



海洋開発産業概論

改訂第 3 版

2021 年 3 月

本教材は、平成 29 年度国土交通省委託事業「海洋開発技術者育成のための基盤整備業務」において作成されたものです。

なお、「改訂第 3 版」は 2020 年（令和 2 年）12 月時点で東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻 鈴木英之教授の監修の下、日本財団オーシャンイノベーションコンソーシアムと一般財団法人エンジニアリング協会が改訂・情報更新をしたものです。

序

本教材「海洋開発産業概論」は、国土交通省委託事業「海洋開発技術者育成のための基盤整備業務」において作成されたものです。本事業においては、「海洋開発人材育成 カリキュラム・教材開発に関する検討委員会」（委員長 東京大学 鈴木英之教授）を設置して、整備すべき教材等に関する検討が行われました。本教材の具体的な内容については、同検討委員会の下に設置された「産業概論ワーキンググループ」（座長 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 坂本隆 海底資源開発事業推進部長（当時））を中心に、検討・作成作業を行いました。

本教材は、海洋開発について初めて学ぶ文系および理系学生を対象に、学生の皆さんが海洋開発に関する基礎的知識を習得し、産業の全体像を掴むことを目的として作成されました。海洋開発分野における理論と実ビジネスを結びつけて理解し、実務のイメージを持つことができるよう、具体的なプロジェクトの紹介も盛り込むこととしました。

本事業では、本教材の他、「海洋開発工学概論」および「海洋開発ビジネス概論」の作成を行っております。

海洋資源開発および海洋再生可能エネルギー開発について、それぞれのプロセス、必要となる施設や機器の構造、構成するシステムについて技術的な側面から理解を深めたい学生の皆さんには「海洋開発工学概論」を、プロジェクト・マネジメントを中心とした海洋開発のビジネスを実施するために必要な知識を深めたい学生の皆さんには「海洋開発ビジネス概論」をあわせて手に取って頂ければ幸いに存じます。

本教材作成にあたってご協力頂いた関係各位に心から謝意を表するとともに、本教材を通じて、学生の皆さんが海洋開発産業に関心を持ち、この分野に進むことのきっかけになることを心より期待致します。

2018年3月

海洋開発人材育成 カリキュラム・教材開発に関する検討委員会

目次

1	序論	1
1.1	海洋開発産業の定義	1
1.2	海洋開発の意義	2
1.2.1	海洋開発の必要性～世界的な流れ～	2
1.2.2	海洋開発産業の規模	3
1.3	海洋開発に影響を与える要因	5
1.4	海洋開発における沿岸国の権利	5
1.5	日本における海洋開発の重要性	7
2	海洋開発産業の背景と現状	12
2.1	海洋資源開発	12
2.1.1	海洋石油・天然ガス開発	12
2.1.2	新たな資源開発への挑戦	33
2.2	海洋再生可能エネルギー開発	42
2.2.1	洋上風力発電	42
2.2.2	その他発電システム	53
3	海洋石油・天然ガス開発の実際	80
3.1	一般的な開発の全体工程	80
3.1.1	開発の全体工程	80
3.1.2	各段階での主なタスク	81
3.2	プロジェクト事例	98
3.2.1	イクシス LNG プロジェクト	98
3.2.2	国内プロジェクト	109
4	海洋再生可能エネルギー開発の実際	120
4.1	発電システム	120
4.1.1	洋上風力発電システム	120
4.1.2	その他の再生可能エネルギー発電システム	132
4.2	開発の全体工程	141
4.2.1	工程全体の流れ	141
4.2.2	各段階の主なタスク	144
4.3	プロジェクト事例	146
4.3.1	概要	146
4.3.2	研究課題	148
4.3.3	事業の流れ	150

5	安全と環境保全	155
5.1	過去の事故事例と安全・環境保全規制の強化	155
5.2	HSE (Health, Safety and Environment)	171
5.2.1	HSE とは	171
5.2.2	リスク評価の手法	181
5.3	環境影響評価	189
5.3.1	環境影響評価とは	189
5.3.2	海洋開発における環境影響評価の必要性	191
5.3.3	環境影響評価の事例	197
6	プロジェクト・マネジメント(Project Management)	206
6.1	プロジェクト・マネジメントとは	206
6.1.1	組織マネジメントの概要	208
6.1.2	プロジェクト計画の概要	212
6.1.3	スケジュール管理の概要	215
6.1.4	コスト管理の概要	216
6.1.5	リスク管理の概要	218
6.1.6	品質管理の概要	224
6.2	契約・保険・ファイナンスの基礎	228
6.2.1	契約とは	228
6.2.2	契約の種類	228
6.2.3	主な保険の種類	232
6.2.4	ファイナンスとは	233
6.2.5	海洋開発プロジェクトにおける契約・保険・ファイナンスの事例	235
7	(付録) 世界のプロジェクト	240
7.1	海洋石油・天然ガス開発プロジェクト	240
7.2	海洋再生可能エネルギー開発プロジェクト (洋上風力発電・潮汐発電)	266
	(付録) 用語の解説	277
	索引	291

※「(付録) 用語の解説」には、海洋開発について初めて学ぶ学生(文系・理系)に最低限知っておいて欲しい用語を掲載しました。「用語の解説」掲載の用語については、本文中初出時に右肩に星印*を記載しています。

それ以外で説明が必要な用語については、本文または脚注において説明を記載しています。

尚、本書で紹介している企業名・業務内容などは2019年12月末時点の情報に基づき記載しております。

1 序論

地球表面の約70%は海で覆われている。古来人類は広大な海を交通、貨物輸送、水産資源確保の場として利用してきたが、経済、社会の発展のため、海洋に豊富に存在する鉱物資源、エネルギー等の有効利用の必要性が、益々高くなってきている。すなわち、海洋開発産業(offshore industry)の重要性が高まっているといえる。

海洋開発産業とは何か。また、どのような背景でその重要性が増しているのか。本章で概説する。

1.1 海洋開発産業の定義

「海洋開発産業」と一口に言っても、その領域は多岐にわたる。例えば、ブリタニカ国際大百科事典では、「海洋開発産業」の定義は下記のように述べられている。

海洋開発にたずさわる産業の総称。おもな部門としては海底油田、海底鉱物資源、熱水鉱床や温度差発電、波力発電、水産増養殖を対象とした資源エネルギー開発、海上空港、人工島といった海上、海中のスペース利用や海底パイプラインの敷設などの海洋土木などがある。

本書では、海洋開発産業の中でも、石油や天然ガス(natural gas)*などの海底の資源の採掘等を行う海洋資源(ocean resources)開発、および洋上風力、波力、潮流(tidal current)*、海流(ocean current)*、潮汐(tide)*、海洋温度差等、海域において利用可能な再生可能エネルギー(これらを総称して「海洋再生可能エネルギー(ocean renewable energy)*」という)開発を対象とし、その産業の全体像や開発の各工程の概要を説明し、関連する基礎知識について紹介する。

図 1.1.1 に示すように、海洋資源開発、海洋再生可能エネルギー開発の中でもいくつかの分類に分かれるが、その中でも、既に商業化されている分野と、商業化に向け研究開発の段階にある分野とがある。

(1) 海洋資源開発

「資源」とは、産業等に利用可能な自然から採れる有用物であり、海洋資源の中には、石油・天然ガスの他、メタンハイドレート(methane hydrate)*、海底熱水鉱床(SMS : Sea-floor Massive Sulfides あるいは sea-floor hydrothermal deposit)*などの海底鉱物資源などがある。海洋資源開発のうち、既に商業化されているのは、図 1.1.1 中最も大きな円で示した海洋石油・天然ガス開発のみである。したがって、本書では、海洋石油・天然ガス開発を中心に扱うこととするが、海洋石油・天然ガス開発と密接に関連するその他の資源開発についても、新たな開発分野として紹介する。

水産資源の増養殖についても、海洋資源開発の一分野と捉えられるが、本書では扱わないこととする。

(2) 海洋再生可能エネルギー開発

エネルギーとは、ある物体が『仕事をする「ものを動かす、温める、光らせる等」力』

第1章 序論

を指す。再生可能エネルギーは、石油・天然ガスや石炭といった有限な資源である化石エネルギーとは異なり、自然界に常に存在するエネルギーのことである。大きな特徴として、「枯渇しない」「偏在していない」「発電時(利用時)にCO₂を排出しない(増加させない)」の三点が挙げられる。海洋再生可能エネルギーとは、洋上の風力、波力、潮流・海流等の海洋の自然エネルギーを指し、これらのエネルギーを電気エネルギーに変換して発電を行う。

海洋再生可能エネルギーについては、図 1.1.1 中、他の再生可能エネルギー開発と比較して大きな円で示されている洋上風力発電(ocean wind turbine あるいは offshore wind turbine)*が欧米を中心に既に広く商業化されている。このため、本書では、洋上風力発電を主に扱う。また、一部の国で商業化されている潮汐発電(tidal power generation)*、将来の事業化を見据え研究開発が進められている波力発電(wave power generation)*、潮流発電(tidal current power generation)*・海流発電(ocean current power generation)*、海洋温度差発電(OTEC : Ocean Thermal Energy Conversion)*等についても紹介する。

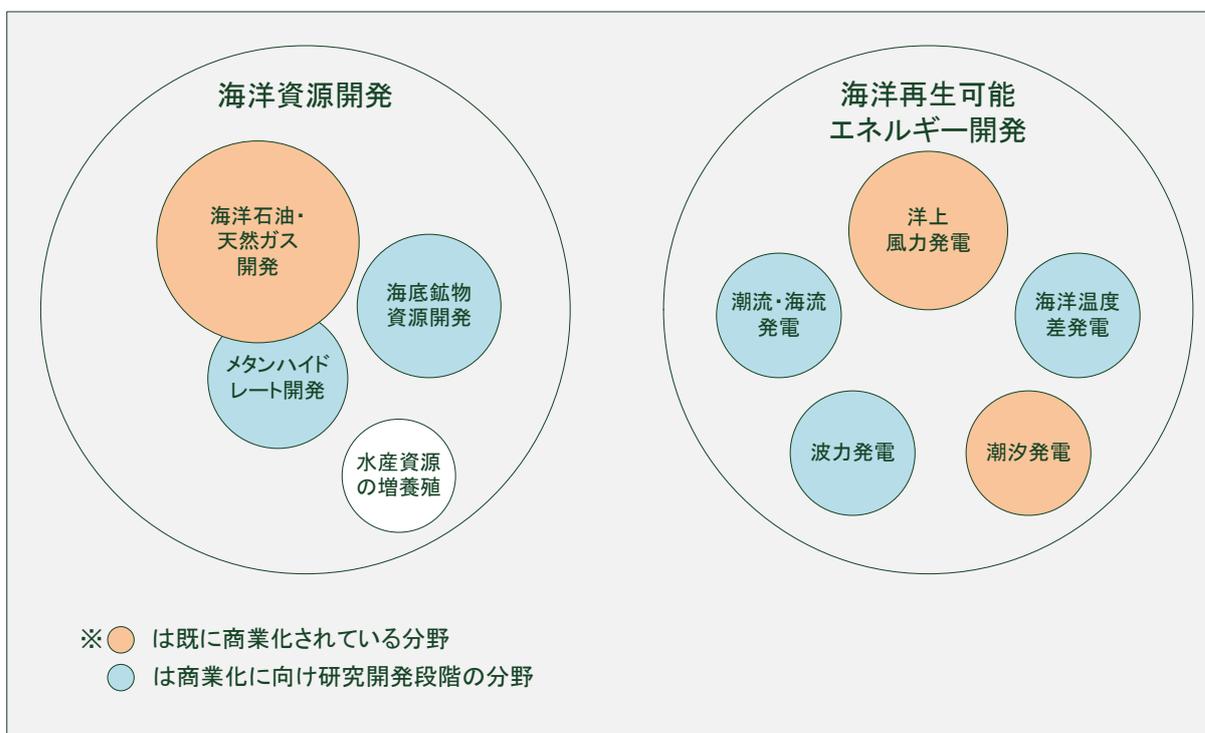


図 1.1.1 本書で扱う海洋開発産業の領域のイメージ

1.2 海洋開発の意義

1.2.1 海洋開発の必要性～世界的な流れ～

(1) 海洋資源開発

前述のように、ものを温めたり、動かしたり、光で照らしたりするためには、エネルギーが必要であり、現代社会の利便性は、その利用抜きにしては実現し得ない。エネルギー需要は、社会の発展に伴いこれまで拡大を続けてきており、今後もさらに拡大していくことが見込まれる。石炭や石油・天然ガスなど、燃焼させることでエネルギーを得ることがで

第1章 序論

きる資源は、現代社会に不可欠なものであり、中でも、石油・天然ガスは2015年時点で、一次エネルギー¹全体の過半を占める重要なエネルギー源である。

国際エネルギー機関(IEA)、BP、米国エネルギー省情報局(EIA)、日本エネルギー経済研究所(IEEJ)によって、世界の一次エネルギー消費量は、2015年に対し2030年は約1.2～1.3倍に拡大すると予想されている。その中で、最も増加するのは再生可能エネルギーであり、既に先進国ではエネルギー利用の転換や利用効率の向上により、石油需要の縮小が始まっている。一方、新興国では今後自動車保有数が増えることにより、特に輸送部門で石油の消費量が増加し、加えて石油化学産業の需要拡大が予測されている。したがって、石油は引き続き最大のエネルギー源であり続け、一次エネルギー消費の3割前後を維持すると考えられている。また、天然ガスは化石燃料の中では最も堅調な需要が見込まれ、特に中国と中東諸国で、電力・民生部門に加え、トラックや船舶向け燃料としての天然ガス需要が拡大すると見込まれている。

石油・天然ガス開発は、開発コストおよび生産効率性の観点から、技術的に開発が容易ないわゆる「イージーオイル・ガス」から優先的に進められるため、これまで陸上もしくは浅海の在来型油ガス田が従来の石油・天然ガス開発の中心的役割を担ってきた。しかし、将来的にさらなる石油・天然ガスの生産が必要となる中、今後はより難易度の高い場所での探鉱(exploration)*・開発・生産を進めていくことが求められる。

石油・天然ガス需要の成長を支えるため、近年は、シェールガス・オイル(shale gas and oil)*を代表とする非在来型資源(unconventional resources)*の生産拡大が顕著である。一方で、中長期的に拡大する石油・ガス需要を支えるために重要な役割を担う可能性がある生産手段の一つが、海洋での石油・天然ガス開発であるといえる。現在の世界における生産量のうち海洋油ガス田からの生産が約4割とされており、今後も海洋における開発の拡大が期待される。

(2) 海洋再生可能エネルギー開発

世界的に地球温暖化対策が強く求められる中、温室効果ガス(GHG: Green House Gas)であるCO₂の削減が課題となっている。化石燃料と異なり、利用時に温室効果ガスであるCO₂を排出しない、再生可能エネルギーへの期待が高まっている。

このうち、風力発電に関しては、陸上に比べ強く安定した風が吹く海洋が注目されている。洋上風力発電は、欧州を中心に商業化されており、今後も世界的にさらなる普及が見込まれている。

この他、潮汐発電が一部の国で商業化されており、波力発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電についても、実証研究段階ではあるが、今後の利用可能性に期待がもたれている。

1.2.2 海洋開発産業の規模

現状において、海洋開発産業はどのくらいの規模を有するのだろうか。上述のように、海

¹一次エネルギー: 石油、石炭のように、自然から採取されたままの物質を源としたエネルギー。電気、都市ガスなどは、一次エネルギーを加工した二次エネルギーと呼ぶ。

第1章 序論

洋開発産業の中で、既に商業化されているのは、海洋石油・天然ガス開発と洋上風力発電の二つである。これら二つを比較すると、海洋石油・天然ガス開発の方が、圧倒的に市場規模が大きいことから、以下で、海洋石油・天然ガス開発産業を例に、他の産業との比較を試みる。

一般財団法人エンジニアリング協会が2014年度に実施した試算によれば、探査船(research vessel あるいはsurvey vessel)*、海洋掘削リグ(offshore drilling rig)*などの海洋石油・天然ガス開発に必要な設備の年間建造費は1080億ドル（仮に1ドル=100円とすると、およそ11兆円）である。集計や試算の方法の違いもあるため厳密な比較はできないが、これらの設備の製造業は、現在において既に造船業や民間航空機製造業と比較しても遜色ない規模を誇っている（表 1.2.1参照）。

さらに、海洋石油・天然ガス開発産業全体を見渡すと、これらの設備の製造業の他に、これらを使って探査、掘削などの操業を行う市場も存在する。この市場の規模は、同試算によると年間約1500億ドル（およそ15兆円）である。このように、設備投資や操業に要する費用などをすべて足し合わせると、海洋石油・天然ガス開発産業の市場規模は年間4000億ドル（およそ40兆円）とも試算され、巨大な市場が形成されているといえる。

表 1.2.1 世界市場における海洋石油・天然ガス開発産業と他産業との規模の比較

	海洋石油・天然ガス開発	造船業	民間航空機産業
市場規模（年間） 1USD=100円 で換算	1080億ドル （およそ11兆円）	930億ドル （およそ9兆円）	— 11.5兆円
データの説明	エンジニアリング協会による設備建造費 試算額※1	2014年竣工船舶の取引 額※2	2012年の市場規模※3

※1 出典：エンジニアリング協会：平成26年度「海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査」報告書

※2 出典：Clarksons Research :World Shipyard Monitor, Volume 22, No.11, 2015

※3 出典：経済産業省 産業技術環境局：我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査

海洋石油・天然ガス開発の必要性、重要性は今後益々高まることが予想され、市場の成長が見込まれることから、海洋開発市場全体としての規模はさらに大きく拡大していくものと考えられる。

第1章 序論

1.3 海洋開発に影響を与える要因

資源、再生可能エネルギーの種類は問わず、我々は、存在する資源やエネルギーのすべてを利用できるわけではない。環境上の制約や、技術的な制約等により、利用できるものは限られる。また、そうした制約がクリアされた場合でも、開発コストが高く、収益が得られない場合、または他の選択肢と比較して収益性に乏しい場合には、開発を断念するという判断がなされることとなる。

すなわち、資源・エネルギー開発において、経済性が成り立つかどうかという点は、最も重要な要素の一つであり、海洋開発についても同じことが言える。例えばシェールオイル・ガスや深海での石油・天然ガス開発、再生可能エネルギー開発等の新たな分野への投資は、中長期的に必要であることは変わらないものの、陸上の油・ガス田からの産出に比べてコストがかかるため、短期的には石油価格の変動に左右される面がある。

1.4 海洋開発における沿岸国の権利

海洋開発においては、沿岸国にどのような権利が与えられているかという点も押さえておく必要がある。

20世紀に入り、貿易や遠洋漁業の拡大などによって海洋の利用が拡がり、国際的な慣習法の法典化に向けた動きが見られるようになった。中でも重要な契機となったのは、1945年にトルーマン米大統領が行った「トルーマン宣言」である。同宣言は、大陸棚(continental shelf)の海底と地下の天然資源に対する管轄権や沿岸の漁業を規制する水域を一方的に主張したものであった。この宣言を受け、他国も追随するかたちで一方的に沿岸海域の管轄権を主張することになったことから、国際連合は1958年に第一次国連海洋法会議を開催し、ここで「領海と接続水域に関する条約」や「公海に関する条約」等、後の国連海洋法条約のベースとなる「ジュネーブ海洋法4条約」が採択された。その後1960年代に入り、アフリカや中南米の新興国が領海基線²から200海里³までを領海(territorial sea)、または排他的経済水域(EEZ: Exclusive Economic Zone)*である、と主張するようになったことなどを受け、10年間という長い時間をかけた各国の粘り強い交渉の後、領海等の範囲について合意に至り、1982年に国連海洋法条約(UNCLOS: United Nations Convention on the Law of the Sea)が採択された。同条約は「海の憲法」とも呼ばれ、海域分類や権利義務関係、海洋環境の保全、紛争解決手続きなどが規定された。

領海などの用語説明として海上保安庁海洋情報部が示す概念図を図1.4.1に示す。

² 領海基線：海岸の低潮線、湾口もしくは湾内等に引かれる直線。基線。

³ 海里：長さを表す単位で、1海里が緯度1分に相当する。メートル換算にすると、1海里は1852mである。

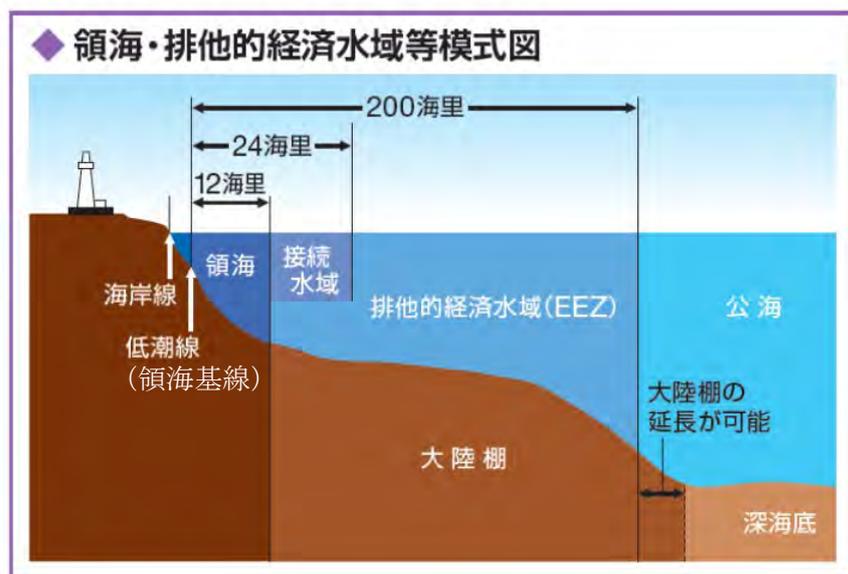


図1.4.1 領海・排他的経済水域等模式図
 (出典：海上保安庁海洋情報部ウェブサイト、一部加工)

沿岸国では、下記の通り、領海内での主権の行使が認められている他、EEZや大陸棚においても権利が与えられている。

(1) 領海：

領海基線からその外側 12 海里（約 22km）の線までの海域を指す。沿岸国の主権は、領海の上空並びに領海の海底およびその下にも及ぶが、外国船舶は無害通航権を有する。

(2) 接続水域：

領海基線からその外側 24 海里（約 44km）の線までの海域（領海を除く）を指す。接続水域においては、沿岸国は、自国の領土または領海内における通関、財政、出入国管理（密輸入や密入国等）または衛生（伝染病等）に関する法令の違反の防止および処罰を行うことが認められている。

(3) EEZ：

領海基線からその外側 200 海里（約 370km）の線までの海域（領海を除く）を指す。EEZ においては、以下の権利が認められている。

- ① 天然資源の開発等にかかわる主権的権利
- ② 人工島、設備、構築物の設置および利用にかかわる管轄権
- ③ 海洋の科学的調査にかかわる管轄権
- ④ 海洋環境の保護および保全にかかわる管轄権

EEZ では、沿岸国は水域と海底とその下の天然資源の探査、開発に主権的権利を有している。すなわち、海水中の水産資源および海底の鉱物資源に対し権利を行使できる。

第1章 序論

(4) 大陸棚：

領海基線からその外側 200 海里（約 370km）の線までの海域（領海を除く）を基本とするが、大陸辺縁部の外縁がこれを超えて延びている場合には、延長することができる。

なお、大陸棚においては、以下の権利が認められている。

- ① 天然資源の開発等にかかわる主権的権利
- ② 人工島、設備、構築物の設置および利用にかかわる管轄権

大陸棚では、沿岸国は海底とその下の天然資源の探査、開発に権利を有しているといえる。海底の鉱物資源や海底に定着性の生物資源が対象となるが、海水中の資源については対象外となっている。

なお、大陸棚の外は「深海底」とし、そこにある資源は人類共通の財産とされている。

図 1.4.2 に、海上保安庁海洋情報部が公表している日本の領海等の概念図を示す。他国との境界が未確定の海域もあるが、日本が海洋開発の権利を行使できる海域は、概ね同図の通りであると考えられる。領海および EEZ を合わせた面積は、世界第 6 位の広さを誇る。



注) 外国との境界が未画定の海域における地理的中間線を含め便宜上図示

図 1.4.2 日本の領海等概念図

(出典：海上保安庁海洋情報部ウェブサイト)

1.5 日本における海洋開発の重要性

日本は、広大な領海・EEZ・大陸棚を有している。近年、これらの海域でメタンハイドレートや海底熱水鉱床などの鉱物資源の存在が確認されており、資源開発の期待が高まっている。他方、資源国における資源ナショナリズム(resource nationalism)*の高まり等により、資源の安定供給が脅かされる可能性があり、他国の資源政策に左右されない資源の確保は重要な課題である。また、メキシコ湾、北海、ブラジル沖などでは既に海洋開発のフィールドが存在し、

第1章 序論

今後も開発が進められると見込まれる中、我が国が有する優れた技術を海外に展開することで、我が国の産業の更なる発展が望める。このように、海洋開発に挑戦することは、資源の確保や経済成長の観点から非常に重要である。

しかしながら、我が国の周辺で資源を採掘することが経済的・エネルギー的に合理的であるかどうかを判断したり、環境に配慮しながら生産を続けたりするためには、賦存量(resources)*・賦存状況や、採掘に伴う環境への影響を予め把握しなければならない。また、生産に必要な技術の開発も必要となる。このように、我が国周辺の海域における海洋開発には、多くの解決すべき課題が残されている。海洋開発分野は国際的な競争に晒されており、これらの問題を一つひとつ解決していかなければ、目の前にある資源の開発ビジネスを諸外国に奪われる事態にもなりかねない。

このように、海洋開発は極めて重要であるが、一方で課題も山積しており、中長期的な観点から計画的に課題解決に向けた取り組みを推進していく必要がある。

こうした背景の中、海洋に関する施策を総合的、一体的、計画的に推進するため、「海洋基本法(Basic Act on Ocean Policy)*」が制定され、それに基づく「海洋基本計画(Basic Plan on Ocean Policy)*」が策定されている。また、経済産業省は、メタンハイドレートや海底熱水鉱床などの商業化までの工程表を示すなど、国においても中長期的な視点で、計画的に海洋開発に取り組んでいる。

また、このように重要な海洋開発分野において、海洋資源の成因に関する科学研究、将来の開発を見越した生態系調査および長期監視技術開発を進めるとともに、民間と協力して海洋資源調査技術の開発を進めるため、国家プロジェクトである、「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP : Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)⁴」の11の課題の一つとして「次世代海洋資源調査技術研究開発計画(海のジパング計画)」が進められている。本プログラムは、得られた技術等を民間に移転し、世界に打って出ることができる海洋資源調査産業を創出することが狙いであり、海洋開発分野の可能性をまた一つ広げるものである。

さらに、国土が狭く、土地確保が難しい日本では、資源開発、再生可能エネルギー開発以外でも海洋の活用は重要であり、過去にも洋上施設建設のプロジェクトが進められてきた。例えば、急激な石油価格の変動や戦争などの有事に備え、日本では10か所の国家石油備蓄基地があるが、そのうち、長崎県の上五島、福岡県の白島の2か所の国家石油備蓄基地は、「浮遊式海洋構造物(洋上タンク方式)」による洋上石油備蓄システムを採用している(図1.5.1)。

また、日本で技術開発されたメガフロート(mega-float、超大型浮体構造物)は、水深や地盤に関係なく海域を利用可能であり、耐震性に優れ、埋め立て工事と比較して環境への影響が少ないことなどから、洋上空港への利用等が期待される。1999年には、横須賀沖にて長さ1000m級の実証浮体が設置され、航法システムのチェックを航空局航法検査機(YS-11機)が低空で実施し、2000年には小型機及びヘリコプターにより実際の離着陸の評価飛行実験が行われている(図1.5.2)。

⁴ 戦略的イノベーション創造プログラム(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, SIP): 内閣府の総合科学技術・イノベーション会議が司令塔となり、府省の枠や旧来の分野の枠を超えた科学技術イノベーションを実現するために創設されたプログラム。

第1章 序論



(上五島国家石油備蓄基地)



(白島国家石油備蓄基地)

図1.5.1 洋上石油備蓄の例

(出典：(左) 上五島石油備蓄ウェブサイト、(右) 白島石油備蓄ウェブサイト)



図1.5.2 横須賀港沖合の浮体空港実証実験用の空港モデル

(出典：海洋産業研究会ウェブサイト)

日本は、四方を海に囲まれた海洋国家であり、石油や鉱物等のエネルギー資源の輸入のほぼすべてを海上輸送に依存している。また、国土面積が小さく、天然資源の乏しい島国である日本にとって、海洋の生物資源や周辺海域の大陸棚・深海底に埋蔵される海底資源は、非常に重要である。このように、我々の生活と海洋は切っても切れない関係にあり、環境保全等に配慮しつつ海洋開発を行っていくことは、海洋立国を目指す日本にとって最重要課題の一つである。それを担う海洋開発産業は、将来にわたり極めて重要な役割を果たしていくものであるといえる。

第1章 序論

<参考資料>

- ブリタニカ・ジャパン. ブリタニカ国際大百科事典. ブリタニカ・ジャパン. 2015.
- 造船業・海洋産業における人材確保・育成方策に関する検討会. “海洋開発分野の技術者育成の方向性について(案)”. 国土交通省. 2014-08-26.
<https://www.mlit.go.jp/common/001050820.pdf>, (参照 2021-02-22).
- 資源エネルギー庁. 平成 28 年度エネルギーに関する年次報告 HTML 版. エネルギー白書. 2017, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017html/>, (参照 2021-02-22).
- エンジニアリング協会. 平成 26 年度 海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査 報告書. 2015, 351p.
- 経済産業省産業技術環境局. 我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査報告書. 2014, 526p.
- Clarksons Research. World Shipyard Monitor. 2015, Vol.22, No.11.
- International Energy Association (IEA). “World Energy Outlook 2017”. IEA.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>, (cited 2021-02-22).
- BP, “Energy Outlook 2017”, BP
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2017.pdf>, (cited 2021-02-22).
- U.S. Energy Information Administration (EIA). “International Energy Outlook 2017”. IEA. <https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/>, (cited 2021-02-21).
- みずほ銀行産業調査部. “海洋資源開発産業の現状と展望”. みずほ産業調査. みずほ銀行産業調査部, 2014, No.4, 47, 79p.
https://www.mizuhobank.co.jp/corporate/bizinfo/industry/sangyou/pdf/1047_all.pdf, (参照 2021-02-22).
- 三井海洋開発. “業界の展望”. 三井海洋開発.
<https://www.modec.com/jp/ir/individuals/outlook.html>, (参照 2021-02-22).
- 外務省. “わかる！国際情勢 Vol.61 海の法秩序と国際海洋法裁判所”. 外務省. 2021-02-22.
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/pr/wakaru/topics/vol61/> (参照 2021-02-22).
- 海上保安庁海洋情報部. “管轄海域情報～日本の領海”. 海洋保安庁.
https://www1.kaiho.mlit.go.jp/JODC/ryokai/ryokai_setsuzoku.html, (参照 2021-02-22).
- 内閣府. “海洋基本計画. 内閣府.
<https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan.html>, (参照 2021-02-22).
- 資源エネルギー庁. “「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」について”. 経済産業省. 2019-02. https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/strategy/001.html, (参照 2021-02-22).
- 資源エネルギー庁. “石油・天然ガスをめぐる最近の動向(資源・燃料政策に関する有識者との意見交換会資料)”. 経済産業省. 2011-11.
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/shigenjuyou_kaihatsu_wg/001_01_03a.pdf, (参照 2017-11-01).

第1章 序論

- 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）． “「海のジパング計画」 “黄金の国”を海洋に求めて”． 内閣府．
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sympo1412/subject/subject_05.html,
（参照 2021-02-22）．
- 白島石油備蓄． “施設概要”． 白島石油備蓄．
<https://shirashima.jp/facility> ,（参照 2021-02-22）．
- 海洋産業研究会． “浮体構造物（マリンフロート）の活用に関する調査研究”． 海洋産業研究会． <https://www.rioe.or.jp/marinefloat2.htm>,（参照 2017-11-01）．

2 海洋開発産業の背景と現状

本章では、まず海洋開発の領域の一つである海洋資源開発の背景とその現状について、海洋石油・天然ガス開発を中心に、開発の歴史、その分布と賦存量、開発および生産産業を構成する企業など（プレイヤー）を紹介するとともに、今後の産業界の動向について紹介する。さらに、海洋石油・天然ガスと密接に関連するメタンハイドレート、海底熱水鉱床などの海底鉱物資源の開発についても新たな資源開発への挑戦として紹介する。

また、海洋再生可能エネルギー開発についても、今後の発展が期待される海洋開発の重要な分野である。本章2節では既に商業化されている洋上風力発電について、エネルギー分布や賦存量、導入ポテンシャル、市場動向、今後の課題について概説する。また、商業化に向け実証研究が進められている他の海洋再生可能エネルギー利用についても、これまでの研究開発の経緯、今後の課題や見通し等について概説する。

2.1 海洋資源開発

2.1.1 海洋石油・天然ガス開発

(1) 海洋石油・ガス開発の歴史

① 石油産業の成立と発展

a) 石油産業の誕生

石油産業の歴史は、1859年米国ペンシルベニア州オイルクreekと呼ばれる地域で、エドウィン・ドレークが油生産井の機械掘りを行い、岩盤下の地下69.5フィート（約21m）の地層から石油の出油に成功したことから始まるとされる。原油から抽出した灯油がランプの油として、これまでの鯨油に代わって利用されることとなった。

石油ブームの中、ジョン・ロックフェラーは、1870年に米国オハイオ州クリーブランドに Standard Oil Company を設立し、原油の精製を始めた。1880年代半ばには、オハイオ州からインディアナ州で油田が発見されると石油の生産にも乗出し、総合石油企業を作り上げ、多数の傘下企業を抱える Standard Oil Trust として成長させた。

その後も、米国では大規模な油田の発見が続き、米国の石油産業は大きな成長を遂げ、1900年代には、Texaco、Gulf Oilなどの新しい石油会社が創立されている。

一方、米国で80%以上のシェアを持つまでに大きくなった Standard Oil Trust は米国世論の反発もあり、1911年に反トラスト法（独占禁止法）によって、後のExxonとなる Standard Oil of New Jersey、同Mobilとなる Standard Oil of New York、同Chevronとなる Standard Oil of California、同Amocoとなる Standard Oil of Indiana、同Conocoとなる Continental Oil and Transportation Company などの34の石油会社へと分割された。

米国におけるドレークの石油開発に遅れること20年余り、帝政ロシア下のアゼルバイジャン、カスピ海の西岸バクーで、スウェーデンのノーベル兄弟（ダイナマイトで有名なノーベルの兄たち）が1870年代に石油精製を始めた。市場であるロシアや欧州へ石油を出荷するルートとしてバクーからカスピ海を北上し、ボルガ川、バルト海へと進むルー

第2章 海洋開発産業の背景と現状

トを取ったが、輸送コストには難があった。石油は、それまで樽詰めで輸送されていたが、ノーベルらが世界で初めて油タンカーを開発し、1878年に石油のばら積輸送を始めたことはよく知られている。

ノーベルの競合相手たちは、欧州市場への輸送ルートとしてバクーから黒海沿岸のバツームへの鉄道建設を計画、これにロスチャイルド家が資金提供し、1883年に黒海ルートが完成した。ロスチャイルド家は、その後バクー近くのバニト油田の権益を得るなどして、石油事業に参入していった。スタンダードやノーベルが優位であったロシアや欧州における石油市場での競合の中で、ロスチャイルドはアジアに販路を求めた。

横浜でマーカス・サミュエル商会を設立して雑貨などの貿易業に携わっていたイギリス人のマーカス・サミュエルは、ロスチャイルドの要望を受けて、アジアへの最短ルートとしてスエズ運河を通過する航路を開発した。サミュエルは、油タンカーを新たに建造した。イギリスを出港した油タンカーは、バツームで灯油を積み込み、1892年7月に世界で初めてスエズ運河を通航したタンカーとなり、その後最終目的地バンコクで無事に積出しをした。

サミュエル商会は、これをきっかけにして次第に石油事業に進出し、1897年に北ボルネオの油田開発権を獲得するなど発展し、Shell Transport and Trading を設立した。

その当時、オランダ領であったジャワ島、スマトラ島、ボルネオ島での石油開発は、1880年に設立されたオランダのRoyal Dutchが一手に手掛けていた。しかし、Royal Dutchは、販売網が十分ではなく、競合していたShell Transport and Tradingと1903年に販売に関しての事業提携を行った。その後、1907年に両社は、Royal Dutch Shellとして統合され、1914年にメキシコ、1928年にベネズエラのマラカイボ油田の開発に成功し、米国Standard Oil Companyとともに世界の石油産業界の二大巨星となった。

b) 石油産業の成長

1896年頃誕生したガソリン自動車の普及、船舶(艦船)燃料の石炭から石油への変換、また、飛行機の新たな登場など、急激に石油がエネルギー源の中心となって、1900年代から石油の需要が猛烈に伸びた。

こうした状況のなか、石油確保のため、イギリスは、1908年ペルシャ(現イラン領)のマスジッド・イ・スレーマンでイギリス人が発見した大油田に、Anglo-Persian Oil Company (APOC、BPの前身)を設立し、石油生産を始めた。その後、第二次世界大戦(1939年~1945年)までに、次々とイランで大油田を発見している。

イギリスは、第一次世界大戦の結果、オスマン帝国の一部(現イラク領)を委任信託統治領として得て、そこに Turkish Petroleum Company (後の Iraq Petroleum Company) を設立、1927年にはキルクーク油田を開発し、その後もクウェート、アラブ首長国連邦、オマーンと進めていった。この中東での油田発見により、それまでの米国とロシアを中心とした世界の石油産業の地図は大きく塗り替えられることとなった。

そのなかで、米国系石油企業も、バーレーン、クウェート、サウジアラビアなどの中東地域で石油の利権を求めた。Standard Oil of California (現 Chevron) と Texaco (現 Chevron) が共同して、1936年に現在の Aramco となる石油会社をサウジアラビアに設

第2章 海洋開発産業の背景と現状

立し、1940年にアブ・キェーク油田の開発を始め、以後第二次世界大戦後にガワール油田やサファニア油田などの世界最大級の油田を次々と発見、開発に成功した。

Standard Oil of New Jersey、Royal Dutch Shell および British Petroleum の3社に加えて、米国系の Mobil、Chevron、Texaco、Gulf Oil の4社を加えた7つの石油会社は、石油の探鉱から、生産、輸送、精製、販売までのすべての段階を垂直統合した巨大企業となって、圧倒的な市場支配力を持つようになったことから、セブン・メジャーズ（セブン・シスターズ、国際石油資本(international oil majors)*ともいわれる）と呼ばれるようになった。セブン・メジャーズの時代は、OPECの台頭まで続いた。

c) 民族資本の台頭、OPEC(Organization of the Petroleum Exporting Countries、石油輸出国機構)の設立とメジャーズの市場独占の排除

第二次世界大戦後、新しい歴史の流れは植民地主義の終結、民族自決主義の台頭というナショナリズム中心の世界観となり、石油産業の構造もこの新しい動きとともに変遷することとなった。1951年のイランにおけるアバダン紛争に代表される、かつて被植民地であった産油国で石油利権を産油国に取り戻そうとする動きが起こった。この紛争は産油国側の挫折となるが、これを契機に国際石油資本と産油国との長い闘いとなり、10年後の1960年に、中東産油国（クウェート、サウジアラビア、イラン、イラク）とベネズエラによる OPEC の結成、設立に結びつくこととなった。

さらに、ナショナリズム中心の世界観の台頭は、石油資源を国内に持たない消費国による国有石油会社の設立とその国際舞台への登場につながり、また、1950年代以降の石油開発の舞台を陸上から大陸棚を中心とした海洋へと変遷させてきた。

d) オイルショックと OPEC 離れ

1970年代に入ると、産油国OPECの力が国際石油資本に対抗できるまで育ってきたことがあり、国際石油資本の力に陰りが見えてきた。

その状況下、1973年の第4次中東紛争を契機に、OPECは石油価格の引上げと生産量削減（石油戦略）を決定、その結果起こった第一次オイルショックは、石油を世界の経済ばかりか政治をも動かす戦略物資に変えてしまう結果となった。これを武器にOPEC加盟各国は、国際石油資本が持つ石油利権を次々と接收、国有化していった。クウェートのKOC、サウジアラビアのAramco、イランのNIOC、イラクのINOCが生まれてきた。

この動きは、1979年のイラン革命を引き金に、再びオイルショックを引き起こすこととなった（第二次オイルショック）。

二度にわたるオイルショックは、世界の石油産業の構造、世界の経済構造まで大きく変えていくこととなった。石油節約、代替エネルギー開発の動きとともに、自国でのエネルギー確保と政治リスクの少ない地域での石油開発の動きが強くなり、海洋油田の開発へと向かっていった。具体的には、1970年代以降の北海油田の開発、メキシコのユカタン半島沖合の油田開発、ブラジル沖合プレソルト油田⁵などの開発は OPEC 離れを象

⁵ プレソルト油田：プレソルトとは、一般的には、地中の岩塩層の下にある原油・天然ガスを含むことのできる炭酸塩からなる多孔質な岩石のことをいう。ブラジル沖合の大水深（1,000 mから2,000 m）海域にあるエスピリトサント盆地、カンボス盆地、サントス盆地の海底下（サントス盆地の場合、約3,000 m～約4,000 m）には、延長約1,000 km、幅数百kmに及ぶエリアで炭酸塩岩を貯留岩とする油ガス田の存在が確認されており、海底油ガス田の開発が進められている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

徴する出来事となった。

以下に、最近の世界の石油開発の生産量分布マップ（図2.1.1）および生産量など（図2.1.2）を示す。確認埋蔵量および可採年数の定義については、(2)石油・天然ガスの分布と資源量(resources)*を参照されたい。

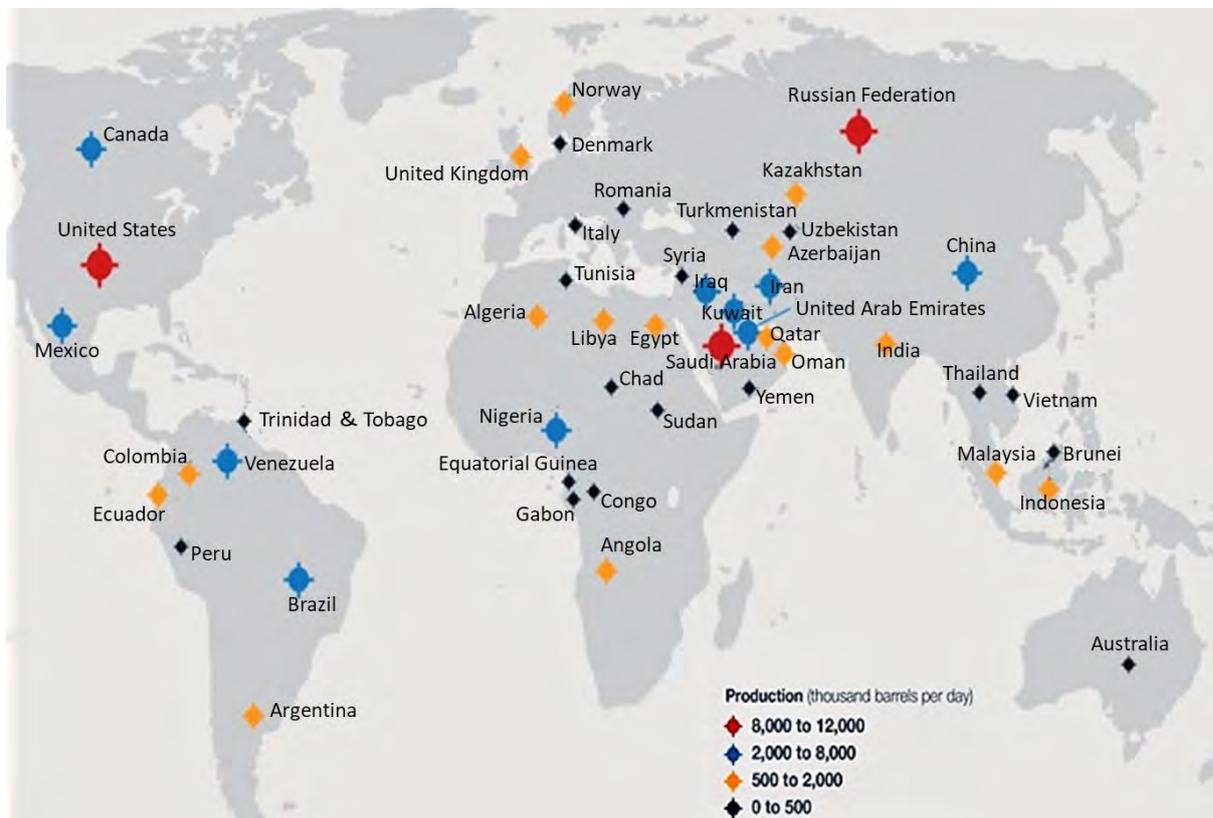


図2.1.1 世界の石油開発の生産量分布マップ
(出典：“BP Statistical Review of World Energy 2013”, BP)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

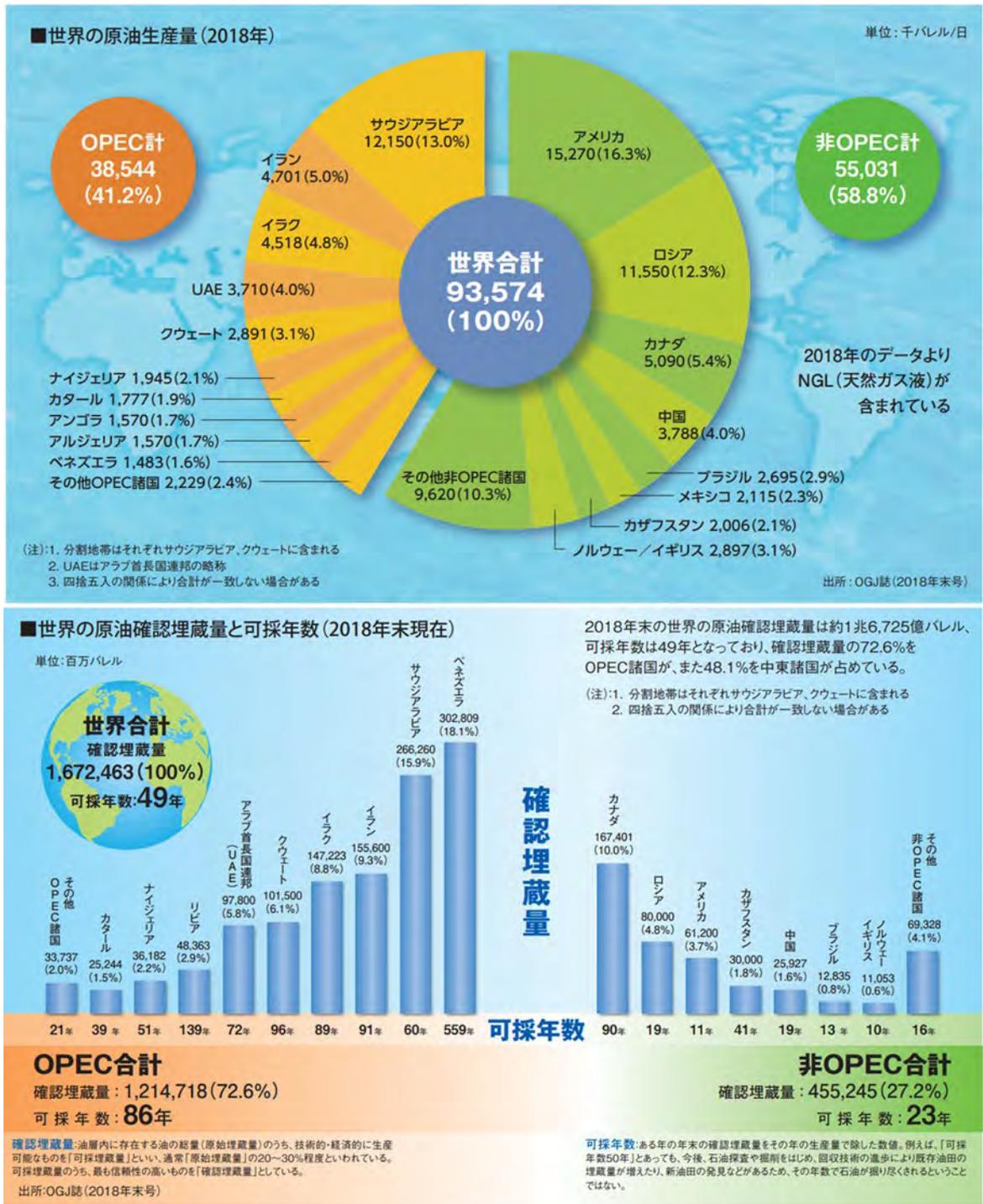


図2.1.2 世界の原油生産量・原油確認埋蔵量・可採年数
(出典:「今日の石油産業2019」石油連盟)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

現在では、世界の石油開発、石油生産の拠点は、従来の OPEC 中心からグローバルな分布へと変化している。

米国では、1990年代から新しい石油・天然ガス資源として重要視されていたシェール・オイルやシェール・ガスが、石油・天然ガス価格の上昇や水圧破壊、水平坑井など掘削、生産技術が進歩、確立したことや、米国政府のサポート（2005年 Energy Policy 法など）もあり、2006年以降急激にその生産量を増加させている。

米国の原油生産量は1970年に約960万bbl(barrel、バレル)*/日でピークに達した後に減少を続け、2008年には1947年以降最低となる500万bbl/日を記録した。当時、米国の原油生産量はさらに減少し、輸入原油への依存度がさらに増大すると予想されていたが、シェール・オイルの生産増により、原油生産量は2009年から毎年大幅に増加し、2013年には約750万bbl/日、2014年には約870万bbl/日となった。

また、シェール・ガスの生産増により、2006年から米国の天然ガス生産量は増加を始め、2011年には1973年を上回り過去最大となった。2013年の生産量は、24.3兆立方フィートに達し、米国は世界最大の天然ガス生産国となっている。

以上のように、米国でのシェール・オイルやシェール・ガスの開発によって、石油や天然ガスの生産増大が可能になった。その結果、米国の天然ガス輸入量は減少し、国内価格が低下したことで、世界のエネルギー事情が大きく変わりつつある。これがいわゆる、シェール・ガス革命である。

② 天然ガス産業の成立と発展

a) 天然ガス開発の創生期

天然ガス田の開発およびその利用は、第二次世界大戦前から世界に先駆けて、米国で始まった。米国中西部での石油探鉱とともに発見された大量の天然ガスは、パイプラインで東部の需要地へ輸送された。さらに、第二次世界大戦後も大規模高圧パイプラインからなる供給ネットワークを拡大し、カナダ西岸も含む国際パイプラインを形成している。

欧州においては、第二次世界大戦後、まずフランス南部、イタリア北部でガス田の発見があり、天然ガスの利用が始まった。その後、1959年にオランダの北海周辺で巨大なガス田であるフローニンゲン・ガス田が発見され、これを契機に欧州各国にパイプラインが敷設され、天然ガス供給ネットワークが形成された。このネットワークへの天然ガス供給源として、北海の中部、北部のガス田の開発、さらには、ロシア、アルジェリア（地中海横断パイプライン）のガス田開発と供給ラインの拡大が続き、大規模な供給ラインが整備された。

2000年代に入り、中央アジアのトルクメニスタンのガス田およびロシアのガス田や、ASEANのインドネシア、ブルネイのガス田、中南米のボリビアのガス田などでもパイプライン・ネットワークの建設が始まり、一部は供給を開始している。

b) 液化天然ガス（LNG : Liquefied Natural Gas）の出現と躍進

天然ガスの主成分であるメタンは、常温では気体であり、臨界点のマイナス 82.5℃、45.8 気圧、あるいは、沸点のマイナス 161.5℃、1 気圧で初めて液化する。21 世紀のクリーンな主要エネルギーとして期待される天然ガスであるが、この性状が輸送・貯蔵効

