

目次

第5章 貯留層等総合評価	5-1
5.1 IW-2におけるフォールオフテスト解析	5-1
5.1.1 解析方法	5-2
5.1.2 解析結果	5-8
5.1.3 フォールオフテスト解析のまとめ	5-14
5.2 IW-2 および OB-2 の圧力予実績	5-15
5.2.1 2019年度予実績確認モデルのグリッドシステム	5-16
5.2.2 予実績比較結果	5-18
5.2.3 IW-2 および OB-2 の圧力予実績に関するまとめ	5-22
5.3 ヒストリーマッチ	5-23
5.3.1 スキンファクターの設定	5-23
5.3.2 ヒストリーマッチに関するまとめ	5-30
5.4 IW-2 長期挙動予測シミュレーション	5-31
5.4.1 使用した貯留層モデル	5-31
5.4.2 長期挙動予測シミュレーションのパラメータの設定	5-35
5.4.3 長期挙動予測シミュレーション結果	5-35
5.4.4 長期挙動予測シミュレーションのまとめ	5-105
5.4.5 IW-2 長期挙動予測シミュレーションに関するまとめ	5-106
5.5 萌別層流動-地化学連成シミュレーションモデルの作成	5-106
5.5.1 地層水 地層鉱物の化学種組成の推定	5-106
5.5.2 反応速度パラメータと反応表面積の設定	5-111
5.5.3 萌別層流動-地化学連成シミュレーションモデルの作成まとめ	5-115
5.6 萌別層 3D 流動-地化学連成シミュレーションの実施	5-117
5.6.1 GEM/TOUGH2 による 3D 流動シミュレーション結果の比較	5-117
5.6.2 萌別層 3D 流動-地化学連成シミュレーションの実施	5-119
5.6.3 萌別層 3D 流動-地化学連成シミュレーションのまとめ	5-144

第5章 貯留層等総合評価

2018年度業務において修正した萌別層の貯留層モデルを元に、圧入停止時の圧力解析（フォールオフテスト）や圧入実績に基づいて貯留層パラメータを修正することにより、貯留層モデルの更新を行った。

5.1 IW-2におけるフォールオフテスト解析

圧入中に上昇した貯留層圧力は圧入を停止すると低下する。低下状況を解析することにより坑井や貯留層の状況にある程度把握することが可能であり、この解析はフォールオフテスト解析（以下、「FOT解析」と称する。）と呼ばれている。

図5.1-1および表5.1-1は2016年4月6日の圧入開始以降の主な圧入停止のタイミングと、FOT解析を試みたタイミングを示している。圧入井では坑内に設置したPTセンサーにより、圧力（橙色線）・温度データを取得している。センサーより深部に位置する仕上げ区間上端の圧力（灰色線）は取得したデータからセンサー位置でのCO₂密度を求め、その密度をPTセンサーからの深度差から推定した。FOT解析は推定した仕上げ区間上端圧力を用いた。なお、圧力解析にはParadigm社製の圧力解析ソフト「Interpret」を使用した。

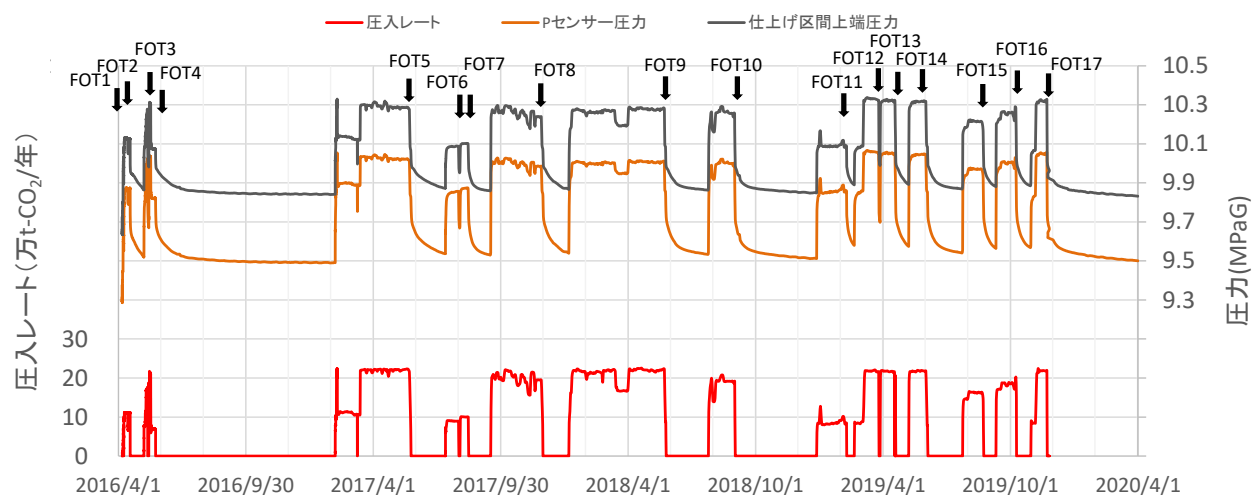


図 5.1-1 FOT 実績

表 5.1-1 FOT 実績

FOT	開始時刻	終了時刻	停止種類	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
	2016年					
FOT1	4月8日 6時14分	4月8日 17時1分	予定外停止	11	58,800	81
FOT2	4月17日 22時16分	5月7日 15時15分	予定外停止	473	109,351	2,558
FOT3	5月13日 1時0分	5月14日 14時19分	予定外停止	37	139,056	4,330
	2017年					
FOT4	5月24日 9時0分	2月5日 17時35分	計画停止	6,177	71,079	7,163
FOT5	5月25日 9時47分	7月13日 16時15分	計画停止	1,183	64,861	61,239
FOT6	8月1日 10時0分	8月3日 9時57分	計画停止	48	88,474	65,793
FOT7	8月15日 9時0分	9月16日 12時0分	予定外停止	771	100,124	69,070
FOT8	11月30日 9時27分	1月6日 11時50分	計画停止	890	85,159	109,250
	2018年					
FOT9	5月25日 9時20分	7月25日 11時36分	計画停止	1,466	87,709	188,136
FOT10	9月1日 2時25分	12月27日 13時28分	予定外停止	2,819	189,602	207,209
	2019年					
FOT11	2月8日 8時33分	2月19日 11時18分	予定外停止	267	83,620	217,425
FOT12	3月26日 10時37分	3月28日 11時3分	予定外停止	48	218,008	233,438
FOT13	4月19日 13時31分	5月8日 11時28分	予定外停止	454	108,463	246,354
FOT14	6月4日 8時49分	7月24日 17時10分	予定外停止	1,208	78,536	261,632
FOT15	8月23日 5時19分	9月10日 11時48分	予定外停止	438	137,885	274,342
FOT16	10月9日 18時20分	10月30日 11時8分	予定外停止	497	80,592	288,874
FOT17	11月22日 11時30分	停止注	計画停止		216,498	300,012

5.1.1 解析方法

(1) 概要

FOT解析では、横軸に圧入を停止してからの経過時間、縦軸に圧入停止後の圧力変化と圧力変化を微分した値（以下、「デリバティブカーブ」と称する。）を共に対数スケール

でプロットする(以下、「ローグプロット」と称する。)。ローグプロットを利用することで流動形態(線形流・放射状流・球状流等)等の識別が容易となる。また、解析ソフトのタイプカーブ(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した。使用した解析モデルには、IW-2のようなほぼ水平な高傾斜井に対するCO₂圧入結果に対応したタイプカーブが存在しないため、ここでの解析結果は参考値となる。

解析に使用した圧力は、Meunier et al.(1987)¹⁾の手法により、以下に示す Normalized Pseudo Pressure を用いた。

$$m(p) = \left(\frac{\mu z}{2p}\right) \int_{p_0}^p \frac{2p dp}{\mu z} \quad \text{式(5.1-1)}$$

$m(p)$: Normalized Pseudo Pressure、 \bar{P} : 貯留層平均圧力

一例として図5.1-2にFOT9におけるローグプロットを示す。補正前のグラフはPTセンサー圧力を用いたプロット(参考)、補正後のグラフは解析対象となる仕上げ区間上端圧力に補正したプロットである。圧力の補正は、PTセンサーの温度圧力条件から推定されるCO₂密度と、PTセンサー～仕上げ区間上端深度の深度差から実施するため、より正確な解析にはPTセンサーにおける温度圧力条件が安定している必要がある。そのためには、圧入停止直前の圧入レートが安定し、圧入停止にかかる時間が短時間であることが望まれる。

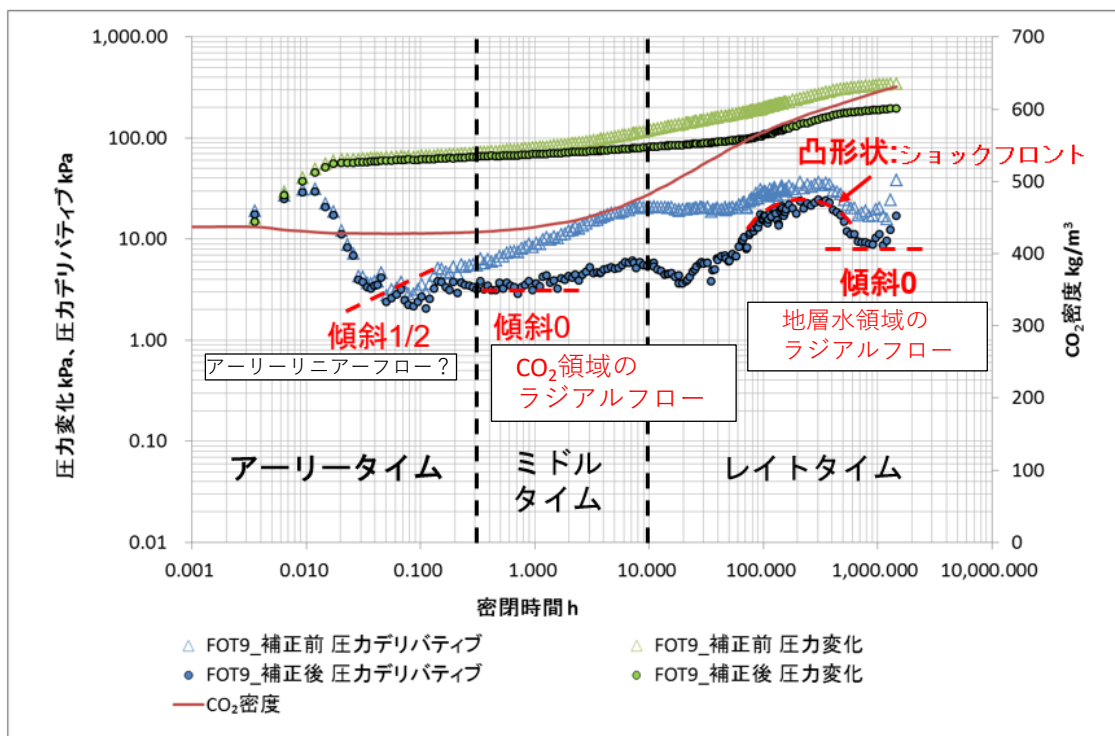


図 5.1-2 ログ-ログプロットの例 (FOT9)

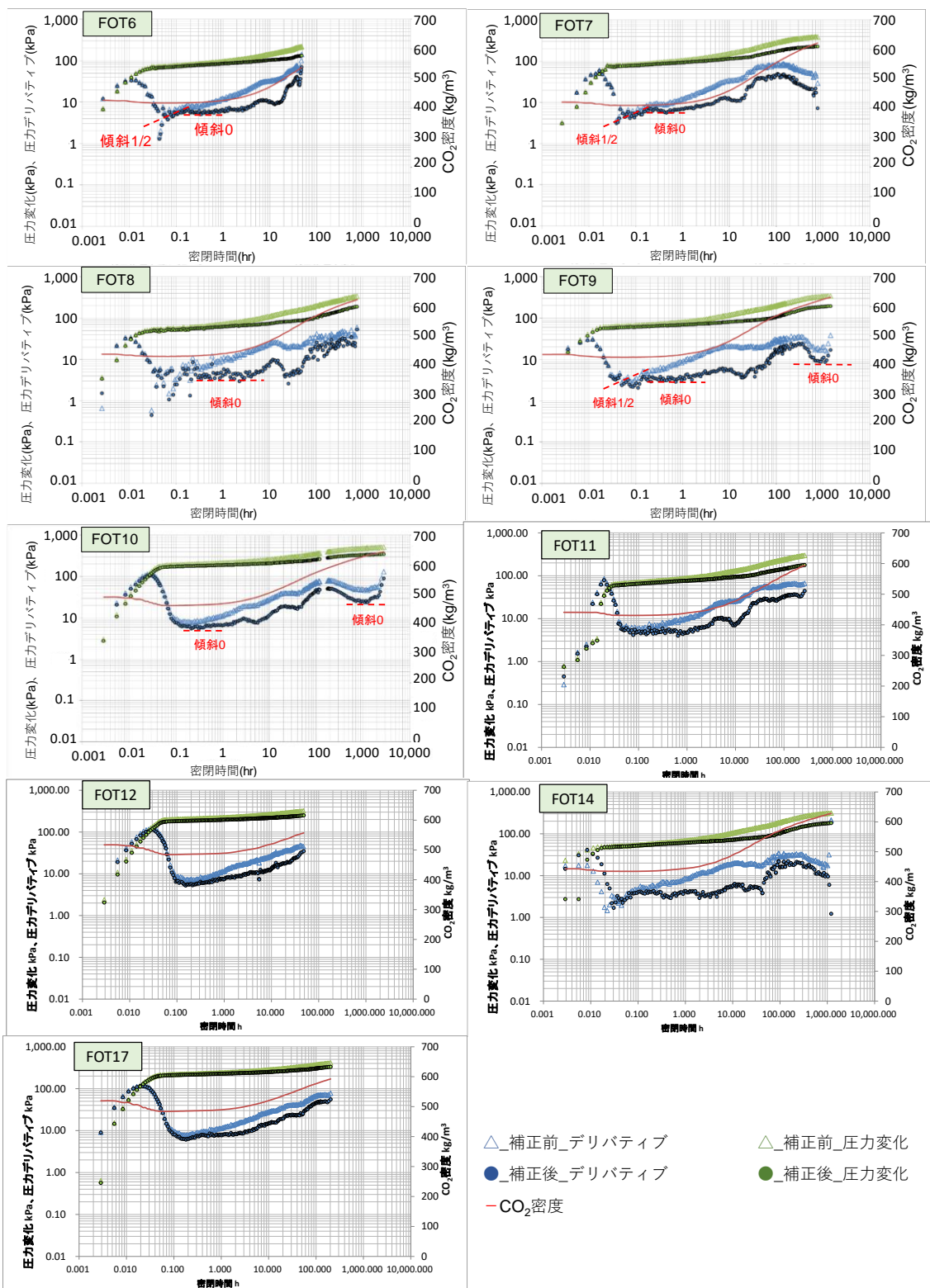
(2) 解析データ

圧入停止は計画外のケースが多く、表 5.1-2 に示すように、圧入停止時に PT センサーにおける温度圧力条件が安定しなかったため、取得したデータが解析に不向きなケースも多かった。本検討では、解析条件を満たすと判断した、FOT6～12、14、17 について解析を実施した。図 5.1-3 にそれぞれのログ-ログプロットを示す。

表 5.1-2 FOT 一覧(解析の有無)

FOT	圧入 停止 方法	CO ₂ 領域の ラジアル フロー (ERF)	地層水領域の ラジアル フロー (LRF)	備考欄
FOT1	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT2	○	×	×	ERF 確認不可
FOT3	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT4	○	×	×	ERF 確認不可
FOT5	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT6	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT7	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT8	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT9	○	○	○	
FOT10	○	○	○	
FOT11	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT12	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT13	×	—	—	直前でレートダウンした後に圧入停止
FOT14	○	○	○	
FOT15	×	—	—	圧入停止前に何度かレート変更した後に
FOT16	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT17	○	○	確認中	

注)圧入停止方法：圧入停止直前に2日程度以上の定レートで圧入後に停止したケースは○、圧入レートが安定しないまま停止した場合は×。CO₂領域のラジアルフロー、地層水領域のラジアルフロー：ログログプロットの圧力デリバティブカーブから認識されたケースは○、認識できなかったケースは×。青色は解析を実施。



注) (補正前)はPTセンサーの圧力値を直接使用したカーブ。(補正)はPTセンサーの圧力・温度データをもと、仕上げ区間上端の圧力を推定して求めたカーブ。CO₂密度はPTセンサーの圧力・温度値から求めたCO₂の密度。

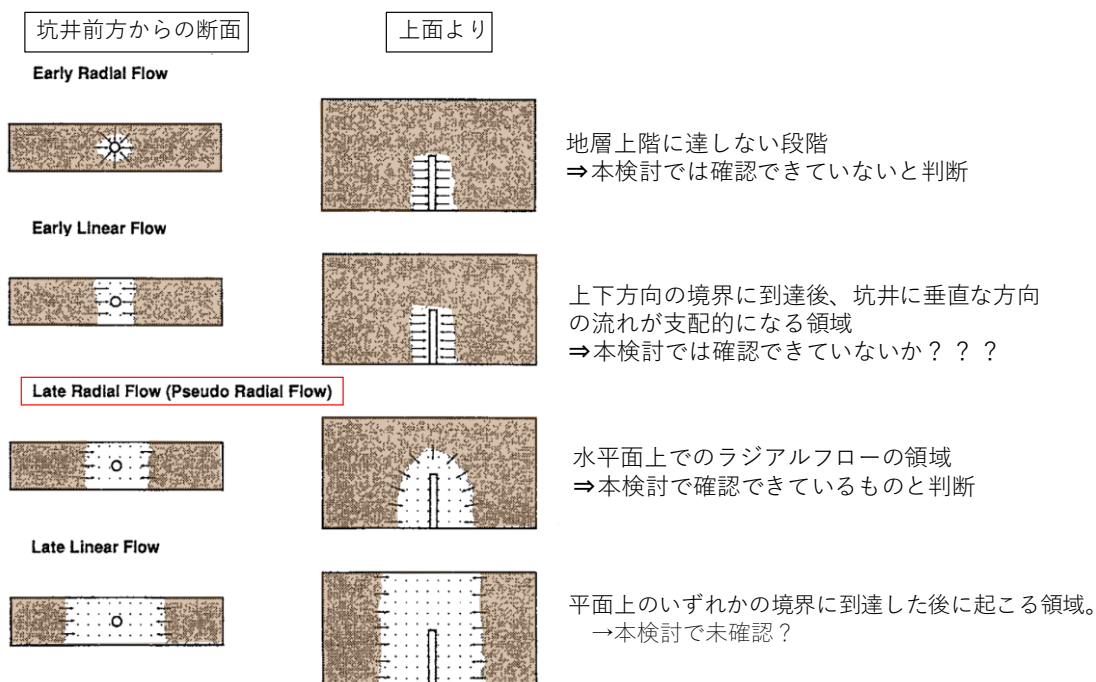
図 5.1-3 FOTのローグログプロット (FOT6~10、11、12、14、17)

参考のため、図 5.1-4 はガスの生産井（水平井）において生産を中断した直後に想定される圧力挙動を示す。IW-2 は最大傾斜 83° の高傾斜井であるため、水平井における圧力挙動と類似した挙動が認識されるものと仮定した。

アーリーリニアフロー（以下、「ELF」と称する。）は圧入井からの流れが上下の地層境界等に到達し、坑井に垂直な方向に線形で広がる流れであり、デリバティブカーブの傾斜が $1/2$ となる。本年度以前の検討では、アーリータイムの領域において認められたデリバティブカーブの $1/2$ 傾斜を ELF とみなして、ELF 解析を実施し、坑井近傍の浸透率および CO_2 飽和率を推定していたが、圧入停止条件等が適切であっても ELF が認識できないケースがあることから、本検討では、昨年度以前の検討での ELF の認識が誤りである可能性を考慮し、ELF 解析は実施しなかった。

アーリーラジアルフローは地層境界に達しない段階で認識される挙動で、本検討では認識できていないと考えている。

レイトラジアルフロー（スードラジアルフロー）は坑井と水平な面に放射状に広がる流れであり、デリバティブカーブの傾斜は 0 となる。本検討では、圧入停止後 0.3 時間程度以降に認識されたデリバティブカーブの傾斜が 0 となる挙動をレイトラジアルフローの挙動と考え、ショックフロントの挙動（デリバティブカーブで上方向に凸の形状）が認められる以前のラジアルフローの挙動を CO_2 領域のラジアルフロー、それ以降のラジアルフローを地層水領域のラジアルフロートと見なして解析した。



注) 島本(1995)²⁾より作成。ログ-ログプロットにおいて、アーリーニアフローは1/2傾斜のデリバティブカーブとして認識され、ラジアルフロー(スードラジアルフロー)は0傾斜のデリバティブカーブとして認識される。

図 5.1-4 水平井で予想される圧力挙動

5.1.2 解析結果

(1) CO₂領域のラジアルフロー解析

解析対象とした各FOTにおけるデリバティブの傾斜0を、CO₂領域のラジアルフローと仮定して解析した。圧力解析ソフト「Interpret」にて、貯留層性状が均質で、半無限円(ある境界での圧力が初期から変わらない)を想定した物理モデル(Homogenous, Infinite Lateral)を使用した。解析に際しては、貯留層性状が均質かつ無限に広がるものと仮定した。解析に用いた入力値と解析結果を表5.1-3に、マッチング状況を図5.1-5に示す。

表 5.1-3 CO₂ 領域ラジアルフロー解析の入力値と結果 (FOT6~12、14、17)

	単位	FOT6	FOT7	FOT8	FOT9	FOT10	備考欄	
圧入	m ³ /日	129,623	146,691	124,766	128,502	277,785	圧入停止	
レート	t-CO ₂ /年	88,474	100,124	85,159	87,709	189,602	直前のレート	
累計圧入量	t-CO ₂	65,793	69,070	109,250	188,136	207,209		
有効層厚	m	19						CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028						9.82MPaG/37.8°C
CO ₂ 粘性	cP	0.0521						
孔隙率		0.28						検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8						高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵						9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷						
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵						
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶						コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,000	3,078	3,900	4,950	6,000	解析結果	
浸透率	mD	158	162	205	261	316		

	単位	FOT11	FOT12	FOT14	FOT17	備考欄	
圧入	m ³ /日	122,509	319,403	115,063	317,189	圧入停止	
レート	t-CO ₂ /年	83,618	218,008	78,536	216,498	直前のレート	
累計圧入量	t-CO ₂	217,425	233,438	261,632	300,012		
有効層厚	m	19					CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028					9.82MPaG/37.8°C
CO ₂ 粘性	cP	0.0521					9.82MPaG/37.8°C
孔隙率		0.28					検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8					高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵					9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷					
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵					
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶					コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,600	6,650	4,940	6,080	解析結果	
浸透率	mD	190	350	260	320		

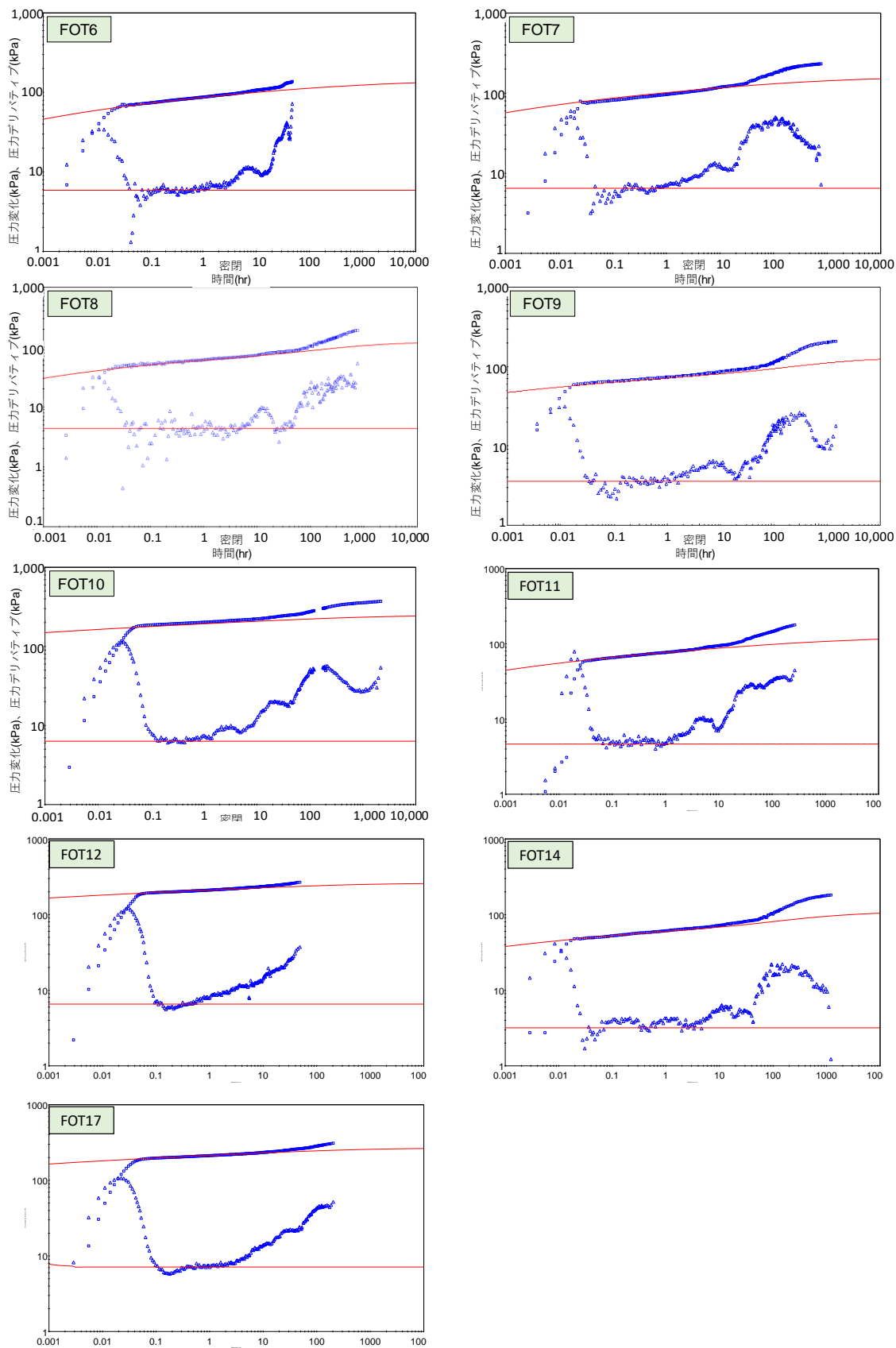


図 5.1-5 ラジアルフロー解析マッチング状況 (FOT6~12、14、17)

FOT10までは、圧入レートが高いほどかつ累計圧入量が多いほど浸透率×有効層厚の値が増加する傾向が認められた。前者の原因は圧入レートが上がるほど流動坑底圧が上昇して圧入区間が増大するため、後者の原因は累計圧入量の増加と圧入井周辺の貯留層の平均CO₂飽和度が上昇により、CO₂の相対浸透率が向上するためであると考えられる。FOT11以降は、それ以前の傾向とは若干異なり、累計圧入量の増加が浸透率×有効層厚の向上につながる相関が不明瞭となっている。

(2) ホーナープロット解析

① ホーナープロット解析結果

密閉後10時間以降のレイトタイムで見られたデリバティブの傾斜0を対象にホーナープロット解析を実施した。ホーナープロット解析ではラジアルフローと考えられる領域で直線を引き、その傾きから式(5.1-2)を用いて浸透率を推定し、その切片(ホーナータイム=1)から貯留層平均圧力を算出した。

$$k \times h = \frac{162.6 \times q \times B \times \mu}{m} \quad \text{式 (5.1-2)}$$

注) k:浸透率、h:有効層厚、q:流量、B:容積係数、 μ :粘性、m:ホーナープロットにおける傾きを示す。

圧力解析ソフト「Interpret」によるホーナープロット法では、Superposition function 式(5.1-3)を横軸に、Normalized Pseudo Pressure 式(5.1-1)を縦軸にとり、式(5.1-2)の傾きmを求め、k×h(浸透率×有効層厚)を算出する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式 (5.1-3)}$$

注) f: Superposition function、 t_{sp} : Superposition time、 q :レート、n:n番目を示す。

ホーナープロット解析でのマッチング状況を図5.1-6に、解析結果を表5.1-5に示す。浸透率×有効層厚は、ラジアルフロー解析よりも小さい。これはラジアルフローの解析で対象としたCO₂が到達した領域の浸透率よりも、ホーナープロットで対象とした貯留層全体の浸透率の方が低いことを示している。CO₂が圧入された領域が局所的であることや、水平方向に不均質に圧入されていること等が理由としてあげられる。

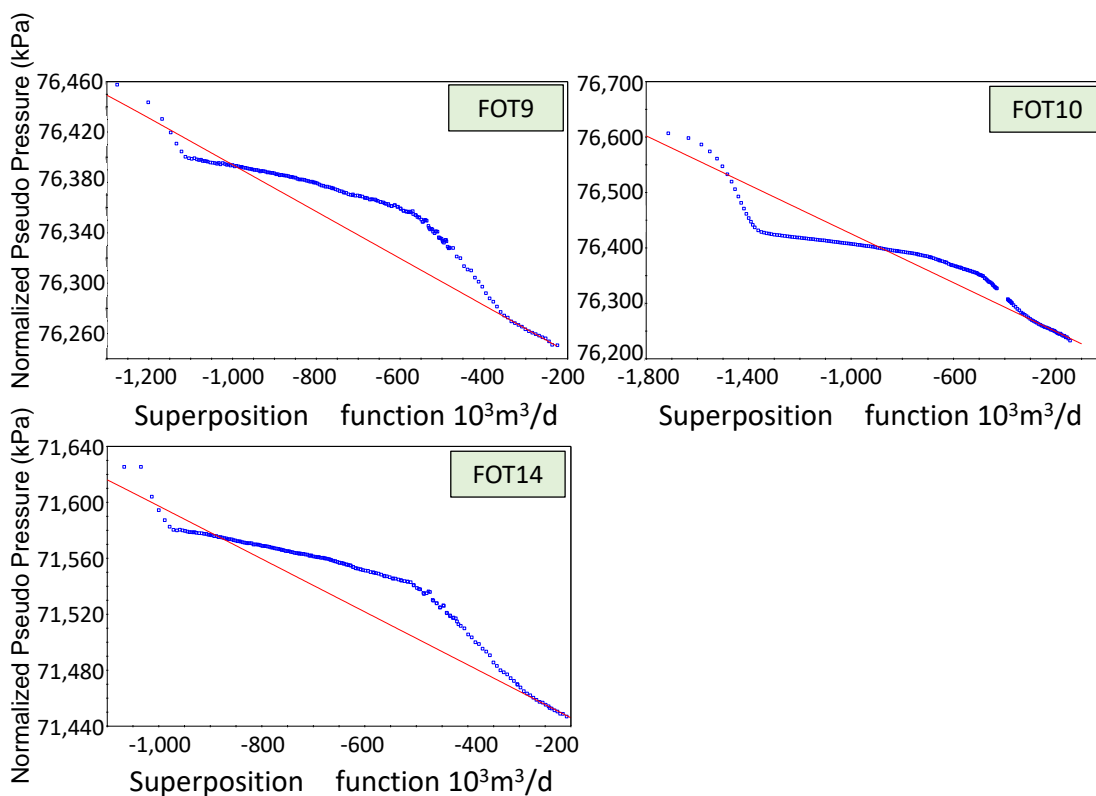


図 5.1-6 ホーナープロット解析状況 (FOT9、FOT10、FOT14)

表 5.1-5 ホーナープロット解析結果

		FOT9	FOT10	FOT14
圧入レート	m ³ /D	128,502	277,785	115,063
浸透率×有効層厚	mD*m	1,691	1,425	1,662
浸透率	mD	9	8	9
貯留層平均圧力	MPaG	9.82	9.82	9.83

② 探査半径の推定結果

レイトラジアルフローは探査半径（圧力伝搬が及んだ範囲）が坑井長（圧入区間長）を上回った時に検知される。IW-2の仕上げ区間長は、水平方向距離 1,140 m 程度となるため、レイトラジアルフローは探査半径が 1,140 m を超えているはずである。また、CO₂を深部塩水層に圧入する場合、貯留層内での流体の動きやすさの指標となるモビリティ（浸透率/粘性）は CO₂領域と地層水領域およびその中間であるショックフロントの3領域で異なるものと考えられる。この考えに基づき、探査半径を式 (5.1-4) ～式 (5.1-6)

(Rahman et al. (2014)³⁾) を用いて算出した。ここで、FOT9、FOT10、FOT14のそれぞれにおいて、デリバティブカーブが上側に凸となる挙動（ショックフロント）が、密閉後 600 時間で終了していると仮定した。表 5.1-6 に CO₂領域およびショックフロント領域

の探査半径の推定結果を示す。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3}} \left(\sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right) + R_2 \left(1 - \sqrt{\frac{M_3 F_2}{F_3 M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (5.1-4)}$$

$$R_2 = R_1 \left(1 - \sqrt{\frac{M_2 F_1}{F_2 M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (5.1-5)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t} \quad \text{式 (5.1-6)}$$

注) R:半径、M:モビリティ(浸透率/粘性)、F:ストラティビティ(孔隙率×総合圧縮率)、k:浸透率、 ϕ :孔隙率、 μ :粘性、 c_t :総合圧縮率、 Δt :密閉時間、下付き番号 1: CO₂領域、下付き番号 2: ショックフロント領域、下付き番号 3: 塩水領域を示す。

表 5.1-6 探査半径の算出に用いた入力値と計算結果

	入力値		FOT9	FOT10	FOT14	適用
CO ₂ 領域	半径	m	422	464	421	式 (5.1-6) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	4,950	6,000	4,940	ラジアルフロー解析結果
	浸透率	mD	261	316	260	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	50	50	50	ショックフロント出現よりも手前
	粘性	cP	0.052	0.052	0.052	9.82 MPaG、37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	貯留層平均値
	総合圧縮率	1/kPa	0.00346	0.00346	0.00346	圧力解析の入力値
ショックフロント領域	半径	m	1,070	1,113	1,109	式 (5.1-5) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	CO ₂ 領域と同じと仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	760	760	855	ホーナープロット解析値
	浸透率	mD	40	40	45	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	600	600	600	ショックフロント終了時
	粘性	cP	0.052	0.052	0.052	CO ₂ 領域と同じと仮定
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	CO ₂ 領域と同じと仮定
	総合圧縮率	1/kPa	0.00136	0.00136	0.00136	相対浸透率曲線から導いたフラクショナルフロー曲線からショックフロントでのSg=0.28を算出して計算
塩水領域	有効層厚	m	181	181	181	層厚 220 m に平均的なネットグロス比 0.78 を考慮
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	25,533	19,150	24,465	ホーナープロット解析値に塩水 (0.77cP) と CO ₂ (0.05cP) の粘性比を乗じたもの
	浸透率	mD	141	106	135	上記 2 つの値より計算
	粘性	cP	0.77	0.77	0.77	9.82 MPaG、37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	検層解析結果
	総合圧縮率	1/kPa	0.00024	0.00024	0.00024	9.82 MPaG、37.8°C

FOT9、10、14 のデリバティブカーブにおいて圧入停止時間 600 時間以降で認められた

レイトラジアルフローに対し、式(5.1-4)を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した(図5.1-7)。FOT9、10、14ともに圧入停止時間600時間付近から探査半径が坑井の仕上げ長である1,140mを超えることが予想された。FOT9、10、14において密閉後600時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜0を、地層水領域におけるレイトラジアルフローと見なすことの妥当性が示された。

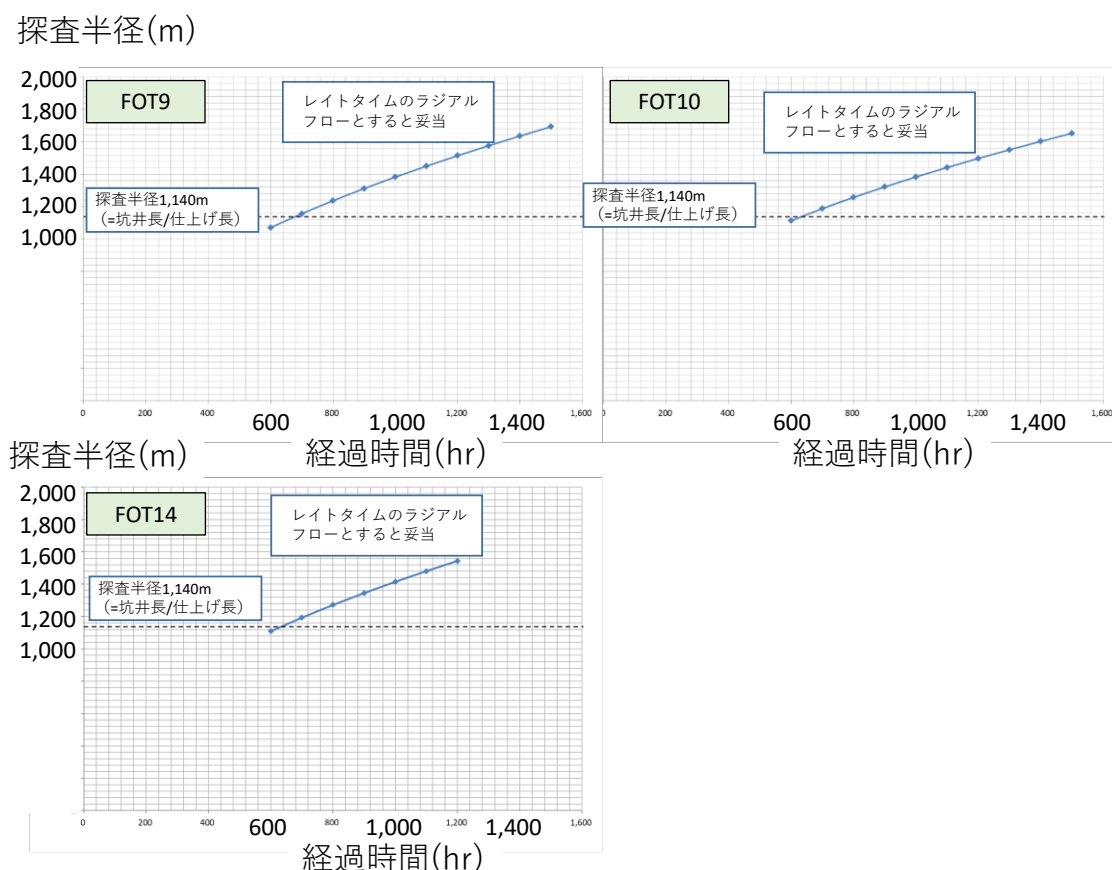


図 5.1-7 ホーナープロット解析状況 (FOT9、FOT10、FOT14)

5.1.3 フォールオフテスト解析のまとめ

FOT6~12、14、17の9回のFOTのデリバティブカーブの傾斜0の挙動に対し、ラジアルフロー解析を実施した。その結果、FOT11以降で、圧入レートとCO₂の累計圧入量および解析されるk×h値の関係が異なる傾向があり、FOT11以降に圧入性が低下した可能性が示唆された。

FOT9、10、14の密閉時間10時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜0の挙動に対し、ホーナープロット法を適用した。その結果それぞれのFOTで推定された貯留層平均圧力は初期圧力の9.82 MPaGに近い値となり、圧力上昇の影響が及ばない領域の

挙動を示している可能性が示唆された。

FOT9、10、14の密閉時間600時間頃までに認められるショックフロント挙動以降に認められるデリバティブカーブの傾斜0の挙動は、探査半径の解析からレイトラジアルフローの挙動を示していることが示唆された。

【参考文献】

- 1) Meunier, D.F., Kabir, C.S., Wittmann, M.J., “Gas Well Test Analysis: Use of Normalized Pseudovariables” SPE13082 (1987)
- 2) 島本辰夫、“水平坑井の圧力解析と生産予測”、石油技術協会、vol60、p.462-473(1995)
- 3) Rahman, N.M.A., Al-Thawad, F.M., BinAkresh S.A., “SYSTEM FOR COMPUTING THE RADIUS OF INVESTIGATION IN A RADIAL, COMPOSITE RESERVOIR SYSTEM” U.S Patent Application Publication (2013)

5.2 IW-2 および OB-2 の圧力予実績

2018年度に作成した貯留層評価モデル(30個の具現像モデル)の、再現性を確認するために、IW-2とOB-2の坑底圧力とログ-ログプロットの予実績比較を実施した。表

5.2-1に本モデルで使用したパラメータを示す。基本的なパラメータは2018年度の貯留層評価モデル¹⁾と同様とした。

表 5.2-1 モデル入力値

モデル	2018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：708,711
	セクターモデル：1,933,868 (細分化後)
基準温度	36.2°C@920.41 m(TVDSS)
基準圧力	9,290 kPa@920.41 m(TVDSS)
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	岩相毎に設定
浸透率(mD)	岩相毎に設定
ネットグロス比	岩相毎に設定
岩石圧縮率(1/kPa)	4.54×10 ⁻⁶

モデル	2018年度モデル
相対浸透率曲線	岩相 10、11 : n=2.0、その他 : n=3.5
krg	岩相 10、11=0.60、その他=0.143
krw	1.00
Sgc	0.05
Swir	浸透率と孔隙率より算出
ヒステリシス(Sgrmax)	$Sgc+0.5 \times (1-Swir-Sgc)$
毛細管圧力	CCS-2、OB-2、IW-2 コア試料分析データより作成
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⁾
krg	1.00
krw	1.00
Sgc	0.05
Swir	0.638
ヒステリシス(Sgrmax)	なし

本検討において予実績比較に用いるモデルを便宜上、予実績確認モデルと称する。

5.2.1 2019年度予実績確認モデルのグリッドシステム

予実績比較では目的に応じて2018年度に作成したフィールドモデルとセクターモデルを使用した(表 5.3-1、図 5.2-1)。

1) フィールドモデル :

OB-2 までを含めた広域のモデルであり、OB-2 の坑底圧力推定に用いた。水平方向のグリッドサイズは 100m×100m、垂直方向が 5m 程度、セル数は 163×126×173 とした。

2) セクターモデル :

フィールドモデルから坑井周辺を切り出し、グリッドサイズを細分化したモデル。対象範囲は限定されるが予測精度が向上する。図 5.2-1 のように 31×31×48 のモデルを切り出し、坑井周辺を水平方向に 11.1 m×11.1 m (9×9 分割)、更に坑井通過グリッドとその隣接グリッドを最小 1.1 m×1.1 m (9×9 分割) に細分化している。IW-2 の仕上げ区間上端圧力およびローグログプロットの予実績比較には本モデルを用いた。

表 5.3-1 2019年度予実績確認モデルのパラメータ

モデル	予実績確認モデル
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・ブロック数	フィールドモデル：708,711
	セクターモデル：1,933,868 (細分化後)
基準温度	36.2°C@920.41 mSSL
基準圧力	9,290 kPa@920.41 mSSL
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	岩相毎に設定
浸透率 (mD)	岩相毎に設定
ネットグロス比	岩相毎に設定
岩石圧縮率 (1/kPa)	4.54×10^{-6}
相対浸透率曲線	高浸透率領域とその他で krg の形状を変更
krg	高浸透率領域=0.6 その他=0.144
krw	1.00
Sgc	0.05
Swir	浸透率と孔隙率より算出
ヒステリシス (Sgrmax)	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：1.3×10 ¹¹
	セクターモデル：5.1×10 ⁹
モデル	予実績比較用モデル
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 ²⁾
	krw 曲線:van Genuchten ³⁾
krg	1.00
krw	1.00
Sgc	0.05
Swir	0.638
ヒステリシス (Sgrmax)	なし

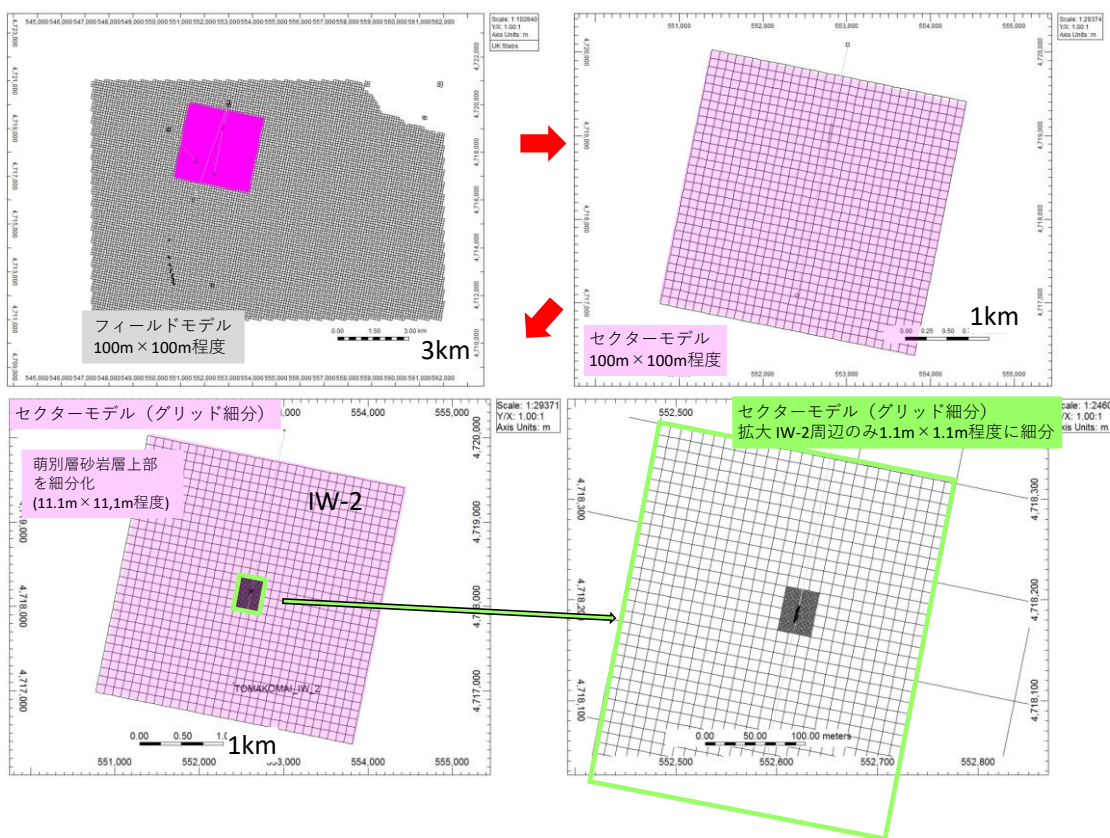


図 5.2-1 2019 年度 予実績比較モデルのグリッドシステム

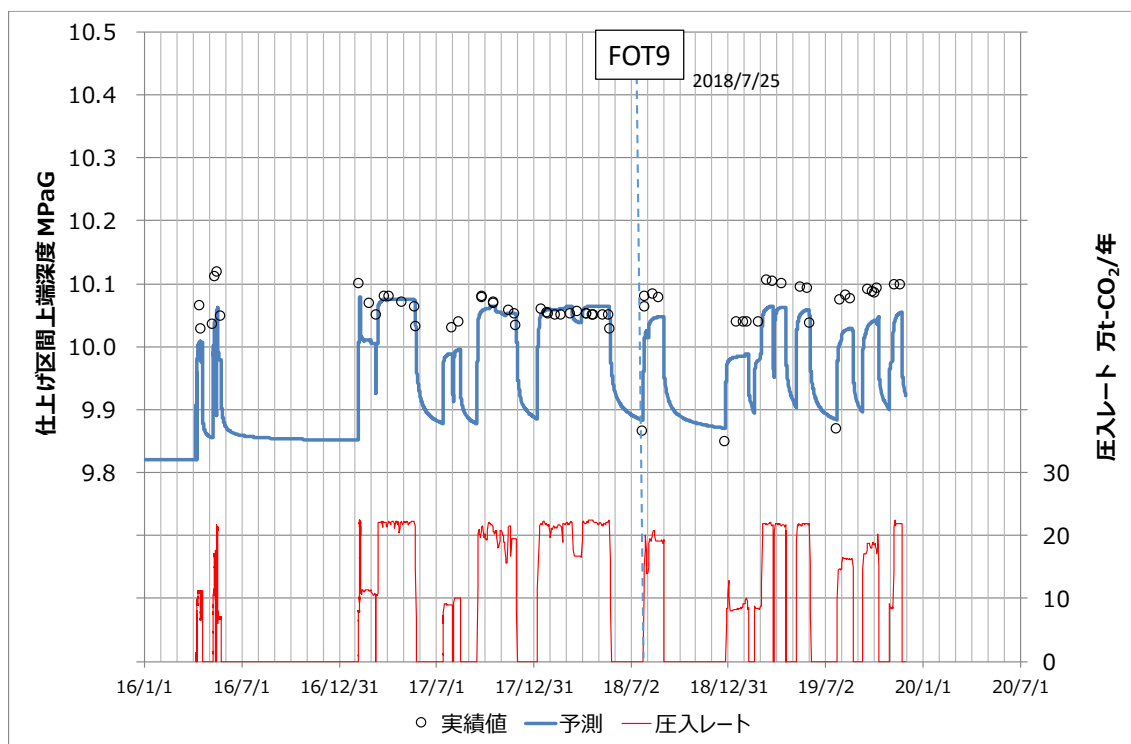
5.2.2 予実績比較結果

(1) 苫小牧 IW-2 の仕上げ区間上端の圧力

予実績比較モデル（図 5.2-1 左下、セクターモデル）を用いて、2016 年 4 月 6 日～2019 年 11 月 30 日間の圧入実績にもとづいた仕上げ区間上端の圧力推移を推定し、実績値と比較した（図 5.2-2）。FOT9 の前後でシミュレーションによる坑内の圧力予測と、実測値との乖離が大きくなる傾向が示された。検討に用いた 30 個の具現像（異なる岩相分布を持つ地質モデル）により予測した坑内圧力予測と圧力実測値との目的関数（式 5.2-1）を求めたところ（表 5.2-2）、FOT9 の前後で目的関数の値が大きくなることが示された。シミュレーションによる予測値が実測値に近いほど、目的関数の値は小さくなる。FOT9 前後で貯留層や圧入井に何らかの変化が生じ、地質モデル（2018 年度モデル）の貯留層パラメータ等の調整が必要となった。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{\text{obs}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{obs}}} \sqrt{(d_{\text{sim}}^i - d_{\text{obs}}^i)^2} \quad \text{式 (5.2-1)}$$

注) n_{obs} : 実績データ数、 d_{sim} : シミュレーション計算値、 d_{obs} : 実績データ



注) 実績値は、3章において圧入能力評価に用いた坑内流送シミュレーションで推定した仕上げ区間上端圧力。圧入停止時の実績値はPTセンサーの圧力からの推定値。予測圧力は予実績確認モデルによるシミュレーションで予測した仕上げ区間上端における圧力推移を示す(例として具現像24のみを表示)。

図 5.2-2 IW-2における圧入レートと仕上げ区間上端圧力の予実績比較

表 5.2-2 具現像ごとの目的関数一覧

具現像の番号	目的関数 kPa			具現像の番号	目的関数 kPa		
	全期間	2018年7月25日以前	2018年7月25日以後		全期間	2018年7月25日以前	2018年7月25日以後
1	30.2	21.6	43.1	16	31.3	22.1	45.2
2	31.1	21.8	45.1	17	30.4	23.9	40.3
3	29.8	21.9	41.9	18	27.5	21.5	36.6
4	29.9	23.1	40.3	19	26.2	20.4	35.1
5	30.8	21.6	45	20	30.5	22.2	43.2
6	31.6	22	46.2	21	29.4	21.6	41.2
7	28.9	22.2	39.1	22	29.5	24.4	37.3
8	27.5	24.6	32	23	29	22.8	38.5
9	31.6	21.8	46.6	24	31.1	22.5	44.2
10	30	21.8	42.4	25	31.7	22.4	45.9
11	30.6	23.1	41.9	26	31.4	22.2	45.4
12	30.8	20.9	45.7	27	30	22.9	40.8
13	30.7	22.5	43	28	28.2	20.4	40.2
14	32.5	21.3	49.4	29	30.6	22.2	43.4
15	31	21.3	45.9	30	29.5	23.2	39.1

(2) フォールオフテスト解析のログ-ログプロット

セクターモデルを用い、圧入開始の2016年4月6日から2019年11月30日までの

CO₂圧入実績を入力してフォールオフテストを再現し、得られた坑底圧力データから FOT6~12 と 14、17 についてローグ-ローグプロットを作成した (図 5.2-3)。実測値によるデリバティブカーブとシミュレーションによるデリバティブカーブの傾向はおおむね一致するため、妥当なモデルであると判断した。

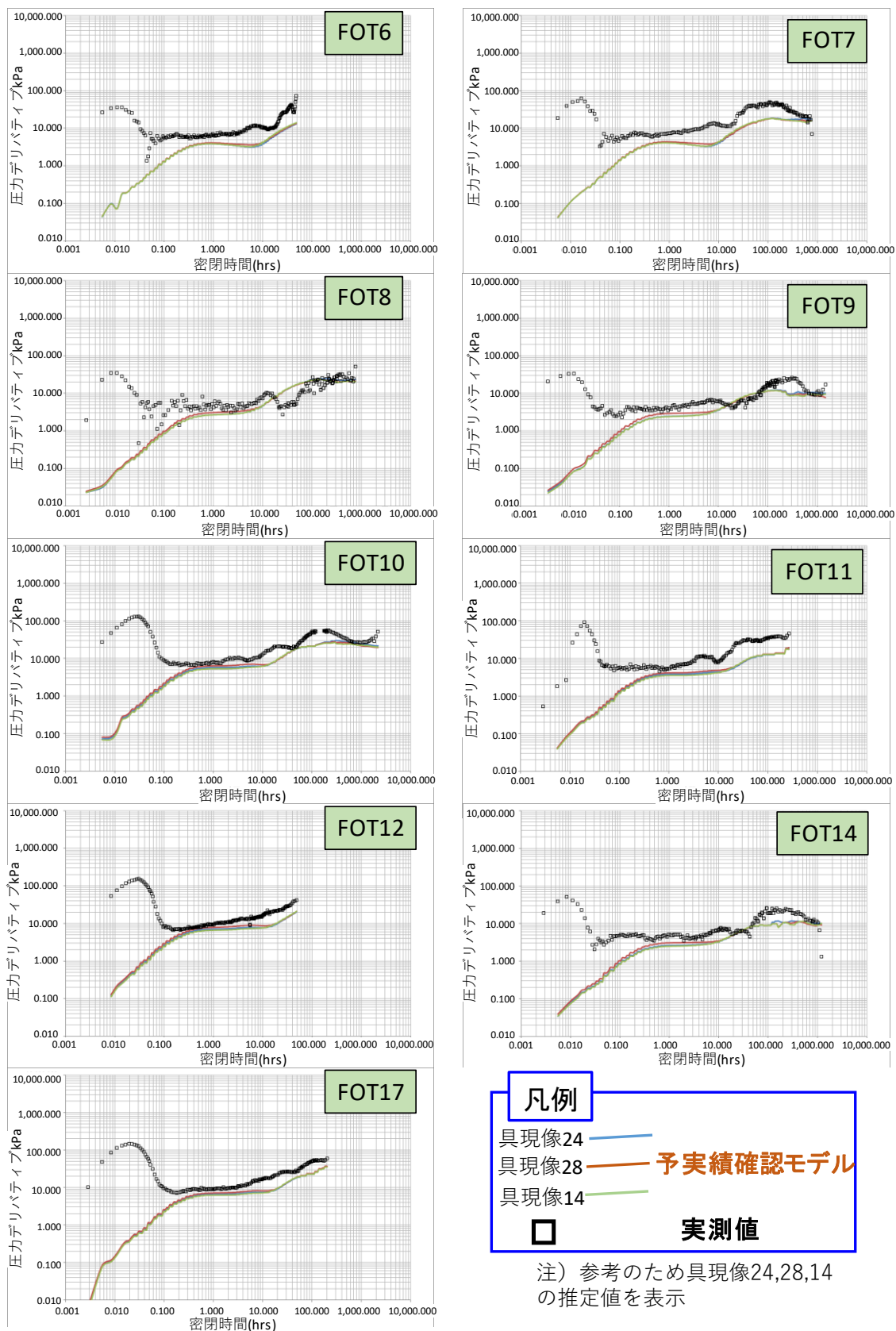


図 5.2-3 IW-2 予実績比較モデルによる FOT の圧力変化、デリバティブカーブの再現と実績値との比較

(3) OB-2 坑底圧力

図 5.2-4 に OB-2 における坑底圧力の予実績比較を示す。OB-2 の圧力計は測定値が安定しない傾向があるものの、IW-2 と圧力的な応答があり、IW-2 において高レートでの圧入の少し後に坑底圧力が上昇する傾向が認められた。フィールドモデルによるシミュレーションでも、同様の傾向が再現された。OB-2 の圧力測定値の絶対値に問題がある可能性があるが、IW-2 の圧入と応答した圧力変化が再現されるため、本フィールドモデルは妥当であると判断した。

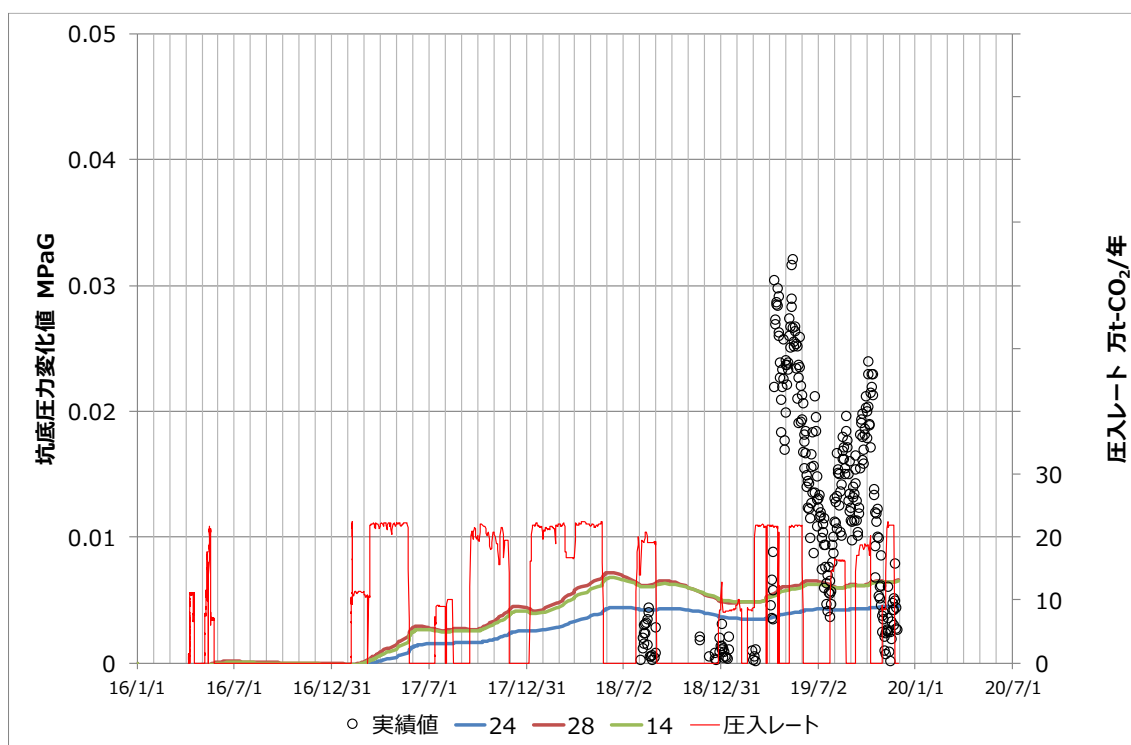


図 5.2-4 IW-2 における圧入レートと OB-2 坑底圧力の予実績比較

5.2.3 IW-2 および OB-2 の圧力予実績に関するまとめ

予実績確認モデルを用いた予実績比較では、FOT9 以降（2018年7月25日）の坑内圧力の目的関数が大きくなり、IW-2 の坑内圧力が十分に再現できなくなったことが示唆された。貯留層パラメータの見直し等、モデルの修正が必要であると判断した。

予実績確認モデルを用いて再現した FOT のローグログプロットの傾向は、実測値の傾向とおおむね一致するため、予実績確認モデルは妥当であると判断した。

また、OB-2 における IW-2 の圧入に応答した坑底圧の上昇傾向をシミュレーションで再現できていると判断した。

【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)

5.3 ヒストリーマッチ

図 5.2-2 および表 5.2-2 で示した通り、FOT9 実施の前後で仕上げ区間上端圧力の予実績値の乖離が大きくなった。原因は明らかではないが、本検討では、出砂等による貯留層の一部でスキンファクターが上昇したことが原因であると仮定した。萌別層の貯留層モデルでは、萌別層砂岩層の上部に二層の高浸透率領域の存在を解釈しており、主に CO₂はその高浸透率領域から圧入されているものと考えられる。本検討では、試行錯誤的に二層の高浸透率領域に与えるスキンファクターの値を考察することで、仕上げ区間上端圧力の予実績値の乖離を減少させるヒストリーマッチを実施した。

5.3.1 スキンファクターの設定

(1) スキンファクターについて

スキンファクターは、式 (5.3-1) の流量と圧力差の関係式における、式(5.3-2)に示す Well Injectivity Index (以下、「WI」と称する。)中の S で示される。出砂等により坑井近傍で圧入が阻害されるとプラスとなる。

$$Q = \sum WI\lambda(P_{bh} - P_o) \quad \text{式 (5.3-1)}$$

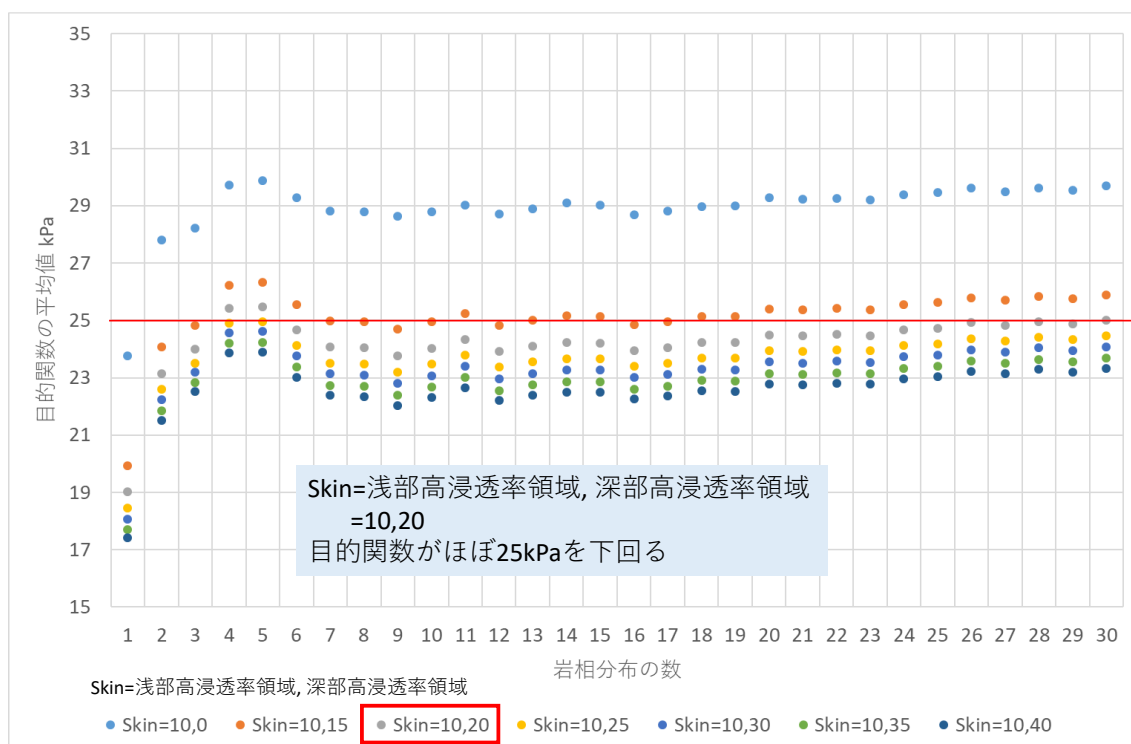
$$WI = \frac{2\pi kh}{\ln(r_e/r_w)+S} \quad \text{式 (5.3-2)}$$

注) Q : 流量、P_{bh} : 流動坑底圧力、P_o : グリッドの圧力、WI : well injectivity index、k : 水平浸透率、h : グリッドの厚さ、λ : トータルモビリティ(ここでは CO₂と水の相対浸透率をそれぞれの粘性で割り、合計したもの)、r_w : 坑井半径、r_e : 有効半径(=0.37×(グリッド面積)^{0.5})、S : スキンファクター

(2) スキンファクターの調整

二層の高浸透率領域について、S (スキンファクター) を変化させ、目的関数を改善させることでヒストリーマッチを行った。試行錯誤の結果、FOT9 以前は浅部高浸透率領域を S=10 とした。FOT9 以降については、浅部高浸透率領域を S=10、深部高浸透率領域を

S=20 とすることで、圧入性が低下した可能性がある FOT9 以降の仕上げ区間上端圧力の予実績にかかる目的関数の値をほぼ 25 kPa 以下とすることができた (図 5.3-1)。



注) 平均した岩相分布の数

図 5.3-1 スキンファクターの設定と目的関数 (FOT9 以降の状況)

(3) 岩相分布の抽出

FOT9 以前の仕上げ区間上端圧力の予実績にかかる目的関数が 25 kPa 以下となる岩相分布モデルから、50 の岩相分布モデルを抽出し、圧入した全期間と FOT9 以降の仕上げ区間上端圧力の予実績にかかる目的関数を算出した (表 5.3-1)。全期間の目的関数はすべて 25 kPa を下回ったが、FOT9 以降の目的関数については使用した岩相分布モデルの関数以上が 25 kPa を上回った。目的関数が 25 kPa を下回る岩相分布モデルを 10 モデル抽出し、以下に示す圧入指数や FOT カーブの検討に使用した。

表 5.3-1 各岩相分布の目的関数（全期間および FOT9 以降）

岩相分布 番号	全期間の 目的関数(kPa)	FOT9以降のみの 目的関数(kPa)	岩相分布 番号	全期間の 目的関数(kPa)	FOT9以降のみの 目的関数(kPa)
1	22.4	19.0	29	23.7	29.6
2	22.9	27.3	31	23.0	22.6
4	23.5	25.7	32	22.9	28.6
5	23.3	29.6	33	22.5	22.5
6	22.9	25.7	34	23.3	29.0
7	21.7	20.7	36	19.6	11.5
8	21.8	20.5	37	22.9	22.9
9	22.7	23.8	39	23.1	29.4
10	21.6	21.6	41	23.2	29.1
11	23.1	26.3	42	23.2	28.7
12	24.1	27.5	43	21.2	22.2
13	21.8	19.2	44	22.7	26.2
14	22.5	26.3	45	21.8	22.4
15	22.0	25.9	46	21.6	20.5
16	22.1	24.0	47	23.1	28.3
17	21.9	20.1	48	22.6	24.5
18	22.9	25.8	49	22.2	25.8
19	23.0	27.3	50	22.2	23.6
20	22.6	24.0	51	22.8	26.1
21	24.0	29.5	52	21.0	20.1
22	22.4	23.8	53	22.5	24.9
23	22.6	25.7	54	22.8	22.3
24	21.8	23.5	55	23.4	29.6
27	23.3	29.0	56	23.0	27.8
28	22.6	26.4	57	22.5	21.5

圧入指数・FOT検討で使用

25kPa以下

(4) 圧入指数の検討

表 5.3-1 に示す 10 の岩相分布モデルを用いた圧入指数の再現値と実測値とを比較した。

FOT9 前後共に抽出したすべての岩相モデルにおいて実測値をおおむね再現できているものと判断される（図 5.3-2、図 5.3-3）。

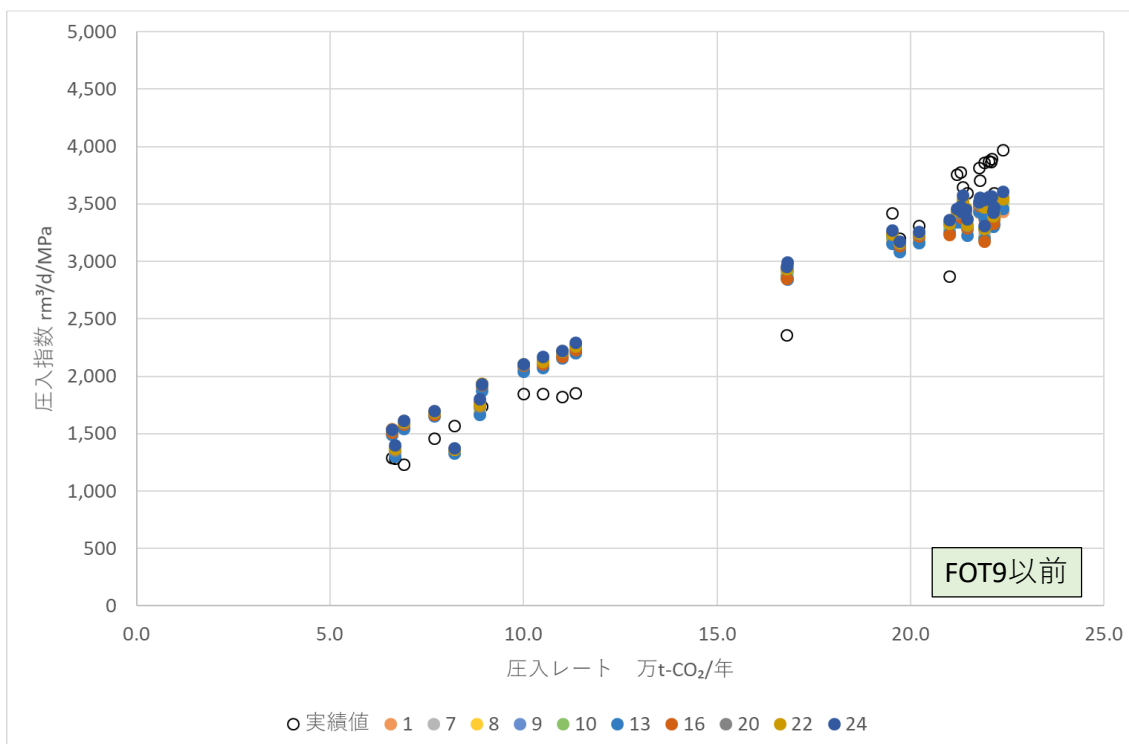


図 5.3-2 圧入指数の実測値と抽出岩相モデルによる再現値との比較 (FOT9 以前)

