

表 3.1-2 滝ノ上層 T1 部層貯留層総合評価のまとめ

項 目	
貯留層	構造 ●北西-南南東に延びる背斜構造(苫小牧沖構造)の北東翼部。 ●圧入想定ポイントから2km程度西側に滝ノ上層下位から荷葉層に達する断層の存在が推定される。
	対象深度・層厚 ●垂直深度:約2,400～3,000m ●層厚:約600m
	岩相 ●溶岩～凝灰角礫岩、凝灰岩
	物性 圧入対象岩相は滝ノ上層T1部層下部の溶岩～凝灰角礫岩相で孔隙率・浸透率が高いことが期待される岩相。 ●孔隙率:5～18%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下), 孔隙率:3～19%(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.68～1.18mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) ●浸透率:0.001～0.01mD(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) ●浸透率:0.002～7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.01mD～2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果)
	圧入・貯留性能 ●【貯留層評価】3Dデータなどの解析で良好と想定している岩相を調査井(苫小牧CCS-1)では未確認。 ●【シミュレーション】貯留性能が良好な岩相に圧入することで、25万トン/年×3年圧入可能。
遮蔽層	岩相 ●泥岩(振老層～平取・軽舞層)
	層厚 ●層厚:約1,100m
	物性 ●孔隙率:12.4～18.0%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) ●浸透率: $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$ mD(苫小牧CCS-1コア試験:水浸透率) ●スレシヨルド圧力:1.29～12.3※MPa以上(苫小牧CCS-1コア試験:N ₂ -水系残差圧力法) ●スレシヨルド圧力:11.72MPa※以上(苫小牧CCS-1コア試験:CO ₂ -水系段階昇圧法) ※ブレークスルーしなかった。 ●リークオフ圧力:45.3MPa(等価泥水比重:1.96)(振老層(苫小牧CCS-1)2,352m)
	遮蔽性能 ●【シミュレーション】遮蔽層へのCO ₂ の到達は確認されなかった。
	坑井掘削難易度 ●大深度の高傾斜井となる。
圧入後CO ₂ の挙動 (シミュレーション結果)	
●(3年圧入後)気相CO ₂ の拡がりは400m×600m程度。溶解CO ₂ は550m×700m程度(P50モデル)。 ●圧入終了後は地層水への溶解等による下方への移動が認められる。 ●200年程度で、気相CO ₂ の拡がりに変化は見られなくなる。	

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。シーケンス層序学と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 $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ 、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、CO₂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 CO₂トラッピング、CO₂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

CO₂圧入井（圧入位置）は、萌別層砂岩層を対象としたAIバージョン結果を基に、貯留CO₂の拡がりが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、CO₂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CO₂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、CO₂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℃ (1,046.835 mVD)	
基準圧力	10,669.4kPa (1,046.835mVD)	
CO ₂ 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 ⁹ Rm ³	
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 ⁻¹)	1.532×10 ⁻⁶ 測定値	
塩分濃度 (ppm NaCl)	18,000 (Cl ⁻ =10,350mg/L)	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 K _{rg}	測定値	Corey (1954) ¹⁾
液相 相対浸透率 K _{rw}	測定値	van Genuchten (1980) ²⁾
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.05	0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.49 測定値	0.638 Bennion (2007) ³⁾
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.275 Holtz (2002) ⁴⁾	—
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	van Genuchten (1980) ²⁾	
P _c (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 CO₂-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 C C S - 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 $k_v=17\text{mD}$ 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れ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 CO₂ 挙動を把握することを目的として、苫小牧 C C S - 2 コア試料の残差圧力測定（N₂-水系）で正しい測定ができなかった試料の測定値（著しく低い測定値）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-N₂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 T S T - 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 CO₂ 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 CO₂ 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 (Rm 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)	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 × 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 × 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 × 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 × 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 × 10 ⁹
⑥個別層砂岩層上限変更	17	1.7	0.1	4, 5, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 6, 7, 10	49 × 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 × 10 ⁹

(4) シミュレーションによるCO₂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、貯留可能性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CO₂圧入挙動について述べる。

① CO₂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)CO₂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が圧入圧力上限(13.4MPa)に達して、圧入レートが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)CO₂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。

