

3. 二酸化炭素地中隔離におけるリスク・アセスメントの考え方

Risk Assessment Scheme of CO₂ Geologic Sequestration

山本晃司*

Koji YAMAMOTO*

Abstract; Risk assessment of CO₂ leakage from geologic sequestration sites is unavoidable for the implementation of the technology. However, the nature of the risk is different from well-known other toxic materials due to the complexity and uncertainty of the earth crust structures, long life time of CO₂, and wide spatial distribution of leakage and its risk. In this paper, the characters of the risk and involved factors are summarized, and risk assessment schemes are discussed. Impacts of the leakage, flow paths, mechanism, and categorization of the storage structures are essential to assess the risk. A quasi quantitative analysis method is also proposed.

Key Words; Geologic sequestration, leakage, safety and environment, Global warming

1. はじめに

二酸化炭素の地中隔離は、経済発展と温室効果ガスの排出削減が両立できる現実的な手段として注目されている。隔離技術に関する IPCC の特別報告書が今年中に公開される予定で、2008 年からの京都議定書の第一約束期間に向けて実用化への拍車がかかると思われる。そこで問題になるのは地中貯留が長期的に確実な隔離手法であるかどうかであるが、地下の流体の挙動には不確実性の存在が避けられず、CO₂ のリークはなんらかの形で起こりうると考えるべきであろう。筆者らは排出量の国別インベントリに隔離量をどう反映させるかという政策的な課題の検討 (Yoshigahara et al., 2004) の過程で、CO₂ の隔離とリークの特性を分析した。CO₂ リークのリスクはサイトの選定、経済性、技術の社会的受容性等と密接に関わっており、技術課題としてのみでなく社会における技術の適用性という観点からも重要である。そこで、ここではリークの時間的、空間的拡がりや影響について整理し、リスク解析の課題について整理することとする。

2. CO₂ 地中隔離のリスク特性

(1) CO₂ 漏洩のリスク解析

CO₂ のリークアセスメントの流れを図 1 に示す。ここで示すように、CO₂ の漏洩の時間・空間的拡がりを解析するのが第一目標で、その環境・安全へのインパクトを検討するのが第二の課題であるが、CO₂ のリークの問題では考えられる経路が多数あり、時間・空間的拡がりもバラエティに富んでいる、不確実性が高い等の点が、工場から排出される化学物質などとは同等に扱えないこの問題の特徴といえる。

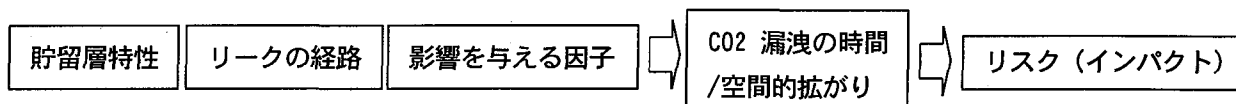


図 1 CO₂ リークのリスクアセスメントの流れ

* みずほ情報総研株式会社環境・資源エネルギー部 Mizuho Information & Research Institute

(2) CO₂の影響とリスクの種類

CO₂が大気へ放出された場合のリスク（インパクト）は、

- A. 人畜・植物の健康及び周囲の局所的生態系への影響（安全性、局所的環境影響）
- B. CO₂排出削減効果の低減（大域的環境影響、経済性）

の二つが考えられる。

自然界のCO₂による事故としては1986年8月カメルーンの火山湖の湖底からのCO₂放出で1700名以上が死亡した事故（Kling, 1987）、1997年7月八甲田山中の自衛隊員3名の死亡事故（Hernández Perez et al., 2003）等が良く知られている。しかし、CO₂は濃度1%以下では無毒で長期的な曝露があったとしても慢性障害なども生じ得ない。従って、Aについては、高濃度のCO₂が、狭い範囲に急速に放出される場合に生じると考えられる。この場合、集中度が問題でリークの総量は大きな問題とは言えない。

