

生産手法分野の研究開発

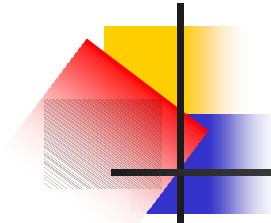
4. 分解採収手法開発

2002年7月2日

研究実施機関：

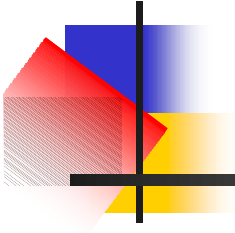
三菱重工業株式会社（神戸造船所・高砂研究所）

日本オイルエンジニアリング株式会社

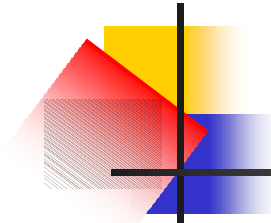


研究項目

1. 生産手法の事前評価
2. 既存プロトタイプ専用シミュレータによる
第1回陸上産出試験の事前検討と分解・
採収法の評価

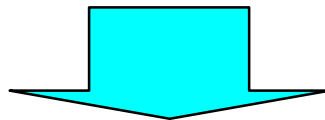


(1) 生産手法の事前評価



研究の目的

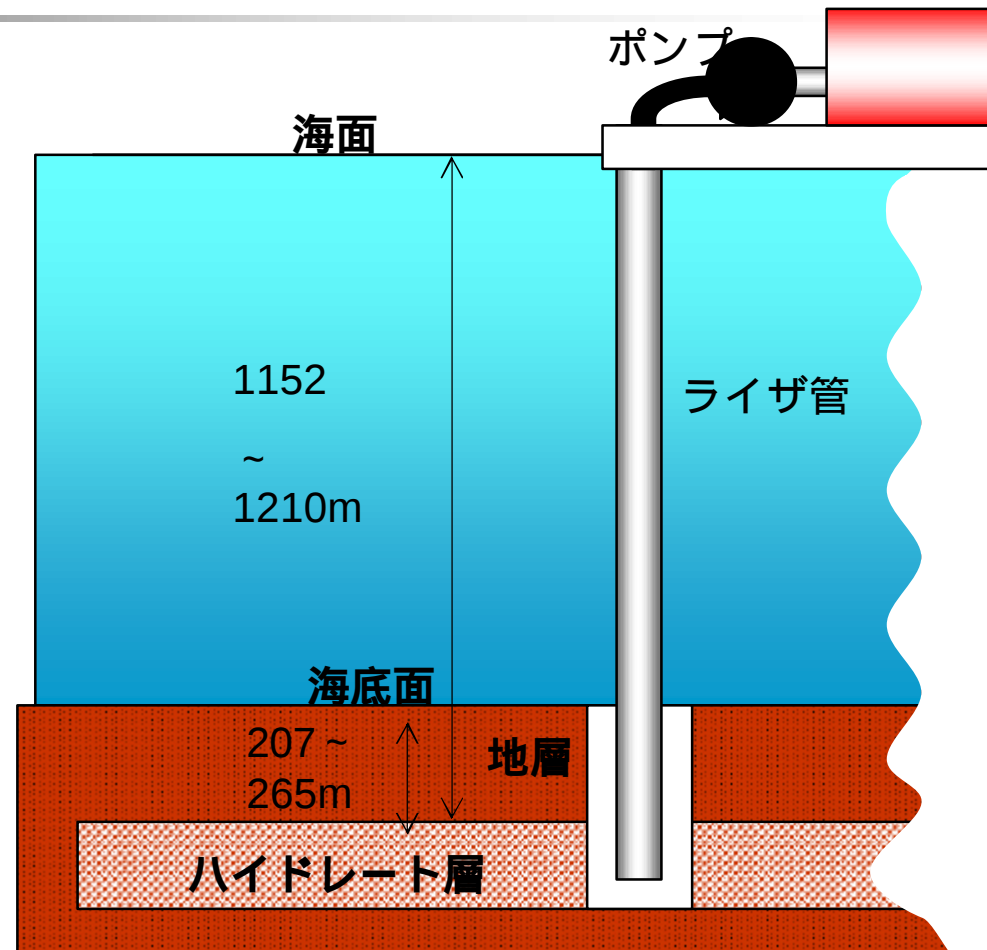
ハイドレートの資源化に当たっては、
生産過程でハイドレート分解のためのエネルギーが必要
ガス / 液体 / 固体混相での搬送などの補機動力が必要
であり、工業プラント的要素が強い。

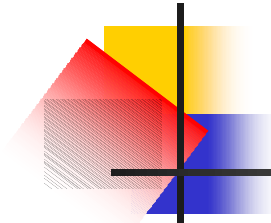


現状考えられている生産手法（ 坑井加熱法、 減圧法 ）でのフィジ
ビリティスタディを行うことで、工業的に成り立つための基本的な開
発指針を得る。

研究内容

- 減圧法と坑井加熱法の各手法について、簡略化したモデルでヒート・マスバランス評価
- 機器仕様・ランニングコストを評価し、その所用動力、エネルギー収支を比較



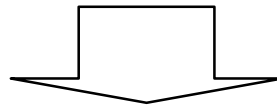


検討方法

ハイドレート層分解に伴う伝熱と流動を考慮した簡易モデルによりハイドレート分解時のヒート & マスバランス経時変化を評価

ライザー管での熱移動量・必要搬送動力を配管内二相流伝熱モデル及び配管内二相流流動モデルにより評価

一般的機器仕様値により生産に要する動力量を評価

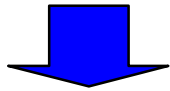


機器仕様の概念と経済性・生産性向上のための要因を分析

ヒート・マスバランス評価 - 減圧法

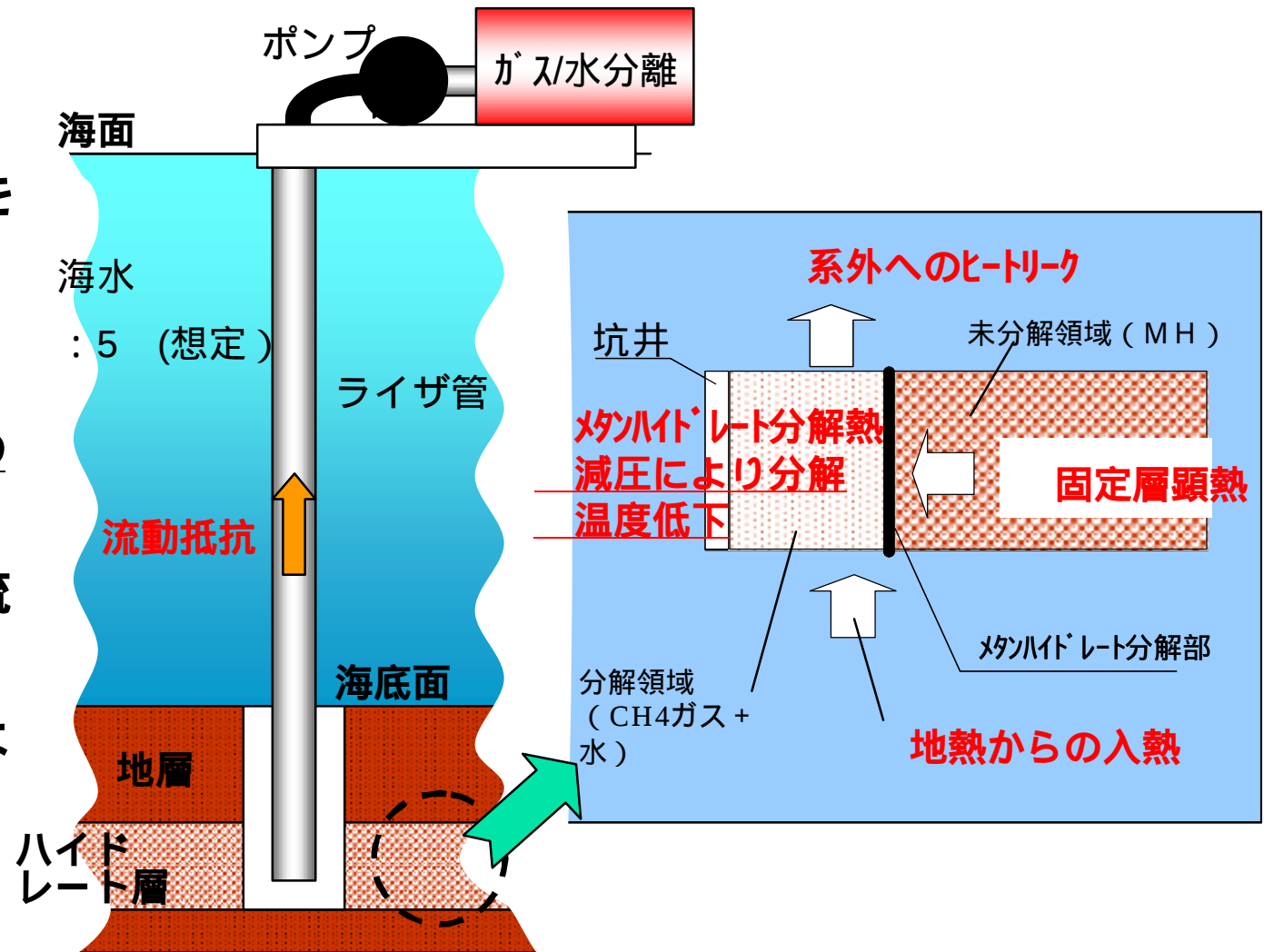
< 減圧法 >

- 減圧と地層からの入熱により、MHを分解



ガス生産性低下の要因

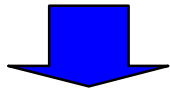
- ライザー管での流動抵抗
- 分解界面移動による熱抵抗の増加



ヒート・マスバランス評価 - 坑井加熱法

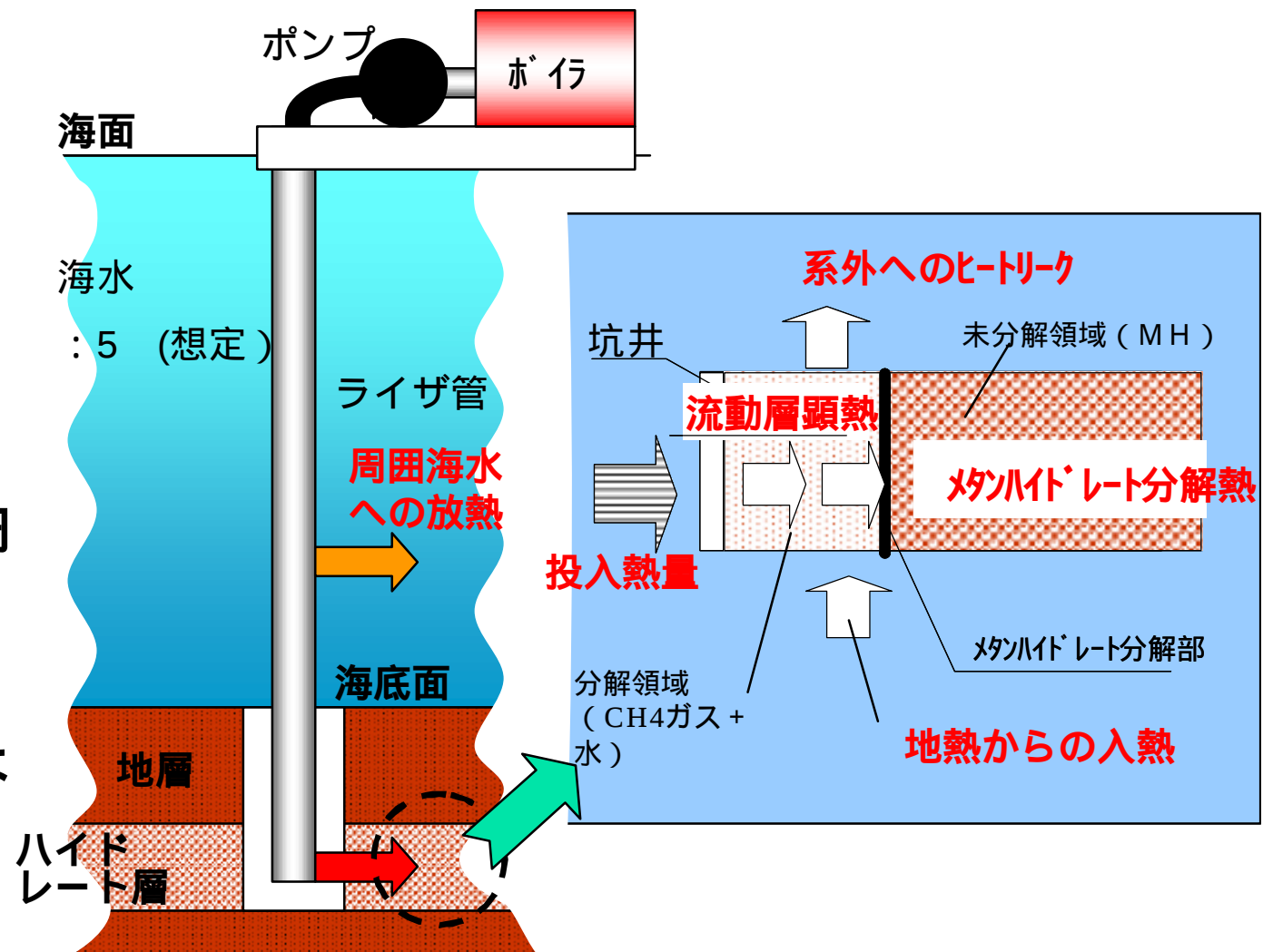
< 坑井加熱法 >

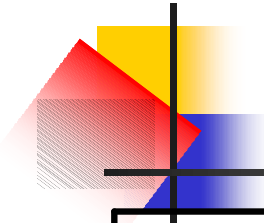
- 洋上から温水を循環し、その投入熱によりMHを分解



熱ロスの要因

- ライザー管での周囲海水への放熱
- 地層中への放熱
- 分解界面移動による熱抵抗の増加





ヒート・マスバランス評価～計算条件

	熱境界	圧力境界
坑井加熱法	温度：80 熱伝達率：5000W/m ² ・K (温水循環を想定)	9.0MPa
減圧法	-	2.0MPa (ドロダウン80%想定)

