

夾炭層を対象とした CO₂ 地下貯留シミュレーターの開発

-石炭層が CO₂ 地下貯留に及ぼす影響-

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻

47-096674 田中啓 (2011年3月終了予定)

指導教員：島田荘平 准教授

Keywords: CCS、夾炭層、シミュレーション

1. 緒言

・研究の背景

地球温暖化を抑制するため、温室効果ガスの削減は喫緊の課題である。その一方で、GHG 排出量の約 60%を占める、化石燃料は今後も使用が見込まれる。

化石燃料の使用を継続しつつ、温室効果ガスの削減を可能にする技術として、二酸化炭素の回収・貯留 (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS)があげられる。中でも二酸化炭素の地下貯留 (Carbon Dioxide Geological Storage, CGS) が代表的であり、

IEA によれば、CCS による CO₂ 排出削減量は 2050 年時点の総削減量の 14% から 19% に当たるとされており、今後 10 年間で約 100 の CCS プロジェクトが必要であるとされる。

日本では、2020 年までに 10 万 t の大規模実証試験を行うことを目標としている。日本の北海道、日本海沿岸、常磐地域、九州北部に多くの貯留容量があると見積もられている。

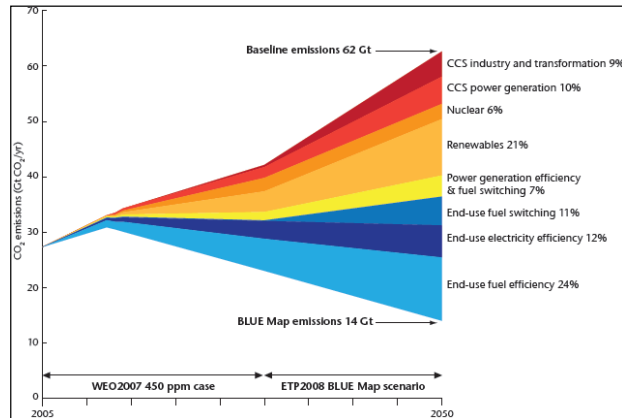


Fig.1 Comparison of the World Energy Outlook 2007 450ppm case and the BLUE Map scenario, 2005-2050

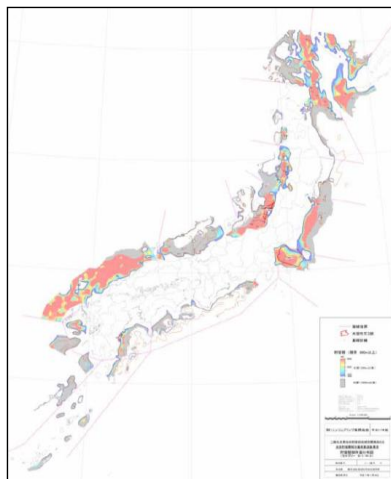


Fig. 2 CO₂ Storage Capacity, RITE, 2005

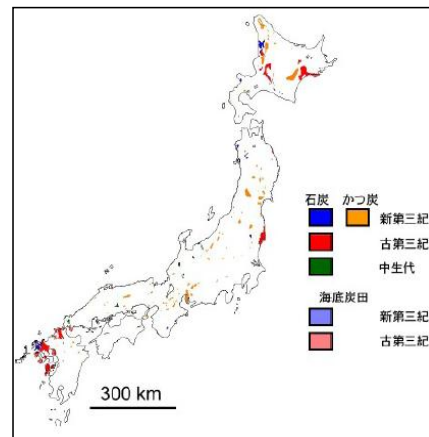


Fig.3 Distributions of Coal Mine & Coal Bearing formation, CRIEPI, 2009

地層を夾炭層という。特に採掘不能炭層 (USC) である深部夾炭層での CO₂ 地下貯留は、同時に CBM の回収が期待でき、USC の活用法の 1 つとして考えられる。

