

台湾における二酸化炭素地中貯留実験の 事前予測評価

末永 弘^{1*}・田中 姿郎¹・窪田 健二¹・鈴木 浩一¹・海江田 秀志¹

¹電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1 6 4 6）

*E-mail: suenaga@criepi.denken.or.jp

電力中央研究所ではこれまで二酸化炭素(CO₂)地中貯留に関して、注入したCO₂の地下における移行を評価する手法を開発し、現場に適用してきた。しかしながらこの手法を機能検証するためには多くの現場に適用し、有効性を確認する必要がある。このことから、台湾におけるCO₂地中貯留実験候補サイトを対象に、CO₂を注入した際における移行範囲を予測するシミュレーションを実施した。シミュレーションには、サイトにおける地震探査結果、サイトから採取したコア試験結果をもとに構築した水理地質構造モデルを用いた。シミュレーションの結果から、年間100万トンのCO₂を50年間にわたり注入した場合でも、注入したCO₂が貯留し、実験が成立する可能性が示された。

Key Words : carbon dioxide(CO₂), geological storage, numerical simulation, Taiwan

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によれば、気候システムの温暖化を抑制するためには温室効果ガスの排出量を抜本的かつ持続的に削減する必要がある。二酸化炭素(CO₂)回収・貯留（CCS）技術は火力発電のライフサイクルを通じた排出の削減が可能であるとされている¹⁾。電力中央研究所では、CCSのうちCO₂地中貯留に関してこれまで多くの研究を実施してきており^{2,3)}、その中で注入したCO₂の地下における移行を評価する技術を開発し^{4,5)}、現場へ適用してきた⁶⁾。しかしながら、この技術の妥当性を検証するためには、さらに多くの現場に適用し、有効性を確認していくことが必要である。

そこで本研究では、2009年度より共同研究を実施している台湾電力総合研究所（台湾電力における技術研究所、以降TPRI [Taiwan Power Research Institute]と称す）が主体となって行う予定であるCO₂地中貯留実証実験サイトを対象に、注入したCO₂の移行範囲の変化を予測するシミュレーションを実施した⁷⁾。本報では、台湾でのCCS研究の状況、TPRIによる実証実験サイトを対象としたCO₂流動モデルを構築した結果、ならびにCO₂流動シミュレーションを実施した結果について述べる。

2. 台湾におけるCCSに関する既往研究

台湾政府では、温室効果ガス抑制の観点から、2009年5月にCO₂の大排出源を対象に、CO₂排出削減目標を設定した。台湾においては、発電に伴うCO₂排出量の割合が他の産業よりも多く、台湾電力は国営かつ唯一の電力会社であることから、台湾政府よりCO₂排出量削減の強い要請を受けている。このことから台湾電力では、2008年からCCSに関するロードマップを策定し、CO₂地中貯留のポテンシャル（貯留可能量）調査、貯留候補地における地震探査による地質構造調査、3000m級のボーリング孔による地質調査等を実施してきた⁸⁾。

電力中央研究所とTPRIは2009年より共同研究を実施しており、台湾における地中貯留実証実験候補地の選定、岩石試料を用いたCO₂・地下水の流動特性評価について技術協力を行ってきた。図-1に、台湾電力により選定された地中貯留実証実験サイトの位置を示す。地中貯留実証実験サイトは、台湾中西部彰化県にある彰化県臨海工業地区の埋め立て地にあり、15km程度北東には台中石炭火力発電所が立地している（図-1(b)）。2012年より図-1(b)に示す位置においてボーリング孔TPCS-M1孔の掘削を開始し、2013年に3000mの掘削を完了した。その後、2014年にTPRIの要請により、TPCS-M1孔においてCO₂を注入することを想定し、CO₂流動モデルの構築ならびにシミュレーションによる移行範囲の予測を行った。

