

SRCCS から 10 年

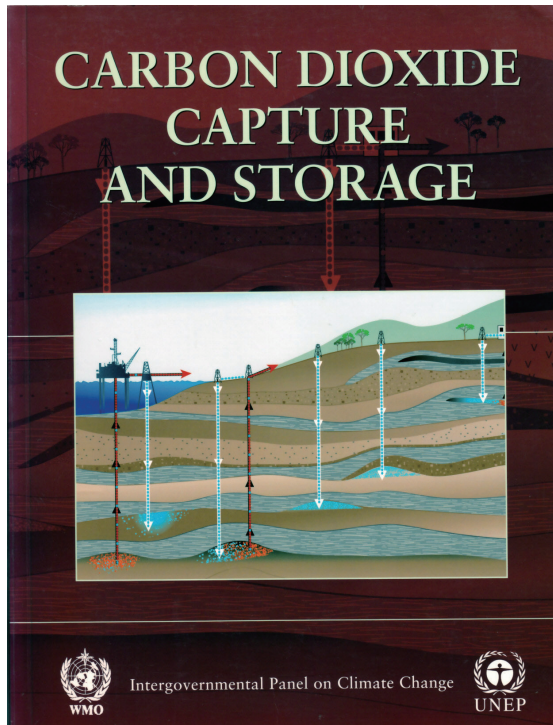
奥山康子¹⁾

1. はじめに

地球温暖化対策としての CO₂ 地中貯留に関わる人々が「SRCCS」と略称する出版物があります。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が 2005 年に発行した、「IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage」(二酸化炭素回収と貯蔵に関する IPCC 特別報告書; IPCC, 2005: 第 1 図) です。この出版物の発行は、2 年後の IPCC 第 4 次評価報告書発表とともに、それまで潜在していた CCS 研究開発への強力な追い風となりました。二酸化炭素回収と貯蔵という事柄や、その略号である「CCS」という言葉が、地球温暖化対策として普及する端緒となったともいわれます。2015 年は、SRCCS 発行から 10 年目にあたります。この間の CCS に関する内外での研究の進展には、目覚ましいものがあります。基礎研究が拡充した

だけでなく、先行していた Sleipner 海域 (北海) などに加えて実用規模から小さなところでは圧入量 1 万トン未満のパイロット試験が多数実施され、この分野の研究開発に携わる人員・機関は世界的にも爆発的に増加しました。産総研地質調査総合センターが CO₂ 地中貯留研究開発のプロジェクトを始めたのも、2005 年からです (當舎・奥山, 2008)。この 10 年間の総括は、化石燃料消費サイドとして CO₂ 排出削減問題に取り組む国際エネルギー機関温室効果ガス対策プログラム (IEAGHG) にとっても重要事項と考えられていて、IEAGHG が主催する国際会議「温室効果ガス制御技術国際会議 (GHGT)」の 2014 年の大会 GHGT-12 でも、最後のパネル・ディスカッションのテーマとなっていました (IEAGHG, 2014)。

この 10 年間の総括が必要という認識は広い範囲で共有されていましたが、節目となる年に SRCCS の後継となる IPCC の出版物は発行されませんでした。しかしそれに代わるように、Elsevier 社の発行する温室効果ガス対策技術の専門誌「International Journal of Greenhouse Gas Control (JGGC)」に、10 周年記念特別号「Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO₂ Capture and Storage」が組まれました (第 2 図)。特集号は、同誌の第 40 巻 1 号で、2015 年 9 月 1 日にオンライン版が公開されています。筆者は現在 CO₂ 地中貯留プロジェクトから離れていますが、外部の経験者としてこの特別号についてあらましを紹介したいと思います。10 周年特集号は専門誌であるため、技術系でない人も読者に想定した SRCCS よりはかかなり固い内容です。本稿が、地球温暖化対策としての CCS のこの 10 年間を知る 1 つの手がかりになれば幸いです。



第 1 図 SRCCS 表紙。図は、同書のあげた CO₂ 地中貯留法を左から右へ次のように示す; 深部塩水帯水層貯留 (沿岸域), 石油 / 天然ガス増進回収法 (CO₂-EOR/EGR), 深部塩水帯水層貯留 (陸域), 枯湯油・ガス田への貯留, 炭層メタン増進回収法 (ECBM)。



第 2 図 JGGC の 10 周年特集号表紙。

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード: SRCCS, CO₂ 地中貯留, レビュー, IEAGHG, 実証試験

2. SRCCS の構成

まず SRCCS の構成を第 1 表に示します。SRCCS は、IPCC の出版物らしく、政策立案者向け要旨と技術的要旨からはじまります。第 1 章は実質的な前書きで、CCS の概念や大気中 CO₂ による影響の緩和策としての意義などを概説しています。続いて、CO₂ 大規模発生源についての分析 (第 2 章)、大規模排出源からの CO₂ の分離・回収 (第 3 章)、貯留サイトまでの輸送 (第 4 章) となります。地球温暖化対策という「CO₂ の大規模発生源」とは火力発電所、特に石炭火力発電所、製鉄所、水素製造やアンモニア製造などの化学工場などを指します。CO₂ の貯留・隔離は 3 つの章にわたり、第 5 章で地中貯留、第 6 章で海洋貯留そして第 7 章で工業的鉱物化による CO₂ 隔離が扱われています。以上は、CO₂ の発生から貯留・隔離に至る物質としての流れに沿った配置といえます。