北海道、常磐、九州地域には、幾つかの石炭層と岩石層で構成される夾炭層という地層が存在している。石炭層には CO₂ の吸着作用があるため、CGS に際して何らかの影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、RITE の試算では CO₂ 貯留における石炭層の影響は考慮されていない。もし石

炭層が及ぼす影響を加味した場合、プラスの影響として、石炭、頁岩の吸着作用により、貯留容量が増加することや石炭、頁岩の吸着作用に伴う、浸透率の変化により、漏洩量が減少することが考えられるが、逆に、岩石よりも低浸透率の石炭が存在する場合、貯留容量が減少する可能性や石炭層に存在するメタンガスの漏洩といったことも考えられる。そこで、これらの影響を定量的に評価する上で、深部夾炭層における総合的な CCS シミュレーションが必要となる。

・ 研究の目的

深部塩水帯水層に存在する石炭層 (深部夾炭層) が CO₂貯留メカニズムや貯留要領に及ぼす影響を、定量的に求め、日本における CO₂地下貯留の有効性について検証する。

・ 研究の方法

本研究室が所有する夾炭層を対象とした CO₂地下貯留シミュレーター、ECOMERS (CBF)-UT (Enhanced Coalbed Methane Recovery Simulator (for Coal-bearing Formation))に必要な改良を施し、石炭層を含むモデルと含まないモデルでの数値シミュレーションを行い、両者を比較する。

2. 夾炭層における CCS シミュレーターについて

本研究室のシミュレーターは、地下の CO₂、メタン、窒素、NaCl、水の各成分について、温度変化やそれによる状態変化を考慮しており、これら流体の岩石または石炭中の挙動を予測できる。

Pruessらによって、現在、世界で用いられている幾つかの CCS

シミュレーター間の計算結果の比較がなされており、本研究室のシミュレーターもその有効性の検証のため、同様の計算問題を用いて比較を行った。

検証問題は8つからなり、そのうち2つに関しては計算結果の良い一致を見た。しかしながら、3つについては計算は行えたものの、他のシミュレーターと一致した結果は得られず、他の3つに関しては、計算自体が行えなかった。そこで、シミュレーターに改良を施し、その精度向上を目指した。

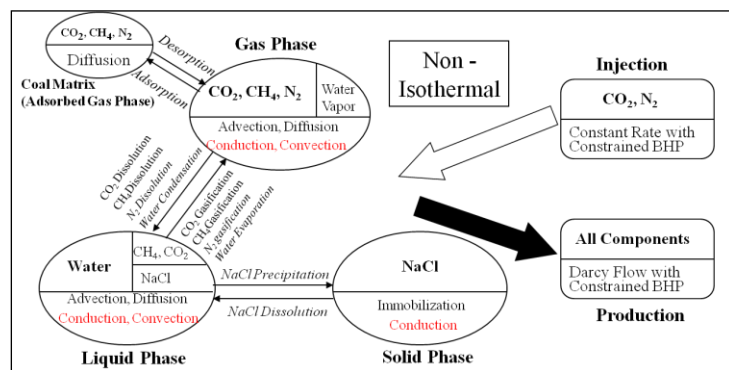


Fig.4 Concept of coal-bearing formation Simulator

Table. 1 Verification Problems

No.	Results
1	Mixing of stably stratified gases ○
2	Advective-diffusive mixing due to lateral density gradient ○
3	Radial flow from a CO ₂ injection well △
4	CO ₂ Discharge along a fault zone ×
5	Mineral trapping in a glauconitic sandstone aquifer ×
6	Hydromechanical responses during CO ₂ injection into an aquifer-caprock system △
7	CO ₂ injection into a 2-D layered brine formation △
8	CO ₂ -Oil displacement and phase behavior ×

