

## 長期的なCO2削減シナリオの分析とCCSの位置づけ

## Analysis of long-term CO2 emission reduction scenario and the role of CCS

\*中神 保秀<sup>1</sup>、秋元 圭吾<sup>1</sup>

\*Yasuhide Nakagami<sup>1</sup>, Keigo Akimoto<sup>1</sup>

1. 地球環境産業技術研究機構

1. Research institute of innovative technology for the earth

国際的に長期的に大幅なCO2削減が求められる中、本プレゼンでは、

- ・ 温度上昇 2℃、1.5℃目標達成のCO2排出パス
- ・ CO2排出削減のための限界削減費用
- ・ パリ協定での各国NDC（約束草案）の評価
- ・ CCSの位置付け

について、RITEのモデルで評価した内容等について紹介するとともに、俯瞰的に見たCCSの位置付け等について紹介する。

キーワード：CO2、気候変動、モデル分析、環境、CCS

Keywords: CO2, Climate Change, Model Analysis, Environment, CCS

## 坑井配置の自動最適化手法の二酸化炭素地中貯留への適用 Automatic optimization for well placement for large-scale geologic CO<sub>2</sub> storage

\*宮城 充宏<sup>1</sup>、山本 肇<sup>1</sup>、薛 自求<sup>2</sup>

\*MIYAGI ATSUHIRO<sup>1</sup>, HAJIME YAMAMOTO<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>2</sup>

1. 大成建設株式会社、2. 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1. Taisei Corporation , 2. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

二酸化炭素回収・貯留技術（Carbon dioxide Capture and Storage ; CCS）は、火力発電所などから排出されるCO<sub>2</sub>を大幅に削減可能な地球温暖化対策技術である。排出ガスからCO<sub>2</sub>を分離・回収し、地下深部の地層中に圧入井を通じて封入する。年間100万トン/年を超える高い圧入レートが想定される商業規模CCSプロジェクトでは、大量のCO<sub>2</sub>貯留によって生じる貯留層の圧力上昇を抑えつつ、安全かつ効率的に貯留を行う必要がある。その方策の一つとして圧入井の他に圧力緩和井を設けて、高い圧入レートによる地層圧の上昇を緩和することが提案されている。

圧力緩和井の設置にあたっては、貯留層の不均質性や断層、コストなど多くの要因を考慮し、適切な本数や形状、位置などの配置パラメータを決定することが重要となる。坑井配置の自動最適化は石油貯留層工学の分野で広く研究されているが、一般に膨大なシミュレーション回数が必要になることが知られている。

本研究では、流体シミュレーションに要する時間や回数を低減しつつ、圧力緩和井の配置パラメータ決定を効果的に最適化する手法の開発を行っている。その第一歩として、汎用最適化手法ツールHEEDSとCO<sub>2</sub>地中挙動解析コードTOUGH2/TOUGHREACTのMPI並列化版を組み合わせた最適化システムを構築した。このシステムは、様々な最適化手法に対応し、大規模並列計算による計算時間の大幅な短縮が可能である。今回、均質あるいは不均質な地層モデルでの圧力緩和井の最適化問題に適用し、代表的な最適化手法（遺伝的アルゴリズムGA、粒子最適化法PSOなど）の適用性ならびに有用性を検討したので、その結果を報告する。

キーワード：二酸化炭素回収貯留、最適化、貯留層シミュレーション、TOUGH2

Keywords: Carbon dioxide capture and storage, Optimisation, Reservoir Simulation, TOUGH2

## 二酸化炭素の地中貯留におけるCO<sub>2</sub>貯留層内の圧力抑制に関する数値解析 検討

### Numerical simulation study on mitigation of the pressure build-up in the geological formation during injection of CO<sub>2</sub>

\*藤田 クラウディア<sup>1</sup>、平塚 裕介<sup>1</sup>、山本 肇<sup>1</sup>、中島 崇裕<sup>2</sup>、薛 自求<sup>2</sup>

\*Claudia Fujita<sup>1</sup>, Yusuke Hiratsuka<sup>1</sup>, Hajime Yamamoto<sup>1</sup>, Takahiro Nakajima<sup>2</sup>, Ziqiu Xue<sup>2</sup>

1. 大成建設株式会社、2. 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1. Taisei Corporation, 2. Research Institute of Innovative Technology for the Earth Kyoto

二酸化炭素回収貯留(CCS)を商業化するにあたり、大規模なCO<sub>2</sub>圧入時の大きな問題の一つとして、貯留層内圧力の上昇がある。圧力上昇が大きいと、必要な圧入レートでの継続的な圧入操作が困難になるだけでなく、周辺の地層の安定性に影響を与える可能性も指摘されている。

本研究では、CO<sub>2</sub>の圧入による圧力上昇を減少する方法としてBusheckら(2014)が提案した、地層水の事前揚水により予め貯留層圧を低減する手法（デュアルモード坑井）ならびに圧入と同時に別の坑井にて地層水を生産する手法を検討した。数値解析コードとしては多成分・多相流体と熱流動の数値解析コードTOUGH2（LBNL開発）を用いた。

ケーススタディーとして、北海道の苫小牧市で実施中の大規模CCSプロジェクトでの圧入対象層に相当するモデルを作成し、上記の手法の効果を次に述べる3つのケースで検討した。

ケース1は基本ケースであり、地層水生産無しでCO<sub>2</sub>を圧入するケースである。ケース2では圧入開始に先立って5年間地層水を生産してからCO<sub>2</sub>を圧入する。最後にケース3ではCO<sub>2</sub>を圧入と同時に別の坑井から地層水を生産する。なお、CO<sub>2</sub>の圧入期間は100年間とし、1年当たり20万トンCO<sub>2</sub>を圧入し、生産井で地層水を同じ質量レートで生産した。

この結果から、今回の条件においては、デュアルモード井よりも、個別生産井手法がCO<sub>2</sub>圧入時の貯留層圧力上昇を抑制し、圧入レートの維持する上で有効であることが分かった。ただし、貯留層の体積が小さい場合にはデュアルモード坑井の効果が高くなる。また事前の地層水の生産期間を延長することにより大きな効果が得られると考えられる。

個別生産井を用いた手法は、圧入可能なCO<sub>2</sub>容量を増やし、CCSの対象サイトの選択肢を増やすことに役立つと考えられる。

キーワード：二酸化炭素の回収貯留、圧力上昇、地層水生産

Keywords: Carbon Capture and Storage, pressure build-up, production of formation water

# An automatic seismic event identification method by sequential discounting autoregressive (SDAR) change point detecting

\*Luchen Wang<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>1</sup>

1. RITE Research Institute of Innovative Technology for the Earth

In recent years, more and more reservoir evaluation studies, including CO<sub>2</sub> sequestration, hydraulic fracturing and fracture mapping, focus on seismicity monitoring. The primary task for monitoring is the identification of seismic events in a long-term sustained time series record. Unfortunately, the time-varying characteristics of SNR (signal to noise ratio) and seismic event waveforms increase the difficulty in the automatic detection of seismic events. First, The uneven data energy distribution due to uneven data energy distribution influences the outlier identification of the targeted event, especially for weak energy earthquakes. Second, different seismic events contain different waveform properties. A fixed detecting model is inappropriate for long-term observation. Events in close propinquity of a time series also lead to a complex automatic detecting model.