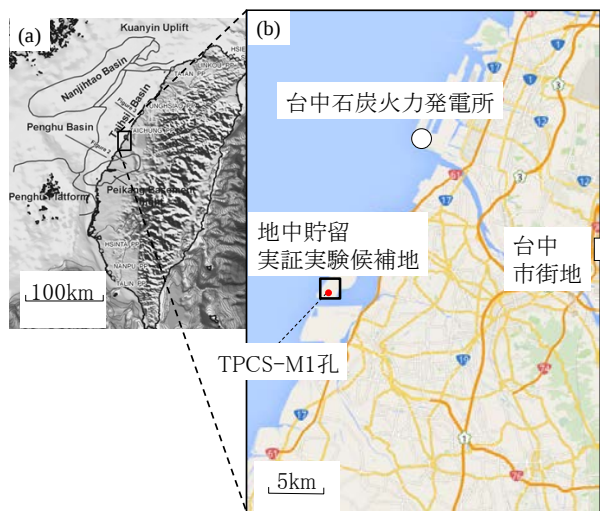


図-1 台湾における実験候補地⁷⁾(a)台湾全体図, (b)台中付近拡大図).

次章より, この内容について述べる.

3. CO₂流動モデル

(1) 水理地質構造モデル

実証実験候補サイトにおいて台湾電力により実施された地震探査の結果, ならびにTPCS-M1孔における地質調査結果⁹⁾を用いて求めた地層の3次元分布をもとに, 各地層において絶対浸透率, 間隙率を与えることにより水理地質構造モデルを作成した. 各地層における間隙率については, TPCS-M1孔から得られたボーリングコアを用いて, また, 各地層における絶対浸透率については, 台湾の露頭およびTPCS-M1孔で得られたコアを用いて作成された間隙率と絶対浸透率の相関関係より求めた⁹⁾.

TPRIでは, 事前の調査結果から, CO₂地中貯留の遮蔽層として深度2135~2295mの錦水頁岩が, 貯留層として, TPCS-M1孔における深度2295~2608mの桂竹林層, および観音山砂岩が, それぞれ有望であると推定している⁹⁾. このことから, これらの遮蔽層・貯留層候補について, 間隙率分布から絶対浸透率を求め, 錦水頁岩よりも上位の2層は合わせて1層とし(以降, Upper Layerと称す), 電力中央研究所で採取したコア試料を用いた間隙率, 絶対浸透率を与えることとした. 錦水頁岩に存在する頁岩の絶対浸透率は非常に小さく, これよりも上位のUpper Layerへは, CO₂が移行する可能性が低いため, 1層として扱った. また, 観音山砂岩よりも下方には遮蔽層を設定し, これよりも下方にはCO₂は移行しないものと仮定した.

図-2にシミュレーションで用いた水理地質構造モデルのうち地層分布を, 図-3に遮蔽層・貯留層において与えた間隙率, 絶対浸透率の分布を, 表-1に各地層に与えた

値をそれぞれ示す. 図-2の中で, 貯留層の中には, 浸透率の比較的大きな地層と, これよりも小さいシール層となりうる層が交互に分布しているため, 比較的大きな地層を貯留層として与え(KCL1, KCL2, KYS1, KYS2), 浸透率の小さい層をSeal rockとした. 特にKCL1よりも上位の地質ユニットは, 上部へのCO₂の漏出を評価するため, 1~3mの層厚で3層の地層をモデル化した(図-3). また, CS(錦水頁岩主体)の中の一部には, 層厚が60m程度の桂竹林層が存在する. 貯留層の層厚はKCL1, KCL2, KYS1, KYS2の順に, 20.5, 18.0, 36.5, 33.0mである. 図-3の中で「入力値」と記載したものは, ある地質ユニットにおいて複数の間隙率, 絶対浸透率のデータがあるものの平均を取った値を示す. 間隙率は算術平均により, 絶対浸透率は調和平均により, それぞれ平均値を求めた.

(2) 二相流モデル

二相流モデルは, 台湾の実証実験候補サイトと同様の地質である露頭およびTPCS-M1孔で採取したコアを用いて, 室内試験により求めた.

