

CO₂地中貯留のリスクマネジメント

鳥羽瀬 孝臣^{1*}・庄路 友紀子¹

¹電源開発株式会社 技術開発部 茅ヶ崎研究所（〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88）

*E-mail: takaomi_tobase@jpower.co.jp

化石燃料を用いて発電しながらCO₂排出を抑制できる CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）は、電力の安定供給と気候変動緩和を両立させることのできる革新的技術開発として期待が寄せられている。一方、CCSを構成するCO₂地中貯留は地下深部（自然）を対象とするため不確実性を伴い、それに対処するためのリスクマネジメントが必要である。CO₂地中貯留で懸念される主要なリスクは、貯留性能（圧入性能・貯留容量）リスク、漏洩リスク、誘発地震リスクの3つである。本稿では、これらのリスクを評価するに際しての留意点及び、リスク対応（リスク要因を踏まえた上での調査・監視・対策）について概説する。また、CO₂地中貯留の社会的受容性に資するリスクコミュニケーションについても言及する。

Key Words : CCS, CO₂ underground storage, risk management, risk communication

1. はじめに

化石燃料を用いて発電しながら CO₂ 排出を抑制できる CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）は、電力の安定供給と気候変動緩和を両立させることのできる革新的技術開発として期待が寄せられている。CCS は、CO₂ の分離回収・圧縮液化・輸送・地中貯留の各工程で構成される。分離回収・圧縮液化・輸送は人工的な設備や機器で処理するため人為的にコントロールできると考えられるが、地中貯留は地下深部（自然）を対象とするため大きな不確実性が伴う。本稿では、CO₂ 地中貯留の不確実性に対処するためのリスクマネジメント及び、社会的受容性に資するリスクコミュニケーションについて概説する。

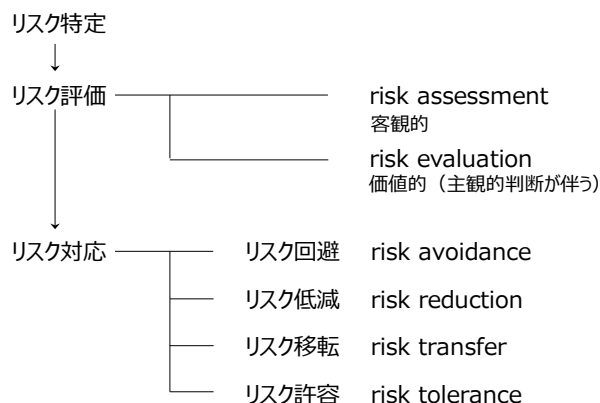


図-1 リスクマネジメントの流れ

2. 一般的なリスクマネジメント

リスク（risk）の定義は、分野毎に様々異なるが、本稿では以下を採用する。

定義1：the probability of something bad happening at some time in the future（将来のいつか何か悪い事象が起きる可能性）¹⁾

定義2：悪い事象（危害など）の大きさとその発生確率の組み合わせ

一般的なリスクマネジメントは図-1 に示すように、リスクを特定・評価し、リスクの程度に応じてリスク対応を講じる。リスク対応は、図-2 に示すとおり、リスクが大きいと評価される場合には回避措置を講じるが、リスクが十分に小さいと評価される場合には許容する（リスクをゼロにすることはできないが残余リスクを認めて安全とみなす）ことになる。回避と許容の間にある一定レベルのリスクに対しては低減措置（いわゆる安全対策）を講じて、リスクを許容レベル以下にまで小さくすることが求められる。なお、図-1 に示すリスク移転は、保険に加入するなどリスクを外部に移すものであり、本考察の対象からは除外する。

