

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

地盤改良剤によるメタンハイドレート層の安定化技術の研究

Research on Stabilization of Methane Hydrate Reservoir by Grout
Material

申請者

劉雨晨

Yuchen LIU

地球・環境資源理工学専攻 石油工学研究

2023年7月

メタンハイドレート (MH) は、新しいエネルギー資源として注目されている。日本近海にも大量に賦存されていることから、その開發生産を実現できれば、日本のエネルギー自給率を大幅に向上させることができる。その生産手法としては、坑内の水位 (圧力) を低下させ、MH を水とガスへと分解させる減圧法が既に確立されている。しかし、減圧法を用いた過去のフィールド産出試験では、いずれも激しい出砂現象が発生し、機器の損耗により産出試験が中止を余儀なくされた。この出砂を防ぐためには、過去の産出試験においてグラベルパック・スクリーンなどの対策機器が投入されたが、いずれも効果が限定的であり、出砂を完全に防ぐことができなかった。

このような出砂現象は、埋蔵深度が浅く、未固結または固結が不十分な砂層に賦存する MH の分解による貯留層強度の低下や、強減圧による貯留層の有効応力の上昇に起因したと考えられる。一方、土木分野においては、地盤改良材を地中に注入し、土砂粒子を人工的に固着することで地盤の強度を向上させる手法がある。これを基に、石油工学と土木工学の融合的な手法として、1) 砂粒子を人工的に固結できる地盤改良剤を MH 層に注入し、または 2) 坑井の周辺に発生した空洞に RCS などの硬化性粒子を充填し、浸透性と強度を両立した改良体を作成することで、出砂を防ぐと同時にメタンガスを産出する生産手法を提案した。上記の提案手法は、現時点において日本、米国で特許を取得しており、十分な新規性と進歩性が認められている。

本提案の手法を検証し、さらに実用化させるためには、MH が存在する砂層と類似した粒径分布を有する模擬試料に地盤改良剤を注入し、その注入可否、固化効果、固化後の浸透率や MH 分解後の強度を解明する必要がある。しかし、MH の生成と維持には高压が必要であり、学内で安全かつ効率的に実験を行うことが困難である。そのため、本研究では、常圧で高い飽和率を容易に維持できる模擬ハイドレート: 臭化テトラ-*n*-ブチルアンモニウム (TBAB) のハイドレート (TH) と、比較的低压で生成・維持可能でかつ MH のように分解時にガスが発生するイソブタンハイドレート (i-BH) を用いて実験を行った。実験では、坑井からの 2 次元断面モデルを作成できる実験装置 2 基、定量実験用の円柱型供試体を量産できる実験装置 3 基 (改良型を含む) 及びその補機類を自ら設計・製作し、予備実験等により性能試験をクリアしてから実験に運用した。

予備実験は、模擬ハイドレート 2 種類の性質を踏まえて 2 段階に分けて実施した。第 1 段階では、まず、表層地盤を施工対象とした地盤改良剤を水層に注入し、出砂防止効果を確認した。また、模擬ハイドレートとして比較的作成しやすい TH を実験に用いたため、その生成物質である TBAB が地盤改良剤の効果に影響がないことを確認した。一方、第 2 段階では、MH と同様に分解ガスを発生できる i-BH の生成特性を解明し、それを用いて所期した飽和率を有する i-BH 供試体を量産する手法を確立した。さらに、異なる恒温水槽の間を移動する際の供試体

の温度安定時間等を計測し、実験操作の一連の手順を確立した。

本実験は、まず、比較的作成しやすい TH を用いて、本手法の適用性に係る 4 つの条件、即ち：1) ハイドレートを含む模擬砂層試料に注入でき、2) 孔隙に大量のハイドレートが存在した条件においても固結でき、3) 固結後の模擬砂層試料は流体の生産に十分な浸透性を持ち、かつ 4) ハイドレートが分解した後にも十分な強度を有することを確認した。その結果、初期 TH 飽和率 $\leq 60\%$ の条件では上記の 4 点を全部満たすが、初期 TH 飽和率 $\geq 70\%$ の場合はその効果が著しく低下したことが明らかになった。

この問題点に対し、高飽和率 TH 供試体ないし MH 層を対象に薬剤の注入性を向上させる手法として、インヒビターや温水の事前圧入によって、一部の MH を分解させる前処理を提案し、その有効性を実験により検証した。

