

<砂層型メタンハイドレート研究開発>

生産技術の開発 貯留層評価

MH21-S研究開発コンソーシアム 貯留層評価チーム

2025年10月24日(金)

「生産技術の開発」に係る目標と実施内容(1/2)

目標

- 長期安定生産の見通しがつき、生産挙動予測の信頼性向上がされていて、長期陸上産出試験で検証されていること。
 - 貯留層内並びに坑井近傍の現象の理解が進み、生産の安定性を阻害する要因の抽出と分析が行われ、対策技術が提示されること。
 - 生産挙動予測の信頼性が向上して、有望濃集帯においては経済性の基準を満たすことが期待される1坑井あたりの生産レート(日産5万立方メートルが目安)の見込みが得られていること。
 - 生産挙動予測の信頼性は長期陸上産出試験における長期生産挙動のデータ等により確認されていること。
 - 生産技術の改良がなされ、海洋で数か月程度の連続生産が可能な技術の見込みが得られていること(基本設計実施可能な技術レベルの達成)。

「有望濃集帯の抽出に向けた海洋調査」に係る目標

次フェーズ海洋産出試験の実施候補地点が抽出されていること

※経済性の基準(原始資源量100億m³以上)を満たすと評価されたことについては、第46回メタンハイドレート開発実施検討会(8月21日)にて説明済み

マイルストーン

- ① これまでの海洋産出試験における評価を行い、課題と考えられる事項と解決策の案が抽出されていること。(2019年度末頃)
- ② 長期陸上産出試験の長期生産挙動データの取得と生産技術の実証が十分に実施されていること。(2021年度末頃)

(出典) 第34回メタンハイドレート開発実施検討会、資料4 砂層型メタンハイドレートの研究開発 フェーズ4(2019～2022年度)実行計画(案)概要

「生産技術の開発」に係る目標と実施内容(2/2)

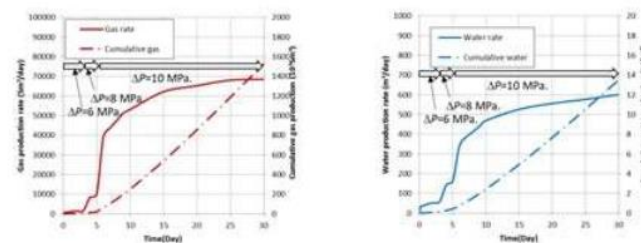
実施内容

ロ) 生産挙動予測と技術的可採量評価の信頼性向上(貯留層評価)

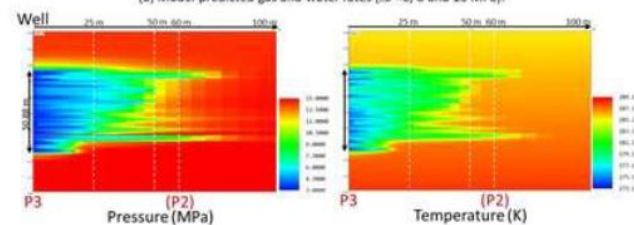
メタンハイドレート層の地質的不均質性等の特徴を盛り込んだ地質・貯留層モデルの構築手法、並びにそれらのモデルに基づく貯留層シミュレーション等により、次フェーズ海洋産出試験への移行の可否の判断に資する信頼性の高い(予測と実際の生産データの乖離が小さい)生産挙動予測手法、技術的可採量の評価手法の開発を進める。

- 貯留層評価の観点から、安定的な生産を阻害している可能性のある要因の抽出
- 米国アラスカ州の陸上において掘削された層序試験井から得られたデータを踏まえた地質・貯留層モデルの構築と、ガス・水生産量予測
- 長期陸上産出試験で得られたデータを用いた評価・解析作業
- 長期生産挙動に関する知見の整理、生産挙動予測手法や技術的可採量評価手法の信頼性向上のための取組
- 生産性・回収率を向上する生産増進技術の開発

<参考: 第2回海洋産出試験における生産挙動の予測>

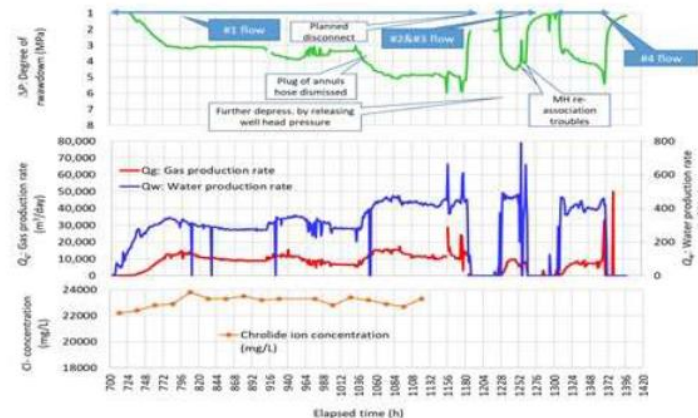


(a) Model predicted gas and water rates ($\Delta P=6, 8$ and 10 MPa).



