

HRE031-01

会場:303

時間:5月24日 08:30-08:45

大気CCS:遠隔地未利用エネルギー活用による温暖化防止ジオエンジニアリング Air-CCS: Climate geoengineering in use of untapped natural energy in remote regions

小出 仁^{1*}

Hitoshi Koide^{1*}

¹産総研

¹AIST

2011年1月一般教書演説で、オバマ米大統領は「今はスプートニクの時-現代のアポロ計画クリーンエネルギー技術開発でアメリカの競争力を強化しよう」と呼びかけました。「CO₂回収・貯留(CCS)の小さな一歩は、人類の大きな飛躍」と言われ、地球温暖化防止は「世界の最重要技術課題」ともされています。その一方で、CO₂回収・貯留(CCS)技術には、様々な方面から根強い反感があります。後始末技術の宿命で、「可能なら無い方が良い」と思われているために、厳しい見方をされる傾向もありますが、安全性と経済性が厳しく問われています。その中でも、CCSに対しては、特に長期安全性とエネルギーペナルティ(CCSのために余分に消費するエネルギー)が問題にされます。そのため長期安全性と省エネルギーがCCSの主要な技術開発課題になります。

ここでは、従来の視点を若干変えて、長期安全性とエネルギーペナルティの両方を比較的容易に克服できるジオエンジニアリング-遠隔地(僻地)における大気CCS-を提案します。それは遠隔地(僻地)における大気CCS技術の適用です。現代世界の問題の一つである都市への人口・経済活動集中のため、エネルギー需要が都市域近くに集中し、したがってCO₂排出源も都市域近くに集中しています。エネルギー需要が都市域近くに集中するために、都市域から遠い遠隔地(僻地)の自然エネルギーは利用されずに残されがちです。遠隔地(僻地)の大部分は、海洋や極地・高緯度地域・高標高地域や沙漠で、CO₂シンクとして適した地域ですが、人口は少なく、産業もほとんど無いので、エネルギー需要は無く、CO₂排出源もほとんどありません。

CO₂がほとんど無ければ、通常CO₂回収・貯留(CCS)技術は成り立ちません。遠方の大規模CO₂排出源から大量のCO₂を遠隔地に運ぶには、長大なCO₂パイプラインやCO₂タンカーに巨額のインフラストラクチャー投資が必要で、輸送エネルギー・ロスも大きくなります。しかし、遠隔地にも大気があるので、大気中からCO₂を回収すれば、CO₂回収・貯留(CCS)が成立します。化石燃料の燃焼排ガスからCO₂を回収する通常CO₂回収・貯留(CCS)と区別して、大気CO₂回収・貯留(大気CCS)と呼ぶことにします。ただし、大気中のCO₂濃度は、約390ppmと薄いので、CO₂を回収するには余剰なエネルギーが必要です。CO₂回収や、CO₂地下注入に必要なエネルギーは、遠隔地に残されている未利用の自然エネルギー(風力、太陽光、太陽熱、地熱、天然ガスなど)を利用します。大気CCSのエネルギー・ペナルティを、活用されていない自然エネルギーで補填できます。

極地(南極など)・高緯度地域(シベリア・カナダ・アラスカなど)・高標高地域(チベット高原など)の地下約300mより深い帯水層や、約300mより深い海洋底の下の岩石層にCO₂を貯留すれば、CO₂ハイドレートによるシール層が形成される(“自己シーリング”)ため、CO₂漏洩がほとんど無く、また余剰CO₂をすべて収容するに十分な容量があります。大気CCSは、究極的な温室効果ガス削減オプションになります。

キーワード: ジオエンジニアリング, CCS, 二酸化炭素, 温室効果ガス削減, 自然エネルギー, 地球温暖化

Keywords: geoengineering, CCS, carbon dioxide, greenhouse gas mitigation, natural energy, global warming

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



HRE031-02

会場:303

時間:5月24日 08:45-09:00

CO₂ 地中貯留リスクアセスメントツールの構築 Development of Risk Assessment Tool for CO₂ Geological Storage

田中 敦子^{1*}, 坂本靖英¹, 駒井武¹

Atsuko Tanaka^{1*}, Yasuhide Sakamoto¹, Takeshi Komai¹

¹ (独) 産業技術総合研究所

¹ AIST

本ポスターでは、まず CO₂ 地中貯留に関する多様なリスクの概念を整理して示した上で、我々が開発中の CO₂ 地中貯留リスク評価システムを紹介する。我々のリスク評価システムは、ハザード評価部、CO₂ 移動評価部、およびリスク評価部で構成される物である。比較的浅い層のフラクチャや断層を通じた CO₂ 移動量を見積り、地表付近への滲出の影響を評価する。我々の取り組みは、意思決定に役立つリスクの定量化表現を行い、CO₂ 地中貯留の法規上の取扱に関連する安全・リスクマネジメントを支援することにある。

キーワード: CO₂ 地中貯留, リスク評価システム, 影響評価, CO₂ 回収貯留

Keywords: CCS, CO₂ geological storage, risk assessment system, impact evaluation

HRE031-03

会場:303

時間:5月24日 09:00-09:15

深部帯水層に注入されたCO₂の長期挙動に対するシール特性の影響検討シミュレーション

Simulation of the Effects of Seal Properties on the Long-term Behavior of CO₂ Injected Into a Deep Saline Aquifer

加野 友紀^{1*}, 石戸 経士¹
Yuki Kano^{1*}, Tsuneo Ishido¹

¹産総研 地質調査総合センター
¹GSJ/AIST

CO₂ 地中貯留は地球温暖化を抑制するための早期対策技術として考えられている。CO₂ の貯留層には枯渇油ガス田や不採掘炭層、塩水帯水層等が挙げられ、国内及び国際的に試験・実証プロジェクトが行われている。我が国では背斜構造を持たない帯水層（一般帯水層と称する）において、水溶性天然ガスが長期に渡って貯留されていることが知られており、貯留ポテンシャルの観点からも一般帯水層におけるCO₂の地中貯留が検討されてきた。

背斜構造が存在しない場合においても、上部層の高遮蔽性がCO₂ プルームの広がりに対し十分連続性を有する場合、圧入層内に全てのCO₂を貯留することが可能であると考えられる。他方、圧入層直上の地層単層での遮蔽性が十分でない場合、長期においてはCO₂ プルームの一部が上部層を通り抜けて地層内を上昇する可能性がある。この時、我が国に広く分布する砂泥互層のように帯水層と遮蔽層が鉛直方向に交互に分布する場合、CO₂には複層によるトラッピング効果及び溶解・残留ガストラッピングメカニズムが働くと考えられる。筆者らはこれまでに帯水層へ圧入されたCO₂の長期挙動シミュレーションと主要パラメータに関する感度解析を行い、遮蔽層が単層では遮蔽性が十分でない場合においても互層構造によりCO₂を浅部に到達させることなく貯留できる可能性を示した。

これまでの研究では、この遮蔽性が十分でない層の浸透率を均質多孔質として比較的大きな値を与えてきたが、実際には、難透水の泥岩の水平方向の連続性が十分でなかったり、フラクチャーが存在する状況が考えられる。このような場合、マクロに平均化した浸透率は同等でもCO₂が砂岩から成るバスに集中することにより流動挙動が大きく異なる可能性がある。今回は、フラクチャー岩体を表現するためのダブルポロシティモデルをシール層に適用し、シール層の岩石特性がCO₂の長期挙動にもたらす影響を検討した。

シミュレーションで使用した二次元モデルは、水平方向に40 km、鉛直方向に2 kmの領域を対象とし、上端には温度15℃、圧力0.1 MPaの地表条件を設定した。最上部の300 mには未固結堆積物が分布し、その下に砂泥互層が分布する。水の相対浸透率はvan Genuchten型、CO₂の相対浸透率はCorey型で表されるものとした。また、毛管圧はvan Genuchten型を選択した。CO₂は深度950 mから1000 mに50年間圧入されるものとし、そのレートは2次元モデルの面と垂直方向の厚さを1 kmとした場合に年間100万トン相当となるよう設定した。

このモデルを使用して、圧入期間の50年間及びその後1000年間におけるCO₂ プルームの広がりや地層水への溶解量等に関するシミュレーションを行った。このシミュレーションにより、泥岩層の連続性が十分でなく比較的大きな浸透率(1 mD)を有する遮蔽層を想定して、多孔質媒質とした場合とダブルポロシティ媒質とした場合の、長期挙動の差異を検討した。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。

キーワード: CO₂ 地中貯留, 塩水帯水層, 砂泥互層, ダブルポロシティモデル, 数値シミュレーション

Keywords: Geological storage of CO₂, Saline aquifer, alternating layers, double porosity model, numerical simulation

HRE031-04

会場:303

時間:5月24日 09:15-09:30

弾性波アクロスと地震計アレーによる CO₂ 地中貯留の長期連続監視法・その II Semi-permanent continuous monitoring of the CO₂ sequestration zone using Seismic ACROSS and multi-geophones Part II

羽佐田 葉子^{1*}, 笠原 順三², 鶴我 佳代子³
Yoko Hasada^{1*}, Junzo Kasahara², Kayoko Tsuruga³

¹ 大和探査技術株式会社, ² 静岡大学理学部, ³ 東京海洋大学

¹Daiwa Exploration & Consulting Co., Ltd., ²Shizuoka University, ³Tokyo Univ. Marine Sci. and Tech.

