

CO₂ 地中貯留のナチュラルアナログとしての温泉場における炭酸塩反応実験 Carbonate reaction experiments in hot springs as a natural analogue field of CO₂ geological sequestration

徂徠 正夫^{1*}; 佐々木 宗建¹
SORAI, Masao^{1*}; SASAKI, Munetake¹

¹ 独立行政法人産業技術総合研究所

¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

帯水層への CO₂ 地中貯留では、CO₂ の地層水への溶解を起点として様々な地化学プロセスが起こる。このような地化学プロセスのうち、炭酸塩鉱物の反応は、鉱物トラップとして CO₂ の固定に寄与する一方で、坑井周囲やキャップロック内部の間隙での溶解を通して浸透率の増加の原因となるなど、貯留安全性の増加と漏洩リスクの両面から最も重要である。しかしながら、これらの反応プロセスは時間スケールが長期にわたることもあり、これまで CO₂ 地中貯留条件下でのキネティクスに関しては不明な点が多かった。特に、反応速度に対する飽和度や不純物濃度の効果の解明と、実際に生成する炭酸塩鉱物の特定が課題となっている。

ここでは、可能な限り CO₂ 地中貯留条件に近い環境下で反応速度を求める手法を適用した。本手法の特徴は2つ挙げられる。一つ目は、天然の温泉を反応場として現場実験を行う点にある。特に、炭酸泉あるいは炭酸水素塩泉を選ぶことにより、実際の CO₂ 圧入サイト以外で、簡便に CO₂ 地中貯留のナチュラルアナログとしてのフィールドが得られる。また、そこに産出している鉱物を観察することにより、過去からの長期にわたる反応の結果と照合することも可能となる。2番目の点は、種結晶を温泉場に持ち込む点にある。あらかじめキャラクタライズした種結晶について、反応前後の表面形状変化をナノスケールで解析することにより、反応の遅い鉱物に対しても短時間で高精度の反応速度の測定が可能となる。また、任意の鉱物について、現場条件における生成可否の判定がより確実にできるようになる。

今回選定したサイトは、北海道斜里町のウトロ温泉である。本サイトでは、源泉からの温泉水が上流タンクに貯留された後、50 m の配管を伝って排水されている。温泉水の排水過程で CO₂ の脱ガスが起こるため、下流にいくにしたがい過飽和度が高くなり炭酸塩が生成しやすくなっている。そこで、上流タンク内と配管中間部および配管下端の3カ所を観測点として設定した。いずれの観測点においても、主要な4種類の炭酸塩鉱物である、カルサイト、アラゴナイト(共に CaCO₃)、ドロマイト (CaMg(CO₃)₂) およびマグネサイト (MgCO₃) のへき開片を温泉水中に最長24時間浸漬させ、所定時間ごとに1個ずつ回収して試料表面の観察を行った。今回の実験では、温泉水そのままでの反応に加えて、上流タンク内で CO₂ をバブリングあるいは塩化マグネシウムを添加した場合についても、それぞれ反応を行った。

回収した試料について、位相シフト干渉計およびレーザー顕微鏡を用いて、基準面と反応面の高さ変化をナノ～ミクロンレベルで測定することにより反応速度を算出した。その結果、炭酸塩鉱物の反応速度は温泉水組成の変化に対応して敏感に変動することが示された。特に、現場におけるカルサイトの反応速度は従来得られていた理論値よりも低下していた。これは、溶液の飽和度の関数形の違いや溶液に含まれる種々のイオン(主として Mg イオン)による抑制効果のためであると予想される。また、ドロマイトの過飽和度が最も高いにも関わらず、その成長速度はカルサイトやアラゴナイトと比較して著しく遅いことも明らかとなった。このことは、炭酸塩鉱物の沈殿に関して、過飽和度だけからその生成を判断することは誤った予測につながることを示唆している。

本研究は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業(弾性波探査を補完する CO₂ 挙動評価技術の開発)」の一部として実施した。

キーワード: CO₂ 地中貯留, ナチュラルアナログ, 炭酸塩, 反応速度, 鉱物トラップ, 温泉

Keywords: CO₂ geological sequestration, natural analogue, carbonate, reaction rate, mineral trapping, hot spring