表-1 地層ごとの絶対浸透率・間隙率(地層名は図-2参照)

地層名	絶対浸透率(md)	間隙率(-)
Upper layer	7.4	0.24
CS	0.00073	0.22
Seal rock	0.00013~0.054	0.14~0.25
KCL1	23	0.33
KCL2	15	0.32
KYS1	20	0.32
KYS2	40	0.34

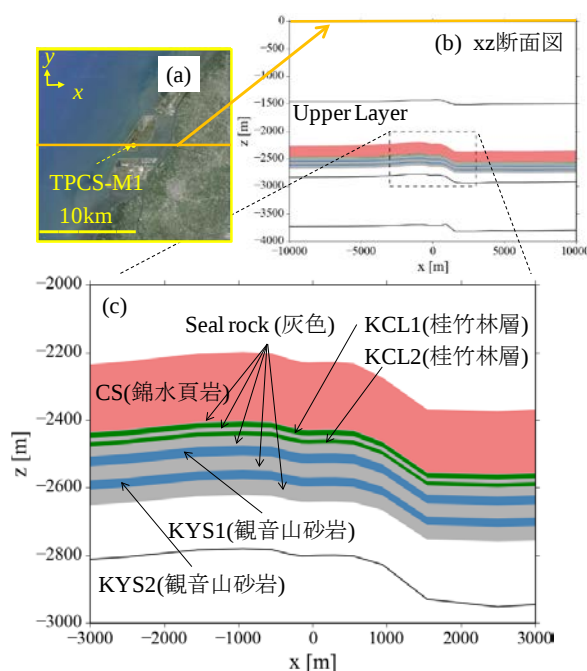


図-2 水理地質構造モデル. (a)解析領域とxz断面として選択した箇所, (b)xz断面図, (c)遮蔽層・貯留層の拡大図.

二相流モデルのうち、毛管圧は水銀圧入式ポロシメータにより求めた。ポロシメータとは、間隙径分布の測定に用いられるものであり、測定された圧入水銀の体積と圧入圧力の関係をもとに、岩石の水飽和率と毛管圧の関係を求めた⁵⁶⁾。これらの関係をvan Genuchtenのモデル式¹⁰⁾にフィッティングし、フィッティングパラメータを求めることにより毛管圧モデルとした。

相対浸透率は、岩石試料を用いたCO₂透過試験装置⁹⁾により測定したデータに対して、数値解析によるヒストリーマッチングを行うことにより同定した。CO₂透過試験による測定は、CO₂の透過圧を7.5MPa程度、温度を35～40℃程度と設定し、実施した。ヒストリーマッチングは、上述した毛管圧モデル、およびCO₂透過試験結果から定常解析解を用いて得られた相対浸透率を一次近似データとして入力し、岩石内におけるCO₂の流動をシミュレーションにより再現することにより行った。シミュレーションには、汎用岩盤内二相流解析コードTOUGH2¹¹⁾にCO₂移行解析に特化したECO2Nモジュール¹²⁾を組み込んだものを用いた。なお、毛管圧・相対浸透率同定方法の詳細は、文献⁵⁶⁾を参照されたい。

図-2の地質要素のうち、KCL1、KCL2、KYS1、KYS2については、TPCS-M1孔から採取したコアのうち、これらの地質要素が存在する深度のコアを用いて二相流モデルを求めた。またUpper layerについては、同様の地質である露頭より採取したコアを用いて二相流モデルを求め