The STA/LTA (short term averaging / long term averaging) method is a widely used seismic first arrival identification algorithm. This method is simple and suitable for real-time processing. It contains 2 steps: 1. set a short time window included in a long time window and calculate the time window signal amplitude (or energy) average, respectively. 2. slide the windows in the time series and calculate the two average ratios. The outlier of the ratio refers to the appearance of a seismic event. The STA/LTA method can be employed for real-time processing. However, for low SNR or related signal noise situation, STA/LTA detecting effect will be impaired. Besides, for long-term series, it is difficult to estimate an appropriate time window size for the ratio calculation. Considering seismic observed record as a stochastic time series, AR (autoregressive) process can be applied for seismic event detecting. For the event phase arrival, AR method assumes that the segments before and after the event phase is stationary as different AR models. The change point between these two models refers to the seismic event on time series. Since the AR method avoids the amplitude or energy calculation, it produces better results for low SNR signals. However, AR method needs the signal stationarity assumption, so it is not suitable for time-varying long-term records.

In this work, an improved AR method for automatic seismic event detecting is applied. This algorithm, called SDAR (sequential discounting AR learning), is widely used to represent a statistical behavior of a time series. There are 2 advantages of SDAR: 1. Real-time estimation. When new data appears in the record, the SDAR model parameters can be updated. 2. Discounting property. Comparing with AR method, the SDAR introduces the discounting parameter to decrease the statistic value on future data. Therefore, the SDAR method can handle the unstable time-varying long-term series. Comparing SDAR and STA/LTA method, the Tomakomai OBC observation test shows that SDAR can increase the seismic event detecting rate.

Keywords: seismic event detecting, SDAR, change point

## Acoustic sonar detectability of gas bubbles from seafloor for environmental monitoring at offshore CO<sub>2</sub> storage sites

\*中村 孝道<sup>1</sup>、西村 真<sup>1</sup>、内本 圭亮<sup>1</sup>

\*Takamichi Nakamura<sup>1</sup>, Makoto Nishimura<sup>1</sup>, Keisuke Uchimoto<sup>1</sup>

1. 公益財団法人地球環境産業技術研究機構地球環境産業技術研究所CO<sub>2</sub>貯留研究グループ

1. CO<sub>2</sub> Storage Research Group, Research Institute of Innovative Technology for the Earth

Geological CO<sub>2</sub> storage is proposed in sedimentary formations. Because storage sites are selected deliberately to minimize the risk of leakage, CO<sub>2</sub> is assumed to be stable in the reservoirs. CO<sub>2</sub> leakages from geological storage systems are unlikely, but still possible. At offshore CO<sub>2</sub> storage site, CO<sub>2</sub> could leak out from the seafloor into the seawater. CO<sub>2</sub> leakage may lead to significant effects on the local environment. From the public and stakeholders, concerns about the risk of in situ leakage and ecological impacts are emerging. Therefore, it is the most important verification for geological CO<sub>2</sub> storage project that there is no detectable leakage or migration of CO<sub>2</sub> by environmental monitoring. Appropriate environmental monitoring methods and public communications are lead to secure social license and also needed to progress of safety geological CO<sub>2</sub> storage project. Further, in Japan, operators of offshore CCS are required to plan monitoring programs, as stated in the Act for the Prevention of Marine Pollution and Maritime Disasters. In the monitoring plan, an operator has to be able to determine the location and extent of any CO<sub>2</sub> leakage. Consequently, it is necessary to develop detection methods of CO<sub>2</sub> leakage in the sea.

For offshore environmental monitoring, acoustic methods were expected that could direct detection of CO<sub>2</sub> bubbles in the seawater. It was described that effectiveness of acoustic methods for seafloor and water column monitoring in IEAGHG special report (IEAGHG, 2012). In practice, it was used in seafloor survey of several offshore geological CO<sub>2</sub> storage projects. For example, in Sleipner, side scan sonar (SSS) and multibeam echo sounder systems (MBES) were used for seafloor observations on storage site ([www.eco2-project.eu](http://www.eco2-project.eu)). In QICS project (Blackford et al., 2014) that CO<sub>2</sub> controlled release experiment from shallow seafloor, clearly images of both gas plume within the water column and pockmarks on the seafloor obtained using MBES (Cevatoglu et al., 2015). Furthermore, gas flux quantification using hydrophone, passive acoustic method was shown (Bergès et al., 2015). However, there were no data about flow rates of released CO<sub>2</sub> and MBES image data was used as check the location of releasing point. Detectability of acoustic methods was unclear.

This paper focuses specifically on the detectability of active acoustic method. Controlled compressed air release experiments were carried out in shallow inner bay at the depth of 5 to 6 m. Observations using active acoustic instruments such as multibeam sonar (MBS) and SSS were deployed to assess its detectability for gas bubbles stream. Analysis of the image acquired by active acoustic instruments led to the following conclusions:

- Images of MBS data could detect gas bubbles stream. The survey using MBS have the potential to be effective method for localization of leakage point in narrow area.
- Images of SSS data could detect gas bubbles stream. Images of SSS data showed high detectability of gas bubbles stream. The survey using SSS have the potential to be effective method for detection of CO<sub>2</sub> leakage and localization of leakage point.
- Image processing and analyzing of SSS data, the quantification data of gas bubbles stream were obtained. Flow rates from any image data could estimate within order of magnitude, with relative high quantification accuracy.
- The survey using SSS have the potential to be effective method for not only leakage detection but also

leakage scale grasp. The broad seafloor survey using active acoustic instruments such as SSS is crucial point of efficient leakage detection and localization.

Bergès, B.J.P., Leighton, T.G., White P.R. (2015) Passive acoustic quantification of gas fluxes during controlled gas release experiments. *Int. J. Greenh. Gas Cont.* 38, 64-79.

