

サステナブルな石油開発とは

日本オイルエンジニアリング株式会社
開発技術部技術顧問
内木 元義



1. 石油開発の流れ

「サステナブルな私たちの石油開発」を考える前に、石油開発の主体について整理しておきましょう。

石油開発の主体としては、日本のINPEXのような石油開発会社（石油や天然ガスの探鉱・開発・生産を専門に行います）、そしてサウジアラビアのSaudi AramcoやブラジルのPetrobrasなどの国営石油会社（NOC）（多くの産油国では、国営企業が石油資源の開発を担っています）、そしてExxonMobil、Shell、BPなどの国際石油会社（IOC）（世界各地で探鉱・開発・生産を行っています）、そして政府や資源管理機関（多くの国では政府が鉱区の設定や開発権の許可を行い、民間企業や国営企業が実際の開発を実施します）などがあります。

これらの主体が石油開発に着手するにはどのような手順および条件が必要なのか、従来の石油開発の流れをなぞってみることにしましょう。

この流れは業界では大きく上流（Upstream）、および下流（Downstream）に分類します。ちなみに筆者が所属する日本オイルエンジニアリング株式会社（JOE）は、この上流から下流までのエンジニアリングとコンサルティングにかかわっています。上流では石油・天然ガスを探す（探鉱）、石油・天然ガスの存在を確認する試掘、その試掘結果から埋蔵量評価を行い、開発計画を立てます。この段階で経済性評価も重要で、将来を含む石油・天然ガス価格、必要な投資額、運転コストなどを考慮して投資判断を行います。そして投資判断で着手が決定されれば、開発、生産、輸送と進み、下流の精製、販売となります。最後は油ガス田そのものの閉山・環境回復となります。最初の探鉱から油ガスを生産し、販売に至るまで10～20年以上かかることもあります。また、最後の閉山・環境回復まで含めると数十年以上要することもあります。

2. 埋蔵量

まず、石油開発で必ず出てくる用語に「埋蔵量」があります。この「埋蔵量」とはいったい何でしょうか。埋蔵量に関する新基準「Petroleum Resources Management System 2007 (PRMS)」が、2007年3月末にSPE（Society of Petroleum Engineers：石油技術者協会）、WPC（World Petroleum Congress：世界石油会議）、AAPG（American Association of Petroleum Geologists：米国石油地質家協会）およびSPEE（Society of Petroleum Evaluation Engineers：石油評価技術協会）の4組織によって策定されました。これら4組織が、2005年より2年間かけて、現状の技術革新や経済的背景に沿う資源量と埋蔵量の世界基準を作成すべく、各石油会社や世界各国における埋蔵量の定義、分類に関する調査（mapping）、基準について外部からの意見聴取を行い、多くの会社からの意見を反映した新基準を策定したのです。

これによると、石油の埋蔵量とは、「地下に存在する石油のうち、現在の技術と経済条件で採掘できると見込まれる量」であって、「地下にある石油の総量」とは違うということです。地下に存在すると考えられる石油の総量（採掘が難しいものも含む）が資源量であり、その中でも、現在の技術や石油価格の条件で採掘できると判断された量が埋蔵量なのです。たとえば、ある油田に100億バレルの石油があると推定されても、技術的・経済的に採掘できるのが40億バレルなら、その40億バレルが「埋蔵量」とされるのです。ということは、埋蔵量は状況によって変化するということを意味します。すなわち、

- ・ 採掘技術が進歩すると、これまで採れなかった石油が採れるようになり、埋蔵量は増えることがある
- ・ 石油価格が上昇すると、採算が取れる油田が増え、

埋蔵量が増えることがあります。逆に価格が下がると、採算が取れない油田が増え、埋蔵量が減ることもある

ということです。

3. サステナブルな石油開発とは

ここで本稿の本題であるサステナブルな石油開発について考えてみましょう。AIに聞いてみたところ、

- ①将来世代のニーズを損なうことなく、現在のエネルギー需要を満たす形で石油を開発・生産する
- ②環境・社会・経済のバランスをとりながら石油資源を開発・利用する
- ③石油を使い続けながらも、CO₂排出を極力ゼロに近づけ、環境負荷を最小化しつつ、エネルギー供給を維持するための開発・生産のあり方

