

目次

第5章 貯留層等総合評価	5-1
5.1 萌別層貯留層モデルの更新	5-1
5.1.1 萌別層グリッドモデルの作成	5-1
5.2 IW-2におけるフォールオフテストの解析	5-41
5.2.1 解析方法	5-42
5.2.2 解析結果	5-46
5.2.3 フォールオフテスト解析のまとめ	5-55
5.3 IW-2 および OB-2 の圧力予実績	5-56
5.3.1 2018年度予実績確認モデルのグリッドシステム	5-56
5.3.2 予実績比較結果	5-58
5.3.3 IW-2 および OB-2 の圧力予実績に関するまとめ	5-61
5.4 2018年度モデルによるヒストリーマッチ	5-62
5.4.1 2018年度モデルのグリッドシステム	5-62
5.4.2 2018年度モデルの入力パラメータ	5-65
5.4.3 ヒストリーマッチ結果	5-75
5.4.4 ヒストリーマッチに関するまとめ	5-80
5.5 IW-2 長期挙動予測シミュレーション	5-81
5.5.1 使用した貯留層モデル	5-81
5.5.2 長期挙動予測シミュレーションのパラメータの設定	5-86
5.5.3 長期挙動予測シミュレーション結果	5-86
5.5.4 挙動予測シミュレーションのまとめ	5-128
5.6 萌別層 1D 流動－地化学連成シミュレーションの実施	5-129
5.6.1 地層水および地層鉱物の化学種組成の推定	5-129
5.6.2 反応速度パラメータと反応表面積の設定	5-133
5.6.3 1D 流動－地化学連成シミュレーション	5-137
5.6.4 1D 流動－地化学連成シミュレーションのまとめ	5-140
5.7 萌別層 3D 流動－地化学連成シミュレーションの実施	5-142
5.7.1 GEM/TOUGH2 による 3D 流動シミュレーション結果の比較	5-142
5.7.2 萌別層 3D 流動－地化学連成シミュレーションの実施	5-144
5.8 苫小牧 IW-1 FOT 解析	5-171
5.8.1 FOT 解析の実施条件	5-171

5.8.2 圧力デリバティブに関する考察	5-172
5.8.3 苫小牧 IW-1 FOT 解析のまとめ	5-176
5.9 苫小牧 IW-1 ヒストリーマッチの実施	5-177
5.9.1 圧入予実績比較	5-177
5.9.2 ヒストリーマッチ	5-180
5.9.3 苫小牧 IW-1 ヒストリーマッチまとめ	5-181
5.10 苫小牧 IW-1 流動シミュレーションの実施	5-182
5.10.1 将来予測ケースでの CO ₂ 圧入シナリオ	5-182
5.10.2 流動シミュレーション結果	5-183
5.11 滝ノ上層 1D 流動ー地化学連成シミュレーションの実施	5-194
5.11.1 地層水および地層鉱物の化学種組成の推定	5-194
5.11.2 反応速度パラメータと反応表面積の設定	5-198
5.11.3 滝ノ上層 1D 流動ー地化学連成シミュレーション	5-201
5.11.4 1D 流動ー地化学連成シミュレーションのまとめ	5-203
5.12 滝ノ上層 3D 流動ー地化学連成シミュレーションの実施	5-205
5.12.1 GEM/TOUGH2 による 3D 流動シミュレーション結果の比較	5-205
5.12.2 滝ノ上層 3D 流動ー地化学連成シミュレーションの実施	5-206

第5章 貯留層等総合評価

5.1 萌別層貯留層モデルの更新

5.1.1 萌別層グリッドモデルの作成

流動シミュレーションや流動地化学連成シミュレーションを実施するため、貯留層モデルを作成した。貯留層モデルを作成するために、貯留層や遮蔽層の岩相や岩石物性値を入力するためのグリッドモデルを作成した（5.1.1(4)①参照）。

グリッドモデルの作成は、対象範囲内に位置する坑井の確認層序を基準とし、弾性波探査記録の解析と総合して実施した。時間ドメインの二次元・三次元弾性波探査記録の解析により、主要層準の時間構造図を作成し、深度構造図に変換したうえで作成した（図5.1-1）。

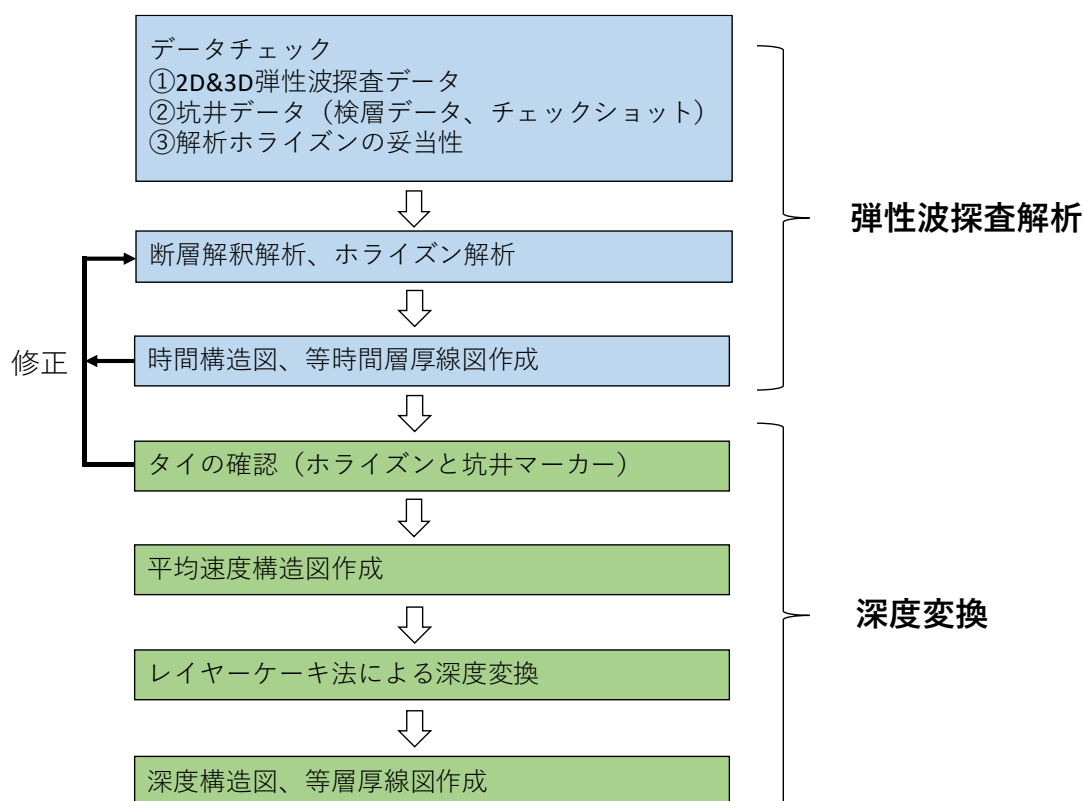
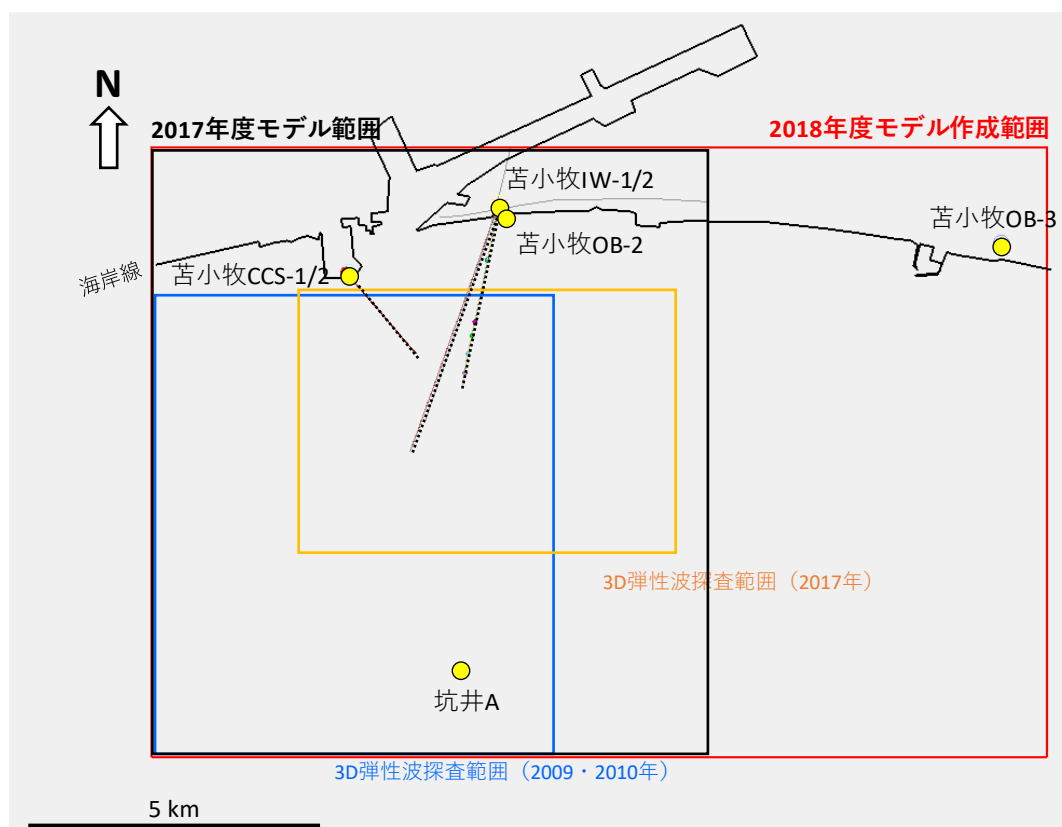


図 5.1-1 萌別層グリッドモデル作成のための深度構造図作成にかかるワークフロー

(1) 萌別層グリッドモデルの拡張範囲

萌別層グリッドモデルの作成範囲は、2017年度モデルの作成範囲から5kmほど東側に拡張し、苫小牧OB-3を包括する範囲とした（図5.1-2）。



注）既存の測線および基礎物理探査測線は示していない。

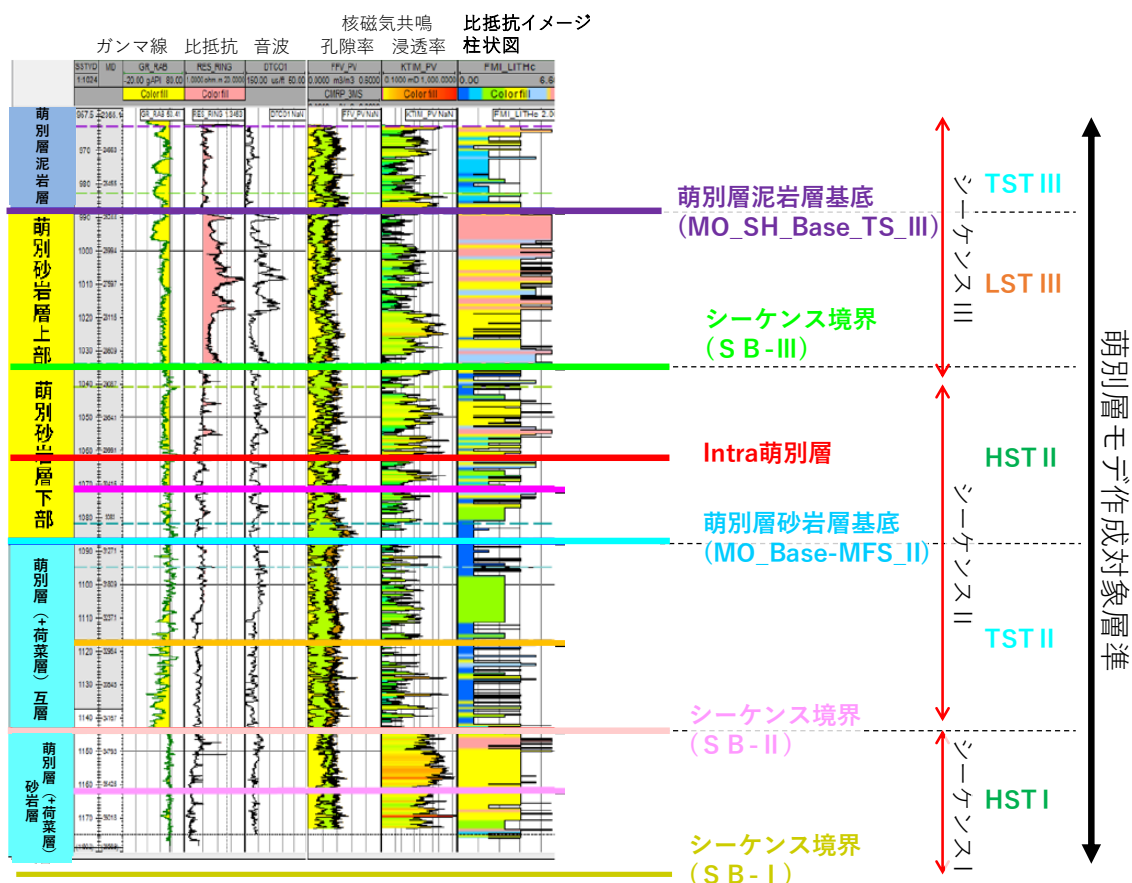
図 5.1-2 萌別層グリッドモデル作成範囲

(2) 弾性波探査データの解析

追跡したホライズンは 2017 年度以前を基本的に踏襲し、解析範囲を既存の基礎物理探査データを用いて東側に拡張した。

① 解析ホライズン

2017 年度以前を基本的に踏襲し、坑井層序と弾性波探査記録から、シーケンス層序学的な観点からシーケンス境界（以下、「SB」と称する。）、最大海氾濫面（以下、「MFS」と称する。）、海進面（以下、「TS」と称する。）等を設定し弾性波探査記録上で追跡した（図 5.1-3）。使用した坑井層序データは、苫小牧 CCS-1（以下、「CCS-1」と称する。）、苫小牧 IW-1（以下、「IW-1」と称する。）、苫小牧 IW-2（以下、「IW-2」と称する。）、苫小牧 OB-2（以下、「OB-2」と称する。）、苫小牧 OB-3（以下、「OB-3」と称する。）、および坑井 A（既存の坑井）である。



HST：高海水準期堆積体、TST：海進期堆積体、LST：低海水準期堆積体
シーケンス I (Sq I) には LST I、TST I、HST I が含まれると推定されるが、主に HST I からなるため、HST I 記載（以降同様）。

図 5.1-3 苫小牧 IW-2 における萌別層貯留層モデル作成層準のシーケンス層序区分

② 解釈結果

図 5.1-4～図 5.1-6 に対象範囲内の、三次元弾性波探査記録の時間断面図（解釈線有／無）を示す。基本的に図 5.1-3 で示したシーケンス層序学的な区分にもとづいて、ホライズンを追跡した。SB I～TSⅢの間が貯留層である萌別層砂岩層および萌別層（+荷葉層）の砂質岩であり、TSⅢ～鵠川層基底の区間が遮蔽層である萌別層泥岩層にあたる。

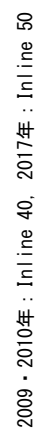
図 5.1-4 は IW-2 を横切る東西断面を示す。この断面では、ほぼ中央部に SB I を切り SB II には至らない断層が解釈されている。断層の東西でホライズン間の時間層厚が増加する傾向が認められる部分もある。断層の西側では、各ホライズンの深度が下がる傾向が認められる。この傾向は萌別層泥岩層にも認められる。このことは萌別層泥岩層堆積時ころまで、断層が動いていた可能性を示唆している。

図 5.1-5 は図 5.1-4 よりやや南側を通る東西断面を示している。断面図の中央部付近の東西で三次元弾性波探査記録の取得年度が異なるため、若干表示が異なっているように

見えている。断層の東側が西側に比べ上昇しており、SBⅠにSBⅡ、MFSⅡが収斂しているため、これらの層準が形成された時点において、断層のすぐ東側が構造的な高所をなしていたことが推定される。断層の西側は恐らく断層で落ち込んでおり、断層の東側よりも同層準の堆積物が厚く、さらにその西側で時間層厚を増す傾向が認められる。また、断層の西側に Intra 萌別層ホライズン～鵠川層上限まで、断層の西側で層厚を増す傾向が認められるため、この断層は鵠川層堆積期ころまでは継続的に活動していた可能性がある。

図 5.1-6 は CCS-1 付近から南側に至る南北断面である。断面の中央部において SBⅠ～Intra 萌別層層準が薄く南北で同層準の時間層厚が増す。また、SBⅠにSBⅡ、MFSⅡが収斂しているため、図 5.1-5 での解釈と同様に、同層準が堆積した時点で構造的な高所をなしていた可能性がある。

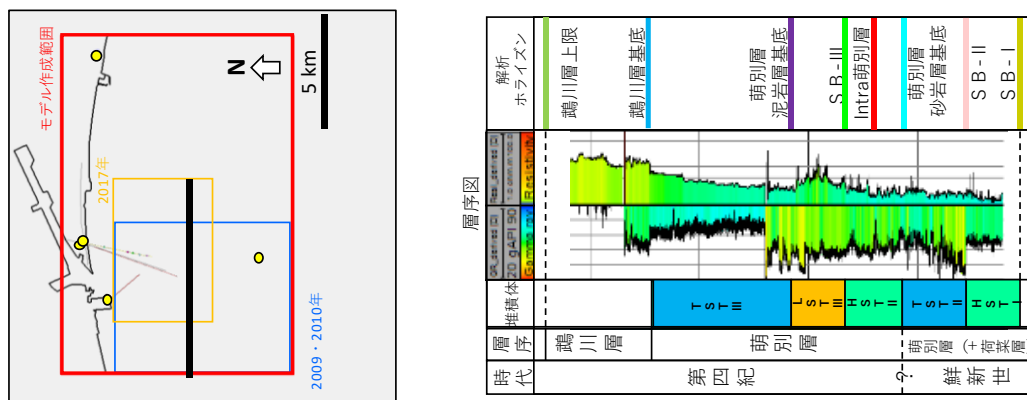
図 5.1-7 は三次元弾性波探査データ範囲より、二次元の既存弾性波探査データ測線の解析結果から作成した時間ホライズントレース断面である。この断面において紫色に着色した萌別層貯留層の遮蔽層である萌別層泥岩層が対象地域の北東側において鵠川層基底に削剥され欠如することを示している。



5-5



5-6



3D（2009・2010年）弾性波探査データ

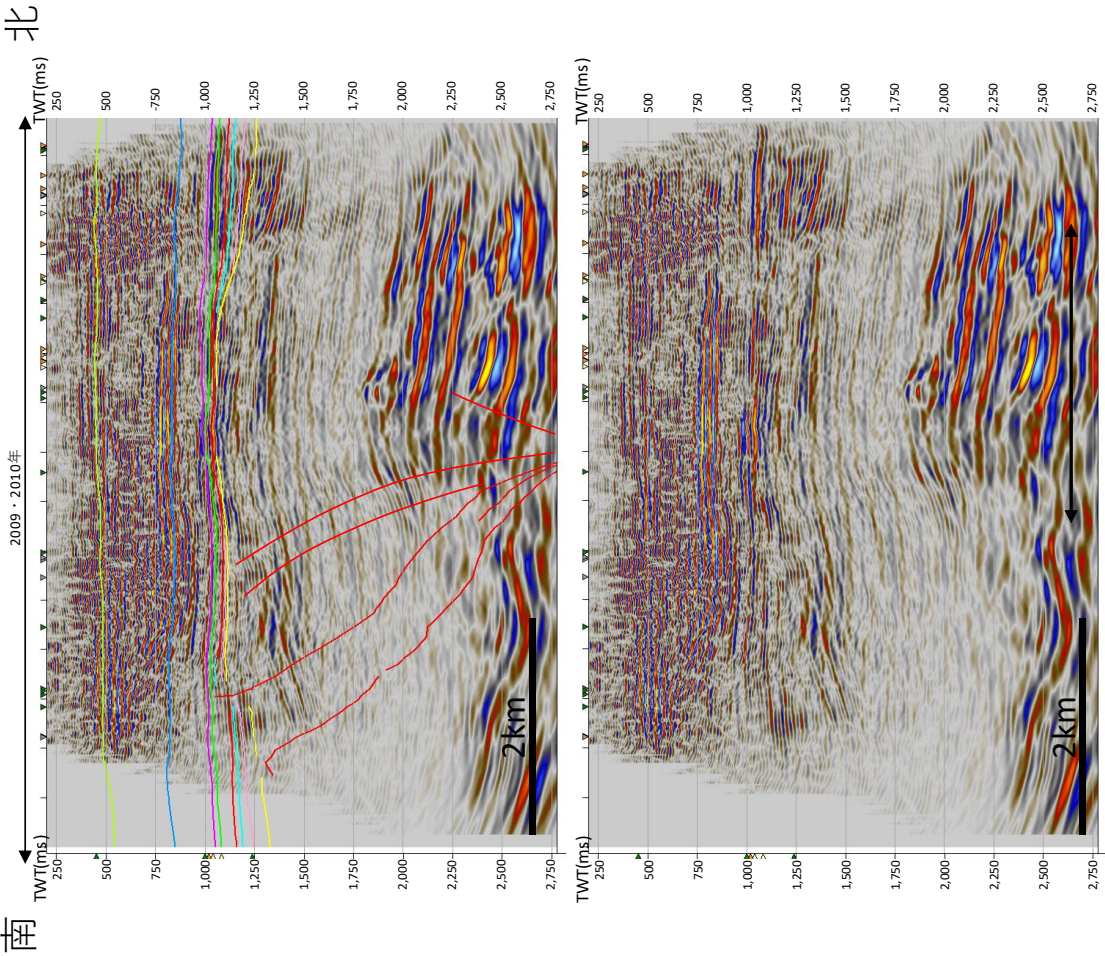
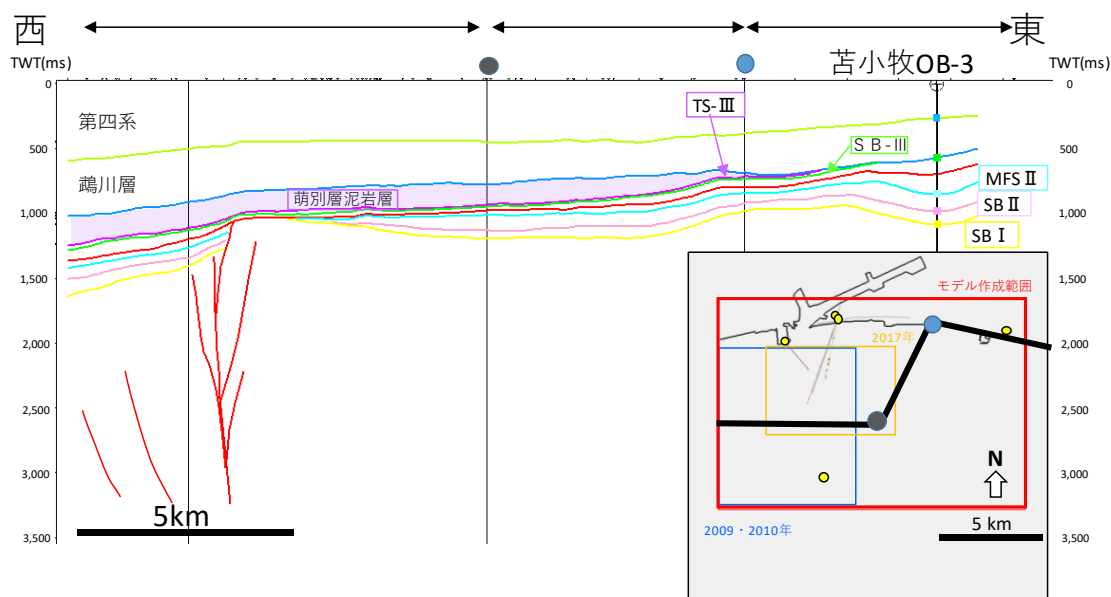


図 5.1-6 弾性波探査解析断面の例（南北断面）

弾性波探査時間断面図（2009・2010年：Crossline 270）



注) 対象範囲の北東部では、萌別層泥岩層（遮蔽層）は鵜川層に削剥され消滅する。

図 5.1-7 弾性波探査解析断面を元に作成した断面図

図 5.1-8 に SB I、SB III、萌別層砂岩層上限、萌別層泥岩層上限ホライズンの深度構造図を示す。深度構造は時間ドメインの弾性波探査記録を解析して作成した時間構造図を、深度変換することによって作成した。SB I 層準では断層のすぐ東側で同層準が欠如している。この層準では断層周辺で構造的な高まりを構成している。より上位の SB III 層準、萌別層砂岩層上限層準、萌別層泥岩層上限層準ではこの断層は弾性波探査記録上認識されておらず、地質構造自体が平坦化される傾向が認められる。

図 5.1-9 に SB I～SB II、MFS II～Intra 萌別層、SB III～萌別層泥岩層基底、萌別層泥岩層間の等層厚線図を示す。SB I～Intra 萌別層に至る層準では、断層の東側で層厚を減じ、それらの層が欠如していると考えられる。図 5.1-4～図 5.1-6 の断面図の解析から、SB I に SB II、MFS II が収斂しているため、SB II、MFS II が形成された時期にはすでに構造的な高所となっており、欠如域は削剥されたのではなく、堆積しなかったものと考えられる。SB III～萌別層泥岩層基底の層準は、萌別層砂岩層上部に該当し、現状で CO₂ が圧入されている層準であると考えている（第 3 章等参照）。エリア内で概ね 20 m 程度の層厚を有し、エリアの東部で若干厚くなる傾向が認められる。対象エリアの北東側では鵜川層基底の削剥により欠如する。萌別層泥岩層準は南西ほど層厚を増す傾向が認められる。萌別層砂岩層上部と同様に、対象エリアの北東側では鵜川層基底の削剥により欠如する。

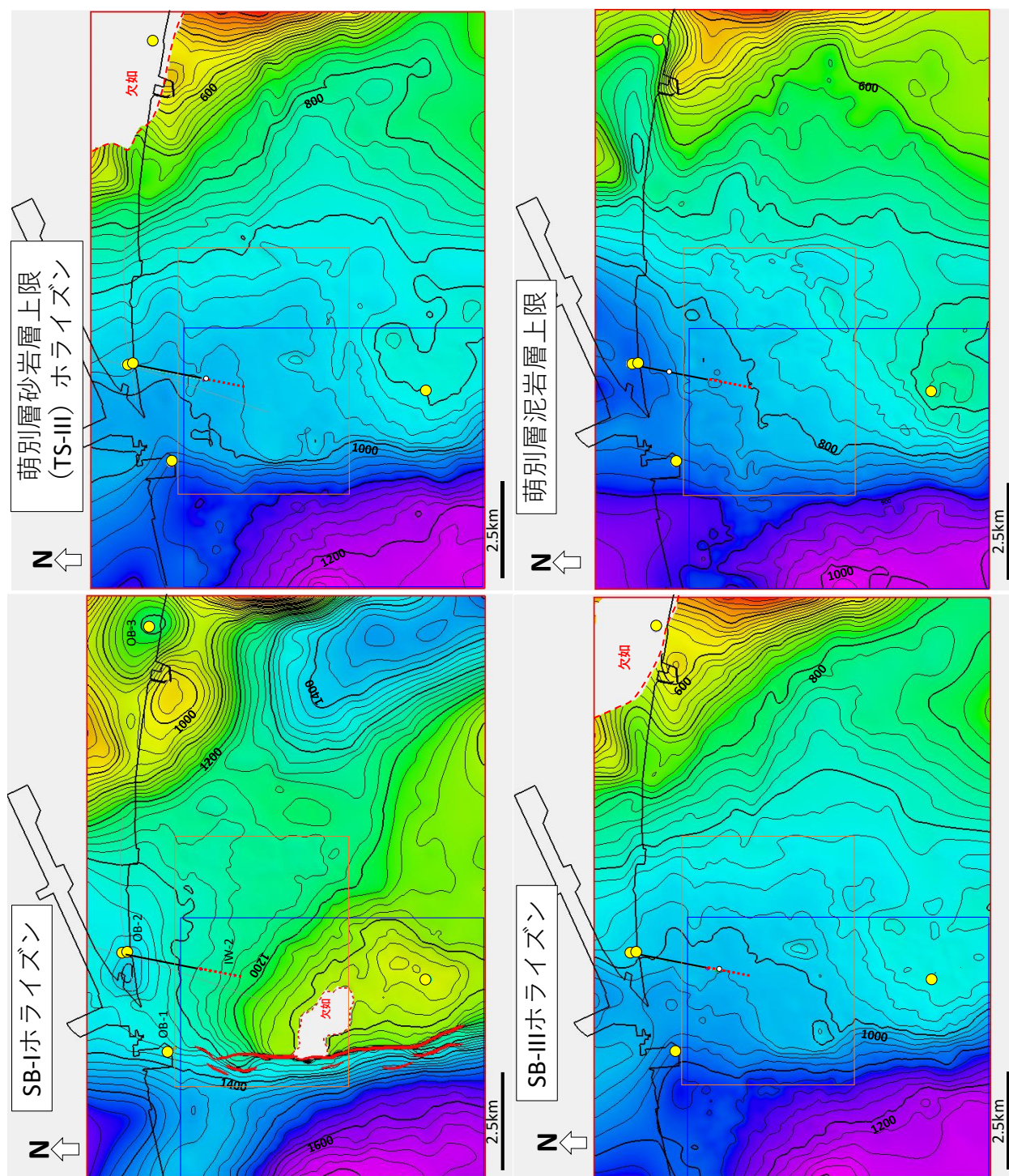


図 5.1-8 深度構造図（SB I、SBⅢ、萌物層砂岩層上限、萌別層泥岩層上限）

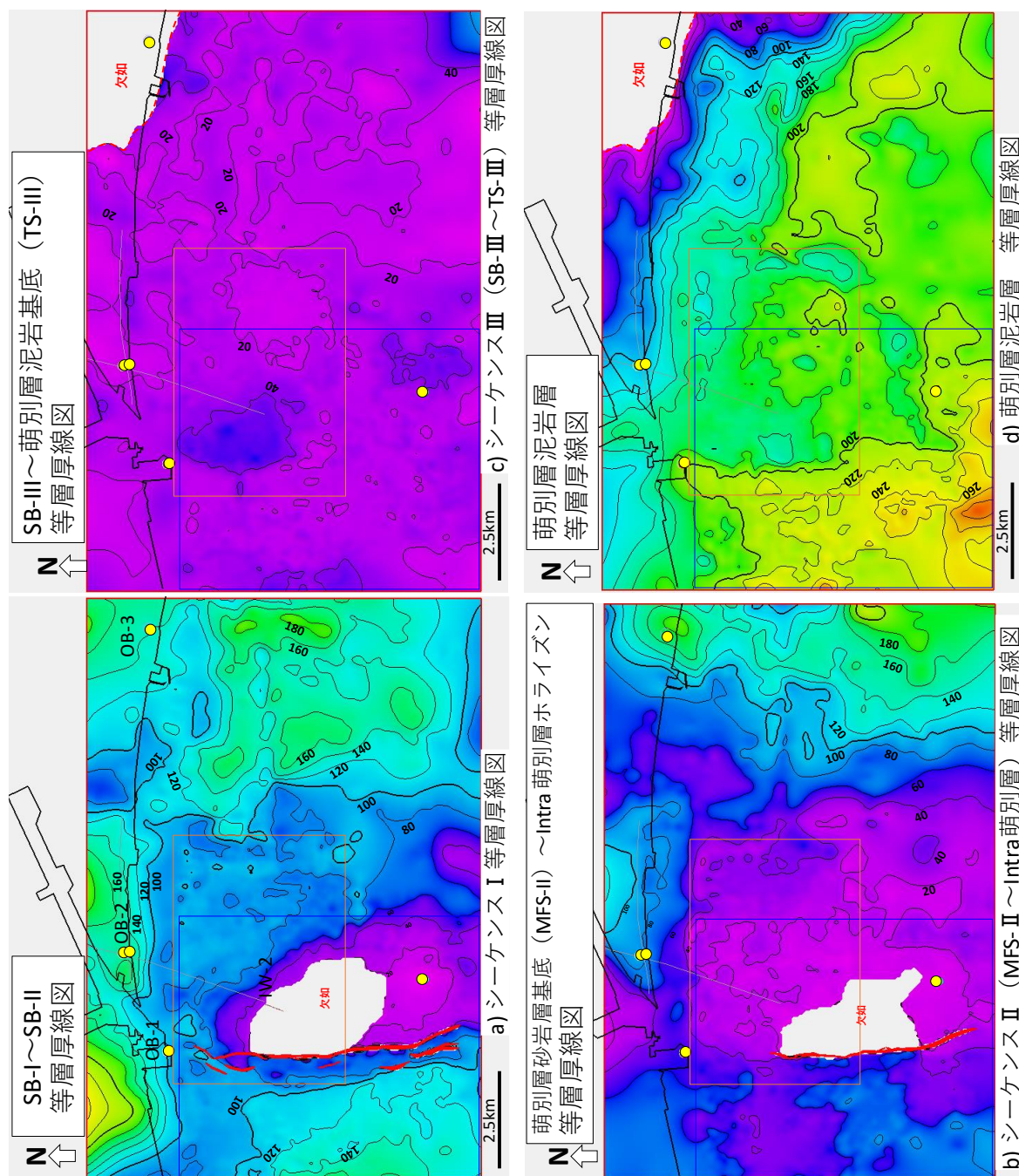
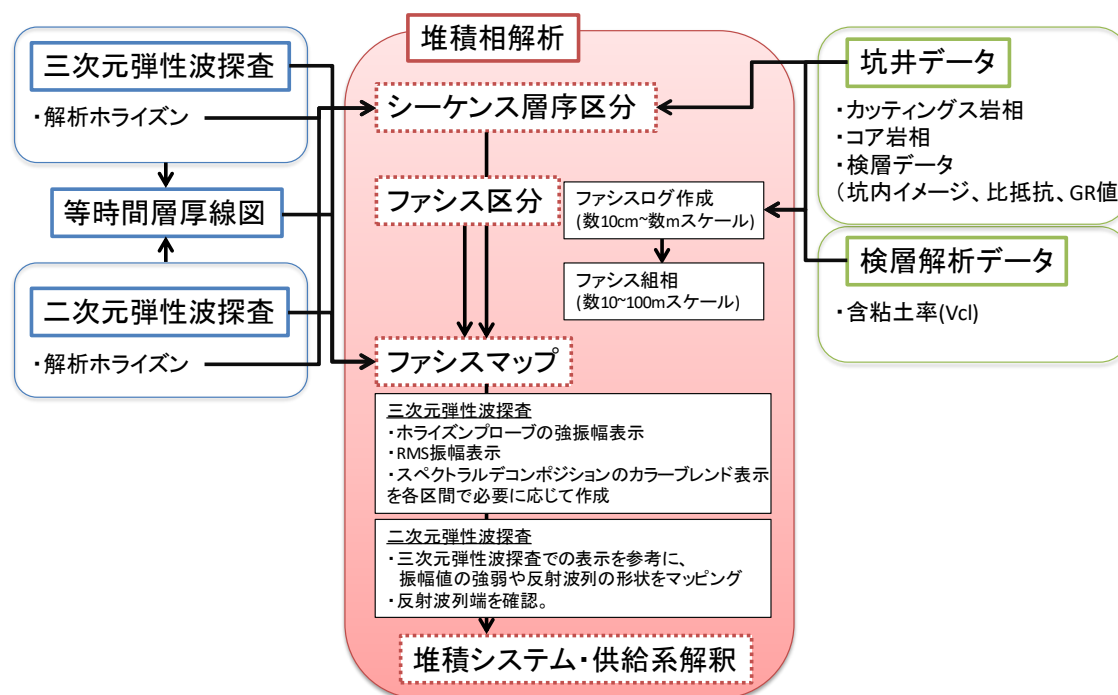


図 5.1-9 等層厚線図（SB I ~SB II、MFS II ~Intra 萌別層、
SB III ~萌別層泥岩層基底（TS-III）、萌別層泥岩層）

(3) 堆積相解析

萌別層（＋荷葉層）砂岩層～萌別層砂岩層の分布を推定するために、CCS-1、IW-2、OB-2、OB-3 の 4 坑井のデータおよび三次元弾性波探査データ、二次元弾性波探査データを用いて堆積相解析を実施し、堆積システムについて考察を行った。堆積相解析は図 5.1-10 に示す手順により実施した。弾性波探査解析と坑井対比をもとに、シーケンス層序

区分を検討し、各区分において解析を行う枠組みとした。次に坑井のカッティングス・コアのデータや検層データをもとに坑井におけるファシスを区分し、坑内イメージ検層データのある各坑井において数10 cm～数mスケールのファシスログを作成した。ただし、OB-2ではイメージ検層データの品質が悪い箇所があったため、他の検層カーブから人工ニューラルネットワークを用いて作成したファシスログで補完した。OB-3についてもコアやイメージ検層データが取得されていないため、同様に作成されたファシスログとカッティングス記載を参考にして作成した。このファシスの組み合わせをもとに、さらに数10～100 mスケールのファシス組相を区分し、各ファシス組相に対する堆積環境の推定を行った。また、三次元弾性波探査データから振幅値等を表示するマップを作成し、この結果を参考に三次元弾性波探査データの範囲外においても各区分の等時間層厚線図と二次元弾性波探査データの振幅値の強弱や反射波列の形状にもとづいてファシス組相の分布を推定した。最後に、これらの結果から堆積システム（堆積環境）および堆積物の供給系を解釈した。



注) ファシス区分は堆積相区分に相当する。主な解析材料が検層データであり、直接地層を解析したものでないため、「ファシス区分」とした。ファシス組相も堆積組相に相当するが、同様の理由により「ファシス組相」とした。

図 5.1-10 堆積相解析作業ののワークフロー

① シーケンス層序区分

CCS-1 および IW-2 を基準として構成したシーケンス層序区分を踏襲しつつ、三次元弾性波探査記録の特徴から若干の修正を加えた。

シーケンス層序学的検討により、萌別層（+荷菜層）～萌別層は3つの堆積シーケンス（下位からシーケンスⅠ、シーケンスⅡ、シーケンスⅢ）に区分され、基底面がシーケンス境界（SB-I、SB-Ⅱ、SB-Ⅲ）と定義できる（表 5.1-1）。SB-Ⅱ～SB-Ⅲ間のシーケンスⅡ内には、最大海氾濫面である MFS-Ⅱが、シーケンスⅢ内には海進面である TS-Ⅲが定義でき、それぞれ萌別層砂岩層基底、萌別層泥岩層基底に相当する。

表 5.1-1 シーケンス層序区分

シーケンス層序区分	同時間堆積体	ゾーン名	相当する層準名	ホライズン	ホライズン略称
				鵠川層基底	MU_Base
Sequence III	TST	TST III	萌別層泥岩層	萌別層泥岩層基底	MO_SH_Base_TS_III
	LST	LST III	萌別層砂岩層上部	シーケンス境界SB III	SB_III
Sequence II	HST	HST II	萌別層砂岩層下部	萌別層砂岩層基底	MO_Base-MFS_II
	LST-TST	LST-TST II	萌別層（+荷菜層）互層	シーケンス境界 SB II	SB_II
Sequence I		Sq I	萌別層（+荷菜層）砂岩層	シーケンス境界SB I	SB_I

注）Sq I には LST I、TST I、HST I が含まれると推定している。

a. シーケンスⅠ（萌別層（+荷菜層）砂岩層）

IW-2 の深度 3,443.0 mMD から掘り止め深度までの区間に確認された砂質堆積物をシーケンスⅠの高海水準期堆積体（HSTⅠ）と認定した。この層準は CCS-1 の深度 1,352.93 mMD を基底とする厚い塊状砂岩層に対比できる。三次元弾性波探査データの解析から SB-I は IW-2 の掘り止め深度より下位の、一連の連続的で平行な反射面から成るサクセッションの上面で、ベースラップ（オンラップもしくはダウンラップ）が認められる。この SB-I ホライズンは CCS-1 では、近傍の二次元弾性波探査断面からおおよそ深度 1,400 mMD 付近に投影される。苫小牧 CCS-1 のカッティングスの岩相変化とガンマ線検層カーブの変動パターンは、深度 1,410.0 mMD をベースとして上方へ比較的砂質な区間が続いて上方粗粒化し、その上位 1,302.5 mMD に定義されている SB-Ⅱまでの間に上方細粒化と上方粗粒化のパターンが認められることから、深度 1,410.0 mMD から 1,302.5 mMD の区間を、低海水準期堆積体（LSTⅠ）・海進期堆積体（TSTⅠ）・

高海水準期堆積体（HST I）を含むシーケンスⅠ区間と認定した（図 5.1-12）。IW-1 と OB-3 についても同様に、解析ホライズンが通る深度をもとに坑井のカッティングスの岩相変化とガンマ線検層、自然電位検層のカーブの変動パターンからシーケンスⅠの下限と上限を定義した。IW-1 と OB-3 においては、上方粗粒化や粗粒化も細粒化も示さずに上方に累重する（以下、「上方累重」と称する。）のパターンはみられないが、上方細粒化とその上位の上方粗粒化パターンを示す層準の層厚が厚くなっていることから、低海水準期堆積体（LST I）は非常に薄く、海進期堆積体（TST I）と高海水準期堆積体（HST I）が厚く発達していると解釈した。

b. シーケンスⅡ LST-TST（萌別層（+荷葉層）互層）

この区間の上限は、IW-2 と CCS-1 のカッティングス柱状図およびガンマ線検層カーブのパターンから、上方細粒化サクセッションの上限となる最大海氾濫面 MFS-Ⅱで設定した。その他の坑井においても、解析ホライズンをもとに、上方細粒化サクセッション上部の最も細粒化していると推定できる深度を MFS-Ⅱと認定した（図 5.1-11）。IW-2 および CCS-1 では、SB-Ⅱと MFS-Ⅱに挟まれるこの区間を、本年度以前には海進期堆積体（TST Ⅱ）としていたが、それぞれの坑井において、上方細粒化する区間の下位に上方累重パターンが認められるため、これをシーケンスⅡの低海水準期堆積体（LST Ⅱ）と認定し、SB-Ⅱと MFS-Ⅱで挟まれる区間をシーケンスⅡ LST-TST とした。

c. シーケンスⅡ HST（萌別層砂岩層下部）

この区間の上限である SB-Ⅲは、IW-2 と CCS-1 において砂質シルト岩と砂岩の互層から、厚い砂岩・礫岩層へと明瞭な岩相変化を示す境界に定義していた。本年度の解析では、三次元弾性波探査データ上にて従来の SB-Ⅲホライズンよりやや上位の負の反射面がオンラップサーフェスとなっていることが明らかとなったため、この反射面をシーケンス境界 SB-Ⅲと考えた。IW-2 と CCS-1 においては、SB-Ⅲは砂岩がちな砂岩・礫岩の互層から、より礫岩の多い互層となる境界付近にあたっており、ガンマ線検層カーブにおいても上下の上方粗粒化あるいは上方累重の境界を示す区間となっている（図 5.1-11）。その他の坑井においても同様に、ホライズン追跡をもとに SB-ⅢおよびシーケンスⅡ HST 区間の認定を行った。なお、OB-3 ではこの区間の上部は鵠川層により削剥される。

d. シーケンスⅢ LST（萌別層砂岩層上部）

SB-Ⅲ上には厚い砂岩・礫岩層が発達し、その上位はシルト岩等の細粒な堆積物が主体となる。IW-2 および CCS-1 では、この厚い砂岩・礫岩層の上限が海進期堆積体の基底となる海進面 TS-Ⅲとなる。同様に、CCS-2、IW-1、OB-2 においてもカッティングス柱状図とガンマ線検層カーブのパターンから、粗粒な堆積物から細粒な堆積物に変化し上方細粒化サクセッションの基底となる境界を TS-Ⅲとした（図 5.1-11）。OB-3 においては、鵠川層の削剥によりこの区間は保存されていない。

e. シーケンスⅢ TST（萌別層泥岩層）

IW-2 および CCS-1 では、TS-Ⅲから上位の区間は鵠川層基底まで上方に細粒化しており、海進期堆積体（TST Ⅲ）と解釈した。この区間はシルト岩が主体となっており萌別層泥岩層に相当する。一方、IW-1、OB-2 では、TS-Ⅲから鵠川層基底までの区間において、カッティングス柱状図とガンマ線検層カーブの両者で一連の上方細粒化とその上位の上方粗粒化が観察される（図 5.1-11）。このことから、IW-1 と OB-2 付近では TS-Ⅲから鵠川層基底までの区間（萌別層泥岩層相当層）は、シーケンス Ⅲの海進期堆積体（TST Ⅲ）に加えて高海水準期堆積体（HST Ⅲ）も発達している可能性がある。なお OB-3 では、鵠川層基底の削剥によってこの区間は保存されていない。

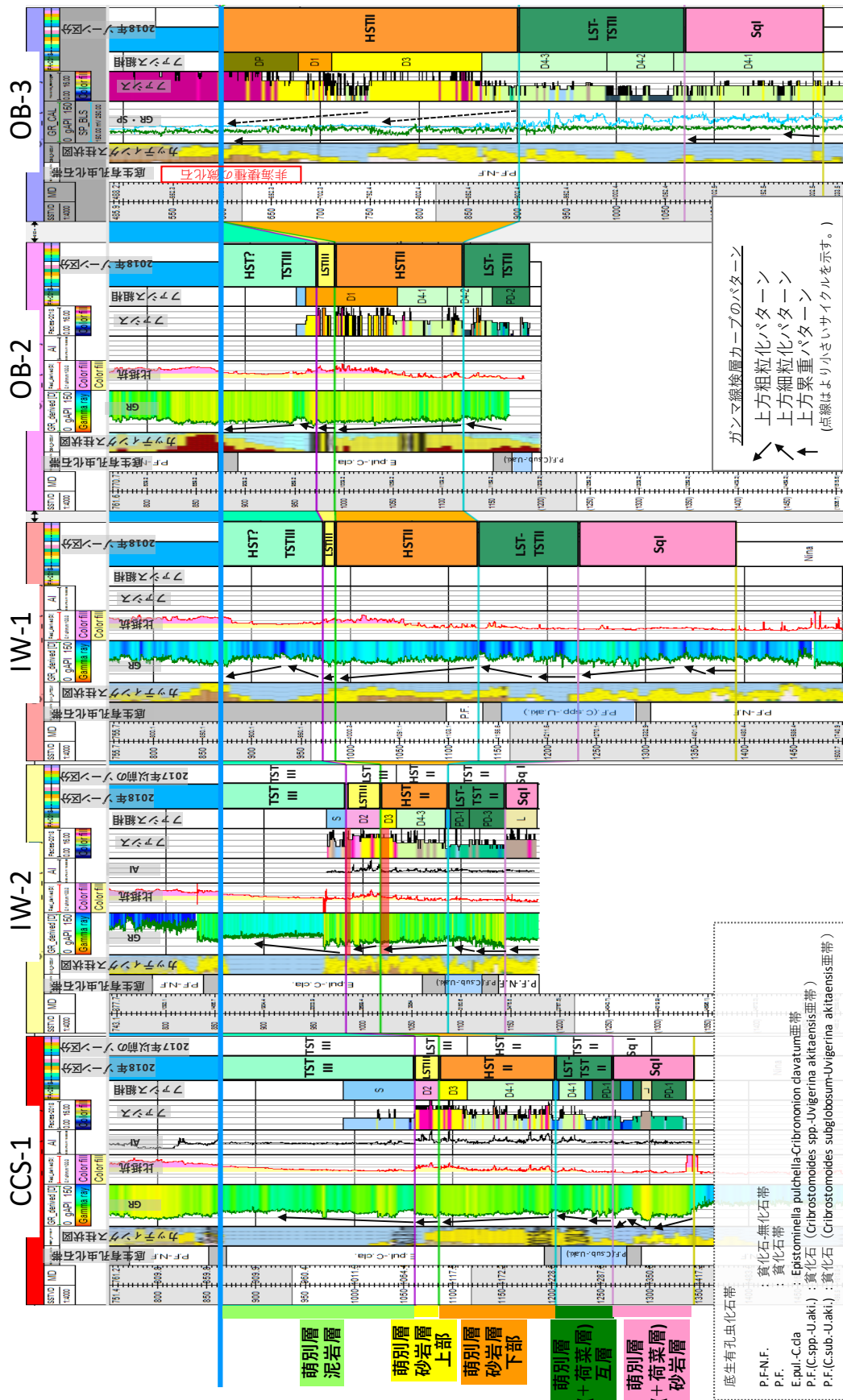
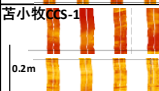
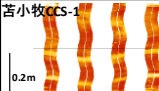
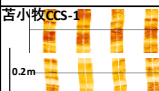
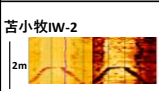
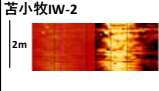
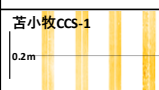


図 5.1-11 シーケンス層序区分にもとづく坑井対比の概要

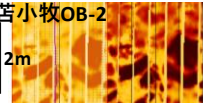
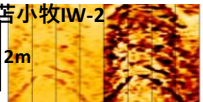
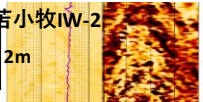
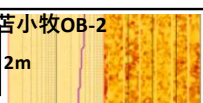
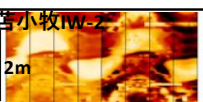
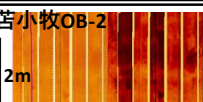
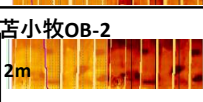
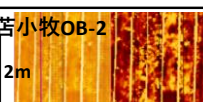
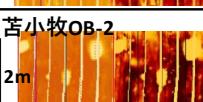
② 坑井におけるファシス区分とファシス組相区をもとにした、堆積環境の推定

萌別層区間において、比抵抗イメージ検層データを有する3坑井（CCS-1、IW-2、OB-2）にておいファシス区分を実施した。堆積物を構成する基質について、各坑井のカッティングス柱状図、比抵抗値および検層解析により求めたVclay値を参考に、礫、砂岩、砂質シルト岩、シルト岩を区分し、比抵抗値の高い礫岩、砂岩が明色に、比抵抗値の低いシルト岩が最も暗色になるように各坑井の比抵抗イメージの色調を調整した。その上で、基質の明暗と、礫等イメージ上で認識可能な含有物の明暗をもとに、比抵抗イメージ検層で含有物を顕著に認識できない砂岩およびシルト岩とその互層について7つのファシスに区分し（図5.1-12）、礫等の含有物を含む岩相については9つのファシスに区分した（図5.1-13）。

比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	検層データにおける特徴	ファシス区分	推定される岩相
暗色。 (生痕や炭質物が明暗の点で見えることもある。)	苫小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色)。 比抵抗値<2, Vclay値>0.25, GR値 55~70	Siltst	シルト岩
やや暗色。 (コントラストの弱い互層状が混沌とした様相を示す。)	苫小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い傾向。 - 比抵抗値がやや低い(イメージでやや暗色)。 比抵抗値 1~2, Vclay値 0.2~0.25, GR値 35~50	sdly-Siltst	砂質シルト岩
暗色とやや暗色(ときに明色)の互層を示す。	苫小牧CCS-1 	- GR, Vclay値高い傾向で振幅小さく変動。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色), 部分的に高い(イメージで明色)。 比抵抗値 1~3, Vclay値 0.2~0.4, GR値 30~60	silty-alt	砂岩-砂質シルト岩 -シルト岩 互層
やや暗色と明色の互層を示す。	苫小牧CCS-1 	- GR, Vclay値低い傾向で振幅小さく変動。 - 比抵抗がやや高い(イメージでやや明色)。 比抵抗値 2~4, Vclay値<0.3, GR値 45~60	sdly-alt	(礫岩-) 砂岩-砂質シルト岩 互層
比抵抗イメージではSstと同じくらい明色に見える。	苫小牧IW-2 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値は高い(イメージで明色)。 比抵抗値>3, Vclay値>0.25	Siltst?	含細礫シルト岩?
比抵抗イメージではSiltstやsdly-Siltstと同じく暗色に見える。 Siltstにはほとんど見られない葉理が見られることがある。	苫小牧IW-2 	- GR値, Vclay値が低い。 - 比抵抗値はやや低い(イメージでやや暗色)。 比抵抗値<2, Vclay値<0.2	Sst2	砂岩
明色。	苫小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が低い。 - 比抵抗値が高い(明色)。 比抵抗値 2~4, Vclay値<0.2, GR値<45	Sst	砂岩 (一部細礫岩)

注) ファシス区分の基準となる、比抵抗イメージの特徴および検層データにおける特徴を示す。比抵抗値およびVclay値を基準に区分した。GR値は参考値とした。

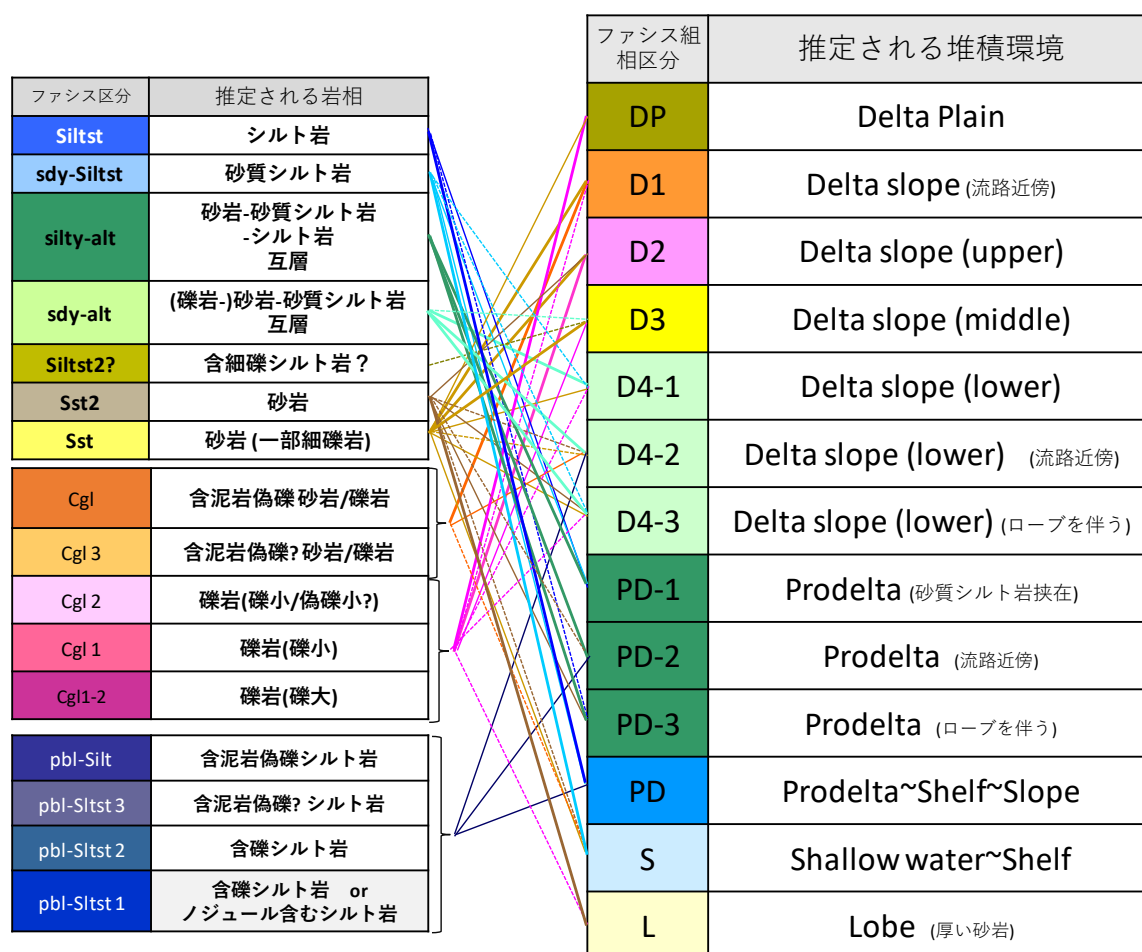
図 5.1-12 ファシス区分の例（泥質～砂質岩）

比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	ファシス区分	推定される岩相
含暗色角礫 背景は 明色	苫小牧OB-2 2m 	Cgl	含泥岩偽礫 砂岩/礫岩
含暗色円礫 背景は 明色	苫小牧IW-2 2m 	Cgl 3	含泥岩偽礫? 砂岩/礫岩 (礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明・暗色円礫(小) 背景は 明色	苫小牧IW-2 2m 	Cgl 2	礫岩(礫小/偽礫? 径数cm~数10cm) (暗色の礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明色円礫 背景は 明色	苫小牧OB-2 2m 	Cgl 1	礫岩 (礫小 径数cm~数10cm)
含明色円礫(大) 背景は 明色	苫小牧IW-2 2m 	Cgl1-2	礫岩(礫大 径数10cm~1m)
含暗色角礫 背景は 暗色	苫小牧OB-2 2m 	pbl-Silt	含泥岩偽礫シルト岩 (礫は泥岩偽礫か 一部は炭質物の可能性も有?)
含暗色円礫 背景は 暗色	苫小牧OB-2 2m 	pbl-Sltst 3	含泥岩偽礫? シルト岩 (礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明・暗色円礫(小) 背景は 暗色	苫小牧OB-2 2m 	pbl-Sltst 2	含礫シルト岩 (暗色の礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明色円礫 背景は 暗色	苫小牧OB-2 2m 	pbl-Sltst 1	含礫シルト岩 or ノジュール含むシルト岩

注) ファシス区分の基準となる、比抵抗イメージでみられる特徴を示す。比抵抗値や Vclay 値は、含まれる礫や偽礫の大きさによって大いに変化するため、ファシスの区分の基準には用いていない。

図 5.1-13 ファシス区分の例（粗粒含有物を含む岩相）

ファシス区分の基準にもとづいて、ファシスログを作成し、ファシスログにおけるファシスの組み合わせから 13 のファシス組相を区分した。本検討において推定した堆積システムとファシス組相、ファシスの組み合わせを図 5.1-14 に示す。また、各坑井において推定したファシス組相とそのファシス組相を形成した堆積システムの推定結果を図 5.1-15～図 5.1-17 に示す。また、図 5.1-18 に対象地域で推定した堆積システムの古環境の概念図を模式的に示す。



注) ファシスとファシス組相間の線は、各ファシス組相を構成するファシスの出現頻度を示す（太い実線＞実線＞点線）。

図 5.1-14 ファシス区分とファシス組相、推定した堆積環境の関係

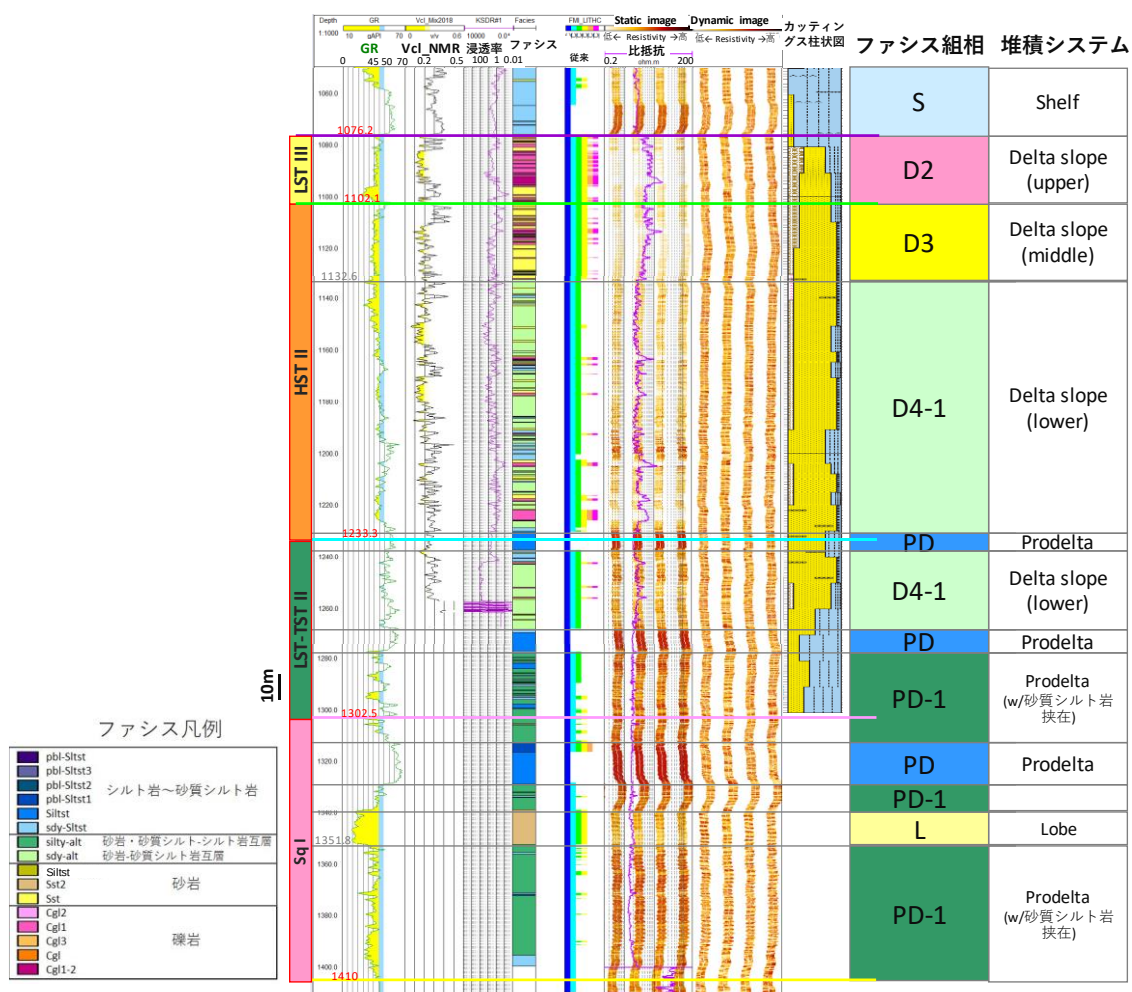


図 5.1-15 坑井柱状図とファシス組相、堆積システム（CCS-1）

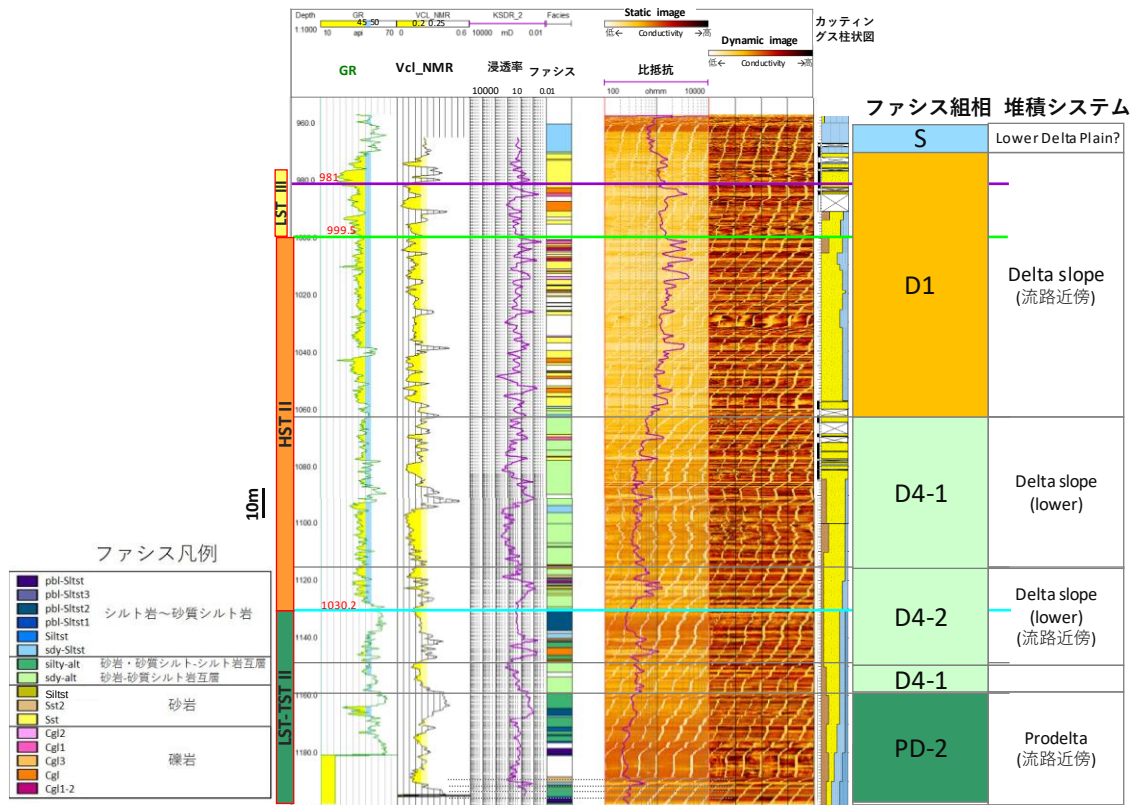


図 5.1-16 坑井柱状図とファシス組相、堆積システム（OB-2）

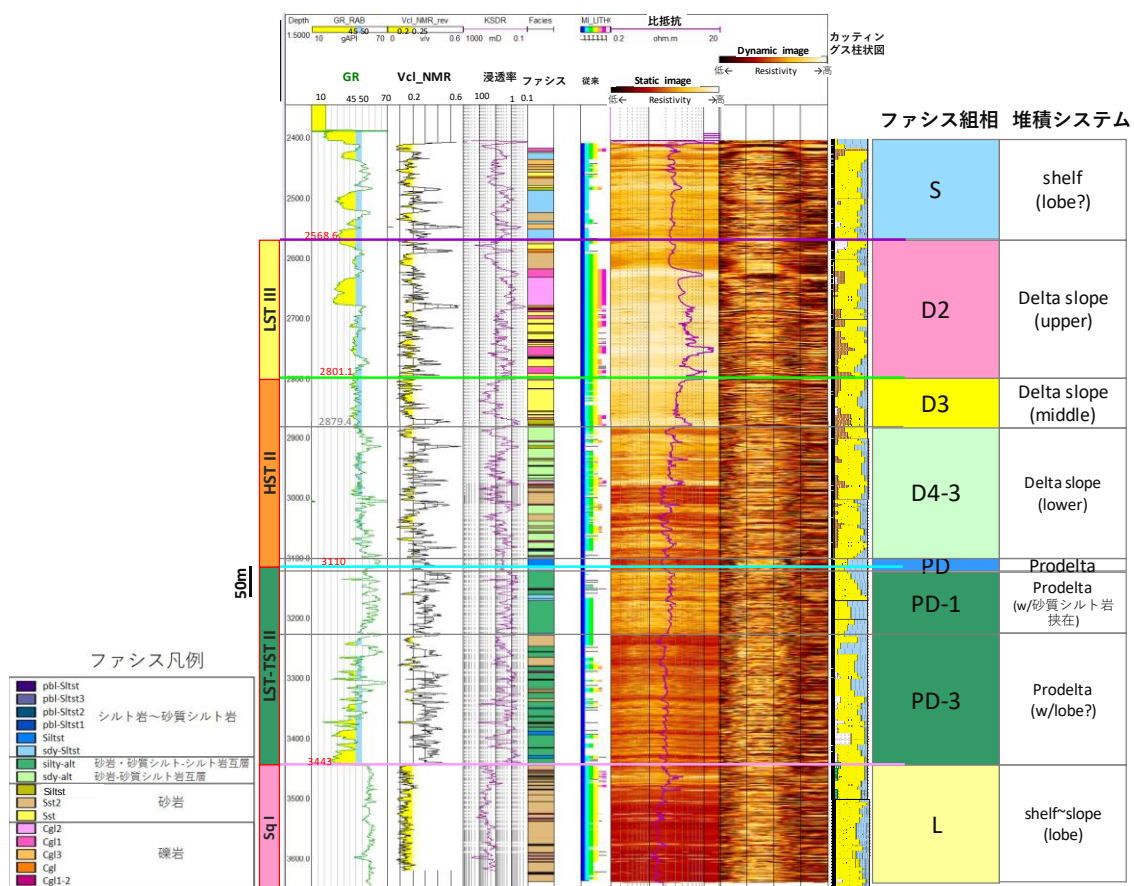
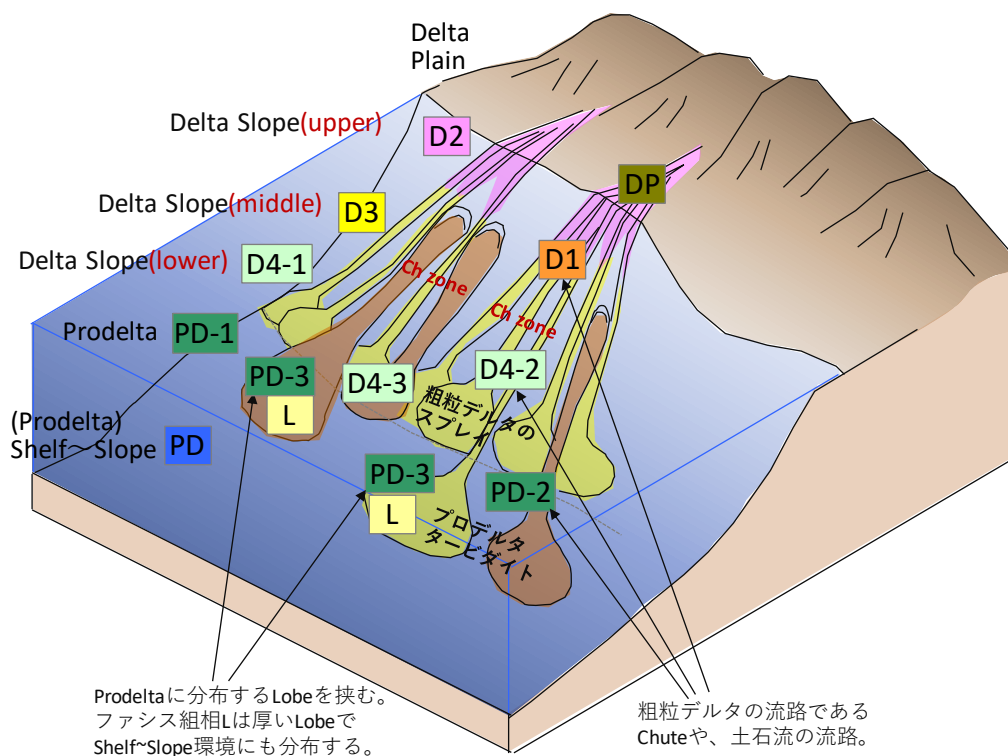


図 5.1-17 坑井柱状図とファシス組相、堆積システム（IW-2）



注) Prior and Bornhold (1989)¹⁾、Prior and Bornhold (1990)²⁾、Nemec (1990)³⁾、Richards and Bowman (1998)⁴⁾ をもとに作成

図 5.1-18 堆積システムの模式図

a. ファシス組相 DP

OB-3 のみに存在するファシス組相で、坑井掘削時に採取したカッティングス試料の記載より、礫岩・砂岩を主体とする岩相と考えられる（図 5.1-11）。範囲内の坑井の萌別層（+ 荷葉層）～萌別層で唯一非海棲種微化石の産出が確認され、陸上の堆積物であることが示唆される。大きな礫岩を含む 70～80m の厚い砂礫層であることと陸上の堆積物であることから、ファンデルタの陸上部やデルタプレインの堆積環境を示すものと解釈した。

b. ファシス組相 D1

OB-2 の萌別層砂岩層区間（HSTⅡ、LSTⅢ）で観察されるファシス組相で、OB-3 ではファシス組相 DP の下位に推定される。主に、泥岩偽礫を含む砂岩/礫岩であるファシス Cgl/ファシス Cgl 3 と、砂岩からなるファシス Sst の互層から構成される。OB-2 では海成堆積物であり、泥岩の偽礫を含むことから削剥を伴う高エネルギー環境下での堆積が示唆され、堆積物の供給源あるいは流路に近い堆積環境を推定した。一連の泥岩偽礫を含むファシス組相の中で、最も粗粒な砂岩・礫岩を含む互層であることから、粗粒

デルタの堆積システムにおける、スロープ中～上部の流路近傍の堆積環境を示すファシス組相であると解釈した。

c. ファシス組相 D2

IW-2 や CCS-1 の萌別層砂岩層上部区間（LSTⅢ）に分布する。主に、大小の礫を伴う礫岩を示すファシス Cgl 1/Cgl 1-2/Cgl 2 と砂岩を示すファシス Sst の互層からなる。ファシス組相 D1 でみられたような泥岩偽礫を示すファシスはほとんど含まない。坑井のコアや比抵抗イメージ検層データにおいては、礫の正級化構造と時に基底部に逆級化が観察されることもあり、一部は高密度あるいは低密度のタービダイトによって形成された可能性が示唆される⁵⁾。主に粗粒な砂岩・礫岩のファシスから成るファシス組相であることから、粗粒デルタの堆積システムにおけるスロープ上部の環境を示すファシス組相であると解釈した。

なお、本検討で堆積システムの推定に際して用いる上部・中部・下部といった分類は、堆積物の粒度から相対的な供給源からの距離を推定し便宜的に用いたもので学術的な用語ではない。

d. ファシス組相 D3

IW-2 や CCS-1、OB-3 の萌別層砂岩層下部区間（HSTⅡ）の上部に分布する。砂岩を示すファシス Sst を主体とし、礫岩を示すファシス Cgl 1/Cgl 1-2/Cgl 2 を挟在する。坑井のコアや比抵抗イメージ検層では、礫から砂岩への正級化、時に逆級化が認められ、斜交葉理、平行葉理の堆積構造が認められることが多いことから、タービダイトによって形成されたことが考えられる⁵⁾。ファシス組相 D2 よりも礫岩が減り砂岩を主体とする低エネルギー環境となることから、粗粒デルタのスロープ中部の環境を示すファシス組相であると解釈した。

e. ファシス組相 D4-1

CCS-1、OB-2 の萌別層砂岩層下部区間（HSTⅡ）の下部等に存在する。砂質シルト岩と砂岩（一部礫岩）の互層を示すファシス sdy-alt を主体とし、礫岩を示すファシス、砂岩を示すファシス、砂質シルト岩を示すファシスを部分的に挟在する。坑井のコアや坑内イメージログでは正級化、斜交葉理、平行葉理の堆積構造が認められ、一部は低密度のタービダイトによって形成されたと考えられる。ファシス組相 D3 よりも細粒で低エネルギー環境での堆積を示唆することから、粗粒デルタのスロープ下部を示すファシス組相であると解釈した。

f. ファシス組相 D4-2

OB-2 や OB-3 の萌別層砂岩層下部区間（HST II）の下部や萌別層（＋荷菜層）互層（LST-TST II）での存在を推定した。ファシス組相 D4-1 と同様に砂質シルト岩と砂岩（一部礫岩）の互層を示すファシス **sdylt** を主体とするが、これに泥岩偽礫を含むと考えられるファシス **Cgl/Cgl 3** や含礫シルト岩を示すと考えられるファシス **pbl-Sltst 2** 等を挟在する。堆積物の粒度の分別がなく泥岩に偽礫や礫を含む岩相は、一般に土石流によって形成されたと考えられている⁵⁾。ファシス組相 D4-1 に比べて、スロープ下部の堆積環境の中でも、通常のタービダイトや土石流の流路に近い環境を示すファシス組相であると解釈した。

g. ファシス組相 D4-3

IW-2 および OB-3 の萌別層砂岩層下部区間（HST II）の下部や萌別層（＋荷菜層）互層（LST-TST II）に存在する。ファシス組相 D4-1 と同様に砂質シルト岩と砂岩（一部礫岩）の互層を示すファシス **sdylt** を主体とし、砂岩を示すファシス **Sst 2** を挟在する。ファシス **Sst 2** は比抵抗イメージ検層において、萌別層砂岩層上部区間で多くみられた **Vclay** 値が低く比抵抗値の高い砂岩を示すファシス **Sst** とは異なり、**Vclay** 値は低いが比抵抗値も低いファシスとなっている。坑井で採取したコアに、ファシス **Sst2** は含まれないため実際の岩相は不明であるが、ファシス **Sst2** は IW-2 の掘り止め深度付近においてカッティングスや核磁気共鳴検層検層（以下、「NMR 検層」と称する。）から砂岩層であると推測され低比抵抗値（高ガンマ線強度）の岩相であると推定される。IW-2 の掘り止め付近のまとまった砂岩層はファシス組相 **L** として後述するが、同様の堆積物がファシス組相 D4-3 に薄く挟在していると考えられる。ファシス組相 D4-1 と同様に粗粒デルタのスロープ下部において、ローブが分布する堆積環境を示すファシス組相であると解釈した。

h. ファシス組相 PD-1

IW-2 や CCS-1 の萌別層（＋荷菜層）互層区間（LST-TST II）および砂岩層区間（Sq I）に存在する。シルト岩と、砂岩もしくは砂質シルト岩が互層すると考えられるファシス **silty-alt** を主体とする。粗粒デルタのシステムの中で最も碎屑物の供給源から離れた（ディスタルな）堆積環境であるプロデルタの堆積環境を示すファシス組相であると解釈した。

i. ファシス組相 PD-2

OB-2の萌別層（＋荷菜層）互層区間（LST-TSTⅡ）に分布する。ファシス組相 PD-1と同様にファシス silty-alt を主体とするが、主に含礫シルト岩を示すと考えられるファシス pbl-Sltst 2 を挟在する。プロデルタの堆積環境の中でも土石流の流路に近い堆積環境を示すファシス組相であると解釈した。

j. ファシス組相 PD-3

IW-2の萌別層（＋荷菜層）互層区間（LST-TSTⅡ）に分布する。ファシス組相 PD-1と同様にファシス silty-alt を主体とするが、砂岩を示すと考えられるファシス Sst 2 を主に挟在する。プロデルタの堆積環境の中でもローブが分布する堆積環境を示すファシス組相であると解釈した。

k. ファシス組相 PD

CCS-1の萌別層（＋荷菜層）互層区間（LST-TSTⅡ）や砂岩層区間（Sq I）に存在する。砂岩や砂質シルト岩の挟みのないシルト岩を示すと考えられるファシス Siltst からのファシス組相である。プロデルタの堆積環境と解釈した PD-1 の上・下位や最大海氾濫面の層準にみられるため、プロデルタからデルタの影響から離れた陸棚～スロープのような堆積環境に移行している時期を示すファシス組相であると解釈した。

l. ファシス組相 S

萌別層泥岩層（TSTⅢ）において認識される。生物擾乱を含む砂質シルト岩を主体とし、砂岩と互層する区間も認識される。粗粒デルタシステムから離れた浅海～陸棚の堆積環境を示すファシス組相であると解釈した。

m. ファシス組相 L

IW-2、CCS-1の萌別層（＋荷菜層）砂岩層区間（Sq I）に分布する。低比抵抗を示すファシス Sst 2 が厚く累重する。時に比抵抗の高い角礫状の含有物をベースに含むことがあり、上方に平行葉理、斜交葉理を伴うことからタービダイト成の砂岩が厚くスタックしたものと推測した。プロデルタ～陸棚～斜面に堆積したローブを示すファシス組相であると解釈した。

③ 弾性波探査データを用いたマッピング

シーケンス層序区分をもとにした層序区間に対し、三次元弾性波探査データを使用し、ホライズンプローブおよび RMS 振幅を用いたマッピングを実施し、堆積体の分布

やその形態を把握し、堆積システムと堆積物の供給系を解釈した。

ホライズンプローブとは、三次元弾性波探査データにおける二つのホライズン区間の振幅値の大きさによりカラーリングし三次元表示する手法で、堆積体の分布・形態の把握に用いた。既存坑井の音波検層データから、正の振幅値がより高い方が礫岩の存在を、インピーダンスが低い面を示す負の振幅値が低い方が砂岩の存在を示すと推定した。色調・不透明度を調整し、正の振幅値が大きいエリア（礫岩が発達）を紫色系、負の振幅値が大きいエリア（砂岩が発達）を赤色系で示し、正と負の低い振幅値（シルト岩が発達）を透明となるように表示して使用した。

RMS 振幅とは、三次元弾性波探査データにおける二つのホライズン区間の振幅値を二乗平均平方根（Root Mean Square : RMS）で表示したもので、正負を問わずに振幅の強弱を表示することができる。ホライズンプローブの表示と同様に、振幅値の分布の形態から、堆積体の分布を推定することに使用した。本解析では振幅値の大きさにより暖色系→寒色系で表示した。

④ 堆積システムと堆積物の供給系の解釈

①～③で示した堆積相解析から、対象地域の堆積システムと堆積物の供給系を解釈した。

a. 萌別層（+荷葉層）砂岩層（シーケンス I /SB- I ～SB- II）

この層準は対象区間における最下位区間となる。三次元弾性波探査データのホライズンプローブの検討では、下部と上部に二分して解釈した（図 5.1-19a、b）。同図の着色された部分の中部には南北方向に延びる断層が推定されており、その断層の西側に正負の強振幅反射波が広く分布する。その分布域は、本層準の下部よりも上部においてより西側に移行する傾向が認められる。断層の東側には図 5.1-19a、b)で白く着色した範囲周辺で構造的な高まりがあり、この層準の堆積物が分布しない。また、北東部にはやや強い正負の振幅値の反射波が分布する。RMS 振幅でも同様の傾向が認められる（図 5.1-19c）。既存の二次元弾性波探査記録では、西あるいは南へのベースラップが認識され、北東方向から、西～南側への堆積物の供給を示唆する。

坑井のファシス組相は CCS-1（図 5.1-15）においてプロデルタ、OB-3（図 5.1-11）において粗粒デルタのスロープ下部の環境を示し、CCS-1 と IW-2（図 5.1-17）には砂質なファシス組相 L が分布する。

以上より、OB-3 を含む北～東部のエリアは粗粒デルタのスロープ下部であると解釈した。既存の二次元弾性波探査記録では、このエリアに短い強反射もしくは凹状の反射

が認められ、この部分を流路（チャンネル）が発達するゾーンと考え、その周辺部の連続的な強反射が発達する部分を粗粒デルタ末端のスプレイと解釈した。その西側の CCS-1 と IW-2 を含むエリアは、粗粒デルタのプロデルタの堆積環境を示しているものと解釈した。IW-2 の比抵抗イメージ検層でみられた厚いタービダイト成砂岩のようなファシスを含むローブが発達しているものと解釈した。また、断層の西側はプロデルタと推定したエリアよりも構造的に下がっており、また層厚も増す傾向が認められることから（図 5.1-5）、プロデルタよりも沖合で水深が深いスロープの堆積環境であったと解釈した。このエリアには強振幅反射波が広がっていることから、プロデルタを越えて沖合に供給された粗粒堆積物のローブが堆積している可能性もありえる。

振幅反射波が分布し、断層の東の構造的な高まりには本層準が分布しないエリアがあり、断層の西側には正負の強振幅反射波が広く分布する。上述したシーケンスⅠと類似した分布傾向を示す。RMS 振幅でも同様の傾向が認められる（図 5.1-20c）。既存の二次元弾性波探査記録では、南へのベースラップが認識され、北東方向から、南方への堆積物の供給を示唆する。

坑井のファシス組相は IW-2（図 5.1-17）、CCS-1（図 5.1-15）、OB-2（図 5.1-16）では、本層準の下部はプロデルタ、上部はプロデルタおよび粗粒デルタのスロープ下部、OB-3（図 5.1-11）においては上部・下部とも粗粒デルタのスロープ下部の環境をそれぞれ示すと考えられる。

以上より、OB-3 を含む北～東部のエリアは粗粒デルタのスロープ下部であると解釈した。既存の二次元弾性波探査記録では、このエリアに短い強反射もしくは凹状の反射が認められ、この部分を流路（チャンネル）が発達するゾーンと考え、その周辺部の連続的な強反射が発達する部分を粗粒デルタ末端のスプレイと解釈した。その西側の OB-2 を含むエリアは、下部はプロデルタ、上部は粗粒デルタのスロープ下部を示すと解釈した。IW-2 周辺部はプロデルタの環境の中にタービダイトから成るローブあるいは粗粒デルタ末端のスプレイが東に移動しながら堆積したものと解釈した。三次元弾性波探査の範囲外となる更に南東側には既存の二次元弾性波探査記録にも強反射が認識され、タービダイトから成るローブである可能性がある。断層の西側はシーケンスⅠと同様に、東側よりは深い堆積環境であるスロープの堆積環境が推定されるが、強振幅反射波の存在から粗粒堆積物がローブとして堆積している可能性も示唆される。

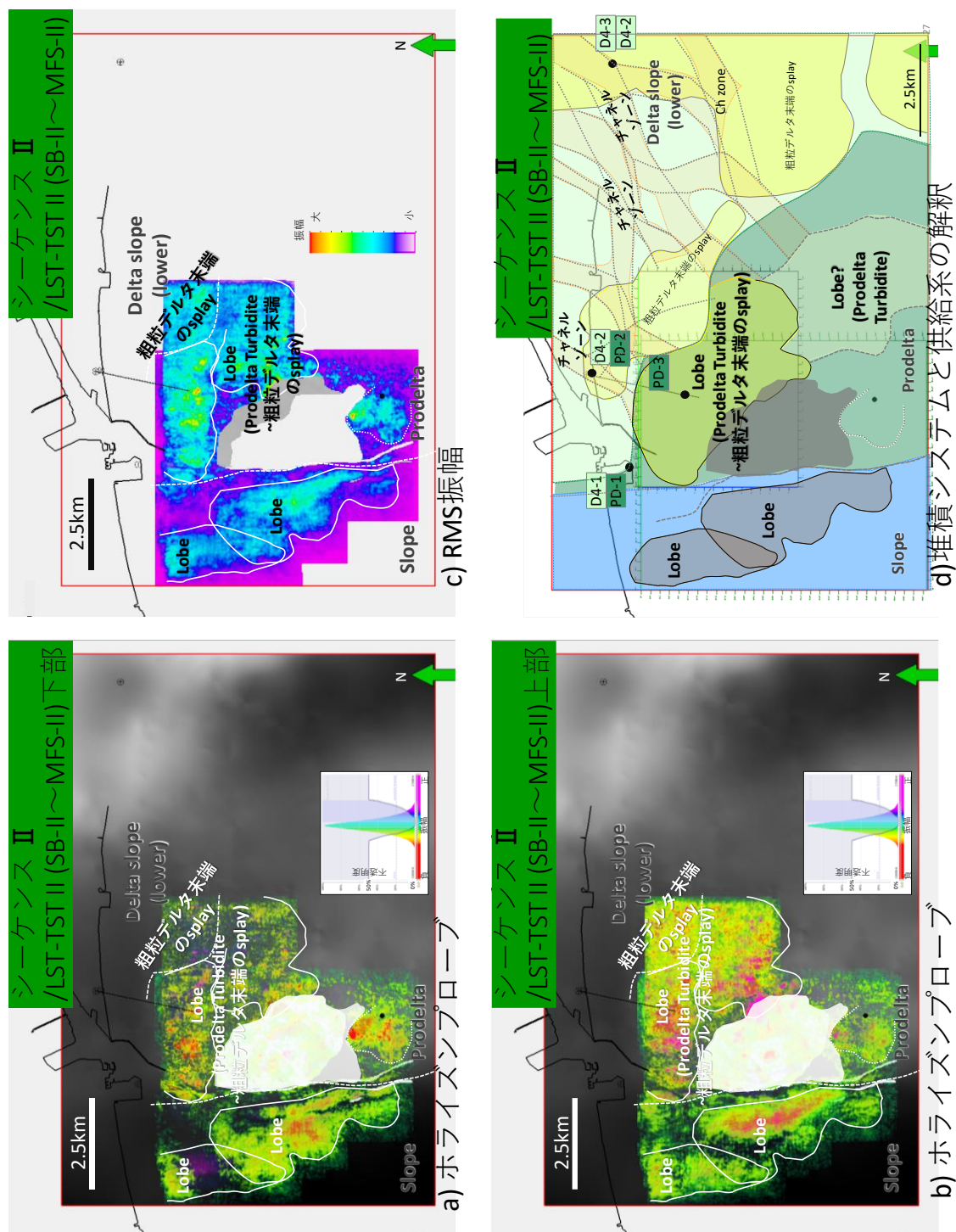


図 5.1-20 萌別層（+荷菜層）互層（LST-TST II）の堆積システムと堆積物供給系の解釈

c. 萌別層砂岩層下部（HST II/MFS-II～SB-III）

三次元弾性波探査データのホライズンプローブの検討では、下部と上部に二分して解釈した（図 5.1-21a）、b）。本層準の下部、上部共に正および負の強振幅反射波が分布

する。その傾向は断層の東側で顕著である。断層東側の構造的高まりには本層準下部の途中層準から上位の層準が分布する。強振幅反射波の分布の傾向は RMS 振幅（図 5.1-21c）でも同様の傾向を示す。

坑井のファシス組相は CCS-1（図 5.1-15）、OB-2（図 5.1-16）、IW-2（図 5.1-17）において下部では粗粒デルタのスロープ下部の堆積環境を、上部では粗粒デルタのスロープ中部の堆積環境であると解釈される。OB-3（図 5.1-11）においては、下部では粗粒デルタのスロープ下～中部、上部では陸上のデルタプレインの堆積環境であると解釈される。

