

## 石油・天然ガス資源の 探査・開発・生産に関する技術開発の動向

我が国のエネルギー供給見通しによれば、今後30年、石油および天然ガスが全エネルギー供給量の過半を占める見通しである。原油の可採年数は、確認可採埋蔵量から50年程度とされる。一方、世界の一次エネルギー消費は今後も拡大する。特に、中国、インドという巨大人口国の急速な経済成長が必要とする一次エネルギーは膨大であり、2030年にはこの2国で世界のエネルギー消費の1/4を占めるとされている。両国の化石資源、特に石油・天然ガス権益の確保競争は過熱しており、石油価格の高騰高止まりの一因となっている。

我が国は、エネルギー消費量を減少させ、かつ再生可能なエネルギーへのシフトを基本としているが、2030～2050年の化石資源から再生可能エネルギーへの移行期までの間、十分な化石資源の供給を確保する機動的なエネルギー政策が不可欠である。本稿では、石油資源の上流分野の主要技術を概観し、今後の技術開発の方向を探り、日本の状況を国際的に位置づけるとともに必要な政策を考察した。

現在、国際的には石油大企業および産油国営石油企業がオーナーとして、資源開発を行っている。それらを支える技術サービスにもまた、国際的なヒエラルギーが形成されている。地形航空調査に始まって、物理探査や化学探査が実施されているが、人工地震の反射波の解析から地下地層を推定し、石油や天然ガスの存在可能な地層を見出す地震探査も今後最も有効な技術と見なされる。多重波の解析とコンピューターシミュレーションおよびその図形表示が今後、さらに進歩する。こうした探査に基づいて、試掘された岩石の分析、場合によってはガスや油層を直接探知する等の地下構造・地下資源データの総合的解析によって、生産開発の可否が決定される。生産開始後の生産性の維持・向上のために、地下地層、ガス・油層、生産物の地下地上境界での変化を把握・予測し、解決手段を講ずる技術も進展してきている。

石油・天然ガス資源供給を確保するための政策は多面的でなければならない。我が国においても、オーナー企業が十分な資金力とプロジェクト経験を蓄え、技術サービス企業が高度な技術と実績を獲得し、我が国の高い工業技術力を背景に先端技術の導入を進めるための戦略が必要であろう。これら資源の探査（探鉱）・開発・生産の上流分野において、国際競争力のある高い技術、強力な産業、それらを支える人材を有するための政策が必要である。

今後、上流の要素技術としては、高度なセンサー、情報通信、情報解析、高度な掘削機械および材料、その高度な3次元制御、ロボット誘導による地下情報の取得、地下層の時間変化をもファクターとする4次元情報の解析・シミュレーション・グラフィックス技術の開発が進み、厳しい環境の地域や深海での開発が拡大していくであろう。こうした資源上流技術展開の最先端分野において、日本は強力な技術基盤を有している。この資源上流の最先端技術開発をさらに推進することによって、たしかな優位性が確保できると考えられる。ただしそのためには、各技術が経験と実績によって裏打ちされることが必要である。それだけでなく、開発業務が民族の対立や国際的な権益競争のなかでおこなわれることから、確かな知識・技術とともに、賢明さだけでなく、精神的なタフさをもあわせ持つ人材を養成する努力が必要である。

# 石油・天然ガス資源の 探査・開発・生産に関する技術開発の動向

持田 勲  
客員研究官

大平 竜也  
環境・エネルギーユニット

## 1 はじめに

我が国のエネルギー供給見通し(図表1)によれば、2010年には石油(LPGを含む)および天然ガスの供給は、原油換算で各々2.77～2.53億kl、9,100万～8,100万klで、全エネルギーの46～44%、15～14%に、2030年では、2.56億kl、1.08億kl、42%、18%に達する。両者は、全一次エネルギー供給量の過半を占めると見通されている。

図表2に示す世界の原油確認可採埋蔵量<sup>①②</sup>は、新規油田発見・開発と並んで、深部探査、重質原油の組込、さらに既存の油田からの回収率向上の見込みが立つことに

よって毎年増加していくものの、現行消費量が続けば可採年数は50年弱と見積もられている。地域的には、カナダ等の超重質原油の組み込みにより北米の埋蔵量が大幅に増加しているが、西欧、

アジア・大洋州、東欧・旧ソ連の各地域の可採年数<sup>③</sup>は20年以下とされている。

一方、世界の一次エネルギー消費は、2003年において原油換算で97.4億トンに達し、その61%が石

### ■用語説明■

①確認埋蔵量

地震探査、油層検層等を通して確認された埋蔵量。

②可採埋蔵量

その時点で経済的に回収可能な埋蔵量。価格の上昇や採掘法の進歩により、確認埋蔵量は増大する。経済の変化や価格上昇により、促進回収や厳しい条件の採掘が経済性を満たすようになり、新規な油田の発見がなくても確認埋蔵量が増加する。

③可採年数

$$\text{可採年数} = \frac{\text{可採埋蔵量}}{\text{生産量(年間)}}$$

図表1 一次エネルギー供給の見通し

単位：百万kl

|             | 1990年度 |     | 2002年度 |     | 2010年度 |     |        |     |       |       | 2030年度 |     |
|-------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|-------|-------|--------|-----|
|             | レファレンス |     | レファレンス |     | レファレンス |     | 現行対策推進 |     | 追加対策  |       | レファレンス |     |
| 一次エネルギー国内供給 | 512    |     | 576    |     | 602    |     | 585    |     | 569   |       | 607    |     |
| エネルギー別区分    | 実数     | 構成比 | 実数     | 構成比 | 実数     | 構成比 | 実数     | 構成比 | 実数    | 構成比   | 実数     | 構成比 |
| 石油          | 271    | 53% | 263    | 46% | 258    | 43% | 247    | 42% | 236程度 | 41%   | 233    | 38% |
| LPG         | 19     | 4%  | 19     | 3%  | 19     | 3%  | 19     | 3%  | 17程度  | 3%程度  | 23     | 4%  |
| 石炭          | 86     | 17% | 111    | 19% | 111    | 18% | 105    | 18% | 101程度 | 18%程度 | 106    | 17% |
| 天然ガス        | 53     | 10% | 80     | 14% | 91     | 15% | 86     | 15% | 81程度  | 14%程度 | 108    | 18% |
| 原子力         | 49     | 10% | 69     | 12% | 85     | 14% | 85     | 14% | 87程度  | 15%程度 | 90     | 15% |
| 水力          | 22     | 4%  | 19     | 3%  | 21     | 3%  | 21     | 4%  | 21程度  | 4%程度  | 20     | 3%  |
| 地熱          | 0      | 0%  | 1      | 0%  | 1      | 0%  | 1      | 0%  | 1程度   | 0%程度  | 1      | 0%  |
| 新エネルギー等     | 12     | 2%  | 14%    | 2%  | 16%    | 3%  | 22     | 4%  | 27程度  | 5%    | 27     | 4%  |

注1) 2003年度において、各種統計の統廃合等を踏まえ、1990年度以降のエネルギーバランス表を改定したため、最終エネルギー消費および一次エネルギー供給の実績値は、前回(2001年)の長期エネルギー需給見通しとは異なっている点に留意する必要がある。

注2) 前回(2001年)の長期エネルギー需給見通しにおける「一次エネルギー供給の推移と見通し」のエネルギー別区分のうち、「石油」にはLPGも含まれているが、今回は含まれていない。

注3) 「新エネルギー等」には、新しいエネルギーの他に炉頂圧発電等の廃棄エネルギー活用が含まれる。

文献<sup>1)</sup>(P.17)

