

「エネルギー研究クラスター」発足シンポジウム(2019年2月28日)
東京コンベンションホール

新しい天然ガス資源： メタンハイドレートの開発技術の現状と将来展望

増田 昌敬*

東京大学 人工物工学研究センター**

* 工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター 協力研究員

** 2019年4月より, 東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻

メタンハイドレート－燃える氷 (Flammable Ice)

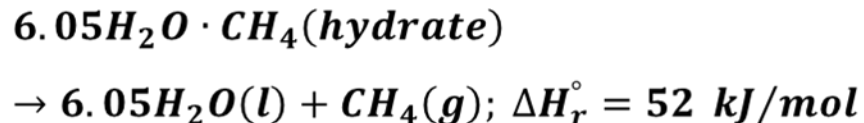
- メタンハイドレートは、低温・高圧の条件下で安定に存在
 - 見かけは氷に似ている
 - 周りの圧力が下がったり、温度が上がると、メタンガスと水に分解する



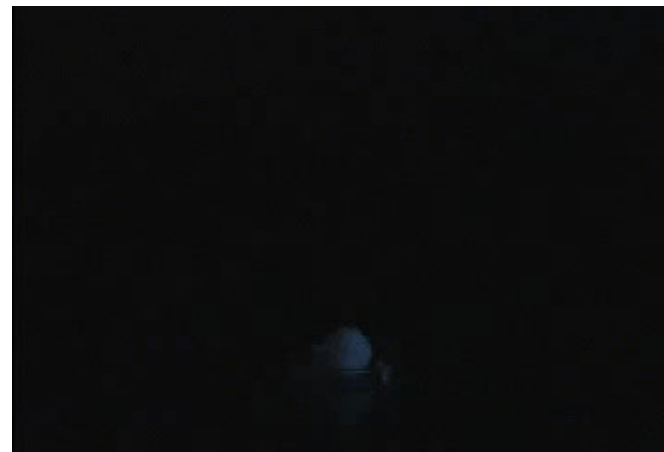
Methane hydrate

圧力が下がると、メタンがハイドレート(水分子の籠)から放出される

吸熱反応



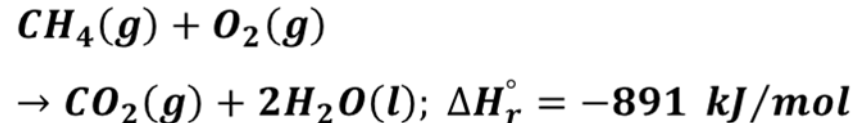
大気圧条件



Flammable ice

放出されたメタンが燃焼する

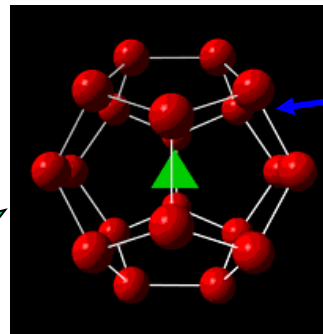
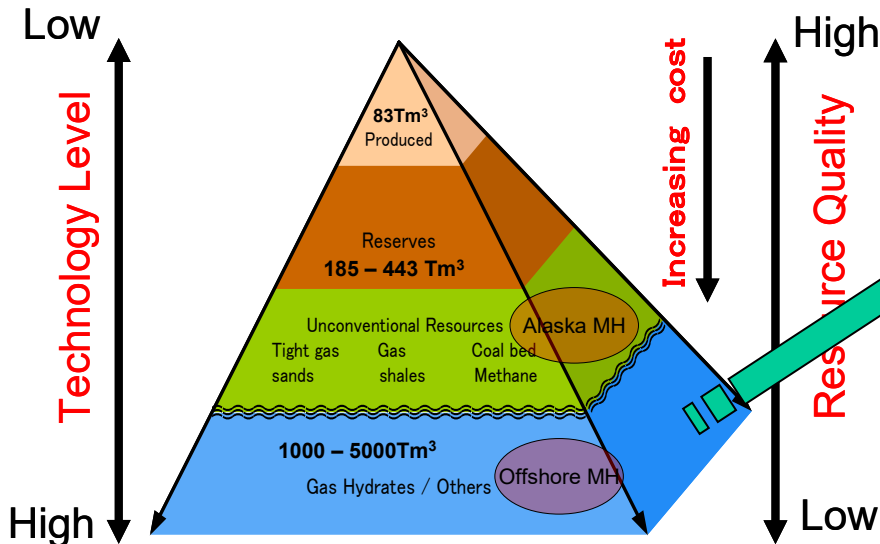
発熱反応



メタンハイドレート – 非在来型の天然ガス資源

天然ガス資源の究極資源量

メタンハイドレート：低温高圧の環境で安定に存在するメタンの水和物（固体結晶）



低温・高圧の条件下では、水分子の水素結合が強くなり、水分子の作るクラスター(かご)構造の中にメタン分子が捕獲されて存在する

世界の海域には、膨大な量（1000～5000 兆m³）のメタンガスを含むメタンハイドレートが存在

原始資源量：1000～5000兆m³

- 回収率：10%（例えば）
- 可採資源量（R）：100～500兆m³
- 2016年の天然ガス生産量（P）：3.6兆m³
- R/P（供給可能年数）= 27～139年

