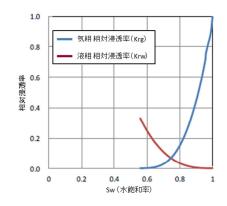
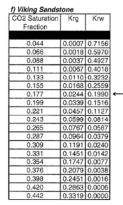
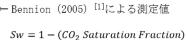
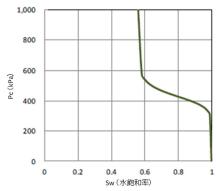


第4.5-11 図 地質モデルにおける孔隙率および浸透率分布の更新









· van Genuchten (1980) [2]による関数

毛細管圧曲線の導出 w - Suis

 $Pc = Po \times \left(\left[S^* \right]^{-\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{(1-\lambda)} \qquad S^* = \frac{Sw - Swir}{1 - Swir}$

Pc: 毛細管圧力(kPa), Po: 置換圧力(kPa), λ : 係数($\lambda=0.91$), Sw: 水飽和率, Swir: 残留水飽和率, S^* : 正規化された水飽和率

・ Akaku (2008) [3]による経験式 $\log Po = -0.32931 \times \log k + 1.9259$

- ・ $k = 0.0072 \, \text{mD}$ (平均浸透率) により, $Po = 428.1 \, \text{kPa}$ 。
- Swir = 0.558
- 注:1. 上:相対浸透率曲線,下:毛細管圧曲線。
 - 2. 経済産業省(2011),「苫小牧地点における貯留層総合評価 補足説明資料」から引用。
 - http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004_s02_00.pdf
 - 3. 相対浸透率曲線および毛細管圧曲線については、採取したコアの浸透性が低く、新たな相対浸透率のデータを取得できなかったため、圧入前の地質モデルと同様のものを使用した。
- 第 4.5-12 図 修正モデルで用いた貯留層(凝灰岩)の相対浸透率曲線と毛細管圧曲線およびそれらの導出手法

d. 構造モデルの更新

構造モデルは、滝ノ上層圧入井の掘削実績に合わせて深度データを更新した。

e. 属性モデルの更新

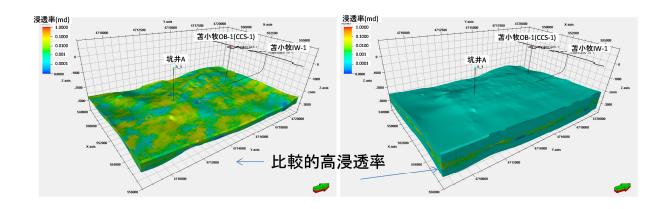
b.の手法により地質モデルの属性を更新した。更新した属性モデルの例を,第 4.5-13 図に示す。

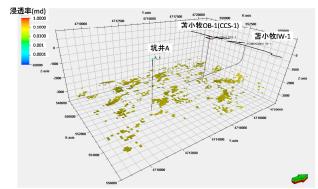
圧入井掘削前のモデルは地球統計学的に 50 種類のモデルを作成したが,圧入井の掘削の結果,圧入井の極近傍以外で岩相や属性を地球統計学的に推定することは困難と判断し,1 ケース (P50 モデル。第 4.5 節(1) ア) c.参照)の属性モデルを作成した。実際に CO₂ を圧入開始後には,定期的なフォールオフテストの実施や繰り返し弾性波探査の実施を計画しており,それらの結果を踏まえたうえで属性モデルを修正する。

^[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, p8

van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

^[3] Akaku, K. 2008. Feasibility Study of Residual CO₂ Trapping. In "Nano-Mega Scale Flow Dynamics in Energy System": Tohoku University Press, Sendai.





注:浸透率>0.05mD でフィルタリング

第 4.5-13 図 更新した属性モデルの例(浸透率)

CO₂挙動予測シミュレーション

作成した地質モデルを用いて,CO。挙動予測シミュレーションを実施し,CO。圧入時の圧 力挙動のほか,貯留層内での移動・到達範囲を推定した。CO2の圧入レートは25万トン/年 で,3年間の連続圧入(計75万トン圧入)とした注1。

なお,後述のイ)で示す滝ノ上層圧入井の掘削結果を踏まえた予測では,圧入レートを坑 底圧の規定上限圧力で制限するため、圧入は1,500トン/年程度の圧入レートで開始するが、 圧入開始直後に坑底圧の規定上限圧力に到達するため圧入レートを下げ,その後概ね 300 トン/年程度の圧入レートで推移する。3年間の累計圧入量は,1,000トン程度となる。

