

帯水層貯留におけるシール層の遮蔽性能評価

西山 治希^{1*}・重岡 優希¹・木野戸 広¹・鳥羽瀬 孝臣²

¹株式会社J-POWERビジネスサービス 社会環境部（〒104-0045東京都中央区築地4-6-4）

²電源開発株式会社 技術開発部 茅ヶ崎研究所（〒1 253-0041神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88）

*E-mail: Haruki_Nishiyama@jpbs.co.jp

CO₂地中貯留は、CO₂の漏洩を防止するために貯留層の上部に十分な遮蔽性能を持つシール層が必要である。地中貯留の方法は幾つか提案されているが、最も一般的な帯水層貯留はシール層として浸透性が非常に小さな泥岩等のキャップロックの存在が前提である。本検討は帯水層貯留におけるシール層の遮蔽性能を評価することを目的に、実際に操業しているCCSプロジェクトの公開情報に基づき貯留層とシール層をモデル化して数値解析を行った。検討の結果、シール層が確実な遮蔽性能を得るための絶対浸透率の目安を得ることができた。また、貯留層最上部へCO₂ブルームが到達して残留ガス飽和度に達したときに、CO₂の浮力によってシール層の応答圧力が上昇することが分かった。

Key Words : carbon dioxide capture and storage, reservoir simulation, caprock layer, evaluation of sealing performance

1. はじめに

2015年の国連気候変動枠組条約締結国会議（COP22）で合意されたパリ協定は「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」ことを目標とした。また、2021年8月に公表されたIPCCの第6次評価報告書¹⁾では、気温上昇を1.5℃程度で安定させる排出シナリオにおいて、世界全体で2050年頃にカーボンニュートラルを、2050年以降はネガティブエミッションを実現する必要があるとしている。

我が国も「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、脱炭素に向けた技術開発を加速させなければならない。脱炭素技術の一つとして、CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）がある。2021年7月公表の第6次エネルギー基本計画²⁾では「CCSの商業化を前提に2030年までに導入することを検討するために必要な適地の開発、技術開発、輸送実証、事業環境整備などに取り組む」（抜粋）ことが記載されており、早期にCCSを社会実装する必要性が高まっている。

CCSは、分離回収、輸送、地中貯留の各工程で構成される。地中貯留（帯水層貯留）は、地下深部にCO₂を貯める貯留層とCO₂の漏洩を防止するシール層（キャップロック）の両方を併せ持つ地質構造が必要である。貯留層はできるだけ大量のCO₂を貯留させるため大きな孔隙率と高い浸透率が求められる。シール層（キャップロ

ック）は十分な遮蔽性能を得るため浸透率が非常に小さな泥岩等の地層が必要である。

貯留サイトの大きさは数十kmオーダーの広がりがある一方で、事前に行われる坑井調査は費用面と安全面（CO₂漏洩経路のおそれ）を考慮して制約を受けるため、初期調査に基づいて行う貯留層やシール層の性状評価は不確実性を伴う。したがって、帯水層貯留において、CO₂を安全かつ経済的に貯留するために、不確実性を考慮した検討が必要である。

本稿は、帯水層貯留におけるキャップロックの遮蔽性能に焦点を当てる。Quest CCSプロジェクト（カナダ）で公開されているデータに基づき、解析的な検討によりシール層（キャップロック）の浸透率による遮蔽性能への影響について論じる。

2. Quest CCSプロジェクト

カナダのアルバータ州に位置するQuest地点において、2015年から水素製造に伴う副生物としてのCO₂を回収して地中の帯水層に貯留している。Quest CCSプロジェクトの貯留計画は、100万ton-CO₂/年×25年である³⁾。坑井が3か所設置され、圧入開始当初はそのうち2か所の坑井でCO₂が圧入された。各坑井の貯留層最上部で圧力モ

