

### 3.1.2 萌別層評価結果

#### (1) 貯留層評価

2.8.1 で記載のとおり、萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約 100m である。

萌別層砂岩層は、比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられる。シーケンス層序学でいう高海水準期堆積体 (HST) に相当し、ファンデルタ・陸棚 (Shelf)・斜面 (Slope) の 3 つに分類できる。少なくとも 5 つファンデルタが北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈した。ファンデルタは北東部を中心に発達し、砂礫岩層は堆積物供給源である北東側がより粗粒で、南西に向かって細粒になる傾向にあると推定した。

以上のことから、ファンデルタと解釈した北東部に存在する砂礫岩層が圧入対象となり得ると考えられる。

#### (2) 遮蔽層評価

2.8.2 で記載のとおり、萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数 100m の比較的深い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さが分布する。コア試験結果からは水浸透率が  $0.80 \times 10^{-3}$ ～ $1.73 \times 10^{-3}$  mD、スレシヨルド圧力が 0.75MPa、1.65MPa、1.67MPa の結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で 1.50 の強度を確認している。

以上の結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。

#### (3) シミュレーション概要

##### ① 概要

シミュレータとして GEM (ver. 2010.12) を使用し、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛管圧力と低浸透性による物理的トラッピング、ガス相対浸透率のヒステリシスによる残留 CO<sub>2</sub>トラッピング、CO<sub>2</sub>の地層水への溶解による溶解トラッピングである。

第 2 章にて作成した属性モデルにおいて分類した堆積相区分について、シミュレーションモデルでは以下の通り大きく 2 種類に整理し、それぞれに岩相を設定した。

砂岩：堆積相区分4・8・9

泥岩：堆積相区分1・2・3・5・6・7・10

CO<sub>2</sub>圧入井（圧入位置）は、萌別層砂岩層を対象としたA Iバージョン結果を基に、貯留CO<sub>2</sub>の拡がり三次元弾性波探査の範囲内に留まるようにすることも考慮して、想定する陸上基地からの掘削方位を設定し、仕上げ区間は圧入井の萌別層砂岩層にあたる全区間とした。また、萌別層砂岩層における坑井の最終坑径を8.5インチ（半径0.10795m）、チュービング径を3.5インチ（内半径0.038m）とした。

圧入時に許容される最大坑底圧力については、苫小牧CCS-2の萌別層泥岩層下部のリークオフ圧力が等価泥水比重で1.50であるので、貯留層上限深度でのリークオフ圧力を計算し、その90%を最大坑底圧力とした。すなわち、CO<sub>2</sub>圧入井において、グリッドモデルでの貯留層最上位での垂直深度が1,011.93mであることからリークオフ圧力を求め、この90%（13,410kPa）をCO<sub>2</sub>圧入時に許容される最大坑底圧力とした。

シミュレーションでは、CO<sub>2</sub>の圧入目標量を25万トン/年×3年として、表3.1-4で示す各ケースに対してシミュレーションを実施した。

## ② パラメータ

シミュレーションパラメータは苫小牧CCS-1および苫小牧CCS-2で得られたデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等）および文献値により表3.1-3に示す値を用いた。

表 3.1-3 萌別層砂岩層 シミュレーションパラメータ

モデル	萌別層砂岩層 2011 モデル	
サイズ	8km × 15km × 1,500m	
グリッド	40 × 75 × 43 Grid	
アクティブ・ブロック数	97,024	
基準温度	44.78°C (1,046.835 mVD)	
基準圧力	10,669.4kPa (1,046.835mVD)	
CO <sub>2</sub> 圧入レート、圧入期間	250,000 トン/年 × 3 年	
圧入圧力上限	13,410kPa	
帯水層容積 (面積 × 層厚 × 孔隙率)	49 × 10 <sup>9</sup> Rm <sup>3</sup>	
岩石性状	砂岩	泥岩
平均孔隙率	0.281	0.342
平均浸透率 (mD)	17.0	0.00173
圧縮率 (kPa <sup>-1</sup> )	1.532 × 10 <sup>-6</sup> 測定値	
塩分濃度 (ppm NaCl)	18,000 (Cl <sup>-</sup> =10,350mg/L)	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 Krg	測定値	Corey (1954) <sup>1)</sup>
液相 相対浸透率 Krw	測定値	van Genuchten (1980) <sup>2)</sup>
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05	0.05
不動水飽和率 Swir	0.49 測定値	0.638 Bennion (2007) <sup>3)</sup>
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.275 Holtz (2002) <sup>4)</sup>	—
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	van Genuchten (1980) <sup>2)</sup>	
Pc (kPa)	4.04	750

## 【参考文献】

- 1) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly*, November, 38-41.
- 2) van Genuchten, M. Th., 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- 3) Bennion, D.B., 2007, Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks: *paper SPE 106995-MS*.
- 4) Holtz, M. H., 2002, Residual Gas Saturation to Aquifer Influx: A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction: *paper SPE 75502*.

