

# 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

(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)

国際共同研究期間\*1

平成 24 年 9 月 1 日から平成 29 年 9 月 8 日まで

JST 側研究期間\*2

平成 23 年 6 月 1 日から平成 29 年 3 月 31 日まで

(正式契約移行日 平成 24 年 4 月 1 日)

\*1 R/D に記載の協力期間

\*2 開始日=暫定契約開始日、終了日=R/D に記載の協力期間終了日又は当該年度末

### 平成 26 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 年度採択>



## 成果目標の達成度について

本図は本プロジェクトの成果目標を図示したものであり、中間報告書提出時点（2015年2月末）での達成度を太赤破線にて示す。将来圧入するCO<sub>2</sub>の貯留層での挙動解析は、地質モデルを構築し、貯留層シミュレーションを行い、経年予測を行った。さらに圧入に際し必要になるGundihでのCCS各種地上設備の概略設計を終えたことから、約60%の達成と判定した。今後、詳細設計、施設建設、圧入へと進む。次に、中央の各種モニタリング手法の開発は順調に進んでおり、これまで重力探査法でのベースライン調査を行っている（今後も継続）。電磁探査法でのベースライン調査は2014年度に終了した。また、坑井内微小地震計を用いたモニタリングに関しては、2014年度に予備実験を終了した。一方、地震探査他のベースライン調査は今後行う予定であり、このため現時点での達成度は約50%と判定した。

右端のCCSに関する研究成果の普及、CCSの社会的認知活動に関しては、当初の計画通りシンポジウムなどを毎年開催してきた。さらに、インドネシア国においてCCS事業を所轄する主要な政府機関（SKK Migas、DG Migas（MEMR）、経済調整担当省など）との密接な連携をもって本プロジェクトを進めている。この結果、ほぼ毎回、日本及びインドネシアでのシンポジウムには、上記政府機関等からの参加者があり講演を頂いている。平成26年9月に東京（早稲田大学）で開催した地上設備F/Sの成果を含むCCSワークショップには、経済調整担当省高官（Montty Girianna 事務次官ら）が参加し、本プロジェクトへの謝意と今後の期待、支援の約束が表明された。本CCSプロジェクトは現在インドネシア国での温暖化対策の重要な技術開発と位置づけられるまでに至っており、これらはプロジェクトが押し進めて来たアウトリーチ活動の成果である。これらのことから達成度は90%とした。

## 2. プロジェクト成果の達成状況とインパクト

### (1) プロジェクト全体

#### ① プロジェクトのねらい

本プロジェクトでは、地球温暖化を助長することなくエネルギーの増産を図るための切り札的技術として期待されているCCSを促進するために不可欠なCO<sub>2</sub>の安全な地中貯留を実現するための技術開発を行う。先進国ではすでにCCSの商業化まで進んでいる地域もいくつかあるが、いまだ世界各地で実用化を目指した研究が進められているのが実情であり、今後予想されるCCS事業の急増に対応できる技術は未だ確立されるに至っていないのが現状である。特に、注入されたCO<sub>2</sub>が地表や浅部地下水層に漏れいすることなく、長期間にわたって安定的に地下に貯留可能かどうかについては今後の研究課題として残されている。

そのような状況で、本プロジェクトでは、実際にガス田開発が行われる実フィールドでCO<sub>2</sub>の注入およびモニタリング実験を行い、CO<sub>2</sub>地中貯留のための最適な貯留層評価技術およびモニタリング技術の研究開発を行う。研究の最終成果としてCO<sub>2</sub>の安全な地中貯留のための技術指針を作成し、インドネシアを中心にその普及拡大を図る計画である。この成果は、インドネシアだけでなく同様な状況にあるアジアの新興国においてエネルギー増産と地球温暖化抑制の両立を可能にすることに寄与するとともに、日本国内のCCS事業の推進ならびにCDMメカニズムを活用した地球温暖化事業の促進にも寄与できると考える。

#### ② 当初の計画（全体計画）に対する当該年度成果（達成状況）

平成26年度は、従来の計画に則して、貯留層シミュレーションの総合的な解析を行い、圧入地域周辺に存在する断層を通じたCO<sub>2</sub>漏洩リスクや岩石力学的検討によるCO<sub>2</sub>の安全な圧入が基本的に

可能である事を確認した。また、CO<sub>2</sub>の地層水への溶解プロセスのシミュレーションへの組み込みに関わる基礎的検討を行った。モニタリング手法の開発に関しては、重力探査は平成25年度の予備調査に引き続き、平成26年度はベースライン調査の一環として平成25年度に輸出供与した重力計(CG-5)や日本から持参した絶対重力計A10を用いた広域調査を実施した。次に、電磁探査に関しては、本年度はTDEM装置のMIセンサーを4式と電磁探査データ解析ソフトウェアを供与し、6月にJepon-1周辺地域の地表予察と使用機器準備他のロジスティックス検討を行い、8月にはITB研究者チームと共にベースライン調査を実施した。地震探査関係では、平成25年度に調達供与した坑井内微小地震計を用いて平成26年11月から平成27年2月にかけて予備調査を実施し、坑井内地震計5式を追加調達して供与した。また、平成24年度、26年度に調達した地表地震探査装置を用いたベースライン調査に関して、ITB研究者と予備的な協議を開始した。更に、新型震源機器によるCO<sub>2</sub>の漏洩監視への適用可能性に関する基礎研究を行った。収集した岩石資料を用いた実験のまとめも行った。

平成25年度にITBにて実施したCO<sub>2</sub>回収・輸送・圧入に関わる地上設備のF/Sの成果を平成26年度にまとめ、これまでのSATREPS研究(地質学・地球物理学・貯留層研究(GGRと呼称))と併せて平成26年度内にADBへ研究報告を行った。ITBの上記F/Sには、CCS実施のための法規制に関わるF/Sと社会受容性に関するF/S調査も併せて行われた。

CCS実施に当たっての大きなリスク要因として考慮しなければならない事項として、地表への漏洩という課題が考えられる。この課題に対しては各種漏洩の可能性を考え、シミュレーションスタデューによって評価されている。今回はこれらのリスク要因に関して、インドネシア側のカウンターパートであるITBがノルウェーのDNV社の研究者と共に、検討を行った。その結果古い坑井を利用した二酸化炭素の圧入に関してリスクのあることが解ったため、平成26年度において、二酸化炭素に対する坑井のケーシング評価プログラムを導入し、検討を進めた。

定期的実施しているGundih CCSシンポジウムの第8回シンポジウムを9/26に秋田県大潟村で開催し、50名を超える参加者があった。また、シンポジウム中にProfessor Dr. Akhmaloka(ITB学長)の秋田大学訪問が重なり、学長のシンポジウムへの参加もあった。第9回Gundih CCSシンポジウムを3月6-7日にスラバヤで開催した。更に、ITBが実施した地上設備構築に関わるF/Sを広くアピールするためのADBワークショップと謳ったF/Sの一般向け報告会を8月期にバンドン(ITB)にて、また、9月期に東京(早稲田大学)にて開催した。

JICAの短期招聘プログラムを利用して2名のITB研究者(Dr. Eko Januari, Mr. Fernando Hutapea)を招聘し、日本研究者との共同研究や研修を行った。

### ③ インパクト

平成23年度にプロジェクトを開始以降、本プロジェクトは、アジア開発銀行、ノルウェー国などから注目をあび、特にアジア銀行からは本プロジェクトの地上設備構築に関わる費用の提供を受けることとなった。更に、ノルウェー国からは、プロジェクトのリスク解析調査のための費用の提供を受けるに至った。更に、平成26年度より我が国の公的機関(NEDO)による、本プロジェクトの実験地(Jepon-1)をプラットフォームにした、JCM(二国間)クレジットのためのCO<sub>2</sub>隔離事業の可能性調査が開始された。我が国においては国連が認証するCDM以外に、政府は二国間オフセットクレジット制度(JCM)を進めており、将来的にCCSがJCM制度の一部に認定されるならば、我が国が発信する新しいCO<sub>2</sub>削減の方法論として世界に対して、インパクトも大きいと考えられる。

(2) 研究題目 1 「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」(京都大学グループ)

① 研究のねらい(目的および内容)

C02 を注入する貯留層の特性を評価する手法及び C02 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

C02 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 C02 の濡れ性の評価を行い、これを基に LBM を使って孔隙内で C02 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。具体的には、弾性波を用いた手法と、重力の手法の技術開発を進めている。重力探査に関しては、九州大学と協働にてインドネシア国での調査を実施している。これら評価結果をベースに C02 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

(貯留層内の C02 挙動モニタリング手法開発)

平成 25 年度は新潟県長岡市で行われた C02 圧入実証試験で取得された検層データを元に、C02 飽和と弾性波速度の関係に関して検討を進めた。平成 26 年度はこれらの結果を踏まえ、二酸化炭素の地下貯留において重要となる多孔質媒体中における多相流体流動への理解、ならびに地震波速度へ多相流体流動が与える影響の詳細な理解を目的とし、シミュレータの開発と岩石モデルを用いた数値シミュレーションによる検討を行った。

流体シミュレーションを行う際には格子ボルツマン法を用いた。3 次元シミュレーションを行う為、D3Q19 モデルを採用し、境界条件としては通常のノンスリップ条件とし、地層水と二酸化炭素の 2 相流を取り扱うために、色付き粒子モデルを採用した。この手法は Shan-Chen モデルや自由エネルギーモデルと比較して、界面を少ないグリッドで再現可能であり、界面張力・粘性等のパラメータを独立に調整可能である利点を有している。また二酸化炭素と水の置換が岩石の地震波速度へ及ぼす影響を検討するに、波動シミュレータの開発を進めた。支配方程式となる応力-粒子速度の式はスタガード格子法を採用したが、一般的なスタガード格子では、対象となる媒質に強い不均質性がある際に数値誤差・発散が生じてしまうことが知られているため、回転スタガード格子(Rotated Staggered Grid)を用いた。

岩石モデルとしては、堆積岩の形状を模した粒子充填モデルを採用し、鉱物粒子サイズソーティングはガウス分布し、岩石モデルは個別要素法を用いて作成した。以下に作成された粒子充填モデルを示す。

