

(5) シミュレーションによる貯留CO₂の長期挙動予測

① 圧入に伴う貯留層内のCO₂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CO₂飽和率分布を図3.1-24～図3.1-26に示す。また、CO₂が地層水に溶解した状態の溶解CO₂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CO₂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CO₂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、CO₂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CO₂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CO₂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CO₂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、CO₂は1,000年後までほとんど動かなかった。溶解CO₂は1,000年後まで拡がり続けた。

c 高浸透率ケース

気相CO₂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CO₂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、CO₂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CO₂は1,000年後まで主に垂直方向に広がった。

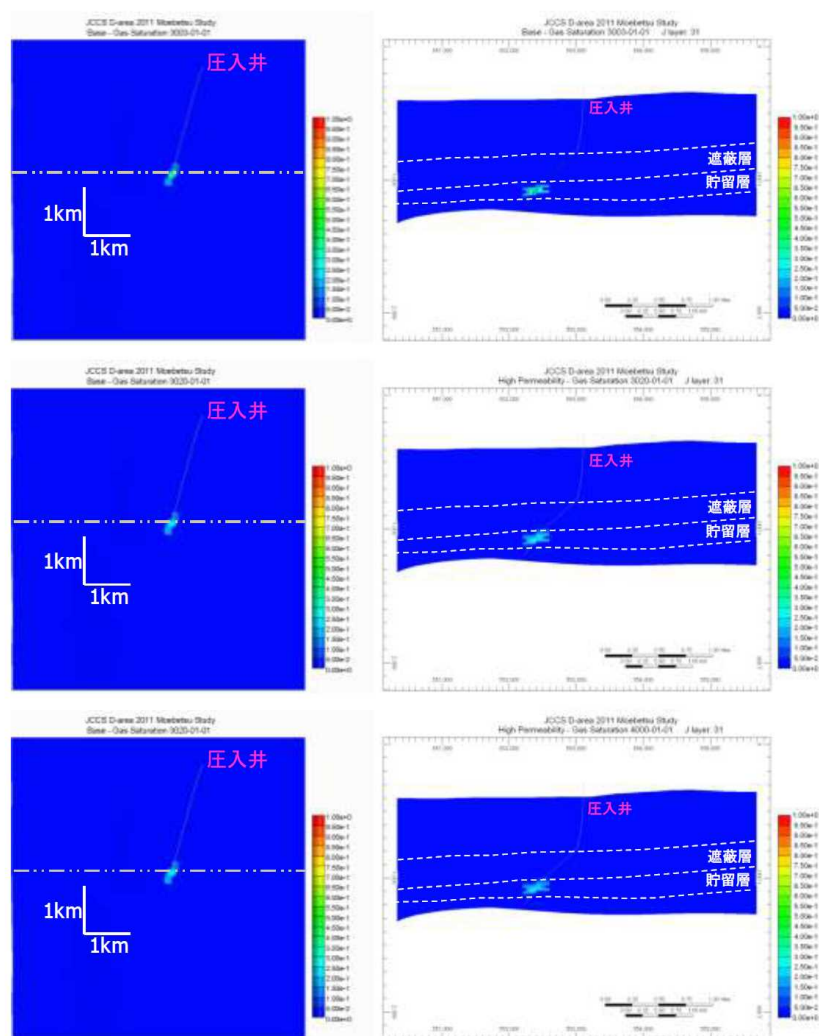


図 3.1-24 CO₂飽和率の推移（ベースケース）

（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の位置））

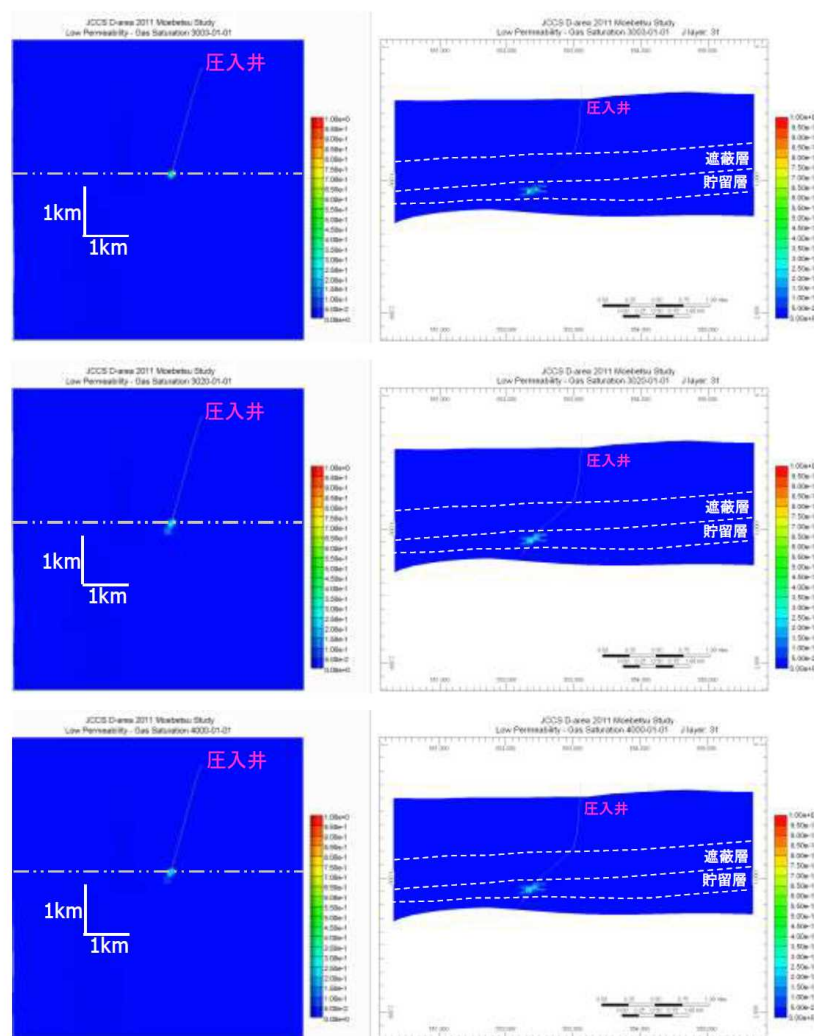


図 3.1-25 CO₂飽和率の推移（低浸透率ケース）

（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））