油・天然ガスで占められている。さらに注目すべきは、図表3に示す国別の石油消費量の推移で、西欧、日本が微減しているのに対して、中国を含むアジアで大幅増大、アメリカやロシアでも微増している。この統計にインドは含まれていないが、インドも急速な経済成長に伴い、世界の石油・天然ガスの大消費国になっており、2003年の石油消費量は日量242万バレル、米中日に次ぐ第4位を、独露と争っている。2030年のインドのエネルギー需要は原油換算10億トンに達し、中国の25億トンと併せて世界のエネルギー需要の25%を占めると予想されている。このように、大人口国における急速な経済成長に伴う石油・天然ガス消費の急速かつ大幅な増加から、図表2の可採年数では楽観的になれない。

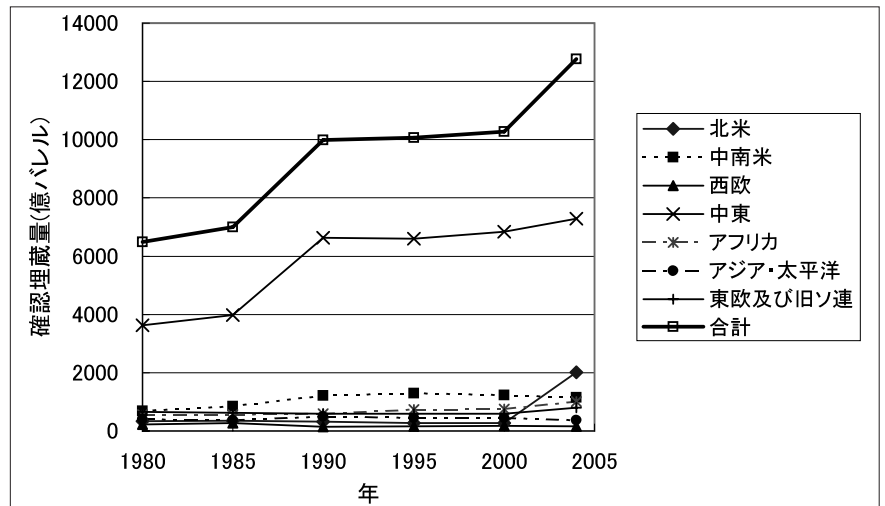
エネルギー消費量を減少させていくことが我が国の方針とはいえ、再生可能なエネルギーが価格と量の両面で供給可能になるまでの間、自国の経済成長、国民生活の維持に必要な一次エネルギー供給を確保することへの機動的な総合政策は不可欠であろう。このために、再生可能なエネルギー

の開発と並んで、化石資源を確保する調和のとれた政策を採用すべきであろう。原油・石油商品価格の高騰、石油・天然ガス資源の権益確保の過熱に対して、我が国としても周到かつ万全の準備が不可欠である。一次エネルギー供給の確保には一国の総合力が問われることは言うまでもないが、我が国においては技術力および産業力を中心とする戦略の有無が問われている。その中で、石油・天然ガス資源の探査（探鉱）、開発、生産における産業、技術と人材が国際的競争力を持つことにより、他の

資源国と協力しながら経済性安定性の高い資源を確保していくことが、重要な戦略のひとつである。

現在の石油・天然ガスの探査・開発・生産は、国際的に分業と連携によって行われている。産油国国策会社と世界の石油大企業（5章で述べるメジャーが中心で、これらに各国の国営あるいは大企業が増加している）がプロジェクトオーナーとして上下流業務を主導している。探査・開発・生産については、二大サービス企業（ハリバーパートナー<sup>④</sup>、シュランベルジェ<sup>⑤</sup>）を頂点として、各技術要素の専門

図表2 世界の原油確認可採埋蔵量の推移



OGJ誌（2004年末号）をもとに著者が作成

図表3 世界の国別石油消費量の推移

単位：1000バレル/日（%）

| 国・地域          | 1985           | 1990           | 1995           | 2000           | 2003           |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 日本            | 4,435 (7.6)    | 5,305 (8.1)    | 5,784 (8.4)    | 5,576 (7.4)    | 5,451 (7.0)    |
| 中国            | 1,810 (3.1)    | 2,255 (3.4)    | 3,390 (4.9)    | 4,985 (6.6)    | 5,982 (7.7)    |
| アジア（日本・中国を除く） | 3,535 (6.1)    | 5,360 (8.2)    | 8,014 (11.6)   | 9,406 (12.5)   | 10,174 (13.0)  |
| アメリカ          | 15,170 (26.0)  | 16,305 (24.9)  | 17,725 (25.6)  | 19,701 (26.2)  | 20,071 (25.7)  |
| ドイツ           | 2,670 (4.6)    | 2,710 (4.1)    | 2,882 (4.2)    | 2,763 (3.7)    | 2,664 (3.4)    |
| フランス          | 1,790 (3.1)    | 1,910 (3.2)    | 1,893 (2.7)    | 2,007 (2.7)    | 1,991 (2.5)    |
| イタリア          | 1,730 (3.0)    | 1,930 (2.9)    | 1,987 (2.9)    | 1,956 (2.6)    | 1,927 (2.5)    |
| イギリス          | 1,630 (2.8)    | 1,760 (2.7)    | 1,757 (2.5)    | 1,705 (2.3)    | 1,666 (2.1)    |
| ロシア           | 4,910 (8.4)    | 5,015 (7.7)    | 2,934 (4.2)    | 2,474 (3.3)    | 2,503 (3.2)    |
| 中東            | 2,980 (5.1)    | 3,395 (5.2)    | 4,028 (5.8)    | 4,320 (5.7)    | 4,480 (5.7)    |
| その他           | 17,765 (30.4)  | 19,535 (29.8)  | 18,766 (27.1)  | 20,361 (27.1)  | 21,203 (27.1)  |
| 世界計           | 58,425 (100.0) | 65,480 (100.0) | 69,160 (100.0) | 75,254 (100.0) | 78,112 (100.0) |

出典：BP「世界エネルギー統計」2004年度版、文献<sup>1)</sup> (P.20)



企業、土木建設企業、およびローカルサービスの各企業が、プロジェクトのためにコントラクターチームを編成し、業務に当るのが通例とされている。つまり、資源の権益を獲得し、プロジェクトを主導するオーナー企業、権益の一部を期待するプロジェクト参加企業と、高度の上流技術をもってプロジェクトの推進に協力するサービス企業に分かれる。前者が資源の獲得、開発、生産の経済性を的確に判断し、サービス会社の知識を組織化する。後者は信頼性が高い上流技術の開発を受けて、多数のオーナー企業の主導のもとに種々の開発サービスを行う。この際、技術の実証・実用は、各々プロジェクトのなかで完成されていなければならない。同時に、オーナーが経済性の高い権益を獲得するには、国際的なプロジェクト経験と並んで、総合的な高度の上流技術の裏付けとサービス会社の有効的な組織化が不可欠とされている。

最近の国際情勢から、我が国の

■用語説明■

④ Halliburton

1919年、米テキサスで設立。従業員85,000人、100カ国以上で活動。現在2社制。ESG：石油・天然ガス、上流のサービス、工業、建設。KBP：石油・天然ガス、中下流のサービス、工業、建設。高度MWD（Measurement While Drilling）、LWD（Logging While Drilling）技術／地下実写、生産、災害防止。第一次湾岸戦争（1991年）クウェイトにおける320の油田火災の消火が著名（ホームページより抜粋）。

