

小特集「CO₂ 地中貯留」— まえがき —

西澤 修* 稲崎 富士**
當 舎 利 行*** 笠 原 順 三****

Preface for the Special Issue on “Geological Storage of Carbon Dioxide”

Osamu NISHIZAWA*, Tomio INAZAKI**,
Toshiyuki TOSHA*** and Junzo KASAHARA****

Key words : geological storage of carbon dioxide, Nagaoka CCS project in Japan, deep saline aquifer for CCS in Japan, CCS natural analogue, mineralization CCS

キーワード : CO₂ 地中貯留, 長岡 CCS プロジェクト, CCS 深部帯水層, CCS ナチュラルアナログ, 鉱物固定

2007年, IPCC (気候変動に関する政府間パネル) は第4次評価報告書 (AR4) を発表し, その中の政策決定者向け要約は, 「気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは, 大気や海洋の世界平均温度の上昇, 雪氷の広範囲にわたる融解, 世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である」 (IPCC, 2007) と温暖化を断定した表現となっている。また, 同要約では温暖化は人為起源の温室効果ガス (GHG: Greenhouse Gas) の増加による可能性がかなり高く GHG 増加による地球環境の変動が人類の生活や文明に深刻な影響を及ぼすという懸念から, 人類全体がただちに GHG 削減に取り組むべきであると述べている (加藤, 2007)。IPCC はまた, 温暖化抑制の緩和策として, エネルギー利用の効率化と再生可能エネルギー (自然エネルギー) 利用の促進に加え, 2030年までを目途とした短・

中期については, 化石燃料消費の際の主要な温室効果ガスである二酸化炭素の分離回収・貯留 (CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage) が有効であろうと予測している (IPCC, 2005)。CCS は排ガスからの CO₂ の分離回収と, 回収された CO₂ の輸送・貯留技術からなるが, 本誌読者の多くが地球科学関係の教育, 研究, 技術に携わる方々であることから, 本小特集は貯留に焦点をあて, 関連する科学技術の話題を集めた。

CO₂ の貯留には水圏 (海洋) と地圏 (地下) が候補となるが, ここで扱うのは地圏への貯留で, 陸域および海域の地下が対象となる。CO₂ 地中貯留は技術的には石油の増進回収 (EOR: Enhanced Oil Recovery) ときわめて近い関係にあるため, 地中貯留は技術的にすでに確立されたものといった誤解が一部にある。EOR は生産量が低下した石油井に, 水蒸気, CO₂ などのガス

* (株) ダイヤコンサルタント

** 独立行政法人土木研究所

*** 独立行政法人産業技術総合研究所

**** (株) 地球科学総合研究所

* DIA Consultants Co., Ltd.

** Public Works Research Institute

*** Institute of Advanced Industrial Science and Technology

**** JGI, Inc.

や界面活性剤などを注入し、これら流体と石油を強制的に置換し石油の増産をはかるもので、とくにCO₂は石油の粘性を下げるため高い効果を示す場合が多く、欧米では多数の石油生産井で使われている。しかし、本特集で紹介するCO₂地中貯留はEORとは異なり地下の帯水層への貯留である。

帯水層へのCO₂貯留のアイデアは日本の研究者によって最初に提案された(Koide *et al.*, 1992)。彼らがCO₂貯留の候補としたのは、塩分を多く含むため生活・産業用水資源としての利用価値のない地下深部の帯水層である。深部帯水層は広範囲に分布するので、大きな貯留ポテンシャルを持つ。帯水層へのCO₂貯留はEORとは質的に異なり実施例も非常に少ない。帯水層への圧入方法、貯留層内でのCO₂の挙動、地表への影響など、詳しいことは調べられていないため実用技術として確立されてはいない。

地中貯留の対象としては、このほかに、石炭に吸着されたメタンとCO₂とを置換する炭層固定(ECBM: Enhanced Coal Bed Methane)や、蛇紋岩層や高温岩体の鉱物と反応させる鉱物固定などもあるが、いずれも我が国では深部帯水層に比べ小規模で対象地域も限られるため、本特集では詳しく触れていない。