気候変動の要因として CO₂ があげられる。CO₂ 削減の方法として CO₂ の地中貯留がある。CO₂ の地中貯留 (CCS) では、地中貯留した CO₂ 溶解水の状態を監視することが安全性の上で重要である。CCS や石油・天然ガスの貯留層の時間変化を地震波を用いてモニタリングするためには、計測システムの長期にわたる安定性が重要となる。本発表では、弾性波アクロスを用いて貯留層の時間変化を監視することを目的としたシミュレーションについて報告する。弾性波アクロスでは、精密に制御した地震波を長期間安定して発生させることができるため、対象の時間変化を監視するのに適している。これまでに、主に 2 次元のシミュレーションによって、弾性波アクロスによるモニタリングの可能性を検討してきた。しかし、地震波マイグレーション処理においても 3 次元的構造が結果に著しい影響を与えるので、この手法の有効性を定量的に評価するためには、3 次元の波動場計算を含むより現実的なシミュレーションが必要である。今回小規模ではあるが 3 次元でのシミュレーションを行い送受信点配置などの影響を検討した。

東西と南北に各 700m、深さ 350m の地質構造モデルを用いて、地下 110m に 10m の立方体状の低速度域が出現した場合のシミュレーションを行った。震源は 1 点で、受信点は数十点を地表に配置する。震源は地表に設置したアクロス震源を想定して鉛直または水平の単一力とし、震源時間関数は中心周波数 15Hz の Ricker wavelet とした。波動場の計算には有限差分法 (Larsen and Schultz, 1995) を用いた。まず低速度域がない場合とある場合で波動場計算を行い、受信点で得られる地動速度の受信波形をそれぞれ計算した。次に、変化前後の受信波形の差分を計算し、変位に変換したものを、震源波形として受信点から逆伝搬させた。逆伝搬の波動場の振幅などによって変化域のイメージングを行った。イメージングには、地動速度ベクトル場の大きさ及び発散の絶対値を用い、時間に対して絶対値の最大値をとるか、あるいは二乗平均平方根を求めてその値が大きい場所が時間変化の起きた場所とみなす。

差分波形の Time Reversal 手法 (逆伝搬) により、変化域のイメージングを試みた。受信点の変化域を取り囲んでいない場合は、変化域を明確にイメージングすることができなかった。表層に低速の堆積層がある場合にもイメージの解像度が劣化することが分かった。堆積層中の波長が短くなるのが影響していると考えられる。監視対象と受信点の配置については、地質構造に応じて最適な配置を考える必要がある。また、イメージングの際に用いる値については、今回の結果では地動速度の大きさの二乗平均平方根を用いたものが最もよく変化域を表しているように見えた。

これらのシミュレーションから、対象となる箇所において適切な地質構造モデルを与えられれば、どのような送受信点配置でどの程度の変化が検出できるかを評価できることが分かった。時間変化の検出可能性に影響を与える要因としては、送受信点配置と波長との関係の他、変化域の空間的広がりや深度、物性変化の規模などによる変化の大きさと測定における SN 比との関係が重要項目となる。実際の評価には各項目についての詳細な検討が必要である。

キーワード: CCS, CO₂ 地中貯留, タイムラプス, 弾性波アクロス, 逆伝搬

Keywords: CCS, CO₂ sequestration, time lapse, ACROSS, back propagation, time reversal

HRE031-05

会場:303

時間:5月24日 09:30-09:45

玄武岩を用いた水 - 岩石 - 二酸化炭素反応の解析と応用 application and analysis of water-rock-carbon dioxide reaction using basalt

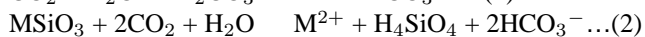
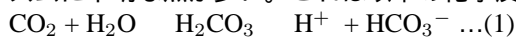
片山 智弘^{1*}, 鹿園 直建¹, 高谷 雄太郎², 加藤 泰浩²

Tomohiro Katayama^{1*}, Naotatsu Shikazono¹, Yutaro Takaya², Yasuhiro Kato²

¹慶應義塾大学大学院, ²東京大学大学院

¹Graduate School, Keio University, ²Graduate School, University of Tokyo

反応系内に水と岩石と二酸化炭素が存在している反応(以下、水 - 岩石 - CO₂ 反応と呼ぶ。)は反応速度や溶解メカニズムに不明な点が多い。これは以下の化学反応系列で表せる。



M は二価の金属

これは(1)~(3)の化学反応からなっている。(1)は水への二酸化炭素の溶解反応、(2)は水、岩石、二酸化炭素が反応し、炭酸水素イオンと金属イオンが生成する反応である。そして、系内でそれらが過飽和になることで二次反応にて(3)が起こり、炭酸塩鉱物が生成するというものである。この反応は近年注目を集めている。以下3つの分野に分けて説明する。

二酸化炭素地中貯留

近年地球温暖化対策の1つとして二酸化炭素を大量に貯留できる二酸化炭素地中貯留が注目されている。これは工場などの大規模排出源から排出された二酸化炭素をパイプラインで輸送して、地下1000mに圧入するというものである。

しかし、この技術は安全性をさらに深く検討する必要がある。特に圧入した地下挙動に不明な点が多く、地表から漏洩しないかどうかや二酸化炭素が固定される貯留時間についても地下の岩石と地下水、圧入する二酸化炭素の反応を考えて推定してゆく必要がある。

始生代の古環境復元

太陽輝度は現在よりも低かったにも関わらず、気温は現在よりも高かった。これは一般的には温室効果ガスである二酸化炭素濃度が現在よりも高かったからであるといわれている。

しかし、二酸化炭素濃度推定値は大きく幅があり、動的平衡論か化学平衡論かアプローチが変えることで10⁻¹⁰-3.5気圧となっている。高二酸化炭素分圧下での溶解・沈殿反応速度、メカニズムに関する推定研究が不可欠であるが、これらの研究はほとんどされていない(鹿園, 2007)。

これらから古海水と海嶺と大気中の二酸化炭素のシミュレーションを通して始生代の二酸化炭素濃度の推定を行う。

その他の分野

地球化学的な視点から水へ二酸化炭素と玄武岩を添加することにより、ミネラルウォーターの生成を試みた研究(五味, 2009)があり、二酸化炭素の圧力を高くして添加すると、おいしい水の指標と健康にいい指標を満たすことも確認している。

しかし、実際の反応は非常に複雑であるので、よりメカニズムを考えてゆく必要性や、再現性を統計的な見地からもより検討する余地がある。

また、水圏、岩石圏、大気圏の移動量フラックスを考える際にも水と岩石と二酸化炭素(大気)反応を考えることは有用である。

物質循環の研究は柏木(2003)などさかんに行われているが、理論計算がメインになっており、実際に溶解実験を通して、この反応の反応速度やメカニズムを検討することでより正確なフラックスの推定に役立てることが出来ると考えられる。

これらの検討をすべく、溶解実験を行うには母岩の選定が重要であるが、本研究では玄武岩を用いた。これは先行研究が少ないことや二酸化炭素地中貯留に炭酸塩の生成に重要な二価の金属イオン(Fe, Mg, Ca)を豊富に含んでいることや中央海嶺は主に玄武岩でできていることからである。

以上より、玄武岩を用いて水 - 岩石 - 二酸化炭素反応の溶解反応速度と溶解メカニズムを解析し、上記の分野に応

用することが本研究の目的である。

キーワード: 玄武岩, 水 - 岩石反応, 二酸化炭素地中貯留, 溶解反応速度定数, シミュレーション
Keywords: basalt, water-rock reaction, CCS, the dissolution rate constant, simulation

HRE031-06

会場:303

時間:5月24日 09:45-10:00

本邦グリーンタフ地域における CO₂ 貯留実現へ向けた実験的研究 Experimental study for the CO₂ geological storage in Green-Tuff Region in Japan

高谷 雄太郎^{1*}, 中村 謙太郎², 加藤 泰浩¹
Yutaro Takaya^{1*}, Kentaro Nakamura², Yasuhiro Kato¹