3. CO₂地中貯留のリスク特定・評価

CO₂ 地中貯留を実施する際に懸念される主要なリスクは次の3つであると考えられる。

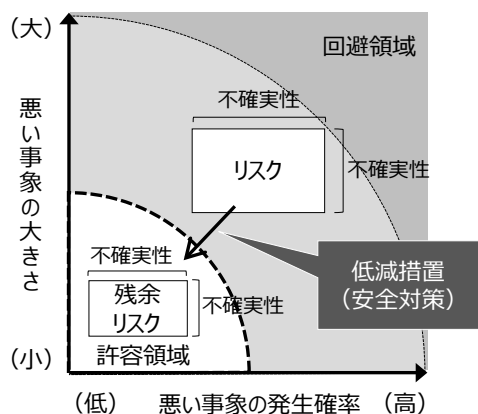


図-2 リスク対応

- ① 貯留性能リスク
- ② 漏洩リスク
- ③ 誘発地震リスク

(1) 貯留性能リスク

貯留層の貯留性能に大きな影響を与えるのは、圧入性能 (injectivity) と貯留容量 (capacity) である。

圧入性能 (injectivity) は、単位時間当たりの CO_2 圧入量 ($\text{ton-CO}_2/\text{time}$) で示される。圧入時の圧力が大きければそれだけ多くの CO_2 が圧入できるが、許容圧入圧力 (遮蔽層の破壊圧の 90% 程度) 以下にしなければならない。つまり、圧入性能の良い貯留層とは、圧入時の圧力応答が小さい地層であり、高い浸透率を有することが条件となる。また、長期的には、圧入時の貯留層圧力の上昇により圧入性能が低下することや、圧入井周辺のドライアウトに伴う塩の析出、地化学反応による鉱物沈殿 (目詰まり) による浸透率低下などの影響についても留意が必要である。

貯留容量 (capacity) は、貯留層における CO_2 貯留量 (総 ton-CO_2) で示される。貯留容量を評価する方法として、容積法と解析的手法がある²⁾。容積法は、貯留層の体積に孔隙率と貯留効率係数 (我が国では 25%~50% 程度を採用) を乗じて求めることを基本としている。解析的手法は、貯留層の不均質性や圧入井の配置、圧入手順など具体的な条件を反映したモデルを用いて貯留シミュレーションを行うもので、貯留容量をより精度良く推定できる。その際、不均質な貯留層とその不確実性をどのようにモデル化するかが重要となる。

貯留層の貯留性能の良し悪しは、CCS の経済性を左右する³⁾ ため、CCS 事業の実施 (投資) 判断に大きな影響を与える。貯留層の貯留性能評価の流れを図-3 に示す。貯留サイトを選定し、事業実施 (投資) 判断を行うタイミングにおいて得られる地質情報は限られており、それに基づく貯留性能評価は大きな不確実性を有しているが、CCS 事業の進行とともに地質情報が追加更新さ

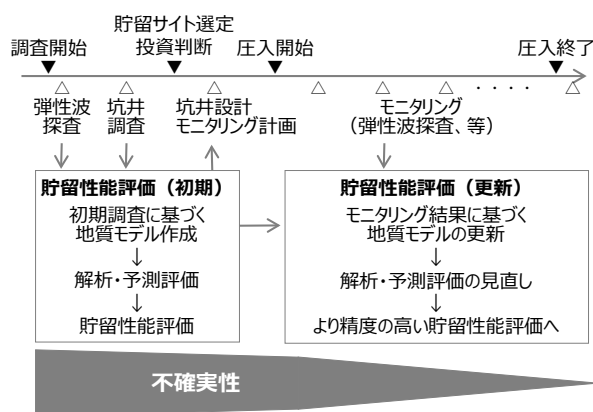


図-3 貯留層の貯留性能評価の流れ

れることにより不確実性は低減していくと考えられる。

(2) 漏洩リスク

漏洩 (containment) とは、貯留層に圧入された CO_2 が遮蔽機能を破って大気中や海水中に漏れ出すことである。

CO_2 地中貯留の方法として、在来型石油ガスと同様に遮蔽層を必要とする帯水層貯留が一般的であるが、温度圧力条件によるハイドレートメカニズムを利用し遮蔽層を必要としない CO_2 ハイドレート貯留⁴⁾ も提案されている。帯水層貯留における CO_2 漏洩リスクは、貯留層上部の遮蔽層 (泥岩等) のシール性能に依存することになる。

帯水層貯留の場合、 CO_2 が漏洩する要因は、遮蔽層のシール性能不足、遮蔽層を貫通して漏洩経路となる断層や、既存坑井の存在などが考えられる。したがって、漏洩を防止するためには、事前に遮蔽層の浸透率や強度の確認、断層や既存坑井の有無及び性状の確認が必要である。また、 CO_2 圧入時には遮蔽層を破壊しないように許容圧入圧力以下での圧力管理を行わなければならない。

リスクの時間的変化に関して言えば、 CO_2 圧入後時間経過とともに CO_2 貯留量が増大することや貯留層内の圧力の上昇によって CO_2 の漏洩リスクは高まると考えられる。先に述べた貯留性能リスクが圧入開始前の投資判断時の懸念事項であるのに対して、漏洩リスクは圧入時・圧入終了後の懸念事項である。

(3) 誘発地震リスク

誘発地震 (induced seismicity) に関しては、シェールガス生産や高温岩体地熱発電等で地層内への流体圧入時に誘発地震を引き起こすことが指摘されている。これらの圧入圧力は岩盤を破碎させるほど大きい。一方、 CO_2 地中貯留の圧入圧力は遮蔽層を破壊しないようにコントロールされており、誘発地震を引き起こす圧入圧力とは異なる。

