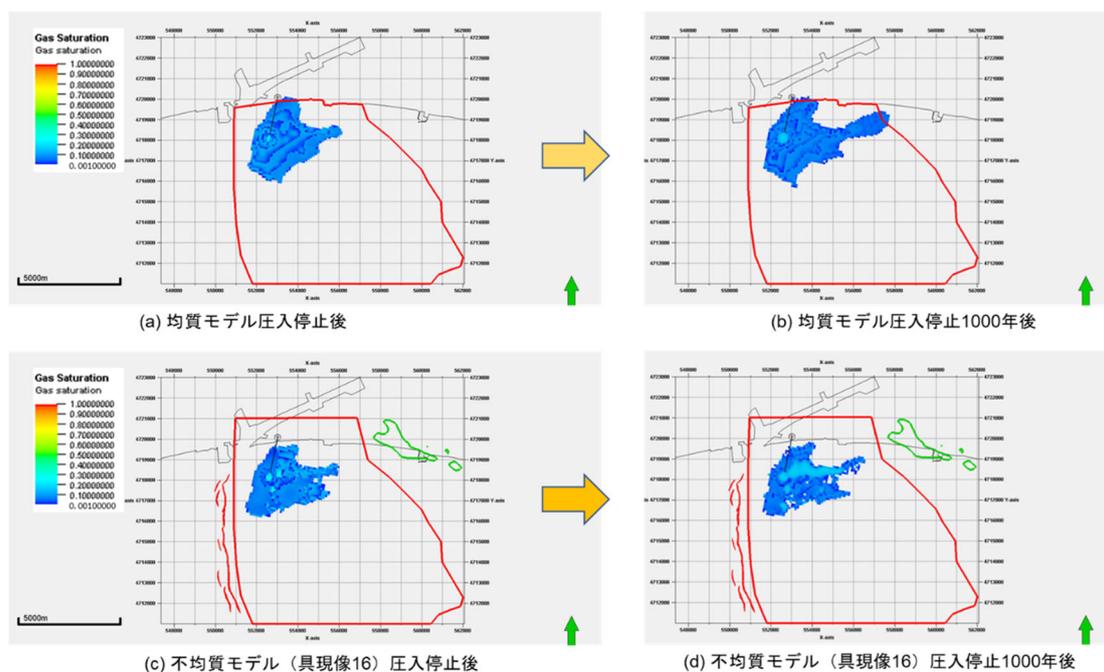


図 5.3-10 累計圧入量 900 万 t-CO₂ 圧入後の CO₂ 飽和率分布

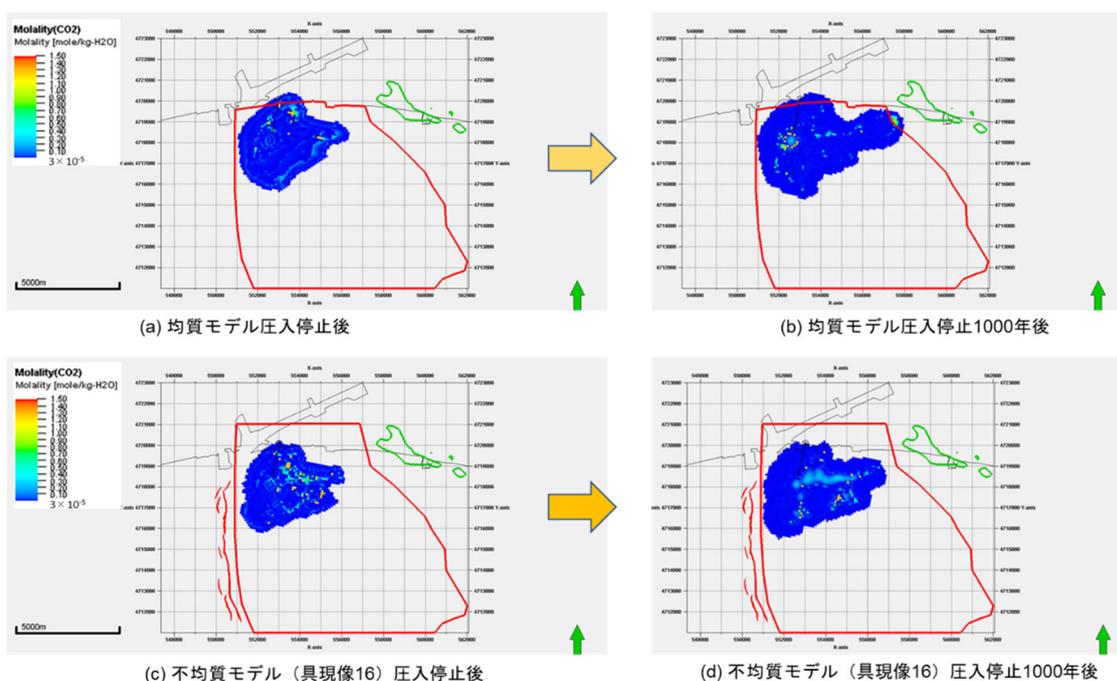


図 5.3-11 累計圧入量 900 万 t-CO₂ 圧入後の溶存 CO₂ 量分布

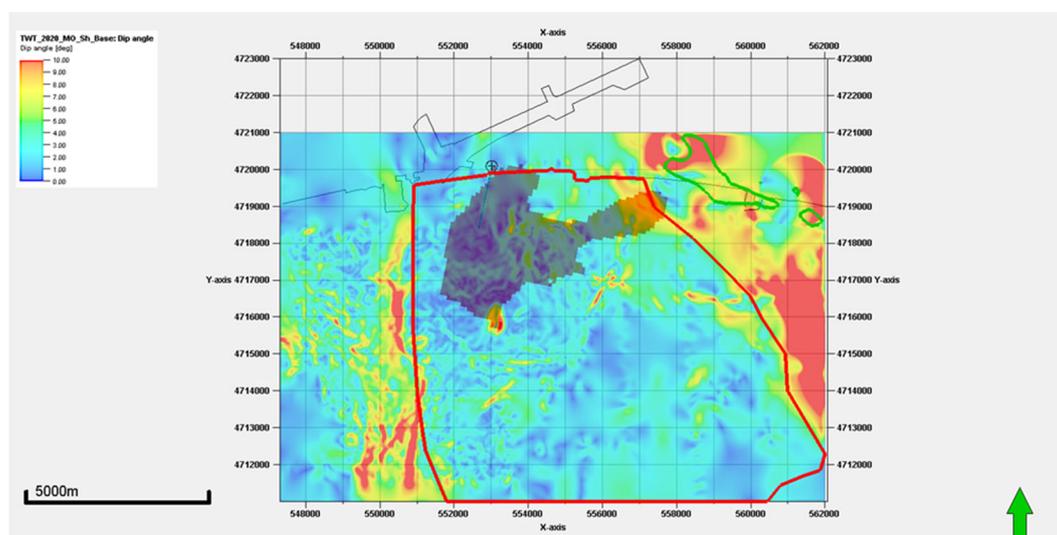


図 5.3-12 萌別層砂岩層上部の地層傾斜角度と均質モデルにおける 900 万 t-CO₂ 圧入 1,000 年後の CO₂ 飽和率分布

図 5.3-13 は、均質モデルおよび不均質モデルにおける、1,300 万 t-CO₂ 圧入後および 1,000 年後の CO₂ 飽和率分布であり、図 5.3-14 は、溶存 CO₂ 量分布である。不均質モデルは、フェーズ 3 における圧入可能量が 1,300 万 t-CO₂ であった具現像 4 について図示した。均質モデルの CO₂ 飽和率分布は、圧入直後においてすでに 750 mTVDSS 境界へ到達しており、1,000 年後には遮蔽層層厚 20 m 以下の領域へ到達している。CO₂ の溶解は超

臨界CO₂が移動すると同時に起こるため、溶存CO₂分布も同様に圧入停止1,000年後には遮蔽層層厚20m以下の領域へ到達する。図5.4-4に示すように、750mTVDDS境界付近から東側にはフラットな領域が存在し、さらに東の遮蔽層層厚20m境界に沿って東へ向かって7~10度程度の傾斜がついている。均質モデルにおける1,000年後のCO₂飽和率分布の形状から、地層傾斜の影響を強く受けていることがわかる。

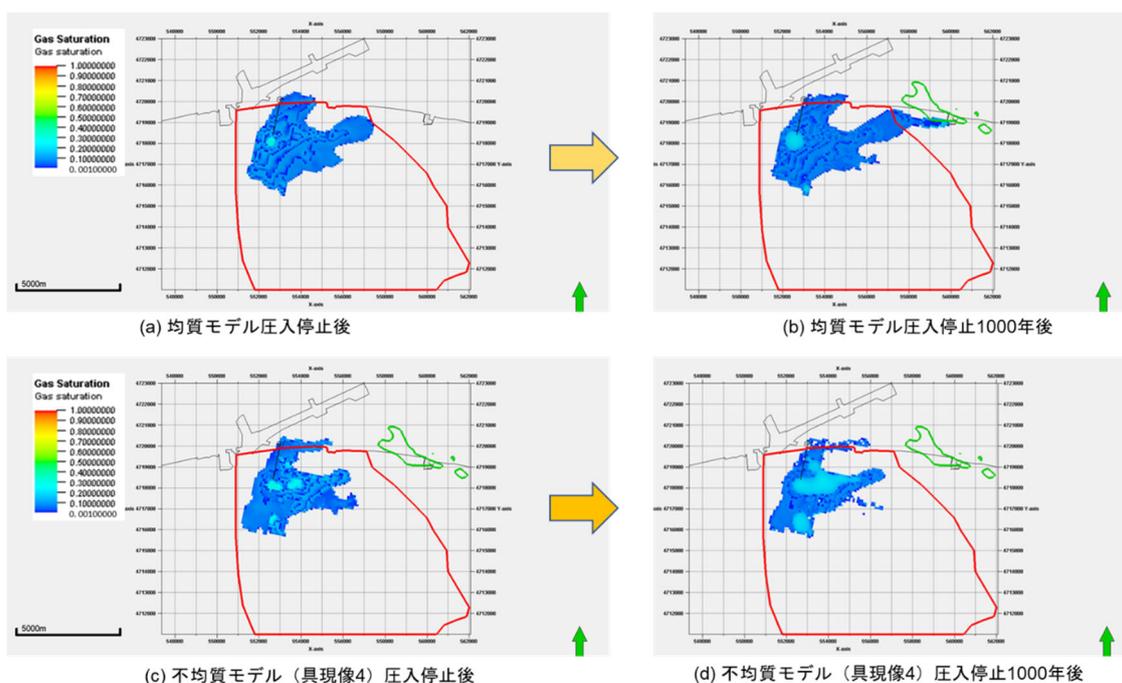


図 5.3-13 累計圧入量 1,300 万 t-CO₂ 圧入後の CO₂ 飽和率分布

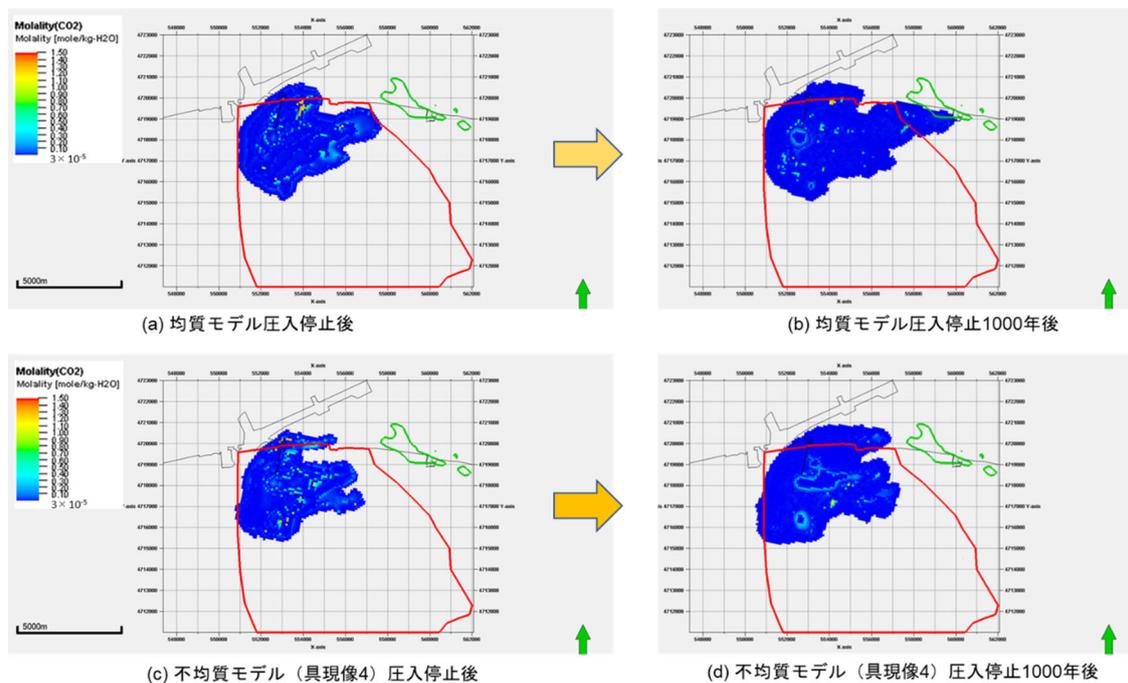


図 5.3-14 累計圧入量 1,300 万 t-CO₂ 圧入後の溶存 CO₂ 量分布

以降の項では、圧入停止から圧入停止 1,000 年後までの期間における貯留層内の挙動予測にかかる項目について、フェーズ 2 およびフェーズ 3 の資料をまとめた。

5.3.4 圧入井の仕上げ区間上端における圧力推移

フェーズ 2 およびフェーズ 3 について、P90、P50、P10 相当具現像における IW-2 の仕上げ区間上端深度の坑底圧力推移を図 5.3-15 から図 5.3-20 にそれぞれ示す。CO₂ 圧入中はいずれも圧力上限値 12.93 MPaG には到達せず、最大で 10.39 MPaG 程度であり、圧入停止後は 5 年程度で圧力低下はほぼ安定した。圧入停止 1,000 年後の仕上げ区間上端における圧力は、フェーズ 2 の P90、P50、P10 フェーズ 3 の P90 で 9.85 MPaG であり、フェーズ 3 の P50、P10 で 9.86 MPaG であった。開境界ではあるが、圧入量の大きいケースの坑底圧力はやや大きい結果となった。

