

SRREN

ipcc

気候変動に関する政府間パネル
第3作業部会 - 気候変動の緩和（策）

再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書
最終版

海洋エネルギー（仮訳）

海洋エネルギー（仮訳）

統括執筆責任者:

Anthony Lewis (Ireland) and Segen Estefen (Brazil)

執筆責任者:

John Huckerby (New Zealand), Kwang Soo Lee (Republic of Korea), Walter Musial (USA), Teresa Pontes (Portugal), Julio Torres - Martinez (Cuba)

執筆協力者:

Desikan Bharathan (USA), Howard Hanson (USA), Garvin Heath (USA), Frederic Louis (France), Sandvik Øystein Scråmestø (Norway)

査読編集者:

Amjad Abdulla (Republic of Maldives), José M. Moreno (Spain) and Yage You (China)

本章の引用時の表記方法:

Lewis, A., S. Estefen, J. Huckerby, W. Musial, T. Pontes, J. Torres - Martinez, 2011: Ocean Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs - Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

注意

本報告書は、IPCC「Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation」Final Release を翻訳したものです。この翻訳は、IPCC ホームページに掲載されている報告書

<http://srren.ipcc-wg3.de/>

を元に行っています。また、翻訳は 2011 年 5 月 9 日リリースの初版に基づいて行っており、その後 IPCC によって行われた修正、追加、削除等の変更には対応しておりませんので、ご注意ください。

本報告書「再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書」は上記報告書の仮訳であり、IPCC の公式訳ではありません。正本は英文のみで提供されており、本日本語仮訳を引用して問題が生じて責任を負いかねますのでご了承ください。

第6章: 海洋エネルギー

目次

目次	2
要約	4
6.1 序論	5
6.2 資源ポテンシャル	5
6.2.1 波エネルギー	5
6.2.2 潮汐	7
6.2.3 潮流	8
6.2.4 海流	8
6.2.5 海洋温度差発電	9
6.2.6 塩分濃度差発電	10
6.3 技術及び用途	10
6.3.1 序論	10
6.3.2 波力発電	10
6.3.2.1 振動水柱型	11
6.3.2.2 振動物体型システム	11
6.3.2.3 越波型装置	11
6.3.2.4 動力取り出しシステム	12
6.3.3 潮汐発電	12
6.3.4 潮流発電及び海流発電	13
6.3.5 海洋温度差発電	15
6.3.6 塩分濃度差発電	15
6.3.6.1 逆電気透析	15
6.3.6.2 浸透圧発電	16
6.4 市場及び産業の発達の世界的・地域的狀態	17
6.4.1 序論	17
6.4.1.1 市場	17
6.4.1.2 産業開発	17
6.4.2 波力発電	18
6.4.3 潮汐発電	18
6.4.4 潮流発電及び海流発電	19
6.4.5 海洋温度差発電	19
6.4.6 塩分濃度差発電	20
6.4.7 政策の影響	20
6.5.1 ライフサイクル温室効果ガス排出	22
6.5.2 その他の環境及び社会的影響	22
6.5.2.1 波力発電	23
6.5.2.2 潮汐発電	23
6.5.2.3 潮流発電及び海流発電	24
6.5.2.4 海洋温度差発電	24
6.5.2.5 塩分濃度差発電	24
6.6 技術の向上、イノベーション、及び統合の展望	25
6.6.1 波力発電	25
6.6.2 潮汐発電	25
6.6.3 潮流発電及び海流発電	25
6.6.4 海洋温度差発電	26
6.6.5 塩分濃度差発電	26
6.7 コストの傾向	26
6.7.1 序論	26
6.7.2 波力発電及び潮流発電	28
6.7.3 潮汐発電	30
6.7.4 海洋温度差発電	30
6.7.5 塩分濃度差発電	31
6.8 普及のポテンシャル	31
6.8.1 海洋エネルギーを対象とした普及シナリオ	31

6.8.2 短期的な予想 32

6.8.3 二酸化炭素抑制からみた長期的普及 33

6.8.4 普及に関する結論 34

REFERENCES 35

地図に関する免責条項: 本技術要約の地図上に表示された国境と名称、及び使用された記号は、国連から公式に承認または承諾を得たものではない。本章で他の出典から複製された地図は、国連の慣行に細部にわたり準拠しているわけではないことに留意。

要約

海洋エネルギーは、長期的な炭素排出削減のポテンシャルを秘めているが、開発が初期段階であるため 2020 年までに短期的に大きな貢献をする可能性は低い。2009 年、追加で設置された海洋の発電容量は世界規模で 10MW 未満、2009 年末までの累積設備容量は約 300MW である。すべての海洋エネルギー技術は、潮汐発電を除き、構想段階、研究開発（R&D）中、または商用前の試作品実証段階にある。海洋エネルギー技術の性能は、経験の積み重ねが進み、新たな技術が品質の低い資源にアクセス可能になるにつれ、時の経過とともに着実に向上すると予想される。技術的進歩による十分な関連コストの削減で幅広い海洋エネルギー普及が可能になるが、気候変動緩和における海洋エネルギーの将来の役割を評価するうえで、最も重大な点は不確実性である。技術的ポテンシャルは海洋エネルギー普及にとって世界規模の主な障壁にならないと予想されるものの、資源の特徴から、今後地域のコミュニティがその地域の資源状況に適した複数の使用可能な海洋技術のなかから選択する必要がある。

海洋エネルギー資源の評価は予備的段階だが、理論的ポテンシャルは、現在の人間のエネルギー要件を容易に上回る。海洋エネルギーは、海水を動力源として活用または海水の化学・熱ポテンシャルを利用する技術から生産される。海洋における再生可能エネルギー（RE）資源は 6 つの供給源から得られ、それぞれの起源及び変換に必要な技術も異なる。これらは、波力発電、潮汐発電、潮流発電、海流発電、海洋温度差発電（OTEC）、塩分濃度差発電である。海洋エネルギーは、電力供給だけでなく、飲料水の直接生産または熱エネルギーサービスのニーズへの対応も可能であろう。海洋エネルギーの理論的ポテンシャルは 7,400EJ/年と推定されており、現在及び将来の人間のエネルギーへのニーズを十分上回る。多様な海洋エネルギー技術のポテンシャルについては、かなり少数の評価しか実施されておらず、こうしたポテンシャルも将来の技術開発に基づき変動する。ある評価では、2050 年の世界規模の技術ポテンシャルを 331EJ/年とし、海洋温度差発電（300EJ/年）及び波力発電（20EJ/年）の割合が大半を占めている。他方、別の評価では「活用可能な推定可能エネルギー源」をわずか 7EJ/年としている。海流発電及び塩分濃度差発電の浸透圧発電など、一部の潜在的な海洋エネルギー資源は世界的に分散しているが、海洋エネルギーの他の形態は補完的に分散している。海洋温度差エネルギーは基本的に、赤道周辺の熱帯（緯度 0～35°）に分散しているが、波エネルギーは基本的に緯度 30～60°で生じる。海洋温度差、海流発電、塩分濃度差発電などの一部の海洋エネルギー資源はベースロード発電に使用されるだろうが、その他は変動性のある発電プロフィールを持つため、発電予測の可能性が異なる。利用可能な文献は限定されているが、気候変動が海洋エネルギーの技術的ポテンシャルに与える影響は中程度と予測されている。

海洋エネルギーシステムは開発の初期段階だが、技術実証の数を考えると、技術的進歩は急速に進むだろう。河川の水力ダムを河口に応用して利用する潮汐エネルギーを除き、大半の海洋エネルギー技術の開発は試作段階を超えていない。基本コンセプトは、数世紀ではなく数十年前から分かっていたが、海洋エネルギー技術の開発が実際に始まったのは 1970 年代であったが、1980 年代の石油危機後の期間には勢いが衰えてしまった。幅広い海洋エネルギー技術の研究開発は 2000 年代初めに再開され、一部の技術、具体的には波エネルギー及び海流発電エネルギーでは、本格的な試作品の導入に到っている。風力タービン発電機とは異なり、海洋エネルギー変換装置には統一的な設計基準に収束しておらず、またエネルギー抽出の選択肢の範囲を考えると、統一的な装置設計も考えにくい。波力発電及び海流発電では、多数の試作品が開発中であり、装置の世界的な開発も加速している。

政府の政策は、海洋エネルギー技術の実施加速に貢献している。一部の国や地域の政府は、様々なイニシアチブを通じ、海洋エネルギー開発を支援している。このなかには、装置開発者に対する研究開発及び補助金、発電に対する性能奨励、海洋インフラ開発、許可に関する標準、協定、及び法的介入、海域や資源の割り当てなどがある。

海洋エネルギーは、長期的な炭素排出削減のポテンシャルがあり、環境への影響も低いと思われる。海洋エネルギー技術は、運用時に温室効果ガスを発生させず、ライフサイクル温室効果ガス排出も低いいため、排出削減に大きな貢献を果たすポテンシャルがある。送電連系を伴う大規模の普及は、炭素を排出するエネルギー供給を置換するために使用可能だが、一方、小規模な開発では、限られたコミュニティに電力や飲料水を供給するだろう。既存の世界のエネルギーシナリオは限定的な数しか検討されていないが、そこから示されるように、2050 年までに最大 1,943TWh/年（～7EJ/年）エネルギー供給という普及予測のもと、海洋エネルギーは、温室効果ガス排出を相殺することで、長期的な気候変動の緩和を助けるポテンシャルを有している。実際の導入の増加に伴い、海洋エネルギープロジェクトによる地域社会的影響及び環境的影響が評価されているが、その他の海洋産業及び洋上産業の経験に基づき環境への貢献は推定可能である。海洋エネルギー技術の環境リスクは比較的低いと思われるが、海洋エネルギー普及の初期段階では、社会的及び環境への懸念が最終的に開発をどの程度制約するかは不明確である。

