

REVIEW

統合型分析手法の 適用の現状

貯留層シミュレーション × 坑井内流動 × 地表設備を一体で解く

Integrated Production / Asset Modeling (IPM / IAM)

対象読者：石油開発エンジニア／経営層／大学生・大学院生

2026年8月

本資料の構成

- | | | |
|----|--------------------|----------------------------------|
| 01 | 統合型分析手法とは | 定義と全体像 — 何を一体で解くのか |
| 02 | なぜ必要か | 従来のサイロ型モデルの限界と統合の価値 |
| 03 | 連成のしくみと手法 | 貯留層・坑井・地表の結合方式（VFP / 陽・陰連成） |
| 04 | ツール環境の現状 | 主要ソフトウェアと業界での位置づけ |
| 05 | 適用の現状①：デジタル油田 | リアルタイム最適化・デジタルツイン |
| 06 | 適用の現状②：CCS・エネルギー転換 | CO ₂ 圧入・貯留への展開と横断評価指標 |
| 07 | 価値・課題・展望 | 導入価値と障壁、今後の方向性 |

統合型分析手法とは

地下（貯留層）から地上（生産設備）までを **一つの連成モデル** として扱い、坑井や設備を横断して圧力・流量を整合させながら評価・最適化する手法。

貯留層

Reservoir

- 貯留層シミュレーション
- 圧力・飽和率・流動の
- 経時変化を予測
- （ECLIPSE / INTERSECT / CMG 等）

坑井内流動

Wellbore / VLP

- 坑井内の多相流圧力損失
- IPR / VLP のノードル解析
- 人工採収（ESP・ガスリフト）
- VFPテーブルで表現

地表設備

Surface facility

- パイプライン網・集約系
- セパレータ・圧縮機・ポンプ
- 生産／圧入設備の
- ネットワーク解析

核心：三者を個別に解くのではなく、境界条件（坑口圧WHP・坑底圧BHP・流量）を介して結合する。

これにより「井戸・設備の制約を織り込んだ貯留層挙動」と「貯留層の応答を反映した設備設計」を同時に評価できる。

なぜ必要か — サイロ型の限界

従来：分断されたモデル

課題 貯留層・坑井・地表を別々のチーム／別々のツールで構築

課題 相互作用を反映するには手作業の反復が必要 → 時間・属人化

課題 設備制約を無視した非現実的な生産予測

課題 部門最適の積み上げで全体最適に届かない

統合型：全体を一体で評価

利点 相互作用を自動で整合・反復を大幅削減

利点 設備制約を織り込んだ現実的な生産・圧入予測