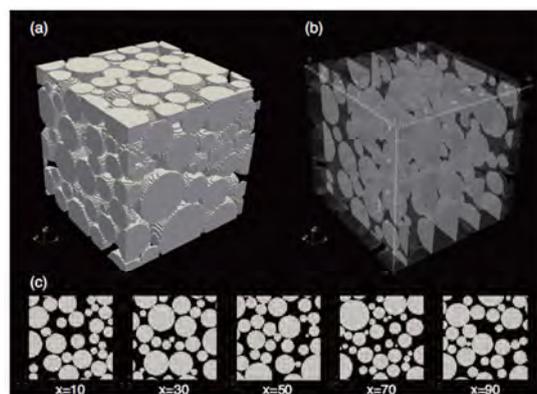


図 I-2-(2)-1 シミュレーションに用いた粒子充填モデル

この岩石モデルに対して二酸化炭素圧入に伴う流体置換のシミュレーションを行なった。この際、粘性力と毛管圧力の比であるキャピラリ数と呼ばれる無次元数に着目し、これを  $10^{-5}$  から  $10^{-3}$  のオーダーで変化させケーススタディを行い、置換メカニズムとして高いキャピラリ数の領域ではViscous Fingeringが、低いキャピラリ数の領域ではViscous FingeringとCapillary Fingeringのクロスオーバーが観察された。更に、低キャピラリ数の領域においては、間隙スケールでの現象として知られるHaines ジャンプが観察された。結果の一部を以下に図示する。

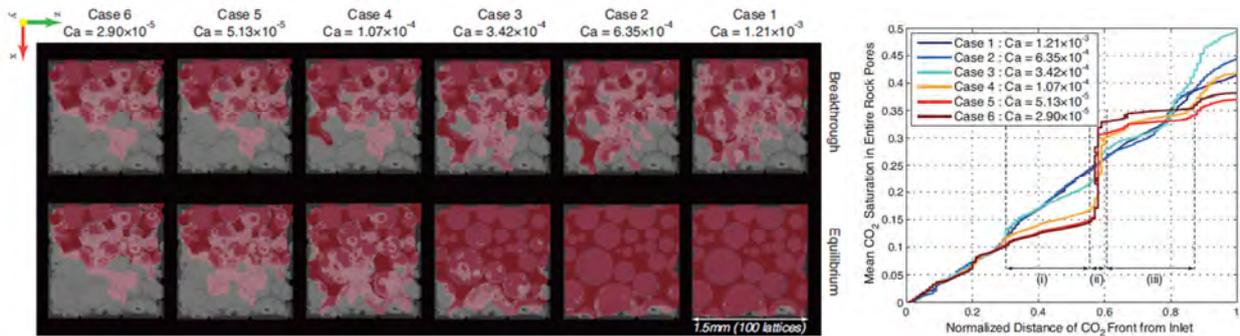


図 I-2-(2)-2 (右) 地層水が上から圧入される二酸化炭素 (赤) によって置換される様子。  
(左) 二酸化炭素が岩石を通り抜けるまでの飽和率の変化の様子

ここでは、二酸化炭素地下貯留における貯留層評価や圧入効率において最も重要となる二酸化炭素の平衡飽和度に対し、Haines ジャンプが及ぼす影響について議論を行なった。観察されたHaines ジャンプは前進型 (方向が圧入方向と同方向であるもの) と後進型 (方向が圧入方向と逆方向であるもの) の二種類に分類され、二酸化炭素の飽和度は前進型のHaines ジャンプが発生するときに非常に低い値を示すことがわかった。

格子ボルツマンシミュレーションにより得られた間隙中の二酸化炭素と水の分布をもとに、有限差分による波動シミュレーションを用いて地震波速度の変化を評価した。二酸化炭素圧入に伴う地震波速度の線型な速度の減少が観察された。一方、岩石モデル中に二酸化炭素と水をランダムに配置し、二酸化炭素と水の流体分布が地震波速度に及ぼす影響を検討した結果、二酸化炭素の飽和度に対する地震波速度の関係は格子ボルツマンシミュレーションにより求められた分布状態とランダム配置した状態とで大きく差があることが確認された。この差は部分飽和 (Patchy saturation) と均質飽和であることが解った。その結果を以下に示す。図中の白丸点は流れの、また赤十字点はランダムに地層水が置換された場合に対応する弾性波速度である。両者は大きく異なっており、二酸化炭素は部分飽和 (Patchy saturation) で有ることが解った。

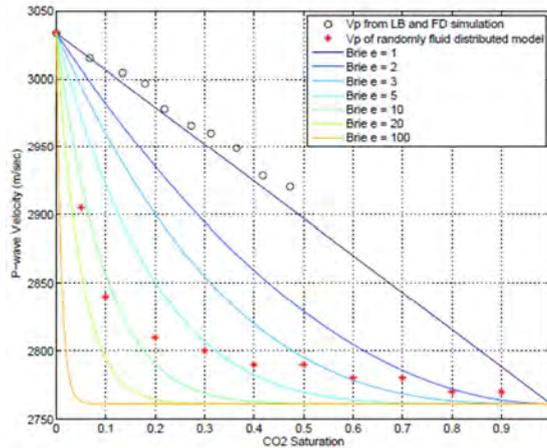


図 I-2-(2)-3 置換後のモデルに対する飽和度と弾性波速度の関係

またこれらの結果は、有限差分波動シミュレーションによる地震波速度の評価が妥当であることを示しており、今回作成した格子ボルツマン法及び有限差分法による波動シミュレーションを組み合わせることで、間隙というマイクロなスケールでの多相流体分布を考慮に入れた地震波速度の定量的な評価を行うことに成功した。これらの成果は、今後現場での二酸化炭素圧入に伴う地震波を用いたモニタリングにおいて取得されたデータの解釈において基本となる事項であり、この成果を元に、今後観測データの解析を進める事にする。

(重力調査)

平成 26 年度には、平成 25 年度末に導入された gPhone 重力計 3 台および Scintrex CG-5 相対重力計の初期性能確認ならびに gPhone のバンドンでの連続観測テスト、また、昨年引き続きグンディ地区での A10 絶対重力計による予備調査ならびに CO<sub>2</sub> 注入井候補地の JEPON-1 坑井地域での CG-5 重力計を用いたベースライン調査を実施した。また、CO<sub>2</sub> 注入に伴う重力変化のモデリングにも着手した。

gPhone 重力計については、平成 25 年 1 月に京都大学に納入され、1 月 23 日から 2 月 27 日までの約 1 カ月、初期性能確認後、3 月にインドネシアに移送した。その後、4 月上旬に ITB のジャティナンゴール・キャンパス内で連続テスト観測を開始した。その後、当初設置した建物の改築のため、9 月に同キャンパス内の約 500m 離れた別の場所に移設、観測を継続している。図 I-2-(2)-4 (A, B, C) に、それぞれの観測点での重力計の設置状況を示す。



図 I-2-(2)-4 gPhone テスト状況 (A) 京大



図 I-2-(2)-4 gPhone テスト状況 (B) ITB



これらの点は重力基準点として、CG-5重力計を用いた約400点のグリッドサーベイを実施している。図 I-2- (2)-5 にグリッドサーベイの測定点および A10 ならびに CG-5 での測定の状況を示す。これらの測定結果については、現在、ITB で解析が進められており、今後の重力変化の基準となるほか、地下密度構造の精密な決定も行われる予定である。

以上の観測・測定研究に加え、今年度は、CO<sub>2</sub> 注入開始に伴う重力変化のモデリングについても着手した。モデリングについては Jepon を対象に行われている CO<sub>2</sub> 注入シミュレーション結果（密度変化）に基づき、重力フォワード計算を行った。計算方法は CO<sub>2</sub> 注入シミュレーションと同様に地下をブロックの集合体で表現し、各ブロック内での密度変化による重力変化を角柱の厳密解である Okabe (1979) の方法で計算し、これらの総和を地表での観測点における重力変化としている。また、注入量の条件としては予定されているものに加えていくつかのパターンについても試算を行う予定である。

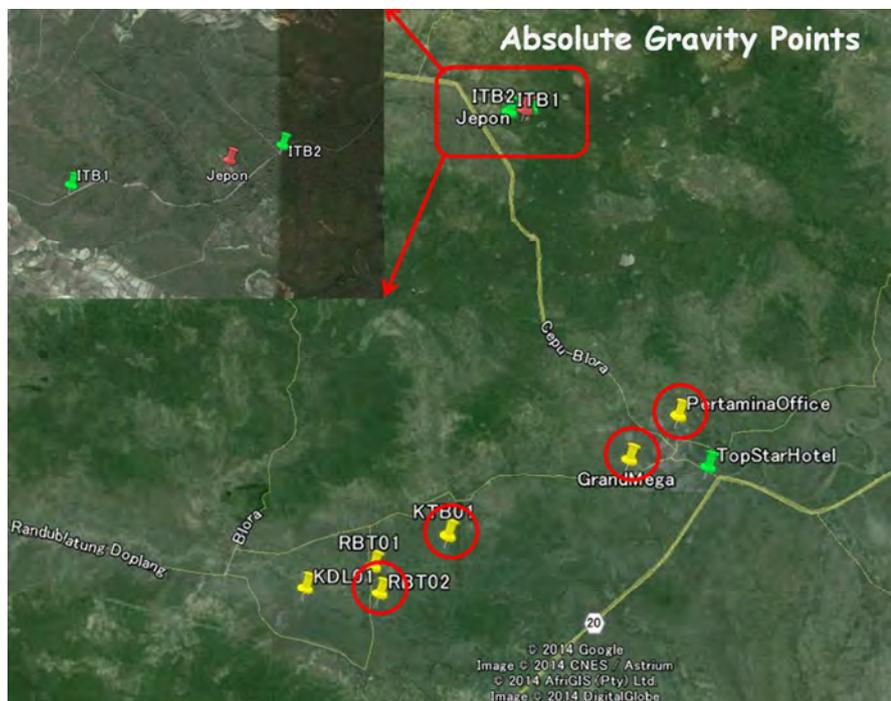


図 I-2-(2)-5 A10 による絶対重力測定点。黄色ピンは平成 25 年度に設置の測定点で、それ以外の点は平成 26 年度に設置。赤丸の測定点では平成 26 年度に再測定を実施。

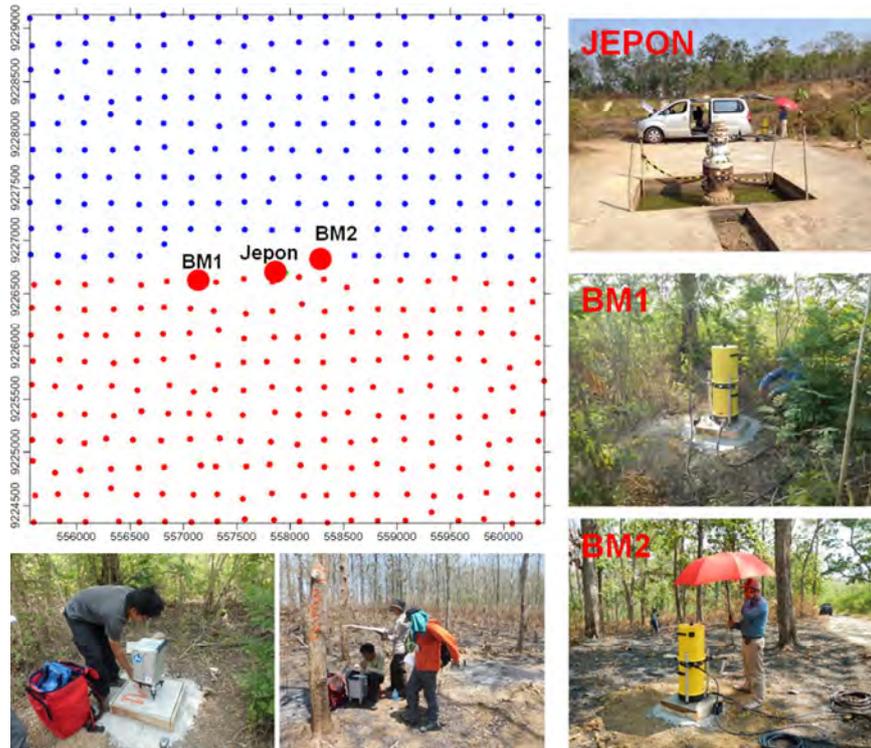


図 I-2-(2)-6 A10 による重力基準点と CG-5 によるグリッドサーベイの重力点。写真は基準点での A10 の測定および CG-5 での測定の状況を示す。

