

1 緒言

地球温暖化は、深刻な地球環境変動を引き起こす地球環境問題である。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第 3 次評価報告書では、1990～2100 年までに地球平均地上気温は 1.4～5.8、平均海面水位は 0.09～0.8m 上昇すると予測している⁽¹⁾。また、2005 年 2 月 26 日の京都議定書の発効に向け、日本は 2008～2012 年に温室効果ガスの総排出量を 1990 年比で 6% 減少させなければならない。

このことから、CO₂ の排出削減が急務となっており、安全かつ即効性のある画期的な CO₂ 排出削減方法を検討する必要がある。

2 本研究の目的

本研究では、図 1 のように海底堆積層に CO₂ をハイドレートとして、安全かつ長期的にわたり CO₂ を貯留するシステムの実現可能性を検討することを目的としている。

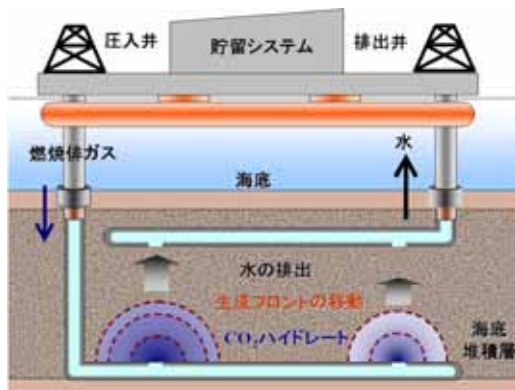


図 1 本研究における CO₂ 貯留の概念図

よって、本研究では海底堆積層に CO₂ ガスを圧入し、ハイドレートが生成する際の生成挙動、層内閉塞の可能性、CO₂ の貯留量を明らかにし、閉塞が生じない最適な CO₂ 貯留方法を提案し、その妥当性を評価する。

3 水飽和模擬砂層への CO₂ 圧入実験

3.1 目的

海底堆積層を模擬した水飽和模擬砂層に

CO₂ を一定流量で圧入し、ハイドレートを生成させた際の CO₂ ハイドレートの生成挙動を把握する。また、閉塞が生じる可能性のある条件を把握し、その要素を考察する。

3.2 実験装置

実験装置図を図 2 に示す。

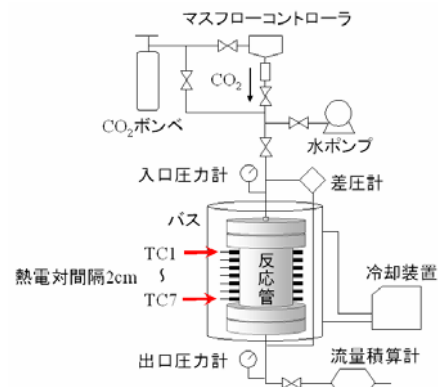


図 2 水飽和した模擬砂層への CO₂ 圧入実験の実験装置

3.3 実験手順

実験手順を以下に示す。

反応管内部に水飽和模擬砂層を作成する。実験温度・圧力に設定し、CO₂ ガスを一定流量で反応管上部から圧入する。実験中は、ハイドレートの生成熱による砂層温度の変化、圧力変化、砂層両端の差圧変化を測定する。また、排出される水量を 1 分毎に測定する。

模擬砂層ガス通過後、実験を終了し、反応管内部の全 CO₂ ガス量を測定する。

温度と圧力変化から生成フロントの移動、また排出水量から気液界面の移動、そして差圧変化からは層内の浸透性を調べ、模擬砂層における CO₂ ハイドレートの生成挙動を考察する。また、測定したガス量からは、孔隙を占める水・ハイドレートの飽和率 $S_w \cdot S_H$ を計算した。

3.4 実験結果

3.4.1 生成フロントと気液界面の時間変化

豊浦砂・2・3.1MPaにおいてCO₂圧入流量を変化させた場合のCO₂ハイドレートの生成挙動を考察した。図3に、気液界面と生成フロント、差圧変化を流量ごとに示す。

