

NEDO

再生可能エネルギー

技術白書

第2版

再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編
New Energy and Industrial Technology Development Organization

第1章 再生可能エネルギーの役割

第2章 太陽光発電

第3章 風力発電

第4章 バイオマスエネルギー

第5章 太陽熱発電・太陽熱利用

第6章 海洋エネルギー

第7章 地熱発電

第8章 中小水力発電

第9章 系統サポート技術

第10章 スマートコミュニティ



第6章 海洋エネルギー

6.1	技術の概要.....	4
6.1.1	波力発電の原理・種類.....	4
	(1) 振動水柱型.....	4
	(2) 可動物体型.....	4
	(3) 越波型.....	5
6.1.2	潮流・海流発電の原理・種類.....	6
	(1) 潮流発電.....	6
	(2) 潮汐力発電.....	7
	(3) 海流発電.....	8
6.1.3	海洋温度差発電の原理・種類.....	9
	(1) 発電方式 ¹	10
	(2) 冷水取水管.....	12
	(3) 海洋深層水の複合利用.....	13
6.1.4	システム価格，発電コスト.....	13
	(1) 波力発電・潮流発電のコスト.....	13
	(2) 海洋温度差発電のコスト.....	16
6.2	導入ポテンシャル，導入目標，導入実績.....	17
6.2.1	導入ポテンシャル.....	17
	(1) 波力発電のポテンシャル.....	17
	(2) 潮流・海流発電のポテンシャル.....	21
	(3) 海洋温度差発電のポテンシャル.....	26
6.2.2	導入目標.....	28
	(1) 波力・潮流発電の導入目標.....	28
	(2) 海洋温度差発電の導入目標.....	30
6.2.3	導入実績.....	31
	(1) 潮汐力発電.....	31
	(2) 波力発電・潮流発電の導入実績.....	32
	(3) 海洋温度差発電の導入実績.....	33
6.3	世界の市場動向.....	33
6.3.1	波力発電・潮流発電の市場動向.....	33
	(1) 市場の現状と将来見通し.....	33
	(2) 政策，プレーヤー，技術開発レベルの変遷.....	34
	(3) スコットランドの ROUND 1 プロジェクト.....	35
6.3.2	海洋温度差発電の市場動向.....	36
6.4	各国の技術開発動向.....	37

6.4.1	波力発電・潮流発電の技術開発動向	37
(1)	日本.....	39
(2)	欧州.....	43
(3)	米国.....	52
(4)	カナダ	55
(5)	アジアとオセアニア.....	56
6.4.2	海洋温度差発電の技術開発動向	59
(1)	日本.....	61
(2)	欧州.....	63
(3)	米国.....	64
(4)	アジア諸国.....	64
6.5	世界のビジネス動向	66
6.5.1	波力発電.....	68
(1)	Pelamis 波力発電装置	68
(2)	Oyster 波力発電装置 (Aquamarine Power, 英国)	69
(3)	PowerBuoy 波力発電装置 (Ocean Power Technologies, 米国)	70
6.5.2	潮流発電.....	71
(1)	SeaGen 潮流発電装置.....	71
(2)	OpenHydro 潮流発電装置	72
(3)	Hammerfest Strom 潮流発電装置.....	73
(4)	AK1000 (AR1000) 潮流発電装置.....	74
(5)	ALSTOM (旧 TGL) 潮流発電装置.....	74
(6)	SR250 潮流発電装置.....	75
(7)	Voith Hydro 潮流発電装置	76
6.5.3	海洋温度差発電	77
(1)	Lockheed Martin.....	77
(2)	OTEC International	77
(3)	DCNS	78
6.6	今後に向けた課題と克服方策	79
6.6.1	技術課題の克服	80
6.6.2	高効率化, 低コスト化.....	80
6.6.3	地域との協調.....	80
6.6.4	離島での利用促進.....	80
6.6.5	大規模化および大型化への対応	81
6.6.6	まとめ.....	82

6.1 技術の概要

6.1.1 波力発電の原理・種類

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。波力発電システムは主に次の3種類に区分される。また設置形式の観点から、装置を海面または海中に浮遊させる浮体式と、沖合または沿岸に固定設置する固定式に分けられる。

(1) 振動水柱型

振動水柱型波力発電システムは OWC (Oscillating Water Column) システムともいい、装置内に空気室を設け、海面の上下動によって生じる空気室内外の圧力差により空気タービンを回転させる方式である。構造が簡素で、台風などの異常波浪に対する構造物の対策が比較的、採りやすく、波力発電の中では安全な形式とされている。

日本で開発されてきた波力発電装置にはこの方式が多く採用されており、1965年に海上保安庁に採用された益田式航路標識用ブイは、小型ながら最初に実用化された浮体式の振動水柱型装置(最大出力30W~60W)である(図6-1右)。

振動水柱型波力発電システムの空気タービンには、波によって生じる往復気流中でも常に一方方向に回転するように設計されたタービンとして、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。

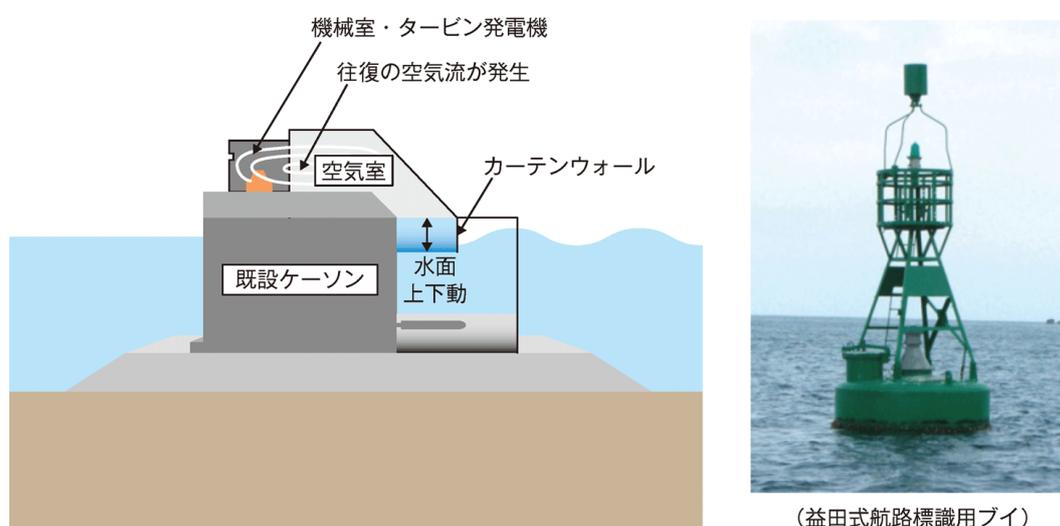


図6-1 振動水柱型波力発電システム (左：固定式 右：浮体式)

出典：三菱重工鉄構エンジニアリング資料，緑星社ホームページより NEDO 作成

(2) 可動物体型

可動物体型波力発電システムは、可動物体を介して波の作用による運動を機械的エネルギー等に変換して発電するシステムであり、沖合に設置される波力発電装置の主流である。

浮遊構造物で水面や水面下の浮きを利用して波のエネルギーを吸収し、機械的エネルギーに変換するポイントアブソーバー式(代表例：三井造船波力発電装置)や、複数の浮き材を並べて互いに相対動可能に接続した筏体で波のエネルギーを吸収し、回転運動に変換して発電機を回転さ

せるラフト式（代表例：Pelamis 波力発電装置）、振り子構造で波の動きによって高圧水を発生させ、陸上水力発電タービンへ送り込む振り子式（代表例：Oyster 波力発電装置）などが開発されている（図 6-2）。

NEDO による 2011 年度海洋エネルギー技術研究開発では、機械式波力発電システムの研究開発が進められている。

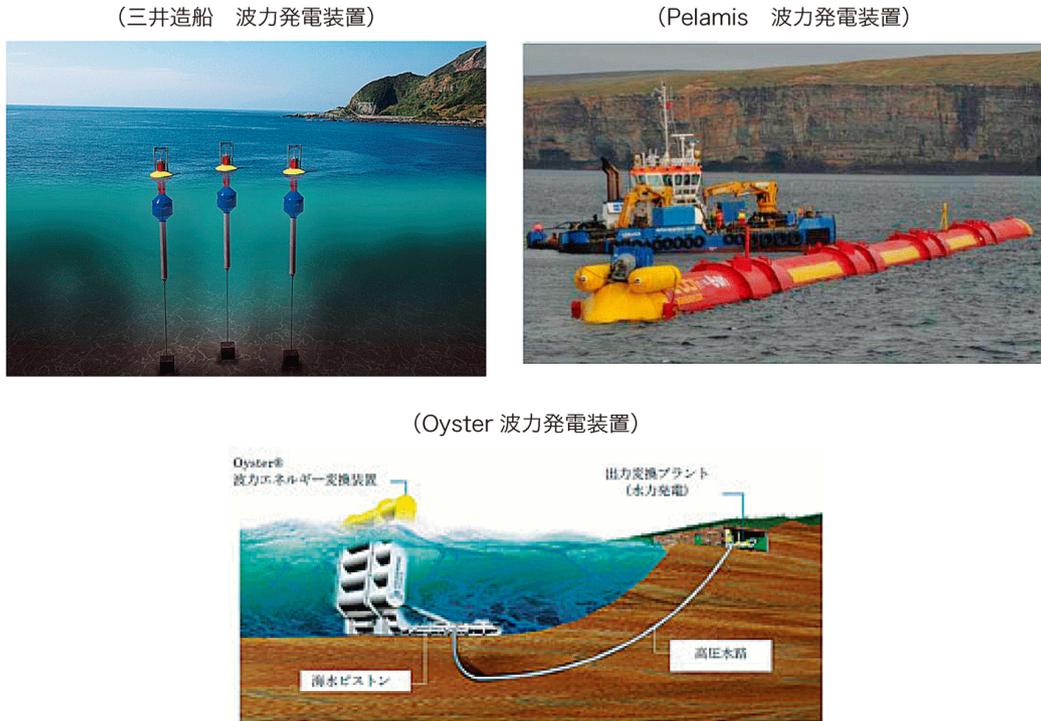


図 6-2 可動物体型波力発電システムの例

出典：三井造船資料，Pelamis Wave Power 資料，Aquamarine Power 社資料

(3) 越波型

越波型波力発電システムは、波を貯水池などに越波させて貯留し、貯水面と海面との高低差を利用して海に排水する際に、タービンを回して発電する方式である（図 6-3）。

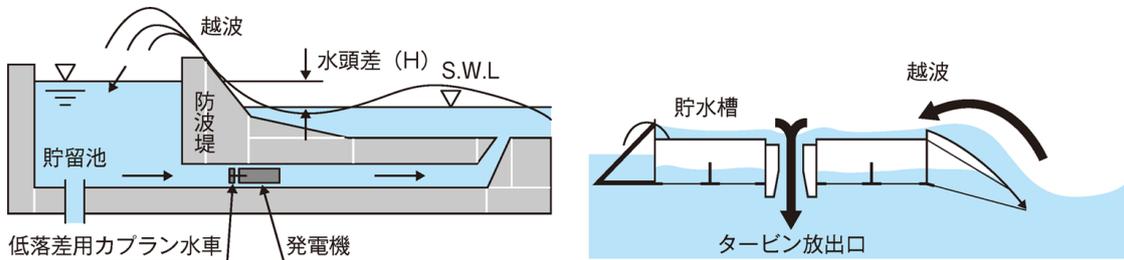


図 6-3 越波型波力発電システム例（左：固定式 右：浮体式）

出典：「海洋資源利用に関する調査」（2006，海上技術安全研究所），Wave Dragon ApS ホームページより NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

6.1.2 潮流・海流発電の原理・種類

潮流は、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るため、発電に利用するには予測が可能であり信頼性の高いエネルギー源となる。流速に対する地形の影響が大きく、海峡や水道など流路の幅が狭い地点では流速が速くなる。なお、潮の干満差の位置エネルギーを使った発電は「潮汐力発電」と定義され、潮流発電とは区別される。また、海流は、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。流速や流量、および流路は季節などによって多少の変化はあるが、大きくは変わらず、幅 100km、水深数百 m 程度と大規模で安定したエネルギー源である。

(1) 潮流発電

潮流発電は、潮流の運動エネルギーを利用し、一般的には水車によって回転エネルギーに変換して発電する方式である。

1970年代から技術開発が行われてきたが、これまではプロジェクトや事業の実現可能性を調査検討するフェージビリティスタディや小規模の実験段階にとどまっていた。しかし、近年になり、予測可能で安定的な再生可能エネルギーとして注目が集まっている。

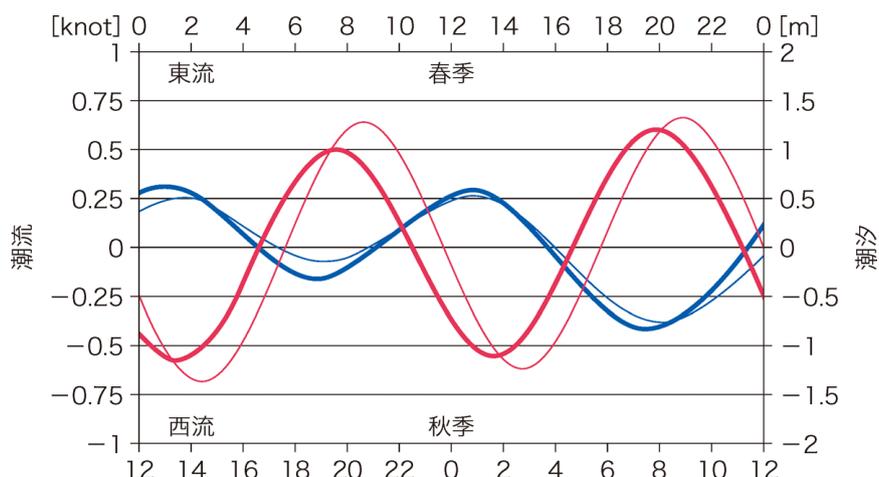


図 6-4 潮流および潮汐曲線（春秋季）

太線：佐世保港口の潮流 細線：佐世保港の潮汐
赤線：朔望（大潮期） 青線：両弦（小潮期）
出典：国土交通省資料より NEDO 作成

内湾や海峡では、海水が一方向に流れ出してから、流速が次第に大きくなって極大に達した後、次第に小さくなって停止する。次いで反対の方向に流れ始め、極大に達した後、再び停止する。このように、潮流が流向を転ずることを「潮流の転流」という。また、転流に際して、海水がほとんど流れないときのことを「憩流」という。多くの場所では、1日に4回の転流があるが、場所によっては2回の転流しかないこともある。2つの転流の間にある最強の流速は、月齢によって変化する。外洋などの開けた場所では、憩流が存在しない。

潮流発電システムのエネルギー変換装置には、一般的に水車が用いられ、海水の流れる運動エネルギーをタービンの回転を介して電気エネルギーに変換する。タービンは風力発電と同様、回

回転軸の方向によって「水平軸型」と「垂直軸型」に分けられる。現在は、水平軸型を採用するシステムが主流となっている。

1) 水平軸型タービン

海水の流れに対して水平な回転軸に取り付けた2枚もしくは3枚の羽根(ブレード)によって、潮流の運動エネルギーを回転運動に変え、発電機を回して発電する方式である。最も代表的な方式はプロペラ式であり、多くのプロジェクトで採用されている。

2) 垂直軸型タービン

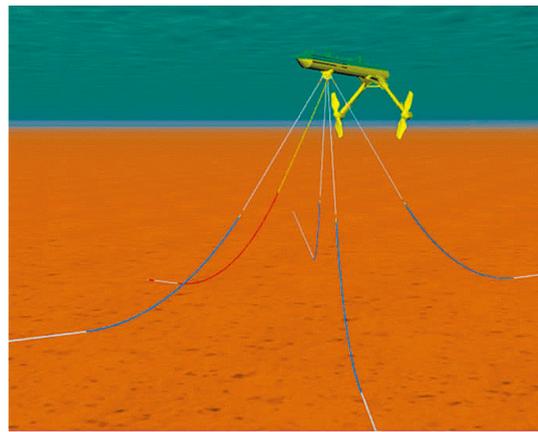
回転軸が海水の流れに対して垂直であるタービンで、揚力を利用したダリウス式や抗力を利用したサボニウス式が代表的である。流れの方向に対する依存性が少なく、一般的にブレードの製造がプロペラ式に比べて容易であるなどの利点がある。

また、潮流発電の設置形式には、海底に固定する海底設置型と浮体型がある(図6-5)。

NEDOによる2011年度海洋エネルギー技術研究開発では、着定式潮流発電システムの研究開発が進められている。



(水平軸・海底設置型)



(水平軸・浮体型)

図6-5 潮流発電システムの設置形式(左:着定式 右:浮体式)

出典:川崎重工業資料, Scotrenewables Tidal Power ホームページ

(2) 潮汐力発電

潮流発電と同様、海水の流れを利用した発電技術として、潮汐力発電と海流発電が挙げられる。

潮汐力発電は、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、水力発電の応用であるため、古くから実用化されている技術である。水力発電と同様の原理を用いて、潮位差が大きい湾や河口の入り口などにダムと水門を建設し、水位差によって発電する。基本的には満潮時に貯水し、干潮時に水門を開いて水を放出することによって発電機を回して発電する。主に干潮時の一方向の流れにのみ発電する方式と、タービンが双方向の流れに対して回転し、交互に発電できる二方向方式がある。また、ポンプによる揚水も併せて行い、稼働率を向上させる方式も実施されている。潮汐は大潮のときと小潮のときで潮位差が異なるが、周期的な現象であり、時刻の予測ができるため、発電計画を立てやすい点が大きな利点である。ただし、大規模なダムを建設することによる周辺海域への影響などには、十分な注意が必要である。

第6章 海洋エネルギー

潮汐力発電プラントとして最も有名なものは、40年間の運転実績を誇るフランスのランス潮汐力発電所である。1967年から発電を開始しており、最大定格出力は240MW、年間の発電量は約600,000MWh、平均出力は約68MWである。

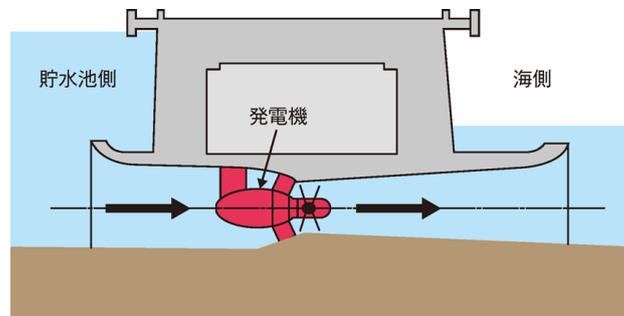


図 6-6 潮汐力発電システムの例

出典：エネルギー総合工学研究所資料より NEDO 作成

(3) 海流発電

海流発電は、一般的にエネルギー変換装置として水車を用い、海流の運動エネルギーをタービンの回転を介して電気エネルギーに変換する発電システムである。海流は流れの強い地点は陸地から数 km 以上離れており、水深が深いため、装置の設置や管理が難しいこと、送電距離が長くなることなど、実用化に向けて多くの課題が残されている。

NEDO による 2011 年度海洋エネルギー技術研究開発では、水中浮遊式海流発電システムの浮体係留システムの安定性の向上、メンテナンス性の高度化やタービン発電機の高効率化の要素技術の開発を進めている（図 6-7）。

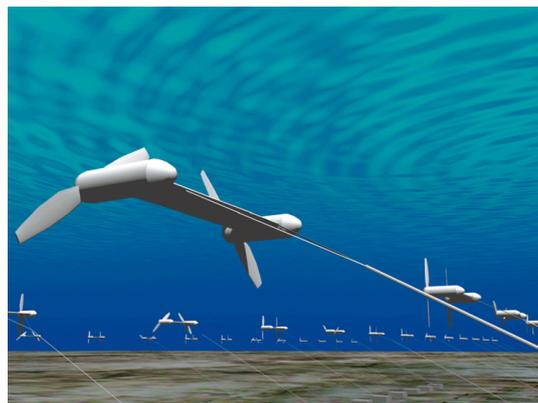


図 6-7 水中浮遊式の海流発電システム

出典：IHI ホームページ

6.1.3 海洋温度差発電の原理・種類

海洋温度差発電（Ocean Thermal Energy Conversion : OTEC）は、表層の温かい海水（表層水）と深海の冷たい海水（深層水）との温度差を利用する発電技術である。

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移動する。移動によって、周辺の海水との間に温度差が生じ、密度が相対的に大きい極地方からの冷たい海水は深層へと沈み込んでいく。この表層水と深層 600～1,000m に存在する 1～7℃程度の深層水を取水し、温度差を利用して発電する。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、ベース電源として使え、計画的な発電が可能となる。

図 6-8 に熱帯および亜熱帯地域の海水の垂直温度分布を、図 6-9 に表層と深層 1,000m との海水温度差分布を示す。赤道近くでは 24℃と特に高いことがわかる。

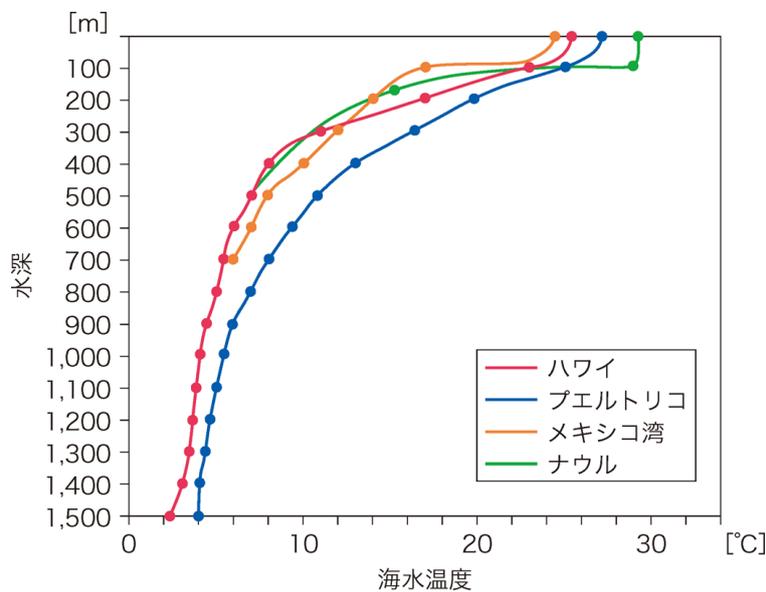


図 6-8 熱帯および亜熱帯地域の海水の垂直温度分布

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページより NEDO 作成

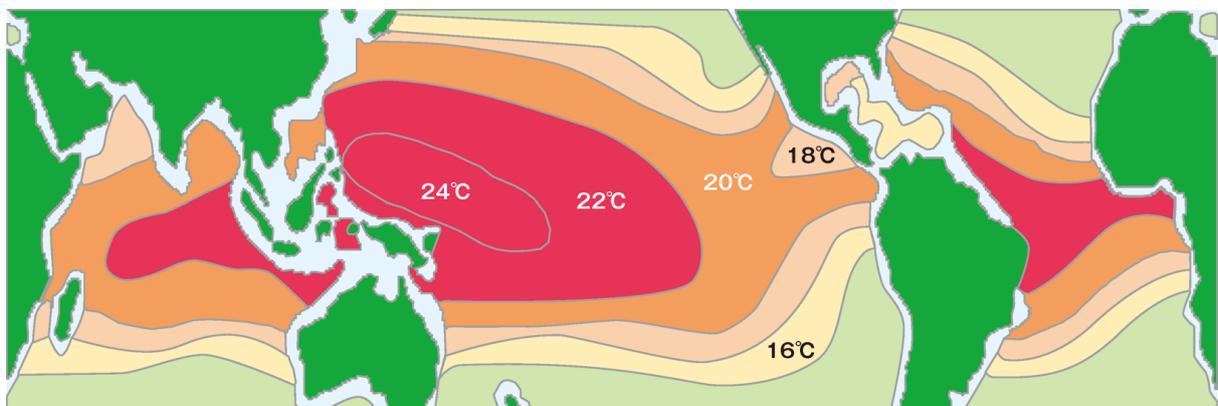


図 6-9 表層と深層 1,000m との海水温度差分布

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページより NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

(1) 発電方式¹

海洋温度差発電システムは、蒸発器、タービン、発電機、凝縮器、ポンプで構成し、各機器はパイプで連結されている。主な発電方式として、オープンサイクル、クローズドサイクル、ハイブリッドサイクルの3種類がある。

1) オープンサイクル

オープンサイクルは、主に蒸発器、タービン、発電機、凝縮器で構成する。システムの構造上、作動流体を循環させる必要がないため、作動流体ポンプは存在しない。オープンサイクルでは、表層水から作り出した水蒸気を作動流体として用いる。蒸発器、タービン、凝縮器の中は、真空ポンプによってあらかじめ減圧されており、表層水を蒸発器に導いてフラッシュ蒸発させる。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する。タービンから出る膨張した水蒸気は凝縮器に入り、汲み上げられた深層水によって冷却され、海に排出される。排出された水は飲料用としても使用できる。本システムは、作動流体がサイクル内を循環しないため、オープンサイクルと呼ばれる。

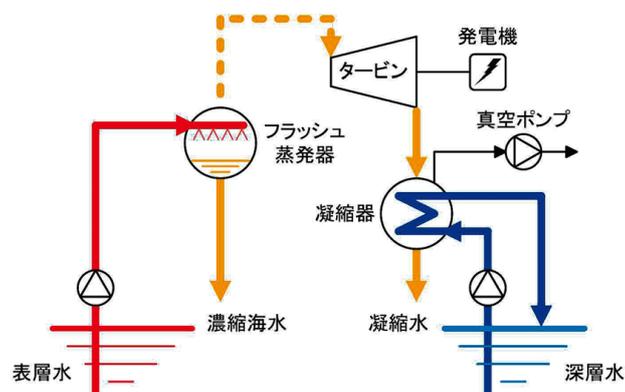


図 6-10 オープンサイクルのシステム図

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センター資料より NEDO 作成

2) クローズドサイクル

クローズドサイクルは、主に蒸発器、タービン、発電機、凝縮器、作動流体ポンプから構成される。

蒸発器、タービン、凝縮器がパイプで繋がれており、低沸点の作動流体が封入されている（図 6-11）。作動流体は、蒸発器で表層水から熱を受け取り蒸発する。蒸発した作動流体は、タービンに送られて発電した後、凝縮器で汲み上げられた海洋深層水で冷やされて液化し、作動流体ポンプによって再び蒸発器に送られる。低温熱源として約 5°C の海洋深層水、高温熱源として約 18～30°C の表層水を用いる本システムは、作動流体がサイクル内を循環するため、クローズドサイクルと呼ばれる。