以上より、OB-3 付近は、下部層準では粗粒デルタのスロープ部～上部の堆積環境を、上部層準ではデルタプレインの堆積環境を示す。OB-3 の西～南西で OB-2 や IW-2 の間に位置するエリアは、下部層準で粗粒デルタのスロープの中部、上部層準で粗粒デルタのスロープの上部の堆積環境を示すものと解釈した。OB-2 や IW-2 が位置するエリアは、下部層準では粗粒デルタのスロープ下部、上部層準では粗粒デルタのスロープ中部を示す堆積環境であると解釈した。断層の西側は OB-2 や IW-2 が位置するエリアよりもやや沖合の堆積環境（プロデルタ～粗粒デルタのスロープ下部）にローブあるいは粗粒デルタ末端のスプレイが分布している可能性を解釈した。

5.1-22b))。弾性波探査記録では東へのベースラップが認められ、南側へは局所的な高まりに対しオンラップする。

坑井のファシス組相は CCS-1（図 5.1-15）、IW-2（図 5.1-17）において粗粒デルタのスロープ上部の堆積環境を解釈した。OB-2（図 5.1-16）では粗粒デルタの流路近傍の堆積環境を解釈した。なお、OB-3 では鵠川層による削剥のため本層準は分布しないが、弾性波探査で認められた反射波列の傾向から推定される堆積物の供給方向（北東から南西や南）から、CCS-1、IW-2、OB-2 が示す粗粒デルタのスロープ上部よりも浅い堆積環境が分布していることも考えられる。

以上より、全体的に HSTⅡ よりも浅い堆積環境への変化が読み取れ、東部は粗粒デルタプレインから粗粒デルタのスロープ上部に流れ込む網状河川が分布し、IW-2 付近の層厚が厚めのエリア（図 5.1-9c)) は粗粒デルタのスロープ上部において、粗粒堆積物からなるマウスバーの堆積環境を示すものと解釈した。西部の弱振幅波が発達するエリアはその東部との関連から、デルタスロープの中部～下部の堆積環境であろうと推定した。細粒な堆積物が堆積したエリアで、弱振幅を呈するものと解釈した。

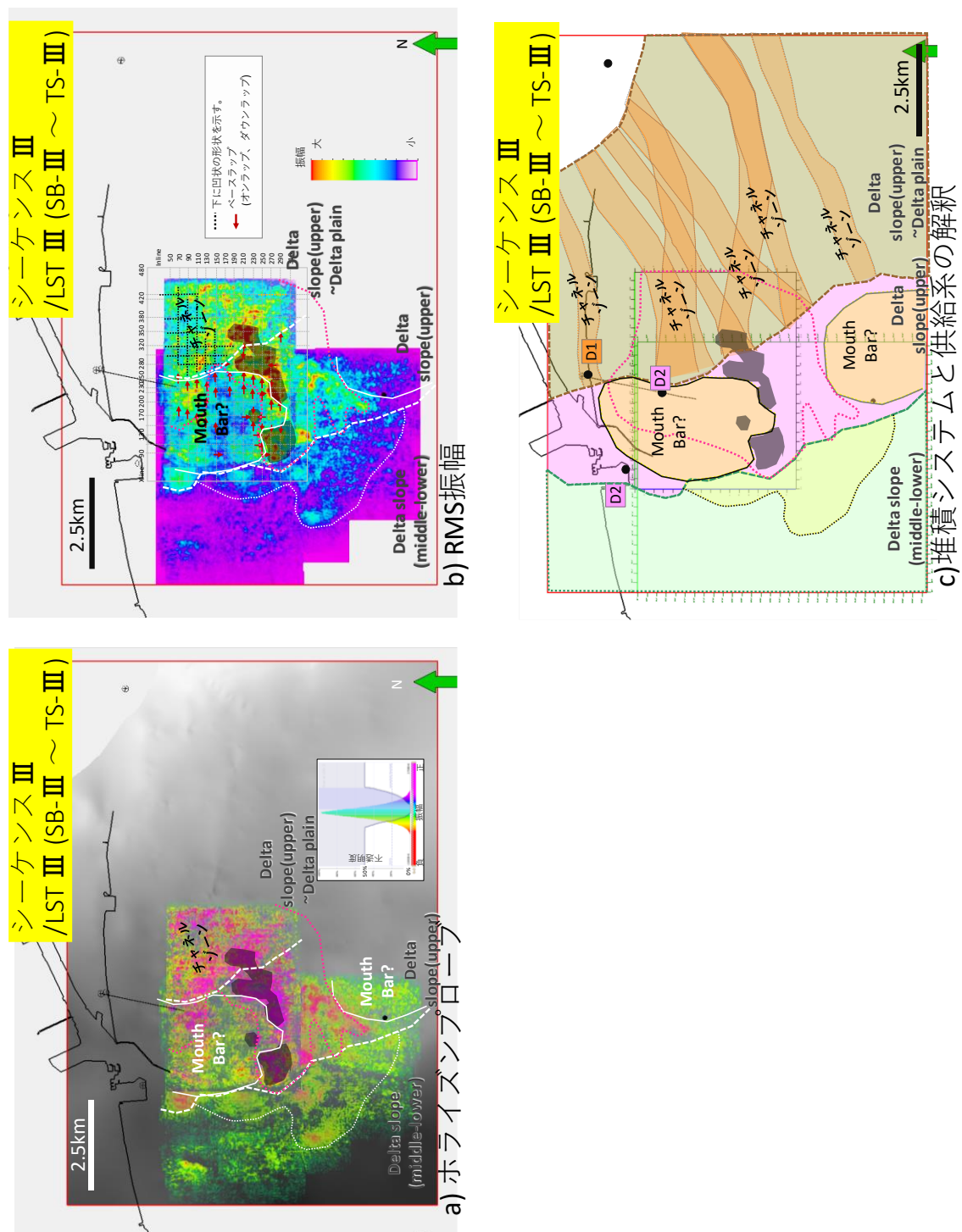


図 5.1-22 萌別層砂岩層上部（LST III）の堆積システムと堆積物供給系の解釈

(4) 萌別層地質モデルの作成

図 5.1-23 に示すワークフローに従って地質モデルを作成した。

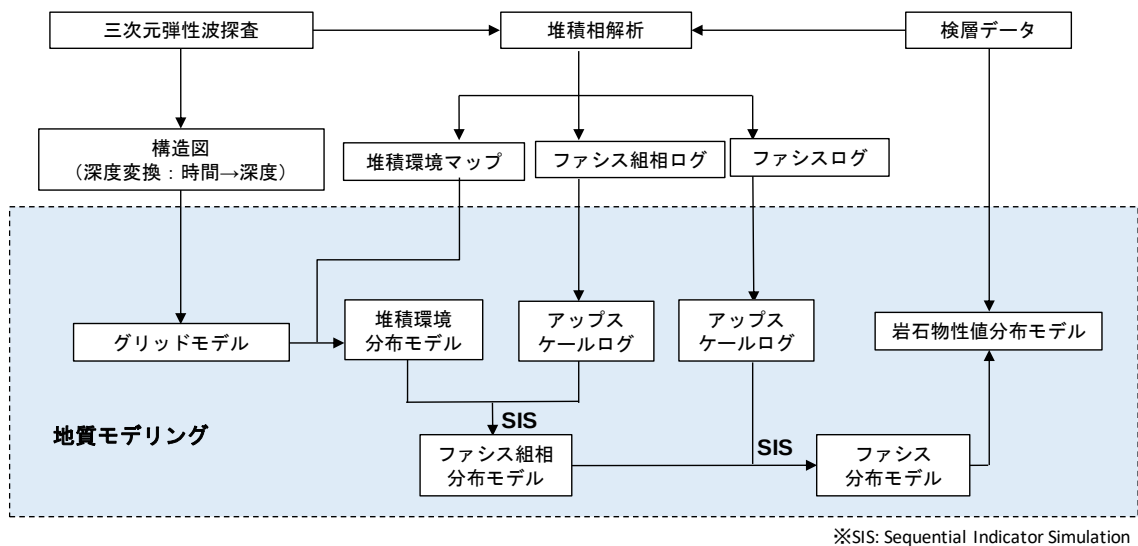


図 5.1-23 地質モデル作成のワークフロー

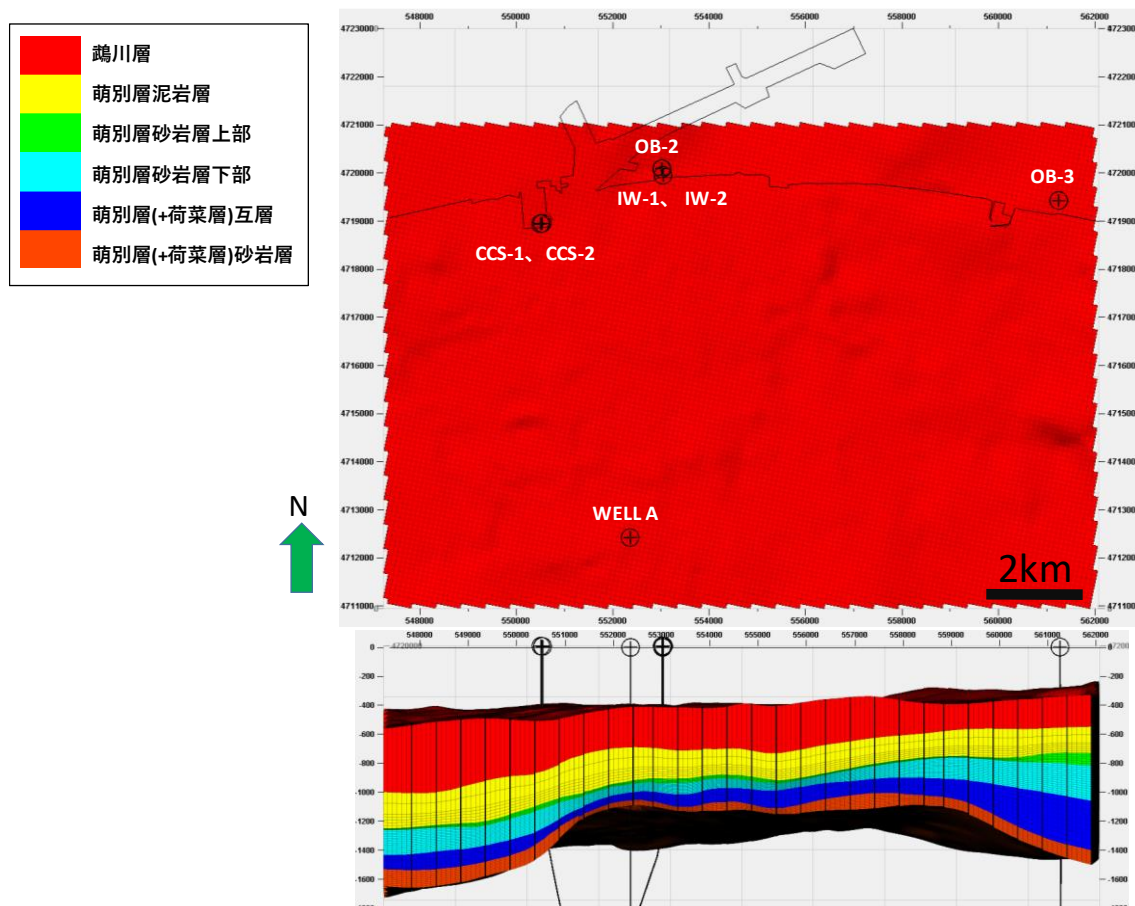
① グリッドモデルの作成

5.1.1 (2)で作成した深度構造図を用いて地質モデルのグリッドモデルを作成した。グリッドモデルは、弾性波探査記録を解析して得た各ホライズン間を6ゾーンに区分し、それぞれのゾーンを表5.1-2に示すようなレイヤー数で垂直方向を分割し、平面的には100 m×100 mとなるように分割してセル化した。貯留層区間の垂直方向のセルサイズは、IW-2において5 m程度になるように設定した。作成したグリッドモデルの概要を図5.1-24に示す。

表 5.1-2 グリッドモデルのレイヤーとセルの設定

			セルサイズ	セル番号	
	i方向(東西方向)		100m	1~163	
	j方向(南北方向)		100m	1~126	

k方向 (垂直方向)	Zone名	Zone区間(解析ホライズン名)	レイヤー数	セル番号	レイヤリング方法
	鶴川層 (Mukawa)	QTN_Base ~ MU_Base	1	1	Proportional
	萌別層泥岩層 (Mo_SH_TST)	MU_Base ~ MO_SH_Base_TS_III	7	2~8	Fractions
	萌別層砂岩層上部 (Mo_Sst_up_LST)	MO_SH_Base_TS_III ~ SB-III	6	9~14	Proportional
	萌別層砂岩層下部 (Mo_Sst_low_HST)	SB-III ~ MO_Base-MFS-II	15	15~29	Proportional
	萌別層(+荷葉層)互層 (Ni_Alt_TS)	MO_Base-MFS-II ~ SB-II	10	30~39	Proportional
	萌別層(+荷葉層)砂岩層 (Ni_Sst_HST)	SB-II ~ SB-I	10	40~49	Proportional



注）（上）上方からの外観。（下）南方向からの外観。

図 5.1-24 グリッドモデルの概要

② ファシス分布モデルの作成

図 5.1-23 に示すように、5.1.1 (3)の堆積相解析において推定した堆積環境分布図と坑井における堆積相解析の結果を用いて、地球統計学的手法（Sequential Indicator Simulation）により、不均質なファシス分布モデルを作成し、ファシスごとに決定した物性値を入力した。

堆積相解析の推定結果に対応した堆積相分布となる。推定したファシス組相の分布と、坑井におけるファシス区分をハードデータとして、地球統計学的手法によりファシスの分布を推定した。

a. 堆積環境分布の推定

5.1.1 (3)の堆積相解析において推定した堆積環境をグリッドモデルに決定論的に入力した（図 5.1-25）。

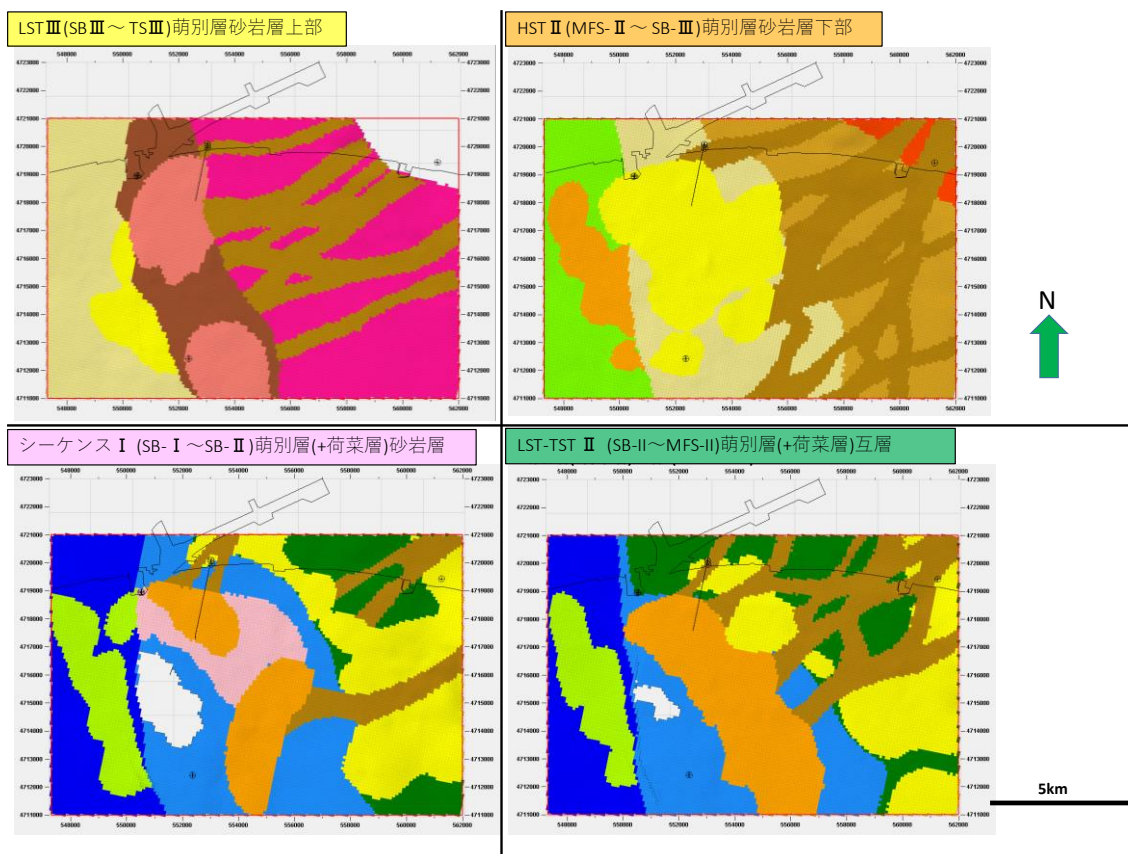


図 5.1-25 地質モデルにおける堆積環境の推定

b. ファシス組相分布の推定

堆積環境分布と坑井におけるファシス組相の解釈結果をハードデータとして用いて、地球統計学的手法（Sequential Indicator Simulation）にもとづいてファシス組相の分布を推定した（図 5.1-26）。

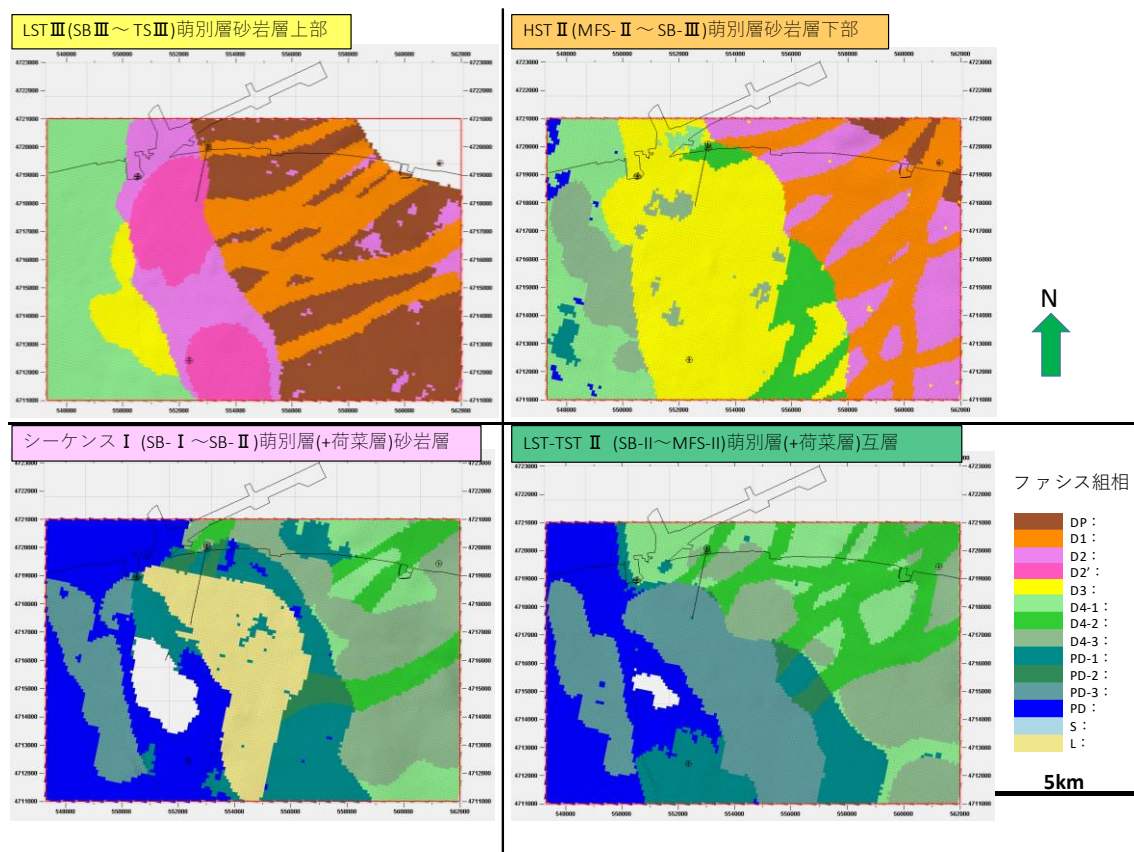


図 5.1-26 地質モデルにおけるファシス組相の推定

c. ファシス分布の推定

ファシス組相分布の推定結果と坑井におけるファシス組相の解釈結果をハードデータ（基準）として用いて、地球統計学的手法（Sequential Indicator Simulation）にもとづいてファシス分布を推定した（図 5.1-27）。ファシス組相をなすファシスの組み合わせの範囲で分布に変化が生じることとなる。

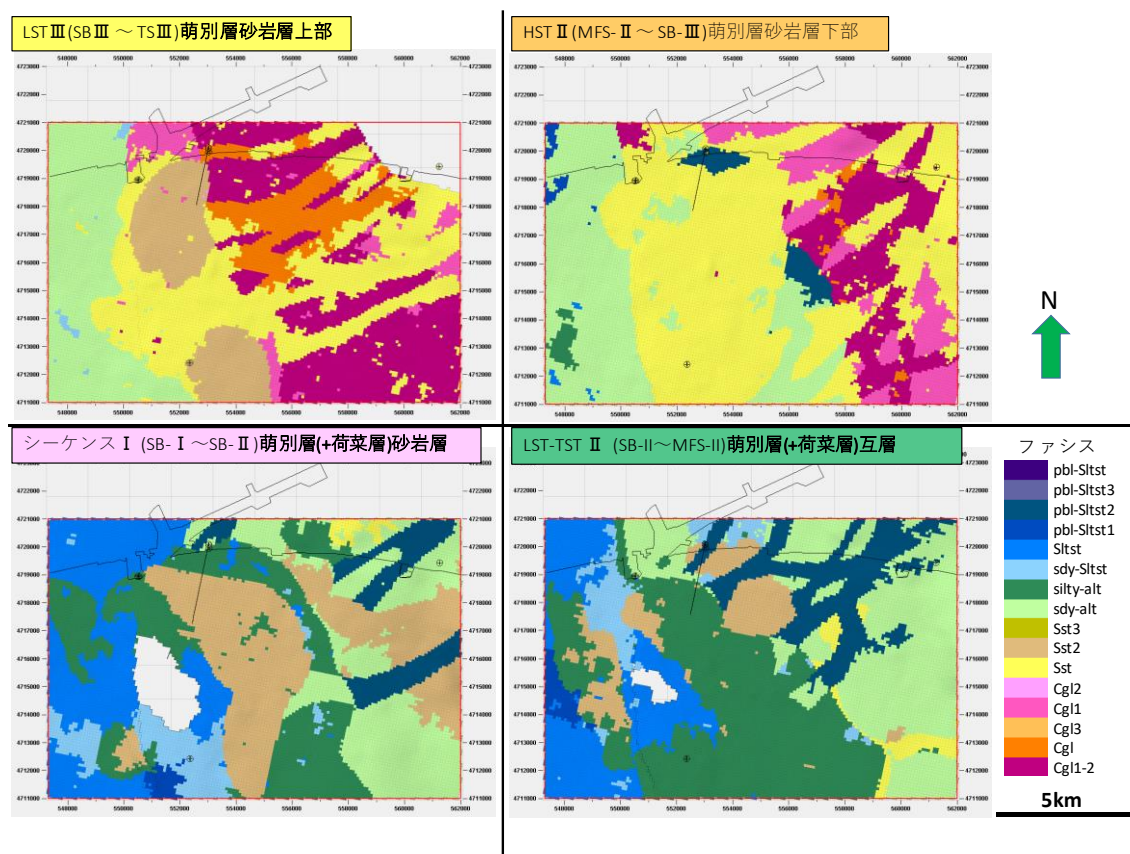


図 5.1-27 地質モデルにおけるファシスの推定

d. 物性値モデルの作成

c.で作成した不均質性を考慮したファシス分布に対し、検層解析による有効孔隙率、5.4.2 項のヒストリーマッチで設定した浸透率を、ファシスごとに表 5.1-3 のように入力した。孔隙率は IW-2、OB-2、CCS-1 の検層解析から求めたファシスごとの全孔隙率の平均値を、浸透率は同坑井で取得した NMR 検層値を用いて求めたファシスごとの平均値を入力した。

表 5.1-3 各ファシスに入力した孔隙率と浸透率

ファシス名	全孔隙率	浸透率 (mD)	備考
Muddy	0.34	2	泥質岩を一括
sdv-Sltst	0.28	1	
silty-alt	0.29	6	
sdv-alt	0.28	5	
Sst2	0.29	21	
Sst1	0.26	10	
Cgl2	0.24	1	
Cgl1	0.22	4	
Cgl3	0.28	8	
Cgl	0.23	4	
Clg1-2	0.23	4	

注) 表中の muddy は泥質なファシス（siltst, pbl-sltst, pbl-sltst1~3）一括して平均。

【参考文献】

- 1) Prior, D.B. and Bornhold, B. D., “Submarine sedimentation on a developing Holocene fan delta”, Sedimentology, 36, p.1053-1076 (1989)
- 2) Prior, D. B. and Bornhold, B. D., “The underwater development of Holocene fan deltas”, In Colella, A. and Prior, D. B. eds. : Coarse-grained Deltas, IAS, p.75-90(1990)
- 3) Nemec, W., “Aspects of sediment movement on steep delta slopes”, In Colella, A. and Prior, D. B. eds. : Coarse-grained Deltas, IAS, p.29-74(1990)
- 4) Richards, M. and Bowman, M., “Submarine fans and related depositional systems II: variability in reservoir architecture and wireline log character”, Marine and Petroleum Geology, 15, p.821-839(1998)
- 5) Posamentier, H. W. and Walker, R.G., “Deep-water turbidites and submarine fans”, In Posamentier H.W. and Walker, R.G. eds.: Facies Models Revisited. Spec. Pub. SEPM, 84, p.397-520(2006)

5.2 IW-2におけるフォールオフテストの解析

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の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解析（以下、「FOT 解析」と称する。）と呼ばれている。

図 5.2-1 および表 5.2-1 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（黄色線）・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 CO_2 密度を求め、その密度をもとに推定した。FOT 解析では推定した仕上げ区間上端の圧力を用いている。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。

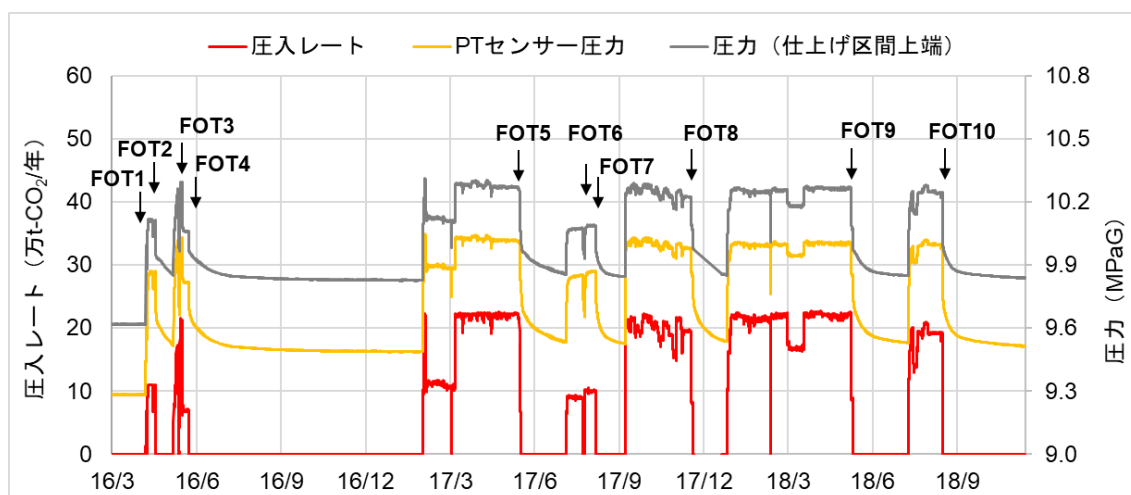


図 5.2-1 FOT 実績

表 5.2-1 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
FOT1	2016 年 4 月 8 日 6 時 14 分	2016 年 4 月 8 日 17 時 1 分	予定外停止	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	予定外停止	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	予定外停止	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	計画停止	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	計画停止	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	計画停止	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	予定外停止	771	100,124	69,070
FOT8	2017 年 11 月 30 日 9 時 27 分	2017 年 1 月 6 日 11 時 50 分	計画停止	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	計画停止	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	予定外停止	2,819	189,602	207,209

5.2.1 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カーブ（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。そして、坑井や貯留層の状況に応じて特徴的な形状を示すデリバティブカーブを解析モデルと照合することで貯留層性状を推定する。ただし、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解析モデルが存在しないため、ここでの解析結果は参考値である。

一例として図 5.2-2 に 9 回目の FOT における解析用プロット（以下、「ローグーログプロット」と称する。）を示す。補正前のグラフが参考として示した PT センサー圧力を用

いたプロット、補正後のグラフが解析対象となる仕上げ区間上端圧力を用いたプロットである。ロガーログプロットは圧入停止時間が長くなるほど坑井から離れた貯留層の状況を反映していると考えられ、ここでは、特徴的な形状が見られた時間帯を指標とし、圧入停止0.3時間までをアーリータイム、10時間までをミドルタイム、10時間以降をレイトタイムと区分した。

図5.2-3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しており、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 飽和率を推定した。

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、ミドルタイムにおいて認められるデリバティブカーブの傾斜 0 を CO_2 領域のレイトラジアルフローとみなし、また、レイトタイムにおいて認められる同傾斜 0 を地層水領域でのレイトラジアルフローとみなした。それぞれに対してラジアルフロー解析を実施し、各領域の浸透率および CO_2 飽和率を推定した。地層水領域のレイトラジアルフローからは貯留層の平均圧力も推定した。なお、デリバティブカーブに見られる上方向に凸の形状は CO_2 領域と地層水領域の境界面であるショックフロントを示すと解釈した。ショックフロントは CO_2 を圧入するほど坑井から遠方に移動するため、累計圧入量が増加するほどデリバティブカーブに現れる時間が遅くなる。

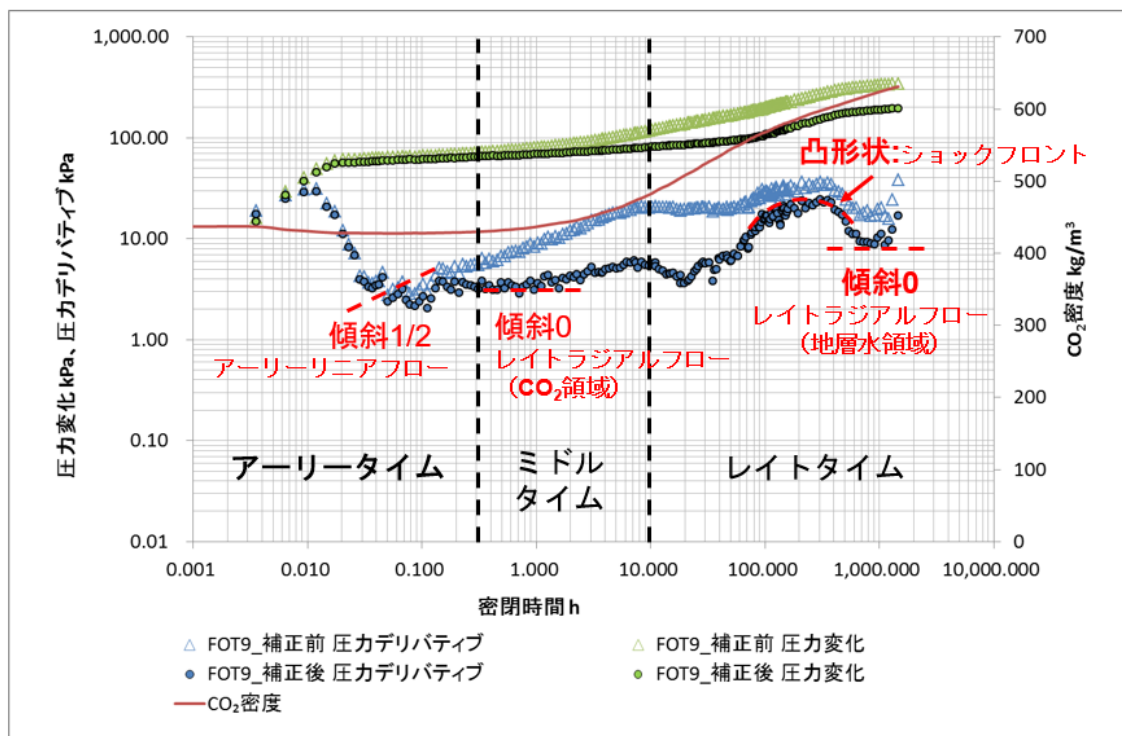
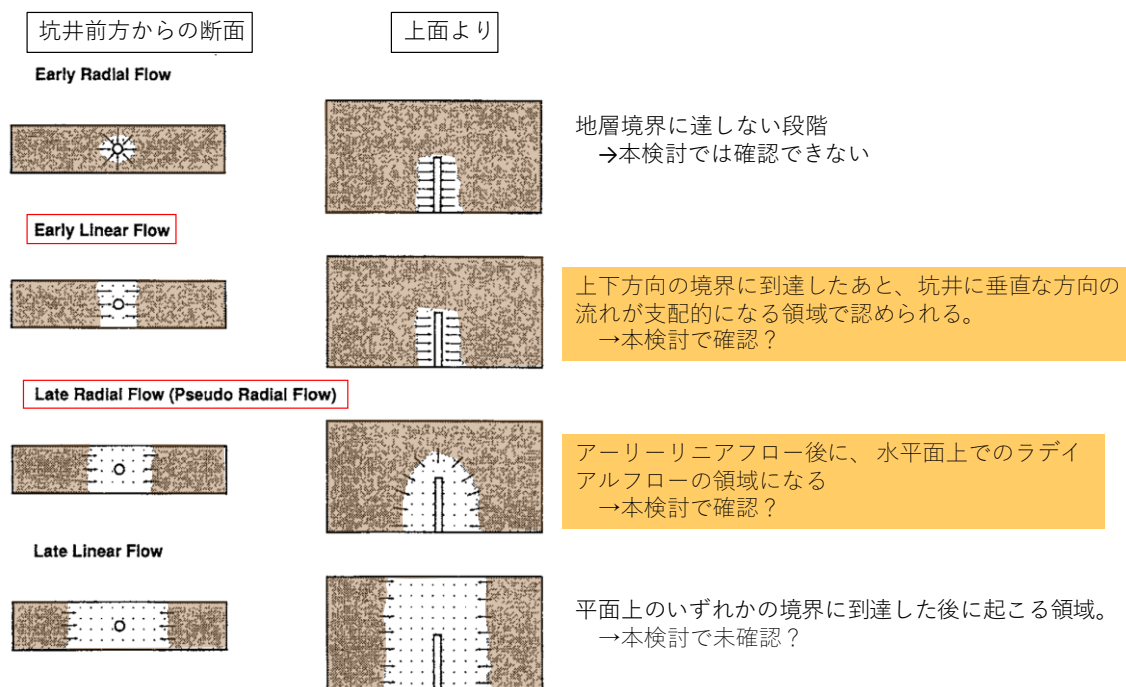


図 5.2-2 ログ・ログプロットの例（FOT9）



注) 島本（1995）¹⁾ より作成。ログ・ログプロットにおいて、アーリーリニアフローは 1/2 傾斜のデリバティブカーブとして認識され、レイトラジアルフロー（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 5.2-3 水平井で予想される圧力挙動

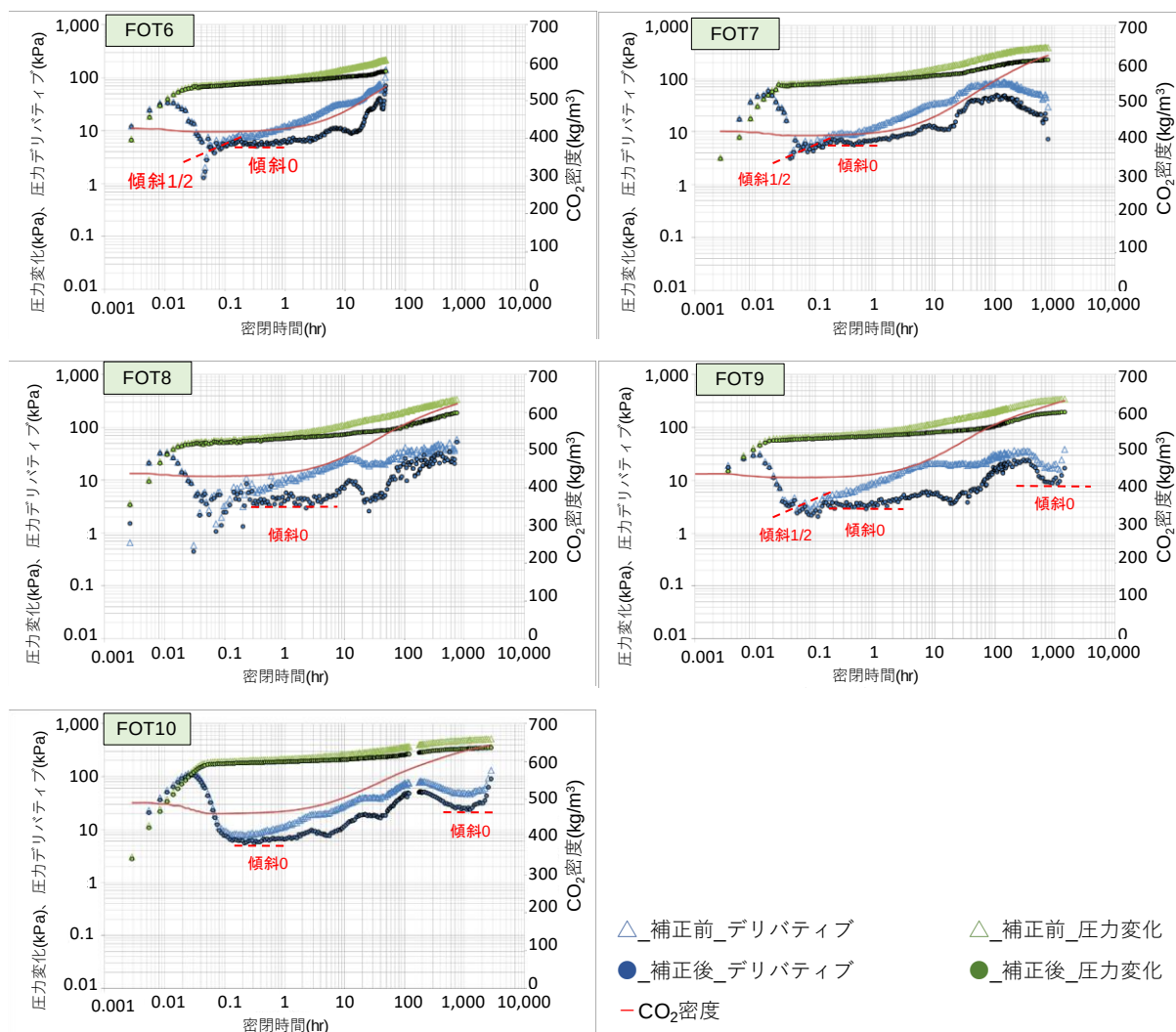
(2) 解析データ

これまでに計10回のFOTを実施したが、FOT1、3、5は停止操作が緩やかであったため解析に足るデータを取得できなかった。また、FOT2、4のデリバティブカーブはELFとショックフロントの出現時間が重なっている可能性があったことから解析対象から外した。

最終的に、解析可能と判断したFOT6～10を対象に解析を実施した。実施した解析を表5.2-2に、各FOTのログーログプロットを図5.2-4に示す。

表 5.2-2 実施した解析

FOT No.	実施した解析		
	アーリーリニアフロー	ラジアルフロー	ホーナープロット
FOT6	○	○	
FOT7	○	○	
FOT8		○	
FOT9	○	○	○
FOT10		○	○



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 5.2-4 FOT のログログプロット (FOT6～10)

5.2.2 解析結果

(1) アーリーリニアフロー解析

① アーリーリニアフロー解析結果

アーリータイムで認識された FOT6、7、9 の傾き 1/2 のデリバティブカーブを対象に、Goode et.al (1987) ²⁾ が示す式 (5.2-1) ～ (5.2-3) を解くことによるアーリーリニアフロー解析（以下、「ELF 解析」と称する。）を実施した。

$$\Delta P = \frac{8.128qB}{hL} \sqrt{\frac{\mu \Delta t}{k\phi c}} + \gamma$$

式 (5.2-1)

$$t_{Self} = \frac{1,800D^2 \phi \mu c}{k_z} \quad \text{式 (5.2-2)}$$

$$t_{Eelf} = \frac{160L^2 \phi \mu c}{k} \quad \text{式 (5.2-3)}$$

ここで、 ΔP :圧力変化、 ϕ :孔隙率、 μ :粘性、 c :総合圧縮率、 k :水平浸透率、 k_z :垂直浸透率、 t :時間、 Z :圧縮係数、 q :流量、 B :容積係数、 h :層厚、 L :仕上げ区間長、 γ :切片、 D :仕上げ区間と下部境界との距離（有効層厚の1/2と仮定）、 t_{Self} :ELF開始時間、 t_{Eelf} :ELF終了時間をそれぞれ示す。表5.2-3に入力値と解析結果を示す。

表 5.2-3 ELF 解析の入力値と解析結果

			FOT6	FOT7	FOT9
入力値	圧入レート	m ³ /D	129,623	146,691	128,503
		t-CO ₂ /年	88,474	100,124	87,709
	累計圧入量	t-CO ₂	65,793	69,070	188,136
	坑井長	m	100		
	有効層厚	m	19		
	tSelf	hrs	0.07	0.07	0.10
	tEelf	hrs	0.20	0.20	0.30
	傾き	kPa/cycle	31.9	30.9	15.8
	容積係数	rm ³ /m ³	0.0028		
	CO ₂ 粘性	cP	0.05		
	孔隙率		0.28		
	総合圧縮率	1/kPa	1.11 × 10 ⁻⁵	1.30 × 10 ⁻⁵	2.73 × 10 ⁻⁵
	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		
解析結果	水平浸透率	mD	95	111	156
	垂直浸透率	mD	28	33	48
	kv/kh		0.29	0.29	0.31
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	1,809	2,114	2,959
	CO ₂ 飽和率		0.07	0.09	0.26

アーリータイムは坑井近傍の貯留層状況を反映しており、累計圧入量が多いほど推定されるCO₂飽和率が高い。圧入レートが同程度のFOT6、9では累計圧入量がより多いFOT9の浸透率×有効層厚解析値が若干高く、これは累計圧入量の増加に伴い貯留層の平均CO₂飽和率が上昇したことに起因していると推定される。一方、累計圧入量が同程度のFOT6、7では圧入レートが高いFOT7の浸透率×有効層厚解析値が高い。この結果は第3章で述べた、圧入レートが増加するほど圧入指数も増加する傾向と調和的であった。しかしながら、②で後述するように、FOTの回数が増えるほど、傾斜1/2は不明瞭となる傾向があり、FOT10では傾斜1/2が見られない。これまで認識していた1/2の傾斜がELFではなく、別の要因によるものである可能性が考えられるが、ELF解析では圧入性評価や他の解析結果と整合する結果を得た。

② デリバティブカーブの傾斜1/2に対する検証

FOT6～10におけるアーリータイムの領域を拡大したデリバティブカーブを示す（図5.2-5）。上述した通り、FOT6～9ではデリバティブカーブの傾斜1/2を認識できたが、FOT10では認識でなかった。拡大図（図5.2-5）からは、FOT6～9ではデリバティブカーブが乱れており、この乱れを傾斜1/2として認識したことが示唆される。一般的にこのようなデリバティブカーブの乱れはPhase Redistributionと呼ばれる坑内におけるガス上昇や液体の降下を示唆するものであると考えられ、表5.2-3の解析結果は参考値と考える。ELF解析の結果は圧入挙動やその他の解析結果と整合的ではあるが、解析対象とした領域が乱れの影響を受けていた可能性もあるため(2)で述べるラジアルフロー解析も試みることでCO₂領域の貯留層性状を評価することを試みた。

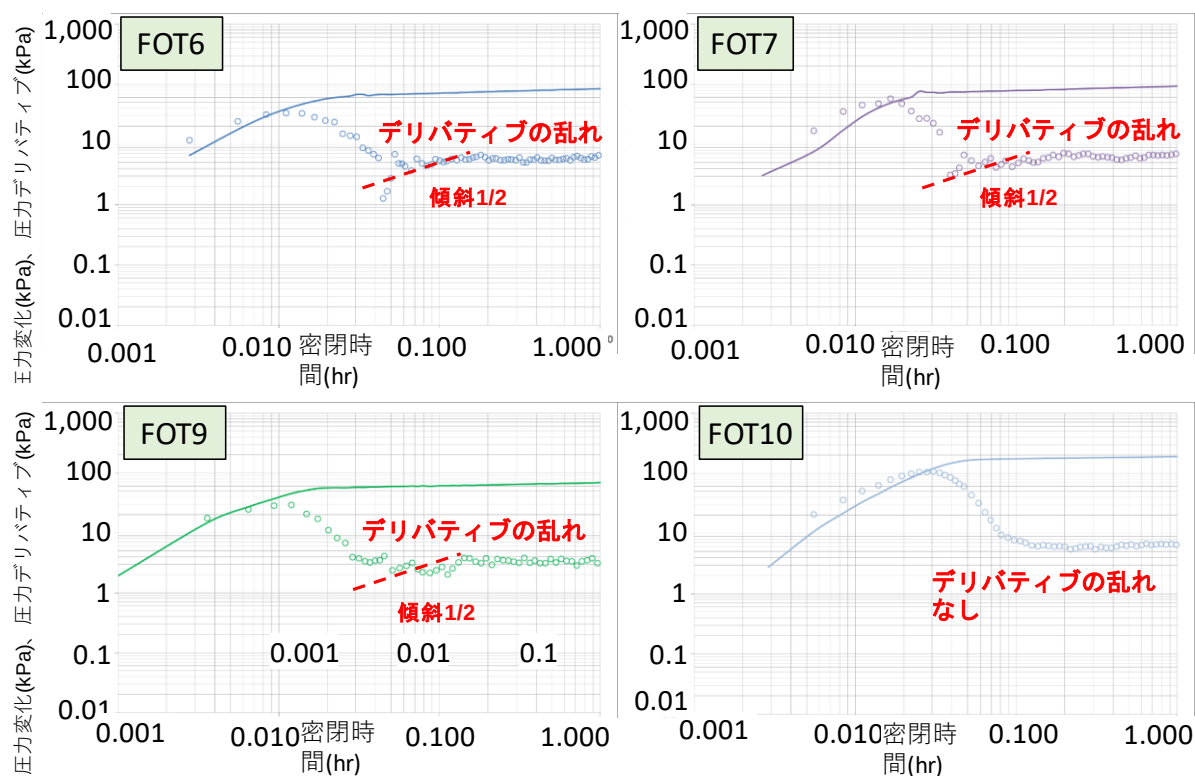


図 5.2-5 FOT6～10 のデリバティブカーブ（アーリータイムを拡大）

(2) ラジアルフロー解析

FOT6～10 のミドルタイムにおける傾斜 0 のデリバティブカーブは CO_2 領域でのレイト ラジアルフローを示しているとみなし、圧力解析ソフト Interpret にて、ラジアルフロー解析を試みた。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。解析結果を表 5.2-4 に、マッチング状況を図 5.2-6 に示す。

表 5.2-4 ラジアルフロー解析の入力値と結果（FOT6～10）

			FOT6	FOT7	備考欄	
入力 値	圧入レート	m ³ /日	129,623	146,691	圧入停止 直前のレート	
		t-CO ₂ /年	88,474	100,124		
	累計圧入量	t-CO ₂	65,793	69,070		
	有効層厚	m	19		CO ₂ が主に 圧入されている と考えられる区間	
	CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028		9.82 MPaG、37.8℃	
	CO ₂ 粘性	cP	0.0521		9.82 MPaG、37.8℃	
	孔隙率		0.28		検層解析結果	
	CO ₂ 飽和率		0.80		高浸透率領域の 不働水飽和率=0.2	
	総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵			
	水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷		9.82 MPaG、37.8℃	
	CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵		9.82 MPaG、37.8℃	
	岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶		コア試験データより	
解析 結果	浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,000	3,078		
	浸透率	mD	158	162		
			FOT8	FOT9	FOT10	備考欄
入力 値	圧入レート	m ³ /日	124,766	128,502	277,785	圧入停止直前の レート
		t-CO ₂ /年	85,159	87,709	189,602	
	累計圧入量	t-CO ₂	109,250	188,136	207,209	
	有効層厚	m	19			CO ₂ が主に 圧入されている と考えられる区間
	CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028			9.82 MPaG、37.8℃
	CO ₂ 粘性	cP	0.0521			9.82 MPaG、37.8℃
	孔隙率		0.28			検層解析結果
	CO ₂ 飽和率		0.80			高浸透率領域の 不働水飽和率=0.2
	総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵			
	水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷			9.82 MPaG、37.8℃
	CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵			9.82 MPaG、37.8℃
	岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶			コア試験データより
解析 結果	浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,900	4,950	6,000	
	浸透率	mD	205	261	316	

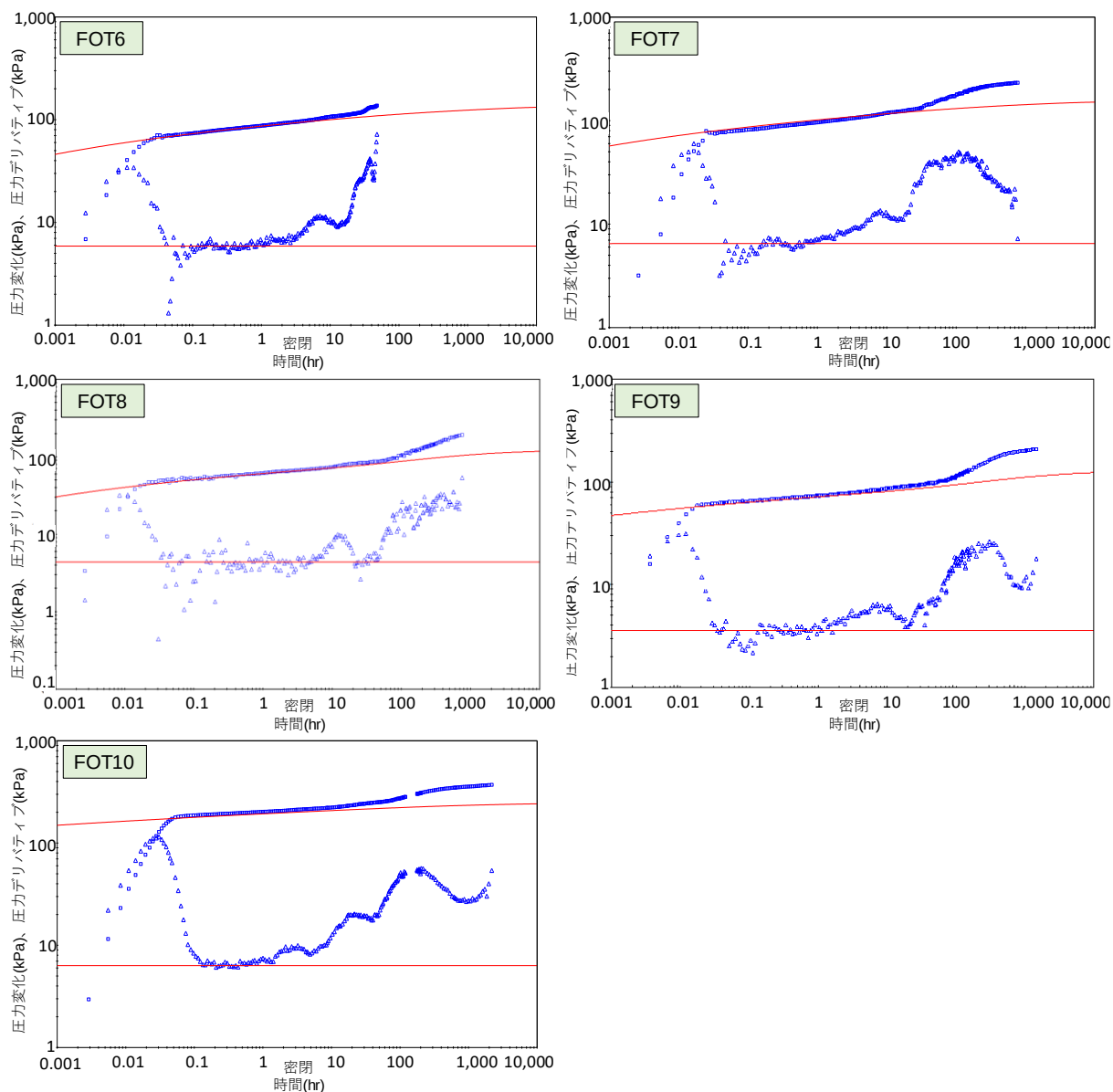


図 5.2-6 ラジアルフロー解析状況（FOT6～10）

同程度の圧入レート後に実施した FOT6、8、9 の解析結果は、あとから実施した FOT ほど、浸透率×有効層厚の値が増加した。これは累計圧入量の増加に伴い、坑井近傍の平均 CO₂ 飽和率が上昇したことに起因すると考えられる。一方、同程度の累計圧入量の状況下で実施した FOT9、10 の解析結果の比較では、圧入レートがやや高い FOT10 の方が浸透率×有効層厚が大きい。これも、圧入性評価や ELF 解析と整合する結果となった。なお、ELF 解析では仕上げ区間上端の推定圧力を用いたが、ラジアルフロー解析では、PT センサー圧力を用いたため、この解析値がやや大きく解析されている。

(3) ホーナープロット解析

① ホーナープロット解析結果

レイトタイムで見られた傾斜 0 のデリバティブカーブを対象にホーナープロット解析を実施し、式（5.2-4）により貯留層性状および貯留層平均圧力を推定した。解析対象とした FOT9、10 のレイトラジアルフローは CO₂ 領域の外側にある地層水領域での流れを反映したものと考えられる。

$$kh = \frac{162.6qB\mu}{m} \quad \text{式 (5.2-4)}$$

ここで、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、式（5.2-5）に示す Superposition function を横軸に、式（5.2-1）に示した Normalized Pseudo Pressure を縦軸にとり、式（5.2-1）の傾き m を求めることにいり、式（5.2-4）に代入する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式 (5.2-5)}$$

ここで、f: Superposition function、 t_{sp} : Superposition time、q:レート、n:n 番目を示す。解析結果を表 5.2-5 に示す。ホーナープロットで推定される浸透率×有効層厚の値は圧力伝搬が及んだ領域全体の平均的な値であり、CO₂ が拡散した領域を対象とした ELF 解析結果に比べ小さい。このことは CO₂ が圧入された範囲が局所的であるか、貯留層性状が不均質であることを示唆している。貯留層平均圧力は FOT9、10 とともに 9.82 MPaG と推定され、貯留層の初期圧力と同じであった。このことからレイトタイムで見られた傾斜 0 がレイトラジアルフローを示している可能性は高い。レイトラジアルフローは探査半径が坑井長（仕上げ長）より長くなった場合に検知できる挙動である。そこで次の②で探査半径を推定し、坑井長と比較することで、上述した仮説の妥当性を評価した。

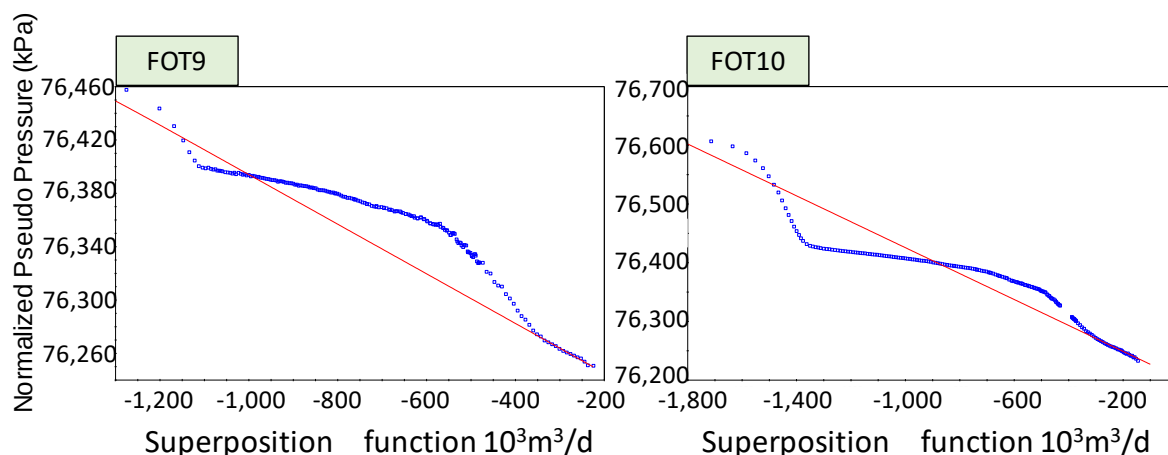


図 5.2-7 ホーナープロット解析状況（上：FOT9、下：FOT10）

表 5.2-5 ホーナープロット解析結果

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

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）が坑井長を上回った時に検知される。ここで、IW-2は最大傾斜 83° の高傾斜井であるため、仕上げ区間上端から下端までの水平方向距離 1,140 m を坑井長とした。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。探査半径は式（5.2-6）～式（5.2-8）（Rahman et al. (2014)³⁾）を用いて算出した。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3}} \left(\sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right) + R_2 \left(1 - \sqrt{\frac{M_3 F_2}{F_3 M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (5.2-6)}$$

$$R_2 = R_1 \left(1 - \sqrt{\frac{M_2 F_1}{F_2 M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (5.2-7)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t} \quad \text{式 (5.2-8)}$$

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、ct: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 5.2-6 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。

表 5.2-6 探査半径の算出に用いた入力値と計算結果

	入力値		FOT9	FOT10	適用
CO ₂ 領域	半径	m	422	464	式 (5.2-8) より計算
	有効層厚	m	19	19	仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	4,950	6,000	ラディアルフロー解析結果
	浸透率	mD	261	316	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	50	50	ショックフロント出現よりも手前
	粘性	cP	0.052	0.052	9.82 MPaG、37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	貯留層平均値
	総合圧縮率	1/kPa	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	式 (5.2-7) より計算
	有効層厚	m	19	19	CO ₂ 領域と同じと仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	760	760	ホーナープロット解析値
	浸透率	mD	40	40	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	600	600	ショックフロント終了時
	粘性	cP	0.052	0.052	CO ₂ 領域と同じと仮定
	孔隙率		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	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	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	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	上記 2 つの値より計算
	粘性	cP	0.77	0.77	9.82 MPaG、37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	検層解析結果
	総合圧縮率	1/kPa	0.00024	0.00024	9.82 MPaG、37.8°C

FOT9、10 のデリバティブカーブ（図 5.2-4）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 (5.2-7) を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した（図 5.2-8）。FOT9、10 と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。デリバティブカーブにおける傾斜 0 を地層水領域におけるレイトラジアルフローとすることが妥当であることが示された。

探査半径(m)

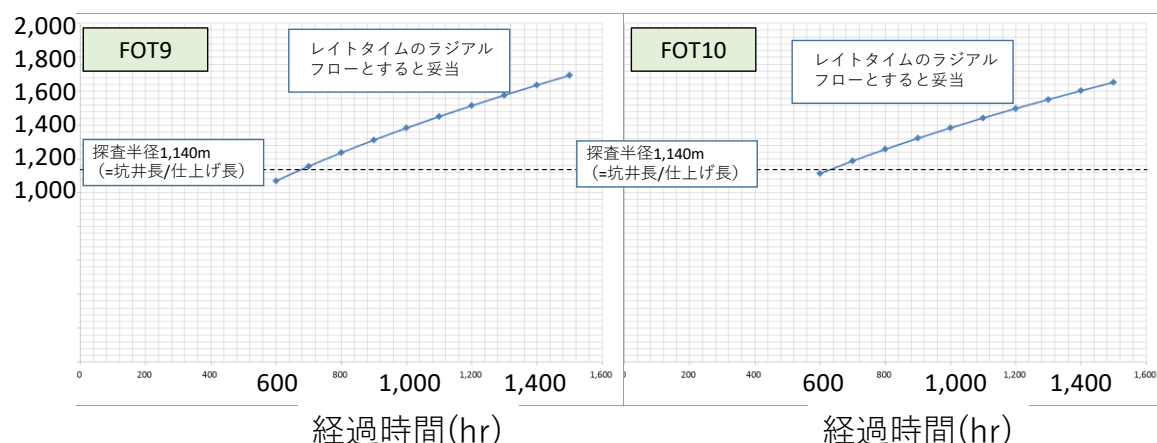


図 5.2-8 ホーナープロット解析状況（FOT9、FOT10）

5.2.3 フォールオフテスト解析のまとめ

FOT6、7、9を対象としたELF解析では圧入挙動やその他の解析結果と整合する結果を得た。しかしながら、FOT6～9のデリバティブカーブで見られた傾斜 1/2 が FOT10 には見られず、これまで傾斜 1/2 と認識していたものがELFではなくデリバティブの乱れに起因していた可能性が浮上した。この点については引き続きFOTを繰り返し検証する必要がある。

FOT6～10のデリバティブカーブにおいてミドルタイムに現れた傾斜 0 を、CO₂が拡散した範囲におけるレイトラジアルフローによるものとみなし、ラジアルフロー解析を行った。その結果、圧入挙動やその他の解析結果と整合する結果を得た。

FOT9、10のデリバティブカーブにおいてレイトタイムに現れた傾斜 0 を地層水領域におけるレイトラジアルフローによるものとみなし、ホーナープロット解析を行った。その結果も圧入挙動や他の解析結果と整合しており、得られた貯留層の平均圧力は 9.82 MPaG となり初期圧力と一致した。また、推定した探査半径は坑井長より長く、レイトタイムの傾斜 0 がレイトラジアルフローであることを支持する結果であった。

【参考文献】

- 1) 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)
- 2) Goode, P.A., Thambynayagam, R.K.M., “Pressure Drawdown and Buildup Analysis of Horizontal Wells in Anisotropic Media” SPE14250(1987)

- 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)

5.3 IW-2 および OB-2 の圧力予実績

2017年度に作成した貯留層評価モデル¹⁾の、再現性を確認するために、IW-2の圧入実績に応じたシミュレーション値と実績値との比較を行った。表5.3-1には本モデルのパラメータを示す。基本的なパラメータは2017年度の貯留層評価モデル¹⁾と同様であるが、基準温度の算出式を、式(5.3-1)から式(5.3-2)に変更したため、初期温度が40.5℃から36.2℃となった。前者は調査井掘削時に実施した検層の各ランにおける検層ツールの最大到達深度と留点温度計の値との近似から算出した。後者はOB-2に設置したDTS温度計のモニタリングデータとIW-2の初期温度を考慮して算出した。

$$\text{貯留層温度 (}^{\circ}\text{C)} = 0.0337 \times \text{深度 (TVDSS)} + 9.5 \quad \text{式 (5.3-1)}$$

$$\text{貯留層温度 (}^{\circ}\text{C)} = 0.0290 \times \text{深度 (TVDSS)} + 9.5 \quad \text{式 (5.3-2)}$$

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。

5.3.1 2018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フィールドモデルとセクターモデルを使用した（図5.3-1）。

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100 m×100 m、セル数は110×116×118であり、萌別層砂岩層上部と下部のみ垂直方向が1.25 mとなるように細分化した。

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5.3-1のように20×30×115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 2018 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：10 km×10 km×1,500 m
	セクターモデル：2 km×3 km×1,500 m
グリッド	フィールドモデル：110×116×118
	セクターモデル：20×30×115
アクティブ・ブロック数	フィールドモデル：981,711
	セクターモデル：419,108（細分化後）
基準温度	36.2℃@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	IW-2 側にて領域別に平均化
浸透率（mD）	IW-2 側にて領域別に平均化 高浸透率領域を設定
ネットグロス比	IW-2 側にて領域別に平均化 高浸透率領域のみ 1 と設定
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

注）2018 年度予実績確認モデルは、基準温度以外は 2017 年度モデル¹⁾ と同様の設定。

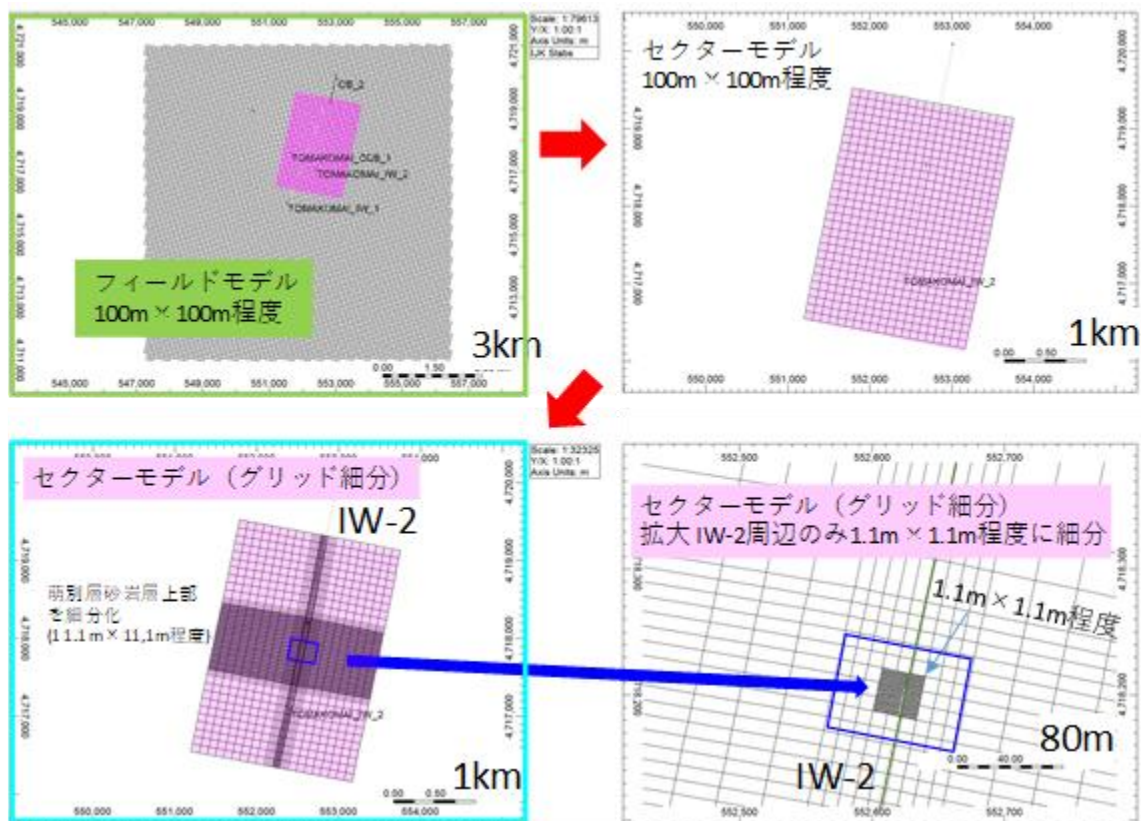


図 5.3-1 2018 年度 予実績比較モデルのグリッドシステム

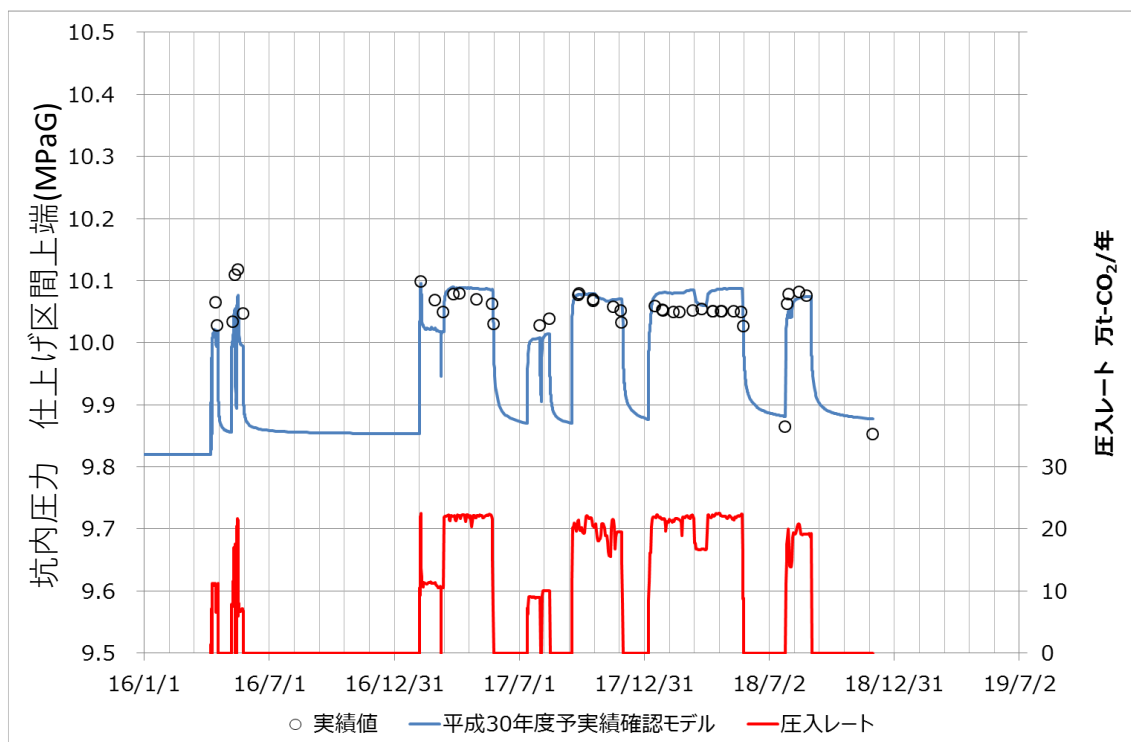
5.3.2 予実績比較結果

(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 5.3-1 左下）を用いて、2016 年 4 月 6 日～2018 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 5.3-2）。この結果の目的関数（式（5.3-3））は 25 kPa となり、予実績比較モデルの圧力再現精度は妥当と考えた。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{\text{obs}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{obs}}} \sqrt{(d_{\text{sim}}^i - d_{\text{obs}}^i)^2} \quad \text{式 (5.3-3)}$$

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。2018年度予実績確認モデルは、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。

図 5.3-2 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

(2) フォールオフテストのローグログプロット

実績値から作成したローグログプロットのみドルタイムにおいて、FOT6～10では傾斜0のデリバティブカーブ（CO₂領域のラジアルフローを示唆）が認められた。このFOT6～10について予実績比較モデルを用いてローグログプロットを再現し、実績値によるローグログプロットと比較した（図 5.3-3）。再現したデリバティブカーブでは、実績と同様にFOT6～10のみドルタイムで傾斜0が認められた。FOT9、10のレイトタイムでは傾斜0が認められた。FOT10では、FOT6～9で認められるアーリータイムの傾斜1/2が見られない。傾斜1/2がデリバティブの乱れによるものであるかELFを示すものであるかは、今後もFOTを繰り返し、再現性を確認する必要がある。また、FOT9、10のレイトタイムにおける傾斜0が現れる範囲も、やや乖離しており再現性が十分ではない。この点は貯留層の水平方向の不均質性を考慮することで改善が期待されたことから、5.4節で後述するように、不均質性を考慮した2018年度貯留層モデルを構築しヒストリーマッチを試みた。

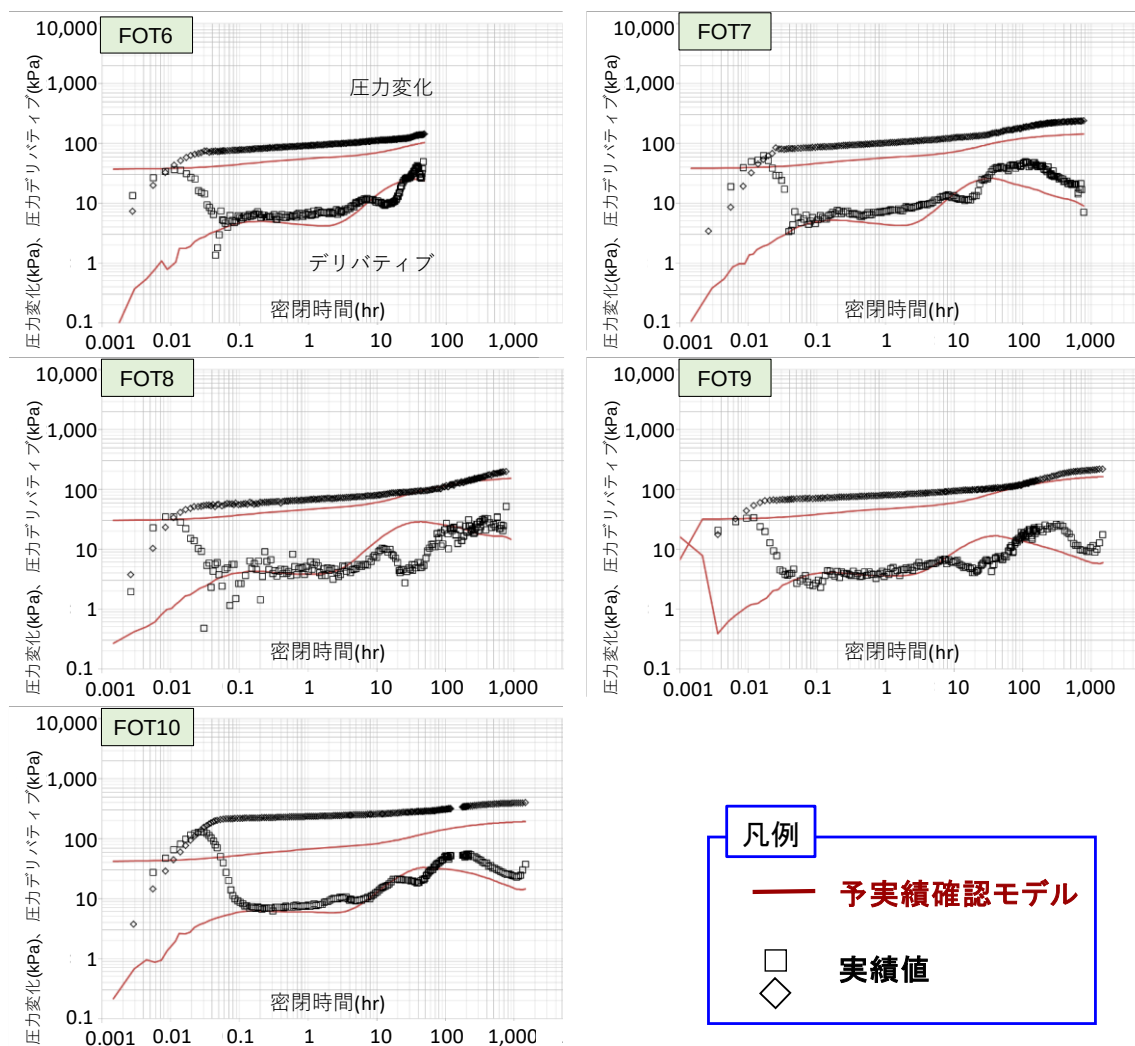


図 5.3-3 IW-2 予実績比較モデルによる FOT の圧力変化、デリバティブカーブの再現と実績値との比較

(3) OB-2 坑底圧力

図 5.3-4 に OB-2 の坑底圧力上昇値の予実績を示す。シミュレーションでは、圧入開始後の 2016 年 5 月頃からの圧力上昇が予測される（青色の実線）。坑底圧力の上昇の実績値は不明瞭ながら、IW-2 での圧入中に OB-2 の坑内圧力の上昇傾向が示唆され、本フィールドモデルの一応の妥当性が確認された。

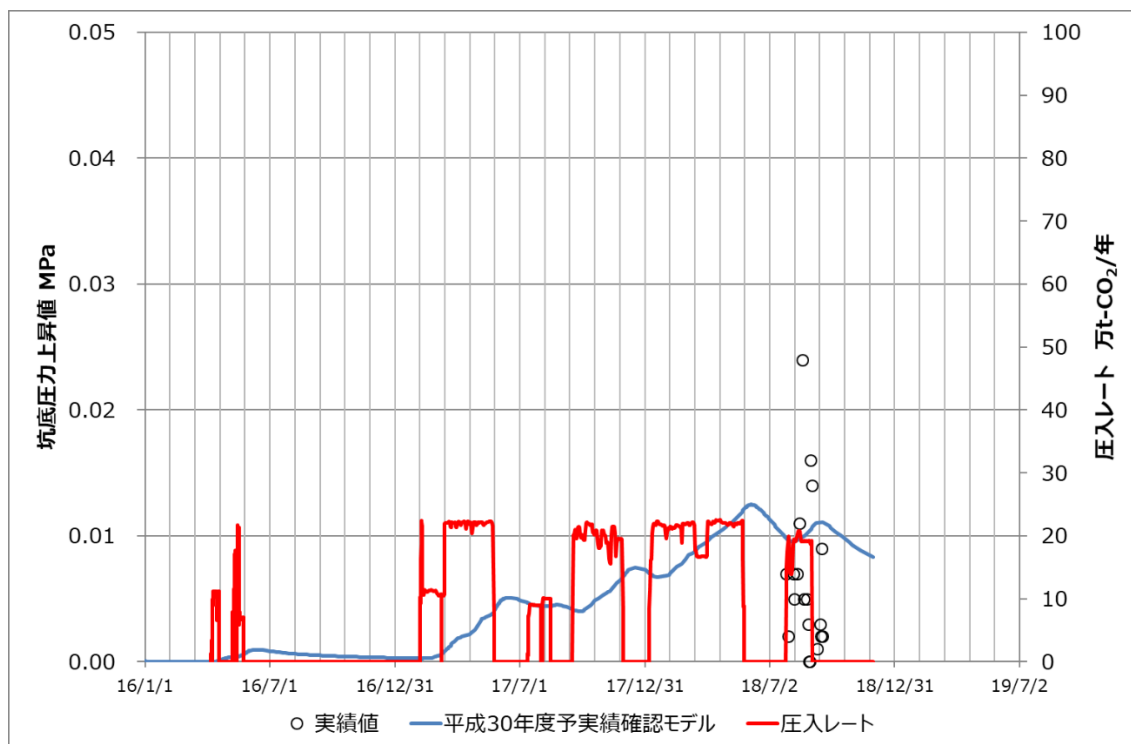


図 5.3-4 IW-2 坑底圧力の予実績比較

5.3.3 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、2018 年 11 月 30 日までの IW-2 の坑内圧力がほぼ再現されたことから、本モデルで設定した垂直方向の浸透率分布は妥当と考えられる。同モデルによる FOT のログ-ログプロットの再現では、今まで ELF と考えてきたアーリータイムの傾斜 1/2 が再現できないものがあり、今後の検討を要する。

また、OB-2 における坑内圧力観測で示唆される坑内圧力の上昇傾向を、シミュレーションで再現できている可能性がある。

【参考文献】

- 1) 日本CCS調査（株）、「2017 年度「2017 年度苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業」成果報告書」（2018）
- 2) Corey, A.T., "The Interrelation Between Gas and Oil Relative Permeabilities". Prod. Monthly. 19 (1),p.38-41 (1954)
- 3) van Genuchten, M.Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Soc. Am. J., 44, p. 892-898 (1980)

5.4 2018年度モデルによるヒストリーマッチ

2017年度モデルはIW-2の仕上げ区間上端圧力や各FOTのローグログプロットにおけるアーリータイムおよびミドルタイムの再現性は高いが、FOT9、10のレイトタイムの再現性は低い。貯留層の水平方向の不均質性を考慮することでこの点が改善されると期待されたことから、貯留層の不均質性を考慮すべく地質モデルを更新し、そのモデルを用いてヒストリーマッチを行った。2018年度のヒストリーマッチで行った作業概要は以下である。

- 1) フィールドモデルから圧入井周辺を部分的に切り出したセクターモデルを用いて、シミュレーション精度を損なうことなく計算時間を短縮するためグリッドシステムを変更した。
- 2) 坑井データで認められた16の岩相を設定し、それぞれのパラメータを決定した。
- 3) NMRの解析結果、2017年度評価における浸透率分布、2017年度実施の繰り返し三次元弾性波探査の解析結果を参照し、各岩相の浸透率を見直した。
- 4) 地球統計学的手法で作成したグリッドシステムが共通で、岩相分布が異なる50個のセクターモデル（以下、「具現像」と称する。）で、圧入実績の再現性および累積分布関数を評価するとともに、ローグログプロットの再現性や繰り返し三次元弾性波探査データの解析結果との整合性を確認した。

5.4.1 2018年度モデルのグリッドシステム

図5.4-1に示すように、計算時間を短縮するためフィールドモデルからセクターモデルを切り出し、坑井周辺のシミュレーション精度を上げるべくセクターモデルのグリッドをさらに細分化した。細分化は坑井が通過する100 m×100 m×5 mのグリッドを最終的に1.23 m×1.23 m×1.25 mとした。計算に6時間を要した2017年度モデルと異なり、細分化を坑井周辺に限定することでグリッド数を軽減し、計算時間は半分となった。

2017年度と新たに作成した2018年度のグリッドシステムでは、シミュレーションで再現される仕上げ区間上端圧力（図5.4-2）やローグログプロット（図5.4-3）の形状に顕著な違いは見られない。この結果を受け、本グリッドモデルを2018年度評価で用いることとした。なお、グリッドシステムの妥当性は、50個ある具現像の内の一つを2017年度モデルと比較することで行った。

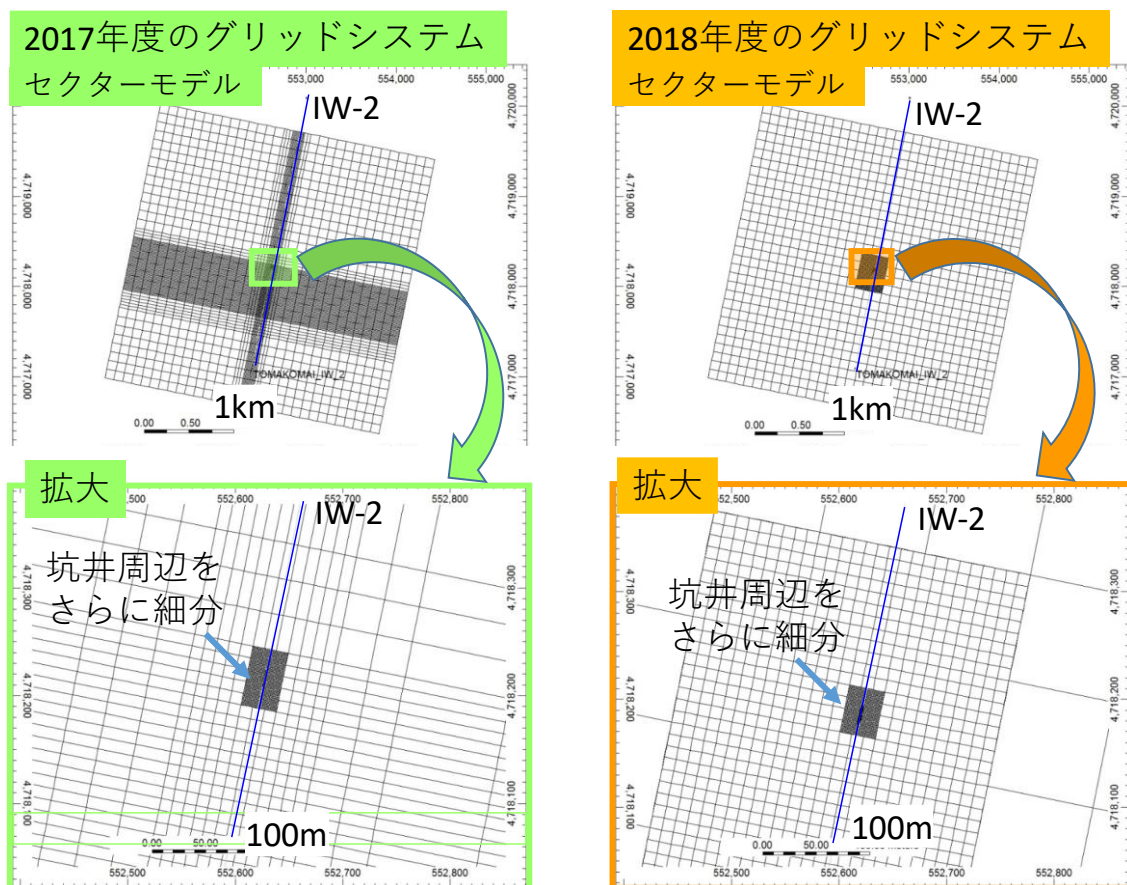


図 5.4-1 2017 年度モデルと 2018 年度モデルのグリッドシステムの比較

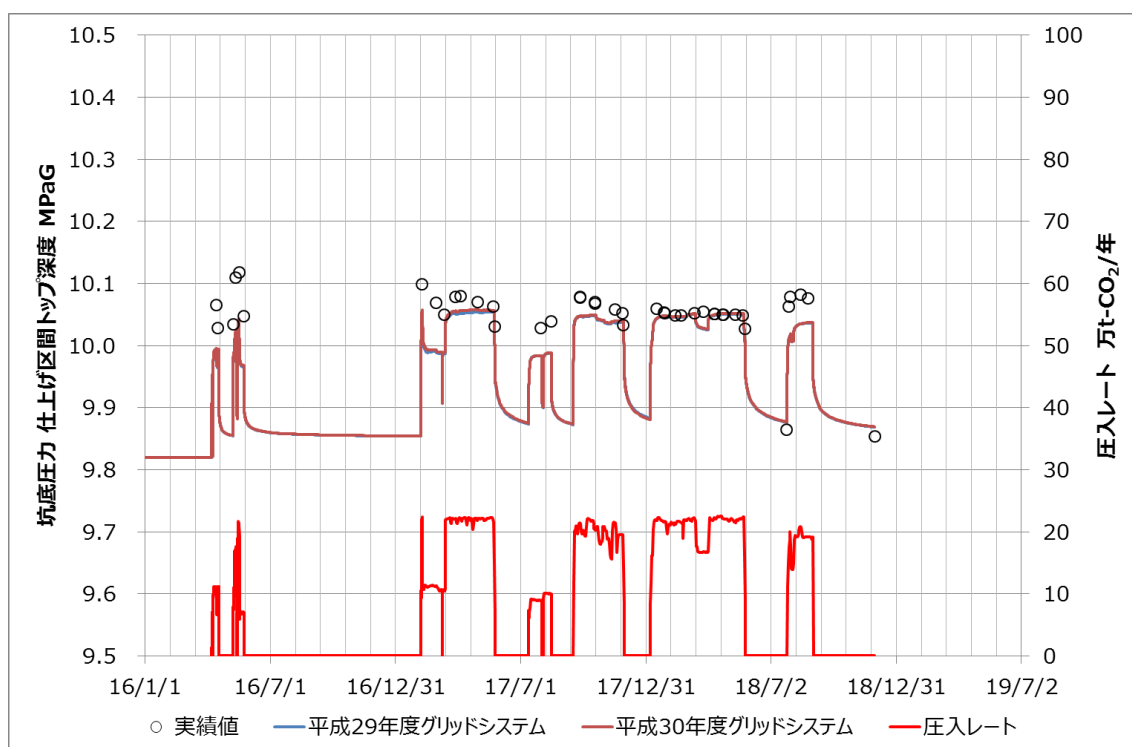


図 5.4-2 2017 年度および 2018 年度グリッドシステムにより再現された仕上げ区間上端
圧力と実績値の比較

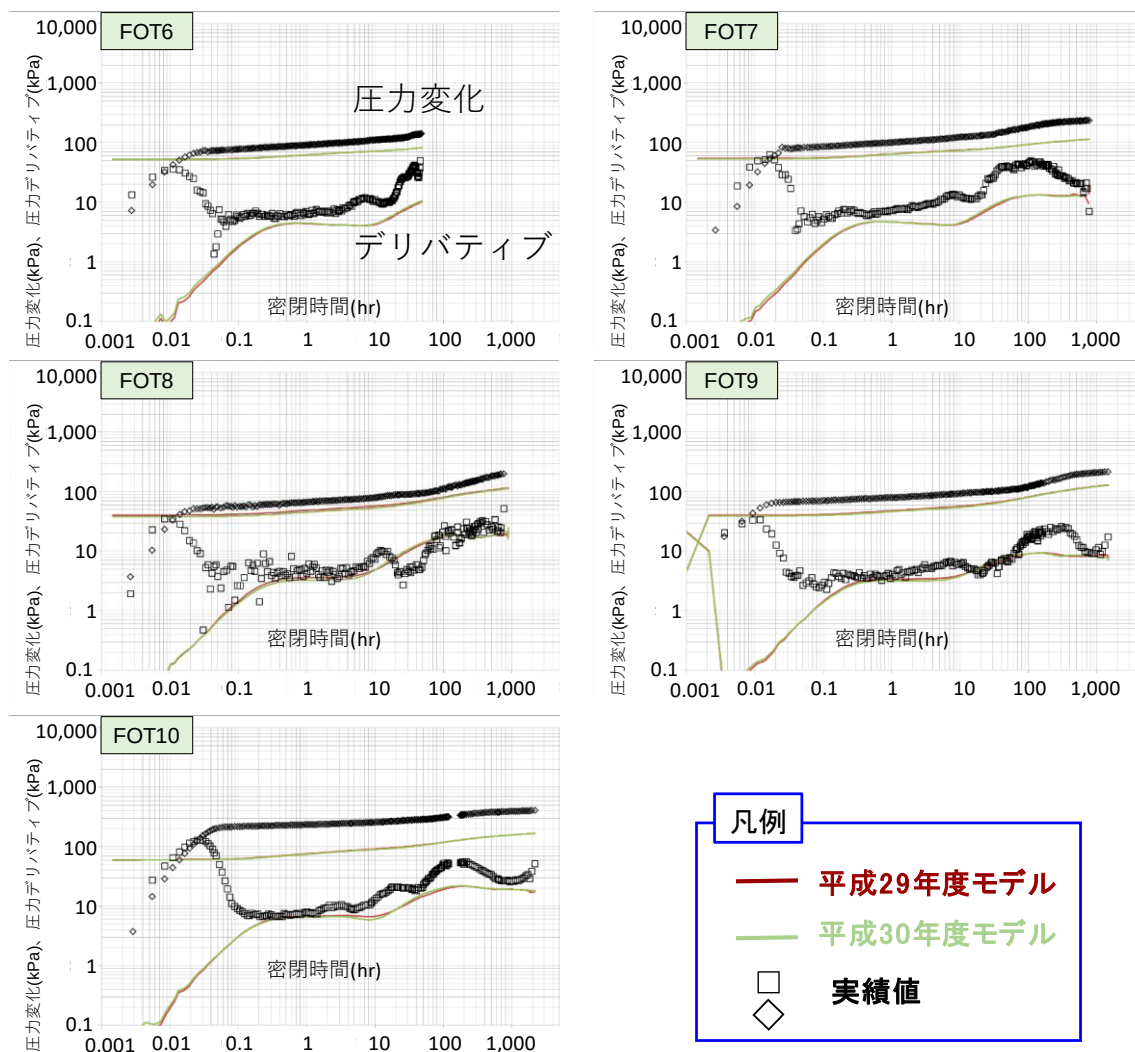


図 5.4-3 2017 年度および 2018 年度グリッドモデルにより再現されるロガーログプロットと実績値との比較

5.4.2 2018 年度モデルの入力パラメータ

ヒストリーマッチに使用したセクターモデルへの入力パラメータを表 5.4-1 に示す。

表 5.4-1 ヒストリーマッチ用いた地質モデルのパラメータ

モデル	予実績確認用モデル（5.3 節） セクターモデル	改定後モデル セクターモデル
サイズ	2 km×3 km×1,500 m	3 km×3 km×1,700 m
グリッド	20×30×115	31×31×48
アクティブ・ブロック数	419,108	46,128
基準温度	36.2℃@920.41 mSSL	
基準圧力	9,290kPa@920.41 mSSL	
塩分濃度（ppm NaCl）	3,150	
境界条件	開境界	
貯留層		
孔隙率	IW-2 にて領域（浸透率分布）別に平均化	岩相毎に設定
浸透率（mD）	IW-2 にて領域（浸透率分布）別に平均化 高浸透率領域を設定	岩相毎に設定
ネットグロス比	IW-2 にて領域（浸透率分布）別に平均化 高浸透率領域のみ 1 と設定	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：krg n=2.0 その他：krg n=3.5	岩相 10、11：n=2.0 その他：n=3.5
krg	高浸透率領域=0.60 その他=0.143	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）	Sgrmax=Sgc+0.5×（1-Swir-Sgc） （シミュレーターソフトのデフォルト）	
毛細管圧力	CCS-2、OB-2、IW-2 コア試料より作成	
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 ³⁾	krw 曲線:van Genuchten ⁴⁾
krg	1.00	
krw	1.00	
Sgc	0.05	
Swir	0.638	
スレシヨールド圧力	370kPa	
毛細管圧力	van Genuchten ⁴⁾ の関数にて、Sgc における毛細管圧力がスレシヨールド圧力となるように定義	
ヒステリシス（Sgrmax）	なし	

