

## 6 波力発電の技術の現状とロードマップ

### 6.1 技術を取りまく現状

#### 6.1.1 技術の俯瞰

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以下の3種類に区分される。また設置形式の観点からは、装置を海面又は海中に浮遊させる浮体式と、沖合又は沿岸に固定的に設置する固定式とに分けられる。

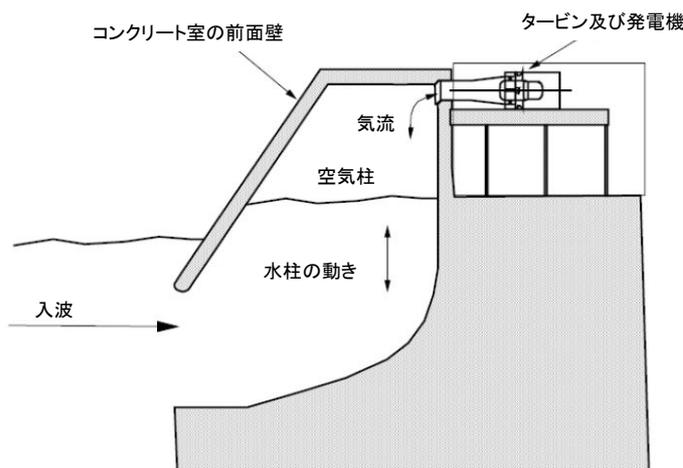
##### (1) 振動水柱型

振動水柱型波力発電システムはOWC（Oscillating Water Column）システムとも言い、装置内に空気室を設けて海面の上下動により生じる空気の振動流を用いて、空気タービンを回転させる方式である。構造が簡素で、空気を介してエネルギー変換するため、台風等の異常波浪に対する構造物の対策が比較的取りやすく、より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、世界で広く用いられている（図表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、波により生じる往復気流中でも常に一方方向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（図表6.2）が主に採用されている。

図表 6.1 振動水柱型波力発電システム（左：固定式 右：浮体式）

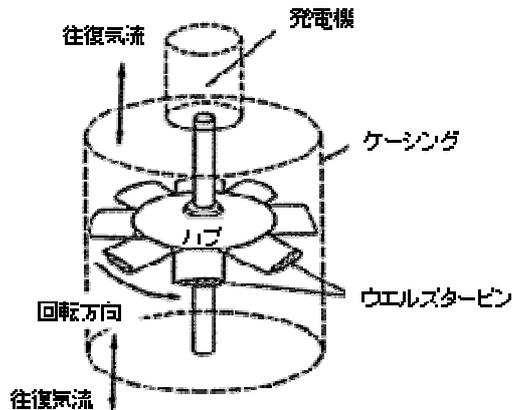


出典：“Ocean Energy: Global Technology Development Status”（2009, IEA-OES）

（益田式航路標識用ブイ）

出典：緑星社ホームページ  
(<http://www.ryokusei.co.jp/>)

図表 6.2 ウェルズタービン



出典：「波力発電用往復流型タービンの開発」(2008, 高尾 学, (社)日本機械学会ニューズレター)

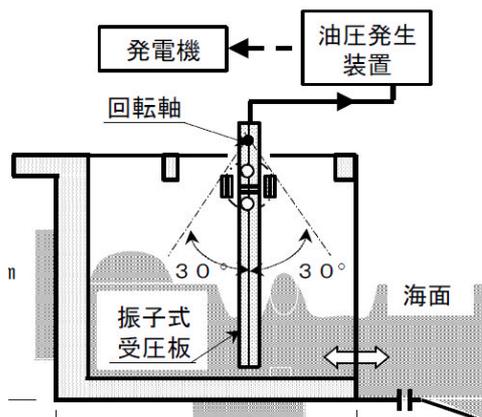
(2) 可動物体型

可動物体型波力発電システムは、波のエネルギーを可動物体を介して機械的な運動エネルギーに変換し、それを動力源として油圧発生装置等のピストンを動かして発電するシステムである。海中に設置した受圧板で受けた波のエネルギーを受圧板の機械的な振り子運動エネルギーに変換する方式や (図表 6.3 左)、浮遊構造物で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 (図表 6.3 右) 等が例として挙げられる。

日本においては、発電機の回転数と位相を浮体の揺れに同期させることによりジャイロモーメントを発生させ、発電機を駆動するジャイロ式波力発電システムや、電場応答高分子型人工筋肉を使用した新しい方式の波力発電システムの開発等が進められている (6.1.5 節参照)。

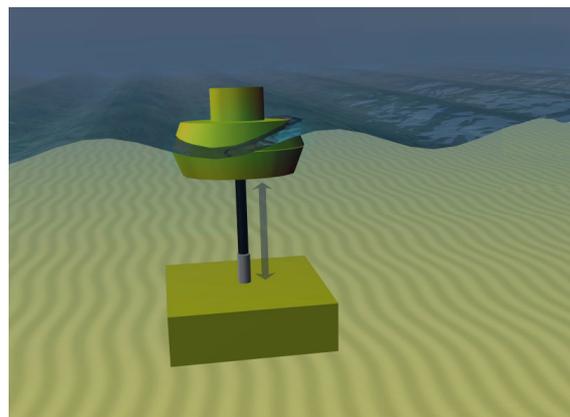
図表 6.3 可動物体型波力発電システム (左：固定式 右：浮体式)

(振り子式波力発電システム)



出典：「海洋資源利用に関する調査」(2006, (独)海上技術安全研究所)

(ポイント・アブソーバー式波力発電システム)



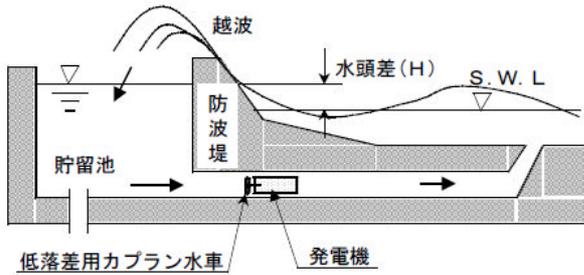
出典：Aquatic Renewable Energy Technologies 社 ホームページ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> [http://www.aquaret.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=137&Itemid=280&lang=en](http://www.aquaret.com/index.php?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=280&lang=en)

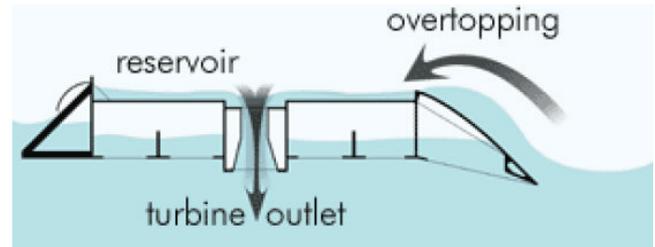
### (3) 越波型

越波型波力発電システムは、波を貯水池等に越波させて貯留し、水面と海面との落差を利用して海に排水する際に、導水溝に設置した水車を回し発電する方式である。平成 21 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、越波型波力発電システムに関する東海大の提案が採択されている。

図表 6.4 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, (独)海上技術安全研究所）



出典：Wave Dragon ApS 社ホームページ  
(<http://www.wavedragon.net/>)

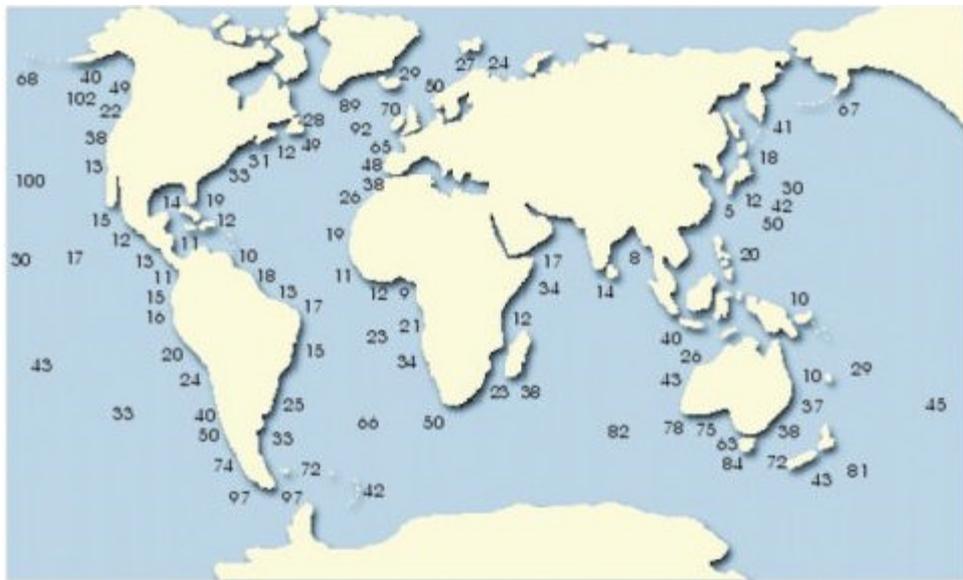
## 6.1.2 ポテンシャル

### (1) 世界

世界の波力エネルギーの分布を図表 6.5 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。特に欧州周辺の波力エネルギーは 50~70kW/m と比較的高い値を示している。ただし、これらのデータは統一された手法にて収集されたものではないため、精度については留意が必要である。

なお、日本近海の波力エネルギーは年平均 12~18kW/m と、マクロ的には諸外国と比較して大きくないが、日本の周辺海域の基礎的データが十分に整備されていないため、詳細なポテンシャルは不明である。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あたっては、より詳細なメッシュデータが求められる。

図表 6.5 世界の波力エネルギーの分布（年平均：kW/m（波高））



出典：Pelamis Wave Power Ltd ホームページ (<http://www.pelamiswave.com/content.php?id=155>)

図表 6.6 各地近海の波力エネルギー

場所	波力エネルギー [kW/m]
日本	12~18
英国	70
ポルトガル	48
米国（ハワイ）	100
豪（ポートランド）	63

出典：Pelamis Wave Power Ltd ホームページ (<http://www.pelamiswave.com/content.php?id=155>) より作成

IEA-OES<sup>2</sup>の資料によると、世界の波力エネルギーの理論的な年間の資源量は、8,000～80,000TWhとされている。

図表 6.7 世界の波力エネルギー資源量

波力エネルギー	8,000～80,000TWh/年
---------	-------------------

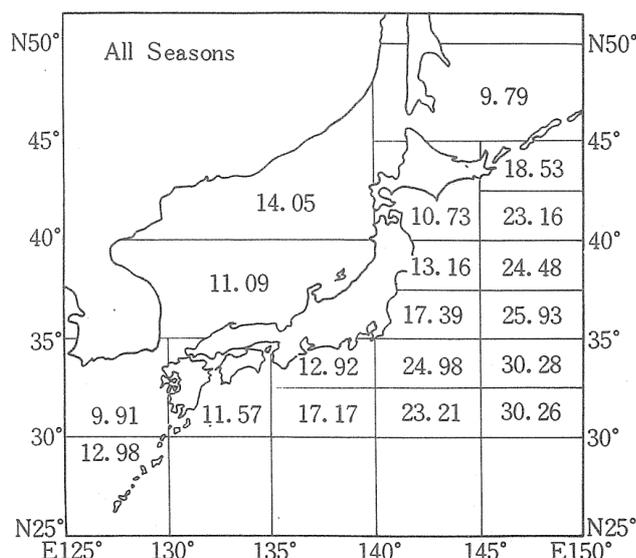
出典：“Harnessing the Power of the Oceans” (2008, Gouri S.Bhuyan)

## (2) 日本

日本近海の波力エネルギーについては、前田・木下らによる日本近海<sup>3</sup>、および高橋らによる日本沿岸<sup>4</sup>の波力エネルギー試算例がある。

前田・木下らは、日本造船研究協会の統計を用いて、沖合を含めた日本近海の波力エネルギーを推定している（図表 6.8）。沖合にいくほど波力エネルギー密度は高く、特に太平洋岸の福島、茨城、千葉沖の波力エネルギーが大きいと試算されている。また、日本周辺の平均波力エネルギー密度を約 10kW/m とし、日本全周（約 5000km）で 100%吸収するとした場合、約 50GW のエネルギーが得られるとしている。

図表 6.8 日本近海の波力エネルギー（kW/m、通年）



出典：前田久明 木下健「波浪発電」（1979，生産研究 31 巻 11 号）

高橋らは、全国の主要港に配置された波浪観測網のデータを用いて日本周辺における波パワーの特性を調べており、日本沿岸の平均波力エネルギー密度を 7kW/m と試算している。日本の総海岸線を 5,200km とした場合、日本沿岸に打ち寄せる波力エネルギーは 36GW となる。これは日本の電力会社 10 社の 2009 年時点の発電容量（約 204GW）<sup>5</sup>の約 3 分の 1 に相当する。

<sup>2</sup> IEA（国際エネルギー機関）内に「海洋エネルギーシステムに係る実施協定（Implementing Agreement on Ocean Energy Systems）」に基づき発足した組織。

<sup>3</sup> 前田久明 木下健「波浪発電」（1979，生産研究 31 巻 11 号）

<sup>4</sup> 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）

<sup>5</sup> 電気事業連合会 電力統計情報（<http://www.fepec.or.jp/library/data/tokei/index.html>）

6 波力発電の技術の現状とロードマップ

地域別の波力エネルギーを見ると、本州中央部は 9～11.5kW/m と大きく、玄界灘（平均 3.8kW/m）や紀伊半島沿岸（4.9kW/m）、北海道沿岸（3.9～5.3kW/m）は比較的小さいと試算されている。

図表 6.9 日本沿岸の波力エネルギー（kW/m）



日本沿岸の波力エネルギー	<p>36GW</p> <p>日本沿岸の平均波力エネルギー密度：7kW/m</p> <p>日本の総海岸線：5,200km</p>
--------------	--