海域のメタンハイドレートから10%のメタンをエネルギーとして取り出して利用可能になれば、30～140年分の天然ガスの供給が可能になる

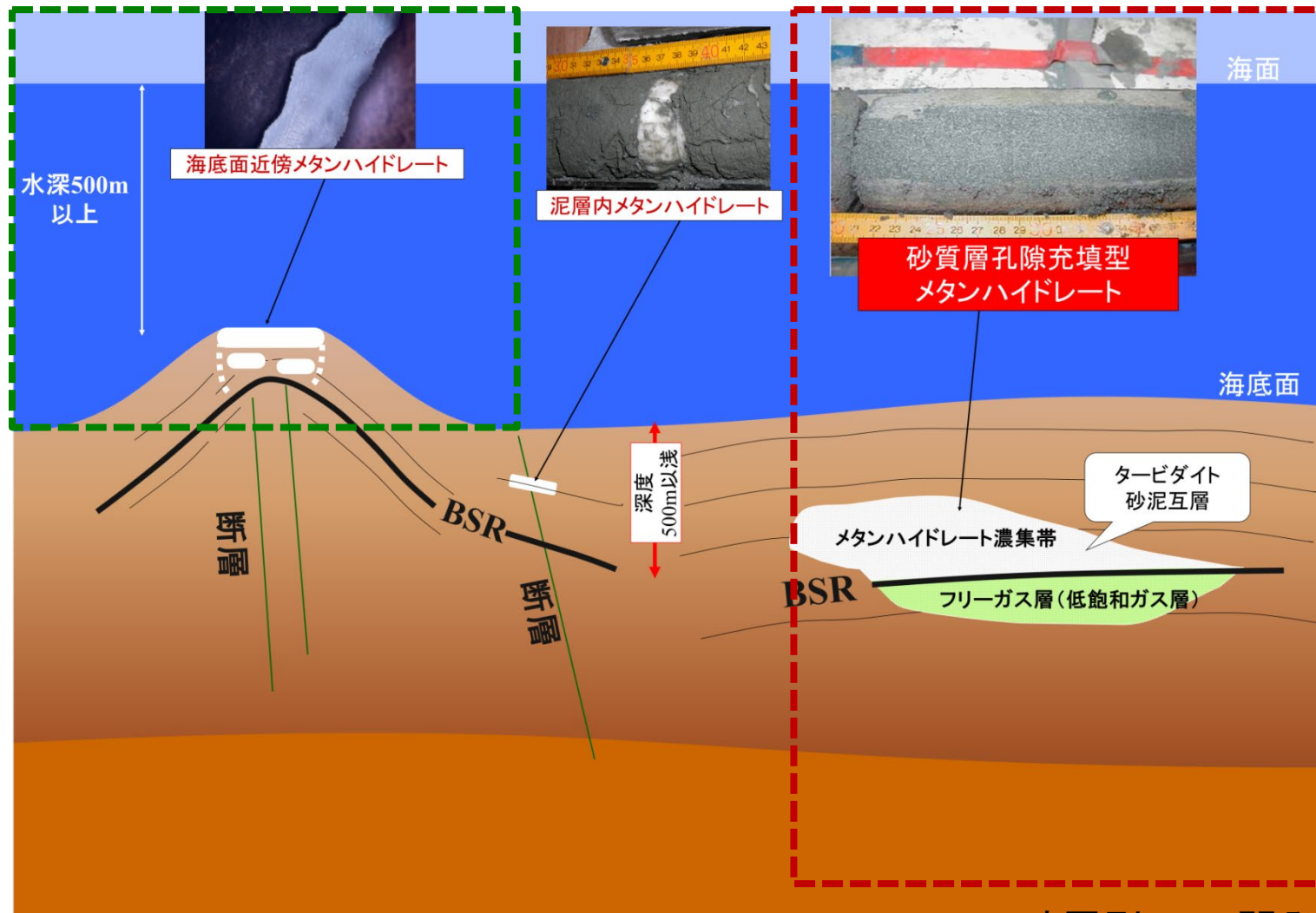
未来の燃料資源
メタンハイドレート



MHの賦存が確認あるいは推定されている場所(MH21研究コンソーシアム提供)

海域における存在形態－表層型と砂層型メタンハイドレート (MH)

表層型MH: 資源量と回収技術の調査段階



(図の出所) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

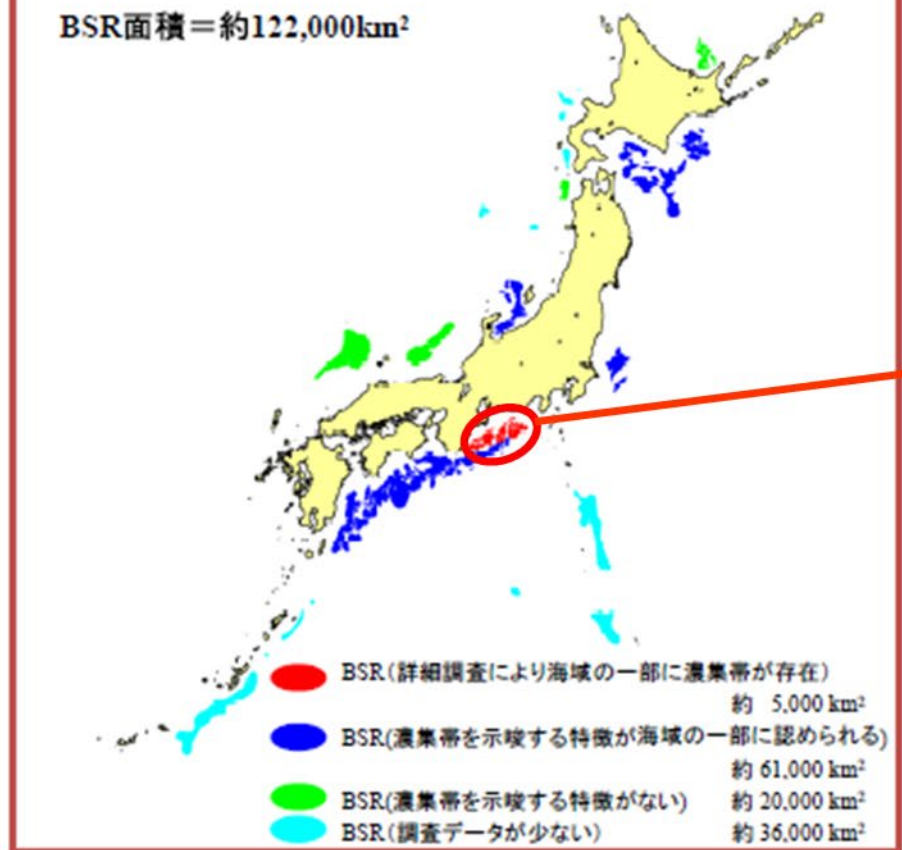
JOGMEC News No.46 http://www.jogmec.go.jp/publish/publish_10_000018.html