地中貯留における CO₂ 挙動モニタリングの現状と課題 current trends and challenges in monitoring of injected CO₂ in saline aquifer storage

薛自求^{1*}
XUE, Ziqiu^{1*}

¹ 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構, ² 九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所
¹Research International of Innovative Technology for the Earth (RITE), ²Kyushu University, International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I2CNER)

大規模排出源から分離回収された二酸化炭素 (CO₂) は、パイプラインなどで貯留サイトに輸送され、地下深部の貯留層に圧入される。そのような貯留層には CO₂ を貯える空隙が多く、難浸透性の泥質岩から上位地層 (キャップロック) に覆われるため、長期にわたって安全に CO₂ を地下に封じ込むことができると考えられている。地下深部の貯留層に CO₂ を圧入すると、空隙を満たしていた間隙水 (化石塩水) の一部が置換され、CO₂ は圧入井から徐々に周囲へ広がっていくが、貯留層の特性 (孔隙率、浸透率、不均質性) に大きく依存すると考えられている。

油ガス田開発の分野では、CO₂-EOR (石油増進回収) の過程で圧入された CO₂ の挙動をモニタリングしながら、圧入井や生産性の位置決めが行われている。3次元反射法弾性波探査はよく実施されているが、複数の坑井を利用する坑井間の弾性波や電磁波トモグラフィの実施例も多く報告されている。CO₂-EOR のサイトに実績やノウハウが蓄積されてきた CO₂ 挙動モニタリング技術の多くは、ほぼそのまま地中貯留に適用できるが、CO₂ 地中貯留の長期安全性を議論する上ではコストも含めて適用課題も明らかになってきている。

本講演では北米地域、とくにアメリカの地域炭素隔離パートナーシップ (Regional Carbon Sequestration Partnership) の CO₂ 圧入プロジェクト、最近注目されている Shell 主導の QUEST プロジェクト、長岡や苫小牧実証試験の CO₂ 挙動モニタリング実績及び計画をレビューするほか、地中貯留における CO₂ 挙動モニタリングの最新動向と課題を紹介する。

キーワード: 二酸化炭素, 塩水性帯水層, 物理検層, 弾性波探査, トラップメカニズム, モニタリング
Keywords: carbon dioxide, saline aquifer, well logging, seismic survey, trap mechanism, monitoring

鉛直断層によるCO₂浅部移行に伴う地球物理観測量の変動予測 Prediction of changes in geophysical observables associated with CO₂ migration through vertical faults

石戸 経士^{1*}; 杉原 光彦¹; 相馬 宣和¹; 西 祐司¹
ISHIDO, Tsuneo^{1*}; SUGIHARA, Mituhiko¹; SOMA, Nobukazu¹; NISHI, Yuji¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ AIST

産総研では、地下の流体流動シミュレーション（以下、貯留層シミュレーション）によって計算される圧力、温度、塩分濃度、CO₂飽和度等の変化を、地球物理観測量の変化に変換するための計算プログラムの開発・整備を行っている。この物理量変換プログラムのことを地球物理ポストプロセッサと呼んでいるが、これまでに微小重力、自然電位、地表変位のデータや電気・電磁気探査、地震探査によって得られるデータに対応するポストプロセッサを開発している。

CO₂ 地中貯留の分野において、貯留層シミュレーションとリンクした地球物理ポストプロセッサ計算は、以下のような目的で使用できるものと考えている。

① 適切なモニタリング・システムの選択・配置の検討：想定した地下モデル及び潜在リスクに対して、地表における物理探査データの分布及び変化を予測し、これを測定するための適切なモニタリング手法の選択とその配置などを検討する。

② 地下状態の迅速な把握：実測で得られたモニタリング・データを、計算により予測された物理探査データの変化と比較することによって、圧入したCO₂が予測通り貯留されているか確かめる。

③ 予測とは異なる実測値が得られた場合、実測値を説明するよう地下モデルを改良し（ヒストリーマッチング）、CO₂の挙動も含めて差異が生じた原因を究明する。また、予測とは異なる挙動が、潜在リスクに起因する可能性が考えられる場合には、その監視のための効果的なモニタリング手法の選択とその配置などを検討する。

