

メタンハイドレート生産技術の到達点

— 博士論文(2003 年)の技術的想定と現在(2026 年)の照合 —

対象論文：河田裕子『世界エネルギーシステムにおけるメタンハイドレート導入の評価』（東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻 博士論文, 指導教官 藤田和男教授, 2003 年）

焦点：生産技術(生産手法・産出試験・技術課題・数値評価)を中心とした更新・検証

作成日：2026 年 8 月／本文中の上付き番号は末尾の出典リストに対応

エグゼクティブサマリー

本レポートは、2003 年の博士論文が示したメタンハイドレート(以下 MH)の生産技術に関する想定・試算・技術目標を土台に、その後 23 年間の実際の技術動向と照合したものである。技術面の要点は以下の通り。

- **手法選定は的中：**論文が「最も優れる」と評価した減圧法は、その後の日本の海洋産出試験(2013・2017 年)および米国アラスカの長期陸上試験(2023–2024 年)すべてで採用され、事実上の世界標準として実証された。論文の手法選定は技術的に正しかった。
- **熱水圧入法・新手法：**論文が「劣位」とした熱水圧入法は生産の主手法としては追われず、廃熱利用の補助的位置づけに留まる。論文が扱わなかった CO₂置換法(Ignik Sikumi, 2012 年)は概念実証されたが低流量で、実用スケールには至っていない。
- **長期安定生産は未達：**論文が最重要の「今後の課題」とした長期安定生産は、23 年を経てなお未確立。産出試験は 6 日→24 日→約 10 か月(アラスカ)と段階的に延伸したが、数年連続・数百万 m³/日規模の商業生産は実証されていない。出砂・出水の制御が依然として核心的な壁。
- **技術目標・コスト：**論文が定量化した技術目標(掘削・海底生産システム・坑井修繕費の約 50%削減、水平長 2000m の水平坑井、熱効率改善)は大半が未達成。コストは依然 LNG 輸入価格を大きく上回り、論文試算(70.2～88.8\$/Boe)を覆すブレイクスルーは生じていない。

- **■ 対象の拡張**：論文が対象外とした日本海側の表層型 MH が新たな開発対象に加わり、砂層型とは異なる生産・分離技術が必要となっている。数値シミュレータ(MH21-HYDRES)による生産挙動予測・経済性評価は精緻化された。
- **■ 制度的到達点**：2024 年 8 月の国の中間評価は「商業化の目処立たず」と総括。商業化目標は当時計画の 2016 年から 2030 年度以降へ後退した。

1. 論文(2003)が扱った生産技術のスコープ

照合の前提として、論文が技術的に何を対象にしたかを整理する。論文第 4 章・第 7 章が生産技術評価の中核である。

- **対象資源** 対象資源：海域(オフショア)の MH。原始埋蔵量の 95%以上を占めることを根拠に海域に焦点化(=太平洋側の砂層型に相当)。
- **生産手法** 生産コンセプト：①垂直坑井を用いた減圧法、②水平坑井を用いた減圧法、③熱水圧入法の 3 方式を設定。
- **経済性** コスト算定：IHS Energy 社の QUE\$TOR(石油・ガス開発コスト計算ソフト)で開發生産コストを算出。
- **環境性** CO₂評価：生産設備・操業燃料からの CO₂排出量を手法別に算定し、LNG・石油と比較。
- **応用技術** 導入プロジェクト：生産した MH ガスと LNG を燃料とするハイブリッド型コンバインドサイクル発電(熱水圧入法時は発電廃熱を熱水製造に利用)を提案。

論文自身が最終章で、「商業化に向けた経済性評価には、詳細な地質モデルに基づく数値シミュレーションモデルの完成が必要」「大水深海底下浅層における長距離水平坑井の掘削仕上げ技術の確立が求められる」と、技術的な宿題を明示していた。以下ではこれらの宿題の達成度を軸に照合する。