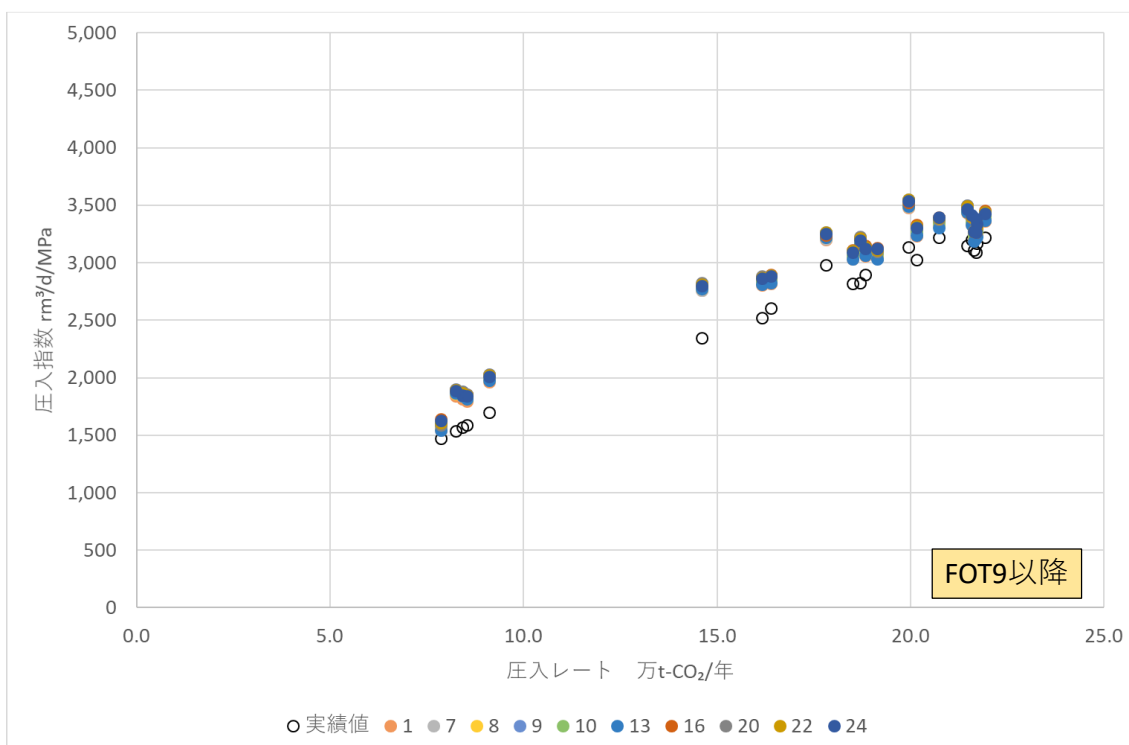


図 5.3-3 圧入指数の実測値と抽出岩相モデルによる再現値との比較 (FOT9 以降)

また、浅部高浸透率領域を $S=10$ 、深部高浸透率領域を $S=20$ とした岩相モデル 1 において、22 万 $\text{t-CO}_2/\text{年}$ (2019 年 6 月 1 日の状況) および 8 万 $\text{t-CO}_2/\text{年}$ (2019 年 6 月 4 日

の状況)での圧入を再現し、モデルにおいて浅部高浸透率領域と深部高浸透率領域でのCO₂が圧入される割合を再現した(図5.3-4、図5.3-5)。8万t-CO₂/年程度の低レートによる圧入では、CO₂は浅部更新統領域に圧入され、22万t-CO₂/年のような高レートの圧入では、圧入区間が下位に拡大し、下部高浸透領域からも圧入されるようになる状況が再現できていることが確認できる。

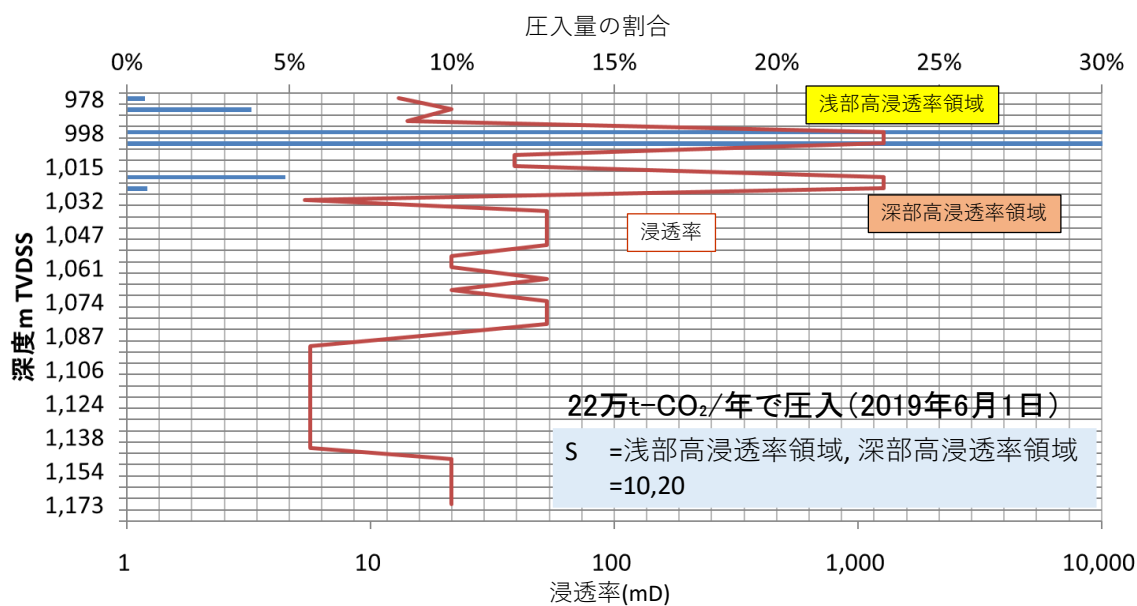


図 5.3-4 浅部高浸透率領域と深部高浸透率領域の圧入量の割合の再現【22万 t-CO₂/年】

(浅部高浸透率領域 : S=10、深部高浸透率領域 : S=20)

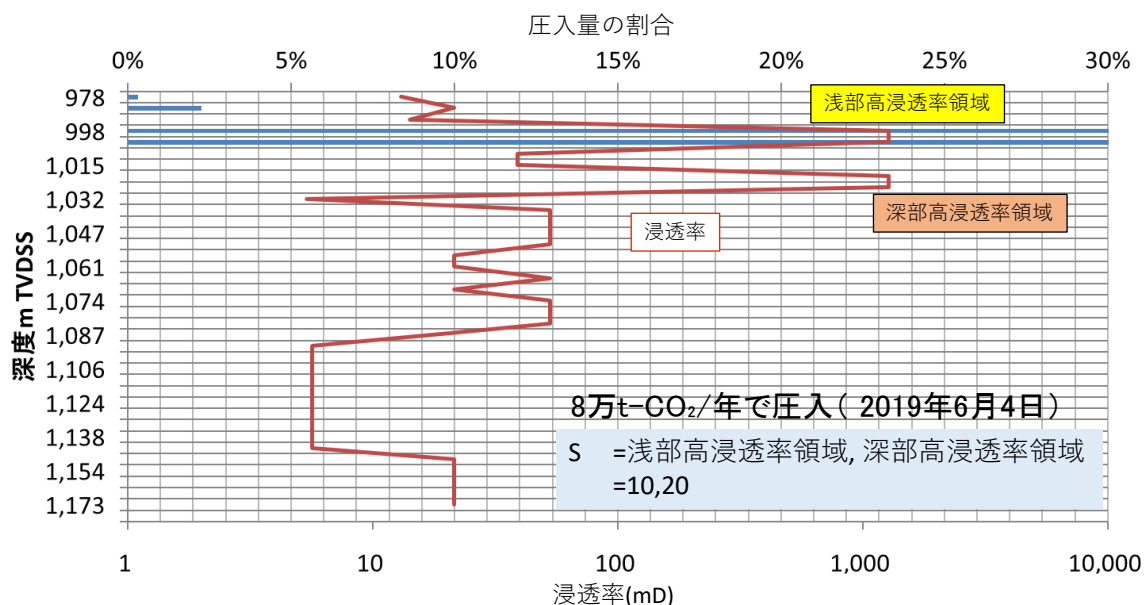


図 5.3-5 浅部高浸透率領域と深部高浸透率領域の圧入量の割合の再現【8万 t-CO₂/年】
 (浅部高浸透率領域 : S=10、深部高浸透率領域 : S=20)

(5) FOT のログ-ログプロット

表 5.3-1 に示す 10 の岩相分布モデルを用いて、FOT6~12、14、17 の 9 回の FOT を再現した (図 5.3-6) 。スキnfactor を設定していない 2018 年度の P10、P50、P90 具現像により再現したデリバティブカーブも併記した。すべての FOT においておおむね実データを再現できているものと考えられる。

ショックフロントと考えているデリバティブカーブで上に凸の挙動よりも早い段階で、スキnfactor を調整した 10 の岩相分布モデルによるデリバティブカーブの方が、スキnfactor を調整していない 2018 年度の P10、P50、P90 具現像よりも高いデリバティブ値を示し両者に乖離が認められる。これは、スキnfactor の調整により、浅部高浸透率領域への圧入量が制限されたことにより、貯留層中の CO₂ 領域における浸透性が低下したことが原因であると考えられる。

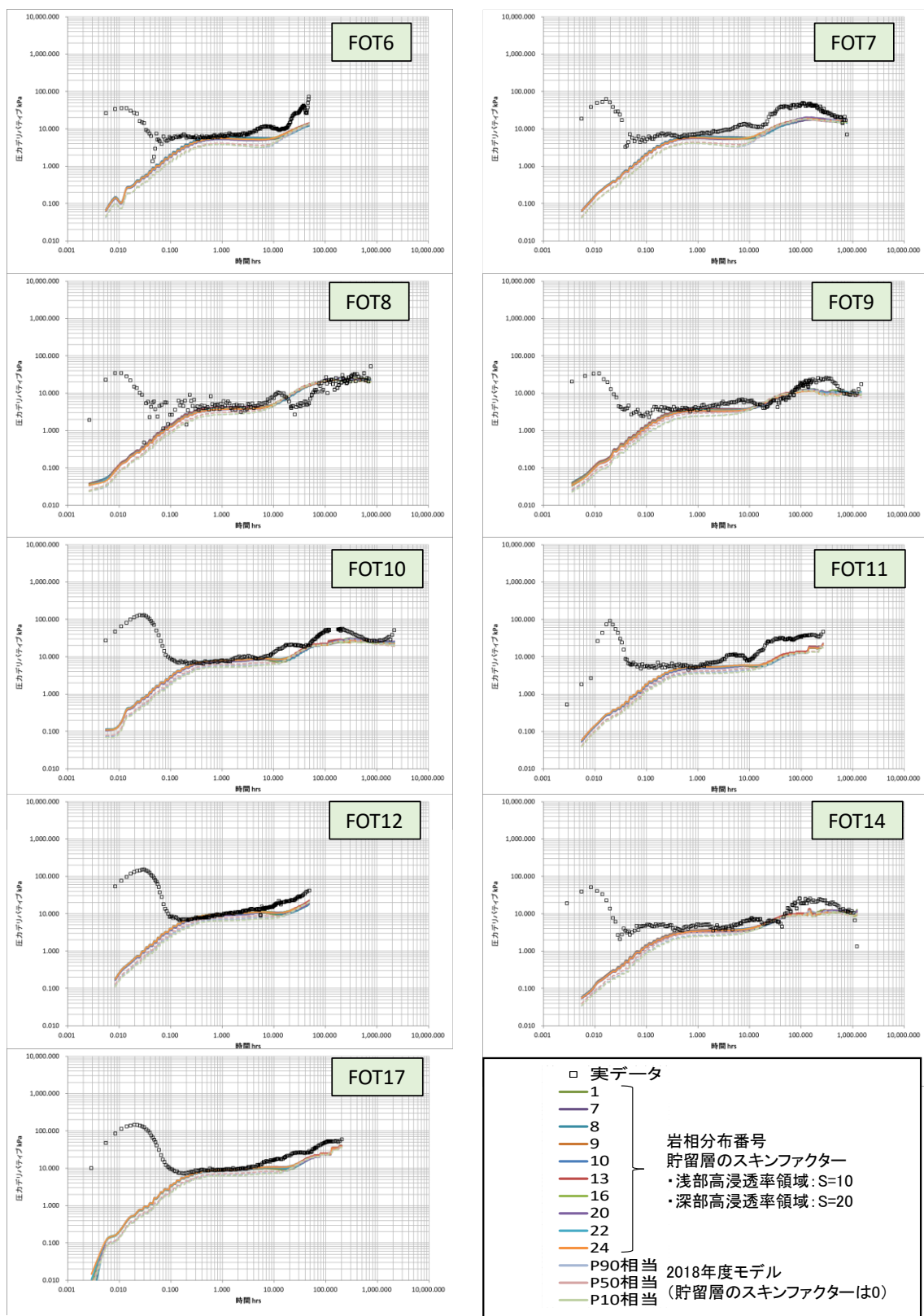
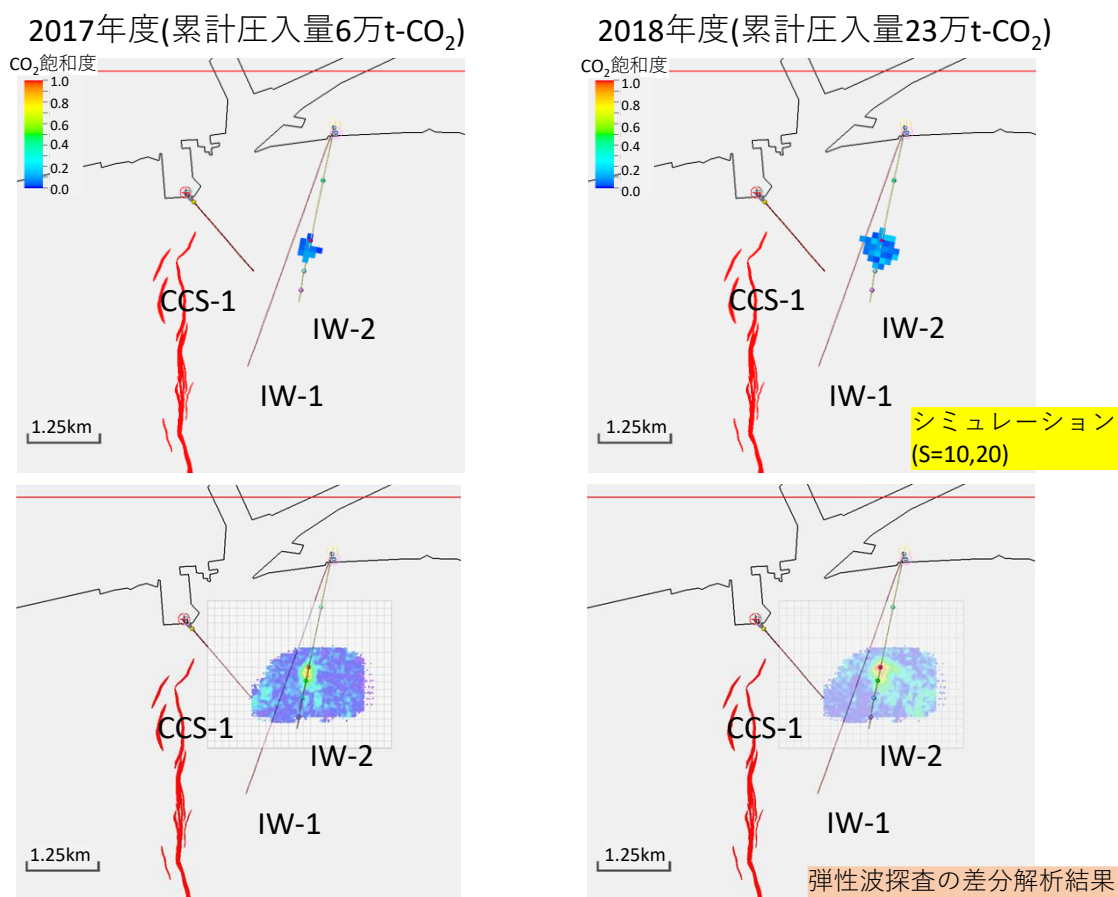


図 5.3-6 浅部高浸透率領域と深部高浸透率領域の圧入量の割合の再現【8万 t-CO₂/年】

(6) 弾性波探査の差分解析結果との比較

2017年8月1日時点(6.6万t-CO₂圧入時点)および2018年9月1日時点(20.7万t-CO₂圧入時点)で取得した三次元弾性波探査データのベースデータとの差分解析から認められたRMS振幅のアノマリーの分布と、三次元弾性波探査データを取得したタイミングにおける岩相分布1モデルによるシミュレーションによるCO₂飽和度分布を比較した(図5.3-7)。それぞれのタイミングにおけるRMS振幅のアノマリーの分布とCO₂飽和度分布はおおむね一致しているものと考えられる。



注) 23万t-CO₂圧入時のRMS速度の振幅アノマリー分布は、日本CCS調査(株)(2019)¹⁾から、6万t-CO₂圧入時のRMS速度の振幅アノマリー分布は、斉藤ほか(2018)²⁾より引用。

図5.3-7 浅部高浸透率領域と深部高浸透率領域の圧入量の割合の再現(2019年6月1日、22万t-CO₂/年で圧入、浅部:S=10、深部:S=20)

5.3.2 ヒストリーマッチに関するまとめ

FOT9以降で圧入性が低下した原因を、スキンファクターが生じたことと仮定し、浅部浸透率領域と浅部高浸透率領域のスキンファクターを試行錯誤的に求めた。その設定に、実際の圧入や圧入停止時の状況をシミュレーションにより再現し、圧入指数やFOTによ

るデリバティブカーブを再現し実データと比較した。その結果、試行錯誤的に求めたスキ
ンファクターの設定で、実際の圧入指数やFOTの状況を再現できることが示された。

【参考文献】

- 1) 日本CCS調査(株)、“2018年度「2018年度苫小牧におけるCCS大規模実証試験
事業」中間成果報告書”(2019)
- 2) 齊藤秀雄、新色隆二、東中基倫、土屋真、棚瀬大爾 “苫小牧 CCS 実証試験における
繰り返し弾性波探査結果(速報)”(2018)

5.4 IW-2 長期挙動予測シミュレーション

ヒストリーマッチは、セクターモデルを用いて行い、FOT9 以前は浅部高浸透率領域の
みに $S=10$ を与え、FOT9 以降には浅部高浸透率領域に $S=10$ 、深部高浸透率領域に $S=20$
与えることで実施した。長期挙動予測では、ヒストリーマッチの設定をフィールドモデル
に適用した。

5.4.1 使用した貯留層モデル

FOT9 以前の目的関数が 25 kPa となる岩相分布モデルの内、FOT9 以降の目的関数も
25 kPa 以下となる 30 個の岩相分布モデルを抽出し、具現像とした(図 5.4-1)。

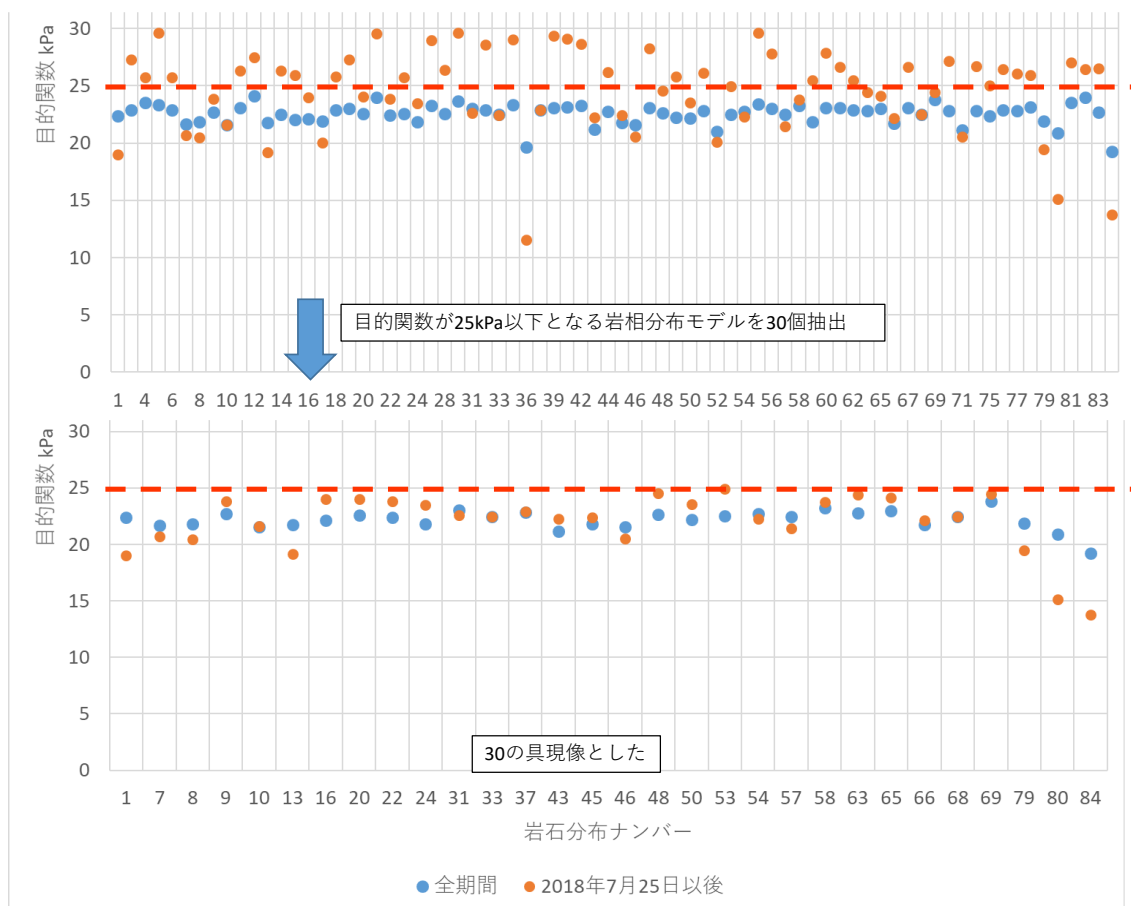
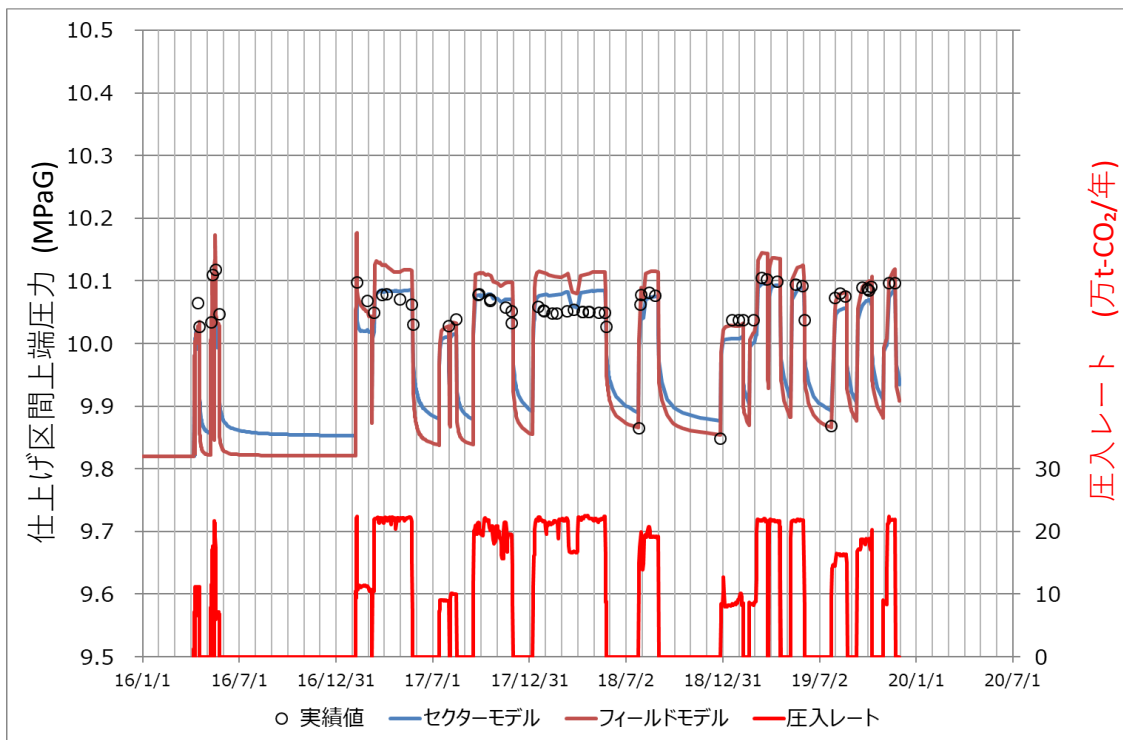


図 5.4-1 シミュレーション使用する貯留層モデル（具現像）の抽出

使用した地質モデルは、全体のグリッドサイズが 100 m×100 m×5 m 程度となるフィールドモデルを使用した。第 5.3 節で使用した圧入井の圧入区間周辺のグリッドを細分化したセクターモデルを組み込んだフィールドモデルに適用するよりも、計算時間の短縮が可能となる。再現される仕上げ区間上端圧力の推移や貯留層内での溶解 CO₂ 量分布等の計算結果が、グリッドを細分化したモデルによる計算結果と大差ないことを確認（図 5.4-2、図 5.4-3）した上で使用した。



注) 実測値は、PTセンサーで計測した圧力から管内流動シミュレーションにより仕上げ区間上端の圧力を推定した値。グリッドサイズが大きいフィールドモデルによるシミュレーション結果の方が、グリッドを細分化したセクターモデル(以下、「LGR」と称する。)よりも、0.03 MPaG程度高い圧力挙動を示す傾向が認められる。具現像1を使用した。

図 5.4-2 フィールドモデルとセクターモデル(LGR)による仕上げ区間上端圧力の比較

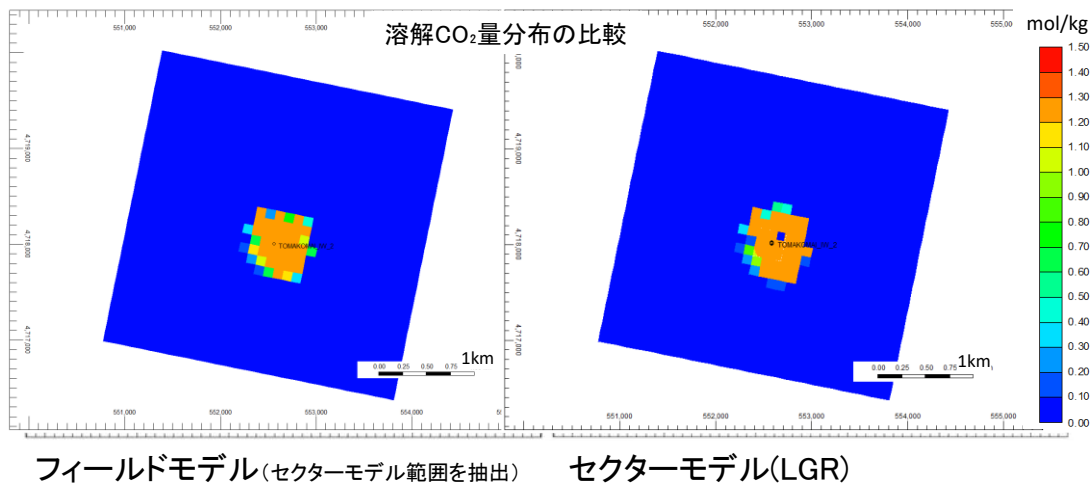


図 5.4-3 フィールドモデルとセクターモデル(LGR)による溶解CO₂量分布の再現性比較

また、地質モデルの端のグリッドに入力する貯留層の有効孔隙を増加させることで、地

質モデルの境界が開いたモデル(以下、「開境界モデル」と称する。)を設定した(図5.4-4、表5.4-1)。

2018年度の検討を踏襲し、地質モデル縁辺グリッドの有効孔隙を500倍としてシミュレーションを実施することとした。

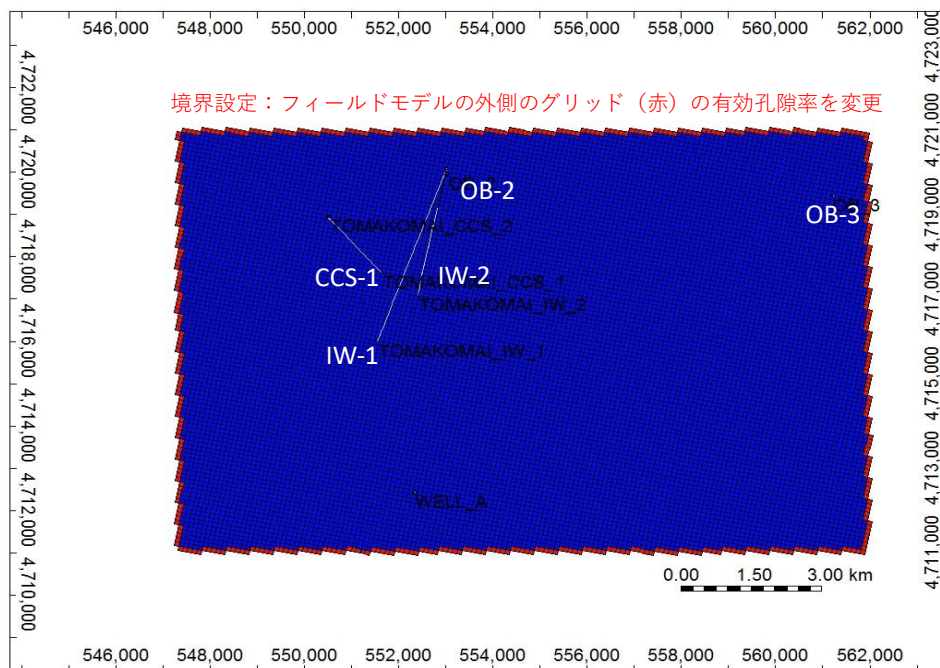


図 5.4-4 地質モデルの境界設定について

表 5.4-1 地質モデルの境界条件の設定

境界モデル名	縁辺グリッドの有効孔隙 倍率	貯留層有効孔隙(億m ³)	貯留層全体の有効孔隙 倍率
閉境界モデル	1	122.9	1
開境界モデル×50	50	352.4	3
開境界モデル×100	100	586.6	5
開境界モデル×200	200	1,054.90	9
開境界モデル×300	300	1,523.30	12
開境界モデル×400	400	1,991.70	16
開境界モデル×500	500	2,460.10	20
開境界モデル×600	600	2,928.50	24
開境界モデル×700	700	3,396.80	28

5.4.2 長期挙動予測シミュレーションのパラメータの設定

2018年度の検討を踏襲した(表5.4-2)。

表 5.4-2 地質モデル入力値

モデルサイズ	15km × 10km × 1,700m		
グリッド数	163 × 126 × 173		
アクティブ・ブロック数	708,711		
基準温度	36.2°C@920.41m(TVDSS)		
基準圧力	9,290kPa@920.41m(TVDSS)		
塩分濃度(ppm NaCl)	3,150		
境界条件	開境界		
	モデル境界に500倍の有効孔隙を設定		
	貯留層	遮蔽層	
孔隙率	岩相毎に設定	孔隙率	0.299
浸透率(mD)	岩相毎に設定	浸透率(md)	0.0015
ネットグロス比	岩相毎に設定	相対浸透率曲線	krw曲線:Corey
岩石圧縮率(1/kPa)	4.54×10^{-6}		krw曲線:van Genuchten
相対浸透率曲線	岩相10、11:n=2.0	krw	1
	その他:n=3.5	krw	1
krw	岩相10、11=0.60	Sgc	0.05
	その他=0.143	Swir	0.638
krw	1	ヒステリシス(Sgrmax)	なし
Sgc	0.05		
Swir	浸透率と孔隙率より算出		
ヒステリシス(Sgrmax)	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}		

5.4.3 長期挙動予測シミュレーション結果

圧入実績(2019年11月22日まで圧入)に基づいたケース1、ケース1に続いて2021年4月1日より圧入を再開するケース2、ケース2に続き、途中から圧入区間を変更するケース3-1と3-2を実施した(図5.4-5)。以下、ケースごとに結果の詳細を述べる。

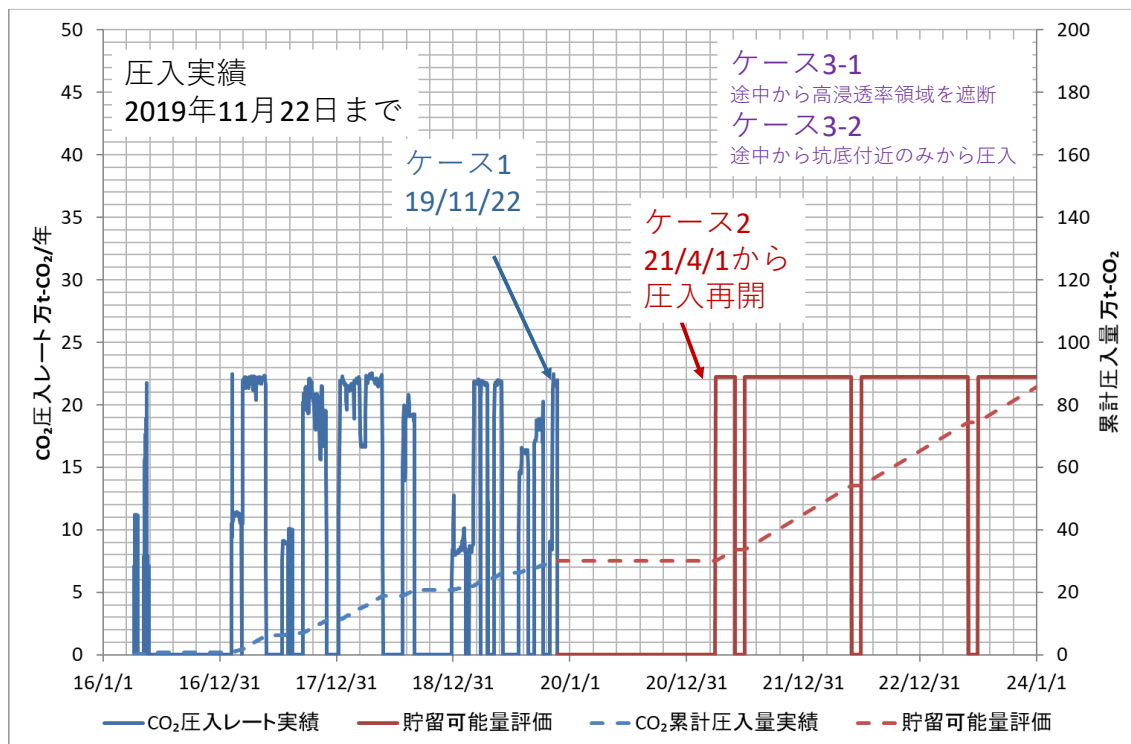


図 5.4-5 長期挙動予測シミュレーションの実施ケース

(1) ケース 1 (実績ケース : 2019 年 11 月 22 日に圧入を停止)

圧入実績に即したケース。2016 年 4 月 6 日の圧入開始から 2019 年 11 月 22 日までに累計 30 万 t-CO₂を圧入し、圧入停止後 1,000 年間の挙動を予測した。

30 個の具現像について同様の圧入を実施する長期挙動予測シミュレーションを実施し、監視期間が終了する 2021 年 4 月 1 日時点での各具現像の仕上げ区間上端圧力の平均値 (9.049 MPaG) と標準偏差 (0.001 MPaG) を求め、累積分布曲線を作成した (図 5.4-6)。各具現像の圧力の振れ幅は非常に小さいものとなった。

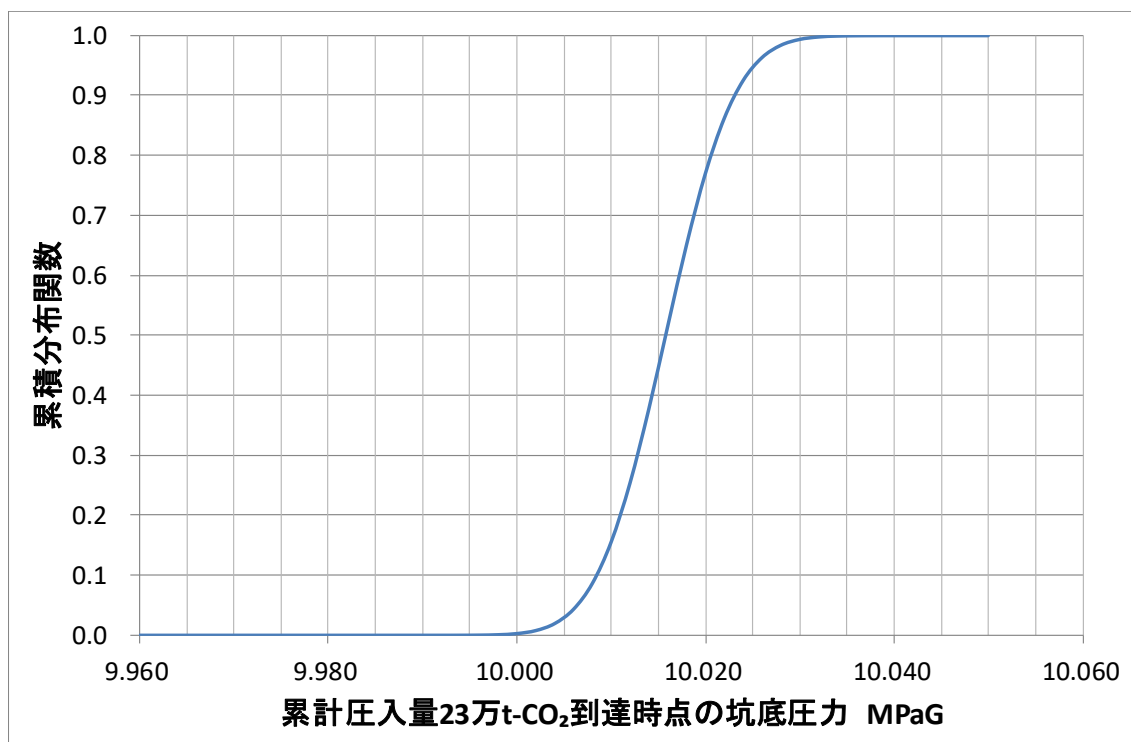
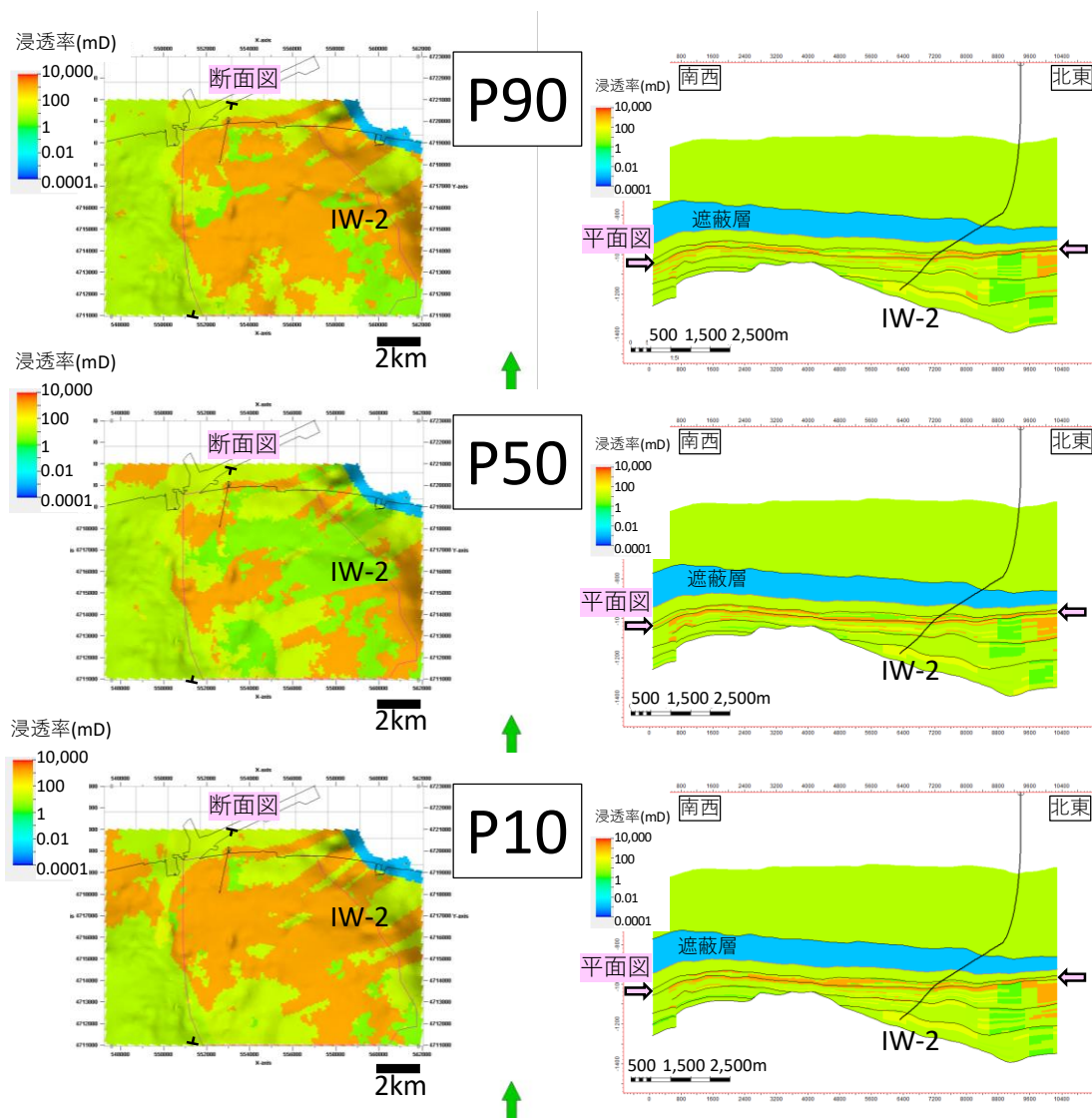


図 5.4-6 ケース 1 2021 年 4 月 1 日時点の仕上げ区間上端圧力の累積分布曲線

図 5.4-7 にケース 1 における P90、P50、P10 に相当する具現像の浸透率分布を示す。左側の平面図は、浅部高浸透率領域における浸透率分布を示している。右側の断面図は IW-2 の坑跡に平行な方向の断面図を示している。



注) 平面図は浅部高浸透率領域に相当する層準。

図 5.4-7 ケース 1 における 90、P50、P10 に相当する具現像の浸透率分布

① IW-2 坑内圧力挙動予測

図 5.4-8 にケース 1 の圧入により P90、P50、P10 各具現像で再現された仕上げ区間上端の圧力推移と、圧力の実測値のプロットを示す。それぞれの具現像で再現される圧力推移に大差はなく、圧力実測値ともおおむね一致した。

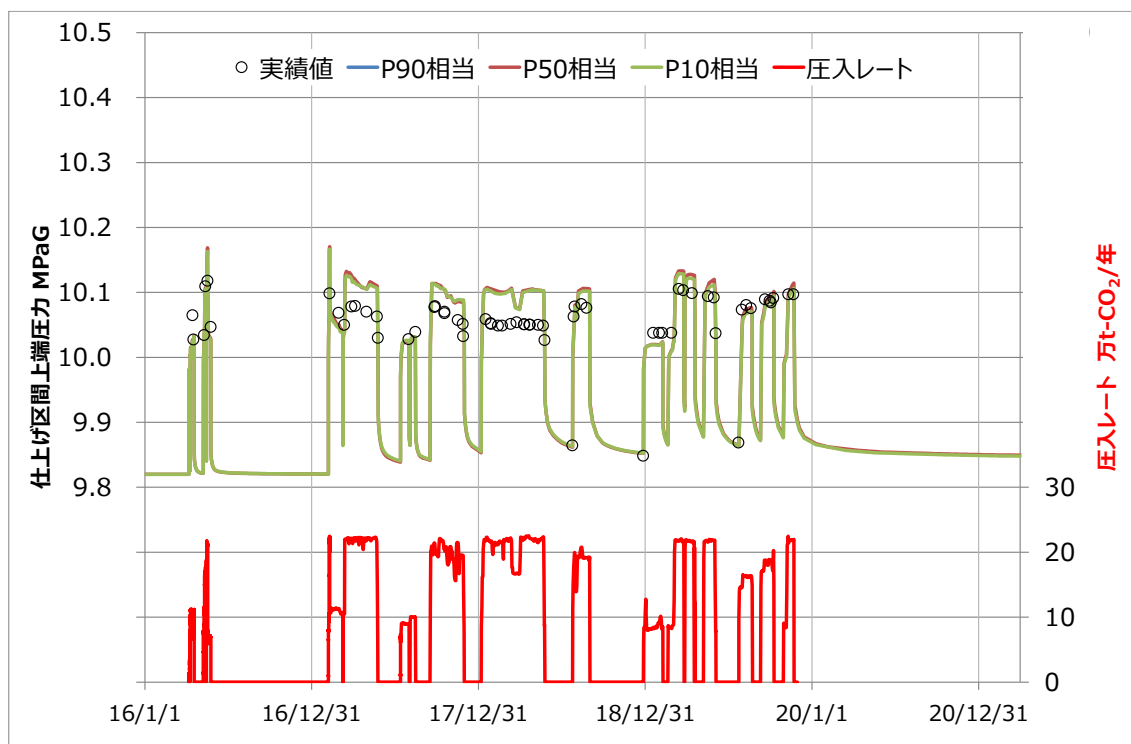
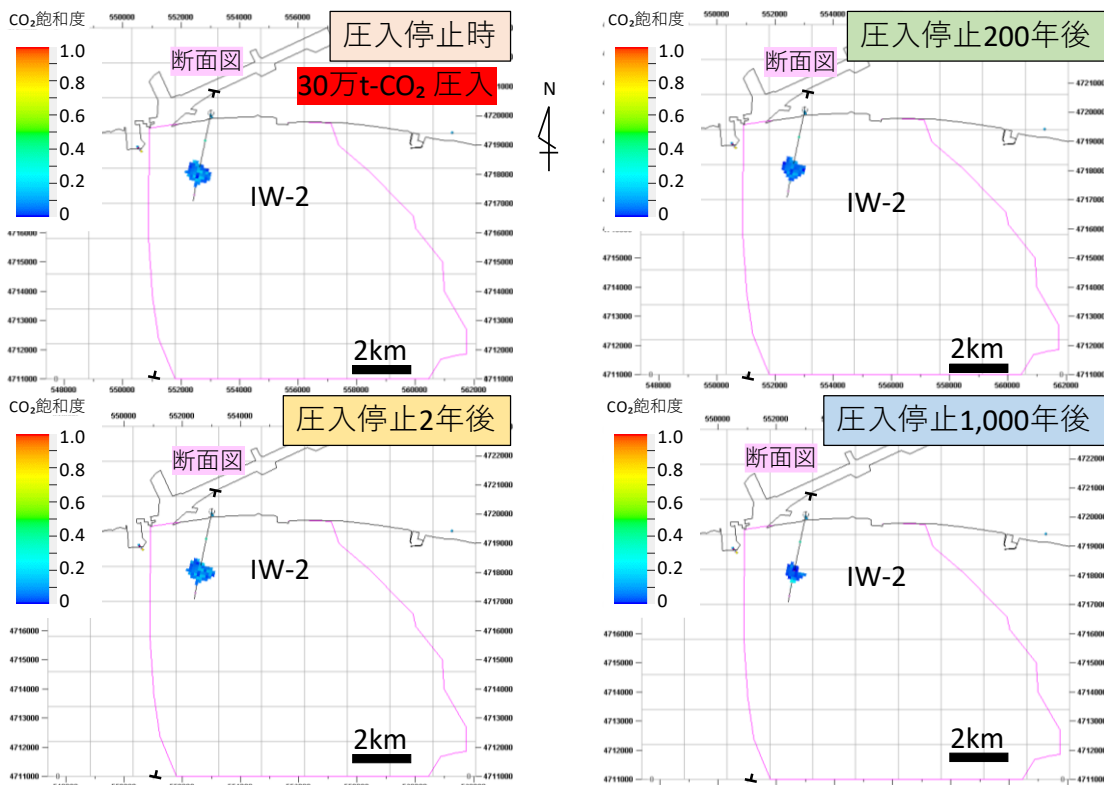


図 5.4-8 ケース 1 P90、P50、P10 具現像による仕上げ区間上端圧力
(実績ベース 2019 年 11 月 22 日に累計圧入量 30 万 t 圧入で停止)

② 長期挙動予測結果

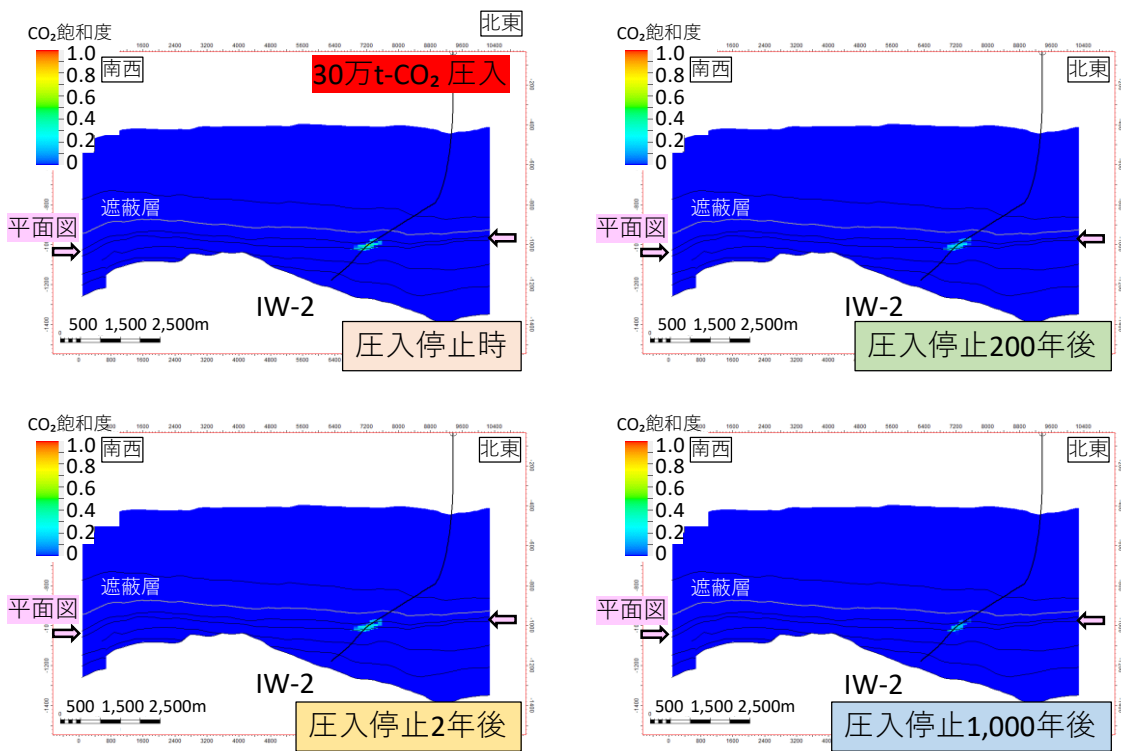
a. CO₂ 飽和度分布

図 5.4-9～図 5.4-14 に P90、P50、P10 の各具現像における圧入停止時、圧入停止から 2 年後、圧入停止から 200 年後、圧入停止から 1,000 年後の各時点で予想される CO₂ 飽和度の分布を示す。各具現像とも岩相分布の違いにより、CO₂ 飽和度の形に多少の違いが見られるが顕著な差異は認められない。ほぼ坑井周辺に均等に広がっており、岩相の不均質性による CO₂ 飽和度の影響は少ないものと考えられる。時間の経過とともに CO₂ は圧力差(粘性力)や浮力によって周辺に広がり、周辺の CO₂ が未飽和の地層水に溶解するため、CO₂ 飽和度の分布範囲は徐々に縮小する。各断面図に示されるように CO₂ は高浸透率領域を中心に圧入されている。いずれの具現像においても CO₂ 飽和度の分布範囲は遮蔽層には及んでいない。



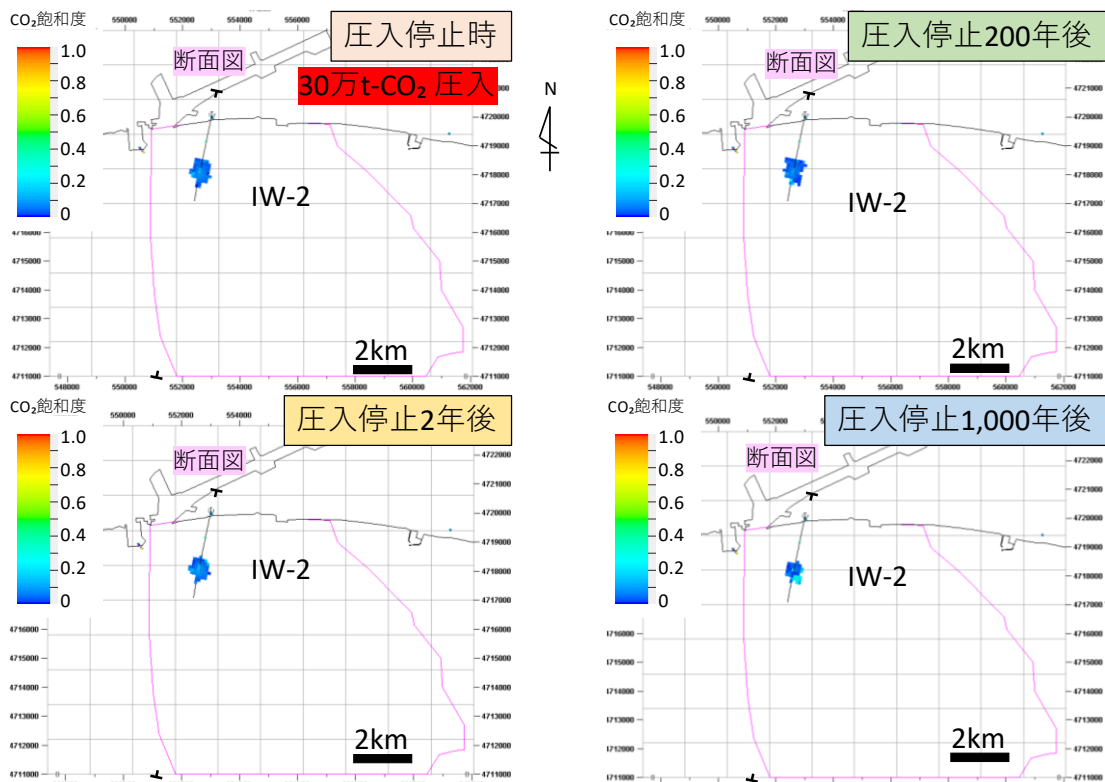
注) 貯留層に圧入された CO₂ 飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 0.001。

図 5.4-9 ケース 1 P90 具現像における CO₂ 飽和度分布 (平面図)



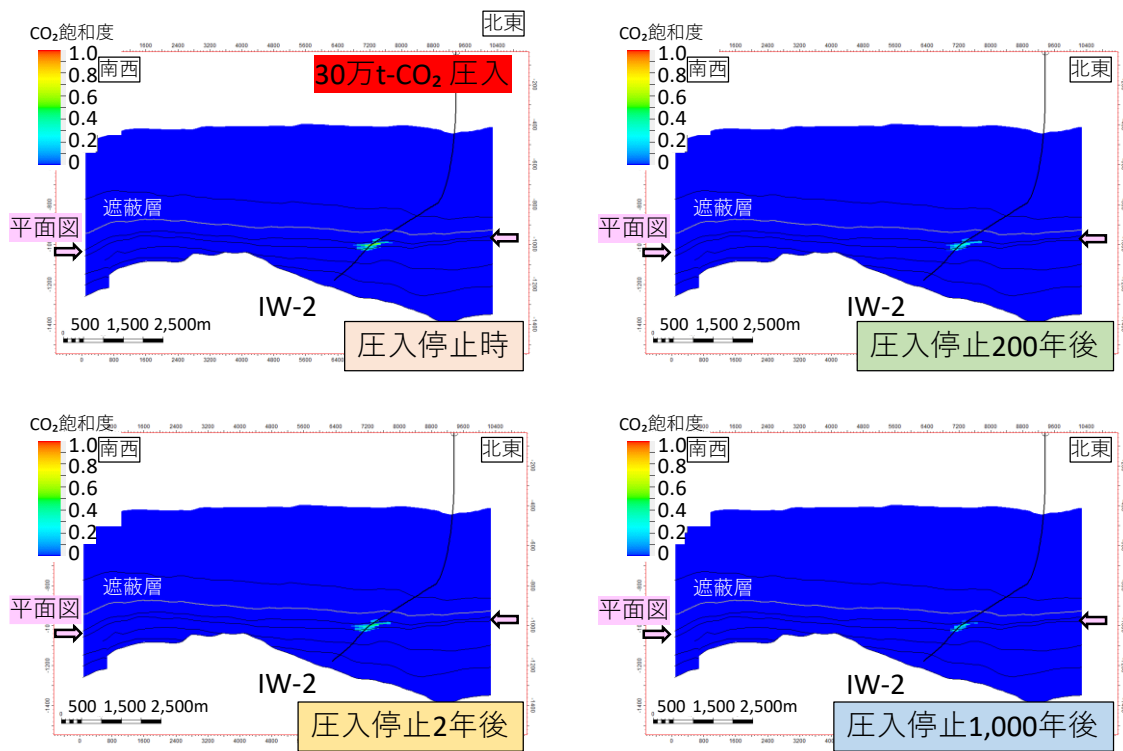
注) 図 5.4-9 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-10 ケース 1 P90 具現像における CO₂ 飽和度分布 (断面図)



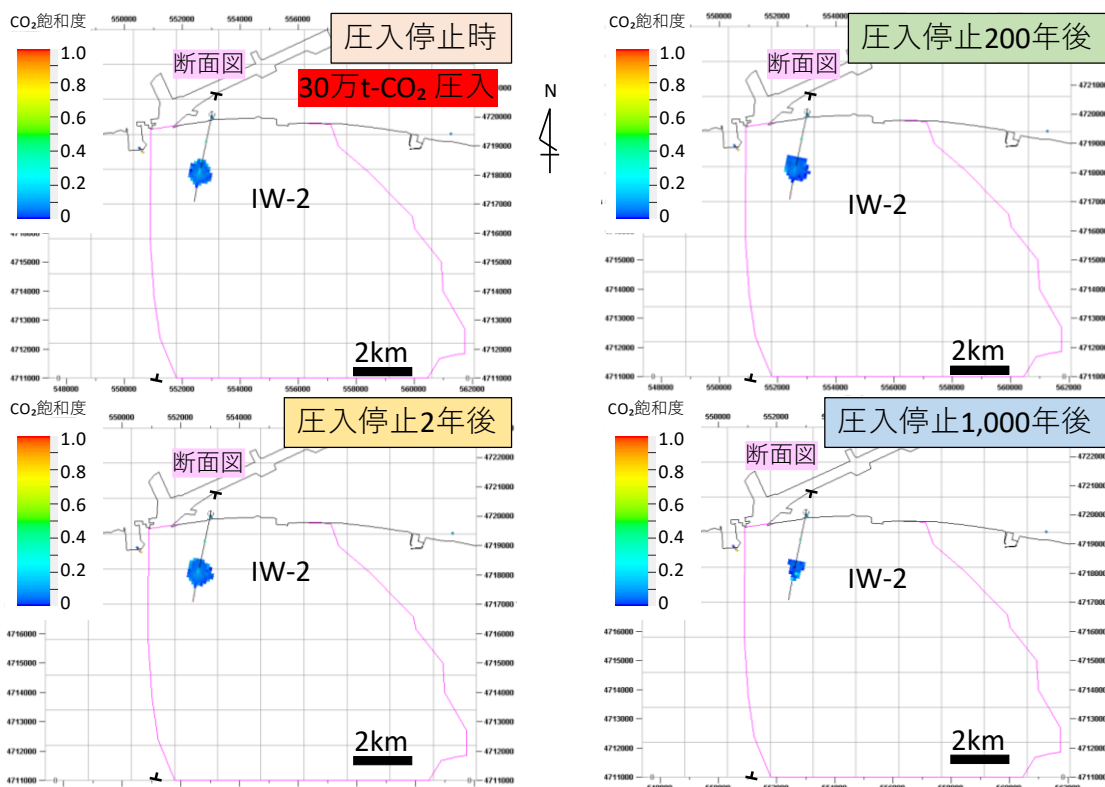
注) 貯留層に圧入された CO₂ 飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 0.001。

図 5.4-11 ケース 1 P50 具現像における CO₂ 飽和度分布 (平面図)



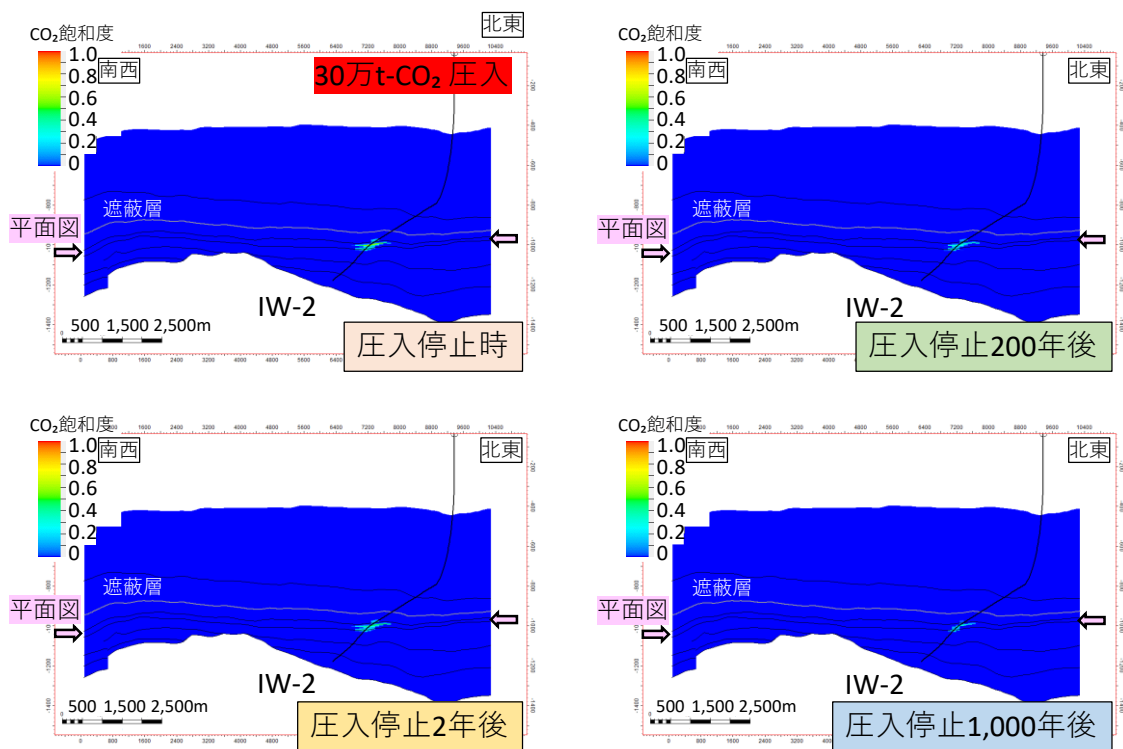
注) 図 5.4-11 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-12 ケース 1 P50 具現像における CO₂ 飽和度分布 (断面図)



注) 貯留層に圧入されたCO₂飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は0.001。

図 5.4-13 ケース 1 P10 具現像におけるCO₂飽和度分布(平面図)



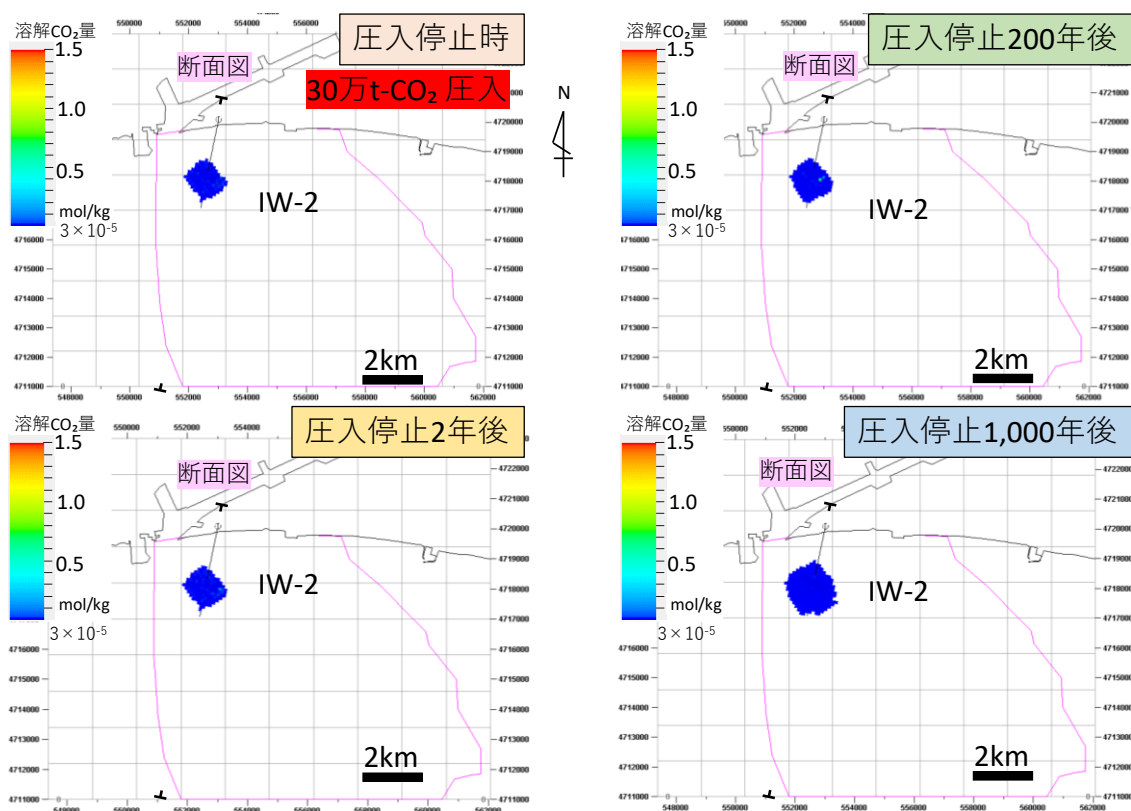
注) 図 5.4-13 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-14 ケース 1 P10 具現像におけるCO₂飽和度分布(断面図)

b. 溶解CO₂量分布

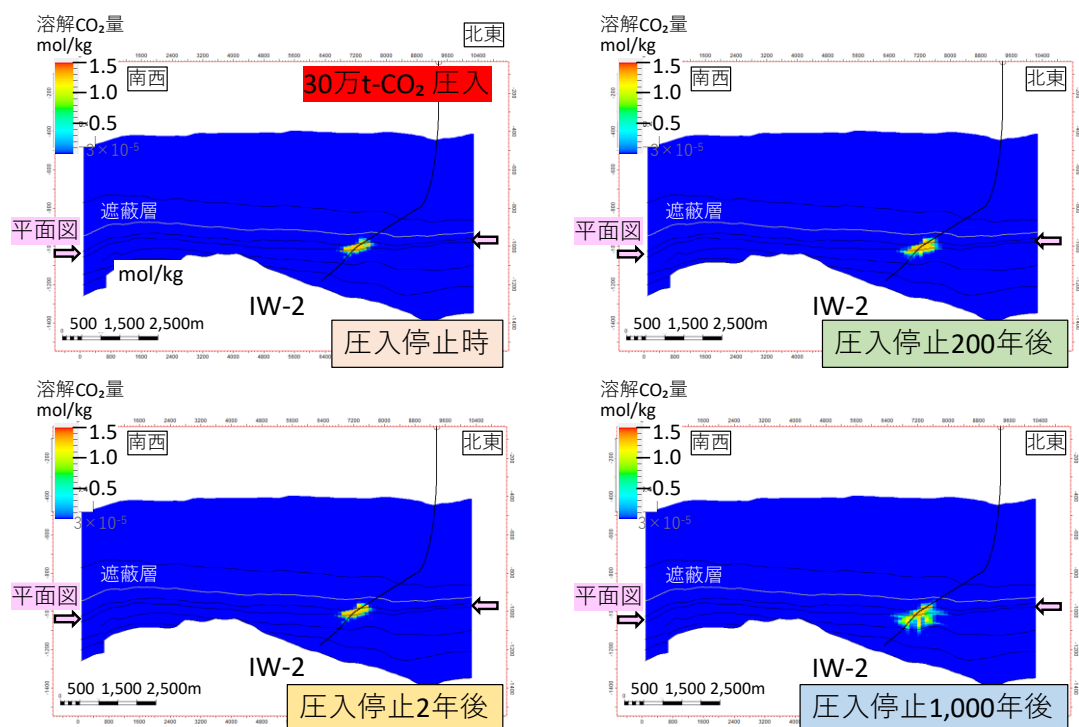
図5.4-15～図5.4-20にP90、P50、P10の各具現像における圧入停止時、圧入停止から2年後、圧入停止から200年後、圧入停止から1,000年後の各時点で予想される溶解CO₂量の分布を示す。

各具現像とも岩相分布の違いにより、溶解CO₂量の分布形態に多少の違いが見られるが顕著な差異は認められない。時間の経過とともに溶解CO₂量は地質構造的に低い周辺部分や下方へと分布を広げる。各断面図に示されるようにCO₂が主に圧入された高浸透率領域を中心に溶解CO₂量が増加する。時間の経過とともに溶解したCO₂を含む地層水とその周辺の地層水との密度差により、溶解CO₂量の分布は下方に垂れ下がるようになる。