(b) A model predicted pressure and temperature distribution (30th day)

<参考: 第2回海洋産出試験における実際の生産挙動>



(出典) 第34回メタンハイドレート開発実施検討会、資料4 砂層型メタンハイドレートの研究開発 フェーズ4(2019～2022年度)実行計画(案)概要

経済性評価の前提条件（フェーズ3）

表 1 経済性評価に係る前提条件一覧

項目	前提条件
濃集帯	・ 実在が期待される濃集帯の特徴に合わせてベースとなるモデルを構築
貯留層	・ 既存坑井データや堆積学的な検討に基づき地層や MH の胚胎状況を想定 (濃集帯全体に渡り水平方向には均一に連続していると仮定)
生産手法 (含、生産 シミュレ ーション)	・ 減圧法（坑底圧は 3MPa と想定） ・ 1 坑井が一辺約 600m の方形領域に相当する面積（排ガス半径 350m 相当）をカバー ・ 領域外との熱・流体の交換は無いものと仮定 ・ MH の分解に伴う砂の流動や付随する障害、地盤の変形に伴う生産性への影響等は考慮しない
ガス販売 方法	・ 濃集帯近傍の海岸まで海底パイプラインでガスを輸送してエネルギー事業者の販売と想定 ・ 付臭・熱量調整なし、5.6MPa まで昇圧した状態での販売を想定（発電所のイメージ） ・ ガス販売価格は熱量に応じた価格と想定
開発シ ステム (図 2)	・ 複数の生産井を一つのマニフォールドに接続し、ガスや水を集約する ・ マニフォールド後段にサブシーセパレータを配置し、ガスは、プラットフォームへ集めた上で、昇圧や脱湿を行い、海底パイプラインにより陸上に圧送 ・ 水は、海底で分離した後、海底面下（MH 貯留層よりも深い地層）に圧入する想定 ・ 減圧ポンプは各坑井に配置するのではなく、セパレータの後段に配置する想定

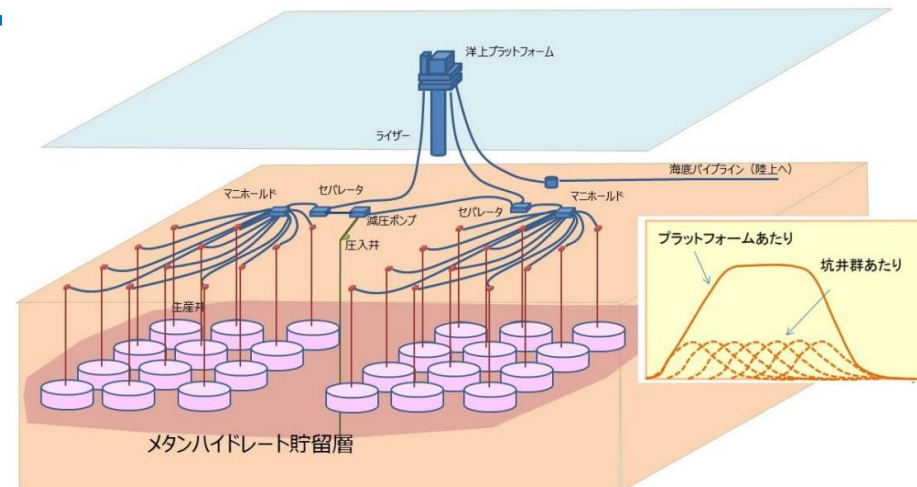


図 2 開発システムのイメージ図

表 2 商業化の実現が期待できる濃集帯の条件

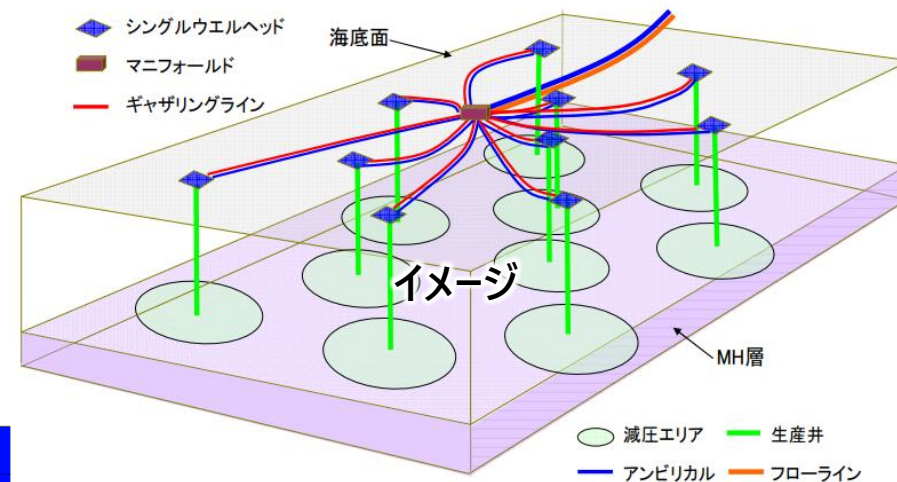
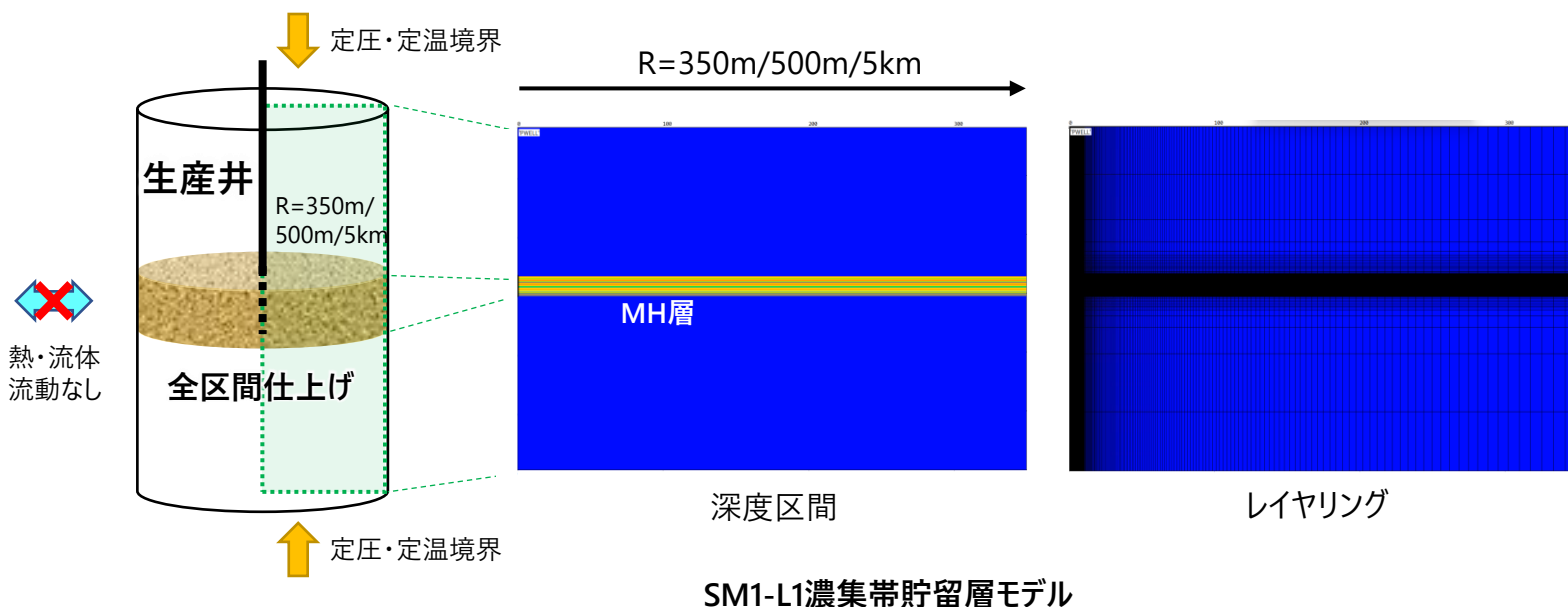
		約10\$/MMBtuを基準		約18\$/MMBtuを基準
原始資源量	坑井生産レート (8年平均値)	大規模 約500億m ³ (約2TCF) 以上	中規模 約100~500億m ³ (約0.4~2TCF)	小規模 約100億m ³ (約0.4TCF) 以下
高 15万m ³ /日程度以上	◎ (優先順位: 高)	○ (優先順位: 中)	×	(対象外)
中 5~15万m ³ /日程度	○ (優先順位: 中)	△ (優先順位: 低)	×	(対象外)
低 5万m ³ /日程度以下	×	×	×	(対象外)

