

地球規模課題対応国際科学技術協力

(環境エネルギー分野「低炭素社会の実現に向けたエネルギーシステムに関する
研究」領域)

「インドネシア中部ジャワ州グンディガス田における二酸化炭素の地中貯
留及びモニタリングに関する先導的研究」

(インドネシア)

平成 25 年度実施報告書

代表者:松岡俊文

京都大学大学院工学研究科・教授

<平成 23 度採択>

1. プロジェクト全体の実施の概要

インドネシアでは、今後のエネルギー需要の急拡大にともない、新規あるいは老朽化の進んだ油ガス田の開発や増産が緊急の課題となっている。一方、インドネシアのガス田の多くはCO₂含有量が高く、天然ガスの生産に伴うCO₂の処分が、地球温暖化の問題と絡んで大きな社会的問題となっている。そこで、本研究では、石油やガスの増産にともなうCO₂の大気中への放散を抑制し、地球温暖化を防ぐための具体策として期待されているCCS(Carbon Dioxide Capture and Sequestration)の促進を図ることを目的に、インドネシア国のバンドン工科大学(ITB)を中心とした研究機関と共同で、CO₂の安全な地中貯留技術の確立のための研究開発を行う。具体的には、天然ガスの開発が始まるインドネシア中部ジャワ州のグンディガス田において実施するCCSにおいて、CO₂貯留層の評価技術およびモニタリング技術の研究開発を行い、その結果をもとにCO₂の地中貯留技術に関わる技術指針を作成し、普及を図る計画である。

平成23年度は、本格的な研究開始のための準備として、インドネシアのジャカルタおよび東京において、関係研究機関の研究者ならびに一般参加者を集めたCCSに関するシンポジウムを開催し、世界各国ならびにインドネシア、日本両国におけるCCSに関わる政府や研究機関の動向や技術開発の状況、また本研究で実施する予定の研究計画などについての紹介を行った。

平成24年度は、5年計画のプロジェクトの初年度として、CO₂貯留層の評価技術の開発を目的に、グンディガス田周辺で取得された既往データを再解析し、貯留層候補地層の地質学的、地球物理学的特性を明らかにするとともに、予備的な貯留層シミュレーションを行い貯留性能の検討も行った。その結果、サイト北部により適した貯留層候補地層が存在する可能性が明らかとなったため、新たに必要なデータを入手・再解析を行うことを決めた。モニタリング技術の開発については、電磁法探査装置、地震探査装置、微小地震観測装置の導入準備を行った。CCS事業の普及拡大を目的としたシンポジウムを東京とインドネシアバリ島で開催した。東京では70名を超える参加者、バリ島ではプロジェクト遂行上重要な関係機関からの参加者を得て成功裏に終えることができた。

平成25年度は、前年度の計画通り、サイト北部のデータの再解析を行い、構築した地質モデル及び貯留層モデルに基づき、貯留層シミュレーションを行い、圧入サイトとして問題がないことを確認した。以上の結果からサイト北部に位置するPertamina社の廃止坑井であるJepon-1を用いた圧入の検討を開始した。さらに本年度は、ITBにて地上設備に関するフィジビリティスタディ(F/S)を実施した。本F/Sでは、日本の関連企業への技術ヒアリングを行った。Gundihの北部地域において、貯留層露頭および掘削による貯留層層準の岩石資料を回収・分析し、物理探査モニタリングの際のシミュレーションの基礎的な地層情報を得た。前年度に調達した、地震探査装置、坑井内地震計及び(TDEM法)電磁探査装置、また、本年度に調達した重力計(gPhoneXおよびCG5)の輸出を完了し、前者3装置に関しては、現地(ITB Jatinangorキャンパス)において、ITB技術者への操作研修を含む小規模観測実験を行った。また、来年度に実施する一部のベースライン調査の仕様の検討を行った。

CCS事業の普及拡大を目的としたシンポジウムを福岡(11月)とインドネシアバリ島(3月)で開催した。福岡では55名を超える参加者、バリ島ではプロジェクト遂行上重要な関係諸機関からの参加者を得て成功裏に終えることができた。3月期のシンポジウムの際のJCC会議にて、次年度研究計画の方針に関して、承諾を得た。

平成26年度は、これまで実施した貯留層シミュレーションの総合的な評価を行い、ITBによる地上設備検討の成果をまじえて、圧入設備の設計を行う。最終的な圧入サイトを決定し、モニタリング調査における各種物理探査のシミュレーションを実施して仕様を決定し、一部のベースライン調査を開始する。また、圧入に伴う環境影響