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。平成 25 年度、26 年度共に、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。また平成 26 年度には JICA 短期研修プログラムで、ITB 研究者 (Lecturer Dr. Eko Januari) を約 3 か月間招聘し、主として九州大学にて共同で研究することで重力調査に関する十分な技術供与・移転ができた。更に、同プログラムで ITB 研究者 (Mr. Fernando Hutapea) を招聘し、サンコーコンサルタントへ研修委託をして、地表地震探査を主体にデータ取得、処理、解析、解釈の研修を行った。特に、供与機器である同型の地震探査装置による現場実習による今後実施する地震探査への重要な人材養成にもなった。

(3) 研究題目 2 「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」(秋田大学)

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 26 年度は、昨年度に引き続き、パラメータを変化させ（表 I-2-(3)-1）、貯留層シミュレーションを継続し、高精度化を目指した。

表 I-2-(3)-1 平成 26 年度の計算パラメータ

平成26年度シミュレーションパラメータ	
パラメータ項目	設定値
貯留層サイズ	13300 m x 12300 m / 445 m x 445 m
グリッド分割数	133 x 123 x 10 / 89 x 89 x 9
圧入層	第1層、第2層、全4層
孔隙率	0.13, 0.18, 0.23 0.28
水平浸透率(砂岩)	50, 100, 200, 400, 800 (md)
水平浸透率(泥岩)	0 md
鉛直浸透率	水平浸透率の1/10
温度	55, 60, 65, 70, 75 (°C)
境界条件	No Flow
圧入期間	1, 2, 5, 10, 20 年
CO2圧入レート	10, 20, 100 (Kton/年)
初期圧力	1500 bar
初期水飽和率	1

広域モデルに加えて圧入井（Jepon-1）周囲のみの詳細モデルを準備し、地層モデルパラメータを変化させ、シミュレータを使って CO2 流動範囲の推定を継続して行った。計算の結果、1 年間で 1 万トン圧入した場合、地層の浸透率により流動方向に相違が生じることがわかった。図 I-2-(3)-1 に浸透率が異なる場合の 1 年後の CO2 貯留状態の計算結果を示す。また、第 2 層にのみ圧入した場合の結果を図 I-2-(3)-2 に示す。浸透率が低い場合は圧入井周囲に広がるのに対し、浸透率が高い場合は、背斜軸に沿って流動することが示された。一方、どのような浸透率であっても、断層までは到達しないこともわかった（図 I-2-(3)-3）。

また、CO2 が到達しない場所であっても、地層圧は変化する。断層付近の地層圧の変化を推定した結果を図 I-2-(3)-4 に示す。計算の結果、断層付近の地層圧の変化は 1MPa 以下を示し、断層の状態を不安定にさせる程の影響はないことがわかった。

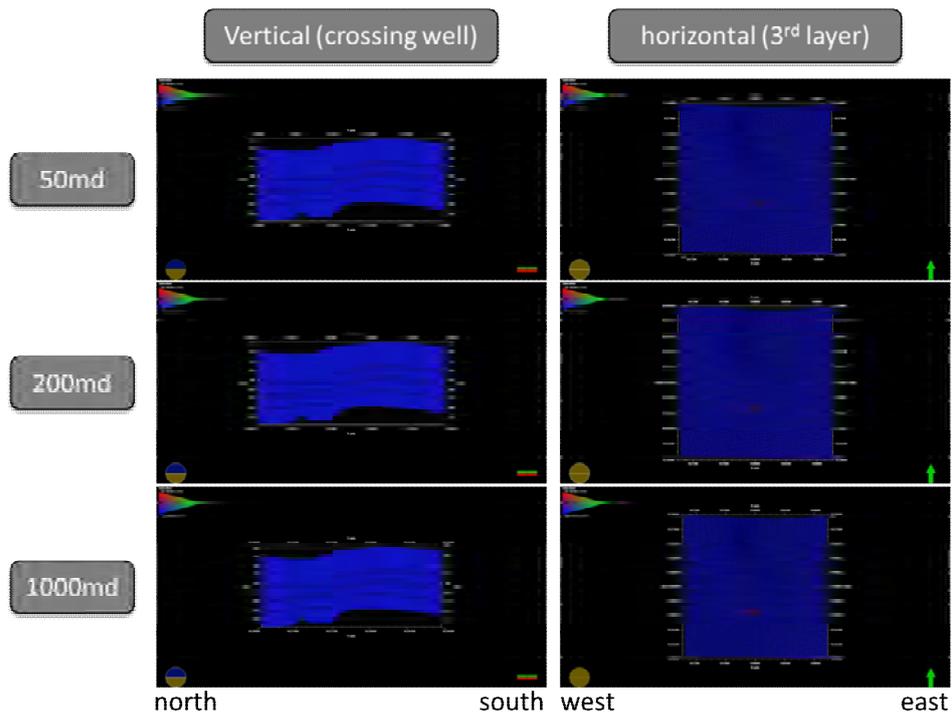


図 I-2-(3)-1 圧入した CO<sub>2</sub> の 1 年後の流動分布  
 (左列は圧入井を横切る垂直断面で、右列は第 1 砂岩層 (最浅部) の水平断面)

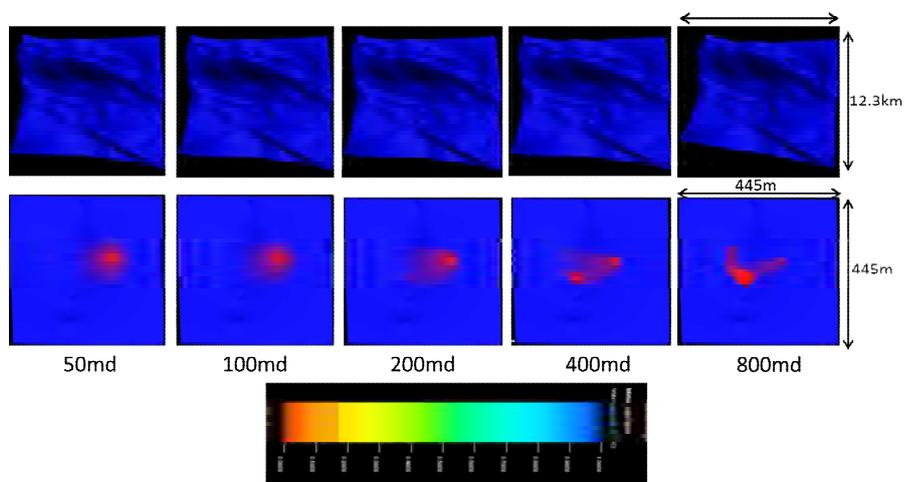


図 I-2-(3)-2 第二層のみに圧入した場合の浸透率の相違による CO<sub>2</sub> 流動範囲の相違

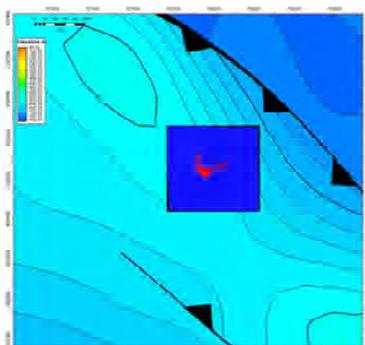


図 I-2-(3)-3 年間 1 万 t で 1 年間圧入した場合の CO<sub>2</sub> の流動範囲

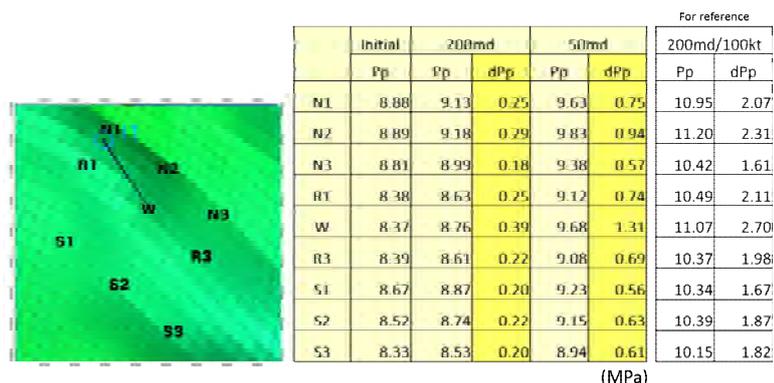


図 I-2-(3)-4 年間 1 万 t で 1 年間圧入した場合の地層圧分布

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。貯留層シミュレーションに関しては、シンポジウムや内部会議を通じて、情報交換による相互の情報共有ができた。

(4) 研究題目 3 「電気・電磁法を利用したモニタリング技術の研究」(早稲田大学)

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 26 年度は 6 月に Jepon-1 周辺の予察を実施し、8 月に研究者と共に TDEM 法のベースライン調査を実施した。

TDEEM 法ベースライン調査の予察(6 月実施)

CO2 圧入サイトの地理・地勢・地形を確認し、送受信位置の候補地を選定し、必要な機材の数量や仕様を確定した。また、8 月に実施するベースライン測定の実施期間や準備作業について、ITB 研究者らと綿密な準備協議を行った。送信電極設置の候補地では設置抵抗を計測し、大電流送信の為に設置電極に 1.5m のアース棒を複数使うこととし、日本側で準備した。



図 I-2-(4)-1 予察の様子(左：Jepon-1 周辺、右：送信電極設置候補地での接地抵抗測定)  
ベースライン測定 (8月実施)