砂層型MH: 開発技術の整備に向けた研究段階

日本周辺海域のBSR分布図（砂層型MH）

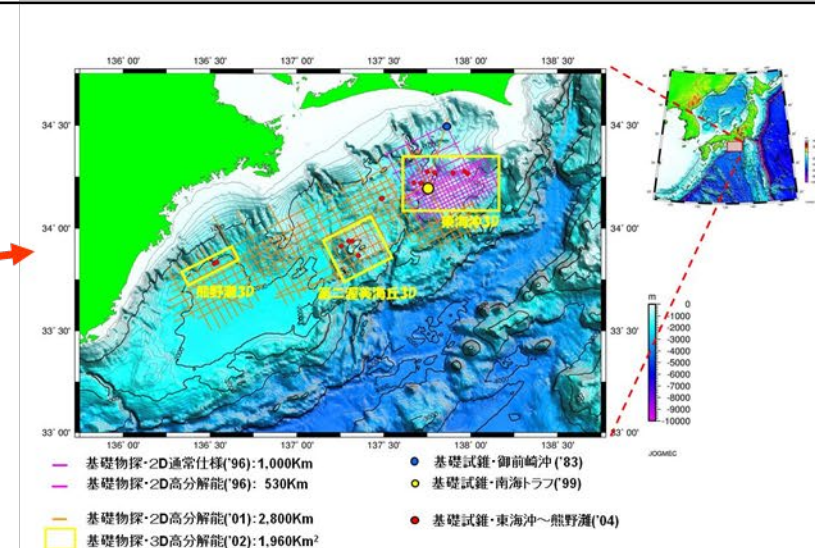
最新のBSR分布図(2009年)

BSR面積 = 約122,000km²



東部南海トラフ海域のメタンハイドレート

- メタンガス原始資源量(※): 約1.1兆m³
(LNG換算で約8億4千万トン)
- BSR分布面積: 約5,000km²



<<参考>>

- 2015年の我が国のLNG輸入量は約8,700万トン
(天然ガス換算で約1,180億m³)

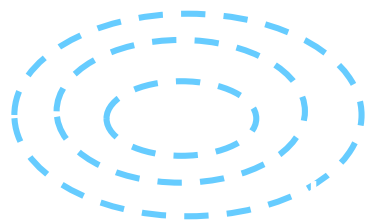
(※) 原始資源量は、地下に集積が見込まれる資源の単純な総量であり、**技術的に採掘可能な可採埋蔵量ではない**

(図の出所) MH21研究コンソーシアム
HP: <http://www.mh21japan.gr.jp/>

経済的・技術的に開発可能になれば、大きな資産となる

メタンハイドレートからメタンを取り出せれば、お金持ちになれるか？

海底下のメタンハイドレート

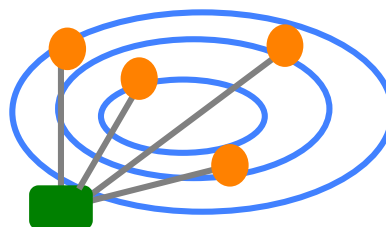


資源量: A

$A = 500 \text{億 m}^3$

(1兆 m^3 の20分の1)

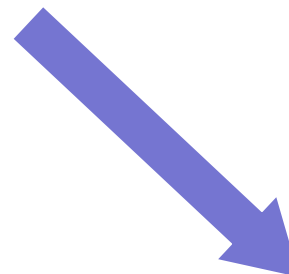
開発プロジェクト



埋蔵量: B

どのくらい採れるか
回収率 $R = 0.5$

$$B = A \times R = 250 \text{億 m}^3$$



ガス販売価格 $C = 40 \text{円/m}^3$

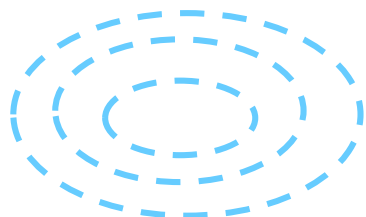
売上 $S = C \times B = 1 \text{兆円}$



現金

まだ開発技術が確立していないので、想定資源量の段階

原始資源量(In-Place Resources)



資源量(ポテンシャル)

Volume

将来的に生産可能な資源

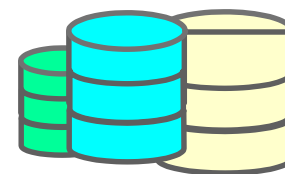


- 環境に調和した経済性のある開発技術
- ガスの生産技術

科学技術の挑戦

推定究極可採量

Estimated
Ultimate Recoverable



埋蔵量(Reserves)



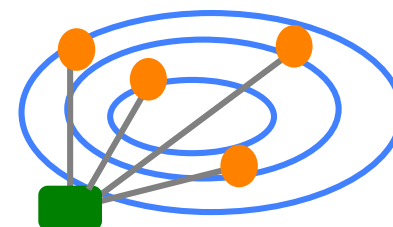
Net Present Value

プロジェクトの収益
(現在価値)

Value



将来の商業生産



開発プロジェクト

「我が国におけるメタンハイドレート開発計画（平成13年7月，経済産業省）」

- 目的と6つの目標，及び目標達成に向けて段階的に技術開発を進める開発スケジュール
- 平成17年と平成20年に開発スケジュールの見直しが行われ，最終的に平成30年度（2018年度）までの計画

目的

我が国周辺に相当量の賦存が期待されるメタンハイドレートについて，将来のエネルギー資源として位置づけ，その利用に向けて，経済的に掘削・生産回収するための技術開発を推進し，エネルギーの長期安定供給確保に資する。

目標

1. 日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化
2. 有望メタンハイドレート賦存海域のメタンガス賦存量の推定
3. 有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択，並びにその経済性の検討
4. 選択されたメタンハイドレート資源フィールドでの産出試験の実施
5. 商業的産出のための技術の整備
6. 環境保全に配慮した開発システムの確立

開発スケジュール

●フェーズ1（2001年度～2008年度）

基礎的研究（探査技術等）の推進，海洋産出試験の対象となりうる資源フィールドの選択，陸上産出試験実施による技術の検証 等

●フェーズ2（2009年度～2015年度）

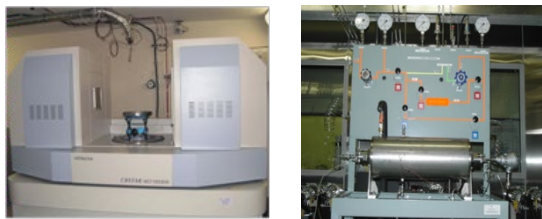
基礎的研究（生産技術等）の推進，我が国近海での海洋産出試験の実施 等

●フェーズ3（2016年度～2018年度）

商業的産出のための技術の整備，経済性・環境影響評価等の実施 等

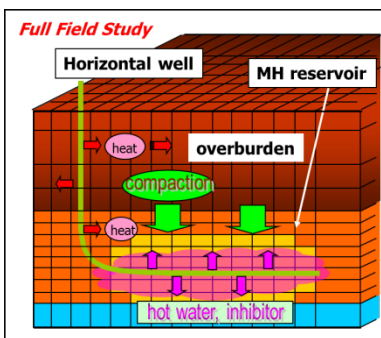
経産省の下で行われている研究開発 (MH21コンソーシアム)