の評価手法の検討を行う。

2. 研究グループ別の実施内容

(1) 京都大学グループ／貯留層評価及びモニタリング技術の最適化に関する研究

①研究のねらい(目的および内容)

CO₂ を注入する貯留層の特性を評価する手法及び CO₂ の貯留層内での挙動をモニタリングする手法の最適化に関する研究を行い、手法と手順に関する規準案を作成する。

②研究実施方法

CO₂ の貯留層内での流動に関して、ナノスケールからマクロスケールまでの検討を行うために、分子動力学的手法を用いて、鉱物表面における CO₂ の濡れ性の評価を行い、これを基に LBM を使って孔隙内での CO₂ の流動を検討する。モニタリング技術については各手法の探査試験結果をもとに適用性を評価する。両評価結果をベースに CO₂ 地中貯留に関する規準案を作成する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

平成 24 年度には、分子動力学を用いたシリカ表面における CO₂ の濡れ性に関する評価を行い、実験結果との良い一致を得た。また、既往データの再解析による、圧入の候補貯留層を抽出、貯留層モデルを試作して、予備的なシミュレーション結果に基づく検討を行った。その結果、サイト北部の地層の貯留性能の評価も合わせて行う必要があることが明らかになった。

平成 25 年度には、弾性波の減衰評価による貯留層評価方法の研究を行った。また、モニタリング技術の一つである重力探査に関連し、絶対重力計(A-10)を用いた予備調査を行った。

④カウンターパートへの技術移転の状況

日本側の他グループと共に、地質モデル構築、貯留層評価を ITB の研究者と連携して行い、地質モデルの構築・評価、貯留層シミュレーションを実施し、CO₂ 圧入サイトの絞り込みを継続する中で技術交換を行った。約一か月間にわたる広域重力探査を ITB 研究者と共に実施し、技術指導・移転を行った。

(2) 秋田大学グループ／貯留層シミュレーション及び動態モニタリング技術の研究

①研究のねらい(目的および内容)

CO₂ を貯留層に最も効率的、経済的に且つ安全に注入するための諸条件ならびに最適なモニタリング手法を検討するために、実際の貯留層をモデル化して注入シミュレーションを行う。

②研究実施方法

貯留層シミュレータ GEM を利用したシミュレーションにより最適な注入のための諸条件を検討する。シミュレータへの入力物性を得るために、および岩石中の CO₂ の挙動を把握するために、現地で採取した岩石サンプルを用いて室内試験を行う。モニタリング技術の研究としては、自然地震を利用したトモグラフィ法や地震波干渉法の適用性を検討し、モニタリングのための観測仕様を決定する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

平成 24 年度は予備的な貯留層シミュレーションを実施し、サイト周辺での CO₂ の貯留層候補地層の露頭から岩石サンプルを取得し、岩石の室内試験に必要な設備の準備を行った。

平成 25 年度は、地表調査に基づき決定した、掘削によるコア回収を日本側他チームと共に実施すると

共に、原位置での比抵抗測定を実施して、電磁探査に必要な基礎情報を得た。九大で作成した地質モデルを基に貯留層シミュレーションを行い、長期間の安全な貯留の評価を行った。

④カウンターパートへの技術移転の状況

ITB の研究者と共に、原位置での比抵抗測定を実施、スキルやノウハウの確認、技術交換ができた。

(3)早稲田大学グループ／電気・電磁法を利用したモニタリング技術の研究

①研究のねらい(目的および内容)

注入した CO₂ の貯留層内での動態をモニタリングする手法の1つとして電気・電磁法の適用性を研究、評価する。

②研究実施方法

時間領域電磁法探査(TDEM)の最新の測定機を導入し、その現地適用を通じて、従来の周波数領域電磁法では必ずしも明確になっていない電磁法探査の CO₂ 挙動モニタリングへの適用性を明らかにする。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

平成 24 年度には、本プロジェクトに適合する仕様にて TDEM 装置を発注した。

平成 25 年度 10 月に TDEM 装置が納品され、輸出前の動作確認実験を実施し、正常動作を確認後、11 月に輸出した。12 月には現地において、ITB の研究者と共に小規模実験観測を実施し、技術研修も併せて行った。また、地質モデルや貯留層モデルを基に電磁法の数値シミュレーションを行い、浅部と深部の貯留層への適用可能性を検討し、ベースライン探査の計画を立案した。