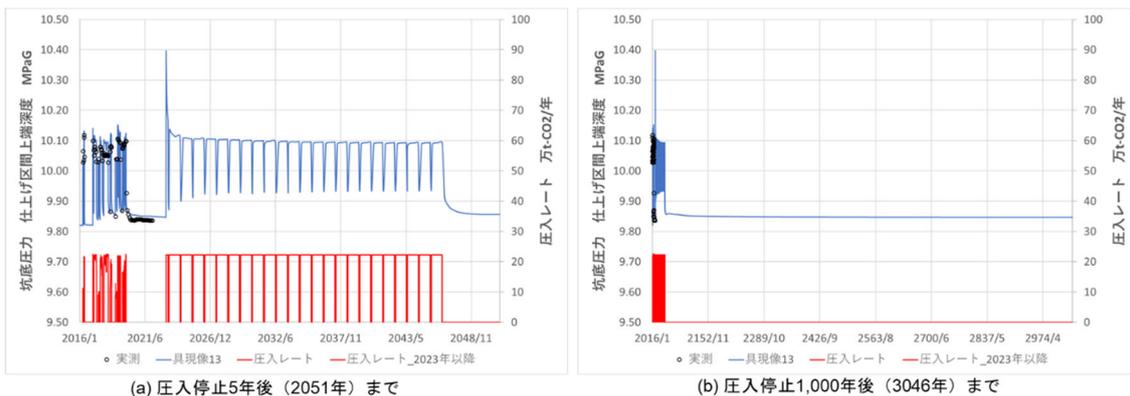


図 5.3-15 フェーズ2のP90相当具現像6におけるIW-2仕上げ区間上端圧力推移

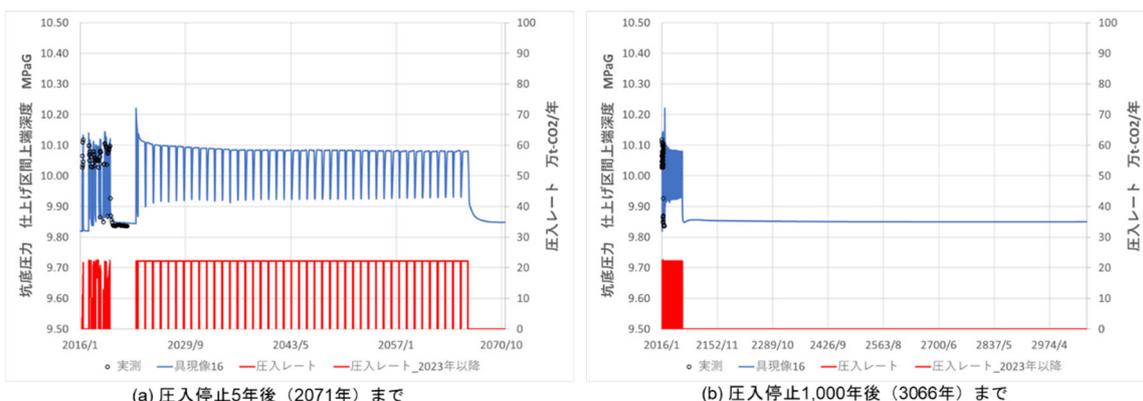


図 5.3-16 フェーズ2のP50相当具現像16におけるIW-2仕上げ区間上端圧力推移

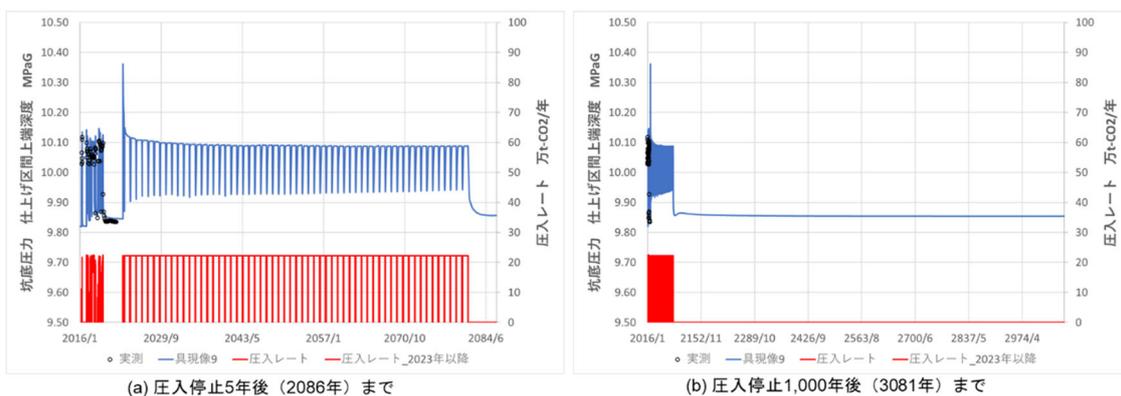


図 5.3-17 フェーズ2のP10相当具現像9におけるIW-2仕上げ区間上端圧力推移

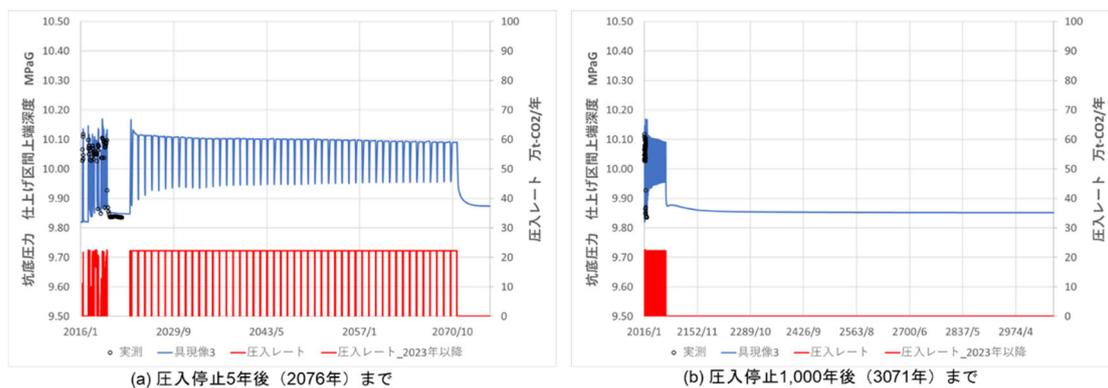


図 5.3-18 フェーズ3のP90相当具現像3におけるIW-2仕上げ区間上端圧力推移

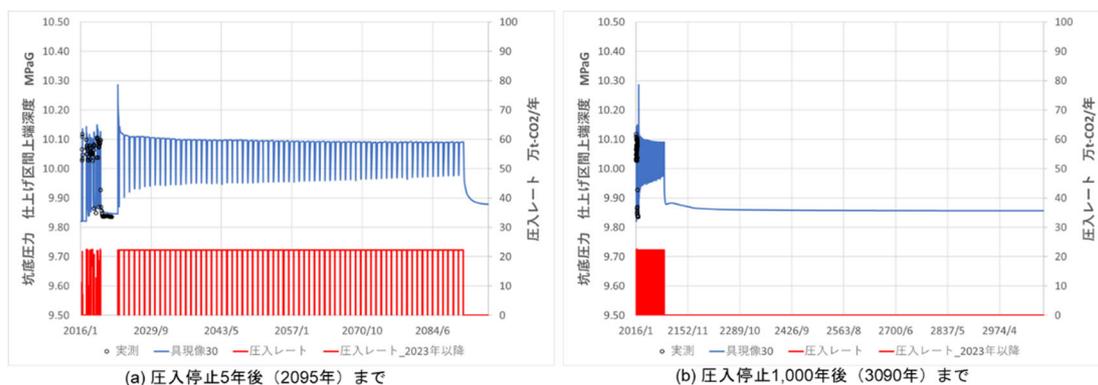


図 5.3-19 フェーズ3のP50相当具現像30におけるIW-2仕上げ区間上端圧力推移

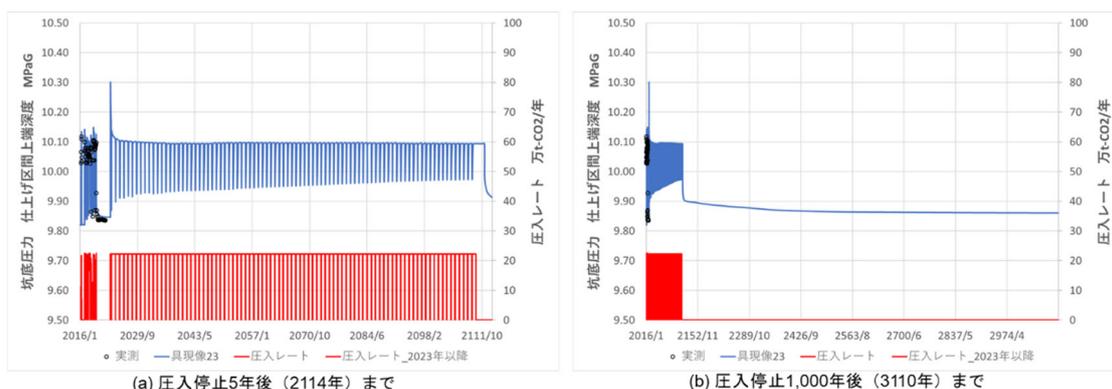


図 5.3-20 フェーズ3のP10相当具現像23におけるIW-2仕上げ区間上端圧力推移

5.3.5 圧力変化分布

フェーズ2およびフェーズ3について、P90、P50、P10相当の具現像における圧入停止直後と圧入停止2年後、圧入停止200年後および圧入停止1,000年後での圧力変化分布の平面図と断面図を図5.3-21から図5.3-32に示す。

(1) フェーズ2のP90相当(具現像6)の圧力変化分布

坑井周辺では100 kPa~300 kPaの圧力変化(上昇)が見られる。また、モデルの西側にある断層付近の圧力上昇値は、50kPa以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止1,000年後にはCO₂が存在する坑井周辺以外の圧力変化は見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認できるが、この時点では遮蔽層全体まで圧力変化は確認されない。

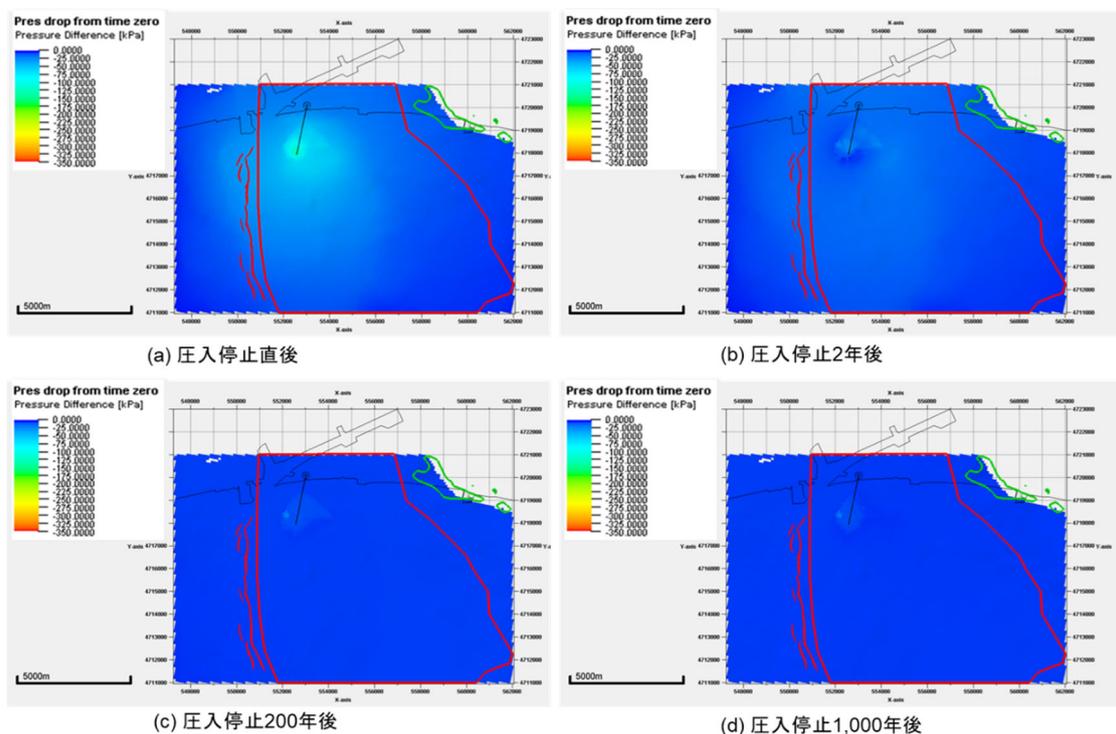


図 5.3-21 フェーズ2のP90相当具現像(具現像6)の圧力変化分布 平面図 (k=11)

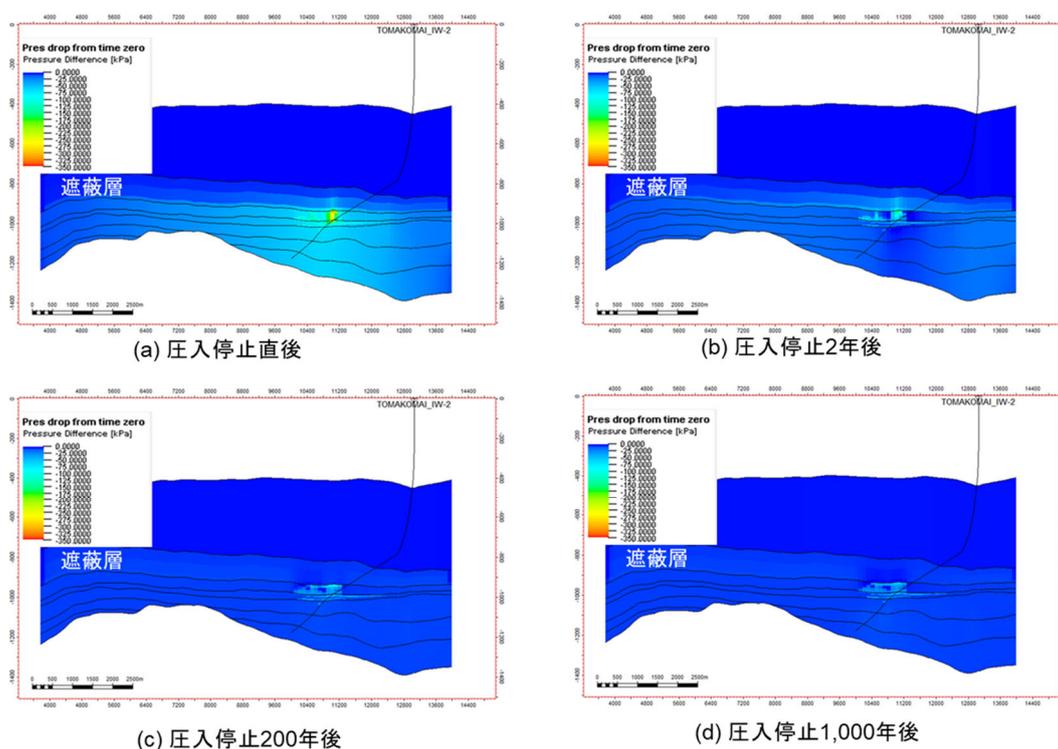


図 5.3-22 フェーズ2のP90相当具現像(具現像6)の圧力変化分布 坑井断面図

(2) フェーズ2のP50相当(具現像16)の圧力変化分布

坑井周辺は100 kPa~300 kPaの圧力変化(上昇)が見られる。また、モデルの西側にある断層(k=10を含む萌別層砂岩層上部下部には到達していない)付近の圧力上昇値は、50kPa以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止1,000年後にはCO₂が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認できるが、この時点では遮蔽層全体まで圧力変化は確認されない。

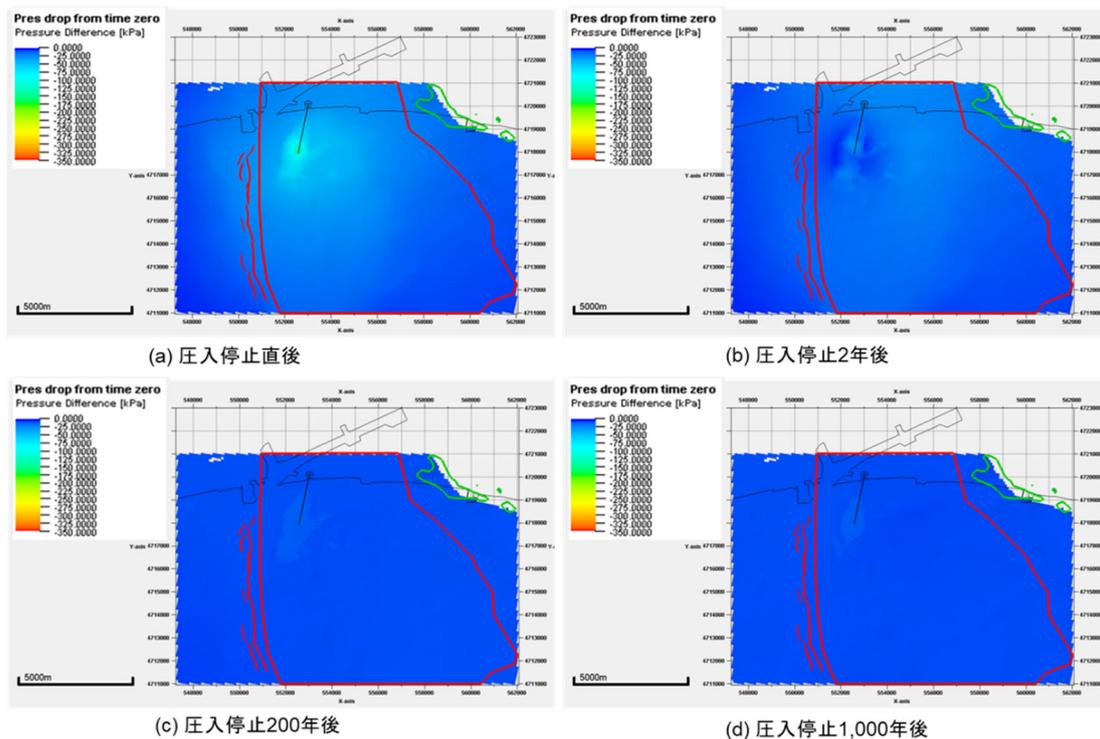


図 5.3-23 フェーズ 2 の P50 相当具現像 (具現像 16) の圧力変化分布 平面図 (k=11)

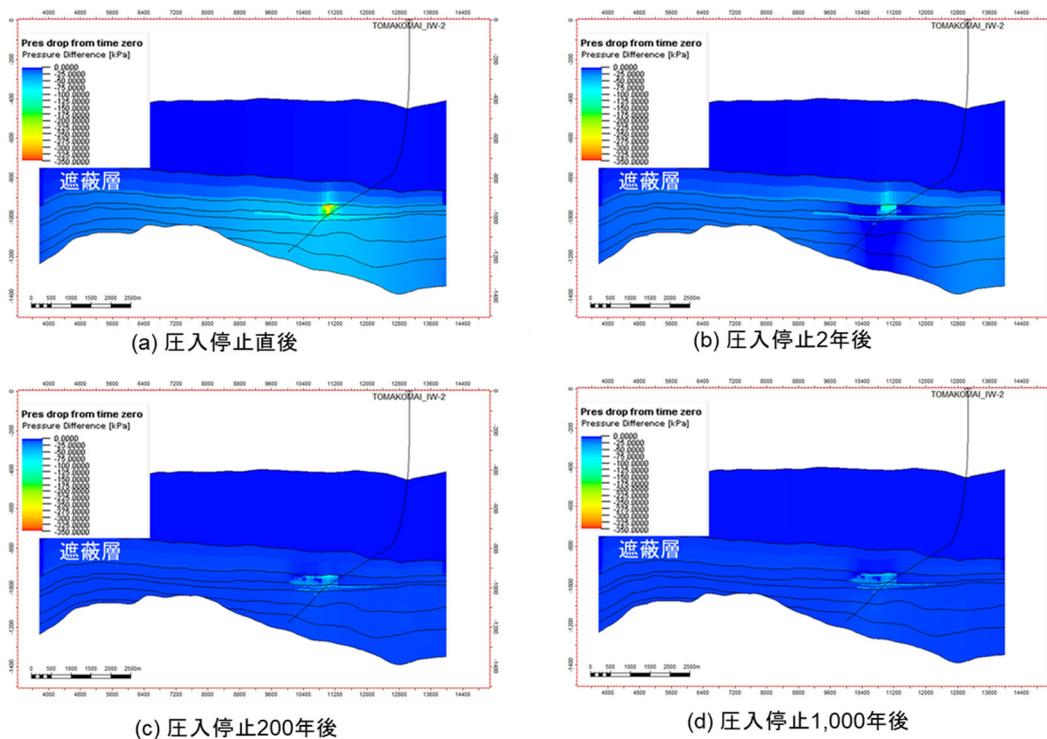


図 5.3-24 フェーズ 2 の P50 相当具現像 (具現像 16) の圧力変化分布 坑井断面図

(3) フェーズ2のP10相当(具現像9)の圧力変化分布

坑井周辺は100 kPa~300 kPaの圧力変化(上昇)が見られる。また、モデルの西側にある断層付近の圧力上昇値は、50kPa以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止1,000年後にはCO₂が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認でき、坑井直上付近は遮蔽層全体にわたって圧力変化が確認された。坑井周辺以外にも、CO₂が存在している坑井から南側の貯留層上端部分にて、約200 kPaの圧力上昇が見られる。

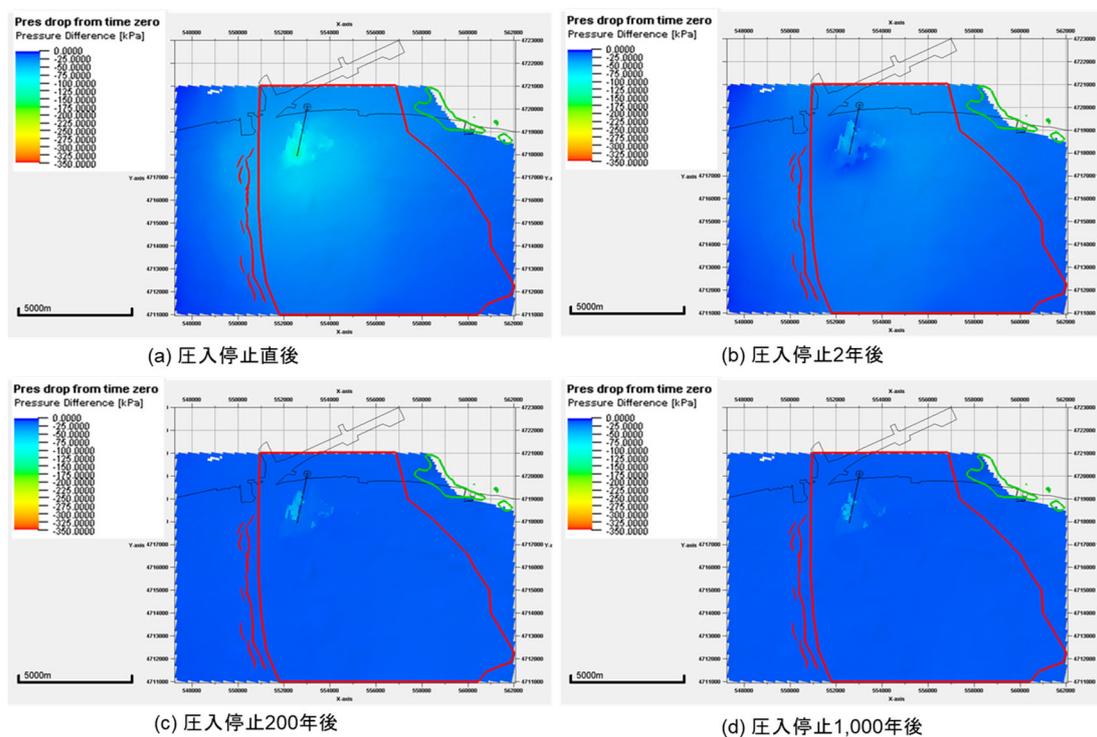


図 5.3-25 フェーズ2のP10相当具現像(具現像9)の圧力変化分布 平面図 (k=11)