以上のように帯水層貯留はもっとも一般的な貯留手法であり、世界全体で1兆トンをゆうに超える膨大な貯留ポテンシャルがあるため各国で実用化に向けた取り組みがなされている。日本国内での貯留ポテンシャルはすべての深部帯水層を合わせると、約1461億トンと予測される(RITE, 2007)。帯水層貯留の基礎技術の多くは石油や天然ガス開発技術から導入されたものであり、これらの技術との関連が深い。

深部帯水層貯留が社会的受容を得るためには、圧入されたCO₂が長期にわたり貯留層内に留まる(トラッピング: trapping)メカニズムを科学的に明らかにする必要がある。帯水層貯留では、石油や天然ガス胚胎部でみられる地層のシール性による閉じ込め(トラッピング)といった物理トラッピングとともに、CO₂の塩水への溶解とい

う地化学的トラッピングも重要である。また、長期的には鉱物と地層水の化学反応と、それによって生じる岩石中の空隙・割れ目など地下水流路の状態変化に起因する貯留層の輸送特性の変化も考慮されねばならない。そのため、トラッピングに関する実験や観測データの取得が必要で、取得されたデータは貯留層内でのCO₂の長期挙動を予測するシミュレーションに生かされねばならない。このように、深部帯水層CO₂貯留では、貯留層を構成する多孔質岩中での岩石-CO₂-塩水系の挙動を把握するために、物理、化学、鉱物学など、さまざまな観点からの総合的アプローチが必要となる。

この小特集は、帯水層貯留でのCO₂トラッピングメカニズムとCO₂挙動モニタリングについての科学研究や関連技術をわかりやすく紹介することを目的とする。したがって、CCSの有効・非有効性、あるいは実施の賛否に関する議論は扱わず、CO₂の深部帯水層貯留に関連した科学と技術に関する論説を集めた。物理・化学的手法による貯留層の観測、観測結果を解釈するための岩石物性実験、深部地下水の化学的性質の調査とそれにもとづく貯留ポテンシャル評価、地下水と鉱物との反応速度の計測、そして貯留層の長期変動を推定するために必要な自然界の類似現象の調査・研究などである。以下に論説の内容を簡単に紹介する。

薛・中尾(2008)は、CCSの事業化や実用化研究プロジェクトの世界的動向と、それらを実現するための各国の政策的取り組みを紹介する。CCSは単に国家の主導による環境対策ではなく、ビジネスとしての経済行為であり、各国のCCSプロジェクトに対する施策も、グローバル経済の枠組みの中で眺めるべきであろう。また、この論説では引き続き論説へのガイドとして、地中貯留に関連した基本的用語や基本概念も説明される。

薛・松岡(2008)と、これに続く三戸ほか(2008)では、日本で行われた1万トン規模のCO₂地中貯留圧入実証実験の詳細が紹介される。深部帯水層貯留として世界最大規模の実績をあげているのは、1996年からノルウェー沖で行われ

ている民間会社による地中貯留事業で、天然ガスに付随する不要な CO₂ を年間 100 万トンのペースで海底下 800 ~ 1000 m の砂岩層へ圧入している。これに比べると長岡のプロジェクトは極めて小規模ではあるが、科学的知見を得る試験としては最大量の圧入と多方面の調査が行われ、圧入前後の貯留層の状態が詳しく調べられた。この結果、深部帯水層への CO₂ 圧入実験としては世界に類をみない豊富な科学的成果が得られた。二つの論説は、これまで個別に報告されてきた長岡プロジェクトの科学的成果をまとめたもので、陸域帯水層への CO₂ 貯留を科学的に議論するために必要な基礎研究のレビューとなっている。

奥山ほか (2008) は、日本各地の地下水の成分をもとに、深部帯水層貯留のポテンシャルを論じたものである。長岡プロジェクトでは背斜構造の帯水層が選ばれたが、これは石油や天然ガスが存在する場所と同様な地質条件では CO₂ も長期間安定に存在できるという考えにもとづく。背斜構造では貯留層上部にある低浸透性の岩層 (キャップロック) の働きにより、CO₂ が気体となって漏れるのを防止するだろう。しかし、このような理想的な地質条件を備えた帯水層 (構造的帯水層) は日本国内の限られた地域でしかみられない。我が国の CO₂ の大規模排出源は沿岸域に立地した火力発電所や製鉄所などであるため、この近傍で地中貯留が行われれば回収 CO₂ の輸送コストを減らすことができ、CCS の経済性が向上する。しかし、構造的帯水層はこれらの大規模排出源から離れたところにある。そこで日本に広く分布する非構造的帯水層 (一般帯水層) をも対象として地中貯留を考える必要がある。このため一般帯水層の水質データを入手しコンパイルする作業が行われた。この論説では一般帯水層を含む日本の深部帯水層内の水の化学成分データを地中貯留の観点からコンパイルしている。CCS の実用化はまずこうしたデータの整備から始まる。