それに対してBの排出削減効果の低減では総量が問題となる。仮に100万キロワット級の石炭火力発電所が50年分に排出する総量にほぼ相当する230Mt-CO₂を貯留したサイトから年間1%のCO₂が漏洩したとしても年間の排出量は2.3Mt-CO₂以下であり、1990年時点でのわが国の年間総排出量である1123Mt-CO₂に比べると0.2%程度に過ぎない。従って、特定サイトの安定性が気候変動に大きな影響を与えるとは考えにくい。またこの場合は、貯留したCO₂が半分に減る期間は $\log(0.99)/\log(0.5)=69$ 年となり、実質的な効果はCO₂の排出を数十年～数百年遅らせることだということもいえる。しかし、大気中のCO₂濃度の急上昇を遅らせるという観点では、このような遅延効果も十分に意味があるともいえる。

3. リークの経路とメカニズム

(1) CO₂トラップのメカニズム

気体あるいは超臨界流体の状態におけるCO₂の比重は1以下であるので、地層水中を上向きに移動させる力が働いている。このような移動を妨げる仕組み（トラップ）はPhysical ((or Hydrostratigraphic) Trapping, Solubility Trapping, Residual Gas Trapping, Mineral Trapping)の4つに整理されている（Benson and Cook, 2004）。それらの分類と、それぞれのメカニズムのはらむ問題点を表1に示す。長期的には地層のトラップは強化されて安定化に向かうという考えもあるが、Physical Trapping 以外はいずれも圧入直後のCO₂圧力が高い状態で地層中にCO₂が一定期間留まる必要があるため、少なくとも隔離の初期にはPhysical Trappingの仕組みが必要である。

(2) 貯留層特性

貯留層の特性は次の二つに大別できる。

- ・Class 1: 確実な構造的キャップロックを持つ貯留層: 油ガス田のように過去に圧力のかかった流体を長期間保持した履歴のある貯留層。最低、油ガスの生産以前の圧力に達するまで安定的にCO₂を貯留できると考える。
- ・Class 2: シールが不確実な貯留層: 現状で不透水層の下にあってもガスの保持が可能かどうか確実でない貯留層。多くの帯水層がこのタイプである。

その他の貯留層性状には、浸透率、深度（温度・圧力を通じてCO₂の物性と関係）、フラクチャーの発達、応力条件（断層の動きやすさと関係）、化学的・鉱物的特性、人工的流路（坑井、坑道）の有無などが挙げられる。

(3) リークの時間的・空間的広がり

CO₂はmineralization（鉱物化）を除けば時間とともに量が減ることはなく、また流体として長距離移動できるので検討すべきリークの時間的・空間的広がりバラエティが大きい。地表にCO₂が現れる状況を大別したのが図2である。それぞれ数年～数千年、あるいは数m～数kmの幅があり、パターンの違いでインパクトの有り様が異なる。

表 1 トラップの種類と特徴

メカニズム	問題点
Physical (or Hydrostratigraphic) Trapping	
石油貯留層の形成と同様に、低浸透率のキャップロックと背斜等によるドーム形状の地質構造の組み合わせによるシール構造がある場合、キャップロックの低浸透性と幾何形状により CO_2 の上向き及び側方への移動が妨げられる。	油ガス田の場合は炭化水素を長期間保持するシールが存在することが確かめられるが、それ以外では圧入された CO_2 の保持が確実といえない。油ガス田の場合も、生産時・圧入時の圧力変動、あるいは掘削・坑井刺激・増進回収等によりシールが破壊されている恐れがある。
Solubility Trapping	
CO_2 が地層水に溶解すると密度は水と同程度または若干大きくなる。そのため、 CO_2 が水に完全に溶け切れれば移動は移流または拡散のみとなり、地層水の流れがなければ移動時間は非常に長くなる。	長いスケールでは移流及び拡散による移動が生じる。圧入を続けた場合は地層中の圧力分布により流れが生る。温度圧力変化により溶解度が変化する。
Residual Gas Trapping	
多孔質体中で気泡の状態で存在するガスは表面張力により孔隙を封鎖して実効的な浸透圧を減少させる。したがってガスの飽和率が一定の範囲であれば、気体の CO_2 の移動も妨げられる。	Trapping が生じるのは一定のガス飽和度の範囲（孔隙サイズ、鉱物の濡れ性等で変わる）なので圧入全量をトラップできない。
Mineral Trapping	
炭酸が地層水中あるいは岩石中の金属イオンと反応して炭酸塩鉱物を作り地層に沈着する。（石炭への吸着を含める場合もあるが、石炭の場合は地層中の CO_2 分圧が下がれば脱着するので、性質としては Solubility に近い）	反応に長い時間がかかる。酸性度があがると再度 CO_2 が発生する。

