

6. 4 石油 (petroleum)

石油は、得られるエネルギー源に対して採掘に要するエネルギーが少なく、生産効率が高い地下資源であり、非常に使いやすい液体燃料（原料）であり、重要な化学原料である。

20世紀の文明、経済発展は、石油の安価大量供給によって支えられ、プラスチックなどの化成品の多くは、石油精製によって作られる原料から石油化学によって作られている。

石油は、エネルギー資源と化学原料にとって非常に重要な資源であるが、油田が局在化していたため、たびたび世界の政治・経済に大きな影響を与えてきた。

多くのエネルギー資源を輸入に依存している日本は、エネルギー所費の約半分を石油に頼っている。

将来の石油経済を考えると、石油の生成機構を知ることは非常に重要であるが、石油の起源は学説として定まっていない。生物由来の有機成因説と無機成因説があるが、日本では、石油が化石資源と信じられてきたため、石油資源を枯渇性資源と考えるのが一般的である。東欧では、ドミトリ・メンデレーエフ（1834～1907年、ロシア）が石油無機起源説（1870年）を唱えたこともあって、伝統的に無機起源説が主流である。

石油の起源は、科学的に未解決であり、正確な埋蔵量も分かっていないため、正確な将来予測は困難となっている。

6. 4. 1 石油の利用

石油が、採掘されるようになったのはヨーロッパで17世紀末、米国では19世紀後半である。石油から得られる灯油は照明に利用されたが白熱電球の発明により需要は伸びなかった。

この頃、蒸気機関に代わる内燃機関（ICE、internal combustion engine）の研究が盛んに行われるようになっていたが、初期の内燃機関は水素ガスを利用するものが多く、使いやすいものではなかった。石油精製の廃棄物であるガソリンを利用する液体燃料内燃機関（オットーのガソリンエンジン）が発明され、世界は大きく変わった。表6-4-1に内燃機関の発明や特許取得の年表を簡単に示す。

ジェームズ・ワット（1736～1819年、イングランド）が開発した蒸気機関（1769

年)は、18世紀の産業革命を推進した。それまで、動力を必要とする工場は水力が利用できる場所に限定されていたが、蒸気機関によって、立地の自由度が増し、燃料となる石炭をエネルギーの主役にした。

しかし、蒸気機関は、出力に対して機械が大きく重いという問題があり、高出力にするとボイラーの爆発事故を招くため、輸送機械には不向きで、主に船舶(蒸気船)や鉄道用蒸気機関車に用いられ、馬車や荷車の動力源としてはほとんど利用されていなかった。

一方、蒸気機関に代わる内燃機関の研究が進められていたが、19世紀に都市ガスが普及してからは、これを利用した内燃機関(ガスエンジン)の開発が盛んになった。

熱力学の法則が確立する前の時代に、ニコラ・カルノー(1796~1832年、フランス)がカルノーサイクルを提唱、温度差や圧縮の重要性が示され、多くの技術者が気体の圧縮やガスの燃焼を研究、数多くの内燃機関の発明がなされ、特許が出された。

最も成功した最初の内燃機関は、ジャン=ジョゼフ・ルノアール(1822~1900年、ルクセンブ

表6-4-1-内燃機関の発明

年	発明者	エンジン
1509	ダ・ヴィンチ	無圧縮式内燃機関
1824	カルノー	蒸気機関の効率
1848	Jスワン	白熱電球の発明
1852	ジュール&ケルビン	JT効果
1859	ルノアール	ルノアール・エンジン
1870	Sマルクス	初のエンジン付荷車
1876	Nオットー	4ストロークエンジン
1878	Dクラーク	2ストロークエンジン
1882	Jアトキンソン	アトキンソンサイクル
1883	Gタイムラー	キャブレターエンジン
1884	Nオットー	液体燃料エンジン
1891	Hスチュワート	焼玉エンジン
1892	Rディーゼル(リンデ社)	カルノーエンジン
1893	Rディーゼル	オイルエンジン論文(後のディーゼルエンジン)
1894	レイリー&ラムゼー	アルゴンの発見
1900	Rディーゼル	パリ万博にバイオ燃料エンジン出展
1902	Cリンデ	酸素の深冷分離
1925	Jヘーゼルマン	直噴ガソリンエンジン
1931	Aリヒテ(ユンカーズ社)	直噴ガソリンエンジンの実用化
1957	Fバンケル(NSU社)	バンケルエンジン
1954	メルセデス・ベンツ社	自動車用直噴ガソリンエンジン

ルク)のルノワールエンジンである(1859年)。ルノワールエンジンは、蒸気機関と大きく異なり、燃焼室にガスを導入、電気式の点火プラグで着火するエンジンである。照明用ガス(石炭ガス)を燃料とし、蒸気機関よりコンパクトであった

ため、蒸気機関の定置型動力源の代替となり、初の量産エンジンとなった。

また船舶用エンジンには、水の電気分解による水素を燃料としたが、大きな設備を要し、ガスやオイルの消費量も大きいため小型の輸送機械には用いることはできなかった。

19世紀末、欧州では、馬車を代替する輸送機器として、蒸気機関自動車、電気自動車、内燃機関自動車の開発が進められていた。

大きく重い蒸気機関、航続距離が非常に短い電気自動車、水素ガスを燃料とする内燃機関が、それぞれの課題を抱えていたが、「液体燃料」を使用できる内燃機関が登場、大きな技術革新を起こした。

内燃機関は小型の輸送機関に最も適した動力源となり社会を大きく変えることになり、また、それまで、石油精製の廃棄物として投棄されていた「ガソリン」が燃料として使えるようになり、石油の重要性も変わっていった。

ニコラウス・オットー（1832～1891年、ドイツ）は、ルノワールエンジンをヒントに2サイクルエンジンを製作する会社を興し、その後、ゴットリーブ・ダイムラー（1834～1900年、ドイツ）とヴィルヘルム・マイバッハ（1846～1929年、ドイツ）がこれに参加、共同で新たな4サイクルエンジンを発明した（ドイツAG社）。

ルノワールエンジンは、現在の4サイクルエンジンのような燃焼前の圧縮がないため、著しく出力が低かったが、オットーらの内燃機関はこれを改善、しかし、当初は、石炭ガスを燃料とし、点火用の熱源（種火）を必要としていたため定置式限定で輸送機器には使えなかった。

その後、オットーらは、電気式の点火装置を採用、液体燃料を空気と混合して燃焼させる4サイクルエンジンの開発に成功した（1862年）。コンパクトで非常に使い勝手のよいエンジンは自動車にも搭載できるようになった。

この当時、欧州の各国の多くの技術者が新たな内燃機関の開発を競ったが、液体燃料を用いた小型のエンジンを開発して最も大きな成功を収めたのがオットーらのエンジンである。4ストロークエンジンを発明したのはオットーではないが、彼らが初めて実用化したため、今日でも「ガソリンエンジン」のことを「オットーサイクル」と呼ぶ。

一方、ガスエンジンを製作する会社を経営していたカール・ベンツ（1844～1929年、ドイツ）は、自力で走行する自転車の夢をかなえるため、4サイクルのガソリンエンジンを搭載する自動車の特許を取得、世界初のガソリンエンジンで走行する自動車を製作した。（ベンツ・パテント・モートルヴァーゲン、1885年）

ドイツAG社のダイムラーも全く同じ年にガソリンエンジンを用いた車両を発明、その後、ダイムラーとマイバッハはドイツAG社から独立、ダイムラーモトーレン社を設立（1890年）、その後ベンツ社と合併し（ダイムラー・ベンツ社、1926年）、ドイツに自動車産業が興った。

オットー、ダイムラー、マイバッハが発明したガソリンエンジンとベンツが発明したガソリンエンジン自動車の技術は、その後世界中に広まっていった。

深冷空気分離装置を開発したリンデ社でも新たな内燃機関が発明された。

カール・フォン・リンデ（1842～1934年、ドイツ）は、冷凍機を開発し、空気を低温にし、蒸留分離によって酸素を製造する深冷空気分離装置を発明したが、当時、リンデ社の開発責任者であったルドルフ・ディーゼル（1858～1913年、フランス生まれ、ドイツ）は、熱力学や熱機関を研究し、動力源のための内燃機関を研究・開発を進めていた。

ディーゼルは、リンデ社における冷凍機の研究開発の傍ら、カルノーが見出したカルノーサイクルを目指したエンジンの研究を続けていた。オットーがガソリンエンジンを発明してから14年後、ディーゼルは新たなエンジンに関する論文と特許を提出した（1893年）。この当時は、まだ大規模な油田は発見されておらず、ディーゼルは、野菜オイルを燃料とする内燃機関を開発、1900年のパリ万博にピーナツオイルエンジンを展示した。

リンデ社は、その後、世界最大のフォークリフト部門を有する会社となるが、本業は産業ガスであり、本格的なエンジン会社、自動車会社とはならなかったため、ディーゼルが発明したエンジンは、リンデ社を離れてマン社やスルザー社によって本格的な開発が進められることになった。実用化されたエンジンは、後に「ディーゼルエンジン」と呼ばれるようになった。