3. シミュレーターの改良

シミュレーターの精度向上のため、いくつかの改良を施した。代表的なものを以下に述べる。

・地盤の応力分布

ECOMERS(CBF)-UT はもともと、ECBMR を対象として作られたため、地下深度による応力の変化を省略している。一般に地層圧は正常圧層では静水圧に等しく、

$$u = \gamma_l \cdot z$$

で表される。ここで、 γ_l は水の単位体積重量を表す。導入後のシミュレーションの結果、応力分布によって、流体の上方向への流れが増加することが分かった。

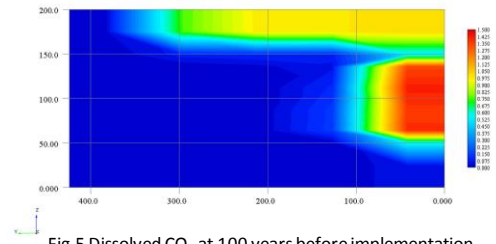


Fig.5 Dissolved CO₂ at 100 years before implementation

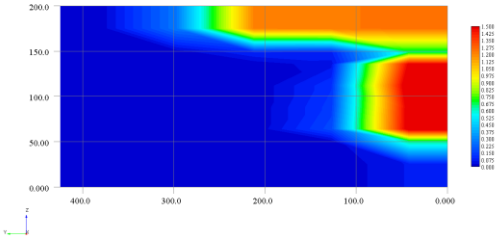


Fig.6 Dissolved CO₂ at 100 years after implementation

・残留トラッピング

CO₂ 地下貯留において、CO₂ は幾つかのトラッピングメカニズムによって地層中に貯留される。

残留トラッピングは主要な物理的トラッピングの1つであり、シミュレーターでは未考慮である。残留トラッピングとは、岩石中のCO₂と塩水の流動特性の違いによって、いったん地層中に侵入したCO₂が、地下水の流入により地層中に取り残されることをさす。石油工学でよく用いられる相対浸透率のヒステリシスにより残留トラッピングを記述する方法で導入を図った。

ヒステリシスを考慮した相対浸透率は以下の式で表される。

$$k_{rg}^{im}(S_g) = k_{rg}^{im}(S_g^*) \frac{k_{rg}^d(S_{gi})}{k_{rg}^d(S_{g,max})}$$

ここで、

$$S_g^* = S_{gt,max} + \frac{(S_g - S_{gt})(S_{gi,max} - S_{gt,max})}{S_{gi} - S_{gt}}$$

$$k_{rg}^{im}(S_g^*) = S_{gF}^{*2} \left\{ 1 - (1 - S_{gF}^*)^{\epsilon-2} \right\} = \left(S_g^* - \frac{S_g^*}{1 + CS_g^*} \right)^2 \left(1 - \left\{ 1 - \left(S_g^* - \frac{S_g^*}{1 + CS_g^*} \right) \right\}^{\frac{2}{\lambda} + 1} \right)$$

であり、 S_g は気体の飽和度、 k_{rg} は気体の相対浸透率を表している。導入後の計算により、特に圧入直後のCO₂の流動性が減少することが判明した。

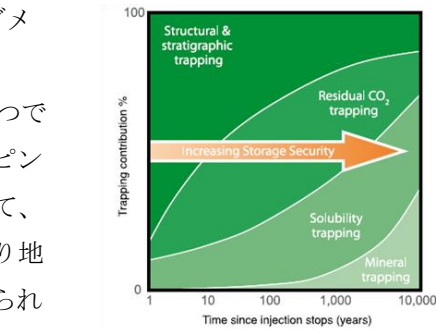


Fig.7 CO₂ Storage Security

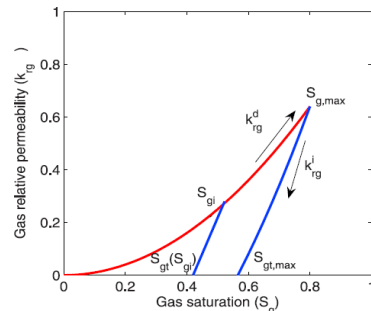


Fig.8 Parameters required in the evaluation and application of the Land trapping model