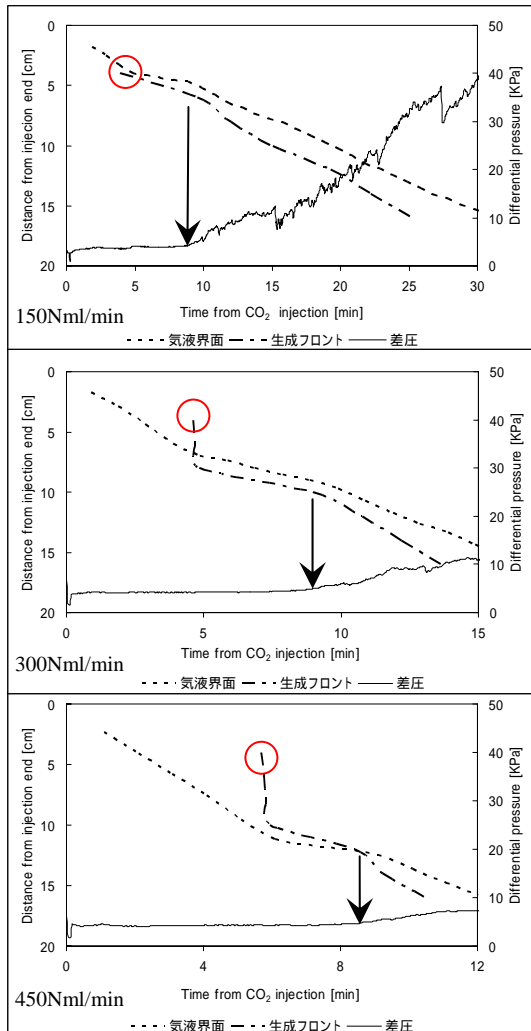


図3 CO₂流量変化が生成挙動に及ぼす影響

図3において、左X軸は砂層中心部垂直方向を示している。○はハイドレートの生成地点、矢印は差圧が増大し始めた時点を示している。図3において、気液界面の移動曲線の上方は水不飽和層、下方は水飽和層であることを示す。流量300Nml/minと450Nml/minにおいて、生成フロントは水不飽和層から出発し、気液界面に向かって一気に降下する。その後、気液界面を追い越し、水飽和層へと移動する挙動を示した。また、差圧変化では、

生成フロントが水飽和層へ移動し気液界面とフロントの位置差が生じ始めた時点とほぼ一致して増加傾向を示した。

よって、ハイドレートが水不飽和層から水飽和層へ生成の場を移行した時点から層内に大きな流動抵抗が生じることが考察できる。特に、流量150Nml/minでは、実験中ほぼ大半が水飽和層でハイドレートが生成しているため、差圧の増大も著しく大きい。

よって、温度・圧力が等しい条件では、CO₂圧入流量が極端に少ないとハイドレートの生成は水飽和層で支配的となり、層内に閉塞を招く恐れがある。

3.4.2 CO₂圧入流量と過飽和度がS_wとS_Hへ及ぼす影響

図4に、先ほどの2・3.1MPaの条件におけるS_HとS_wの計算結果をCO₂流量に対してプロットした。

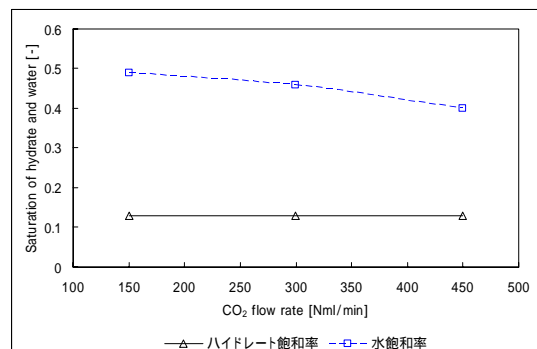


図4 CO₂圧入流量がS_wとS_Hに及ぼす影響

図4から、温度・圧力条件が等しい場合、CO₂流量に大きく影響されるのはS_wであることがわかる。温度・圧力が等しい場合、過飽和度は等しいのでハイドレートの生成速度は等しい。しかし、流量を増加させることで、ハイドレートの生成速度に対して気液界面の移動速度が大きくなり、気液界面付近においてハイドレートの生成よりも水押し出しが優先され、層内のS_wが減少したと考えられる。