第2章 海洋開発産業の背景と現状

率の改善、設備、管理面での高い障壁を作り、その供給ネットワークは圧力を加えてパイプラインで圧縮輸送する方式に頼っていた。したがって、そのネットワークはガス田に近いパイプライン網が設置できる国域に限られていた。つまり、主要な天然ガス産業、貿易は、米国を中心とする北米圏、欧州を中心とするロシア、北アフリカ圏に限られていた。

このような状況ではあったが、超低温域での熱力学、材料力学の進歩に伴い、1940年代には米国が夏場（非需要期）にLNGをタンクで貯蔵する試みを、1950年代には欧州が大西洋地域でLNGを輸送する試みを行い、LNGの輸送に関連する技術、材料・機器・装置の開発、ノウハウの蓄積が進められた。

そして、1954年に米国で、LNG輸送用のバージ（港内、内海、河川等で貨物を運搬する自走できない平底の船。はしけ）“METHANE”が建造され、ミシシッピ河口のガス田よりシカゴまでLNG試験輸送を行った。この輸送はタンク損傷が激しく、失敗に終わったが、LNG輸送船開拓史の第一番船として、“METHANE”はその名を刻むこととなった。

その後、英米両国を中心に、LNGの洋上輸送が推進され、1959年に戦時標準船を改造した“METHANE PIONEER”で、米国ルイジアナ州のレイク・チャールズより大西洋をわたり、イギリステムズ河口のキャンベイ島へ輸送したのが最初の洋上輸送の成功となった。

その後、本格的なプロジェクトとしての洋上LNG輸送は、1964年に、アルジェリアからイギリスへのLNG輸送用に、LNG専用船として“METHANE PRINCESS”および“METHANE PROGRESS”が建造されて始まった。しかし、このプロジェクトは、翌1965年に北海のイギリス鉈区でガス田が発見されたため、途中で棚上げとなってしまった。

このLNG成立期において、我が国では、高度経済成長を成し遂げていたが、その反動として、1960年代より深刻な大気汚染、水質汚染などの公害問題が発生していた。これに対処するために、クリーンなエネルギー源である天然ガスを石炭、石油の代替として用いることを決めた。米国アラスカを出航したLNG船“POLAR ALASKA”は、1969年11月横浜へ入港し、これが世界における本格的な大型LNG船による洋上輸送の始まりである。

この本格的な洋上LNG輸送プロジェクトの開始と成功および遠距離の天然ガスの国際パイプライン・ネットワークの拡大を契機にして、1970年代からの二度のオイルショックの影響も加わり、アジア、中東、豪州などの新たな地域に目が向けられ、天然ガス田の開発は世界的に広がることとなった。アラスカ、リビア、ブルネイ、アブダビ、インドネシア、さらには、マレーシア、カタール、ナイジェリア、エジプト、豪州などで開発が行われている。

LNGの価格は、当初石油より高かった。しかし、大気汚染などの環境対策費が不要であることや、オイルショック以降の石油価格の高騰から、価格面でも有利となったことにより、1980年代以降は、世界的にLNGの導入が着実に増加することとなった。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

また、シェール・ガス革命により2010年代半ばより米国が石油・天然ガスの輸入国から輸出国に転じることとなり、現在世界の天然ガスをめぐる情勢は大きく変化しているところである。

③ 海洋石油・天然ガス開発の歴史

a) 海洋石油・天然ガス開発の創成期

1896年に米国カリフォルニア州サンタバーバラにあるサマーランド沿岸部にある油田の海岸部に設けた油生産井が、世界最初の海洋油生産井といわれている。また、1910年から行われたGuffey Petroleum（のちのGulf Oil、Chevron）によって、米国の内陸湖カドー湖で行われた石油開発が、最初のオフショア油田開発といわれている。

1920年代に入り、ベネズエラのマラカイボ湖、ソ連のバクー油田のカスピ海、1930年代に入っては、米国のカリフォルニアとメキシコ湾岸および英領ボルネオのブルネイ沖で海洋油田の開発が盛んに行われるようになった。この頃までは、岸に近く水深の浅い静穏な地域での開発であり、生産方法は、海岸から延長された栈橋やプラットフォームを用いた掘削、あるいは、海岸から傾斜掘りであった。

その後、米国ルイジアナ州沖での油田発見、さらに、カナダのエリー湖水域でのガス田発見など、徐々に陸域から離れていくことになる。そして、1938年にはルイジアナの海岸より約2.5km離れた場所で、メキシコ湾で初の油生産井が掘られた。ルイジアナの油田海域は非常な遠浅で、海岸より100km位離れても水深50m程度で、豊富な石油が存在するため、海洋石油開発はルイジアナ沖を中心にして始められることとなった。ここで海洋石油の開発技術が発達、確立し、世界に広がっていった。

b) 本格的な海洋石油・天然ガス開発の開始

世界で初めての本格的な海洋での石油掘削、生産は、1947年に海岸より陸地が見通せないほど離れたルイジアナの沖合海域で、オクラホマのKerr-McGee Corporationが固定式の海洋プラットフォーム(offshore platform)*によって行ったとされている。これが契機となって、本格的な海洋石油・天然ガス開発が開始されたことから、1947年は海洋油田の開発が始まった年とされている。

c) 海洋石油・天然ガス開発の発展期

メキシコ湾米国海域で始まった海洋石油開発の探査や掘削能力は、1950年代に入り海底から構造物を建てる固定式プラットフォームに代わって浮体構造物を利用する移動式海洋掘削装置(MODU : Mobile Offshore Drilling Unit)*が開発され、新たな局面を迎えた。これは、海洋における油田の探査、掘削に大いに寄与し、1950年代後半の米国、中東でのさらなる海洋油田の発見をはじめ、アラスカのクック湾、ナイジェリア、ガボン、エジプトのスエズ湾、オーストラリアのバス海峡、ブルネイ、北海、イタリアのアドリア海などの海洋油田の開発へと繋がっていった。

海洋での石油開発が始まった当初は、生産プラットフォームも掘削プラットフォーム同様に着底式であり、せいぜい水深200m～300mでの設置が限界であったため、開発海域も浅海域に限定されていた。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

1970年代に入ると海洋石油・天然ガス開発はさらに活発化するなかで、浮体式の生産が開発され、油田開発は、着底式プラットフォームの設置が困難な水深の海域へと広がっていくこととなった。浮体式生産設備は、1975年に地中海での運用を手始めに、ブラジル沖海域での海洋石油・天然ガス開発の拡大に繋がっていった。ブラジルの国営石油会社である Petrobras は、1977年に掘削リグを改造したセミサブ型生産設備の運用を開始した。

海洋石油・天然ガス開発は、その掘削設備、生産設備および石油探査技術の発展、進化に伴い、次第により深い海域へと進んでいる。1970/1980年代には、北海油田、メキシコのユカタン半島沖合の油田、ブラジル沖合プレソルト油田の開発活発化、さらには1980年代のサハリンなどの氷海域での石油開発、2000年代のメキシコ湾大水深海域などでの油田開発と世界的に拡大するとともに、より水深の深い海域（深海域）へも広がっていった。

さらに、2000年代後半より、クリーン・エネルギー源としての天然ガスの重要度が増したことに伴い、海洋天然ガス田の開発が活発化している。このような背景のなかで、FLNG (Floating Liquefied Natural Gas)*などの新しい技術、高度な洋上生産設備が用いられている。このような技術・設備の高度化、進化とともに新しい海域での海洋石油・天然ガス開発が始まっている。海洋石油・天然ガス開発の歴史を年表（表 2.1.1）にまとめた。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

表 2.1.1 石油・天然ガス開発の歴史

西暦(年)	石油・天然ガス開発(全般)		海洋石油・天然ガス開発	世界の主な出来事
	石油開発	天然ガス開発		
1850年代	・1859年: 米国オイルクリークで世界で初めて石油採掘			
1870年代	・1870年: 米国オハイオ州で、ジョン ロックフェラーがスタンダードオイル設立(石油産業の始まり) ・1870年中頃: 帝政ロシア・バクー地方で、ノーベル兄弟によって油田開発が始まる			アメリカ南北戦争 普仏戦争 ドイツ帝国成立 アメリカのエジソンが蓄音機を発明
1880年代	・1886年ごろより、ロスチャイルド家がバクー油田の石油生産を担い、欧州、アジアへの鉄道による輸送始める			
1890年代	・1890年: マーカス・サミュエルにより、タンカーによるスエズ運河経由の石油輸送に初めて成功する。 ・1897年: マーカス・サミュエル商会(シェル商事) 北ボルネオの油田開発権を取得し、世界の貿易港に船舶用燃料施設を設け、燃料の販売を開始		1896年: 米国カリフォルニア西海岸のサマーランド油田の油田の海への延長部で世界で初めての海洋掘削を実施	
1900年代	・米国 石油産業の伸長(1901年 ガルフオイル、1901年 テキサコオイルなどの新しい石油会社が設立される) ・1902年: シェル商事はロイヤル・ダッチ石油会社と石油の欧州、アジア、アフリカへの販売の業務提携。 ・1906年: 英国アングロ・ペルシャ(後のブリティッシュ・ペトロリアム: BP)がイランで油田発見 ・1907年: ロイヤル・ダッチ・シェル社設立			ノーベル賞が創設される ライト兄弟が飛行機による人類初の有人動力飛行 血の日曜日事件、ロシア第1次革命開始 米海軍が真珠湾に基地を建設
1910年代	・1911年: スタンダード・トラスト解体(エクソン、モービル、シェブロン、アモコ、コンコの前身会社発足)、後継会社はスタンダード石油ニュージャージー(後のエクソン)	天然ガスの商業的利用の始まり。1800年代後半より、世界に先駆けて、米国で、中西部での石油採掘と共に産出される随伴の天然ガスをパイプラインで東部に輸送し利用。		伊土戦争-1912年迄 中華民国建国 第二次バルカン戦争 第一次世界大戦勃発 ロシア革命が起こる 第一次世界大戦が終わる パリでベルサイユ条約
1920年代	・1927年: BPを中心としたトルコ石油会社によりイラン・キルクーク油田の開発が始まる		ベネズエラのマラカイボ湖、ソ連のバクー石油のカスピ海岸部分の水深の浅い海域で海洋油田の開発が始まる	フシントン会議 ソビエト社会主義共和国連邦成立 国内共闘-1949年迄 ジュネーブ国際経済会議開催(52カ国) パリ不戦条約 世界大恐慌
1930年代	石油メジャーズ=セブン・シスターズ(スタンダード石油ニュージャージー、ロイヤル・ダッチ・シェル、モービル、シェブロン、テキサコ、ガルフおよびBP)による世界の石油開発・供給市場の独占が続く 1936年: シェブロン及びテキサコによるサウジ進出(アラムコ社設立)		1938年: メキシコ湾の米国ルイジアナの海岸より、2.5km離れた水深の浅い海域で、初めて油井を掘る	ヒトラーが独首相に就任、ナチス政権始まる 第二次エチオピア戦争-1936年迄 スペイン内戦 第二次世界大戦(ヨーロッパ戦争)勃発 ダンケルクの戦い
1940年代	1940年: アラムコによるアラブ・アブ・ケーク油田開発 1940年代後半: アラムコによるガワール油田、サファニア油田と世界最大級の油田が次々に開発される	欧州における天然ガス利用の始まり: フランス南部、イタリア北部でのガス田発見により天然ガス利用が始まる	1947年: 世界で初めての固定式プラットフォームによる本格的な海洋油田の掘削(陸地が見通せない米国ルイジアナ沖合)	モスクワの戦い、スターリングラードの戦い イタリアが連合国に無条件降伏 連合軍によるノルマンディー上陸作戦 ドイツが連合国に無条件降伏 ギリシャ内戦-1949年迄 第1次中東戦争 中華人民共和国が成立、中華民国(台湾) 朝鮮戦争-1953年迄
1950年代	民族資本の台頭 ⇒メジャーズによる市場独占の排除の動きが活発化	1954年: 米国で世界に先駆け、LNG輸送バナー" Methane "によるLNGの試験輸送実施。 1959年: LNG輸送船" Methane Pioneer "による世界初めての海上輸送(米国~英国) 1959年: オランダ北海周辺で巨大なフローニンゲンガス田発見	1950年代: より深い水深での海洋油田開発の為、ジャッキアップ型、掘削船などの移動式掘削装置が開発され、米国、中東での新油田発見に繋がる。	朝鮮戦争が休戦 アルジェリア戦争-1962年迄 第一次スーダン内戦-1972年迄 第2次中東戦争(スエズ戦争) ソ連が人工衛星スプートニク1号の打上げ成功 金門砲戦(中華人民共和国VS中国人民解放軍) 中印国境紛争-1962年迄(中国VSインド)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

1960年代	1960年：中東産油国とベネズエラによりOPEC設立される	フロンゲンガス田発見を契機に欧州各国を結ぶパイプラインによる供給ネットワークが敷設される	1961年：セミサブ型掘削装置の開発により、アラスカのクック入江、ナイジェリア、ガボン、エジプトのスエズ湾、オーストラリアのバス海峡、ブルネイ、北海、イタリアのアドリア海などでの海洋油田に繋がる。	ベトナム戦争勃発 キューバ危機 キプロス内戦-1964年迄 コロンビア紛争-継続 南ローデシア紛争-1979年迄 第3次中東戦争(六日戦争)
1970年代	1973年：OPEC石油戦略を決定(石油価格の引上げと生産量削減) OPEC諸国による、メジャーズの石油利権の接収と国有化(KOC, ARAMCO, NIOC, INOCなどの設立)	1964年：世界最初のLNGの商業的輸送として、アルジェリア～英国間のLNG船によるプロジェクト開始(翌年中断、通り止め) 1964年：LNG船“Polar Alaska”による本格的LNG洋上輸送(アラスカ～日本)開始	1975年：世界で初めての浮体式生産が地中海 イタリア海域に設置。 これを契機に、従来の着床式生産設備(水深 200～300mが設置限界)に代わり、より深い海域での油田開発へ拡大する。ブラジルのカンボス海盆及びサントス海盆、メキシコのユカタン半島沖合など	ブラハの春(チェコ事件、ソ連のチェコ介入) 中ソ国境紛争 ヨルダン内戦(黒い九月事件) カンボジア内戦-1992年迄 第4次中東戦争(十月戦争)(第一次石油危機) キプロス紛争 ベトナム戦争が終わる
1980年代	新しい石油開発の対象は、陸上から大陸棚を中心とした海洋石油開発への進出となる。	石油の代替エネルギー、クリーンなエネルギーとして、大々的なガス田の開発加速(アラスカ、リビア、ブルネイ、アブダビ、インドネシア、マレーシア、カタール、ナイジェリア、エジプト、豪州など)		イラン革命、第2次オイルショック イラン-イラク戦争-1988年迄 フォークランド紛争(マルビーナス戦争)
1990年代		1990年代半ば：氷海海域 サハリン沖での海洋石油開発プロジェクト開始 1999年：氷海サハリン2生産開始	1990年代半ば：氷海海域での海洋石油開発の開始 1999年：氷海サハリン2生産開始	ベレストロイカが始まる チェルノブイリ原子力発電所事故 ベルリンの壁崩壊(米ソ「冷戦終結宣言」) 湾岸戦争-1991年迄、東西ドイツの統一 湾岸戦争、ソビエト連邦崩壊 香港が中国に返還される
2000年代			2003年：メキシコ湾にて、Drilling Shipによる水深 3051mでの掘削に成功(世界記録)	アフガニスタン侵攻、アメリカ同時多発テロ事件 イラク戦争 ロンドン同時爆破事件 世界同時不況
2010				シリア内戦

第2章 海洋開発産業の背景と現状

(2) 石油・天然ガスの分布と資源量

① 世界の石油・天然ガスの分布と資源量

地下に存在すると推定されるすべての炭化水素の量を資源量 (resources) といい、この資源量のうち、既発見であり、技術的に回収 (採取) 可能であり、経済性がある残存している量を埋蔵量(reserves)*という。

また、現在の技術と価格の下で採掘可能であると考えられる石油埋蔵量のことを確認埋蔵量 (proven reserves) といい、ある年の年末の確認埋蔵量(R)をその年の石油生産量(P)で割ったものを可採年数 (R/P : Reserves to Production ratio) という。

2014年末時点での世界の石油確認埋蔵量は、約1.7兆bbl (オイルサンド(oil sand)*を除く)、これを2014年の石油生産量で除した可採年数は52.5年であった。

確認埋蔵量は、新しい発見によって増加し、生産によって減少する他、原油価格の上昇や、開発技術の向上によって拡大する可能性がある。世界の石油の可採年数は1920年代から40年代にわたって15~20年で推移してきたが、1950年代に主として中東において巨大な石油埋蔵量の発見が相次いで、50年代末には約40年になった。1960年代は、中東やアフリカを中心に大きな石油埋蔵量の発見があったが、世界の石油消費の伸びの方がそれを上回ったため、次第に可採年数は低下した。ところが1973年末に起きた第四次中東戦争を契機とする石油危機に端を発した原油価格の大幅上昇 (図2.1.3) は、一方で石油消費 (したがって、生産) を停滞させ、他方で北海やアラスカなど限界地域や、中小油田の開発を可能にし、既存油田の埋蔵量についても、商業的に生産し得る量を増大させた。可採年数は、1979年の27.1年を底にして、1984年末には34.0年となり、1980年代以降では40年程度の水準を保っている。

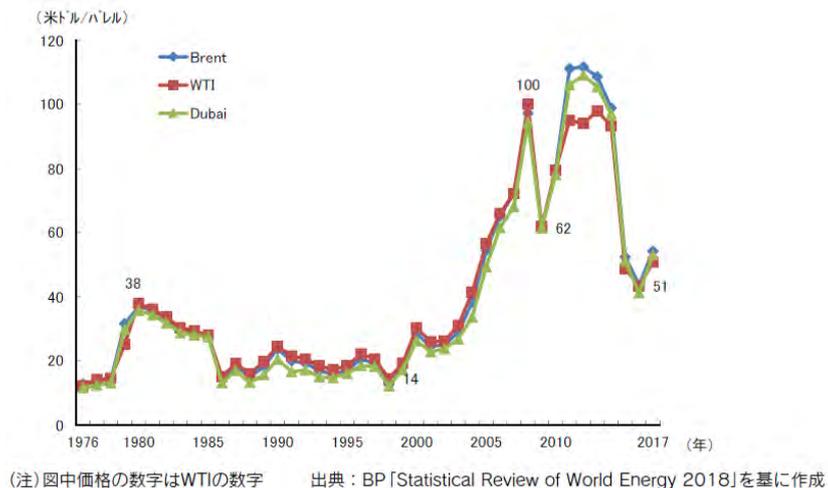


図2.1.3 原油価格の推移

(出典: 「エネルギー白書 2019」資源エネルギー庁)

図2.1.4には、BP 統計による最近20年の世界の石油確認埋蔵量の変化を示す。同じく、2019年末で世界の天然ガスの確認埋蔵量は、198.8兆m³、可採年数は49.8年であった。

図 2.1.5 に石油の分布、図 2.1.6 に天然ガスの分布を示す。石油の地域分布は偏ってお

第2章 海洋開発産業の背景と現状

り、アジア、特に中東地域が約 60%を占める。次いで北米の約 20%、欧州と南米の 10%である。

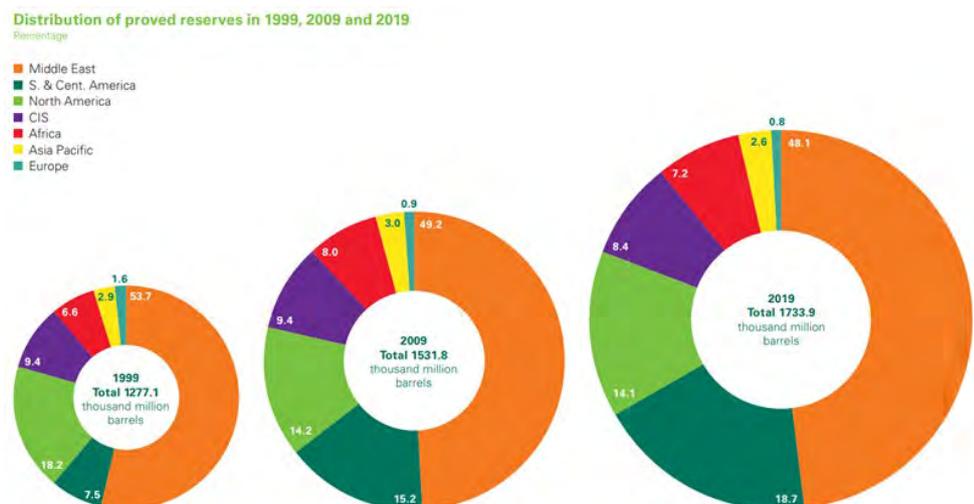


図2.1.4 1999年、2009年、2019年における世界石油確認埋蔵量
(出典：“Statistical Review Of World Energy-2020” BP を基に作成)

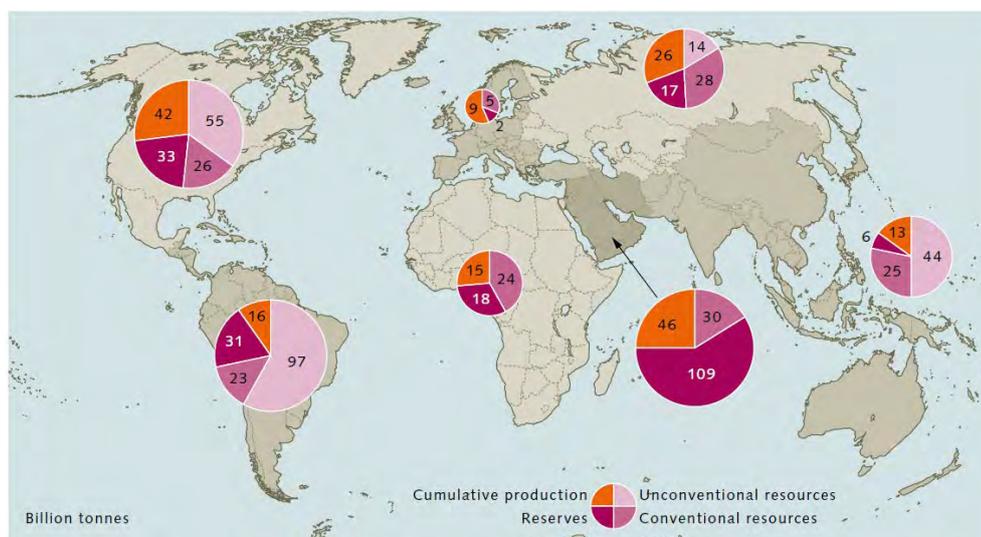


図2.1.5 石油の分布
(出典：“World Ocean Review” Maribus、一部加工)

なお、世界的には、オイルサンド、オイルシェール（油母頁岩）等の「非在来型石油」が豊富に存在している。オイルサンドは大部分がカナダに、次いでナイジェリア、マダガスカル、米国などに賦存しており、オイルシェールは米国、ブラジル、中国、カナダ、ロシア、コンゴなど世界各地に分布している。また、オイルサンドの一種であるオリノコータルはベネズエラのオリノコ川流域を中心に存在する超重質油である。

シェール・オイルの可採埋蔵量は 3,450 億 bbl⁶と推定されており、主な保有国は、米国、ロシア、中国、アルゼンチンなどである。

⁶ 2013 年、EIA（米国エネルギー省情報局）による。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

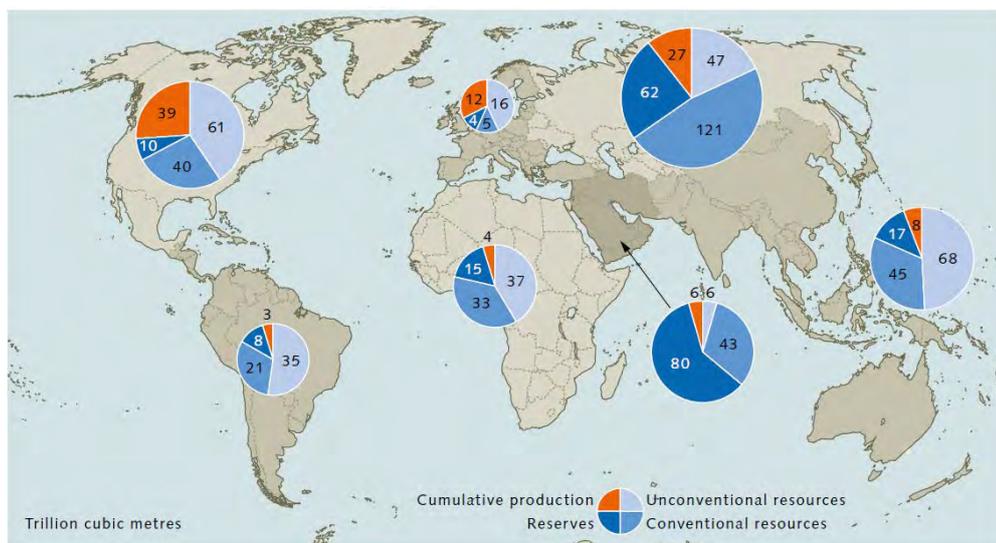


図2.1.6 天然ガスの分布
(出典：“World Ocean Review” Maribus、一部加工)

② 海洋石油・天然ガスの分布

1980年代以降、新しい油田の開発は、海洋に主体を移しており、北海油田、メキシコのユカタン半島沖合、ブラジル沖合プレソルト油田、アフリカ東岸、西岸、フィリピン、マレーシアなどの新しい油ガス田が開発されている。この海洋油ガス田開発地域の確認埋蔵量については、情報、データが乏しく、正確な割合は不明ながら、生産量ベースでの海洋石油が占める割合は、2015年時点で約33%（図2.1.7）といわれており、近々40%を超えると予想されている。

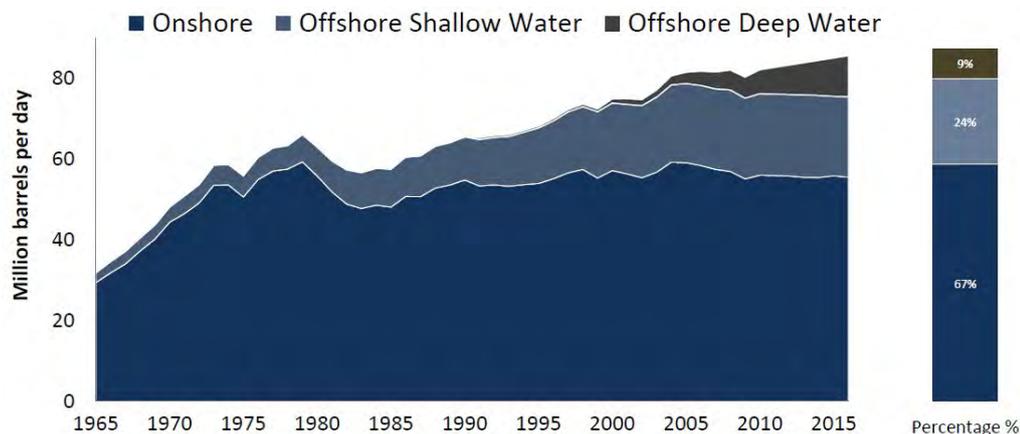


図2.1.7 世界の海洋石油・天然ガス生産量推移
(出典：Infield Systems ウェブサイト)

(3) 産業を構成するプレイヤー

海洋石油・天然ガスの資源開発には、第3章で詳述するように、鉱区取得から始まり、探鉱、試掘、開発、生産、輸送など多くの段階があり、各段階で行われる活動は変化していき、プレイヤーも変わっていく。

海洋資源開発産業を構成するプレイヤーは、その役割から大きく三つのカテゴリーから

第2章 海洋開発産業の背景と現状

なると考えることができ、カテゴリーごとに役割とプレイヤーを概観する。

一つ目は、オペレーター(operator、操業主体)*を構成するカテゴリーである。オペレーターは、資源開発事業の最上流にあつて、開発に必要な資本と技術情報を持ち、相手国政府との鉱区などの交渉から、開発計画の決定、販売計画の決定まで、開発事業の全般にかかわっている。かつてセブン・シスターズといわれたExxon Mobil、Chevron、Shell、BPなどの国際石油会社に加えて、近年台頭してきたPetrobras(ブラジル)、Petronas(マレーシア)などを筆頭とする国営あるいは国有石油会社、さらには、国際石油開発帝石(INPEX)、JX石油開発など本邦の石油開発会社および総合商社などがこのカテゴリーに含まれる。

なお、資源開発事業は巨大な事業であり、複数の企業が共同して実施する場合がほとんどである。一般的にオペレーターとは、これらの参加企業の中で決定権を持って主体的に事業を進めていく立場にあることを意味し、その他のオペレーターに協力する立場で事業に参加している企業は、ノン・オペレーターといわれる。

二つ目は、オペレーターとの間で契約を結び、オペレーターが行う業務に直接的に参加するカテゴリーであり、オフショア産業ではコントラクター(contractor)*といわれている。

コントラクターには、海底下の石油の存在場所を探る探鉱コントラクター、実際に掘削を行い石油の存在を確認するために行う試掘や商業生産に入るために行う生産井の掘削を行う海洋掘削コントラクター、オペレーターが決定したコンセプトデザインに従って生産、払出しなどに必要な設備、例えば石油の処理施設、貯蔵施設、あるいは生産プラットフォーム等を設計から据付けまでの一貫サービスである EPCI* (設計: Engineering、調達: Procurement、建設: Construction、据付: Installation の頭文字をつなげたもの) サービスによって一式すべて提供するエンジニアリング企業などがある。

探鉱においては、Petroleum Geo-Services(PGS)、CGG、地球科学総合研究所(JGI、日本)、日本海洋事業(日本)など、掘削においては、ENSCO plc、Noble Corporation plc、Schlumberger、Seadrill、Transocean、日本海洋掘削(JDC、日本)などの企業がある。EPCI サービスを行うエンジニアリング企業では、Bechtel、KBR、TechnipFMC、Aker Solutions、McDermott International、現代重工、千代田化工建設(日本)、日揮(JGC、日本)などの企業を挙げることができる。

また、オペレーターとの直接契約により、エンジニアリング企業や海運会社が、自ら保有、運用する浮体式生産設備などによって石油・天然ガスの生産などを手掛け、あるいは生産に必要な資器材の海上輸送などを行うオフショア支援業務を行う場合も多い。

浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備(FPSO: Floating Production Storage and Offloading system)*など浮体生産設備の運用では、SBM Offshores、BW Offshores、Maersk、Teekay Petrojarl、三井海洋開発(MODEC、日本)、オフショア支援では、川崎汽船(日本)がこのような事業を行っている。

もう一つのカテゴリーは、探鉱、掘削、エンジニアリングなどのコントラクターが事業実施のために発注する設備や機器を、設計、製造し、コントラクターに提供するカテゴリーである。

海洋での探鉱には、ストリーマケーブルなどの地震探査(seismic exploration あるいは

第2章 海洋開発産業の背景と現状

seismic survey)*機器を搭載した専用の調査船が不可欠な道具であり、海洋での掘削には掘削装置を搭載した専用の浮体設備、掘削リグあるいは掘削船（ドリルシップ）が必要である。

石油・ガスの生産においては、地中から採取した流体を処理し、目的とする石油を生産し、貯蔵するなどの設備、施設が中核となる。油ガス田が海岸に近い場合には、石油・ガスの生産施設を沿岸の陸上部に建設することが多いが、より海岸から遠く離れ、より深い海域での油ガス田の開発が主流となった現在では、こうした生産の施設も浮体上に搭載した生産リグやFPSO（図2.1.8）など浮体式生産設備が重要な設備である。

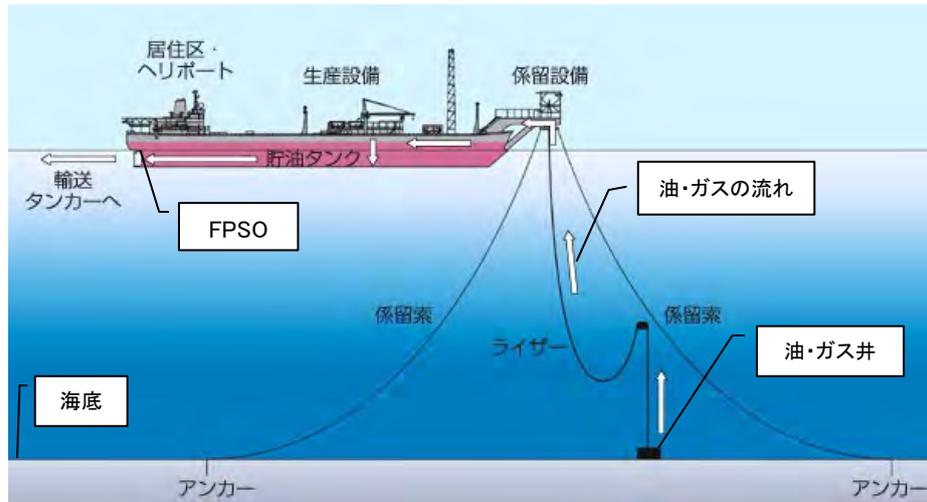


図2.1.8 FPSOによる石油の生産のイメージ
(出典：MODEC ウェブサイト、一部加筆)

これら浮体式設備をコントラクターに提供しているのは、いわゆる造船・重工業メーカーである。造船・重工業メーカーは、浮体など構造体の製造と機器類の装備を主たる事業にして、探査機器、掘削機器、あるいは、石油・ガスの処理設備などの上載機器（一般にはトップサイド(topside)*といわれる)と種々の付帯設備を専門の機器メーカーなどから調達し、アッセンブリー(組み立て)を行っている。

大型の掘削船では、三星重工、大宇造船海洋、現代重工、IHCなどが、FPSOなどの浮体式設備では、三星重工、Keppel Offshore & Marine、Sembcorp Marineなどが代表企業であり、IHI（日本）、ジャパンマリンユナイテッド（JMU、日本）、三菱重工（MHI、日本）/三菱造船(日本)などの造船所・重工メーカーも浮体式海洋石油・ガス貯蔵積出設備(FSO：Floating Storage and Offloading system)*や調査船、オフショア支援船などを中心にオフショア分野に積極的に取り組んでいる。

また、生産・処理施設のための大規模な海中・海上構造物を使用せず、図2.1.9に示すように、海中に比較的小型の生産・処理施設を設けることが特徴であるサブシー生産システム(SPS：Subsea Production SystemあるいはSea-floor Production System)*の利用が、大水深海域（サブシー、厳密な定義はないがおおよそ水深500m程度より深い海域）において急速に増加しつつある。

海底生産技術では、油生産井の頂部海底に設けられ生産量を調整する海底ツリー、複数

第2章 海洋開発産業の背景と現状

の海底ツリーからの油・ガスを一つにまとめる処理設備などを含めたマニホールド(manifold)、それらの制御システム、およびそれらの機器をつないで石油などの流路や制御ケーブルの経路となる海中アンビリカル(Subsea umbilical)、海底と洋上の処理施設をつなぐライザー(Riser)、海底で油・ガスを運ぶフローライン(Flowline)* (これらを総称して、それぞれの頭文字をつなげて SURF と呼んでいる) などが生産の中心となる設備である。

サブシー生産システムでは、TechnipFMC、Cameron、National Oilwell Varco、GE Energy などの企業があり、本邦企業では日鉄エンジニアリング(旧新日鉄住金エンジニアリング(NSENGI)) が SURF を中心としてサブシー生産システムへ取り組んでいる。

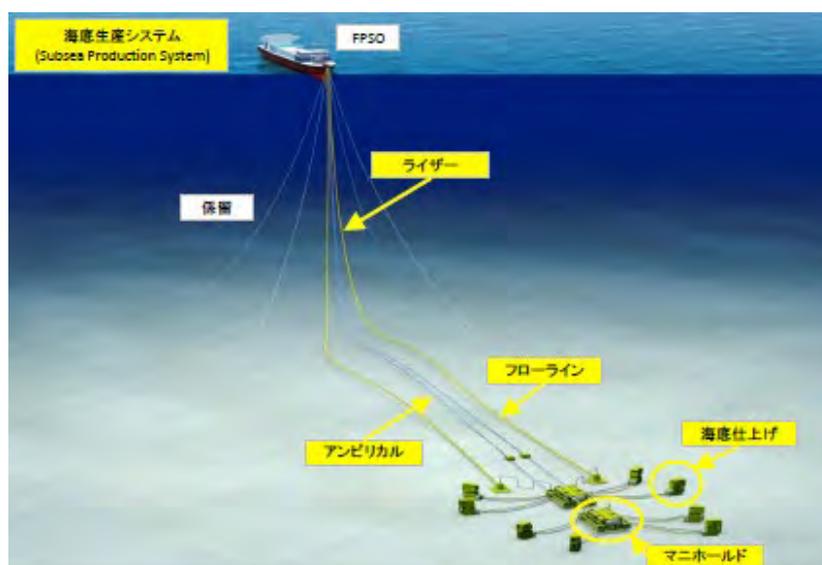


図 2.1.9 サブシー生産システム
(出典：NSENGI ウェブサイト)

(4) 極地・氷海、大水深での石油・天然ガス開発への挑戦

世界の一次エネルギー消費は、増加を続けている。石油、天然ガスは、一次エネルギー需要に対して合計して 50%を超えており、その需要の伸びに応えるため、石油・天然ガスの供給量を今後も増加させていくことが期待されている。

石油・天然ガスは、現在注目を集めている再生可能エネルギーに比べると、そのエネルギー収支比 (EROI : Energy Return On Investment または EPR⁷ : Energy Profit Ratio) が非常に良く経済的であり、発電、燃料用エネルギー源としてのみならず、化学製品などの原材料としても重要な資源であるため、その安定供給は世界経済に大きく影響する。

いわゆる従来の油ガス田から生産される石油「イージーオイル」は、生産量の増加が難しくなっているといわれている。そのような状況の中で、シェール・ガスを代表とする非在来型資源の生産拡大は、石油・天然ガスの供給量拡大の顕著な事例である。その一方、

⁷ EPR とは、自然界からエネルギーの採取の難易度を示す指標であり、エネルギー収支比=採りだされたエネルギー(出力)÷採りだすために要したエネルギー(入力)で表す。現在、米国の油田で算出する石油の平均値が 10 程度、一方、風力発電では施設の稼働年数などの条件に大きく左右されるが 3~4 程度との推算例がある。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

長期的、安定的な石油・天然ガス供給源としては、海洋石油・天然ガス資源の開発が重要視されている。現在、世界の石油生産量のうち海洋油ガス田からの生産は、約40%とされているが、大水深海域、極地海域での石油・天然ガス開発が進むことで、生産量のさらなる伸長が期待されている。

① 大水深海洋石油・天然ガス開発

海洋における石油・天然ガスの生産は、図2.1.10に示すように1970年代に沿岸域や水深300m未満の海域（浅海域）をフィールドとして始まり、探鉱から掘削、あるいは生産のあらゆる技術の進歩によって次第に水深を上げて、現在ではおよそ水深2,000～3,000mで油ガス田が開発され、油・ガスの生産が行われている。

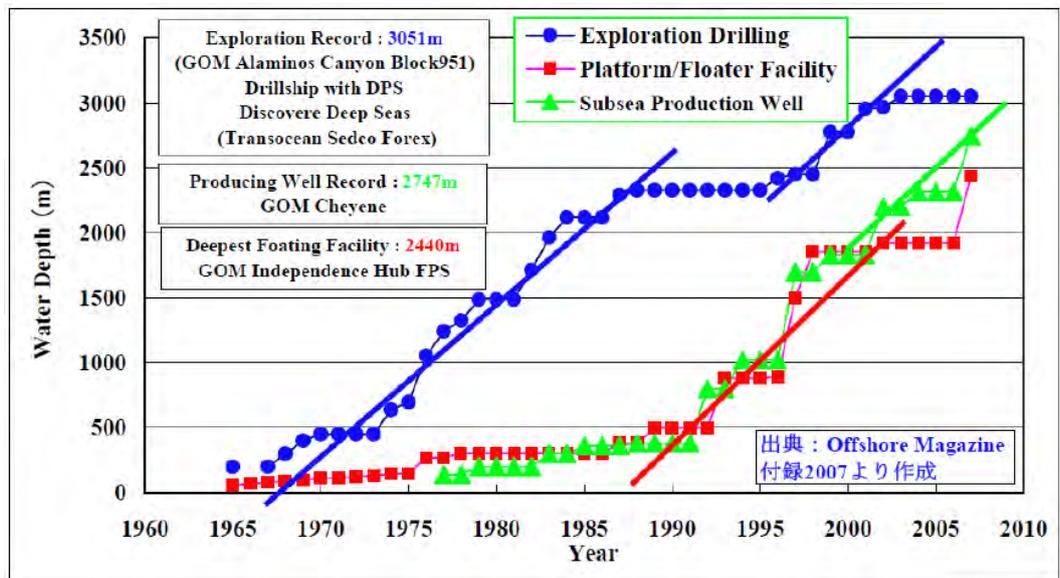


図 2.1.10 開発・生産水深の推移

(出典: 「海底生産システムの現状: Subsea Production System (SPS) —どこまで信頼性を保ち、機器を海底に設置できるか—」 JOGMEC)

現在、大水深における油ガス田での生産が行われている海域と今後開発が予定されている海域を、図 2.1.11 に示す。既存の海洋油田であるメキシコ湾、北海、西アフリカ沖の周囲や、ブラジル沖、オーストラリア周辺などでさらに大水深における海洋石油・ガス田の開発が計画されており、注目されている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

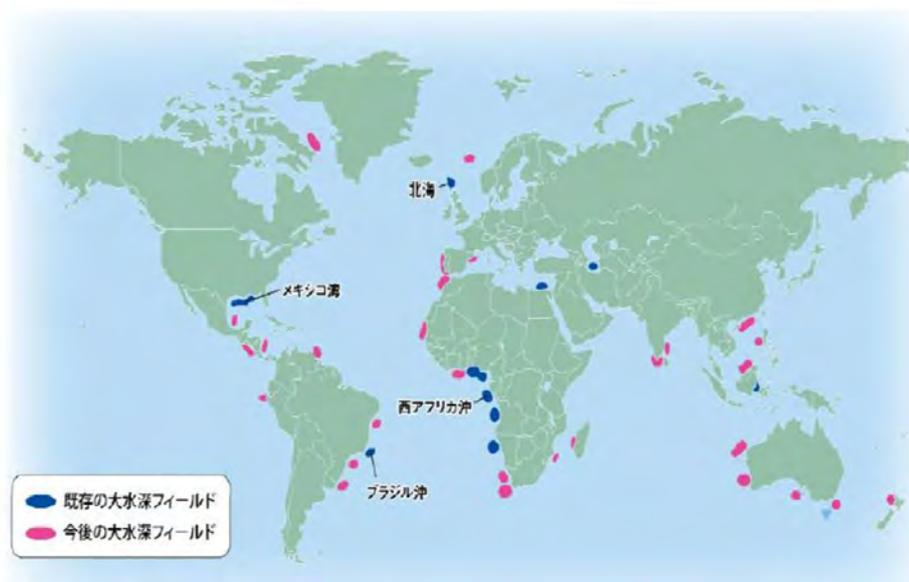
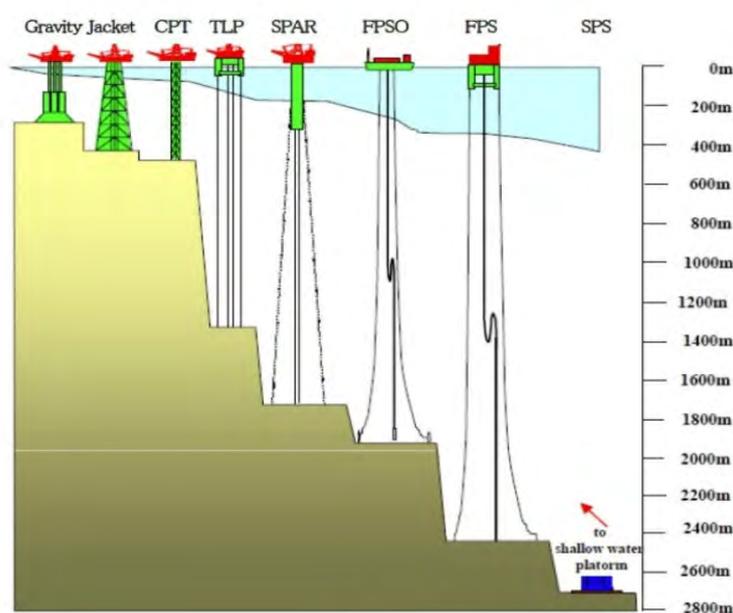


図2.1.11 世界の大水深海洋石油・天然ガス開発マップ
 (出典：「大水深石油開発のトレンド：概説」JOGMEC)

図 2.1.12 に示すように、水深の推移とともに、さまざまな形式の洋上生産設備が開発され、使用されている。大水深 (deep sea) での開発とともに、効率的な生産方式としてサブシー生産システムが注目を集めている。



出所：JOGMEC 技術調査部「海洋工学ハンドブック(第4版)」, 2007年11月

図2.1.12 洋上石油生産設備の水深推移
 (出典：「海洋工学ハンドブック (第5版)」JOGMEC)

油・ガスの生産とは、生産井から取り出した油・ガスを洋上や陸上の処理施設に送り、油・ガスの分離をはじめとして、不要物の除去等を行い、製品となった油・ガスを貯蔵し、積出することである。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

このすべての生産に関するプロセスを海底で完結させようとするシステムが前述のサブシー生産システムである。

② 極地海域での石油・天然ガス開発

石油・資源開発のニューフロンティアとして、北極圏に注目が集まっている。

古くから北極圏には相当量の地下資源が眠っているといわれている。環境の厳しさがあって、資源探査も難しいところであったが、近年続いている地球温暖化の影響から海氷面積が減少こともあり、開発が進んできている。

ロシアやノルウェーは、北極海に面した国であり大きな大陸棚を持ち、この地域で油ガス田の開発・探鉱を進めている（図 2.1.13）。これらのプロジェクトには、日本の石油開発会社等も参画している。

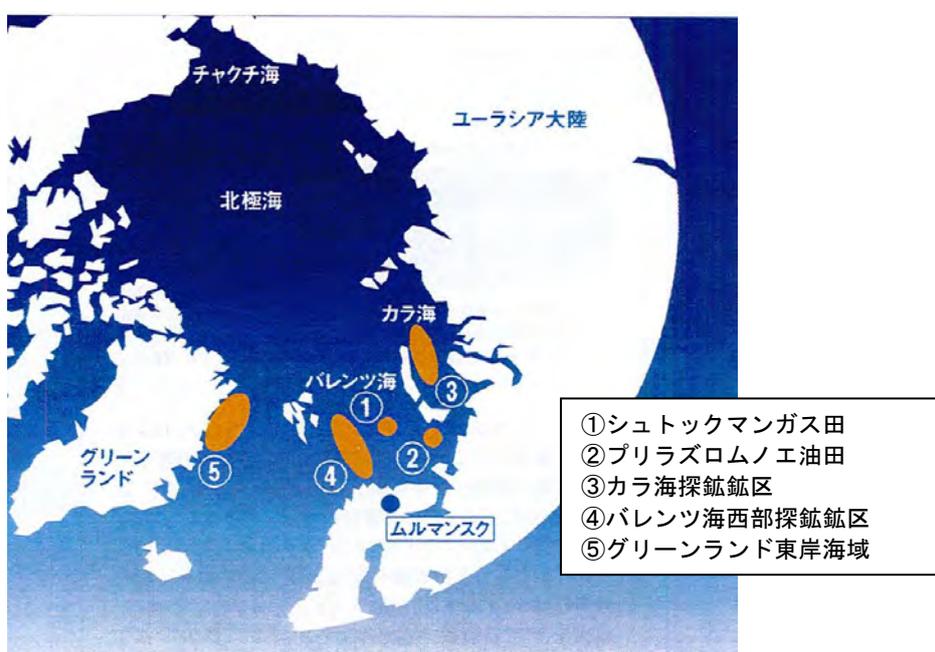


図2.1.13 北極圏プロジェクトの位置図

(出典：「世界が注目するニューフロンティア 北極圏資源開発」
2014.3 JOGMEC NEWS Vol.36、JOGMEC)

米国地質調査所(USGS : United States Geological Survey)は、2008年に実施した地質学的な調査から、北極圏には未発見資源量として、石油約900億bbl（世界の未発見石油の13%に相当）、天然ガス約1,670兆立方フィート（未発見天然ガスの30%）がある可能性が高いと推定しており⁸、極地・氷海で資源開発が、非常に注目を集めている。

③ 大水深海洋石油・天然ガスの開発と我が国の海洋資源開発技術伸長の取り組み

海洋開発のフィールドが増加し、多様化するにしたがって、これまでに無い新たな発想に基づく技術や設備が必要になる。

例えば、昨今の海洋石油・天然ガス開発の沖合化に伴い、新しい油ガス田の探査掘削

⁸ 2008年 USGS が公表した資料「環北極圏資源評価 (Circum-Arctic Resources Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas of the North Arctic Circle)」による。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

を行うドリルシップやFPSO等の多数の洋上施設と陸の距離が遠くなると、人員や機材、消耗品等をより効率的に輸送するための設備やシステムが必要となる。このようなニーズに対応するものとして、沖合に洋上中継基地（ハブ浮体）を設置し、陸からハブ浮体まで人員や物資を船舶で大量輸送した上で、ハブ浮体から多数の洋上施設までの間をヘリコプター等で小口輸送する「ロジスティックハブ・システム」が検討されている。

このような動きに呼応して、我が国造船・海運企業等は、上記のようなシステムの安全性評価をはじめとする、海洋開発フィールドで求められる新たな技術の研究開発と実用化を目的とする「J-DeEP技術研究組合」を2013年2月に設立し、同システムの実現に向けた調査研究を実施した。同組合は、ハブ浮体の投入が想定される海域の気象・海象条件下における要求性能を踏まえ、ハブ浮体等の試設計、実環境下における運航シミュレーション、安全性・経済性・システム稼働率の分析、リスク評価等、本システム導入にあたって想定される課題を網羅的に検証してきた（図2.1.14）。

このように新たな技術を世界に先駆けて実現することは、日本企業の受注機会の拡大につながるだけでなく、新たな技術の導入が期待される海洋資源開発プロジェクトへの参画機会の拡大にもつながる。さらに我が国企業が海外で海洋開発事業の実績を積むことは、将来的には我が国の排他的経済水域の資源開発にも貢献するものと考えられる。

なお、海外での海洋開発プロジェクトへの参画を見据えて、海洋開発事業の拡大が見込まれる中南米・アジア等において、ロジスティックハブ・システムの導入に向け、関係政府機関、企業等との協議が進められている。