2. 生産手法の技術評価 — 論文の予測と現在

2.1 減圧法：論文「最優」評価は実証された

論文は、水平坑井を用いた減圧法が経済性・CO₂排出量ともに最も優れると結論づけた(IRR10%となる単価 70.2\$/Boe、CO₂排出原単位 58.4 g-C/Mcal でいずれもガスの中で優位)。減圧法は坑井内の圧力を下げてハイドレートの水とガスに分解する手法で、人工的な熱入力が不要なためエネルギー効率が高い。

現在：日本の第 1 回(2013 年)・第 2 回(2017 年)海洋産出試験、および米国アラスカの長期陸上試験(2023–2024 年)は、いずれも減圧法を採用した^{[1][2][6][7]}。減圧法は MH 生産の事実上の標準手法として確立しており、論文の技術評価は的中したと言える。

2.2 熱水圧入法：論文「劣位」評価どおり非主流

論文は、熱水圧入法は熱水製造に生産ガスを消費するため経済性・CO₂の双方で減圧法に劣ると評価した(88.8\$/Boe、CO₂原単位 79.6 g-C/Mcal で在来型石油並み)。現在も、産出試験の生産手法として熱水圧入法単独が採用された例はなく、減圧法を補完する加熱(温水・電磁など)は補助的な位置づけに留まる。論文の相対評価はその後の技術開発の方向性と整合している。

2.3 論文が扱わなかった新手法：CO₂置換(CO₂-CH₄交換)法

論文以降に実地検証された新方式が CO₂置換法である。ハイドレート構造中のメタンを CO₂と入れ替えて回収する手法で、メタン生産と CO₂地中貯留を同時に狙える点が特徴。2012 年、米国アラスカ・プルドーベイで実施された Ignik Sikumi #1 試験(ConocoPhillips・DOE・JOGMEC・USGS)で世界初の現場実証が行われた^{[3][4]}。

- CO₂+N₂混合ガスを 12 日間圧入し、その後 21 日間の減圧フローバックで回収。37 日間の総ガス生産量は約 24,410m³。
- メタン置換は起こるが、置換速度(反応キネティクス)と流量が低く、単独の商業手法としてはスケールしていない。現状は減圧法との併用・CCS 併用の観点で研究が継続。

=論文の 3 手法の枠組みは、その後「CO₂置換」という第 4 の選択肢で補われたが、主軸が減圧法である構図は変わっていない。

生産手法の到達点(まとめ)

生産手法	論文(2003)の評価	現在(2026)の到達点
水平坑井 減圧法	最優(70.2\$/Boe, 低 CO ₂)	全産出試験で採用 = 標準手法。ただし長距離水平坑井は未確立
垂直坑井 減圧法	生産量低く高コスト (1,084\$/Boe)	試験は垂直・傾斜井中心。生産性の低さは論文指摘どおり
熱水圧入法	劣位(88.8\$/Boe, 高 CO ₂)	生産主手法としては非採用。加熱は補助的利用に留まる
CO ₂ 置換法	(対象外)	2012 年に現場実証。低流量で商業スケール未達。CCS 併用で研究継続

3. 産出試験の実績 — 「長期安定生産」という論文の宿題

論文は商業化の最大の技術課題として長期安定生産を挙げていた。2003 年時点では海洋産出試験は未実施だったが、その後の試験群でこの宿題が段階的に検証されてきた。生産の連続日数は「6 日→24 日→約 10 か月」と着実に延伸している。

試験	時期／場所	手法	主な結果	技術的到達点・課題
第 1 回 海洋産出試験	2013 年 3 月／東部南海トラフ 第二渥美海丘(水深約 1,000m)	減圧法	6 日間で約 12 万 m ³ (平均約 2 万 m ³ /日)を生産	世界初の海洋産出。6 日目に 出砂で生産ライン閉塞し中断。 ガス/水分離・坑井圧力制御・出砂対策が課題として顕在化
第 2 回 海洋産出試験	2017 年 4-6 月／同海域(2 坑井)	減圧法	AT1-P3：12 日・41,000m ³ (出砂断続)／ AT1-P2：24 日・222,500m ³ (出砂なし・出水多で減圧幅制限)	連続生産日数を延伸。出砂制御は一部改善もなお不安定、想定超の出水が減圧幅を制約
アラスカ長期陸上試験 (Hydrate-01)	2023 年 9 月-2024 年 7 月／米国アラスカ ノーススロープ	減圧法 (長期)	約 10 か月にわたる長期減圧試験を実施(2023/9/19 開始-2024/7/30 完了)	月単位の長期生産挙動データを世界で初めて取得。日本の商業生産に向けた方法論確立が目的