ニタリングを実施している。

Quest CCSプロジェクトに関する情報はアルバータ州政府のWebサイト（<https://open.alberta.ca/dataset?tags=Quest+CCS+project>）で公開され、その年次レポート⁴⁾でモニタリング結果を入手できる。また、Quest CCSプロジェクトの事業者が行った長期予測解析結果も公開されている。

3. 解析方法

解析は、米国のLawrence Berkeley National Laboratoryが開発した多相流解析シミュレータのTOUGH2を用いる。解析モジュールには二酸化炭素用状態方程式モジュールのECO2Nを利用する。TOUGH2/ECO2Nは、長岡CO₂圧入実証試験などにおいて、解析シミュレータとして利用された多数の実績がある⁵⁾。

TOUGH2の支配方程式は、式(1)に示すエネルギー保存則および質量保存則からなる⁶⁾⁷⁾。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^K dV_n = \int_{\Gamma_n} F^K \cdot n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^K dV_n \quad (1)$$

ここで、 V_n は対象領域、 Γ_n は閉境界、 M^K は単位体積当たりの質量またはエネルギー、 F^K はフラックス、 q^K はシンク/ソース項、 n は部分面 $d\Gamma_n$ の法線ベクトルである。また、上付の添字 $K=1, \dots, NK$ は水、空気、

CO₂などの各流体成分の質量を、 $K = NK + 1$ は熱エネルギーをそれぞれ意味する。

数値解法には積分差分法が用いられている。式(1)を時空間方向に離散化し、ニュートン・ラブソン法により収束解を求める。

4. 解析モデル

解析モデルは図-1に示すとおり、平面15km×10km、断面52mで、貯留層（6層）及びシール層（1層）で構成した。貯留層及びシール層の各物性値はQuest CCSプロジェクトに関する公開情報⁹⁾に基づき表-1及び表-2に示すとおり設定した。

貯留層の物性値は、表-1に示す6層で孔隙率と絶対浸透率を設定した。水と超臨界CO₂の相対浸透率と水飽和度との関係を図-2に、毛管圧と水飽和度との関係を図-3に示す。図-2に基づき残留ガス飽和度を0.288、不動水飽和度を0.05として設定した。孔隙率は全層均一で0.181とした。

シール層の物性値は、Quest CCSプロジェクトの年次レポート⁹⁾で表-2に示す3つのシール層の孔隙率と絶対浸透率が示されている。そこで、今回の検討では図-1に示すシール層の物性値を表-2を参考にパラメトリックに設定して、シール層の遮蔽性能を評価する。

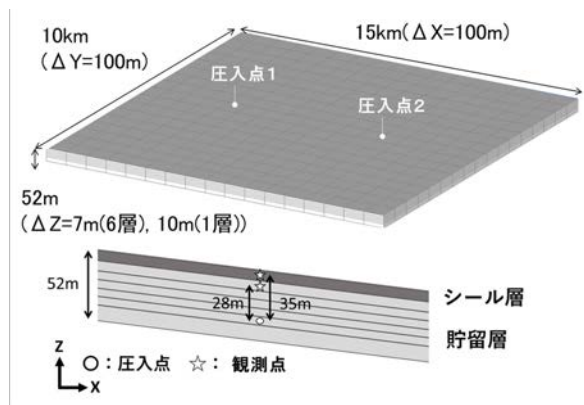


図-1 解析モデル

表-1 Questサイトにおける貯留層の絶対浸透率

各層 (貯留層)	孔隙率(-)	絶対浸透率 Kh (水平) (m ²)
1層目	0.181	4.90×10^{-14}
2層目	0.181	9.46×10^{-14}
3層目	0.181	4.19×10^{-13}
4層目	0.181	8.28×10^{-13}
5層目	0.181	7.39×10^{-13}
6層目	0.181	1.28×10^{-13}