ア) 滝ノ上層 T1 部層における CO₂ 挙動予測 (圧入井掘削前)

a. 概要

Computer Modelling Group Ltd.社の GEM (ver2010.12)を使用し,シミュレーション で考慮した貯留メカニズムは,以下の3種類である

- ・泥岩の毛細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 00,トラッピング

^{注1} 平成 23 年度シミュレーションは 25 万トン/年の圧入レート ,平成 24 年度シミュレーションは 20 万トン/年の 圧入レートであるのは,CO₂の供給量の見直しにより計画変更したことによる。また,保守・点検の都合,モニ タリング計画との関連,貯留層の状況等により,一時的に,あるいは長期的に一方の貯留層だけに圧入するケ -スも想定されることから,それぞれに圧入する最大値として,圧入レートを設定している。

・CO2の地層水への溶解による溶解トラッピング

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。圧入井における滝ノ上層 T1 部層の全区間に対して CO_2 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の結果から, 地層破壊圧力の 90% (41,853kPa) とした^{注1}。

b. 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, 物理検層測定値等) および文献値により, 第4.5-5 表に示す値を用いた。

-

^{注1} 苫小牧 CCS-1 の遮蔽層におけるリークオフテストで確認したリークオフ圧力は ,その深度(垂直深度 2,352m) で ,45.3MPa(461.6kg/cm²)であった。これは等価泥水比重で 1.96g/cm³ となる。この等価泥水比重から ,滝ノ上層圧入井の遮蔽層深度 (垂直深度 2,418m) におけるリークオフ圧力を求め(473.9kg/cm²) , その 90%の値 (426.5kg/cm²=41,853kPa)をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。

第4.5-5表 シミュレーションパラメータ一覧(平成23年度地質モデル)

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2011 モデル						
サイズ	8km×12km×4km (ideal volume: 24km×24km×4km)						
グリッド	80×120×106 グリッド						
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)						
CO 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)				
亚切尔堡	0.125	0.127	0.15				
平均孔隙率	Bennion(2005) ^[1]	0.127	0.15				
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(NaCI)	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 Benni	0.8					
早十球のガラ約和東 Carmov	0.2						
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	from default	-					
毛細管圧力曲線	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩(遮蔽層)				
七細目圧力曲線	Bennion (2006) ^[4] , va	測定値					

c. 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。

圧入終了時の坑底圧力(貯留層上限深度での坑内圧力)の圧力上昇量を序列化して, 50個のモデルの累積確率分布を作成した。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(第4.5-14図)。

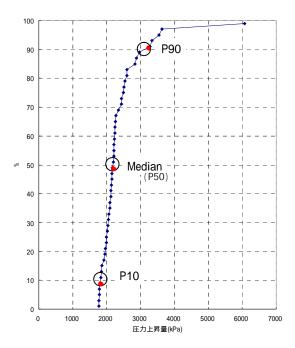
⁻

^[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, pp.7-9, p.12

^[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp.38-41

van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

 $^{^{[4]}}$ Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO_2 relative permeability at reservoir condition in CO_2 -Brine systems. paper SPE 99325, p.9



第 4.5-14 図 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(平成 23 年度地質 モデル)

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。

- a) P10 モデル:圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 10%
- b) P50 モデル:圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 50%
- c) P90 モデル:圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 90%
- 3つのモデルに与えられた浸透率分布の例を,第4.5-15図に示す。
- イ) 滝ノ上層 T1 部層における CO₂ 挙動予測 (圧入井掘削結果を踏まえた予測)

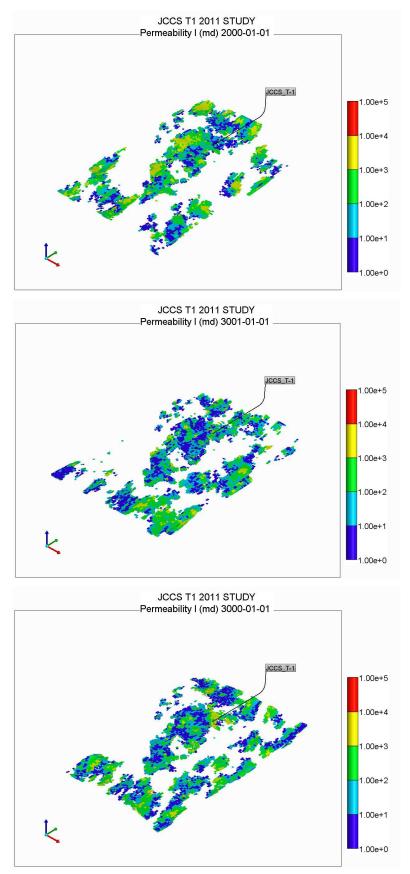
a. 概要

Computer Modelling Group Ltd.社の GEM (ver2014.10) を使用し,シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは,以下の3種類である