¹ 本項は佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページを基に取りまとめている。

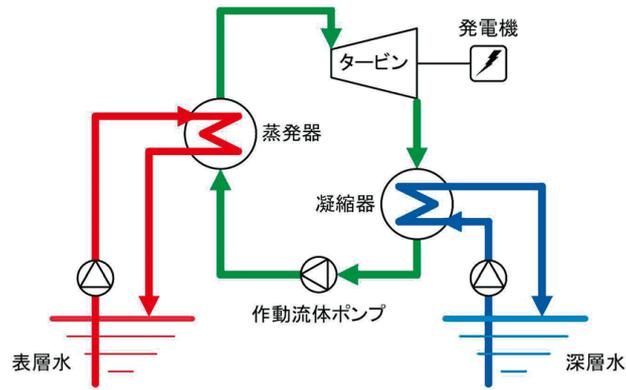


図 6-11 クローズドサイクル海洋温度差発電の概念図

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センター資料より NEDO 作成

作動流体としては、アンモニアやフロン 22 などが適するといわれていたが、経済性や環境への影響などから、現在はアンモニアと水の混合媒体が期待されている。

NEDO による 2011 年度海洋エネルギー技術研究開発では、海洋温度差発電システムの熱交換器および多段ランキンサイクルの研究開発を進めている。

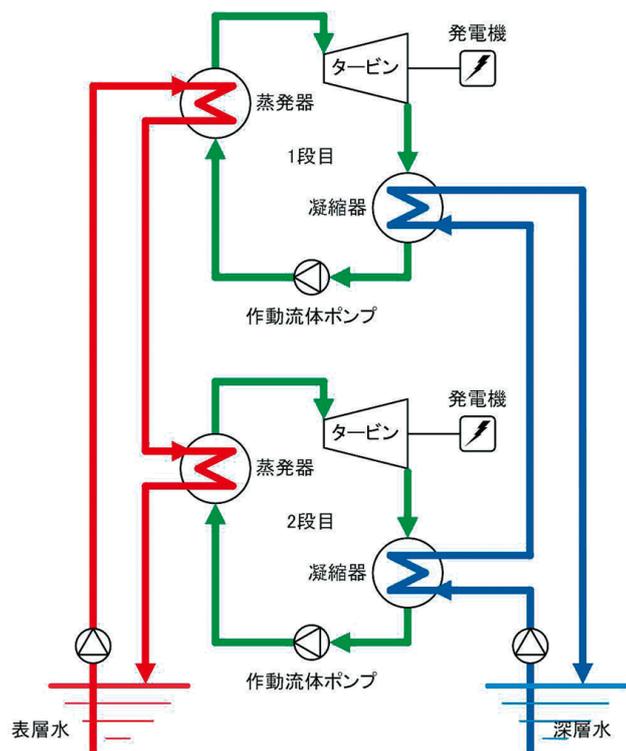


図 6-12 多段ランキンサイクル海洋温度差発電の概念図

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センター資料より NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

3) ハイブリッドサイクル

ハイブリッドサイクルは、オープンサイクルとクローズドサイクルを組み合わせたシステムである。基本構造はクローズドサイクルであるが、蒸発器に導入する高温熱源が異なる。

クローズドサイクルでは、蒸発器に表層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表層水を導入し、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、クローズドサイクルに比べ、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。

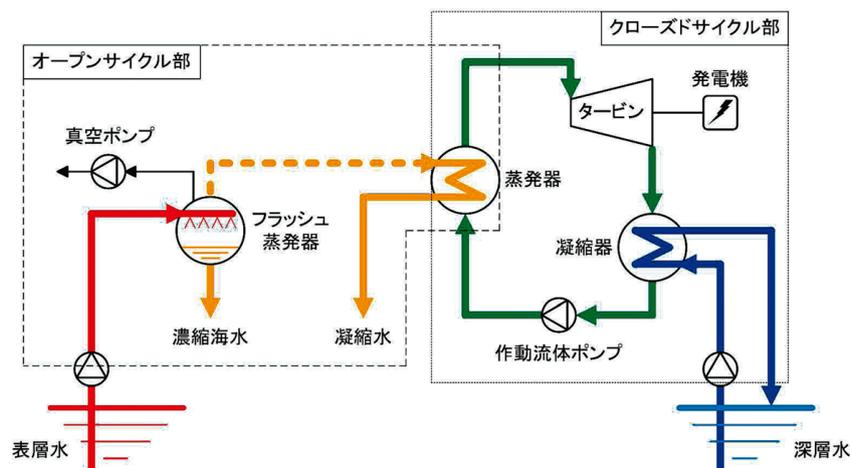


図 6-13 ハイブリッドサイクル海洋温度差発電の概念図

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センター資料より NEDO 作成

(2) 冷水取水管

深層水を水深 600~1,000m の深層から汲み上げるのに必要となる冷水取水管は、海洋温度差発電の重要な構成要素の一つである。現在、主に表 6-1 に挙げる材料が使用あるいは提案されている。

表 6-1 冷水取水管の材料

材料	長所・特徴	短所・課題
FRP サンドイッチ構造体	<ul style="list-style-type: none"> ・軽量 ・強度を必要に応じて変えられる 	<ul style="list-style-type: none"> ・海水中の長期設置による劣化 ・大口径・長尺化技術の確立が必要 ・接合部の信頼性
ゴム等の柔軟材料	<ul style="list-style-type: none"> ・折りたたみが可能 ・製造法が確立している ・熱絶縁が良い 	<ul style="list-style-type: none"> ・技術開発途上 ・海水の吸収による強度劣化 ・腐食対策
鋼	<ul style="list-style-type: none"> ・機械的性質が十分既知 ・海洋中への利用実績がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・建築コストが比較的高い ・重量が重くなる
コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> ・強度が高い ・低コスト ・耐久性が高い ・熱絶縁が良い 	<ul style="list-style-type: none"> ・プレストコンクリート以外は引張応力に弱い ・接合部の信頼性

出典：L.A. Vega, Economics of Ocean Thermal Energy Conversion, Proc. Of Oceanology International vol.6 (1994) より NEDO 作成

(3) 海洋深層水の複合利用

深海から汲み上げられる海洋深層水は、発電以外にもさまざまな用途に活用できる。具体的には、海水淡水化、海洋深層水による漁場造成、冷熱利用、リチウムなどの金属回収などが挙げられる（図 6-14）。

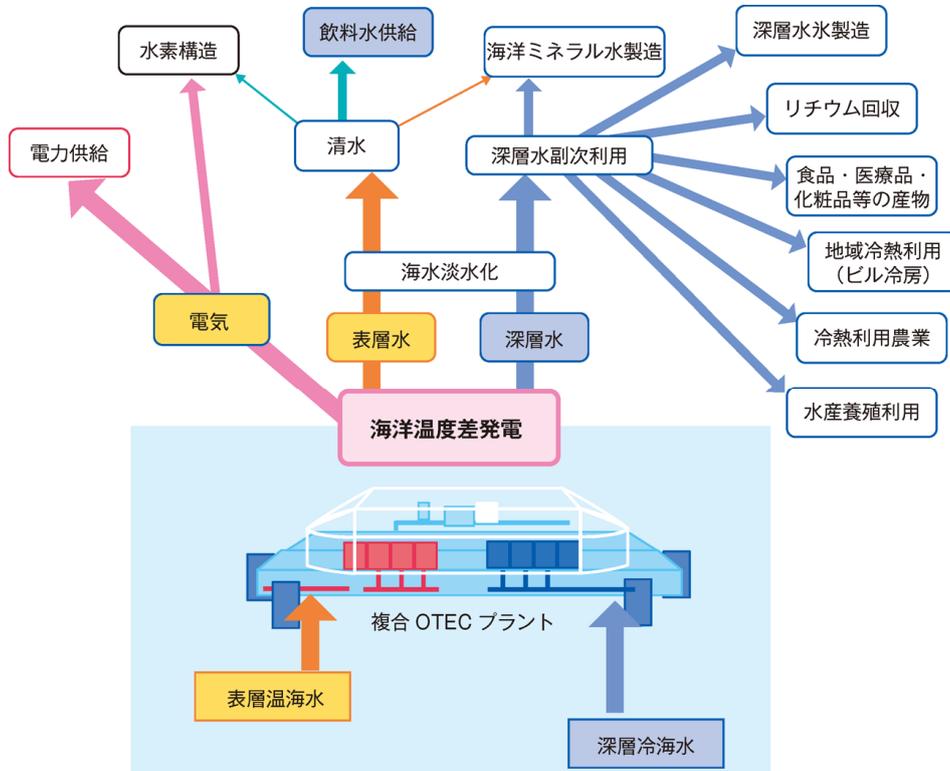


図 6-14 海洋温度差発電の複合利用

出典：海洋政策研究財団ホームページより NEDO 作成

6.1.4 システム価格、発電コスト

(1) 波力発電・潮流発電のコスト

1) システム価格

波力発電および潮流発電のシステム価格試算例を表 6-2 に示す。なお、ここに示す価格は現在開発中の波力発電装置のデータや開発事業者による推計値がベースとなっており、短中期的にデータが変わる可能性があることに注意が必要である。また、近年、鋼材価格が上昇傾向にあり、鋼材価格の将来動向についても注意が必要である。

波力発電および潮流発電は現在、実用化に向けた技術開発段階にあり、研究開発レベルがプレ実証プロジェクトから実証プロジェクトに進むとともに、システム価格は大きく下がっている。それは、装置のデザインや使用部材などの技術改良の成果によるものである。

波力発電のシステム価格は、プレ実証プロジェクトの段階では 79～112 万円/kW 程度であるのに対し、実証プロジェクトの段階では 53～74 万円/kW 程度まで低減されている。商用プロジェクトの段階では、36～51 万円/kW 程度までコストダウンが進むと見られている。

潮流発電のシステム価格は、プレ実証プロジェクトの段階では 112～146 万円/kW であるのに

第6章 海洋エネルギー

対し、実証プロジェクトの段階では46～56万円/kWまで低減されている。商用プロジェクトの段階では、42～43万円/kWまでコストダウンが進むと見られている。

表 6-2 波力・潮流発電のシステム価格試算例^{※1} [万円/kW]

発電システム	プレ実証プロジェクト	実証プロジェクト ^{※2}	商用プロジェクト ^{※3}
波力発電	79～112	53～74	36～51
潮流発電 ^{※4}	112～146	46～56	42～43

※1：1ポンド＝130円として換算

※2：最初の10MWプロジェクトにおける価格

※3：50MW以上設置実績を積んだ後の10MWプロジェクトにおける価格

※4：設置水域（浅水域、深水域）により価格が異なる

出典：“Cost of and financial support for wave, tidal stream and tidal range generation in UK”（2010, Ernst & Young LLP）より NEDO 作成

2) 発電コスト

波力発電および潮流発電の発電コスト試算例を表 6-3 に示す。システム価格と同様、将来的な技術開発の動向や鋼材価格などによって、短中期的にデータが変わる可能性があることに留意が必要である。

波力発電では、プレ実証プロジェクトおよび実証プロジェクトの発電コストは、それぞれ72円/kWh、52円/kWhと他の再生可能エネルギーと比較して高いが、2020年には28円/kWhまで削減されると試算されている。

潮流発電では、プレ実証プロジェクトの発電コストは59～70円/kWhであるが、実証プロジェクトでは23～32円/kWhまで削減されると試算されている。2020年には23～26円/kWhまでコスト削減が進むと考えられている。

表 6-3 波力・潮流発電の発電コスト試算例^{※1} [万円/kWh]

発電システム	プレ実証プロジェクト	実証プロジェクト ^{※2}	2020年
波力発電	72	52	28
潮流発電 ^{※3}	59～70	23～32	23～26

※1：1ポンド＝130円として換算

※2：最初の10MWプロジェクトにおける価格

※3：設置水域（浅水域、深水域）により価格が異なる

出典：“Cost of and financial support for wave, tidal stream and tidal range generation in UK”（2010, Ernst & Young LLP）より NEDO 作成

図 6-15 に、風力発電（陸上、洋上）、潮流発電、波力発電のコスト内訳例を示す。陸上風力とその他海洋再生可能エネルギー（洋上風力、潮流発電、波力発電）を比較すると、陸上風力は発電コストに占める構造体（タービン、電気設備など）の比率が約8割を占めている。一方、海洋再生可能エネルギーは、基礎、係留、グリッド接続、設置、運転および保守に係るコストが約5～7割を占めており、構造体以外の各構成要素で、コスト削減余地が多く残されている。

潮流発電と波力発電（浮体式）を比較すると、潮流発電は構造体（構造および原動機、動力取出装置）に係る割合が約25%であるのに対し、波力発電は約50%と大きい。潮流発電は、風力発電などの既存技術の応用から、構造体部分の基礎的技術が集約されつつあるのに対し、波力発電は、構造体に係る技術の確立とコスト削減に向けた技術開発が必要である。

第6章 海洋エネルギー

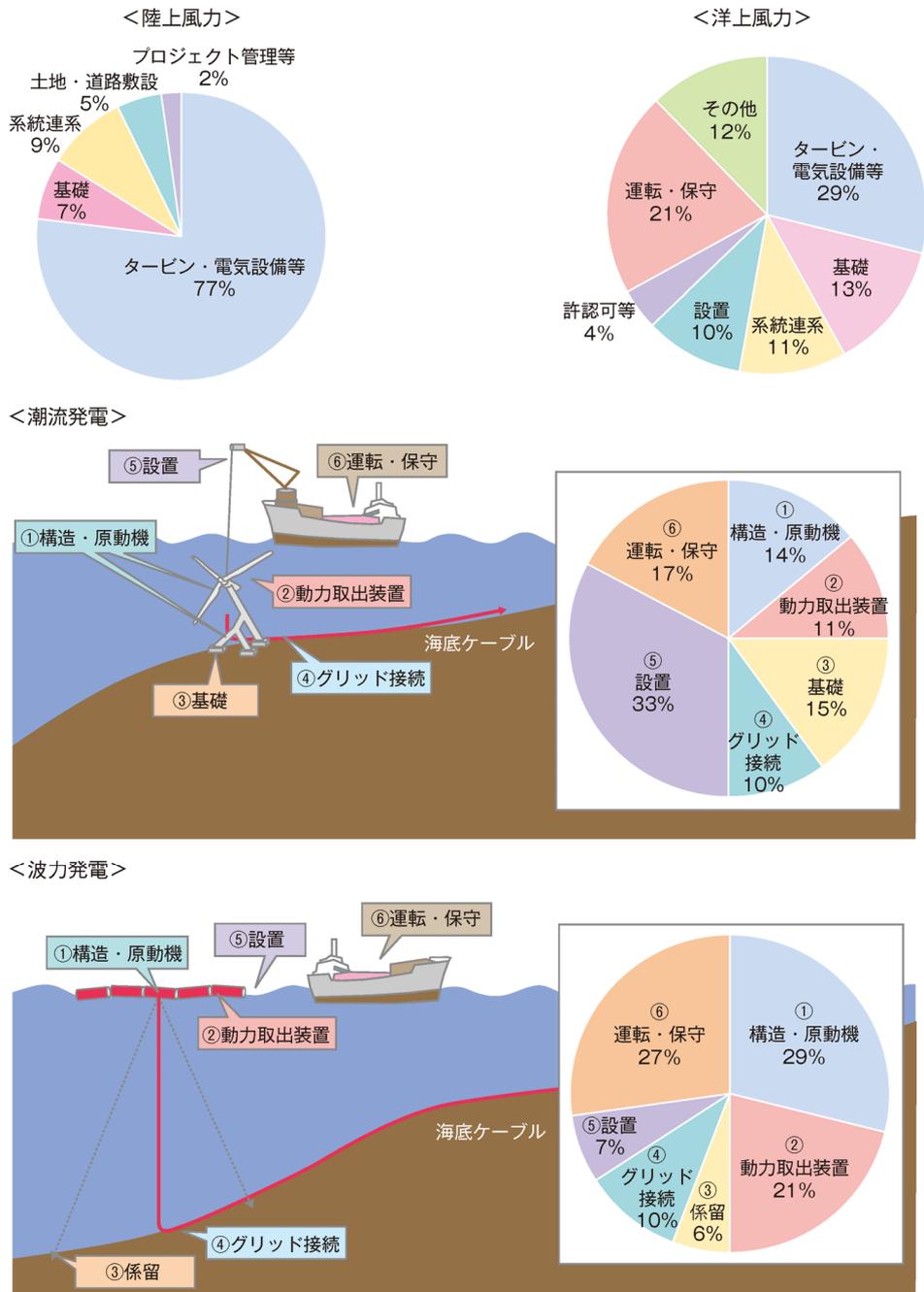


図 6-15 風力発電（陸上・洋上），潮流発電，波力発電のコスト内訳例

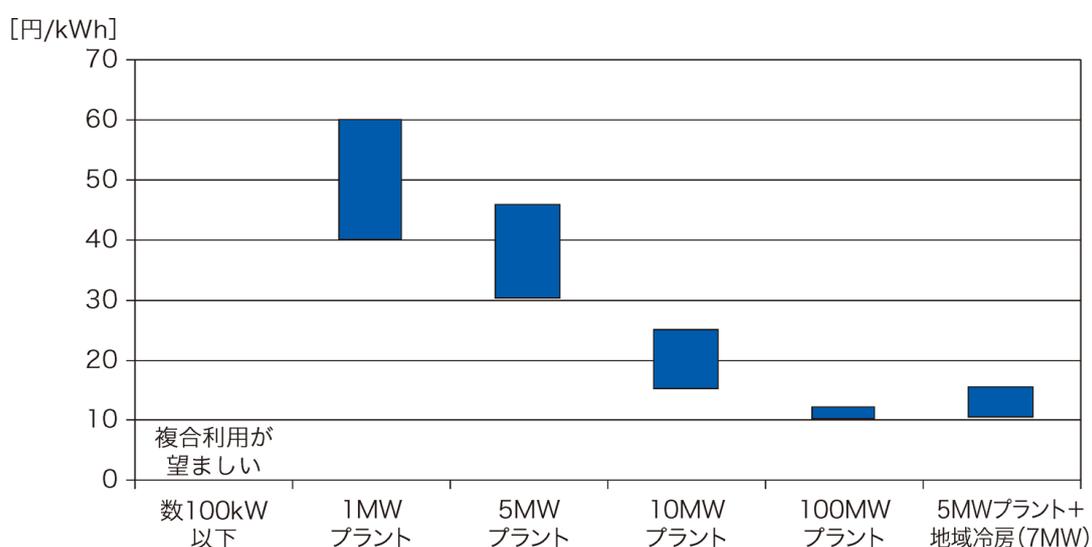
出典：“Offshore wind power: big challenge, big opportunity”（2008, Carbon Trust），“Accelerating marine energy”（2011, Carbon Trust）より NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

(2) 海洋温度差発電のコスト

海洋エネルギー資源利用推進機構（Ocean Energy Association-Japan : OEA-J）の海洋温度差分科会が試算した海洋温度差発電の発電コストを図 6-16 に示す。なお、海洋温度差の発電コストは、温度差や設置域の取水条件（深さ、陸からの距離など）などによって異なることに留意が必要である。

数 100kW 以下の規模では、発電のみで経済性を成り立たせるのは難しく、海水淡水化技術や海洋深層水の利活用、リチウム回収などとの複合利用が望ましいとされている。プラント規模が大きくなるほど発電コストは低減され、1MW プラントは約 50 円/kWh であるのに対し、10MW プラントでは約 20 円/kWh、さらに 100MW プラントでは約 10 円/kWh にまで低減されると試算されている。経済性向上策として、地域冷房などとの組み合わせも提案されている。



プラント規模	コスト	備考
数 100 kW 以下	未試算	複合利用（海水淡水化、リチウム回収等）が望ましい。
1 MW プラント	50 円 /kWh 程度 (40~60 円 /kWh)	量産によって、40 円 /kWh 以下になる可能性あり。
5 MW プラント	30.4~45.7 円 /kWh ^注	海洋温度差発電量のみの評価。
10 MW プラント	20 円 /kWh 程度 (15~25 円 /kWh)	量産によって、更に経済性が向上する可能性あり。
100 MW プラント	10 円 /kWh 程度	量産によって、更に経済性が向上する可能性あり。
5 MW プラント+ 地域冷房 (7 MW)	10.3~15.3 円 /kWh ^注	海洋温度差発電量+冷熱を電力換算して合わせた評価。

図 6-16 海洋温度差発電の発電コスト

注：試算値の幅は金利の設定条件（3, 5, 8%）による。
出典：OEA-J 海洋温度差発電分科会資料より NEDO 作成

6.2 導入ポテンシャル，導入目標，導入実績

6.2.1 導入ポテンシャル

(1) 波力発電のポテンシャル

1) 世界

世界の波力エネルギーの分布試算例を図 6-17 に示す。世界的には、北大西洋，北太平洋，南米の南岸，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。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沿岸で 10kW/m 未満、沖合で 10～20kW/m 未満と、諸外国と比較して大きくない。しかし、日本の周辺海域の基礎的データが十分に整備されておらず、局所的には理想的な波が得られるエリアも存在するため、今後導入を検討するに当たって、より詳細なメッシュデータが求められる。

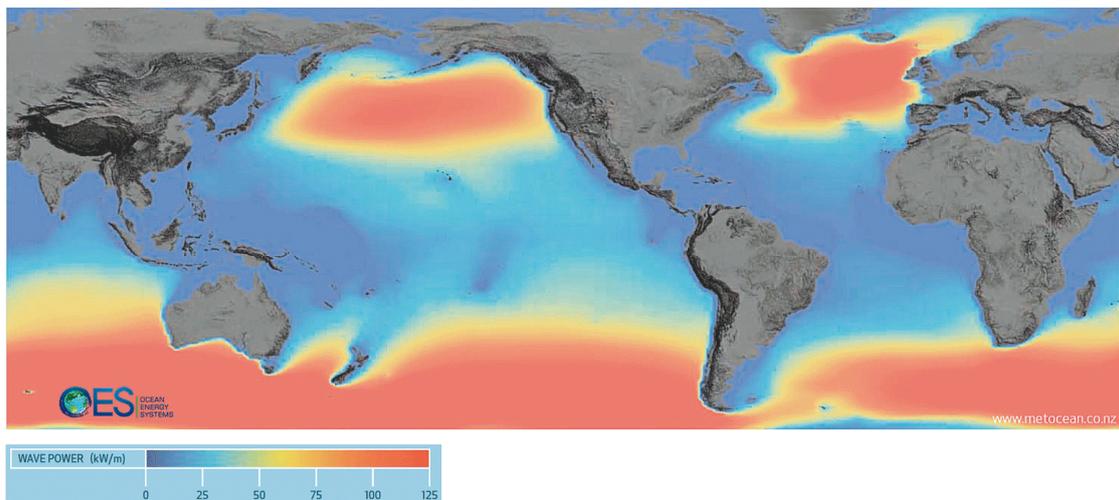


図 6-17 世界の波力エネルギーの分布（年平均：[kW/m]）

出典：“An International Vision for Ocean Energy”（2012，IEA-OES）より NEDO 作成

2) 日本

日本近海の波力エネルギーのポテンシャルについては、1970～80 年代に実施された前田と木下らによる日本近海，および高橋らによる日本沿岸の波力エネルギー試算例がある。また，最近では，東京都の呼び掛けで設置された「波力発電検討会」や NEDO によってポテンシャルが試算されている。

2011 年度の NEDO 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。ただし，波力エネルギー密度が諸外国と比較して小さいことから，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%）と試算されている。

第6章 海洋エネルギー

表 6-4 海洋エネルギーのポテンシャル試算例

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 5,200 km 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】 離岸距離 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算出。

※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：前田久明・木下健「波浪発電」(1979) 生産研究 31 巻 11 号、高橋重雄「日本周辺における波パワーの特性と波力発電」(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」(2011, NEDO) より NEDO 作成

試算例それぞれについて各種、前提条件などが異なることから、試算結果にはばらつきがある。前述したとおり、より詳細なポテンシャルの把握のためには、日本の周辺海域の基礎的データのさらなる整備や、より詳細なメッシュデータなどが必要となる。2010 年度の NEDO 調査では、波力発電のポテンシャル試算に係る課題として次のことを挙げられている。

〈波力発電ポテンシャル試算に係る課題〉

- ・気象庁の提供する沿岸波浪実況 GPV データが 1 年しかないため、観測値と比較している波浪のシミュレーションデータなどを活用し、複数年の解析ができることが望ましい。
- ・国土交通省の全国港湾海洋波浪情報網 (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS: NOWPHAS) のデータは、沿岸に近い場所で測定された値であるため、その値で補正されたシミュレーションデータは沖合の波浪を過小評価している可能性がある。
- ・特に重要と考えられた離岸距離 10km から 20km の波浪については、GPS 波浪計による観測の実施と、全国港湾海洋波浪情報網などの既存の観測網で測定された沖合の波浪データの収集、

解析，評価が必要と考えられる。

- ・今後の波力発電の適地を検討する際，ポテンシャルが高いと考えられた房総半島沖，東京と沖縄の離島部などで，波浪観測値に基づくさらに細かな空間分解能での評価が必要である。

3) 欧州

欧州は，世界的に最も波力エネルギーポテンシャルに恵まれた地域の一つである。英国，アイルランド，ノルウェー，ポルトガルの周辺海域のポテンシャルが大きい，特に英国とスコットランドは波力エネルギー密度が $20\sim 70\text{kW/m}$ と大きく，欧州の波力エネルギーポテンシャルの約半分が英国周辺海域に，約 10% がスコットランドに賦存している。スコットランド北端にある欧州海洋エネルギーセンター（European Marine Energy Centre : EMEC）²では，最大波高約 15m の波を得ることができる。

英国周辺のポテンシャル（導入に係る各種制約，地理的要因を加味したもの）は 700TWh/年 と試算されており，これは英国の電力消費量の約 2 倍に相当する。英国貿易産業省（DTI）の試算では，波力発電装置の効率や稼働率などを考慮すると，実際に取り出せる電力は 50TWh/年 （2010 年時点の電力需要の約 13%）とされている。

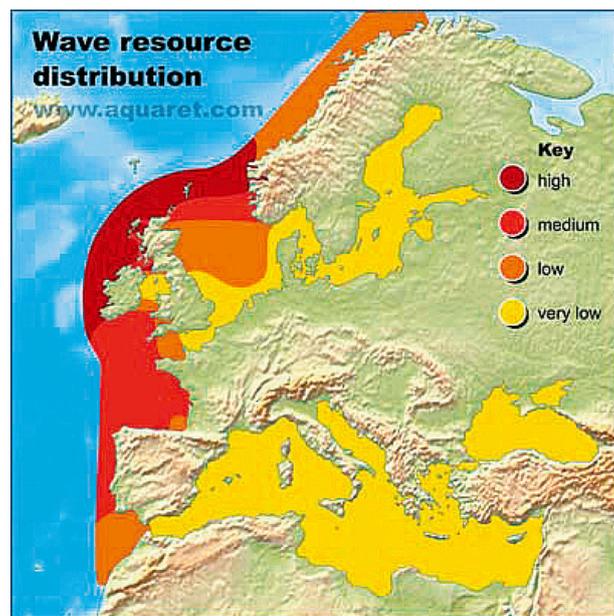


図 6-18 欧州の波力エネルギーポテンシャルマップ

出典：AQUARET ホームページ

² スコットランドのオークニー諸島にある波力発電および潮流発電のフルスケール実証機の実海域試験サイト。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・組織から約 500 万ポンドの出資を受け，2003 年に開設された。