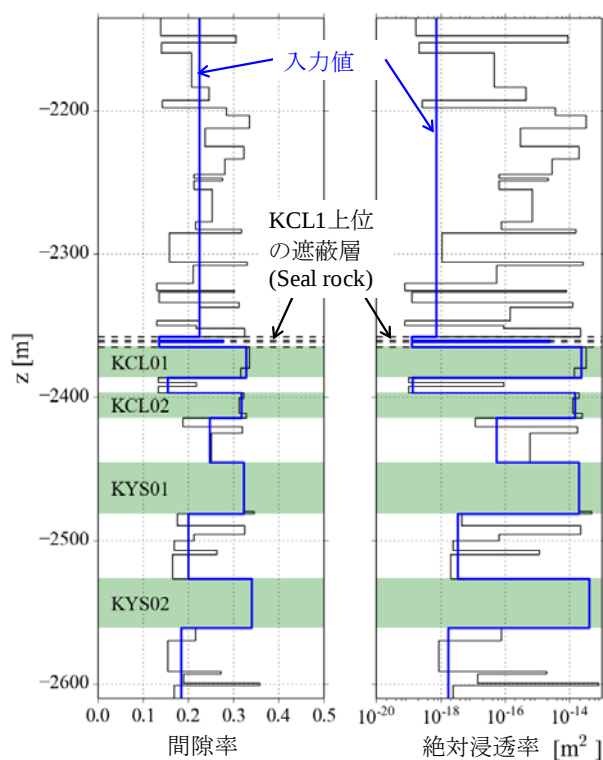


図-3 水理地質構造モデルで与えた絶対浸透率・間隙率分布(图中的「入力値」は地層ごとに求めた平均値を表す)。

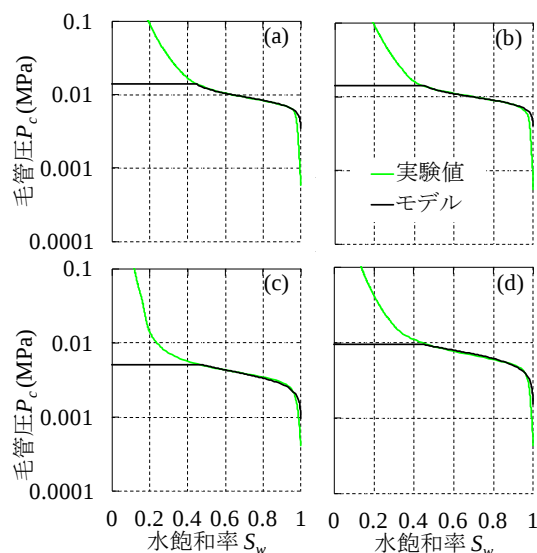


図-4 毛管圧モデル((a)KCL1, (b)KCL2, (c)KYS1, (d)KYS2). 「モデル」は van Genuchten モデル¹⁰⁾のフィッティング結果。

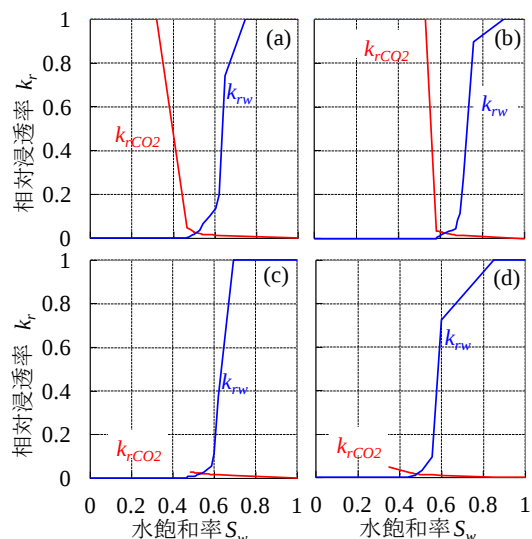


図-5 相対浸透率モデル((a)KCL1, (b)KCL2, (c)KYS1, (d)KYS2).

た。CSとSeal rockについては、当該地質についてTPCS-M1孔から良好なコアが得られなかったため、CSよりも上位にあり、堆積年代の近い地層より採取したコアを用いて二相流モデルを求めた。

図-4に毛管圧モデル、図-5に相対浸透率モデルの同定結果例をそれぞれ示す。貯留層(KCL1、KCL2、KYS1、KYS2)のモデルでは、毛管圧モデルはいずれも類似した形状となっているのに対し、相対浸透率モデルのうち、気相相対浸透率 k_{rCO_2} の形状は異なっていることが分かる。これは、両貯留層のCO₂の浸透特性が異なっていることを示している。一方、液相相対浸透率 k_{rw} については、貯留層の地質によらず類似した形状を示している。

4. CO₂移行シミュレーション

CO₂移行シミュレーションでは、室内試験のシミュレーションの時と同様、汎用気液二相流解析コードTOUGH2¹¹⁾を用いた。図-6にシミュレーションに用いたメッシュを示す。解析領域は平面図上で20km×20km、深度方向に4kmである。メッシュの中央部の貯留層の深度にCO₂を注入することを想定し、シミュレーションを実施した。物性値等詳細は文献⁷⁾を参照されたい。