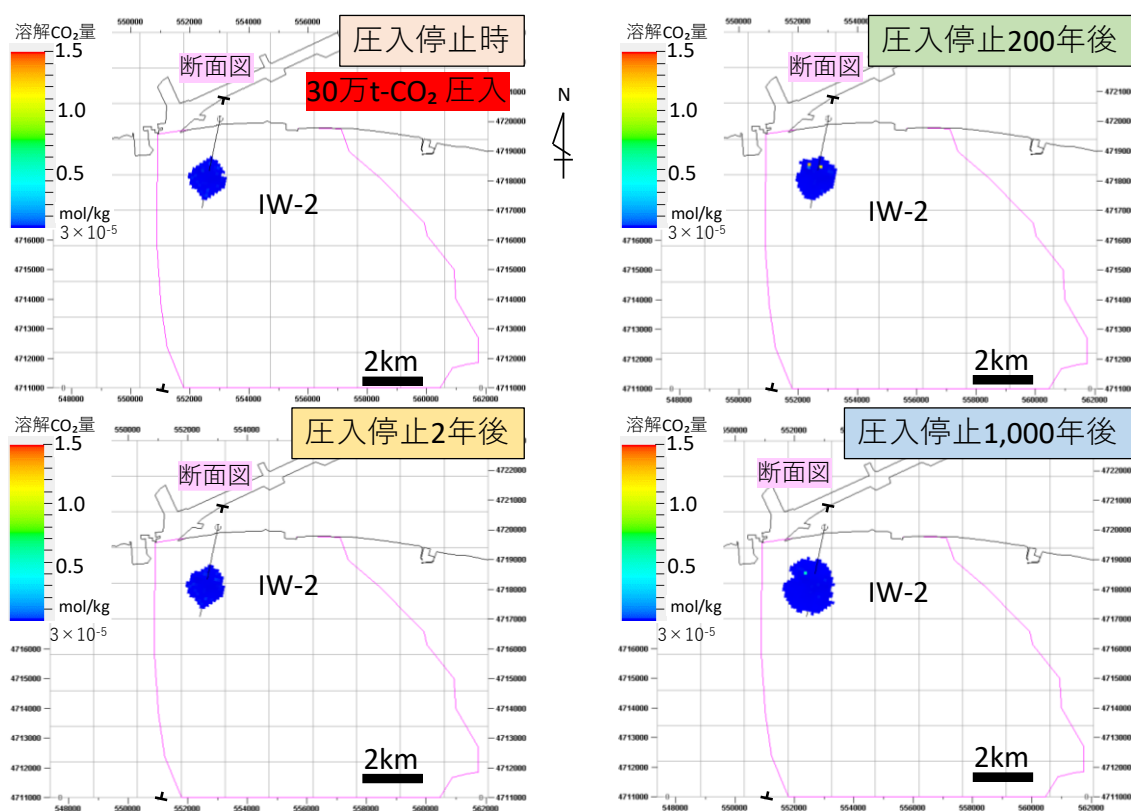
注) 貯留層に圧入された溶解CO₂量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図5.4-15 ケース1 P90 具現像における溶解CO₂量分布(平面図)



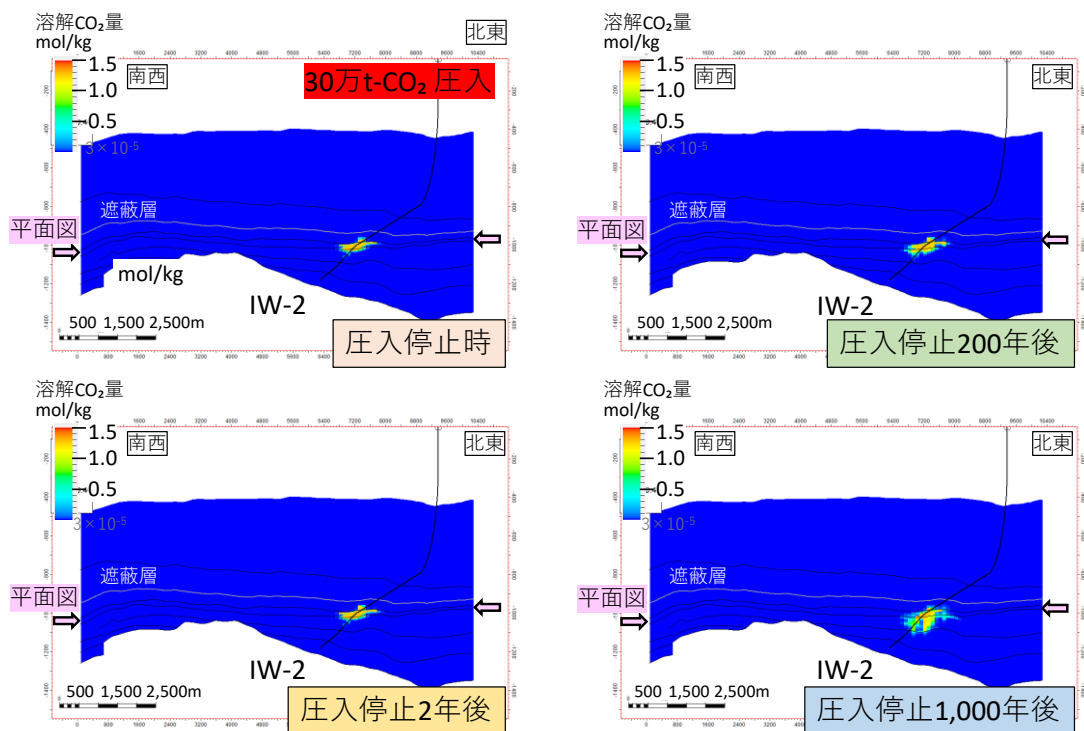
注) 図 5.4-15 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-16 ケース 1 P90 具現像における溶解 CO₂ 量分布 (断面図)



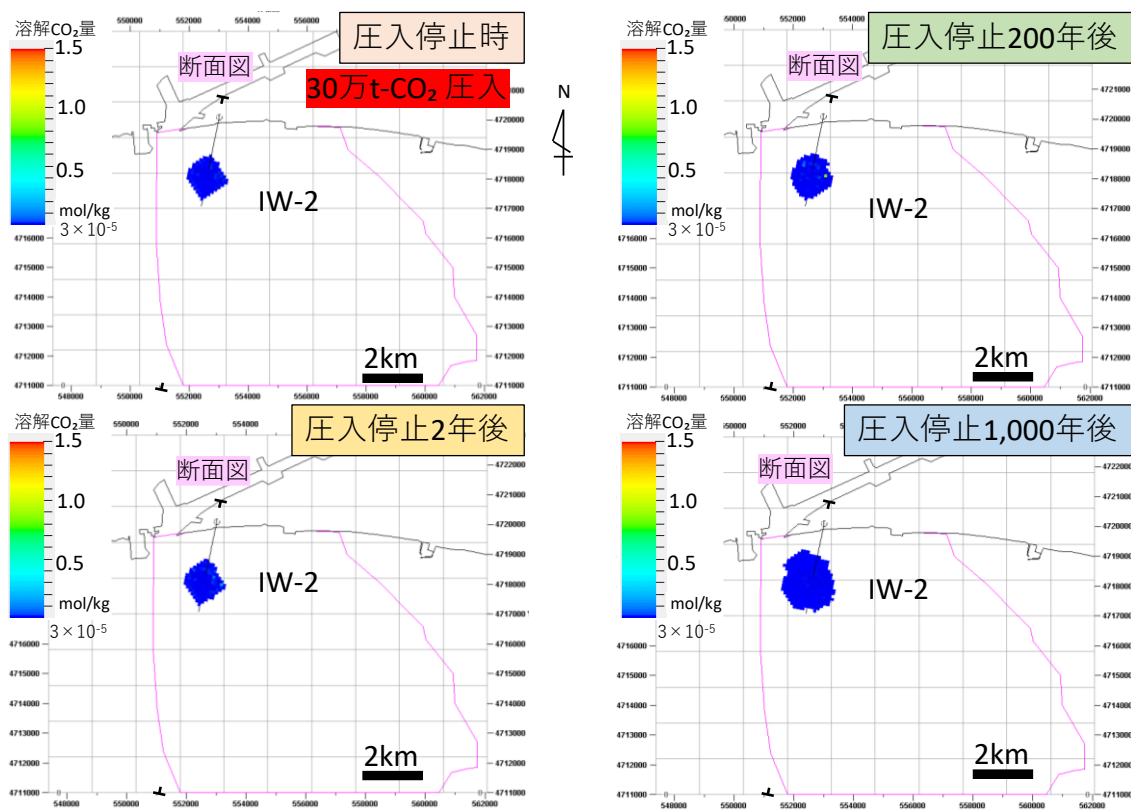
注) 貯留層に圧入された溶解 CO₂ 量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.4-17 ケース 1 P50 具現像における溶解 CO₂ 量分布 (平面図)



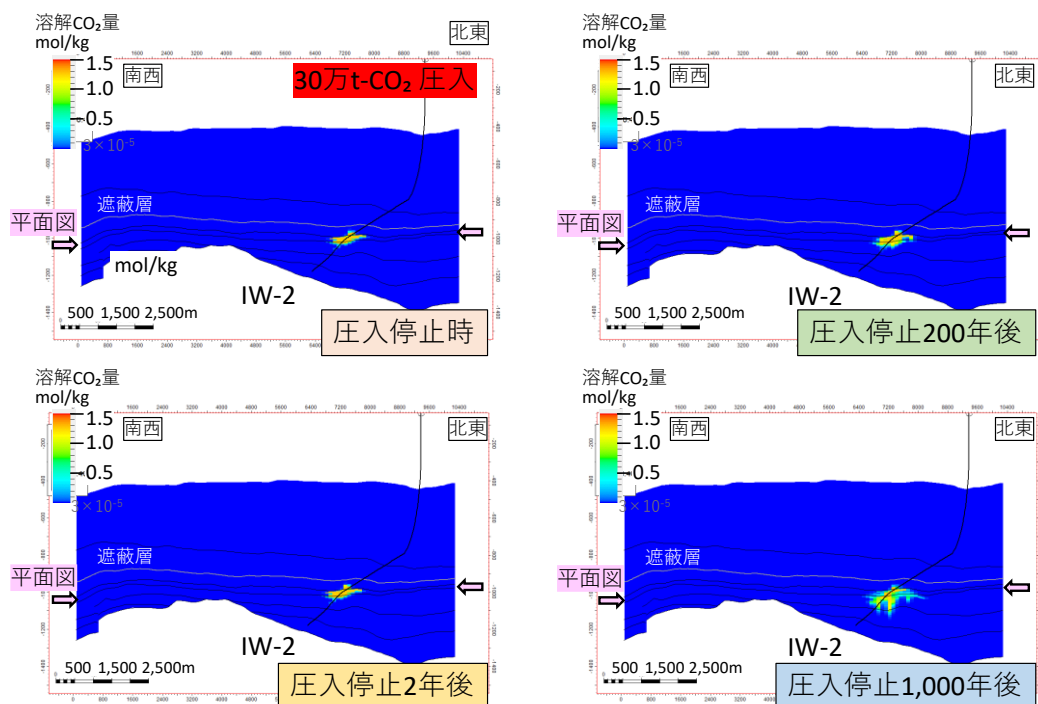
注) 図 5.4-17 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-18 ケース 1 P50 具現像における溶解 CO₂ 量分布 (断面図)



注) 貯留層に圧入された溶解 CO₂ 量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.4-19 ケース 1 P10 具現像における溶解 CO₂ 量分布 (平面図)



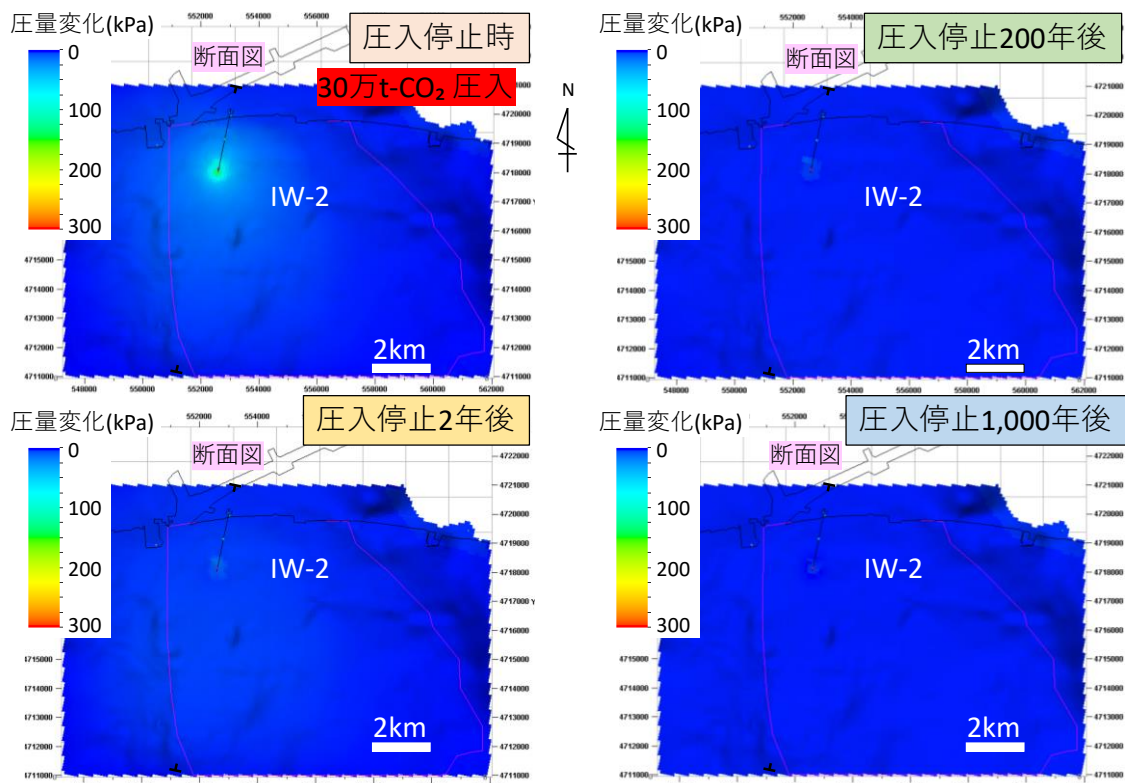
注) 図 5.4-19 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-20 ケース 1 P10 具現像における溶解 CO₂ 量分布 (断面図)

c. 圧力変化分布

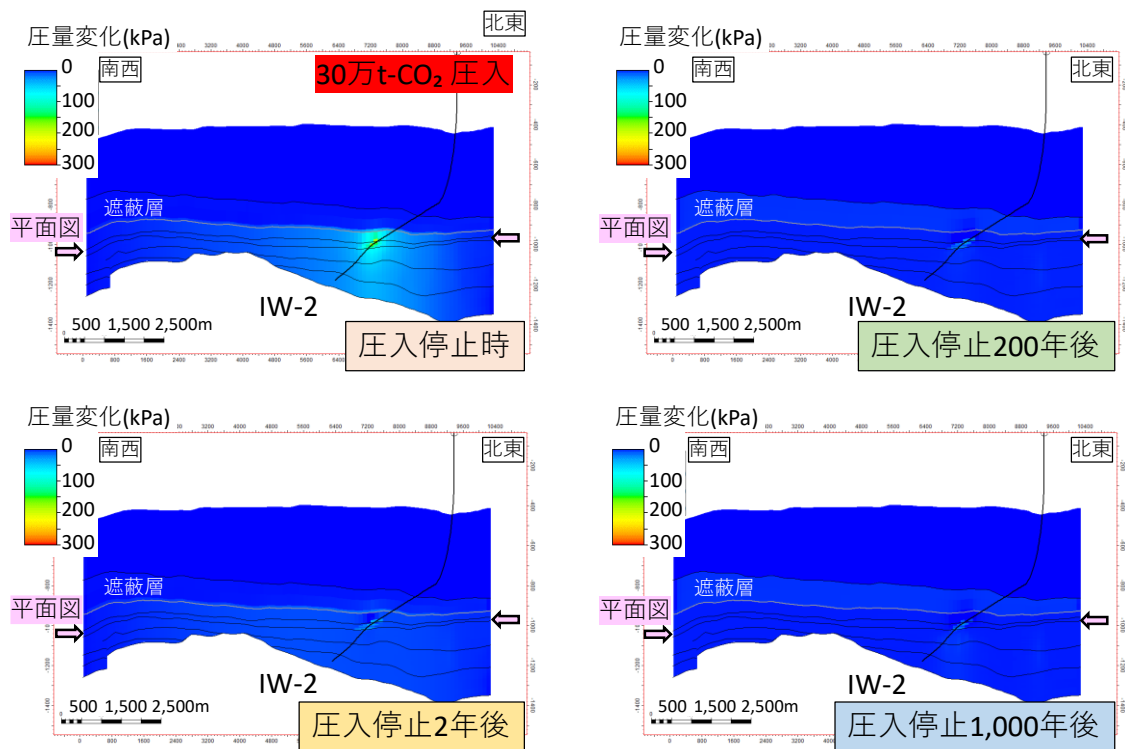
図 5.4-21～図 5.4-26 に P90、P50、P10 の各具現像における圧入停止時、圧入停止から 2 年後、圧入停止から 200 年後、圧入停止から 1,000 年後の各時点で予想される貯留層の圧力変化の分布を示す。

各具現像とも岩相分布の違いにより、圧力変化の分布に多少の違いが見られるが顕著な差異は認められない。圧入停止時には IW-2 周辺でおよそ 100 kPa～150 kPa の圧力変化 (上昇) が認められる。その時点における西側の断層付近における圧力上昇値は 10 kPa 以下と予想される。圧入停止後、貯留層圧力の変化は迅速に解消され、圧入停止 1,000 年後にはほぼ圧力変化は回復する。



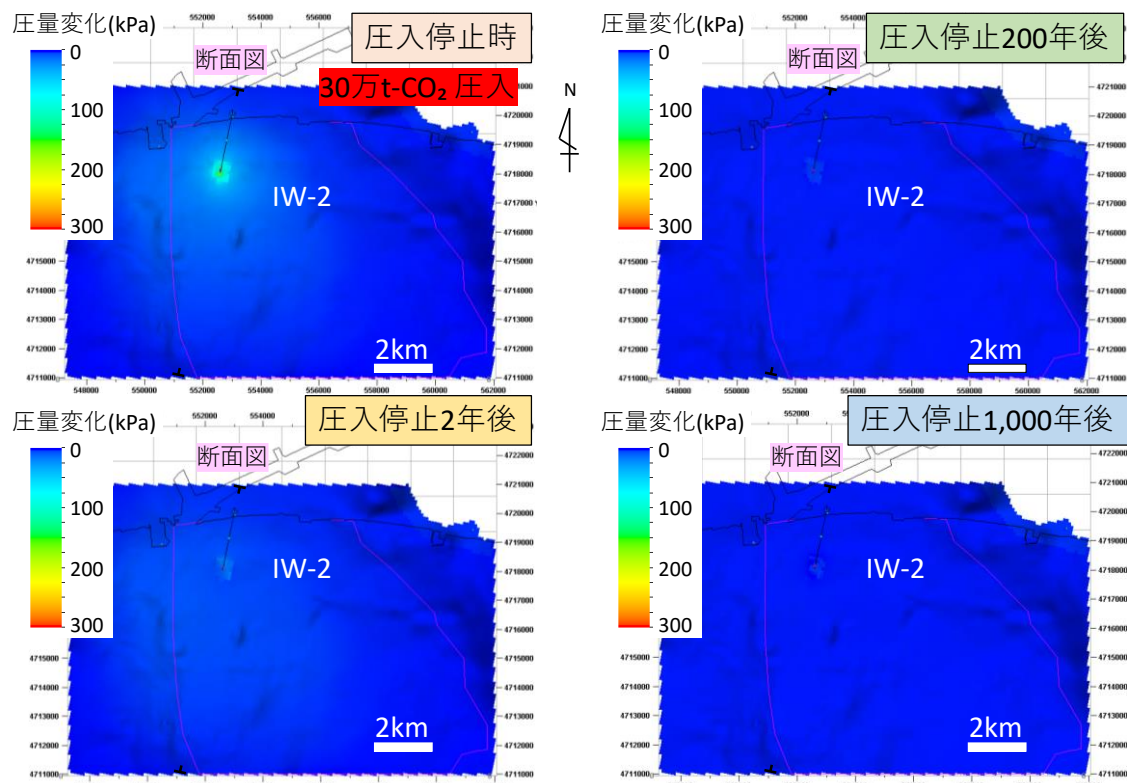
注) 浅部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.4-21 ケース 1 P90 具現像における圧力変化分布 (平面図)



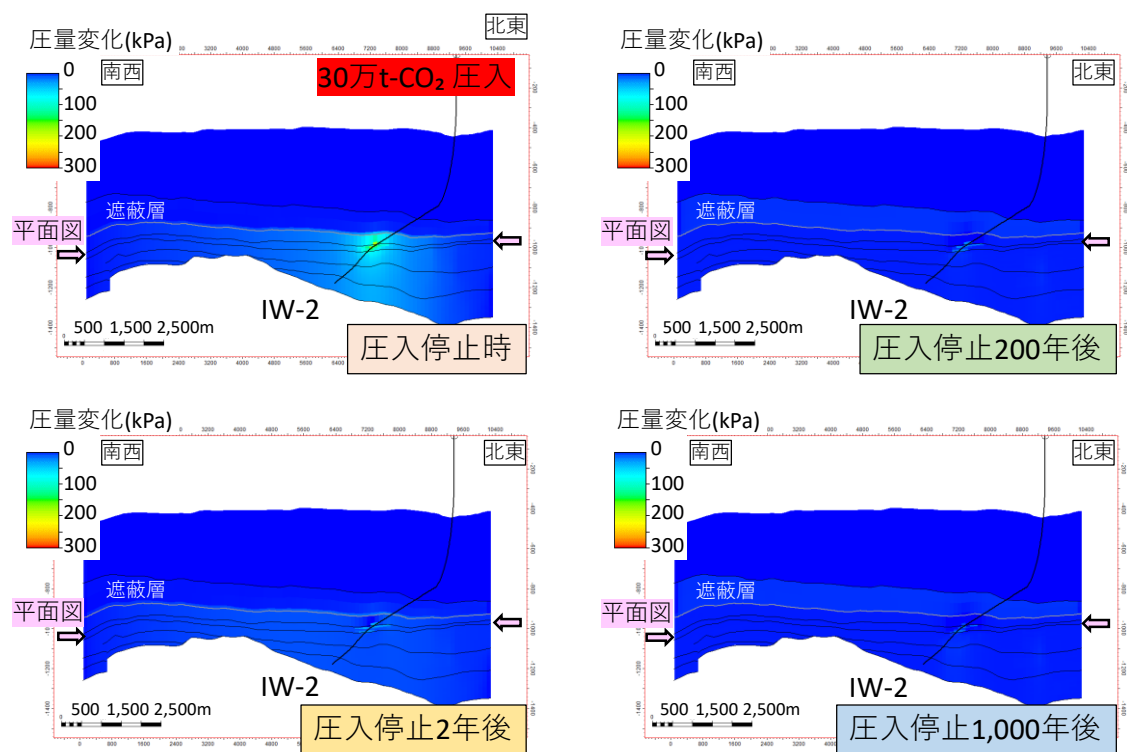
注) 図 5.4-21 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-22 ケース 1 P90 具現像における圧力変化分布 (断面図)



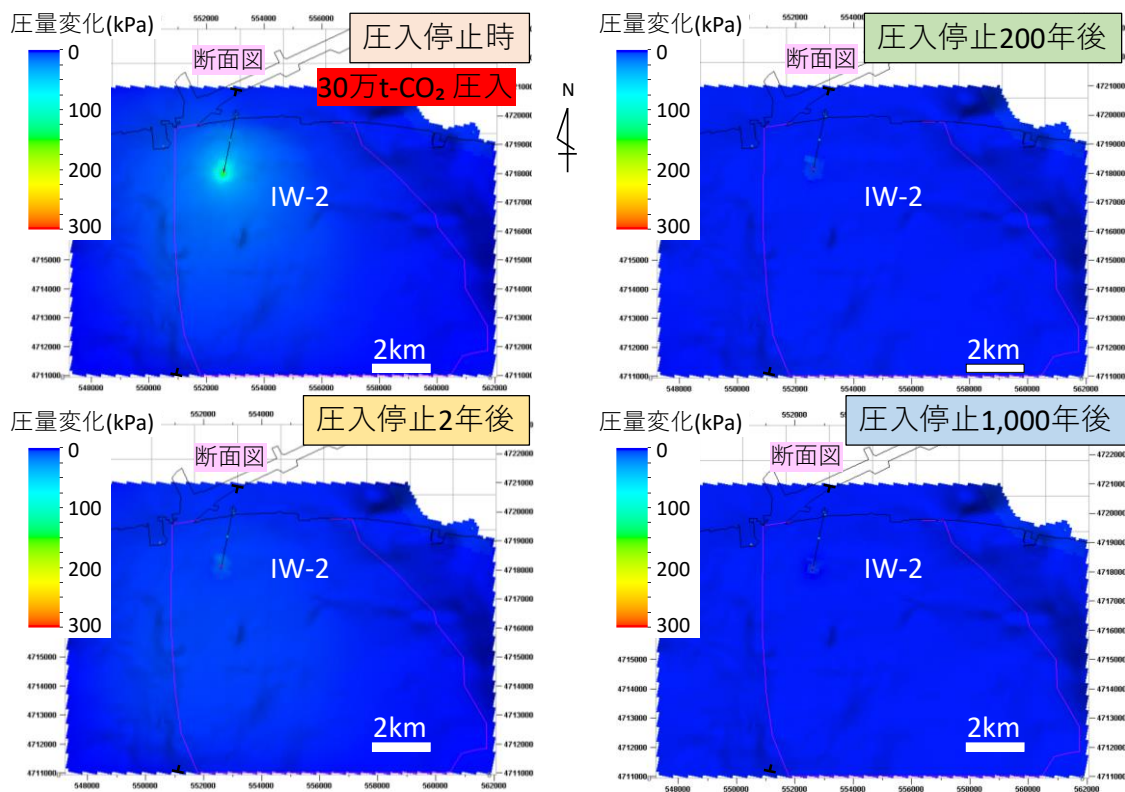
注) 浅部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.4-23 ケース 1 P50 具現像における圧力変化分布 (平面図)



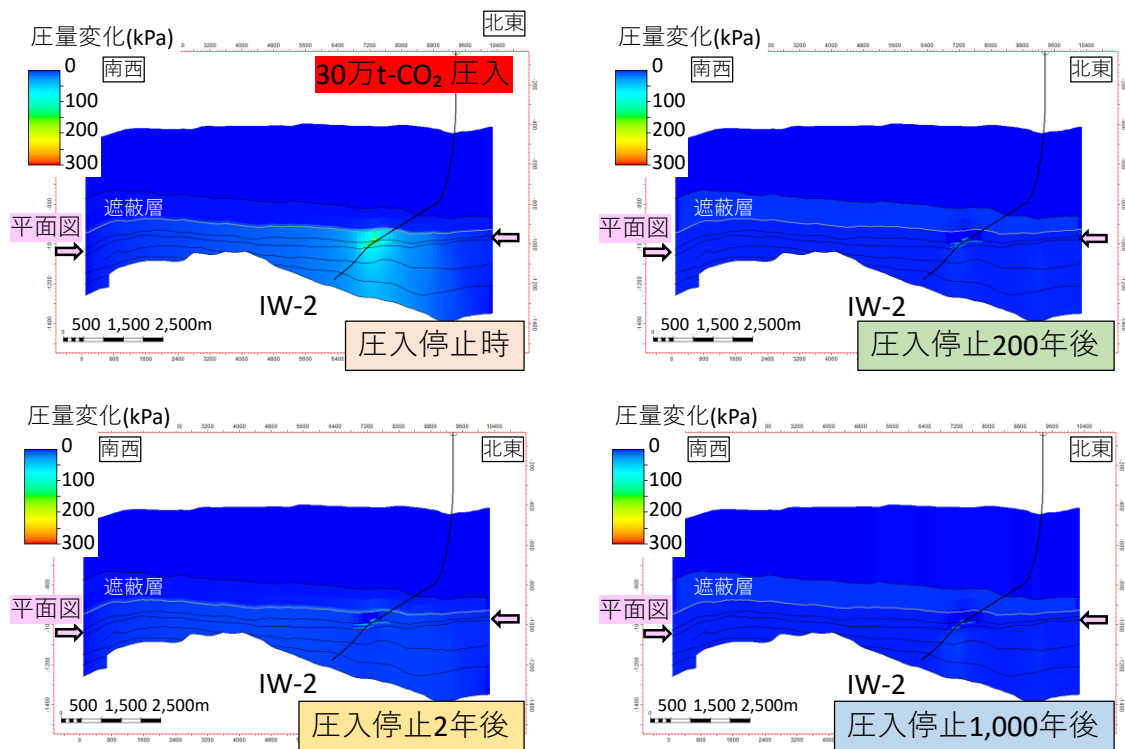
注) 図 5.4-23 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-24 ケース 1 P50 具現像におけるにおける圧力変化分布 (断面図)



注) 浅部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.4-25 ケース 1 P10 具現像における圧力変化分布 (平面図)



注) 図 5.4-25 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-26 ケース 1 P10 具現像におけるにおける圧力変化分布 (断面図)

d. 貯留形態の予測

図 5.4-27 にケース 1 における P10、P50、P90 の各モデルの圧入終了から 1,000 年後までの貯留形態の予測を示す。圧入停止後貯留層内の超臨界 CO₂ は地層水への溶存と残留により貯留層中にトラップされ、おおむね 200~400 年後ころまでに圧入した CO₂ のほぼすべてが溶存トラップと残留トラップにより貯留層内で移動しない状態になる。

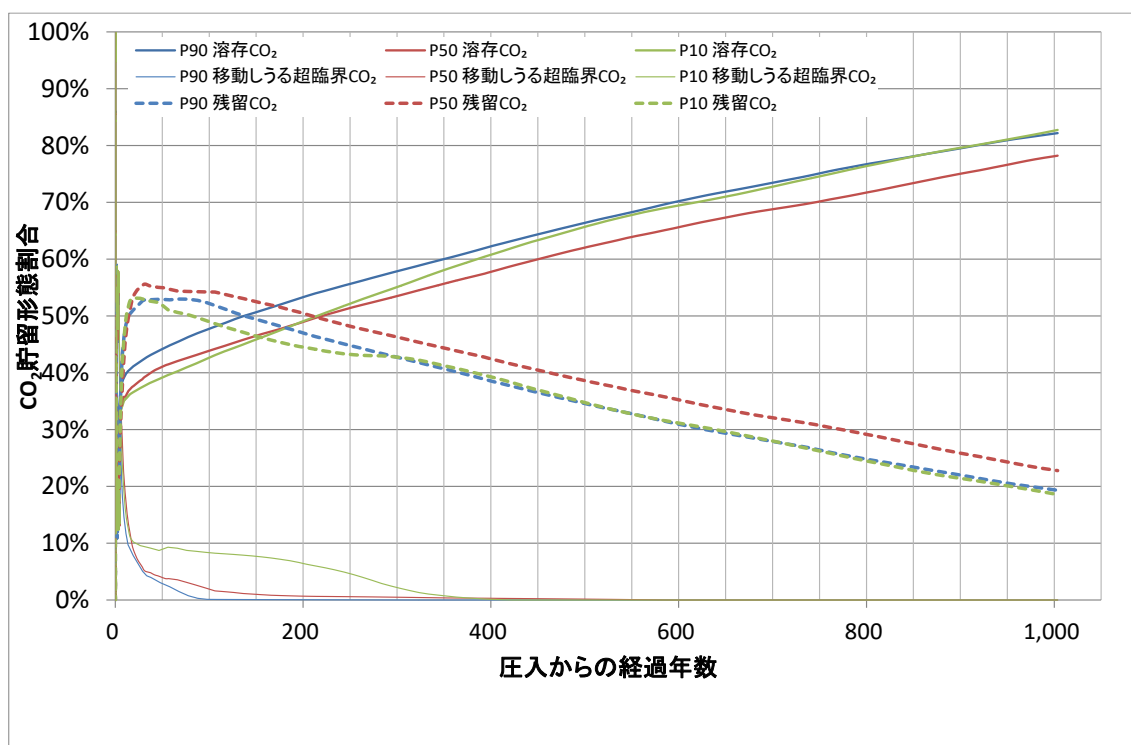


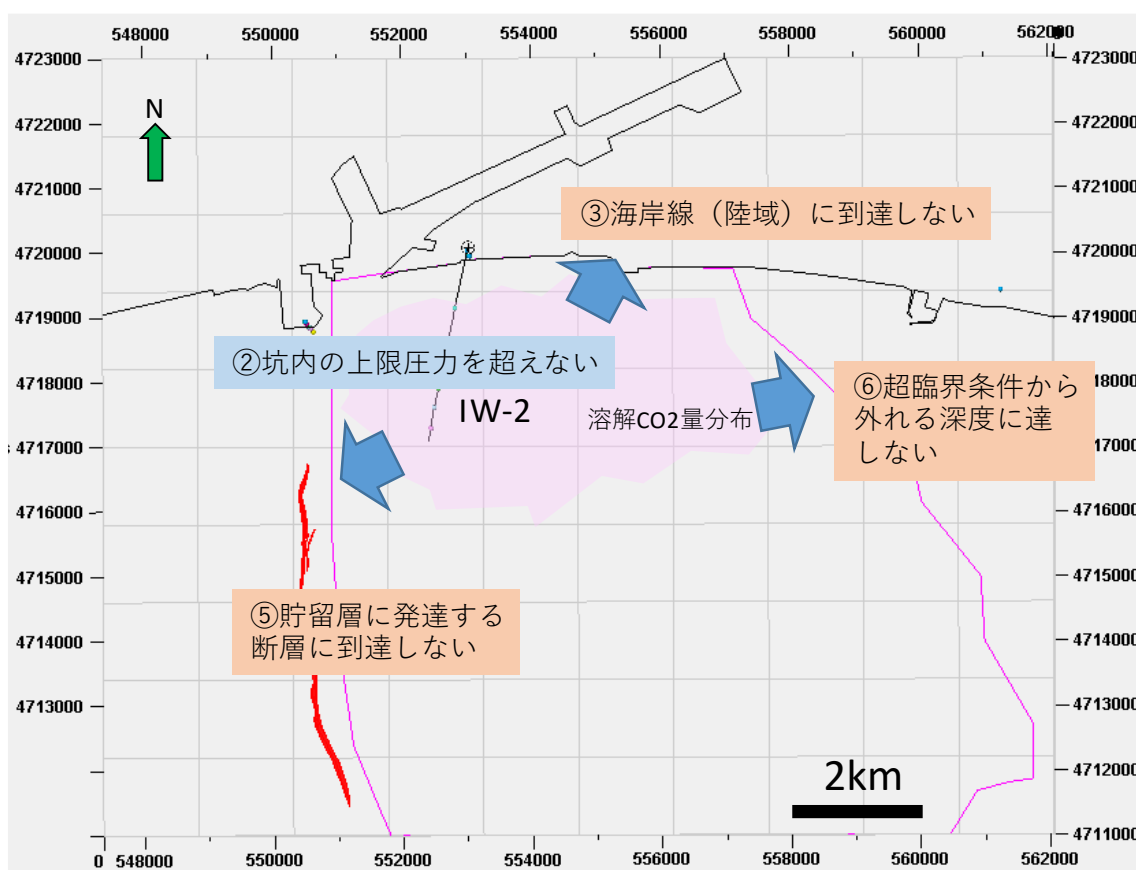
図 5.4-27 ケース 1 貯留形態の予測

(2) ケース 2 (現状設備による最大貯留 (圧入) 可能量/独自基準による想定)

ケース 1 の圧入停止期間を 2021 年 3 月 31 日までとし、それ以降 22 万 t-CO₂/年で圧入を継続 (6 月の 1 箇月は圧入停止) し、圧入量が 100 万 t 増加するごとに、1,000 年間の監視期間を設け、その監視期間中に所定の条件を満たす限り 100 万 t 単位の圧入を繰り返すことで、最大貯留 (圧入) 可能量を推定した (表 5.4-3、図 5.4-27)。

表 5.4-3 圧入を継続する条件

番号	対象期間	条件
①	圧入中	ケース1の圧入シナリオに追加して、2021年4月1日以降、22万t-CO ₂ /年で圧入(6月の1箇月間は圧入停止)。
②	圧入中	IW-2 仕上げ区間上端圧力が12.93MPaG以下。
③	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が海岸線に到達しない。
④	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が、遮蔽層層厚が20m以下となるエリアに到達しない。
⑤	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が、西部断層に到達しない。
⑥	圧入停止から1,000年間	溶解CO ₂ 量の分布が、深度750mに到達しない(超臨界条件を満たす)。



注) 監視期間中の溶解CO₂量分布が、東西および北限はピンク色の線、図面の南限を超えないことを確認する。弾性波探査解析の結果から断層は遮蔽層に到達していないと考えている。

図 5.4-27 最大貯留可能量算定のための監視期間中の条件

ケース1と同様、30個の具現像(図5.4-1)を用いて、上記の条件において圧入し、最大貯留可能量を推定した。図5.5-27に各具現像で推定された最大貯留可能量と累積分布関

数から求めた、P90、P50、P10それぞれの最大貯留可能量の関係を示す。具現像 30 個の平均は 470 万 t-CO₂、標準偏差は 252 万 t-CO₂ となった。P90 は 147 万 t-CO₂、P50 は 470 万 t-CO₂、P10 は 793 万 t-CO₂ となり、振れ幅が非常に大きい。これは、地質モデルにおける岩相分布推定にかかる不確実性が大きいことに起因するものと推察される。

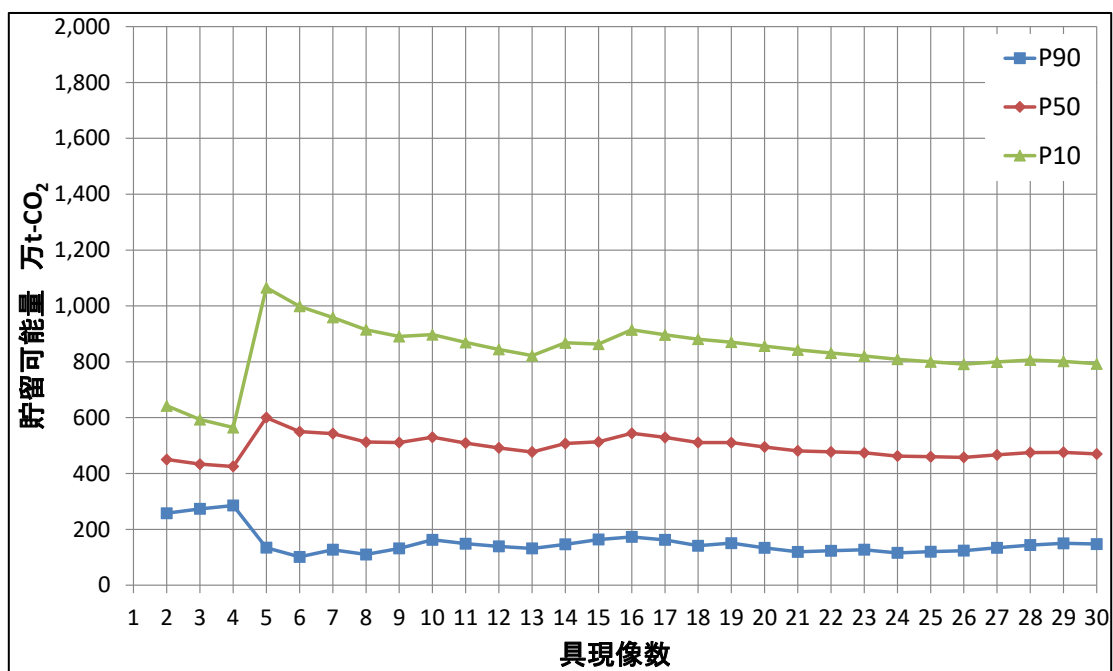
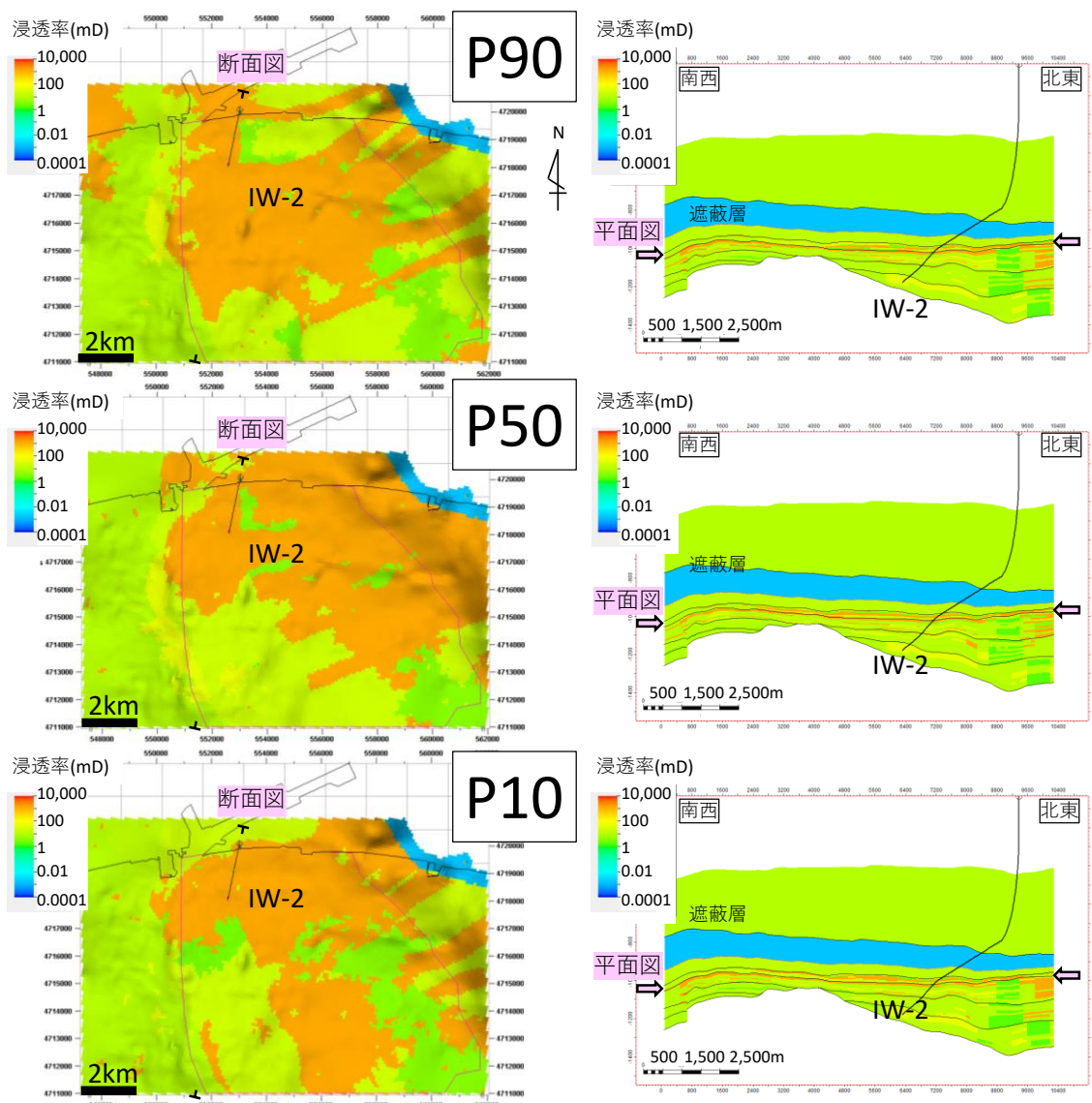


図 5.4-28 具現像の数と想定される P90、P50、P10 の最大貯留可能量

図 5.4-29 にケース 2 における P90、P50、P10 に相当する具現像の浸透率分布を示す。圧力が上がりやすい P90 具現像では、IW-2 のすぐ東側にあまり浸透率の高くない岩相が分布すると想定されており、P10 具現像は IW-2 全体に高浸透率の岩相が分布する想定になっている。



注) 平面図は貯留層の浅部高浸透率領域の浸透率分布。

図 5.4-29 代表具現像 (P10、P50、P90) の浸透率分布

① P90 具現像で想定される挙動予測

a. IW-2 坑内圧力の挙動予測

図 5.4-30 に代表具現像 (P90) の仕上げ区間上端圧力の推移を示す。圧入終了後速やかに圧力が低下する。

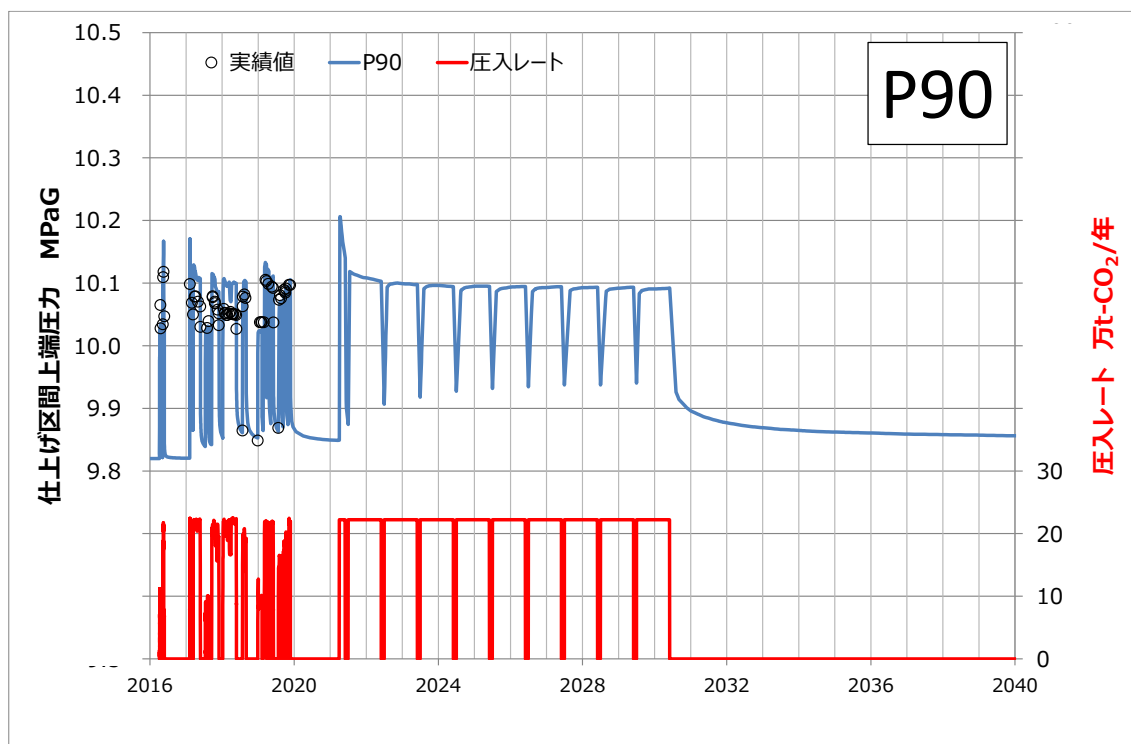
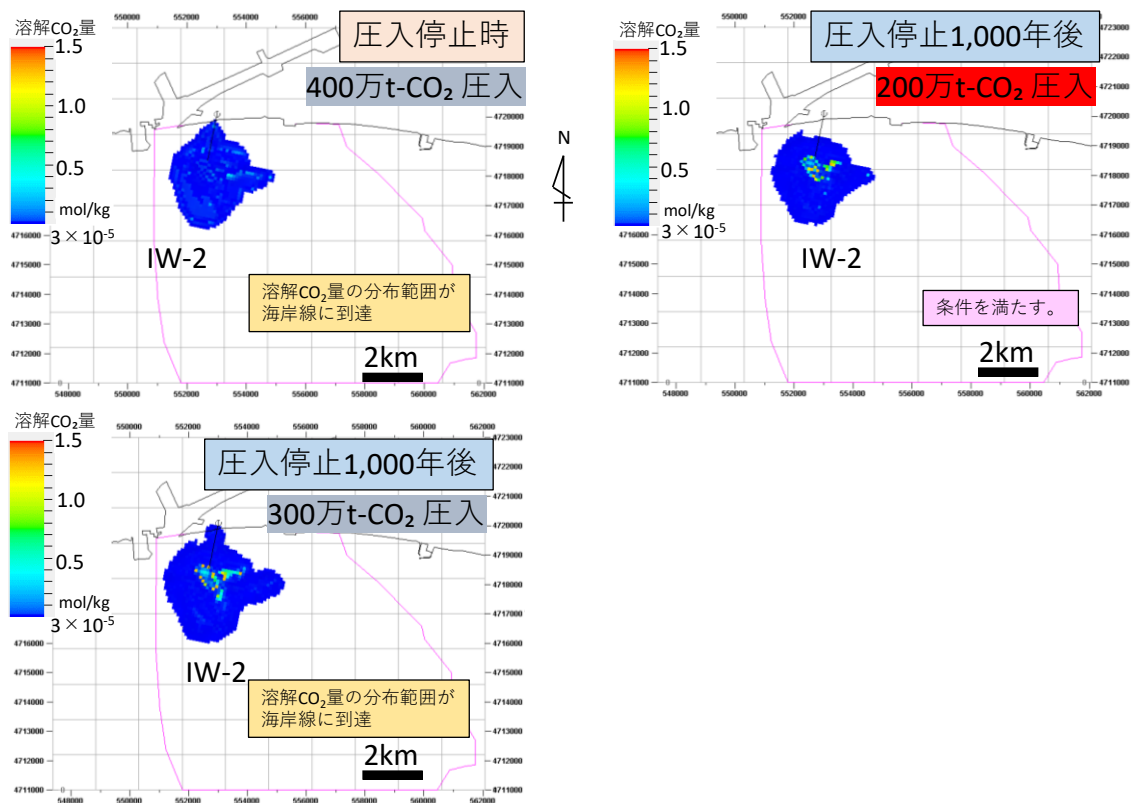


図 5.4-30 ケース 2 P90 具現像による仕上げ区間上端圧力

b. 長期挙動予測結果 (CO₂ 飽和度分布、溶解 CO₂ 量分布、圧力変化分布)

P90 具現像では、400 万 t-CO₂ 圧入時の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。また 300 万 t-CO₂ 圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。200 万 t-CO₂ の圧入に際しては、全て表 5.4-3 および図 5.4-27 に示す圧入の条件を満たす (図 5.4-31)。以上より、P90 具現像では 200 万 t-CO₂ の圧入が可能であると判断した。



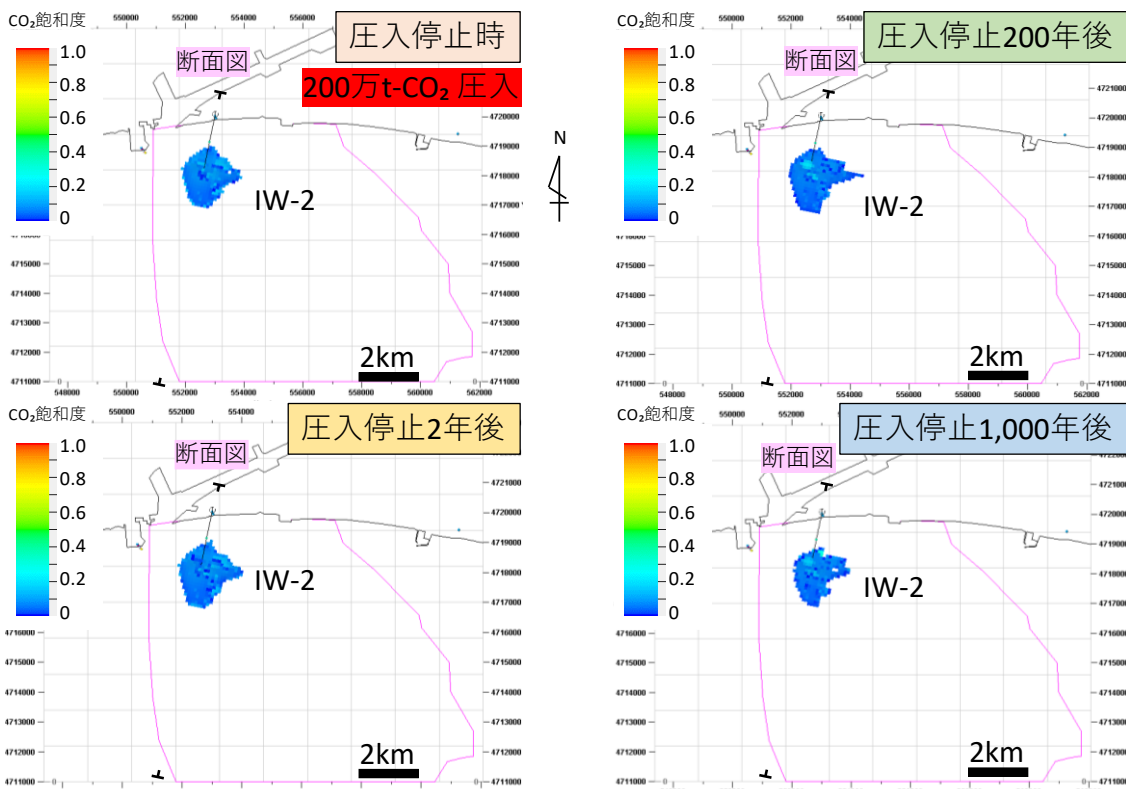
注) 表示の下限は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.4-31 ケース 2 P90 具現像による貯留(圧入)可能量の判断

図 5.4-32、図 5.4-33 に P90 具現像により 200 万 t-CO₂ 圧入停止時、圧入停止 2 年後、200 年後、1,000 年後の各時点において予測される CO₂ 飽和度の分布を示す。岩相の分布形態と地層の構造を反映した分布を示す。1,000 年後ころまでには CO₂ の地層水への溶解が進み、CO₂ 飽和度の分布域が減少する。

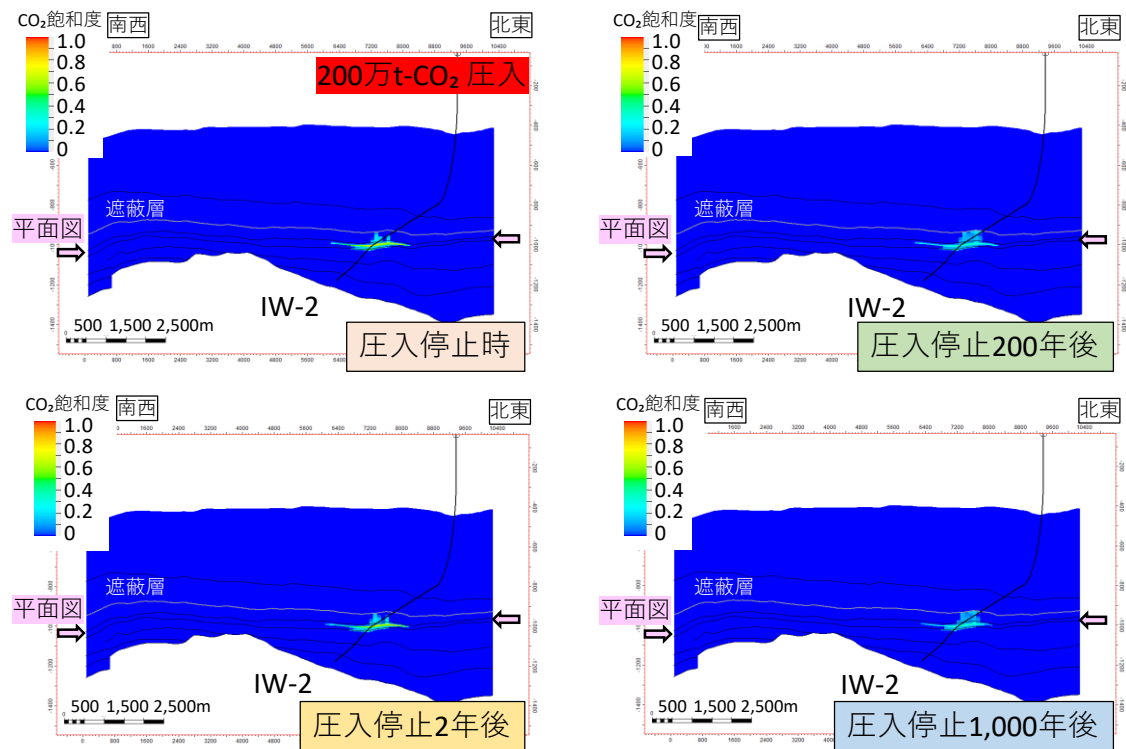
図 5.4-34、図 5.4-35 に溶解 CO₂ 量分布の経時変化を示す。CO₂ が地層水と接触する場所で溶解 CO₂ 量は生じることから、CO₂ 飽和度の分布範囲よりも広範囲に分布を広げる。CO₂ が溶解した地層水は、CO₂ が溶解していない地層水よりも密度が高いため、時間の経過と共に溶解 CO₂ 量分布は地質構造的に低い周辺部分や下方へと分布を広げる(図 5.4-35)。

図 5.4-36 に貯留層上部の最も高浸透率の岩相が分布していると考えている層準における圧力変化の分布を示す。図 5.4-37 は IW-2 に沿うように作成した断面図を示している。圧入停止直後には、IW-2 周辺でおおよそ 100 kPa~150 kPa の圧力上昇が認められ、その時点の西側断層付近では、50 kPa ほどの圧力上昇が予想される。圧入停止 200 年後ころまでには圧力上昇はほぼ解消され则认为られる。



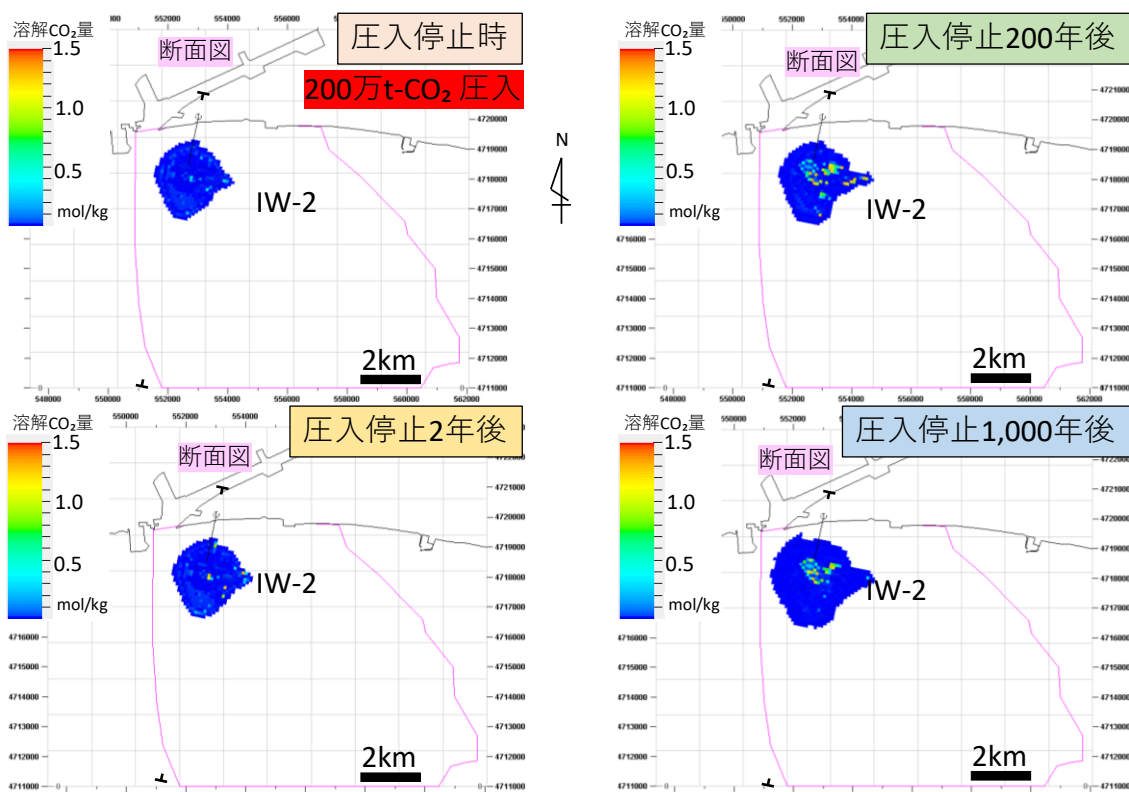
注) 貯留層に圧入されたCO₂飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は0.001。

図 5.4-32 ケース 2 P90 具現像におけるCO₂飽和度分布



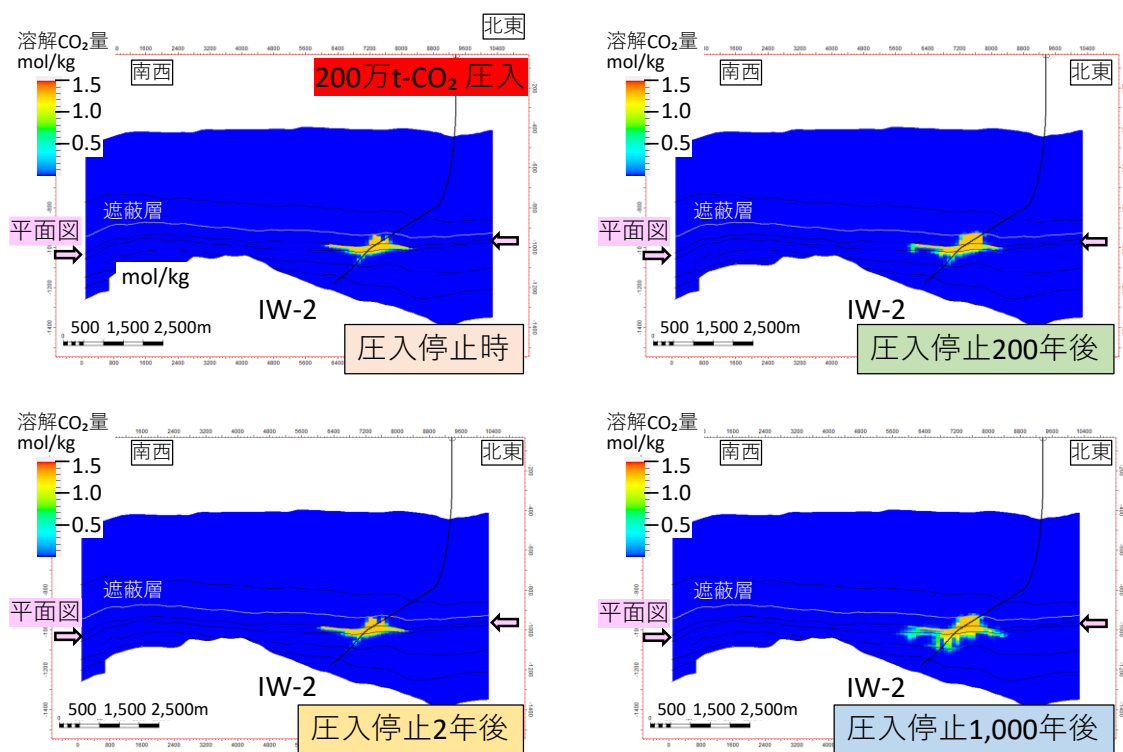
注) 図 5.4-32 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-33 ケース 2 P90 具現像におけるCO₂飽和度分布



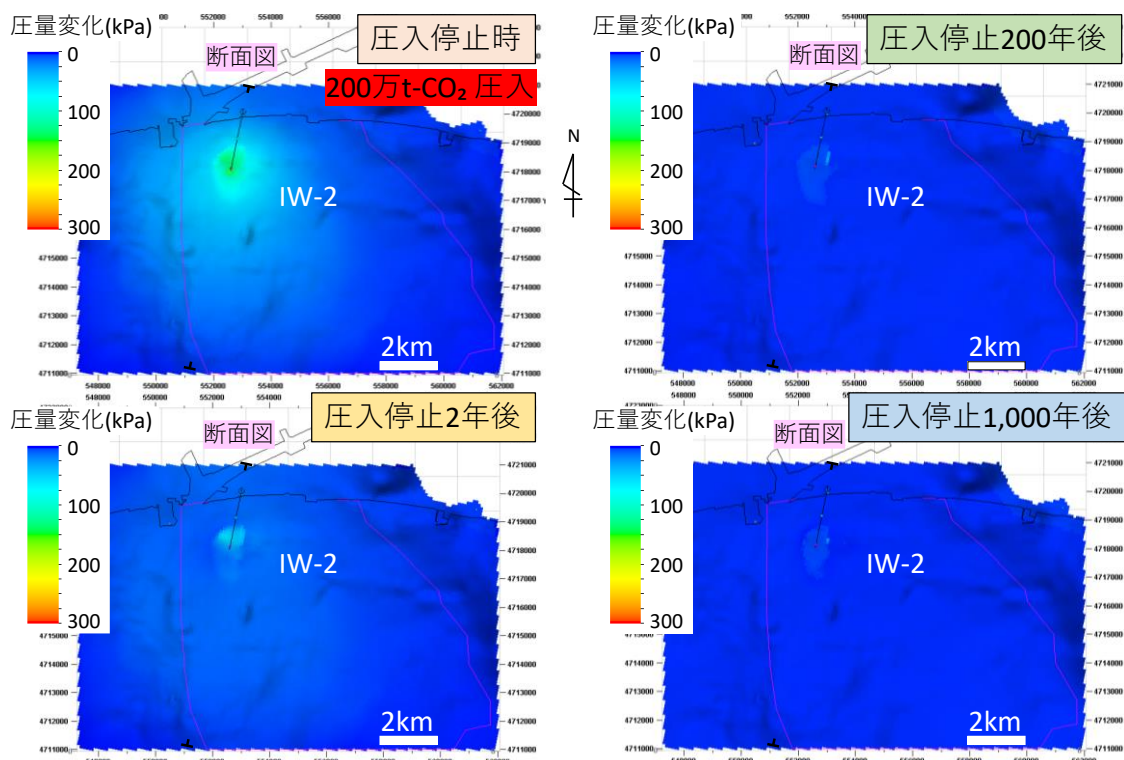
注) 貯留層に圧入された溶解CO₂量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.4-34 ケース 2 P90 具現像における溶解CO₂量分布



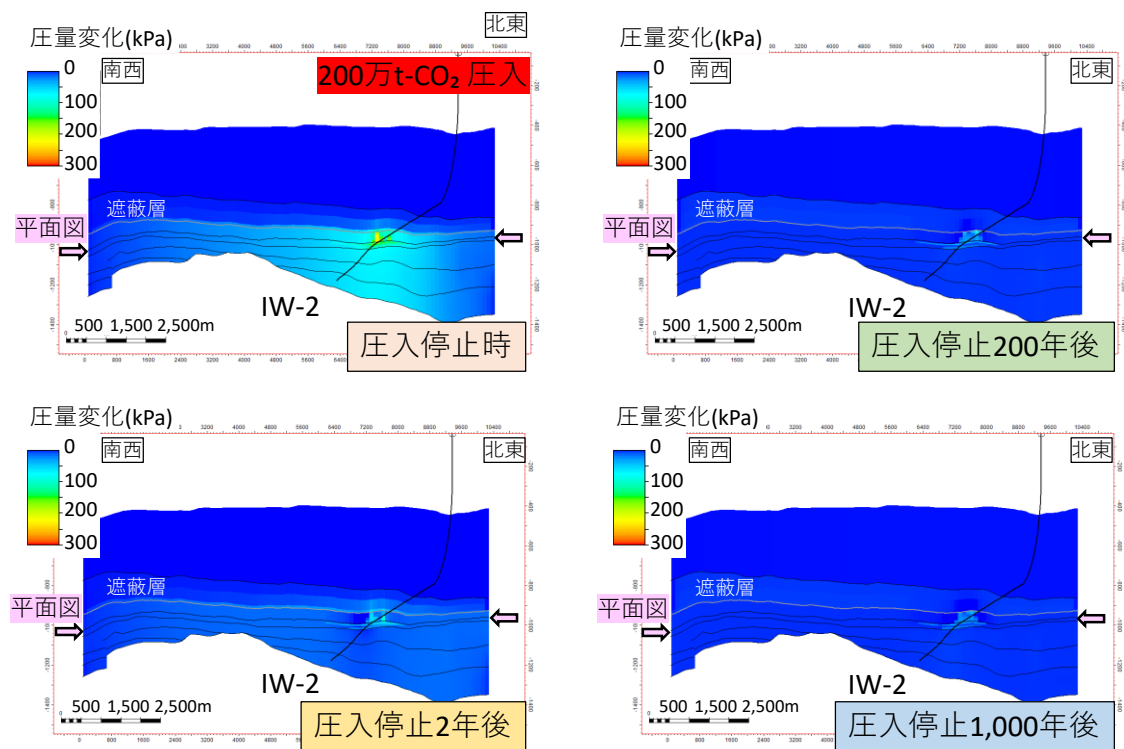
注) 図 5.4-34 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-35 ケース 2 P90 具現像におけるCO₂飽和度分布



注) 浅部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.4-36 ケース 2 P90 具現像における圧力変化分布



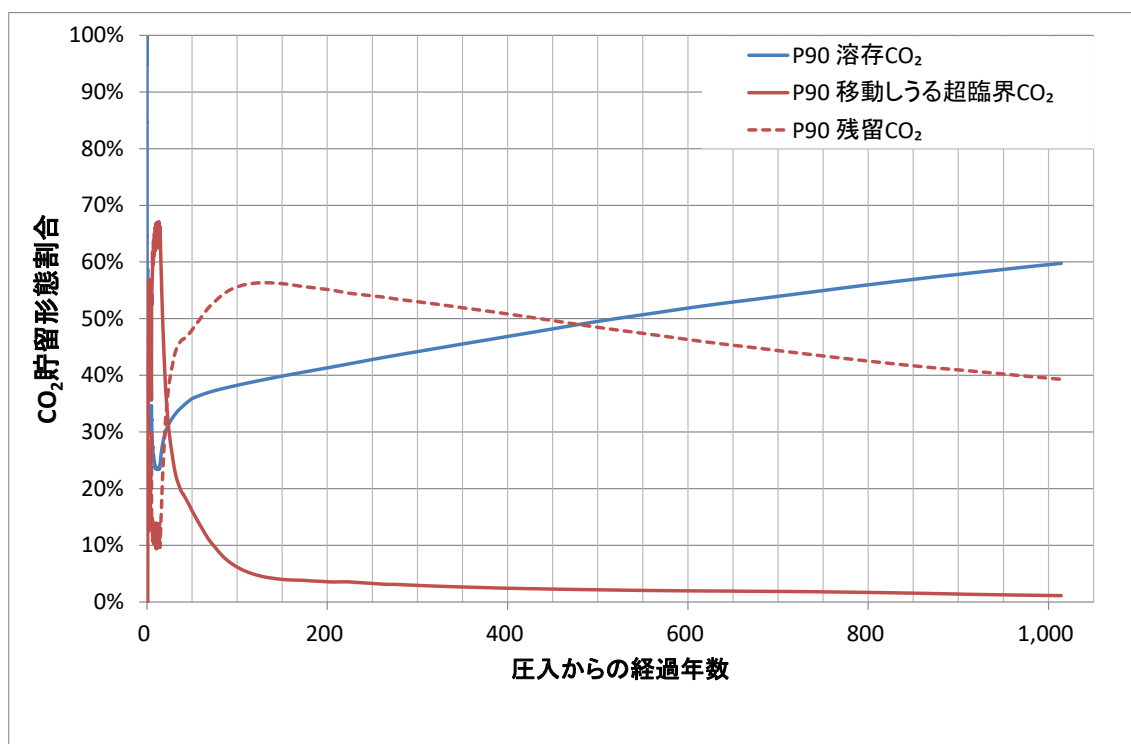
注) 図 5.4-36 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-37 ケース 2 P90 具現像における圧力変化分布

c. 貯留形態変化の挙動予測

圧入した超臨界状態のCO₂は周辺の貯留層の孔隙に存在する地層水(深部塩水)に溶解し、溶解CO₂の割合が増加する。溶解していない超臨界CO₂は貯留層中を移動する過程で、貯留層の孔隙中に毛細管圧力のため移動できない状態となる(残留CO₂)。残留CO₂の一部も移動できない状態で溶解CO₂となる。