研究基盤ツールの構築



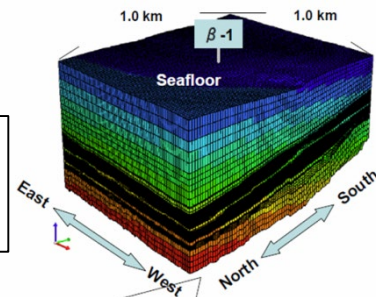
室内実験・シミュレーションによる生産手法の評価・選定

- 生産シミュレータMH21-HYDRESによる挙動予測の検証
- 室内実験と数値シミュレーションにより、MH層からの効率的なガス生産手法として、減圧法を選定



- コア採取・分析技術の確立
- 生産シミュレータ(MH21-HYDRES)の開発
- 地層変形シミュレータ(COTHMA)の開発

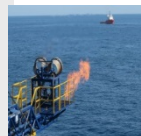
実フィールドでの減圧法によるガス・水生産挙動の計算予測



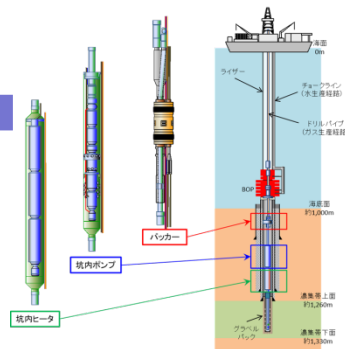
生産技術の実証試験

渥美半島から志摩半島沖合で、海底下のMH層から減圧法によるガス生産実験を実施

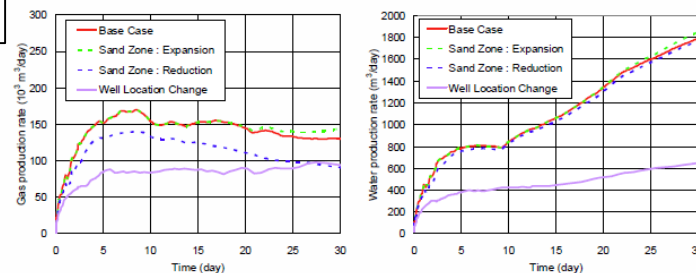
- 2013年3月: **第1回海洋産出試験**
 日量平均20,000m³, 6日間の連続ガス生産, 累計ガス生産量: 約119,000m³)
- 2017年5月～6月: **第2回海洋産出試験**
 合計生産時間: 約36日(うち約20日間の連続生産)
 累計ガス生産量: 約263,000m³



減圧法を適用するためのフィールド機器の開発



- 貯留層モデルの作成とシミュレーション



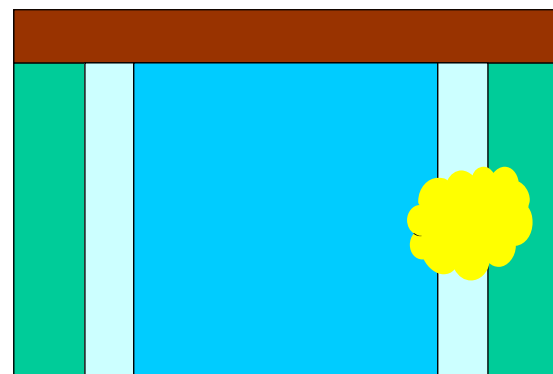
(a) Gas production rate (b) Water production rate
 Figure 14 - Predicted gas and water production performances (β -1 well)