初期条件は、圧力については静水圧分布、温度については一定(75℃)とした。事前に温度のデータがなかったため、地表温度15℃、地温勾配25℃/kmとして、貯留層のある深度2400mの温度を全体の温度と仮定した。今回のシミュレーションでは、CO₂は深度約2400mにおいて、深度方向に狭い領域を移行すると想定されたことから、温度を一定としても問題ないものと考えた。境界条件は、すべての境界で固定圧力境界とした。年間100万トンのCO₂を50年間連続して注入し、注入開始から100年後までの移行を解析した。

シミュレーションでは、まず貯留層へのCO₂の注入を一定流量(年間100万トン:全貯留層への合計注入量)とした場合のシミュレーションを実施した。この結果を図-7に示す。図にはCO₂注入開始後10, 50, 100年後のy=0(CO₂注入位置)のxz断面におけるCO₂飽和率の分布を示している。また、解析領域のうち、 $-3\text{km} \leq x \leq 3\text{km}$ 、 $-3\text{km} \leq z \leq -2\text{km}$ の部分を取り出して表示している。この結果から、注入開始後100年経過してもCO₂は上方へ移行していないことが分かる。これは、遮蔽層(Seal rock)の浸透率が貯留層よりも十分小さいことに起因するものと考えられる。

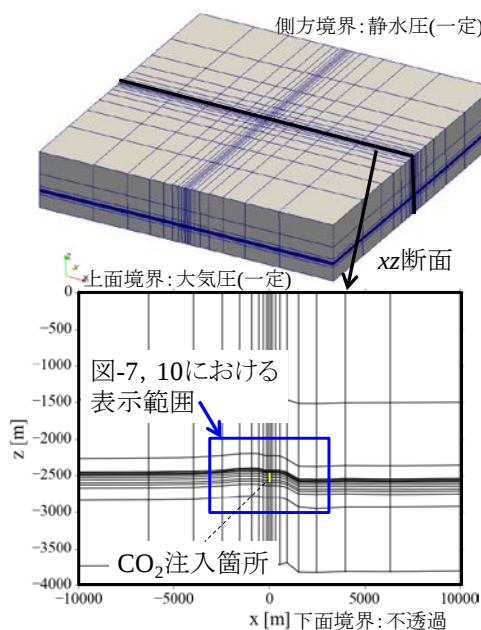


図-6 シミュレーションに用いたメッシュ。

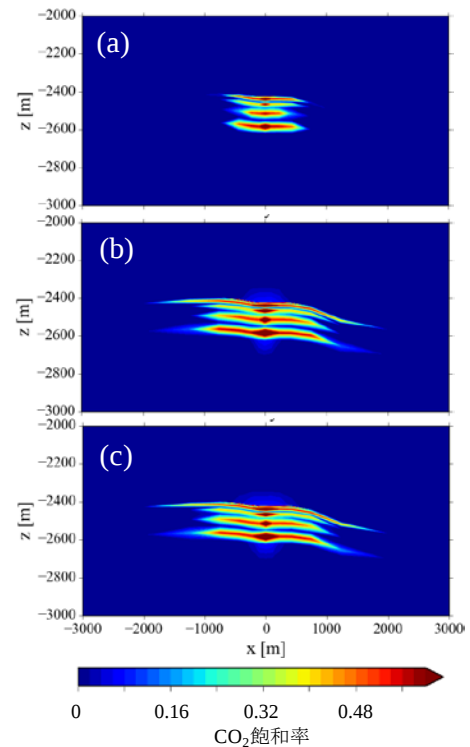


図-7 シミュレーション結果(一定注入流量, (a)注入10年後, (b)50年後, (c)100年後).