ディーゼルエンジンは、野菜オイル（バイオ燃料）だけではなく、石油から作られる軽油、重油など非常に幅広い燃料にも対応するようになり、特に大型の機関を得意とし、船舶や鉄道の機関用燃料が石炭燃料から石油燃料へと変わっていった。また、鉄道、船舶だけでなくバスやトラック、建設機械といった大型の車両が、ディーゼルエンジンによって動くようになった。

ガソリンを用いるエンジンは、多くの研究者、技術者によって実用化されており、オットーやバンケルなどの開発者の名前と呼ばれることがあまりない。使用される燃料でまとめて「ガソリンエンジン」と呼ばれる。

一方、ディーゼルエンジンは、基本的にディーゼルがひとりで発明したものであ

り、2ストロークも4ストロークもいずれのエンジンも、ルドルフ・ディーゼルの名前を冠して「ディーゼルエンジン」と呼ばれる。

またディーゼルエンジンに使用される燃料は多彩であるが、英語圏では自動車用の燃料をディーゼル燃料と呼ぶ。日本では、石油から作られる燃料を、ガソリン、軽油、重油などと呼ぶが、軽油は日本だけの名称であり、相当する英語がない。用途からみると、日本語の軽油の英語訳は Diesel fuel が最も近い。(中国語の軽油は別の物質である)。

オットーのガソリンエンジン、ディーゼルのディーゼルエンジンの普及によって、石油は重要な輸送機器用の燃料となった。20世紀初頭の、電気、水素、石油(ガソリンとディーゼル)という3つの自動車燃料の覇権争いは、石油が勝利することになり、石油とそれを利用した内燃機関の発達によって本格的な石油時代が始まった。

6. 4. 2 石油資源

鉄道、自動車、船舶、飛行機の交通網が発達、世界は広範な移動手段を獲得しそれまでとは大きく異なる交流が可能となっていた。

1914年に、連合国（仏英露日など多数）と中央同盟国（ドイツ、オーストリア＝ハンガリー、オスマン、ブルガリア）の間で世界戦争が起り1918年まで続き、後に第一次世界大戦と呼ばれるようになった。

世界戦争の原因には、領土問題、複雑な同盟関係、軍拡競争などがあるが、石油をエネルギー源とする科学技術の発展が、移動技術や軍事技術の拡大をもたらし、大規模な戦争の背景ともなった。

世界戦争終結からわずか20年後、1939年には、再び世界戦争が勃発（第二次世界大戦）、連合国（英国、中国、ソ連、米国など）と枢軸国（ドイツ、イタリア、日本、フィンランド、ハンガリーなど）の間で1945年まで人類史上最大の大戦争が続いた。石油は戦争の原因のひとつでもあり、石油に関わる科学技術は、再び、兵器開発など戦争継続に利用された。

化学の分野では、戦時代替品としてナイロン（絹代替）、合成ゴム、人造石油などが開発された。ドイツでは、戦争によって石油が入手できなくなることを予測し、フィッシャーらがCTL/石炭液化を開発（1923年）、固体である石炭をガス化し、化学反応によって液化する化学プラントで「人造石油」が生産された。

ドイツのカイザー・ウィルヘルム研究所のフランツ・フィッシャーとハンス・トロプシュは、石炭やバイオマスから作られる合成ガス（CO/H₂）を原料として炭化水素を合成する方法を開発、フィッシャー・トロプシュ法（FT法）と呼ばれるこのプロセスは、その後、天然ガスや石油の反応にも利用されるようになり、重要な触媒化学という技術分野が生まれた。

炭田はあるが油田がないドイツ国内で、燃料を確保する目的で産み出されたFT法は、その後の近代化学産業における重要なプロセスとなり、GTL（Gas To Liquid = ガス液化油）、CTL（Coal To Liquid = 石炭液化油）、BTL（Biomass To Liquid = バイオマス液化油）などの技術に用いられるようになった。

ドイツの人造石油の製造技術は、同盟国であり、同様に油田はないが炭田を有する日本にも伝わった。しかし、石炭からのガス化・液化は大量のエネルギーを消費するため、油田から出る石油とは競争ができず、また十分な量を確保することもで

きなかった。

第二次世界大戦終結後、中東（Middle East）に良質・安価な大規模油田が発見され、世界最大の石油輸出拠点となった。20世紀後半から、世界は本格的な石油の時代となっていった。中東には、クウェート、サウジアラビア、イラン、イラク、アラブ首長国連邦などに大規模な油田がある。

一般に、中東と呼ばれるのは、アラブ首長国連邦、イエメン共和国、イスラエル国、イラク共和国、イラン・イスラム共和国、エジプト・アラブ共和国、オマーン国、カタール国、クウェート国、サウジアラビア王国、シリア・アラブ共和国、トルコ共和国、バーレーン王国、パレスチナ暫定自治政府、ヨルダン・ハシミテ王国、レバノン共和国の16ヶ国。このうち10ヶ国が産油国、隣接するアゼルバイジャン共和国まで含めると中東地域には11ヶ国の産油国が集まっている。また中東に近い北アフリカには、エジプト、スーダン、リビア、アルジェリアなどの産油国がある。

石油が強力なエネルギー資源となった理由は、前述の液体燃料であり使い勝手がよいという特長の他に、EROEI（Energy Returned on Energy Invested）が非常に大きいということがある。EROEI＝（エネルギーの産出／採掘に投入するエネルギー）であり、エネルギー資源を特徴付ける指標となる。

表6-4-2は、石油とその他の資源のEROEI（推定値）であるが、中東石油の効率の高さが飛び抜けて大きく、その他の在来型石油の効率も他のエネルギー源に比べると大きい。

石油は、エネルギー効率が強く、生産コストが低い（およそ20ドル/バレル＝12.6円/L）が、販売価格は比較的高い（100ドル/バレルの時63円/L）ため、高い経済性をもち、富を生む資源となっている。

表6-4-2-石油とその他の資源のEROEI

エネルギー源	EROEI 推定値	備考
石油（中東）	100～200	抜群の生産性
石油（在来型）	30～100	高い生産性
石油（非在来型）	10～30	重質油など
天然ガス	40～100	石油とほぼ同等
石炭	30～50	石油のおよそ半分
原子力	10～20	ほぼ発電用
風力	10～15	ほぼ発電用
太陽光	5～10	極めて低い効率

石炭は、石油に比べて発熱量が小さくEROEIは石油の半分以下であるが、非在来型石油、重質油などは石炭よりも効率が低い。

原子力、風力、太陽光は、ほぼ発電にしか使えないため、効率が低い。電気は、使い勝手のよいエネルギー形態であるが、熱エネルギーなどを一旦電気に変換するため効率は高くない。原子力は、大きな熱エネルギーを生み出すが、温度の低いランキンサイクルを用いた発電方式のため、全体の効率は高くない。

世界最大の油田は、中東サウジアラビアのガワール油田（1948年発見）、推定埋蔵量750～830億バレル）とクウェートのブルガン油田（1938年発見）、推定埋蔵量660～720億バレルである。

バレル（樽）とは石油の量を表すのにしばしば用いられる容積の単位であり、多数の定義があるが、原油の場合、1バレル=159リットルと換算される。100億キロリットル=629億バレルであり、ガワール油田の埋蔵量がこれに近い。

原油の生産量、価格などに、このバレルという単位が用いられ、原油価格は1バレル当たりの米ドル建て価格が統計資料として用いられている。

たとえば北海油田の1バレル当たりの原油スポット価格は、1987年で20ドル、2008年に130ドルに急騰、2016年には大きく下落し再び25ドルと大きく変化し、この間の世界経済に非常に大きな影響を与えている。

原油の消費量もこのバレルで示されることが多く、消費量の大きい国としては、米国1900万バレル（日量）、中国1100万バレル、日本430万バレル、インド385万バレルなどとなっている（2014年のBPの統計）。

米国と中国の消費量が圧倒的に大きく、2カ国で日量3000万バレル、年間では110億バレルにもなる。世界最大の2つの油田の埋蔵量がそれぞれ約700億バレル、その他の世界各地の油田の埋蔵量はこれより一桁小さいので、その消費量の大きさが分かる。この数字だけをみるとすぐにでも石油が枯渇するような錯覚を覚えるが、いつまでたっても埋蔵量は減ってこない。

なぜ、中東に良質安価な油田が集中しているのか、謎である。地球全体の面積から考えるとごくわずかな地域に莫大な量の石油が埋蔵されているが、もしそれが生物起源であるとしたら、この地域にだけ、他の地域にはない大変な量の植物が長期間生育し、石油が生成できる地質学的変動があったことになる。現在は砂漠地帯となっている中東には、大量の石油を生成できた地質学的・生物学的な証拠が見つかっていない。

世界には4万ヶ所ほどの油田地域があり、中東以外では、アジア、欧州、南北アメリカ大陸に油田がある。アジアには中国、マレーシア、インド、ベトナム、ブルネイ、パキスタンなど、欧州では、ロシア、カザフスタン、ノルウェー、英国、

オランダ、アメリカ大陸では、カナダ、米国、メキシコ、ブラジル、ベネズエラ、アルゼンチンなどが産油国である。

石油自体は、比較的どこにでもあって、地下資源としては特に珍しいものではない。しかし、大規模に安価に生産できる地域は限定されるため、石油は資源としては局在しているとみなされる。したがって、地球上には産油国と非産油国がある。日本にも油田はあるが、国際競争力がないため、本格的な生産は行われず、石油の無い国・非産油国とされている。国内最大の勇払油田の生産量は、年間150万バレル、国内消費量は、日量430万バレルである。