第6章 海洋エネルギー

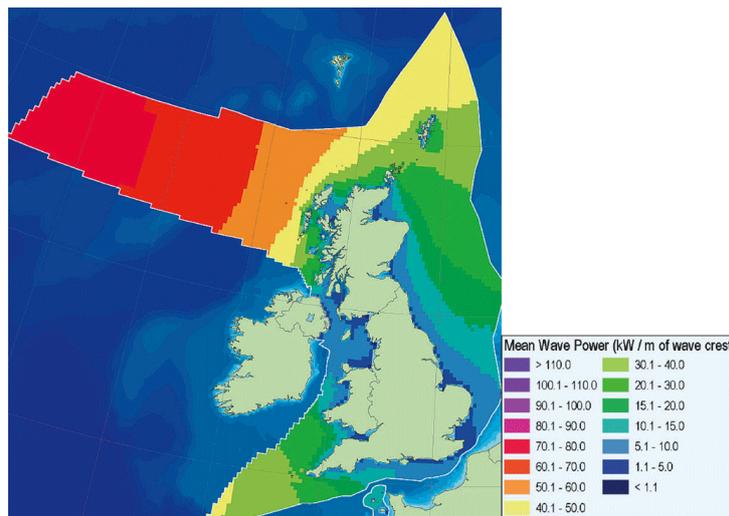


図 6-19 英国周辺海域の年平均波力エネルギー密度 [kW/m]

出典：“Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources” (2008, BERR)

4) 米国

米国では、西海岸やアラスカの波力エネルギーポテンシャルが大きく、20~40kW/m程度の波力エネルギーが存在する。米国電力研究所（EPRI）の試算によると、米国周辺海域の波力エネルギーポテンシャルは2,640TWh/年であり、これは米国の年間発電量の約65%に相当する³。ただし、このうち約60%はアラスカ（1,570TWh/年）に賦存していることから、本土での利用可能量は限定的となる。ポテンシャルの約20%（590TWh/年）が賦存する西海岸では、技術的に取得可能なエネルギー量は約50%と試算されている。



図 6-20 米国周辺海域の年平均波力エネルギー密度 [kW/m]

出典：NREL ホームページ (http://maps.nrel.gov/mhk_atlas)

³ 米国の2010年の電力発電量は約4,125TWh

表 6-5 地域別波力エネルギー賦存量

地域	エネルギー賦存量※ ¹	技術的に取得可能なエネルギー量※ ²
西海岸（ワシントン州, オレゴン州, カリフォルニア州）	590 TWh/年	50 %
東海岸（メイン州～ノースカロライナ州）	200 TWh/年	73 %
東海岸（サウスカロライナ州～フロリダ州）	40 TWh/年	82 %
メキシコ湾	80 TWh/年	84 %
アラスカ（太平洋）	1,360 TWh/年	46 %
アラスカ（ベーリング海）	210 TWh/年	56 %
ハワイ	130 TWh/年	72 %
プエルトリコ	30 TWh/年	83 %
合計	2,640 TWh/年	—

※1：米国大陸棚における総ポテンシャル

※2：ウェーブファームの出力密度を 20MW/km とした場合

出典：“Mapping and Assessment of the United States Ocean Wave Energy Resource”（2011, EPRI）より NEDO 作成

（2）潮流・海流発電のポテンシャル

1) 世界

i) 潮流

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で、地域性が非常に強いエネルギーであるといえる。

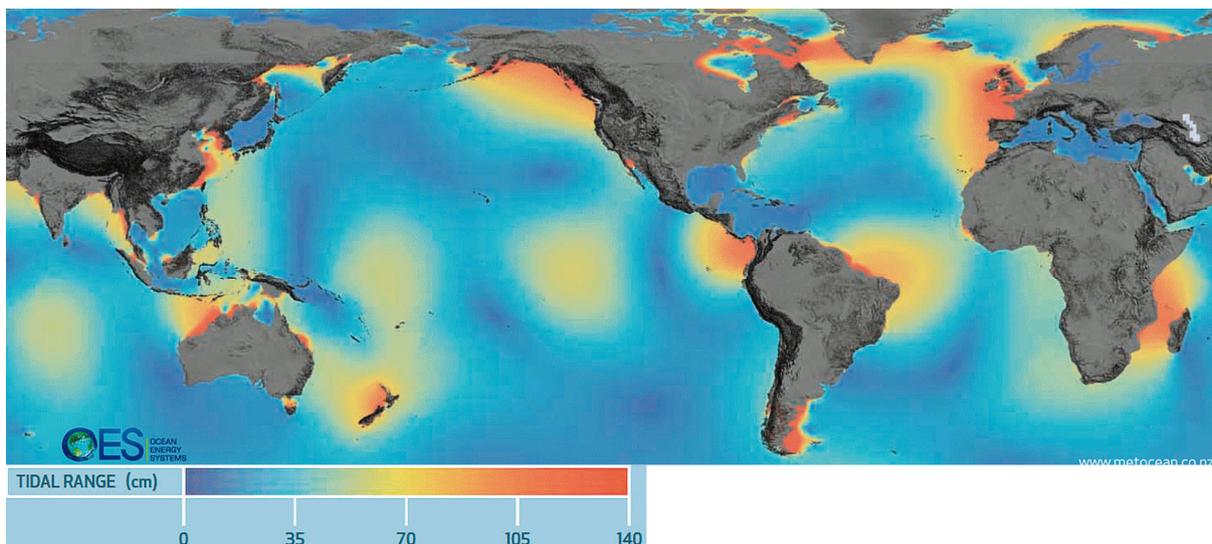


図 6-21 世界の潮位分布（M2 分潮，主太陰半日周潮）

出典：“An International Vision for Ocean Energy”（2012, IEA-OES）

第6章 海洋エネルギー

潮流は、流速に対する地形の影響が大きく、海峡や水道など流路の幅が狭い地点では流速が速くなる。英国貿易産業省（DTI）は、世界の潮流発電のポテンシャルを試算しており、世界全体のポテンシャル 3,000GW のうち、流速や地理的条件から発電に利用できるのは 3% と試算している。ポテンシャルは大きいですが、実際の発電を考えた場合の適地が限られるため、得られる電力は限定的となる点が潮流エネルギー利用の制約となる。

ii) 海流

海流とは、海洋を地球規模で見たときの、連続的で特定の方向をもった海水の流れである。季節によって流速が変化する海流や、いくつかのパターンがあって時期によっていずれかのパターンになる海流など、流速や流向が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もある。

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。

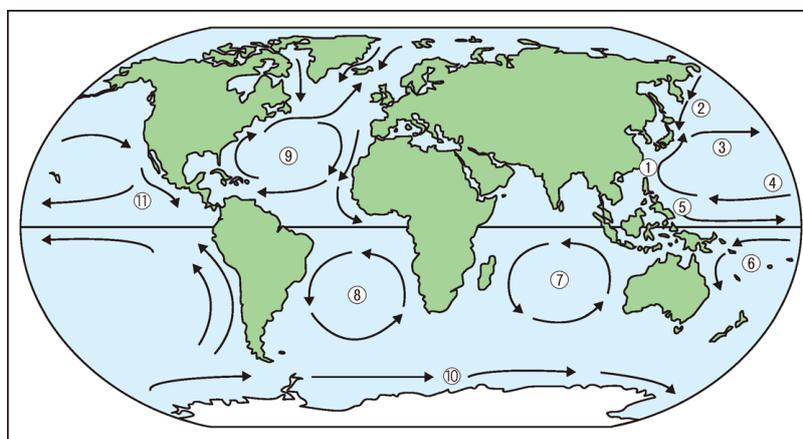


図 6-22 世界の主な海流

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
出典：気象庁ホームページより NEDO 作成

2) 日本

i) 潮流

2010 年度の NEDO 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、潮流エネルギーの賦存量は約 22GW 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）の約 11% に相当する。ただし、実際の機器の設置や、導入に適した流速（1m/s 以上）を得られる地域などを考慮すると、現実的な導入量は約 1.9GW、発電可能量は 6TWh（年間電力需要の約 0.7%）と試算されている。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。津軽海峡でも強い潮流が見られる。

同調査では、海峡部の周辺海域では、必ずしも航路とは重ならず、しかも潮流の強い海域があるため、代表的な海峡部の近辺部の詳細なシミュレーションを実施することが望ましいこと、また大小さまざまな海峡が存在する瀬戸内海で詳細なシミュレーション計算を実施し、流速の出現頻度などが算定できれば、パワーカーブを用いた詳細なポテンシャル評価が可能であることなどが指摘されている。

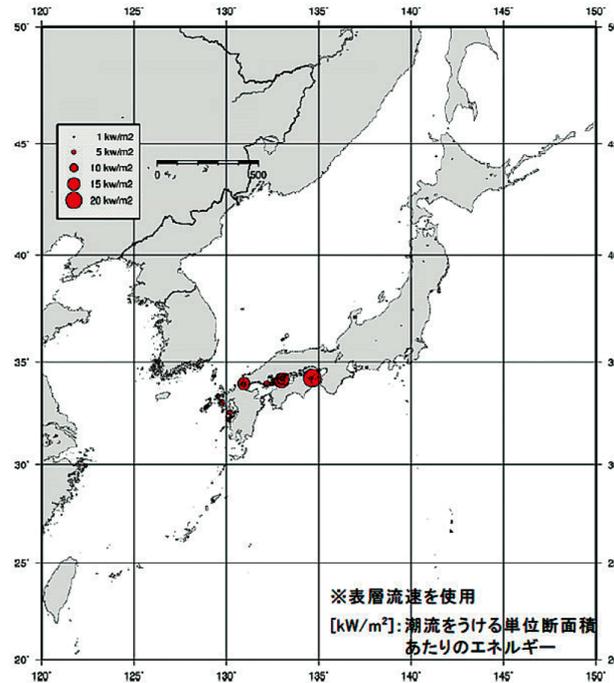


図 6-23 日本の潮流エネルギー密度 [kW/m²] (月齢周期平均)

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
 出典：「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」(2011, NEDO)

なお、潮汐力発電は、満潮時と干潮時の潮位差が大きいか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。

ii) 海流

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。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。2010 年度の NEDO 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、海流エネルギーの賦存量は約 205GW と試算されている。

ただし、実際の機器の設置や、導入に適した流速（水深 5m で 1m/s 以上）を得られる地域などを考慮すると、現実的な導入量は約 1.3GW、発電可能量は 10TWh（年間電力需要の約 1%）と試算されている。

第6章 海洋エネルギー

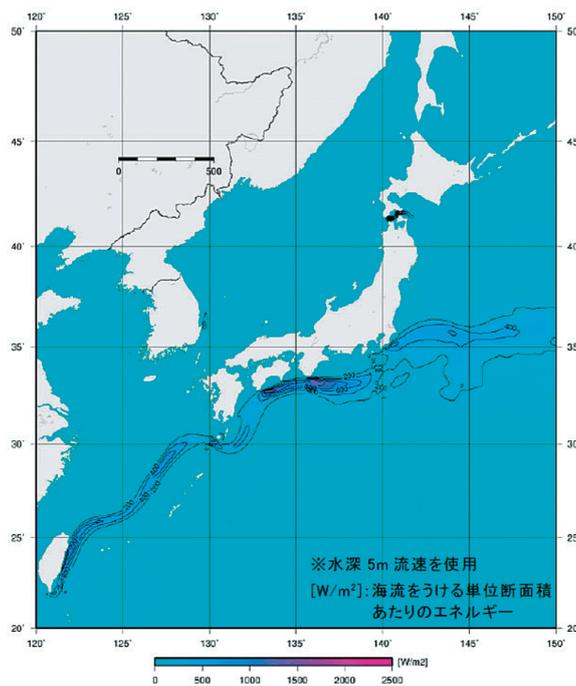


図 6-24 日本の海流エネルギー密度 [W/m²]

出典：「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」（2011，NEDO）

3) 欧州

欧州では、特に英国周辺海域にポテンシャルが集中しており、スコットランドには、欧州の潮流エネルギーの 25%が賦存していると試算されている。英国貿易産業省（DTI）の試算では、英国の有力 10 地点で 36TWh/年（2010 年時点の電力需要の約 10%）の発電が可能とされている。



図 6-25 欧州の潮流エネルギーポテンシャル分布

出典：AQUARET ホームページ

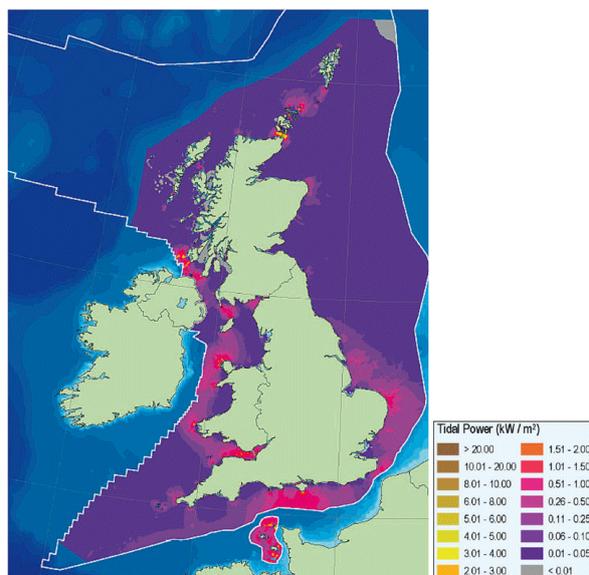


図 6-26 英国周辺海域の年間平均潮流エネルギー [kW/m²]

出典：“Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources”（2008，BERR）

4) 北米

全米の潮流ポテンシャルは 50GW（2009 年時点の発電容量の約 5%）と試算されているが、そのうち 47GW がアラスカに賦存しており、本土のポテンシャルは小さい。

カナダ全体の潮流ポテンシャルは約 42GW（2009 年時点の発電容量の約 32%）と試算されているが、その 80%は冬期に凍結する環境下であり、適地は限定的となる。カナダでは、特に東海岸のファンディ湾などのポテンシャルが大きい。ファンディ湾は潮の干満差が大きく、毎日 1,000 億トンもの海水が出入りしており、ファンディ湾にある FORCE 実証試験サイトは、最大で 5m/s の潮流が得られる（6.4.1（4）に詳述）。

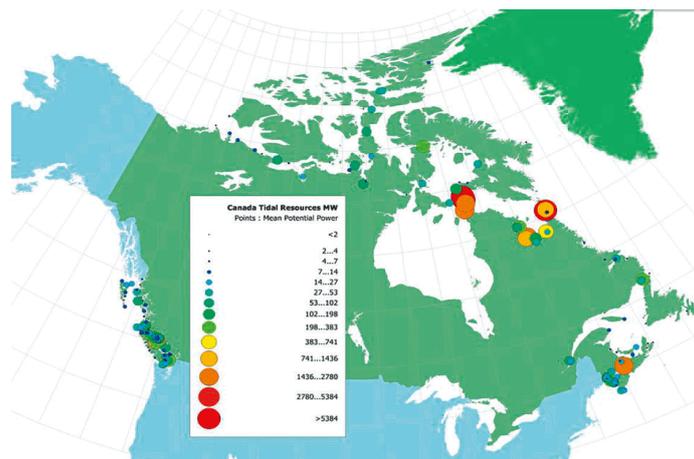


図 6-27 カナダの潮流エネルギー分布 [MW]

出典：“Canada Ocean Energy Atlas (Phase 1) Potential Tidal Current Energy Resources Analysis Background” (2006, Canadian Hydraulics Centre)

5) 韓国

黄海に面する韓国西海岸は潮位差が大きく、特にリアス式海岸が発達した南海岸で、潮流発電の適地が多く存在する。韓国の潮流エネルギーポテンシャルは 5,900MW であるが、経済性のあるポテンシャルは南西部の約 470MW（2009 年時点の発電容量の 0.6%）と試算されている。現在、1MW の実証プラントが、南西部の珍島郡 Uldolmok に建設されており、ここでは最大 6.5m/s の潮流を得ることができる。

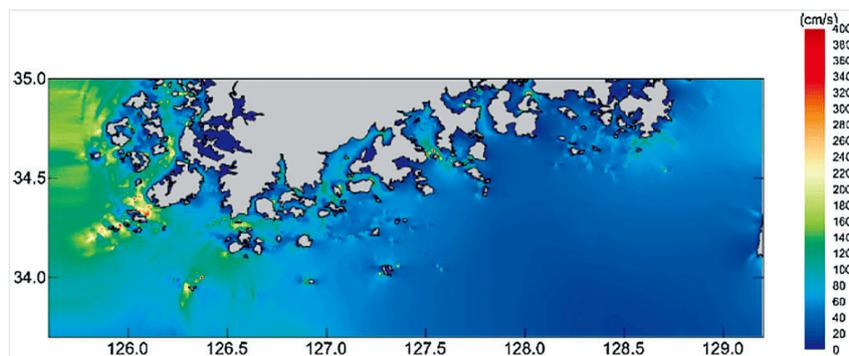


図 6-28 韓国南海の最大潮流速分布 [cm/s]

出典：Gunwoo Kim 他，“An overview of ocean renewable energy resources in Korea” (2011)

表 6-6 韓国における潮流発電の有望候補地

海峡	平均水深[m]	海峡幅[m]	最大流速[m/s]	ポテンシャル	
				[MW]	[MWh/年]
Uldolmok	20	300	6.50	366,354	122,171
Changjuk	30	3500	3.59	1,867,359	360,206
Maenggol	45	4200	3.49	3,088,113	595,684
Hoenggan	30	2000	2.50	360,352	69,510
Daebang	15	250	2.50	22,522	4,344

出典：Gunwoo Kim 他，“An overview of ocean renewable energy resources in Korea”（2011）より NEDO 作成

(3) 海洋温度差発電のポテンシャル

1) 世界

海洋温度差発電では、経済性を成立させるために平均的に 20℃程度の温度差が必要とされている。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。

日本では、沖縄、鹿児島、小笠原諸島などが適地に挙げられるが、本州でも理想的な温度差の下で発電するためには、発電所や工場などの温水排熱の活用が有効と考えられる。

IEA-OES⁴ 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。

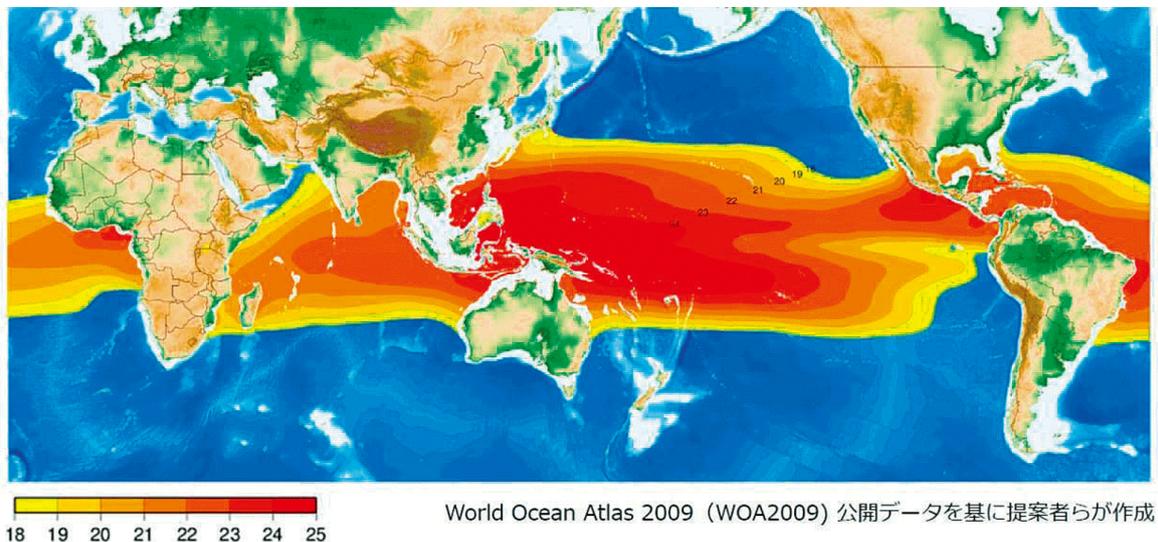


図 6-29 世界の表層海水と深層海水（水深 1,000m）との平均温度差分布

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センター提供

2) 日本

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賅える規模となる⁵。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。

⁴ IEA-Ocean Energy Systems (<http://www.iea-oceans.org/index.asp>), IEA (国際エネルギー機関) 内の組織

⁵ 2009 年度の電力需要は、10 社販売電力量合計で 858.5TWh (電気事業連合会確報)

第6章 海洋エネルギー

また、2010年度にNEDOにより実施された「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」では、日本の排他的経済水域（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6-7）。

表 6-7 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	19,268,496	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	49,868,928	15,018,144	155,843,028	46,925,568	2,211,391,044	1,368,417,996

※1：沿岸固定，離岸距離 30km 以内
 ※2：沖合浮体，離岸距離 30km 以内
 ※3：沖合浮体，離岸距離制限なし

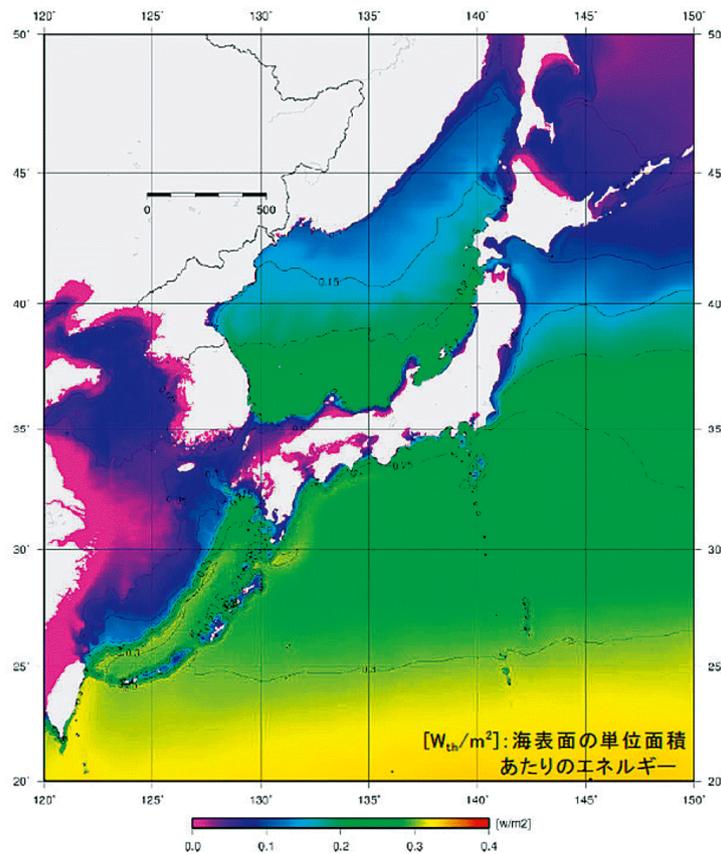


図 6-30 海洋温度差ポテンシャルマップ [W_{th}/m²] (エネルギー密度)

出典：「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」（2011，NEDO）

第6章 海洋エネルギー

6.2.2 導入目標

(1) 波力・潮流発電の導入目標

現在、国としての導入目標を掲げている国は少ないが、欧州では、英国のスコットランドが先導し、複数の国が導入目標を設定している。

1) 日本

日本では、波力発電および潮流発電についての導入目標値は掲げられていない。

日本の海洋エネルギー資源利用推進機構（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、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。また、潮流発電については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 6-8 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：「海洋エネルギー資源フォーラム」資料（2008、海洋エネルギー資源利用推進機構）より NEDO 作成

表 6-9 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	(1 MW : 100基) (5 MW : 6基)	(1 MW : 310基) (5 MW : 50基) (10 MW : 20基)	(1 MW : 600基) (5 MW : 200基) (10 MW : 600基)

前提条件：稼働率：30%

出典：「海洋エネルギー資源フォーラム」資料（2008、海洋エネルギー資源利用推進機構）より NEDO 作成

2) 欧州

欧州では、英国、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。特に英国は、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。英国内でも、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、1GW は潮流発電で達成する計画であり、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。

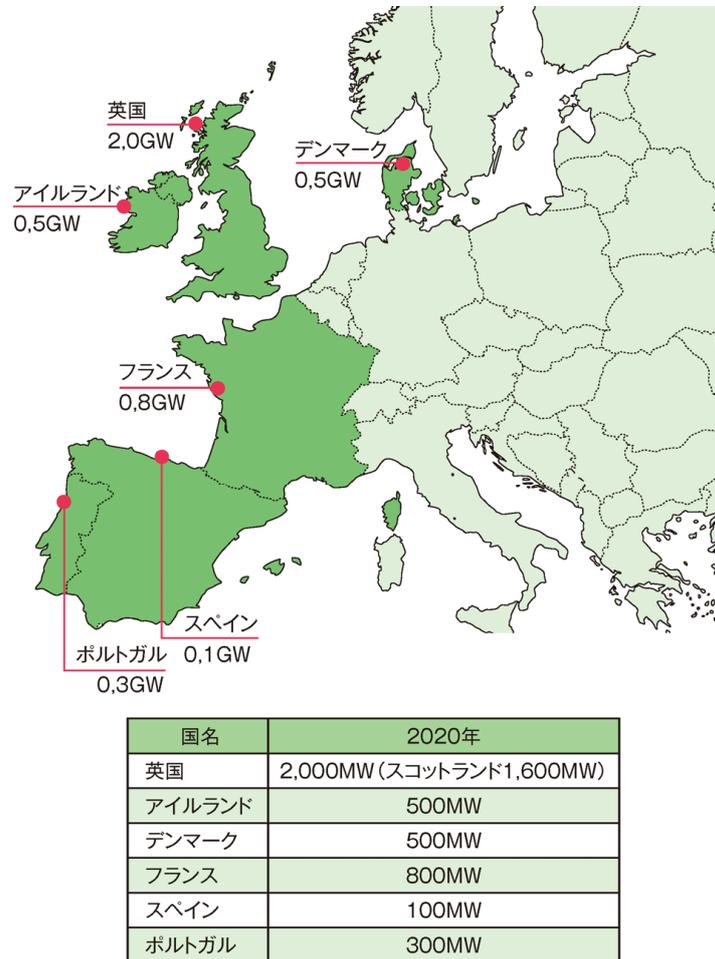


図 6-31 欧州の海洋エネルギー導入目標

出典：“OES-IA Annual Report 2010” (2009, IEA-OES) より NEDO 作成

3) 米国

米国では、国全体としての導入目標値は掲げられていない。ただし、29 の州政府とワシントン D.C.政府⁶が電気事業者に対して供給電力の一定割合を再生可能エネルギーで賄うことを義務付ける RPS (Renewable Portfolio Standard) 制度を導入しており、そのうち 20 州で波力発電が制度の対象となっている。

⁶ 2010 年 3 月時点。

第6章 海洋エネルギー

(2) 海洋温度差発電の導入目標

海洋温度差発電は、近年、世界的に再注目され始めたところであり、具体的な導入目標を掲げている国は少ないが、フランス、米国、台湾などで導入に向けた動きが加速している。

1) 日本

日本では、海洋温度差発電の導入目標値は掲げられていない。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によれば、海洋温度差発電については 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 6-10 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) (10 MW : 25 基)	(1 MW : 100 基) (5 MW : 40 基) (10 MW : 25 基) (50 MW : 40 基)	(10 MW : 40 基) (50 MW : 55 基) (100 MW : 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：海洋エネルギー資源フォーラム資料（2008，海洋エネルギー資源利用推進機構）より NEDO 作成

2) フランス

フランスの海洋開発研究機構（IFREMER）は、環境グレネル会議⁷で提示された目標の達成を前提に、最終消費エネルギーに占める再生可能エネルギーの割合を 2020 年までに 20%に引き上げるという試算をしている。試算は 4 つのシナリオ別に行われており、ベストシナリオで 200MW の海洋温度差発電が導入できるとしている（表 6-11）。