(上図の出所) Kurihara et al.: Paper OTC20737, May 2010

メタンハイドレートのガス生産方法－減圧法と加熱法

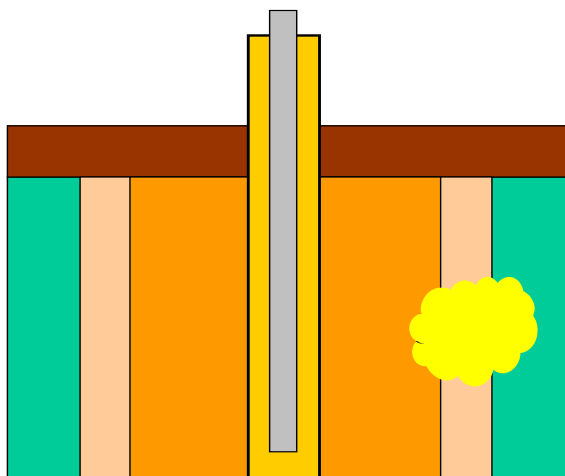
(1) 減圧法

生産用の井戸を掘り、そこで減圧することによって、地層内に存在するメタンハイドレートの自然分解を促す方法

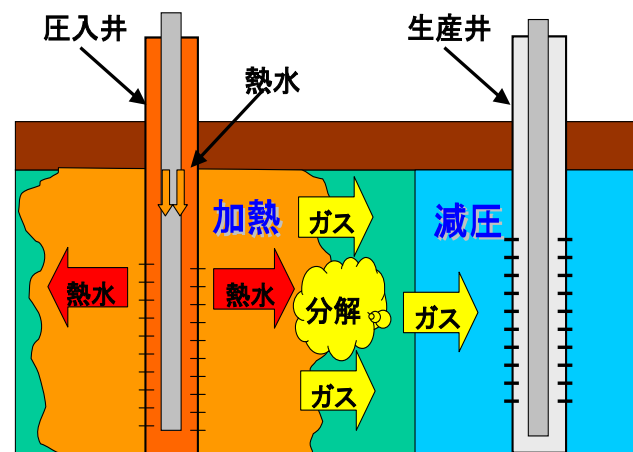


(2) 加熱法

人工的に地層中へ熱を加えてメタンハイドレートの分解を促進する方法



井戸内に温水を循環して地層を加熱して、MHを分解させる

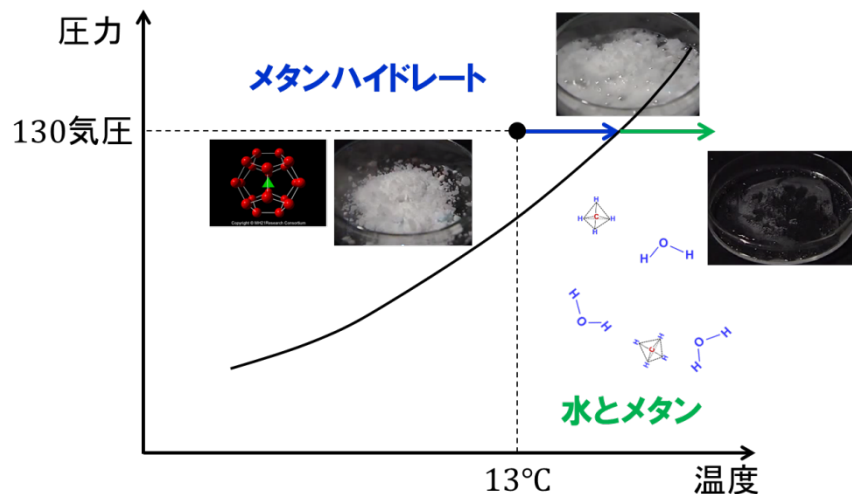


一つの井戸から熱水をMH層内に圧入して、MHの分解で発生するメタンガスを生産井から生産する

減圧法と加熱法の違い（概念）

加熱法によるMH分解の原理

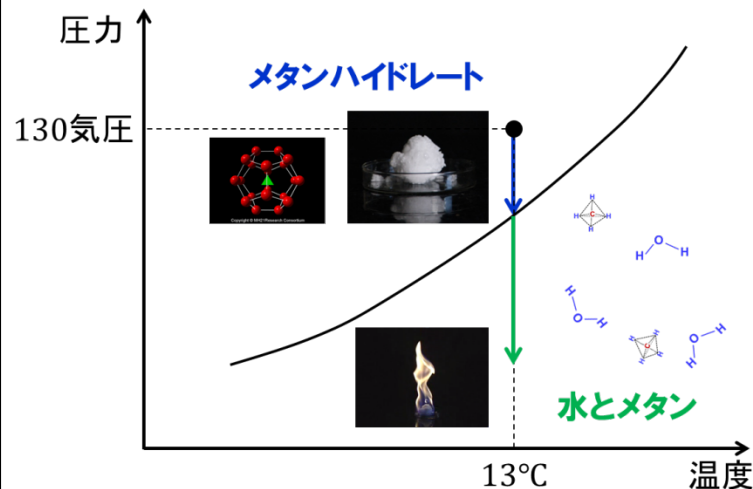
メタンハイドレートを温めると、水分子の作るかごがこわれて、ハイドレートは分解する：メタンと水に変わる



- MHに温水をかけると、分解する
- お湯をやかんで温めていくと沸騰するのと同じ原理

減圧法によるMH分解の原理

メタンハイドレートの圧力を下げると、水分子の作るかごがこわれて、ハイドレートは分解する：メタンと水に変わる



- MHの周りの圧力を下げると、分解する
- 水を容器に入れて、減圧していくと沸騰するのと同じ原理

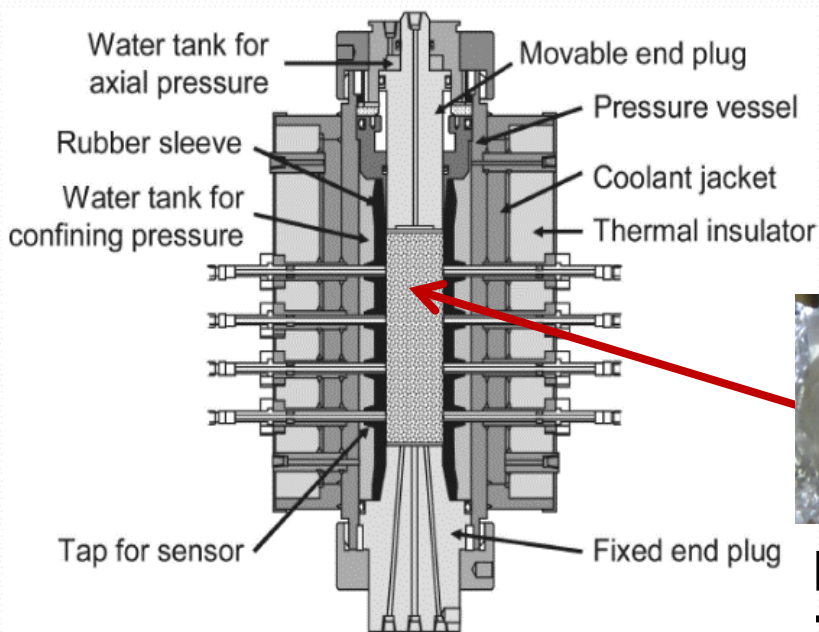
→ メタンハイドレート開発研究が始まった当初は、地層を温めてMHを分解するしかないと考えられていたが、実際のコアサンプルを用いた実験と第1回陸上産出試験の解析から、減圧法が有効に機能することが判明

コア実験での減圧法のシミュレーションの例

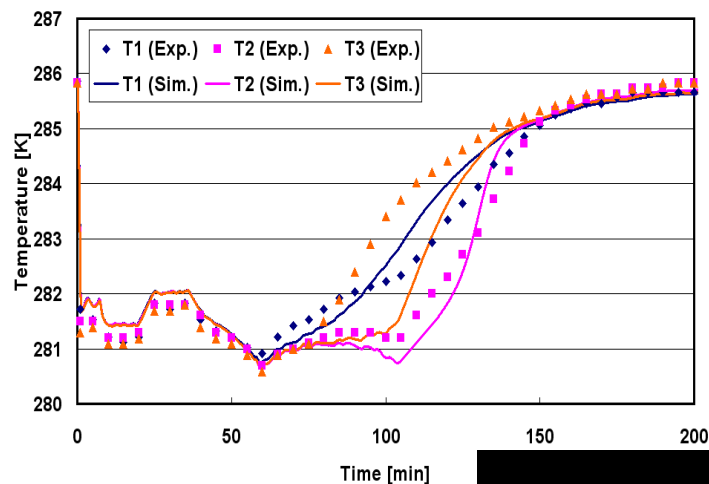
- MHを含む砂層模擬コアの一端面を減圧したときの、ガス・水の生産挙動とコア温度変化の予測