第 8 章は CCS のコストについてのレビュー、そして最終の第 9 章は CCS の温室効果ガスインベントリーへの影響を取り上げています。「温室効果ガスインベントリー」とは、CO₂ を含む 6 種類の温室効果ガスについて一定期間の排出量や吸収量をまとめたもので、普通は国連気候変動枠組条約や京都議定書のもとで各国が作成する「国家温室効果ガスインベントリー」を指します。SRCCS 当時は多国間の CO₂ 排出権取引や、京都議定書に定めるクリーン開発メカニズム (CDM) で CCS をどのように位置づけるかが特に重要な問題であったため、第 9 章で取り上げられました。以上の SRCCS においても重視されたのは分離・回収と地中貯留で、それぞれ 74 ページおよび 82 ページの分量を有しています。

3. 10 周年特集号の構成と特徴

一方の JGGC10 周年特集号ですが、こちらは第 1 表のような 18 編の論文に編集委員会からの緒言が加わり、全部で 19 編の記事から構成されています。458 ページという分量は、SRCCS を少々上回ります。第 1 表では、掲載論文のタイトルを SRCCS の構成に合うように並べました。論文タイトルの前にある数字は特集号での掲載順で、SRCCS と同じように CCS での物質 CO₂ の流れにおおむね従っているのが分かります。異なる点は、SRCCS の第 4 章、第 6 章、第 7 章および第 9 章の内容に合う論文が、特集号に見当たらないことです。SRCCS 第 6 章にある海洋貯留は、2006 年 2 月にロンドン条約 1996 年議定書が発効したことから、現在、本来の意味の実施は不可

能となっています。第 7 章で取り上げられている鉱物化も、温暖化対策としては限定的という見方が確立しています。一方、分離・回収した CO₂ を合成化学の原材料とするなどの CO₂ 利用は、まだ実験途上に近い状態で、温暖化対策とするには至らないという評価です (論文 1: Gale *et al.*, 2015)。したがって、SRCCS から 10 年を経た現在、CCS の「S」(貯留) 方策は地中貯留に限られ、このために効率的な輸送方法は、陸上ではすでに確立されているパイプライン輸送でほぼ決まったという状況です。日本のような海洋国では船舶輸送もあり得ますが、こちらは技術開発途上ということでしょう。こういった情勢が、SRCCS と今回の特集号の構成が著しく違う背景となっています。

SRCCS で CO₂ 発生源を扱う第 2 章に対応するのは、バイオマス利用に関する論文 16 (Kemper, 2015) のみです。バイオマスは大気中 CO₂ を生物が固定したものであり、それを燃焼でエネルギー利用することは CO₂ を元のよう大気に返すことから、CO₂ 排出として中立 (カーボン・ニュートラル) とみなされています。ここで発生する CO₂ を化石燃料利用の場合のように分離し大気から隔離できると、ネットの CO₂ 削減が図られると考えることができるわけです。論文 16 では、バイオマス・エネルギープラントへの CCS 適用の実証試験例を紹介し、技術的發展を展望しています。なお、バイオマス・エネルギーを対象とする CCS を IEAGHG 筋ではしばしば「Bio-CCS」と呼んでいますが、これは産総研で進行中の微生物利用のバイオ CCS とは異なる点にご注意ください。

SRCCS 第 3 章に対応する CO₂ 分離・回収に関する論文は、10 周年特集号では論文 2 から 6 の 5 編です (Idem *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2015; Stanger *et al.*, 2015; Abanades *et al.*, 2015; Jansen *et al.*, 2015)。CO₂ 発生源としては SRCCS から 10 年後の現在も石炭火力発電所が最も重要であり、それに適した分離・回収の実用的手法が 3 つあるということも変わりありません。論文 5 を除く 4 編はこの 3 方式について、この 10 年間の技術的進展をまとめたものです。これらの論文ではアミン溶液を用いた CO₂ 回収技術の進展をレビューしているのに対して、論文 5 はアミン以外の CO₂ 吸収材、具体的には分離膜や固体吸収剤などの研究開発の状況をまとめています。いずれの論文でも回収のコストを減らしエネルギー効率を向上させるために、さらに研究開発が必要という結論であり、課題は SRCCS 時代と同様と行うことができるでしょう。

論文 7 から 14 は CO₂ の貯留に関するものです。分量としては 10 周年特集号掲載論文の 3 分の 1 に達していて、SRCCS 以来この分野で最も盛んな研究開発が行われてき

第 1 表 SRCCS および 10 周年特集号 (JGGC, 第 40 巻第 1 号) の構成の比較.

SRCCS	JGGC, 40巻 第1号 (2015年9月)
Foreword	
Preface	
Summary for policy makers	
Technical summary	
Ch. 1 Introduction	1 Special issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO ₂ Capture and Storage
Ch. 2 Sources of CO ₂	16 Biomass and carbon dioxide capture and storage
Ch. 3 Capture of CO ₂	2 Practical experience in post-combustion CO ₂ capture using reactive solvents in large pilot and demonstration plants 3 Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvent 4 Oxyfuel combustion for CO ₂ capture in power plants 5 Emerging CO ₂ capture system 6 Pre-combustion CO ₂ capture
Ch. 4 Transport of CO ₂	該当論文 なし
Ch. 5 Underground geological storage	7 Review of CO ₂ storage efficiency in deep saline aquifers 8 CO ₂ migration and pressure evaluation in deep saline aquifers 9 Capillary trapping for geological carbon dioxide storage—From pore scale physics to field scale implications 10 Convective dissolution of CO ₂ in saline aquifers: Progress in modeling and experiments 11 Subsurface geochemical fate and effects of impurities contained in a CO ₂ stream injected into a deep saline aquifer: What is known 13 The state of the art in monitoring and verification—Ten years on 12 Recent advances in risk assessment and risk management of geologic CO ₂ storage 14 Development since 2005 in understanding potential environmental impacts of CO ₂ leakage from geological storage
Ch. 6 Ocean storage	該当論文 なし
Ch. 7 Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide	該当論文 なし
Ch. 8 Costs and economic potential	15 The cost of CO ₂ capture and storage
Ch. 9 Implications of carbon dioxide capture and storage for greenhouse gas inventories and accounting	該当論文 なし
	17 Legal and regulatory developments on CCS
	18 Developments in public communications on CCS