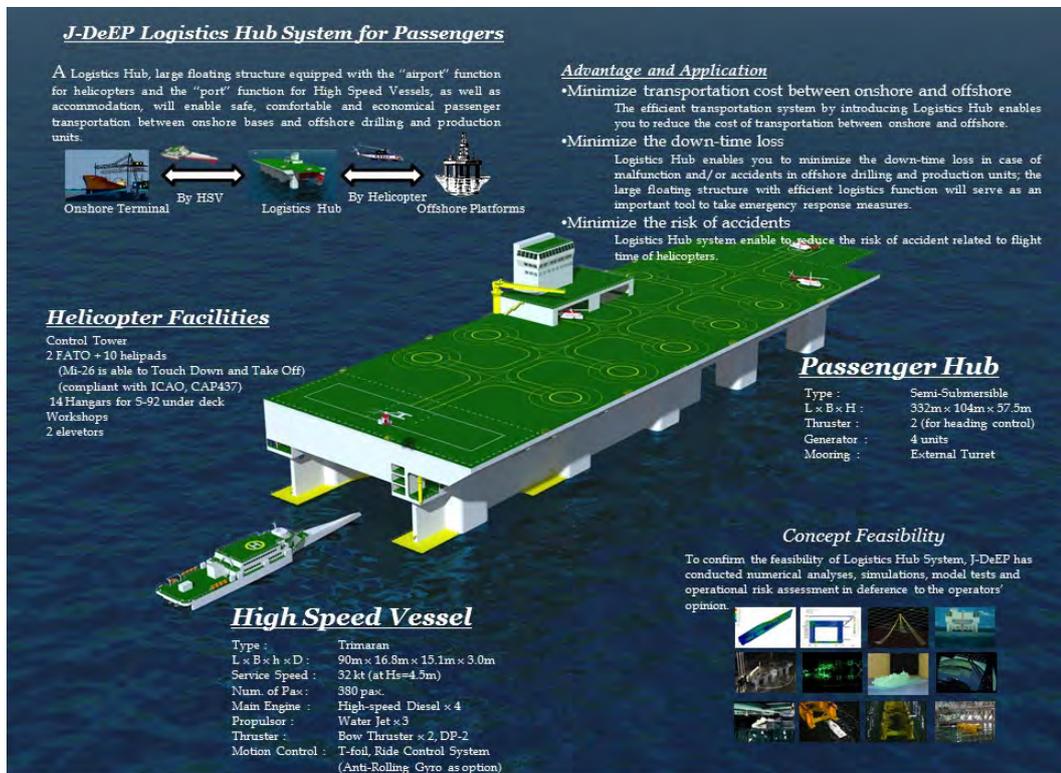


図2.1.14 Logistics Hub System for Passenger
(出典：J-DeEP 技術研究組合パンフレット)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

2.1.2 新たな資源開発への挑戦

(1) メタンハイドレート

① メタンハイドレートとは

メタンハイドレートは、メタンと水が低温・高圧の状態では結晶化した物質である。メタン分子と水分子だけで構成されているため、火を近づけると水分子に囲まれていたメタン分子が燃え、水だけが残る。

日本の周辺海域において相当の量が存在していると考えられていることから、将来の天然ガス資源として期待されている。

日本の周辺海域に存在するメタンハイドレートは、その堆積深度から表層型と砂層型に分類できる。

表層型メタンハイドレートは水深500m以上の海底面付近に存在するもので、日本海側を中心に確認されている。表層型は、採掘しようとするに分解しガス化してしまい回収ができなくなるため、生産が難しいと考えられている。

他方、砂層型メタンハイドレートは、水深が500m以上の深い海底面下数百メートルの砂層に存在するものである。砂層型は、通常のガス田とは異なり資源（ガス）が自噴しないため、減圧法や加熱法というメタンハイドレート特有の採取方法などについて研究が進められており、基本的には従来の石油・天然ガスにおける掘削・生産手法の活用が可能であり、探査も行いやすい。また、砂層型のメタンハイドレートは、ある程度量が存在すると指摘されていることもあり、表層型よりも従来型の石油・天然ガスにより近い砂層型を中心に研究開発が進められている。

図 2.1.15 に砂層型と表層型メタンハイドレートの概念図を示し、表 2.1.2 に砂層型と表層型の特徴を比較する。

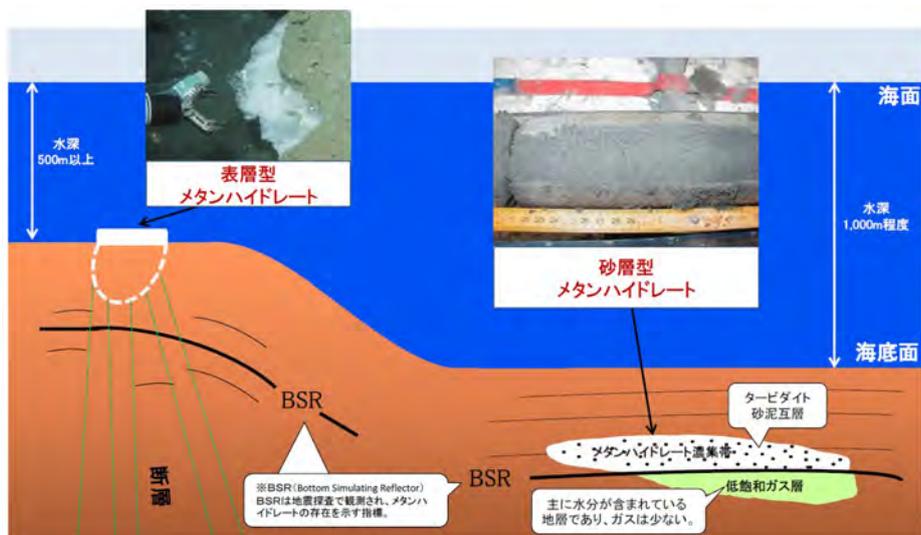


図2.1.15 砂層型と表層型メタンハイドレートの賦存形態概念図
(出典：「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」経済産業省)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

表 2.1.2 砂層型と表層型の特徴

項目	砂層型	表層型
賦存形態	水深が 500m 以深の海底面下数百メートルの地層中に砂と混じり合った状態で賦存する。	水深 500m 以深の海底に塊状で存在する。
賦存海域	東部南海トラフ海域を中心に相当量の賦存が見込まれている。	日本海側を中心に確認されている。
生産技術	自噴しないため、減圧法や加熱法という採取方法などについて研究が進められている。	採掘しようとする、分解しガス化してしまい回収ができなくなるため、生産がなかなか難しいと考えられている。
技術開発	在来型石油・天然ガス資源の生産技術に加え、新たな技術開発が必要である。	分布する海域や資源量等の本格的な調査の実施と、その結果を踏まえた開発手法の検討が必要である。
経済産業省の取り組み	平成 30 年度を目途に、商業化の実現に向けた技術の整備を行う。	日本海側を中心に資源量を把握するため、平成 25 年度以降 3 年間程度で、広域的な分布調査に取り組む。

(出典：「石油・天然ガスを取り巻く現状：第 97 回海洋フォーラム資料」2012 年を基に作成)

② 資源分布

メタンハイドレートは世界の大洋の周辺に分布している。その量は、石油、天然ガス、石炭などの化石燃料の総量にも匹敵すると推定されているが、海底堆積物中に存在するすべてのメタンハイドレートが資源として使えるわけではない。資源として使えるためには、密集し、まとまって存在している必要がある。

図 2.1.16 にメタンハイドレートが存在すると推定される場所を、図 2.1.17 には日本周辺の海域においてメタンハイドレートの存在が推定される場所を示す。

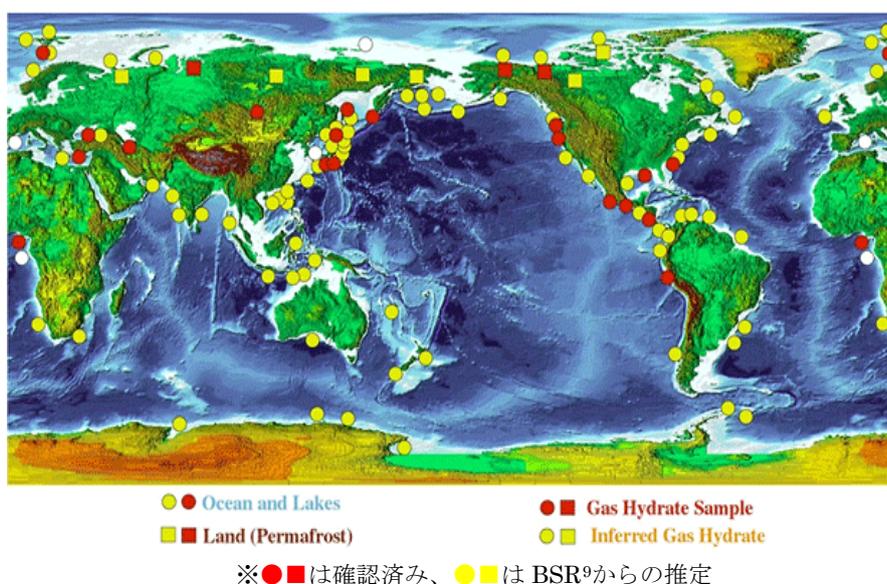


図2.1.16 メタンハイドレートが存在すると推定される場所
(出典：明治大学ガスハイドレート研究所ウェブサイト)

⁹ 海底擬似反射、詳細は③資源量・エネルギーポテンシャルを参照

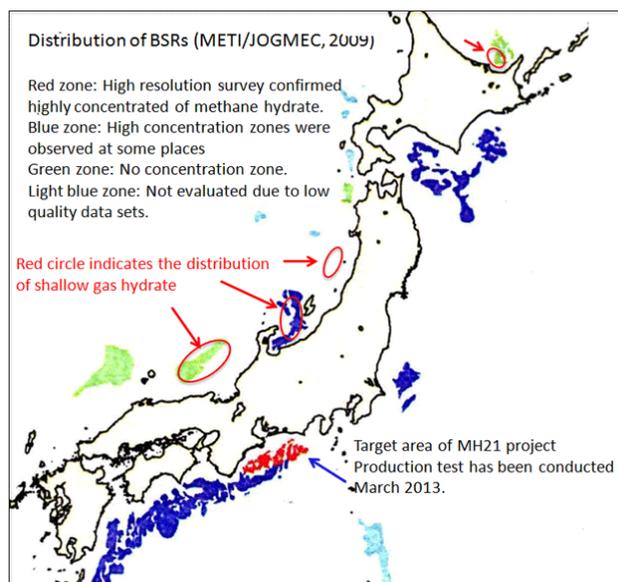


図 2.1.17 日本周辺でメタンハイドレートが分布すると推定される海域 (BSR 分布図)

(出典：明治大学ガスハイドレート研究所ウェブサイト)

③ 資源量・エネルギーポテンシャル

全世界の海域には1,000～5,000兆 m^3 の資源量が存在する推定されており、その資源ポテンシャルは膨大である。在来型天然ガスの究極可採資源量¹⁰436兆 m^3 と比較すると2～11倍の量であり、海洋メタンハイドレートの10%が開発可能になれば、34～172年分の天然ガスの供給が可能になる。特に、日本周辺の全海域に分布するメタンハイドレートは約12兆 m^3 （日本の国内ガス消費量の100年以上に相当）のメタンガス相当と推定されることから、日本のエネルギーセキュリティ確保に貢献する新たな国産エネルギー資源として期待されている。

メタンハイドレートの調査は、石油・天然ガスと同様に、反射法地震探査（音波探査）によって実施される。この調査データから BSR（Bottom Simulating Reflector、海底擬似反射面）と呼ばれる特徴的な反射面を確認することによって、地層中のメタンハイドレートの存在を推定している。BSR は地層中に海底面とほぼ並行する形で表れ、メタンハイドレートが安定的に存在する領域の基底部に相当する。BSR 分布図は、メタンハイドレートの存在（平面的な広がり）を知る手がかりとなる。しかし、BSR 分布図だけでは、メタンハイドレートの資源量（空間的な広がり）を特定することはできない。メタンハイドレートの賦存状態（どのような状態で存在しているか）を把握するためには、詳細調査（三次元地震探査特殊解析や掘削調査等）によって、メタンハイドレート濃集帯の分布状況を知ることが必要である。

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)¹¹は、石油公団他が2000年に取りまとめたBSR分布図を基に、2001年度から東部南海トラフ海域をモデル海域とした

¹⁰ 究極可採資源量：可採埋蔵量とその計算時点までの累計生産量を合わせた資源量

¹¹ メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21)：平成13年7月に発表された「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」を実現するため、平成13年度に設立された官民学共同の組織。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

詳細調査(三次元地震探査や掘削調査等)を実施してきた。さらに2007～2008年度には、詳細調査によるBSRの推定手法およびノウハウの新たな蓄積を活用して、日本周辺海域における既存二次元地震探査調査データの見直し作業を実施した。これに基づき、東部南海トラフ海域に賦存するメタンハイドレートの資源量を約1.1兆 m^3 (日本の天然ガス消費量の約13.5年分)と算定し公表(2007年、経済産業省)した。

表 2.1.3 に海域メタンハイドレートの資源量をまとめる。

表 2.1.3 海域メタンハイドレートの資源量

海域	賦存量(兆 m^3)	消費量との対比
全世界の海域	1,000～5,000	在来型天然ガスの究極可採資源量 436 兆 m^3 と比較すると 2～11 倍の量
日本周辺海域	12	日本の国内ガス消費量の 100 年分以上
東部南海トラフ海域	1.1	日本の天然ガス消費量の約 13.5 年分

(出典：海洋政策研究所第97回海洋フォーラム「石油・天然ガスを取り巻く現状」資料(2012年)およびメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム「日本周辺海域におけるメタンハイドレート起源BSR分布図」(2009年)を基に作成)

④ 生産方法

メタンハイドレートの生産方法として、加熱法、減圧法、化学的手法など各種提案されているが、加熱法と減圧法が有力とされている。ただし、加熱法と比較すると減圧法の方がより効率的であるということが、2008年カナダ北西部陸上の永久凍土帯における産出試験で判明したため、現在では減圧法が最も有力な生産手法と考えられている。同産出試験において5.5日間連続ガス生産を実現しており、この方式による陸上での生産試験は成功したといえるが、長期間の継続生産、海域での減圧法の効率確認などの課題が残されている。

a) 加熱法

温水注入などでメタンハイドレート層の温度を上げることで、メタンハイドレートからメタンを取り出す方法。メタンハイドレートからメタンが自壊するほど海底の温度を引き上げるには膨大なエネルギーを要する。

b) 減圧法

海底下数百メートルに存在するメタンハイドレート層まで掘削し、生産井内の水を汲み上げ、周囲の圧力を減すことでメタンハイドレートの分解を促し、井戸に流入してきたメタンガスと水を分離し、海上でガスを採取する方法である(図 2.1.18)。

日本では、2013年に世界初の海洋産出試験が渥美半島から志摩半島沖合の東部南海トラフ海域で実施され、約6日間の減圧法によるガスの生産実験により、累計約12万 m^3 の連続ガス生産が確認されている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

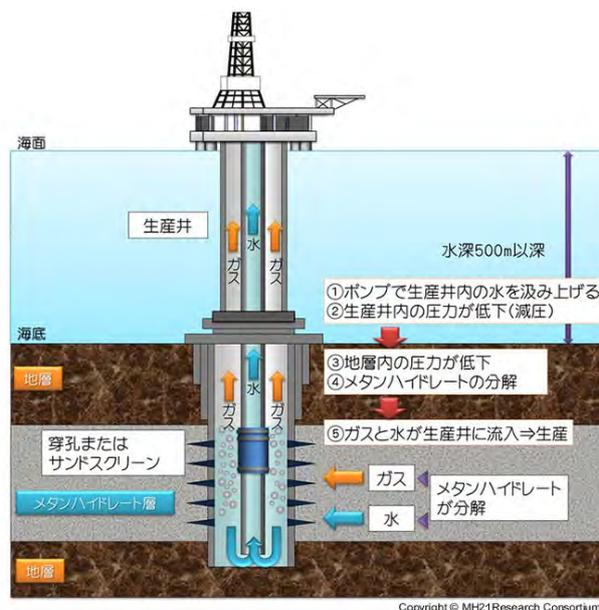


図2.1.18 減圧法の概念図

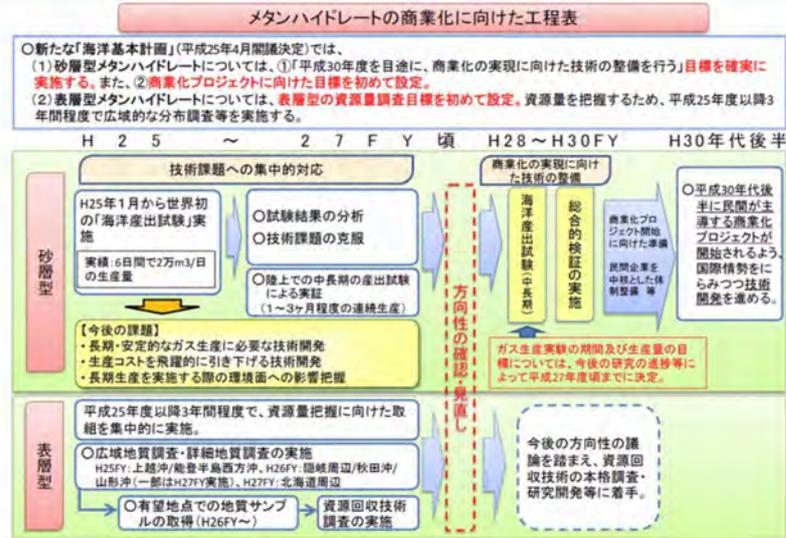
(出典：メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムウェブサイト)

⑤ ロードマップ

メタンハイドレートフォーラム 2013(2014.1.24 開催)での「メタンハイドレート開発研究の展望」で示されたメタンハイドレートの開発研究のロードマップを図 2.1.19 に示す。

本ロードマップでは、砂層型メタンハイドレートについて引き続き海洋生産試験を推進し、平成30年代後半には民間主導の商業化プロジェクトが開始されるよう技術開発を進めていくこととされている。

海洋エネルギー・鉱物資源開発計画(平成25年12月24日)



MHP Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan

18

今後のMH開発研究の展開(計画)

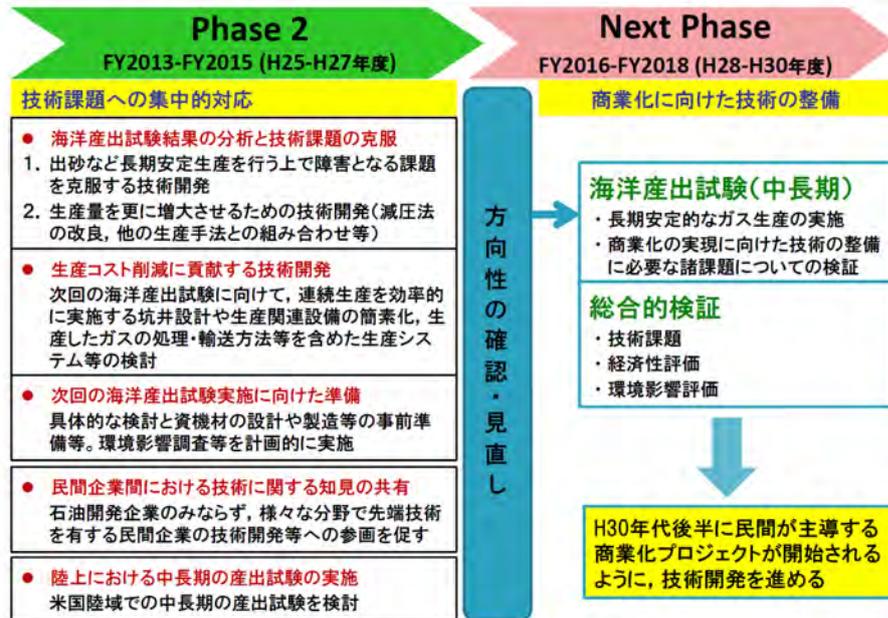


図2.1.19 メタンハイドレート開発計画

(出典: 「メタンハイドレート開発研究の展望」メタンハイドレートフォーラム2013)

(2) 海底鉱物資源開発

① 海底鉱物資源の概要

近年、世界的に海底鉱物資源の権益を確保する動きが活発化している。

海洋鉱物資源は、分布する場所、形成の仕方・形状・含まれる金属元素の違いなどから、マンガン団塊(manganese nodules)*、海底熱水鉱床およびコバルトリッチクラスト(cobalt-rich ferromanganese crusts)*の3種類に分けることができる。最近では、第4の資

第2章 海洋開発産業の背景と現状

源としてレアアース(rare-earth elements)*を含む堆積物にも注目が集まり、学術調査の他、資源としてのポテンシャルを評価する試みも行われている。

図 2.1.20 に海底鉱物資源の分布概念図、表 2.1.4 に分布概要、表 2.1.5 に海底鉱物資源の特徴を示す。

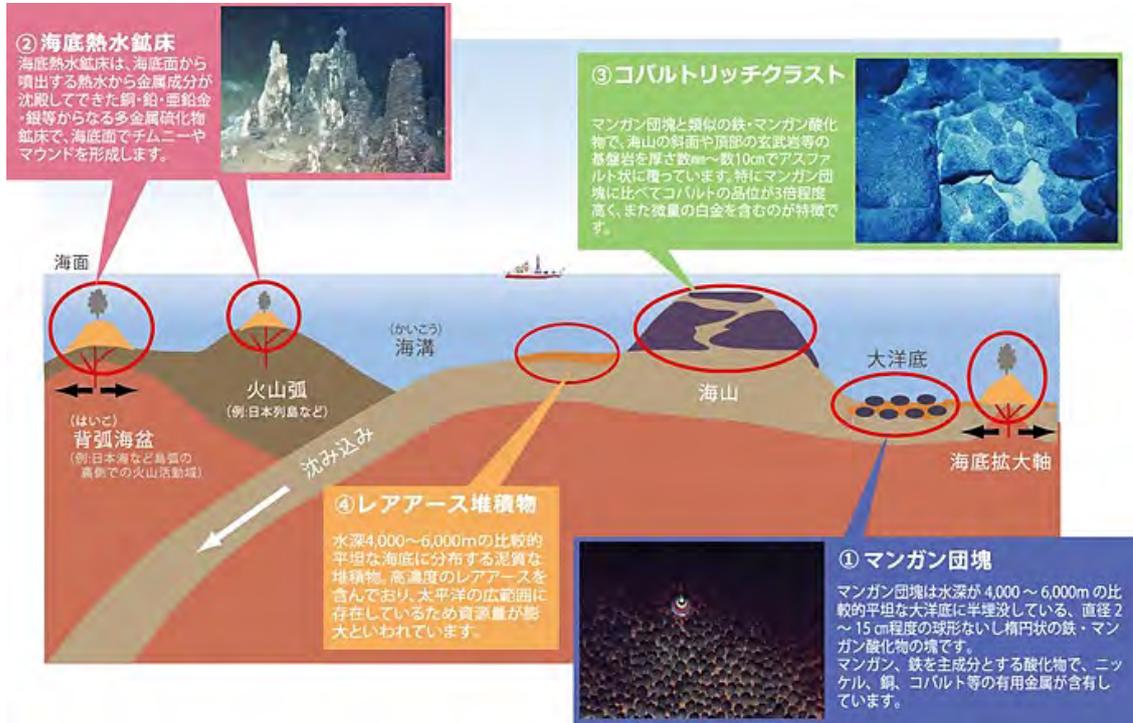


図2.1.20 海底鉱物資源の分布概念図

(出典：JOGMEC ウェブサイト)

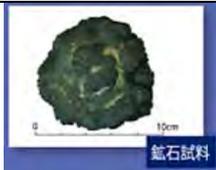
表 2.1.4 海底鉱物資源の分布概要

種類	海底分布の概要
海底熱水鉱床	海底面から噴出する熱水から金属成分が沈殿してできた銅、鉛、亜鉛、金、銀などからなる多金属硫化物鉱床で、海底面でチムニーやマウンドを形成する。
コバルトリッチクラスト	マンガン団塊と類似の鉄・マンガン酸化物で、海山の斜面や頂部の玄武岩などの基盤岩を厚さ数ミリメートルから数十センチメートルでアスファルト状に覆っている。特にマンガン団塊に比べてコバルトの品位が3倍程度高く、また微量の白金を含むのが特徴である。
マンガン団塊	水深が4,000から6,000mの比較的平坦な大洋底に半埋没している、直径2～15cm程度の球状ないし楕円状の鉄・マンガン酸化物の塊である。マンガン、鉄を主成分とする酸化物で、ニッケル、銅、コバルトなどの有用金属が含有されている。
レアアース泥	水深が4,000から6,000mの比較的平坦な海底に分布する泥質な堆積物である。高濃度のレアアースを含んでおり、太平洋の広範囲に存在しているため資源量が膨大だといわれている。

(出典：JOGMEC ウェブサイトを基に作成)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

表 2.1.5 海底鉱物資源の特徴

項目	海底熱水鉱床	コバルトリッチクラスト	マンガン団塊	レアアース泥
水深	700～2,000m	800～2,400m	4,000～6,000m	4,000～6,000m
含有する有用金属	銅、鉛、亜鉛、金、銀、レアメタル	マンガン、銅、ニッケル、コバルト、白金他	マンガン、銅、ニッケル、コバルト他	レアアースを含有
分布海域(代表的海域)	海底拡大軸、背弧海盆、火山弧(東太平洋海膨、沖縄諸島、伊豆・小笠原諸島など)	大洋の海山・海台(南鳥島、ウェーク島、マーシャル諸島、ハワイ諸島等周辺)	大洋の深海底(ハワイ南東方海域など)	太平洋の海底に後半に渡って分布(南東太平洋や中央太平洋)
分布域の地形・地質	過去、現在の熱水活動域	平頂海山斜面部および平頂部、比較的凹凸に富む	比較的平坦、遠洋性堆積物分布	平坦な海底、粘土状の堆積物
鉱石資料				

(出典：JOGMEC ウェブサイトを基に作成)

② 海底熱水鉱床の開発状況

ここでは、海底鉱物資源の中から、海底熱水鉱床を取り上げ、商業化を目指して行われている開発状況を概説する。

a) 概要

海底熱水鉱床は、地下深部に浸透した海水がマグマ等により熱せられ、有用金属が溶解している「熱水」が海底から噴出し、周辺の海水によって冷却される過程で、銅、鉛、亜鉛、金、銀等の各種金属が含まれる硫化物として堆積してできたものである。

一般に、海底熱水鉱床は、水深1,000～3,000mの中央海嶺など海底が拡大する場所(海底拡大軸)やニュージーランド～フィジー、パプアニューギニア～マリアナ～日本に至る西太平洋の島弧-海溝系に分布し、世界で約350か所程度の徴候地が見つまっている。日本周辺海域では、沖縄トラフや伊豆・小笠原海域において、海底熱水鉱床の徴候が数多く確認されている。日本周辺海域の海底熱水鉱床は、世界的にも比較的分布水深が浅く、開発に有利であるとされている。

我が国以外でも、ロシア、フランス、中国、韓国、インド、ブラジルが国際海底機構(ISA: International Seabed Authority)から公海域での探査権を取得し、世界的にも権益確保の動きが活発化している。また、韓国はトンガやフィジーの探査鉱区を取得して、掘削調査などを行っている。さらに、民間企業の Nautilus Minerals 社がパプアニューギニアの領海内での開発を目指して、採鉱システムの開発を行っている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

b) 探査技術

既存の熱水鉱床探査手法は、特徴的な海底地形や現在の熱水活動などを精密海底地形調査により摘出する方法が適用されている。一方で、海底地形からでは存在が把握できない熱水活動を停止した鉱床（潜頭性鉱床）に対する探査手法は、大きな資源量が期待されているにもかかわらず、世界的に見ても確立されていない。このことから、文部科学省認可法人として民間企業により技術研究組合（J-MARES）が設立され、SIP 課題（戦略的イノベーション創造プログラム）「次世代海洋資源調査技術」において、熱水鉱床、特に潜頭性熱水鉱床を対象とした調査システム・運用方法の確立を目的とした研究開発を進めており、将来の調査産業創出を目指している。

c) 全体システム

石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）では、商業生産を意図した探鉱システムの開発検討も行われている。検討されている探鉱システムは、探鉱の母船となる探鉱船、探鉱物を海底から母船まで送る揚鉱管、探鉱機と揚鉱管をつなぐフレキシブルホース、海底を走行し探鉱する探鉱機、探鉱船の位置保持に用いられる自動船位保持装置（DPS：Dynamic Positioning System）*、また、遠隔操作無人潜水機（ROV：Remotely Operated Vehicle）* / 自律型無人潜水機（AUV：Autonomous Underwater Vehicle）* などの無人潜水機、および陸域への鉱石輸送を行うシャトル運搬船などによって構成される。探鉱システムの構成要素の概念図と必要となる機能を図2.1.21と表2.1.6に示す。

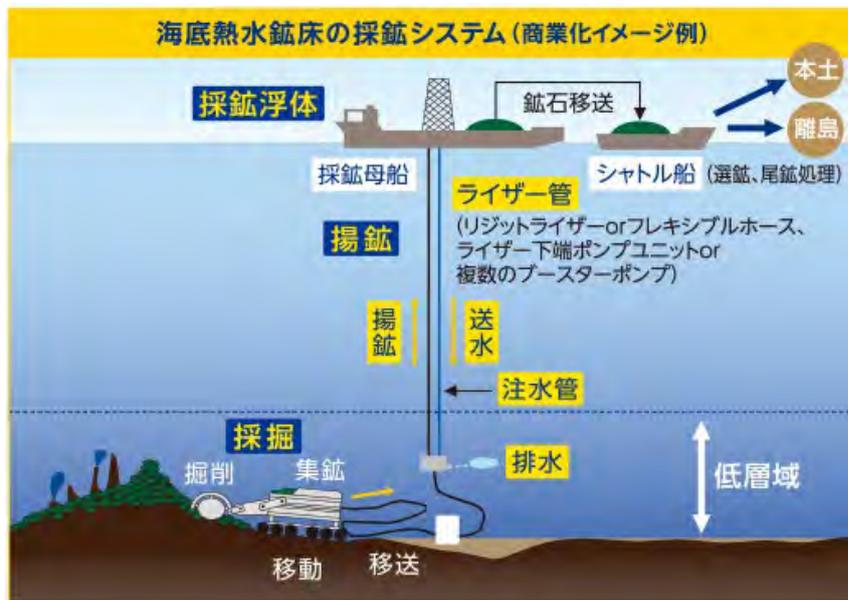


図2.1.21 探鉱システムの概念図

（出典：「資源ライブラリ 広報誌特集：国産資源 開発への挑戦／海底熱水鉱床」 JOGMEC）

第2章 海洋開発産業の背景と現状

表 2.1.6 採鉱システムの構成要素と必要となる機能

機材	必要となる機能
採鉱母船	DPS または係留索で定位置を保持しながら、鉱物を海上まで引き上げ、それをシャトル運搬船に積み込む。すべての活動の基地となる艦体で、油ガス開発におけるプラットフォームと同等の揚鉱機能、管理機能、生活機能を有する。
DPS または係留索	想定される海象条件のもとで採鉱船を定位置に保持する機能
揚鉱管	鉱石を採鉱船まで流体輸送する揚鉱装置
フレキシブルホース	採鉱機と揚鉱管をつなぐとともに採鉱機の活動を支援する。
採鉱機	海底で採鉱作業を行う。海底での走行機能、採鉱機能、およびモニタリング機能が必要である。
シャトル運搬船	採鉱した鉱物を採鉱船から陸上まで輸送する。
ROV、AUV	探査、海底環境のモニタリング、採鉱活動の支援

(出典：「平成 26 年度 海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査報告書」 エンジニアリング協会)

2.2 海洋再生可能エネルギー開発

2.2.1 洋上風力発電

風力発電は、風の運動エネルギーを風車によって回転エネルギーに変え、発電機に伝送し、電気エネルギーに変換する発電システムである。

風が風車に与える運動エネルギーは、風速の 3 乗に比例して増大する性質を持っており、理論的には風速が 2 倍になると風力エネルギーは 8 倍になる。風車は、より風の強い場所に設置すること、大きい翼で効率良く風を受けることが重要である。

陸上に設置した風力発電(図 2.2.1) や、陸上に近い浅い海域で海底に構造物を設置した着床式洋上風力発電(bottom-mounted offshore wind turbine)*は実用化が進展しており、欧州を中心にロンドン・アレー(図 2.2.2) に代表されるような大型の発電施設からなるウィンドファーム(wind farm)*が稼働している。このような状況下、より大型の風車の設置に適した沖合の洋上に風車を設置する浮体式洋上風力発電(floating wind turbine)*に関してさまざまな取り組みがされている。日本においても、浮体式洋上風力発電の系統連系が始まっている。



(新出雲風力発電所)

図2.2.1 陸上ウィンドファームの例
(出典：ユーラスエナジーウェブサイト)



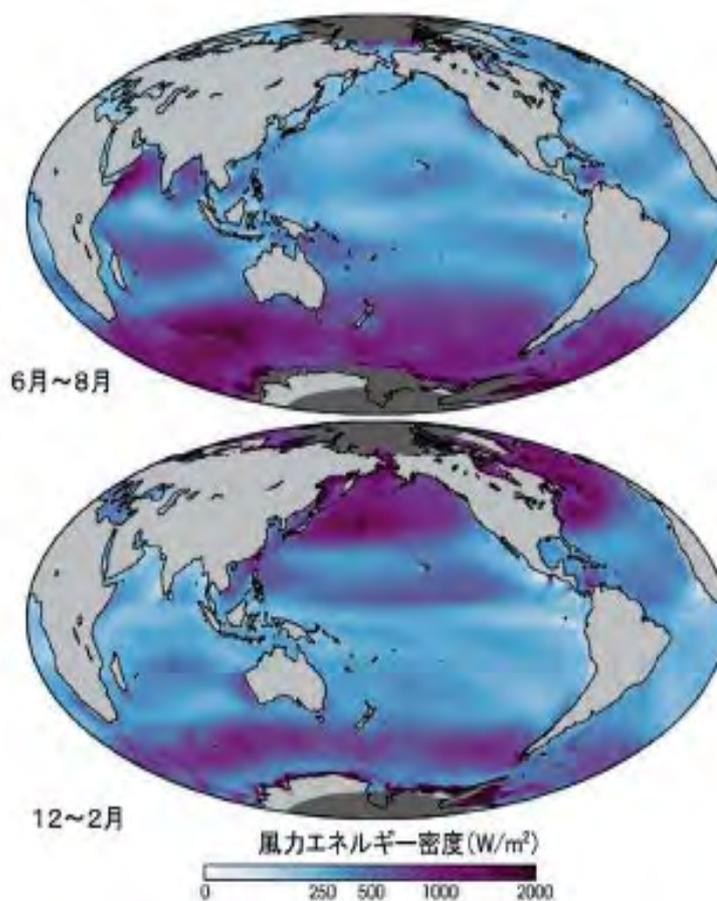
(London Array)

図2.2.2 洋上ウィンドファームの例
(出典：London Array ウェブサイト)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

(1) 賦存量

一般に、洋上の風速は強勢で乱れが小さいことから、風力発電に適している。つまり、洋上では陸上よりも良い風況が得られる。世界の洋上の年間平均風力エネルギー密度の分布を図 2.2.3 に示す。北半球冬季は、特に米国東岸やイギリス・ノルウェー沖の北海、日本沿岸域などの風況が良い。また、豪州沿岸、南アフリカ、アルゼンチン南部などは一年を通して風況に恵まれている。



※海上風（高さ10m）の平均風力エネルギー密度

図2.2.3 世界の風力エネルギー密度分布（洋上）
（出典：NASA ウェブサイト）

風力発電において、設置地点で年間平均風速が7m/s以上あることが、経済性を確保するうえでの目安とされている。図 2.2.4 および図 2.2.5 に、日本の陸上および洋上の風力賦存量図を示す。

陸上では、北海道や北東北を中心に風況に恵まれた地域も存在するが、概して年間平均風速7m/s以上の風況を得られる地域は少ない。

洋上では、年間平均風速7m/s以上の風況を得られる地域（図 2.2.5 のオレンジや赤い部分）が、北海道、北東北、関東、九州などに見られ、陸上に比べて洋上は風況に恵まれた地域が多い。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

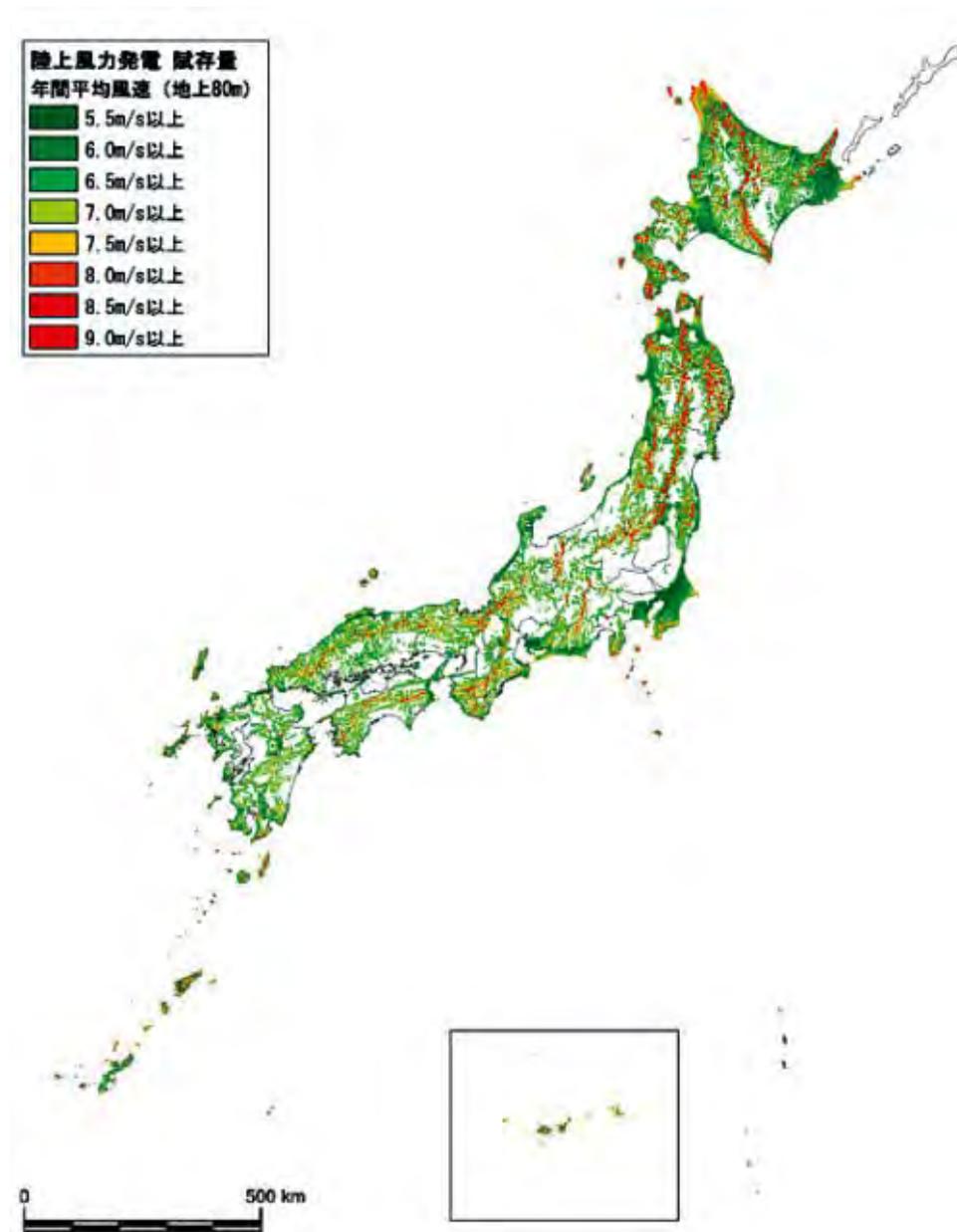


図2.2.4 日本の風力賦存量分布（陸上）

（出典：「平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業（風力エネルギーの導入可能性に関する調査）」
資源エネルギー庁）

第2章 海洋開発産業の背景と現状

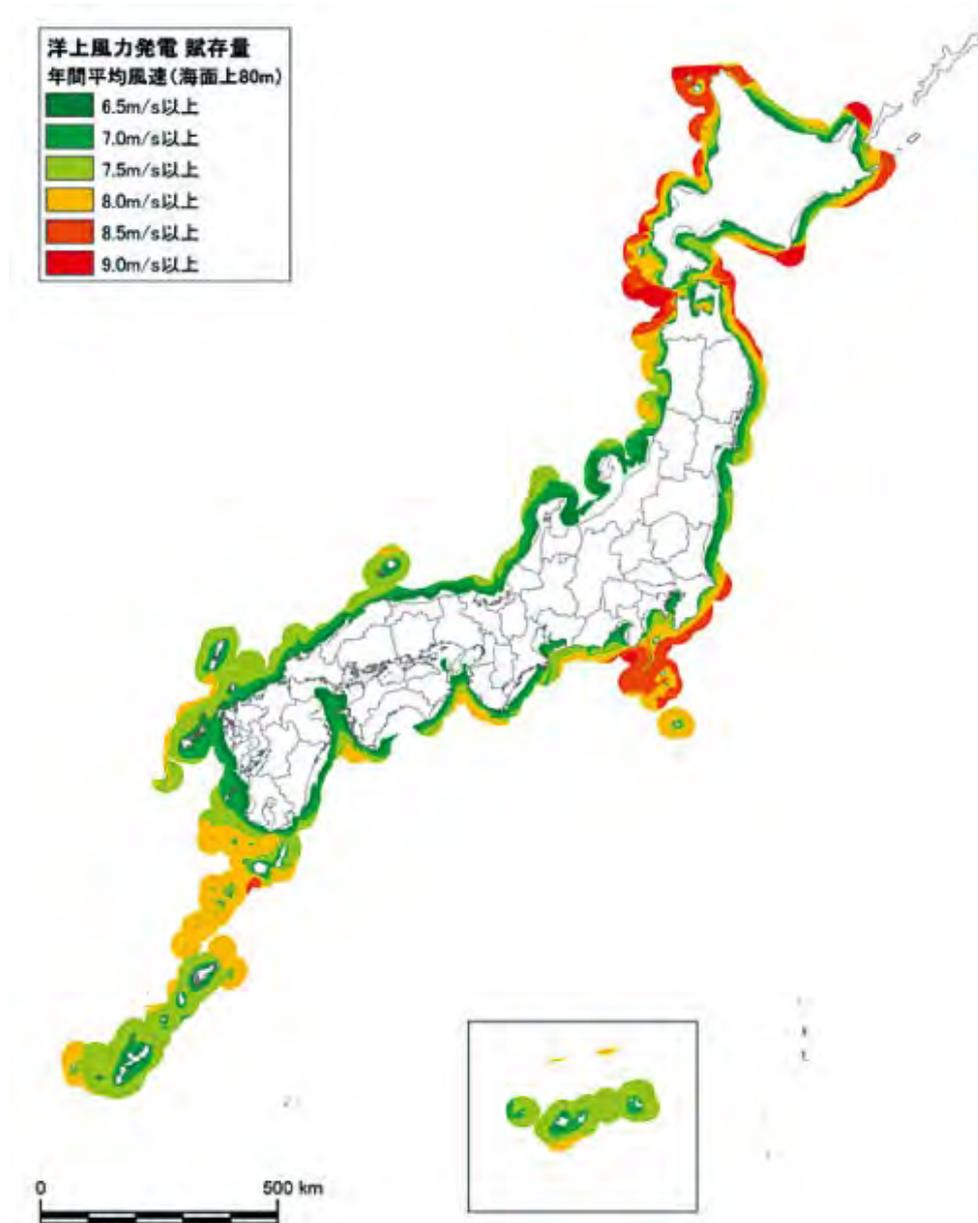


図2.2.5 日本の風力賦存量分布（洋上）

(出典:「平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業(風力エネルギーの導入可能量に関する調査)」
資源エネルギー庁)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

(2) 洋上風力発電の導入ポテンシャル

① 用語の定義

洋上風力発電が見込まれる量を表す用語として、「賦存量」、「導入ポテンシャル」、「導入可能量」が用いられており、以下のように定義する。

a) 賦存量

賦存量とは、設置可能面積、平均風速などから理論的に算出することができるエネルギー資源量である。

b) 導入ポテンシャル

導入ポテンシャルとは、賦存量から自然要因（標高、傾斜など）と法規制（自然公園、保安林など）等を理由とした開発不可能地を除いて算出したエネルギー資源量である。

c) 導入可能量

導入可能量とは、経済性（固定価格買取制度(FIT: Feed-In Tariff)*、収益率など)を考慮し導入ポテンシャルから絞り込んだエネルギー量である。

② 導入ポテンシャルおよび導入可能量の試算

洋上風力発電の導入ポテンシャルについて、経済産業省による試算では15億kW、環境省による試算では16億kWとなっている。導入可能量についての試算では、前提とした建設コストの想定に差があり、両者の試算が大きく開いている。いくつかのケースが示されているが、20円/kWで15年買取りの場合として、経済産業省は4,500万kW、環境省では17万kWとされている。一般的な家庭の消費電力に換算すると3,200万世帯分または12万世帯分に相当する。

洋上風力の主要な電力供給事業者のエリア別の導入ポテンシャル分布状況を図 2.2.6 に示す。九州エリアの導入ポテンシャルが最も大きく、全体の29%を占めており、北海道エリアが26%、東北エリア14%でそれに続いている。

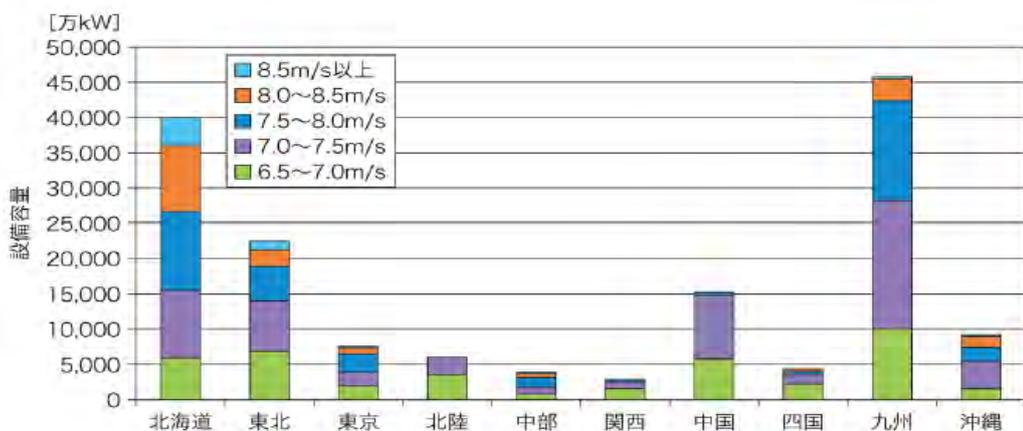


図2.2.6 洋上風力の電力供給エリア別の導入ポテンシャル分布状況

(出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO（平成22年度「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」環境省よりNEDO作成）)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

(3) 市場動向

① 世界の導入実績

全世界および主要国における洋上風力発電累積導入量の推移を図2.2.7に示す。世界的には、2011年の累積導入量が4,117MWに対し、2014年に8,759MWとなっており、3年間に倍増していることがわかる。なお、2019年には累積導入量は29GWに達している。

国別に見ると、イギリスの導入量が最も多く、全体の50%を占めている。次いで、デンマーク、ドイツ、ベルギーと続いており、遠浅の地形が多く地理的なメリットのある欧州で先行して導入が進められていることがわかる。中国もベルギーに次いで導入量が多く、積極的な取り組みが窺える。日本でも導入が進められているものの、世界的に見るとその量は僅かであるのが現状である。

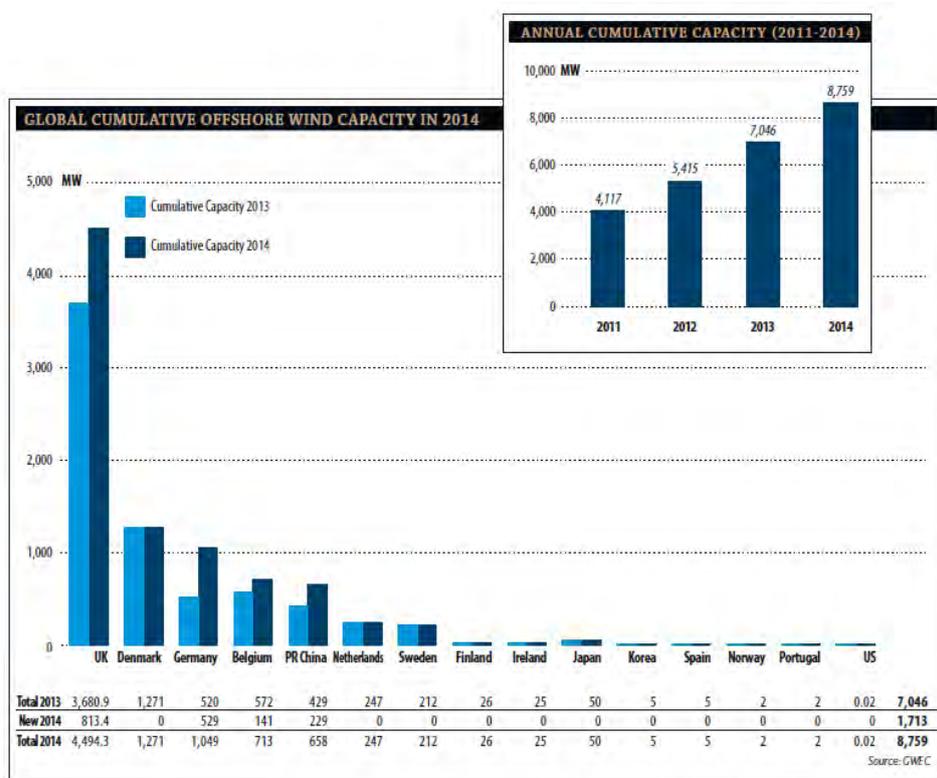


図2.2.7 世界および主要国における洋上風力発電累積導入量の推移
(出典：“Global Wind Report – Annual Market Update 2014”GWEC)

② 洋上風力発電産業におけるプレイヤー

洋上ウィンドファームの主要構成要素としては、風力発電機、洋上変電所、海底送電線・通信ケーブル、港湾施設などがあり、さまざまな企業関わっている。図2.2.8に、洋上ウィンドファームの主要構成要素とプレイヤーを示す。

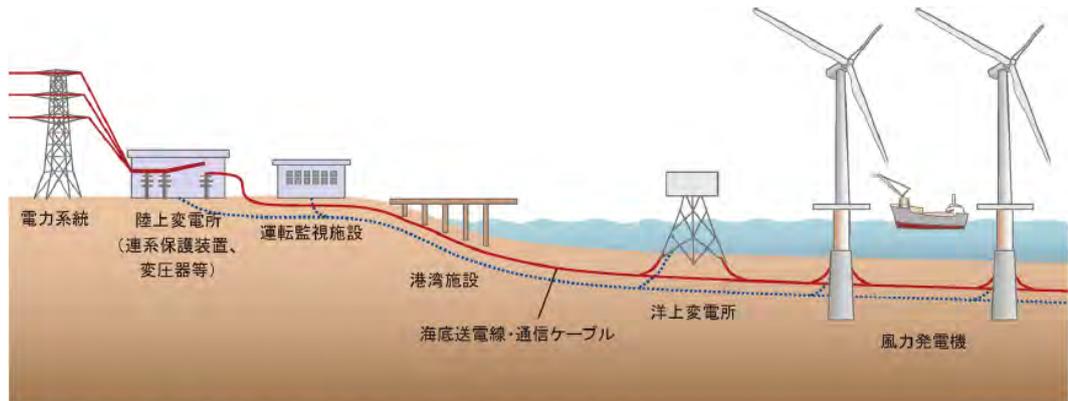
風力発電機については、かねてから Vestas 社（デンマーク）と Siemens 社（ドイツ）が主要サプライヤーであるが、合併、提携が進むとともに中国企業のシェアも増加している。また、三菱重工業、日立製作所等の日本企業も風力発電機の市場に参入していたが、生産からは休止或いは撤退している。オランダ、ベルギー、イギリスの企業は、北