圧入したCO₂の貯留形態の変化予測を図5.4-38に示す。圧入期間中は、移動しうる状態のCO₂の割合が最も高い。圧入を停止後しばらくの間は、圧入による流れと浮力により貯留層内を移動するCO₂が残留トラップされるため、残留CO₂の割合が高まる。貯留層内でのCO₂の移動が収束し、新たに残留トラップされるCO₂の割合が減少すると、残留CO₂と移動しうるCO₂の地層水への溶解が進み、溶存CO₂の割合が増加する。圧入開始から1,000年後ころに圧入したCO₂の99%程度が溶存トラップと残留トラップにより貯留層内で移動しない状態になるものと推定される。



注) 圧入期間は14年間。

図 5.4-38 ケース 3 P90 具現像における貯留形態の変化

② P50 具現像で想定される挙動予測

a. IW-2 坑内圧力の挙動予測

図 5.4-39 に代表具現像 (P50) の仕上げ区間上端圧力の推移を示す。圧入終了後速や

かに圧力が低下する。

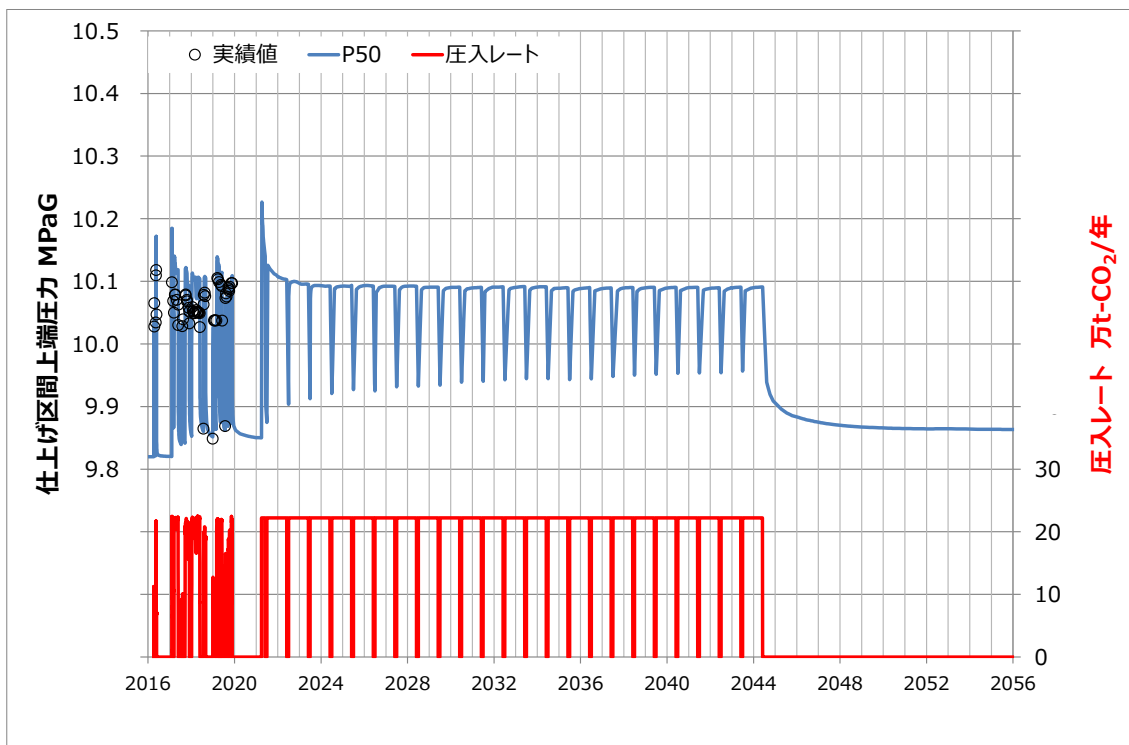
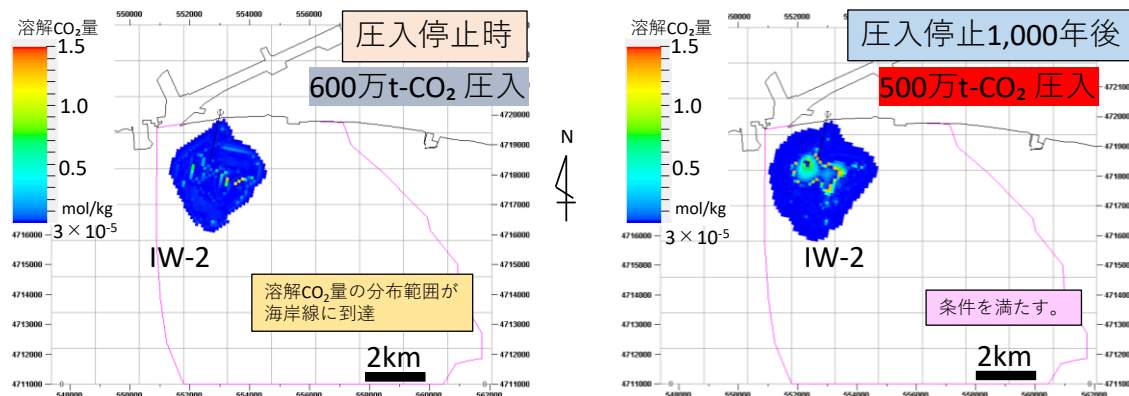


図 5.4-39 ケース 2 P50 具現像による仕上げ区間上端圧力

b. 長期挙動予測結果 (CO₂ 飽和度分布、溶解 CO₂ 量分布、圧力変化分布)

P50 具現像では 600 万 t-CO₂ 圧入時の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。500 万 t-CO₂ の圧入に際しては、全て表 5.4-3 および図 5.4-27 に示す圧入の条件を満たす (図 5.5-39)。以上より、P50 具現像では 500 万 t-CO₂ の圧入が可能であると判断した。



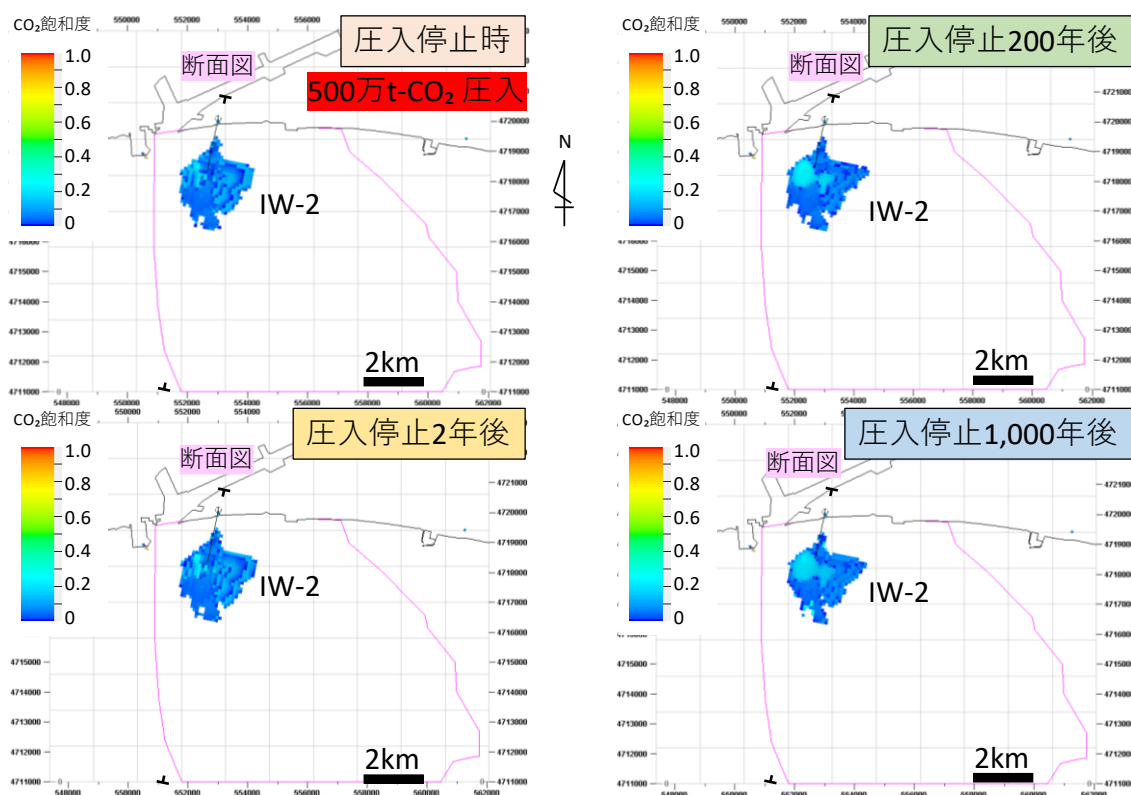
注) 表示の下限は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.4-40 ケース 2 P50 具現像による圧入不可能と判断した条件

図 5.4-41、図 5.4-42 に P50 具現像により 500 万 t-CO₂ 圧入停止時、圧入停止 2 年後、200 年後、1,000 年後の各時点において予測される CO₂ 飽和度の分布を示す。圧入停止時まで、やや東側に CO₂ 飽和度の分布範囲を広げている。時間の経過とともに平面的な分布範囲は減少するものの、浮力により CO₂ が上昇し、貯留層の上部で CO₂ 飽和度が高くなる傾向が認められる。

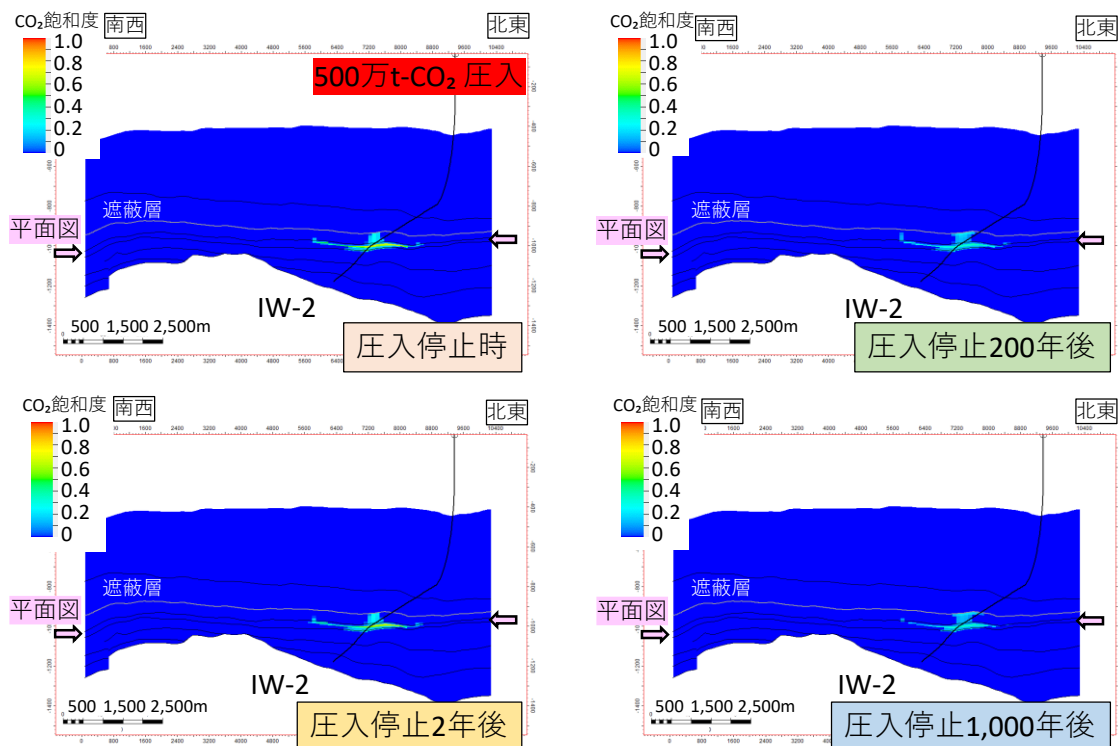
図 5.4-43、図 5.4-44 に溶解 CO₂ 量分布の経時変化を示す。CO₂ が地層水と接触する場所で溶解 CO₂ 量は生じることから、CO₂ 飽和度の分布範囲よりも広範囲に分布を広げる。CO₂ が溶解した地層水は、CO₂ が溶解していない地層水よりも密度が高いため、時間の経過と共に溶解 CO₂ 量分布は地質構造的に低い周辺部分や下方へと分布を広げる(図 5.4-44)。

図 5.4-45 に貯留層上部の最も高浸透率の岩相が分布していると考えている層準における圧力変化の分布を示す。図 5.4-46 は IW-2 に沿うように作成した断面図を示している。圧入停止直後には、P90 ケースと同様に IW-2 周辺でおよそ 100 kPa~150 kPa の圧力上昇が認められ、その時点の西側断層付近では、50 kPa ほどの圧力上昇が予想される。圧入停止 200 年後ころまでには圧力上昇はほぼ解消されるものと推定される。



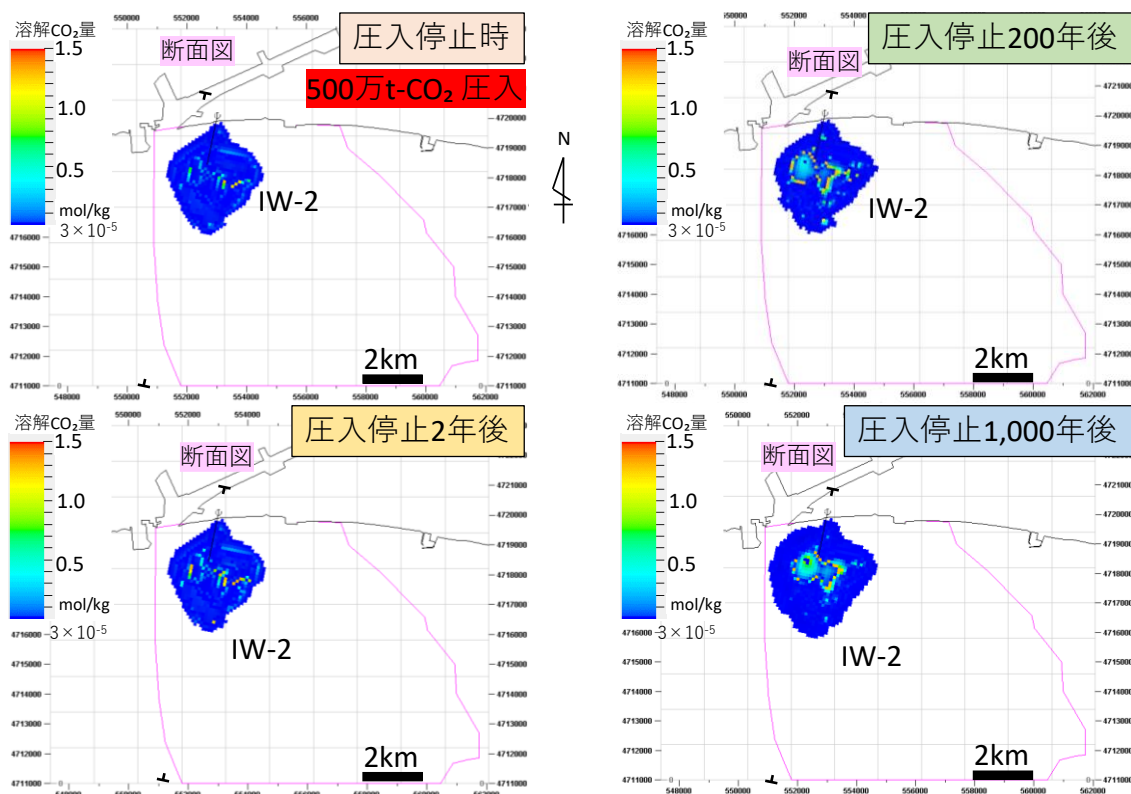
注) 貯留層に圧入された CO₂ 飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 0.001。

図 5.4-41 ケース 2 P50 具現像における CO₂ 飽和度分布



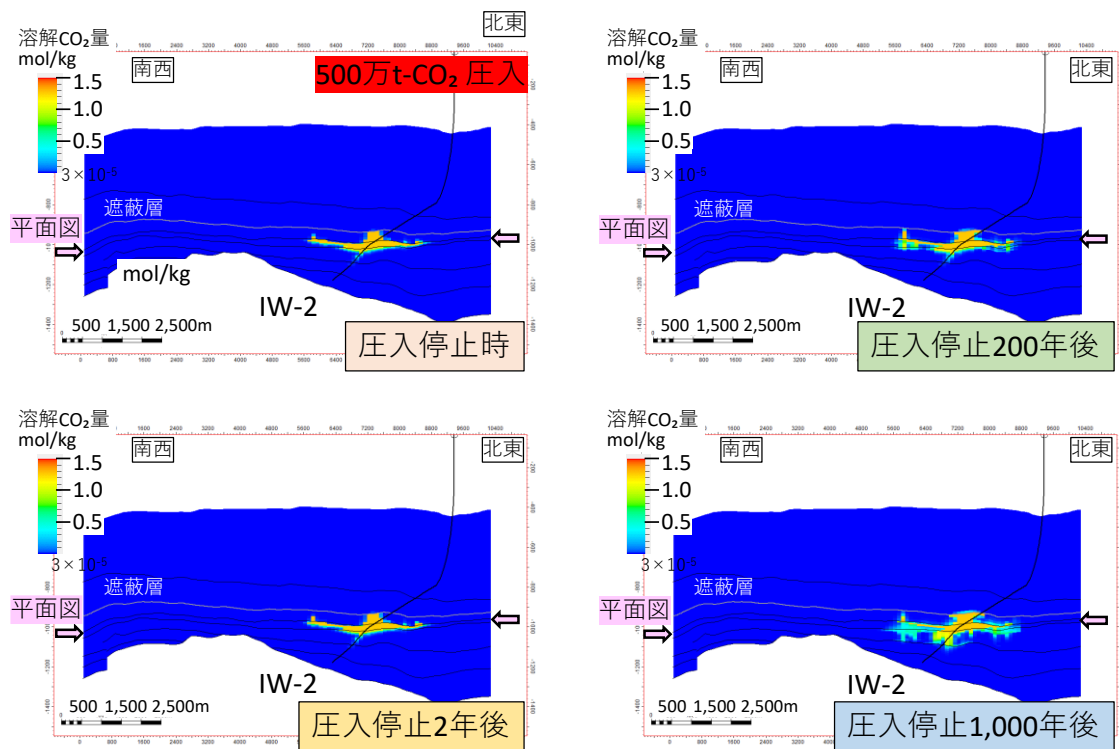
注) 図 5.4-40 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-42 ケース 2 P90 具現像における CO₂ 飽和度分布



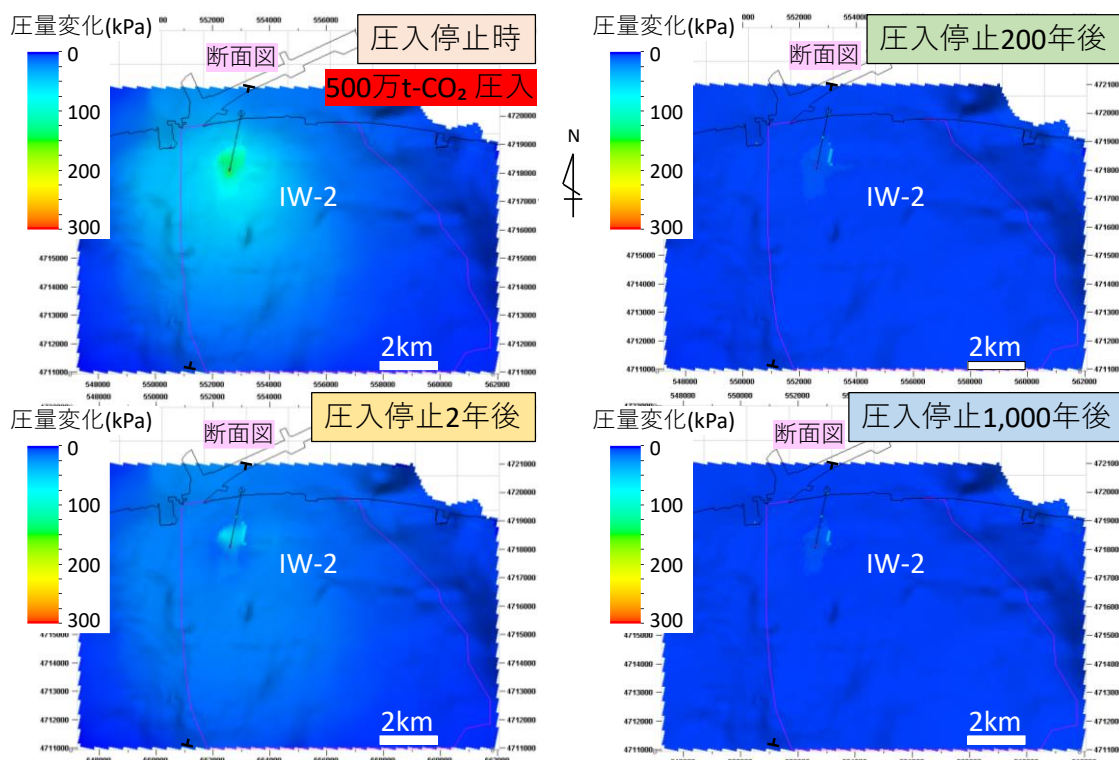
注) 貯留層に圧入された溶解 CO₂ 量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.4-43 ケース 2 P50 具現像における溶解 CO₂ 量分布



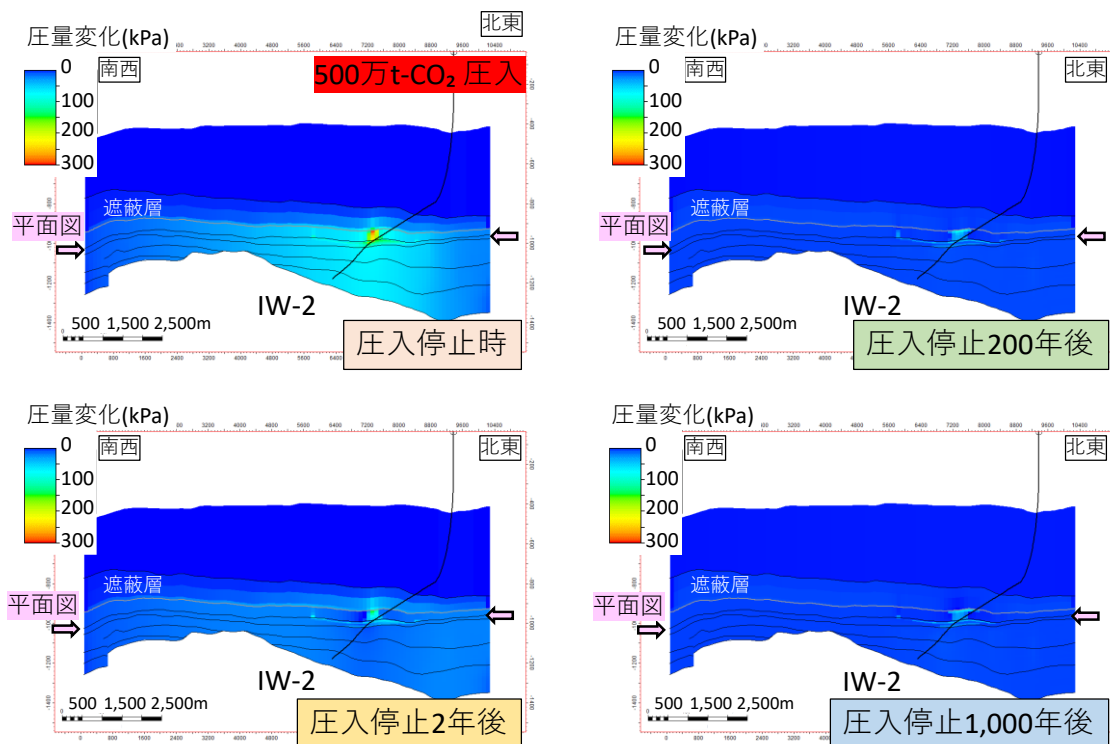
注) 図 5.4-43 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-44 ケース 2 P50 具現像における溶解 CO₂ 量分布



注) 浅部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.4-45 ケース 2 P50 具現像における圧力変化分布

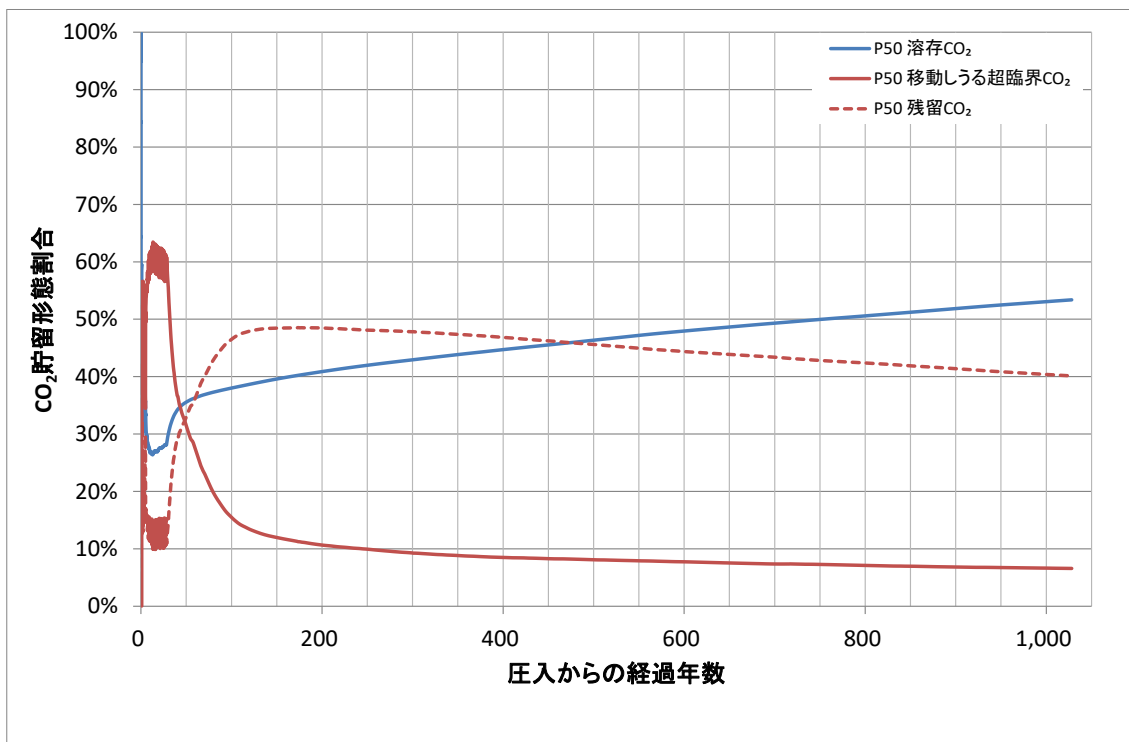


注) 図 5.4-45 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-46 ケース 2 P50 具現像におけるにおける圧力変化分布

c. 貯留形態変化の挙動予測

圧入した CO₂ の貯留形態の変化予測を図 5.4-47 に示す。圧入期間中は、移動しうる状態の CO₂ の割合が最も高い。圧入を停止後しばらくの間は、圧入による流れと浮力により貯留層内を移動する CO₂ が残留トラップされるため、残留 CO₂ の割合が高まる。貯留層内での CO₂ の移動が収束し、新たに残留トラップされる CO₂ の割合が減少すると、残留 CO₂ と移動しうる CO₂ の地層水への溶解が進み、溶存 CO₂ の割合が増加する。圧入開始から 1,000 年後ころに圧入した CO₂ の 93%程度が溶存トラップと残留トラップにより貯留層内で移動しない状態になるものと推定される。



注) 圧入期間は29年間。

図 5.4-47 ケース 2 P50 具現像におけるにおける貯留形態の変化

③ P10 具現像で想定される挙動予測

a. IW-2 坑内圧力の挙動予測

図 5.4-48 に代表具現像 (P10) の仕上げ区間上端圧力の推移を示す。圧入終了後速やかに圧力が低下する。

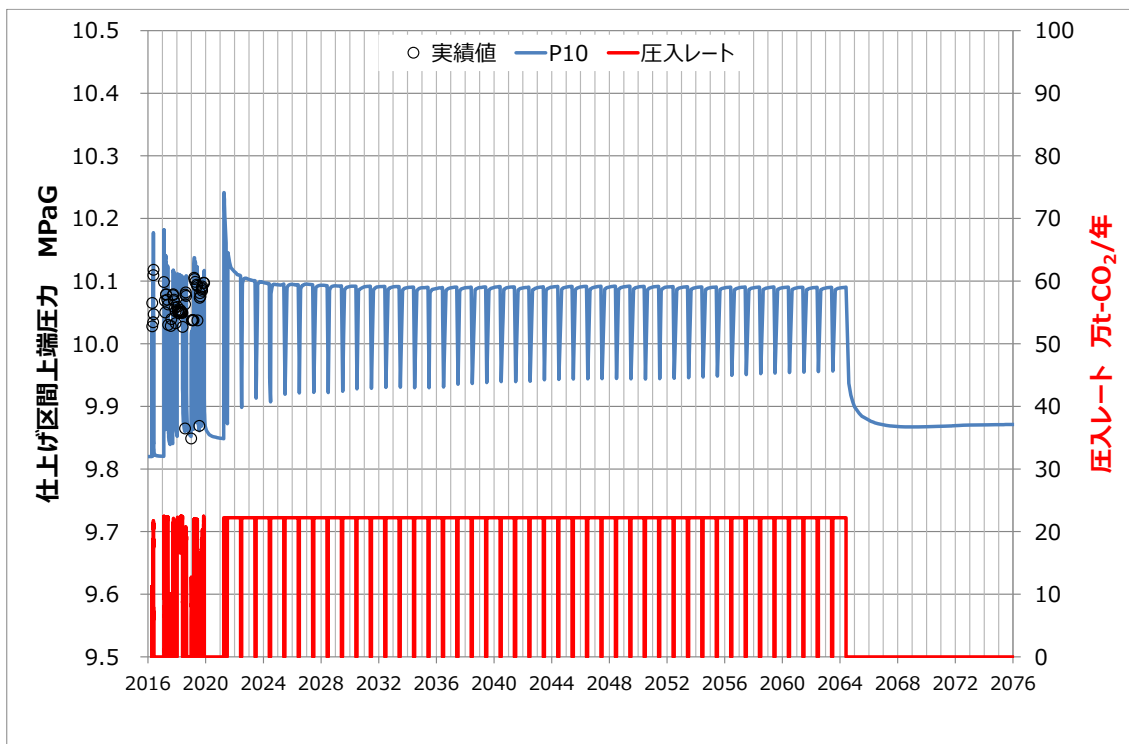
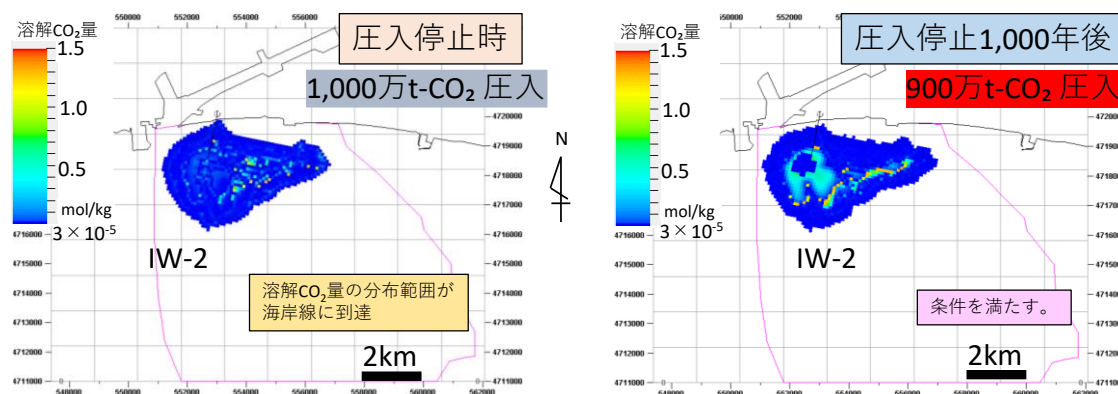


図 5.4-48 ケース 2 P10 具現像による仕上げ区間上端圧力

b. 長期挙動予測結果 (CO₂ 飽和度分布、溶解 CO₂ 量分布、圧力変化分布)

P10 具現像では、1,000 万 t-CO₂ 圧入時の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。900 万 t-CO₂ の圧入に際しては、全て表 5.4-3 および図 5.4-27 に示す圧入の条件を満たす (図 5.4-49)。以上より、P10 具現像では 900 万 t-CO₂ の圧入が可能であると判断した。



注) 表示の下限は 3×10^{-5} mol/kg。

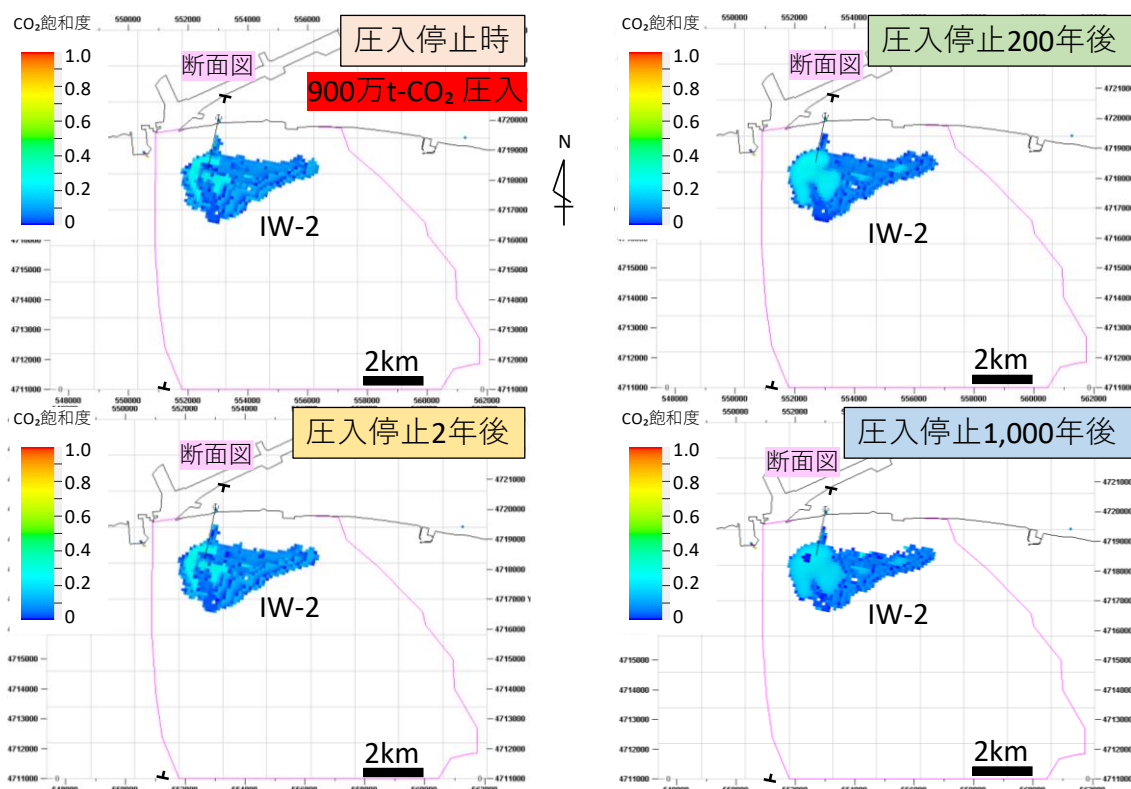
図 5.4-49 ケース 2 P10 具現像による最大貯留 (圧入) 可能量の判断

図 5.4-50、図 5.4-51 に P10 具現像により 500 万 t-CO₂ 圧入停止時、圧入停止 2 年

後、200年後、1,000年後の各時点において予測されるCO₂飽和度の分布を示す。圧入停止までには東側に分布範囲が拡大する。高浸透性岩相の分布や東側が構造的に高いことに起因するものと考えられる。200年後ころまでには浮力の影響で貯留層上方のCO₂飽和度が上昇するが、1,000年後ころまでにはCO₂の地層水への溶解が進み、全体的にCO₂飽和度の低下が予測される。

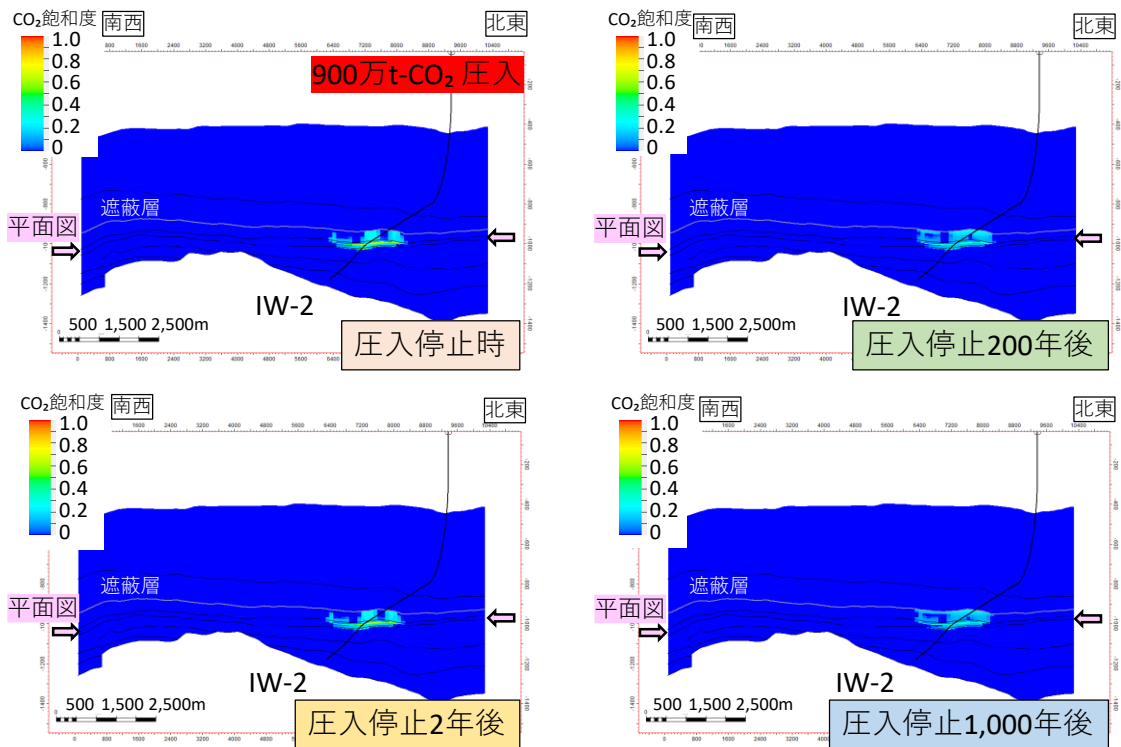
図5.4-52、図5.4-53に溶解CO₂量分布の経時変化を示す。CO₂飽和度の分布と同様に圧入停止から200年後ころまでには、東側に分布範囲が拡大し、1,000年後ころまでには、さらに分布範囲を拡大することが予測される。また、このころまでには、溶解CO₂量分布の下方への垂れ下がりが顕著となる(図5.4-53)。

図5.5-54に貯留層上部の最も高浸透率の岩相が分布していると考えている層準における圧力変化の分布を示す。図5.5-55はIW-2に沿うように作成した断面図を示している。圧入停止直後には、IW-2周辺でおよそ100 kPa~150 kPaの圧力上昇が認められ、その時点の西側断層付近では、50 kPaほどの圧力上昇が予想される。圧入停止200年後ころまでには圧力上昇はほぼ解消され则认为られる。



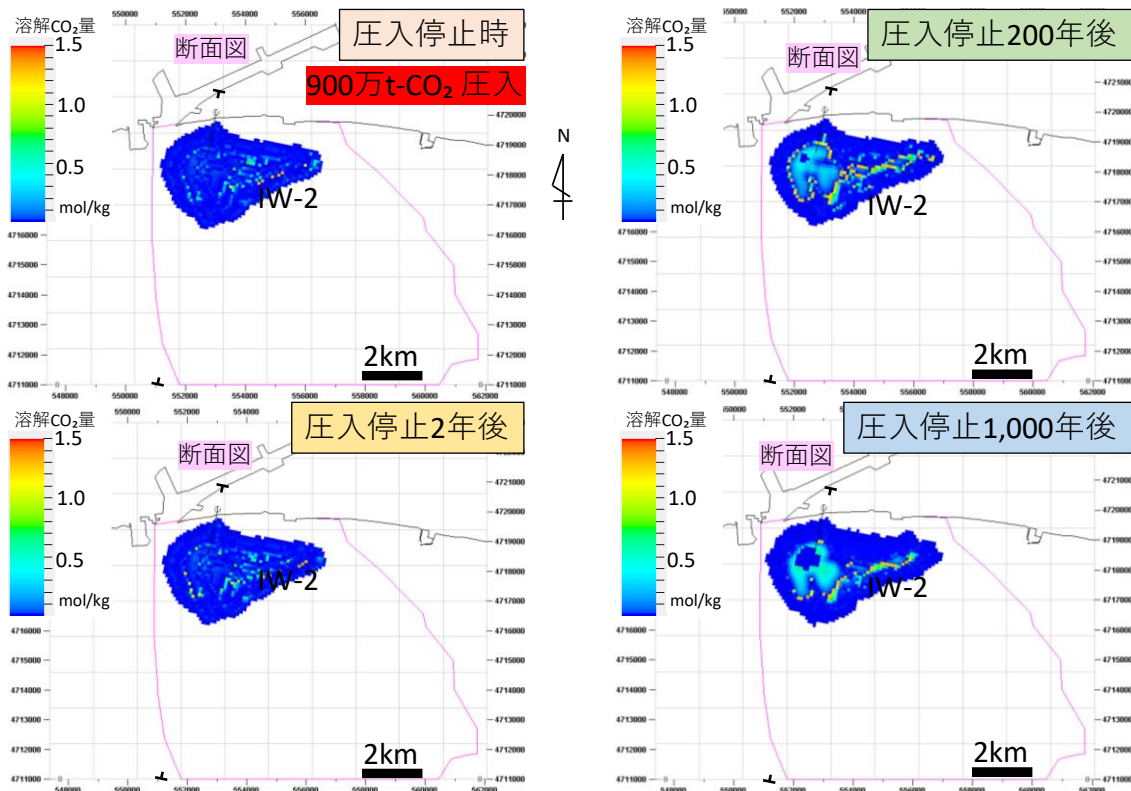
注) 貯留層に圧入されたCO₂飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は0.001。

図5.4-50 ケース2 P10 具現像におけるCO₂飽和度分布



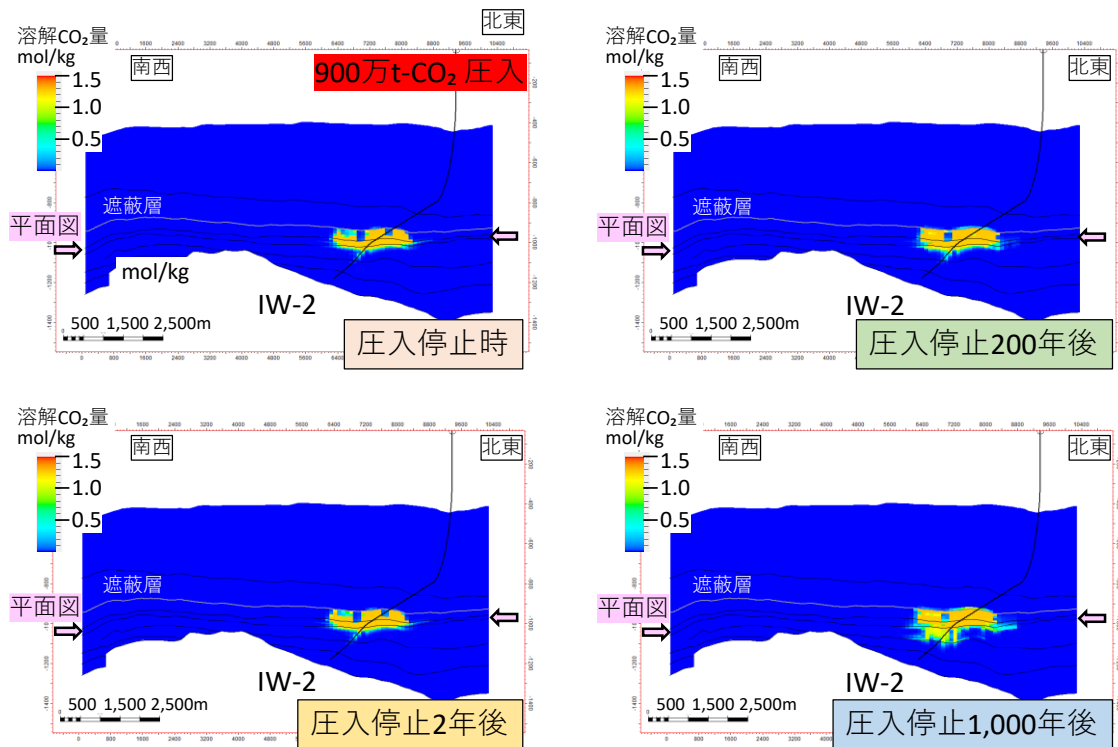
注) 図 5.4-50 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-51 ケース 2 P10 具現像における CO₂ 飽和度分布



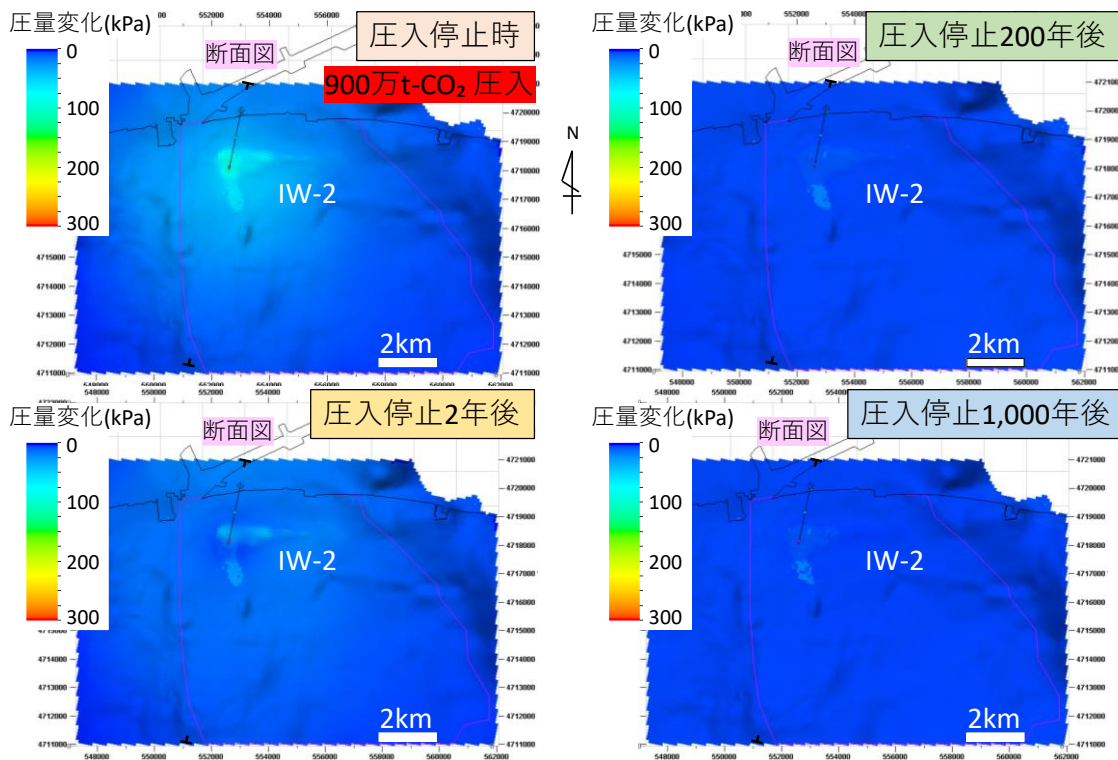
注) 貯留層に圧入された溶解 CO₂ 量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.4-52 ケース 2 P10 具現像における溶解 CO₂ 量分布



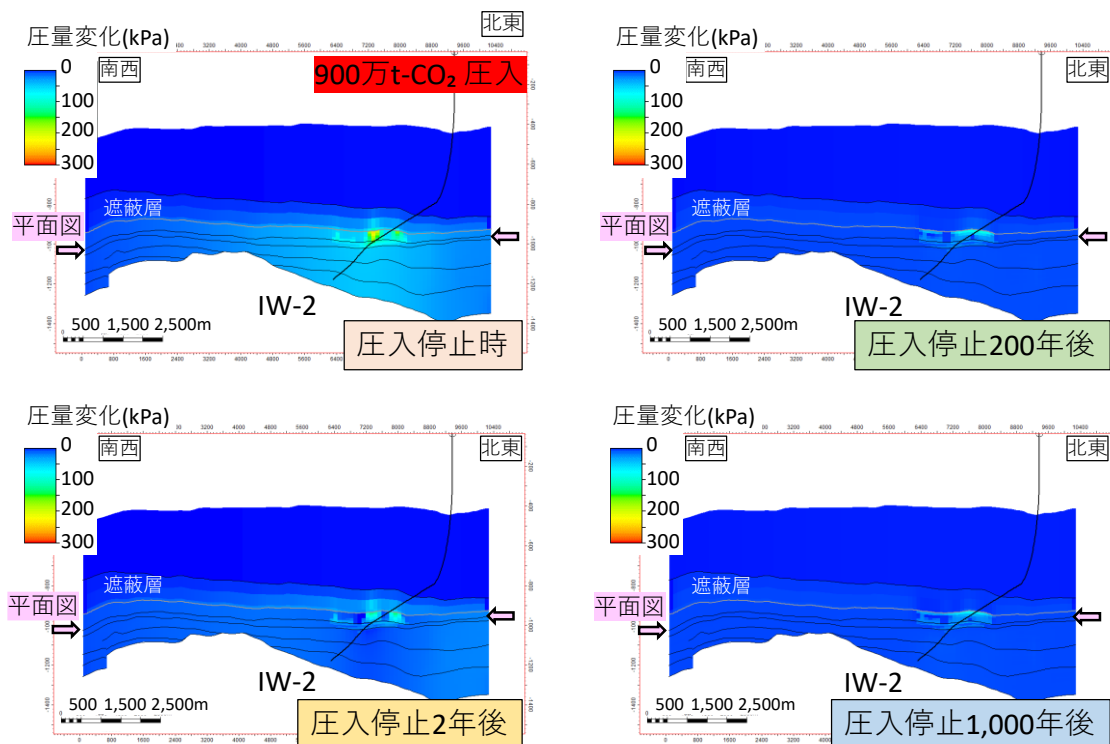
注) 図 5.4-52 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-53 ケース 2 P10 具現像における CO₂ 飽和度分布



注) 浅部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.4-54 ケース 2 P10 具現像における圧力変化分布

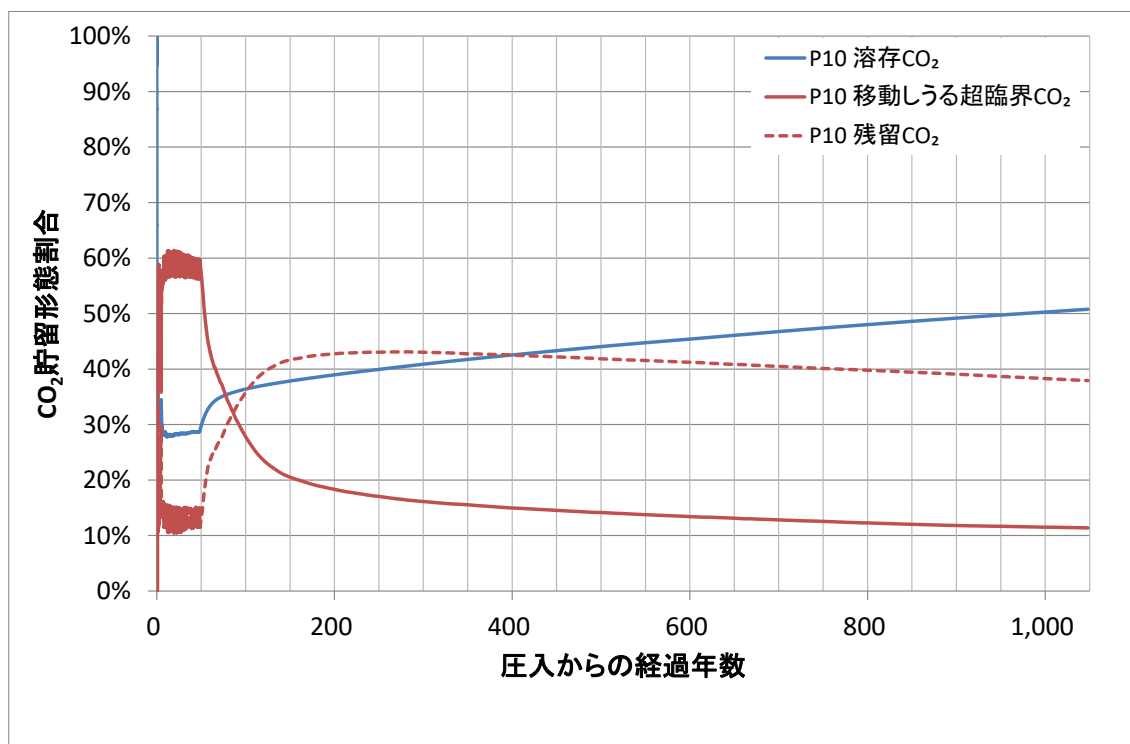


注) 図 5.4-54 に示す断面図位置における断面図。

図 5.4-55 ケース 2 P10 具現像におけるにおける圧力変化分布

c. 貯留形態変化の挙動予測

圧入した CO₂ の貯留形態の変化予測を図 5.4-56 に示す。圧入期間中は、移動しうる状態の CO₂ の割合が最も高い。圧入を停止後しばらくの間は、圧入による流れと浮力により貯留層内を移動する CO₂ が残留トラップされるため、残留 CO₂ の割合が高まる。貯留層内での CO₂ の移動が収束し、新たに残留トラップされる CO₂ の割合が減少すると、残留 CO₂ と移動しうる CO₂ の地層水への溶解が進み、溶存 CO₂ の割合が増加する。圧入開始から 1,000 年後ころに圧入した CO₂ の 88%程度が溶存トラップと残留トラップにより貯留層内で移動しない状態になるものと推定される。



注) 圧入期間は 51 年間。

図 5.4-56 ケース 2 P10 具現像におけるにおける貯留形態の変化

(3) ケース 3 (ケース 2 の設定からあるタイミングで仕上げ区間を変更することによる最大貯留 (圧入) 可能量/独自基準による想定)

IW-2 では、貯留層区間の全層準を仕上げ区間としており、圧入に際し貯留層にかかる CO₂ の圧力が貯留層圧力を上回る区間が貯留層の上部付近に限定されるため、CO₂ は貯留層の最上部付近からのみ圧入されている。ケース 1 およびケース 2 による圧入では、IW-2 の現状を反映した長期挙動予測を実施しているが、ケース 3 では、ケース 2 の圧入の途中で、仕上げ区間の一部を閉鎖する設定により仕上げ区間を変更する設定とした。

仕上げ区間の変更後は、ケース 2 と同様 22 万 t-CO₂/年の圧入レートで圧入を継続 (6 月は圧入停止) し、100 万 t-CO₂ 圧入するごとに設定した基準 (表 5.4-1、図 5.4-27) を確認し、その基準を満たす限り圧入を継続することで最大貯留 (圧入) 可能量を推定した。なお、使用した貯留層モデルは、ケース 2 と同様、P10、P50、P90 具現像を使用した。

① 仕上げ区間の設定

ケース 2 の貯留 (圧入) 可能量を加味し、モデルごとに表 5.4-4 に示すタイミングで仕上げ区間を変更した。変更する仕上げ区間は、萌別層砂岩層上部のみを閉塞すること

を想定したケース3-1と、萌別層(+荷菜層)砂岩層以外を閉鎖することを想定したケース3-2の2ケースとした(図5.4-57)。

表 5.4-4 仕上げ区間の設定を変更するタイミング

具現像	貯留(圧入)可能量 (万t-CO ₂)	全層仕上げから 切り替えるタイミング 貯留(圧入)量 (万t-CO ₂)
	ケース2	
P90相当	200	200
		100
P50相当	500	500
		400
		300
		200
		100
P10相当	900	900
		800
		700
		600
		500
		400
		300
		200
		100

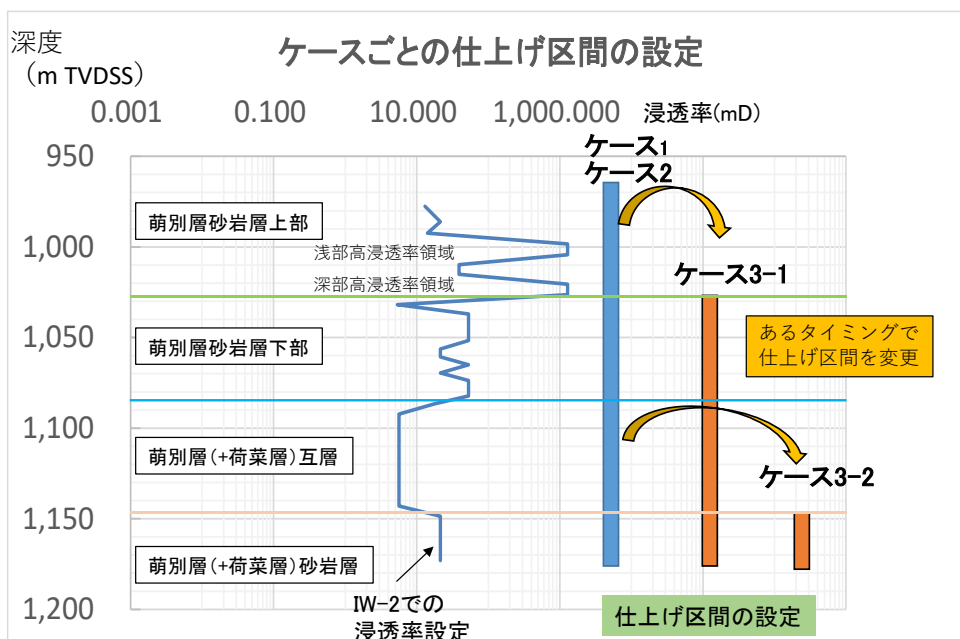


図 5.4-57 ケース 3 (ケース 3-1、3-2) における仕上げ区間の設定

② 圧入上限圧力の設定

ケース 1 およびケース 2 では、IW-2 掘削時に測定した仕上げ区間直上遮蔽層のリークオフ圧力の 90% を遮蔽層の破壊圧と見なし、仕上げ区間上端深度における圧入上限圧

力として設定した。ケース3-1、ケース3-2では、仕上げ区間を変更するので、それぞれの仕上げ区間直上深度での圧入上限圧力を設定する必要がある。

2011年に掘削した苫小牧CCS-1(現OB-1)において実施したブライン圧入テストにおいてブレイクダウン圧力(EMW1.46 g/cc @1,048.19 mTVDSS)を確認しているため、この値を破壊圧設定の基準とし表5.4-5のように圧入上限圧力を設定した。

表 5.4-5 圧入上限圧力の設定 (ケース3-1、ケース3-2)

		ケース3-1	ケース3-2
仕上げ区間 上端深度	m(TVDSS)	1,030	1,145
地層破壊圧	MPaG	14.63	16.28
設定 圧入上限圧力 地層破壊圧×90%	MPaG	13.17	14.65

③ 貯留(圧入)可能量算定結果

貯留(圧入)可能量の推定結果一覧を表5.4-6に示す。

表 5.4-6 貯留(圧入)可能量推定結果

具現像	全層仕上げから 切り替えるタイミング 貯留(圧入)量 (万t-CO ₂)	貯留可能量 (万t-CO ₂)	
		ケース3-1	ケース3-2
P90相当	200	300	500
	100	1,100	700
P50相当	500	500	500
	400	600	600
	300	800	900
	200	1,200	800
	100	1,100	700
P10相当	900	900	1,000
	800	900	1,000
	700	1,200	1,200
	600	1,100	1,200
	500	1,100	1,100
	400	1,000	1,000
	300	1,000	900
	200	900	800
100	900	700	

a. ケース 3-1 で想定された貯留（圧入）可能量

P90 具現像を使用した場合、全層仕上げにより 100 万 t-CO₂ 圧入後、仕上げ区間の切り替えを行った場合に最も多量の CO₂ を貯留可能となり、その圧入量は 1,100 万 t-CO₂ となることが予測された。以下に、最大貯留（圧入）時における、圧入終了時までの IW-2 坑内圧力挙動の推移（図 5.4-58）と、圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布（図 5.4-59）を示す。

P50 具現像を使用した場合、全層仕上げにより 200 万 t-CO₂ 圧入後、仕上げ区間の切り替えを行った場合に最も多量の CO₂ を貯留可能となり、その圧入量は 1,200 万 t-CO₂ となることが予測された。以下に、最大貯留（圧入）時における、圧入終了時までの IW-2 坑内圧力挙動の推移（図 5.4-60）と、圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布（図 5.4-61）を示す。

P10 具現像を使用した場合、全層仕上げにより 700 万 t-CO₂ 圧入後、仕上げ区間の切り替えを行った場合に最も多量の CO₂ を貯留可能となり、その圧入量は 1,200 万 t-CO₂ となることが予測された。以下に、最大貯留（圧入）時における、圧入終了時までの IW-2 坑内圧力挙動の推移（図 5.4-62）と、圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布（図 5.4-63）を示す。

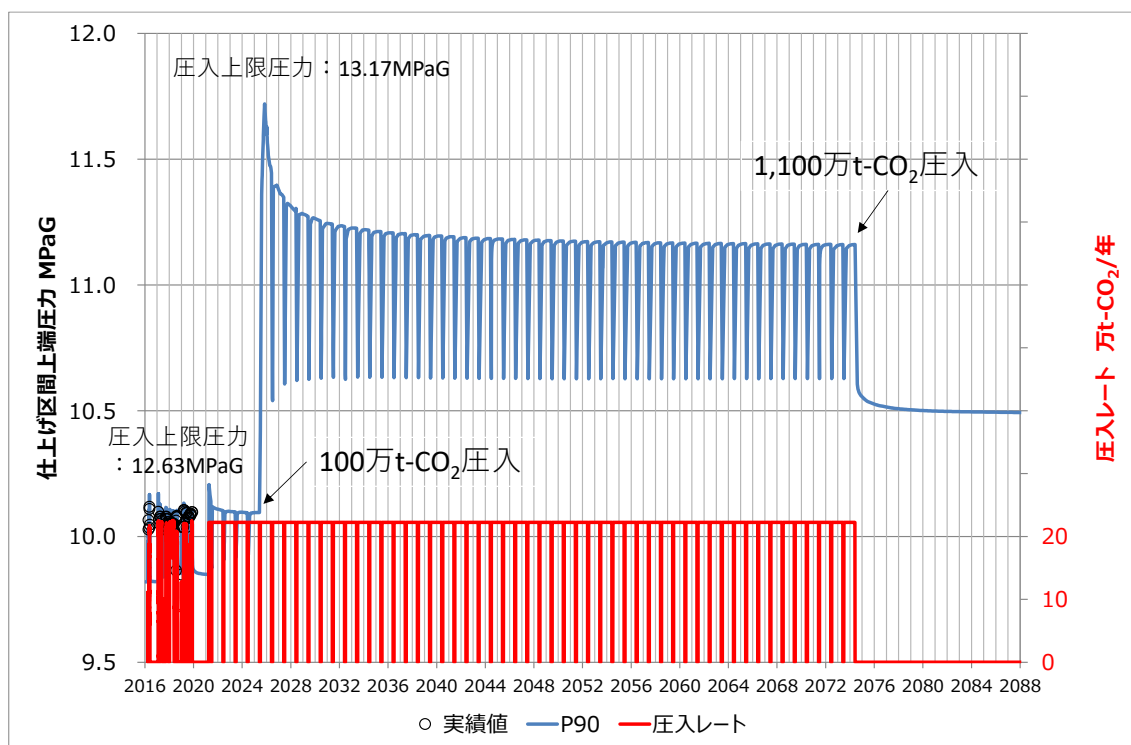


図 5.4-58 ケース 3-1 P90 具現像 最大圧入量達成までの仕上げ区間上端圧力の推移

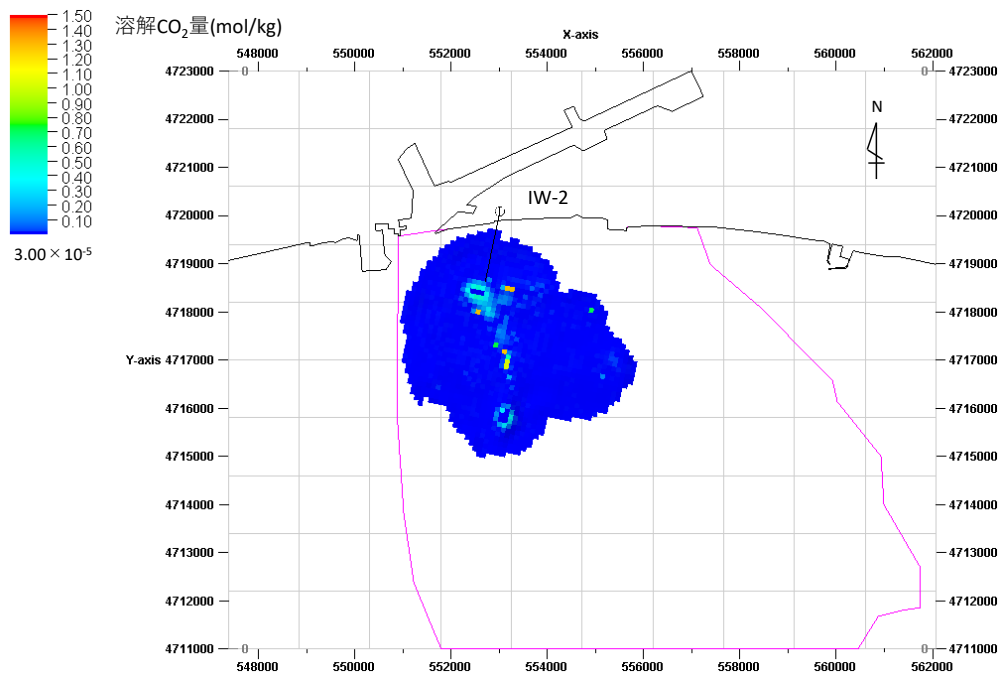


図 5.4-59 ケース 3-1 P90 具現像 最大量圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布

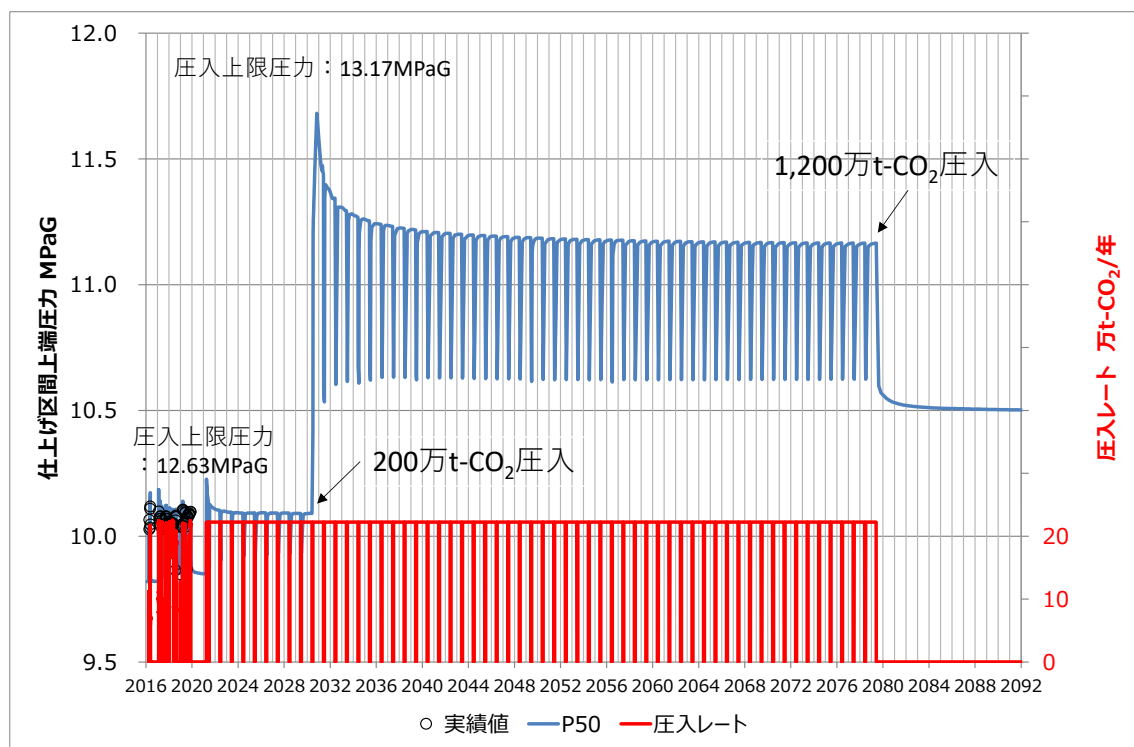


図 5.4-60 ケース 3-1 P50 具現像 最大圧入量達成までの仕上げ区間上端圧力の推移

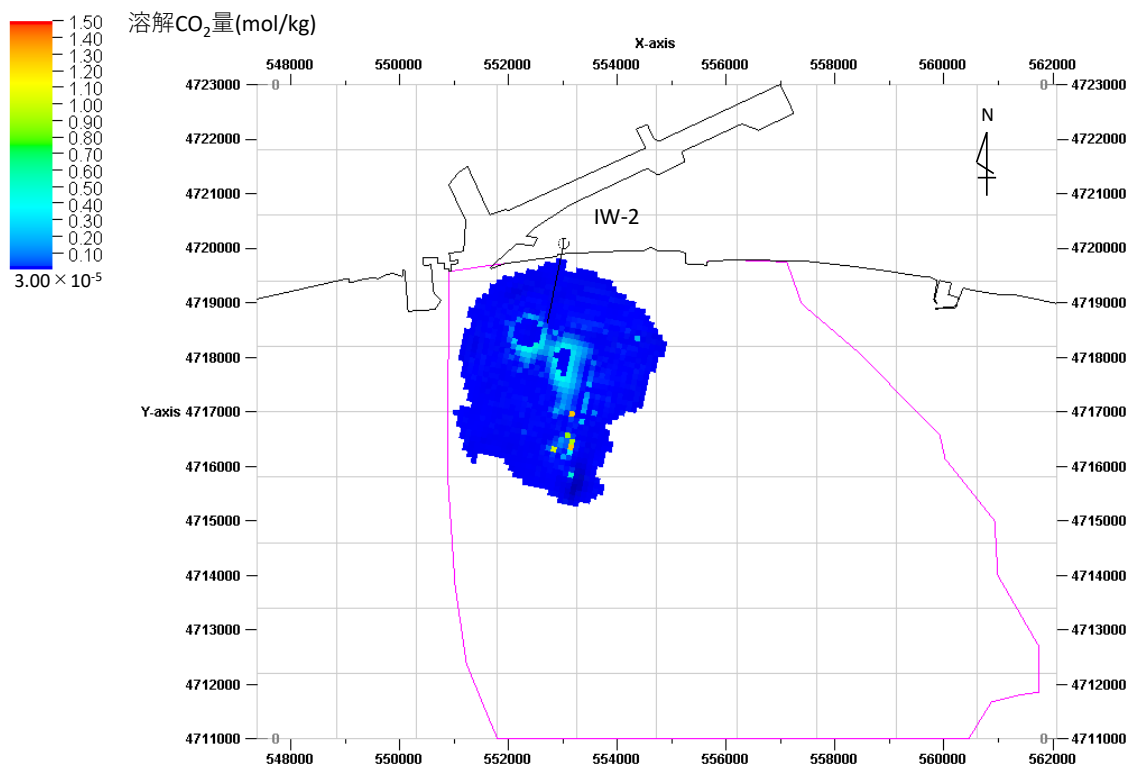


図 5.4-61 ケース 3-1 P50 具現像 最大量圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布