たことをうかがわせます。貯留に関する内容は、次の章でより詳しく見てみたいと思います。

論文 15 (Rubin *et al.*, 2015) は CCS のコストについて、SRCCS 以降 10 年間の見積りの変化をまとめたレビュー論文です。著者のうち 2 人 (E.S. Rubin および H.J. Herzog) は SRCCS の第 8 章の著者であり、まさしく同書のアップデートといえる論文でしょう。新興国の経済成長によって火力発電所の建設コスト、付随する CCS プラントのコストそして燃料費も SRCCS 時点より著しく上昇しているが、CO₂ 排出回避のコストは SRCCS 時点とあまり変わっていないとしています。また、後述のような石油増進回収 (EOR) 用に回収した CO₂ を売ることができれば、CCS のコストは著しく下げられるとしています。

CCS に関わる法規制について、回収・輸送・貯留という CCS の要素過程ごとに関係する法律が異なるため、SRCCS では各章の中で言及されていました。法規制の現況についてまとめた論文 17 (Dixon *et al.*, 2015) からは、この 10 年で CCS が CO₂ 発生から貯留・隔離まで一貫したシステムとして理解されるようになったことがうかがえます。CCS が、CO₂ 排出削減策として現実化している表れと言えましょう。

論文 18 (Ashworth *et al.*, 2015) は CCS についての社会対話の、ここ 10 年間の進展を取り上げています。これは SRCCS ではほとんど触れられてなかった項目です。この論文では社会科学者の CCS に対する姿勢を公表論文やその他の記事から探り、CCS の社会受容をはかる窓口としてこういった人々の手を借りられるか検討しています。

4. 地中貯留についての SRCCS 以降の進展

CO₂ 地中貯留の方法については、中尾ほか (2014) が紹介しています。SRCCS では、同書の表紙にもなっている第 1 図でいくつもの貯留法をあげていました。中でも深部塩水帯水層は石油・天然ガス鉱床を利用する場合と違って貯留場所が偏在せず、貯留量が著しく大きい可能性があるため、この 10 年間の貯留技術研究開発のターゲットでありました。中尾ほか (2014) にあるように、産総研の研究も深部塩水帯水層を念頭に置くものです。

CO₂ 地中貯留にあたっては貯留可能な地下の空隙体積を見積もる必要があり、SRCCS 当時は貯留層とする地下地層の空隙率をもとに貯留量が見積もられてきました (例えば Nakanishi *et al.*, 2009)。これに対して論文 7 にある貯留効率 (storage efficiency) という概念は、地下岩層の空隙体積など固定的要素だけではなく、空隙への CO₂ の

侵入しやすさや圧入した CO₂ プリュームの移動性などという動的要素も加味して貯留可能性を吟味・評価しようというものです (Bachu *et al.*, 2007)。論文 7 は、この概念の提唱者を中心としてまとめられました (Bachu, 2015)。貯留層だけではなくキャップロックを含めた貯留システム全体の特性・性能、さらには法的制約 (※これは国ごと、あるいはサイトごとに異なる可能性がある) まで含めた貯留可能量を見積もることで、深部塩水帯水層貯留の量的可能性や効率を評価する必要があると主張しています。このような貯留量評価が提唱される背景には、地下の貯留システムの数理モデル化や、圧入 CO₂ の挙動シミュレーションがこの 10 年間に著しく高度化したことが挙げられます。同様に論文 8 も、深部塩水帯水層貯留での圧入 CO₂ の移動性と地下圧力上昇に関して、近年のシミュレーション研究を中心にまとめています (Birkholzer *et al.*, 2015)。圧入 CO₂ の移動と閉じ込めについては、実証試験での知見を取り入れることで、SRCCS 当時未解明であった多くの事柄が理解されるようになってきました。シミュレーションの世界では、貯留に伴う圧入井付近の圧力上昇はごく短時間に広範囲に伝搬することが分かっている、これが場合によっては貯留性能を左右する重要な要素になりうるという著者たちは強調しています。また、貯留領域の境界の水文学的性状を定めることが、計算上も実用上も重要な事柄であるとしています。

論文 9 から 11 は、CO₂ がいかにして地下に貯留されるかという「貯留メカニズム」に関する研究のレビューです。これらについては、次の章でみてみたいと思います。

地下に圧入・貯留した CO₂ は、予想外に移動したり漏洩することがないように監視 (モニタリング) する必要があります。モニタリングは手法として地球物理学的モニタリングと地球化学的モニタリングに分けられ、さらに対象別に貯留層程度の深度を対象とするものと、人の生活圏を含む浅層を対象とするものがあります。両者とも、貯留サイトが陸上か海底かによって方法が系統的に異なります。モニタリングが非常に多様であるのは、目的が貯留状態の把握に限らず各種規制への対応など多様であることによります。論文 13 は、CO₂ 地中貯留でのモニタリングの、ここ 10 年間の進歩をレビューするものです (Jenkins *et al.*, 2015)。3 人の著者は、筆頭者 (C. Jenkins) が Otway 実証試験 (オーストラリア) のモニタリング全般、次の A. Chadwick が Sleipner 海域での CO₂ 地中貯留の繰返し弾性波探査をそれぞれ総括し、また最後の S.D. Hovarka は北米大陸での CO₂-EOR サイトを中心に活躍する、この世界の代表者たちです。このレビュー論文では特に代表的とい