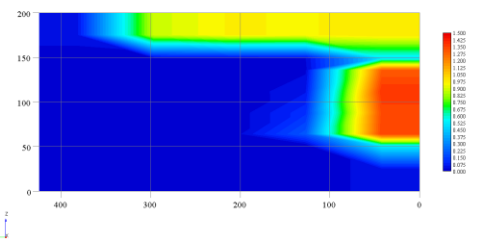


Fig.9 Dissolved CO₂ at 100 years after implementation

4. シミュレーターの有効性の検証

シミュレーターの改良後、再度、他のシミュレーターとの比較を行い、有効性の検証を行った。

5. モデルでの計算

実地盤を模擬した2つのモデルについてシミュレーションを行った。石炭の存在する Model 2 では存在しない Model 1 よりも注入井が最大坑底圧に達するのが遅いため、注入量は30%程度増加した。また、溶解量は Model 1 の方が多いものの、Model 2 ではCO₂の吸着が起こるため、結果としてフリーCO₂の量は石炭層が存在する Model 2 の方が約40%少なかった。

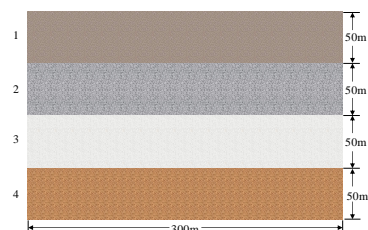


Fig.10 Structure of Reservoir Model1

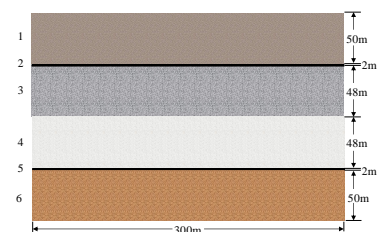


Fig.11 Structure of Reservoir Model 2

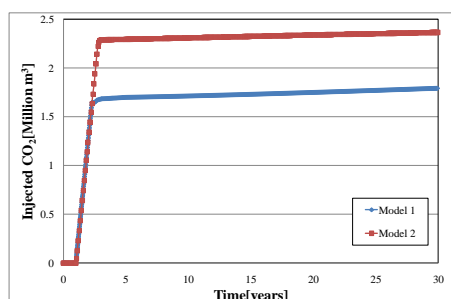


Fig.12 Amount of Injected CO₂

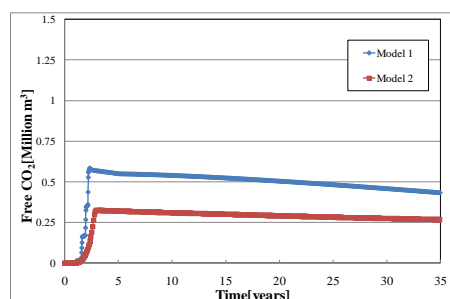


Fig.12 Amount of Free CO₂

6. まとめと結論

夾炭層へのCO₂地下貯留を対象とした数値計算シミュレーター、ECOMERS (CBF)-UTの改良を行い、他のシミュレーターを使った計算結果との比較によってシミュレーターの有効性を検証した。その後、石炭層を含んだリザーバーモデルと含まないリザーバーモデルについて計算を行い、石炭層がCO₂地下貯留に及ぼす影響について評価した。

石炭層がCO₂貯留量に及ぼす影響は少ないとはいえ、CCSを行う際には、考慮に入れる必要がある。

参考文献

- [1] IEA, 2009, CCS technology road map
- [2] Z. Chai, 2010, Assessment on the CO₂ geological sequestration into deep coal-bearing formation using numerical fluid dynamics simulation, Dissertation, Shimada laboratory, University of Tokyo
- [3] K. Pruess, J. Garcia, T. Kavscek, C. Oldenburg, J. Rutqvist, S. Jonny, C. Steefel, and T. Xu, 2002, Intercomparison of numerical simulation codes for geologic disposal of CO₂, Lawrence Berkeley National Laboratory
- [4] J. E. Killough, 1976, Reservoir simulation with history-dependent saturation functions, Soc. Pet. Eng. J., 16, 37–48