原典：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）

出典：「波力発電の動向について」（2009, OEA-J 資料）

### 6.1.3 導入目標量例

欧州、米国、日本における再生可能エネルギーおよび波力発電の導入目標量例を図表 6.10 に示す。各国において、意欲的な導入目標が設定されている。

図表 6.10 欧米諸国における再生可能エネルギー・波力発電の導入目標量例

	導入目標 等	
	再生可能エネルギー全体	波力発電
EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>2007年に、2020年までにEU全体の最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合を20%とする戦略を決定。</li> <li>2009年の「再生可能エネルギー導入促進に関する欧州指令」で、上記目標達成のための国別目標値を設定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>欧州再生可能エネルギー評議会は、左記指令の目標を達成するために必要な波力発電導入量を、2010年に1TWh、2020年には5TWhと試算。</li> <li>英国は2020年までに波力発電と潮汐発電の合計で1~2GWの導入が可能と見通している。</li> <li>アイルランドは、海洋エネルギーを2012年までに75MW、2020年までに500MW導入する目標を設定。</li> </ul>
米国	<ul style="list-style-type: none"> <li>多くの州で、電力部門における再生可能エネルギー利用義務制度(RPS)を策定。オバマ大統領は、2025年までに25%導入という連邦RPS制度を提案。</li> <li>オバマ大統領は「New Energy for America」で再生可能エネルギー由来の電力量割合を、2012年に12%、2025年に25%とする目標を発表。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>22の州・地域で波力発電がRPSの対象となっている。</li> </ul>
日本	<ul style="list-style-type: none"> <li>「2030年のエネルギー需給展望」（総合資源エネルギー調査会 需給部会、2005）において、2010年の再生可能エネルギーの対一次エネルギー供給比を、3.0%に引き上げる目標を設置。</li> <li>「長期エネルギー需給見通し（再計算）」（総合資源エネルギー調査会 需給部会、2009）において、2020年、2030年の新エネルギー導入見通しが示された。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>国としての目標値はなし。</li> <li>海洋エネルギー資源利用推進機構（OEA-J）のロードマップにおいて、2020年までに51MW、2030年までに554MW、2050年までに7,350MWの発電規模を想定。</li> </ul>

出典： Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, “Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020” (2008, EREC)、DSIRE ホームページ (<http://www.dsireusa.org/>)、 “New Energy for America” (2009, Barack Obama and Joe Biden)、 「長期エネルギー需給見通し（再計算）」 (2009, 経済産業省)、 「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)

## (1) 欧州

欧州における波力発電の導入目標量例を図表 6.11 に示す。

図表 6.11 欧州における導入目標量例

出典	2020 年	2030 年
再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令 <sup>6</sup>	EU 全体の最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合を 20%に引き上げるための国別目標値 (図表 6.12) を設定。	—
Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020 (EREC)	5TWh ※上記指令を達成するために必要な波力発電による発電量	—
英国	1,000~2,000MW (波力発電と潮流発電)	—
アイルランド	75MW (海洋エネルギー)	500MW (海洋エネルギー)

出典：Directive 2009/28/EC (2009, EC)、“Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020” (2008, EREC)、“RE-thinking 2050” (2010, EREC)、“Marine Energy Action Plan 2010” (2010, 英国政府)、“OES-IA Annual Report 2009” (2009, IEA-OES)

2007 年 3 月、欧州理事会は、EU の地球温暖化対策として 2020 年までに、EU 全体のエネルギー消費全体に占める再生可能エネルギーの比率を 20%に引き上げることで合意した。これを受けて、「再生可能電力推進に関する指令」<sup>7</sup>と「バイオ燃料促進に関する指令」<sup>8</sup>を修正、廃止する新たな指令である「再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令」が策定され、本指令において加盟各国に法的拘束力のある数値目標が設定された (図表 6.12)。

欧州再生可能エネルギー評議会 (European Renewable Energy Council : EREC) は、この目標を達成するために必要な再生可能エネルギーの種類毎の寄与度 (発電量) を試算しており、海洋エネルギー発電により、2010 年に 1TWh、2020 年には 5TWh が供給されるとしている (図表 6.13)。

国別には、英国が 2020 年までに波力発電と潮流発電の合計で 1~2GW が可能との見通しを出している。また、アイルランドでは、海洋エネルギーの導入目標として 2012 年までに 75MW、2020 年までに 500MW を掲げている。

<sup>6</sup> Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC

<sup>7</sup> EU の全電力供給量に占める再生可能電力の割合を 2010 年までに EU 全体で 21% にするという目標を掲げ、加盟各国に目標 (法的拘束力なし) を設定した指令。(Directive 2001/77/EC)

<sup>8</sup> 2010 年までにガソリン、ディーゼル油の 5.75%をバイオ燃料で代替する目標 (法的拘束力なし) を設定した指令。(Directive 2003/30/EC)

図表 6.12 再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令における  
EU 加盟国の 2020 年目標値

	最終エネルギー消費量に占める 再生可能エネルギーの割合[%]			EU 指令による 国別目標値
	2001	2003	2005	2020
ベルギー	1.3	1.6	2.2	13%
ブルガリア	7.1	9.0	10.6	16%
チェコ共和国	2.4	4.2	6.3	13%
デンマーク	12.3	14.9	17.0	30%
ドイツ	3.9	4.4	5.8	18%
エストニア	15.3	14.9	18.0	25%
アイルランド	2.2	2.2	3.0	16%
ギリシャ	6.5	7.2	7.5	18%
スペイン	9.1	9.4	7.6	20%
フランス	10.9	9.9	9.5	23%
イタリア	5.2	4.4	4.8	17%
キプロス	2.5	2.5	2.9	13%
ラトビア	34.4	31.9	35.5	40%
リトアニア	15.3	15.4	15.0	23%
ルクセンブルク	0.7	0.8	0.9	11%
ハンガリー	2.6	4.7	4.3	13%
マルタ	0.0	0.0	0.0	10%
オランダ	1.6	1.8	2.4	14%
オーストリア	25.8	21.8	23.0	34%
ポーランド	6.9	7.0	7.2	15%
ポルトガル	20.5	21.5	17.0	31%
ルーマニア	13.7	15.4	19.2	24%
スロベニア	16.1	14.3	14.9	25%
スロバキア	6.2	5.2	6.9	14%
フィンランド	27.9	26.7	28.5	38%
スウェーデン	40.0	33.9	40.8	49%
英国	0.9	1.0	1.3	15%

出典：“RENEWABLE ENERGY SOURCES IN FIGURES” (2008, BMU)、Directive 2009/28/EC

図表 6.13 目標達成に必要な波力発電による発電量予測

	2006 年	2010 年	2020 年
発電量 (TWh)	—	1	5

出典：“Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020” (2008, EREC)

6 波力発電の技術の現状とロードマップ

(2) 米国

米国における波力発電の導入目標量例を図表 6.14 に示す。

図表 6.14 米国における導入目標量例

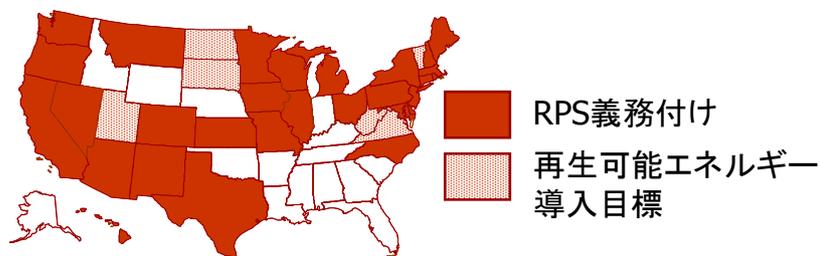
出典	2020 年	2030 年
RPS 法	州別 RPS 法により規定 (図表 6.15 参照)	
New Energy for America (オバマ大統領)	(2012 年) 再生可能エネルギー由来の電 力量割合: 12%	(2025 年) 再生可能エネルギー由来の電 力量割合: 25%

出典: DSIRE ホームページ (<http://www.dsireusa.org/>)、"New Energy for America" (2009, Barack Obama and Joe Biden)

米国においては国全体としての導入目標値は掲げられていない。ただし米国では、29 の州政府と DC 政府<sup>9</sup>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 制度を導入しており、そのうち 19 州において波力発電が制度の対象となっている (図表 6.16)。

また、オバマ大統領が掲げる「New Energy for America」計画では、電力消費量に占める再生可能エネルギー由来の電力量の割合を、2012 年までに 10%、2025 年までに 25%に引き上げる目標が掲げられている。

図表 6.15 州別の RPS 導入状況 ((2009 年 7 月現在))



出典: DSIRE ホームページ (<http://www.dsireusa.org/>) より作成

図表 6.16 各州の RPS 目標

■ : 波力発電を制度の対象に含めている州

州	目標	達成年	州	目標	達成年
カリフォルニア	20%	2010	カンザス	20%	2020
オハイオ	25%	2025	ウィスコンシン	10%	2015
イリノイ	25%	2025	テキサス	5,880MW	2015
ニューヨーク	24%	2013	ユタ (※)	20%	2025
ペンシルバニア	18%	2020	コロラド	20% (私営)、10% (公営)	2020
ニュージャージー	22.5%	2021	ニューメキシコ	20% (私営)、10% (公営)	2020

<sup>9</sup> 2010 年 3 月時点。

州	目標	達成年
ミネソタ	25%	2025
バージニア (※)	15%	2025
ノースカロライナ	12.5%(私営) 10%(公営)	2021 2018
ワシントン	15%	2020
メリーランド	20%	2022
ミズーリ	15%	2021
オレゴン	25%(大規模事業者) 5~10%(小規模事業者)	2025
アリゾナ	15%	2025
ミシガン	10%+1,100MW	2015
ネバダ	25%	2025
マサチューセッツ	15%	2020
コネチカット	23%	2020

州	目標	達成年
ハワイ	40%	2030
ニューハンプシャー	23.8%	2025
モンタナ	15%	2015
デラウェア	20%	2019
ワシントン D.C.	20%	2020
メイン	40%	2017
ノースダコタ (※)	10%	2015
ロードアイランド	16%	2020
バーモント (※)	20%	2017
サウスダコタ (※)	10%	2015
アイオワ	105MW	-

注：(※)は義務量ではなく、目標量を設定している州。なお、カリフォルニアは2020年までに33%の達成を目標としている。

出典：DSIRE ホームページ (<http://www.dsireusa.org/>) より作成

### (3) 日本

日本においては、波力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（略称 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の発電規模が想定或いは期待されるとしている。

図表 6.17 日本における波力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 kWh/年	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	0.02MW	51MW	554MW	7,350MW
(参考)		(0.1MW： 450 基) (0.5MW： 10 基) (1.0MW： 1 基)	(0.1MW： 2,000 基) (0.5MW： 600 基) (1.0MW： 50 基) (2.0MW： 2 基)	(0.1MW： 3,000 基) (0.5MW： 4,500 基) (1.0MW： 3,800 基) (2.0MW： 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：Onshore：25%、Near-shore：27%、Offshore：40%

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）

### 6.1.4 導入実績

波力発電システムで実用化されているものは少なく、現在多数の実証試験プラントが設置されている。2008年9月に、ポルトガル沖において 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、図表 6.18）が運転開始したが、数週間で故障が発生し、現在改修中の模様である<sup>10</sup>。

代表的な実証試験プラント、波力発電装置は、「5.2.1.2 技術開発動向」にて紹介する。

図表 6.18 Agucadoura Wave Farm 外観



出典：Pelamis Wave Power 社ホームページ（<http://www.pelamiswave.com/>）

<sup>10</sup> 波力発電検討会報告書（2010，波力発電検討会）

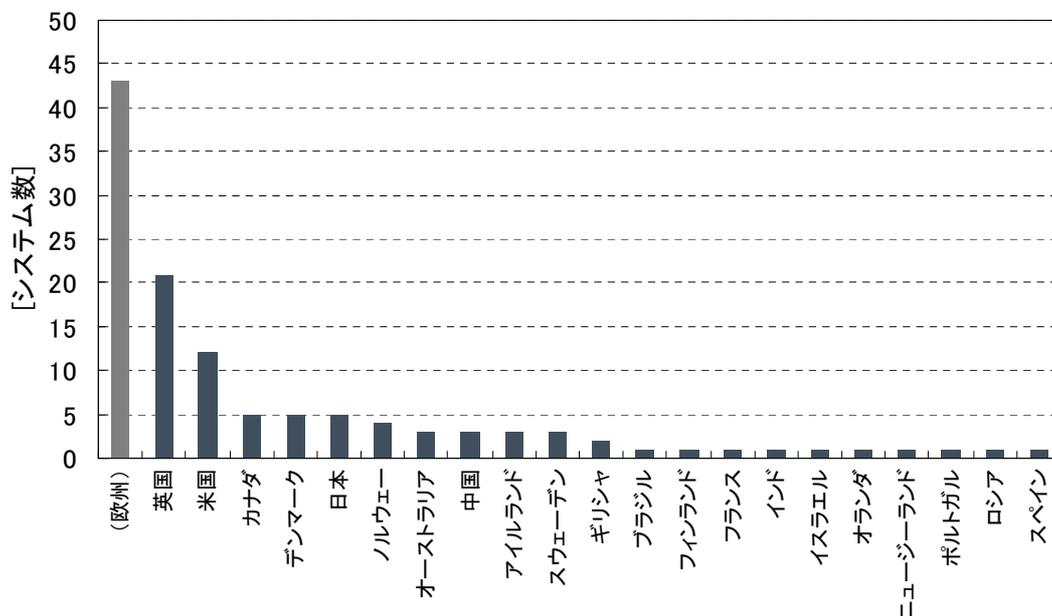
### 6.1.5 技術開発動向

現在、波力発電を含む海洋エネルギー利用技術は、欧州（特に英国）や米国を中心に進められている。日本においても過去に基礎的研究は進められており、当時は世界を先導していたが、予算の縮小等により実用化段階の研究が進んでおらず、日本の研究開発進捗は欧米に10年遅れていると言われている。

国別の主要な波力発電プロジェクト件数を図表 6.19 に示す。また、世界と日本における主要な波力発電プロジェクトを、それぞれ図表 6.20 および図表 6.26 に示す。プロジェクトの約6割は欧州において、さらにその約半数は英国で行われている。現在世界全体で100件程度の波力発電に関する開発プロジェクトが進められている。

以下、日本、欧州、米国における技術開発動向を概観する。

図表 6.19 主要な波力発電開発プロジェクト件数（国別）



出典：“Ocean Energy: Global Technology Development Status”（2009, IEA-OES）より作成

## (1) 欧州

図表 6.20 に、欧州における主要な波力発電プロジェクトを示す。先述のとおり、世界のプロジェクトの約 6 割は欧州において、さらにその約半数は英国で行われている。

図表 6.20 欧州の主要な波力発電プロジェクト

設置場所	名称	開発事業者	技術	設置	発電容量 [kW]	設置年
ノルウェー	TAPCHAN	Norwave (ノルウェー)	越波型	固定式	350	1985
アイルランド	McCabe Wave Pump	Hydam Technology (アイルランド)	可動物体型	浮体式	- (淡水化+発電)	1996
ポルトガル Pico 島	欧州パイロットプラント	(EU 支援)	振動水柱型	固定式	400	1998
英国 Islay 島	LIMPET	Wavegen (英)	振動水柱型	固定式	500	2000
デンマーク	Wave Dragon	Wave Dragon ApS (デンマーク)	越波型	浮体式	20	2003
ポルトガル	Archimedes Wave Swing (AWS)	AWS Ocean Energy (英)	可動物体型	固定式	500×4	2004
デンマーク	Wave Star Energy	Wave Star Energy (デンマーク)	可動物体型	浮体式	(1:10 モデル 24m)	2006
スウェーデン	Seabased	Uppsala 大学 (スウェーデン)	可動物体型	浮体式	100	2006
ポルトガル	Pelamis	Pelamis wave power (英)	可動物体型	浮体式	750×3	2008 (商業運転)
スペイン	Powerbuoy	Ocean Power Technologies (米)	可動物体型	浮体式	150×9, 40×1	2008
英国	Oyster	Aquamarine Power (英)	- (水力発電と結合)	固定式	315	2009

