

# 環境プロジェクトとしてのコールベットメタン増進回収の実現可能性評価

環境システムコース エネルギー環境学分野

36783 舟橋 悠紀

## 1. 緒言

温暖化やエネルギー供給の切迫が懸念される中で、天然ガスへの燃料転換や短期的な二酸化炭素削減ポテンシャルを持った地中貯留技術の開発が進められている。コールベットメタン（以下 CBM）は炭層中に存在するメタンを主成分としており、主に石炭表面に吸着した状態で存在している。非在来型天然ガスであるが、アメリカでは天然ガス生産の8%を占めている。コールベットメタン増進回収（以下 ECBMR）は、二酸化炭素を注入して生産を増進する手法で、原油の二次回収に類似しているが、吸着力を利用する点が特徴的である。即ち、メタン生産により二酸化炭素固定費用の一部を補いつつ、長期的に安定な固定が実現できる可能性がある。世界の採炭不可能な炭層における貯留容量は20Gt-CO<sub>2</sub>程度と見積もられている。

天然ガス開発や二酸化炭素固定を効率的に実施するには、メカニズムを解明して貯留層モデルを構築し、生産シミュレーション、FS 調査を経て計画される。CBM の生産性や固定容量は、吸着特性や浸透性といった炭層毎に異なる特性に依存する。しかし、既往の経済性評価は米国やカナダにおける実地試験を基にしており、炭層条件が限定されている。また、二酸化炭素注入に伴う浸透性の低下や従来の吸着モデルで説明できない現象が報告されている。さらに、二酸化炭素地中固定技術は一般にガスのリークや環境影響が懸念されている。EOR や帯水層への固定については研究例があるが、炭層固定の場合は定性的な議論に限られる。

そこで本研究はシミュレーションを行い、ECBMR に特徴的なメカニズムによる生産性への影響、経済的な開発計画のための固定排出源の選定、炭層のシール性能およびこれらの炭層特性依存性について検討した。

## 2. シミュレーション

ガス貯留層としての炭層はガス貯留・移動メカニズムが複雑で非線形性が強い為、生産予測

にはシミュレーションが不可欠である。研究室において開発したシミュレータ(ECOMERS - UT) <sup>1</sup>の改良を進めた。炭層モデルにはマトリックスとフラクチャーからなる二重孔隙モデルを適用し、マトリックスでの吸着はラングミュア吸着等温式、マトリックス-フラクチャー間の拡散はフィックの法則、フラクチャー中の移流はダルシー則に従うとした。支配方程式は、水および各ガス成分の連続の式である。解法は有限体積法、風上差分法、完全陰解法を用いた。

### 結果の検証

計算結果を検証するため、既存の6シミュレータと比較した<sup>2</sup>。5点法の坑井配置で坑井間隔50.294mとした(図1)。生産速度パターンが一致し、基本性能が確認された(図2)。微小な誤差の要因は、差分法、収束条件、状態方程式にあると考えられる。

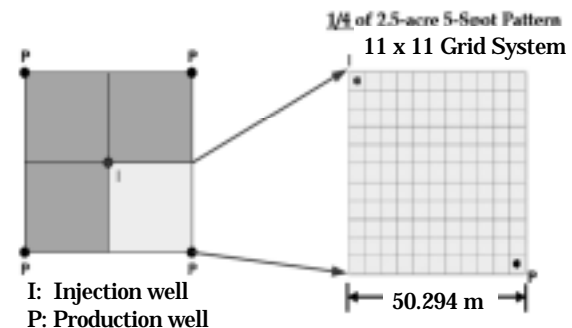


図1 炭層モデル

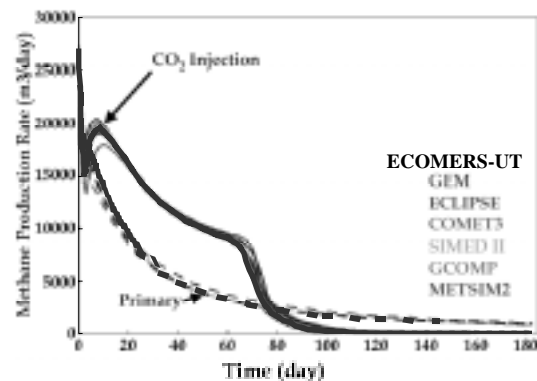


図2 生産速度比較

### 3. 貯留層特性と生産性

CBM の生産性は、貯留層としての炭層特性及び開発計画による。CBM 生産において最も重要な炭層特性である絶対浸透率であり、増進回収においてはさらに二酸化炭素吸着に伴う膨張が鍵となると考えられる。ここでは現実的な開発規模として坑井間隔 400m とした。