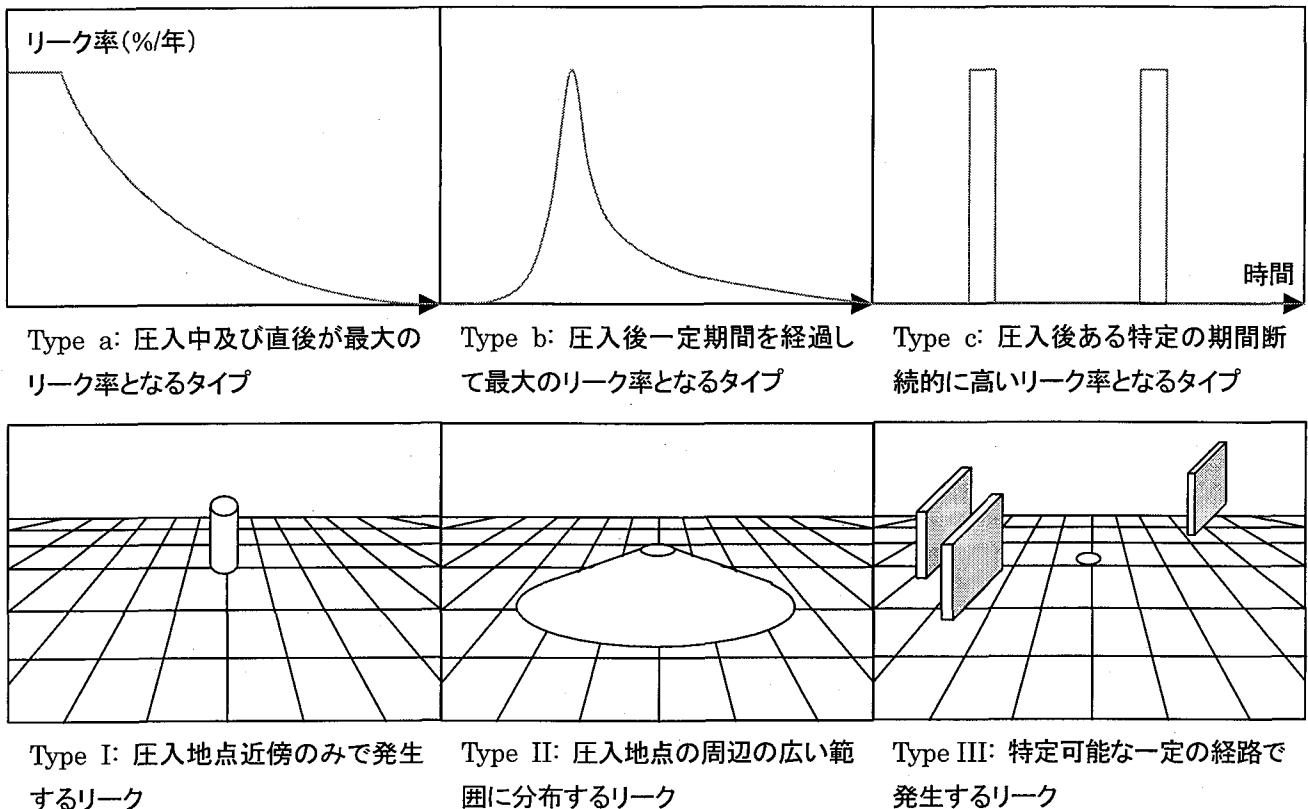


図 2 CO_2 リークの時間・空間的拡がりの例

(4) リークの経路と関連する要因

リークの経路の概念図を図 3 に示す。これらを分類し時間・空間的特徴とインパクトを整理したのが表 2 である (Yamamoto et al, 2004)。

A. 坑井及び周辺からのリークは圧入中及び終了直後の安全性に関わるリークとして最大の関心と言える。これらは主に坑井のケーシング・セメンチングの不良や炭酸との反応による劣化で生じ、地表や浅部地下水に漏洩する危険がある。Gordon and Bloom (1986) は米国における有害液体廃棄物の地下圧入による地下水の汚染事故について多数報告しているが、それらの汚染の要因の多くがこの問題である。

B. 廃坑坑井等の人工パスからのリークは確実なキャップロックを持つ油ガス田においては最大の懸念と言える。特に廃坑技術の未熟であった古い時期に開発された油ガス田において大きな問題といえる。

C. シール・キャップロックの浸透性 (断層・き裂等の地層の不連続性を含む) によるリークは最も一般的に検討されている課題で、未知の断層・き裂の存在、キャップロックと CO_2 の化学反応などの要因が予測との差を生み出す。

D. 圧力変動による貯留構造の一時的破壊は、油ガス生産時の圧力低下、あるいは増進回収技術や CO_2 圧入で貯留層周辺の断層が再活性化される過程での浸透性向上であり、キャップロックの力学的条件に影響される (Yamamoto and Takahashi, 2004)。

E. 地震等の外力による貯留構造の破壊は一時的なものと恒久的なものがあり、恒久的なものはサイトが適切に選ぶことで低確率にできる。地震等の影響は、1965-67 年の松代群発地震で CO_2 が地表に現れたことが知られていて、また最近もイタリアにおける地下のガス移動と余震活動の活動が報告される (Miller et al, 2004) など無視できないが、必ずしも恒久的破壊に破壊に結びつくとはいえない。

4. リスク評価の考え方

CO_2 の漏洩リスクの評価は、インベントリ作成、経済性評価、安全性確保等それぞれの目的によって異なった方法で行われると考えられるが、モデル化による将来予測を重視する考え方と、モニタリングによる現状把握を重視する考え方の二つがあり得る。モデル化にはデータが十分にありメカニズムが理解されていることが前提となり、適用できるフィールドは限られるが、将来のリスクを含めて検討できる利点がある。この場合もモニタリング結果による検証が必要である。