出典：米国エネルギー省ホームページ (<http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydrokinetic/>)、「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より作成

欧州の海洋エネルギー技術の開発を支えている大きな要因は、再生可能エネルギーを支援することにより世界の気候変動の脅威に取り組みようとする政府の積極的な政策、潮力・波力エネルギー資源の利用可能性の高さ、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意欲にある<sup>11</sup>。

欧州においても、1970 年代のオイルショックを契機に波力発電への関心が高まり、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、周辺海域の波のエネルギー密度が高いノルウェーや英国を中心に 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装置の開発に参入している。

現在は、英国の Pelamis 発電装置が最も実用化に近い段階にある (P327 参照)。2008 年 9 月には、ポルトガル沖において Pelamis 波力発電装置を用いた、総出力 2,250kW (750kW 機×3 基)

<sup>11</sup> 「欧米における潮力・波力発電プロジェクトの最新動向」(2009, NEDO 海外レポート)

の商用プラント（Agucadoura Wave Farm、図表 6.18）が運開した。しかしながら、数週間で故障が発生し、現在改修中の模様である<sup>12</sup>。

欧州では、図表 6.21 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。代表的な実証試験サイトは、スコットランドのオークニー諸島に整備されている European Marine Energy Centre (EMEC)<sup>13</sup>である。その他ポルトガルにも Wave Energy Centre<sup>14</sup>があり、様々な実証試験が行われている。

図表 6.21 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（系統非連系）。近くに新たな実証サイトが整備される予定。
Narec <sup>15</sup> （北東イングランド）	造船のドックを改良して作った 1/10 スケールモデルの実証試験が可能な施設があり、1m の人工波を起こせる。洋上風力発電のタービン実験施設もある。
Wave Hub（南西イングランド）	実機スケールの実証試験が可能。系統連系が可能。
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 <sup>16</sup> や IEA-OES <sup>17</sup> 等）の活動への参加、各種レポートの作成等も実施。

EMEC は、地元スコットランドの組織をはじめ、英国貿易産業省（DTI）を含む複数の公的機関・組織から約 500 万ポンドの出資を受け、2004 年 8 月に開設された。波力発電および潮流発電の実海域試験を行うことができる。波力発電については 4 つの実験サイト、陸上までの海底電気ケーブル、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ている。EMEC のあるオークニー諸島は海洋条件に恵まれており、EMEC の波力発電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。

EMEC で実証試験が行われた Pelamis Wave Power 社の波力発電装置 Pelamis は、ポルトガル沖にて 3 基の商用機として設置されており、現在 E.on<sup>18</sup>の出資により改良機（P2 Pelamis）の実証試験が行われている。

<sup>12</sup> 「波力発電検討会報告書」（2010, 波力発電検討会）

<sup>13</sup> EMEC（<http://www.emec.org.uk/index.asp>）

<sup>14</sup> WEC（<http://www.wavec.org/index.php/1/home/>）

<sup>15</sup> Narec（<http://www.narec.co.uk/>）

<sup>16</sup> European Ocean Energy Association（<http://www.eu-oea.com/index.asp?sid=102>）

<sup>17</sup> 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。

<sup>18</sup> ドイツに本社を置く欧州の大手エネルギー会社。

図表 6.22 EMEC (欧州海洋エネルギーセンター)



主な設備	概要
実験サイト	波力発電については海岸より約 2km 沖、水深 50m の位置に、0.5km 間隔で 4 つの実証サイトを設置。それぞれの実証サイトに向けて 11kV の外装電力ケーブルを敷設している。5 つの潮流発電用実証サイトも備えている。
波測定用ブイ	波高・波長・方角の計測機器を搭載したブイ。リアルタイムで計測データを送信できる。
サブステーション	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、通信機器を持つサブステーション。
データセンター	SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition : 計測データの制御および監視) システムを導入し、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。データセンターから操作可能。
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できる。

出典 : EMEC ホームページ (<http://www.emec.org.uk/>)

### <Pelamis 波力発電装置>

「Pelamis」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。1998年に設立された英国の Pelamis Wave Power 社（2007年 Ocean Power Delivery 社から社名変更）により研究開発が行われている。

Pelamis 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。

2008年にポルトガル沖に 750kW 機を 3 基設置して、系統に連系する Aguçadoura プロジェクトが開始された。このプロジェクトは、再生可能エネルギー事業者 Enersis 社の主導で進められている。

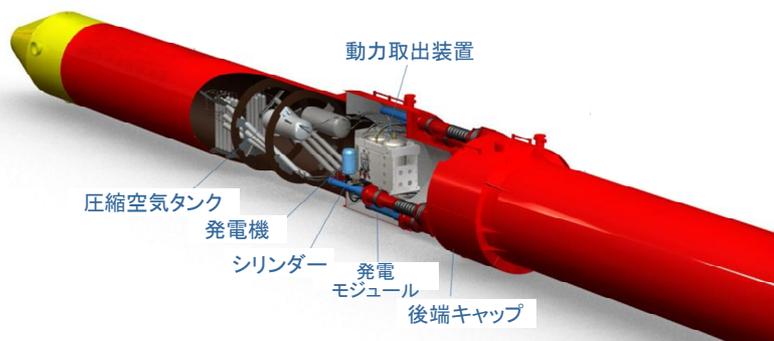
図表 「Pelamis」単機の概要

全長×直径	150m×3.5m
発電出力	750kW
動力変換	油圧システム
排水重量	700 トン

図表 プラント概観



図表 モジュール断面図



出典：Pelamis Wave Power 社ホームページ (<http://www.pelamiswave.com/>)

## (2) 米国

図表 6.23 に米国の主要な波力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、認可プロセスに時間とコストがかかること、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はじめている<sup>19</sup>。

図表 6.23 米国の主要な波力発電プロジェクト

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	PowerBuoy	Ocean Power Technologies (米)	可動物体型	浮体式	40	2008
米国	SeaDog	Independent Natural Resources(米)	可動物体型	固定式	- (ホップ実証)	2007
米国	AquaBuOY	Finavera Renewables(加)	可動物体型	浮体式	250	2007

出典：米国エネルギー省ホームページ (<http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydrokinetic/>)、「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より作成

米国を代表する波力発電装置に、Ocean Power Technologies 社の「Power Buoy」(P329 参照)が挙げられる。ポイント・アブソーバー型 (P312 参照) の波力発電装置で、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見られる。米国ニュージャージー州沿岸に定格 40kW 級の初期の試験機を 1 台設置し、2005 年 10 月からの 1 年間と 2008 年 8 月から現在まで稼働しており、この間台風や 12m 以上の波浪に耐えている。2008 年からはハワイ沖においても実証試験が行われている<sup>20</sup>。

スペインでは、世界最大の再生可能エネルギー会社イベルドロラとスペイン政府との合弁事業として建設が進められている 1.39MW の波力発電所に採用され、第 1 フェーズとして 2008 年 9 月に定格 40kW 改良型の装置を設置した<sup>20</sup>。

2010 年中頃にはスコットランド オークニーに定格 150kW の装置を設置予定である。同社は、海底に設置される系統連系機器の開発も進めており、Wave Hub (図表 6.21 参照) を構成する 4 海区の一つである OPT 海区にはこれを設置する計画である<sup>20</sup>。

<sup>19</sup> 「欧米における潮力・波力発電プロジェクトの最新動向」(2009, NEDO 海外レポート)

<sup>20</sup> 「波力発電検討会報告書」(2010, 波力発電検討会) より引用。

### <PowerBuoy 波力発電装置>

「PowerBuoy」は、米国の Ocean Power Technologies (OPT) 社により開発された、ブイの形をした可動物体型の波力発電装置である。PowerBuoy は波の運動に従い自在に動き、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発電を停止し、通常の波に戻ると復旧する。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) の開発も行っている。

ハワイの米国海軍基地沖において 2008 年より試験が行われている他、Iberdrola S.A 社と契約を締結しスペインにおいて 1.39MW (40kW×1 基、150kW×9 基) 実証プロジェクトを進めている。また、ニュージャージー州やオレゴン州、オーストラリアのポートランドにおいてもプロジェクトが進められている。

2009 年 7 月、東京都は、温室効果ガスの大幅削減に向け再生可能エネルギーの飛躍的拡大を推進する一環として、海洋エネルギーの利用、中でも波力発電に着目、学識経験者や民間事業等と波力発電検討会を立ち上げ、波力発電の利用可能性を検討した。PowerBuoy を開発した OPT 社もこれに参加している。

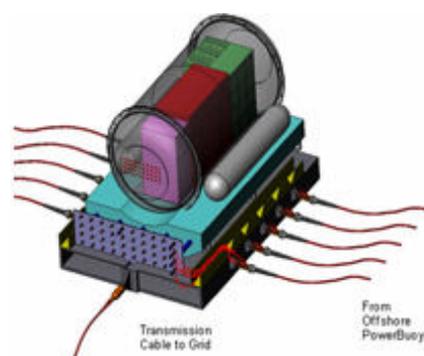
図表 「PB150 PowerBuoy」の概要

全長×幅	44m×14m (144.3ft×45.9ft)
発電出力	150kW
動力変換	油圧システム

図表 プラント概観



図表 Underwater Substation Pod (USP) 概念図



出典：Ocean Power Technologies 社ホームページ (<http://www.oceanpowertechnologies.com/index.htm>)

(3) 日本

日本の波力発電開発は、1919年に千葉県大東崎において実施された、振り子式及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、海上保安庁により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 30W～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（図表 6.24）。現在国内外で数千台が稼働中である。

図表 6.24 益田式航路標識ブイ（再掲）



出典：緑星社ホームページ（<http://www.ryokusei.co.jp/>）

波力発電研究が本格化したのは1970年代で、オイルショックを契機に、石油・天然ガスの代替エネルギーとして、世界的に波力発電への関心が高まった。特に我が国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」、「海陽」（図表 6.25）等、様々な波力発電装置の実海域実験が精力的に行われた。

当時我が国は、波力発電研究の先端にあったが、その後石油価格の高騰が沈静化していく中で、研究開発投資も先細りとなり、2003年に終了した「マイティホエール」（図表 6.25）の研究開発以後、日本においては大規模な実証プロジェクトは行われていない。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形となった。

図表 6.25 日本における主要な大規模実証プロジェクト

プラント・技術・開発主体等	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"> <li>●全長 80m, 幅 12m, 総重量 800t の船型浮体に 13 の空気室を設置。</li> <li>●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。</li> <li>●装置は山形県鶴岡市由良の沖合 3km に係留。</li> </ul>	 出典：JAMSTEC ホームページ（ <a href="http://www.jamstec.go.jp/j/">http://www.jamstec.go.jp/j/</a> ）

<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"> <li>●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。</li> <li>●沖縄県八重山郡竹富町西表船浮湾サバ崎沖水深 10m に設置。</li> <li>●異常海象時には構造物全体がジャッキアップする。</li> </ul>	 <p>出典：(財)日本造船振興財団海洋環境技術研究所資料</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"> <li>●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。</li> <li>●幅 30m, 長さ 50m のプロトタイプ装置。</li> <li>●ウェルズタービンを 3 台設置。総合変換効率は最大 15%。</li> <li>●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。</li> <li>●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。</li> </ul>	 <p>出典：JAMSTEC ホームページ (<a href="http://www.jamstec.go.jp/j/">http://www.jamstec.go.jp/j/</a>)</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)

近年になり、地球温暖化問題や近年の石油価格の高騰、エネルギー安全保障の必要性を受け、世界的に波力発電を含む海洋エネルギー利用が再び脚光を浴びている。その流れを受けて、日本においても再度研究開発の気運が高まっており、発電効率の高い装置を波エネルギー密度の高い沖合に設置するというコンセプトのもとに、様々な波力発電装置の開発が行われている。

ジャイロ式波力発電装置 (P333 参照) や、人工筋肉を用いた EPAM 波力発電装置 (P335 参照) などは、従来の発電装置とは異なる原理を用いており、日本独自技術としてその実用化が期待される。平成 21 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、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が採択された。また、平成 22 年度の環境省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」が採択されている。

日本のものづくり技術、浮体技術の水準は高く、本格的な技術開発が再開されれば海外に追いつくことは可能との見解もある。

図表 6.26 近年の主要な波力発電装置

装置名	設置場所	開発主体	技術	実施期間
ジャイロ式波力発電装置	鳥取県、和歌山県	神戸大学	可動物体型	2004～2010
つるべ式波力発電装置	山口県下関市彦島	山口大学	可動物体型	2005
EPAM 発電装置	カリフォルニア	HYPHER DRIVE	可動物体型	2008.12

出典：「21世紀の海洋エネルギー開発技術」（2006, (社)日本海洋開発建設協会）、「ジャイロを利用した高効率波力発電装置」（2007, 神戸大学 神吉 博）、和歌山県ホームページ (<http://www.pref.wakayama.lg.jp/index.html>)、HYPHER DRIVE 社ホームページ (<http://www.hyperdrive-web.com/index.html>) より作成

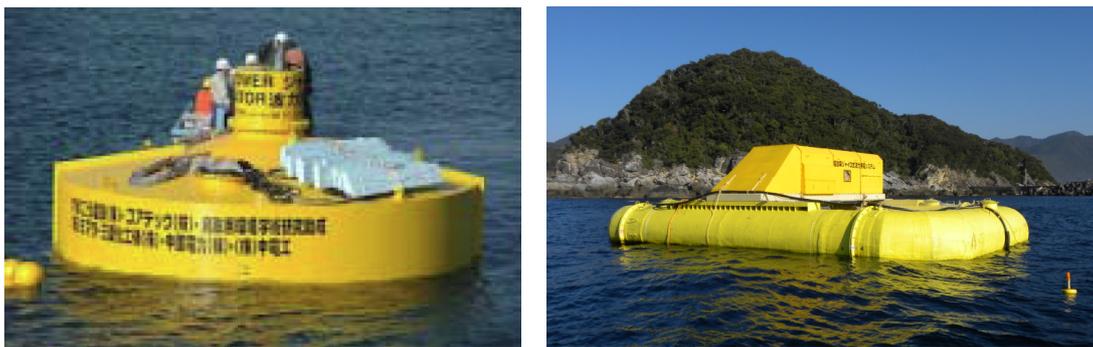
### ＜ジャイロ式波力発電装置＞

ジャイロ式波力発電装置は、波を受けて傾いた回転する円板が元に戻ろうとする力（ジャイロモーメント）で直接発電機を駆動するもので、従来のエネルギー変換方式とは原理が異なる。エネルギー変換回数が少ないため、高効率化が可能であり、従来の方式に比べて発電効率を約2倍にすることが可能である。その他、特徴として主に以下の項目が挙げられている。