ここでは、上記の①の観点で行った、潜在リスクを想定した貯留層シミュレーションと、その結果に重力、地表変位および地震波（反射法）のポストプロセッサを適用した計算例を報告する。

貯留層シミュレーションは、米国ユタ州の Gordon Creek 地域の概念モデルにもとづいているが、それをかなり単純化したもので、地表標高を 1800 mRSL として、Entrada 砂岩層（ $z=200\sim 400$ mRSL）を圧入貯留層、その上位の Curtis 層を遮蔽層と設定し、CO₂を年間 100 万トンで圧入した場合の地下における CO₂の流動を計算した。断層のない場合と、潜在リスクとして仮定の鉛直断層を設定した場合の2つのケースについてシミュレーションを行った。断層ゾーンは（圧入点を $x=y=0$ m として） $x=200\sim 300$ m、 $y=300\sim 800$ m、 $z=200\sim 1200$ mRSL の範囲に設定し、CO₂ 圧入開始後 4 年経過した時点で開口するとした。断層開口後、全圧入量のうち約 7%が断層を上昇し浅部帯水層（上面が $z=1300$ mRSL）へ流れ込む。浅部帯水層へ上昇した CO₂ は半分以上が水に溶解しているが、圧力が低下するため CO₂ ガスの密度は、圧入深度で約 700 kg/m³ であったものが 200 kg/m³ 以下まで小さくなる。

地表の重力低下は、断層なしの場合、圧入開始後 10 年の時点で最大 10 microGal 程度であるが、（4 年目に）断層が開口した場合は、浅部帯水層へ上昇した低密度の CO₂ ガスにより、断層直上を中心に 40 microGal 程度となる。断層開口後 3 年程度で、断層なしと断層開口の場合の重力低下量の差は、比較的広い範囲で 10 microGal 以上となる。

地表変位については、断層なしの場合、貯留層での圧力増加 10 bars 前後に対応して圧入開始後 10 年で最大 30 mm 程度となる（各岩石種の体積弾性率、剛性率は 2GPa 前後を仮定）。断層開口の場合は、圧入開始後 10 年になると浅部帯水層へ上昇した CO₂ のうちガス量は 20 万トンになり、浮力効果も加わることから断層直上で隆起量は 48 mm となる。断層面付近では、Joule-Thomson 冷却により温度低下域が現れ、これは若干隆起を抑制する。

反射法の応答については、断層直上を横切る測線では、断層開口後 2 年程度で浅部帯水層へ上昇した CO₂ に対応するイベントが明瞭になる。ただし、圧入井付近を横切る（ x 方向の）測線では、断層開口後 5 年以上経過し浅部帯水層内で CO₂ ガスが十分に拡大する時点まで反射イベントは現れない。

繰り返し反射法は、潜在リスクに対処する上でも基本的なモニタリング手法であるが、3次元の反射法をしばしば実施するのは費用の面から難しいと思われる。今回のケースは、特に重力観測について、1、2か所での（超伝導重力計を用いた）高精度の連続観測が反射法を補完する上で有効であることを示している。今後、様々なケースについて、地表変位、自然電位、比抵抗などを含め反射法を補完する物理探査手法によるモニタリングについて体系的な検討を進めたいと考えている。

謝辞：本研究は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO₂ 挙動評価技術の開発）」の一部として実施した。

キーワード: 貯留層シミュレーション, 地球物理モニタリング, 潜在リスク, CO₂ 地中貯留
Keywords: reservoir simulation, geophysical monitoring, potential risk, CO₂ geological storage

微生物と CCS を利用した CO₂ 排出削減と資源創成のリスク評価 Risk Assessment of Microbial Associated CO₂ Geological Storage and CH₄ Production

田中 敦子^{1*}; 坂本 靖英¹; 眞弓 大介¹; 東野 晴行¹; 坂田 将¹; 中尾 信典¹

TANAKA, Atsuko^{1*}; SAKAMOTO, Yasuhide¹; MAYUMI, Daisuke¹; HIGASHINO, Haruyuki¹; SAKATA, Susumu¹; NAKAO, Shinsuke¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ AIST