坑井データから認められた 16 の岩相のパラメータを IW-2 および OB-2、CCS-1 の検層

解析に基づき決定した。その後、IW-2のNMRの解析結果、2017年度に評価した垂直方向の浸透率分布、2017年度繰り返し三次元弾性波探査の解釈結果と照合し岩相の浸透率を見直した。

2017年度モデルでは、圧入区間における推定下端深度とNMR解析結果に基づき、モデルの垂直方向を複数の領域に区分し、領域毎にパラメータを設定することで垂直方向の不均質性を表現したが、各領域の水平方向のパラメータは一定であった。そこで、2018年度評価では水平方向の不均質性を表現するために16の岩相を設定し、IW-2およびOB-2、CCS-1の検層解析に基づき、それぞれのパラメータを決定した。各岩相のパラメータを表5.4-2に示す。また、以下に各パラメータの決定方法を述べる。特に断りがないものは、貯留層のパラメータを示す。

表 5.4-2 各岩相のパラメータ

岩相	孔隙率	水平浸透率 (mD)	kv/kh	ネットグロス比	ファシス区分 (5.1節)
1	0.35	2	0.76	0.76	pbl-Sltst
2	0.35	2	0.76	0.76	pbl-Sltst3
3	0.35	2	0.76	0.76	pbl-Sltst2
4	0.35	2	0.76	0.76	pbl-Sltst1
5	0.35	2	0.76	0.76	Siltst
6	0.28	1	0.76	0.77	Siltst2?
7	0.29	6	0.7	0.69	sdv-Sltst
8	0.28	5	0.62	0.8	silty-alt
9	0.27	1	0.51	0.56	sdv-alt
10	0.29	21	0.7	0.85	Sst2
11	0.26	10	0.65	0.82	Sst1
12	0.24	1	0.72	0.78	Cgl2
13	0.22	4	0.69	0.83	Cgl1
14	0.28	8	0.32	0.75	Cgl3
15	0.23	4	0.76	0.79	Cgl
16	0.23	4	0.51	0.76	Clg1-2

注) 表に示した水平浸透率は修正前の値である。修正方法および修正後の水平浸透率は本項の(2)に記載。ファシス区分については5.1節に記載。圧入区間に分布する岩相は5～13。

(1) 孔隙率

CCS-1、OB-2、IW-2の検層解析結果を、岩相ごとに平均した値を使用した。なお、岩

相 1～5 は岩相の類似性やデータ数を考慮し一括して平均した。

(2) 浸透率

各岩相の浸透率は、CCS-1、OB-2、IW-2 で取得した NMR 検層から得られた値をもとに設定した浸透率と孔隙率の近似式と、(1)で求めた孔隙率から求めた値を基本とした。

図 5.4-4 に岩相ごとに求めた孔隙率と浸透率の関係を示す。青点の点は NMR 検層による孔隙率（全孔隙率）と浸透率をプロットしたものである。「未調整」とした曲線は、このプロットデータから、最小二乗法により求めた孔隙率と浸透率の近似曲線を示している。ここでの浸透率は、一般的に使用される KSDR モデルに基づく式 (5.4-1) から算出した。

$$\text{浸透率} = a \times \text{全孔隙率}^b (\text{T2LM})^c \quad \text{式 (5.4-1)}$$

T2LM : NMR 検層により得られる T2 幾何平均

a、b、c : 定数。b は一般値として 4 を使用

2017 年度の検討¹⁾において、萌別層砂岩層上部に 2 層の高浸透率領域を仮定することで圧力解析的に妥当な結果が得られたため、本検討においてもこの方法を踏襲した。また、斉藤ほか (2018)²⁾により、繰り返し三次元弾性波探査における RMS 振幅の最大値が、IW-2 の 1,001 m (TVDSS) 付近に認められることが報告されている。この深度付近に最も CO₂ が圧入されており、また、この深度に分布する岩相（岩相 11）が、最も圧入性が高いものと仮定して、2017 年度に設定した浸透率分布を修正した（図 5.4-5）。浸透率分布の修正のために、図 5.4-4 に示す岩相のうち、萌別層砂岩層上部に分布する岩相 1～岩相 13 の浸透率と孔隙率の近似式を修正した。 $a \times (\text{T2LM})^c$ を岩相 1～岩相 16 毎に異なる定数として扱い、この定数を試行錯誤的に変更した。この修正に際しては、修正した近似曲線が NMR 検層による孔隙率と浸透率のプロット範囲から逸脱しないこと、仕上げ区間全体の浸透率の平均値が、圧入井掘削時にブライン圧入テストで得た平均浸透率（152 mD）と同程度となることを考慮した（表 5.4-3）。

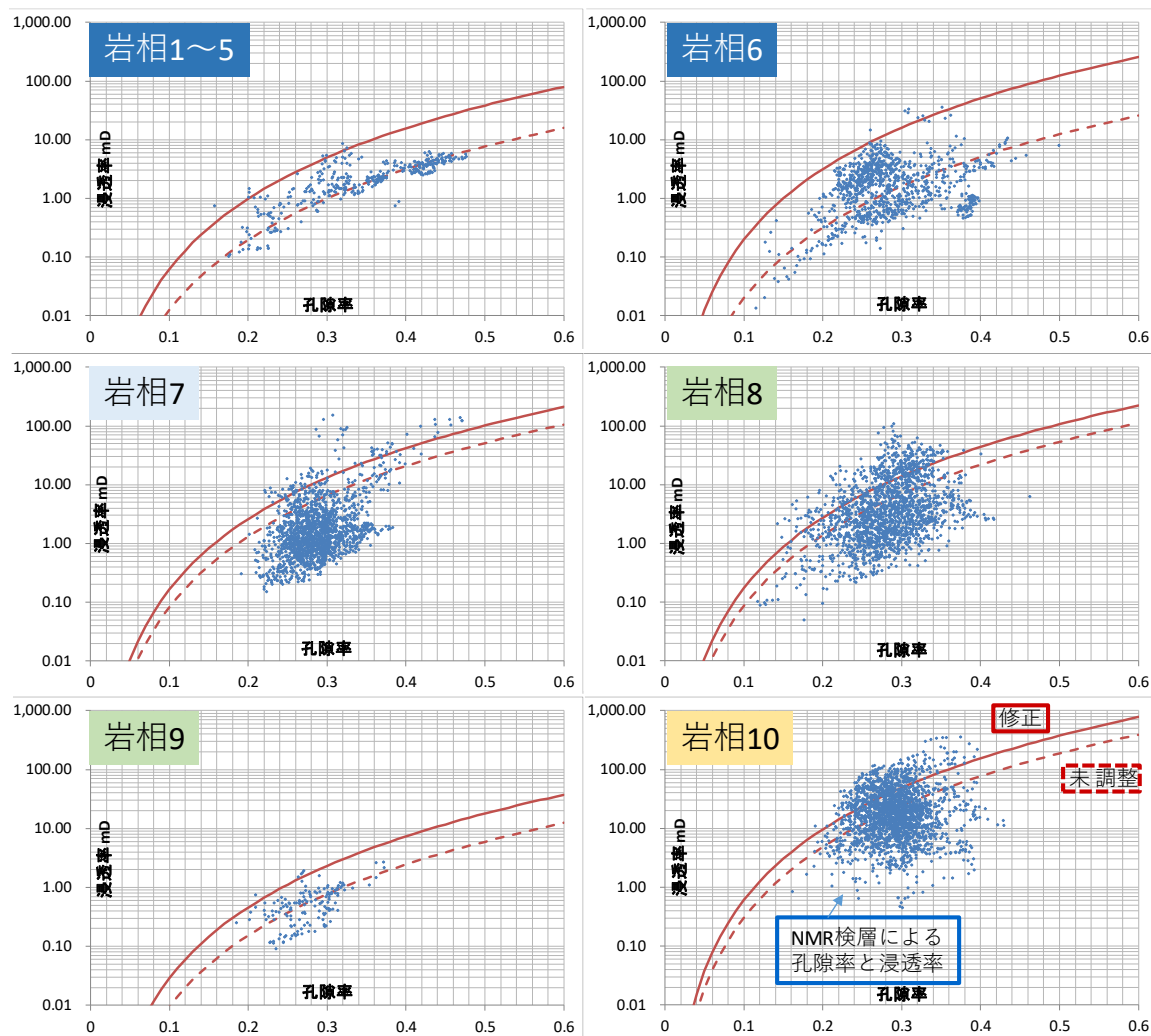
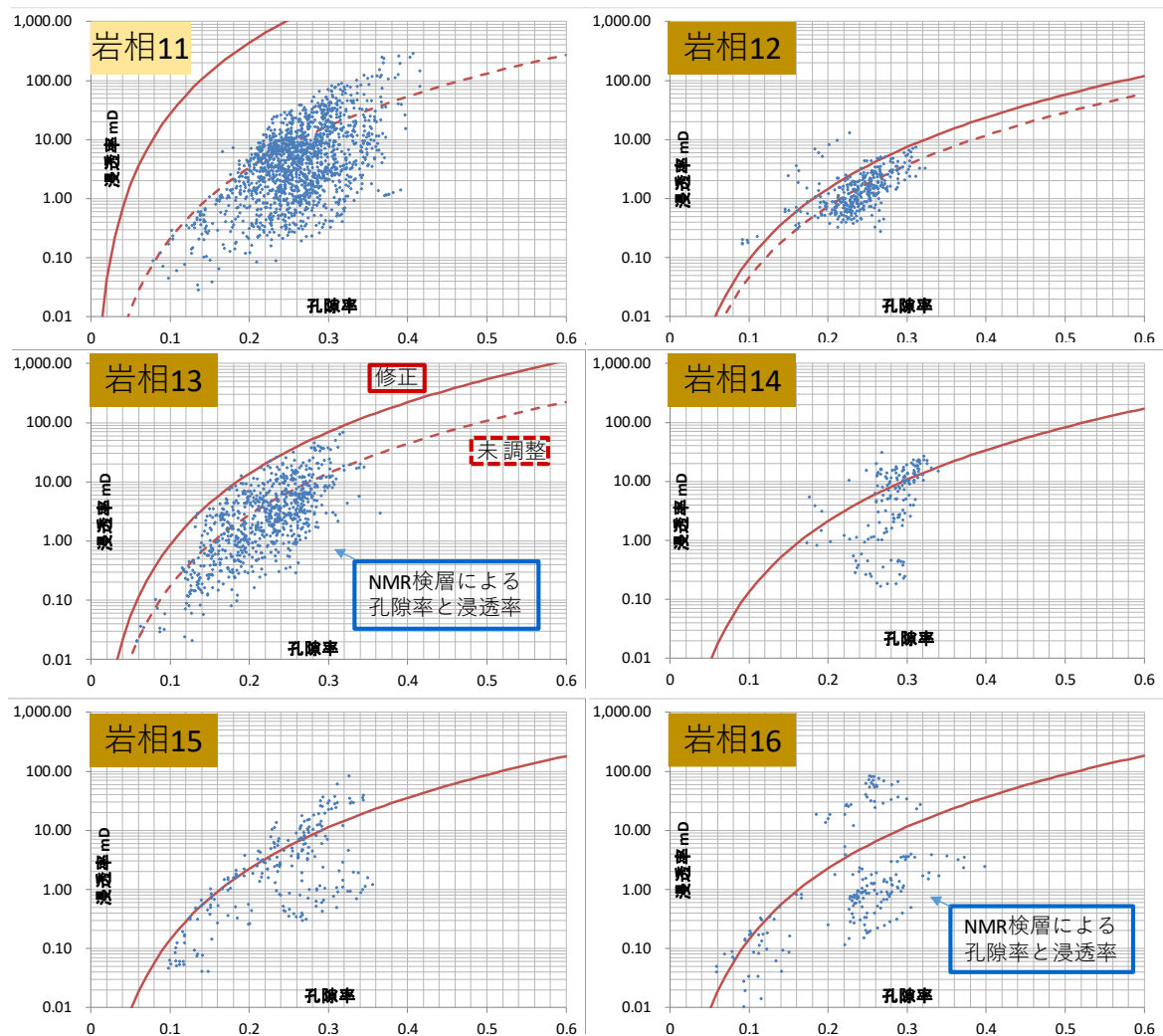


図 5.4-4(a) 区分した岩相とシミュレーションに用いた孔隙率と浸透率の関係



注) 岩相 14～16 は修正せず。

図 5.4-4(b) 区分した岩相とシミュレーションに用いた孔隙率と浸透率の関係

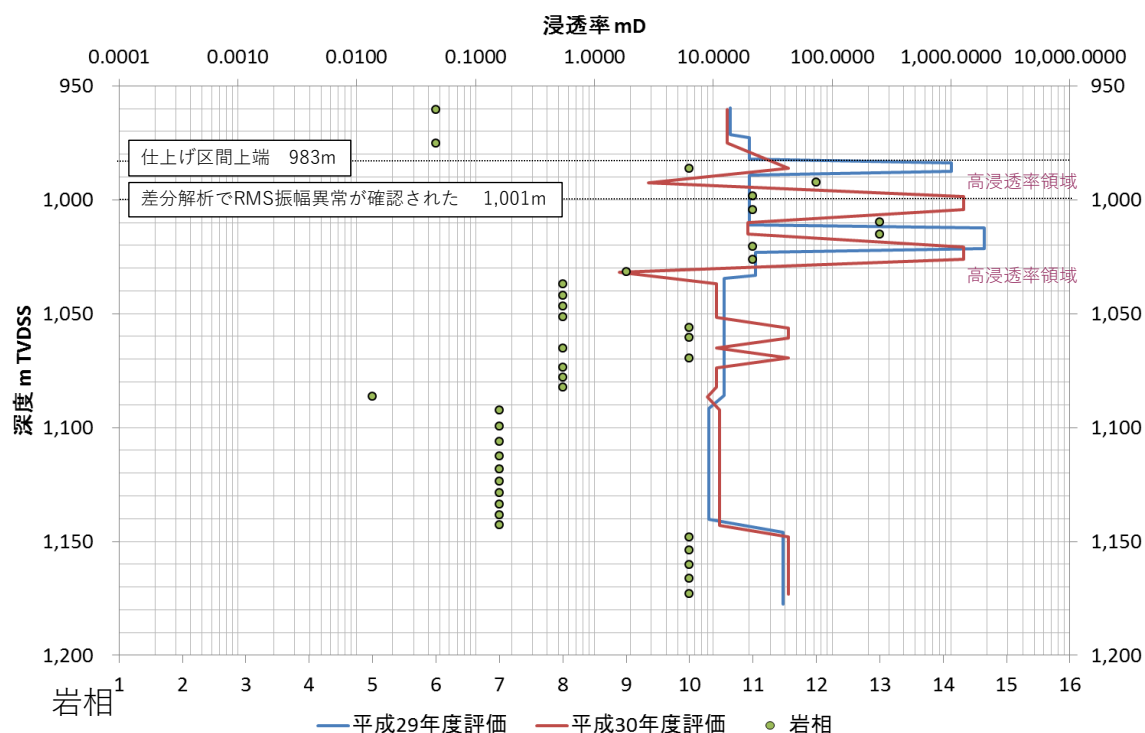


図 5.4-5 区分した岩相と浸透率分布の関係

表 5.4-3 各岩相のパラメータ

岩相	定数 【a × (T2LM) ^c 】		浸透率 (mD)	
	未調整	修正	調整前	修正
1	123	123	2	2
2	123	123	2	2
3	123	123	2	2
4	123	123	2	2
5	123	613	2	9
6	198	1,979	1	13
7	816	1,632	6	11
8	858	1,717	5	11
9	96	287	1	2
10	3,007	6,014	21	43
11	2,094	273,276	10	1,281
12	459	918	1	3
13	1,724	8,622	4	19
14	1,324	1,324	8	8
15	1,392	1,392	4	4
16	1,419	1,419	4	4

注) 水平浸透率は、浸透率=a×全孔隙率⁴ (T2LM)^c

(3) ネットグロス比

IW-2、OB-2、CCS-1の検層解析から求めた含粘度率 V_{clay} 、全孔隙率 PHIT から有効孔隙率 PHIE を以下の式（5.4-2）で求めた。

$$PHIE = (1 - V_{clay}) \times PHIT \quad \text{式 (5.4-2)}$$

PHIE/PHIT をネットグロス比とみなし、ネットグロス比 = $(1 - V_{clay})$ として、岩相毎に平均した値を用いた。なお、岩相 1～4 はデータ数が少ないことから、岩質が近い岩相 5 も含めて平均化した。

(4) 垂直浸透率／水平浸透率比（kv/kh）

検層データを垂直方向のグリッドサイズである 1.25m にアップスケーリング後、水平方向の浸透率を加重平均、垂直方向の浸透率を調和平均し各セルの kv/kh を算出した。各セルの岩相はアップスケーリング後のセルにおいて最も割合の多い岩相とし、同一の岩相をもつセルの kv/kh を平均した。これにより求めた平均値を各岩相の kv/kh とした。

(5) 相対浸透率曲線

2017 年度評価¹⁾と同様に CCS-2 と OB-2 のコアデータによって測定された数値を標準化することで求めた。標準 CO₂ ガス相対浸透率 k_{rg}^* と標準塩水相対浸透率 k_{rw}^* はそれぞれ式（5.4-3）と、式（5.4-4）の近似式を用いて作成した。式（5.4-3）の n は、圧入区間の主要な岩相である岩相 10 と岩相 11 では、 $n=2.0$ とし、それ以外の岩相では $n=3.5$ を仮定した。 S_{wir} は CCS-2 のコアデータから得た値を使用している（式（5.4-5））。CO₂ ガス相対浸透率の最大値（以下、「 k_{rgmax} 」と称する。）は文献値である 0.6 と、CCS-2 と OB-2 のコア分析値から得た 0.144 を用いた。また、臨界飽和率（ S_{gc} ）は 0.05 を仮定した。

例としてシルト岩と砂岩の相対浸透率曲線の図 5.4-6 に示す。

$$k_{rg}^* = (1 - S_w^*)^n \quad \text{Corey (1954) } ^{3)} \text{ の近似式 式 (5.4-3)}$$

$$k_{rw}^* = \sqrt{S_w^*} \left(1 - \left(1 - S_w^{*\frac{1}{\lambda}} \right)^\lambda \right)^2 \quad \lambda = 0.8 \quad \text{van Genuchten (1980) } ^{4)} \text{ の近似式 式 (5.4-4)}$$

(5.4-4)

$$k_{rg}^* = k_{rg} / k_{rg@S_{wir}}$$

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{wir}}$$

$$k_{rw}^* = k_{rw} / k_{rw@S_{wmax}}$$

$$S_{wir} = 0.78 - 0.0542 \log (k) / \phi \quad \text{式 (5.4-5)}$$

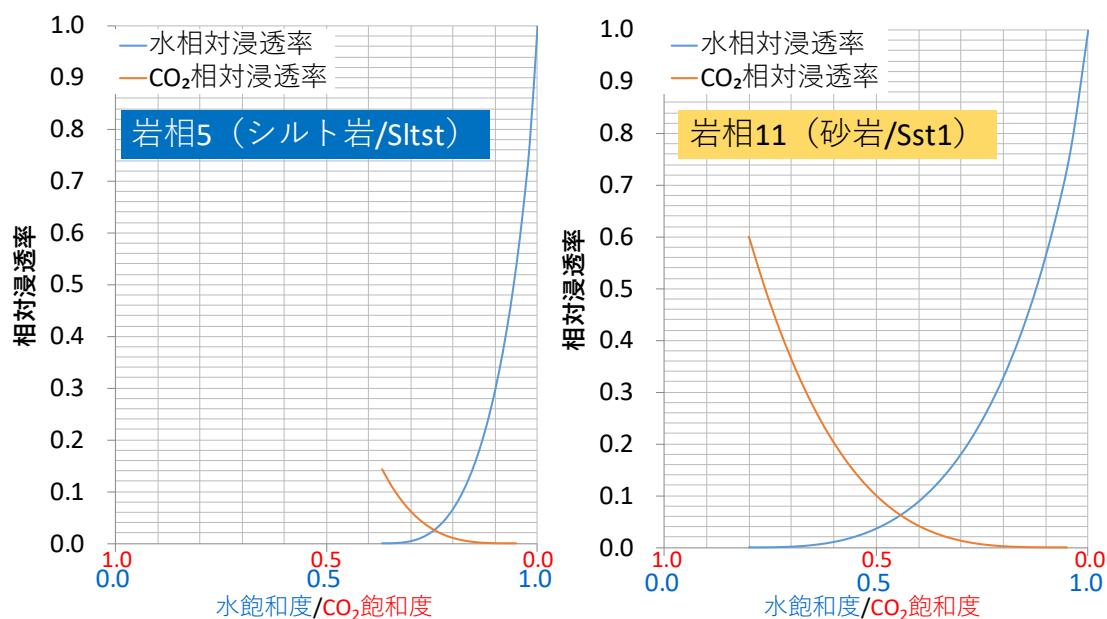


図 5.4-6 相対浸透率曲線の例

(6) 毛細管圧力

2017 年度評価¹⁾と同様に CCS-2、OB-2 および IW-2 のコアデータにより取得された N₂-水系の毛細管圧力データを CO₂-水系に変換し、浸透率と孔隙率による相関を求めることにより（式（5.4-6）、式（5.4-7））作成した。毛細管圧力曲線の例を図 5.4-7 に示す。

$$P_c = J(S_w) * T \cos \theta * \sqrt{\frac{\phi}{k}} * CF \quad \text{式 (5.4-6)}$$

$$J(S_w^*) = 6.28 * \exp(-5 * S_w^*) \quad \text{式 (5.4-7)}$$

P_c:毛細管圧力

J (S_w) :J-function

Tcon θ :界面張力×Cos（接触角）

CF:Conversion Factor（kPa の場合、31.8316）

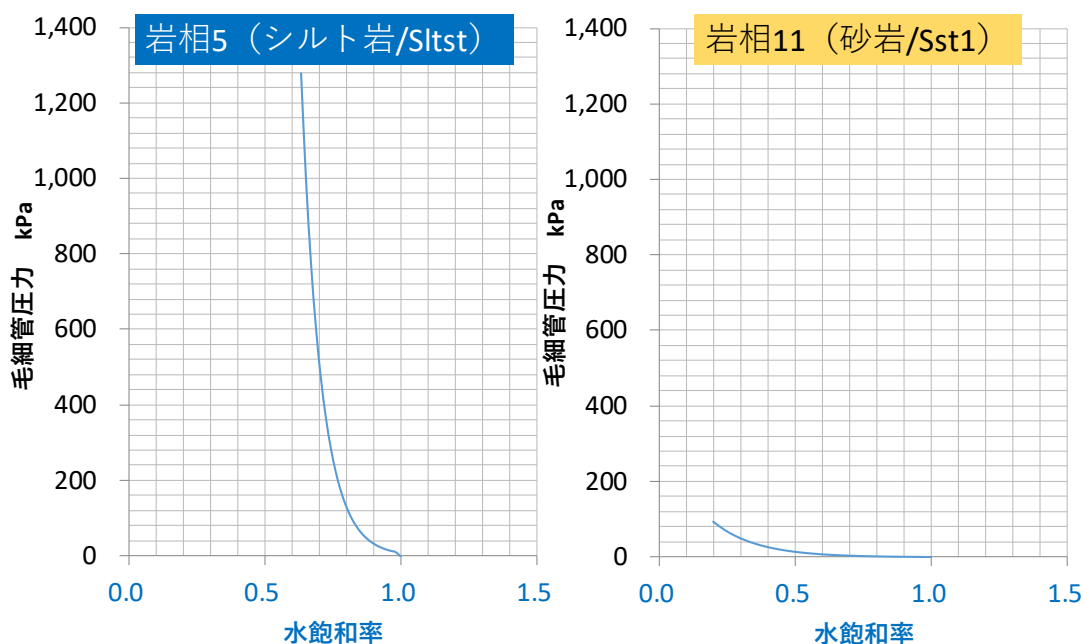


図 5.4-7 毛細管圧力曲線の例

(7) 遮蔽層の孔隙率・浸透率・ k_v/k_h ・ネットグロス比

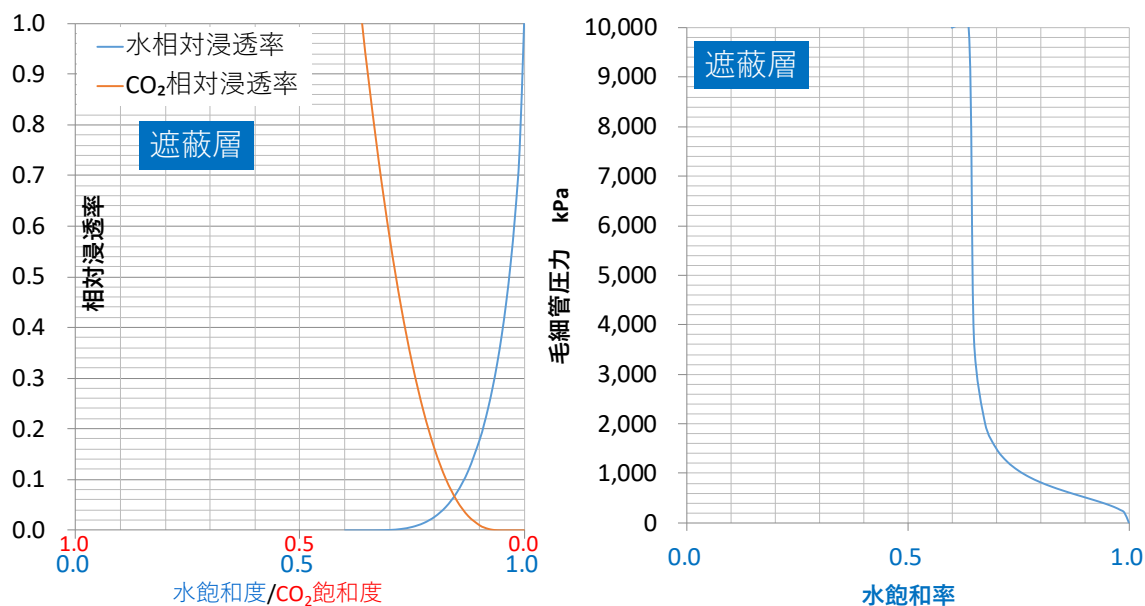
2017 年度評価¹⁾と同様に、CCS-2 と OB-2 の解析値の平均から孔隙率は 0.299 とし、水平および垂直浸透率は 0.0015 mD を用いた ($k_v/k_h=1$)。また、ネットグロス比=1 と仮定した。

(8) 遮蔽層の相対浸透率曲線

2017 年度評価¹⁾と同様に、不動水飽和率は Bennion and Bachue (2007)⁵⁾ の低浸透性岩石に対する水系のフラッド実験結果より 0.638 と仮定した。また、臨界ガス飽和率 (S_{gc}) は 0.05 を仮定した。相対浸透率曲線における CO_2 相対浸透率 k_{rg} は Corey (1954)³⁾ の、水相対浸透率 k_{rw} は van Genuchten (1980)⁴⁾ の近似式において係数を仮定し設定した (図 5.4-8)。なお、ヒステリシスは考慮していない。

(9) 遮蔽層のスレッシュホールド圧力・毛細管圧力

2017 年度評価¹⁾と同様に、CCS-2 と OB-2 でのスレッシュホールド圧力測定結果で最も低い値を用い、スレッシュホールド圧力は 370 kPa を使用した。毛細管圧力は van Genuchten (1980)⁴⁾ の関数にて定義し、臨界飽和率 (S_{gc}) における毛細管圧力がスレッシュホールド圧力となるように定数を決定した (図 5.4-8)。



注）左）相対浸透率曲線、右）毛細管圧力曲線

図 5.4-8 遮蔽層に設定した相対浸透率曲線と毛細管圧力曲線

5.4.3 ヒストリーマッチ結果

50 個の具現像を用いてヒストリーマッチを実施し、その精度を以下の項目を指標に評価した。

- 1) 仕上げ区間上端の圧力
- 2) 圧入指数の推移
- 3) FOT のログ-ログプロット
- 4) 2017 年度繰り返し三次元弾性波探査の解釈結果との比較

(1) 仕上げ区間上端の圧力

表 5.4-3 に各具現像の目的関数を示す。平均は 28kPa となる。この結果に基づく累積分布関数と使用した具現像数（あるいは岩相分布のパターン数）に対する平均した目的関数および標準偏差を図 5.4-9 に示す。評価に用いる適切な具現像数を見積もるため、使用する数を 10 個ずつ増やして結果を確認した。累積分布関数および標準偏差は 20 個以上から収束しはじめた。

表 5.4-4 において水色でハイライトした具現像は目的関数が小さい 10 個の具現像である。後述する②圧入指数の推移以降の検証は、これら 10 個の具現像を用いて行った。

表 5.4-4 各具現像の目的関数

具現像	平均		具現像	平均
1	26.9		26	26.0
2	29.5		27	31.4
3	25.9		28	32.9
4	27.5		29	32.2
5	32.6		30	24.0
6	27.1		31	24.7
7	25.1		32	30.7
8	24.0		33	25.9
9	26.3		34	31.9
10	24.6		35	23.9
11	27.6		36	24.9
12	38.3		37	24.6
13	24.0		38	23.4
14	30.4		39	31.4
15	27.4		40	25.0
16	25.6		41	31.3
17	27.0		42	30.7
18	27.9		43	23.9
19	29.4		44	28.9
20	26.5		45	25.7
21	31.8		46	25.0
22	26.6		47	32.6
23	32.4		48	26.7
24	28.3		49	24.9
25	23.6		50	26.2

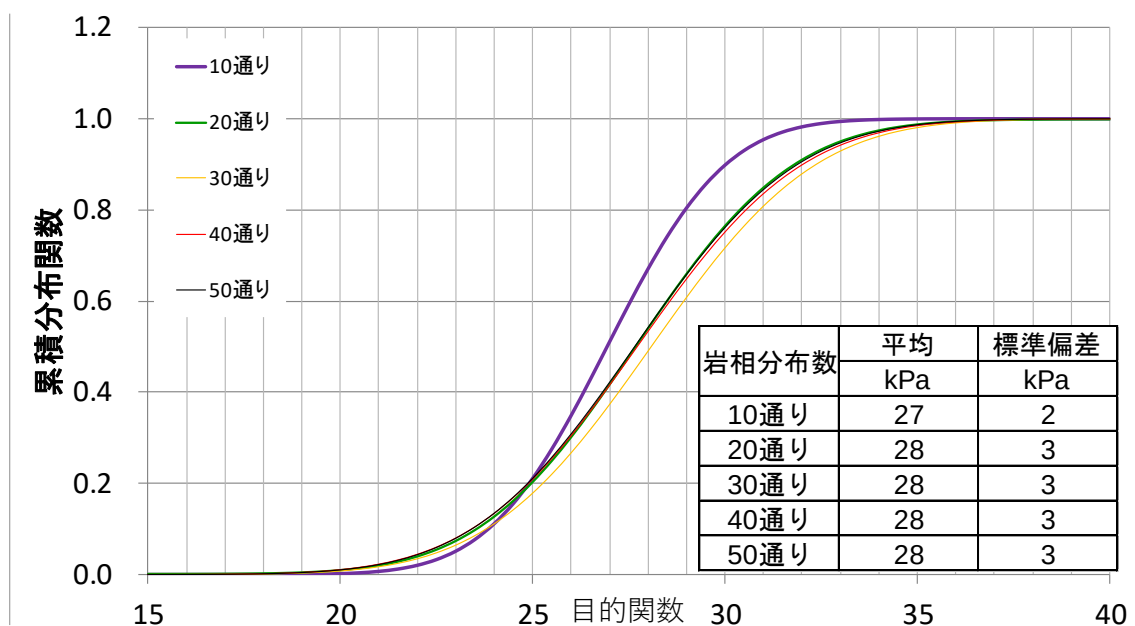
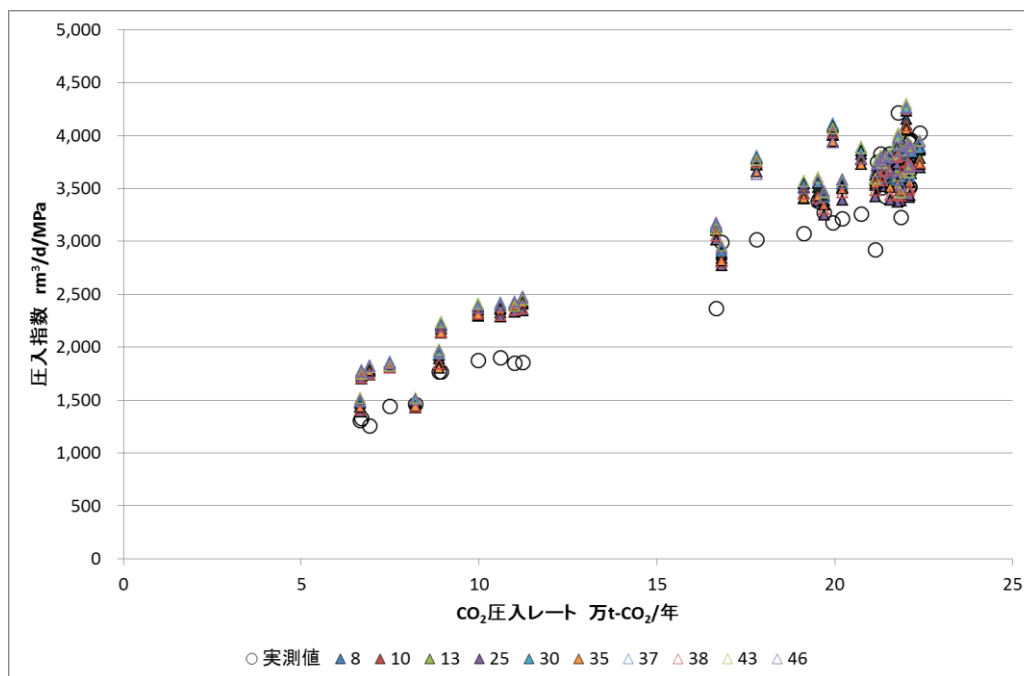


図 5.4-9 50 個の具現像による累積分布関数（左図）および使用した具現像数に対する平均目的関数と標準偏差（右表）

(2) 圧入指数

図 5.4-10 は実績および目的関数が小さい 10 個の具現像（表 5.4-4）の圧入レートと圧入

指数の関係を示す。凡例にある数字は具現像の番号を示しており、白丸プロットが実績、各色の三角プロットがシミュレーション結果である。いずれの具現像も実績同様に、圧入レートが増加するほど圧入指数が高くなる。



注）圧入指数は、仕上げ区間上端深度において一日あたりに圧入されるCO₂の体積を、圧入時の圧力と初期圧との差圧で除した値。圧入指数が高い程、低い圧力で大量のCO₂が圧入できることになる。

図 5.4-10 圧入レートと圧入指数の比較

図 5.4-11 は目的関数が最も小さい具現像 No.38 を用いて、8 万 t-CO₂/年および 22 万 t-CO₂/年で CO₂ を圧入するシミュレーションを実施した際に、CO₂ が圧入される深度と、圧入される全 CO₂ に対する当該深度に圧入される CO₂ の割合を示している。圧入レートが増えたことで圧入区間が拡張する様子がうかがえる。この結果は第 3 章で述べた圧入レートが増えるほどに圧入区間下端深度が下降する傾向と整合しており、圧入時に想定される圧入状況を再現できている。

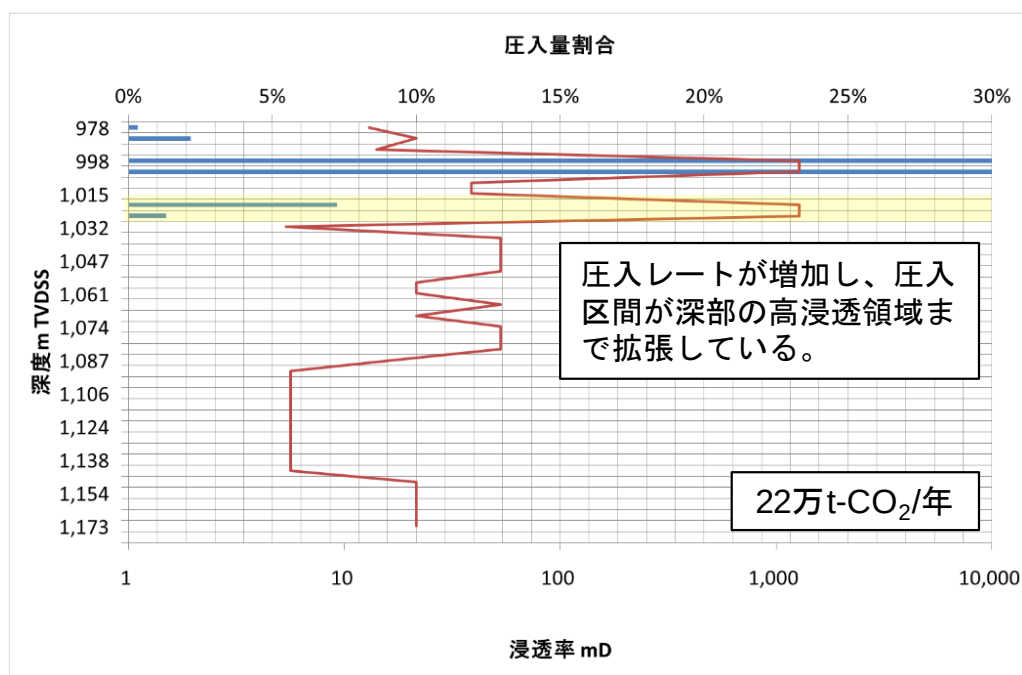
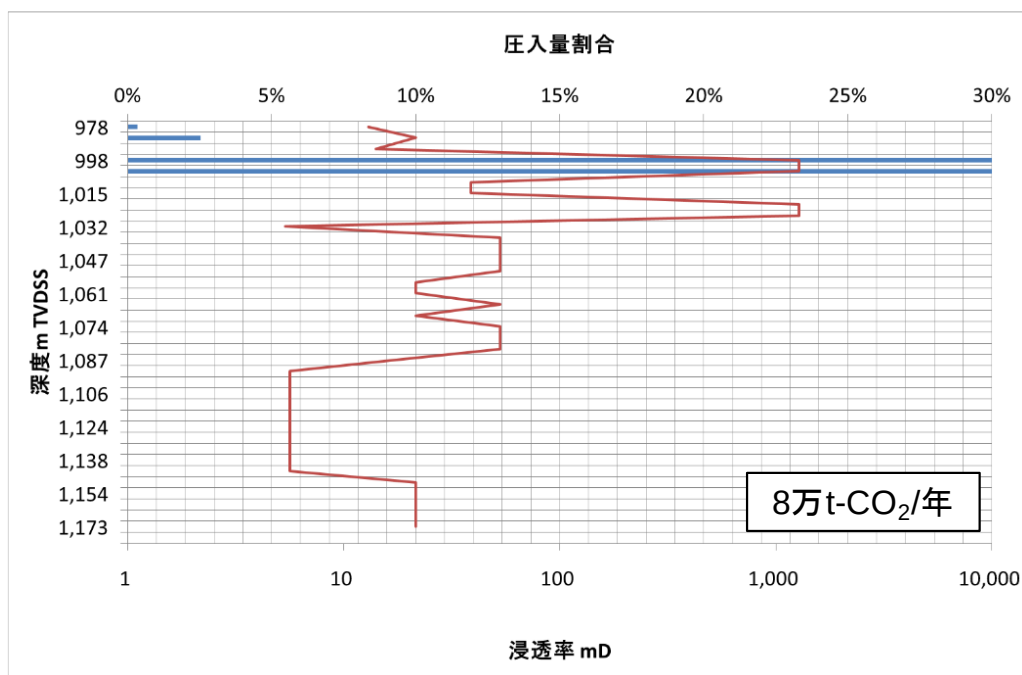


図 5.4-11 圧入レートに応じ再現される圧入量の割合と深度との関係（具現像 No.38、
上：8 万 t-CO₂/年、下：22 万 t-CO₂/年）

(3) フォールオフテストのローグログプロット

50 個の具現像の内、目的関数が小さい 10 個の具現像（表 5.4-4）を用いて、実際の FOT6～10 を再現し、ローグログプロットを作成した。作成したローグログプロットと、2017 年度モデルで再現したローグログプロットおよび実績値とを比較した（図

5.4-12)。各具現像のデリバティブカーブはアーリータイムの中盤まで実績値とやや乖離が見られるものの、以降の傾向は概ね再現できている。特に FOT9、10 のレイトタイムについては 2017 年度モデルと比較してマッチング精度が改善されたと考えられる。また、ショックフロントを示す上に凸の形状が現れる時間は、2017 年度モデルよりも再現性が向上したと考えられる。本検討のモデルでは、貯留層性状の水平方向の不均質性を考慮したことで再現性が改善されたものと推定される。

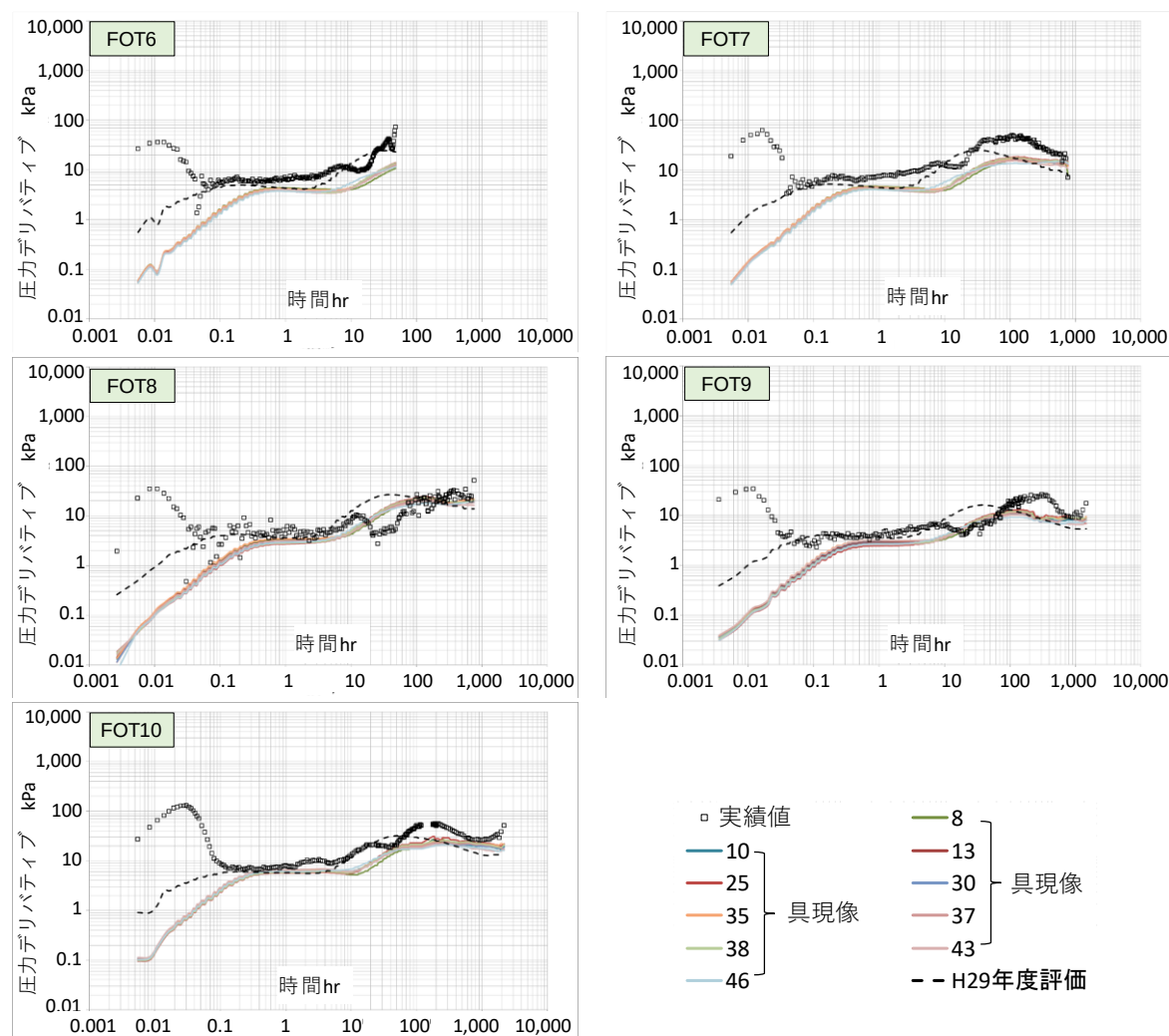
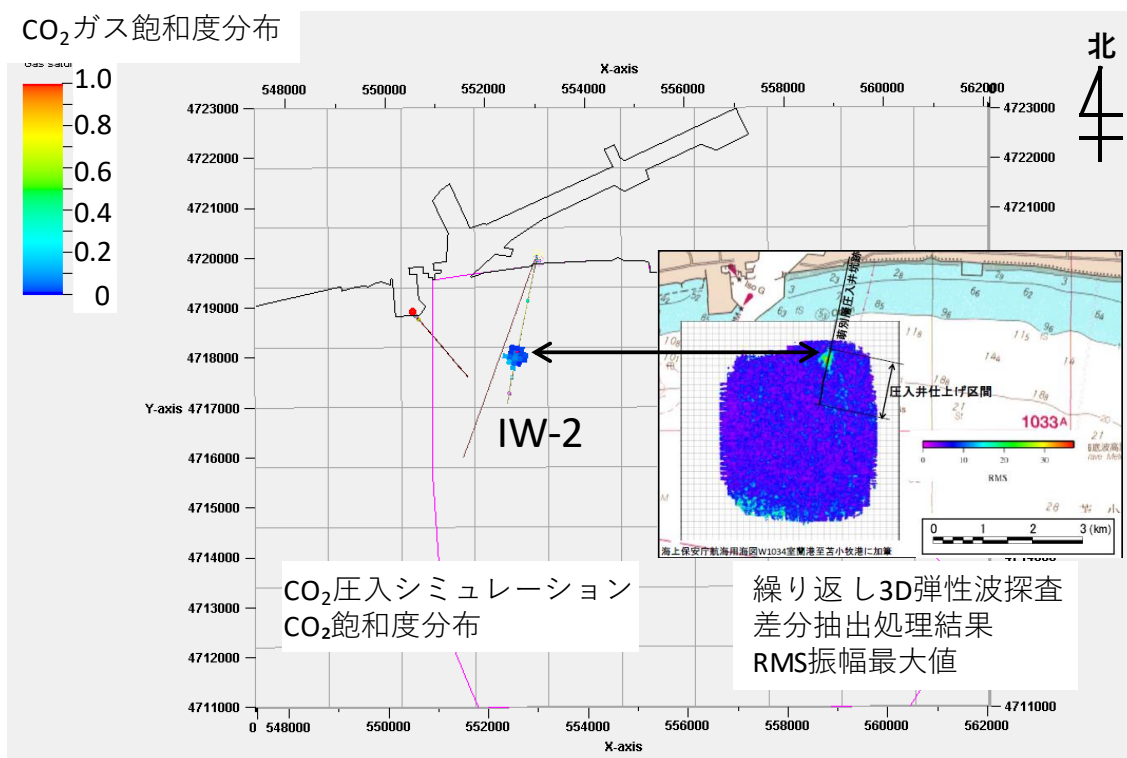


図 5.4-12 ログログプロットの比較（FOT6～10）

(4) 繰り返し三次元弾性波探査解析結果との比較

圧入開始前の初期状態で実施した三次元弾性波探査データと、65,000 t 程度の CO₂ を圧入した、2017 年 8 月 1 日頃に実施した三次元弾性波探査データとの差分を解析した結果から、RMS 振幅値に異常値が認められた（図 5.4-13 右図）。同時点の貯留層内での CO₂

飽和度の広がり、目的関数が最も小さい具現像 38 を用いてシミュレーションにより再現した（図 5.4-13 左図）。RMS 振幅値の異常値の広がり、シミュレーションにより再現した CO_2 飽和度の分布範囲は、仕上げ区間の上部付近にて同程度の広がりとなり整合的な結果を示している。RMS 振幅値の異常値が CO_2 飽和度の分布を示唆するものであると仮定した場合、具現像 38 が適切なモデルであると考えることができる。



注）左図は上方から俯瞰した CO_2 飽和度分布。 CO_2 飽和度の下限値は 0.001。右図は圧入開始前の初期状態と 2017 年 8 月 1 日頃の、三次元弾性波探査の差分解析結果で示された RMS 振幅の異常値の範囲（緑色）。

図 5.4-13 繰り返し三次元弾性波探査による差分解析結果との比較

5.4.4 ヒストリーマッチに関するまとめ

岩相分布が異なる 50 個の具現像を用いてヒストリーマッチを行った。仕上げ区間上端圧力の目的関数、圧入指数の推移、FOT のログーログプロット、2017 年度に実施した繰り返し替えし三次元弾性波探査の解釈結果との整合性を確認し、モデルの精度を検証した。

各具現像の仕上げ区間上端圧力の振れ幅は 23.4～32.9 MPaG であり、計算結果に対する岩相分布の影響は軽微であった。得られた目的関数の平均は 28 MPaG であり、2017 年度モデルの 25 MPaG と同程度となった。

目的関数が小さい 10 個の具現像を用いて圧入性を評価したところ、いずれも圧入レー

トの増加に伴う上昇が見られ、実績と同様の結果を得た。同様に FOT のログーログプロットの再現性についても、2017 年度モデル同様に実績をほぼ再現している。貯留層性状の不均質性を考慮したことで FOT9、10 のレイトタイムの再現性については、2017 年度モデルよりも向上したと考えられる。

【参考文献】

- 1) 日本CCS調査（株）、“2017 年度「2017 年度苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業」成果報告書”（2018）
- 2) 斉藤秀雄、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）
- 3) Corey, A.T., "The Interrelation Between Gas and Oil Relative Permeabilities", Prod. Monthly. 19(1), p.38-41(1954)
- 4) van Genuchten, M.Th., “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, Soil Soc. Am. J., 44, p.892-898(1980)
- 5) Bennion, B., Bachu, S., “Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for -Water System in Ultralow-Permeability Confining Caprocks”, SPE 106995(2007)

5.5 IW-2 長期挙動予測シミュレーション

ヒストリーマッチで調整したパラメータを用いて、CO₂を圧入し、圧入中および圧入後の挙動を予測する長期挙動予測シミュレーションを実施した。

5.5.1 使用した貯留層モデル

122 通りの岩相分布を有する具現像について圧入実績に準ずる圧入をシミュレーションし、目的関数が 25 kPa 以下となる具現像を 30 個抽出し、その中で最も目的関数が小さい具現像の地質モデルをシミュレーションに使用した（図 5.5-1）。

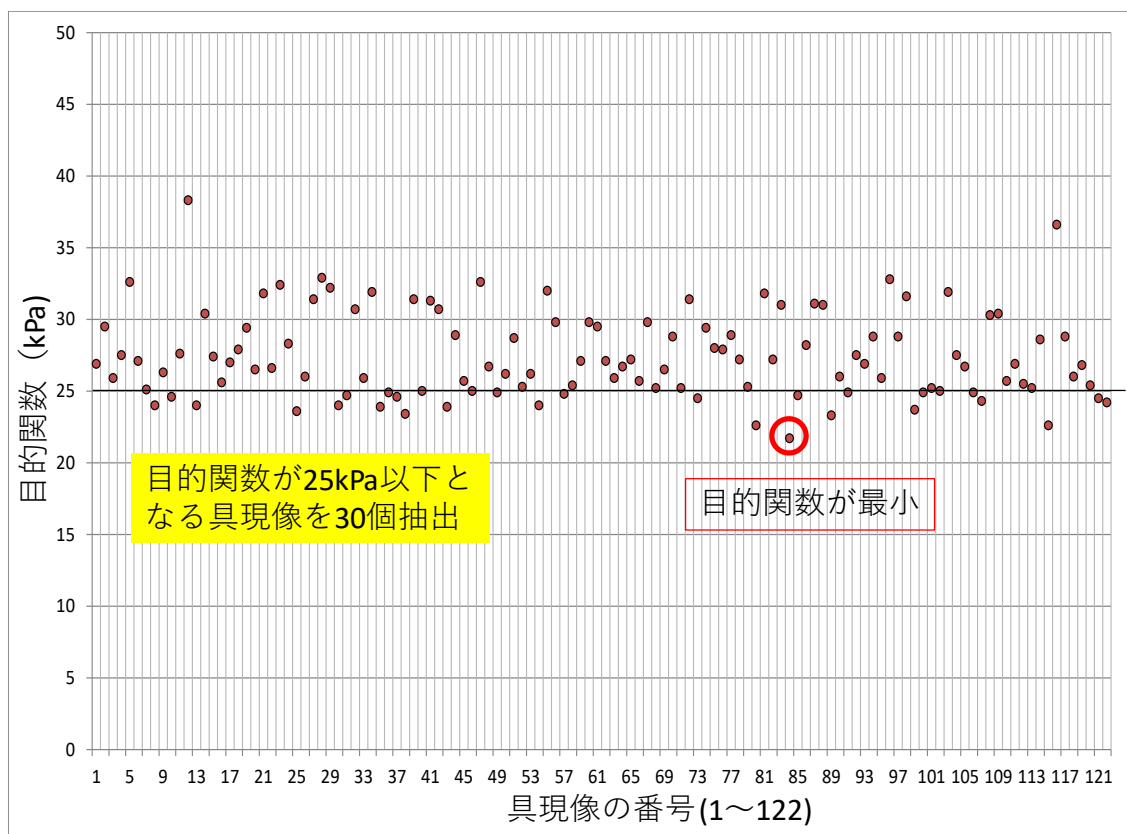
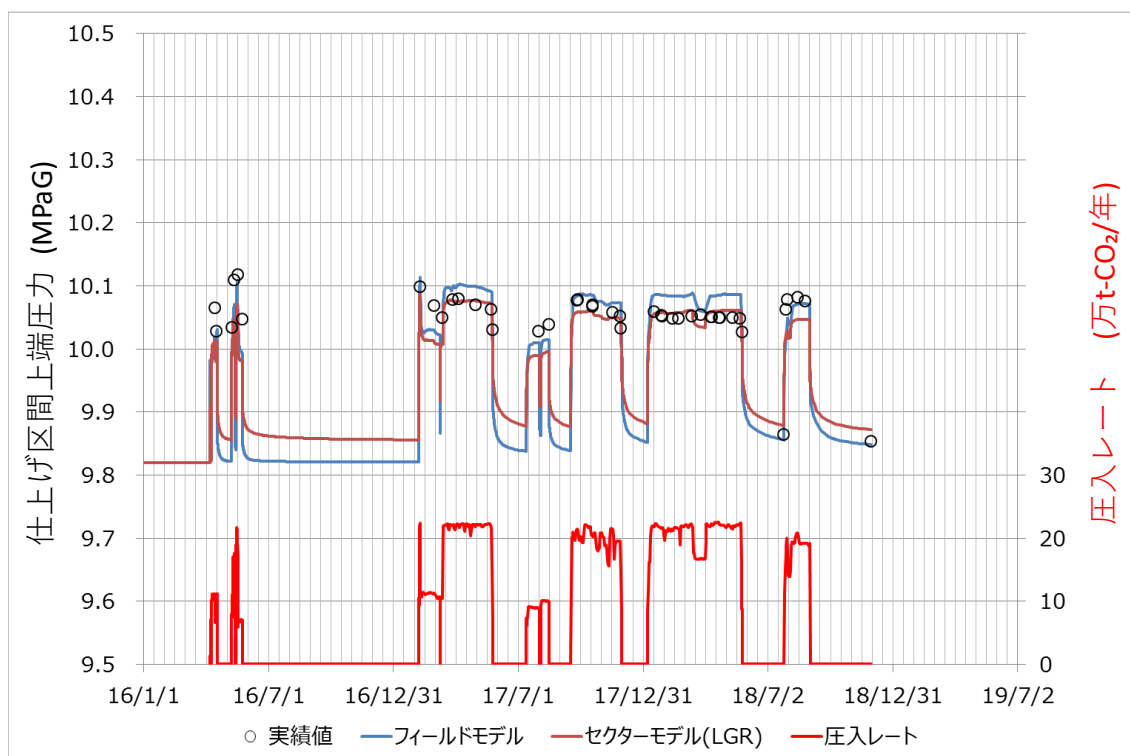


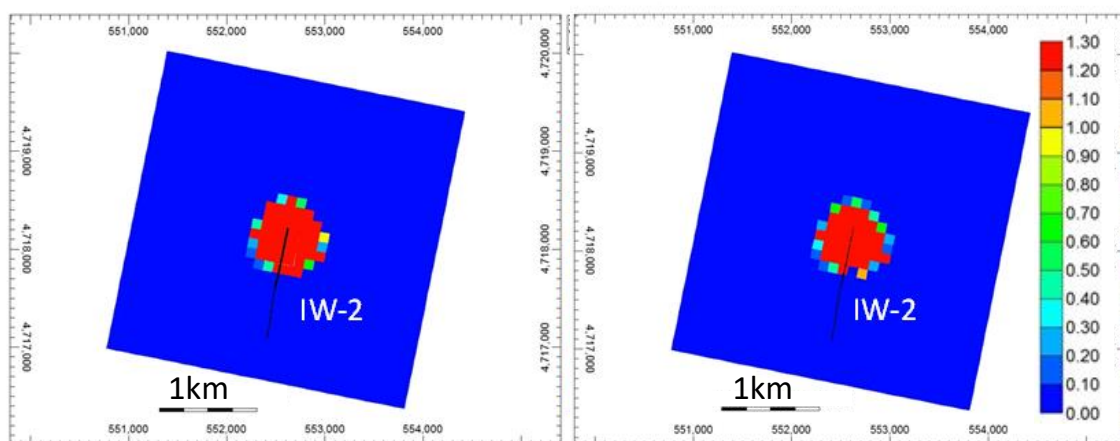
図 5.5-1 シミュレーション使用する貯留層モデルの抽出

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 5.4 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 5.5-2、図 5.5-3）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。

図 5.5-2 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再現性比較



フィールドモデル(セクターモデル範囲を抽出) セクターモデル(LGR)

図 5.5-3 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 5.5-4、表 5.5-1）。

IW-2 においては地質モデル縁辺の有効孔隙を 1～700 倍に設定した場合であっても、予想される仕上げ区間上端における圧力挙動に差異は認められない（図 5.5-5）。また、有効孔隙設定を 500 倍以上にすることで、OB-2 において推定される圧力変化の挙動がほぼ同等となった（図 5.5-6）。現状では、OB-2 において CO₂ 圧入による圧力変化を明確に観測することができていないため、シミュレーションで予想される圧力挙動は最低限の圧力変化を仮定し、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。

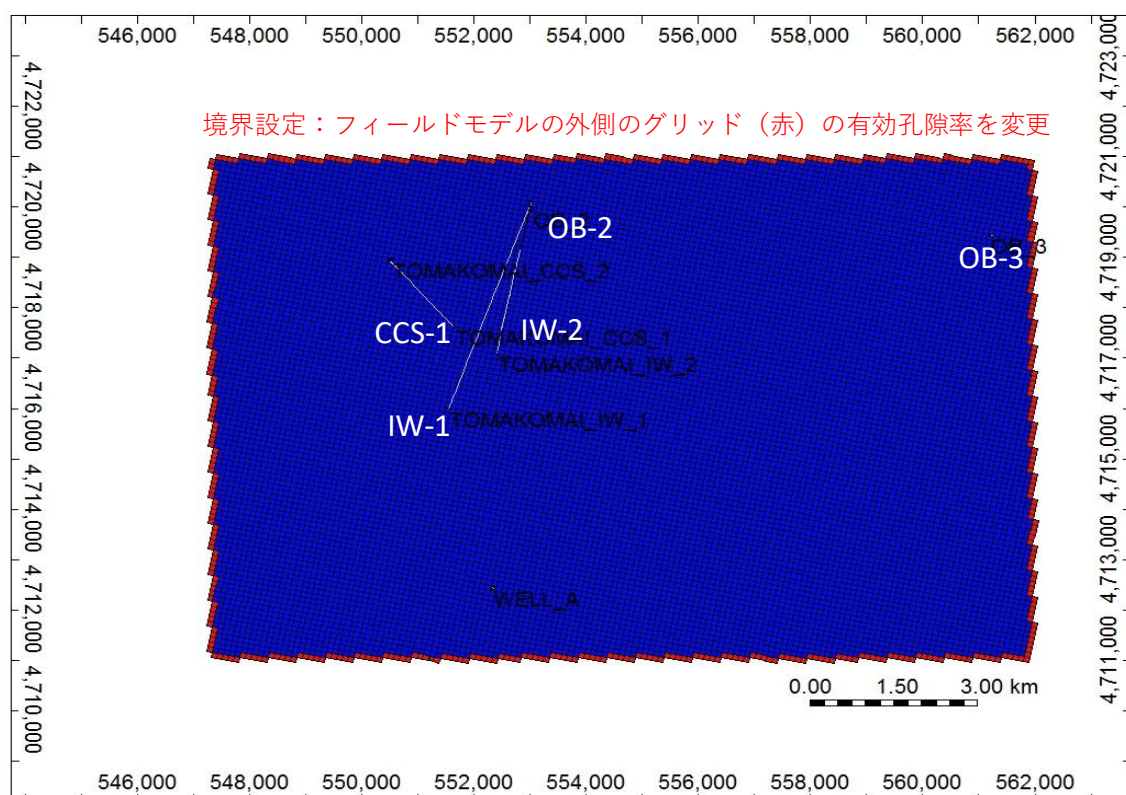
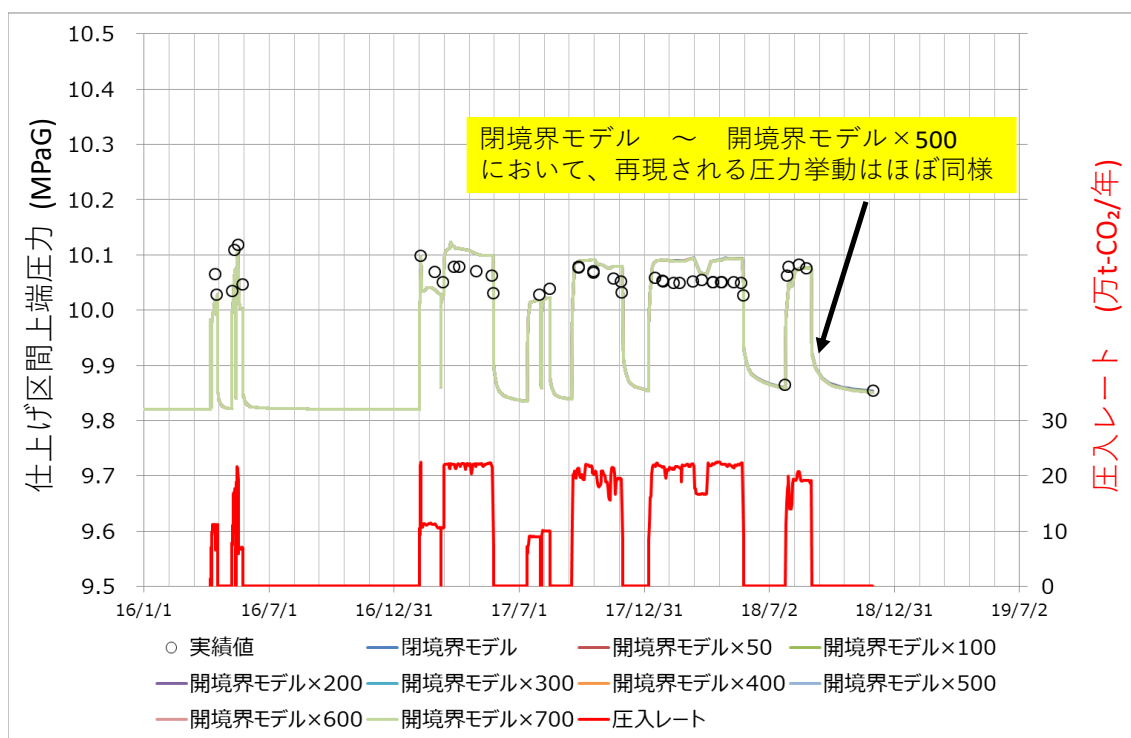


図 5.5-4 地質モデルの境界設定について

表 5.5-1 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



注) 閉境界および開境界モデル×50～開境界×700 で再現される IW-2 における圧力挙動に大差がなく、予測される圧力挙動は 1 本の線に見える。

図 5.5-5 境界条件の設定と IW-2 における仕上げ区間上端の圧力挙動の予測

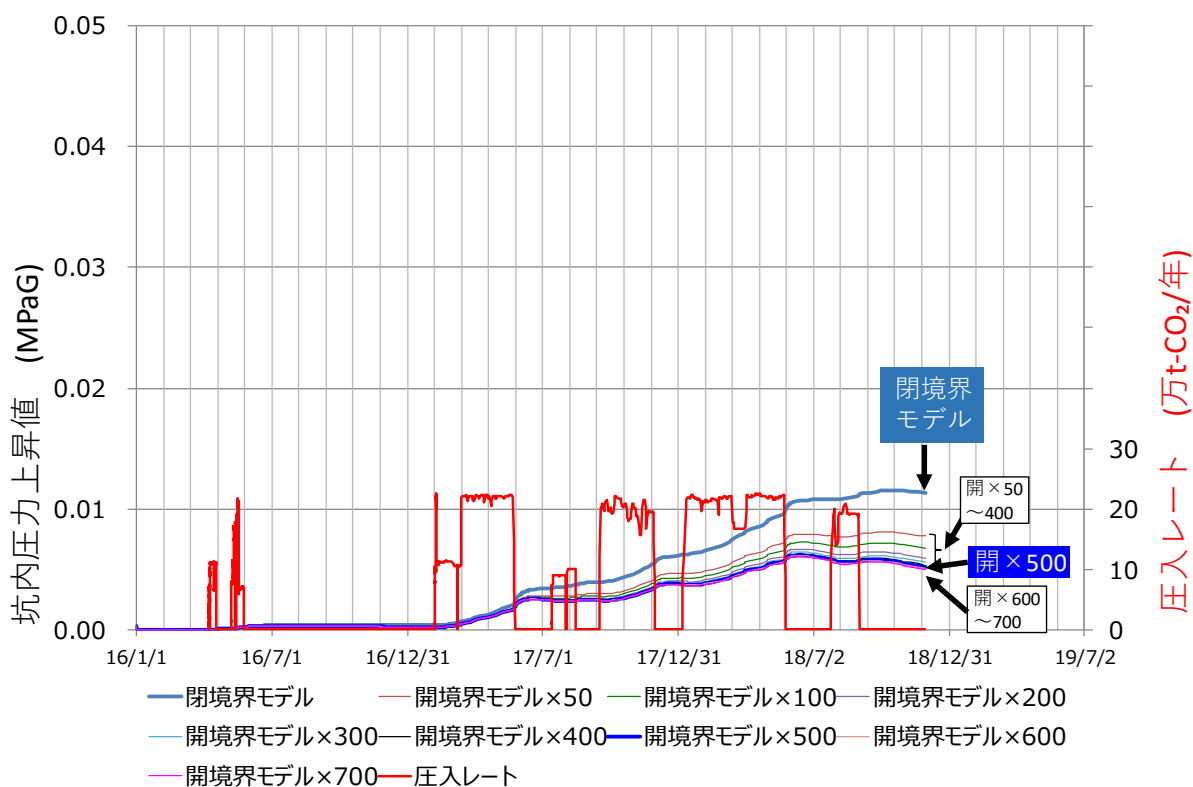


図 5.5-6 境界条件の設定と OB-2 における圧力変化の予測

5.5.2 長期挙動予測シミュレーションのパラメータの設定

5.4 節のヒストリーマッチで使用したセクターモデルと同様の方法でパラメータを設定した。使用した地質モデルについては、ヒストリーマッチでは計算時間を短縮するためにセクターモデルを使用したのに対して、長期挙動予測シミュレーションではフィールドモデルを使用した。

5.5.3 長期挙動予測シミュレーション結果

2018 年 11 月 30 日までの圧入実績に加え、それ以降は計画圧入レートで圧入する 3 ケースについて CO₂ を圧入し地下の挙動を予測する長期挙動予測シミュレーションを実施した（図 5.5-7、表 5.5-2）。以下、ケースごとに結果の詳細を述べる。

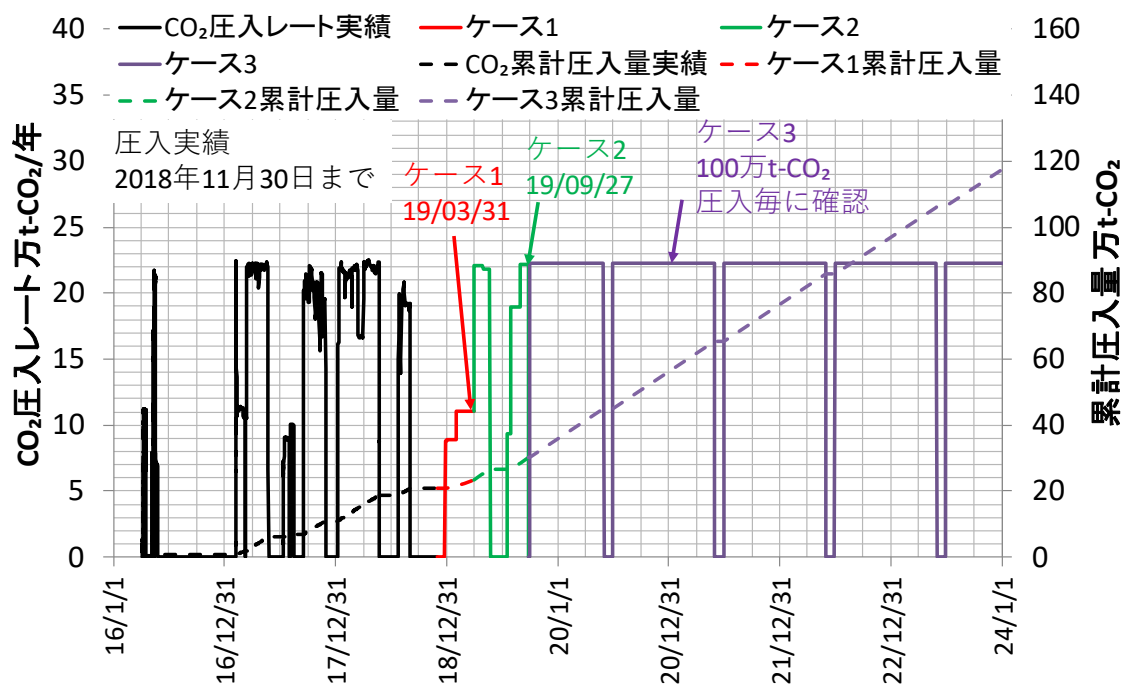


図 5.5-7 長期挙動予測シミュレーションの実施ケース

表 5.5-2 シミュレーション実施ケースの設定

	圧入期間	累計圧入量	備考
ケース1	2016年4月6日～ 2019年3月31日 まで	23万t-CO ₂	2018年11月30日までの圧入実績 +計画
ケース2	2016年4月6日～ 2019年9月27日 まで	30万t-CO ₂	
ケース3	2016年4月6日～ 2028年5月31日 まで	P90モデル 200万t-CO ₂	○最大圧入量の確認 ○22万トン/年で圧入（6月は圧入停止）で 圧入し、100万t-CO ₂ 圧入毎に条件を確認。 条件から外れない限り圧入を継続。 条件：圧入上限圧力を超えない。 1,000年後までに 条件：西側の断層に到達しない。 条件：陸域に到達しない。 条件：超臨界条件から外れる深度に移動し ない。
	2016年4月6日～ 2048年5月31日 まで	P50モデル 600万t-CO ₂	
	2016年4月6日～ 2067年5月31日 まで	P10モデル 1,000万t-CO ₂	

(1) ケース 1（2019 年 3 月時点までの圧入を想定）

圧入開始から 2018 年 11 月 30 日までの圧入実績と、2018 年 11 月 30 日時点で想定した、圧入計画に基づき、2019 年 3 月 31 日までに累計圧入量 23 万 t-CO₂を圧入するケー

スを想定した（図 5.5-8、表 5.5-2）。

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、圧入終了時における各具現像の仕上げ区間上端圧力の平均値（10.02 MPaG）と標準偏差（0.006 MPaG）を求め、累積分布曲線を作成した（図 5.5-8）。累積分布関数の値から、P90、P50、P10 に相当する具現像を抽出した。

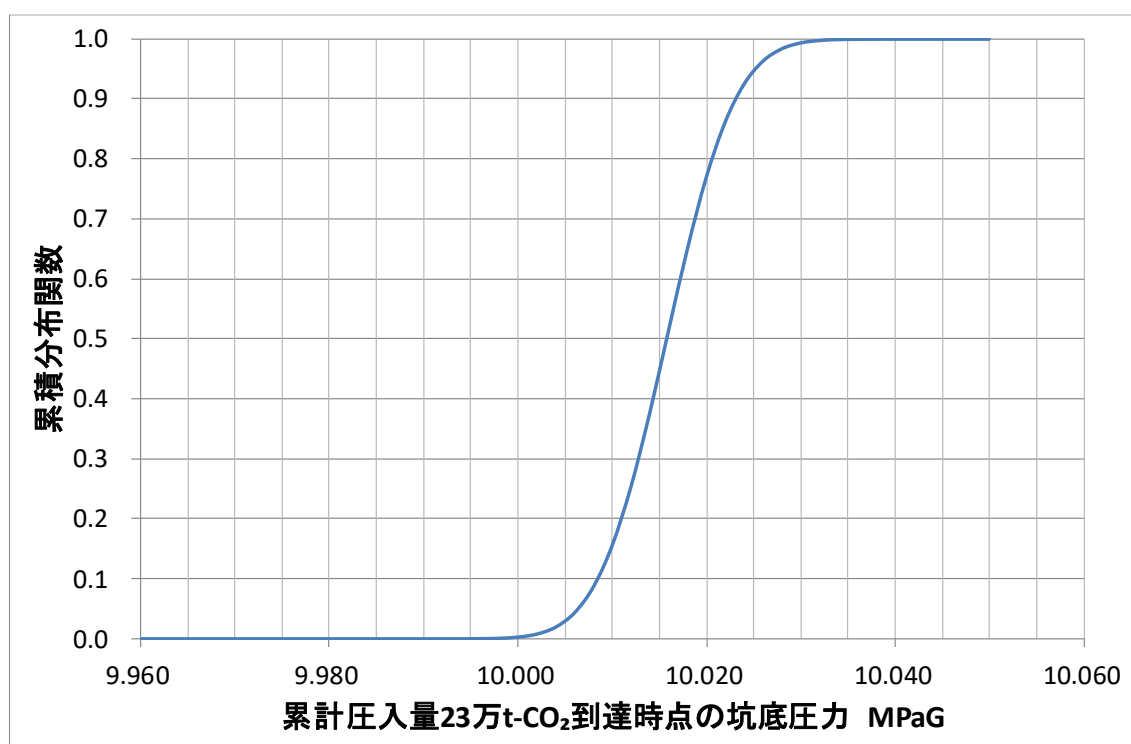
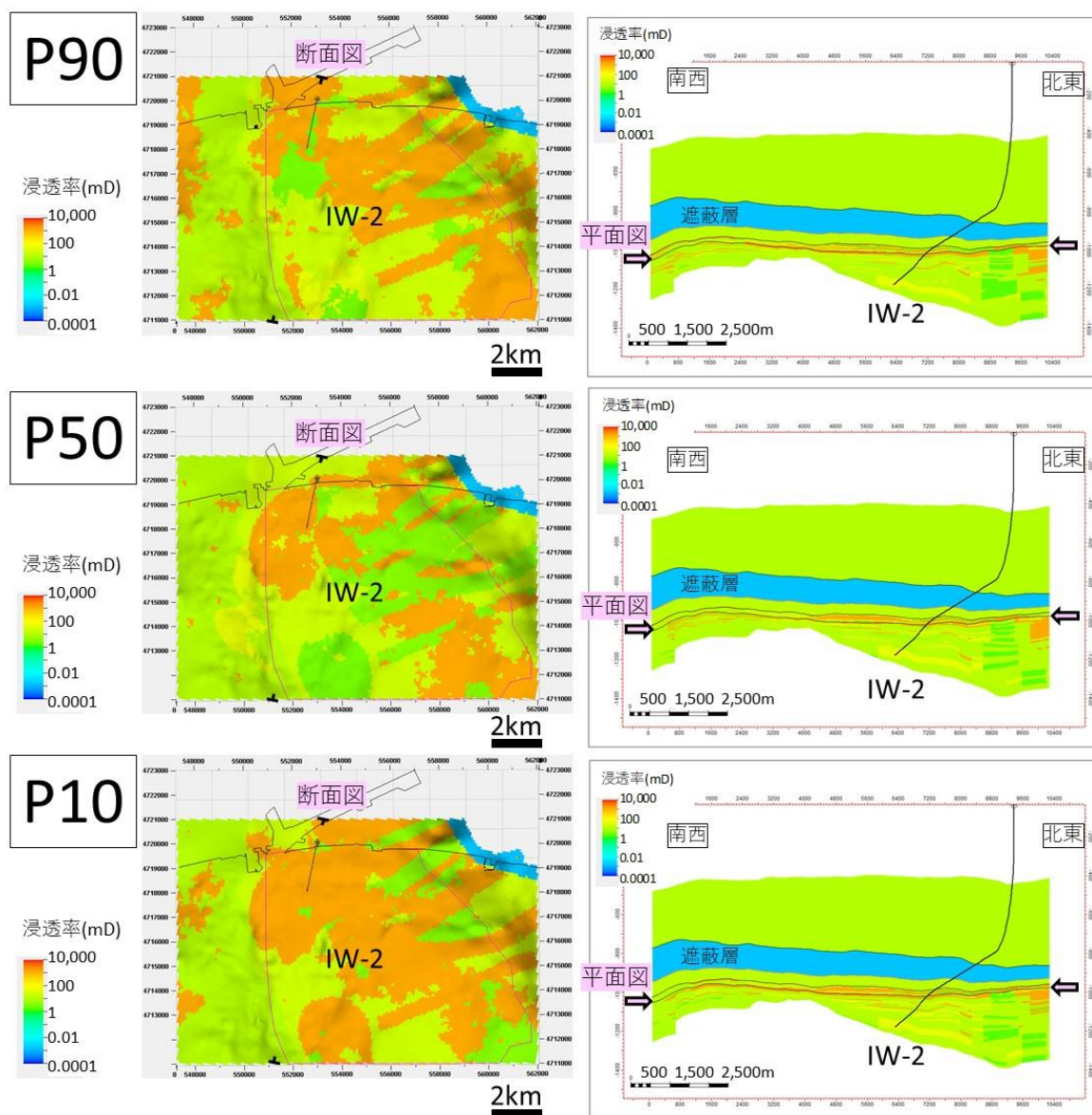


図 5.5-8 ケース 1 圧入終了時の仕上げ区間上端圧力の累積分布曲線

図 5.5-9 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、図 5.4-5 における上部の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）平面図は図 5.4-5 における上部の高浸透率領域に相当する層準。

図 5.5-9 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 5.5-10 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、圧力実測値とも概ね一致する。

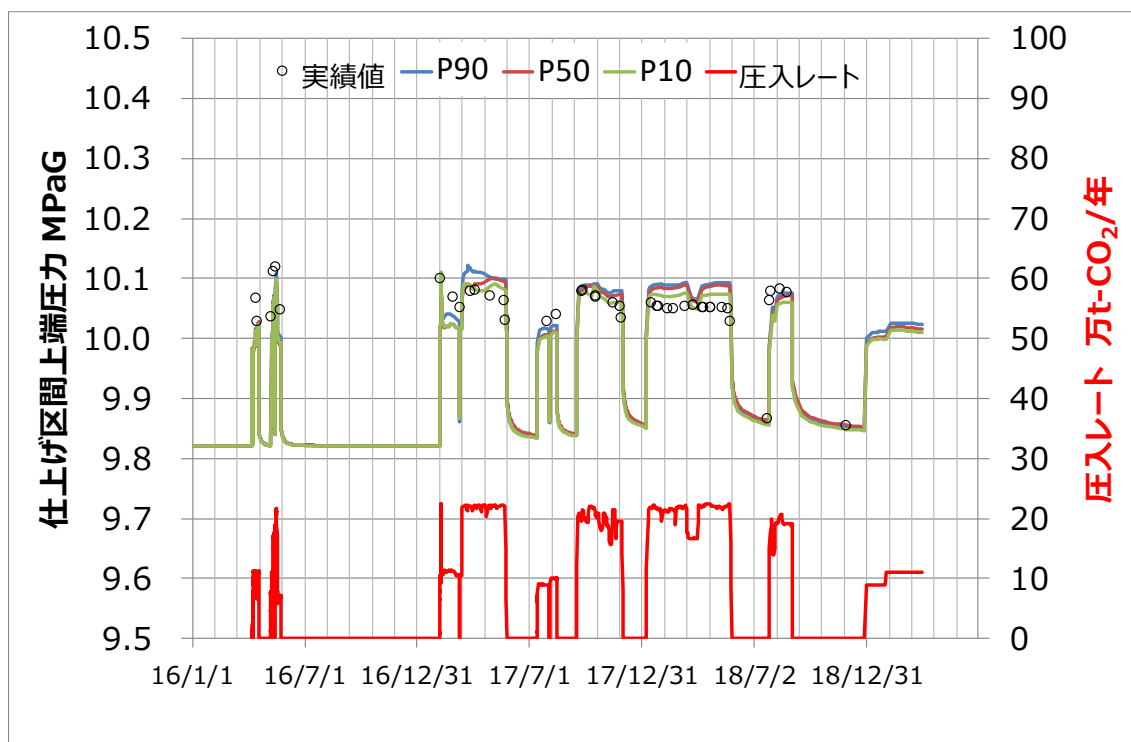
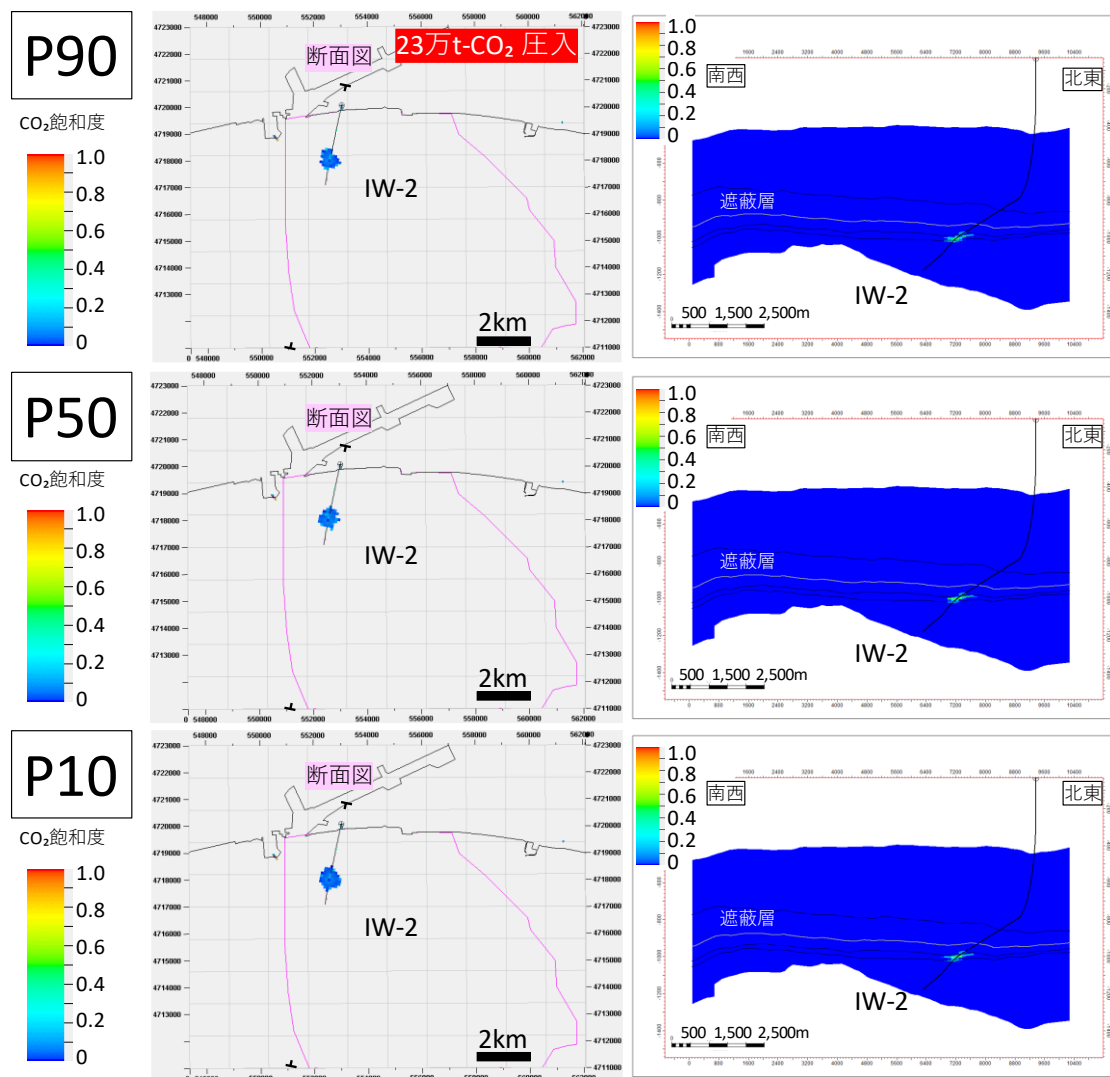