第2章 海洋開発産業の背景と現状

海の石油・ガス開発のノウハウを生かし、海洋土木工事の分野で重要な役割を果たしている。

関連電気設備や海底ケーブルのサプライヤーは、ノルウェーやスウェーデン、ドイツ、イタリアなど、各国に分散している。近年、洋上風力市場を牽引しているイギリスは、洋上風力発電産業に積極的に投資しており、北海における国内外市場への展開を見据え、同国東海岸に関連設備を増強している。

欧州において市場が拡大するにつれ、洋上風力発電産業としてサプライチェーンが構築されつつあるといえる。



	港湾管理	海底ケーブル (製造)	海底ケーブル (敷設)	海洋土木	電気設備	基礎	風力発電機
主要企業	—	Nexans, Prysmian, ABB NKT, Scanrope	Technip, CT Offshore, Global Marine, Vesser&Smit	A2Sea, MPI, SHL, Geosea	ABB, Siemens Energy, Alstom Grid	SIF, Smulders, Bladt, EEW, Weserwind, BiFAB, Aker	Siemens, Vestas, Repower, Areva
新規参入企業	—	DRAKA, JDR	Beluga	Fred Olsen, Beluga, Inwind, GOAH, Sea Jacks	C&G	H&W, TAG, Tata, Hereema, ZPMC, Shinan, Fabricom	BARD, GE, Doosan, Gamesa, Alstom, Nordex, 三菱重工

図2.2.8 洋上ウィンドファームの主要構成要素とプレイヤー

(出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO ("Wind in our Sails" EWEA より NEDO 作成))

③ 発電コスト

表 2.2.1 に、陸上および洋上における風力発電の発電コスト試算例を示す。

陸上風力発電の発電コストは、世界的に見て概ね 10 円/kWh 前後であり、従来型電源に対してコスト競争力を持つ水準とされる。

洋上風力発電のシステム価格は、陸上風力発電の約2倍であるが、陸上よりも風況が良く約50%程度多くの発電量を得られるため、陸上風力発電とほぼ同水準の発電コスト(約 8~15円/kWh程度) が実現可能とされている。

なお、この値は欧州で広く導入が進んでいる、水深が 50m 未満の遠浅な海域に着床式洋上風力発電を建設した場合を前提としたものであり、日本で実証研究が進められてい

第2章 海洋開発産業の背景と現状

る浮体式洋上風力発電については、同水準の発電コストを達成可能か否かは留意が必要である。

なお、日本の風力発電の発電コスト試算は、内閣官房国家戦略室に設けられたコスト等検証委員会が2012年に行ったものであるが、陸上風力発電は好条件が揃った場合で約10円/kWhと、火力発電（石炭、LNG）と同程度の発電コストになり得るという試算結果、および洋上風力発電については9.4～23.1円/kWhと、陸上風力発電よりも高めの発電コストになるとの試算結果が出されている。あわせて、洋上風力発電では、送電線の敷設コストが陸上より高価になることが指摘されている。

表 2.2.1 風力発電の発電コスト

	場所	発電コスト [円 / kWh]※1	出典等
陸上風力	世界	3.2～12.8※2 (0.04～0.16ドル / kWh)	Deploying Renewables – Best and Future Policy Practice (2011, IEA)
		5.6～10.4 (0.07～0.13ドル / kWh)	Technology Roadmaps Wind energy (2009, IEA)
	日本	9.9～17.3※3	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会)
洋上風力	世界	8.0～15.2 (0.1～0.19ドル / kWh)	Deploying Renewables – Best and Future Policy Practice (2011, IEA)
		8.8～10.5 (0.11～0.131ドル / kWh)	※2005～2008年の価格 Technology Roadmaps Wind energy (2009, IEA)
	日本	9.4～23.1※2	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会)

※1: 換算レートはドル＝80円を使用。

※2: 建設費 1,400～2,500 ドル/kW, O&M コスト 建設費の2.5%, 全負荷時間 1,800～3,500 時間/年, 加重平均資本コスト 6.5%, 稼働年数 20～25年と仮定。

※3: 建設費 20～35万円/kW, 設備の廃棄費用 建設費の5%, O&Mコスト 人件費・修繕費(建設費の1.4%) 諸費(建設費の0.6%) 業務分担費(直接費の 14%)の和, 設備利用率 陸上風力 20%・洋上風力 30%, 稼働年数 20年, 割引率 3%と仮定。

(出典: 「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」 NEDO を基に作成)

(4) 研究開発動向

① 洋上風力発電の形態 ー着床式から浮体式へー

洋上風力発電には、風車を海底に固定した構造物上に設置する着床式洋上風力発電と、ロープや錨などの係留装置で固定した浮体構造物上に設置する浮体式洋上風力発電とがある。

洋上風力発電の商業化が進んでいる欧州では、遠浅の海岸が多く、気象条件も比較的安定していることから、ほとんどが着床式の洋上風力発電である。一般には、水深約 50m を境にして、水深が深い海域では浮体式構造がコスト的に優位になるといわれている。

日本の場合は、近海には遠浅の海岸が少なく、台風の襲来などもあり気象条件も比較的厳しい。着床式の場合は、台風などによって設備が損壊する危険性が大きい。浮体式の場合は、強風によって海が荒れても基礎が海底に固定されていないので、設備が損壊する危険性は少ないといわれる。一方で、着床式ではほとんど動揺が無いが、浮体式では風や波の影響によって動揺するため、風車や支持構造物の設計に固有の技術が求められる。こうした特性を踏まえて、長崎県五島列島沖や福島県福島沖、北九州沖などの海域で実証研究が進められてきた。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

② 浮体式の実証研究事業

日本においては、2001年度から複数の機関で、浮体式洋上風力発電の研究が開始されている（表 2.2.2）。

表 2.2.2 日本における浮体式洋上風力発電の研究開発の状況

年度	機関	概要
2001	日本海洋開発産業協会	海洋資源・エネルギーを複合的に活用する沖合洋上風力発電等システムの開発調査研究
2002	日本海洋開発産業協会	浮遊式風力発電基地の自然エネルギーの最適輸送技術に関する調査研究
2003～2005	海上技術安全研究所	浮体式洋上風力発電による輸送用代替燃料創出に資する研究
2003～2007	国立環境研究所	洋上風力発電を利用した水素製造技術開発（セイリング式 ¹³ ）
2005～2006	東京電力・東京大学	フロート式洋上風力発電に関する研究
2009～2010	京都大学・佐世保重工等	浮体式洋上風力発電に関する研究
2011	NEDO	浮体式洋上風力発電に係る基礎調査
2011～	環境省	浮体式洋上風力発電実証事業（長崎県沖）
2012～	経済産業省	浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業

（出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO を基に作成）

実証研究では、2009年、京都大学・佐世保重工などグループが、2MWクラスの浮体式風車を想定した10分の1スケールの実証試験モデルにより海上での実験を実施したことを手始めとして、2010年度からは環境省からの委託研究として戸田建設や日立製作所などのグループが、長崎県五島列島沖を実証海域として実証研究を開始した（図2.2.9）。2012年6月には小型の実証試験機の洋上設置などを経て、2013年10月に目標とする2MWの浮体式風車（図2.2.10）を導入して発電を開始し、さまざまな計測を行って事業性の評価などを行ってきた。長崎県五島市栴島沖における、環境省による本実証事業は2015年度に終了した。現在は崎山沖に移設し、地元で運転が継続されている。



図2.2.9 五島沖実証実験の位置図

（出典：環境省_浮体式洋上風力発電実証事業ウェブサイト）

第2章 海洋開発産業の背景と現状

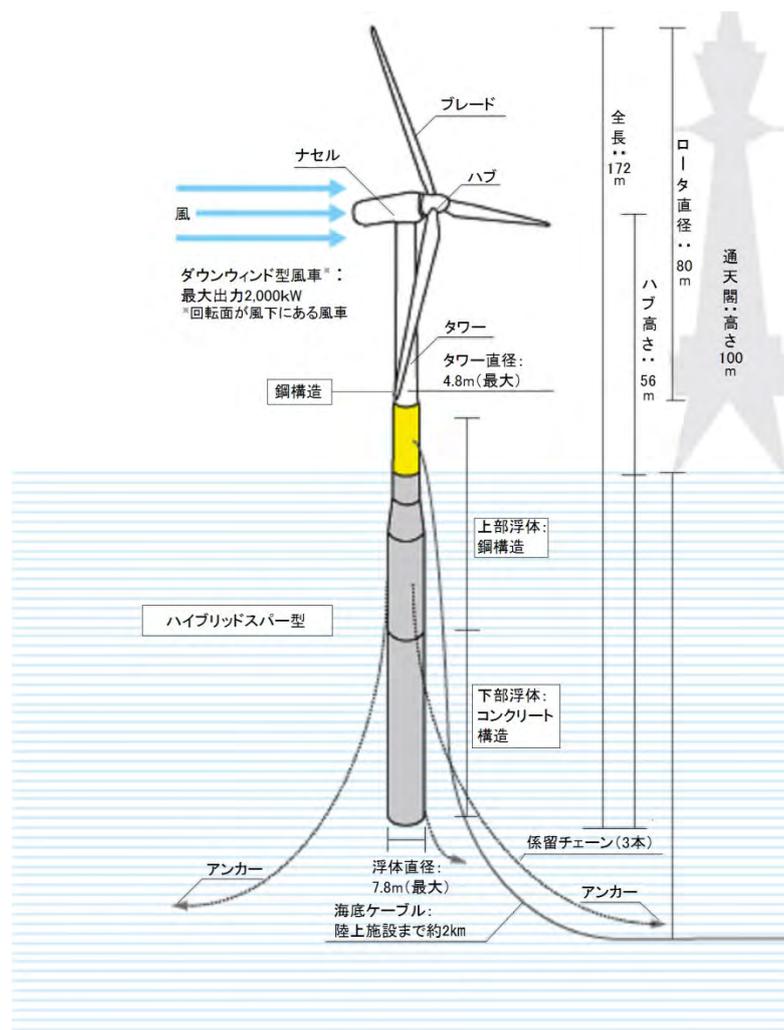


図2.2.10 五島沖に設置された浮体式風車
(出典：環境省_浮体式洋上風力発電実証事業ウェブサイト、一部加工)

また、2012年度からは経済産業省の委託研究として丸紅を代表とするコンソーシアムが、「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」として実証研究を福島沖で開始し、2MW浮体式風力発電1基、7MW浮体式風力発電1基および変電設備などを備えた浮体式洋上サブステーションに加えて5MW浮体式風力発電などで構成され、世界初となる浮体式洋上風力発電所の建設を行っている。2MWおよび7MWの浮体式洋上風車は、それぞれ2013年および2015年に発電を開始した。3基目となる5MWの浮体式洋上風車は2016年に設置工事を完了している。この事業については、第4章で詳細を紹介しているので参照されたい。

最近では、NEDOにより北九州市沖約15キロメートル、水深約50メートルの海域に設置した日本初のバージ型浮体式洋上風力発電システム実証機「ひびき」の実証運転を2019年5月より実施している。

海外に目を向けると、ノルウェーにおいてEquinor(旧Statoil)社が、ポルトガルにおいてPrinciple Power社がフルスケールの実証試験を実施するなどしており、世界的にも浮

第2章 海洋開発産業の背景と現状

体式風車の実用化に向けて開発競争の時代に入りつつある。また、2010年3月、IEC（International Electro technical Commission、国際電気標準会議）において、韓国から浮体式風車の国際標準化に向けた提案「浮体式風車の国際標準（IEC 61400-3-2）が行われ、日本が培ってきた技術的知見などを取り込みつつ、2015年に最終ドラフト化され、2019年4月に技術仕様書として発行された。

(5) 風力発電のロードマップ

① 欧州主要国

欧州主要国における導入目標を表 2.2.3 に示す。

イギリスは、洋上風力発電の導入を推進し、再生可能エネルギーにかかわる EU 指令で設定された導入目標（2020 年までに 15%）を達成するため、“UK Renewable Energy Roadmap” を策定し、その中で 2020 年までに陸上風力発電 10～13GW、洋上風力発電 11～18GW の導入が見込めると分析している。

ドイツは、環境先進国として EU 指令における導入目標を上回る、「2020 年までに 35%」という野心的な目標を掲げている。風力発電については、2020 年までに陸上風力発電 35.75GW、洋上風力発電 10GW の導入見通しを示している。

デンマークやスペインも野心的な導入目標を掲げている。

表 2.2.3 欧州主要国における導入目標（2020 年）

国	導入目標	
	再生可能エネルギー全体	風力発電
英国	最終エネルギー消費量の15%	(※導入見通し) 陸上風力: 10～13 GW 洋上風力: 11～18 GW
ドイツ	最終エネルギー消費量の35%	(※導入見通し) 陸上風力: 35.75 GW 洋上風力: 10 GW
スペイン	最終エネルギー消費量の30%	陸上風力: 35 GW 洋上風力: 750 MW
デンマーク	最終エネルギー消費量の20%	電力需要の50%を風力発電より供給

(出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO を基に作成)

② 日本

日本においては、国としての風力発電導入目標量は掲げられていない。

環境省は、2012年に「グリーン成長の実現」と「再生可能エネルギーの飛躍的導入」に向けたイニシアティブを発表し、今後、特に導入戦略が必要と考えられる再生可能エネルギーの一つに洋上風力発電を挙げている。洋上風力については、各種施策を実施することによって、2020年までに400MW、2030年までに5,860MWを導入するシナリオを提示している。

(6) 今後の課題

洋上浮力発電に関しては、実用化に向けて何よりも発電コストの低減が求められている。陸上風車に比べて環境の厳しさから建設コストや維持管理に要するコストが嵩むことは避

第2章 海洋開発産業の背景と現状

けがたいが、技術開発を進めることによって、これを低廉化することが求められている。

また、海域を利用する関係者は多く、洋上風車が比較的大きな面積の海域を占めることから、特に漁業者などとの協調については、今後の課題となっている。

2.2.2 その他発電システム

(1) 波力発電

波力発電は波のエネルギーを利用した発電システムで、約1世紀にわたる技術開発の歴史がある。

① 波力エネルギーの分布と賦存量

a) 世界の波力エネルギーの分布と賦存量

世界の波力エネルギーの分布試算例を図2.2.11に示す。

世界的には、北大西洋、北太平洋、南米の南岸および南オーストラリアの海域に大きな波力エネルギーが存在している。偏西風の影響によって、一般に波力エネルギーは大陸西海岸が大きく、東海岸は小さい傾向にある。また、世界の波力エネルギーの賦存量は8,000～80,000TWh/年と推定されている。

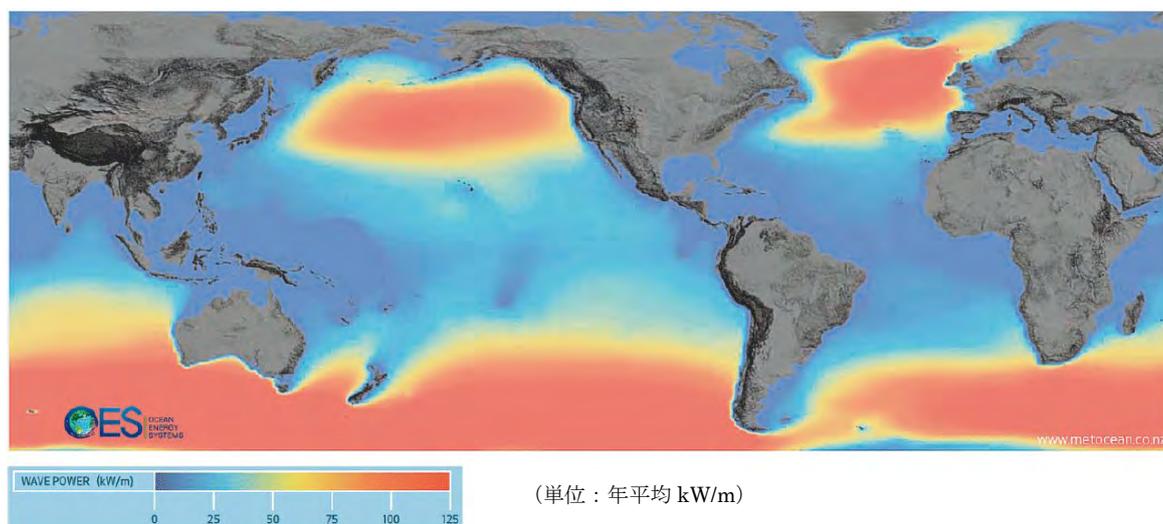


図 2.2.11 世界の波力エネルギーの分布

出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO、一部加工
("An International Vision for Ocean Energy" (2012, IEA-OES) より NEDO 作成)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

b) 日本の波力エネルギーの分布と賦存量

図 2.2.12 に、日本沿岸における湾岸線の単位長さあたりの波力エネルギー分布(kW/m)を示す。日本は、ユーラシア大陸の東側に位置することから、波力エネルギー密度が概して小さく、沿岸では 10kW/m 未満、沖合で 10~20kW/m 未満であるが、福島県から静岡県の間や伊豆諸島、宮古島から石垣島の周辺は、日本では波力エネルギーが大きいところである。

なお、2011年度のNEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術開発機構）による「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」では、波力エネルギーの賦存量（沖合100kmまで）は195GWと試算されており、これは2010年の大手電力会社10社の総発電容量（約207GW）に相当する。



図 2.2.12 日本沿岸の波力エネルギーの分布 (kW/m)

(出典：「日本周辺における波パワーの特性と波力発電」高橋重雄、港湾技術研究資料 No.654)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

② 波力発電のポテンシャル

ポテンシャルは、賦存量から自然条件、社会条件、技術レベルなどの制約条件を考慮して導き出されるものと定義されているとおり、これらのシナリオ次第で変化しうるものであることを付記したうえで、参考として試算例を紹介する。

世界の波力エネルギーの理論的な賦存量は8,000～80,000TWh/年、このうち現状技術による発電ポテンシャルは45,000TWh/年とする試算例がある。

日本近海の波力エネルギーのポテンシャルについての試算例を、表2.2.4に示す。表が示すように、試算によって幅があるが、NEDOによる試算では、波力エネルギーの賦存量（沖合100kmまで）を195GW、現状技術を想定した場合の発電可能量は19TWh（年間電力需要の約2%）としている。

表2.2.4 海洋エネルギーのポテンシャル試算例(波力発電)

試算例	試算結果			前提条件等
	賦存量 ^{※1}	導入ポテンシャル ^{※2}	発電ポテンシャル ^{※3}	
前田・木下ら	—	50 GW	—	日本周辺の平均波力エネルギー密度を約10 kW/mとし、日本全周(約5,000 km)で100%吸収するとした場合
高橋ら	—	36 GW	—	日本沿岸の平均波力エネルギー密度を7 kW/mと試算している。日本の総海岸線を5,200kmとした場合
波力発電検討会	300 GW～ 400 GW			沖合いの波エネルギー密度 15～20 kW/m、沖合線長 10,000 km、風による復元効果を2倍とした場合
NEDO	195 GW (沖合 100 km まで)	現状技術： 5.4 GW 将来技術： 24.9 GW	現状技術： 19 TWh 将来技術： 87 TWh	【賦存量】 離岸 100 km の外周ラインで平均波力エネルギー密度を線積分して算出。 【導入・発電ポテンシャル】 ・沿岸固定式：沿岸部で、護岸に隙間なく設置 ・沖合係留方式：波に対して垂直方向に複数設置し、更にそれらを波の進行方向に多段に設置。 ・現状技術では離岸距離 30 km 以内かつ 100 m 以浅の外周ラインの距離から算出。 ・将来技術では離岸距離 100 km の外周ラインの距離から産出。

※1: 設置可能面積、波パワー等から理論的に算出されるエネルギー量

※2: 地理的条件を考慮し、発電デバイスを海上または陸上に敷設した場合に得られる設備容量

※3: 地理的条件を考慮し、発電デバイスを海上または陸上に敷設した場合に得られる年間を通じた総発電量

(出典：「再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDOを基に作成(「波浪発電」前田久明・木下健(1979)生産研究 31 巻 11 号、「日本周辺における波パワーの特性と波力発電」高橋重雄(1989)港湾技術研究資料 No.654, 「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」NEDOよりNEDO作成)

③ 導入事例

波力発電は、太陽光発電、風力発電と並ぶクリーンな発電方法として、欧州を中心に各国で開発が進められてきた。2008年9月、ポルトガル沖でPelamis波力発電装置を用いた、総出力2,250kW(750kW機×3基)の商用プラントが運転を開始したが、数週間で故障が発生し、運転停止となった。欧州海洋エネルギーセンター(EMEC: European Marine Energy Centre)において改良機であるPelamis IIの実証試験が行われていたが、2013年7月にプロジェクトに参加していたドイツのエネルギー会社E.ON社が撤退したことを受け、プロジェクトの大幅な見直しを迫られた。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

④ プロジェクトの事例

a) 欧州の事例

欧州では、再生可能エネルギーを支援することによって世界の気候変動の脅威を打破するため、またクリーン技術の主導的地位を得て経済成長のチャンスを掴むべく、産学官が連携して意欲的な取り組みが進められている。

波力発電についても1970年代以降に関心が高まり、多くの研究開発が行われてきた。1970年代のエネルギー危機後に研究開発予算は縮小したものの、周辺海域の波力エネルギー密度が高いイギリスを中心に1990年代半ばから再び活発化し、多くのベンチャー企業が波力発電の開発に参入している。近年では大手開発事業者が同分野に参入し始めている。

さらに欧州では、表 2.2.5 で示すサイトに代表される実証試験サイトが整備されており、企業の技術開発推進に大きく貢献している。

表 2.2.5 欧州の主要な実証試験サイト

実証試験サイト	概要
EMEC (スコットランド オークニー島)	実機スケールの実証試験が可能、送電線も整備。陸上までの海底ケーブル、変電所、風速・波高等の計測所、オフィス・データ解析施設等を備える。近くに新たな実証サイトを整備する予定。
Wave Hub (南西イングランド)	世界最大の波力発電実証試験サイト。実機スケールの実証試験が可能。送電線も整備（系統連系）。
Wave Energy Centre (ポルトガル)	実証試験サイトを提供する他、企業の R&D 支援、海洋関係機関 (EU-OEA や IEA-OES 等) の活動への参加、各種レポートの作成も実施。

(出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO を基に作成)

最も進んでいるのはイギリスであり、研究開発段階に応じて、体系的な実証試験サイトが整備されている。

中でもEMECは、スコットランド政府を代表してハイランド開発公社 (Highlands and Islands Enterprise) が招集した複数の公的機関および組織から約500万ポンドの出資を受け、2004年に開設され、研究実証センターとして機能している (図 2.2.13)。出資者には、スコットランド開発公社 (Scottish Enterprise)、オークニー諸島議会 (Orkney Islands Council) など地元スコットランドの組織をはじめ、イギリス貿易産業省 (DTI) やカーボントラスト社などが含まれる。

EMECのあるオークニー諸島は海洋条件に恵まれており、波力発電のフルスケール実証機の実海域試験を行うことができる。波力発電については深水域 (水深約50m) のテストサイトを五つ、浅水域のテストサイトを一つ、陸上までの海底ケーブル、変電所、風速や波高等の計測所、オフィスおよびデータ解析施設などを備えている。波力のテストサイトでは最大波高15mの波を連続的に受けることができる。また、より波の穏やかな場所で実海域試験ができるサイトも用意されている。

EMECには、後述する潮流発電についてもフルスケール実証機が備えられ、実海域試

第2章 海洋開発産業の背景と現状

験を行っている。



図 2.2.13 EMEC実証試験サイト（波力サイト）
 (出典：EMEC ウェブサイト、一部加工)

また、2010年に整備された南西イングランドのWave Hubでは、実機スケールの実証試験を行うことが可能である。2002年に北東イングランドに整備されたNAREC (National RENEwable Centre) やポルトガルのWave Energy Centreなどにおいて、さまざまな実証実験が行われている。

b) 日本の事例

日本の波力発電の開発は、1919年に千葉県大東崎で実施された、振り子式および空気圧縮式の波力発電装置の現地実験に始まる。1965年には、海上保安庁によって浮体式振動水柱型装置の益田式航路標識用ブイ（最大出力30～60W）が採用され、世界で初めて実用化された波力発電装置となった。

1970年代に起きたオイルショックから新たなエネルギー源として再生可能エネルギーに対する期待は大きくなり、日本は四方を海に囲まれていることから、特に波力発電への期待は高く、「海明」や「海陽」（表 2.2.6）など、さまざまな波力発電装置の実海域実験が精力的に行われた時期があった。しかし、2003年に終了した「マイティホーエル」の研究開発以後、日本では大規模な実証プロジェクトは行われておらず、結果として継続的に研究開発を進めてきた欧米に遅れを取る状況にある。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

表 2.2.6 日本の主要な大規模実証プロジェクト（波力発電）

プラント・技術・開発主体など	概要	写真
<p>海明 －振動水柱型・空気流 －1978～1980. 海洋科学技術センター</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・全長80m, 幅12m, 総重量800tの船型浮体に13の空気室を設置. ・空気室は入射波の進行方向に沿って配置, 定格125kWのタービン発電機を8室に搭載. ・装置は山形県鶴岡市由良の沖合3kmに係留. 	 <p>出典: JAMSTEC ホームページ (http://www.jamstec.go.jp/j/)</p>
<p>海陽 －可動物体型・回転運動 －1984～1985. 日本造船振興財団</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・波浪エネルギーを油圧に変換. 油圧モーターを経て交流発電機を駆動. ・沖縄県八重山郡竹富町西表船浮湾サバ沖水深10mに設置. ・異常海象時には構造物全体がジャッキアップする. 	 <p>出典: 日本造船振興財団海洋環境技術研究所</p>
<p>マイティホエール －振動水柱型・空気流 －1998～2002. 海洋科学技術センター</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の空気室は波の入射方向に直角に配置, 後方に浮力室とスロープを配置. ・幅 30m, 長さ50mのプロトタイプ装置. ・ウェルズタービンを3台設置. 総合変換効率は最大5%. ・波エネルギー利用と装置背後の静穏海域を利用する多目的利用型. ・発電コストについて, 陸上へ送電する浮体式システムは287円/kWh, 波力発電を浮体の多機能の一部とした場合は181～123円/kWhと試算. 	 <p>出典: JAMSTEC ホームページ (http://www.jamstec.go.jp/j/)</p>

(出典: 「再生可能エネルギー技術白書 第2版」 NEDO を基に作成

(「海洋エネルギーの利用技術に関する現状と課題に関する調査」 NEDO および「波浪エネルギー利用技術の研究開発－沖合浮体式波力装置「マイティホエール」の開発－」JAMSTEC より NEDO 作成))

近年の原油価格の急激な上昇及び下降があるものの（図 2.1.3 を参照）、世界的な海洋エネルギー技術開発の活発化や、再生可能エネルギー導入普及のニーズの高まりなどから、海洋エネルギー利用が再び脚光を浴びており、日本でも NEDO が中心となって海洋エネルギーの研究開発プログラムを実施している（表 2.2.7、表 2.2.8）。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

表 2.2.7 NEDO の海洋エネルギー技術研究開発(1/2) (波力発電)

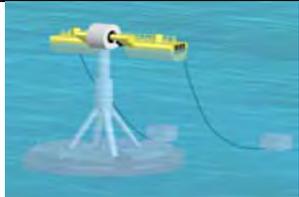
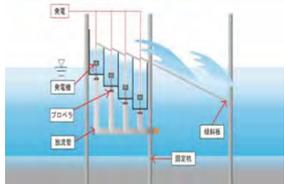
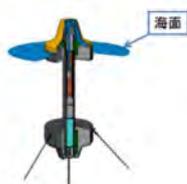
	機械式 (Power Buoy)	空気タービン式 (振動水柱型)	ジャイロ式
事業期間	H23~27 年度	H23~27 年度	H23~27 年度
イメージ			
体制	三井造船(株)	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株)	日立造船(株) (株)ジャイロダイナミクス
原理	波の上下運動をラック&ピニオンで回転運動に変換し、発電機で発電	波で生じる空気室の動揺を空気タービンの回転運動に変換し発電機で発電	波による上下運動をフライホイールの回転運動に変換し発電機で発電
開発項目	同調制御を利用した、緊張係留によるパワーブイの開発	空気室とウォールによる共振現象を利用した、高効率な防波堤設置の波力発電の開発	密室構造で発電機が外気、海水に接しないジャイロ式の波力発電の開発
設備容量	定格 80kW 級	定格 100kW 級	定格 100kW 級
寸法等	フロート直径：8.5m 全高 53m(海面上 10m)	ウォール幅：20m ウォール奥行：10m	係留装置：26m×3.4m× 29.4m(基礎含む) 浮体：4.2m×3.4m×14.8m

表 2.2.8 NEDO の海洋エネルギー技術研究開発(2/2) (波力発電)

	越波式	リニア式
事業期間	H24~27 年度	H26~29 年度
イメージ		
体制	市川土木(株) 協立電機(株) いであ(株)	釜石・大槌地域産業育成センター、 東京大学、東北大学、横浜国立大学、 (独法)海上技術安全研究所
原理	越波による位置エネルギーをタービンの回転運動に変換し、発電機で発電	波のうねりによる上下運動を利用したリニア式波浪発電
開発項目	傾斜角度と水槽容量の最適化および放流管等への生物付着対策による高効率越波式の波力発電の開発	次世代同調制御とアレー制御技術の開発
設備容量	25kW 級	200kW
寸法等	デバイス幅：20m 奥行：5m 高さ：5m	フロート直径：7m 重量：200t

(出典：「平成 26 年度 海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査報告書」エンジニアリング協会 (NEDO 資料よりエンジニアリング協会作成))

⑤ 市場動向

現在、波力発電の商用プラントは稼動していないが、イギリスのスコットランドを中心とする欧州各国でフルスケール実証機が設置され、実用化に向けた技術開発を推進し

第2章 海洋開発産業の背景と現状

ている。技術開発が順調に進み、投資が活発化した場合2020年頃までに欧州を中心に初期市場が形成されると見込まれている。

⑥ ロードマップ

a) 欧州のロードマップ

欧州では、イギリス、アイルランド、デンマーク、フランス、スペイン、ポルトガルが海洋エネルギー導入目標を設定している。特にイギリスは、世界に先駆けて非常に野心的な導入目標（2020年までに2GW）を掲げている。イギリス内でも、特にスコットランドが海洋エネルギー利用に積極的な取り組みを見せており、2020年までに1.6GWの導入目標を掲げている。うち0.6GWは波力発電で、導入目標達成に向けて、世界初の海洋エネルギー発電事業のための海域商用リースとなるROUND1プロジェクト（Pentland Firth and Orkney Waters Round 1 Project）が開始されている。

b) 日本のロードマップ

日本では、政府として波力発電についての導入目標値は掲げられていない。

海洋再生エネルギーの実証研究や事業化推進のため、産学官で設立された一般社団法人海洋エネルギー資源利用推進機構（OEA-J）が、2050年に向けた海洋エネルギー開発ロードマップを作成している。表2.2.9に示す前提条件の下において、波力発電については2020年までに51MW、2030年までに554MW、2050年までに7,350MWの発電規模が期待されるとしている。

表 2.2.9 OEA-Jによる波力発電の導入ロードマップ

	2020年まで	2030年まで	2050年まで
想定或いは期待される 発電量	2億 kWh/年	7.5億 kWh/年	200億 kWh/年
想定或いは期待される 発電規模	51 MW	554 MW	7,350 MW
内訳	(0.1 MW : 450 基) (0.5 MW : 10 基) (1.0 MW : 1 基)	(0.1 MW : 2,000 基) (0.5 MW : 600 基) (1.0 MW : 50 基) (2.0 MW : 2 基)	(0.1 MW : 3,000 基) (0.5 MW : 4,500 基) (1.0 MW : 3,800 基) (2.0 MW : 500 基)

前提条件1：日本周辺の波パワーの平均 7kW/m

前提条件2：日本沿岸の総延長 5,000km

前提条件3：日本周辺の波パワー総量（前提条件1、2より 3,500万 kW）の利用率 6.5%

前提条件4：稼働率：Onshore25%、Near-shore27%、Offshore40%

（出典：「再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDOを基に作成

（「海洋エネルギー資源フォーラム資料」海洋エネルギー資源利用推進機構より NEDO 作成）

⑦ 今後の課題

波力発電は、欧州では商用化発電の試みが始まっているが、我が国では実証試験が再開されたところである。今後の導入を推進していくうえで、欧州より波密度の低い日本の自然条件に見合った発電システムの開発、耐久性のあるシステムの開発、海洋という環境のなかで管理・運用する技術の蓄積などの課題が残されている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

(2) 潮流、海流、潮汐発電

波力の他に、潮流、海流、潮汐の自然エネルギーが再生可能エネルギーとして利用されている。

潮流とは、月と太陽の引力で生じる周期的な変動である「潮汐」によって起こる水平方向の流れであり、潮の干満によって規則的に流れ、予測が可能な信頼性の高いエネルギー源となる。海流とは、太陽熱と偏西風などの風によって生じる大洋の大循環流であり、地球の自転と地形によってほぼ一定の方向に流れている。潮流や海流のある海中に水車（タービン）を設置し、電気を得る方法が潮流発電や海流発電である。

また、潮汐に伴う潮位差が大きい湾や河川の入り口などにダムと水門を建設し、水力発電と同じ仕組みで潮の干満による水位差のエネルギーを利用し電力を得る方法が潮汐発電である。

① 潮流と海流の分布

a) 潮流および潮汐の分布

i) 世界の潮流、潮位の分布

潮汐と潮流は、ともに天体の運行に基づく海水の運動であるため、変化の周期などは同一に表される。

しかし、潮汐の大きさと潮流の最強流速の関係は場所によって異なり、潮汐は大きいものの潮流が微弱な場所や、潮汐は小さいものの潮流が極めて強い場所などさまざま、地域性が非常に強いエネルギーであるといえる。

図 2.2.14 に、世界の潮位分布（主太陰半日周潮¹²）を示す。図 2.2.14 から、欧州近海やカナダ北東部、中国から朝鮮半島沿岸で大きな潮位が見られる。したがって、こうした海域で潮汐発電導入のポテンシャルが高いと考えられる。

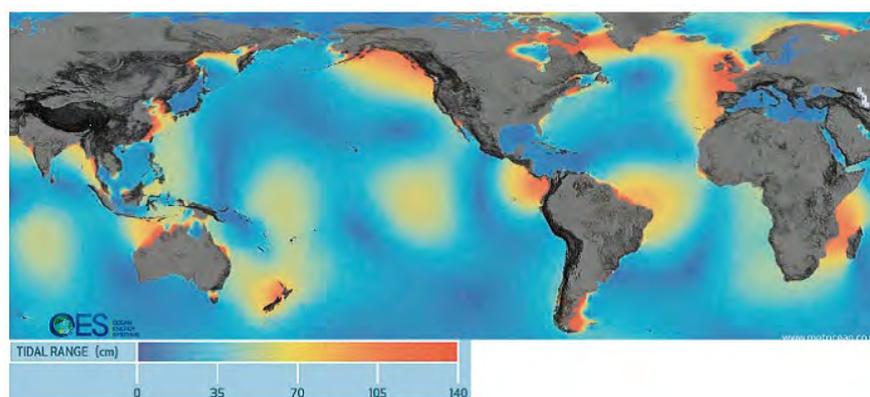


図2.2.14世界の潮位分布（主太陰半日周潮）

（出典：“An International Vision for Ocean Energy” IEA-OES、一部加工）

これに対し潮流は、流速に対する地形の影響が大きい。すなわち、海峡や水道などの流路の幅が狭い水域では流速が速くなる。

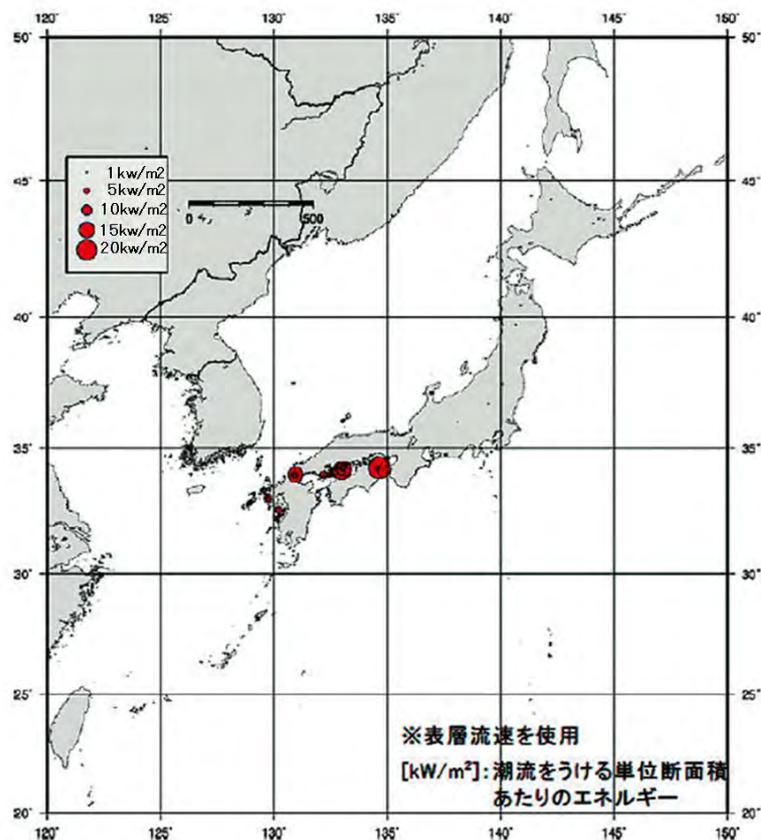
¹²主太陰半日周潮：月による起潮力を調和分解して展開したときの最大の振幅をもつ項。M2分潮とも呼ぶ。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

ii) 日本の潮流、潮位の分布

図 2.2.15 に日本の潮流エネルギー密度を示す。日本で潮流が強い個所のほとんどは、瀬戸内海と九州西岸にあることがわかる。また、津軽海峡でも強い潮流が見られる。

なお、潮汐発電は、満潮時と干潮時の潮位差が大きいほど大きな潮汐力エネルギーが得られ、一般に潮位差5m以上が実用化の目安となっている。諸外国には10m以上の潮位差が得られる地点が存在するのに対し、日本では、最も好条件の有明海でも最大潮位差4.9mであり、ポテンシャルは小さいとされている。



(注：海図に記載のある日本沿岸の海峡・瀬戸・水道など 281 地点のうち、流速表示のある 150 地点)

図 2.2.15 日本の潮流エネルギー密度 [kW/m²] (月齢周期平均)
(出典：「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」NEDO、一部加工)

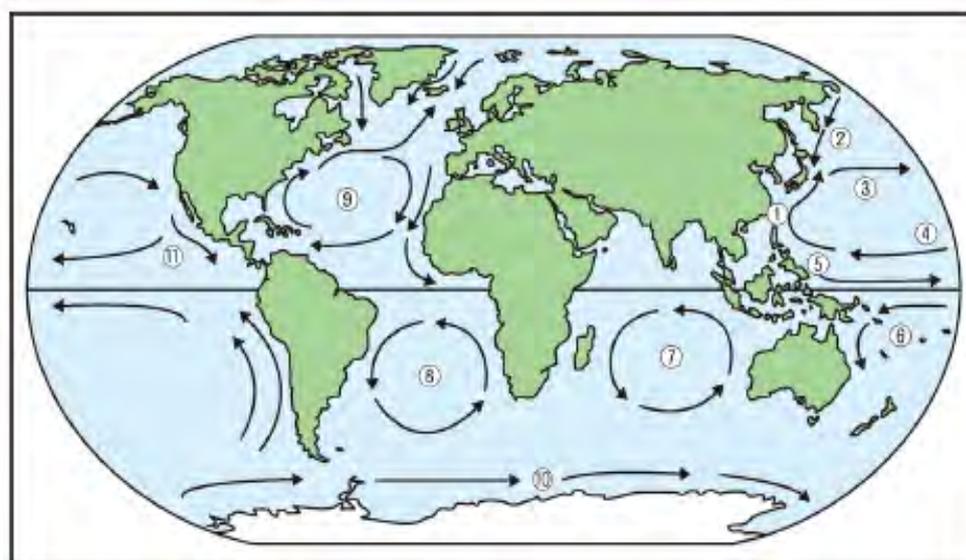
第2章 海洋開発産業の背景と現状

b) 海流の分布

i) 世界の海流の分布

世界の主な海流の分布を図 2.2.16 に示す。世界の海流の代表的なものは黒潮、メキシコ湾流（北大西洋海流）、南インド海流などであり、これらは特に流速が速く、流量が多い。

海流には、季節によって流速が変化する海流や、流向が時期によっていくつかのパターンで変化する海流などがあり、潮汐周期よりも長い時間スケールで安定的に変化するものがある。



①黒潮②親潮③北太平洋海流④北赤道海流⑤赤道反流⑥南赤道海流
⑦南インド海流⑧南大西洋海流⑨北大西洋海流⑩南極海流⑪カリフォルニア海流

図 2.2.16 世界の主な海流の分布
(出典：「再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO
(気象庁ウェブサイトより NEDO 作成))

ii) 日本の海流の分布

日本周辺には黒潮が流れているため、海流エネルギーのポテンシャルは大きい。図 2.2.17 に、日本の海流エネルギー密度を示す。安定した海流エネルギーが得られる地点としては、八重山諸島、トカラ列島、足摺岬沖、八丈島沖などが挙げられる。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

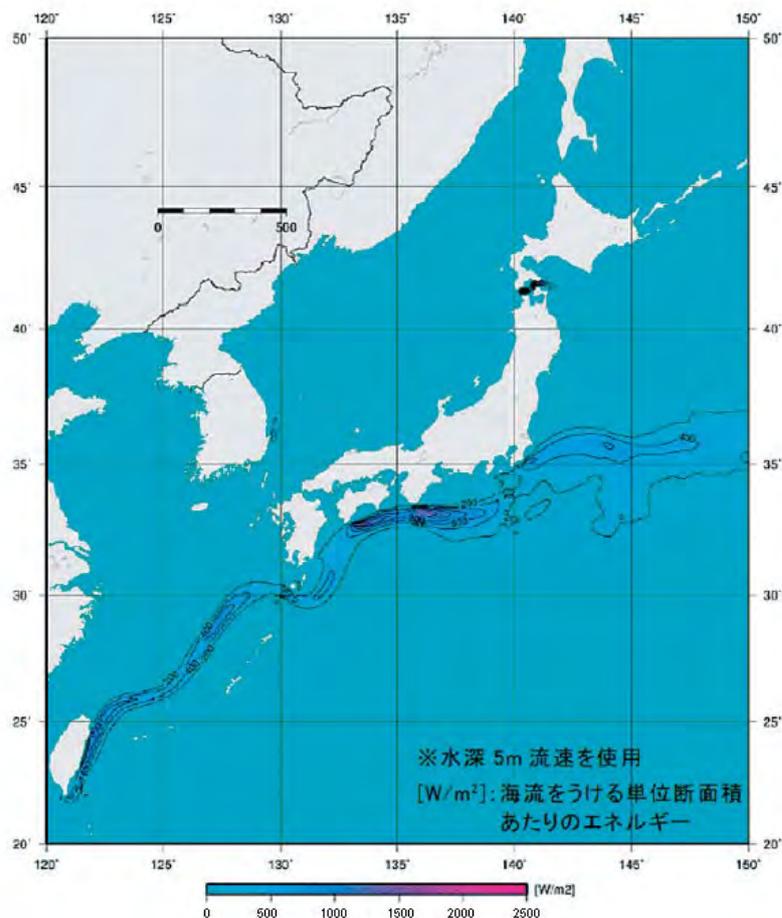


図 2.2.17 日本周辺の海流エネルギー密度 [W/m²]
 (出典：「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」NEDO)

② 潮流、海流、潮汐発電のポテンシャル

NEDO が、日本の海洋エネルギーの発電ポテンシャルについて現状技術を想定し実施した試算例を、表 2.2.10 に示す。潮流の場合は 6TWh/年、海流の場合は 10TWh、潮汐の場合は 0.38TWh と試算されている。

表 2.2.10 日本の海洋エネルギーのポテンシャル

ポテンシャル	潮流	海流	潮汐
海洋エネルギーポテンシャル(MW)	22,137	205,143	286
導入ポテンシャル(MW)	1,870	1,276	172
発電ポテンシャル(TWh/年)	6	10	0.38

- 海洋エネルギーポテンシャル：海水のもつ物理的な位置エネルギー・運動エネルギー
- 導入ポテンシャル：物理的条件を考慮し、発電デバイスを理想的に海上または陸上に敷設した場合に得られる設備容量
- 発電ポテンシャル：物理的条件を考慮し、発電デバイスを理想的に海上または陸上に敷設した場合に得られる年間を通じた総発電量

(出典：「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」NEDO を基に作成)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

③ 導入事例

a) 潮汐発電

潮汐発電は、水力発電の応用技術であることから古くから実用化されており、商業発電所として稼働している施設も多い(表 2.2.11)。しかし、日本の潮汐発電のポテンシャルは小さく、国内では稼働しているプラントはない。

潮汐発電プラントとして最も有名なフランスのランス潮汐発電所(図 2.2.18)は、潮位差が最大13.5m、平均8.5mと潮汐発電に適した潮位条件をもつランス川河口に立地している。1967年から発電を開始しており、すでに約半世紀にわたる稼働実績がある。長さ750メートルの堤防下に出力10MWの円筒水車24台が設置されており、最大定格出力は240MW、年間の発電量は約60万MWh、平均出力は約68MWである。水車タービンは双方向の流れに機能し、川の流れと潮汐を相互に利用する仕組みとなっている。

表 2.2.11 世界の主要な潮汐発電所

発電所	発電所
ランス潮汐発電所 (フランス)	1967年からフランスのランス川河口(平均潮位差8.5m)にて発電を開始。最大定格出力は240MW、年間の発電量は約 600,000 MWh、平均出力は約68 MW。
アンナポリス発電所 (カナダ)	1984年にカナダのファンディ湾(最大潮位差 16.4 m)で20 MWの潮汐発電所が運転を開始。
キスラヤ潮汐発電所 (ロシア)	1968年に北極圏のコラ半島ムルマンスク北西80 kmの入り江にキスラヤ潮汐発電所を建設。最大出力は400kW。
江夏潮汐発電所 (中国)	1980年に運転開始した、中国初の大規模な潮汐発電の実験プラント。平均潮位差5mの双方向発電方式。最大出力は3.9MW。
始華湖潮汐力発電所 (韓国)	2011年に運転開始。最大出力は254MWで、世界最大規模。

(出典：「再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO を基に作成)



図 2.2.18 ランス潮汐発電所(フランス)

(出典：Tidal Energy ウェブサイト)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

また韓国では、世界最大規模となる始華湖潮汐発電所(発電出力 254MW) (図 2.2.19) が 2011 年に運転を開始し、さらに数か所の潮汐発電が計画されている。



図 2.2.19 始華湖潮汐発電所
(出典：K-water ウェブサイト)

b) 潮流発電および海流発電

潮流発電は1967年から実用運転が行われているのに対し、潮流発電は実証試験段階であり、海流発電は実証研究に取り掛かった状況である。

④ 実証実験プロジェクトの事例

a) 欧州の事例

欧州では、波力発電の項で、実証初期段階用のサイトとして紹介した、NARECが2002年に北東イングランドに整備されており、前述のEMECなどのフルスケールの実証実験に進む前段階での検証が行われている(図 2.2.20)。潮流発電については、3MW級のドライブレインやブレード試験を行うことが可能である。

また、前述の EMEC において、波力発電だけではなく、潮流発電のフルスケール実証機の実海域試験を行っている。潮流発電については、水深 20~50m の五つの試験サイトがあり、大潮時には 4m/sec の潮流を得ることができる。また、波力サイトと同様、陸上までの海底ケーブルや変電所、風速や潮流速度などの計測所、オフィス、データ解析施設などを備えている。より潮流の穏やかなテストサイトも別途用意されている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

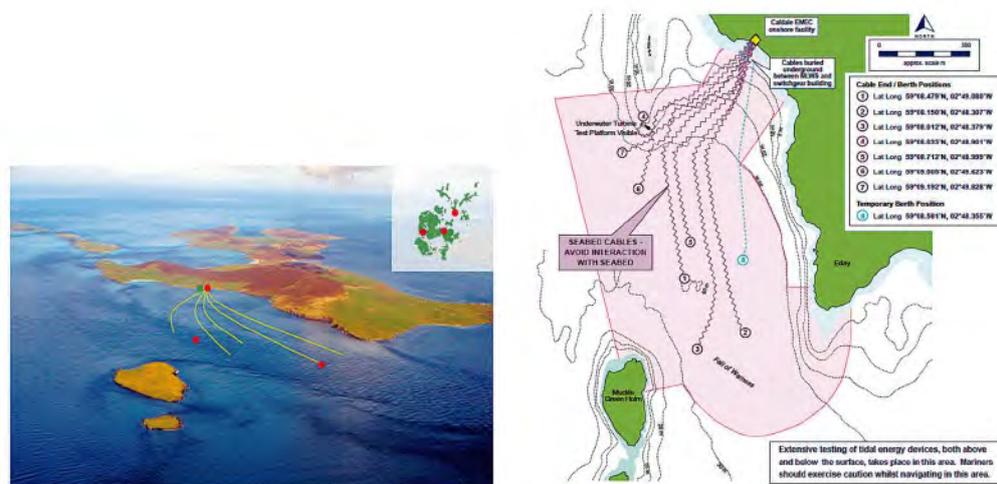


図 2.2.20 EMEC実証試験サイト（潮流サイト）
 （出典：EMEC ウェブサイト、一部加工）

また、2013年9月にスコットランド政府が、スコットランドとオークニー諸島を隔てるペントランド海峡 (Pentland Firth) における Meygen 潮力発電施設の建設を承認し、商業化に向けた実証研究プロジェクトが進行している。Meygen 潮力発電施設は、2020年代初めまでに、398MW の電力を供給することが期待されている。

b) 日本の事例

NEDO では、平成 23 年（2011 年）度から海洋エネルギーの技術研究開発に取り組んでおり、潮流・海流発電では、表 2.2.12～表 2.2.14 に示す 9 件の技術研究開発が実施されている。2017 年には IHI が水中浮遊式海流発電システムの実証試験を実施している。

また、環境省の平成 26 年（2014 年）度潮流発電技術実用化推進事業として、長崎県五島市沖（東亜建設工業）と兵庫県淡路市岩屋沖（三菱重工業）の 2 か所が採択され、潮流発電システムの開発や環境影響長等の潮流発電技術実用化推進事業（経済産業省連携事業）がスタートした。2019 年より九電みらいエナジーにより長崎県五島市沖潮流発電技術実用化試験設備設置の検討が進められている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

表 2.2.12 NEDO の海洋エネルギー技術研究開発(1/3) (潮流・海流発電)

