

コールベッドメタン増進回収における水平坑井の経済性評価

環境システムコース エネルギー環境学分野

36647 高橋 毅

1. 研究背景と目的

環境への意識が高まっている今日において対処すべき環境問題として温室効果ガスの削減およびエネルギー問題がある。その2つの問題を同時に対処しうる技術としてコールベッドメタン増進回収が注目されている。

コールベッドメタンとは、石炭層中に存在するCH₄であり、コールベッドメタンをより多く回収する方法として、石炭層内にガスを注入するコールベッドメタン増進回収法がある。化石燃料の有限性や地球温暖化防止の観点から、その回収技術の進展が期待されているが、特に、注入ガスにCO₂を使用するとCH₄とCO₂が1:2の割合で置換し、CO₂が石炭に吸着することから、この方法はCO₂固定技術の一つであり、温室効果ガスの削減につながるのである。

しかし、このコールベッドメタン増進回収法はまだ確立されていない。その理由として、石炭層内の流体の貯蔵および輸送のメカニズムが極めて複雑で解明されていないこと、実地試験がほとんど行われていないこと、経済的に採算が合わないと考えられていること等が挙げられる。

そこで本研究は、コールベッドメタン増進回収システムの経済的成立性に注目し、実用化できるシステムの具体像を提示することを目的とした。特に、浸透率の低い石炭層からのコールベッドメタンの生産量を増加するために、従来使用されている垂直坑井に加え、水平坑井を用いたシステムを想定する。

ガスの注入システム、生産システムの各部に最適なものを選択し、各部のコスト評価式から得られた総費用を把握した上で、経済的に採算が合うようにするにはどのように工夫すればよいかを検討した。また、得られた具体像からコールベッドメタン増進回収技術における課題と、あるべき新技術開発の方向性について抽出した。

2. 水平坑井シミュレータ

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)¹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。

3. 坑井掘削軌跡と生産性

CBMの生産性は、貯留層としての炭層特性及び開発計画に依存する。そこで炭層特性と実施した計算シナリオの設定を表3.1に示す。また、坑井掘削軌跡として図3.1に示す3通りのケースを想定した。

表 3.1 計算シナリオ設定

	水平坑井 (a)	垂直坑井 (b)	水平・垂直 坑井(c)
増進回収			
一次回収			n/a
浸透率	0.1~10md	1md	

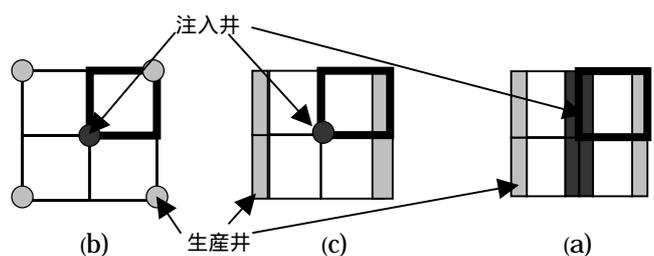


図 3.1 坑井の種類

3.1 水平坑井の生産性

水平坑井における増進回収と一次回収のメタン生産速度を計算した(図3.2)。一次回収と増進回収とでメタン生産性に大きな違いは見られなかった。これは水平坑井の場合は坑井と炭層との接触面積が大きい為、二酸化炭素吸

着に伴う増進効果がなくともメタン生産がある程度可能であると考えられる

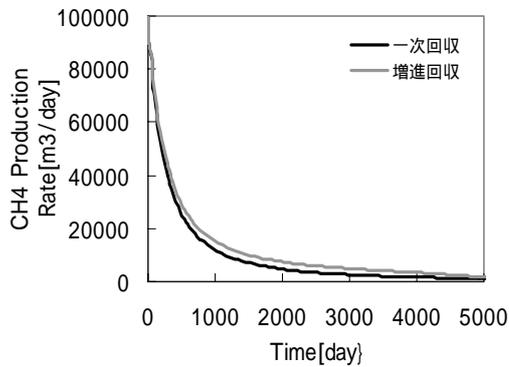


図 3.2 一次回収と増進回収のメタン生産速度

次に絶対浸透率を 0.1, 1, 3.65, 10md としてメタン生産速度を計算した(図 3.3)。また、ブレイクスルー ($[CH_4] < 0.9$) までの生産を想定した場合の増進効果を表 3.2 に示す。浸透率が高いほど初期の生産性に優れていた。しかし、浸透率が低い場合は生産性が低いが、一次回収と比較した増進効果がある。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。