④カウンターパートへの技術移転の状況

11 月には、招聘した ITB 研究者へ電磁探査(TDEM 法)の原理・装置の使用手法の講義を早稲田大学で行い、12 月には実機による小規模実験を現地で行い、実践的な操作手法の技術の伝達できた。

(4)深田地質研究所グループ／探査データの総合解釈・評価技術の研究

① 研究のねらい(目的および内容)

各種探査で得られた物性値から CO₂ の飽和度等の変化を推定するための解析手法及び CO₂ 貯留層および帽岩の評価技術について研究を行う。

② 研究実施方法

既往の適用事例を調査し、複数の物理探査データから貯留層、帽岩及び貯留層内の CO₂ の評価手法について整理し、課題を抽出する。物理探査データから帽岩の力学的、水理学的特性を評価する手法について研究する。

③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

平成 24 年度は非破壊的に帽岩の力学的特性を推定する手法として、ロックフィジックスを利用して弾性波速度から静的ヤング率や圧縮強度を推定する手法を開発した。

平成 25 年度は、計画した導入機材として、分散型地震探査システムおよび微小地震観測システムの納品(発注は平成 24 年度)、それに伴う動作試験および技術研修を日本およびインドネシアにて実施した。また、データ解析手法の研究では、物理探査データから地盤の透水性を推定する手法について検討を行い、実データで適用性の評価を行った。

④ ウンターパートへの技術移転の状況

新しく導入した分散型地震探査システムおよび微小地震観測システムの技術研修をインドネシア研究者に対して実施した。ロックフィジックスを用いた解釈技術の研究について、福岡でのシンポジウムの機会を利用して ITB の研究者と技術交流会を実施した。

(5)九州大学グループ／貯留層評価及びモニタリング手法の研究

①研究のねらい(目的および内容)

グンディガス田の既往データの解析によりサイトの地質モデル及び CO₂ 貯留層モデルを構築し、CO₂ 圧入シミュレーションによって貯留性能の評価を行う。(←京大から役割を抜いてここにはめた)

②研究実施方法

既往の適用事例を調査し、複数の物理探査データから貯留層、帽岩及び貯留層内の CO₂ の評価手法について整理し、課題を抽出する。物理探査データから帽岩の力学的、水理学的特性を評価する手法について研究する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

ITB 研究者と共に、地質モデルの構築作業を行った。また、既存の地震探査データの新手法による再処理を行い、これらに基づく貯留層把握を ITB 研究者と共に実施し、圧入サイトの決定のため基礎情報を得た。貯留層モデル構築の基本情報となる地層の物性情報を得るため、圧入対象岩相のコアを回収し分析を実施した。

⑤ ウンターパートへの技術移転の状況

地質モデル構築を ITB 研究者と共に連携して行い、また、ロックフィジックスを利用した貯留層の透水性の評価法についてはシンポジウム時に招聘した ITB 研究者と共に個別ミニワークショップを開催して、技術交換を実施。ITB 研究者と共に、現地でのコア回収と分析を実施し、技術交換を行った。

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国内 1 件、国際 12 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 5 件、国際 26 件)
- ③ 論文詳細情報(著者名、発表論文タイトル、掲載誌)
 - 1) Tsuji, T., Dvorkin, J., Mavko, G., Nakata, N., Matsuoka, T., Nakanishi, A., Kodaira, S., and Nishizawa, O. (2011), Vp/Vs ratio and shear-wave splitting in the Nankai Trough seismogenic zone: Insights into effective stress, pore pressure and sediment consolidation, *Geophysics*, 76, No.3, WA71-WA82
 - 2) Nakata, N., Snieder, R., Tsuji, T., Larner, K., and Matsuoka, T. (2011), Shear-wave imaging from traffic noise using seismic interferometry by cross-coherence, *Geophysics*, 76, No. 6, SA97-SA106
 - 3) Yamada, Y., McNeill, L., Moore, J.C., Nakamura, Y., (2011), Structural styles across the Nankai accretionary prism revealed from LWD borehole images and their correlation with seismic profile and core data: Results from NanTroSEIZE Stage 1 expeditions, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q0AD15,

doi:10.1029/2010GC003365.