石油の採掘には、巨額の投資が必要であるため、石炭から石油への転換、石油によるエネルギー革命は、欧米の国際石油資本（石油メジャー）が中心となって推進された。第二次世界大戦後、欧米のメジャーが世界の石油を独占した。米国系5社、欧州系2社の「セブン・シスターズ」による石油支配が続いた。①スタンダードオイルニュージャージー（後のエッソ、エクソンモービル）②ロイヤル・ダッチ・シェル（オランダ、英国）③アングロペルシャ石油会社（BP）④スタンダードオイルニューヨーク（モービル、エクソンモービル）⑤スタンダードオイルカリフォルニア（シェブロン）⑥ガルフオイル（シェブロン、一部BP）⑦テキサコ（シェブロン）

1960年代に産油国は、メジャー支配の脱却を目指し、自らの権益を守るために、石油輸出国機構（OPEC: Organization of the Petroleum Exporting Countries、オペック、1960年設立）を結成、アラブの産油国は、アラブ石油輸出国機構（OAPEC: Organization of Arab Petroleum Exporting Countries、オアペック、1968年設立）を設立、1970年代に産油国の資源ナショナリズムが台頭した。

1970年代には、産油国の石油会社への経営参加、国営化が進められた。1972年にアルジェリア、リビアの油田が国有化され、1976年には、サウジアラビアの原油採掘権を独占する世界最大の石油会社サウジアラムコの株式がメジャー4社からサウジアラビア政府に譲渡された。

1973年と1979年の2度オイルショック（oil crisis）が世界を襲い、石油の決定権は産油国に移り、セブン・シスターズの影響力は低下、メジャーによる石油支配は終了した。

第一次石油危機：1973年10月、アラブ諸国とイスラエルの間で第四次中東戦争が勃発、OAPECは、原油の生産制限などを実施、さらにOPECが、原油の大幅値上げを発表、それまで1バレル2ドル程度であった原油価格は、一気に11ドルま

で値上がりした。

第二次石油危機：1978年秋、イランの政変をきっかけに、石油需給が逼迫。OPECは、原油価格を四半期ごとに引き上げることを決め、その後、OPEC加盟国は一方的にプレミアムを付加したため、原油価格は無秩序状態になり暴騰し、1980年には30ドルを超えた。

表 6-4-3-主な産油国

産油国	OPEC	OAPEC	資源	産油国	OPEC	OAPEC	資源
アラブ首長国連邦	○	○	中東大油田	エクアドル	×○		輸出の40%が石油
イエメン		△		コロンビア			石油・石炭
イラク	○	○	中東大油田	ペルー			石油・銀
イラン	○		中東大油田	ブラジル	△		大規模海底油田 ブレソルト
オマーン		△	ホルムズ海峡	ベネズエラ	○		輸出の96%石油
カタール	○	○	中東大油田	ポリビア	△		
クウェート	○	○	中東大油田	アルジェリア	○	○	石油・天然ガス
サウジアラビア	○	○	世界最大の生産	アンゴラ	○		石油・ダイヤモンド
シリア	△	○		エジプト		○	
バーレーン		○	中東大油田	ガボン	×		GDPの35%
アゼルバイジャン			バクー油田	コンゴ共和国			GDPの半分
インド			石油製品が主な 輸出品	コンゴ民主共 和国			
インドネシア	○		資源大国	スーダン	△	△	中国資本で開発
カザフスタン			資源大国	南スーダン			2011年独立、スーダ ンの石油の80%
中国			石油輸入国	赤道ギニア			油田で急成長
ブルネイ			GDPの半分	チュニジア		×	
ベトナム			輸出の20%	ナイジェリア	○		石油輸出货量8位
ミャンマー				リビア	○	○	陸上、海上油田
マレーシア			サラワク州北部 の海	モーリタニア		△	
オーストラリア			資源大国	英国			脱炭素社会を志向
米国			資源大国	ノルウェー	△		北海油田
カナダ			資源大国	ハンガリー			石炭・石油
メキシコ	△		石油、銀	デンマーク			北海油田
アルゼンチン			パタゴニア地域	ロシア			資源大国

○は加盟国、△は加盟候補国、×は脱退

OPEC、OAPEC は、国際石油資本メジャーから石油産出国の利益を守ることを目的として設立された組織であり、現在 OAPEC 加盟国は 10 ヶ国、OPEC 加盟国は 13 ヶ国、世界の石油の価格決定に重要な役割を果たしている。

2 度の石油危機を経て、セブン・シスターズは再編され、現在は、エクソンモービル、ロイヤル・ダッチ・シェル、BP、シェブロン の 4 グループに統合されている。メジャー各社は、石油企業一辺倒からエネルギー総合企業への転換を進めている。また、現在の世界の石油は、欧米メジャーだけではなく、産油国の企業、ペトロナス、ペトロブラス、ガスピロムなどが大きな影響力を持っている。この半世紀の間に、石油は、エネルギー資源や化学原料の中心的な役割を担いながら、その業界は大きく変遷している。

資源の枯渇、特に石油の枯渇が具体的に意識されるようになったきっかけに、ローマクラブのレポート「成長の限界」（1972 年）がある。

ローマクラブは、このレポートで「人口増加や環境破壊が続けば、資源は枯渇、石油は 20 年で枯渇し、環境の悪化によって 100 年以内に人類の成長は限界に達する」と報告、無限の資源を前提としてきた 20 世紀後半の文明に大きな警鐘を鳴らした。ローマクラブ（The Club of Rome）は、1968 年設立の民間シンクタンクであるが、最近までの会長はリヒャルト・フォン・ヴァイツゼッカー元ドイツ大統領（1920～2015 年、ドイツ）、会員には、ミハイル・ゴルバチョフ、小宮山宏、猪口邦子、緒方貞子など日本でもよく知られる著名人が多く、発行されるローマクラブ・レポートが社会に与える影響は大きい。

米国の石油地質学者 MK ハーバートが「オイルピーク理論」を発表した（1956 年の米国石油学会）、ハーバート・モデルは、有限資源の生産量は開発限界と市場圧力による分布曲線で表されるというもので、1960 年代から 1970 年にかけての米国の石油生産量を正確に表していたため、石油の枯渇が近いというローマクラブの科学的な調査・報告は広く信じられた。

「成長の限界」のプロジェクトリーダーは、システムダイナミクスの専門家であるマサチューセッツ工科大学のデニス・メドウス（1942 年～、米国）であり、そのシミュレーション結果に世界は注目した。100 年後に人類は成長の限界に達するということが示され、わずか 20 年で石油は枯渇し、石油の無い世界が到来するというシナリオに世界は衝撃を受けた。

しかし、石油は、「成長の限界」が予想したようには、枯渇しなかった。20 年で枯渇しなかったばかりか、石油の可採年数は、この 40 年間、ずっと 40 年前後で推

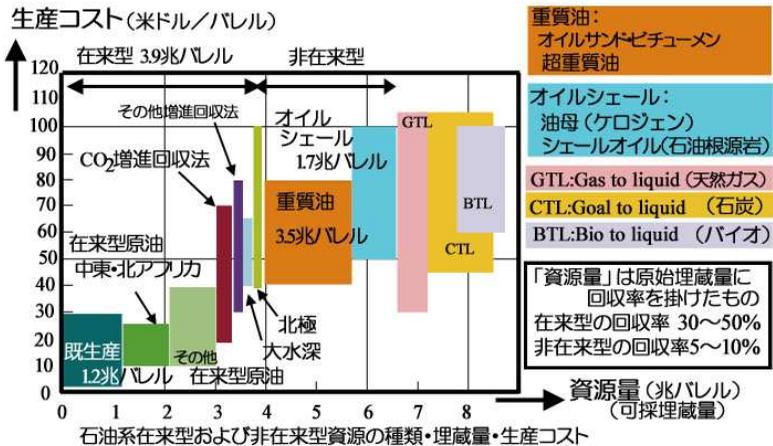
移しており、可採埋蔵量は、むしろ年々増加傾向にある。シミュレーションには「技術革新が全くないと仮定すると」という前提が示されていたが、なぜか大きく予想が覆され、石油のない世界は到来しなかった。

地球の地下にどのくらいの石油があるのか、本当のところは分かっていない。

図 6-4-1 に IEA のデータを元に JOGMEC がまとめた世界の石油資源の埋蔵量の予想を示す。図のグラフの縦軸が生産コスト、横軸が埋蔵量である。グラフの左下が安価だが埋蔵量が少ないもの、右上が資源量は多いが、コストがかかるものを表している。

左下の部分が既に生産済みのもの、2 番目、3 番目が中東および OPEC 産油国などの在来型 (conventional resources) の油田である。低コストの資源から利用され、次第に採掘コストがかかる非在来型資源 (unconventional resources) に移行していくため縦軸 (コスト) が大きくなると横軸 (埋蔵量) が増えていく。

資源全てが回収可能ではないため、ここに示された「資源量」とは、原始埋蔵量に回収率を掛けたものであり、現在の技術水準などから、在来型は回収率 30~50%、非在来型では回収率 5~10%とされている。