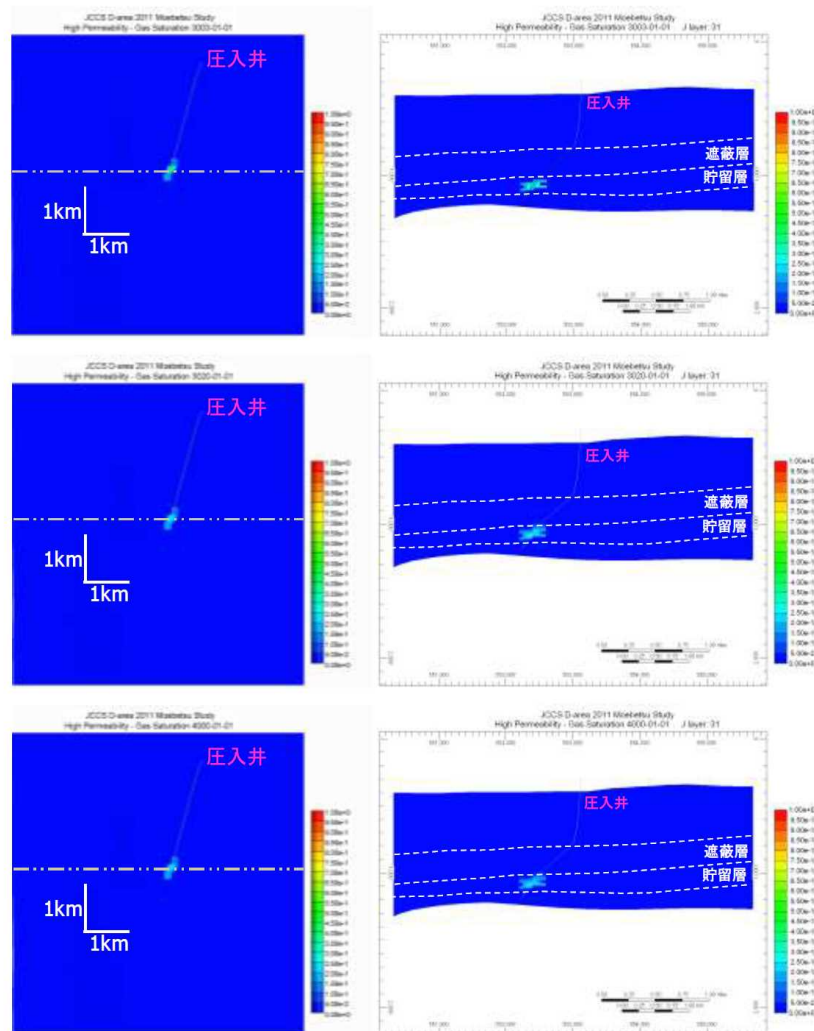


図 3.1-26 CO_2 飽和率の推移（高浸透率ケース）

（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））

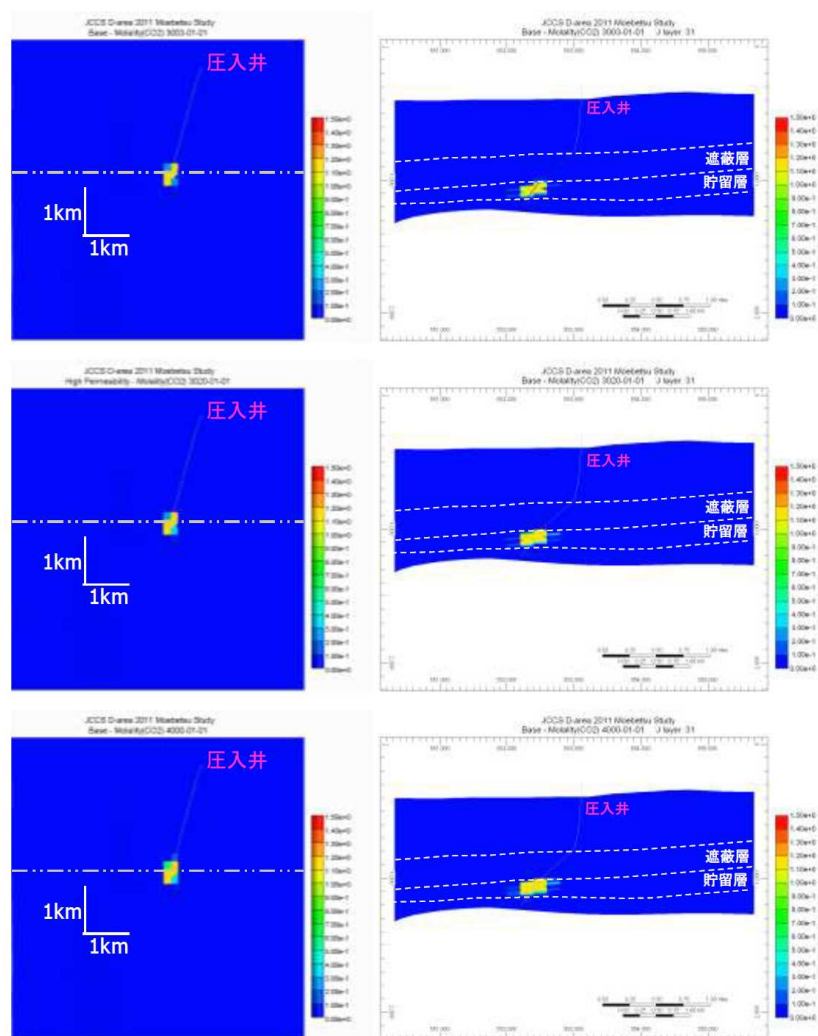


図 3.1-27 溶解CO₂濃度 (単位 : mol/kg) の推移 (ベースケース)
 (上 : 3 年後 中 : 20 年後 下 : 1,000 年後)
 (左 : 平面分布 (k 方向セル 28) 右 : 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

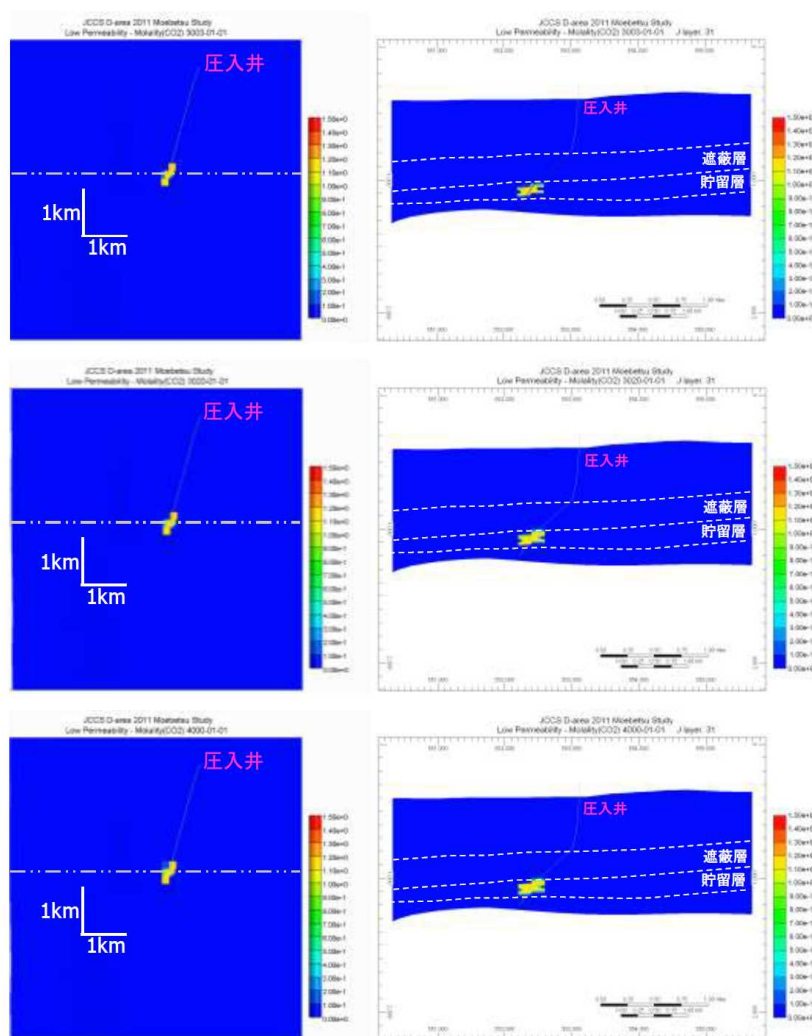


図 3.1-28 溶解CO₂濃度 (単位 : mol/kg) の推移 (低浸透率ケース)
 (上 : 3 年後 中 : 20 年後 下 : 1,000 年後)
 (左 : 平面分布 (k 方向セル 28) 右 : 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