普及が成功すれば、コスト削減につながる。海洋エネルギー技術は初期の開発段階であるが、研究開発及び実証が進み、導入が始まれば、技術の投資コスト及び均等化発電原価は現在の競合出来ないレベルから減少するという楽観的な兆候がある。海洋エネルギーの大規模スケールでの開発で技術的進歩により十分な関連コストの削減が可能になるが、気候変動緩和に将来の海洋エネルギーが役立つ評価がえられるかが最も重大な不確実性である。

6.1 序論

本章では、海洋エネルギーがエネルギー供給全体に果たし得る潜在的な貢献と、それによって気候変動に果たす潜在的な貢献について論じる。海洋の再生可能エネルギー源は、6つの注目すべき供給源から得られ、それぞれ起源及び変換に必要な技術も異なる。これらの源は以下のとおりである。

- ・ **波エネルギー**。海洋の表面を吹く風の運動エネルギーの置換から得られる。
- ・ **潮汐（潮の満ち引き）**。地球、月、太陽間の引力の相互作用から得られる。
- ・ **潮流**。潮汐と関連した沿岸海域の満ち引きに起因する流れから得られる。
- ・ **海流**。風成及び熱塩循環から得られる。
- ・ **海洋温度差発電（OTEC）**。海洋表層に熱として貯蔵される太陽エネルギーと通常 1,000m 以下の深層の低温海水によって生じる温度差から得られる。
- ・ **塩分濃度差（浸透膜発電）**。河口の淡水と海水の間の塩分濃度差から得られる。

海洋バイオマスファーム（Marine biomass farming）は海草や藻類からバイオ燃料を生産するファームであり、第2章で扱われる。海底の地熱エネルギーは海底海嶺の噴出孔から湧き出る熱水を指し、第4章で論じられる。

海洋エネルギー技術は、潮汐発電を除き、構想段階、研究開発段階、または商用前の試作品実証段階にある。資源が世界規模で分散し、大半の海洋エネルギーのエネルギー密度が比較的高いため、技術上の課題が克服可能で、それによりコストが削減可能な場合、海洋エネルギーは向こう数十年でエネルギー供給と気候変動緩和に重要な役割を果たすポテンシャルがある。このため、一部の政府により、海洋エネルギー技術の開発普及を推進し加速するための幅広い取り組みが実施されている。

環境及び社会的影響に関する情報は、主に海洋技術の運用経験が乏しいことから、限定的であるが、環境に対する悪影響は比較的低いと想定している。大半の海洋エネルギー技術のコストは、現在、将来とも評価が難しいのは、コスト想定 の 妥当性 評価 に 使用 可能な 製造 経験 や 導入 経験 が、ほとんどないためである。

本章は8つの節で構成され、海洋エネルギーの様々な側面を提示する。様々な海洋の資源ポテンシャルについては6.2節で、理論的ポテンシャルと技術的ポテンシャルの双方に着目し取り上げる。海洋エネルギー技術の開発と用途の現状は、6.3節で対応する。市場及び産業の発展に関する議論（政府の政策を含む）は6.4節に、環境影響及び社会影響は6.5節で扱う。最後に、技術向上、コストの傾向、及び潜在的な普及に関する予測についてはそれぞれ、6.6節、6.7節、及び6.8節で検討する。

6.2 資源ポテンシャル

それぞれの海洋エネルギー技術のポテンシャルに関する評価は、比較的少なく、こうしたポテンシャルは、将来の技術開発に基づき異なってくる。第1章で示したように、海洋エネルギーの理論的ポテンシャルは7,400EJ/年であり（Rogner et al., 2000）、Krewitt et al. (2009) は 2050 年の世界規模の技術的ポテンシャルを 331EJ/年とし、このうち、海洋温度差発電（300EJ/年）及び波力発電（20EJ/年）が圧倒的な割合を占めるとした。その対極にあるのが IPCC の AR4 で、「活用可能な推定可能エネルギー源」として、わずか 7EJ/年しか示していない（Sims et al., 2007）。本節では、利用可能な文献が初期のものであり、また海洋エネルギーの技術的ポテンシャルでかなりの不確実性があることを考慮し、理論的ポテンシャル及び技術的ポテンシャル双方で特定の推定を扱う。さらに、それぞれの海洋エネルギー源全体で本質的に相違があるため、資源ポテンシャルの評価は同様に、海洋エネルギー源ごとに論じる。

本節ではまた、気候変動が海洋エネルギーの技術的ポテンシャルに与える潜在的影響についても論じる。簡潔に言う と、利用可能な文献は限られているが、気候変動の影響は中程度と予想される。多数の例では、気候変数は基礎となるエネルギー源に絶対に影響を与えない（潮汐発電、潮流発電など）が、その他の例では、世界規模の技術的ポテンシャルの推定値に大きな影響を与える可能性はないと思われる（海洋温度差発電、波力発電、塩分濃度差発電、海流発電など）。

6.2.1 波エネルギー

海洋の波エネルギーは（内部波また津波とは別物として）、風から海洋に置換されるエネルギーである。風が海洋上で吹くと、空気と海洋の相互作用により風エネルギーの一部が水に伝わり、波を起こすが、波は、この位置エネ

ルギー（平均水位から移動した水量において）と運動エネルギー（水粒子の動きにおいて）として形成される。波の高さと周期は、置換エネルギー量に左右され、このエネルギー量は、風速、吹送時間、及び風が移動した海洋の距離吹送距離の関数である。波は、エネルギーの置換では非常に効率が良く、暴風地域から海洋表面を長距離で移動でき、これは、うねりと呼ばれる（Barber and Ursell, 1948; Lighthill, 1978）。地球で最もエネルギーの高い波は緯度 30～60°で温帯低気圧が作り出す。波エネルギーの利用可能性は一般に季節により異なり、時間の周期も短い。また、季節変動は一般に北半球のほうが大きい。波浪の年間変動は通常長い歴史のある合理的な世界規模のデータベースを使用し、モデリングで長期的平均を使用して予測される。

洋上波力の年間平均を示した世界地図（図 6.1）では、最大の波力レベルは、最も高エネルギーの風と最大の吹送距離を持つ温帯緯度の海域の大陸西岸沖で生じることが示されている。

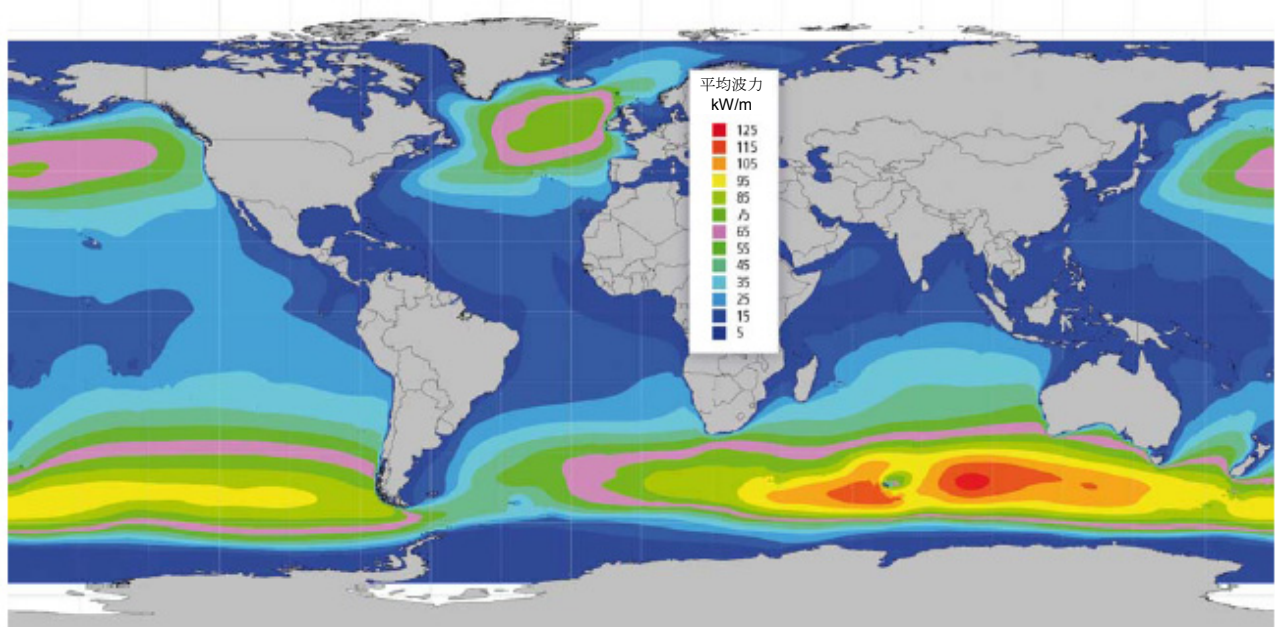


図 6.1: 年間の洋上波エネルギーレベルの世界における分布（Cornett, 2008）。

波エネルギーの理論的ポテンシャルは全体で 32,000TWh/年（115EJ/年）であり（Mørk et al., 2010）、これは 2008 年時の世界の電力供給のおよそ 2 倍にあたる（16,800TWh/年または 54EJ/年）。この数値は、地理的、技術的考察または経済的考察に拘束されて無い値である。国または地域の沿岸における年間波エネルギー発生の地域的分散は、理論上の波エネルギー P の値が 5kW/m 以上で緯度が 66.5°以下の地域で得られている（表 6.1）。表 6.1 に示された波エネルギーの理論的ポテンシャル（29,500TWh/年または 106EJ/年）は、上記の波エネルギーの理論的ポテンシャル全体から 8%減少しているが（5kW/m 未満の地域は除外）、それでも理論的ポテンシャルの推定値と見なされるべきである。波エネルギーの技術的ポテンシャルは、この数値を大幅に下回り波力発電装置の技術的開発の影響を受ける。Sims et al. (2007) は、洋上の波力発電装置の効率が 40%で、これらの装置が波浪 30kW/m を超える海岸線近くに設置されるとの想定で、波力発電の世界規模の技術的ポテンシャルを 500GW と推定している。一方、Krewitt et al. (2009) は、波エネルギーのポテンシャルを 20EJ/年と報告している。