出典: IEA 2011a / JOGMEC 本村真澄「非在来型化石燃料の現状と展望」2012/08/20

図 6-4-1-石油資源の可採埋蔵量 (参考: JOGMEC レポート)

資源量の中には、現在の技術では回収ができないメタンハイドレートなどの資源は含まれていない。

ここで、JOGMEC レポートの表題は、「非在来型化石燃料の現状と展望」になっ

ており、「石油は化石燃料である」という前提で書かれており、石油が地球内部で生産される可能性については考慮されていない。また未発見の資源の予想は含まれておらず、現時点で分かっている資源量を議論しているため、少なめの予想ということになる。

既生産量が約 1.2 兆バレルであるのに対して、在来型の可採埋蔵量は約 3.9 兆バレルと推定されているので、これまでに在来型資源量の 1/3 ほどを生産、消費していることになる。

省エネ技術（効率の利用、使用量の削減）の進歩があるため、簡単な比較はできないが、既生産量の大半が過去 50 年ほどのものだとすると、その 2 倍、100 年ほどで在来型の資源を使い切ってしまう計算になる。

この在来型に非在来型の石油系資源を加えると約 7 兆バレル、これに石炭の液化 CTL、天然ガスの液化 GTL、バイオ燃料 BTL を含めると約 9 兆バレルとなり、既生産量を除くと、これまでに消費した量の約 8 倍の資源が回収可能ということになる。

非在来型としては、オイルサンドなどの重質油の可採埋蔵量が 3.5 兆バレルある。

重質油は、在来型とされる油田の性状とは大きく異なり、本格的な生産には至っていないため「非在来型」とされているが、採掘そのものは既に行われている。

1960 年代にオイルサンドの表土を露天掘りし、砂分と油分を分離してピチューメン（超重質油）を取り出すことが行われている。掘り出した砂の約半分がピチューメンである。露天掘りは大規模な森林破壊を伴うため採掘後の地表復元が必要である。1980 年代からは、地下のオイルサンド層に高温・高圧の水蒸気を注入してピチューメンを流動化して回収する工法が利用されている。

最も多く埋蔵しているのは、北米カナダと南米ベネズエラであり、重質油を資源とみなした場合、ベネズエラの石油埋蔵量はサウジアラビアを抜き世界一位となる。

ただし、図にあるように重質油は、「在来型」の石油に対してコスト的に不利なため、原油価格が低迷すると競争力を失い、一気に埋蔵量が減少することになる。

シェールガスと同時に生産される、オイルシェールは 1.7 兆バレルとされている。

CTL、GTL、BTL は石炭や天然ガスなどの液化技術であり、原料は石油ではないが、約 2 兆バレル相当が資源量とされている。メタンハイドレートは、非在来型の天然ガスであるが、現在の技術では採掘ができないことと他の資源に比べて量が少ないため、この資料の中では資源として含まれていない。

石油の資源量は、今後の技術革新、新たな油田や資源の発見、原油価格の変化によって、この資料に示される量より増える可能性があるが、現時点で分かっている

だけでも非常に多い。その規模は、現在の生産量に対して数百年以上はあると考えられており、少なくとも21世紀も炭化水素の時代は続くと思われている。

「成長の限界」(1972年)で有限資源の枯渇とそれに依存した文明に対して警鐘を鳴らしたローマクラブは、続編である「限界を超えて一生きるための選択」(1992年)で、「人類にとって脅威なのは、環境汚染や地球温暖化であり、21世紀前半に破局が訪れる、これを回避するために、行き過ぎた消費を抑え、大幅なエネルギー消費削減を行うことが重要テーマである」と提言している。

人類の文明の危機はさらに増しているが、当初の資源枯渇が間近であるという見解は撤回されている。資源枯渇が近いという議論は、43年前に起こり、23年前に消滅した。今、石油の枯渇が差し迫っているという議論をすれば、かなり時代錯誤ということになる。

しかし、今でも石油資源が枯渇することを前提にした議論が起こることがある。何百年も先まで見据えて枯渇を議論しているとは思えないので、おそらく、当時、刷り込まれた石油20年枯渇説から、今も抜け出せないままなのかも知れない。

資源の消費速度が生産速度を上回れば、いずれ枯渇するというのは自明であるが、有限資源は必ずしも枯渇しない。有限であるかか無尽蔵であるかは、観念的ではなく、定量的な問題である。

太陽エネルギーも無限ではないが、誰も枯渇を想定して考えない。太陽が燃え尽きる時、あるいは、そのずっと前に太陽が赤色巨星となって地球を飲み込む先までは、誰も人類の文明の存続を議論しないからである。地球の資源についても、半径6000kmほどの地球に対してわずか10kmほどの表層部分しか考慮していない。人類の科学技術では、地球深部までは到底届かないだろうと考えるからである。

有限と考えるときの地球の範囲は、人間にとっての生存圏のようなもの、手が届きそうな範囲の資源の枯渇を議論している。したがって、枯渇や無尽蔵を議論する時には、観念的に考えるのではなく、地下や海洋を科学的に理解し、定量的に議論することが重要である。太陽は無尽蔵の資源、石油は枯渇性資源といった短絡的な結論ではなく、より科学的な数字が議論される必要がある。

たとえば、ローマクラブが最初に示した20年で枯渇するという数値は、石油には資源としての将来性はなく、石油を原料とする産業や全てのシステムは崩壊するということである。この短い期間では何の準備もできない。もし100年後に枯渇するというのが正解であれば、少し長持ちさせるための研究が間に合うかも知れない。しかし過去100年間の科学や文明の変遷を考えると、これからの100年を予想することは容易ではなく、今何ができるのかもはっきりしない。

120年前までは、空気の組成も分かっておらず、分子も発見されておらず、空気の液化も産業ガスの業界も存在していなかった。100年前に産業ガスのビジネスを想定できなかったように、100年後の石油が無い世界を想像することは簡単ではない。

もし、石油の枯渇が1000年も先ということであれば、ほとんどの人が今から何かを準備する必要を感じないであろうし、もし1万年以上先のことであれば、石油を枯渇性資源とはいわないと思う。46億年の地球の歴史の中のたった1万年は、わずかの時間であるが、しかし、おそらく人類にとっては無尽蔵の資源ということになる。「枯渇」や「無尽蔵」という言葉をどこで使うのかは、具体的な数字を示すことによって（その数字の信頼性も含めて）変わるものである。

現在、世界では、温暖化による気候変動が差し迫った課題である、という認識が高まっている。「環境と開発に関する国際連合会議」（UNCED、1992年、リオ・デ・ジャネイロ）において、国際的な枠組みを設定した環境条約が採択された。

この条約は「気候変動に関する国際連合枠組条約」（UNFCCC、UN Framework Convention on Climate Change）と呼ばれる地球温暖化を防止するための条約であり、短く「国連気候変動枠組条約」あるいは「地球温暖化防止条約」とも呼ばれる。

1992年に日本を含む155ヶ国が署名、1994年に発効した。この温暖化防止条約の交渉会議は、締約国会議（通称COP）として毎年開催されている。

補足 6-5：COP（締約国会議、Conference of the Parties）

COPという名称が知られる条約には、「生物の多様性に関する条約（CBD/COP）」、「ラムサール条約（水鳥湿地保全条約、Convention on Wetlands）」、「WHO たばこ規制枠組条約（WHO FCTC）」、「国連砂漠化対処条約（UNCCD）」などがある。

近年は、単にCOPといえば、「温暖化防止条約」を指すことが多く、地球温暖化は、多くの関心を集める課題といえる。1997年に京都でCOP3が開かれ、京都議定書が採択された。日本でも環境問題が大きな関心を集めた。2001年には、日本の環境庁が環境省となった。

1997年の第3回京都会議（COP3）では、温室効果ガスの削減目標を定める「京都議定書」が採択された。2015年には、第21回締約国会議（COP21パリ）が開催されている。

この条約の目的は、空気中の温室効果ガスの増加が地球を温暖化し、自然の生態系などに悪影響を及ぼすおそれがあることを、人類共通の関心事であると確認することと、温室効果ガスの濃度を安定化させ、現在および将来の気候を保護する

ことである。

「気候変動に関する政府間パネル」(通称 IPCC)という国家間機関が、科学的研究を行っており、近い将来、温室効果ガスによって地球の平均気温が上昇し、人間やその他の生態系に影響が及ぶだろうという報告を行っている。IPCCは、気候変化に関する科学的な判断基準の提供を目的として、国際連合環境計画 (UNEP) と国際連合の専門機関・世界気象機関 (WMO) が共同で設立した (1988 年) 機関であり、130 ヶ国の政府関係者、学者などが参加している。

京都議定書における排出量削減対象となっている温室効果ガスは、CO₂、メタン、N₂O (亜酸化窒素)、ハイドロフルオロカーボン類 (HFCs)、パーフルオロカーボン類 (PFCs)、六フッ化硫黄 (SF₆) の 6 種類である。

表 6-4-3 に主な温室効果ガスと日本の法 (地球温暖化対策の推進に関する法律施行令) が定める地球温暖化係数を示す。

地球温暖化係数 (global warming potential、GWP) とは、CO₂ を基準に、その気体の大気中の濃度あたりの温室効果の 100 年間の強さを比較したものである。100 年間とは、各温暖化ガスの大気中での分解を考慮したもので、寿命が長いほど温暖化係数が大きくなる。