室内実験でのコア装置

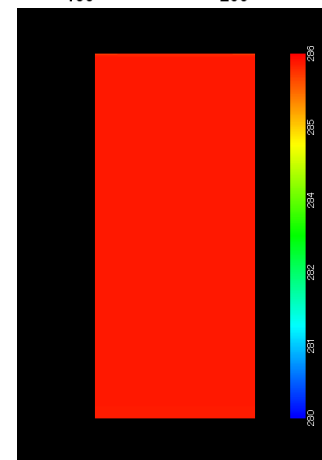
↑ 減圧による生産



コア内の温度変化についての計算予測と実験の比較



MHを含む砂層模擬
コア



現場の産出試験による技術実証

知る

- 1972年:西シベリアのMessoyakhaガス田は、ハイドレートからガスを生産しているとの報告(Makogon博士)
- 1980年台:アラスカのハイドレート開発を目標にした研究プロジェクト(米国エネルギー省)
- **1999年:基礎試錐「南海トラフ」**, 静岡県御前崎沖合約50km, 水深945mの地点でMH層を掘削。MHを含む地層のコアを採取

学ぶ

- **2001年7月:経済産業省「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」**
- 2002年:第1回陸上産出試験, 温水循環法により5日間で約**470m³**のガス生産(日・加・米・独・印の5カ国共同研究) → 加熱法より減圧法が良いとわかる
- 2008年:第2回陸上産出試験, カナダで, **永久凍土下のMH層から減圧法によるガス生産実験**に成功, 5.5日間の連続ガス生産(累計ガス生産量:約**13,000m³**)

実践

- **2013年3月:第1回海洋産出試験(ガス生産実験)**, 渥美半島から志摩半島沖合, **海底下のMH層から減圧法によるガス生産実験**を実施, 日量平均約20,000m³で, **6日間の連続ガス生産**に成功(累計ガス生産量:約**120,000m³**)
→ 出砂と天候悪化により, 6日間で生産試験を終了
- **2017年5~6月:第2回海洋産出試験(ガス生産実験)**, 約1ヵ月の連続生産
→ 出砂対策, ガス・水分離機器などの技術実証, 長期生産予測の基礎データ取得

貯留層評価・生産技術の実証試験（日本の第2回海洋産出試験）

経済産業省の「我が国のメタンハイドレート開発計画」

- 渥美半島～志摩半島沖のMH濃集帯を対象に、第2回海洋産出試験を実施
- 2017年4月～7月のガス生産実験：減圧法を適用することによって、1本目の生産井では約12日間で約40,850 m³、2本目の生産井では約24日間で約222,600 m³のガスを生産



2017年5月4日のニュース(NHKテレビ)より

メタンハイドレート開発技術の整備に向けての課題

ステップ2: 総合的検証(開発の経済性・環境影響・エネルギー収支)

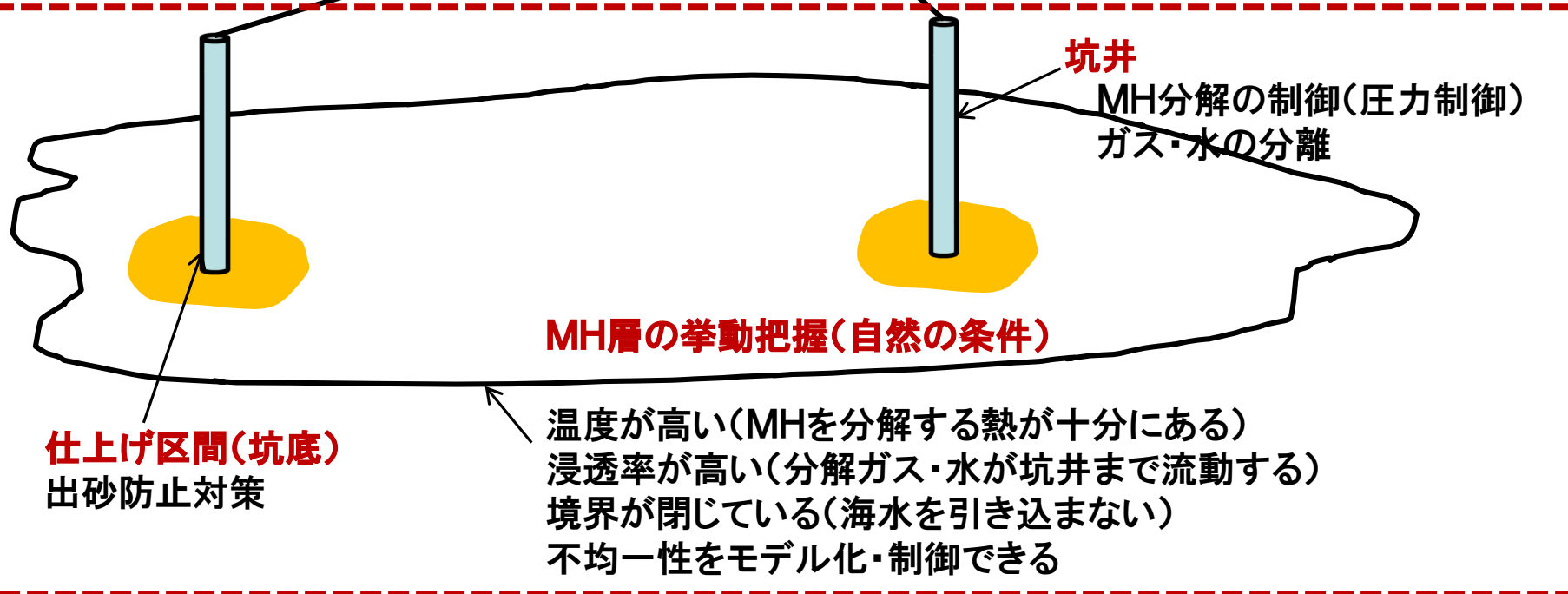
- ・長期のガス生産挙動シミュレーション
- ・海底下から地上までを結ぶ開発システムの検討

MH分解のモニタリング
環境対策, 生産最適化

海底機器・施設
水処理, 昇圧など

生産エネルギーの輸送・利用
海底パイプラインなど

ステップ1: 生産技術の実証(海底下の技術)



MHの商業的開発で要求される技術 – どこまで進んでいるのか？



段階	TRL	Development Stage	探査	掘削	貯留層評価	生産	開発システム	輸送	利用
概念	0	Unproven Idea							
基本設計 エンジニアリング	1	Analytically Proven Concept							
	2	Physically Proven Concept							
機能試験 システム化	3	Prototype Tested							
	4	Environment Tested							
フィールドで実証	5	System Integration Tested							
	6	System Installed							
	7	Proven Technology							

qualification (Red dashed line across TRL 3-4)

現場技術 (Blue double-headed arrows between TRL 4-5)

第2回海洋産出試験 (2017年に実施) (Green oval around TRL 3-4)

Light blue arrows point down from TRL 1 to 2, 2 to 3, 3 to 4, 4 to 5, 5 to 6, and 6 to 7.