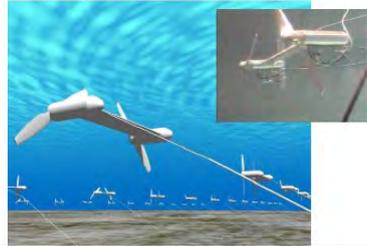
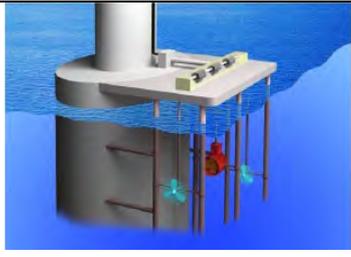
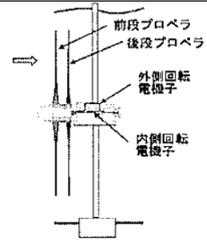
	着定式 (H23)	浮体式 (H24)	水中浮遊式 (H23)
事業期間	H23～25年度、H26～29年度	H24～27年度	H23～27年度、H26～29年度
イメージ			
体制	川崎重工業(株) 九州大学 (H26より)	三井海洋開発(株)	(株)IHI (株)東芝 (株)三井物産戦略研究所 (H27まで) 東京大学 (H27まで)
原理	海底にブレードや発電機等からなるナセルを設置し、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し発電機で発電	浮体構造物に垂直タービンを適用し、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し、発電機で発電	海中に浮遊式のブレードや発電機等からなる装置を設置し、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し発電機で発電
開発項目	設備やメンテナンスの際に、潜水士を不要にする海底設置式の潮流発電の開発、新型ナセル・ブレード	荒天時に耐える浮体構造・係留方法の確立と共に、高効率垂直式潮流タービンの開発	浮体・係留システムの安定性やメンテナンス性の高度化 タービン発電機の高効率化
設備容量	定格 100kW 級	25kW 級	定格 2000kW 級
寸法等	海底設置：水深 30～50m 水中翼直径：18m ナセル長：17m	鉛直軸ロータ：直径 15m×長さ 20m 浮体：直径 29m×高さ 7m 水深対応：18m 以上	タービン直径：40m 幅：29.4m(ブレード含め) 奥行：10m

表 2.2.13 NEDO の海洋エネルギー技術研究開発(2/3) (潮流・海流発電)

	油圧式 (H24)	橋脚利用式 (H24)	相反転プロペラ式 (H25)
事業期間	H24～27年度	H24～25年度	H25～27年度
イメージ			
体制	佐世保重工業(株) 東京大学 九州大学	ナカシマプロペラ(株) 五洋建設(株) 広島工業大学	(株)協和コンサルタンツ アイム電機工業(株) 前田建設工業(株) 九州工業大学、早稲田大学
原理	上げ潮。下げ潮にそれぞれ対応したツインロータにより、潮流の流体エネルギーを回転運動で油圧に変換し、油圧式の同期発電機で発電	上げ潮。下げ潮に一枚翼により、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し同期発電機で発電	相互に逆回転する二段のプロペラと内外二重の回転電機子から構成される相反転方式の発電ユニット
開発項目	ツインブレードの開発 高効率油圧制御システムの開発	対称ブレードの開発 橋脚設置用の基礎開発	相反転プロペラ式ロータ
設備容量	250kW 級	100kW 級	～900kW
寸法等	浮遊設置：水深 15～50m ブレード直径：3.0m	基礎構造：幅 9m×長さ 20m (橋脚構造：幅 25m×高さ 25m)	ブレード直径：7.0m

第2章 海洋開発産業の背景と現状

湯量：200リットル	ブレード直径：3.2m	
------------	-------------	--

表 2.2.14 NEDO の海洋エネルギー技術研究開発(3/3) (潮流・海流発電)

	海中浮遊式 (H25)	垂直軸直線翼式 (H26)	橋脚・港湾構造物仕様式 (H26)
事業期間	H25～27年度	H26～29年度	H26～29年度
イメージ			
体制	三菱重工業(株)	(株)大島造船所 サイエンスリサーチ(株)	中国電力(株) 広島工業大学
原理	ツインロータ 2 組 (双発) からなる海流発電装置。自律型姿勢制御システム技術は、海流中の挙動変化に応じた期待の安定性と発電効率の最適化	潮流の流体エネルギーを垂直軸直線翼により、回転運動に変換した発電機で発電	海峡や瀬戸において、既存の構造物を活用した潮流発電
開発項目	インテリジェント自律型姿勢制御システム技術	低回転・高効率 IPM 型多極発電機と垂直軸翼の開発	垂直軸型揚力式タービン、非接触動力伝達機構、設置・メンテナンス施工方法
設備容量	2MW 級	50kW 型	120kW 級
寸法等	ブレード直径：45m	翼車：高さ 12m、外径 10m 水深：20m、流速 0.5～1.5m/s	ブレード長：5m、ロータ直径：5m 最大注速：3.5m/s

(出典：「平成 26 年度 海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査報告書」エンジニアリング協会 (NEDO 資料よりエンジニアリング協会作成))

⑤ 市場動向

現在、潮汐発電の稼働実績がある一方、潮流と海流発電については、商用プラントが稼働していない現状である。しかし、欧州各国でフルスケール実証機が設置され、実用化に向けた技術開発を推進している。

⑥ ロードマップ

a) 欧州のロードマップ

欧州では、イギリス、アイルランド、デンマーク、フランス、スペイン、ポルトガルが海洋エネルギー導入目標を設定している。特にイギリスは、海洋エネルギー利用に積極的な取り組みを見せており、2020年までに1.6GWの導入目標を掲げ、うち1GWは潮流発電で達成する計画としている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

b) 日本のロードマップ

波力発電と同様に、日本政府としての導入目標は定められていない。

OEA-Jが作成した2050年に向けた海洋エネルギー開発ロードマップでは、潮流発電については、表 2.2.15に示す前提条件の下では、2020年までに130MW、2030年までに760MW、2050年までに7,600MWの発電規模が期待されるとしている。

表 2.2.15 OEA-Jによる潮流発電の導入ロードマップ

	2020年まで	2030年まで	2050年まで
想定或いは期待される 発電量	4億 kWh/年	20億 kWh/年	200億 kWh/年
想定或いは期待される 発電規模	130 MW	760 MW	7,600 MW
内訳	(1MW: 100基) (5MW: 6基)	(1MW: 310基) (5MW: 50基) (10MW: 20基)	(1MW: 600基) (5MW: 200基) (10MW: 600基)

前提条件：稼働率：30%

(出典：「再生可能エネルギー技術白書 第2版」NEDO

(「海洋エネルギー資源フォーラム資料」OEA-JよりNEDO作成を基に作成)

⑦ 今後の課題

波力発電と同じく、日本の自然条件に適合した高効率、高信頼性、低コストの発電システムの開発や管理・運用技術の確立が今後の課題であるとされている。

(3) 海洋温度差発電

海洋の表層100m程度までの海水には、太陽エネルギーの一部が熱として蓄えられており、低緯度地方では年間を通じてほぼ26～30℃程度に保たれている。一方、極地方で冷却された海水は、海洋大循環に従って低緯度地方へ次第に移動する。密度が相対的に大きい極地方からの冷たい海水は、移動とともに深層へと沈み込んでいき、表層の海水とは温度差が生じる。

深層 600～1,000m に存在する 1～7℃程度の深層水をポンプなどで汲み上げ、表層水との温度差を利用して熱機関を駆動し、タービンを回して発電する方法が、海洋温度差発電である。

海洋温度差エネルギーは、昼夜の変動がなく、比較的安定したエネルギー源であり、季節変動が予測可能であるため、計画的な発電が可能となり、将来的なベース電源の一つとして期待できる。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

① 海水温度差の分布

a) 世界の海水温度差の分布

図 2.2.21 に表層と深層1,000mとの海水温度差分布を示す。海洋温度差発電は、平均的におよそ20℃以上の温度差があれば経済性があるとされている。海の表層と深層1,000mとの温度差は赤道付近で大きく、インド、東南アジア、オーストラリア南部、メキシコ、ブラジル、アフリカ中部などの沖合が温度差に恵まれている。

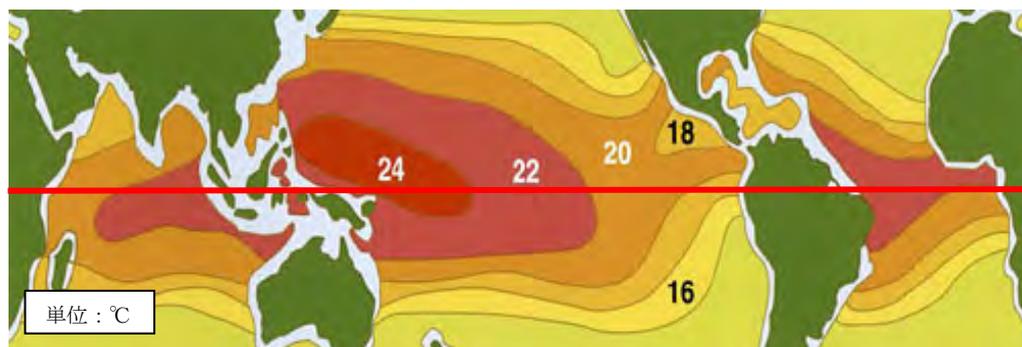


図 2.2.21 表層と深層1,000mとの海水温度差分布
(出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターウェブサイト)

b) 日本の海水温度差の分布

日本周辺の海水温度差分布を図 2.2.22 に示す。沖縄から紀伊半島、さらには小笠原付近の海域では温度差が比較的大きく、OTEC に適している。

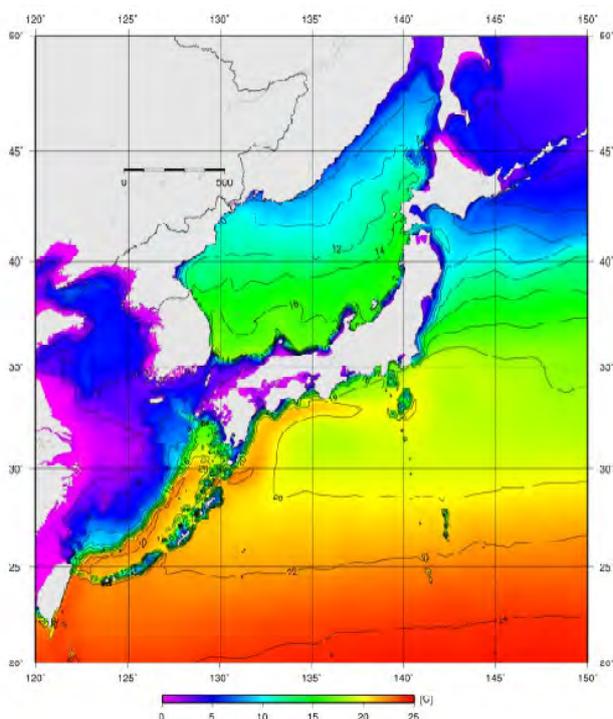


図 2.2.22 日本周辺の海水温度差
(出典：「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」NEDO)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

② 海洋温度差発電のポテンシャル

IEA-OES (International Energy Agency – Ocean Energy Systems)の資料によると、世界の海洋温度差エネルギーの年間発電量は、理論的には10,000TWhとされている。

一方、日本の経済水域内の熱エネルギーの総量は106,000TWhと試算されており、このうち1%を電力として取り出した場合でも発電電力量は1,060TWhとなり、日本の年間電力需要を賄える規模となる。これは約1億トンの石油に相当するエネルギー量である。

また、NEDOが実施した調査では、日本のEEZ内の発電ポテンシャルを1,368TWh (表層―深層間の温度差が20℃以上の海域を対象とした場合)と算定しており、前述した概算値とほぼ同様の数値となる (表 2.2.16)。

表 2.2.16 海洋温度差発電の発電ポテンシャル (MWh/年)

電力管区	シナリオ1 ^(※1)		シナリオ2a ^(※2)		シナリオ2b ^(※3)	
	15℃以上	20℃以上	15℃以上	20℃以上	15℃以上	20℃以上
北海道電力	77,088	0	244,404	0	346,896	0
東北電力	4,267,872	0	13,339,728	0	63,639,648	0
東京電力	17,169,600	6,167,040	53,658,504	19,268,796	1,100,803,500	656,689,896
北陸電力	1,625,856	0	5,077,296	0	35,280,900	0
中部電力	1,674,912	0	5,234,976	0	35,280,900	5,077,296
関西電力	1,247,424	210,240	3,894,696	654,372	67,471,272	8,979,876
中国電力	1,422,624	0	4,446,576	0	62,922,204	0
四国電力	1,506,720	161,184	4,706,748	504,576	51,900,372	15,200,352
九州電力	9,467,808	1,422,624	29,588,652	4,446,576	206,757,900	122,769,648
沖縄電力	11,409,024	7,057,056	35,651,448	22,051,548	586,987,452	559,700,928
合計	49,864,928	15,018,144	155,843,028	46,925,568	2,211,391,044	1,368,417,996

※1 : (シナリオ 1) 沿岸固定, 離岸距離 30km 以内

※2 : (シナリオ 2a) 沖合浮体, 離岸距離 30km 以内

※3 : (シナリオ 2b) 沖合浮体, 離岸距離制限なし

(出典 : 「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」 NEDO を基に作成)

③ 導入事例

現在、商用運転している海洋温度差発電プラントは、国内外とも存在しないが、ハワイでは1MWのプラント建設を計画、フランスは2018年の稼働開始を目標にカリブ海のマルティニーク島沖で16MW級浮体式 OTEC 施設 (図 2.2.23) の建設を始めるなど実用化への動きがある。

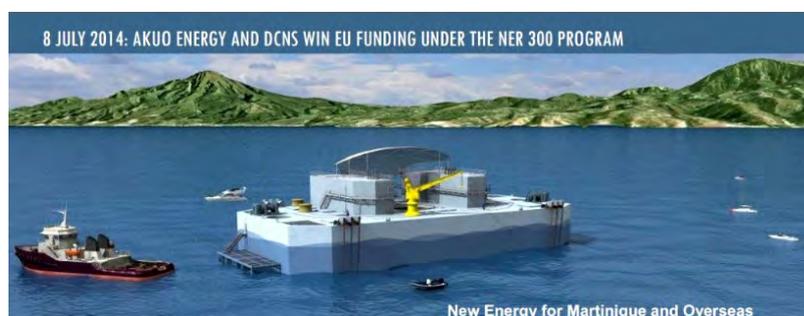


図 2.2.23 マルティニーク島沖 OTEC 完成予想図

(出典 : Akuo Energy, DCNS, 9.07.2014・Press Releases、一部加工)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

④ 実証試験プロジェクトの事例

表 2.2.17に世界の主要な海洋温度差発電実証プラントを示す。海洋温度差発電の歴史は古く、1881年にはフランスでその原理が提唱されていた。1970年代のオイルショック以降、各国で研究開発が進められてきたが、これまでの実証試験は100kW級にとどまっており、実用化には1MW以上の実証試験が不可欠であるとされている。

表 2.2.17 世界の主要な海洋温度差発電実証プラント

プラント・開発主体・稼働年・形式	仕様	概要
Mini-OTEC -NELHA・ロッキード -1978～1979 -クローズドサイクル・洋上	発電出力：50kW 管延長：645m 取水量：75t/h 作動流体：アンモニア 温海水：26.1℃ 冷海水：5.6℃	・発電プラントをバージ ¹¹ (長さ37m, 幅10m)にのせた、世界初の洋上プラント。 ・1979年8月、ハワイのコナ沖で実験が行われ、正味出力15kWを得ることに成功。世界で初めて温度差のみで出力が得られることを証明。
ナウルプラント -東京電力・東電設計 -1982～1983 -クローズドサイクル・陸上	発電出力：100kW 管延長：約900m 取水量：1,410t/h 作動流体：フロン22	・ナウル共和国の海洋温度差発電プラント。日本政府の補助を受けて東京電力と東電設計が建設。 ・世界で初めて海洋温度差発電による電力を供給。 ・1982年にナウル共和国の小学校の照明に利用された。 ・設計値100kWの出力を得ることに成功。(ただし、取水管の流出により長期運転に失敗。)
徳之島プラント -九州電力 -1982～1984 -クローズドサイクル・陸上	発電出力：50kW 管延長：2,400m 取水量：500t/h 作動流体：アンモニア 温海水：28.5℃ 冷海水：12.0℃	・温海水にディーゼル発電の温排水を利用。
伊万里実験プラント -佐賀大学 -1985～2002 -クローズドサイクル・陸上	発電出力：75kW 作動流体：アンモニア 取水量：500t/h 温海水：28.0℃ 冷海水：7.0℃	・温海水はボイラで温度調節し、冷海水は冬場の伊万里湾の表層海水を利用。 ・主に、蒸発器、凝縮器の性能実験を実施。
ハワイのオープンサイクルプラント	発電出力：210kW 管延長：1,829m 作動流体：海水 温海水：26.0℃ 冷海水：6.0℃	・ハワイ島のコナ海岸に建造されたオープンサイクルプラント。 ・1993年には、総出力213kWの発電に成功。
伊万里新サイクルプラント -佐賀大学 -2003～稼働中 -クローズドサイクル・陸上	発電出力：30kW (海水淡水化装置とのハイブリッド) 作動流体：アンモニアと水の混合物質	・ランキンサイクル、カーリーナサイクル、ウエハラサイクルの性能比較試験が可能。 ・カーリーナサイクルおよびウエハラサイクルの作動流体にはアンモニア/水の混合物質を使用 ・ウエハラサイクルと海水淡水化装置を組合せたハイブリッドシステムを研究。 ・深層水は利用せず、表層水のみを利用した実験プラント ・夏場は表層水を温海水として利用し、冷海水は表層水を冷却することで、冬場は表層水を冷海水側に利用し、温海水はボイラで加温する。あるいは、両熱源とも設定温度に加温・冷却することで、それぞれ温度差を作り、実験を行っている。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

プラント・開発主体・稼働年・形式	仕様	概要
インド発電プラント -インド国立化医用技術研究所・佐賀大学 -1997～現在稼働中(海水淡水化) -クローズドランキンサイクル・洋上	発電出力：1MW(目標) 淡水化能力：日量1,000t	<ul style="list-style-type: none"> ・1MW以上の商用化発電施設を目指し、佐賀大学の技術提携のもと実証試験を実施。 ・海水淡水化を実施。2007年に深さ約500mの海洋深層水を用いて日量1,000tを達成。 ・日量100トンの海洋深層水を用いた海水淡水化が、2005年より連続稼働中。2010年、新たに3基設置。現在、動力には、ディーゼル発電を用いているため、OTECとの組み合わせを計画中。
久米島プラント -IHIプラント建設・横河電機・ゼネシス -2013～2015 -クローズドサイクル・陸上	発電出力：50kW 管延長：約2,300m 取水量：540t/h 作動流体：アンモニア及び代替フロン	<ul style="list-style-type: none"> ・実証実験では海水をくみ上げるコストと温度差を検討して、水深700メートルの深層水を取り込む ・次のステップとして発電能力が1MWを超える大規模な設備の導入準備を進める計画 ・発電設備の周辺に海洋深層水の利用設備を展開

(出典：「海洋エネルギーの利用技術に関する現状と課題に関する調査」2008、NEDO を基に作成)

⑤ 研究開発の動向

日本は、世界最高レベルの海洋温度差発電研究設備を持つ佐賀大学海洋エネルギー研究センター(図 2.2.24)の長年にわたる研究開発により、技術面で世界に先行している。



図 2.2.24 佐賀大学海洋エネルギー研究センター
(30kW 海洋温度差発電システム)

(出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターウェブサイト)

第2章 海洋開発産業の背景と現状

日本の海洋温度差発電技術の優位性は、コア技術となる海水温度差に特化した熱交換器、世界最高レベルの効率を誇る発電サイクル、システム制御技術およびそれらを組み合わせた高度なプラントシステムの設計技術にある。また、日本は海洋深層水の汲み上げ実績で世界トップレベルであり、取水技術の信頼性は高い。2013年4月には沖縄県久米島において、実海水を用いて発電を行う設備としては世界で初めてとなる実証試験プラントが稼働を開始した（図2.2.25）。



図2.2.25 沖縄県海洋温度差発電実証設備
(出典：沖縄県海洋温度差発電実証設備ウェブサイト)

海外では、1990年代に行った実証試験以降、研究開発は停滞していたが、近年研究開発を再開する動きが見られる。2008年には、米国エネルギー省（DOE：Department Of Energy）の海洋エネルギー推進プロジェクトの一貫として海洋温度差発電が盛り込まれたことなどから、ハワイ州ではDOEの支援を受けて、10MW級の実証試験が計画されている。その他、フランス、台湾、韓国など数多くの国々においても数MW級の開発プロジェクトが計画されている。

⑥ ロードマップ

a) 米国のロードマップ

米国ハワイ州は、同州の再生可能エネルギーの導入計画の中で、OTECを2015年までに35MW、2030年までに365MW以上導入する目標を掲げている（表 2.2.18）。

表 2.2.18 米国ハワイ州の導入ロードマップ

	2015年	2030年
累積発電容量	35MW	365MW ※再生可能エネルギー全体では1GW

(出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」2014、NEDOを基に作成
(HCEI Road MapよりNEDO作成))

第2章 海洋開発産業の背景と現状

b) 日本のロードマップ

日本政府は、海洋温度差発電の導入目標値を掲げていない。

OEA-J が作成した、2050年に向けた海洋エネルギー開発ロードマップ（表 2.2.19）によれば、海洋温度差発電については、下に示す前提条件の下では、2020年までに510MW、2030年までに2,550MW、2050年までに8,150MWの発電規模が想定あるいは期待されるとしている。

表 2.2.19 OEA-Jによる海洋温度差発電の導入ロードマップ

	2008年	2020年まで	2030年まで	2050年まで
想定或いは期待される発電量	0 TWh/年	2.5 TWh/年	12.5 TWh/年	40 TWh/年
想定或いは期待される発電規模	0 MW	510 MW	2,550 MW	8,150 MW
(内訳)		(1 MW : 60 基) (5 MW : 40 基) (10MW : 25 基)	(1 MW : 100 基) (5 MW : 40 基) (10MW : 25 基) (50MW : 40 基)	(10 MW : 40 基) (50 MW : 55 基) (100MW : 50 基)

注：発電端出力に対する設備利用率は56%としている

(出典：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版」2014、NEDO を基に作成
(海洋エネルギー資源フォーラム資料 (2008, OEA-J) より NEDO 作成))

⑦ 今後の課題

海洋温度差発電は、現在は実証試験段階であり、商用化発電は実現されていない。商用化に向けては、高効率、高信頼性、低コストの発電システムの開発や管理・運用技術の確立が望まれる。

第2章 海洋開発産業の背景と現状

<参考資料>

- ENEOS. “石油便覧”. ENEOS. <https://www.eneos.co.jp/binran/>, (参照 2021-02-22).
- 森島 宏. “天然ガスのすべて—21世紀の主演エネルギーの最新知識—”. 石油/天然ガスレビュー ‘04/1・3, p.118-169,
https://oilgas-info.jogmec.go.jp/review_reports/1006101/1006111.html, (参照 2021-02-22)
- 日本船舶海洋工学会海中技術研究会編. 海洋底掘削の基礎と応用. 成山堂書店, 2010, 200p
- 日本エネルギー学会天然ガス部会編. 天然ガスのすべて—その資源開発から利用技術まで—. コロナ社, 2008, 240p
- 山崎豊彦編. オイルフィールド・エンジニアリング入門—石油・天然ガスを開発する. 海文堂, 2002, 200p
- BP. ”Statistical Review of World Energy”. BP.
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, (cited 2021-02-22)
- Maribus. Oil and gas from the sea. World Ocean Review.
http://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor3/WOR3_chapter_1.pdf, (cited 2016-11-14)
- Infield Systems Limited. Infield Systems Limited. Infield Systems Limited.
<http://www.infield.com/>, (cited 2021-02-22)
- 石油連盟編. “今日の石油産業データ集”,石油連盟, <http://www.paj.gr.jp/statis/data/>, (参照 2021-02-22)
- みずほ銀行産業調査部. “海洋資源開発産業の現状と展望”. みずほ産業調査. みずほ銀行産業調査部, 2014. ,No.4,47, 79p .
https://www.mizuhobank.co.jp/corporate/bizinfo/industry/sangyou/pdf/1047_all.pdf,
(参照 2021-02-22)
- エンジニアリング協会. 平成 26 年度 海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査 報告書、APPENDIX-3 海洋資源開発の技術概要. 2015, 139 p.
- JOGMEC. “大水深石油開発のトレンド：概説”. JOGMEC. 2014-06-11.
https://oilgas-info.jogmec.go.jp/seminar_docs/1007215/1007245.html, (参照 2021-02-22)
- 国土交通省海事局. 海事レポート 2015 未来を拓く、海が拓く. 2015,
https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk1_000055.html, (参照 2021-02-22)
- JOGMEC. 海洋工学ハンドブック. 第5版, 2010, (CD - ROM)
- JOGMEC. 世界が注目するニューフロンティア「北極圏」資源開発. JOGMEC NEWS 2014, Vol.36, p.1-15
<http://www.jogmec.go.jp/content/300171427.pdf>, (参照 2016-11-11)
- 経済産業省. “海洋エネルギー・鉱物資源開発計画”. 経済産業省. 2013-12-24.
https://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/report01_01_00.pdf,
(参照 2021-02-22)
- 松山泰浩. “海洋政策研究所第97回海洋フォーラム講演「石油・天然ガスを取り巻く現状～

第2章 海洋開発産業の背景と現状

メタンハイドレート開発を中心に～」講演資料”。笹川平和財団。2012-12-18.

https://www.spf.org/opri-j/projects/information/forum/backnumber/pdf/97_01.pdf,

(参照 2021-02-22)

- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム。“日本周辺海域におけるメタンハイドレート起源 BRS 分布図”。メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム。2009-07-31。
https://www.mh21japan.gr.jp/pdf/BSR_2009.pdf, (参照 2021-02-22)
- 増田昌敬。“メタンハイドレートフォーラム 2013 資料「メタンハイドレート開発研究の展望」”。メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム。2014-01-24。
<https://www.mh21japan.gr.jp/mh21wp/wp-content/uploads/mhforum201301.pdf>,
(参照 2021-02-22)
- 明治大学ガスハイドレート研究所。“ガスハイドレートとは”。
<http://www.isc.meiji.ac.jp/~hydrate/>, (参照 2021-02-22)
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム。“メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム”。メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム。
<https://www.mh21japan.gr.jp/>, (参照 2021-02-22)
- JOGMEC。“海底鉱物資源開発：海洋鉱物資源の概要”。JOGMEC。
http://www.jogmec.go.jp/metal/technology_013.html, (参照 2021-02-22)
- 資源エネルギー庁。“海洋エネルギー・鉱物資源開発に関する取組と成果、今後の方向性について(資料1)”。経済産業省。2012-06-20。
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/sanyo/dai7/7gijisidai.html>, (参照 2021-02-22)
- 環境省。“平成 21 年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査調査報告書”, 2010 年
<http://www.env.go.jp/earth/report/h22-02/index.html>, (参照 2021-02-22)
- NEDO。再生可能エネルギー技術白書 第 2 版。2014,
https://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html, (参照 2021-02-22)
- ユーラスエナジーホールディングス事業案内。“ユーラス新出雲ウインドファーム”。ユーラスエナジー。
<https://www.eurus-energy.com/project/project-jp/407/>, (参照 2021-02-22)
- London Array。“Key Facts About London Array”。
<https://londonarray.com/project-history/key-facts/>, (cited 2021-02-22)
- 伊藤忠テクノソリューションズ。“平成 22 年度 新エネルギー等導入促進基礎調査事業(風力エネルギーの導入可能量に関する調査) 報告書”。経済産業省。2021-02-22。
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11241654_po_E001771.pdf?contentNo=1&alternativeNo=3, (参照 2021-02-22)
- 戸田建設浮体式洋上風力発電事業。“Vol.2 国内初! 浮体式洋上風力発電設備を実用化”。戸田建設。
https://www.toda.co.jp/business/ecology/special/windmill_02.html,
(参照 2021-02-22)
- 石田雅也, スマートジャパン。“日本で初めて浮体式の洋上風力発電所が営業運転、離島に 1700 世帯分の電力”。アイティメディア株式会社。2016-04-21.

第2章 海洋開発産業の背景と現状

- <https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1604/21/news033.html>, (参照 2021-02-22)
- 石原孟. “我が国の洋上風力発電の技術課題と将来展望. コースタル・テクノロジー2012 特別記念講演(2012-12-03)”. 東京大学. 2013,
<http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/article/2013-2.pdf>, (参照 2021-02-22)
 - 国土交通省. “洋上風力発電の市場について(発表資料)”. 国土交通省.
<https://www.mlit.go.jp/common/001000883.pdf>, (参照 2021-02-22)
 - 福島洋上風力コンソーシアム. “浮体式洋上ウィンドファーム実証研究 事業研究通信 Vol.4”. 福島洋上風力コンソーシアム. 2016-01-16.
<http://www.fukushima-forward.jp/magazine/pdf/magazine004.pdf>, (参照 2021-02-22)
 - 高橋重雄;安達崇. “日本周辺における波パワーの特性と波力発電”. 港湾技術研究資料, No.654, 1989, <https://www.pari.go.jp/search-pdf/no0654.pdf>, (参照 2021-02-22)
 - European Marine Energy Centre (EMEC). “European Marine Energy Centre (EMEC)”. European Marine Energy Centre (EMEC). <http://www.emec.org.uk/>, (cited 2021-02-22)
 - Tidal Energy. “Tidal Energy”. Tidal Energy. <https://www.tidalenergyltd.com/>, (cited 2021-02-22)
 - K-water. “Sihwa-Lake Tidal Power Plant Projects”. K-water.
https://www.kwater.or.kr/eng/busi/project03Page.do?s_mid=1192, (参照 2021-02-22)
 - NEDO. 風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務 報告書, 2011,
https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201107/20110000001165.html,
(参照 2021-02-22)
 - John Huckerby. “An International Vision for Ocean Energy, Ocean Energy Systems”. 2012, <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/>, (cited 2021-02-22)
 - NEDO. 海洋エネルギーの利用技術に関する現状と課題に関する調査 報告書. 2008, 194p.
 - NEDO. 研究評価委員会「海洋エネルギー技術研究開発」(事後評価)分科会. 2018
https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/ZZBF_100334.html, (参照 2021-02-22)
 - 環境省. 潮流発電技術実用化推進事業(経済産業省連携事業). 環境省
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/tidalcurrent_pg/, (参照 2021-02-22)
 - 佐賀大学海洋エネルギー研究センター. “佐賀大学海洋エネルギー研究センター”. 佐賀大学海洋エネルギー研究センター. <https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/>,
(参照 2021-02-22)
 - 沖縄県海洋温度差発電実証設備. “沖縄県海洋温度差発電実証設備”. 沖縄県海洋温度差発電実証設備. <http://otecokinawa.com/>, (参照 2021-02-22)

3 海洋石油・天然ガス開発の実際

本章では、石油・天然ガス開発の一般的な工程について説明し、海洋における石油・天然ガスの開発における各場面で実際に活用されている技術や装置について概説するとともに、国内外で行われている海洋石油・天然ガス開発プロジェクトの具体例を取り上げて詳しく紹介する。

3.1 一般的な開発の全体工程

3.1.1 開発の全体工程

一般的な石油・天然ガスの資源開発は、図 3.1.1 に示すようなプロセスで進展する。まず鉱区取得から始まり、有望な油ガス田の探査、試掘などによる確認、商業生産の可能性評価、施設の計画や生産施設の建設等を経て生産までの油ガス田で行われる直接的な開発工程を上流部門(upstream)*、その後の原油などを生産地から精製基地までの輸送や、石油精製品の製造などを下流部門(downstream)と区別することもある。本章では、上流部門を対象に開発工程を概説する。

可採埋蔵量をすべて採取し終えた油ガス田は終末期を迎え廃坑とされるが、プロジェクトの着手から廃坑まで、10～30年の長期にわたる事業である。また、入札から生産へ移行するまで一般的には4～5年の期間を要している。

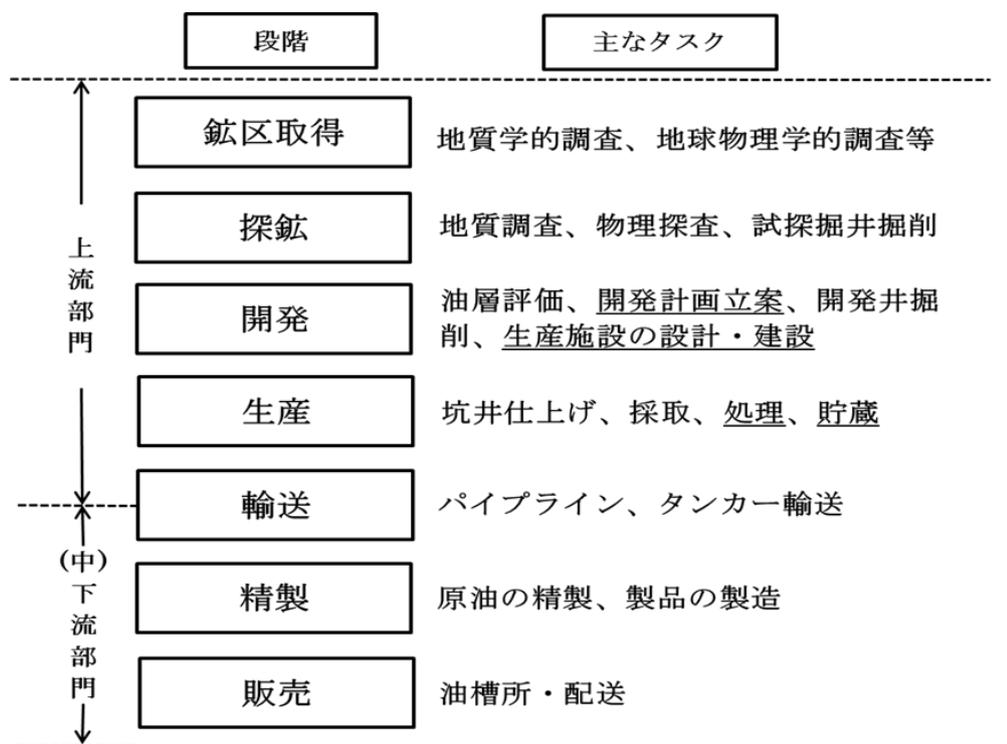


図 3.1.1 石油・天然ガス資源開発プロジェクトにおける開発の流れ
(出典：「JOGMEC 基礎講座テキスト 開発技術」JOGMEC を基に作成)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

上流部門における各段階の概要は以下のとおりである。

(1) 鉱業権(mining right)*取得

石油・天然ガス資源の開発プロジェクトの第一歩は、産油国・産ガス国が設定する鉱業権の取得である。鉱業権は、所有者が行う鉱区の入札等により取得する、あるいは、既に鉱業権を保有する石油開発企業から譲渡を受けるなどの方法が一般的である。

(2) 探鉱

鉱区内の地下に、石油・天然ガスの存在を実際に確認し、かつその埋蔵量や油ガス層の状況が商業的に成功する可能性があるかを、種々の手法を段階的に駆使して調査を行い、総合的な検討を行う。地下を広域的に調べる地質学的な調査、物理探査(geophysical explorationあるいはgeophysical prospecting)*などから開始し、実際に掘削し石油・天然ガスの存在を確認する試掘井(wildcatあるいはexploratory well)*の掘削、油ガス層の広がり調査する評価井の掘削などが行われる。

(3) 開発

鉱区内で確認された油ガス層について技術的な面からの検討に加えて、経済的にも商業生産が可能と判断されると、石油・天然ガスの生産、貯蔵、出荷施設等の設計から建設、パイプライン敷設、生産井の掘削など、商業化へむけて開発が行われる。

石油とは異なりガスには貯蔵や輸送の手段に制約があることから、パイプラインなどでガスとして供給するケースと、液化して専用タンカー等で供給するケースがある。液化プラント設備は大規模設備であり、採算性の検討に与える影響が極めて大きい。ガス田の開発においては、この期間に長期間にわたる顧客を確保することも重要なタスクである。

(4) 生産

すべての生産施設、設備の建設が完了した後、試運転等などで性能の確認を行い、石油・天然ガスの生産を始める。生産開始後には、所期の生産量を確保することが重要であり、安全管理、状態監視と生産の状態に変化があった場合の対策、設備機器の維持管理などが行われている。

(5) 廃坑

生産を続け経済的な埋蔵量をすべて汲み切れれば、その油ガス田の寿命は終了し、坑井の廃坑や生産施設の撤去などを行う。契約や撤去に伴う法的な処置を終えて、石油開発の一連の工程は終了する。

3.1.2 各段階での主なタスク

(1) 鉱業権取得

米国やカナダなどを除くほとんどの国では、地中に存在する石油・天然ガスなどの所有権は国家に属するものとしている。そのため、石油・天然ガス開発は、相手国政府の鉱業権設定から公募による入札開始、開発希望者の入札、入札評価などの手続きを踏むことが一般的で、落札後に相手国政府と石油開発、鉱業権益についての諸条件を取り決めるため

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

の契約を結ぶ。契約に関しては第6章にて述べる。

(2) 探鉱

① 探鉱の流れ

探鉱の中心的な業務は、油・ガスが胚胎している可能性が高いと推定される地下構造を抽出するために行う地表地質調査(geological survey)*、物理探査、石油地質評価、および試掘井の掘削である。代表的な流れを図3.1.2に示す。

試掘により油・ガス貯留層が発見されると、全体の生産能力と可採鉱量を求めるための詳しい貯留層評価を行う。必要があれば、物理探査や評価井の掘削を追加的に実施することもある。

次の段階として、生産施設の規模等についても技術的な検討とともに、経済性の検討を行う。開発が経済的にも可能であると判断された場合には、開発計画を策定、開発実施へと移行していく。

なお、試掘の結果が不成功だった場合や、不採算と判断された場合には、鉱業権は放棄される。

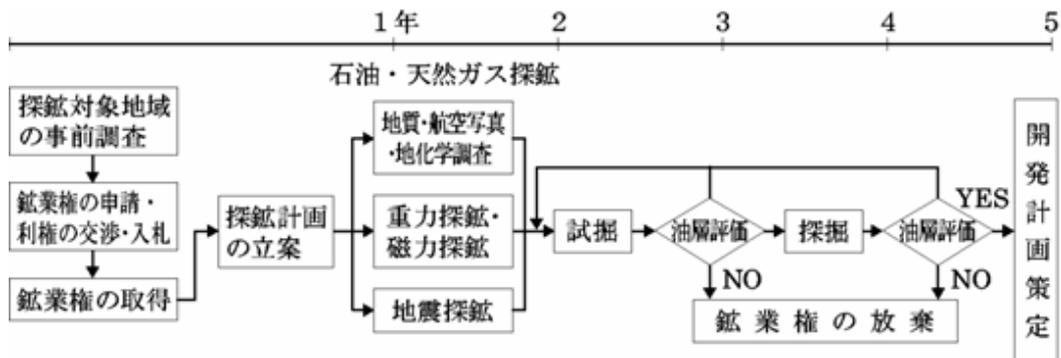


図 3.1.2 石油開発における探鉱の流れ
(出典：ENEOSウェブサイト)

② 探査の方法

a) 地表地質調査

石油や天然ガスの鉱床が形成される機構から、鉱床の存在は、個々の堆積盆地の地質学的特性と大きく関係していると考えられている。したがって、地表地質の分布などの地質学的特性を調査することで、石油の生成された場所である根源岩や、最終的な集積場所である貯留岩の分布の可能性についてある程度の予測が行える。地表地質調査に加えて、航空写真や衛星写真などを用いたリモートセンシング解析等が行われている。

b) 物理探査

掘削することなく地下を探るために行う調査が、物理探査（物理探鉱）である。岩石や地層は固有の物理的特性をもっており、物理的特性を直接あるいは間接的に測定して地下を調べる方法を物理探査という。

物理探査の対象となる物性には、重力や磁力などの直接測定できる物性と、地震波など人工的に何らかのエネルギーを投入して得られた測定値を解析し、間接的に解明可能

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

な物性とがある。

主な物理探査法の概要は以下のとおりである。

i) 地震探査：

地震波が、速度や密度の変化する地層の境界面で反射、屈折を起こす原理を応用して、人工的な発振源から地震波を発生させ、そこから一定距離を離れた受振点で反射波や屈折波を観測して、地下の構造や物性分布を推定する方法で、石油・天然ガスを対象とした物理探査手法として最も一般的な方法である。特に反射波を用いるものを反射法地震探査と呼び、屈折法を用いる場合は、屈折法地震探査と呼んでいる。石油・天然ガスの探鉱は反射法が一般的に適用されている。

ii) 重力探査(gravity survey)*：

地球が均質な完全な回転楕円体であると仮定すれば、地球上のあらゆる場所の重力値は理論値として決まる。しかし、地層による密度差、山塊など周辺地形や潮位変化の影響、地球内部の不均質さ等から観測値は理論値と異なる。この重力の偏差を陸域や海域において測定し、地質構造とその岩石密度により定義される重力値であることから、地下密度構造を推定し鉱床の存在可能性を調査する探査法が重力探査である。微細な構造解析には適さないケースがあり、一般的には概査法の一つであり、探鉱の初期段階で磁力探査(magnetic survey)*とともに用いられることが多い。

iii) 磁力探査：

地球磁場の歪みを測定することにより地下構造を解明しようとする探査の方法である。空間内の磁力を、移動体（船舶、車両、航空機）を用いて連続的に測定し、例えば磁性値の大きい造岩鉱物となる基盤岩の構造を調べ、総堆積層厚の把握を目的とした概査法の一つである。

iv) 電磁探査：

電磁誘導の原理を用いて、電場・磁場の変化に対する地下の応答を計測することにより、地下の物性値を求める手法であり、特に比抵抗値が探査のキーとなる目的の調査に利用されている。

自然界の変化を利用する受動的手法（MagnetoTelluric、MT法など）に対し、人工的に変化を発生させる能動的手法（Controlled Source Electro Magnetic、CSEM法など）があり、近年、海洋において専用調査船を用いた電磁探査法（CSEM法）が開発され、開発費用が巨額となる海洋における石油・天然ガス開発の探鉱リスクを下げる目的で、地震探査とあわせて適用されている。

c) 海上地震探査データ取得

海中で人工的に地震波（音波、弾性波）を発生させると、地下を伝播していく過程で物性境界となる海底面や地層境界面で微弱なエネルギーが反射される。この微弱反射波を計測し処理することで地下構造を調べることができる。これは音響測深機や魚群探知機と、送信器および受信器が船底の一か所に設置されている点を除けば、同じ仕組みである。図 3.1.3は地震探査で得られた地震探査記録断面の例である。

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

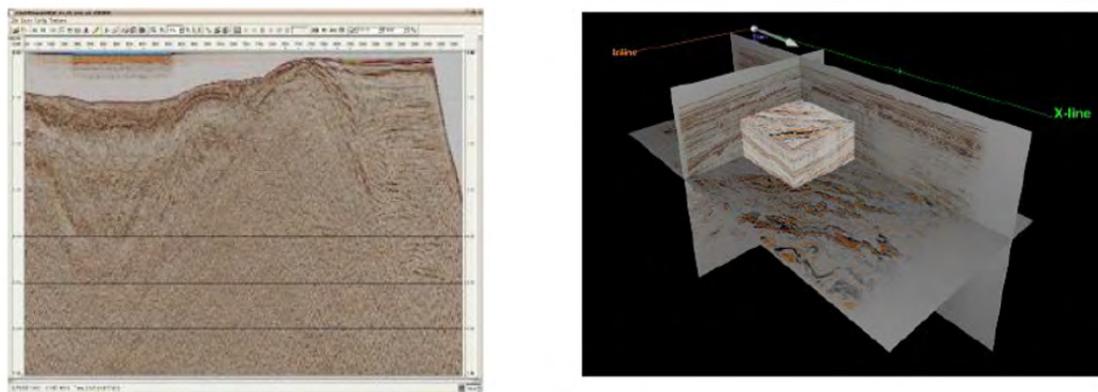


図 3.1.3 地震探査記録断面の例（左：二次元探査、右：三次元探査）
（出典：日本物理探査ウェブサイト）

探査船による地震探査データ収録の仕組みを図 3.1.4 に示す。

振源として、高圧空気を瞬間的に海中に放出して地震波を発生するエアガンを探査船後方に曳航し、さらに受振器として圧力センサーであるハイドロフォンを規則的な間隔で多数内蔵したストリーマケーブルを曳航する。エアガンやストリーマの位置を、GPS 衛星の位置情報等を利用して精度よく計測しつつ、定期的に発振しデータを収録する。得られたデータにさまざまな処理を施し、実際の地下構造などが表現された反射地震探査記録断面を得る。

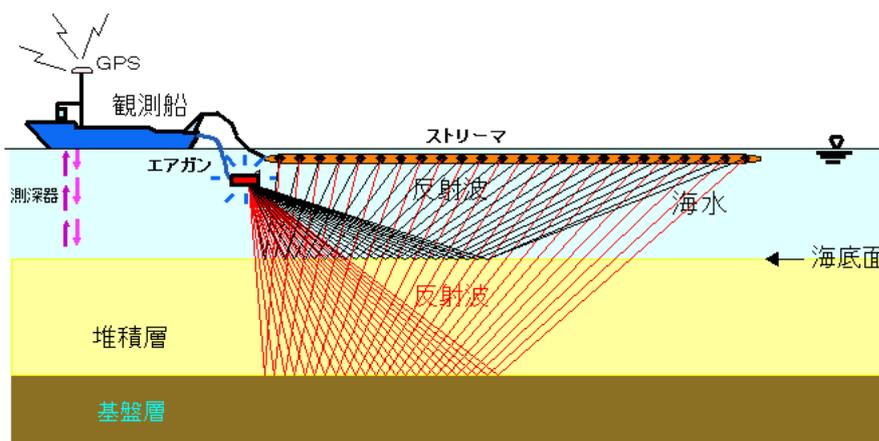


図 3.1.4 地震探査データ収録の概念図
（出典：日本物理探査ウェブサイト）

二次元探査の場合は1組のエアガンおよび1本のストリーマケーブルを用いており、調査船（エアガン、ストリーマケーブル）の通過した調査断面に沿った二次元断面のデータが得られる。これを二次元探査という。次に、1隻の探査船でストリーマケーブルを複数間隔で面的に配置すると、一度にある狭い幅を持った短冊状の三次元探査のデータが得られ、この短冊状のエリアをその幅だけ左右に移動して次の短冊状のデータを取得する。これを繰り返し継続し、最終的に調査海域全体をカバーするように調査を進めることを、三次元地震探査という。

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

図 3.1.5は、経済産業省が所有、JOGMECが運航する物理探査船「資源」であり、三次元地震探査の専用船である。エアガンは船尾から曳航される6組のフロートの下部に設置され、長さ4,800~6,000mのストリーマケーブル10本をそれぞれ約100m間隔に維持して曳航する。



図 3.1.5 物理探査船「資源」
(出典：「物理探査ニュース No.10」物理探査学会)

d) 地震探査データ処理

地震探査データに記録されている反射波は非常に微弱な信号であり、この微弱な信号を石油・天然ガスの存在の評価に利用可能とするには、適切なデータ処理の実施が必要となる。データ処理には、主に(1)S/N比の向上、(2)連続性の向上、(3)正しい位置へのイメージングなどを目的とした多数の処理ステップが必要とされている。例えばエアガンの波形には初動と呼ばれる最初の強振幅の波のみではなく、初動に比べ振幅は小さいものの、後続する波群が存在する。そこで、これら後続波を抑制するための非常に複雑な信号処理を、そのパラメーターをテストしながら適用している。最終地震探査断面を作成するまでには、20を超える処理ステップが必要とされ、地震探査データに対する調査地域や、データ取得仕様に対する最適な処理ステップおよび最適なパラメーターを選択して進めることになるが、中には高コストや長期間を必要とする処理ステップが存在することから、費用や処理期間を十分考慮した上で進めている。

e) 地震探査データ解釈

地震探査データ処理に、地震探査データより作成された震探地震探査断面（二次元の場合）や地震探査ボリューム（三次元の場合）を基に地質構造解釈を行う作業を、地震探査データ解釈という。また入手可能な坑井データを使用して、断面・ボリューム上のさまざまな地質構造的特徴および地震探査記録に特有の反射特徴を解析する手法などを用いて、地質層序、堆積サイクル、堆積環境、岩相およびその分布、構造形成の時期などを推定し、堆積盆地の地史を解明する。その際に地震探査から得られる速度情報などの物性値情報も利用し、地震探査断面、ボリュームと坑井データを用いて物性値解析を実施する。解釈作業の一環として各種構造図、等層厚線図、堆積復元図等の各種図面を作成、試掘対象構造（プロスペクト）を摘出し、地質学的調査の結果もあわせてその評価を行う。

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

③ 試掘

油・ガス層の存否やその広がり、坑井を掘って実際に油・ガス層を掘り当てないと認知できない。未知の油・ガス層を探し当てるために掘られる坑井を試掘井と呼ぶ。その後油・ガス層の広がりや層の厚み等々の全体像の把握のために掘られる坑井を、探掘井と呼ぶ。

a) 掘削作業

坑井の掘削作業には、ドリルパイプの先端に取り付けたビットを回転させて岩石を粉碎し、掘削流体を循環させて岩石の掘り屑を取り除きビットを冷却しながら地層を掘り進むロータリー掘削方式が用いられている。掘削流体は、泥水（でいすい）と呼ばれ、ベントナイトやバライト等を混ぜて粘性や比重を調節した特殊な液体で地層圧を抑圧する。

海洋掘削は、図 3.1.6 に示すような方法で進められ、このような海洋構造物と装置をあわせて掘削装置（掘削リグ）と呼ぶ。

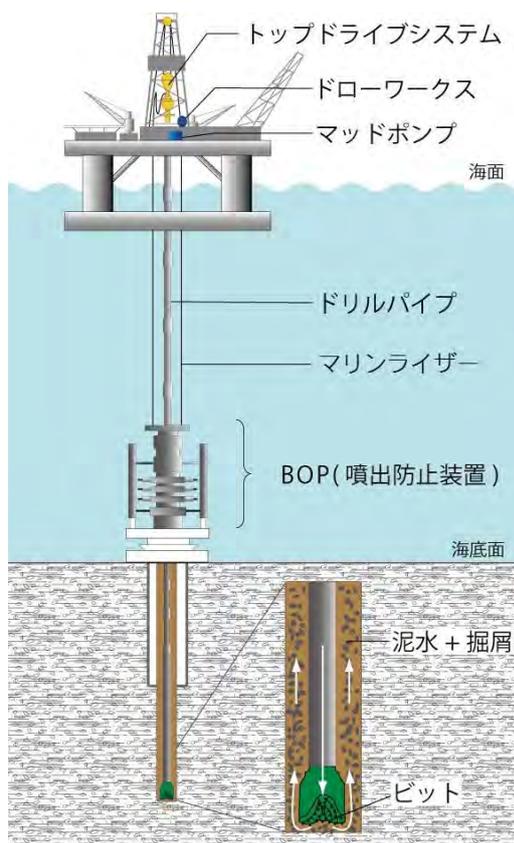


図 3.1.6 掘削リグと海洋掘削のイメージ例
(出典：日本海洋掘削ウェブサイト、一部加工)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

掘削リグは、主に以下のような機器から構成される。

- ドローワークス：

ドリル・ストリング（ドリルパイプやビット等を連結した一連のパイプ）等の揚降
に用いられるウィンチ装置。

- トップドライブシステム：

リグ中央のデリック（^{やぐら}檣）から吊り下げられており、内蔵されたモーターによりド
リル・ストリングに回転力を与える装置。

- マッドポンプ：

泥水を循環させるポンプ、マッドポンプによって加圧された泥水はドリルパイプ内
側を通して先端のビットから噴射され、ドリルパイプの外側から上昇して再びマッ
ドポンプに戻る。泥水は掘り屑を地上まで運び出すとともに、その水頭圧力によっ
て坑井壁の崩壊を防止し、石油や天然ガス等の地層流体の暴噴を抑える役割もある。

- マリンライザー：

洋上にあるリグと実際に掘る海底面をつなぐ管・パイプのことである。マリンライ
ザーは管内のスペースを利用してドリルパイプを掘削面まで通したり、掘削面に必
要なものを送ったり、あるいは海底や掘削面から不要なものや有用なものを取り出
したりするための経路としての役割を果たす。

- 噴出防止装置（BOP：BlowOut Preventer）：

坑井内の圧力バランスが崩れ、地層流体（油田水）が坑井内に侵入する事態（キッ
ク）が生じると、地層内流体が地表まで吹き上げ制御不能の大事故となる。キッ
クの兆候があった場合、坑口を一時的に密閉してキックを制御するため、坑口上に設
置する装置。