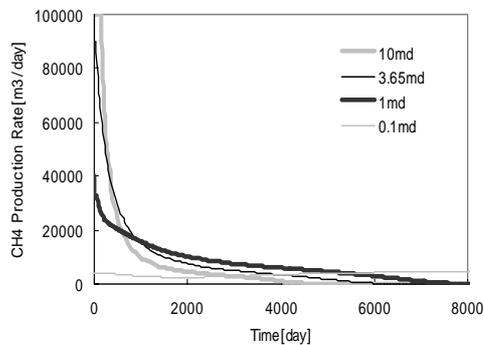


図 3.3 メタン生産速度(絶対浸透率)

表 3.2 絶対浸透率別の生産増進効果

浸透率 [md]	Time [day]	A:増進回収 [m3]	B:一次回収 [m3]	A/B
10	2682	5.74E+07	4.96E+07	1.16
3.65	3620	5.59E+07	4.58E+07	1.22
1.0	4789	5.35E+07	3.71E+07	1.44
0.1	10941	4.12E+07	2.01E+07	2.05

3.2 坑井掘削軌跡

水平坑井と垂直坑井および水平・垂直坑井の生産性の比較を行うため、それぞれのメタン生産速度を計算した(図 3.4)。生産井が水平坑井の場合のメタン生産速度は垂直坑井の場合に比して大幅に大きい結果となった。これは水平坑井の場合、炭層との接触面積が垂直坑井に比べて大きくなることが要因と考えられる。一方で注入井が水平坑井の場合もメタン生産速度は垂直坑井の場合に比して大きい結果となっている。これは、水平坑井の場合、掃功率が高くなることが要因であると考えられる。しかし、注入井を水平にした場合、垂直の場合に比して低圧力でガスを注入することが可能となり、その結果、注入井と生産井との圧力差が低くなり、メタン生産にマイナスのインパクトを与えている。

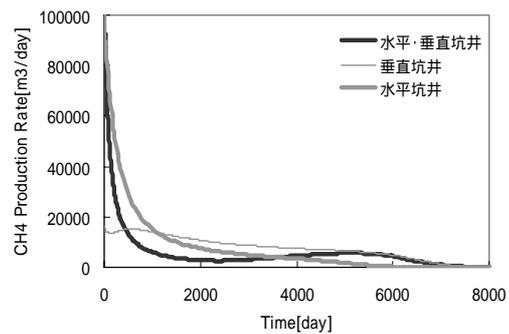


図 3.4 坑井掘削軌跡ごとのメタン生産速度

次に水平坑井と垂直坑井における一次回収でのメタン生産速度を計算し、その結果を図 3.5 に示す。また、増進回収効果を表 3.3 に示す。水平坑井の場合は坑井と炭層との接触面積が大きいため、二酸化炭素吸着に伴う増進効果がなくともメタン生産がある程度可能であると考えられ、増進効果は垂直の場合に比べ小さい。

表 3.3 坑井掘削軌跡ごとの生産増進効果

坑井軌跡	Time [day]	A:増進回 収[m3]	B:一次回 収[m3]	A/B
水平坑井	3620	5.59E+07	4.58E+07	1.22
垂直坑井	5521	5.46E+07	3.20E+07	1.71