HFC は、この他に 20 種近く、PFC も 10 種ほどが指定されている。

NF₃ は排出量が少なく、京都議定書では温室効果ガスに含まれていなかったが、半導体製造のエッチングガスとして使われ、使用は増加傾向にあり、施行令には「三ふっ化窒素」が含まれている。

この表の中では CO₂ の係数が最も小さいが、他のガスよりも濃度が高く、人為的に排出される温暖化ガスの中では最も温暖化への寄与が大きいと考えられている。水蒸気が持つ温室効果も大きく、温暖化への寄与は最も大きい、水蒸気の人為的な発生量は無視できる量であり抑制も現実的ではないため、排出量の削減対象とはならない。

気候変動の研究は、空気中の温室効果ガスの濃度の観測、海水温度、太陽活動など様々な観測データと科学的な理論を必要とし、正しい予測には複雑な計算が必要である。温度計が発明されてからさほど時間はたっておらず、それよりもずっと前の過去の記録をどのように評価するのか、古気候学の研究や現在の気象学を整合させ、複雑で未知の事象も多い気候モデルをどのように構築していくのか、その結果得られる未来の予測はどのくらいの精度があるのか、気候変動研究の科学的難度は極めて高い。

日本では、環境省、国立環境研究所(NIES)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が共同

で温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite、通称：いぶき)を開発、宇宙から温室効果ガスの濃度分布を観測している。「いぶき」は2009年に打ち上げられ、地球表面、大気から放出される遠赤外線と、太陽反射光の近赤外線を測定、CO₂とメタンの濃度を求めている。次のGOSAT-2では、カーボンやPM2.5などの浮遊粒子の監視機能も予定されている。世界各地で、温室効果ガスの監視・測定が行われているが、観測衛星の場合、同じ測定器で地球全域を測定するため、同一尺度での継続監視が可能である。

人為的な温室効果ガスとしてはCO₂の影響が最も大きい。燃焼によって大量のCO₂を放出する石炭と石油が、悪役であるかのような論調が続いている。しかし、人類の文明を持続可能とするには、高効率の石炭利用や石油の利用抜きにエネルギーと文明を議論することはできない。

木材が燃料として大量に消費され森林が消滅しかけたときに、これを救ったのは石炭の利用であった。20世紀前半に人々の移動を容易にしたのは、石油を中心とした液体燃料の内燃機関によるものであり、化学産業も石油を中心に拡大した。20世紀後半には、非常に便利な電気の時代が訪れたが、世界の発電用燃料の大半が石炭と天然ガスと原子力である。CO₂をできる限り排出しないように考えても、石炭、石油、天然ガスを今すぐ放棄できるほど人類の文明は小さくはない。世界は、気候変動の問題と同時に、人口増加、水・食料、エネルギー、経済、貧困など非常に困難な政治的・経済的課題を多く抱えており、これらの課題は相互に関係しているため、文明を持続可能とするには、石炭や石油の利用も総合的に考えていかなければならない。

かつては石油が枯渇すると言われたが、今も、石油精製、石油化学、海運、自動車、航空など数多くの産業が、大量の石油の供給を前提に成り立っており、石油の無い世界は想定できない。20世紀に始まった石油文明は20世紀中には終わらず、21世紀になっても続いている。

表 6-4-3. 主な温室効果ガスと法に定める係数

温室効果ガス	地球温暖化係数 GWP
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298
HFC-23(HFC)	14,800
PFC-14(PFC)	7,390
SF ₆	22,800
NF ₃	17,200

補足 6-6：石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC、ジョグメック）

JOGMEC は、石油・天然ガス・金属資源の開発、備蓄、安定供給、鉱害防止などを目的とする、経済産業省が管轄する日本最大の独立行政法人。石油公団と金属鉱業事業団を前身とする。資源の安定供給業務を行っているため年間予算は 1.7 兆円、2015 年度の国庫支出は 2140 億円と非常に規模が大きい。

各種情報の収集、分析を行ってレポートを発行、定期刊行物としては「石油・天然ガスレビュー」、「金属資源レポート」がある。

6. 4. 3 石油の経済的影響

石油は、大量に埋蔵されているため、当面の枯渇懸念はない。

しかし、現在の生産地の多くが政情不安の地域にあり、また産油国による価格コントロールや資源ナショナリズム、金融メカニズムによって、しばしば価格や供給が不安定になる。

石油は、その価格が高騰しても低迷しても、世界経済に非常に大きな影響を与える資源である。特に日本は、一次エネルギーの半分以上を石油に依存しているため、石油の供給や価格変動によって、経済が大きな影響を受けてきた。

オイルショック（石油危機）のあと、IEA では、1980 年の条約によって石油火力発電を禁止した。産油国によって、先進国のエネルギー資源が支配されることがないように、大型の石油発電所の建設が禁止され、発電用燃料は、石炭火力、原子力への依存が増すようになった。

IEA 加盟国のひとつである日本も、それ以降、新たな石油火力発電所の建設を行っていない。しかし、古い東日本大震災（2011 年）の時に、関東・東北地域の石炭火力発電所、原子力発電所の多くが被災・停止した時に多くの石油発電所が稼働した。古く効率の低い石油火力発電所が非常時に対応できるようにと長期間温存されていたが、これが再稼働され、大きく不足した電力供給をバックアップした。現在、世界の発電燃料の主流は、石炭と原子力と水力であって、「高価な石油発電」に依存する国はほとんどなく、石油が発電に使用されるのは、このような特殊な事情の場合に限られている。

したがって、直接的には、石油の生産と発電は関係がなく、石油価格が電力を支配することはないが、石油の生産量や価格は、天然ガスや石炭など他のエネルギー

資源の価格に大きな影響を与えるため、これらの資源に電力を依存している国では、原油価格の上昇が、間接的に、電力価格に影響し、広く経済・国民生活に影響を与えている。

日本は、石油輸入先の中東依存度が非常に大きいことが問題である。1967年の中東依存度は、91%。2度のオイルショックを経て、中国などから輸入するようにしたため、1987年には中東依存度は、68%まで低下、改善したが、その後、中国の経済が拡大して純輸入国になり、中国からの輸入がなくなったため、2010年には、中東依存度は再び87%と大きくなった。

図6-4-2に2010年度の石油の輸入先の割合（財務省の貿易統計）を示す。

サウジアラビアとアラブ首長国連邦（UAE）の2ヶ国だけで半分を占め、カタール、イラン、クウェート、オマーン、など多くの輸入先が中東の国々である。

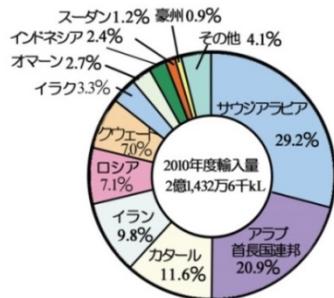
図6-4-3に、石油の輸入先の地図を示す。

中東の国々とこれに隣接するアフリカのスーダンまで、ほとんどの国が、ほぼ同じ地域に集まっており、日本への輸送は全て海上輸送であるから、ホルムズ海峡、マラッカ海峡が地勢上極めて重要なポイントとなっている。

図6-4-4は、（一般財団法人）日本エネルギー経済研究所（IEEJ）・石油情報センターが集計した過去40年間の日本の石油価格の推移をまとめたものである。

バレルあたりのドルではなく、原油と石油製品の価格を、「1リットルあたりの円」で表示しているため、その時代に生活していた人であれば、実感しやすい。00年近くほとんど変化がなかった原油の価格は、1973年に高騰、世界に衝撃を与えた。

1970年頃、1リットル60円ほどであった日本のガソリン価格は、2度目のオイルショックの後、1983年には、170円にもなっており、この間の国民生活への影響が極めて



日本の石油輸入量 (出典:財務省貿易統計)
図6-4-2-石油の輸入先 (2010年度)



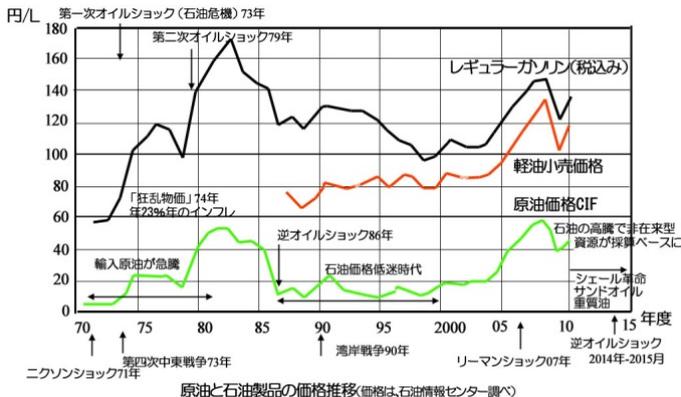
日本が原油を輸入している国の位置
図6-4-3-石油の輸入先の位置
(地図は Wikipedia を利用)