なお、掘削に使用される機器の詳細については、「海洋開発工学概論 海洋資源開発
編」第3章で解説しているので、適宜参照されたい。

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

掘削リグについては、海底に脚を固定する着底式と浮体を利用した浮体式があり、図3.1.7に示すようにそれぞれいくつかの形式がある。形式ごとの特性、稼働場所の水深、海底土質、波浪などの海象条件等を総合的に考慮して安全性と経済性から選択される。

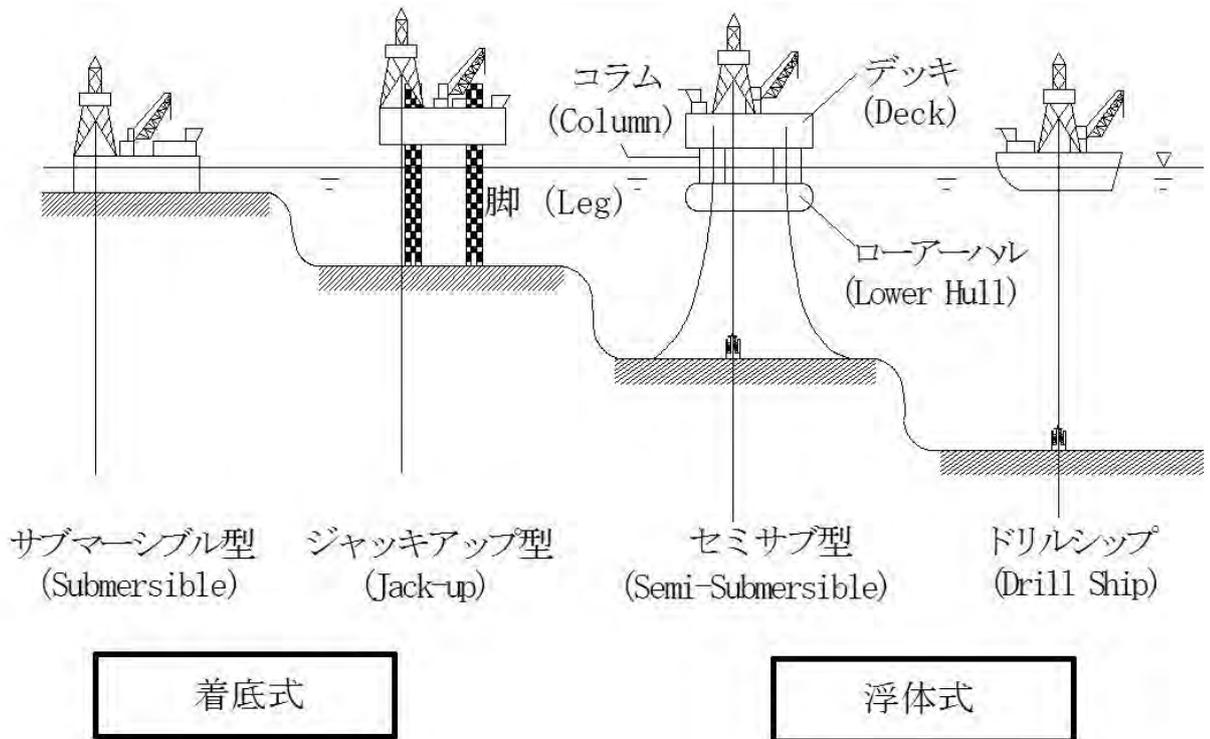


図 3.1.7 海洋掘削で用いられる移動式掘削装置
(出典：ENEOS ウェブサイトを基に作成)

代表例であるジャッキアップ型（着底式）、セミサブ型（浮体式）、ドリルシップ（浮体式）の特徴は次のとおり。

- ジャッキアップ型リグ：

掘削装置を搭載した船体部と昇降可能な脚からなる。掘削時には脚を着底させ船体部を海面上に持ち上げる。海底土質の影響を受けるが波浪による動揺はほとんどない。一般的には水深10～80mの海域で使用される。

- セミサブ型リグ：

ローアーハル（下部船体）上に複数のコラムを立て掘削装置を搭載したデッキ（作業甲板）を有する構造。掘削時はローアーハルにバラスト水を注水し、デッキ部を海面より上げた半潜水の状態とし波の影響を小さくしている。アンカーおよびワイヤーやチェーンによる係留装置、あるいはDPSにより掘削場所に留まる。一般的には水深40～800mの幅広い海域で使用される。

- ドリルシップ：

ドリルシップ型は船型ともいわれ、船に掘削機器等を取り付けたタイプである。掘削作業時には、スラスタ（横移動などに用いられる推進装置）等を使って位置を保持するDPSが用いられ、より大水深の海域でも稼働できる。移動時にジャッキアッ

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

ブ型やセミサブ型に比べて船が受ける抵抗が少なく、推進装置によって普通の船と同じように自走できる。

b) 坑井調査

掘進中の坑井から掘り屑、コアサンプルなどを採取し、地下地質の化学的および物理的情報を計測することを坑井調査と呼ぶ。坑井調査として以下に概説するような坑井地質調査、泥水検層（マッドロギング(mud logging)*）、物理検層(well logging あるいは geophysical logging)*、生産テスト等が行われ、油・ガス層の定性的・定量的調査と評価を行う。

- 坑井地質調査：

坑井掘削中に、掘削泥水の循環によって地表に運ばれてくる掘り屑を一定の間隔で採取し、岩質・岩相および油徴などの調査を行う。

- 泥水検層：

循環泥水およびカッティングスからガスを分離して、ガスクロマトグラフィーによってガスの成分を分析する。ガスの成分比は、地層中の炭化水素が、ガスであるか原油であるかを判断する指標となる。

- 物理検層：

物理検層は、坑井掘削中および掘削終了後、測定機器を坑井内に降ろし、坑井近傍の地層や地層中の流体に関する物性値、例えば比抵抗、密度、弾性波速度、孔隙率などを深度に対して連続的に測定する技法である。坑井近傍の貯留層性状について、
(1) 砂岩/頁岩の識別、(2) 炭化水素/水の識別(3) 貯留層パラメーターである孔隙率、水飽和率の推定等を行うことが検層の大きな目的である。

- ドリルステムテスト(DST : Drill Stem Test)：

坑井の掘進中または掘削終了後、その地層の潜在的生産能力を確かめるために行われる地層試験（フォーメーション・テスト(formation testing)）の方法の一つで、ドリル・ステム(drill stem、またはドリル・ストリング)*を通じて行う方法なので、この名称がついている。油・ガスの賦存が予想される地層に対し実際に生産テストを行い、直接的に油・ガス層の調査、評価を行う。生産能力、流体性状、地層圧力の他、坑底圧力の推移を解析することにより、浸透率、生産性障害、地層の広がり等の推定ができる。

(3) 開発

探鉱の結果、採算性のある油田またはガス田が発見されると、その後石油・天然ガスを回収する生産井を掘削し、所要の生産処理施設・積出し施設などの建設へと移行する。この期間を開発段階という。

開発に進むにあたっては、試掘・探掘で得られたデータを基に油層評価(reservoir evaluation)*、生産計画、掘削計画、施設計画などからなる開発計画を作成し、その採算性を検討する。通常、開発に要する資金は探鉱に要する費用の数倍から数十倍程度となり、開発計画では投下資金に対し最も効率的な収益が得られるよう計画の最適化および経済性評価に関する綿密な検討が行われる。上記の他に、原油価格の長期見通しや石油開発権に

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

関する契約条件なども開発の経済性評価にとって重要な要素である。

① 油層評価

油層評価の目的は、油・ガスの原始埋蔵量の評価および回収率の評価を通じて、どれだけの油・ガスを回収できるか、すなわち可採埋蔵量を評価することにある。物理探鉱、検層解析、コア分析、流体分析などのデータを基に、油田面積、有効層厚、孔隙率、飽和率などを求め、原始埋蔵量と可採埋蔵量を算出する。油田の生産挙動を予測する上で最も重要な点は、油層内の石油の流れである排油機構の評価であり、自然の水押しが期待できない場合などでは、人工採油法(artificial lift)*あるいは後述する水攻法の適否と適用時期などの決定が開発計画における重要な課題となる。

② 生産計画の策定

基本的な生産計画では、ピーク生産レート、ピーク生産期間、掘削と並行して生産を開始するか、全坑井の掘削終了後に生産を始めるかなどの決定が課題であるが、各年の生産予測量を油層評価に用いたシミュレーションにより、各年の生産量を予測する方法が一般的となっている。

③ 掘削計画の策定

生産井の坑井数および坑井配置は、油ガス田のピーク生産レート、坑井当たりの生産能力、構造形態、排油機構などを考慮して決定する。坑井間隔を決定する上では浸透率の大きさを考慮する必要があり、掘削位置を決定する上では、油層頂部のガスキャップや底部の底水の存在を考慮する必要がある。掘削が終了した坑井の上部、海洋の場合には、海底面やプラットフォーム上などに坑口装置 (well head) と呼ぶ設備を取り付け、坑井の保護や生産流量の調整などを行っている。坑井仕上げ (well completion) の方式は、坑井刺激法や出砂対策の必要性、人工採油法の適否の可能性などとも関連し、開発計画作成時の検討項目である。

④ 施設計画の策定

生産施設は、一般的には坑井、集油 (集ガス) 施設、処理施設、貯蔵施設、送油 (送ガス) ・出荷施設からなる。生産施設の基本的な構成は、陸上か海上かにかかわらず共通であるが、海洋油ガス田の場合には、坑井から処理までの過程を海上に建設したプラットフォームで行い、油をパイプラインで陸上基地へ送り、最終処理、貯蔵・出荷をすることが一般的である。

油・ガスの生産に使用される海洋プラットフォームは着底式、浮体式双方でこれまで多数の形式が開発されているが、水深や海象・気象条件など、使用場所における環境条件、離岸距離、生産量などに応じて選択されている。

⑤ 生産施設の設計・建設

生産施設の設計は、「複数コンセプト案の検討・選択 (Concept Select)」、「概念設計 (Pre-FEED)」、「基本設計 (FEED : Front End Engineering Design)」、「調達方針の策定」などのプロセスを経て進められ、これらの結果は事業化を判断する重要な材料となる。FEEDをはじめとする各プロセスにおいて、石油開発会社は、専門的技

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

術や実績を有するエンジニアリング会社等を起用して、実施することが多い。

事業化が決定されれば、生産施設の建設を開始する。一般的には、石油開発会社は、設計（E：Engineering）、調達（P：Procurement）、建設（C：Construction）、据付・敷設（I：Installation）のサービスを一括して請け負う契約（EPCI契約）を結ぶため、コントラクターを入札によって選定し、コントラクターは石油開発会社の協力を得つつ、生産設備を完成させる。

生産施設の建設が完成すると、性能確認のための試験（コミッショニング）が行われ、所期の性能を満足することを確認して、コントラクターから石油開発会社へ引渡しが行われ、操業への準備が整う。

(4) 生産

① 生産施設の種類

生産施設は、着底式、浮体式ともにこれまで多数の形式が開発されているが、水深や海象・気象条件など、使用場所における環境条件、離岸距離、生産量などに応じて選択されている。図3.1.8に洋上での油・ガスの生産に使用される生産海洋プラットフォームの代表例を示す。浮体式生産プラットフォームは、海底仕上げされた坑井と、半潜水式構造物（セミサブ）や浮体構造物とを生産ライザーなどで連結して原油の生産を行うシステムであり、下図に示すように、TLP、セミサブ型のFPS（Floating Production System）、タンカー型システムで生産機能だけでなく貯蔵・積出機能も備えたFPSO、円筒ブイ型のSPARが挙げられる。

この方式では現地での生産プラットフォームの建設工事や海底パイプラインの敷設を行う必要がなく、初期投資額が小さくなることや、開発の意思決定から生産開始までの期間の短縮化が可能となることから、プロジェクトの経済性が高まるので、小規模油田の開発に適用されることが多くなっている。

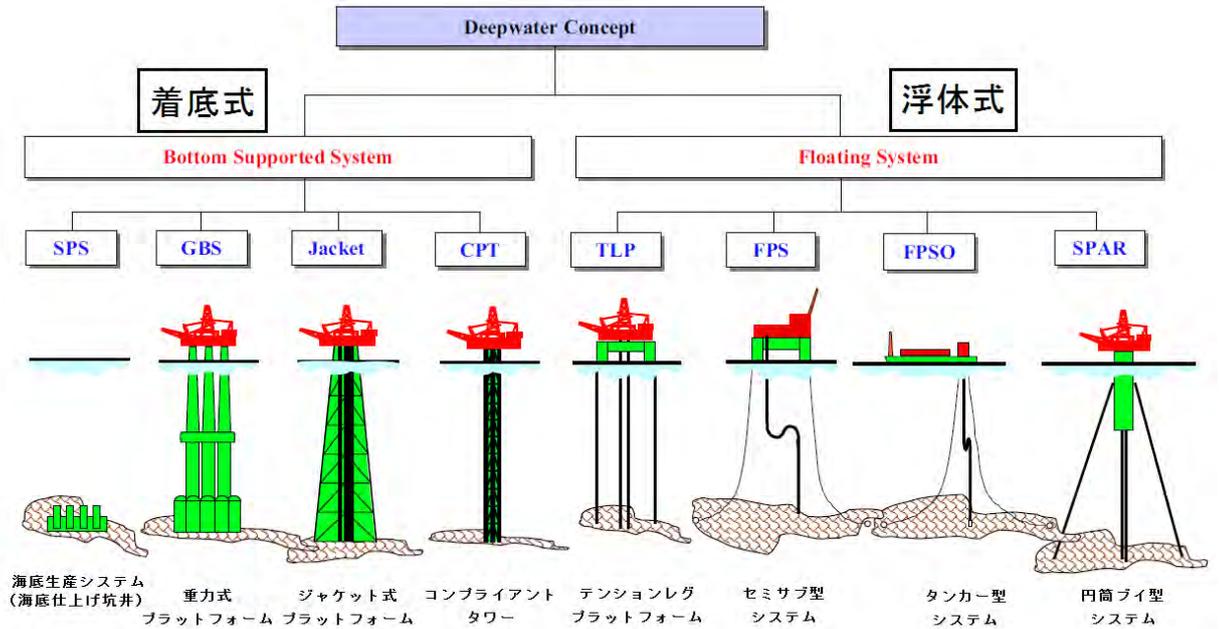


図 3.1.8 生産プラットフォーム
 (出典：「海洋工学ハンドブック (第5版)」JOGMEC、一部加工)

浮体式生産プラットフォームの一つで、生産プラットフォームの主流となりつつあるFPSOによる生産システムの概念図を図 3.1.9に示す。

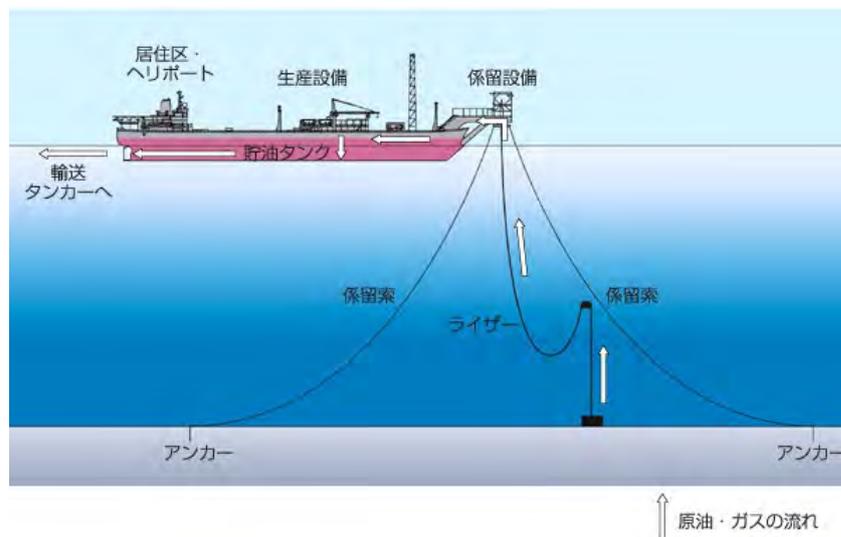


図 3.1.9 FPSOによる生産システムの概念図
 (出典：MODEC ウェブサイト)

FPSOの概要、特徴は次のとおりである。

FPSOは、洋上で石油・ガスを生産し、生産した原油を設備内のタンクに貯蔵して、直接輸送タンカーへの積出を行う設備である(図 3.1.10)。大きくは、船体部、係留装置、生産・貯蔵・積出関係の生産設備、安全設備、居住設備等から構成されている。

船体部は、多くが船舶状の形状をした巨大な鋼構造物であり、新たに建造される他、建造期間を短縮できるなどのメリットもあって既存の油タンカーを改造し利用されるこ

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

とも多い。船体部には、原油貯蔵用のタンクのほか、油処理設備、ガス処理設備、水処理設備、発電設備、それらの制御装置等からなる生産設備、消火設備、救命設備、ヘリコプター・デッキ、居住設備、輸送タンカーの係留装置、積出用ポンプ、フローティングホース等からなる原油積出設備が設置される。

生産設備（production facility）は、一般的に甲板上に設備され、上載設備やトップサイドなどと呼ぶことが多い。



図 3.1.10 FPSOの例
(出典：MODEC ウェブサイト)

FPSOは、水深20m程度の浅い海域から水深2,000m近い深い海域まで、幅広い水深の海域で稼働する。悪天候に遭遇しても、波、風、潮流から受ける力に対抗して、FPSOの位置を一定位置に保持するための設備が係留装置（mooring facility）であり、洋上で石油・ガスの生産を行うFPSOの安全操業を支援する要である。FPSOの代表的な係留方法は、船体の片端・船首部に設備したタレット(turret)*と呼ばれる巨大な回転構造を持つ係留装置を介しての係留である。図 3.1.11に示す通り、タレットは、多数のチェーンまたはワイヤーで構成される係留索によって海底に固定されており、一定の位置を保持する。タレットには、FPSOに生産流体を送るためのフレキシブルライザーも、スイベル(swivel)*を介して接続されている。タレットによって、FPSOは船首の1点で係留されおり、風見鶏のように波、風、潮流からの外力が最も小さくなるようにタレットを中心として自由に回転すること(weather vane)によって、悪天候下でも安定した石油・ガス生産活動を行うことができる。



図 3.1.11 タレットの一例
(出典：MODEC ウェブサイト)

FPSOは、造船所等で大部分を完成させ、現地まで曳航する。したがって設置工事は着底式のプラットフォーム、例えばジャケット式プラットフォームなどに比較すれば容易であり、短期間である。FPSOには、製品である石油輸送のための固定パイプラインは設けず、主に沖合や既存の施設から離れた油田の開発で利用される。

なお、生産設備を持たず、貯蔵・積出のみを目的としたものはFSOと呼ばれる。

② 原油の回収

油層から原油を回収する方法には、時系列的・物理的に異なる回収法が適用されることから、一次、二次、三次という分類が用いられている。自然の排油エネルギーにより原油を回収する方法が一次回収であり、自噴採油とポンプによる人工採油などである。一次回収では十分な生産量が得られない場合、さらに回収率を上げるため二次回収を適用する。二次回収とは、油層圧力を保持するため水やガス等の本来地下にあった流体を油層に圧入し、回収率の高い排油機構を人為的に作る技術のことであり、水を利用した水攻法と呼ばれる方法が一般的である。三次回収法は、二次回収後に適用される回収法であり、外部から界面活性剤、水蒸気、炭酸ガスや天然ガスなどの油層には存在しない流体を油層に圧入し、二次回収で残留した油を流動化させ回収する方法で、原油の粘性、原油のミシブル¹³化など物理化学的な性質の変化を利用した方法である。

最近では、排油機構や流体の置換機構に対する理解が深まり、油田開発時において、どの原理の回収法をいつの時点で適用すれば最も経済性の高い生産計画が得られるかが検討されるようになってきている。そのため、生産開始当初から水やガスの圧入を行ったり、若干の一次回収後に従来は三次回収法に分類されていた熱攻法を適用したり、また天然ガスの圧入でも圧入圧力を高めてミシブル状態を作り出し回収率を増加させたりするなど、これまでの分類法がなじまなくなってきたような背景があり、熱あるいは化学薬品などを加えて、油の性状を変化させ、流動性を改善し回収率を向上させる方法に対して増進回収法(EOR : Enhanced Oil Recovery)*という用語が使用されている。

¹³ ミシブルとは、二つの流体が接する時に両者の間に界面が生じることがない状態のことで、どのような割合で混合しても界面が生じることなく完全に混じり合う混和性を示す性質のことである。通常の状態ではガスと原油との間には界面があり非ミシブル状態であるが、ある状態にすることで界面が消失しミシブル状態になることが知られている。

図 3.1.12にEORのイメージを示す。

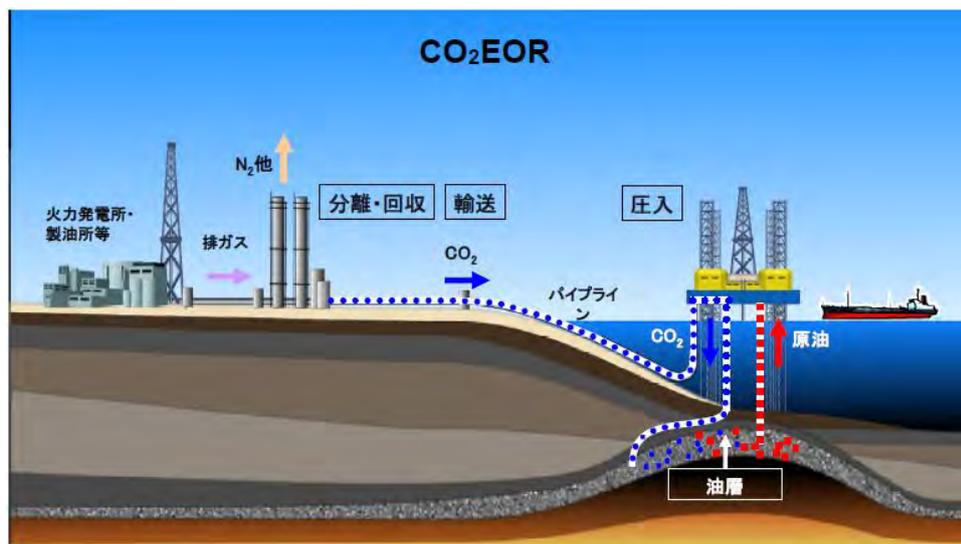


図 3.1.12 EORイメージ図
(出典：JOGMEC ウェブサイト)

③ 石油の生産

坑井から得られる流体（生産流体）は、油やガス、不純物等の混合物であり、原油とするためには、不要物を除去するさまざまな処理が必要である。

海洋の場合、生産過程の一つとしてこの処理を洋上で行っているが、処理には多様な設備機器を必要とするため、図 3.1.13に示すように複数の坑井（生産井）から得られる流体をパイプラインで結び一か所に集め利用効率を高めている。

小規模油田、大水深油田、氷海域油田等の開発の進展に伴って、海底仕上げ井、フローラインとマニホールドで構成されるシステムが広く適用されている。この生産方式をサブシー生産システムと呼んでいる。

なお、本来のサブシー生産システムとは、図3.1.14のように海底仕上げ井と海底機器、海底に設置された生産・処理施設、貯蔵施設および積み出し施設などからなる海底で完結された生産システムのことをいうが、現状では上記の生産方式を指して用いられることも多い。

サブシー生産システムの保守作業には、専用作業船（図 3.1.15）から遠隔操作されるROVや水中で自律的に稼働するAUV等の無人潜水機が用いられる（図3.1.16、図3.1.17）。

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

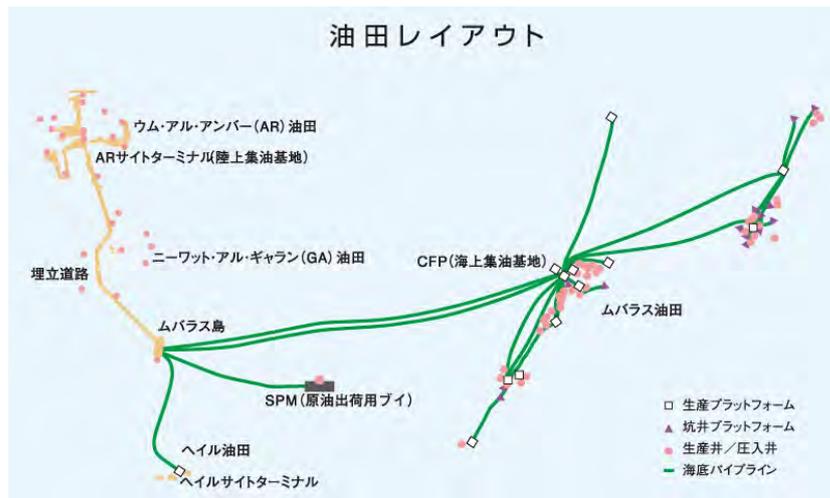


図 3.1.13 海洋油田のレイアウト例
(出典：アブダビ石油ウェブサイト)

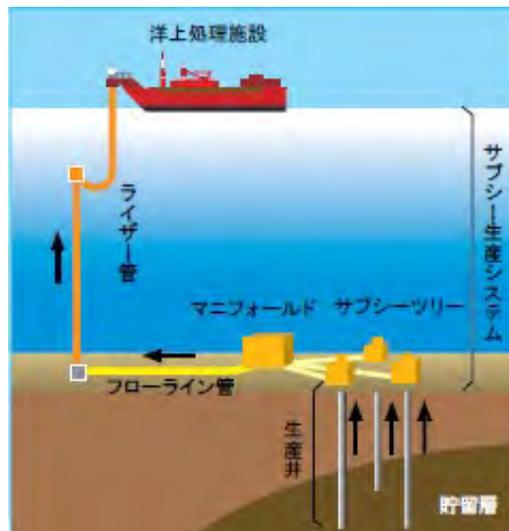


図3.1.14 サブシー生産システムの構成
(出典：「海洋開発におけるサブシー生産システムの動向と展望」2015、金城秀樹)



図 3.1.15 専用作業船の例
(出典：Sealionshippingウェブサイト)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際



図3.1.16 ROVの例

(出典：SAAB製品パンフレット)



図3.1.17 AUVの例

(出典：ROV Committee of Marine Technology Societyウェブサイトの画像を加工)

処理の過程は、坑井から得られる流体からガスや地層水を取り除く分離から始まる。分離に用いる装置がセパレータである。セパレータで分離された油は、計量されたのち、貯油タンクに貯蔵される。一般にはここで、販売契約で定められた含水率以下になるまで静置される。

海洋では、製品の積出しは、パイプラインやタンカー輸送などにより行われる。

図 3.1.18は、プラットフォームおよび洋上貯油、出荷タンカーを用いて海上油田を開発する場合の概念図である。

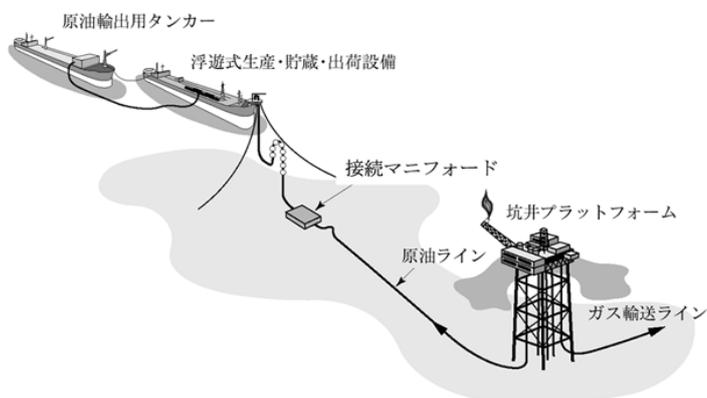


図 3.1.18 海上油田の概念図

(出典：ENEOS ウェブサイト)

④ 天然ガスの生産

天然ガスは、原油に比べ貯留層内における流動性が良く、一般に坑井当たりの生産性も高いため、

- 少ない坑井数で開発を行うことができる
- 回収率が油よりも高い
- 固定顧客への供給契約のため一定量の生産を維持しなければならないなどの違いがあるが、開発や生産における基本的な技術は共通である。

(5) 撤去・廃坑

石油・天然ガスの開発では可採埋蔵量を取りつくせば生産終了となり、坑井や生産設備

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

は撤去や廃棄処理がされる。坑井では坑口や坑内に将来の地震などに対しても十分耐えられる遮蔽を複数段行い、地表・海底面より露出しないよう処理され廃坑とし、生産施設は解体されて撤去される。着底式の海洋プラットフォームでは、スチールストラクチャー（鋼製構造物）は海底面で切断し、上部を撤去または横倒し後漁礁として残置されている。コンクリート・グラビティーベース（コンクリート製の土台）の撤去は実例が少なく、現在のところ仮残置されているところが多い。海底に敷設されたパイプラインも炭化水素の除去後残置または撤去の対象となっているため、十分な考慮が必要である。近年、環境問題が重視されているため、環境影響調査や撤去後に長時間のモニタリングが義務付けられている。

また契約期間の満了により生産を終結することもあり得るが、この場合には契約の定める内容で坑井や生産施設が譲渡されるか撤去となる。

3.2 プロジェクト事例

3.2.1 イクシスLNGプロジェクト

(1) イクシスLNGプロジェクトの概要

イクシスLNGプロジェクトは、オーストラリア連邦西オーストラリア州（西豪州）の沖合約200km（図 3.2.1）に位置するイクシスガス・コンデンセート(condensate)*田より産出される天然ガスを、全長約890kmのガス輸送パイプラインにて北部準州のダーウィンに輸送し、陸上に建設するLNGプラントで液化して出荷するプロジェクトである。年間890万トンのLNG（日本のLNG年間総輸入量の約1割¹⁴）、年間165万トンの液化石油ガス(LPG)、および日量約10万bbl（ピーク時）のコンデンセートの生産・出荷が見込まれ、これは、現在オーストラリアで生産されている油田の中でも最大規模となる。2018年7月にガス生産を開始し、同年10月にLNGおよびコンデンセート、同年11月にLPGの出荷を開始した。

¹⁴ 2019年における日本のLNG輸入量は約7,700万トン

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際



図 3.2.1 イクシスLNGプロジェクトの位置

(出典：INPEX ウェブサイト)

<https://www.inpex.co.jp/ichtthys/>

イクシスLNGプロジェクト（図 3.2.2）は、日本企業が主導する初の大型LNG開発プロジェクトである。国際石油開発帝石株式会社（以下、INPEX）が操業主体（オペレーター）となり、インペックス・イクシス社など豪州グループ会社を通じてプロジェクトパートナーとともに進めているイクシスガス・コンデンセート田の開発事業であり、40年という長期にわたって稼働が見込まれる世界的にも大規模なLNG開発プロジェクトである。



図 3.2.2 イクシスLNGプロジェクト

(出典：INPEXウェブサイト)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実況

本プロジェクトには、INPEXの他、日本のガス会社、電力会社が参加している。プロジェクト参加各社の出資比率は、表 3.2.1の通りである。

表 3.2.1 プロジェクト参加企業の出資比率

INPEX	66.245%
仏トタル (TOTAL)	26.000%
台湾中油 (CPC)	2.625%
東京ガス	1.575%
大阪ガス	1.200%
関西電力	1.200%
中部電力	0.735%
東邦ガス	0.420%

(出典：INPEXウェブサイトを基に作成)

イクシス LNG プロジェクトから生産される LNG の約 7 割相当が日本向けに供給される予定であり (図 3.2.3)、日本へのエネルギー安定供給に大きく貢献することが見込まれるとともに、INPEX がオペレーターとしてイクシス LNG プロジェクトを推進することにより、日本企業の国際的競争力強化に資することが期待されている。

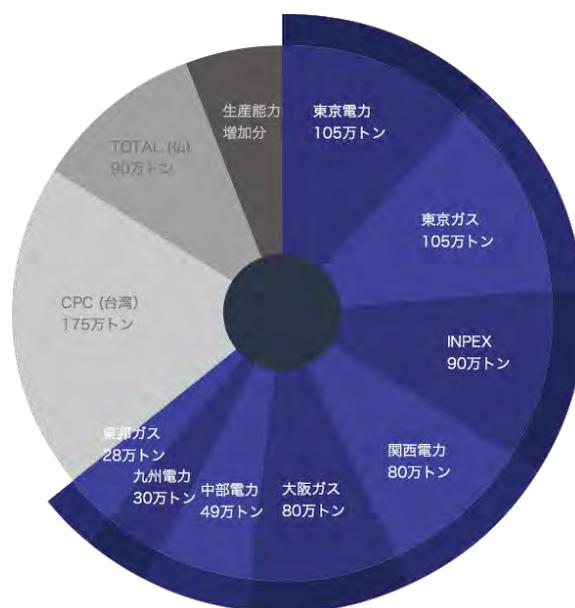


図 3.2.3 生産される LNG の提供状況
(出典：INPEX ウェブサイト)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

(2) 主要な設備

表 3.2.2に開発コンセプトの概要を、図3.2.4に開発の全体イメージを示す。

表 3.2.2 開発コンセプトの概要

生産量	LNG 年間890万トン LPG 年間165万トン コンデンセート 日量約10万bbl (ピーク)
開発井 (海底仕上げ) 沖合生産施設	Brewster部層30坑、Plover層20坑 CPF、FPSO、SPS、ガス・輸送パイプライン、 フローライン、フレキシブルライザーなど
海底パイプライン	42”パイプライン約890kmの敷設
陸上施設 (ダーウィン)	LPG、LNG、コンデンセートを生産、貯蔵、出 荷
陸上貯蔵施設	LNGタンク : 2 × 165,000m ³ C3 (プロパン) タンク : 1 × 85,000m ³ C4 (ブタン) タンク : 1 × 60,000m ³ コンデンセート : 2 × 60,000m ³

(出典：INPEX ウェブサイトを基に作成)

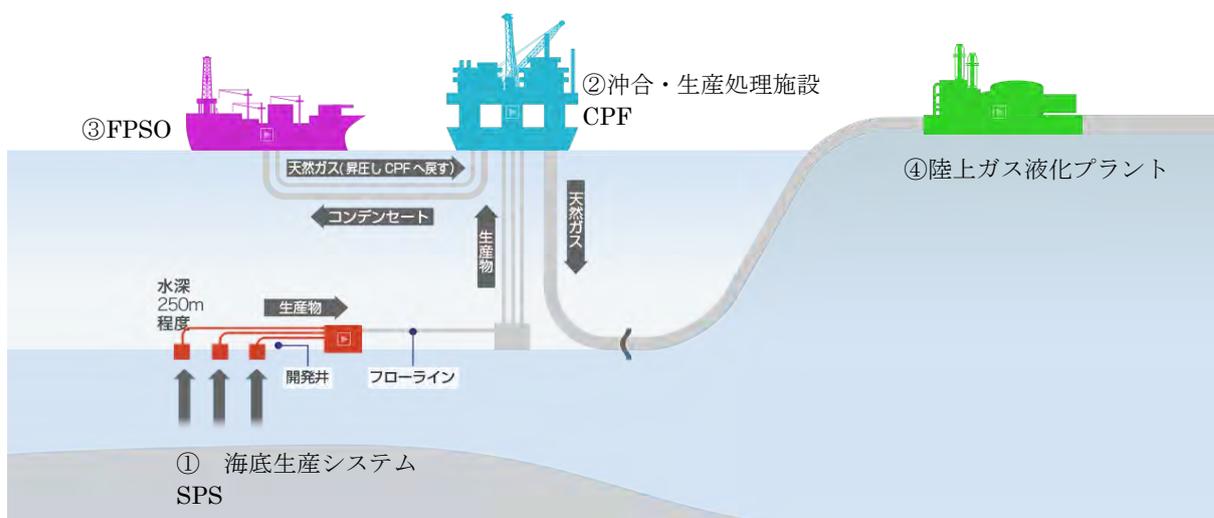


図3.2.4 開発の全体イメージ

(出典：INPEX ウェブサイト)

以下に、生産の流れに沿って、主要な設備を概説する。

① サブシー生産システム (図 3.2.5)

生産井から産出された生産物は、生産マニホールドに集められ、専用パイプであるフローライン、フレキシブルライザーを通じて、CPFに送られる。



図3.2.5 サブシー生産システムのイメージ
(出典：INPEX ウェブサイト)

② 沖合生産・処理施設(CPF：Central Processing Facility)* (図 3.2.6)

サブシー生産システムから送られた生産物は、CPFでガスとコンデンセートに分離・処理される。ガスは陸上の液化プラントにパイプラインを通じて送られ、コンデンセートはFPSOに送られる。

CPFの大きさは約150m×約110m、総排水量は14万トンと、半潜水式の海上生産施設としては世界最大規模を誇る。日量最大1,657百万立方フィートのガスの処理が可能である。



図3.2.6 沖合・生産処理施設のイメージ
(出典：INPEX ウェブサイト)

③ 沖合生産・貯油施設(FPSO：Floating, Production, Storage and Offloading facility)
(図 3.2.7)

CPFにて一次処理したコンデンセートは、FPSOで受け入れ、貯蔵し、タンカーへ出荷されるとともに、コンデンセートからガスを抽出、昇圧し、CPFに戻す。

本FPSOは、長さ約336m、幅約59mと大型原油タンカーに匹敵する大きさで、100万bbl超の原油貯蔵能力を持つ。FPSOからは日量8.5万bbl（ピーク時）のコンデンセート

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

の出荷が可能である。



図 3.2.7 FPSO のイメージ

(出典：INPEXウェブサイト)

④ 陸上ガス液化プラント (図 3.2.8)

陸上ガス液化プラントにパイプラインを通じて運ばれた天然ガスから、コンデンセートとLPGを抽出し、残る天然ガスは冷却し液化される。陸上ガス液化プラントでは、LNG年間890万トン、LPG年間165万トンに加え、コンデンセート日量1.5万バレル（ピーク時）を出荷可能である。



図3.2.8 陸上ガス液化プラントのイメージ

(出典：INPEX ウェブサイト)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

なお、本プロジェクトの主要なコントラクター及び設備の製造者は、表 3.2.3の通りである。

表 3.2.3 主要なコントラクター及び設備の製造者

上流事業	
沖合生産・処理施設(CPF)	三星重工 (韓)
サブシー生産システム(SPS)	GE Oil & Gas (米)
FPSO	大宇造船海洋(韓)
フローライン、フレキシブルライザーなどの接続作業等	McDermott (米)
下流事業	
陸上LNGプラント	日揮、千代田化工、KBR社(米) の企業連合
ガス輸送パイプライン(GEP)	Saipem (伊) ・三井物産・住友商事・メタルワン

(出典：INPEXウェブサイトを基に作成)

(3) プロジェクトの工程

イクシスLNGプロジェクトの歩みを以下に整理する。

① 鉱区取得

1998年、公開入札に応札し、鉱区を取得した。

② 探鉱

2000年、第一次掘削キャンペーンにおいてガス・コンデンセートの胚胎を確認し、2003年と2007年、第二次と第三次の掘削を行った。そして、2008年、LNGプラント建設予定地を北部準州ダーウィンに決定した。2011年、連邦政府・北部準州政府からの承認（環境許認可）を取得し、LNG売買契約を締結した。2012年1月に最終投資決定を実行し、鉱区取得から14年余りを経て、2012年12月にプロジェクトファイナンス契約に調印した（プロジェクトファイナンス契約については、6章参照）。

③ 開発

プロジェクト開始の最終決定を受け、主要な施設の建造が開始されるとともに、生産井の掘削が進められた。

a) 陸上ガス液化プラント

2012年5月にオーストラリア北部準州のダーウィンにて、ガス液化プラントの起工式を開催し、建設工事が開始された。2014年7月にはプラント建設用のモジュール搬入が開始され、工事が進められた（図3.2.9、図3.2.10）。



図3.2.9 モジュール搬入の様子



図3.2.10 プラント用大型モジュール

(出典：INPEXウェブサイト)

b) 沖合生産・処理施設（CPF）

2013年1月に建造工事に着手したCPFは、2014年4月から韓国巨済（コジエ）の造船所にてハルブロックや世界各地で製造された機器の本格的な組み立て作業を行い（図3.2.11）、2015年9月に進水した（図3.2.12）。2017年4月に韓国巨済を出航し、イクシスガス・コンデンセート田まで約6,000kmの距離を曳航され、水深約250mの洋上に設置・係留された。



図3.2.11 CPFのハルブロック



図3.2.12 進水したCPF

(出典：INPEXウェブサイト)

c) 沖合生産・貯油出荷施設（FPSO）

2013年6月より建造・建設に着手し、2014年2月にFPSO船体の本格的な組み立て作業を建造地の韓国オクポにて開始した（図3.2.13）。2014年7月には進水が行われた。世界各地から調達した上載機器の据付も2016年5月に終え、2017年7月韓国オクポを出航し、イクシスガス・コンデンセート田まで曳航され、洋上に設置・係留された。



図3.2.13 建造中のFPSO

(出典：INPEX ウェブサイト)

d) サブシー生産システム

サブシー生産システムは、2014年11月に設置工事が開始された。まず、生産物を洋上のCPFに輸送するためのフレキシブルライザー管等を支える構造物であるRSS(Riser Support Structure)*、(図3.2.14)を海底面に設置した。RSSの設置には、深海での作業に特化した専用船が投入された。

2015年6月には、複数の生産井を接続するための装置である、生産マニホールドの設置工事が開始された(図3.2.15)。



図3.2.14 RSS



図3.2.15 生産マニホールドの設置作業

(出典：INPEXウェブサイト)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

e) ガス輸送パイプライン

ガス・コンデンセート田と陸上液化プラントを結ぶ約890kmにわたるガス輸送パイプライン敷設工事は、2014年6月より、港近郊の浅海エリアから開始された（図3.2.16）。半潜水式のパイプライン敷設の専用船「SEMAC-1」を投入し、ダーウィン湾を起点に約164kmの浅海エリアで敷設作業が行われた。また、CPFまでの残る約718kmのパイプラインの敷設は、深海でのパイプライン敷設作業に特化した最新鋭の専用船である「カストローネ」を別途投入し、敷設作業が行われ（図3.2.17）、2015年11月にパイプラインの敷設作業が完了した。

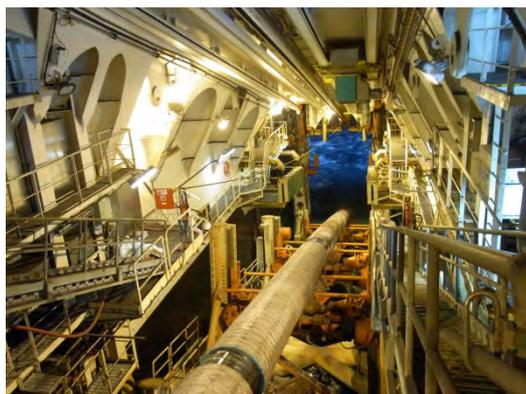


図3.2.16 敷設作業の様子



図3.2.17 深海での敷設作業

(出典：INPEX ウェブサイト)

f) 生産井

生産井の掘削準備は、2014年4月に開始、使用予定の掘削リグ「ENSCO-5006」（図3.2.18）の改良工事をシンガポールで施し、2014年11月には、生産井をコントロールするため海底の生産井頂部に設置される坑口装置（クリスマス・ツリー）が資材基地に搬入されるなどの準備が進められた。

その後、同リグは現地に曳航、設置され、2015年2月より掘削作業を開始した。



図 3.2.18 掘削リグ「ENSCO-5006」

(出典：INPEXウェブサイト)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実況

④ 生産

2018年7月にガス生産を開始し、同年10月にLNGおよびコンデンセート、同年11月にLPGの出荷を開始した。図3.2.19に、プロジェクトの歩みの概要をまとめる。

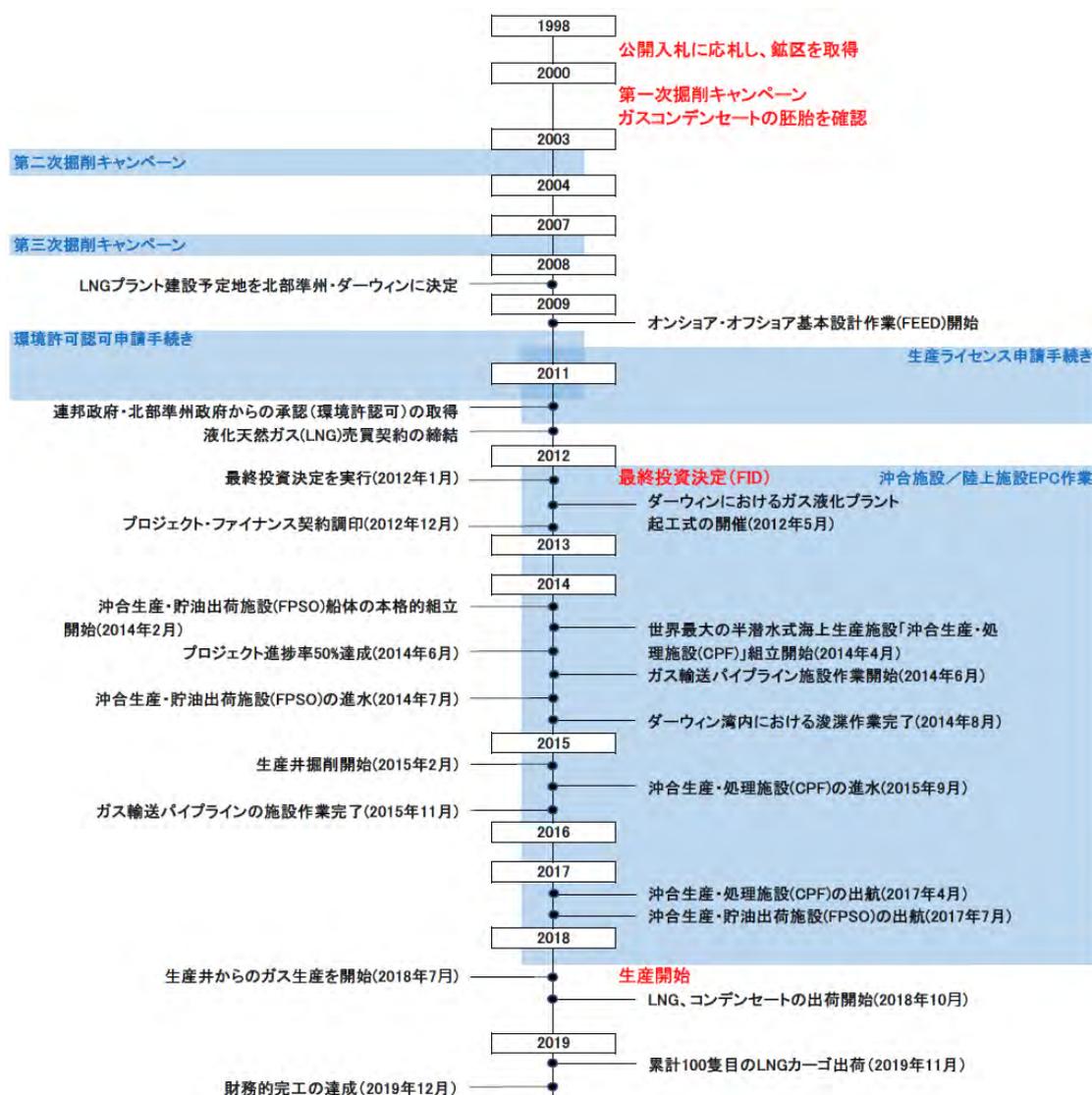


図3.2.19 プロジェクト年表
(出典：INPEXウェブサイトを基に作成)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

3.2.2 国内プロジェクト

日本は、石油・天然ガスの供給をほぼ輸入に頼っているのが現状であるが、国内での石油・天然ガス開発が全く行われていないというわけではない。国内の石油・天然ガス田は、最も安定した供給源であるというだけでなく、我が国の石油・天然ガス開発の技術的な基盤を維持、発展させる上でも重要な場と位置付けられる。このことから、国内でも石油・天然ガス開発の取り組みは進められてきた（図3.2.20）。



図3.2.20 日本の主な油ガス田

(出典：石油鉱業連盟)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

海上の施設は着底式のプラットフォーム（図 3.2.22）1基で、生産された天然ガスは海底パイプライン（外径324mm、長さ41km）で檜葉町に建設されたガス処理プラント（図3.2.23）に送られ、ガスは同プラントに隣接する東京電力株式会社 広野火力発電所に燃料として販売された。磐城沖ガス田の累計生産量は天然ガスが約56億 m^3 （原油換算約3,500万bbl）で、コンデンセート約71,480kl（約45万bbl）であった。



図 3.2.22 磐城沖ガス田のプラットフォーム
（出典：INPEXウェブサイト）



図3.2.23 磐城沖ガス田の陸上プラント
（出典：「中央鉱山保安協議会石油鉱山保安部会（第7回）資料 2007年」経済産業省）

磐城沖ガス田は、2007年に商業生産を終了し、2010年に施設の撤去工事が完了している。

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

磐城沖ガス田の開発の歩みの概要を表 3.2.4に示す。

表 3.2.4 磐城沖ガス田開発の歩み（概要）

1973年	ガス田発見
1981年	プラットフォーム製作開始
1983年	プラットフォーム設置
1984年7月	商業生産開始 生産された天然ガスおよびコンデンセートは、全量を東京電力株式会社の広野火力発電所へ供給
2007年7月	商業生産終了
2009年4月	新日鉄エンジニアリング株式会社がプラットフォームの撤去作業の設計、施工、輸送、揚陸およびプロジェクト全体管理業務を受注
2010年7月	撤去工事完了

(2) 岩船沖油ガス田

岩船沖油ガス田は1983年に発見された国内では最大級の海洋ガス田で、新潟市から北東に約30km、新潟県北蒲原郡中条町の胎内川の河口から沖合に4kmの所に位置している（図 3.2.24）。現在生産が行われている国内唯一の海洋油ガス田であり、1990年に生産を開始し、2012年に原油累計生産量が500万klに達した。現在、石油資源開発株式会社（JAPEX）、日本海洋石油資源開発株式会社（JPO）および三菱ガス化学株式会社の3社で石油・天然ガスの生産が進められている。



図 3.2.24 岩船沖油ガス田の位置
（出典：JPOウェブサイト、一部加工）

岩船沖油ガス田は、新潟県胎内市の胎内川河口沖合の周辺海域に広がっている。探鉱は1958年に始まり、足掛け25年以上にわたった。1982年に当該海域においてエアガンによる

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

物理探鉱調査を実施した結果、石油・天然ガスを貯留可能な構造の存在が予測され、また周囲陸域、海域の地質状況から見て、出油・出ガスの可能性が大きいと判断された。1983年3月に、試掘井「岩船沖SIM-1」で成功を収め、1984年内に3坑の試掘井を掘削した（表3.2.5）。その結果、いずれの試掘井においても出油・出ガスに成功した。

表 3.2.5 岩船沖海域で実施された探鉱作業

1958年	北蒲原重力探鉱
1964年	蒲原沖地震探鉱 岩船沖背斜構造発見
1965年	岩船沖磁力調査
1965年	岩船沖SK-1、2D試掘 西山層より少量の油ガス産出
1969年	日本海エアガン調査
1973年	北蒲原沿岸エアガン調査
1975年	北蒲原浅海エアガン調査 岩船沖背斜鼻状沈降部に貯留岩の発達の可能性発見
1982年	岩船沖南部エアガン調査（精査）
1983-84年	岩船沖SIM-1、2、3、4試掘
1985年	岩船沖三次元エアガン調査

（出典：「岩船沖油田の開発」中林健一を基に作成）

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

1984年10月から、これらの成果を基に地質構造解析、油層評価、埋蔵量計算および経済性検討を実施した結果、岩船沖構造は開發生産に移行できると判断され、1989年3月に開発に移行することを決定した。