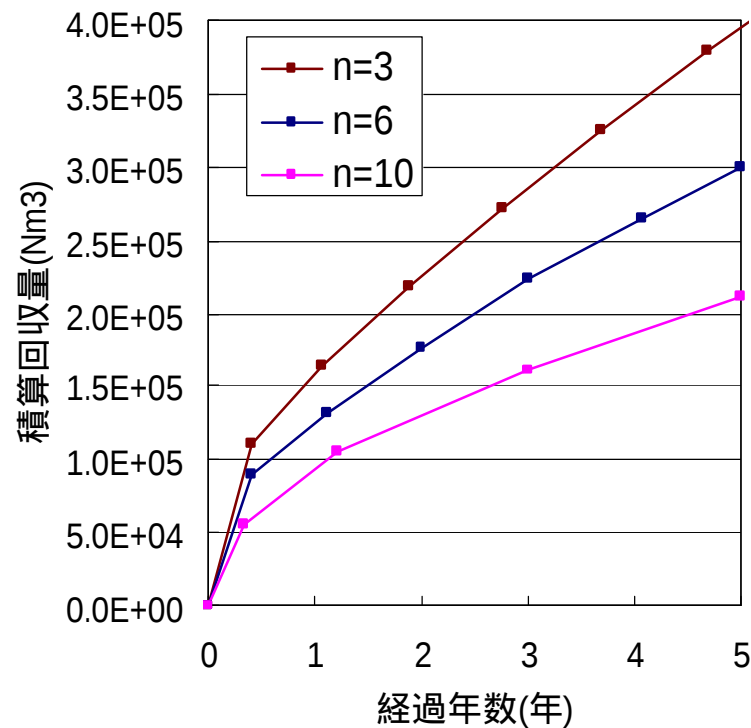
MH層の孔隙率	33%
ハイドレート飽和率	80%
絶対浸透率	0.197 μm ²
相対浸透率指数	n = 3 , 6 , 10
MH層初期条件	13 , 10MPa

ヒート・マスバランス評価

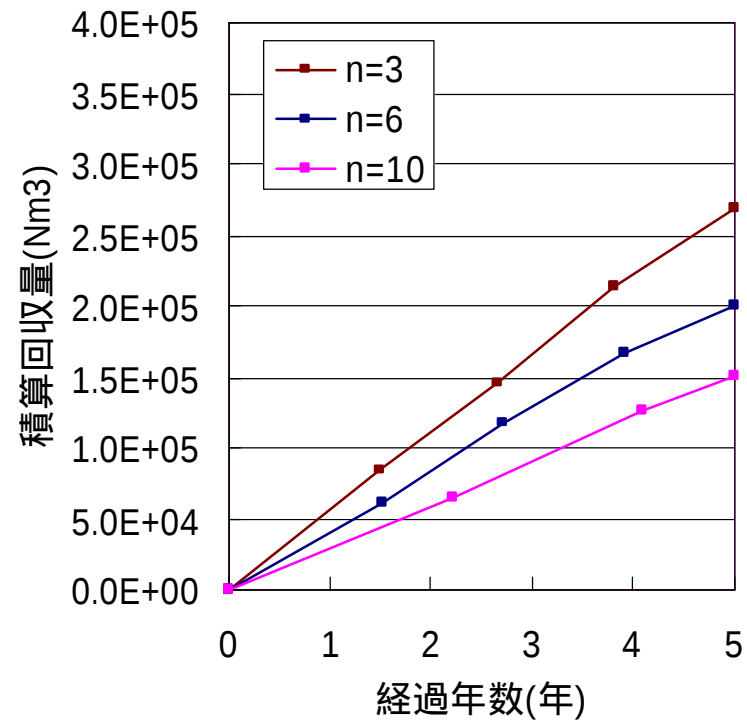
- 累計ガス生産量の計算例

累計ガス生産量

< 熱刺激法 >



< 減圧法 >



機器仕様・ランニングコスト評価～最適化例

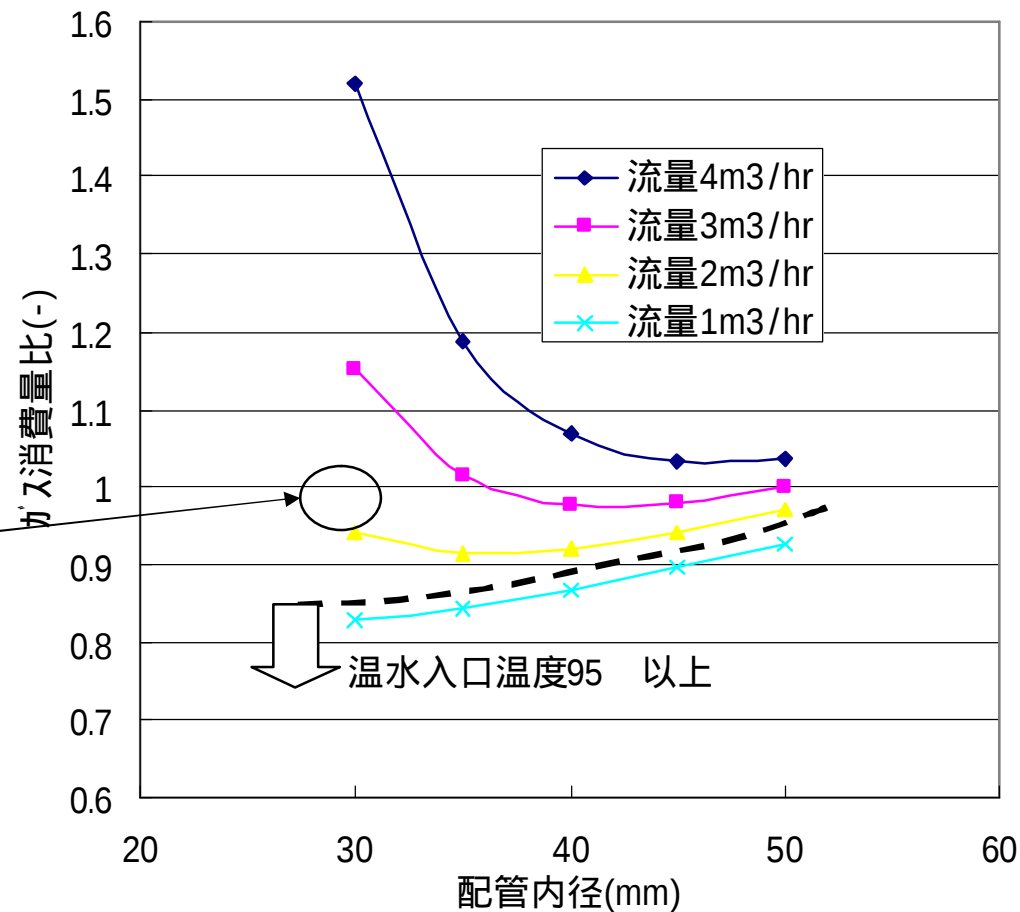
< 配管径最適化検討結果 >

n = 3 の場合

ポンプ、断熱材仕様
を考慮し温水入口温
度を95℃以下となる
ように最適化

最適点

- ・ 配管内径35mm
流量2m³/hr



*ランニングコスト比 :内径50mm、流量3m³/hrを1とした場合

エネルギー収支 - 坑井加熱法

n = 3の場合

< ポンプ >

流量	2m ³ /hr
圧損	0.2MPa
吐出圧	10MPa
動力	0.2kW

< ハイドレート層 >

10 日 後	供給熱量 温水入口温度 温水出口温度	12.6kW 80 71
1 年 後	供給熱量 温水入口温度 温水出口温度	9.6kW 80 73
5 年 後	供給熱量 温水入口温度 温水出口温度	6.9kW 80 75

< ボイラ要求性能 >

10 日 後	ボイラ発熱量 排出温水温度 吸込温水温度	19.5kW 85 72
1 年 後	ボイラ発熱量 排出温水温度 吸込温水温度	16.7kW 84 73
5 年 後	ボイラ発熱量 排出温水温度 吸込温水温度	14.1kW 85 74

< ライザ管 >

内径	35mm
最外径	115mm

< 海水への放熱量 >

10日後	6.9kW
1年後	7.1kW
5年後	7.2kW

ハイド
レート層

地層

海底面

ライザ管

海水

: 5 (想定)

海面

ポンプ

ボイラ

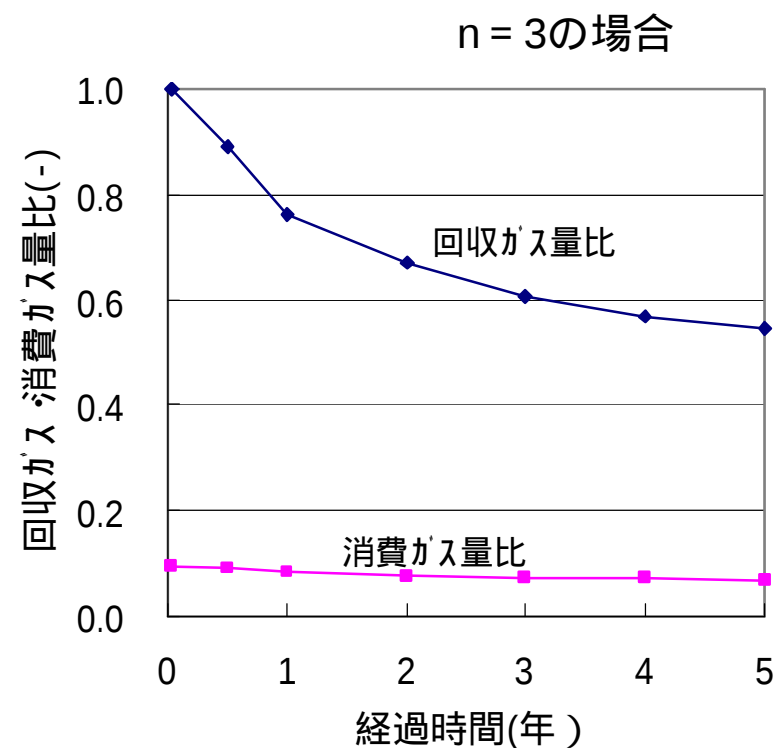
ボイラ発熱量の50%程度が放熱ロスとなる可能性がある

機器仕様・ランニングコスト評価 - 坑井加熱法

< 機器仕様 >

熱源用 ボイラ	ボイラ発熱量 排出温水温度 吸込温水温度	20kW 85 max 72 min
給水 ポンプ	流量 圧損 吐出圧 動力	2m3/hr 0.2MPa 10MPa 0.2kW
ライザ 管	管長 内管 外管 断熱材厚み	1200m 35mm ID55mm/OD65mm 内/外管間に10mm 外管外に25mm

< 回収・消費ガス量比 >



坑井加熱法では回収ガス量と生産に要する消費ガス量の比は経時的に減少する

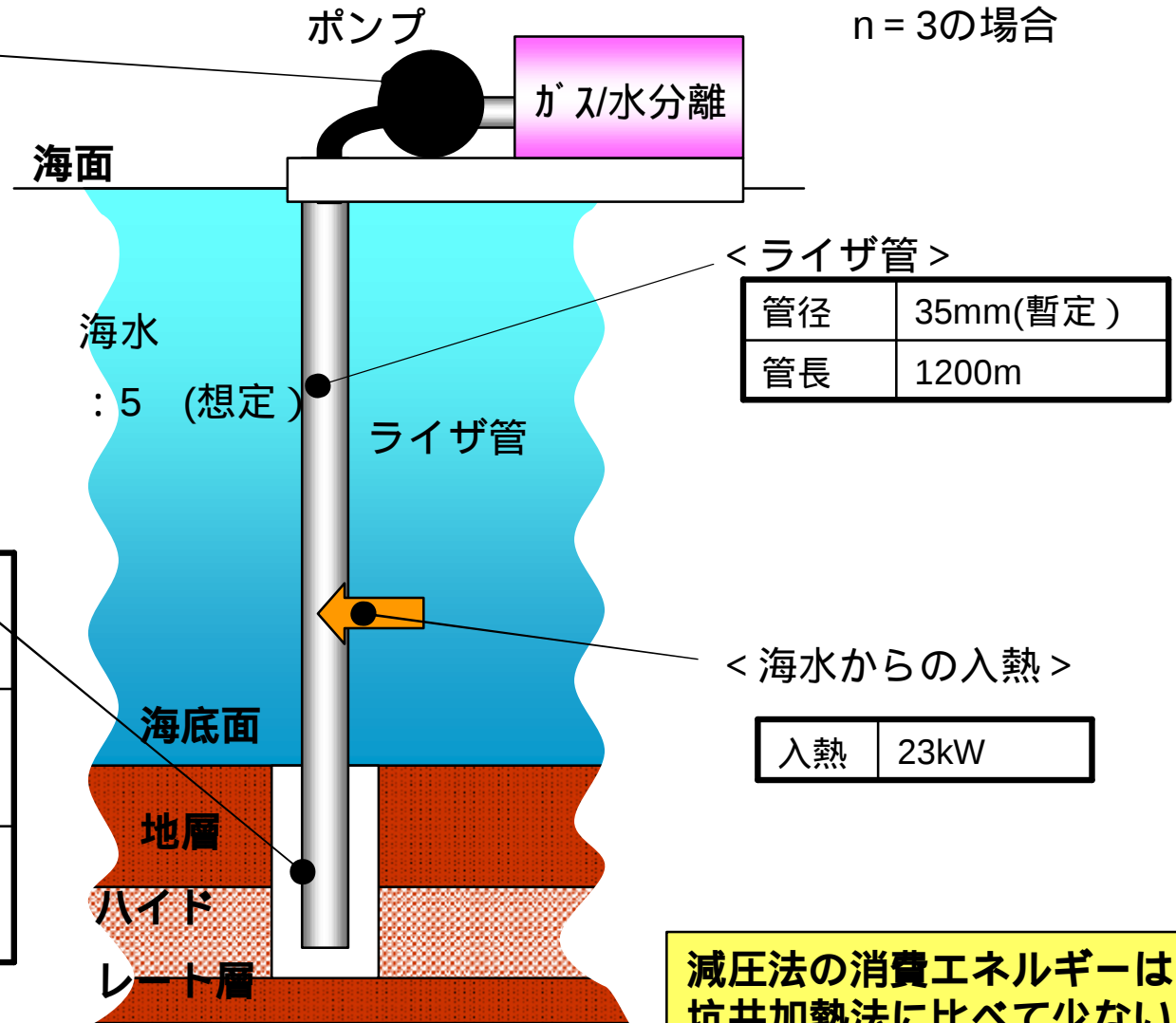
エネルギー収支 - 減圧法

< ポンプ >

吸込温度	5
圧損	0.1MPa
吸込圧	12MPa
動力	2.0kW

< ハイドレート層 >

10日 後	吸込温度 吸込水量 吸ガス量	1.2 6.3Nm ³ /hr 27L/hr
1年 後	吸込温度 吸込水量 吸ガス量	1.2 6.2Nm ³ /hr 26L/hr
5年 後	吸込温度 吸込水量 吸ガス量	1.2 5.6Nm ³ /hr 24L/hr