表 6-11 海洋エネルギーの導入見通し（2020 年 20%目標達成への寄与度）

エネルギー種	発電容量 [MW]	電力量 [TWh/年]	電力量 [百万石油換算トン/年]	対 2020 年 エネルギー需要比
洋上風力発電	4,000	12	1.03	5.2 %
海洋温度差発電	200	1.4	0.12	0.6 %
塩分濃度差発電	55	0.4	0.03	0.2 %
潮流発電	400	1.4	0.12	0.6 %
海流発電	500	1.25	0.11	0.5 %
波力発電	200	0.8	0.07	0.3 %
海洋バイオマス	—	—	0.05	0.3 %
合計	5,355	17.25	1.53	7.7 %

出典：IFREMER 資料より NEDO 作成

⁷ 2007 年 7 月から 10 月まで、フランスのグレネルで行われた環境会議。政府、地方自治体、雇用者、被雇用者、NGO 団体などの代表が参加した。本会議の提言内容を反映させたグレネル法案が策定され、温室効果ガス削減の長期目標として 2050 年に 1990 年比 75%削減、中期目標として 2020 年に現時点と比較し、20%削減が法定された。

3) 米国

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、海洋温度差発電を 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 6-12）。

表 6-12 米国ハワイ州の導入目標

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

出典：HCEI Road Map より NEDO 作成

6.2.3 導入実績

(1) 潮汐力発電

潮汐力発電は、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、海洋エネルギー利用を先導する技術である。ただし、前述したとおり、日本の潮汐力発電のポテンシャルは小さいことから、国内で稼働しているプラントはない。

表 6-13 に、海外の主要な潮汐力発電所を示す。潮汐力発電プラントとして最も有名なランス潮汐発電所は、ランス川河口に位置し、潮位差が最大 13.5m、平均 8.5m と潮汐力発電に適した潮位条件をもつ（図 6-32）。1967 年から発電を開始しており、46 年間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（4 枚羽根横軸円筒カプラン水車）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 600,000MWh、平均出力は約 68MW である。タービンは双方向に機能し、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 6-13 世界の主要な潮汐力発電所

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 8.5 m）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 400 kW。
江厦潮汐発電所 (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 5 m の双方向発電方式。最大出力は 3.9 MW。
始華湖潮汐力発電所 (韓国)	2011 年に運転開始。最大出力は 254 MW で、世界最大規模。

出典：各種資料より NEDO 作成



図 6-32 ランス潮汐力発電所（フランス）

出典：Tidal Energy ホームページ

また韓国では、世界最大規模となる始華湖潮汐力発電所（発電出力 254MW）が 2011 年に運転を開始した（図 6-33）。同国では、さらに数カ所の潮汐力発電が計画されている。



図 6-33 始華湖潮汐力発電所

出典：韓国海洋研究所ホームページ

（2）波力発電・潮流発電の導入実績

潮流発電システムは、研究開発もしくは実証研究の段階にあり、現在、商用プラントは稼動していない。ただし、英国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が推進されており、今後の導入普及が見込まれる。

波力発電については 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（Agucadoura Wave Farm, 図 6-34）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。現在、欧州海洋エネルギーセンター（EMEC, 後述）において、改良機である PelamisII の実証試験が進行中である。

代表的な実証試験プラント、発電装置は、「6.4 技術開発動向」にて紹介する。



図 6-34 Agucadoura Wave Farm 外観

出典：Pelamis Wave Power ホームページ

(3) 海洋温度差発電の導入実績

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。実証試験プラントについては、日米欧で建設されている。

6.3 世界の市場動向

6.3.1 波力発電・潮流発電の市場動向

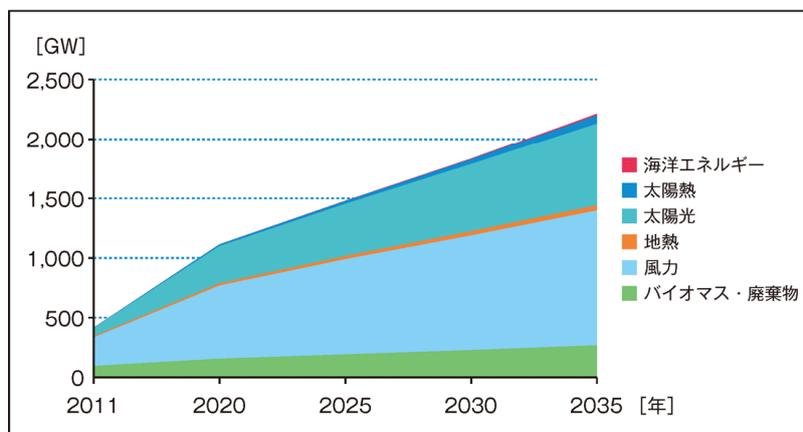
(1) 市場の現状と将来見通し

6.2 で述べたとおり、現在、波力発電および潮流発電の商用プラントは稼動していないが、英国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ている。技術開発が順調に進み、投資が活発化した場合、2015年～2020年頃にかけて、欧州を中心に初期市場が形成されると考えられる。

欧州海洋エネルギー協会（European Ocean Energy Association：EU-OEA）が発表した欧州海洋エネルギーロードマップ2010-2050では、海洋エネルギーの導入量が2020年までに3.6GW（EU-27全体の電力需要の0.3%）、2050年には188GW（EU-27全体の電力需要の15%）近くになる導入見通しが示されている。その一方、IEAのWorld Energy Outlook 2013では、世界の海洋エネルギー導入量は、2020年に1GW、2035年に14GWと試算しており、これと比較すると、EU-OEAによる導入見通しは非常に野心的な数字である。

第6章 海洋エネルギー

	2011年	2020年	2025年	2030年	2035年
海洋エネルギー	1	1	3	6	14
太陽熱	2	14	23	40	70
太陽光	69	312	437	564	690
地熱	11	19	27	35	43
風力	238	612	797	960	1130
バイオマス・廃棄物	93	154	190	226	266



※1：水力を除く
 ※2：New Policies Scenario（現状より政策的支援を強化したシナリオ）の試算結果
 出典：“World Energy Outlook 2013”（2013, IEA）よりNEDO作成

図 6-35 IEA による再生可能エネルギーの発電容量見通し

(2) 政策、プレーヤー、技術開発レベルの変遷

波力発電，潮流発電をはじめとする海洋エネルギー発電技術の技術開発は，日米欧で 1970 年代から開始されていたが，高い発電コストや石油価格の下落から，各国において研究開発費用が削減され，長らく大学および研究機関での実験室試験や水槽試験の域を出なかった。しかし，2000 年代初頭になり，特にスコットランドが世界を先導して海洋エネルギーの技術開発，産業育成の強化に乗り出し，市場を取り巻く環境が大きく変化している。

図 6-36 に，スコットランドの政策，プレーヤー（参加者），技術開発レベルの変遷を示す。2000 年代に入り，スコットランド政府は産業界と議論を深め，2003 年に“Marine Energy Roadmap”を策定した。また，各種支援制度を次々と打ち出し，2006 年には EMEC で実証試験を行う事業者に対する助成制度（Wave and Tidal Energy Support：WATES），2007 年には海洋エネルギーの電力購入義務制度（Marine Supply Obligation：MSO），2008 年にはスコットランドの海域で事業性の成立する⁸海洋エネルギー技術を開発した研究チームに対して賞金 1,000 万ポンドを授与するサルトアイア賞（Saltire Prize）を創設した。加えて，2009 年には，再生可能エネルギーの買取義務制度（Renewables Obligation：RO）で求める再生可能エネルギー義務証書（Renewables Obligation Certificate：ROCs）の発行証書数について，波力に 5ROCs（250 ポンド/MWh），潮流に 3ROCs（150 ポンド/MWh）が設定された。これは当時，洋上風力が 1.5ROCs であったことから，非常に充実した支援レベルであることがわかる。なお，2011 年には波力 5ROCs，潮流 5ROCs に引き上げられ，さらに支援内容が充実した。

⁸ 2 年間で 100MWh 発電することを要件としている。

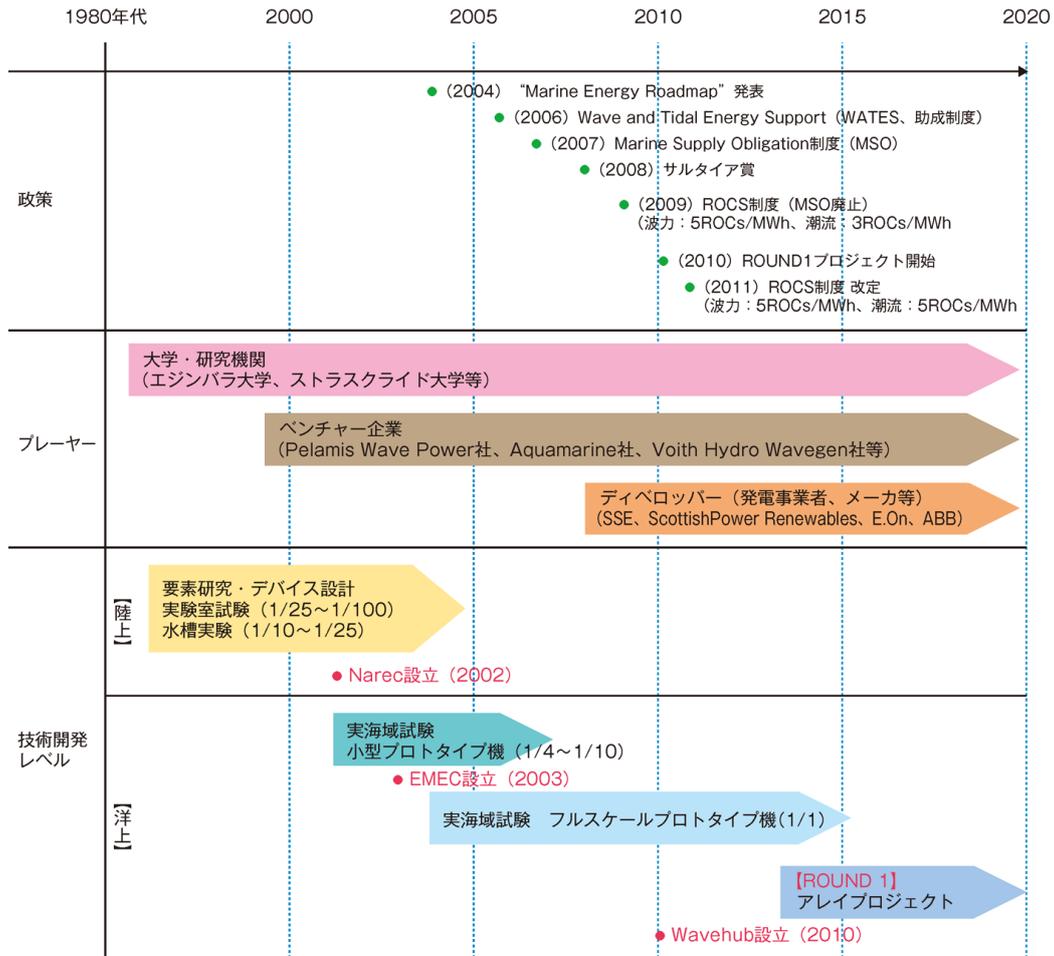


図 6-36 スコットランドの政策・プレーヤー・技術開発レベルの変遷

出典：各種資料より NEDO 作成

また、上記の施策を実施し、海洋エネルギー分野への関心を呼び込むとともに、世界初の本格的な実海域実証試験サイトとなる EMEC を 2003 年に設立し、充実した設備と実海域でフルスケール機の実証試験を行える環境を整えた。なお、英国には、EMEC の他に、1/10 スケールモデルの実証試験が可能な Narec、フルスケール機の実証試験が可能な Wave Hub が整備されている。

このような流れの中で、Pelamis Wave Power や Aquamarine に代表されるベンチャー企業が登場し、技術開発を進めていった。また、2009 年に海洋エネルギー発電技術に充実した ROCS が設定されたことなどによって、大手発電事業者や重電機メーカーなどが市場に参入し、投資が活発化した。

(3) スコットランドのROUND 1 プロジェクト

2010 年には、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、スコットランドのオークニー諸島周辺海域で開始された。本プロジェクトは、スコットランド政府の指定海域で事業者が選定され、2010 年 3 月には落札企業が公表された。現在 SSE、ScottishPower Renewables、E.On、ABB などが海面リース契約を結び、波力発電、潮流発電のファーム化に向けて、ベンチャー企業と協同で技術開発を進めている。

第6章 海洋エネルギー

ROUND1 の 1.6GW の内訳は、波力発電 0.6GW、潮流発電 1.0GW に設定されている。特に波力エネルギーポテンシャルが大きい西側に、ROUND1 の波力発電プロジェクト海域が割り当てられている (図 6-37)。

また、ROUND1 に加え、追加的な商用リースが、スコットランドの他の海域で開始されている。1 サイトのサイズは 30MW 未満と、ROUND1 と比較すると小規模なもので、海洋エネルギー発電の技術革新を目的としたサルタイア賞獲得に向けた事業者の取り組みに期待が掛かっている。

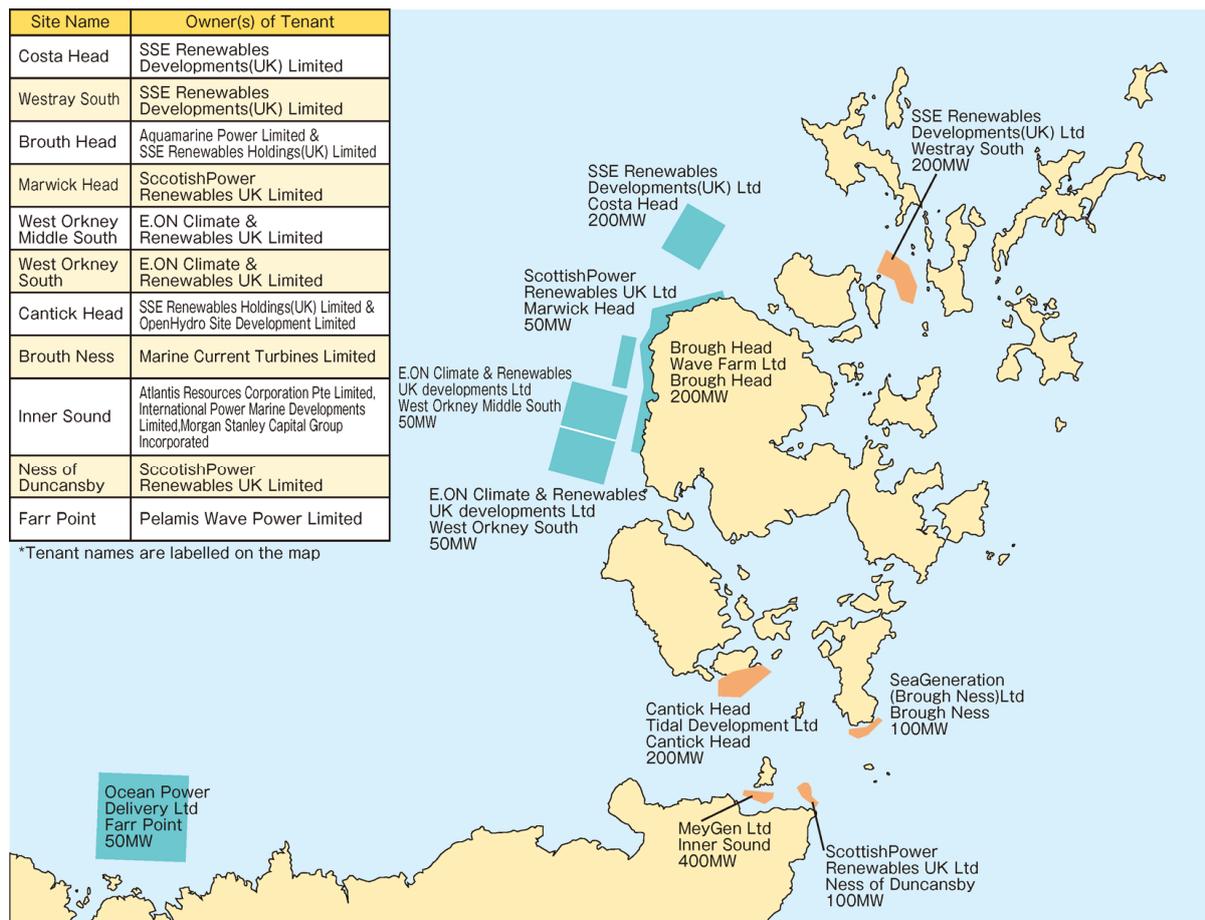


図 6-37 Round 1 プロジェクト指定海域

注：青色は波力発電の指定海域，オレンジ色は潮流発電の指定海域

出典：“Wave and Tidal Energy in the UK” (2011, Renewable UK) より NEDO 作成

6.3.2 海洋温度差発電の市場動向

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。

日本の海洋温度差発電技術の優位性は、コア技術となる海洋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（ウエハラサイクル：1994年、上原ら）、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。

要素部材についても、日本企業が強い競争力を持つものは多い。海洋温度差発電に取り組むゼ

ネシスは、海洋温度差発電に特化した熱交換器の開発を進め、チタンを利用したプレート型の熱交換器を開発している。海洋温度差発電には、大規模な熱交換器が搭載されるため、世界市場が拡大した際、ゼネシス製に代表される日本のチタンプレート型の熱交換器が世界シェアを獲得できれば、相当量（1MW規模で12.4～18トン）のチタンの需要が生まれることになり、これによる日本のチタン産業への波及効果も期待できる。なお、チタン製造技術については、経済産業省によって2005年度からの4年間、海洋温度差発電を含む今後の大量チタン利用を想定し、国際競争力を高めるために「高機能チタン合金創製プロセス技術開発プロジェクト」が実施され、チタンの低コスト製造方法などに関する技術開発が行われた。

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唯一となる実証試験プラントが稼働を開始した。

一方で、1990年代の実証試験を境に、一時、研究開発が行われていなかった海外においても、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（Department of Energy : DOE）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、ハワイ州では米国エネルギー省の支援によって、10MW級の実証試験が計画されている。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（6.4.2節参照）。

以上のことから、日本の技術競争力は、海外の実証プラントがまだ稼働していない現段階では優位性を保っているが、今後、海外の実証試験が進むにつれ、海外メーカーの技術力の躍進によって、急速に競争力を失う危険性がある。

日本の技術競争力を保ち、かつ世界市場シェアを獲得していくためには、国内での迅速な実証試験の実施および他国の追随を許さないコア技術の研鑽に取り組む必要がある。

6.4 各国の技術開発動向

6.4.1 波力発電・潮流発電の技術開発動向

現在、海洋エネルギー発電の技術開発は、欧州（特に英国）や米国を中心に進められている。日本では過去に基礎的研究が進められており、当時は世界を主導していたが、近年は実用化に向けた技術開発の進捗は欧米に10年遅れているといわれている。

海外では、周辺海域の波力および潮流のエネルギー密度が高い英国を中心に1990年半ばから再び活発化し、多くの波力・潮流発電装置の開発が進められている。国別の主要な波力発電プロジェクト件数を図6-38に示す。プロジェクトの約6割は欧州で、さらにその約半数は英国で行われている。

第6章 海洋エネルギー

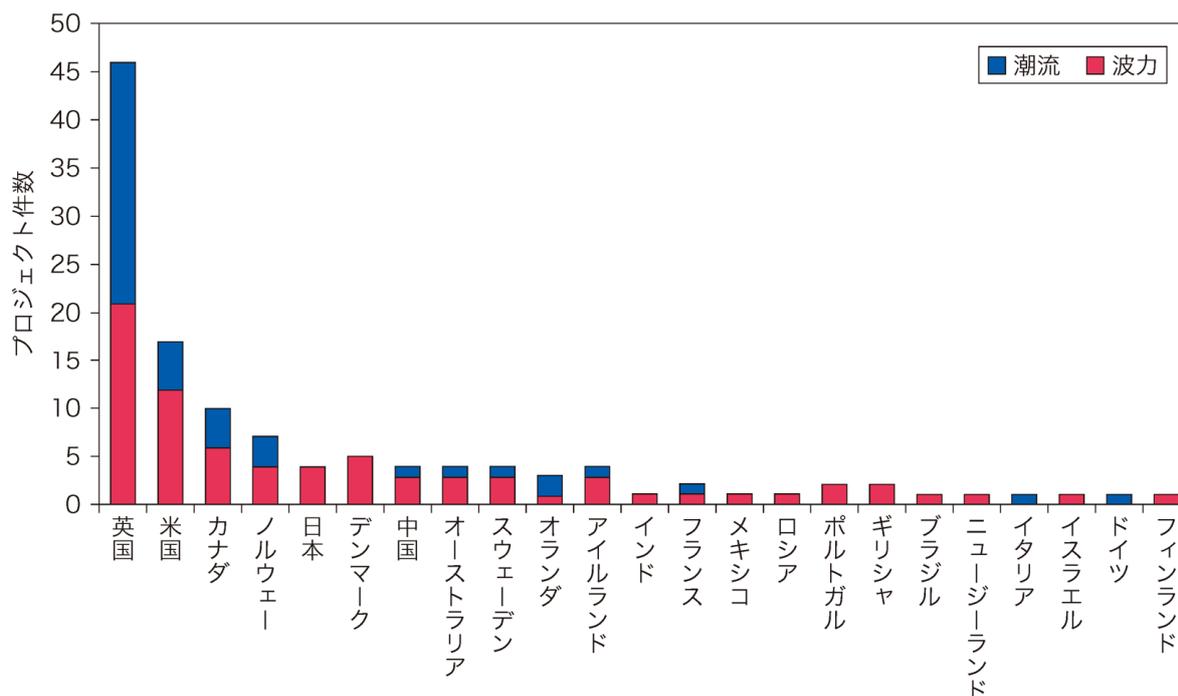


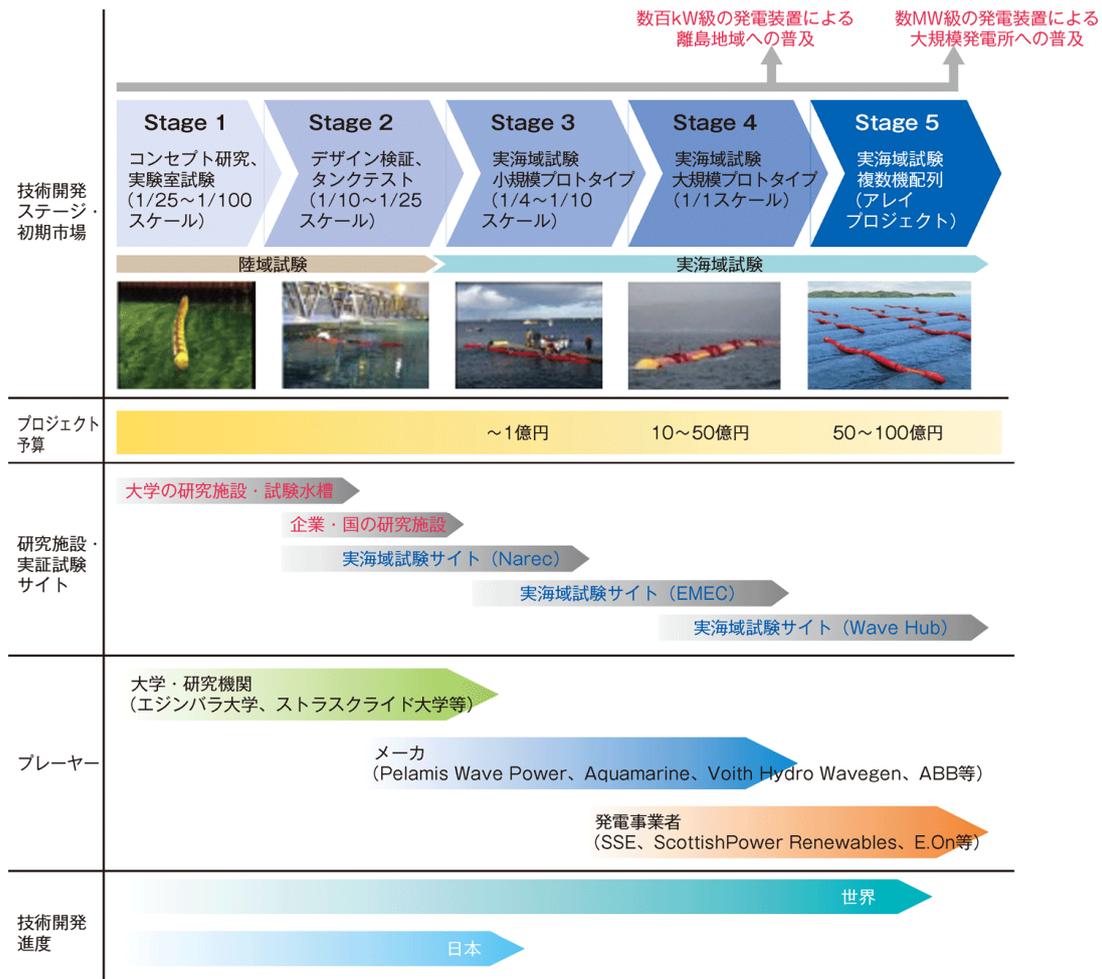
図 6-38 各国の主要な海洋エネルギー技術開発件数

出典：“Accelerating marine energy” (2011, Carbon Trust) より NEDO 作成

図 6-39 に、海洋エネルギーの技術開発ステージと、世界および日本の取り組み状況を示す。陸域でのコンセプト研究 (Stage1)、デザイン検証やタンクテスト (Stage2)、実海域での小規模プロトタイプ機試験 (Stage3)、大規模プロトタイプ機試験 (Stage4)、更にフルスケール機を複数機配列したアレイプロジェクト (Stage5) へと、実用化に向けて技術開発ステージを進むことがモデルケースとなっている。

これまで、大学や研究機関、ベンチャー企業が主体となり、Stage1～Stage3 の技術開発が進められてきた。近年、欧州を中心に大手発電機メーカーや発電事業者が技術開発に参入しており、実用化に近い Stage4～Stage5 の技術開発ステージへと進行している。

一方、日本は Stage2～Stage3 の段階にあり、技術開発の初期段階に位置している。日本の技術の実用化に向けては、早期に基礎技術を確立し、実海域での小規模プロトタイプ機およびフルスケール機の実証試験へと進むことが必要となる。



出典：スコットランド政府資料、各社ホームページ，“Accelerating marine energy” (2011, carbon Trust) などよりNEDO作成

図 6-39 海洋エネルギーの技術開発ステージ

(1) 日本

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。

特に日本は四方を海に囲まれていることから、波力発電への期待は高く、「海明」や「海陽」（表 6-14）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。2003年に終了した「マイティホエール」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。

潮流発電については 1980 年代、日本大学が来島海峡において世界で初めて潮流発電に成功し、その後は日本大学や新日本製鐵で研究された他、2002年に海上保安庁が明石海峡に浮灯標電源用の小型の潮流発電システムを設置したが、電力供給用の潮流発電システムの実用化に至るまでの実証研究は実施されていない。

第6章 海洋エネルギー

表 6-14 日本の主要な大規模実証プロジェクト

プラント・技術・ 開発主体など	概要	写真
海明 —振動水柱型・空気流 —1978～1980, 海洋科学技術センター	<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>
海陽 —可動物体型・回転運動 —1984～1985, 日本造船振興財団	<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崎水深 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資料</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	<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 15 %. ・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：「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), 「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—」(2004, JAMSTEC) より NEDO 作成