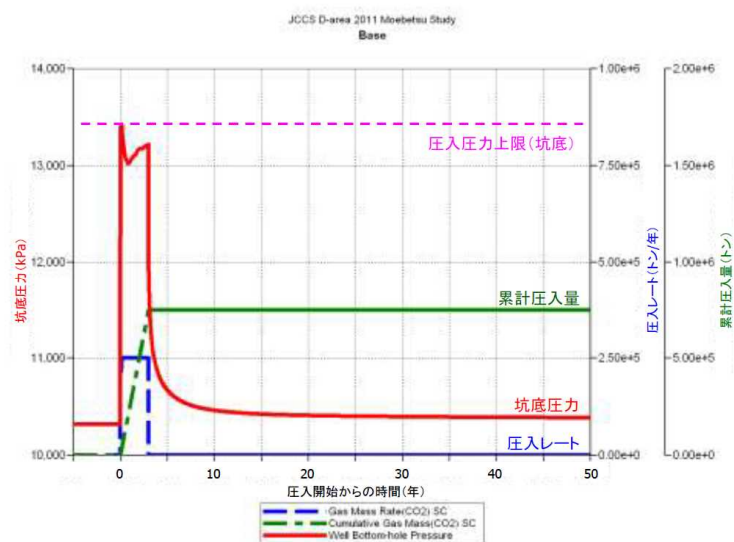


図 3.1-18 ベースケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

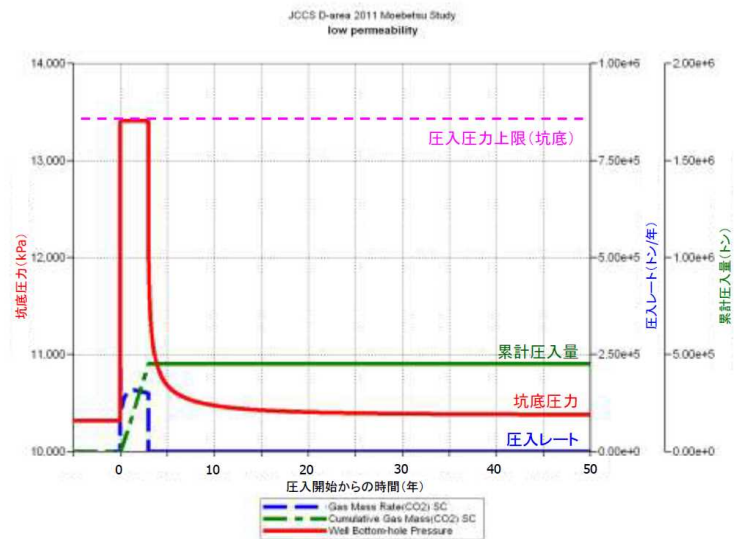


図 3.1-19 低浸透率ケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

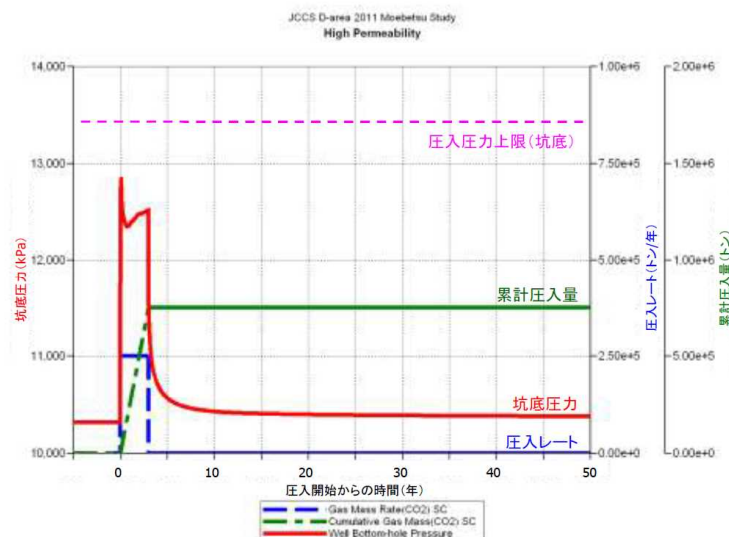


図 3.1-20 高浸透率ケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

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。

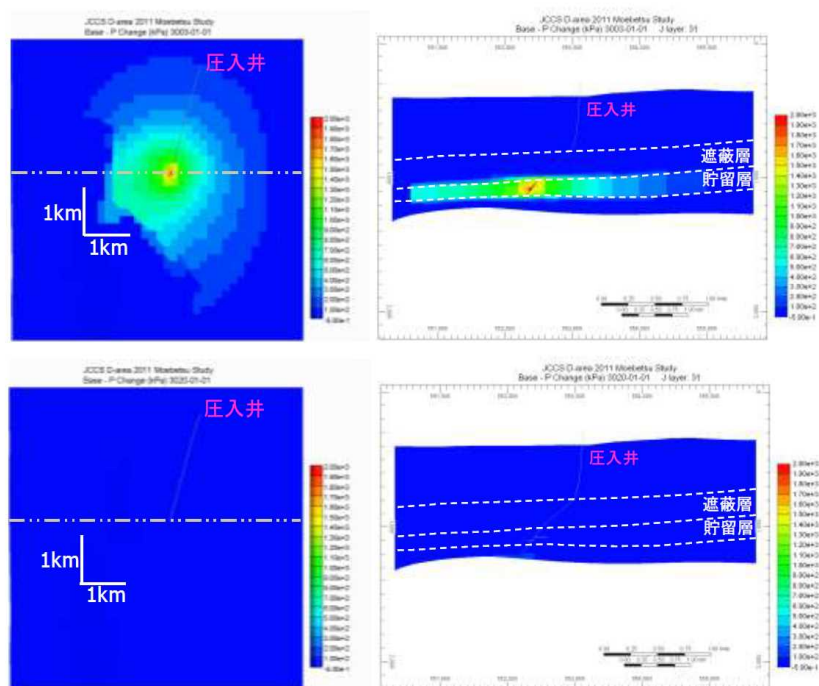


図 3.1-21 CO_2 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（ベースケース）