気候変動による風のパターンの潜在的な変化は、長期的な波浪分布に影響を与える可能性が高いが（Harrison and Wallace, 2005; MCCIP, 2008）、波力発電装置を必要に応じて数十年かけて再配置出来ることから、これらの変化による影響は中程度にすぎない可能性が高い。

表 6.1: 地域別の波力発電の理論的ポテンシャル（Mørk et al., 2010）。

地域	波エネルギー TWh/年 (EJ/年)
西ヨーロッパ及び北ヨーロッパ	2,800 (10.1)
地中海及びアトランティック群島（アゾレス諸島、カーボベルデ、カナリー諸島）	1,300 (4.7)
北アメリカ及びグリーンランド	4,000 (14.4)
中央アメリカ	1,500 (5.4)
南アメリカ	4,600 (16.6)
アフリカ	3,500 (12.6)
アジア	6,200 (22.3)
オーストラリア、ニュージーランド、及び太平洋諸島	5,600 (20.2)
合計	29,500 (106.2)

注: 波エネルギーに関して理論的に世界全体の規模のポテンシャルを、Mørk et al. (2010) が示した結果は、他の研究と一致している（Cornett, 2008）。波エネルギーの地域のポテンシャルを示した研究理論で、表 6.1 のデータ検証に使用可能なものは、これ以外にない。

様々な計測装置が波力の測定に使用されている。

- ・水深 20m 超では、測定用の波浪ブイが使用される（Allender et al., 1989 参照）。浅水域では、海底設置の（水圧と音響の）プローブが使用される。容量式や抵抗式プローブまたは下方に電波を発する赤外線装置とレーザ装置は、洋上の構造物（石油やガスのプラットフォームなど）が使用可能な場合に使用される。
- ・衛星を使用した測定も、有義波高と周期を測定する高度計により、1991 年から定期的に行われている。この方法では、波浪ブイと同程度の精度が得られる（Pontes and Bruck, 2008）。衛星データの主な短所は、測定ごとの間隔が長い点（数日）、隣接トラック間の対応距離も長い点（赤道沿いで 0.8～2.8°）である。
- ・数値波浪モデルの結果は現在、特に平均的な波浪の場合、非常に正確である。こうしたモデルでは、大気モデルによる風況を入力として、洋上波の方向スペクトルを計算する。これらは、波の情報としては、圧倒的に大きな情報源である。

様々な種類の波の情報は補完し合っており、最良の結果を得るために併用されるべきである。波データ源、地図、及びデータベースを検討する際は、Pontes and Candelária (2009) を参照。

6.2.2 潮汐

潮汐は、海面高さの定期的で予測可能な変動で、地球、月、太陽の引力と回転力、遠心力と慣性力が相まって引き起こされる。多くの沿岸地域では 1 日におおよそ 2 回の干満があるが（「半日周潮」という）、一部の場所では 1 日 1 回しかない（日周潮）。24 時間 50 分の大陰日は支配的な要素であるため、満潮と干潮のタイミングが毎日前倒しになっていく。日周期と半日周期の潮汐も、地球の様々な場所で様々な時刻に起きる。

1 年を通じて、潮汐の大きさは地球、月、太陽のそれぞれの位置により異なる。大潮（最大潮汐）は、太陽、月、地球が一直線になる場合（満月と新月時）に起きる。小潮（最小潮汐）は、地球と月の軸の引力が地球と太陽の軸と 90 度になる場合に起きる。大潮と小潮の周期は、月が地球を回る公転周期（29.5 日）の軌道に牽引され、世界で同じ時刻になる。潮位も長期的には変動するが、その規模は、日周期、半日周期、及び大潮と小潮の周期に比べて非常に小さい（Sinden, 2007）。

潮汐のタイミングと規模は地球上の場所により異なり、海底地形、海岸線の形状、及びコリオリの加速度によっても変化する。潮汐特性で、潮汐差がほぼゼロになる地点（無潮点）がある（図 6.2）。しかしながら、これらの地点であっても、無潮点の両側の水面が様々なレベルで存在するため、潮汐は一般に高速の流量を作り出す。これはコリオリの効果及び海盆、大洋と湾内の干渉によるもので、無潮点の周囲を回転する潮汐波のパターンを形成する（無潮系）。潮汐現象の詳細については、Pugh (1987) を参照。

潮汐周期が河口や湾の自然の固有周期と共振することから、潮位の増大につながる。結果として、最大の潮位が可能な場所は共振する河口であり、たとえば、カナダのファンデー湾（17m の潮位）、イギリスのセバン河口（15m）、及びフランスのベドゥ・モン・サン・ミシェル（13.5m）などである（Kerr, 2007）。その他の場所（地中海など）では、潮位は 1m 以下である（Shaw, 1997; Usachev, 2008）。

潮汐は何世紀先であっても高い精度で予測でき、取得電力は変動するものの、気候変動による資源リスクはまったくない。世界規模の潮汐発電の理論的ポテンシャルは、(潮汐と潮流を加算した場合) 3TW の範囲であり、1TW は比較的浅海域に存在するが (Charlier and Justus, 1993)、Sims et al. (2007) 及び Krewitt et al. (2009) は、理論的ポテンシャルのごく一部しか活用出来ない可能性が高いと指摘している。

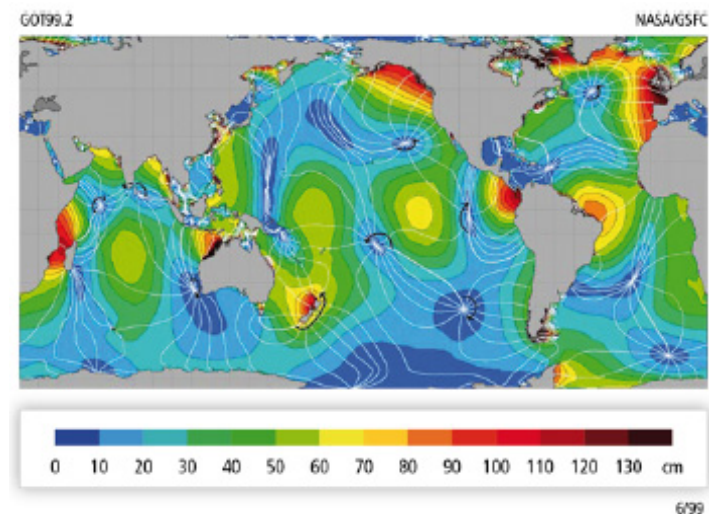


図 6.2: M2 潮位差の世界地図 (NASA, 2006)。

注: M2 は (半日周期) 最大の分潮で、その大きさは潮位差全体の約 60% を占める。白い線は等潮位線であり、この線上の同じ場所で潮の干満が起き、位相差は 30° (1 時間超) である。無潮点は濃い青の部分で示され、等潮位線に対応している。潮汐は無潮点の周囲を回転する。無潮点では、干満が全く無いかほぼ無い状態であるが、強力な潮流が発生する。

6.2.3 潮流

潮流は潮汐に応じた海水質量の流れである (6.2.2 節参照)。潮流は水の水平方向の動きにより起こり、海底の地形、特に沿岸部やその他の狭窄部 (島など) により変化する。潮流は潮汐の干満により起きる。これらの流れは短期的な天候の変動の影響を若干受ける可能性があるが、そのタイミングと規模はかなり予測可能であり、概して気候変動の影響を受けにくい。

潮流エネルギー源のポテンシャルの評価方法は多数あり議論されてきている (Hagerman et al., 2006; Mackay, 2008)。広く使用されているエネルギーフラックス法 (energy flux method) では、海流の潜在的なパワーは流速の 3 乗に比例する。したがって、潮流のパワー密度 (W/m^2) は、流速が少し早くなれば、大幅に高まる。本土と離島の間の海峡や河口内などで生じる海浜流の場合、流速は潮汐との関連で系統的に予想どおりに変化する。しかしながら、海峡の特殊な例では、資源全体の計算にはさらに制限が加わる (Garrett and Cummins, 2005, 2008; Karsten et al., 2008; Sutherland et al., 2008)。

波エネルギーと潮流の資源ポテンシャルを示した地図は、イギリス版が作成されている (UK Department of Trade and Industry, 2004)。同様の資源推定値は、EU (CEC, 1996; Carbon Trust, 2004)、カナダ (Cornett, 2006)、中国 (CEC, 1998) のものが公表されている。

ヨーロッパでは、イギリス、アイルランド、ギリシャ、フランス、及びイタリアが潮流発電のエネルギー資源のポテンシャルに特に関心を示している。106 か所を超える有望な場所が特定されている。この大半はイギリス国内にある (CEC, 1996)。これらの場所の技術的ポテンシャルの推定値は、現代の最先端技術を使用した結果、48TWh/年 ($0.17\text{EJ}/\text{年}$) とされている (CEC, 1996)。中国は、約 14GW の潮流発電が使用可能と推定している (Wang and Lu, 2009)。韓国、カナダ、日本、フィリピン、ニュージーランド、及び南アメリカでも、商用上魅力的な場所が特定されている。

6.2.4 海流

沿岸の潮汐に加え、外洋にも大きな海流が存在する。これらの海流は連続的に同一方向に流れ、変動性は少ない。海洋の大規模な循環は、特定の地域に集中している。特に、風成循環に関連する西岸境界流である。これらの海流の一部には、現代の技術と呼び起こすだけの十分な流速 ($2\text{m}/\text{秒}$ 以下) がある (Leaman et al., 1987)。たとえば、南アフリカ沖のアガラス・モザンビーク海流、東アジアの黒潮、東オーストラリア海流、北アメリカ東部のメキシコ湾流などが、これに該当する (図 6.3)。その他の海流でも、タービシステムが改善されると、開発のポテン