しかし, 近年の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を受け, 海洋エネルギー利用が再び脚光を浴びており, 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。

2009 年度の NEDO 「洋上風力発電等技術研究開発 (海洋エネルギー先導研究)」では, 越波型波力発電装置の技術研究開発に関する東海大学の提案を採択した。2010 年度の環境省による「地球温暖化対策技術開発等事業 (競争的資金)」では, 東京大学, 三井造船, 三井造船昭島研究所による「波力エネルギーの地域特性評価と係留システムの研究」が採択された。

また, 2011 年からは「海洋エネルギー技術研究開発」が開始され, 産学官が一体となった, 波力発電, 潮流および海流発電, 海洋温度差発電の実証研究, 要素技術開発, 調査研究を実施している。

本プログラムでは「海洋エネルギー発電システム実証研究」と「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」の 2 つの事業を実施している。「海洋エネルギー発電システム実証研究」は, 実用段階に比較的近い海洋エネルギーを活用した発電装置について, 発電効率の向上, 運用およびメンテナンス手法や環境影響評価手法の確立などを目的とし, 事業化時に発電コスト 40 円/kWh 以

下となる海洋エネルギー発電システムの実用化を目標としている。発電システムの水槽試験などによる技術的評価、想定海域での自然条件や環境影響の調査および実証研究の全体計画を検討するフェージゼリティスタディー (FS) を行う第1フェーズを2011～2012年度の2年間、その後、実海域で装置を設置し実証を行う第2フェーズを2013～2015年度の3年間実施する予定となっている。

また「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」は、海洋エネルギーを活用した次世代の革新的な発電装置について、発電効率や耐久性の向上、設備や運用コストの低減などを目的に、事業化時に発電コスト20円/kWh以下となる海洋エネルギー発電の要素技術の実用化を目標としている。発電装置の高効率化および耐久性の向上、メンテナンス性の向上などに関する研究開発を実施した上で、水槽試験などによる発電装置などの発電性能や、信頼性などを試験および評価するものである。

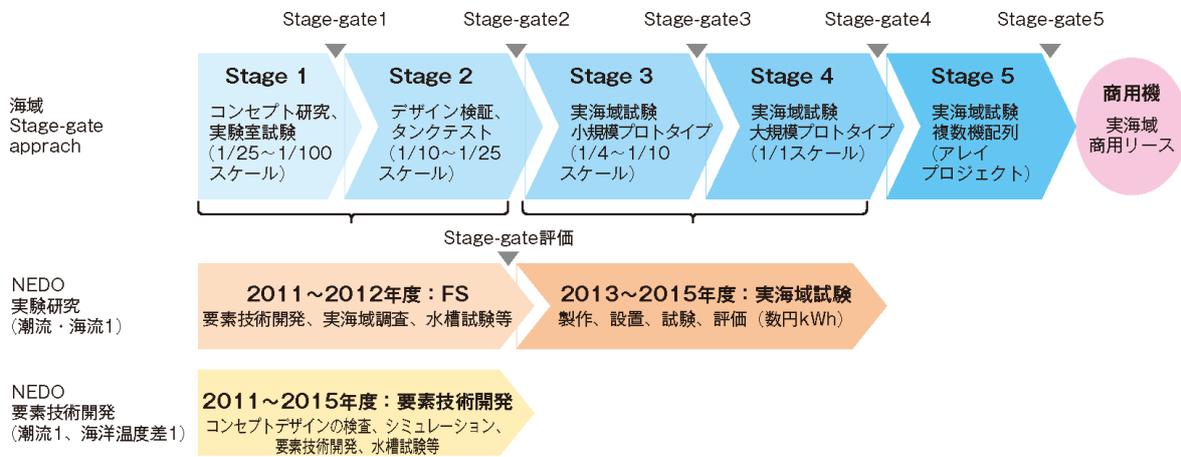


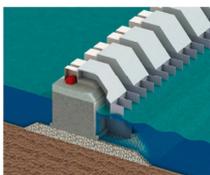
図 6-40 NEDO「海洋エネルギー技術研究開発」の概要

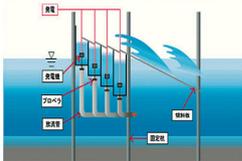
出典：NEDO 作成資料

本事業に採択された事業者を表 6-15 および表 6-16 に示す。海洋エネルギー発電システム実証研究では、波力発電 4 件、および潮流発電 2 件を採択している。また、次世代海洋エネルギー発電技術研究開発では、海流発電 1 件、海洋温度差発電 1 件、および潮流発電 2 件を採択している。なお、実証研究で川崎重工業の開発する潮流発電装置は、NEDO 事業とは別に EMEC で実証試験を実施する予定であり、日本の大手重工業メーカーの初の参入として注目を集めている。

第6章 海洋エネルギー

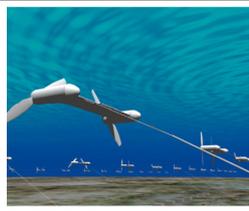
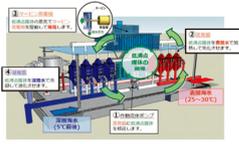
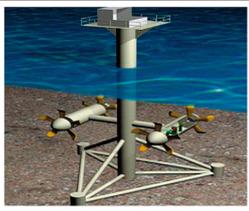
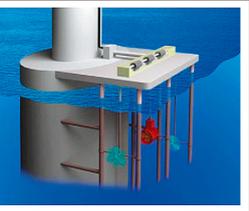
表 6-15 「海洋エネルギー発電システム実証研究」の採択事業

	①機械式波力発電	②空気タービン式波力発電	③ジャイロ式波力発電	④着定式潮流発電
共同研究先	三井造船	三菱重工鉄構エンジニアリング 東亜建設工業	ジャイロダイナミクス 日立造船	川崎重工業
発電原理	波の上下運動をラックと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。	海底にブレードや発電機等からなるナセルを設置し、海流の運動エネルギーをナセルの回転運動に変換し発電機で発電。
研究開発の概要	同調制御を利用した、緊張係留による波力発電の開発。	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式の波力発電の開発。	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。	設置やメンテナンスの際に、潜水士を不要とする海底設置式の潮流発電の開発。
装置イメージ				

	⑤浮体式潮流発電	⑥越波式波力発電
共同研究先	三井海洋開発	市川土木 協立電機 いであ
発電原理	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。	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。
研究開発の概要	荒天時に耐えうる浮体構造・係留方法の確立と共に、高効率垂直式の潮流タービンを開発する。	傾斜角度と水槽容量の最適化及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。
装置イメージ		

出典：経済産業省資料，各社プレスリリース等より NEDO 作成

表 6-16 「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」の採択事業

	①水中浮遊式 海流発電	②海洋温度差発電	③油圧式潮流発電	④橋脚利用式 潮流発電
委託先	東京大学, IHI, 東芝, 三井物産戦略研 究所	佐賀大学 神戸製鋼所	佐世保重工業 東京大学 九州大学	ナカシマプロペラ, 五洋建設 広島工業大学
発電原理	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、海流の運動エネルギーを回転運動に変換し発電機で発電。	海表面と深層の温度差を利用して作動流体を循環させ、タービンの回転運動に変換し発電機で発電。	上げ潮、下げ潮に対応したツインローターにより、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し、油圧式の同期発電機で発電。	上げ潮、下げ潮に対応する対称翼により、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し、同期式発電機で発電。
研究開発の概要	浮体・係留システムの安定性やメンテナンス性の高度化及びタービン発電機の高効率化の要素技術を開発。	高効率な熱交換器の要素技術を開発。	ツインブレード及び・高効率油圧制御システムの要素技術を開発。	対称ブレード及び橋脚設置用の基礎に関する要素技術を開発。
装置イメージ				

出典：経済産業省資料等より NEDO 作成

(2) 欧州

欧州の海洋エネルギー技術の開発を支える大きな原動力は、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に取り組もうとする政府の積極的な政策、クリーン技術の主導的地位を得て経済成長の機会をもたらそうとする産学会の意欲にある。

欧州でも、1970年代以降に海洋エネルギーへの関心が高まり、多くの研究開発が行われた。エネルギー危機後に研究開発予算は縮小したものの、周辺海域の波力および潮流エネルギー密度が高い英国を中心に1990年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、潮流発電装置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。

また、欧州が先行する理由の一つとして、スコットランドのオークニー諸島に整備されているEMECや、ポルトガルのWave Energy Centreなど、実証試験サイトが複数整備されており、企業の研究開発を大きく後押ししている点が挙げられる。

1) 欧州研究開発フレームワーク (FP)

欧州研究開発フレームワーク計画 (Framework Programme : FP) は、欧州連合の科学分野の研究開発への財政的支援制度である。1984年のFP1から始まり、現在はFP7 (2007~2013) が実施されている。

FP7のうち海洋分野のプロジェクトとして、次に示す7つの研究テーマに関するプロジェクトが進行中である (表 6-17)。FP7では、WAVEPORTやSTANDPOINTなど、単機の技術開発に加えて、複数基を配列したアレイプロジェクトが進行している。WAVEPORTでは米国のOcean Power Technologies (OPT) のPowerBuoy波力発電装置、STANDPOINTではアイルランドのWavebobの波力発電装置の技術開発が進められている。

表 6-17 FP7における海洋エネルギープロジェクト

プロジェクト名	概要	開始時期	期間 [月]	総予算 [万ユーロ]	EU ファンド [万ユーロ]
H2OCEAN	水素製造およびエネルギー多目的利用設備を備えた風力・波力発電洋上プラットフォームの開発	2012.01.01	36	605	453
MERMAID	革新的多目的利用外洋プラットフォームの開発	2012.01.01	48	738	548
MARINET	海洋再生可能エネルギーに係る技術開発インフラネットワークの構築	2011.04.01	48	1109	900
AQUAGEN	費用効率の高い水上パワーテイクオフシステムの開発	2011.01.01	36	242	174
ORECCA	外洋再生可能エネルギー変換用プラットフォームの調整活動	2010.03.01	18	180	160
WAVEPORT	波チューニングシステムによる革新的リアルタイム波動を用いた商用規模の波力エネルギー変換装置の実証・設置	2010.02.01	48	850	459
STANDPOINT	ポイント・アブソーバー波力エネルギー変換装置の実証による標準化	2009.11.16	36	850	510
PULSE STREAM 1200	潮流発電装置のフルスケール実証プロジェクト	2009.11.01	48	1394	801
SURGE	WaveRoller 波力発電装置の開発	2009.10.05	36	537	300
WAVETRAIN2	波力エネルギー研究者のための初期訓練ネットワーク	2008.10.01	45	358	358
EQUIMAR	海洋エネルギー抽出装置の性能・コスト・環境影響に係る公平な試験・評価方法の検討	2008.04.15	36	548	399
CORES	海洋再生可能エネルギーシステム装置の開発	2008.04.01	42	452	345

出典：EC CORDIS ホームページより NEDO 作成



図 6-41 FP7 のアレイプロジェクト (STANDPOINT)

出典：“PORTUGAL Marine Energy Activities” (2012, WEC Oceans 2012 資料)

- ①海洋エネルギー変換に係る新規装置およびコンセプトの開発
- ②海洋エネルギーに係る準規範的研究
- ③初期訓練のためのネットワーク構築
- ④フルスケール革新的システムの実証
- ⑤大水深沖合海域での風力および海洋エネルギー複合発電プラットフォームの研究
- ⑥沖合での再生可能エネルギー変換のためのプラットフォームに係る調整活動
- ⑦海洋再生可能エネルギー分野の労働市場ニーズと関連職種の把握

2) EUの技術開発ロードマップ

2007年11月、欧州委員会は、EU自身がその政治的目標を達成し、企業がエネルギーへの新しいアプローチの機会の恩恵を受けるために必要な技術の開発を支援するために、欧州戦略的エネルギー技術計画の提案を採択した。この計画では、特定の産業部門に適切な資源やステークホルダーを取りまとめ、エネルギーの研究と技術革新を強化するための欧州産業イニシアチブ (European Industrial Initiative) を創設する必要性が強調されている。

海洋エネルギー産業の欧州イニシアチブでの戦略的目標と産業部門の目標は、次のとおりである。また、これらの目標を達成するための技術ロードマップを図6-42に示す。

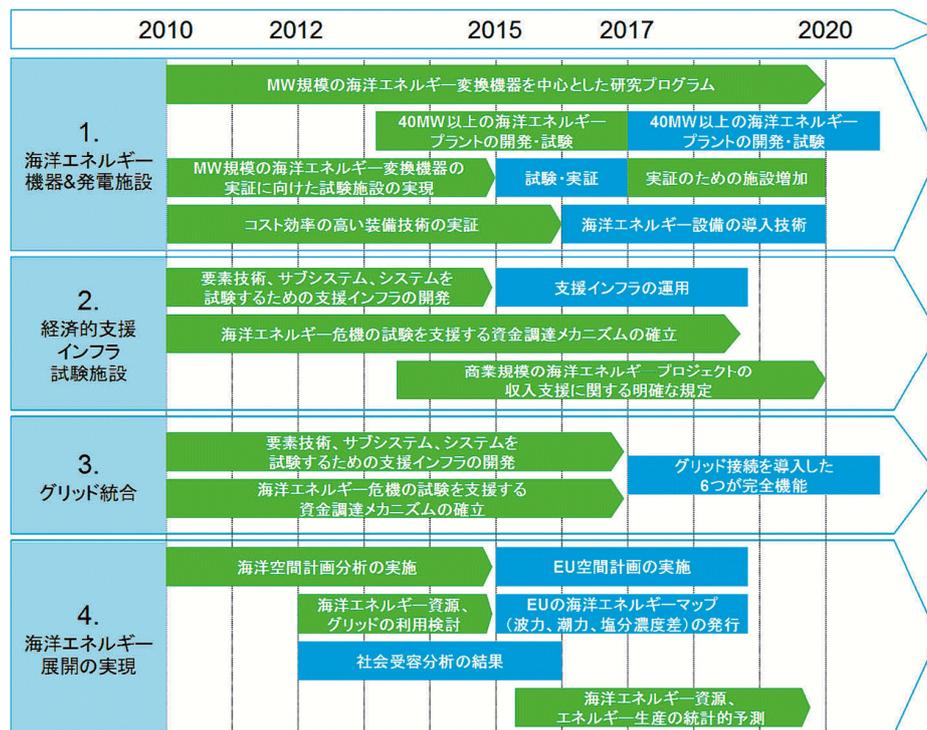


図6-42 海洋エネルギー産業の欧州イニシアチブの技術開発ロードマップ

出典：欧州産業イニシアチブより NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

i) 戦略的目標

- ・海洋エネルギー発電の運用時の競争力を実証すること
- ・海洋エネルギー資源からエネルギーを獲得すること
- ・海洋発電のグリッド統合を促進すること

ii) 産業部門の目標

- ・海洋エネルギーの導入量を 2020 年までに 3.6GW, 2050 年までに 188GW とすること

3) 英国の技術開発ロードマップ

海洋エネルギーを先導している英国の技術開発ロードマップを次に紹介する。

i) “海洋エネルギーアクションプラン (Marine Energy Action Plan)”

英国政府は 2010 年に「海洋エネルギーアクションプラン (Marine Energy Action Plan)」を発表した。このアクションプランは、波力、潮汐力、潮流を対象とし、技術開発を推進するために、民間部門と公共部門で求められる対策の概要を取りまとめ、「英国再生可能エネルギー戦略 (UK Renewable Energy Strategy)」「低炭素産業戦略 (Low Carbon Industrial Strategy)」で定めたビジョンを達成することを目標としている。

波力発電と潮流発電に関しては、2030 年までに図 6-43 に示すような技術展開を計画しており、波力発電と潮流発電の合計で 2020 年までに 1~2GW の導入が可能と見通している。

ii) “Marine Renewable Energy Technology Roadmap”

英国エネルギー研究センター (United Kingdom Energy Research Centre : UKERC) は 2008 年 3 月、「Marine (Wave and Tidal Current) Renewable Energy Technology Roadmap」の最終版を発表した。このロードマップでは、主に技術開発の側面から 2020 年までの導入目標 2GW の達成に向けた道筋が示されているが、政策、環境、商業化の側面についても考慮されている。技術開発者やプロジェクト開発者、政策決定者、政府機関省庁、投資家 (民間、公共)、サプライチェーン、コンサルタント、学術機関に向けたものであり、海洋部門全体の進展を促すことを目的としている。

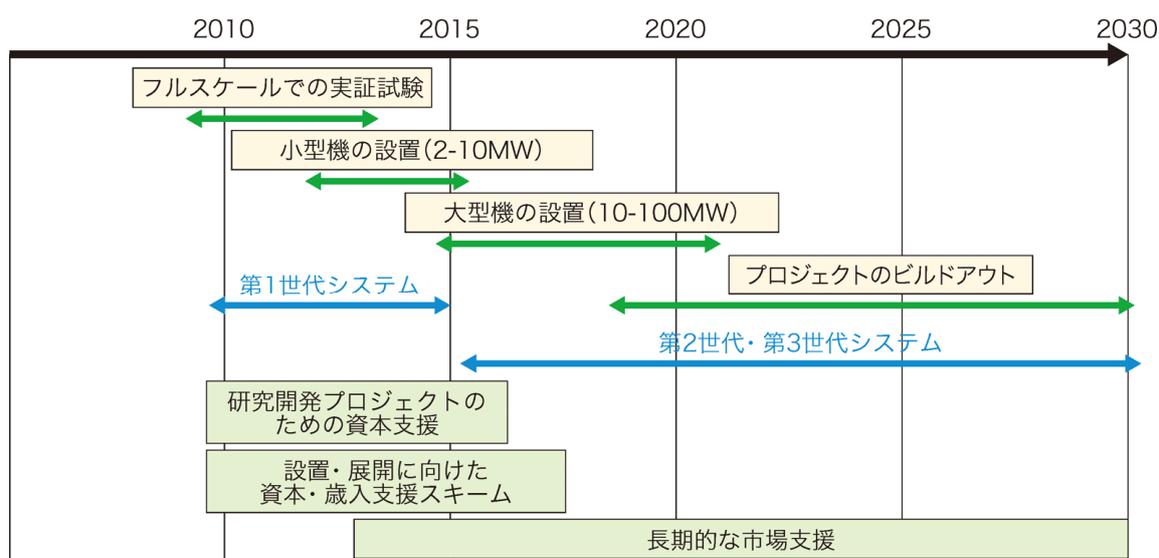


図 6-43 波力・潮流発電 (wave & tidal stream) の技術展開の計画

出典：“Marine Energy Action Plan2010” (2010, 英国政府) より NEDO 作成

本ロードマップでは、まず次のような 2020 年に向けたビジョンを定めている。

〈2020 年に向けたビジョン〉

- 英国の海域で 2020 年までに 2GW 導入を目標に、環境的および社会的責任をもって波力、潮流エネルギーを活用すること
- 展開の阻害要因を克服するための政策や資金調達制度の契機をすること
- サプライチェーンを拡大し、そのあらゆる水準で技術を向上させることで商業的に成立する産業として確立すること
- 2020 年までに他のエネルギー源に対して競争力をもつようになること

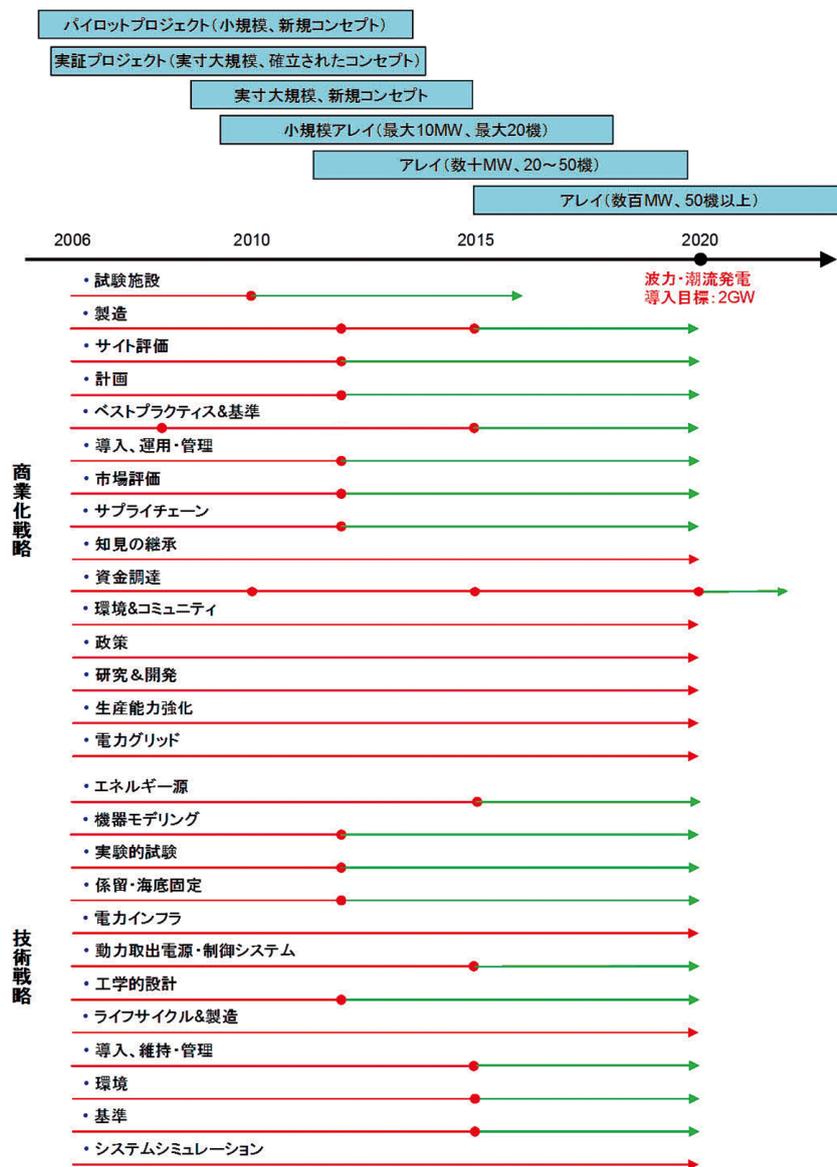


図 6-44 英国の 2020 年までの展開シナリオと商業化戦略と技術戦略

出典：“Marine Renewable Energy Technology Roadmap” (2008, UKERC) より NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

その上で、このビジョンを実現するための展開シナリオを定めており、各段階での商業化戦略と技術戦略を定めている（図 6-44）。

4) 波力発電、潮流発電の実証試験サイト

欧州では、表 6-18 に代表される実証試験サイトが複数、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。

最も進んでいるのは英国であり、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。実証初期段階としては、2002年に北東イングランドに Narec が整備されており、ここでは初期試作機となる 1/10 スケールモデルの実証試験が行われている。また、2004年にスコットランドのオークニー諸島に整備されている EMEC では、試験機から実機スケールの実証試験を行うことができる。加えて、2010年に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。

その他、ポルトガルの Wave Energy Centre、デンマークの Nissum Bredning、フランスの SEM-REV などが整備されている。

表 6-18 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 オークニー諸島)	実機スケールの実証試験が可能。送電線も整備（系統連系）。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が整備される予定。
Narec (北東イングランド)	造船のドックを改良して作った大型水槽による海洋エネルギー発電デバイスの水槽試験が可能であると共に、海底ケーブルや高電圧試験を行う設備、潮流発電については 3 MW 級のドライブトレインやブレード試験を行うことが可能である。
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 ^{※1} や IEA-OES ^{※2} 等）の活動への参加、各種レポートの作成等も実施。

※1：European Ocean Energy Association

※2：IEA-Ocean Energy Systems (<http://www.iea-oceans.org/index.asp>)

出典：各種資料より NEDO 作成

i) EMEC (European Marine Energy Centre)

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8月に開設され、研究実証センターとして機能している。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、英国貿易産業省 (DTI) やカーボントラストなどが含まれる。

EMEC のあるオークニー諸島は海洋条件に恵まれており、波力発電および潮流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 5 つ、浅水域のテストサイトを 1 つ、陸上までの海底ケーブル、変電所、風速や波高などの計測所、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。

第6章 海洋エネルギー

潮流発電については、水深 20~50m の 5 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。より潮流な穏やかなテストサイトも別途用意されている。

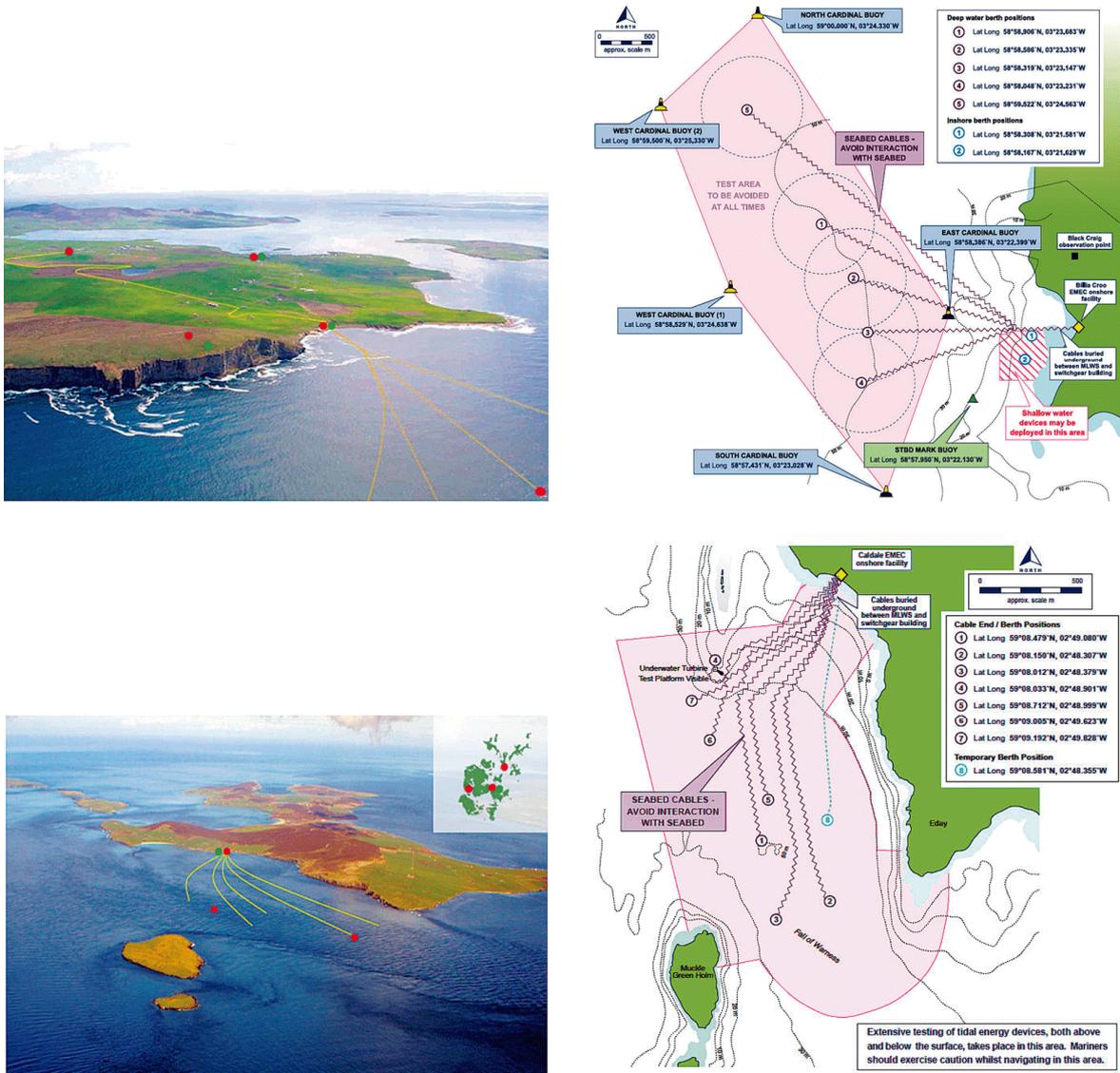


図 6-45 EMEC 実証試験サイト（上：波力サイト 下：潮流サイト）

出典：EMEC ホームページ

表 6-19 EMEC の主要設備

主要設備	概要
実験サイト	波力発電：水深約 50 m，沖合 1～2 km の位置に 5 箇所，浅水域に 1 箇所 潮流発電：水深 10～50 m，沖合約 1～2 km の位置に 7 箇所
海況データ測定設備	波高・波長・方角を計測。リアルタイムで計測データを送信。
変電所	送電網連系のための開閉装置，補助変圧器，バックアップ用発電機，力率改善回路装置，受送電メーター，通信機器等を装備
データセンター	実験サイト・各計測機器からのデータを光ファイバで受信
陸上観測装置	2 台の監視カメラにより陸上側から海上のサイトを監視。
気象観測ステーション	気象情報をリアルタイムでデータセンターへ送信。