¹ 東大・工・システム創成, ² 海洋研究開発機構
¹ Sys. Innovation, Univ. of Tokyo, ² PEL, JAMSTEC

近年, CO₂ 地中帯水層貯留の長期安全性を規定するメカニズムとして地化学トラッピングの重要性が強く認識されるようになった。特に, 地化学トラッピングを有効に利用することのできる地層として Ca や Mg, Fe といった 2 価のカチオンに富む玄武岩層に注目が集っている。筆者らも, CO₂ 玄武岩質帯水層貯留の実現可能性を検討するため玄武岩質岩石を用いた実験的研究を行ってきた。本研究では国内における CO₂ 貯留の大規模な実施を目指し, 本邦のグリーンタフ地域に注目した。グリーンタフは日本海側から北海道東部にかけて広範囲に亘って分布するだけでなく, 凝灰岩であり比較的透水率や間隙率が高いため貯留岩層としては非常に有利な特性を持つ。また, 安山岩質であり K や Mg, Fe といった元素を比較的多く含むため, 地化学トラッピング (鉱物トラッピング) の進行に伴う貯留の長期的安全性の向上も期待される。さらに, 本邦のグリーンタフ地域に存在する帯水層は基本的に, 一部の温泉利用などを除いて経済的利用価値のない塩水性帯水層であるため, 淡水資源を脅かすといった社会的な問題を引き起こす可能性も低い。

著者らは, 貯留候補地の一候補として東北日本のグリーンタフ地域の津川 会津地域の津川層を選定し, 津川層上部の福取緑色凝灰岩部層模式地よりグリーンタフ岩石試料を採取した。そして, 岩石の物理・化学的特性を調べるとともに, 貯留層内における CO₂ の長期的な挙動を予測するため, 本岩石試料を用いて CO₂ 水 岩石反応実験を行った。本発表では, 反応実験により求められた溶解速度から, 長期的な CO₂ 固定効率の予測を行うとともに, グリーンタフ地域における大まかな CO₂ 貯留ポテンシャルについても議論する。

キーワード: CCS, 二酸化炭素地中貯留, 水 岩石反応, グリーンタフ

Keywords: CCS, CO₂ geological storage, water-rock interaction, Green-Tuff

HRE031-07

会場:303

時間:5月24日 10:00-10:15

HCO₃⁻の無機固定によって発生するCO₂の天然再固定：石灰質砂岩構成相のSr, OおよびC同位体による考察

Inorganic precipitations of marine carbonate in sandstone do not release CO₂ outside: Evidence from Sr, O and C isotopes

南 雅代¹, 田中 剛^{4*}, 竹内 誠², 三戸彩絵子³

Minami Masayo¹, Tsuyoshi Tanaka^{4*}, Takeuchi Makoto², Mito Saeko³

¹名古屋大学年代測定総合研究センター, ²名古屋大学大学院環境学研究科, ³地球環境産業技術研究機構 (RITE), ⁴名大年代センター・地球環境産業技術研究

¹Center for Chronological Res. Nagoya Uni, ²Earth and Environmental Sci. Nagoya Univ, ³RITE, ⁴CCR Nagoya Univ. and RITE

自然界における元素の地球化学サイクルを利用して人為起源の二酸化炭素や大気中の二酸化炭素を吸収・固定する様々な試みがなされている。そこでの問題のひとつは、HCO₃⁻を無機化学的にCa²⁺と結びつけ、CaCO₃として沈殿させると、化学反応式からは当量のCO₂が解離する事である。更には、解離したCO₂がHCO₃⁻として再度水に溶解するならH⁺が生じ、溶液が酸性化し、その後にCO₂が溶けにくくなるであろう事も問題となる。これを補うのは、ケイ酸塩鉱物の分解(風化)反応と考えられるが、風化反応が起こる場所と反応時間の長さが問題とされる。演者らは、海水からのCaCO₃無機固定とケイ酸塩の分解が同一場所で同時におこったと考えられる地質事象を見いだした。

南部北上山地は日本列島における三畳系の模式地の一つとして古くから研究されてきた。稲井層群下部の平磯層には、斜交層理の発達した石灰質砂岩が広く分布し、上部外浜から沿岸州域での堆積物とされている。またこの時期は、高温・乾燥気候であったとされている。一方、海洋中での⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比は、全地球的に時代ごとに均質で、年代環境指標の一つとして用いられる。三畳紀の海水は0.7074に始まり0.7082へと急上昇、末期には0.7075近くへ下がったと考えられている。従って、平磯層が堆積した三畳紀前期における海水の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比は、0.7074から0.7080付近(急激に上昇)と考えられる。また、当時の海成石灰岩のδ¹⁸O SMOW, δ¹³C PDBは、それぞれ25-30パーミル、-2パーミル程と考えられている。

平磯層の分布する宮城県南三陸町館浜および浪板から石灰質砂岩2試料を採集した。灰色の均質な岩石で、モードの約25%が石英、25%が斜長石、10%がカリ長石、20%が岩石片で、残り20%が炭酸塩鉱物から構成されている。炭酸塩は、碎屑粒子の間隙を埋めたり、碎屑粒子を置換している。斜長石は全体的に粘土化の変質を受けている。岩石試料を粉碎の後2.4規定の塩酸に一晩浸し、炭酸塩部分のみを溶出させた。また、溶出残渣(ケイ酸塩部分)も回収し、名古屋大学で元素の定量と各種同位体の分析を行った。以下の値は、放射壊変補正を行っていない値である。

炭酸塩部分の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比は、館浜で0.7061、浪板で0.7074と当時の海水の値より大幅に低い事がわかった。両地点の岩石試料は、海岸近くで採集され、現海水の影響を受けている事も考えられるが、現海水の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比は、0.7092と高く、傾向は逆である。館浜と浪板のδ¹³C PDBは、それぞれ1パーミル、1.6パーミルであったが、δ¹⁸O SMOWは、15パーミル、17パーミルと当時の海成石灰岩より大きく低い値を示した。一方、抽出残渣(ケイ酸塩部分)の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比は、0.7058(館浜)、0.7060(浪板)と低い値を示した。平磯層の基底には、中性?塩基性の火山岩片が多く含まれ、稲井層群全体としても長石質である。中性?塩基性の火山岩が原岩であると考えられる。低い⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比は、長石類の値が反映されたものと考えられる。

以上の事から、平磯層下部の石灰質砂岩は、三畳紀の乾燥した地域の浅海で、砂層中に浸入した海水の蒸発により無機的に生じた炭酸塩と、それにより発生した二酸化炭素(重炭酸)と砂層中ケイ酸塩鉱物のその場反応により形成された炭酸塩が混合したものと考えられる。海水から沈殿した炭酸塩の同位体比は、0.7075-0.7080(当時の海水の値)、長石や輝石などとその場反応で生じた炭酸塩は0.7058-0.7060(現在のケイ酸塩部分の値)、石灰質砂岩中の炭酸塩は両者が混合した結果、0.7061(館浜)0.7074(浪板)と海水とケイ酸塩の中間的な⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比を持つに至ったのではあるまいか。この事は、炭酸塩部分のδ¹³Cが海水と変わらないものの、δ¹⁸O SMOWが、15?17パーミルと当時の海成石灰岩より低く、ケイ酸塩の値(0?10パーミル)との中間にある事からも支持される。

この推測が正しいとすれば、その場同時反応がいかに起こったのか、サブカなどでその観察が出来ないか、この石灰質砂岩アナログで見られる鉱物との反応の難易を室内実験結果といかに結びつけるか、などが今後の課題であろう。

キーワード: 二酸化炭素, 地層固定, ストロンチウム同位体, 酸素同位体, 炭素同位体, 石灰質砂岩

Keywords: carbon dioxide, geological storage, Sr isotope, O isotope, C isotope, calcareous sandstone

HRE031-08

会場:303

時間:5月24日 10:15-10:30

日本における二酸化炭素地中貯留の地質学的課題と対応 A solution to CO₂ geological storage problems in Japan

平松 晋一^{1*}, 大岡 政雄¹, 亀谷 裕志¹, 竹島 淳也¹, 東 宏幸¹

Shinichi Hiramatsu^{1*}, masao Ohoka¹, Hiroshi Kameya¹, Junya Takeshima¹, Hiroyuki Azuma¹

¹ 応用地質株式会社 エネルギー事業部

¹Oyo corporation, Energy business divisio

日本列島は、太平洋プレートやフィリピン海プレートが潜り込むサブダクションゾーンのフロントに位置するため、地質構造が複雑であり断層や褶曲構造が発達している。一方、欧米の主要な地域は安定地殻であり、長期にわたって大きな構造運動を受けていないため、地質構造は比較的単調であり、断層や地層の変形は少ない。すなわち、日本と欧米では、基本的な地質構造の骨格が異なるため、CO₂ 地中貯留の対象となる地層の地質年代、水理特性、力学特性等も大きく異なることが予想される。

日本の長岡プロジェクトでは、第四紀前期更新世の灰爪層を貯留層としている。このように、現在、日本で検討されている CO₂ 地中貯留の適地は、主に新生代の第四紀前期更新世～新第三紀鮮新世の比較的新しい時代の堆積盆に限られる。一方、欧米各国で実施または計画されている CCS プロジェクトの多くは、中生代から古生代後期の岩盤が対象となっている。すなわち、日本においては、より新しい時代の“軟質な”地層に CO₂ を貯留することになることから、以下に示すような日本特有の地質学的課題や潜在的な地質リスクが存在すると考えられる。