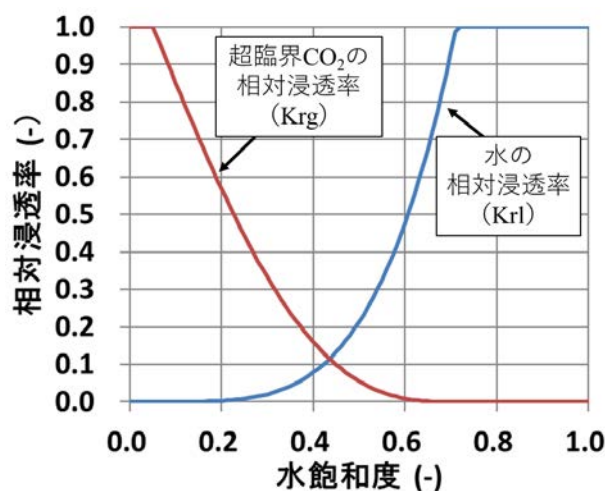


図-2 Questサイトにおける相対浸透率と水飽和度の関係

表-2 Questサイトにおけるシール層の孔隙率と絶対浸透率

シール層	孔隙率(-)	絶対浸透率 Kh (水平) (m ²)
最終シール	0.01	1.00×10^{-21}
第2シール	0.01	1.00×10^{-21}
第1シール	0.04	1.00×10^{-16}

5. 遮蔽性能評価

(1) CO₂の圧入条件

CO₂の圧入期間を25年間とする。圧入開始後初期の圧入レートは公開情報⁹⁾で得られた実績値(図-4)を用いて、それ以降は図-4に示す圧入レートの最終実績値値(107万ton-CO₂/年)の圧入量を圧入終了時まで一定して継続すると仮定した。

(2) 解析ケース

シール層の遮蔽性能を評価することを目的に、図-1に示すシール層の物性値をパラメトリックに設定して検討を行う。解析ケースを表-3に示す。Case-1およびCase-2のシール層の鉛直方向の絶対浸透率($K_v = K_h \times 1/500$)はヒストリーマッチング¹⁰⁾により得られたものである。Case-3のシール層の鉛直方向の絶対浸透率($K_v = K_h \times 1/100$)は比較対象として設定した。

(3) 解析結果

a) シール層の遮蔽性能

図-1に示す圧入点の上部に位置するシール層の観測点における圧入時の応答圧力と貯留層最上部の観測点におけるCO₂飽和度の経時変化を図-5に示す。

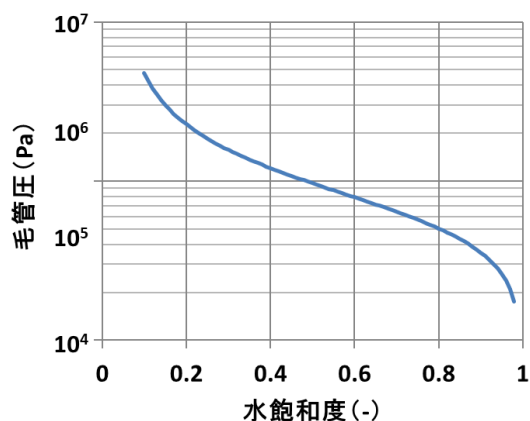


図-3 Questサイトにおける毛管圧と水飽和度の関係

CO₂飽和度に関して、Case-1とCase-3では25年間の圧入期間中にシール層内のCO₂飽和度は0であり、シール層にCO₂が浸透しないことを確認した。Case-2はCase-1およびCase-3と比較すると圧入開始20年後からシール層内のCO₂飽和度が上昇し始めるが、最大0.004とCO₂の浸透がほとんど認められなかった。Case-2における第1シール層を想定した物性値(表-2参照)では、完全ではないものの遮蔽性能が得られた。

圧力応答に関して、図-5に示すとおり圧入量が一定になった後に、シール層内の応答圧力が急上昇する瞬間(Case-3では圧入開始2年後、Case-1とCase-2では圧入開始10年後)があり、特にCase-1とCase-3が顕著である。