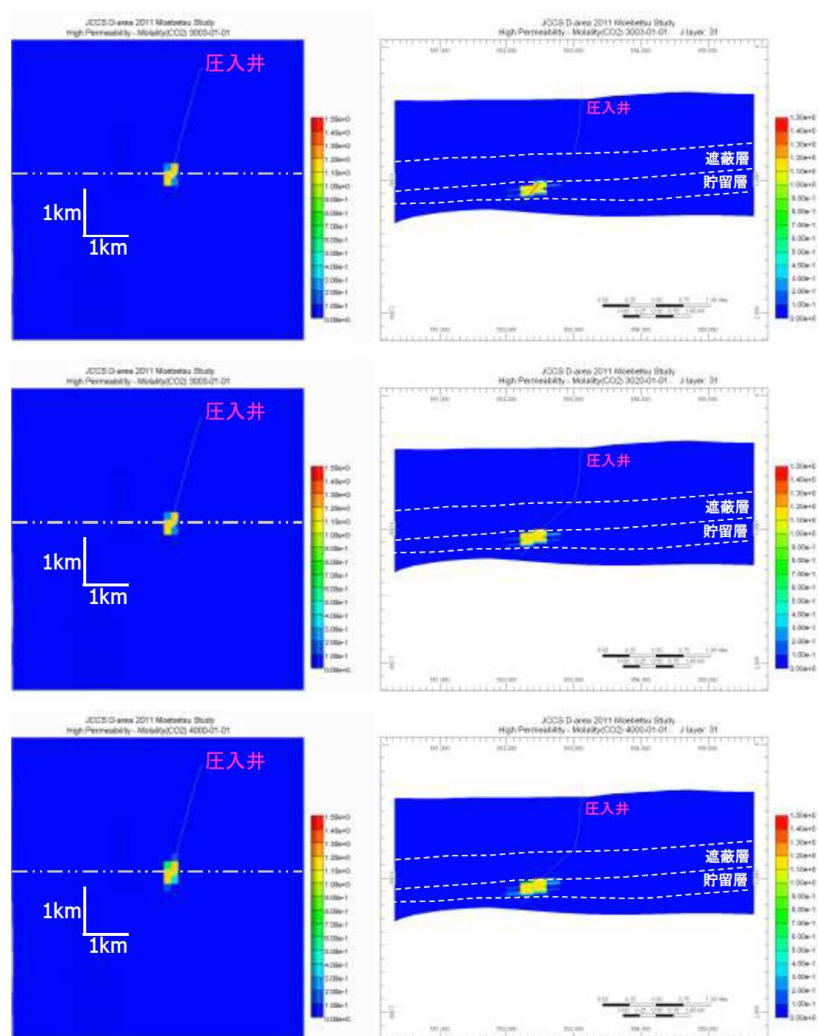


図 3.1-29 溶解 CO_2 濃度 (単位: mol/kg) の推移 (高浸透率ケース)
 (上: 3 年後 中: 20 年後 下: 1,000 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

② 遮蔽性能検討

遮蔽性能の評価の一環として、遮蔽層と貯留層の境界付近の鉛直に並んだ3つのセルにおける CO_2 飽和率と溶解 CO_2 濃度を精査した。遮蔽層と貯留層の境界で最も圧力が高くなる箇所は圧入井が通るセルであることから、このセルを選択し、貯留層上限のセル（堆積相区分8）を貯留層C、その直上の遮蔽層下限のセル（堆積相区分5）を遮蔽層B、さらにその直上の遮蔽層のセル（堆積相区分4）を遮蔽層Aとする（上位から遮蔽層A、遮蔽層B、貯留層Cの順、図2.8-6および図3.1-30）。

コア試料の分析結果では、堆積相区分2（遮蔽層Aよりも上部の泥岩）ではスレシヨルド圧力0.75MPa、遮蔽層Bではスレシヨルド圧力1.65～1.67MPaが得られている。圧入終了時における貯留層上限での圧力（貯留層C：12.1MPa）が、圧入終了時における遮蔽層下限の圧力（遮蔽層B：10.9MPa）にスレシヨルド圧力（1.65MPa）を加えた圧力（12.55MPa）を超えていないことを確認した（図3.1-31）。