世界中の CO_2 圧入サイトでは地震観測が実施されており、日本でも、長岡 CO_2 圧入実証試験 (圧入期間：

2003.7～2005.1, 圧入量：約 10,400 ト) 及び苫小牧 CCS 実証試験 (2019 年 3 月現在で CO₂圧入量は約 23.3 万ト) において微小地震観測が行われている。これらの地震観測を通じて、今のところ CO₂圧入に伴う地震が生じた事例はない⁵⁾。

また、上記報告⁵⁾では、「CO₂圧入サイトでは、圧入井からどれくらい離れた範囲までのイベントを観測するかが重要な検討課題になっている。米国環境保護局 (EPA) は CO₂圧入に伴う貯留層圧力増加の予測計算結果を基に、監視区域を設定している。合理的に監視区域を決定するには、圧入した CO₂の分布域と圧入フロントの関係を科学的に検証する必要がある」とされている。

CO₂地中貯留に伴う誘発地震リスクは小さいと考えられるが、自然地震が多い日本では、社会受容性の観点からも、上記事項を踏まえて事前・圧入時に微小振動を含めた地震観測をしっかり行うことが必要と考えられる。

4. CO₂地中貯留のリスク対応

CO₂地中貯留において懸念される3つのリスク (貯留性能リスク、漏洩リスク、誘発地震リスク) への対応を、それぞれのリスク毎に要因、調査、監視 (モニタリング)、対策に分類・整理して表-1、表-2、表-3 に示す。

表-1 貯留性能リスクへの対応

injectivity/capacity	
要因	・貯留層の広がり不十分 (遮蔽性断層の存在) ・浸透率の空間的低下 (不均質性) ・浸透率の時間的低下 (目詰まり等) ・坑井障害 ・貯留層圧力の増加 ・遮蔽層の強度不足
調査	《弾性波探査》 ・反射面 (地層境界等) の解釈 → 貯留層、断層の分布確認 ・物性分布評価 (アトリビュート解析等) 《坑井試験》 ・坑内検層/コア試験 → 貯留層の浸透率、孔隙率等の確認
監視	《常時》 ・貯留層内の圧力応答 《適宜》 ・上記調査時の弾性波探査をベースラインとして、圧入開始後の弾性波探査による反射面変化の解釈 → CO₂の挙動把握
対策	《事前対策》 ・不確実性を考慮し冗長性を有する貯留計画 (代替貯留層の用意等) 《事後対策》 ・圧入井、圧力緩和井の追加配置 ・代替貯留層 α 圧入区間への圧入変更

表-2 漏洩リスクへの対応

containment	
要因	・遮蔽層のシール性能不足 ・漏洩経路となる断層の存在 ・漏洩経路となる坑井の存在 ・地震等による坑井設備の破損
調査	《弾性波探査》 ・反射面 (地層境界等) の解釈 → 遮蔽層、断層の分布確認 《坑井試験》 ・坑内検層/コア試験 → 遮蔽層の浸透率、強度等の確認 《その他調査》 ・既存坑井の存在位置、プラグ状況の確認
監視	《地表》 ・大気中の CO₂濃度 《海面下》 ・海水中の CO₂濃度 ・海底面の気泡調査
対策	《事前対策》 ・断層や既存坑井の慎重な調査 ・CO₂濃度に関する入念なベースライン調査 《事後対策》 ・不良坑井のプラグ修復 ・圧入停止

表-3 誘発地震リスクへの対応

induced seismicity	
要因	・貯留層圧力の増加に伴う地盤、断層内の有効応力低下 ・クリティカルにストレスされた地震断層の活性化
調査	・周辺活断層の調査・評価 ・地殻応力場の評価
監視	・広域地震観測 (Hi-Net 等) ・貯留サイトにおける地震 (微小振動) 観測 ・光ファイバーによる歪監視 ・安全管システム (Traffic Light System)
対策	《事前対策》 ・誘発地震の可能性について十分な調査 (第三者委員会) ・地震発生に関する入念なベースライン調査 《事後対策》 ・圧入圧力の低下 α 停止 ・迅速な情報公開 ・圧入と地震発生との関連性に関する迅速な検討

CO₂地中貯留におけるリスクマネジメントで重要な点は、貯留層評価の不確実性を考慮した冗長性を有する貯留計画、漏洩監視のための適切なモニタリング計画、社会受容性の観点から綿密な地震観測であると考えられる。リスクマネジメントを行う上で、リスク要因、事前調査、貯留中及び貯留後のモニタリング、事前対策及び事後対策 (リスクが顕在化した場合) をあらかじめ考慮し、事業計画に織り込んでおくことが肝要である。