次に、この考察に基づいて、図5には、豊浦砂・CO₂圧入流量300Nml/minが同じ条件における5・3.1MPa、2・2.1MPa、2・3.1MPa

の条件で得られた S_W と S_H の計算結果を各条件の過飽和度に対してプロットした。

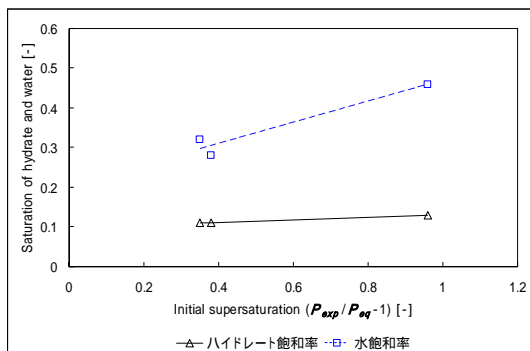


図5 過飽和度の違いが S_W と S_H に及ぼす影響

図5から、過飽和度が小さい場合と大きい場合を比べ、過飽和度が小さい場合に S_W が低い値となった。これは、過飽和度が小さいとハイドレートの生成速度が遅くなるため、このような場合では、気液界面の降下速度は生成速度に対して速くなることが考えられる。よって、ハイドレートの生成よりも水の押し出しが優先され S_W が減少すると考えられる。

3.4 本研究の CO_2 貯留実現可能性

このように、本実験では、気液界面とハイドレートの生成速度の関係から層内の閉塞の可能性と S_W の変化を考察した。

つまり、気液界面の移動速度が極端に遅いと気液界面の移動速度に対してハイドレートの生成速度が速くなり、水押し出しよりもハイドレートの生成が優先され、気液界面で大量のハイドレートが生成し大きな流動抵抗が生じると考えられる。

この考察から、実際に CO_2 を貯留する際、気液界面でのハイドレート生成が支配的にならずに、水不飽和層でのハイドレート生成が支配的となるような条件を選定すれば、閉塞の危険性を回避できることが示唆された。

4 水飽和模擬砂層への $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合ガス圧入実験

4.1 目的

水飽和模擬砂層への CO_2 ガス圧入実験では、

CO_2 流量が極端に少ない場合において、気液界面でのハイドレート生成が支配的となり、層内に閉塞が生じる可能性が考えられた。よって、本実験では気液界面でのハイドレートの生成が引き起こす閉塞に対して対処策を考える。本実験では、生成阻害剤として知られている N_2 ガスを混入し、気液界面におけるハイドレートの生成を制御し、閉塞問題の解決を試みた。125Nml/min で $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合ガスを水飽和模擬砂層へ圧入した。

4.2 実験結果

図6に、 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合ガスを流量125Nml/min で圧入した際の生成フロントと気液界面の位置と差圧変化を示す。

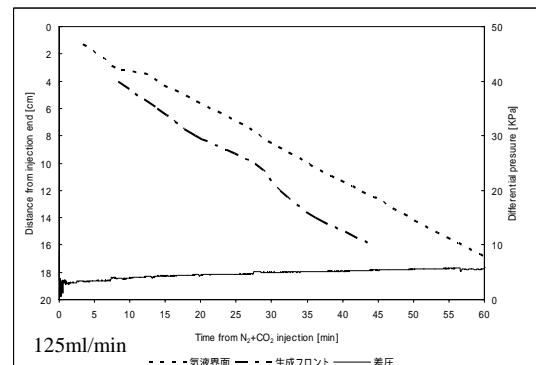


図6 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合ガス圧入実験における実験結果

図6から、気液界面と生成フロントの位置関係は、3章の2・3.1MPa・ CO_2 流量150Nml/min で得られた結果と同様の傾向を示している。しかしながら、差圧が大きく増加していないことから、気液界面におけるハイドレート生成が抑制され、層内に大きな流動抵抗が生じなかったことがわかる。これは、ハイドレートの生成で N_2 が取り込まれずにガス相に残存したために気液界面付近で、濃縮された高濃度の N_2 ガス相が形成したためと考えられる。よって、気液界面ではハイドレートの生成が阻害され、大きな流動抵抗が生じなかったと考察できる。