徂徠 (2008) は、地中貯留された CO₂ の長期安定性を議論するのに必要な、鉱物-水反応系の新しい研究手法を提示する。CO₂ 地中貯留が社会的受容を獲得するには、シミュレーションによ

る貯留層内の CO₂ 長期挙動予測が欠かせないが、そこで仮定される化学反応の反応速度係数が正確でないと予測幅が大きくなり、CO₂ の拡散域や周囲の岩相への固定に対する評価があいまいとなる。そのため、CO₂ を含む地層水と鉱物との反応に関わる係数を短時間に高精度で求める実験が必要となる。従来は、高温域での実験をもとにして外挿により反応速度係数を求めてきたが、この論説は鉱物の溶解速度や反応生成物の成長に関わる反応速度係数を、貯留帯水層の温度領域で高精度で求める装置として、鉱物表面を直接観察する位相シフト干渉計を紹介する。この機器から得られる正確な反応速度データにもとづけば、貯留層挙動の長期予測シミュレーションが可能となる。

當舎ほか (2008) は天然に噴出する土壤ガスから CO₂ の漏洩シナリオを推測する試みである。CO₂ 地中貯留の社会的受容性を高めるためには、上に書いたように CO₂ の地層水への溶解・拡散と、周囲との反応のシミュレーションによる貯留層の長期予測が必要であるが、これだけでなく、実際に CO₂ が噴出した過去の事例を調べることも役に立つ。CO₂ の噴出の際何が起きたか、あるいは、そのときの噴出メカニズムはどのようなものであるかなどを解明すれば、漏洩のシナリオが導かれる。このように、自然界で生じる類似の現象を長期予測に役立てるのがナチュラアナログ研究である。この論説は過去に松代で起きた微小地震を伴う深部地下水の噴出とそれに溶存していた CO₂ ガスの土壤からの放出をナチュラアナログとして、CO₂ 漏洩の長期シナリオを解明する試みである。

本小特集が日本国内での期待が大きい深部帯水層 CO₂ 貯留の理解に役立てば幸いである。

文 献

- IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage.
http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/SRCCS-final/IPCCSpecialReportonCarbondioxide-CaptureandStorage.htm [Cited 2008/08/01].
- IPCC, 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省仮訳 (2007): 第 4 次評価報告書・政策決定者向け要約.
<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf> [Cited 2008/08/01].

- 加藤央之 (2007): IPCC 第 4 次報告書の要点・解説. 地学雑誌, **116**, 798-810.
- Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K. and Shindo, Y. (1992): Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs. *Energy Conversion & Management*, **33**, 619-626.
- 三戸彩絵子・薛 自求・大隅多加志 (2008): 二酸化炭素地中貯留における地球化学反応特性について—長岡実証試験サイトの地層水分析例—. 地学雑誌, **117**, 753-767.
- 奥山康子・佐々木宗建・村岡洋文・金子信行・徂徠正夫 (2008): CO₂ 帯水層貯留での「地層水」の役割とわが国での CO₂ 地化学トラッピングへの適用性. 地学雑誌, **117**, 768-781.
- RITE (2007): 平成 19 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」成果報告書.
- 徂徠正夫 (2008): CO₂ 地中貯留に関連した水-岩石相互作用の研究の現状と速度論的アプローチの展望. 地学雑誌, **117**, 782-796.
- 當舍利行・戸高法文・牧野禎紀・高橋 浩 (2008): CO₂ 地中貯留のナチュラルアナログ—松代での地化学観測—. 地学雑誌, **117**, 797-816.
- 薛 自求・松岡俊文 (2008): 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題. 地学雑誌, **117**, 734-752.
- 薛 自求・中尾信典 (2008): CO₂ 地中貯留—世界各国の技術動向と政策動向および日本の課題—. 地学雑誌, **117**, 722-733.