## ③ ケーススタディ

以下のケーススタディを実施し、各パラメータがシミュレーションの結果に与える影響を検討した。各ケースの概要を表 3.1-4 にまとめる。

## a) ベースケース (表 3.1-4 におけるケース①)

水平浸透率は苫小牧 CCS-1 圧入テストにおける圧力解析結果 (No. 3 圧入テスト: 25mD, No. 3a 圧入テスト: 9mD) の平均値  $k_h=17\text{mD}$  をベースケースにおける水平浸透率 ( $k_h$ ) として設定した。垂直浸透率は水平浸透率の 1/10 ( $k_v/k_h=0.1$ ) として設定した。

## b) 砂岩層の浸透率の影響 (表 3.1-4 におけるケース②~④)

砂岩の浸透率 (水平浸透率) について浸透率に振幅があった場合の圧入挙動について把握することを目的として、ベースケースに対して、高浸透率ケース ( $k_h=25\text{mD}$ ) および低浸透率ケース ( $k_h=9\text{mD}$ ) として検討した。

水平浸透率/垂直浸透率 ( $k_v/k_h$ ) 比についても、ベースケースの 0.1 に対して圧入テストにおける解析結果の平均値 ( $k_v/k_h=0.675$ ;  $k_v=11.475\text{mD}$ ) を与えることでその影響について検討した。

## c) 遮蔽層性状の影響 (表 3.1-4 におけるケース⑤)

遮蔽層性状が劣る場合の CO<sub>2</sub> 挙動を把握することを目的として、苫小牧 CCS-2 コア試料の残差圧力測定 (N<sub>2</sub>-水系) で正しい測定ができなかった試料の測定値 (若しくは低い測定値) を使用し、水浸透率がベースケースより高く ( $k_w=7 \times 10^{-3}\text{mD}$ )、スレシヨルド圧力が極端に低い ( $P_c(\text{CO}_2)=0.012\text{MPa}$  (水-N<sub>2</sub>系スレシヨルド圧力:  $P_c(\text{N}_2)$  系 = 0.028MPa から換算)) ケースを想定して検討した。

## d) 萌別層砂岩層上限の変更 (表 3.1-4 におけるケース⑥)

図 2.8-4 に示すように、ベースケースにおいて堆積相区分 5 (萌別層下部 TST-陸側下部) については、堆積相解釈において対象地域全体に広がっていると仮定しているため、本来、砂礫岩層である堆積相区分 4 に CO<sub>2</sub> は移動することはない。しかしながら、もし何らかの理由で堆積相区分 4 にも CO<sub>2</sub> が貯留された場合にどのような挙動を見せるかを

把握するために、堆積相区分4のトップが萌別層砂岩層トップとなるように本来は泥岩からなる堆積相区分5に砂岩のパラメータを設定したシミュレーションを実施した。

ただし、堆積相区分4、5は圧入対象とはしないため、パーフォレーションを設定せず、圧入圧力の上限もベースケースなど他のケースと同様にした。

e 帯水層容積の影響（表3.1-4におけるケース⑦）

周辺部を含めた既存地質データから、萌別層砂岩層は、地質モデル構築範囲外側への拡がりが確認されている。ケース①～⑥では、外側の帯水層容積についても外周部セルの孔隙容積に反映させている。ケース⑦では帯水層容積を、貯留層の分布域が3Dデータの範囲内に限られるケース（シミュレーションモデルの外周グリッドのVolume Modifyを行わない）を想定した。

表 3.1-4 ケーススタディにおいて使用した各岩相に与えたパラメータ

ケース名	砂岩相				泥岩相				帯水層容積 ( $\text{km}^3$ )
	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	垂直浸透率/ 水平浸透率	堆積相	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	スロート圧力 (MPa)	堆積相	
①ベースケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^9$
②低浸透率	9	0.9	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^9$
③高浸透率	25	2.5	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^9$
④高kv/kh	17	11.475	0.675	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^9$
⑤遮蔽性能 (低)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.007	0.007	0.012	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^9$
⑥前別層砂岩層上層変更	17	1.7	0.1	4, 5, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 6, 7, 10	$49 \times 10^9$
⑦帯水層容積 (小)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$3 \times 10^9$

#### (4) シミュレーションによるCO<sub>2</sub>の圧入挙動

上述の7ケースについて25万トン/年の圧入レートで3年間(75万トン)の挙動予測シミュレーションを行ったところ、ベースケースおよび高浸透率ケースにおいて25万トン/年×3年間の圧入が可能であることを確認した。

低浸透率ケースでは、圧入開始後、坑底圧力(貯留層上限深度での坑内圧力)がすぐに圧入圧力の上限(約13.4MPa)に達することから、圧入レートを14~16万トン/年に減少せざるをえなくなり、その結果、累計圧入量が45.2万トンであった。

