

第3章 貯留層総合評価

3.1 貯留層の総合評価

貯留層総合評価においては、第2章で構築した貯留層モデルを用いてCO₂挙動予測シミュレーションを実施し、その結果を基に計画通りのCO₂圧入が可能か、貯留層からのCO₂の漏出は生じていないか、長期間にわたって計画通りの範囲にとどまっているかを評価した。以下、滝ノ上層および萌別層の評価結果について示す。

3.1.1 滝ノ上層評価結果

(1) 貯留層評価

2.7.1で記載の通り、滝ノ上層は火山性碎屑物を含む火山岩層であり、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。滝ノ上層T1部層（層厚が約600m）は、さらに上部の凝灰岩卓越層と下部の火山岩卓越層に分けられる。

溶岩～凝灰角礫岩相では良好な圧入性状が期待できることから全体が圧入対象となり、凝灰岩相は部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、一部が圧入対象となり得ると考えられる。

(2) 遮蔽層評価

2.7.2で記載の通り、遮蔽対象層となる振老層および平取+軽舞層は、約1,100mの層厚を有する。苫小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部でリークオフ圧力が等価泥水比重1.96の強度を持つことを確認した。

苫小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないものと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が 8.2×10^{-6} ～ 36.7×10^{-6} mD、スレシヨルド圧力が1.29MPa～12.3MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといった比較的低い分析値が得られているものの、CO₂-水系の条件で分析した場合には、11.72MPa以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取+軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。

(3) シミュレーション概要

① 概要

構築した貯留層モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレータは、Computer Modelling Group Ltd. 社のGEM (ver2010.12) を使用した。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、残留ガス飽和率と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。

圧入位置については、陸上から掘削可能な圧入井の仕様に応じて設定した。すなわち、CO₂圧入井は陸上から南西方向に掘削すると仮定し、圧入井における滝ノ上層T1部層の全区間に対してCO₂を圧入した。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-1の振老層下部でのリークオフ圧力が等価泥水比重で1.96であるので、貯留層上限深度での地層破壊圧力を計算し、その90%を圧入圧力上限とした。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2,419.4mから地層破壊圧力を求め、この90%（41,853kPa）をCO₂圧入時に許容される最大坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）とした。

CO₂の圧入目標量は25万トン/年×3年として、第2章で述べた50個のモデル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のデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など）および文献値により、表3.1-1に示す値を用いた。

表 3.1-1 シミュレーションパラメーター一覧

モデル	滝ノ上層 T 1 部層 2011 モデル		
サイズ	8km×12km×4, 000m (ideal volume 24km×24km×4, 000m)		
グリッド	80×120×106 Grid		
アクティブ・ブロック数	384, 050		
基準温度	91. 0℃ (2, 419. 4m)		
基準圧力	34, 370kPa (2, 419. 4m)		
C O ₂ 圧入レート、圧入期間	250, 000 トン/年×3 年		
圧入圧力上限	41, 853kPa		
岩石性状	溶岩（貯留層）	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
平均孔隙率	0. 125 Bennion (2005) ¹⁾	0. 127	0. 150
平均浸透率 (mD)	2. 7	0. 0072	0. 000035
圧縮率 (kPa ⁻¹)	8. 073 × 10 ⁻⁷ 測定値		
塩分濃度 (ppm NaCl)	35, 100 ([Cl ⁻]=21, 300ppm)		
相対浸透率	溶岩（貯留層）	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
気相 相対浸透率 Krg	Bennion (2005) ¹⁾		Corey (1954) ²⁾
液相 相対浸透率 Krw			van Genuchten (1980) ³⁾
臨界ガス飽和率 Sgc	0. 04 Bennion (2005) ¹⁾		0. 05
不動水飽和率 Swir	0. 558 Bennion (2005) ¹⁾		0. 8
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0. 241 from default value of GEM		—
毛管圧力曲線	溶岩（貯留層）	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
	Bennion (2006) ⁴⁾ , van Genuchten (1980) ³⁾		測定値
Pc (kPa)	28. 8	428. 1	469

【参考文献】

- 1) Bennion, B., 2005, Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin: *paper SPE 95547*.
- 2) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly*, November, 38-41.
- 3) 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.
- 4) Bennion, B., 2006 The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-Brine systems: *paper SPE 99325*.

(4) シミュレーションによるCO₂の圧入挙動① CO₂圧入時の挙動

50 個のモデルに対して、25 万トン/年×3 年間の挙動予測シミュレーションを行ったところ、全てのモデルにおいて 25 万トン/年×3 年間の圧入が可能であった。

そこで、このシミュレーションの結果において圧入終了時における坑底圧力（貯留層上限度での坑内圧力）の圧力上昇量で序列をつけ、50 個のモデルの累積確率分布を作成し、圧力上昇量が当該モデル以下になる確率をそれぞれ P10、P50、P90 のパーセンタイル値として設定した（図 3.1-1）。これらの 3 つのモデルについて CO₂ 挙動予測シミュレーションを行った。

- 1) P10 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 10%
- 2) P50 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 50%
- 3) P90 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 90%

これらのモデルに与えられた浸透率は図 3.1-2 のようになっている。

図 3.1-3～図 3.1-5 に 3 つの貯留層モデル（P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル）における圧入期間（3 年間）の CO₂ 圧入に伴う坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的变化を示す。なお、3 年間の CO₂ 飽和率分布および溶解 CO₂ 分布については、3.1.1 (5) において述べる。