8月20日～8/29の日程でTEM法によるモニタリング調査(CO2圧入前のベースライン測定)を行った。測定点は図4-3-4に示すレイアウトにて、総計で66地点とした。日本側からも受信器、センサー、送信電極用アース棒などを持ち込み、インドネシア側(ITB)の機材と合わせて、測定を実施した。約1.6kmの長さの送信電線を接続して送信テストを行い、調査に十分な送信電流140Aを確認した。受信側では日本側とインドネシア側の混成で3チームを構成し、同時測定で高効率を計った結果、5日間で66ポイントの測定を行うことができた。調査後は、CO2圧入後のモニタリング調査で同じ位置を再現する為に、送信電極は地中に埋設し、全受信点に木製のタグを設置した。

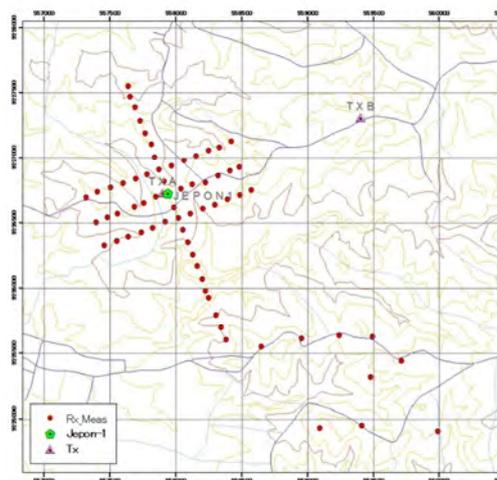


図 I-2-(4)-2 ベースライン測定結果(送信受信位置図、測定の概要)

機材撤収と梱包が完了した調査最終日には、インドネシア側と日本側でそれぞれのデータを交換、統合し、参加メンバー全員でミーティングを行って、調査の反省と解析に向けての打ち合わせを行った。現在、日本・インドネシア双方にて取得データの処理を実施中である。尚、ITBでのデータ処理は日本側から供与した電磁法解析ソフトウェアで実施している。



図 I-2-(4)-3 調査の様子(左：送信電極の打ち込み、中：信号受信中の様子)

④ カウンターパートへの技術移転の状況

平成 26 年度は、予察ならびに調査を日本・インドネシア合同で実施したことで、今後の調査は ITB のみでも実施可能な程度に技術移転ができた。

(5) 研究題目 4「探査データの総合解釈・評価技術の研究」(深田地質研究所)

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 CO<sub>2</sub> の飽和度等の変化を推定するための解析手法及び CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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

(5-1) 地震探査装置の導入と研修

平成 26 年度は、平成 24 年度に導入した機材のうち微小地震観測システムを用いて、微小地震観測データを利用した貯留層評価手法の研究を目的に現地実証試験を計画、実施した。実証試験は、カウンターパートである ITB が Star Energy 社と共同研究を進めている西ジャワ州の実験サイトにて実施した。このサイトでは、地下構造調査を目的として過去に電磁法探査や重力探査も実施されており、それらの探査結果との比較検討を通じて、Gundih ガス田およびその周辺における CO<sub>2</sub> 貯留層評価に必要な基礎的な技術の研究開発が可能と考えられるために、実証試験を計画した。このサイトでは 4 月以降に新しいボーリング孔の掘削が予定されており、掘削に伴う振動や自然地震等を観測することによって、地下の構造や状態変化が把握可能かどうかを評価する予定である。

具体的には、平成 26 年 11 月 3 日～6 日に現地を下見した上で、平成 27 年 1 月 9 日～14 日に予備試験として微小地震観測システム 1 式をサイト内の既存孔に設置し、1 月 13 日から連続観測を開始した。この既存孔はサイト内の地下水観測井であるが、現在は使用していないため、本実証試験に使用することにした。サイトにはこの他にも同種の井戸が複数あるので、本試験ではこれらの井戸を利用して複数点での観測を計画している。観測機器の設置状況を下図に示す。今後、平成 27 年 2 月～3 月にかけて予備試験データを確認の上、複数のシステムをサイト内に設置し観測を開始する予定である。



図 I-2-(5)-1 観測機器の設置状況（左：機器準備状況、右：観測井に設置後の機器）

(5-2) 岩石物理関係研究開発

平成 26 年度は、平成 25 年度に引き続き、複数の物理探査データを利用して地盤の透水係数を推定する手法について研究を進め、土質地盤、堆積性軟岩、堆積岩で得られた物理探査データに適用し、推定精度を含む適用性の評価を行った。特に、CO<sub>2</sub> 貯留層として重要な砂岩について室内試験で測定された S 波速度と比抵抗データを用いて透水係数の推定を行い、室内試験で得られた透水係数との比較を行った。その結果、1 桁以内の精度で推定が可能であることを示すことができた。下図に解析結果を示す。

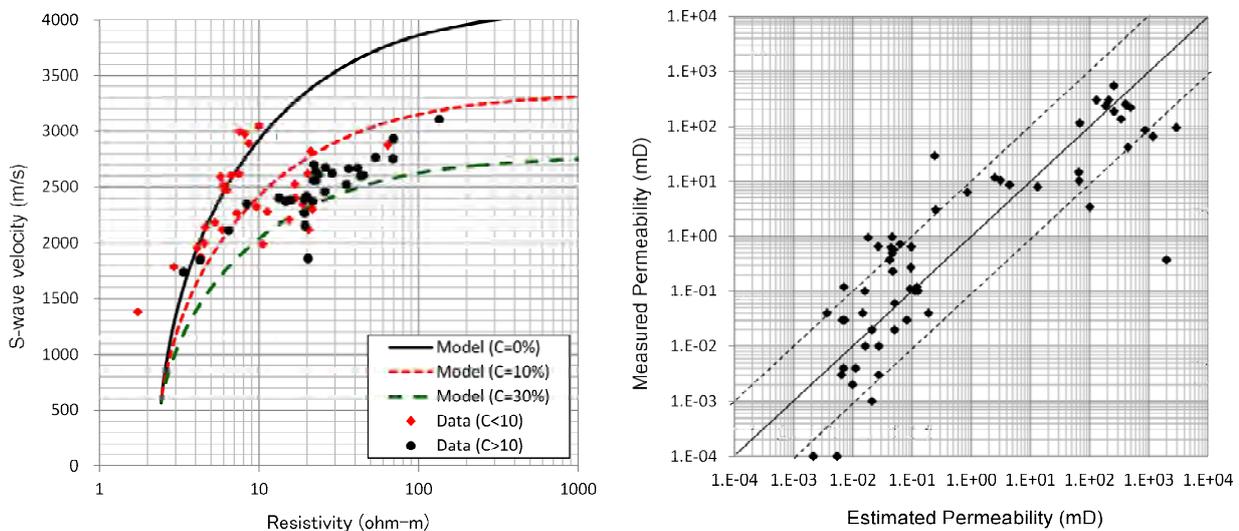


図 I-2-(5)-2 物理探査データによる砂岩の透水係数の推定結果

(左：S 波速度と比抵抗の関係に基づく粒径の推定。右：推定透水結果と実測値の比較結果)

④ カウンターパートへの技術移転の状況

平成 26 年度は、微小地震観測システムの実証試験を通じて、機器の取扱いだけでなく性能の評価法等を含めた技術移転を行った。

(6) 研究題目 5 「貯留層評価及びモニタリング手法の研究」(九州大学)

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。

## ② 研究実施方法

グンディガス田の既往データの解析によって貯留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。また現地で取得した岩石試料に対して実験を行い、貯留層の弾性特性や水理特性を測定し、貯留層シミュレーションに組み込む。現地で重力探査等を実施し、圧入 CO2 のモニタリングの有効性について検討を行う。さらに、圧入 CO2 のモニタリングの新規手法に関する研究も実施する。

## ③ 当初の計画（全体計画）に対する現在の進捗状況

九州大学では当初計画に基づき、平成 26 年度は、(1) 貯留対象層の掘削によるコア取得と基礎物性測定結果のまとめ、(2) 連続的な圧入 CO2 のモニタリングに向けた手法開発、(3) 貯留層シミュレーションでの溶解プロセスの定式化を実施した。

### (6-1) 貯留対象層の掘削によるコア取得と基礎物性測定のまとめ

平成 26 年度は、これまで得られた成果を 10 月に米国テキサス州オースティン市で開催され Greenhouse

Gas Control Technologies Conference (GHGT-12) においてポスター形式で発表した。発表では前年度までの研究成果を基に、本プロジェクトの貯留対象層である Ngrayong 層の貯留性能および Bulu 層の遮蔽性能について議論した。まず掘削コアの岩相解析を鏡下において行い、砂岩、石灰岩、石灰質泥岩および泥岩に大きく分類した。掘削コアの物性測定結果と岩相解析結果を併せて議論した結果、岩石試料の物性値は石灰質泥岩とそれ以外の岩相との間に大きな差異が存在することが明らかになった(図 I-2-(6)-1)。Bulu 層と Ngrayong 層に見られる石灰質泥岩は、著しく低い孔隙率を示していることから、石灰質泥岩は Bulu 層下部の主要な構成岩石であることから、Bulu 層は遮蔽層として十分な性能を有している可能性は大きい。

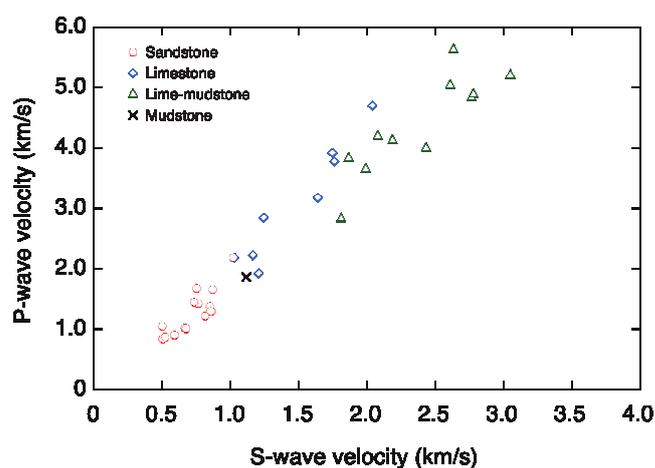


図 I-2-(6)-1 Vp-Vs プロット

また、Ngrayong 層内に挟在する石灰質泥岩も Bulu 層の同種の岩石と同様に低い孔隙率を示す。一方、Ngrayong 層の砂岩は高い孔隙率を示し、低い弾性波速度を示す。これらの測定結果は Ngrayong 層が未固結の砂層もしくは固結度の小さな砂岩で構成されていることを示唆している。また

Sidewall コアの観察結果からも Ngrayong 層が未固結な砂層もしくは固結度の低い砂岩で構成されていることが示されている。従って、Ngrayong 層は大きな CO<sub>2</sub> 貯留性能を持っていると推定できる。一方、Ngrayong 層内部の石灰質泥岩は葉理面などの低浸透率の小規模不均質構造を形成していると考えられる。先行研究は、これらの小規模不均質は貯留層内部での CO<sub>2</sub> 流動を阻害し、補助的なシール層として機能している可能性が大きい。