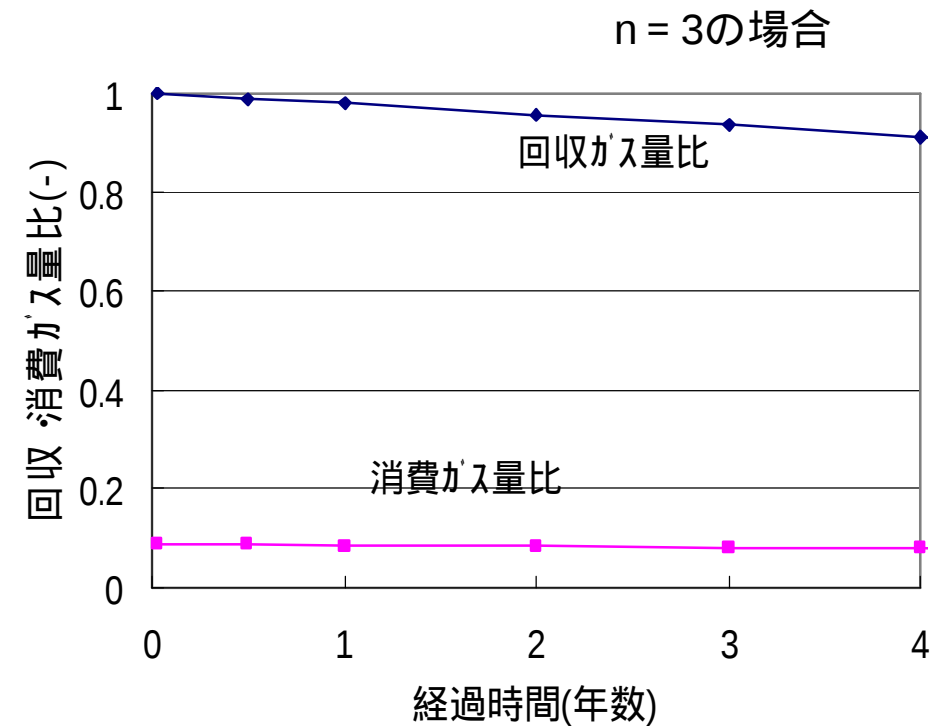


機器仕様・ランニングコスト評価 - 減圧法

< 機器仕様 >

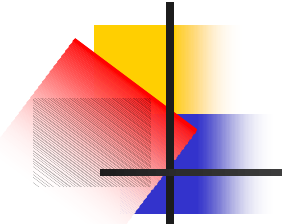
給水 ポンプ	流量 吸込圧 動力	3m ³ /hr (ガス・水混相) 12MPa 2.0kW
ライザ 管	管長 内管	1200m 35mm (暫定)

< 回収・消費ガス量比 >



* 10日後の回収ガス量を1とする。

減圧法の回収ガス量・消費ガス量は生産期間を通じて比較的安定している



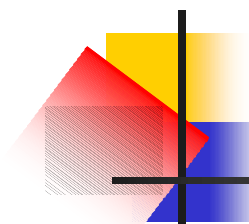
まとめ (1)

生産手法に関する事前FSとして伝熱と減圧によるガス分解採収について基礎的な検討を行い以下の結果を得た。

- 1 . 本検討条件では、坑井加熱法と減圧法を比較した場合、ガス回収量の点では坑井加熱法の方が大きくなる。
- 2 . 回収ガス量の経時変化では、MH分解部の熱抵抗の増加により坑井加熱法の回収速度の低下率が大い
- 3 . ガス回収量に対する相対浸透率の影響が大い
- 4 . 経済性確保のため生産性の向上が不可欠と考えられる



今後、精度向上の向上を図るため専用シミュレータからの計算結果を取り込んで検討を進めて行く必要がある。



まとめ (2)

【坑井加熱法】

分解のための必要供給熱量・動力が大きくエネルギー効率
が低くなる傾向にある。

<技術課題>

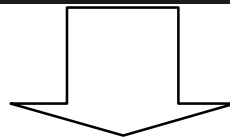
ヒートロス低減（断熱強化）、伝熱促進（水平坑井）etc

【減圧法】

ガス生産量としては安定しているが、坑井当たりの生産量
が少なくなる傾向にある。

<技術課題>

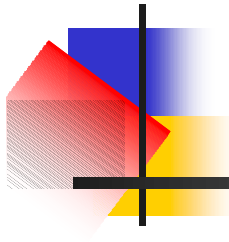
MH層内のガス流動抵抗低減（浸透性改善、水平坑井）
etc



坑井施工の低コスト化技術開発、生産量向上のための生産
法の検討が必要

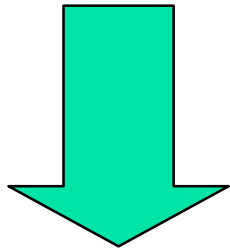
(2) - 1

既存プロトタイプ専用シミュレータによる
第1回陸上産出試験の事前検討



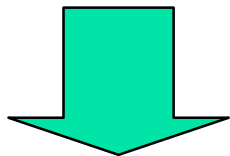
専用シミュレータの開発経緯

2000年3月：1次元直交プロトタイプシミュレータ(東大)



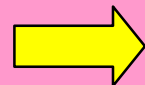
- ✧ 2次元円筒座標モデル化、✧ ソルバーの強化
- ✧ ハイドレート飽和率の陰的取り扱い、✧ 坑井境界条件 (生産井)
- ✧ 計算アルゴリズムの改善

2001年3月：2次元円筒座標モデル (JNOC+JOE+東大)

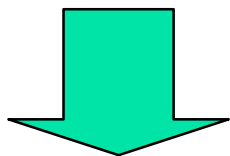


- ✧ 3次元直交座標モデル化、✧ メタノール圧入機能
- ✧ 複数坑井の取り扱い (圧入井、水平坑井を含む) ✧ 熱水循環機能

2002年3月：3次元直交座標モデル (JNOC+JOE+東大)



専用シミュレータ (MH21 生産手法開発Gr)



- ✧ 計算速度・精度の更なる向上、✧ 坑井内圧力・温度挙動の計算
- ✧ 成分・相の追加、✧ 要素モデル 物理現象モデルの追加・統合

Mallik生産試験の挙動予測と MH分解・採収法の評価

専用シミュレータ

Mallik生産試験の挙動予測
→ 貯留層パラメータ値に対する感度分析

- ・ 複数の採収法によるガス生産量
- ・ 貯留層パラメータの影響

種々の貯留層特性に対するMHの分解・採収法の評価

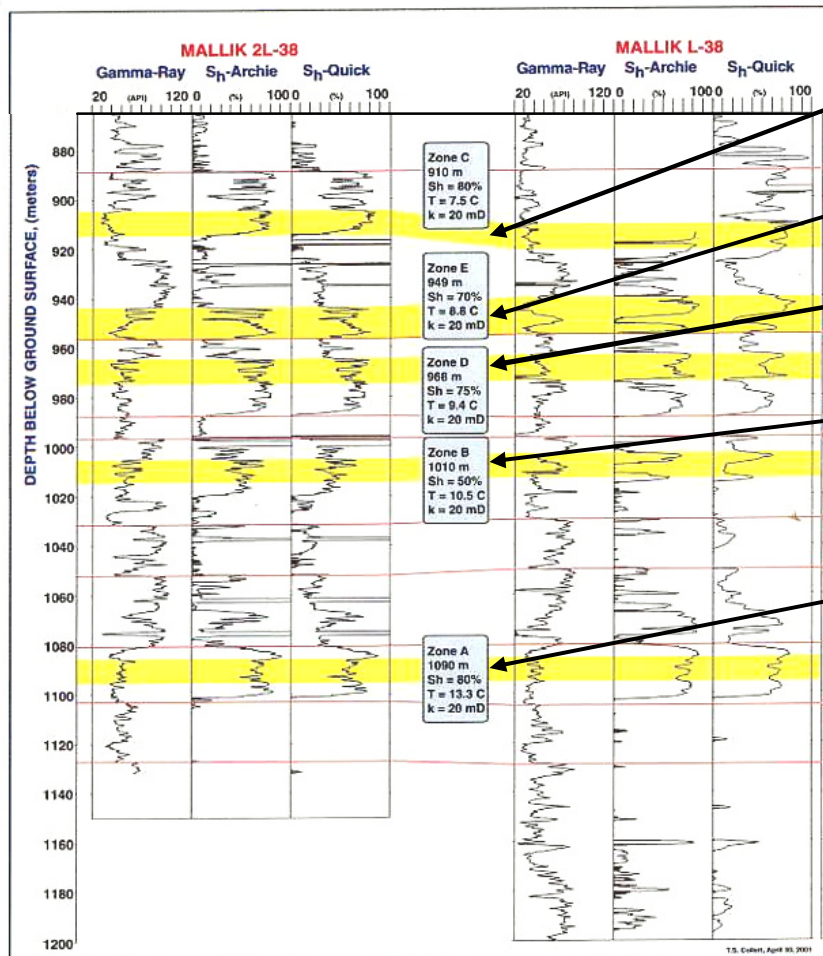
更なる分解・採収法検討のヒント

Mallik生産試験概要



- 場所 : カナダ
マッケンジーデルタ
- 期間 : 2001/12 ~ 2002/3
- テスト概要 :
 - ✧ MDT(Modular Dynamic Test)
A, B, D, E層対象
 - ✧ 温水循環テスト
C層対象

Mallikメタンハイドレート層の層序



Zone C ($S_H=80\%$)

Zone E ($S_H=70\%$)

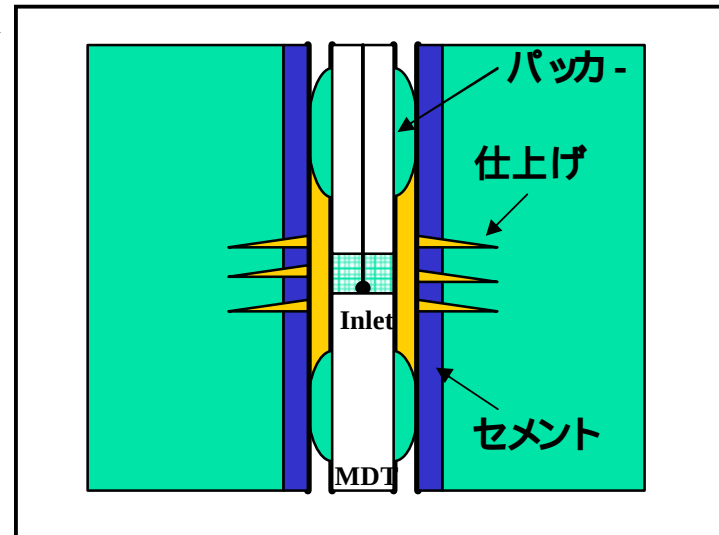
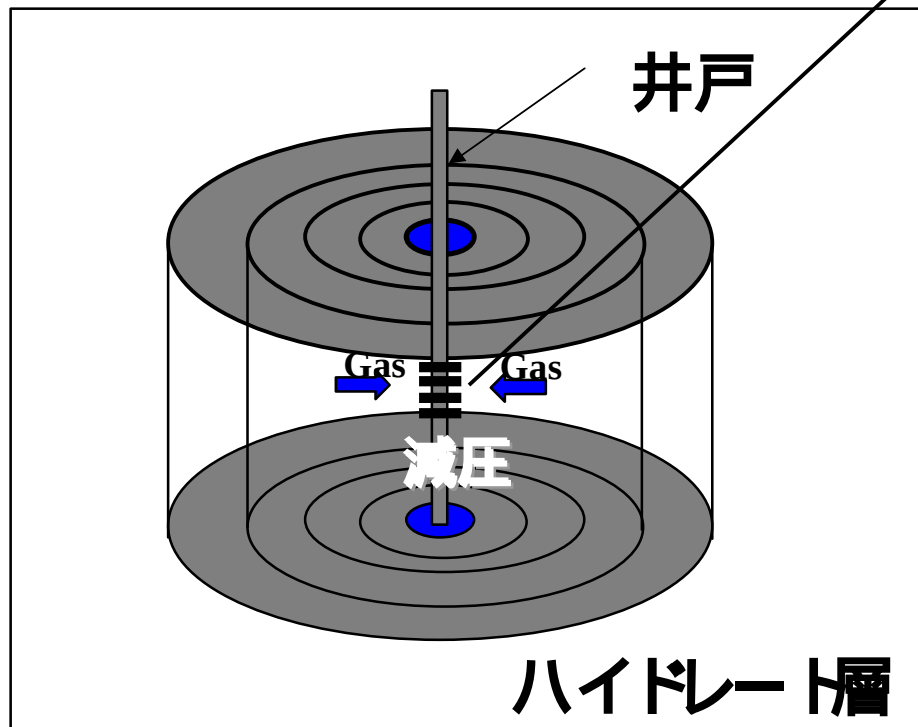
Zone D ($S_H=75\%$)