(出典) フェーズ2及びフェーズ3総括成果報告書、https://www.mh21japan.gr.jp/mh21wp/wp-content/uploads/phase2_3_6_1.pdf

SM1-L1シミュレーション概要

二次元円筒座標系貯留層モデルおよび計算条件

- 垂直井、8年間連続生産、水処理量の上限なし
- ケーススタディ（全48ケース）
 - ・ モデル半径($R=350\text{m}/500\text{m}/5\text{km}$)：3ケース
 - ・ 貯留層物性(初期水有効浸透率*、絶対浸透率*)：8ケース
 - ・ 坑底圧($3\text{MPa}/5\text{MPa}$ 一定)：2ケース



<想定される海洋開発システムのコンセプト例>

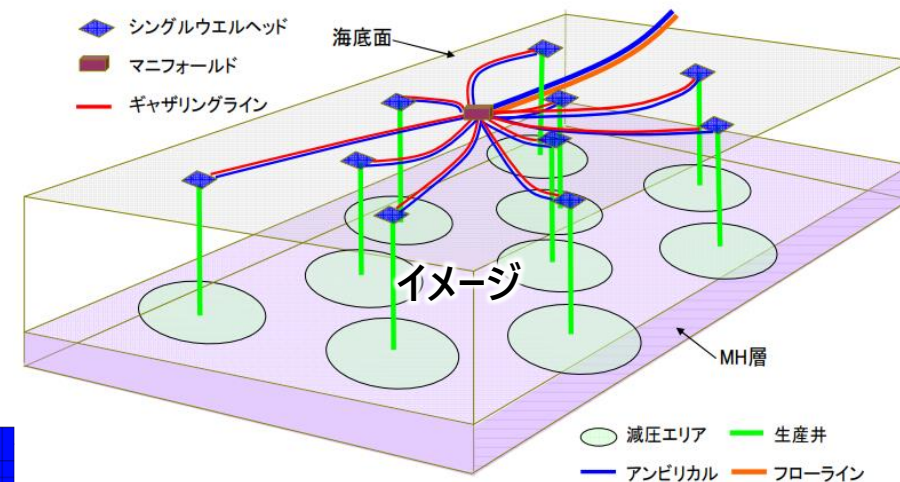
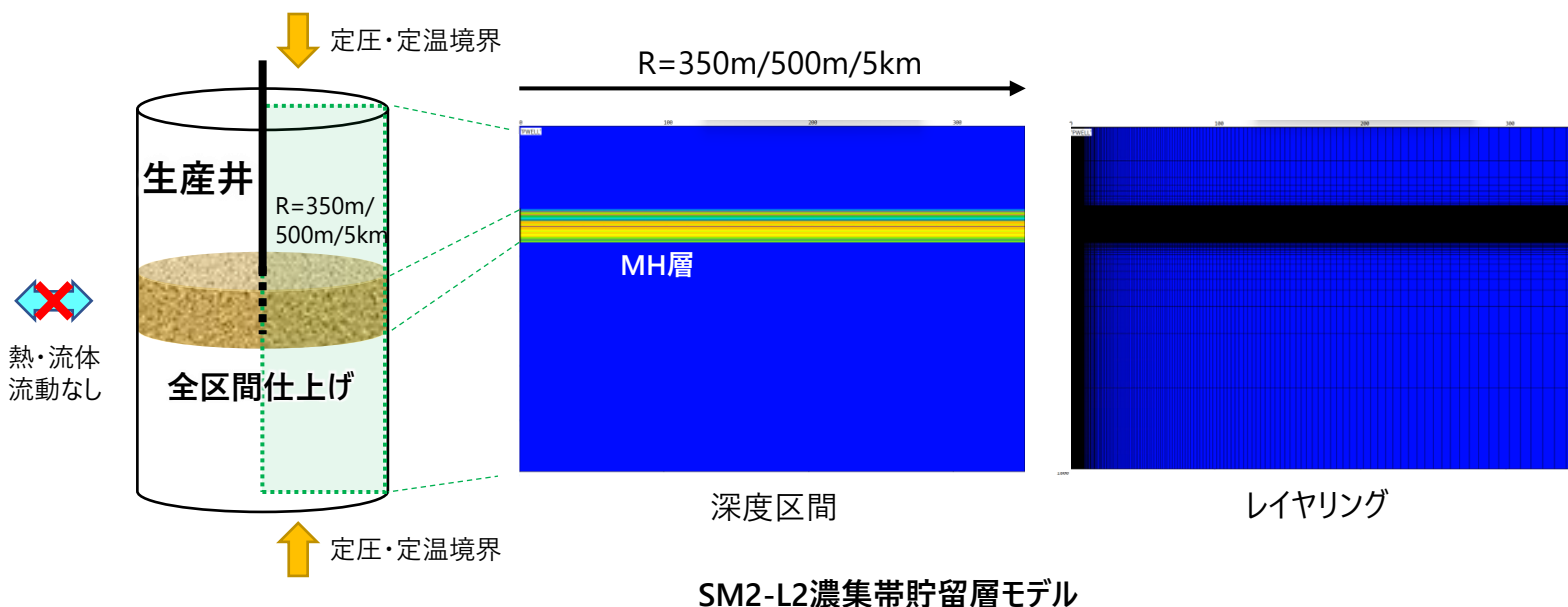
(出典) 第24回 メタンハイドレート開発実施検討会 資料6-2