#### (6-2) アクロス震源を用いた CCS モニタリングシステムの構築

圧入 CO<sub>2</sub> のモニタリングには、不連続的に実施される時間差地震探査 (Time-lapse seismic survey) を用いるのが一般的である。しかし圧入 CO<sub>2</sub> の漏洩を検出する点では、モニタリングを連続的に実施し、いち早く対策を練ることが重要である。弾性波アクロス (精密制御定常信号システム) は、定常的に地下に信号を発信できるため、連続して地震波データを取得することができる。そのため、従来の人工的な震源を用いた地震探査に比べて時間方向の解像度が高く、CO<sub>2</sub> 地中貯留などの地下構造モニタリングに適していると考えられる。本研究では弾性波アクロス震源を用いた地震波解析の時間的安定性を評価するために、名古屋大学の山岡教授と東京大学の渡辺教授と共同で、愛知県豊橋市にある三河地殻変動観測所に設置された小型アクロスを用いたモニタリング手法の開発を行った。特に、表面波解析によるモニタリングの安定性を検証した。アクロスによるモニタリング手法が有効であることが明らかになれば、このモニタリング手法をグンディ CCS プロジェクトに適用することも選択肢の一つとして考えられる。

弾性波アクロスは、錘を周波数変調 (FM) 方式で回転させることによって、地盤に力を加える。錘の回転方向として、時計回りと反時計回りの回転の両方についてデータを取得することで、任意の方向に加振した震源関数を合成することができる。

解析に用いたアクロスデータは 2014 年 8 月 5 日 19 時から 8 月 6 日 9 時の間 (14 時間) に取得されたデータである。地震計の測線長はおよそ 70m であり、地震波データは 10 m 間隔で設置された 8 個のジオフォンにより取得した。データ取得時のアクロスの周波数は 5-15 Hz であり、アクロスは 1 時間おきに反転させた。よって本研究で用いたデータの場合、2 時間のデータごとにアクロスの伝達関数を計算することができる。

観測されたマルチチャンネル地震波データから、表面波マルチチャンネル解析 (Park et al., 1999) により面波分散曲線を推定した (図 I-2-(6)-2 (a))。また観測された地震波の振幅値を Foti (2003) の方法により解析することで、表面波減衰係数を推定した。表面波分散曲線および減衰係数を異なる 2 時間のデータごとに推定した結果を図 I-2-(6)-2 の (b), (c) にそれぞれ示す。推定した分散曲線および減衰係数をみると、異なる時間においてもほぼ同じ推定値が得られていることがわかる。今回データを取得した期間には降雨もなく、浅部構造に変化が生じている可能性は低い。本研究で得られた結果は、アクロス震源を用いたデータに表面波解析することによって、時間的に安定して浅部構造をモニタリングすることが可能であることを示している。

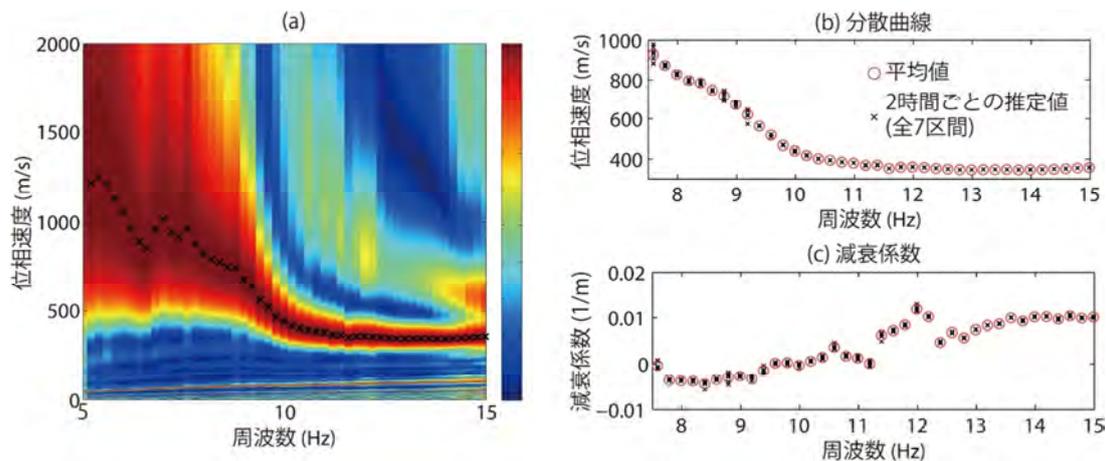


図 I-2-(6)-2 (a) 8月5日 19-21 時のデータから計算した位相速度スペクトル。黒は推定した位相速度を表す。(b)および(c) 8月5日 19時-8月6日 9時に取得された2時間ごとのデータからそれぞれ推定した分散曲線と減衰係数(黒)とその平均値(赤)。分散曲線がほとんど時間変化していないため、分散曲線(黒)が重なって見える。

### (6-3) 貯留層シミュレーションでのCO<sub>2</sub>の溶解プロセスの検討

貯留層では、多孔質岩石の隙間は間隙水で満たされている。圧入初期では、CO<sub>2</sub>は間隙水内のバブルとして存在するが、やがて間隙水に吸収される。その溶解速度は、地層水の特長やCO<sub>2</sub>バブルの径などに依存すると考えられている。この溶解速度は、安全で効率的なCO<sub>2</sub>貯留を可能にするが、現在の貯留層シミュレーションでは、この溶解の影響を経験的に与えることが多い。我々は、CO<sub>2</sub>の溶解プロセスを検討し、貯留層シミュレーションに組み込むことを目指した。

岩石間隙の大きさは数マイクロメートルであり、このような小さなスケールでは全エネルギーに対する界面エネルギーの割合が相対的に大きくなり、その影響が大きくなる。例えば、常温常圧下での水中にあるCO<sub>2</sub>の気泡径が0.25cm未満の場合は、界面張力の影響を受けて、その溶解速度がHigbieの浸透説によるモデルとは異なる挙動を示すことが知られている。界面張力の影響を考慮した溶解の時間発展を記述する一般的な方法として、ヘルムホルツの自由エネルギー減少法則に基づいた様々なPhase field modelが提案されている。グンディ CCS プロジェクトでCO<sub>2</sub>を貯留する帯水層は、深度が1000m(圧力10MPa)、温度は30度を超える。このような条件下では、CO<sub>2</sub>は超臨界流体となる。臨界点近くのCO<sub>2</sub>は、熱伝導率が極大になり、溶解熱や界面を横切る熱流の影響を受けやすい。したがって、間隙水内の超臨界CO<sub>2</sub>の溶解を考える場合には、界面張力の影響に加えて熱の影響も考慮する必要がある。しかしながら、上に述べたPhase field modelでは界面張力の影響を考慮できるものの、熱の影響を組み込むことが難しい。その理由は、ヘルムホルツの自由エネルギーが減少するのは、温度が一様かつ定数とみなせるときに限るからである。したがって、熱の影響を考える場合は、経験的にPhase field modelを補正する必要がある。我々は、そのような経験的な補正を用いるのではなく、非ホロノミック拘束における変分原理に基づいて、非一様温度下での溶解過程を記述する運動方程式を導出する新たな方法を提案し、溶解プロセスにおける熱の影響を調べた。

## 溶解プロセスの定式化と結果

流体の運動を知るには、動力学 (kinematics) を与える保存則と熱力学 (thermodynamics) を与えるエントピーの式の具体的な形を知る必要がある。多成分系について、これらの式を現象論から得ることは難しい。我々はこの問題に対応するため、変分原理を用いた定式化を開発した。このアプローチを用いれば、対称性や作用に極小値を与える解が存在するための必要条件を使うことができ、動力学と熱力学との矛盾のない運動方程式を経験則に頼ることなく導出できる。我々が導出した熱力学を考慮した運動方程式により、CO<sub>2</sub> 吸収過程において、次の2つのことが明らかとなった。

### ① 泡収縮に伴う気泡界面の温度上昇

界面エネルギーに由来したエントロピー流束が界面付近で発生し、これにより界面の温度が上昇することがわかった。気泡が溶解し収縮しているときは、エントロピー流束は界面を超えて気泡から水中に流れて気泡は冷える。ミクロにみれば、界面付近ではエネルギーの高いCO<sub>2</sub>分子から界面を超えて水側に移動していることを表している。これにより気泡内にある界面付近のCO<sub>2</sub>の温度が下がり、界面及び界面付近の水の温度は上昇する。つまり、気泡の溶解によって界面に垂直な方向に非一様な温度場が発生することがわかった。気泡径が小さければ小さいほど、体積に対する表面積の割合が大きくなり、気泡はエントロピー流束によって冷えやすくなり、より非一様な温度場が発生しやすくなると考えられる。

### ② 泡界面の温度上昇による溶解速度の低下

非一様な温度場を考慮しない場合には、界面エネルギーは気泡の表面積を小さくする方向、つまり、気泡の収縮を促進することが知られている。この効果はCO<sub>2</sub>の質量分率  $\phi$  の勾配  $\nabla\phi$  で決まるとされていた。今回、我々は温度を考慮した場合には、これが  $(\nabla\phi)/T$  の分布で決まることを新たに見出した。 $\nabla\phi$  の絶対値は界面で極大となるが、気泡が収縮している際には温度  $T$  も界面で極大になる。したがって、気泡収縮によって発生する非一様な温度場は気泡の収縮の効果を妨げる方向に働く。温度場が定常であるという仮定の下では、気泡が小さいほど溶解速度は速くなる。しかし気泡径が小さいほど、非一様な温度場による溶解を妨げる効果が大きくなる場合には、ある気泡径以下での気泡の溶解速度が逆に遅くなることもありえる。この場合、溶解にはある程度の気泡の大きさが必要であり、小さくなった気泡はいくつかが合わさることで再び大きな気泡を作り、そして溶解するという過程を経て溶けていくと考えられる。このように溶解によって生じる非一様温度場の影響を考えることによって、非自明な溶解の過程が明らかになった。

## 結論と展望

気泡界面ではCO<sub>2</sub>吸収に伴いエントロピー流が発生し、これにより気泡界面温度が上昇することがわかった。気泡径が、あるサイズよりも小さいと気泡が溶けにくくなる可能性があることが分かった。これを具体的に評価し、貯留層シミュレーションに組み込むのは今後の課題である。本定式化で得られた運動方程式は、流れ場があるときも考慮することができる。本研究で実施した本定式化によりCO<sub>2</sub>、水、温度場についての方程式系を得ることができた。また間隙水内のCO<sub>2</sub>の溶解過程を制御するには、圧入する際の圧力、圧入気体の半径、温度を調整する必要があることが分かった。



図 I-2-(6)-3 CO<sub>2</sub> と水の溶解と熱の関係の模式図

④ カ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。平成 25 -26 年度にかけて実施した地質モデル構築では、ITB のみが保有するデータへのアクセスもあり、日本・インドネシアの密な交流の下に研究を実施できた。