Zone B ($S_H=50\%$)

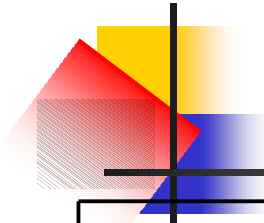
Zone A ($S_H=80\%$)

MDTの予測用モデル概要

減圧法 (モデル概念図)

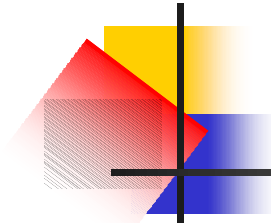


- 2次元円筒座標モデル
- 均一貯留層条件
- 部分仕上げ
- 貯留層上部・下部 no flow



モデル仕様

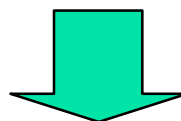
	Zone A	Zone B	ZONE D	Zone E
モデルサイズ, m ²	坑井周150m	坑井周150m	坑井周150m	坑井周150m
グリッドシステム	41 × 19	41 × 19	41 × 19	41 × 19
層厚, m	10	10	10	10
初期圧力, MPa	11.7	10.9	10.4	10.3
初期温度, K	286.5	283.7	282.6	282.0
孔隙率, %	33	33	33	33
浸透率, md	20	20	20	20
ハイドレート飽和率, %	80	50	75	70
水飽和率, %	20	50	25	30
岩石熱伝導率, W/mK	8.4	8.4	8.4	8.4
坑底流動圧力, MPa	5.8	5.4	5.2	5.1
N	2, 10	2, 10	2, 10	2, 10



感度分析

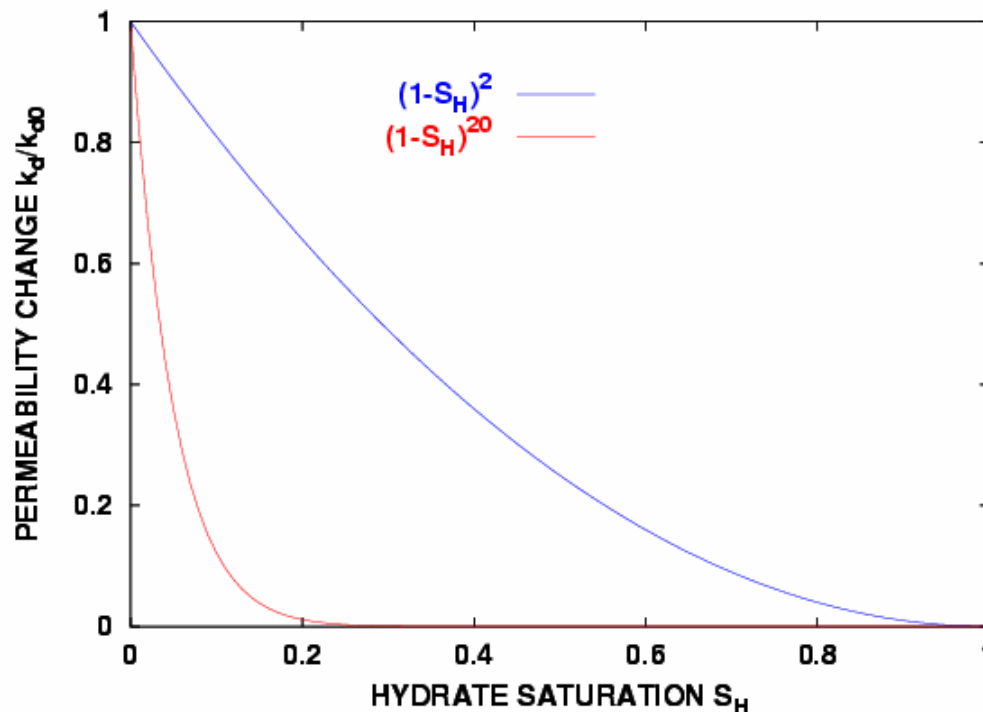
ケース設定 対象層 ZONE D (ベースケースN=2)

パラメータ	レンジ
浸透率	0.1, 20, 1000
ハイドレート飽和率	40, 70, 95
岩石熱伝導率	2, 8.4
N	2, 5, 10



分析結果：ガス生産量は0 ~ 750m³/day

ハイドレート飽和率と絶対浸透率

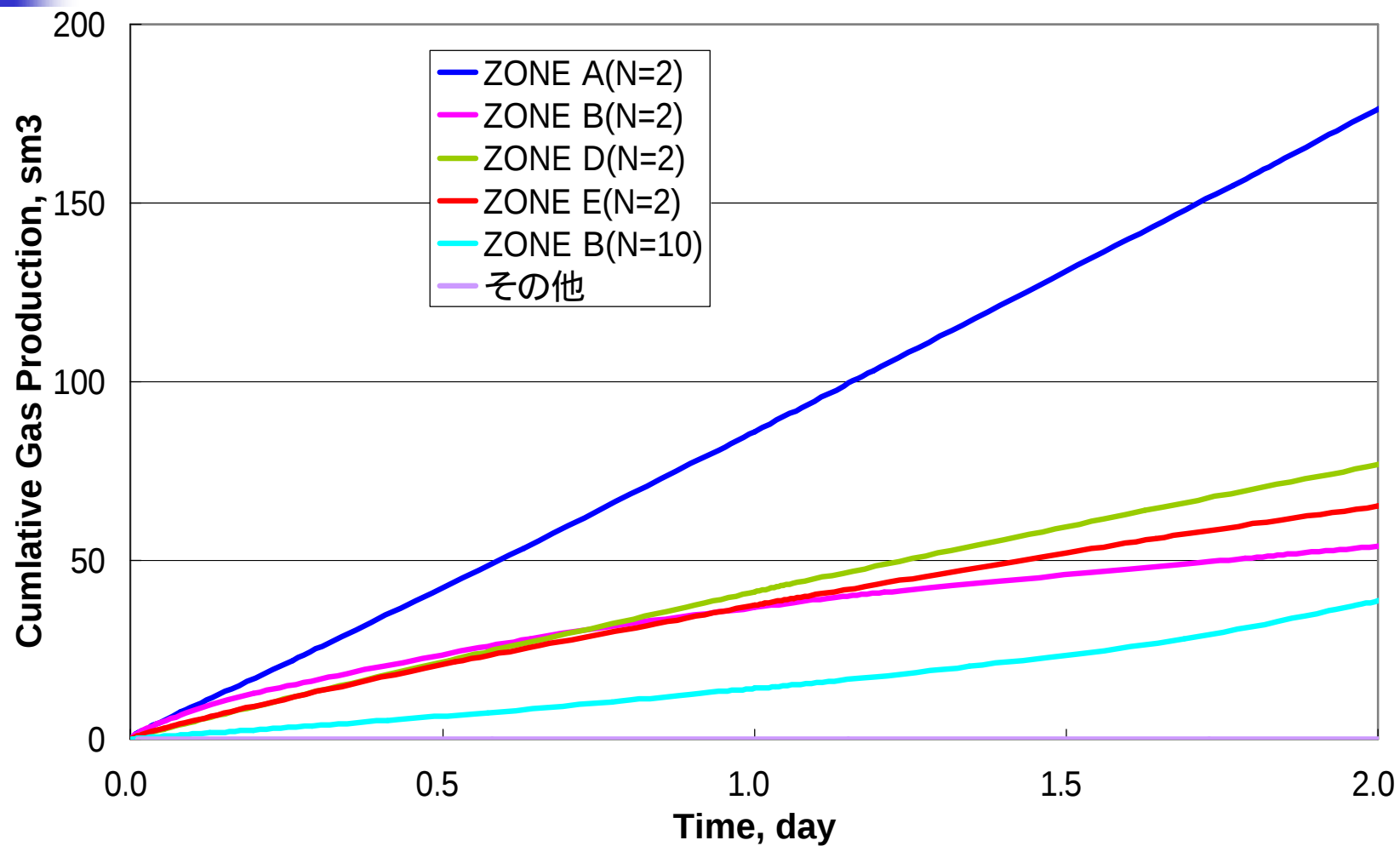


$$k_D = k_{D0} (1 - S_H)^N$$

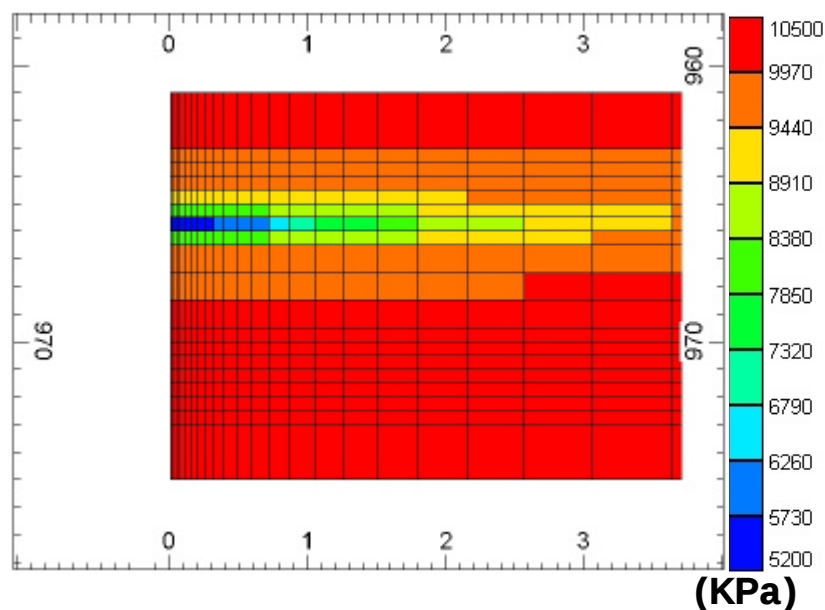
Nについては実際にどの程度の値であるのか正確には判明していない。

実験とのマッチングの結果からは、**20**付近の値が適当であると考えられる。

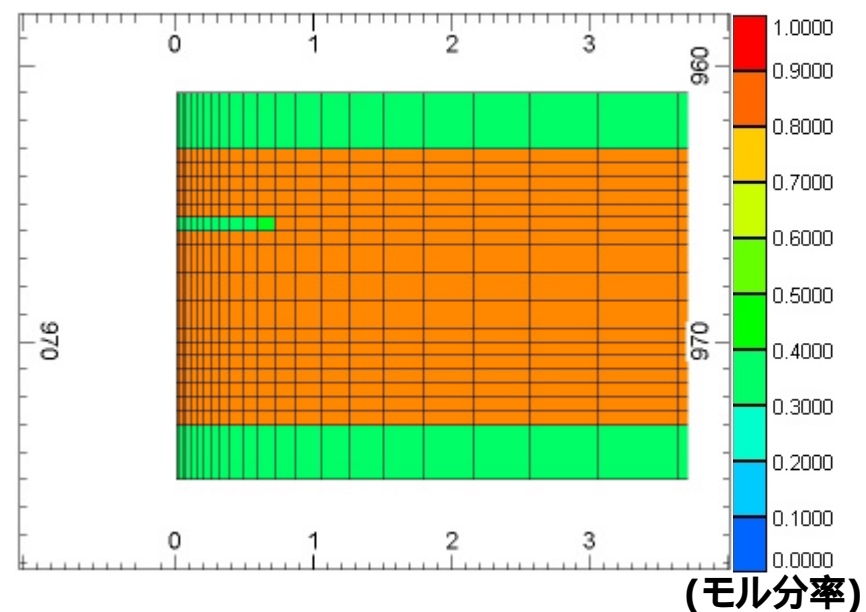
計算結果



圧力、ハイドレート飽和率分布例

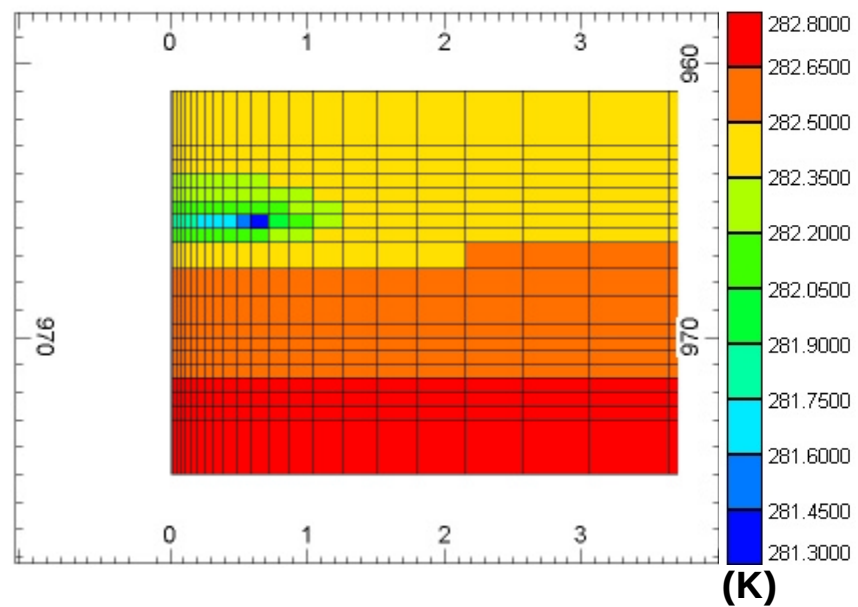


Zone D (N=2; 圧力 2日後)