える海域 2 か所，陸域 4 か所のサイトを例に，いかなる手法とそれらの組み合わせが成功裏のモニタリングとして結実したかをまとめています（第 3 図）．弾性波探査や重力など要素技術別の進歩についても，選ばれた 6 か所に限定することなくまとめられています．筆者たちの見解では，モニタリングにとっては SRCCS からの期間は成功の 10 年と言えるようです．今後の課題は，地下での実際の貯留量を高精度で見積もる方法を確立することと，漏洩がないことを誰にも理解できるように示す手法を確立して規制のスキームに組み込むことであるとしています．

CCS で CO₂ 漏洩が起こった場合に周囲の環境が受けるインパクトは，SRCCS 以降急速に理解が深まった領域と

言えます．論文 14 (Jones *et al.*, 2015) では，環境影響調査を組み込んだ貯留実証試験や天然での CO₂ 湧出地でのナチュラルアナログ研究を，陸域表層部の生態系，飲料水，浅海域の生態系という対象別に分けてレビューしています．結論的に，既存の坑井などよく知られていてシナリオ化された経路からの漏洩の影響は小さく，短時間で緩和するとしています．一方，圧入井やパイプラインからは大規模な漏洩が起きる可能性があり，著者たちはむしろこの方面について事象の予測と対策の研究を進めるべきとしています．

CO₂ 地中貯留のリスク評価も SRCCS 以降急速に進歩した領域とされます．この背景には，世界的に CO₂ 地中貯

プロジェクト	Sleipner 北海	Snøhvit ノルウェー	Decatur アメリカ	Weyburn カナダ	Cranfield アメリカ	Otway オーストラリア
貯留タイプ プロジェクトの性格	帯水層* 事業	帯水層 事業	帯水層 試験/事業	CO ₂ -EOR 事業	CO ₂ -EOR 事業	帯水層 試験
モニタリング手法 (深層対象)						
繰返し3次元弾性波探査	■	■		■		■
3次元多成分弾性波探査			■			
2次元海底弾性波探査	■					
VSP			■		■	■
坑井間弾性波トモグラフィー			■		■	
坑井間比抵抗トモグラフィー			■		■	
微小地震検出			■		■	
海底重力観測	■	■				
坑井重力観測					■	
坑井電磁気観測					■	
坑底圧観測		■	■	■		■
坑底温度測定		■				
地球物理学的坑井観測					■	
坑井内流体採取						■
トレーサー試験						■
(浅海域浅層-表層対象: 海域)						
高分解能3次元弾性波探査		■				
海底-水中音響イメージング	■	■				
堆積物採取						
海洋物理的調査	■					
海洋化学的調査	■					
(浅海域浅層-表層対象: 陸域)						
浅層地下水の地球化学的調査			■	■	■	■
土壌ガスCO ₂ 濃度			■	■	■	■
地表CO ₂ フラックス観測			■	■	■	■
赤外レーダー観測					■	
大気中CO ₂ 観測					■	
空中電磁気調査					■	

* 深部塩水帯水層貯留

■ 法規制対応

■ 試験目的

第 3 図 代表的な 6 か所の大型実証試験で採用されたモニタリング手法. Jenkins *et al.* (2015) の Table 1 を翻訳 (一部抜粋).

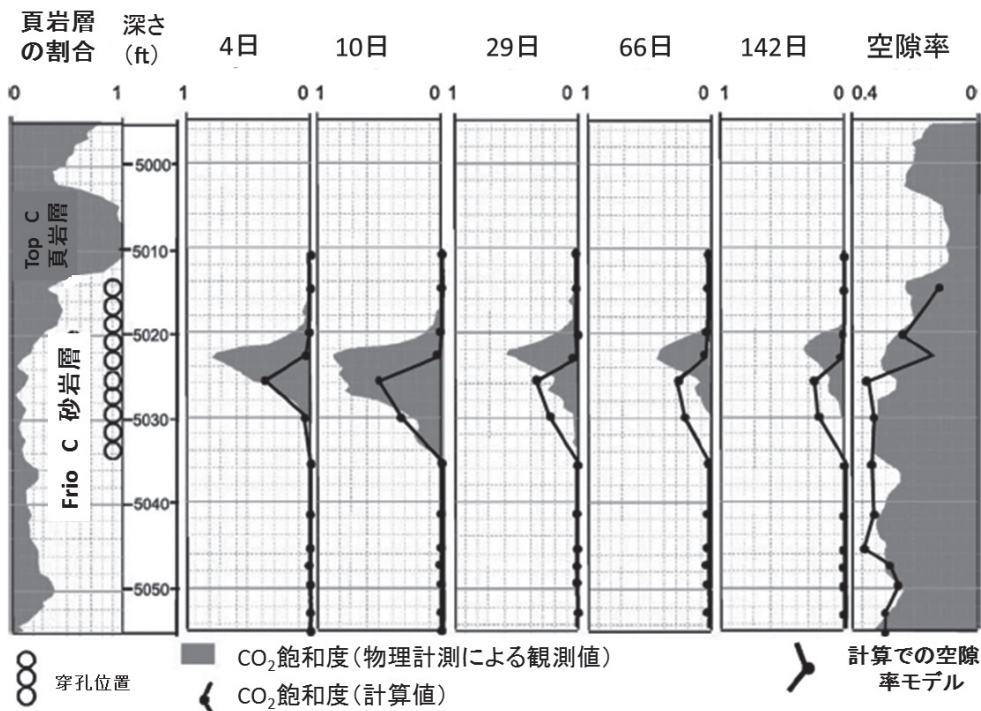
留試験が広く行われるようになり、その中で知識が集積されてきたことが挙げられます。論文 12 (Pawar *et al.*, 2015) は各国での取り組みや、国際連携のもと遂行された 45 件以上のフィールド試験をもとに、CO₂ 地中貯留のリスクとして貯留そのものの確実性、貯留のパフォーマンス、社会受容そして市場の破たんという 4 要素をあげています。社会的要素 2 つが大きなリスク要素とみなされていることに、注意する必要があるでしょう。CO₂ 地中貯留が実用化しようという中で、リスク評価も定量的に行われる必要が高まり、今後の研究の進展に期待したいとしています。