- 4) Kamei, R., Pratt, R.G., and Tsuji, T. (2012), Waveform Tomography Imaging of a Megaseplay Fault System in the Seismogenic Nankai Subduction Zone, *Earth and Planetary Science Letters*, 317-318, 343-353.
- 5) Matsuoka, T., and Xue, Z. (2012), Geophysical Monitoring for Carbon Dioxide Capture and Storage - Case of Nagaoka CO₂ Injection Site in Japan, *The Contribution of Geosciences to Human Security*, Logos Verlag Berlin, pp87-102, ISBN 978-3-8325-3113-3.
- 6) Ledyastuti, M., Liang, Y., Miranda, C. R., and Matsuoka, T. (2012), Comparison of thermodynamic stabilities and mechanical properties of CO₂, SiO₂, and GeO₂ polymorphs by first-principles calculations, *Journal of Chemical Physics*, 137, 034703.
- 7) Ledyastuti, M., Liang, Y., Kunieda, M., and Matsuoka, T. (2012), Asymmetric orientation of toluene molecules at oil-silica interface, *Journal of Chemical Physics*, 137, 064703.
- 8) Ikeda, T., Matsuoka, T., Tsuji, T., and Hayashi, K. (2012), Multimode inversion with amplitude response of surface waves in the spatial autocorrelation method, *Geophys. J. Int.*, 190 (1), 541-552.
- 9) Khakim, M. Y. N., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2012), Geomechanical modeling for InSAR-derived surface deformation at steam-injection oil sand fields, *J. Petrol. Sci. Eng.*, 96-97, 152-161.
- 10) Minato, S., Tsuji, T., Matsuoka, T., and Obana, K. (2012), Crosscorrelation of earthquake data using stationary phase evaluation: Insight into reflection structures of oceanic crust surface in the Nankai Trough, *International Journal of Geophysics*, 8 pages, Article ID 101545.
- 11) Khakim, M. Y. N., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2013), Detection of Localized Surface Heave at Oil Sands Field by Differential SAR Interferometry, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, 6 (6), 2344-2354.
- 12) Kim, J., Nam, M. J., and Matsuoka, T. (2013), Estimation of CO₂ saturation during CO₂ drainage and imbibition processes based on both seismic velocity and electrical resistivity measurements, *Geophysical Journal International*, 195, 292-300.
- 13) Ikeda, T., and Matsuoka, T. (2013), Computation of Rayleigh waves on transversely isotropic media by the reduced delta matrix method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 103 (3), 2083-2093.
- 14) Ikeda, T., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2013), Window-controlled CMP crosscorrelation analysis for surface waves in laterally heterogeneous media, *Geophysics*, 78 (6), EN95-EN105.
- 15) Minato, S., Matsuoka, T., and Tsuji, T. (2013), Singular-value decomposition analysis of source illumination in seismic interferometry by multidimensional deconvolution, *Geophysics*, 78, Q25-Q34.
- 16) Mikami, Y., Liang, Y., Matsuoka, T., and Boek, E. S. (2013) Molecular dynamics simulations of asphaltenes at the oil-water interface: From nanoaggregation to thin-film formation. *Energy & Fuels*, 27, 1838-1845.
- 17) Yoo, S., Kuroda, Y., Mito, Y., Matsuoka, T., Nakagawa, M., Ozawa, A., Sugiyama, K., and Ueda, A. (2013), A geochemical clogging model with carbonate precipitation rates under hydrothermal conditions, *Applied geochemistry*, 30, 67-74.
- 18) Ledyastuti, M., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2013), The first principles molecular dynamics study of quartz-water interface, *Int. J. Quantum Chem.*, 113, 401-412.