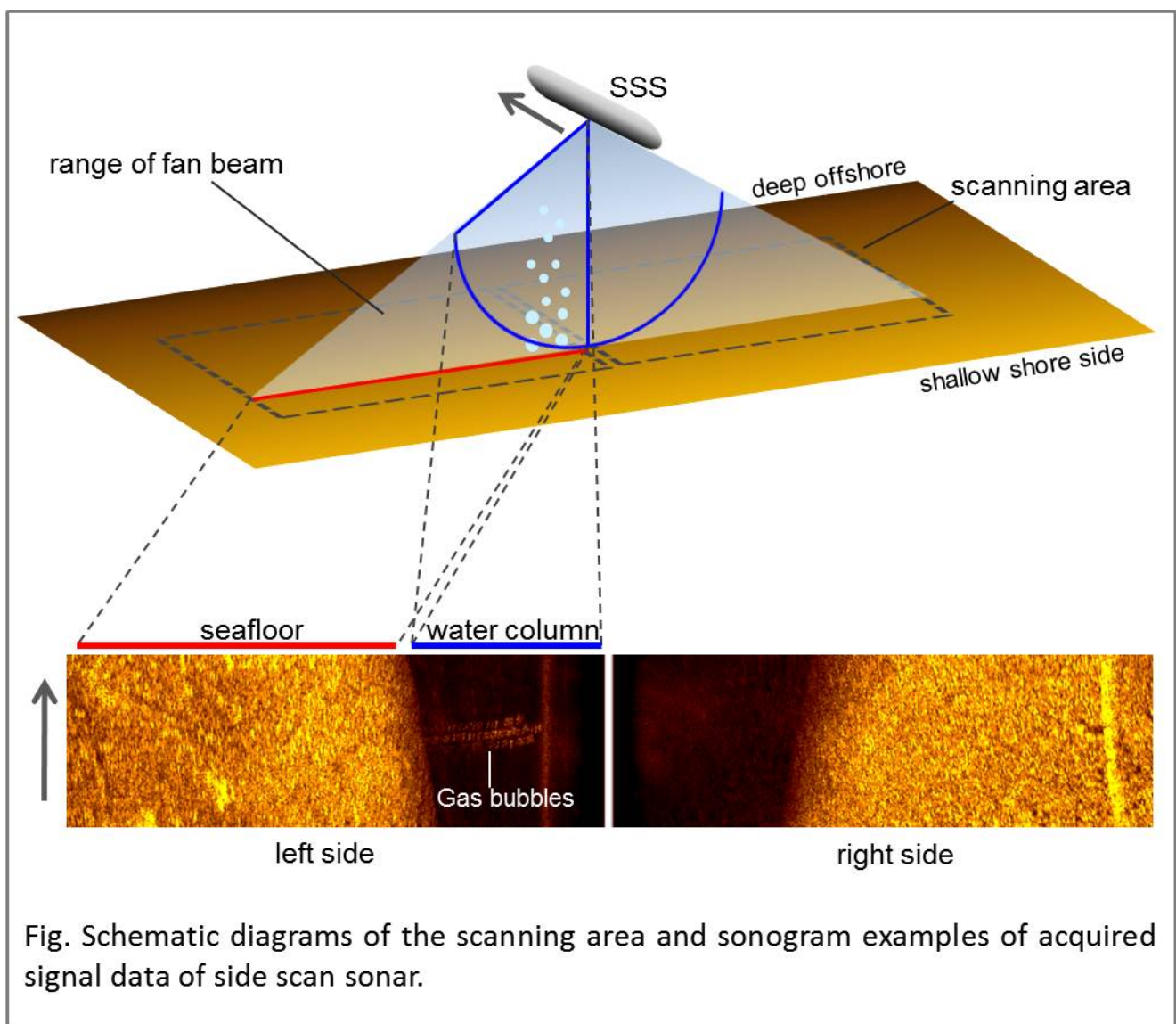
Blackford, J., Stahl, H., Bull, J.M., et al. (2014) Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage. *Nat. Clim. Chang.* 4, 1011-1016.

Cevatoglu, M., Bull, J.M., et al. (2015) Gas migration pathways, controlling mechanisms and changes in sediment acoustic properties observed in a controlled sub-seabed CO<sub>2</sub> release experiment. *Int. J. Greenh. Gas Cont.* 38, 26-43.

IEAGHG. (2012) Quantification Techniques for CO<sub>2</sub> Leakage. Report. 2012/02.

キーワード：海域環境モニタリング、二酸化炭素海底下貯留、音響探査技術、漏出検出

Keywords: offshore environmental monitoring, offshore CO<sub>2</sub> geological storage, acoustic sonar, leakage detection



# 地球惑星と人間社会未来の継続的変化への科技的対応とCO<sub>2</sub> 分離回収系

## Scientific response to successive changes of next Earth and human society and CO<sub>2</sub> capture system

\*三浦 保範<sup>1</sup>

\*Yasunori Miura<sup>1</sup>

1. 客員（山口、AIC大学）

1. Visiting (Yamaguchi University, Foreign University (AIC))

活動する地球惑星において、ミニ地球体である人間生命体の社会活動には継続的な未来志向の考えが不可欠であり、地球と人間社会のCO<sub>2</sub>分離回収の大切さについて次のように報告する。

1. 地球三圏の大気海洋地殻固体物質状態別に観測し解析する現在の研究では、変化した地球における現時点からであり、それらが分離する段階は継続的な活動の研究では見逃しやすい。そのために地球資源物の燃焼から発生するCO<sub>2</sub>ガスを詳細に解明する必要がある。

2. 地球上の局所で短時間にCO<sub>2</sub>を発生しても、局所的な大集合を示す地球環境では、長時間では広領域にその影響が及ぶ。CO<sub>2</sub>発生直後局所的にCO<sub>2</sub>分離回収しないと、広い全圏回収は困難である。

3. 無機的な惑星地球の活動源は、極限状態の衝撃爆発現象の衝突 地震 火山で地球全域に分布する。有機物の生命体の活動源は、水ガス惑星地球上全域における無機起源のガスと水からできる有機物形成反応である。そのため局所活動が地球全域の地球環境に影響を及ぼす。

4. 大気海洋活動は、高温高压状態で形成されて室温にまで冷却減圧して、容易に移動や反応して化合物の形成を繰り返し、広く継続的地球循環を示す。固体岩石は、微粒子から大結晶にサイズ変化を局所から地球全域に残存している。

5. 地球は、自然の極限条件等で変化した岩石で濃縮資源化を繰り返す。その濃縮資源（石炭石油ガス）の人間社会で大量に使い始めたが、使用後は廃棄的処理を繰り返している。継続的な地球上活動では、使用後も地球資源を繰り返し利用する新しい 科技的展開を地球資源利用時に確立することが必要である。

6. 地球上の物質変化で大気ガスと海水溶液が岩石固体と反応を繰り返す状態変化の痕跡を、筆者らは科技的方法での確認を報告した。人工的な状態変化の痕跡物を再現する方法も特許化した。これは、産業革命から地球資源(石炭石油ガス等)を大気海水への放出廃棄を繰り返す前に、人工的に物質の再利用方法を開発して応用すべきであることを示す。

以上から、地球の資源物質を人間社会で利用する場合は、使用後に排出するCO<sub>2</sub>物質の再利用展開をする事が不可欠である。これらの残留物質を示す画像と分析データを本会議で紹介する。

本件の科技的方法の考えは、これまでの地球資源等を破壊的破棄にするのではなく、活動地球のような継続的な活動過程を資源使用後に科技的な工夫で燃焼直後にCO<sub>2</sub>分離回収を行う方法を確立する事、そして地球や生命体と同じ継続的な過程を地球資源燃焼直後に行う事等により、これからの地球環境と人間社会の継続が可能な社会をめざしている。