#### 絶対浸透率

絶対浸透率を 1,3.65,10md として生産速度を計算し(図 3)、増進効果や固定容量を比較した。プレイクスルー( $[CH_4]<0.9$ )までの生産を想定した場合、浸透率が低い場合は生産性が低いが、二酸化炭素注入量あたりのメタン生産量が多く、一次回収と比較した増進効果もある(表 1)。ただし、低浸透性の場合には炭層圧力が上昇するため、リークが懸念される。

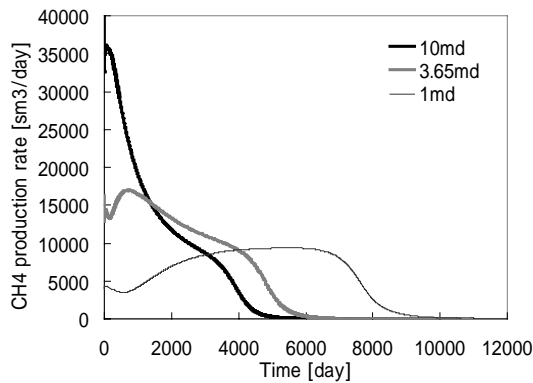


図 3 生産速度(絶対浸透率)

表 1 絶対浸透率別の固定/生産増進効果

Permeability [md]	Time [day]	A: Produced $CH_4$ [ $m^3$ ]	B: Seque $CO_2$ [ $m^3$ ]	C: Primary recovery [ $m^3$ ]	A/B [-]	A/C [-]
1	6676	5.08E+07	1.36E+08	1.88E+07	2.70	2.68
3.65	4091	5.33E+07	1.15E+08	2.88E+07	1.85	2.16
10	3297	5.51E+07	9.31E+07	3.82E+07	1.44	1.69

#### 吸着に伴う膨張

二酸化炭素を注入した場合に注入性が著しく低下する現象は、吸着に伴うマトリックス膨張(孔隙収縮)で説明されている。提案された孔隙率モデル<sup>3</sup>を適用し、生産速度への影響を比較した。膨張の影響は吸着体積、ガス種および炭種による。二酸化炭素の影響はメタンの1-2倍であると設定し、生産速度を比較した(図 4)。二酸化炭素による膨張が大きい場合は、注

入が不可能なほどに坑井付近の浸透性が低下し、一次回収と同様の生産速度となった。膨張の程度により ECBMR に適さない場合がある。

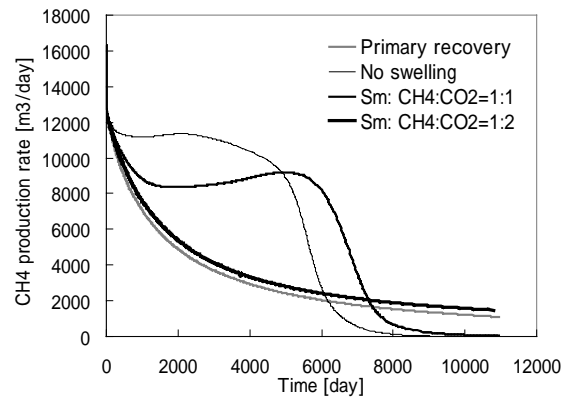


図 4 生産速度(マトリックス膨張)

#### 吸着モデル

メタン及び二酸化炭素の混合ガスの吸着について、多くの研究はラングミュア等温式を拡張させたモデルを適用している。しかし、混合ガスの吸着実験においてこのモデルと合わない結果が報告されている。ここでは、単一ガスの吸着実験においてフィッティングの良かった LRC (Loading Ratio Correlation) モデルを適用し、拡張型ラングミュア式を適用した場合と生産速度を比較した(図 5)。LRC モデルは、一つの分子が複数の吸着サイトの吸着するというモデルである。実際の吸着メカニズムがこれに従うとすれば、拡張型ラングミュア式を用いた計算では、生産速度を過剰に評価してしまう可能性がある。吸着メカニズムの解明、モデルの改良が求められる。

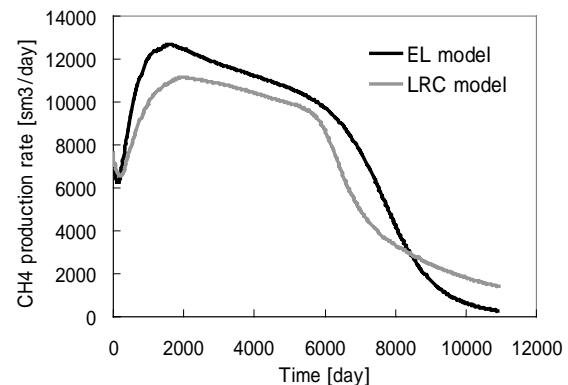


図 5 生産速度(吸着モデル)