⑤ Schlumberger

1912年、仏パリ設立。電気検層専門企業。1940年、米テキサスへ移転。従業員58,000人、80カ国で活動。LWDを最初に導入、Wireline measurementで著名。ドリリング、物理探査、検層を武器とする企業。

商社および石油開発・精製・エンジニアリング等の企業の海外プロジェクトへの入札や参加は拡大しているものの、主導性、規模、経済性の追求の点では、メジャーあるいは新興国の活動と比較すれば決して強力なものとは言えない。我が国はその優れた工業力を活かして高い上流技術を開発し、実用化するという戦略も必要であろう。新興産業国・大需要国が、国営の巨大オーナー会社を活躍させると同時に上流技術を獲得し、新しい開発に実際に適用していくと

いう例が増加していることに留意しなければならない。

こうした背景から、本レポートでは資源技術において上流部門と言われる探査・開発・生産の技術と開発状況を概観し、日本の位置付けを明確にし、近い将来への準備を提言したい。現時点で、これらの技術・技術開発をみる時、石油メジャーを抱える欧米先進国、技術的に成長が著しい資源新興国、大資源国あるいは大消費国を、各々念頭におくことが必要である。

## 2 探査・開発・生産技術の概観

石油・天然ガス事業の開始から生産・廃坑に至るまでの概略を、フローとして図表4に示した。探査、試掘、開発、生産、廃坑の各工程が、長い歳月に亘って進められる。各段階で各種の技術が平行的に進められ、その各々の評価を踏まえて逐次、次の投資額の大きなステップに進むという息の長い業務である。

工程ごとに図表4にあるような多様な要素技術が開発、実証、採用および実施されている。いずれの技術も開発地域の地質状況、石油やガスの埋蔵状況、マーケットとの距離に適合させて操作され、かつ実際に有効性が試され、改良を重ねて、最終的に油田ごとに最

図表4 石油・天然ガス事業フロー

|    | 年 0   | 3～5年   | 6～10年                       |                       |        |
|----|---|--|-----------------------------|-----------------------|--------|
| 工程 | 探査  | 試掘   | 開発                          | 生産                    | 廃棄     |
| 技術 | 広域地質調査<br>リモートセンシング<br>地質航空調査<br>物理探査<br>地質権の申請・交渉<br>対象地域の事前調査<br>地質探査<br>地震探査<br>各種探査データの総合解析 | 試掘井掘削<br>根層・坑井データの解析<br>試掘井の位置選定<br>総合評価・採算性の検討・地質権の放棄 | 油田開発計画<br>生産設備の設置<br>開発井の掘削 | 生産・販売                 | 廃坑施設撤去 |
| 費用 | 探査投資  | 試掘投資   | 開発投資                        | 操業経費<br>生産能力拡張のための再投資 | 廃坑費用   |

著者が作成

適な技術として完成される。従って、技術的な優位性を保つには、油田開発に対する長い経験と実績の裏付けが必要である。同時に、先端技術を常に導入していくことも、優位性確保に不可欠である。現時点での実証・実用技術の多くは、前記の2社によって運用されているので、我が国で開発された技術もそこで採用されて商用となる場合が多い。長期的にはこの国際システムの変革に挑戦し、自立していくことも視野に入れる必要がある。現に新興産油国では、その方向への努力が読みとれる。

2 - 1

探 鋳

図表5に探鋳の代表的技術をまとめた。各々の技術の特長を生かした探鋳方法で、試掘する場所を特定する。特に場所決定の最終段階の技術に位置する人工地震を使った地震探査という手法は重要であり、ハードおよびソフトの技術の改良・進歩が図られている。

図表5 探鋳技術の概略

|                 |   |
|-----------------|---|
| 事前調査            | 文献調査、購入資料による地質的・経済的立地調査   |
| 資源探査            | 探査衛星を利用したりリモートセンシングにより地表状況から堆積含地を見出す  |
| 物理探査<br>(重力、磁力) | 広範囲の地域の重力や磁力を測定して、地下地質構造を推定し、周囲の重力や磁力の異なる堆積含地の概略を把握   |
| 地震探査            | 人工地震を起して、発射された波が地層界面で反射された反射波を地震計で捉え、地下の地層境界面の深度や形状を調べる。海上では圧縮空気を、陸上では火薬の爆発や鉄板の振動を地震源とする。観測された反射波は、デジタル化し、電子計算機処理する |

文献<sup>2)</sup>をもとに著者が作成

図表6 掘削機械の機構

|         |   |
|---------|---|
| 掘削機の機構  | 掘管やケーシングパイプを上下する機構  |
| 回転機構    | ロータリーテーブルを通して、掘管およびビットを回転する機構                                   |
| 泥水循環機構  | 地下の圧力に対抗する流体封止、石油やガスの暴噴を防止すると同時に、井壁の崩壊を防止する。泥水の循環により、掘層を地上に運び出す |
| 安全・防噴機構 | 石油やガスの突噴をもたらず油井内の圧力を密封する機構                                      |

文献<sup>2)</sup>をもとに著者が作成

2 - 2

掘 削

現在、ロータリー式掘削機が試掘や生産坑の掘削に使用されている。図表6にその機構をまとめた。掘削機の先端には表紙カラー図1段目に示すようにビットが設置されており、ビットの掘削方向や速度を地層に合わせる最適化制御が大切であると同時に、ビットの材料ならびに構造も、掘削の精度、効率、寿命にとって重要である。ビットは複雑な構造をしており、材料開発技術と精密な機械加工が必要となる。

掘削は、泥水を掘管に沿って循環させる。泥水は水、ベントナイト、粘性調節剤、濾過性調節剤、潤滑剤、イオン調節剤、PH調節剤、および密度調節剤（バライト）で構成された水スラリーである。その機能は掘屑を地表に運び上げ、地下の情報を伝達する。これによって物理探層が可能になる。この際、汚水は地層の崩壊を防ぎ、地

層内の流体の噴出を防ぎ、ビットを冷却し、ドリルシステムを潤滑する等の役割を果たす。従って、泥水の発達によって高深度掘削が可能になったと言える程重要な役割を果たしている。陸上掘削、海上プラットフォームに加えて、ビットと地上を結ぶ管も、その作動、情報伝達、強度等を含めた材料・構造が高度技術の結実である。要素技術としては掘削坑壁の安定化等、土木技術も含まれている。

表紙カラー図2段目に主な海洋石油掘削リグの構造を示した。図はセミサブマージブル（半潜水型）リグである。浮体面積を相対的に小さくして波による上下部を少なくして、高波時でも安定して掘削ができる。錨と係留索で位置を保持している。

表紙カラー図3段目に示すような海上掘削装置も実用化されている。設置場所の地形、海洋の状況、気象や環境に合わせて、コストパフォーマンスの高い装置が選ばれている。大型海上中海底構造物として、海洋土木の華と言える。