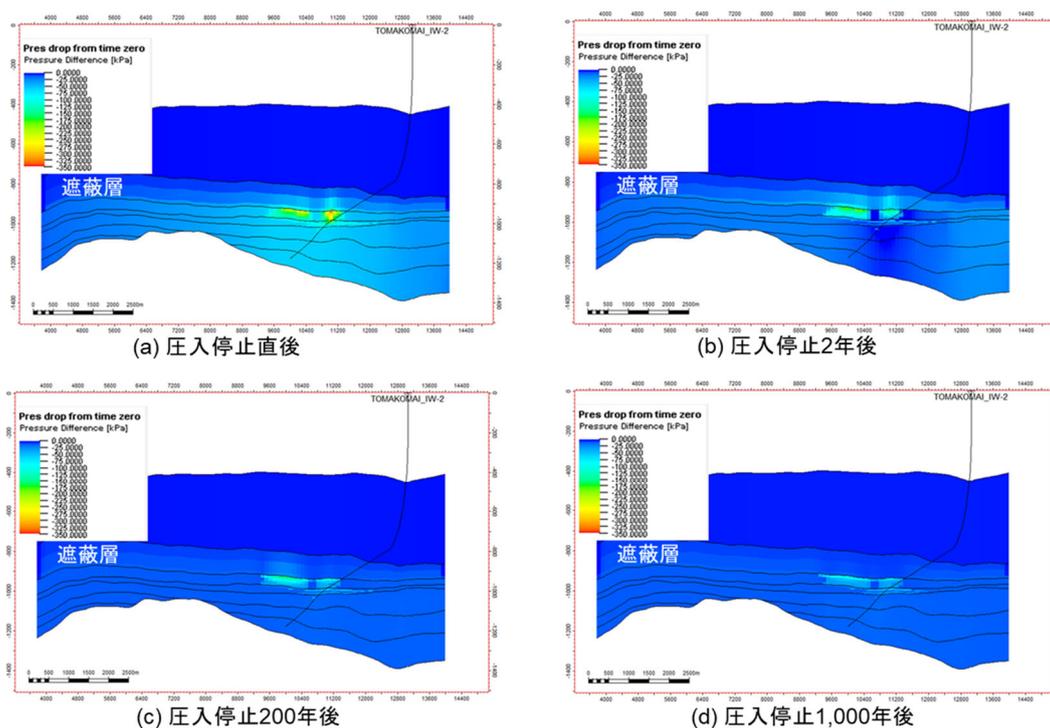


図 5.3-26 フェーズ2のP10相当具現像(具現像9)の圧力変化分布 坑井断面図

(4) フェーズ3のP90相当(具現像3)の圧力変化分布

坑井周辺は100 kPa~300 kPaの圧力変化(上昇)が見られる。また、モデルの西側にある断層付近の圧力上昇値は、50 kPa以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止1,000年後にはCO₂が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認できるが、この時点では遮蔽層全体まで圧力変化は確認されない。

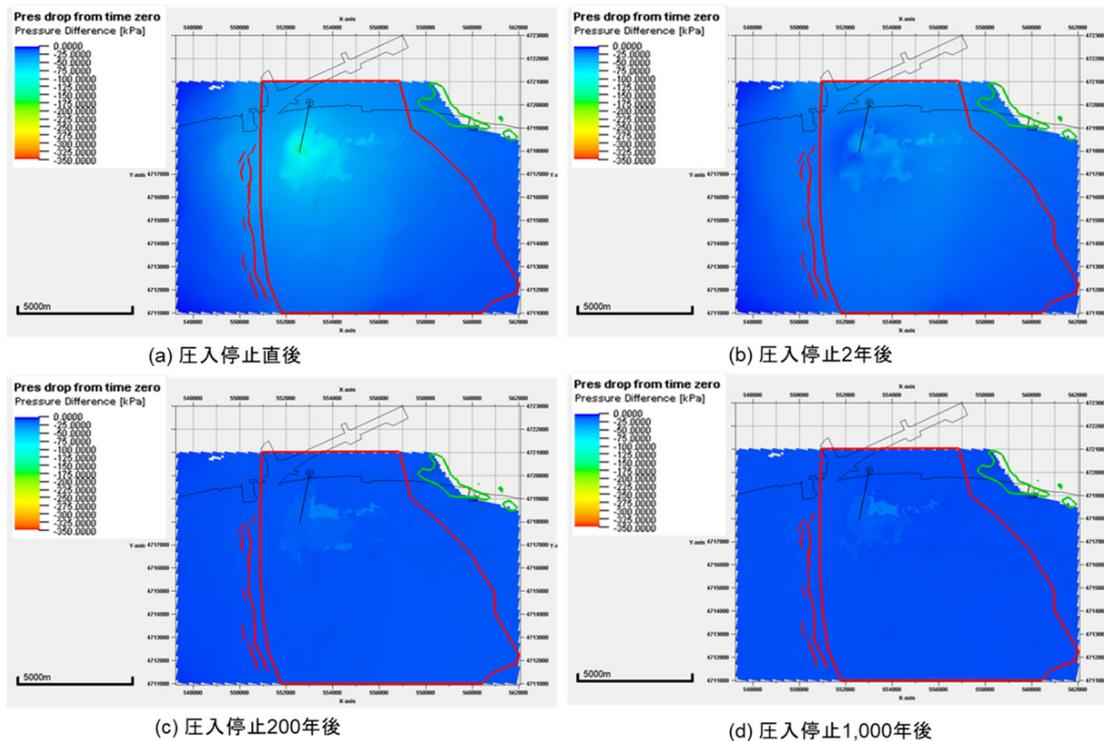


図 5.3-27 フェーズ3のP90相当具現像(具現像3)の圧力変化分布 平面図 (k=11)

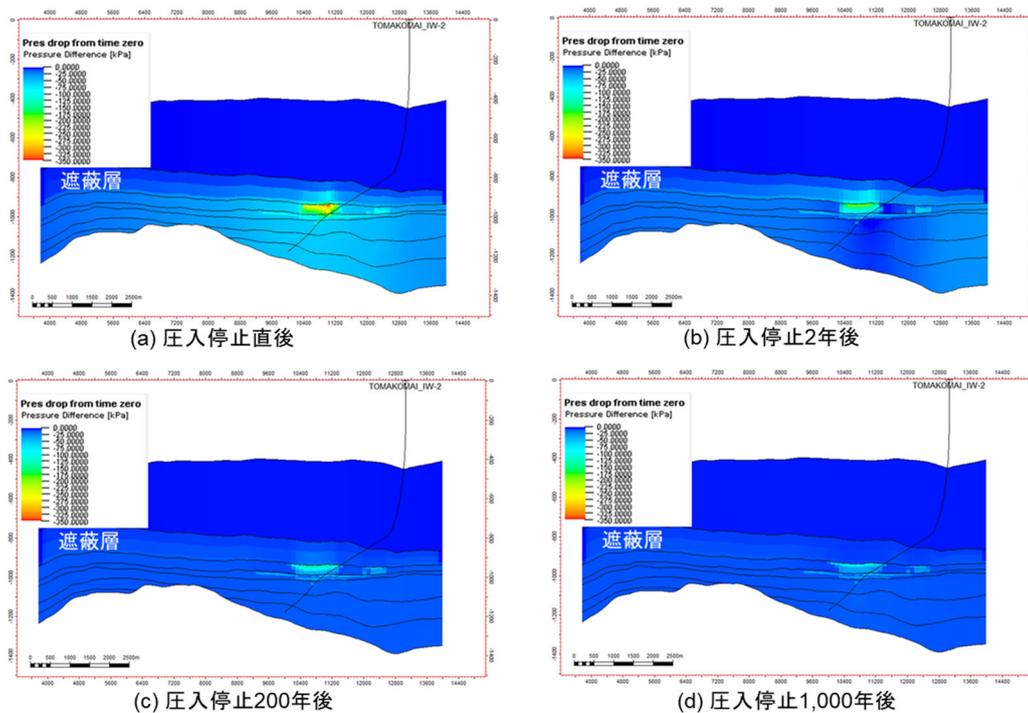


図 5.3-28 フェーズ3のP90相当具現像(具現像3)の圧力変化分布 坑井断面図

(5) フェーズ3のP50相当(具現像30)の圧力変化分布

坑井周辺は100 kPa~350 kPaの圧力変化(上昇)が見られる。また、モデルの西側にある断層付近の圧力上昇値は、50 kPa以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止1,000年後にはCO₂が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認でき、坑井直上付近は遮蔽層全体にわたって圧力変化が確認された。

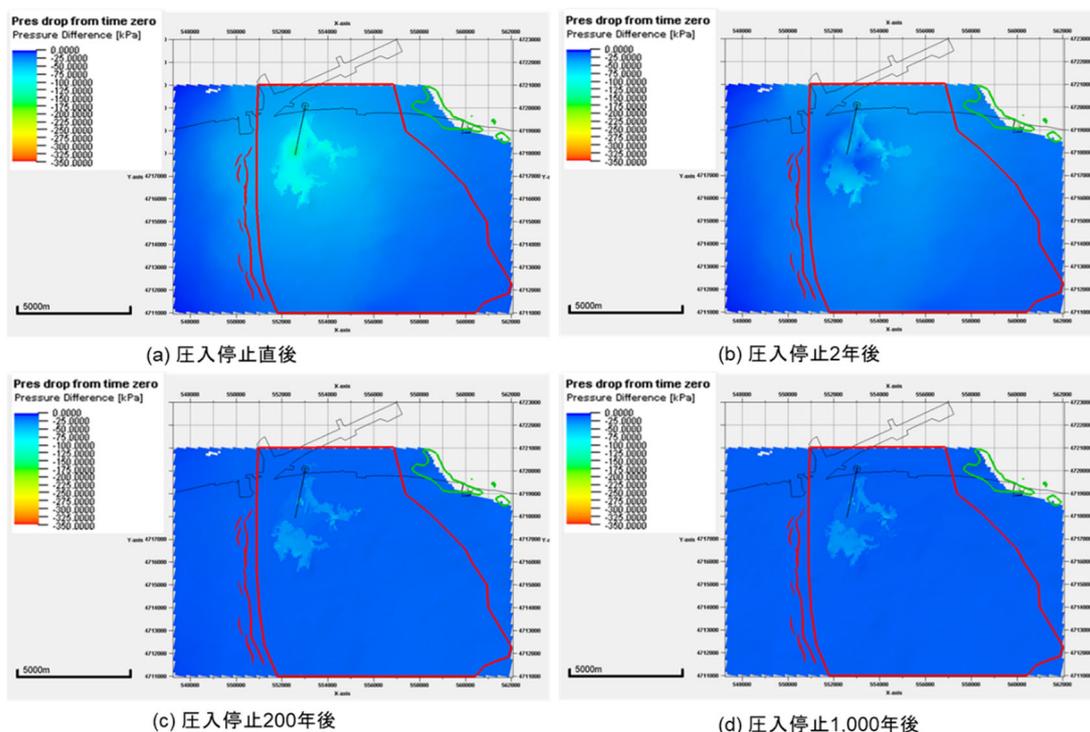


図 5.3-29 フェーズ3のP50相当具現像(具現像30)の圧力変化分布 平面図 (k=11)

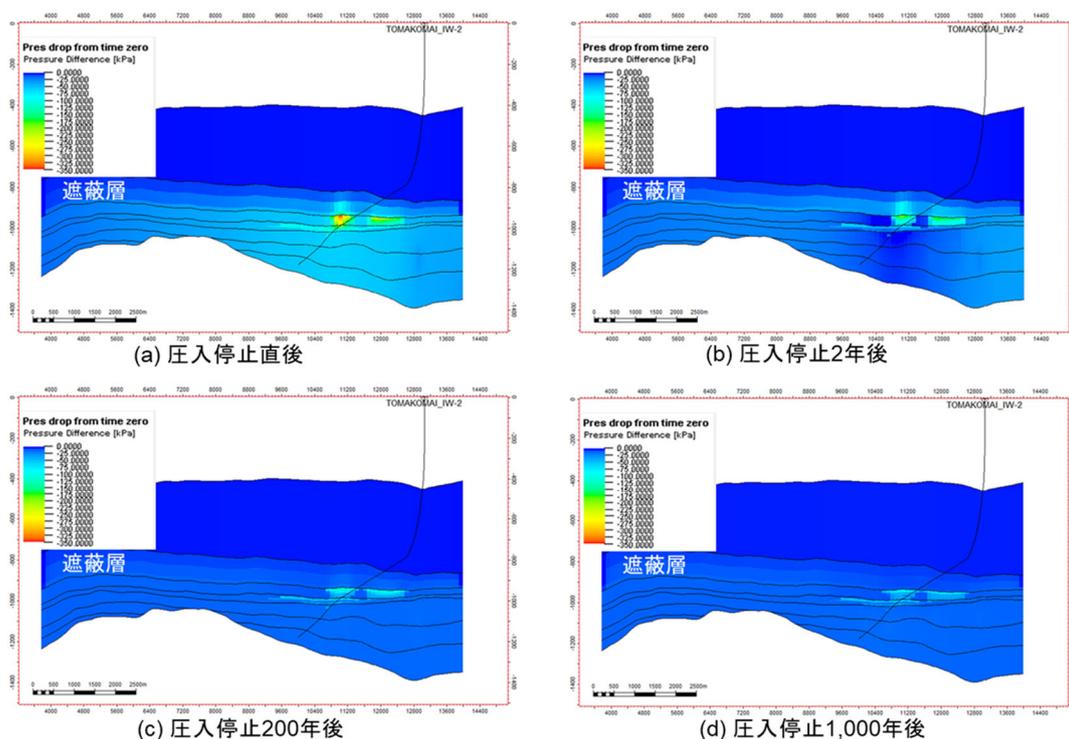


図 5.3-30 フェーズ 3 の P50 相当具現像（具現像 30）の圧力変化分布 坑井断面図

(6) フェーズ 3 の P10 相当（具現像 23）の圧力変化分布

坑井周辺は 100 kPa～350 kPa の圧力変化（上昇）が見られる。また、モデルの西側にある断層付近の圧力上昇値は、約 50 kPa であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止 1,000 年後には CO₂ が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認でき、坑井直上付近は遮蔽層全体にわたって圧力変化が確認された。

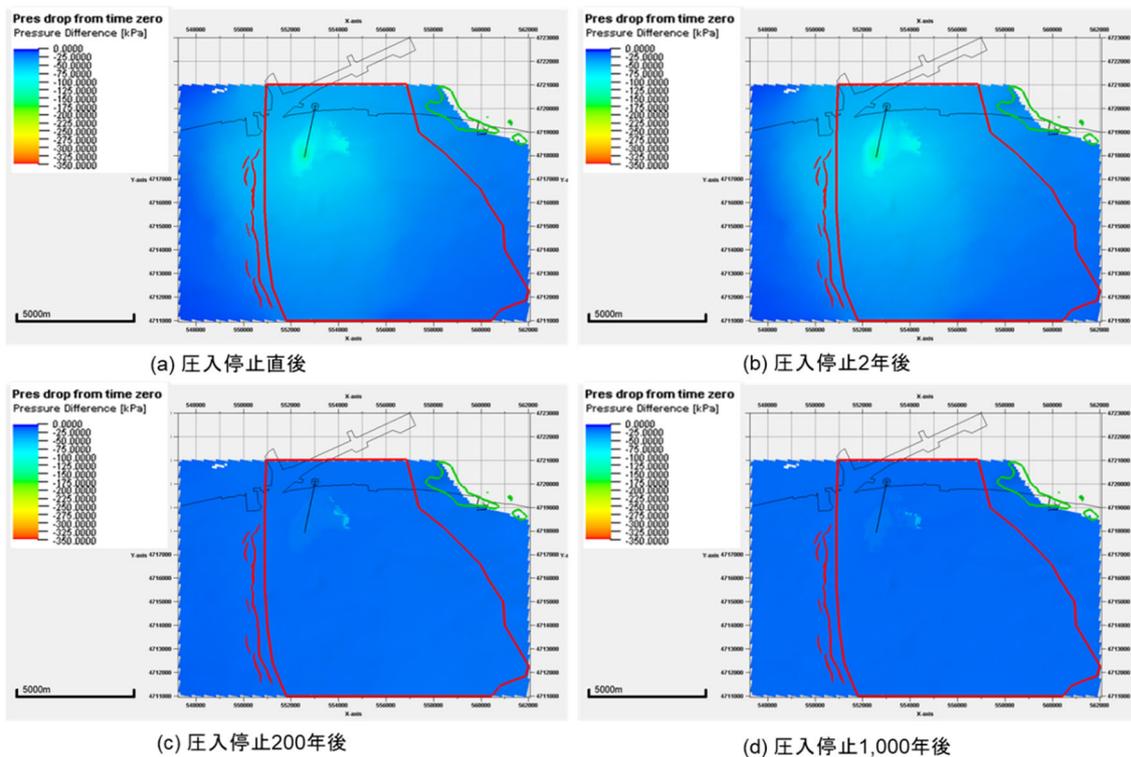


図 5.3-31 フェーズ3のP10相当具現像(具現像23)の圧力変化分布 平面図(k=11)

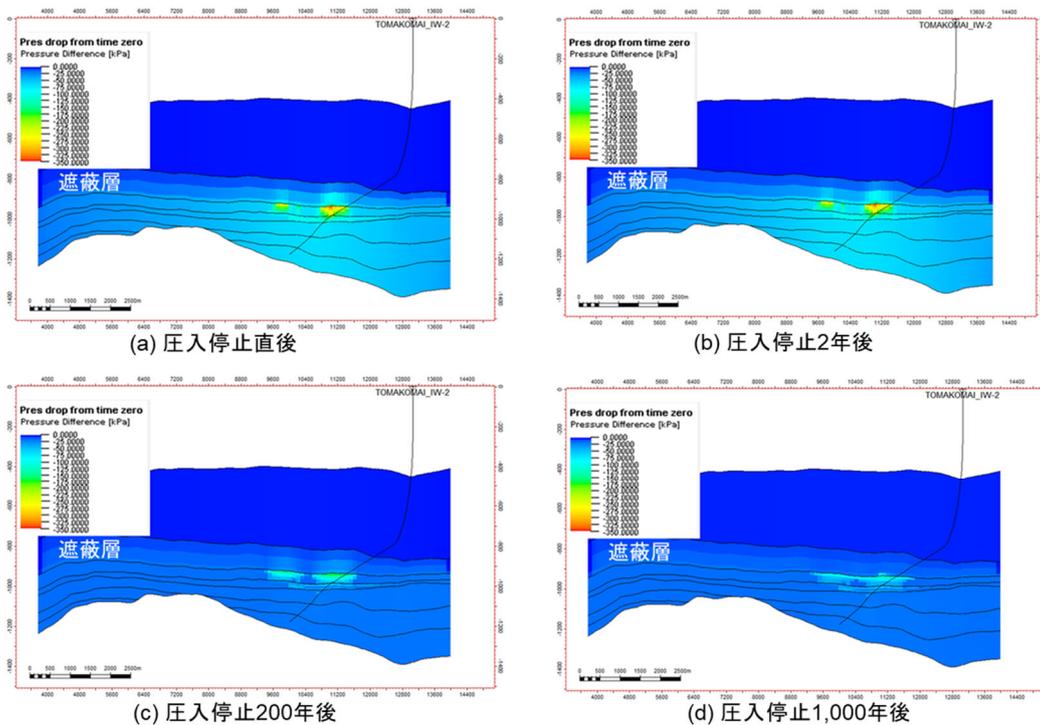


図 5.3-32 フェーズ3のP10相当具現像(具現像23)の圧力変化分布 坑井断面図

5.3.6 CO₂飽和率分布

フェーズ2およびフェーズ3について、P90、P50、P10相当の具現像における圧入停止直後と圧入停止2年後、圧入停止200年後および圧入停止1,000年後でのCO₂飽和率分布の平面図と断面図を図5.3-33から図5.3-44に示す。

(1) フェーズ2のP90相当(具現像6)のCO₂飽和率分布

平面図では、圧入停止200年後にてCO₂が東側へ移動していく様子が見られた。その後、CO₂の塩水への溶解が進み、CO₂の移動は抑制されている様子が確認された。

坑井断面図では、浮力によってCO₂が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂が安全に貯留されている様子が確認された。