#### 4. 開発計画と経済性

資源開発では経済性は主要な指標であり、二酸化炭素固定では費用対効果の最適化が求められる。ガス包蔵量が多く浸透性の高い炭層が当然望ましいが、特定の炭層条件下では坑井配置、注入ガスの選択により経済性が変化する。

##### 注入ガス成分

開発計画において、CBM 開発に有望なサイトと二酸化炭素固定排出源とのマッチングが重要である。浸透率 3.65md の炭層、想定される注入ガス成分 ( $[\text{CO}_2]=100, 95, 90, 30, 15\%$ 、残りは  $\text{N}_2$ 。それぞれ分離回収、酸素燃焼 1、酸素燃焼 2、製鉄、火力発電に相当) を設定し、累積生産量及び生産ガス中のメタン濃度を比較した (図 6、図 7)。窒素は二酸化炭素よりも吸着力が弱く、メタン脱着を促進して生産を増進する効果がある一方で、メタン濃度が早期に低下した。

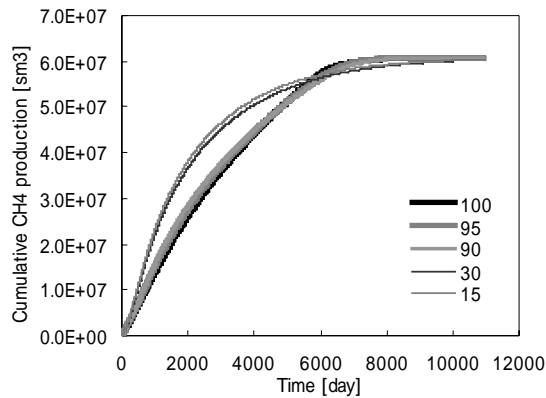


図 6 注入ガス成分と累積生産量

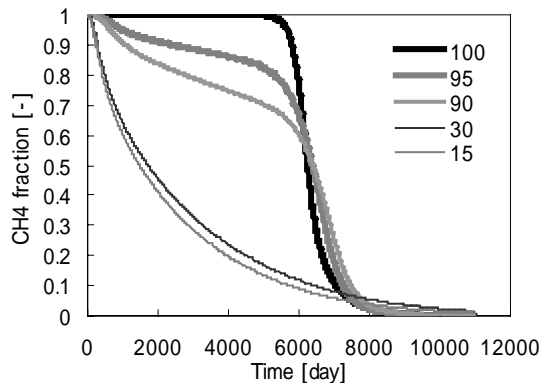


図 7 注入ガス成分と生産ガスのメタン濃度

##### 注入ガス成分と経済性

3.2km<sup>2</sup>の炭層を 16 年で開発する場合の経済性を評価した。注入ガスはプラント排ガスからアミン法で分離し、20000sm<sup>3</sup>/day/well で注入するとした。生産期間におけるメタン濃度低下の具合から、100%二酸化炭素を注入する場合は生産ガスの精製を行わず、排ガスを直接注入する場合は深冷分離法で窒素を分離するとした。二酸化炭素固定量は、注入した二酸化炭素分から生産分およびスチームやエネルギー利用に伴う排出量を差引いて算出した。メタン販売価格は US\$4.44/MMBTU、二酸化炭素クレジットは US\$30/t-CO<sub>2</sub> とした。排ガス購入費用は算入していない。

注入ガス成分と経済性および実質的な二酸化炭素固定量を図 8 に示した。二酸化炭素濃度が低いガスを注入した場合、早期のブレイクスルーで生産ガスの分離コストがかさみ、電力使用により二酸化炭素固定量が見込めない結果となった。

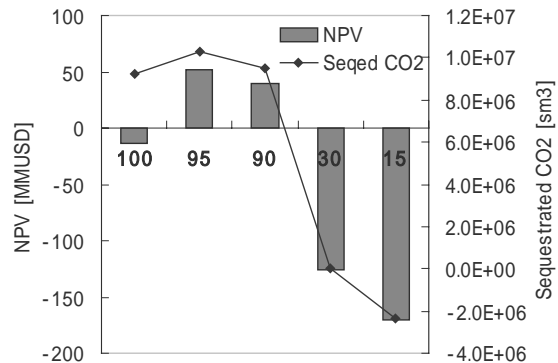


図 8 注入ガス成分と経済性

#### 5. 炭層固定における二酸化炭素のリーク

二酸化炭素固定プロジェクトにおいて、二酸化炭素のリークは安全性と経済性の両面において重要である。リークした場合、地下水や植生への影響、ガス突出や大気への再放出などが懸念される。大気に再放出された場合、固定量 (もしくは二酸化炭素クレジット) を過大評価してしまう。枯渇油田においてはキャップロックのシール性が保障されており超長期的な固定タイムスケールが期待できるが、炭層の場合はその限りではない。炭層の上盤における二酸化炭素挙動を計算し、地層条件とリーク量との