キーワード：二炭酸ガス分離回収、地球圏、人間圏

Keywords: Carbon dioxides capture system, Earth system, Human life system





## 自然ガンマ線検層とコア試料の堆積学的・地球化学的検討を併用した シェール量評価の精緻化の試み：長岡サイトの例

### Evaluation of shale volume using a combination of the gamma-ray logs and core analysis in terms of sedimentology and geochemistry: a case study of the Nagaoka site, Japan

\*伊藤 拓馬<sup>1</sup>、大淵 敦司<sup>2</sup>、中島 崇裕<sup>1</sup>、薛 自求<sup>1</sup>

\*Takuma Ito<sup>1</sup>, Atsushi Ohbuchi<sup>2</sup>, Takahiro Nakajima<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>1</sup>

1. 公益財団法人地球環境産業技術研究機構、2. 株式会社リガク

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth, 2. Rigaku Corporation

CO<sub>2</sub>地中貯留に適した貯留層の選定には、地層のシェールの空間分布を把握することは重要である。地層におけるシェールの空間分布の把握では、各坑井から算定されるシェール量を確定論的に活用する場合が多いため、各坑井での精緻なシェール量評価が必要である。自然ガンマ線（GR）検層は、簡便なシェール量評価のツールのひとつとして広く活用されてきた。GR検層は、地層に含まれる<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>238</sup>Uの放射性核種から放射されるGRを計測する。一般に、砂岩より泥岩や頁岩でGR値が高いことから、地層中のシェール量評価ができる。しかし、地層の鉱物組成が深度ごとに著しく異なれば、GR値から適切なシェール量を算定することは困難となる。このことは、GR値からシェール量を算定する際は、GR値に影響する鉱物を的確に把握すべきことを意味するが、こうした検討事例の蓄積は必ずしも充分でない。本発表では、長岡サイトにおける貯留層の堆積学的・地球化学的検討とGR検層との比較を実施し、GR検層によるシェール量評価の精度向上に関する検討を試みる。

長岡サイトでは、新潟平野の地下約1,000m付近に分布する塩水性帯水層を対象とし、約1万トンのCO<sub>2</sub>を圧入する実証試験が実施された。塩水性帯水層は、浅海堆積物から構成され、前期更新世の灰爪層に対比される。本サイトでは、1本の圧入井（IW-1）と3本の観測井（OB-2、-3、-4）が掘削された。IW-1では貯留層のコア試料が採取された。また、すべての坑井では自然ガンマ線検層が実施され、観測井では<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>40</sup>Kの量比を判定できるスペクトラルガンマ線（SPL）検層が実施された。

貯留層の堆積学的・地球化学的解析では、コア試料の記載による堆積環境の把握、XRF分析による主要・微量元素の測定、XRD分析による鉱物の同定を行った。コア試料の記載では、貯留層は基底部に侵食面をもち、その上位で上方細粒化・粗粒化パターンを示す堆積シーケンスが確認された。堆積シーケンスは、主にプロデルタ～デルタフロント部から構成されると解釈された。GR検層と堆積環境を比較すると、デルタフロント部よりもプロデルタ部では高いGR値を示した。また、GR検層とコア試料の粒度分析による含泥率（＜1/16mm）は、類似したパターンが認められた。このことは、GR強度の支配要因は泥サイズの粒子に帰属されることを意味する。

GR検層とSPL検層の比較では、GRを支配する放射性核種の検討を行った。その結果、K量はプロデルタ部とデルタフロント部で大きな変化はなく、GR値とも相関は認められなかった。このことから、Kを含む鉱物はGR強度の主要な支配要因ではないと解釈される。一方、Th量とU量は、基本的にはプロデルタ部とデルタフロント部とで濃度が異なり、GR値と正の相関を示した。このことは、ThやUを含む鉱物はGR値の支配要因のひとつと解釈される。GR検層とコア試料のXRF分析による主要・微量元素分析の比較では、MgO、TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Th、Zrを含む鉱物がGR値の支配要因のひとつと解釈される。泥サイズを抽出した試料におけるXRD分析の結果、これら元素を含む鉱物はジルコン、スメクタイトおよびクロライトに帰属されると解釈される。

すべての坑井における貯留層のGR検層による堆積学的解析では、二つの上方細粒化・粗粒化堆積シーケンスが認定された。この二つの堆積シーケンスについて、GR強度とSPL検層による放射性核種の濃度の散布図を作成した結果、両者の傾きは各堆積シーケンスでほぼ等しいことが判明した。このことから、各堆積シーケンスでは、後背地の供給源の変化に伴う鉱物組成変化の影響は小さいと解釈できる。しかし、各堆積シーケンスで

GR強度の最大値は異なっている。このことは、GR検層に基づくシェール量評価を行う際は、GR強度のエンドメンバーの設定を各堆積シーケンスで設定すべきことを意味する。GR検層を用いたシェール量評価の精緻化には、貯留層の詳しい堆積学的検討は欠かせないであろう。

キーワード：長岡サイト、堆積学、地球化学、自然ガンマ線検層、スペクトラルガンマ線検層、シェール量

Keywords: Nagaoka site, Sedimentology, Geochemistry, Natural gamma-ray logging, Spectral gamma-ray logging, Shale volume

## Reservoir heterogeneity based on sediment sorting associated with GR and permeability in turbidity sandstone sequence, Kitaura Formation, Akita, Japan

\*千代延 俊<sup>1</sup>

\*Shun Chiyonobu<sup>1</sup>

1. 秋田大学国際資源学部

1. Faculty of International Resource Sciences, Akita University

Outcrop and core data from the interbedded with turbidity sandstone and siltstone, Kitaura Formation of Akita basin show that realistic reservoir characterization can be based on stratigraphic architecture. This deposit represents turbidity sandstone reservoirs that developed from cyclic turbidity currents within hemipelagic basin. Kitaura Formation outcrop are good analogs to CO<sub>2</sub> reservoir characterization and modeling in off Akita area. Analysis and modeling of the turbidity sandstone based on outcrop measurements provide detection and identification of ranging data for sandstone reservoir characterization.

Ourcrop displays of differential weathering, coloration, cementation, and seepage reflect stratigraphic and sedimentary control of fluid flow within the turbidity sandstone. The first step of this study is observations of sedimentary facies that characterized by sedimentary structures, grain-size distribution, thickness of sandstone and siltstone, and cyclicity and lateral variations of sandstones. Measurements of permeability using a field permeameter and conventional soil analysis (e.g. Talsma and Hallam, 1980) yield some of magnitude range of values between distinct populations as follows; a part, b part, and c part of Bouma sequence and low density current deposit composed very fine sandstones. These differences within turbidity sandstones depend on grain size distribution, which indicate sediment sorting. The lateral variations of the sorting of a sandstone layer reveal that various values of reservoir property depend on depositional mechanisms. Natural gamma ray (GR) measured for ratio between clay and sand contents in sandstone layers can regards as a physical property of reservoir heterogeneity. Recognition of physical levels of reservoir heterogeneity can be identified GR and permeability within turbidity sandstone layer even though factor and distribution of physical properties are sampling scale dependent. Outcrop analogs for flow within turbidity sandstones can be generated spatial distribution of reservoir heterogeneity based on sedimentary systems.