図 5.5-10 ケース 1 P90、P50、P10 具現像による仕上げ区間上端圧力
(2019 年 3 月 31 日まで圧入を継続し、累計 23 万 t 圧入するケース)

② 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）

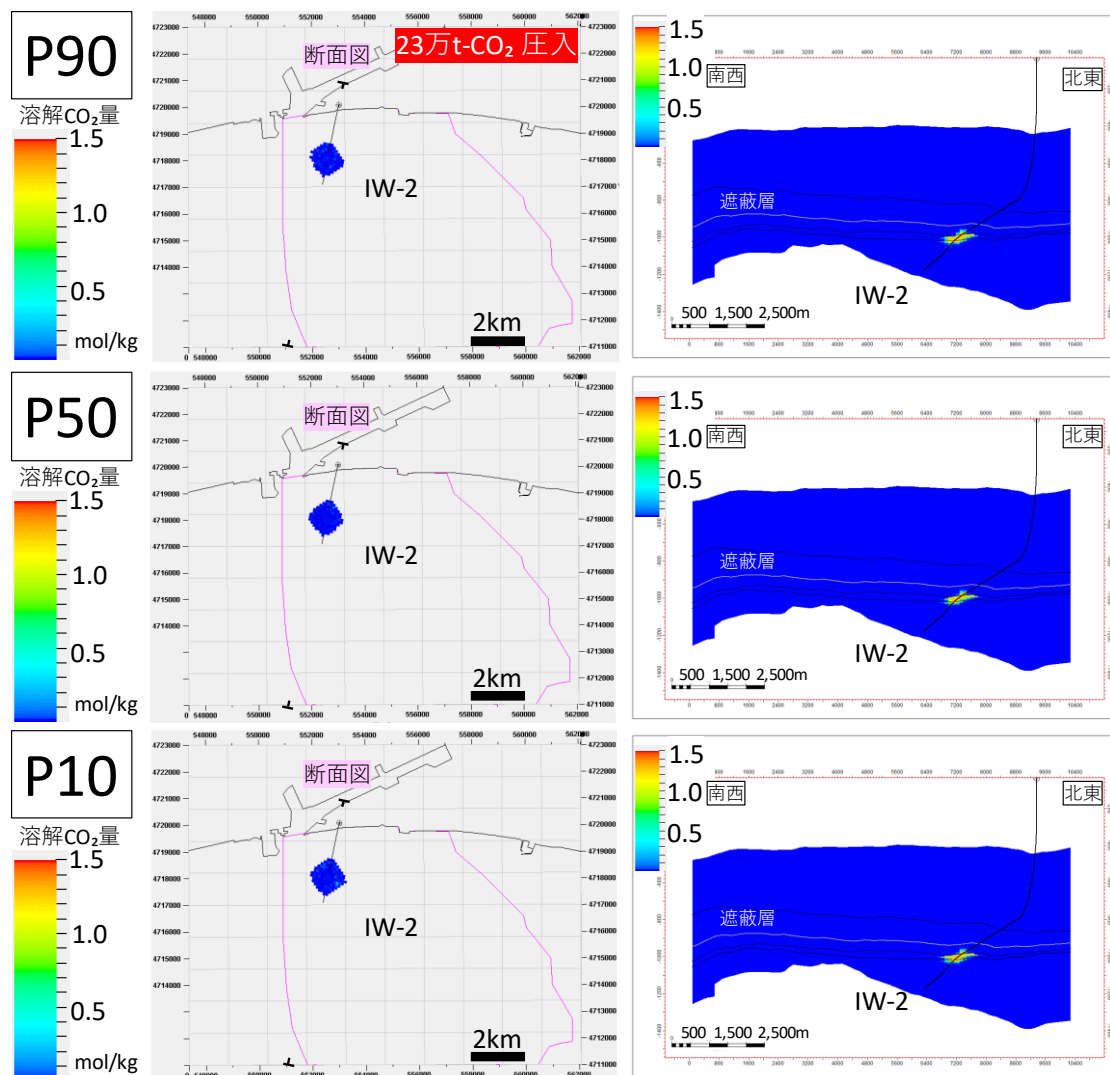
図 5.5-11 に P90、P50、P10 各具現像における圧入終了時に予想される CO₂ 飽和度の分布を示す。左側の平面図は圧入したすべての層準の CO₂ 飽和度の分布を上方から俯瞰した図である。右側の断面図は IW-2 の坑跡に平行な方向の断面図を示している。各具現像の結果から推定される CO₂ 飽和度分布に大差は認められない。



注）圧入終了時の CO₂ 飽和度分布。平面図は圧入された全 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 5.5-11 ケース 1 P90、P50、P10 具現像における CO₂ 飽和度分布

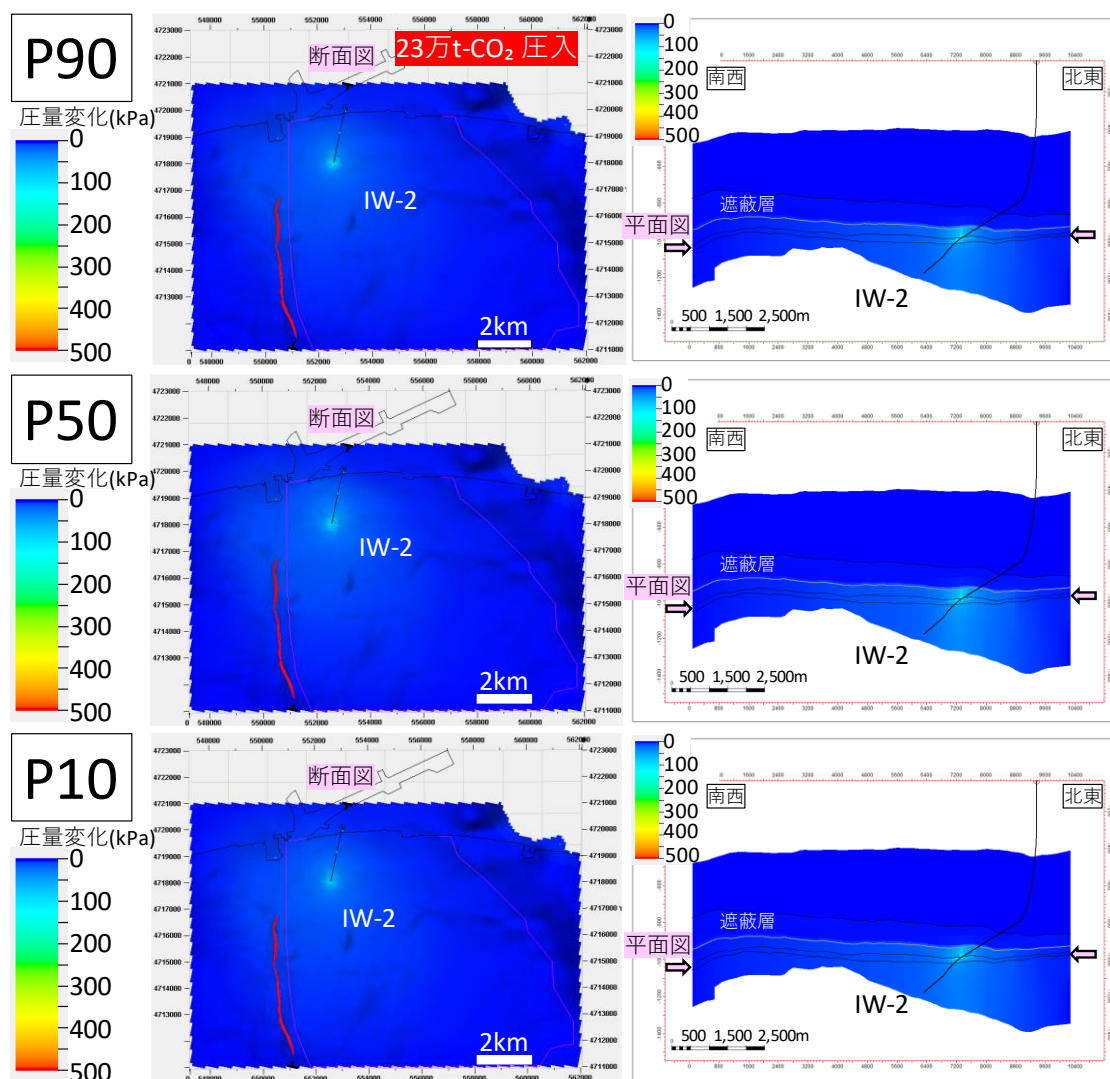
図 5.5-12 に P90、P50、P10 各具現像における圧入終了時に予想される溶解 CO₂ 量分布を示す。左側の平面図は圧入したすべての層準の溶解 CO₂ 量の分布を上方から俯瞰している。右側の断面図は IW-2 の坑跡に平行な方向の断面図を示している。各具現像の結果から推定される溶解 CO₂ 量の分布に大差は認められない。



注）圧入終了時の溶解 CO₂ 量分布。平面図は圧入された全溶解 CO₂ 量分布を上方から俯瞰した図。表示の下限值は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-12 ケース 1 P90、P50、P10 具現像における溶解 CO₂ 量分布

図 5.5-13 に P90、P50、P10 各具現像における圧入終了時に予想される圧力変化の分布を示す。左側の平面図は図 5.4-5 における上部の高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示している。貯留層内で最も圧力変化が大きい層準であると考えられる。平面図では、IW-2 周辺では概ね 100～150 kPa の圧力上昇が認められる。また、西側断層周辺では 10 kPa 以下の圧力上昇値が認められる。



注) 圧入終了時の圧力変化の分布。平面図は図 5.4-5 における上部の高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。平面図に赤色で示した線は断層を示す。弾性波探査記録からこの断層は遮蔽層に達していないと考えられる。

図 5.5-13 ケース 1 P90、P50、P10 具現像における圧力分布

(2) ケース 2（2019 年 9 月時点を想定）

圧入開始から 2018 年 11 月 30 日までの圧入実績と、2018 年 11 月 30 日時点で想定した、圧入計画に基づき、2019 年 9 月 27 日までに累計圧入量 30 万 t-CO₂ を圧入するケースを想定した（図 5.5-7）。

30 個の具現像について同様の圧入を実施する流動シミュレーションを実施し、圧入終了時における各具現像の仕上げ区間上端圧力の平均値（10.08 MPaG）と標準偏差

（0.007 MPaG）を求め、累積分布曲線を作成した（図 5.5-14）。累積分布関数の値から、P90、P50、P10 に相当する具現像を抽出した。

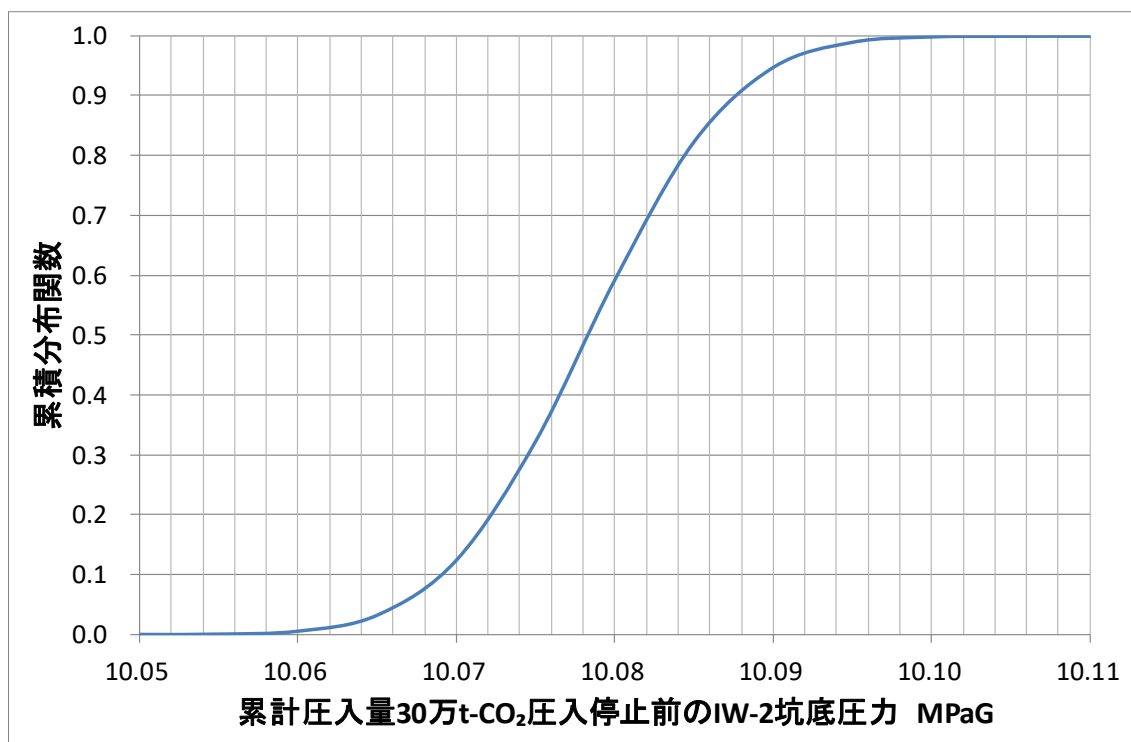
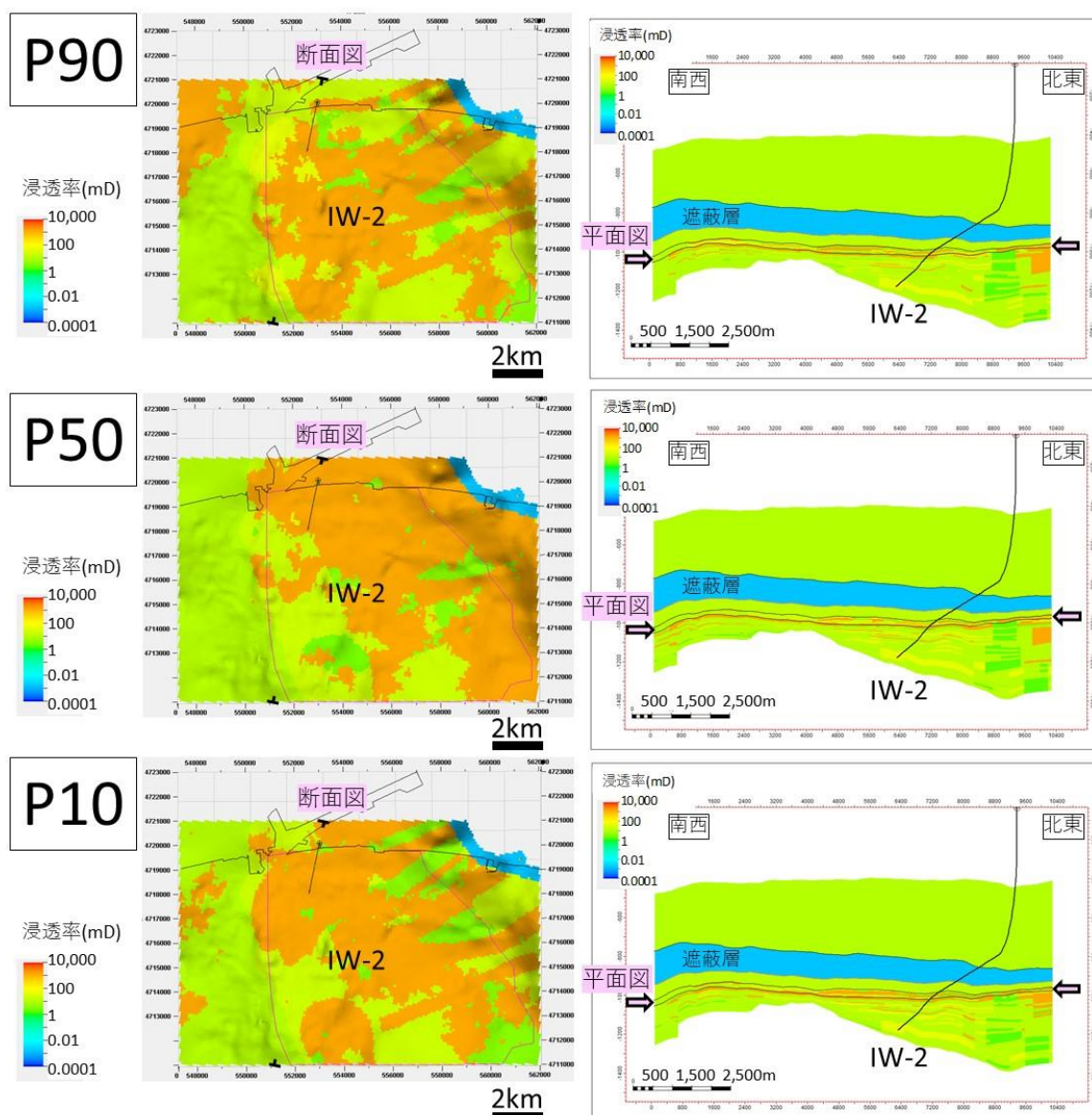


図 5.5-14 ケース 2 圧入終了時の仕上げ区間上端圧力の累積分布曲線

図 5.5-15 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。左側の平面図は、図 5.4-5 における上部の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。P10 の具現像以外はケース 1 とは異なる具現像となった。



注）平面図は図 5.4-5 における上部の高浸透率領域に相当する層準。

図 5.5-15 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

① IW-2 坑内圧力挙動予測

図 5.5-16 にケース 2 の圧入プロファイルにて圧入するシミュレーションにおける、P90、P50、P10 の各具現像において予想される仕上げ区間上端圧力の推移を示す。圧入停止後の仕上げ区間上端圧力は、圧入停止後速やかに停止し、圧入停止 1,000 年後までには初期圧力の 9.82 MPaG まで回復する。

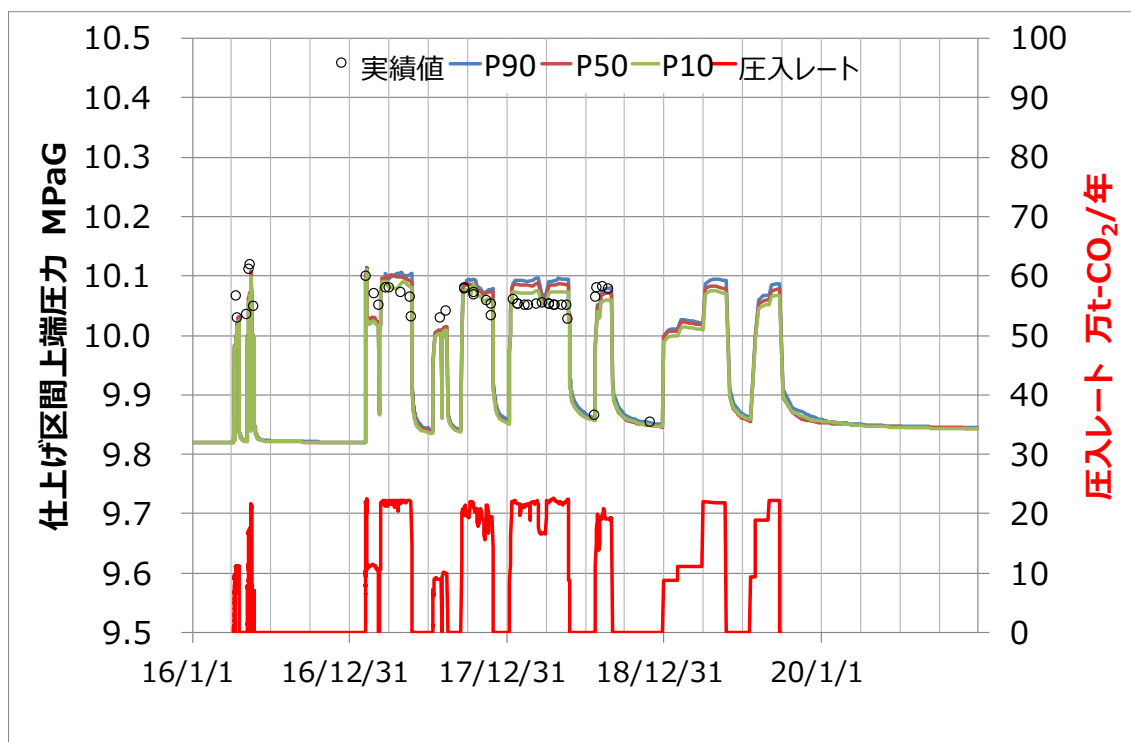
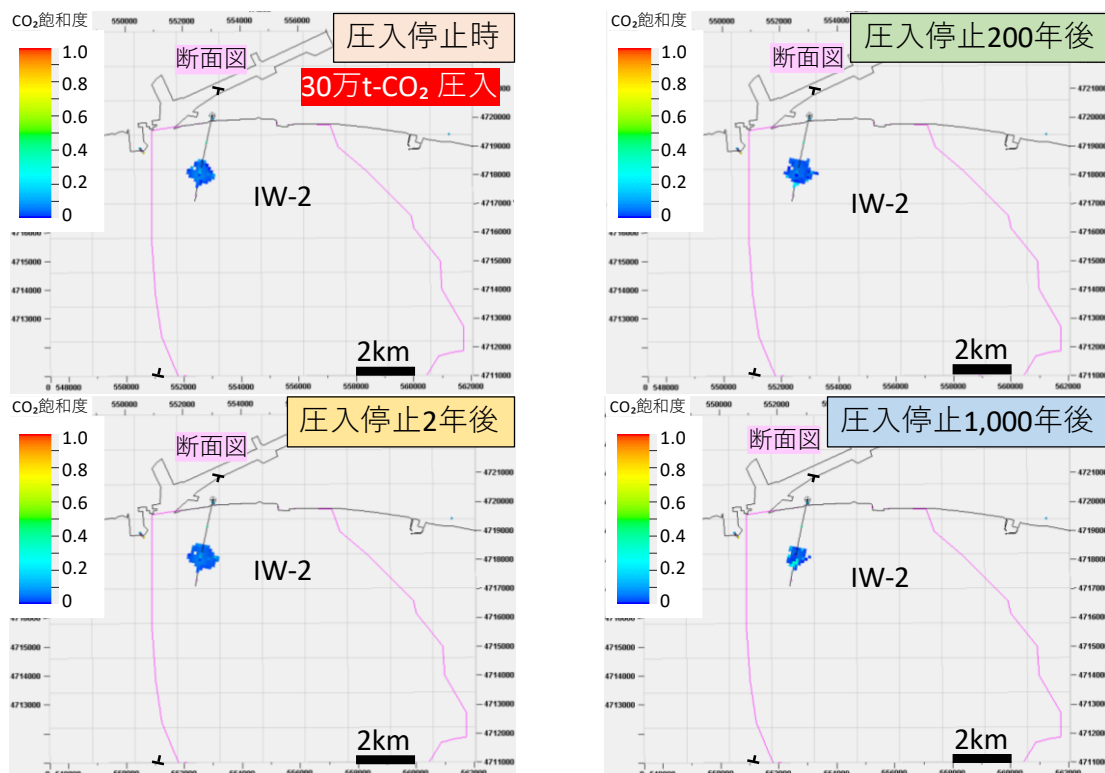


図 5.5-16 ケース 2 P90、P50、P10 具現像による仕上げ区間上端圧力
(2019 年 9 月 27 日まで圧入を継続し、累計 30 万 t 圧入するケース)

② 長期挙動予測結果

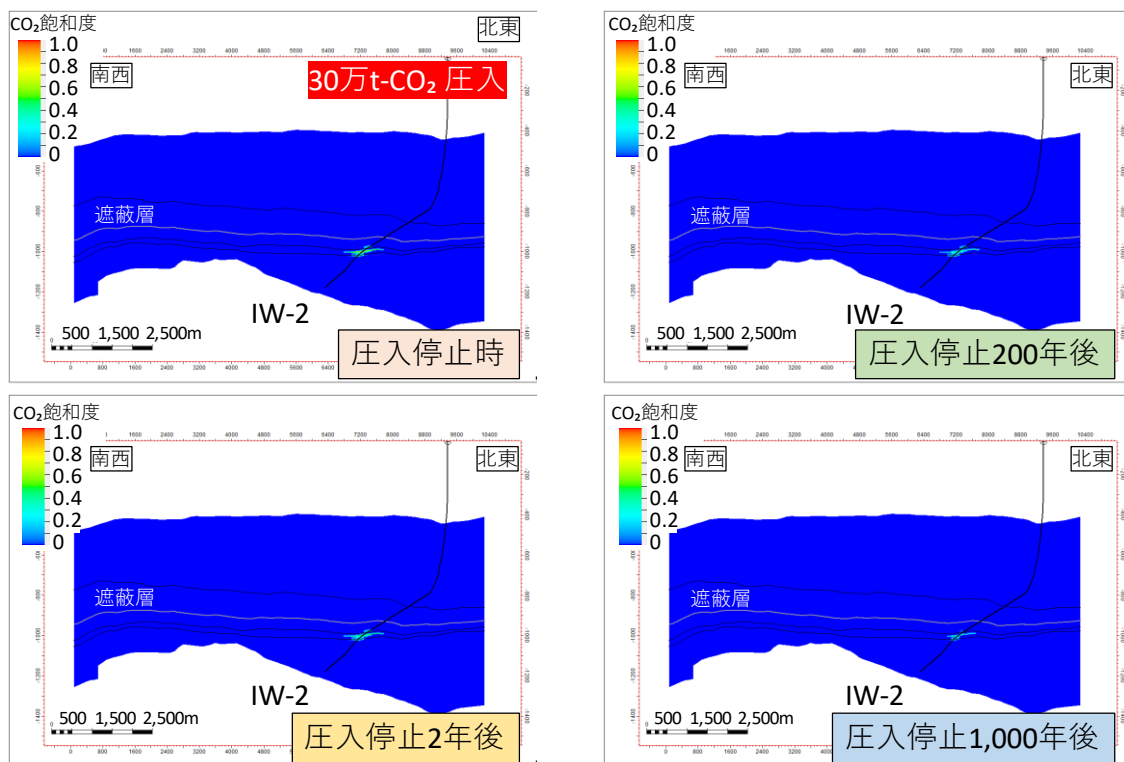
a. CO₂ 飽和度分布

図 5.5-17～図 5.5-22 に P90、P50、P10 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 飽和度の形にも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。



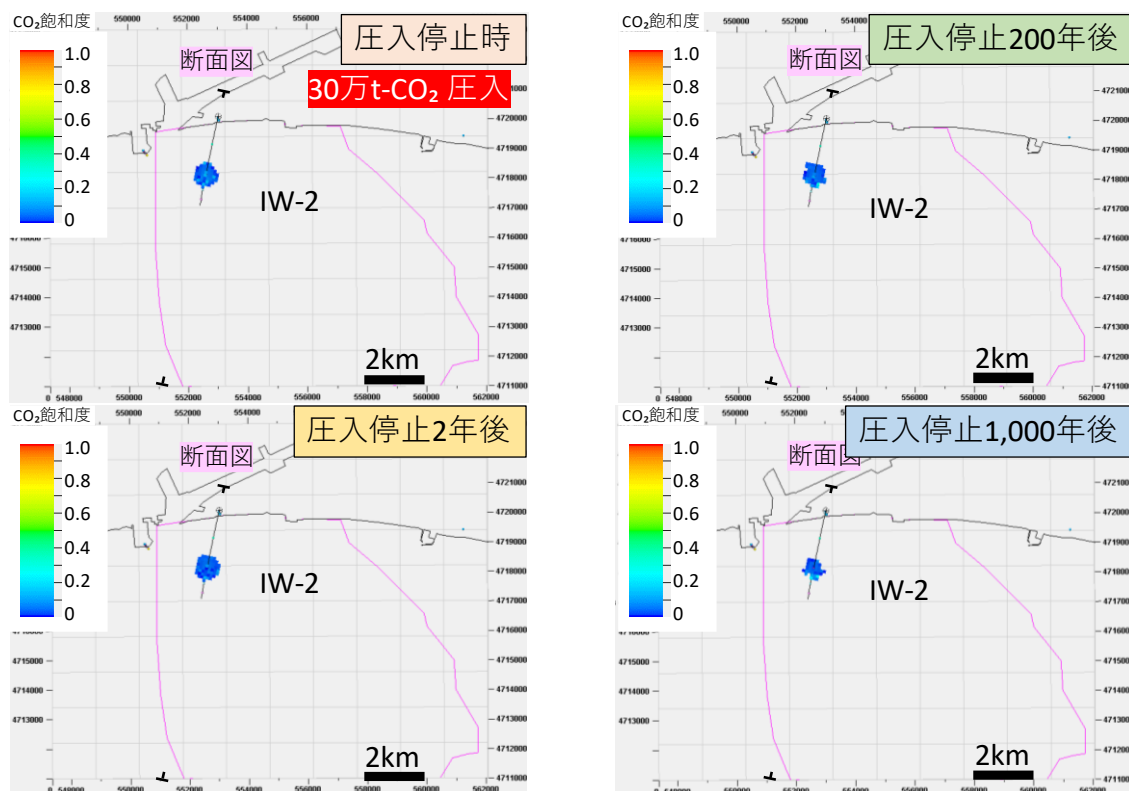
注) 貯留層に圧入された CO₂ 飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 0.001。

図 5.5-17 ケース 2 P90 具現像における CO₂ 飽和度分布



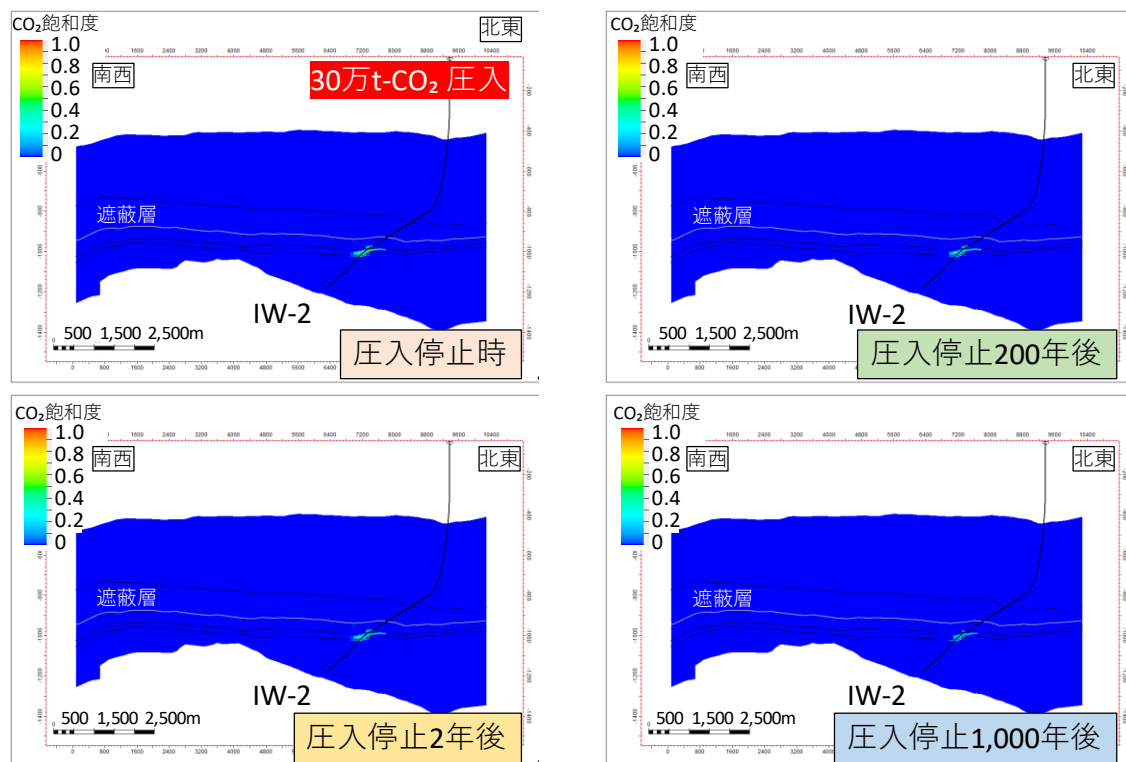
注) 図 5.5-17 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-18 ケース 2 P90 具現像における CO₂ 飽和度分布



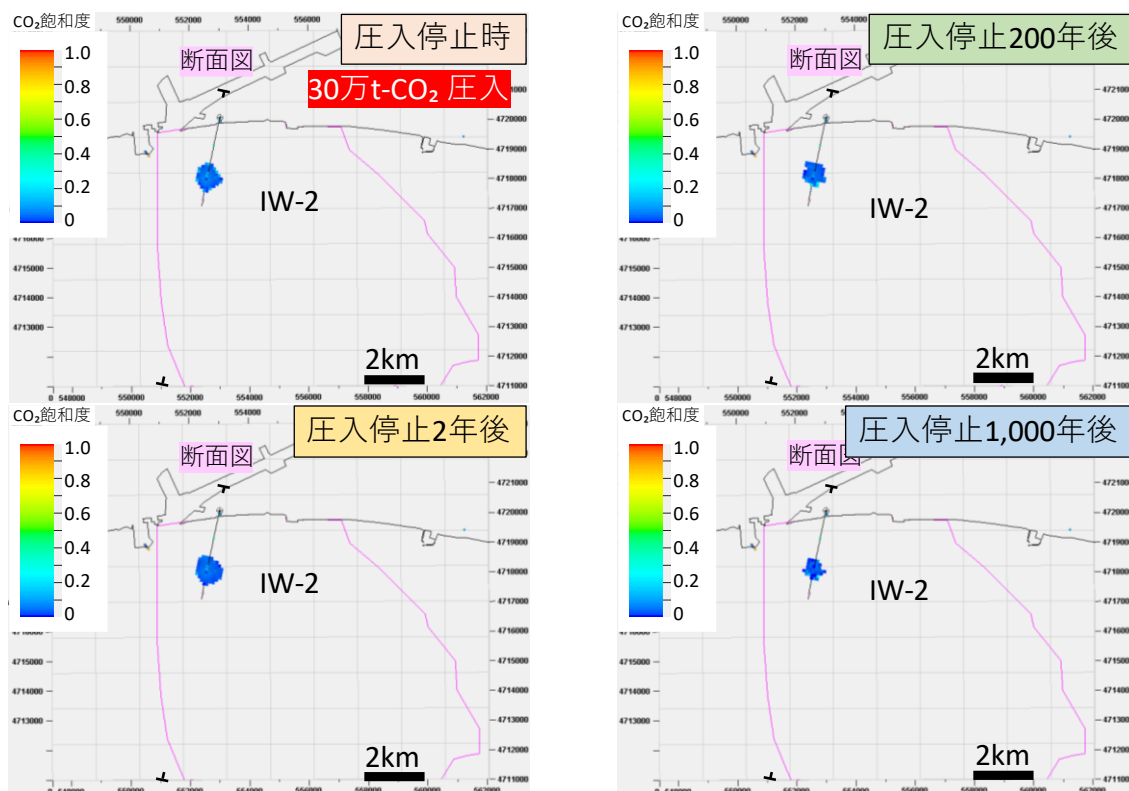
注）貯留層に圧入されたCO₂飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は0.001。

図 5.5-19 ケース 2 P50 具現像におけるCO₂ 飽和度分布



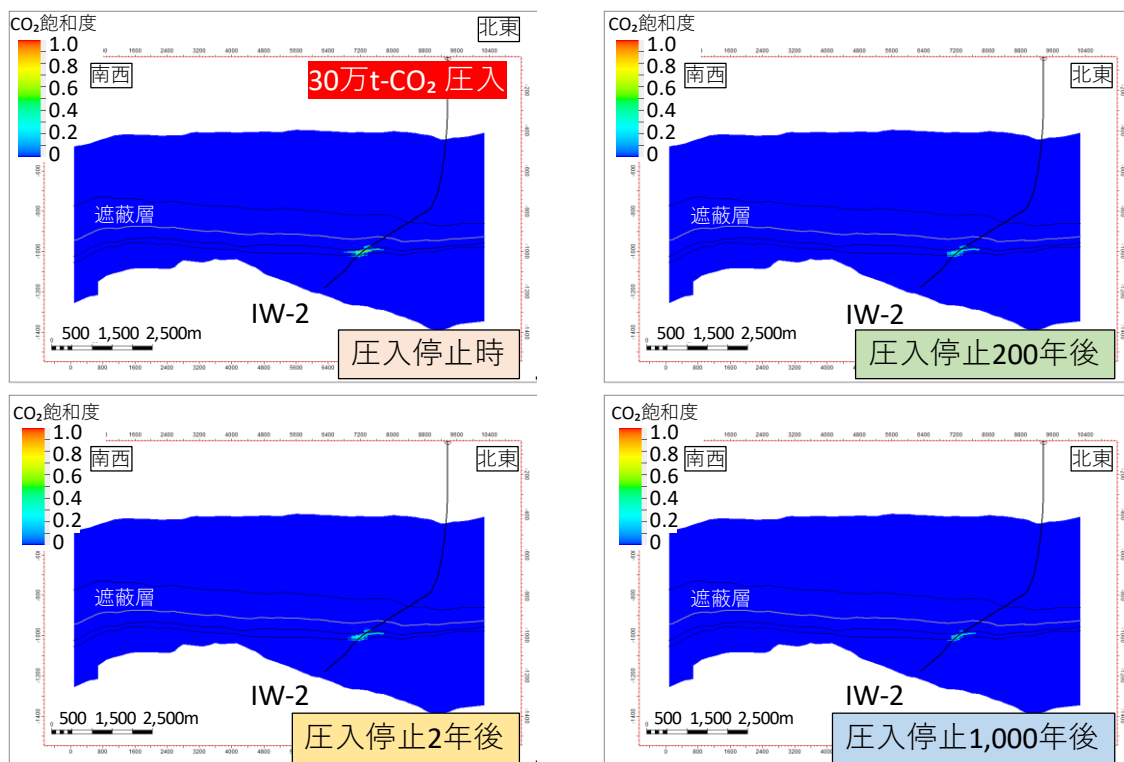
注）図 5.5-19 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-20 ケース 2 P50 具現像におけるCO₂ 飽和度分布



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 5.5-21 ケース 2 P10 具現像におけるCO₂飽和度分布



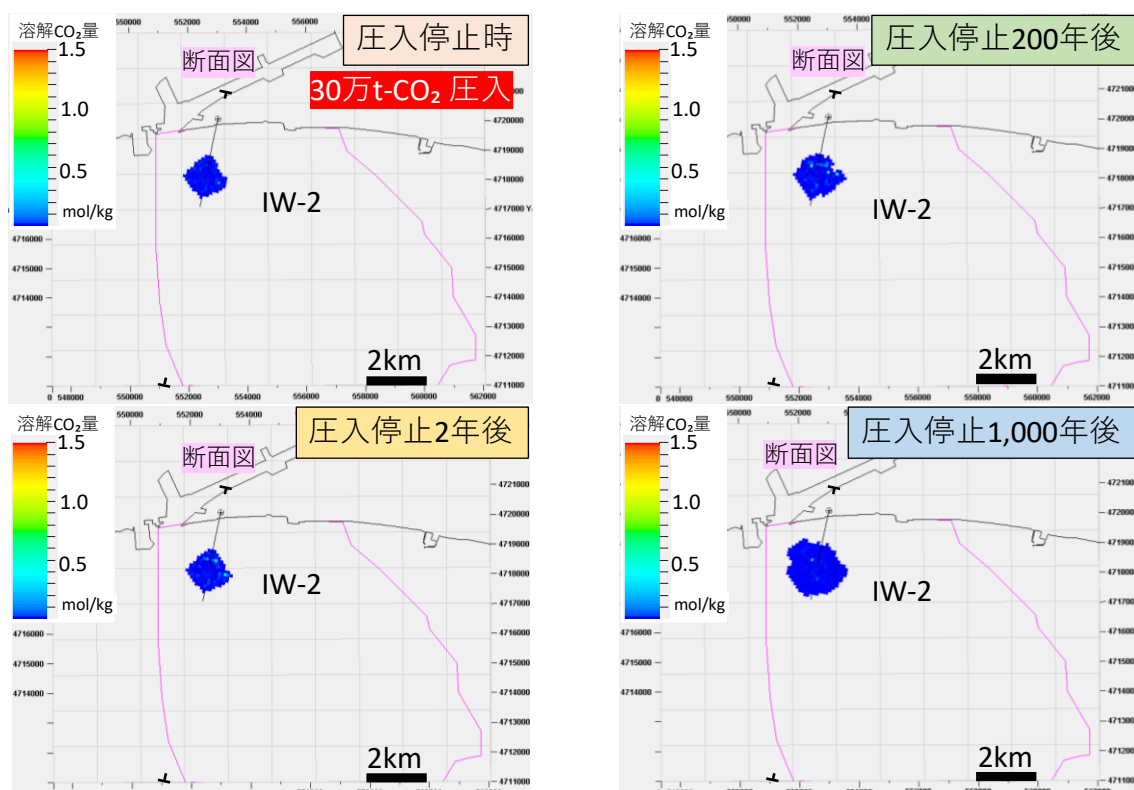
注）図 5.5-11 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-22 ケース 2 P10 具現像におけるCO₂飽和度分布

b. 溶解 CO₂ 量分布

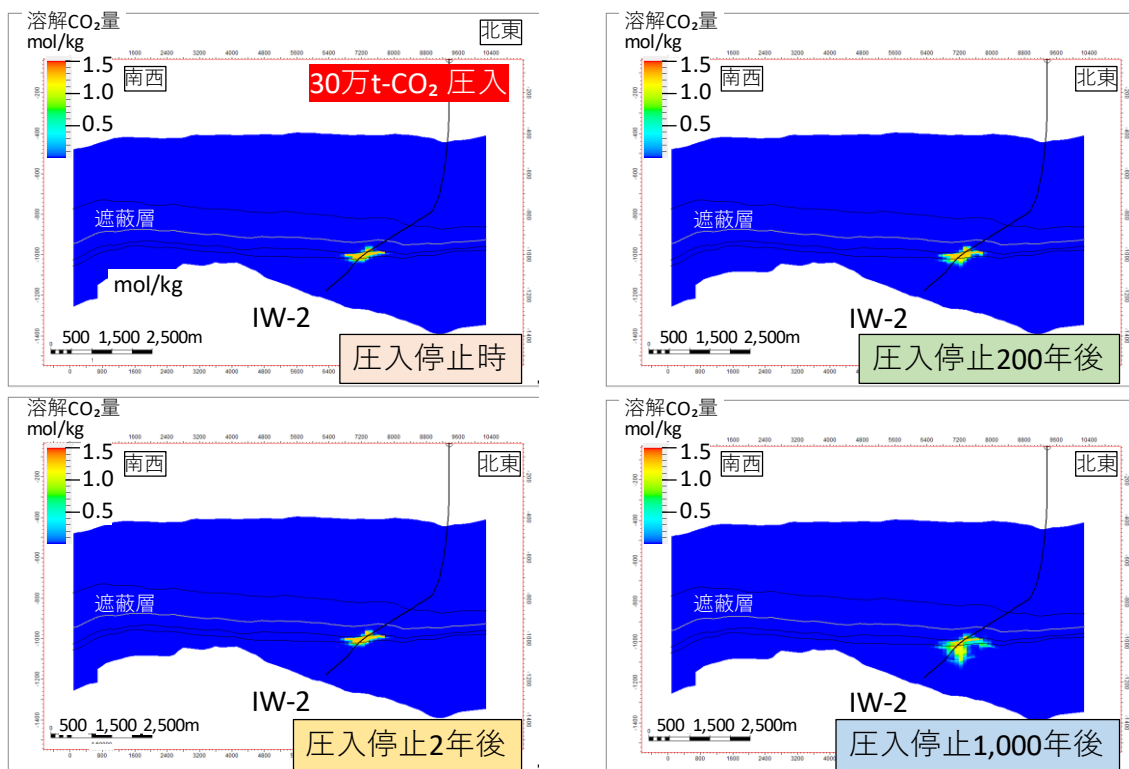
図 5.5-23～図 5.5-28 に P90、P50、P10 各具現像における圧入停止時、圧入停止から 2 年後、圧入停止から 200 年後、圧入停止から 1,000 年後の各時点で予想される溶解 CO₂ 量の分布を示す。

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 量自体は減少するが、平面的な分布範囲が広がる傾向が認められる。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 と地層水との比重差により、溶解 CO₂ 量の分布は下方に垂れ下がるような分布を示すことになる。



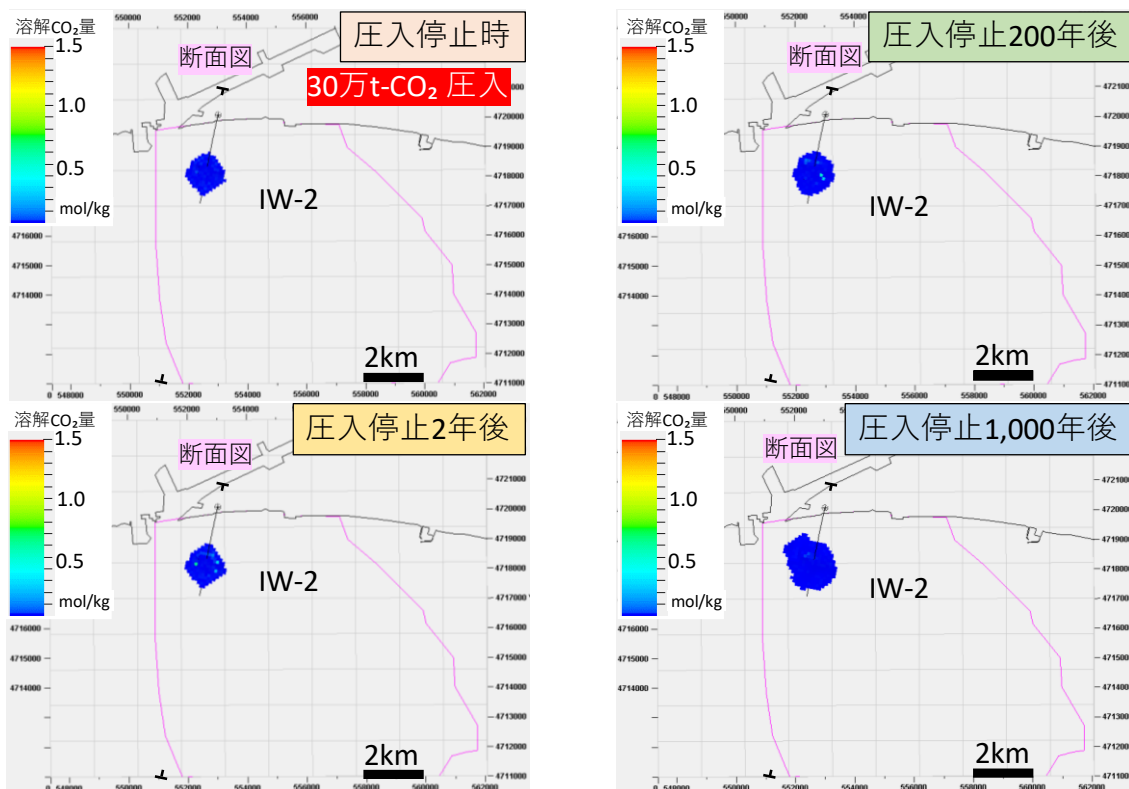
注) 貯留層に圧入された溶解 CO₂ 量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-23 ケース 2 P90 具現像における溶解 CO₂ 量分布



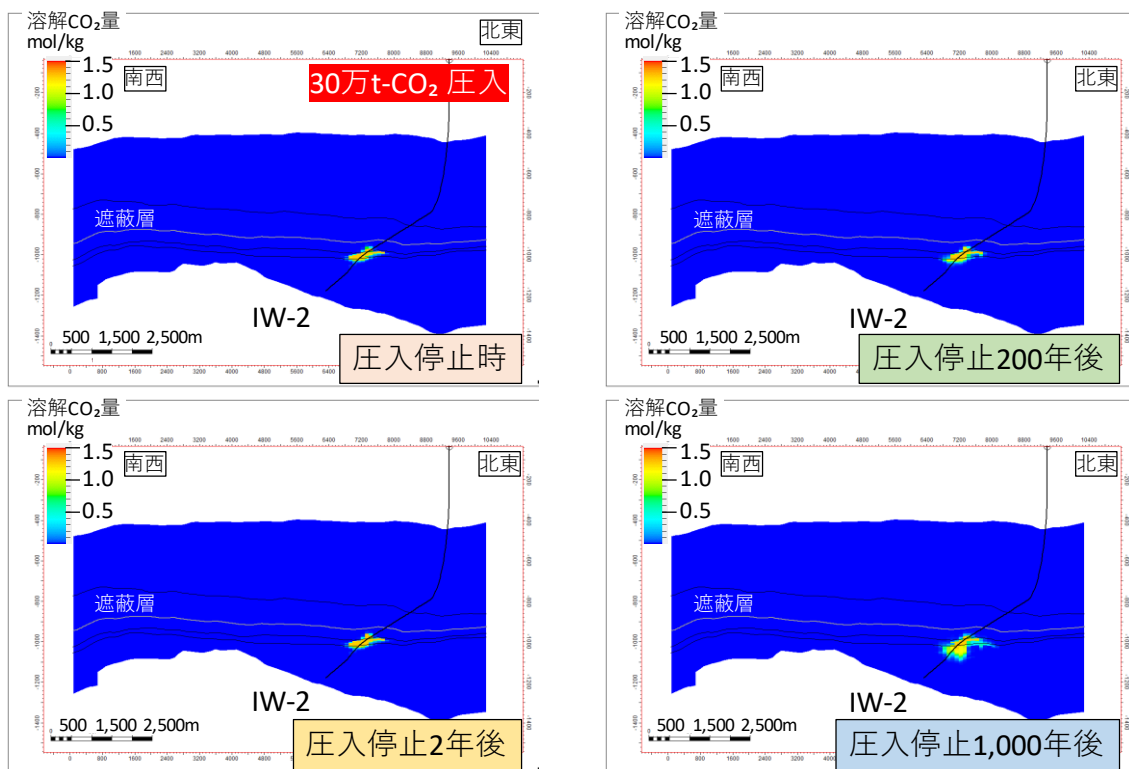
注）図 5.5-13 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-24 ケース 2 P90 具現像における溶解 CO₂ 量分布



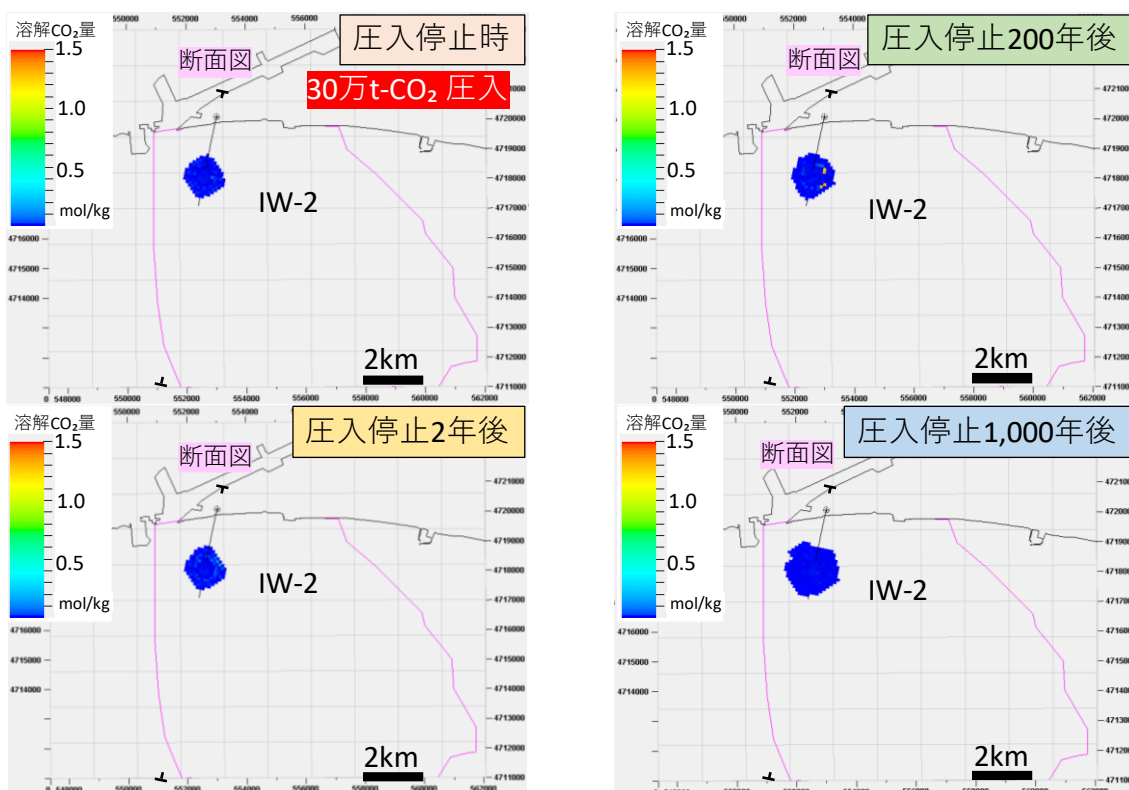
注）貯留層に圧入された溶解 CO₂ 量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-25 ケース 2 P50 具現像における溶解 CO₂ 量分布



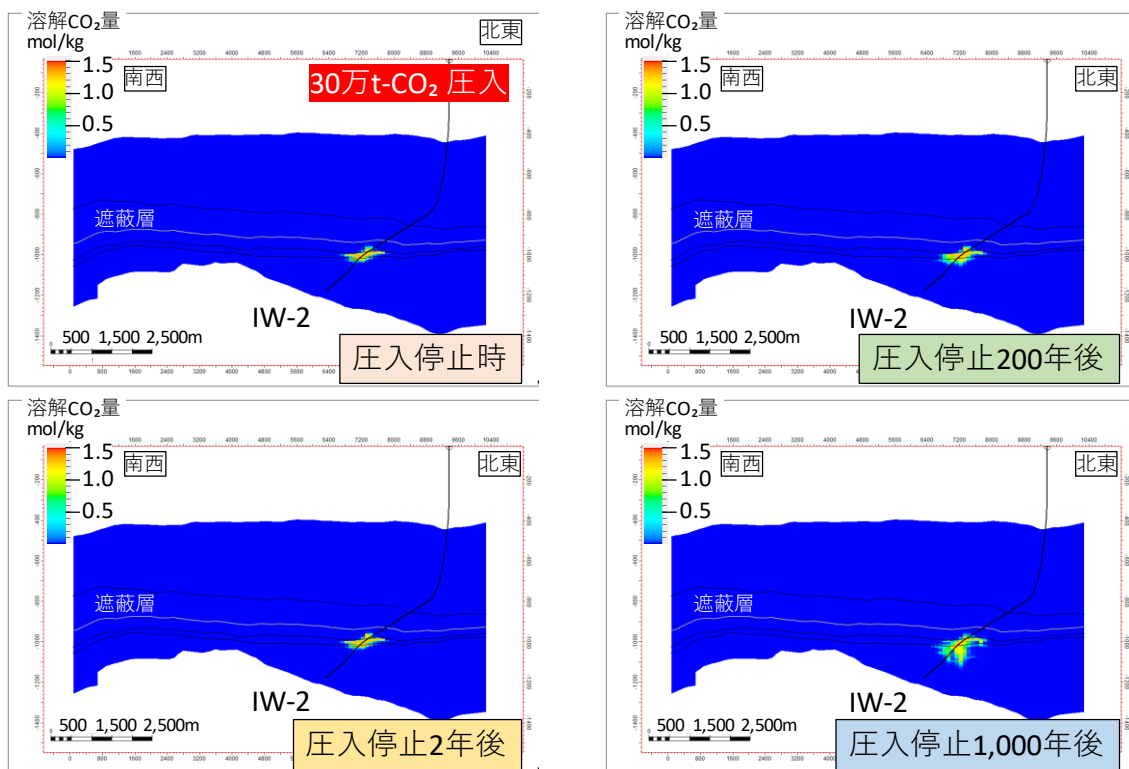
注）図 5.5-15 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-26 ケース 2 P50 具現像における溶解 CO₂ 量分布



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 5.5-27 ケース 2 P10 具現像における溶解 CO₂ 量分布



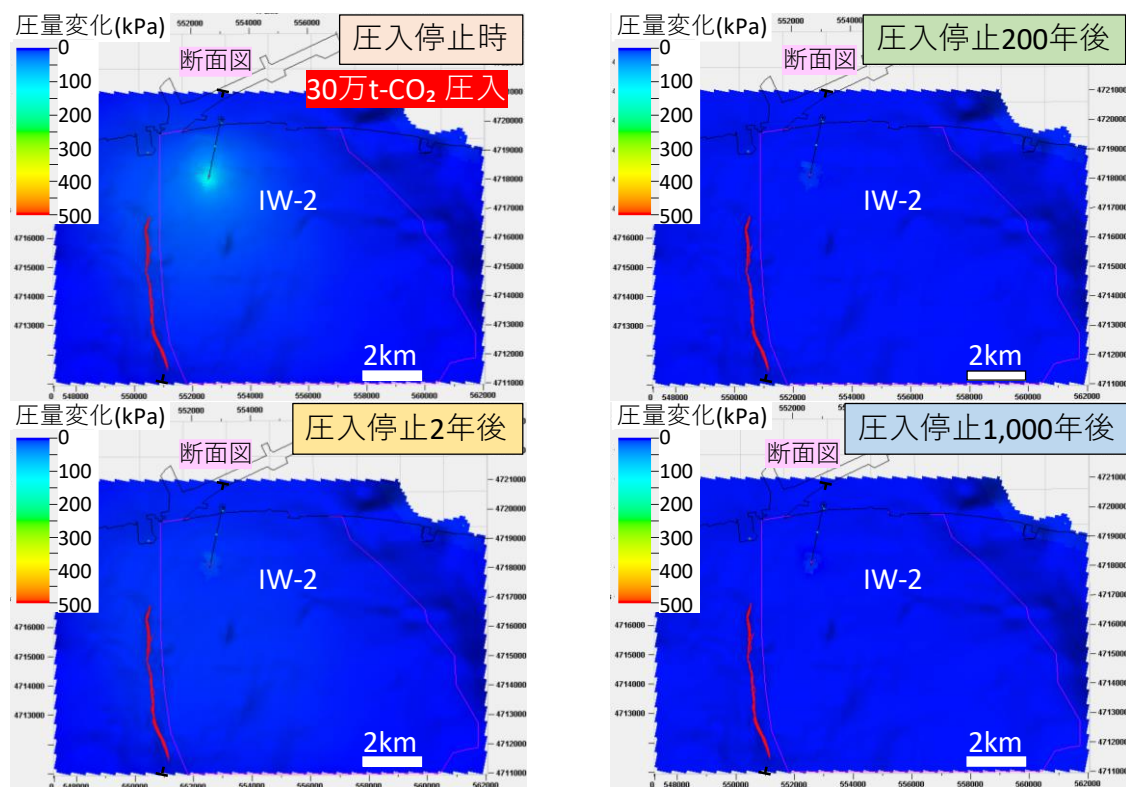
注）図 5.5-17 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-28 ケース 2 P10 具現像における溶解 CO₂ 量分布

c. 圧力変化分布

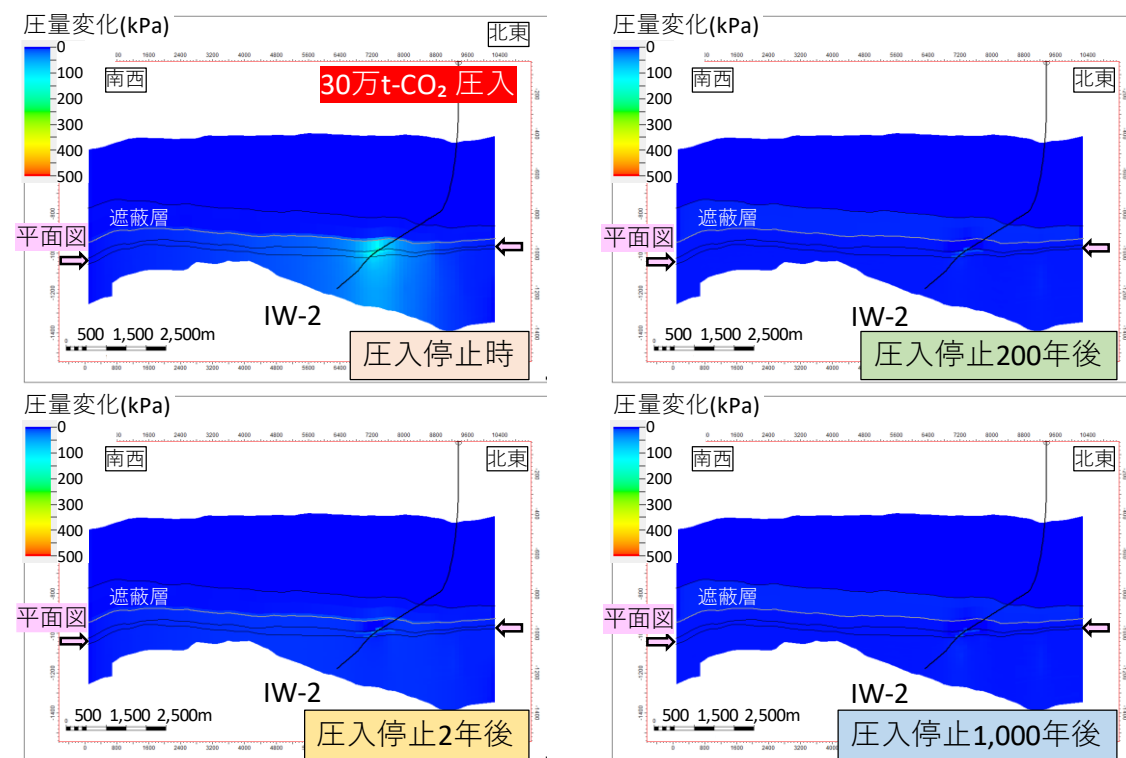
図 5.5-29～図 5.5-34 に P90、P50、P10 各具現像における圧入停止時、圧入停止から 2 年後、圧入停止から 200 年後、圧入停止から 1,000 年後の各時点で予想される貯留層の圧力変化の分布を示す。

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 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。



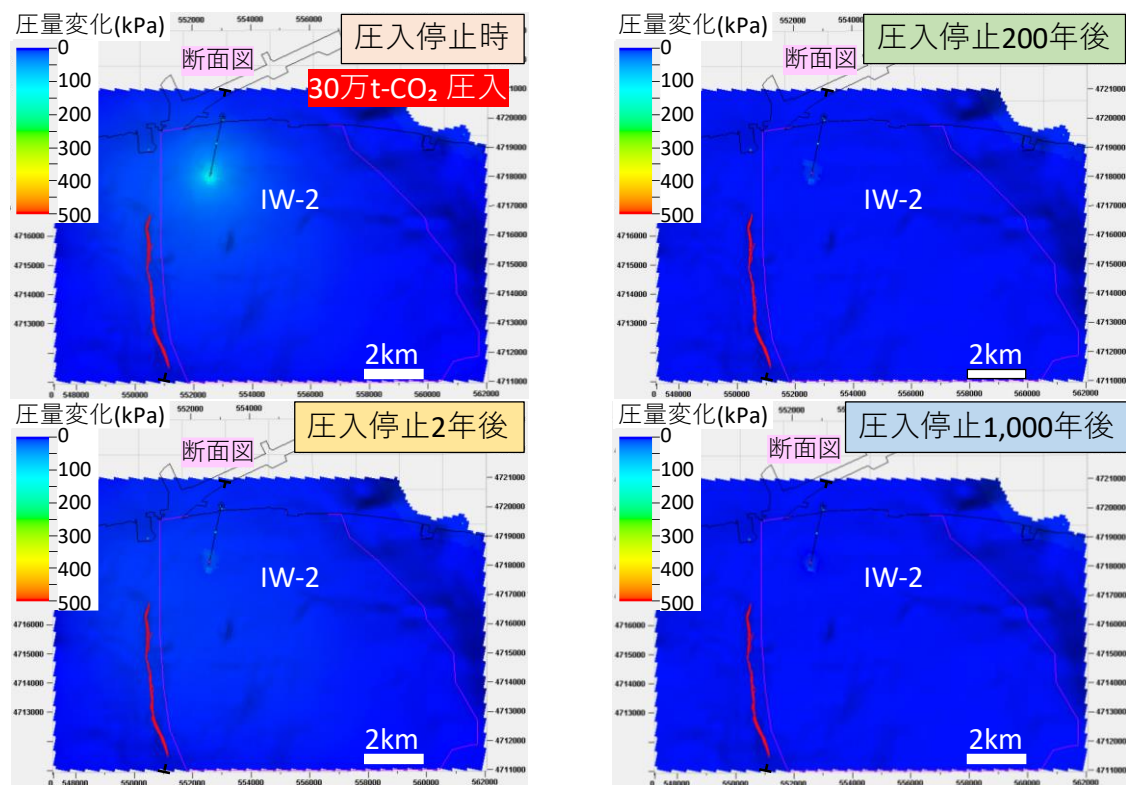
注）図 5.4-5 の上部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.5-29 ケース 2 P90 具現像における圧力変化分布



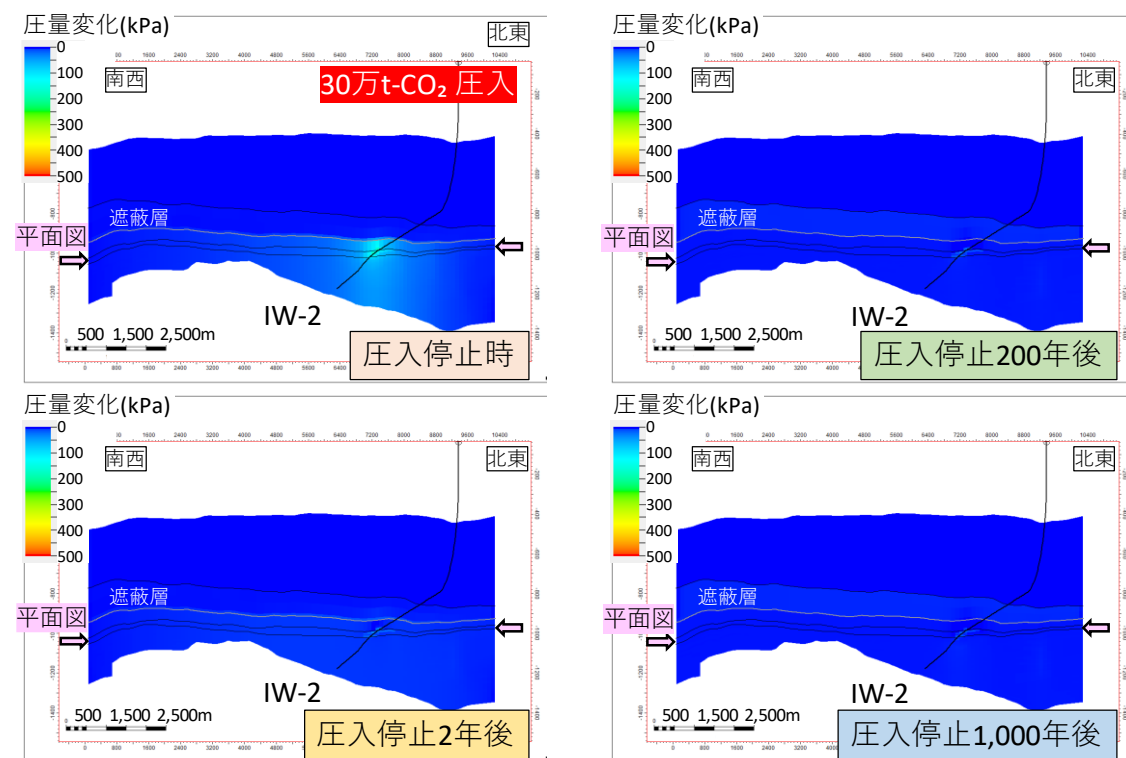
注）図 5.5-19 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-30 ケース 2 P90 具現像におけるにおける圧力変化分布



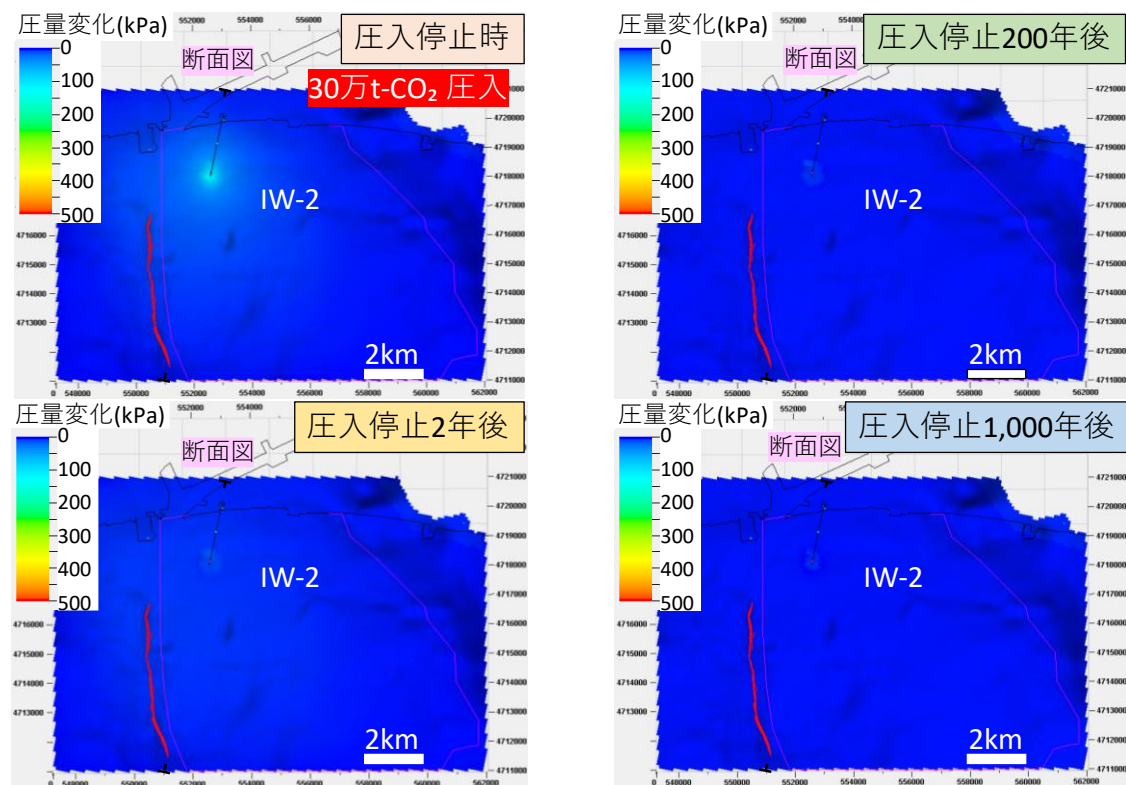
注）図 5.4-5 の上部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.5-31 ケース 2 P50 具現像における圧力変化分布



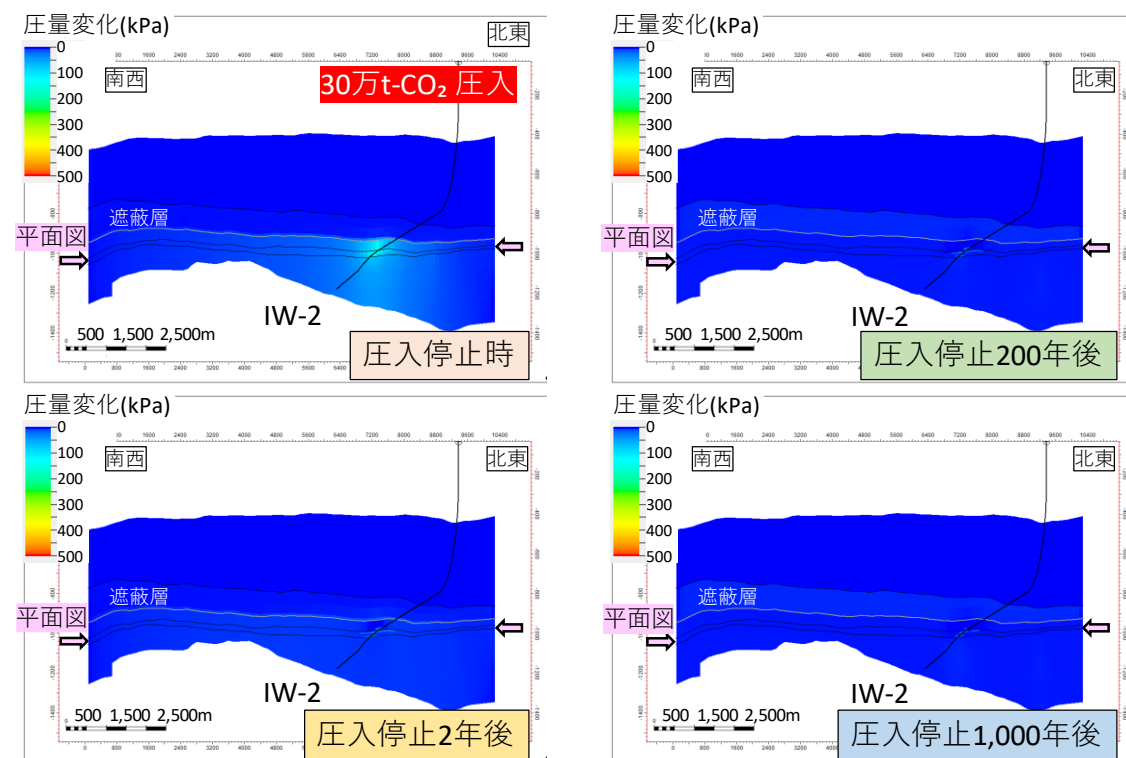
注）図 5.5-31 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-32 ケース 2 P50 具現像におけるにおける圧力変化分布



注）図 5.4-5 の上部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.5-33 ケース 2 P10 具現像における圧力変化分布



注）図 5.5-33 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-34 ケース 2 P10 具現像におけるにおける圧力変化分布

d. 貯留形態の予測

図 5.5-35 にケース 2 における圧入開始から 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、概ね 500～800 年後ころまでにすべての CO₂ が貯留層から移動しない状態になる。

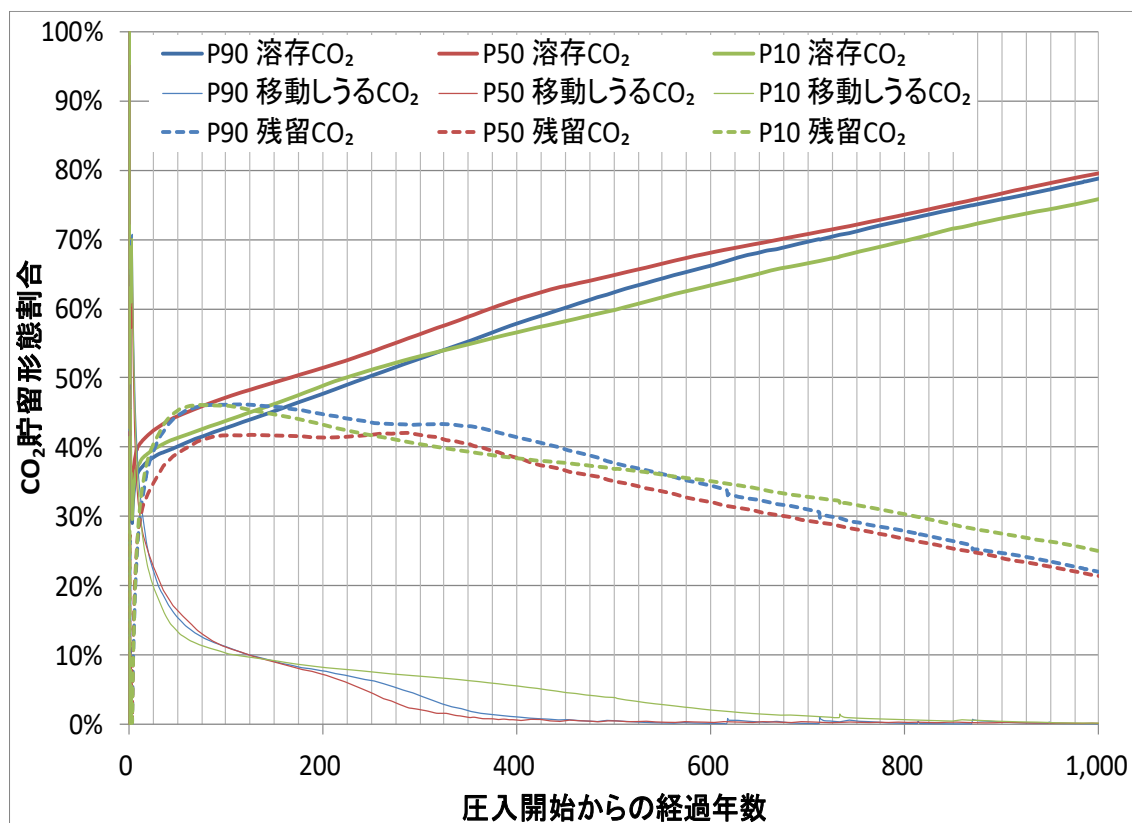


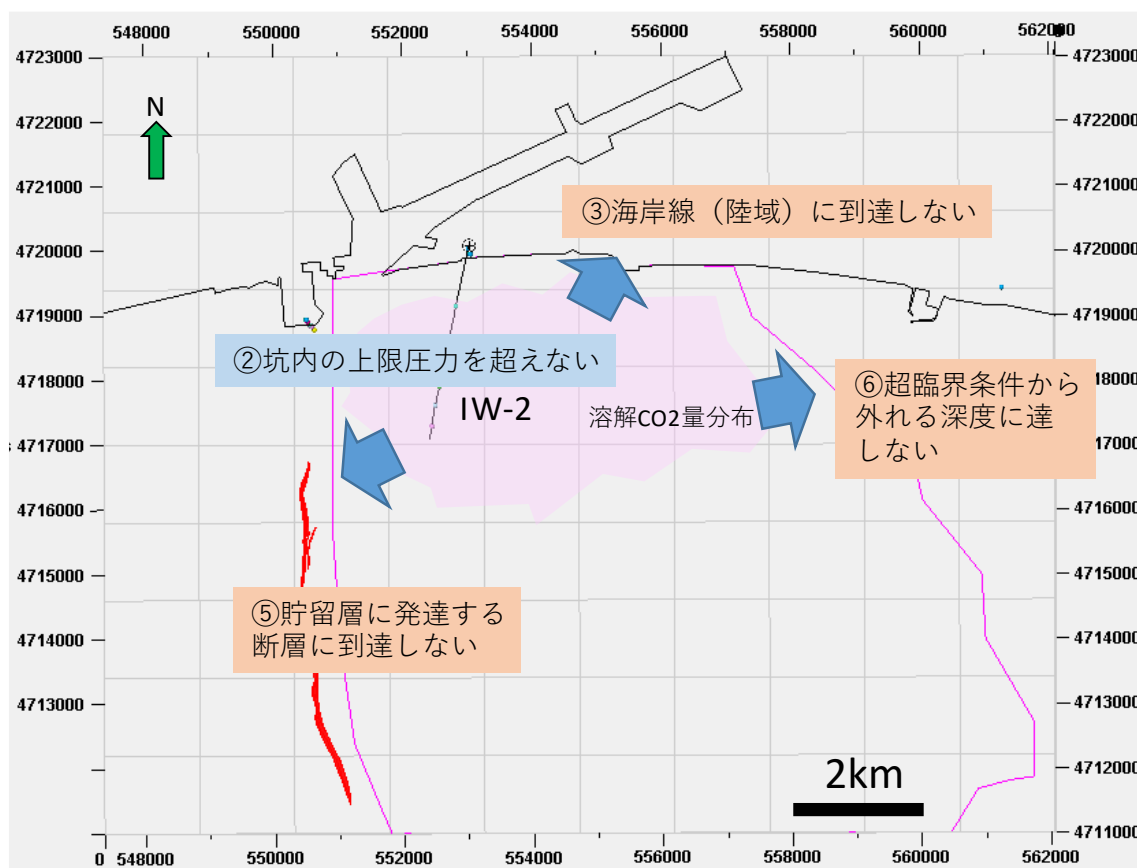
図 5.5-35 ケース 2 貯留形態の予測

(3) ケース 3（現状設備による最大貯留可能量／独自基準による想定）

ケース 2 の圧入に加え、2019 年 10 月 1 日以降、22 万 t-CO₂/年で圧入を継続（6 月の 1 か月は圧入停止）し、圧入量が 100 万 t 増加することにより、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、最大貯留可能量を推定した（図 5.5-7、表 5.5-3、図 5.5-36）。

表 5.5-3 圧入を継続する条件

番号	対象期間	条件
①	圧入中	ケース 2 の圧入シナリオに追加して、2019 年 10 月 1 日以降、22 万 t/年で圧入（6 月の 1 か月間は圧入停止）。
②	圧入中	IW-2 仕上げ区間上端圧力が 12.93 MPaG 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 20 m 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 750 m 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 5.5-36 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、2 と同様、30 個の具現像（図 5.5-1）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 5.5-37 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573万t-CO₂、標準偏差は351万t-CO₂となった。P90は123万t-CO₂、P50は573万t-CO₂、P10は1,023万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。

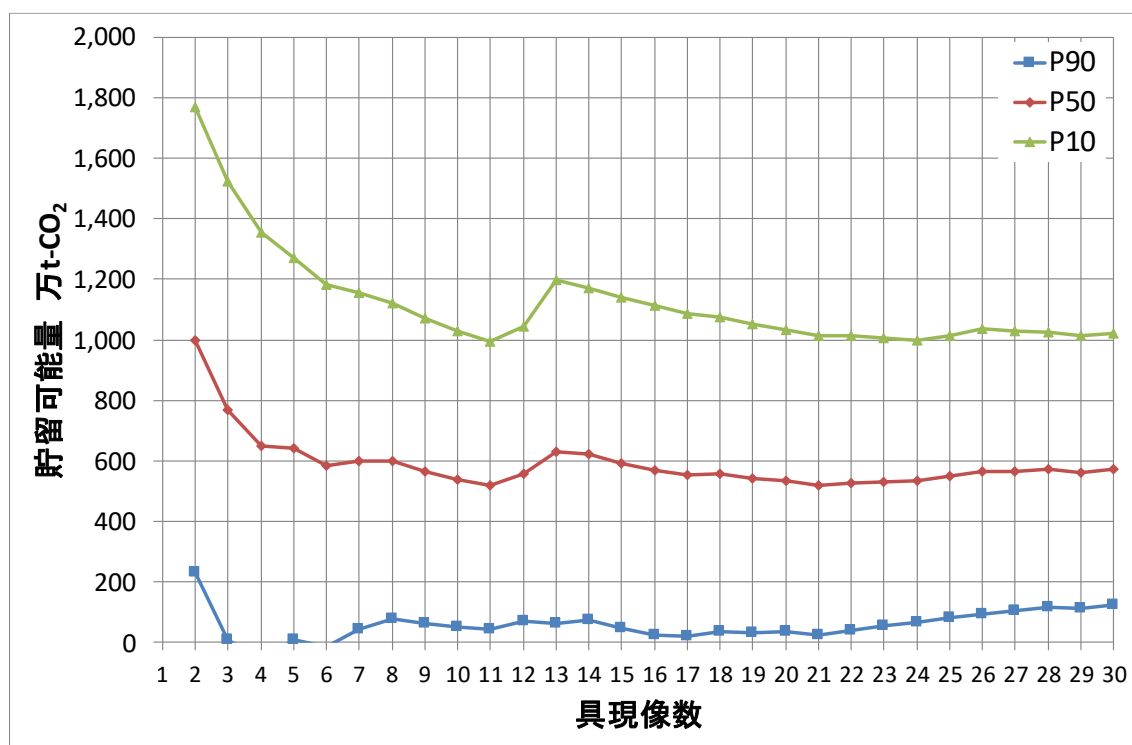
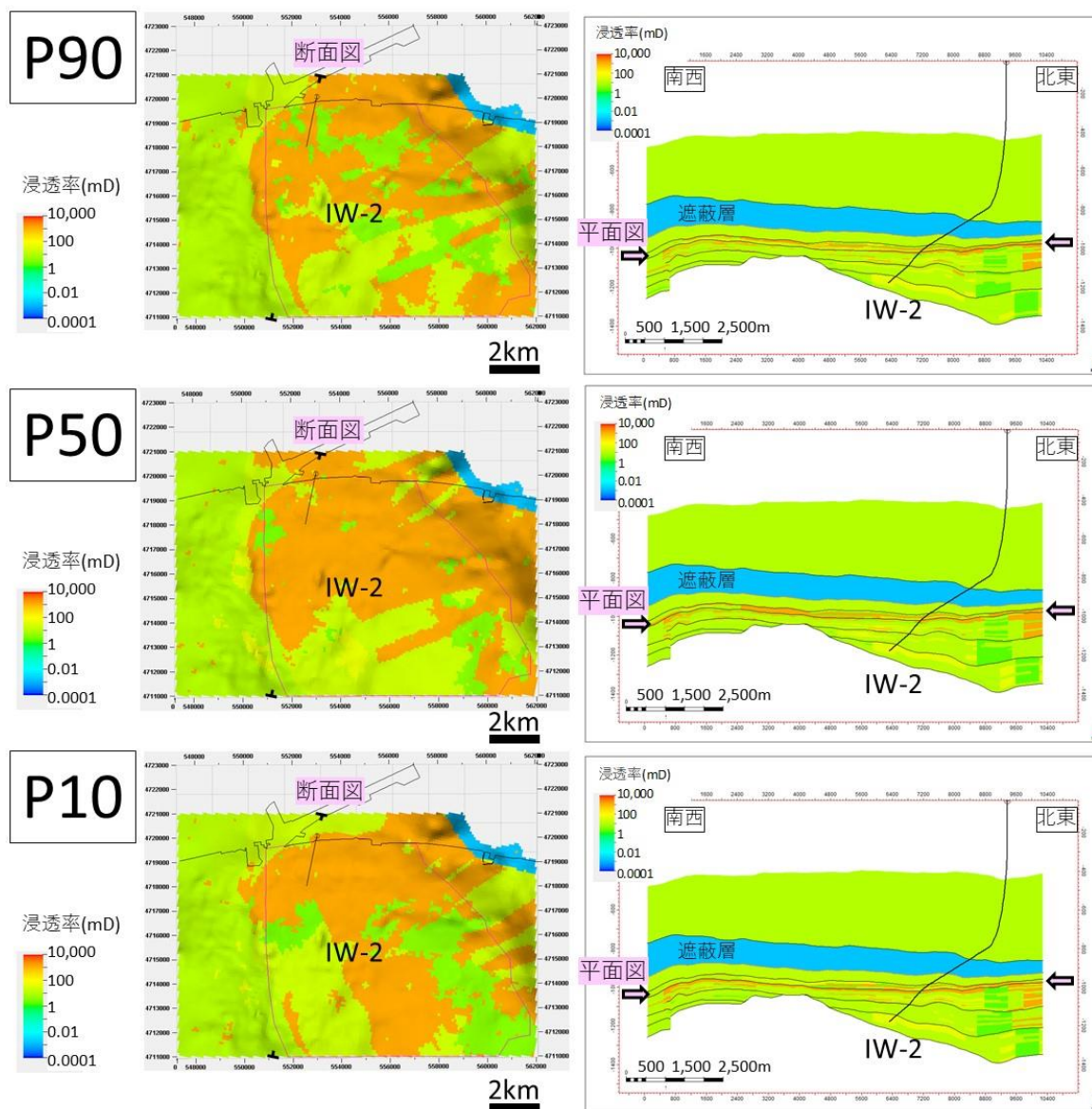


図 5.5-37 具現像の数と想定される P90、P50、P10 の最大貯留可能量

図 5.5-38 にケース 3 における P90、P50、P10 に相当する具現像の浸透率分布を示す。なお、ケース 1 およびケース 2 における P90、P50、P10 の設定は、圧入終了時の仕上げ区間上端圧力の累積分布関数を用いたが、ケース 3 では最大貯留可能量の累積分布関数を用いていることもあり、P90、P50、P10 の具現像が他のケースと一致していない。



注）平面図は貯留層の高浸透率領域の浸透率分布。

図 5.5-38 代表具現像（P10、P50、P90）の浸透率分布

① P90 の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 5.5-39 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。