て大きかったことが分かる。

日本の様々な事象がオイルショックと関わっており、具体的には、インフレ（狂乱物価）、高度経済成長の終焉（戦後初のマイナス成長）、公共事業の計画への影響（整備新幹線、本四連絡橋）、燃料浪費技術の回避、省エネの取組、ガソリンスタンドの休日休業、省エネ技術の開発推進、サンシャイン計画、新エネルギー総合開発機構（後のNEDO）の設立（1980年）などが挙げられる。

原子力発電、石炭などの石油に代わる代替エネルギーや省エネ技術により、1986年には、逆オイルショックが起こり、2000年頃まで石油価格の低迷が続いた。

2004年頃よりBIRCSの経済成長に伴って再び価格が上昇、2007年のリーマンショック以降は石油価格が再び不安定になった。



原油と石油製品の価格推移(価格は、石油情報センター調べ)

図 6-4-4 原油、石油製品の価格推移

(出典：石油情報センターのデータを元に注釈を加筆)

石油に大きく依存し、過去に大きな打撃を受けた日本では、国策として石油備蓄が行われている。

IEA（国際エネルギー機関）への加盟条件のひとつに「石油の純輸入量の90日分を備蓄維持できるOECD加盟国」とある。OECD経済協力開発機構は、欧米の先進国を中心に34ヶ国が加盟しているが、IEAには、アイスランド、メキシコ、チリ、スロベニア、イスラエルの5ヶ国が未加盟、IEA加盟国は29ヶ国である。

純輸入量とは輸入量から輸出量を引いたものであるから、日本や韓国のように石油の輸出が無い国は、かなりの量の備蓄が必要となる。

日本は、IEAに加盟、1975年に国内法を制定し国家備蓄体制を構築してきた。

石油の国家備蓄体制は、20年かけた整備が1998年に完了し、輸入量の約200日

分(8,700万キロリットル、kl)の備蓄が維持されている。

IEAにおける、石油備蓄は、各国の連携によって行われ、石油の価格を安定させる目的で備蓄石油の払い出しが行われる。IEAの協調的備蓄放出は、緊急事態に限られ、2003年のイラク戦争、2005年のハリケーン・カトリーナによるメキシコ湾岸の被災など、過去20回ほど発動されている。

日本では、国内法によって、東日本大震災の時に備蓄石油を活用することができなかったため、すぐに法が見直され、2011年9月以降は、災害時にも備蓄石油の利用ができるようになった。

写真は、日本の石油備蓄基地である。

鹿児島県の志布志基地は、約500万kl。地上タンク方式であるため、十分な保安距離を確保する必要があり、196haと非常に広い面積を有している。

500万klといってもピンとこないが、50万トン級の超大型石油タンカーの輸送能力は200万バレル(31.6万 m^3)あるので(1kl=1 m^3)、およそ16隻分になる。これは、日本の1日の石油消費量455万バレル(72万 m^3)の7日分である。

長崎県の上五島基地は洋上に巨大なタンクを置く方式である。海上設備であるため、老朽化対策やメンテナンスが必要であり、タンクは定期的に造船ドックへ曳航して点検を行うようになっている。

秋田基地は、地中タンク方式である。地上タンク方式のような長い保安距離を必要としないため、広い面積を必要としない。

地下施設は、地上に比べると地震震動が小さく、台風などの災害にも強く、安全性が高いことが実証されている。



図 6-4-5 地上タンク方式・志布志国家石油備蓄基地、500万kl (出典：JOGMEC)



図 6-4-6 洋上タンク方式・上五島国家石油備蓄基地 440万kl (出典：JOGMEC)



図 6-4-7 地中タンク方式・秋田国家石油備蓄基地、450万kl (出典：JOGMEC)



図 6-4-8 地下岩盤方式・久慈国家石油備蓄基地、(出典：鹿島 HP)

建設コストがかかると実施数が少ない。

岩手県の久慈基地は、地下岩盤方式である。日本の高度な土木建設技術が活かされている。この方式も地中タンク方式同様、地震や台風などの自然災害に極めて強く、2度の大地震でも地下設備の安全性の高さが実証された。

地下岩盤方式は、地中タンク方式同様、自然災害の多い日本に適した方式であるが、やはり建設コストが高いのが課題である。

日本国内のLPGの消費量は、石油消費量よりもはるかに少ないが、国民生活に与える影響が大きいとして、国家備蓄が行われるようになってきている。2014年の備蓄能力は、輸入量の28日分である。

LPGの長期備蓄は、通常、マイナス40℃で行われ、冷凍設備が必要である。写真の神栖基地（茨城県）は、2005年に完成、施設容量は20万トンである。

2013年に稼働した波方基地（愛媛県）は、最新の地下岩盤貯蔵方式であり、20℃で水封加圧貯蔵するため冷凍設備を必要としない。施設容量は65万トンである。

石油やLPGの備蓄には、莫大な費用がかかるが、大半のエネルギーを輸入に頼る日本においては、重要な国家事業となっている。

なお、日本以外で、輸入量の90日以上もの石油備蓄を行っている国は、米国、ドイツ、フランス、オランダ、イタリア、韓国などがある。

英国は、純輸出国であるため制度上の備蓄はなく、民間企業が備蓄を行っている。



図 6-4-9-神栖国家石油ガス備蓄基地
(出典：JOGMEC)



図 6-4-10-波方国家石油ガス備蓄基地（愛媛県波方のLPG地下岩盤貯槽、出典：JOGMEC）

6. 4. 4 石油の起源

エネルギーは保存され、なくなったり作られたりはしないが、とりあえず利用できそうな「安価なエネルギー資源」は、なくなる（入手が困難の状態になる）ことがある。

太陽エネルギーであっても、枯渇資源であるが、あまりにも先のことなので、人類の歴史の中では、太陽の寿命を考えず、太陽エネルギーを無尽蔵と考えることにしている。

それに対して、今後、生成されない資源、あるいは、資源の生成速度よりも文明による消費速度の方が大きい資源は、再生できない「枯渇性資源」とされる。

地下資源の場合、埋蔵量が非常に多く、人類文明では使いきれないと判断されれば、枯渇性資源ではなくなるが、現在、石炭、石油、天然ガ

スが枯渇性資源とされている。石炭や石油が生成されるには、長い年月が必要であり、生成速度が消費速度に追いつかないので、このまま使い続ければ、在庫がなくなると考えて「枯渇する」ということになる。

石炭の場合は、特殊な地球環境の中で生成されたため、石炭は石炭層にしかなく、現在は石炭が新たに生成される環境がないため、いずれ枯渇すると考えられている。

生成機構についてははっきりとした結論が出ている石炭に対して、石油や天然ガスの生成機構は未だにはっきりしていない。

近年は、新たな油田・ガス田が発見されたり、一度枯れた油田に原油の再充填が行われたりといったことが起こっており、石油や天然ガスが、実際の埋蔵量はどのくらいあるのか、枯渇性資源なのか、はっきりしないことが多い。

石油や天然ガスの成因については、科学的には、「石油有機起源説」と「石油無機起源説」が存在し、結論が出ていない。

光の波動説と粒子説の長い争いでは、光が波であるという現象が多くみられ、大半の学者が光を波だと考えていたが、粒子でなければ説明できない現象があり、波を伝える媒体エーテルも発見されず、アインシュタインの光量子仮説によって解決された。

石油の有機起源説を裏付ける証拠も多数見出されているが、有機起源説では説明できない事象も多く、いずれが正解なのか、両方とも正解なのか、別の答えがあるのか、まだ分かっていない。

「石油有機起源説」は、米国で根強く、石油を「化石燃料」とする説が主流である。石油には独特のバイオマーカーがあり、微量元素の分析結果も生物由来を示

唆しているという学説である。

日本は大規模な油田がなく、石油の起源を真剣に研究する土壤がないこともあって、石油有機起源説をひとつの学説としてではなく、石油は化石燃料であるという事実として決め付けた論調が多い。

一方、ロシアや東欧では「石油無機起源説」が広く研究されている。地球の地下深い環境におけるメタン生成やそれに続く石油の生成は現在も実験や研究が行われている。

ロシア・ウクライナ学派が提唱する無機起源説は、周期表で知られるドミトリ・メンデレーエフ（ロシア）が提唱・創始した（1870年）もので、メンデレーエフは、現在のような実験がまだ行われていない段階から「石油は地球の奥深くで生まれている」と主張した。全ての石油・天然ガスは、地球深部の無機物に由来するため、生産力のある油田は、再生可能であり、マントルからたえず石油や天然ガスが補給されるという見解もある。実際に起こっている枯渇した油田への再充填現象の説明に用いられる。石油が再生可能エネルギーである、という考えは、今の日本にはない議論である。

石油資源の研究者にとっては、石油の成因は、重大な関心事であるが、米国の学会では、これまで「石油が有機起源であることは明白であり、結論が出ており、無機起源説は異端である」とされていた。米国では、石油の無機起源説は異端であり、学問としての議論はタブーであった。

しかし、宇宙物理学トーマス・ゴールド（1920～2004年、オーストリア）は、米国コーネル大学の教授でありながら無機起源説を擁護した。ゴールドは、パルサーや中性子性星を発見したことで知られる著名な天文学者であるが、「地球深層ガス説」を提唱し「The Deep Hot Biosphere」(1990) を著した。