キーワード：不均質性、タービダイト砂岩、堆積物淘汰度/分級度

Keywords: Reservoir heterogeneity, turbidity sandstone, sediment sorting

## CO<sub>2</sub>注入速度が多孔質砂岩中のCO<sub>2</sub>飽和度と間隙圧に与える影響 Impact of the injection speed on CO<sub>2</sub> saturation and pore pressure

\*北村 圭吾<sup>1</sup>、本田 博之<sup>2</sup>、高木 進之介<sup>2</sup>、今里 光紀<sup>2</sup>、三谷 泰浩<sup>3</sup>

\*Keigo Kitamura<sup>1</sup>, Hiroyuki Honda<sup>2</sup>, Shinnosuke Takaki<sup>2</sup>, Mitsunori Imasato<sup>2</sup>, Yasuhiro Mitani<sup>3</sup>

1. 九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所、2. 九州大学大学院工学府、3. 九州大学大学院工学研究院

1. International Institute for Carbon-Neutral Energy Research, Kyushu University, 2. Graduate School of Faculty of Engineering, Kyushu University, 3. Faculty of Engineering, Kyushu University

地下深部の貯留層に圧入されたCO<sub>2</sub>の挙動を理解する事はCCSの安全性と経済性を評価する上で重要である。地下深部貯留層に圧入されたCO<sub>2</sub>は地下水と二相流を形成し貯留層内部へ侵入する。この時、貯留層内部のCO<sub>2</sub>飽和度 ( $S_{CO_2}$ )と間隙流体圧力 ( $P_p$ )が上昇する。CO<sub>2</sub>飽和度の変化を把握する事はCO<sub>2</sub>貯留量の推定のために不可欠である。また間隙流体圧のモニタリングは貯留層の健全性を評価する上で重要である。近年、CO<sub>2</sub>の注入速度がCO<sub>2</sub>飽和度や間隙水圧に影響を与えている事が実験的および理論的研究から示唆されている。そこで本研究は塩水で飽和したベレア砂岩 ( $\Phi=18.1\%$ )に対して、CO<sub>2</sub>の注入速度(FR)を変化させながら超臨界CO<sub>2</sub>の注入を行い、 $S_{CO_2}$ と間隙差圧 ( $\delta P$ )の測定を行った。同時にP波速度 ( $V_p$ )の測定を実施し、岩石試料中のCO<sub>2</sub>挙動のモニタリングと $V_p$ による $S_{CO_2}$ の推定について検討した。CO<sub>2</sub>の注入速度は10  $\mu\text{l}/\text{min}$ から段階的に5000  $\mu\text{l}/\text{min}$ まで変化させた。同時にP波速度 ( $V_p$ )の測定を実施し、岩石試料中のCO<sub>2</sub>挙動のモニタリングと $V_p$ による $S_{CO_2}$ の推定について検討した。P波速度は岩石試料上に異なった高さに設置した3チャンネルで測定した。極定流量(10  $\mu\text{l}/\text{min}$ )でCO<sub>2</sub>を注入したとき、 $S_{CO_2}$ は9%までしか増加せず、 $\delta P$ は10kPaであった。この時、 $V_p$ の低下は4-5%程度であった。注入速度を500  $\mu\text{l}/\text{min}$ まで増加させたとき、 $S_{CO_2}$ は25%、 $\delta P$ は30kPaまで増加した。一方、 $V_p$ の低下率は5%であった。注入速度が1000  $\mu\text{l}/\text{min}$ より大きくなると $S_{CO_2}$ は35%から47%まで増加したが $\delta P$ も50-500kPaまで急激に増加した。5000  $\mu\text{l}/\text{min}$ の時、各chの $V_p$ の低下率は6-8%であった。これらの結果はCO<sub>2</sub>の注入速度が岩石中のCO<sub>2</sub>挙動に大きな影響を与えている事を示している。またFRの500  $\mu\text{l}/\text{min}$ と1000  $\mu\text{l}/\text{min}$ の間に $S_{CO_2}$ と $\delta P$ の増加量の閾値がある事を示唆された。

キーワード：CO<sub>2</sub>飽和度、間隙差圧、注入速度、二相流

Keywords: CO<sub>2</sub> saturation, differential pressure, injection speed, two-phase flow

## 接触角変化による遮蔽性への影響に関する数値解析

## Numerical Study on the Effects of Change of Contact Angle on Sealing Capacity

\*加野 友紀<sup>1,2</sup>、Ishido Tsuneo<sup>1,2</sup>、Sorai Masao<sup>1,2</sup>\*Yuki Kano<sup>1,2</sup>, Tsuneo Ishido<sup>1,2</sup>, Masao Sorai<sup>1,2</sup>

1. 産総研 地質調査総合センター、2. 二酸化炭素地中貯留技術研究組合

1. AIST, Geological Survey of Japan, 2. Geological Carbon Dioxide Storage Technology RA

CO<sub>2</sub>地中貯留において、我が国の一般的な帯水層の貯留サイトでは反応鉱物が多い地層特性がしばしば見られる。このような地層では、CO<sub>2</sub>の溶解によりpHの低下した間隙水が岩石表面で地化学反応を起こすと、岩石表面に鉱物膜が形成され、岩石の濡れ性（接触角）ひいては毛管圧が変化し、遮蔽性に影響する可能性がある。本研究では、地中貯留における接触角の変化がシール層の遮蔽性にどのような影響を及ぼすかを数値シミュレーションにより検討した。

シミュレーションでは海底下貯留を想定し、水平方向に20 km、鉛直方向に0.5 kmの放射流モデルを用いた。上端を水深200 m海底下の深度700 mとし、温度31 °C、圧力9.0 MPaの条件を設定した。深度1,000 mを中心に100 m厚ないし200 m厚の貯留層が存在し、その直上に100 m厚のシール層が存在する。貯留層の下部は基盤岩、シール層の上部は二次帯水層としている。CO<sub>2</sub>は貯留層に年間100万トンのレートで50年間圧入されるものとした。シミュレーションは圧入期間の50年間及びその後450年間にわたるCO<sub>2</sub>プルームの広がりや地層水への溶解量等に関して行った。計算には、汎用貯留層シミュレータSTARと状態方程式SQSCO2を用いている。