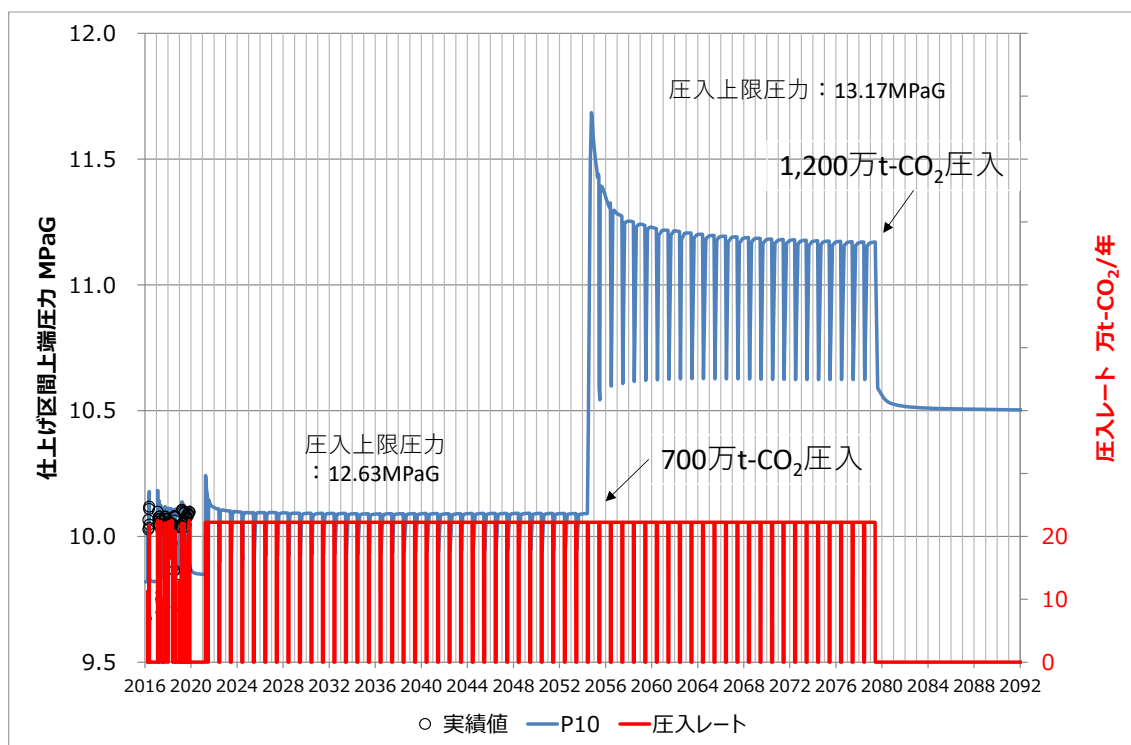


図 5.4-62 ケース 3-1 P10 具現像 最大圧入量達成までの仕上げ区間上端圧力の推移

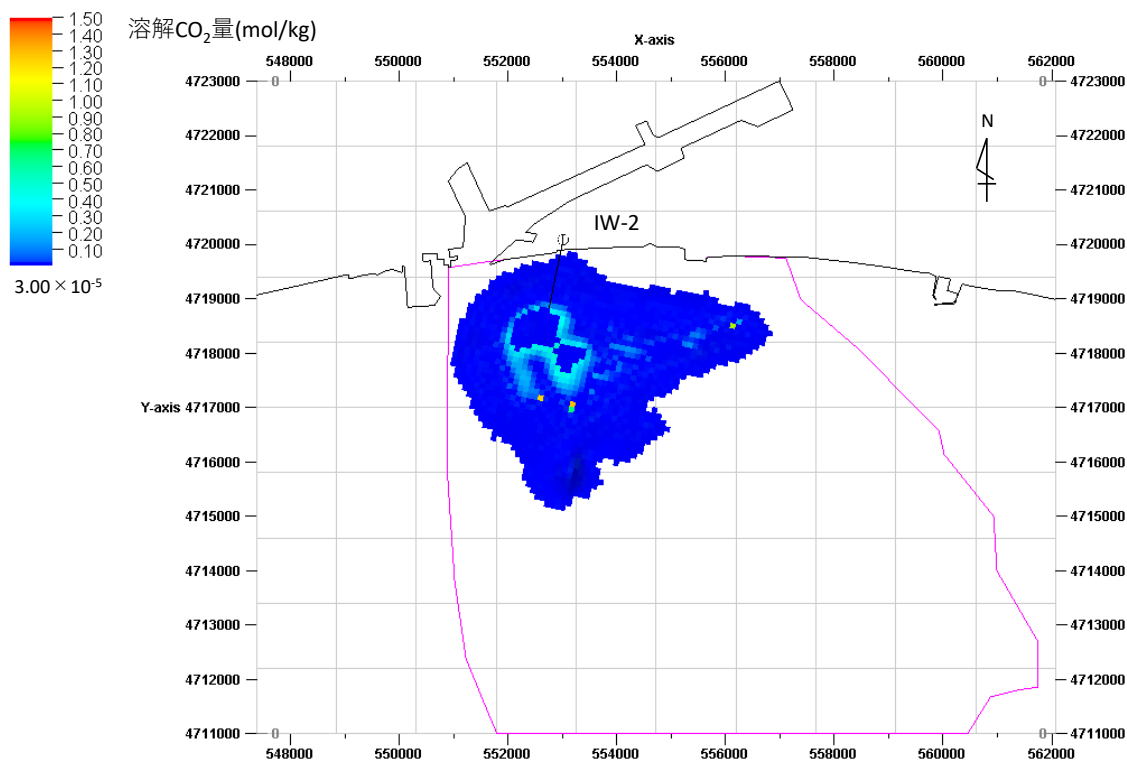


図 5.4-63 ケース 3-1 P10 具現像 最大量圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布

b. ケース 3-2 で想定された貯留（圧入）可能量

P90 具現像を使用した場合、全層仕上げにより 100 万 t-CO₂ 圧入後、仕上げ区間の切り替えを行った場合に最も多量の CO₂ を貯留（圧入）可能となり、その圧入量は 1,100 万 t-CO₂ となることが予測された。以下に、最大貯留（圧入）時における、圧入終了時までの IW-2 坑内圧力挙動の推移（図 5.4-58）と、圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布（図 5.4-59）を示す。

P50 具現像を使用した場合、全層仕上げにより 300 万 t-CO₂ 圧入後、仕上げ区間の切り替えを行った場合に最も多量の CO₂ を貯留（圧入）可能となり、その圧入量は 900 万 t-CO₂ となることが予測された。以下に、最大貯留（圧入）時における、圧入終了時までの IW-2 坑内圧力挙動の推移（図 5.4-66）と、圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布（図 5.4-67）を示す。

P10 具現像を使用した場合、全層仕上げにより 700 万 t-CO₂ 圧入後、仕上げ区間の切り替えを行った場合に最も多量の CO₂ を貯留（圧入）可能となり、その圧入量は 1,200 万 t-CO₂ となることが予測された。以下に、最大貯留（圧入）時における、圧入終了時までの IW-2 坑内圧力挙動の推移（図 5.4-68）と、圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布（図 5.4-69）を示す。

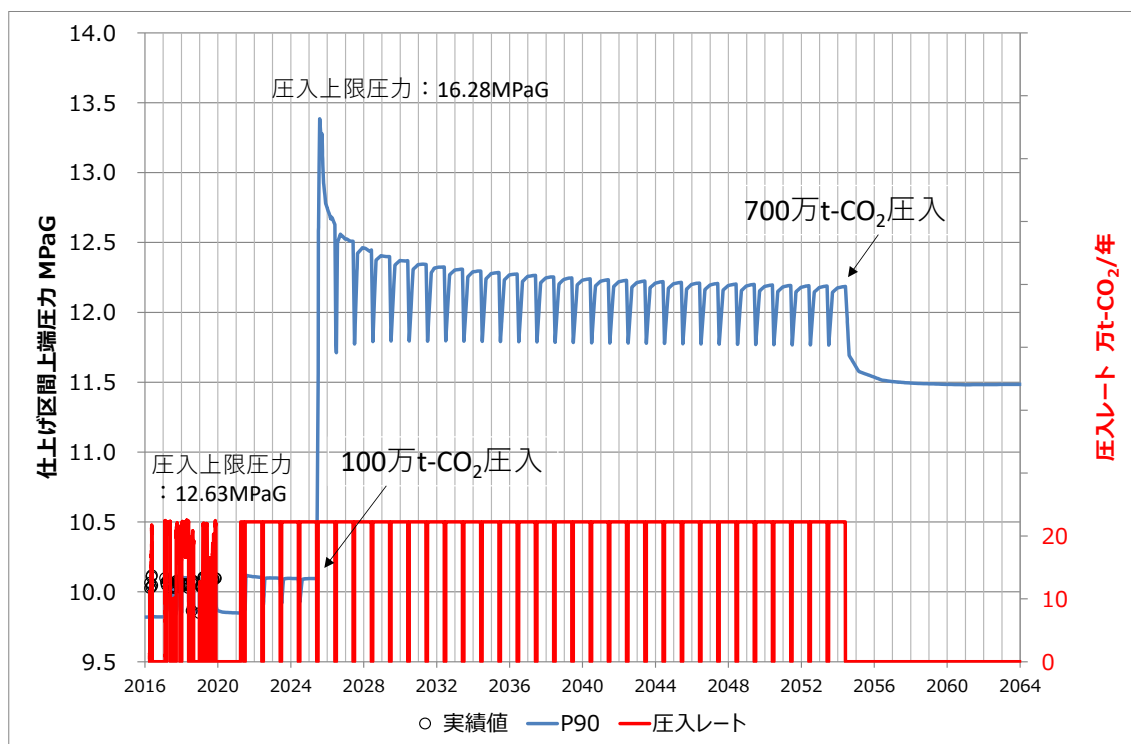


図 5.4-64 ケース 3-2 P90 具現像 最大圧入量達成までの仕上げ区間上端圧力の推移

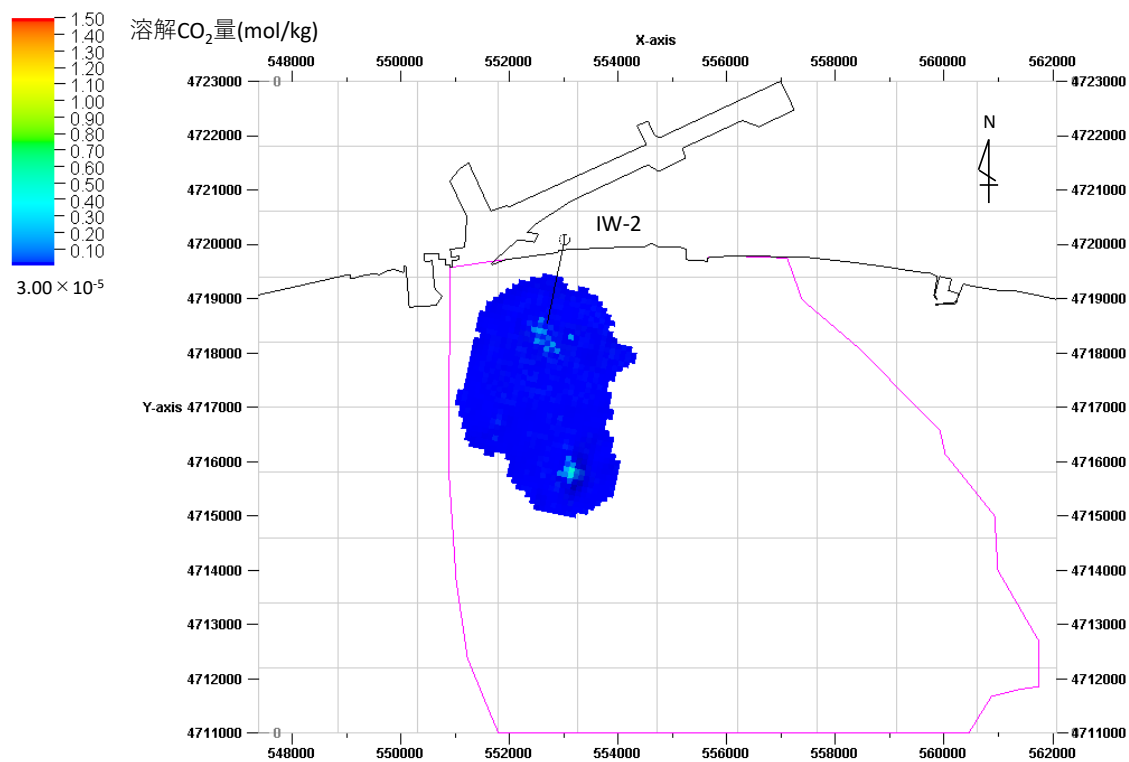


図 5.4-65 ケース 3-2 P90 具現像 最大量圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布

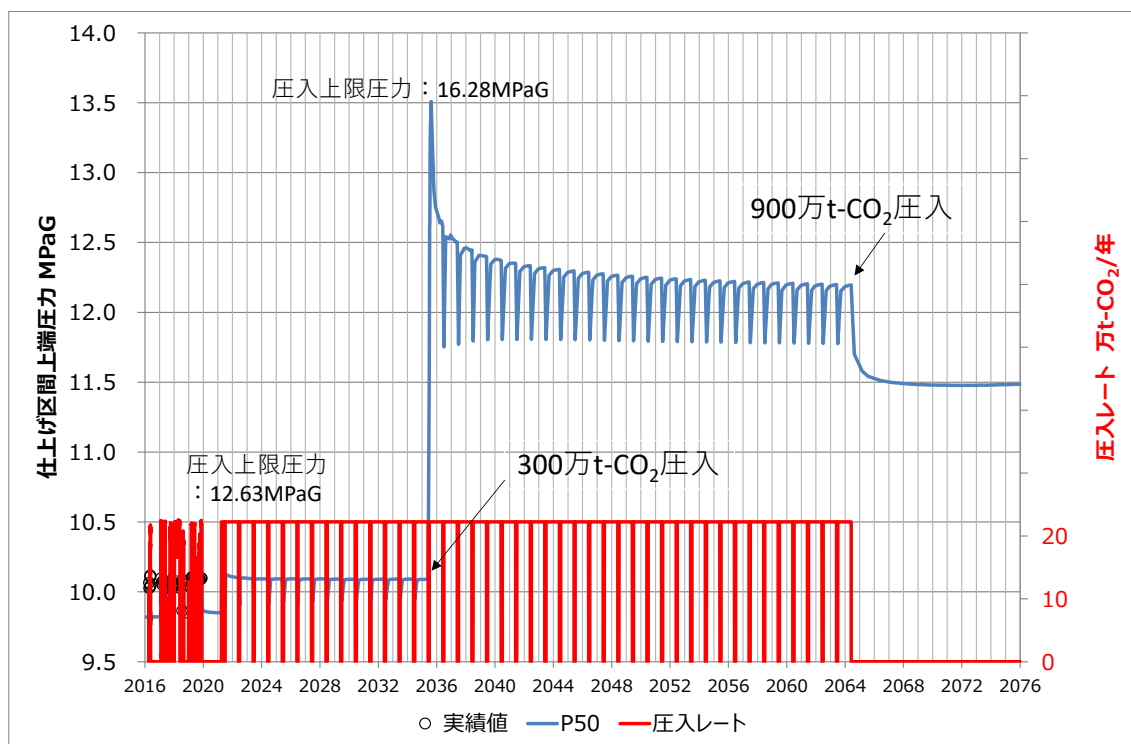


図 5.4-66 ケース 3-2 P50 具現像 最大圧入量達成までの仕上げ区間上端圧力の推移

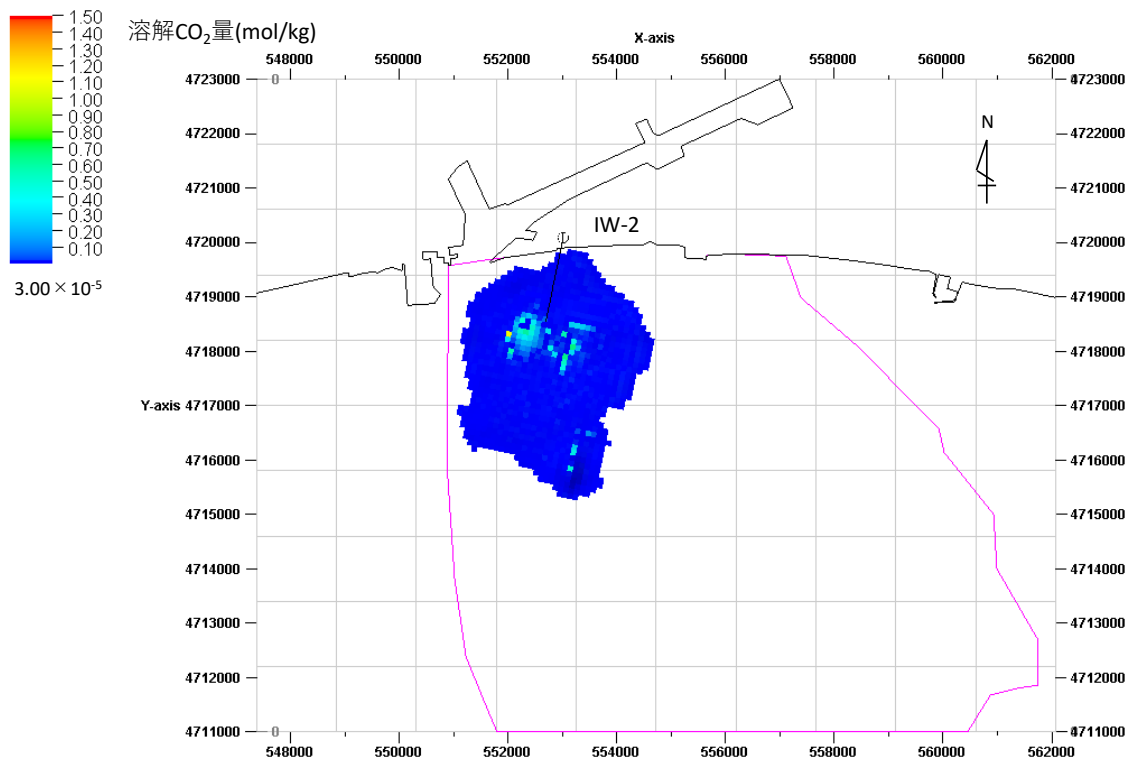


図 5.4-67 ケース 3-2 P50 具現像 最大量圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布

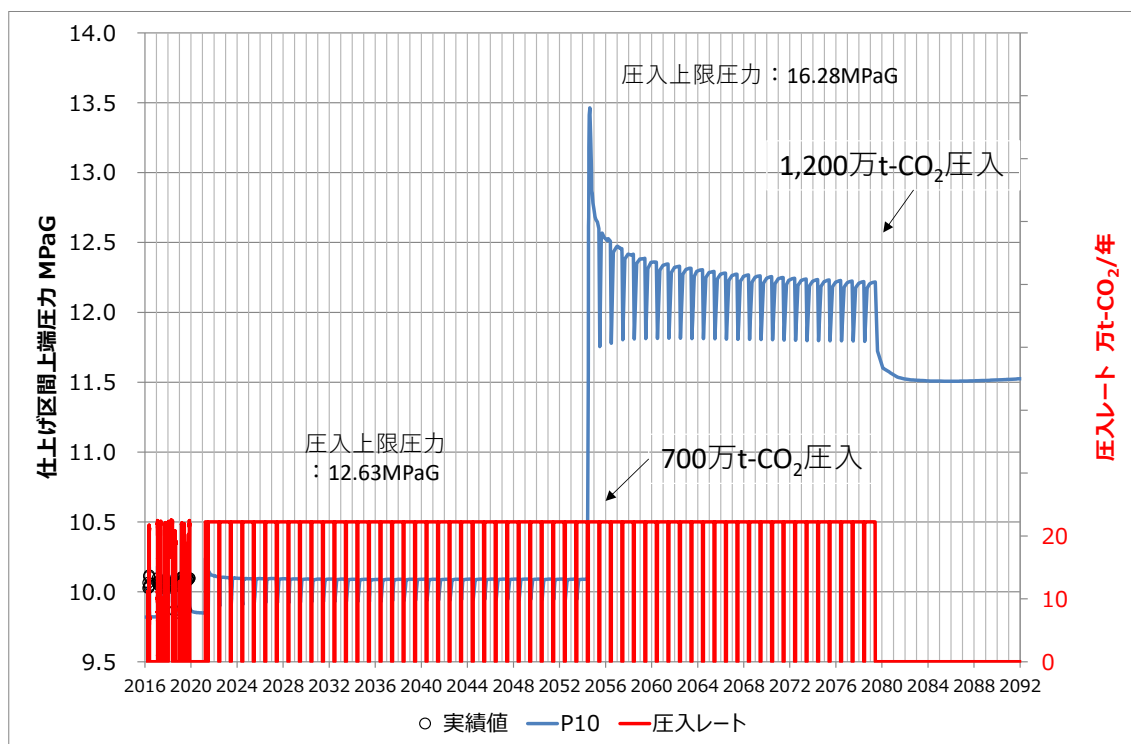


図 5.4-68 ケース 3-2 P10 具現像 最大圧入量達成までの仕上げ区間上端圧力の推移

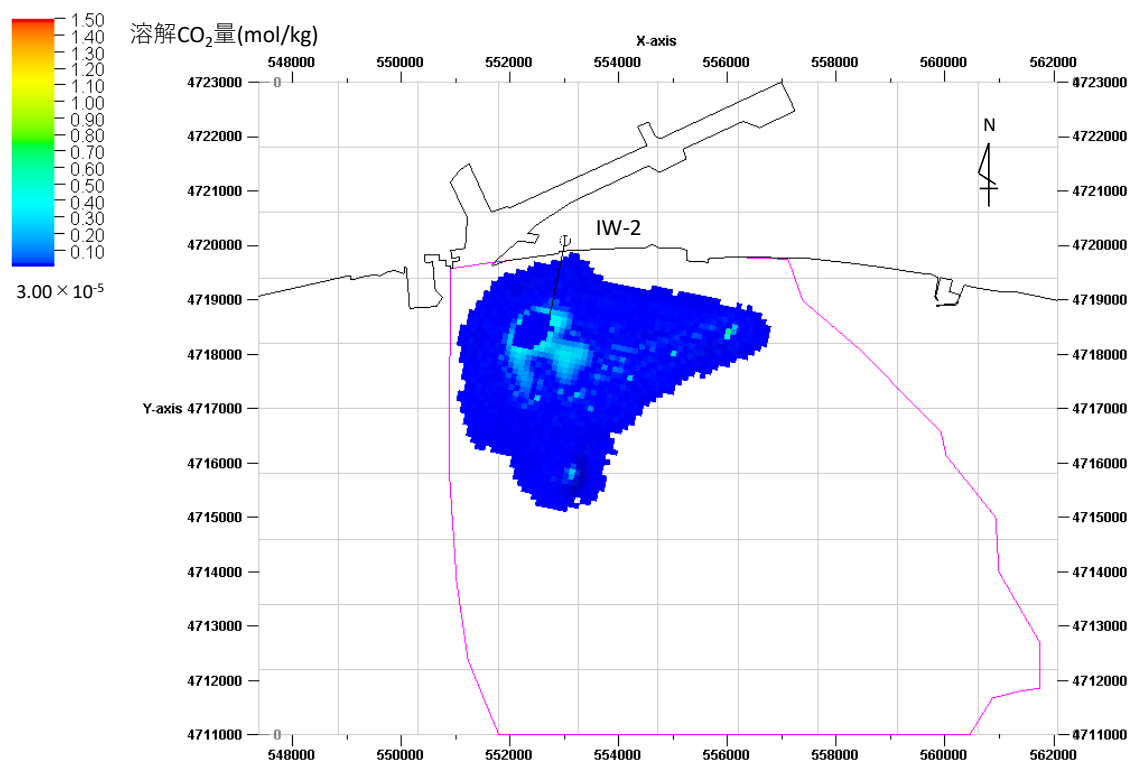


図 5.4-69 ケース 3-2 P10 具現像 最大量圧入停止 1,000 年後の溶解 CO₂ 量分布

④ ケース 3-1 P90、P50、P10 の各具現像で想定される長期挙動予測結果

P90、P50、P10 の各具現像で想定されるによるケース 3-1 のシミュレーションで、最大貯留（圧入）量の CO₂ を圧入した直後、2 年後、200 年後、1,000 年後の長期挙動予測結果（CO₂飽和度分布、溶解 CO₂量分布、圧力変化分布）および貯留形態変化の予測結果を示す（表 5.4-7）。

表 5.4-7 ケース 3-1 各具現像における長期挙動予測結果および貯留形態変化の予測結果にかかる図面番号一覧

結果	P90 具現像結果	P50 具現像結果	P10 具現像結果
仕上げ区間切り替え時圧入量	100 万 t-CO ₂	200 万 t-CO ₂	700 万 t-CO ₂
貯留（圧入）可能量	1,100 万 t-CO ₂	1,200 万 t-CO ₂	1,200 万 t-CO ₂
CO ₂ 飽和度分布（平面図）	図 5.4-70	図 5.4-77	図 5.4-84
（断面図）	図 5.4-71	図 5.4-78	図 5.4-85
溶解 CO ₂ 量分布（平面図）	図 5.4-72	図 5.4-79	図 5.4-86
（断面図）	図 5.4-73	図 5.4-80	図 5.4-87
圧力変化（平面図）	図 5.4-74	図 5.4-81	図 5.4-88
（断面図）	図 5.4-75	図 5.4-82	図 5.4-89
貯留形態変化の挙動予測	図 5.4-76	図 5.4-83	図 5.4-90

各具現像における CO₂ 飽和度分布は、それぞれの具現像で想定される岩相分布や貯留層の傾斜角度、圧入した層準と圧入量に関連するものと考えられる。

CO₂ 飽和度分布では、P10 具現像による結果が特徴的な挙動を示す。P10 具現像は全層仕上げの設定により、P50、P90 具現像による圧入よりも多量の CO₂（700 万 t-CO₂）を圧入後に貯留層の最上部（萌別層砂岩層上部）を閉鎖し、より下位からの圧入に切り替えた。切り替え前には、貯留層最上部付近の高浸透率領域（図 5.4-57）に大量の CO₂ が圧入されたこととなり、貯留層最上部付近は直上の遮蔽層の下端に沿って地質構造的に高い東側に移動しやすいため、P50、P90 具現像による圧入結果に比べ P10 具現像による圧入では、大きく東側に延びるような CO₂ 飽和度分布になったものと考えられる。

溶解 CO₂ は CO₂ が貯留層内で地層水と接触して生じるため、溶解 CO₂ 量の分布域は CO₂ 飽和度分布とその周辺部となる。CO₂ が溶解した地層水は密度が上昇するため、周辺の地層水との密度差により長期的には下方に垂れ下がる。各具現像による結果において、圧入停止 200 年後頃から、この現象が認められるようになる。

圧力変化はいずれの具現像による検討でも圧入井周辺で顕著に圧力が上昇し、圧入停止

時には 500 kPa 程度に達するものの、速やかに圧力上昇は解消する傾向が認められる。

圧力変化で示す平面図は、萌別層砂岩下部の上端部に相当する。圧入停止後 200 年程度までは、CO₂ 飽和度分布から示唆されるように、CO₂ が貯留層内を比較的活発に移動するため、貯留形態変化の挙動予測において残留 CO₂ 量の割合と溶解 CO₂ 量の割合が大きく増加する。それ以降には CO₂ の移動が穏やかとなるため、残留 CO₂ 量や溶解 CO₂ 量の割合の変化も緩慢となる。圧入停止 1,000 年後において、圧入した CO₂ の 3~8% 程度がトラップされずに移動しうる状態の超臨界 CO₂ として分布するものと予想される。トラップされずに残る割合は、仕上げ区間を切り替えて仕上げ区間の下位層準から圧入した CO₂ 量の割合が多い具現像ほど低くなる傾向が認められる。これは下位層準からの圧入の方が浮力の影響等から CO₂ が広範囲に移動しやすくなるためであると推定される。

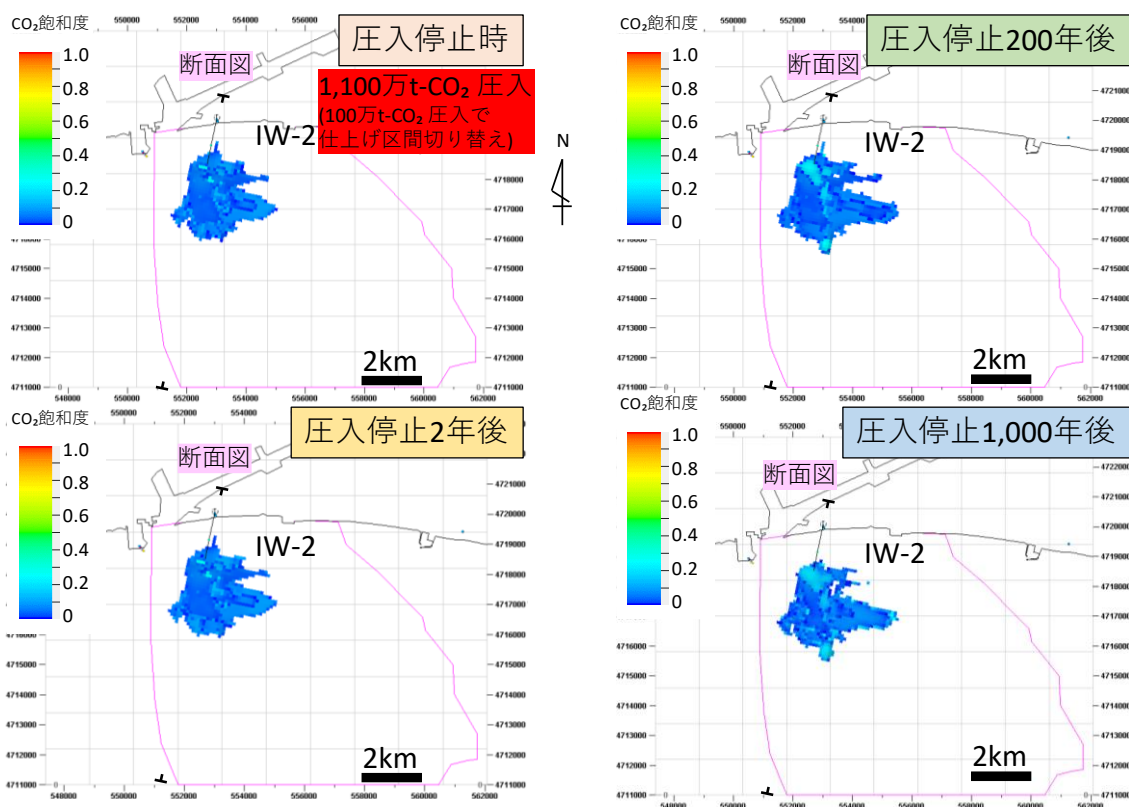


図 5.4-70 ケース 3-1 P90 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (平面図)

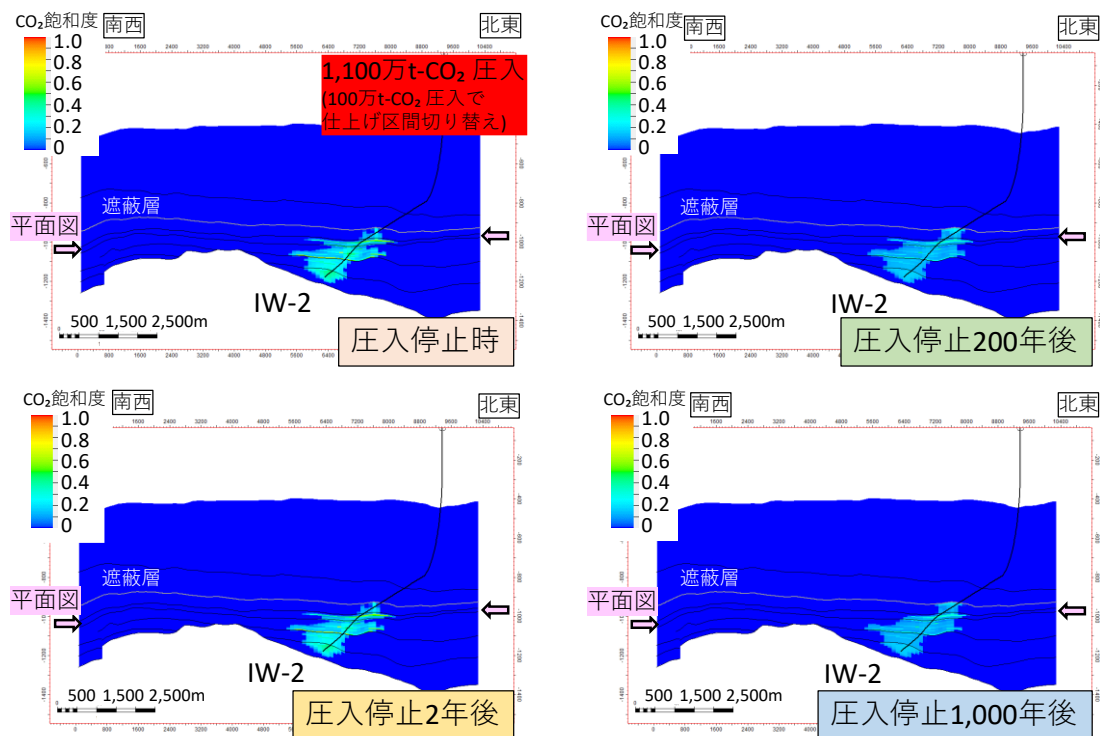


図 5.4-71 ケース 3-1 P90 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (断面図)

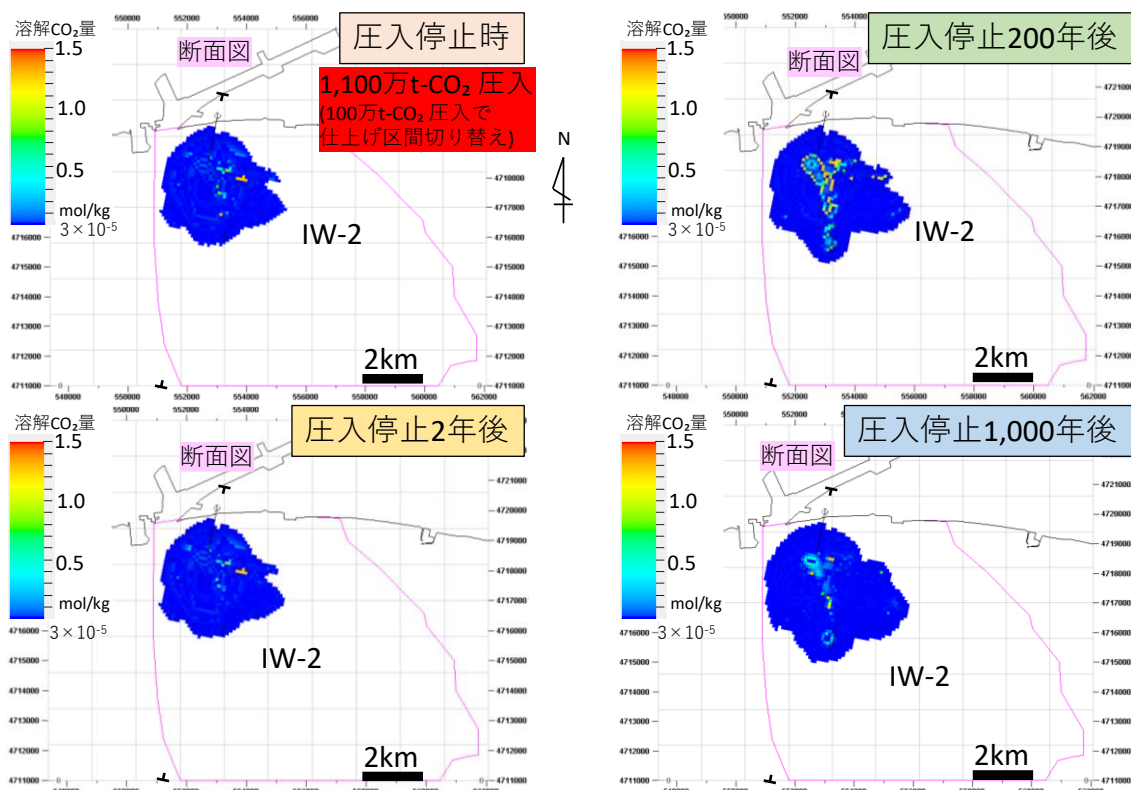


図 5.4-72 ケース 3-1 P90 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (平面図)

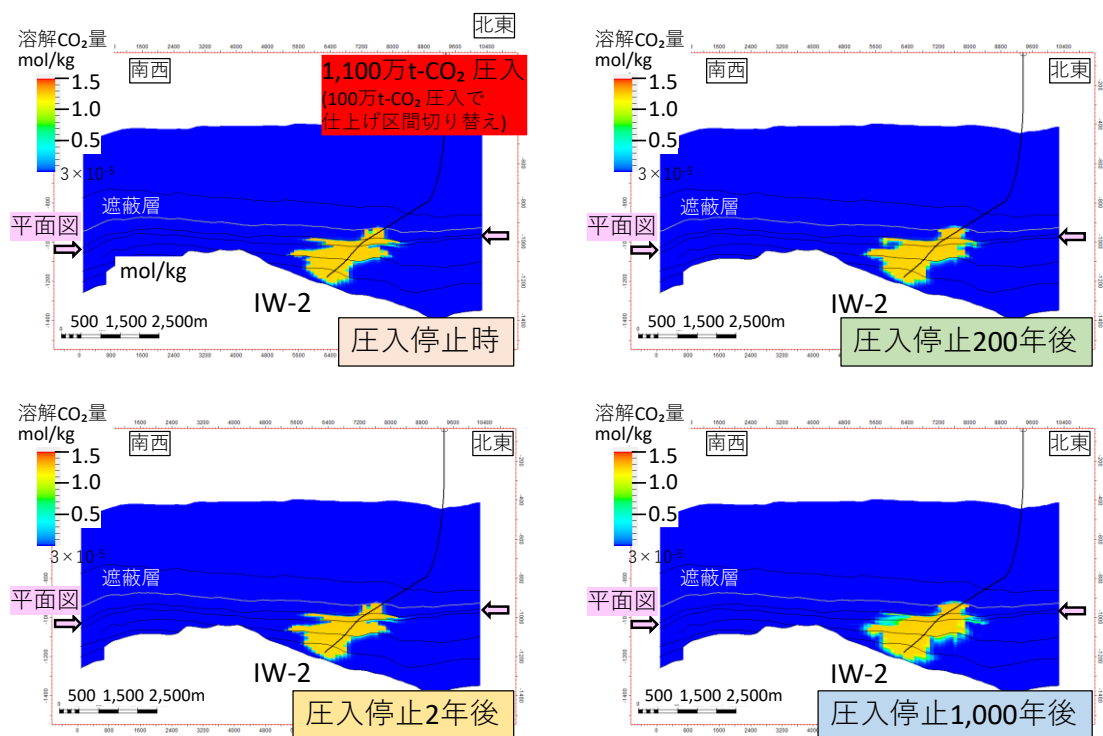


図 5.4-73 ケース 3-1 P90 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (断面図)

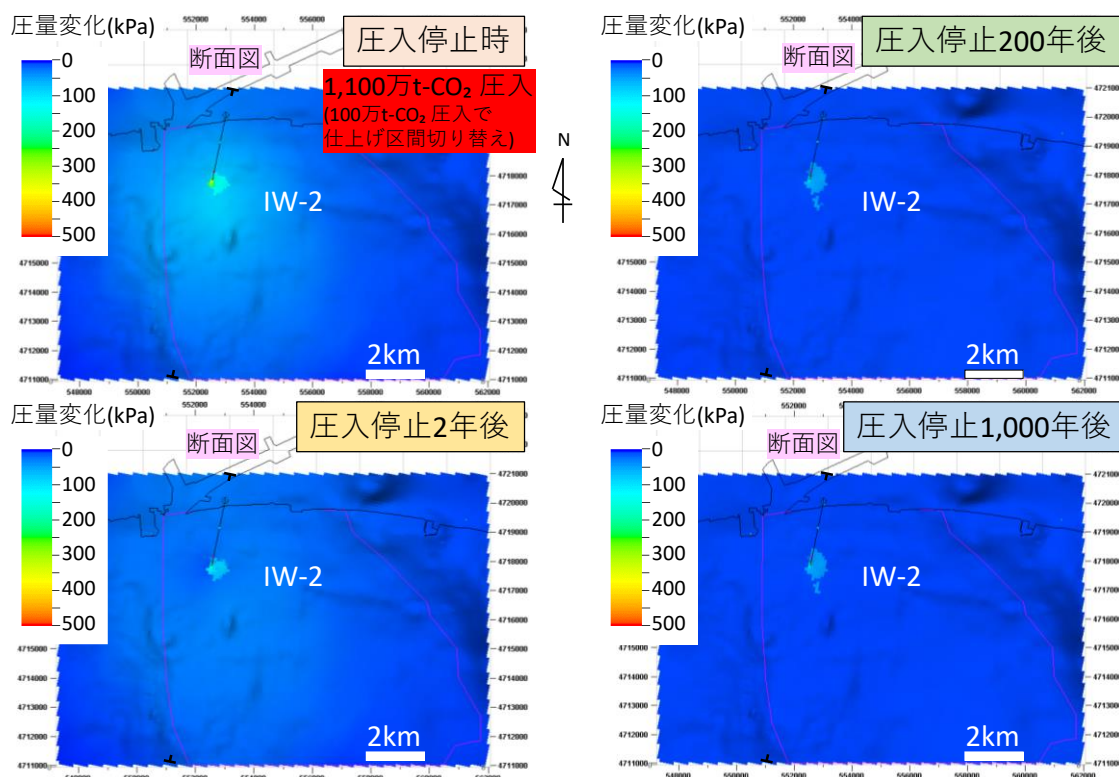


図 5.4-74 ケース 3-1 P90 具現像で予想される圧力変化分布

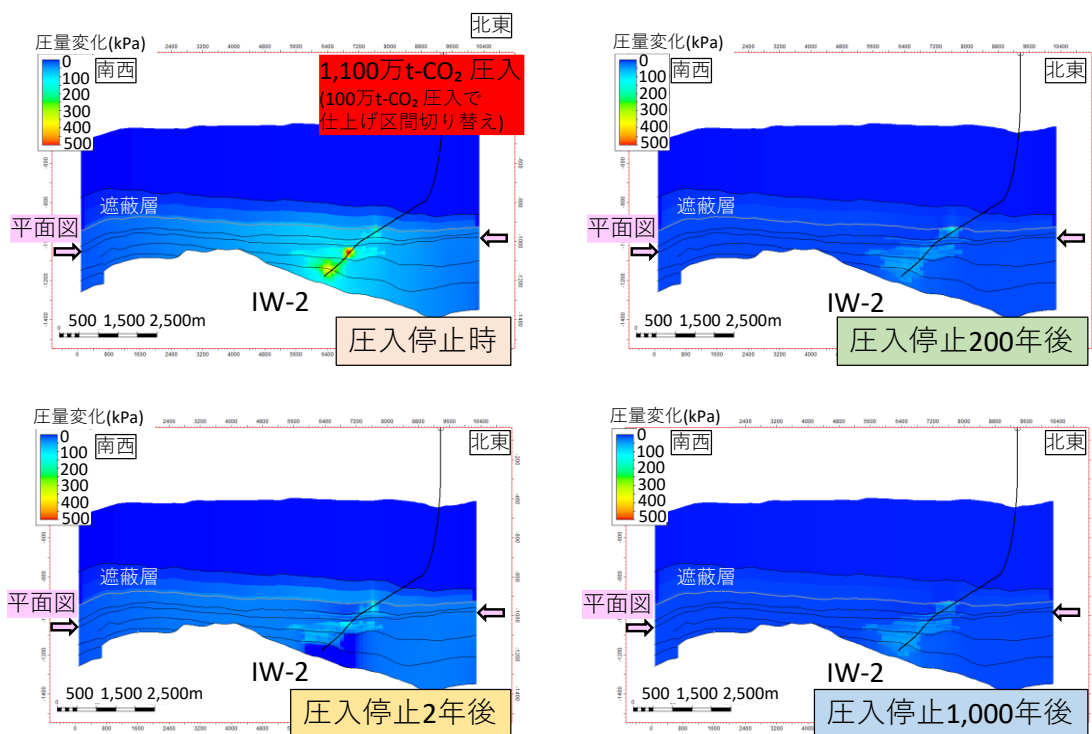


図 5.4-75 ケース 3-1 P90 具現像で予想される圧力変化分布

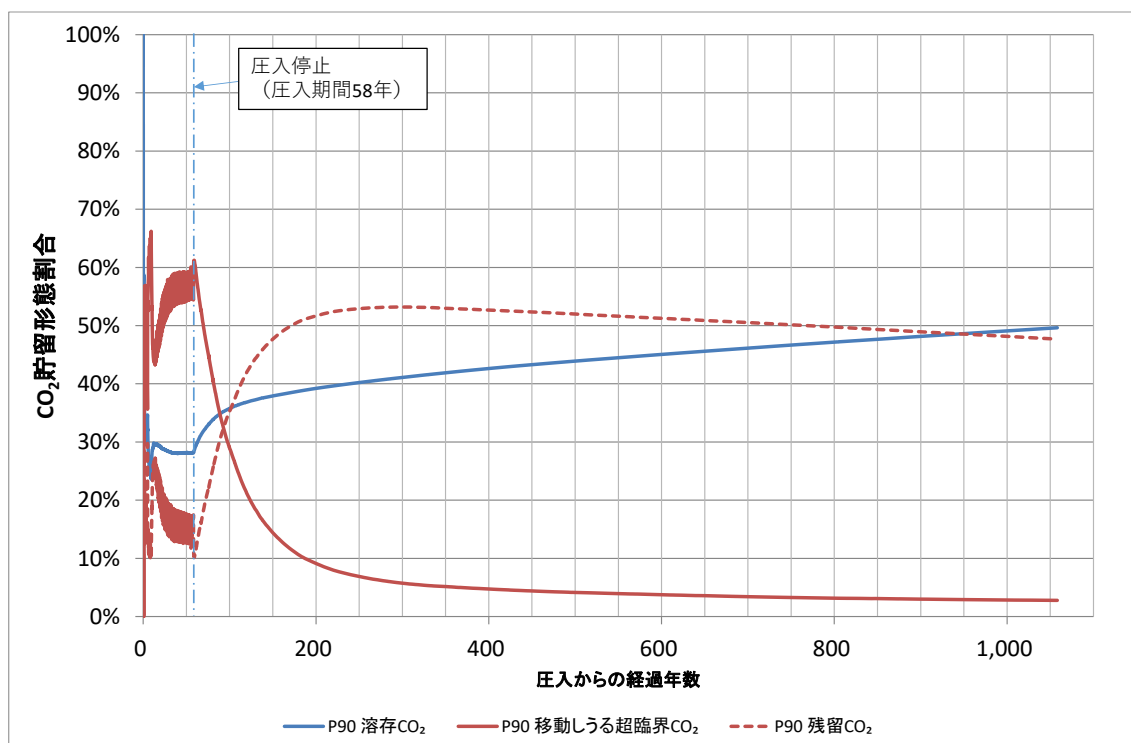


図 5.4-76 ケース 3-1 P90 具現像で予想される貯留形態の変化

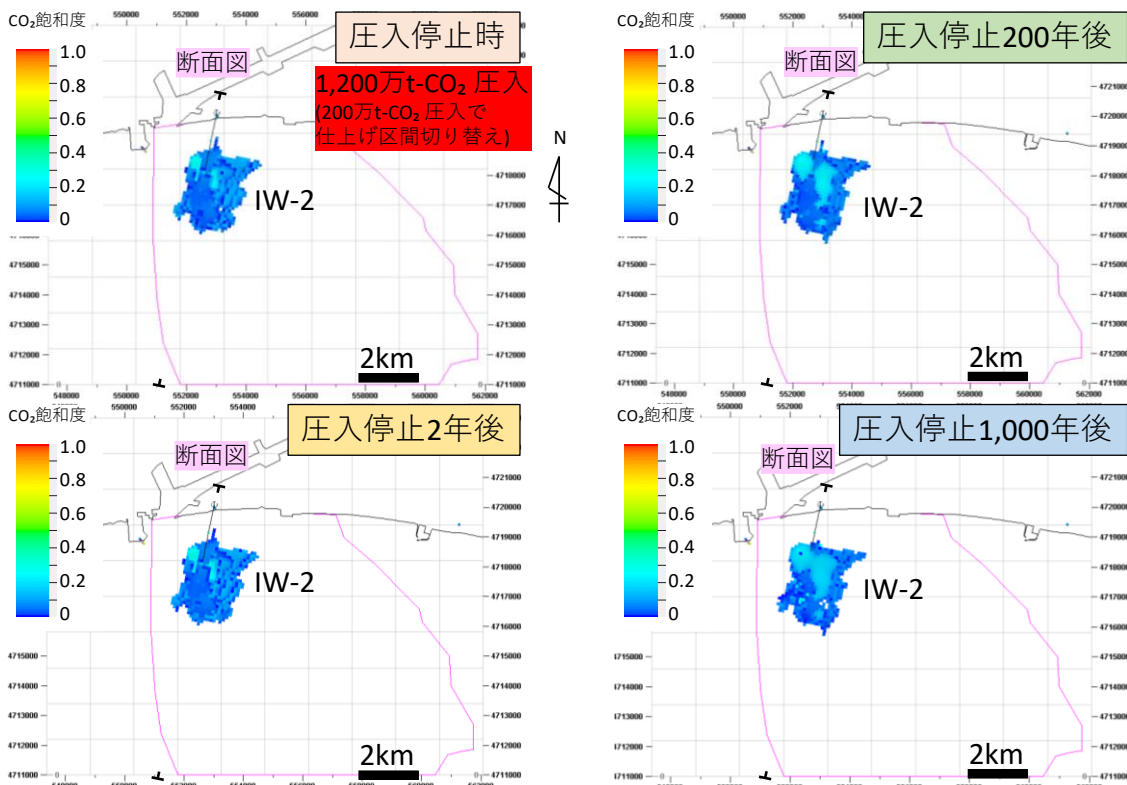


図 5.4-77 ケース 3-1 P50 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (平面図)

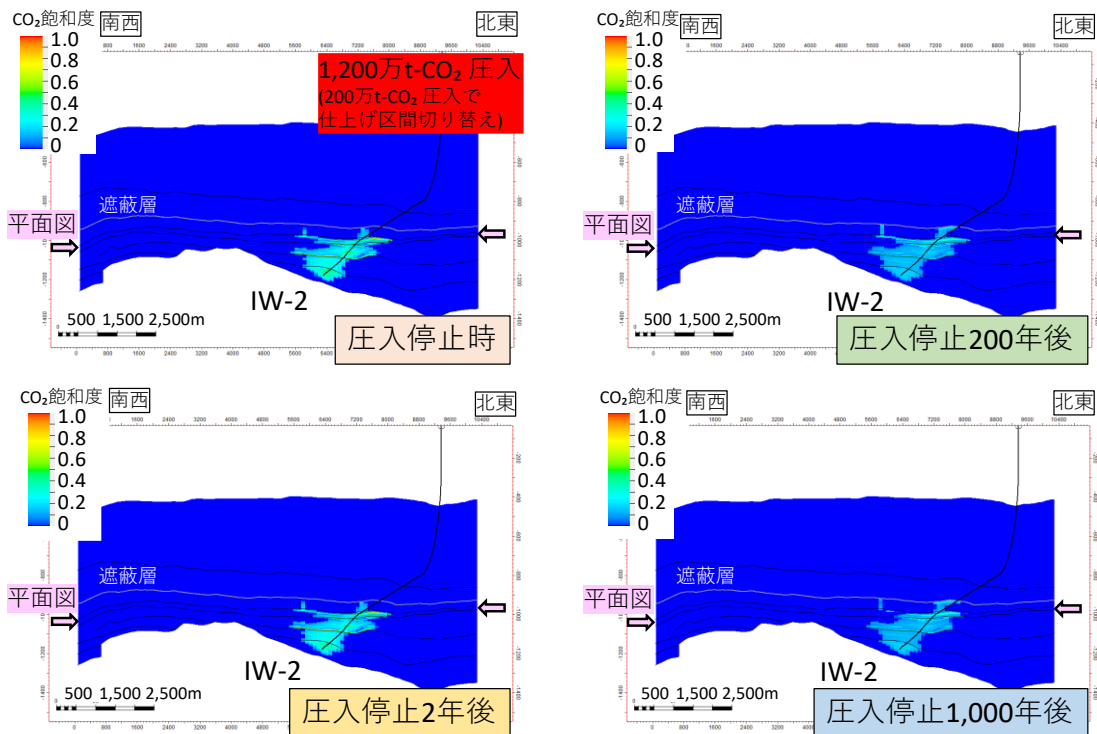


図 5.4-78 ケース 3-1 P50 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (断面図)

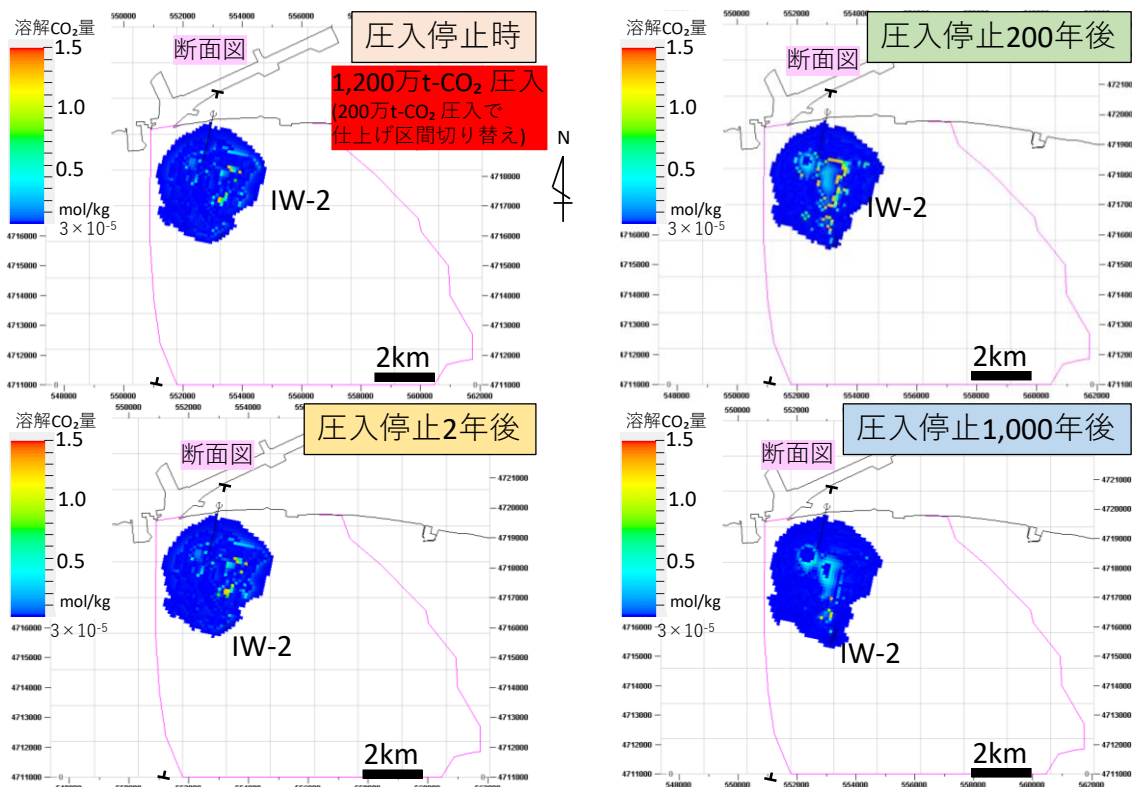


図 5.4-79 ケース 3-1 P50 井現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (平面図)

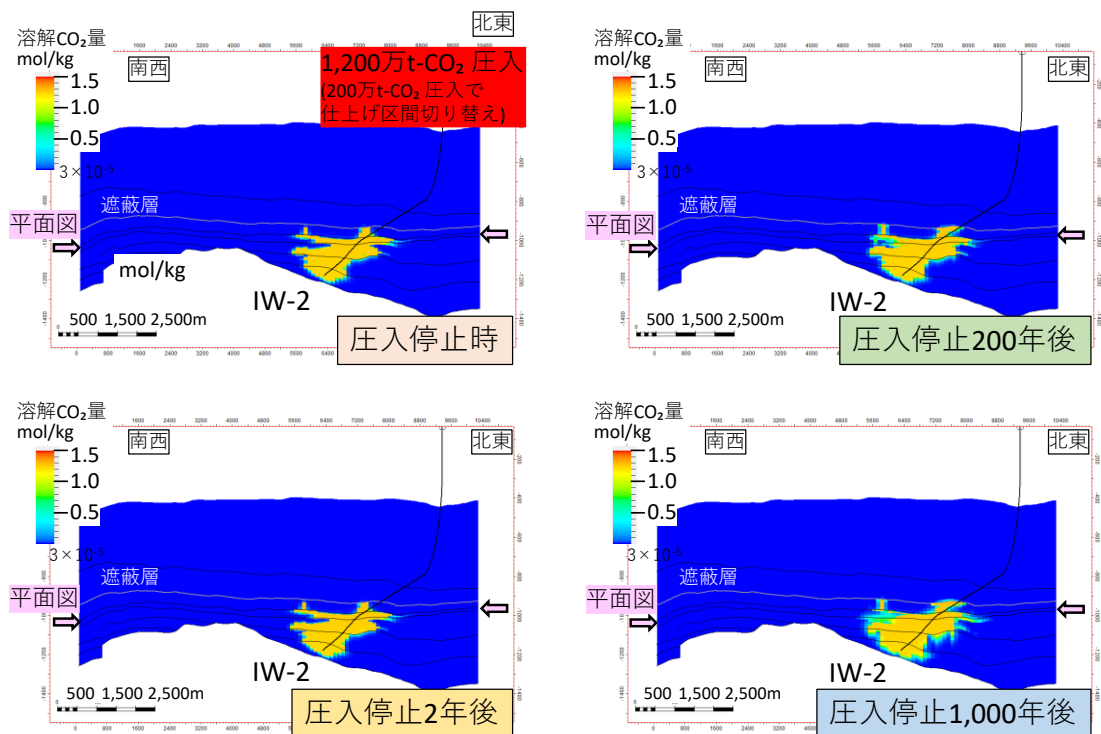


図 5.4-80 ケース 3-1 P50 井現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (断面図)

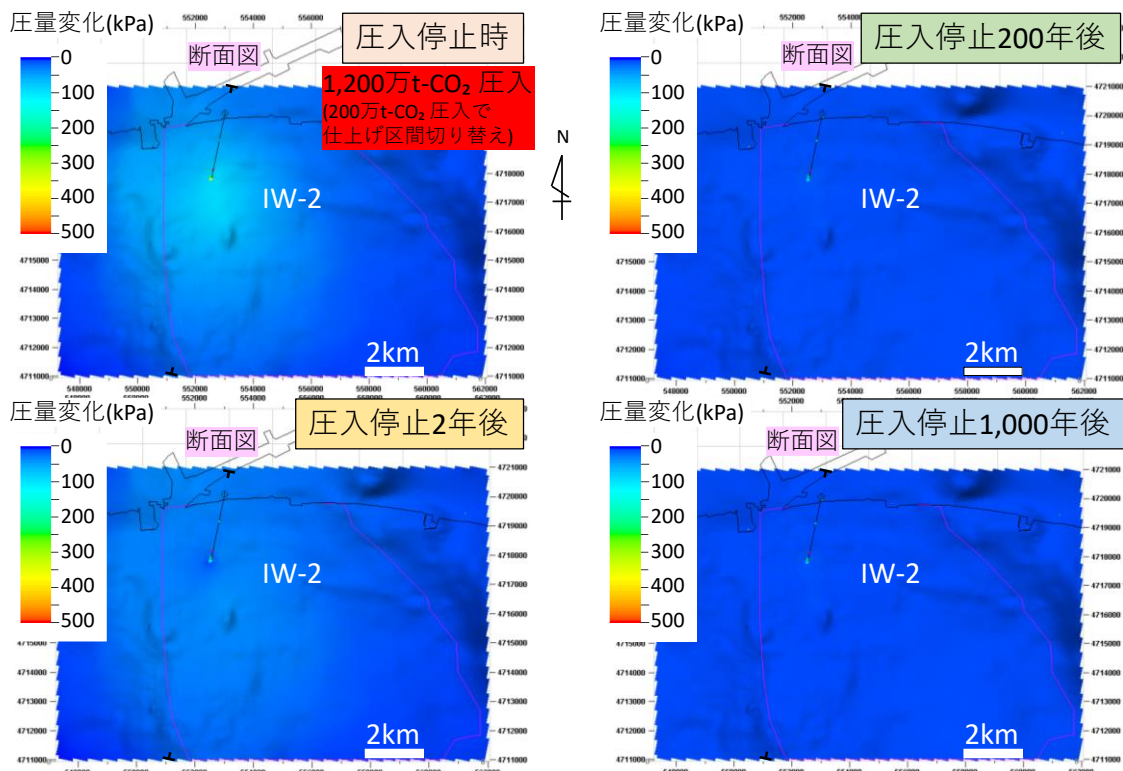


図 5.4-81 ケース 3-1 P50 具現像で予想される圧力変化分布

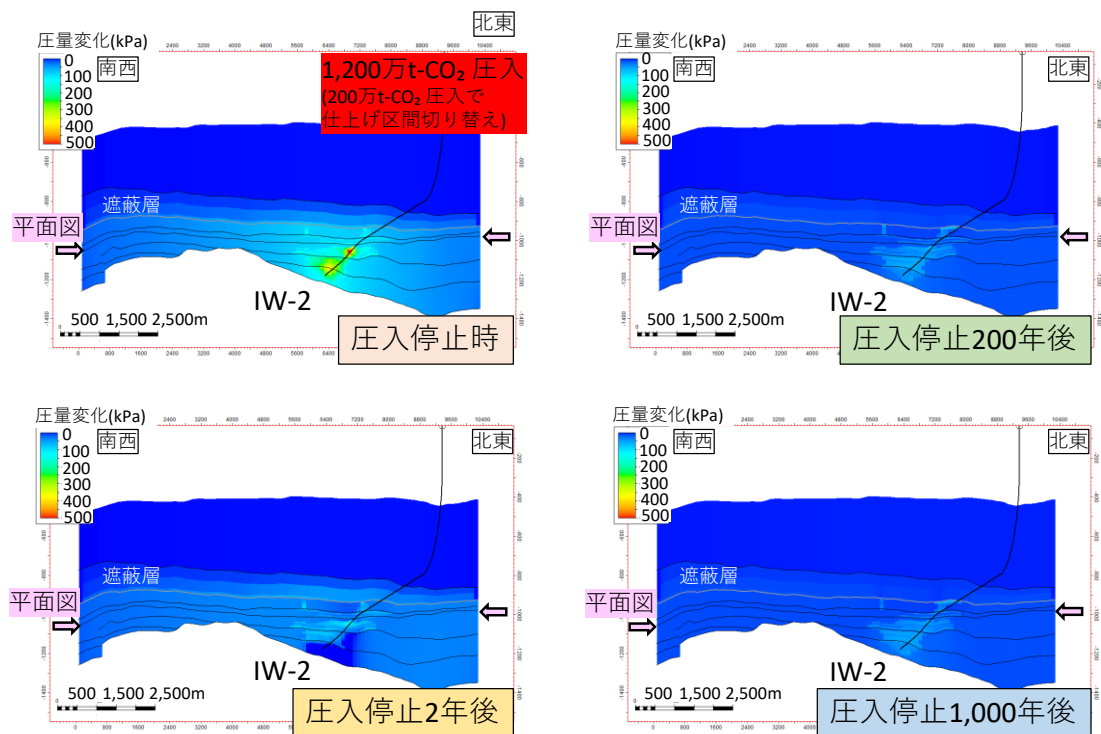


図 5.4-82 ケース 3-1 P50 具現像で予想される圧力変化分布

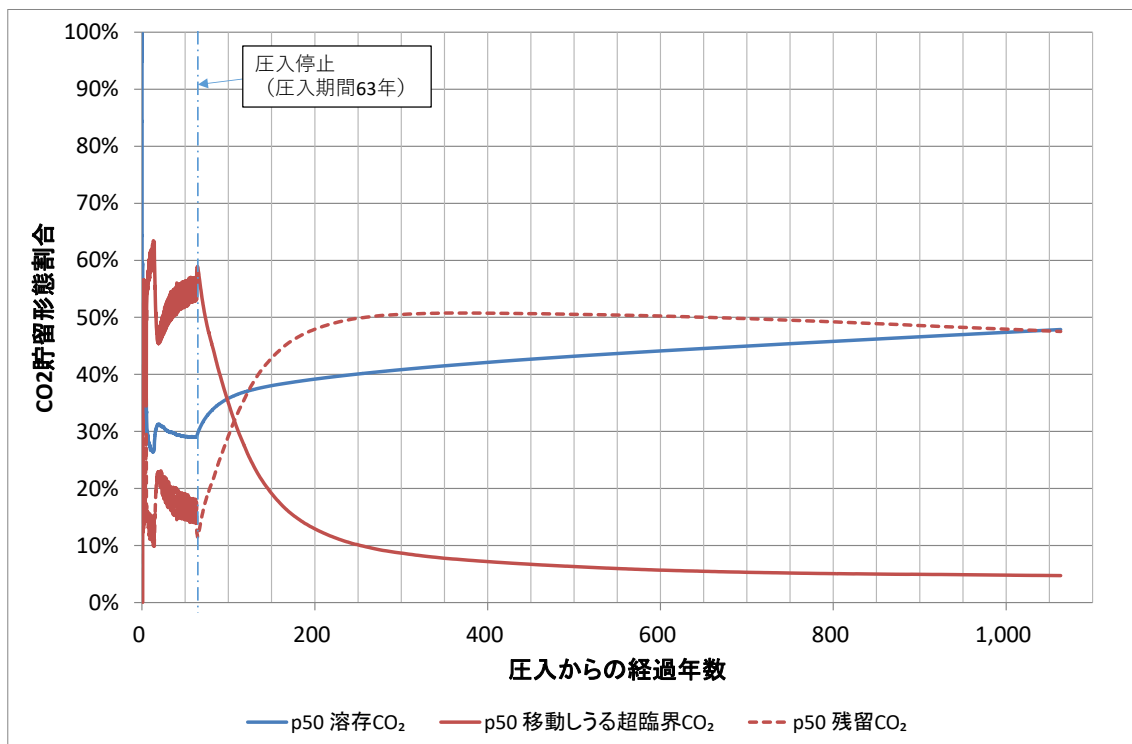


図 5.4-83 ケース 3-1 P50 具現像で予想される貯留形態の変化

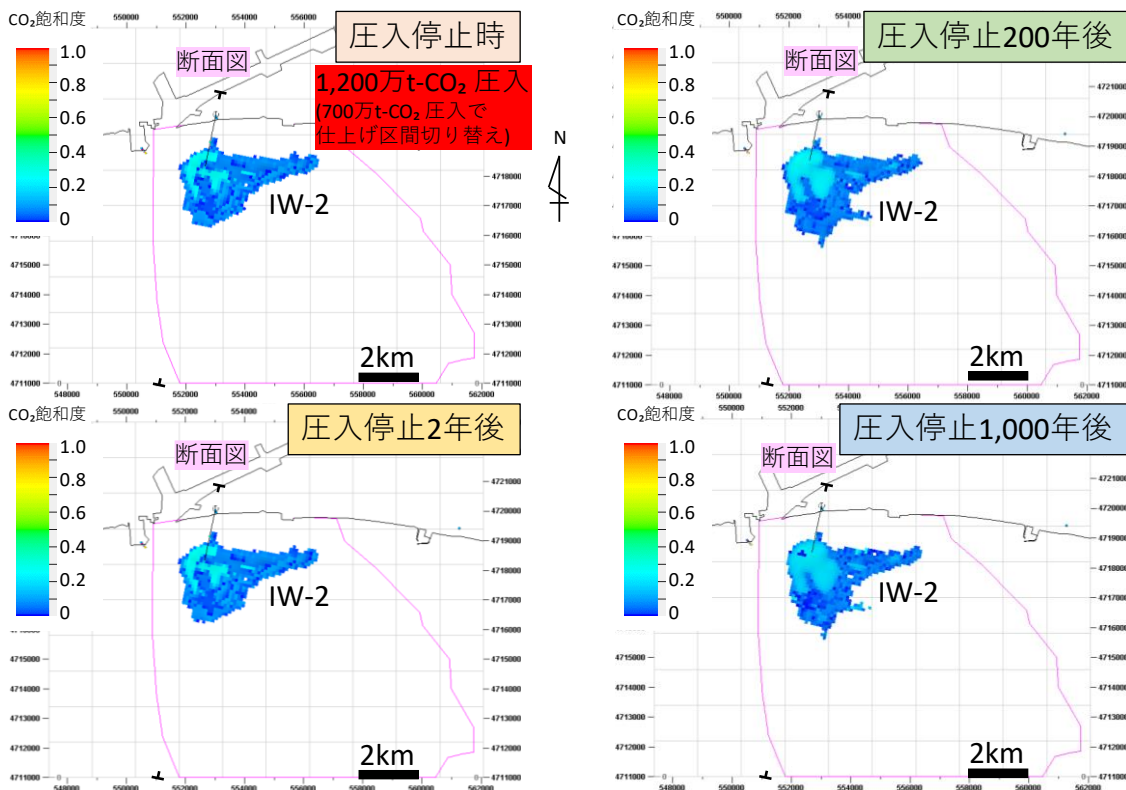


図 5.4-84 ケース 3-1 P10 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (平面図)