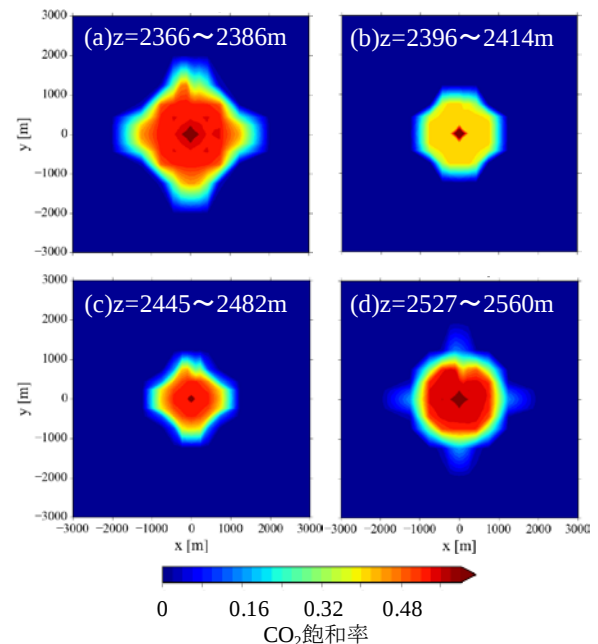


図-8 シミュレーション結果(一定注入流量, 100年後の水平方向の飽和率分布, (a)KCL1, (b)KCL2, (c)KYS1, (d)KYS2).

図-8, 図-9にそれぞれ貯留層内におけるCO₂飽和率, および溶解CO₂質量割合の分布を示す。これらの図はいずれも水平方向のCO₂の移行範囲を表すものと考えられる。図-8と図-9を比較すると、気相CO₂よりも溶解CO₂の方が遠方に移行していることが分かる。しかしながら、溶解した状態のCO₂でも水平方向への移行距離は高々

3km程度であることが分かる。以上のことから、今回対象とした貯留層にCO₂を年間100万トンの割合で50年間注入した場合、注入したCO₂は上方に漏出することはなく、水平方向への移行距離も中心から3km程度であることが推定された。

一方で注入流量を年間100万トンと一定にすると、CO₂の注入により各貯留層の圧力上昇は最大19MPa程度になり、岩盤が破砕される可能性が懸念された。このことから、貯留層へCO₂を注入する際に注入圧を一定とするシミュレーションを実施した。TPRIにより求めた、貯留層の岩石を用いた室内試験に基づく一軸圧縮強度が5～6MPaであった⁹ことから、注入圧力は概ね静水圧+5MPaとなるように設定した。図-10に経過時間ごとのy=0 (CO₂注入位置)のxz断面におけるCO₂飽和率分布を、図-11にそれぞれ貯留層内における溶解CO₂質量割合の分布を示す。これらの図から、注入圧力一定の場合は注入流量一定の場合よりも移行範囲が小さく、中心から高々2kmであることが分かる。これは、注入圧力一定のケースにおける注入流量が、年間32万トン程度にとどまったことによるものと考えられる。

以上から、注入したCO₂は上方に漏出することほとんどなく、年間100万トンの一定流量で注入した場合には水平方向への移行距離は中心から3km程度になり、注入箇所の圧力上昇は19MPaと大きくなること、注入箇所の圧力上昇量を5MPaで制御して一定圧力で注入した場合は、注入流量が年間32万トンと3分の1程度になり、水平方向への移行距離もこれに対応して中心から2km程度

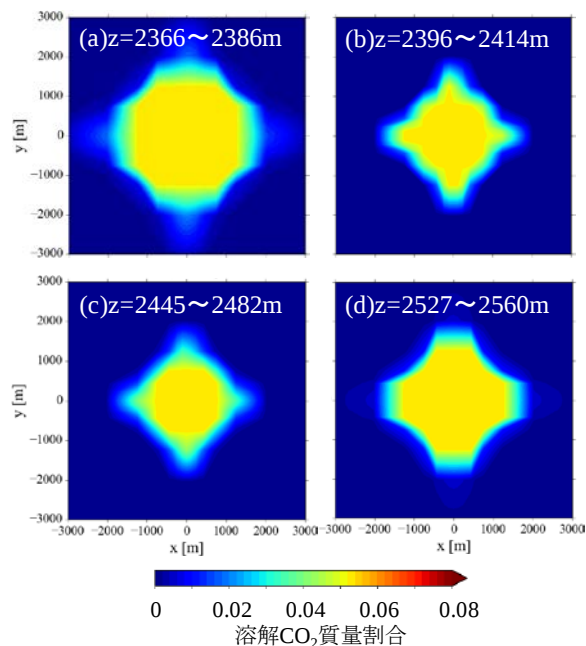


図-9 シミュレーション結果(一定注入流量, 100年後の水平方向のCO₂質量割合分布, (a)KCL1, (b)KCL2, (c)KYS1, (d)KYS2)。