出典：第 1 回[1]、第 2 回[2]、アラスカ[6][7]。

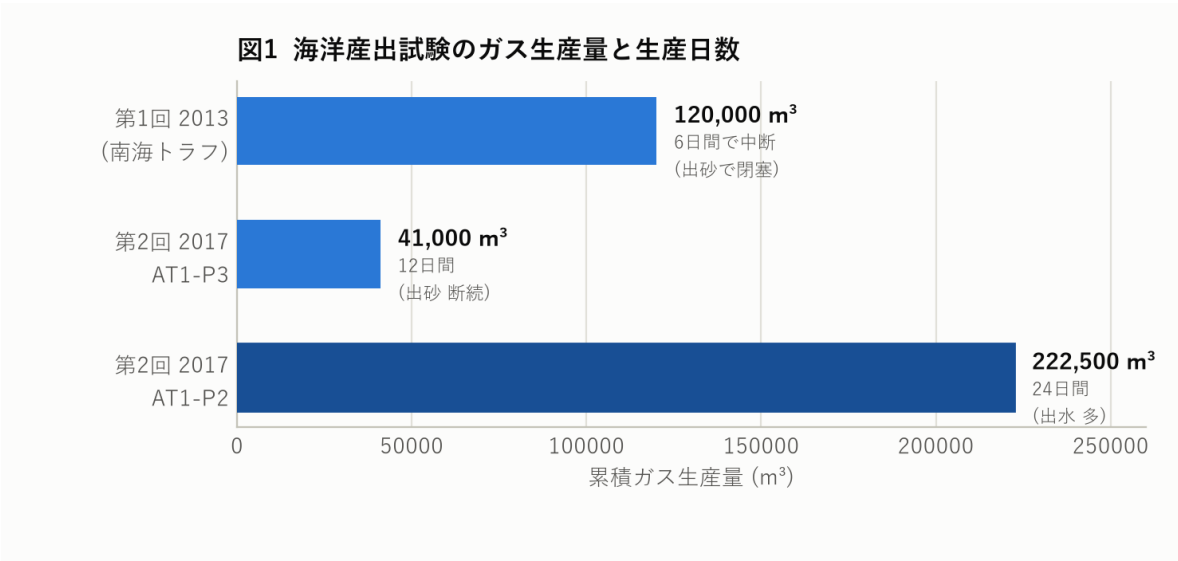


図1 海洋産出試験のガス生産量と生産日数。減圧法。連続生産日数は6日→24日と延伸したが、出砂・出水で長期安定生産には至らず。アラスカ長期陸上試験(2023-24, 約10か月)は生産量非公表のため本図には含まない。

論文が「詳細な地質モデルに基づく数値シミュレーションモデルの完成が必要」とした点については、生産挙動予測シミュレータ MH21-HYDRES が開発され、産出試験の実測データによる履歴マッチングと開発経済性評価・コンセプト設計に用いられている^[8]。数値評価の基盤は論文当時から大きく前進した。