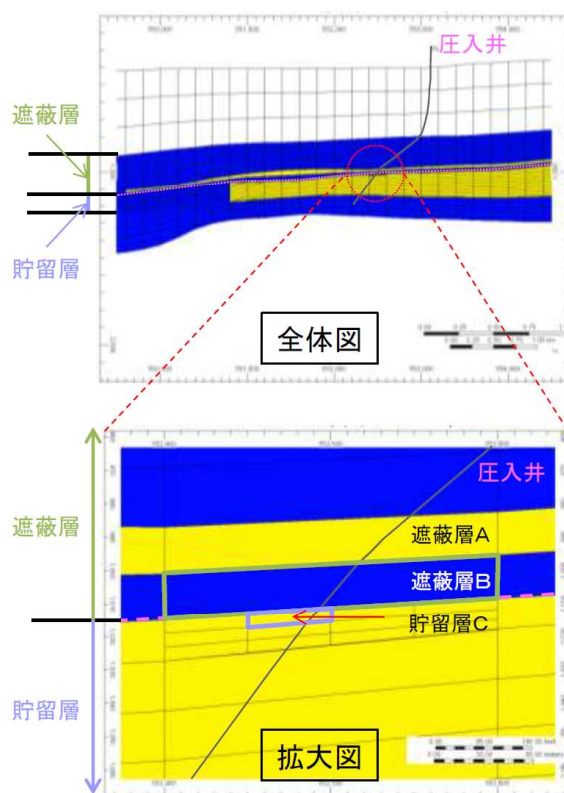


図 3.1-30 萌別層の地質モデル断面図（黄色：砂岩 青色：泥岩）

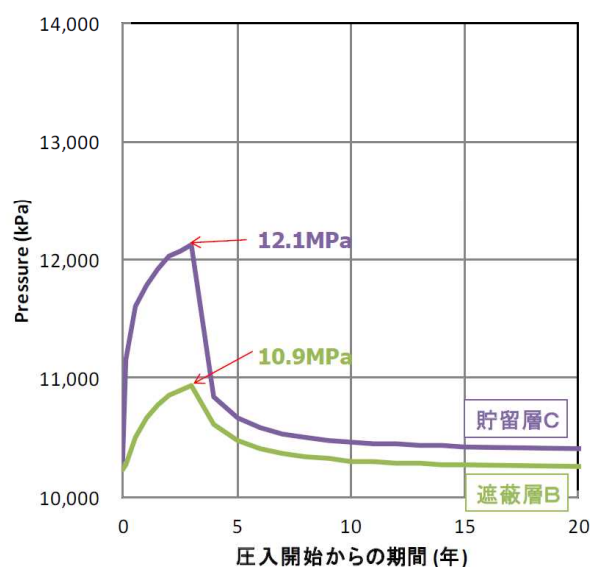


図 3.1-31 遮蔽層Bと貯留層Cの圧力の時間変化

なお、シミュレーションにおけるスレシヨルド圧力については、より安全サイドの設定としてコア試験で得られている最低値（0.75MPa）を採用して遮蔽性能の検討を行った。

a ベースケース

図 3.1-32 にベースケースにおけるそれらのセルのCO₂飽和率および溶解CO₂濃度の時間変化を示す。

圧入中は、遮蔽層Bと貯留層Cのセルの圧力差（約 1.2MPa）が遮蔽層Bに設定したスレシヨルド圧力（0.75MPa）を越えるために、貯留層Cから遮蔽層BへCO₂の流れがあるが、遮蔽層BにおけるCO₂飽和率はほとんど変化がなかった。

一方で、遮蔽層Bにおける溶解CO₂濃度は、圧入開始 1,000 年後に 0.16mol/kg-地層水だけ増加していた。さらに、遮蔽層Aの溶解CO₂濃度は圧入開始 1,000 年後でも 3.4×10^{-4} mol/kg-地層水と非常に低かった。

また、遮蔽層である泥岩は 1.73×10^{-3} md の非常に小さい浸透率を有している。

以上のことから、ベースケースにおいては圧入中にCO₂が貯留層から遮蔽層へとわずかに移動するが、泥岩内の水に溶解して安定した状態となる。したがって、萌別層泥岩層は、所定量のCO₂を貯留層するのに十分な遮蔽性能を有していると判断する。

b 遮蔽性能（低）ケース（表 3.1-4 の⑤）

遮蔽層性状が劣る場合の CO_2 挙動を評価した。スレシヨルド圧力を 0.012MPa、水平浸透率を $7 \times 10^{-3} \text{mD}$ とベースケースよりも遮蔽層性状としては劣る値を設定した。

ベースケースと同様に、遮蔽層と貯留層の境界付近の鉛直に並んだ 3 つのセルにおける CO_2 飽和率と溶解 CO_2 濃度を精査した。図 3.1-33 にそれらのセルの CO_2 飽和率および溶解 CO_2 濃度の時間変化を示す。ベースケースと同様に遮蔽層 A と遮蔽層 B における CO_2 飽和率はほとんど変化がなかった。

一方で、遮蔽層 B における溶解 CO_2 濃度は 0.55mol/kg -地層水（圧入開始 1,000 年後）とベースケースより多くなった。また、遮蔽層 A の溶解 CO_2 濃度は圧入開始 1,000 年後で $2.6 \times 10^{-3} \text{mol/kg}$ -地層水と非常に低かった。

以上のことから、遮蔽性能が極端に劣るケースを想定した場合でもベースケースと同様に遮蔽層内の水に溶解した CO_2 濃度のわずかな上昇は認められるが、溶解して安定した状態であることがわかった。