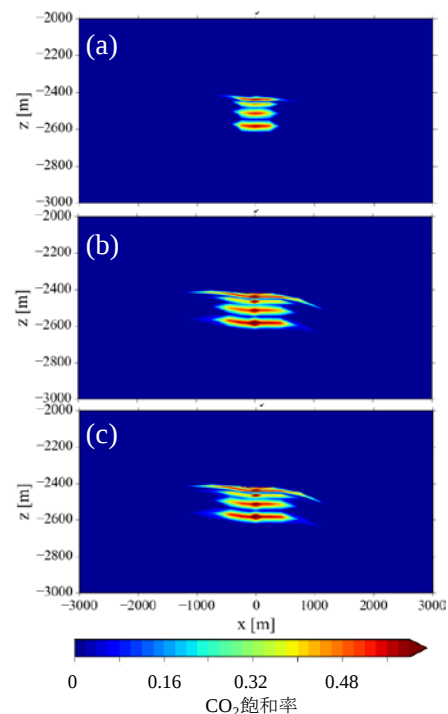


図-10 シミュレーション結果(一定注入圧力(静水圧+5MPa), (a)注入10年後, (b)50年後, (c)100年後)。

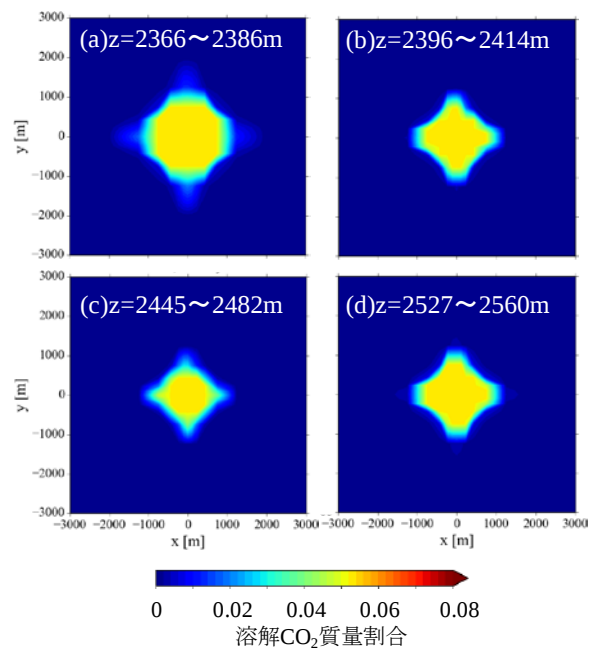


図-11 シミュレーション結果(一定注入圧力, 100年後の水平方向のCO₂質量割合分布, (a)KCL1, (b)KCL2, (c)KYS1, (d)KYS2)。

となると推定された。

5. まとめ

台湾電力総合研究所 (TPRI) との共同研究において、台湾でCO₂地中貯留実証実験が予定されているサイトを

対象に、注入したCO₂の移行範囲の変化を予測するためのシミュレーションを実施した。

まずTPRIから得た地震探査およびボーリング調査結果から地質構造モデルを作成し、地質要素ごとにTPRIのコア調査結果に基づく絶対浸透率、間隙率を与えた。また、CO₂移行シミュレーションに必要なパラメータのうち、CO₂の地下における流動を表現するために必要となる二相流特性（毛管圧、相対浸透率）を、実証実験サイトから得られたコアを用いた室内実験およびこの再現シミュレーションにより同定した。これらのデータに基づき水理地質構造モデルを構築した。

次に注入CO₂の移行範囲を予測するため、年間100万トンで50年間注入するシミュレーションを実施した。この結果、構築した水理地質構造モデルを用いた場合、100年間の期間において、貯留層よりも上位へのCO₂の漏出はほとんどなく、水平方向の移行距離も貯留層の平面的な範囲と比べて十分に小さいことから、実験成立の可能性が示された。