*新しく開発した浸透率評価モデルを用いた浸透率をベースとしつつ、不確実性を考慮して簡易生産実験のヒストリーマッチ結果や追加地質情報（コア、MDT）で補正した複数のケースを設定

SM2-L2シミュレーション概要

二次元円筒座標系貯留層モデルおよび計算条件

- 垂直井、8年間連続生産、水処理量の上限なし
- ケーススタディ（全96ケース）
 - モデル半径($R=350\text{m}/500\text{m}/5\text{km}$)：3ケース
 - 貯留層物性(初期水有効浸透率^{*}、絶対浸透率^{*}、相対浸透率^{**})：16ケース
 - 坑底圧($3\text{MPa}/5\text{MPa}$ 一定)：2ケース



＜想定される海洋開発システムのコンセプト例＞

(出典) 第24回 メタンハイドレート開発実施検討会 資料6-2

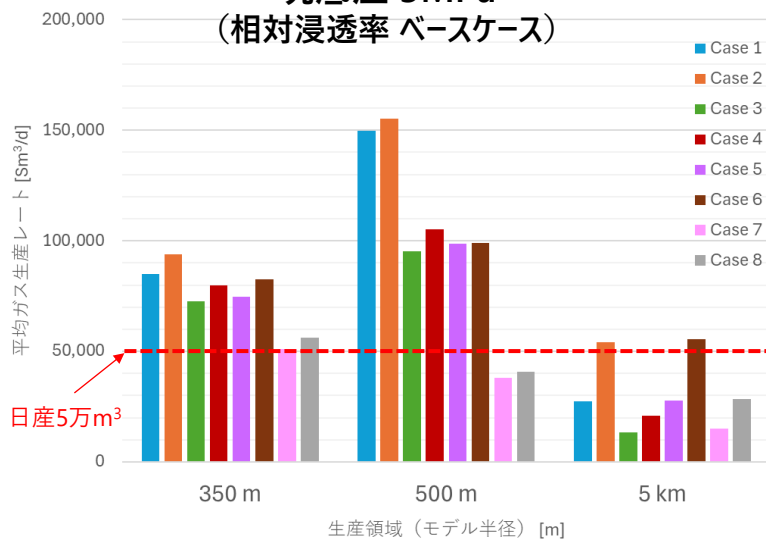
^{*}新しく開発した浸透率評価モデルを用いた浸透率をベースとしつつ、不確実性を考慮して簡易生産実験のヒストリーマッチ結果や追加地質情報（コア、MDT）で補正した複数のケースを設定

^{**}相対浸透率は、令和4年度の試掘・簡易生産実験位置選定に係る検討(ベースケース)、令和5年度の試掘・簡易生産実験のヒストリーマッチング結果(HMケース)に基づき2ケースを設定

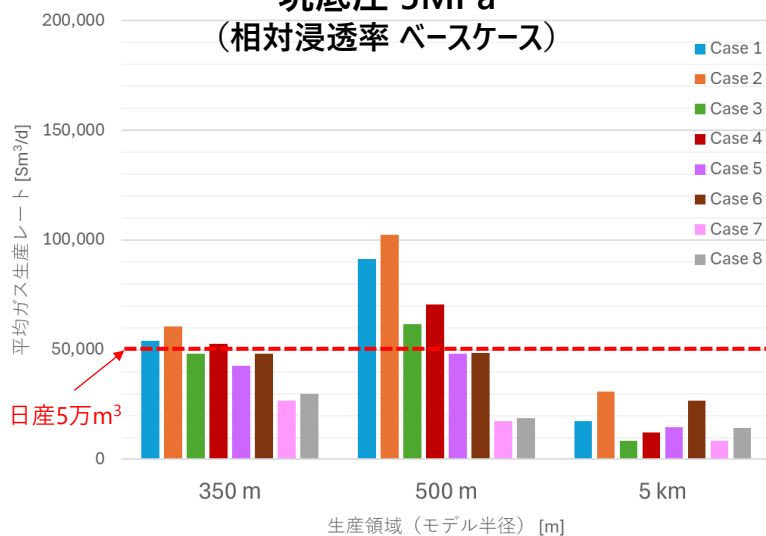
SM1-L1/SM2-L2計算結果まとめ（平均ガス生産レート）

SM1

坑底圧 3MPa
(相対浸透率 ベースケース)