- 広範囲な大きさの波（波高0.5～4m）で高効率発電が可能
- 長寿命（浮体15年、本体30年目標）
- コンパクトかつ軽量
- 低建設コスト、低メンテナンスコスト（塗料、軸受交換のみ）

2003年度より、プロトタイプ機の開発・実験が行われており、2010年には45kW機（4号機）の海上実験が行われた。

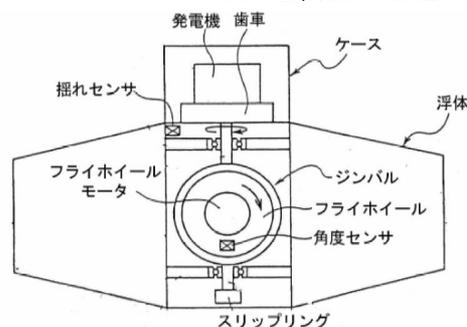
図表 ジャイロ式波力発電装置(左:1号機 右4号機)



出典（左）：「ジャイロを利用した高効率波力発電装置」（神戸大学 神吉 博、(独)科学技術振興機構 平成18年度新技術説明会 配布資料）

写真提供（右）：(株)ジャイロダイナミクス

図表 ジャイロ式波力発電装置の仕組み

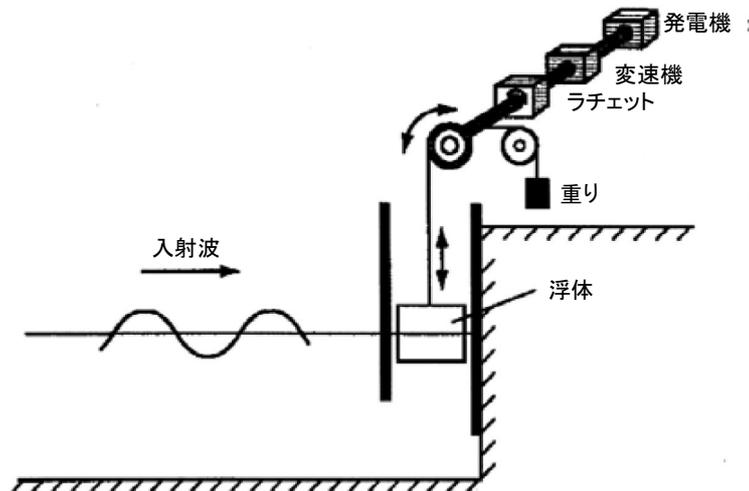


出典：「ジャイロを利用した高効率波力発電装置」（神戸大学 神吉 博、(独)科学技術振興機構 平成18年度新技術説明会 配布資料）

**<つるべ式波力発電装置>**

山口大学が開発を推進する「つるべ式発電装置」は、つるべ式の構成で水面の上下動から一定方向に回転する軸の動力を取出す波力発電装置である。滑車にフロート（浮き）と重りを取り付け、フロートは海に浮かべてフロートの上下運動を滑車の回転運動に変換してタービンを回す。フロートの上下運動を滑車に伝えるワイヤーにはばねを装着することでエネルギーの一部がばねに蓄えられる。

ワイヤーとラチェット機構がポイントで、フレキシブルなワイヤーの張力だけで動力を伝達する部分をもつため、構造強度上の問題の主要部分を解決し、さらにエネルギーを取り込む可動物体と機械部分を構造的に分離して設置や設置後の維持補修を格段に容易にしている。つるべ式構成の要素を複数連結すると、ラチェット機構の作用により個々の要素は不揃いに運動しながら協力して発電機を回す。

**図表 つるべ式波力発電システムの基本構造**

出典：「環境報告書 2007」（山口大学）より作成

### <EPAM 波力発電装置>

EPAM 波力発電装置は、米国の研究機関 SRI International が開発したソフトアクチュエータである、電場応答高分子型人工筋肉（Electroactive Polymer Artificial Muscle : EPAM）を利用した、新しい方式の波力発電である。EPAM は、アクリル系やシリコン系樹脂等からなる薄い高分子膜を伸縮可能な電極で挟んだ構造をしている。電極間に電位差が与えられると静電力によって電極が引き合い、高分子膜が収縮し、面方向に伸長する。この駆動モードを逆にすると、膜の歪みにより発電することができる。

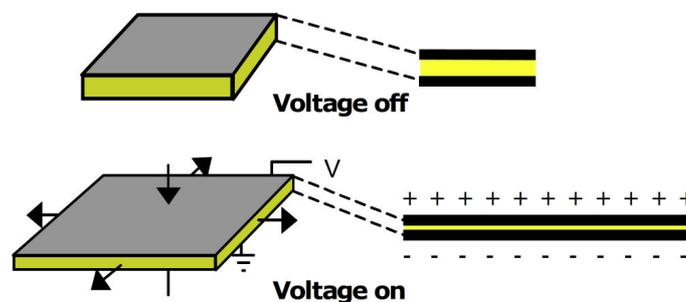
EPAM の波力発電への応用は、日本のベンチャー企業 HyperDrive 社が SRI と共同で開発を進めている。カリフォルニア州サンタクルーズの沖合で実証試験を行っており、将来的には約 2kW/モジュールを目指している。

図表 プラント概観（イメージ図）



出典：SRI International ホームページ (<http://www.sri.com/news/imagebank/EPAMGenerator.html>)

図表 EPAM 波力発電装置の動作原理



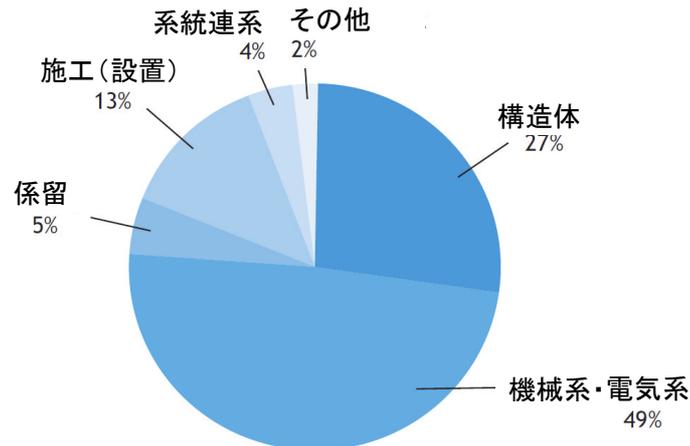
出典：「SRI 型人工筋肉アクチュエータ（EPAM）の現状と将来」（2006、千葉 正毅）

### 6.1.6 システム価格、発電単価等<sup>21</sup>

#### (1) 現状のコスト

波力発電システム価格<sup>22</sup>の内訳例を図表 6.27 に示す。採用する技術の方式や設置エリアにより構成比率は異なるが、機械系・電気系機器のコストが約半分を占めており、次に構造体に係る費用が約3割を占めている。

図表 6.27 波力発電システム価格の内訳例



出典：“Future Marine Energy Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy” (2006, Carbon Trust) より作成

図表 6.28 に波力発電の現状のシステム価格・発電コスト試算例を示す。

システム価格は概ね数十万円/kW～150万円/kW程度となっており、採用するシステムや設置場所によって事例毎に大きく異なるものと思われる。

発電コストについては、技術のタイプや設置場所の波力エネルギー密度に大きく左右されるため、波力エネルギー密度の高い欧州等においては、発電コストはより低くなると考えられる。

生産初期段階を想定した試算では20～75円/kWhと幅があるが、量産化した際の試算では概ね20円～30円/kWh程度と考えられている。発電コストには減価償却費や利子の他に運転・保守管理に係るコストも影響するが、運転・保守管理費は設置場所が沿岸や陸地から近い地点にあるかどうか等によって大きく異なってくる。

<sup>21</sup> 1ドル=100円、1ユーロ=130円として換算している。以下同様。

<sup>22</sup> 設備費（発電装置に係る費用）、設置に係る諸経費（施工、係留、系統連系等に係る費用）の合計をシステム価格と定義する。

図表 6.28 波力発電のコスト試算例

資料 No.	前提等	システム価格	発電コスト
1	沖合設置 (プロトタイプ)	約 68~150 万円/kW <sup>※</sup>	-
2	2005 年	約 60~150 万円/kW <sup>※</sup>	約 20~30 円/kWh <sup>※</sup>
3	設備利用率 10%	40 万円/kW	30 円/kWh
4	EPAM 発電装置 <sup>23</sup> (幅 1m の EPAM 発電装置を量産した場合)	70~90 万円/kW	20~26 円/kWh
5	PowerBuoy 発電装置 <sup>24</sup>	39 万円/kW	15 円/kWh

※ 1 ポンド=170 円、1 ドル=100 円として換算

[出典]

資料 1 “Future Marine Energy Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy” (2006, Carbon Trust)

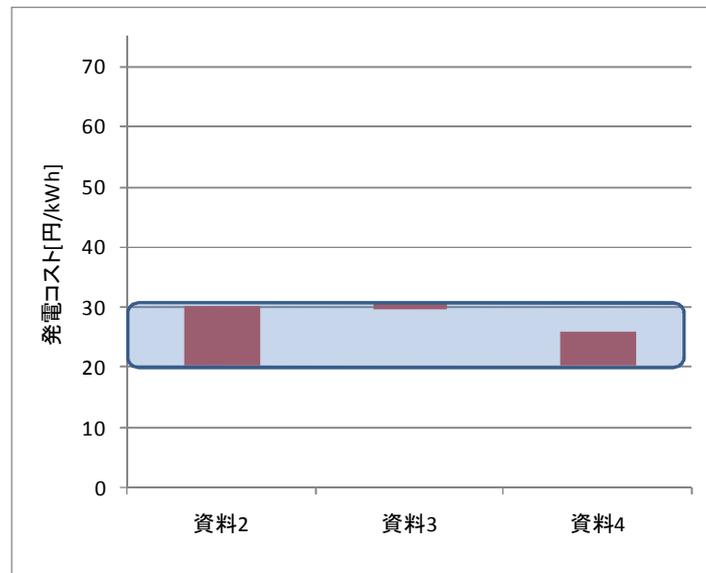
資料 2 “Energy Technology Perspectives 2008” (IEA)

資料 3 浦 環「我が国の海洋開発利用の基本戦略－海洋技術フォーラムからの提言－」(2009, 海洋技術フォーラムシンポジウム資料)

資料 4 千葉 正毅「SRI 型人工筋肉アクチュエータ (EPAM) の現状と将来」(2006)

資料 5 「波力発電検討会報告書」(2010, 波力発電検討会)

図表 6.29 波力発電の発電コスト試算例



資料番号は図表 6.28 に対応

<sup>23</sup> P335 参照。

<sup>24</sup> P329 参照。

(2) 将来のコスト

図表 6.30 に波力発電の将来のシステム価格・発電コスト試算例を示す。

システム価格は、2020 年頃から約 50 万円/kW 以下にまで低減すると予想されており、設計の最適化や規模の経済、習熟効果等によりコスト低減の可能性がある。

また発電コストについて、IEA では 2018 年に約 20 数円/kWh、2030 年から 2050 年にかけては 7 円/kWh 程度のコストレベルになるという野心的な見通しが示されている。

図表 6.30 波力発電の将来コスト試算例

資料 No	前提等	システム価格※	発電コスト※
1	(2005 年)	約 60~150 万円/kW	約 20~30 円/kWh
	2030 年	約 25~50 万円/kW	約 4.5~9 円/kWh
	2050 年	約 20~40 万円/kW	約 4~8 円/kWh
2	40MW (2018 年)	約 26 万円/kW	約 19~26 円/kWh

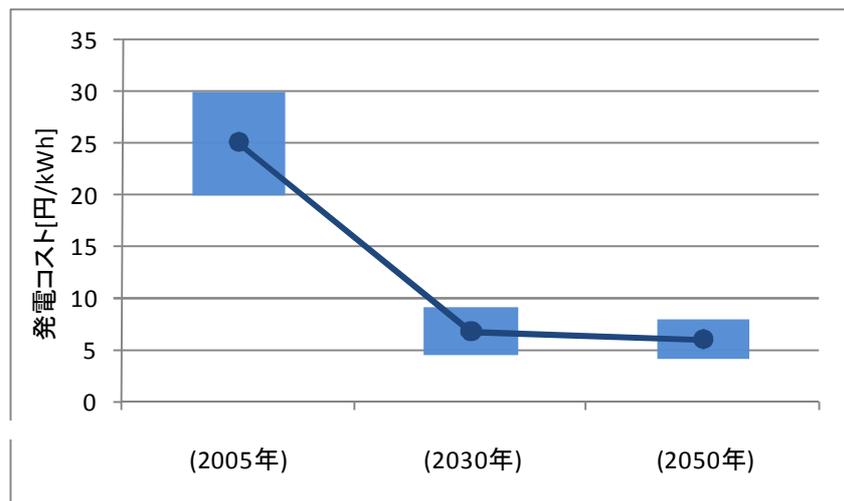
※ 1 ドル=100 円として換算

(出典)

資料 1 “Energy Technology Perspectives 2008” (IEA)

資料 2 “Comparative Costs of California Central Station Electricity Generation” (2010, California Energy Commission)

図表 6.31 波力発電の将来の発電コスト試算例



資料は図表 6.30 の資料 1 に対応

## 6.1.7 推進施策・関連法令

### (1) 欧州

EU の主要な再生可能エネルギー推進施策・関連法令を図表 6.32 に示す。EU は、エネルギーセキュリティ、化石燃料依存からの脱却、社会的・経済的団結等を背景に、地球温暖化対策に係る野心的な目標を掲げ、積極的な環境・エネルギー政策を打ち出してきた。近年の動向として、再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令、およびフィードインタリフ制度について詳述する。