シャルが生じるだろう。

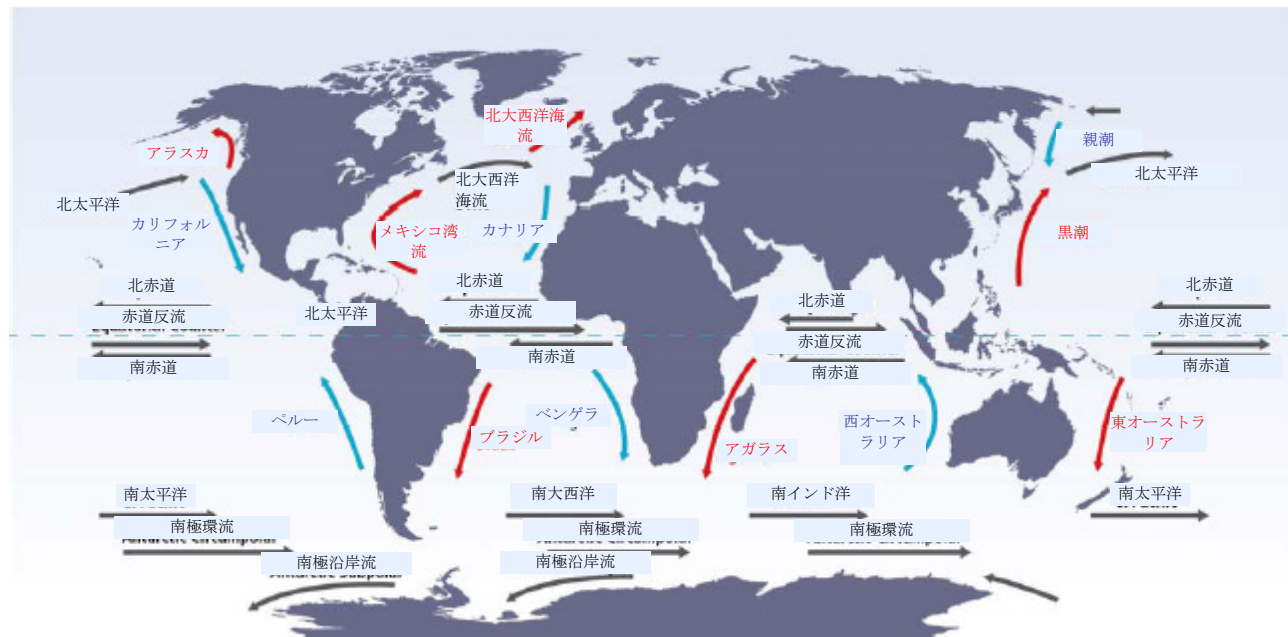


図 6.3: 表層海流。暖流は赤、寒流は青で表示。

メキシコ湾流系のフロリダ海流については、発電ポテンシャルは数十年前に確認されていた。「MacArthur Workshop」では、フロリダ海流は25GWの技術的ポテンシャルを有するとの結論を出した(Stewart, 1974; Raye, 2001)。フロリダ海流は沖合 15~30km の表面近くに中核となる海域があり、北大西洋亜熱帯環流の一部として年間を通じて強力に流れている (Niiler and Richardson, 1973; Johns et al., 1999)。

6.2.5 海洋温度差発電

海洋へ注ぐ太陽エネルギー全体の約 15%は熱エネルギーとして保持される。吸収は最上層に集中し、海水の熱伝導性が低いことから、深度とともに指数関数的に減少する。熱帯の緯度では、海面の温度が 25°C を超え、一方、海面下 1km の温度は 5~10°C である (Charlier and Justus, 1993)。

海洋温度差発電プラントの運用には、最低でも 20°C の温度差が必要と考えられている。アフリカとインド双方の沿岸、アメリカ大陸の熱帯性の西岸と南東岸、及びカリブ海や太平洋の多くの島々では、その海面の温度は 25~30°C であり、750~1,000m の深さでは 4~7°C に低下する。海洋温度差の資源地図には、表層水と深さ 1,000m の海水の年間の平均温度差が示され、温度差が潜在的に 20°C を超える熱帯域が広く存在することが分かる (図 6.4)。太平洋及びカリブ海の国々の多くは、自国の沿岸近くに海洋温度差発電プラントを開発出来るだろう (UN, 1984)。気候変動については、海洋温度差発電の世界規模の技術ポテンシャルに有意性を与えることはないように思われる。

海洋エネルギー源のなかでも、海洋温度差発電は継続的に使用可能な再生可能エネルギー源の 1 つであり、波エネルギーや潮流エネルギーに比べてエネルギー密度は非常に低いが、ベースロードの電力供給に貢献出来るだろう (夏季から冬季にかけては若干変動がある)。

海洋温度差発電の資源ポテンシャルは、その他の海洋エネルギーに比べ、かなり大きいと考えられている (World Energy Council, 2000)。また、2つの回帰線の間で幅広く分布している。世界全体の理論的ポテンシャルで楽観的な推定値は 30,000~90,000TWh/年 (108~324EJ/年) である (Charlier and Justus, 1993)。より最近では、Nihous (2007) が、約 44,000TWh/年 (159EJ/年) の定常的なパワーが得られると計算している。海洋の温度構造に影響がない場合、最大 88,000TWh/年 (318EJ/年) のパワーが可能と見込まれる (Pelc and Fujita, 2002)。

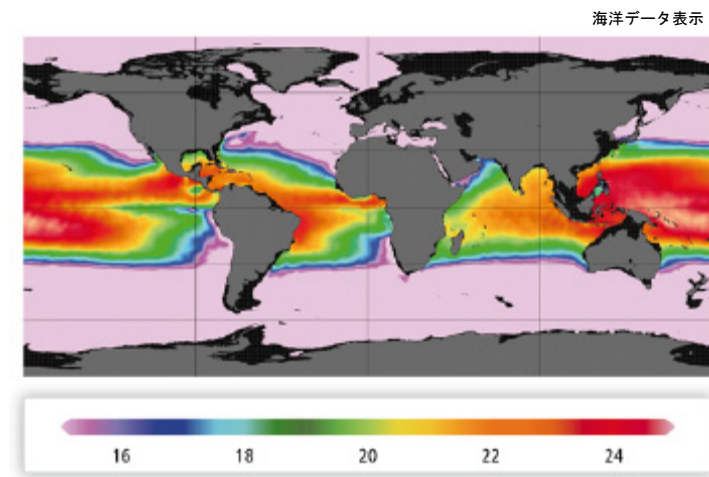


図 6.4: 世界における水深 20 と 1,000m 間の平均温度差 (°C) (Nihous, 2010)。

6.2.6 塩分濃度差発電

淡水と海水が混合すると、エネルギーが熱として放出される。この 2 つの水資源間の化学ポテンシャルを半透過性の膜を利用すると、このエネルギーを熱ではなく圧力として回収でき、その後に有効なエネルギー形態に変換可能である。

海洋に流入する淡水河川は世界的に分布しているため、浸透圧から発電可能で、十分な淡水の供給がある場所であれば、どの地域でも発電や使用が可能だろう。最も適切な場所は河口であり、淡水と海水が大量に接するポテンシャルのためである。

近年、発電の技術的ポテンシャルは 1,650TWh/年 (6EJ/年) と計算された (Scråmestø et al., 2009)。塩分濃度差は、コスト効率の良い技術が開発可能であれば、潜在的にベースロードの発電が可能だろう。

6.3 技術及び用途

6.3.1 序論

現在の海洋エネルギー技術の開発状況は、構想段階及び基礎研究開発段階から試作段階、実証段階まで様々であるが、成熟していると考えられるのは潮汐発電技術のみである。現在、各海洋エネルギー源には多くの技術オプションがあるが、潮汐発電を除き、技術は収斂していない。過去 40 年間にわたって、その他の海洋産業（主に海底石油・ガス）は、材料、建造、防食、海底ケーブル、及び通信において大きく進歩してきた。海洋エネルギーは、これらの進歩から直接的に恩恵を受けると期待される。

競争力のある海洋エネルギー技術はこの 10 年で出現するだろうが、それは大幅な技術向上が達成された場合に限られる。海洋エネルギー技術は、発電と飲料水生産の双方に適しており、海洋温度差発電も熱エネルギーのサービス提供（空調用の海水冷却など）に使用可能である。総括は Krishna (2009) で示されている。

6.3.2 波力発電

波のエネルギーを利用可能なエネルギーの形に変換するため、多種類の動作原理を持つ波力発電技術が考案されており、それらは多くの場合実証されている。主な動作原理としては、運動と波の相互作用（上下揺れ、前後揺れ、縦揺れ）によるものに加え、水深（深部、中部、浅部）及び陸からの距離（海岸線、沿岸、洋上）がある。浮体装置を効率的に運用するには、大きな動きが必要であり、これは共振ラッチにより実現出来る。つまり、位置エネルギーが蓄積されるまで、稼動浮体部の固定や開放を行う。

海洋の波力発電装置の特徴である一般的なスキームは、一次、二次、及び三次の変換過程で構成される (Khan et al., 2009)。一次変換のサブシステムは流体メカニズムのプロセスであり、次の過程に機械力を供給する。二次変換のサブシステムには、発電機を運転する前にパワー系統を容易にするよう、直接駆動または短期の貯蔵を組み込む。三次変換では、電気機械プロセスと電力プロセスを活用する。

近年のレビューでは、様々な開発段階にある波力発電装置が 50 以上示されている (Falcão, 2009; Khan and Bhuyan, 2009; US DOE, 2010)。波力装置の寸法の制約は、実際には完全には調査されていない。波の伝搬方向における波力