Light blue arrows point down from TRL 3 to 4, 4 to 5, 5 to 6, and 6 to 7.

Orange dashed arrow points up from TRL 7 to 6.

メタンハイドレートの商業的開発に向けて – どこまで技術は進んでいるのか？

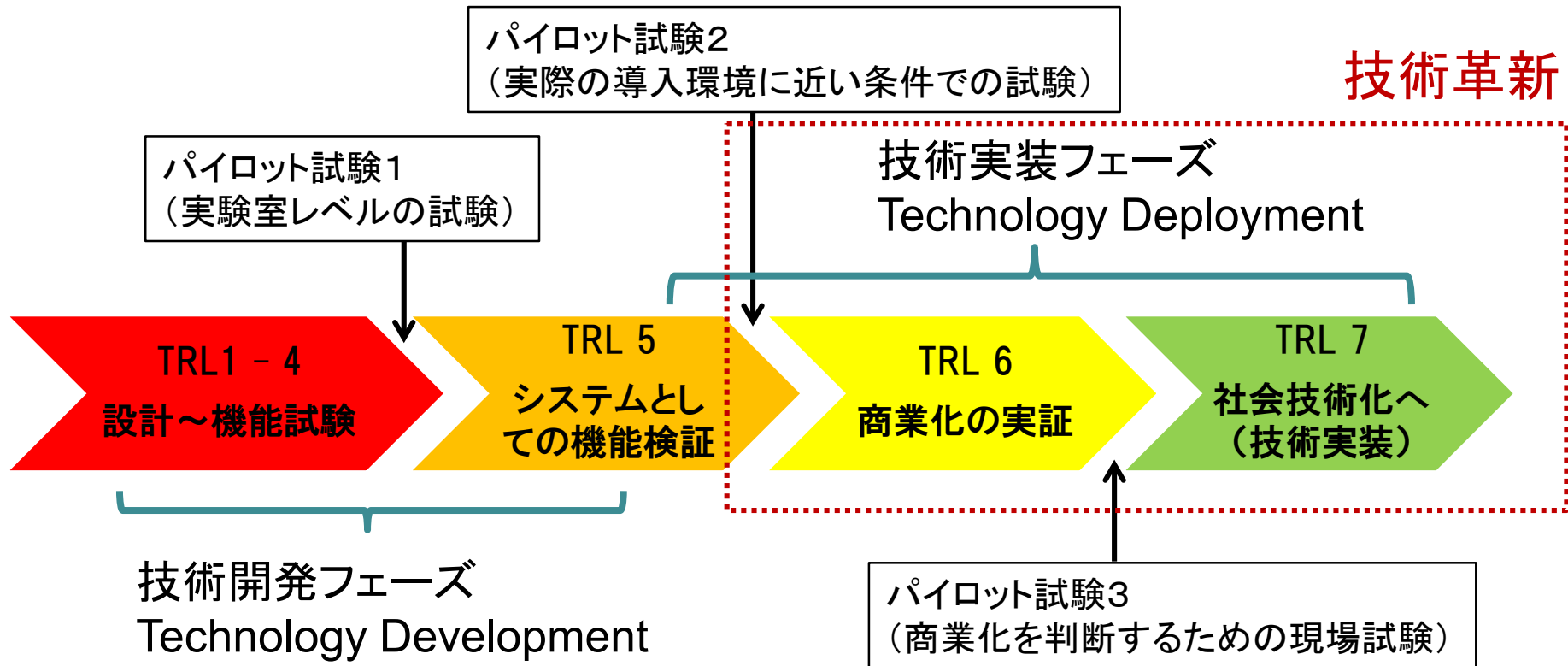
1. 海域MHの商業的開発のためには、MH濃集帯の**探査技術**、**掘削技術**、MH層の挙動をモニタリングやシミュレーション等で把握する技術(**貯留層評価技術**)、ガスの生産技術に至るまでの海底下の技術と、それらの技術を組み合わせた**経済的な開発システム**が整備が必要
2. このうち、探査・掘削技術はほぼ確立
 - 東部南海トラフ海域の砂層型MHには、約1.1兆 m^3 のメタン原始資源量(日本のガス消費量の約10年分に相当)があると報告
 - 他の海域においても濃集帯の抽出作業が継続的に実施されている
3. 貯留層評価・生産技術については実証試験段階、開発システムについては概念設計の段階
 - 第2回海洋産出試験(2017年5月～7月)での減圧法によるガス生産実験
 - ✓ 1本目の生産井: 約12日間で約40,850 m^3 のガス生産
 - ✓ 2本目の生産井: 約24日間で約222,600 m^3 のガス生産
 - 中国では、2018年に南シナ海北部の神狐海域で、海底下のMHから約60日間のガス生産(累計ガス生産量: 約309,000 m^3)を実施したと報道

メタンハイドレートの商業的開発に向けて – どこまで技術は進んでいるのか？

4. 貯留層評価・生産技術の実証試験は、まだ一つの坑井を用いた機能試験の段階
5. 商業的開発の技術実証フェーズに進めるかの鍵
 - ハイドレート濃集帯の不均質性を含めて貯留層の不確実性を適切にモデリングし、それに見合った生産技術を確立できるか？
 - 今後の研究で、地層内のMH分解を制御した形で経済的な生産が可能なことを提示できるか？

MH層からのガス生産レートを増進する方法に関しては、産学の協働によって、大きなイノベーションにつながるアイデアが生まれることが期待されている

開発研究がMHの商業的開発に至るまでのステージゲート



- 技術実装されるためには、個々の技術開発に加えて、システムとしての性能が求められる
- 技術実装フェーズに移行するには、その裏付けデータが必要

死の谷 (valley of death)