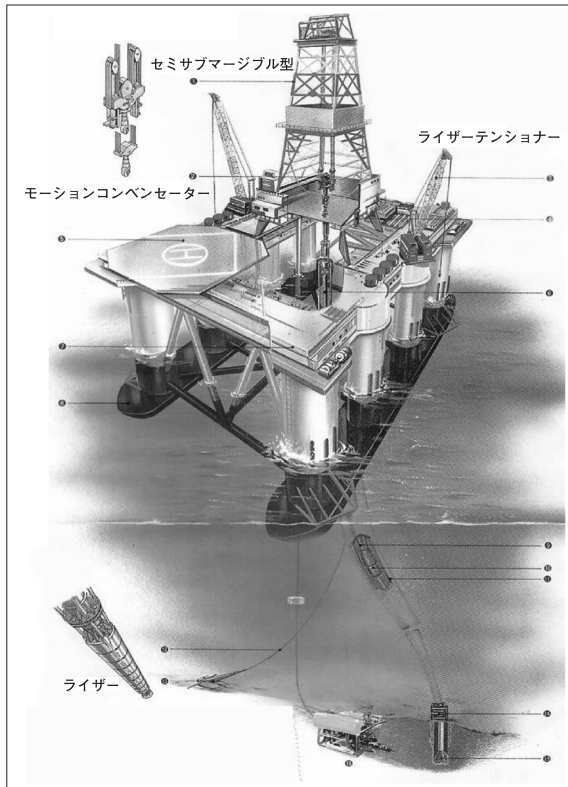
【表紙カラー図1段目】掘削ビットの構造



文献<sup>3)</sup> (P.20)

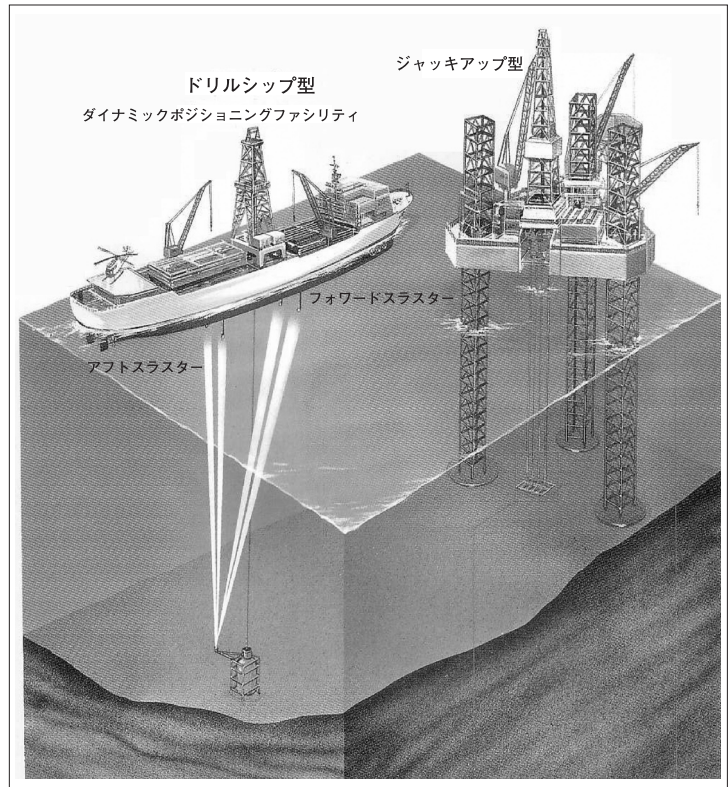


【表紙カラー図2段目】 主な海洋石油掘削リグ



文献<sup>3)</sup> (P. 24)

【表紙カラー図3段目】 いろいろな掘削装置



文献<sup>3)</sup> (P. 25)

図表7 油層評価法

| 泥水検層                            | ワイヤーライン検層                     |
|---------------------------------|-------------------------------|
| 油層・ガス層の検知                       | 地層の深度・岩相の調査                   |
| コア・カッティングス                      | 地質構造調査<br>(地層の傾斜)             |
| 油層の検知                           | 貯留岩の能力調査<br>(孔隙率・油飽和率・浸透性)    |
| 岩相調査<br>(砂岩・泥岩・火山岩…?)           | 貯留層の試油・試ガス                    |
| 化石調査<br>(地質時代の決定)<br>(堆積環境の決定)  | 流体の種類<br>(油・ガス・水?)            |
| 貯留岩の能力調査<br>(孔隙率・浸透率・油飽和率)      | 生産能力調査<br>(流体圧力・浸透率・<br>仕上障害) |
| 根源岩の能力調査<br>(ケロジェンの量・質・<br>熟成度) | 採取流体の組成分析                     |

文献<sup>3)</sup> (P. 28, 29)

2 - 3

検層技術

試掘によって坑内の種々の検層が可能になり、油層・ガス層の存在が直接あるいは予知できる。検層技術を図表7にまとめた。図表8に各検層技術の内容を要約した。泥水、コア、ワイヤーライン検層が実施されており、各々の検層技術を得意とする専門企業がある。貯留層に当れば、試油あるいは試ガスも実施され、流体の種類・濃度に加えて、流体圧力、浸透率、流速から生産能力も推定可能になる。

2 - 4

生産

地下から回収した石油や天然ガスを油とガスに分離し、さらに水分・塩分を除去して製品にな

る。貯留層まで掘削した生産井へ原油あるいはガスを流入させ、油井鋼管を通して地上の通称クリ

スマスツリーと呼ばれる坑口制御装置を経て、分離装置および貯油タンクに送り込まれる。坑口制御

はバルブと流量制御のための温度計および圧力計チョークで構成されている。

生産井には自噴井、ポンプ採油井、ガスリフト採油井がある。自噴井は貯油層のガスや水圧によって油が自然に押し出される井である。生産とともにこの圧力が低下するので、原油をポンプで汲み上げるか、ガスの装入により油の比重を軽くして自噴を助けるなど、汲み上げやすくする工夫をして採油する。

図表 8 検層と試油

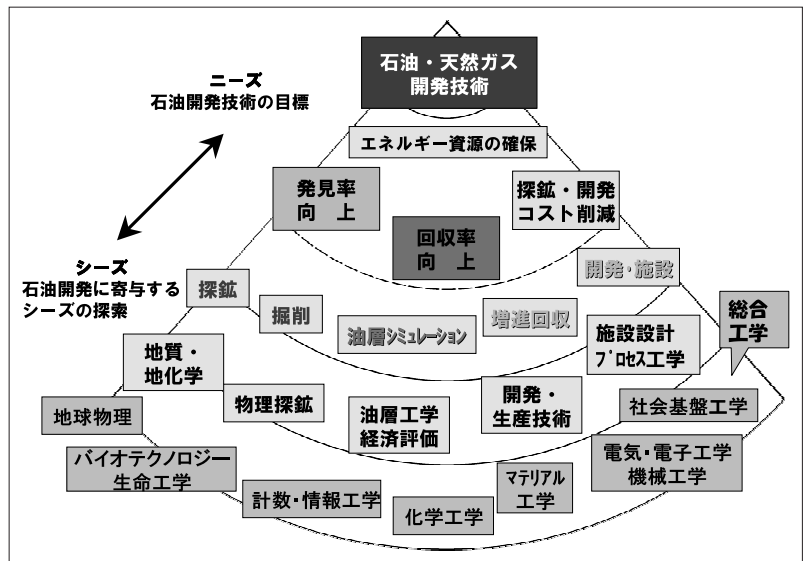
|                  |  |
|------------------|--|
| 泥水検層             | 循環泥水で坑底から地上へ運び上げられた掘屑を検査し、油やガスを化学的に検出する。                         |
| コア検層             | 地層の岩石・含有物を採取し、化学分析する。  |
| ワイヤーライン検層        | 掘削完了後、ワイヤーラインを降ろして、地層の物理的性質を連続的に測定する。電気検層放射能により油層の孔隙率や油の飽和率を求める。 |
| ドリルステム検層         | 上記の検層で有望と判定した地層に対して、ゴムパッカーで遮断し、油やガスを地上に回収する。                     |
| 試掘井における油・ガス・水の回収 | 試掘井ケーシング内の圧力を下げて、油、ガス、水の噴出を誘起して地上に回収し、坑底の圧力や生産能力を把握する。           |