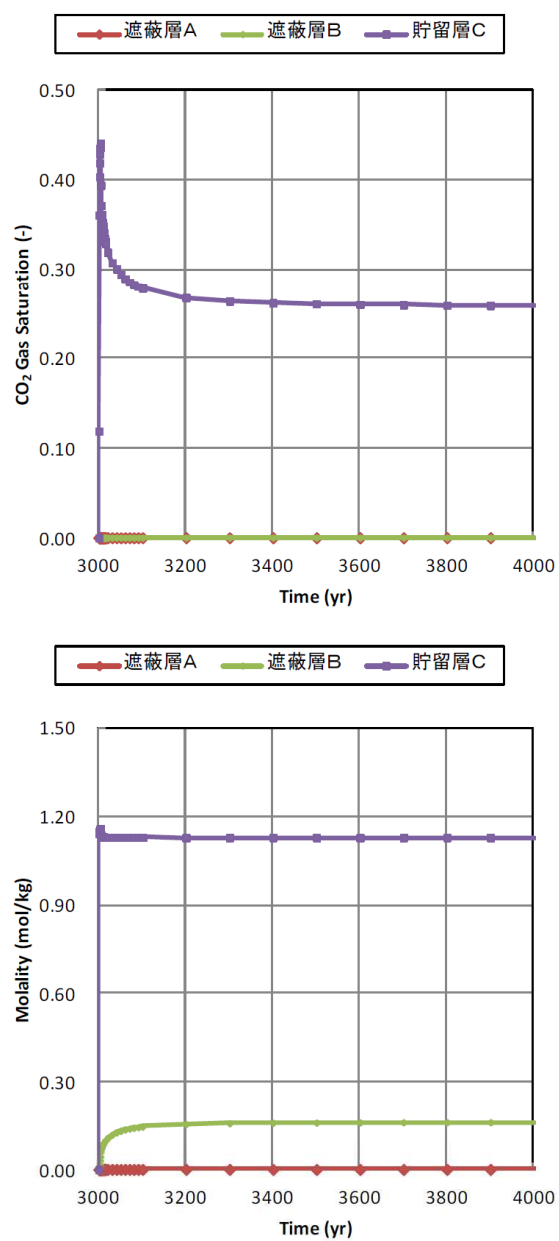


図 3.1-32 遮蔽層・貯留層境界付近でのCO₂飽和率と溶解CO₂濃度の時間変化
(ベースケース) (上: CO₂飽和率 下: 溶解CO₂濃度)
(上位から遮蔽層A、遮蔽層B、貯留層Cの順)

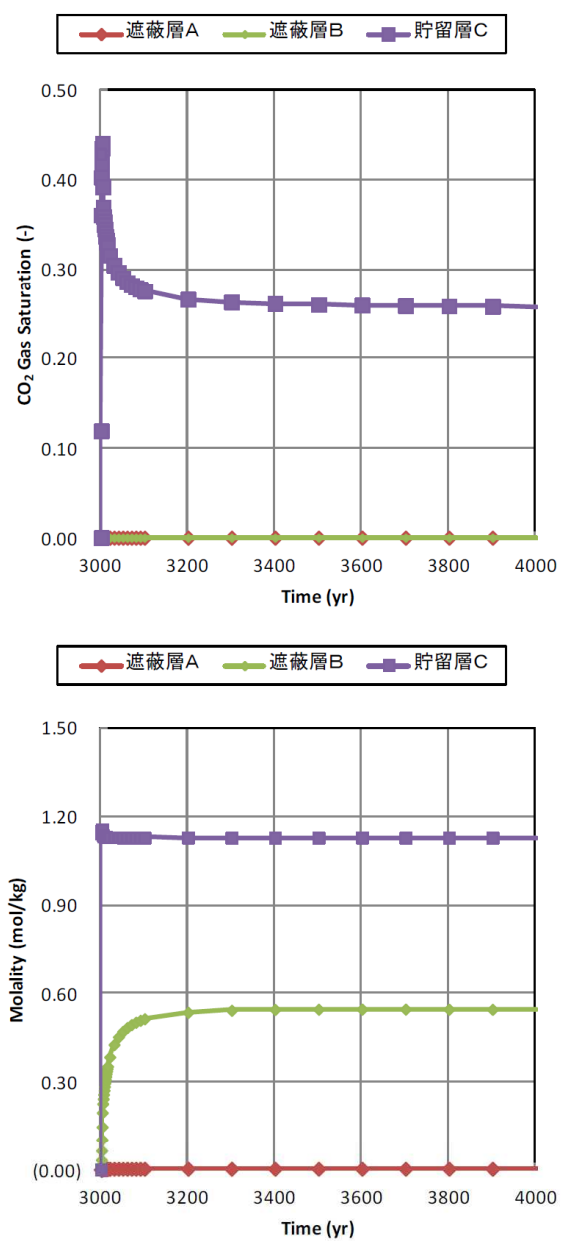


図 3.1-33 遮蔽層・貯留層境界付近でのCO₂飽和率と溶解CO₂濃度の時間変化
 (遮蔽性能(低)ケース) (上: CO₂飽和率 下: 溶解CO₂濃度)
 (上位から遮蔽層A、遮蔽層B、貯留層Cの順)

③ CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留CO₂の3つの貯留形態をMovable、DissolvedおよびTrappedで表現し、各ケースにおける割合について、その経時変化を図3.1-34～図3.1-36に示す。

いずれのケースにおいても圧入終了後すぐにMovable CO₂量は減少し、約50年でその割合は9～10%程度となり、さらに減少を続けていく。また、Trapped CO₂とDissolved CO₂の割合はゆっくりと変化していく。その割合については、圧入開始後1,000年後においては、ベースケースではDissolved CO₂量は約44%、Trapped CO₂は約55%、低浸透率ケースではDissolved CO₂は48%、Trapped CO₂は49%、高浸透率ケースではDissolved CO₂は45%、Trapped CO₂は54%という割合になった。この差については、圧入終了までのCO₂の拡がり方による地層水との接触面積の違い、CO₂が溶解し密度が大きくなった地層水の貯留層内での移動のしやすさ、貯留層内の圧力状態が原因であると考えられる。