図表 6.32 欧州における主要な再生可能エネルギー推進施策・関連法令

推進施策・関連法令	概要
再生可能エネルギー白書 <sup>25</sup> (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2010 年までに EU 内のエネルギー消費量の 12% を再生可能エネルギーで賄う目標を設定（法的拘束力なし）。</li> <li>目標達成に向けた行動計画を策定。</li> </ul>
再生可能電力推進に関する欧州指令 <sup>26</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2010 年までに電力供給量の 21% を再生可能エネルギーでまかなう目標を設定。</li> <li>加盟各国に示唆的目標を設定（法的拘束力なし）。</li> <li>目標達成は困難な見通し（2010 年までに 19% の達成見込み）。</li> </ul>
バイオ燃料促進に関する欧州指令 <sup>27</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2010 年までにガソリン、ディーゼル油の 5.75% をバイオ燃料で代替する目標を設定（法的拘束力なし）。</li> <li>目標達成は困難な見通し。</li> </ul>
再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令 <sup>28</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生可能電力推進に関する指令とバイオ燃料促進に関する指令を修正、廃止する新たな指令。</li> <li>2020 年までに EU 全体の最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合を 20% にする目標を設定。</li> <li>2020 年までに運輸部門における再生可能エネルギーの割合を 10% にする目標を設定。</li> <li>各国に法的拘束力のある目標値を設定。</li> </ul>
フィードインタリフ制度（Feed-in tariff）	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生可能エネルギーの買取価格（tariff）を法律で定め、一定期間の買取りを保障する制度。</li> <li>ドイツ、スペイン等で太陽光発電が爆発的に普及する起爆剤となった。</li> </ul>

<sup>25</sup> COM(1997)599 “Energy for the Future: Renewable Sources of Energy”

<sup>26</sup> Directive 2001/77/EC on the promotion of the electricity produced from renewable energy source in the internal electricity market

<sup>27</sup> Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels and other renewable fuels for transport

<sup>28</sup> Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC

## 1) 再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令

2007年3月、欧州理事会は、EUの地球温暖化対策として以下4項目について合意した。

- 1) 2020年までに、EU全体の温室効果ガス排出量を1990年比で少なくとも20%削減する。
- 2) 2020年までに、EU全体のエネルギー消費全体に占める再生可能エネルギーの比率を20%に引き上げる。
- 3) 2020年までに、各国の輸送用燃料におけるバイオ燃料の比率を10%に引き上げる。
- 4) 新規化石燃料発電所へのCO<sub>2</sub>回収・地中貯留（CCS）システムの設置に向け、各国間で協力して技術開発、法的枠組み作り等を進める。

再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令は、上記4項目のうち2)と3)を達成するための手段や国別目標値を具体化したもので、再生可能電力推進に関する欧州指令（2001）とバイオ燃料促進に関する欧州指令（2003）を修正、廃止する指令である。

図表 6.12 に EU 加盟各国における 2020 年時点の再生可能エネルギー比率の目標値を示す。本指令は「2020年までに20%」という目標を達成するために、法的拘束力のある目標値を加盟各国に課している。国別目標値の設定にあたっては、再生可能エネルギーに関する各国の状況や経済力等が考慮されている。

図表 6.33 EU 加盟国の最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギー比率の経年変化と 2020 年目標値（再掲）

	最終エネルギー消費量に占める 再生可能エネルギーの割合			EU 指令による 国別目標値
	2001	2003	2005	2020
	[%]			
ベルギー	1.3	1.6	2.2	13%
ブルガリア	7.1	9.0	10.6	16%
チェコ共和国	2.4	4.2	6.3	13%
デンマーク	12.3	14.9	17.0	30%
ドイツ	3.9	4.4	5.8	18%
エストニア	15.3	14.9	18.0	25%
アイルランド	2.2	2.2	3.0	16%
ギリシャ	6.5	7.2	7.5	18%
スペイン	9.1	9.4	7.6	20%
フランス	10.9	9.9	9.5	23%
イタリア	5.2	4.4	4.8	17%
キプロス	2.5	2.5	2.9	13%
ラトビア	34.4	31.9	35.5	40%
リトアニア	15.3	15.4	15.0	23%
ルクセンブルク	0.7	0.8	0.9	11%
ハンガリー	2.6	4.7	4.3	13%
マルタ	0.0	0.0	0.0	10%
オランダ	1.6	1.8	2.4	14%
オーストリア	25.8	21.8	23.0	34%
ポーランド	6.9	7.0	7.2	15%

	最終エネルギー消費量に占める 再生可能エネルギーの割合			EU 指令による 国別目標値
	2001	2003	2005	2020
	[%]			
ポルトガル	20.5	21.5	17.0	31%
ルーマニア	13.7	15.4	19.2	24%
スロベニア	16.1	14.3	14.9	25%
スロバキア	6.2	5.2	6.9	14%
フィンランド	27.9	26.7	28.5	38%
スウェーデン	40.0	33.9	40.8	49%
英国	0.9	1.0	1.3	15%

出典：“RENEWABLE ENERGY SOURCES IN FIGURES”（2008, BMU）、  
Directive 2009/28/EC より作成

## 2) フィードインタリフ制度

図表 6.35 に、欧州における主要な波力発電支援制度を示す。

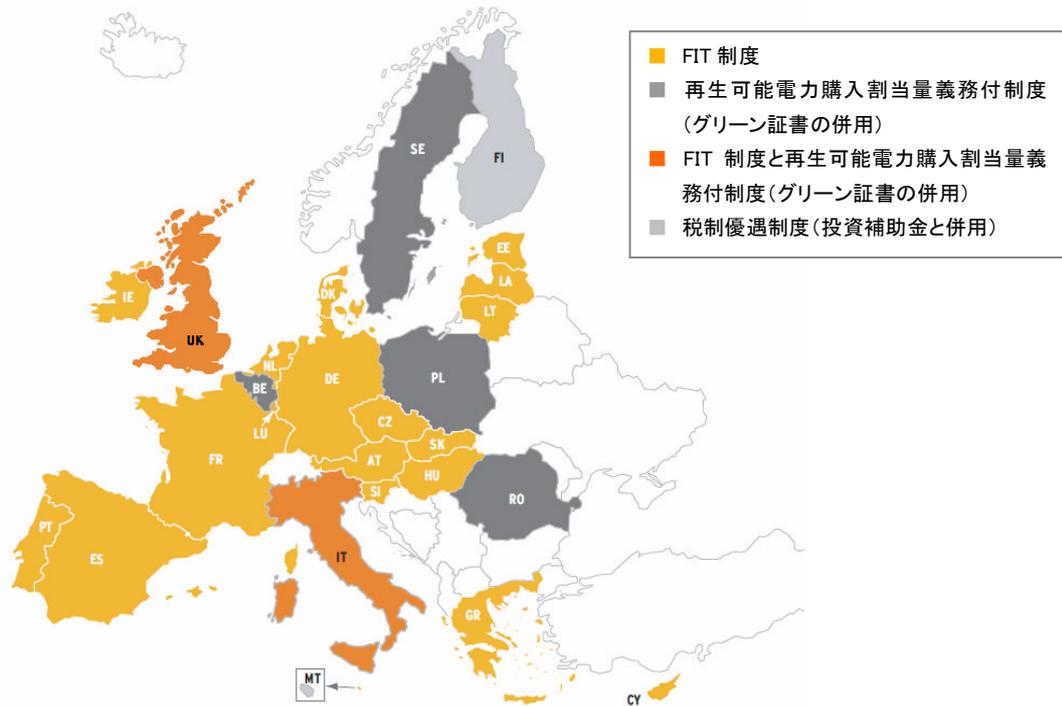
欧州における主要な再生可能エネルギー推進施策に、フィードインタリフ（Feed-in tariff）制度が挙げられる。フィードインタリフ制度とは、再生可能エネルギーの買取価格（tariff）を法律で定める方式の助成制度で、一定期間の買取りを保障する制度である。買取価格は年を経るごとに低減される仕組みになっており、早期に事業を開始した方が有利となる。再生可能電力を通常の電気料金よりも高い価格で安定的に購入してもらえるため、再生可能電力事業者にとって大きなインセンティブとなっている。

波力発電については、ポルトガル、アイルランドにおいてフィードインタリフ制度の対象エネルギーとなっており、それぞれ 0.23 ユーロ/kWh、0.22 ユーロ/kWh の買取価格が設定されている。

FIT の他に代表的なものとして、再生可能電力購入割当量義務付制度が挙げられる。再生可能電力購入割当量義務付制度とは、電力事業者と大口の消費者に、再生可能電力の購入割当量が義務付けられる制度で、日本における RPS 制度と類似の制度である。再生可能電力に対して発行される、売買可能なグリーン証書（Tradable Green Certificates:TGC）と併用されることが一般的で、再生可能電力の使用またはグリーン証書の購入によって割当量を充足できるようになっている。

欧州では、多くの国で FIT が採用されており、2009 年末時点で採用国数は約 20 カ国に及ぶ。しかし買取価格は国によって差があり、制度設計上の問題等から、全ての国でドイツのような爆発的な再生可能エネルギーの普及が進んでいるわけではない。また、スペインでは増大する固定価格買取発電量に対して電力需要家の負担軽減を図るため、エネルギー源別に累積導入量の上限を設定し、上限に達したエネルギー源の買取価格を見直す条項を設定するなど、制度の適切な運用に向けた見直しが進んでいる。

図表 6.34 欧州における再生可能エネルギー支援施策



出典：「RENEWABLE ENERGY SOURCES IN FIGURES」(2009, BMU)

図表 6.35 波力発電に対する欧州主要国の支援策例

国	優遇措置	当該国での価値	日本円換算
イングランド	海洋発電に対する再生可能エネルギー証書 (ROCs) の発行	0.1 ユーロ/kWh	13.0 円/kWh
スコットランド	潮力発電の ROCs	0.15 ユーロ/kWh	19.5 円/kWh
	波力発電の ROCs	0.25 ユーロ/kWh	33.5 円/kWh
ポルトガル	波力発電の固定買取価格 (FIT)	0.23 ユーロ/kWh	29.9 円/kWh
アイルランド	海洋発電の固定買取価格 (FIT)	0.22 ユーロ/kWh	28.6 円/kWh

※ 1 ユーロ=130 円として換算

出典：「波力発電検討会報告書」(2010, 波力発電検討会)

## (2) 米国

米国の主要な推進施策・関連法令を図表 6.36 に示す。世界第 1 位の CO2 排出国として、米国の地球温暖化対策推進の必要性が高まる中、オバマ政権の発足に伴い、グリーンニューディールという政策方針のもとで再生可能エネルギーの導入普及に向けた動きが加速している。

波力発電については、これまで大きくフォーカスされることはなかったが、近年 PTC（生産税控除、P344 参照）の対象エネルギーに波力発電が追加されており、注目が高まっている。

図表 6.36 米国の主要な再生可能エネルギー推進施策・関連法令

推進施策・関連法令	概要
2005 年エネルギー政策法 <sup>29</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 包括的なエネルギー法案。エネルギーインフラの強化、エネルギー効率の向上、再生可能エネルギーの利用拡大、在来型燃料の国内増産等を掲げる。</li> <li>• 再生可能エネルギーについては、再生可能燃料基準（RFS）<sup>30</sup>を導入した他、政府機関の再生可能電力比率を 7.5%に引き上げる目標を設定。また、各種インセンティブ制度を認可・拡充。</li> </ul>
ITC（投資課税控除） （Federal Business Investment Tax Credit）	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 各種エネルギーシステムの設備投資に対して、エネルギー源別の控除率に基づいて課税控除を行う制度。</li> <li>• 太陽光発電の控除率は 30%。</li> </ul>
PTC（生産税控除） （Renewable Energy Production Tax Credit）	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 再生可能エネルギー電力の生産税を控除する制度。</li> <li>• 条件を満たした新施設で生産された電力に対して、稼動開始から最初の 10 年間、1kWh ごとに適用される。</li> <li>• 太陽光発電は対象外。</li> <li>• <u>エネルギー改善・延長法により、潮流発電、波力発電、海洋温度差発電を対象技術に追加。</u></li> </ul>
Renewable Energy Grants （再生可能エネルギー助成制度）	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2009 年 2 月に成立した米国経済再生法により、米国財務省による本助成制度を創設。</li> <li>• 本制度は PTC もしくは ITC の代わりに利用可能。</li> </ul>
MACRS（修正加速度償却法） （Modified Accelerated Cost-Recovery System）	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 太陽光発電設備や風力発電設備等の初期投資に対する加速償却制度。</li> <li>• 太陽光発電の投資に対しては、5 年間の加速的な減価償却が適応できる。</li> </ul>

出典：DSIRE ホームページ（<http://www.dsireusa.org/>）等より取りまとめ

<sup>29</sup> Public Law 190-58, Energy Policy Act of 2005, Aug. 2005

<sup>30</sup> 再生可能燃料基準（Renewable Fuel Standard）。自動車用燃料等へのバイオ燃料の使用を義務付けるもの。

### ① 2005 年エネルギー政策法<sup>31</sup>

2005 年エネルギー政策法（Energy Policy Act of 2005）は、1992 年に成立した「1992 年エネルギー政策法」を踏まえ、より包括的なエネルギー法案として策定された。「エネルギー効率」「再生可能エネルギー」「石油・天然ガス」「石炭」「原子力」「自動車・燃料」「調査・研究開発」等、エネルギーに係る各種項目について、既存の法律の改正、各種インセンティブ制度の策定等が実施されている。

再生可能エネルギーに関しては、連邦政府に対して一定量の再生可能エネルギー由来の電力の買取を義務付けたほか、PTC（生産税控除）や ITC（投資課税控除）等の各種インセンティブ制度を認可・拡充している（PTC、ITC については後述）。特に ITC については、同法により、商業用太陽光発電システムの税控除率が 10%から 30%に大幅に拡充された。

- 連邦政府に対する再生可能電力買取りの義務付け（2013 年までに 7.5%）。
- 再生可能燃料基準（RFS）の導入。2012 年に年間 7.5 ガロンの目標を設定。
- 再生可能エネルギーに係る各種インセンティブの延長・拡充。
  - PTC（生産税控除）の期限を延長
  - 住宅用太陽光システム・燃料電池について 30%の ITC（投資課税控除）を創設
  - 商業用太陽光システムの ITC による税控除額を 10%から 30%に引き上げ

### ② 各種インセンティブ制度

連邦政府による主要なインセンティブ制度には以下が挙げられる。各制度の詳細を図表 6.38 に示す。

- ITC（Federal Business Investment Tax Credit：投資課税控除）
  - ◇ 1992 年のエネルギー政策法（Energy Policy Act）により創設。
  - ◇ 各種エネルギーシステムの設備投資に対して、エネルギー源別の控除率に基づいて課税控除を行う制度。
  - ◇ エネルギー改善・延長法<sup>32</sup>により、太陽エネルギー利用設備、燃料電池、マイクロタービンに係る課税控除が 2016 年まで延長された。また、小型風力発電システム、地中熱ヒートポンプ、CHP が対象エネルギーに追加された。
- PTC（Renewable Energy Production Tax Credit：生産税控除）
  - ◇ 再生可能エネルギー電力の生産税を控除する制度。条件を満たした新施設で生産された電力に対して、稼動開始から最初の 10 年間、1kWh ごとに適用される。
  - ◇ 太陽光は対象外。
  - ◇ エネルギー改善・延長法により、潮流発電、波力発電、海洋温度差発電を対象技術に追加。