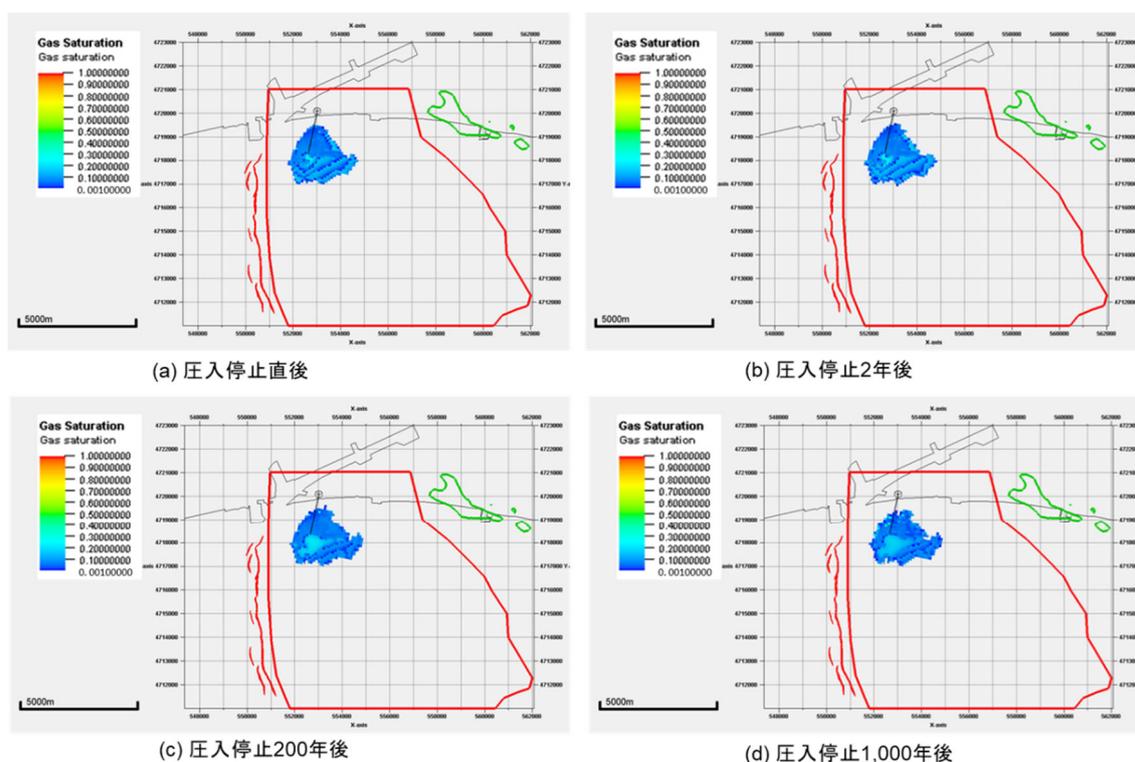


図 5.3-33 フェーズ2のP90相当具現像(具現像6)のCO₂飽和率分布 平面図

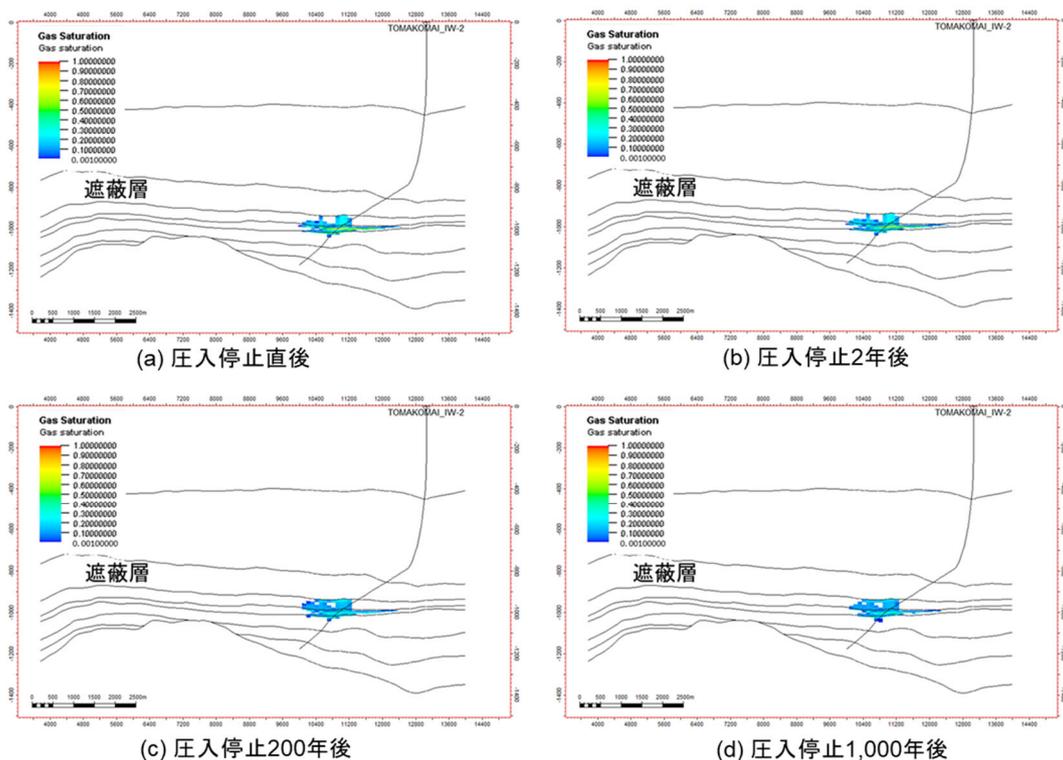


図 5.3-34 フェーズ 2 の P90 相当具現像 (具現像 6) の CO₂ 飽和率分布 坑井断面図

(2) フェーズ 2 の P50 相当 (具現像 16) の CO₂ 飽和率分布

平面図では、圧入停止 2 年後から CO₂ が東側へ移動していく様子が見られた。圧入停止 200 年後以降、CO₂ の塩水への溶解が進み、CO₂ の移動は抑制されている様子が確認された。

坑井断面図では、浮力によって CO₂ が上昇の様子がみられるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂ が安全に貯留されている様子が確認された。

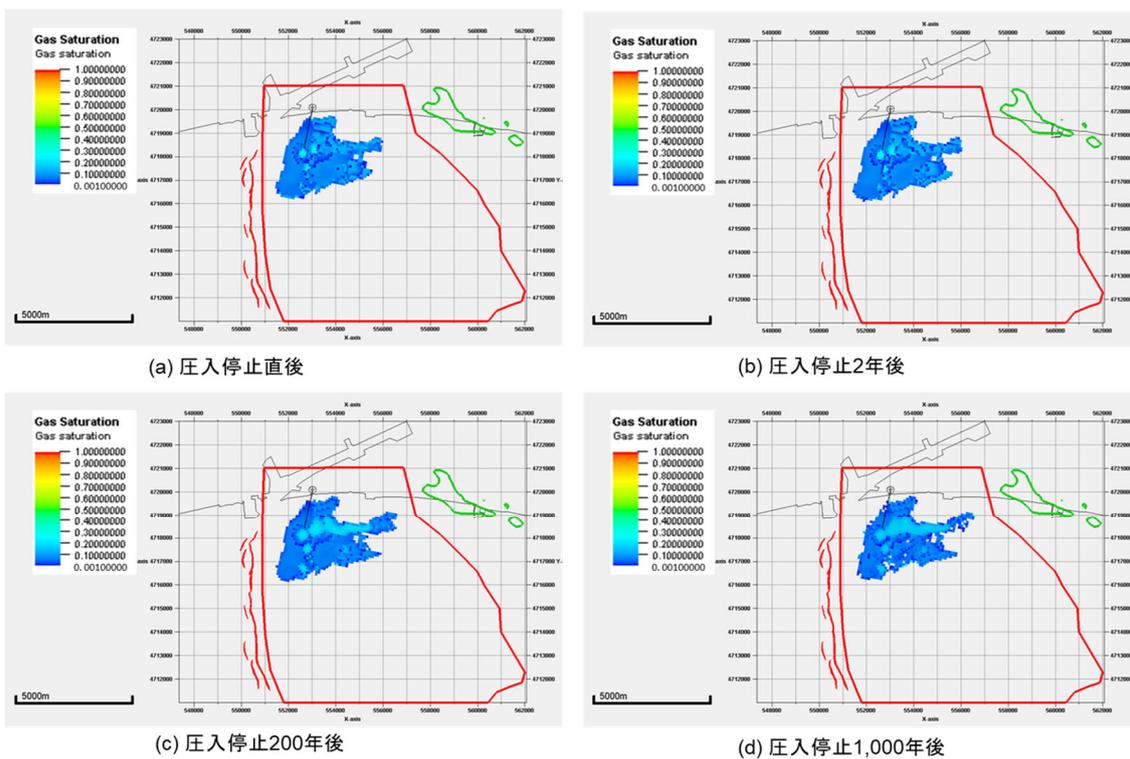


図 5.3-35 フェーズ2のP50相当具現像(具現像16)のCO₂飽和率分布 平面図

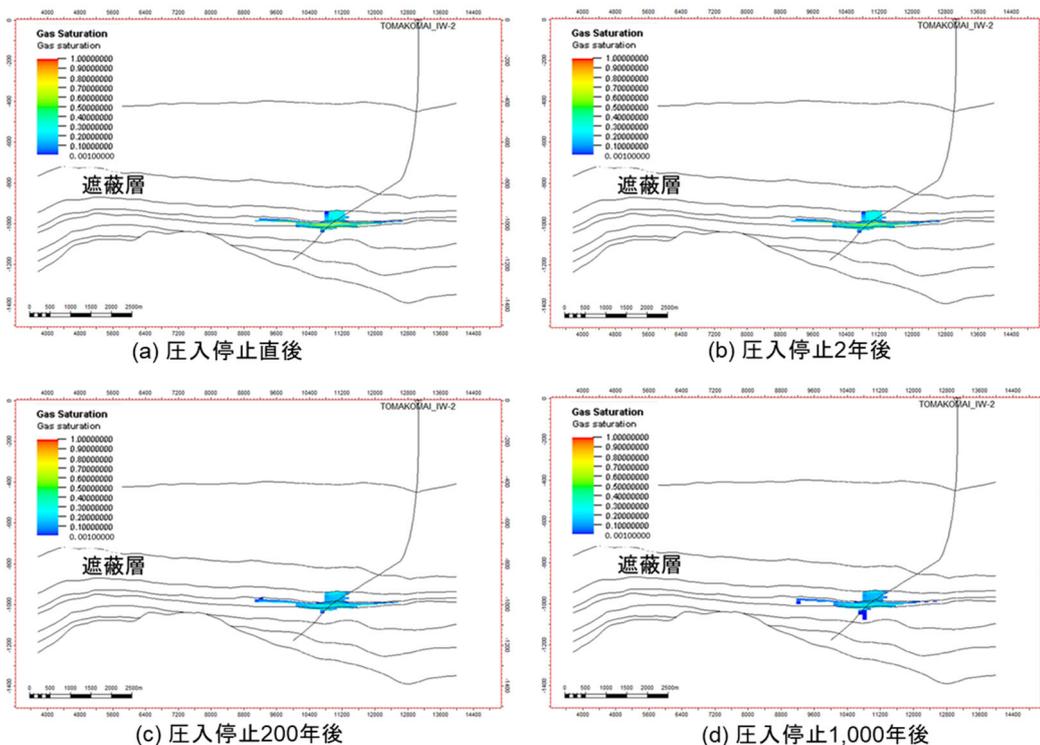


図 5.3-36 フェーズ2のP50相当具現像(具現像16)のCO₂飽和率分布 坑井断面図

(3) フェーズ2のP10相当(具現像9)のCO₂飽和率分布

平面図では、圧入停止200年後からCO₂が特に東側へ移動していく様子が見られた。その後CO₂の塩水への溶解が進み、CO₂の移動は抑制されている様子が確認された。

坑井断面図では、浮力によってCO₂が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂が安全に貯留されている様子が確認された。

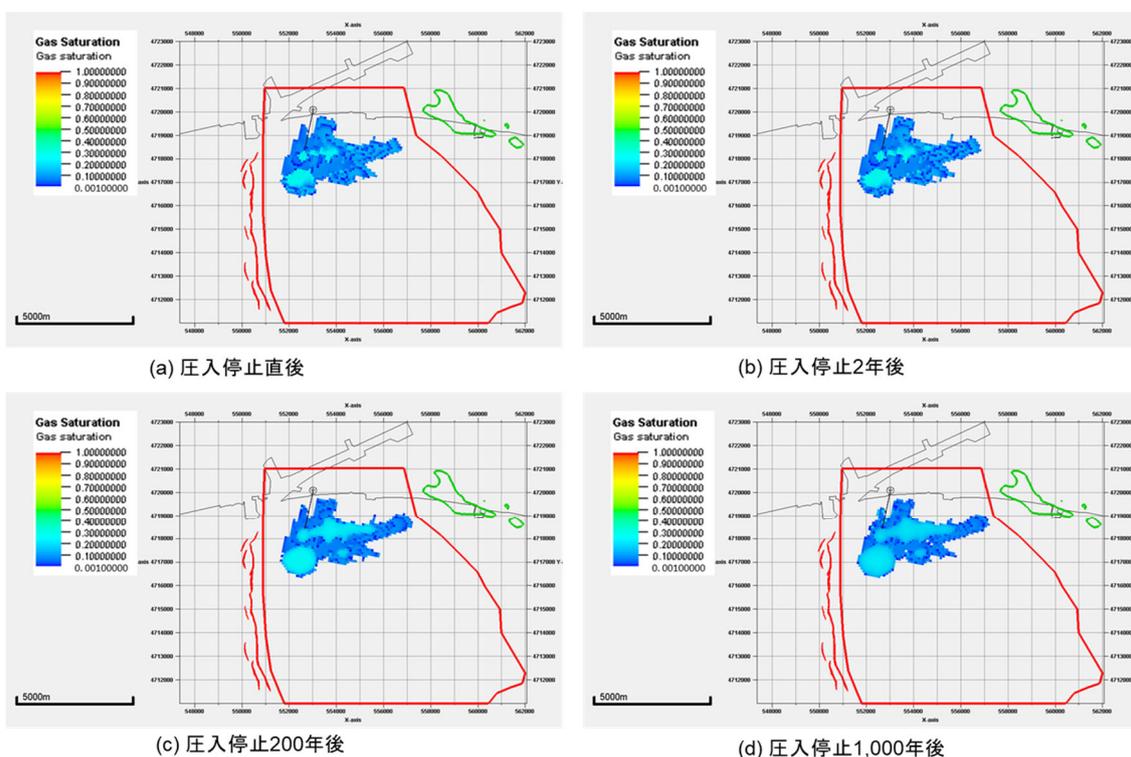


図 5.3-37 フェーズ2のP10相当具現像(具現像9)のCO₂飽和率分布 平面図

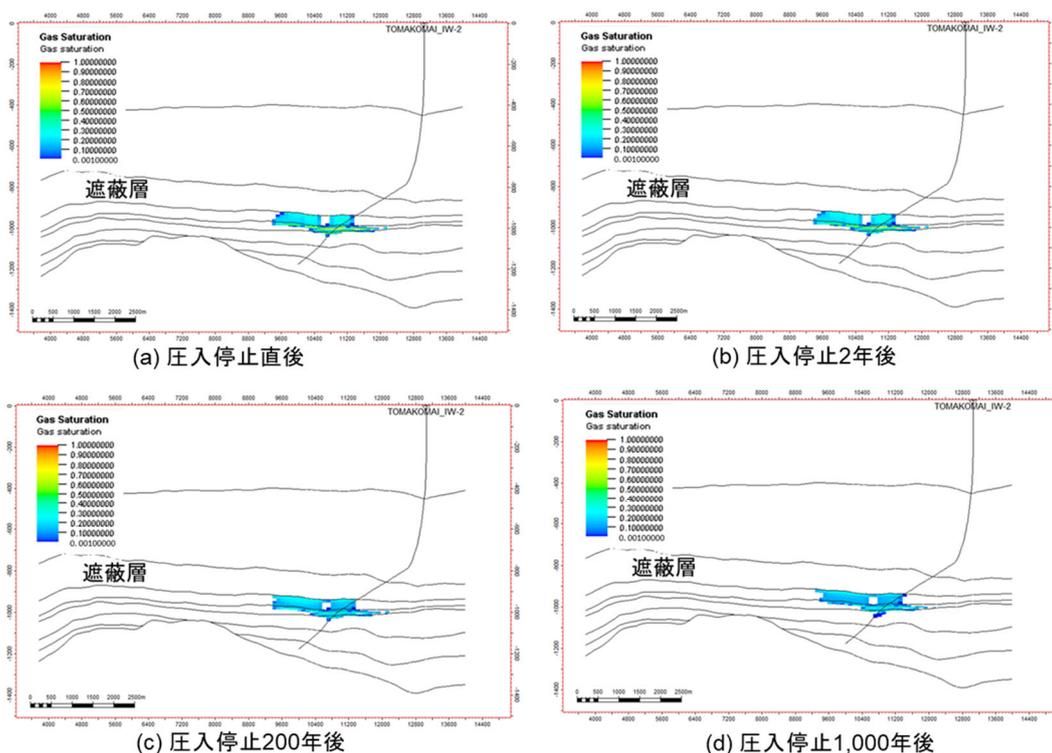


図 5.3-38 フェーズ2のP10相当具現像(具現像9)のCO₂飽和率分布 坑井断面図

(4) フェーズ3のP90相当(具現像3)のCO₂飽和率分布

平面図では、圧入停止2年後からCO₂が特に東側へ移動していく様子が見られた。圧入停止200年後以降は、CO₂の塩水への溶解が進み、CO₂の移動は抑制されている様子が確認された。

坑井断面図では、浮力によってCO₂が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂が安全に貯留されている様子が確認された。

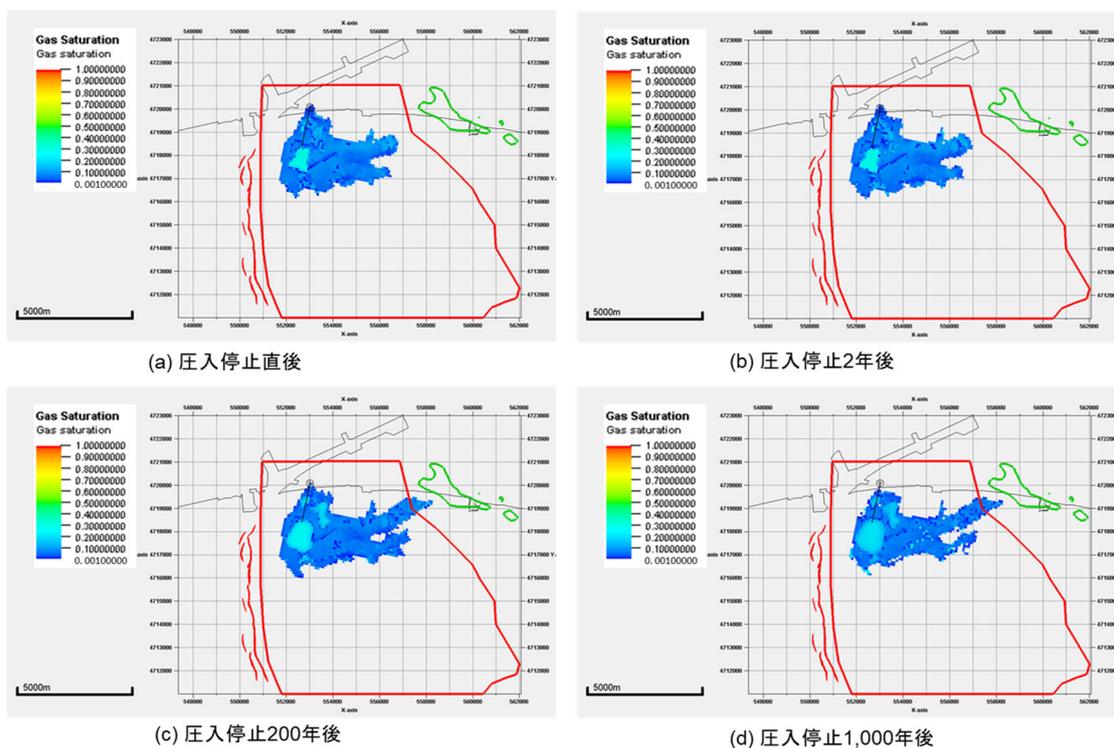


図 5.3-39 フェーズ3のP90相当具現像(具現像3)のCO₂飽和率分布 平面図

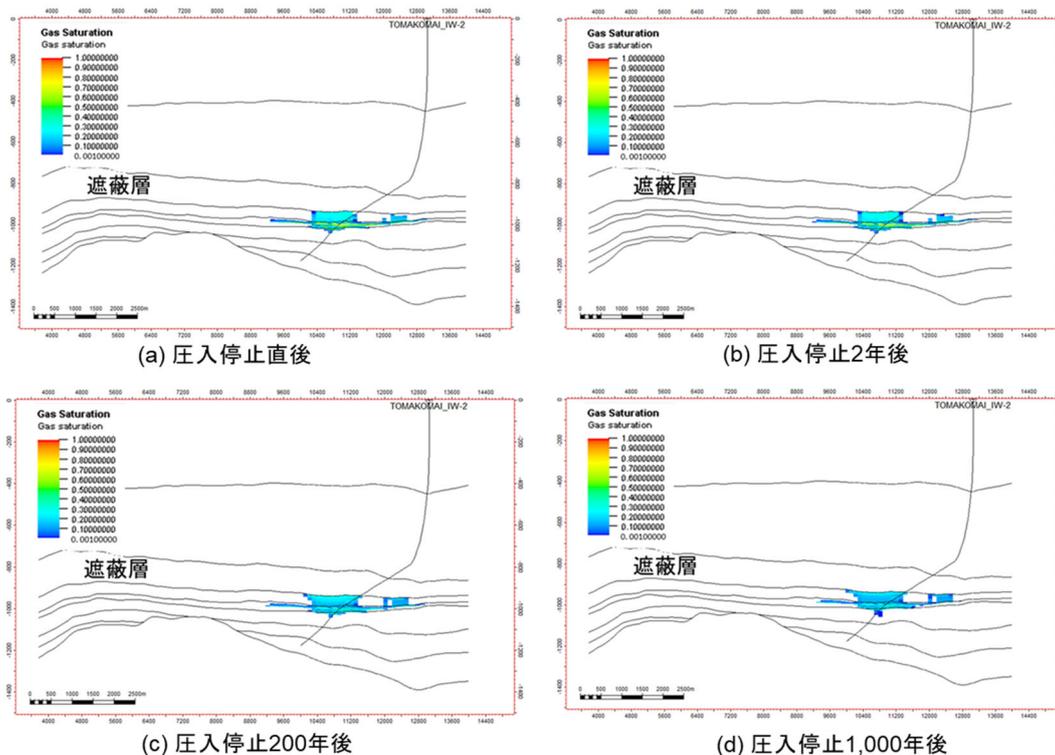


図 5.3-40 フェーズ3のP90相当具現像(具現像3)のCO₂飽和率分布 坑井断面図

(5) フェーズ3のP50相当(具現像30)のCO₂飽和率分布

平面図では、圧入停止200年後からCO₂が特に東側へ移動していく様子が見られた。その後CO₂の塩水への溶解が進み、CO₂の移動は抑制されている様子が確認された。

坑井断面図では、浮力によってCO₂が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂が安全に貯留されている様子が確認された。