4. 残る技術課題－論文の技術目標の達成度

産出試験を経て、論文が挙げた課題の多くが「実データで裏付けられた課題」として残存している。

- ① **出砂制御** 出砂(サンドプロダクション)制御：未固結の浅層砂層からの砂の流入が生産を中断させる最大要因。2013 年は中断原因、2017 年でも断続的に発生。長期生産に耐える防砂・坑井仕上げが未確立。
- ② **出水管理** 出水管理：分解に伴う多量の随伴水。2017 年 AT1-P2 では想定超の出水で減圧幅が 5MPa に制限され、生産性が抑制された。水処理・揚水設計が長期生産の鍵。
- ③ **坑井技術** 坑井仕上げ技術：論文が明示した「大水深海底下浅層における水平長 2000m 級の水平坑井」の掘削仕上げ技術は、いまだ確立されていない。産出試験は垂直・傾斜井が中心。
- ④ **流動保証** フローアシュアランス：生産ライン内でのハイドレート再生成(閉塞)リスク。第2回試験でも生産水ラインの再生成挙動が解析対象となった。
- ⑤ **地層安定** 地層安定性：分解による地盤沈下・坑井健全性への影響。長期・大規模化で顕在化しうる地力学的課題。
- ⑥ **環境技術** メタン漏出：分解メタンの海底・大気への漏出(メタンは CO₂ の 20～80 倍の温室効果)。論文が重視しなかった環境技術課題として現在は重視される。

論文の定量的技術目標 vs 達成度

論文(2003)が掲げた技術目標	狙い	現在(2026)の達成度
掘削費・海底生産システム費・坑井修繕費を約 50%削減	総コスト約 40%減	未達。コスト構造の抜本改善は実証されていない
水平長 2,000m の水平坑井を用いた減圧法	38.4\$/Boe まで低減可能と試算	未達。長距離水平坑井の掘削仕上げ技術が未確立
熱水圧入法の熱効率改善(他熱源の活用)	熱水圧入法の経済性向上	限定的。熱水圧入法自体が生産主手法から外れた

長期安定生産(数年連続・数百万 m ³ /日)	商業生産の前提	未達。最長でアラスカの約 10 か月試験段階
------------------------------------	---------	------------------------

5. 資源タイプの拡張 — 論文が扱わなかった表層型 MH

論文は海域の砂層型(太平洋・南海トラフ)を主対象とした。その後、日本海側に多い**表層型メタンハイドレート**が新たな開発対象に加わった^{[9][10]}。両者は賦存形態が異なり、必要な生産技術も異なる。

区分	砂層型(論文の主対象)	表層型(論文以降に対象化)
分布	太平洋側(東部南海トラフ 等)	日本海側(上越沖・隠岐周辺 等)
賦存形態	砂質層の孔隙中に砂と混在	海底面・浅い泥層中に塊状で存在
生産技術	減圧法で分解・生産(産出試験実施済)	塊状のため減圧法が適用しにくい。回収・メタン分離技術が研究段階
開発段階	長期生産技術の開発・産出試験準備	掘削試験結果の取りまとめ、分離技術の実験・解析段階

表層型の追加は、論文の技術的枠組み(砂層＋減圧法)だけでは日本の MH 資源全体をカバーできないことを意味し、生産・分離技術の新たな開発課題を生んでいる。

6. 経済性と開発体制の現在(技術に影響する範囲)

- コスト** 生産コスト：MH のガス生産コストは現在の試算でも LNG 輸入価格を大きく上回るとされ、論文の 70.2～88.8\$/Boe(LNG CIF の約 3 倍)を覆すコストブレイクスルーは生じていない。商業化には技術進歩と規模の経済によるコスト削減、安定生産の実証が不可欠。