3 つのシミュレーションモデルにおける、圧入終了直前の坑底圧力は P10 モデルで 36,180kPa（ $\Delta P=1,800\text{kPa}$ ）、P50 モデルで 36,580kPa（ $\Delta P=2,200\text{kPa}$ ）、P90 モデルで 37,660kPa（ $\Delta P=3,290\text{kPa}$ ）であり、いずれのモデルにおいても設定した圧入圧力上限（41,853kPa）を大きく下回って、25 万トン/年×3 年間の CO₂ を全量圧入が可能である。また、いずれのモデルにおいても貯留層圧力は圧入終了後に速やかに低下し、圧入終了 5 年後にはほぼ初期貯留層圧力に近い約 35,000kPa（ $\Delta P=700\text{kPa}$ ）まで低下している。

なお、2.7.3 で述べた通り、滝ノ上層 T1 部層は堆積岩と比較して不均質性・異质性が

高く、掘削後の解析結果から、苫小牧CCS-1を掘削した領域は、滝ノ上層T1部層の高AI（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層T1部層の低AI（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

② 貯留層圧力分布

3年間のCO₂圧入終了時点における帯水層圧力の変化（圧入前の初期圧力からの変化量）を図3.1-6～図3.1-8に示す。いずれのモデルにおいても圧力の拡がり圧入井を中心にほぼ南北に長軸をもつ楕円状となる。

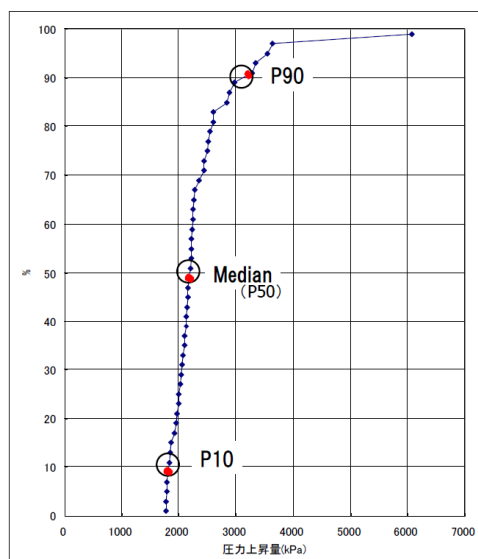


図 3.1-1 50 個のモデルの 3 年間の圧入による圧力上昇量の累積確率分布

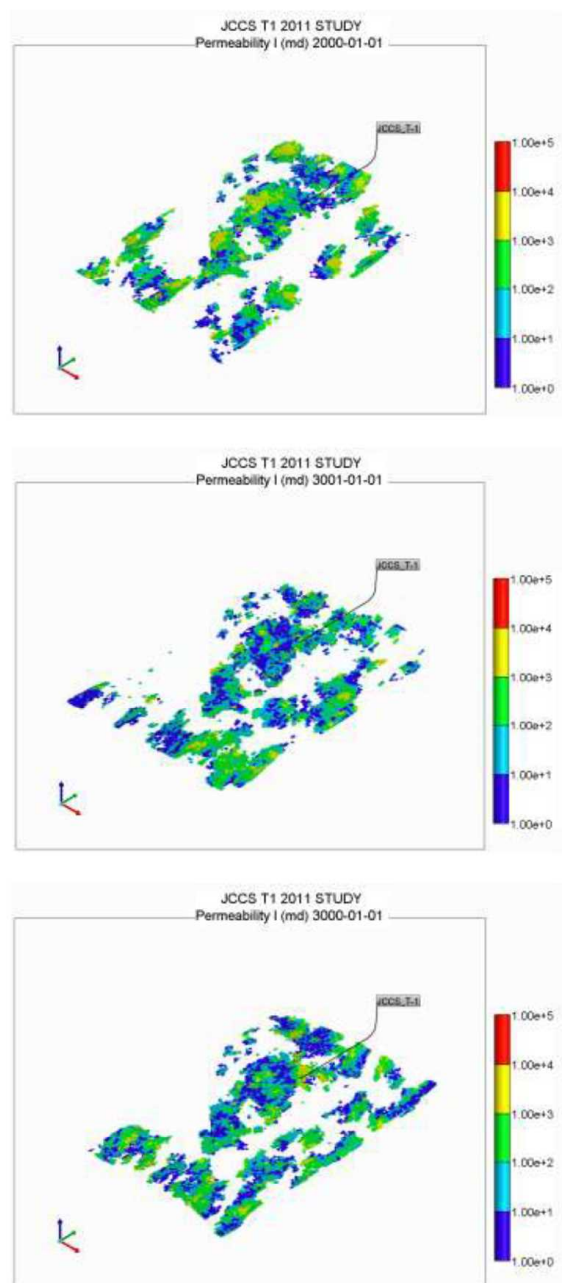


図 3. 1-2 浸透率(単位 : mD)分布 (P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル)