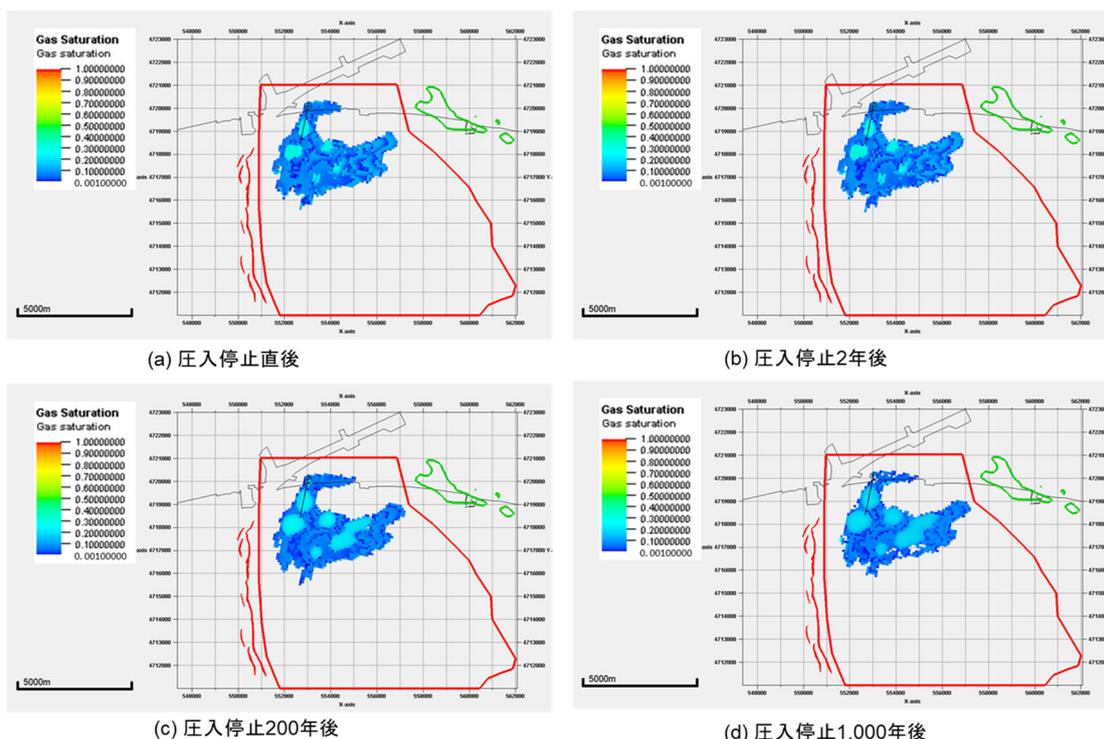


図 5.3-41 フェーズ3のP50相当具現像(具現像30)のCO₂飽和率分布 平面図

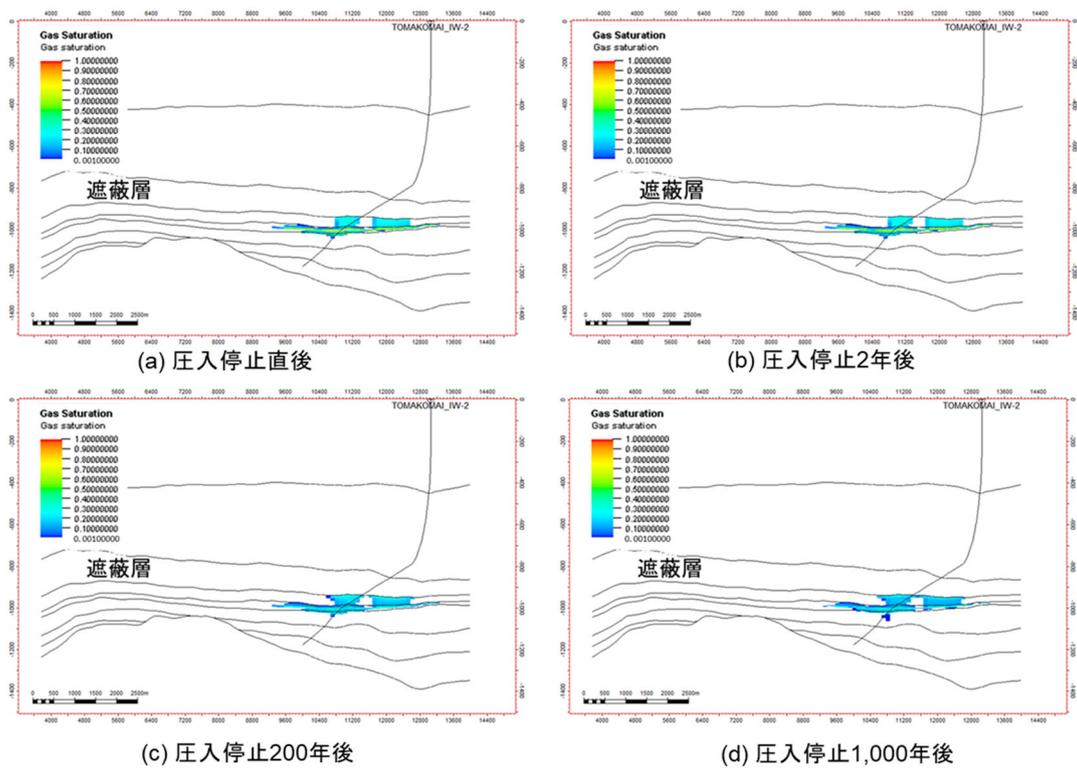


図 5.3-42 フェーズ3のP50相当具現像(具現像30)のCO₂飽和率分布 坑井断面図

(6) フェーズ3のP10相当(具現像23)のCO₂飽和率分布

平面図では、圧入停止200年後からCO₂が特に東側へ移動していく様子が見られた。その後CO₂の塩水への溶解が進み、CO₂の移動は抑制されている様子が確認された。

坑井断面図では、浮力によってCO₂が上昇する様子が見られ、圧入停止1,000年後に、坑井周辺の貯留層と接する遮蔽層部分にCO₂が確認された。

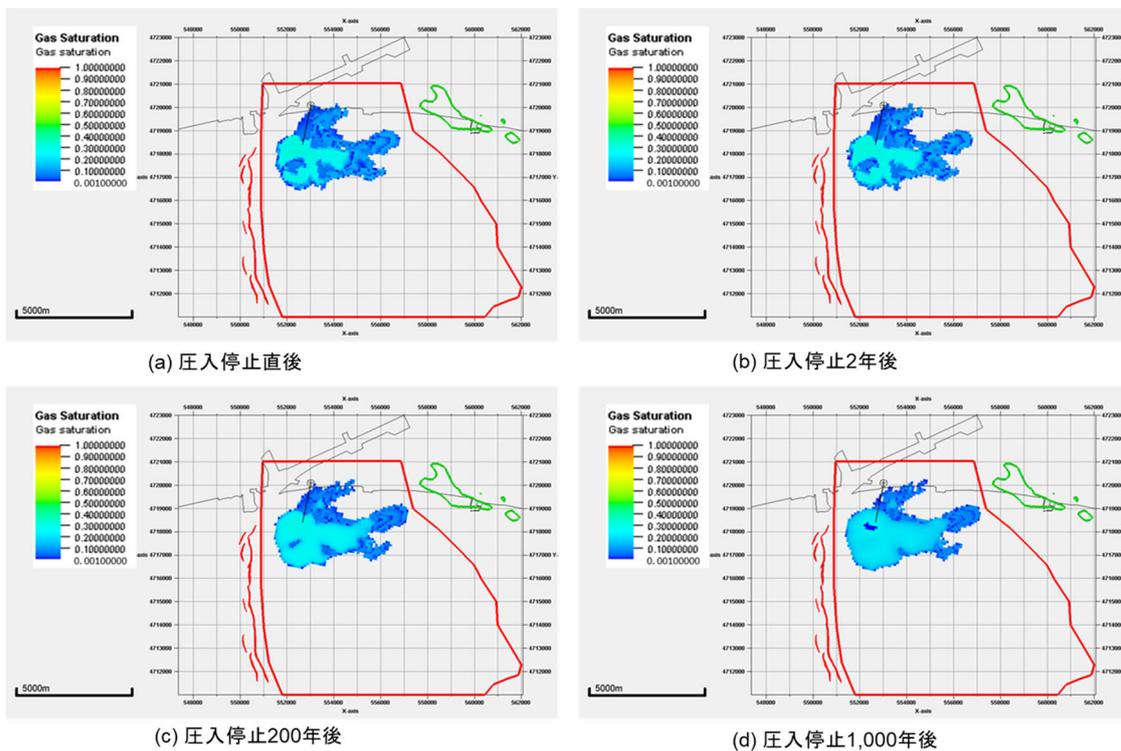


図 5.3-43 フェーズ3のP10相当具現像(具現像23)のCO₂飽和率分布 平面図

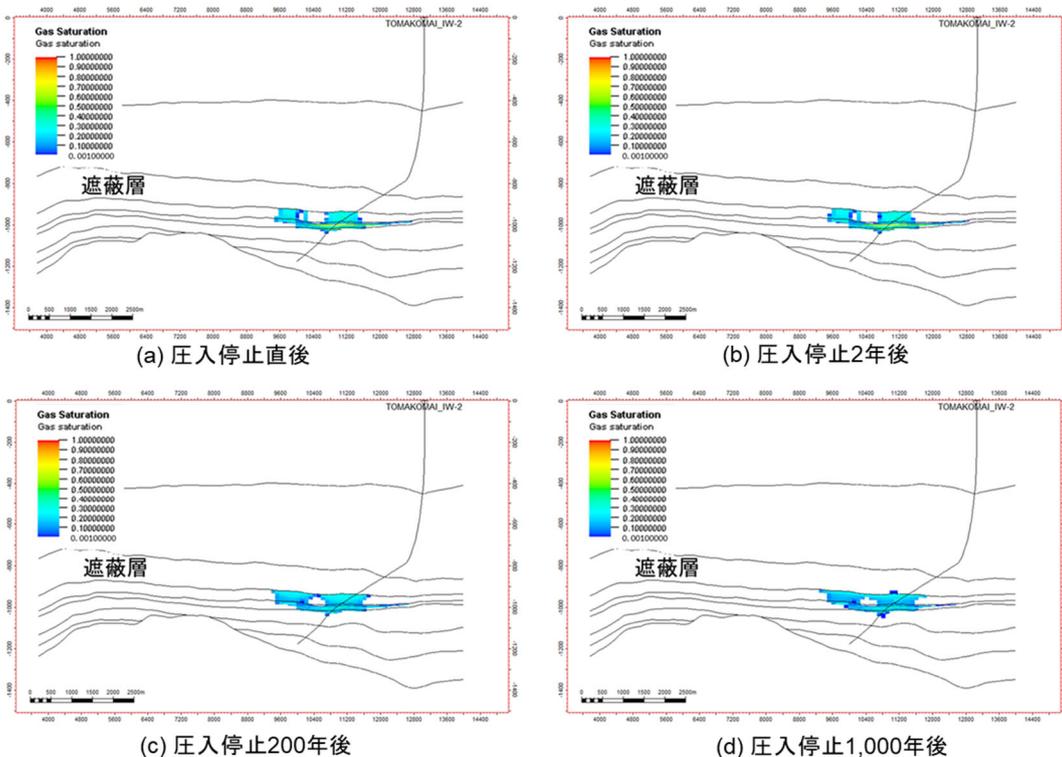


図 5.3-44 フェーズ3のP10相当具現像(具現像23)のCO₂飽和率分布 坑井断面図

5.3.7 溶存CO₂量分布

フェーズ2およびフェーズ3について、P90、P50、P10相当の具現像における圧入停止前と圧入停止2年後、圧入停止200年後および圧入停止1,000年後での溶存CO₂量分布の平面図と断面図を図5.3-45から図5.3-56に示す。

(1) フェーズ2のP90相当(具現像6)の溶存CO₂量分布

平面図では、CO₂飽和度分布で見られた圧入停止2年後でのCO₂の東側への移動により、溶存CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られ、圧入停止1,000年後には東側および西側へ溶存CO₂が拡大した。

坑井断面図では、溶存CO₂はCO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。遮蔽層には溶存CO₂が存在しているが、CO₂飽和度分布ではCO₂が確認されておらず、浸入したCO₂は全て溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂と塩水の比重差により、溶存CO₂が貯留層下部に進んでいることがわかる。

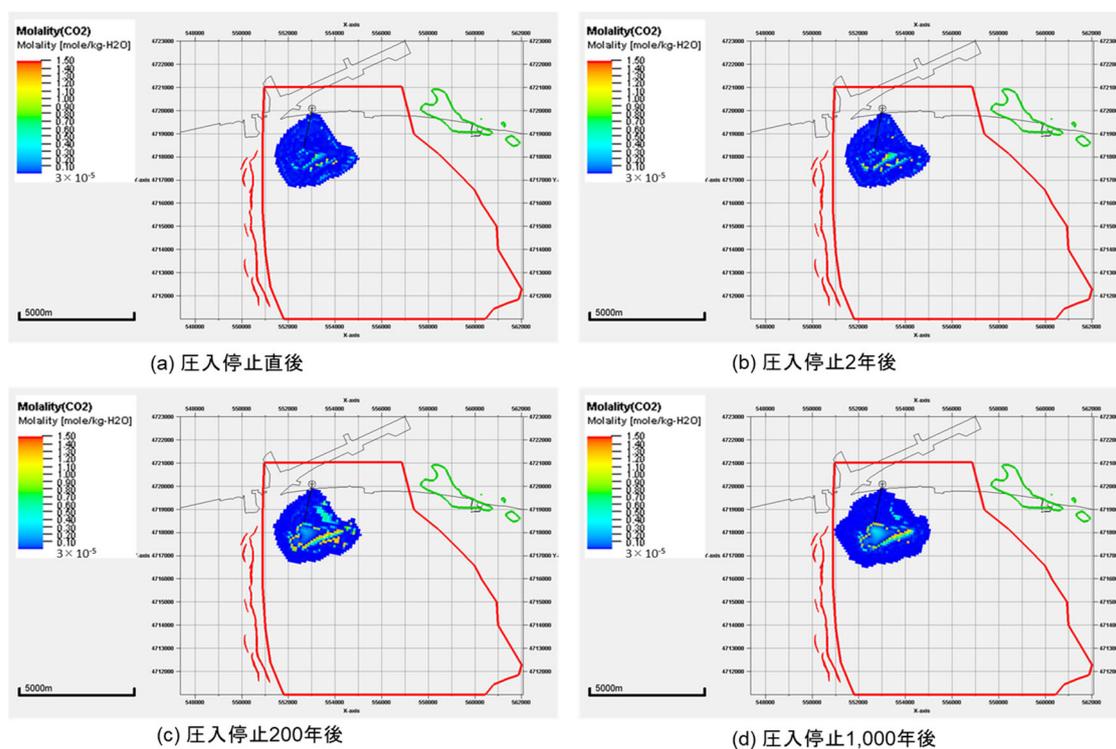


図 5.3-45 フェーズ2のP90相当具現像(具現像6)の溶存CO₂量分布 平面図

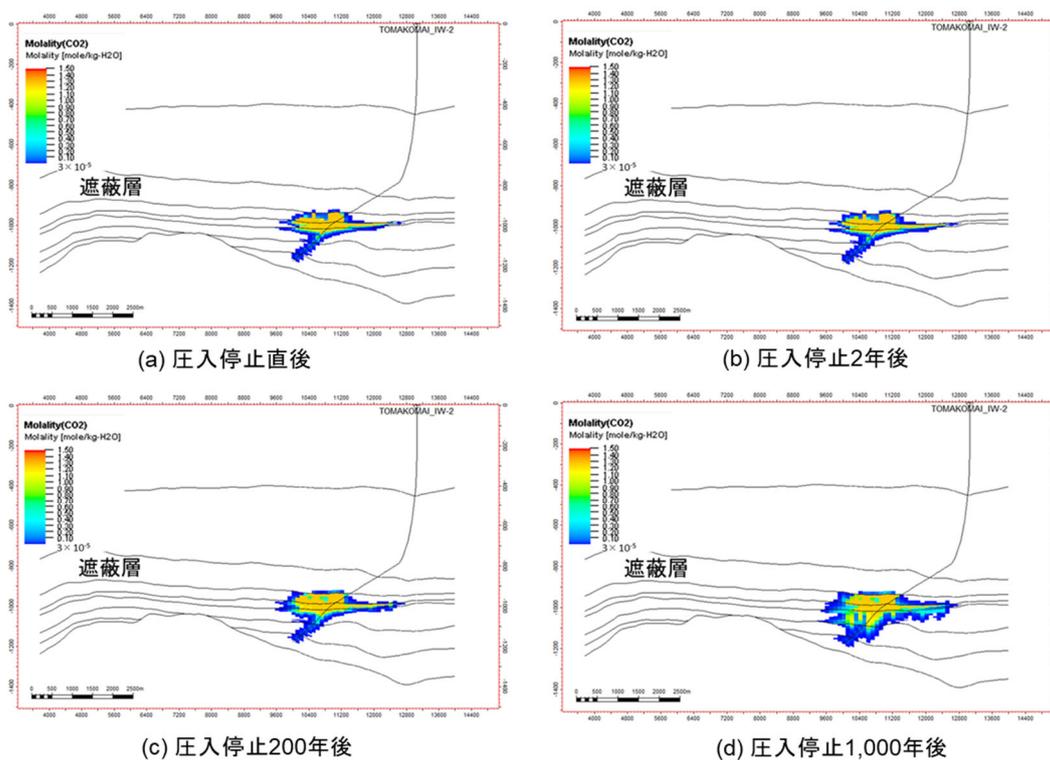


図 5.3-46 フェーズ 2 の P90 相当具現像 (具現像 6) の溶存 CO₂ 量分布 坑井断面図

(2) フェーズ 2 の P50 相当 (具現像 16) の溶存 CO₂ 量分布

平面図では、CO₂飽和度分布で見られた圧入停止 2 年後での CO₂の東側への移動により、溶存 CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られ、圧入停止 1,000 年後には東側および西側へ溶存 CO₂が拡大した。