などの答えが返ってきました。

石油開発におけるエンジニアリング会社として、この一連の流れのなかでかかる最も上流の案件が、資源量評価です。石油・天然ガスを探す探鉱の段階で行われる作業は「地質調査」や「物理探査」であり、JOEは顧客企業から依頼されて調査や探査結果に基づき資源量を評価するだけなので、サステナブルな形での貢献の余地はほとんどありません。

一方、「埋蔵量評価」では、「埋蔵量」が「商業的に回収され得ると予測される石油量」であることから、JOEのようなエンジニアリング会社がサステナブルな石油開発にかかわることができるのです。「商業的に回収され得ると予測される石油量」を予測するためには、複数の試掘（探査井の掘削）を行い、開発計画を作成します。従来は井戸のコスト、生産に必要な施設や石油・天然ガス出荷施設の建設コストなど、さらには石油・天然ガス価格などから採算のとれる計画を提案すれば問題ありませんでした。しかし、サステナブルな石油開発を顧客に提案するためには、「環境・社会・経済のバランスをとる」ことが求められるのです。そのため、開発計画の作成に当たっては、「環境負荷の低減」、「生産プロセスのクリーン化・省エネルギー化」、「デジタル技術（DX）の活用」などを考慮する必要があります。

4. 環境負荷の低減

【CO₂の回収・貯留・利用】

環境負荷の低減策として、CO₂の回収・貯留・利用があります。

石油の生産・精製過程で発生する二酸化炭素（CO₂）を大気中に放出せず、回収して地下に埋め立てたり（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）、別の用途に有効利用（CCU：Carbon dioxide Capture and Utilization）したりする技術です。これらにより、実質的なCO₂の排出量は大幅に削減されます。回収したCO₂を油田に圧入し、地下にCO₂をとどめつつ、残った石油の回収率を高める一石二鳥の技術も活用されています。これに対応することで、産油国・地域において課せられる税金などの恩恵を受け、結果的に経済性が改善する可能性もあります。

図1は2024年6月4日の石油技術協会の春季講演会でJOGMECから紹介された地上で回収されたCO₂を減退ガス田と帯水層に圧入した場合について数値計算で検討した例です。

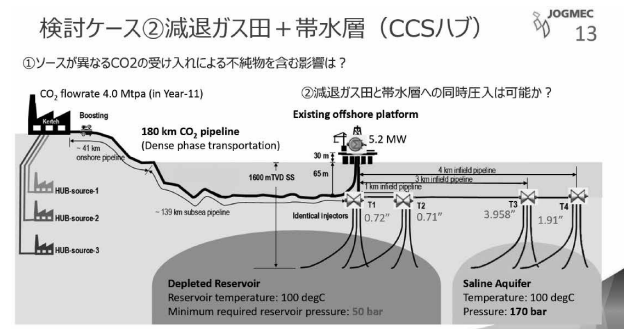


図1 2024年6月4日 石油技術協会春季講演会配布資料「CO₂地中貯留におけるフローアシュアランスに関する検討」から

【生態系への影響を最小化】

環境負荷の低減策には生態系への影響を最小化することも含まれます。

石油開発において生態系への影響を最小化するためには、事前の「環境影響評価（EIA）」の実施、生息地の物理的な保護、および操業中の汚染対策を組み合わせることが不可欠です。これにより、生物多様性の損失を防ぎ、持続可能な事業運営が可能となります。

5. 生産プロセスのクリーン化と省エネ

生産プロセスのクリーン化については、再生可能エネルギーの導入と石油・天然ガス生産時に発生する余分なガス（随伴ガス）を焼却（フレアリング）することを減らす、もしくはなくすことで対応可能です。