5. 貯留メカニズム研究の進展

地下に圧入された CO₂ はまず貯留層岩石の粒子の間隙に入り込み、毛管圧により脱出できなくなってその場にとどまると考えられています。これが「残留ガス・トラッピング」あるいは「キャピラリー・トラッピング」と呼ばれる貯留メカニズムです。深部塩水帯水層貯留では流体の閉じ込めに適した地質構造が期待されないため、SRCCS 当時からこのメカニズムが重要視されていました。その後 10 年の残留ガス・トラッピング研究の進展をまとめた論文 9 によると (Krevor *et al.*, 2015), SRCCS のところは概念でしかなかった残留ガス・トラッピングが、リアリティーを持って CO₂ 地中貯留で最も重要な閉じ込めメカニズム

であると認識されるようになったとしています。室内実験スケールでは、マイクロフォーカス X 線 CT によるその場観察が強力な武器となって、CO₂ 閉じ込めの研究が進んできました。残留ガス・トラッピングに寄与する空隙体積が、典型的には空隙全体の 30 % 内外であるというのが、現在の共通認識であるとしています。野外スケールでは、残留ガス・トラッピングによって圧入 CO₂ のプリュームの移動が遅れ、また安定化することが確認されてきています。その好例としてこの論文で引用されている Frio パイロット試験 (アメリカ、テキサス州) の状況を, Hovarka *et al.* (2006) により第 4 図に示します。この試験では、地下約 1,500 m の傾斜した砂岩層に 1,600 トンの CO₂ を 10 日間かけて圧入し、その後の変化をアップディップ側にある観測井で観測しました。図のように、CO₂ は圧入後短時間で観測井に到達し、圧入終了時点 (10 日後) に CO₂ 飽和率のピークに達します。CO₂ 飽和率は時間とともに徐々に低下しますが、100 日以上経過後も一定量 (飽和率として 40 % 台) が残り続けています。この結果は、圧入 CO₂ が残留ガス・トラッピングでほぼ不動化したことを示すと解釈されています。こういった結果から論文 9 の著者たちは、CO₂ 貯留容量の見積りに当たっても残留ガス・トラッピングの効果を組み入れる必要があると主張しています。

地下の CO₂ は、長期的には貯留層を満たした間隙水に徐々に溶け、こうして移動速度が間隙水の流動と同じに



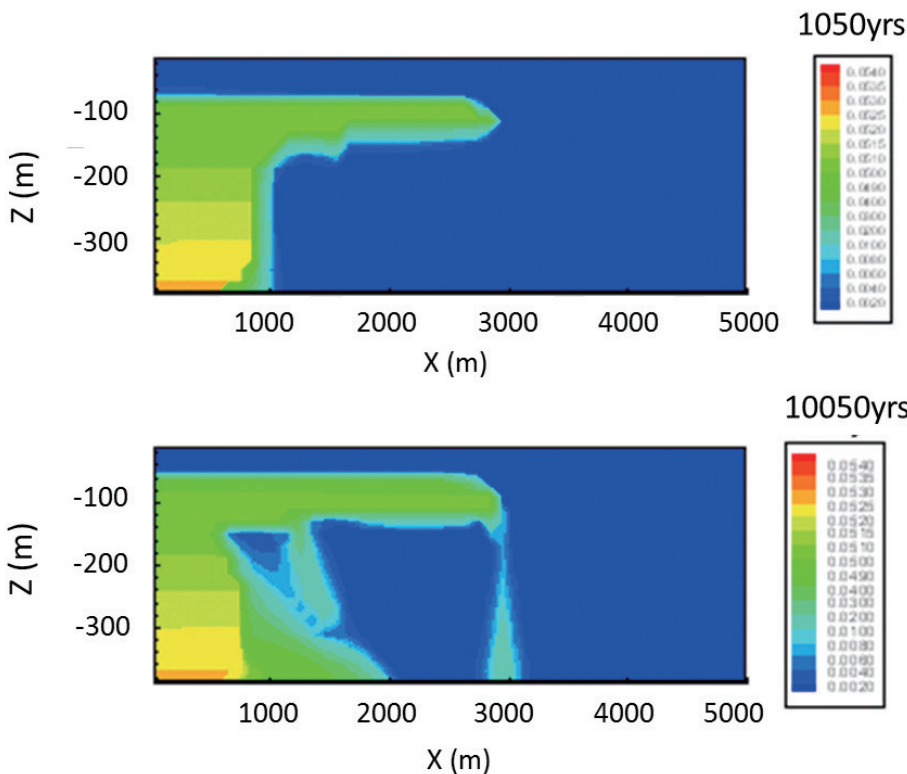
第 4 図 Frio パイロット試験で観測された CO₂ プリュームの変化。Hovarka *et al.* (2006) より翻訳。

なり、すなわち CO₂ プリウム状態よりもはるかに移動が遅くなります (溶解トラッピング)。CO₂ の溶解を進めるメカニズムとして SRCCS 以降注目されているのが「対流混合 (convective mixing)」です (論文 10: Emami-Meybodi *et al.*, 2015)。密度差のため貯留層上部にとどまる CO₂ プリウムが周囲の間隙水に溶け込むと、間隙水は密度を増し、貯留層下部の CO₂ を溶かしていない地層水との間に重力的不安定状況が生じます。この結果、上部の重い間隙水が貯留層下部に沈降するとともに、下部の水が上方に移動し、一種の対流が形成されます。数値シミュレーションで描き出された対流混合の様子を、戸高ほか (2009) より第 5 図に例示します。この例は、厚さ 300 m の砂岩貯留層と同じく 100 m の泥岩キャップロックからなる側方延長 5,000 m の 2 次元モデルで、CO₂ を年間 25 万トンの割合で 50 年間圧入して、圧入後の変化を追ったシミュレーションです。きわめて長い時間が経過した後に、貯留層内での CO₂ 溶解に伴い対流混合が起きることが示されています。対流混合は CO₂ と間隙水の接触を進め、さらなる溶解を進めると期待されています。論文 10 では、対流混合を中心とした圧入 CO₂ の溶解プロセスのシミュレーション及び実験による研究をレビューしています。また、対流混合を工学的に進める技術開発についても、レビューを行っています。現在検討されている中では、貯留層の上部に淡水を圧入して CO₂ がより溶けやすいよう改質を図る方法があるとのこと。