出典：EMEC ホームページより NEDO 作成

ii) Narec

Narec は、北東イングランド地域を管轄する英国政府機関（ONE：英国北東イングランド経済開発公社）と民間からの資金提供によって、2002 年にノーサンバーランド州ブライスに設立された。EMEC などでのフルスケールの実証試験に進むための、前段階の技術開発拠点として位置付けられている。Narec では、英国の洋上風力や海洋エネルギーなど海洋再生可能エネルギーの導入普及を加速するために、洋上での実証研究，陸上試験や水槽試験などを推進し、技術の検証や認証に向けた試験環境を提供して、新規技術の確立，信頼性やコストを検証することなどが可能である。波力発電の実証試験設備は、幅 5.2m，長さ 56m，深さ 4.2m～7.2m の人工水路で、3.25 秒ごとに波高 1m の人工波や不規則な波を任意に再現可能である。また、深さ 1～7m，幅 6m，流速 0～1.5m/s の潮流発電実験設備を備えている。さらに、洋上風力発電については、15MW ドライブトレインや 100m ブレード，実海域で複数機の洋上風車の実証研究などが可能である。



① 実験棟 ② 風力タービン試験設備 ③ 波動水槽 ④ 模擬海底
⑤ 静水槽 ⑥ 3 MW 潮流発電ドライブトレイン試験設備

図 6-46 Narec 実証試験設備

出典：Narec 資料

iii) Wave Hub

Wave Hub は、南西イングランドのコーンウォール州北岸 16km に位置し、世界最大の波力発電実証試験サイトとして建設が開始され、2010 年 12 月に運用を開始した。設立に当たっては、South West RDA, European Regional Development Fund Convergence Programme（欧州地

域開発基金) および英国政府からの資金提供を受けている。

実機スケールの4つのテストサイト、海底ケーブル、変電所をもち、国内送電網に接続されている。WaveHubは、EMECと同様、商用化に向けた最終段階の技術開発拠点として位置付けられている。Wave Hubでは、実証試験機からの電力をユーザーの代わりに販売し、発電量に応じて再生可能エネルギー義務証書(ROC)の形で還元するという取り組みを行っている。

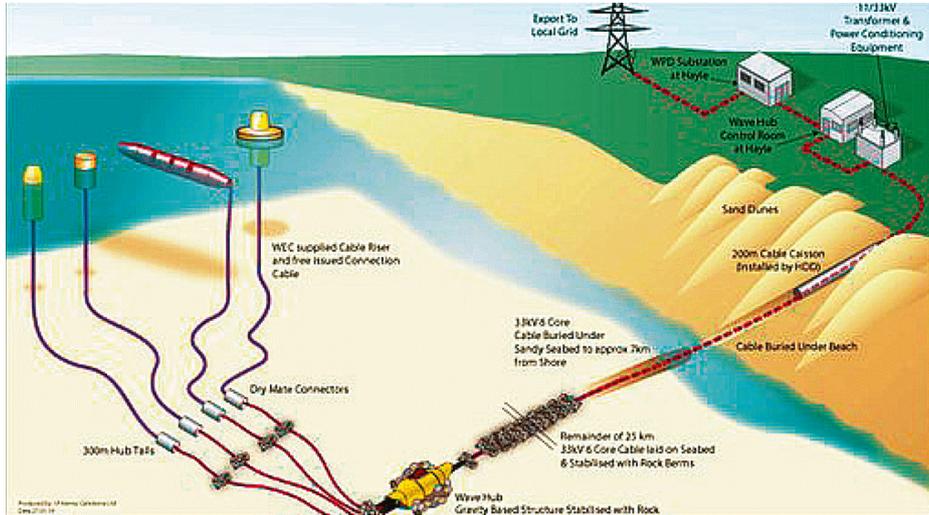


図 6-47 Wave Hub

出典：Wave Hub ホームページ

5) 英国・スコットランドの実証プロジェクト動向

表 6-20, 図 6-48, 図 6-49 に、現在スコットランドの EMEC で実証試験が実施されている技術を示す(各技術の詳細は 6.5 節参照)。単機の実証試験が主に実施されているが、英国各所において、複数基を配列したアレイプロジェクトが複数計画されている。

表 6-20 EMEC で実証試験中の主要技術

技術	装置	メーカー名
波力	Pelamis	Pelamis Wave Power
	Oyster	Aquamarine Power
潮流	Open Hydro Tidal Turbine	Open Hydro
	Hammerfest Strom Tidal Turbine	Hammerfest Strom
	TGL Tidal Turbine	Tidal Generation Limited
	Scotrenewables Tidal Turbine	Scotrenewables Marine Power
	Atlantis Resources Tidal Turbine	Atlantis Resources
	Voith Hydro Tidal Turbine	Voith Hydro

出典：EMEC 資料より NEDO 作成



図 6-48 EMEC 波力サイトの実証試験機

出典：EMEC 資料



図 6-49 EMEC 潮流サイトの実証試験機

出典：EMEC 資料

(3) 米国

1) 主要な技術開発プロジェクト

表 6-21 に米国の主要な波力および潮流発電プロジェクトを示す。米国は英国に次いで海洋エネルギーに係る技術開発が活発な国である。水域の管轄の問題や、認可プロセスに時間とコストが掛かること、そして政府の研究開発費が不足していることが、米国の海洋エネルギープロジェクトの開発を遅らせる要因となってきたが、規制環境については改善され始めている。

波力発電については、Ocean Power Technologies (OPT) の可動物体型の Power Buoy 発電装

置が先導しており、ハワイ州やオレゴン州において実証試験が実施されている。

潮流発電については、ニューヨークで、Roosevelt Island Tidal Energy (RITE) プロジェクトと呼ばれる潮流発電プロジェクトが Verdant Power によって実施されている。2006年～2009年には、世界初の潮流発電の系統連系プロジェクトとして、ヨー制御⁹した6基のプロペラ式潮流発電システム（発電出力200kW）が稼動し、電力を供給した。2012年1月には、米国連邦エネルギー規制委員会（FERC）によって発電施設としての商用利用が認可され、最終的には10MWに達し、8,000世帯分の電力供給を目指している。

表 6-21 米国の主要な波力・潮流発電プロジェクト

設置場所	名称	開発事業者	技術	設置	発電容量[kW]	設置年
米国	SeaDog	Independent Natural Resources (米)	波力 (可動物体型)	固定式	— (ポンプ実証)	2007
米国 オレゴン州	AquaBuOY	Finavera Renewables (加)	波力 (可動物体型)	浮体式	250	2007
米国 ハワイ州	PowerBuoy (PB40)	Ocean Power Technologies (米)	波力 (可動物体型)	浮体式	40	2008
米国 オレゴン州	PowerBuoy (PB150) ¹⁰	Ocean Power Technologies (米)	波力 (可動物体型)	浮体式	150	2012
米国 ニューヨーク市	Free Flow	Verdant Power (米)	潮流	固定式	1,200 (200 kW×6 基)	2006
米国 メイン州	TGU	Ocean Renewable Power Company (米)	潮流	固定式	300	2012

出典：米国エネルギー省ホームページ、「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), 海洋エネルギー資源利用推進機構資料, IEA-OES Annual Report 2010 (2010, IEA-OES), オレゴン波力エネルギートラストホームページ, HCEI ホームページ, Verdant Power ホームページより NEDO 作成

2) 主要な技術開発プログラム

米国エネルギー省 (DOE) では、水力発電プログラム (Water Power Program) の下、海洋エネルギーの技術開発を推進している。同プログラムは 1970 年代から開始され、当初は中小水力を中心とする従来型の水力発電技術に重点を置いていたが、2005 年のエネルギー政策法の成立以降、海洋エネルギーなどの新技術開発にも軸足を置き始め、2008 年～2010 年に 14 の従来型水力発電と 73 の海洋エネルギー関連技術開発に資金供給した。

2012 年度と同プログラムの予算は 59 百万ドル、うち 34 百万ドルが海洋エネルギーに割り当てられている。

⁹ 回転面を変動する流れの向きに追尾させる制御。

¹⁰ OPT はさらに発電容量が 500kW の PB500 の研究開発を進めており、将来的には PB150 とともにオレゴン州のウェーブパークに建設予定。

第6章 海洋エネルギー

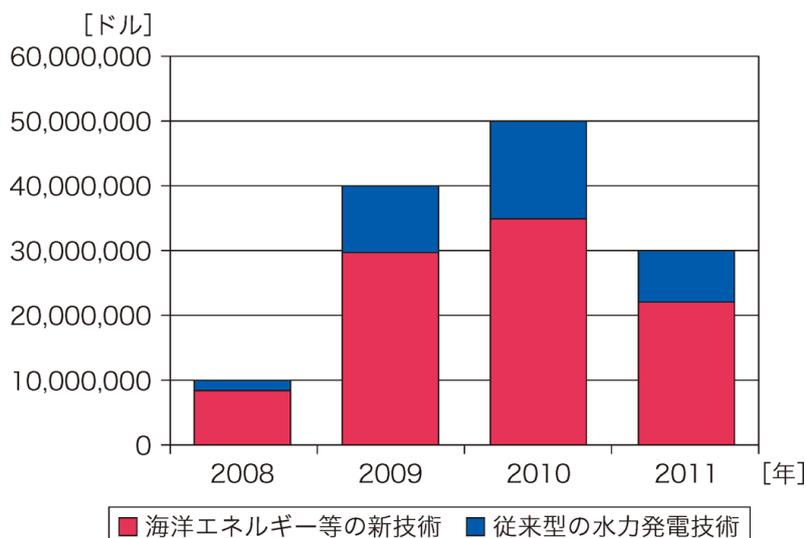


図 6-50 Water Power Program の予算推移

出典：DOE EERE ホームページより NEDO 作成

3) 技術開発ロードマップ

米国の海洋再生エネルギー関連産業団体である Ocean Renewable Energy Coalition (OREC) は 2011 年 11 月、米国の海洋再生可能エネルギー技術ロードマップ (The United States Marine Hydrokinetic Renewable Energy Technology Roadmap) を発表した。本ロードマップの目的は、米国政府に対し、海洋再生可能エネルギー技術への投資の指針を示すことを目的としており、波力、潮流および河川流、海洋温度差、塩分濃度差の技術を対象としている。

本ロードマップでは、2030 年までに 15GW の導入目標を設定し、海洋再生可能エネルギー技術の商業化を実現するために必要な技術開発内容、および各種施策について、時間軸を含めたアクション計画を示している (図 6-51)。

また、海洋再生可能エネルギー技術の副次的効果 (産業育成や雇用創出など) について分析しており、2030 年までに 15GW の目標を達成した場合、製造、設置、運用保守に係る 36,000 人分の雇用を創出可能と分析している。

フェーズ I:	実証試験 100kW	→	パイロット事業 5MW
フェーズ II:	パイロット事業 5MW	→	商用化 (小規模アレー) 50MW
フェーズ III:	小規模アレー 50MW	→	商用化 (大規模アレー) 100MW

図 6-51 商業化に向けた段階的アプローチ

出典：“U.S. Marine and Hydrokinetic Renewable Energy Roadmap” (2011, OREC)

(4) カナダ

カナダでは、国内の海洋関連産業および有識者によって組織された委員会での検討を踏まえて、2011年10月に「カナダの海洋再生可能エネルギー技術ロードマップ (Canada's Marine Renewable Energy Technology Roadmap)」が発表された(図6-52)。本ロードマップの中では、次の目標が掲げられている。

- ・カナダの産業で導入される発電容量を2016年までに75MW、2020年までに250MW、2030年までに2,000MWとすることで、年間20億ドルの経済的価値を創出する。
- ・評価、設計、導入、運用などの技術的ソリューションサービスでの指導力の発揮、世界全体の海洋再生可能エネルギープロジェクトに対して提供する付加価値商品とサービスの割合を2020年までに30%、2030年までに50%とする。
- ・2020年までに water to wire 型の河川流統合システムで世界を先導する。

	2011-2016	2016-2020	2020-2030
1)カナダの共通インフラの活用	商業規模のプロジェクト、方法論や専門知識の実証	基準やベストプラクティス、標準実施要領の策定が中心	試験施設や開発施設から長期的な商業プロジェクトサイトに発展
2)設備のニーズに応えるために必要な解決策の明確化	グリッド統合海洋再生可能エネルギープロジェクト	・エネルギー会社が海洋エネルギーを実現性・信頼性が高いと認識 ・エネルギー会社が海洋エネルギーを長期計画に組み込み	海洋エネルギープロジェクトのエネルギー会社システム運営担当者への統合に関する専門的知見の輸出
3)カナダの河川技術の優位性の確保	展開、運用・管理、修復のソリューション実績	河川流技術の先導者としての世界的な認知度の工場	世界全体のプロジェクトの50%でカナダの技術・専門的知見の活用
4)主要な要素技術の開発	・業界団体における知見の共有 ・カナダのエネルギー変換器の信頼性の実証	・外部のステークホルダーによる海洋エネルギープロジェクトへの投資 ・カナダ製の要素技術の活用	海洋エネルギー商業プロジェクトの50%でカナダの技術・専門的知見の活用
5)他のセクターの技術・知見の活用	・技術適応や技術革新の実証 ・大学におけるプロジェクト	・カナダにおける環境アセスメントの世界的なベストプラクティス ・他部門からの技術適応の分野におけるリーダーシップの確立	カナダの石油・ガス会社が海洋エネルギープロジェクトの主要な開発者・資金提供者に
6)プロジェクト設計ガイドラインの策定と発表	知見に基づく標準実施要領やベストプラクティスの策定	ファンディ湾で使用可能な技術や機器が国際的に最高クラスとして認識・注目度の向上	非常に厳しい環境下におけるライフサイクルを通じた運用・管理の世界的先導者に

図6-52 カナダの海洋エネルギー産業のロードマップ

出典：“Canada's Marine Renewable Energy Technology Roadmap” (2011) より NEDO 作成

カナダのファンディ湾にある FORCE 実施試験サイト (Fundy Ocean Research Center for Energy) では、潮流発電の実証試験が実施されている。ファンディ湾は、潮の干満差が大きく、毎日1,000億トンもの海水が出入りしており、潮流発電の適地である。干潮時の水深は45m、堆積物のない海底岩盤であり、最大で5m/sの潮流が得られる。現在、4つ目のテストバースの建設計画が進められており、2012年中にノバスコシア州が公募を開始する見込みである。

第6章 海洋エネルギー



図 6-53 ファンディ湾（左：干潮時 右：満潮時）

出典：FORCE ウェブページ



図 6-54 FORCE 実証試験サイト

出典：FORCE ウェブページ

(5) アジアとオセアニア

アジアやオセアニアでは、韓国、中国、オーストラリア、ニュージーランド、台湾、インドなどで、海洋エネルギー開発への関心が高まっている。

1) 韓国

韓国で現在、計画および建設中の海洋エネルギープロジェクトの総出力は約 250MW で、先導的技術開発および実用化による世界市場の先行獲得を目指している。2009 年に 1MW の潮流発電実証プラントが南西部の珍島郡 Uldolmok に竣工しており、このプロジェクトでは 2013 年までに 90MW に拡張する予定である。この他、Hadong, Wando-Heonggan などでも潮流発電プロジェクトが計画されている。



図 6-55 韓国の海洋エネルギー導入候補地

出典：韓国政府作成資料より NEDO 作成

2) 中国

中国では、1980年代から最大出力 3.9MW の江夏潮汐発電所が稼働しており、海洋エネルギー利用への取り組みは古くから進められている。近年は波力や潮流発電の技術開発にも力を入れており、主に表 6-22 に示す実証事業が実施されている。

表 6-22 中国における主要な海洋エネルギープロジェクト

種類	概要	実施主体
潮流発電	“Haiming I” 潮流発電装置開発 (10 kW, 水平軸)	ハルビン工科大学
	(300 kW×4) 系統連系型潮流発電システム開発 (山東省 Longxudao Island)	Datang corporation
	1MW 系統連系型潮流発電システム開発 (浙江省 Daishan Island)	China energy construction, Environment Protection Group
	500 kW 独立型潮流発電システム実証事業 (山東省 Zhaitang Island)	China National Offshore Oil Corporation
波力発電	500 kW 独立型波力発電システム実証事業	GuangZhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science
	系統連系型波力発電システム開発 (海南省 Wannin)	Huaneng Renewable Corporation Limited

出典：“Current Activities and Rapid Development of Marine Renewable Energy Technology in China” (2012, WEC Oceans 2012 資料), “Opportunities and challenges of the development of MRE in China” (2012, NOTC 他) より NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー



図 6-56 ハルビン工科大学による潮流発電実証試験

出典：“Current Activities and Rapid Development of Marine Renewable Energy Technology in China” (2012, WEC Oceans 2012 資料)

3) オーストラリア

オーストラリアでは、2000 年初頭から複数の実海域試験が実施されてきたことに加え、2010 年に詳細なポテンシャル調査が実施されている。まだ技術開発の初期段階ではあるが、表 6-23 に示す商用スケールプロジェクトが実施されており、特に潮流発電については数百 MW 級のプロジェクトが進行している。

表 6-23 オーストラリアにおける商用スケールプロジェクト

種類	プロジェクト名	実施主体	場所	発電容量
潮流発電	Clarence Strait Tidal Energy Project	Tenax Energy Pty Ltd	Clarence Strait, NT	450 MW
	Port Phillip Heads Tidal Energy Project	Tenax Energy Pty Ltd	Port Phillip Heads, Vic	34 MW
	Banks Strait Tidal Energy Facility	Tenax Energy Pty Ltd	Banks Strait, TAS	302 MW
波力発電	Victorian Wave Power Demonstration Project	Victorian Wave Partners Pty Ltd	Portland, Vic	19 MW

出典：“Australian Energy Resource Assessment” (2010, オーストラリア政府) より NEDO 作成

4) ニュージーランド

ニュージーランドは島国であり、世界上位の海岸線延長をもつことから、海洋エネルギー利用に対する関心は高い。2011 年 3 月には 200MW の潮流発電プラントが承認された他、政府による第 4 回目の海洋エネルギー開発支援 (4th Round Marine Energy Deployment Fund) が実施され、3つのプロジェクトが選定されている。現在、主に表 6-24 に示すプロジェクトが進行中あるいは計画中である。

表 6-24 ニュージーランドにおける主要な海洋エネルギープロジェクト

種類	概要	実施主体
潮流発電	200 MW 潮流発電プラント開発	Crest Energy
	潮流発電装置の開発（トーリー海峡）	Energy Pacifica
	潮流発電装置の開発（橋梁設置型）	Community Leisure Management (CLM)
	1MW 潮流発電装置プロトタイプ機の開発	Neptune Power
波力発電	Voith Wavegen 波力発電装置の開発（110 kW × 2 基，振動水柱型）	Chatham Islands Marine Energy (CHIME)
	Langlee 波力発電装置の小規模プロトタイプ機（40 kW）の開発	Tangaroa Energy
	MEDF 波力発電装置の開発（DOE 支援によりオレゴン州においても実海域試験を実施）	Wave Energy Technology -New Zealand (WET-NZ)

出典：AWATEA WEC Oceans 2012 資料より NEDO 作成



図 6-57 CLM の潮流発電装置

出典：AWATEA WEC Oceans 2012 資料



図 6-58 MEDF 波力発電装置

出典：AWATEA WEC Oceans 2012 資料

5) その他アジア

台湾では黒潮を利用した海流発電の計画があり，情報収集，研究段階にある．また，インドのグジャラート州カッチ湾では，商用潮流発電プラント（50MW）の建設が予定されており，将来的には総出力 250MW まで引き上げる構想となっている．なお，カッチ湾は経済性のある潮流エネルギーが 300MW 賦存していると推計されている．

6.4.2 海洋温度差発電の技術開発動向

表 6-25 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．

第6章 海洋エネルギー

表 6-25 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：50 kW 管延長：645 m 取水量：75 t/h 作動流体：アンモニア 温海水：26.1 °C 冷海水：5.6 °C	<ul style="list-style-type: none"> ・発電プラントをバージ¹¹（長さ 37 m, 幅 10 m）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 15 kW 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：100 kW 管延長：約 900 m 取水量：1,410 t/h 作動流体：フロン 22	<ul style="list-style-type: none"> ・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 100 kW 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：50 kW 管延長：2,400 m 取水量：500 t/h 作動流体：アンモニア 温海水：28.5 °C 冷海水：12.0 °C	<ul style="list-style-type: none"> ・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：75 kW 作動流体：アンモニア 温海水：28.0 °C 冷海水：7.0 °C	<ul style="list-style-type: none"> ・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：210 kW 管延長：1,829 m 作動流体：海水 温海水：26.0 °C 冷海水：6.0 °C	<ul style="list-style-type: none"> ・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 213 kW の発電に成功。
伊万里新サイクルプラント - 佐賀大学 - 2003~現在稼働中 - 各種サイクル・陸上	発電出力：30 kW （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	<ul style="list-style-type: none"> ・ランキンサイクル，カリーナサイクル，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。

¹¹ 川や運河で砂利などを運ぶ平底船。

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：1 MW（目標） 淡水化能力：日量 1,000 t	<ul style="list-style-type: none"> 1 MW 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 500 m の海洋深層水を用いて日量 1,000 t 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：50 kW 管延長：約 2,300 m 取水量：540 t/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 1 MW 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）

(1) 日本

日本は、数十 kW 級の実証研究では世界トップレベルにある。日本では当初、オープンサイクルの研究開発が行われ、1974年にスタートしたサンシャイン計画（新エネルギー技術研究開発）および1988年に発足した日本海洋温度差発電研究会（民間主体の組織）で、実用化に向けた研究が進められた。佐賀大学では、クローズドサイクルの研究が集中的に実施されてきた。

1979年には、島根沖で日本初の海洋温度差発電の短期間の洋上実験が行われた。当該実験では、海洋温度差発電システムの性能、経済性、環境影響などが検討され、そのポテンシャルの大きさが確認されたが、経済性の課題や石油価格の下落などによって、事業性が低くなったことから研究開発は中止となった。

しかし、その後も佐賀大学海洋エネルギー研究センターが先導的に研究開発を行い、1994年にウエハラサイクル（図 6-59）を開発し、現在も実証研究を継続している（図 6-60）。2009年度 NEDO 洋上風力発電等技術研究開発（海洋エネルギー先導研究）では、革新的凝縮器をもつアンモニアと水を用いた新しい海洋温度差発電の研究開発に関する佐賀大学の提案が採択されている。

ウエハラサイクルの特徴は、作動流体にアンモニアと水混合液を用いて 2 段階で発電する点、作動流体の蒸発器と凝縮器に独特のプレート式熱交換器を用いる点である。世界トップレベルのサイクル熱効率¹²と理論的に評価されており、国内外 12 カ国の特許が確定している。ただし、アンモニアと水混合液を用いると、サイクル熱効率の向上が期待される一方、熱交換器の伝熱性能の低下が懸念される。システムの効率向上には、これらの特性を総合的に評価することが重要である。現在、アンモニアと水混合液の特性を活かした一層の効率向上を目指して研究が進められている。

¹² 海水温度を表層 28℃、深層 8℃を想定した場合、ウエハラサイクルは、カーリーナサイクルとの比較では、熱交換率で 10%ほど効率が良くなるとの試算がある（日本海水学会論文集、2005 年）。A.A.Kalina は特許（昭和 62-39660（1987））で、カーリーナサイクルは、従来のランキンサイクルより約 2 倍の熱効率になると示している。

第6章 海洋エネルギー

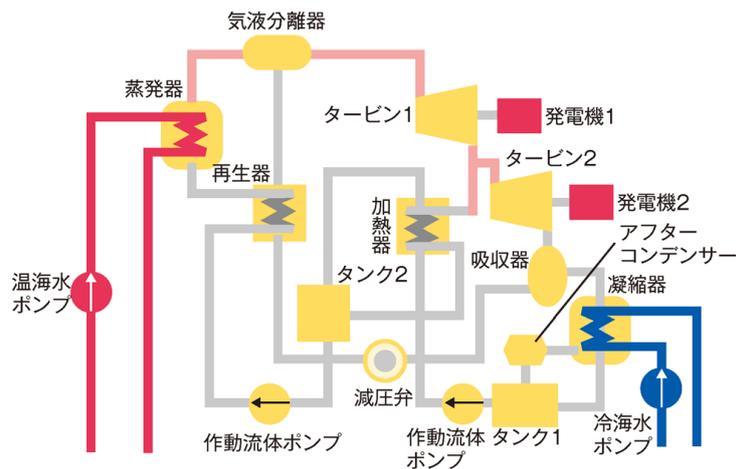


図 6-59 ウエハラサイクル システム図

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページ



佐賀大学海洋エネルギー研究センターには、30 kW 海洋温度差発電装置が設置されている。最近の研究成果では、濃度 99 % 以上のアンモニアと水の混合液による作動流体を用いた場合に、温度差 21 °C、温水流量 111 kg/s、冷水流量 111 kg/s で最大正味出力約 20 kW を得ている。また、温海水および冷海水を模擬した海水淡水化実験装置でも効率よく淡水化できることを実証している。

図 6-60 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 ホームページ

日本の技術レベルは現在、世界トップレベルであり、近年、米国などから協力依頼および共同研究の依頼が多数きている。しかし、MW 級の実証試験はまだ行われておらず、実用化に向けた大きな課題となっている。前述のとおり、世界的に海洋温度差発電への関心が再び高まっており、米国、台湾、フランスを中心に MW 級のプロジェクトが計画されている。日本の現在の技術的地位を維持するためにも、MW 級の実証試験を早急に実施する必要がある。

2011 年から、NEDO による「風力等自然エネルギー技術研究開発 海洋エネルギー技術研究開発」が開始され、産学官が一体となった、波力発電、潮流および海流発電、海洋温度差発電の