- 1) 遮蔽層が軟質であることによる浸透ないし変形による CO₂ の漏洩の問題。
- 2) 貯留層が不均質であることによる CO₂ の挙動の不確実性の問題。
- 3) 新しい時代の地層を切るあるいは変形させている活断層の取り扱いの問題。
- 4) 堆積盆一箇所あたりのポテンシャルが小さい。

これらの地質学的課題は、日本の CCS 事業で見込まれる貯留ポテンシャルの評価に大きく影響してくるばかりでなく、貯留した CO₂ の漏洩や誘発地震の懸念など、CCS 事業の安全性にかかわる。これらの課題を解決するためのアプローチとして、我々は次のような研究を行っている。

- a) 軟質なシール層の力学的安定性（シール層の変形）
- b) 軟質なシール層の浸透性（エントリープレッシャー）
- c) サイスマミックインバージョン及びロックフィジックスを用いた互層状の貯留層のモデリング

我々は、このような日本の地質学的課題を解決していくことで、日本固有のいわゆる「日本型 CCS」の構築をめざして行きたいと考えている。

キーワード: 二酸化炭素帯水層貯留, 日本型 CCS, 軟質地盤, 力学的安定性, 遮蔽性能, サイスマミックインバージョン

Keywords: CO₂ aquifer storage, Japan-type CCS, Soft seal formation, Mechanical stability, Capillary sealing efficiency, Seismic inversion

HRE031-09

会場:303

時間:5月24日 10:45-11:00

産総研における地中貯留研究の取り組みについて On the Geological Storage Research at AIST

中尾 信典^{1*}, 當舎 利行¹

Shinsuke Nakao^{1*}, Toshiyuki Tosha¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ AIST

CO₂ 地中貯留において、CO₂ の安全かつ長期間にわたる貯留を保証するための技術を開発し、早期の実用化に寄与すること、さらに、共通・汎用性の高い技術基盤を確立することを目標として、産総研では CO₂ 地中貯留研究に取り組んでいる。ここでは、その概要を報告する。

平成 22 年度は、複合モニタリング技術の開発、長期挙動予測シミュレーションモデルの高精度化、及び砂泥互層における CO₂ 流動評価手法の開発を主な研究テーマとして取り組んだ。複数の物理探査手法を組み合わせた効率的なモニタリング技術の開発に向けては、150m の坑井を掘削して約 2t の二酸化炭素を圧入し、反射法地震探査と比抵抗探査によるモニタリングを実施し解析技術を検討した。CO₂ の長期挙動予測に不可欠である地下モデルの作成や精緻化を支援する技術としては、MT (地磁気地電流) 法での観測結果をシミュレーションモデルに取り入れるための変換プログラムを整備するとともに、人工岩石を用いた室内実験等により二酸化炭素シール性能評価のための基礎データを取得した。

また、米国エネルギー省傘下の国立研究所と安全性評価に関連した共同研究をスタートさせた。低コストモニタリング技術の開発についてはロスアラモス国立研と、ジオメカニクスを考慮したモデリング手法の開発についてはローレンスバークレー国立研と協力して取り組む。ここでは反射法地震探査を補完するコスト効率の良いモニタリング技術の活用を検討し、効率的に組み合わせることで実規模でのコスト効率の良いモニタリング技術の開発と、長期挙動予測のシミュレーションモデルにジオメカニクスを取り入れて地層の変形等の影響をモデル化する技術の開発を目指す。

本研究は、(財)地球環境産業技術研究機構が経済産業省から補助金の交付を受けた平成 22 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 (二酸化炭素貯留隔離技術研究開発) の一部として、また、米国研究機関との共同研究については、経済産業省からの委託研究“平成 22 年度二酸化炭素挙動予測手法開発事業”の一部として実施した。

Keywords: CCS, CO₂, Geological Storage, Modeling, Monitoring

HRE031-10

会場:303

時間:5月24日 11:00-11:15

二酸化炭素の小規模地中圧入実験 (2) An injection experiment with small amount of Carbon Dioxide(2)

當舎 利行^{1*}, 宮越 昭暢¹, 高倉 伸一¹, 稲崎 富士¹
Toshiyuki Toshi^{1*}, Akinobu Miyakoshi¹, Shinichi Takakura¹, Tomio INAZAKI¹

¹産総研

¹AIST

持続的な経済発展のため、化石燃料から排出される CO₂ を、地中に閉じ込めて大気への放出を抑制する CCS 技術の実用化が求められている。産総研地質ユニットでは、CCS における CO₂ 地中貯留技術の開発を進めており、圧入された CO₂ の地中内での挙動などの解明を進めるとともにモニタリングの研究も展開させている。

CO₂ 地中貯留におけるモニタリングでは、弾性波によるモニタリングが一般的に用いられてきていた。弾性波を用いた探査は、高解像度の探査結果が得られ、人工震源を用いる反射法地震探査では、気体や超臨界状態の CO₂ は塩水との間に大きな音響インピーダンスの差があることから、厚く CO₂ が貯留している地点では明瞭な反射波を検出や弾性波速度の低下の検出が期待できる。しかし、帯水層中 CO₂ の先端は、薄く広がり塩水中に溶けていることが予想されるため、検出感度が落ちる可能性がある。また、地表近くへ移行した CO₂ の検出に関しても同様なことが予想される。一方、比抵抗は、このような変化に対して敏感に反応することから CO₂ の先端部や地表近くの CO₂ を検出できる可能性がある。岩石実験の結果でも、CO₂ の圧入量に対して地震波速度は、当初減少はするものの、20%以上の CO₂ を圧入に対しては、ほとんど減少をしないことが示されている (Lei and Xue, 2009)。

このような弾性波の利点と比抵抗探査での優位性を現場実験で確認をして、双方の利点を合わせた解析方法を検討するため浅い帯水層に気体の CO₂ を圧入して地表にて反射法地震探査を電気探査による比抵抗調査を 2009 年度に産総研内の水位観測井を使用して行った (Tosha et al., 2010)。この実験では、45m 深度までケーシングが入り 47.5m 深度に目的とする帯水層が存在していたが、周囲に埋設物が多く、比抵抗調査ではこれらがおおきく影響をしていた。本年度は、同様の目的で新たな坑井を掘削して小規模地中貯留実験を北海道にて実施した。坑井は 150m まで掘削し、塩ビのケーシングを用いて比抵抗調査への影響を少なくした。2009 年度は坑底に温度計を設置して温度の連続観測を実施するとともに、CO₂ の圧入前後に温度検層を実施した (Miyakoshi et al., 2010) が、今年度も同様の調査を行った。本研究は、(財)地球環境産業技術研究機構が経済産業省から補助金の交付を受けた平成 22 年度「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 (二酸化炭素貯留隔離技術研究開発)」の一部として行った。

キーワード: CO₂, 地中貯留, 温暖化対策, モニタリング, 温度検層

Keywords: CO₂, geological storage, global warming, monitoring, temperature logging

HRE031-11

会場:303

時間:5月24日 11:15-11:30

頁岩のガス吸着特性 - 夾炭層 CO₂ 貯留に関する研究 - Gas adsorption capacity of shales -Study on geological CO₂ storage in coal-bearing formation-

島田 荘平^{1*}, 西入雄喜¹, 崎元 尚土¹, 大賀 光太郎²

SOHEI SHIMADA^{1*}, Yuki NISHIIRI¹, Naoto SAKIMOTO¹, Kotaro OHGA²

¹ 東京大学, ² 北海道大学

¹The University of Tokyo, ²Hokkaido University

CO₂ 地中貯留は CO₂ の大気放出を抑制する有効な方法と考えられており、その貯留方法や貯留後の安定性に関する研究が広範に実施されている。地中貯留の対象層や貯留方法は、EOR や ECBMR などの二次的生産物を回収できる方法や、深部塩水層（帯水層）が考えられている。特に後者は、世界の貯留可能量が大きいことが知られており、現在実行されている大規模な CO₂ 地中貯留プロジェクトは深部塩水層が多い。一方、ECBMR は、メタンの増進回収が見込まれるが、炭層条件が良くない場合は、CO₂ 注入による石炭マトリックスの膨張による浸透率低下の影響で大きな注入性が得られないなどの問題が知られている。

石炭層はその上下盤に比較して地層の厚さが薄く、メタンの増進回収という面が有効に利用されないと、その特徴を十分に発揮できない。一方、上下盤は石炭層に比較して一般に浸透率が小さく、それが CO₂-ECBMR のキャップロックとして作用しているのであるが、CO₂ 貯留という面から見ると、その堆積層の厚さから貯留量としては魅力的である。石炭層での ECBMR と夾炭層帯岩盤（帯水層）への CO₂ 溶解貯留という組み合わせも、CO₂ 地中貯留のひとつのオプションとして考えられる。

このような観点から、著者らは夾炭層への CO₂ 貯留と CBM 増進回収に関する研究を進めている。

夾炭層を形成する砂岩や頁岩は、これまで CO₂ 貯留という対象になっていなかったことから、石炭層のような CO₂ 貯留（固定）メカニズムに関しては関心がもたれなかった。岩石にも石炭と同じように吸着によって CO₂ が吸着されることは若干の報告がある。そこで、夾炭層を構成する頁岩の CO₂ および CH₄ の吸着量を測定した。