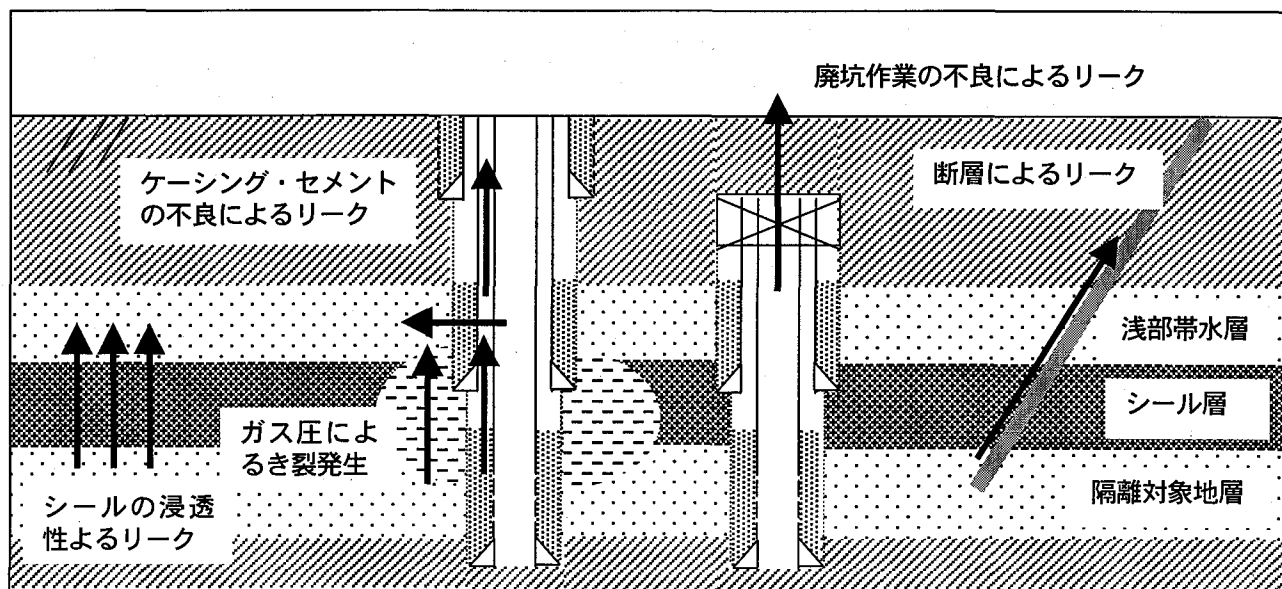


図 3 リーク経路の概念図

モニタリング重視とした場合でも、計測項目や位置の特定には何らかのモデル化検討が必要である。モニタリングは実態をベースにするという点でより信頼性が高いように見えるが、将来的なリスクをサイトの評価に含めることができない。従って、モデリングとモニタリングを相互に補完しあう関係とも言える。

筆者らはリークのリスクの準定量的な評価式を提案しており (Itaoka et al., 2004), そこでは CO_2 の状態を有効粘性係数 η , リークの経路を有効浸透率 $k^{\text{effective}}$, CO_2 を移動させる力を有効密度 $\Delta\rho g$ に代表させ、サイト情報の不確実性の程度を反映した二種類の式を用いている (図 4)。

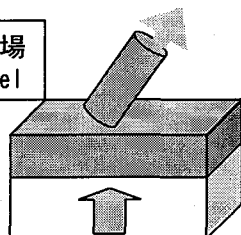
表 2 リーク経路とそれらの特徴

漏洩経路	時間的特徴	空間的特徴	関連する要因	インパクト
A. 坑井及び周辺からのリーク	圧入中及び直後に高く以後低減	坑井周辺で高い	掘削時のオペレーション, ケーシング・セメントと炭酸の反応	A
B. 廃坑坑井等の人工パスからのリーク	圧入後一定期間経過後, 継続的. 比較的高レート.	坑井付近に集中, ただし坑井が多数で位置が不明な場合は広域的	坑井の掘削時期, 廃坑方法	A, B
C. シール・キャップロックの浸透性 (断層・き裂等の地層の不連続性を含む) によるリーク	長期・低レートの安定的漏洩	広域的	キャップロックの健全性, キャップロックと CO_2 の化学反応	B
D. 圧力変動による貯留構造の一時的破壊	圧入直後最大確率, 以後	局所的. ただし, 断層位置が確定できない場合は広域的	地殻応力, 粘土鉱物の影響	A, B
E. 地震等の外力による貯留構造の破壊	地震: 一定確率の断続的漏洩, 開始直後高レート	断層に局所化	地震による応力変化	A, B
	火山活動等: 低確率, 発生後急速な漏洩	広域	想定外の事態	A, B

地層 (キャップロック) の特性・ CO_2 の物性を H, ρ, k, η の 4 つに集約して CQF (Cap Rock Quality Factor) 計算

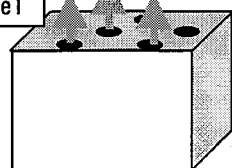
$$CQF = \frac{H}{\kappa}, \quad \kappa = \frac{k^{\text{effective}} \Delta\rho g}{\eta}, \quad k^{\text{effective}} = k^{\text{mat}} + k^{\text{frac}} + k^{\text{well}}$$

不確実性が低い場合: Conduit Model



時刻 $0 \sim CQF$: $v_{\text{leak}} = 0$
 時刻 $CQF \sim CQF + V_{\text{injected}}/\kappa A$: $v_{\text{leak}} = \kappa A$ (A: 流路の面積)
 時刻 $CQF + V_{\text{injected}}/\kappa A \sim \infty$: $v_{\text{leak}} = 0$