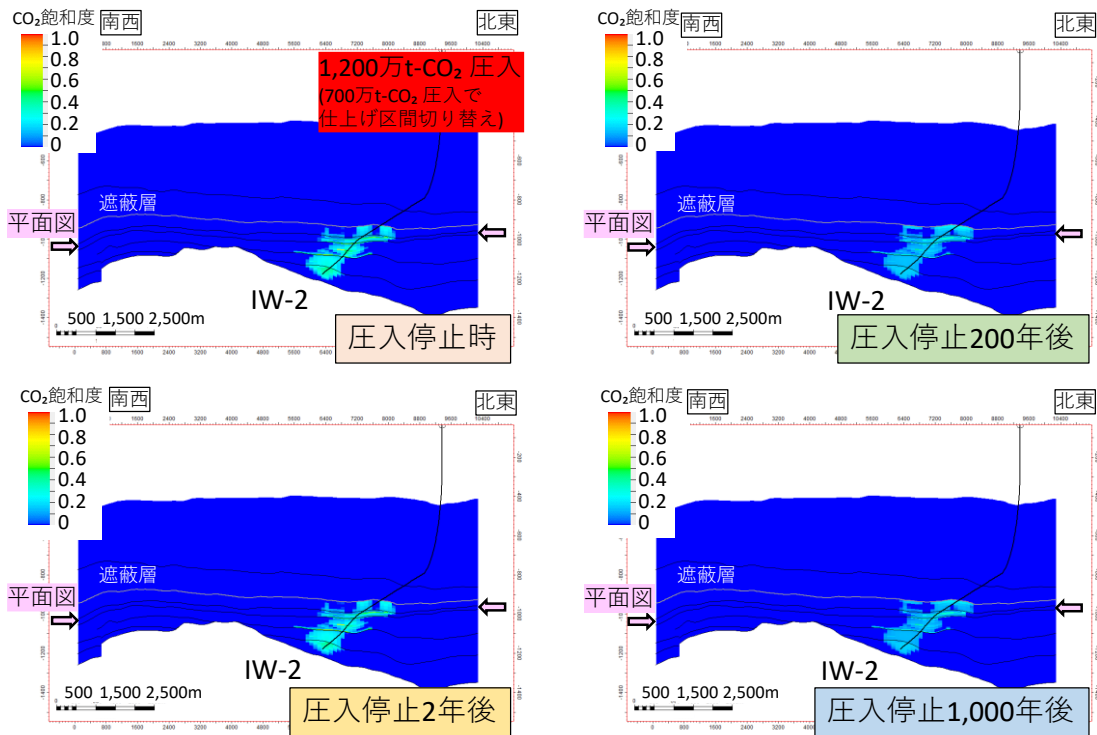


図 5.4-85 ケース 3-1 P10 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (断面図)

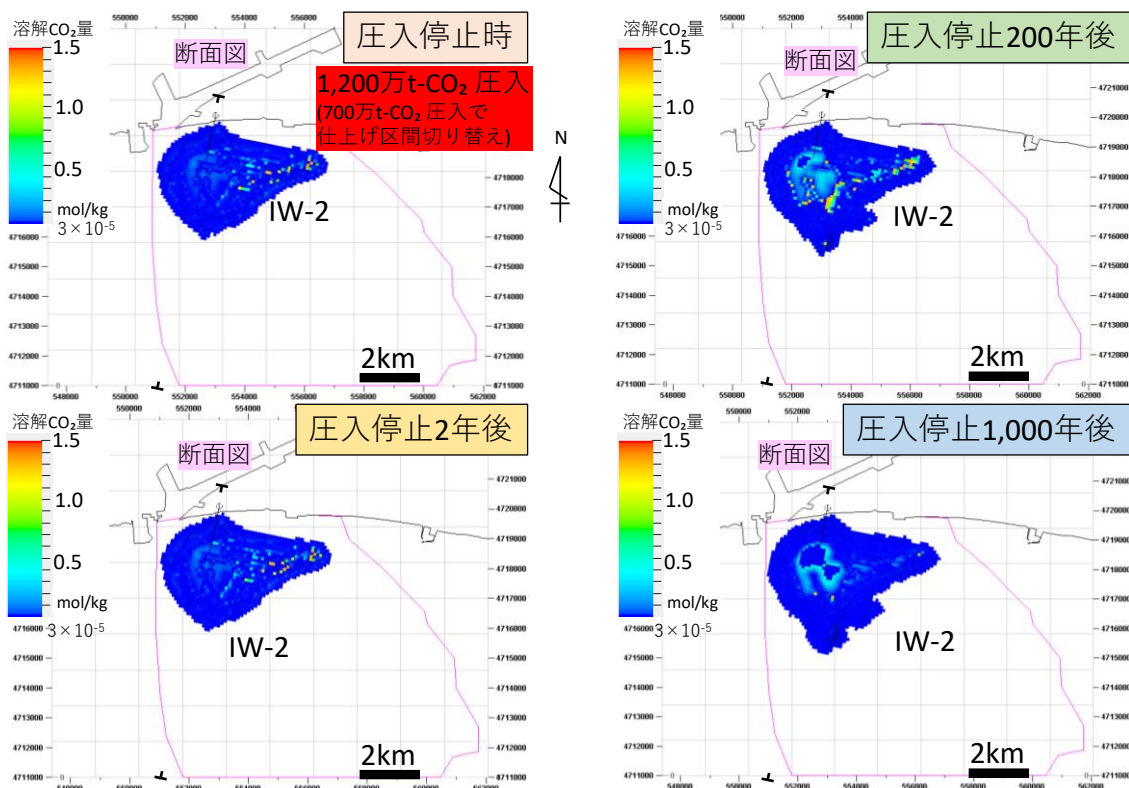


図 5.4-86 ケース 3-1 P10 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (平面図)

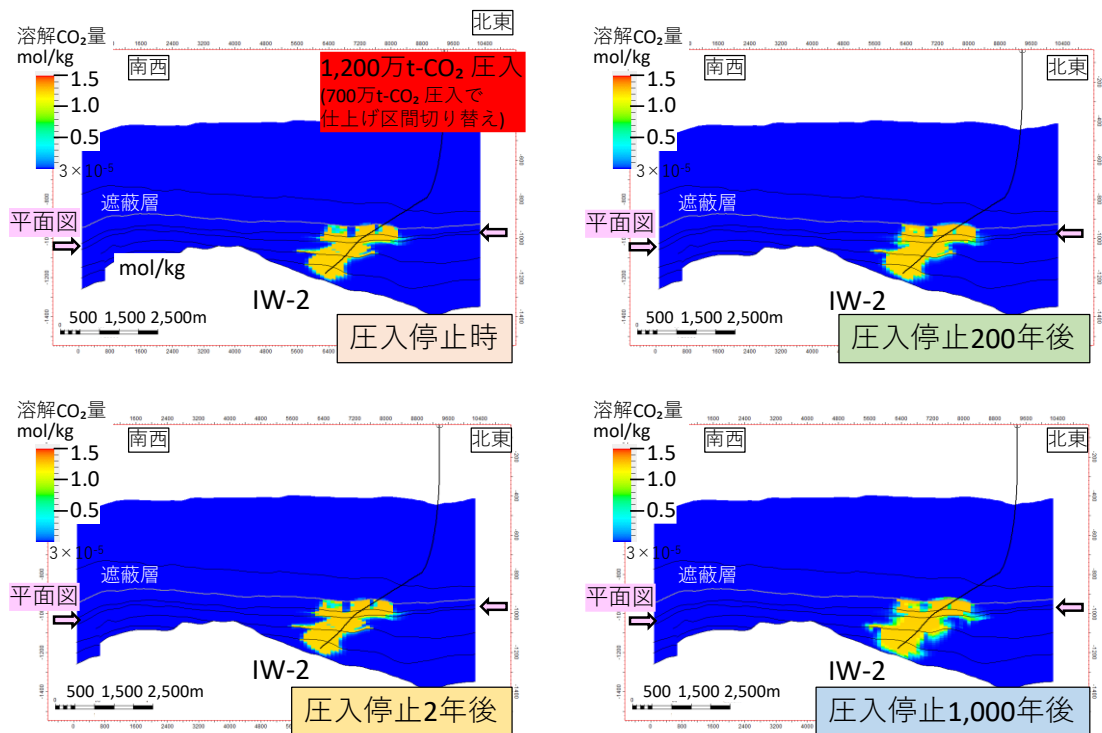


図 5.4-87 ケース 3-1 P10 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (断面図)

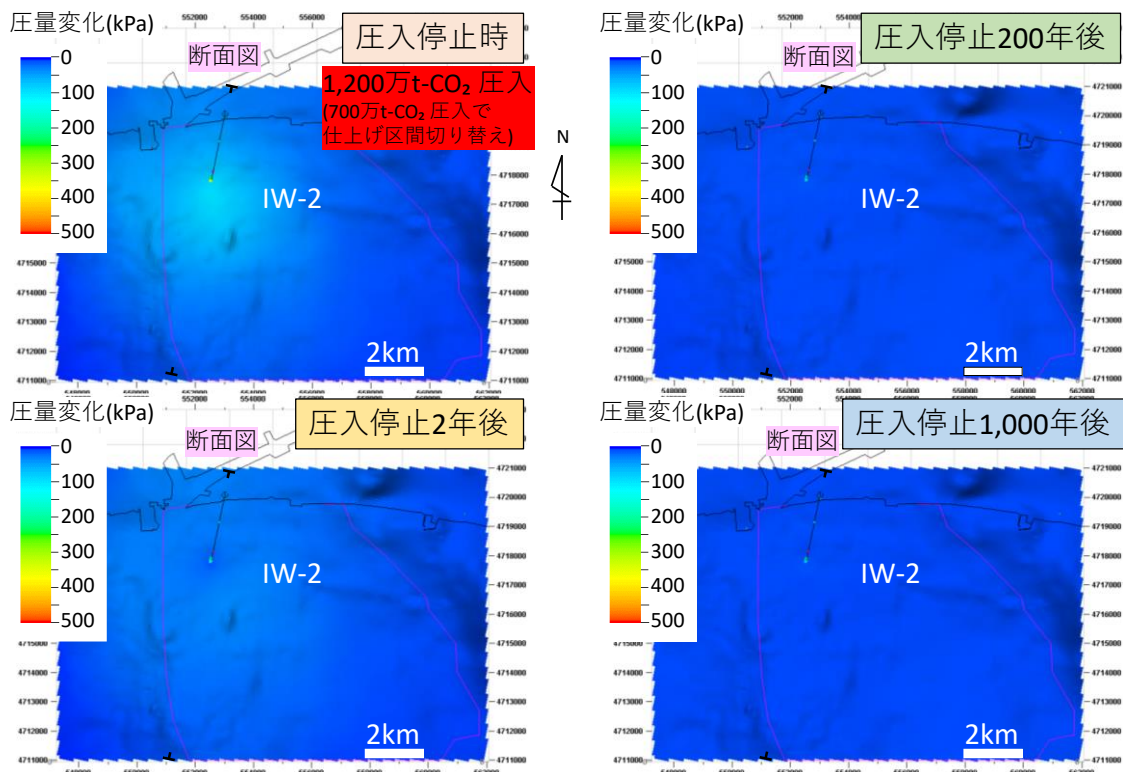


図 5.4-88 ケース 3-1 P10 具現像で予想される圧力変化分布

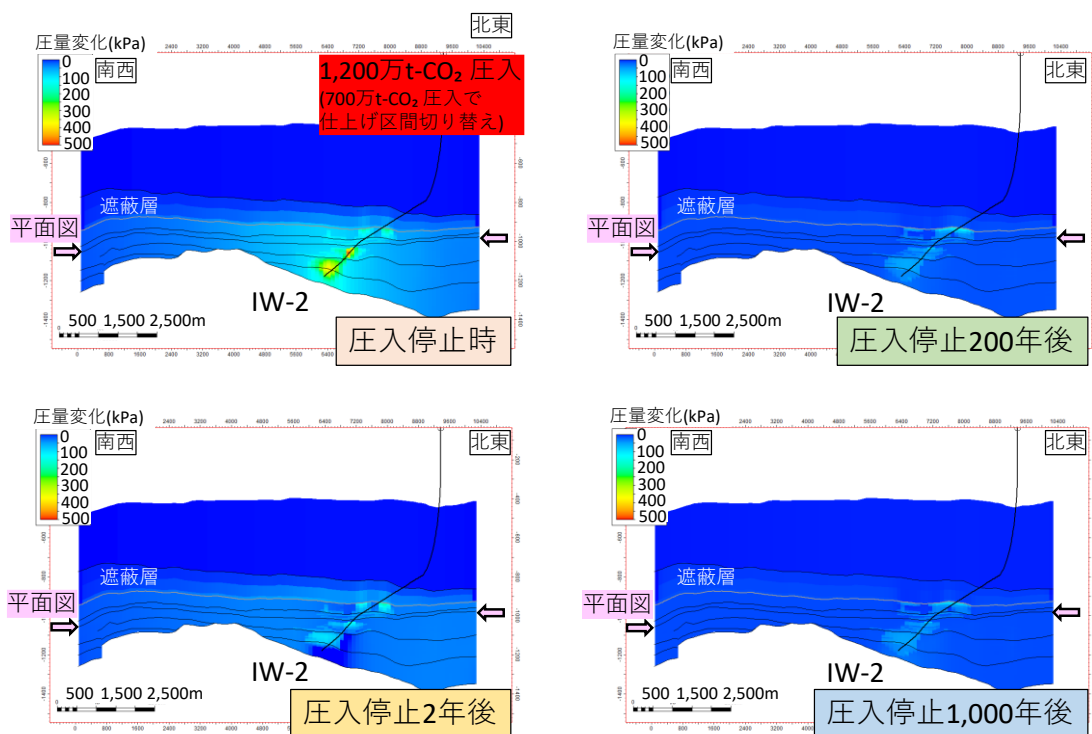


図 5.4-89 ケース 3-1 P10 具現像で予想される圧力変化分布

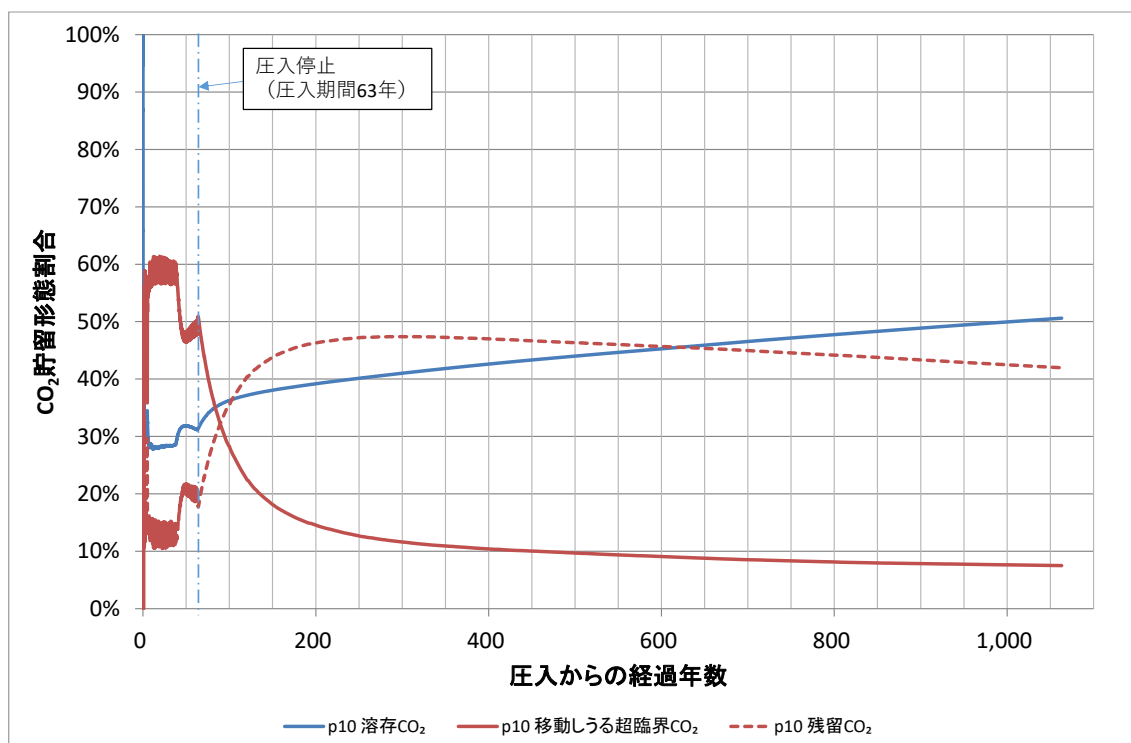


図 5.4-90 ケース 3-1 P10 具現像で予想される貯留形態の変化

⑤ ケース 3-2 P90、P50、P10 の各具現像で想定される長期挙動予測結果

P90、P50、P10 の各具現像によるケース 3-2 のシミュレーションで、最大貯留（圧入）量の CO₂ を圧入した直後、2 年後、200 年後、1,000 年後の長期挙動予測結果（CO₂ 飽和度分布、溶解 CO₂ 量分布、圧力変化分布）および貯留形態変化の予測結果を示す（表 5.4-8）。

表 5.4-8 ケース 3-2 各具現像における長期挙動予測結果および貯留形態変化の予測結果にかかる図面番号一覧

結果	P90 具現像結果	P50 具現像結果	P10 具現像結果
仕上げ区間切り替え時圧入量	200 万 t-CO ₂	300 万 t-CO ₂	700 万 t-CO ₂
貯留（圧入）可能量	500 万 t-CO ₂	900 万 t-CO ₂	1,200 万 t-CO ₂
CO ₂ 飽和度分布（平面図）	図 5.4-91	図 5.4-98	図 5.4-105
（断面図）	図 5.4-92	図 5.4-99	図 5.4-106
溶解 CO ₂ 量分布（平面図）	図 5.4-93	図 5.4-100	図 5.4-107
（断面図）	図 5.4-94	図 5.4-101	図 5.4-108
圧力変化（平面図）	図 5.4-95	図 5.4-102	図 5.4-109
（断面図）	図 5.4-96	図 5.4-103	図 5.4-110
貯留形態変化の挙動予測	図 5.4-97	図 5.4-104	図 5.4-111

各具現像による CO₂ 飽和度分布は、それぞれの具現像で想定される岩相分布や貯留層の傾斜角度、圧入した層準と圧入量に関連するものと考えられる。

ケース 3-1 と同様に CO₂ 飽和度分布では、P10 具現像による結果が特徴的な挙動を示す。P10 具現像では、P50、P90 具現像による圧入よりも多量の CO₂（700 万 t-CO₂）を貯留層最上部付近の高浸透率領域（図 5.4-57）に圧入したため、遮蔽層の下端に沿って地質構造的に高い東側に延びるような CO₂ 飽和度分布になったものと考えられる。

溶解 CO₂ 量の分布はケース 3-1 と同様に、CO₂ 飽和度分布とその周辺部に分布し、圧入停止 200 年後頃から、下方への垂れ下がり現象が認められるようになる。

圧力変化で示す平面図は、萌別層（+荷葉層）砂岩層の上端部に相当する。IW-2 の西側で、萌別層（+荷葉層）砂岩層は削剥により消滅しているため、平面図では白抜けとなっている。ケース 3-1 と同様にいずれの具現像による検討でも圧入井周辺で顕著に圧力が上昇し、圧入停止時には 500 kPa 程度に達するものの、速やかに圧力上昇は解消する傾向が認められる。

貯留形態変化の挙動予測はケース 3-1 と同様に圧入停止 200 年後ころまで残留 CO₂ 量の割合と溶解 CO₂ 量の割合が大きく増加する。それ以降には CO₂ の移動が穏やかとなるた

め、残留CO₂量や溶解CO₂量の割合の変化も緩慢となる。圧入停止1,000年後において、圧入したCO₂の1~8%程度がトラップされずに移動しうる状態の超臨界CO₂として分布するものと予想される。ケース3-1と同様に、仕上げ区間を切り替えて、仕上げ区間の下位層準から圧入したCO₂量の割合が多い具現像ほど移動しうる超臨界CO₂の割合が低くなる傾向が認められる。

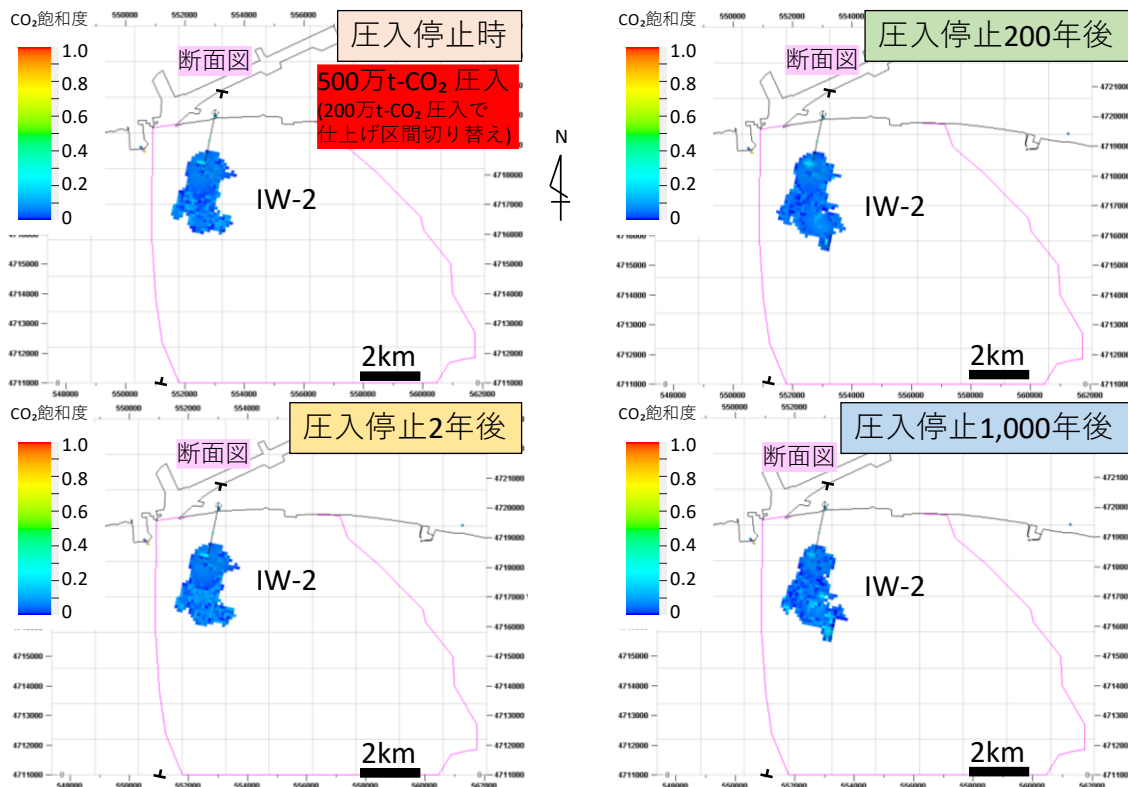


図 5.4-91 ケース 3-2 P90 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (平面図)

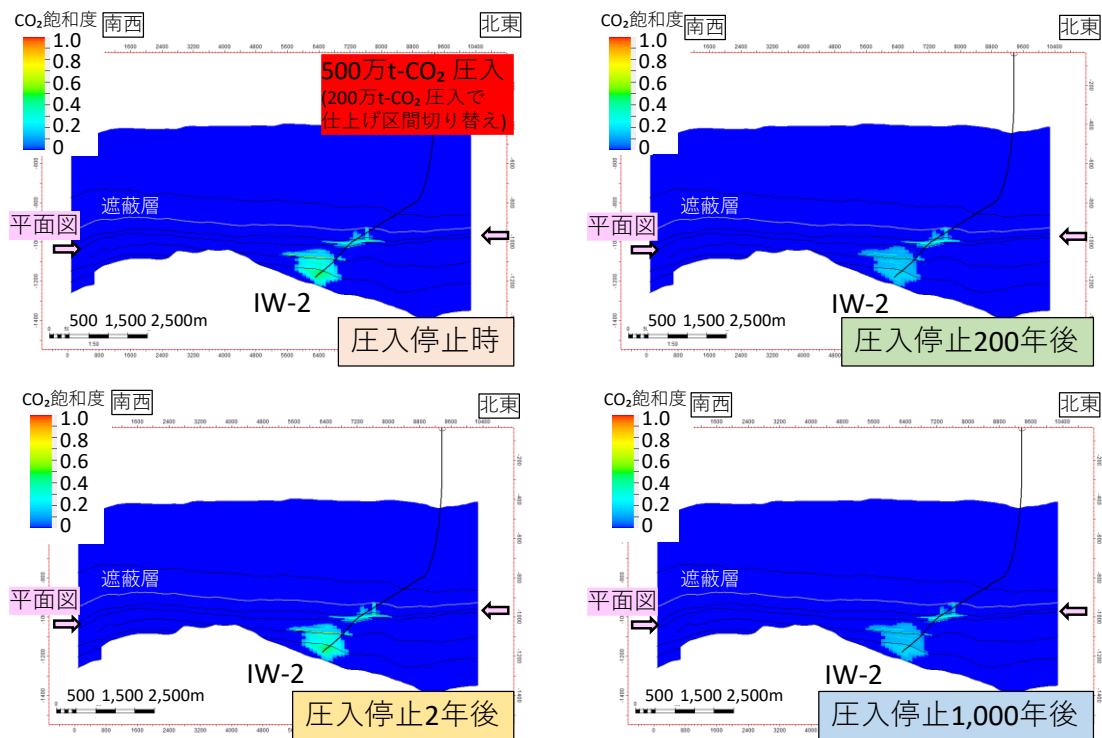


図 5.4-92 ケース 3-2 P90 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (断面図)

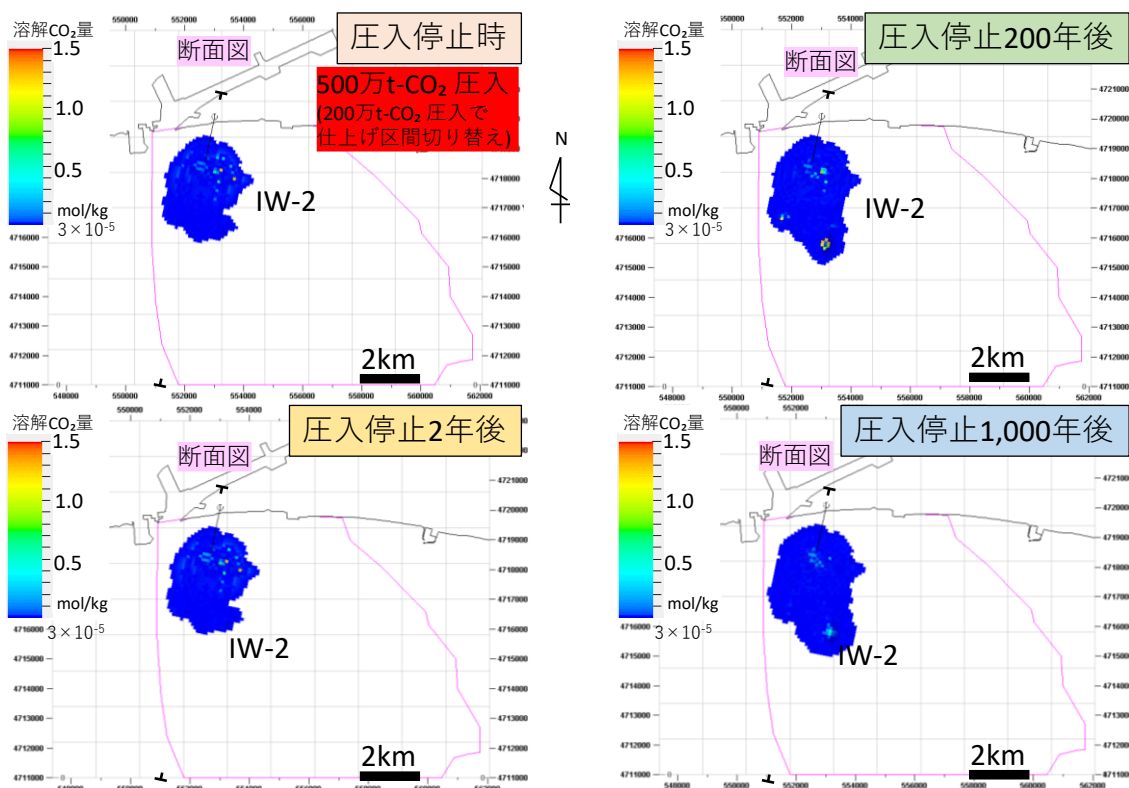


図 5.4-93 ケース 3-2 P90 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (平面図)

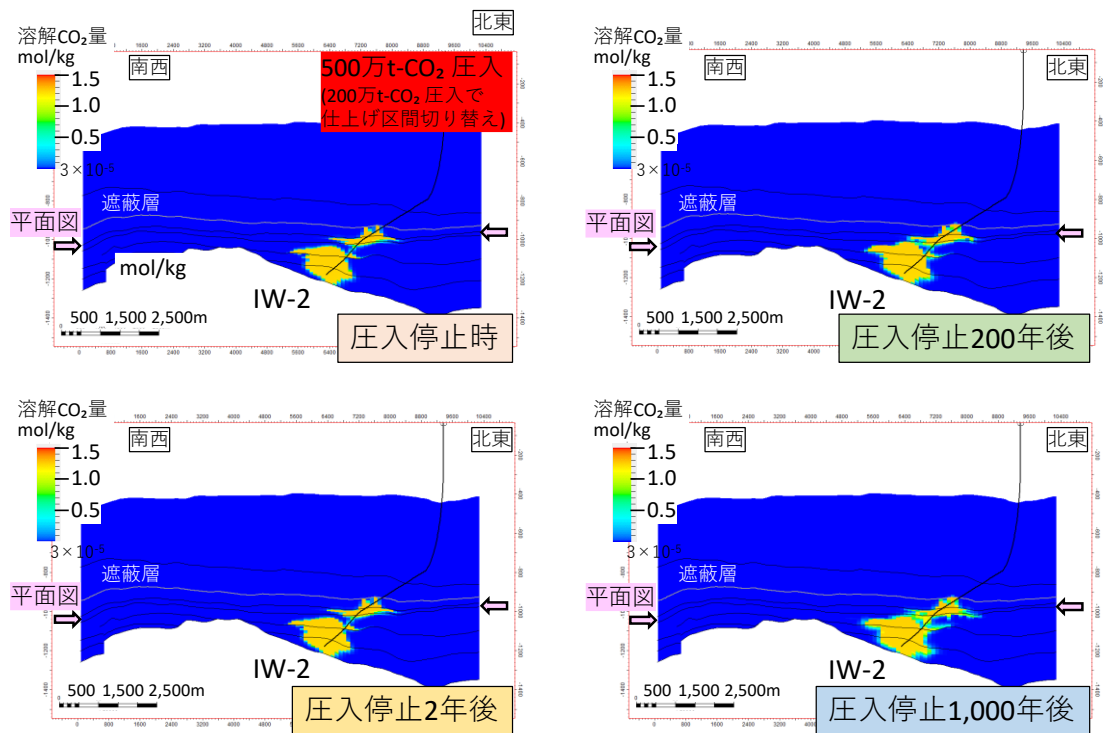


図 5.4-94 ケース 3-2 P90 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (断面図)

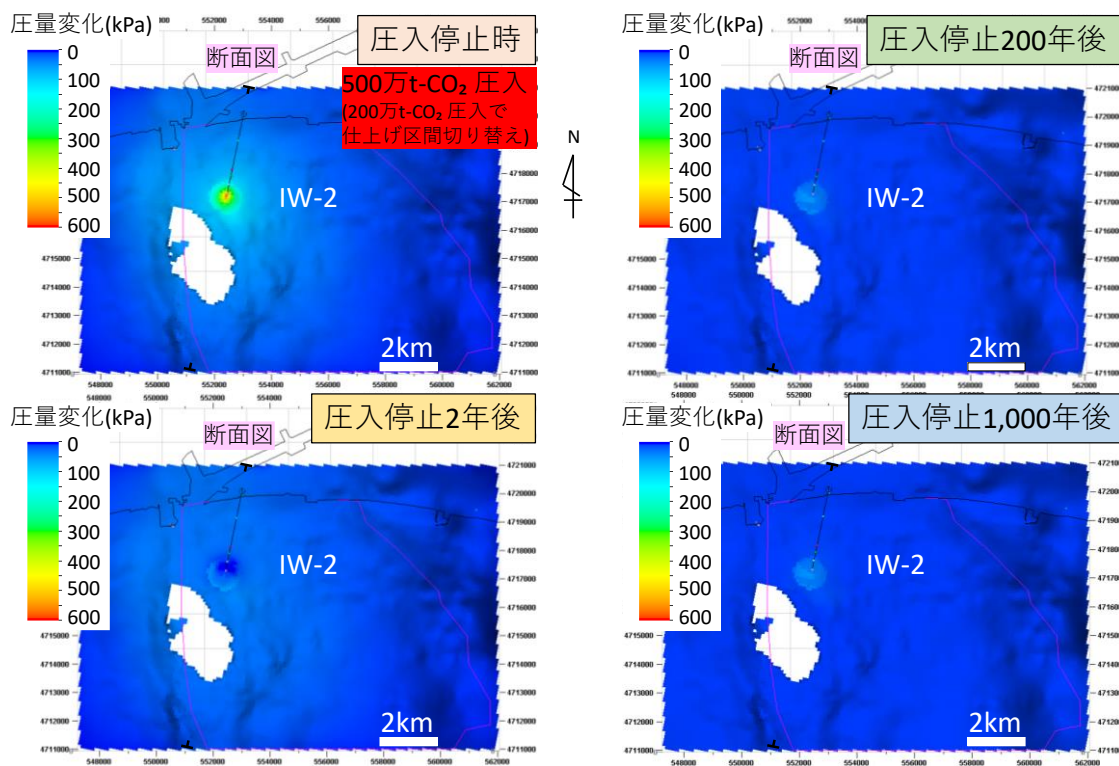


図 5.4-95 ケース 3-2 P90 具現像で予想される圧力変化分布

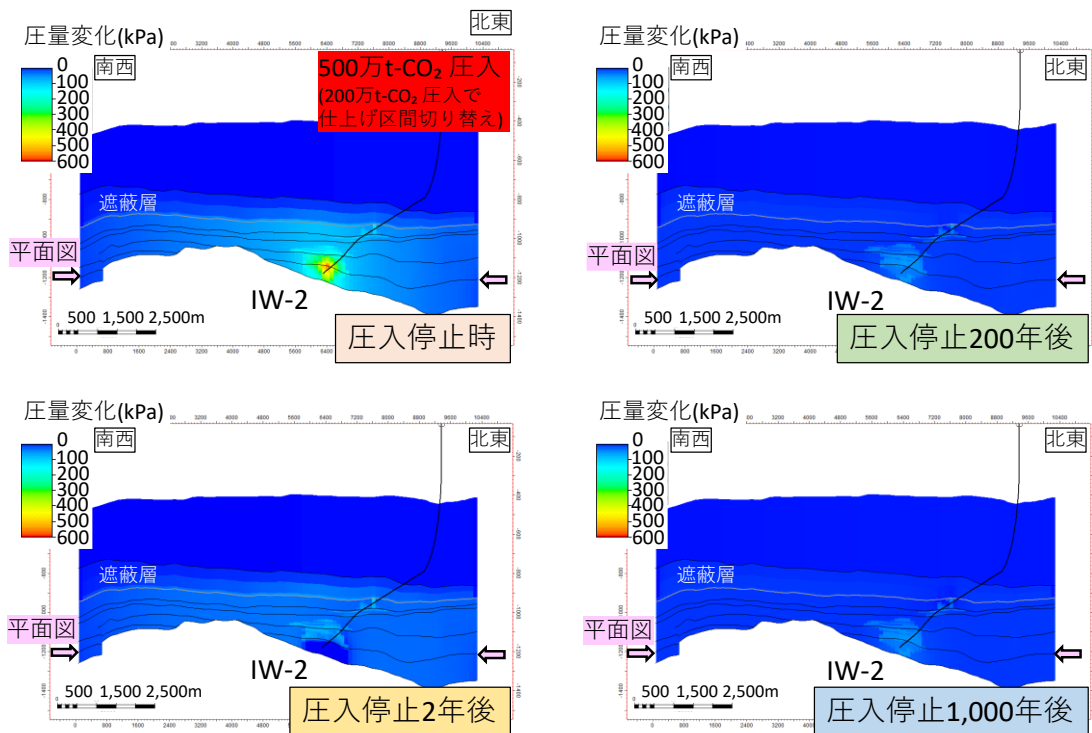


図 5.4-96 ケース 3-2 P90 具現像で予想される圧力変化分布

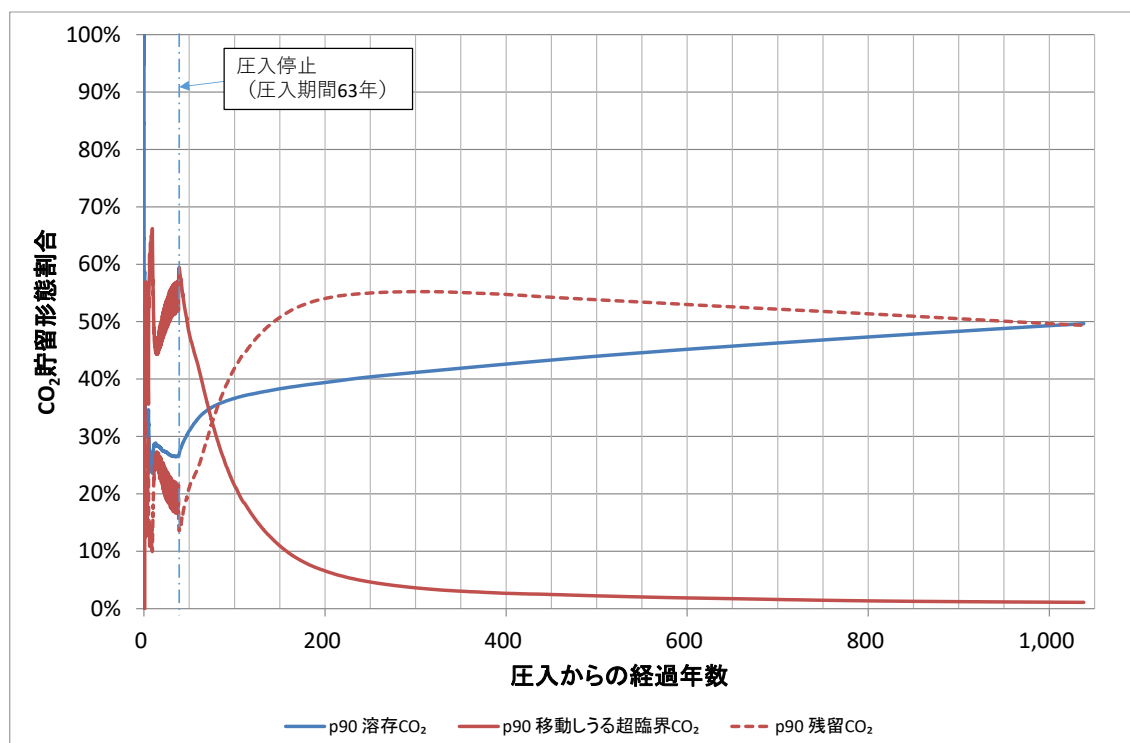


図 5.4-97 ケース 3-2 P90 具現像で予想される貯留形態の変化

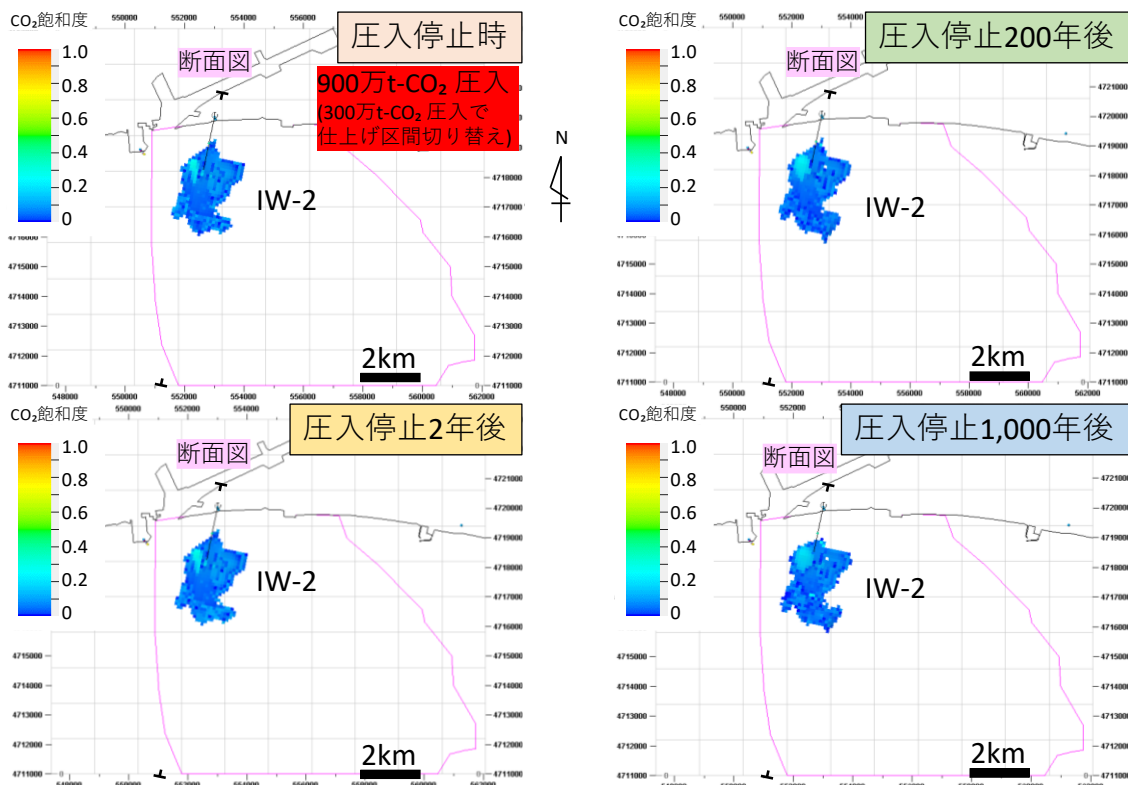


図 5.4-98 ケース 3-2 P50 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (平面図)

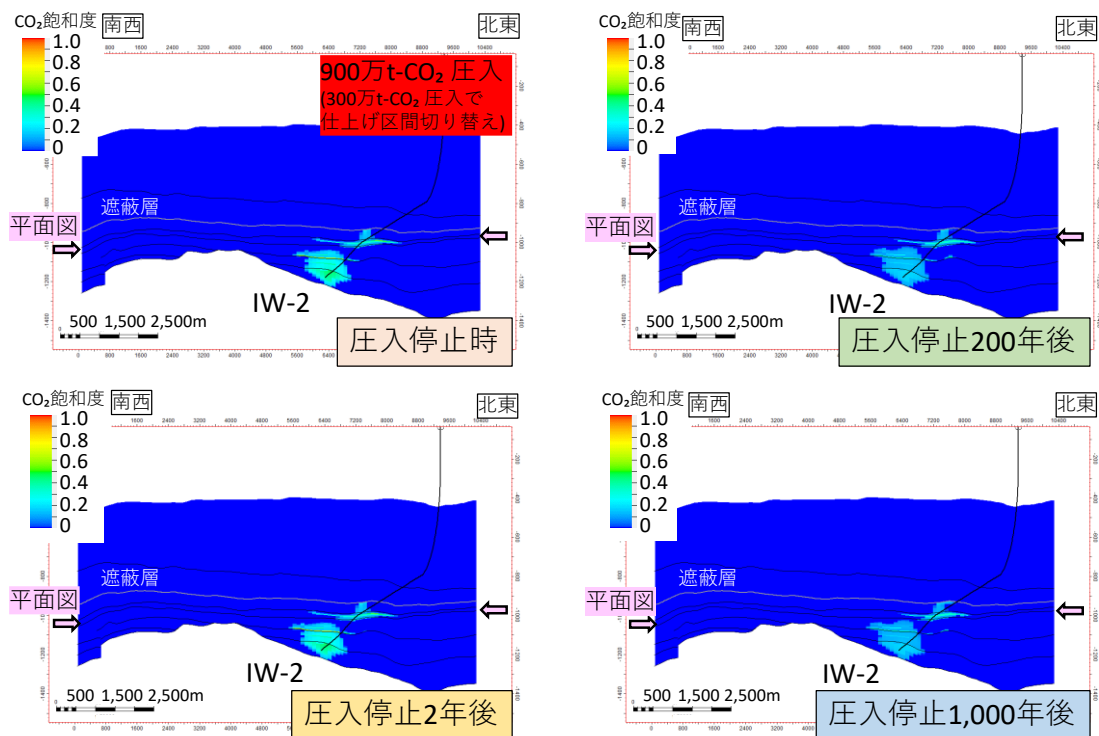


図 5.4-99 ケース 3-2 P50 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (断面図)

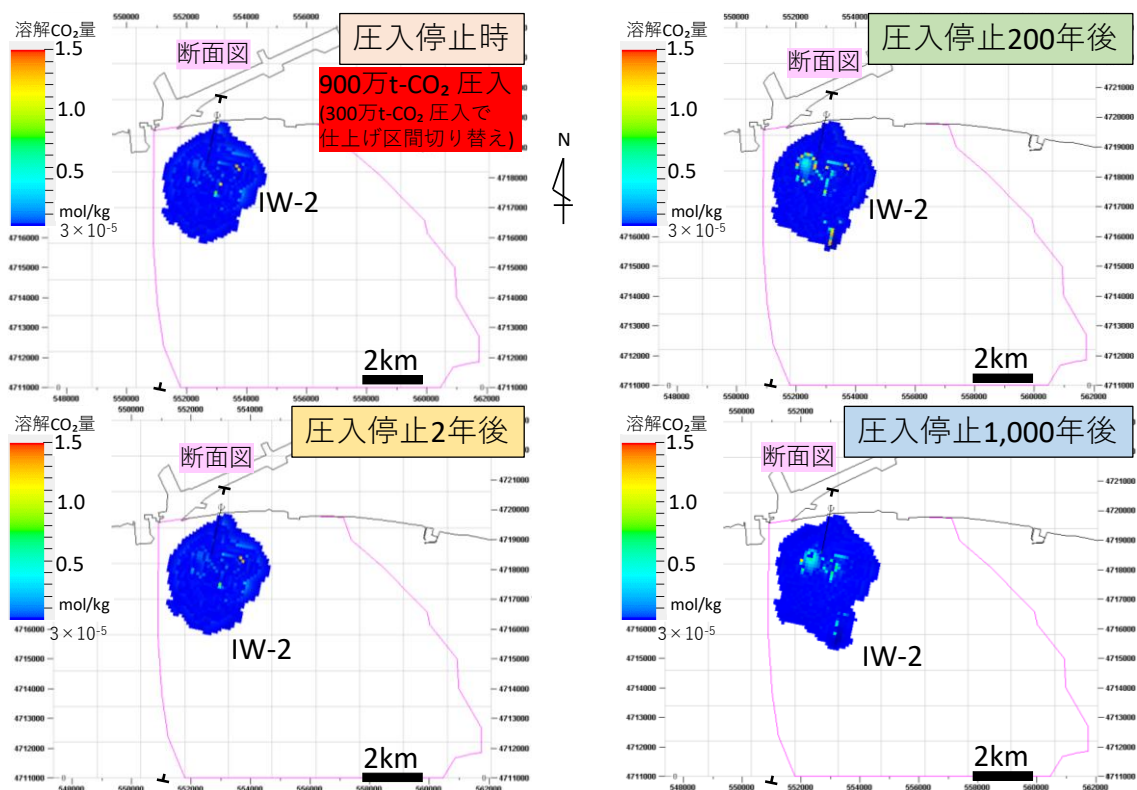


図 5.4-100 ケース 3-2 P50 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (平面図)

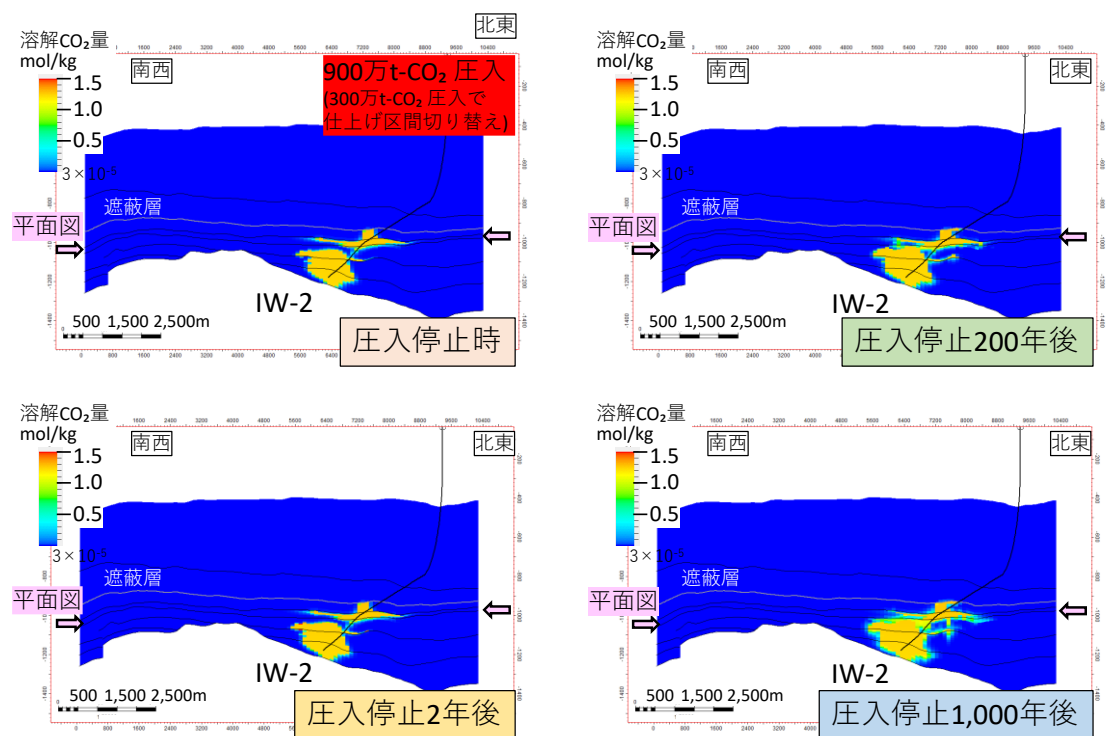


図 5.4-101 ケース 3-2 P50 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (断面図)

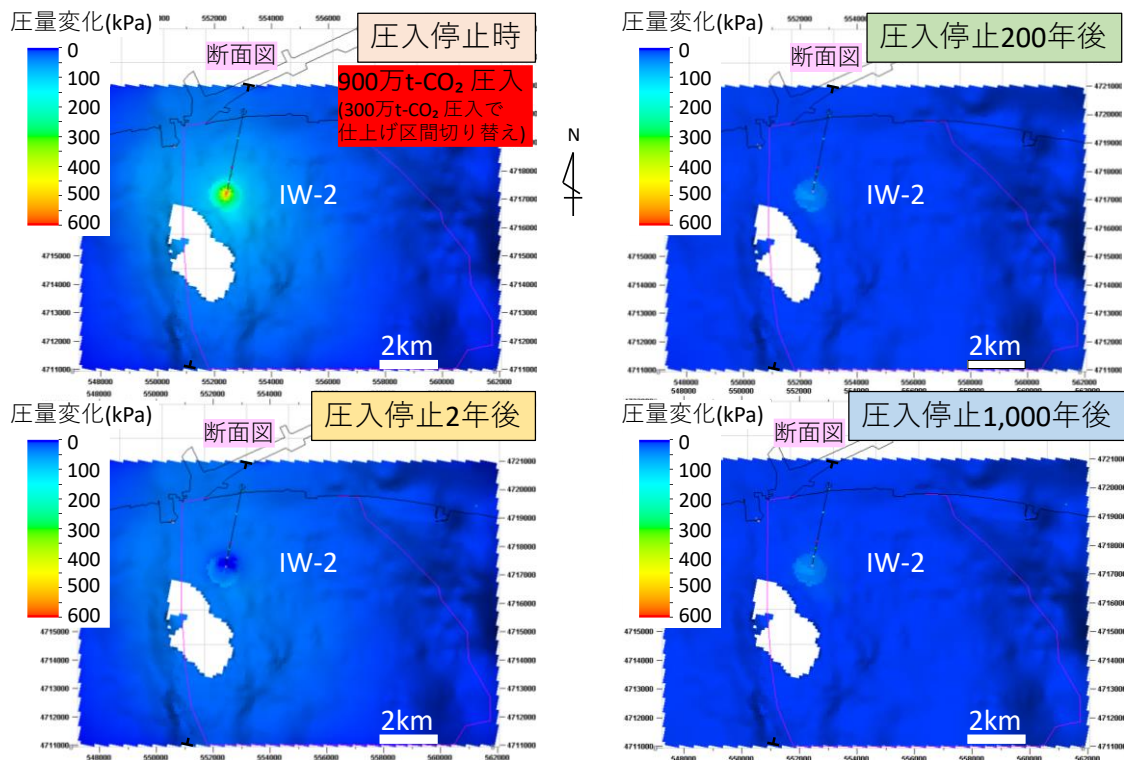


図 5.4-102 ケース 3-2 P50 具現像で予想される圧力変化分布

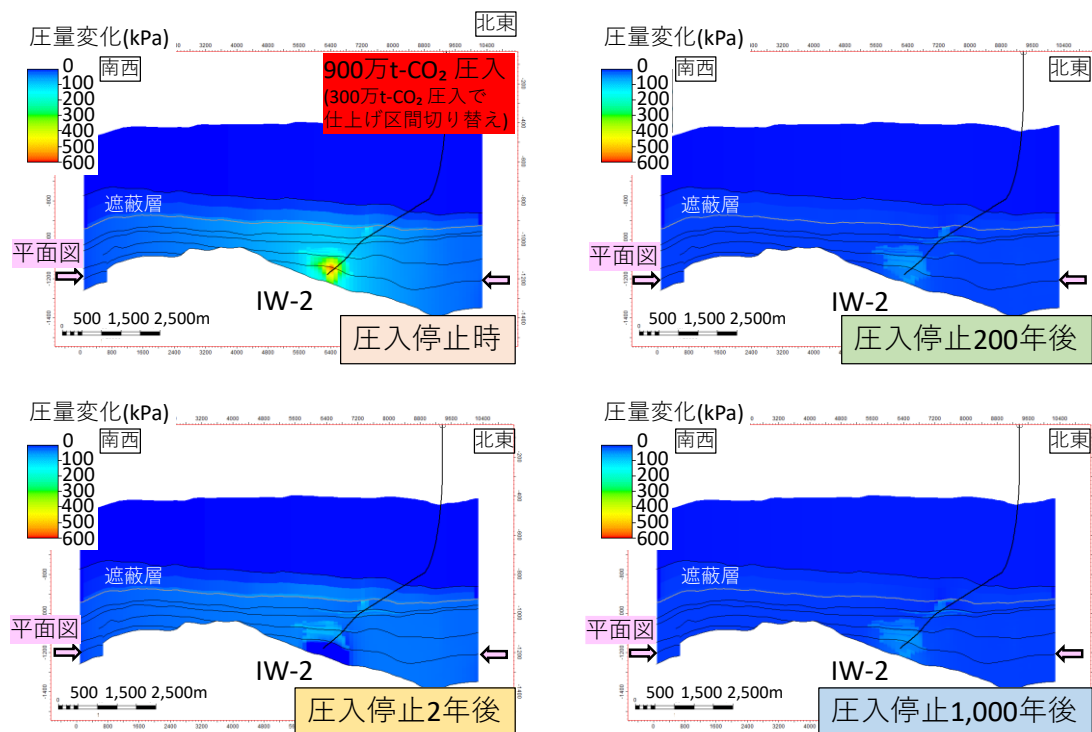


図 5.4-103 ケース 3-2 P50 具現像で予想される圧力変化分布

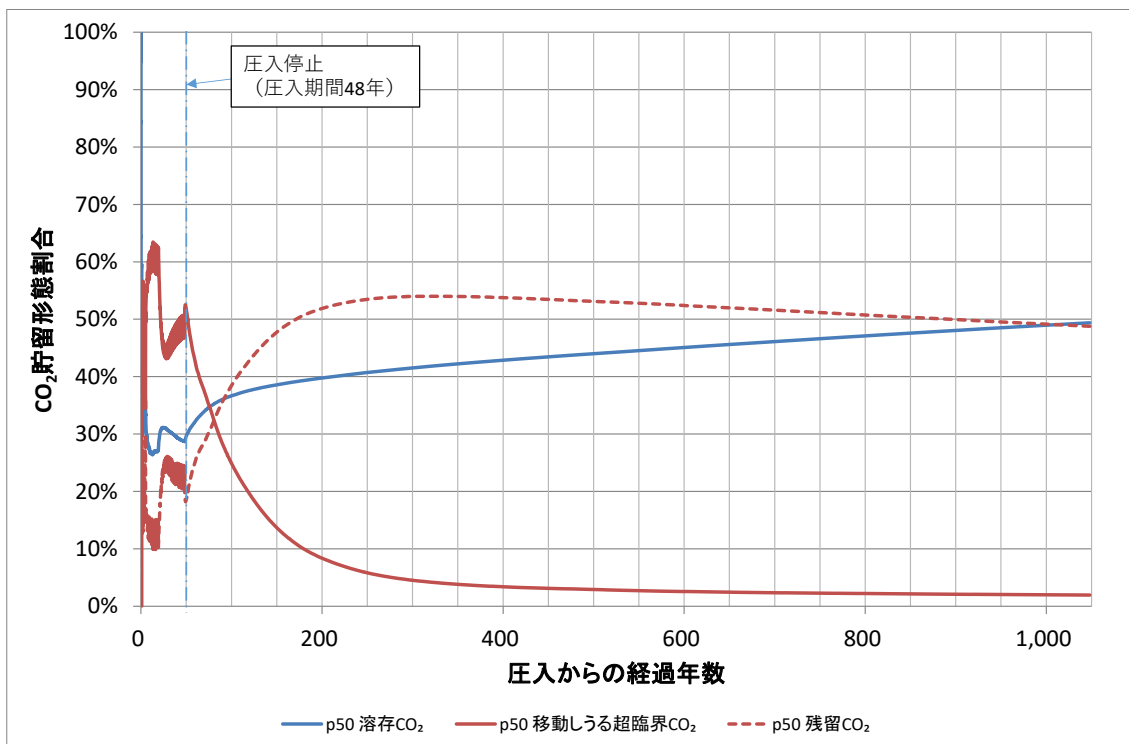


図 5.4-104 ケース 3-2 P50 具現像で予想される貯留形態の変化

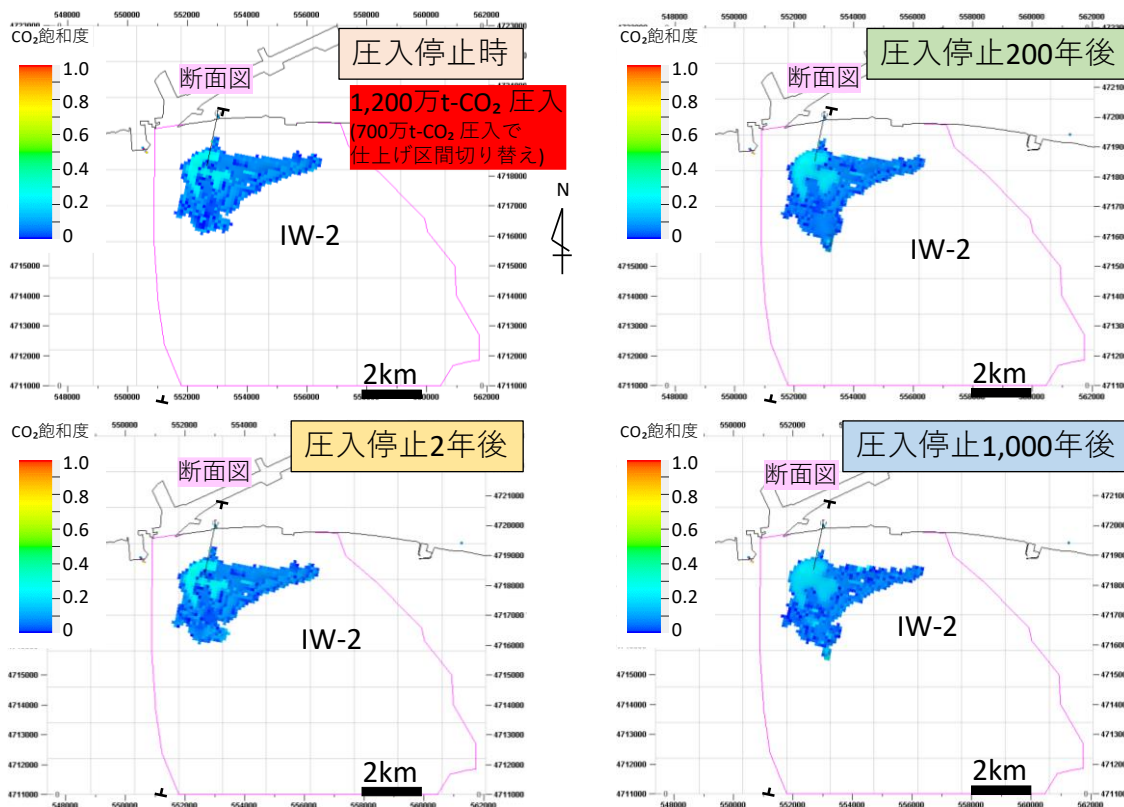


図 5.4-105 ケース 3-2 P10 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (平面図)

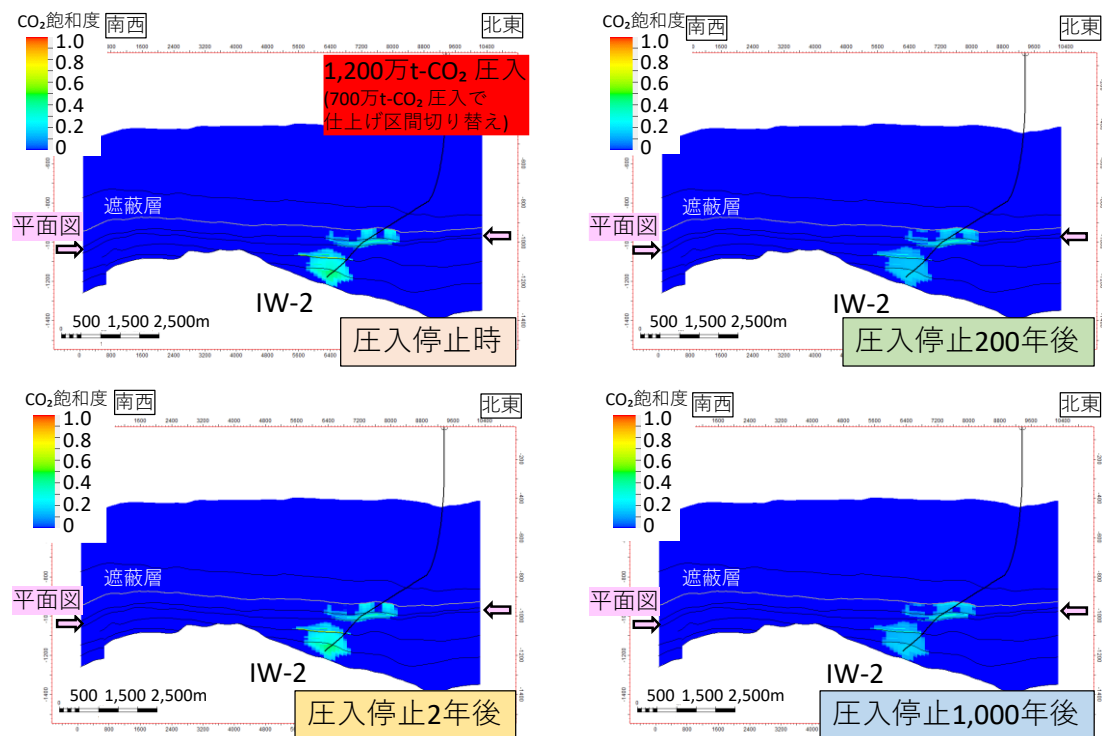


図 5.4-106 ケース 3-2 P10 具現像で予想される CO₂ 飽和度分布 (断面図)

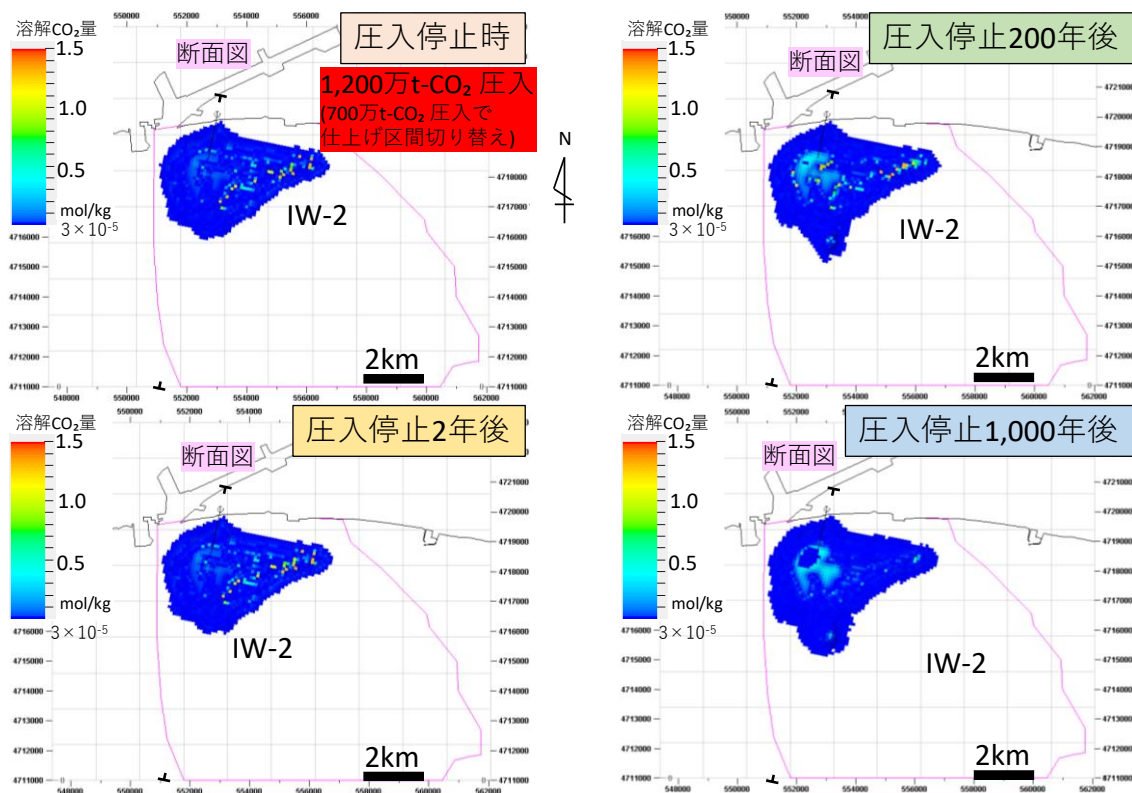


図 5.4-107 ケース 3-2 P10 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (平面図)

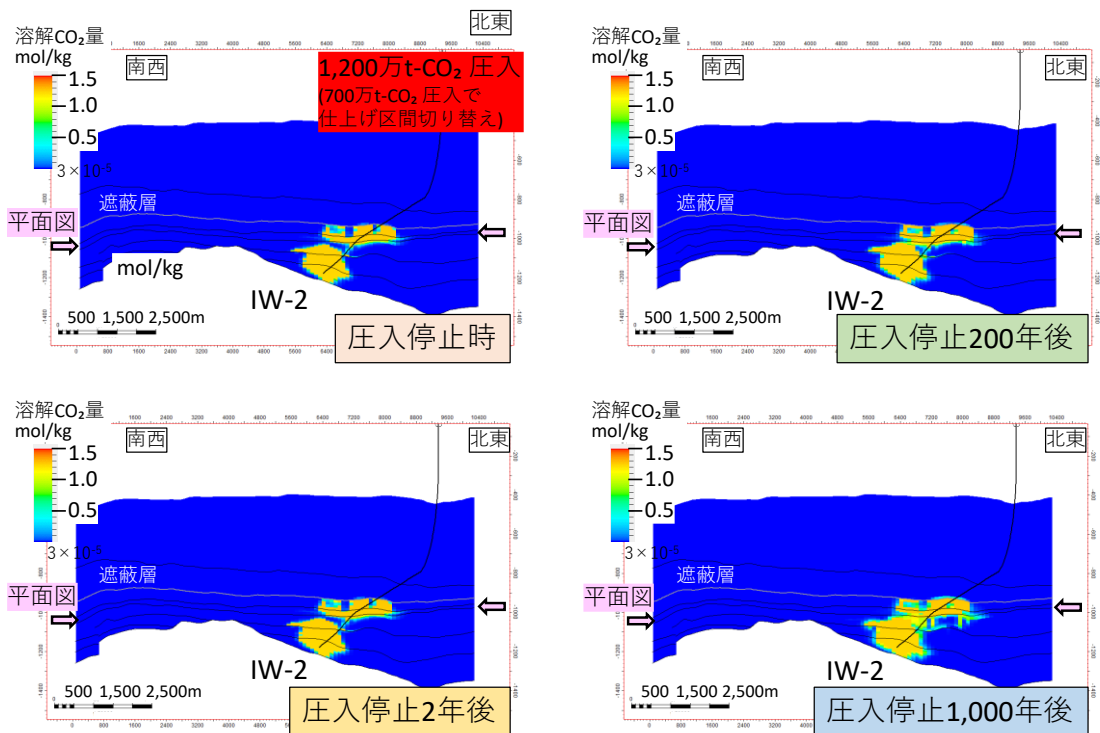


図 5.4-108 ケース 3-2 P10 具現像で予想される溶解 CO₂ 飽和度分布 (断面図)