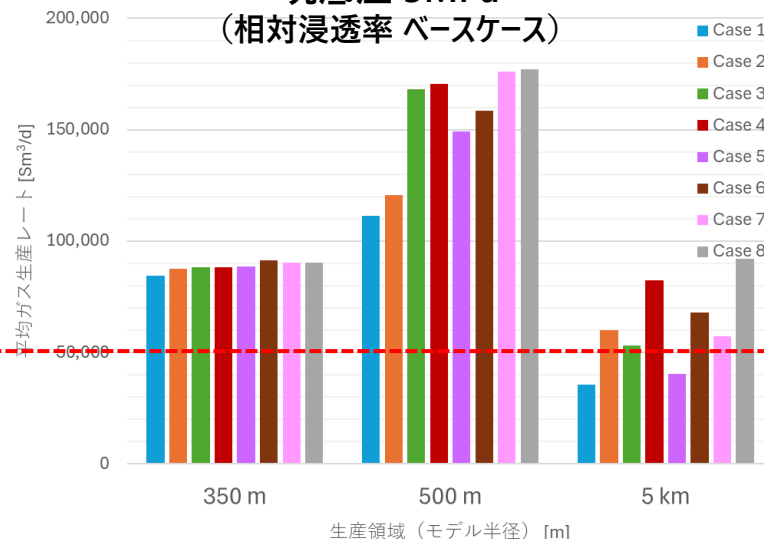


坑底圧 5MPa
(相対浸透率 ベースケース)

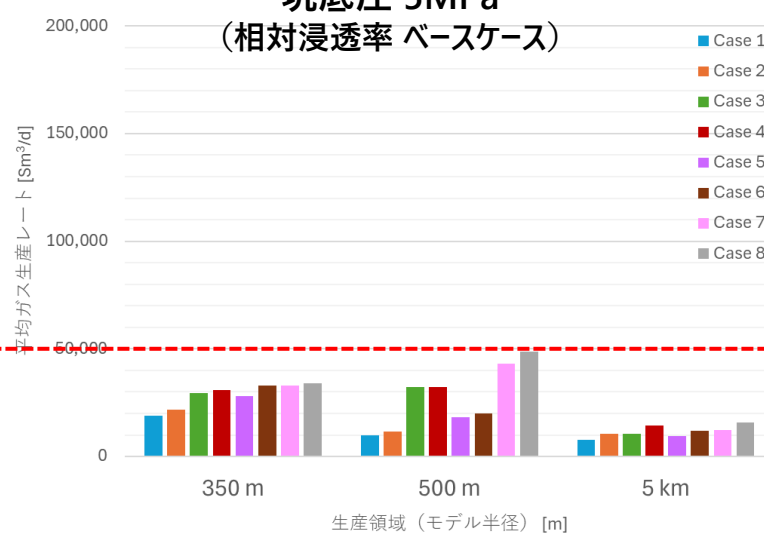


SM2

坑底圧 3MPa
(相対浸透率 ベースケース)

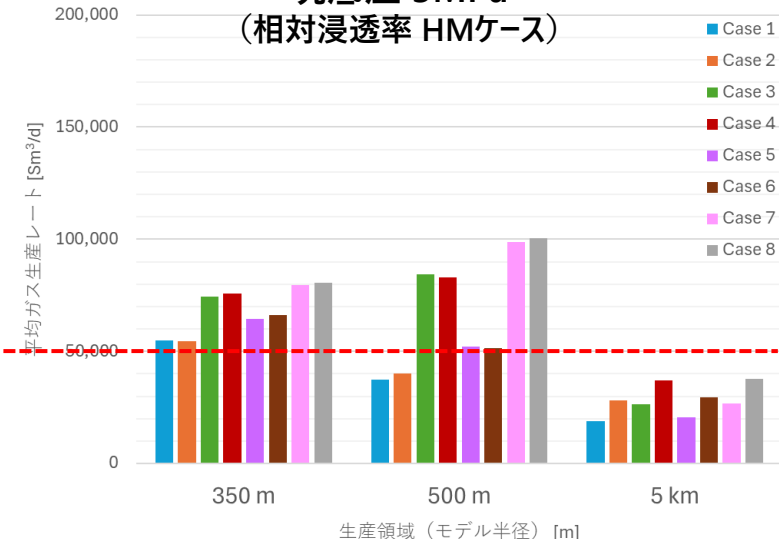


坑底圧 5MPa
(相対浸透率 ベースケース)