以上の通り、貯留可能量に影響を与える要因が水平浸透率であることから、本項では水平浸透率が異なるケースのCO<sub>2</sub>圧入挙動について述べる。

##### ① CO<sub>2</sub>圧入時の挙動

###### a ベースケース

図3.1-18にベースケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。想定圧入レートおよび期間である25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO<sub>2</sub>を圧入可能であることを確認した。ベースケースでは、坑底圧力が、圧入圧力上限(13.4MPa)以下で圧入することができ、圧入終了時点での坑底圧力は13.2MPaとなった。圧入終了後に坑内圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.6MPaとなり、以後ゆっくりと圧入前の地層圧(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

###### b 低浸透率ケース

図3.1-19に低浸透率ケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。低浸透率ケースでは、圧入開始後すぐに坑底圧力が圧入圧力上限(13.4MPa)に達して、圧入レートを11~16万トン/年、累計圧入量が45.2万トンとなった。ベースケースと同様に圧入終了後に坑底圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.7MPa程度となり、以後ゆっくりと圧入前の圧力(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

###### c 高浸透率ケース

図3.1-20に高浸透率ケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。想定圧入レートおよび期間である25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO<sub>2</sub>を圧入可能であることを確認した。高浸透率ケースでは坑底圧力が、圧入圧力上限(13.4MPa)以下の圧力で圧入することができ、圧入終了時点では12.5MPaとなった。他のケースと同様に坑底圧力は圧入終了後に圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.6MPa程度となり、以後ゆっくりと圧入前の圧力(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