著者が作成

### 3 探鉱・開発・生産に関する技術の進歩

2章で探鉱・開発・生産の技術の概略をみたが、今後展開する技術進歩の方向を考えれば、そのニーズとシーズを結ぶ工学とその基盤科学を俯瞰することが有意義である。図表9は藤田教授（芝浦工業大学）による技術鳥瞰図である。ここに示される科学と技術の総合性と同時に、先端性および将来の方向性を的確に把握した発想、実証、実用、商用改善の検証のサイクルを回し続けることが必要である。

図表 9 石油天然ガス開発技術鳥瞰図



文献<sup>4)</sup>より

3 - 1

#### 探鉱技術の最新技術

図表 10 は探鉱技術の進展を示す。地質学等の科学に立脚する探鉱技術は 20 世紀初頭に始まり、1930 年頃から地球物理学を利用する地下構造推定が実施されるようになってきている。最近の電子計算機的能力向上、膨大なデータの蓄積、解析システムおよび数値モデルシミュレーションを利用すれば、地質ならびに油層が精密に描かれ、資源生産の将来予測も可能になりつつある。

2 - 1 で注目した地震探査については、震源と受信機の配置を密

にして、位相の異なる多重反射波の計測から、地層を 3 次元表示する方法が採用されている。精密測定により、地層に挟まれた密度差の大きなガス層の存在も推定できるようになっている。

3 - 2

#### 掘削の先端技術

地底深部の資源回収を実現する高深度掘削については、1985 年、旧ソ連が北極圏で 12,000m

深度を記録し、現在は、15,000m を目標に高深度掘削技術が進められている。

地上障害を避けるため、あるいは垂直坑から横方向に拡がった油層から資源を回収するため、傾斜坑あるいは長偏距水平坑が開発・実施されている。一本の垂直坑に対して複数水平坑をもつマルチラテラル坑法もすでに実用され、資源回収の経済性を高めている。

こうした掘削には、地底位置を高精度に決定した正確な掘削制御

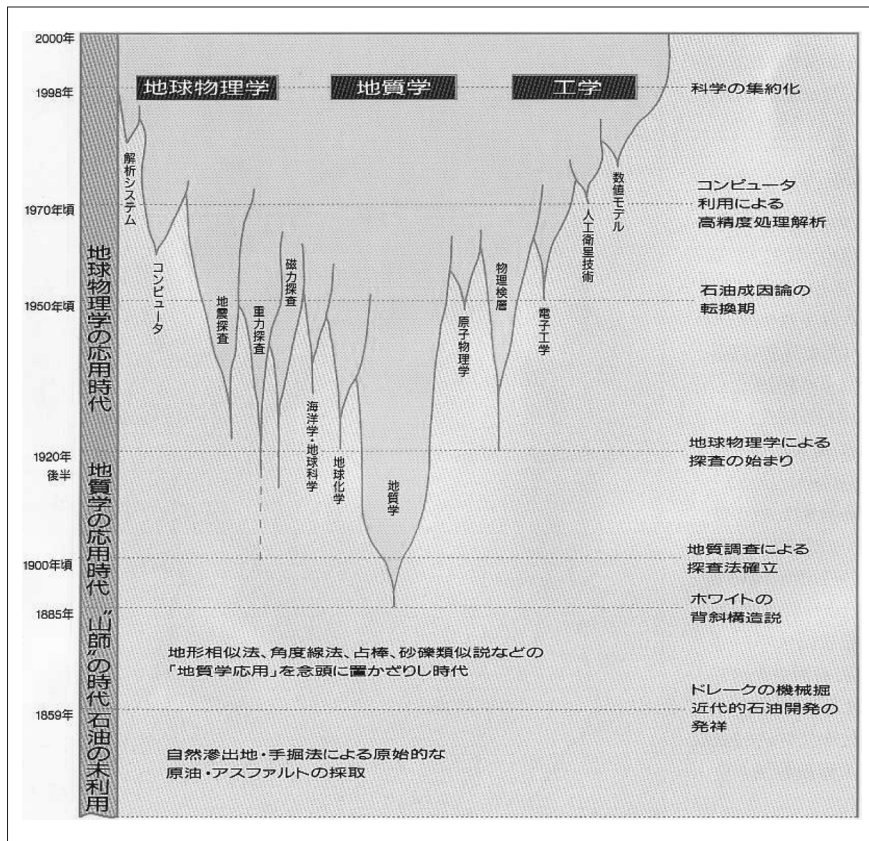


が要求される。このため、掘削先端の坑底情報を採取し、地上の制御システムにフィードバックするMWDが実用化され、衛星情報を用いた位置決定、掘削端での迅速な情報収集、制御プログラム、対比すべきデータベース自動制御等、開発は止まることなく進化している。

さらに、掘削先端におけるビット荷重、トルク等の掘削パラメータ取得に加えて、センサーを設置して比抵抗や $\gamma$ 線吸収等の地質情報を取得して、地上に送信するシステムも開発され、掘削と検層を同時に実行するLWDと呼ばれる方法も実用化されている。

多量の情報の伝送速度を向上する方法も開発課題であるが、泥水を媒体とするマッドパルス、マッドサイレンおよび管伝送の方式やシステムの開発が進められている。

図表 10 探鉱技術のあゆみ



文献<sup>3)</sup> (P.9)

3 - 3

油層評価技術の進展

坑井から得られる岩石、油、ガス、地層水は、これらの流体の圧力や移動のデータを取得、分析、解析し、これに他の地質探査、作井、検層、油層の情報を併せて、油田の姿・状況を再現する数値モデルの構築、さらに予測シミュレーションがなされ、これらは先端油層評価法として発展している。油層内での液体の流動も再現し、外力（例えば水や炭酸ガスを地上から送入した時の流動の変化）もシミュレーションされて、回収率の向上を予測している。

油層から採取された試料について、地底の状況下での物性を推定する地底油層条件下での物性計測も実施されている。こうした解析を鉦区の複数の坑井について集積すれば、地層・油層の地域的広がりを示すグラフィック表示ができる。

生産作業の経過中、3次元地震探査や油層評価を繰り返し、時間変化も合わせて捉えれば、いわゆる4次元モニタリングやシミュレーションが可能になる。その延長上で、油層の生産性や埋蔵量についての将来予測の精度が飛躍的に向上すると考えられる。

3 - 4

開発極限の追求

資源開発の極限はマントルにも達する超高深度へ、また、海洋開発の極限は2,000 mを超える大水深へ、さらに鉦区は北極圏にまで拡大している。厳しい自然条件下での探査や開発に始まって、生産・輸送も厳しい条件下で継続しなければならない。その際には環境の保全も大切な課題となっている。自然環境に適合した探査・開発・生産技術およびそこでの材料・システム等のすべてを技術開発することが今後必要になる。

3 - 5

高次回収 (Enhanced Oil Recovery : EOR) 技術

自然の圧力あるいはポンプで回収できる石油の量（一次回収量）は、通常油層内の資源の20～30%である。さらに回収を継続するためには、人為的に水（水蒸気）やガス（ガス圧入）を圧入し、油層の圧力をあげるが、こうした二次回収で回収率は30～40%に増加する。さらに、水蒸気や界面活性剤を送入して油の粘度を低下させたり、炭酸ガスを送入して岩石から油をはがしたり、薬剤や溶剤で希釈したりすることで、回収率を40～60%に向上させている。さらに、油層で微生物を繁殖させて石油成分を分解したり、あるいは地下でガス化反応を進めて、回収率を向上させる試みもある。