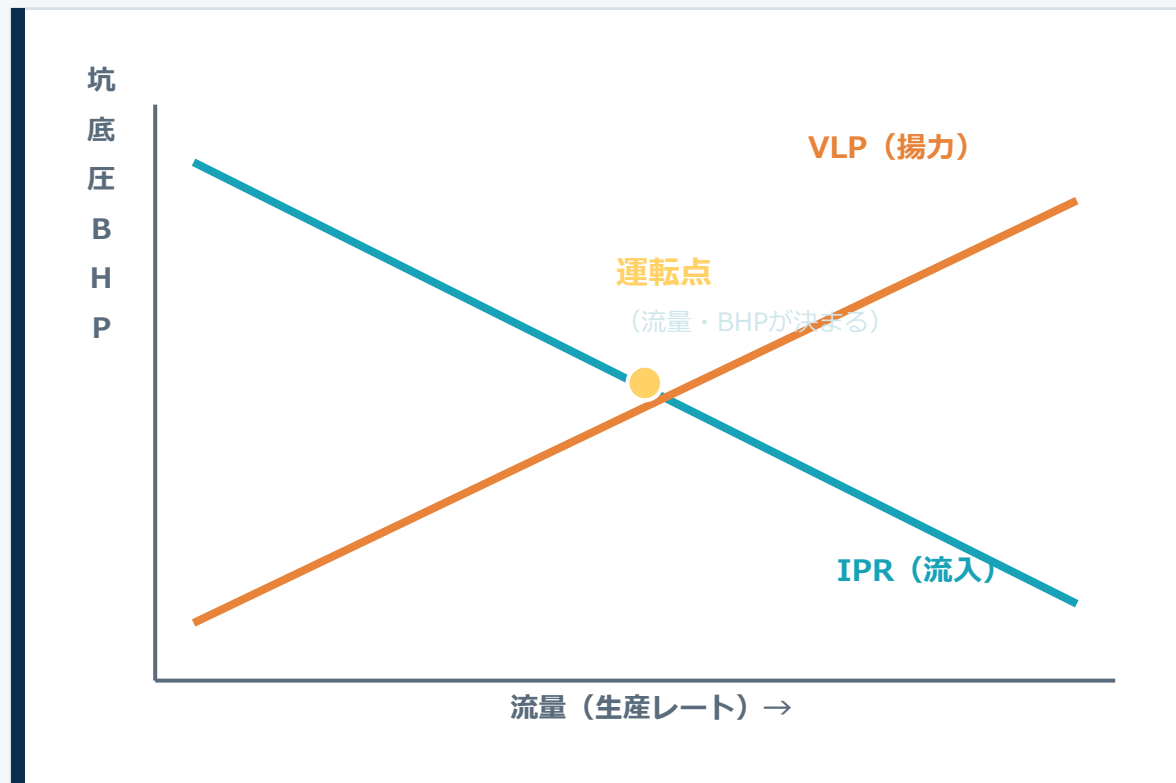
利点 開発計画～操業まで一貫した意思決定

利点 エネルギー効率・コスト・CO₂・環境影響を横断評価

→ 大手・独立系・国営石油会社を問わず、統合型モデリングは実務の必須スキルとなりつつある。

連成の基本原則：ノード解析でつり合い点を探す

連成の出発点は、1本の坑井で「貯留層が押し出す力」と「坑井・地表が受け入れる力」がつり合う点を見つけること。



IPR（流入性能）

貯留層が坑底へ供給できる流量と坑底圧の関係。生産が進み貯留層圧が下がると、曲線全体が下方へシフトする。

VLP（揚力性能）

坑底から地表設備まで流体を運ぶのに必要な坑底圧。地表の背圧・チョーク・配管径・人工採取（ESP等）で変わる。

交点＝運転点

両者がつり合う流量と坑底圧BHP。ここがその瞬間の実際の生産点になる。

→ 統合モデルは、この「つり合い」を**全坑井 × 全設備 × 各時間ステップ**について同時に解いている。

連成の流れ：貯留層と地表網は何を受け渡すか

2つのモデルは、境界の値を交換しながら**計算がつり合うまで反復**し、安定したら次の時間ステップへ進む。

STEP 1 貯留層シミュレータ

現時刻の平均貯留層圧と、各坑井の流入性能（IPR・生産性指数PI）を算出する。

STEP 2 坑井・地表網モデル

地表条件（分離器圧・チョーク・ポンプ）から、各坑井の坑底圧BHPと生産／圧入レートを計算する。

STEP 3 境界条件の受け渡し

求めたレート（または坑底圧）を、貯留層側の坑井境界条件として反映する。

STEP 4 収束判定 → 次ステップ

レート・圧力が安定するまで STEP1-3 を反復。安定したら次の時間ステップへ。

受け渡す主な値

貯留層 → 地表網

- ・平均貯留層圧
- ・流入性能 IPR / 生産性指数 PI

地表網 → 貯留層

- ・坑底圧 BHP
- ・生産／圧入レート
- ・坑口圧 WHP などの制約

⌚ STEP 1～3 を収束するまで反復（陽的連成では時間ステップごとに同期）

VFPテーブルとは：坑井流動を“早見表”にして高速化

VFP（Vertical Flow Performance）テーブル＝坑井内の圧力損失をあらかじめ計算しておく早見表。

生産レート	含水率 WCT	ガス油比 GOR	坑口圧 WHP		坑底圧 BHP (出力)
1,000	0.10	800	20 bar	→	118 bar
2,000	0.10	800	20 bar	→	135 bar
2,000	0.30	800	20 bar	→	142 bar
3,000	0.30	800	20 bar	→	166 bar