地中貯留で圧入される CO₂ の純度は、ロンドン条約の規定に合わせる形で、高純度が要求されています。圧入 CO₂ に高純度を求められることは分離・回収側の負担でもあり、CCS のコスト高の一因ともなっています。そうでもなくとも微量の不純物はさげられず、それが地下でどのような挙動、とくに貯留 CO₂ の安定化を阻害する挙動を取らないかということが関心事でした。論文 11 (Talman, 2015) では、火力発電所の排ガスから分離した CO₂ 中に含まれるうる不純物について、地中貯留条件下での長期的地化学的挙動の研究をレビューしています。この 10 年間の研究から、比較的不活性な不純物ガス (例: Ar, N₂) は圧入以降にあまり影響しないが、酸性ガス (例: SO_x) の存在は圧入井周りを中心にネガティブな影響がありそうなことがわかってきました。O₂ や H₂S のように、貯留層の構成鉱物に依存して影響の異なる不純物もあるということです。不純な CO₂ と貯留層の化学的相互作用については野外スケールを含めた実験研究が今後も必要であり、特に圧入から長時間経過後の不純物の挙動はまだ解明すべき点が多いとしています。

6. 10 周年特集号の先には？

ここまで紹介したように、SRCCS 以降 10 年で CO₂ 地中貯留の理解の仕方は著しく変わりました。たとえば貯留メカニズムと安定化を例に挙げれば、SRCCS ではほぼ未



第 5 図 TOUGH-REACT シミュレーションで描き出された対流混合の状況。側方延長 5,000 m、厚さ 400 m の 2 次元モデルに年 25 万トンの CO₂ を 50 年間圧入したことを想定してのシミュレーションでの、溶存 CO₂ の分布を示す。溶存 CO₂ 濃度は、図の青から赤に向かって高くなる。上段=圧入開始から 1,050 年後。CO₂ プリウムがモデルの貯留層上面に達しキャップロックの底を横に広がり始めた状況を示す、溶存 CO₂ 分布。下段=同じく 10,050 年後。CO₂ 溶解によってプリウムの柱の部分が横に崩れ、上部からは密度の増した地層水が底部に沈下しつつある。戸高ほか (2009) より抜粋。

知であった各種貯留メカニズムの寄与度が量的に把握できるようになってきました。一方で、貯留メカニズムとその時間変化はサイトごとに異なり、統一的にとらえることはできないこともわかってきました。貯留メカニズムの寄与を定量的に把握することは可能であるが、そのためには限られた情報量からいかに正確に不均質な地下の状況を知ることができるかということが、実用上は鍵となるわけです。シミュレーション技術が高度化しても、実データが限定的であれば、それが描かれる結果を制約することは言うまでもありません。

特集号の各論文では、それぞれの領域で今後目指すべき方向性も示されています。ここで各論文の結論は、必ずしも調和した方向ではないということに注意する必要があります。たとえば論文8で貯留層の圧力上昇とこれに起因しての断層などを経由した漏洩が懸念される一方、CO₂漏洩の環境影響をまとめた論文14ではこのようなすでにシナリオ化された漏洩は大きく影響しないと結論しています。こういった一種の食い違いは、今後実用規模を含めた貯留実証で経験を積むことによって収束していくと思われれます。

SRCCSにインベントリーに関する章があったように、温暖化対策の文脈からは貯留CO₂量はある程度厳密に把握される必要があります。特集号では、論文7や8が象徴するように深部塩水帯水層貯留に重点が置かれていますが、世界各地で実施中のCO₂地中貯留の約3/4はCO₂を用いた石油・天然ガスの増進回収(CO₂-EOR)であり、この手法は今後も重要な位置づけを持つと見られています(Global CCS Institute, 2014)。CO₂-EORでのCO₂は一種の薬剤として繰り返し使用されるため、地下に実際に留め置かれたCO₂量の把握が難しいという特性があります。これは地球温暖化対策の文脈上は、あまりありがたくない特性と言えましょう。

CO₂-EORには実施可能な場所が地理的に遍在する問題がありながら、2008年のリーマン・ショックをきっかけに、「CO₂分離・回収と利用・貯留(CCUS)」とよばれて重要性が強調されるようになりました。このようなリアクションは、深部塩水帯水層貯留が経済的メリットを持たないことによるもので、環境対策としてのCO₂地中貯留の最大の弱点とも言えます。この難点を技術開発によるコストダウンではたして克服できるかどうかは、CCS関係者すべてにとって未知の領域といえるでしょう。

CO₂の回収でも、特集号が取り上げた石炭火力発電以外に多様な発生源が存在し、温室効果ガス対策としてはそれらへの対応が残されていることを忘れてはならないでしょ

う。さらに発電セクターでは、先進国を中心に石炭から天然ガスへのシフトが起こっていることに注意すべきでしょう。ガスタービン発電からのH₂Oに富む排ガスからのCO₂分離回収は、いろいろな意味で石炭燃焼と同じとは限らないと予想されます。