【再生可能エネルギーの導入】

油田の掘削リグや生産設備の電力を、太陽光や風力といった再生可能エネルギーを利用した効率的な発電でまかなうことや、石油と一緒に湧き出る随伴ガスを利用した発電により生産プロセスのクリーン化が実現します。

【随伴ガスフレアリングの削減】

従来は廃棄処分として燃やされていた（フレアリング）随伴ガスを回収し、燃料や化学原料として再利用します。燃やさないことでCO₂排出量が削減され、再利用により経済性が向上するというメリットがあります。

6. デジタル技術（DX）の活用

JOGMECの「石油開発産業におけるデジタル技術の活用」(2018年9月20日)では、「石油開発産業におけるデジタル化」、「IOC・NOC・主要会社の取り組み状況」、「経済産業省・JOGMECの取り組み状況」について議論・紹介し、

- ①IOC・NOCはIT企業と協業して自社の埋蔵量増加、コスト削減、安全性向上にデジタル技術を活用する
- ②デジタル技術の導入検討にあたっては、ビジネス課題を明確にしたうえで、小さなスケールから取り組み始めることが重要である
- ③シェール革命に続くデジタル革命により、いち早くデジタル技術を取り入れた企業のみが今後生き残れる時代となった

とまとめています。

石油開発業界では、以前から、初期の段階で得られた地質データをもとに地下数千メートルの油ガス田をコンピューター上で再現し、将来どう生産できるかを試算することによって開発計画を構築してきました。シミュレーションとは「もしこの条件ならどうなるか」を計算する技術です。実際の油ガス田がその瞬間どうなっているかとは直接関係なく、ある時点で作成したモデルを使って計算するのです。

一方、デジタルツインは、現実（リアル）空間を仮想（デジタル）空間上に再現する技術です。最先端テクノロジーを活用することで、現実世界から収集したデータをリアルタイムに反映し、仮想空間上でシミュレーションを行うことができます。

現実空間と仮想空間を対に扱う概念は、宇宙開発分野におけるNASA（米航空宇宙局）のアポロ計画が最初といわれます。石油開発で考えると、従来の油層シミュレーションでは、「地質モデルをつくる」→「履歴適合を行う」→「将来を予測する」という流れであるのに対し、デジタルツインでは、「センサーからデータ取得」→「モデルを自動更新」→「シミュレーションを実行」→「最適な生産条件を提案」→「現場へのフィードバック」というサイクルを繰り返すのです。つまりシミュレーションがデジタルツインの中核機能のひとつになっています。

このデジタルツインを「現実と一致させ続ける」ための重要な基盤技術にデータ同化（Data Assimilation）があります。データ同化は「モデルの予測」と「実際の観測」を統計的に融合する技術です。モデルだけでは誤差があります。たとえば明日の気温は30度になると予測していても、実際の観測では現在27度だった場合、この観測を利用してモデルを修正します。データ同化を行うことによって、「モデルだけでは現実から徐々にずれていく」、「センサーだけではノイズや欠測の影響を受ける」といったデジタルツインの課題を解決できるのです。まとめるとデジタルツインとデータ同化の関係は、表1のように整理できます。

つまり、デジタルツインはシステム全体の概念であり、データ同化はその中で「現実とのずれを修正する頭脳」として機能する技術といえます。特に気象、製造、医療、インフラなど、物理モデルと観測データの両方が利用できる分野では、両者を組み合わせることで高精度な監視・予測・最適化が実現されています。

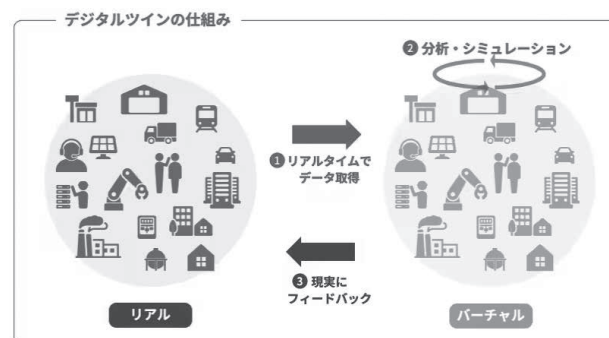


図2 デジタルツインの概念図

出所：Docomo Business Watch IT用語集
<https://www.ntt.com/bizon/glossary/j-t/digital-twin.html>