- ・泥岩の毛細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 002 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

圧入井における滝ノ上層の仕上げ全区間に対して CO_2 を圧入する設定とした。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,滝ノ上層圧入井の振老層下部泥岩(遮蔽層)で実施したエクステンデットリークオフテストで取得したリークオフ圧力を地層の破壊圧と仮定し,その90%(38,000kPa@PT センサー深度)と設定した。



注: 上から順に P10 モデル, P50 モデル, P90 モデル。単位は, mD。 第 4.5-15 図 浸透率分布(平成 23 年度地質モデル)

b. パラメータ

シミュレーションパラメータは,滝ノ上層圧入井のデータ(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,第4.5-6表に示す値を用いた。

第4.5-6表 シミュレーションパラメータ一覧(平成27年度地質モデル)

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2015 モデ	·Jレ				
サイズ	8km×12km×4km 2km×2km×1km(セクターモデル)					
グリッド	80×120×106 グリッド 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 (2,340m/PT センサー深度)					
基準圧力	32,600kPa (2,340m/PT センサー深度)					
CO ₂ 圧入レート , 圧入期間	200,000 トン/年×3年(設定最大レート)					
圧入圧力上限	38,000kPa (PT センサー深度)					
岩石性状	凝灰岩(貯留層)	泥岩(遮蔽層)				
平均孔隙率	滝ノ上層圧入井 AI 分布から推定	0.15				
平均浸透率:mD	滝ノ上層圧入井ビルドアップテスト結果等 から推定	0.000035				
圧縮率:kPa ⁻¹	8.073×10 ⁻⁷ (測定値)					
塩分濃度:ppm(NaCI)	35,100 (Cl ⁻ = 21,300ppm)					
相対浸透率	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	Bellitton (2005)	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	_				
最大人を用り入配作中 Sgrillax	from default value of GEM					
毛細管圧力曲線	凝灰岩(貯留層)	泥岩(遮蔽層)				
七洲自江川西湖	Bennion (2006) $^{[4]}$, van Genuchten (1980) $^{[3]}$	測定値				

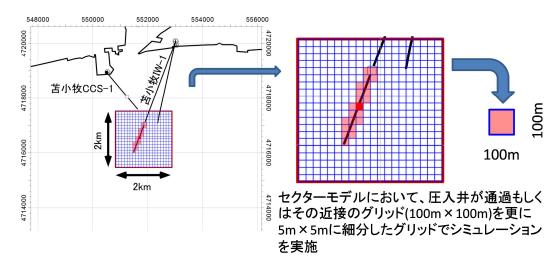
滝ノ上層の貯留岩性状が予想以上に低かったため、地質モデルの一部分を切出した $2 \text{km} \times 2 \text{km}$ のセクターモデルを作成した。 さらにより正確なシミュレーションを実施するために、 $100 \text{m} \times 100 \text{m}$ のセクターモデルとし、滝ノ上層圧入井が通過するグリッドを $5 \text{m} \times 5 \text{m}$ のグリッドに細分の上、シミュレーションを実施した(第 4.5-16 図)。

^[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, pp.7-9, p.12

^[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp.38-41

van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

 $^{^{[4]}}$ Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO_2 relative permeability at reservoir condition in CO_2 -Brine systems. paper SPE 99325, p.9

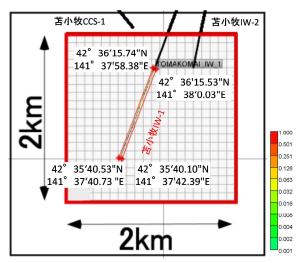


注:全域で作成した地質モデルからセクターモデル($2 \text{km} \times 2 \text{km}$)を切出し,その中を $100 \text{m} \times 100 \text{m}$ に分割した。そのうちの圧入井が通過するグリッドをさらに $5 \text{m} \times 5 \text{m}$ に分割してシミュレーションを実施した。

第 4.5-16 図 平成 27 年度シミュレーションに用いたセクターモデルとグリッド

圧入した CO₂の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO_2 飽和度および溶解 CO_2 量の分布範囲を考慮し,圧入した CO_2 の平面的な分布範囲を推定した(第 4.5-17 図)。



苫小牧CCS-1 苫小牧IW-2 42° 36'15.95"N 141° 37'58.25"E 42° 36'15.67"N 141° 38'0.31"E 3.981 1.585 42° 35'39.89"N 0.631 141° 37'42.52"E 42° 35'40.43"N 0.251 141° 37'40.45 "E 0.100 0.040 0.016 0.006 2km 0.003