1990年に岩船沖プラットフォーム（水深36m、図 3.2.25、図 3.2.26）、海底パイプライン（21km、図 3.2.27）を建設し、並行して開発井を掘削した。岩船沖海底パイプラインは、プラットフォームと新潟市太郎代の陸上基地とを結ぶ、全長21km、直径32cmの海底土中の埋設導管であり、岩船沖において生産された原油および天然ガスは本管の中を通り陸揚げされている。



図 3.2.25 岩船沖プラットフォーム
(出典：JAPEXウェブサイト)

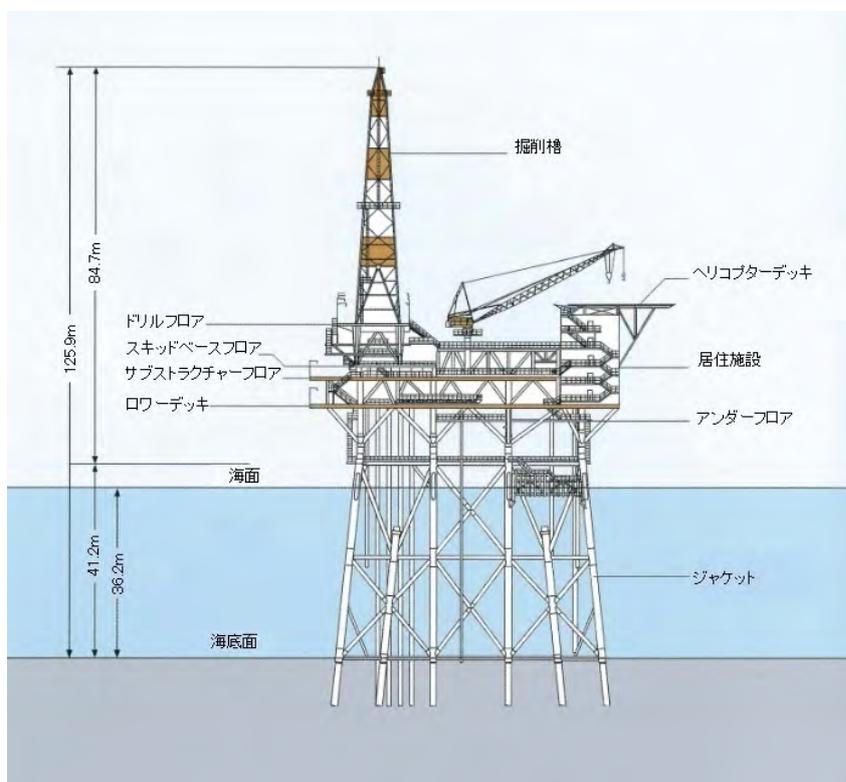


図 3.2.26 岩船沖プラットフォームの構成
(出典：JAPEX等岩船沖油ガス田パンフレット)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

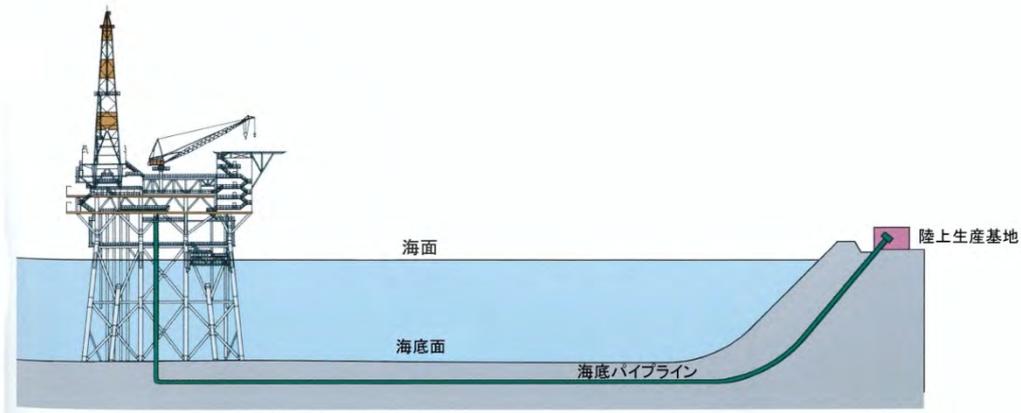


図 3.2.27 岩船沖海底パイプライン
(出典：JAPEX等岩船沖油ガス田パンフレット)

岩船沖油ガス田では、1990年9月15日、第1号井のSIM-B1が開坑され、同年12月5日に石油・天然ガスの生産が開始され、以来安定した操業を継続している。

開発当初は、生産井10坑（油生産井7坑、ガス井3坑）を掘削したが、その後の技術的検討で周辺にも探鉱ポテンシャルがあることがわかったため、2000年から2001年にかけて試掘井2坑を掘削した。その結果、主力生産層の広がりを確認するとともに新たなガス・コンデンセート層を確認するに至ったため、2003年に追加の生産井を掘削した。その後も油ガス層の広がりを確認するための掘削が行われている（図 3.2.28）。

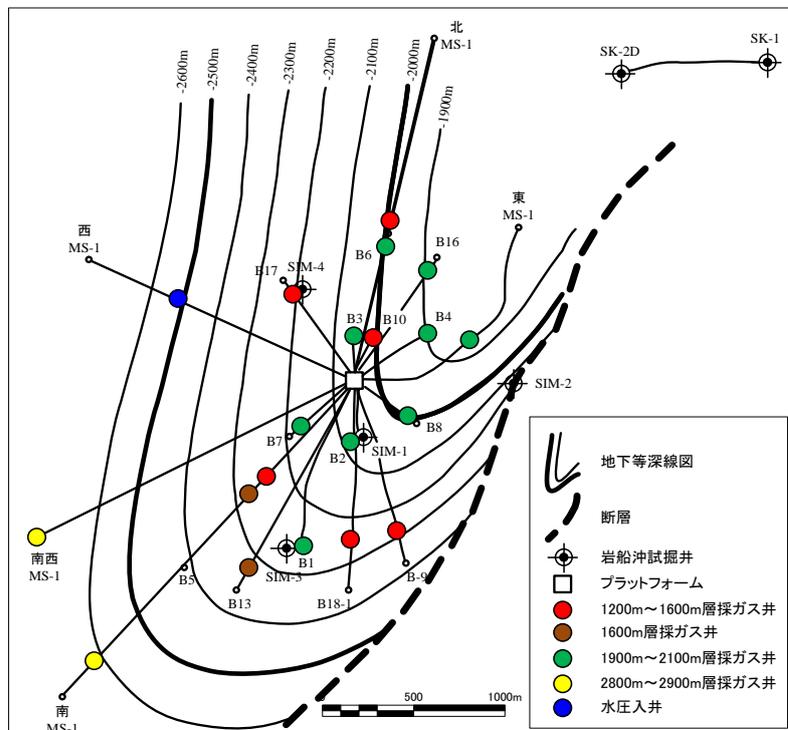


図 3.2.28 岩船沖油ガス田の地下構造図

(出典：JAPEX等岩船沖油ガス田パンフレットを基に作成)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

図 3.2.29に、岩船沖油ガス田における生産物処理の流れを示す。坑井から採取した生産物は、プラットフォーム上のセパレータで、ガス・原油および水に分離し、計量される。計量後にガスと原油は再度混合され、海底パイプラインを經由し陸上生産基地に送られる。

陸上基地処理施設では、スラグキャッチャーと呼ばれる装置やセパレータでガスと原油を分離する。原油はタンクに一時貯蔵された後に、主にタンカーで出荷・販売される。ガスは、グリコールデハイドレーター（ガス成分にグリコールを接触させ残存する水分を除去する装置）と不純物除去装置を經由した後、陸上パイプラインで販売先に送られる。

自噴のみで十分な生産量が得られない場合、回収率を上げるための方策が採られる（3.1.2(4)②原油の回収の項を参照）。岩船沖油ガス田では、自然の排油エネルギーの減退に対応し、生産能力の維持を図るため、人工採油法（ガス・リフト）とガス圧入法が採用されている。ガス・リフトを利用した人工採油法は、自噴できなくなった油生産井に対して、ガスを注入してその圧力を利用して油を噴出させる方法である。これに対し、ガス圧入法では圧力が低下した油層に対してガスを圧入する。これにより油層の圧力を維持すると同時に、ガスで油を押し出すことによって、油生産能力の維持および回収率の増大を図ることができる。

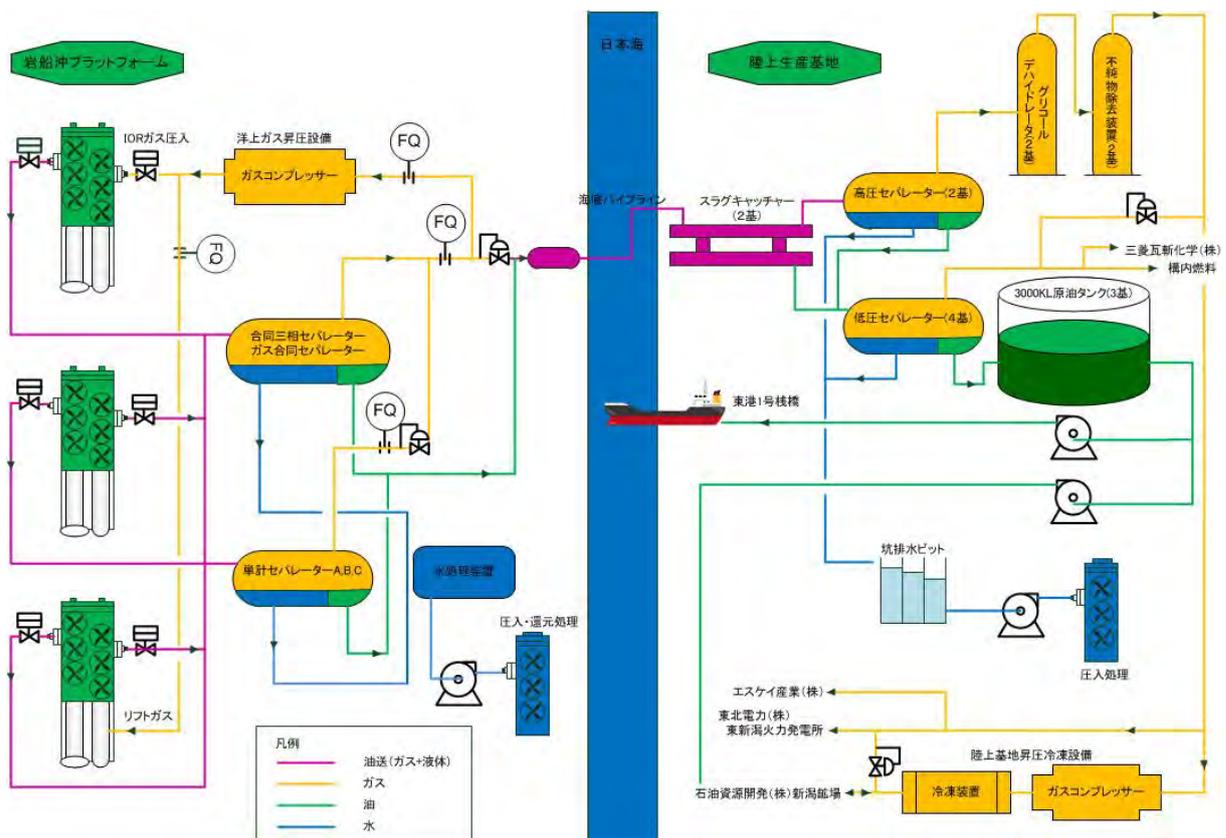


図 3.2.29 岩船沖油ガス田における生産物処理の流れ
 (出典：JAPEX等岩船沖油ガス田パンフレットを基に作成)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

また、図 3.2.30に岩船沖油ガス田陸上生産基地の全景を示す。



図 3.2.30 岩船沖油ガス田 陸上生産基地の全景
(出典：JAPEXウェブサイト)

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

<参考資料>

- 石油技術協会編. 石油鉱業便覧(2013). 石油技術協会, 2014, 960p.
- 山崎豊彦編. オイル・フィールドエンジニアリング入門. 海文堂, 2002, 200p.
- ENEOS. “石油便覧”. ENEOS. <https://www.eneos.co.jp/binran/>, (参照2021-02-22)
- エンジニアリング協会. 平成26年度 海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査報告書、APPENDIX-3 海洋資源開発の技術概要. 2015, p.139
- JOGMEC. 基礎講座テキスト「⑤開発技術」. 2013, 77p.
- 日本物理探査. “物理探査手法”. 日本物理探査.
<https://n-buturi.co.jp/technology/geophy/index.html>, (参照2021-02-22)
- 日本海洋掘削株式会社. “海洋掘削の技術”. 日本海洋掘削株式会社.
<http://www.jdc.co.jp/business/offshore/drilling.php>, (参照2021-02-22)
- JOGMEC. 海洋工学ハンドブック. 第5版, 2010年, (CD - ROM)
- JOGMEC. “原油回収率向上技術分野, 炭酸ガス(CO2)圧入攻法, 二酸化炭素排出抑制に貢献し、原油回収率を高める「炭酸ガス(CO2)圧入攻法」”.
http://www.jogmec.go.jp/oilgas/technology_004.html, (参照2021-02-22)
- 金城秀樹. “海洋油・ガス田開発におけるサブシー生産システムの動向と展望 (三井物産戦略研究所レポート)”. 三井物産戦略研究所. 2015,
https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/10/20/150310m_kinjo.pdf, (参照2021-02-22)
- 伊原賢. “海底生産システムの現状: Subsea Production System (SPS)-どこまで信頼性を保ち、機器を海底に設置できるか”. JOGMEC. 2009,
https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1003850/1003894.html, (参照2021-02-22)
- Sealionshipping. “Sealionshipping”. Toisa DSV.
<http://www.sealionshipping.co.uk/OurFleet/Vessels/Vessel.aspx?vessel=ToisaDSV#next>, (cited 2017-11-21)
- Subsea7. “Data Sheet”. Subsea7.
<https://www.subsea7.com/en/media/datasheets.html>, (cited 2021-02-22)
- Remotely Operated Vehicle Committee of Marine Technology Society. “Remotely Operated Vehicle Committee of Marine Technology Society”. Remotely Operated Vehicle Committee of Marine Technology Society, <https://rov.org/>, (cited 2021-02-22)
- JOGMEC. “国際石油開発帝石のオーストラリアイクシスLNGプロジェクトに係る債務保証 (完工保証) 採択について”. JOGMEC ニュースリリース. 2012-12-18.
<http://www.jogmec.go.jp/news/release/release0458.html>, (参照2021-02-22)
- 国際石油開発帝石. “Ichthys LNG Project”. 国際石油開発帝石.
<https://www.inpex.co.jp/ichthys/index.html>, (参照2021-02-22)
- 国際石油開発帝石. “オーストラリアイクシス LNG プロジェクト 生産開始について”. 国際石油開発帝石. <https://www.inpex.co.jp/news/assets/pdf/20180730.pdf> (参照2021-01-07)
- 国際石油開発帝石. “オーストラリアイクシス LNG プロジェクト 液化天然ガス (LNG) の

第3章 海洋石油・天然ガス開発の実際

出荷開始について”。国際石油開発帝石。

<https://www.inpex.co.jp/news/assets/pdf/20181116.pdf>, (参照 2021-01-07)

- 鈴木郁雄. “Ichthys LNG プロジェクトについて”、石油技術協会誌、85 巻 第2 号 (2020 年3 月) 90～94 頁

https://www.japt.org/files/topics/1882_ext_01_0.pdf, (参照2021-02-22)

- 国際石油開発帝石. “磐城沖ガス田の生産操業終了に伴う関連施設の撤去作業の開始について (お知らせ)”。国際石油開発帝石. 2010,

<https://www.inpex.co.jp/news/assets/pdf/20100428.pdf>, (参照2021-02-22)

- 戸谷裕造、藤崎恭功. “磐城沖プラットフォーム撤去の概要”。石油技術協会誌、77巻 第2 号 (2012年3 月) 105～113 頁

https://www.jstage.jst.go.jp/article/japt/77/2/77_105/pdf, (参照2021-02-22)

- 経済産業省. “わが国の海洋掘削施設等について. II. 国内の海洋油ガス田、磐城沖ガス田、海洋掘採施設等の概要 経済産業省中央鉱山保安協議会石油鉱山保安部会 (第7回) 資料”。2007, 経済産業省.

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g71121d04j.pdf>,

(参照2016-11-11)

- 石油資源開発. “国内油ガス田、岩船沖油ガス田”。石油資源開発.

https://www.japex.co.jp/business/ep_j/domesticfields.html#field07, (参照2021-02-22)

- 中林健一. “岩船沖油田の開発”。石油技術協会誌、56巻 第6 号 (1991年11 月) 534～543 頁

https://www.jstage.jst.go.jp/article/japt1933/56/6/56_6_534/pdf-char/ja, (参照2021-02-22)

- 小林聡、本間章、古屋京、杉田史弥. “岩船沖油ガス田の開発史からみるプロジェクト価値最大化への取り組み”。石油技術協会誌、82巻 第6 号 (2017年11 月) 484～492 頁

https://www.jstage.jst.go.jp/article/japt/82/6/82_484/pdf-char/ja, (参照2021-02-22)

- 三菱ガス化学. “事業紹介・基礎化学品事業部門、岩船沖油ガス田の開発”。三菱ガス化学.

<https://www.mgc.co.jp/company/basic-chemicals/gas-field.html> (参照2021-02-22)

- 日本海洋石油資源開発. “事業案内”。日本海洋石油資源開発.

<http://www.jpo.co.jp/activities/>, (参照2021-02-22)

4 海洋再生可能エネルギー開発の実際

再生可能エネルギーとは、自然界に常に存在する、繰り返し起きる自然現象により得られるエネルギーのことであり、海洋に目を向けると、波、潮流、海流、潮汐など海水を媒体とする運動エネルギーに加え、海水温などの熱エネルギー、塩分濃度などの化学エネルギーも再生可能エネルギーである。また、風のような大気を媒体とする運動エネルギーや、太陽光エネルギーなどの自然エネルギーも海洋空間においては豊富に得られる。

自然の持つエネルギーは、輸送しやすく利用しやすい電気エネルギーへと変換することが一般的である。

洋上の風エネルギーを電気エネルギーに変換する洋上風力発電については、陸上風力発電でエネルギー変換技術の基本形はほぼ確立されており、実用化されている。洋上風力発電では、より規模の大きな発電のための技術開発や、厳しい設置環境に適合させるための技術開発が進んでおり、商業化や実証研究が進展している。

波力、潮流、海洋温度差などを利用した発電に関しては実用的なエネルギー変換の方法を模索している段階にある。

本章では、各発電システムについて概説するとともに、洋上風力発電を主体に開発作業の工程、具体例について紹介する。

4.1 発電システム

4.1.1 洋上風力発電システム

(1) 風車

流体の持っているエネルギーを回転運動に変換する原動機を総称してタービンと呼ぶ。

風力発電では、空気の運動エネルギーを風車すなわち風力タービンによって回転エネルギーに変換し、次に風車の回転エネルギーによって発電機を駆動させ、電気エネルギーに変換している。

風車は昔から動力源として利用されており、さまざま形状がある。羽根の形や風に対する羽根の回転面の向きなどの特徴によって、図 4.1.1 のような分類がされている。羽根の回転軸が風向きに対して水平となる水平軸タイプと、回転軸が風向きに対して鉛直となる垂直軸タイプとに大別し、次に作動原理として羽根に生じる揚力を利用するものと抗力を主に利用するものとに区別している¹⁵。

水平軸・揚力型風車では、プロペラ型風車が、風力発電機としてはもっとも多く利用されている。セイルウィング風車は羽根に三角帆を張ったものであり、オランダ風車も羽根として帆を張ったものである。ともにゆっくりと回転し、主に揚水ポンプの原動機として利用されている。

一方、垂直軸・揚力型風車では、ダリウス型風車や直線翼式（ジャイロミル型風車）が

¹⁵ 揚力と抗力：気流の進行方向に対して飛行機の翼のような形状が、翼の上面と下面に生じる圧力差により受ける垂直方向の力を揚力、気流の進行方向の物体にあたる力を抗力といい、主として揚力で回転力を得る風車を揚力形風車、主として抗力で回転力を得る風車を抗力形風車と呼ぶ。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

ある。ダリウス型風車やジャイロミル型風車の羽根は、ともに飛行機の翼と同じ断面をしており、ダリウス型風車では羽根を弓形に曲げている。これら風車は、小型の風力発電機に使用されることが多い。

垂直軸・抗力型には、サボニウス式、パドル式、クロスフロー式、S型ロータ式などがある。サボニウス風車は円筒を縦半分に切って円周方向にずらした形をしたものである。パドル風車は、風速計によく使われている半球形の受風面を持つ風車である。

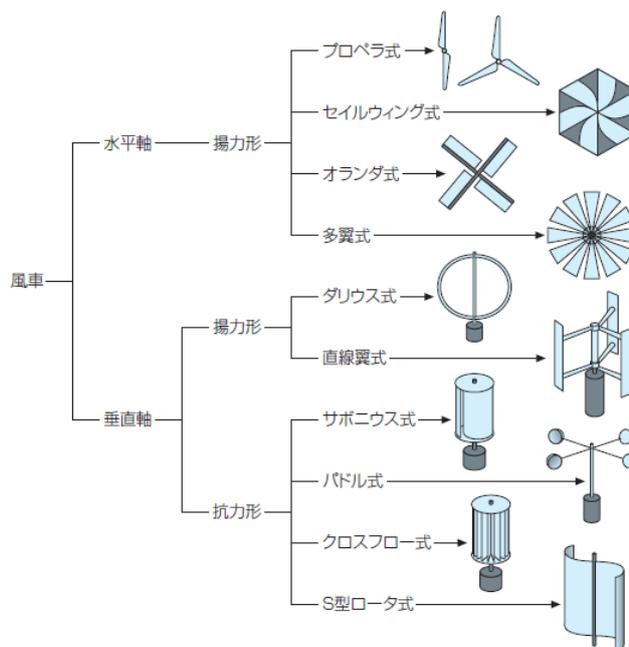


図4.1.1 風車の分類
(出典:西華産業ウェブサイト)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

(2) 風車の構造

プロペラ式風力発電システムを例として、風車の構造を図4.1.2に示す。風力発電システムは、機能ごとに区分すると、①風力エネルギーを機械的動力に変換するブレードなどのロータ系、②ロータの回転動力を発電機へ伝える伝達系、③発電機本体などの電気系、④発電機の運転・制御を行う制御系、および⑤発電機本体などを支持する基礎・構造系からなっている。

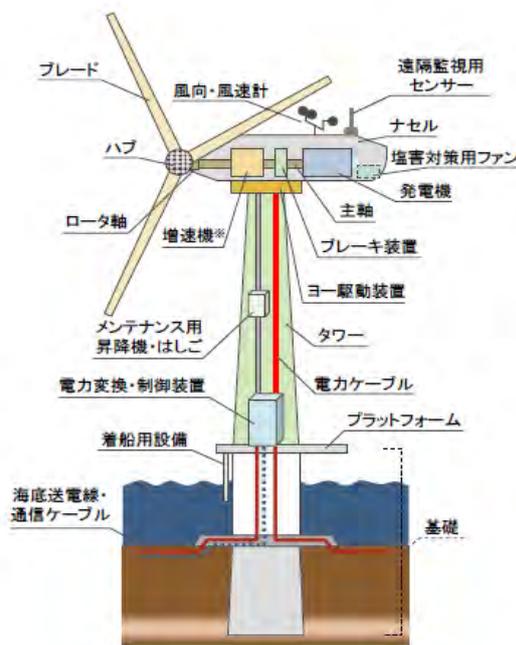


図4.1.2 洋上風車（着床式）の構造例
(出典：「再生可能エネルギー技術白書初版」2012、NEDO)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

それぞれの系に含まれる代表的な構成要素を表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1 プロペラ式風力発電機の構成要素例

構成要素		概要
ロータ系	ブレード	回転羽根, 翼
	ロータ軸	ブレードの回転軸
	ハブ	ブレードの付け根をロータ軸に連結する部分
伝達系	主軸	ロータの回転を発電機に伝達する
	増速機	ロータの回転数を発電機に必要な回転数に増速する歯車(ギア)装置(増速機のない直結ドライブもある)
電気系	発電機	回転エネルギーを電気エネルギーに変換する
	送電ケーブル	発電機からの電力を送電する
	電力変換・制御装置	直流, 交流を変換する装置(インバータ, コンバータ)等
	変圧器	系統からの電気, 系統への電気の電圧を変換する装置
運転・制御系	系統保護装置	風力発電システムの異常, 系統事故時等に設備を系統から切り離し, 系統側の損傷を防ぐ保護装置
	出力制御	風車出力を制御するピッチ制御あるいはストール制御
	ヨー制御	ロータの向きを風向に追従させる
	ブレーキ装置	台風時, 点検時等にロータを停止させる
	風向・風速計	出力制御, ヨー制御に使用されナセル上に設置される
	運転監視装置	風車の運転/停止・監視・記録を行う
支持・構造系	ナセル	伝達軸, 増速機, 発電機等を収納する部分
	タワー	ロータ, ナセルを支える部分
	基礎	タワーを支える基礎部分

(出典: 「風力発電導入ガイドブック」2008年2月改訂第9版、NEDO)

主な機器の特徴を次に記す。

① ブレード

中大型のプロペラ型風力発電機では、ブレードの回転により生じる騒音、ブレードの製作コスト、製作工場から設置場所への輸送などの得失から、3枚翼型が主流となっている。ブレードの材質は、軽量で耐久性のあるガラス繊維強化プラスチック(GFRP)が主として使用され、必要に応じて雷対策、塩害対策などの工夫がされている。

② 発電機

発電機には、交流発電機である誘導発電機あるいは同期発電機が使用される。誘導発電機には出力変動による電圧変動の問題があるが、発電機の構造が簡単で製造コストが低い。同期発電機は電圧制御が可能であり、電力系統(electric(al) power system)*への影響が少なく、コスト高だが発電電力の品質が良く実用機への採用が増えている。

③ 増速機

増速機は、ロータ軸の回転数を交流発電機が要求する入力回転数に増速するための歯車装置で、ブレードと発電機の間置かれる。

④ 運転・制御系

風車は、風速が上がればブレードの回転速度は上がり発電機の出力が増える。しかし、一定の速度を超える強風では、ブレードの回転速度が過大となってブレードの破損事故、あるいは発電機の出力が過大となって発電機の焼損事故等が引き起こされる恐れがある

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

ため、風車の出力（回転）を制御する必要がある。

風車の回転速度を制御する代表的な方法にはピッチ制御があるが、これは風速と発電機の出力を検知して発電機出力が目標値（定格値）となるようにブレードの取付け角（ピッチ角）を変化させ、風車の回転速度を制御するものである。ピッチ制御は、台風等の強風時にブレードのピッチ角をゼロ度、すなわちブレードを風向に平行（フェザー状態）にすることで、ロータを停止させる機能としても利用されている。

その他、風車の回転速度を制御する方法には、ストール（失速）制御がある。ストール（失速）現象とは、流れの中で翼の迎角を大きく（流入角度を大きく）していくと、翼の上面で流れの剥離が起こり、急激に揚力を失う現象のことである。

ピッチ角を固定した風車では、流入する風の風速でブレードへの相対流入角が変わる。一定以上の風速ではストール現象が起き、ブレードが揚力を失うようなブレード形状で、風車の出力（回転）を抑制する方法をストール制御と呼んでいる。

図 4.1.3 は、ピッチ制御・ストール制御の出力特性を模式的に示したものである。一定風速以上になると発電を開始（カットイン）し、発電機定格出力に達する風速以上では、ピッチ制御もしくはストール制御により出力制御を行い、さらにある風速以上では危険防止のため発電を停止（カットアウト）する制御を行う。

ピッチ制御はピッチ角を変えるための油圧装置等が必要となりコスト面では割高になるが、ストール制御に比べて定格風速付近での発電効率を良くすることができ、定格風速を超えた領域においても細かい制御が可能である。

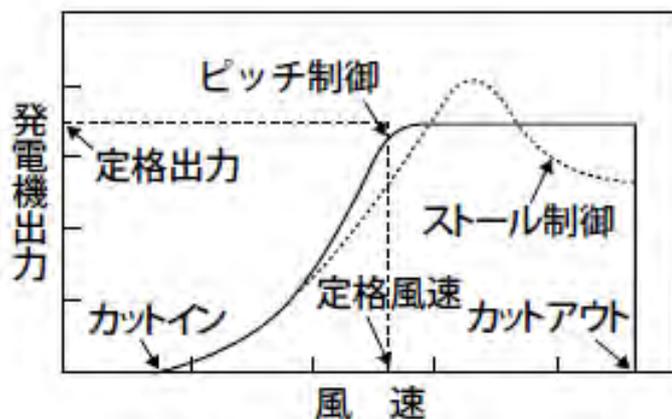


図 4.1.3 ピッチ制御機・ストール制御機の出力特性

(出典：「エネルギー総研レビューNo.9 風力発電における運転制御方法 ピッチ制御・ストール制御」

中国電力)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

風車のロータを風向きに追従させる制御をヨー制御という。

プロペラ型風車には、タワーやナセルの風下側でロータが回転するダウンウィンド型風車とロータがタワーやナセルの風上側で回転するアップウィンド型風車とがある。それぞれの違いを図4.1.4に示す。

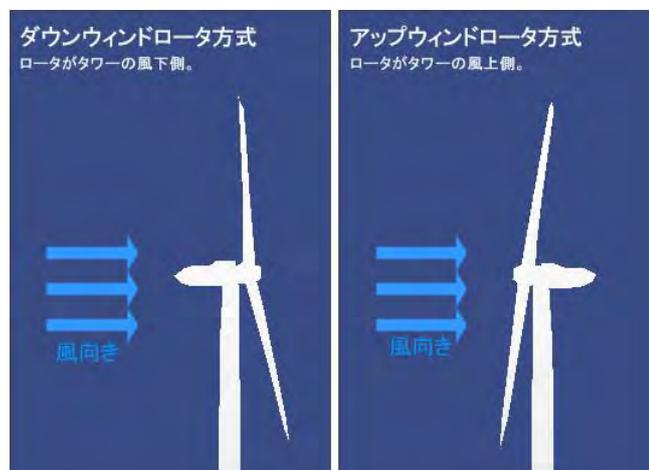


図 4.1.4 ダウンウィンドロータ方式とアップウィンドロータ方式の違い
(出典：日立製作所ウェブサイトを参考に作成)

ダウンウィンド型風車では、ロータに働く空気力そのものが自動的にロータを風向きに追従させる力として働くため、ヨー制御に特別な駆動機構は必要としない。しかし、タワーによる風の乱れを受けるなどのデメリットもあって、タワーの風上側にロータ面が向くようにしたアップウィンド型風車が大型風車の主流となっている。

アップウィンド型風車では、ナセル上に設けた風向センサーで風向を検出し、ロータを風向きに追従するよう旋回させる駆動装置をナセルとタワーの間に設け、ヨー制御を行っている。

その他、ナセル内に安全のため台風時や点検時にロータの回転を停止させるブレーキ装置が設けられている。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

⑤ 系統連系(interconnection of power system)*など電気系

交流発電機の出力を他の発電機に接続された電力系統に並列に繋ぎ送電することを系統連系と呼ぶ。風力発電で発電した電力は、一般には電力会社の電力網と接続し送電することになる。風力発電で発生した電力の電圧や周波数の変動が発生すると電力会社の系統全体の品質に悪影響を及ぼすため、厳しい電力の品質管理が求められる。交流発電機の出力を電力系統に連系する場合、図 4.1.5 に示すとおり、変圧器によって電圧変換のみを行って直接系統に接続する AC リンク方式、発電機の交流出力を一旦コンバータにより直流に変換したのちインバータにより電力系統と同じ周波数の交流に変換する電力変換装置を使用した DC リンク方式がある。DC リンク方式では、風力発電システムに固有の問題である風速変動にかかわらず、電圧や周波数の制御が可能であり、風の強さに応じてもっとも効率の良いロータの回転数において運転できる可変速運転が可能となるため大型機に主に採用されている。

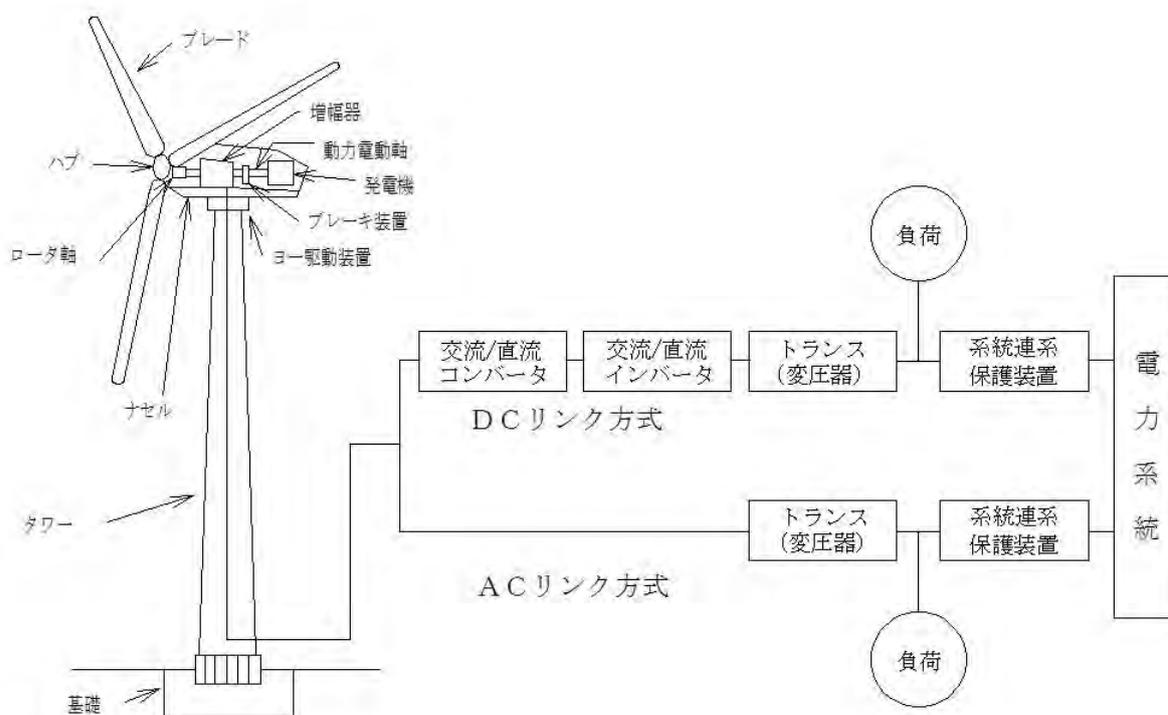


図4.1.5 プロペラ型風力発電システム

(出典：「風力発電システムの設計マニュアル」1996年、NEDOを基に作成)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

洋上風力発電における施設配置概念図を図4.1.6に示す。洋上に風力発電機を設置し、運転監視や系統連系のための施設を陸上に設置、その間を送電ケーブルや海底送電ケーブルで結んでいる。大規模な洋上風力発電施設などでは、大量の電気を効率良く送電するために風車近くの洋上に変電設備を設けて高圧化し送電することもある。

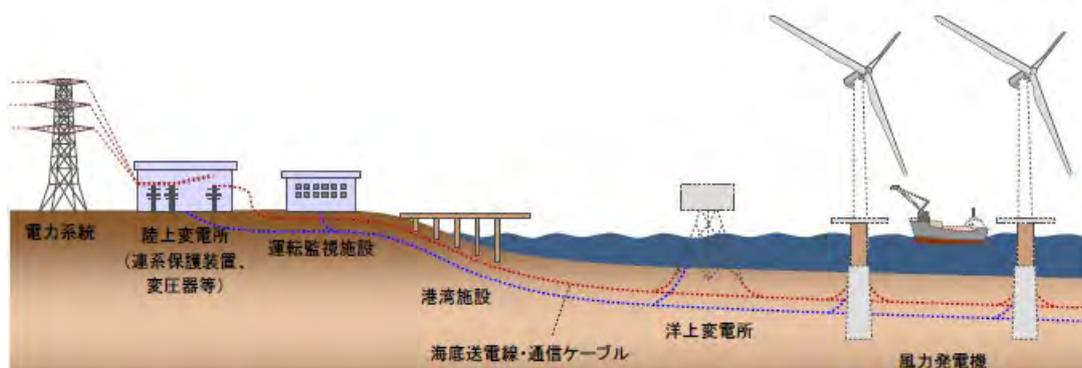


図4.1.6 洋上風力発電システムの施設配置概念図

(出典：「再生可能エネルギー技術白書初版」2012年、NEDO)

⑥ 基礎や浮体

洋上風力の発電施設を支持する構造物には、構造形式として大きく分けると、海底に直接基礎を設置する着床式と、浮体を風車の基礎として利用する浮体式がある。図4.1.7に示すように、およそ水深60mまでは着床式が、60m以上では浮体式が選択されている。

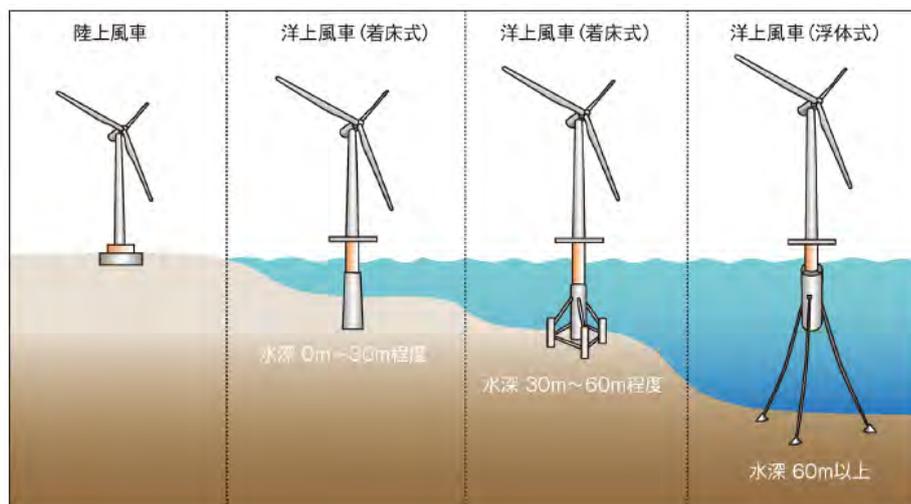


図4.1.7 洋上風力発電施設の支持構造物形式と水深の関係

(出典：「再生可能エネルギー技術白書第2版」2014年、NEDO

“Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine”
(2007, NREL)よりNEDO作成))

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

図 4.1.8 にさまざまな着床式支持構造物の形式を示す。

着床式支持構造物は、モノパイル式、重力式、ジャケツ式（格子梁式）の三つの基本的な形式に分類される。モノパイル式の発展形として3本のパイルを使用するトリパイル式や4本または8本のパイルを使用するドルフィン式（組杭式、図 4.1.8）があり、トリポッド形式と呼ばれるモノパイル式とジャケツ式のハイブリッド形式やハイブリッド重力式と呼ばれるジャケツ式と重力式のハイブリッド形式もある。

水深 30m までの水深では、海底に1本の杭を打ち込むモノパイル式やコンクリートのケーソンを基礎とする重力式が主に用いられている。水深がおよそ 30m~60m 海域では、施工の難易度、経済性からトリポッド式やジャケツ式が有利となる。

例えば、スコットランド近くの北海にあるベアトリスウインドファーム実証プロジェクトでは、水深 45m において2基の 5MW 風車がジャケツ構造物の上に設置されている。国内で稼働中の洋上風車の場合では、酒田港と瀬棚港においてドルフィン式が、鹿島港ではモノパイル式、銚子沖では重力式、北九州沖では重力・ジャケツ式（ハイブリッド式）が採用されている。

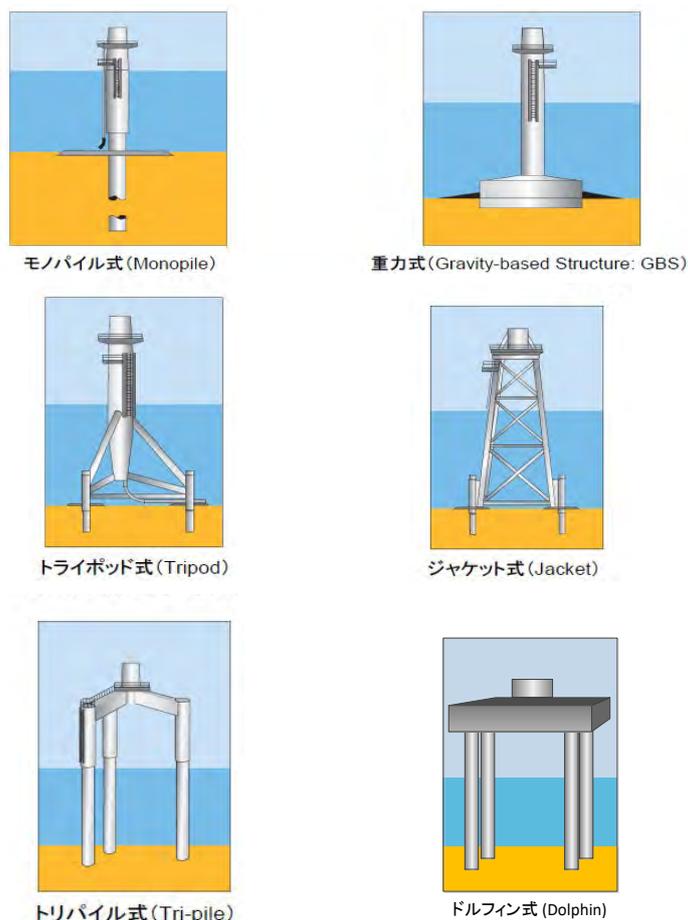


図 4.1.8 着床式洋上風力発電の支持構造物

(出典：「再生可能エネルギー技術白書第2版」2014年、NEDO
“Wind in our Sails” (2011, EWEA)より NEDO 作成、
ドルフィン式のみ 産業概論ワーキンググループ事務局作成)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

風車を設置する場所の水深が60m程度にまで達すると、着床式に比べて浮体式の支持構造のほうがより経済的に有利であるとされている。

浮体式の支持構造は、浮体の形状と係留システムなどによって特徴づけられるが、主なものを図4.1.9に示す。



スパー式

セミサブ式

緊張係留式(TLP)

(カテナリー係留)

(カテナリー係留)

(テンションレグ係留)

図4.1.9 浮体式洋上風力の支持構造の例

(出典：(左) Equinorウェブサイト、(中) GustoMSCウェブサイト、(右) PelaStarウェブサイト)

浮体式支持構造物の代表的な形式としては、スパー式、セミサブ式（セミサブマージブル式：半潜水式）、緊張係留式（TLP：Tension Leg Platform）がある。

スパー式は、浮体を一本の細長い円筒形とし大部分を海中に沈めた構造物である。魚釣りに使用する自立うき（棒うき）が波の中でも安定して立って浮くのと同様の原理で、海面を横切る面積を小さくすることで波の影響を小さくし、重量物をこの浮体の下方に搭載し浮体全体の重心を浮体が受ける浮力の中心より下側とすることで復原力¹⁶を得て、浮体を安定させている。

セミサブ式は、トラスやラーメン構造とした浮体構造物であり、高さのおよそ半分をバラスト¹⁷により海中に沈めることで波浪の影響を小さくしようとする方式である。セミサブ式は、スパー式に比べて水深が浅いところでも設置可能である。

TLPとは、セミサブ型の浮体を後で述べる緊張係留により海底に繋いだものである。

また、代表的な係留システムには、カテナリー係留、緊張係留（TLM：Tension Leg Mooring）がある。懸垂線状に垂らした鋼製のチェーンの自重によって生じる張力によって水平方向の復原力を得る係留方法をカテナリー係留といい、ロープを組み込んだり途中にシンカー（重り）やブイ（浮き）を加えることがある。緊張係留は、海底から浮体

¹⁶ 船やブイなどの浮体は波や風などの外力が働くと傾斜するが、その外力が無くなった時に元に戻ろうとする力

¹⁷ 浮体の重量を増すために積み込む水（海水）などの重量物

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

を結んだ係留ケーブルによって、浮体を海中に引き込むことで得られる余剰な浮力により生じる鉛直方向の張力を利用して水平方向の復原力を得る方式である。

浮体式支持構造による洋上風力発電は現在実証実験の段階にあり、スパー式とセミサブ式は、フルスケール機が稼働し実証実験が行われている。長崎県五島沖ではカタナリー係留を使用したハイブリッドスパー式、福島県沖ではカタナリー係留を使用したコンパクトセミサブ式浮体や、カタナリー係留とV字型セミサブ式、同じくカタナリー係留を使用したアドバンストスパー式が採用されている。¹⁸

(3) 風車の規模、発電量

① 風車の規模

風は質量を有する空気の流れであり運動エネルギーを持っている。その運動エネルギーは運動エネルギーの法則に従って以下のように表される。

$$\text{風の運動エネルギー} = 1/2 \times \text{風の質量} \times \text{風速の2乗} \quad \text{①式}$$

「風の質量」は、所定の断面積を単位時間あたりに通過する空気の質量のことであり、以下で表される。

$$\text{風の質量} = \text{断面積} \times \text{空気密度} \times \text{風速} \quad \text{②式}$$

この②式を①式に代入すると、次式のようになる。

$$\text{風の運動エネルギー} = 1/2 \times \text{断面積} \times \text{空気密度} \times \text{風速の3乗} \quad \text{③式}$$

したがって、以下のことが示される。

- 風車への流入エネルギーは断面積に比例する。
- 風車への流入エネルギーは空気密度に比例する。
- 風車への流入エネルギーは風速の3乗に比例する。

風の運動エネルギーが断面積に比例するので、風力発電機の発電容量は風車の受風面積、すなわちロータの大きさによって決まることが分かる。また、風の運動エネルギーは風速の3乗に比例することから、風速の変動によって発電量が大きく変動することが分かる。

風車の受ける風の運動エネルギーから風車が回転する機械的エネルギーへの変換効率（出力係数・パワー係数）の理論的な最大値は「**BETZの限界**」として約**59%**であることが知られている。実際の風車では空気の抵抗や粘性による損失のため、変換効率は理論値には達せず、プロペラ型では**40%**から**45%**程度である。

¹⁸ 「4.3 プロジェクト事例 ～福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業～」を参照

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

参考までに、図 4.1.10 に理想風車で得られる風力エネルギー密度（単位面積あたりの風力の運動エネルギー）を、図 4.1.11 に各種風車の出力係数を示す。

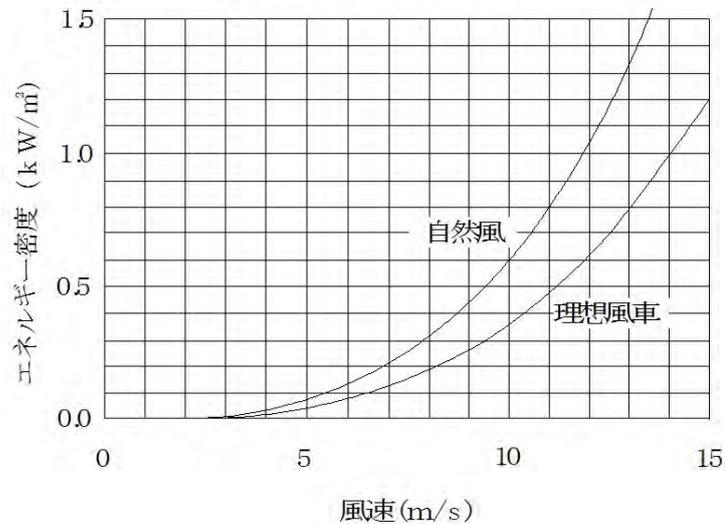


図4.1.10 理想風車で得られる風力エネルギー密度
(出典：「さわやかエネルギー風車入門」1996年、牛山泉を基に作成)

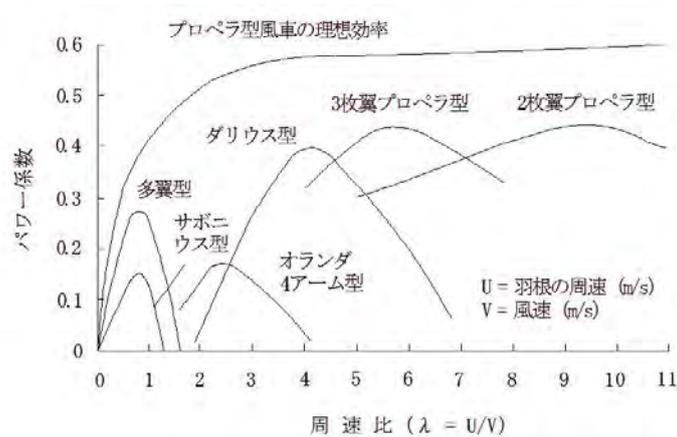


図4.1.11 各種風車の出力係数
(出典：「さわやかエネルギー風車入門」1996年、牛山泉を基に作成)

実際の風力発電システムでは、さらに増速機などの機械系伝達効率や発電機の効率などが加わるため、風力エネルギーから電気エネルギーに変換できる割合、すなわち総合効率はこれらの積となり 30%から 40%程度¹⁹と見積もることができる。

これらを総合すると、プロペラ型の風力発電機においては以下の目安が得られる。

$$\text{風力発電機の出力目安値 (kW)} = 0.4 \text{ (kW/m}^2\text{)} \times \text{風車の投影面積(m}^2\text{)}$$

¹⁹ NEDO 再生可能エネルギー技術白書(第2版)による。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

5MW級の風力発電の場合は、ロータ径は目安として約126mとなる。日本最大の観覧車（葛西臨海公園）でさえ直径は111mであり、風力発電のロータがいかに大きいかかわかる。

② 発電電力量

設置する発電機（風力発電システム）が発電できる電力量を計画段階で推計するためには、設置しようとする風力発電システムの出力曲線（ある機種での風速と発電量の関係）と設置地点の風速出現確率分布を用いて計算することになる。ただし、風速の出現確率分布を得るには長期にわたる観測を必要とする。このため、長期のデータがまだ得られておらず、出現確率分布を把握できていないものの、概略の評価を行わねばならない事情がある場合には、この種の自然現象の出現確率はレイリー分布等で表される確率分布に近いことを利用して推定することもある。

表4.1.2は風車規模と年間発電量の目安を示す。例えば、2000kWクラスの風車が年間平均風速7m/sの地点に設置されたとすると、目安として6788MWh/年の発電量が得られる。これは、平均的な家庭の消費電力量²⁰として、およそ2260世帯に相当する。

表4.1.2 風車規模と年間発電量の目安

風車規模毎の参考発電電力量					
地上高さ30m ² 地点での年間平均風速	4m/s	5m/s	6m/s	7m/s	8m/s
400kWクラス (35m高)	196(4.1)	391(5.1)	635(6.1)	897(7.2)	1,150(8.2)
600kWクラス (50m高)	560(4.3)	1,040(5.4)	1,565(6.5)	2,057(7.5)	2,471(8.6)
1000kWクラス (65m高)	883(4.5)	1,620(5.6)	2,428(6.7)	3,208(7.8)	3,897(8.9)
1500kWクラス (65m高)	1,216(4.5)	2,284(5.6)	3,491(6.7)	4,674(7.8)	5,728(8.9)
2000kWクラス (65m高)	1,877(4.5)	3,456(5.6)	5,167(6.7)	6,788(7.8)	8,195(8.9)

注) 表中()内の数値は風速の高度分布を考慮し修正した風速
(出典: 「新エネルギーガイドブック」2008年、NEDOを基に作成)