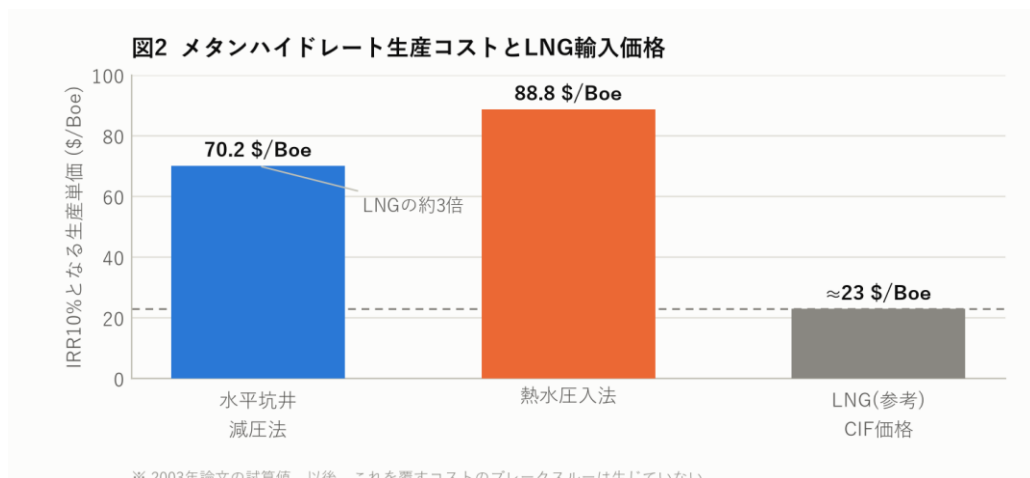


図2 メタンハイドレート生産コストと LNG 輸入価格(2003 年論文の試算値)。以後、これを覆すコストのブレイクスルーは生じていない。

- **評価技術** 数値評価：MH21-HYDRES による生産挙動予測と経済性評価・開発コンセプト設計が定着。論文が求めた数値シミュレーション基盤は整備された。

開発体制：研究は MH21 から MH21-S 研究開発コンソーシアムへ。砂層型フェーズ 4 の研究開発期間は当初 2022 年度末までを 2025 年度末まで延長^{[5][11]}。2024 年 8 月の国の中間評価は「商業化の目処立たず」と総括し^[5]、商業化目標は論文当時計画の 2016 年から、2030 年度以降(民間主導プロジェクトを 2023–2027 年度に開始)へと後退した。

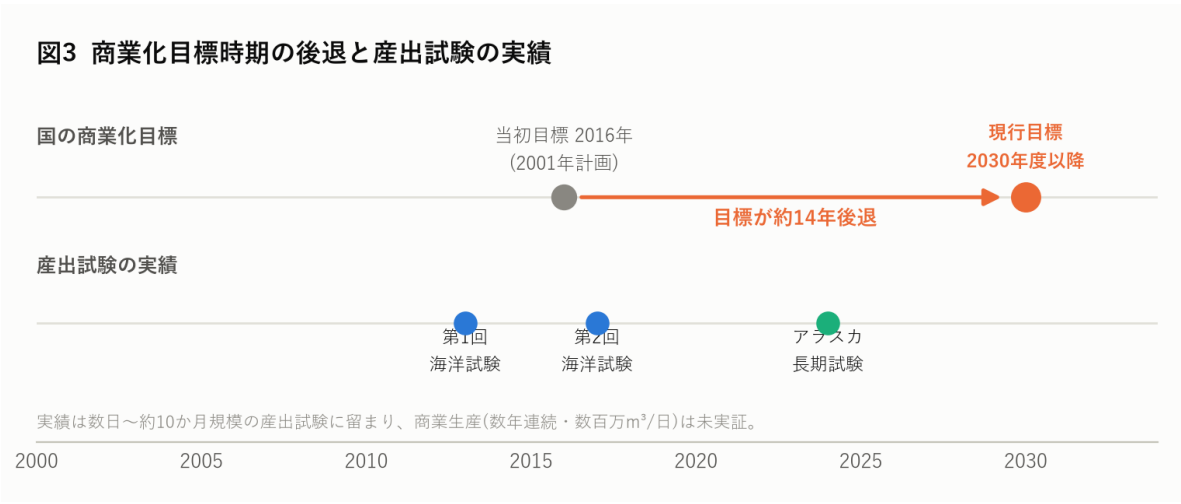


図3 商業化目標時期の後退と産出試験の実績。実績は数日～約 10 か月規模の産出試験に留まり、商業生産(数年連続・数百万 m³/日)は未実証。

7. 技術面の総括

論文(2003)の技術命題	照合結果	評価
減圧法(特に水平坑井)が最も優れる	全産出試験で減圧法を採用・実証	的中
熱水圧入法は劣位	生産主手法として非採用	的中
垂直坑井は生産性が低い	試験でも低生産性を確認	的中
長期安定生産が最大の課題	23 年経てなお未確立(最長約 10 か月試験)	未達(課題継続)
長距離水平坑井の掘削仕上げが必要	未確立	未達
コスト約 50%削減が必要	抜本的削減は未実証	未達
詳細な数値シミュレーションが必要	MH21-HYDRES で整備	達成・前進
(想定外) CO ₂ 置換法	2012 年に現場実証	想定外の展開
(想定外) 表層型 MH	日本海側で新たな開発対象化	想定外の展開