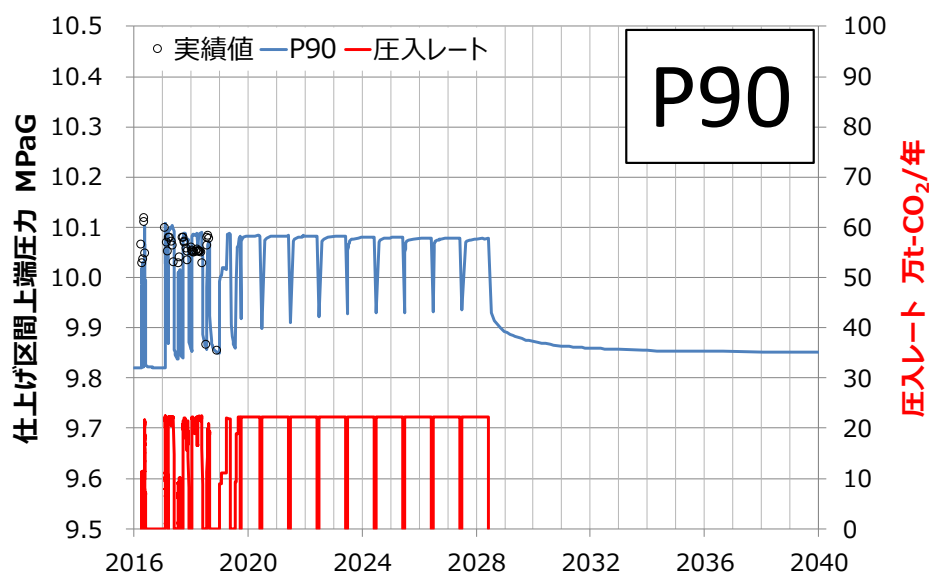
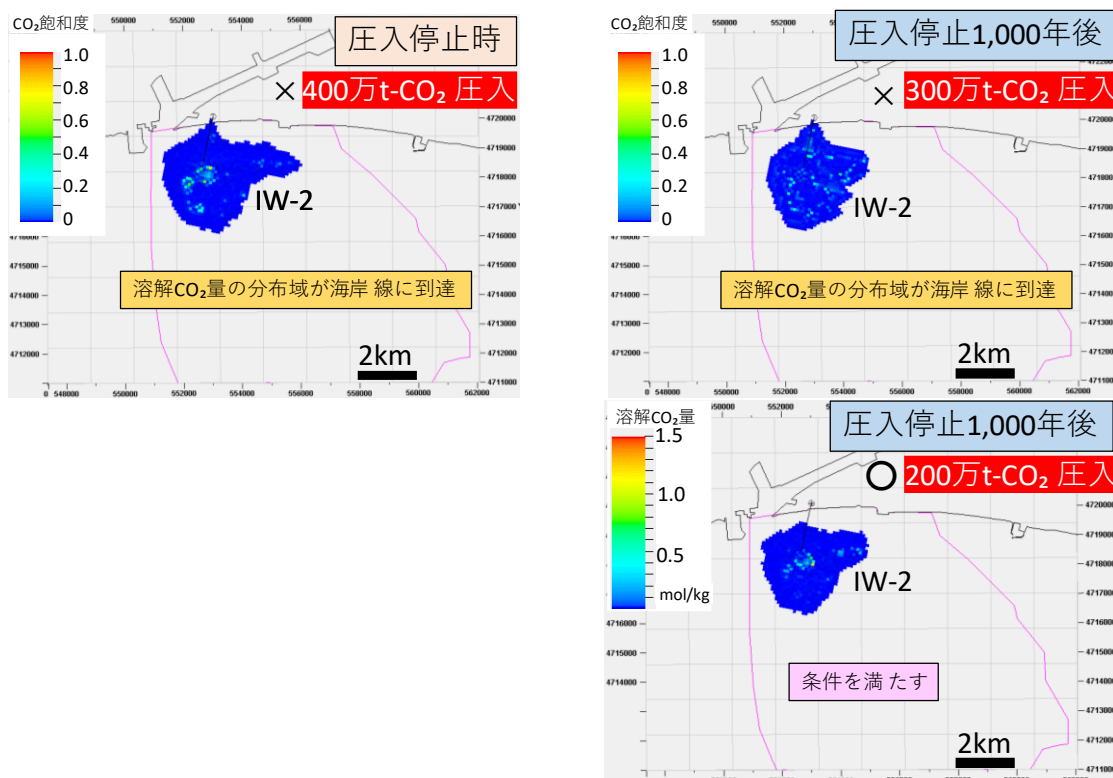


図 5.5-39 ケース 3 P90 具現像による仕上げ区間上端圧力

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の具現像では、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5.5-3および図5.5-36に示す圧入の条件を満たす（図5.5-40）。以上より、P90の具現像では200万t-CO₂の圧入が可能であると判断した。



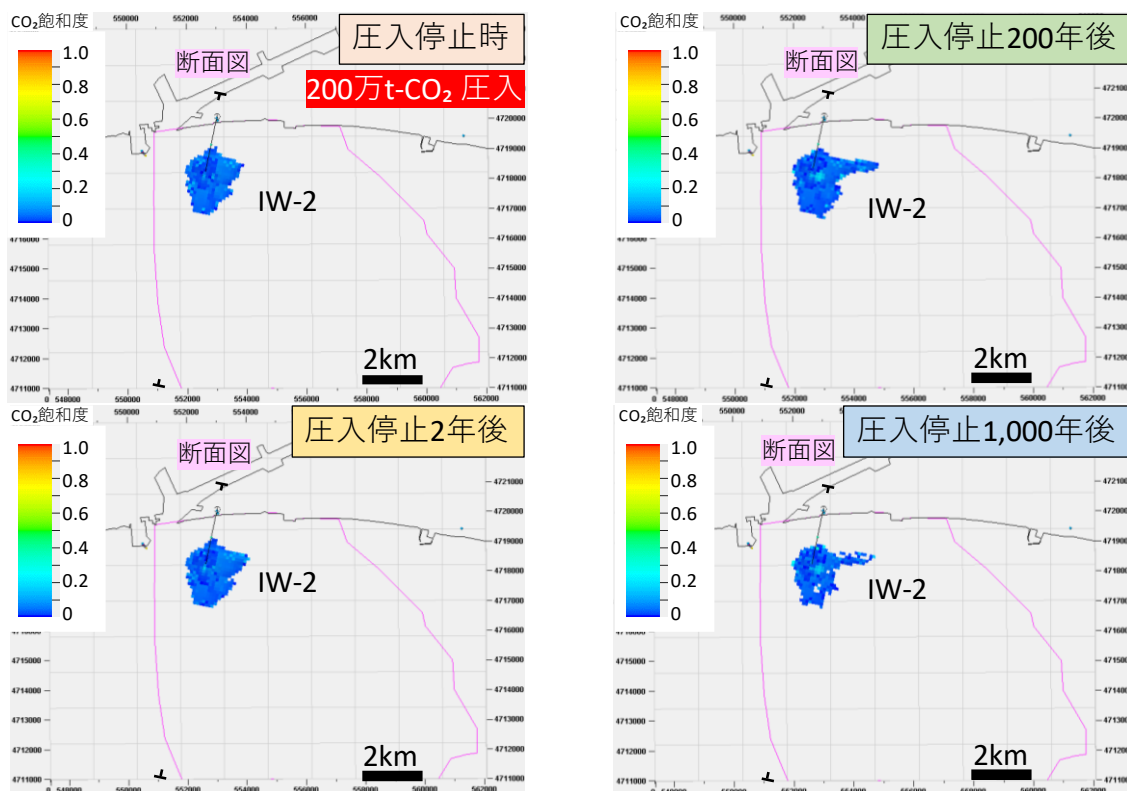
注) 表示の下限は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-40 ケース 3 P90 具現像による圧入不可能と判断した条件

図 5.5-41、図 5.5-42 に圧入停止時、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 CO_2 飽和度の分布を示す。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することが予想される。浸透率を有する岩相の分布形態を反映し、また、東側が構造的に高いことに起因すると考えられる。1,000 年後ころまでには CO_2 の地層水への溶解が進み、 CO_2 飽和度の分布域が減少してゆく様子が予測されている。

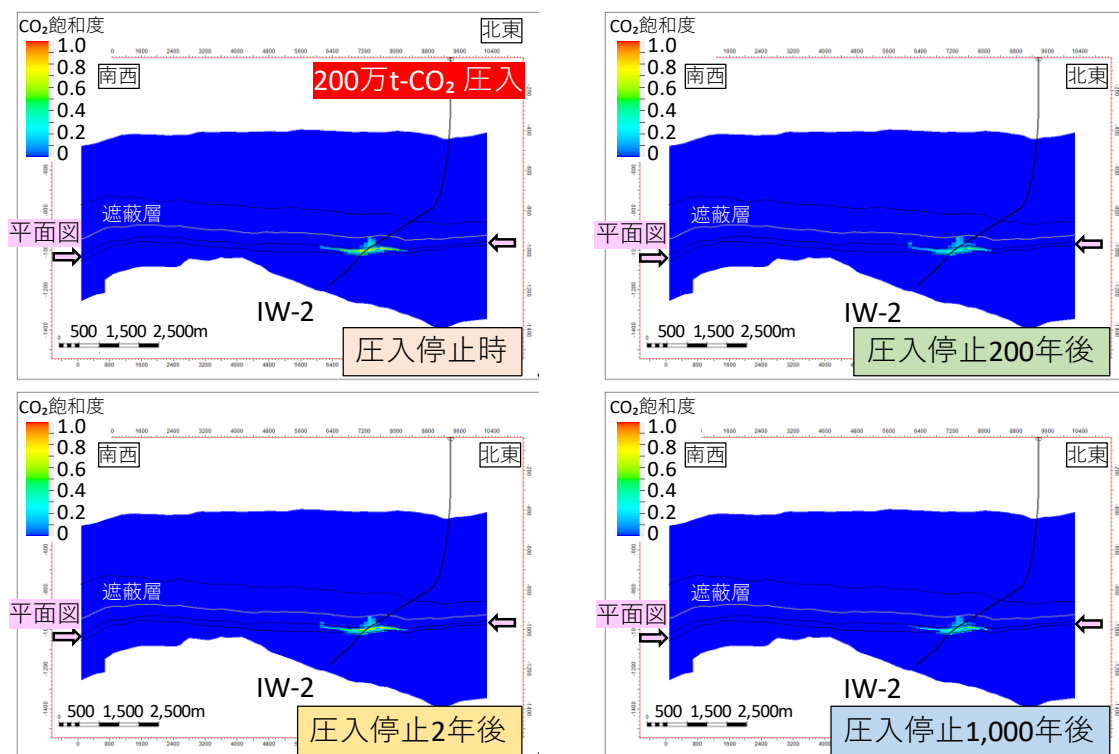
図 5.5-43、図 5.5-44 に溶解 CO_2 量分布の経時変化を示す。 CO_2 飽和度の分布と同様に圧入停止から 200 年後ころまでには、東側に分布範囲が拡大することが予想され、1,000 年後ころまでには、さらに分布範囲が拡大するものの、溶解 CO_2 量自体は減少することが予想される。また、1,000 年後ころまでには、溶解 CO_2 量分布の下方への垂れ下がりが顕著となる（図 5.5-44）。

図 5.5-45 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 5.5-46 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、IW-2 周辺で 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 1,000 年後ころまでには圧力上昇はほぼ解消されることが考えられる。



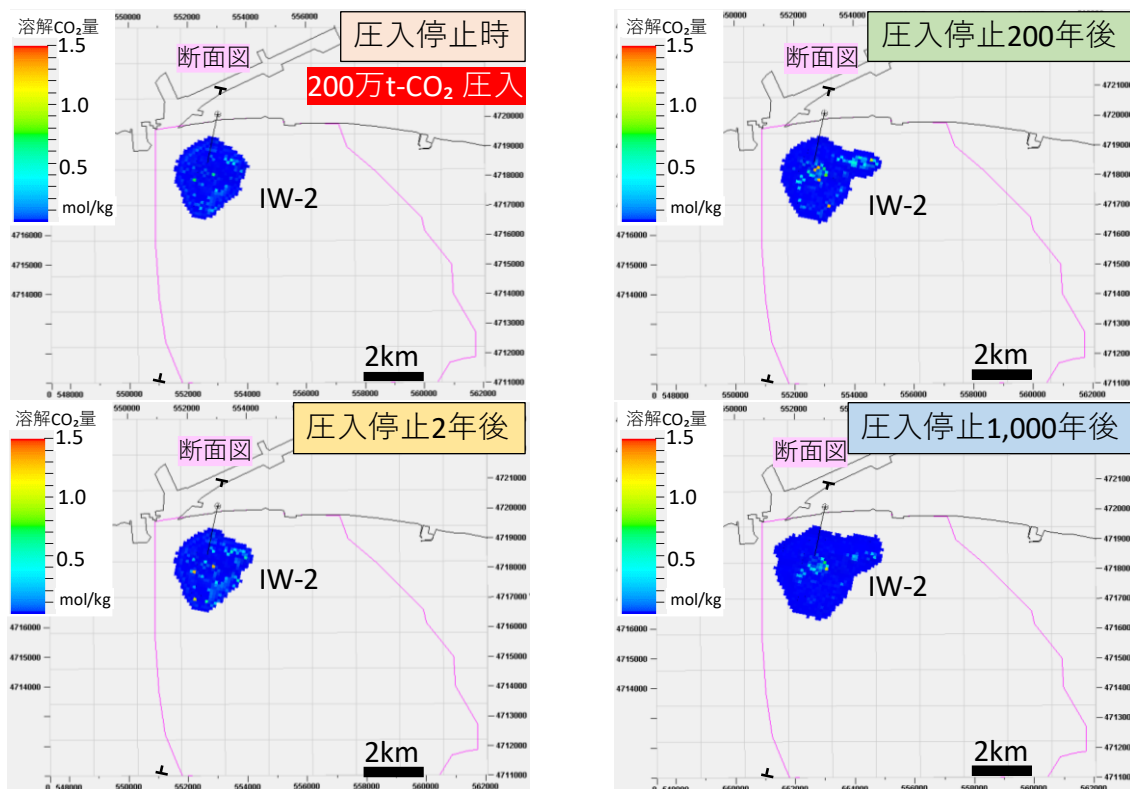
注）貯留層に圧入されたCO₂飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は0.001。

図 5.5-41 ケース 3 P90 具現像におけるCO₂飽和度分布



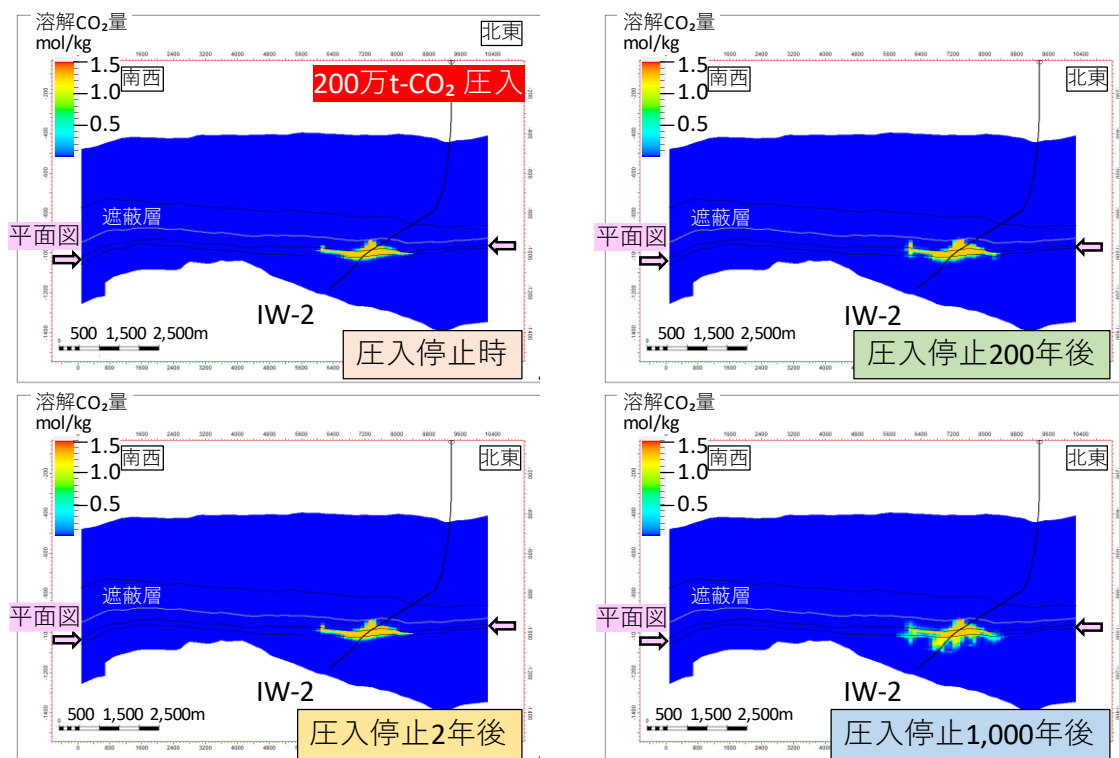
注）図 5.5-31 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-42 ケース 3 P90 具現像におけるCO₂飽和度分布



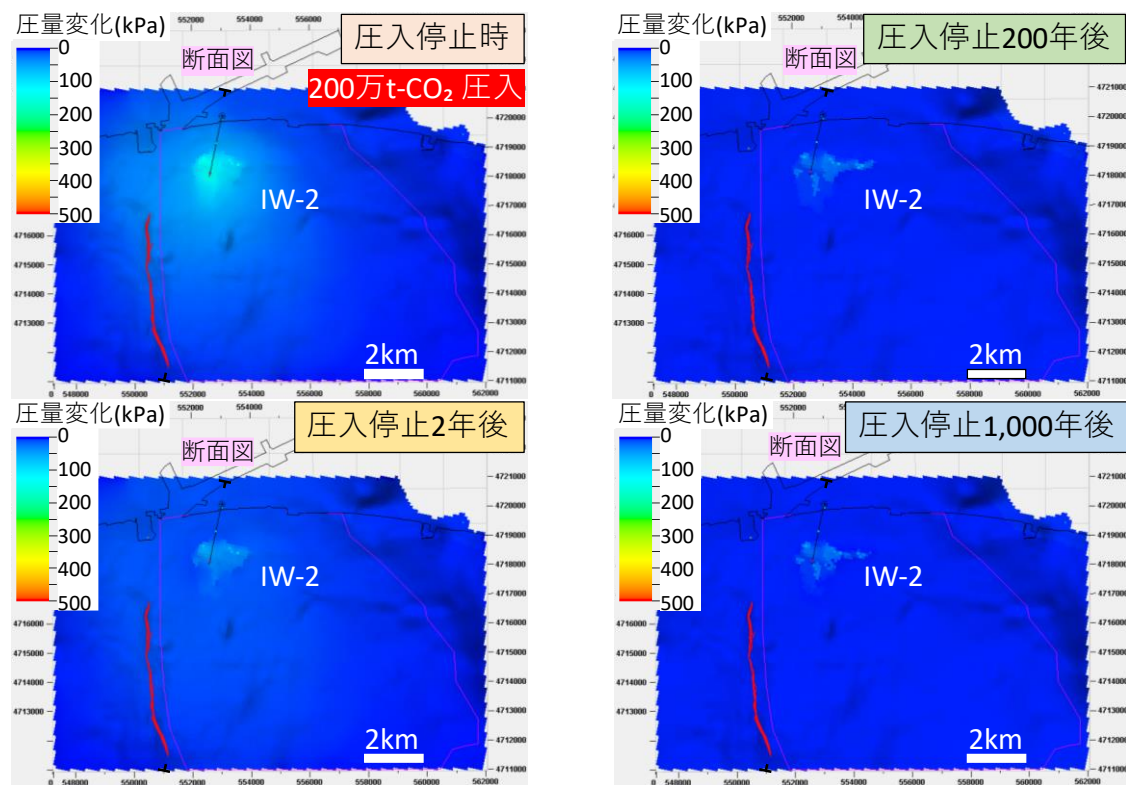
注）貯留層に圧入された溶解CO₂量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-43 ケース 3 P90 具現像における溶解CO₂量分布



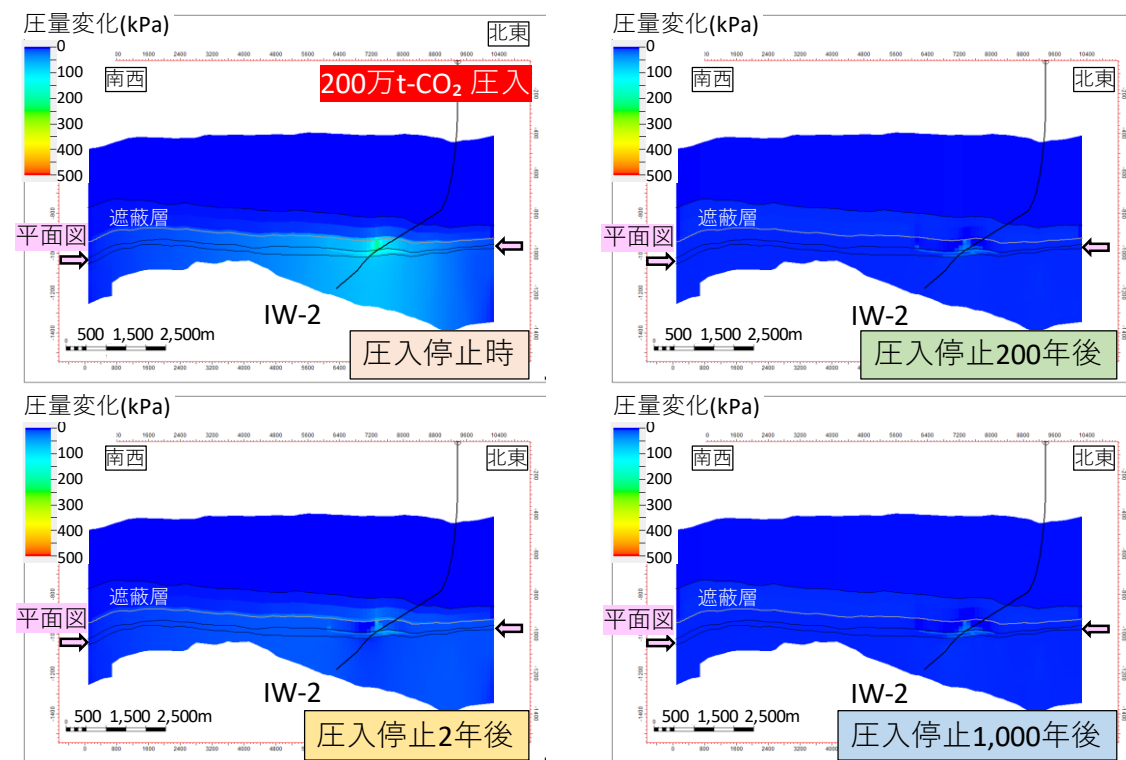
注）図 5.5-33 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-44 ケース 3 P90 具現像におけるCO₂飽和度分布



注）図 5.4-5 の上部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.5-45 ケース 3 P90 具現像における圧力変化分布



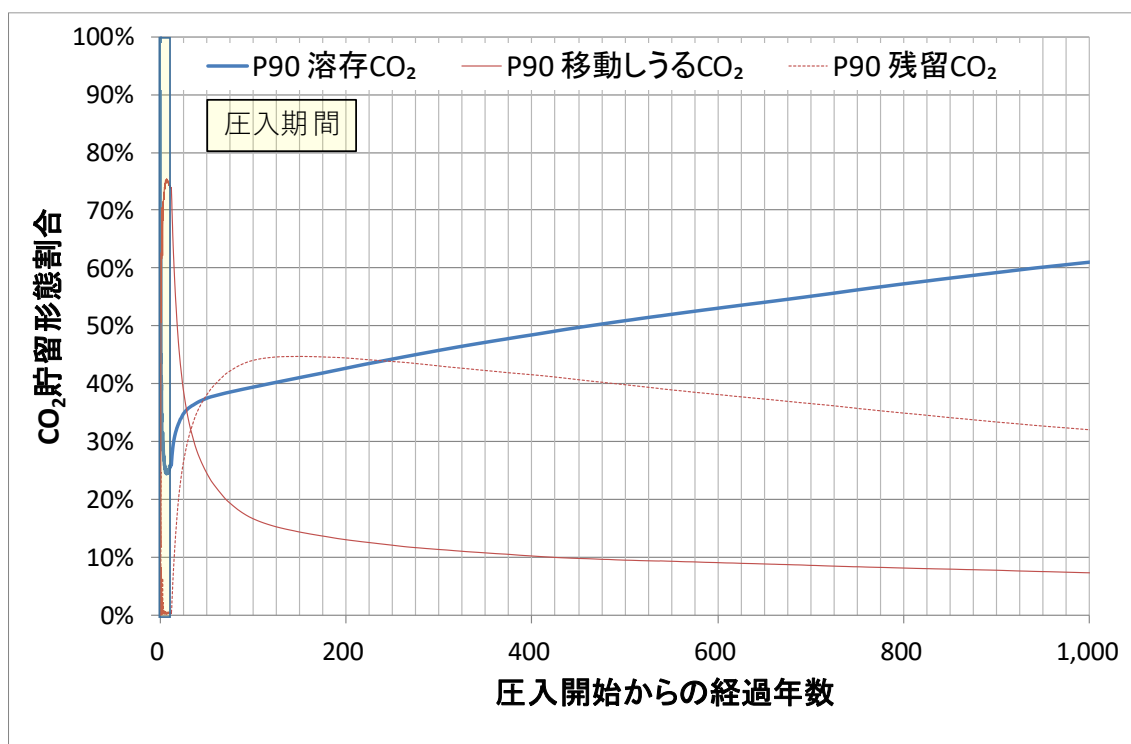
注）図 5.5-35 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-46 ケース 3 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5.5-47に示す。圧入中期間中は、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92%程度が貯留層中にトラップされるものと推定される。



注) 圧入期間は12年間。

図 5.5-47 ケース 3 P90 具現像における貯留形態の変化

② P50 の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 5.5-48 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。

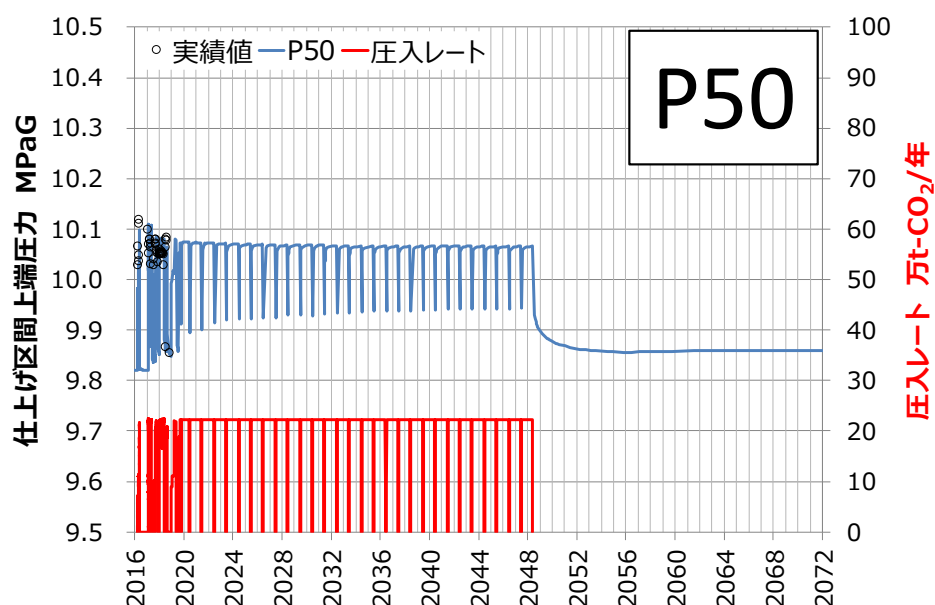
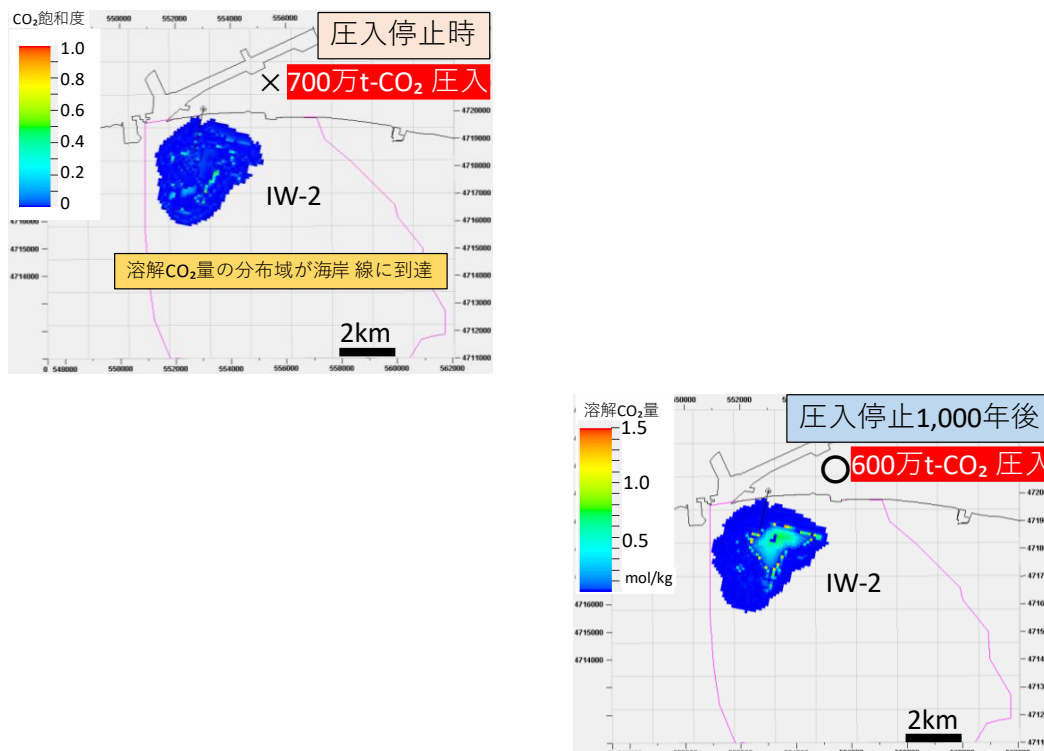


図 5.5-48 ケース 3 P50 具現像による仕上げ区間上端圧力

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の具現像では、700万t-CO₂圧入時の溶解CO₂分布域が海岸線に到達する。
600万t-CO₂の圧入に際しては、全て表5.5-3および図5.5-36に示す圧入の条件を満たす（図5.5-49）。以上より、P50の具現像では600万t-CO₂の圧入が可能であると判断した。



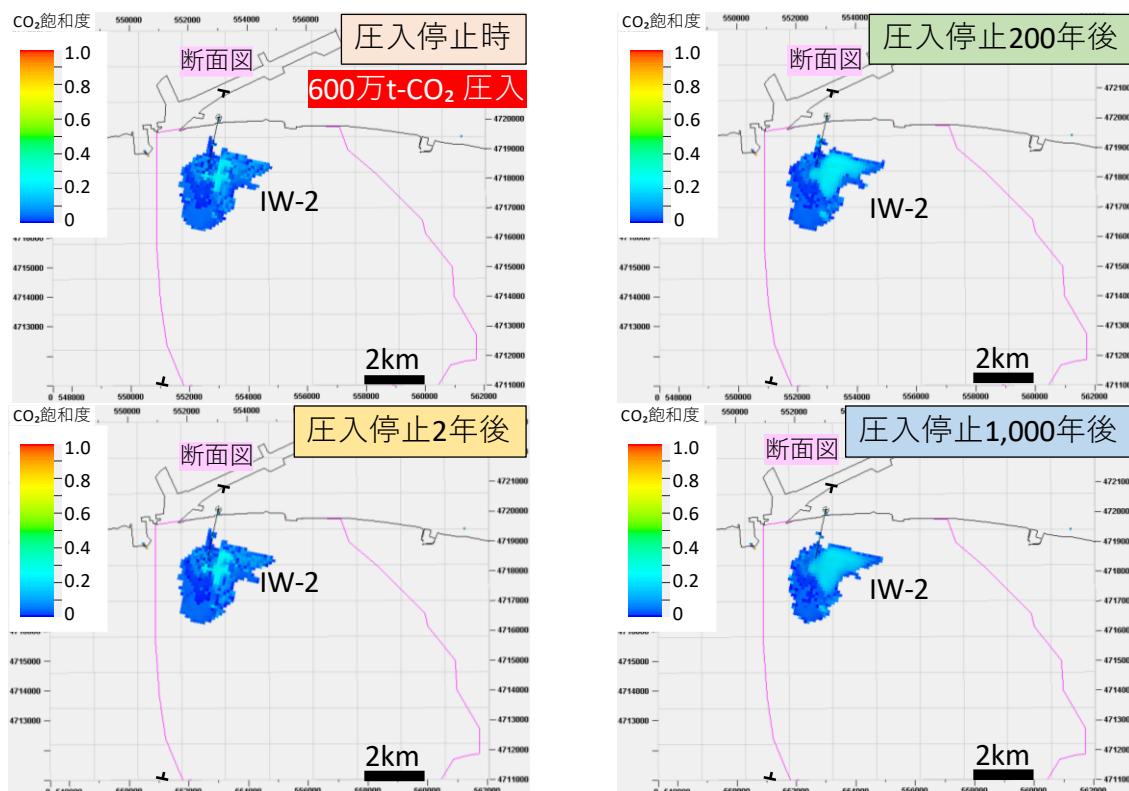
注) 表示の下限は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-49 ケース 3 P50 具現像による圧入不可能と判断した条件

図 5.5-50、図 5.5-51 に圧入停止時、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 CO_2 飽和度の分布を示す。圧入停止時までに、やや東側に CO_2 飽和度の分布範囲を広げている。時間の経過とともに浮力による、 CO_2 が上昇することで、貯留層の上部で CO_2 飽和度が上昇する傾向が認められる。圧入停止 1,000 年後ころまでには CO_2 の地層水への溶解が進み、 CO_2 飽和度の分布域が減少する。

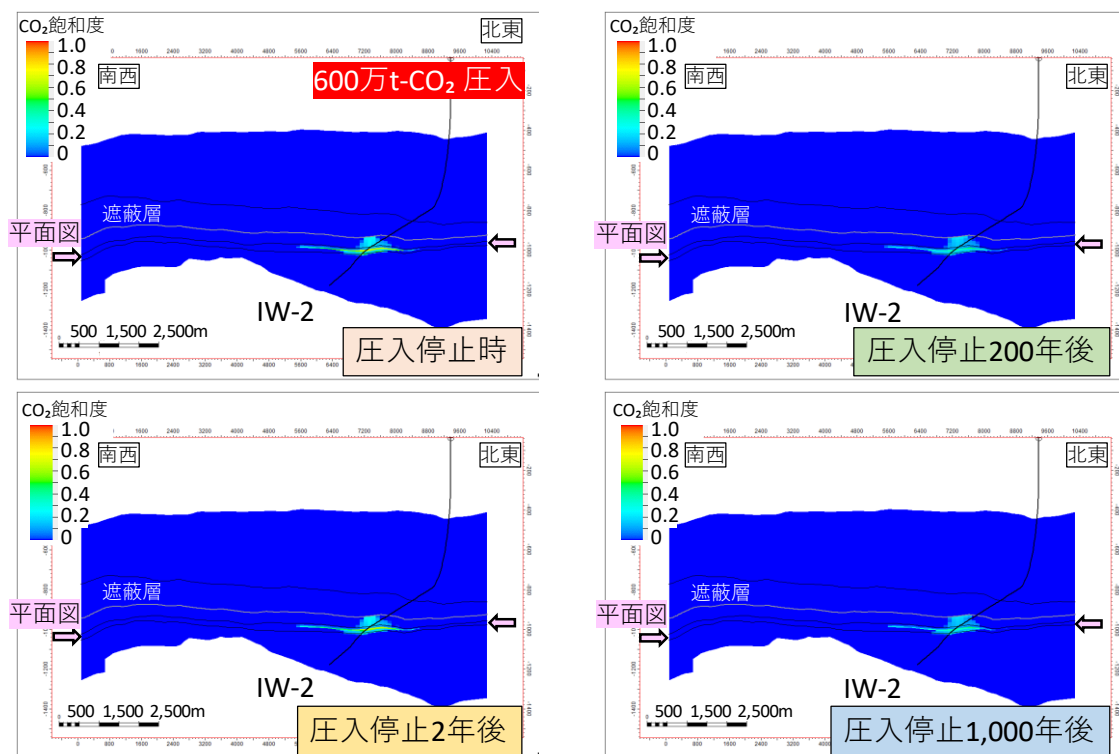
図 5.5-52、図 5.5-53 に溶解 CO_2 量分布の経時変化を示す。 CO_2 飽和度の分布と同様に圧入停止から 200 年後ころまでには、東側に分布範囲が拡大することが予想され、1,000 年後ころまでには、さらに分布範囲が拡大するものの、溶解 CO_2 量自体は減少することが予想される。また、1,000 年後ころまでには、溶解 CO_2 量分布の下方への垂れ下がりが顕著となる（図 5.5-53）。

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、P90 ケースと同様に IW-2 周辺で 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 1,000 年後ころまでには圧力上昇はほぼ解消されることが考えられる。



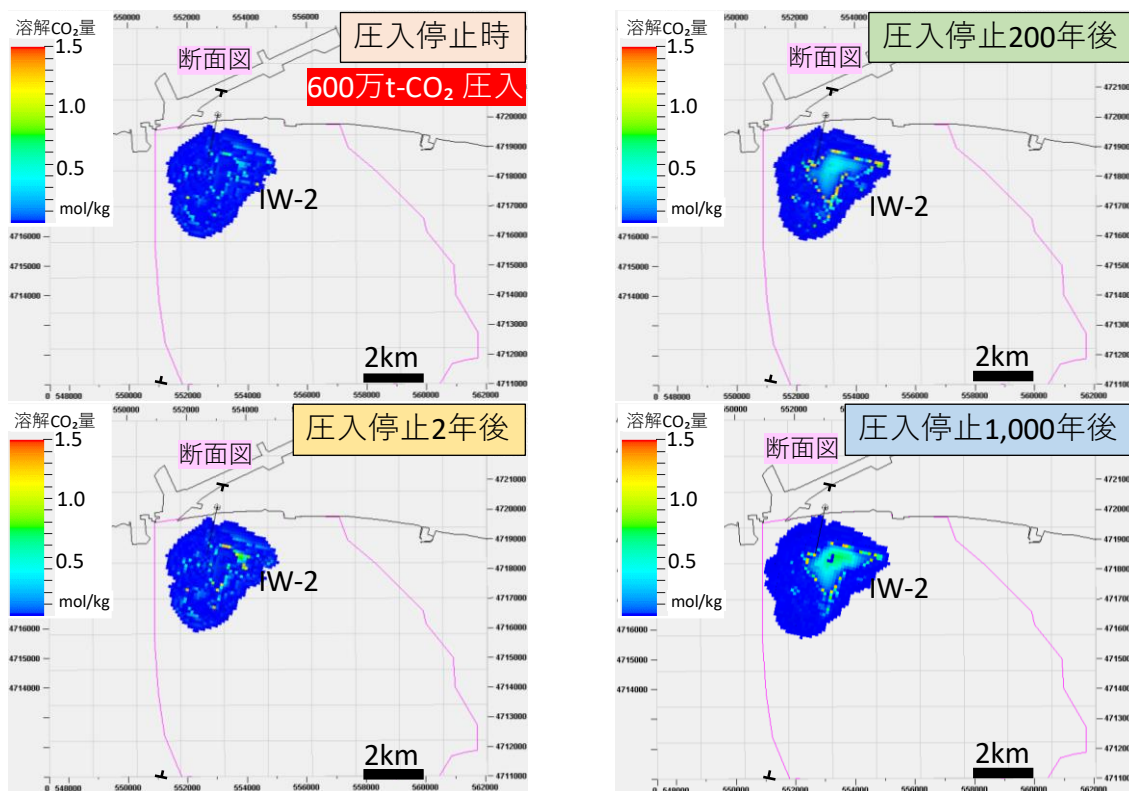
注）貯留層に圧入された CO₂ 飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 0.001。

図 5.5-50 ケース 3 P50 具現像における CO₂ 飽和度分布



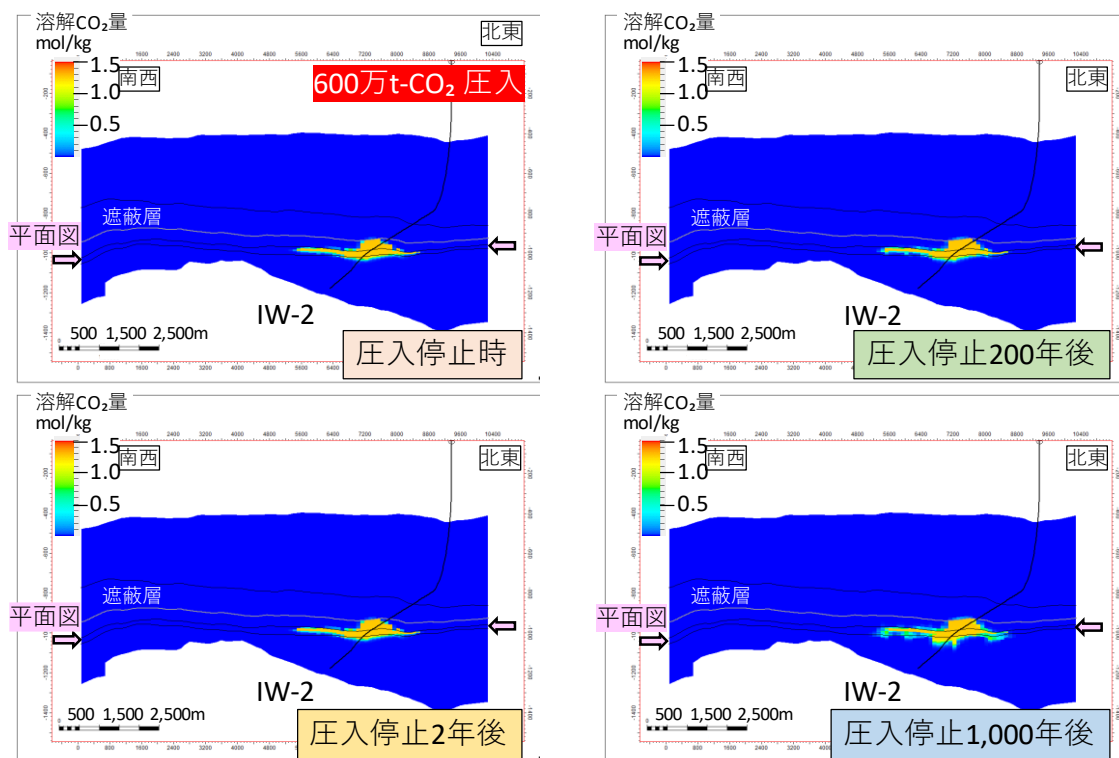
注）図 5.5-40 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-51 ケース 3 P90 具現像における CO₂ 飽和度分布



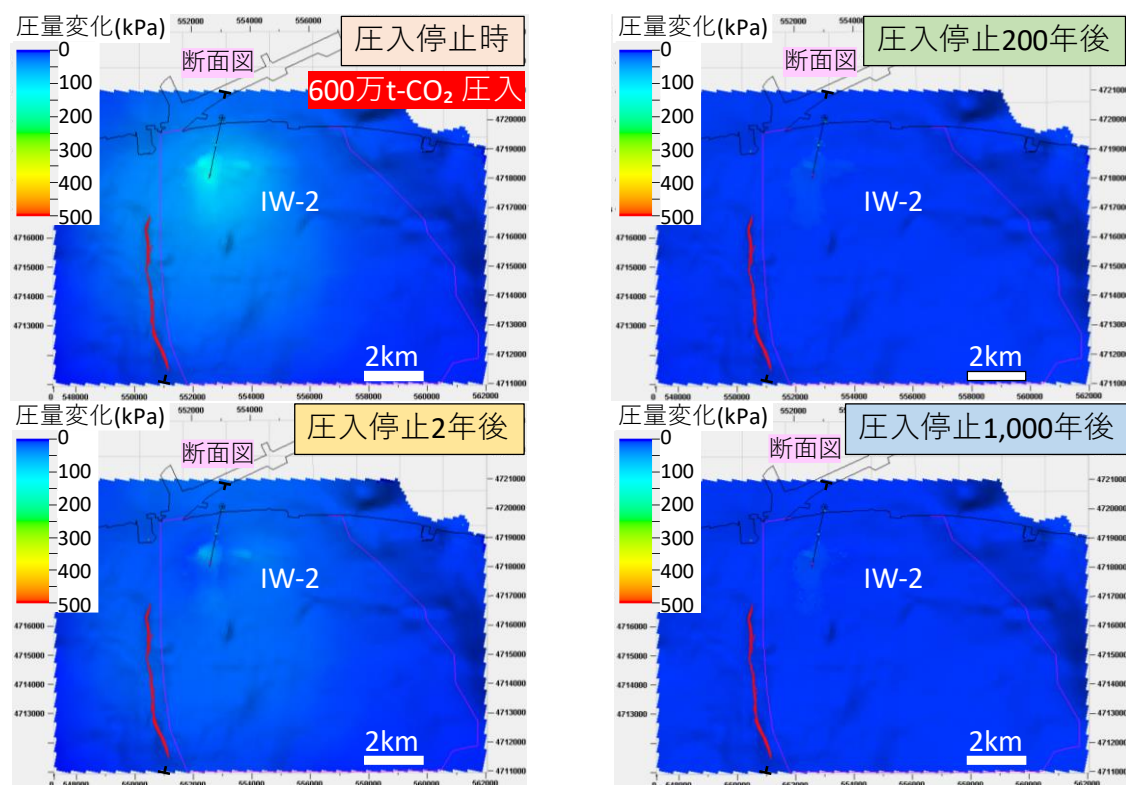
注）貯留層に圧入された溶解CO₂量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-52 ケース 3 P50 具現像における溶解CO₂量分布



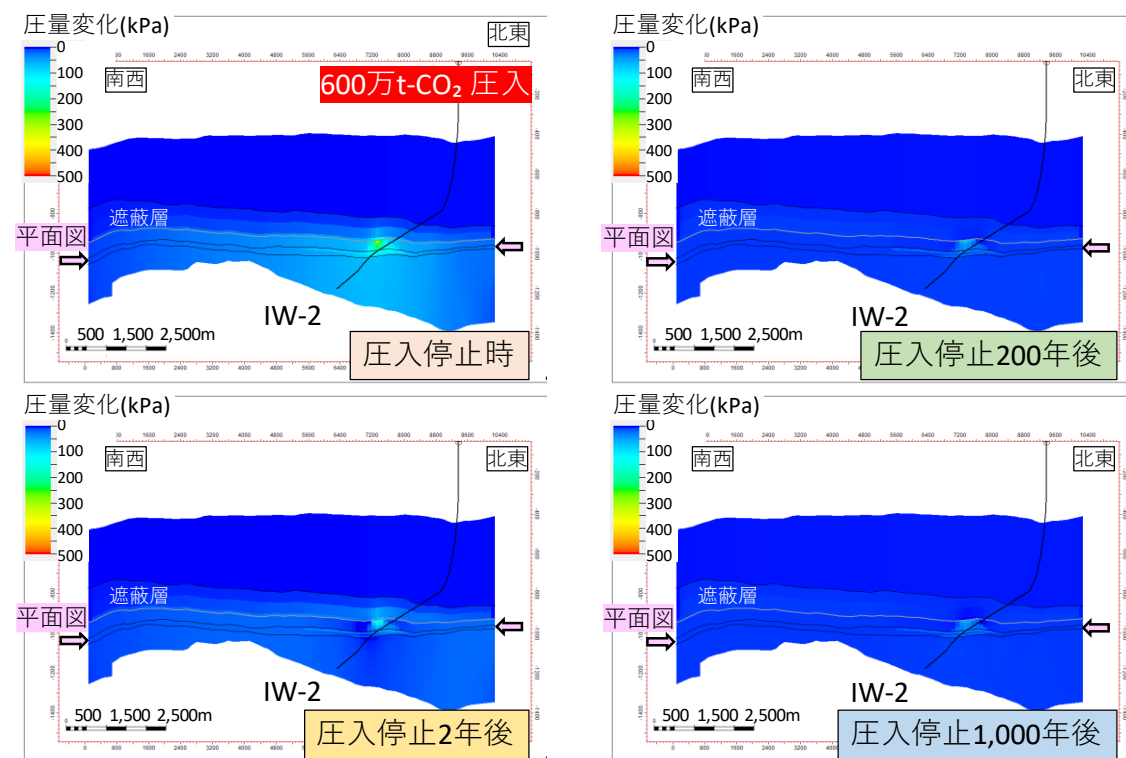
注）図 5.5-42 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-53 ケース 3 P50 具現像における溶解CO₂量分布



注) 図 5.4-5 の上部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.5-54 ケース 3 P50 具現像における圧力変化分布

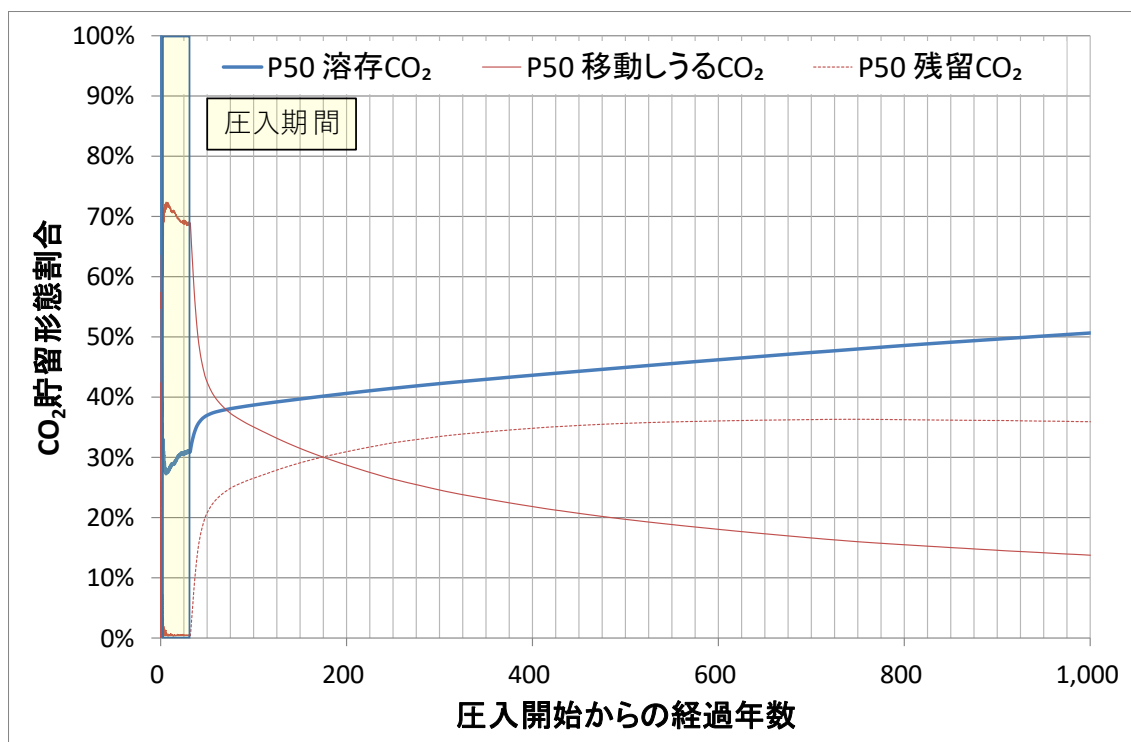


注) 図 5.5-44 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-55 ケース 3 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5.5-56に示す。圧入中期間中は、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86%程度が貯留層中にトラップされるものと推定される。



注) 圧入期間は32年間。

図 5.5-56 ケース 3 P50 具現像における貯留形態の変化

③ P10 の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5.5-57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。

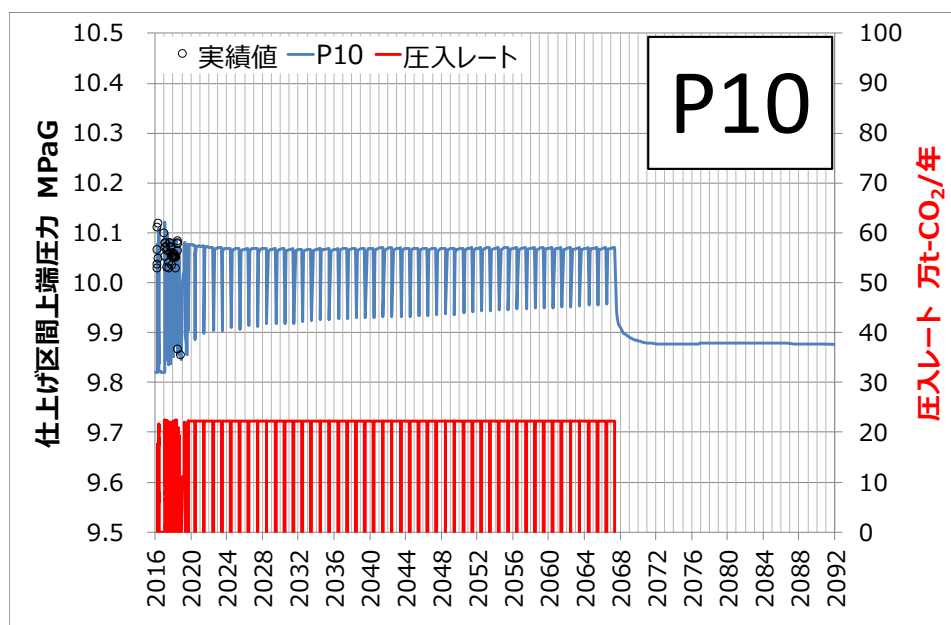
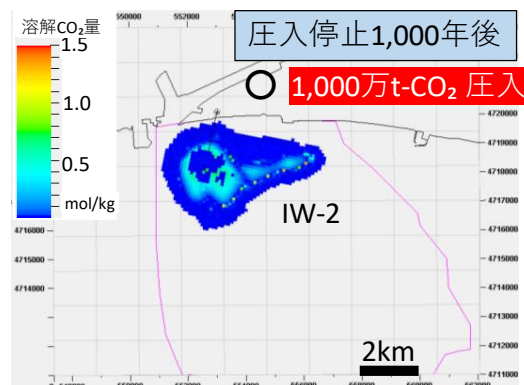
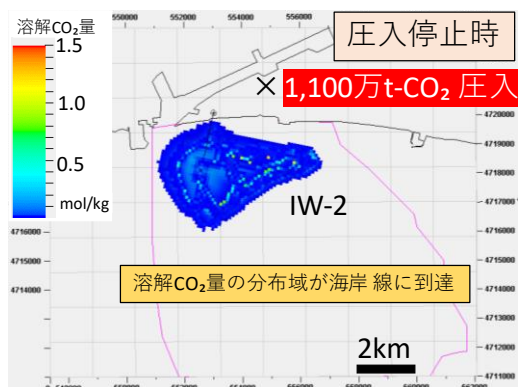


図 5.5-57 ケース 3 P10 具現像による仕上げ区間上端圧力

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 の具現像では、1,100 万 t-CO₂ 圧入時の溶解 CO₂ 分布域が海岸線に到達する。
1,000 万 t-CO₂ の圧入に際しては、全て表 5.5-3 および図 5.5-36 に示す圧入の条件を満たす（図 5.5-58）。以上より、P10 の具現像では 1,000 万 t-CO₂ の圧入が可能であると判断した。



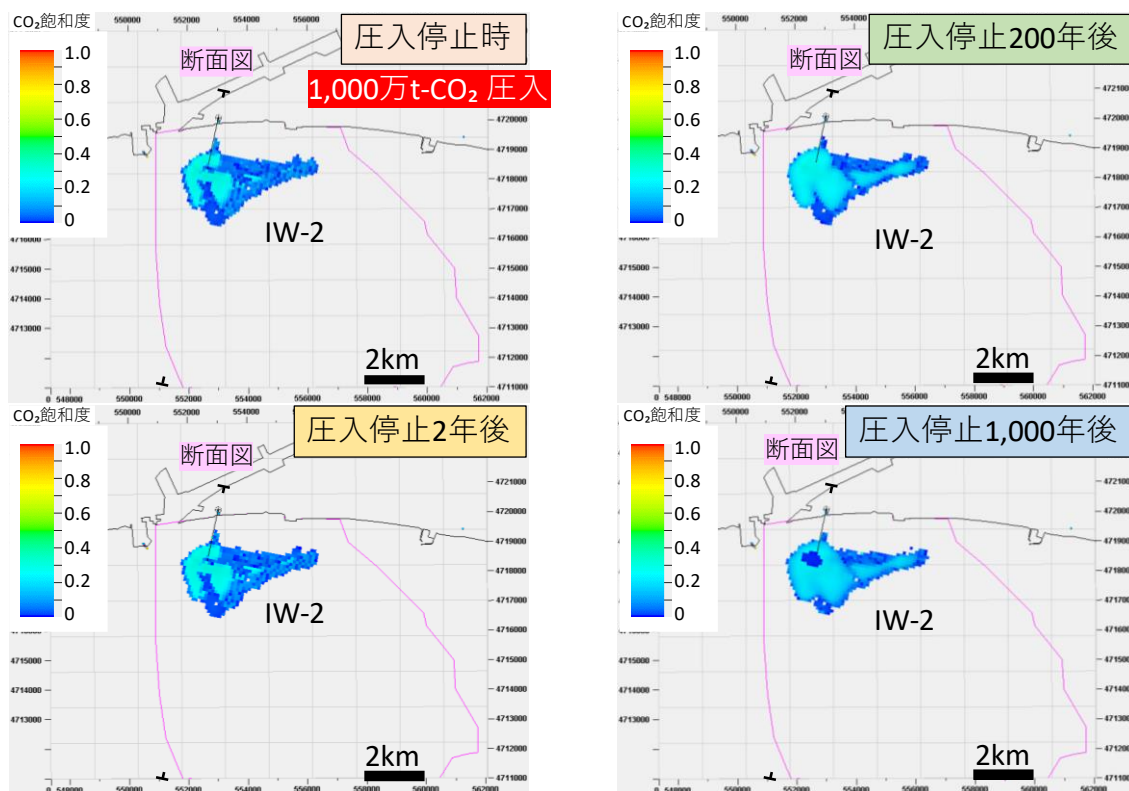
注) 表示の下限は $3 \times 10^{-5} \text{ mol/kg}$ 。

図 5.5-58 ケース 3 P10 具現像による圧入不可能と判断した条件

図 5.5-59、図 5.5-60 に圧入停止時、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 CO_2 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 CO_2 飽和度が上昇するが、1,000 年後ころまでには CO_2 の地層水への溶解が進み、全体的に CO_2 飽和度の低下が予測される。

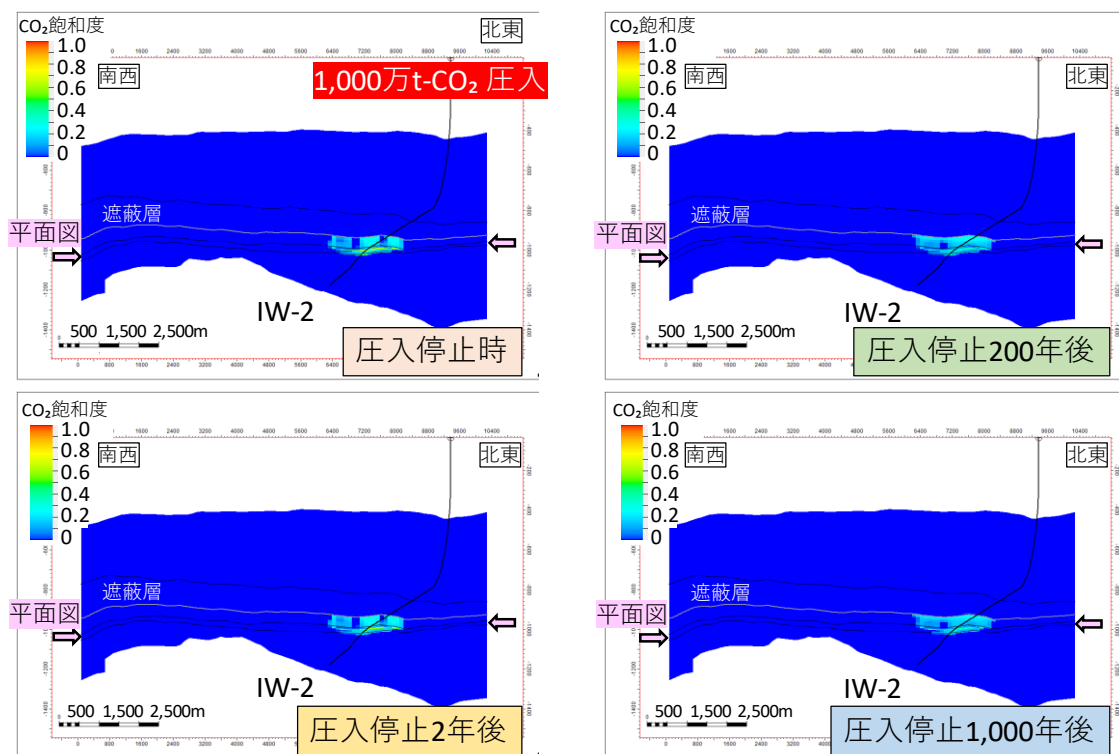
図 5.5-61、図 5.5-62 に溶解 CO_2 量分布の経時変化を示す。 CO_2 飽和度の分布と同様に圧入停止から 200 年後ころまでには、東側に分布範囲が拡大し、1,000 年後ころまでには、さらに分布範囲を拡大することが予測される。また、このころまでには、溶解 CO_2 量分布の下方への垂れ下がりが顕著となる（図 5.5-62）。

図 5.5-63 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 5.5-64 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 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 1,000 年後ころまでには圧力上昇はほぼ解消されることが考えられる。



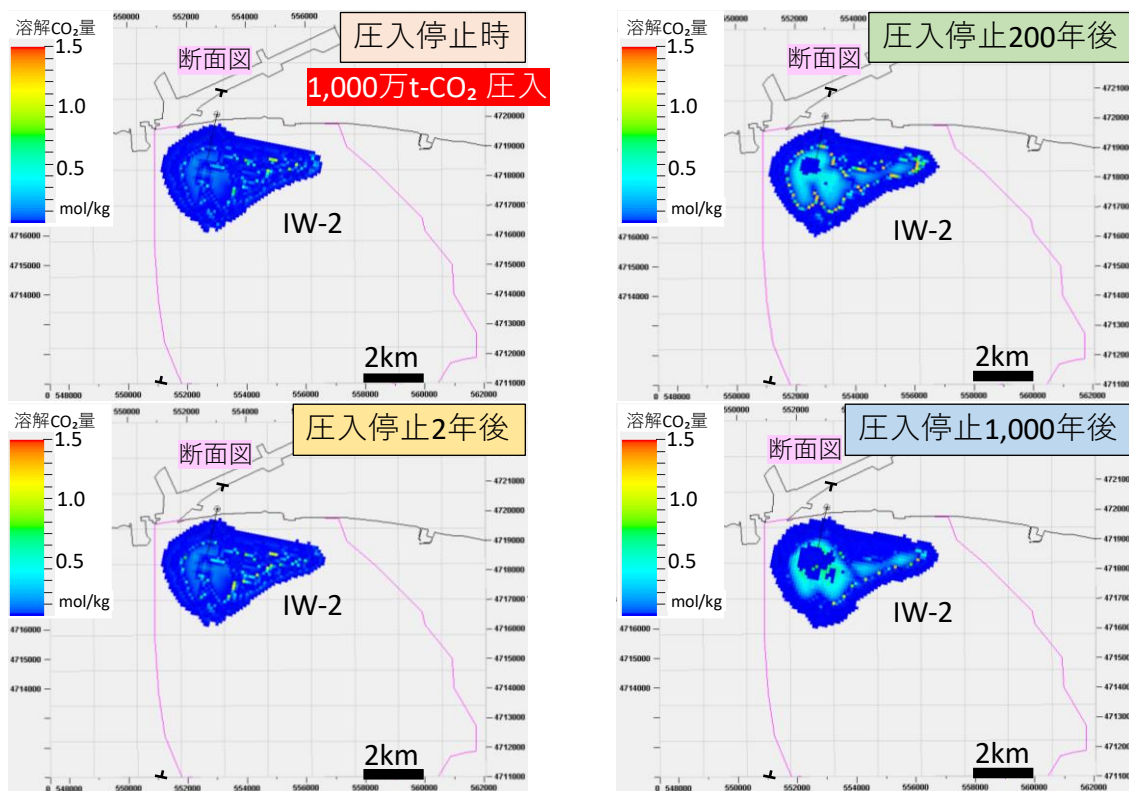
注) 貯留層に圧入された CO₂ 飽和度の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 0.001。

図 5.5-59 ケース 3 P10 具現像における CO₂ 飽和度分布



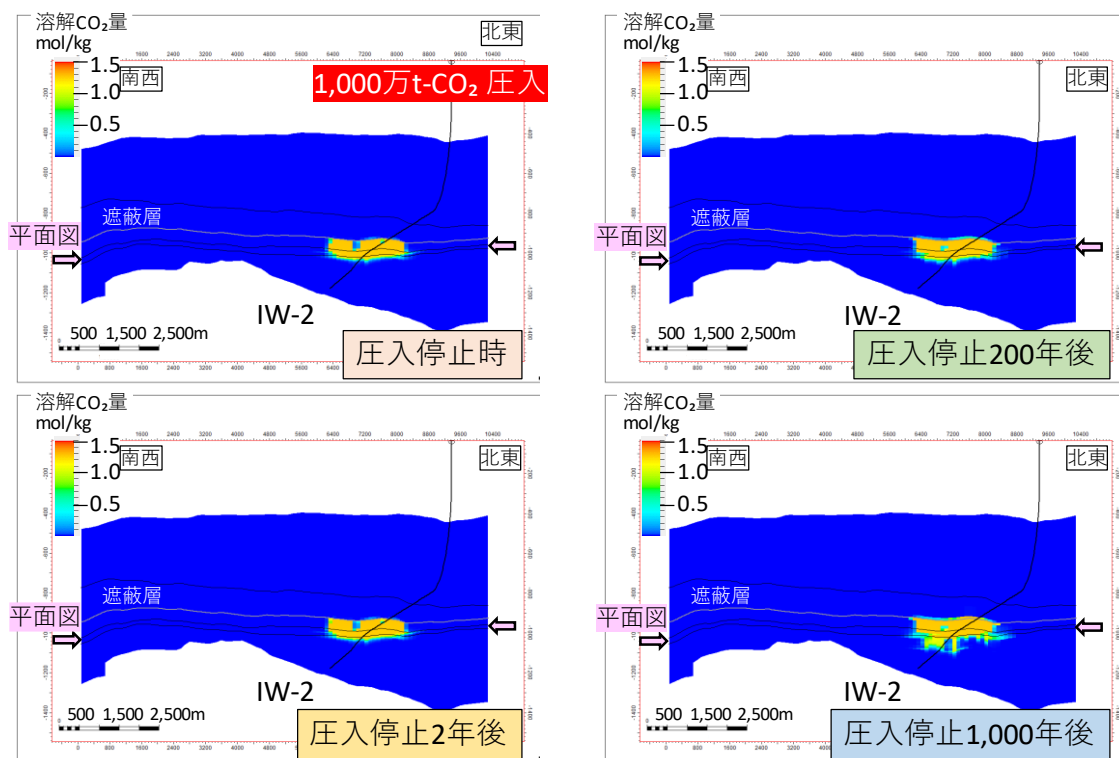
注) 図 5.5-49 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-60 ケース 3 P10 具現像における CO₂ 飽和度分布



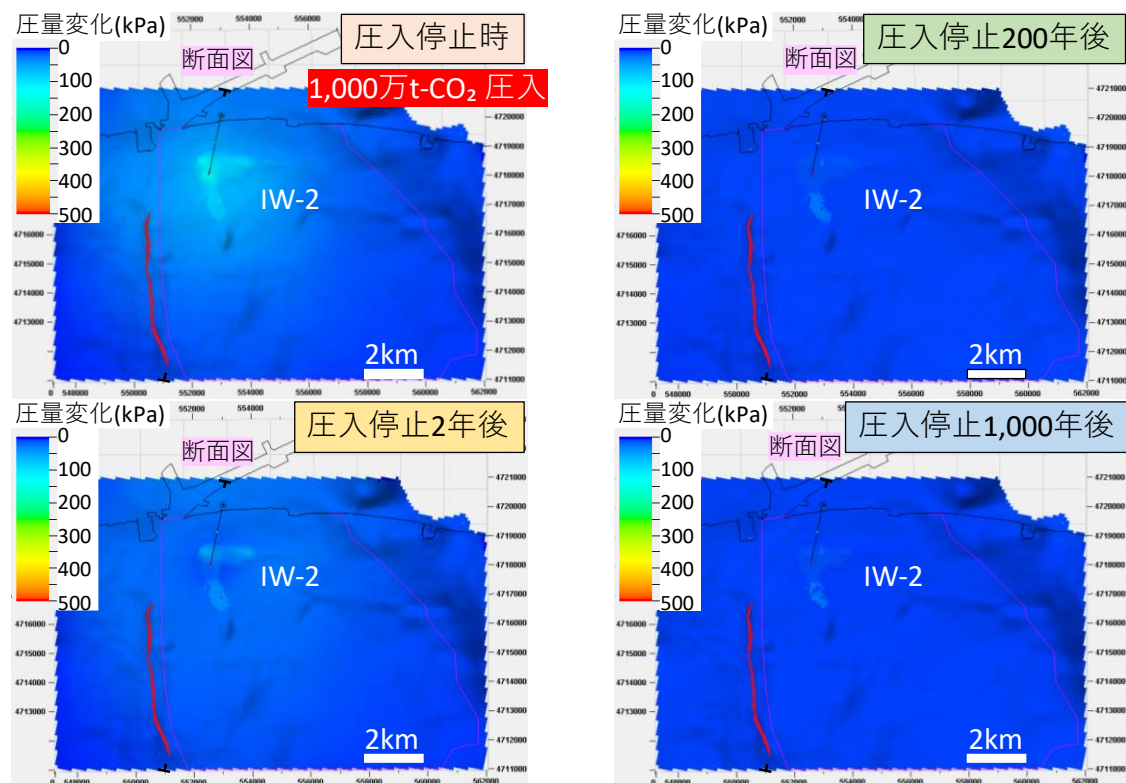
注) 貯留層に圧入された溶解 CO_2 量の分布を上方から俯瞰した図。表示の下限値は 3×10^{-5} mol/kg。

図 5.5-61 ケース 3 P10 具現像における溶解 CO_2 量分布



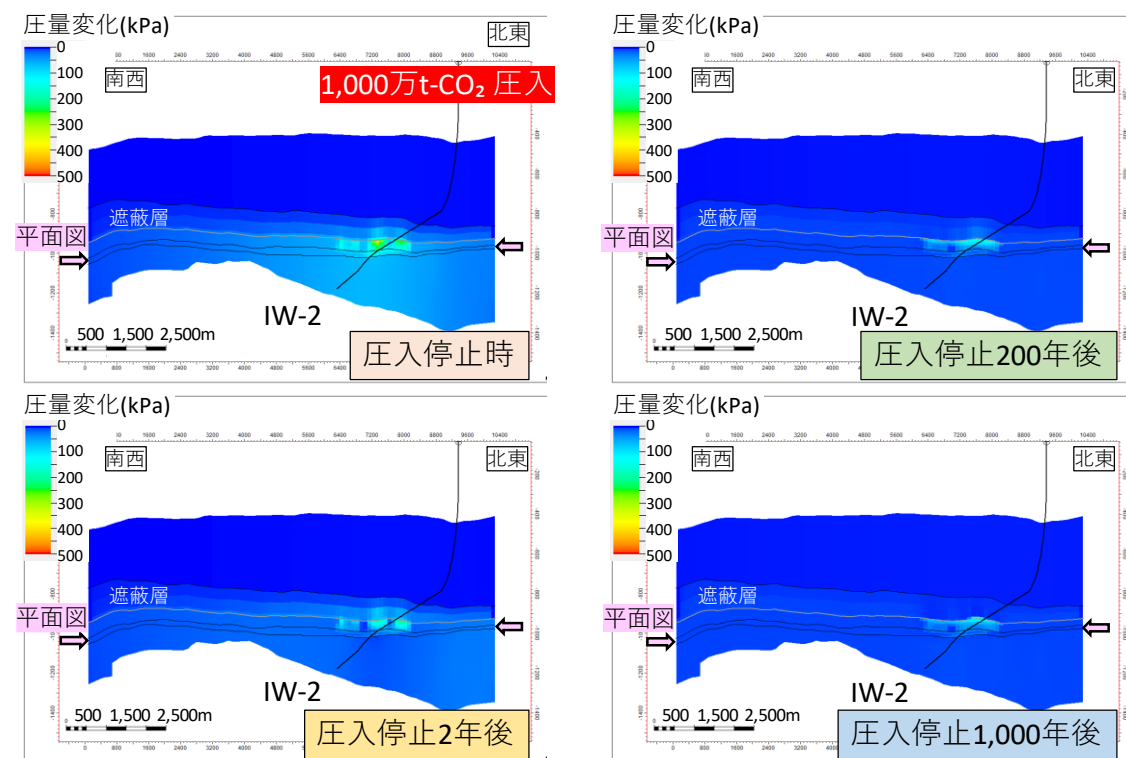
注) 図 5.5-51 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-62 ケース 3 P10 具現像における CO_2 飽和度分布



注）図 5.4-5 の上部高浸透率領域に相当する層準の圧力変化を示す。

図 5.5-63 ケース 3 P10 具現像における圧力変化分布

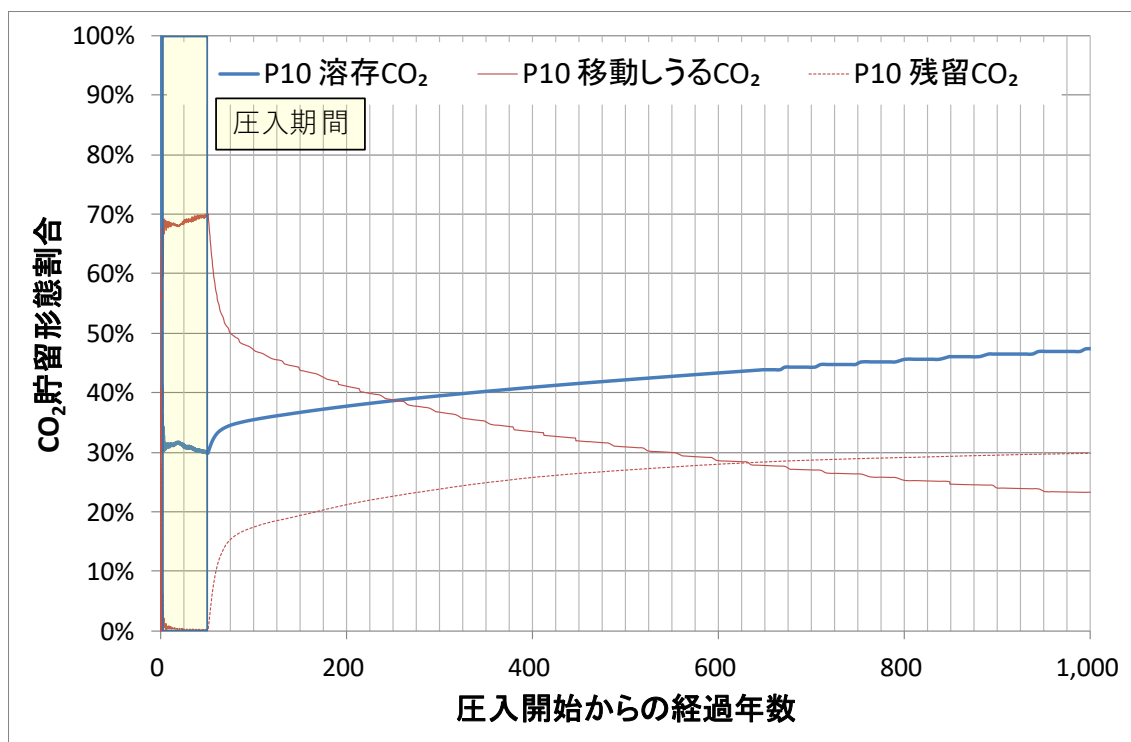


注）図 5.5-53 に示す断面図位置における断面図。

図 5.5-64 ケース 3 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5.5-65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77%程度が貯留層中にトラップされるものと推定される。



注) 圧入期間は 51 年間。

図 5.5-65 ケース 3 P10 具現像における貯留形態の変化

5.5.4 挙動予測シミュレーションのまとめ

30 個の具現像を用いて、長期挙動予測シミュレーションを実施した結果、30 万 t-CO₂ の圧入は安全に実施可能であるとする結果を得た。

最大貯留可能量を推定した結果、最大貯留可能量は平均で 573 万 t-CO₂、標準偏差は 351 万 t-CO₂ となった。振れ幅が大きい、地質の不均質性に対する不確実性の大きさに起因するものと推察される。

5.6 萌別層 1D 流動－地化学連成シミュレーションの実施

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、5.2～5.5 節に記した。5.6～5.7 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。5.6 節では 5.7 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、1D 流動－地化学連成シミュレーションについて記載する。

5.6.1 地層水および地層鉱物の化学種組成の推定

(1) 地層水化学組成

IW-2 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 5.6-1）

表 5.6-1 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－斜ブチロル沸石、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⁾ を使用した。再構成後の地層水組成の pH と飽和度の関係を図 5.6-1 に示す。再構成においては、斜プチロル沸石、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。

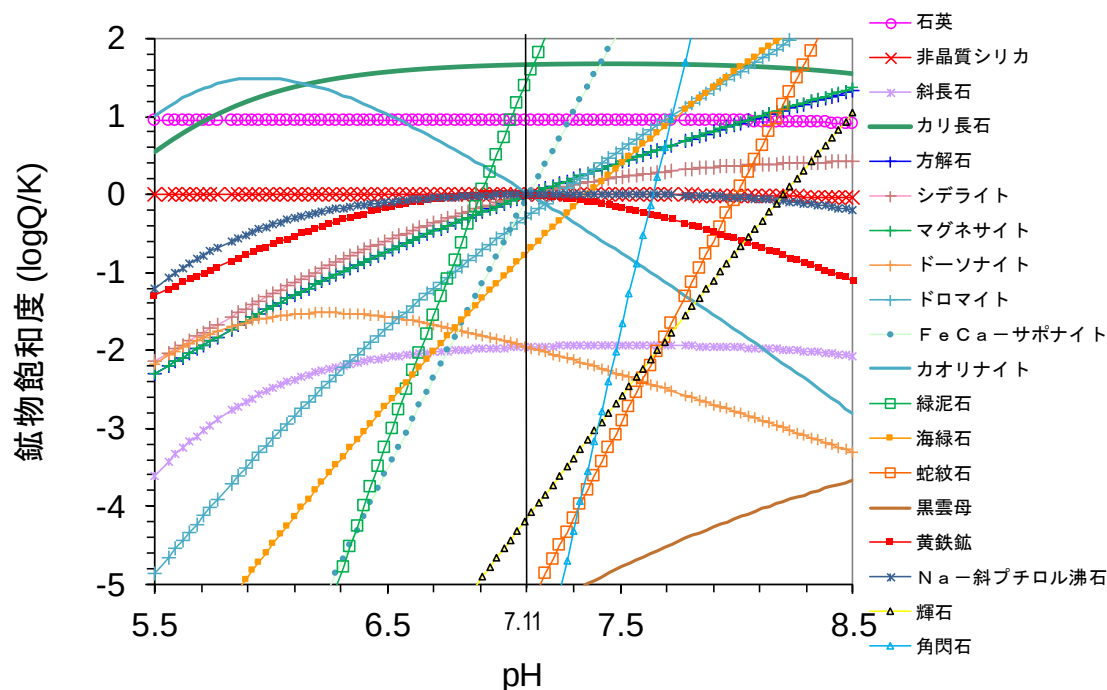


図 5.6-1 萌別層再構成後の地層水組成の pH と飽和度の関係

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 5.6-2 に示す。

表 5.6-2 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-斜プチロル沸石
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）³⁾ 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 5.6-3）。

表 5.6-3 萌別層の鉱物組成

group	和名	name	鉱物組成とlog Q/ 萌別層		組成
			vol%	log Q/K	
シリカ鉱物	石英	quartz	36.11	0.96	SiO ₂
	非晶質シリカ	amorphous silica	0.00	eq.	SiO ₂
長石	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
炭酸塩鉱物	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
粘土鉱物	FeN-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
硫化鉱物	黄鉄鉱	pyrite	0.27	eq.	FeS ₂
沸石	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	輝石	diopside/hedenbergite	0.33	-4.12	CaMg _{0.8} Fe _{0.2} (SiO ₃) ₂
角閃石	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 5.6-4 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 5.6-4 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 ⁻	HAIO 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。

5.6.2 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 5.6-1 式で記述される (e.g. Xu et al., 2007⁴⁾)。

$$r = \pm Ak \left[1 - \left(\frac{Q}{K} \right) \right] \quad (5.6-1 \text{ 式})$$

ここで、 r が反応速度、 A は反応表面積、 k は反応速度定数、 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℃) での反応速度定数 k_{25} を用いて以下の 5.6-2 式のように示される。

$$k = k_{25} \exp \left[-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (5.6-2 \text{ 式})$$

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 5.6-5 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)⁵⁾ 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 5.6-5 反応速度パラメータ

名前	mol/m ² .sec @25℃	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 polymorph)
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) ⁵⁾	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) ⁶⁾	
輝石	7.763×10^{-12}	40.6	Palandri and Kharaka (2004) ⁵⁾	diopside
角閃石	2.512×10^{-11}	94.4		jadeite
Na-斜プロチロル沸石	2.370×10^{-13}	58.0	Birkholtzer et al. ⁷⁾	clinoptilolite
方解石	1.549×10^{-6}	23.5	Palandri and Kharaka (2004) ⁵⁾	
シデライト	1.259×10^{-9}	62.8	Steeffel (2001) ⁸⁾	
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) ⁵⁾	
ドロマイト	2.512×10^{-9}	95.3		ordered

(2) 反応表面積の設定

5.6-1 式で示すように、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い。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., 2007⁴⁾, Aradottir et al., 2012¹⁰⁾）。本検討では、2015 年度業務¹⁾と同様に鉱物を細粒砂岩（0.2 mm）を念

頭に置き、Xu et al. (2007⁴⁾, 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 5.6-6 設定①）。表 5.6-6 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 5.6-7 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 1,000 年間にわたり安定している。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 1D 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 5.6-2～5.6-3 に示す。

表 5.6-6 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-斜プチロル沸石	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 5.6-7 反応表面積の設定によ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）の溶解が進行する。	×
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、サポナイトと斜ブチロル沸石が沈殿する。	×
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、シデライト、斜ブチロル沸石サポナイトが沈殿する。海緑石溶解のタイミングが設定②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、サポナイトと斜ブチロル沸石が沈殿する。	×
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	設定③よりもやや遅いタイミングで、海緑石の溶解、シデライト、斜ブチロル沸石、サポナイトが沈殿する。	○
萌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、斜ブチロル沸石とスメクタイトの自生			

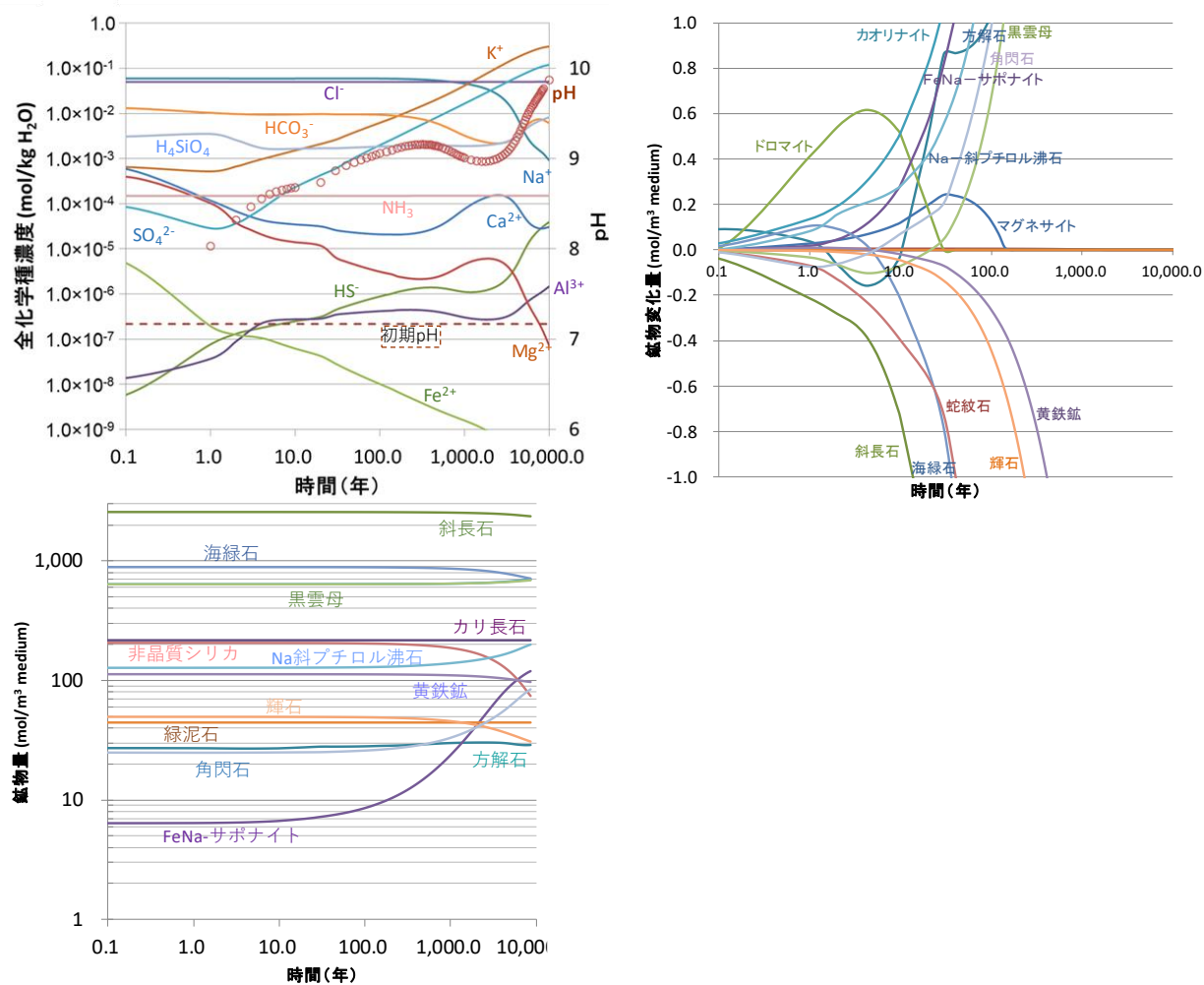


図 5.6-2 設定①によるバッチ試験の結果

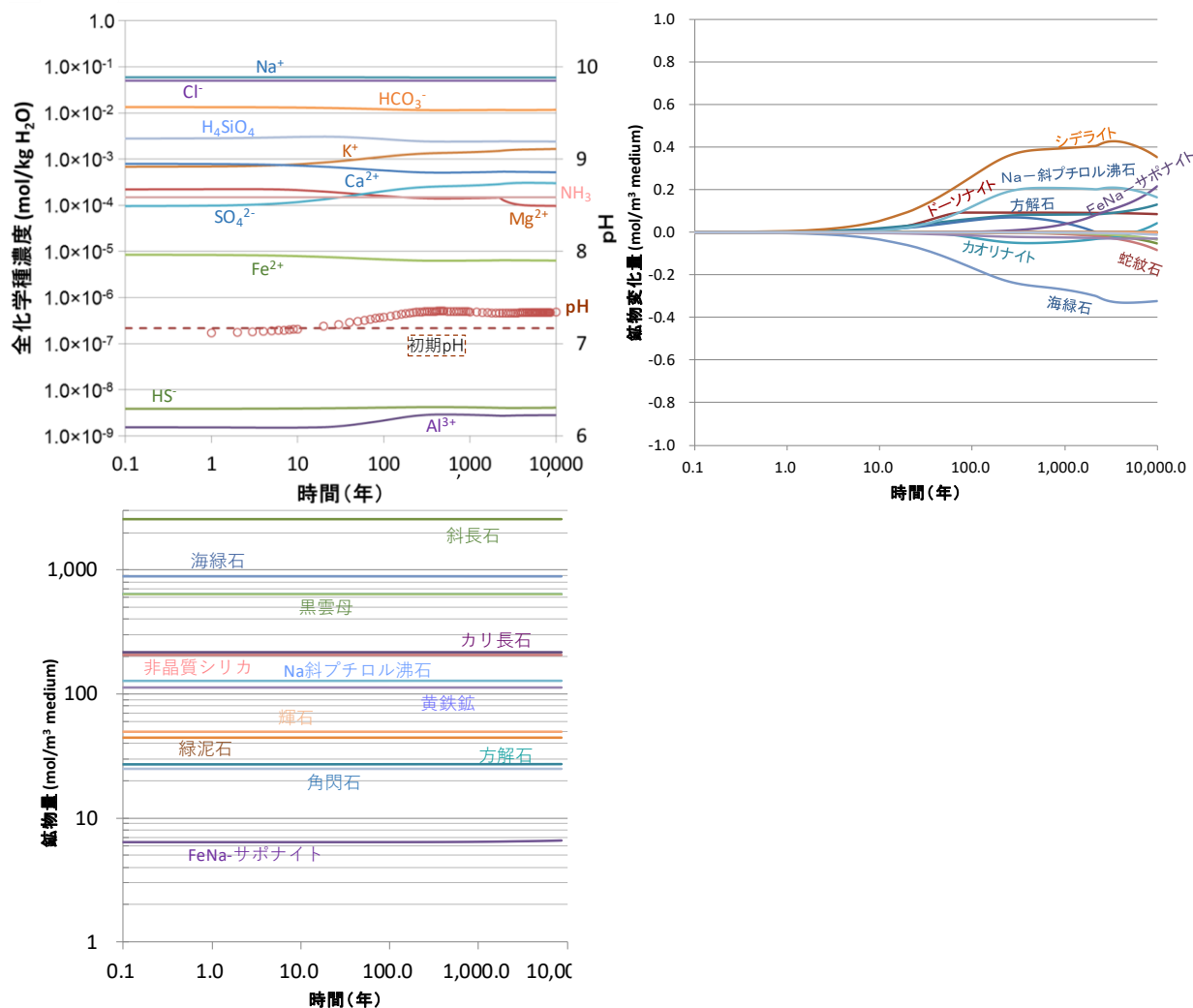


図 5.6-3 設定⑤によるバッチ試験の結果

5.6.3 1D 流動－地化学連成シミュレーション

TOUGHREACT V2.0 を用いて、5.6.2(2)で設定した設定③と設定⑤を入力したモデルを用いて、1D 軸対称流動モデル組み込み、1D 流動－地化学連成シミュレーションを実施した。