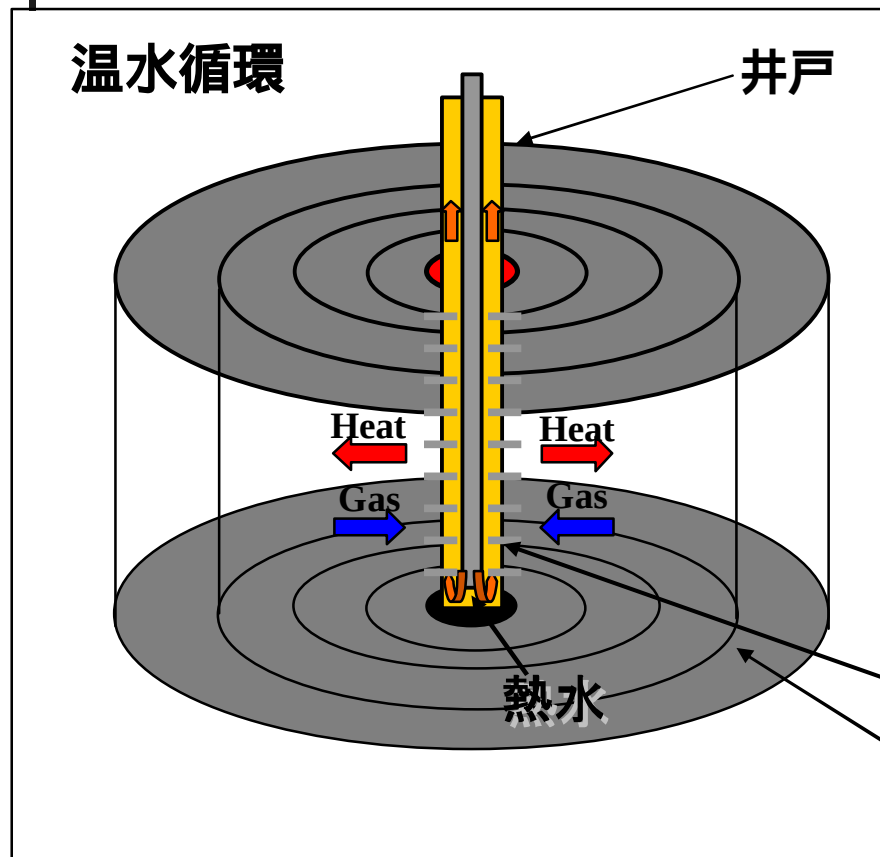
Zone D (N=2; ハイドレート飽和率 2日後)

温度分布図例



Zone D (N=2; 温度 2日後)

温水循環フローテスト予測



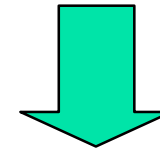
- 2次元円筒座標モデル
- 均一貯留層条件
- 熱水循環
- 全仕上げ
- 貯留層上部・下部 no flow

モデル仕様

(ベースケース & 感度分析パラメータ)

ベースケース・パラメータ	Zone C
モデルサイズ, m ²	坑井周り50m
グリッドシステム	20 × 19
層厚, m	10
初期圧力, MPa	9.87
初期温度, K	280.7
孔隙率, %	33
浸透率, md	20
ハイドレート飽和率, %	80
水飽和率, %	20
岩石熱伝導率, W/mK	8.4
坑底流動圧力, MPa	10.5
N	10

感度分析パラメータ	レンジ
浸透率	0.1, 20, 1000
ハイドレート飽和率	40, 70, 95
岩石熱伝導率	2, 8.4
N	2, 5, 10, 15, 20



ベースケース結果

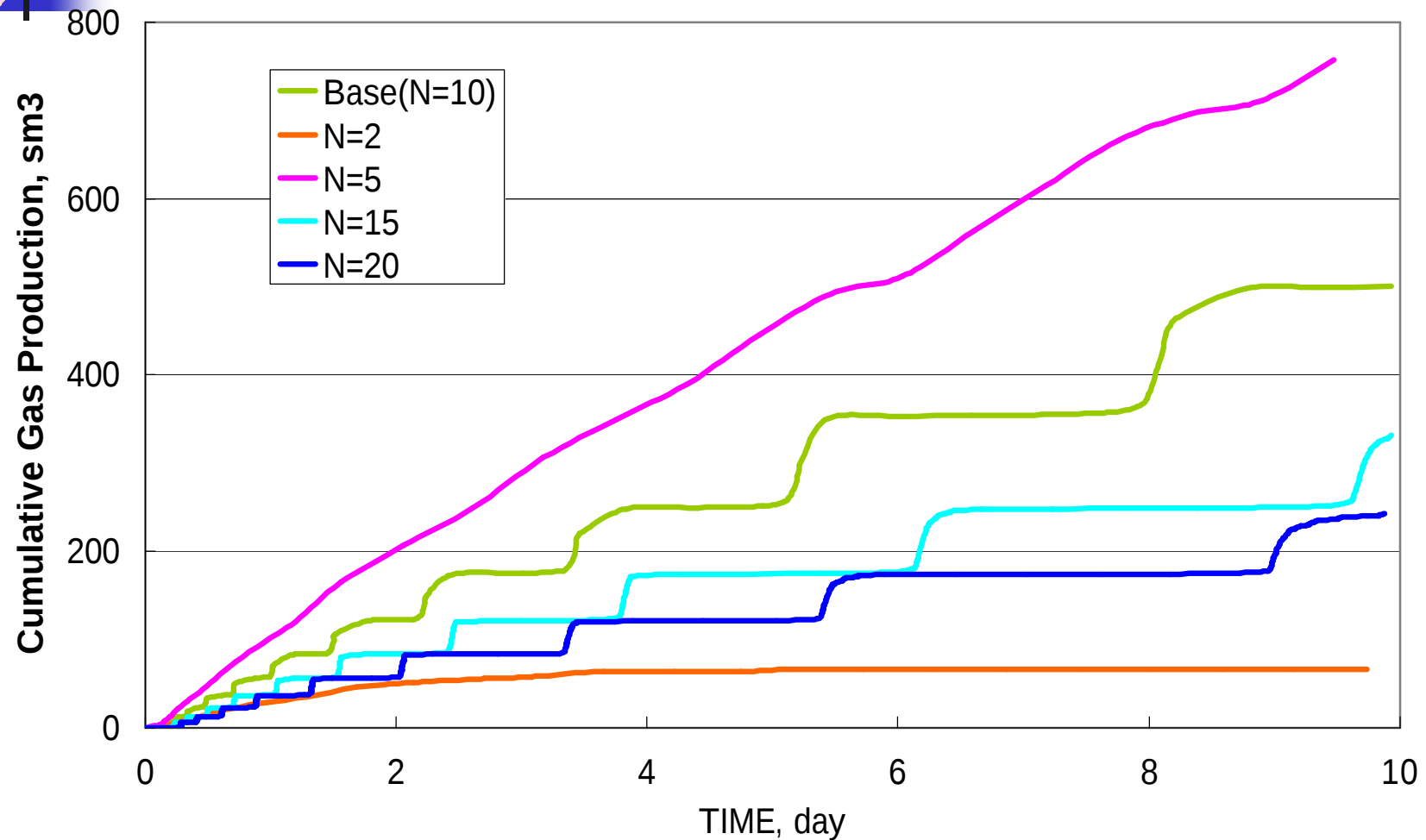
50 m³/day

感度分析結果

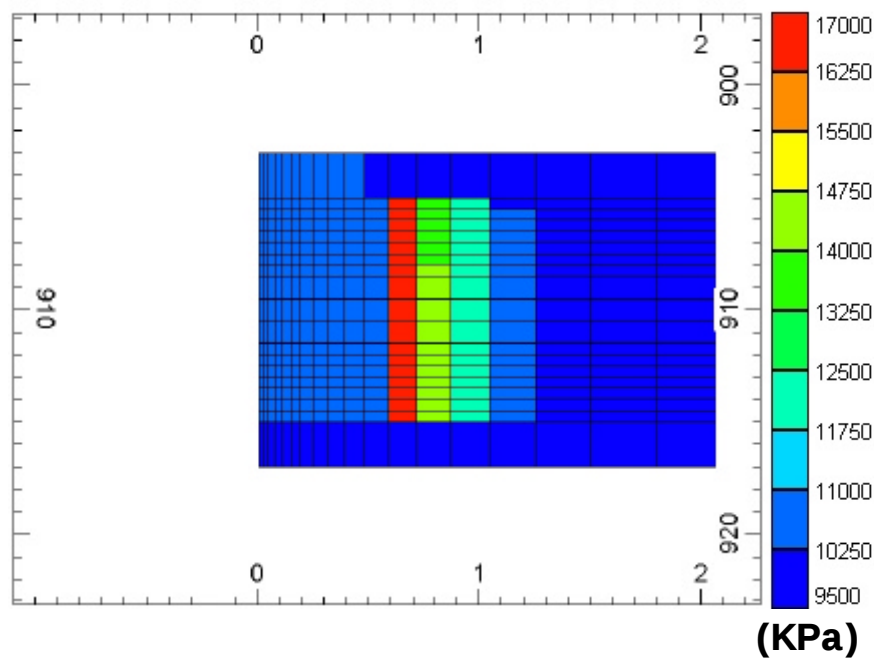
6 ~ 80m³/day

計算結果例

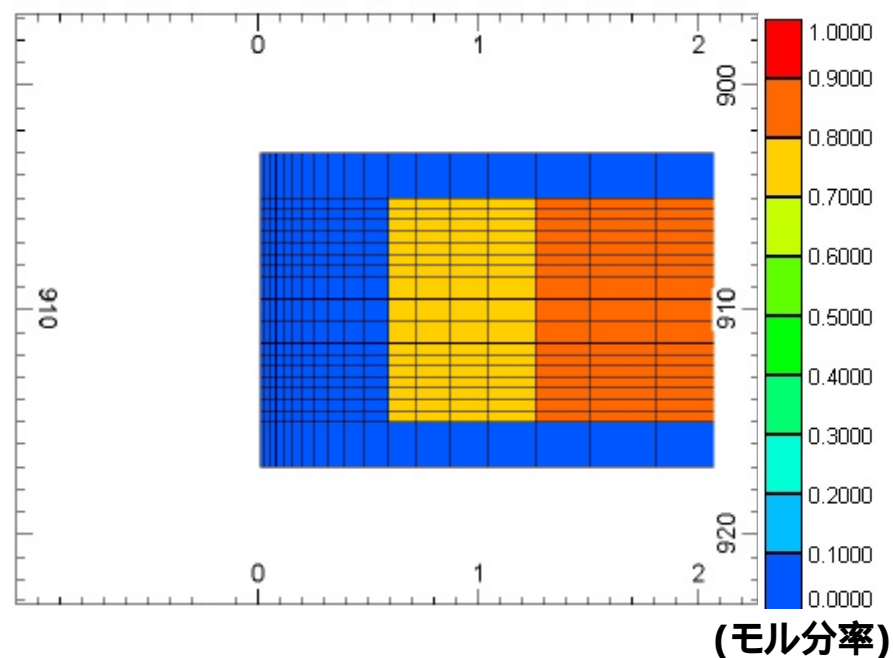
(浸透率低下次数Nに関する感度分析)



圧力・ハイドレート飽和率分布例

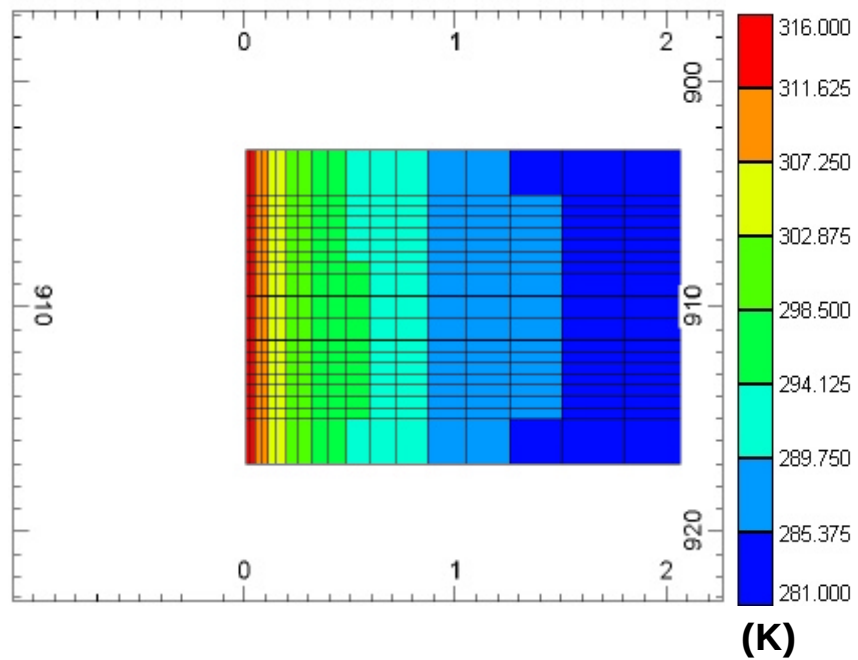


Base (圧力 10日後)

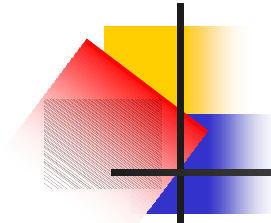


Base (ハイドレート飽和率 10日後)