入力（レート・WCT・GOR・WHP・人工採収設定）→ 出力（坑底圧BHP）を補間で即座に取得

なぜ速い・使われるのか

- 貯留層シミュレータは反復のたびに坑井流動を解き直さず、表を参照（補間）するだけ
- 計算が大幅に高速化 → 大規模資産・多数坑井でも実用的
- 人工採収やチョークの条件を表に織り込める
- **実務の主流。多くの商用ワークフローの標準的な結合方式**

連成手法の3つの結合方式

貯留層と坑井／地表ネットワークを、どのタイミング・どの精度で結合するかで手法が分かれる。

陽的（Explicit / ルーズ）連成

- 各シミュレータを順番に解き、
- 前ステップの境界条件を受け渡し
- 計算負荷が小・柔軟
- 流量／圧力の振動が出やすい

陰的（Implicit / タイト）連成

- 両者を反復的に同時求解
- ニュートン反復レベルで整合
- 安定・高精度
- 計算コストが大きい

VFPテーブル方式

（実務の主流）

- 坑井流動を事前計算した表で表現
- 貯留層シミュレータに組み込み
- 高速で実装が容易

トレードオフ：計算効率 ↔ 数値安定性 ↔ 精度。目的（設計検討・感度分析・リアルタイム最適化）に応じて選択する。

実務では、坑井流動をVFP表に落として貯留層シミュレータに結合する「陽的＋テーブル」方式が広く用いられる。

ツール環境の現状

Petroleum Experts IPM スイート

- GAP（地表網）・PROSPER（坑井/人工採取）
- MBAL（物質収支）・PVTP・REVEAL
- RESOLVE が貯留層～坑井～地表を統合
- 坑井・人工採取設計のデファクト

SLB（Schlumberger）

- PIPESIM：定常の坑井・網モデル／ノードル解析
- ECLIPSE・INTERSECT：貯留層シミュレータ
- 感度分析・サブサーフェス～地表統合に強み

組み合わせ運用が実態

- 貯留層は ECLIPSE 等
- 坑井・網は PROSPER・GAP / PIPESIM
- 異なるツールを連成させて使うのが一般的
- 近年はリアルタイム自動化データと結合

※ 商用ツール名は各社の登録商標。特定製品の推奨ではなく業界動向の把握を目的とする。

適用の現状：デジタル油田・リアルタイム最適化

統合モデルにリアルタイム計測データを結合し、**日々の生産を監視・自動最適化**する流れが加速。

デジタルツイン

- 資産の仮想複製をリアルタイム更新
- 最適な操業設定点を継続的に探索
- IIoT計測（圧力・温度・振動）と連携

自動生産最適化

- 最適化アルゴリズム（例：焼きなまし法）
- 人工採収・チョーク・坑井開閉を数千反復で調整
- 水生産低減と油生産維持を両立

デジタル油田(DOF)

- 予知保全・坑井性能最適化
- フローアシュアランス
- 日々の生産オペ・保全に活用

事例：KOC 北クウェート — 1,400本超の生産井を含む複雑な地表網のデジタルツイン

- リアルタイムデータと統合し、水生産を抑制しつつ油生産を維持・増加
- 最適化ワークフローが人工採収パラメータ・チョーク設定を自動調整
- 「モデル＝設計ツール」から「モデル＝日々の操業意思決定基盤」へ

適用の現状：CCS・エネルギー収支分野への展開

統合型手法は石油生産にとどまらず、**CO₂圧入・貯留（CCS/CCUS）**の設計・評価へ応用が拡大。

CCSでなぜ統合が重要か

- 地表設備と貯留層特性（不均質性・浸透率・孔隙率等）の
- 連携が、**総貯留量と最大圧入レート**を決める
- CO₂圧入井の過渡現象が地表網へ及ぼす全系影響を評価
- フローアシュアランス（相挙動・析出）が事業成立性を左右
- 帯水層・減衰貯留層、陸上/洋上輸送まで一体で検討できる