貯留層の浸透率は鉛直・水平方向に10/100 mD、シール層は0.1/1 mDとした。水およびCO<sub>2</sub>の相対浸透率の関数は全層共通とし、それぞれvan Genuchten型及びCorey型で表されるものとした。不動水飽和度は0.2、残留CO<sub>2</sub>飽和度は0.05とし、ヒステリシスが生じるものとしている。毛管圧はvan Genuchten型とし、残留CO<sub>2</sub>飽和度における毛管圧をスレッシュホールド圧 $P_{th}$ とみなした。スレッシュホールド圧は貯留層を0.1 MPa、遮蔽層を0.5 MPaないし1.0 MPaとした。本研究では、初期の水-CO<sub>2</sub>-地層の接触角は0°の水濡れとし、ある時点で地化学反応による接触角の変化が発生することを仮定、これを15°刻みで75°まで振るケーススタディを行った。接触角 $\theta$ の変化によりラプラスの式 $P_{th} = 4 \sigma \cos \theta / d$ にしたがってスレッシュホールド圧が変化するものとしている。ここで、界面張力 $\sigma$ およびスロート径 $d$ は不変とした。接触角変化による毛管圧変化（すべてのCO<sub>2</sub>飽和度で $\cos \theta$ に比例）のタイミングについては、変化なし、圧入開始から25年後、50年後、100年後の各ケーススタディを行った。

シミュレーションの結果として1) 接触角が変化しないケースでは圧入中に遮蔽層へ若干のCO<sub>2</sub>進入が見られるが、圧入停止後はほぼ停止する。2) いずれのケースでも圧入停止から450年後時点でCO<sub>2</sub>は貯留層および遮蔽層内に留まり、二次帯水層への進入は起こらなかった。これは遮蔽層の浸透率が十分小さいため、また残留ガストラップが働いたためと考えられる。3) 接触角の変化により毛管圧が低下すると、圧入停止後も遮蔽層へのCO<sub>2</sub>進入が続くケースがあった。4) 特に、初期スレッシュホールド圧が低く、貯留層厚の厚い浮力が大きいケースでは効果が顕著であった。以上の結果から、地化学反応による接触角の変化が、長期的な遮蔽性に影響を及ぼす可能性が示唆された。

本研究は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」の一部として実施した。

キーワード：二酸化炭素地中貯留、接触角、毛管圧、数値解析

Keywords: Geological storage of CO<sub>2</sub>, contact angle, capillary pressure, numerical simulation

## Micro-bubble Injection Enhanced dissolution during CO<sub>2</sub> Sequestration in saline

\*LANLAN JIANG<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>1</sup>, Hyuck Park<sup>1</sup>, Tamotsu Kiyama<sup>1</sup>

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

CO<sub>2</sub> micro-bubble injection is available for storing CO<sub>2</sub> in aquifers with non-anticline (monotonic) structure in a low-cost concept. In this study, the dynamic displacement and dissolution during CO<sub>2</sub> flushing was investigated by using medical X-ray CT scanner. CO<sub>2</sub> was injected into brine saturated sandstone with 0.05 mL/min under reservoir condition (10MPa/40°C). Two sets experiments with micro-bubble and normal bubble CO<sub>2</sub> were conducted to quantify compare the enhanced dissolution efficiency. Larger interfacial area between CO<sub>2</sub> and brine during the injection enhanced the mass transfer and delayed CO<sub>2</sub> breakthrough. The breakthrough time for micro bubble was nearly 120 min corresponding to 180 min for normal bubble under the same injection rate. By image analysis, the high sweep efficiency during micro-bubbles injection was obtained. Micro-bubble CO<sub>2</sub> preferred to trap into tiny pores since the small size bubble and micro-bubbles injection accelerated gas trapping because of the fully dissolution. CO<sub>2</sub> micro-bubble sequestration is also a novel technology to store CO<sub>2</sub> from the small- to middle-scale emission sources by enhanced dissolution and effective use of pore space suggested by our experimental results.

Keywords: micro bubble, CO<sub>2</sub> saturation, high sweep efficiency, dissolution

CO<sub>2</sub>貯留効率向上のための溶解促進技術の検討Study of advanced CO<sub>2</sub> dissolution technology for improvement of CO<sub>2</sub> storage efficiency\*上田 良<sup>1</sup>、中野 正則<sup>1</sup>、薛 自求<sup>2</sup>\*Ryo Ueda<sup>1</sup>, Masanori Nakano<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>2</sup>

1. 石油資源開発株式会社、2. 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1. Japan Petroleum Exploration Co., Ltd., 2. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

CCS事業化において圧入コストの低減化は大きな課題である。CO<sub>2</sub>を地下により効率的に圧入、貯留するためには貯留層の圧力増加の抑制につながる溶解促進技術の確立が肝要となるが、有力な手法としてCO<sub>2</sub>をマイクロバブル化して圧入する技術に注目した。本研究では実験および実験を模擬したフローシミュレーションを通じてマイクロバブル圧入効果およびそのメカニズム検討を進めている。

マイクロバブルは多孔質の特殊フィルターをCO<sub>2</sub>が通過することで発生する。これまでの研究<sup>i</sup>でラボスケールではマイクロバブル圧入によりCO<sub>2</sub>飽和率（CO<sub>2</sub>相として存在している体積の割合）が増加することが確認されているが、マイクロバブルの坑内、貯留層内での挙動、影響およびそのメカニズムを検討することがフィールドでの実用化に向けての重要なカギとなる。

その一つとして、マイクロバブルの「侵入距離」に焦点を当て、30cmと長いベレア砂岩コアでのマイクロバブル圧入効果を検証した。CO<sub>2</sub>が超臨界となる温度、圧力条件（40℃、10MPa）でコアフラッド実験を実施し、CO<sub>2</sub>飽和率では通常圧入では24.4%、マイクロバブル圧入では26.2%と相対的増加度で7.4%（（26.2-24.4）/24.4×100%）、CO<sub>2</sub>貯留量（大気圧換算）でそれぞれ7.73L、5.93Lと相対的増加度で30.4%（（7.73-5.93）/5.93×100%）と長いコアでもマイクロバブル圧入を適用することによりCO<sub>2</sub>貯留量が増加することが確認され、また、相対的増加度で貯留量が飽和率を上回っていることから、CO<sub>2</sub>溶解促進効果の可能性が示唆された。更に、マイクロバブル圧入挙動として、CO<sub>2</sub>のブレイクスルー時間が遅くなる現象も確認された。

謝辞：本研究は二酸化炭素技術研究組合の「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」の一環として行われた。また、本研究の基礎となるマイクロバブル技術は東京ガス株式会社とRITEとの共同研究成果である。深く謝意を表します。

## 参考文献

i) Akai, T., Xue, Z., Yamashita, Y., Yoshizawa, M. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, 2015 SPE-177672-MS

キーワード：二酸化炭素地中貯留、溶解促進、マイクロバブル、コアフラッド実験

Keywords: Geological CO<sub>2</sub> Storage, advanced dissolution, microbubble, core flooding

## 長岡サイトにおいて繰り返し検層によって得られたフィールドスケールの トラッピング・メカニズム

### Trapping mechanisms in field scale observed by time-lapse well logging at the Nagaoka site

\*中島 崇裕<sup>1</sup>、薛 自求<sup>1</sup>

\*Takahiro Nakajima<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>1</sup>

1. (公財) 地球環境産業技術研究機構

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

This paper discusses CO<sub>2</sub> trapping in field scale observed at the Nagaoka pilot-scale injection site. IPCC (2005) illustrated the contributions of various trapping mechanisms over time, and pointed out the importance of capillary and solubility trapping at the early stage of geological CO<sub>2</sub> storage. Capillary trapping is caused by interfacial forces at the pore of rock and prevents migration of CO<sub>2</sub> bubble. Solubility trapping means that gaseous CO<sub>2</sub> dissolves into formation water. After the report of IPCC, many laboratory experiments related to these trapping mechanisms have been conducted. Meanwhile, field observations were limited. In this paper, we study trapping mechanisms observed at the Nagaoka site.