(1) 1D 流動－地化学連成シミュレーションモデルの設定

表 5.6-8 に 1D 流動－地化学連成シミュレーションに使用する 1D 軸対称流動モデルの条件を示す。反応表面積の設定は 5.6.2(2)で設定した設定③と設定⑤を用い、シミュレーションにおける圧入にかかる設定は、図 5.5-16 で示したケース②（2019 年 9 月 27 日まで圧入を継続し、累計 30 万 t-CO₂ を圧入するケース）とした。

表 5.6-8 1D 軸対称流動モデルの設定条件

		萌別層
有効孔隙率	(%)	28
絶対浸透率	(mD)	168
岩石圧縮率	(1/Pa)	4.54×10^{-6}
貯留層厚	(m)	159
初期温度	(°C)	37.8
初期圧力	(MPa)	9.9213
		(深度973.63m)

(2) 設定③の結果

図 5.6-4 に CO₂ 固定化量の経時変化を、図 5.6-5 に鉱物溶解・沈殿量の経時変化を示す。CO₂ 圧入開始後 20 年頃から徐々に CO₂ の鉱物固定化が始まり、圧入から約 1,500 年後には圧入した CO₂ の 85% 程度が鉱物固定化され、その後はほぼ一定の値となる。CO₂ の固定化にはシデライトおよびマグネサイトの沈殿によるものである。鉱物溶解は海緑石が主体であり、海緑石の溶解により生じた Fe²⁺ や Mg²⁺ が HCO₃⁻ と反応し、それぞれシデライトとマグネサイトの沈殿が生じると考えられる。それ以外にも海緑石の溶解により H₄SiO₄、Al³⁺、K⁺ が生じるが、それらは非晶質シリカ、カオリナイトの沈殿により消費されている。K⁺ については、萌別層の地層温度（44℃）では、カリ長石が生成しないと考えられるため、シミュレーション上沈殿を認めていないため、鉱物沈殿による消費は起こらず地層水中に溶存する。

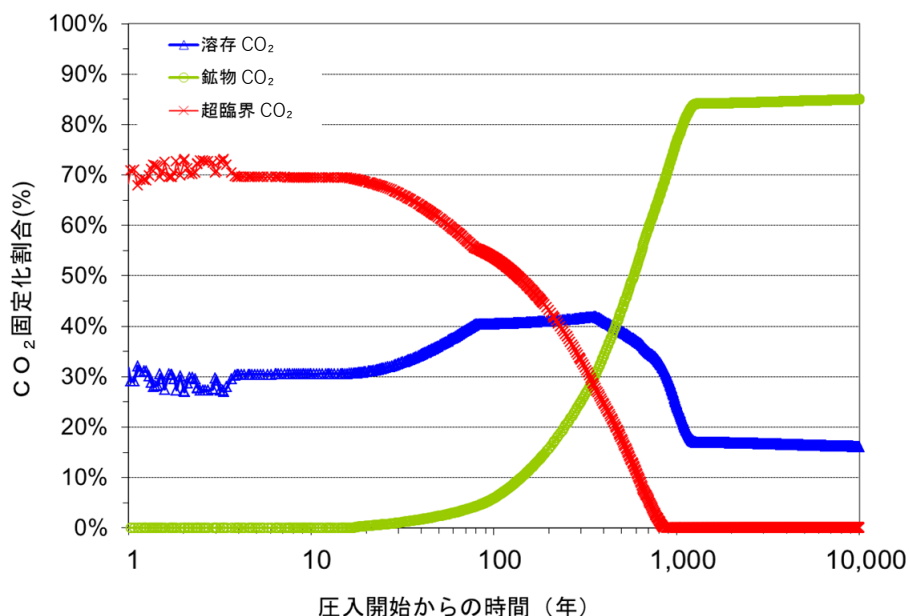


図 5.6-4 CO₂ 固定化量の経時変化（設定③）

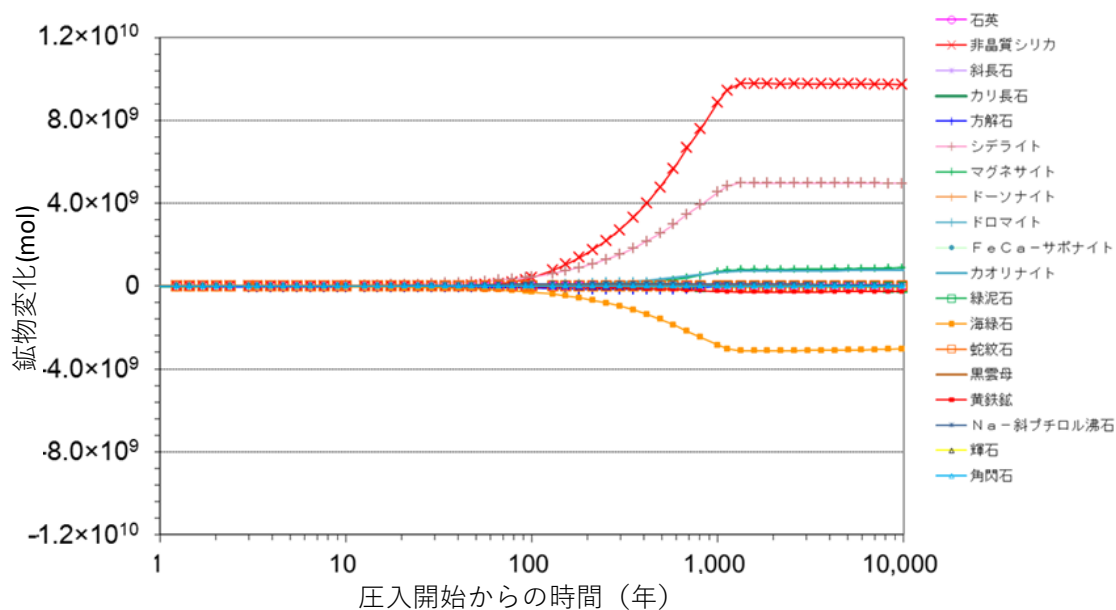


図 5.6-5 鉱物の溶解および沈殿量の経時変化（設定③）

(3) 設定⑤の結果

図 5.6-6 に CO₂ 固定化量の経時変化を、図 5.6-7 に 鉱物変化量の経時変化を示す。本ケースでは CO₂ の 鉱物固定化が CO₂ 圧入後 2,000 年後から進行し、10,000 年後には 10% 以上 CO₂ が 鉱物固定される。鉱物溶解は海緑石が主体であり、海緑石の溶解により生じた Fe²⁺や Mg²⁺が HCO₃⁻と反応し、それぞれシデライトとマグネサイトの沈殿が生じると考えられ、設定③と類似する。また設定⑤では、圧入中から方解石の溶解が生じており、圧

入終了後も溶解が継続する傾向が認められる。

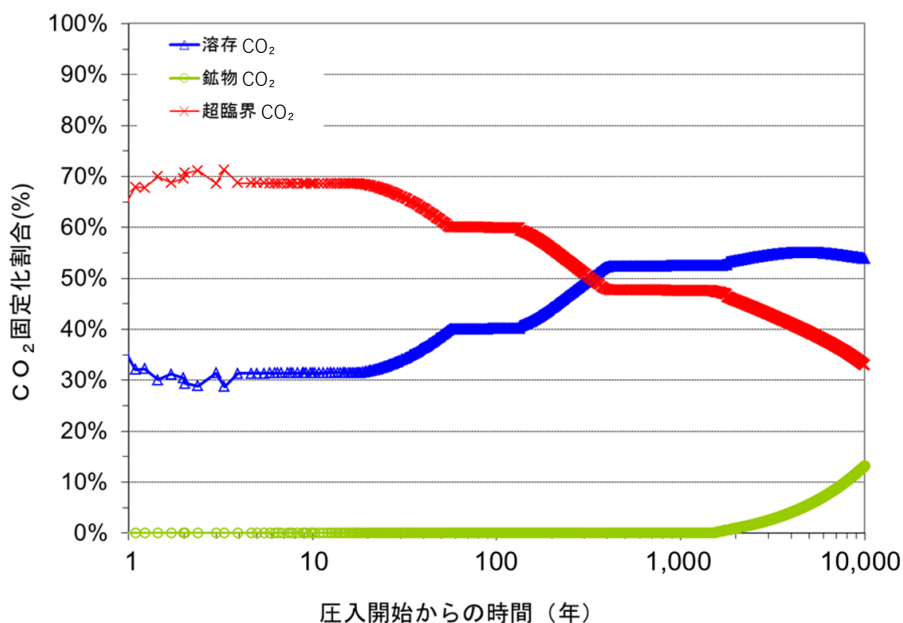


図 5.6-6 CO₂ 固定化量の経時変化（設定⑤）

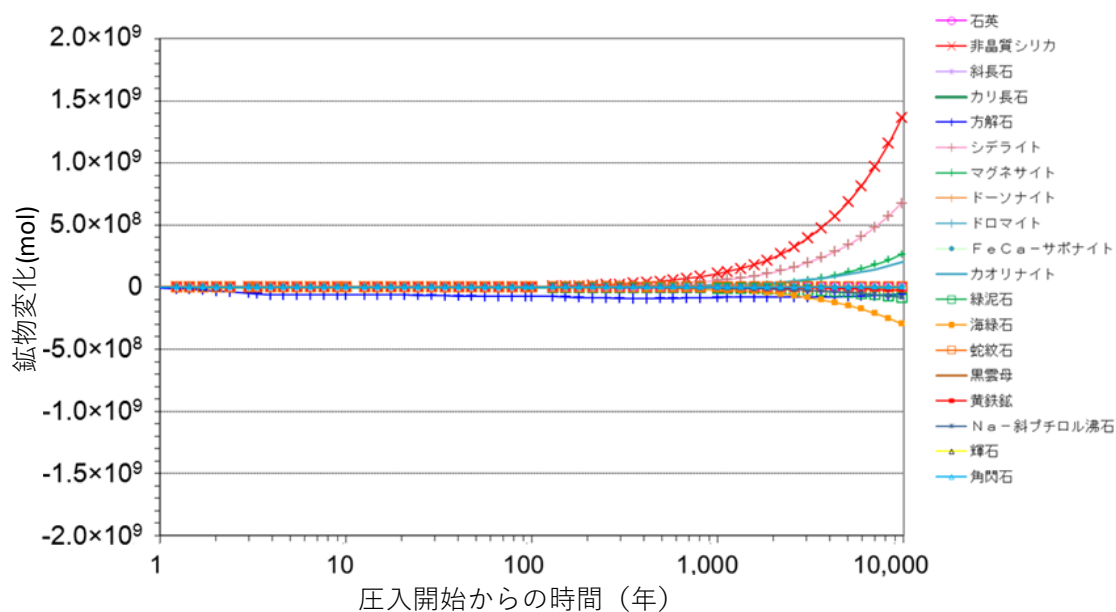


図 5.6-7 鉱物の溶解および沈殿量の経時変化（設定⑤）

5.6.4 1D 流動－地化学連成シミュレーションのまとめ

苫小牧 OB-2 掘削時に萌別層貯留層より採取した地層水化学組成の分析結果を基に、熱力学再構成による分析値の補正を行い、その地層水が萌別層貯留層中において、CO₂を圧入しない状態で 10,000 年間にわたり安定的であることを前提に、貯留層を構成する鉱物

の反応表面積を調整し、2 ケースの妥当と考えられる設定を定義した（設定③、設定⑤）。この2 ケースの設定により 30 万 t-CO₂ を圧入する 1D 流動－地化学連成シミュレーションを実施した。その結果、設定③、設定⑤共に海緑石が溶解し、主にシデライトやマグネサイトが沈殿する結果となったが、設定③の方が数 100 年早期にこの反応が顕著となる結果となった。海緑石が基質に多く存在する萌別層の岩石試料の解析結果¹⁾ を考慮すれば、海緑石の反応表面積を 1/10,000 に設定し、より上記の反応のタイミングが遅い設定⑤が妥当な設定であると判断される。

以上より設定⑤により、3D 流動－地化学連成シミュレーションを実施することとした。

【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) 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）
- 5) 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）
- 6) Xu, T., Apps, J. A., Pruess, K., “Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system”, Chem. Geol., 217, p295-318（2005）
- 7) 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）

- 8) Steefel, C. I., “CRUNCH Version 1.2” LLNL (2001)
- 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)

5.7 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

5.7.1 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。図 5.7-1 は両シミュレーターにより、図 5.5-16 で示したケース② (2019 年 9 月 27 日まで圧入を継続し、累計 30 万 t-CO₂を圧入するケース) の圧入シナリオによるシミュレーション結果のうち、深度 999.2725mTVDSS における圧力挙動の比較である。両シミュレーターによる結果はおおむね一致する。

図 5.7-2 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概ね一致すると確認し、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。

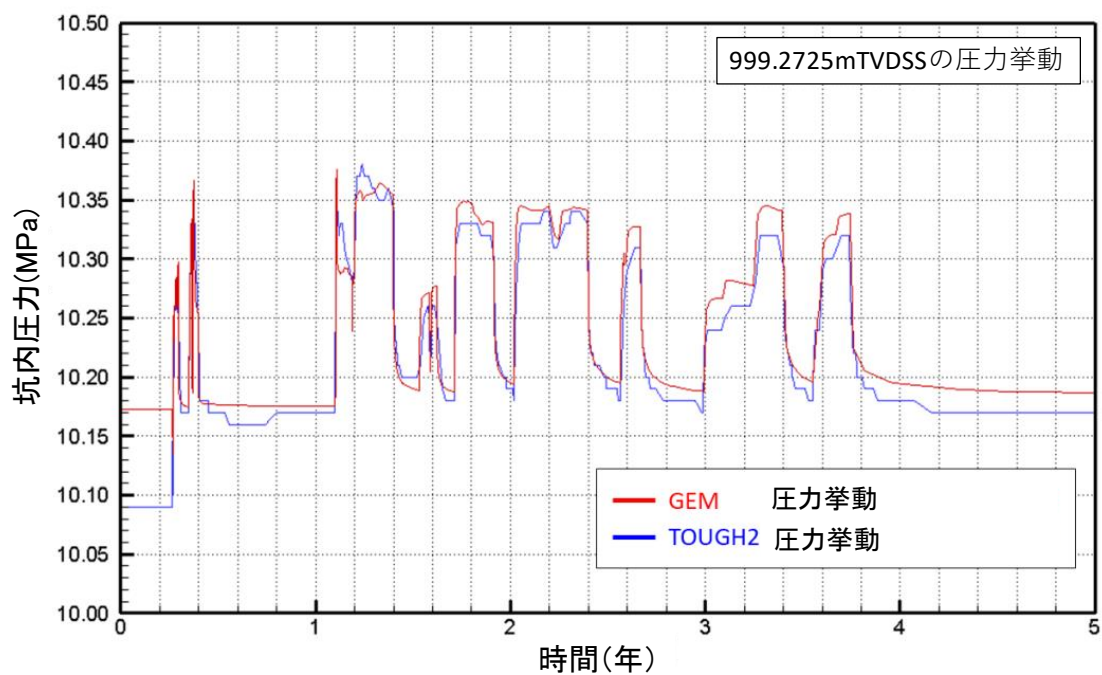
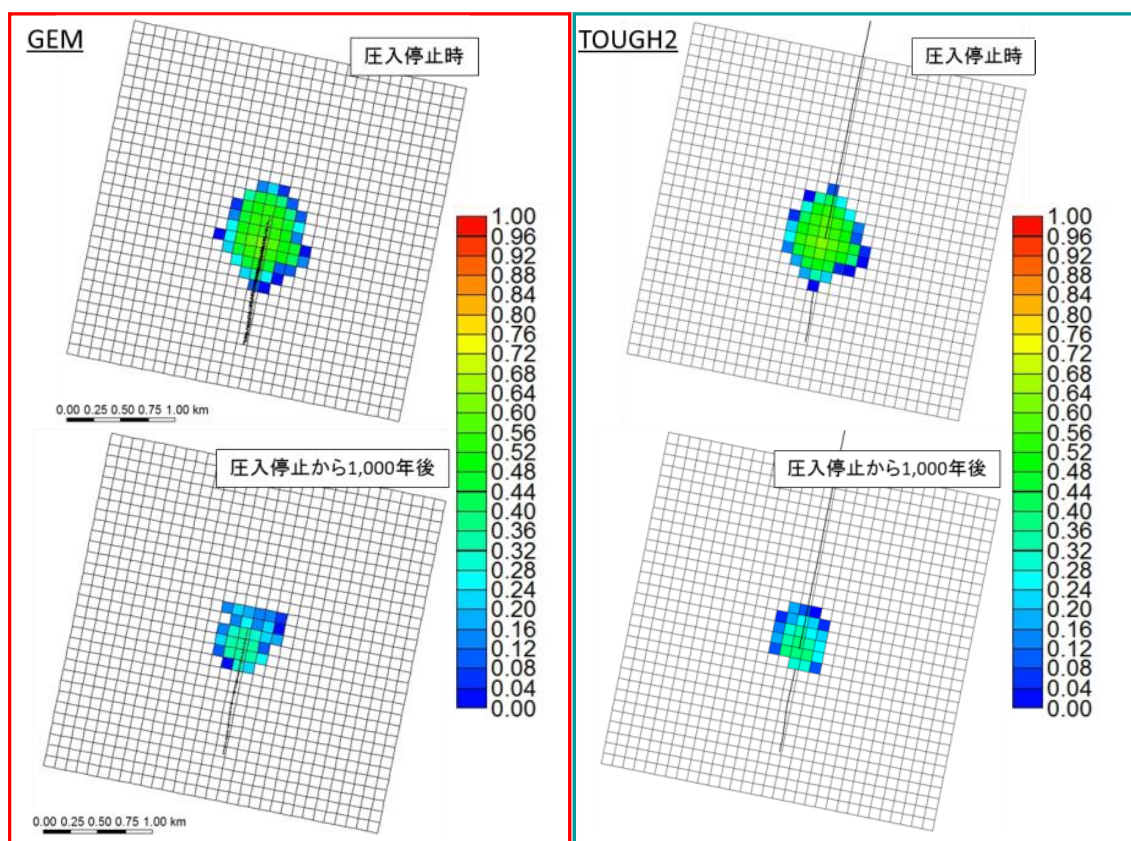


図 5.7-1 GEM と TOUGH2 による流動シミュレーション結果の比較（坑内圧力挙動）



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 5.7-2 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）

5.7.2 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 5.6-6 の設定③および設定⑤を 3D モデルに組み込んでシミュレーションを実施した（表 5.7-1）。

表 5.7-1 設定条件

設定名	調整内容（表 5.6-4）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、角閃石の反応表面積を 10 ⁻⁴ に調整
設定⑤	海緑石の反応表面積を 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。

① 設定③

モデル全体の鉱物溶解・沈殿量の経時変化を図 5.7-3 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。

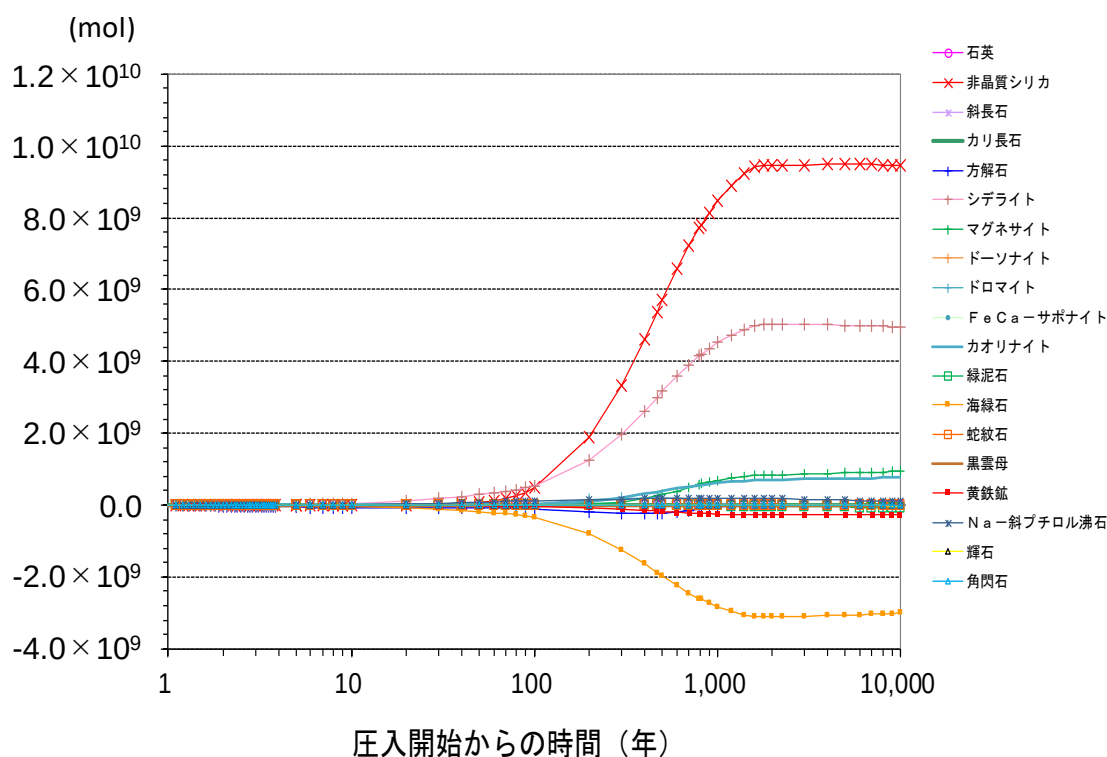


図 5.7-3 モデル全体の鉱物の溶解・沈殿量の経時変化（設定③）

モデル全体のCO₂固定化量割合の変化を図5.7-4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。

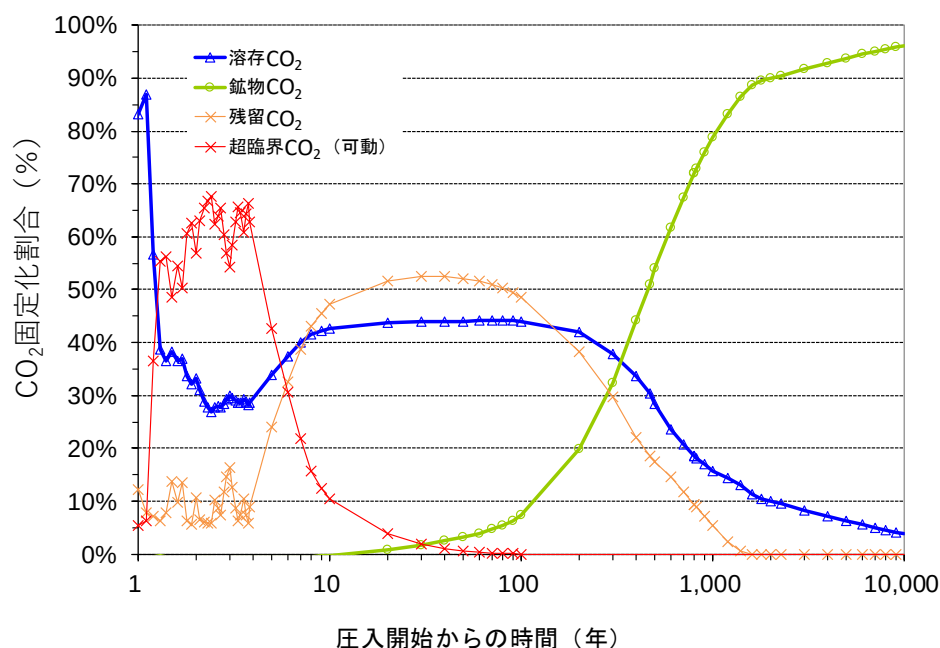


図 5.7-4 モデル全体のCO₂固定化量の経時変化（設定③）

図5.7-5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5.7-4）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5.7-6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としても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5.7-4）ため、図5.7-6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。

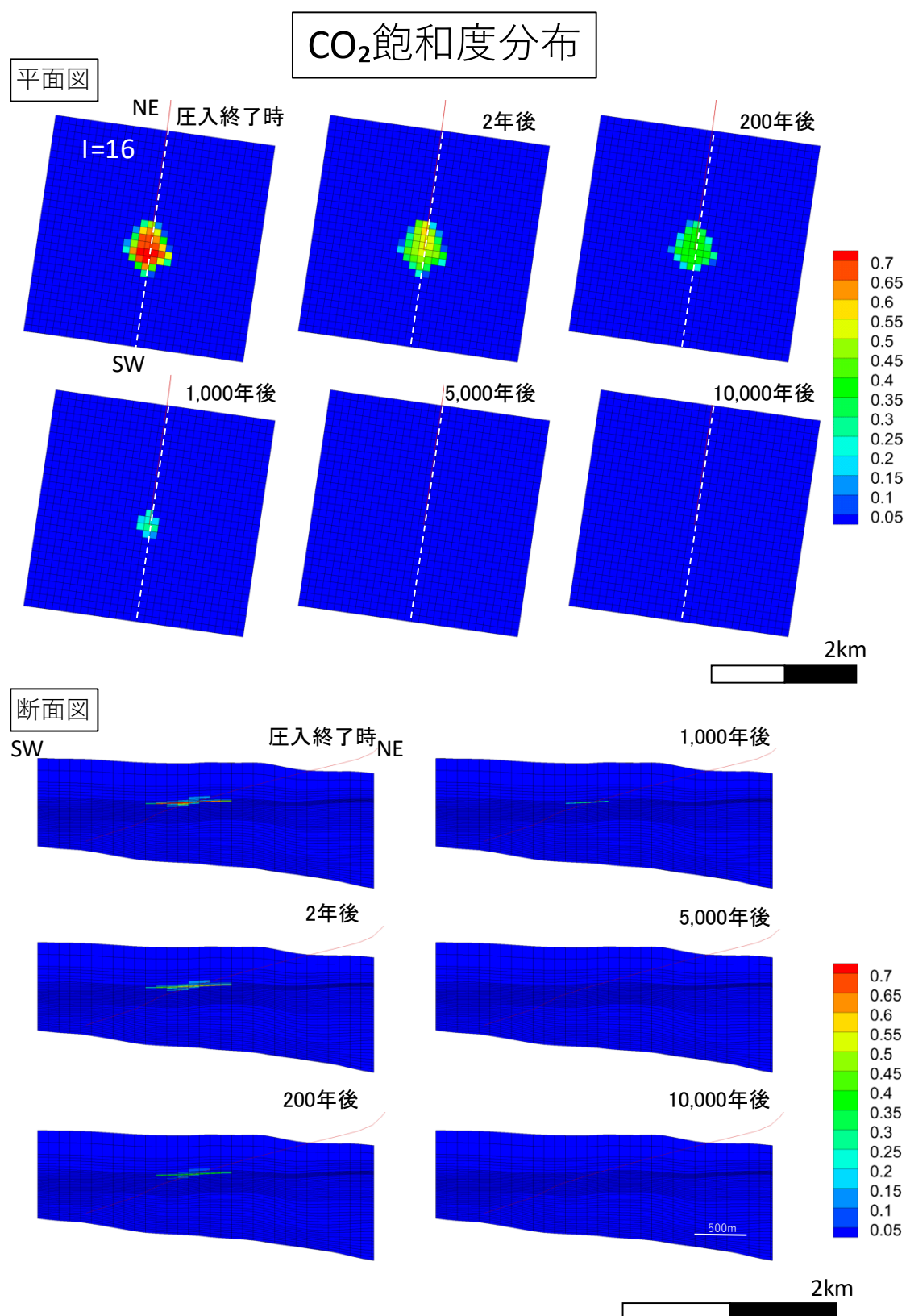


図 5.7-5 CO₂ 飽和度分布の経年変化（設定③）

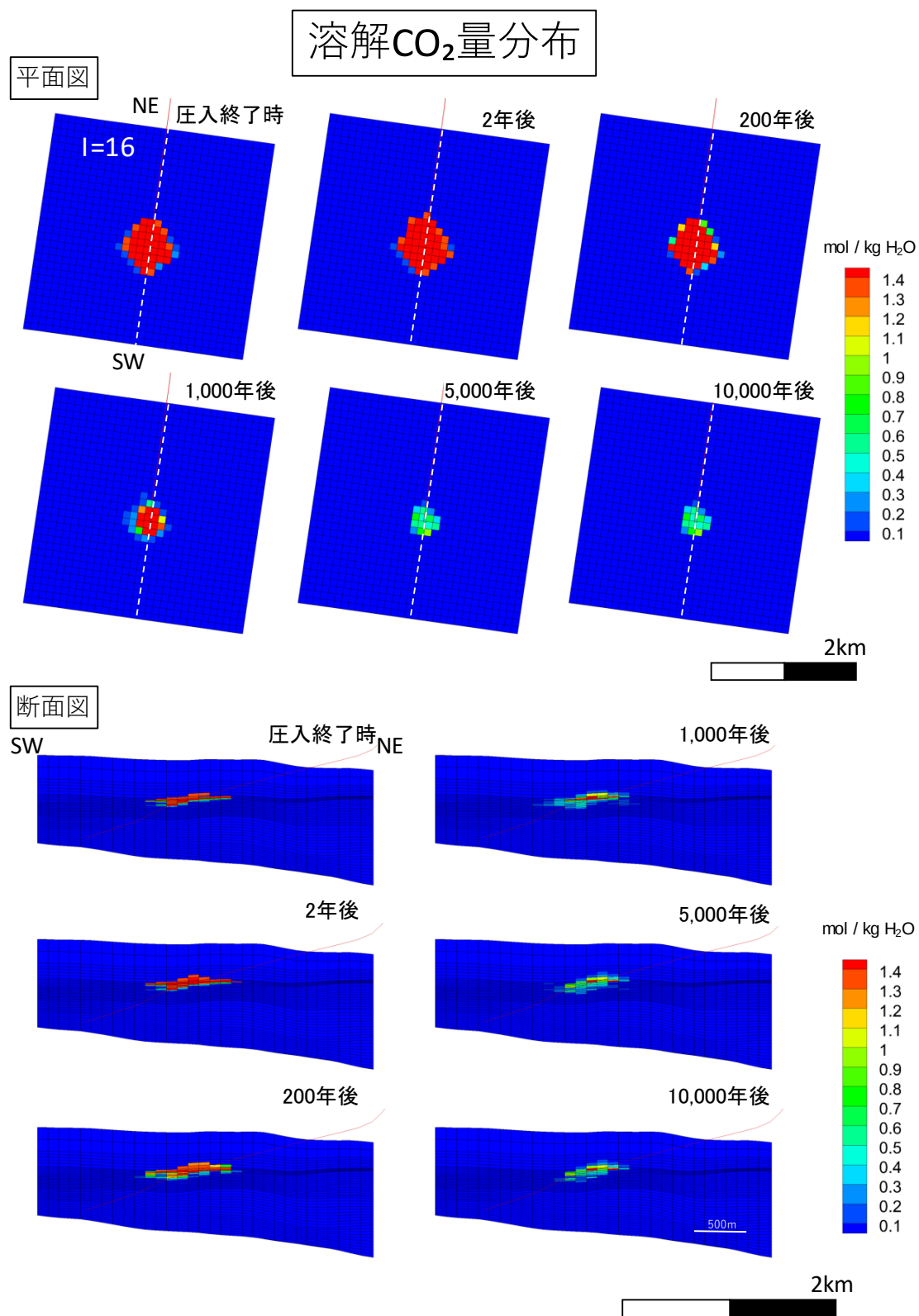


図 5.7-6 溶解 CO₂ 量分布の経年変化（設定③）

図 5.7-7 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の鉱物化は200年後ころから顕著となるため（図5.7-4）、そのころからpH値の上昇が明瞭となる。

図5.7-8に海緑石溶解量分布の経年変化を示す。また、図5.7-9に非晶質シリカの、図5.7-10にシデライトの、図5.7-11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量の増加（図5.7-6）によりpHが低下した範囲（図5.7-7）で生じるため、図5.7-8～図5.7-11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5.7-12）。

図5.7-13に孔隙率の経時変化を示す。図5.7-4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5.7-14）。

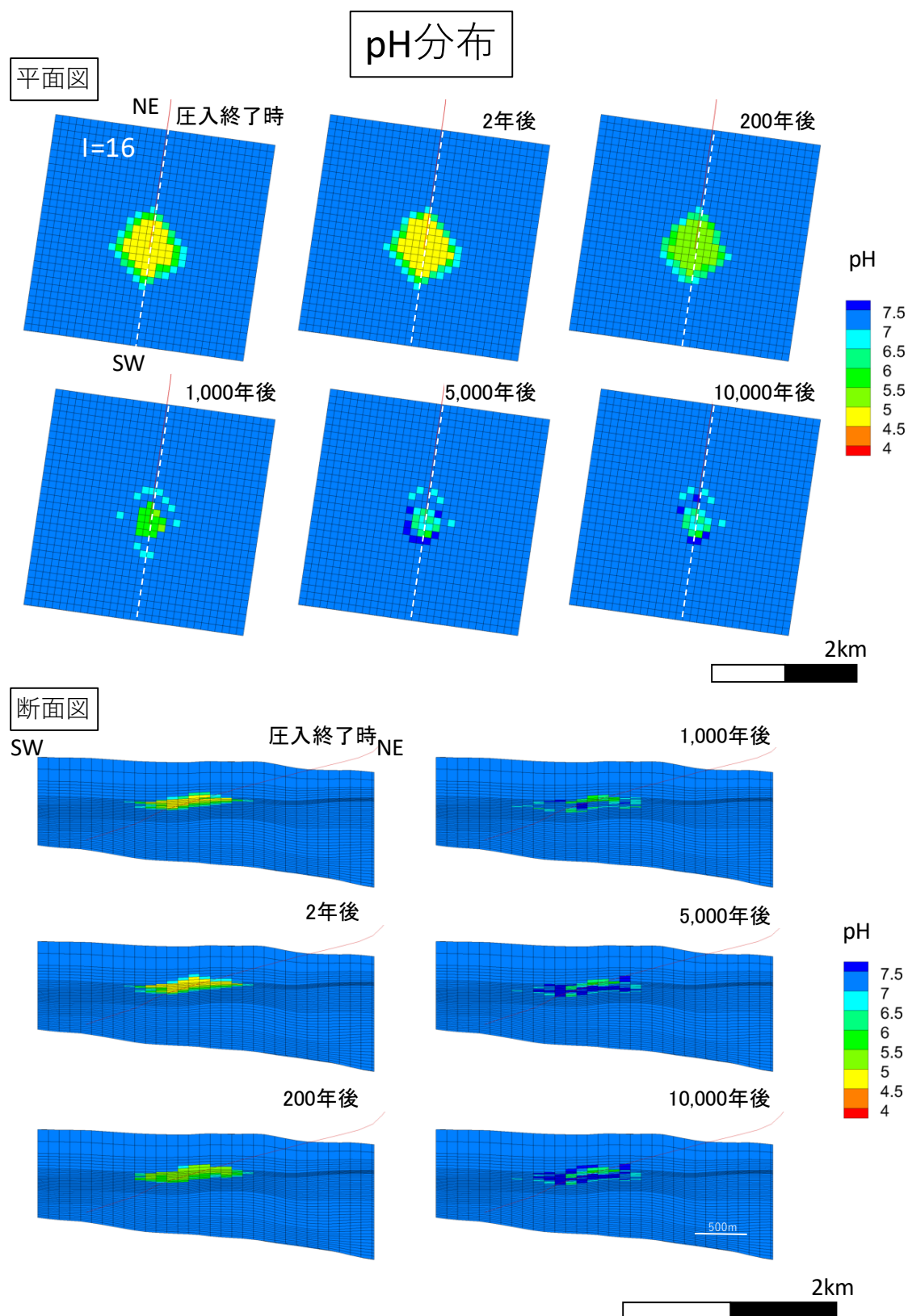


図 5.7-7 pH 分布の経年変化（設定③）

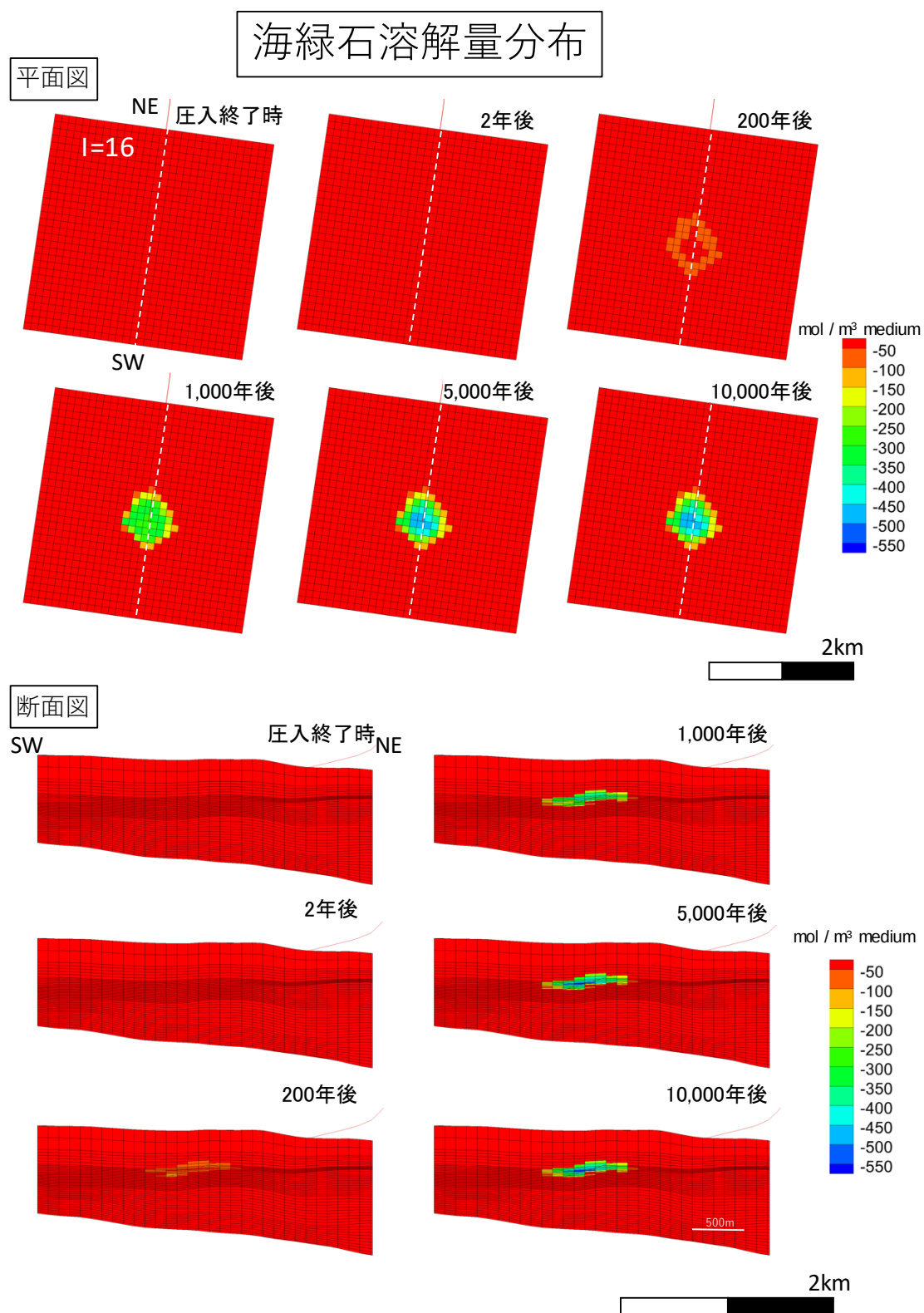


図 5.7-8 海緑石溶解量分布の経年変化（設定③）

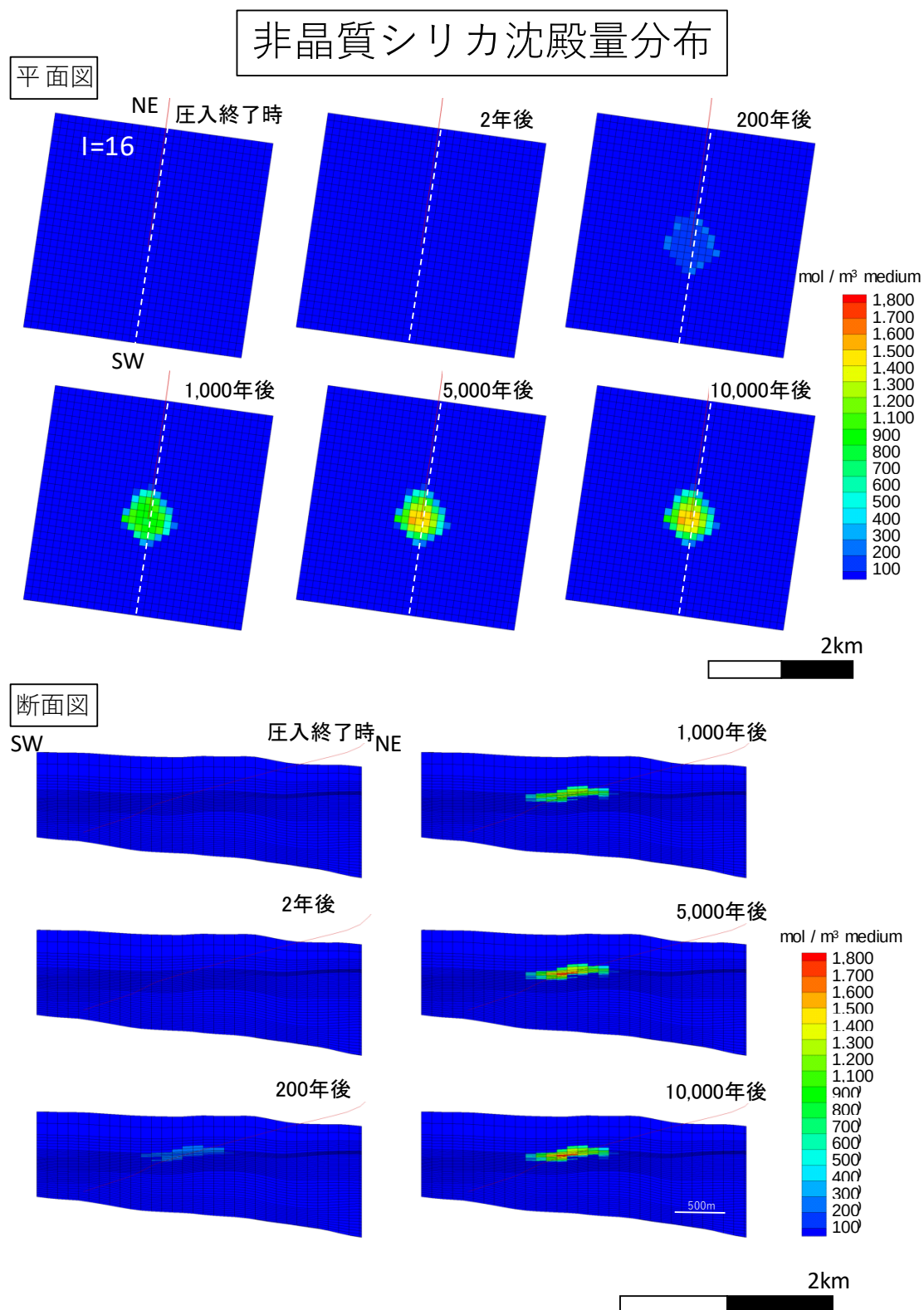


図 5.7-9 非晶質シリカ沈殿量分布の経年変化（設定③）

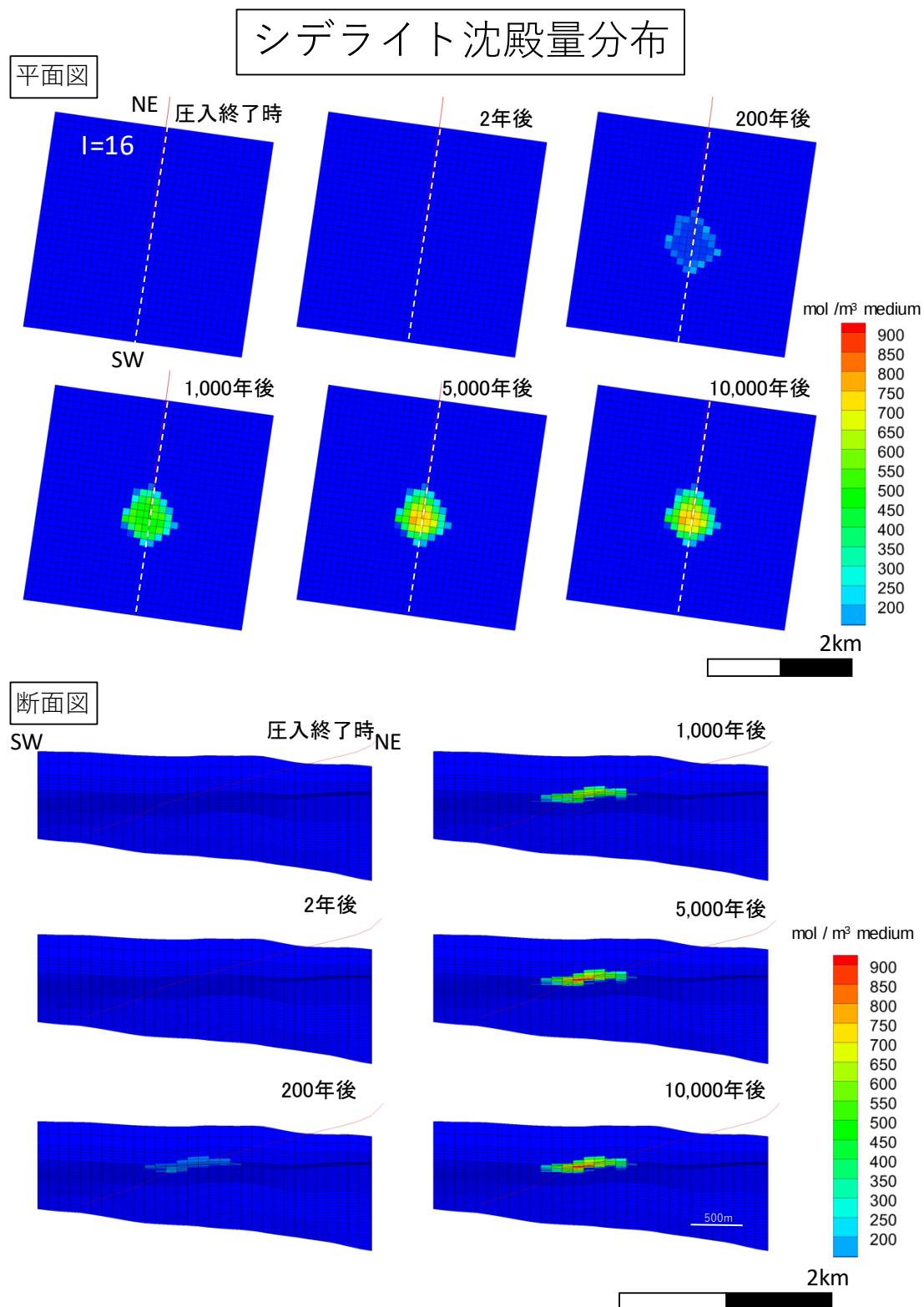


図 5.7-10 シデライト沈殿量分布の経年変化（設定③）

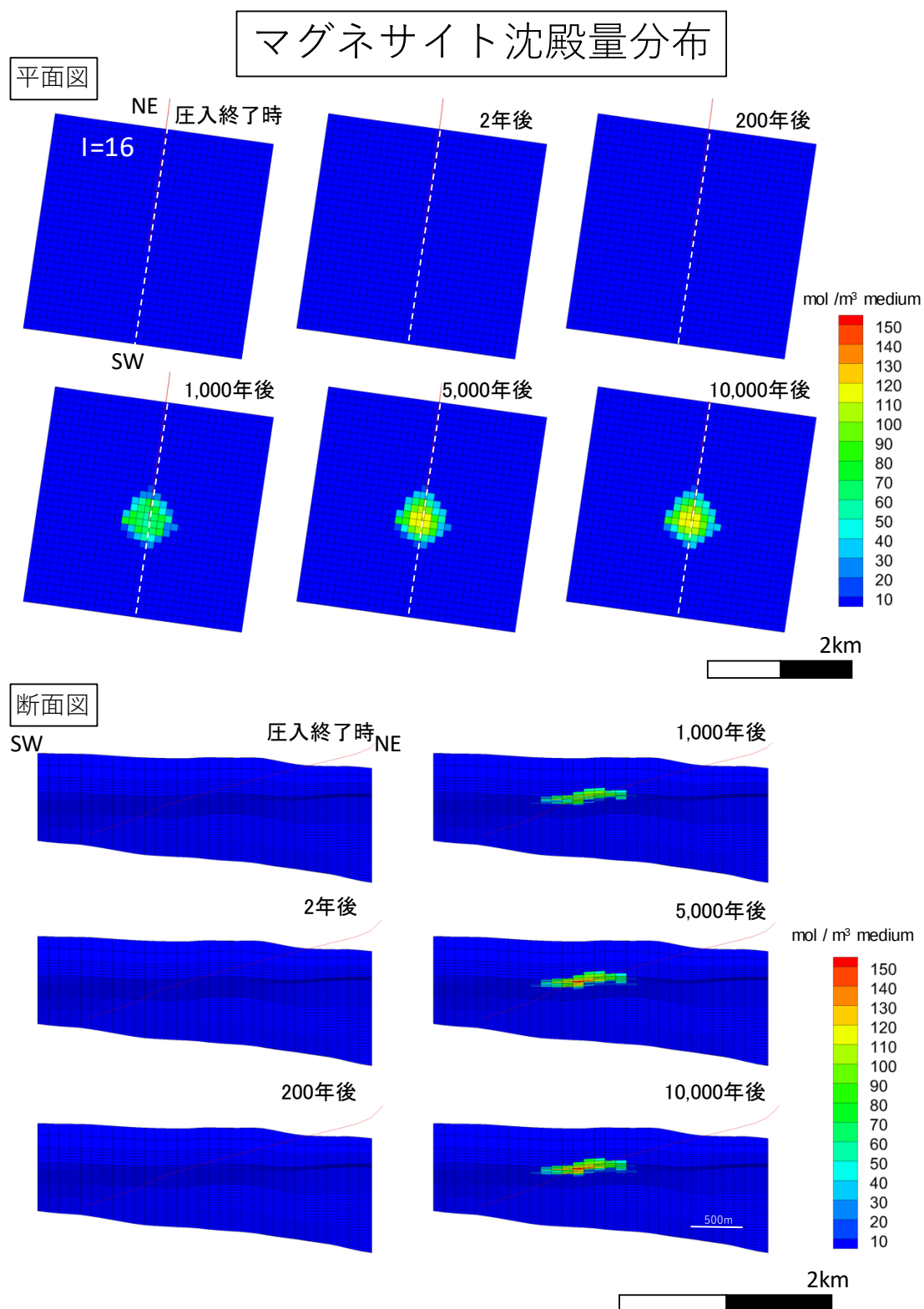


図 5.7-11 マグネサイト沈殿量分布の経年変化（設定③）

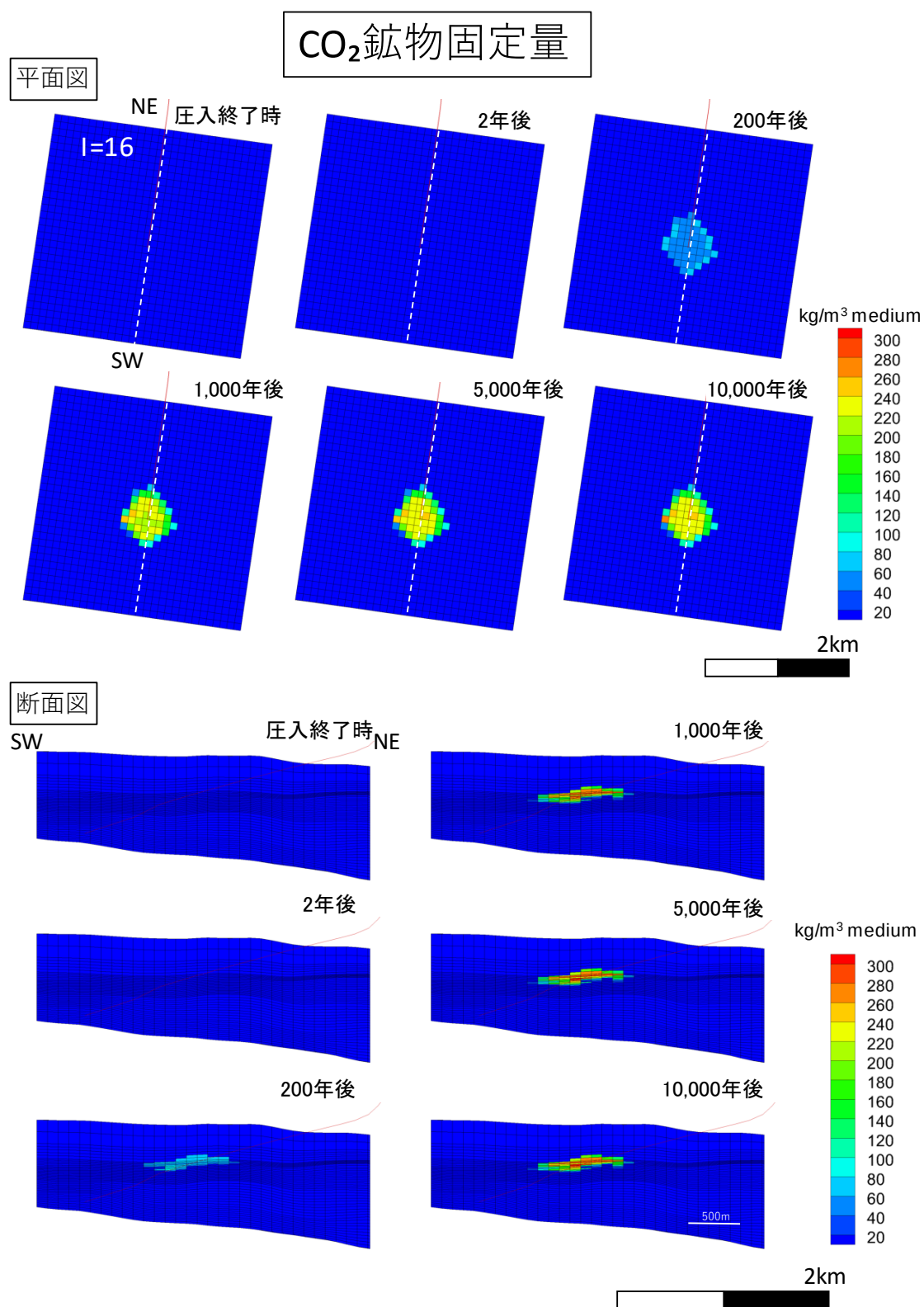


図 5.7-12 CO₂ 鉱物固定量の経時変化（設定③）

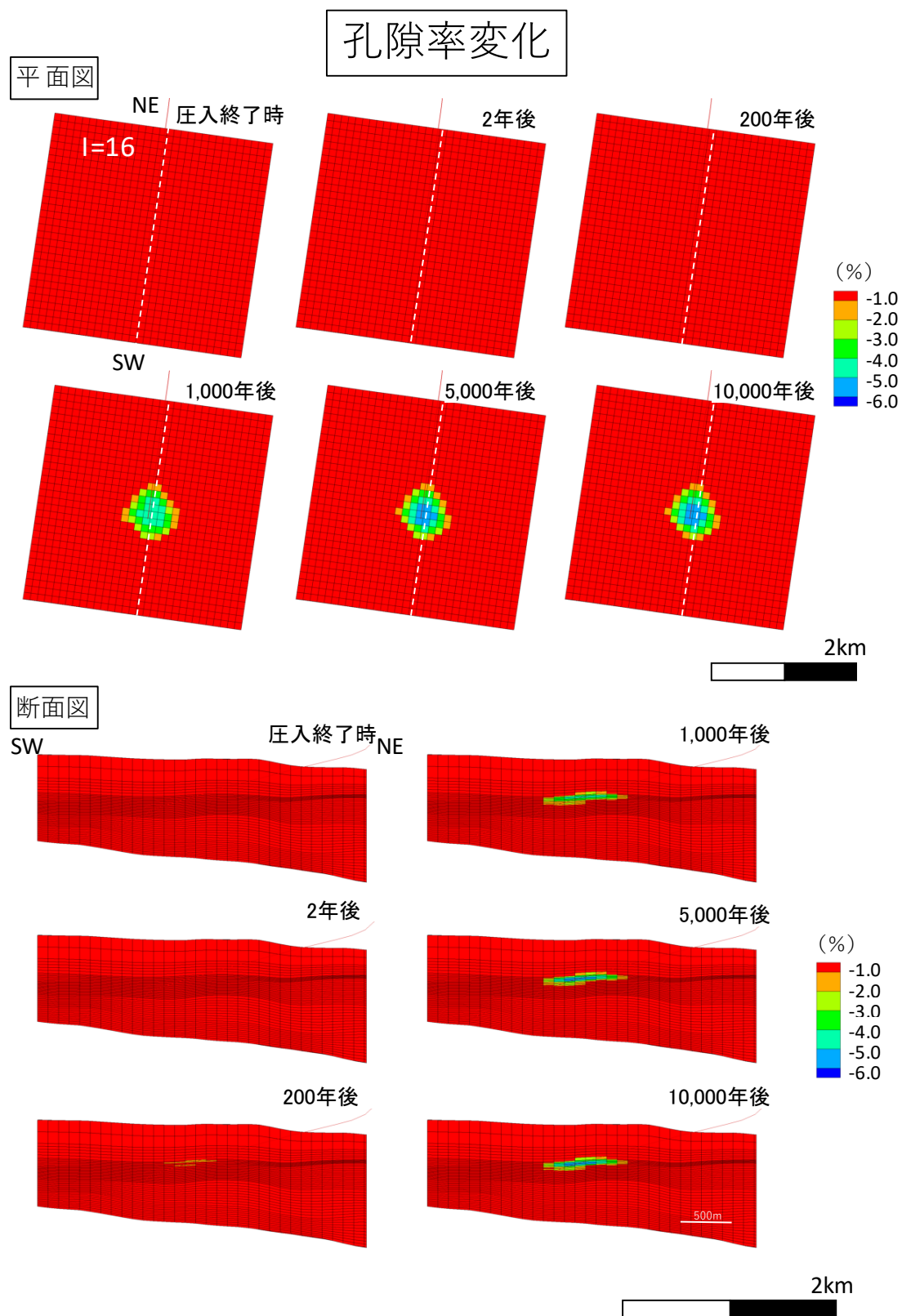


図 5.7-13 孔隙率の経時変化（設定③）

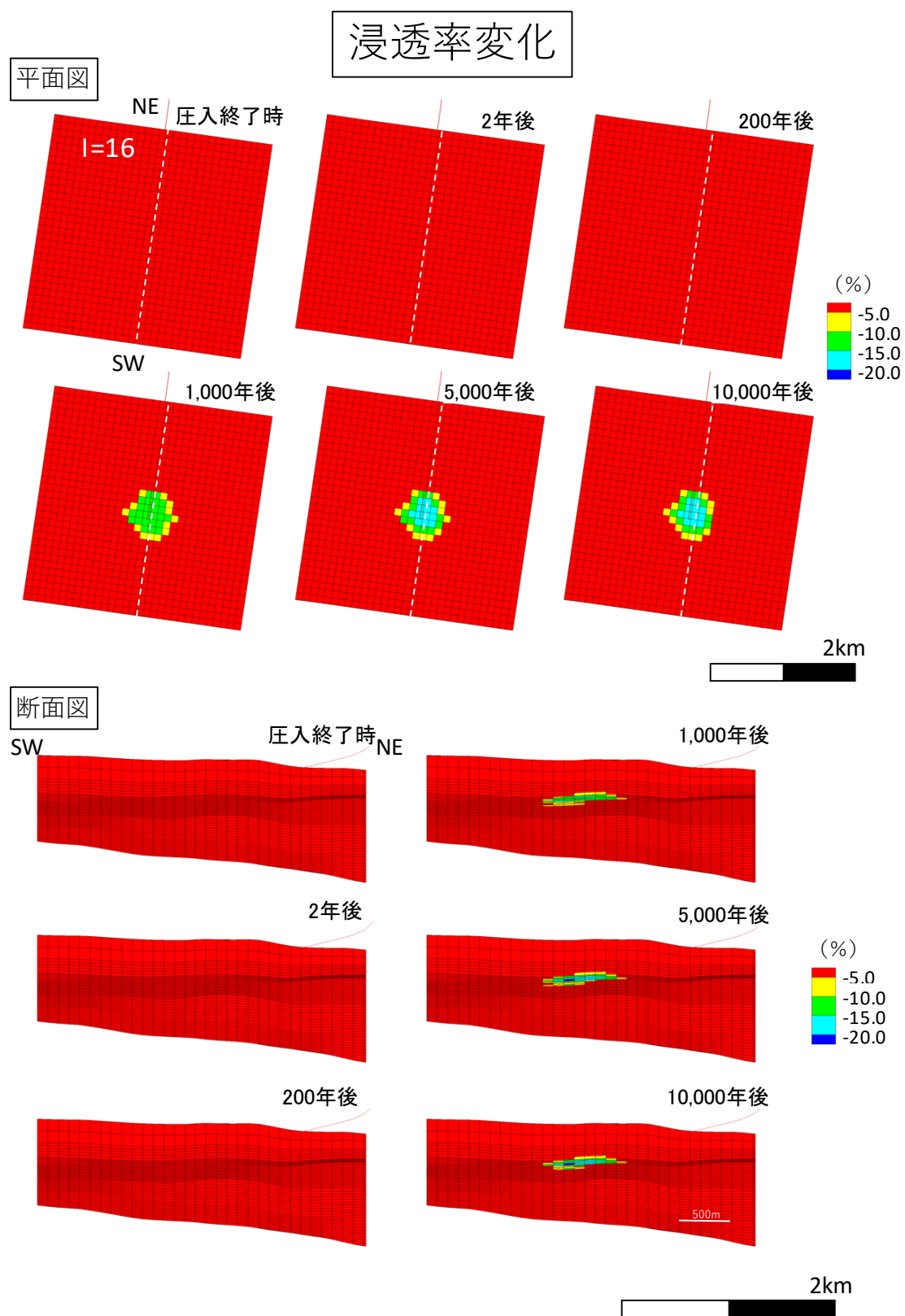


図 5.7-14 浸透率の経時変化（設定③）

② 設定⑤

モデル全体の鉱物溶解・沈殿量の経時変化を図 5.7-15 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。

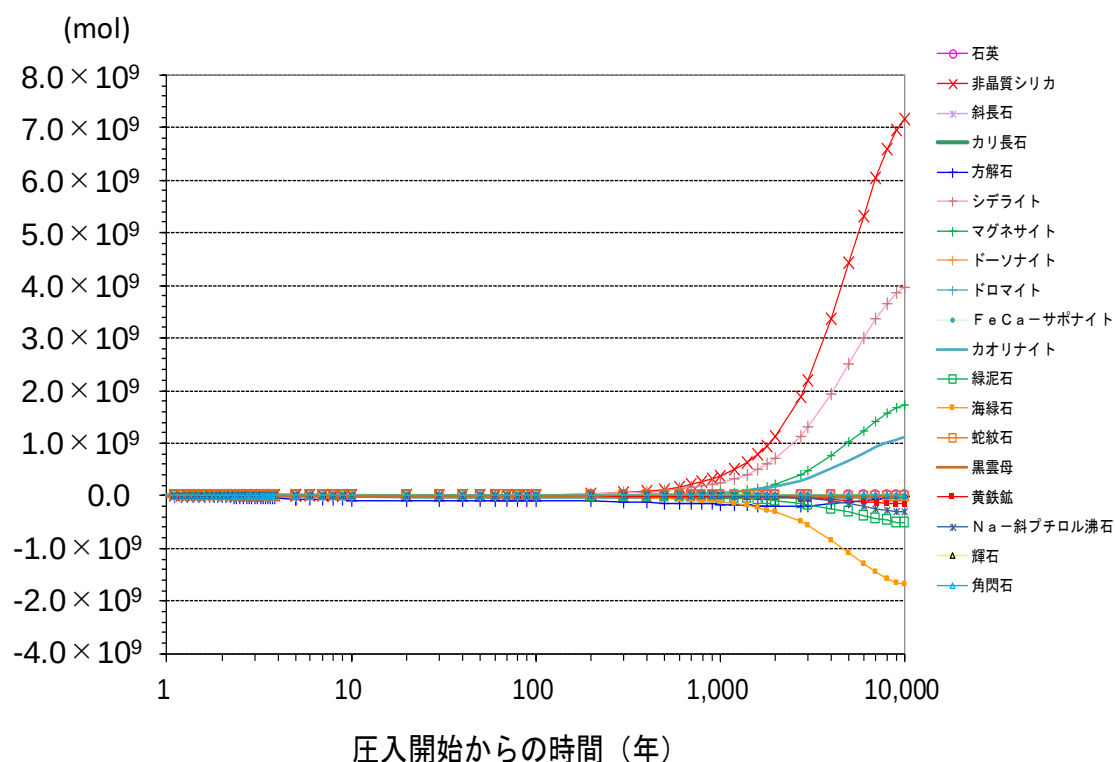


図 5.7-15 モデル全体の鉱物の溶解・沈殿量の経時変化（設定⑤）

モデル全体の CO₂ 固定化量割合の変化を図 5.7-16 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 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。

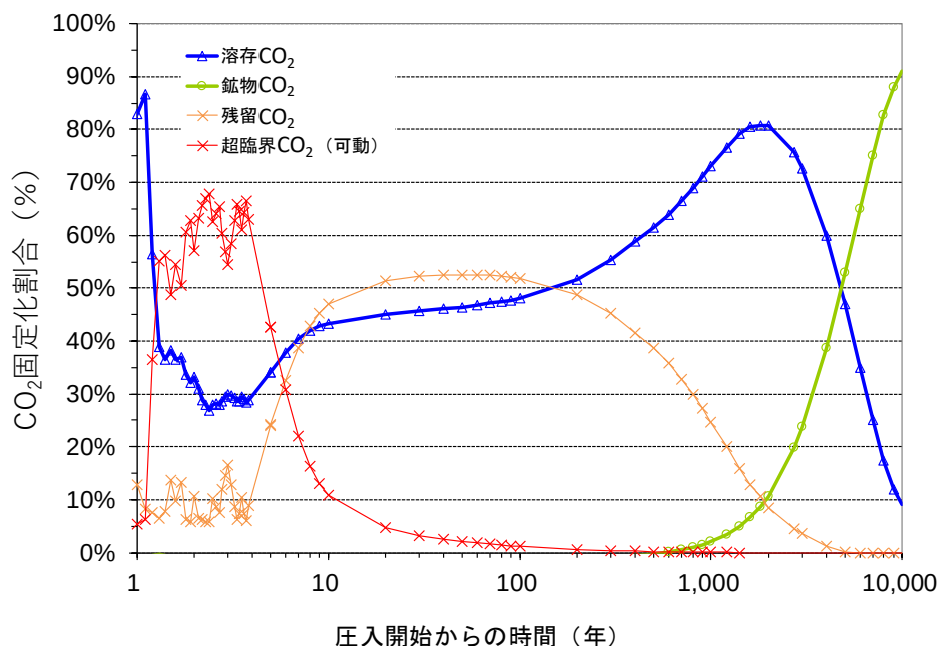


図 5.7-16 モデル全体の CO₂ 固定化量の経時変化（設定⑤）

図 5.7-17 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 5.7-16）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 5.7-18 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 5.7-16）ため、図 5.7-18 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。

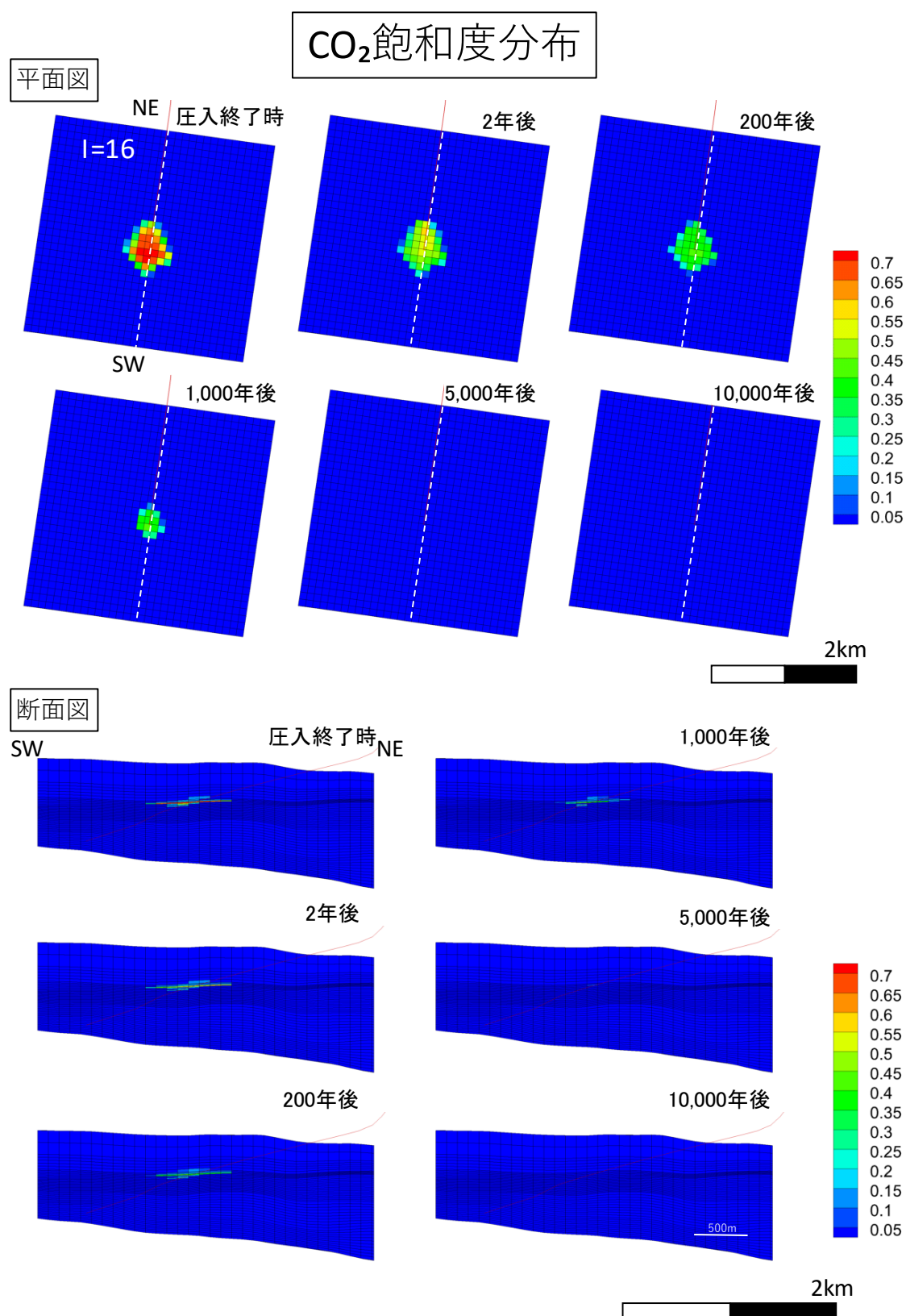


図 5.7-17 CO₂ 飽和度分布の経年変化（設定⑤）

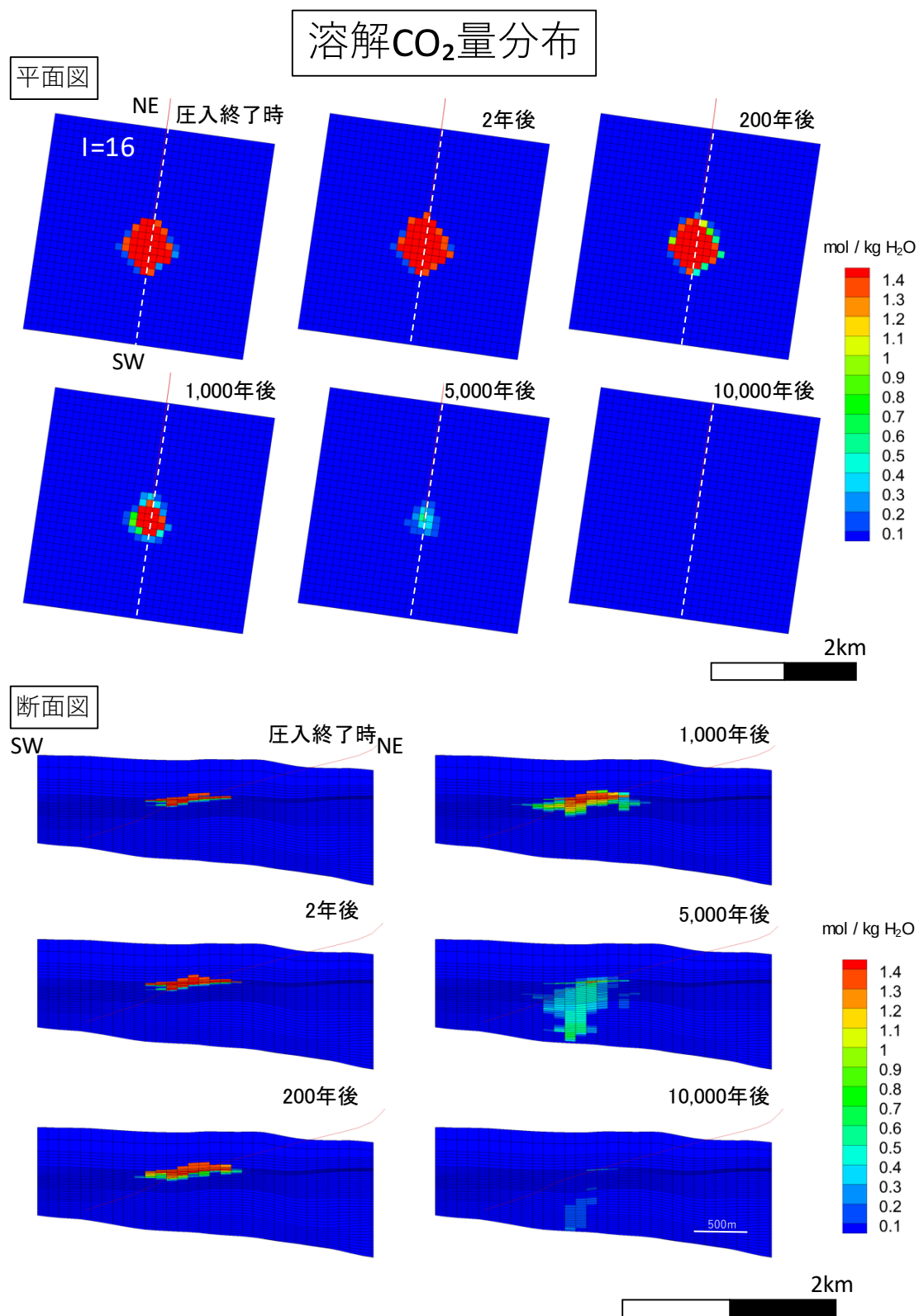


図 5.7-18 溶解 CO₂ 量分布の経年変化（設定⑤）

図 5.7-19 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 5.7-16）、そのころからpH値の上昇が明瞭となる。

図 5.7-20 に海緑石溶解量分布の経年変化を示す。また、図 5.7-21 に非晶質シリカの、図 5.7-22 にシデライトの、図 5.7-23 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 5.7-18）によりpHが低下した範囲（図 5.7-19）で生じるため、図 5.7-20～図 5.7-23 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 5.7-24）。

図 5.7-25 に孔隙率の、図 5.7-26 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 5.7-16 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 5.7-26）。

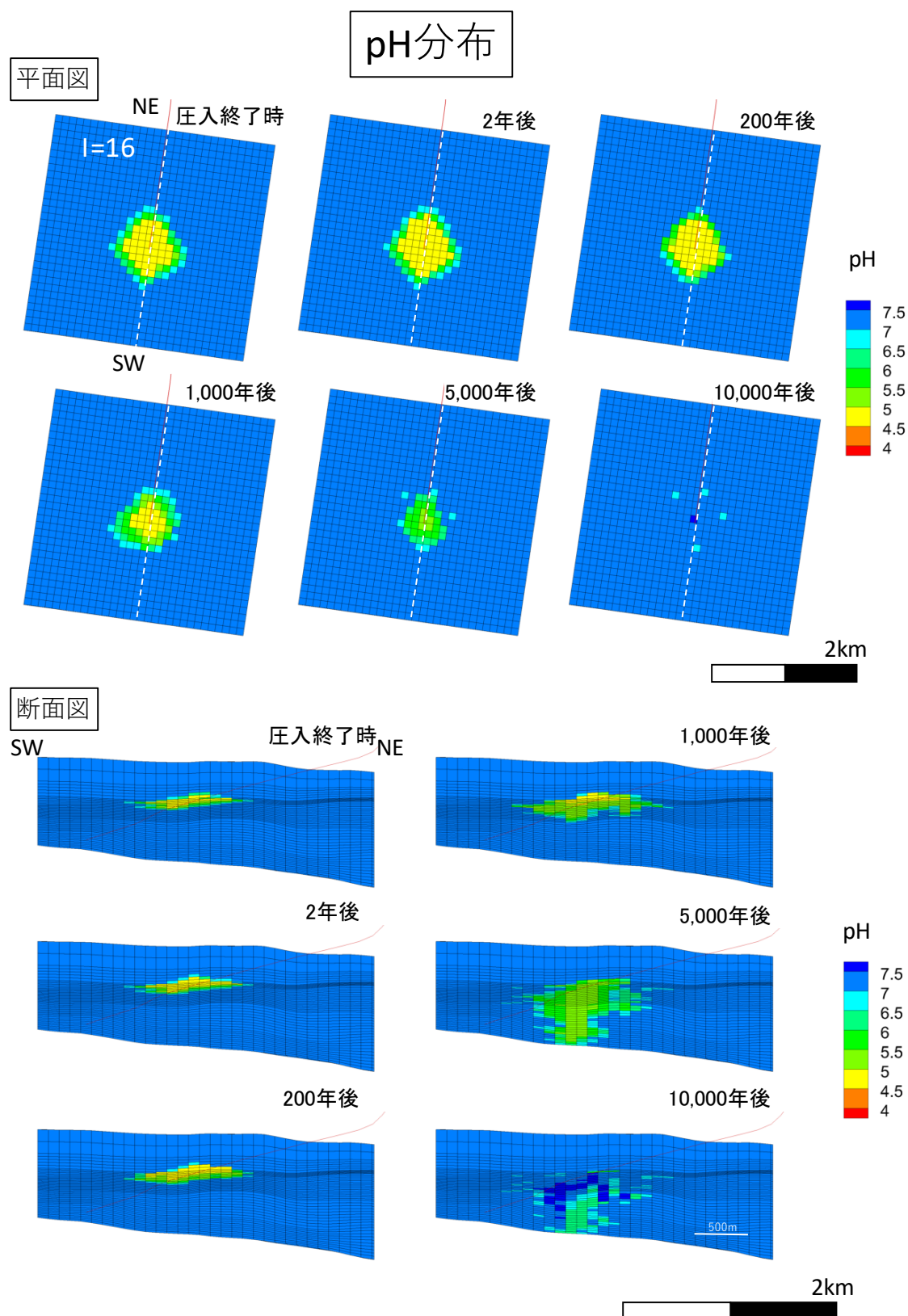


図 5.7-19 pH 分布の経年変化（設定⑤）

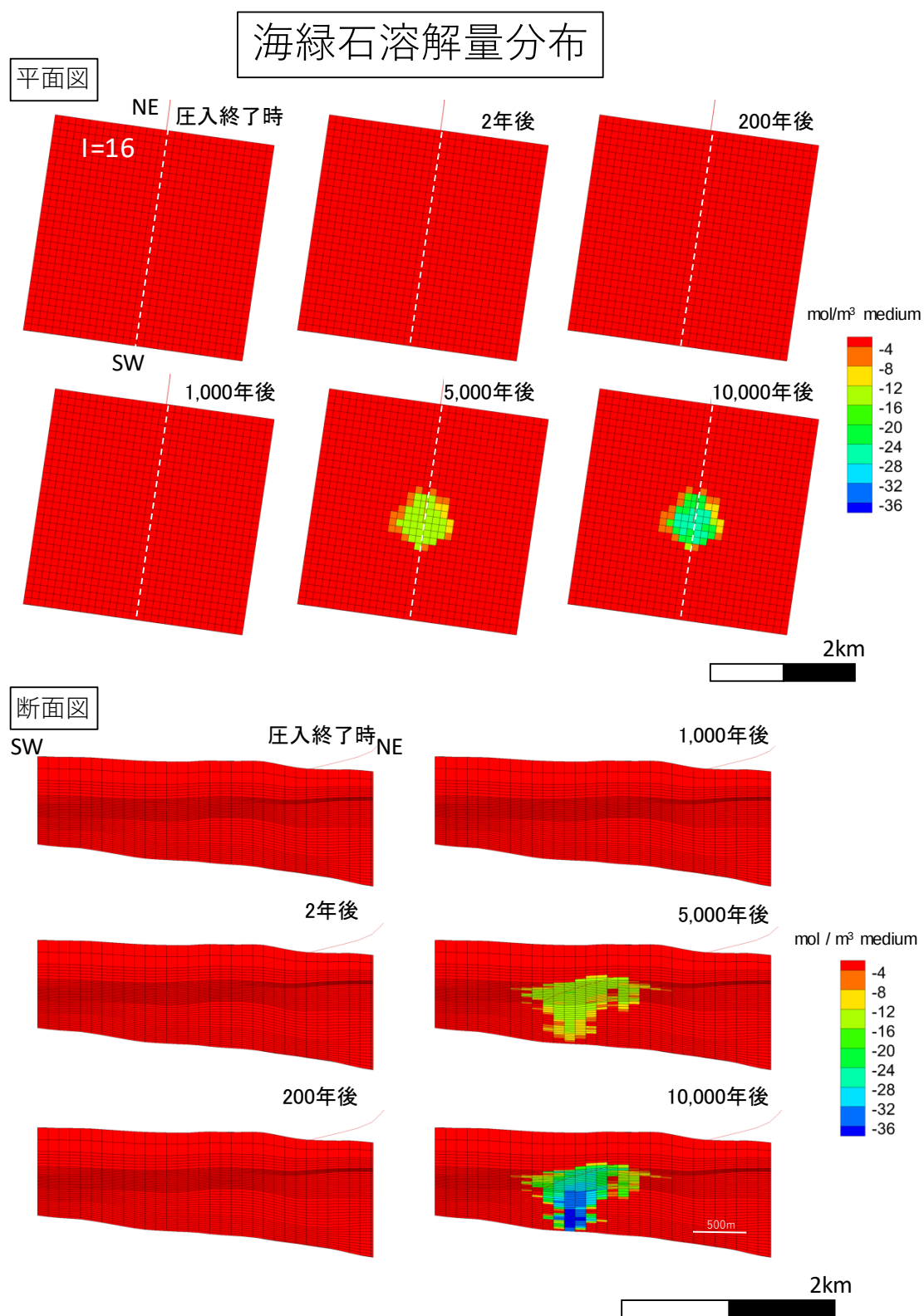


図 5.7-20 海緑石溶解量分布の経年変化（設定⑤）

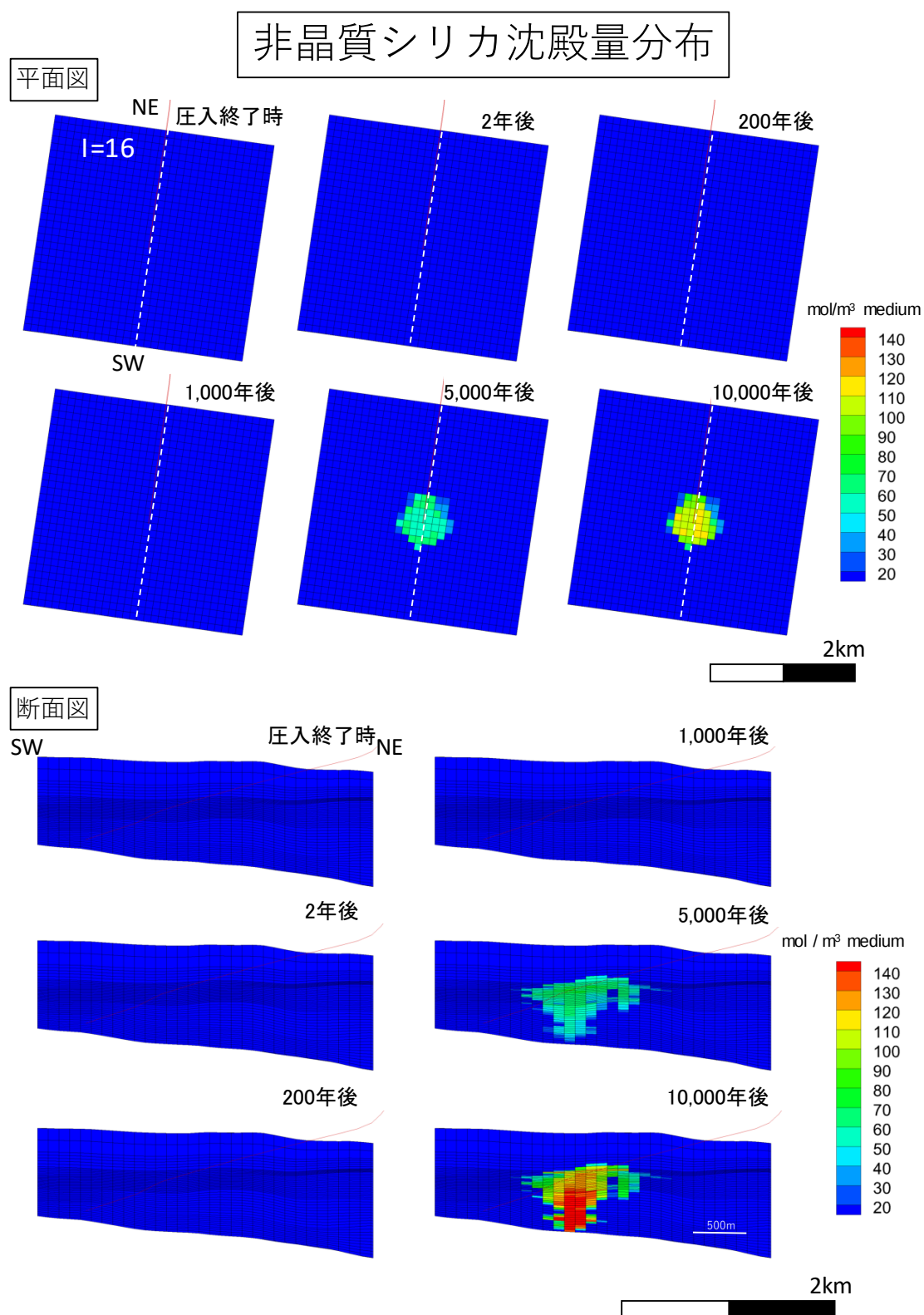


図 5.7-21 非晶質シリカ沈殿量分布の経年変化（設定⑤）

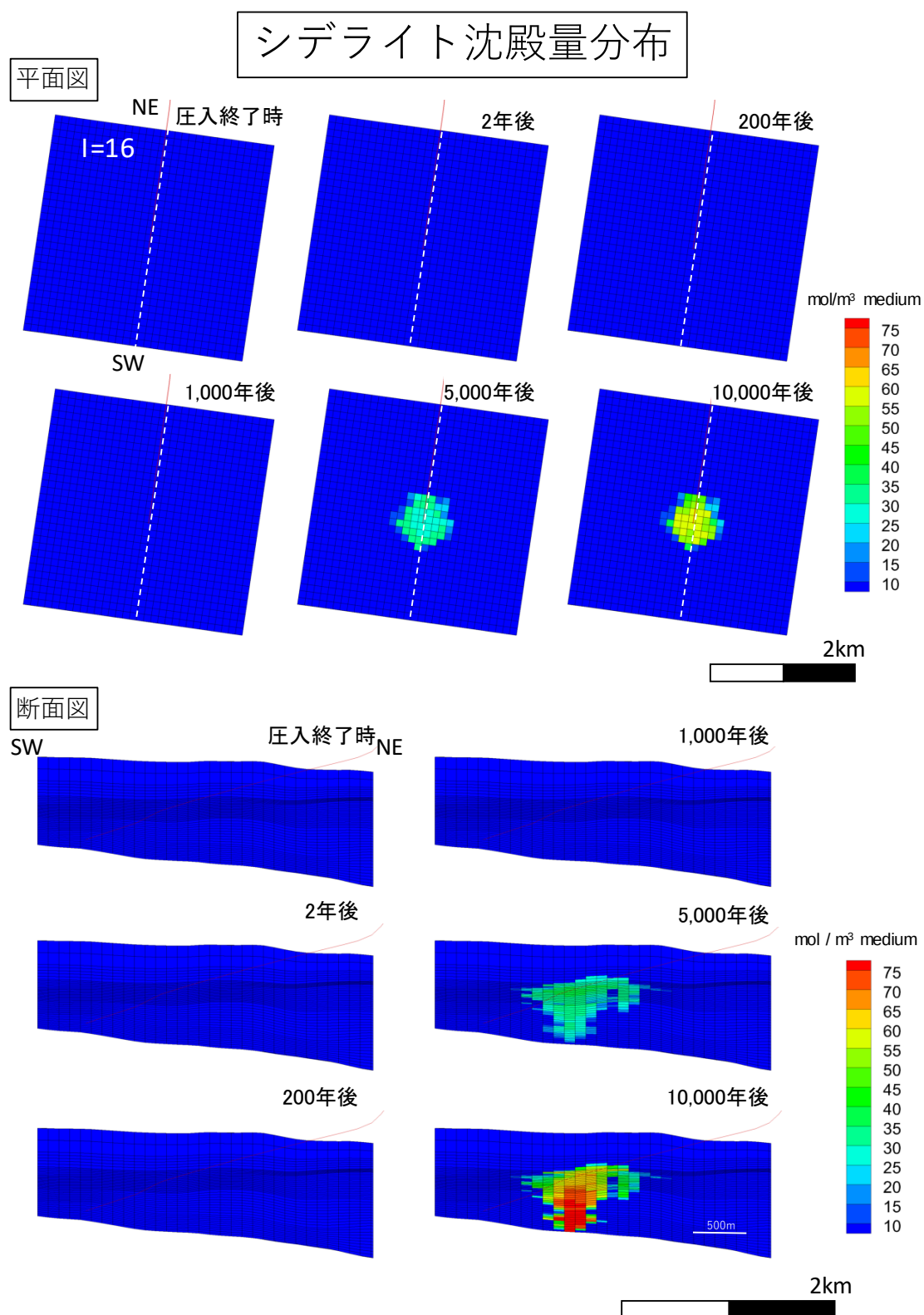
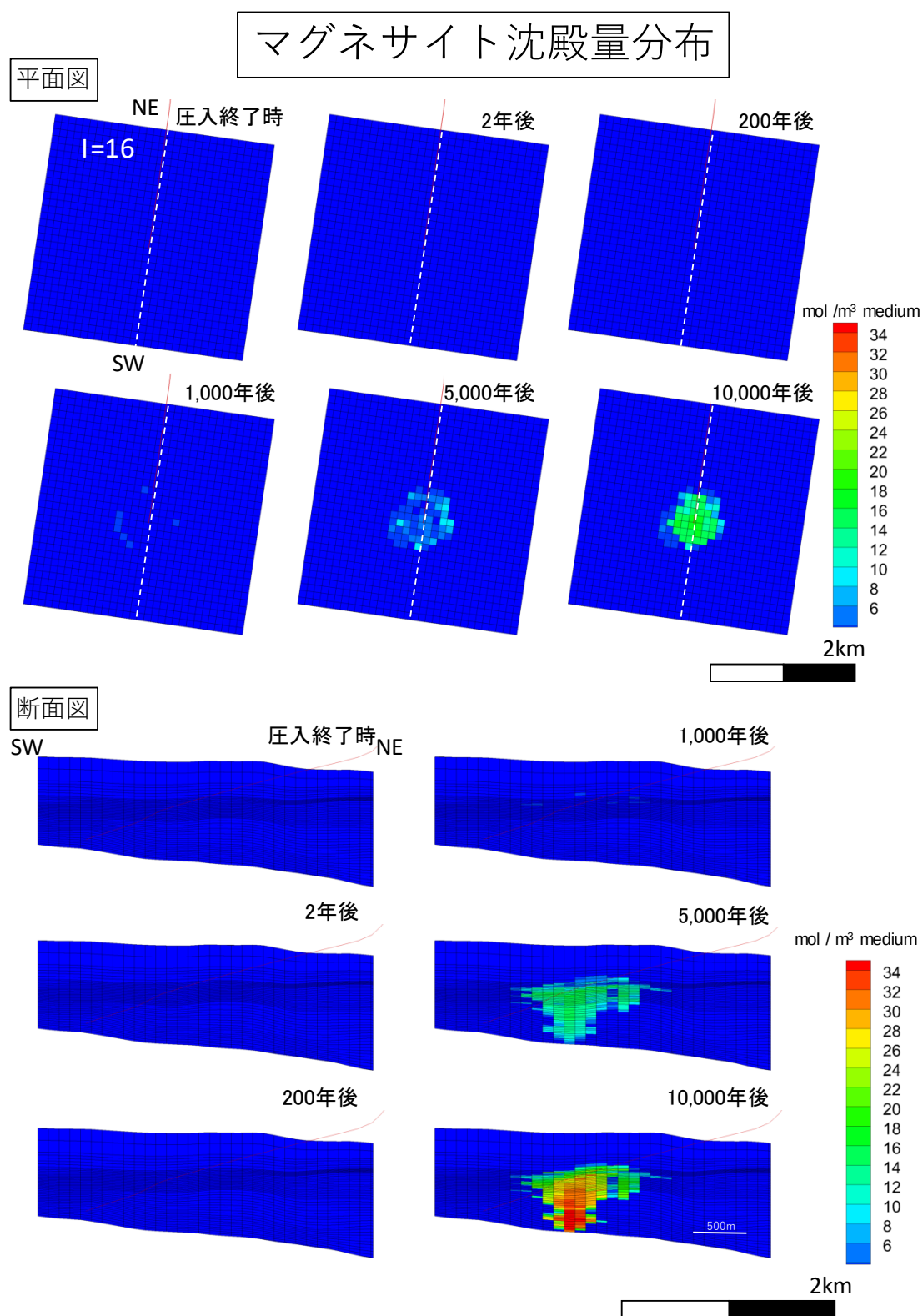