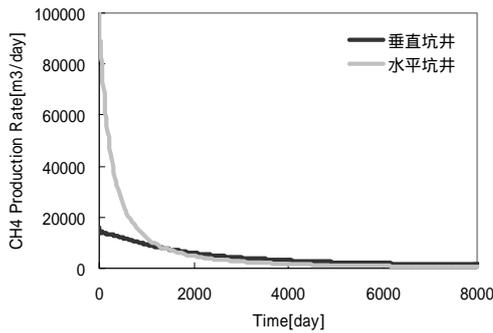


図 3.5 坑井掘削軌跡と一次回収

最後に低浸透率でのメタン回収率を坑井掘削軌跡ごとに計算した(図 3.6)。水平坑井の場合、低浸透率炭層であってもメタン生産が可能であり、垂直坑井の場合に比べメタン回収率に優れている。また、垂直坑井の場合、1mdの炭層では注入圧力の制限から二酸化炭素の注入量が少なくなった(図 3.7)。

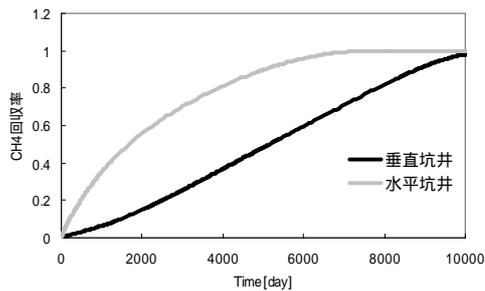


図 3.6 低浸透率炭層におけるメタン回収率

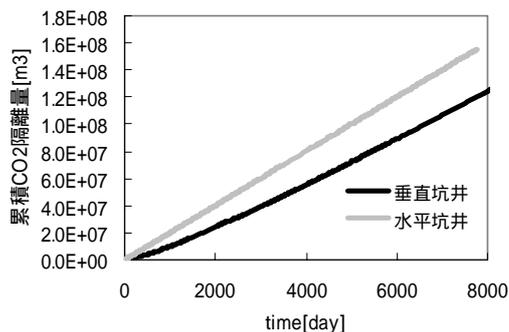


図 3.7 二酸化炭素固定量

4. 坑井掘削軌跡と経済性

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。

4.1 経済性評価プロセス

そこで 6.4km²の炭層を想定し、20 年間で開発する場合の経済性を評価した。システムの経済性評価を行うにあたっては全体を 1)火力発電所からのCO₂の分離・回収プラント、2)圧縮プラント、3)注入ガス輸送パイプライン、4)炭層へのガス注入と炭層からのガス生産、5)CH₄の分離・回収プラント、6)生産CH₄の輸送パイプラインの 6 段階に分ける。注入ガスは 20000sm³/day/wellで注入するとした。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-CO₂とした。なお、排ガス購入費用は算入していない。

4.2 水平坑井の経済性

水平坑井の経済性を示すため、注入ガス成分ごとに純現在価値を算定した(図 4.1)。注入ガス成分に窒素を含む場合は、排ガスからの分離回収が無い代わりに生産ガスの精製を行う設定になっており、これが経済性へ影響する。ただし、二酸化炭素分離回収コストとメタン分離回収コストはプロジェクト規模が同規模ならば差が見られない。また、二酸化炭素濃度が低い場合は、注入した二酸化炭素よりもプロセスで使用したエネルギーによる二酸化炭素発生量が多いため、実質的な固定量がマイナスとなった。この場合、二酸化炭素クレジットが得られないため、経済性は大きく低下した。

二酸化炭素分離回収を行わない限り、注入ガス中の二酸化炭素濃度が高いほど経済性が高いのは当然である。ここで、排ガスの購入価格を考慮していないことに注意しなければならない。即ち、二酸化炭素濃度の高い排ガスを得るには、酸素燃焼などの燃焼技術を使う必要がある。燃焼効率の向上などでコストを賄える場合は問題ないが、コストが上昇した場合は、それが排ガス購入価格として反映しなければならない。