一方で石炭は石油と違って分布が偏在しないため、発展途上国にとって今後も利用しやすいエネルギー資源であることに変わりはありません。石炭火力発電所を前提とするCCS技術には、今後は発展途上国支援という展開がありうるでしょう。

日本は地質学的変動帯にあるため、CO₂地中貯留が既存の断層に及ぼす影響、とくに断層の再活動とそれに伴う地震発生、ひいては貯留CO₂が漏洩することが心配されます。特集号の論文には断層の問題に言及するものがいくつもありますが、断層とそのジオメカニカルな安定性を主題としたものはありません。しかし断層がCO₂地中貯留にとってさまざまな意味で重要であることは認識されており、IEAGHGはCO₂地中貯留での断層の安定性に関する機関レポートを発表して(IEAGHG, 2015)、断層の安定性の判断基準について機関としての見解を示しています。

断層は廃止坑井とともに、貯留CO₂の潜在的漏洩経路として常に想定されるものです。天然ではCO₂湧出はごく普通に観察されるにもかかわらず、CCSで貯留CO₂が漏洩する可能性は、事業が社会的になかなか受け入れられない理由の1つとなっています。このため、シナリオ化された漏洩をあまり危惧しない特集号の論文14に筆者は、実際はその通りかもしれないとは思いつつ、やや楽観的ではないかという感想を持っています。砕いていえば、安全であると示すことだけで安心は得られないのではないかということです。CCSが地球温暖化対策となるためにはいたるところでそれが実施される必要がありますが、社会の側の受け止め方はどうでしょうか？オピニオン・リーダーたちを巻き込む努力が必要ではないでしょうか。

7. 日本の実証試験と産総研への期待

日本は世界第5位のCO₂排出国であり、CCS研究にも早期から取り組んできました。世界で初めての陸域での貯留実証試験である岩野原実証試験から14年を経て、2016年4月には、北海道の苫小牧で年10万トン規模のCCS実証試験が始まる予定です。この試験は、石油精製の過程で発生するCO₂を陸上輸送の上、苫小牧沖の浅海底下の地層に貯留する、日本で初めての回収-輸送-貯留が一貫した試験であることが特徴です。

産総研での CO₂ 地中貯留研究は、中尾ほか (2014) によって取りまとめのうえ、GSJ 地質ニュースの特集号として紹介されています。産総研での研究は、CO₂ 地中貯留で標準的である三次元弾性波探査と組み合わせる地球物理学的モニタリング手法の開発と (相馬ほか, 2014; 石戸ほか, 2014; 杉原, 2015), わが国の地質に合わせ亀裂系を有する細かなスケールの砂岩泥岩互層が貯留の場所となることを想定して CO₂ の閉じ込め性能を評価しようという遮蔽性能評価の研究 (徂徠ほか, 2014; 奥山ほか, 2014) を柱としてきました。この一連の紹介記事の後には、苫小牧実証試験を踏まえてモニタリング研究の拠点を実証試験エリアに移してきました。2015 年度には、2016 年からの CO₂ 圧入にそなえた地球物理学的モニタリングのためのベースライン観測が始まっています。第 3 図に見るように、浅海底下の地層をターゲットにした地球電磁気学的モニタリングは世界でもほとんど例がなく、成果が目まぐるしく進んでいます。

日本では、CO₂ 地中貯留を組み込んだ CCS はあまり話題にならず経緯してきました。特に 2011 年の東日本大震災以降は、エネルギーの安定供給と原子力発電の問題の方が注目され、CO₂ 問題は棚上げにされたようにも思えます。しかし IPCC の第 5 次評価報告書を待つまでもなく、地球温暖化の影響はじわじわと身近に及びつつあります。2015 年 5 月にハワイでの継続観測で大気中 CO₂ 濃度が 400 ppm を超えた (NOAA, 2015) ことが報じられ、大気中 CO₂ の濃度上昇が温暖化の原因であるという理解が少しずつ広まってきたように思われます。同時に温室効果ガス対策としての CO₂ 地中貯留も、苫小牧実証試験が最近の経済誌に取り上げられたように (河野, 2015) 注目されてきているようです。産総研の CO₂ 地中貯留研究は、2016 年度から新しいフェーズに入る予定です。日本の地質条件に合った CCS についての技術的展望が開けることを期待して、本稿を終えることといたします。

文 献

- Abanades, J.C., Arias, B., Lyngfelt, A., Mattisson, T., Wiley, D.E., Li, H., Ho, M.T., Mangano, E. and Brandani, S. (2015) Emerging CO₂ capture systems. *JGGC*, **40**, 126-166.
- Ashworth, P., Wade, S., Reiner, D. and Liang, X. (2015) Developments in public communications on CCS. *JGGC*, **40**, 449-458.
- Bachu, S. (2015) Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers. *JGGC*, **40**, 188-202.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., Maathiasen, O.M. (2007) CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps. *JGGC*, **1**, 430-443.
- Birkholzer, T., Oldenburg, C.M. and Zhou, Q. (2015) CO₂ migration and pressure evolution in deep saline aquifers. *JGGC*, **40**, 203-220.
- Dixon, T., McCoy, S.T. and Havercroft, I. (2015) Legal and regulatory developments on CCS. *JGGC*, **40**, 431-448.
- Emami-Meybodi, H., Hassanzadeh, H., Green, C.P. and Ennis-King, J. (2015) Convective dissolution of CO₂ in saline aquifers: Progress in modeling and experiments. *JGGC*, **40**, 238-266.
- Gale, J., Abanades, J.C., Bachu, S. and Jenkins, C. (2015) Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO₂ Capture and Storage. *JGGC*, **40**, 1-5
- Global CCS Institute (2014) The global status of CCS 2014. Global CCS Institute. <https://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/180923/global-status-ccs-2014.pdf> (2015 年 12 月 3 日確認)
- Hovorka, S.D., Benson, S.M., Doughty, C., Freifeld, B.M., Sakurai, S., Daley, T.M., Kharaka, Y.K., Holtz, M.H., Trautz, R.C., Nance, H.S., Myer, L.R. and Knauss, K.G., (2006) Measuring permanence of CO₂ storage in saline formations: the Frio experiment. *Environ. Geosci.* **13**, 105-121.
- Idem, R., Supap, T., Shi, H., Gelowitz, D., Ball, M., Campbell, C. and Tontiwachwuthikul, P. (2015) Practical experience in post-combustion CO₂ capture using reactive solvents in large pilot and demonstration plants. *JGGC*, **40**, 6-25.
- IEAGHG (2014) GHGT-12 conference summary. http://ieaghg.org/docs/General_Docs/GHGT-12%20Summary%20Brochure.pdf (2015 年 10 月 29 日確認)
- IEAGHG (2015) Criteria of fault geomechanical stability during a pressure build-up. Report:2015/04, 111pp. http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2015-04.pdf (2015 年 10 月 29 日 確認)
- IPCC (2005) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 431pp.