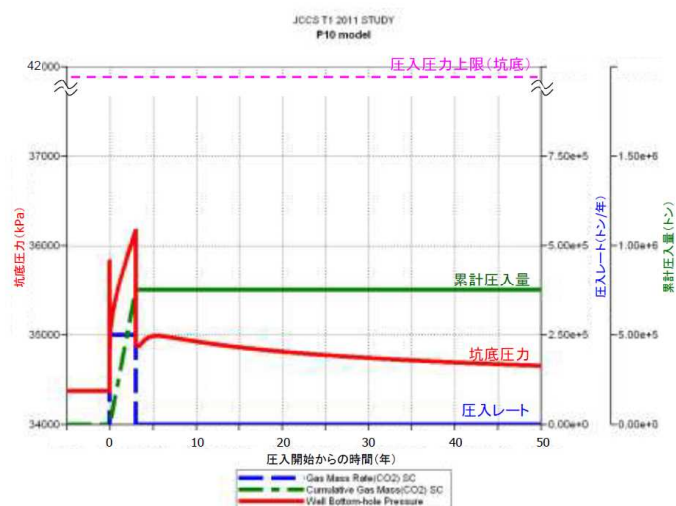


図 3.1-3 P10 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

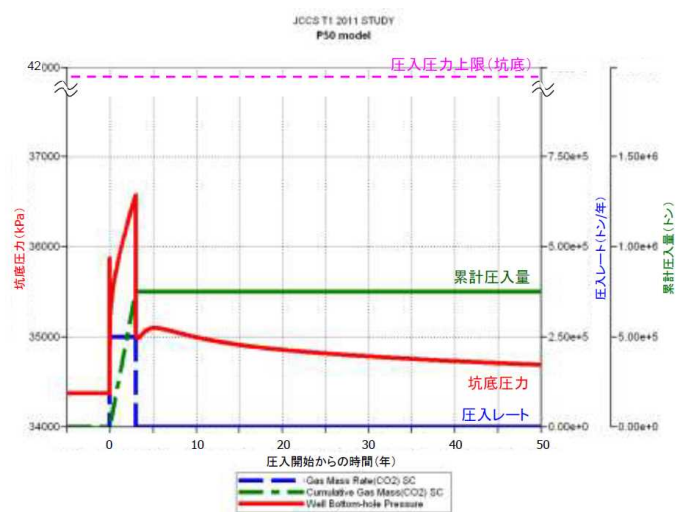


図 3.1-4 P50 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

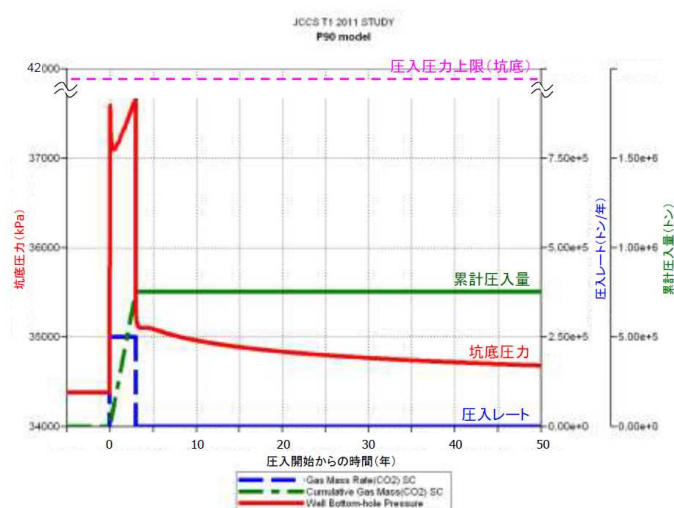


図 3.1-5 P90 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

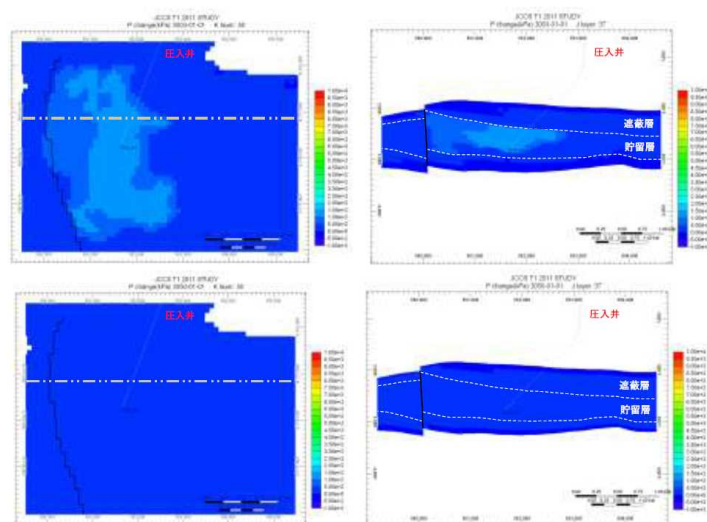


図 3.1-6 CO₂圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（P10 モデル）

（上：圧入終了時（3 年後） 下：50 年後）

（左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

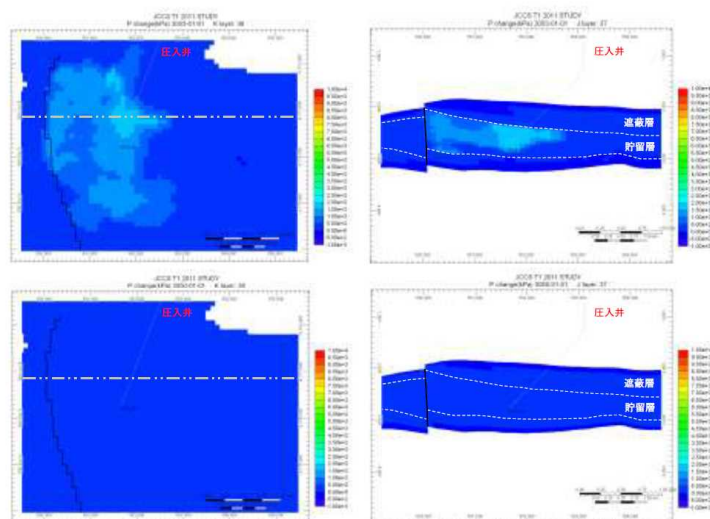


図 3.1-7 CO_2 圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移 (P50 モデル)