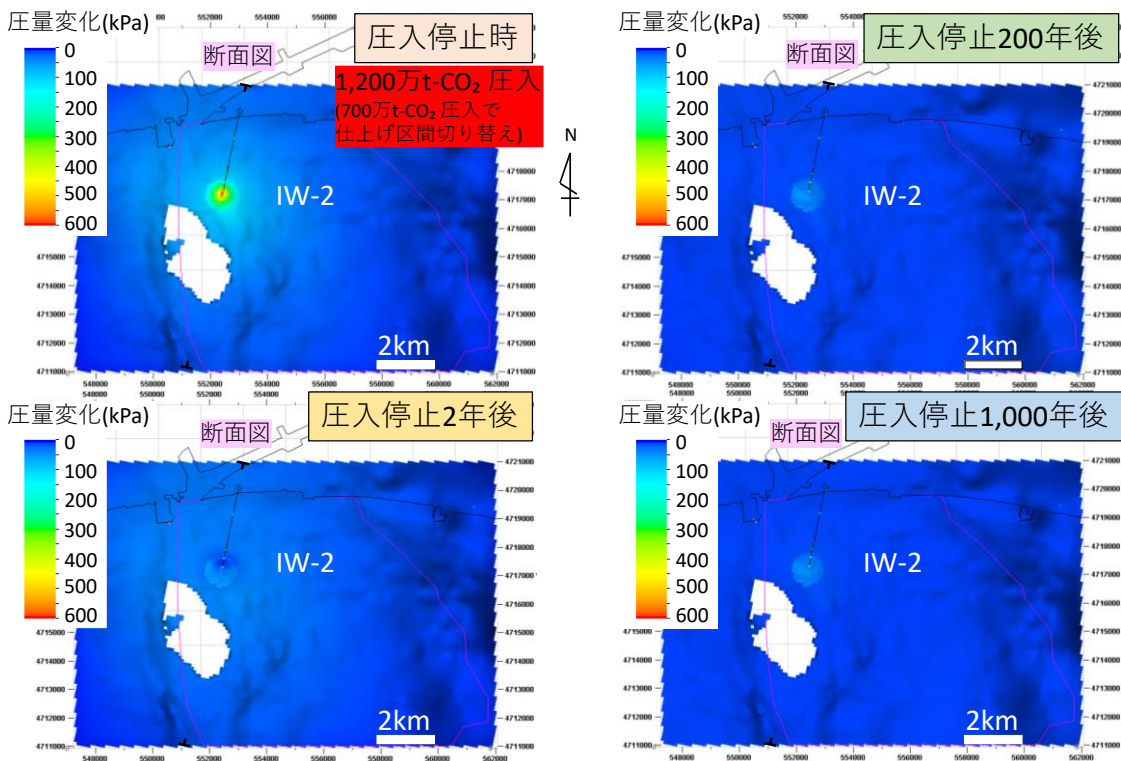


図 5.4-109 ケース 3-2 P10 具現像で予想される圧力変化分布

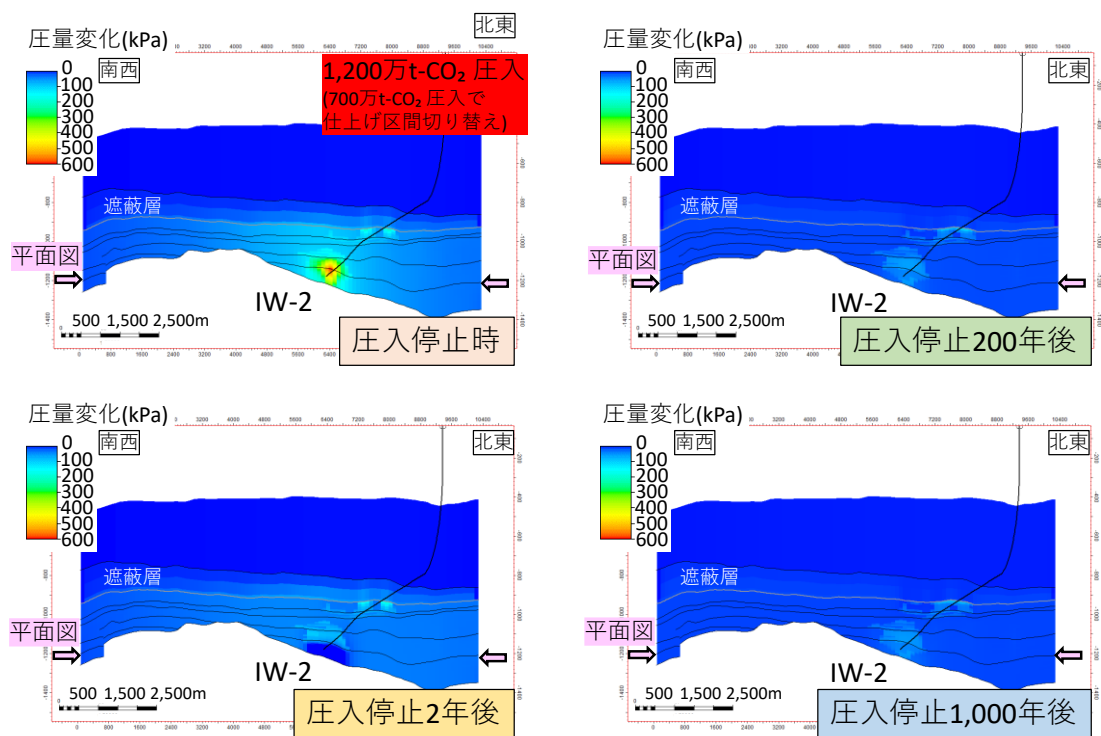


図 5.4-110 ケース 3-2 P10 具現像で予想される圧力変化分布

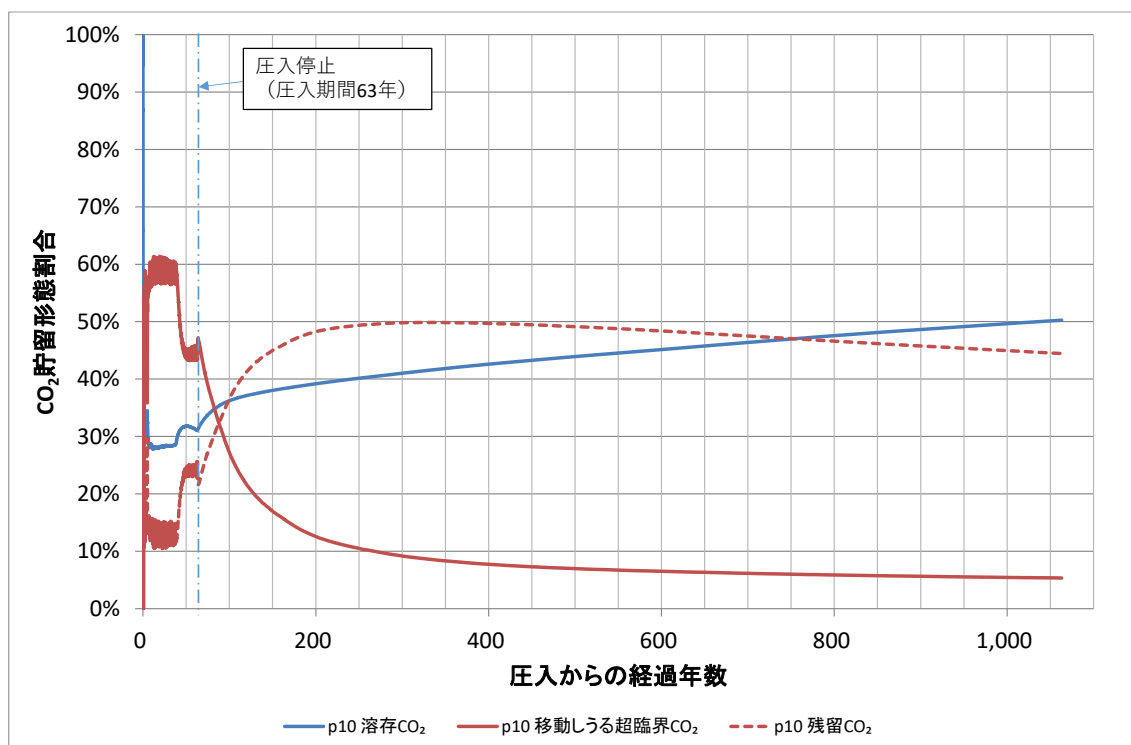


図 5.4-111 ケース 3-1 P10 具現像で予想される貯留形態の変化

5.4.4 長期挙動予測シミュレーションのまとめ

(1) ケース1 (実績ケース：2019年11月22日に圧入を停止)

2016年4月6日～2019年11月22日の圧入実績に即した圧入により、累計30万t-CO₂を圧入し、圧入停止後1,000年後までの長期挙動予測を実施した。CO₂飽和度の分布範囲は最大1km×1km程度、溶解CO₂量の分布範囲(1ppm相当以上)は、2km×2km程度となることが予想された。また圧入により上昇した貯留層圧力は、圧入停止2年後頃までにはほぼ解消されると考えられる。

(2) ケース2 (現状設備による最大貯留(圧入)可能量/独自基準による想定)

ケース1の圧入停止後、2021年4月1日から圧入を再開し、それ以降22万t-CO₂/年で圧入を継続(6月の1箇月は圧入停止)し、圧入量が100万t増加するごとに、1,000年間の監視期間を設け、その監視期間中に所定の条件を満たす限り100万t単位の圧入を繰り返すことで、最大貯留(圧入)可能量を推定した。その結果、標準的なモデル(P50具現像)による予測では500万t-CO₂程度の圧入が可能であると推定された。同モデルによる予測では、CO₂飽和度の分布範囲は2.5km×2.5km程度、溶解CO₂量の分布範囲(1ppm相当以上)は、4km×4km程度の範囲となることが予測された。

(3) ケース3 (ケース2の設定からあるタイミングで仕上げ区間を変更することによる最大貯留(圧入)可能量/独自基準による想定)

ケース2による圧入の途中のあるタイミングで仕上げ区間を下位層準のみに限定し、圧入を継続することで、最大貯留(圧入)可能量を推定した。萌別層砂岩層上部のみを閉塞することを想定したケース3-1と、萌別層(+荷葉層)砂岩層以外を閉鎖することを想定したケース3-2を実施した。それぞれのケースについて、P90、P50、P10相当の各具現像を使用した。

ケース3-1：平均的な具現像(P50相当)では、全層仕上げの設定(現在のIW-2の設備)により、200万t-CO₂圧入後に、圧入区間を切り替える(萌別層砂岩層上部を閉鎖する)ケースが最も大量のCO₂を圧入することが可能となった(1,200万t-CO₂)。

具現像により異なるが、CO₂飽和度の分布範囲は最大3.5km×4.5km程度、溶解CO₂量の分布範囲(1ppm相当以上)は、4.5km×6.0km程度の範囲となることが予測された。

ケース3-2：平均的な具現像(P50相当)では、全層仕上げの設定(現在のIW-2の設備)により、300万t-CO₂圧入後に、圧入区間を切り替える(萌別層(+荷葉層)砂岩層以外を閉鎖する)ケースが最も多量のCO₂を圧入することが可能となった(900万t-CO₂)。

具現像により異なるが、CO₂飽和度の分布範囲は最大3.7 km×4.8 km程度、溶解CO₂量の分布範囲(1 ppm相当以上)は、4.8 km×5.8 km程度の範囲となることが予測された。

5.4.5 IW-2長期挙動予測シミュレーションに関するまとめ

ケース1として、圧入実績に即したケース。2016年4月6日の圧入開始から2019年11月22日までに累計30万t-CO₂を圧入し、圧入停止後1,000年間の挙動を予測した。

ケース2として、現状のIW-2設備により、長期間圧入を継続することで、独自に設定した基準を満たす範囲における最大貯留(圧入)可能量を推定し、500万t-CO₂程度(P50具現像)と推定された。

ケース3として、ケース2による圧入(全層仕上げ)の途中段階で、仕上げ区間を切り替えて、長期間圧入を継続することで、独自に設定した基準を満たす範囲における最大貯留(圧入)可能量を推定した。現状の全層仕上げの設定から、途中段階で萌別層砂岩層上部を塞ぐ設定(ケース3-1)では、最大貯留(圧入)可能量が1,200万t-CO₂(P50具現像)と予測された。現状の全層仕上げの設定から、途中段階で萌別層(+荷菜層)砂岩以外を閉鎖する設定(ケース3-2)では、最大貯留(圧入)可能量が800万t-CO₂(P50具現像)と予測された(表5.4-6)。

5.5 萌別層流動-地化学連成シミュレーションモデルの作成

圧入したCO₂の貯留層内での長期挙動を予測する流動シミュレーションについては、5.2~5.4節に記した。5.5節では貯留層に圧入したCO₂が地層水に溶解し、貯留層を構成する岩石鉱物と地化学的に反応することを考慮した流動-地化学連成シミュレーションについて示す。5.5節では5.6節で示す3D流動-地化学連成シミュレーションの準備として、流動-地化学連成シミュレーションモデルの作成について記載する。

5.5.1 地層水 地層鉱物の化学種組成の推定

(1) 地層水化学組成

IW-2が掘削時に萌別層の地層水採取を試みたが、地層圧が低かったとこともあり、混合物の少ない地層水を採取することができなかった。OB-2では混合物の少ない地層水を採取することができていたため、2015年度に作成した貯留層評価報告書¹⁾と同様に、OB-2において採取された地層水化学組成を使用した。地層水組成は、熱力学的に再構成し、シミュレーションモデルに入力した(表5.5-1)。

表 5.5-1 萌別層地層水の分析結果と再構成後の組成

	苫小牧OB-2で採取した地層水の分析値 (19Feb. 2013 sampling)	熱力学的に再構成した萌別層の地層水組成
貯留層温度(°C)		44
pH	8.34	7.11
mg/kg		
Cl ⁻	1942	1780
SO ₄ ²⁻	9.16	9.20
HCO ₃ ⁻	731	809
HS ⁻	分析せず	0.000129
SiO ₂ (aq)	74.4	168
Al ³⁺	検出限界以下	0.0000401
Ca ²⁺	78.5	30.1
Mg ²⁺	13.7	4.94
Fe ²⁺	0.30	0.44
K ⁺	26.6	26.7
Na ⁺	1365	1370
NH ₄ ⁺	2.7	2.70
備考	pHは大気圧、室温条件での測定値	黄鉄鉱、非晶質シリカ、Na-斜プロロル沸石、カオリナイト、シデライト、マグネサイト、方解石、FeNa-サポナイトと化学平衡になるように地層水組成を熱力学的に再構成した

地層水組成の熱力学的再構成は、Geochemist's Workbench²⁾の化学平衡計算機能を用い、溶液化学種の熱力学データ(平衡定数 log K)には苫小牧地点における低温の続成作用で観察される沸石および粘土鉱物との反応を考慮するのに適したフランス地質・鉱山研究所(BRGM)で作成されたThermoddem(06jun2017)³⁾を使用し、以下の手順で実施した。

- 1) 貯留層温度において、地層水が方解石に飽和するようにCO₂を添加する。同時に分析データのチャージバランスが成立するようにCl⁻濃度を補正する。
- 2) 自生鉱物(沸石、黄鉄鉱等)や地層水と化学平衡にあると考えられる鉱物(シリカ鉱物等)に対して同時に飽和する条件で、Al³⁺、H₄SiO₄、HS⁻、(Fe²⁺)濃度を計算させながら、pHを変化させ、貯留層岩石中に存在する鉱物の飽和度(log Q/K)がある程度0に収斂するpHを確認する。
- 3) さらにこのpHにおいて、地層中に存在する鉱物が同時に飽和するように、かつその後のCO₂圧入シミュレーションによって、二次鉱物として沈殿しうる鉱物が過飽和とならないよう、2)で計算した化学種以外の濃度も分析値から補正し、熱力学的に再構成された地層水の化学種組成を決定する。

貯留層内に方解石が存在する場合は、地層水は貯留層の温度・圧力条件において、方解

石に対して飽和しているものと考えられが、地層水は大気圧下で採取されたため、地下状態からの減圧により溶解していたCO₂の一部が脱ガスし、その濃度とpHに影響を及ぼしている可能性が高い。そのため、まず、1)で貯留層条件において地層水が方解石に飽和するまで、試料を採取する過程で失われたCO₂を加え、CO₂濃度とpHの分析値を補正した。Al³⁺とHS⁻は濃度が極めて低く、通常は高精度の分析値が得られないため、2)でこれらの成分を含む鉱物(自生鉱物等)との化学平衡を仮定して、地層水中の化学種濃度を推定した。また、H₄SiO₄とFe²⁺は沈殿により水相から失われやすく、これらの分析結果は貯留層内での地層水の組成を反映していない可能性もあるため、同様に2)で鉱物との化学平衡を仮定して濃度を補正した。岩石鉱物の観察結果等から自生鉱物と考えられるものは、2)、3)の段階で極力すべて飽和となるようにした。また、貯留層では確認されていないものの、圧入したCO₂との反応で沈殿すると考えられる二次鉱物についても過飽和にならないように、地層水の分析値を補正した。

再構成後の地層水組成のpHと飽和度の関係を図5.5-1に示す。再構成においては、斜ブチロル沸石、サポナイト(スメクタイト)、黄鉄鉱、炭酸塩鉱物(方解石、シデライト、マグネサイト)、カオリナイト、非晶質シリカと地層水が化学平衡になるようにした。

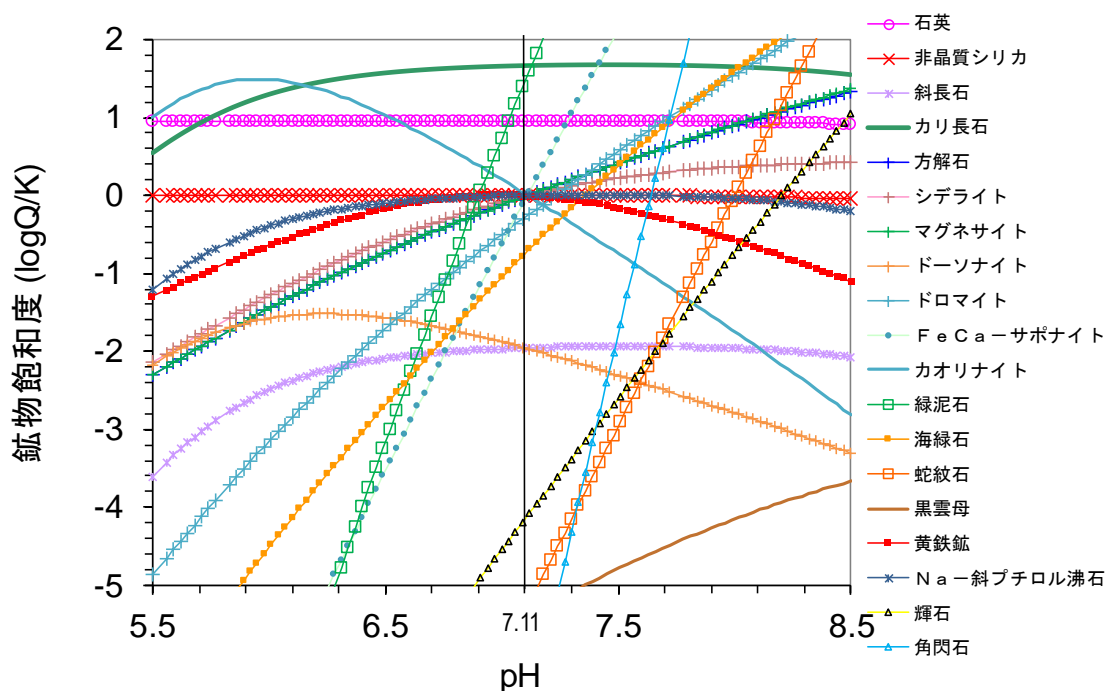


図 5.5-1 萌別層再構成後の地層水組成のpHと飽和度の関係

再構成した地層水組成をもとに設定した、流動-地化学連成シミュレーションで用いた地層水組成を表 5.5-2 に示す。

表 5.5-2 シミュレーションに使用した地層水組成

化学種	萌別層	
	モル濃度(mol/kg)	平衡にした鉱物
H ⁺	1.14 × 10 ⁻³	カオリナイト
Cl ⁻	5.05 × 10 ⁻²	
SO ₄ ²⁻	9.62 × 10 ⁻⁵	
HCO ₃ ⁻	1.33 × 10 ⁻²	マグネサイト
HS ⁻	3.92 × 10 ⁻⁹	黄鉄鉱
H ₄ SiO ₄	2.80 × 10 ⁻³	非晶質シリカ
Al ³⁺	1.48 × 10 ⁻⁹	Na-斜プテロル沸石
Ca ²⁺	7.54 × 10 ⁻⁴	方解石
Mg ²⁺	2.04 × 10 ⁻⁴	FeNa-サポナイト
Fe ²⁺	7.86 × 10 ⁻⁶	シデライト
K ⁺	6.86 × 10 ⁻⁴	
Na ⁺	5.99 × 10 ⁻²	
NH ₃	1.50 × 10 ⁻⁴	

(2) 地層鉱物組成

鉱物の熱力学データ（溶解平衡定数 log K 等）として、苫小牧地点における低温の続成作用で観察される沸石および粘土鉱物との反応を考慮するのに適したフランス地質・鉱山研究所（BRGM）で作成された Thermoddem(06jun2017)²⁾ を使用した。

鉱物組成は 2015 年度業務¹⁾ において、調査井や圧入井で採取したコアおよびカッティングス試料に対する岩石薄片の観察や、X 線回析分析、蛍光 X 線分析、走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）等の各分析値を用いて推定した分析値をもとに、熱力学データベース Thermoddem³⁾ に記載されている鉱物への置き換えを行ったものである（表 5.5-3）。

表 5.5-3 萌別層の鉱物組成

和名	name	萌別層		組成
		vol%	log Q/K	
石英	quartz	36.11	0.96	SiO ₂
非晶質シリカ	amorphous silica	0.00	eq.	SiO ₂
斜長石	albite/anorthite	25.84	-1.96	Na _{0.5} Ca _{0.5} (Al _{1.5} Si _{2.5})O ₈
カリ長石	K-feldspar	2.36	1.66	K(AlSi ₃)O ₈
方解石	calcite	0.10	eq.	CaCO ₃
シデライト	siderite	0.00	eq.	FeCO ₃
マグネサイト	magnesite	0.00	eq.	MgCO ₃
ドーソナイト	dawsonite	0.00	-1.96	NaAl(CO ₃) ₂
ドロマイト	dolomite	0.00	-0.26	CaMg(CO ₃) ₂
FeNa-サポナイト	FeNa-saponite	0.09	eq.	Na _{0.34} Mg ₂ FeAl _{0.34} Si _{3.66} O ₁₀ (OH) ₂
カオリナイト	kaolinite	6.34	eq.	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
緑泥石	clinoclore/daphnite	0.95	1.53	Mg _{2.5} Fe _{2.5} Al(AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₈
海緑石	glauconite	12.42	-0.72	(K _{0.75} Mg _{0.25} Fe _{1.5} Al _{0.25})(Al _{0.25} Si _{3.75})O ₁₀ (OH) ₂
黒雲母	Siderophyllite/Eastonite	9.51	-5.18	KFeMgAl ₃ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂
黄鉄鉱	pyrite	0.27	eq.	FeS ₂
Na-斜プチロル沸石	Na-clinoptilolite	2.74	eq.	Na _{1.1} (Si _{4.9} Al _{1.1})O ₁₂ ·3.5H ₂ O
輝石	diopside/hedenbergite	0.33	-4.12	CaMg _{0.8} Fe _{0.2} (SiO ₃) ₂
角閃石	tremolite/actinolite	0.69	-6.80	(Ca ₂ Mg ₃ Fe ₂)Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂

(3) 溶液化学種

地化学反応シミュレーションに用いる溶液化学種について、表 5.5-4 に示す通り、一次化学種として 14 種を、二次化学種として 51 種を、Thermocdem³⁾ から選択した。

表 5.5-4 シミュレーションに使用した一次化学種および二次化学種

一次化学種 (14種)		二次化学種 (51種)	
HS ⁻	Fe ³⁺	FeCO ₃	MgOH ⁺
Al ³⁺	S ₂ O ₃ ²⁻	FeHSO ₄ ⁺	MgSO ₄
Na ⁺	SO ₃ ²⁻	FeO	NaAlO ₂
K ⁺	Al(OH) ²⁺	FeOH ⁺	NaCO ₃ ⁻
Ca ²⁺	AlH ₃ SiO ₄ ²⁺	H ₂ S	NaHCO ₃
Mg ²⁺	AlOH ²⁺	H ₂ SiO ₄ ²⁻	NaOH
Fe ²⁺	AlO ₂ ⁻	HAlO ₂	NaSO ₄ ⁻
Cl ⁻	AlSO ₄ ⁺	HCl	NH ₄ ⁺
SO ₄ ²⁻	Ca(HCO ₃) ⁺	HFeO ₂ ⁻	S ²⁻
HCO ₃ ⁻	CaCl ⁺	HSiO ₃ ⁻	Si ₂ O ₂ (OH) ₅ ⁻
H ₄ SiO ₄	CaCl ₂	HSO ₄ ⁻	Si ₂ O ₃ (OH) ₄ ²⁻
NH ₃	CaCO ₃	KAlO ₂	Si ₄ O ₆ (OH) ₆ ²⁻
H ⁺	CaOH ⁺	KCl	OH ⁻
H ₂ O	CO ₂	KOH	CaSO ₄
	CO ₃ ²⁻	KSO ₄ ⁻	FeSO ₄
	Fe(CO ₃) ₂ ²⁻	Mg(HCO ₃) ⁺	
	FeCl ⁺	MgCl ⁺	
	FeCl ₂	MgCO ₃	

注) 2015 年度業務¹⁾ と同様。

5.5.2 反応速度パラメータと反応表面積の設定

(1) 反応速度パラメータ

鉱物の溶解・沈殿の反応速度については、以下の式 (5.5-1) で記述される (e.g. Xu et al., 2007⁸⁾)。

$$r = \pm Ak \left[1 - \left(\frac{Q}{K} \right) \right] \tag{5.5-1}$$

ここで、 r が反応速度、 A は反応表面積、 k が反応速度定数、 K は平衡定数、 Q は活量積。

反応速度定数は温度によって変化するため、ある温度 T での反応速度定数 k は $T_0 = 298.15 \text{ K}$ (25°C) での反応速度定数 k_{25} を用いて以下の式 (5.5-2) のように示される。

$$k = k_{25} \exp \left[-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \tag{5.5-2}$$

ここで、 E は活性化エネルギー、 R はガス定数を示す。鉱物の溶解・沈殿の反応速度計算を行うためには、各鉱物に対してこれらの反応速度パラメータの設定が必要となる。

表 5.5-5 に本検討で使用した反応速度定数と活性化エネルギーを示す。Palandri and Kharaka (2004)⁴⁾ を出典とする反応速度パラメータについては、すべて同文献で neutral mechanism とされる反応速度定数および活性化エネルギーを採用した。

表 5.5-5 反応速度パラメータ

名前	mol/m ² .sec @25°C	活性化 エネルギー (kJ/mol)	引用元	備考
石英	3.981 × 10 ⁻¹⁴	90.9		
非晶質シリカ	1.698 × 10 ⁻¹³	68.7		dissolution (amorphous silica)
	3.802 × 10 ⁻¹⁰	49.8		precipitation (All SiO ₂ polymorphs)
斜長石	1.230 × 10 ⁻¹¹	45.2		labradorite
カリ長石	3.980 × 10 ⁻¹³	38.0		
	3.981 × 10 ⁻¹⁴	22.2		set to kaolinite
	3.981 × 10 ⁻¹⁴	48.0	Palandri and Kharaka (2004) ⁴⁾	montmorillonite
FeNa-サポナイト	3.980 × 10 ⁻¹⁵	48.0		montmorillonite
カオリナイト	6.607 × 10 ⁻¹⁴	22.2		
緑泥石	3.020 × 10 ⁻¹³	88.0		chlorite
海緑石	7.943 × 10 ⁻¹⁰	85.0		
蛇紋石	1.000 × 10 ⁻¹²	73.5		
黒雲母	2.818 × 10 ⁻¹³	22.0		biotite
黄鉄鉱	3.981 × 10 ⁻¹¹	62.7	Xu et al. (2005) ⁵⁾	
輝石	7.763 × 10 ⁻¹²	40.6	Palandri and Kharaka (2004) ⁴⁾	diopside
角閃石	2.512 × 10 ⁻¹¹	94.4		jadeite
Na-斜方ブチロル沸石	2.370 × 10 ⁻¹³	58.0	Birkholtzer et al.(2005) ⁶⁾	clinoptilolite
方解石	1.549 × 10 ⁻⁶	23.5	Palandri and Kharaka (2004) ⁴⁾	
シデライト	1.259 × 10 ⁻⁹	62.8	Steefel (2001) ⁷⁾	
マグネサイト	4.571 × 10 ⁻¹⁰	23.5		
ドーソナイト	1.000 × 10 ⁻⁷	62.8	Palandri and Kharaka (2004) ⁴⁾	
ドロマイト	2.512 × 10 ⁻⁹	95.3		ordered

コンセプト: 基本的にはXu et al. (2005)等の反応表面積に準拠。普通鉱物9.1、黄鉄鉱12.9、粘土鉱物108.7。
 緑泥石はコンセプトに従えば108.7を与えるべきだが、9.1に設定(2014年度検討¹⁾を踏襲)。
 海緑石は粘土鉱物だが球粒状の形状を取るため、9.1に設定。

(2) 反応表面積の設定

式 (5.5-1) で示すように、反応表面積は反応速度を左右するため、地化学反応モデルを構築するうえで極めて重要なパラメータであるが、不確実性が非常に大きく、正確に把握することは現在の科学技術では不可能である。自然界の観察結果から得られる風化速度は室内実験で測定される反応速度に比べ小さいことが報告されており、これは鉱物表面のコーティング、被覆、表面状態、反応表面積、反応時間、物質移動様式等が関与している可能性が想定されるが、明確な理由はわかっていない(例えば、White and Brantley, 2003⁹⁾)。このような効果を反映させるため、シミュレーションにおいては、反応表面積または反応速度定数のオーダーを低下させて、フィールド情報との整合性を図った解析例も報告されている(例えば、Xu et al., 2007⁸⁾, Aradottir et al., 2012¹⁰⁾)。本検討では、2015年度業務¹⁾と同様に鉱物として細粒砂岩(0.2mm)を念頭に置き、Xu et al.(2007

8), 2008¹¹⁾, 2011¹²⁾)の砂岩を対象とした反応表面積を基準として用いた(表 5.5-6 設定①)。表 5.5-6 の設定②~設定⑤の様に貯留層を構成する鉱物の反応表面積を調整し、CO₂を圧入しない状態で地層水と貯留層岩石間のバッチ反応速度シミュレーションを実施し、10,000年間の地層水組成および初生鉱物組成の安定性を確認した。その結果の概要を表 5.5-7 に示す。反応表面積の設定を調整した設定③と設定⑤のケースのpHおよび溶液化学種濃度が10,000年間にわたり安定しているため、設定③と設定⑤の設定が妥当であると判断し、この設定を用いて3D流動-地化学連成シミュレーションを実施した。例として、不適と判断した設定①と妥当と判断した設定⑤のバッチ反応速度シミュレーションの結果を図 5.5-2~5.5-3 に示す。

表 5.5-6 実施ケースの反応表面積の設定

実施ケース		設定①	設定②	設定③	設定④	設定⑤
基準	標準	9.1				
反応表面積	黄鉄鉱	12.9				
(cm ² /g)	粘土鉱物	108.7				
反応表面積	石英	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
(cm ² /g)	非晶質シリカ	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	斜長石	9.1	9.1×10^{-4}	9.1×10^{-5}	9.1×10^{-4}	9.1×10^{-5}
	カリ長石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	方解石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	シデライト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	マグネサイト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	ドーソナイト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	ドロマイト	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	FeNa-サポナイト	108.7	108.7	108.7	108.7	108.7
	カオリナイト	108.7	108.7	108.7	108.7	108.7
	緑泥石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	海緑石	9.1	9.1	9.1	9.1×10^{-4}	9.1×10^{-4}
	蛇紋石	108.7	108.7×10^{-3}	108.7×10^{-4}	108.7×10^{-3}	108.7×10^{-4}
	黒雲母	108.7	108.7×10^{-3}	108.7×10^{-4}	108.7×10^{-3}	108.7×10^{-4}
	黄鉄鉱	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
	Na-斜プテロル沸石	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	輝石	9.1	9.1×10^{-4}	9.1×10^{-5}	9.1×10^{-4}	9.1×10^{-5}
	角閃石	9.1	9.1×10^{-4}	9.1×10^{-5}	9.1×10^{-4}	9.1×10^{-5}
析出しない鉱物	緑泥石	緑泥石	緑泥石	緑泥石	緑泥石	緑泥石
	カリ長石	カリ長石	カリ長石	カリ長石	カリ長石	カリ長石
	石英	石英	石英	石英	石英	石英
	文献 (基準値)	著しく未飽和鉱物の反応表面積を低下	著しく未飽和鉱物の反応表面積をさらに低下	stab-MN2に加え海緑石の反応表面積を低下	stab-MN3に加え海緑石の反応表面積を低下	

表 5.5-7 反応表面積の設定にかかるバッチ反応速度シミュレーション結果の概要

	反応表面積の設定	pHおよび溶液化学種濃度の経時変化	鉱物溶解・沈殿量の経時変化	判定
設定①	文献のまま	短期間に変化	短期間に未飽和な鉱物(斜長石、蛇紋石、海緑石等)の溶解が進行	×
設定②	未飽和鉱物の反応表面積を $10^{-3} \sim 10^{-4}$ に低下	1,000年ころから大きく変化	海緑石と斜長石の溶解が徐々に進み、サポナイトと斜プテロル沸石が沈殿	×
設定③	設定②よりさらに、未飽和鉱物の反応表面積を低下	10,000年で0.3以下の変化	海緑石の溶解が徐々に進み、サポナイトと斜プテロル沸石が沈殿。海緑石溶解のタイミングがstab-MN2よりも早まる。	○
設定④	設定②よりさらに、海緑石の反応表面積を低下	1,000年ころから大きく変化	海緑石と斜長石の溶解が徐々に進み、サポナイトと斜プテロル沸石が沈殿	×
設定⑤	設定③よりさらに、海緑石の反応表面積を低下	10,000年で0.4程度の変化	海緑石の溶解およびシデライトの沈殿がより遅くなり	○
前別層岩石サンプルの観察結果	斜長石の溶脱、海緑石の溶解、斜プテロル沸石とスメクタイトの自生			

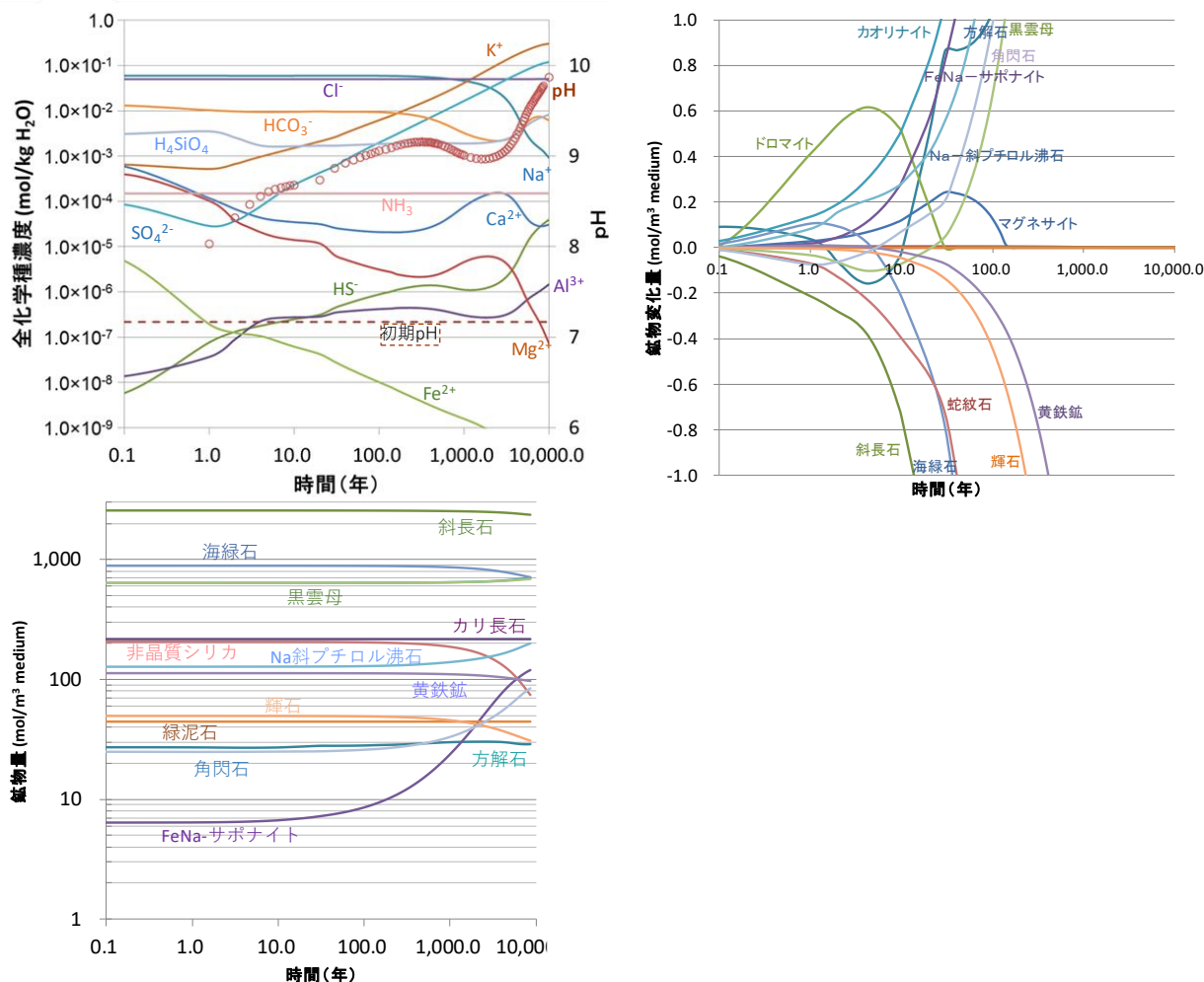


図 5.5-2 設定①によるバッチ試験の結果

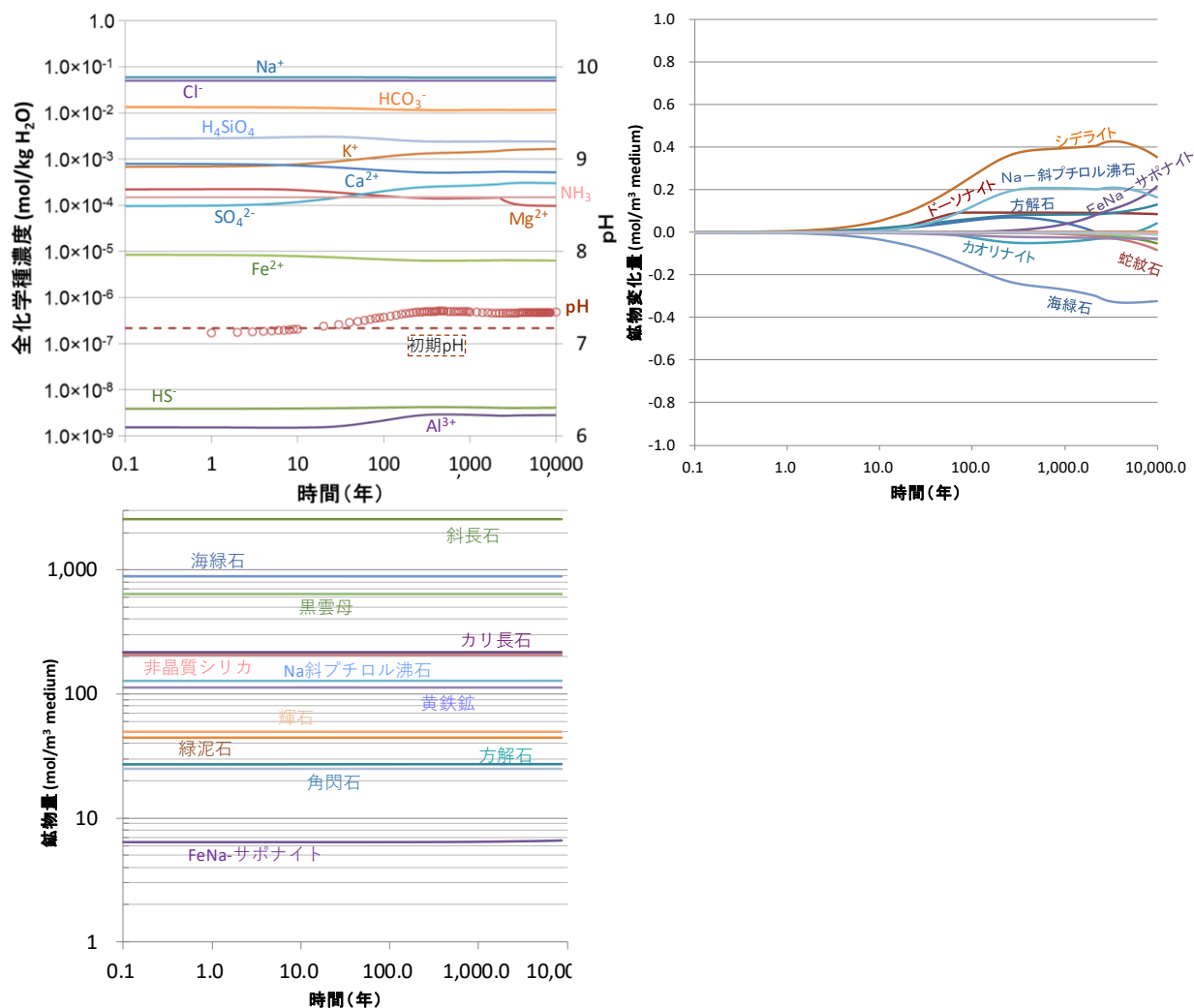


図 5.5-3 設定⑤によるバッチ試験の結果

5.5.3 萌別層流動—地化学連成シミュレーションモデルの作成まとめ

OB-2 掘削時に萌別層砂岩層より採取した地層水試料をベースに、地層水の熱力学的再構成を行い、地層水組成を設定した。調査井や圧入井で採取したコアおよびカッティングス試料に対する岩石学的な分析や検討に基づき、鉱物組成を決定した¹⁾。鉱物の熱力学データは、Thermoddem³⁾を参照の上設定した。溶液化学種は検討の上 Thermoddem³⁾設定した。反応速度パラメータは文献値を参照の上、設定した。反応表面積については、文献値をベースに、実際の岩石試料の観察状況を踏まえ、CO₂を圧入しない状態で、地層水組成や初生鉱物組成の安定性をシミュレーションに(バッチ試験)により確認の上設定した。

【参考文献】

- 1) 日本CCS調査(株)、“2015年度「平成24年度二酸化炭素削減技術実証試験事業(国庫債務負担行為に係るもの)」成果報告書”(2016)
- 2) Bethke, C. M., Yeakel, S., “The Geochemist’s Workbench® Release 10.0 Reaction Modeling Guide”, Aqueous Solutions, LLC(2015)
- 3) フランス地質・鉱山研究所(BRGM)ホームページ、Thermodem(06jun2017), http://thermoddem.brgm.fr/sites/default/files/toughreact_thermoddemv1.10_06jun2017.zip
- 4) Palandri, J. L., Kharaka, Y., “A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling”, USGS open file report(2004)
- 5) Xu, T., Apps, J. A., Pruess, K., “Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system”, Chem. Geol., 217, p295-318(2005)
- 6) Birkholtzer J., Rutqvist J., Sonnenthal E., Barr D. , “ DECOVALEX-THMC Task D: Long-term permeability/porosity changes in the EDZ and near field due to THM and THC processes in volcanic and crystalline-bentonite systems, status” report october 2005. LBNL report. LBNL—59122(2005)
- 7) Steefel, C. I., “CRUNCH Version 1.2” LLNL(2001)
- 8) Xu, T., Apps, J. A., Pruess, K., Yamamoto, H., “Numerical modeling of injection and mineral trapping of CO₂ with H₂S and SO₂ in a sandstone formation”, Chem. Geol., 242, p.319-346(2007)
- 9) White, A. T., Brantley, S. L., “The effect of time on weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in laboratory and field?”, Chem. Geol., 202, p.479-506(2003)
- 10) Aradottir, E. S. P, Sonnenthal, E. L., Bjornsson, G., Jonsson, H., “Multidimensional reactive transport modeling of CO₂ mineral sequestration in basalts at Hellisheidi geothermal field, Iceland”, International J. of Greenhouse Gas Control, 9, p24-40(2012)

- 11) Xu, T., Sonnenthal, E., Spycher, N., Pruess, K., “TOUGHREACT User’s Guide: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media, V1.2.1.”, LBNL report(2008)
- 12) Xu, T., Spycher, N., Sonnenthal, E., Zhang, G., Zheng, L., .Pruess, K., “TOUGHREACT Version 2.0: A simulator for subsurface reactive transport under non-isothermal multiphase flow conditions”, Computer & Geosci., 37, p.763-774 (2011)

5.6 萌別層 3D 流動-地化学連成シミュレーションの実施

3D 流動-地化学連成シミュレーションは TOUGHREACT を用いて実施した。3D 流動シミュレーションは GEM を用いたため、TOUGHREACT による 3D 流動-地化学連成シミュレーションに先行し、セクターモデルを用いて、GEM と TOUGH 系のシミュレーター (TOUGH2) による 3D 流動シミュレーション結果の整合性を確認したうえで、TOUGHREACT による 3D 流動-地化学連成シミュレーションを実施した。

5.6.1 GEM/TOUGH2 による 3D 流動シミュレーション結果の比較

GEM と TOUGH 系のシミュレーター (TOUGH2) による 3D 流動シミュレーション結果を比較した。IW-2 の圧入実績に基づくシミュレーションから得られる深度 999.2725 mTVDS における圧力挙動の比較を図 5.6-1 に示す。両シミュレーターによる結果はおおむね一致する。

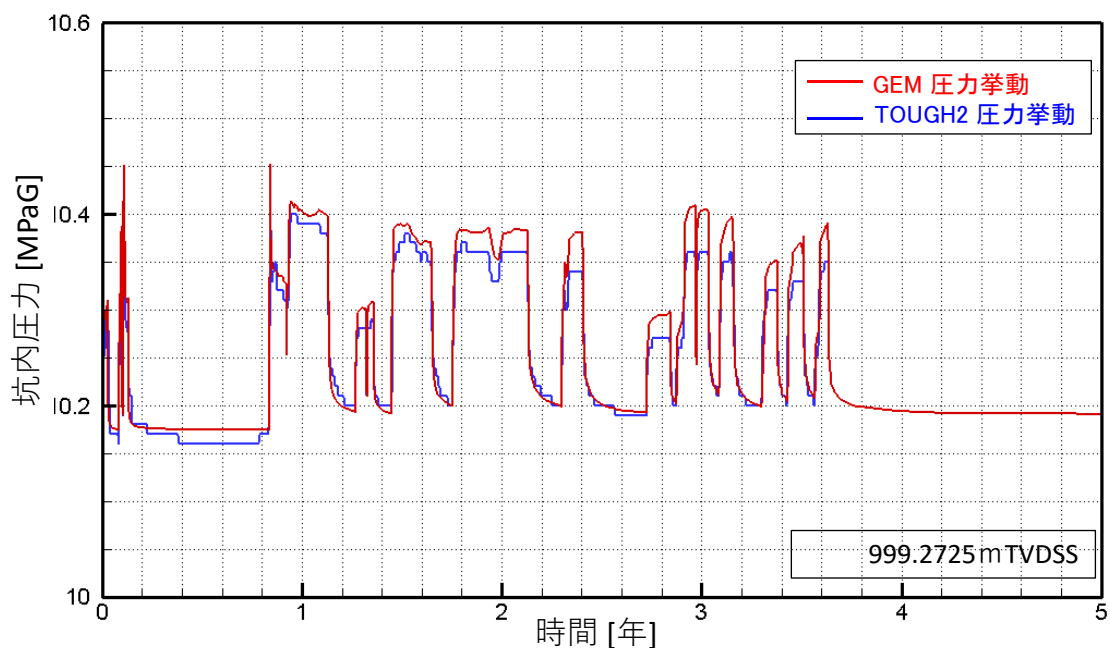
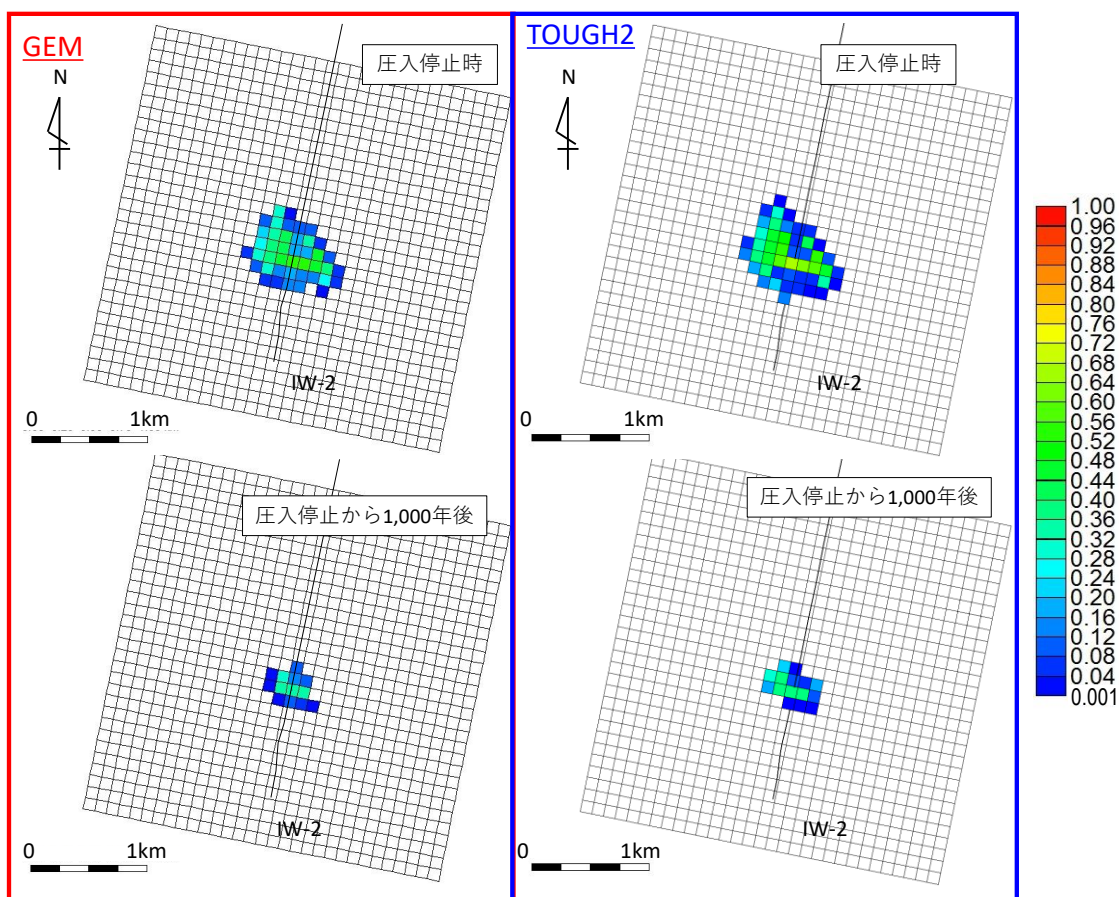


図 5.6-1 GEM と TOUGH2 による流動シミュレーション結果の比較 (坑内圧力挙動)

図 5.6-2 は両シミュレーターにより CO₂飽和度分布の比較を示している。両シミュレーターによる結果はおおむね一致する。

以上の様に両シミュレーターによる 3D 流動シミュレーション結果はおおむね一致することを確認し、TOUGHREACT により 3D 流動-地化学連成シミュレーションを実施した。



注) 平面図は貯留層上限付近の同一層準における CO₂ 飽和度分布を示す。

図 5.6-2 GEM と TOUGH2 による流動シミュレーション結果の比較 (CO₂ 飽和度分布)

5.6.2 萌別層 3D 流動-地化学連成シミュレーションの実施

TOUGHREACT により 3D 流動-地化学連成シミュレーションを実施した。

(1) 解析条件

表 5.5-6 の設定③および設定⑤を 3D モデルに組み込みシミュレーションを実施した (表 5.6-1)。

表 5.6-1 設定条件

設定名	調整内容 (表 5.5-4) に記載 (反応表面積の基準値は文献値より引用)	
設定③	海緑石の反応表面積は非調整	斜長石、蛇紋石、黒雲母、輝石、角閃
設定⑤	海緑石の反応表面積を 10 ⁻⁴ に調整	石の反応表面積を 10 ⁻⁴ に調整

3D 流動-地化学連成シミュレーションにおける、鉱物の生成や溶解が貯留層の孔隙率

を変化させるため、浸透率にも影響が及ぶ。本検討では、鉱物生成・溶解に伴う孔隙率変化を考慮するとともに、浸透率の変化は Kozeny-Carman の式¹⁾により評価した。

$$k = k_i \frac{(1-\phi_i)^2}{(1-\phi)^2} \left(\frac{\phi}{\phi_i} \right)^3$$

ここで、 k ：浸透率、 ϕ ：孔隙率、 k_i 、 ϕ_i ：初期の浸透率と孔隙率である。

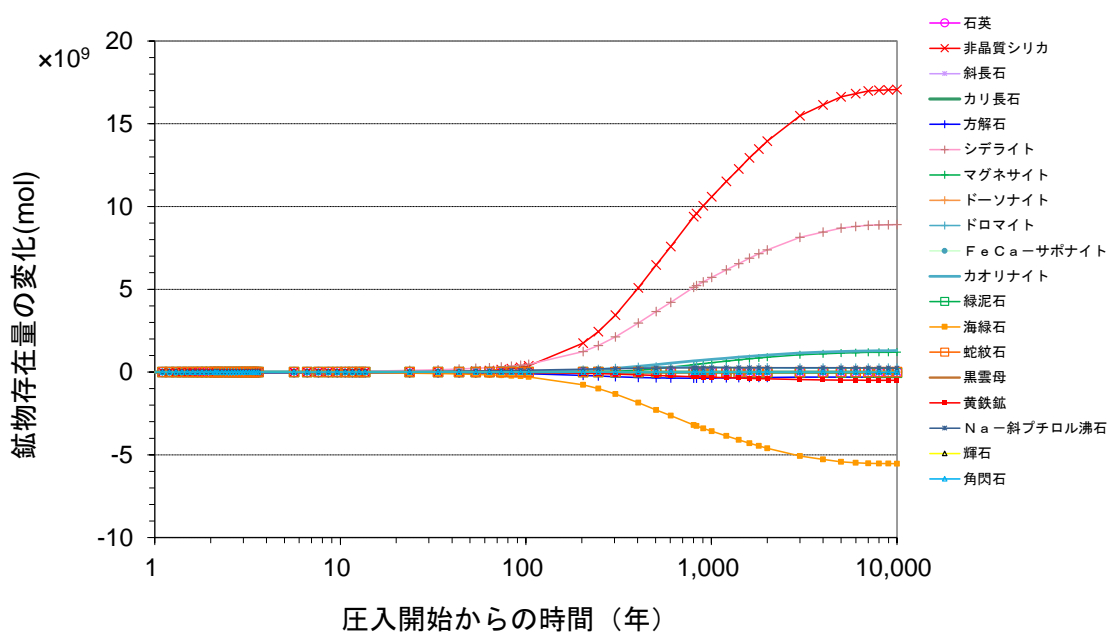
(2) 解析結果

設定③と設定⑤のそれぞれのケースにおける 3D 流動-地化学連成シミュレーションの結果を以下に示す。

なお、実際の反応にかかる反応表面積を正確に把握することは不可能であるため、結果は参考値となる。

① 設定③（ベースケース）

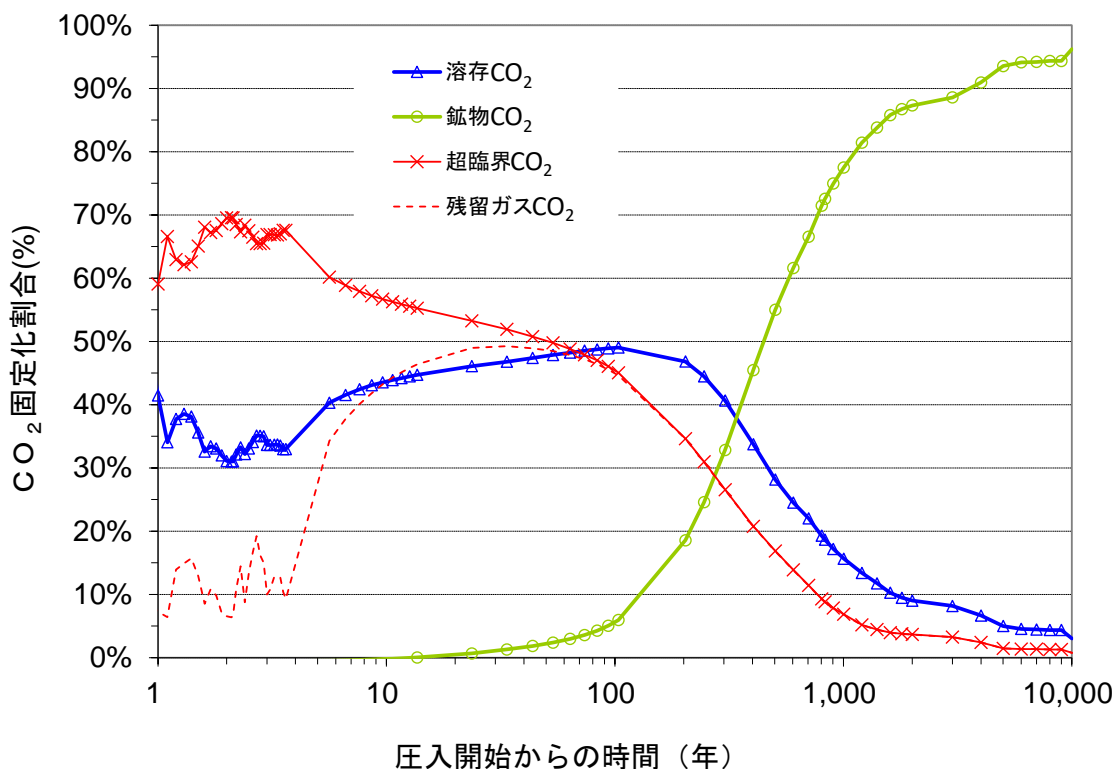
モデル全体の鉱物溶解・沈殿量の経時変化を図 5.6-3 に示す。CO₂との反応により沈殿する主な鉱物は非晶質シリカ、シデライト、マグネサイトであり、溶解量が多い鉱物は、海緑石である。CO₂が鉱物固定化される主なメカニズムは、海緑石の溶解によって Fe²⁺および Mg²⁺が地層水に供給され、シデライトとマグネサイトとして固定化され沈殿するものである。方解石は、圧入から約 500 年間は若干溶解するが、その後は微量ながら沈殿に転じている。これらの鉱物の溶解と沈殿は、CO₂圧入量が多い萌別層の最上部で多く生じるものと考えられる。



注) 計算結果は検討で仮定したパラメータを用いた計算結果としては正確であるが、反応性に大きな影響を持つ反応表面積を正確に把握することが不可能であることから、計算結果は参考値とする。

図 5.6-3 モデル全体の鉱物の溶解・沈殿量の経時変化 (設定③)

モデル全体の CO₂ 固定化量割合の変化を図 5.6-4 に示す。貯留層内の CO₂ は、圧入中は移動し得る超臨界 CO₂ (可動) と溶存 CO₂ の割合がほとんどとなる。圧入停止後より残留 CO₂ の割合が増加する。鉱物として固定される CO₂ は圧入開始から 10 年後ころから認められ、時間の経過とともに徐々に割合を増し、10,000 万年後には圧入した CO₂ の 95% 程度となる。100 年後ころまでにはすべての CO₂ が移動しない状態となり、超臨界 CO₂ (可動) は消滅する。



注) 計算結果は検討で仮定したパラメータを用いた計算結果としては正確であるが、反応性に大きな影響を持つ反応表面積を正確に把握することが不可能であることから、計算結果は参考値とする。

図 5.6-4 モデル全体の CO₂ 固定化量の経時変化 (設定③)

図 5.6-5 に CO₂ 飽和度分布の経年変化を示す。100 年後ころまでに超臨界 CO₂ (可動) は消滅する (図 5.6-4) ため、200 年後以降の図は、残留 CO₂ による飽和度を示している。2,000 年後ころまでには、残留 CO₂ は全てが溶存 CO₂ に変化するため、5,000 年後までに CO₂ 飽和度は 0.5% 未満となる。

図 5.6-6 に溶解 CO₂ 量分布の経年変化を示す。溶解 CO₂ は超臨界 CO₂ が地層水に溶解することにより生じるため、CO₂ 飽和度分布で飽和度の上昇が認められる部分の周辺に多く分布する。超臨界 CO₂ は、移動しうる超臨界 CO₂ (可動) のほか、残留 CO₂ もとして貯留層内に存在する。10,000 年後であっても 5% 程度の溶存 CO₂ が存在する (図 5.6-4) ため、図 5.6-6 における 10,000 年後の平面図および断面図において溶解 CO₂ 量の分布が示されている。

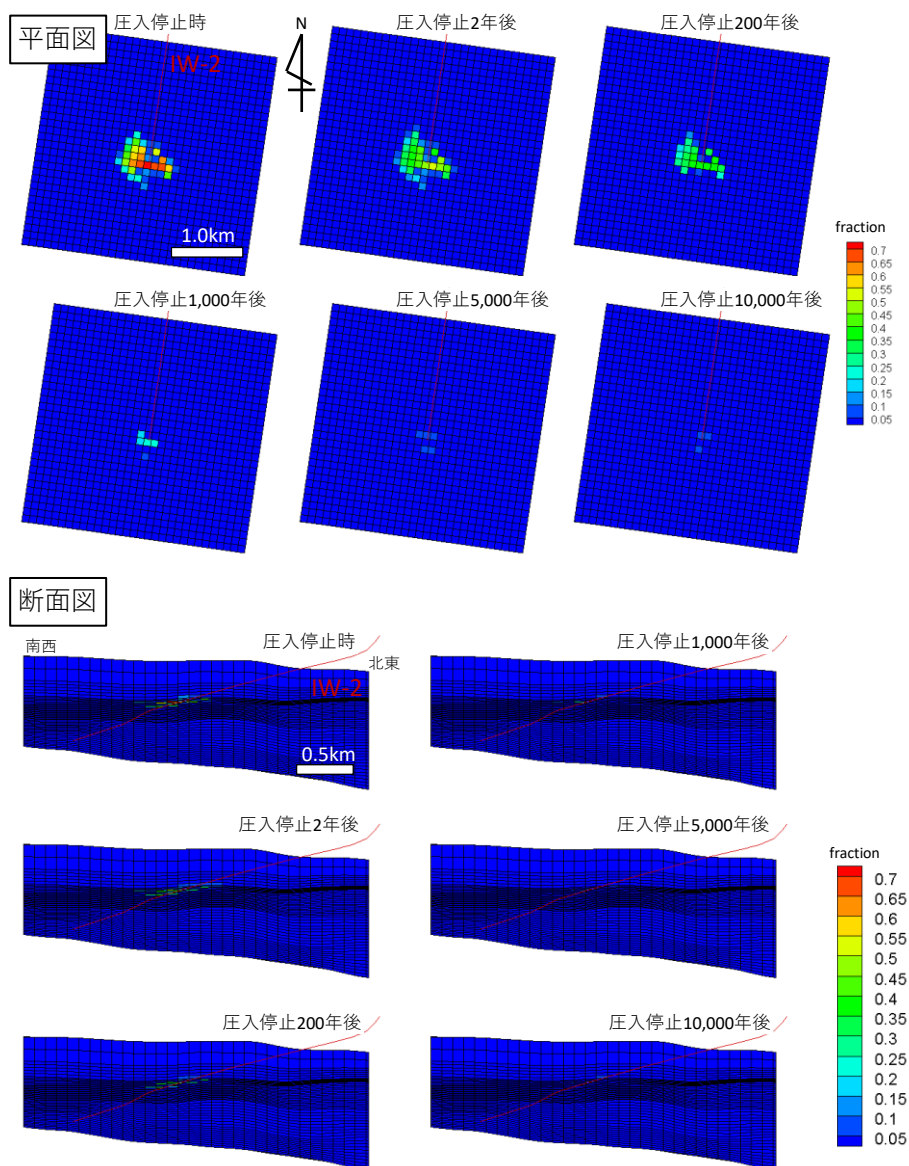


図 5.6-5 CO₂ 飽和度分布の経年変化 (設定③)

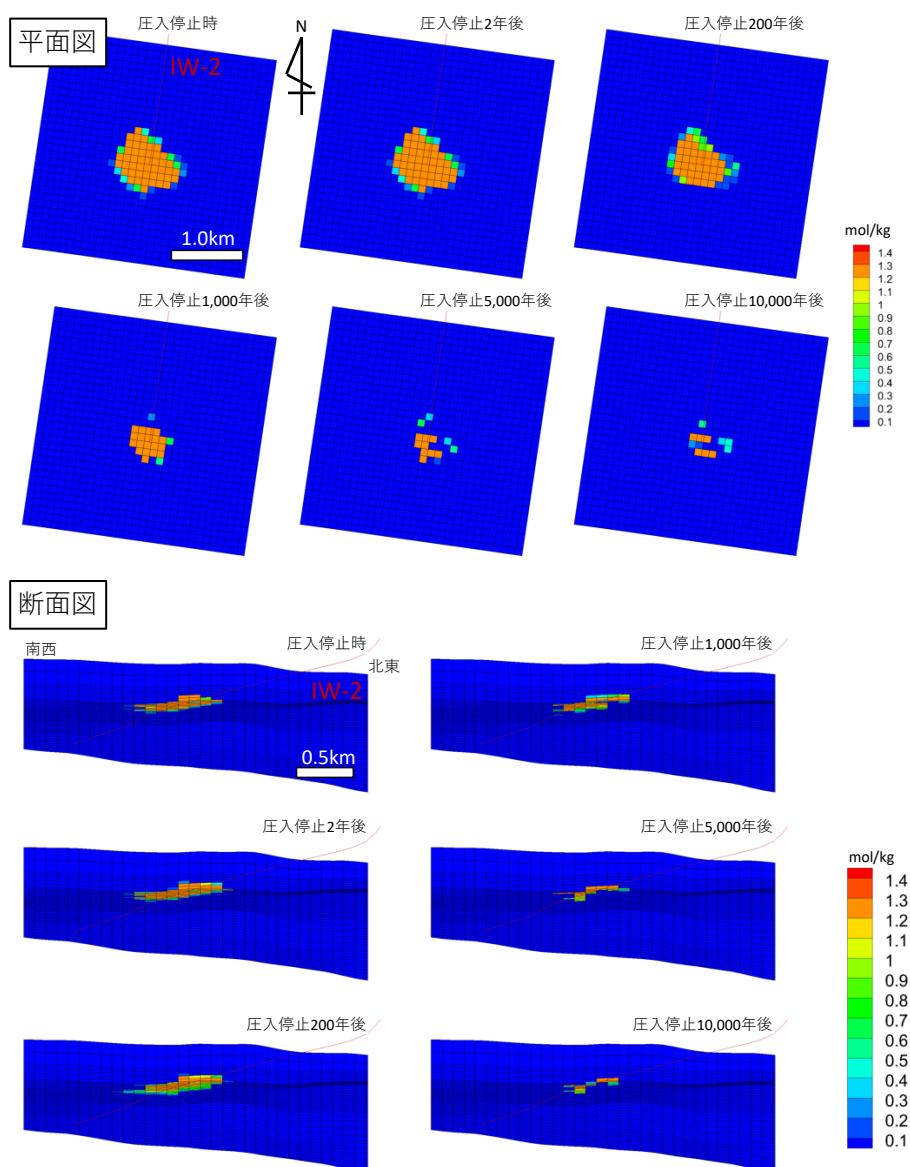


図 5.6-6 溶解 CO₂ 量分布の経年変化 (設定③)

図 5.6-7 に地層水 pH の経年変化を示す。溶解した CO₂ がイオン化し、pH は 5 以下まで低下するが、岩石との地化学反応（主に海緑石の溶解）の進行に伴って中和されるため上昇する。CO₂ の鉍物化は 200 年後ころから顕著となるため（図 5.6-4）、そのころから pH 値の上昇が明瞭となる。

図 5.6-8 に海緑石溶解量分布の経年変化を示す。また、図 5.6-9 に非晶質シリカの、図 5.6-10 にシデライトの、図 5.6-11 にマグネサイトの沈殿量の経年変化を示す。CO₂ の鉍物化は溶解 CO₂ 量が増加（図 5.6-6）により pH が低下した範囲（図 5.6-7）で生じるため、図 5.6-8~図 5.6-11 に示す鉍物の溶解・沈殿は溶解 CO₂ 量分布量が高い範囲で生じて

いる。CO₂鉱物固定量の分布も同様の傾向を示す(図5.6-12)。

図5.6-13に孔隙率の経時変化を示す。図5.6-4に示すように鉱物化するCO₂の割合は100年後ころから明瞭となり、200年後頃から急激にその割合を増す。孔隙率の変化(減少)はCO₂鉱物化の顕著となる200年後頃より明瞭となり、5,000年後頃までには最大となる。浸透率の変化は孔隙率の変化と相関させているため、浸透率の変化も孔隙率の変化と同様の傾向を示す(図5.6-14)。