実験に使用した試料は 5 種で、夕張、美唄、釧路、Illinois の夾炭層から採取した頁岩と、米国ペンシルバニア州産の Gas Shale である。吸着量測定には定容法を用いた。測定温度は、35、50、圧力は大気圧から 9 MPa の範囲である。

測定した試料全てで、ある程度の CO₂ 吸着量が確認された、その値は広い範囲にあるが、最も吸着量の大きかった夕張頁岩では、35、5MPa で 14cc/g の吸着量を示した。この値は、中程度の CO₂ 吸着量を有する石炭の吸着量に相当する。CH₄ と CO₂ の吸着量比はどの試料も凡そ、1:2 であった。試料の細孔分布と吸着量の関係、元素分析と吸着量の関係を調べたが、今回の測定結果からは、はっきりした関係は求められなかった。

夾炭層岩石はガス吸着能があることから、夾炭層 CO₂ 貯留では、夾炭層岩石の空隙中への CO₂ 貯留の他に、吸着によるガス貯留も考慮する必要があることが示唆された。

キーワード: 頁岩, 夾炭層, CO₂, 地中貯留, 吸着, コールベッドメタン

Keywords: Shale, Coal-bearing formation, CO₂, Geological storage, Adsorption, Coalbed methane

HRE031-12

会場:303

時間:5月24日 11:30-11:45

夾炭層 CBM 増進回収 (ECBMR) 時のガス流動 - 夾炭層 CO₂ 貯留に関する研究 - Gas flow in ECBMR in coal-bearing formation - Study on CO₂ storage in coal-bearing formation-

島田 荘平^{1*}, 田中 啓¹, 西澤 領太¹
SOHEI SHIMADA^{1*}, Kei TANAKA¹, Ryota NISHIZAWA¹

¹ 東京大学

¹The University of Tokyo

CO₂ 地中貯留は CO₂ の大気放出を抑制する有効な方法と考えられており、その貯留方法や貯留後の安定性に関する研究が広範に実施されている。地中貯留の対象層や貯留方法は、EOR や ECBMR などの二次的生産物を回収できる方法や、深部塩水層 (帯水層) が考えられている。特に後者は、世界の貯留可能量が大きいことが知られており、現在実行されている大規模な CO₂ 地中貯留プロジェクトは深部塩水層が多い。一方、ECBMR は、メタンの増進回収が見込まれるが、炭層条件が良くない場合は、CO₂ 注入による石炭マトリックスの膨張による浸透率低下の影響で大きな注入性が得られないなどの問題が知られている。

石炭層はその上下盤に比較して地層の厚さが薄く、メタンの増進回収という面が有効に利用されないと、その特徴を十分に発揮できない。一方、上下盤は石炭層に比較して一般に浸透率が小さく、それが CO₂-ECBMR のキャップロックとして作用しているのであるが、CO₂ 貯留という面から見ると、その堆積層の厚さから貯留量としては魅力的である。石炭層での ECBMR と夾炭層帯岩盤 (帯水層) への CO₂ 溶解貯留という組み合わせも、CO₂ 地中貯留のひとつのオプションとして考えられる。

このような観点から、著者らは夾炭層への CO₂ 貯留と CBM 増進回収に関する研究を進めている。

筆者らはこれまで、CBM 増進回収のメタン生産と CO₂ 貯留を計算するシミュレータ (ECOMERS-UT) を開発している。夾炭層への CO₂ 貯留を計算するには、岩石中の CO₂ 貯留、特に帯水層の塩水への CO₂ 溶解等を考慮したシミュレータが必要である。現在、これらの要素を計算できるシミュレータ ECOMERS (CBF) -UT (Enhanced Coalbed Methane Recovery Simulator (for Coal-bearing Formation) ? The University of Tokyo) を開発中である。これまで、化学トラッピング以外の CO₂ トラッピング条件を組み込んだシミュレータを開発できている。その妥当性は、TOUGH2 などの市販のシミュレータとの比較計算により確認している。

石炭層 2 層 (上層および下層)、岩石層 1 層からなる簡単な地層モデルを対象に、ECOMERS (CBF) -UT を用い、夾炭層 ECBMR 時の CH₄ と CO₂ 流動および CBM 生産量、CO 固定量を計算した。計算では、岩石層の浸透率、岩石層の厚さ、CO₂ 注入量、生産井および注入井の配置などを変化させた。

その結果、夾炭層 CO₂ 貯留では、単一の ECBMR には見られない面白い現象が確認された。生産井からの CH₄ 生産量は、下層と上層 CH₄ 生産量の和となる場合があり、その値は複雑に変化する。岩石層の浸透率が大きい場合は、生産井方向に地層水が流れるため、CBM 生産を低下させる。これは、夾炭層 ECBMR の欠点といえる。一方、岩石層の浸透率が大きい場合は、岩石層への CO₂ 貯留が早い時期に大きくなる。この場合の CBM 生産量と CO₂ 固定量にはトレードオフの関係があり、その最適条件は、経済性評価などによって検討する必要がある。

キーワード: 夾炭層, CO₂, 地中貯留, CBM 増進回収, ガス流動, シミュレーション

Keywords: Coal-bearing formation, CO₂, Geological storage, Enhanced coalbed methane recovery, Gas flow, Simulation

HRE031-13

会場:303

時間:5月24日 11:45-12:00

地球惑星と工業的な高温炭酸ガス固定問題

Affairs of solidified carbon dioxides at high temperature on Earth planet and artificial industry

三浦 保範^{1*}

Yasunori Miura^{1*}

¹ 山口大学

¹ Yamaguchi University

本研究結果は次のようにまとめられる。

1. 地球温暖化は、地球惑星全体の現象である。人工的な炭酸ガス増加問題は、グローバル的な発想で対応しないと、局所的な考えの対応は結果的に効果的な地球惑星科学的な対応にならない。

2. 低温で生活している生命体の呼吸循環や地球上の海水中での炭酸ガスからの炭酸塩鉱物生成の循環反応は、比較的低温炭酸ガスの状態変化と固定化反応である。地球史の生命体（植物等）発生後の酸素発生と炭酸ガス減少はこのタイプの効果的な低温反応に基づく。

3. 産業革命以来の人工的な炭酸ガスの増加は、（石油石炭燃焼による）煙突や燃焼排気管からの高温炭酸ガス発生によるものであり、空中に放出したため状態変化しなかったことを示している。

4. 地球の比較的低温の自然大気（低温高温活動中）惑星に比べて、金星の高温炭酸ガスは、火山や隕石衝突による活動的な高温発生後状態変化せずにそのままになっている（高温活動中断中）惑星である。火星は低温炭酸ガスが現在では火山と海水経由の炭酸塩形成固化が止まり、極冠のドライアイス固化との状態変化をする（低温活動中）惑星である。大気がない月や小惑星の小天体は岩石固体以外しかないグローバル的な状態変化の活動停止をした（グローバル活動中止）天体である。

5. 地球での高温炭酸ガスの人工的（工業的）発生の増加は、金星的状况である。その発生した高温炭酸ガスの状態変化を利用して、気体の減少（状態変化により）することにより、地球温暖化防止だけでなく、将来金星の温度変化で活動継続が期待できる。

6. 工業的な炭酸ガス減少法は、筆者の提案（2007）したグローバルな高温直接固定発想が適切である。その意味で、それ以外は局所的で複雑思考のエネルギー浪費的で（科学的）バブル的手法であると考えられる。

キーワード: 高温炭酸ガス, 低温炭酸ガス, 地球惑星, 工業排気炭酸ガス, 状態変化, グローバル思考

Keywords: carbon dioxides at high temperature, carbon dioxides at low temperature, Earth planet, industrial gas, state change, global idea

HRE031-14

会場:303

時間:5月24日 12:00-12:15

CO₂ と水の置換による弾性波異向性の変化 Seismic anisotropy due to CO₂ replacing water

雷 興林^{1*}, 薛 自求²
Xinglin Lei^{1*}, Ziqiu Xue²

¹ 産業技術総合研究所, ² 地球環境産業技術研究機構

¹AIST, ²RITE

多孔質堆積貯留層は通常強い異向性を示す。CO₂ 注入後モニタリングにおいて弾性波探査による方法、特に弾性波トモグラフィは最も有効であることが分かっている。この場合、弾性波異向性を考慮した逆解析が重要であることが室内実験データを用いた解析結果で明らかになっている (Lei&Xue, 2009)。

この研究では、更に弾性波異向性も飽和度や間隙圧の関数であることに着目し、室内実験データに基づく弾性波異向性モデリングを行った。異向性の考慮により逆解析の精度が向上できるだけでなく、注入による間隙圧の拡散や CO₂ 飽和度の推測にも異向性が重要なデータとして利用できることを明らかにする。

「謝辞」本研究は、(財)地球環境産業技術研究機構が経済産業省から補助金の交付を受けた平成 22 年度「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 (二酸化炭素貯留隔離技術研究開発)」の一部として、行った。

参考文献:

Lei X.-L., Z. Xue, 2009. Ultrasonic velocity and attenuation during CO₂ injection into water-saturated porous sandstone: Measurements using difference seismic tomography. *Phys. Earth Planet. Inter.* 176, 224-234.