実証研究，要素技術開発，調査研究を実施している。海洋温度差発電については，佐賀大学および神戸製鋼所の研究グループを採択している（表 6-26）。

表 6-26 NEDO 海洋エネルギー技術研究開発 採択事業者

事業名	発電方式	実施事業者
海洋エネルギー発電システム実証研究	機械式波力発電	三井造船
	空気タービン式波力発電	三菱重工鉄構エンジニアリング 東亜建設工業
	ジャイロ式波力発電	ジャイロダイナミクス 日立造船
	着定式潮流発電	川崎重工業
	浮体式潮流発電	三井海洋開発
	越波式波力発電	市川土木 協立電機 いであ
次世代海洋エネルギー発電技術研究開発	水中浮遊式海流発電	東京大学 IHI 東芝 三井物産戦略研究所
	海洋温度差発電	佐賀大学 神戸製鋼所
	油圧式潮流発電	佐世保重工業 東京大学 九州大学
	橋脚利用式潮流発電	ナカシマプロペラ，五洋建設 広島工業大学

出典：NEDO 作成資料

(2) 欧州

欧州では，フランスが海洋温度差研究の先導的役割を担っている。フランスの海洋温度差発電研究の歴史は古く，科学者 George Claude は，1926 年に小さな実験装置を用いて，世界初の海洋温度差発電の公開実験を行った。1930 年には，キューバでオープンサイクルシステムを用いて海洋温度差技術を初めて検証している。1950 年以降，研究開発は沈静化していたが，近年になって地球温暖化問題，石油価格の高騰などの影響から，再び海洋温度差発電への関心が高まっており，フランス政府は国を挙げて研究開発を推進する意向を示している。このような状況下，造船役務局（Direction des Constructions Navales Services : DCNS）は，海外県マルティニーク向け 10MW 実証設備の概念設計を，NER300 European Funding Program の下，2012～2016 年に進めるとともに，2013 年に陸上型，2014 年に洋上浮体型のプロジェクトを発表することを明らかにしている。

オランダは，インドネシアの数社とともにバリ島にある 100kW のクローズサイクルプラントの研究を成功させている。また，2009 年に設立された Bluerise は，カリブ海のオランダ領キュラソー島において，海洋温度差発電プロジェクトを開発中である。その他の欧州各国も海洋温度差発電に関する基礎もしくは実用的問題の解決に貢献している。例えば，ノルウェーは汎用性のあるポンプの研究を行った。クロアチアは，モジュール規範のコンセプトに基づき，配管構造システムのための熱伝達の計算手順や陸地外での海洋温度差発電の研究を行ってきた。ウクライナ

第6章 海洋エネルギー

では、複雑な海洋温度差発電システムのエネルギー効率の理論的解析が行われた。ルーマニアでは、システム効率性の改善のために海洋温度差発電の構成要素について研究が行われた。しかし、現在はどの研究開発も終了し、技術者もほとんど残っていない。

(3) 米国

米国では、クローズドサイクルについては1980年代までにはほぼ技術が成熟したと政府は判断し、以降オープンサイクルについての基礎的研究が中心となった。1993年には、210kWのオープンサイクル方式海洋温度差発電で総電力213kWの発電を成功させた。しかし、その後は大きな進展がなく、原油価格の下落とともに研究開発は衰退した。

近年になり、地球温暖化問題、石油価格の高騰などの影響から、米国でも海洋温度差発電が再び脚光を浴びている。2008年には、米国エネルギー省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。ハワイ州では10MW級の実証試験が計画されており、米国エネルギー省の支援で運転開始を目指している。これは、ハワイ州の再生可能エネルギーの導入計画に基づくもので、海洋温度差発電を2015年までに35MW、2030年までに365MW以上の導入する計画が盛り込まれている。その他、グアムなどでも、海洋温度差発電の設置が検討されている。一方、ハワイ州では、海洋深層水を利用した大規模な冷熱利用が検討されている。海洋深層水の冷熱利用で、70～80%の二酸化炭素削減が期待されている。

(4) アジア諸国

近年、インドをはじめとするアジア諸国が海洋温度差発電技術に興味を示しており、日本の研究者との共同研究によって発展を遂げている。

1) インド

インド政府は、海洋温度差発電について、量質ともに21世紀の重要なエネルギー源の一つとして大きな期待を寄せている。これまでの調査の結果、インド政府は海洋温度差発電のポテンシャルを約180,000MWと試算している。インド国立海洋技術研究所(NIOT)は、5MW規模の海洋温度差発電商用プラントの実用化を目的とし、1MWの実証試験プロジェクトと海水淡水化のプロジェクトを開始した。

「SAGAR SHAKTHI」(サンスクリット語で海から授かる力の意)と命名されたこの実証プラントでは現在、海水の淡水化を行っており、2007年には1,000トン/日の淡水製造に成功している。今後、海洋温度差発電とのハイブリッド化を計画している。

このプロジェクトの遂行に際し、佐賀大学のこれまでの研究成果が注目され、1997年9月にインドでの海洋温度差発電の共同開発と実証試験のための協力協定が佐賀大学との間で結ばれた。本プロジェクト成功後、インドでは積極的に海洋温度差発電の商用プラントを国内に建設する予定で、その規模は約1,000基と計画されている。



図 6-61 SAGAR SHAKTHI 実証プラント

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センター ホームページ



図 6-62 1MW 海洋温度差発電の概念図

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センター ホームページ

2) 台湾

台湾は、海洋温度差発電の導入にとって最も適している場所の一つであり、かつては海洋温度差発電研究の中心的役割を担っていた。これまでに、大規模 OTEC プラントの設計研究に貢献してきた Multi-product OTEC プラントや、Master OTEC プラントの幅広い設計に関する研究を成功させている。欧米同様、原油価格の下落とともに研究開発は衰退したが、2007 年に台湾政府の支援の下、台湾電力が実用化に向けた研究開発を再開した。2010 年からは、1MW の陸上タイプと 100MW の浮体式の基本設計が行われている。

第6章 海洋エネルギー

3) インドネシア

インドネシアは、海洋温度差発電の適地が多く、政府で検討されてきたが、原油の下落とともに中断されていた。近年、州政府と大学（Dama Persada University など）を中心に、海洋温度差発電の本格的な導入が検討されている。特に West Sumatra, Bali island, North Sulawesi の3ヵ所（**図 6-63**）を最も有力な候補地としており、2009年には実現可能調査を行っている。

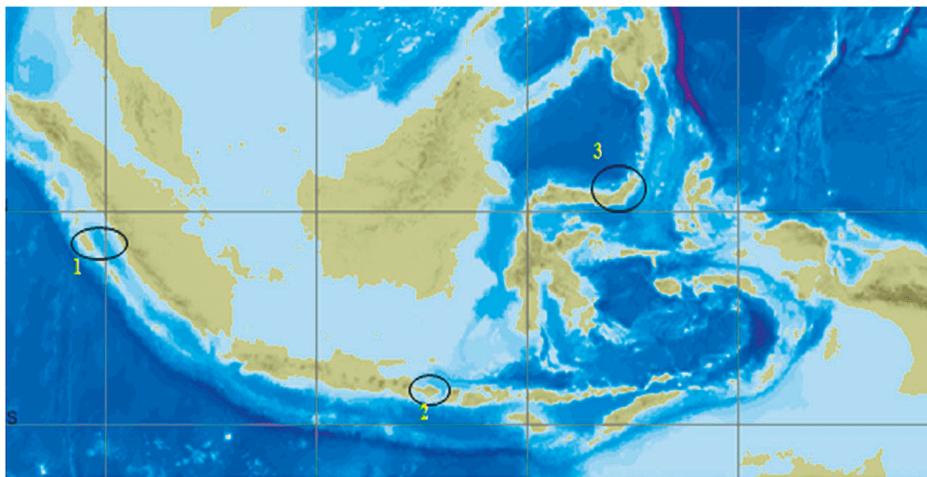


図 6-63 インドネシアの海洋温度差発電導入候補地
(1. West Sumatra 2. Bali island 3. North Sulawesi)

出典：“POSSIBILITY STUDY OF OTEC & DOWA IN INDONESIA”（International Symposium on Sustainable Energy and Environmental Protection 2009（Indonesia）資料）

4) 韓国

韓国は韓国海洋科学技術院（Korean Institute of Ocean Science and Technology : KIOST）および韓国電力公社（Korea Electric Power Corporation : KEPCO）が開発を行っている。KIOSTは、2014～2017年に、200kW級および1MW級のパイロットプラント、2018～2020年に10MW級の実用プラントを建設するロードマップを発表している。

また KEPCO は、開発の端緒として、既存発電所の温排水を利用した10kWの実験設備を建設中である。

6.5 世界のビジネス動向

前述したとおり、潮汐力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、既に商用プラントによって電力が供給されている。

一方、波力発電、潮流発電などについては商用化に向けた技術開発途上にあるが、欧州を中心に単機の実証試験から、複数基を配列したアレイプロジェクトへと技術開発ステージが進みつつあり、商用化に向けた開発スピードが加速している。

波力および潮流発電については、特に英国のスコットランドが先導しており、政府の指定海域の商用リースプロジェクト（ROUND1）が開始されている。波力および潮流発電のファーム化に向けて、**表 6-28**に示す開発事業者がサプライヤーと協同で技術開発を進めており、技術サプライヤーの多くは、現在、EMECで実証試験を実施している（**表 6-29**）。

表 6-27 世界の主要な潮汐力発電所

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 8.5 m) 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 400 kW。
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 5 m の双方向発電方式。最大出力は 3.9 MW。
始華湖潮汐力発電所 (韓国)	2011 年に運転開始。最大出力は 254 MW で、世界最大規模。

出典：各種資料より NEDO 作成

表 6-28 Round 1 プロジェクト落札企業と技術サプライヤー

波力発電サイト	開発事業者	技術サプライヤー	容量 [MW]
Costa Head	SSE Renewables Developments	未定	200
Brough Head	SSE Renewables Holdings	Aquamarine Power	200
Marich Head	Scottish Power Renewables	Pelamis Wave Power	50
West Orkney South	E.On Renewables	Pelamis Wave Power	50
Amadale	Pelamis Wave Power	Pelamis Wave Power	50
West Orkney Middle South	E.On Renewables	Pelamis Wave Power	50
潮流発電サイト	開発者	技術サプライヤー	容量 [MW]
Westray South	SSE Renewables Developments	未定	200
Cantick Head	SSE Renewables Holdings	Open Hydro	200
Brough Ness	SeaGeneration Ltd	Marine Current Turbines	100
Ness of Duncansby	Scottish Power Renewables	Hammerfest Strom	100
Inner Sound	MayGen	Atlantis Resources	400

※：2012 年 2 月現在

出典：スコットランド政府資料より NEDO 作成

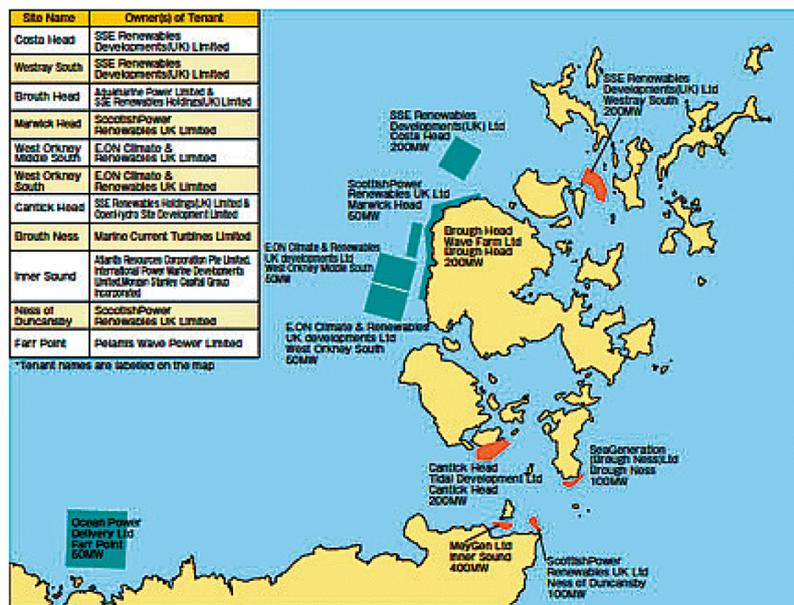


図 6-64 Round 1 プロジェクト指定海域 (再掲)

注：青色は波力発電の指定海域 オレンジ色は潮流発電の指定海域

出典：“Wave and Tidal Energy in the UK” (2011, Renewable UK) より NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

表 6-29 EMEC で実証試験中の主要技術（再掲）

技術	装置	メーカー名
波力	Pelamis	Pelamis Wave Power
	Oyster	Aquamarine Power
潮流	Open Hydro Tidal Turbine	Open Hydro
	Hammerfest Strom Tidal Turbine	Hammerfest Strom
	TGL Tidal Turbine	Tidal Generation Limited
	Scotrenewables Tidal Turbine	Scotrenewables Marine Power
	Atlantis Resources Tidal Turbine	Atlantis Resources
	Voith Hydro Tidal Turbine	Voith Hydro

波力および潮流発電の商用化に向けては、発電デバイスの開発に加えて、デバイスの製造、設置、運用、保守などを支えるサプライチェーンの構築や、それを支える港湾、作業船、製造施設、管理施設、事務所などの関連するインフラ整備も必要となる。スコットランドでは、1GW の海洋エネルギーを導入するために必要なインフラ施設と設備を次のように見通しており、これらインフラの施設と設備に必要な投資額は、8～9 億ポンド（1,040～1,170 億円）と試算している。

施設／設備	必要な数量
運転管理センター	1
試作機／実証機	50
商業機	1100～1200
新規港湾	3～4
組立／メンテナンス施設	2～3
作業ボード	20～30
大型作業船	10
現地作業員	500～1000
変電所（洋上／陸上）	10～20
電力変換施設	2～3
新規送電線	50～150 km
接続ケーブル	1000
高圧直流送電設備	2



図 6-65 海洋エネルギー発電を 1GW 導入に必要なインフラ施設/設備（一部抜粋）

出典：Aquatera 資料「Obtaining sustainable economic benefits from ocean technology」より NEDO 作成

6.5.1 波力発電

(1) Pelamis波力発電装置

Pelamis 波力発電装置は、海蛇のような形態の浮体式可動物体型波力発電装置である。スコットランドの EMEC で、2004 年に、世界に先駆けてフルスケール機の実証試験を実施しており、現在最も実用化に近い技術の一つである。

2004 年に実証試験が行われた Pelamis 発電装置は、直径 3.5m の円筒形浮体 4 台を縦に連結し、連結部分にシリンダーポンプ 2 台と可変容量型モーター 1 台を組み合わせた油圧変速機を使用して発電機を駆動するものであった。2008 年、ポルトガル沖で、同発電装置を用いた総出力 2,250kW（750kW 機×3 基）の商用プラント（Agucadoura Wave Farm）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。2010 年に EMEC で、改良機である Pelamis II の実証試験が進行中である。Pelamis II では、全長を 150m から 180m、直径を 3.5m から 4m、浮体個数を 4 から 5、浮体連結部を 3 ヶ所から 4 ヶ所へと改良し、単機容量を拡大している。

スコットランドの ROUND1 の 4 つの波力発電用サイト (50MW×4) で, Pelamis 波力発電装置が採用されており, E.ON 向けは 2011 年 11 月で EMEC 設置から 1 年が経過, ScottishPower Renewables 向けは 2011 年 11 月に EMEC に到着している。



図 6-66 プラント概観

出典：Pelamis Wave Power ホームページ

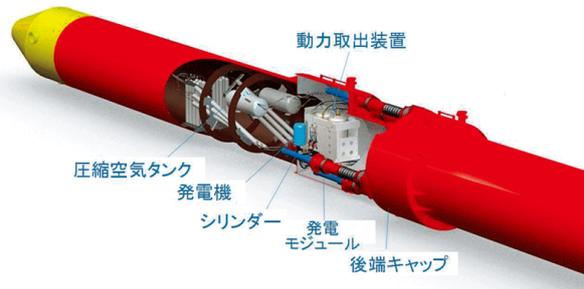


図 6-67 モジュール断面図

出典：Pelamis Wave Power ホームページ

表 6-30 Pelamis II 波力発電装置の概要

項目	概要
開発主体	Pelamis Wave Power (英国)
技術ステータス	実用化～商用化
技術仕様	技術種類：可動物体型, 浮体式 サイズ：全長 180 m, 直径 4.0 m 発電出力：750 kW 動力変換：油圧システム 排水重量：1300 トン

出典：Pelamis Wave Power ホームページより NEDO 作成

(2) Oyster波力発電装置 (Aquamarine Power, 英国)

Oyster 波力発電装置は, 海底に設置したフラップが波力によって前後運動するエネルギーを利用して海水を沿岸に高圧輸送し, 陸上で水力発電を行う技術である。英国の Aquamarine Power によって開発されている。スコットランドの ROUND1 で Oyster 波力発電装置が採用されており, Pelamis 波力発電装置と並んで, 実用化に最も近い発電装置の一つに挙げられる。

同社の技術の強みは, 陸上で発電するためメンテナンスが容易で, 構造がシンプルなため, 信頼性が高く, 大きな波にも対応可能な点などが挙げられる。

2009 年に最初のフルスケール機 (Oyster1, 100kW) の実海域試験が実施され, 2010 年にかけて 6,000 時間の運転を達成した。また, 2011 年には改良機である Oyster800 (800kW) が完成し, 2011 年 9 月から実海域試験を開始している。各種技術改良を進めており, Oyster1 では 4 パイル式の基礎構造を用いていたが, Oyster800 では 2 パイル式, Oyster801 ではモノパイル式を採用し, 設置に係るコストを削減している。

なお, スコットランドの ROUND1 の 1 サイト (200MW) で, Oyster 波力発電装置が採用されている。

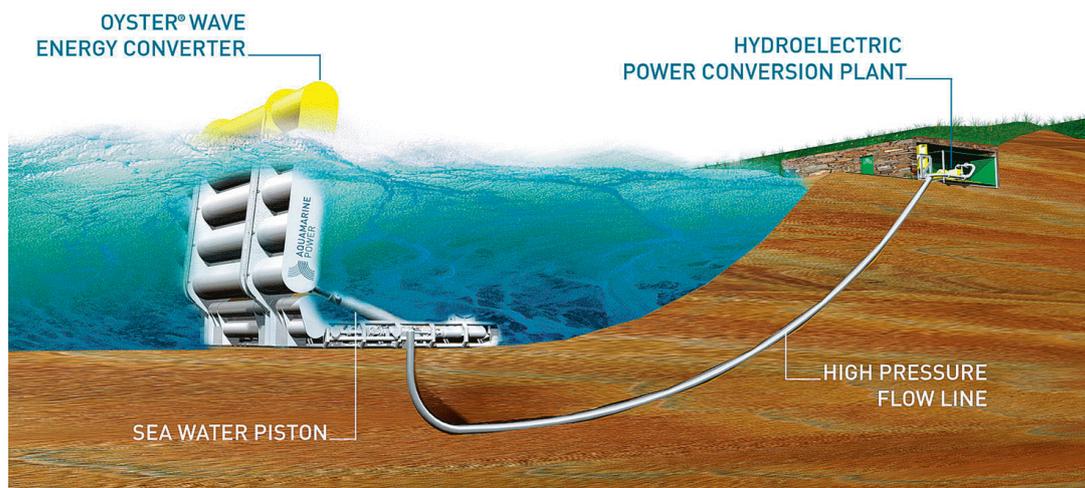


図 6-68 Oyster 波力発電装置のシステム概要

出典：Aquamarine Power 資料

表 6-31 Oyster 800 波力発電装置の概要

項目	概要
開発主体	Aquamarine Power (英国)
技術ステータス	実用化～商用化
技術仕様	技術種類：可動物体型、固定式 サイズ フラップ：幅 26 m × 長さ 12 m × 厚さ 6 m, 重量 320 トン 基礎：長さ 20 m × 幅 3 m × 高さ 6 m の基礎 2 基がクロスフレームで連結される。重量 350 トン 発電出力：800 kW 動力変換：hydraulic piston

出典：Aquamarine Power ホームページより NEDO 作成

(3) PowerBuoy波力発電装置 (Ocean Power Technologies, 米国)

PowerBuoy 波力発電装置は、米国の Ocean Power Technologies によって開発された、ブイの形をした可動物体型の波力発電装置である。ポイントアブソーバー型の波力発電装置で、波の運動に従って自在に動き、発電機を駆動する。モニタリングセンサが備えられており、荒波の際には自動的にロックされて発電を停止し、通常の波に戻ると復旧する。構造がシンプルかつ大部分が水中に没しているため、安全性や信頼性で有利とされている。また、グリッドとの接続に際し、10 基からの電力を一つにまとめて海底ケーブルに接続する水中変電ポッド (Underwater Substation Pod : USP) も開発している。

現在、ピーク発電出力 866kW の Mark3 を開発中であり、2011 年 4 月～10 月には、EMEC で実証試験が実施され、予測計算どおりの出力を確認するなど、良好な結果が得られている。米国 Reedsport Wave Park でも 10 基が設置される予定である。

日本では、三井造船と提携し、日本の海域に適した日本型 PowerBuoy 波力発電装置の開発を進めている。



図 6-69 プラント概観

出典：Ocean Power Technologies ホームページ

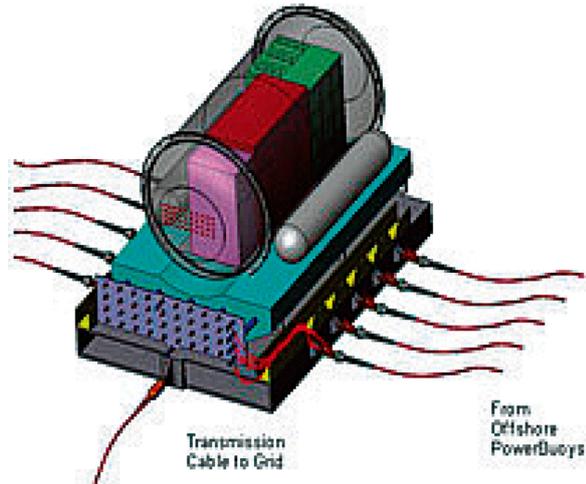


図 6-70 Underwater Substation Pod (USP) 概念図

表 6-32 PowerBuoy Mark3 波力発電装置の概要

項目	概要
開発主体	Ocean Power Technologies (米国)
技術ステータス	実用化～商用化
技術仕様	技術種類：可動物体型、浮体式 サイズ：フロート直径 11 m, 減揺板直径 14 m, 高さ 43.5 m 発電出力：866 kW 動力変換：油圧システム

出典：Ocean Power Technologies ホームページより NEDO 作成

6.5.2 潮流発電

現在、各国でさまざまな潮流発電装置が開発されている。次に、EMECにて実証試験を実施しているものや、特に実用化に近いと考えられる装置と企業を紹介する。

(1) SeaGen潮流発電装置

SeaGen 潮流発電装置は、1本の支柱に2つの水平軸型タービンを備える構造をもつ。各タービンの出力は600kWである。発電時にはタービンが水中に没し、メンテナンス時には海上に浮上する昇降機能を備えている。英国のMarine Current Turbinesが開発している。

2008年からSeaGenプロジェクトとして、北アイルランドで1.2MW潮流発電システムを運転している。これは世界初の商用規模の系統連系型潮流発電システムであり、発電した電力はアイルランドのESB Independentが購入している。

表 6-33 SeaGen 潮流発電装置の概要

項目	概要
開発主体	Marine Current Turbines Limited (英国)
技術ステータス	実用化～商用化
技術仕様	技術種類：水平軸 Twin Turbines, 支柱固定, Yaw 固定, 可変ピッチ 定格出力：1.2 MW 定格流速：2.4 m/s Cut-in 流速：0.7 m/s Cut-out 流速：3.4 m/s タービン直径：18 m タービン長：21 m 支柱重量：220 トン アーム重量：78 トン

出典：Marine Current Turbines 資料より NEDO 作成



図 6-71 システム概念図

出典：Marine Current Turbines 資料

(2) OpenHydro潮流発電装置

2008 年末, カナダの Nova Scotia Power 向けに, 初号機となる 1MW 潮流発電を納入し, 海底の岩盤に固定して運転を開始している. 一方で, 2006 年から EMEC で実証試験中である.

表 6-34 OpenHydro 潮流発電装置の概要

項目	概要
開発主体	OpenHydro (アイルランド)
技術ステータス	実験段階
技術仕様	技術種類：海底設置型 サイズ：16 m (1 MW 級のタービン直径) 発電出力：100 kW～4 MW (実験段階も含む) 発電機：リム側に内蔵 その他：ダクト付発電機一体型, 上げ潮・下げ潮のどちらでも発電可

出典：OpenHydro ホームページより NEDO 作成



図 6-72 システム概念図

出典：OpenHydro ホームページ



図 6-73 システム概念図

出典：Hammerfest Strom ホームページ

(3) Hammerfest Strom 潮流発電装置

2003 年から 6 年間、ノルウェーの Kvalsund 海峡で実験されてきた HS300 (300kW) の発展形として、1MW の HS1000 が 2011 年 12 月に EMEC に設置された。2012 年に EMEC での発電実験を開始して、さらなる大型化と Islay 海峡での大規模化に備えたいとしている。

表 6-35 Hammerfest Strom 潮流発電装置の概要

項目	概要
開発主体	Hammerfest Strom (ノルウェー)
技術ステータス	プレ商用化のデモ機
技術仕様	技術種類：海底設置型、ピッチ可変水平軸タービン サイズ：タービン直径 30 m 発電出力：1 MW 特徴：タービンは Yaw 固定で、ロータのピッチを制御して流向変化に対応する

出典：Hammerfest Strom ホームページより NEDO 作成

第6章 海洋エネルギー

(4) AK1000 (AR1000) 潮流発電装置

2010年8月、EMECに2重ロータのAK1000を海底設置したが、設置後すぐに（数時間後）全ブレードが破損したため回収している。2011年7月に、ブレードを交換後、再設置したが、ブレードが破損（チップペーン部）したため再度回収し、その後、片側固定翼を外して単一ロータに変更（AR1000に改名）して2011年11月に再設置した。その2週間後、装置はチェックのために再度、回収された。最終配備で少量の発電が得られたと発表されている。現在 EMEC にて実証試験を実施中である。

表 6-36 AK1000 (AR1000) 潮流発電装置

項目	概要
開発主体	Atlantis Resources (シンガポール)
技術ステータス	フルスケール実証試験
技術仕様	技術種類：海底設置式、固定翼、単一ロータ型 2重ロータ（型式 AK1000）から単一ロータ（型式 AR1000）に変更 発電出力：1 MW @ 2.65 m/s (AR1000) サイズ：φ18 m ロータ

出典：Atlantis Resources ホームページより NEDO 作成



図 6-74 システム概念図

出典：Atlantis Resources ホームページ

(5) ALSTOM (IBTGL) 潮流発電装置

2008年に500kWのデモ機の組み立てが完了し、2009年に発電制御プログラムを作成した。2010年の初めにEMECの実験サイトにタービン台の据え付け工事を完了し、同年9月に500kWの潮流発電装置を設置して数日間の動作試験および安全性試験を行った。2011年6月、潮止まりの25分間に再設置して、フルパワーの発電実験を開始した。現在 EMEC で実証試験を実施中である。2012年にTGLはALSTOMの傘下に加わった。

表 6-37 TGL 500kw tidal turbine の概要

項目	概要
開発主体	ALSTOM (旧 TGL) (フランス)
技術ステータス	実用化～商用化
技術仕様	技術種類：水平式, 海底設置型, Yaw 制御, ピッチ制御 定格出力：50KW 定格流速：2.7 m/s Cut-in 流速：1 m/s Cut-out 流速：3.4 m/s タービン直径：18 m タービン長：21 m 空中重量：140 トン 水中重量：110 トン

出典：TGL ホームページより NEDO 作成



図 6-75 システム概念図

出典：TGL ホームページ

(6) SR250 潮流発電装置

浮体式の潮流発電装置. 2011 年 3 月から EMEC でテストプログラムを成功している.