## II. 今後のプロジェクトの進め方、および成果達成の見通し（公開）

本研究プロジェクトでは、CCS の安全で且つ効果的な実施に必要な CO<sub>2</sub> 貯留層の評価技術ならびに注入後の CO<sub>2</sub> の貯留層内での分布や挙動のモニタリング技術の研究を行い、実際の CCS 事業に役立つオペレーションの規準書を作成することを目標としている。併せて、研究成果をインドネシア国内での CCS 事業の推進に生かすために、研究者だけでなく技術者への技術移転およびインドネシア政府機関や石油会社への普及活動も積極的に行っており、今後も継続する。

当初 CO<sub>2</sub> の注入は、グンディガス田の開発者である Pertamina がガス生産事業の一環として実施予定であったが、CCS が企業にとって収入を生まないこと、さらに現在のインドネシア国内法律上は無理であることが解った。このため本プロジェクトにおいて CO<sub>2</sub> 圧入実施の実現が危ぶまれたが、アジア開発銀行が東南アジアで最初の CCS 事業である本プロジェクトに興味を示し、合計 1000 万ドルの研究資金の提供を申し出る状況となり、この問題は解決の方向で進んでいる。本プロジェクト採択時において、本研究を進める上で重要な分岐点である CO<sub>2</sub> の注入前後で研究フェーズを 2 つに分けて、実施内容と成果目標を設定した。

具体的には、CCS 技術の確立に必要な「サイトおよび CO<sub>2</sub> 貯留層評価技術の開発」と「CO<sub>2</sub> 挙動モニタリング技術の開発」を行い、CO<sub>2</sub> 地中貯留のためのサイトおよび貯留層評価とモニタリング技術の手順をまとめた規準書を作成する。規準書に記載する内容としては、貯留層評価技術については、1) 地質モデル作成に必要なデータと解析、解釈法、2) 貯留層シミュレーションモデルの作成と計算法、3) シミュレーション結果に基づく貯留層の総合評価法、4) CCS 事業の経済性評価法について、実例を含む記載とする。モニタリング技術については、1) サイト条件・環境を考慮した最適モニタリング手法

の選定規準、2) 探査計画指針、3) 探査法の測定・解析法、4) CO<sub>2</sub> の定量的評価のための解釈法、5) 貯留層モデルの修正法について、実例を含む記載とする。これらに関しては現在進行中である。

本研究プロジェクト遂行上ポイントとなるのはCO<sub>2</sub> の注入時期である。上記のとおり、CO<sub>2</sub> の注入作業は実際の操業計画の中に位置づけられるため、研究期間内の最適な時期に注入が実施されるかどうかは今後の操業者との協議に依存する。しかしながら、操業者である Pertamina はインドネシア国の方針に従い CCS 事業を積極的に進める姿勢を示しており、グンディガス田は重要なパイロットサイトとして位置付けられている。本研究の成功は操業者としての今後の事業の成功にも直結すると考えているため、共同研究機関として多くの研究者を参加させ、研究計画の立案にも参画している。

本プロジェクトでは、実際にガス田開発が行われる実フィールドでCO<sub>2</sub> の注入およびモニタリング実験を行い、CO<sub>2</sub> 地中貯留ための最適な貯留層評価技術およびモニタリング技術の研究開発を行う。研究の最終成果としてCO<sub>2</sub> の安全な地中貯留のための技術指針を作成し、インドネシアを中心にその普及拡大を図る計画である。この成果は、インドネシアだけでなく同様な状況にあるアジアの新興国においてエネルギー増産と地球温暖化抑制の両立を可能にすることに寄与するとともに、日本国内の CCS 事業の推進ならびに CDM メカニズムを活用した地球温暖化事業の促進にも寄与できると考える。

本プロジェクトの遂行に当たってはインドネシア国営石油会社である Pertamina 社から多大な援助必要であるが、さらに資金的援助に関してはアジア開発銀行 (ADB) 始め、外部研究ファンドの獲得も視野に入れながら進める。また日本独自の温暖化対策として、アジアの国々との間で進めている 2 国間オフセットクレジット制度は、重要な我が国の政策項目でもあり、これも視野に入れて、インドネシアでの CCS 事業が JCM 制度に合致しているかについての検討を進めると同時に、その実施に向けての検討も進める。これらの付加的な事項は、将来民間企業が CCS を事業として始める際には必須であり、本プロジェクトにおいてもウォッチングが必要と考える。

### Ⅲ. 国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など (公開)

#### (1) 共同研究全体

##### ・プロジェクト全体の現状と課題

共同研究者である ITB の積極的な研究活動により、計画以上のスピードで成果が得られている。これは、ITB と Pertamina との信頼関係が厚く、既往データの提供や現地の情報提供等がきわめてスムーズに進んだためと考えている。また、グンディガス田を対象とした CCS の (地上設備および法整備に関わる) フィジビリティスタディ (FS) が ITB によって別途実施された。両プロジェクトは互いに補完的に進めることができ、次年度の成果目標の 1 つである FS 報告書の完成が確実となり、CO<sub>2</sub> の圧入決定時期の確定を行うことができる。

##### ・各種課題を踏まえ、研究プロジェクトの妥当性・有効性・効率性・自立発展性・インパクトを高めるために実際に行った工夫

インドネシア国内での CCS に対する理解を深めてもらうために、シンポジウムには政府の関係機関からの参加を働きかけた。その結果、平成 25 年 11 月に福岡で開催した第 6 回 CCS シンポジウムには MIGAS からの参加を得た。また、第 7 回 CCS シンポジウムには、MIGAS 他多数のインドネシアの関連行政組織からの参加者を得た。平成 26 年度には、9 月に秋田県大潟村にて第 8 回の、また平成 27 年 3 月にはスラバヤにおいて第 9 回の CCS シンポジウムを開催した。第 8 回シンポジウムに

においては、Gundih が位置する Blora 県の県知事他関係者らを日本 CCS 株式会社が進めている苫小牧での CCS デモ事業地へ招聘し、現場視察を実施して実際の CCS 現場の理解の促進を図った。9 月には東京（早稲田大学）にて「GundihCCS パイロット事業の地上設備構築（含む法規制問題）フィジビリティスタディ」のワークショップを開催し、本プロジェクトの紹介と CCS への理解促進のための啓蒙も行った。この際には、招聘したインドネシア経済調整担当省次官から、本プロジェクトへの期待と支援の謝意と期待に加えて、継続的な支援を行うことが表明された。

- ・プロジェクトの自立発展性向上のために、今後相手国（研究機関・研究者）が取り組む必要のある事項

ITB では CCS 研究の本格的な実施を念頭に、世界の関係機関へのヒアリング調査やノルウェーやオーストラリアの関係機関との積極的な交流を図っている。今回のプロジェクトを契機に、資金協力も含めた CCS 研究組織（コンソーシアム）を立ち上げ、長期的な視点で研究を進める体制を具体化するべく活動中である。具体的にはアジア開発銀行（ADB）からの USD10M のファンドを受けることが決定したため、圧入に伴う地表設備の建設などはスムーズに進行すると予測される。

- ・ CCS の民間による実用化への方策など

CCS の民間による実用化においては、その経済的なインセンティブが必要であるが、その一環として CDM 以外に、日本政府が進めている二国間オフセットクレジット制度（JCM）の利用が考えられる。これらの点に関して検討を進めることが必要である。この点に関しては（株）環境総合テクノスが NEDO の委託を受けて、本プロジェクトを例に取って、インドネシアでの CCS の JCM 化に関して検討を進めている。

## (2) 京都大学グループ

共同研究者である ITB は石油・ガス開発のための貯留層評価技術には高い技術力を有している。経験の少ない日本の研究者の方が学ぶことが多いかもしれない。しかしながら、CO<sub>2</sub> の貯留層評価は油・ガス田の貯留層評価とは異なる点も多い。特に、トラップ構造のない場合の CO<sub>2</sub> の残留トラップ等による貯留性能の評価は今回ターゲットする塩水帯水層への CO<sub>2</sub> の地中貯留を考える場合には重要である。また、CO<sub>2</sub> の地中貯留にはパイロットステージ、デモンストレーションステージ、商業化ステージと異なるステージがあり、今回はあくまでもパイロットステージの研究であることを理解した上でプロジェクトを進めて行く必要がある。このあたりの理解が現時点でインドネシア側に十分でない点がみられるので、会議の度に理解を図って行く必要があると考えている。

## (3) 秋田大学グループ

岩石サンプルを用いた室内試験は、九州大学の研究者と秋田大学で進めることになっている。ITB に室内試験設備がないためであるが、ガス田で採取されたサンプル（例えば、sidewall core）の試験（サンプルは国外に持ち出しできない）や採取した直後に試験を実施する必要がある場合も想定される。インドネシア国内には室内試験設備を有した機関もあるので、それらの期間とのタイアップや利用について予め検討しておく必要がある。

## (4) 早稲田大学グループ

ITB や Pertamina には早稲田大学で電磁法探査を学んだ研究者がおり、電磁法探査装置の導入から使用まで円滑に進むと思われるが、深度 1000m を超える大規模な探査の経験はないため、導入時の指導を行っている。時間領域電磁法探査の CO<sub>2</sub> モニタリングへの適用は世界でも初めてであり、その成果が期待されるが、一方では学ぶべき事例がないことが課題でもある。試行錯誤が必要と考える

ので、現場を知る Pertamina の研究者の参画が必須であると考えます。

#### (5) 深田地質研究所グループ

探査データの総合解釈技術 j の 1 つにロックフィジックスを利用した方法が現在最も注目を集めており、本研究でもそのアプローチの適用を考えている。ITB ではその 1 つの手法であるデジタルロックという手法を用いて、露頭やボーリングで得られた貯留層の岩石サンプルから間隙率や透水性係数等 CO<sub>2</sub> のシミュレーションに必要な貯留層特性の推定を試みている。共通のアプローチを利用することから共同研究はスムーズに進むと考えているが、アプリケーションソフト等基盤となるツールの共通化を図る必要があると考えている。

#### (6) 九州大学グループ

インドネシア国外に持ち出すことができないデータを用いた地質モデル構築や、シミュレーションのための貯留層評価は、常に ITB の研究者と連携して行う必要がある。この重要なステージで、本研究課題を遅延なく進めるために、研究会議をタイムリーに行うべく努力している。また、圧入後の安全を担保するための貯留層シミュレーションは、秋田大学チームと連携して実施している。これらの結果は、地上設備設計の基礎情報としても重要となるため、FS チームとの更なる連携強化を図る必要がある。

### IV. 社会実装（研究成果の社会還元）（公開）

#### (1) 成果展開事例

平成 26 年度より我が国の公的機関（NEDO）による、本プロジェクトの実験地（Jepon-1）をプラットフォームにした、JCM（二国間）クレジットのための CO<sub>2</sub> 隔離事業の可能性調査が開始された。