今後は、TPRIによる台湾での実証実験の際の予測評価に向け、モデルの高度化を図る。

謝辞：研究の実施にあたり、共同研究相手先である台湾電力総合研究所の楊明偉氏、Sinotech社の俞旗文副所長には、実験および解析に必要な資料を提供頂き、解析結果とりまとめに際し有益な助言を頂いた。また、株式会社電力計算センターの石原修二氏には数値計算を実施する際に、株式会社セレスの渡辺雅一氏、須藤昌幸氏にはボーリングコアを用いた室内試験を実施する際に多大な協力を頂いた。以上の方々に謝意を表明する次第である。

参考文献

1) IPCC: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

- 2) 田中姿郎, 末永弘, 伊藤由紀, 窪田健二, 志田原巧, 伊藤久敏, 中川加明一郎, 鈴木浩一, 大隅多加志, 駒田広也: 大規模排出源近傍における CO₂ 地中貯留可能性評価法—深部帯水層貯留に向けた研究開発—, 電力中央研究所総合報告, N07, 2009.
- 3) 海江田秀志, 末永弘, 下田昭郎, 田中姿郎, 窪田健二, 津旨大輔, 伊藤久敏, 鈴木浩一, 下島公紀, 窪田ひろみ, 坪野考樹, 仲敷憲和, 横山隆壽, 大隅多加志: 我が国の地質的特徴を踏まえた CO₂ 地中貯留技術の開発, 電力中央研究所総合報告, N16, 2012.
- 4) 末永弘, 中川加明一郎, 志田原巧: CO₂ 地中貯留における移行挙動モデルの提案と現場への適用, 電力中央研究所研究報告, N06023, 2007.
- 5) Suenaga, H., Nakagawa, K.: Analysis of two-phase flow properties of sandstones to evaluate their suitability for geologic storage of CO₂, *Proceedings of the 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-10)*, Energy Procedia, 2011.
- 6) Suenaga, H., Tanaka, S., Kaieda, H.: Prediction of CO₂ migration in the proposed CO₂ storage site of ZeroGen, Australia, *CRIEPI Report*, N11003, 2011.
- 7) 末永弘, 田中姿郎, 窪田健二, 鈴木浩一, 海江田秀志: 台湾電力総合研究所による CO₂ 地中貯留実証実験における注入 CO₂ の移行事前予測評価, 電力中央研究所調査報告, N14015, 2015.
- 8) Yu, C.W., Chiao, C.H., Hwang, L.T., Yang, W.H., Yang, M.W.: A Pilot 3000m Drilling for Characterizing a Candidate Deep Saline Aquifer in Western Taiwan, *Proceedings of the 12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-12)*, Energy Procedia, 2014.
- 9) Yu, C.W.: On-site investigation and planning for a pilot test program in a preferred carbon sequestration reservoir (Phase-1), Final report submitted to Taiwan Power Company by Sinotech Engineering Consultants, Inc., 2014.
- 10) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc.*, 44, pp. 892-898, 1980.
- 11) Pruess, K., C. Oldenburg and G. Moridis: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report*, LBNL-43134, 1999.
- 12) Pruess, K.: ECO2N: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO₂, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report*, LBNL-57952, 2005.

A PRELIMINARY NUMERICAL PREDICTION FOR AN EXPERIMENT OF CO₂ GEOLOGICAL STORAGE IN TAIWAN

Hiroshi SUENAGA, Shiro TANAKA, Kenji KUBOTA, Koichi SUZUKI and Hideshi KAIEDA

We have developed a method to evaluate migration of an injected CO₂ in underground with respect to CO₂ geological storage. It is necessary to apply the method to many fields to confirm its functional verification. So a simulation of CO₂ migration was conducted for a CO₂ geological storage site where Taiwan Power Research Institute plans to perform a field experiment. A hydrogeological structure model constructed with seismic and laboratory core experiment results was used in the simulation. As a result of the simulation, a commercial scale field CO₂ injection experiment with annual 1 Million tonnes of CO₂ for 50 years could be estimated feasible in this study.