現在こうした回収法の向上が、



可採埋蔵量が増加する大きな要因となっている。

生産の経時に伴う油成分の変化に加えて、地層障害による生産の低下や停止もありうるが、この場合、地層障害を水圧や爆発で取り除く技術も開発されている。断層を含む複雑地層においては、油層が分断されていることから、このような技術も回収率向上の重要な手段である。

3 - 6

### 注目される国産技術

㈱石油天然ガス金属鉱物資源機構 (JOGMEC) は、次のような技術を開発し、国内外の開発に適用して実証を目指している。油層解析については、ハリバートン社、シュランベルジュ社と共同して商業化を目指している。

#### (1) 地下構造イメージング

断層、亀裂、岩塩ドーム等を伴う急傾斜で複雑な地下地質構造を正確に描写することは、地層探査の通常の解析では困難とされてきた。しかし、地震探査の解析プログラムを複数組み合わせることで、複雑な地下地質構造を描写するプログラムを開示している。こ

の技術は、小規模ワークステーションでの並列計算により地下構造を解析する技術であり、数多くのサイトにリンクされ、その効用が確認されつつある。

#### (2) 検層技術

検層技術では、採取したコア岩石の分析技術の向上が期待されている。X線 CT スキャナーを用いて岩石コア内の油水の流動状況を観察し、岩石内部における流体の動的挙動が解析される。この技術によって、中東油田での水攻法回収向上における水滞留の状況が解明された。こうした In-situ 解析は、油層の現状を精度よく測定できる重要な手法である。今後は、岩石の化学的・物理的構造の対比と、鉱区全体のモデル化が進んでいくと想像される。

坑井壁近傍の地層とその中の流体の性状を計測する検層の手段として、中性子照射により水素原子が $\gamma$ 線を放出することを利用して、水素原子を検知する方法があり、この技術によって、水の存在が検知できる。パルス中性子源としては放射性物質が使われてきたが、電氣的に中性子を発生するパルス中性子源が開発されて、LWD ツールのひとつに仕上げら

れた。現在シュランベルジュ社と商業化に向けて実証試験を進めている。

#### (3) 掘削と掘削ツール

5,000m より深く存在する浸透性の低い岩相において多段水圧破碎によりガス層を解放し、この結果天然ガス生産性を6倍に向上でき、地下における正確・精密な作業実施として注目されている。マルチラテラル水平坑への再アクセスや水平掘削においては、あらゆる方向を高精度に制御できる駆動システムを持つ掘削装置 (マルチラテラルタイバックおよび遠隔的方向制御システム) を開発し、スペリーサン社およびハリバートン社と各々共同して実証し、商業化される見込みである。

また、硫化水素や炭酸ガス濃度の高い腐蝕性ガスが多く産出されるようになっているが、これに対し、耐久性の高い材料を選定し、さらに低価格化することが求められている。これには、長時間の実証的な試験が必要とされているが、含水率、温度、圧力等を再現した実証条件下での選定試験を実施し、コスト削減を追求している。

## 4 近未来の資源開発

従来、経済的あるいは技術的に採掘が難しいと思われてきた地域での石油や天然ガスも、現在の強い需要や将来の供給懸念から注目され、一部は既に採取に向けた開発が実現され、また、将来に向けての準備がなされている。

4 - 1

### 超重質原油の利用技術

現時点では、留出油成分量が小さい超重質原油も国際マーケット

に上市されることが現実味を帯びてきている。アラビアンヘビー、クウェイトヘビー、マリム原油、オリノコータル、タールサンドビチュメン等が、そうした超重質原油である。産油国における価値の増加を目指して、これらの安定した生産と適切な軽質化も技術開発対象となっている。このうちタールサンドビチュメンは、シリカと一緒に露天掘りで採取され、油分を抽出および回収し、蒸留残油からコーカー熱分解によって留出油

を得て、これに軽度の水素化処理を施して、合成原油として上市されている。今後、埋蔵深度の増加によって露天堀が難しくなれば、地下での水蒸気圧入、部分燃焼、地下ガス化等の新しい回収法も取り入れる必要が出てくる。一方、現在の先進国マーケット上市には高品質精製技術の開発も必要である。こうしたことから、上下流一体になった回収と精製を一元的に開発することが必要であり、このような一元的開発は今後の日本の

取り組み課題のひとつである。国際的参加の増加がすでに始まっているが、現在は産油国との将来を見通した共同開発を指向できる最後のチャンスであろう。

4 - 2

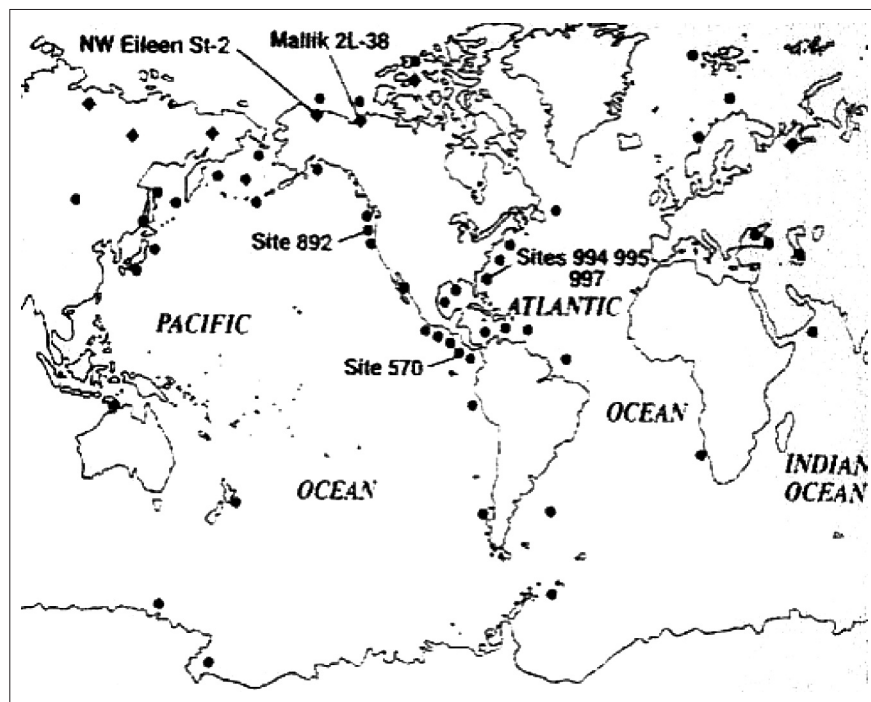
中小ガス田の開発にともなう技術開発

天然ガスの長距離輸送は、パイプラインやLNG輸送に拠っている。いずれにしても、インフラの整備に巨額の先行投資が必要であ

る。生産量の限定的な中小ガス田は産地消費以外の利用が難しいため、開発が見送られているが、経済的な長距離輸送の手段が開発されれば、商業化できる。これらを可能にする技術としては、

- ①高密度の吸着材に吸蔵させた輸送、あるいはメタンハイドレートスラリーにして輸送
  - ②天然ガスからのジメチルエーテル(DME)、炭化水素など低圧下で液化する化合物へ転換して輸送
- などが挙げられる。