(上: 圧入終了時 (3 年後) 下: 50 年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

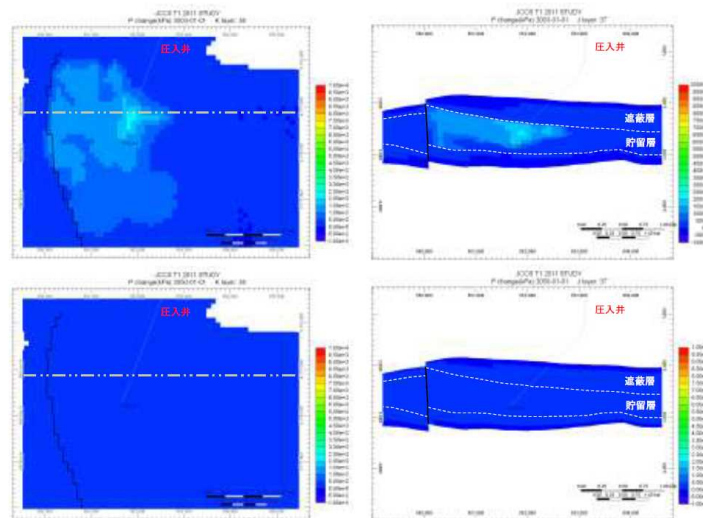


図 3.1-8 CO_2 圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移

(P90 モデル) (上: 圧入終了時 (3 年後) 下: 50 年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 38) 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CO₂の長期挙動予測

3つの貯留層モデル(P10モデル、P50モデル、P90モデル)について、圧入開始から1,000年間(圧入3年間、圧入終了後997年間)のCO₂の挙動予測シミュレーションを実施した。以下に長期的な挙動に関する各モデルの比較を示す。

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CO₂飽和率分布を図3.1-9～図3.1-11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3.1-12～図3.1-14に示す。

1) P10モデル

CO₂は、高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に選択的に圧入される。圧入されたCO₂は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相^{注)}CO₂は圧入井から水平的に約600m先まで、溶解CO₂は約800m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂はほとんど移動せず溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO₂は拡がらない。

注) CO₂は、温度圧力条件により液体と気体の性状を合わせ持った状態となるが、シミュレータの中では「気相」として取り扱われることから、本書では「気相」と称する。

2) P50モデル

CO₂は、比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル同様、圧入されたCO₂は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相CO₂は圧入井から水平的に約450m先まで、溶解CO₂は約700m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂は殆ど移動せず、溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO₂は拡がらない。

3) P90モデル

CO₂は貯留層の比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル、P50モデル同様、圧入されたCO₂は坑井を中心として拡がり、圧入終了時点で気相CO₂は圧入井から水平的に約400m先まで、溶解CO₂は約500m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂はほとんど移動せず、溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解

CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。
遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）へはCO₂は拡がらない。