化石燃料をエネルギー源とする発電所で燃焼によって発生する CO₂ や、天然ガス・石油等の精製所から精製の工程で発生する CO₂ を処理する手段として、CO₂ 地中貯留技術が期待されている。CO₂ 地中貯留技術は、臨界状態の密度の高い CO₂ を地中に隔離するため、大量の CO₂ の固定が可能である。CO₂ 地中貯留の対象とされる地層は主にかん水層や枯渇したガス油田である。

CO₂ 地中貯留 (CCS) の重要な候補サイトの一つとなっている枯渇油ガス田には、未回収の原油が半分以上残されている。近年眞弓らは、油ガス貯留層内に自然に存在する嫌気性の特定の微生物のメタン生成能力が、CO₂ 分圧の上昇によって活性化されることを見出した。これは枯渇油ガス田を対象とした CCS サイトにおける、原位置での天然ガス資源創成の可能性を示唆するものと言える。

このような地下環境における微生物活動を考慮した新たな資源創成型の CCS 技術を確立するためには、まず、微生物によるメタン生産量と CO₂ 固定量をはじめとする諸元の定量的に評価して便益を把握する必要がある。

我々は、微生物活動を考慮した新たな資源創成型の CCS 技術の基本的な便益を明らかにすることを目標に、地層モデルに地下微生物の働きを組み込み、CCS プロセスにおける地層モデルの挙動とメタン産出量の評価を行うとともに、CO₂ 地中貯留にかかわるサイト周辺の環境インパクト評価および産業安全面のリスクアセスメントを進めている。CO₂ 地中貯留サイトの地下の貯留層・地表・注入井坑口周辺の大気環境をとりあげて、CO₂ 漏洩のリスクの評価を進めるとともに、CO₂ 地中貯留リスク評価プログラムを開発中である。本報告ではこれらの取り組みの中から、とりわけサイト周辺のリスク評価について報告する。

キーワード: CCS, 微生物, 周辺リスク, メタン生産, 環境影響

Keywords: CCS, microbial, peripheral risk, methane production, environmental impact

CCS の国際動向 Current Status of CCS in the World

田中 良三^{1*}
TANAKA, Ryoza^{1*}

¹ 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

¹Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)

CCS is a promising technology to mitigate the global warming. The low-carbon technology, according to an analysis by the International Energy Agency (IEA), is required to contribute to 14% of the global CO₂ emissions reduction by 2050 necessary to achieve the internationally-agreed goal of limiting the rise of the average global temperature to 2 degree C. There have been more than 10 commercial-scale CCS projects, including the world first CCS project in the power sector that became operational in Canada in autumn 2014, and there have also been around 10 projects under construction. The progress of CCS deployment is, however, far behind the anticipated trajectory. This is mainly because there is lack of business case. This is underpinned by a fact that most of the projects under operation and construction are in combination with enhanced oil recovery (EOR) by using anthropogenic CO₂, which contributes to making them feasible commercially. The situation draws wider attention to policies and regulations to incentivize or mandate CCS implementation. Such policies and regulations have been in place mainly for fossil fuel power plants in, for example, the USA, Canada and the UK. This presentation is to summarize the current status of large-scale CCS projects and CCS incentive/ mandatory policies and regulations.

新第三紀—第四紀シルト岩中の亀裂透水性の応力依存性 Stress dependency of permeability through a single fracture in Neogene-Quaternary siltstone

野口 真未^{1*}; 上原 真一²

NOGUUCHI, Mami^{1*}; UEHARA, Shin-ichi²

¹ 東京大学新領域創成科学研究科環境システム専攻, ² 東邦大学理学部生命圏環境科学科

¹Department of Environmental system, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, ²Department of Environmental science, Faculty of Science, Toho University

二酸化炭素地中貯留において、遮蔽層として期待される泥質岩に亀裂があった場合、そこから二酸化炭素が漏洩する可能性が指摘されている。したがって、泥質岩の亀裂が流路として機能する条件を解明することは重要である。