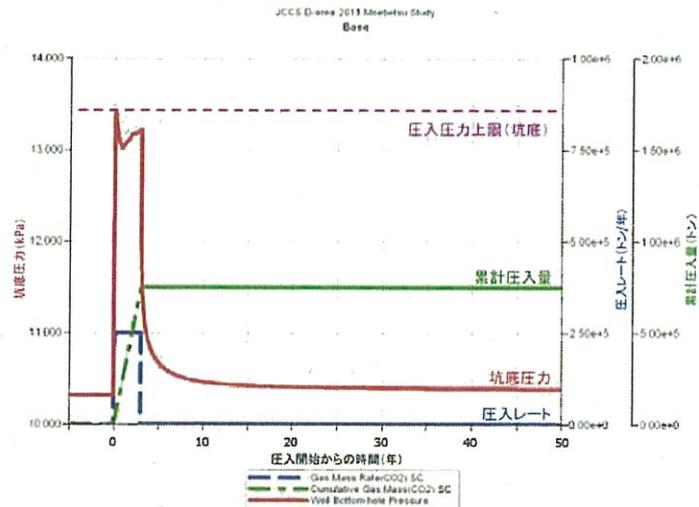


図 3.1-18 ベースケースにおける坑底圧力の時間(年)的变化

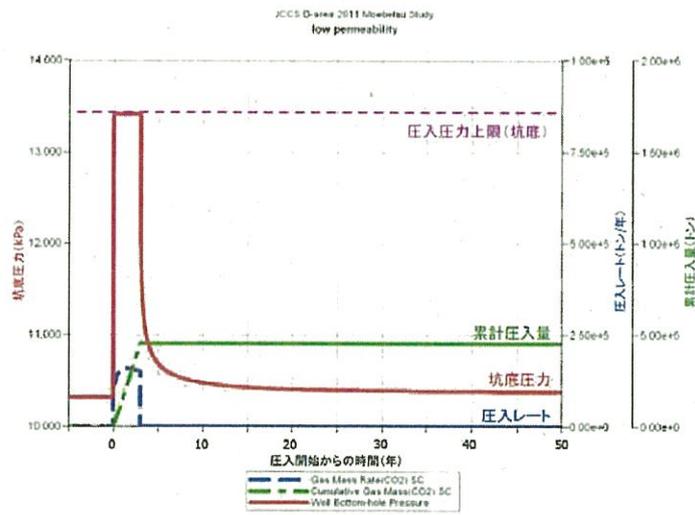


図 3.1-19 低浸透率ケースにおける坑底圧力の時間(年)的变化

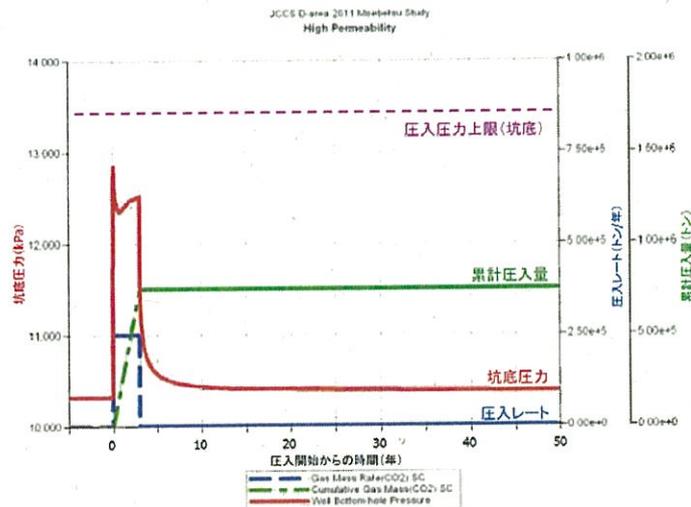


図 3.1-20 高浸透率ケースにおける坑底圧力の時間(年)的变化

② 貯留層の圧力分布

a ベースケース

図 3.1-21 にベースケースにおける圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 800m、東西約 800m の範囲に 1,000kPa (圧入前の地層圧の約 10%) 以上に上昇した領域が、南北に約 6km、東西約 6km の範囲に 100kPa (圧入前の地層圧の約 1%) 以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

b 低浸透率ケース

図 3.1-22 に低浸透率ケースにおける圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 600m、東西約 400m の範囲に 1,000kPa (圧入前の地層圧の約 10%) 以上に上昇した領域が、南北に約 4km、東西約 4km の範囲に 100kPa (圧入前の地層圧の約 1%) 以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

c 高浸透率ケース

図 3.1-23 に圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 800m、東西約 800m の範囲に 1,000kPa (圧入前の地層圧の約 10%) 以上に上昇した領域が、南北に約 6.5km、東西約 4km の範囲に 100kPa (圧入前の地層圧の約 1%) 以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

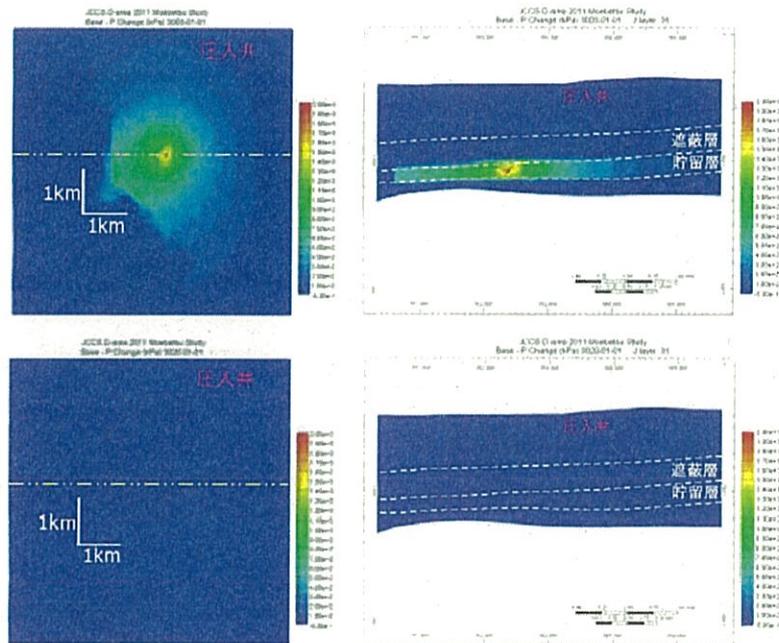


図 3.1-21 CO<sub>2</sub>圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（ベースケース）  
 （上：3年後 下：20年後）  
 （左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

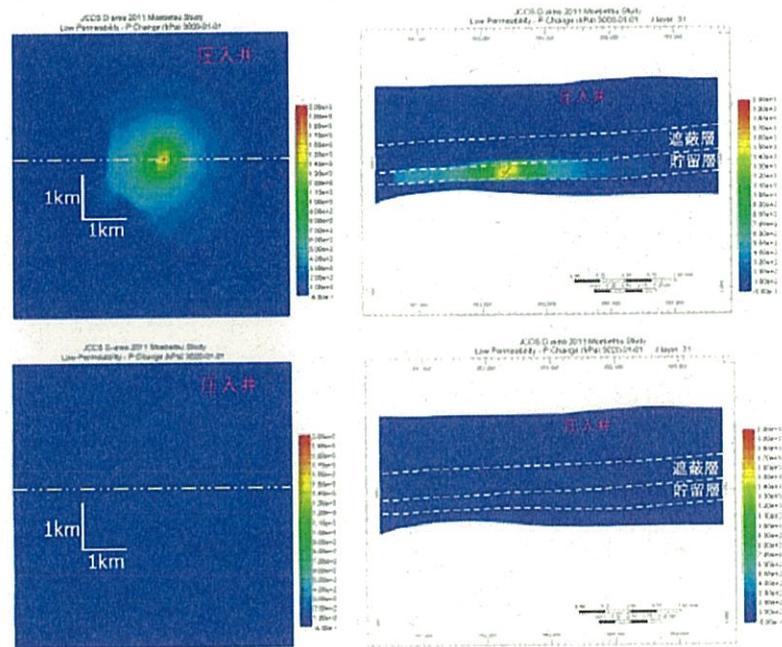


図 3.1-22 CO<sub>2</sub> 圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移 (低浸透率ケース)  
 (上: 3 年後 下: 20 年後)  
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