CO。飽和度の最大分布域

溶解CO₂量(mol/kg)の最大分布域

- 注:1. 図中の滝ノ上層圧入井,萌別層圧入井および苫小牧 CCS-1 は,坑井の坑跡を上面に投影したもの。
 - 2. 滝ノ上層圧入井の仕上げ区間全体から, CO_2 が滝ノ上層中に圧入される。圧入に際し予想される CO_2 飽和度および溶解 CO_2 量の分布を,階調をつけて色表示した。
 - 3. 図中の座標は,シミュレーションにより予想される CO_2 飽和度および溶解 CO_2 量の分布域を考慮して想定した圧入した CO_2 の分布範囲を平面に投影したもの。シミュレーション結果は,三次元的にグリッド化した地質モデルを用いて実施したため,分布自体もグリッドを反映した形(四角)となる。
 - 4. 圧入した CO_2 の分布範囲は限定的となるため , 滝ノ上層圧入井の圧入区間から , CO_2 飽和度では 20m , 溶解 CO_2 量では 25m までの範囲とした。
 - 5. CO2 飽和度の下限値は,0.001(0.1%)。溶解 CO2 量の下限値は,0.001mol/kg。

第4.5-17 図 CO₂の平面的な分布範囲(平成27年度シミュレーション結果)

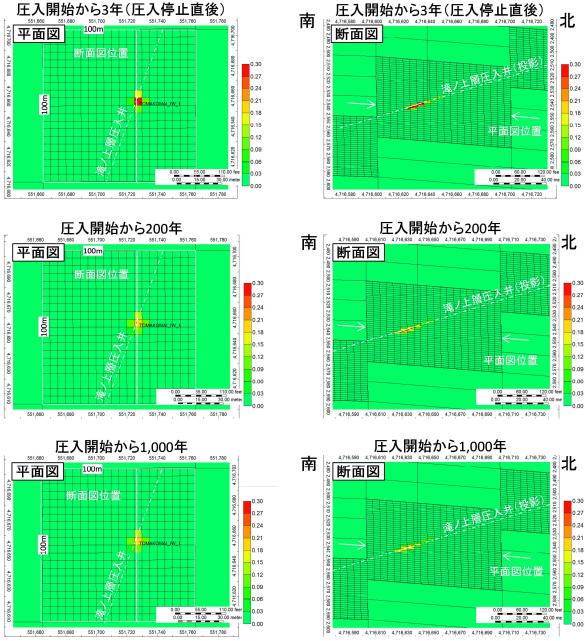
予想される CO_2 飽和度の分布域は溶解 CO_2 量の分布域に含まれるため , 溶解 CO_2 量の分布域を圧入した CO_2 の分布範囲とした。

第4.5-7表に, CO2の平面的な分布範囲の座標を示す。

第4.5-7表 海底下廃棄した CO₂の平面的な分布範囲 (滝ノ上層 T1 部層)

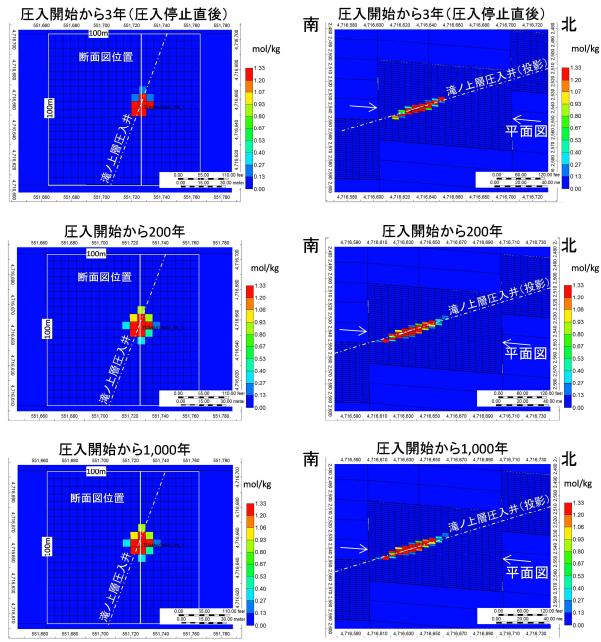
	北限	北限		南限		東限		西限			
度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
42	36	15.95	42	35	39.89	141	38	0.31	141	37	40.45

また , CO_2 飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第 4.5-18 図に , 溶解 CO_2 量の分布に対するシミュレーション結果を第 4.5-19 図に示す。