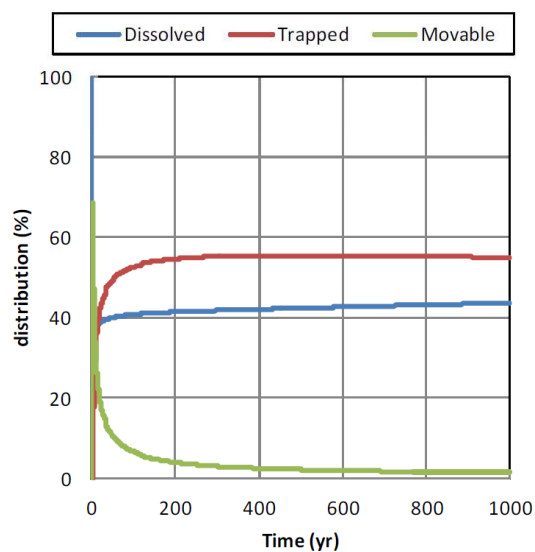


図 3.1-34 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（ベースケース）

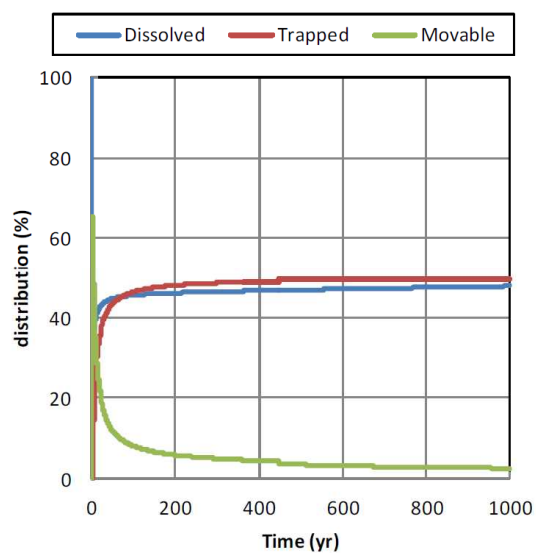


図 3.1-35 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（低浸透率ケース）

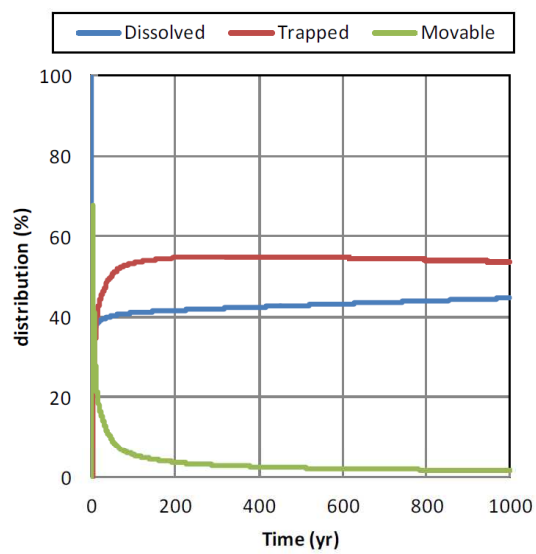


図 3.1-36 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（高浸透率ケース）

(6) 総合評価

① 萌別層評価のまとめ

萌別層砂岩層について行った貯留層評価、遮蔽層評価、 CO_2 挙動予測シミュレーションの結果を以下の記述および表 3. 1-5 にまとめる。

- 1) 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。緩やかな西傾斜で安定的に堆積し、層厚は約 100m である。砂礫岩相は北東部を中心に発達していると解釈される。
- 2) 萌別層泥岩層は、下位の萌別層砂岩層の上位に安定して堆積し、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さがあり良好な遮蔽性能が期待される。
- 3) 貯留層の性能、遮蔽層の性能を評価するため、25 万トン/年×3 年間の CO_2 を圧入し、圧入終了後 997 年間（圧入開始から 1,000 年間）の CO_2 挙動を予測するシミュレーション実施した。
- 4) シミュレーションの結果をまとめると、以下の通りである。
 - ・7つのケース中6ケースで25万トン/年×3年間（累計圧入量：75万トン）の圧入は可能であった。層内の浸透率を 9mD とした低浸透率ケースでは3年間で累計圧入量が 45.2 万トン（平均 15 万トン/年）であった。浸透率が低い場合においても萌別層における最少想定圧入レートの 10 万トン/年での圧入が可能であることを確認した。
 - ・気相 CO_2 の拡がり圧入井近傍において水平方向に東西 400m 程度、南北 600m 程度までであり、溶解 CO_2 の拡がり東西 400m 程度、南北 600m 程度までであった。
 - ・遮蔽層（萌別層泥岩層）へは遮蔽層の下限のセルには溶解 CO_2 の状態では存在するが、それより上位へは移動していなかった。
 - ・圧入終了時における貯留層上限での圧力（12.1MPa）が、圧入終了時における遮蔽層下限の圧力（10.9MPa）にスレシヨルド圧力（1.65MPa）を加えた圧力（12.55MPa）を超えていないことを確認した。

② 総合評価

萌別層砂岩層への最少想定圧入レートである 10 万トン/年×3年間の CO_2 圧入は可能であり、遮蔽層（萌別層泥岩層）への CO_2 の拡がりもないと評価する。