<sup>31</sup>“Energy Policy Act of 2005: Summary and Analysis of Enacted Provisions”(Mar. 2006, CRS)、米国総務省資料、Pew Center on Global Climate Change ウェブサイト

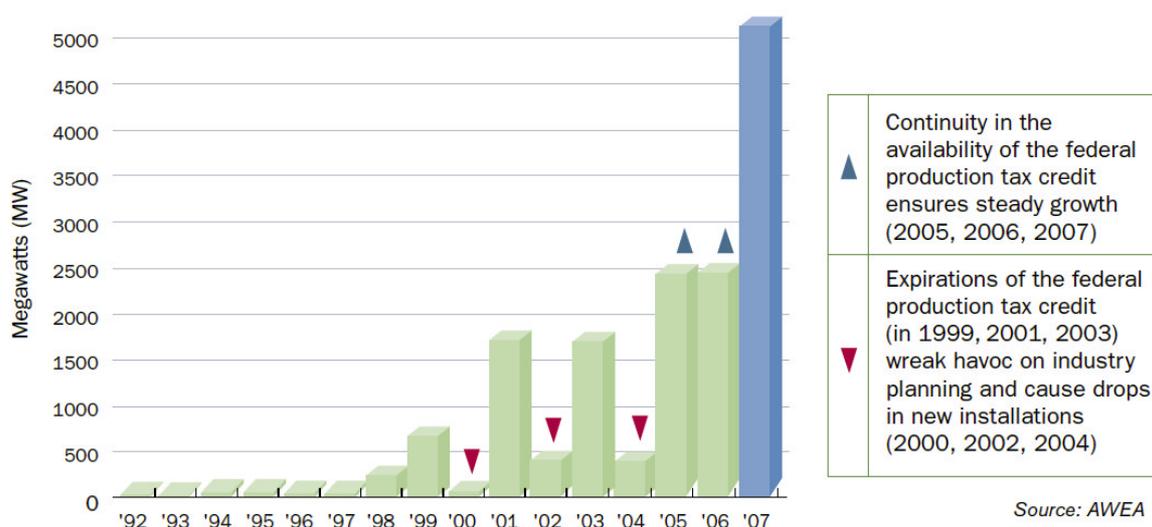
<sup>32</sup> Energy Improvement and Extension Act of 2008、金融危機対策関連法案（Public Law 110-343）の一つ。再生可能エネルギー、CO<sub>2</sub>回収・除去技術、エコカー・バイオ燃料、省エネ機器等に係る各種インセンティブが延長、拡充された。

◇ 米国経済再生法<sup>33</sup>により風力発電の控除期間が 2012 年末に延長された。

- Renewable Energy Grants (再生可能エネルギー助成制度)
  - ◇ 米国経済再生法により創設。
  - ◇ 本制度は PTC もしくは ITC の代わりに利用可能。
  - ◇ 潮流発電、波力発電、海洋温度差発電も同制度の対象。
- Modified Accelerated Cost-Recovery System (MACRS) (修正加速度償却法)
  - ◇ 太陽光発電設備や風力発電設備等の初期投資に対する加速償却制度。
  - ◇ 太陽光発電の投資に対しては、5 年間の加速的な減価償却が適応できる。

上記のうち、PTC (生産税控除) は特に再生可能エネルギーの導入量に大きく影響を与える制度に挙げられる。例えば風力発電の導入量は、PTC の延長の有無に大きな影響を受けている (図表 6.37)。

図表 6.37 PTC の延長と風力発電の発電容量 (新規増設分) の経年変化



▲は PTC の税控除期限が延長された年、▼は PTC の税控除期限が切れた年を表している。期限が延長された年は導入量が大きく伸びているのに対し、期限が切れた年は導入量が大きく減少しており、PTC が風力発電設備導入に与えている影響の大きさが分かる。

出典：“Wind Power Outlook 2008” (AWEA)

<sup>33</sup> American Recovery and Reinvestment Act、2008 年末の金融危機対策として 2009 年 2 月に成立。各種経済刺激策に加え、科学技術、環境保護、各種インフラへの投資、州や地方政府の財政安定化策等が盛り込まれている。

図表 6.38 連邦政府の主要な再生可能エネルギー支援施策

施策名	対象セクター	対象システム	インセンティブ	期限
ITC (投資課税控除)	商業、産業、電気事業	太陽熱利用、太陽熱発電、太陽光発電、風力、バイオマス、地熱発電、燃料電池、小型風力発電、地熱利用、マイクロタービン、CHP 等	<p>&lt;控除率&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>30% : 太陽熱利用、太陽光発電、燃料電池、風力発電</li> <li>10% : 地熱利用、マイクロタービン、CHP</li> </ul>	2016/12/31
PTC (生産税控除)	商業、産業	風力発電、バイオマス、地熱発電、埋立地ガス発電、廃棄物発電、水力発電、 <u>潮流発電、波力発電、海洋温度差発電</u> 等 ※太陽光発電、太陽熱発電は対象外	<p>&lt;控除額&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>風力 : 2.1 セント/kWh</li> <li>閉鎖系バイオマス、地熱 : 2.1 セント/kWh</li> <li>開放系バイオマス、埋立地ガス、廃棄物、水力、海洋エネルギー : 1.0 セント/kWh</li> </ul>	2013/12/31
Renewable Energy Grants (再生可能エネルギー助成制度)	商業、産業、農業	太陽熱利用、太陽熱発電、太陽光発電、燃料電池、小型風力発電、風力、バイオマス、水力、地熱発電、埋立地ガス、廃棄物、地中熱ヒートポンプ、マイクロタービン、CHP、 <u>潮流発電、波力発電、海洋温度差発電</u> 等	<p>&lt;助成率&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>固定資産の 30% : 燃料電池、太陽エネルギー関連設備、小型風力、風力、バイオマス、水力、地熱発電、埋立地ガス</li> <li>固定資産の 10% : その他対象エネルギー</li> </ul>	2011/10/1
MACRS (修正加速度償却法)	商業、産業	太陽熱利用、太陽熱発電、太陽光発電、埋立地ガス、風力発電、バイオマス、再生可能燃料(運輸用)、地熱発電、地熱利用、燃料電池、廃棄物利用、CHP、マイクロタービン等	<p>&lt;償却期間&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>5年 : 太陽熱利用、太陽光、地熱発電、風力発電、燃料電池、マイクロタービン</li> <li>条件を満たす設備については、初年度 50% のボーナス償却を利用できる。</li> </ul>	2009/12/31

出典 : DSIRE ホームページ (<http://www.dsireusa.org/>) より取りまとめ

### (3) 日本

日本の主要な再生可能エネルギー推進施策・関連法令を図表 6.39 に示す。我が国のエネルギー自給率は極めて低く、「エネルギーの安定供給」は最重要課題の一つであること、また地球温暖化対策への取り組みが急務であること等から、これまで多くのエネルギー政策が展開されてきた。

海洋エネルギーについては、2007 年に海洋基本法が策定され、日本として戦略的に海洋エネルギー開発に取り組む素地が出来た。以下にエネルギー基本計画、RPS 法、技術戦略マップ、海洋基本計画について詳述する。

図表 6.39 日本における主要な環境・エネルギー政策

政策名称	概要
エネルギー基本計画（2003） 第一次改定 2007 年 3 月 第二次改定 2010 年 6 月	<ul style="list-style-type: none"> <li>「エネルギー政策基本法」（2002）に基づき策定され、エネルギーの需給に関する施策の長期的、総合的かつ計画的な推進を図ることを目的としている。</li> <li>2007 年に第一次改定、2010 年に第二次改定を実施。第二次改定では、2030 年までの今後 20 年程度を視野に入れた具体的施策を明示。</li> <li>再生可能エネルギーについては、2020 年までに一次エネルギー供給の 10%をまかなう目標を設定。</li> </ul>
電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法：RPS 法（2003）	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気事業者に新エネルギーを利用して得られる電気の一定量以上の利用を義務付ける法律。対象は、風力、太陽光、地熱、水力、バイオマス。</li> </ul>
新・国家エネルギー戦略（2006）	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー安全保障を軸に、我が国の新たな国家エネルギー戦略を提示。</li> <li>①国民に信頼されるエネルギー安全保障の確立</li> <li>②エネルギー問題と環境問題の一体的解決による持続可能な成長基盤の確立</li> <li>③アジア・世界のエネルギー問題克服への積極的貢献を目標として掲げる。</li> </ul>
技術戦略マップ（エネルギー技術）（2007、毎年更新）	<ul style="list-style-type: none"> <li>新産業を創造していくために必要な技術目標や製品・サービスの需要を創造するための方策を提示。</li> <li>産業技術政策の研究開発マネジメント・ツール整備、産学官における知の共有と総合力の結集、国民理解の増進を目的とする。</li> </ul>
海洋基本法（2007）	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋に関する施策を総合的かつ計画的に推進し、我が国の経済社会の健全な発展及び国民生活の安定向上を図るとともに、海洋と人類の共生に貢献することを目的とした法律。</li> </ul>

## 6 波力発電の技術の現状とロードマップ

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 本法律に基づき、海洋に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るため「海洋基本計画」が策定された。</li> </ul>
海洋基本計画（2007）	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 「海洋基本法」に基づき、海洋に関する基本的な計画を定めたもの。</li> <li>● 排他的経済水域等における当面の探査・開発の対象を石油・天然ガス、メタンハイドレート及び海底熱水鉱床とする。</li> <li>● 海洋エネルギーに関しては、洋上風力、波力、潮汐発電等の技術開発を支援。</li> </ul>
Cool Earth エネルギー革新技術計画（2008）	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量を半減するという長期的目標の実現に向け、 <ol style="list-style-type: none"> <li>①重点的に取り組むべき21の革新技術の選定</li> <li>②21技術の技術ロードマップの提示</li> <li>③国際連携のあり方の提示</li> </ol> </li> </ul> <p>を行っている。</p>
京都議定書目標達成計画（2008）	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 「地球温暖化対策推進法」（1998）に基づき、6%削減約束を達成するために必要な措置を提示。</li> <li>● 再生可能エネルギーについて、太陽光、太陽熱、風力、バイオマス、未利用エネルギー（温度差エネルギー、雪氷熱等）等の導入を促進。</li> </ul>
エネルギー供給構造高度化法（2009）	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電気やガス、石油事業者等のエネルギー供給事業者において、非化石エネルギー源の利用拡大、化石エネルギー原料の有効利用を促進することを目的とする。</li> <li>● 電力会社に加え、ガス会社や石油会社にも新エネルギーの利用を義務付け。</li> <li>● 本法律の枠組みの中で、「太陽光発電の固定価格買取制度」を策定。</li> </ul>
各種再生可能エネルギー導入補助事業・研究開発補助事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 図表 6.42 参照</li> </ul>

## 1) エネルギー基本計画

国がエネルギー政策を進めるに当たり、「安定供給の確保」、「環境への適合」及びこれらを十分考慮した上での「市場原理の活用」を基本方針とすること等を内容とする「エネルギー政策基本法」が2002年6月に制定された。「エネルギー基本計画」は、エネルギー政策基本法に基づき2003年に策定され、エネルギーの需給に関する施策の長期的、総合的かつ計画的な推進を図ることを目的としている。

本計画は少なくとも3年ごとに検討を加え、必要に応じて改定されることが法定されており、2007年3月に第一次改定、2010年6月に第二次改定が実施された。

第二次改定では、エネルギー政策は、国民や事業者の理解・協力のもと、中長期的な視点で総合的かつ戦略的に推進する必要があるとの考えに立ち、2030年までの今後「20年程度」を視野に入れ、以下の目標の実現に向けた具体的施策を明示している。

- ① 資源小国である我が国の実情を踏まえつつ、エネルギー安全保障を抜本的に強化するため、エネルギー自給率（現状18%）<sup>34</sup>及び化石燃料の自主開発比率（現状約26%）をそれぞれ倍増させる。これらにより、自主エネルギー比率を約70%（現状約38%）とする。
- ② 電源構成に占めるゼロ・エミッション電源（原子力及び再生可能エネルギー由来）の比率を約70%（2020年には約50%以上）とする（現状34%）。
- ③ 「暮らし」（家庭部門）のエネルギー消費から発生するCO<sub>2</sub>を半減させる。
- ④ 産業部門では、世界最高のエネルギー利用効率の維持・強化を図る。
- ⑤ 我が国に優位性があり、かつ、今後も市場拡大が見込まれるエネルギー関連の製品・システムの国際市場において、我が国企業群が最高水準のシェアを維持・獲得する。

再生可能エネルギーについては、2020年までに一次エネルギー供給に占める割合を10%に高めることを目標に掲げている。主な再生可能エネルギーとして、太陽光発電、風力発電、地熱発電、水力発電、バイオマス利用、空気熱や地中熱利用、太陽熱利用、雪氷熱利用等を挙げている。

## 2) 技術戦略マップ

技術戦略マップは、新産業を創造していくために必要な技術目標や製品・サービスの需要を創造するための方策を提示するものである。産業技術政策の研究開発マネジメント・ツール整備、産学官における知の共有と総合力の結集、国民理解の増進を目的としている。技術開発とそれ以外の関連施策を併せて示した導入シナリオ、政策目標を実現するために必要な技術を要素技術を含めて抽出した技術マップ、技術開発の進展を時間軸に沿って示した技術ロードマップから構成されている。

