

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



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
 ^[2] 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, CO₂ 挙動予測シミュレーションを実施し, CO₂ 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1)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 CO2 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 ー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 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。

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)					
C0₂ 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)			
可方式影响	0.125	0 127	0, 15			
半均扎原举	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 (測定值)					
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 Bennion (2005) ^[1]		0.8			
早十成のガフ約和変 Sarmay	0.2					
取入戏曲力入肥和率 Sgimax	from default	-				
毛细管压力曲缩	溶岩(貯留層)	凝灰岩(貯留層)	泥岩(遮蔽層)			
七至四月二日第	Bennion (2006) ^[4] , va	測定値				

第4.5-5 表 シミュレーションパラメーター覧(平成 23 年度地質モデル)

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

^[3] 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 CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-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 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

圧入井における滝ノ上層の仕上げ全区間に対して CO₂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。



JCCS T1 2011 STUDY Permeability I (md) 3001-01-01



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ー覧(平成27年度地質モデル)

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2015 モデル				
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	$Poppion\left(2005\right)\left[1\right]$	Corey (1954) ^[2]			
液相 相対浸透率 Krw	benirroir (2003) (3	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			
- 早十 武 図 ガ フ 約 印 家 Sarmay	0.241				
取八元田ガス記和平 Sylliax	from default value of GEM	-			
毛细管压力曲组	凝灰岩(貯留層)	泥岩 (遮蔽層)			
七細官江刀曲縁	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2km × 2km 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,100m×100m 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5m×5m 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

^[3] 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 CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-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(2km×2km)を切出し,その中を 100m×100m 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 5m×5m 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 CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲を考慮し,圧入した CO₂の平面的な分布範囲を推定した(第4.5-17 図)。



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, CO₂ が滝ノ上層中に圧入される。圧入に際し予想される CO₂ 飽和度および溶解 CO₂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 CO₂ 飽和度および溶解 CO₂量の分布域を考慮して想定した圧入した CO₂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 CO₂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, CO₂飽和度では 20m, 溶解 CO₂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。

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

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)

また, CO₂ 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 CO₂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。

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。
 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。

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。
 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 CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 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, CO₂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。

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	-	-	2,381	遮蔽層深度
CO_2 飽和度下限分布深度	-	-	2,814	坑底+20m
溶解 CO_2 量上限分布深度	-	-	2,381	遮蔽層深度
溶解 CO_2 量下限分布深度	-	-	2,819	坑底+25m

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)

注: 圧入した CO₂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,CO₂ 飽和度では 20m,溶解 CO₂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 CO₂量の方がやや広範囲に分布するため,圧入した CO₂の分布範囲は,溶解 CO₂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 $M CO_2$) 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 CO₂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 CO₂の割合が増加する。

 圧入停止後に徐々に溶解 CO₂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 CO₂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。