装置の寸法は一般に、その場所の波浪スペクトル密度に現れる主要な波長以下の長さ限定される。実用規模の波エネルギー発電装置には、大型装置ではなく配列した複数設置が必要であり、装置は風力タービン発電機と同様、海域に特有な条件で選択される可能性が高い。

波力発電システムの分類には、いくつかの方式が提案されている（Falcão, 2009; Khan and Bhuyan, 2009; US DOE, 2010 など）。Falcão（2009）（図 6.5）の提案する分類方式は主に、動作原理に基づく。左側は型式、中央が場所、右側は小節で概要を示す動作モードである。電気ポリマーやバルジ加工チューブ（bulging tube）を新たに使用した試作装置が少数あるが、この分類体系からは除かれている。

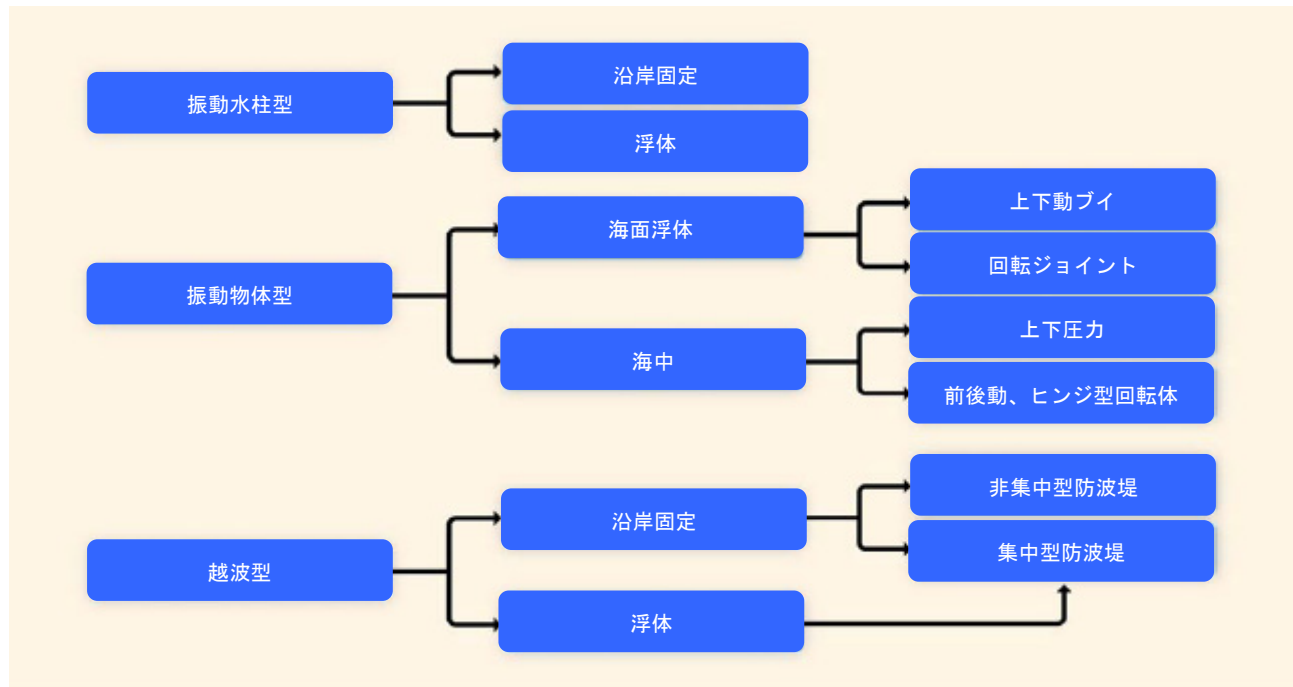


図 6.5: 波力発電技術：動作原理に基づく分類（Falcão, 2009）。

6.3.2.1 振動水柱型

振動水柱型（OWC）は、波を空気室で様々な圧力レベルの空気流を作り出す波力変換器である（Falcão et al., 2000; Falcão, 2009）。高速で排出される空気の流れは発電機と連結された空気タービンで運動エネルギーが電力に変換される（図 6.6a）。波が下がると、空気が逆流して空気室を満たし、この時もエネルギーを生み出すシステムである（図 6.6b）。空気タービンは、流れの方向に関係なく同じ方向に回転する、その様なタービン設計または変動ピッチ対応のタービン翼が用いられる。振動水柱型装置は、破波帯の上に固定構造物を作ることが可能であり（崖設置または防波堤の一部）、沿岸では海底設置型、深い海域では係留浮遊システムも可能である。

6.3.2.2 振動物体型システム

振動物体型（OB）波エネルギー変換装置は、入射波を使用し、2つの浮体の間で振動運動を引き出し、そして、これらの運動は出力取り出しシステムの稼働に使用される（Falcão, 2009）。振動物体型は、海面の装置として設置可能であり、また、あまり事例はないが、完全に海中に没水させて使用することも出来る。一般には、軸対称の海面浮体装置（ブイ）で浮力を使用し上下運動を導き、一方二次浮体は、係留固定し、その間の相対運動を導く（図 6.6c）。これらの装置は、無指向性であるため、一般的に「ポイントアブソーバー」と呼ばれる。別の種類の海面浮体装置では、円柱の浮体間を上下動を許す関節で接合して使用する。波は、動力取り出し装置の抵抗を受ける浮体間の関節部の運動から導かれる。一部の振動物体型装置は完全に水没した形で使用され、この場合は波エネルギーを吸収する振動水圧に依存する。最後に、ヒンジ型の装置があり、この装置は、比較的沿岸近くの海底に設置され、押し寄せる波の水平エネルギーを装置の前後動で受け止める。

6.3.2.3 越波型装置

越波型装置は、押し寄せてくる波を平均水面上の貯水槽に集め、波エネルギーを位置エネルギーに変換するターミネーター型波力装置である（Falcão, 2009）。貯水槽は、従来の低落差水力タービンを通じて下方に排水される。これらのシステムは、洋上の浮体装置も可能であるし、海岸線や人工の防波堤に組み込むことも可能である（図 6.6d）。

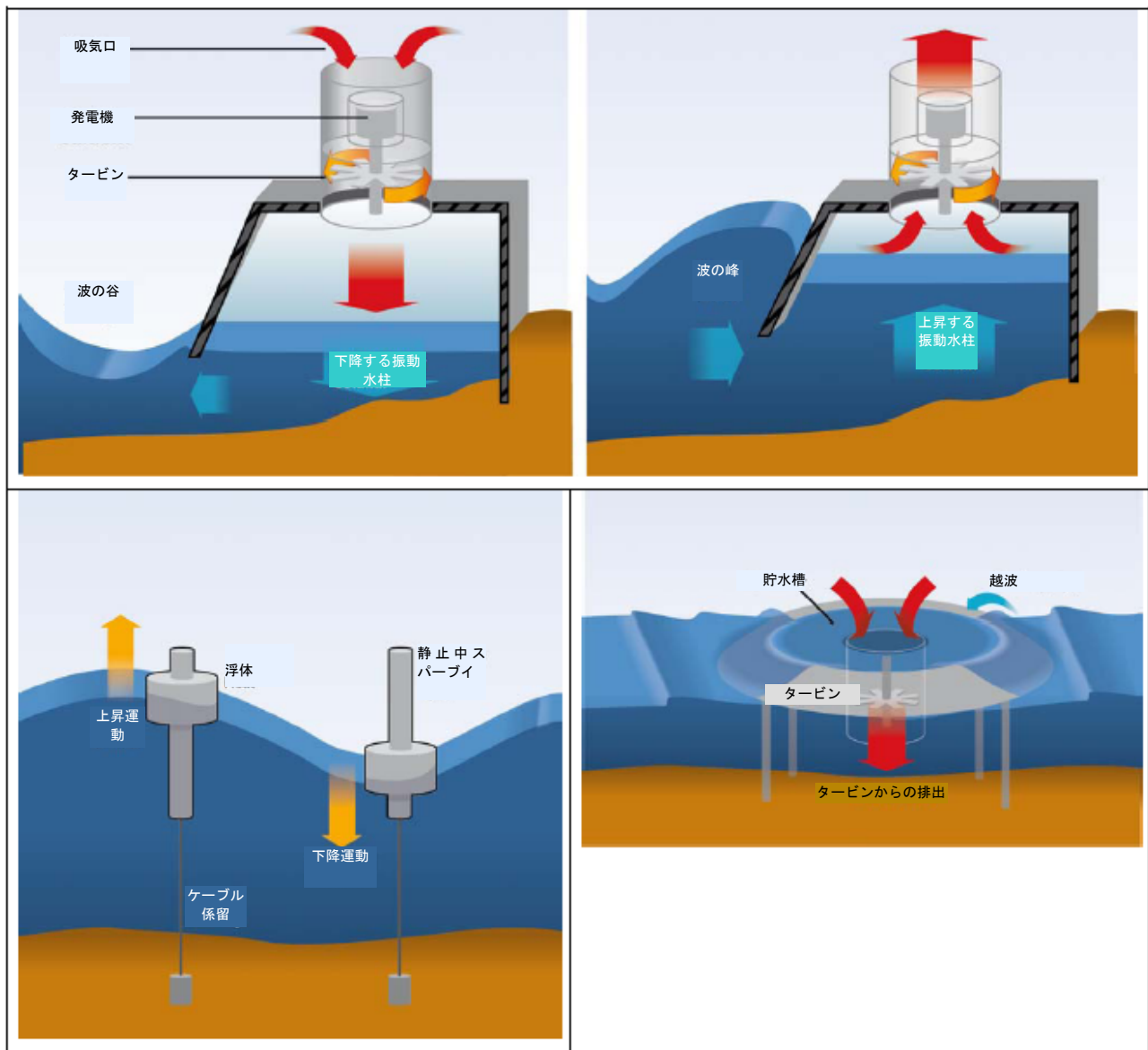


図 6.6: 波力変換装置とその動作: (a, b) 振動水柱型装置、(c) 振動物体型装置、(d) 越波型装置 (国立再生産可能エネルギー研究所 (NREL) による描写)。