なお、ガスを注入しない場合は、注入井掘削コストが発生しないため、最も経済的となった。

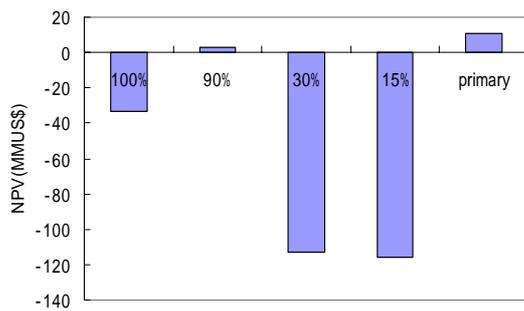


図 4.1 注入ガス成分と純現在価値

坑井間隔が 800m の場合、ブレイクスルーが 10 年程度で起こってしまい、プロジェクトとして適切ではない。そこで坑井間隔を 800m と 1600m に設定した場合の経済性を算定した(図 4.2)。坑井間隔を 1600m に広くした場合、メタン生産に関しては 800m の場合に比して回収が遅くなるが、坑井掘削コストが少ないため、純現在価値は大きくなっている。

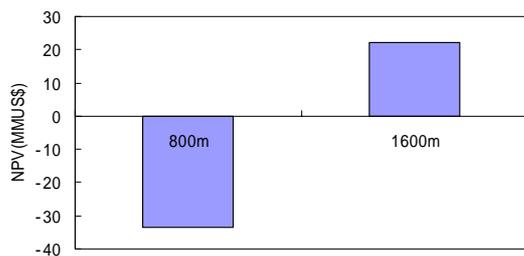


図 4.2 坑井間隔と純現在価値

4.3 坑井掘削軌跡と経済性

水平坑井と垂直坑井の経済性を比較するため、純現在価値を算定した(図 4.3)。絶対浸透率が 3.65md、10md の場合は、水平坑井より垂直坑井の純現在価値が大きくなっているが、0.1md の場合は、垂直坑井より水平坑井の純現在価値が大きくなった。これは低浸透率炭層における水平坑井の優位性を示している。浸透率が中程度以上の場合、垂直坑井であってもある程度のメタン生産が可能であるため、メタン価格 4.44US\$/MMBTU のもとでは、水平坑井より垂直坑井のほうが優れている。しかし、低浸透率の場合、垂直坑井ではガスが流れにくい、水平坑井では井戸と炭層の接触面積が大きいため、低浸透率であってもある程度のガスが流れる。その結果、低浸透率の炭層においては、水

平坑井の方がメタン生産量および二酸化炭素隔離量ともに大きくなり経済的に優位になると考えられる。

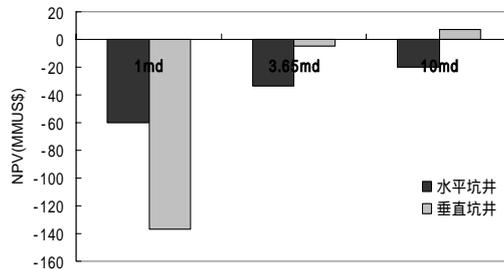


図 4.3 水平坑井と垂直坑井の純現在価値

5. 中国におけるケーススタディ

中国の炭層からサンプルで 3 件抽出し、その炭層特性のもと²、水平坑井と垂直坑井のどちらが経済性の点で優れているか結論を導いた(図 5.1)。中国では低浸透率炭層が多いため、水平坑井を坑井掘削軌跡として採用すべきである。

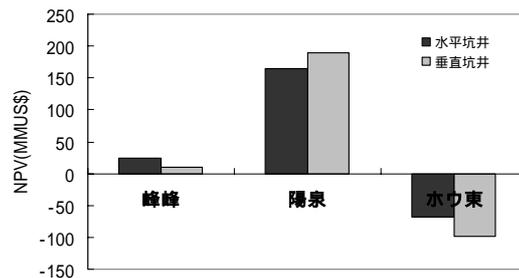


図 5.1 中国の炭層における純現在価値

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、炭層特性および坑井掘削軌跡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。水平坑井と垂直坑井を比較した場合、炭層条件およびメタン価格等によってその優位性は変化することが示された。低浸透率炭層、または、メタン価格が 6US\$/MMBTU 程度まで上昇すれば水平坑井が経済的に優れた坑井掘削軌跡であるといえる。

1 舟橋悠紀、東京大学大学院修士論文、2005

2 China National Administration of Coal Geology, "Coalbed Methane Resources of China", China University of Mining & Technology Press, 1998