図-4 CO₂の圧入初期の圧入レート

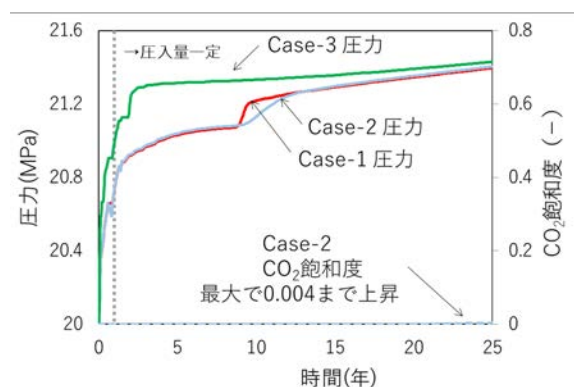


図-5 シール層内の観測点における応答圧力とCO₂飽和度の経時変化

表-3 解析ケース

ケース名	貯留層			シール層			Questサイトのシール層
	孔隙率	絶対浸透率 水平 Kh	絶対浸透率 鉛直 Kv	孔隙率 (-)	絶対浸透率 水平 Kh(m ²)	絶対浸透率 鉛直 Kv	
Case-1	表-1	表-1	Kh×1/500	0.01	1.00×10 ⁻²¹	Kh×1/500	最終シール
Case-2	表-1	表-1	Kh×1/500	0.04	1.00×10 ⁻¹⁶	Kh×1/500	第1シール
Case-3	表-1	表-1	Kh×1/100	0.01	1.00×10 ⁻²¹	Kh×1/100	最終シール

b) 貯留層最上部におけるCO₂飽和度とシール層内の応答圧力の関係

Case-1とCase-3のシール層の観測点の応答圧力と貯留層最上部層の観測点のCO₂飽和度の関係を図-6に示す。Case-1とCase-3ともに貯留層最上部のCO₂飽和度が残留ガス飽和度である0.288に到達した時点でシール層の応答圧力が急上昇している。

(4) 考察

貯留層最上部のCO₂飽和度が0.288（残留ガス飽和度）に到達した時点でシール層の応答圧力が急上昇する。シール層の応答圧力に影響を与える要因としてCO₂圧入に伴う圧力応答に加えてCO₂の浮力が作用したものと考えられる。また、シール層の観測点の応答圧力と貯留層最上部層の観測点のGas Flow Lateを図-7に示す。Gas Flow Lateは水平方向（X, Y方向）と鉛直方向（Z方向）へのCO₂の移動量を表す。シール層の観測点の圧力が急上昇する時点での貯留層最上部層の観測点では鉛直方向へのCO₂の移動はなく水平方向への移動が認められる。なお、水平方向のGas Flow Lateは平面的に全方位に移動するため±で表示している。

シール層の直下にCO₂が到達したことによりシール層に対する外力としての浮力が作用する。浮力を駆動力とするCO₂は貯留層最上部へ到達した後、その上位にあるシール層によって鉛直方向への移動を阻まれ水平方向に移動すると考えられる。

6. 結論

Quest CCSプロジェクトの公開データに基づき貯留層およびシール層をモデル化してシミュレーションを実施し、主にシール層の遮蔽性能に焦点を当てて検討を行った。

Quest サイトは貯留層の上部に表-2に示す3つのシール層を有し、解析上では第1シール（表-3のCase-2）は僅かにCO₂の浸透が認められるが、第2シールと最終シール（表-3のCase-1）はCO₂の浸透は認められなかった。Quest サイトは第2シールと最終シールの存在によりCO₂の漏洩を防止する遮蔽性能が機能し貯留の安全性を確保していると考えられる。