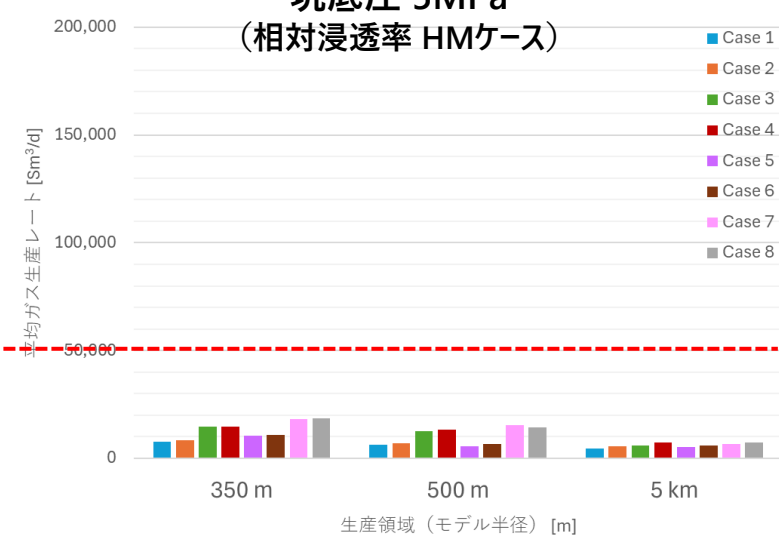


SM2

坑底圧 3MPa
(相対浸透率 HMケース)



坑底圧 5MPa
(相対浸透率 HMケース)



まとめ①：生産量予測の信頼性に関する成果と課題

生産量に最も影響を与える浸透率の評価技術

- 第二渥美海丘などの貯留層評価に用いてきた浸透率モデルに加え、フェーズ4では**新しい浸透率評価モデル*を開発**した。従来のモデルと比較して、ハイドレートを含む**コアで測定した浸透率に比較的近い値の浸透率を評価することができる**ようになりつつある。また、このモデルは、チューニングが必要なパラメータが少なく、現場で取得した物理検層(NMR)データからすぐに浸透率を評価できる利点がある。
- 今般の志摩半島沖における濃集帯を対象とした長期生産挙動予測に際しては、新規のサイトであるため**コアで測定した浸透率やMDTなどの結果で補正したモデルを用いることで不確実性を考慮した評価**を実施した。

生産予測の信頼性向上に資する事後解析の継続および生産データ取得の必要性

- アラスカでの長期生産試験では、**新しい浸透率評価モデルをベースとしたモデルを構築（コア分析結果で補正済み）**した。並行して、恣意的なマッチングを極力避け、試験実績を再現することができる貯留層性状や条件を検討するべく、**データ同化**を用いたヒストリーマッチを試行中**である。試験サイト特有の事象を排除し、普遍的なハイドレート層の長期的応答の把握にはまだ時間を要する。
- 一方、海洋においては試掘・簡易生産実験を実施したものの、SM1/SM2両方の生産データを得ることはできてはいない。従い、貯留層物性を物理検層データのみでなくコア分析結果で補正して構築した地質/貯留層モデルを用いた長期生産予測シミュレーションを実施したとは言え、この**モデルの信頼性を検証するに耐え得る中長期的生産データが必要**である。

*浸透率評価モデルについてはスライド9-10枚目、**データ同化についてはスライド11枚目を参照

まとめ②：志摩半島沖における目標生産レート達成見込み

- 事前調査井掘削、試掘・簡易生産実験、追加調査井掘削などで取得したデータから構築した地質/貯留層モデルを用いた生産挙動予測シミュレーションにより、志摩半島沖の濃集帯（SM1およびSM2）にて期待される1坑井あたりの生産レートを検討した。
- 志摩半島沖の濃集帯において、条件は異なるものの、SM1およびSM2それぞれの濃集帯にて、目標生産レート（1坑あたり日産5万m³が目安）を上回る平均ガス生産レートが見込まれる。なお、過度なドローダウンをかけずに目標生産レートをクリアできる可能性があるSM1の優先度が高い。
 - **SM1濃集帯**：貯留層性状の観点ではSM2にやや劣後するものの（特にSM2の絶対浸透率はSM1よりも高い）、地層温度が高く、坑底圧5MPaでも生産レートの目標をクリアする計算結果を得た。
 - **SM2濃集帯**：SM1と比較して貯留層性状は良好だが、地層温度が低く、ハイドレートの分解のために消費できる地層顕熱が少ない。しかし、坑底圧3MPaまで減圧することができる前提であれば、より多くの地層顕熱を使えるため目標生産レートの達成に一定の期待を持つことができる。
 - SM1は、ハイドレート濃集帯の中にガスが存在している地点も確認されているため、掘削時だけでなく、特に生産初期の段階でのガスロックや坑内/管内でのハイドレート化などへの対策を十分に準備した上で、オペレーションに臨む必要がある。

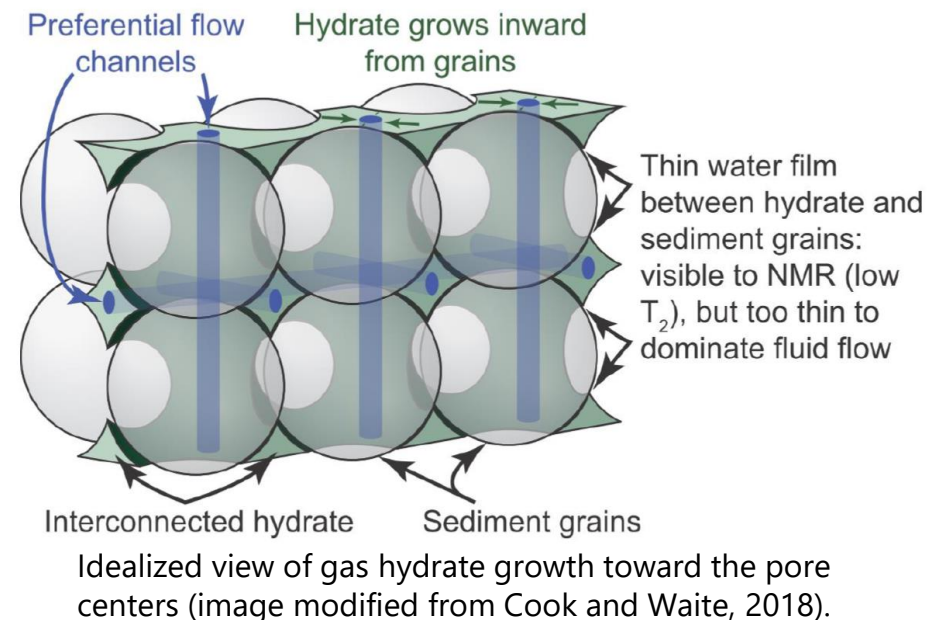
（補足）・本スタディの計算条件は、フェーズ3で実施した経済性評価の前提条件に準ずる。