表1 デジタルツインとデータ同化の関係

デジタルツイン	データ同化
現実をデジタル上で再現する仕組み	モデルと観測を融合して状態を更新する技術
シミュレーションや予測の基盤	デジタルツインを現実と同期させるための中核技術
センサー、通信、シミュレーションなどを含むシステム全体	状態推定・パラメータ推定を担うアルゴリズム

JOEでもJOGMECから委託を受けているメタンハイドレート開発にかかるシミュレーションモデルの構築作業でこのデータ同化を応用しています。

図3に、米国アラスカにおけるメタンハイドレート産出試験を対象としてデータ同化を実施した際の、ガス生産井PTW1および観測井GDWを含む貯留層の概念図を示します。

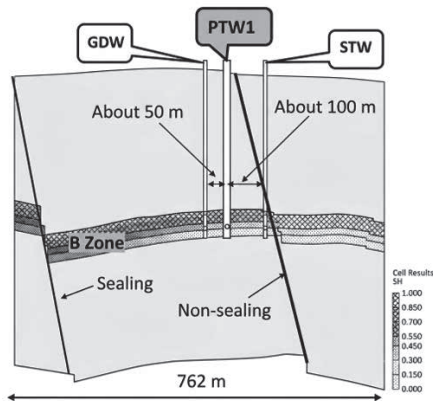


図3※ データ同化を試みたメタンハイドレート貯留層

240日に及ぶ生産期間の生産井、および観測井の圧力と温度変化の観測値と計算結果の同化を試みました。なお、ここでは計算機の処理能力を鑑みてもう一本の観測井戸であるSTWのデータの使用は断念しました。

図4に同化結果、図5に同化によって得られた浸透率を示しました。ここで、①は最初に想定したデータに基づく結果、②は同化によって得られた結果、③が観測された結果を示しています。最初に想定したデータが同化プロセスを繰り返すことによって観測値に収斂していく様子がみられます。