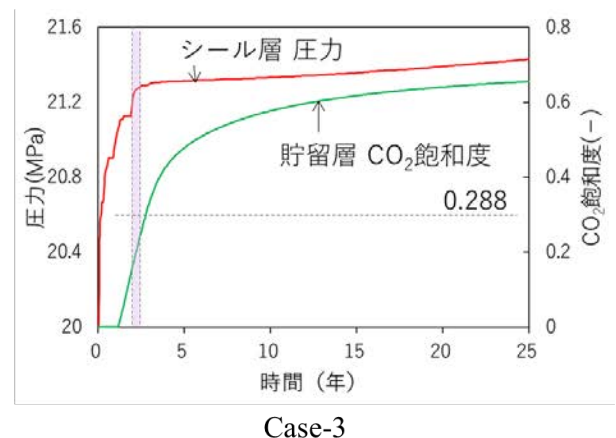
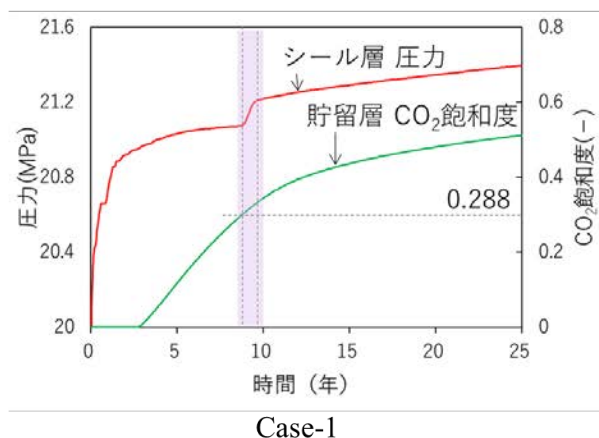


図-6 Case-1とCase-3のシール層の応答圧力と貯留層最上部のCO₂飽和度の経時変化

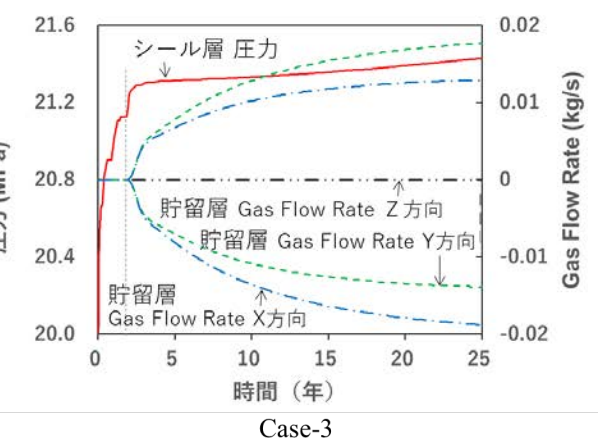
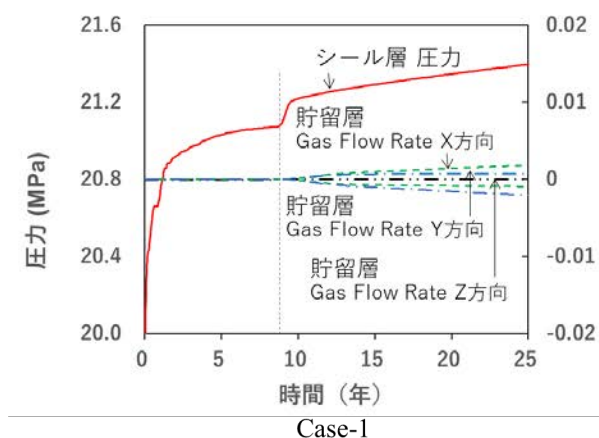


図-7 Case-1とCase-3のシール層の応答圧力と貯留層最上部のGas Flow Rateの経時変化

今回の検討結果から、シール層の遮蔽性能に関して、絶対浸透率は水平方向 $1.00 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ で鉛直方向はその1/500 ($0.50 \times 10^{-19} \text{ m}^2$) の条件では長期的に漏洩のリスクがあることが分かった。帯水層貯留におけるシール層の絶対浸透率と遮蔽性能の関係を把握する目安になると考えられる。