- あくまで複数坑井での同時生産を仮定した場合の計算結果であり、単独の坑井で生産した場合の生産挙動や生産レートとは異なる。
- 坑井周りでの圧力損失は考慮していないため、坑井近傍では坑底圧＝地層圧とみなす。

【参考】浸透率評価モデル(1/2)

< 初期水有効浸透率 >

- 新たに提案した浸透率評価式は、動水半径モデルをメタンハイドレート用に拡張したもの。
- Kozeny-Carman式 of 概念を応用し、NMRの緩和時間 T_2 分布から推定した比表面積（動水半径の逆数）を用いて浸透率を計算するモデルである。メタンハイドレートの生成により有効孔隙が減少しても細孔中心部に優先的な流路が形成され得るため、比較的浸透率の低下が少ない場合がある。
- フィッティングパラメータがほぼ無く、検層結果から直接推定することができる。



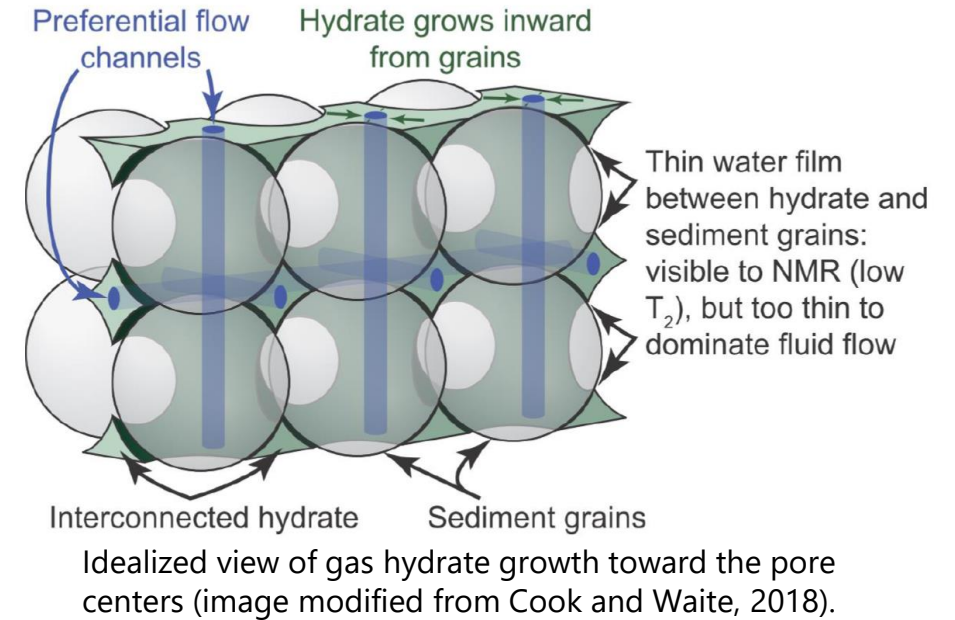
初期水有効浸透率 (K_{eff})	絶対浸透率 (K_{int})
$K_{eff} = C_s \phi_{NMR} \left(\frac{c_n \rho_2}{4 \sum \frac{f(T_{2i})}{T_{2i}}} \right)^2 \times 10^3$ C_s: shape factor of flow path (0.5) ϕ_{NMR}: NMR porosity c_n: shape factor (4 for the cylinder network model) ρ_2: surface relaxation coefficient $f(T_2)$: frequency at T_2 relaxation time	$K_{int} = C(\phi_t)^4 \left(\frac{FFV + \alpha V_h}{BFV + (1 - \alpha)V_h} \right)^2$ C: Constant value ϕ_t: Total porosity FFV: Free fluid volume BFV: Bound fluid volume V_h: Gas hydrate volume α: Ratio of FFV to the total NMR volume ($FFV + BFV$) in hydrate-free sediment

(出典) Yoneda et al., 2022, <https://doi.org/10.1306/04272120204>などに基づき作成

【参考】浸透率評価モデル(2/2)

< 絶対浸透率 >

- 修正Timur-Coatesモデル
- 従来のモデルでは、メタンハイドレートが分解した場合、生じた水のすべてが自由水として流動に寄与すると仮定してNMRシグナルを利用していた。その結果、実測値（コア分析）の10～100倍程度過大評価する場合があった。
- これに対し、補正パラメータ α を導入し、ハイドレート由来の細孔体積の一部（実験では57%）のみをFFVに加え、残りをBFVとして扱うよう改良した。これにより過大評価が抑制され、予測浸透率は実測値に近い信頼性の高い値となることが示された。



初期水有効浸透率 (K_{eff})	絶対浸透率 (K_{int})
$K_{eff} = C_s \phi_{NMR} \left(\frac{c_n \rho_2}{4 \sum \frac{f(T_{2i})}{T_{2i}}} \right)^2 \times 10^3$ C_s: shape factor of flow path (0.5) ϕ_{NMR}: NMR porosity c_n: shape factor (4 for the cylinder network model) ρ_2: surface relaxation coefficient $f(T_2)$: frequency at T2 relaxation time	$K_{int} = C(\phi_t)^4 \left(\frac{FFV + \alpha V_h}{BFV + (1 - \alpha)V_h} \right)^2$ C: Constant value ϕ_t: Total porosity FFV: Free fluid volume BFV: Bound fluid volume V_h: Gas hydrate volume α: Ratio of FFV to the total NMR volume (FFV+BFV) in hydrate-free sediment