坑井断面図では、溶存 CO₂は CO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。遮蔽層には溶存 CO₂が存在しているが、CO₂飽和度分布では CO₂が確認されておらず、浸入した CO₂は全て溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存 CO₂と塩水の比重差により、溶存 CO₂が貯留層下部に進んでいることがわかる。

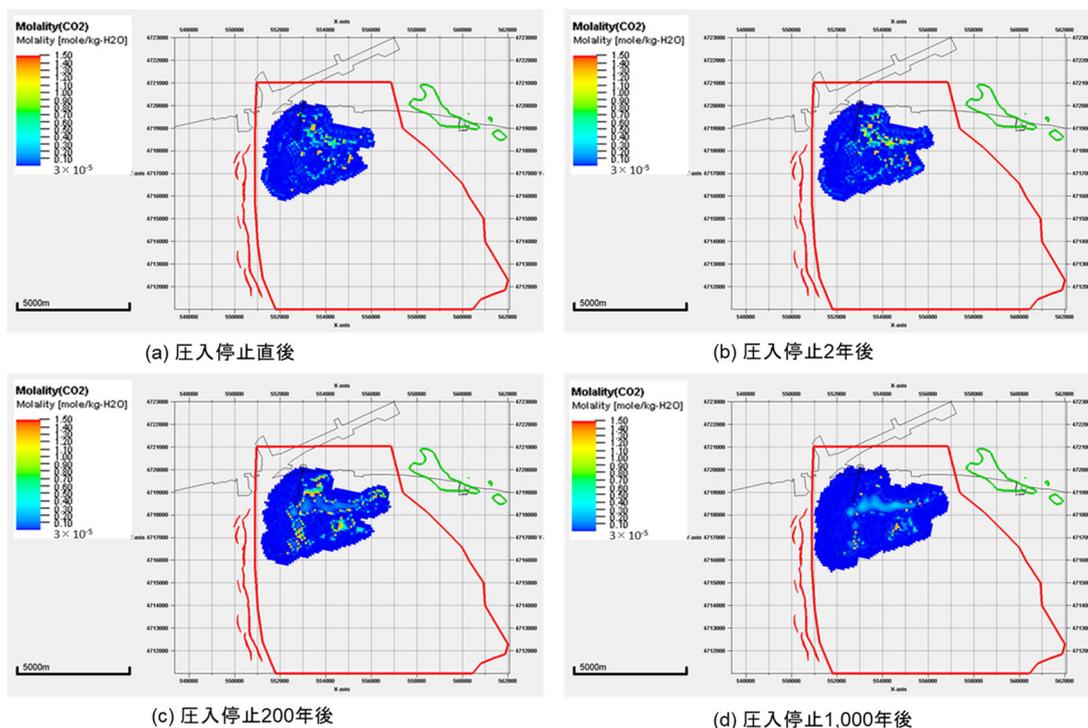


図 5.3-47 フェーズ2のP50相当具現像(具現像16)の溶存CO₂量分布 平面図

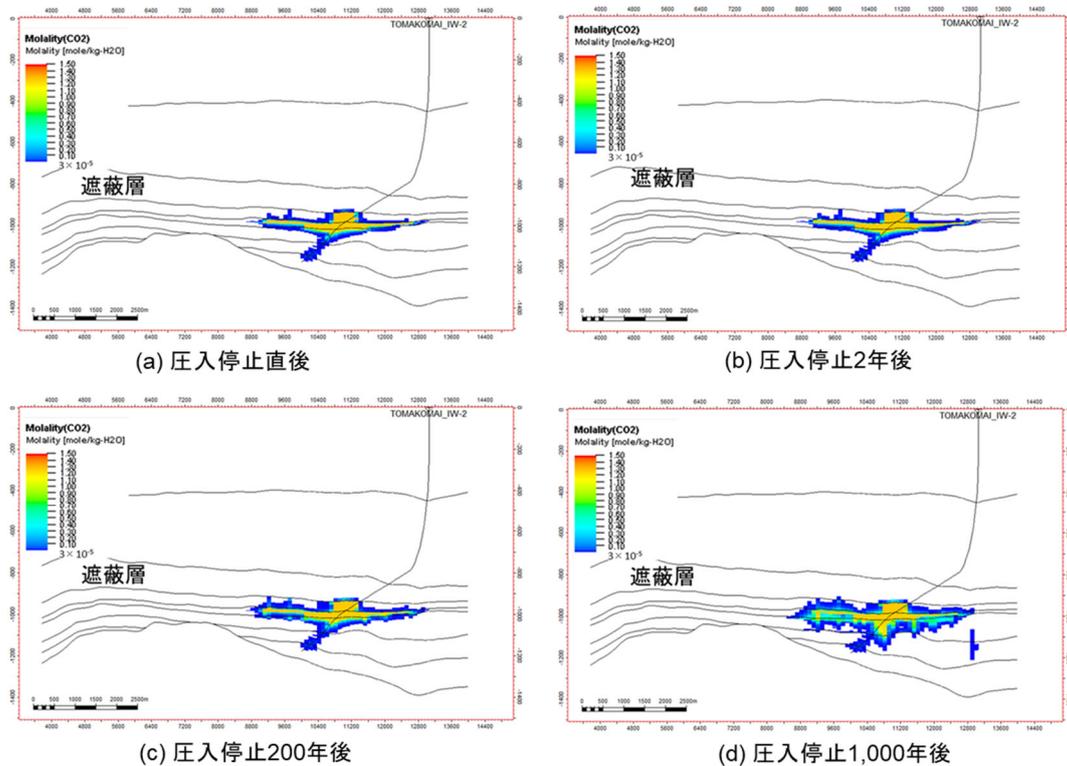


図 5.3-48 フェーズ2のP50相当具現像(具現像16)の溶存CO₂量分布 坑井断面図

(3) フェーズ2のP10相当(具現像9)の溶存CO₂量分布

平面図では、CO₂飽和度分布で見られた圧入停止200年後でのCO₂の東側への移動により、溶存CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られ、圧入停止1,000年後には全体的に溶存CO₂が拡大した。

坑井断面図では、溶存CO₂はCO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。遮蔽層には溶存CO₂が存在しているが、CO₂飽和度分布ではCO₂が確認されておらず、浸入したCO₂は全て溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂と塩水の比重差により、溶存CO₂が貯留層下部に進んでいることがわかる。

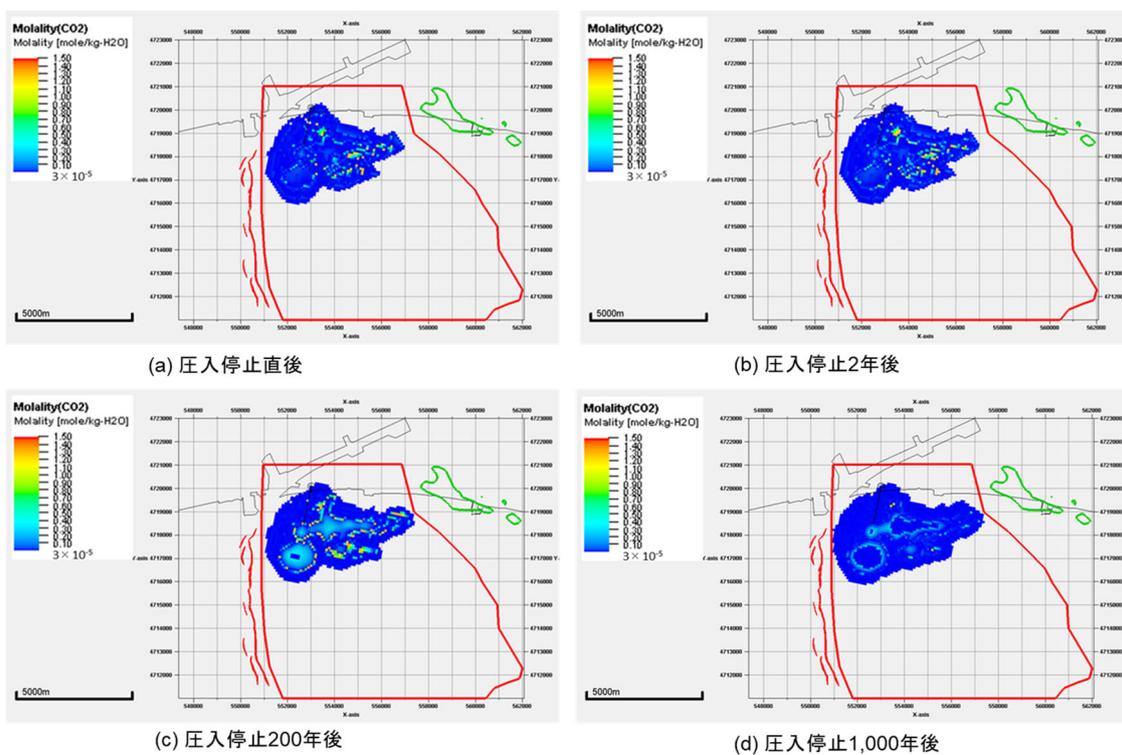


図 5.3-49 フェーズ2のP10相当具現像(具現像9)の溶存CO₂量分布 平面図

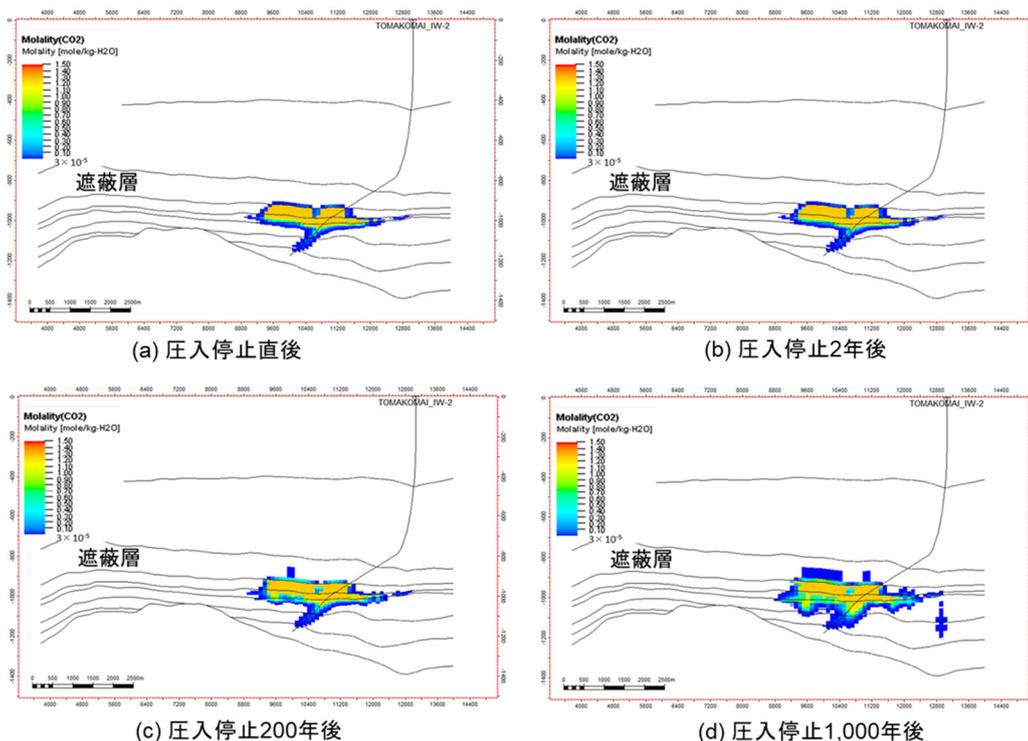


図 5.3-50 フェーズ 2 の P10 相当具現像 (具現像 9) の溶存 CO₂ 量分布 坑井断面図

(4) フェーズ 3 の P90 相当 (具現像 3) の溶存 CO₂ 量分布

平面図では、CO₂飽和度分布で見られた圧入停止 2 年後での CO₂の東側への移動により、溶存 CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られ、圧入停止 200 年後以降は、特に東側へ大きく拡大した。

坑井断面図では、溶存 CO₂は CO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。遮蔽層には溶存 CO₂が存在しているが、CO₂飽和度分布では CO₂が確認されておらず、浸入した CO₂は全て溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存 CO₂と塩水の比重差により、溶存 CO₂が貯留層下部に進んでいることがわかる。

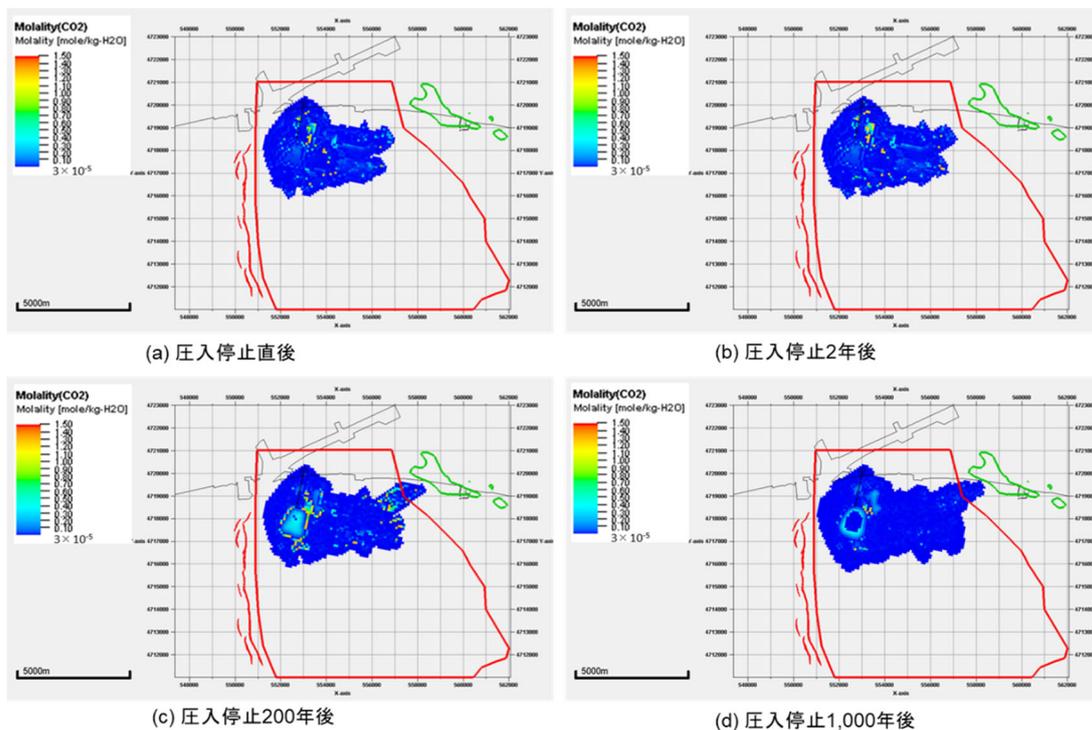


図 5.3-51 フェーズ3のP90相当具現像(具現像3)の溶存CO₂量分布 平面図

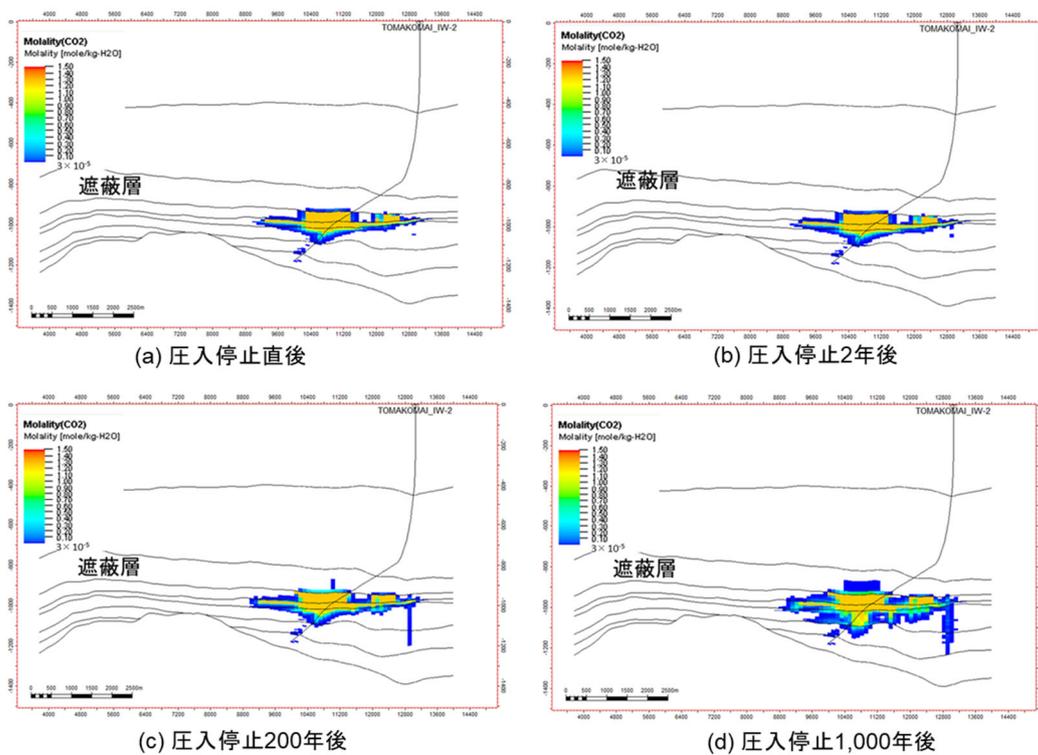


図 5.3-52 フェーズ3のP90相当具現像(具現像3)の溶存CO₂量分布 坑井断面図

(5) フェーズ3のP50相当(具現像30)の溶存CO₂量分布

平面図では、CO₂飽和度分布で見られた圧入停止200年後でのCO₂の東側への移動により、溶存CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られ、圧入停止200年後以降は、全体的に溶存CO₂が拡大した。

坑井断面図では、溶存CO₂はCO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。遮蔽層には溶存CO₂が存在しているが、CO₂飽和度分布ではCO₂が確認されておらず、浸入したCO₂は全て溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂と塩水の比重差により、溶存CO₂が貯留層下部に進んでいることがわかる。