キーワード: CCS, 弾性波, 異向性, 室内実験

Keywords: CCS, Elastic wave, Anisotropy, Laboratory

HRE031-15

会場:303

時間:5月24日 12:15-12:30

CO₂ 状態モニタリング手法と岩石の物性 地震波速度異方性と比抵抗 Monitoring subsurface CO₂ condition by applying rock physics

西澤 修^{1*}, 山田 達也², 薛 自求¹

Osamu Nishizawa^{1*}, Tatsuya Yamada², Ziqiu Xue¹

¹ 財団法人地球環境産業技術研究機構, ² 京都大学大学院工学研究科

¹ Res. Inst. Innovative Tech. Earth (RITE), ² Graduate School Engineering, Kyoto Univ.

CO₂ 地中貯留の安定性を確かめるため、地下貯留サイトでの CO₂ 挙動の把握が重要である。貯留層の中の CO₂ は温度圧力条件に応じて、液体、気体、超臨界状態をとるが、これら状態が岩石物性の変化に及ぼす影響を明らかにすることは CO₂ 挙動把握の重要な手がかりとなる。

CO₂ 状態変化が岩石物性に及ぼす影響が大きいのは気体状態への変化が生じた場合である。CO₂ が気体状態になると、岩石の弾性波速度や比抵抗の値が大きく変化することが期待される。ここでは、シール作用をはたす泥岩（キャップロック）の地震波速度異方性と、貯留層となる砂岩の比抵抗に対し、気体状態 CO₂ がどの程度の効果を及ぼすか、実験結果やモデル計算をもとに考える。

泥岩には層状ケイ酸塩鉱物が選択配向したものがおり、このような岩石は地震波速度異方性を示す。また、泥岩では面構造が顕著で、面に平行に割れやすいため、微小クラックの面が平行に配列した構造でモデル化できる。つまり、鉱物の選択配向とクラックの選択配向とが重なった構造である。

岩石が上記のような微細構造を持つ場合、岩石の地震波速度異方性は横等方性 (transverse isotropy: TI) を示し、P 波、S 波（一般に振動方向に依存する二つの速度を持つ）の速度は軸と伝播方向との角度のみで決まる。

TI では軸方向以外の伝播方向で、振動方向が伝播方向に平行（P 波）あるいは垂直（S 波）でない波が現れ、それぞれ、擬似 P 波 (quasi P: qP)、擬似 S 波 (quasi S: qS) と呼ばれる。等方に平行に振動する S 波（Sh 波）は擬似 S 波にはならないが、これに直交して振動する S 波（Sv 波）は qS 波で振動方向は qP 波の振動方向と直交する（qSv 波と表記）。Sh 波と qSv 波の速度差から TI 異方性媒質の S 波スプリティングが求められる。

クラック中の流体が液体から気体に変化すると、Sh 波の速度は大きな影響を受けないが、qSv 波の速度は変化する。このため、クラック内流体が液体から気体に変化したとき、S 波スプリティングの大きさも変化する。

CO₂ が拡散する際、低圧側に広がれば空隙内の圧力低下のためクラック内の CO₂ が気体となることが予想され、その際の S 波スプリティングの大きさをモデル計算で求めることができる。この量は、岩石自身の異方性の大きさとクラック量、クラックの扁平度に関係しており、実際の岩石で予想される変化量は観測で検出することが可能な大きさである。この関係は CO₂ 貯留サイトでの CO₂ 挙動モニタリングに利用できるかもしれない。

いっぽう、砂岩の比抵抗では 100 ~ 0.01 Hz の低周波数側の電流・電圧の位相差に気体となった CO₂ の影響が現れる。低周波側での位相差は岩石・流体の界面に現れる電気二重層中のイオンが電界変化によって移動する際の緩和現象とする説がある。もし、水中の溶存 CO₂ が気体となって一部の空隙を満たした場合、気体を含む空隙が分布した岩石は CO₂ 溶存水で満たされた岩石に比べ、位相差に大きな影響が現れる。これにより、貯留層内でガス化した CO₂ の分布を調べる手がかりが得られるかもしれない。

キーワード: 二酸化炭素地中隔離, 岩石物性, 地震波速度, 異方性, 岩石比抵抗

Keywords: CCS, rock physics, seismic velocity, anisotropy, rock resistivity

HRE031-16

会場:303

時間:5月24日 12:30-12:45

CO₂ 挙動モニタリングに関わる drainage と imbibition における弾性波の走時と振幅の検討

Experimental study for CO₂ migration monitoring to estimate P-wave traveltimes and amplitudes by drainage and imbibition

坂下 晋^{1*}, 北村 圭吾¹, 信岡 大², 東 宏幸², 竹島 淳也², 斎藤 秀樹², 薛 自求¹

Susumu Sakashita^{1*}, Keigo Kitamura¹, Dai Nobuoka², Hiroyuki Azuma², Junya Takeshima², Hideki Saito², Ziqui Xue¹

¹ 地球環境産業技術研究機構, ² 応用地質株式会社

¹RITE, ²OYO corporation

1. はじめに

CO₂ 地中貯留において、地下深部の帯水層に圧入された CO₂ 挙動のモニタリングは重要な課題であり、現状物理探査および物理検層が有効な方法と考えられている。

日本国内では、新潟県長岡市において CO₂ 地中貯留実証実験が行われ、弾性波トモグラフィによる圧入前後の速度変化から CO₂ の分布範囲が推定された (Saito et al., 2006)。また、圧入後のモニタリングでは、物理検層による 5 年間の比抵抗変化から溶解トラップと残留ガストラップを伴う imbibition 様の状態が進行しているとされている (Mito and Xue, 2010)。

本研究では、多胡砂岩試料を用いた室内試験において、drainage(排水過程)と imbibition(吸水過程)における弾性波の走時と振幅の関係を検討し、各過程の開始や終了時の特徴を把握した。この結果を踏まえ、長岡での弾性波トモグラフィ測定データの drainage に対応する圧入前後および imbibition の可能性がある圧入後 5 年経過したデータの特徴を検討した。

2. 室内試験方法

室内試験は、Lei and Xue(2009)と同様に下記の方法で実施した。

直径 50mm、長さ 100mm の円柱状試料の対向する側面に、1MHz の卓越周波数を持つ P 波振動子を 8 個ずつ合計 16 個貼り付けた。パルスジェネレータから発生するパルス信号を、高速スイッチング回路を通じて順番に全ての振動子に送信し、発振振動子を除く全振動子による受振信号を A/D ボードを介して PC に収録した。200MHz のサンプリングレートで 200 回のスタッキングを行い、1 サイクル(ch1 から ch16 までの発振と受振)を約 2 分おきに実施した。

試験は、試料全体を一定の静水圧に保つ圧力容器とシリンジポンプ、試料の上下端で差圧により流体を注入する 2 つのシリンジポンプを用いて実施した。十分乾燥させた試料を封圧 12MPa、温度 40 度の圧力容器内に置き、まず、CO₂ 飽和水を試料上端から 0.5MPa の差圧で注入し、水飽和状態とした。次いで、超臨界 CO₂ を試料下端から 0.3MPa の差圧で注入した (drainage)。その後、CO₂ 飽和水を試料下端から drainage と同程度の圧力勾配と圧入レートとなるよう制御して注入した (imbibition)。drainage と imbibition において収録した波形のうち、波線が最短となる対向する振動子での初動走時および初動の振幅を読み取った。

3. 室内試験結果

drainage では、CO₂ の圧入量の増加に伴い走時の遅れと振幅の減少が認められ、imbibition では、走時と振幅の回復が認められた。いずれのチャンネルも走時変化が 10% 程度に対して、振幅変化は 70% 程度であった。drainage では、CO₂ のブレイクスルーに相当する走時遅れと振幅減少の開始時間は、走時より振幅の方がわずかに早かった。imbibition では、drainage と比較して、走時と振幅の変化は緩やかで、両者の変化の開始はどちらが先か不明瞭であった。一方、変化の終了は、走時が振幅より先に一定値を取る傾向が認められた。

4. 原位置試験

長岡での弾性波トモグラフィ測定は、CO₂ 圧入前 (BLS)、3,200t 圧入時 (MS1)、6,200t、8,900t、10,400t 圧入時 (MS2~MS4) および圧入後 9 カ月、33 カ月、69 カ月 (MS5~MS7) の合計 8 回実施している。これらのうち、特に圧入範囲付近を通る波線を用いて検討した。その結果、圧入時 (MS1, MS2) と圧入前 (BLS) との比較から、室内試験 drainage と同様に、走時より先に振幅が変化しているデータが確認できた。また、MS5~MS7 では走時の変化が認められず、振幅は一部回復傾向が認められるものの、明瞭な変化は認められなかった。