- 注:1. 左:坑跡が通過する地点の平面図,右:その地点の南北方向の断面図。
 - 2. 上段:圧入開始から3年後(圧入停止直後),中段:圧入開始から200年後,下段:圧入開始から1,000年後。
 - 3. シミュレーションに使用する地質モデルを,圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために,地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは 100m×100m のグリッドであるが,圧入井が通過するグリッドは 5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した(平面図では 5m×5m のグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリッドは,垂直方向は約 2m に分割した。

第 4.5-18 図 CO₂ 飽和度の推移 (平成 27 年度シミュレーション結果)



- 注:1. 左:坑跡が通過する地点の平面図,右:その地点の南北方向の断面図。単位は,mol/kg。
 - 2. 上段:圧入開始から3年後(圧入停止直後),中段:圧入開始から200年後,下段:圧入開始から1,000年後。
 - 3. シミュレーションに使用する地質モデルを,圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために,地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは 100m×100m のグリッドであるが,圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した(平面図では5m×5mのグリッド表示は省略)。圧入井が通過するグリッドは,垂直方向は約2mに分割した。

第 4.5-19 図 溶解 CO2 量の推移 (平成 27 年度シミュレーション結果)

圧入した CO₂の垂直的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO_2 飽和度および溶解 CO_2 量の垂直的な分布範囲は,第 4.5-18 図および第 4.5-19 図に示すとおり,圧入井の坑跡に沿った上下 10m 以内となる。

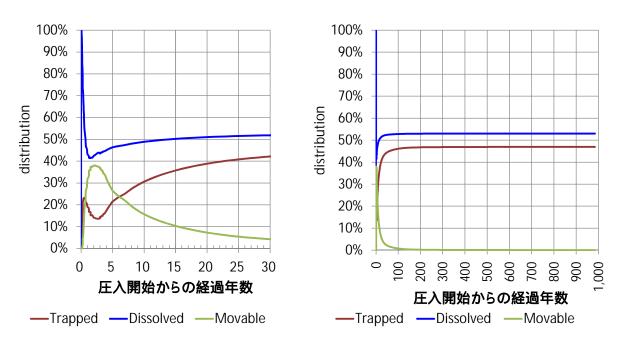
第 4.5-8 表に, CO_2 の垂直的な分布範囲の座標を示す。なお,安全側に立ち,圧入井の貯留層区間の下 50m とし,上限は遮蔽層深度としている。

第4.5-8表 海底下廃棄した CO2の垂直的な分布範囲 (滝ノ上層 T1 部層)

GL = 9.1m	掘削深度(mMD)	垂直深度(mVD)	レベル (mbmsl)	備考
滝ノ上層上限	4,624	2,390	2,381	
圧入井坑底深度	5,800	2,753	2,794	
CO ₂ 上限分布深度	-	-	2,381	遮蔽層深度
CO ₂ 下限分布深度	-	-	2,819	坑底+25m
CO ₂ 飽和度上限分布深度	-	ı	2,381	遮蔽層深度
CO ₂ 飽和度下限分布深度	-	ı	2,814	坑底+20m
溶解 CO ₂ 量上限分布深度	-	ı	2,381	遮蔽層深度
溶解 CO₂量下限分布深度	-	1	2,819	坑底+25m

注: 圧入した CO_2 の分布範囲は限定的となるため,下限は圧入井の坑底(圧入区間の最深部)から, CO_2 飽和度では 20m,溶解 CO_2 量では 25m までの範囲とした。また,上限については,遮蔽層までとした。溶解 CO_2 量の方がやや広範囲に分布するため,圧入した CO_2 の分布範囲は,溶解 CO_2 量の分布範囲とした。

貯留 CO_2 の3つの貯留形態を, Movable (移動する可能性がある気相 CO_2), Dissolved (溶解 CO_2) および Trapped (孔隙等にトラップされ動かない気相 CO_2) の3つに表現し, CO_2 圧入量に対する割合の経時変化を,第4.5-20図に示す。



注:左図;時間スケールが0~30年。右図;時間スケールが0~1,000年。

第 4.5-20 図 CO₂の貯留フォーム(割合)の変化(平成 27 年度シミュレーション結果)

圧入開始初期には圧入した CO_2 のほとんどは溶解するが ,貯留層の浸透性が低いために影響範囲が広がらず , すぐに溶解しきれなくなり , Movable CO_2 の割合が増加する。

圧入停止後に徐々に溶解 CO_2 量が増加するが,圧入停止後 50 年程度で安定する。圧入終盤より圧入井から徐々に周辺に移動した Movable CO_2 がトラップされ,約 200 年でその割合はほとんど 0 となる。

圧入停止から 200 年程度以降では, Movable, Dissolved および Trapped の割合は安定する。