温度分布図例

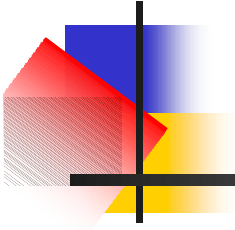


Base (温度 10日後)



まとめ - マリック生産試験の挙動予測

- マリック生産試験では、MDTおよび温水循環による連続フロー試験が実施された。予想される貯留層特性に基づき各試験に対するモデル計算を行った。更に、不確実な貯留層パラメータについては、感度分析計算を実施し、ガス生産に与える影響を検討した。
- MDTでは、各テストに対して0 ~ 750 m³/dのガス生産があったと予想される。ガス生産量に最も大きな影響を与える要因は（ハイドレート存在下での）貯留層浸透率である。
- 温水循環試験では、6 ~ 80 m³/dのガス生産があったと予想される。ガス生産量に最も大きな影響を与える要因は（ハイドレート存在下での）貯留層浸透率 熱伝導率である。

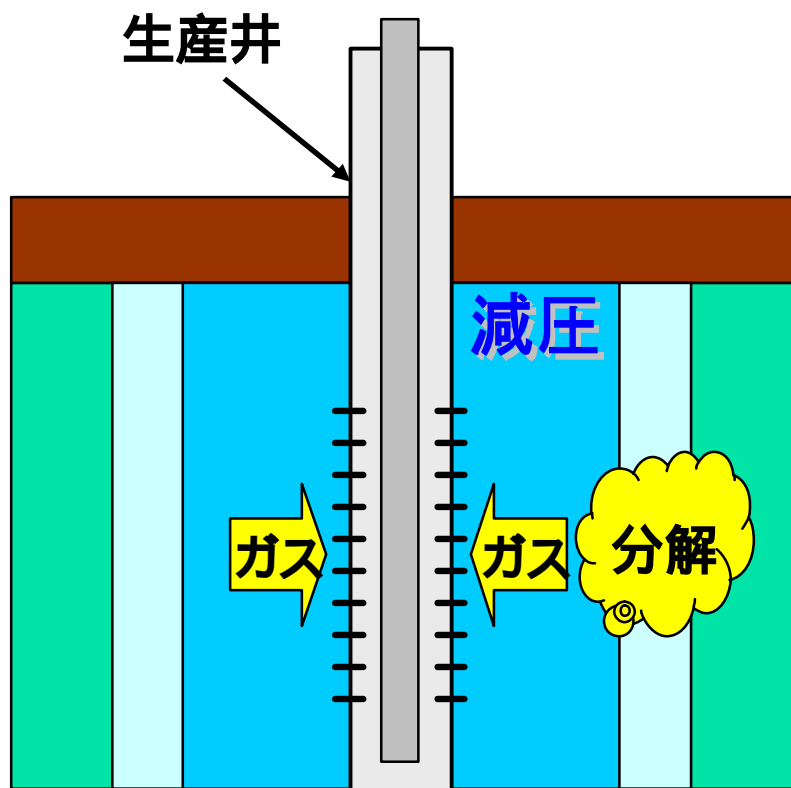


2-(2) 分解・採収法の評価

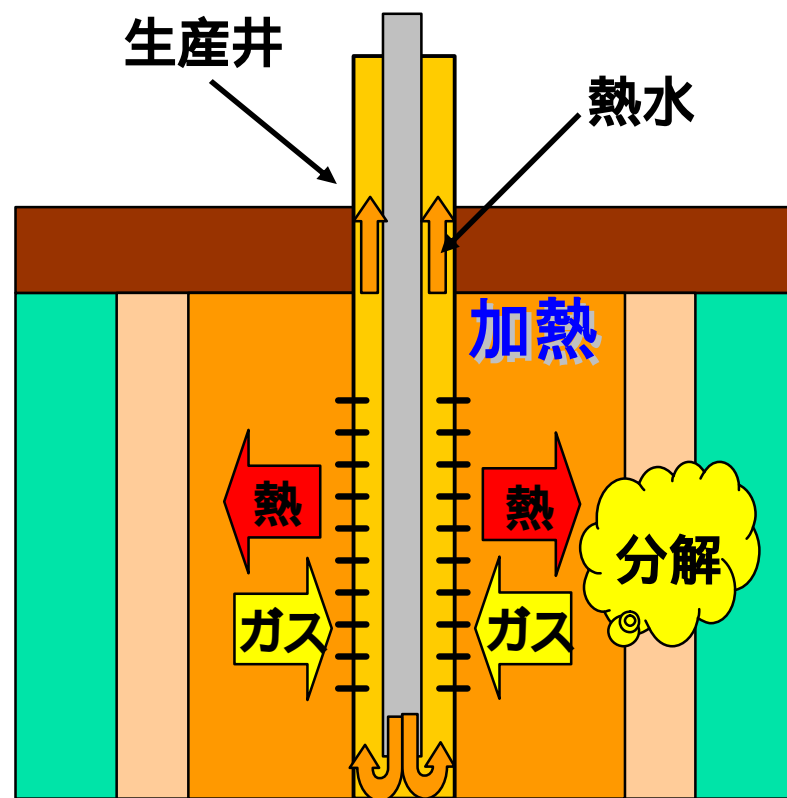
- 分解・採収法
- 貯留層特性別分解・採収法の適応性
- 操業条件が採収に与える影響

分解・採収法 (1/2)

減圧法

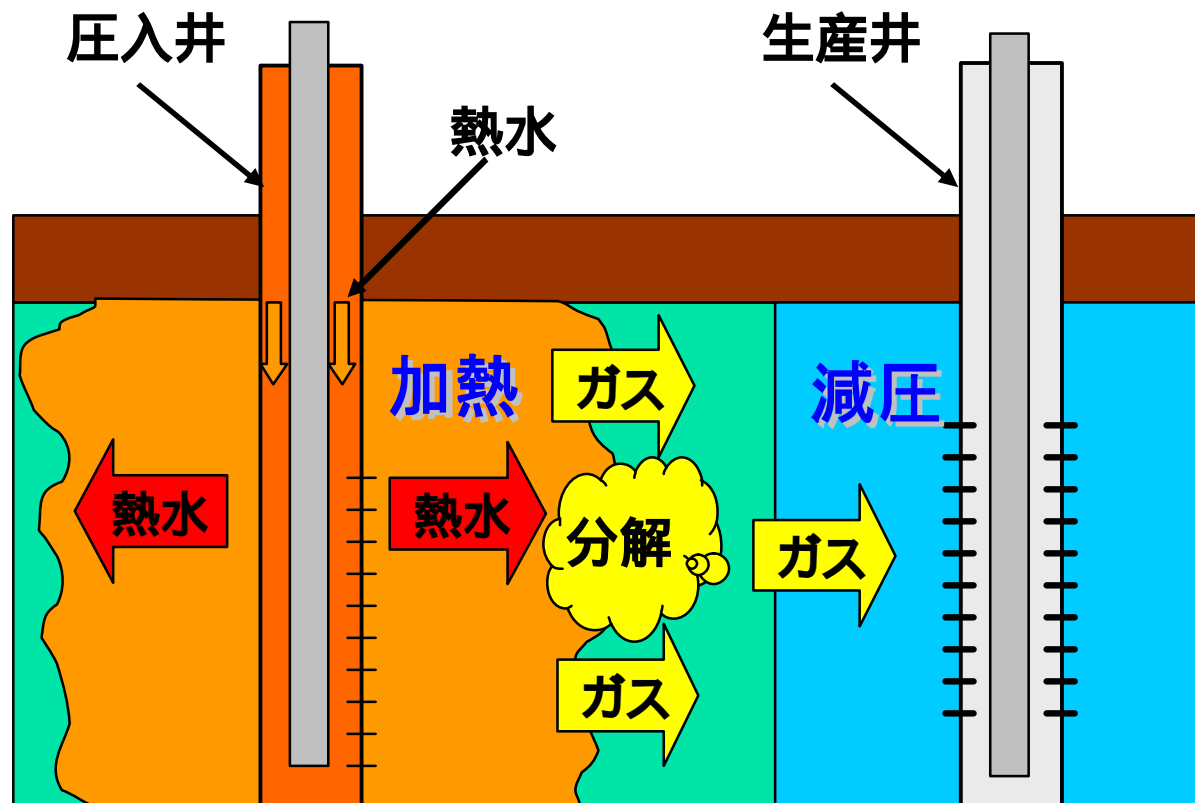


温水循環法



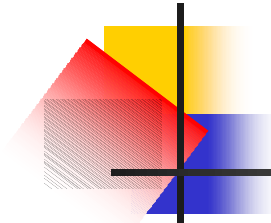
分解・採収法 (2/2)

熱水圧入法



その他の方法

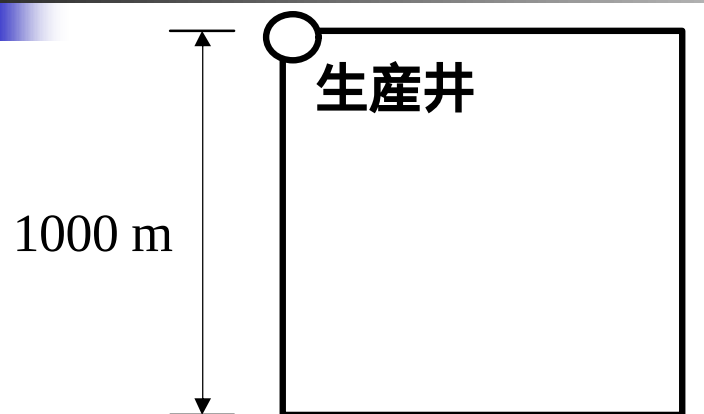
- ☐ インヒビター-圧入
- ☐ 直接掘削
- ☐ その他？



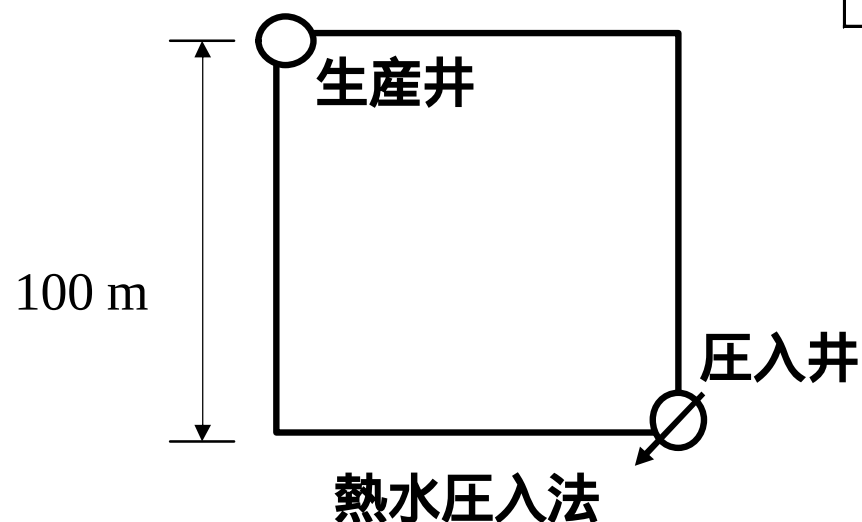
貯留層特性別分解・採収法の適応性 - 検討項目

- ハイドレート存在下での貯留層の浸透性 (N)
- メタンハイドレート飽和率
- 貯留層の層厚
- 貯留層初期状態
- 帯水層を伴う貯留層
- 帯ガス層を伴う貯留層

貯留層特性別分解 採収法の適応性検討 (ベースモデル概要)



減圧法 熱水循環法



MH 層の層厚 h	10 m
浸透率 k	20 md
孔隙率 ϕ	30 %
初期圧力 P_i	9.3 MPa
初期温度 T_i	8.8
初期ハイドレート飽和率 S_h	70 %
浸透率低下次数 N	2 または 10

流動坑底圧力

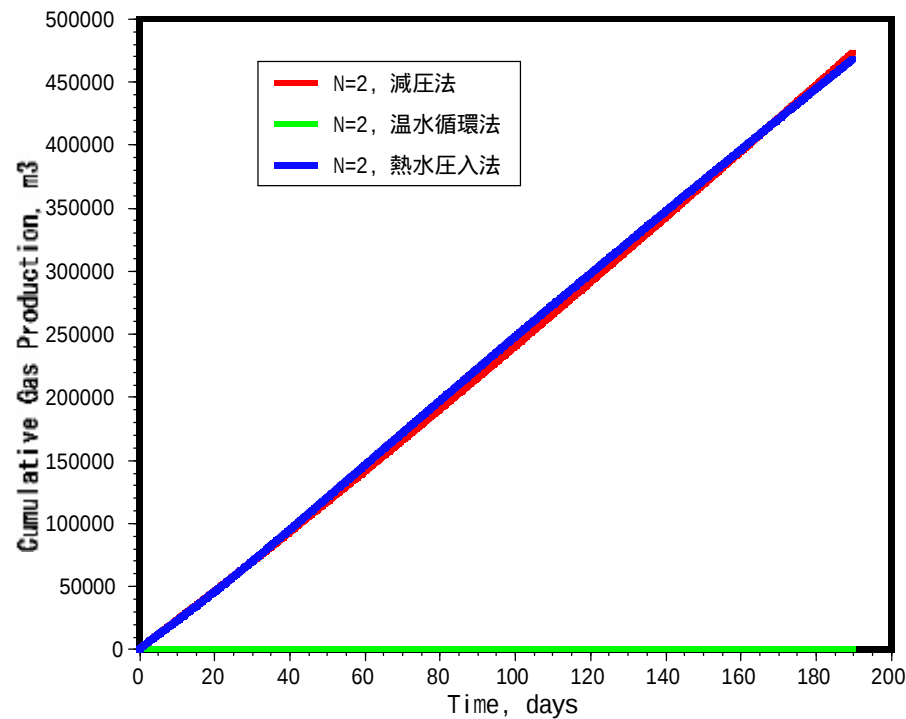
- $P_f = 1.9 \text{ MPa}$ (減圧法)
- $= 9.7 \text{ MPa}$ (熱水循環法)
- $= 11.2 \text{ MPa}$ (熱水法、圧入井)
- $= 1.9 \text{ MPa}$ (熱水法、生産井)