#### (2) 社会実装に向けた取り組み

本プロジェクトは、パイロット研究ではあるが、天然ガス生産地域を対象に、CO<sub>2</sub> の貯留サイト決定、貯留層評価、長期固定安全性の確認、モニタリング手法の開発と適用、CCS の法規制問題の検討、社会受容性まで CCS 事業に関わる全ての領域を含んでいるほとんど唯一のプロジェクトであり、内外から非常に注目を浴びている。成果公表のリストした如く、GCCSI をはじめとする CCS の専門機関からの招待講演の依頼を受け、プロジェクトの内容を社会一般に向けて発信し、プロジェクトもさることながら一般的に低い CCS の認知度を高めている。

### V. 日本のプレゼンスの向上（公開）

平成 26 年度は、地上設備構築に関わるワークショップをインドネシア（バンドン）及び日本（東京）にて開催したが、特に、9 月に東京で開催した ADB F/S ワークショップへは、インドネシアでの国際事業を管掌する担当省である経済調整担当省の事務次官を含む高官らの参加があり、本プロジェクトがインドネシアで実施されることへの謝意と今後の展開への期待の表明があった。

### VI. 成果発表等（公開）

指定の様式（様式 02）にとりまとめ。

### VII. 投入実績（非公開）

指定の様式（様式 03）にとりまとめ。

#### **VIII. その他（意見・要望）（公開）**

特になし

以上

VI(1) (公開)論文発表等

	国内	国際
原著論文 本プロジェクト期間累積件数	6	44

①原著論文(相手側研究チームとの共著論文)

著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ-おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表日 ・出版日	特記事項 (分野トップレベル雑誌への掲載など、特筆すべき論文の場合、ここに明記く)
Tsuji, T., Kitamura, K., Matsuoka, T., Yamada, Y., Kadir, W.G.A, Rachmat Sule, M., Priyonom, A., Ariadji, T., Sapiie, B., Hato, M., Takahashi, T., Onishi, K., Widarto, D.S., Sebayang, R.I., Prasetyo, A., Pertamina, and Gundih CCS Project Team (2014), Reservoir characterization for site selection in the Gundih CCS Project, Indonesia, Energy Procedia, 63, 6335-6343.	10.1016/j.egypro.2014.11.580.	国際誌	出版済み	
Kitamura, K., Yamada, Y., Onishi, K., Tsuji, T., Chiyonobu, S., Sapiie, B., bahar, A., Danio, H., Muhammad, A., Erdi, A., Sari, V.M., Matsuoka, T,m Kadir, W.G.A., and Gundih CCS project team. (2014)、 Potential evaluation of CO2 reservoir using the measured petrophysical parameter of rock samples in the Gundih CCS Project, Indonesia, Enregy Procedia、 63、 4965-4970	10.1016/j.egypro.2014.11.525	国際誌	出版済み	

(Y2014集計→)論文数	2件
うち国内誌	0件
うち国際誌	2件
(累積数→)論文総数	2
うち国内誌	0
うち国際誌	2
公開すべきでない論文	0件

②原著論文(相手側研究チームとの共著でない論文)

著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ-おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表日 ・出版日	特記事項 (分野トップレベル雑誌への掲載など、特筆すべき論文の場合、ここに明記く)
K. Kobayashi, Y. Liang, and T. Matsuoka, Molecular dynamics study of aqueous NaCl solution: Flash crystallization caused by solution phase change. J. Solution Chemistry 43, 1799-1809 (2014).		国際誌	出版済み	
K. Kobayashi, Y. Liang, T. Sakka, and T. Matsuoka, Molecular dynamics study of salt-solution interface: Solubility and surface charge of salt in water. J. Chem. Phys. 140, 144705 (2014).		国際誌	出版済み	
Jiang, F., and Tsuji, T. (2014), Changes in pore geometry and relative permeability caused by carbonate precipitation in porous media, Physical Review E 90, 053306.	10.1103/PhysRevE.90.053306.	国際誌	出版済み	
Kitamura, K., Jiang, F., Valocchi, A.J., Chiyonobu, S., Tsuji, T., and Christensen, K.T. (2014), The study of heterogeneous two-phase flow around small-scale heterogeneity in porous sandstone by measured elastic wave velocities and lattice Boltzmann method simulation, Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 119, No.10, 7564-7577.	10.1002/2014JB011281.	国際誌	出版済み	

Jiang, F., and Tsuji, T. (2014), Interfacial Tension Effect on Cluster Size Distributions for Residual Trapping of CO2 in Sandstones, <i>Energy Procedia</i> , 63, 5483-5489.		国際誌	出版済み	
Ikeda, I., Matsuoka, T., Tsuji, T., and Nakayama, T. (2014), Characteristics of the horizontal component of Rayleigh waves in multimode analysis of surface waves, <i>Geophysics</i> , 80, No.1, EN1-EN11.		国際誌	出版済み	
Kimura, S., Honda, K., Kitamura, K., Taniguchi, I., Shitashima, K., Tsuji, T., and Fujikawa, S. (2014), Preliminary feasibility study for on-site hydrogen station with distributed CO2 capture and storage system, <i>Energy Procedia</i> , 63, 4575-4584.	10.1016/j.egypro.2014.11.490.	国際誌	出版済み	
Tsuji, T., Ashi, J., and Ikeda, Y. (2014), Strike-slip motion of a mega-splay fault system in the Nankai oblique subduction zone, <i>Earth, Planets and Space</i> , 66, 120.	10.1186/1880-5981-66-120.	国際誌	出版済み	
Khakim, M.Y.N., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2014), Lithology-controlled subsidence and seasonal aquifer response in the Bandung basin, Indonesia, observed by synthetic aperture radar interferometry, <i>International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation</i> , 32, 199-207.	10.1016/j.jag.2014.04.012.	国際誌	出版済み	
Tsuji, T., Kamei, R., and Pratt, G. (2014), Pore pressure distribution of a mega-splay fault system in the Nankai Trough subduction zone: Insight into up-dip extent of the seismogenic zone, <i>Earth and Planetary Science Letters</i> , 396, 165-178.	10.1016/j.epsl.2014.04.011.	国際誌	出版済み	
Miyakawa, A., Saito, S., Yamada, Y., Tomaru, H., Kinoshita, M., and Tsuji, T. (2014), Gas hydrate saturation at Site C0002 of IODP Expeditions 314 and 315 in the Kumano Basin, Nankai Trough, Island Arc, 23,142-156.	10.1111/iar.12064.	国際誌	出版済み	
Kamei, R., Pratt, G., and Tsuji, T. (2014), Misfit functionals in Laplace-Fourier domain waveform inversion, with application to wide-angle ocean bottom seismograph data, <i>Geophysical Prospecting</i> , 62, No.5, 1054-1074.	10.1111/1365-2478.12127.	国際誌	出版済み	
Ishitsuka, K., Fukushima, Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Matsuoka, T., and Giao, P.H. (2014), Natural surface rebound of the Bangkok plain and aquifer characterization by persistent scatterer interferometry, <i>Geochemistry, Geophysics, Geosystems</i> , 15, No.4, 965-974.	10.1002/2013GC005154.	国際誌	出版済み	
Jiang, F., Tsuji, T., and Hu, C. (2014), Elucidating the role of interfacial tension for hydrological properties of two-phase flow in natural sandstone by an improved lattice Boltzmann method, <i>Transport in Porous Media</i> , 104, No.1, 205-229.	10.1007/s11242-014-0329-0.	国際誌	出版済み	
Yamabe, Y., Tsuji, T., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2015), Lattice Boltzmann simulations of supercritical CO2-water drainage displacement in porous media: CO2 saturation and displacement mechanism, <i>Environmental Science &amp; Technology</i> , 49, No. 1, 537-543.	10.1021/es504510y.	国際誌	出版済み	
Jiang, F. and Tsuji, T. (2015), Impact of interfacial tension on residual CO2 clusters in porous sandstone. <i>Water Resour. Res.</i>	10.1002/2014WR016070	国際誌	accept	

高橋亨・相澤隆生・村田和則・西尾英貴・松岡俊文(2014):統合物理探査データを用いた河川堤防の浸透性プロファイリング、物理探査(in press).	国内誌	in press	
---	-----	----------	--

(Y2014集計→)論文数 17 件  
うち国内誌 1 件  
うち国際誌 16 件  
(累積数→)論文総数 48  
うち国内誌 6  
うち国際誌 42  
公開すべきでない論文 0 件

	国内	国際
<b>その他の著作物 本プロジェクト期間累積件数</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

③その他の著作物(相手側研究チームとの共著のみ)(総説、書籍など)

著者名,タイトル,掲載誌名,巻数,号数,頁,年	出版物の種類	発表日・出版日	特記事項
著作物数	0 件		
公開すべきでない著作物	0 件		

④その他の著作物(相手側研究チームとの共著でないもの)(総説、書籍など)

著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ-おわりのページ	出版物の種類	発表日・出版日	特記事項
高橋 亨・田中 荘一(2014):地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした解釈技術に関する研究(その8)-物理探査データによる透水係数の推定(2)-、深田地質研究所年報、No.15.	年報	出版済み	
(FY2014集計→)著作物数	1 件		
公開すべきでない著作物	0 件		

⑤研修コースや開発されたマニュアル等

研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数	開発したテキスト・マニュアル類	特記事項

VI(2)(公開)学会発表

	国内	国際
招待講演 本プロジェクト期間累積件数	2	
口頭発表 本プロジェクト期間累積件数	12	77
ポスター発表 本プロジェクト期間累積件数	1	6

総件数

98

①学会発表(相手側研究チームと連名のもののみ)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演	口頭発表	ポスター発表
2014	国内学会	1) 羽藤正実、松岡俊文、高橋亨、Wawan Kadir、Sule Rachmat、グンディCCS研究プロジェクトチーム(2014):インドネシア中部ジャワ州Gundihガス田における先導的CCS研究-背景と研究の現状-、資源・素材学会平成26年度春季大会(平成26年3月28日)		●	
2014	国内学会	1) 北村圭吾、山田泰宏、尾西恭亮、辻 健、Benyamin Sapiie <sup>4</sup> 、Alfian Bahar <sup>4</sup> 、松岡俊文、Wawan Kadir (2014)、グンディCCS研究プロジェクトチーム インドネシア中部ジャワ州Gundihガス田における先導的CCS研究-岩石物性測定結果に基づく貯留層評価-、資源・素材学会平成26年度春季大会(平成26年3月28日)		●	
2014	国内学会	1) 辻 健、松岡俊文、北村圭吾、山田泰広、尾西恭亮、Tutuka Ariadji、Wawan Gunawan Kadir (2014)、グンディCCSプロジェクトチーム、"Pilot Study on CCS in Gundih Gas Field in Central Java、Indonesia - Reservoir characterization and simulation for site selection"、資源素材学会(平成26年3月28日)		●	
2014	国内学会	北村圭吾、千代延俊、山田康広、尾西恭介、辻健、Benyamin Sapii、Alfian Bahar、Rachmat Sule、松岡俊文、Wawan Gunawan a. Kadir (2014)、インドネシア中部ジャワ州グンディガス田における先導的CCS研究-岩石物性測定に基づく貯留性能評価、日本地質学会代121年学術大会(平成26年9月12日)			●
2014	国際学会	Fukuda, Y., SATREPS CCS Project (GravityTeam) (2014): Gravity Monitoring of CCS in Gundhi, Indonesia, Pannel Discussion, The 39th HAGI Annual Convention & Exhibition, Solo Paragon Hotel, Indonesia October 14, 2014.		●	