Nagaoka project was undertaken in order to verify an ability of CO<sub>2</sub> injection into Japanese formation. The target reservoir consists of a limb of anticline structure and has 15 degree dipping. About 10 k-tons of CO<sub>2</sub> were injected into a thin permeable zone from July 2003 to January 2005. Time-lapse well loggings have been carried out for more than 12 years, and the number of monitoring logging is 44 times so far. CO<sub>2</sub> breakthrough was detected at a down-dip well (OB-2) located 40m away from the injection well, and at an up-dip well (OB-4) located 60m from the injection point. From the neutron logging data, CO<sub>2</sub> saturation in super-critical phase was evaluated, and from the induction logging the existence of super-critical and dissolved CO<sub>2</sub> is deduced. At OB-2, CO<sub>2</sub> saturation peaked at 63% around 22 months after the start of injection, decreased gradually, and stabilized at around 20%. At OB-4, CO<sub>2</sub> saturation peaked at 69% around 15 months and remained relatively high value (40%).

We considered that the maximum saturation at each depth was corresponding to the initial saturation of drainage process and the latest observation could be assumed as the residual state. The relationship between the initial and residual saturation is called IR curve and represents the fundamental flow properties in drainage process. The results at OB-2 showed that most of the data can be explained by single Land's model. Exception came from relatively silty layer, which means pore distribution is different from other layers. At OB-4, IR relationship was scattered and indicated that the latest state is far from the residual condition. The difference between down- and up-dip direction is thought to exhibit migration effects in the reservoir.

Concerning the dissolved CO<sub>2</sub>, the thickness of the low resistivity anomaly became larger. This showed that the solubility trapping was progressing. The rate of thickening was the same order as the dissipation of bicarbonate ion. This was consistent with the expectation from the linear instability theory for density convection of CO<sub>2</sub> dissolved water.

These results showed capillary and solubility trapping mechanisms in the field scale observation. The drainage process in field scale could be explained by Land's model as laboratory experiments, and the



fitted model was depend on rock type. Solubility trapping in several mD formations was confirmed that dissipation process was dominant during the first decade of CO<sub>2</sub> storage. These results could be used for simulation tasks to build a better flow model.

キーワード : CO2地中貯留、多相流、残留ガストラッピング、溶解トラッピング、Landモデル、長岡サイト  
Keywords: CO2 geological storage, multiphase flow, residual trapping, solubility trapping, Land model, Nagaoka site

## 不均質堆積岩におけるマイクロバブルCO<sub>2</sub>流動の可視化と定量評価 Visualization and measurement of CO<sub>2</sub> microbubble flooding in heterogeneous sedimentary rock

\*朴 赫<sup>1</sup>、蔣 蘭蘭<sup>1</sup>、木山 保<sup>1</sup>、薛 自求<sup>1</sup>

\*Hyuck Park<sup>1</sup>, LANLAN JIANG<sup>1</sup>, KIYAMA TAMOTSU<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>1</sup>

1. 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

We carried out laboratory experiments of CO<sub>2</sub> microbubble and normal bubble flooding in porous sandstone to confirm the difference in dissolution and sweeping effect. During the experiments, we obtained the specimen porosity and monitored fluid saturation process by using CT image analysis. Sarukawa sandstone (diameter: 34.80mm, length: 79.85mm, north central Japan) was used in this study. Porosity of specimen determined by X-ray CT imaging is 30.94%. The specimen has heterogeneous structure. The experiments were conducted under the pressure and temperature conditions that simulate underground environments; pore pressure: 10MPa, temperature: 40 degrees Celsius. The confining pressure selected in this study is 12MPa. The specimen was first saturated with KI aqueous solution (12.5%), and then oil was injected to make oil-water mixed state. Totally, ten steps of flooding were performed for each experiment. For each step, KI aqueous solution and oil were carefully recovered from the syringe pump (back pressure pump). We increased the differential pressure to examine the influence of differential pressure on oil recovery in heterogeneous media. The microbubble and normal bubble flooding tests were carried out until the total fluid injections reach about 3PV (pore volume). Figures a) and b) show the differential CT images when the CO<sub>2</sub> microbubble and normal bubble injections reach 2.95PV and 2.98PV, respectively. It is clear that the CO<sub>2</sub> microbubbles were able to sweep out more than the normal microbubbles. For example, the oil recoveries were identified as 56.04% and 45.12% after 1.0PV injection of CO<sub>2</sub> in the specimen. The case of microbubbles is about 10.92 % point higher than the case of normal bubble.

キーワード : X線CT、マイクロバブルCO<sub>2</sub>、ノーマルバブルCO<sub>2</sub>、不均質岩

Keywords: X-ray CT, CO<sub>2</sub> microbubble, CO<sub>2</sub> normal bubble, heterogeneous rock

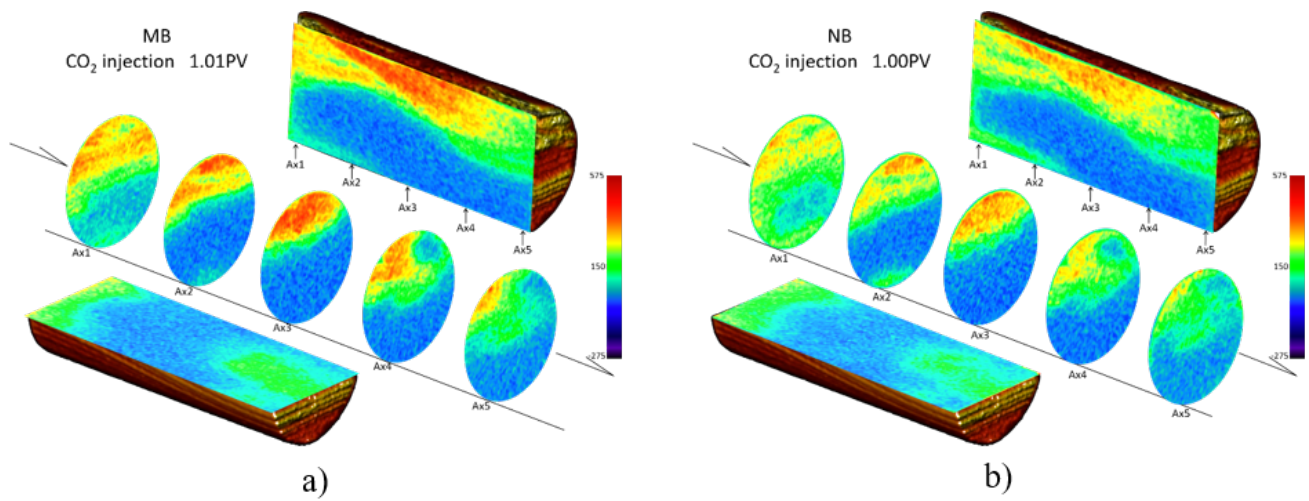


Figure. X-ray CT differential images of CO<sub>2</sub> microbubble and normal bubble flooding in the Sarukawa sandstone a) after 1.01PV(pore volume) injection of CO<sub>2</sub> microbubbles, b) after 1.00PV injection of CO<sub>2</sub> normal bubbles