- 19) Makimura, D., Kunieda, M., Liang, Y., Takahashi, S., Okabe, H., and Matsuoka, T. (2013), Application of molecular simulations to CO₂-EOR: Phase equilibria and interfacial phenomena. *SPE Journal*, **18**, 319-330.
- 20) Yamabe, H., Nakaoka, K., Xue, Z., Matsuoka, T., Kameyama, H., and Nishio, S. (2013), Simulation Study of CO₂ Micro-bubble Generation Through Porous Media, *Energy Procedia*, **37**, 4635-4646.
- 21) Tsuji, S., Liang, Y., Kunieda, M., Takahashi, S., and Matsuoka, T. (2013), Molecular dynamics simulations of the CO₂-Water-Silica interfacial systems. *Energy Procedia* **37**, 5435-5442.
- 22) Yoo, S., Mito, Y., Ueda, A., and Matsuoka, T. (2013), Geochemical clogging in fracture and porous rock for CO₂ mineral trapping. *Energy Procedia* **37**, 5612-5619.
- 23) K. Becker, A.T. Fisher, and T. Tsuji, New Packer Experiments and Borehole Logs in Upper Oceanic Crust: Evidence for Ridge-parallel Continuity in Crustal Hydrogeological Properties, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, **14**, 2013.
- 24) R. Kamei, G. Pratt, and T. Tsuji, On acoustic waveform tomography of wide-angle OBS data – Strategies for preconditioning and inversion, *Geophysical Journal International*, **194**, 1250-1280, 2013.
- 25) M.Y.N. Khakim, T. Tsuji, and T. Matsuoka, Detection of Localized Surface Uplift by Differential SAR Interferometry at the Hangingstone Oil Sand Field, Alberta, Canada, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **99**, 1-11, 2013.
- 26) S. Chiyonobu, T. Nakajima, Y. Zhang, T. Tsuji, and Z. Xue, Effect of reservoir heterogeneity of Haizume Formation, Nagaoka Pilot Site, based on high-resolution sedimentological analysis, *Energy Procedia*, **37**, 3546-3553, 2013.
- 27) 池田達紀、松岡俊文、辻 健、林宏一 (2011)、SPAC 法における異なる相関距離を考慮したマルチモード解析、*物理探査*、64、No.2、127-138.
- 28) 柳 丞烈、上田 晃、水戸 義忠、松岡俊文 (2012)、高温下 CO₂ 地中貯留を模擬したカラム試験における炭酸塩鉱物の付着速度評価、*材料*、61、No.3、253-258.
- 29) 山邊浩立、松岡俊文 (2012)、格子ボルツマン法による地震波の水油 2 相流体に及ぼす影響の兼用、*地学雑誌*、121、No.1、53-67
- 30) 國枝真、上田晃、松岡俊文、岡津弘明、福中康博 (2012)、油-鉱物-水システムにおける濡れ性に関する研究—マイクロスケールでの接触角測定—、*地学雑誌*、31-38
- 31) 本田博巳 (2013)、デルタ：陸現成砕屑物の運搬御中継基地としての機能、*石油技術協会誌*, **78(4)**, 307-308.

(2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳 (国内 0 件、海外 0 件、特許出願した発明数 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数 (国内 0 件、海外 0 件)

4. プロジェクト実施体制

- (1) 京都大学グループ (貯留層評価及びモニタリング技術の最適化に関する研究)
 - ① 研究者グループリーダー名： 松岡俊文 (京都大学大学院工学研究科・教授)

②研究項目:CO₂ を注入する貯留層の特性を評価する手法及び CO₂ の貯留層内での挙動をモニタリングする手法の最適化に関する研究を行い、手法と手順に関する規準化案を作成する。

(2)秋田大学グループ(貯留層シミュレーション及び動態モニタリング技術の研究)

①研究者グループリーダー名: 尾西恭亮 (秋田大学大学院工学資源学研究科・助教)

②研究項目:CO₂ を貯留層に最も効率的、経済的に且つ安全に注入するための諸条件ならびに最適なモニタリング手法を検討するために、実際の貯留層をモデル化して注入シミュレーションを行う。

(3)早稲田大学グループ(電気・電磁法を利用したモニタリング技術の研究)

①研究者グループリーダー名: 斎藤章 (早稲田大学理工学術院・特任教授)

②研究項目:注入した CO₂ の貯留層内での動態をモニタリングする手法の1つとして電気・電磁法の適用性を研究、評価する。

(4)深田地質研究所グループ(探査データの総合解釈・評価技術の研究)

①研究者グループリーダー名: 高橋亨 (公益財団法人深田地質研究所・理事)

②研究項目:各種探査で得られた物性値から CO₂ の飽和度等の変化を推定するための手法及び CO₂ 貯留層の評価技術について研究を行う。

(5)九州大学グループ(貯留層評価及びモニタリング手法の研究)

①研究者グループリーダー名: 辻健 (九州大学 I2CNER 准教授)

②研究項目:グンディガス田の既往データの解析によりサイトの地質モデル及び CO₂ 貯留層モデルを構築し、CO₂ 圧入シミュレーションによって貯留性能の評価を行う。