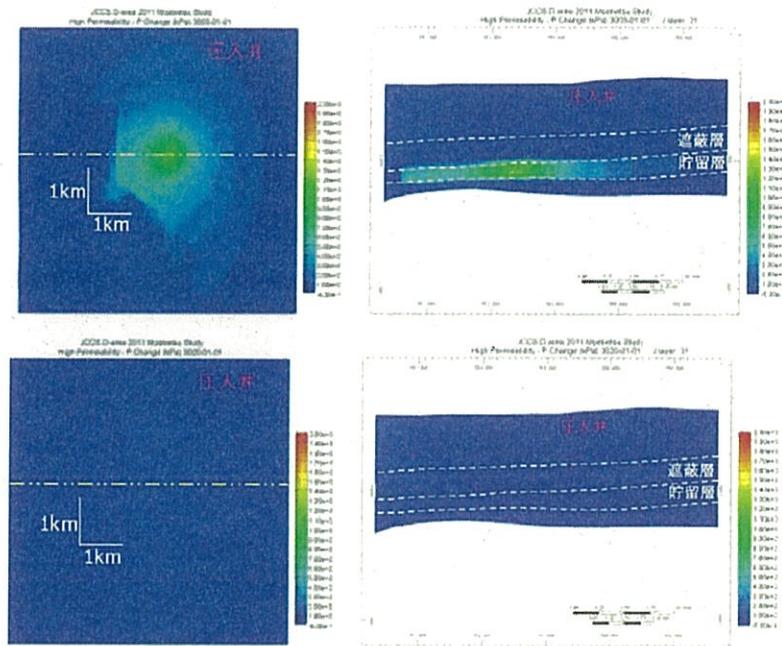


図 3.1-23 CO<sub>2</sub>圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（高浸透率ケース）  
 （上：3年後 下：20年後）  
 （左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

(5) シミュレーションによる貯留CO<sub>2</sub>の長期挙動予測① 圧入に伴う貯留層内のCO<sub>2</sub>分布予測

圧入終了時点（圧入開始から3年後）、圧入開始から200年後および1,000年後における気相のCO<sub>2</sub>飽和率分布を図3.1-24～図3.1-26に示す。また、CO<sub>2</sub>が地層水に溶解した状態の溶解CO<sub>2</sub>濃度の分布を図3.1-27～図3.1-29に示す。

## a ベースケース

気相CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに飽和率の高い範囲が広がっている。同様に、溶解CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mの範囲に広がっている。その後、CO<sub>2</sub>は水平方向にはほとんど動かなくなるが、貯留層内での上方への移動があり、遮蔽層下限までの移動が見られる。20年後以降、1,000年後まではほとんど動かなかった。一方で、溶解CO<sub>2</sub>は1,000年後まで主に垂直方向に広がった。

## b 低浸透率ケース

気相CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約200m、南北約200mに飽和率の高い範囲が広がっている。一方、溶解CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに広がっている。その後、CO<sub>2</sub>は1,000年後までほとんど動かなかった。溶解CO<sub>2</sub>は1,000年後まで拡がり続けた。

## c 高浸透率ケース

気相CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに飽和率の高い範囲が広がっている。一方、溶解CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約600m、南北約800mに広がっている。その後、CO<sub>2</sub>は水平方向にはほとんど動かなくなるが、貯留層内での上方への移動があり、遮蔽層下限までの移動が見られる。20年後以降、1,000年後まではほとんど動かなかった。一方で、溶解CO<sub>2</sub>は1,000年後まで主に垂直方向に広がった。