4.1.2 その他の再生可能エネルギー発電システム

(1) 波力発電

海上を吹く風のエネルギーが海面に波を起こす。波の持つ運動エネルギーを取り出して発電しようとするのが、波力発電である。

風力発電では、風のエネルギーを風車によって直接回転エネルギーに変換し、発電機を駆動する。これに対して、波力発電の場合には、直接回転運動に変換することができず、一旦別の媒体の運動エネルギーへと変換（1次変換）し、次に発電機を駆動する回転エネルギーを得る（2次変換）方法を取っており、さまざまな方法が試行されている。このた

²⁰ 東京電力管内の2015年平均消費電力量は約250kWh/月。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

め、波力発電は波のエネルギーの1次変換の方法によって、以下のように分類されている。

① 可動物体型 (moving body type)

海面に浮かべた可動物体の動揺を機械的な運動エネルギーに変換し、これを動力源として油圧発生装置 (油圧ポンプ) などを動かして油圧モーターにより回転運動に変換して発電機を駆動する。

可動物体型として分類される波力発電には、以下のようなものがある。

- a) 固定点として利用する大型の浮体にヒンジやガイドなどによって取り付けられた対象海域の波長に比べて小さい寸法とした浮体・受圧板を波の力を受ける可動物体として使用する一点吸収型 (point absorber type)
- b) ヒンジなどで接続された複数の同程度の大きさの浮体を入射波の進行方向に置きそれぞれ異なる波の位相で運動させる。隣り合った二つの浮体の間に生じる角度変化により油圧装置を駆動させエネルギーを取り出そうとする減衰器型 (attenuator 型)
- c) 沿岸域海底に置かれた基礎にフラップをヒンジなどで接続し、沿岸では水粒子の運動は楕円になることを利用してその水平運動成分 (サージ) によりフラップを前後に動かす oscillating surge wave converter 型
- d) 海底等に固定された構造物とその上の波によって上下する浮体からなる submerged pressure differential 型
- e) 海底をピン支持とした振動板の振動に伴い高圧の水が海底のパイプを通して海岸に送られ陸上の水力発電装置を使用する oscillating wave surge converter 型

図 4.1.12 はスコットランドの Ocean Power Delivery 社が開発している「ペラミス」(Pelamis、うみへび) と名付けられた可動物体型波力発電装置の一例である。

全長 180m、直径 4m、総重量約 1350 トン、4 個の円筒形の浮体をまっすぐ三つの関節で接続している。波の中では浮体をつなぐ関節の角度が変化する。関節角度の変化を油圧に変換する。図 4.1.12 (下) に、ペラミスの関節部分の切断図を示す。減衰器型の名前の由来となるラムシリンダーなど油圧機構が装備されているのが見える。発電能力は 1 基あたり約 0.75MW である。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

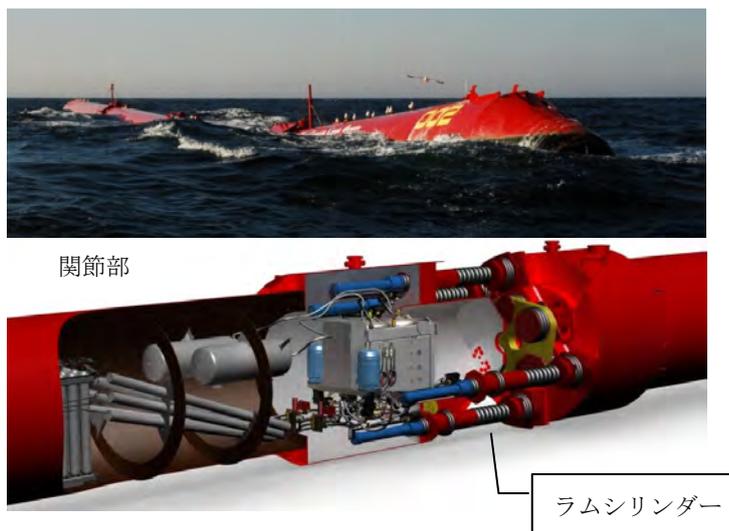


図 4.1.12 ペラミス（可動物体型波力発電装置）

(出典：“Pelamis: experience from concept to connection”, Phil. Trans. R. Soc. A (2012) 370, 365–380, 2011, Richard Yemm et al. 一部加工)

ペラミスとならんで最も実用化に近いものと見られる波力発電装置に、米国の Ocean Power Technologies 社 (OPT) が開発した一点吸収型に分類される「パワーブイ」(Power Buoy)がある。

パワーブイは、図 4.1.13 に示すように、大きくはほとんど水中に没しているスパー型ブイ（赤色部）と、ブイ本体を軸にして上下に可動するフロート（橙色部）から構成され、その相対運動により発電している。

2005 年から 2008 年にかけて、米国ニュージャージー沿岸に定格 40kW 級の初期の試験機による試験を始め、2008 年にスペイン、2011 年にスコットランド・オークニー、2011 年から 2013 年にふたたび米国ニュージャージーでの試験など実績を積み、改良を重ねてきている。

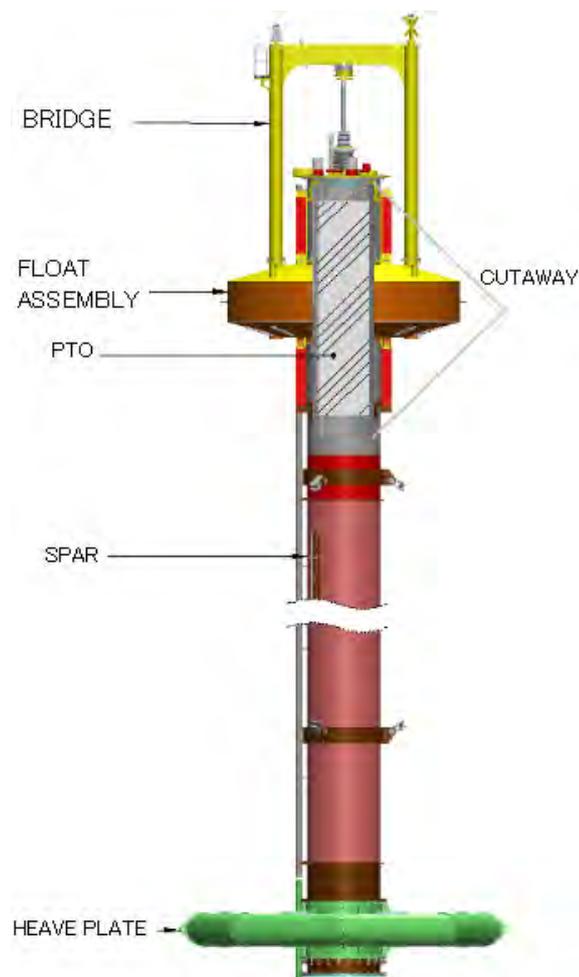


図4.1.13 一点吸収型パワーブイ
(出典：Ocean Power Technologies ウェブサイト、一部加工)

② 振動水柱型（OWC：Oscillating Water Column Type）

下面のみを開放した円筒を海面に差し入れると、波が通過するとき空気室内の海面は少し上下するが、特定の周期の波の中では円筒内の空気が共振を起こして大きく上下する。この現象は水柱振動と呼ばれる。波の通過によって水柱振動が起きている空気室内では内部の圧力は大きく変化し、空気室の上面に穴があれば大きな空気の入りが生じる。そこに空気タービンを置き発電する方式である。空気タービンには往復気流中でも常に一方に回転することができ、形状や構造が簡単であるウェルズタービンが主に採用されている。

図4.1.14は、浮体式振動水柱型波力発電装置の模式図および航路標識ブイの電源装置としての利用例である。小型の波力発電機としては大いに実績がある。

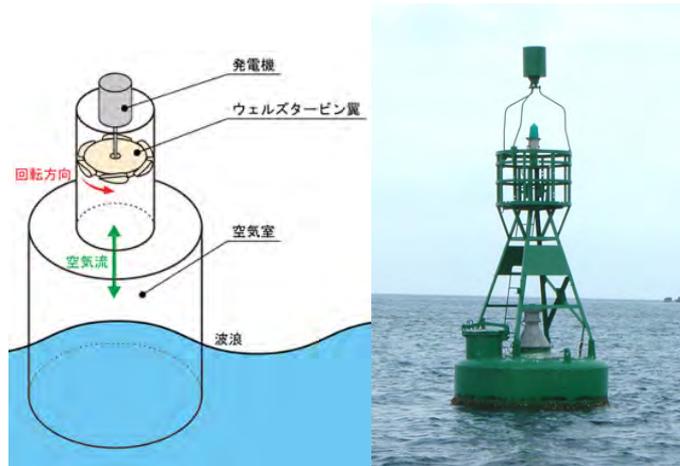


図4.1.14 振動水柱型波力発電装置
(出典：緑星社ウェブサイト)

③ 越波型 (overtopping type)

波は護岸や防波堤などの海岸構造物に衝突すると静水面上よりも高く打ち上がり、また傾斜海岸では遡上して行く。一般には、海岸構造物に衝突し打ち上げた海水が構造物の天端を越えて陸側・堤内に流入する現象を越波と呼ぶ。

越波型とは、越波による海水を貯水池あるいは貯水槽等で一時的に貯留し、貯水面と海面との高低差を利用し、排水路にタービンおよび発電機を設置して発電する方式の波力発電装置である。

図4.1.15はWave Dragon社の開発した浮体式の越波型発電装置の例である。片側が越波を考慮した断面形状となっている浮体本体、浮体本体の両側に設置する大きな波の反射板、そしてこれらを係留する装置から構成されており、浮体上部に貯留した海水を排水する際に発電するための低圧タービンと発電機が、排水路に複数設置されている。

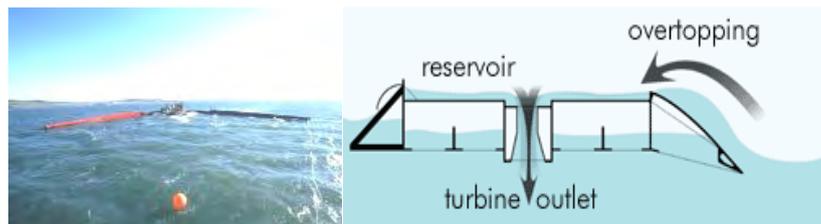


図4.1.15 越波型波力発電装置の例
(出典：Wave Dragon ApS ウェブサイト)

(2) 潮流・海流発電

潮流とは、月、太陽、地球などの天体運動により生じる潮汐現象により海水が移動する流れであり、潮汐と同じように1日1回または2回の周期的な変化をする。

海流とは、太陽熱によって生じる海水や大気の循環によって引き起こされる流れであり、ほぼ流れの向きや速さが一定している。

一般的に潮流は、地形の影響を受けて強まるため比較的浅い海域で見られ、海流は、地球の自転の影響も受けており黒潮やメキシコ湾岸流のように大陸の西側において深い海域を流れている。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

潮流・海流発電システムは、このようにして生じた潮流あるいは海流による海水の流れの持つ運動エネルギーを、流れの中におかれたタービンにより回転エネルギーに変換し、このエネルギーを発電機の前動力として利用し、電気エネルギーを得るシステムである。

潮流・海流発電では、水平軸型タービンの一つであるプロペラ型が多くプロジェクトで採用されている。一方、周期的な潮流の向きの変化に対応できるため、流れの方向に対する依存性が無い垂直軸のダリウス式やサボニウス式などのタービン形式も採用されている。海底に設置した構造物にタービン部を固定する着底式、係留された浮体に取り付ける浮体式に加えて、海底などから係止したタービン部を水中に浮遊させる浮遊式などがある。

潮流・海流発電はまだタービンの高効率化、係留システムの安定性などの諸課題を解決すべく研究開発が進められている状況である。

浮体式海流発電の構想例を図4.1.16に示す。

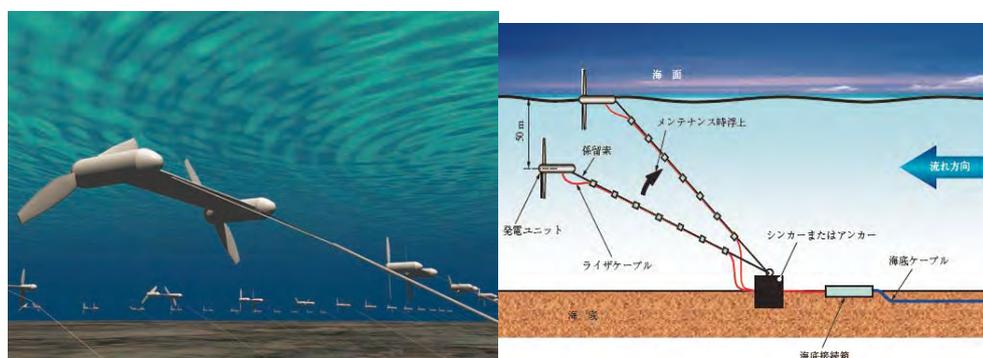


図4.1.16 浮体式海流発電の構想例
(出典：「IHI 技報 Vol.53, No.2」2013、IHI)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

(3) 潮汐発電 (tidal power generation)

潮汐発電とは、潮汐に伴う潮位差を利用してタービンを回し発電する方式で、水力発電の応用技術として古くから実用化されてきた。その技術の起源は11世紀のイギリスの潮汐水車にあると考えられ、産業革命までの約800年間にわたり使われた、長い歴史のある海洋エネルギー装置といわれる。

潮汐の干満を利用する潮汐発電は、潮位差が大きい湾や河口の入り口に堤防と水門を建設しダムを造る。堤防の一部に設けた水門を開閉し、潮の干満を利用し海水の出入りをコントロールすることにより、ダムと海に大きな水位差が生まれる。この水位差をもとに発生させた水の流れにより発電機を回す。

基本的には、高潮位あるいは低潮位の時に水流を作り発電する一方向式が用いられるが、双方の流れに対応して発電する双方向式もある。また、一方向式には満潮時に発電する方法と干潮時に発電する方法の二つがある。

図4.1.17に、双方向式を用いるフランスのランス潮汐発電所の構造原理を示す。1966年11月26日に完成した世界初にして当時の世界最高出力の潮汐発電所であり、ランス川河口に全長750mとなる2基のダムを建設しランス川を完全に堰き止め、平均で8m、最大で13.5mという大きな潮位変化により24基のタービンが最大240MWの電力を生み出している。

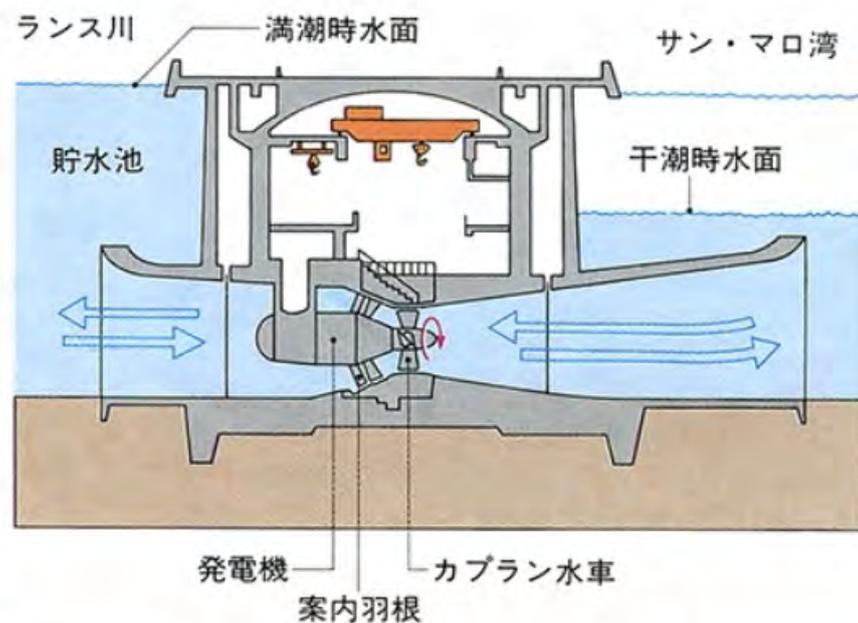


図4.1.17 潮汐発電の構造原理 (ランス)

(出典: 「日本大百科全書 (ニッポニカ)」 小学館)

一方、韓国の始華湖 (シファホ) 潮汐発電所は、一方向式の満潮時発電に分類される。2011年から運転を開始し、設備容量は254MWで世界最大級の規模である。詳細については第7章を参照されたい。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

(4) 海洋温度差発電

海水の温度は、太陽の熱によって温められた表層が高く、深度が深くなるにつれて次第に下がり、約 600m～1000 m の深層部では一定となる、表層の海水と深層部にある冷海水との間には約 10～25℃の温度差がある。例えば、赤道直下での海洋表層水は 30℃近くあるが、水深数百メートルの海洋深層水は 5～10℃であり、20～25℃の温度差がある。この海洋に蓄えられた熱エネルギーを、表層水と深層水との温度差を利用して熱サイクルにより電気エネルギーに変換する発電システムが海洋温度差発電である。

海洋温度差発電に利用される電熱サイクルには、オープンサイクル（開サイクル）とクローズサイクル（閉サイクル）、そしてこれらのサイクルを組み合わせたハイブリッドサイクルの三つがある。

① オープンサイクル

蒸発器・凝縮器・タービン・発電機から構成され、作動流体を循環させる必要がないため作動流体ポンプはない。このシステムでは、蒸発器、タービン、凝縮器内をあらかじめ真空ポンプで真空にしておき、温海水を蒸発器内に導入して蒸発させて水蒸気を得る。この水蒸気を作動流体として、タービンに送り、タービンを回して発電を行う。タービンから出た膨張した水蒸気は凝縮器に入り、冷海水によって冷却され、海に排出される。

このように作動流体である水蒸気はサイクル内を循環しないのでオープンサイクルと呼ばれる。

排出した水は飲料水としても使用できる。

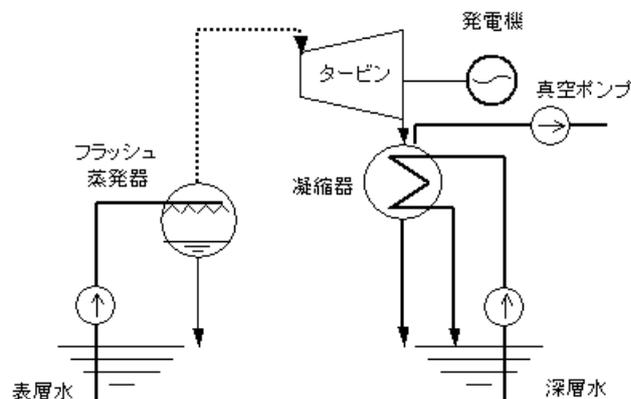


図4.1.18 海洋温度差発電・オープンサイクル
(出典：佐賀大海洋研究センターウェブサイト)

② クローズサイクル

蒸発器・凝縮器・タービン・発電機・作動流体ポンプから構成される。蒸発器・凝縮器・タービンはパイプで繋がれていて、作動流体が封入されている。作動流体は、蒸発器で高温熱源から熱を受け取り、タービンで仕事（発電機を回転させる）を行い、凝縮器で低温熱源へ熱を捨て、再び蒸発器で熱を受け取り、これらの装置を循環する。このサイクルは火力や原子力発電所と同じサイクルであるが、低温熱源として約 5℃の深層水（冷

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

海水)、高温熱源として約 18~30°Cの表層水(温海水)を使うことが異なる。また、作動流体は、各熱源の温度が低く、温度差も小さいことから 15~25°Cで蒸発する物質を使用する。この作動流体には、フロン 22 やアンモニアが適当であるといわれていたが、現在ではアンモニア/水の混合媒体が有望視されている。

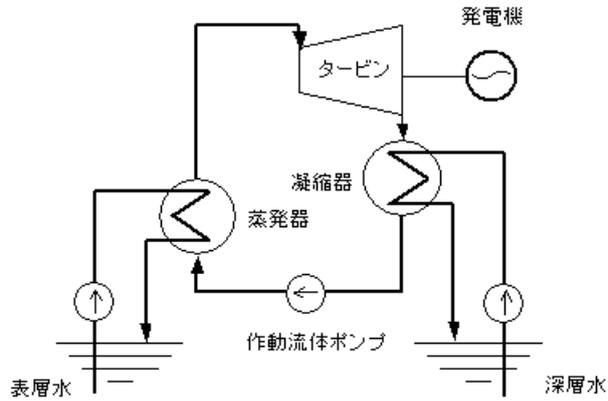


図4.1.19 海洋温度差発電・クローズサイクル
(出典：佐賀大海洋研究センターウェブサイト)

③ ハイブリッドサイクル

クローズサイクルとオープンサイクルを組み合わせたサイクルで、基本構造はクローズサイクルであるが、蒸発器に導入する高温熱源が異なる。

クローズサイクルでは、蒸発器に温海水を直接導入するのに対し、ハイブリッドサイクルでは、一旦オープンサイクルの蒸発器に温海水を導入し、そこで得られた水蒸気を高温熱源として使う。このことから、クローズサイクルに比べ、蒸発器の海水による汚染がなく、性能の低下が防げる。また、オープンサイクル同様、蒸発器から排出された水は、飲料水として使えるため、淡水化技術の応用として考えられている。

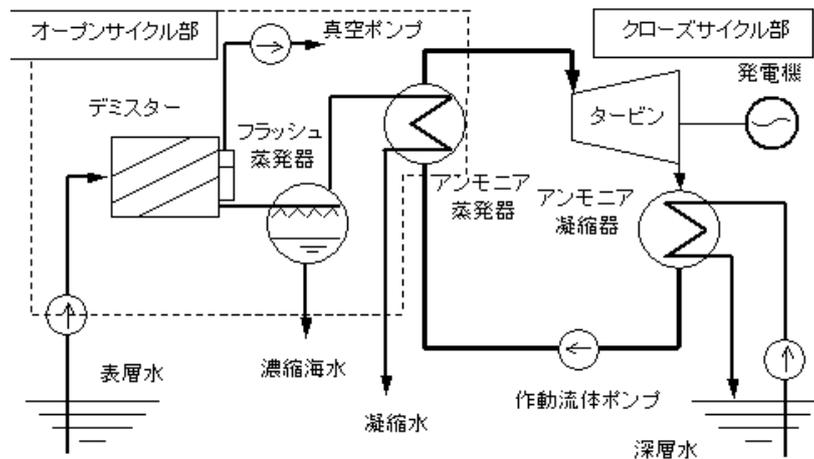


図4.1.20 海洋温度差・ハイブリッドサイクル
(出典：佐賀大海洋研究センターウェブサイト)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

図 4.1.21 は沖縄県久米島に建設された沖縄県海洋温度差発電の実証実験設備であり、2013年4月から本格稼働している。2013年3月の試験運転では、表層水温 23.5℃、深層水温 9.3℃の条件で 3.1kW の発電が確認されている。



図4.1.21 沖縄県海洋温度差発電実証設備（久米島）
（出典：沖縄県海洋温度差発電実証設備ウェブサイト）

4.2 開発の全体工程

4.2.1 工程全体の流れ

海洋再生可能エネルギーの開発工程について、洋上風力発電事業計画の場合を例として概説する。

NEDO が洋上風力発電の導入促進を目的に発電事業者等への参考として作成した「着床式洋上風力発電導入ガイドブック」において例示している洋上風力発電事業計画の流れを図 4.2.1 に示す。

「立地環境調査」や「気象・海象調査」などの実現可能性を探る調査から開始し、「基本設計」、「実施設計」、「建設工事」の各段階へと順次に進め、「事業」を開始する。やがて設備等の寿命等を迎えて「撤去・解体」により計画を終了する。

各段階において必要となる種々の技術的な検討とともに関係する法規の検討を行い、適切な時期に管轄所官庁への許認可手続きを行うことが求められている。また、漁業、海運業などの海域を利用する利害関係者との調整や電力会社との協議も各段階で必要である。

日本において洋上風力発電を計画する場合、立地調査などの計画開始から発電事業の開始までに要する期間として 10 年余が想定されており、同ガイドブックに、図 4.2.2 のようなタイムテーブルが例として示されている。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

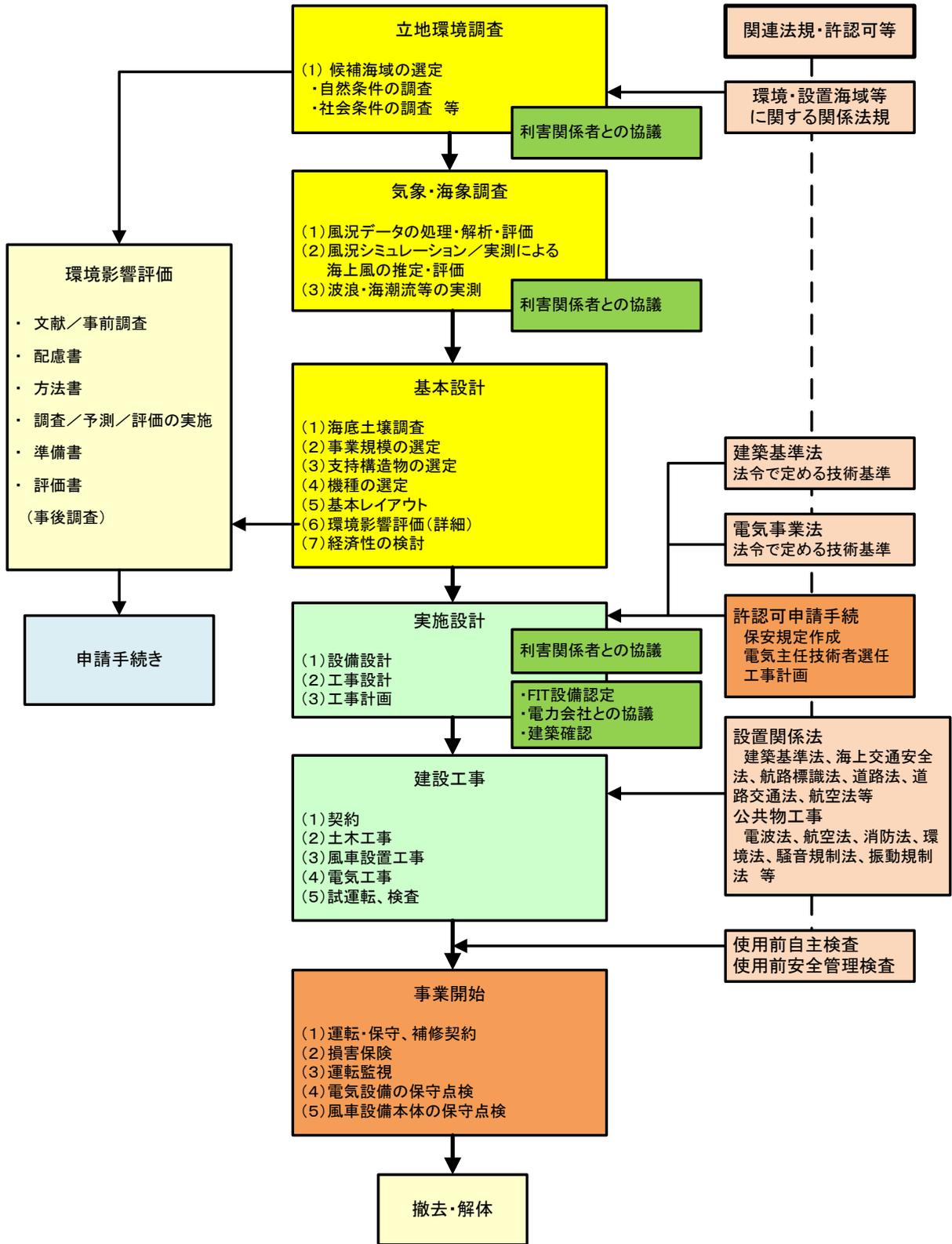


図4.2.1 洋上風力発電にかかわる導入の流れ

(出典：「着床式洋上風力発電導入ガイドブック(第1版)」2015年、NEDOを基に作成)

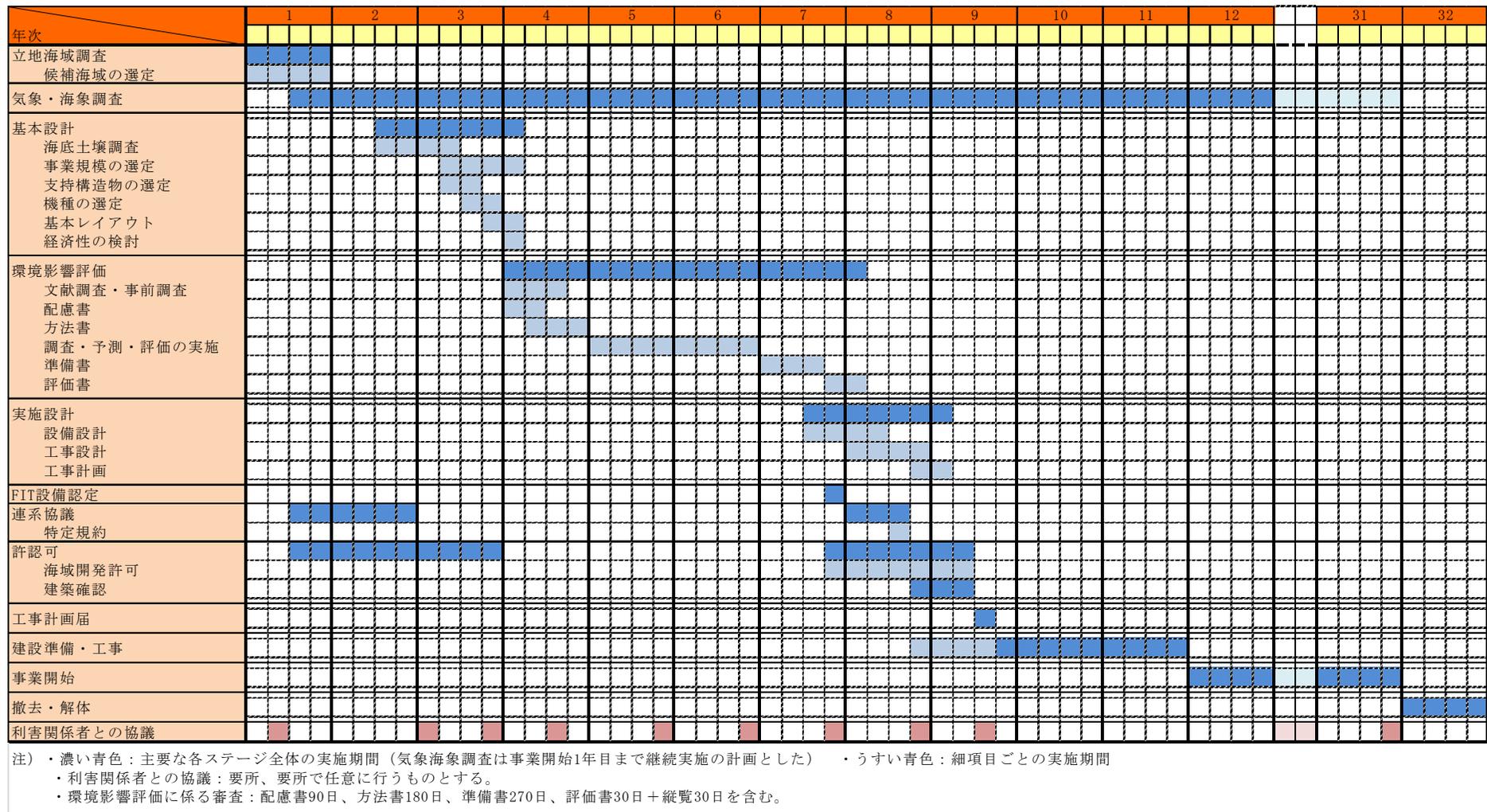


図4.2.2 洋上風力発電導入のタイムテーブルの例
 (出典：「着床式洋上風力発電導入ガイドブック(第1版)」2015年、NEDOを基に作成)

4.2.2 各段階の主なタスク

(1) 立地海域調査

事業を実施しようとする候補地を選定するために、候補海域について自然条件および社会的条件の双方から調査する。

調査すべき自然条件としては、風、落雷、台風、地震、波浪、潮汐、潮流、天候に関する状況、地形（海底地形）、地質、および海洋生物の棲息状況等広範な内容がある。風、波および潮流など自然条件の多くは、国などの諸機関等がそれぞれ観測点を定めて観測を行っており統計資料等が利用可能である場合が多い。これらの中から近隣の観測データを利用し、候補地の状況を推定することが行われている。

風況が風車の運転状況すなわち発電量など事業の成否に直接的に関係することは自明であるが、自然条件は、その他にも設備や施設の設計条件、建設工事の方法、必要工事期間などにも影響を及ぼす。さらには維持管理の内容等にも自然条件が大いに影響するため、自然条件について広範に調査を行う必要がある。

社会的条件の代表例としては、関連法規、関係官庁の許認可と系統連系が挙げられる。

国は海域の利用に関してはさまざまな法令により制約を設けている。主なものとして、自然公園法、自然環境保全法、文化財保護法、景観法、海岸法、港湾法、国土計画利用法などがある。

立地を予定する海域でこれらの関係する法令の規定する条件を満たすかどうか、法令の定める許認可手続きなどについて検討を行う。

建設工事に関しても、建築基準法、電波法、航空法、消防法、騒音規制法、振動規制法、自然環境保全法、海岸法、海上交通安全法、港則法、船舶安全法、航路標識法など関係する法律が多数あり、当該事項の有無や手続きなどを調査する。

(2) 気象・海象調査

立地調査段階では参照可能な付近の地点の気象・海象データを利用して何らかの方法により候補地の気象・海象を推定している。この段階では、候補海域において風況観測塔などの観測設備を設けて実測データを得て、気象状況等に関する推定の精度を上げることがプロジェクトリスクの低減や収益性の正確な評価のためには有効である。統計的に有意な実測データを得るためには、事象の性質や参照可能な付近地のデータの有無等にもよるが、少なくとも数年以上の期間にわたって継続した観測が必要とされる。

(3) 基本設計

気象調査や経済性検討、地域住民との調整などを踏まえて、風車の設置点や施設規模を設定するために行う事前調査を基本設計と呼んでいる。

洋上風車の場合、基本設計の手順は以下のとおりである。

- ① 風車設置点の決定
- ② 風力発電設備規模の設定
- ③ 風車の機種選定
- ④ 海底地形・土質調査

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

- ⑤ 支持構造物の選定、施設の基本配置
- ⑥ 経済性の検討

(4) 環境影響評価

基本設計と並行して環境影響評価を進める。環境影響評価法では、環境アセスメントを実施すべき事業の規模、環境アセスメントを実施する場合の手続き等について定めている。影響を受ける対象を環境要素と呼び、人間や生物などがこれにあたる。また、影響を及ぼす要因としては、騒音、水質（水の濁り）、地形・地質、風車の影（シャドー・フリッカー）、景観などが挙げられる。

表 4.2.1 は法令が定める風力発電における環境影響評価における参考項目の一覧表である。環境影響評価法では、風力発電については総発電量 10,000kW 以上の場合を対象としており、7,500kW 以上で個別に必要と判断されると対象となる場合がある。

着床式洋上風力発電の場合、水中騒音による魚類および海棲哺乳類等の海洋生物への影響、バードストライク、海草・海藻など植物への影響、景観、水の濁り、海底地形の改変などについて検討を行っている。

表 4.2.1 風力発電における環境影響評価にかかわる参考項目の一覧

環境要素の区分		影響要因の区分		環境影響評価法（風力発電）				
				工事の実施			土地又は工作物の存在及び供用	
				工使用資材等の運搬出入	建設機械の稼働	造成等施工等による一時的な影響	地形変化及び施設の使用	施設の稼働
環境として、調査、予測及び評価されるべき環境要素	大気環境	大気質	窒素酸化物	*	*			
			粉じん等	*	*			
		騒音・超低周波音	騒音(20Hz~100Hz)	*	*			*
			超低周波音(20Hz以下)	*	*			*
		振動	振動	*	*			
	水環境	水質	水の濁り		*	*		
		底質	有害物質		*			
		その他	流向・流速					
	その他の環境	地形及び地質	重要な地形及び地質				*	
		その他	風車の影					*
系の生物の保全を旨として調査、予測及び評価されるべき環境要素	動物		重要な種及び注目すべき生息地(海域に生息するものを除く。)			*	*	
			海域に生息する動物			*	*	
	植物		重要な種及び重要な群集(海域に生息するものを除く。)			*	*	
			海域に生息する動物			*	*	
	生態系		地域を特徴づける生態系(陸域)			*	*	
評価を旨とするべき環境要素	景観		主要な眺望点及び観光資源並びに主要な眺望景観				*	
	人と自然との触れ合いの活動の場		主要な人と自然との触れ合いの活動の場	*			*	
詳細の環境への影響を予測及び評価されるべき環境要素	廃棄物等		産業廃棄物			*		
			残土			*		

注) *: 発電所アセス省令の別表五で取り上げられている参考項目と影響要因の区分付け

(出典: 「着床式洋上風力発電導入ガイドブック(第1版)」2015年、NEDOを基に作成)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

(5) 実施設計

実施設計において、洋上風車システムおよび電気設備を主な対象として設備に関する仕様を決め、関連する施設を対象として建築・土木工事に関する設計を行う。

工事内容としては、洋上風力発電設備に関する海底地盤整備、支持構造物の設置、風車の据付、海底送電線などの敷設、洋上変電所の建設などの諸工事があるが、これらが支障なく安全に行われるように適切な工事計画を策定する。工事計画には、工事工程は勿論のこと、その前提となる工事手順や必要な工事機材あるいは資材保管場所等に関する計画、必要な手続き、安全対策などが含まれている。

(6) 建設工事

工事等の契約手続、土木工事、風車設置工事、電気工事および試運転・検査を行う。

(7) 事業開始

運転・保守・補修・損害保険等の契約手続をはじめ、稼働後には運転監視、電気設備および風車設備本体の保守点検を行う。

(8) 撤去

20年間等の稼働後に事業を終了する場合、施設を撤去・解体する。

4.3 プロジェクト事例

プロジェクト事例として、今後の日本の洋上風力発電事業の発展において極めて重要なプロジェクトとして位置づけられている、現在福島沖で進められている「福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」²¹を取り上げる。

4.3.1 概要

着床式洋上風力発電については商用化され、欧州では大規模なウィンドファームが実現している一方、浮体式について現在実証研究段階にある。

浮体式洋上風力発電に関しては、ノルウェーやポルトガルなどで実証研究が行われており、日本でも五島列島沖などで実証研究が行われているが、発電設備1基での実証実験であり、大型のウィンドファーム実現までには、まだまださまざまな課題がある。遠浅で地形的に有利な欧州と比較して、日本では漁業権の調整の問題等もあり、今後洋上風力発電を普及させていくためには、浮体式の技術を導入していくことが欠かせない。

このような状況下、経済産業省が主体となり、浮体式洋上風力発電のビジネスモデルを確立し、大規模浮体式洋上風力ウィンドファームの事業展開を実現することに大きく寄与することを目的として、福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業が開始された。本実証研究プロジェクトは、丸紅株式会社（プロジェクトインテグレータ）、東京大学（テクニカルアドバイザー）、三菱商事株式会社、三菱重工業株式会社、ジャパンマリンユナイテッド株式会社、三井造船株式会社、新日鐵住金株式会社、株式会社日立製作所、古河電気工業株式会社、清水建設株式会社および、みずほ情報総研株式会社の11社からなる「福島洋上風力コン

²¹ 2016年度から「福島浮体式洋上風力ウィンドファーム実証研究事業」として実施している。

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

ソーシアム」が経済産業省の委託により取り組んでいる。

また、本実証研究プロジェクトの展開により、東日本大震災の被害からの復興に向けて、再生可能エネルギーを中心とした新たな産業の集積・雇用の創出を行い、福島が風車産業の一大集積地となることを目指している。

図 4.3.1 に実証実験海域の概略位置を、図 4.3.2 に実証研究プロジェクトで設置される浮体の全容を示す。



図4.3.1 実証研究プロジェクトの概略位置
(出典：丸紅ウェブサイト)



図4.3.2 実証研究プロジェクトで設置される浮体の全容
(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイト)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

4.3.2 研究課題

浮体式洋上風力発電は、世界的にも商業化に向けた取り組みが始まったばかりであり、大規模浮体式洋上ウィンドファームを実現するためには、浮体式風車、浮体式変電設備、送電システム等の技術的な課題が残されている。図 4.3.3 に、本プロジェクトの理念と方針を示す。本実証研究事業では、技術的な課題のみならず、社会的な合意形成に向けた取り組みも進められる。

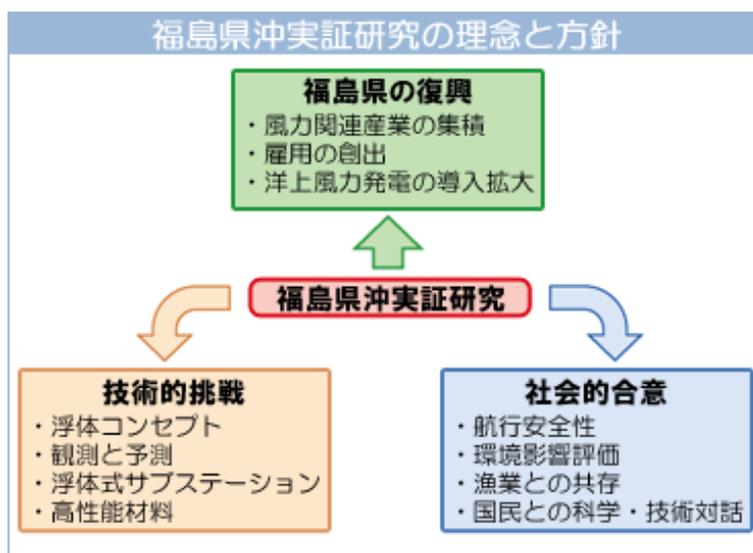


図4.3.3 実証研究プロジェクトの理念と方針
(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイト)

具体的には、以下をテーマに研究に取り組んでいる。

- (1) 世界最大級の 7MW 浮体式風車や世界初の 25MVA 浮体式洋上変電設備および 66kV の大容量ライザーケーブルの開発により浮体式洋上風力発電の事業性の検証を行うこと
- (2) 世界初の浮体式洋上観測システムを構築して浮体の動揺を考慮した気象・海象の観測手法を確立し浮体式洋上風力発電の性能評価を可能にすること
- (3) 複数タイプの風車と浮体を用いることにより各種浮体式洋上風力発電システムの特性および制御効果を明らかにすること
- (4) 浮体式洋上風力発電所の送変電システムの開発
- (5) 腐食および疲労に強い高性能鋼材の開発
- (6) 厳しい環境条件での建設に向けての施工技術開発等の技術課題に挑戦しており、あわせて将来大規模な洋上風力発電を実現するために欠かせない社会的合意形成の在り方、すなわち漁業との共存方策の提案、航行安全性と環境影響の評価手法の確立

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

なお、コンソーシアム・メンバーの主な役割については、表 4.3.1 に示す通りである。

表 4.3.1 コンソーシアム・メンバーの主な役割

コンソーシアム・メンバー	主な役割
丸紅株式会社【プロジェクトインテグレーター】	事前協議・許認可，維持管理，漁業との共存
国立大学法人東京大学【テクニカルアドバイザー】	観測予測技術，航行安全性，国民との科学・技術対話
三菱商事株式会社	系統連系協議，環境影響評価
三菱重工業株式会社	V字型セミサブ浮体(7MW)
ジャパン マリン ユナイテッド株式会社	アドバンストスパー浮体，浮体サブステーション
三井造船株式会社	コンパクトセミサブ浮体(2MW)
新日鐵住金株式会社	高性能鋼材の開発
株式会社日立製作所	洋上変電所の開発
古河電気工業株式会社	大容量ライザーケーブルの開発
清水建設株式会社	海域調査，施工技術
みずほ情報総研株式会社	浮体式洋上風力発電に関する情報基盤整備

(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイトを基に作成)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

4.3.3 事業の流れ

本実証研究事業は、2011年3月に発生した東日本大震災からの復興事業としての側面を持ち、経済産業省の委託事業として進められている。2012年3月に先述のコンソーシアムが委託先として採択され、2011年度内に事業が開始された。

本実証研究プロジェクトは、図4.3.4に示すように、第1期、第2期からなる。

第1期では、2MWのダウンウィンド型浮体式洋上風力発電設備1基と、世界初となる25MVA浮体式洋上変電所1基を事業海域に設置し、風力発電から浮体式の変電所を経由し陸上の電力網へ送電するための海底ケーブルを設置している。2013年3月に建設が開始され、同11月に運転開始、実証実験が始まった。本プロジェクト開始から、運転開始までの間、航行安全を期すための関連団体との協議や地元漁業関係者への説明、内閣府、国交省、環境省、農林水産省などの関係省庁、地元行政への説明を行うとともに、環境アセスメント等の許認可を取得した。

2014年から開始した第2期では、7MWの油圧ドライブ型浮体式洋上風力発電設備（ふくしま新風）が2015年9月に設置を完了し、同年12月から実証運転を開始している。また、2016年に5MW浮体式ダウンウィンド型洋上風車（ふくしま浜風）の設置が完了した。



図4.3.4 プロジェクト計画の概要
(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイト)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実況

表 4.3.2、図 4.3.5～図 4.3.7 に、本実証研究プロジェクトにおける主な施設を示す。

表 4.3.2 本プロジェクトの主な施設

設備名称	設備規模	風車形式	浮体形式	工期
浮体式洋上サブステーション「ふくしま絆」	容量 25MVA 電圧 66kV	変電所 (日立製作所製)	アドバンストスパー ²² (ジャパンマリンユナイテッド製)	第1期
ダウンウィンド型風車搭載用セミサブ「ふくしま未来」	2MW	ダウンウィンド型 (日立製作所製)	4 コラム型セミサブ (三井造船製)	第1期
7MW 風車搭載用セミサブ「ふくしま新風」	7MW	油圧式ドライブ型 (三菱重工業製)	3 コラム型セミサブ ²³ (三菱重工業製)	第2期
5MW 風車搭載用アドバンストスパー「ふくしま浜風」	5MW	ダウンウィンド型 (日立製作所製)	アドバンストスパー (ジャパンマリンユナイテッド製)	第2期

(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイトを基に作成)

	
水面上高さ	約 61m
浮体長さ×幅	約 33m×約 33m
浮体高さ	71m
喫水	50m
変電設備、観測設備、ヘリデッキなどを装備	

図 4.3.5 浮体式洋上サブステーション「ふくしま絆」
(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイトを基に作成)

²²一般的なスパーである細長い円筒形状に安定性を高めるため六角形状の構造を縦に数か所配置した形式で、通常のスパー（円柱式）に加えて喫水が小さいことが特長

²³V字型セミサブとは、V字に配置した二つのローワーハル、その交差部とローワーハルの端部に立てた合計3本のコラムとで構成されるセミサブの形式

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

	
風車ロータ径	80m
ハブ海面高	105m
浮体長さ X 幅	約 58m x 65m
浮体高さ	32m
喫水	17m

図 4.3.6 2MW ダウンウィンド型洋上風車「ふくしま未来」

(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイトを基に作成)

7MW 風車搭載用セミサブ 「ふくしま新風」	5MW 風車搭載用アドバンストスパー 「ふくしま浜風」
	
風車ロータ径：167m ハブ海面高：105m 浮体長さ X 幅：約 85m x 約 150m (V字の一辺が約 106m) 浮体高さ：32m 喫水：17m	風車ロータ径：126m ハブ海面高：86m 浮体長さ X 幅：約 59m x 51m 浮体高さ：48m 喫水：33m

図 4.3.7 第2期の主な建造施設

(出典：福島洋上風力コンソーシアムウェブサイトを基に作成)

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

<参考資料>

- NEDO. 風力発電導入ガイドブック. 第9版, 2008, p.1-201,
<http://www.nedo.go.jp/content/100079735.pdf>, (参照 2021-02-24)
- 西華産業. “製品紹介・発電エネルギー設備、風力発電”. 西華産業株式会社.
<https://seika.com/product/wind/>, (参照 2021-02-24)
- エンジニアリング協会. 平成 26 年度 海洋石油ガス開発技術等に関する動向調査 報告書、
APPENDIX-3 海洋資源開発の技術概要. 2015, p.139
- NEDO. 再生可能エネルギー技術白書. 第2版, 2014,
https://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html, (参照 2021-02-24)
- NEDO. 再生可能エネルギー技術白書初版, 2010,
https://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_2010_index.html, (参照 2021-02-24)
- Governor's School for Agriculture of Virginia Polytechnic Institute and State University.
“Wind Turbines”. Governor's School for Agriculture of Virginia Polytechnic Institute
and State University. <https://govschoolagriculture.com/tag/wind-turbines/>, (cited
2021-02-24)
- European Wind Energy Association (EWEA). “Wind in our Sails - The coming of Europe's
offshore wind energy industry”. European Wind Energy Association (EWEA).
http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Offshore_Report.pdf,
(cited 2021-02-24)
- Equinor. “StatoilHydro to build first full scale offshore floating wind turbine”. Equinor.
2008-05-22.
<https://www.equinor.com/en/news/archive/2008/05/22/hywindfullscale.html>, (cited
2021-02-24)
- GustMSC. “Floating Wind”. GustMSC.
<https://www.gustmsc.com/our-markets/offshore-wind/floating-wind>, (cited 2021-02-24)
- Pelastar. “Pelaster”. Pelastar. <http://pelastar.com/>, (cited 2021-02-24)
- 牛山泉. さわやかエネルギー風車入門 (増補版). 三省堂書店, 2004, 304p.
- Richard Yemm. et.al. “Pelamis: experience from concept to connection”. Phil. Trans. R.
Soc. A (2012) 370, 365-380, doi:10.1098/rsta.2011-03-12,
<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2011.0312>, (cited 2021-02-24)
- Ocean Power Technology. “Offshore Engineering & Design”. Ocean Power Technology.
<https://oceanpowertechnologies.com/offshore-engineering-design/>, (cited 2021-02-24)
- 緑星社. “FTW 型波力発電装置”. 緑星社.
https://www.ryokuseisha.com/product/power_supply/index.html, (参照 2021-02-24)
- Wave Dragon. “Wave Dragon - Principle”. Wave Dragon.
http://www.wavedragon.net/?option=com_content&task=view&id=6, (cited 2021-02-24)
- 川崎重工業. “潮流発電システムの開発に着手”. 川崎重工業.
https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20111019_2.html, (参照 2021-02-24)
- IHI. “水中浮遊式海流発電システムの開発”. IHI 技報, Vol.53, No.2, 2013,

第4章 海洋再生可能エネルギー開発の実際

https://www.ihico.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/dc72a0a3242f4417c2c7b1e4ee4d1306.pdf, (参照 2021-02-24)

- EDF. “Tidal Power”. EDF.
<https://www.edf.fr/en/the-edf-group/industrial-provider/renewable-energies/marine-energy/tidal-power>, (cited 2021-02-24)
- 小学館. 日本大百科全書 (ニッポニカ), 小学館. 1994.
- K-water. “Sihwa-Lake Tidal Power Plant Projects”. K-water. “
https://www.kwater.or.kr/eng/busi/project03Page.do?s_mid=1192, (cited 2021-02-24)
- 佐賀大学海洋エネルギー研究センター. “海洋温度差発電(OTEC)”. 佐賀大学海洋エネルギー研究センター.
https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/ocean_energy/about_otec_0/, (参照 2021-02-24)
- 沖縄県海洋温度差発電実証設備. “沖縄県海洋温度差発電実証設備”. 沖縄県海洋温度差発電実証設備. <http://otecokinawa.com/>, (参照 2021-02-24)
- 福島洋上風力コンソーシアム. “福島洋上風力コンソーシアム”. 福島洋上風力コンソーシアム. <http://www.fukushima-forward.jp/>, (参照 2021-02-24)