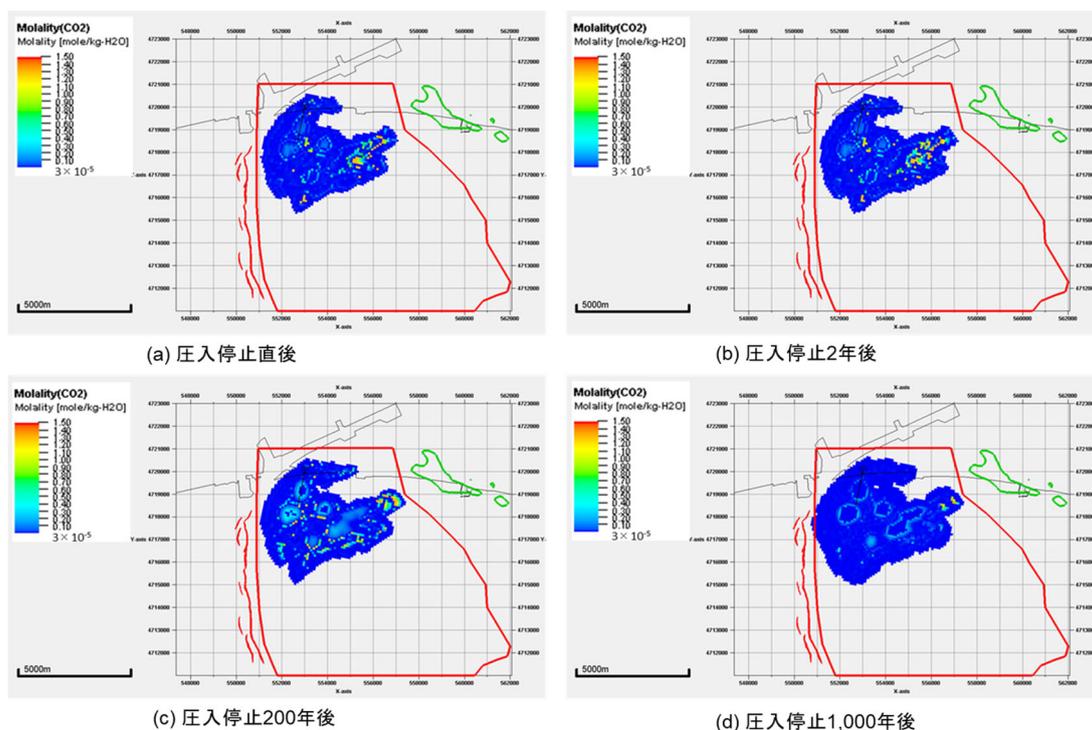


図 5.3-53 フェーズ3のP50相当具現像(具現像30)の溶存CO₂量分布 平面図

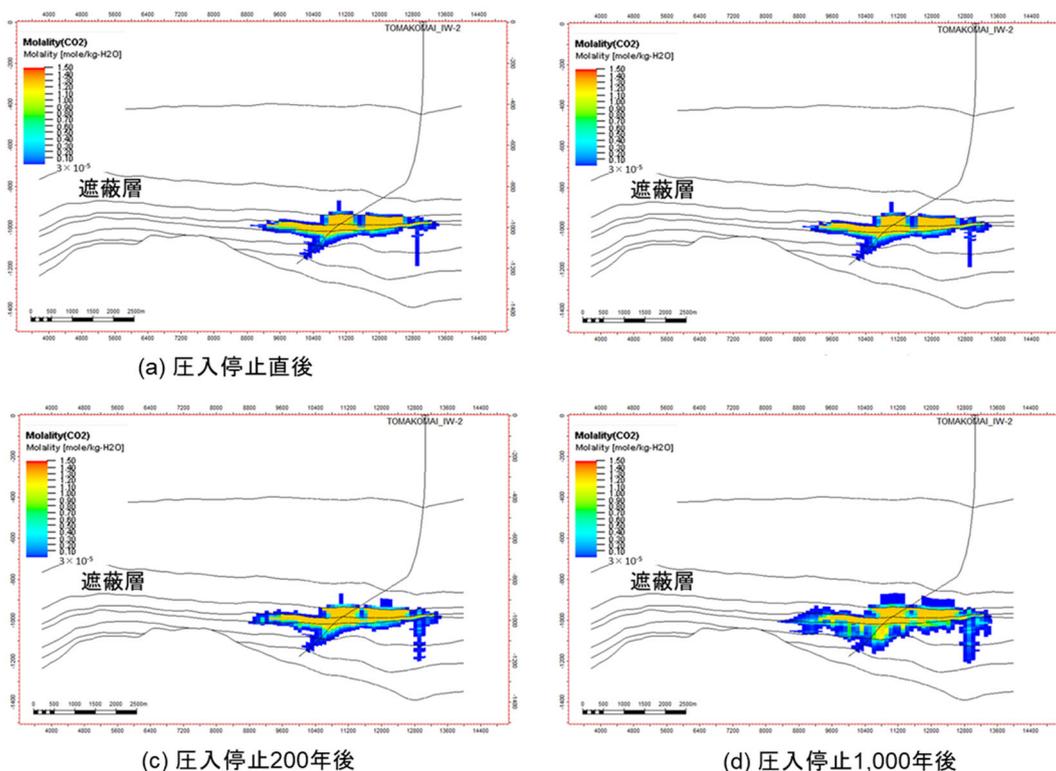


図 5.3-54 フェーズ3のP50相当具現像(具現像30)の溶存CO₂量分布 坑井断面図

(6) フェーズ3のP10相当(具現像23)の溶存CO₂量分布

平面図では、CO₂飽和度分布で見られた圧入停止200年後でのCO₂の東側への移動により、溶存CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られ、圧入停止200年後以降は、特に北側および西側へ溶存CO₂が拡大した。

坑井断面図では、溶存CO₂はCO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。圧入停止1,000年後には、遮蔽層の下部に超臨界CO₂および溶存CO₂が存在しているが、遮蔽層全体にわたって分布する様子は見られていない。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂と塩水の比重差により、溶存CO₂が貯留層下部に進んでいることがわかる。

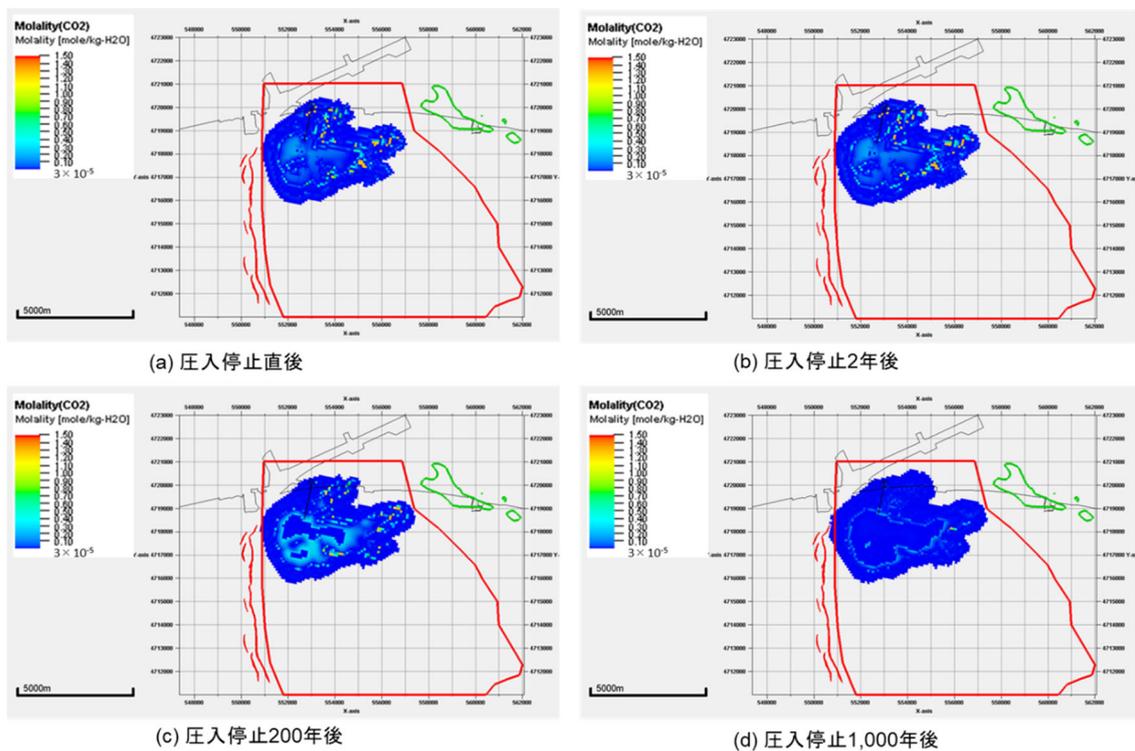


図 5.3-55 フェーズ3のP10相当具現像(具現像23)の溶存CO₂量分布 平面図

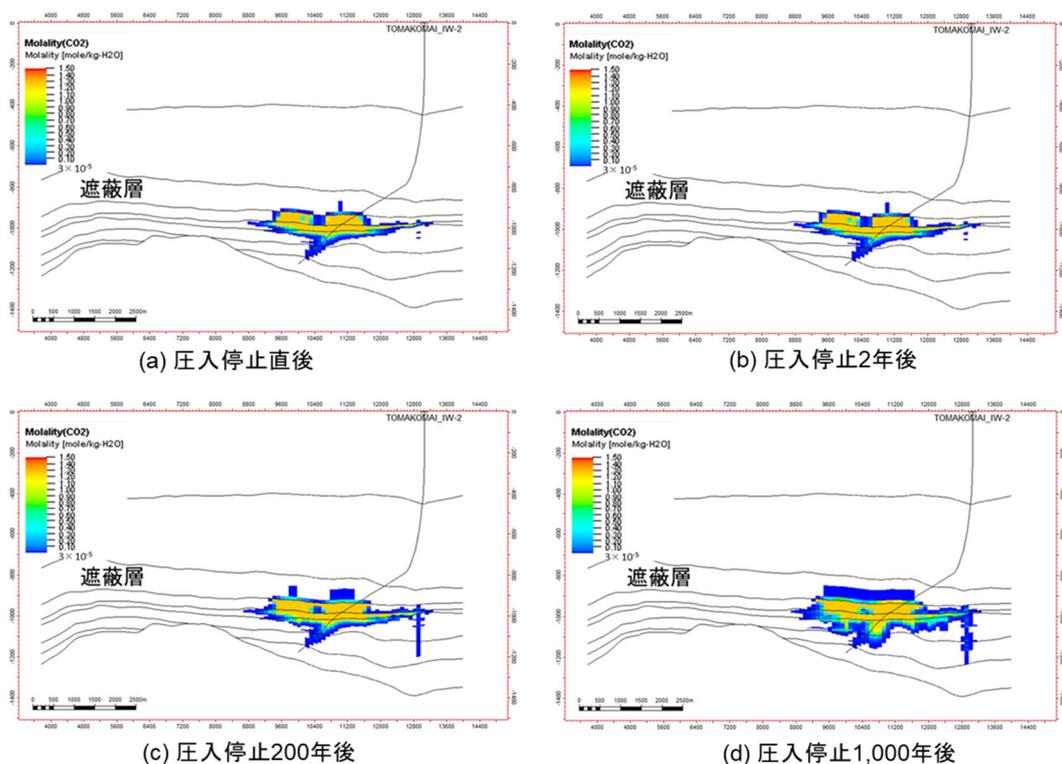


図 5.3-56 フェーズ3のP10相当具現像(具現像23)の溶存CO₂量分布 坑井断面図

5.3.8 750 mTVDSS境界の制約条件に関する考察

前述のとおり、750 mTVDSS境界へ溶存CO₂が到達することが原因で圧入可能量が制限された具現像は、フェーズ2において7個、フェーズ3において22個あった。つまりフェーズ3まで制約条件を緩和すると、7個の具現像が750 mTVDSS境界を越えて溶存CO₂が分布する。

圧入可能量算定の制約条件として設定すべき項目を再検討するため、750 mTVDSS境界の外側ではCO₂が何相として存在するのか、相変化によるCO₂の物性変化が貯留安定性におよぼす影響について検討した。

(1) 750 mTVDSS境界の外側における液相CO₂および気相CO₂の分布

図5.3-57は純度100%のCO₂の相図である。CO₂は温度31℃以上かつ圧力7.3 MPaG以上において超臨界状態となる。また臨界点を下回る領域では、蒸気圧曲線上で液相と気相の2相が同時に存在し、図でオレンジ色に示す蒸気圧曲線より下の領域は気相として、図で青色に示す蒸気圧曲線より上の領域では液相として存在する。

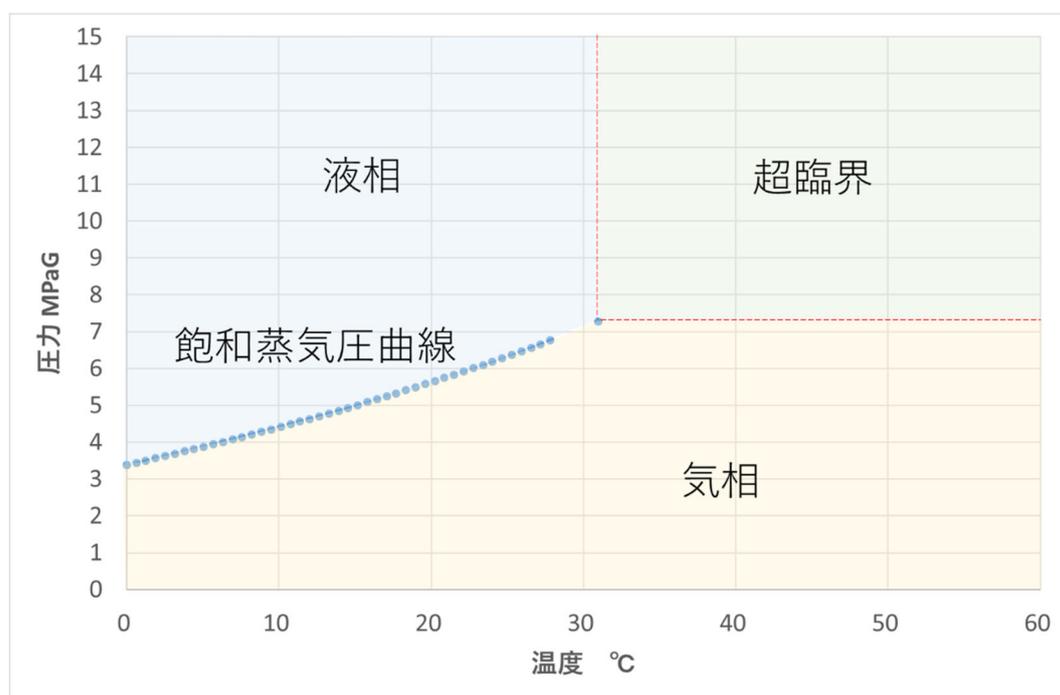


図 5.3-57 CO₂の相図

圧入した超臨界CO₂は圧力差および比重差により移動し、塩水のほうが比重が大きいため、坑井遠方では特に上方へ移動する。主要圧入領域である萌別層砂岩層は東に向かって

浅くなっているが、一般的に地下深度が浅くなるほど貯留層温度は低下し、また水頭圧の影響で地下深度が浅くなるほど貯留層圧力も低下する。結果として圧入したCO₂は移動に伴い、図 5.3-57 の相図において右上から左下に向かって、地層圧力・温度ともに低下する方向へ動くことが想定される。

本項では溶存CO₂が特に東側へ顕著に分布した具現像 26 を例に用いて、累計圧入量 1,600 万 t-CO₂ 到達後に圧入を停止し、1,000 年後の地層圧力・温度およびCO₂飽和率分布を確認した。

図 5.3-58 および図 5.3-59 で青色に示すのは、k=8 について、それぞれCO₂が液相で存在する領域、気相で存在する領域である。750 mTVDSS 境界の外側は、CO₂が液相として存在し、さらに東側ではCO₂が気相として存在する地層圧力・温度条件となっていることが分かる。

また、図 5.3-60 および図 5.3-61 は、k=8 について、それぞれCO₂が液相として存在する領域、気相として存在する領域のCO₂飽和率分布であり、液相CO₂と気相CO₂の両方が分布していることが分かった。なお、CO₂が液相として存在する領域において、CO₂飽和率分布が0.01 以上であったのはk=6,7,8 であり、ここでは最も広範囲に液相CO₂が分布していたk=8 を図示した。

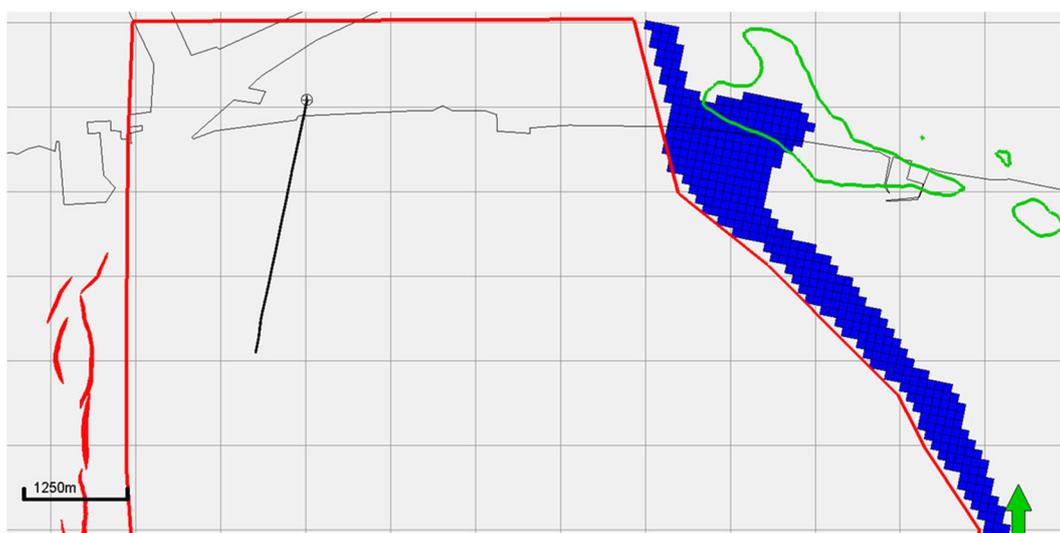


図 5.3-58 CO₂が液相として存在する領域（具現像 26 における累計圧入量 1,600 万 t-CO₂ 圧入後の圧入停止 1,000 年後、k=8）

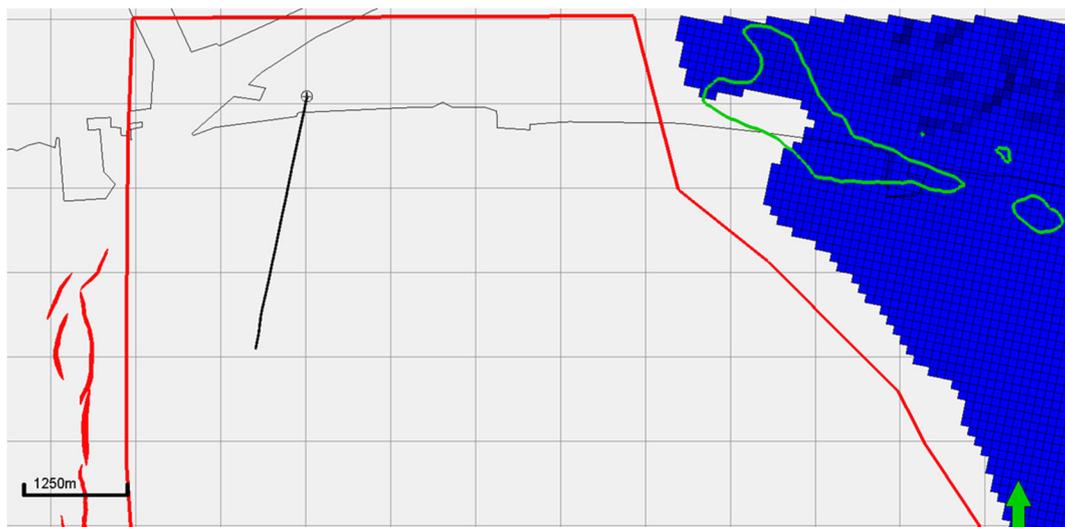


図 5.3-59 CO₂が気相として存在する領域(具現像 26 における累計圧入量 1,600 万 t-CO₂ 圧入後の圧入停止 1,000 年後、k=8)



図 5.3-60 液相 CO₂飽和率分布(具現像 26 における累計圧入量 1,600 万 t-CO₂ 圧入後の圧入停止 1,000 年後、下限値:0.01 上限値:0.1、k=8)



図 5.3-61 気相 CO₂ 飽和率分布 (具現像 26 における累計圧入量 1,600 万 t-CO₂ 圧入後の圧入停止 1,000 年後、下限値:0.01 上限値:0.1、k=8)