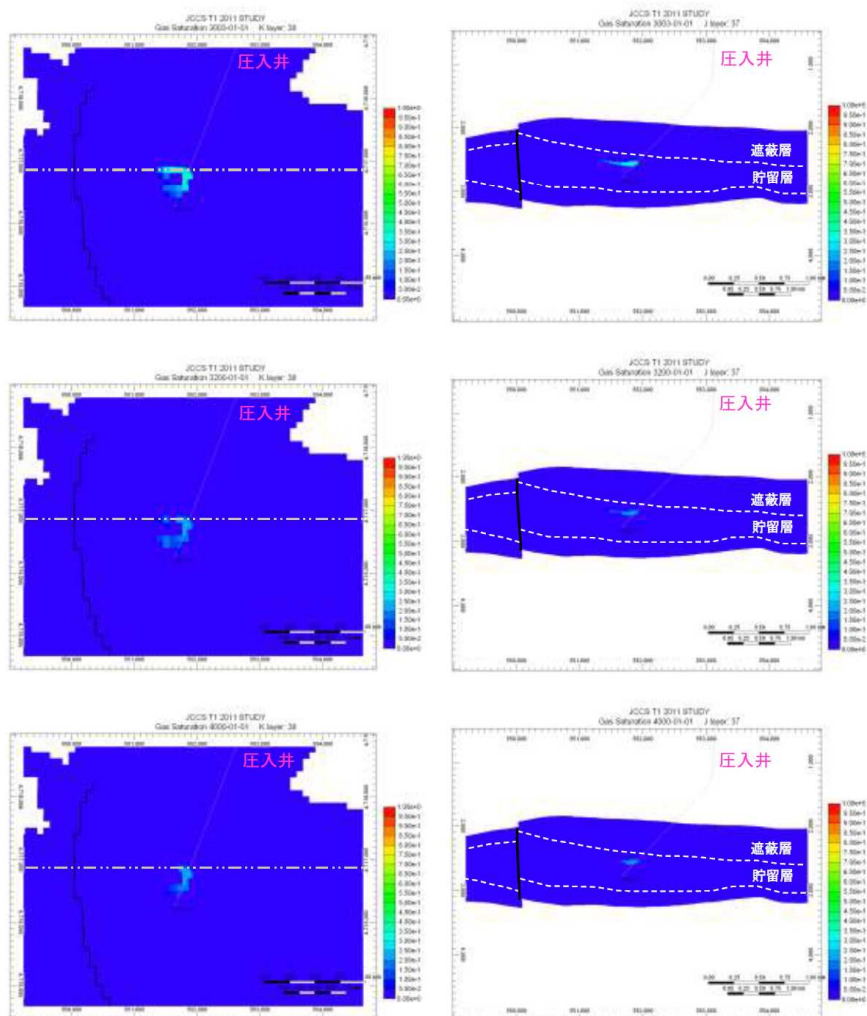


図 3.1-9 P10 モデルにおけるCO₂飽和率の推移

（上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）

（左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

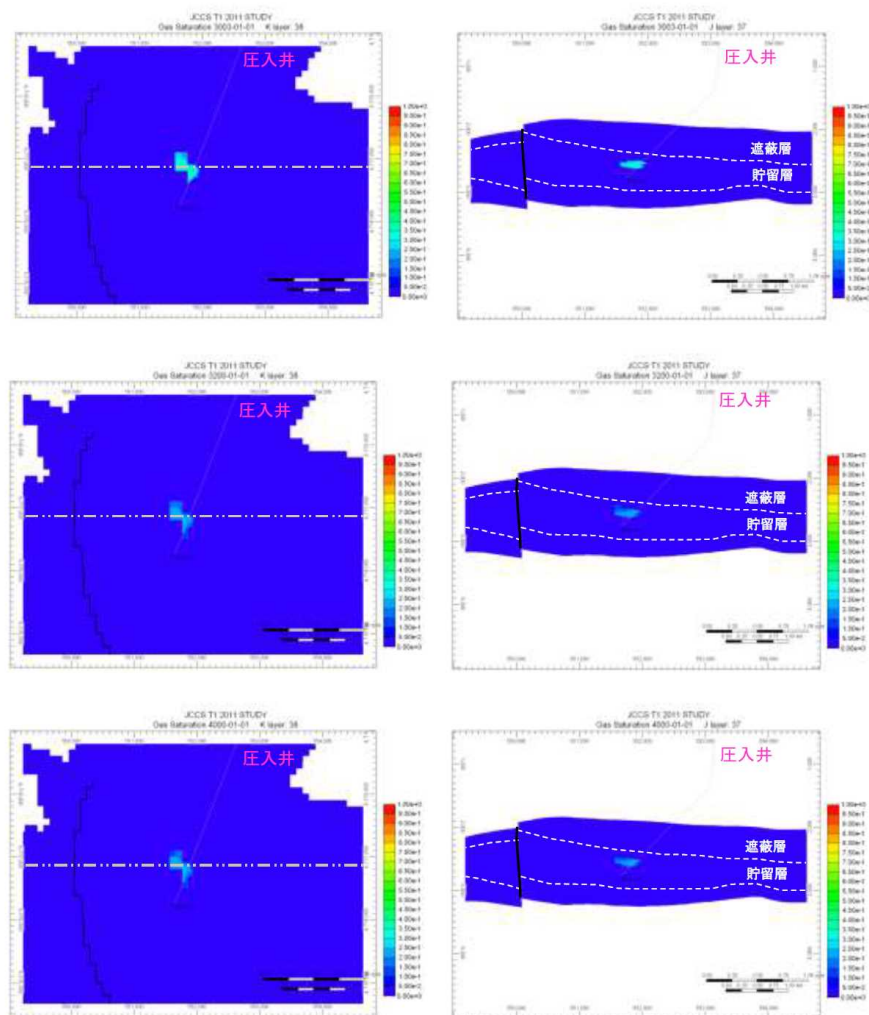


図 3.1-10 P50 モデルにおける CO_2 飽和率の推移

(上 : 圧入終了時 (3 年後) 中 : 200 年後 下 : 1,000 年後)