## 地化学反応が遮蔽性能に及ぼす影響に関する予備的検討

### Preliminary evaluation on geochemical impacts to rock's sealing performance

\*徂徠 正夫<sup>1</sup>

\*Masao Sorai<sup>1</sup>

1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

1. Research Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

CO<sub>2</sub>地中貯留では、CO<sub>2</sub>が地表に漏洩することなく安定に隔離され続けることが前提となる。このような地下のシール性能を決める因子が、キャップロックの浸透率と毛管圧（スレッシュホールド圧）である。これまで貯留サイトの岩石に対する浸透実験からこれらのパラメータの計測が行われてきたが、CO<sub>2</sub>が溶解した間隙水中で長期にわたる地化学プロセスを経た後も、同様のシール性能が保証されるかどうかは確認されていなかった。本研究では、キャップロックのシール性能および貯留層の圧入性の両方の観点から、岩石が反応する際の水理特性の変化を定量的に評価した。

日本各地の露頭から採取された堆積岩のうち、3種類の泥岩（浪花層、大原層および一志層群泥岩）、五日町層群泥灰岩、および2種類の砂岩（灰爪層石灰質貝屑砂岩および大泊有孔虫砂岩）を選定した。偏光顕微鏡によるモード測定および粉末X線解析からは、一志層群泥岩以外の全ての岩石が炭酸塩鉱物を含んでいることが示された。特に泥灰岩と2つの砂岩で、炭酸塩鉱物の含量が多くなっていた。

初めに、超臨界CO<sub>2</sub>-水反応システムにより、閉鎖系での反応実験を行った。反応に先立ち、岩石を直径14 mm、高さ10 mmの円筒状に成形した。個々の岩石に対して4個の試料を用意し、異なる時間別々に反応させた。反応時間は、1週間、2週間および4週間とした。実験中はオープン内を40℃に保持し、超臨界CO<sub>2</sub>で10 MPaに加压維持した。次に、反応後の試料に対して、超臨界CO<sub>2</sub>シール圧測定システムを用いて浸透実験を行った。室温、大気圧下での浸透率測定に引き続き、10 MPa、40℃の条件下で段階昇圧法によりスレッシュホールド圧を測定した。

今回の実験により、水理特性に及ぼす地化学反応の影響が岩石種によって全く異なることが確認された。すなわち、浪花層泥岩、大原層泥岩および灰爪層石灰質貝屑砂岩は4週間の反応でほとんど変化がみられなかったが、その他の岩石では、反応時間の経過と共に、浸透率が増加し、スレッシュホールド圧が減少した。実際には、一志層泥岩と五日町層群泥灰岩では反応後にクラックが形成していたため、これらの岩石の水理学的変化は地化学反応に起因したものではない。一方で、大泊有孔虫砂岩では、比較的多量に含まれる炭酸塩鉱物がCO<sub>2</sub>溶解水中で溶解した結果、シール性能が低下したと考えられる。ここでは、同じ石灰質の灰爪層石灰質貝屑砂岩では水理特性が変化しなかった点が注目される。この理由として、灰爪層石灰質貝屑砂岩では炭酸塩が流路と接していなかったため、炭酸塩とCO<sub>2</sub>溶解水の反応が進行しなかったことが予想される。発表では、溶出した化学成分と細孔径分布の変化データも併せた形で、地化学反応と水理特性の関係を議論する予定である。

キーワード：CO<sub>2</sub>地中貯留、遮蔽性能、地化学反応、炭酸塩鉱物、キャップロック、スレッシュホールド圧

Keywords: Geologic CO<sub>2</sub> storage, Sealing performance, Geochemical reaction, Carbonate minerals, Caprock, Threshold pressure

## An option for marine monitoring at offshore CO<sub>2</sub> storage sites: observing pCO<sub>2</sub> in the sea

\*内本 圭亮<sup>1</sup>、中村 孝道<sup>1</sup>、西村 真<sup>1</sup>、薛 自求<sup>1</sup>

\*Keisuke Uchimoto<sup>1</sup>, Takamichi Nakamura<sup>1</sup>, Makoto Nishimura<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>1</sup>

1. 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture and storage (CCS) is a promising option to reduce CO<sub>2</sub> emissions and consequently to mitigate global warming. Since reservoirs capable of storing CO<sub>2</sub> stably are selected, the risk of CO<sub>2</sub> leakage is extremely low. There is, however, concern that CO<sub>2</sub> might leak out. To verify that CO<sub>2</sub> is not leaking, as well as to detect CO<sub>2</sub> leakage if leakage occurs, monitoring is important. In offshore storage, since leaked CO<sub>2</sub> would go out into the sea out of the seabed, monitoring in the sea is necessary. However, there seems to be no monitoring method that is useful in all sea areas or for all situations. In the practical monitoring, it is necessary to combine a few methods according to the situation and the sea area. Partial pressure of CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) in the sea is one of items to monitor since pCO<sub>2</sub> in the sea would increase by leaked CO<sub>2</sub>. However, it is difficult to distinguish high pCO<sub>2</sub> values due to CO<sub>2</sub> leakage from those due to natural variability in some areas. In the present study, we discuss a method to assess anomalously high values of pCO<sub>2</sub> using not only pCO<sub>2</sub> but also dissolved oxygen. As an example, we analyzed data observed in Osaka Bay. We have shown that the method using both pCO<sub>2</sub> and DO is effective in the eastern (innermost) part, where stratification is relatively strong throughout the year. However, the method is less effective in the western part of Osaka Bay, where water is relatively well mixed vertically due to strong tidal currents. We have concluded that observing pCO<sub>2</sub> and assessing it based on both pCO<sub>2</sub> and DO is potentially a useful option for marine monitoring although this method is not effective in all sea areas.

キーワード：海底下貯留、CCS、二酸化炭素分圧、溶存酸素、海域モニタリング

Keywords: offshore storage, CCS, partial pressure of CO<sub>2</sub>, dissolved oxygen, marine monitoring