図表 11 世界のメタンハイドレートの賦存地域



文献<sup>5)</sup>(P.31)、Kvenbolden 1999より

4 - 3

メタンハイドレートへの注目について

メタンガスが一定の割合で水と混合してシャーベット状になっているものがメタンハイドレートであり、大水深海底の地層に大量に埋蔵されていることが確認されている。日本近海を含む世界各地の深海に大量に賦存することが認められているため、将来の天然ガス資源として認識されている。図表11は、世界の深海底でメタンハイドレートの存在が認められる海域を示した。

しかし、氷を融解せずにメタンハイドレートからメタンのみを低エネルギー消費高効率回収できる技術はまだ開発されていない。また、深海や極地に多量存在するメタンハイドレートの採取は事実上難しい。さらに、メタンの大気放出は、環境への影響が極めて大きいので、回収にあたっては環境負荷を増加させない細心の注意が必要である。科学的・経済的に、冷徹な視点で、メタンハイドレートの回収の基礎基盤研究にあたるべきで、夢の資源といったようないたずらな幻想は排除しなければならない。

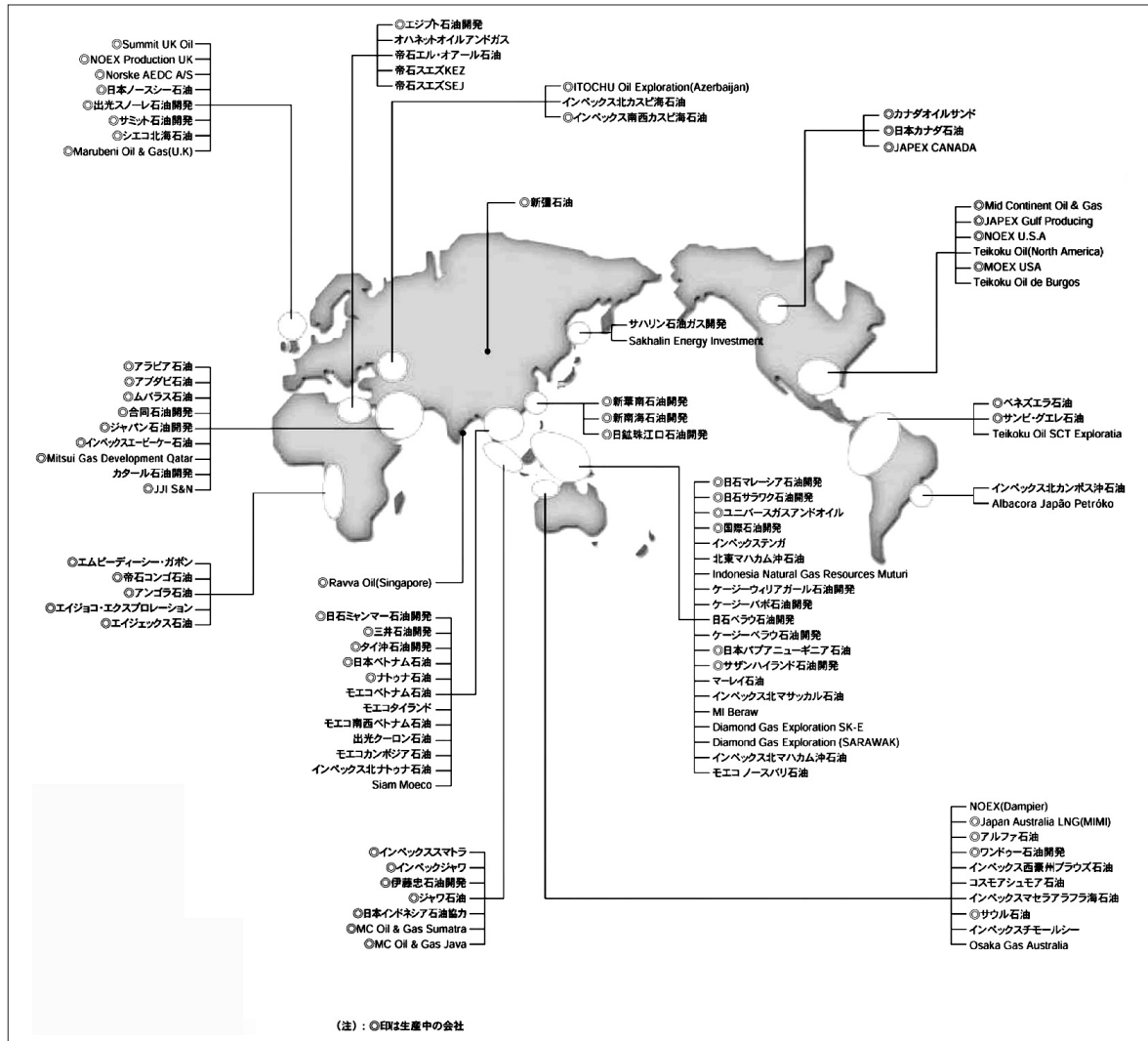
5 世界の資源開発状況と日本の取り組み

世界の資源開発は、依然、エクソンモービル(米)、シェル(和蘭)、BP(英)、トタル(仏)、コノコ・フィリップス(米)、シェブロン(米)のメジャーおよび準メジャーと呼ばれる各企業が主導的である。最近、投資額が伸び悩んでいると言われるが、それでも40~100億ドル(2004年)に達する各社の探鉱開発費は圧倒的である。

米国は、エネルギー独立計画のもと、エネルギー省(DOE)も上流技術開発にも力を入れており、1500m以上の水深度開発を進める方針を打出し、同時に開発の基礎基盤となる研究にも多額の資金支援を決定している。技術開発項目としては、砂岩、石炭層からの天然ガス回収、5,000m以深の大深度ガス回収、環境負荷の小さいボー

リング等が例示されている。一方、中国石油天然気株式会社は80億ドルに達する巨額の投資をもって国内外で開発を進めており、前記メジャーの一角を占める勢いである。日本海域、ベトナムの海底開発、カザフスタン、アルジェリア、ナイジェリア、ブラジル等の海外開発にも積極的で、技術習得から自主技術開発への移

図表 12 わが国の石油開発会社の主な海外石油開発プロジェクト



文献<sup>1)</sup> (P. 28)

行期にある。さらに、これに中国石油化学株式会社、中国海洋石油開発株式会社の2社が追随している。2004年、中国科学技術部の資源環境分野重要課題20のなかには、深海での石油ガス探査およびそのキー技術、ガス・液体・石炭資源地質の各探査理論とそれらの技術、海洋での石油ガス資源開発の安全保障技術が挙げられ、国家としてこうした研究に注力する方針が伺える。

インドも急速な経済成長に伴い、石油・天然ガスの需要が急速拡大しており、国営インド石油天然ガス会社、国営インド石油およびリライアンス・インダストリの国営および市営企業が、自国周辺の天然ガス開発および世界各地で

権益を取得し、油田開発も積極的に進めている。現時点では提携合弁の事業が中心と見られるが、鉄鋼産業の急速な成長の例をみると、上流の技術習得や自主技術開発およびその実用化もそう遅くない時期に開始するであろう。中国との厳しい競争が、すでに予見されている。

タイ国営石油ガス公社、シンガポールのゲッペルコーポレーション、インドネシアのプミ・リソース・メデュ・エナジー、マレーシアのペトロナス等の国営石油企業や石油開発技術企業の成長も目覚ましい。これらの企業規模は日本の新日本石油(株)や国際石油開発(株)に匹敵する迄になっており、海外展開を加速している。