しかし、このような前処理工程ではハイドレートが一部分解するため、実際の MH 層の場合は分解ガスの発生が予想される。分解ガスは、孔隙流体の組成や性質を大きく変えるため、TH 供試体を用いた注入実験とは異なる挙動を示す可能性が予想される。この点について、MH と同様に分解時にガスが発生する i-BH を用いて検証した。その結果、薬剤注入時に発生した分解ガスは、1) i-BH の表面と注入薬剤との接触妨害、2) 薬剤注入のための圧力勾配の抑制、3) 気泡の毛細管圧力による薬剤の注入抵抗の増加といった作用から、薬剤の注入障害を引き起こすリスクを確認した。また、注入終了後にも発生し続けた分解ガスは、一旦注入した薬剤を孔隙から排出する作用も確認した。ただ、このような作用を受けた場合においても、浸透性と強度を両立した供試体の作製に成功した。

その上、改良体の物性に影響を与え得る要素として、地層条件 4 点と操業条件 8 点に対する供試体の物性の変化について検討した。その結果、改良剤が注入可能な粒径範囲に限り、砂の粒径が細かい程、地層温度が高い程、または TH/i-BH 飽和率が低い程、より低浸透率、高強度の改良体を作成できることが分かった。また、とある MH 層を対象に、より高い強度すなわち高い出砂防止効果を有する改良体を作成するためには、改良剤を調製するための各組成の濃度を高め、かつ常温で調製することが重要である。さらに、坑井周辺の温度を高めることや養生期間を延長することも有効であるが、浸透率を過小にならないように、適切に計画・操業する必要がある。一方、初期地層水は改良材に置き換えられるため、その塩分濃度は改良体の物性に大きな影響が確認できなかった。

他には、初期 i-BH 飽和率よりも、改良剤を注入停止時の残存 i-BH 飽和率の方が固結後の供試体の物性に大きな影響を与えることが判明した。これは、分解ガスによる薬剤の排出作用が、孔隙に残った改良剤粒子の量を減らしたためである。また、初期 i-BH 飽和率 $\geq 15\%$ の場合は、分解ガスによる薬剤への注入障害が著しく、インヒビターによる前処理で 10%~15%前後に低下させた後に初めて大量注入が可能になるため、供試体の物性に著しい差異が見られず、概ね同養生温度に

おける水層の 2/3 程度の強度になったことが明らかになった。

以上の知見を基に、初期 TH 飽和率 = 60%、80% 及び水層を想定した供試体を用いてケーススタディを行った。その結果、常圧・3℃の条件において 1 週間養生した場合の有効浸透率 = 374mD、一軸圧縮強度 = 6.08MPa であり、十分な浸透性と強度を有する供試体の作製に成功した。なお、実際の MH 層では温度が 3℃より高いことから、更に高い安定化効果を達成できると期待される。

本研究の博士論文は以下の内容で構成されている。

- 第 1 章 はじめに：本研究の背景、目的、手法、時期、実施体制、論文構成。
- 第 2 章 基礎理論：MH の性質、MH の生産手法と過去の産出試験、および土木分野における各種の地盤改良手法とその改良材。
- 第 3 章 先行研究：在来型の油ガス井を対象とする既存の出砂対策 6 種類と、MH 層の出砂対策のための既存の提案 2 種類（日本、中国）。
- 第 4 章 技術提案：本研究で提案させた地盤改良剤による MH 層の安定化手法の説明。
- 第 5 章 実験設計：実験の概要、模擬ハイドレートの説明、評価指標の選定、及びこれらの要求に満たす実験システムの設計と製作。
- 第 6 章 予備実験：水層における地盤改良剤の効果の確認、TBAB による地盤改良剤の効果への影響の検証、TH を含む砂層の初期浸透率の測定、i-BH の生成特性の解明およびその供試体の量産化。
- 第 7 章 本実験：ハイドレート層における適用性 4 条件の確認、注入性（安定化効果）向上のための提案とその検証、分解ガスの挙動とその影響（注入障害、薬剤排出）の確認、影響要素（地層条件 4 点×操業条件 8 点）の検討、本手法のポテンシャルを探るためのケーススタディの実施。
- 第 8 章 考察：本手法の適用性、適用する際の注意事項、得られる効果等の考察。
- 第 9 章 まとめ：本研究のまとめ、本手法の有望性と今後の取り組み。

以上より、本論文は、国産エネルギーとして期待される MH の実践的な開発法を提唱するものであり、博士（工学）の学位論文として相応しいものと認める。

2023 年 7 月

審査員

主査 早稲田大学教授 Ph.D. University of Texas at Austin 栗原正典

早稲田大学教授 Ph.D. University of Texas at Austin 古井健二

早稲田大学准教授 Ph.D. University of Utah 上田匠

早稲田大学非常勤講師 Ph.D. University of Texas at Austin 大内久尚