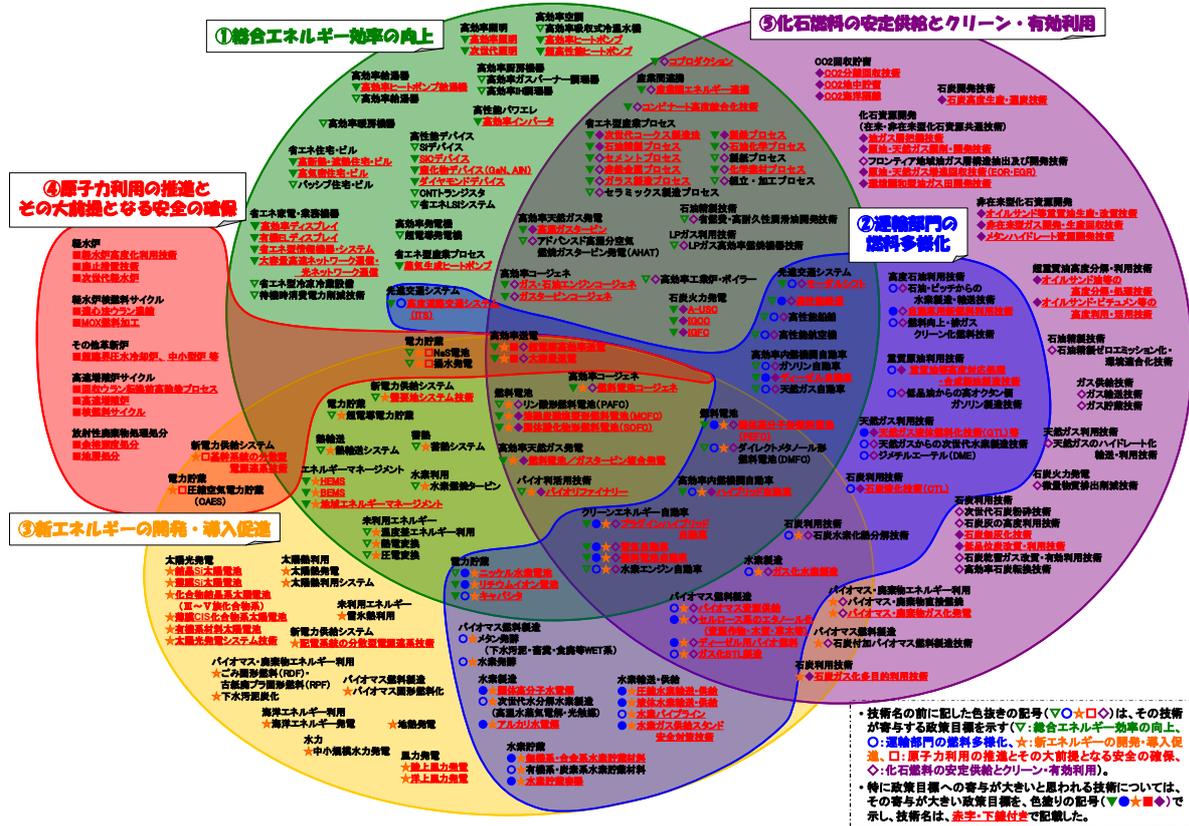
本技術戦略マップの作成にあたっては、「新・国家エネルギー戦略」（2006）における政策の柱を踏まえ、①総合エネルギー効率の向上、②運輸部門の燃料多様化、③新エネルギーの開発・

<sup>34</sup> 一次エネルギー国内供給のうち、国産エネルギー（再生可能エネルギー等）及び準国産エネルギー（原子力）の供給の占める割合。OECD 諸国のエネルギー自給率の平均値は約70%。

## 6 波力発電の技術の現状とロードマップ

導入促進、④原子力の利用、⑤化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーン利用、の5つの政策目標を設定した上で、これらに寄与する主なエネルギー分野の技術を抽出している（図表 6.40）。本技術戦略マップの中に、海洋エネルギーも一技術として取り上げられ、波力発電、潮汐・潮流発電、海洋温度差発電の技術ロードマップが示されている。

図表 6.40 エネルギー技術俯瞰図



出典：「技術戦略マップ 2010 エネルギー分野」（2009，経済産業省）

### 3) 海洋基本計画

1994年に国連から発行された「国連海洋法条約」により、従来の領海と公海に加え排他的経済水域（EEZ）、大陸棚等の海域区分が導入された結果、沿岸国の権限が拡大し、日本は国土面積の12倍に及ぶ世界第6位の管轄海域を持つことになった。これは海洋利用の可能性の広がりをも意味するとともに、海洋管理という新たな視点での政策を整備する必要性を意味する。また、国際社会における海洋の管理と利用を巡る動きは活発であり、我が国も海洋を管理する立場から明確な姿勢を持って対応していく必要がある。

このような状況を踏まえ、2007年7月20日「海洋基本法」が施行され、海洋に関する基本姿勢が明確化されるとともに、海洋に関する施策を集中的かつ総合的に推進するための体制として、内閣に総合海洋政策本部が設置された。『海洋基本計画』は、「海洋基本法」第16条の規定に基づき、海洋に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るため、政府が海洋に関する基本的な計画を定めたものである。計画の概要を図表 6.41 に示す。

図表 6.41 海洋基本計画の概要



出典：環境省 中央環境審議会資料

第1部では6つの基本的な方針、第2部では12の施策計画、第3部ではその他必要な事項が挙げられている。このうち海洋エネルギーに関連する項目は、基本方針の「①海洋の開発及び利用と海洋環境の保全との調和」と「③科学的知見の充実」、施策計画の「①海洋資源の開発及び利用の推進」と「③排他的経済水域等の開発等の推進」である。

この中で、排他的経済水域等における当面の探査・開発の対象を石油・天然ガス、メタンハイドレート及び海底熱水鉱床とし、必要な政策資源を集中的に投入するとともに、コバルトリッチクラストについては今後の調査・開発のあり方について検討する、としている。その他の海洋エネルギーに関しては、洋上風力発電の設置コストの低減、耐久性の向上のための技術的課題、環境影響評価手法の確立等に取り組むとする他、波力、潮汐等による発電については、国際的な動向を把握しつつ、我が国の海域特性を踏まえ、その効率性、経済性向上のための基礎的な研究を進めるとしている。

#### 4) 各種再生可能エネルギー導入補助事業・研究開発補助事業

図表 6.42 に、主要な再生可能エネルギー導入補助事業・研究開発補助事業について、波力発電関連事業を中心に示す。

図表 6.42 再生可能エネルギー導入補助事業例

事業名(補助率等)	制度概要	対象者	対象エネルギー	実施主体
<b>地方公共団体対策技術率先導入補助事業</b> 補助率：1/2 以内	地方公共団体が策定した実行計画に基づく代エネ・省エネ設備導入事業や、公共施設へのシェアード・エスコ事業について、要件を満たす設備の導入費用の一部を補助する。	地方公共団体/地方公共団体の施設へシェアード・エスコを用いて省エネ化を行う民間団体等	太陽光発電、風力発電、バイオマス、太陽熱利用、中小水力発電、地熱発電、温度差熱利用、雪氷熱、海洋エネルギー	環境省
<b>地域イノベーション創出研究開発事業</b> 一般型：初年度目1億円以内/件 2年度目5千万円以内/件 地域資源活用型：3千万円以内/件 2年度目2千万円以内/件	産学官の研究開発リソースの最適な組み合わせからなる研究体を組織し、新製品開発を目指す実用化技術の研究開発を通じて、新たな需要を開拓し、地域の新産業・新事業の創出に貢献しうる製品等の開発を支援する。	研究体	太陽光発電、風力発電、バイオマス、太陽熱利用、中小水力発電、地熱発電、温度差熱利用、雪氷熱、海洋エネルギー	経済産業省
<b>新エネルギーベンチャー技術革新事業</b> 委託費：1千万円/件（1年、FS）	中小・ベンチャー企業等が保有している潜在的技術シーズを活用した技術開発の推進、および新事業の創成と拡大等を目指した事業化を支援する。	企業/大学/独立行政法人等	太陽光発電、風力発電、バイオマス、太陽熱利用、中小水力発電、地熱発電、温度差熱利用、雪氷熱、海洋エネルギー	NEDO
<b>地球温暖化対策技術開発事業【競争的資金】</b> 委託事業：上限なし（予算枠7億円） 補助事業：1/2（上限なし、予算枠2.5億円）	再生可能エネルギー導入技術実用化開発、省エネ対策技術実用化開発等の技術開発分野ごとに、実用的な温暖化対策技術の開発について、優れた技術開発の実施に係る提案と実施体制を有する民間企業等を公募により選定し、委託又は補助を行う。	民間事業者/公的研究機関/大学等	太陽光発電、風力発電、バイオマス、太陽熱利用、中小水力発電、地熱発電、温度差熱利用、雪氷熱、海洋エネルギー	環境省

出典：NEDO、経済産業省、環境省資料より取りまとめ

### 6.1.8 ビジネスモデル

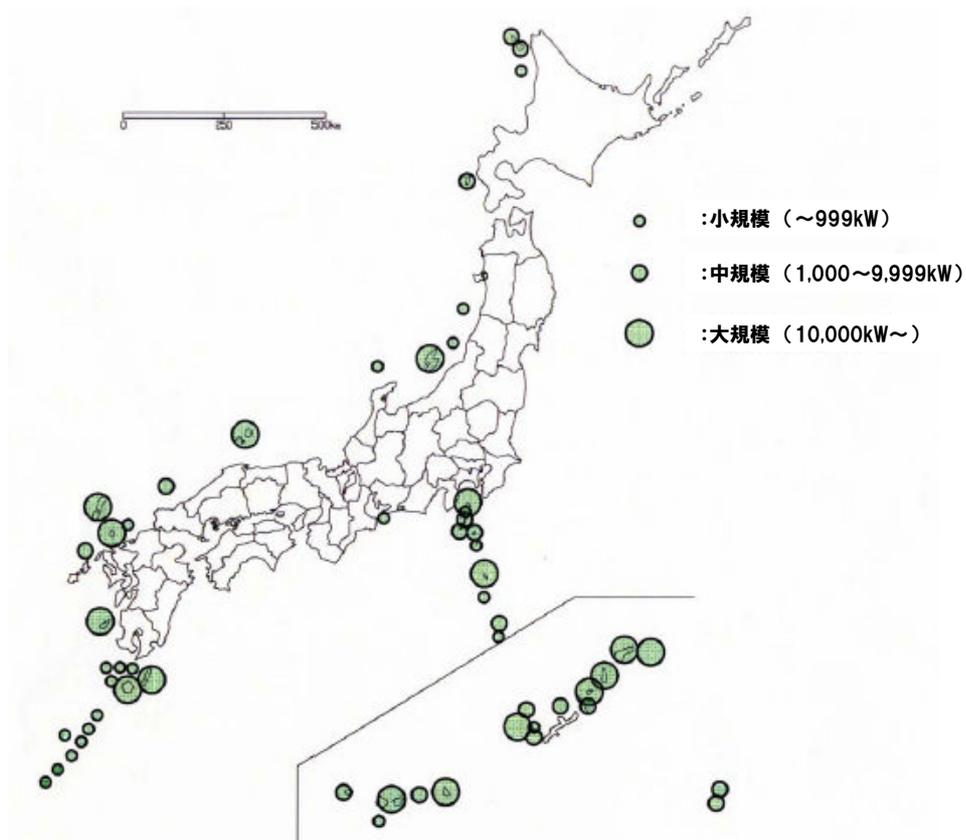
#### (1) 離島の分散型電源

波力発電の普及には、既存電源と競合するレベルまで発電コストを下げる必要があるが、発電コストの削減を図る中で、当面のターゲットとして、発電コストの高い離島における分散電源としての利用が考えられる。

日本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（図表 6.43）。発電設備は一部の島で水力発電、地熱発電、太陽光発電、風力発電や移動用発電設備としてのガスタービン発電機等を有しているものの、概ね全てがディーゼル発電機である<sup>35</sup>。ディーゼル発電は、既存電源と比較して発電コストがときに4倍以上になる上、近年の石油価格の高騰によりさらに割高となる傾向にある。

従って、実用化の初期段階は離島のディーゼル発電に対しては競争力を有する可能性があり、離島をターゲットとして、ディーゼル発電の補助用あるいは代替電源として10~30MW規模の比較的小規模の波力発電システムを導入していくことが有効と考えられる。

図表 6.43 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）

<sup>35</sup> 「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）

## (2) 大規模ウェーブファーム

離島の分散型電源として、波力発電システムの技術完成度が高められ、普及が進展したその先には、50～100MW サイズの大規模ウェーブファームへの展開が期待される。

平成 22 年 3 月に「波力発電の導入促進に関する提言」をまとめた波力発電検討会（委員長：東京大学荒川忠一教授）は、25 円/kWh の固定価格買取制度があれば設備補助なしで 50～100MW サイズの大規模ウェーブファームの商用化は可能と予測している。

## (3) 洋上のオンサイト電力需要

離島の分散型電源、あるいは大規模ウェーブファームのように専ら陸上への送電を想定とするもの以外にも、洋上のオンサイト電力需要に対応した展開も考えられる。

先に紹介したように、波力発電を利用した航路標識用ブイ（最大出力 30W～60W）は既に 40 年を超える実績があり、国内外で数千台が稼働中である。洋上の電力需要としては、航路標識用ブイに加え、養殖設備用電源、深層水汲上げ用電源等が考えられる。

図表 6.44 航路標識用ブイ（再掲）



出典：緑星社ホームページ（<http://www.ryokusei.co.jp/>）

### 6.1.9 国内技術の競争力

現在、波力発電を含む海洋エネルギー利用技術は、欧州（特に英国）や米国を中心に進められている。日本においても過去に基礎的研究は進められており、当時は世界を主導していたが、予算の縮小等により実用化段階の研究が進んでおらず、日本の研究開発進度は欧米に 10 年遅れていると言われている。1970 年代のオイルショック後、石油価格の高騰が沈静化していく中で、日本における波力発電研究は大きく縮小してしまっただが、海外においては、周辺海域の波のエネルギー密度が高いノルウェーや英国を中心に 1990 年半ばから再び活発化し、多くの波力発電装置の開発が進められた。

現在は、英国の Pelamis 発電装置が最も実用化に近い段階にあり（P327 参照）、2008 年 9 月には、ポルトガル沖において Pelamis 波力発電装置を用いた、総出力 2,250MW（750kW 機×3 基）の商用プラント（Agucadoura Wave Farm、P322）が運開した。数週間で故障が発生し、現在改修中の模様だが<sup>36</sup>、本プロジェクトは波力発電が実用化の一手前まで来ていることを示している。

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 European Marine Energy Centre（EMEC）<sup>37</sup>や、ポルトガルの Wave Energy Centre<sup>38</sup>など、実証試験サイトが複数整備されており、企業の RD&D を大きく後押ししている点が挙げられる。

米国においても、Ocean Power Technology 社が「Power Buoy」P329 参照）で先導しており、米国ニュージャージー州沿岸、ハワイ沖、スペイン、スコットランドにおいて、実証試験を実施および計画している。

このように、現状では欧米に先行されており、過去 10 年間に申請された膨大な数の特許をかくぐって、新たに日本の独自技術を開発することは難しいという見解もある<sup>39</sup>。しかしながら、先に紹介したジャイロ式波力発電装置（P333 参照）や、EPAM 波力発電装置（P335 参照）など、地道に開発が継続されてきた技術も存在する。また、日本のものづくり技術、浮体技術の水準は高く、国の支援体制を整えば、国際競争力を持つ技術が育つ可能性は十分にある。