5. まとめと今後の課題

長岡では、圧入後 69 カ月 (5 年 9 カ月) 後の弾性波の走時および振幅に変化が認められなかった。この結果は貯留層内の CO₂ が安全に貯留されていることを示す。今後は、走時と振幅は緩やかに変化していくと推定されるため、走時に加えてより変化の大きい振幅も着目することが重要である。

HRE031-17

会場:303

時間:5月24日 14:15-14:30

長岡サイトにおけるCO₂貯留モニタリングのための繰り返し物理検層のデータ解析 Data analysis of time-lapse well logging results for the monitoring of stored CO₂ at the Nagaoka pilot site

中島 崇裕^{1*}, 薛自求¹, 三戸彩絵子¹
Takahiro Nakajima^{1*}, Ziqiu Xue¹, Saeko Mito¹

¹ (財)地球環境産業技術研究機構

¹RITE

CO₂ 地中貯留を安全に実施するためには、地中のCO₂の挙動をモニタリングする技術が必要不可欠である。長岡プロジェクトでは、CO₂ 圧入前から圧入後6年以上にわたってCO₂ 圧入井の周囲の観測井で、継続的に音波検層、中性子検層、インダクション検層が行われており、CO₂の挙動を把握するのに成功している(薛・松岡, 2008、Mito & Xue, 2010)。この結果から、どのようなメカニズムでCO₂がトラップされているかなどを推定するためには、弾性率・密度等の地球物理パラメータと、空隙率・飽和度などの貯留層パラメータをつなぐ岩石物理モデルを把握することが欠かせない。また、これまでの結果において、例えば音波検層ではP波到達時間データのみを用いている等、必ずしも検層データで得られているデータの情報を全て抽出しているわけではない。本研究では、これまでに行われた検層データからさらに詳細な解析を進め、測定誤差を考慮したCO₂ 飽和度を求める。

長岡プロジェクトでのCO₂ 圧入実験では、これまでのモニタリングのための検層結果より、地下1100mの厚さ約4mの帯水層内にCO₂が貯留されていることが分かっている(薛・松岡, 2008)。観測井での検層データでは、比抵抗検層は再現性も高く測定精度が高いが、中性子検層は誤差が大きいということが分かっている。そこで各検層結果に関して、CO₂の到達前の複数回の観測結果による測定誤差の評価、およびCO₂が到達していない領域の観測結果を確認し、測定誤差と長期のトレンドを評価する。こうして得られた測定誤差を考慮した上で観測結果の解析を行い、その後の解釈を進めていく。長岡の圧入井から一番近い観測井周辺においては、Mito & Xue (2010)で指摘されているように、CO₂ 圧入によって押し出された地層水が再び浸透してきているimbibitionの状態になっていることが確認できる。

また、比抵抗検層結果および一般の堆積岩における経験則として用いられるArchie則により得られるCO₂ 飽和度は小さく見積もられている。これは、岩層内の粘土鉱物の存在を考慮していないためと考えられる。この粘土鉱物の分布として、鉱物の間に層状に存在する場合と、鉱物間に一様に存在する場合を考え、それぞれの場合における比抵抗値の変化量を見積もる。これらのモデルと、観測されている誤差の影響も考慮した長岡の岩石物理モデルについて考察する。

本研究は、(財)地球環境産業技術研究開発機構が経済産業省から補助金の交付を受けた平成22年度「二酸化炭素挙動予測手法開発事業」の一部として行った。

薛自求・松岡俊文, 地学雑誌, V.117, P.734-752, 2008.

Mito, S. and Xue, Z., Proc. 10th international conference on green gas control technology (GHGT-10), 2010.

キーワード: CO₂ 地中貯留, 検層, モニタリング, 長岡

Keywords: CO₂ geological storage, Well logging, monitoring, Nagaoka

HRE031-18

会場:303

時間:5月24日 14:30-14:45

定常法による水 - 超臨界 CO₂ 系の相対浸透率測定方法の開発 Design of experimental facility for steady state relative permeability measurements in water-supercritical CO₂ systems

小暮 哲也^{1*}, 薛 自求¹
Tetsuya Kogure^{1*}, Ziqiu Xue¹

¹ 財団法人 地球環境産業技術研究機構

¹ RITE

多孔質媒体中の多相流挙動のシミュレーションを行うためには、相対浸透率曲線 (流体の飽和率と相対浸透率との関係) の情報が必要となる。二酸化炭素地中貯留 (CCS) においては、圧入された CO₂ の地中内挙動を予測することが重要であり、その計算に用いられる。CO₂ 貯留の対象層は地下 1000 m 程度であり、およそ 40・100 気圧という環境である。この環境下で CO₂ は超臨界状態として存在する。従来の研究からは、貯留層環境下における水 - 超臨界 CO₂ 系の相対浸透率曲線に関する情報が得られていないため、室内実験による測定を試みた。

相対浸透率を測定する方法には、定常法と非定常法の二種類がある。そのうち定常法では、二種類 (あるいはそれ以上) の流体を一定の割合で同時に岩石コアに圧入し、コア上下の差圧やコアから流出する流体の割合が一定となる平衡状態を作り出す。平衡状態になったときの飽和率、流速、コア上下の差圧からそれぞれの流体の浸透率を計算することで、信頼できるデータの取得が可能であることから、本研究では定常法により測定を行った。

相対浸透率の測定システムは一般に、岩石コアを設置するコアホルダー、コアホルダー内の圧力やコア内流体の圧力・流速を制御するポンプ、そしてコアから流出した流体を集め、重力によりそれぞれの流体に分離させる分離装置から構成される。分離装置内のある流体の体積変化を測定することにより、相対浸透率を計算することができる。しかしながら、従来多くの研究で用いられていた分離装置は貯留層環境下の圧力に対応できず、そのためコアから流出する CO₂ の体積を超臨界状態で測定することができなかった。そこで分離装置を 250 気圧まで耐圧化し、水および超臨界 CO₂ の液面変化量を観測できるようにした。

測定には、均質な構造を持つペレア砂岩と不均質な多胡砂岩を用いた。絶対浸透率はともに 10 mD である。測定開始前に CO₂ を溶解させた水で岩石を飽和させた。そして 40・100 気圧に調節された水と超臨界 CO₂ を同時にコア内に圧入し、コア上下の圧力および流出する流体の割合が一定になるまで継続した。圧入流体の流速は 0.5 ml/min であり、水と超臨界 CO₂ の割合を段階的に変化させた。ある割合での定常流が得られるまでに、ペレア砂岩では 3 日、多胡砂岩では一週間を要した。計測に時間はかかるものの、圧入した超臨界 CO₂ の量からコア内の水飽和率を計算し、ダルシー則により計算された相対浸透率とともにプロットすることで、定常法による水 - 超臨界 CO₂ 系での相対浸透率曲線を得ることができた。

キーワード: 相対浸透率測定, 定常法, 水 - 超臨界 CO₂ 系

Keywords: relative permeability measurements, steady state, water-supercritical CO₂ systems

HRE031-19

会場:303

時間:5月24日 14:45-15:00

CO₂ 挙動予測のための相対浸透率の測定 Relative Permeability Experiments for Estimating CO₂ Movement

亀谷 裕志^{1*}, 細田 光一², 小野 正樹², 上堂 蘭 四男², 竹島 淳也¹, 東 宏幸¹, 平松 晋一¹

Hiroshi Kameya^{1*}, Kohichi Hosoda², Masaki Ono², Yotsuo Kamidozono², Junya Takeshima¹, Hiroyuki Azuma¹, Shinichi Hiramatsu¹

¹ 応用地質株式会社 エネルギー事業部, ² 応用地質株式会社 コアラボ試験センター

¹OYO Corporation, Energy Division, ²OYO Corporation, OYO Core Lab

地球温暖化対策のひとつとして、CO₂ の回収、地中隔離 (CCS) が検討されている。地中貯留の対象層としては廃油・ガス田や炭鉱などが考えられているが、日本国内では帯水層中への貯留が最も有望と考えられている。地中貯留のため CO₂ を帯水層中に圧入した際に CO₂ がどのように帯水層中に広がるか、さらに長期間に渡りどのように移動するか、また浸透率の小さな遮蔽層を通過して地表に到達することが無いかなど、解明すべき点は多い。これらの挙動を評価するために、帯水層中への地中隔離における CO₂ の浸透シミュレーションはこれまでに多く行われている。しかしながら、CO₂ を用いた二相流の相対浸透率等の物性については十分なデータが得られているとはいえない。

相対浸透率の測定は古くから油層工学の分野で行われており、試験手法は定常法と非定常法 (置換法) の 2 つの方法に分けられる。定常法は 2 種類の流体を一定比率で同時に供試体に浸透させる方法で、それぞれの流量と供試体両端の圧力差から浸透率を求めることが可能である。しかし貯留や生産で扱う二相流問題は、基本的に一方の流体が別の流体を置換する過程であり、定常法の試験はこの条件を満たしていない。非定常法 (置換法) は、通常ぬれ性の流体で飽和された試料を非ぬれ性の流体で置換する試験である。