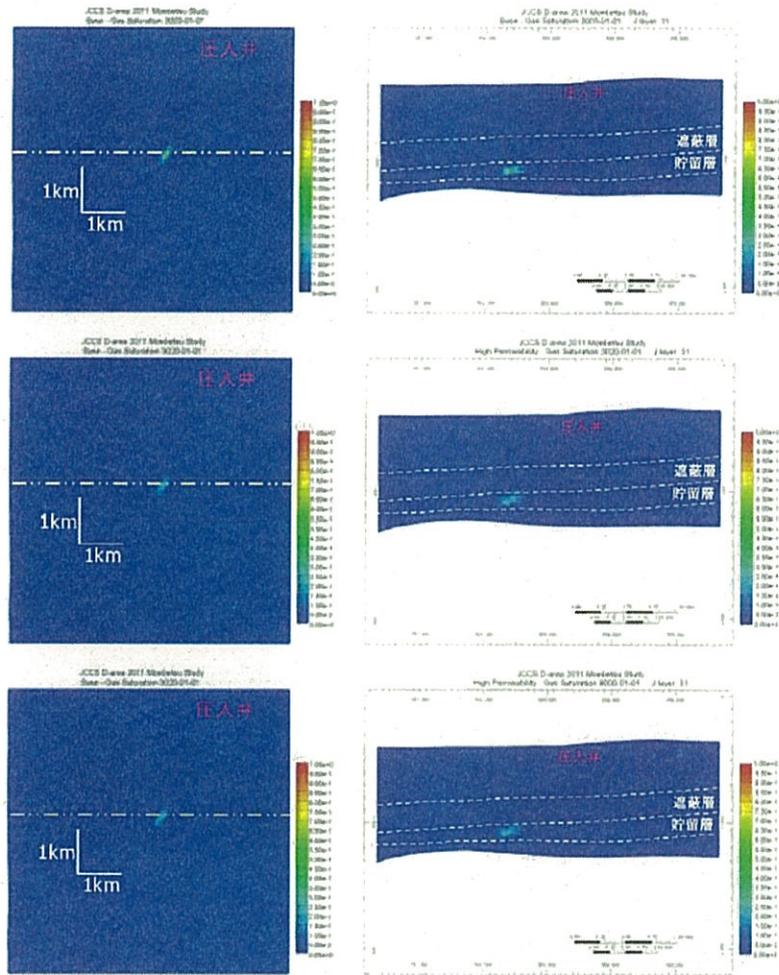


図 3.1-24 CO<sub>2</sub>飽和率の推移（ベースケース）

（上：3年後 中：20年後 下：1,000年後）

（左：平面分布（k方向セル28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線的位置））

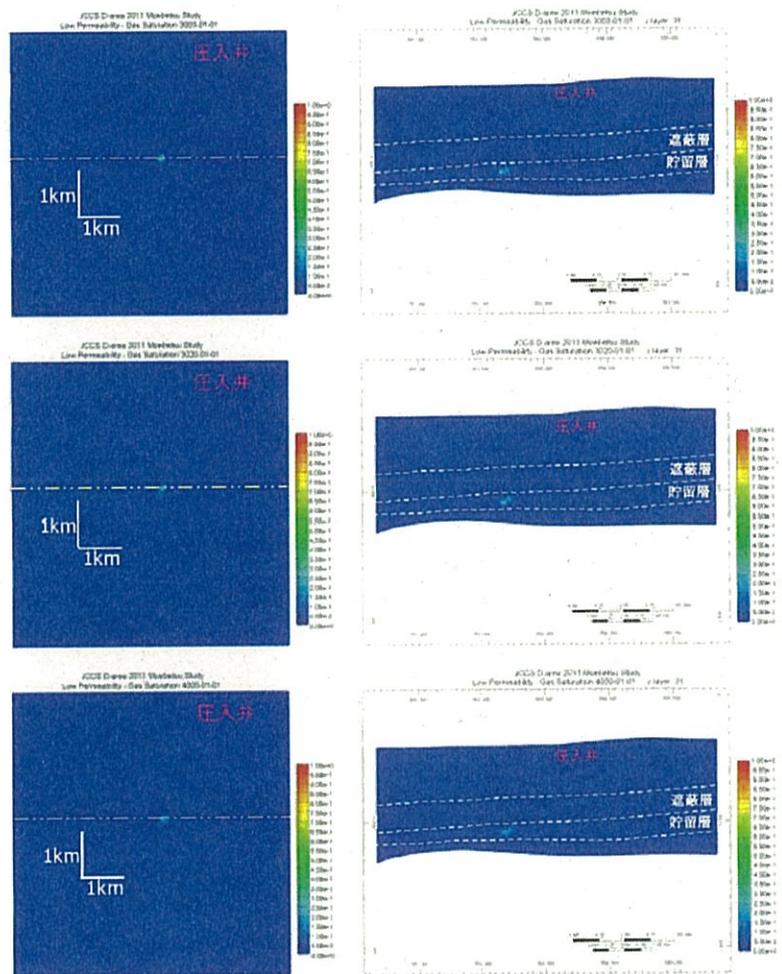


図 3.1-25 CO<sub>2</sub>飽和率の推移 (低浸透率ケース)