図 5.7-22 シデライト沈殿量分布の経年変化（設定⑤）



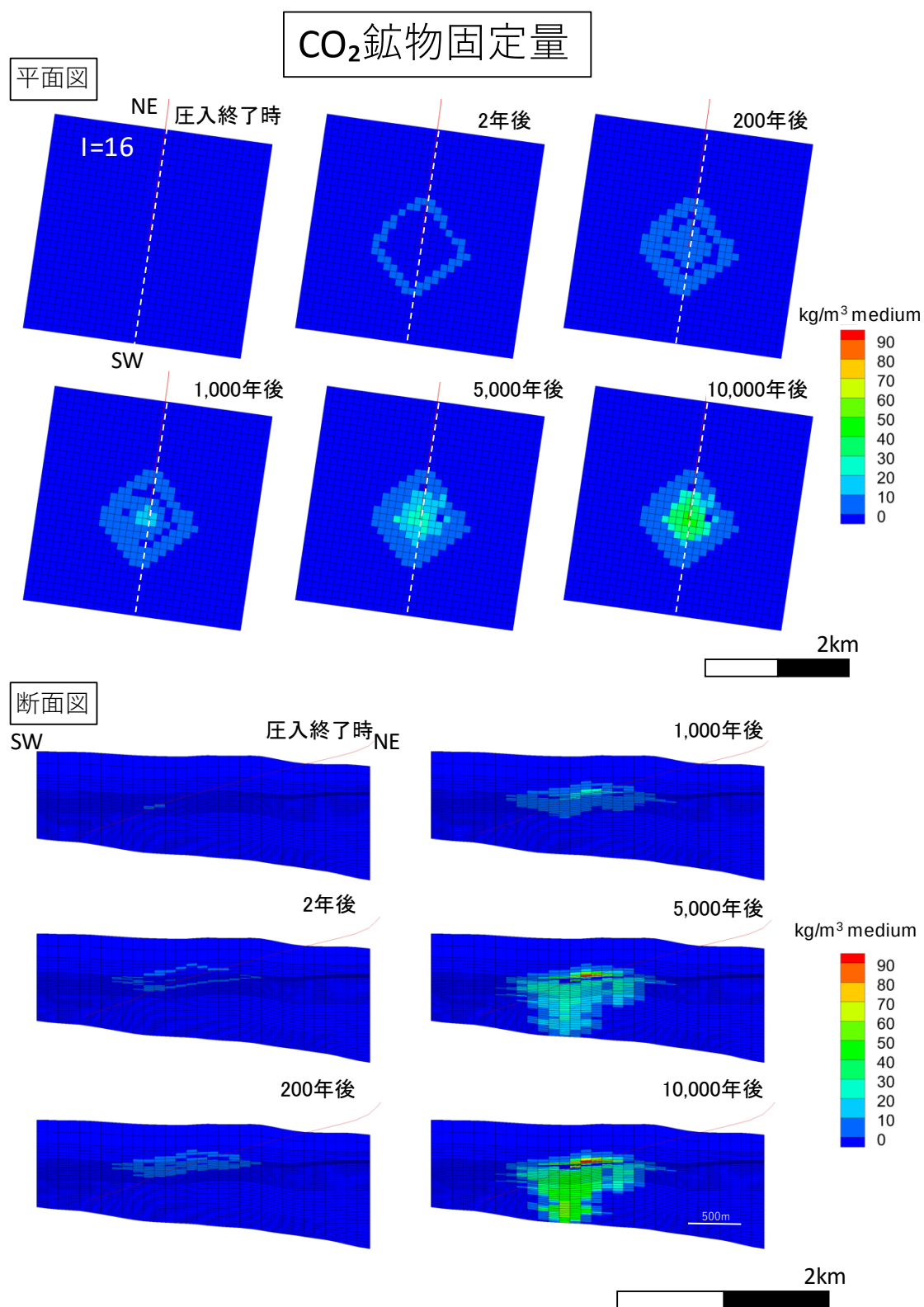


図 5.7-24 CO₂ 鉱物固定量の経時変化（設定⑤）

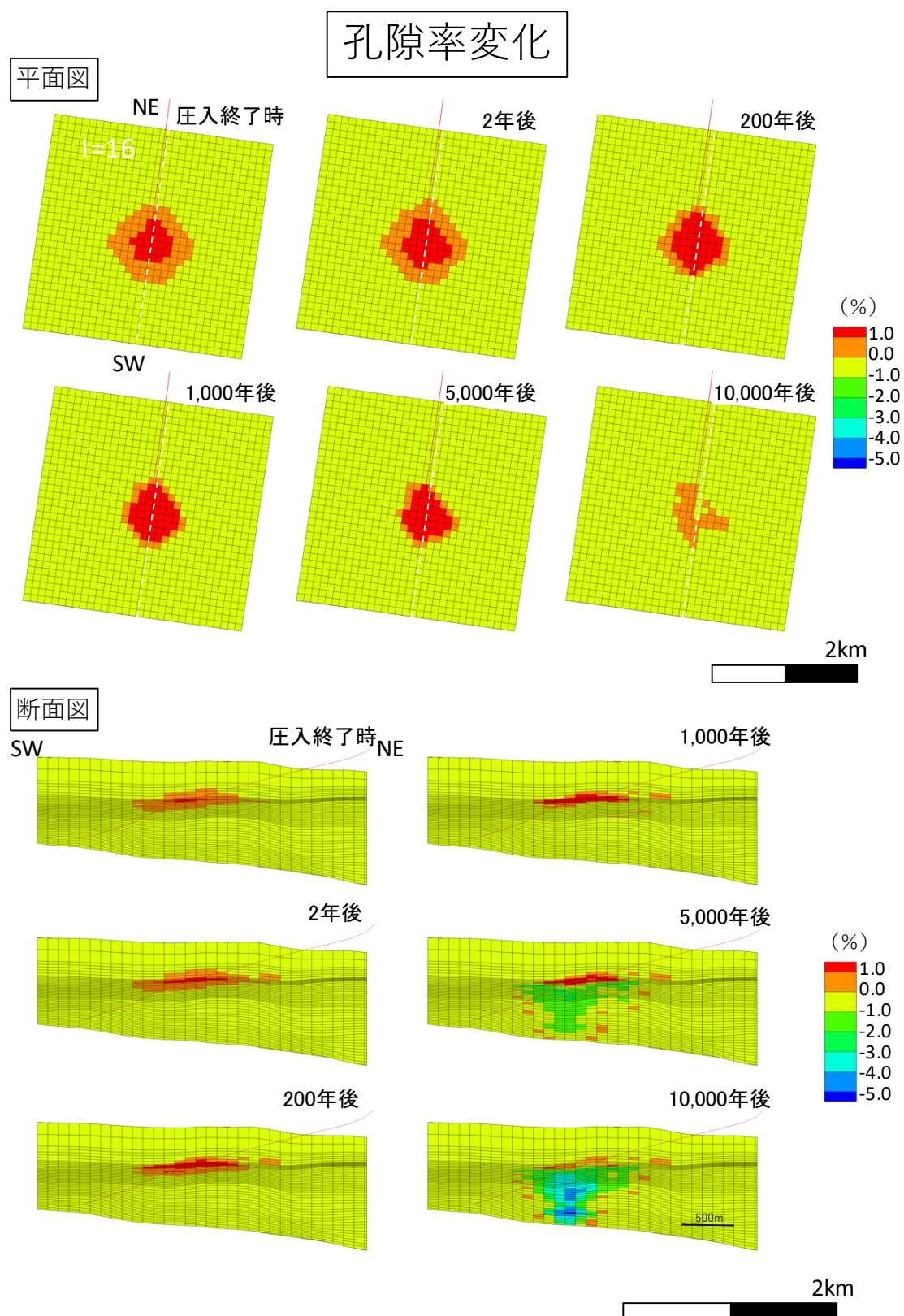


図 5.7-25 孔隙率の経時変化（設定⑤）

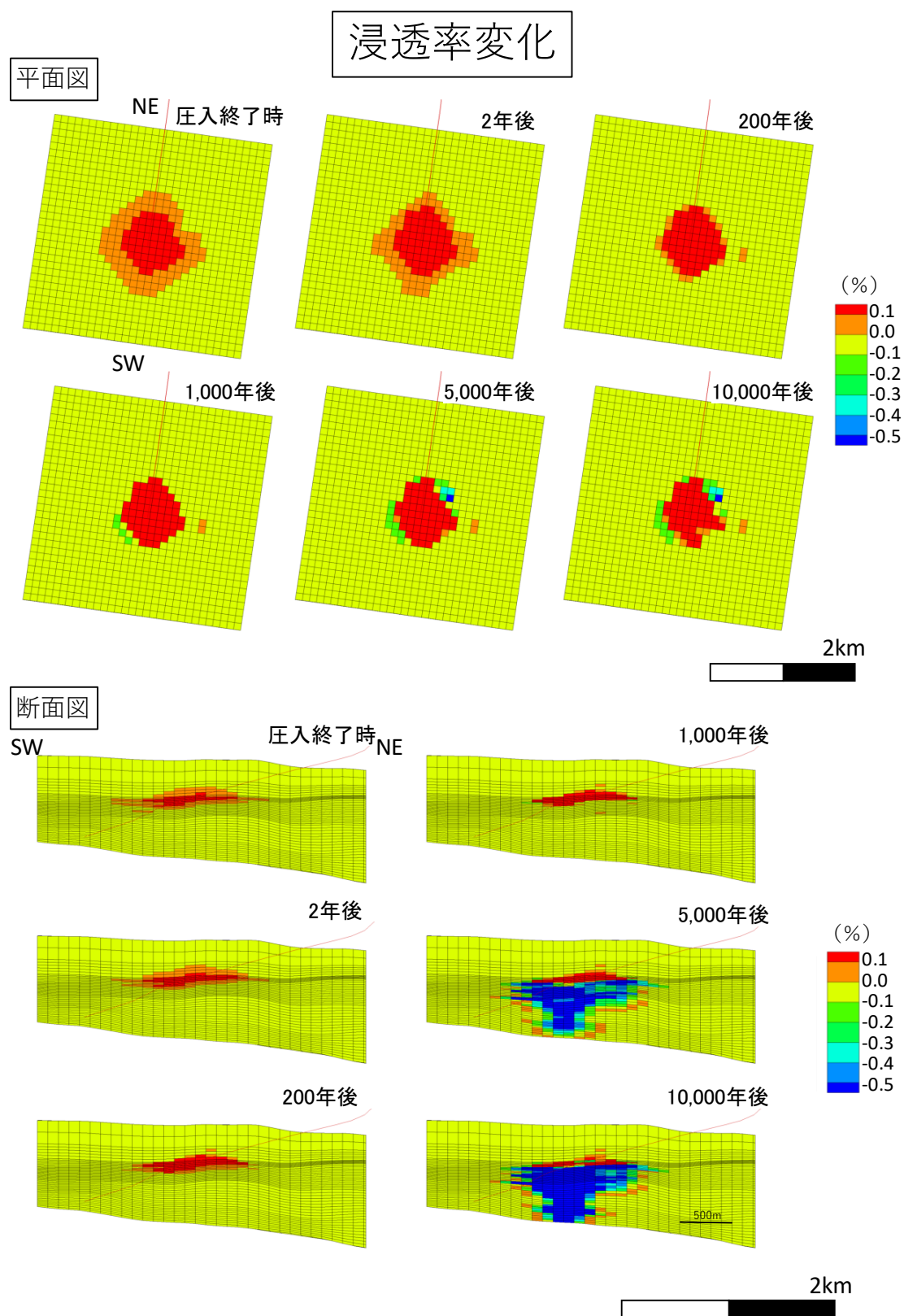


図 5.7-26 浸透率の経時変化（設定⑤）

(3) 萌別層 3D 流動－地化学連成シミュレーションのまとめ

海緑石の反応速度および反応表面積の設定については不確定な要素が多いが、萌別層～荷菜層の岩石試料の岩石鉱物学的な検討結果より海緑石は基質に多く含まれることが示唆されている²⁾。したがって、設定③よりも海緑石の反応表面積を少なく見積もった設定⑤の方がより妥当であると考ええる。

【参考文献】

- 1) Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier, 1972.
- 2) 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）

5.8 苫小牧 IW-1 FOT 解析

滝ノ上層への圧入は2018年2月6日～2月23日および同年8月15日～9月1日の2度実施し、総計で98.2t-CO₂を地下に圧入した。圧入に際しては、まず滝ノ上層圧入井の管内流体（ブラインおよび地層水）が貯留層に圧入されるため、貯留層へのCO₂圧入量は、管内ブラインおよび地層水容量分を差し引いて考える必要がある。

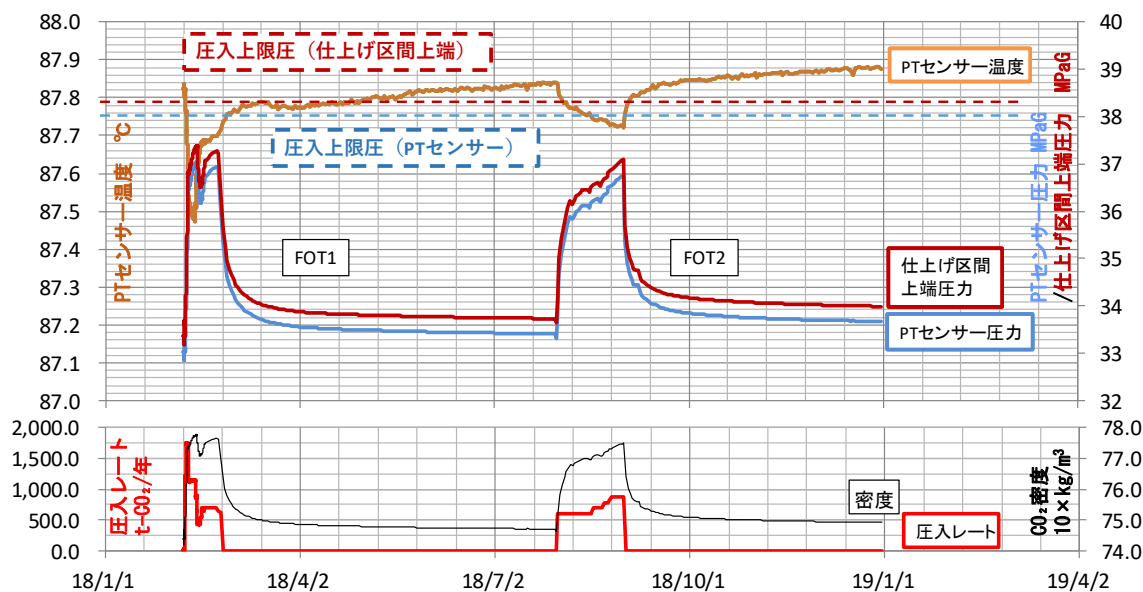
5.8.1 FOT 解析の実施条件

表 5.8-1 に示すように、2回の圧入を停止したのちに FOT を実施した。実施順に FOT1、FOT2 と称する。解析に使用した圧力値は PT センサーの圧力を基に、PT センサー～仕上げ区間上端の圧力を補正した値（図 5.8-1）を使用した。

表 5.8-1 滝ノ上層への圧入状況

圧入期間	圧入量 (t-CO ₂)	管内ブラインおよび地層水 置換状況	備考
2018年2月6日 ～2月23日	37.2	0～5,380 mMD まで置換 (坑底 5,800 mMD)	圧入停止後 FOT 1
2018年7月31日 ～9月1日	61.0	4,739～5,800 mMD まで置換	圧入停止後 FOT2

注) 管内ブラインの置換状況等については 3.3 節に記載。FOT1 の期間中にブライン液面が上昇。



注) PT センサーの温度圧力値から CO₂ 密度を推定し、その密度と PT センサー～仕上げ区間上端間の垂直深度差から圧力を補正した。

図 5.8-1 滝ノ上層への圧入状況と坑内圧力・温度等変化

5.8.2 圧力デリバティブに関する考察

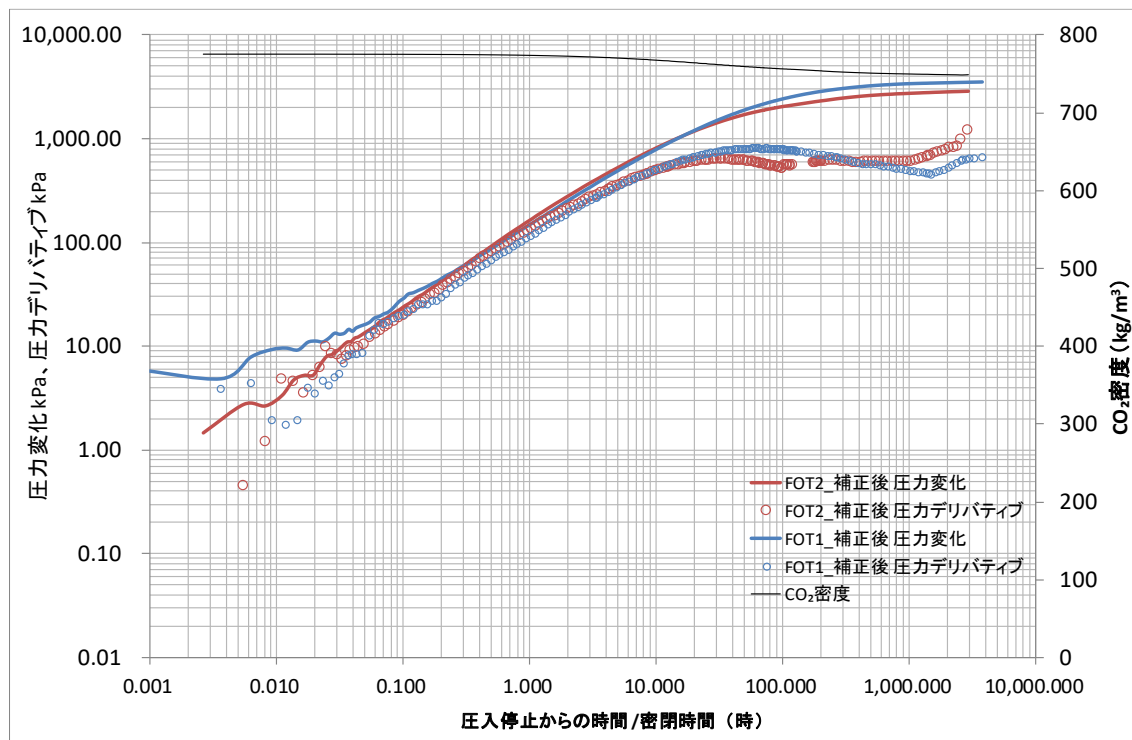
FOT 解析では両対数グラフの横軸に密閉時間（圧入停止からの経過時間）、縦軸に圧力変化と圧力デリバティブ（圧力変化を微分し、時間変化を乗じたもの）をプロットし

（以下、「ロガーログプロット」と称する。）、これを解析することで流動形態（線形流、放射状流、球状流等）およびその到達領域を推定する。解析は、Pradigm 社製の圧力解析ソフト「Interpret」を用いたタイプカーブ（解析解）と観測データを照合することで実施した。

(1) 解析用プロット（ロガーログプロット）の作成

図 5.8-2 に FOT1 と FOT2 のロガーログプロットを示す。PT センサー深度の圧力値を仕上げ区間上端深度の圧力値に補正するために使用した CO₂ 密度変化も同時にプロットした。CO₂ 密度はいずれの FOT でも密閉時間 10 時間頃から低下するが、両 FOT の圧力変

化はほとんど生じていない。圧力デリバティブの変化では、1,000 時間後ころからラジアルフローを反映したと推定される 1/2 スロープが認められる。なお、0.5 時間後頃までのばらつきは、圧入井坑内（Borehole Storage）の影響であると考えられる。



注) PT センサー深度の圧力値を、PT センサーで計測した温度・圧力値から求めた CO₂ 密度値により、仕上げ区間上端深度の圧力値に補正。図中の密度は補正に使用した密度値を示す。

図 5.8-2 FOT1 および FOT2 のローグログプロット

(2) アーリーリニアフロー解析

図 5.8-2 における 1,000 時間後頃に認識される 1/2 スロープをアーリーリニアフロー（以下、「ELF」と称する。）による反応であると仮定し、5.2.2 項と同様に Goode et al. (1987)¹⁾ の手法で ELF 解析を実施した。解析にかかる入力値と解析結果を表 5.8-2 に示す。FOT1 では管内のブラインおよび地層水の CO₂ による置換が終了しておらず、CO₂ とブラインおよび地層水の境界深度は仕上げ区間にあたる 5,378 mMD (2,623 mTVD) と考え、その深度以浅は CO₂、以深はブラインおよび地層水（比重 1.04）と仮定した。FOT2 は CO₂ に置換を終了後に実施したため圧入流体は CO₂ とした。圧入流体が異なることから、両者の圧入性を「 $k_{ave} \cdot L / \mu$ 」で比較すると FOT2 の方が良好な圧入性であると評価される。

また、ここでは ELF を仮定して解析を実施したが、実際の仕上げ区間長は 1,159 m 程度に対して、圧入に寄与した坑芯沿いの長さ（坑井長、L）は FOT1 で 186 m、FOT2 で

250 m と考えられることから、圧入による流れが貯留層の上下の境界に達していたとは考えにくい。ためログログプロットで認識された 1/2 スロープは ELF による挙動を示していない可能性がある。

表 5.8-2 ELF 解析の入力値と解析結果

	アーリーリニアフロー解析		FOT1	FOT2
入力値	水圧入レート	kl/d	2	0
	CO ₂ 圧入レート	t-CO ₂ /年	622	870
	坑井長	m	186	250
	有効層厚	m	57	77
	tSelf	時間	1,500	1,500
	tElf	時間	2,400	2,500
	傾き	kPa/cycle	37.66	
	B	rm ³ /m ³	1.017	0.003
	μ	cP	0.35	0.064
	ϕ		0.13	
	Ct	1/kPa	1.22×10^{-6}	
	Cw	1/kPa	5.43×10^{-7}	
	Cg	1/kPa	1.21×10^{-5}	
	Cr	1/kPa	6.79×10^{-7}	
解析結果	水平浸透率	mD	0.00992	0.0023
	垂直浸透率	mD	0.00426	0.00099
	kv/kh		0.43	0.43
	k*h	mD*m	0.57	0.18
	kave*L/ μ	mD*m/cP	3.94	6.8
	Sg		0	0

注) 水圧入レート：ブラインおよび地層水の圧入レート、坑井長 (L)：坑芯に沿った圧入に寄与した区間長（可変して調整）、有効層厚 (h)：坑井長の垂直方向の厚さ、tSelf: ELF 開始時間、tElf: ELF 終了時間、B: 容積係数、 μ : 粘性、 ϕ : 孔隙率、Ct: 総合圧縮率、Cr: 岩石圧縮率、Cw: 塩水圧縮率、kh: 水平浸透率、kz: 垂直浸透率、Kave: 平均浸透率 ($k_{ave}=k_x \times k_y \times k_z$ の 3 乗根)、Sg: CO₂ 飽和度。

(3) アーリーラジアルフロー解析

ELF とみなしたログログプロットのデリバティブカーブをアーリーラジアルフロー（以下、「ERF」と称する。）とみなし解析した。ERF は、水平井において最初に見られる流動様式であり、貯留層の上限や下限等の境界に到達していないときに認められる流動様式である。解析にかかる入力値と解析結果を表 5.8-3 に示す。解析は圧力解析ソフト「Interpret」を用いた。通常の解析では kv/kh として、ERF とレイトラジアルフローによって調整するが、レイトラジアルフローが確認できていないため、流動シミュレーションモデルで使用する設定（0.1、一般値）を用いた。ELF 解析と同様に FOT1 と FOT2 の解析結果から圧入性を「 $k_{ave} * L / \mu$ 」で比較すると FOT2 の方が良好な圧入性であると評価される。

また、以下の式から探査半径は、FOT1で53 m、FOT2で47 mと推定された。ERFは貯留層の上端や下端等の圧力境界に到達しない時点で示される挙動であると考えられている。探査半径の推定が正しければ、有効層厚が358 mであることを考慮すると、ログ-ログプロットのデリバティブカーブはERFによる挙動を示していると考えることが妥当と考える。

$$\text{探査半径} = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t}$$

k:浸透率、 ϕ :孔隙率、 μ :粘性、 c_t :総合圧縮率、 Δt :密閉時間

レイトラジアルフローを含む十分なログ-ログプロットが得られていないため、参考値であるが、解析上、スキnfアクターが解析された（表 5.8-3）。坑内流体のCO₂による置換終了後に実施したFOT2の解析では、坑井近傍の状態を示唆するmechanical skinが-0.6となった。一般に、スキnfアクターがマイナスを示すことは、坑井周辺にフラクチャーの存在等を示唆すると考えられる。

表 5.8-3 アーリーラジアルフロー解析の入力値と解析結果

	アーリーラジアルフロー解析		FOT1	FOT2
入力値	水圧入レート	kl/d	2	0
	CO ₂ 圧入レート	t-CO ₂ /年	622	870
	坑井長	m	1,159	
	有効層厚	m	358	
	tSelf	時間	-	
	tEelf	時間	-	
	傾き	kPa/cycle	-	
	B	rm ³ /m ³	1.017	0.003
	μ	cP	0.35	0.064
	ϕ		0.13	
	Ct	1/kPa	1.22×10^{-6}	
	Cw	1/kPa	5.43×10^{-7}	
	Cg	1/kPa	1.21×10^{-5}	
	Cr	1/kPa	6.79×10^{-7}	
解析結果	水平浸透率	mD	0.00297	0.00065
	垂直浸透率	mD	0.000297	0.000065
	kh/kh		0.1	0.1
	k*h	mD*m	1.063	0.233
	kave*L/ μ	mD*m/cP	4.52	5.48
	Sg		0	0
	total skin		-2.4	-3.1
	completion skin		-2.5	-2.5
	mechanical skin		0.1	-0.6

注) 水圧入レート：ブラインおよび地層水の圧入レート、坑井長（L）：坑芯に沿った仕上げ区間長、有効層厚（h）：坑井長の垂直方向の厚さ、tSelf:ELF 開始時間、tEelf: ELF 終了時間、B:容積係数、 μ ：粘性、 ϕ ：孔隙率、Ct：総合圧縮率、Cr：岩石圧縮率、Cw：塩水圧縮率、kh:水平浸透率、kz:垂直浸透率、Kave：平均浸透率（ $k_{ave}=k_x \times k_y \times k_z$ の 3 乗根）、Sg：CO₂ 飽和度、total skin：completion skin と mechanical skin の和、completion skin：坑井の仕上げ機構による浸透性の変化を評価、mechanical skin：坑井近傍での貯留層の浸透率の変化を評価.skin がプラスだと何らかの障害のために浸透性が低下したことを示唆する、

5.8.3 苫小牧 IW-1 FOT 解析のまとめ

FOT1、FOT2 におけるローガーログプロットのデリバティブカーブに対し、ELF および ERF を仮定した解析解による解析を実施した。どちらの仮定においても、FOT1 よりも FOT2 の浸透性が高いとする推定結果を得た。また、現状では、ローガーログプロットのデ

リバティブカーブは ELF よりも ERF を仮定した方が妥当と考えられる。

【参考文献】

- 1) Goode, P.A., Thambynayagam, R.K.M., “Pressure Drawdown and Buildup Analysis of Horizontal Wells in Anisotropic Media” SPE14250（1987）

5.9 苫小牧 IW-1 ヒストリーマッチの実施

CO₂の圧入開始前に作成したシミュレーションモデル¹⁾に、実際の圧入状況を入力することにより予測される圧力挙動と実績値を比較（圧入予実績比較）し、両者の乖離を貯留層パラメータの調整により整合させた（ヒストリーマッチ）。

5.9.1 圧入予実績比較

CO₂の圧入開始前に作成したシミュレーションモデルからセクターモデルを切出し、圧入井周辺のグリッドサイズを細分化したモデル（図 5.9-1、表 5.9-1）を用いて、実際の圧入状況を入力することにより圧力挙動を予測した。

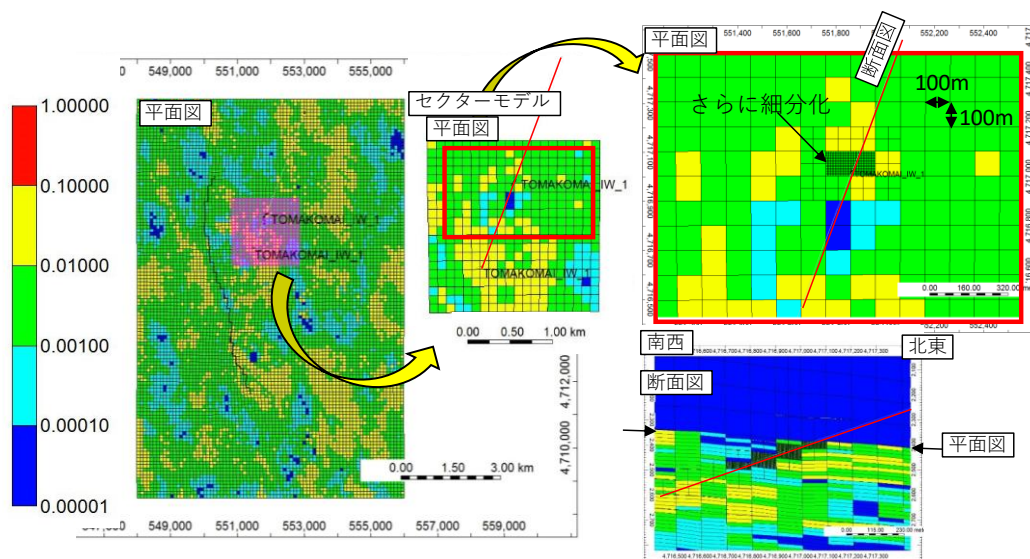


図 5.9-1 圧入予実績比較に使用したセクターモデル

表 5.9-1 予実績比較モデルへの入力データ

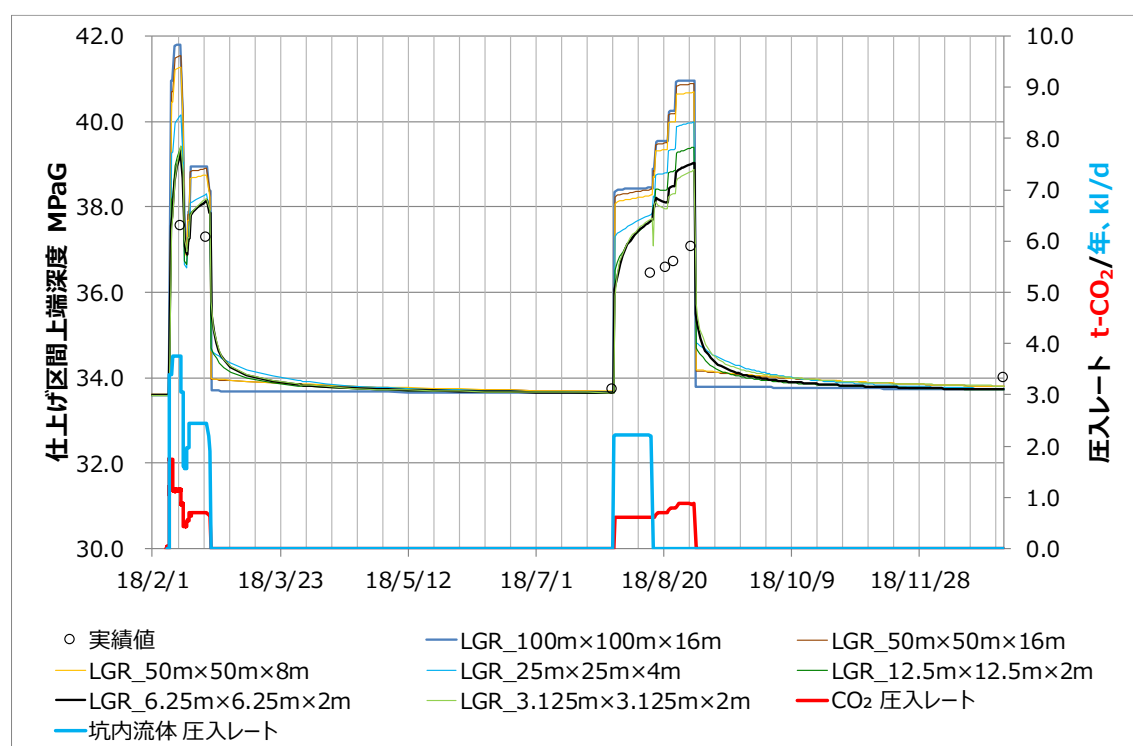
モデル	CO ₂ 圧入開始前モデル	CO ₂ 圧入開始後モデル
モデルサイズ	8 km × 12 km × 4,000 m	
	⇒ 2 km × 2 km × 1,000 m（セクターモデル）	
グリッド数	80 × 120 × 106	
	⇒ 20 × 20 × 62（セクターモデル）	
アクティブ・ブロック数	24,800（セクターモデル）	
基準温度	88.3℃ PT センサー深度 2,342 m（TVDSS）	89.2℃ 仕上げ区間上端深度 2,386 m（TVDSS）
基準圧力	33,040kPaG PT センサー深度 2,342 m（TVDSS）	33,600kPaG 仕上げ区間上端深度 2,386 m（TVDSS）
塩分濃度（ppm NaCl）	35,112	
貯留層		
岩相	凝灰岩	
孔隙率	三次元弾性波探査の AI 分布と CCS-1、IW-1 の分析値より推	
浸透率（md）	IW-1 掘削時のフローバックテスト結果を用いて推定 kv/kh=0.1	
岩石圧縮率（1/kPa）	3.268×10^{-7}	6.790×10^{-7}
相対浸透率曲線		
kr _g	Bennion（2005） ²⁾	
kr _w	Bennion（2005） ²⁾	
S _{gc}	0.04	
Sw _{ir}	0.558	
ヒステリシス（S _{gr} max）	0.241	
毛細管圧力	Bennion（2006） ³⁾ , van Genuchten（1980） ⁴⁾	
遮蔽層		
孔隙率	0.19	
浸透率（mD）	4.3×10^{-5}	
相対浸透率曲線		
kr _g	Corey（1954） ⁵⁾	
kr _w	van Genuchten（1980） ⁴⁾	
S _{gc}	0.05	
Sw _{ir}	0.8	
ヒステリシス（S _{gr} max）	考慮なし	
毛細管圧力	van Genuchten（1980） ⁴⁾	
スレッシュホールド圧力	9.90	

セクターモデルにおいて坑井が通過もしくは坑井に近接するグリッドのサイズを細分化

し（以下、「LGR」と称する。）、最適な圧入挙動を検討した。LGRは表5.9-2のように実施し、それぞれのグリッドサイズの貯留層モデル（セクターモデル）において、圧入実績を再現するシミュレーションを行い、圧力の実績値と比較した（図5.9-2）。LGRにおいて最もグリッドを細分化したケースが概ね妥当な圧力値を再現することを確認した。

表 5.9-2 グリッドサイズの細分化

100m × 100m × 16m	i（東西）×j（南北）×k（垂直）
50m × 50m × 8m	
25m × 25m × 4m	
12.5m × 12.5m × 2m	
6.25m × 6.25m × 2m	
3.125m × 3.125m × 2m	



注）CO₂圧入レートは地表での圧入レートを示しており、坑内流体（ブライン）のCO₂への置換が終了するまでの貯留層への圧入流体は、全て坑内流体（ブライン）であったと仮定した。

図 5.9-2 LGR サイズの違いとセクターモデルによる圧力挙動の再現状況

5.9.2 ヒストリーマッチ

(1) 浸透率

貯留層にCO₂が到達したのちに実施したFOT2のアーリーラジアルフロー解析で得られた平均浸透率×坑井長（ $k_{ave} \cdot L$ ）（表 5.8-3）に合うよう、孔隙率と浸透率の相関式を以下のように改定した。

$$\text{CO}_2 \text{ 圧入前} \quad \text{浸透率} = 3.1784 \times 10^{-5} \times e^{32.183\phi}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 圧入後改定} \quad \text{浸透率} = 4.7917 \times 10^{-5} \times e^{32.183\phi}$$

調査井（苫小牧 CCS-1）および圧入井（苫小牧 IW-1）の岩石試料の孔隙率および浸透率の分析値との関係を図 5.9-3 に示す。

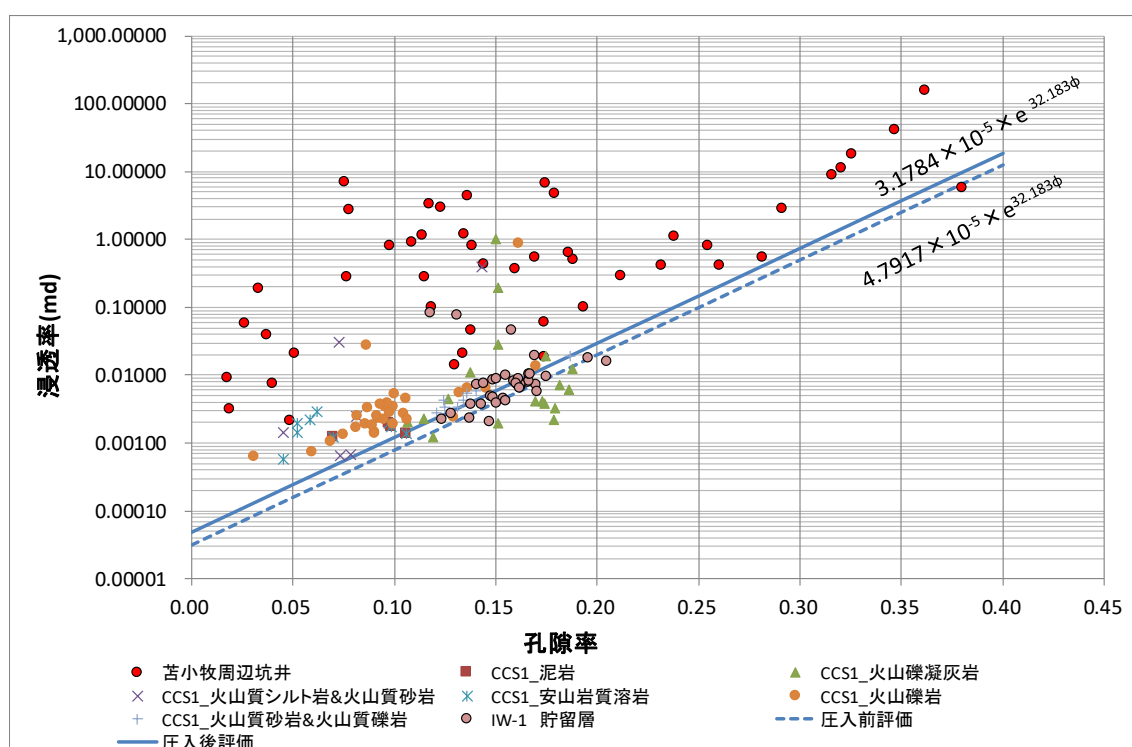


図 5.9-3 貯留層モデルの浸透率調整

(2) ヒストリーマッチング

アーリーラジアルフロー解析において、参考値ではあるがマイナスとなるスキンプアクターが解析された（表 5.8-3）。スキンプアクターを変化させる要因（断裂の影響等）が圧入性に影響している可能性を考慮し、スキンプアクターを変化させることによりヒストリーマッチングを実施した。スキンプアクターを-0.3 と設定した設定で圧力挙動の実績値をほぼ再現できると判断し（図 5.9-4）、この設定を用いてより広範囲に及ぶモデルによるシミュレーションを実施することとした。

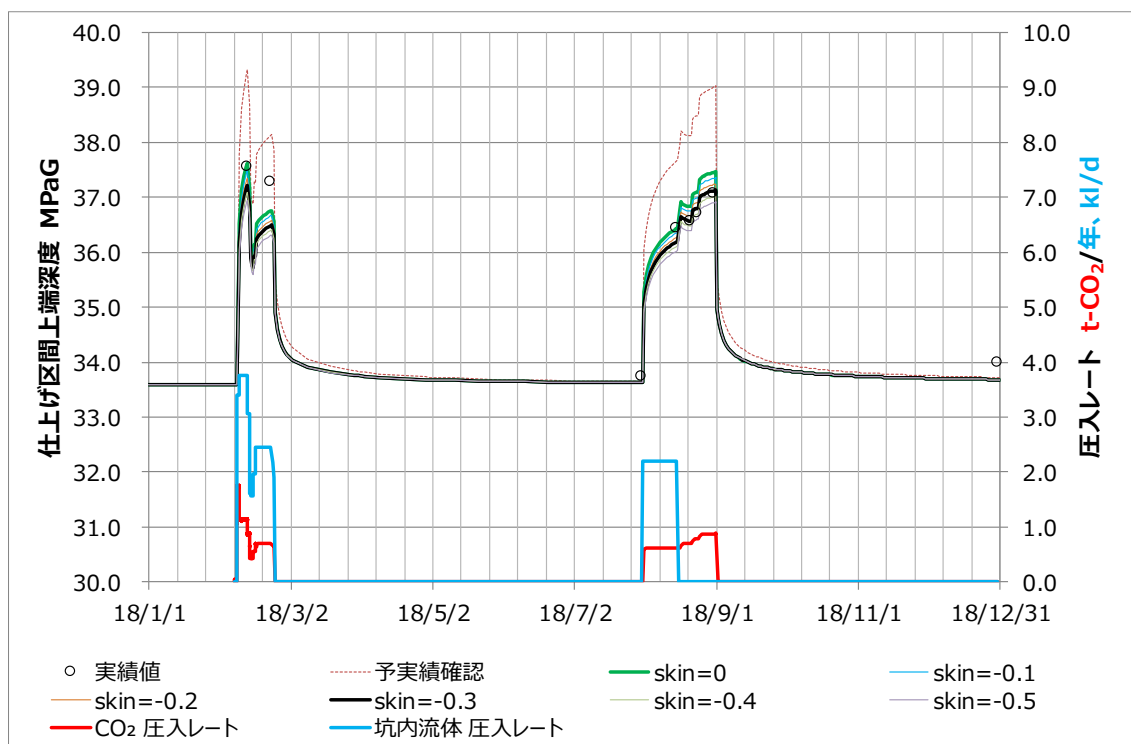


図 5.9-4 スキンファクターの設定によるヒストリーマッチング

5.9.3 苫小牧 IW-1 ヒストリーマッチまとめ

既存の貯留層モデルからセクターモデルを作成し、LGR のグリッドサイズを調整し、圧入履歴に対応する坑内圧力挙動がおおむね妥当な値になることを確認した。

FOT2 のアーリーラジアルフロー解析で得られた平均浸透率×坑井長 ($k_{ave} \cdot L$) に基づき浸透率を調整するとともに、スキンファクターを調整することにより圧入実績を再現する貯留層モデルとなるように、ヒストリーマッチを行った。

【参考文献】

- 1) 日本CCS調査（株）、“2017年度「2017年度苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業」成果報告書”（2018）
- 2) Brant Bennion, Hycal Energy Research Laboratories Ltd., Calgary, AB, Canada, and Stefan Bachu, Alberta Energy and Utilities Board, Edmonton, AB, Canada, “Relative Permeability Characteristics for Supercritical CO₂ Displacing Water in Variety of Potential Sequestration Zones in the Western Canada Sedimentary Basin ” SPE 95547 (2005)
- 3) Brant Bennion, Hycal Energy Research Laboratories Ltd., Calgary, AB, Canada, and

Stefan Bachu, Alberta Energy and Utilities Board, Edmonton, AB, Canada, “The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-Brine systems” SPE 99325 (2006)

- 4) M.TH. van Genuchten, “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) A.T.Corey, “The Interrelation Between Gas and Oil Relative Permeabilities” Producers Monthly November, p.38-41 (1954)

5.10 苫小牧 IW-1 流動シミュレーションの実施

5.9 節で使用した貯留層モデルを用いて圧入シナリオに沿った所定量の CO₂ を圧入し、圧入後 1,000 年に至る期間の挙動を予測する流動シミュレーションを実施した。

5.10.1 将来予測ケースでの CO₂ 圧入シナリオ

(1) ケース 1

2018 年 2 月と 8 月～9 月に実施した圧入実績に基づき、追加の圧入を実施しないケース。累計 98.2t-CO₂ を圧入するシナリオ（図 5.10-1）。

(2) ケース 2

ケース 1 に加え、2019 年 4 月から 2019 年 9 月 20 日の間に追加で圧入し、累計圧入量を 376 t-CO₂ とするシナリオ（図 5.10-1）。実績圧入レート（ケース 1）を参考に、100 kg-CO₂/時～120 kg-CO₂/時の圧入レートを想定し、PSA オフガス供給元のメンテナンスを考慮して 5 月下旬から 7 月下旬は圧入を停止することとした。

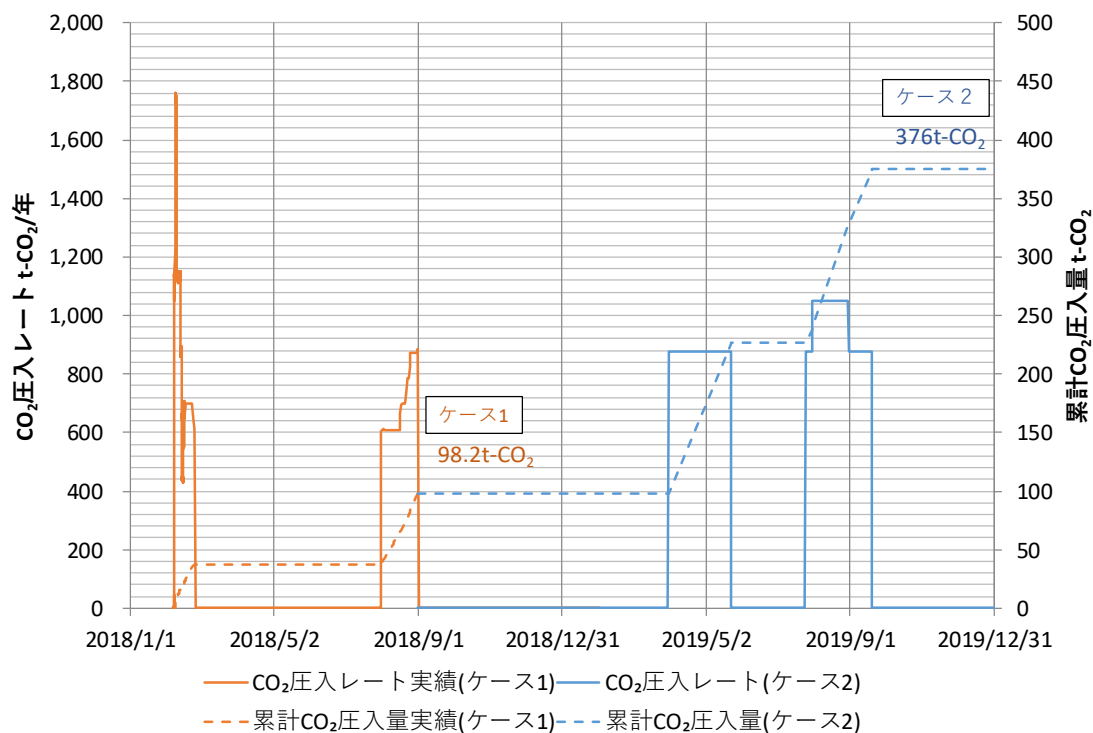


図 5.10-1 流動シミュレーションにおける圧入シナリオ

5.10.2 流動シミュレーション結果

(1) ケース 1

① 苫小牧 IW-1 坑内圧力の推移予測

図 5.10-2 に圧入レートと仕上げ区間上端における坑内圧力の実績値ならびにシミュレーションで予測される圧力挙動を示す。圧入中の仕上げ区間上端圧力は、37.2 MPaG 程度まで上昇したが、圧入停止後低下し、圧入停止後 10 年程度で初期圧（33.60 MPaG）程度まで回復するものと推定される。

なお、図 5.9-2 に示すように 3.125 m×3.125 m×2 m と 6.25 m×6.25 m×2 m のサイズで予想さえる圧力挙動に大差がないため、計算時間を考慮して貯留層モデルには 6.25 m×6.25 m×2 m のグリッドサイズを適用した。

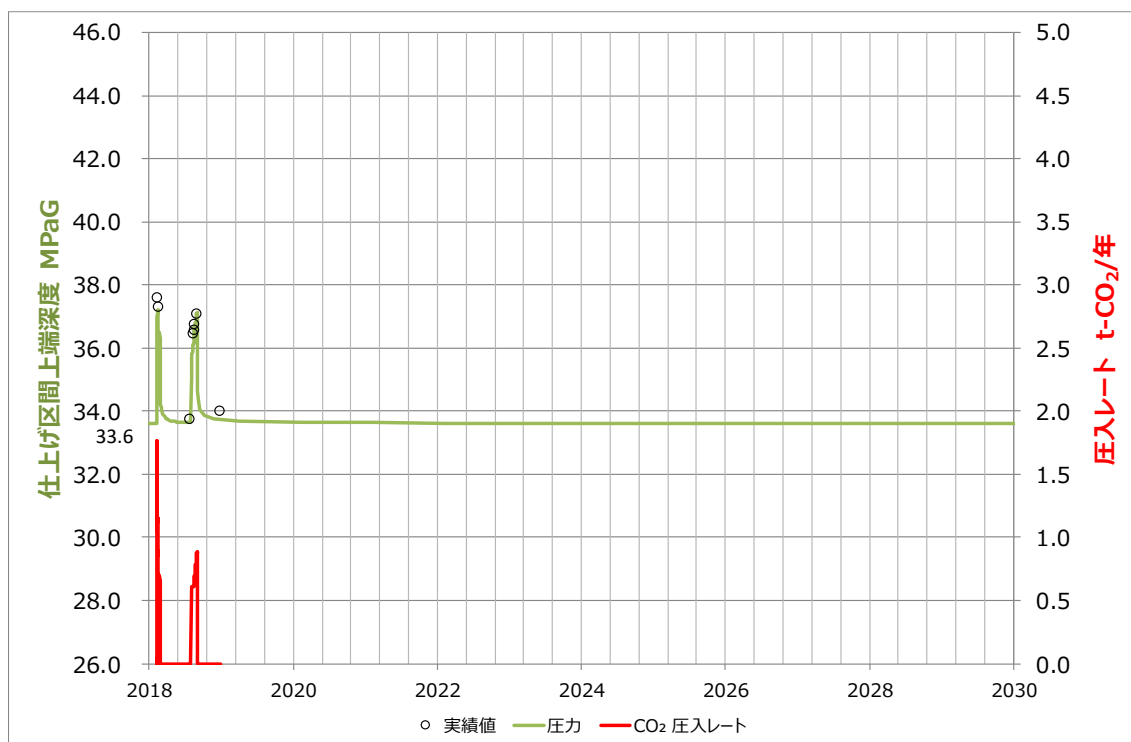


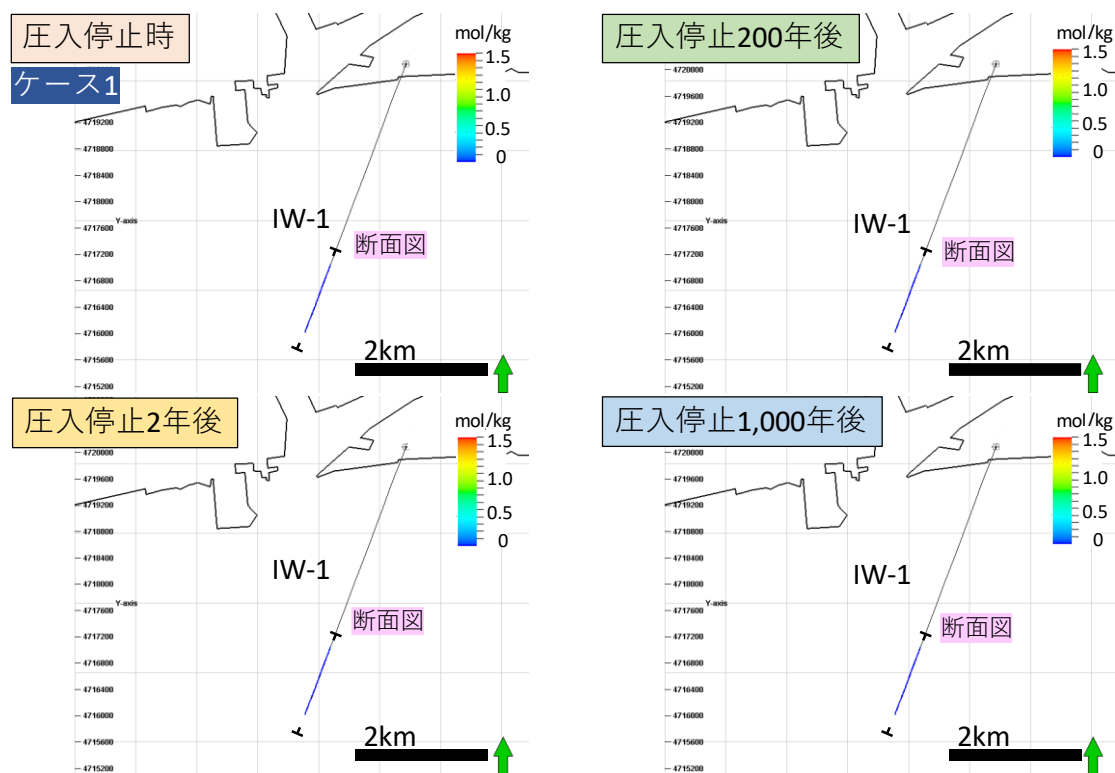
図 5.10-2 ケース 1 仕上げ区間上端深度における圧力変化の予測

② CO₂ 飽和度の挙動予測

圧入レートが低く、累計圧入量が少量であるため、圧入した CO₂ の全量が直ちに地層水に溶解するため、CO₂ 飽和度の分布図を示すことができない。シミュレーションに使用した貯留層モデルのグリッドサイズは 6.25 m×6.25 m×2 m なので、実際の CO₂ 飽和度の分布域は圧入井から概ね半径 6.25 m 以内の極限定的な範囲であると推定される。

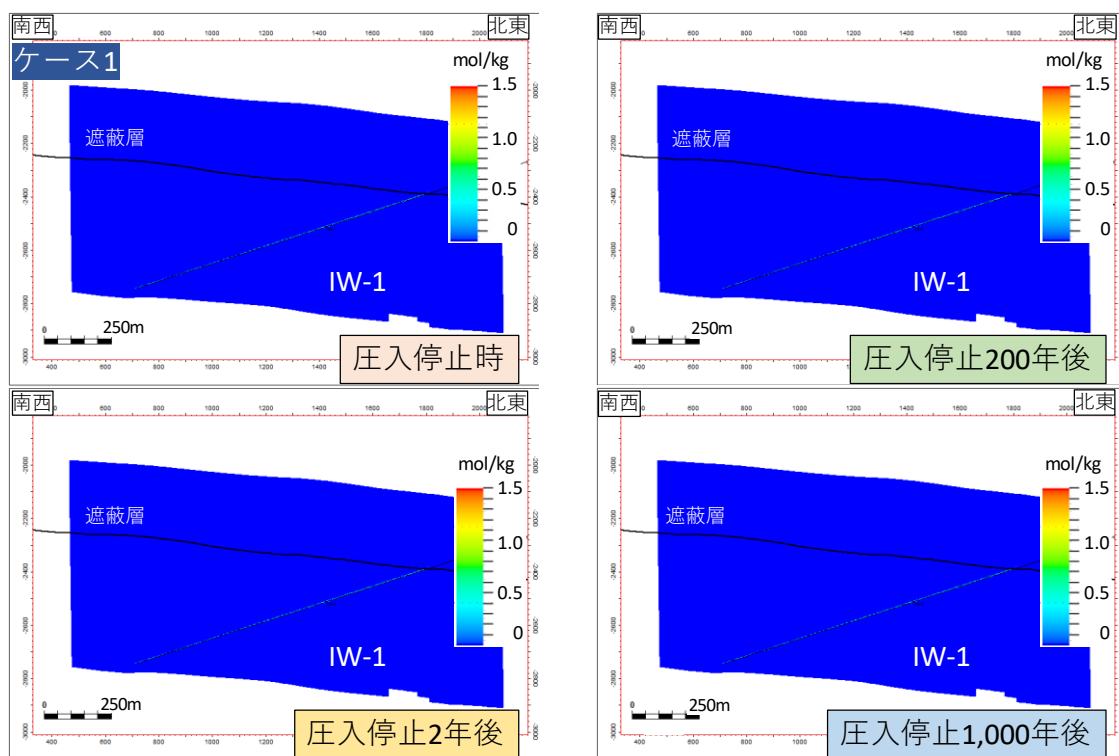
③ 溶解 CO₂ 量の挙動予測

溶解 CO₂ 量の経時変化を図 5.10-3 および図 5.10-4 に示す。溶解 CO₂ 量の分布範囲は圧入井の極近傍に限定される。



注) すべての溶解 CO₂ 分布を上方より俯瞰

図 5.10-3 ケース 1 溶解 CO₂ 量分布の経年変化（平面図）



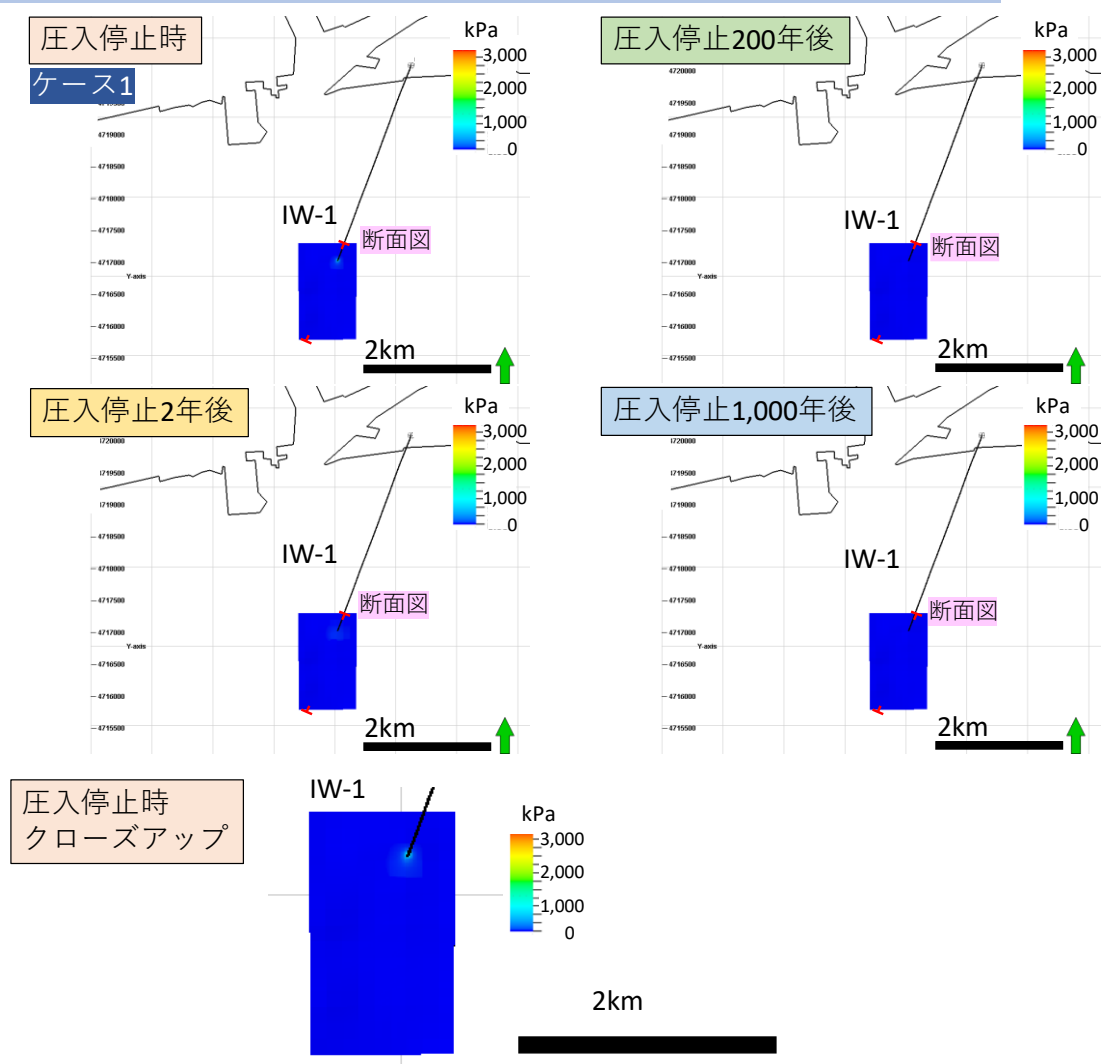
注) 断面図位置は図 5.10-3 を参照のこと。

図 5.10-4 ケース 1 溶解 CO₂ 量分布の経年変化（断面図）

④ 圧力変化の挙動予測

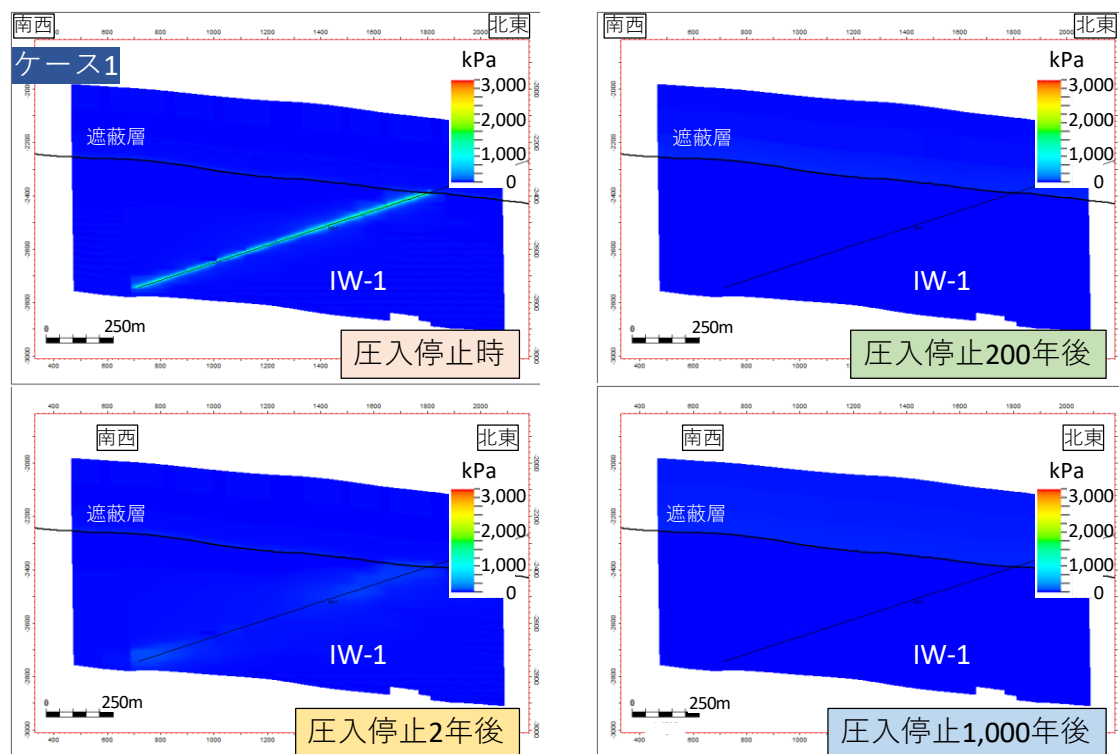
圧力変化（圧力上昇）の経時変化を図 5.10-5 および図 5.10-6 に示す。圧入終了時の圧力変化は圧入井の全仕上げ区間で生じており（図 5.10-6）、CO₂は仕上げ区間全体から貯留層に圧入された。図面上は明瞭ではないが、圧入実績から最大 3,600 kPa 程度の圧力変化が生じているはずである。圧入停止後に速やかに上昇した圧力は解消されるものと考えられる。

滝ノ上層 圧力変化 ケース1



注）貯留層上面の圧力変化。

図 5.10-5 ケース 1 圧力変化の経時変化（平面図）

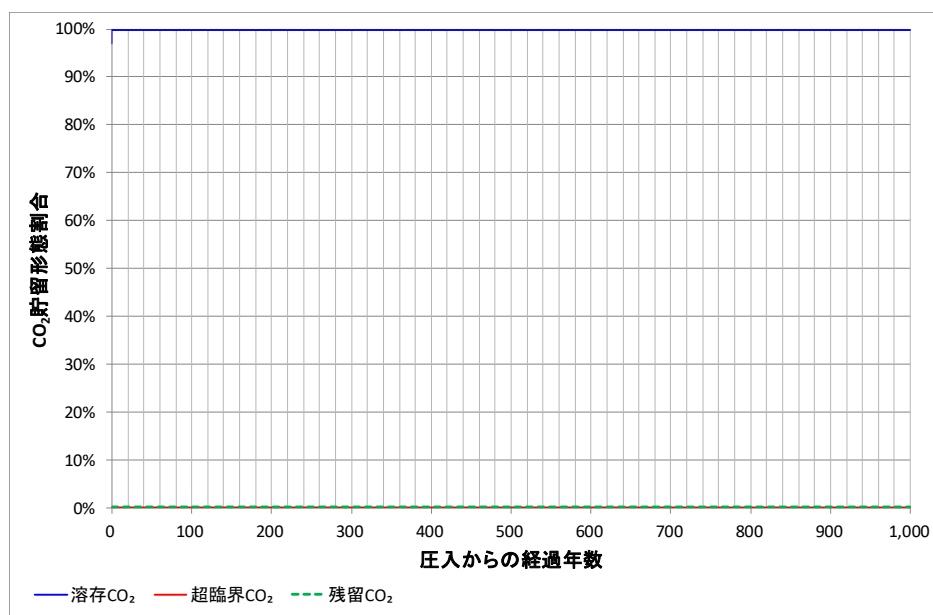


注）断面図位置は図 5.10-5 を参照のこと。

図 5.10-6 ケース 1 圧力変化の経時変化（断面図）

⑤ 貯留形態変化の挙動予測

98.2 t-CO₂ を圧入したが、貯留層に圧入された CO₂ 量は管内容量分を差し引いた 35t-CO₂ 程度であったと考えられる。貯留層モデルに対し圧入した CO₂ 量が少なく、CO₂ は圧入後直ちに全量が溶解する。したがって、超臨界状態の CO₂ は存在せず、溶存 CO₂ 量が 100%となっている。



注）圧入したCO₂は全量が溶解し、溶存CO₂となる。

図 5.10-7 ケース 1 CO₂の貯留形態

⑥ ケース 1 まとめ

圧入したCO₂量では、CO₂飽和度分布（図面としては示せない）や溶解CO₂量の分布範囲は坑井の極近傍に限定される。圧入により貯留層圧力は上昇するが、圧入終了から10年程度ではほぼ初期圧に回復するものと推定される。

(2) ケース 2

① 苫小牧IW-1坑内圧力の推移予測

図 5.10-8 に圧入レート、累計CO₂圧入量、仕上げ区間上端における坑内圧力の実績値ならびにシミュレーションで予測される圧力挙動を示す。圧入中に仕上げ区間上端圧力が圧入上限値に（38.26 MPaG）に達したため、圧入レートを低下させたため、想定期間での累計圧入量は354 t-CO₂となった（計画376 t-CO₂）。上昇した圧力は、圧入停止後緩やかに低下する。圧入停止10年程度で33.83 MPaG、圧入停止1,000年後には33.82 MPaG程度まで回復するものと推定される。

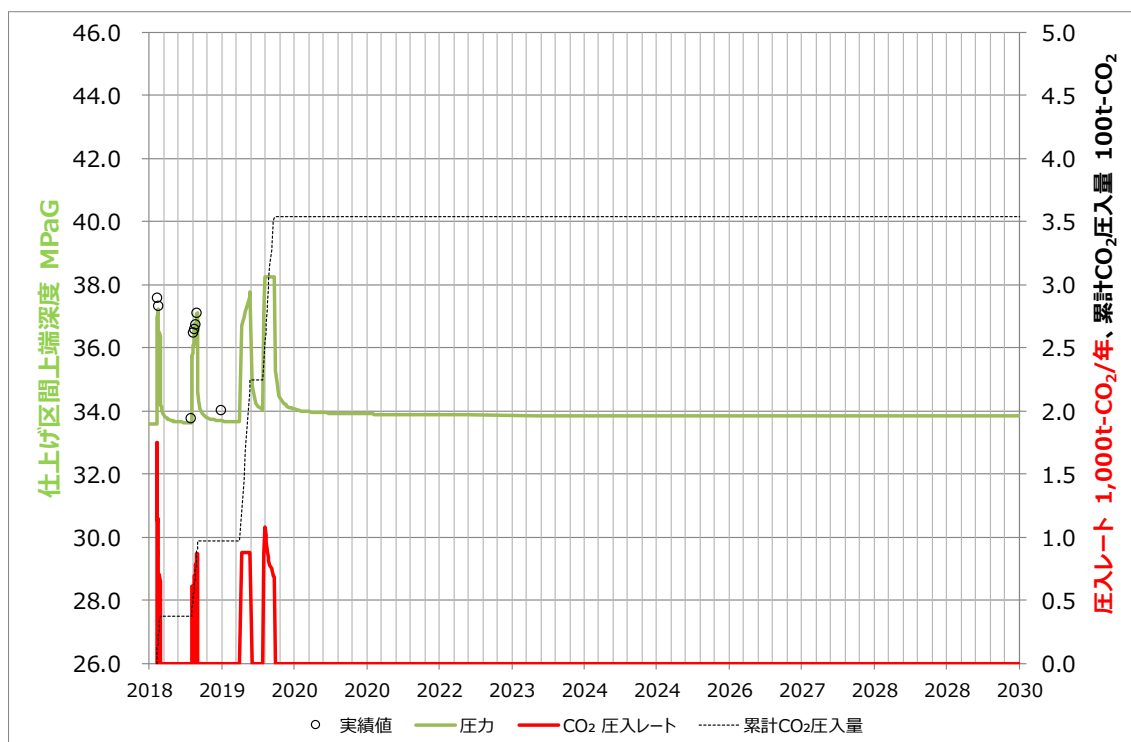


図 5.10-8 ケース 2 仕上げ区間上端深度における圧力変化の予測

② CO₂ 飽和度の挙動予測

圧入井のごく近傍でのみ CO₂ 飽和度が上昇すると考えられる（図 5.10-9、図 5.10-10）。上昇した CO₂ 飽和度は、圧入停止から 1,000 年経過しても変化が認められない。これは貯留層の浸透性が低いために、地層水や CO₂ が貯留層内で移動できないため、CO₂ の溶解が進行しないことが原因であると推定される。

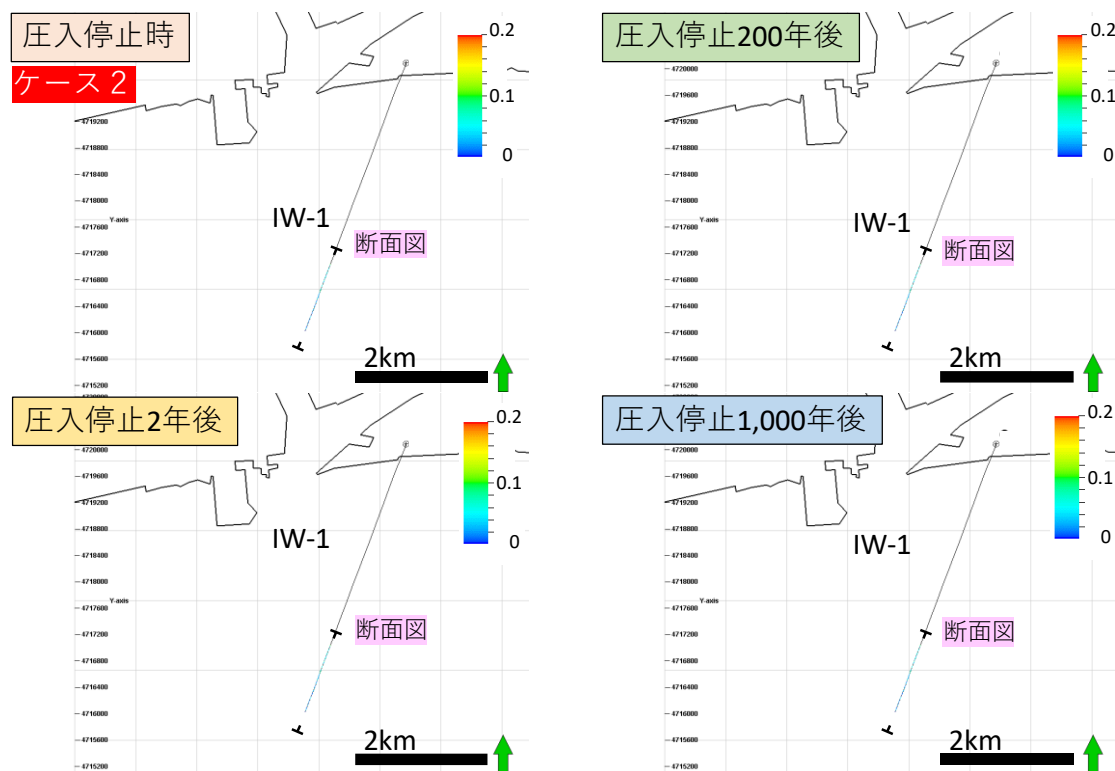


図 5.10-9 ケース 2 CO₂ 飽和度分布の経年変化（平面図）

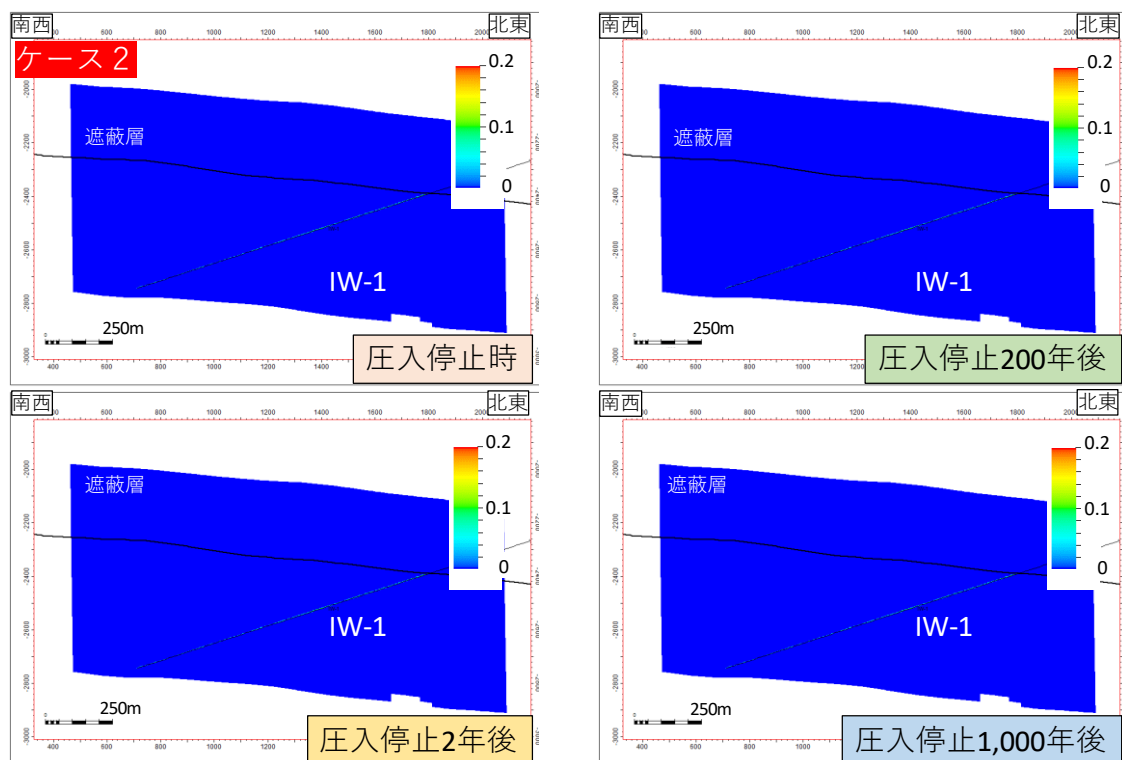


図 5.10-10 ケース 2 CO₂ 飽和度分布の経年変化（断面図）

③ 溶解 CO₂ 量の挙動予測

溶解 CO₂ 量の経時変化を図 5.10-11 および図 5.10-12 に示す。溶解 CO₂ 量の分布範囲は圧入井の極近傍に限定される。CO₂ 飽和度と同様に貯留層の浸透性が低いため、圧入停止から 1,000 年経過しても変化が認められない。

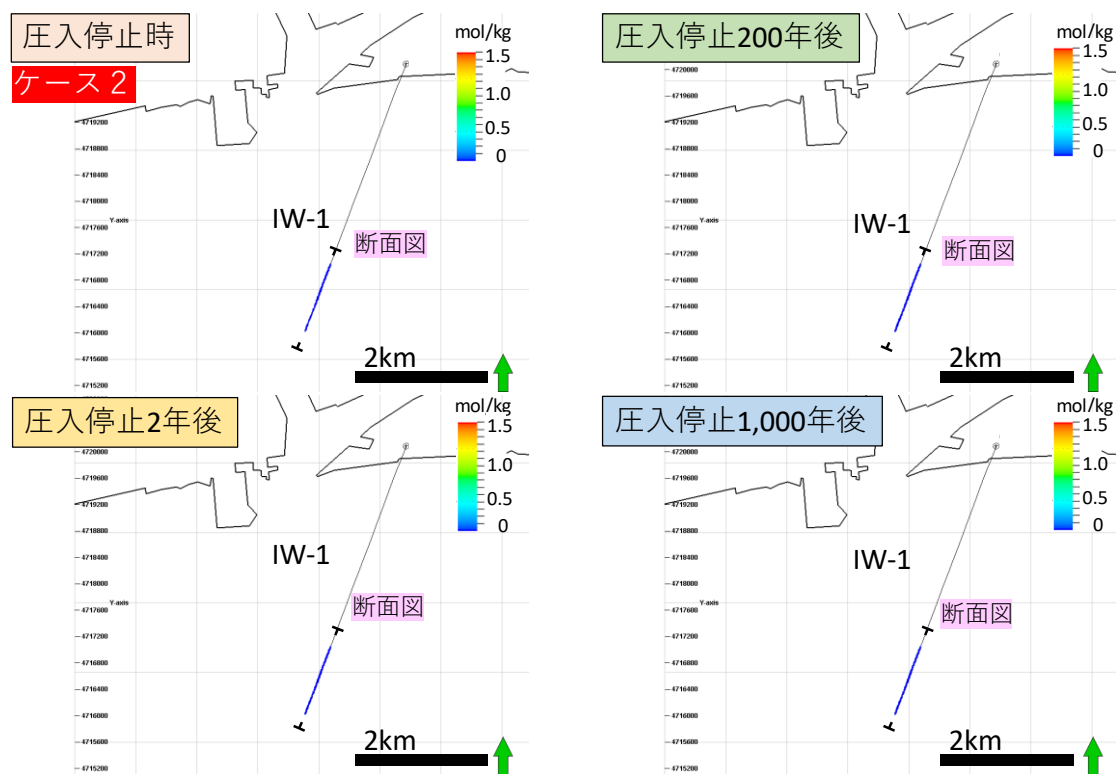


図 5.10-11 ケース 2 溶解 CO₂ 量分布の経年変化（平面図）

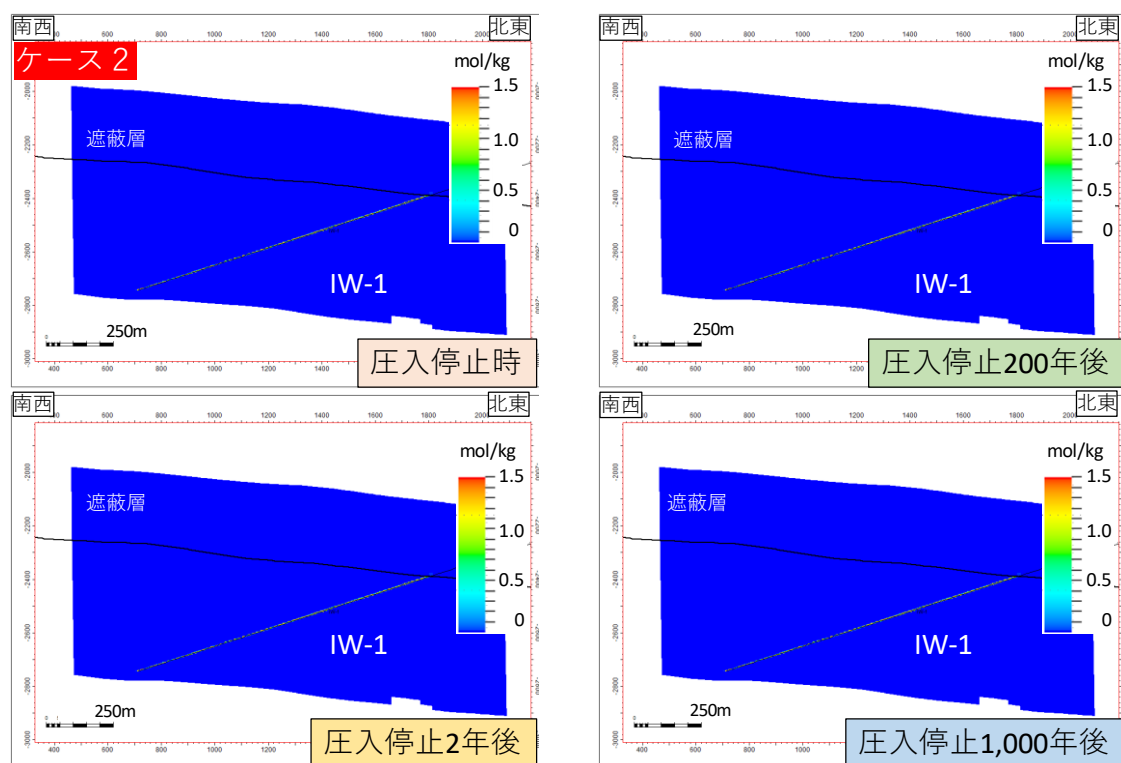


図 5.10-12 ケース 2 溶解 CO₂ 量分布の経年変化（断面図）

④ 圧力変化の挙動予測

圧力変化（圧力上昇）の経時変化を図 5.10-13 および図 5.10-14 に示す。ケース 1 と同様に圧入終了時の圧力変化は圧入井の全仕上げ区間で生じており（図 5.10-14）、CO₂は仕上げ区間全体から貯留層に圧入された。ケース 1 よりも CO₂の圧入量が多いため、貯留層圧力変化が広範に及ぶが、圧入停止後に速やかに上昇した圧力は解消されるものと考えられる。