(左 : 平面分布 (k 方向セル 38) 右 : 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

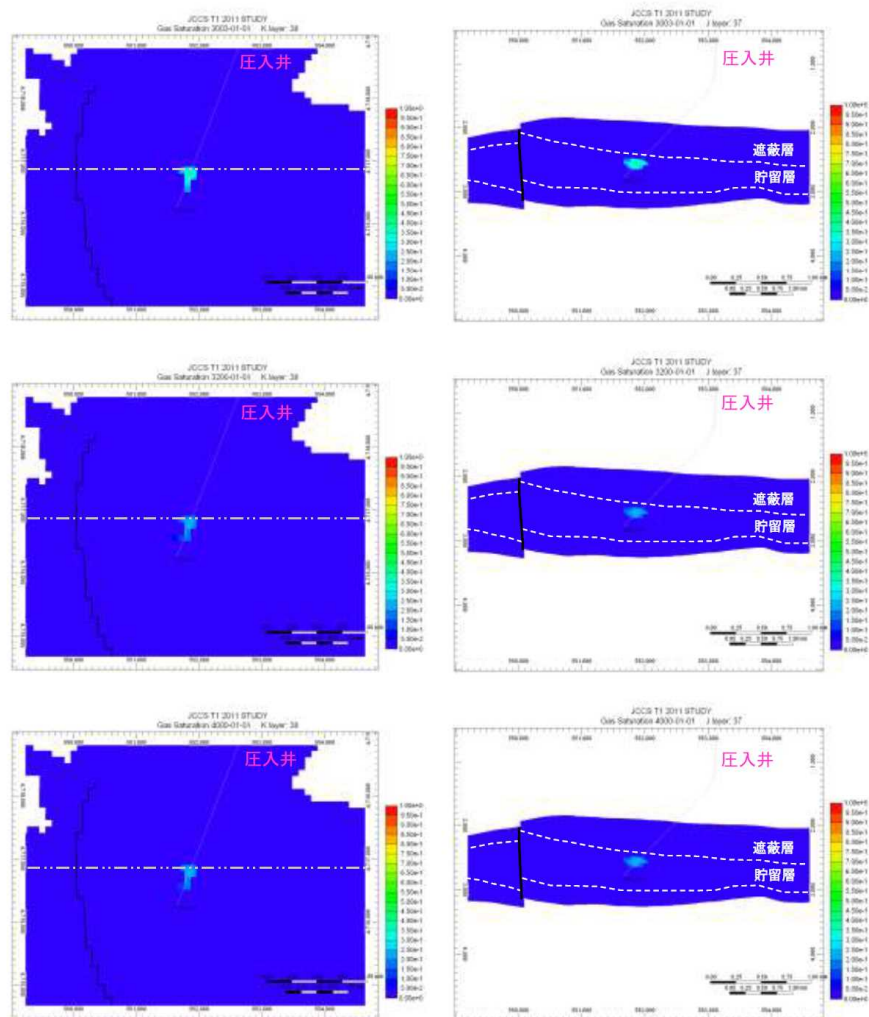


図 3.1-11 P90 モデルにおける CO_2 飽和率の推移

(上：圧入終了時 (3 年後) 中：200 年後 下：1,000 年後)

(左：平面分布 (k 方向セル 38) 右：東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

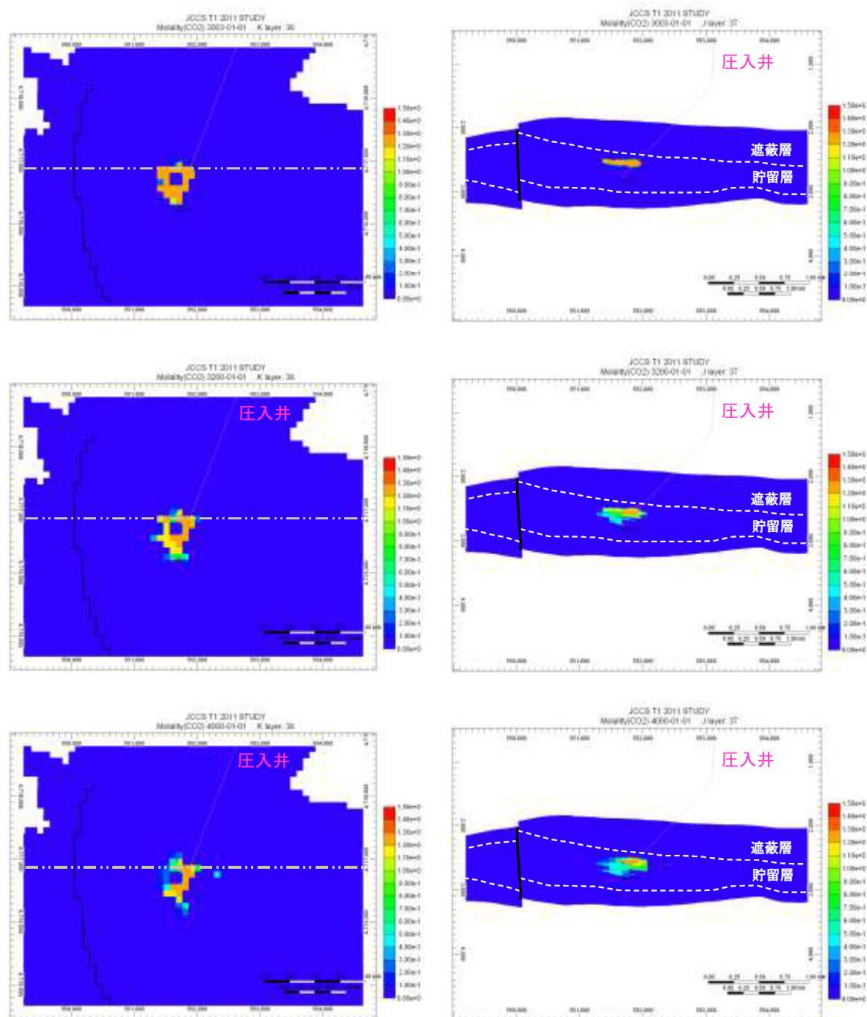


図 3.1-12 P10 モデルにおける溶解 CO_2 濃度 (単位: mol/kg) の推移
 (上: 圧入終了時 (3 年後) 中: 200 年後 下: 1,000 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