---

<sup>36</sup> 「波力発電検討会報告書」（2010, 波力発電検討会）

<sup>37</sup> EMEC（<http://www.emec.org.uk/index.asp>）

<sup>38</sup> WEC（<http://www.wavec.org/index.php/1/home/>）

<sup>39</sup> 「波力発電検討会報告書」（2010, 波力発電研究会）

## 6.2 技術ロードマップ

### 6.2.1 目指す姿

#### (1) 波力発電を取りまく環境

現在、波力発電の開発が、欧州を中心に世界各地で積極的に進められている。背景には、地球環境問題やエネルギーセキュリティ問題が深刻化する中、再生可能エネルギーの一つである波のエネルギー賦存量が約 8,000～80,000TWh 程度<sup>40</sup>と非常に大きいことが挙げられる。欧州周辺海域は波のエネルギー密度が高いために特に波力発電への期待が大きく、多くのベンチャー企業が市場に参入している。

波力発電の研究開発は、1970 年代のオイルショックを契機に、石油・天然ガスの代替エネルギーとして、各国で開始された。四方を海に囲まれている我が国においても波力発電への期待は高く、「海明」、「海陽」(P330 参照)等、様々な波力発電装置の実海域実験が行われていた。当時我が国は、波力発電研究の先端にあったが、その後石油価格の高騰が沈静化していく中で、研究開発投資も先細りとなり、「マイティホエール」(P330 参照)の実験終了とともに波力発電研究のブームは過ぎ去った。

一方欧州においては、エネルギー危機後に研究開発予算は縮小したものの、ノルウェーや英国を中心に 1990 年半ばから再び活発化し、英国の Pelamis 発電装置 (P327 参照) を代表として、多くのベンチャー企業が波力発電装置の開発に参入している。スコットランドのオークニー諸島の欧州海洋エネルギーセンター (EMEC) や、ポルトガルの Wave Energy Centre など、波力発電装置の実証試験サイトが整備されており、企業の技術開発を強力に後押ししている (P325 参照)。米国においても、Ocean Power Technology 社が精力的に活動しており、2008 年よりハワイ沖にて PowerBuoy 波力発電装置の実証試験が行われている。

過去 10 年間における日本の波力発電の研究開発進捗は、欧米に大きく遅れを取っている状況であり、巻き返しを図るためには、早急に研究開発体制を整える必要がある。日本は国土面積の 12 倍にも及ぶ世界第 6 位の管轄海域を有しており、海洋エネルギーのポテンシャルは大きい。また、日本は世界に誇る技術大国であり、国内市場に加えて海外市場の開拓を視野に入れた、官民一体となった戦略的な取組みが必要とされている。

#### (2) 我が国の保有する波力発電技術

このような状況下にあって、近年日本においても、発電効率の高い装置を波エネルギー密度の高い沖合に設置するというコンセプトのもとに、様々な波力発電装置の開発が行われている。ジャイロ式波力発電装置 (P333 参照) や、人工筋肉を用いた EPAM 波力発電装置 (P335 参照) などは、従来の発電装置とは異なる原理を用いており、日本独自技術としてその実用化が期待される。

また、日本のものづくり技術、浮体技術の水準は高く、本格的な技術開発が再開されれば海外に追いつくことは可能との見解を持つ専門家は多い。

<sup>40</sup> “Harnessing the Power of the Oceans” (2008, Gouri S. Bhuyan)

### (3) 日本の波力発電が目指すべき姿

以上の状況を整理すると、今後大きく拡大する可能性が高い波力発電市場において、欧米に対する技術開発の遅れを取り戻すとともに、日本の独自の波力発電装置や高い技術力を生かし、国内および海外市場で普及しうる波力発電装置の開発を早急に実施する必要がある。

国内普及を考えた場合には、欧州に比べて波エネルギー密度が低いといわれる日本の自然条件下で経済的に成立するシステムを構築するため、より高効率で、高信頼性のシステムを低価格で実現することが鍵となる。また、日本の自然条件下で成立する波力発電装置が実現されれば、すなわち海外市場において十分に競争力を有する技術を取得することが可能となる。

以上より、波力発電の目指す姿を図表 6.45 の通り掲げる。

図表 6.45 波力発電の目指す姿

- 日本の自然条件下で成立する高効率・高信頼性・低価格の波力発電装置を開発する。
- 日本の高度な技術力を活かし、海外市場で競争力を有する装置開発・国内企業育成を図る。

## 6.2.2 目指す姿の実現に向けた課題と対応

### (1) 高効率・高信頼性波力発電装置の開発

日本の自然条件下で成立する高効率・高信頼性・低価格の波力発電装置の開発に向けてまずクリアしなければならない条件は、日本の自然条件下で、高効率・高信頼性を実現する波力発電装置（タービン・発電機）の開発である。低コストな波力発電装置の早期実現が望ましいが、まずは、エネルギー変換の中核部が技術的に確立されることが実用化に向けた第一歩となる。

### (2) 低コスト化の実現

また、波力発電の大量普及に向けては、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。

### (3) 分散型電源としての実用化、国内導入促進

波力発電の当面のターゲットと考えられるのが、分散型電源としての実用化である。小規模な分散電源としては、水産養殖用や漁港での製氷用電源が考えられるが、離島等の独立系統は既存のディーゼル発電が割高なことから、ディーゼル発電の補助用あるいは代替電源用を実用化初期段階のターゲットとすることが適切である。

この段階においては、国内導入を促進することにより、技術改良、運用ノウハウ、実績を蓄積し、国内企業の育成を図ることが重要である。

#### (4) 国内外の大規模システムへの導入、海外展開

分散型電源への導入が進んだ後のシナリオとしては、国内における大規模システムへの導入、そして海外市場への展開と進むのが理想である。日本国内で培った技術、ノウハウ、実績を持って出来る限り早期に海外市場へ進出し、市場シェアを獲得することが目標となる。

### 6.2.3 技術開発目標と技術開発の内容

以上、波力発電の目指すべき姿と、課題と対応から導き出される、波力発電の技術開発目標、技術開発内容を以下に示すとともに、波力発電の技術ロードマップを図表 6.49 に示す。

#### (1) 技術開発目標

技術開発目標については、図表 6.46 のとおり設定した。

国内企業の育成、国際競争力の強化については、早期に実証試験サイトを整備し、2015 年以降は小規模・分散型電源の実用化および国内導入の促進、2020 年以降は大型システム化および海外市場への展開を目標に掲げた。

単機出力については、現時点では 0.1MW 以下のクラスでの開発が中心であるが、2020 年には 0.5～1MW、2030 年には 2MW クラスの波力発電装置の開発を目指すこととした。ただし、波力発電装置の形状によっては大規模化が有効な手段でないこともあることから、あくまでも発電コスト低減の一つのアプローチの指標として、上記目標値を掲げるものとする。

発電コストについては、2020 年は分散電源としての実用化が定着する時期と位置づけ、既存の離島電源の一つである 100kW 級風車の発電コスト 20 円/kWh の水準以下を目標とした。2030 年は大規模システムへの導入が実現する時期と位置づけ、既存電源と競争力を持つ 5～10 円/kWh を目標に設定した。

図表 6.46 波力発電の技術開発目標

	2015 年	2020 年	2030 年
国内企業の育成、 国際競争力の強化	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証試験サイトの整備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小規模・分散型電源の実用化</li> <li>国内導入の促進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大規模システム化</li> <li>海外市場への展開</li> </ul>
単機出力	—	0.5～1MW	2MW
発電コスト	—	20 円/kWh 以下	5～10 円/kWh

(2) 技術開発内容

前項で設定した技術開発目標を実現するため、以下に示す技術開発課題に取り組む必要がある。

図表 6.47 波力発電の主な技術課題

技術課題		解決策・要素技術
高効率・高信頼性化	発電効率の向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 適地の選定                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 海洋環境の調査・モニタリング</li> <li>➢ 総合海況マップ（波浪、潮流、風況）の作成</li> </ul> </li> <li>● タービン、発電機等の高効率化</li> <li>● 位相制御技術</li> </ul>
	設備の維持管理・故障の防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>● モニタリングシステム、遠隔操作システム</li> <li>● 海洋環境の予測システム</li> </ul>
	海洋環境への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 海洋生物の付着防止技術（防汚塗料の塗布、音・超音波システム、オゾンガスの海水混合等）</li> <li>● 塩害・さび防止技術（防腐食塗料の塗布等）</li> <li>● 漏水防止、密閉技術</li> </ul>
	環境への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実証試験による基礎データの収集</li> <li>● シミュレーションによる影響予測技術</li> </ul>
低コスト化	イニシャルコストの削減	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低コスト材料の開発</li> <li>● 係留・送電線コストの削減</li> <li>● 量産技術</li> <li>● 低コスト施工技術</li> </ul>
	ランニングコストの削減	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 運転・保守管理費の削減</li> </ul>
大規模システム化	送電・電力輸送	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 送電技術の高度化</li> <li>● 遠距離送電システム</li> </ul>
	出力の平滑化	<ul style="list-style-type: none"> <li>● エネルギー貯蔵（二次電池、フライホイール、電気二重層キャパシタ、超電導エネルギー貯蔵、揚水発電、圧縮空気貯蔵等）</li> <li>● 洋上水素製造</li> </ul>

## 1) 高効率・高信頼性化

### ① 発電効率の向上

発電効率の向上の解決策としては、第一に発電適地の選定が挙げられる。日本近海の波力エネルギーは世界的に見ると決して恵まれているとはいえないが、水深が深く波高の大きい沖合など、波力エネルギーの強い海域も存在すると考えられている。適地選定のためには、信頼性の高いデータ収集が必要であり、海洋環境調査・モニタリングを実施し、波浪・潮流・風況を把握可能な総合海況マップを作成することが必要不可欠である。

タービン、発電機の変換効率の向上も発電効率向上の重要な解決策である。また、波力発電システムに特有な解決策として強制的位相制御を行う方法も考えられる。これは、波力エネルギーの変換効率は特定の波周期に高い値を示し、前後では急激に低下することから、位相制御により広範囲の波周期に高いエネルギー変換率を得ようというものである。

### ② 設備の維持管理・故障の防止

波力発電装置は、岸壁に設置する形態はともかく、洋上に設置する形態の場合には、設備の維持管理・故障の未然防止に注意が必要となる。管理・運用上、モニタリングシステムや遠隔操作システムの導入は不可欠となる。また、台風などの通過をあらかじめ予測し、故障等の影響を最小限にとどめることも重要な対策であり、海洋環境予測システムの開発も重要課題に挙げられる。

陸上に比べ洋上は観測データに乏しいのが現状である。波力発電装置に気象・海象観測装置が搭載されることにより、自らの管理・運用に活かされるだけでなく、将来近隣に設置される波力発電システムにも観測データを活用することができる。

### ③ 高耐久化

波力発電装置は他の海洋構造物と同様、海洋環境に曝されることから、海洋生物の付着防止、塩害・さびの防止に努めるとともに、機械類に海水が及ばぬよう漏水防止、密閉対策が必要となる。

### ④ 環境への影響

波力発電装置を海域に設置することにより周辺環境に与える影響については、充分留意が必要である。実証試験により基礎データを収集し、各種シミュレーションによる予測との比較等を行うことに、波力発電の環境影響を検証していく必要がある。

## 2) 低コスト化

### ① インitialコスト・ランニングコストの削減

波力発電プラントのインシヤルコストは、設備費と施工費に大別される。採用する技術の方式や設置エリアにより構成比率は異なるが、構造体、機械系・電気系機器、係留のコストが約8割を占めており、低コスト化には設備費の削減が重要となる（図表 6.48）。素材コストについては、習熟効果が効かないこと、外的要因によって価格が高騰することもあることから、低コ

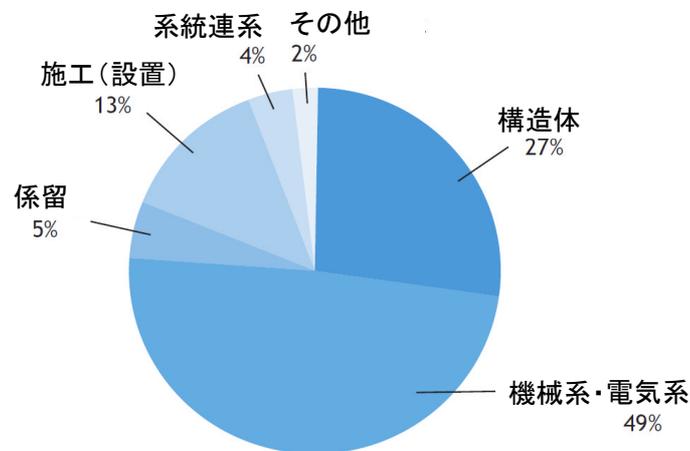
## 6 波力発電の技術の現状とロードマップ

スト材料の開発は重要である。また、係留・送電線コストの削減も課題に挙げられる。また、機器のコストは累積生産量がある程度を超えると低減するため、将来的には量産技術の確立も重要となる。

施工費はシステム価格の13%を占めている。主には設置用特殊船の用船料、作業員の人件費で占められ、設置地点・設置時の気象・海象条件によって増減する。設備費と同様、設置台数が増えてくれば習熟効果によるコスト減少も見込まれるが、低コスト施工技術の確立が必要である。

イニシャルコストの削減に加え、メンテナンス等のランニングコストを抑制する手法の確立も必要である。設置やメンテナンス用の専用船の建造も、設置台数の拡大が見込まれる場合には検討する必要がある。

図表 6.48 波力発電システム価格の内訳例（再掲）



出典：“Future Marine Energy Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy” (2006, Carbon Trust) より作成

### 3) 大規模システム化

#### ① 送電・電力輸送

システムの大規模化に伴い、送電・電力輸送技術の高度化が必要となる。送電方式には、直流送電と交流送電がある。従来、昇圧／降圧が容易な交流方式が用いられてきたが、整流器の発達に伴い、直流送電が注目されるようになってきている。直流送電のメリットは、送電中の電圧降下、電力損失が小さく、絶縁が容易なことなどである。一方、デメリットとしては、大容量の直流を遮断することは容易ではないこと、交直変換設備が必要で、システムとして複雑になることなどである。一般には長距離大容量の送電には直流送電が、比較的短距離小容量の場合には交流送電がコスト的には有利とされている。波力発電システムの発電規模、離岸距離に応じた送電方式の選択が求められる。

#### ② 出力の平滑化

エネルギー利用の面から出力変動の平滑化は自然エネルギー共通の課題である。

出力を平滑化する方法としては、エネルギー貯蔵が一般的である。一般的なエネルギー貯蔵

方式としては、二次電池、フライホイールなどがある。ジャイロ式波力発電装置（P333 参照）はフライホイールを使用しているため、回転数の制御により出力の平滑化を図っている。また、山口大学が開発を推進する「つるべ式発電装置」（P334 参照）では、エネルギーの一部をばねに蓄積し出力の平滑化を図っている。

また、電力の燃料貯蔵として、洋上水素製造も長期的技術課題として挙げられる。

図表 6.49 波力発電の技術ロードマップ