- 大規模試験を行う場所・組織の確保
- プロジェクトファイナンス(資金確保)
- 明確な結論を導く必要

研究室目標：エネルギー資源開発への新技術の実装

非在来型天然ガス資源の開発

石油の増進回収技術

シェールガス
Shale Gas

メタンハイドレート
Gas Hydrate

デジタルオイル
Digital Oil

重質油の増進回収
Heavy Oil EOR

ナノ粒子を利用した水攻法
Nanoparticle Waterflood

低塩分濃度水の石油増進回収
Low Salinity Waterflood

アスファルテン対策
Asphalten Mitigation



教授：増田昌敬

- メタンハイドレートガス生産プロセス、水溶性天然ガスの有効利用



特任准教授：梁 云峰
(LIANG Yunfeng)

- 石油工学における分子動力学計算(アスファルテン, オイルサンド, 石油増進回収)

基礎研究(R&D)



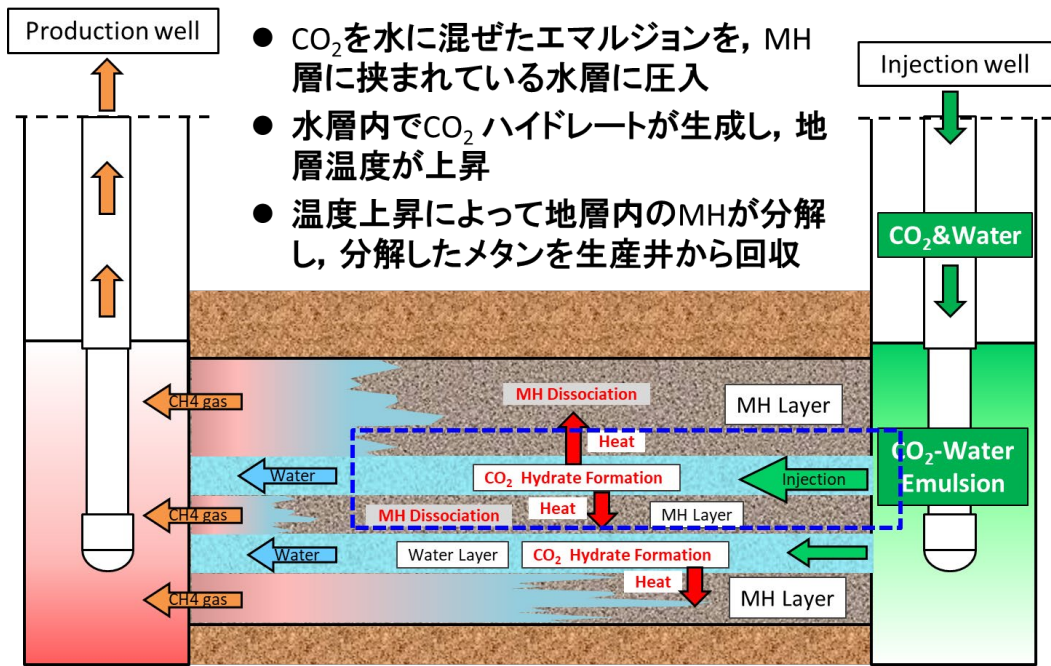
実フィールド開発への新技術の適用

メタンハイドレートの商業的開発

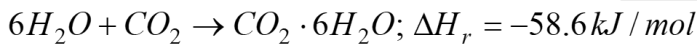
資源開発へのナノテクノロジーの適用

研究テーマ例：砂層型メタンハイドレートからの新しいガス生産手法の探求

MH層内にCO₂をエマルジョンとして圧入し、CO₂をハイドレートとして固定しながらメタンを回収する、新しい生産手法



- CO₂を水に混ぜたエマルジョンを、MH層に挟まれている水層に圧入
- 水層内でCO₂ハイドレートが生成し、地層温度が上昇
- 温度上昇によって地層内のMHが分解し、分解したメタンを生産井から回収

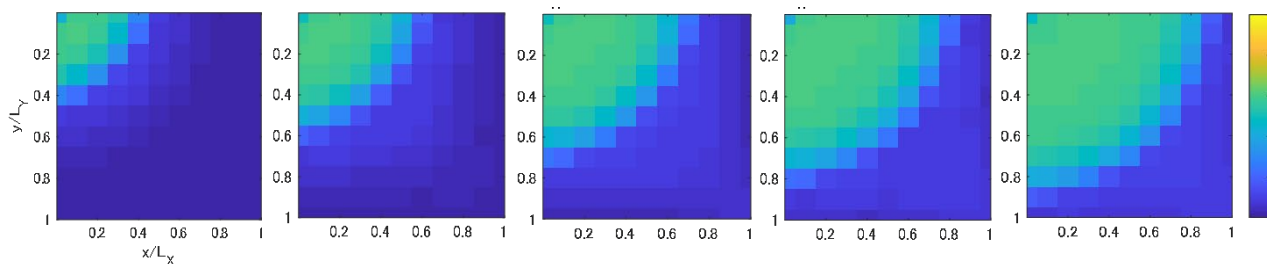
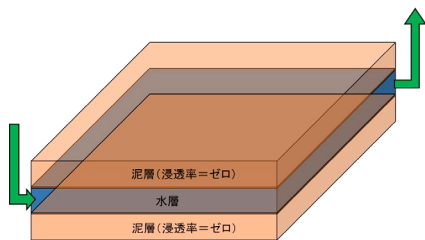
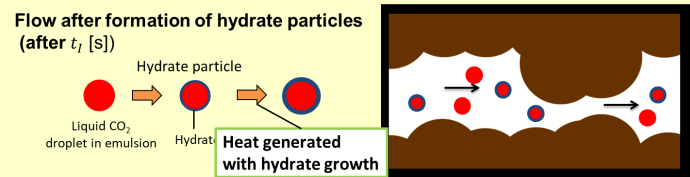


C/Wエマルジョン圧入実験

(ガラスビーズ焼結コアを用いた室内実験)



C/Wエマルジョン圧入法の数値計算



謝辞

MH21研究コンソーシアムは、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)と産業技術総合研究所で構成され、経産省からの委託事業を実施しています。本講演では、本コンソーシアムの報告資料を多く引用させていただきました。関係者の方々に対して、最後に謝辞を表します。

- 経済産業省 資源エネルギー庁
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)
- (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)
- (国研)産業技術総合研究所(AIST)