(上: 3年後 中: 20年後 下: 1,000年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

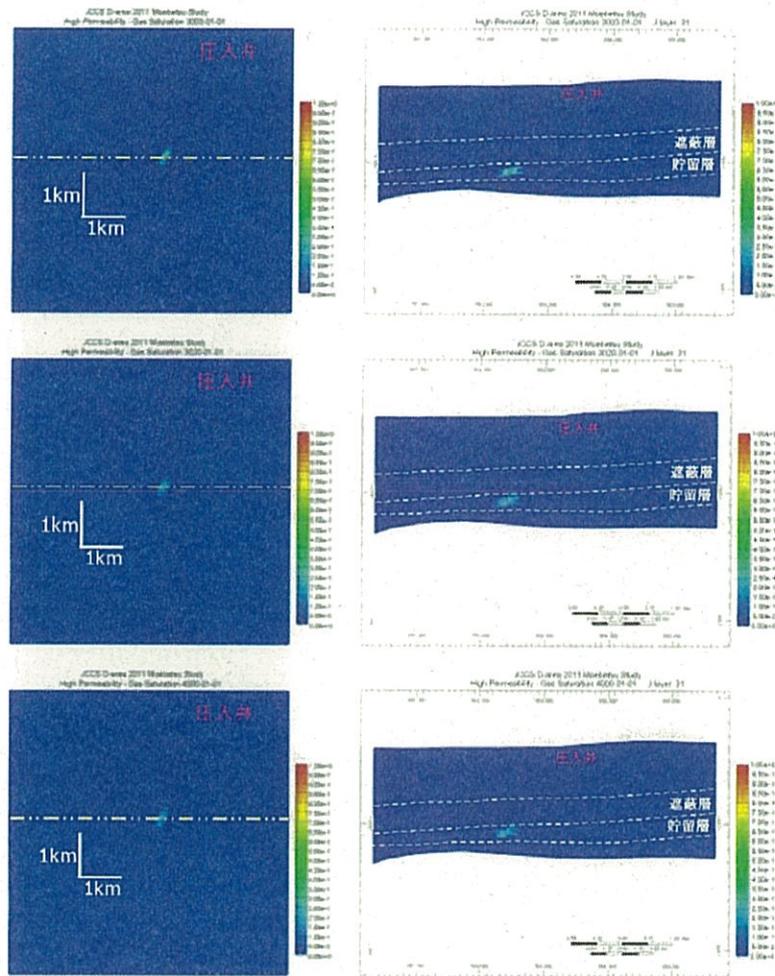


図 3.1-26 CO<sub>2</sub>飽和率の推移 (高浸透率ケース)

(上: 3年後 中: 20年後 下: 1,000年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

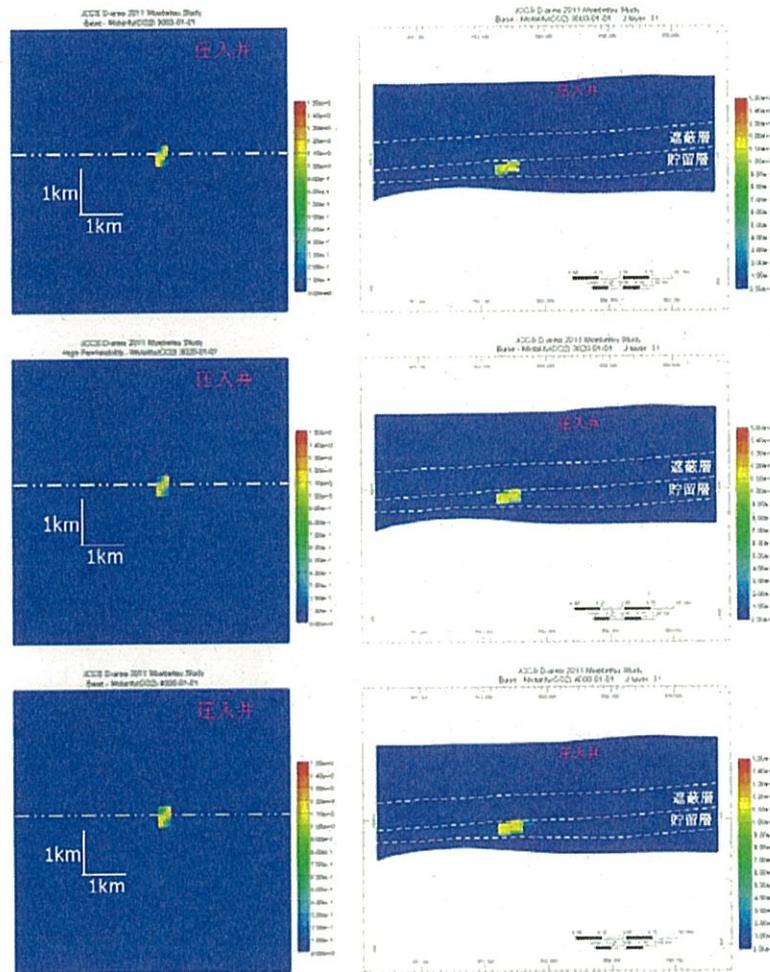


図 3.1-27 溶解CO<sub>2</sub>濃度 (単位: mol/kg) の推移 (ベースケース)  
 (上: 3年後 中: 20年後 下: 1,000年後)  
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