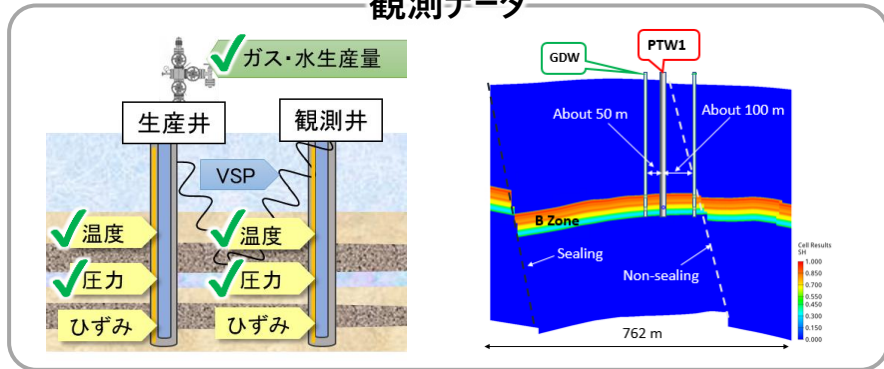
（出典）Yoneda et al., 2022, <https://doi.org/10.1306/04272120204>などに基づき作成

【参考】データ同化

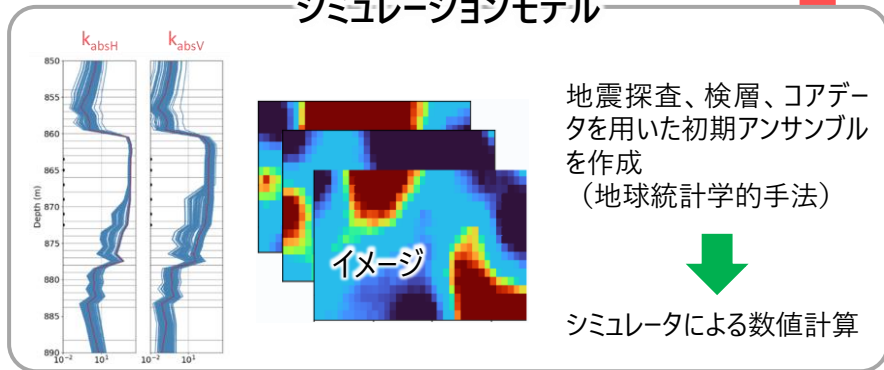
データ同化による解析

- データ同化：「観測データ」と「シミュレーションモデル」を使い、**貯留層の最も確からしい状態**（貯留層物性値、断層、スキン）を統計的に推定
- 最も身近なデータ同化の応用例：**気象予報**

観測データ

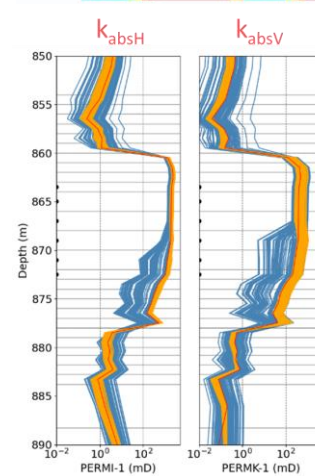
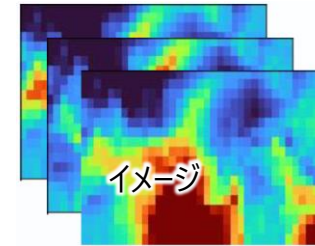


シミュレーションモデル



データ同化

Ensemble Smoother

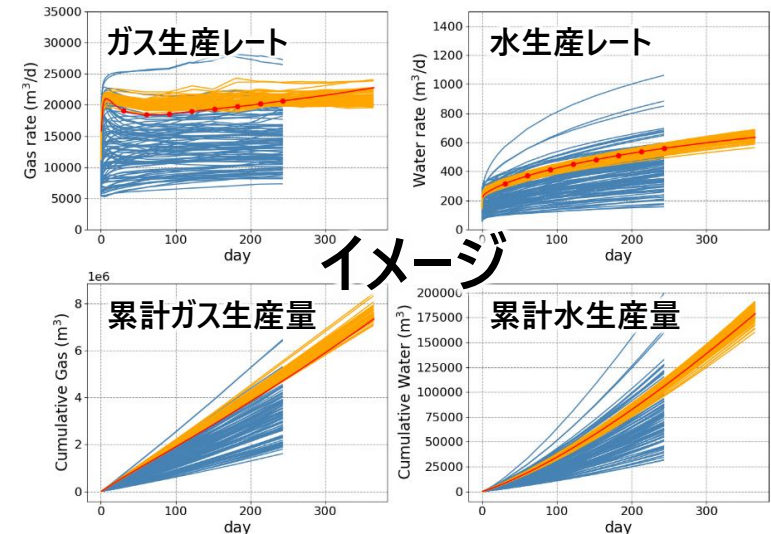


状態ベクトル(貯留層物性値等)の更新

→データ同化により各アンサンブルが観測データへ収束

→観測データを再現できる貯留層の状態を推定し、さらに将来を予測

初期アンサンブル
観測データ
データ同化後



生産レート・累計生産量

(出典) 砂層型メタンハイドレートフォーラム 2022、3. アラスカ陸上産出試験では何をするのか?、<https://www.mh21japan.gr.jp/pdf/mh21form2022/doc03.pdf?d=20211221>に基づき作成