実際に、圧入ガス、砂層通過直後のガス、砂層内のガス相、ハイドレート相における N_2

と CO₂ の組成比を測定したところ、砂層通過直後のガスには、高濃度の N₂ ガスが含まれていた。また、ハイドレート相に約 9 割もの CO₂ が取り込まれていたことから、ガス相に残存した N₂ ガスにより気液界面でのハイドレート生成が抑制されたことが確認できた。

本実験では、N₂ ガスを混入することで、層内における閉塞の危険性を回避することに成功した。

表 1 CO₂ と N₂ の組成比

	N ₂	CO ₂
圧入ガス [%]	0.13	0.86
砂層通過直後のガス [%]	0.72	0.23
砂層内のガス相 [%]	0.56	0.40
ハイドレート相 [%]	0.05	0.93

5 水不飽和模擬砂層におけるハイドレート飽和率と絶対浸透率の評価実験

5.1 目的

水不飽和層でのハイドレート生成が支配的な条件で CO₂ 貯留を行うことを想定し、水不飽和層でハイドレートが生成した場合の層内の浸透性を評価し、水不飽和層でのハイドレート生成が支配的な貯留条件であれば、砂層内に十分にガス供給が行え、また、貯留可能領域を拡大することができることを実証する。

5.2 実験手順

実験手順を以下に示す。

水不飽和模擬砂層を作成する。

水不飽和模擬砂層内にハイドレートを生成させ、 S_H の異なる試料を作成する。

その砂層に CO₂ ガスと水を流し、その際生じる砂層両端の差圧を測定する。

Darcy 則より、差圧から絶対浸透率 K を求める。

ハイドレートを分解し各試料の S_H の値を計算し、 S_H に対する K の関係を調べる。

5.3 実験結果

図 7 に、豊浦砂と 8 号珪砂における S_H と K の関係をプロットした。

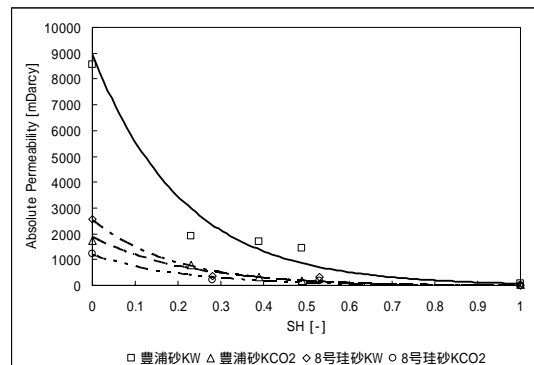


図 7 S_H と K の関係

本実験において、ハイドレート飽和率 S_H が 0 ~ 0.5 までの豊浦砂及び 8 号珪砂の模擬砂層では、**200 ~ 9000mDarcy** の絶対浸透率を持つことが確認できた。既往の研究において、Levorsen (1967)⁽²⁾によると、孔隙率 20 ~ 25% で、**K100 ~ 1000mDarcy** の層では、石油貯留において十分な浸透性を有すると報告している。このことから、海底堆積層に CO₂ をハイドレートとして貯留する際、水不飽和層でのハイドレート生成が支配的な条件で CO₂ を圧入しハイドレートを生成させれば、水不飽和層でハイドレートが生成しても、その層内では CO₂ ガスと水の流動性が十分確保されることがわかる。よって、CO₂ 貯留層において長い距離にわたり、CO₂ ガスを供給できることが実証された。

6 結言

本実験結果から、CO₂ 貯留における閉塞問題に対する解決策を見出し、その策が実際に妥当性を有することが確認できた。また、CO₂ 貯留の際に、水不飽和層でのハイドレート生成が支配的な条件を選ぶことにより、閉塞の危険性を回避できることが示唆された。

【参考文献】

(1) <http://www.ipcc.ch/>

(2) Levorsen, A. I. (1967) *Geology of Petroleum* (Freeman, San Francisco), 2nd Ed.