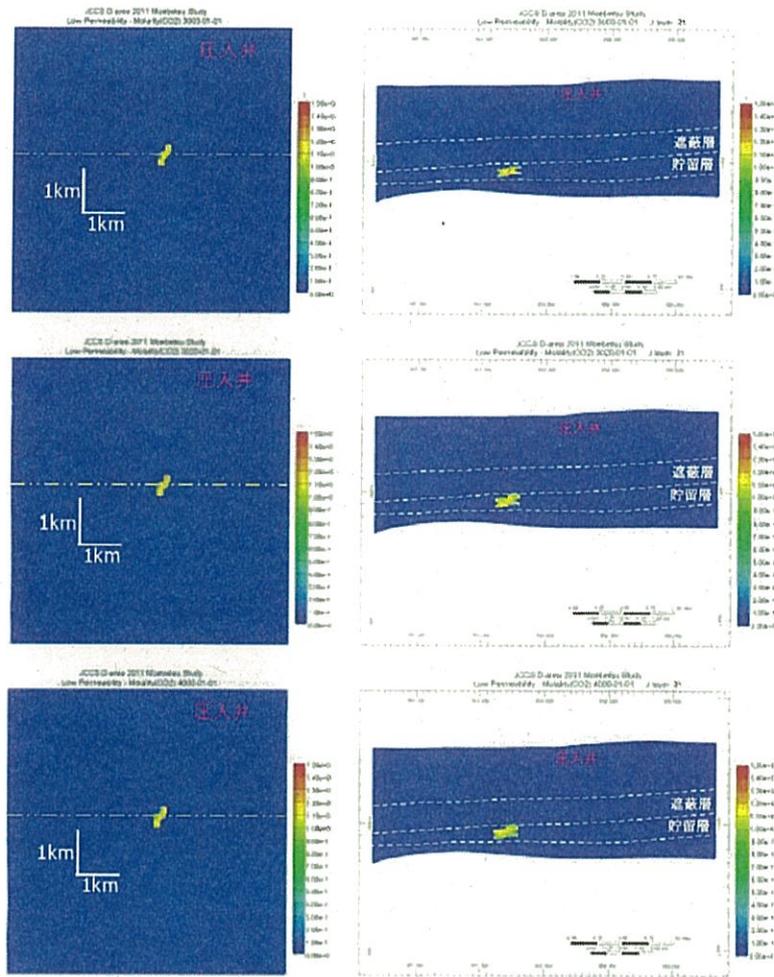


図 3.1-28 溶解CO<sub>2</sub>濃度(単位: mol/kg)の推移(低浸透率ケース)  
 (上: 3年後 中: 20年後 下: 1,000年後)  
 (左: 平面分布(k方向セル28) 右: 東西断面(位置は平面分布の点線の位置))

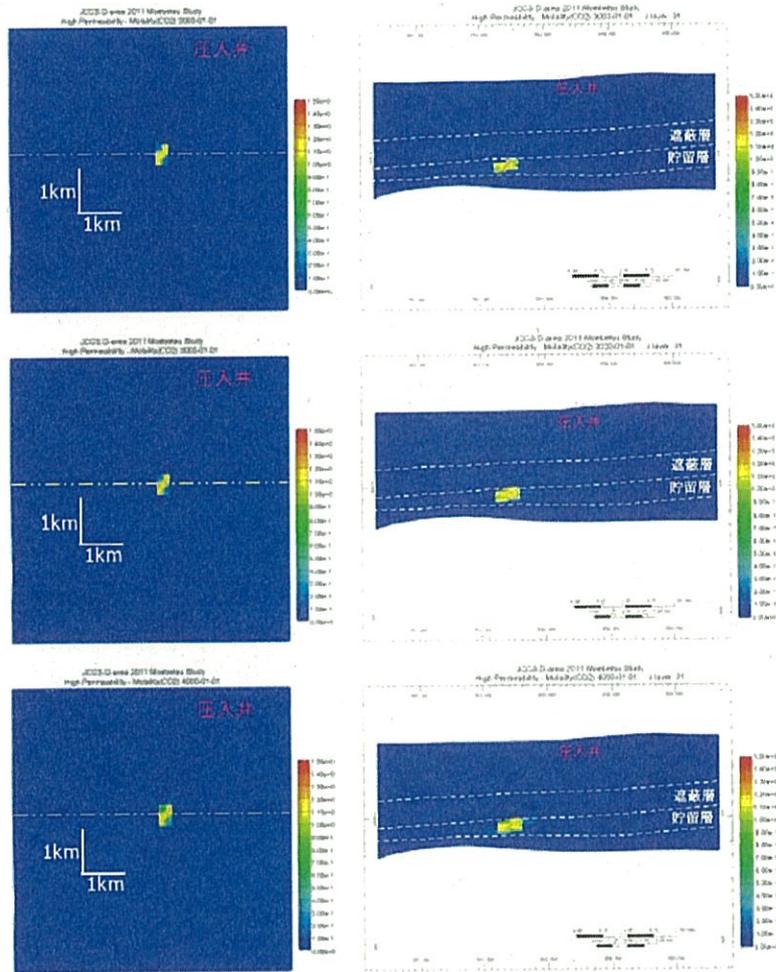


図 3.1-29 溶解CO<sub>2</sub>濃度 (単位: mol/kg) の推移 (高浸透率ケース)  
 (上: 3年後 中: 20年後 下: 1,000年後)  
 (左: 平面分布 (k方向セル28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))