貯留層特性別分解・採収法の適応性検討

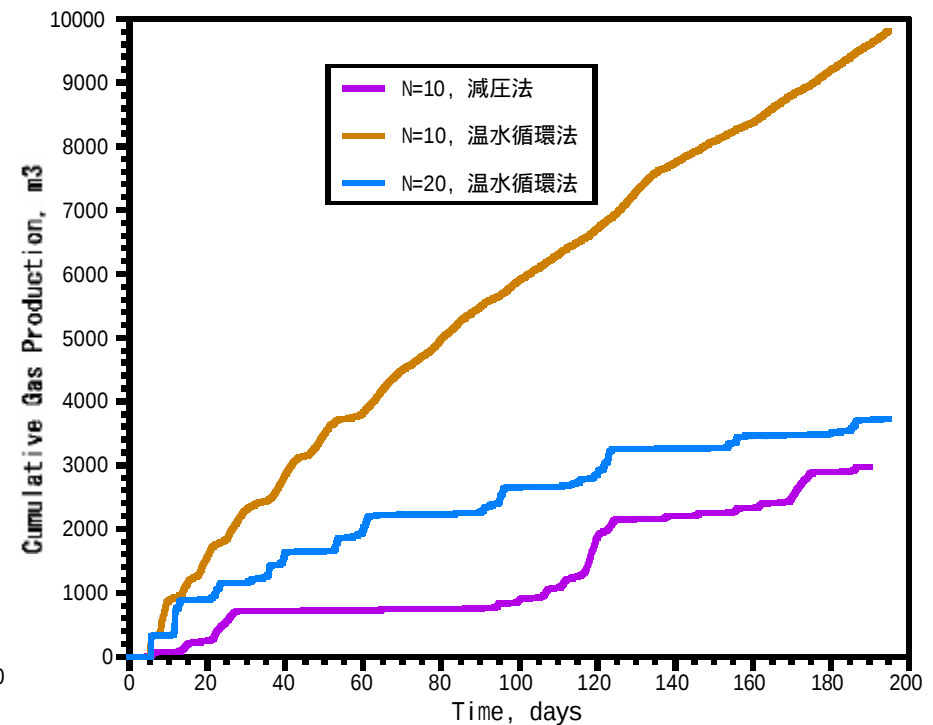
- 検討ケース一覧

検討ケース	検討ケースにおける N 値		
	減圧法	温水循環法	熱水圧入法
N (2, 10, 20)	2, 10	2, 10, 20	2, 10
MH 飽和率 (70, 40%)	2, 10	10	10
貯留層層厚 (2, 10, 50 m)	2	10	-
貯留層圧力 (6.5, 9.3 MPa)	2, 10	10	-
帯水層 (0, 1 m)	10	-	10
帯ガス層 (0, 1 m)	2	-	-

ハイドレート存在下での貯留層の浸透性の影響 - 累計ガス生産量

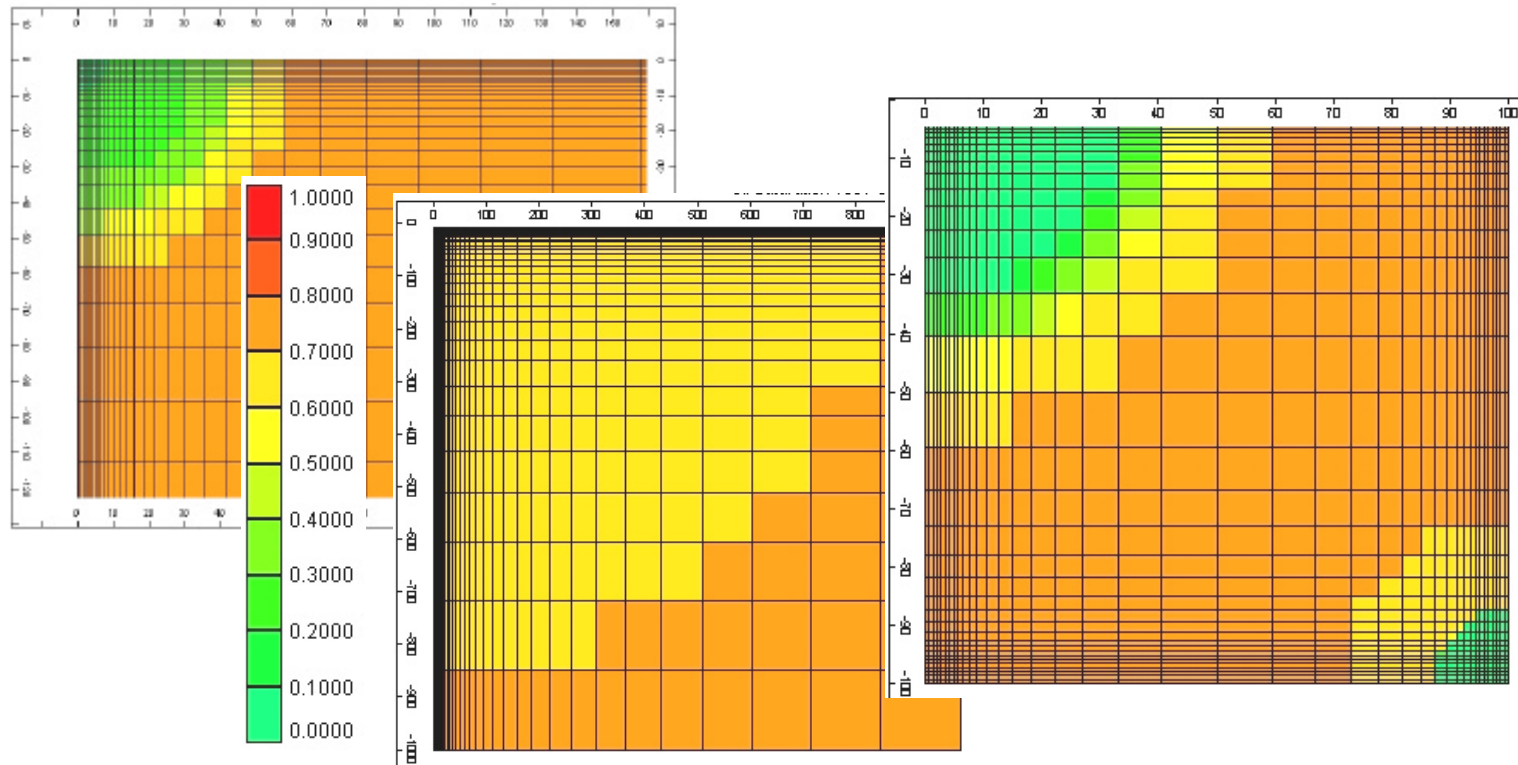


浸透性の大きい貯留層



浸透性の小さい貯留層

ハイドレート飽和率分布 (N=2, 190日後)

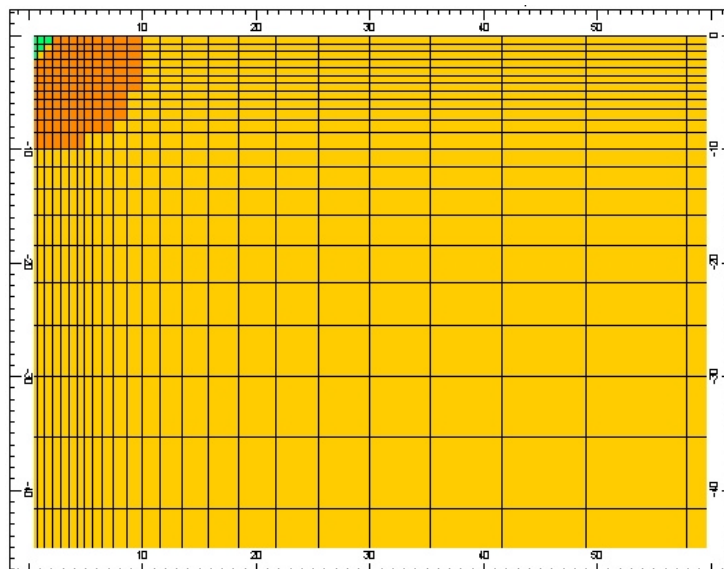


減圧法

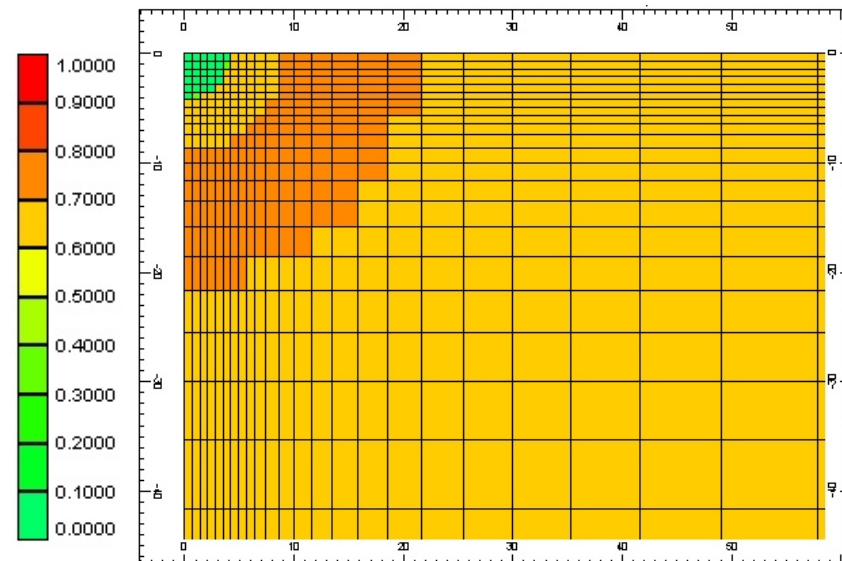
温水循環法

熱水圧入法

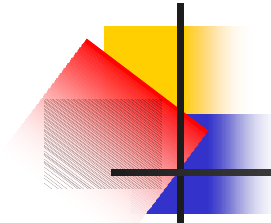
ハイドレート飽和率分布 (N=10, 190日後)