6.3.2.4 動力取り出しシステム

動力取り出しシステムは、波力装置が生み出した運動エネルギー、空気流、または水流を有効な形態（通常は電力）に変換するために使用される。適用される技術により、異なる選択肢が多数存在する。これらは Khan and Bhuyan (2009) により十分に説明されている。実際の波変動は、これに対応して電力変動を生み出すため、単一の装置では電力の特性は低いと言える。実験で短時間のエネルギー貯蔵（数秒の間）の装置では、エネルギーを届けるには平滑にする必要性が示された。複数の装置による累積電力は、単一の装置によるものに比べ平滑になるため、装置の連携した配列が普及する可能性が高い。大半の振動物体型装置は、共振を使用して最適なエネルギー吸収を行うが、これには、構造装置の配列、質量、または装置寸法が波周期に連動していなければならない。最大出力は、最新の制御システムでのみ抽出出来る。

6.3.3 潮汐発電

潮汐発電の開発は通常、河口の開発を基に行われる。河口を堰き止め、その奥に単一の貯水槽（池）を形成し、従来の低落差水力タービンを設置する。別の堰の構成が提案され、これは複数の貯水池の運用である。各貯水池間にタービンが設置され、貯水池は時間により貯水と排水を繰り返される。複数貯水池のスキームでは、通常のスキームに比べ、ほぼ継続的に発電が可能になるなど、発電はより柔軟に使用可能になるだろう。

直近で見られる進歩は、河口から離れた洋上の（単一または複数）貯水池であり、「潮汐ラグーン」と呼ばれる。

容量と出力の点では柔軟性が高まり、繊細な河口の環境にもほぼ影響を与えないか、まったく影響を与えない。

この技術では商用可能なシステムが使用され、潮汐発電で最も広く使用される変換メカニズムはバルブタービンである (Bosc, 1997)。北フランスの La Rance にある発電プラント (240MW) では、双方向 (引き潮と満ち潮) で発電可能なバルブタービンが使用され、高潮時にヘッドの低い貯水池の貯水量を増やすため、ポンプとして働かせる機能を備えている (Andre, 1976; De Laleu, 2009)。韓国の始華発電所 (254MW) は竣工間近であり、満ち潮のみの単一モードで 25.4 の MW バルブタービン 10 基を使用する (Paik, 2008)。

非常に緩やかに傾斜する海岸線など、有利な条件を備える一部の場所が潮汐発電プラントによく適している。イングランド南西とサウスウェールズ間に位置するセバン河口などが、これに該当する。現在の実現可能性調査では、堰や潮汐ラグーンなどの選択肢が盛り込まれている。従来の潮汐発電所は、干満の一部しか発電に使用しない。この結果、潮汐発電所の平均設備利用率の推定値は、25~35%とばらついているが (Charlier, 2003)、一方で、ETSAP (2010b) は設備利用率の範囲を 22.5~28.5%と報告している。

6.3.4 潮流発電及び海流発電

潮流、河川流、及び海流から運動エネルギーを抽出する技術は開発中であり、これまでのところは潮流エネルギーの変換装置が最も普及している。河川流発電装置 (river current device) は第 5 章で説明した。潮流発電タービンと河川流発電タービンや海流発電タービンの基本的な相違点は、河川流と海流の流れは一方向であるのに対し、潮流は干満のサイクルの関係で逆の流れが生じる点である。このため、潮流発電タービンは双方向で発電出来るように設計されている。

潮流発電と海流発電のエネルギーシステムを分類したスキームが、複数提案されている (Khan et al., 2009; US DOE, 2010)。通常は、動作原理に基づき、軸流タービン、クロスフロー・タービン、及び往復運動機器などに分類される (Bernitsas et al., 2006, 図 6.7 参照)。一部の装置は、一台の装置に複数のタービンが備わっている (図 6.8a)。軸流タービン (図 6.8 a) は水平軸に関して動作し、クロスフロー・タービンは、流れを増進させるシュラウド (カウリングやダクト) の有無を問わず、垂直軸 (図 6.8 b, c) または水平軸に関して動作するだろう。

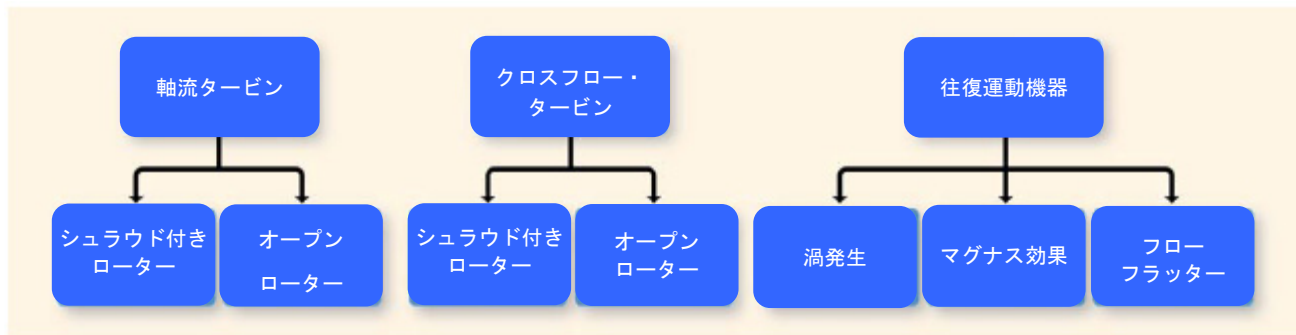


図 6.7: 現在の潮流エネルギー技術と海流エネルギー技術の分類（動作原理）。

水流エネルギー変換システムの多くは、風力タービン発電機と類似している。しかしながら、海洋タービンの設計者は、往復流、キャビテーション、及び海面下の厳しい条件（海水による腐食、海洋瓦礫、付着など）も考慮しなければならない。軸流タービンは逆流に対応可能でなければならないが、クロスフロー・タービンは流れの方向に関係なく動作を続ける。軸流タービンは、干満に対応して約 180° のナセル方向に逆転するか、そうでなければ、ナセルを固定してもローターブレードは双方向の流れに対応させる。ローターのシュラウド（カウリングまたはダクトとも言う）は、ローターを通じて流速を早め、先端損失を低下させることで、流体力学的性能を強化する。経済的便益を実現するには、エネルギーを追加回収し、装置の耐用年数でシュラウドのコストを相殺しなければならない。

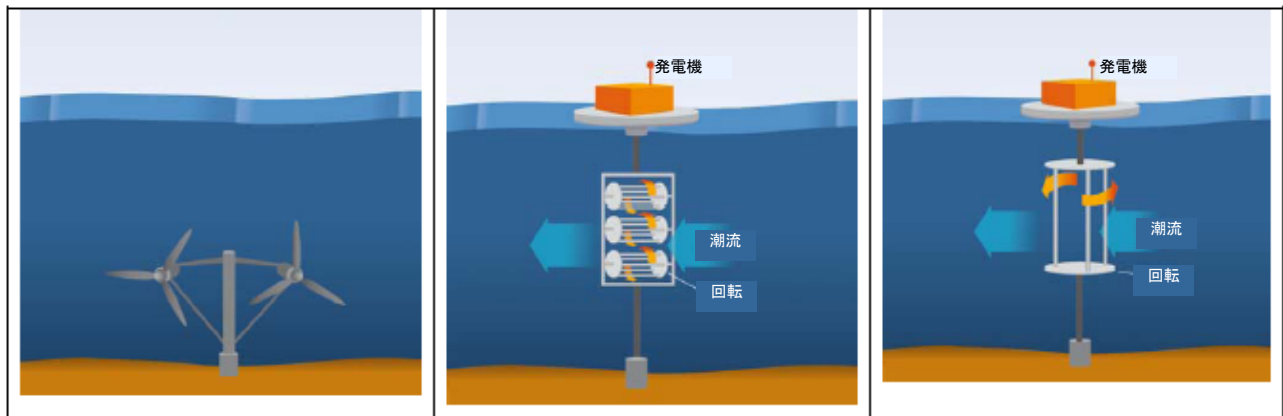


図 6.8: 潮流エネルギー変換器とその動作: (a) 双子タービン水平軸装置、(b) クロスフロー装置、(c) 垂直軸装置（NREL 設計）。

往復運動装置（図なし）は一般に、渦の剥離、又はパッシブ及びアクティブなフラッターシステム（通常は水中翼）、一般的な水中翼（潮流帆かけなど）といった基本的な流体现象に基づく。これらは、水流と直角方向の機械的振動を誘発する。

これらの装置の大半は開発の構想段階にあるが、2つの振動装置の試作品がイギリスの外洋で実験中である（Engineering Business, 2003; TSB, 2010）。

潮流資源の開発には、風力発電ファームと同様に複数の機械を使用する必要がある。このためタービンの立地は、特に装置後方の渦が重要である（Peyrard et al., 2006）。

外洋のエネルギーを回収する海流システムには、潮流と同一の基本技術が必要になる可能性が高いが、関連するインフラの一部は異なる。深海域の用途の場合、中性浮力のタービン/発電機のモジュールと係留索、さらに係留装置は代替可能な海底固定構造物と組み合わせる場合がある。もう1つの方法として、他の洋上浮体構造物（洋上のプラットフォームなど）に固定も可能である（VanZwieten et al., 2005）。これらのモジュールにも流体力学的な揚力設計がなされ、最適かつ柔軟な垂直位置を維持することが出来る（Venezia and Holt, 1995; Raye, 2001; VanZwieten et al., 2005）。さらに、外洋の海流発電では、水路の制約がないため、ローターの規模の制約はない。このため、海流発電システムには大規模なローターが装備されるだろう。