5. CO₂地中貯留のリスクコミュニケーション

CO₂ 地中貯留に伴う3つのリスクのうち、貯留性能リスクは経済性に大きな影響を与えるが、漏洩リスクと誘発地震リスクは安全性の問題である。

安全 (safety) は、国際基本安全規格 (ISO/IEC GUIDE 51:2014) によれば “freedom from risk which is not tolerable (許容できないリスクがないこと)” と定義され、同規格では、許容可能なリスク (tolerable risk) について、

“level of risk which is accepted in a given context based on the current values of society (その時代の社会の価値観に基づき、所与のコンテキストにおいて受け入れられている水準のリスク)” としている。つまり、安全は科学技術による客観的評価だけでなく、人びとの価値観 (主観的評価) を含む概念と理解できる。

図-2 に示すリスク対応において、「リスクが十分に小さいと評価される場合には許容する (安全とみなす)」と述べたが、ここで問題となるのは、評価する主体は誰かということになる。事業者や専門家が「安全」とみなしても、一般市民が「安全」とみなすとは限らない。安全の概念には、価値観 (主観的要素) を内包しているからである。

CCS は新しい技術であり、一般市民にとっては認知度の低い分野であると考えられる。CCS を社会実装し、一般社会に広く受け入れてもらう (社会受容性を得る) ために、事業者は CCS 事業に関して、表-4 に示す3つの側面 (必要性、妥当性、正統性) に留意した情報提供を行う必要があると考えられる⁹⁾。その上で、一般市民の意見や懸念に耳を傾け、相互作用的なリスクコミュニケーションを図ることが重要である。

現在、日本 CCS 調査会社は経済産業省の委託を受けて苫小牧 CCS 実証試験を行っている。同会社はホームページで実証試験に係る情報を積極的に公開しており、社会受容性の観点からも大いに参考にすべきである。

表-4 CCS 事業における情報提供のポイント

必要性	・エネルギー問題と気候変動問題との関連性についての理解促進 ・CCS は電力の安定供給と脱炭素を両立させることができる技術であることの理解促進
妥当性	・CO₂ 地中貯留のリスクや安全性に関する正確な情報提供 ・貯留サイト選定の根拠 ・地域経済への貢献
正統性	・許認可等手続きに瑕疵がないこと ・リスク情報を含めて、積極的に情報公開を行う姿勢

6. おわりに

CCS を事業として行う場合には、特に CO₂ 地中貯留の不確実性に対処するためのリスクマネジメント及び、社会受容性に資するリスクコミュニケーションが必要であることを述べた。

国の地球温暖化対策計画 (2016 年 5 月 13 日、閣議決定) では、温室効果ガスを 2050 年までに 80%削減を目指すとの長期目標を掲げている。電力部門は、日本の CO₂ 排出量の約半数を占めており、この目標達成に向けて果たすべき役割は大きい。電力の安定供給と脱炭素化を両立させる CCS の実用・商用化を目指して研究に邁進する所存である。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、助言をいただいた大成建設株式会社の山本肇氏と畑明仁氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) オックスフォード現代英英辞典 第9版, オックスフォード大学出版局
- 2) 鳥羽瀬孝臣, 西山治希, 木野戸広: CO₂ 地中貯留における貯留層評価, 電力土木, No.399, pp.59-63, 2019.
- 3) 鳥羽瀬孝臣, 尾留川剛, 庄路友紀子: CCS の経済性評価, 電力土木, No.402, pp.80-84, 2019.
- 4) 鳥羽瀬孝臣, 池川洋二郎: ハイドレートを利用した CO₂ 地中貯留の提案, 電力土木, No.396, pp.82-86, 2018.
- 5) 薛自求: CO₂ 地中貯留技術開発の動向, エネルギー・資源, Vol.40 No.3, pp.24-27, 2019.
- 6) 鳥羽瀬孝臣: 社会的選択問題における合意形成, 科学技術社会論学会第16回年次研究大会予稿集, pp.81-82, 2017.
- 7) 日本 CCS 調査会社: <https://www.japanccs.com/>

RISK MANAGEMENT OF CO₂ UNDERGROUND STORAGE

Takaomi TOBASE, Yukiko SHOJI

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) can control CO₂ emission while generating electricity using fossil fuel, can balance climate change mitigation with steady supply of the electricity. On the other hand, risk management to deal with it is necessary for the CO₂ underground storage to constitute CCS with uncertainty to intend for a deep part under the ground. The main risk concerned about by CO₂ underground storage are injectivity, capacity, containment, induced seismicity. This report explain outline about risk assessment and risk countermeasure (investigation, monitoring, measures on having been based on a risk factor).