ゴールドは、1950年代中頃より、天然ガスも石油も化石資源ではなく地球内部で生成されると考え、さらに石油が変質して石炭ができたと考えていたため、既に定説となっている石炭さえも化石資源ではないと主張した。（日本語版は、「地球深層ガス—新しいエネルギーの創生」、「未知なる地底高熱生物圏—生命起源説をぬりかえる」）

石油の成因が異なると、探索する場所と探索方法が異なり、資源量も異なるため、今後の油田の発見や埋蔵量の推定に大きな影響がある。もし、石油が、化石資源ではなく、再生可能資源となれば、エネルギー・資源問題の考え方は大きく変わる。

近年、基盤岩油田（生物の化石が見つからないはずの深部岩の石油）が、次々に見つかっており、これが、偶発的な発見ではなくなってきたため、2000年頃からは、

英米など西欧の学会でも、非化石炭化水素の研究が再認識されるようになってきた。ゴールドの主張のように、石油は有機起源だけでは説明できない事例が多くなり、米国でも議論を封印することができなくなってきた。

次の図に米国の学会（業界の研究会）での議論を示す。これは、IEEJ（一般財団法人日本エネルギー経済研究所）の研究者が、米国石油地質家協会（AAPG）研究会議「石油の起源、無機起源か有機起源か」（2005年）に参加した時の報告書から一部を抜粋したものである。

AAPGは、石油地質学の学術団体と石油天然ガス探鉱関係者のビジネスが融合したもので、この時の年会も50カ国7000人が参加しており大きなイベントである。

米国でも、無機起源説が公に議論されたのである。

有機起源説の主流は、ケロジェン説（kerogen、油母）であり、その根拠は原油中のバイオマーカーとされる。

いくつかのバイオマーカーによって石油は生物由来とされるが、石油以外の化石資源が移動して石油と混ざったという説もある。

無機起源説には2つのルートがあり、ひとつは地球創世記に持ち込まれた炭化水素があるという宇宙起源説、もうひとつは地殻深部で生成されるマントル起源説である。

宇宙起源説の根拠は、他の天体でみつかると非生物起源の炭化水素である。マントル起源説を裏付けるために、地球深部の環境を再現したF-T反応の実験などが行われている。

有機起源説では説明ができないいくつかの現象が無機起源説で説明できるということがあがるが、無機起源説で説明される最も影響が大きい事象に、基盤岩油田が世界各地に発見されているということがある。

基盤岩（bedrock）は、大陸地殻を構成し古い変成岩と火成岩から成る厚い基礎部分であり、生物化石がある堆積層よりもかなり深い。

もし、石油を化石資源と考えると、油田を探す時の試掘井の深さは堆積層までとなるが、近年は、より大深度の基盤岩の探索が行われるようになってきている。

JX 日鉱日石開発が探鉱・開発・生産を行っているベトナムのランドン油田、フンドン油田は、花崗岩質基盤岩内に発達したフラクチャーが貯留層となっている油田である。マレーシア、イエメンでも、大規模な基盤岩油田が発見されている。

1990年代後半から開発が始まったベトナムの油田は例外とされていたが、無機起源説の可能性を示唆するような基盤岩油田が見つかりはじめ、2000年頃よりウクライナの事例（無機起源説による探鉱による大規模油田の発見）が英文の論文に

なったこともあって、米国でも議論が始まった。化石層ではないところから発見される油田は例外ではなくなってきたのである。

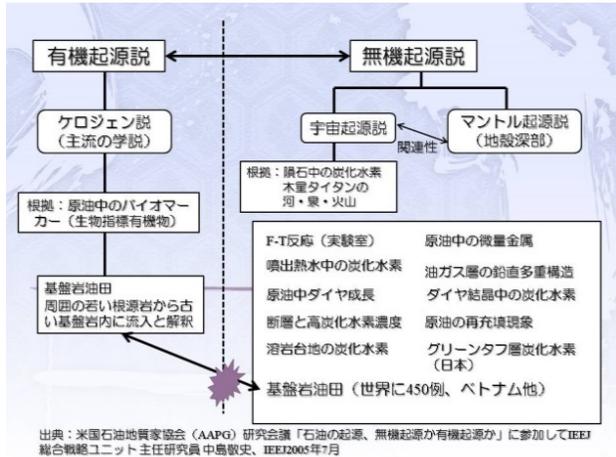


図 6-4-11-石油の有機起源説と無機起源説 (IEEJ 中島氏の報告書を参考)「無機起源石油・天然ガスが日本を救う!地球深層ガス説の新展開」、中島敬史、JOGMEC アナリシス、石油・天然ガスレビュー、2005.5.Vol.39No.3

基盤岩で発見される石油が増えてきたことに対して、無機起源説では、地殻深部で生成されたと説明、有機起源説では、有機起源の石油が地球深部に移動するダウンマイグレーション現象が起きていると説明している。

どちらの説が正しいかははっきりしないが、化石層である堆積層よりはるかに深い深成岩基盤岩や火山岩などから石油が見つかる事例は非常に多く、IEEJ の中島氏の調査によると、化石地層以外の探鉱で成功した油田ガス田は、日本も含めて世界に 500 力所以上あるため、全てをダウンマイグレーションで説明するのは難しいと思われる。

従来の石油探鉱は、堆積盆地基底部まで掘ることはなく、その前に止めるのが常識であったが、現在では、有機起源説・無機起源説に関わらず基盤岩まで掘り進めるということがおこなわれることが奥まっている。石油探索・採掘にはその国の政府の認可が必要であるが、探鉱を許可する条件として、より深い地層まで掘削するように指示する国も現れている。

石油の無機起源説の根拠として、惑星探査機カッシーニ (NASA・欧州宇宙局、

1997年打ち上げ)による土星の衛星タイタンの調査結果も指摘される。

カッシーニはタイタンを上空から調査するだけではなく、小型の探査機ホイヘンスを軟着陸させて大気や地表を調査、メタンやエタン(気体・液体・固体)を確認している。土星本体は、表面がアンモニアで覆われた巨大ガス惑星であるが、衛星タイタンは岩石でできており、半径が2576kmと太陽系では木星の衛星ガニメデにつく大きな衛星である。

衛星であるが質量が大きく、表面温度が低い(94~174K)ため、窒素分子を引き止めることができ、窒素97%の大気を持つことが出来ている。タイタンの表面には、メタンの雨、河川、海など地球に似た地形や気象が確認されている。ここには、炭化水素が大量にあり、生物由来ではない合成反応が示唆されている。

タイタンは大きな衛星であるため、古くから知られており(1655年にクリスティアーン・ホイヘンスが発見)、近年になって詳細な観測が行われるようになった。1980年代にNASAの探査機ボイジャーが観測、1990年代にはハッブル宇宙望遠鏡、2003年からはハワイ・すばる望遠鏡で観測が始まり、2004年に探査機カッシーニが土星軌道に投入された。探査機ホイヘンスはタイタンの低温の窒素大気中をパラシュートで降下、地表面への軟着陸に成功した。分厚い雲に覆われて観測が難しかったタイタンのデータを地球に送っている。

もし、石油の起源が明らかになり、石油が一部の地域の資源ではなく、どこにでもある資源になると世界地図は大きく変わることになる。

米国では、異端とされてきた無機起源説は、最近になって科学的な議論がなされるようになり、地質学者だけでなく経済学者の中にも無機起源説を唱える研究者が現れている。

6.4.5 石油のタンカー輸送

日本は、ほとんどのエネルギー資源を輸入しているが、そのうち、石油・天然ガスの多くが中東あるいはアジア・オセアニア地域より大型タンカーによって輸送されている。

世界の石油生産量の半分近くが国際パイプラインによるパイピング輸送であるが、半分以上はタンカーによる海上輸送である。日本は石油も天然ガスもパイプラインを持たず、全てタンカー輸送によって輸入しているため、経済活動も一般生活も全てこの海上輸送に依存している。

原油を運ぶタンカーや石油製品を運ぶプロダクトタンカーは、人件費や運行コストを考えると積載量の大きい船舶の方が有利であるが、港湾設備の制限と世界の航路の様々な通過制限があるため、そのサイズが決まっている(表6-44)。

石油製品などを運搬するプロダクト

タンカーは、およそ積載重量6万トン以下でほとんどのところを航行できる。

パナマ運河を通過する船舶は、船舶の長さと同幅に制限があり、最大の大きさ、パナマックス級の船舶の積載量はおよそ50万バレルである。一般的な原油の取引は100万バレル単位で行われるため、カリブ海/大西洋側から太平洋側の国へ原油を輸送する場合の制約条件となる。カナダの太平洋岸の港から日本やアジアへの輸出が有利になるのはパナマ運河の制約に関係している。

次の大きさは、アフラマックスは、ロンドンタンカーブローカーが決めた運賃シートに由来する大きさである。運河や海峡の通過とは関係ないが、大型のタンカーが入港できないような規模の港を利用する輸出入ではアフラマックスタンカーが用いられる。

表6-44 タンカーなどの大きさ

船種・船級	載貨重量 万トン	船の大きさなど
プロダクトタンカー	1~6	
パナマックス	6~8	50万バレル級、旧パナマ運河の最大幅08ft(32.9m)
アフラマックス	8~12	AFRA (Average Freight Rate Assessment)、8万トンで輸送運賃が変わる
スエズマックス	12~20	100万バレル級、スエズ運河、最大喫水20m
VLCC Very Large Crude Carrier	20~32	200万バレル級、原油用
ULCC Ultra Large Crude Carrier	32~55	原油用スーパータンカー、マラッカ海峡を通れないほど大きい