(想定外) メタン漏出の温室効果	環境技術課題として重視	想定外の展開
------------------	-------------	--------

図4 論文の技術命題10項目の照合結果

的中 3項目	達成・前進 1項目	未達(課題継続) 3項目	想定外 3項目
-----------	--------------	-----------------	------------

図4 論文の技術命題 10 項目の照合結果。的中=減圧法優位・熱水圧入法劣位・垂直坑井の低生産性／達成・前進=数値シミュレーション整備／未達=長期安定生産・長距離水平坑井・大幅コスト削減／想定外=CO₂置換法・表層型 MH・メタン漏出。

結論として、論文の生産手法に関する技術評価(減圧法優位・熱水圧入法劣位・垂直坑井の低生産性)は、その後の実証で妥当性が裏付けられた。一方、論文が「今後の課題」として定量化した長期安定生産・長距離水平坑井・コスト大幅削減という技術目標は、23 年を経てなお大半が未達である。加えて、CO₂ 置換法・表層型 MH・メタン漏出という論文の想定外の要素が、現在の技術開発の論点として加わっている。

出典

[1] JOGMEC「メタンハイドレート開発技術」および第 1 回海洋産出試験ニュースリリース。

https://www.jogmec.go.jp/oilgas/oilgas_10_000010.html /

https://www.jogmec.go.jp/news/release/release_00371.html

[2] K. Yamamoto et al., "The second offshore production of methane hydrate in the Nankai Trough...", PMC/RSC Advances (2019). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9070378/>

[3] U.S. DOE/NETL, "2012 Ignik Sikumi Gas Hydrate Field Trial" (CO₂/CH₄ Exchange). <https://netl.doe.gov/node/6324>

[4] USGS, "Successful Test of Gas Hydrate Production Test Well Ignik Sikumi on Alaska's North Slope".

<https://www.usgs.gov/centers/cersc/science/successful-test-gas-hydrate-production-test-well-ignik-sikumi-alaskas-north>

[5] 経済産業省 産業構造審議会「メタンハイドレート研究開発事業 中間評価報告書」(2024 年 8 月)。

https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/r06/640.pdf

[6] U.S. DOE, "DOE and International Partners Complete Gas Hydrates Production Testing on the Alaska North Slope" (2023/9–2024/7). <https://www.energy.gov/fecm/articles/doe-and-international-partners-complete-gas-hydrates-production-testing-alaska-north>

[7] USGS, "Gas Hydrate Energy Research – 2024 Update". <https://www.usgs.gov/centers/central-energy-resources-science-center/science/gas-hydrate-energy-research-2024-update>

[8] MH21-S 研究開発コンソーシアム(生産手法開発・MH21-HYDRES). <https://www.mh21japan.gr.jp/results.html>

[9] 産業技術総合研究所「表層型メタンハイドレートの回収・生産技術の研究開発」.

https://unit.aist.go.jp/georesenv/topic/SMH/project_seisan2.html

[10] 上越市「日本海上越沖の表層型メタンハイドレート」. <https://www.city.joetsu.niigata.jp/soshiki/sanritu/methane-hydrate.html>

[11] JOGMEC「メタンハイドレート研究開発の総括成果報告書とフェーズ4実行計画の公表」. https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1008604/1008759.html

※ 本レポートは 2003 年博士論文の技術的記述(生産手法・試算値・技術目標)を出発点に、公開情報で現在の到達点を照合した中間成果である。定量値は各出典時点のもの。