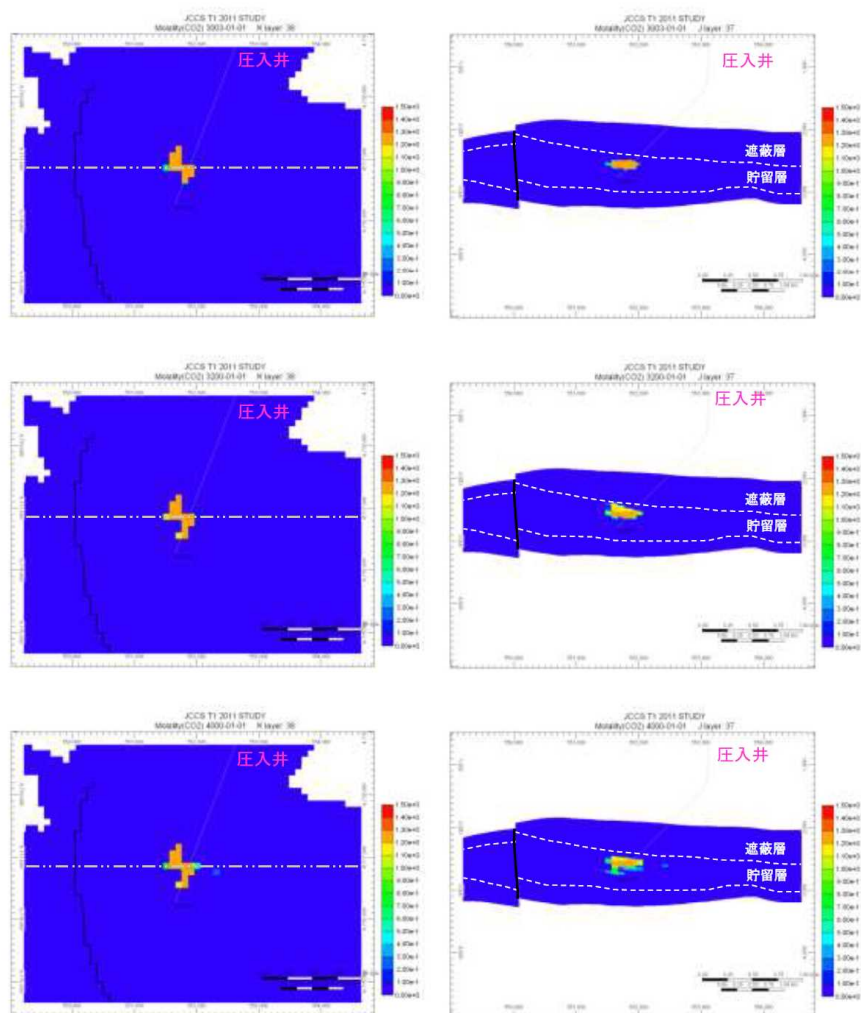


図 3.1-13 P50 モデルにおける溶解 CO_2 濃度 (単位: mol/kg) の推移
 (上: 圧入終了時 (3 年後) 中: 200 年後 下: 1,000 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

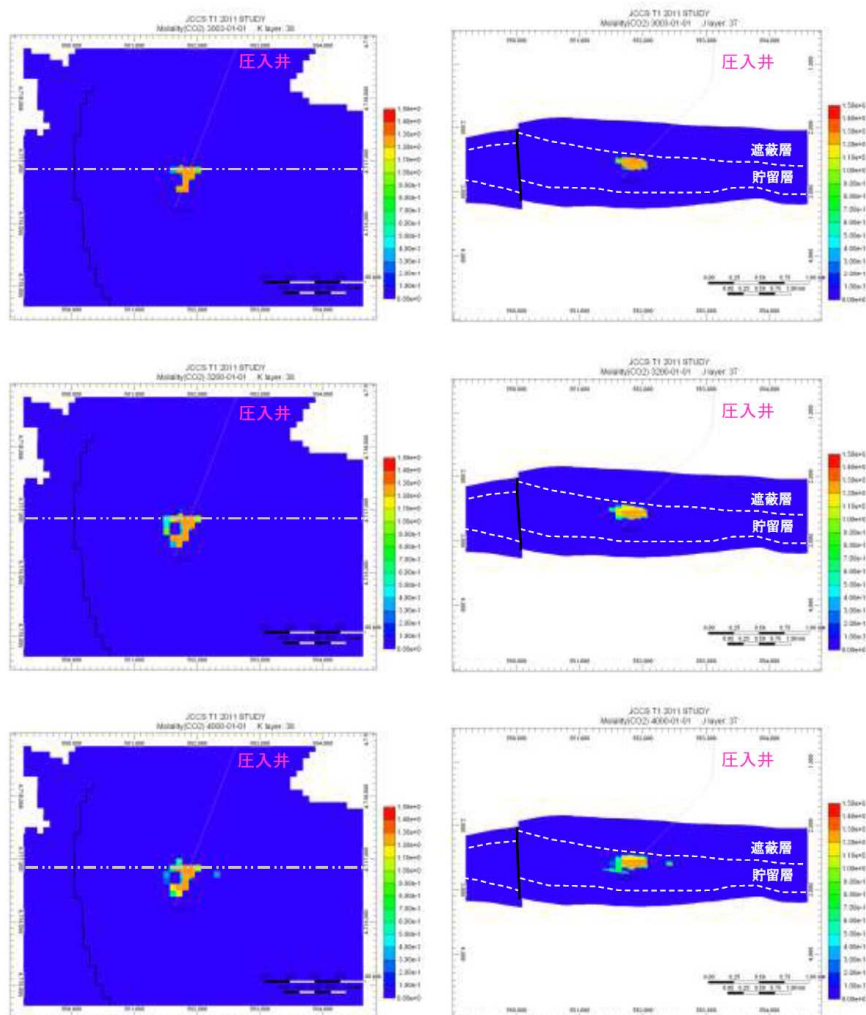
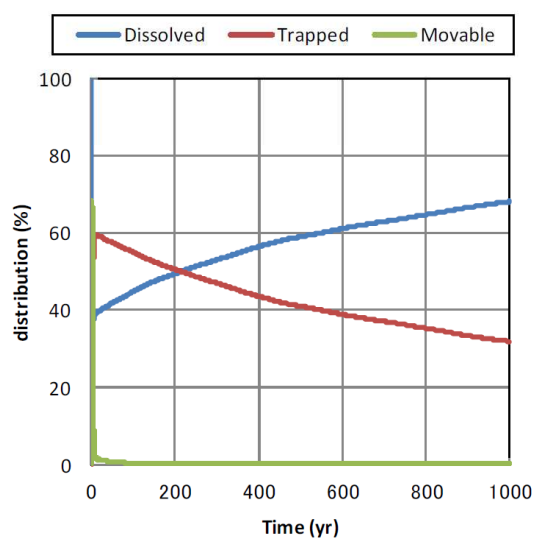