置換法の試験では、置換過程での飽和度分布は試料内部で均一でないことから、相対浸透率の計算には解析解や、数値解析を用いる必要がある。一般に油層工学の分野で良く用いられるのは JBN 法と呼ばれる一次元の置換 (石油の回収) 問題の解析法である。この手法は流量や圧力などの計測値の差分を必要とするため、直接測定データを用いた場合には誤差が生じ易く、適当な関数で測定結果を近似する等の工夫が必要である。また JBN 法は毛管圧や流体の圧縮性、重力の影響を無視しているため、これらの影響が大きな条件下では適用が難しい。このため実験の条件を考慮した二相流の数値解析を行い、実験値と解析値の差が最小となるような浸透率を求めるヒストリーマッチング法が研究されている。

以上のような問題を背景として、筆者らは超臨界 CO₂ を用いた岩石浸透試験装置を開発した。開発した装置は置換法の相対浸透率試験を基本とし、流量収支による飽和度を把握する方法を採っている。流量の計測には、高圧対応の分離容器を試料下流側に設置し、試料から排出された流体を分離した。供試体の飽和度変化を評価するためには流体の積算体積に影響する配管の貯留量 (デッドボリューム) を把握する必要がある。デッドボリュームにはポンプから供試体に入るまでの配管部分と、供試体から出て分離容器に達するまでの 2 種類があり、それぞれ別の方法で評価する必要がある。前者は置換する流体が供試体に到達する前後の流量や圧力変化から判断し、後者は事前に配管のデッドボリュームを計測しておいて、その分を排出した流体の積算流量から減じて算出した。

国内の砂岩や泥岩などを用いて、置換法による相対浸透率の測定を行った。特に年代の若い堆積物を対象とした場合、遮蔽層のシール性能もさほど大きなものでなく、遮蔽層内部に CO₂ がどのように浸透していくかを相対浸透率の測定結果を用いて評価することも重要であると考えられる。試験結果から以下のことが判明した。

1) JBN 法の相対浸透率は平均的な流量から計算した結果と比較すると、置換側の流体である CO₂ ではほぼ一致するが、水では差が生じる。

2) JBN 法から算出した相対浸透率を用いて、Tough2 により数値シミュレーションを行うことにより試験時の挙動を概ね再現できる。

3) 得られた CO₂ の相対浸透率は、Corey(1954) など既存の理論モデルとは必ずしも適合しない。試験結果をモデル化するにはより自由度が必要である。

キーワード: CCS, 二相流, 相対浸透率, 室内実験

Keywords: CCS(Carbon dioxide Capture and Storage), Two Phase Flow, Relative Permeability, Laboratory Experiment

HRE031-20

会場:303

時間:5月24日 15:00-15:15

多胡砂岩の層理面構造がCO₂流動に与える影響に関する岩石物理学的研究 The rock physical approach to the complex CO₂ flow in the bedded Tako sandstone

北村 圭吾^{1*}, 薛 自求¹, 山田 達也², 西澤 修¹
Keigo Kitamura^{1*}, Ziqiu Xue¹, Tatsuya Yamada², Osamu Nishizawa¹

¹ (財)地球環境産業技術研究機構, ² 京都大学大学院工学研究科
¹RITE, ²Kyoto University

In this study, we try to elucidate the effect of thin low-porosity layer in porous Tako sandstone on CO₂ flow by experimental and theoretical studies. Tako sandstone is early Miocene marine sandstone, mainly composed of quartz and plagioclase. This rock is characterized by the well-developed and low porosity foliations are mainly composed hematite. We have measured two channels of P-wave velocities (V_p) on the foliation channel (LPZ) and high porosity zone (HPZ) by using 1MHz P-wave transducers during CO₂ injection stage (drainage) and water re-injection stage (imbibition). In drainage, both of channels show large velocity reduction over 0.2 km/s (>10 %). In imbibition, they indicate different V_p-change with injecting water. The V_p of HPZ starts the V_p-recovery from 50ml injection and almost recovers at 120ml. On the other hands, LPZ starts V_p recovery from 100ml water injection and do not finish at 250ml. These results suggest that the HPZ has large CO₂ mobility and the LPZ has different CO₂ flow pattern between drainage and imbibition. Next, we try to 2D core-scale flow simulation by TOUGH-2 to check and discuss about CO₂ behavior in Tako sandstone. This simulation is based on 2-D porosity distribution map of core and uses relative permeability for parameters. The result of our simulation indicates that the foliation (LPZ) has large trapping potential of CO₂. The HPZ, which is directly beneath of foliation zone (DBFZ), has large CO₂ saturation in early stage of drainage. We confirm that CO₂ have large mobility and vigorous vertical flow in HPZ. After reaching upper foliation, CO₂ flows laterally along foliation and raise saturation of whole HPZ. In imbibition, CO₂ saturation of HPZ decreases rapidly to assign residual CO₂ saturation over 40ml water injection. However, DBFZ keep high CO₂ saturation after 100ml water injection. On the other hands, CO₂ saturation of LPZ is smaller than HPZ in drainage stage, but they show large saturation value over 20ml water injection. These results suggest that the foliation of Tako sandstone behaves as a barrier of CO₂ flow. It is implied that the thin low-porosity layer may be a barrier of CO₂ flow in porous saline aquifer.

キーワード: P 波速度, 片理面, CO₂ 流動パターン, 孔隙率分布, CO₂ 飽和度, TOUGH-2

Keywords: P wave velocity, foliation, CO₂ flow pattern, porosity distribution, CO₂ saturation, TOUGH-2

HRE031-21

会場:303

時間:5月24日 15:15-15:30

X線CT装置によるCO₂挙動可視化技術の開発 Visualization technique of CO₂ storage mechanisms using X-ray computed tomography

矢崎 至洋^{1*}, 千代延 俊¹, 薛 自求¹
Yukihiro Yazaki^{1*}, Shun Chiyonobu¹, Ziqiu Xue¹

¹ 地球環境産業技術研究機構

¹RITE

Carbon Capture and Storage (CCS) is one of the useful means to reduce CO₂ to the atmosphere. The captured CO₂ gas in industrial and energy-related sources is injected into deep geological formations. In order to assess the long-term risk of injected CO₂, it is necessary to elucidate the storage mechanisms, such as geological characteristics and movement of CO₂.

We show the visualization technique of CO₂ storage mechanisms using a medical X-ray computed tomography (CT). X-ray CT is a medical imaging method employing tomography created by computer processing and can produce a three-dimensional image of components both externally and internally.

1) Characterization of geological formations

Basic properties, such as pore shape, pore size distribution and porosity, are usually determined by cutting samples from the whole core. These analyses are suitable for complex reservoir characterization. On the other hand, the X-ray CT scanner is a powerful tool for nondestructive analysis of geological materials. Utilization of conventional core analysis and CT scanning will make possible accurate evaluation of rock properties and geological formations.

2) Elucidation of CO₂ flow and transport processes

The effectiveness of geological storage depends on a combination of physical process (e.g. residual CO₂ gas trapping) and geochemical processes of solubility trapping and mineral trapping. Therefore, we have to develop a greater understanding of these trapping mechanisms. Experiments of residual gas trapping are conducted with X-ray CT scanning. These experiments are designed to allow monitoring the evolution of trapped gas over time (4-D). Measurements of gas-water saturation with geophysical properties will be undertaken in this study.

HRE031-22

会場:303

時間:5月24日 15:30-15:45

堆積相解析に基づく長岡実証サイトの地質学的特徴 Geological features of reservoir formation of Nagaoka CO₂ injection Site, based on the sedimentary facies analysis

千代延 俊^{1*}, 矢崎 至洋¹, 薛 自求¹
Shun Chiyonobu^{1*}, Yukihiro Yazaki¹, Ziqiu Xue¹

¹(財)地球環境産業技術研究機構

¹RITE

Nagaoka CO₂ injection Site in the Niigata plain is the largest oil field in Japan. At present, the aquifer of this oil field in Miocene to Pliocene have been proven since the beginning of systematic evaluation and exploration for the carbon dioxide capture and storage (CCS). Nagaoka injection Site is located in the central part of the Niigata basin, where there is the favorable geological conditions for forming aquifers. The aquifers widely distributed in the Niigata basin was deposited widely the paralic to hemipelagic environment during the Neogene. The superimposed fluvial-delta to marine deposits distributed approximately from north to south have constituted the complex sandstone aquifer in Nagaoka area. Under the background on the end shape of anticline, the aquifer is lay lenticular formation. As a result, a large area lithologic trap for the CCS was formed in Nagaoka area. The core sample included high contents of medium to coarse sandstone and tuff as well as the dissolution and erosion of volcanic matters were useful for understanding the forming the high porosity and permeability reservoirs.

キーワード: 帯水層, 空隙率, 粒度分析, 堆積相

Keywords: aquifer, porosity, particle size analysis, sedimentary facies