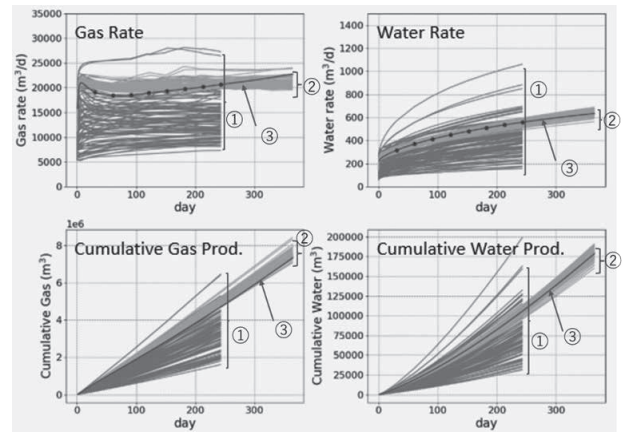


図4※ 生産井PTW1の観測データと同化結果

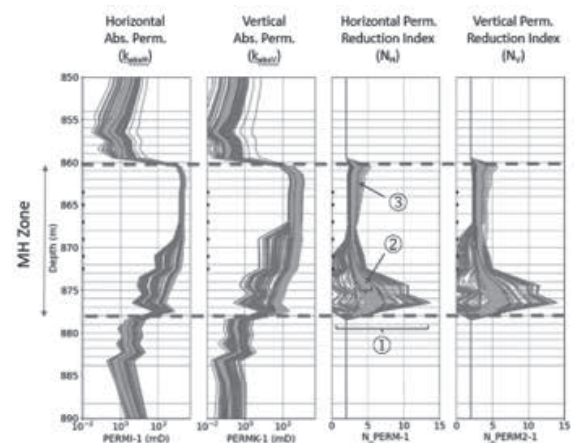


図5※ データ同化によって得られた浸透率

7. 地域社会への配慮

サステナブルな石油開発では、今まで触れてきたような「環境負荷の低減」、「生産プロセスのクリーン化と省エネルギー化」、「デジタル技術（DX）の活用」だけでなく地域社会への配慮も不可欠です。石油開発は雇用や経済成長をもたらす一方で、住民の生活や文化、健康、自然環境に大きな影響を及ぼす可能性があります。そのため、地域社会との信頼関係を築きながら事業を進めることが、長期的な持続可能性につながります。考慮すべき点を箇条書きにしてみると次のとおりとなるのではないのでしょうか。

- ①地域住民の権利と生活の尊重
- ②社会的信頼の構築
- ③地域経済への貢献
- ④環境と健康への配慮
- ⑤先住民族や文化への尊重

総じて、サステナブルな石油開発とは、経済的利益・環境保全・社会的責任の3つをバランスよく実現することを目指す取り組みです。地域社会への配慮は、その中核となる要素であり、住民との信頼関係を築くことで、事業の安定的な運営と地域の持続的な発展の両立を支える重要な役割を果たします。

8. あるべきサステナブルな石油開発

これまでみてきたように探鉱から開発、生産、輸送、精製に至る石油・ガス開発の上流から下流までを通じたあるべきサステナブルな石油開発は、

- ・低炭素化技術の提案力強化
- ・環境配慮型設計（Eco-Design）の標準化
- ・排出量データの可視化・報告システム構築
- ・デジタル技術の導入と運用支援
- ・環境・社会・ガバナンス（ESG）に基づくプロジェクト評価
- ・顧客への脱炭素ロードマップ提案

によって実現されるものと考えます。

9. おわりに：エネルギーの未来を支える技術パートナーとして

世界が脱炭素社会を目指すなかにおいても、人々の暮らしや経済活動を支えるエネルギー源として、石油・天然ガスの重要性がすぐに失われるわけではありません。今求められているのは、開発をただ止めることなく、「いかに環境負荷を低減し、社会的責任を果たしながら供給を維持・発展させるか」というサステナブルな形への変革です。

地下構造の解析から最新のDX技術、環境対策に至るまで、多様な課題が複雑に絡み合う現代の石油開発において、エンジニアリング・コンサルティング企業が果たすべき役割はかつてないほど高まっています。

JOEは、長年培ってきた経験と先端的技術（データ同化やデジタルツインなど）を結集し、資源開発にかかわるすべてのステークホルダーの皆さまとともに、持続可能なエネルギーの未来をひらくための役割を果たすべく、技術革新と提案力の向上に邁進してまいります。

※図3～5出所：JOGMEC, JOE and KKE (2022), Gas Production from Methane Hydrates and Application of Data Assimilation Technique, The International EnKF Workshop 2022, Balestrand, Norway, 2 June 2022.をもとに作成

（筆者略歴）

1972年に東京大学工学部資源開発工学科を卒業後、1974年に東京大学大学院工学系研究科修士課程（石油工学）を修了し、同年アラビア石油株式会社に入社。1976年に米国テキサス大学大学院博士課程へ進学し、1979年にPh.D. (Petroleum Engineering) を取得した。

帰国後はアラビア石油株式会社技術部に勤務し、その後、サウジアラビアのアラビア鉱業所において生産部および企画部の業務に従事した。また、日本本社技術部とサウジアラビア現地拠点との双方で要職を歴任し、石油・ガス田の開発、生産管理、事業計画立案などに携わった。

2000年からはアルカフジ共同操業機構（KJO）企画部にて事業運営に従事し、2005年にアラビア石油株式会社本社技術部へ復帰。2009年より日本オイルエンジニアリング株式会社（JOE）開発技術部に所属し、石油・天然ガス開発分野における技術開発およびプロジェクト推進に従事している。