2014	国際学会	Kitamura, K., Yamada, Y., Onishi, K., Tsuji, T., Chiyonobu, S., Sapiie, B., bahar, A., Danio, H., Muhammad, A., Erdi, A., Sari, V.M., Matsuoka, T., m Kadir, W.G.A., and Gundih CCS project team. (2014)、 Potential evaluation of CO2 reservoir using the measured petrophysical parameter of rock samples in the Gundih CCS Project, Indonesia、 GHGT-12、 October 6-9, Austin, USA.			●	
			FY2014集計 →	0	4	2
			累積件数 →	0	10	2

件

②学会発表(相手側研究チームと連名でないもの)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演	口頭発表	ポスター発表
2014	国際学会	Tsuji, T. (2014)、 Reservoir characterization and monitoring in CCS projects in geological formations typical in Japan (e.g., Indonesia)、 CCOP/PETRAD-PVN/VPI VIGMR Seminar on Carbon Capture and Storage of CO2 and EOR、 March 18、 2014.		●	
2014	国際学会	Tsuji, T. (2014) Digital rock physics for CO2 dynamic modeling and monitoring, The 8th Symposium on CCS in Gundih Area、 Java、 Indonesia、 Oogata, Akita Japan、 26 Sept. 2014.		●	
2014	国際学会	Onishi, K. (2014) Current research status of Geology and Geophysics (Japan team), The 8th Symposium on CCS in Gundih Area、 Java、 Indonesia、 Oogata, Akita Japan、 26 Sept. 2014.		●	
2014	国内学会	Saito, A. (2014) Quick report: Baseline survey of Electro-magnetic method and gravity survey, The seminar of Gundih CCS pilot project, Tokyo Japan, 30 Sep. 2014.		●	
2014	国内学会	高橋亨(2014):インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの研究開発動向と展望、CCSセミナー、CCS(分散型CCS含む)とCO2輸送・貯留(EOR含む)に関する研究開発及び装置・材料・技術などの動向、(株)技術情報センター依頼講演、東京。	●		
2014	国内学会	高橋亨(2014):インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの現状と今後の計画、GCCSI勉強会における依頼講演、東京	●		

2014	国内学会	1) 辻健・蔣飛 (2014) :CO2の鉱物化に伴う水理特性と弾性特性の変化、資源・素材学会平成26年度春季大会(平成26年3月28日)		●	
2014	国内学会	永黒 友貴・中山 圭子・羽藤 正実・齋藤 章(2014) :線電流送信源を用いたTDEM法によるCCSモニタリング, 物理探査学会 第130回学術講演会論文集、231-234.		●	
2014	国際学会	K. Umeda, R. Li, Y. Sawa, H. Yamabe, Y. Liang, H. Honda, S. Murata, T. Matsuoka, T. Akai, and S. Takagi, Multiscale simulations of fluid flow in nanopores for shale gas. IPTC-17949 (2014).		●	
2014	国際学会	R. Hibi, K. Tagami, K. Kobayashi, Y. Liang, H. Honda, S. Murata, T. Matsuoka, M. Morimoto, T. Uetani, and E. S. Boek, Investigation of asphaltene-asphaltene association and aggregation for compositional reservoir simulators by quantitative molecular representations. IPTC-18097 (2014).		●	
2014	国際学会	Fukuda, Y. (2014): Applications of a portable absolute gravimeter, for gravity monitoring, The 39th HAGI Annual Convention & Exhibition, Solo Paragon Hotel, Indonesia October 15, 2014.		●	
2014	国内学会	Sofyan Y., 西島 潤, 藤光康宏 (2014) Application of A10 Absolute gravimeter for precise monitoring in Kamojang Geothermal Field, Indonesia, 日本地熱学会平成26年学術講演会, 2014年10月30日, 弘前市		●	
2014	国内学会	板倉統、風間卓仁、福田洋一(2014)、独立成分分析による時系列重力データの分析、日本測地学会第122回講演会、2014年11月7日、つくば。		●	
2014	国際学会	Sofyan Y., Nishijima J. and Fujimitsu Y. (2014) Sustainable energy development and water supply security in Kamojang Geothermal Field: The Energy-Water Nexus, American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., December 17, 2014		●	
2014	国際学会	Takahashi, T. (2014): Soil permeability profiling using multiple geophysical data, Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-PREVIEW, 2014, EGU General Assembly 2014		●	

2014	国際学会	Takahashi, T. and Tanaka, S. (2014): Permeability profiling with integrated geophysical data, 10 <sup>th</sup> International Workshop on the Application of Geophysics to Rock Engineering, Sapporo, Japan.		●	
2014	国際学会	Takahashi, T., Aizawa, T., Murata, K., Nishio, H. and Matsuoka, T. (2014): Soil permeability profiling on a river embankment using integrated geophysical data, Expanded Abstract, SEG2014.		●	
2014	国内学会	高橋亨(2014)：複合物理探査データを利用した土質地盤の透水係数の推定、第49回地盤工学研究発表会、福岡。		●	
2014	国内学会	橋直人・中山圭子・齋藤章(2014)：フィードバック回路を用いた広ダイナミックレンジMI磁力計の開発, 物理探査学会第131回学術講演会論文集、135-138		●	
		FY2014集計 →	2	17	0
		累積件数→	2	79	5

件

VI(3) (特許出願した発明件数のみを公開し、他は非公開)特許出願

①国内出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	(出願取り下げ等についても、こちらに記載して下さい)	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する外国出願※
記載例	2012-123456	2012/4/1	○○○○						戦略太郎	○○大学 ◎◎研究科△△専	PCT/JP2012/123456
No.1											
No.2											

※関連する外国出願があれば、その出願番号を記入ください。

国内特許出願数  
公開すべきでない特許出願数

②外国出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	(出願取り下げ等についても、こちらに記載して下さい)	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する国内出願※
記載例	PCT/JP2012/123456	2012/9/20	○○○○						戦略太郎	○○大学 ◎◎研究科△△専	特願2010-123456
No.1											
No.2											

※関連する国内出願があれば、その出願番号を記入ください。

外国特許出願数  
公開すべきでない特許出願数



VI(5) (公開)ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等の活動

①ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2014/04/18	招待講演(CCSセミナー)	東京	30名	「インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの研究開発動向と展望」と題して講演を行った。(株)技術情報センターからの依頼講演)
2014/5/16	Gundih CCS ワークショップ	オスロ	50名(6名)	ノルウェイ政府からの研究資金獲得のためのCCSワークショップをITB研究者と共に実施。
2014/8/22	ADB F/S Workshop	バンドン	50人(46人)	ITB受託研究(地上設備、法規制、社会受容)にSATREPS研究を含めた一般向けワークショップを開催。
2014/9/26	第8回CCSシンポジウム	秋田県大湯村	51人(34人)	定例のGundih CCSシンポジウム。ITB学長、経済調整担当省高官の参加を得た。
2014/9/29	ADB F/S Workshop	東京	108人(30人)	バンドンで開催(8/22)したワークショップとほぼ同様の内容で日本人向けのワークショップを開催し、本プロジェクトの状況を一般公開
2014/12/12	招待講演(GCCSI勉強会)	東京	40人(-)	「インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの現状と今後の計画」と題して講演を行った。(GCCSI日本事務局からの依頼講演)
2015/2/26	招待講演(GCCSI勉強会)	東京	40人(-)	「日本周辺でのCO2地中貯留のポテンシャルと課題:FCNERの取り組み」と題して講演を行った。(GCCSI日本事務局からの依頼講演)
2015/3/7	第9回CCSシンポジウム	スラバヤ	60人(51人)	定例のCCSシンポジウムに加えて、ADB F/S研究内容を網羅する一般向け報告を行った。第3回JCCM開催。

②合同調整委員会開催記録(開催日、出席者、議題、協議概要等)

年月日	出席者	議題	概要
2012/9/10	(主たる参加者) インドネシア側6名、日本側6名	Gundih CCSプロジェクトにおける最初の合同委員会であり、本プロジェクトを推進する際の課題についての協議	第1回JCCM 本研究の計画のプレゼンが行われ、研究を推進するに当たって、日本・インドネシアの関係諸機関が解決すべき課題を抽出し、検討を行った。
2014/3/15	(主たる参加者) インドネシア側6名、日本側11名	2013年度研究成果概要報告 2014年度研究計画の説明	第2回JCCM 高等教育総局長を議長として会議を進めた。日本・インドネシア双方のプロジェクトリーダーから現況の説明を行った後、2013年度の研究成果概要と2014年度研究計画の説明を行い、次年度研究体制を含めて承認された。
2015/3/6	(主たる参加者) インドネシア側6名、日本側9名	2014年度研究成果概要報告 2015年度研究計画の説明 2015年度以降のファンディング 中間評価対応	第3回JCCM JICAジャカルタ事務所挨拶の後、インドネシアプロジェクトリーダーから現況の説明を行った。日本側研究者より2014年度の研究成果概要と2015年度研究計画の説明を行い、研究体制を含めて承認された。インドネシア側からはADB次期ファンディングに関わる事務手続き進捗状況の説明を行った。

# JST成果目標シート

Feb 2015時点進捗

※プロジェクト外予算(ADB資金他)での実施

※※1)高分解能反射法、2)電気・電磁法、3)重力探査、4)InSAR、5)微小地震、6)自然地震、7)地球化学・水理地質学、8)定量的解釈技術

プロジェクトの最終段階で各手法の適用性についてスクリーニングを行い技術指針を作成する。

## JST従たる評価項目

日本におけるCCSの推進	開発技術のフィードバックによる日本国内でのCCS技術の発展及び競争力向上
開発技術、指針(案)の普及	ISO等、世界におけるCCS技術標準化への貢献
論文発表	貯留層モデル、CO2シミュレーション、CO2モニタリング手法、CCS評価手法等に関する論文の掲載数
人材育成	日伊両国の参画学生、若手研究者の各種調査手法に関するスキル・ノウハウの向上; 研究共著論文の掲載数