上原ほか [1] は有効圧（封圧と間隙圧の差）の昇圧過程において、亀裂の入った泥質岩と無垢な岩石の透水性を比べると、ある有効圧下で亀裂は閉口し、流体の移動経路として有効にはたらかなくなることを、そして、この有効圧条件が岩石の降伏条件に関係することを明らかにした。しかしながら、二酸化炭素地中貯留を行う場合は、地中で封圧を受けている岩石に二酸化炭素を圧入し間隙圧が増加するので、有効圧の除圧過程に注目する必要がある。この除圧過程の透水性と岩石の深度との関係性は、我が国で二酸化炭素地中貯留の対象として期待されている新第三紀—第四紀の堆積岩については明らかになっていない。

そこで本研究では、有効圧の除圧過程での透水性の変化が岩石の存在する深さによってどう変わるかを明らかにするとともに、岩石の降伏条件によってどのように変化するかを調べることを目的として、空隙構造の降伏条件の異なる上総層群大原層シルト岩（OHR3）と黄和田層シルト岩（KWD2）で、透水実験を行った。円柱形に整形した2種類のシルト岩を万力で力を加え、単一亀裂を作製し、それぞれの試料に対して昇圧過程と除圧過程を1つのサイクルとして、いくつかの最大有効圧（2~21 MPa）を設定し、透水係数を測定した。これを OHR3 では3回、KWD2 では2回実験を行った。

全ての実験について、昇圧過程と除圧過程の透水係数が一致しないサイクルと無垢な岩石と亀裂入りの岩石の透水係数が一致するサイクルが存在したため、前者を亀裂降伏開始サイクルと呼び、後者を亀裂閉口サイクルと呼ぶことにした。両者を全実験において推定したところ、亀裂閉口サイクルは OHR3 では7~9 MPa、KWD2 では17~21 MPa、亀裂降伏開始サイクルは OHR3 では5 MPa、KWD2 では3~9 MPaと推定された。亀裂閉口サイクルは無垢な岩石の降伏条件と等しく、これは既存の研究と一致する。また、亀裂降伏開始サイクルは無垢な岩石の降伏条件より低圧に現れ、これは、亀裂のかみ合わせが悪いことで亀裂面の接触面積が小さくなる一方で、接触部分にはたらく応力は設定した有効圧よりも大きく、岩石の降伏条件に達しているためと考えられる。よって、亀裂の閉口は岩石の降伏条件に依存しているが、亀裂の降伏開始は亀裂の状態に依存する傾向があると考えられる。

参考文献：[1] 上原, 嶋本, 松本ほか (2011) Journal of MMIJ, Vol.127, 139-144.

キーワード: 亀裂透水性, 新第三紀シルト岩, 室内透水試験, 応力依存性

Keywords: Fracture Permeability, Neogene Siltstone, Laboratory Permeability Test, Stress Dependency

X線CTによるCO₂-EOR室内試験の可視化と定量評価 X-ray CT visualization technology for CO₂-EOR laboratory test

朴 赫^{1*}; 木山 保¹; 西澤 修¹; 薛 自求¹; 張 毅¹

PARK, Hyuck^{1*}; KIYAMA, Tamotsu¹; NISHIZAWA, Osamu¹; XUE, Ziqiu¹; ZHANG, Yi¹

¹ 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

¹Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)

X-ray CT visualization technique has come to be actively utilized in the field of earth science not only medical and industrial fields. With this technique, it is possible to monitor the fluid movement of the internal structure and confirmed in a pore of the rock samples in a nondestructive manner. In particular, it is possible to quantitatively evaluate the physical properties such as porosity and fluid saturation in the rock sample by analyzing the X-ray CT data. Such techniques are also used in research related to oil development.

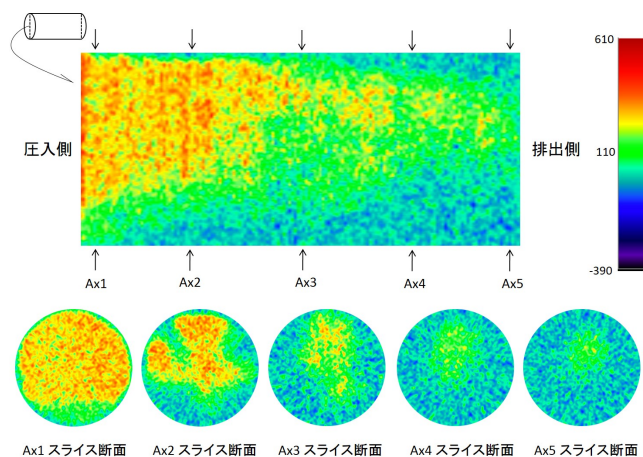
There are three main categories of EOR (Enhanced Oil Recovery); thermal recovery, gas injection and chemical injection. In particular, CO₂-EOR, one of the gas injection method is a technique which has attracted attention of many new markets among EOR technology.