ここで、CO₂ 飽和率の下限値を臨界 CO₂ 飽和率である 0.05 として、具現像 26 において 1,600 万 t-CO₂ 圧入到達後、圧入停止 1,000 年後の CO₂ 飽和率分布 (k=8) を図 5.3-62 に示す。750 mTVDSS 境界を越えて、液相条件および気相条件で存在する領域に臨界 CO₂ 飽和率を超える量の CO₂ が分布しており、流動可能なガスが存在することが分かる。

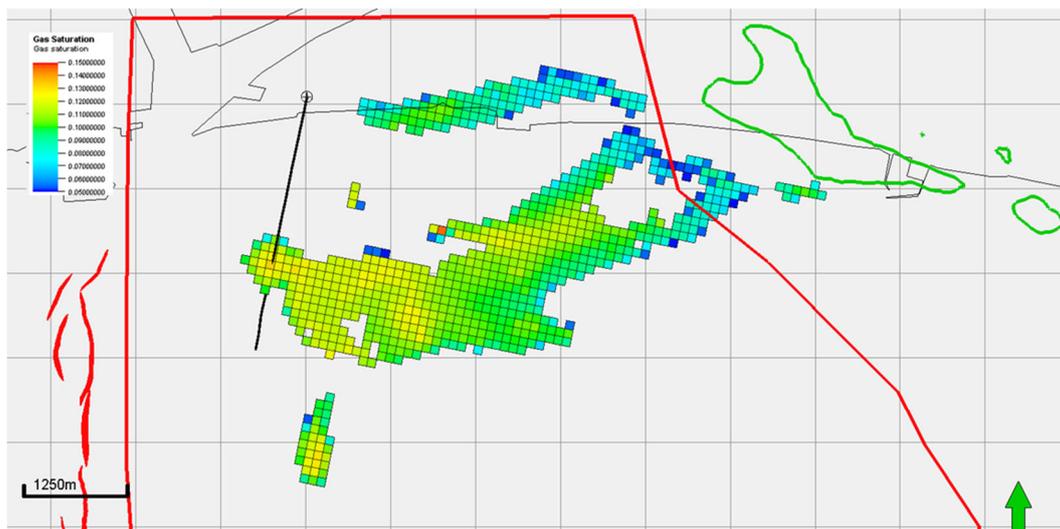


図 5.3-62 CO₂ 飽和率分布 (具現像 26 における累計圧入量 1,600 万 t-CO₂ 圧入後の圧入停止 1,000 年後、下限値:0.05 上限値:0.15、k=8)

具現像 26 を用いて 1,600 万 t-CO₂ 圧入を行い、圧入停止後 1,000 年後の CO₂ 飽和率分

布上において、図 5.3-63(a)に示すように、A~Eの5つのセルを例にとり、各点の地層圧力・温度条件を、図 5.3-63(b)のCO₂相図上に示した。750 mTVDSS境界のすぐ東側に分布しているA、B、Cの3点は液相であり、より東側へ分布しているD、Eの2点は気相である。

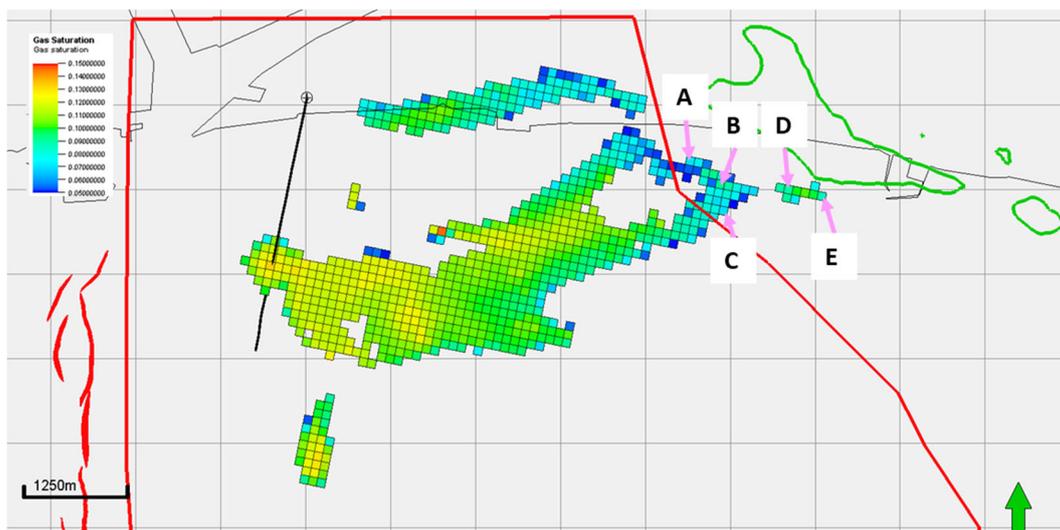


図 5.3-63(a) CO₂飽和率分布(具現像 26 における累計圧入量 1,600 万 t-CO₂ 圧入後の圧入停止 1,000 年後、下限値:0.05 上限値:0.15、k=8)

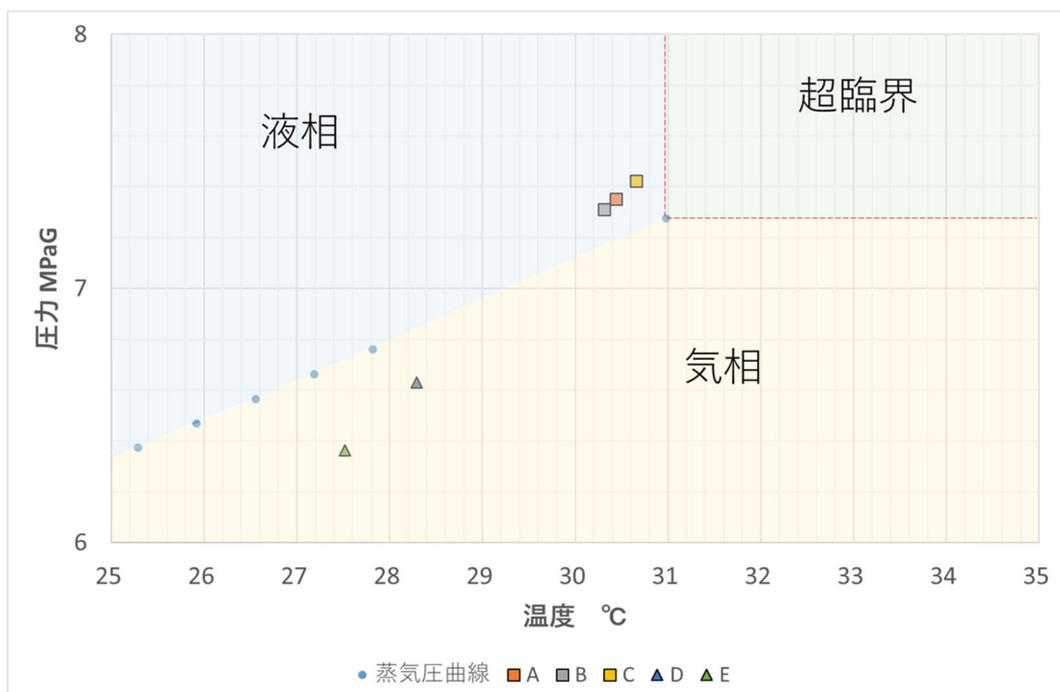


図 5.3-63(b) CO₂相図と数値解結果との対応

(2) CO₂の相変化が貯留安定性に与える影響

図 5.3-64 は純度 100%の CO₂の比重および粘度である。なおこれらは、流体の PVT シミュレーションソフトである「PVTSim (calsep 社製)」を使用し、EOS (Gerg-2008) を用いて推定した値である。

図 5.3-64(a)および(b)にそれぞれ示すように、飽和蒸気圧曲線の延長線上を境に上側の領域の方が、下の領域よりも比重および粘度は大きい。ほとんどの場合、超臨界 CO₂ より液相 CO₂の方が、また気相 CO₂よりも超臨界 CO₂の方が、比重および粘度が大きく塩水との比重差は小さい。

CO₂を深部塩水層へ圧入する場合、CO₂は圧力差および比重差により移動し、塩水の方が比重が大きいため、坑井遠方では特に上方へ移動する。CO₂の単位時間当たりの移動量は、比重差に比例し粘度に反比例するため、より比重差が小さく粘度が大きい方が CO₂の移動が抑えられる。つまり、液相、超臨界、気相の順で、CO₂が広がりやすく、貯留安定性の観点で好ましいと考えられる。

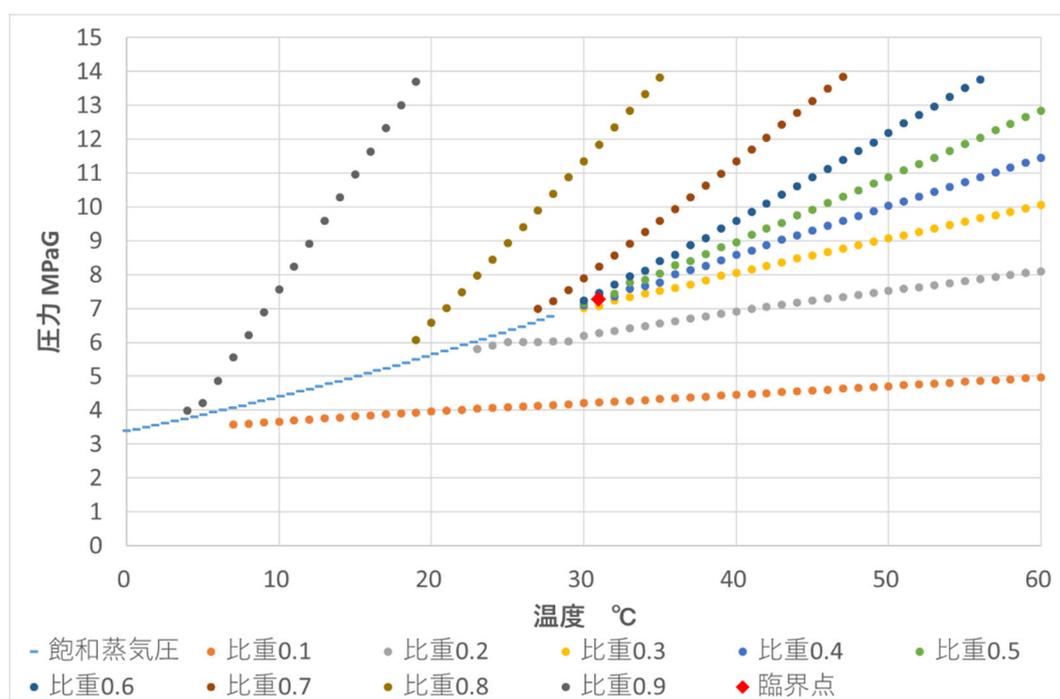


図 5.3-64(a) CO₂の比重

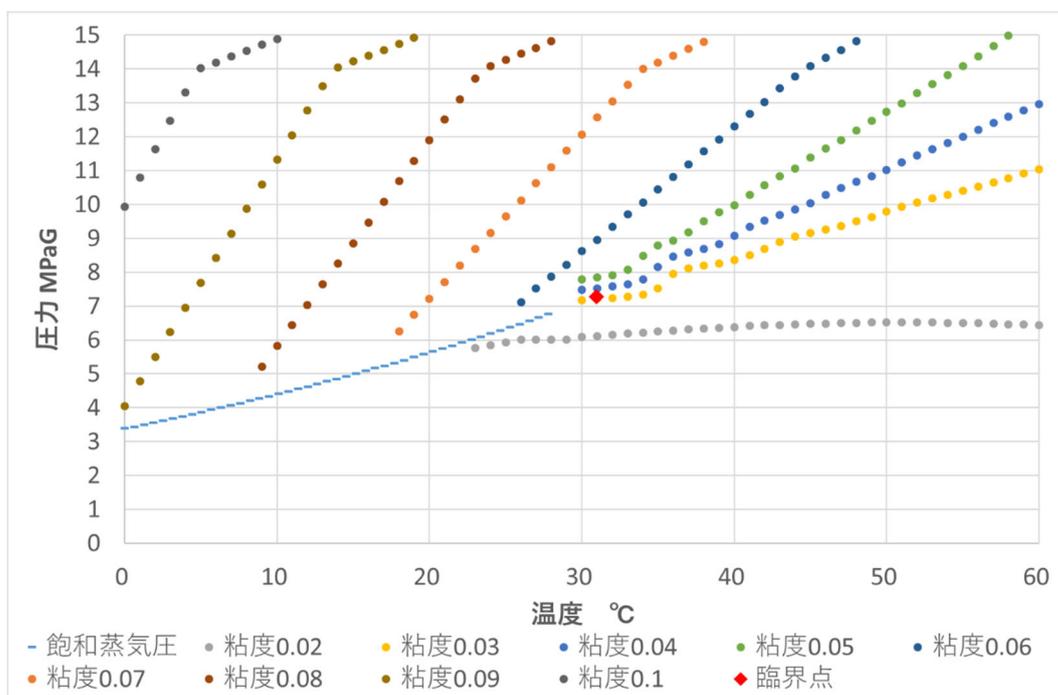


図 5.3-64(b) CO₂の粘度 mPa・s 単位

750 mTVDSS 境界を越えた東側に CO₂ が到達した場合、その CO₂ のうち一部は超臨界状態から液相へ変化すると想定される。CO₂ の比重および粘度は大きくなり、移動速度は落ちると考えられるため、貯留安定性の観点では好ましい相変化である。しかし、さらに東側へ CO₂ が移動すると、液相から気相へと相変化すると想定され、CO₂ の比重および粘度は小さくなり、超臨界状態よりも移動しやすい状況になると考えられる。

貯留された CO₂ が液相状態であることは、超臨界状態よりも移動速度が低減するため貯留安定性の観点ではむしろ好ましい。ただし、液相領域を超えて気相へ相変化すると、超臨界状態よりも貯留安定性が悪化すると想定される。750 mTVDSS 境界よりも東側には、萌別層砂岩層上部の地層傾斜角度が 10° 程度である領域が存在しており、気相 CO₂ が到達した場合、さらに東側へ CO₂ が進展しやすいと想定されるため注意が必要である。

5.3.9 制約条件の違いによる圧入可能量の比較のまとめ

貯留可能領域の境界条件に溶存 CO₂ が到達後もさらに圧入を継続した場合を想定し、条件を 1 つ撤廃した段階をフェーズ 2、2 つ撤廃した段階をフェーズ 3 として、圧入可能量評価を行った。フェーズ 2、3 の P90 相当、P50 相当、P10 相当の各具現象における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移と圧力変化、CO₂ 飽和度、溶存 CO₂ 量の各分布から長期的な CO₂ 流動挙動を数値シミュレーションにより推定した。

条件緩和によって最も圧入可能量の増大が見込める制約条件の組合せは、フェーズ2では北部海岸線の条件であり、フェーズ3では北部海岸線と断層周辺境界の条件であった。

岩相分布の不均質性を考慮すると、圧入量の増加に伴い、溶存CO₂分布は北部海岸線の次に西側の断層付近へ到達した後、西側への進展は抑えられ、750 mTVDS境界や遮蔽層層厚20 m以下の境界が存在する東側に向かって局所的に広がる傾向が高い。

超臨界CO₂が移動した先からCO₂の溶解が生じるため、圧入可能量評価の確認事項である溶存CO₂分布の形状は、超臨界CO₂の流動に影響を受けている。超臨界CO₂は、地層傾斜に加えて浸透率分布の影響を受けるため、圧入可能量評価は具現像ごとの振れ幅が大きい。浸透率分布を決定づける岩相分布は堆積相解析に基づいており、東側はデルタスロープのチャンネルゾーンに高浸透率岩相が分布する。フェーズ3程度の圧入量規模になると、特に東側へのCO₂の進展が顕著になるため、山側のチャンネル供給源の位置が東西方向にずれるとチャンネルゾーンの位置が変わり圧入可能量に影響を及ぼす可能性がある。広域の坑井データおよび2Dデータが取得できれば、大局的な情報を基に堆積相解析の更新を行うことで、岩相分布の不確実性を低減し、圧入可能量評価の精度向上に繋がると考えられる。

また、CO₂が制約条件である750 mTVDS境界を越えて東側に進展すると、超臨界から液相、気相へ相変化することが分かった。超臨界よりも液相の方がCO₂の移動速度が抑えられるが、さらに東へ移動すると気相へ変化する。気相は超臨界よりもCO₂の移動速度が大きくなるため、750 mTVDS境界の制約条件を緩和する場合、CO₂が液相か気相のどちらになるかを考慮する必要がある。

5.4 まとめ

海洋汚染防止法に基づく監視計画に沿ってCO₂の圧力や広がりの変化が事前の予測・評価の範囲にあることを確認するため、圧力データの実績と予測の比較やCO₂圧入および圧入停止後の貯留層圧力推移についてのデータ解析を更新したが、特に貯留層の異常を示す事象は生じておらず、シミュレーションの予測の範囲内であると考え、貯留層モデル修正の必要はないと判断した。

総合検討として、この貯留層モデルを用いて、潜在的なリスクを考慮して設定した貯留範囲を規定する制約条件を緩和した場合の圧入可能量の増大およびリスクについて評価を行った。制約条件としては北部海岸線へCO₂が到達しないという条件が30具現像モデルのうち28個と最も多く、こちらを緩和すると約500万t-CO₂の圧入可能量の増大が見込

めると予測する。また、地層傾斜の影響を評価するため、圧入井に沿って評価した浸透率が水平方向に均一になるような疑似モデル(均質モデル)を考案し、CO₂の挙動予測を行った。その結果、不均質性を導入しているモデルのほうがCO₂の広がりを抑制し、圧入可能量が大きくなることが判明した。

なお、今後の課題については以下のとおりである。

- ・圧入井の坑底圧力の予実績比較やフォールオフ解析では予測モデルおよび実測値のどちらも誤差を含むため、現状のデータからの両者の差異のさらなる検討はミスリードを引き起こす可能性がある。予測ではPTセンサー深度での測定値を仕上げ区間上端深度へ換算した推定値を用いており、PTセンサー設置深度から仕上げ区間上端深度までの圧力勾配を連続測定することで精度向上を図ることができるが、IW-2のような高傾斜井での圧力勾配測定は測定器の抑留等のリスクが非常に高く、現在のところ実施が困難である。
- ・CO₂の挙動予測は浸透率分布の影響を受けるため、圧入可能量は具現像ごとの振れ幅が大きい。特に、東側へCO₂が広がりにくい具現像は、圧入可能量の増大が大きいことから、東側の浸透率分布の精度向上を図ることが重要であり、そのためには坑井掘削によって得られるデータ等の取得が必要である。
- ・貯留層モデルの東側はデルタスロープのチャネルゾーンに高浸透率岩相が分布しており、堆積相解析で想定している山側のチャネル供給源の位置が東西にずれると、チャネルゾーンの位置が変わり、圧入可能量に影響を及ぼす可能性がある。坑井掘削によって得られるデータおよび広域の2D・3Dの弾性波探査データ等が取得できれば、大局的な情報を基に堆積相解析の更新を行うことで、岩相分布の不確実性を低減し、圧入可能量評価の精度向上に繋がると考える。

【参考文献】

- 1) Corey, A.T., "The Interrelation between Gas and Oil Relative Permeabilities" Producers Monthly November, p.38-41 (1954)
- 2) van Genuchten, M.TH., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils" Soil Science Society of America. Journal Vol 44 p.892-898 (1980)
- 3) R. Span and W. Wagner, "A New Equation of State for Carbon Dioxide covering the

Fluid Region from the Triple Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa” J. Phys. Chem. Ref. Data 25, p.1509-1596 (1996)

- 4) China Peixue Jiang, Xiaolu Lia, Ruina Xua, Yongsheng Wang, Maoshan Chen, Heming Wang, Binglu Ruan, “Thermal modeling of CO₂ in the injection well and reservoir at the Ordos CCS demonstration project, China” International Journal of Greenhouse Gas Control (2014)