100万バレル級はスエズマックスと呼ばれる大きさである。スエズ運河は、最大喫水と高さには制限はあるものの、幅や長さの制限は重要でないため大型船舶の航行が可能であり、中東や北アフリカの石油・天然ガスがインド洋側と地中海の間を行き来できる。

スエズマックスより大きいVLCCと呼ばれる200万バレル級のタンカーは、運河の航行はできないが、中東から日本や韓国などへの大量輸送に適している。

さらに大きいULCCの場合は、狭い海峡や座礁のおそれがある海域を通行できないため、航路に制限があるが一度に大量の原油を運搬できるスーパータンカーである。

世界は、ひとつの海でつながっているが、大陸や島などの陸地によって制限され、航路には、いくつかの重要な「チョークポイント」が存在し、日本の社会・経済は、このチョークポイントのリスクを抱えている。

90日分以上の原油備蓄はあるものの、もしホルムズ海峡などのチョークポイントが何らかの原因で通行できなくなれば、調達危機、エネルギー危機が生じる。

(1) スエズ運河

スエズ運河の最大の特徴は、スエズ運河ルートによって欧州とアジアの航路が9700kmも短縮されることである。

地中海と紅海には海面の高度差がほとんど無いため、運河中に閘門は設置されていない。海水が自由に流れるため、運河内の水は海水である（紅海側から地中海側へ流れる）。運河の全長は193km、深さ24m、幅205m（2010年）、運河の南北両端と途中に人口50万人の都市が3つあり、運営するエジプト政府のスエズ運河庁がある。

スエズマックスの具体的条件は、喫水20m以下（海底トンネルがあるため）または載貨重量数24万トン以下、水面からの高さが68m以下（送電線や橋があるため）、最大幅77.5m以下となっており、かなり大きな艦船が通行可能である。運河は1レーンのみの一方通行で、南北に行きかう船は、途中の湖やバイパスですれ違う。放射性物質や危険物の運搬も可能であるため、各国の海軍の軍艦が武装したまま通行している。

スエズ運河の開通は1869年、フランス資本で建設されたが、その後、英国政府がスエズ運河会社の株主となった。1963年の第三次中東戦争によって封鎖され、1973年の第四次中東戦争で機雷封鎖されスエズ運河は使用できなくなった。その

後、米軍が機雷を掃海、1981年よりイスラエル軍が撤退を開始して、自由な航行が可能となった。現在のスエズ運河は、エジプト政府が所管している。

アラブの産油国各国は、スエズ運河に並行する原油パイプラインをエジプト国内に建設し(1977年)、紅海側から運河を通らずに地中海側へ輸送できるルートも確保、運河閉鎖リスクに備えている。

(2) ホルムズ海峡

日本にとって最重要のチョークポイントはペルシャ湾とオマーン湾をつなぐホルムズ海峡である。

世界で取引される石油の20%がホルムズ海峡を通過しており、通過する石油の量は、1,700万バレル/日(2011年)(270万kL/日)もあり、その85%以上がアジア向け(中国、日本、韓国)である。ホルムズ海峡の通過量は、日本の消費量440万バレル/日の約4倍である。

また、LNGタンカーも通過しており、2011年の1~10月のLNG通過量は、7000万トン(平均23万トン/日)である。

ホルムズ海峡は、原油が毎日230万トン、天然ガスが23万トンも通過する極めて重要なシーレーンとなっている。代替ルートとして陸上パイプラインがいくつかあるが、輸送能力が低く、コストもかかるため海峡が閉鎖されると重大な影響がある。

ホルムズ海峡の南側は、オマーンの飛び地、北側はイランである。オマーンの飛び地はアラブ首長国連邦に囲まれた半島の先端にある。オマーンは度々ペルシャ(イラン)に侵略・支配された歴史を持ち、海峡を隔てたイランは仮想敵国である。ホルムズ海峡の最も



図 6-4-12-ホルムズ海峡の位置

狭いところは幅33.8km。国際分離通航帯が、オマーン領海側に設定されている。南北二つのレーン幅は約4km、中央分離帯もほぼ同じ幅がある。狭い海域に莫大な量の石油・天然ガスを積載したタンカーが通行する。

ペルシャ湾の奥には、クウェート、イラク、サウジアラビアがあり、大量の船舶がホルムズ海峡を通過、中東で紛争が起こるたびに、海峡の安全な通行が政治的・軍事的駆け引きに使われる重要なチョークポイントである。

カタールに米空軍、バーレーンに米海軍が駐留している。

(3) マラッカ海峡

マラッカ海峡は、インドネシアとマレーシアおよびシンガポールの間にあり、ホルムズ海峡とは異なり迂回ルートはあるが、ペルシャ湾からアジア市場へ石油を海上輸送するための最短ルートであるため、日本にとって重要なシーレーンとなっている。

最狭部は2.8km、最浅部の水深は22.5mである。イエメン沖のマンデブ海峡と並んで海賊多発地帯である。マラッカ海峡が通行できない場合は、インドネシアのロンボク海峡へ迂回しなければならない。

(4) パナマ運河

パナマ運河は太平洋と大西洋を結ぶ重要なルートである。

現在は、米国のメキシコ湾からアジアへの石油や天然ガスの大量輸送がないため、エネルギー資源に関わる重要なチョークポイントとはなっていないが、アジア・太平洋と米国の東海岸を結ぶ貨物（工業製品・農産物）の重要な輸送ルートである。

パナマ運河の特徴は、パナマ運河にある3つの湖のうち最も高いガトゥン湖（ダム湖）が海抜26mのところであり、太平洋と大西洋の海水が直接つながっていないことである。そのため、パナマ運河を通過する船舶は、閘門（ロック）を使って湖の高さまで持ち上げられ、淡水湖を航行、再び海面の高さまで降ろされるという行程で太平洋と大西洋を行き来する。

航行する船舶は、閘門の大きさから、幅と長さの制約を受けるため、パナマックス級船舶はギリギリの大きさで設計され、自力航行ではなく鉄道の機関車で牽引曳航されて、閘門を通過する。

太平洋と大西洋を結び南米の南端のルートはかなりの大回りとなるため、多くの船舶がパナマ運河を利用するが、船舶の大きさの制限と通行量が大きな課題である。

パナマ地域の開発は、米国のカリフォルニア地域のゴールドラッシュ時に太平洋と大西洋をつなぐ最短ルートとしてパナマ鉄道を建設したことから始まる（1855年開通）。

続いて、米国では鉄道を使わずに、直接、船のまま大西洋から太平洋へ出られるようにと、パナマ付近に運河を建設する計画がたてられ、スエズ運河で実績のあるフランス・スエズ運河会社がこれを主導することになった（1880年）。

1892年に、スエズ運河会社が倒産し、運河計画は米国が継承することになり、当初は、パナマよりも北のニカラグア湖を利用するルートが有力であった。しかしこの地域の政情が不安定で計画が進まず、米国議会は、ニカラグアルートを放棄し、当時コロンビア共和国領土であったパナマ地峡に運河を建設することを決定した。

翌1903年、コロンビアからパナマが独立し、米国はパナマ共和国とパナマ運河条約を締結した。1914年に、パナマ運河が開通。運河の収入はパナマ共和国、運河地帯の施政権と運河の管理権は米国が保有、米国は永久租借地に軍事施設を置くことになった。1977年に新パナマ運河条約が締結され、1999年にパナマ運河の管理権は、全てパナマに返還・譲渡された。

20世紀後半は、大西洋から太平洋への輸送（南向け輸送）は米国からの農産物が多く、太平洋から大西洋への輸送（北向け輸送）は日本からの工業製品が多い状態が続いたが、21世紀になってから、北向き輸送は中国が最も多くなった。



図 6-4-13-パナマの地図

通行する船舶の増加に対応し、大型船の通行を可能とするため、パナマ政府は、2007年に新パナマ運河の拡張工事に着手、日本のみずほ銀行などが協力して、2016年5月に工事が完了、6月26日から新パナマ運河の運用が開始される。

従来のパナマ運河は、3つの湖に3つの閘門があったが、これを迂回して太平洋側と大西洋側に3段の閘門を設置、輸送力は2倍になる。



図 6-4-14-パナマ運河（元図は Wikipedia）

パナマ運河の輸送力が増すと、米国からアジアへの農産物だけでなく、石油や天然ガスの輸送の可能性も大きくなると思われる。日本などのアジア各国のエネルギー政策にも影響があると考えられる。

なお、大きな世界地図で見ると南北アメリカ大陸の東側に大西洋、西側に太平洋があるが、パナマ地域が大きく湾曲しているため、パナマ運河は、太平洋が南側で東側、大西洋が北側で西側になっており、アジアから米国へは北向け貨物、米国から

アジアへは南向け貨物と呼ぶ。当初の案にあったニカラグア運河は、中国主導（HKND グループ、香港ニカラグア運河開発投資有限公司）で建設が進められている。2019年完成予定で、パナマ運河より大きい40万トン級が航行可能とされている。



図 6-4-15-ニカラグア運河（元図は Wikipedia）