ブラジルは、南米第2の産油国として、年5億バレルの原油生産を突破している。国営会社ペトロブラスは同国の上流部門を独占して、リオデジャネイロ沖の水深1,400mに達する大水深海底開発を行っている。生産コストは平均\$10~14/バレルと安くないが、すでに自主技術による開発・生産体制を構築していると言われている。2005年には自給率100%を越え、輸出国になる見込みで、上下流の技術開発も加速されよう。

我が国も国の指導のもと、技術力と大きな市場を武器に、上流部門での存在価値を高め、図表12のように世界各地で原油獲得を目指してきた。地下深部の生産技術や先端技術の応用など技術的な



強みもあるが、世界で大油田開発オペレーターとしての実績は少なく、産油国政府との結びつきも強くないことから、メジャーの巨大さと新興国の勢いを前に、劣勢感が拭えない。このような状況下で力を発揮できるような人材の不足も懸念されている。こうした情勢のなか、JOGMECが委託した(財)石油開発情報センター：石油開発技術戦略検討委員会（委員長、藤田和男 東京大学名誉教授）は、図表13のような石油ガス開発技術の開発目標を掲げている。残念ながら、これまでのところ、この目標に向かって強力な推進が施策されたとは聞いていない。今後、この分野の科学・技術と、その実用・商用を実行する産業のあり方について議論が深まることを期待したい。

図表13 石油・ガス開発技術の開発目標

| テーマ名               | 個別課題名  |
|--------------------|--|
| 1. 探鉱成功率の向上        | ①石油情報の統合化<br>②地質モデルの高度化<br>③地質探査技術の高精度化<br>④物理探査技術の高精度化<br>⑤炭化水素直接探知法の開発 |
| 2. 既発見油・ガス田の回収率の向上 | ①高精度油層評価技術<br>②生産性向上技術<br>③増進回収技術  |
| 3. コスト削減           | ①三次元自沈探鉱コストの軽減<br>②掘削コストの軽減<br>③生産コストの軽減<br>④新しい掘削・生産システムの開発             |
| 4. ガスの有効利用         | ①LNGコストおよび天然ガスコストの低減<br>②ガス液体燃料化技術                                       |
| 5. 非在来型石油資源の開発     | ①オイルシェール開発技術<br>②超重質油開発技術<br>③メタンハイドレート探鉱開発技術<br>④水溶性天然ガス最適開発技術          |
| 6. 地球環境保全          | ①環境負荷低減技術<br>②環境影響評価技術<br>③流出油対応技術                                       |

石油開発情報センター石油開発技術戦略検討委員会報告（JOGMEC委託）より

## 6 提言

我が国においては、石油・天然ガスの上流部門における産業と技術において、米欧メジャーに比肩することは不可能であるとの悲観論が依然として支配的である。新興国の目覚ましい成長、技術の内製化を見るにつけても、手をこまねく以外に方法がないとの自嘲もある。しかし、我が国が今後も科学技術立国を国是として、21世紀前半を生き抜くためには、石油・天然ガスの確保と技術維持は不可欠である。石油・天然ガス資源の上下流において、世界に発信できる技術と、それを支える科学を力強く展開していくべきであるし、同時に、それらを駆使できる産業の強力化も必須である。ここでは、日本人の叡知と胆力が問われている。エネルギー総合戦略の対象として石油・天然ガスを捉えるうえで、下記の3点を提言したい。

### (1)産業力の強化

現在、石油精製・生産の分野の企業の再編を通して、上下流一帯化した一定規模の産業が形成される気運が生まれている。日本の社会において、その重要性が認知され、世界規模の影響をもつ資本、技術、交渉力の蓄積を目指す必要がある。この際、探査、開発、生産技術の実証および実用化を通して、競争力のある上流技術を世界に発信できる強力な石油産業構造の構築を、国とともにその投資家としての国民が真剣に考えていただきたい。

### (2)上流技術の継続的進歩の必要性

日本の幅広い先端科学と技術を背景に、総合科学として上流技術開発を展開する必要がある。特に、高深度水深部開発の技術に取り組むべきである。また、超重質原油も開発の重点的対象になろう。

ロボット、通信、制御、センシング情報処理、高精度高耐久性の機械・材料に関する技術開発を積極的に進める必要があり、これらが、石油資源の遠隔探知技術に発展していこう。

さらに、上流技術と関連した地球物理、地球化学、界面化学、化学工学の強化と、それらの実用技術への積極的貢献を進め、探鉱・開発・生産の技術にこれらの新しい科学を導入していく必要がある。最近建造された深海掘削船ちきゅうには世界に誇る最新の探査船であり、人類未踏のマントル掘削する研究と融合して、日本近海大水深や大深度地下の地質構造の徹底した調査を資源探査に結びつける努力を期待する。

### (3)人材の養成・確保

石油・天然ガスの資源の存在する世界の場所で活躍できる人材の

養成は、日本にとって緊急の課題である。国内外の企業・大学研究機関でも、科学技術の知識と開発力およびビジネスマインドを持って世界中の多様な民族と付き合える日本の人材が必要である。

このために、国内の大学・企業が連携し、理工学の幅広い素養と創造性を持った活力のある大学卒業生を100人／年程度の規模で、国際的に評価される人材へ養成するプログラムが必要である。経験と実績によって裏打ちされた最先端技術だけでなく、民族の対立や国際的な権益競争を乗り越えて開発業務を行い、世界に挑戦していく気概を持つようなタフな人材の養成を発想するべきである。その際には、世界的にすでに評価を確立している諸外国の大学、研究機関や企業の助けを必要とする現状を認識しなければならない。この

分野においては、急速発展国さらに発展途上国に恩恵を与えるかの思い上がりは捨て、我が国が世界に学ぶ姿勢も必要である。そうした人材の受皿が国内企業にあることが望ましいが、世界で活躍できる広い視野をもった人材の養成を目指すべきである。日本が世界の必要とする人材の輩出とその養成の場としての大学院や研究機関を整備することは、国と教育機関に加えて産業の任務である。

### 謝 辞

本小論をまとめるにあたって、下記の方々にご教示戴きました。紙面を借りてお礼申し上げます。

芝浦工業大学 藤田 和男 教授、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 織山 純 氏、和佐田 演慎 氏、石油・天然ガス開発 R&D 推進グループ 大野 健二

氏、石油資源開発株式会社 加藤 進 氏、帝国石油株式会社 山本 一雄 氏、海外・大陸棚本部業務部 千石 雄三 氏、技術企画部 杉山 広巳 氏。

### 参考文献

- 1) 今日の石油産業 2005、石油連盟、経済産業省
- 2) 新編 石油開発の技術、猪間明俊 著、石油文化社
- 3) 石油開発技術のしおり、石油鉱業連盟
- 4) 文部科学省科学技術政策研究所 講演会、2005年10月17日、石油・ガス資源開発における先端技術、芝浦工業大学 教授 藤田 和男 氏
- 5) 技術センター幕張における技術開発の概要、石油天然ガス・金属鉱物資源機構

### 執 筆 者



客員研究官  
**持田 勲**

九州大学産学連携センター  
科学技術振興機構研究成果活用プラザ館長

工学博士。2004年九州大学を退官。特任教授として、化石資源エネルギー、炭素材料、環境保全の研究開発を進めると同時に、研究の社会還元を目指している。



環境・エネルギーユニット  
**大平 竜也**

科学技術動向研究センター  
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

工学博士。企業にてエネルギー機器の研究開発に従事。専門は、機械工学、エネルギー工学、原子力工学。現在、エネルギー・環境分野の科学技術政策並びにエネルギー・環境・経済の3E問題解決に資する政策と企業経営に興味をもつ。