6.3.5 海洋温度差発電

海洋温度差発電（OTEC）プラントには、オープン、クローズド、及びハイブリッドの3つの変換スキームがある（Charlier and Justus, 1993）。オープンサイクルでは、温かい表層海水の約0.5%を真空室でフラッシュ蒸発させる。この蒸気がサイクルの作動流体であり、冷たい深海水による凝縮前に発電タービンを経由する。脱塩水は、適切なサイクル稼働による付加的な製品として取得出来る。

クローズドサイクルは、より効率的な熱的性能があり、海洋の表層から温かい海水を汲み上げ熱交換器を通じて、二次作動流体（アンモニア、プロパン、またはクロロフルオロカーボン（CFC）など）を気化させ、この、高圧の蒸気がタービンを経由する。蒸気はその後、海水で冷却され、液体に戻る。クローズドサイクルのタービンは、オープンサイクルのタービンに比べ、二次作動流体がより高圧で作動するため小型になる。

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の両方を使用する。アンモニアまたは別の作動流体を使用し、クローズドランキンサイクル用の熱源として利用し淡水がフラッシュ蒸発され、蒸気を作り出す。

海洋温度差発電技術の試験は行われてきたが、真空状態の維持、熱交換機の生物付着、及び腐食などの問題に遭遇している。ただし、水素、リチウム、その他の希少元素など、多数の潜在的な副産物を取りだせるため、この技術の経済的な実行可能性は向上している。

海洋温度差エネルギーは、海水による空調にも使用可能なため、熱エネルギーのサービスを提供出来る（Nihous, 2009）。

6.3.6 塩分濃度差発電

河川が塩分のある海に流入する場所などで淡水と海水が混じり合うと、エネルギーが放出され、局所的に水温がごくわずかに上昇する（Scråmestø. et al., 2009）。コンセプトのなかでも、逆電気透析（RED）及び浸透圧発電（PRO）は、この熱を電力に変換するものとして特定されている。このエネルギー変換形態は浸透発電と呼ばれることも多く、2009年には、初の5kWの浸透圧発電のパイロット発電プラントがノルウェーで稼働した。

6.3.6.1 逆電気透析

逆電気透析（RED）プロセスは、2つの溶液の化学ポテンシャルにおける差を動力源とする概念である。濃縮塩溶液と淡水は、陰イオン交換膜と陽イオン交換膜を交互に配置し、その中を通して接触する（AEM 及び CEM）（図6.9）。化学ポテンシャルの相違が、各膜全体で電圧を発生させる。このシステムの全体的なポテンシャルは、ポテンシャルの相違と膜合計の総計である。このコンセプト試験用の初の試作品がオランダで建設中である（van den Ende and Groeman, 2007）。

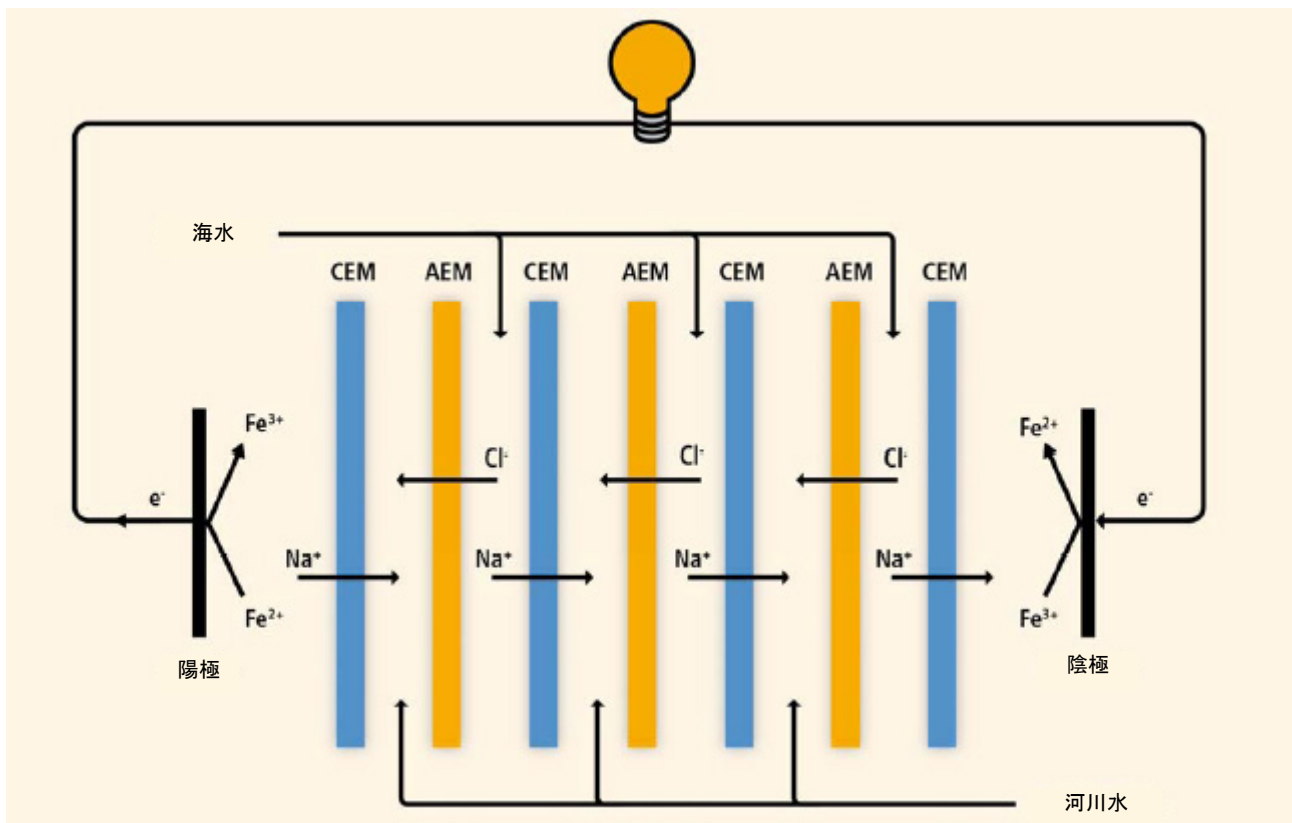


図 6.9: 逆電気透析 (RED) システム (van den Ende and Groeman, 2007)。

注: CEM=陽イオン交換膜、AEM=陰イオン交換膜、Na=ナトリウム、Cl=塩素、Fe=鉄

6.3.6.2 浸透圧発電

浸透圧発電 (PRO) は浸透発電とも呼ばれ、化学ポテンシャルを圧力として活用するプロセスであり (図 6.10)、1970 年代に初めて提案された (Loeb and Norman, 1975)。

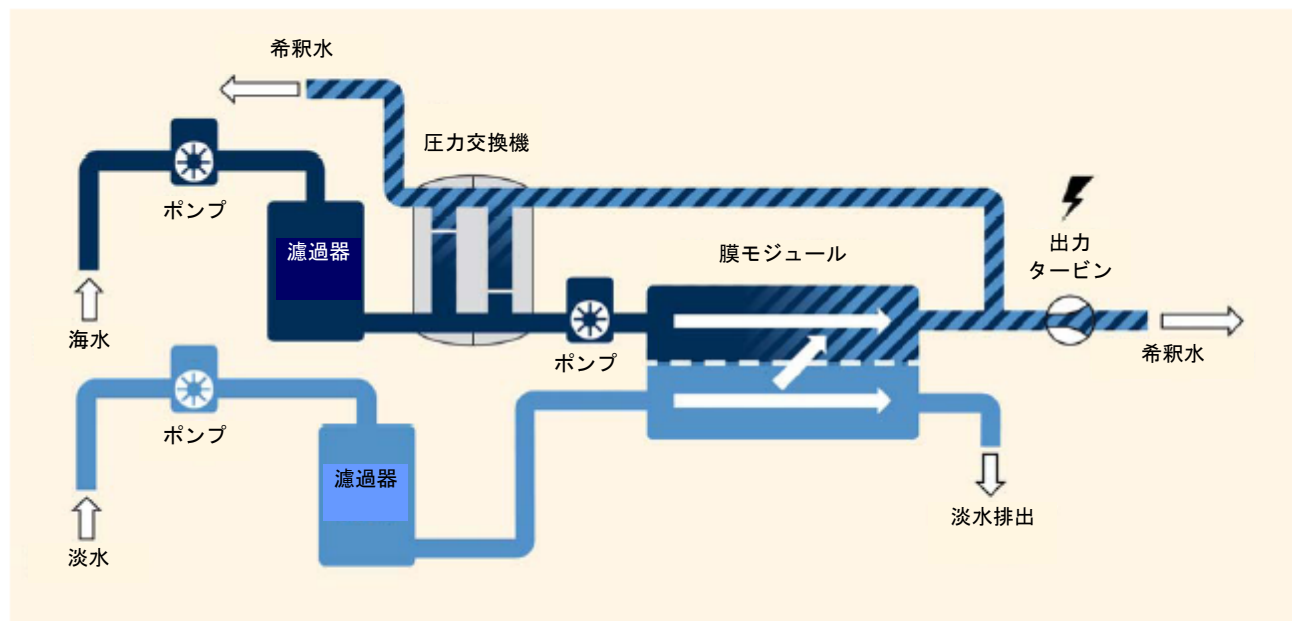


図 6.10: 浸透圧発電 (PRO) プロセス (Scråmestø. et al., 2009)。

浸透圧発電プロセスは、2つの液体間 (海水と淡水など) の塩分濃度差で自然に生じる浸透圧を活用する。海水と淡水は、混ざり合おうとする強い傾向がある。これは、液体間の圧力相違が浸透圧差に比べ小さい間は生じる。海水と淡水の場合、浸透圧差は海水の塩分によるが、2.4~2.6MPa (24~26 バール) の範囲である。