不確実性が高い場合: Membrane Model



$$v_{\text{leak}} = \frac{V_{\text{injected}}}{CQF} e^{-t/CQF}, \quad V_{\text{remain}} = V_{\text{injected}} \left(1 - \frac{1}{CQF} \int_0^t e^{-t'/CQF} dt' \right) = V_{\text{total}} e^{-t/CQF}$$

v_{leak} : リーク量, V_{injected} : 圧入量, V_{remain} : 残留量

図 4 準定量的評価の流れ

5. リスク解析の今後

筆者らの研究の中では、地中貯留のリスク検討の現状と課題がどう認識されているかについて国内でこの問題を検討している研究者らとの議論した。そこでの主な意見としては次のようなものがあった。

- ・CO₂ 隔離のベネフィットとリスクの比較がまだなされていない
- ・リスクコミュニケーションのあり方を検討すべき
- ・リスク評価の技術的基盤はありある程度の評価は現状で可能であるが、不確実性をどう考えるか、伝えるかが課題

放射性廃棄物も同様であるが、不確実性がつきまとう地中に人間活動で生じた物質を還すという行為に一定の抵抗があることは避けられない。その点も考慮に入れて、今後は個別の技術課題の研究を進めるとともに、地中隔離のベネフィット、圧入・維持管理のコスト、長期的な安全性の責任を誰が負うべきかといった議論とリスクの関係にも着目した研究を推進する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は経済産地球環境国際研究推進事業「二酸化炭素の国別排出インベントリ算出における隔離技術の適用ルールに関する研究」の一環として行われた地中隔離に関する研究の一部です。同研究の共同研究者である産業技術総合研究所の赤井誠氏、みずほ情報総研の板岡健之氏、芦ヶ原千里氏、北村修氏、その他研究に協力いただいた各位に感謝申し上げます。

参考文献

- Benson, S. and Cook, P., Status and current issues in geologic storage of carbon dioxide, Proc. 7th International Conference on Green House Gas Control Technologies, Vancouver BC, September 2004.
- Gordon, W and Bloom, J. 1986. Deep Problems; limits to underground injection as a hazardous waste disposal method, Proc. International Symposium on Subsurface Injection of Liquid Wasters :3-50.
- Itaoka, K., Yamamoto, K. and Yoshigahara, C.: Simple estimation methodology of leakage from geologic storage of CO₂, Proc. 7th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies(GHGT-7), Vancouver BC, September, 2004.
- Hernández Perez, P., K. Notsu, M. Tsurumi, T. Mori, M. Ohno, Y. Shimoike, J. Salazar, and N. Pérez. 2003. Carbon dioxide emissions from soils at Hakkoda, north Japan, J. Geophys. Res., 108 (B4), 2210.
- Kling, G. W., M. Clark, H. R. Compton, J. D. Devine, W. C. Evans, A. M. Humphrey, J. P. Lockwood and M. L. Tuttle. 1987. The 1986 Lake Nyos gas disaster, Cameroon, West Africa, Science. Vol. 236: 169-175.
- Miller, S.A., Colletini, C., Charaluce, L., Cocco, M. Barchi, M. & Kaus, B.J.P. 2004. Aftershocks driven by a high-pressure CO₂ source at depth. Nature, 427, 724-727.
- Yoshigahara, C., Itaoka, K. and Akai, M., Draft Accounting Rule for carbon capture and storage technology, Proc. 7th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies(GHGT-7), Vancouver BC, September, 2004.
- Yamamoto, K., Kitamura, O., Itaoka, K. and Akai, M., A Risk Analysis scheme of the CO₂ leakage from geologic sequestration, Proc. 7th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies(GHGT-7), Vancouver BC, September, 2004.
- Yamamoto, K., and Takahashi, K., Importance of geomechanics for the safety of CO₂ geologic sequestration, Ohnishi & Aoki eds., Contribution of Rock Mechanics to the New Century, 467-472, Millpress, Rotterdam, 2004.