表 3.1-5 萌別層砂岩貯留層総合評価のまとめ

項目	
貯留層	構造 ●緩やかな北西傾斜(1~3°)の単斜構造
	対象深度・層厚 ●垂直深度:約1,100~1,200m ●層厚:約100m
	岩相 ●砂岩主体(礫質砂岩、シルト岩を伴うファンデルタ堆積物)
	物性 ●孔隙率:25~40%(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下)、孔隙率:20~40%(物理検層解析結果) ●浸透率:9~25mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) ●浸透率:1~1,000mD(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下、空気) ●浸透率:1~120mD(物理検層解析結果)
	圧入・貯留性能 ●【苫小牧CCS-1圧入テスト】最大1,200kl/日(掘削深度1,077~1,217mのうち57.5m) ●【シミュレーション】25万トン/年×3年間圧入可能(低浸透率ケースを除く)
遮蔽層	岩相 ●シルト岩～泥岩(萌別層上部)
	層厚 ●層厚:約200m
	物性 ●孔隙率:32.4~37.2%(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下) ●浸透率: $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3}$ mD(苫小牧CCS-2コア試験:水浸透率) ●リークオフ圧力:14.6MPa(等価泥水比重:1.50)(萌別層泥岩層(苫小牧CCS-2)991m) ●スレシヨルド圧力:0.75, 1.65, 1.67MPa(苫小牧CCS-2コア試験:CO ₂ -水系)
	遮蔽性能 ●【シミュレーション】圧入終了時における貯留層上限での圧力(12.1MPa)が、圧入終了時における遮蔽層下限の圧力(10.9MPa)にスレシヨルド圧力(1.65MPa)を加えた圧力(12.55MPa)を超えていないことを確認した。
坑井掘削難易度 ●軟弱な第四系・鶴川層内での坑跡コントロールや水平に近い掘削のため、掘削障害のリスクあり。	
圧入後CO ₂ の移動(シミュレーション結果) ●(3年圧入後)気相CO ₂ の拡がりは圧入井近傍で400m×600m程度、溶解CO ₂ は400m×600m程度(ベースケース)。 ●20年程度で、気相CO ₂ の拡がりに変化は見られなくなる。 ●1,000年後までは、周辺部での地層水へのCO ₂ の溶解が進み、CO ₂ 飽和率減少が確認される。	

3.2 貯留対象層周辺を取巻く環境等の評価

3.2.1 活断層分布および地震活動

(1) テクトニクス概要

図 3.2-1 に苫小牧周辺のテクトニクスを示す地質概念図を示す。圧入想定域は、北海道の石狩一日高地域に属する（図 3.2-1 左下の地質図）。地質構造的には、西方に向かって前進する北北西－南南東方向の褶曲・衝上断層帯で特徴づけられる（図 3.2-1 上段の図）。同褶曲・衝上断層帯は、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成された日高衝突帯の西側の前縁部に形成されている¹⁾。

広域の地質構造的な特徴は、以下のとおり要約できる（図 3.2-1）。

- ・西方に向かって前進する複数の褶曲・衝上断層帯が発達する。これらは、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成されたもので、中新世に始まったものである。
- ・褶曲・衝上断層帯にはいくつかの断層が認められ、地表に現れている最も西側の断層は馬追断層で代表される断層群である。
- ・既往の弾性波探査データから馬追断層の西側にはいくつかの伏在衝上断層が推定される。
- ・馬追断層およびその西側の伏在衝上断層は、南北に延びる活断層である「石狩低地東縁断層帯」を形成している。

【参考文献】

- 1) 伊藤他（1999），日高衝突帯におけるデラミネーション-ウェッジ構造．月間地球，v. 21, n. 3, pp. 130-136.

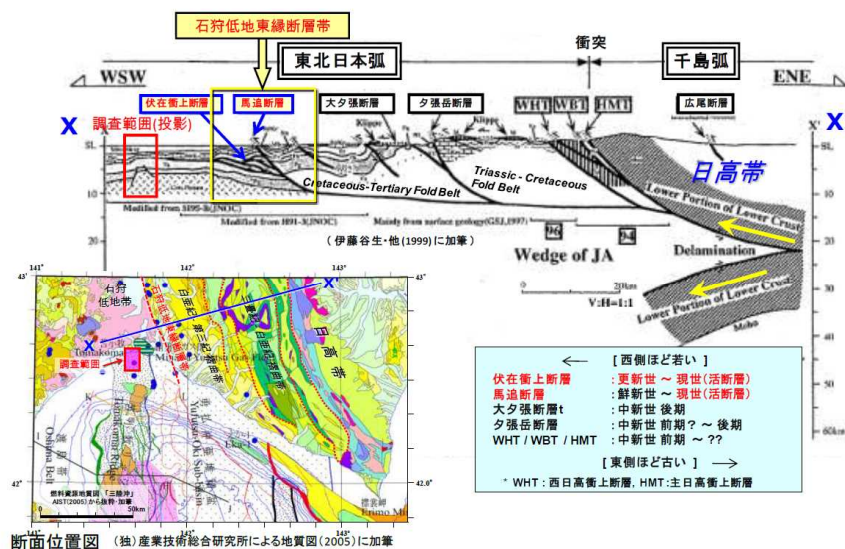


図 3.2-1 苫小牧周辺のテクトニクス概要

(2) 北海道周辺の地殻応力分布

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」においては、CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項として、CO₂圧入地点付近における過去の地震活動が挙げられている。過去の地震活動の検討の一環としては、圧入地点周辺の地殻応力状態や歪みの蓄積状況を事前に把握する必要があることから、国土地理院によるGPS観測点網（GEONET）による年間平均変位速度ベクトルと、地殻応力データベースであるWorld Stress Map²⁾（WSM）を利用して応力分布について調査した。

図 3.2-2 に、WSMによる応力データ分布および札幌観測点を固定した変位速度図を示す。これらの図に現れた応力分布を反映すると考えられる特徴を列記する。

北海道南東部-日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間 20mm 以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧・室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。