（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））

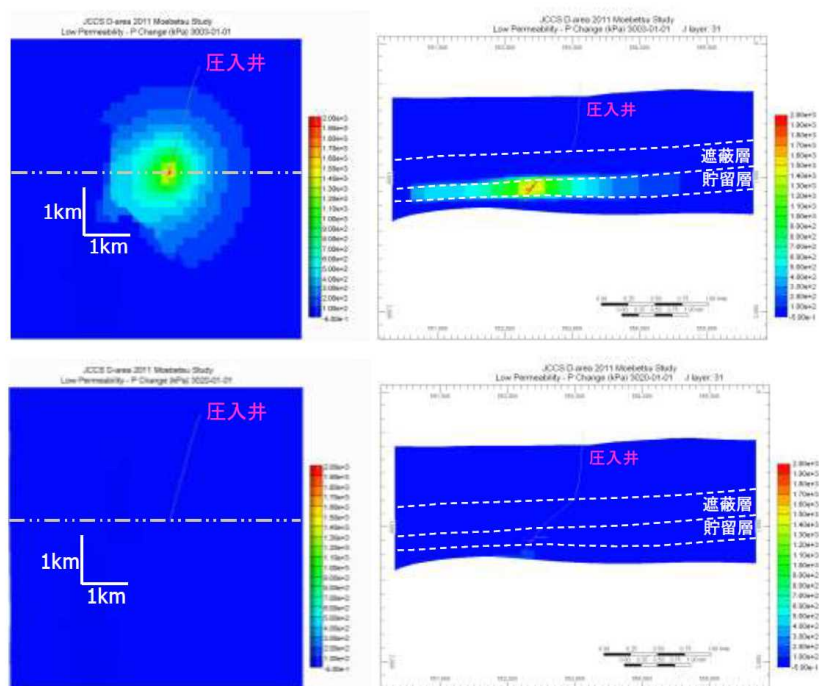


図 3.1-22 CO₂圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（低浸透率ケース）
（上：3年後 下：20年後）
（左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

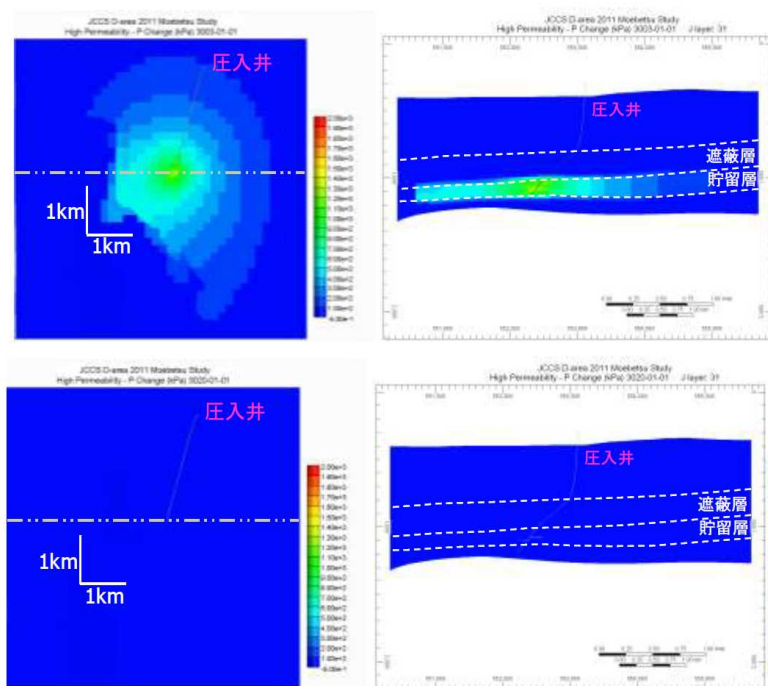


図 3.1-23 CO_2 圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移 (高浸透率ケース)
 (上: 3 年後 下: 20 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))