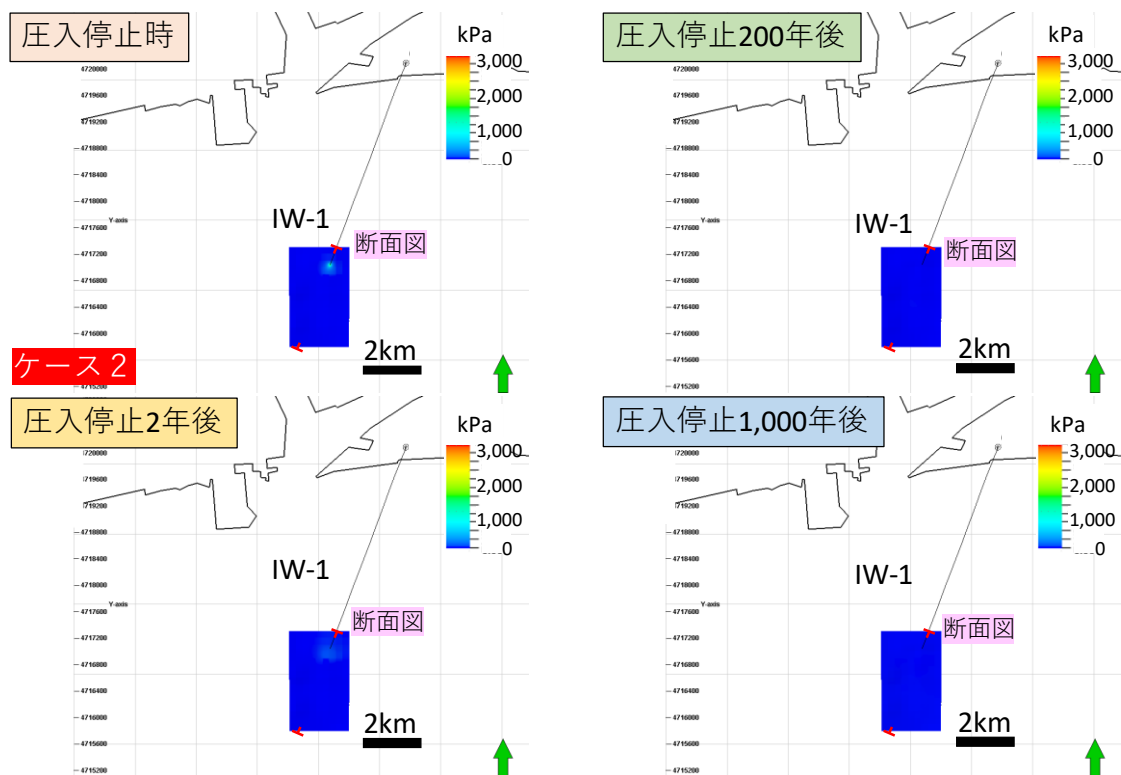


図 5.10-13 ケース 2 圧力変化の経時変化（平面図）

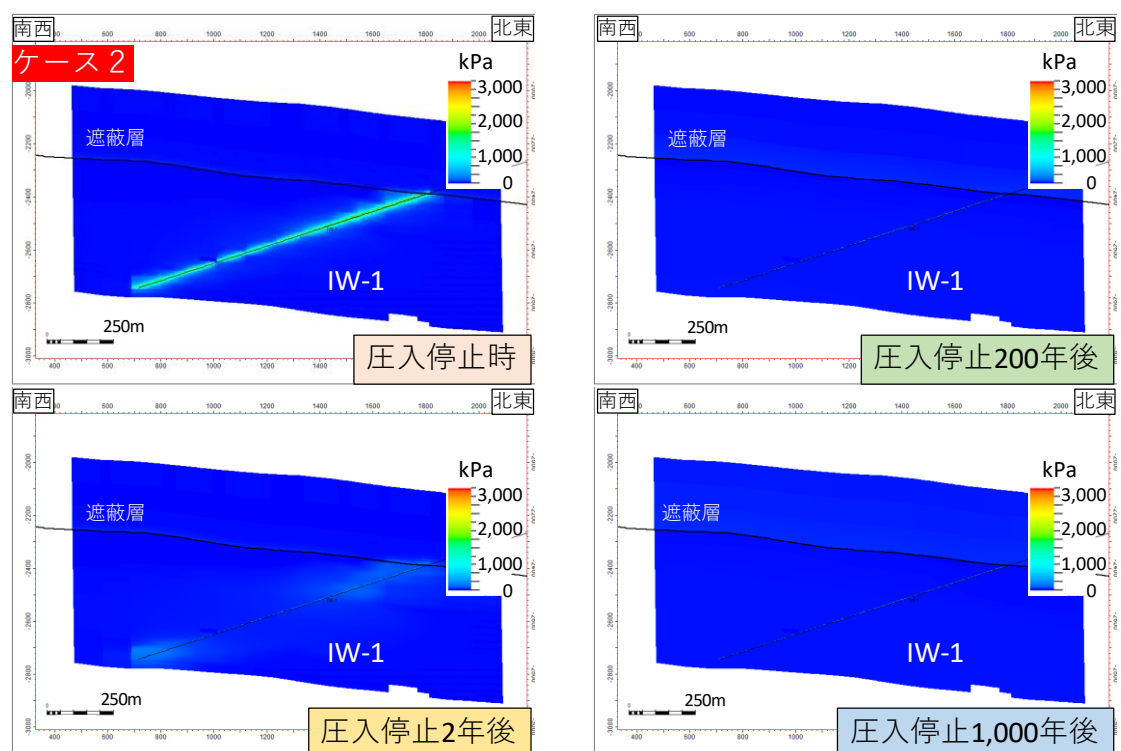


図 5.10-14 ケース 2 圧力変化の経時変化（断面図）

⑤ 貯留形態変化の挙動予測

354 t- CO_2 を圧入したが、貯留層に圧入された CO_2 量は管内容量分を差し引いた 290 t- CO_2 程度であったと考えられる。圧入中は、圧入した全ての CO_2 が溶解するが、圧入停止後には圧入した CO_2 の 33%程度が超臨界 CO_2 のまま残留トラップされる。これは貯留層の浸透性が低いために、地層水や CO_2 が貯留層内で移動できず、残留トラップされた CO_2 が CO_2 に未飽和な地層水と接触できないため、 CO_2 の溶解が進行しないことが原因であると推定される。圧入終了 1,000 年後においても、溶解 CO_2 および残留トラップされた超臨界 CO_2 の割合は変化しない結果となっている。

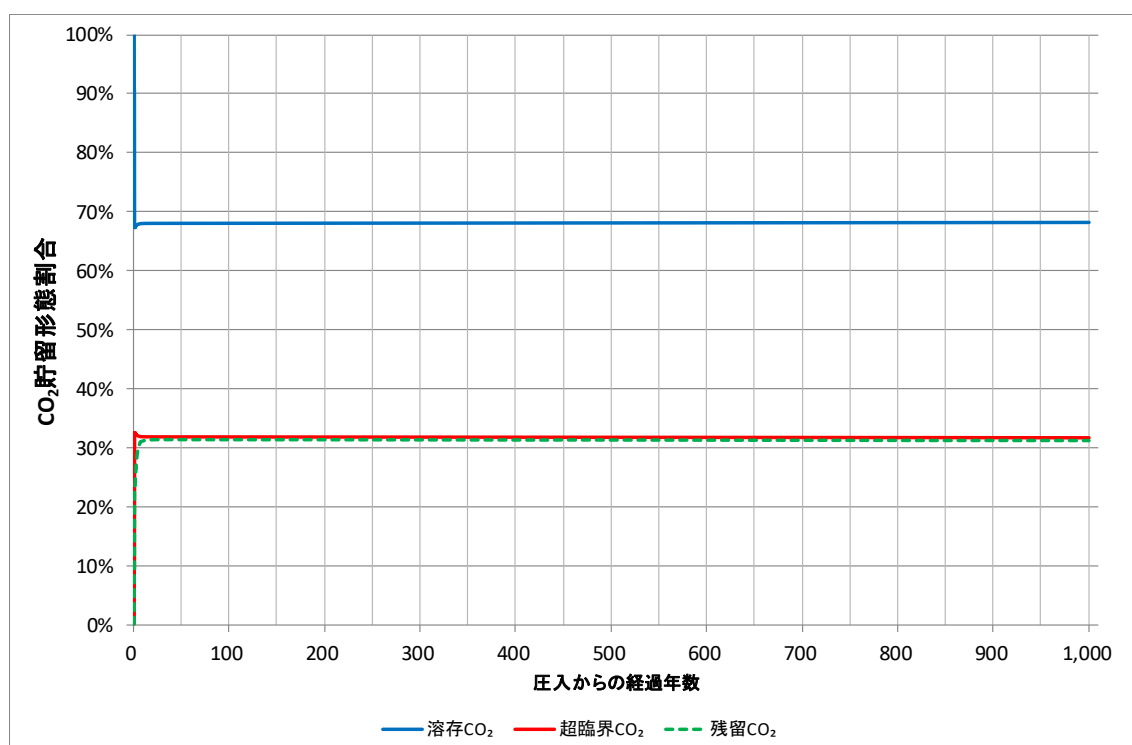


図 5.10-15 ケース 2 CO_2 の貯留形態

⑥ ケース 2 まとめ

CO_2 飽和度分布や溶解 CO_2 量の分布範囲は坑井のごく近傍に限定される。圧入により貯留層圧力は上昇するが、圧入停止後に速やかに初期圧近くまで回復する。圧入した CO_2 は速やかに溶解および残留トラップされ、安全に貯留されるものと推定される。

5.11 滝ノ上層 1D 流動－地化学連成シミュレーションの実施

5.11.1 地層水および地層鉱物の化学種組成の推定

圧入した CO_2 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、

5.8～5.10 節に記した。5.11～5.12 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。5.11 節では 5.12 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、1D 流動－地化学連成シミュレーションについて述べる。

(1) 地層水化学組成

滝ノ上層 T1 部層の地層水は、2015 年度に作成した貯留層評価報告書¹⁾と同様に、苫小牧 OB-1 において採取された地層水化学分析データに基づいて、自生鉱物相である黄鉄鉱、斜プチロル沸石（固溶体）、方解石、サポナイト（固溶体）、ならびに化学平衡にあることが推定されるカルセドニーと同時に飽和するように熱力学的に再構成した。苫小牧 OB-1（CCS-1）地層水分析結果と再構成後の組成を表 5.11-1 に示す。

表 5.11-1 滝ノ上層地層水の分析結果と再構成後の組成

	苫小牧CCS-1で採取した地層水の分析値から作成 (31 Jan. 2011 sampling)	熱力学的に再構成した 滝ノ上層T1部層の地層水組成
貯留層温度(°C)		90
pH	6.77	6.72
mg/kg		
Cl ⁻	19,698	20,775
SO ₄ ²⁻	63.4	63.4
HCO ₃ ⁻	48.2	7.50
HS ⁻	分析せず	0.000479
SiO ₂ (aq)	39.7	83.0
Al ³⁺	検出限界以下	0.00143
Ca ²⁺	8,310.8	8,312
Mg ²⁺	1.6	1.56
Fe ²⁺	9.2	9.25
K ⁺	68.0	68.0
Na ⁺	3,898	3,899
NH ₄ ⁺	16.6	16.6
備考	地層水－ブライン単純混合モデルによる地層水組成推定値(ブライン混合比率8wt%) pHは産出水の大気圧、室温条件での測定値	カルセドニー、黄鉄鉱、方解石、サポナイト(固溶体)、斜プチロル沸石(固溶体)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

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⁾を使用した。

再構成後の地層水組成の pH と飽和度の関係を図 5.11-1 に示す。再構成においては、自生鉱物相である黄鉄鉱、斜プチロル沸石（固溶体）、方解石、サポナイト（固溶体）、ならびに化学平衡にあることが推定されるカルセドニーと同時に飽和するように熱力学的に

再構成した。

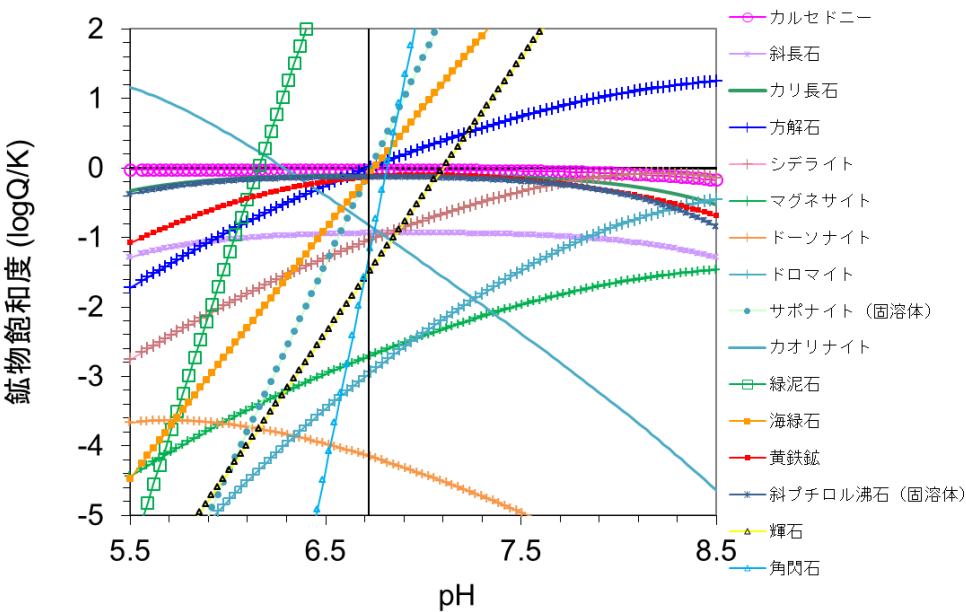


図 5.11-1 滝ノ上層再構成後の地層水組成の pH と飽和度の関係

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 5.11-2 に示す。

表 5.11-2 シミュレーションに使用した地層水組成

化学種	滝ノ上層T1部層	
	モル濃度 (mol/kg)	平衡にした鉱物
H ⁺	8.70 × 10 ⁻⁴	サポナイト(固溶体)
Cl ⁻	6.06 × 10 ⁻¹	
SO ₄ ²⁻	6.83 × 10 ⁻⁴	
HCO ₃ ⁻	1.30 × 10 ⁻⁴	方解石
HS ⁻	1.79 × 10 ⁻⁸	黄鉄鉱
H ₄ SiO ₄	1.02 × 10 ⁻³	カルセドニー
Al ³⁺	5.41 × 10 ⁻⁸	
Ca ²⁺	2.15 × 10 ⁻¹	斜プチロル沸石(固溶体)
Mg ²⁺	6.64 × 10 ⁻⁵	
Fe ²⁺	1.71 × 10 ⁻⁴	
K ⁺	1.80 × 10 ⁻³	
Na ⁺	1.75 × 10 ⁻¹	
NH ₃	1.01 × 10 ⁻³	

(2) 地層鉱物組成

鉱物組成は2015年度業務¹⁾の結果を踏襲した。岩石薄片観察と分析（XRD、XRF、SEM-EDS等）およびこれらを用いた最適化計算による鉱物組成推定結果を反映させつつ、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。地化学反応シミュレーションに用いる鉱物組成を、飽和度とともに表 5.11-3 に示す。

表 5.11-3 鉱物組成

group	和名	name	鉱物組成とlog Q/K		組成
			滝ノ上層T1部層		
			vol%	log Q/K	
シリカ鉱物	カルセドニー	chalcedony	11.16	eq. SiO ₂	
長石	斜長石	albite/anorthite	35.29	-1.17	Na _{0.5} Ca _{0.5} (Al _{1.5} Si _{2.5})O ₈
	カリ長石	K-feldspar	2.24	-0.05	K(AlSi ₃)O ₈
炭酸塩鉱物	方解石	calcite	1.55	eq.	CaCO ₃
	シデライト	siderite	0.00	-0.91	FeCO ₃
	マグネサイト	magnesite	0.00	-2.71	MgCO ₃
	ドーソナイト	dawsonite	0.00	-4.13	NaAl(CO ₃) ₂
	ドロマイト	dolomite	0.00	-2.95	CaMg(CO ₃) ₂
粘土鉱物	サポナイト(固溶体)	SS-saponite	17.67	eq.	Na _{0.0816} Ca _{0.1292} Mg ₂ FeAl _{0.34} Si _{3.66} O ₁₀ (OH) ₂
	カオリナイト	kaolinite	0.00	-0.76	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	緑泥石	clinochlore/daphnite	0.09	4.94	Mg _{2.5} Fe _{2.5} Al(AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₈
	海緑石	glauconite	16.39	-0.66	(K _{0.75} Mg _{0.25} Fe _{1.5} Al _{0.25})(Al _{0.25} Si _{3.75})O ₁₀ (OH) ₂
硫化鉱物	黄鉄鉱	pyrite	0.17	eq.	FeS ₂
沸石	斜プチロル沸石(固溶体)	SS-clinoptilolite	14.26	eq.	Na _{0.198} Ca _{0.451} (Si _{4.9} Al _{1.1})O ₁₂ ・3.828H ₂ O
輝石	輝石	diopside/hedenbergite	1.09	-1.45	CaMg _{0.8} Fe _{0.2} (SiO ₃) ₂
角閃石	角閃石	tremolite/actinolite	0.09	-0.86	(Ca ₂ Mg ₃ Fe ₂)Si ₆ 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 5.11-4 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、Thermoddem³⁾から選択した。

表 5.11-4 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+}	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	FeHSO_4^+	MgSO_4
Na^+	SO_3^{2-}	FeO	NaAlO_2
K^+	$\text{Al}(\text{OH})^{2+}$	FeOH^+	NaCO_3^-
Ca^{2+}	$\text{AlH}_3\text{SiO}_4^{2+}$	H_2S	NaHCO_3
Mg^{2+}	AlOH^{2+}	$\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$	NaOH
Fe^{2+}	AlO_2^-	HAIO_2	NaSO_4^-
Cl^-	AlSO_4^+	HCl	NH_4^+
SO_4^{2-}	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)^+$	HFeO_2^-	S^{2-}
HCO_3^-	CaCl^+	HSiO_3^-	$\text{Si}_2\text{O}_2(\text{OH})_5^-$
H_4SiO_4	CaCl_2	HSO_4^-	$\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4^{2-}$
NH_3	CaCO_3	KAIO_2	$\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_6^{2-}$
H^+	CaOH^+	KCl	OH^-
H_2O	CO_2	KOH	CaSO_4
	CO_3^{2-}	KSO_4^-	FeSO_4
	$\text{Fe}(\text{CO}_3)_2^{2-}$	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)^+$	
	FeCl^+	MgCl^+	
	FeCl_2	MgCO_3	

注) 2015 年度業務¹⁾と同様。

5.11.2 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

萌別層に関する 5.6.2 項と同様に、5.6-1 式および 5.6-2 式を用いて設定した。

表 5.11-5 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 5.11-5 反応速度パラメータ

名前	k25	E	引用元	備考
カルセドニー	3.981×10^{-14}	90.9		set to quartz
斜長石	1.230×10^{-11}	45.2		labradorite
カリ長石	3.980×10^{-13}	38.0		
サポナイト(固溶体)	3.980×10^{-15}	48.0		montmorillonite
カオリナイト	6.607×10^{-14}	22.2	Palandri and Kharaka (2004) ⁴⁾	
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		diopside
角閃石	2.512×10^{-11}	94.4	Palandri and Kharaka (2004) ⁴⁾	jadeite
斜ブテロール沸石(固溶体)	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	Steeffel (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

注) k25: 25℃における反応速度定数 (mol / m²・s)、E: 活性化エネルギー (kJ / mol)

(2) 反応表面積の推定

鉱物の反応表面積は、地化学反応モデルを構築する上で、きわめて重要であるが、最も不確定性の大きいパラメータである。本検討では、2015年度業務¹⁾と同様に表 5.11-6 に示す反応表面積を各鉱物に適用した。文献 (Xu et al. 2007⁸⁾、2008⁹⁾、2011¹⁰⁾) では、鉱物の粒径を中～細粒砂岩の粒径 (0.2 mm) を想定し、初生鉱物の反応表面積を 9.1 cm²/g、黄鉄鉱を 12.9 cm²/g、粘土鉱物を 108.7 cm²/g とするが、貯留層の岩相を考慮し、初生鉱物の粒径は礫径を考慮して反応表面積を 1/100 とし、二次鉱物および粘土鉱物については文献値のままの反応表面積を与えた。また、緑泥岩は過飽和であるが、圧入井や観測井の岩石試料に緑泥石の自生が確認できなかったため¹⁾、シミュレーション上緑泥石は沈殿しない設定とした。

表 5.11-6 反応表面積の設定

実施ケース		設定
基準反応表面積 (cm^2/g)	標準	9.1
	黄鉄鉱	12.9
	粘土鉱物	108.7
反応表面積 (cm^2/g)	カルセドニー	0.091
	斜長石	0.091
	カリ長石	0.091
	方解石	0.091
	シデライト	9.1
	マグネサイト	9.1
	ドーソナイト	9.1
	ドロマイト	9.1
	サポナイト(固溶体)	1.087
	カオリナイト	108.7
	緑泥石	0.091
	海緑石	0.091
	黄鉄鉱	0.129
	斜プチロル沸石(固溶体)	0.091
	輝石	0.091
	角閃石	0.091
	析出しない鉱物	緑泥石

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（図 5.11-2）。1,000年間にわたり鉱物変化量は極めて小さいことから、地層水の安定条件は満たされていると考え、この設定が妥当であると判断した。この設定を用いて1D流動-地化学連成シミュレーションを実施した。

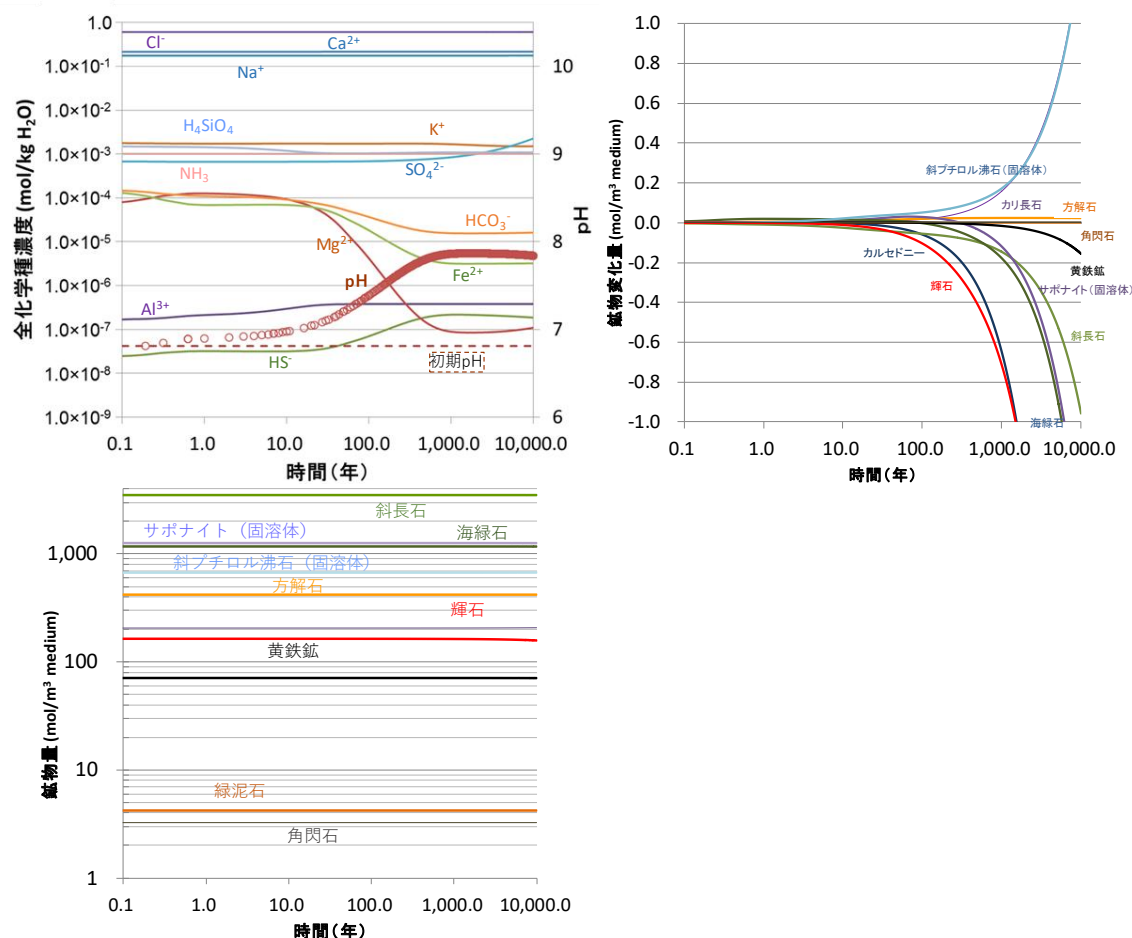


図 5.11-2 バッチ試験の結果

5.11.3 滝ノ上層 1D 流動－地化学連成シミュレーション

TOUGHREACT V2.0 を用いて、5.11.2 で設定した入力値により、1D 軸対称流動モデルを組み込み、1D 流動－地化学連成シミュレーションを実施した。

(1) 1D 流動－地化学連成シミュレーションモデルの設定

表 5.11-7 に 1D 流動－地化学連成シミュレーションに使用する 1D 軸対称流動モデルの設定条件を示す。1D 軸対称流動モデルは、同心円柱のグリッドからなり、一番中心のグリッドに CO₂ を圧入する。半径方向のグリッドサイズは指数関数的に大きくなるように設定し、CO₂ が圧入される中心のグリッドの半径は 0.108 m とし、モデルの一番外側は中心から 10,000 m の距離に位置する。圧入レートは圧入実績に基づいた（図 5.10-2）。貯留層への CO₂ 圧入量は 35 t-CO₂ となる。

表 5.11-7 1D 軸対称モデルの条件

		滝ノ上層T1部層
有効孔隙率	(%)	13.4
絶対浸透率	(mD)	0.00297
岩石圧縮率	(1/Pa)	6.79×10^{-7}
貯留層厚	(m)	358
初期温度	(°C)	95.2
初期圧力	(MPa)	33.7013
		(深度2,385.6m)

(2) 結果

図 5.11-3 に CO₂ 固定化量の経時変化を、図 5.11-4 に系全体の鉱物変化量の経時変化を示す。CO₂ 圧入後 10 年ごろから CO₂ の鉱物固定化が始まり、圧入開始から約 2,000 年後には圧入したすべての CO₂ が鉱物固定化される。CO₂ の圧入により、海緑石と斜長石が溶解することにより、海緑石から Fe²⁺と Mg²⁺が、斜長石から Ca²⁺が地層水に供給され、地層水中の HCO₃⁻と反応して、炭酸塩鉱物（シデライト、方解石、マグネサイト）として沈殿し CO₂ が鉱物として固定化される。

検討結果において炭酸塩鉱物としてドーソナイトやドロマイトが沈殿しない理由は、初期地層水組成に Ca²⁺が多く含まれており Ca²⁺がドロマイトより反応速度の速い方解石として固定されること、ドーソナイトの沈殿に必要な Al³⁺が、カリ長石として固定されているためであると推測される。また、反応速度の速い非晶質シリカに代えて、反応速度の遅いカルセドニーを沈殿可能な設定としたため、地層水へ H₄SiO₄が豊富に供給され、カルセドニーより少し反応速度の速いカリ長石と斜ブチロール沸石（固溶体）がより沈殿しやすい環境になっている。

沈殿する鉱物が炭酸塩鉱物を含めて萌別層とは異なる理由は、滝ノ上層 T1 部層の貯留層温度が、萌別層に比べて高いこと、初期地層水および初生鉱物組成が異なること等が反映された結果である。

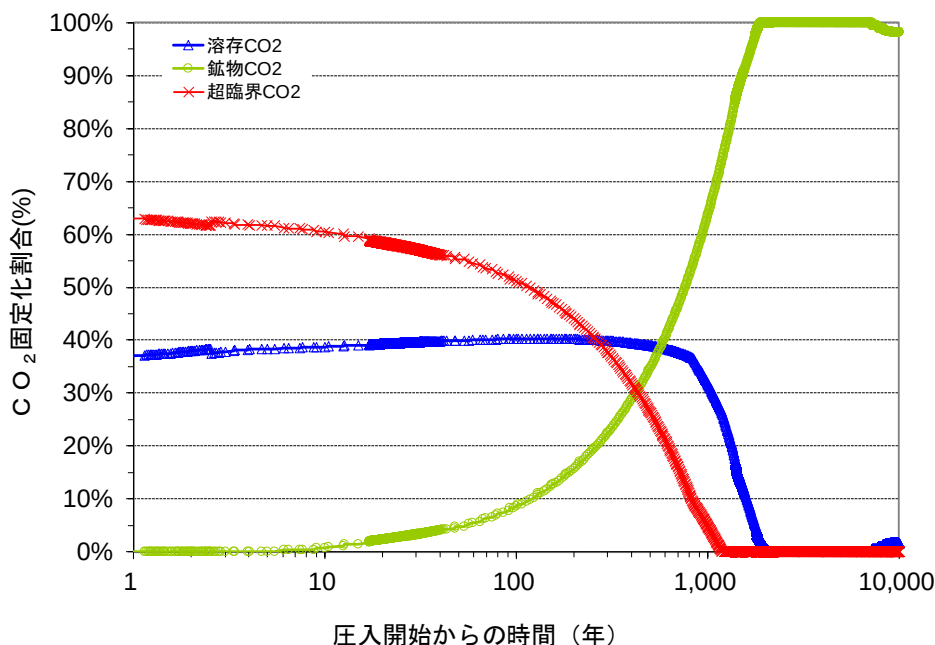


図 5.11-3 CO₂ 固定化量の経時変化

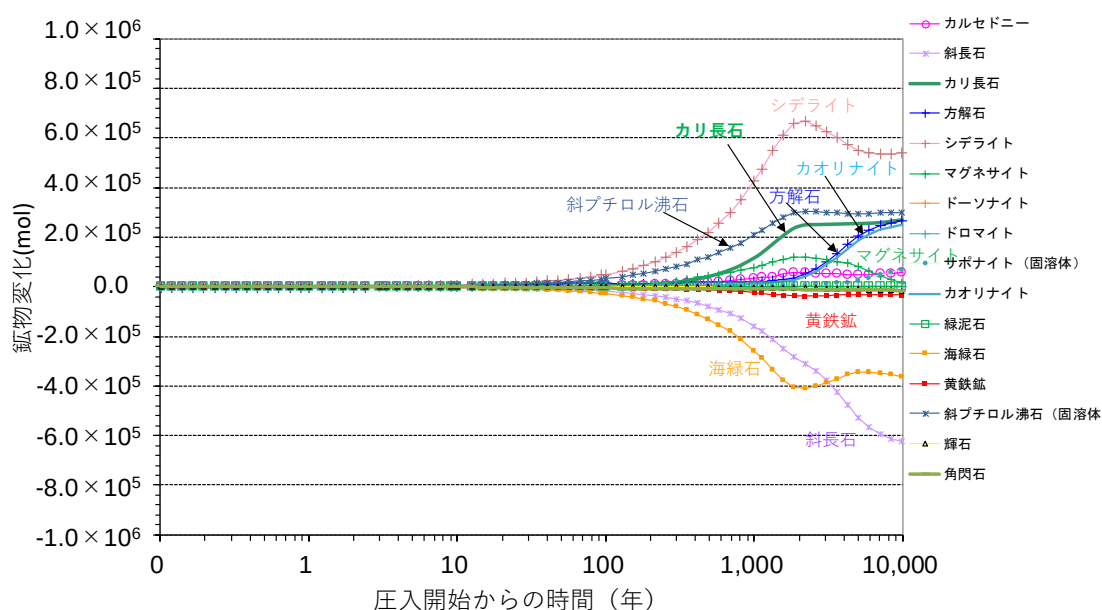


図 5.11-4 鉱物の溶解および沈殿量の経時変化

5.11.4 1D 流動－地化学連成シミュレーションのまとめ

苫小牧 OB-1 掘削時に滝ノ上層 T1 部層貯留層より採取した地層水化学組成の分析結果を基に、熱力学再構成による分析値の補正を行い、その地層水が滝ノ上層 T1 部層貯留層中において、CO₂を圧入しない状態で 10,000 年間にわたり安定的であることを前提に、貯留層を構成する鉱物の反応表面積を調整し、圧入実績を反映し貯留層へ 35 t-CO₂（地表

から地下へは 98.2 t-CO₂) を圧入する 1D 流動－地化学連成シミュレーションを実施した。その結果、海緑石と斜長石が溶解し、主にシデライト、方解石、マグネサイトとして沈殿し CO₂ が鉱物固定されることが推定された。圧入開始から 2,000 年後頃までには、圧入した CO₂ のほとんどが鉱物固定される結果となった。

1D 流動－地化学連成シミュレーションを実施したパラメータ設定により、3D 流動－地化学連成シミュレーションを実施することとした。

【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) 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)

10) 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)

5.12 滝ノ上層 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。

5.12.1 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。図 5.12-1 は両シミュレーターにより、図 5.10-1 で示したケース 2（2019 年 9 月 20 日まで圧入を継続し、累計 376 t-CO₂ を圧入するケース）の圧入シナリオによるシミュレーション結果のうち、深度 2,403.47 mTVDSS における圧力挙動の比較を示している。圧力挙動は坑内の CO₂ 置換終了時からの挙動を示した。両シミュレーターによる結果はおおむね一致する。

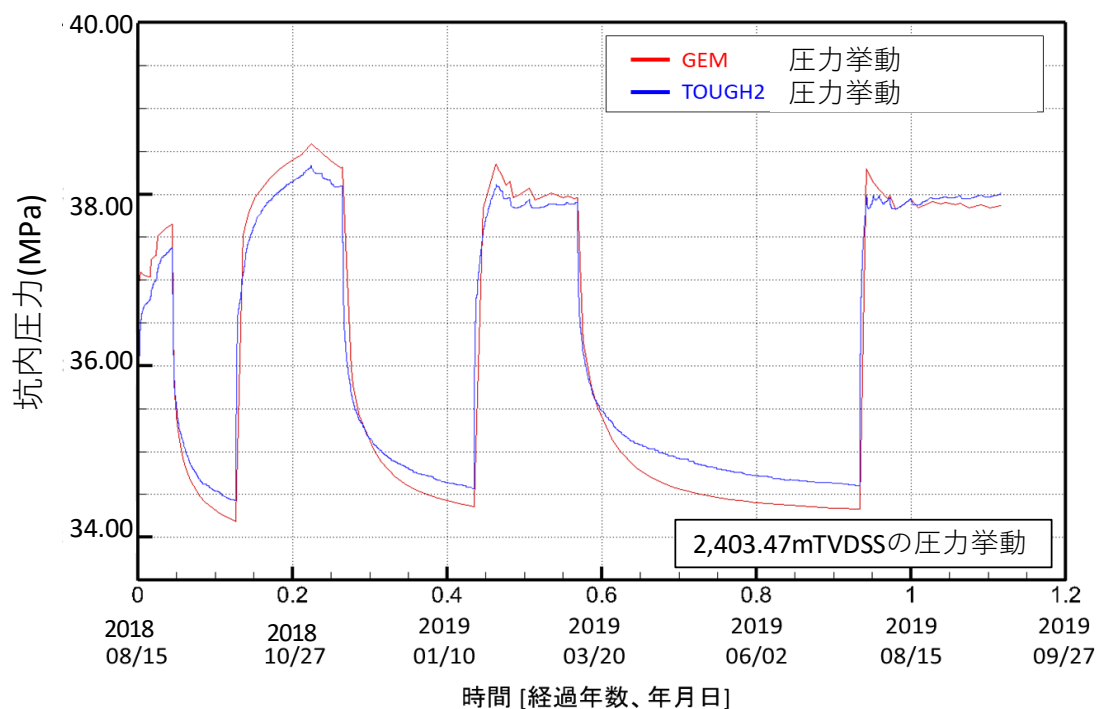


図 5.12-1 GEM と TOUGH2 による流動シミュレーション結果の比較（坑内圧力挙動）

5.12.2 滝ノ上層 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 5.11-5 の設定を 3D モデルに組み込んでシミュレーションを実施した（表 5.12-1）。

表 5.12-1 設定条件

反応表面性の調整（文献値からの調整）	
100 倍	未調整
シデライト、マグネサイト、ドーソナイト、 ドロマイト、カオリナイト	カルセドニー、斜長石、カリ長石、方解石、 サポナイト（固溶体）、緑泥石、海緑石、黄鉄鉱、 斜プチロル沸石（固溶体）、輝石、角閃石

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

① ケース 2（376 t-CO₂ 圧入ケース）

モデル全体の鉱物溶解・沈殿量の経時変化を図 5.12-2 に示す。CO₂ との反応により沈殿する主な鉱物はシデライト、斜プチロル沸石、マグネサイト、方解石、カリ長石であり、溶解量が多い鉱物は、海緑石と斜長石である。海緑石の溶解によって Fe²⁺ および Mg²⁺ が、斜長石の溶解により Ca²⁺ が地層水に供給され、地層水中の HCO₃⁻ と反応してシデライト、マグネサイト、方解石として CO₂ が沈殿し鉱物固定化される。

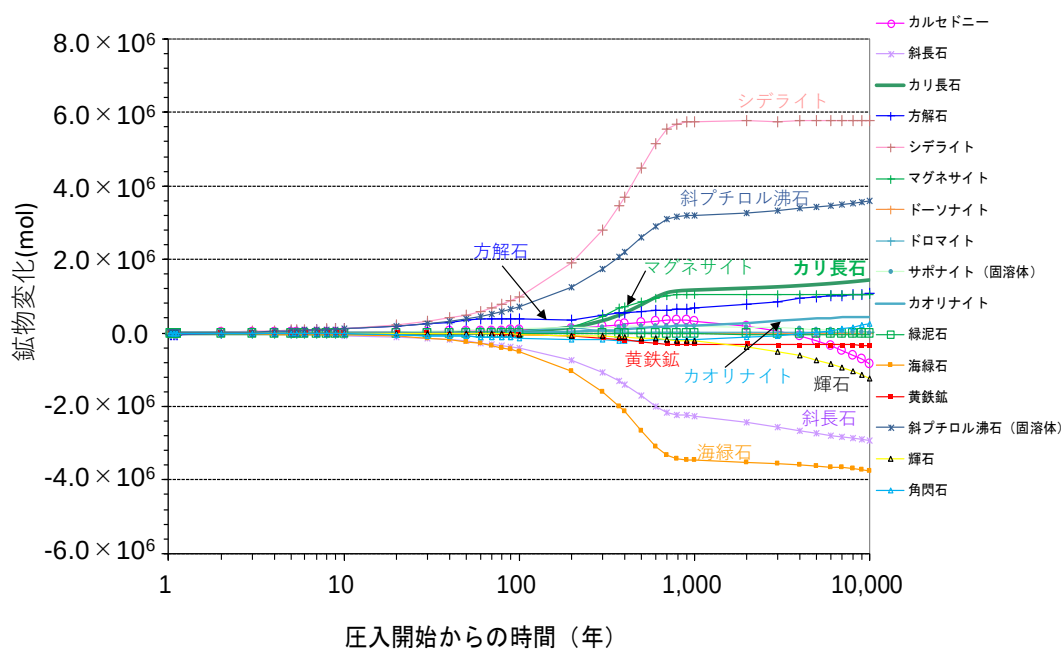


図 5.12-2 モデル全体の鉱物の溶解・沈殿量の経時変化（ケース 1）

モデル全体の CO₂ 固定化量割合の変化を図 5.12-3 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。超臨界 CO₂ は 200 年後ころまでにはほぼ消滅する。鉱物として固定される CO₂ は圧入開始から 2 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 92% 程度となる。40 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。

なお、流動地化学連成シミュレーションでは、流動シミュレーションで考慮しないCO₂、鉱物、地層水のイオン化や化学反応を考慮するため、図 5.12-3 における超臨界CO₂、溶存CO₂、残留CO₂の割合変化が図 5.10-15 に示す流動シミュレーション結果と異なるものと考えられる。

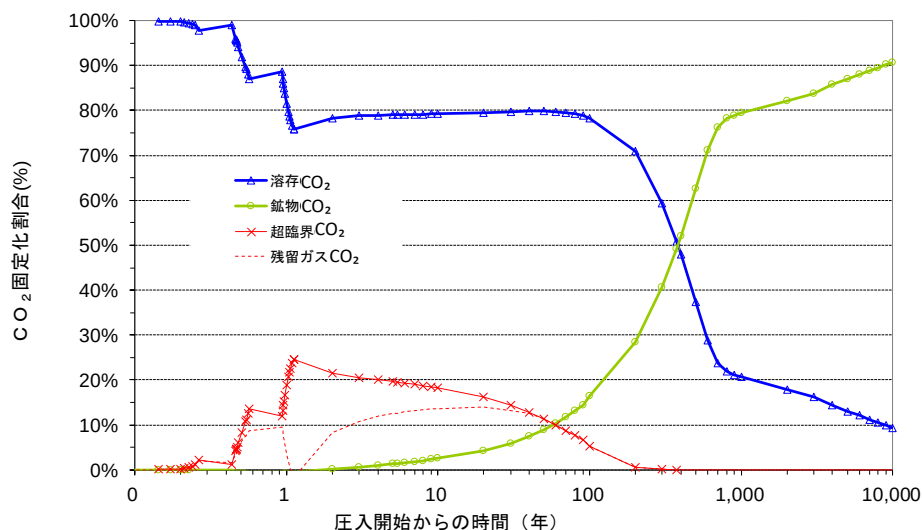
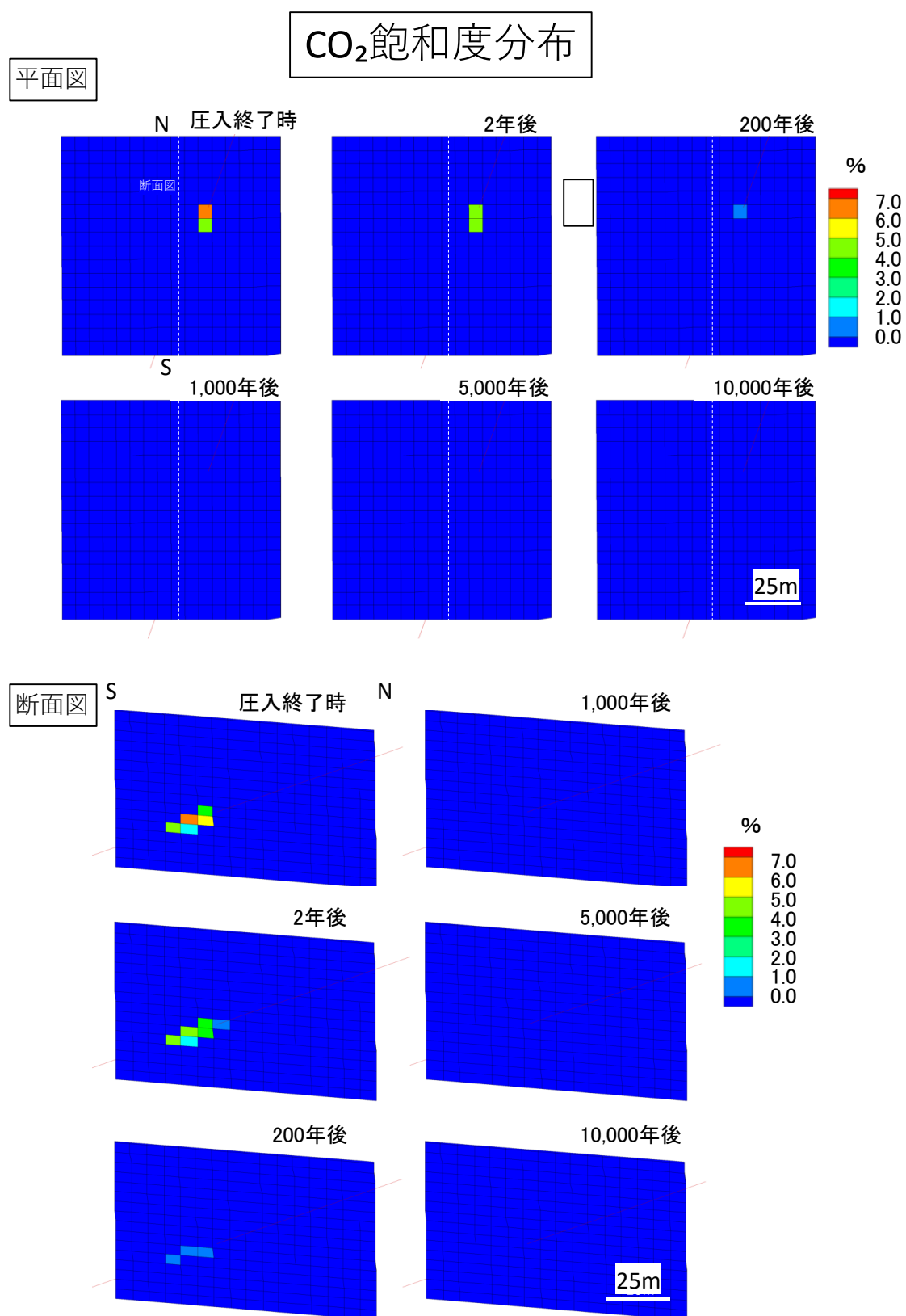


図 5.12-3 モデル全体の CO₂ 固定化量の経時変化（ケース 1）

図 5.12-4 に CO₂ 飽和度分布の経年変化を示す。30 年後ころまでに超臨界 CO₂ のすべてが残留 CO₂ となり、200 年後ころまでには残留トラップされた状態の超臨界 CO₂ も消滅する（図 5.12-3）。図 5.12-4 の 200 年後の図に示される CO₂ の分布は残留 CO₂ による飽和度を示している。

図 5.12-5 に溶解 CO₂ 量分布の経年変化を示す。図 5.12-3 における溶存 CO₂ 量の分布を示している。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。10,000 年後であっても 10% 程度の溶存 CO₂ が存在する（図 5.12-3）ため、図 5.12-5 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。



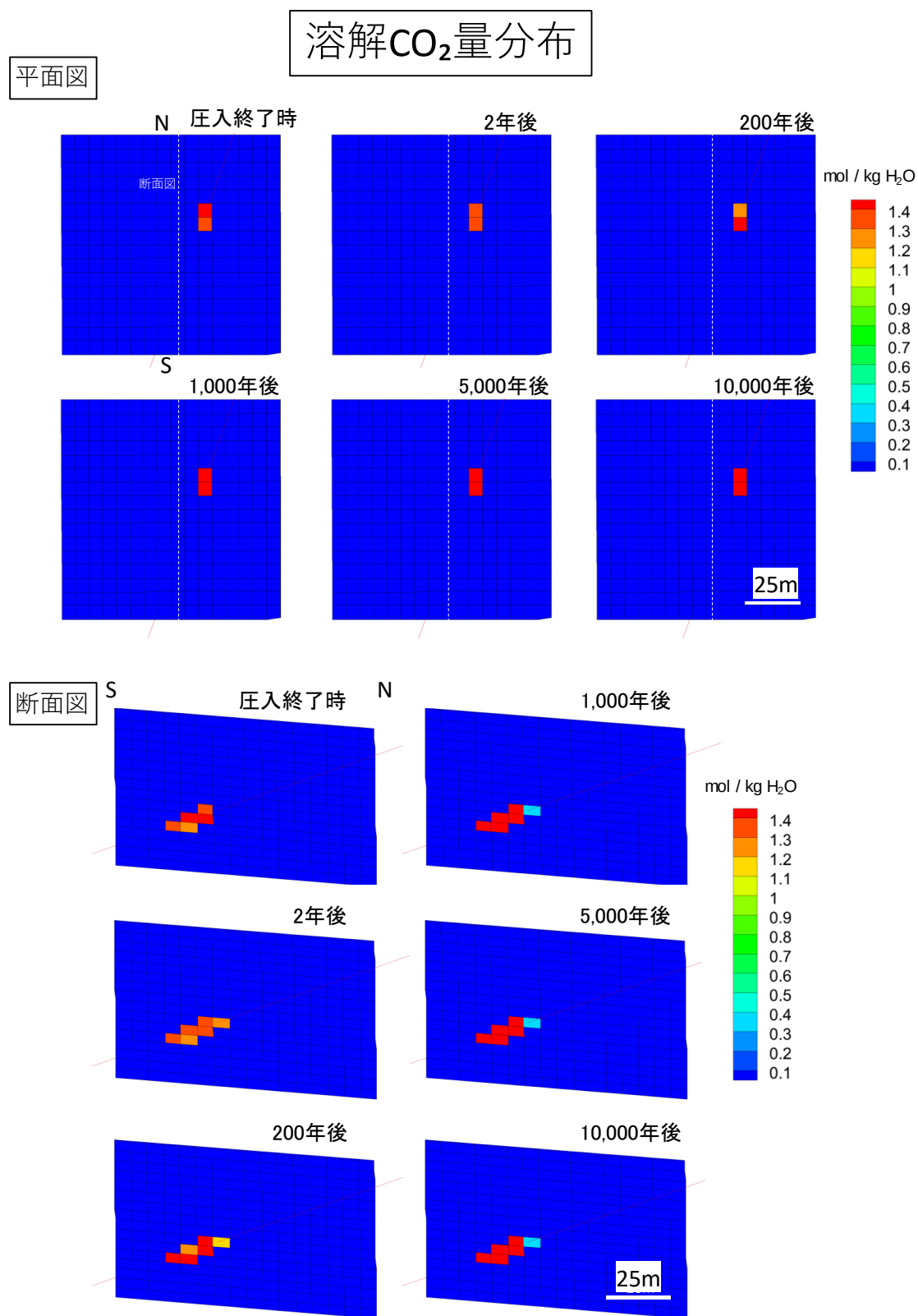


図 5.12-5 溶解 CO₂ 量分布の経年変化（ケース 1）

図 5.12-6 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 4.5 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。

図 5.12-7 に方解石、図 5.12-8 にシデライトの、図 5.12-9 にマグネサイトの沈殿量の経年変化を示す。図 5.12-10 に海緑石溶解量分布の経年変化を示す。図 5.12-3 で示すように CO_2 の鉱物化量は 100～1,000 年後の間に顕著に増加するが、各鉱物の沈殿量や溶解量もこの間に顕著であることが分かる。 CO_2 の鉱物化は溶解 CO_2 量が増加（図 5.12-5）により pH が低下した範囲（図 5.12-6）で生じるため、図 5.12-7～図 5.12-10 に示す鉱物の溶解・沈殿は溶解 CO_2 量分布量が高い範囲で生じている。 CO_2 鉱物固定量の分布も同様の傾向を示す（図 5.12-11）。

図 5.12-12 に孔隙率の、図 5.12-13 に浸透率の経年変化を示す。圧入中ならびに圧入後の一定期間は、反応速度が比較的速い方解石や海緑石の溶解により孔隙率ならびに浸透率が若干上昇し、鉱物沈殿の進行とともに孔隙率と浸透率が低下してゆく。圧入期間中の孔隙率と浸透率の増加率は最大で各々0.5%未満であり、貯留層への CO_2 圧入に対する影響は小さいものと考えられる。

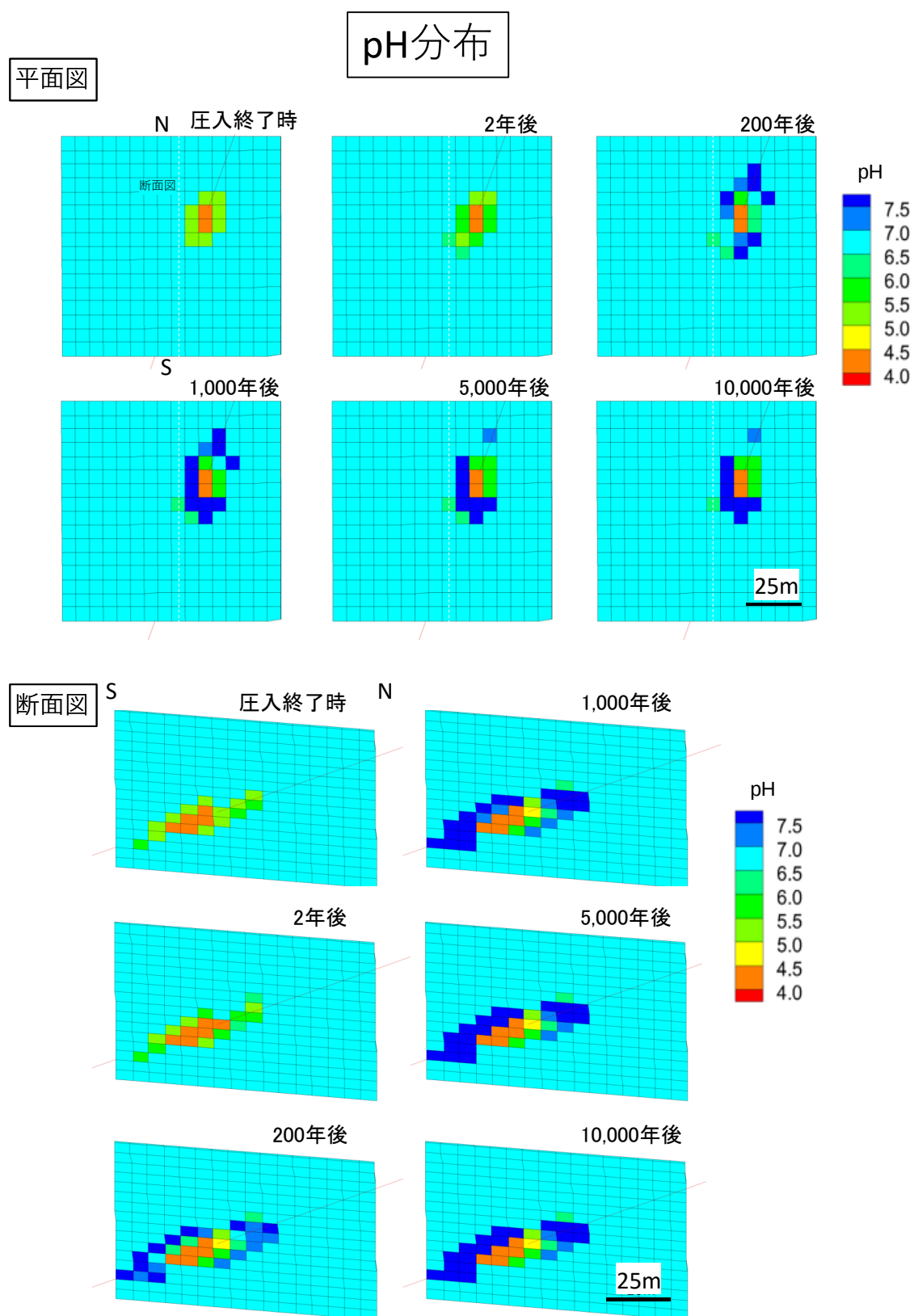


図 5.12-6 pH 分布の経年変化（ケース 1）

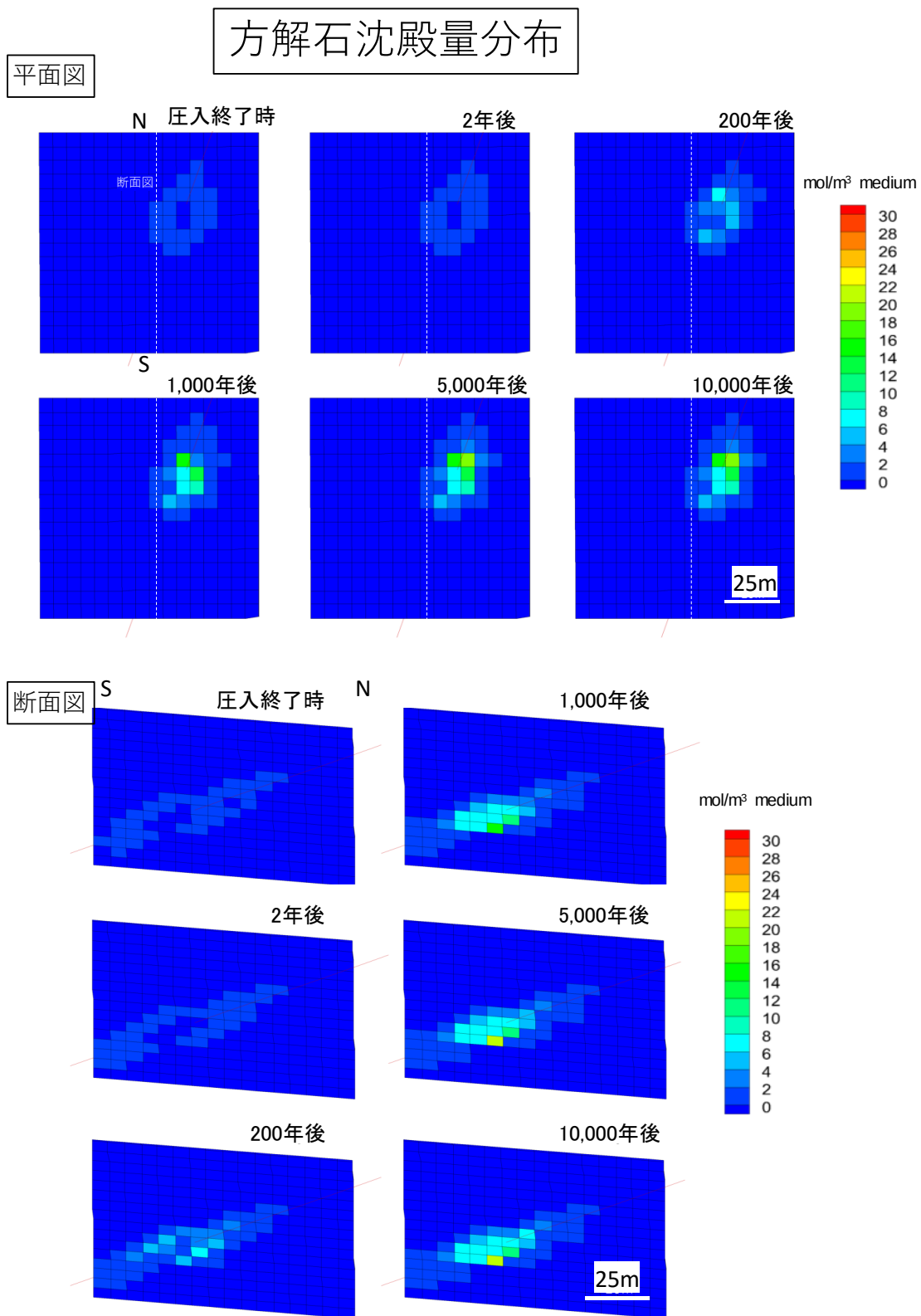


図 5.12-7 方解石沈殿量分布の経年変化（ケース 1）

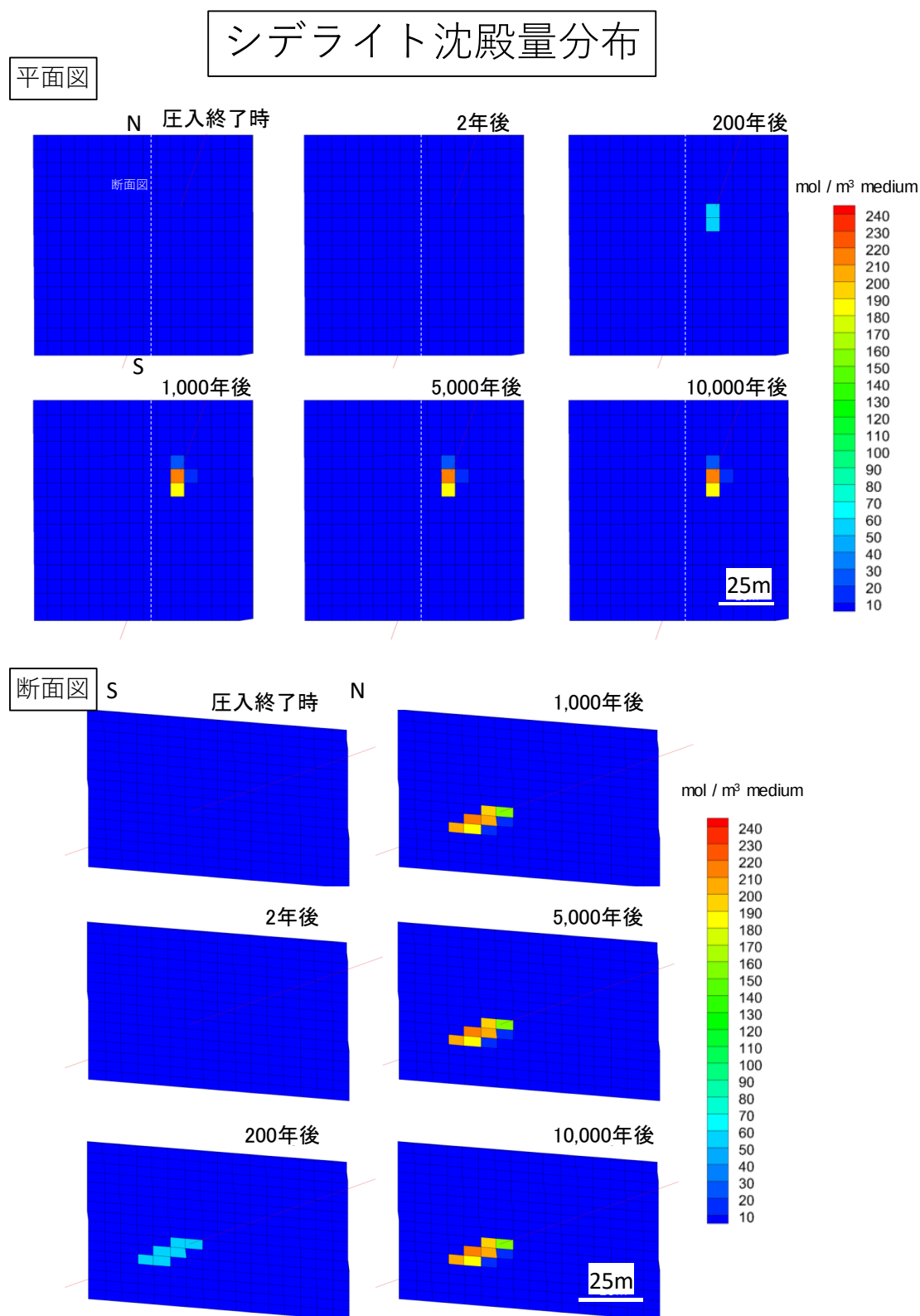


図 5.12-8 シデライト沈殿量分布の経年変化（ケース 1）

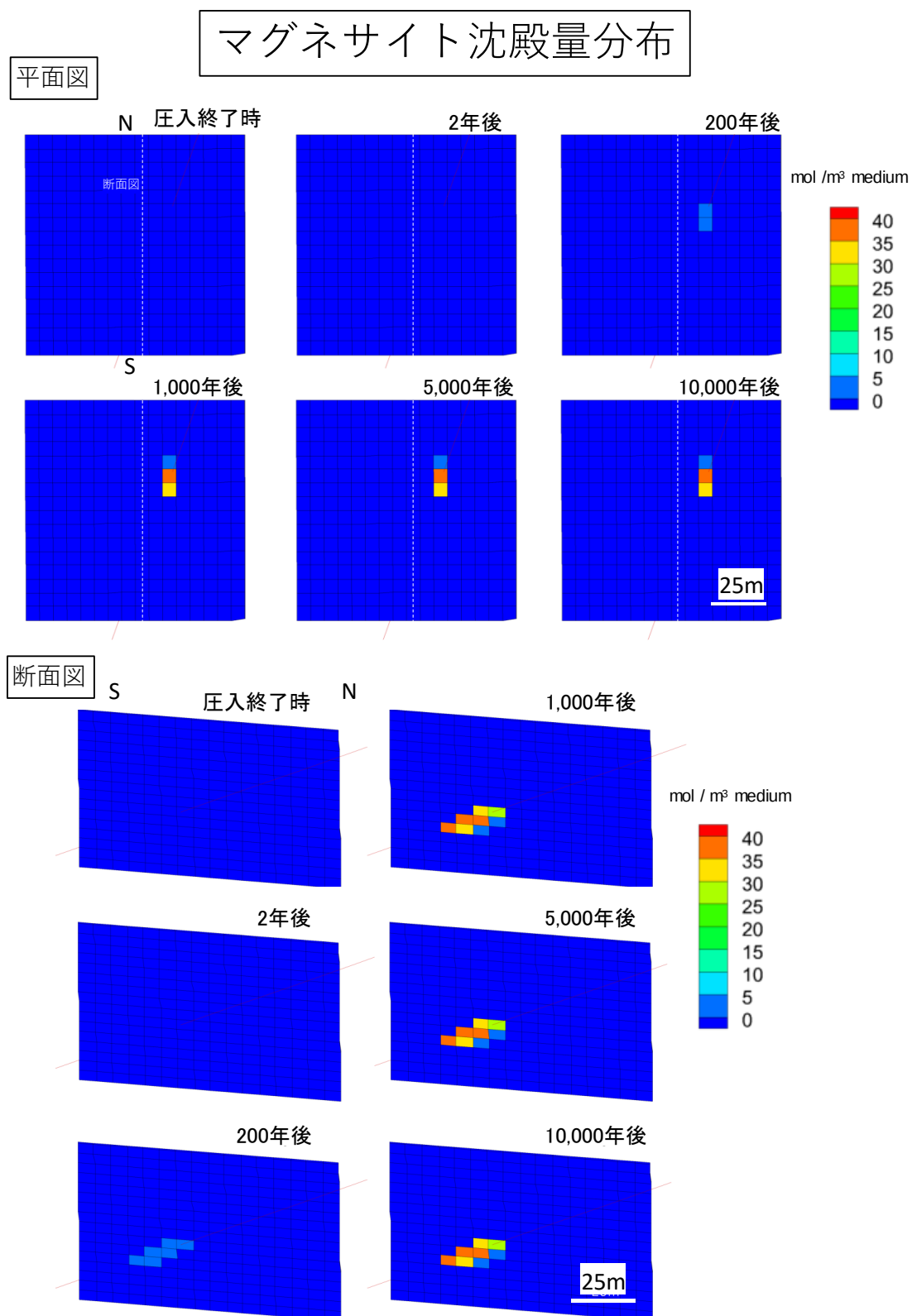


図 5.12-9 マグネサイト沈殿量分布の経年変化（ケース 1）

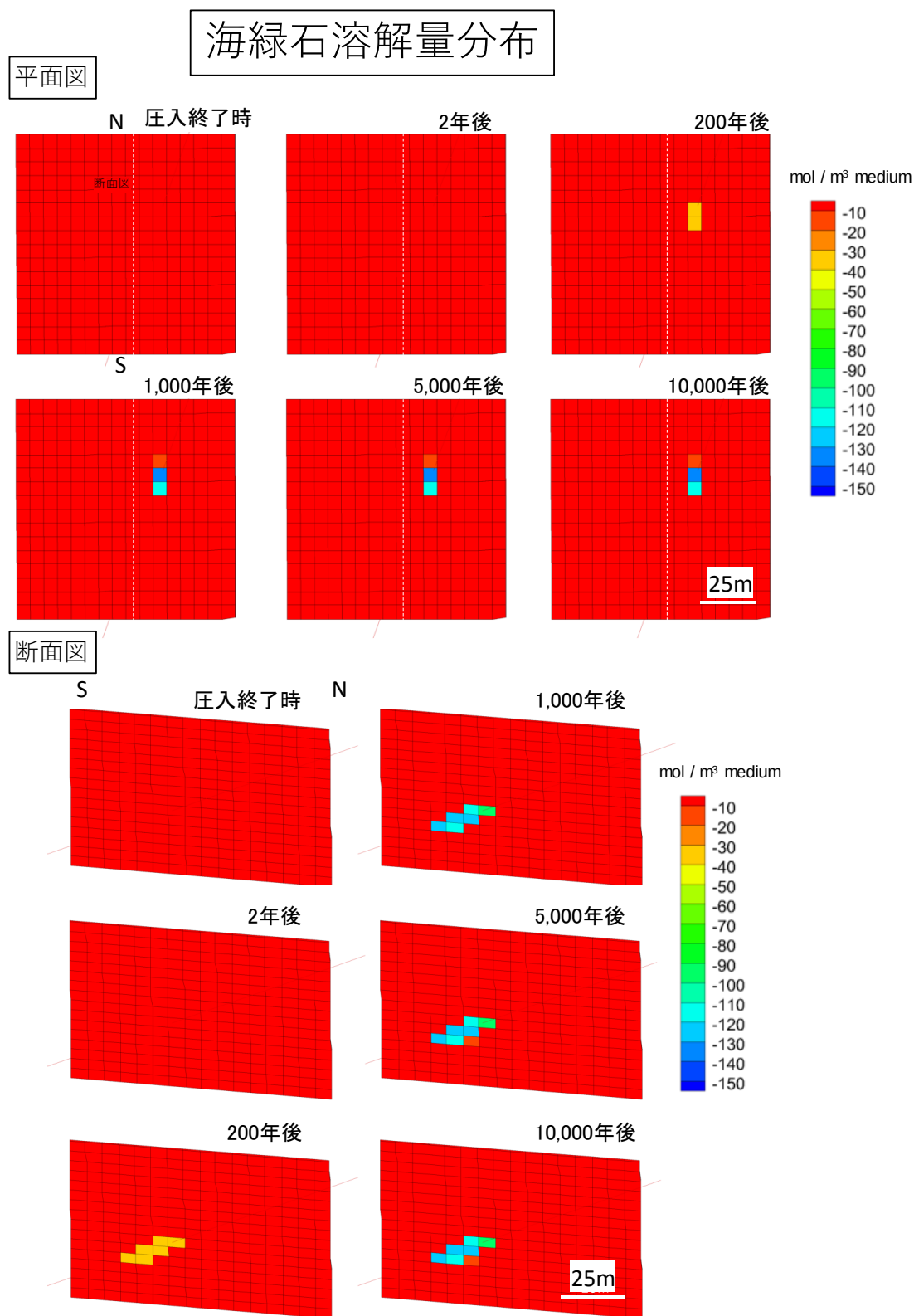


図 5.12-10 海緑石溶解量分布の経年変化（ケース 1）

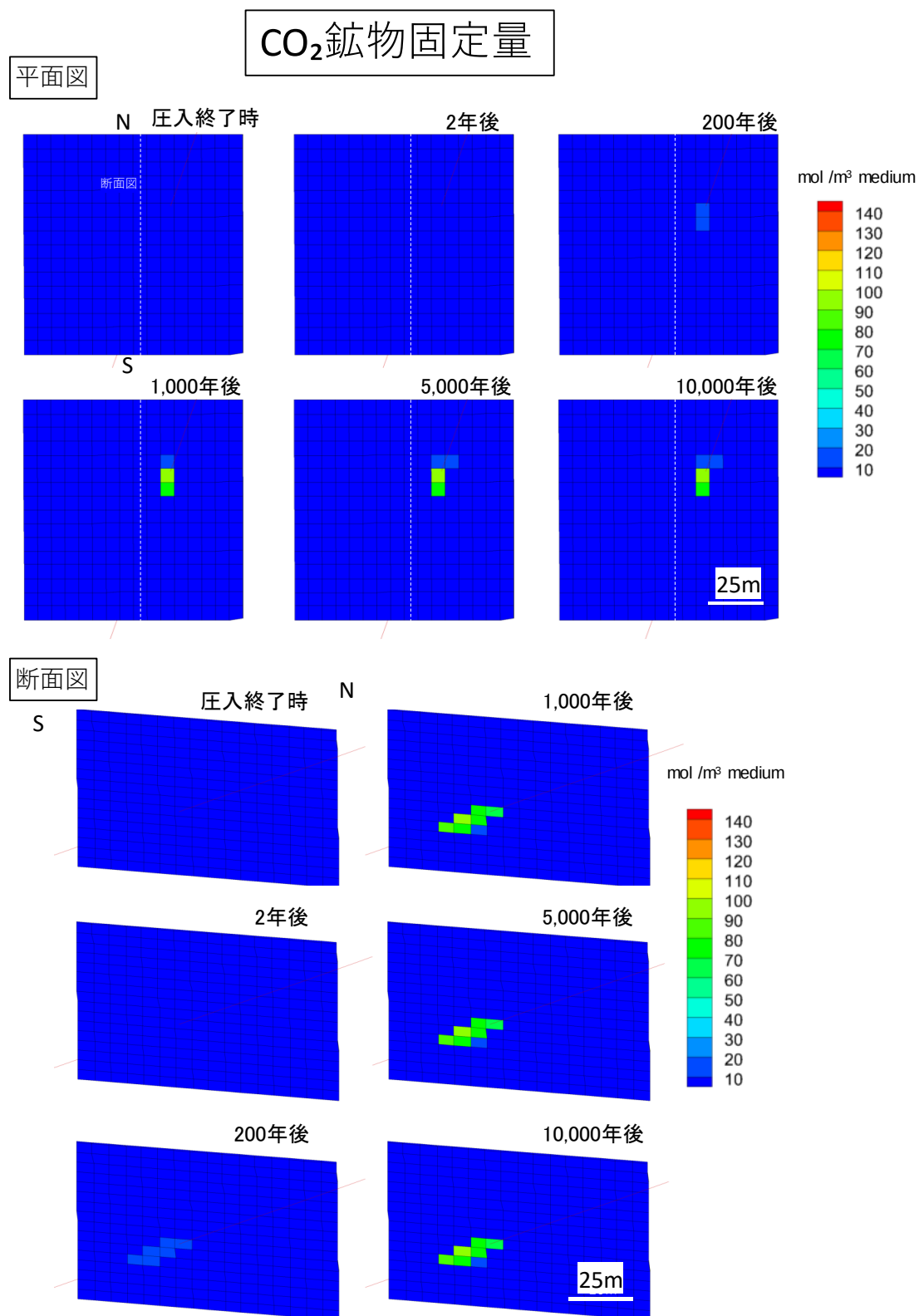


図 5.12-11 CO₂ 鉱物固定量の経時変化（ケース 1）

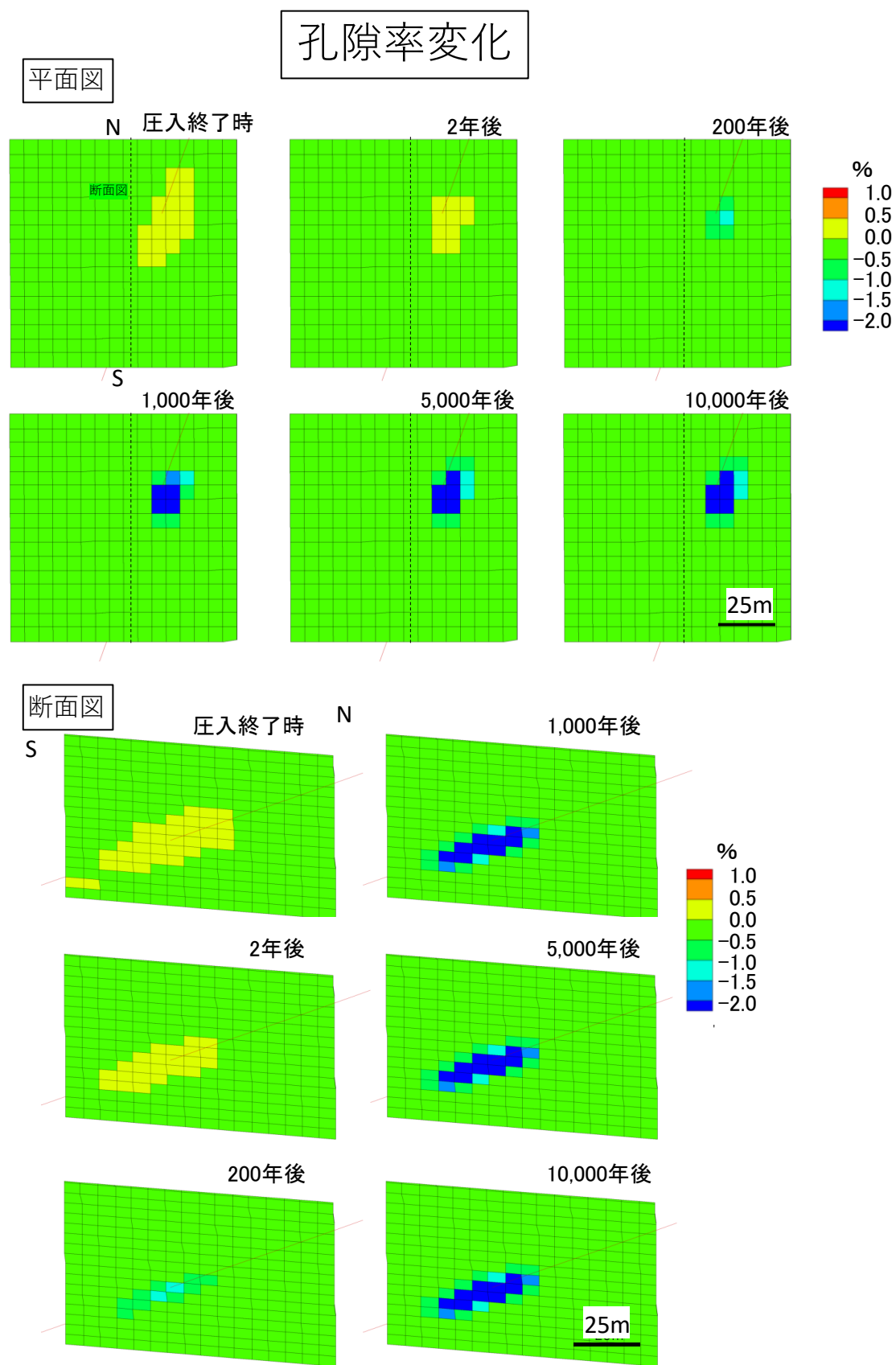


図 5.12-12 孔隙率の経時変化（ケース 1）

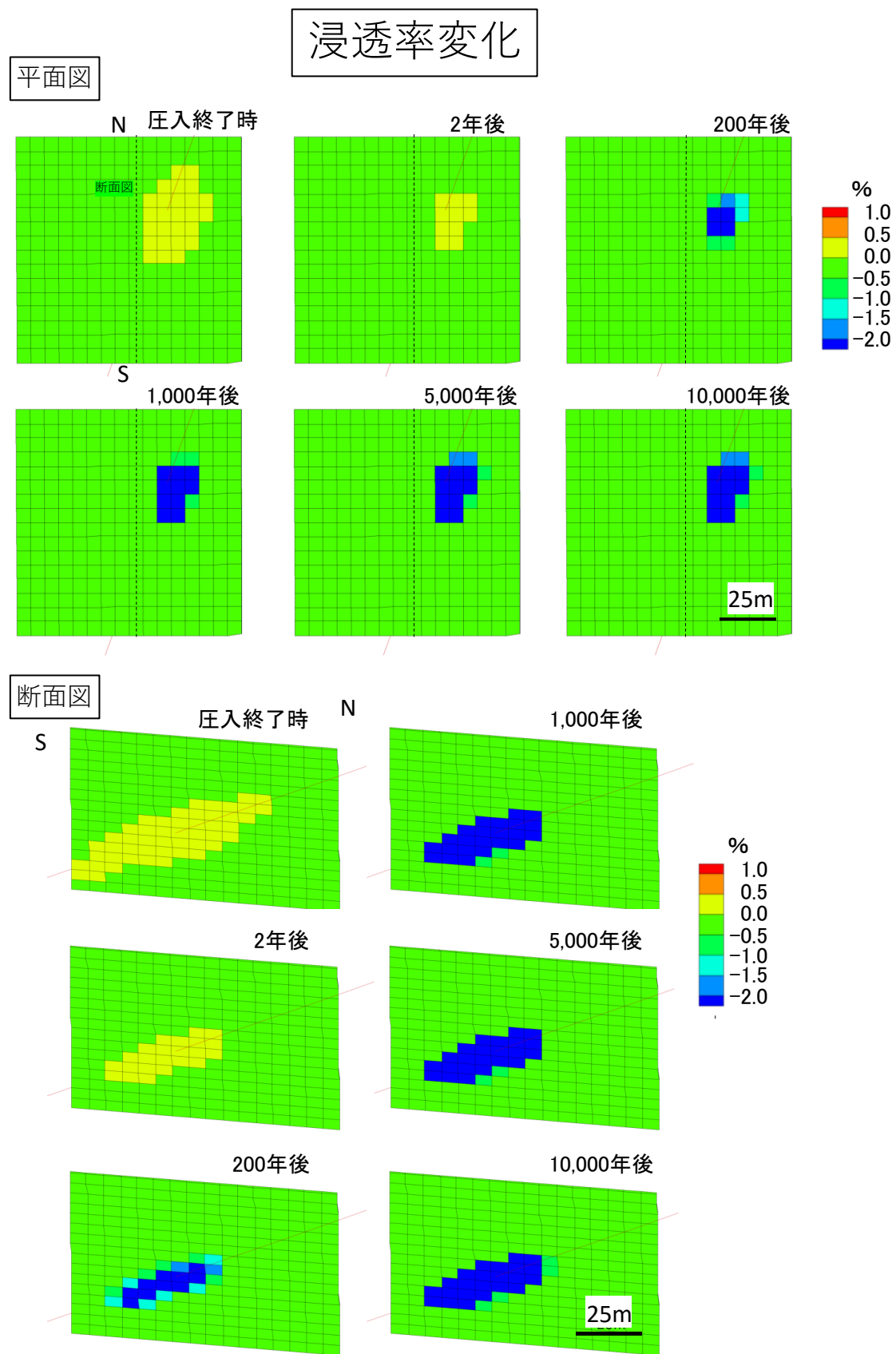


図 5.12-13 浸透率の経時変化（ケース 1）

② ケース2（98.2 t-CO₂ 圧入ケース）

CO₂の圧入量が微量であるため、CO₂は圧入後直ちに溶解する（図 5.12-14）。また、圧入開始から 10,000 年後における鉱物化量は 1%程度である（図 5.12-14）。

モデル全体の鉱物溶解・沈殿量の経時変化を図 5.12-15 に示す。反応により沈殿する主な鉱物は、カルセドニー、輝石、海緑石、斜長石等であり、生成する鉱物は角閃石、斜プロチノル沸石、カリ長石等となる。これらの鉱物の生成・沈殿は、1D 流動－地化学連成シミュレーションの結果と明らかに異なり（図 5.11-4）、バックグラウンドで生じる地層水中での水・岩石反応であると考えられる。1D 流動－地化学連成シミュレーションでは、少量の CO₂の圧入挙動を解析するために圧入対象グリッドを単純化し、極小間隔（半径 0.108 m）に設定したが、3D モデルのグリッドシステムでは、計算時間等を考慮した現実的な範囲で極力グリッドサイズを小さくしたもの、現状の圧入量に対しては、グリッドサイズの細分化が十分ではない可能性がある。

鉱物の溶解や沈殿に関する経時変化の図面は省略する。

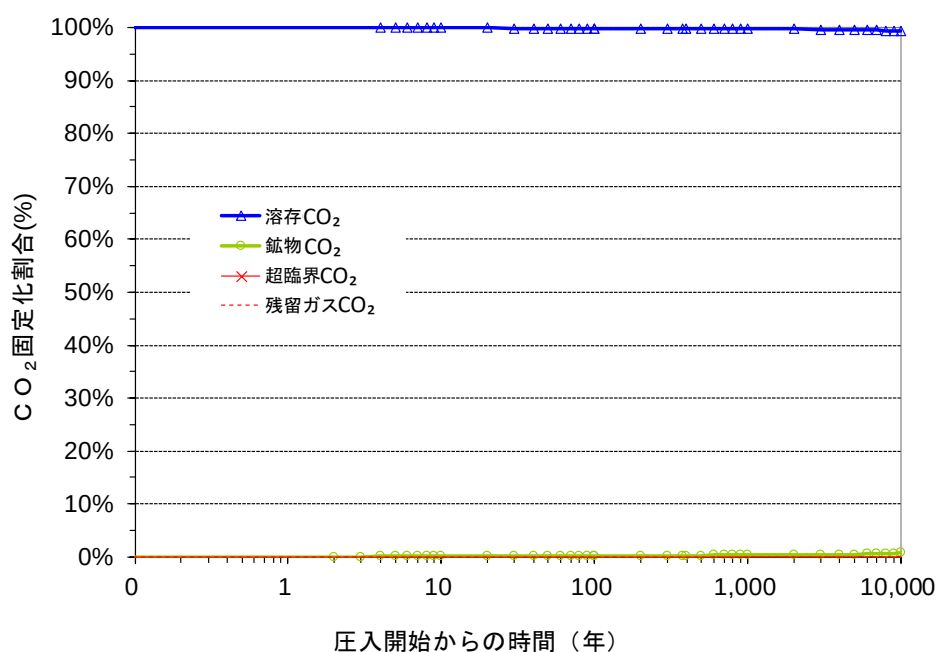


図 5.12-14 CO₂ 固定化量の経時変化（ケース 2）

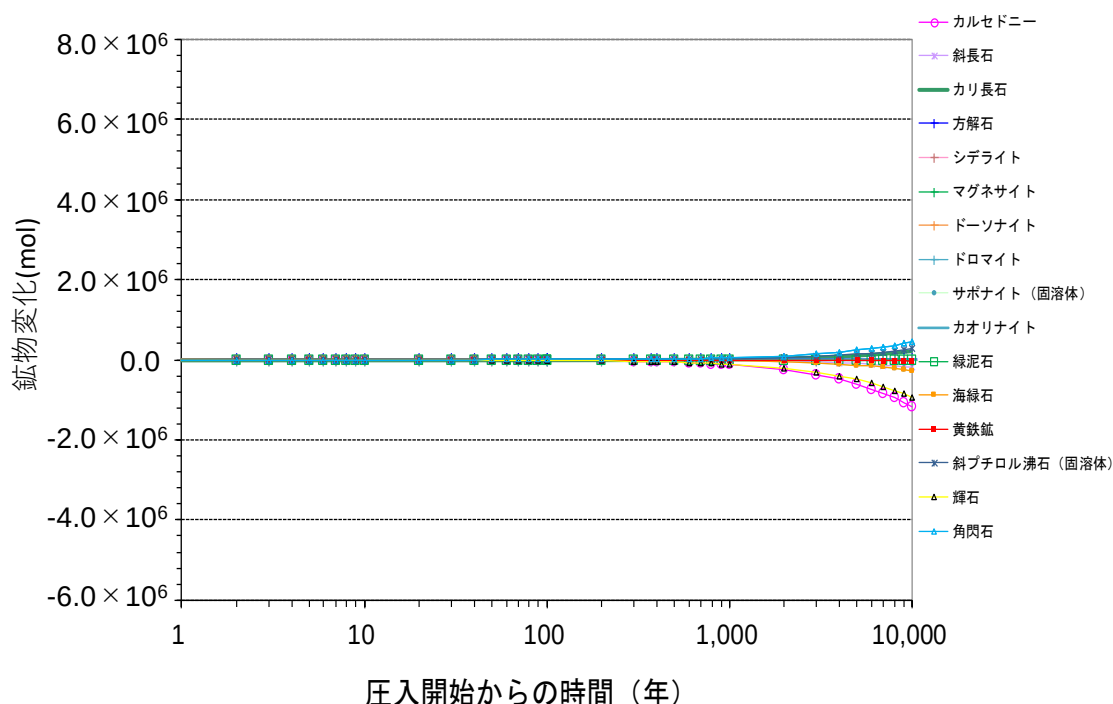


図 5.12-15 モデル全体の鉱物の溶解・沈殿量の経時変化（ケース 2）

(3) 滝ノ上層 3D 流動-地化学連成シミュレーションのまとめ

1D 流動-地化学連成シミュレーションと基本的に同様の物性値パラメータを用いて作成した 3D 貯留層モデルを用いて、376 t- CO_2 を圧入するケース（ケース 1）と 98.2 t- CO_2 を圧入するケース（ケース 2）の 1D 流動-地化学連成シミュレーションを実施した。ケース 2 では、圧入した CO_2 量が少なく妥当な解析結果が得られなかった。

CO_2 の鉱物固定は、海緑石の溶解によって Fe^{2+} および Mg^{2+} が、斜長石の溶解により Ca^{2+} が地層水に供給され、地層水中の HCO_3^- と反応してシデライト、マグネサイト、方解石として CO_2 が沈殿し鉱物固定化されるメカニズムであることが確認された。

圧入した CO_2 のうち、超臨界 CO_2 は 200 年後ころまでにはほぼ消滅する。鉱物として固定される CO_2 は圧入開始から 2 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 年後には圧入した CO_2 の 92% 程度となる。40 年後ころまでにはすべての CO_2 が移動しない状態となることが推定された。

【参考文献】

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