シール層への外力に関しては、CO₂圧入に伴う圧力応答に加えてCO₂の浮力を考慮しなければならない。CCSの操業が終了し、CO₂の圧入が停止されると圧入に伴って上昇していた圧力は急低下し、その後は緩やかに低下する。圧入されたCO₂は浮力により貯留層内を移動してシール層直下に到達するとシール層への外力として作用する。圧入終了後も貯留されたCO₂による浮力が外力として作用し続けることになる。シール層への外力（応答圧力）は、シール限界圧¹¹⁾の超過やキャップロックの破壊にも影響を与えるため圧力上昇をできるだけ抑制するように貯留設計を行わなければならない。そのためには、数値解析によって圧力応答を適切に評価する必要があると考える。

CCSプロジェクトの初期段階で得られる地質情報は十分ではない可能性があるため、例えば今回の検討のようにパラメトリックなケーススタディを数多く行うなど不確実性を考慮した検討が必要と考える。（なお、本内容は研究対象としてQuest CCSプロジェクトの公開情報を用いたもので、Quest CCSプロジェクトの事業者が行ったものではないことに留意されたい。）

参考文献

- 1) IPCC : AR6 Climate Change 2021:The Physical Science Basis , 2021.08.
- 2) 第6次エネルギー基本計画, 2021.
- 3) Shell News Releases : Quest CCS Facility Captures And Stores Five Million Tonnes Of CO2 Ahead Of Fifth Anniversary, 2020.
- 4) Shell Quest Carbon Capture and Storage Project: Fifth Annual Status Report.Submitted to AER, 2017.
- 5) 地球環境産業技術研究機構：平成 23 年度二酸化炭素回収・貯留安全性評価技術開発事業成果報告書, 2012.
- 6) Pruess, K., C. Oldenburg, and G. Moridis. :TOUGH2 user's guide. Version 2.0. Rep. LBNL-43134.Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA., 1999.
- 7) 山本肇, Keni Zhang, 唐崎健二, 丸井敦尚：二酸化炭素地下貯留に関する大規模シミュレーション技術の開発, 大成建設技術センター報, 第 40 号, 2007.
- 8) 末永弘, 中川加明一郎, 志田原巧：CO₂ 地中貯留における移動挙動モデルの提案と現場への適用, 電力中央研究所報告, N06023, 2007.
- 9) Shell Quest Carbon Capture and Storage Project: Generation-4 Integrated Reservoir Modeling Report, 2011.
- 10) 重岡 優希, 西山 治希, 木野戸 広, 鳥羽瀬 孝臣, 中島 崇裕, 薛 自求：CO₂ 地中貯留における貯留容量評価, 岩の力学シンポジウム, 2021 年
- 11) 西本壮志, 薛自求, 木山保, 石島洋二：CO₂ 地中貯留におけるキャップロックに対する超臨界 CO₂ の閾値圧力測定に関する実験的研究, 物理探査, 第 62 巻第 4 号, pp.421-432,, 2009.

EVALUATION OF SEALING PERFORMANCE OF CAPROCK

Haruki NISHIYAMA, Yuki SHIGEOKA, Hiroshi KINOTO, Takaomi TOBASE,

In the saline aquifer storage of CCS, a caprock with sealing capability is required at the top of the reservoir. The storage performance of the reservoir is evaluated by predicting the pressure rise and the spread of the CO₂ plume due to CO₂ injection using numerical analysis. In this study, numerical analysis was performed using the analytical model of both the caprock layer and the reservoir.

As a result, a generally required condition on the absolute permeability for having a reliable sealing performance was confirmed. The pressure of the caprock layer rises due to the buoyancy of CO₂ when the CO₂ plume reaches the top of the reservoir.