表 6-38 SR250 潮流発電装置の概要

項目	概要
開発主体	Scotrenewables Tidal Power (英国)
技術ステータス	実証試験～実用化
技術仕様	技術種類：双発水平軸水車, 浮体式 サイズ：33 m×2.3 m, タービン直径 8 m 発電出力：250 kW 固定ピッチブレード ギヤ伝達・可変速発電機 カテナリー係留

出典：Scotrenewables Tidal Power ホームページより NEDO 作成

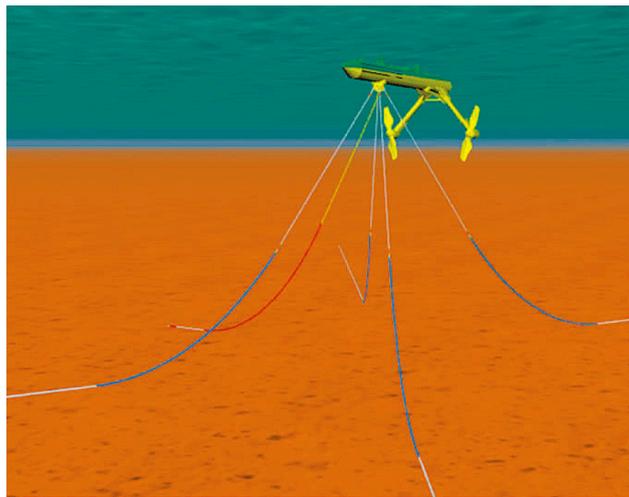


図 6-76 システム概念図

出典：Scotrenewables Tidal Power ホームページ

(7) Voith Hydro潮流発電装置

2006年から韓国のRentecとの共同研究が始まり、2009年に110kW試作機が韓国に納入され、2011年に海底に設置された。現在EMECで実証試験を実施中である。

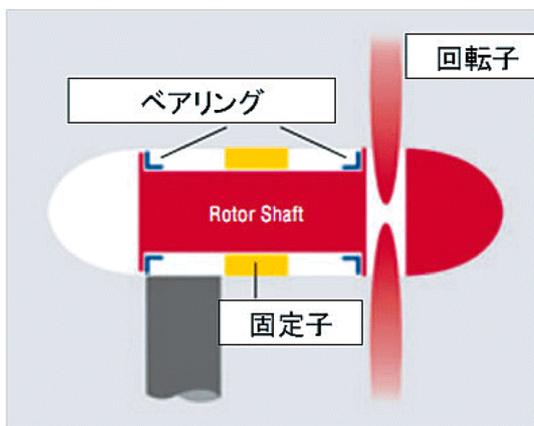
表 6-39 Voith Hydro 潮流発電装置の概要

項目	概要
開発主体	Voith Hydro Ocean Current Technologies (ドイツ)
技術ステータス	実用化～商用化
技術仕様	技術種類：水平式、海底設置型、固定式 発電出力：110 kW (3分の1スケール)、1 MW (フルスケール) タービン直径：5.3 m (110 kW機)、16 m (1 MW機) 必要流速：3 m/s 以上

出典：Voith Hydro Ocean Current Technologies ホームページより NEDO 作成



(110 kW 機外観)



(モジュール断面図)

図 6-77 システム概念図

出典：Voith Hydro Ocean Current Technologies ホームページ

6.5.3 海洋温度差発電

(1) Lockheed Martin

ハワイ州立自然エネルギー研究所（Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority : NELHA）に設置された、海洋温度差発電用熱交換器試験設備で、2011年初夏から実証試験を実施している。米国防衛省 The Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) から、海洋温度差発電の開発として12.5百万ドルの支援を受け、本熱交換器もその開発の一環として製作されている。

表 6-40 10MW 級 OTEC 実証プラントの概要

項目	概要
開発主体	Lockheed Martin (米国)
技術ステータス	実証実験中
技術仕様	技術種類：OTEC 用熱交換器 サイズ：直径 0.9 m×高さ 12 m 発電出力：約 100 kW に用いられる熱交換器 相当 タイプ：シェル&チューブ式（チューブ材質：アルミ合金）

出典：Lockheed Martin ホームページより NEDO 作成



図 6-78 システム概観図

出典：Lockheed Martin ホームページ

また、2013年10月には、中国企業の Reignwood グループと、10MW 級プラントの設計契約を締結し、建設に向けた動きを進めている。

(2) OTEC International

2011年9月に、NELHA による 1MW 級実証設備の RFI (Request for Interest) に応募し、採択された。現在、設置に向けて交渉している。

表 6-41 OTEC International 実証プラントの概要

項目	概要
開発主体	OTEC International (米国)
技術ステータス	建設に向けて協議中
技術仕様	技術種類：陸上設置型 サイズ：未詳 発電出力：1,000 kW

出典：OTEC International ホームページより NEDO 作成



図 6-79 プラント概観図

出典：OTEC International ホームページ

(3) DCNS

DCNS の Nantes-Indret センターに実験機を設置し、試運転が行われている。試運転完了後、レユニオン大学サンピエール校 (University of La Reunion, 仏国レユニオン島) に輸送し設置する予定である。

表 6-42 DCNS 社実証プラントの概要

項目	概要
開発主体	DCNS (フランス)
技術ステータス	開発 (陸上の実験機製作済み, 試験中)
技術仕様	サイクル：ランキンサイクルのみの模様 熱交換器：シェル&チューブ型 タービン：実験機は不設置, 拡張弁で対応。 熱源・冷熱源：ヒートポンプ温水・冷水製造 (海水実験も可能な仕様)

出典：DCNS 社ホームページより NEDO 作成



図 6-80 システム概念図

出典：DCNS 社ホームページ

6.6 今後に向けた課題と克服方策

海洋エネルギー発電については、まだ世界的に研究開発もしくは実証研究の段階にあり、本格的な事業化に向けて、まず技術的な課題を克服しなければならない。そのため、水槽試験から実海域試験へと発電デバイスをスケールアップし、実海域試験では、単機デバイスから複数機デバイスへと発電能力を向上し、性能、信頼性、施工や運転保守などを検証し、各種技術を確立する。また、発電デバイスの効率化やコスト低減を進め、事業可能性を明らかにする。

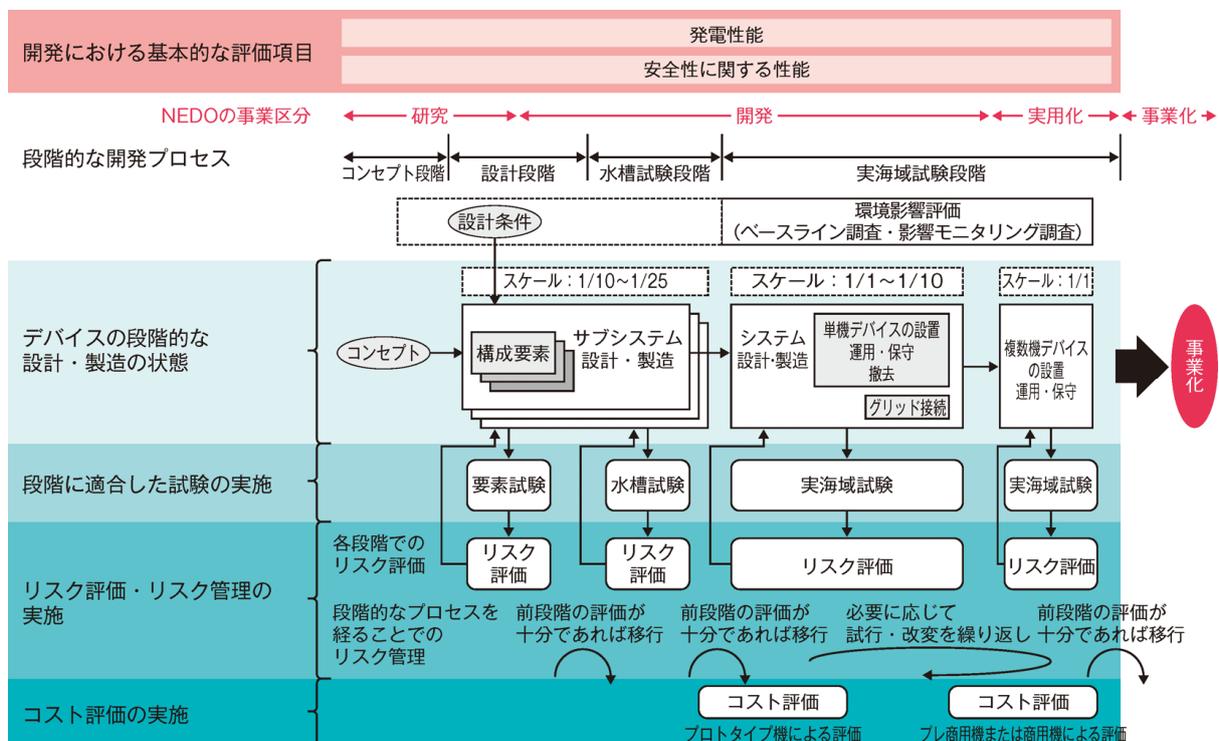


図 6-81 海洋エネルギー発電デバイスの開発プロセスの概略

出典：NEDO 作成資料

第6章 海洋エネルギー

さらに、海洋エネルギー発電は、実海域に発電デバイスなどを設置するため、海域を利用する他の産業や地域の方々との調整や協調関係を醸成する必要がある。海洋エネルギー発電デバイスの設計や水槽試験などの開発初期の段階から、実海域での実証研究に向けた地域との協議、各種許認可手続きを行い、実証研究を推進し、事業化することが望まれる。

6.6.1 技術課題の克服

現在、波力発電および潮流発電は、事業化の一手手前の段階にあると考えられている。それは、2008年にポルトガル沖で Pelamis 波力発電装置を用いた世界初の商用プラントが故障したように、太陽光や風力など他の再生可能エネルギーと比較して、技術の信頼性には多くの課題が残されている。現在、欧州を中心に、高い導入目標の下、さまざまなフルスケール機の試験が実施されているが、2020年までに導入普及を実現するためには、基礎的技術を確立し、高信頼性を実現することが鍵になると考えられており、特にそれらの検証が行われている EMEC の実証研究の動向が注視される。

我が国の海洋エネルギーの利用推進に向けては、我が国特有の気象や海象条件に適した発電デバイスの技術開発を完了し、経済性をもって発電することを確認することが不可欠である。そのため、NEDOでは、波力発電および潮流発電の実証研究や要素技術開発などによって、性能や信頼性などを検証し、技術課題を克服する取り組みを進めている。さらに、それらの成果を取りまとめ、海洋エネルギー発電デバイスの研究開発や実証研究に取り組む企業や研究機関、大学などに成果を普及し、海洋エネルギー発電の導入普及の基盤を整備することが望まれている。

6.6.2 高効率化、低コスト化

波力発電および潮流発電の導入普及に向けて、高効率化と低コスト化の実現が必須である。ターゲットとした市場に競争力のある価格で製品を提供できなければ、他のエネルギーシステムに優先して導入されることは難しい。特に、波浪について、我が国は欧州に比べ、一年を通じた平均的な波浪エネルギーが低い一方、台風など局所的に厳しい海象条件にあるため、高効率かつ高信頼性を経済的に実現する発電システムを確立する必要がある。このように、我が国の自然条件下で成立する発電システムを実現することができれば、海外市場で十分に競争力をもつ技術を取得することが可能と考えられる。

6.6.3 地域との協調

海洋エネルギー発電の導入に向けては、候補海域の賦存量評価を踏まえた事業計画を検討するとともに、事業計画の検討初期の段階から地域関係者との協議や協調に取り組むことが重要である。海域の選定や事業計画などを地域関係者と協議するとともに、国や地方自治体への許認可手続きを円滑に進める必要がある。特に、地域との協調を醸成するために、候補海域に該当する地方自治体と調整および連携し、航行や漁業など既存の海域利用者と十分に協議するとともに、周辺住民への情報の開示、周辺環境への影響評価などを行うことが重要となる。

6.6.4 離島での利用促進

当面のターゲット市場を明確化し、事業計画やサプライチェーンを検討するとともに、実証研

究のデータなどを踏まえ、発電システムの高効率化や高信頼化などを実現することが重要である。

我が国には多くの離島が存在するが、離島の電力系統は本土と連系していない場合が多い。一部の島で水力発電、地熱発電、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギーを導入しているケースもあるが、大半はディーゼル発電によって島内の電力を賄っている。ディーゼル発電は、石油価格の高騰などの影響を受けて、既存電源と比較して、発電コストがときに4倍以上になる場合もある。そのため、海洋エネルギー発電の事業化初期の段階では、周りを海に囲まれ海洋エネルギーに恵まれている、離島での利用が有望であると考えられる。そのため、NEDOでは、離島での波力発電や潮流発電の実現可能性を検討しており、自治体や地域関係者の協力を得ながら、海象計測機器の設置や、そのデータに基づく実証研究の実現可能性を検証している。特に東京都神津島での波力発電の実証研究については、モデルケースとしての可能性があり、今後、実証研究の実現やその成果普及が強く望まれている。

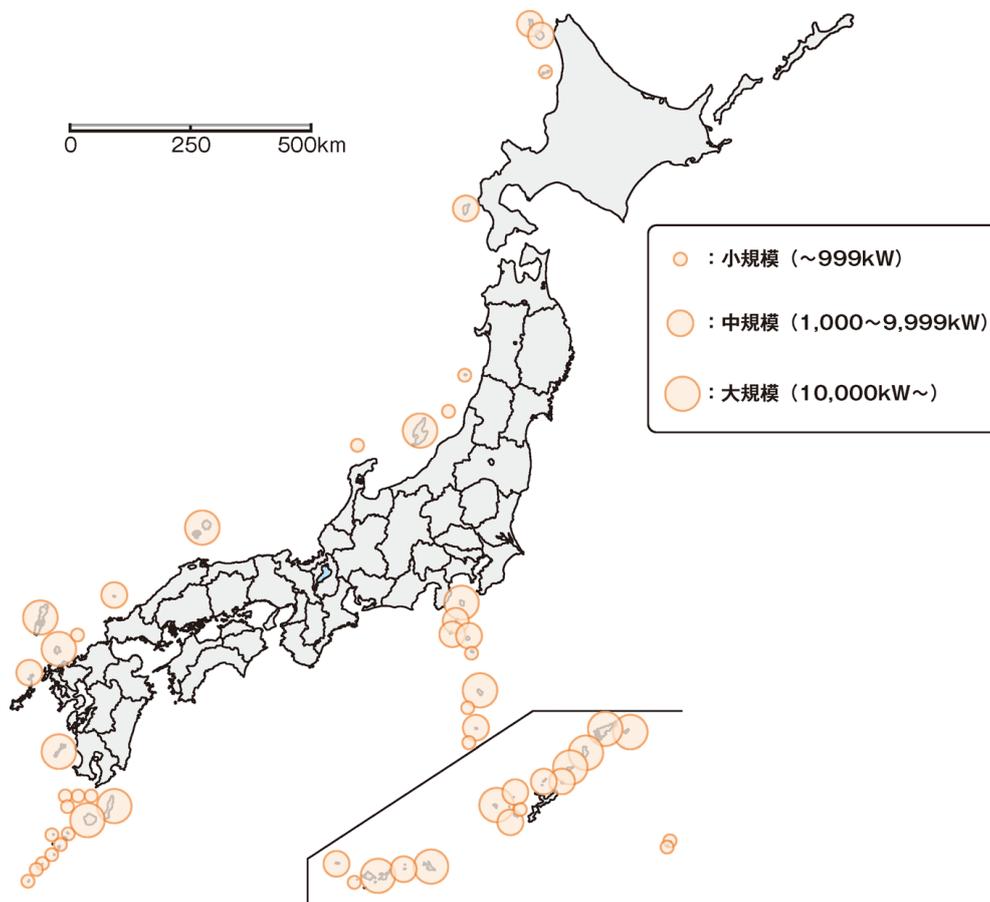


図 6-82 国内の離島系統の分布

出典：「離島等独立系統における新エネルギー活用型電力供給システム安定化対策実用化可能性調査」(2006, NEDO)

6.6.5 大規模化および大型化への対応

英国の ROUND1 をはじめ、欧州では、単機の発電システムによる検証から、複数機の発電システムを実海域に配列する実証研究が進められている。これは、複数の風車を風力発電所に建設し、発電コストの低減や大規模な発電を実現しているのと同様、海洋エネルギー発電でも、波力

第6章 海洋エネルギー

発電デバイスや潮流発電デバイスを実海域に複数機配列し、発電デバイスの製造、施工や運転保守などを合理化し、発電コストを低減するとともに、発電規模を向上するものである。さらに、洋上風車の大型化同様、海洋エネルギー発電デバイスの大型化も各国で進められており、数百 kW 級の発電デバイスから、MW 級の発電デバイスへと大型化が進められている。一方、風力発電と異なり、海洋エネルギー発電はこれまで、複数機配列による実証研究などの事例に限られており、デバイス間の後流影響や運転保守、系統連系に係る技術などの課題や不確実性を克服する必要がある。そのため、NEDO で現在推進している単機発電デバイスの実証研究を着実に実施し、その成果を踏まえた、複数機配列の実現可能性や大型化などについて検討し、国内外での海洋エネルギー発電の導入普及を推進する必要がある。

6.6.6 まとめ

海洋エネルギー発電は、まだ世界的に研究開発および実証研究段階であるものの、欧州を中心にデバイスの複数機配列や大型化などの検討が進められており、事業化前の段階にあると位置付けられる。

NEDO は、国内での海洋エネルギー発電の導入や、我が国企業の国際競争力を強化するため、実証研究および要素技術開発を実施し、発電デバイスの技術課題の克服および低コスト化技術の開発を推進している。特に、実海域での実証研究では、地点のポテンシャル評価や荒天時の予測を踏まえた設計条件の確認、発電デバイスの設置候補海域の選定に係る地域関係者との調整や協議などをプロジェクト初期から推進している。今後、許認可手続きや発電デバイスの製作、実海域での施工、発電デバイスの設置完了後の運転保守などを予定しており、実海域での性能や信頼性の評価を行い、施工方法や運転保守技術などの技術課題の克服を目指すとともに、発電コストなどを検証する。そして、それらの実証研究や要素技術開発から得られるデータや事例を収集し、成果として取りまとめる。さらに、世界的には国際標準の策定に向けた検討が進められていることから、我が国の実海域試験から得られる各種データなどを活用した国際貢献も望まれている。

実海域試験などから得られるデータや事例を、国内外での海洋エネルギー発電デバイスの事業化に向けた取り組みに活かすとともに、事業化を前倒しする新たな支援施策や市場環境の整備を推進し、海洋エネルギー発電の事業化に向けた基盤を整備する。

第6章 参考文献

- (1) L.A. Vega, Economics of Ocean Thermal Energy Conversion, Proc. Of Oceanology International vol.6 (1994)
- (2) Cost of and financial support for wave, tidal stream and tidal range generation in UK, (2010, Ernst & Young LLP)
- (3) Offshore wind power: big challenge, big opportunity, (2008, Carbon Trust)
- (4) Accelerating marine energy, (2011, Carbon Trust)
- (5) An International Vision for Ocean Energy, (2012, IEA-OES)
- (6) Harnessing the Power of the Oceans, (2008, Gouri S.Bhuyan)
- (7) EU-OEA (European ocean energy) ホームページ, <http://www.oceanenergy-europe.eu/>
- (8) 前田久明 木下健, 波浪発電, (1979, 生産研究 31 巻 11 号)
- (9) 高橋重雄, 日本周辺における波パワーの特性と波力発電, (1989, 港湾技術研究資料 No.654)
- (10) 電気事業連合会 電力統計情報
- (11) FREDS MARINE ENERGY GROUP (MEG) MARINE ENERGY ROAD MAP Forum for Renewable Energy Development in Scotland (FREDS), (2009/1, スコットランド政府), <http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/281865/0085187.pdf>
- (12) MARINE ENERGY ROAD MAP Wave and tidal energy in the Pentland Firth and Orkney waters: How the projects could be built A report commissioned by The Crown Estate and prepared by BVG Associates, (2011/3, スコットランド政府), <http://m.thecrownestate.co.uk/media/71431/pentland-firth-how-the-projects-could-be-built.pdf>
- (13) Electricity Information 2011, (2011, IEA)
- (14) Renewable UK ホームページ, <http://www.renewableuk.com/>
Wave and Tidal Energy in the UK State of the industry report March 2011
- (15) aquaret ホームページ <http://www.aquaret.com/index.php>
- (16) 気象庁ホームページ, <http://www.data.kishou.go.jp/db/kaikyo/knowledge/kairyu.html>
- (17) Canada Ocean Energy Atlas (Phase 1) Potential Tidal Current Energy Resources Analysis Background, (2006, Canadian Hydraulics Centre)
- (18) Assessment of Energy Production Potential from Tidal Streams in the United States Final Project Report, (2011, Georgia Tech Research Corporation)
- (19) Gunwoo Kim 他, An overview of ocean renewable energy resources in Korea, (2011, Renewable and Sustainable Energy Reviews), Volume 16, Issue 4, May 2012, Pages 22782288
- (20) Harnessing the Power of the Oceans, (2008, Gouri S.Bhuyan)
- (21) 佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページ, http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about_ocean_energy.html
- (22) World Energy Outlook 2013, (2013, IEA)
- (23) Oceans of energy European Ocean Energy Roadmap 2010-2050, (2010, EU-OEA)
- (24) ゼネシスホームページ, <http://www.xenesys.com/index.html>
- (25) 米国エネルギー省ホームページ, <http://www.energy.gov/>
- (26) Wave and Tidal Energy in the UK, (2011, Renewable UK)
- (27) Accelerating Marine Energy, (2011, Carbon Trust)
- (28) EMEC (European Marine Energy Centre) ホームページ, <http://www.emec.org.uk/>
- (29) WavEC (Wave Energy Centre) ホームページ, <http://www.wavec.org/index.php/1/home/>
- (30) 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-, (2004, JAMSTEC)
- (31) PORTUGAL Marine Energy Activities, (2012, WEC Oceans 2012)
- (32) EC (European Commission CORDIS) ホームページ, http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html
- (33) Marine Energy Action Plan2010, (2010, 英国政府)
- (34) Marine Renewable Energy Technology Roadmap, (2008, UKERC)
- (35) EMEC ホームページ <http://www.emec.org.uk/>
- (36) Wave Hub ホームページ <http://www.wavehub.co.uk/>
- (37) IEA-OES Annual Report 2010, (2010, IEA-OES)
- (38) オレゴン波力エネルギートラスト (Oregon Wave Energy Trust) ホームページ, <http://oregonwave.org/>
- (39) HCEI (Hawaii Clean Energy Initiative) ホームページ, <http://www.hawaii-clean-energy-initiative.org/>
- (40) Verdant Power ホームページ, <http://verdantpower.com/>
- (41) FORCE (Fundy Ocean Research Center) ホームページ, <http://fundyforce.ca/>
- (42) U.S. Marine and Hydrokinetic Renewable Energy Roadmap (2011, Ocean Renewable Energy Coalition)

第6章 海洋エネルギー

- (OREC)), <http://www.oceanrenewable.com/wp-content/uploads/2011/05/MHK-Roadmap-Final-November-2011.pdf>
- (43) Canada's Marine Renewable Energy Technology Roadmap (2011, Marine Renewable Energy Technology Roadmap Steering Committee), http://www.marinerenewables.ca/wp-content/uploads/2012/09/MRE_Roadmap_e.pdf
- (44) Current Activities and Rapid Development of Marine Renewable Energy Technology in China, (2012, WEC Oceans 2012)
- (45) Opportunities and challenges of the development of MRE in China, (2012, NOTC 他)
- (46) Australian Energy Resource Assessment, (2010, オーストラリア政府)
- (47) Aotearoa Wave and Tidal Energy Association (AWATEA) 資料
- (48) POSSIBILITY STUDY OF OTEC & DOWA IN INDONESIA, (International Symposium on Sustainable Energy and Environmental Protection 2009 (2009, Indonesia)
- (49) Asia Pacific Clean Energy Summit and Expo 2013 併催 OTEC Symposium 発表資料
- (50) Bluerise ホームページ, <http://www.bluerise.nl/>
- (51) 2nd Marine Renewable Energy Workshop, KOREA 発表資料, (2013/8)
- (52) Aquatera 資料, Obtaining sustainable economic benefits from ocean technology]
- (53) Pelamis Wave Power ホームページ, <http://www.pelamiswave.com/>
- (54) Pelamis Wave Power プレスリリース, <http://www.pelamiswave.com/news/news/134/ScottishPower-Renewables-Pelamis-P2-Machine-Celebrates-One-Year-of-Accelerated-Real-Sea-Testing>
- (55) Aquamarine Power 資料, The Construction of Oyster A Nearshore Surging Wave Energy Converter, <http://www.aquamarinepower.com/sites/resources/Published%20papers/2473/The%20construction%20of%20Oyster%20-%20a%20nearshore%20surging%20wave%20energy%20converter.pdf>
- (56) Aquamarine Power 資料, Oyster 2 (Phase 1) Decommissioning Programme, <http://www.aquamarinepower.com/sites/resources/Reports/2918/Oyster%202%20Phase%201%20Decommissioning%20Programme%20-%20Draft%20for%20Consultation.pdf>
- (57) Ocean Power Technologies ホームページ, <http://www.oceanpowertechologies.com/>
- (58) Marine Current Turbines 資料, http://www.marineturbines.com/3/news/article/17/seagen_tidal_energy_system_reaches_full_power__1_2mw
- (59) OpenHydro ホームページ, <http://www.openhydro.com/home.html>
- (60) Hammerfest Strom ホームページ, <http://www.hammerfeststrom.com/>
- (61) Atlantis Resources ホームページ, <http://atlantisresourcesltd.com/>
- (62) Alstom ホームページ, <http://www.alstom.com/power/renewables/ocean-energy/tidal-energy>
- (63) Scotrenewables Tidal Power ホームページ, <http://www.scotrenewables.com/>
- (64) Voith ホームページ, <http://voith.com/en/index.html>
- (65) Voith ホームページ, <http://voith.com/en/products-services/hydro-power/ocean-energies/tidal-current-power-stations--591.html>
- (66) Voith ホームページ, [http://voith.com/en/Voith_Ocean_Current_Technologies\(1\).pdf](http://voith.com/en/Voith_Ocean_Current_Technologies(1).pdf)
- (67) Lockheed Martin ホームページ, <http://www.lockheedmartin.com/>
- (68) Lockheed Martin プレスリリース, <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2013/october/131030-mst-otec-lockheed-martin-and-reignwood-group-sign-contract-to-develop-ocean-thermal-energy-conversion-power-plant.html>
- (69) OTEC International ホームページ, <http://www.oteci.com/>
- (70) DCNS ホームページ, <http://en.dcnsgroup.com/>