減圧法



温水循環法

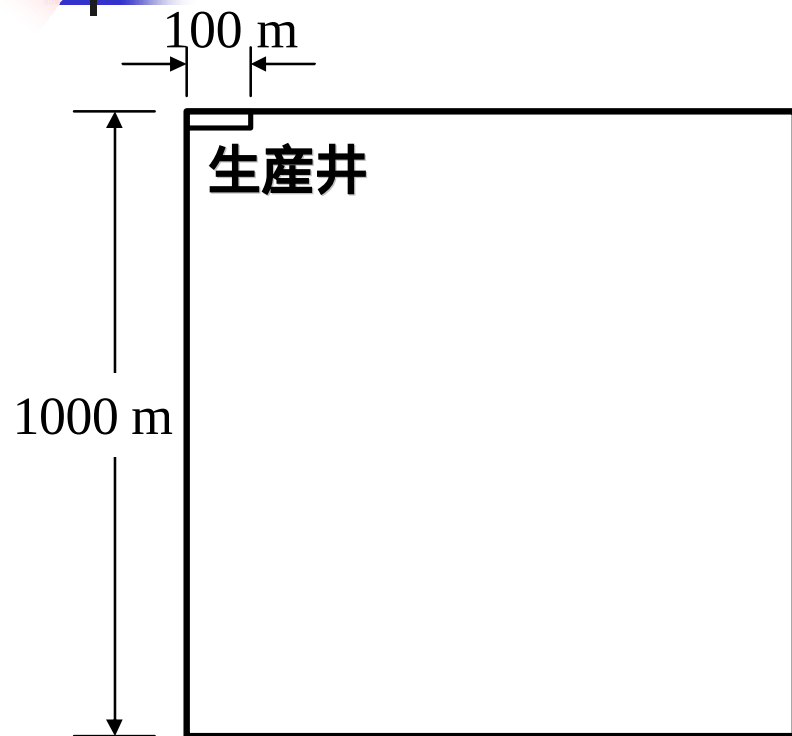


操業条件が採収に与える影響

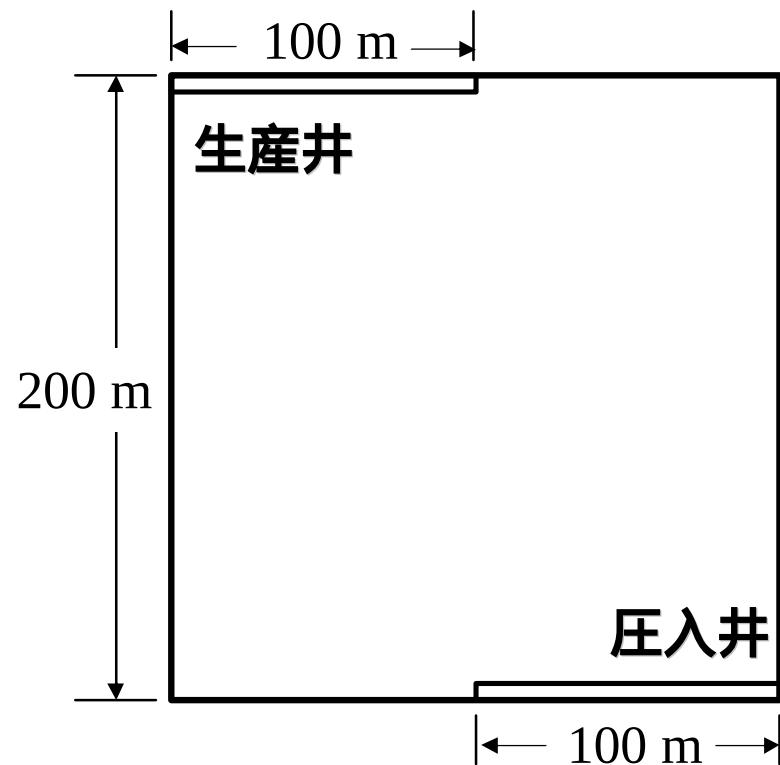
- 検討項目

- 水平坑井の効果
- 温水循環法における坑底温度の効果
- 坑井配置の影響

水平坑井モデル

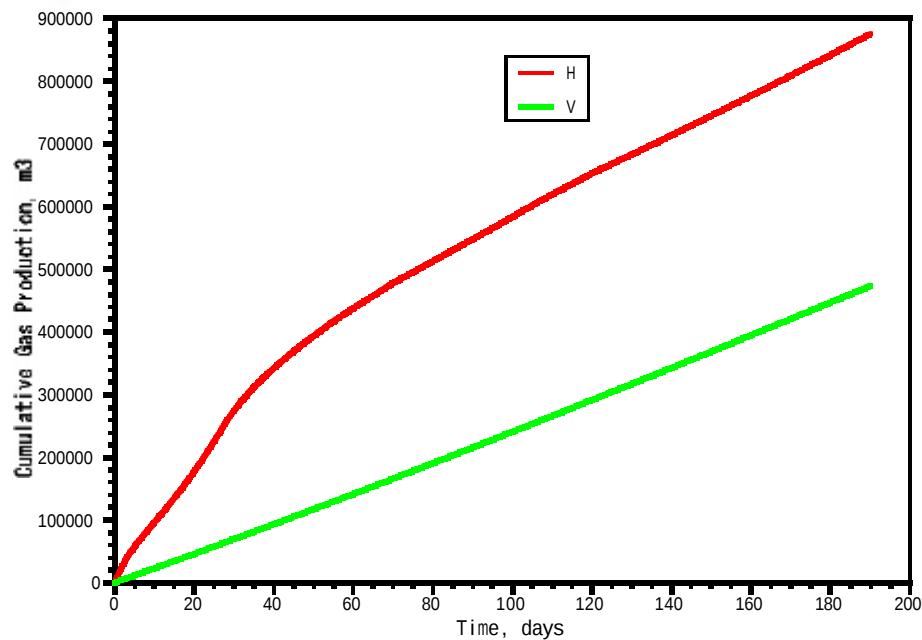


減圧法 (N=2)、温水循環法
(N=10)

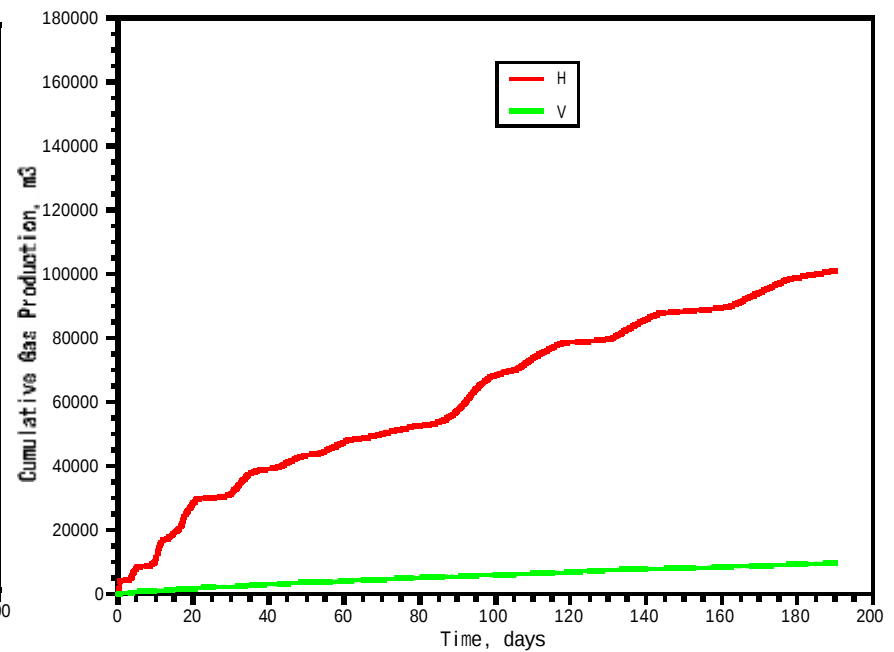


熱水圧入法 (N=2)

計算結果例 - 水平坑井と垂直坑井の生産性の比較 (1/2)

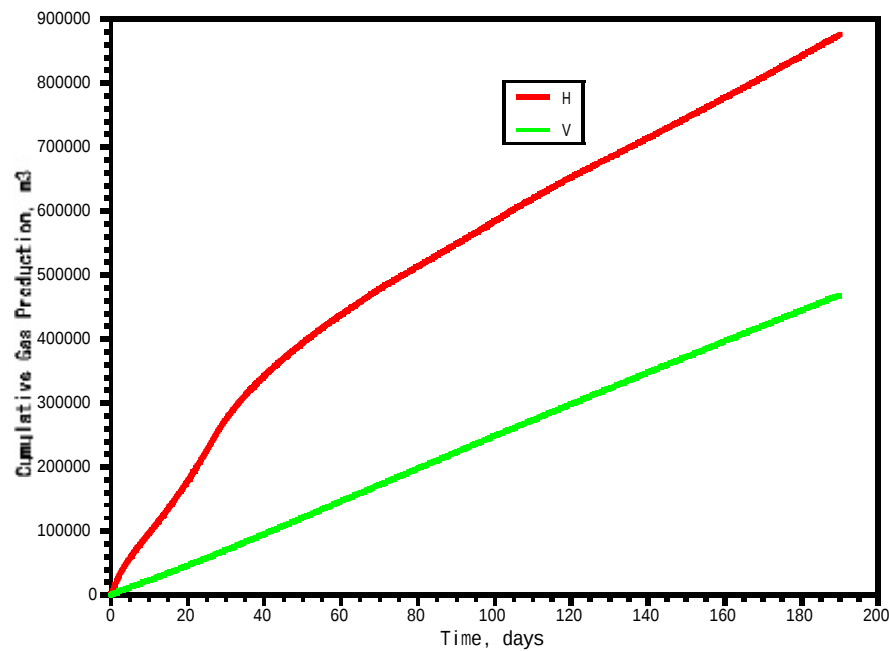


減圧法 (N=2)



温水循環法 (N=10)

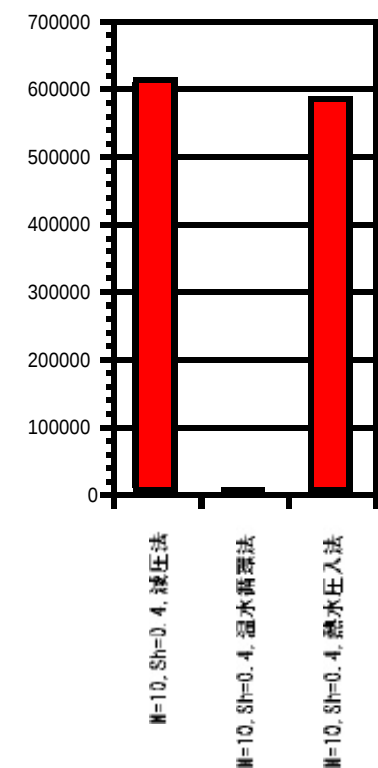
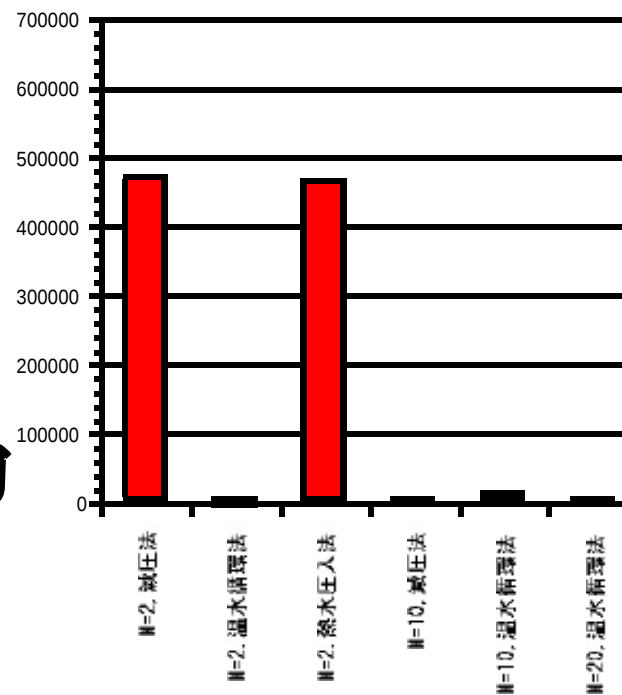
計算結果例 - 水平坑井と垂直坑井の 生産性の比較 (2/2)



熱水圧入法(N=2)

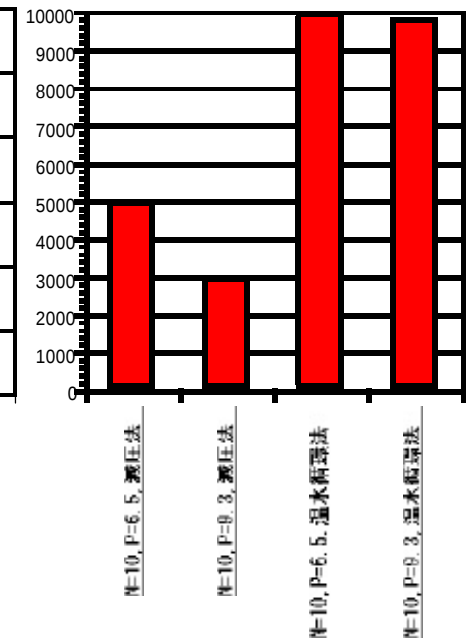
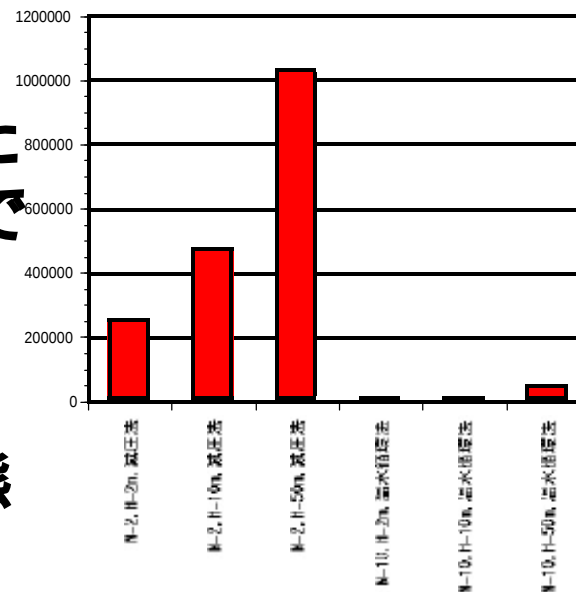
MH分解・採収法の検討 - 貯留層特性 を考慮した分解・採収法の適用性 (1/3)

- 種々の貯留層特性における減圧法、温水循環法、熱水圧入法の適用性を検討した。
- MH存在下で浸透性の良い貯留層に対しては減圧法、悪い貯留層に対しては温水循環法による採収が、最もガス生産量を増加させる。
- MH飽和率が低い場合には高い浸透性が期待され、従って減圧法が適用可能となる。



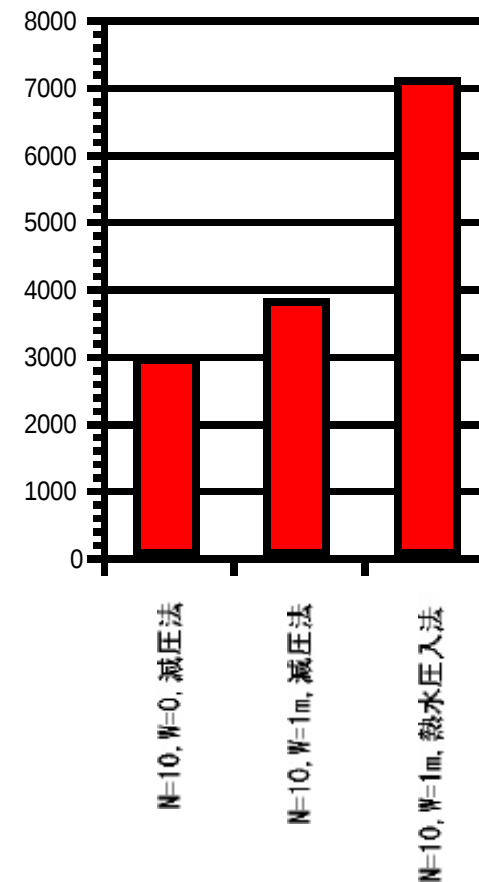
MH分解・採収法の検討 - 貯留層特性 を考慮した分解・採収法の適用性 (2/3)

- 貯留層厚が厚くなればガス採収量が大きくなることは自明である。但し単位層厚当たりのガス採収量は、減圧法では層厚が厚くなるほど減少する。
- 貯留層初期状態が平衡状態に近い場合には、採収法によらず、ガス生産量は増加する。



MH分解・採収法の検討 - 貯留層特性 を考慮した分解・採収法の適用性 (3/3)

- MH層が水層と共存している貯留層において減圧法を適用した場合には、水層から水を生産することにより、ガス生産量を増加させることが可能である。また水層に熱水を圧入することにより、ガス採収量を大きく増加させることも期待される。



MH分解・採収法の検討 - 操業条件が採収に与える効果

- いずれの採収法においても、水平坑井を適用することによりガス採収量を大きく増加させることができる。