図 3.1-14 P90 モデルにおける溶解 CO_2 濃度 (単位: mol/kg) の推移
 (上: 圧入終了時 (3 年後) 中: 200 年後 下: 1,000 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

② CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留CO₂の3つの貯留形態を Movable（移動する可能性がある気相CO₂）、Dissolved（溶解CO₂）および Trapped（孔隙などにトラップされ動かない気相CO₂）で表現し、各モデルにおける3種類の貯留形態のCO₂圧入量に対する割合について、その経時変化を図3.1-15～図3.1-17に示す。いずれのモデルにおいても圧入終了後すぐに Movable CO₂ 量は減少し、約200年でその割合は殆ど0となる。その後、残留ガス飽和率によりトラップされたCO₂が地層水に溶解することで、Trapped CO₂と Dissolved CO₂の割合が変化していく。その割合については、1,000年後にはP10モデルにおいてはDissolved CO₂量が約70%に達するのに対して、P90モデルにおいては約45%となる。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3.1-15 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P10モデル）

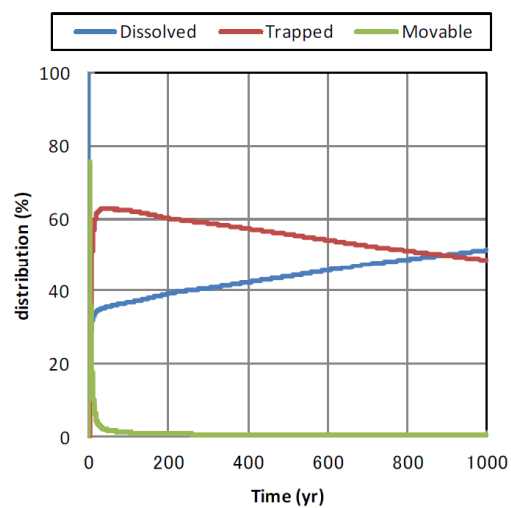


図 3.1-16 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P50 モデル）

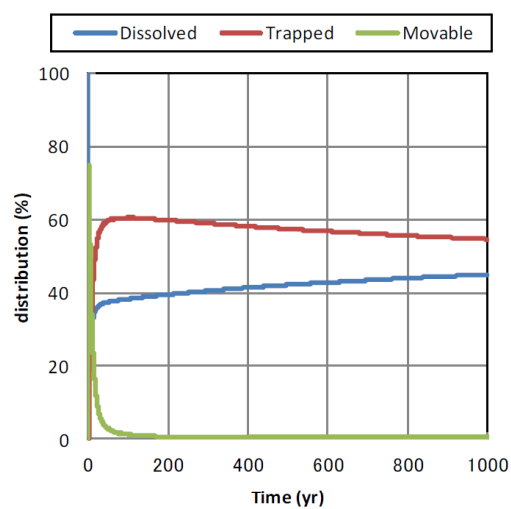


図 3.1-17 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P90 モデル）

(6) 総合評価

① 滝ノ上層評価のまとめ

滝ノ上層について行った貯留層および遮蔽層の評価ならびに 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 3.1-2 にまとめる。

- 1) 滝ノ上層は、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。本層の圧入対象層は、溶岩～凝灰角礫岩相と凝灰岩相とに大別され、凝灰岩相では、貯留層としてそれほど良好な性状は期待できないが、溶岩～凝灰角礫岩相では良好な性状が期待できる。
- 2) 滝ノ上層T1部層の上位には、主に泥岩からなる層厚約1,100mの振老層および平取+軽舞層が分布する。調査データから、苫小牧沖構造の西翼を通る断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は良好な遮蔽性能を有する地層であると期待できる。
- 3) 貯留層の性能、遮蔽層の健全性を評価するため、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。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。
 - ・作成した50個の貯留層モデルの全てにおいて25万トン/年×3年間の圧入は可能であった。
 - ・気相 CO_2 の拡がり（圧入終了時点で、圧入井から水平にP10モデルで約600m程度、P50モデルで450m程度、P90モデルで約400m程度）であった。
 - ・溶解 CO_2 の拡がり（圧入終了時点で、P10モデルで約800m程度、P50モデルで700m程度、P90モデルで約500m程度）であった。
 - ・3つのモデルでは遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）への CO_2 の到達は、圧入開始から1,000年後においても確認されなかった。
- 4) 滝ノ上層は堆積岩と比較して不均質性・異方性が高く、掘削後の解析結果から苫小牧CCS-1を掘削した領域は滝ノ上層の高AⅠ（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層の低AⅠ（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

② 総合評価

滝ノ上層への25万トン/年×3年間の CO_2 圧入を行った場合、滝ノ上層への CO_2 の圧入は可能であり、遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）への CO_2 の拡がりはないと評価する。