- 石戸経士・杉原光彦・西 祐司 (2014) ポストプロセスによる地球物理観測量の変動予測. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 143-148.
- Jansen, D., Gazzani, M., Manzolini, G., Dijk, E.V. and Carbo, M. (2015) Pre-combustion CO₂ capture. *JGGC*, **40**, 167-187.
- Jenkins, C., Chadwick, A., Hovorka, S.D. (2015) The state of the art in monitoring and verification—Ten years on. *JGGC*, **40**, 312-349.
- Jones, D.G., Beaubien, S.E., Blackford, J.C., Foekema, E.M., Lionse, J., Vittor, C.D., West, J.M., Widdicombe, S., Hauton, C. and Queirós, A.M. (2015) Developments since 2005 in understanding potential environmental impacts of CO₂ leakage from geological storage. *JGGC*, **40**, 350-377.
- 河野拓郎 (2015) CO₂ を海底下に封じ込める！ 地球温暖化対策の切り札「CCS」開発最前線. *Diamond_on_Line* - “激変 エネルギー最新事情”, *ダイヤモンド*. <http://diamond.jp/articles/-/80490> (2015 年 10 月 27 日 確認)
- Kemper, J. (2015) Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. *JGGC*, **40**, 401-430.
- Krevor, S., Blunt, M.J., Benson, S.M., Pentland, C.H., Reynolds, C., Al-Menhali, A. and Niu, B. (2015) Capillary trapping for geologic carbon dioxide storage – From pore scale physics to field scale implications. *JGGC*, **40**, 221-237.
- Liang, Z.H., Rongwong, W., Liu, H., Fu, K., Gao, H., Cao, F., Zhang, R., Semaa, T., Henni, A., Sumon, K., Nath, D., Gelowitz, D., Srisang, W., Saiwan, C., Benamor, A., Al-Marri, M., Shi, H., Supap, T., Chan, C., Zhou, Q., Abu-Zahra, M., Wilson, M., Olson, W., Idem, R. and Tontiwachwuthikul, P. (2015) Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *JGGC*, **40**, 26-54.
- Nakanishi, S., Mizuno, Y., Okumura, O., Miida, H., Shidahara, T. and Hiramatsu, S. (2009) Methodology of CO₂ aquifer storage capacity assessment in Japan and overview of the project. *Energy Procedia*, **1**, 2639-2646.
- 中尾信典・當舎利行・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留技術の概要と産総研での取り組み. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 133-136.
- NOAA (2015) Recent monthly mean CO₂ at Mauna Loa. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> (2015 年 10 月 27 日 確認)
- 奥山康子・船津貴弘・藤井孝志 (2014) CO₂ 地中貯留での地盤変化を予測する—岩石力学—流体流動シミュレーション研究—. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 149-152.
- Pawar, R.J., Bromhal, G.S., Carey, J.W., Foxall, W., Korre, A., Ringrose, P.S., Tucker, O., Watson, M.N. and White, J.A. (2015) Recent advances in risk assessment and risk management of geologic CO₂ storage. *JGGC*, **40**, 292-311.
- Rubin, E.S., Davison, J.E. and Howard J. Herzog, H.J. (2015) The cost of CO₂ capture and storage. *JGGC*, **40**, 378-400.
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 137-142.
- 徂徠正夫・佐々木宗建・藤井孝志・加野友紀・上原真一 (2014) CO₂ 地中貯留における砂岩泥岩互層の遮蔽性能評価. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 153-156.
- 杉原光彦 (2015) テキサス州ファンズワースでの重力計測の手記. *GSJ 地質ニュース*, **4**, 251-258.
- Stanger, R., Wall, T., Spörl, R., Paneru, M., Grathwohl, S., Weidmann, M., Scheffknecht, G., McDonald, D., Myöhänen, K., Ritvanen, J., Rahiala, S., Hyppänen, T., Mletzko, J., Kather, A. and Santos, S. (2015) Oxyfuel combustion for CO₂ capture in power plants. *JGGC*, **40**, 55-125.
- Talman, S. (2015) Subsurface geochemical fate and effects of impurities contained in a CO₂ stream injected into a deep saline aquifer: What is known. *JGGC*, **40**, 267-291.
- 戸高法文・奥山康子・赤坂千寿・佐々木宗建・當舎利行 (2009) 地化学・貯留層シミュレーションによる二酸化炭素の地化学トラッピングの検討：東京湾岸モデル. *岩石鉱物科学*, **38**, 90-100.
- 當舎利行・奥山康子 (2008) CCS 技術開発と評価—CO₂ 地中貯留技術の現状と展望. *産総研 TODAY*, **8**, no.1, 14.

OKUYAMA Yasuko (2016) 10 years from SRCCS.

(受付：2015 年 12 月 1 日)