関係を示した。

### 地層モデル

炭層の上盤に夾炭層を有する頁岩層を、炭層の直ぐ上部には低浸透性の泥岩 1m を設定した。下盤は粘土質が多いことから不透性とした。地層モデルを表 2 に示した。計算グリッドは泥岩層において細分し、5x5x13 とした。

表 2 地層モデル

	層厚 [m]	孔隙率 [-]	浸透率 [md]	
			水平	垂直
頁岩	20	0.05	0.5	0.05
炭層	3	0.001	3.65	1.0
頁岩	20	0.05	0.5	0.05
炭層	3	0.001	3.65	1.0
頁岩	20	0.05	0.5	0.05
泥岩	1	0.01	0.01	0.001
炭層	9	0.001	3.65	1.0

### 二酸化炭素リーク体積

注入開始後 16 年における孔隙中の二酸化炭素濃度を図 9 に示した。上下が深度方向、左右が水平後方で、注入井は左下、生産井は右下に位置する。上盤夾炭層において二酸化炭素のフロントが停止している様子を確認した。泥岩浸透率及び夾炭層の有無とリーク体積との関係を図 10 に示した。1x10<sup>-3</sup>md の場合は期間中の二酸化炭素注入量(1.1x10<sup>8</sup>sm<sup>3</sup>)の 7.9%、1x10<sup>-4</sup>md の場合は 0.1%リークした。リークによる環境影響次第であるが、1x10<sup>-4</sup>md、1m の泥岩層に十分なシール性能があり、帽岩として機能すると考えられる。逆に、断層や坑井刺激により泥岩層のシール性が低下した場合は、大量のリークが懸念される。また、夾炭層が存在することで、リークしたガスの一部が炭層に吸着され、フリーで存在する量が軽減された。

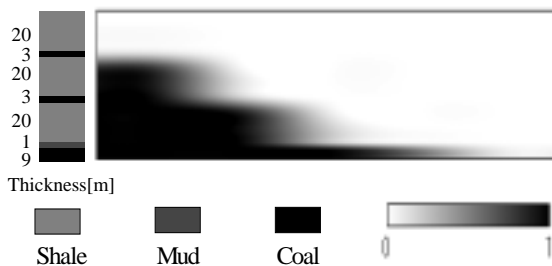


図 9 孔隙中の二酸化炭素濃度

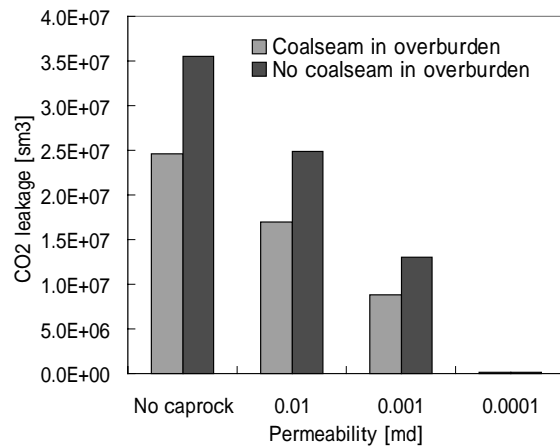


図 10 夾炭層と二酸化炭素リーク体積

## 6. 結論

コールベットメタン増進回収シミュレーションを行い、炭層特性が生産性に与える影響を示した。一次回収と同様に、ECBMR においても浸透率が高いほど生産性が高く、重要な炭層特性であることを示した。二酸化炭素吸着に伴う膨張が著しい炭層は増進回収に不適であり、また正確な生産予測の為に吸着メカニズムの解明が重要である事を示した。

注入ガス成分別に生産速度や経済性を示し、開発計画における固定排出源と二酸化炭素固定サイトとのマッチングに関する知見を得た。二酸化炭素濃度の低い排ガスを利用した場合は、生産ガスのメタン濃度が低下し、精製プロセスでのエネルギー消費により実質的な二酸化炭素固定が見込めない可能性がある。

炭層固定の環境影響の一指標として、炭層からリークする二酸化炭素量を計算した。上盤に浸透性の低い泥岩層などが存在する場合は、十分なシール性能があることを示した。また、夾炭層が存在する場合はリーク量が軽減されることを示した。以上から、事前の地質調査が重要である事を示した。

- 1 児玉裕幸、東京大学大学院修士論文、2004
- 2 David H.-S. law, et al, Numerical Simulator Comparison Study for Enhanced Coalbed Methane Recovery Processes, part 1:CO2 Injection, SPE75669, 2002
- 3 Laxminarayana Chikatamarla, et al, Implications of volumetric swelling/shrinkage of coal in sequestration of acid gases, Proc. International Coalbed Methane Symposium, 2004