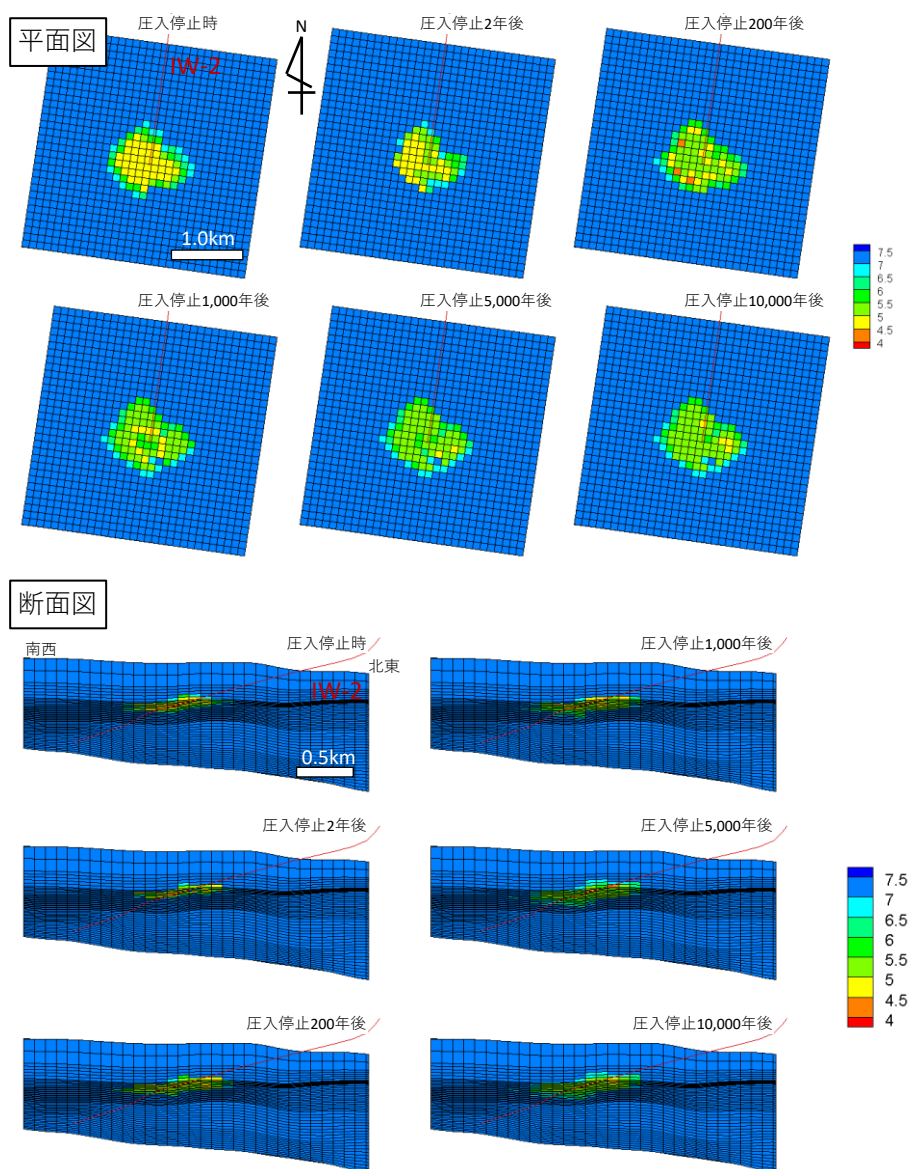


図 5.6-7 pH 分布の経年変化 (設定③)

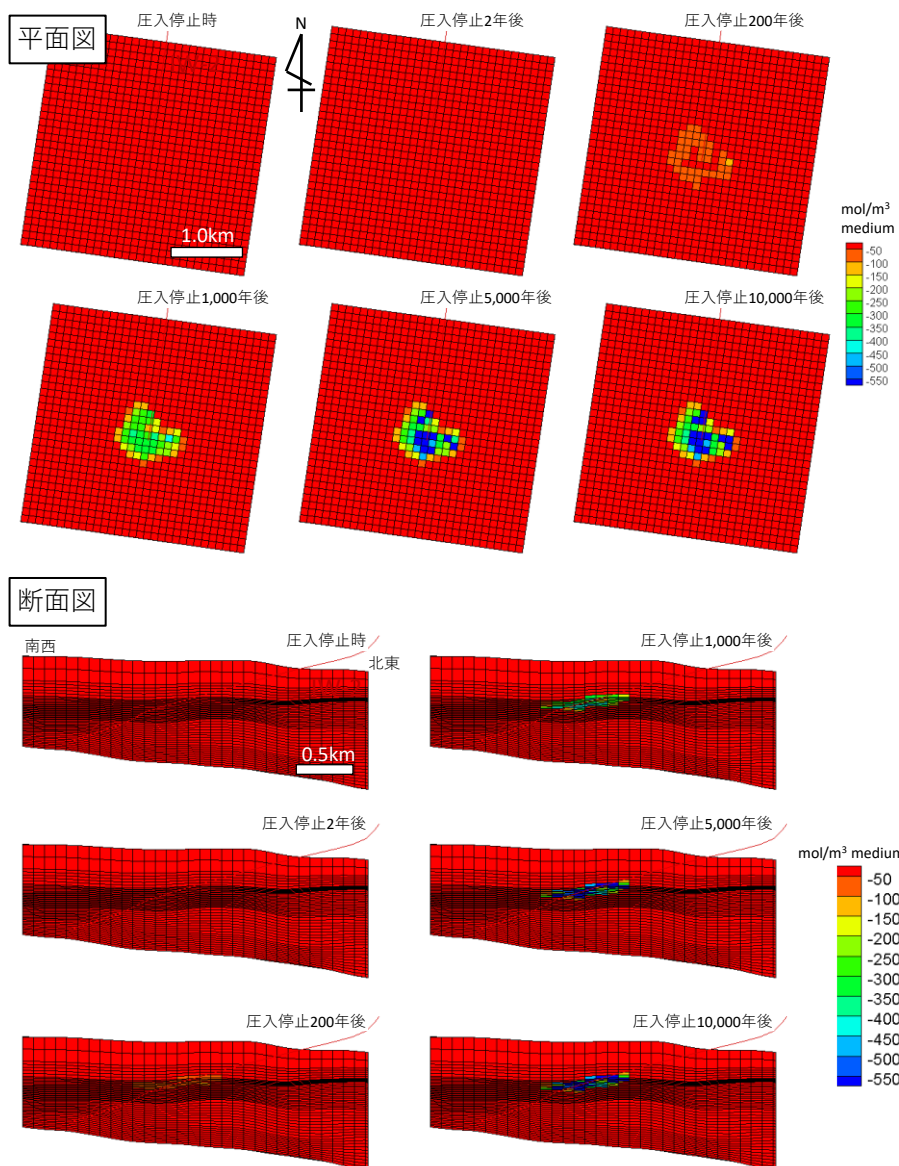


図 5.6-8 海緑石溶解量分布の経年変化 (設定③)

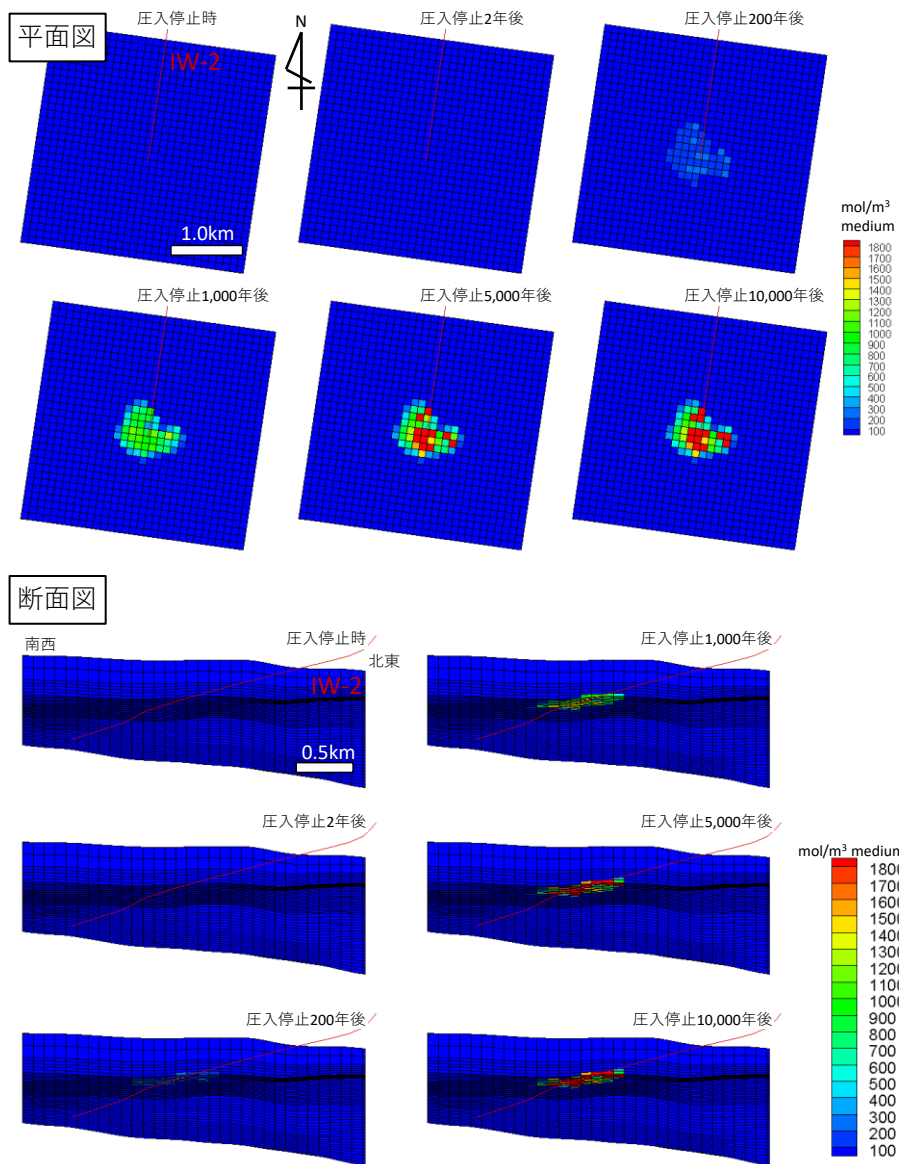


図 5.6-9 非晶質シリカ沈殿量分布の経年変化 (設定③)

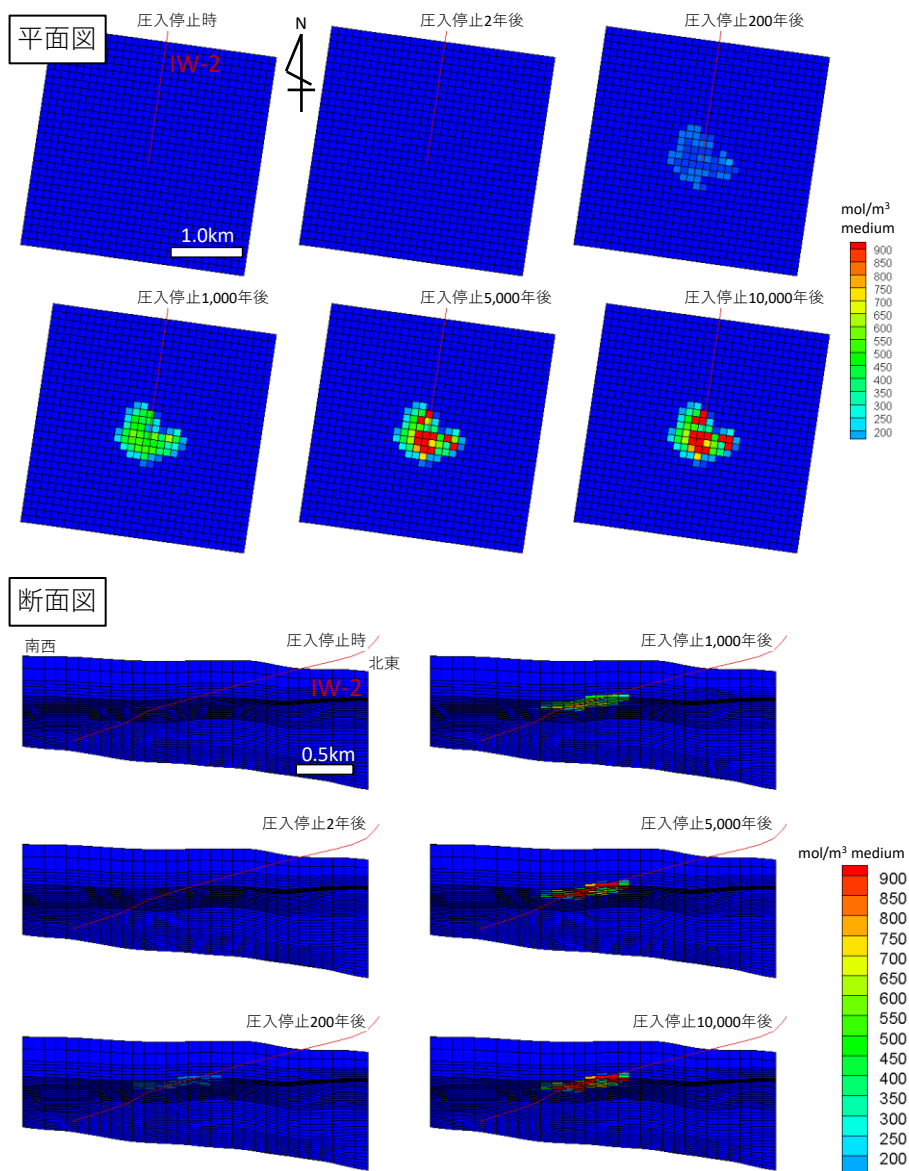


図 5.6-10 シデライト沈殿量分布の経年変化 (設定③)

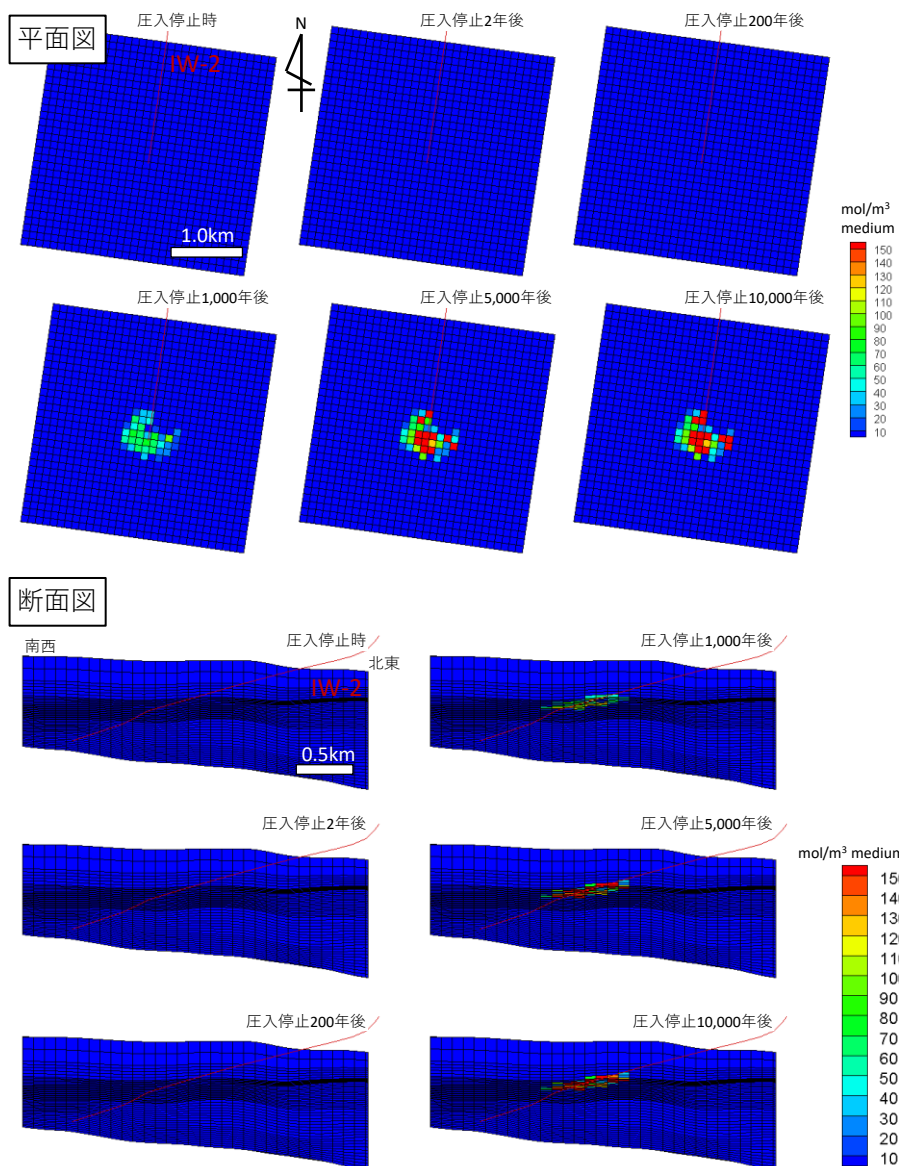


図 5.6-11 マグネサイト沈殿量分布の経年変化 (設定③)

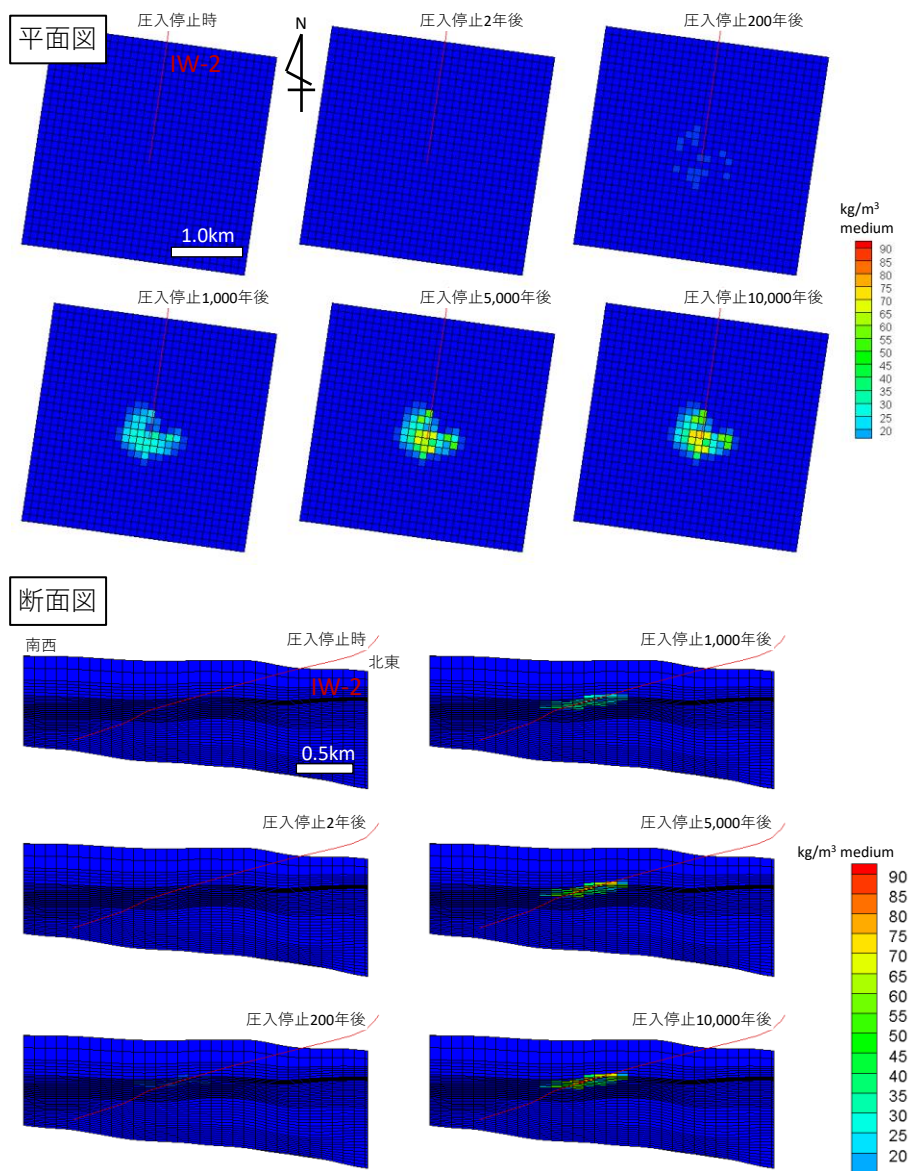


図 5.6-12 CO₂鉱物固定量の経時変化 (設定③)

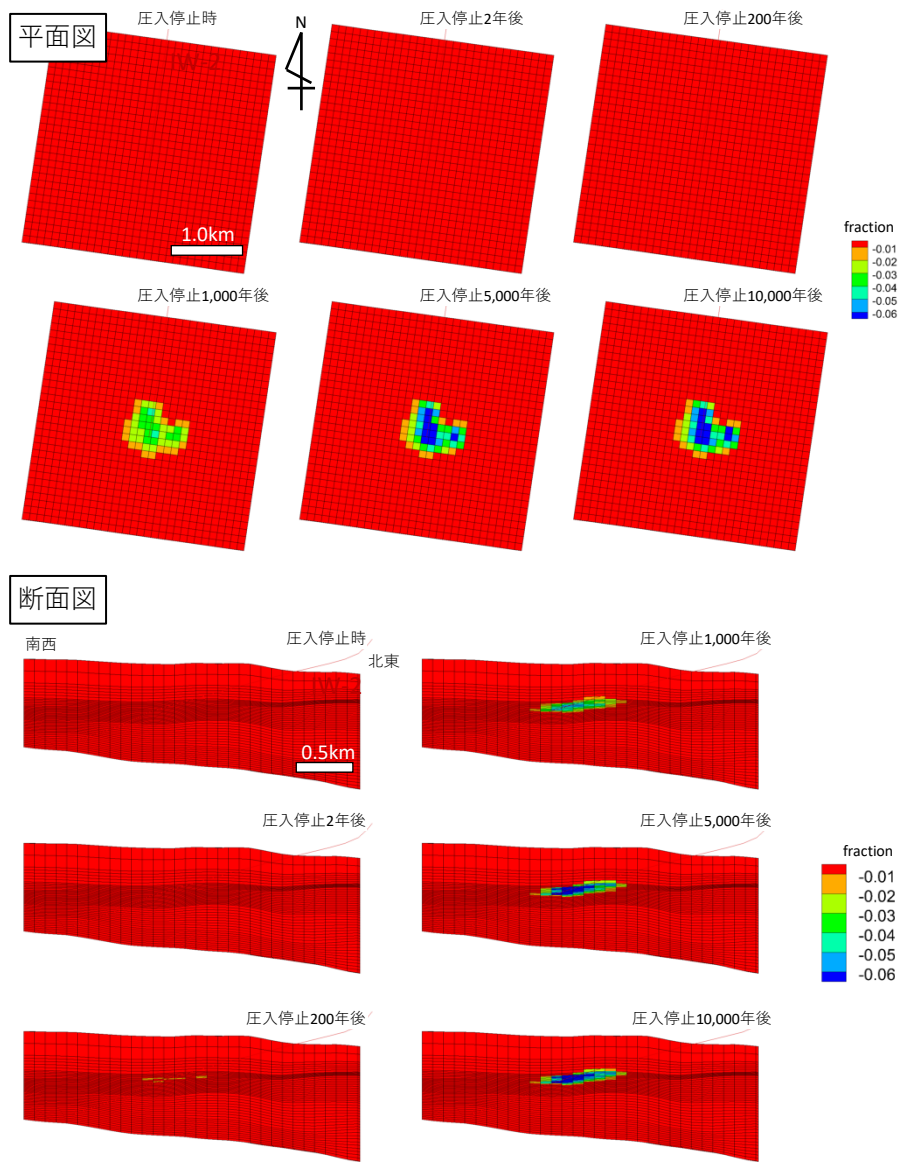


図 5.6-13 孔隙率の経時変化 (設定③)

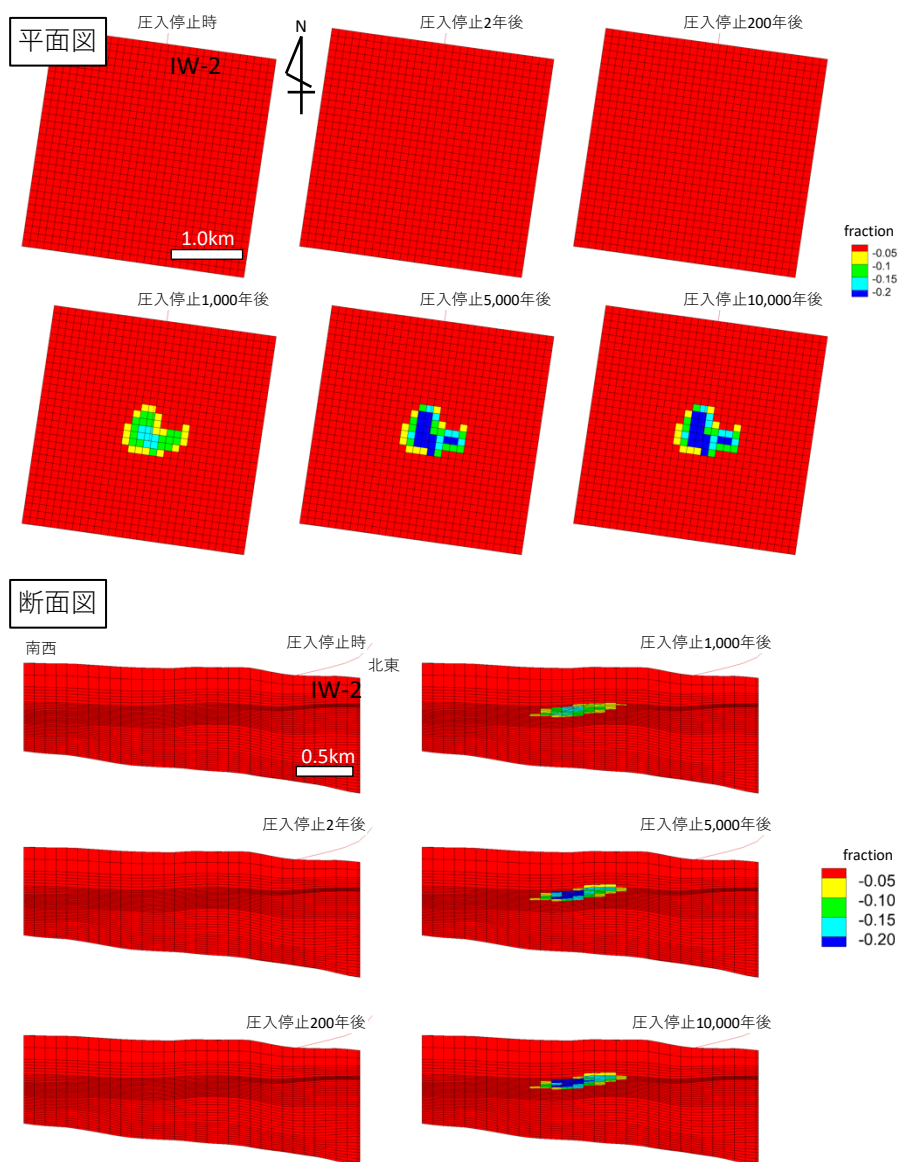


図 5.6-14 浸透率の経時変化 (設定③)

② 設定⑤

モデル全体の鉱物溶解・沈殿量の経時変化を図 5.6-15 に示す。CO₂ との反応により沈殿する主な鉱物は設定③と同様に、非晶質シリカ、シデライト、マグネサイトであり、溶解量が多い鉱物は、海緑石である。CO₂ が鉱物固定化される主なメカニズムも設定③と同様となる。方解石は、圧入から約 4,000 年間には若干溶解するが、その後は微量ながら沈殿に転じている。これらの鉱物の溶解と沈殿は、CO₂ 圧入量が多い萌別層の最上部で多く生じるものと考えられる。

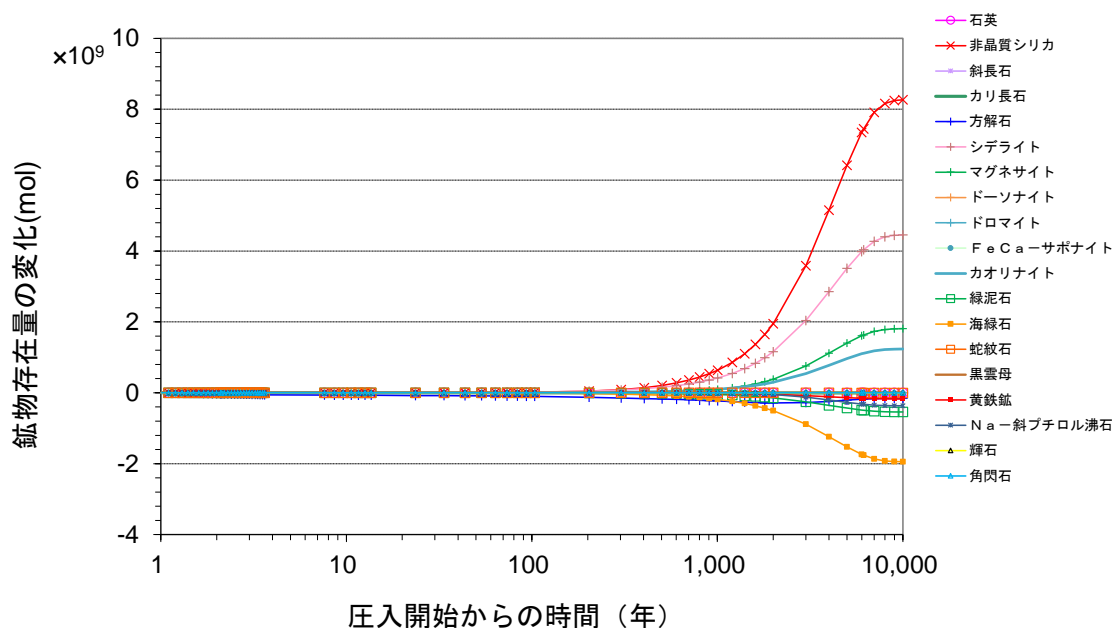
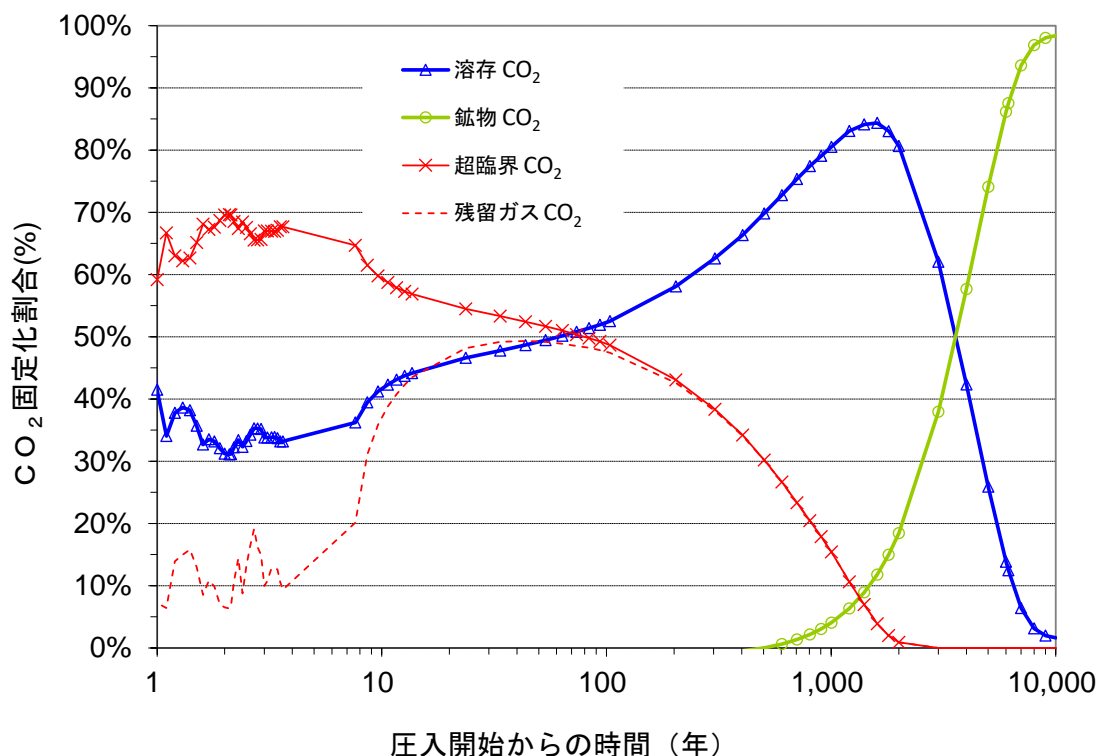


図 5.6-15 モデル全体の鉱物の溶解・沈殿量の経時変化 (設定⑤)

注) 計算結果は検討で仮定したパラメータを用いた計算結果としては正確であるが、反応性に大きな影響を持つ反応表面積を正確に把握することが不可能であることから、計算結果は参考値とする。

モデル全体のCO₂固定化量割合の変化を図5.6-16に示す。貯留層内のCO₂は、圧入中は移動し得る超臨界CO₂(可動)と溶存CO₂の割合がほとんどとなる。圧入停止後より残留CO₂の割合が増加する。鉱物として固定されるCO₂は圧入開始から700年後ころから認められ、時間の経過とともに徐々に割合を増し、10,000万年後には圧入したCO₂の90%程度となる。1,000年後ころまでにはすべてのCO₂が移動しない状態となり、超臨界CO₂(可動)は消滅する。設定⑤は設定③に比べ海緑石の反応表面積を1/10,000に設定したため、海緑石の溶解と炭酸塩鉱物化が遅くなり、設定③に比べCO₂が鉱物化するタイミングが遅れている。およそ100年後以降の溶存CO₂量の割合に影響しているものと考えられる。



注) 計算結果は検討で仮定したパラメータを用いた計算結果としては正確であるが、反応性に大きな影響を持つ反応表面積を正確に把握することが不可能であることから、計算結果は参考値とする。

図 5.6-16 モデル全体の CO₂ 固定化量の経時変化 (設定⑤)

図 5.6-17 に CO₂ 飽和度分布の経年変化を示す。1,000 年後ころまでに超臨界 CO₂ (可動) はほぼ消滅する (図 5.6-16) ため、1,000 年後の図における CO₂ 飽和度分布は、残留 CO₂ による飽和度を示している。5,000 年後ころまでには、残留 CO₂ は全てが溶存 CO₂ に変化するため、5,000 年後の CO₂ 飽和度は 0.5% 未満となっている。

図 5.6-18 に溶解 CO₂ 量分布の経年変化を示す。溶解 CO₂ は超臨界 CO₂ が地層水に溶解することにより生じるため、CO₂ 飽和度分布で飽和度の上昇が認められる部分の周辺に多く分布する。超臨界 CO₂ は、移動しうる超臨界 CO₂ (可動) のほか、残留 CO₂ としても貯留層内に存在する。10,000 年後であっても 10% 程度の溶存 CO₂ が存在する (図 5.6-16) ため、図 5.6-18 における 10,000 年後の平面図および断面図において溶解 CO₂ 量の分布が示されている。溶解 CO₂ は地層水よりも密度が高いため、断面図において、下方への垂れ下がりが顕著となっている。

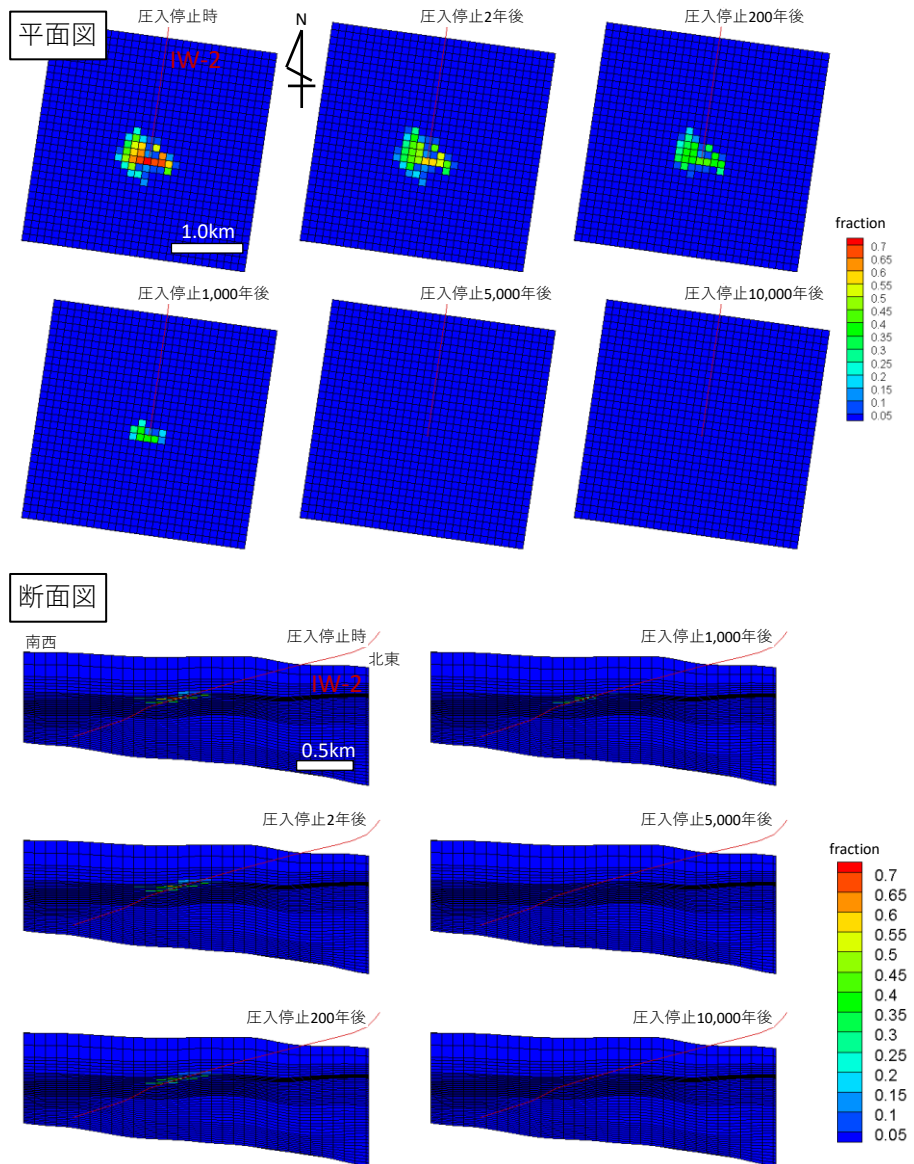


図 5.6-17 CO₂飽和度分布の経年変化 (設定⑤)

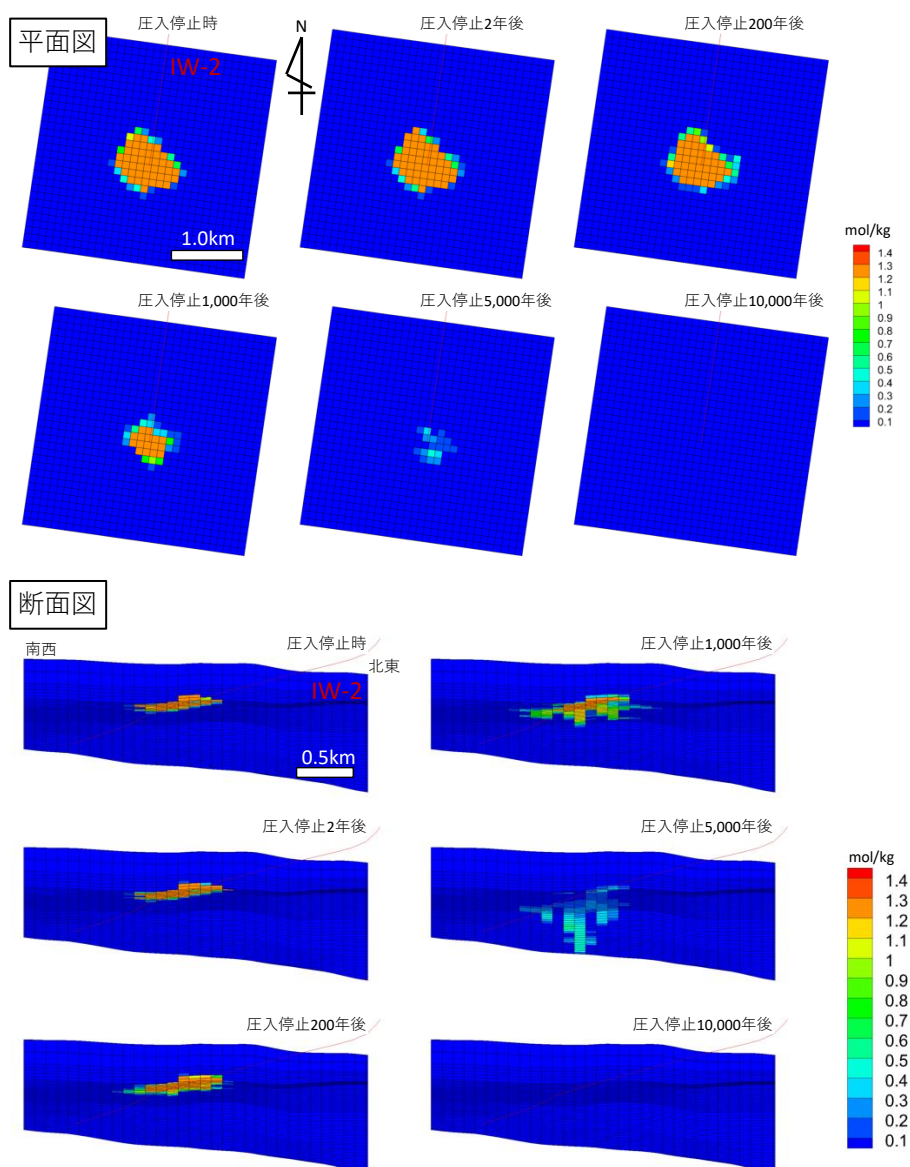


図 5.6-18 溶解 CO₂ 量分布の経年変化 (設定⑤)

図 5.6-19 に地層水 pH の経年変化を示す。圧入期間中に溶解した CO₂ がイオン化し、pH は 5 以下まで低下するが、その後は岩石との地化学反応（主に海緑石の溶解）の進行に伴って中和されるため上昇する。1,000 年後ころから CO₂ の鉱物化が顕著となるため（図 5.6-16）、そのころから pH 値の上昇が明瞭となる。

図 5.6-20 に海緑石溶解量分布の経年変化を示す。また、図 5.6-21 に非晶質シリカの、図 5.6-22 にシデライトの、図 5.6-23 にマグネサイトの沈殿量の経年変化を示す。CO₂ の鉱物化は溶解 CO₂ 量が増加（図 5.6-18）により pH が低下した範囲（図 5.6-19）で生じるため、図 5.6-20～図 5.6-23 に示す鉱物の溶解・沈殿は溶解 CO₂ 量分布量が高い範囲で

生じている。CO₂鉱物固定量の分布も同様の傾向を示す(図 5.6-24)。

図 5.6-25 に孔隙率の、図 5.6-26 に浸透率の経時変化を示す。溶解量は少ないが方解石の溶解が圧入初期より継続して生じるため、孔隙率ならびに浸透率が上昇している。図 5.6-16 に示すように鉱物化する CO₂ の割合は 1,000 年後ころから明瞭となり、2,000 年後頃から急激にその割合を増すため、そのころから孔隙率と浸透率は減少に転じる(図 5.6-26)。

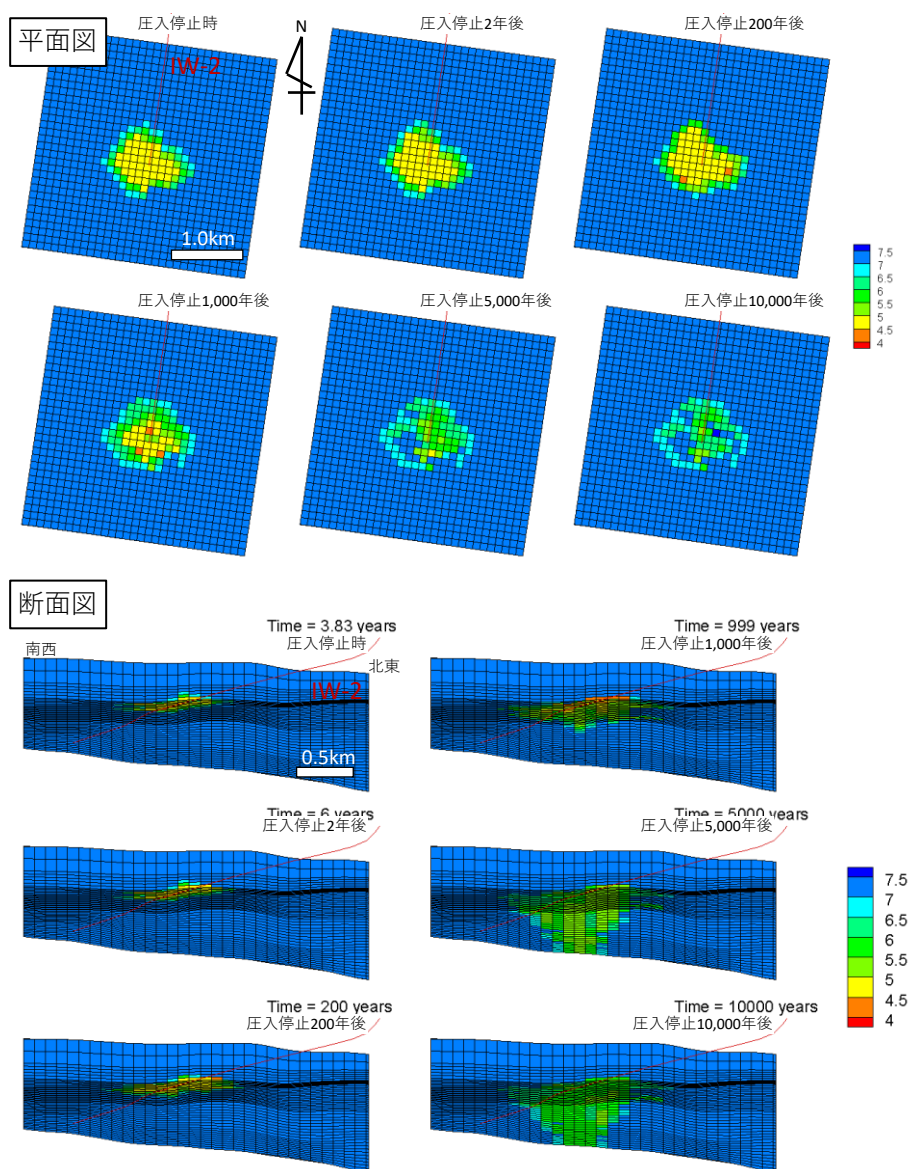


図 5.6-19 pH 分布の経年変化 (設定⑤)

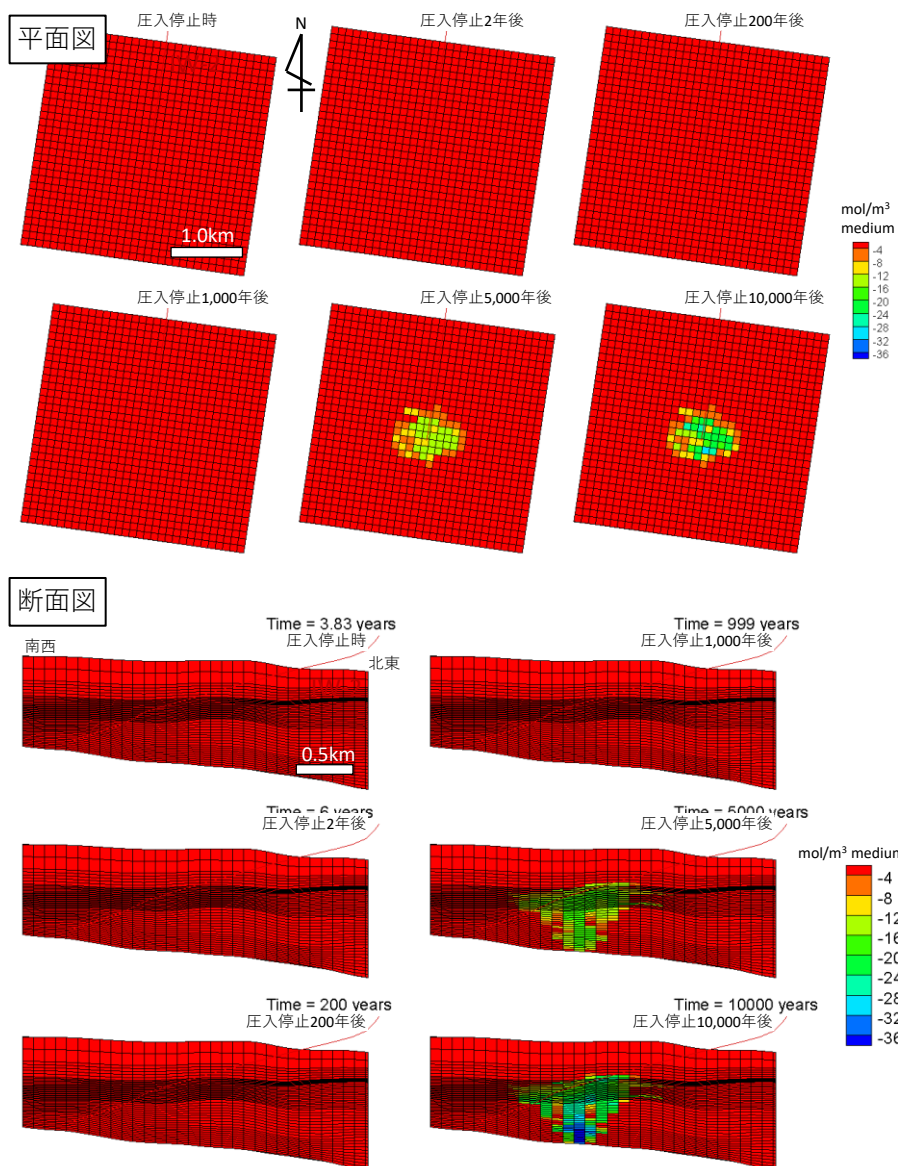


図 5.6-20 海緑石溶解量分布の経年変化 (設定⑤)

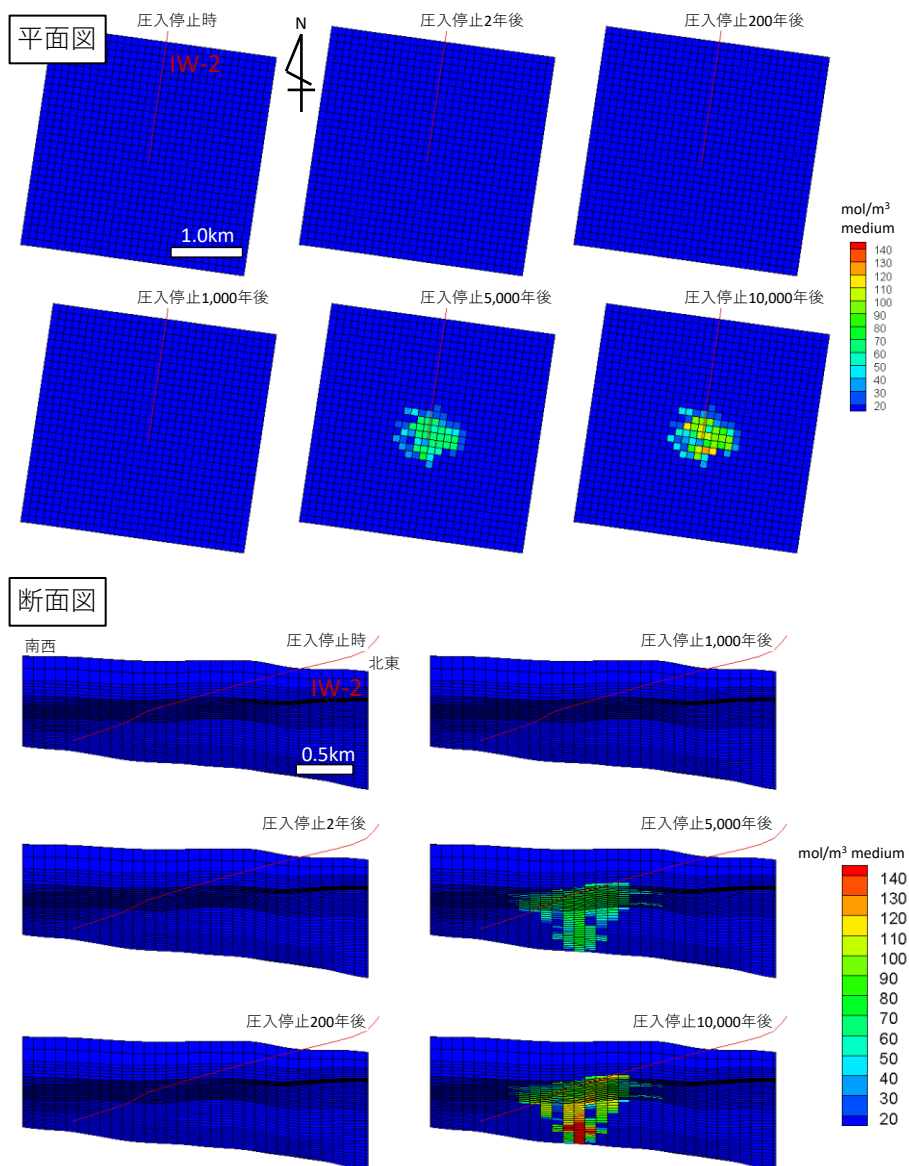


図 5.6-21 非晶質シリカ沈殿量分布の経年変化 (設定⑤)

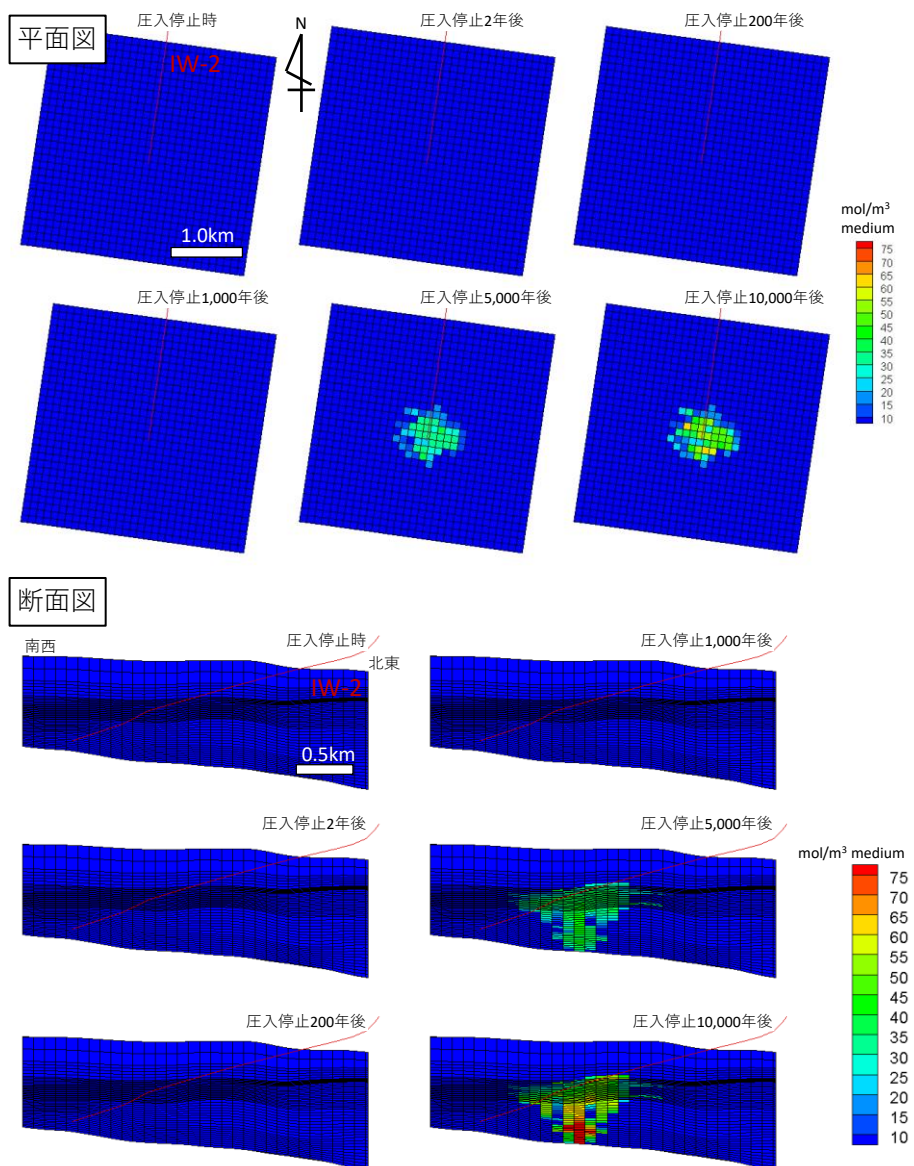


図 5.6-22 シゲライト沈殿量分布の経年変化 (設定⑤)

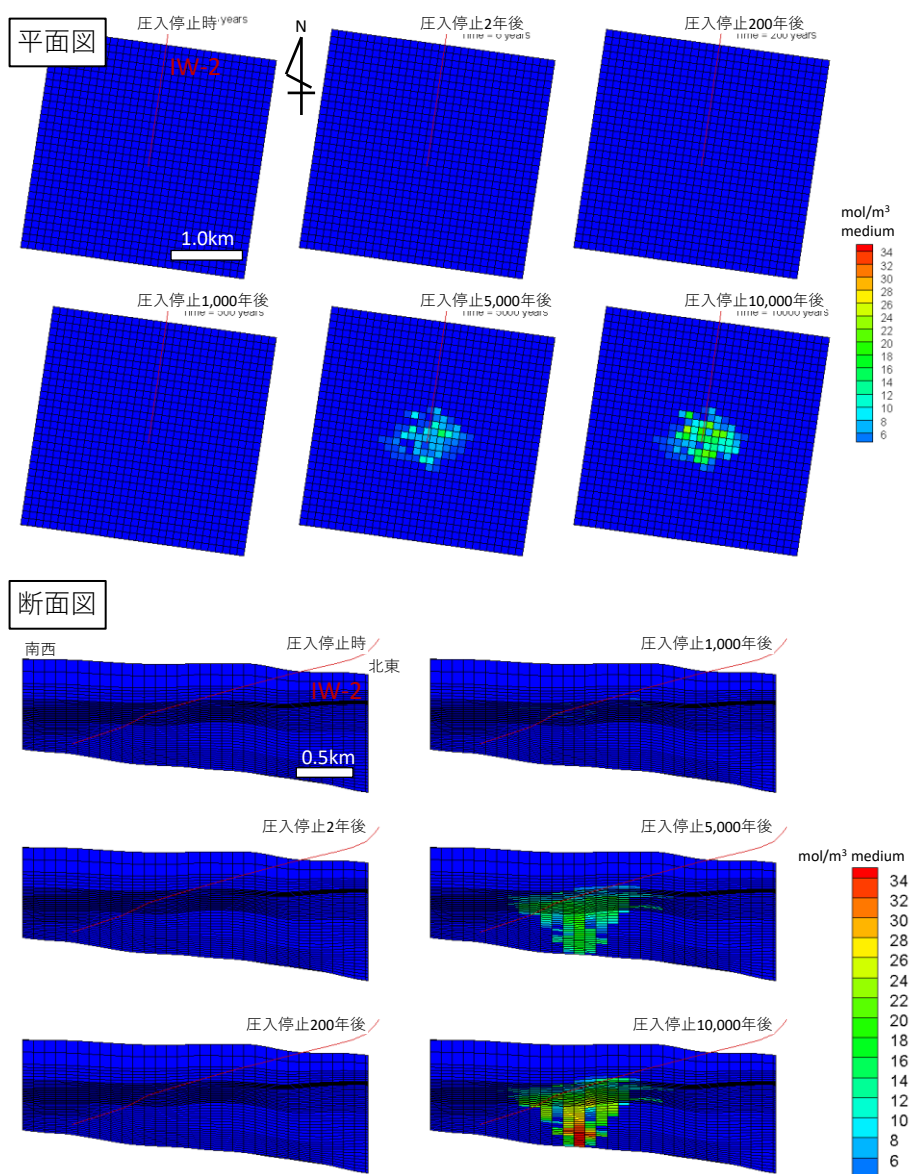


図 5.6-23 マグネサイト沈殿量分布の経年変化 (設定⑤)

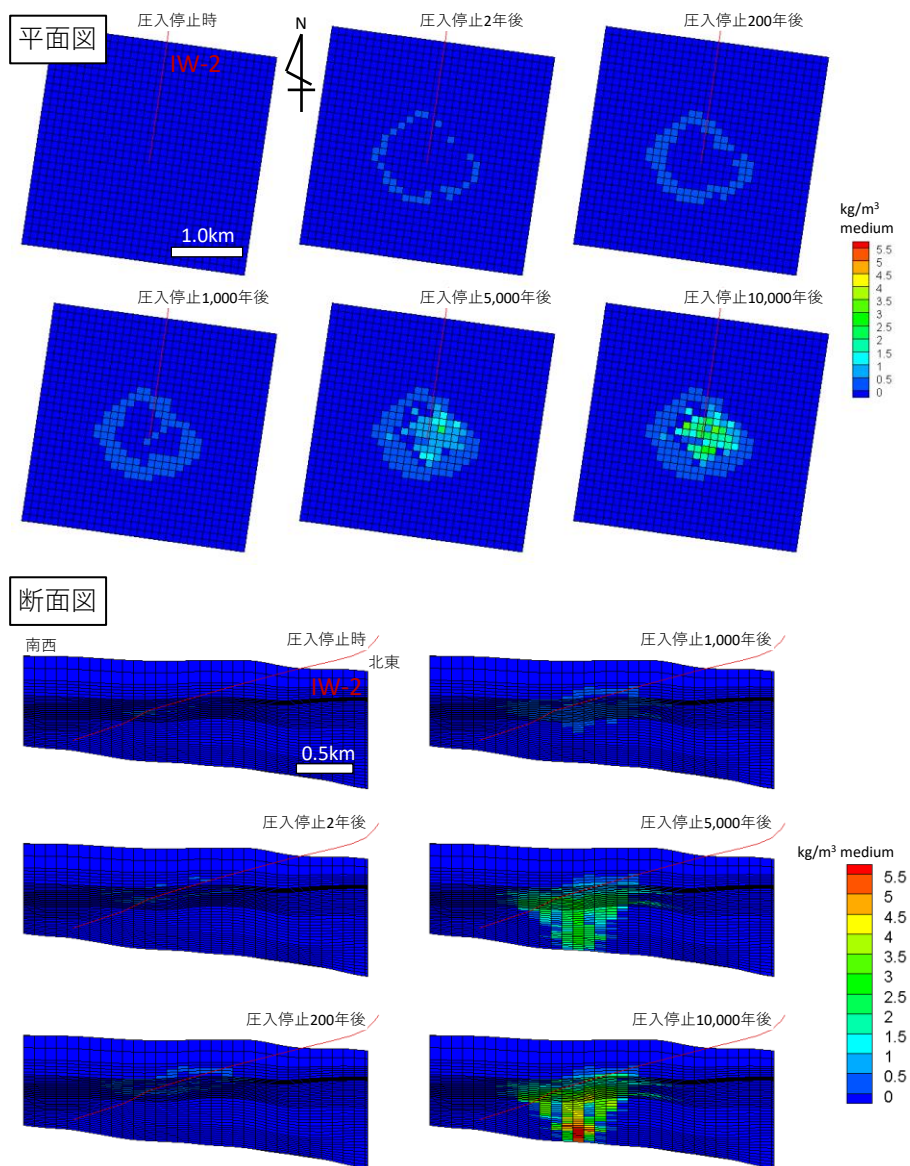


図 5.6-24 CO₂ 鉱物固定量の経時変化 (設定⑤)

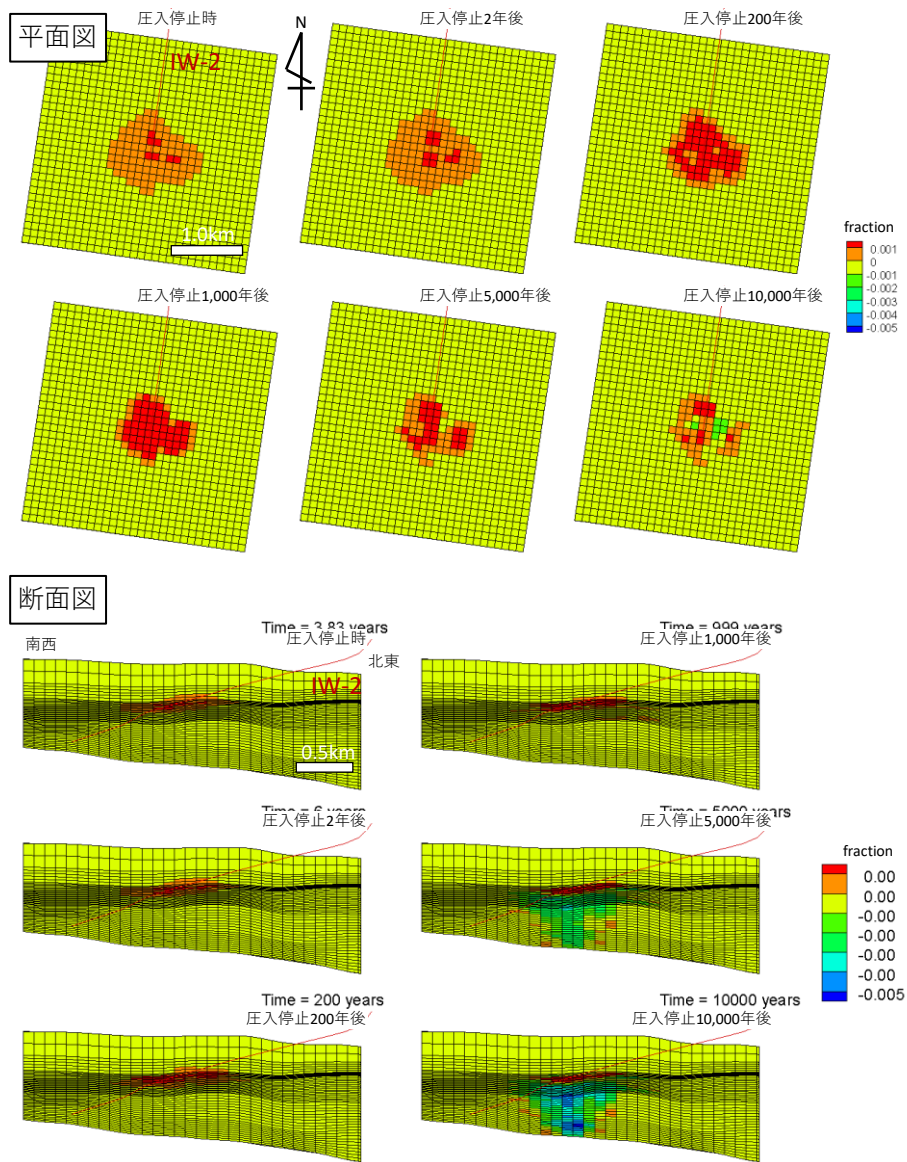


図 5.6-25 孔隙率の経時変化 (設定⑤)

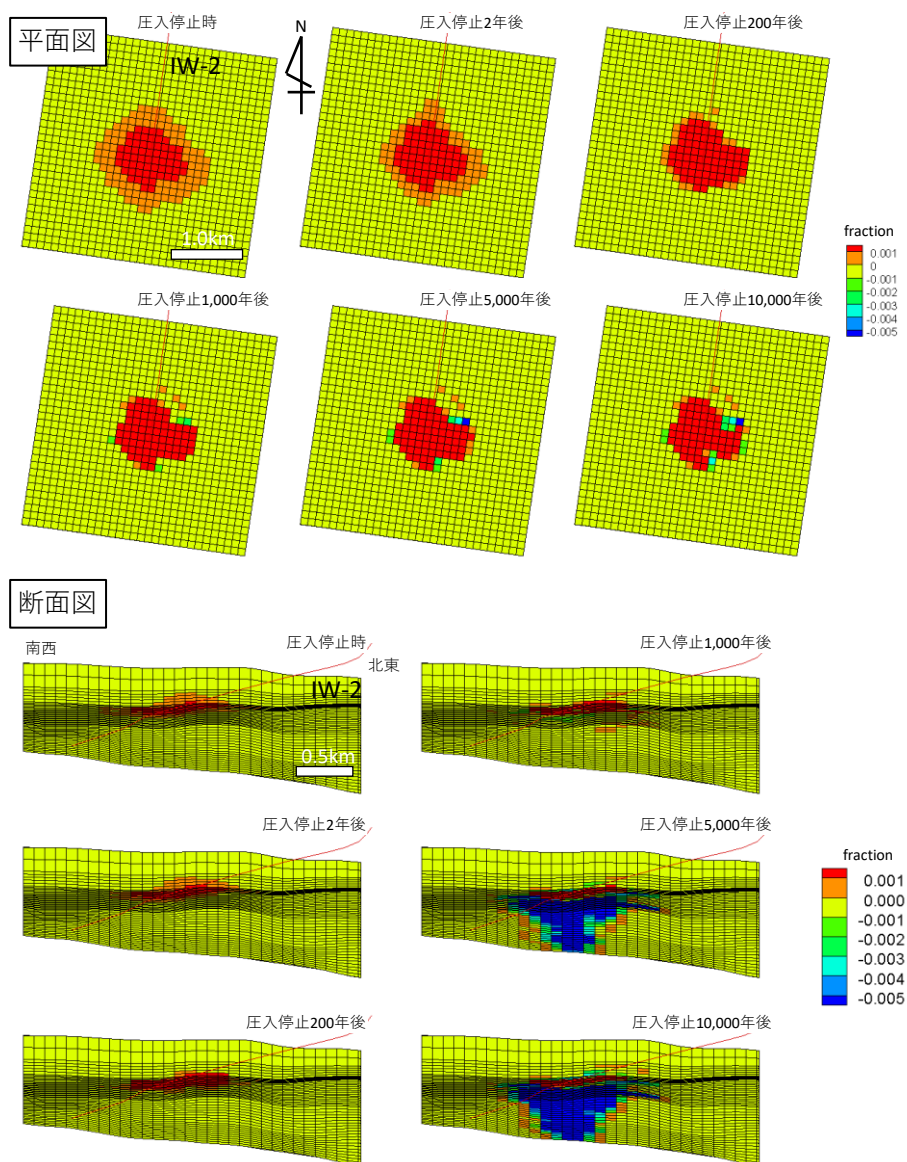


図 5.6-26 浸透率の経時変化 (設定⑤)

5.6.3 萌別層 3D 流動-地化学連成シミュレーションのまとめ

TOUGHREACT を用いて、IW-2 での実際の圧入実績に基づき、30 万 t-CO₂ を圧入する、3D 流動-地化学連成シミュレーションを実施した。

反応表面積は、文献値を基準とし反応表面積の設定にかかるとかかるバッチ反応速度シミュレーション結果から、斜長石、蛇紋石、黒雲母、輝石、角閃石にかかる反応表面積を調整したケース (設定③) と、加えて海緑石の反応表面積を調整したケース (設定⑤) で実施した。岩石薄片の観察結果から、萌別層中に存在する海緑石は微少な大きさであることから、海緑石の反応表面積も調整した設定⑤が妥当であると判断した。

萌別層砂岩層に CO₂ を圧入した際には、海緑石が溶解することにより Fe²⁺や Mg²⁺が供

給され、地層水に溶解したCO₂と反応し、シデライトやマグネサイトとして固定される反応が想定される基本的な反応となる。

【参考文献】

- 1) Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier, 1972.