We developed an experimental system in which the CO₂-EOR laboratory tests and X-ray CT visualization can be performed simultaneously using a rock sample. The experimental system is intended to quantitatively evaluate whether there is an effect on CO₂-EOR for the rock sample. Berea sandstone (diameter: 35mm, length: 80mm) were used for this experiment. The experiment was carried out under conditions that simulate the temperature and pressure of the underground; confining pressure 12MPa, pore water pressure 10MPa and temperature 40 °C. Injection of the fluid was controlled by a high-precision syringe pump. In addition, specially designed high-pressure vessel to X-ray transparent was utilized for X-ray CT visualization. Porosity of the rock sample determined by X-ray CT image was about 20.21%, which is consistent with the porosity obtained in the previous test by the saturated immersion method. The sample has been saturated with KI aqueous solution, and then mixed with oil (KI-Oil mixed state; oil saturation rate 58.50%). The CO₂-EOR test was carried out until the CO₂ injection reaches 2PV (pore volume), finally, about 66.10% of the oil recovery rate was confirmed. Figure 1 shows a CT image when the CO₂ injection amount reaches the 0.25PV.

In this study, the CO₂-EOR laboratory test of porous sandstone and X-ray CT visualization were carried out to obtain the porosity, fluid saturation and oil recovery rate. We report the experiment method and results in detail. This study is expected to contribute to the development of CO₂ injection methods for efficiency improvement of CO₂-EOR (for example, micro-bubble CO₂-EOR).

キーワード: エクス線CT, 二酸化炭素-石油増進回収法, 可視化, 画像解析, 定量評価

Keywords: X-ray CT, CO₂-EOR, visualization, image analysis, quantitative assessment



テキサス州ファンズワース CO2-EOR サイトでの重力モニタリング (2) Gravity monitoring at the Farnsworth CO2-EOR site, TX (2)

杉原 光彦^{1*}; 名和 一成¹; 池田 博²; 宮川 歩夢¹; 相馬 宣和¹; 石戸 経士¹; 西 祐司¹
SUGIHARA, Mituhiko^{1*}; NAWA, Kazunari¹; IKEDA, Hiroshi²; MIYAKAWA, Ayumu¹; SOMA, Nobukazu¹;
ISHIDO, Tsuneo¹; NISHI, Yuji¹

¹ 産業技術総合研究所, ² 筑波大学

¹ AIST, ² University of Tsukuba

テキサス州のファンズワース CO2-EOR テストサイトでは 2014 年に CO2 圧入が始まった。我々は CO2 圧入前から行っていた超伝導重力計 iGrav15 による連続計測を継続している。2014 年 7 月からは 2 台目の iGrav17 を導入して 1 m 隔てて 12 月まで並行測定を行った。その後 iGrav17 を約 600m 隔てた地点に移設して並行測定を行った。CO2 地中貯留のための重力モニタリングでは重力変化の経年変化成分と重力計のドリフト成分の識別が本質的に重要である。ドリフト評価手法としては、絶対重力計との並行測定が一般的だが、超伝導重力計同士の並行測定はドリフト評価のみならずノイズ要因の究明にも極めて有効だった。また、移設した iGrav17 は移設 10 日後には、ほぼ元のドリフト曲線に重なった。観測点間距離のある並行測定は重力変化源の深度推定に有効と考えられるので、移設の影響が限定的であったことは機動的計測の活用も有望であると言える。本研究は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO2 挙動評価技術の開発）」の一部として実施した。米国エネルギー省 (DOE) が主導する SWP には現場調査について便宜を図っていただいた。

キーワード: 超伝導重力計, CO2 地中貯留, 重力モニタリング, 並行測定

Keywords: gravity monitoring, superconducting gravimeter, CO2 storage