統合モデルで横断評価できる指標

- **圧入性**：総貯留量・最大圧入レート
- **エネルギー効率**：圧入・水生産に伴う動力
- **フローアシュアランス**：相状態・ハイドレート析出リスク

含意：エネルギー効率・電力コスト・CO₂排出量についても横断評価できる点が、CCS事業の成立性判断と操業条件の絞り込みに直結する。統合型手法はエネルギー収支評価の実装基盤となる。

導入価値と課題・障壁

価値 (Value)

- 現実的な生産・圧入予測 → 開発計画の質向上
- 反復作業の削減・意思決定の高速化
- 部門横断の全体最適（サブサーフェス～設備）
- 感度分析で有望な操業条件を効率的に絞り込み
- リアルタイム化で日々の操業改善・増産／減コスト
- コスト・CO₂・環境影響を統合評価

課題・障壁 (Barriers)

- データ品質とモデル更新の維持コスト
- 連成の数値安定性・計算負荷の管理
- ツール間連携（異種シミュレータ結合）の難しさ
- 組織・チーム間の分業文化からの転換
- 専門人材（統合スキル）の確保・育成
- 明確な戦略とビジネス目標への接続が前提

まとめと今後の展望

- | | | |
|----|--------------------|---|
| 01 | 統合型手法は「必須スキル」化 | 貯留層×坑井×地表を一体で解く手法は、大手・独立系・国営を問わず実務標準になりつつある。 |
| 02 | 実装は「陽的＋VFPテーブル」が主流 | 計算効率と実装性のバランスから広く採用。目的に応じ陰的連成やフル連成を使い分ける。 |
| 03 | リアルタイム化・デジタルツインへ | 静的な設計ツールから、日々の操業を最適化する意思決定基盤へと役割が拡張。 |
| 04 | CCS・エネルギー収支評価にも拡大 | CO ₂ 圧入・貯留の成立性判断に不可欠。エネルギー収支問題への適用可能性。 |
| 05 | 成否を分けるのはデータと人・組織 | モデル更新の運用、異種ツール連携、統合評価を行うスキルを持つ人材の育成が今後の鍵。 |

主な参考情報

■ 基礎・概説

- ▶ Integrated asset modelling — Wikipedia (定義・全体像)
- ▶ SLB, The Defining Series: Integrated Asset Modeling (概説)
- ▶ H.D. Beggs, Production Optimization Using Nodal Analysis, OGCI/PennWell

■ 連成・ノードル解析の手法

- ▶ Mach, Proano & Brown (1979), SPE-8025 — ノードル解析の原典
- ▶ Coats et al. (2004), SPE-79704 — 貯留層に完全連成した坑井・地表設備モデル
- ▶ Ghorayeb et al. (2003), SPE-79702 — 貯留層・地表網連成の汎用コントローラ
- ▶ SPE-65159 (2000), Linking Reservoir and Surface Simulators
- ▶ MDPI Processes (2022), Dynamically Coupled Reservoir & Wellbore Simulation: A Critical Review
- ▶ ScienceDirect (2025), New interpolation model for explicit coupling using flow tables (VFP)

■ 統合生産モデリング（実務）

- ▶ Petroleum Experts, IPM / RESOLVE 技術資料
- ▶ SPE-113904 (Deepwater GoM, Jack) / SPE-167557 統合生産システムモデリング

■ CCS・エネルギー転換への適用

- ▶ SPE Europec 2024, Importance of Integrated Asset Modelling (IAM) in CCS Applications
- ▶ SPE ATCE 2025, Impact of CO₂ Injection Well Transients on CCUS Systems
- ▶ SPE ETS 2024, Importance of Surface-Subsurface Integration in CCS System Design

■ デジタル油田・リアルタイム

- ▶ OPES 2025, Digital Twin with Real-Time Data, KOC North Kuwait (1,400+ producers)

※ SPE番号は OnePetro 収録の会議・論文番号。各社製品名は登録商標。URL・書誌の詳細は別紙一覧を参照。