海水は、浸透圧発電の膜モジュールに入る前、浸透圧の半分程度の約 1.2~1.3MPa (12~13 バール) に加圧される。膜モジュールでは、淡水は膜を通じて加圧された海水に移動する。その結果生じた希釈水はその後、2つの流れに分かれる (Scråmestø, et al., 2009)。3分の1は (膜を経由する淡水量にほぼ応じて) 水力タービンで発電に使用され、残りは入って来る海水の加圧のために圧力交換機に入れられる。希釈水は、この2つの溶液が最終的に混じり合う場合、河川または海水に戻すことが出来る。

6.4 市場及び産業の発達の世界的・地域的狀態

6.4.1 序論

波・潮汐発電技術の研究開発プロジェクトは、過去 20 年間で急増し、中には現在本格的な商業化前の試作段階に入っているものもある。現在、唯一の利用可能な実用規模かつ運用可能な海洋エネルギー技術は潮汐発電である。その最も良い例は、1966 年に竣工したフランス北西部の 240MW のランス潮汐発電所である。254MW の始華発電所 (韓国) は、2011 年に運用を開始する予定である。海洋温度差発電、塩分濃度差、海流を含むその他の海洋エネルギー源を開発する技術は、まだ構想、研究開発、あるいは初期試作段階である。現在、100 を超える様々な海洋エネルギー技術が 30 以上の国で開発中である (Khan and Bhuyan, 2009)。

6.4.1.1 市場

海洋エネルギー技術はすべて、潮汐発電を除き、構想段階、研究開発中、または商用前の試作品実証段階にある。結果として、海洋エネルギー技術の商業市場は現時点では事実上存在しない。

一部の政府は様々な取り組みやインセンティブを使用し、海洋エネルギー技術の実施を推進、加速している。これらは 6.4.7 節で取り上げる。海洋エネルギー技術とそれによる電力の市場展開を主導するのは、大西洋北東部の沿岸諸国である。クリーン開発メカニズム (CDM) や共同実施 (JI) などの財政的メカニズムにより、開発途上国の政府は、海洋エネルギー開発に対しさらに外部から確実な資金調達が可能になる。韓国の始華発電所プロジェクトも、一部はクリーン開発メカニズム (CDM) の資金提供を受けている (UNFCCC, 2005)。

加圧水または飲料水を生産する海洋エネルギー技術が開発中であり、電力と同様、あるいは電力の代わりに、水市場で競合可能になるだろう。

6.4.1.2 産業開発

海洋エネルギー産業が現在の研究開発段階から移行するなか、電気工学、海洋工学、海洋工事などの既存産業の能力と専門家が取り込まれ、業界のサプライチェーンの急速な成長が後押しする。海洋エネルギー産業は現在、多数のベンチャー企業が金融部門からの限られた投資を受けながら支えている。装置開発に対する大規模な公共投資も過去 10 年で普通に行われるようになり、一部の政府は他の産業からの技術と知見の移転による便益を認識している。

海洋エネルギーには独特な特徴があるため、国家的な海洋エネルギー試験センターの国際ネットワークができた。このなかには、スコットランドの欧州海洋エネルギーセンター European Marine Energy Centre¹ (EMEC) も含まれる。EMEC は、世界で増加する試験センターのなかでも初めて設立されたセンターである。装置開発者はこれらの場を活用して、既存のインフラ、特に海底ケーブル、電力購買契約、及び許可を得て、自己の試作品の試験コストを削減出来る。これらのセンターは、装置開発者が装置試作品の試験コストを効率的に分担出来るようにし、幅広い波力発電技術と潮流発電技術の開発を加速させている。

産業開発のロードマップとサプライチェーンの研究は、スコットランド、イギリス、及びニュージーランドを対象に行われている (AWATEA, 2008; Mueller and Jeffrey, 2008; MEG, 2009)。ロードマップについては、アメリカ (Thresher, 2010) 及びアイルランド (SEAI, 2010) が作成を終了し、カナダが作成を開始している。同様のロードマップは EU 諸国 (EOEA, 2010) 及びヨーロッパの海洋エネルギー科学研究 (ESF MB, 2010) を対象に作成されている。これらの国々では、産業または地域の開発イニシアチブとしての海洋エネルギーの市場ポテンシャルを評価しはじめている。産業集積開発を支援する地域は、拡張性のある電力開発を主導し、魅力的な産業集積を模索する。

世界及び地域の一連の取り組みは現在、海洋エネルギー市場と産業の共同開発のために存在する。これらは、国際ネットワークの開発、情報の流れ、障壁の除去、及び海洋エネルギー取り込みを加速させる努力を支援している。現在活発なイニシアチブは以下のとおりである。

¹ センターの詳細については、www.emec.org.uk 参照。

- ・ IEA の Ocean Energy Systems Implementing Agreement²。このイニシアチブで、開発途上国の加盟国は地域の海洋エネルギー資源活用のための知識移転の機会を探ることが可能である。
- ・ Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices (EquiMar) 。EU が資金拠出するイニシアチブで、波エネルギー変換装置及び潮流エネルギー変換装置の評価議定書の提供を目的とする³。
- ・ Wave Energy PLanning And Marketing (WavePLAM) プロジェクト。ヨーロッパの産業イニシアチブで、波エネルギーの技術的以外の障壁に対応する⁴。

6.4.2 波力発電

波力発電技術は、1974 年の第一次石油危機後に開発が始まった。多くの様々な種類の変換装置がこれまで提案、試験されているが、依然として商用前の段階である。近年、政府と開発事業者は、海洋力発電装置の構造開発の指導にあたり、技術成熟度 (Technology Readiness Levels) を使用し始めている (Holmes and Nielsen, 2010) 。洋上で最初の試作品試験前に (1:4~1:10 のスケール) 、研究所の試験タンク施設で小規模な装置試験を行うのが (1:15~1:50 のスケール) 通常である。商用前の試験は、半分または実規模で行われる。現在、実規模での建設、試験が行われているのは、ごくわずかの装置のみである。個々のモジュールと小規模な配列に関しては、商用前の試験が近年開始され、この 10 年で加速が見込まれる。開発の初期段階を考えると、波力発電のコストは比較的高いが、コスト削減の大幅なポテンシャルはある。Marine Energy Accelerator (Callaghan, 2006) などのプログラムや市場を先導するための奨励の目的は、コスト削減の経験を加速させ、将来的に波力発電が商用上競合出来るよう模索することにある。

沿岸固定式の振動水柱装置は 1999 年からポルトガルで運用され (Falcão et al., 2000; Aqua-RET, 2008) 、少し類似した装置 (Voith Hydro Wavegen の LIMPET) ⁵が 2000 年からスコットランドのアイラ島でほぼ継続的に運用されている。2 つの沿岸固定の振動水柱装置の試験が、2006 年からはオーストラリア (Energetech や Oceanlinx) ⁶とアイルランド (OE Buoy) ⁷で、試作規模で行われている (Denniss, 2005) 。振動水柱装置は 1990~2005 年の間、インド南岸沖で運用されて発電モジュールに関する複数の実験が実施され、波力による脱塩が実証された (Ravindran et al., 1997; Sharmila et al., 2004) 。

開発された振動物体装置のうち最も成熟したものは、750kW の Pelamis Wavepower⁸アテニューエータ装置 (エネルギーを前から順に吸収するタイプ) である。これは、スコットランドで試験が行われ、ポルトガルで導入されている。ポルトガルの装置は、商用実証プロジェクトの一環として売却された。商用間近のその他の水柱振動物体技術としては、オーシャンパワー・テクノロジー社の PowerBuoy⁹がある。これは小型 (40~250kW) の垂直軸を備えた装置で、ハワイ、ニュージャージー、スペイン北岸で展開されている。開発中のその他の振動物体技術には、アイルランドの Wavebob 装置¹⁰、WET-NZ 装置¹¹、ブラジルの Hyperbaric 装置などがある (Estefen et al., 2010) 。

オランダでは、越波型装置 2 機が試作規模で建設され、洋上で展開されている (Wave Dragon¹²及び WavePlane¹³) 。最終的に、2 機の前後揺れ装置が試験されている。Aquamarine Power¹⁴は、初の実規模の「Oyster」を 2009 年 11 月に EMEC で導入済みであり、AW Energy (フィンランド) は Waveroller¹⁵をポルトガル沿岸沖で前後揺れ装置を展開する予定である。

6.4.3 潮汐発電

現在は、河口の潮汐発電所のみが運用されている。河口を堰き止める堰に発電ユニットを装備する、この技術自体は成熟しているが、実用規模で展開されている潮汐発電所は、世界では、1966 年に運用に成功した 240MW のラン

² 活動の詳細については、www.iea-oceans.org for description of activity 参照。

³ プロジェクトの結果詳細については、www.equimar.org 参照。

⁴ プロジェクトの結果詳細については、www.waveplam.eu 参照。

⁵ 技術解説については、www.wavegen.co.uk 参照。

⁶ 技術解説については、www.oceanlinx.com 参照。

⁷ 技術解説については、www.oceanenergy.ie/index.html 参照。

⁸ 技術解説については、www.pelamiswave.com 参照。

⁹ 技術解説については、www.oceanpowertechnologies.com 参照。

¹⁰ 技術解説については、www.wavebob.com 参照。

¹¹ 技術解説については、www.wavenergy.co.nz 参照。

¹² 技術解説については、www.wavedragon.net 参照。

¹³ 技術解説については、www.waveplane.com 参照。

¹⁴ 技術解説については、www.aquamarinepower.com 参照。

¹⁵ 技術解説については、www.aw-energy.com 参照。

ス発電所のみである。それ以降、その他の小規模プロジェクトが中国、カナダ、及びロシアで開始されている。254MW の始華発電所は 2011 年の運用開始が見込まれ、稼働後は世界最大の潮汐発電所になる。始華発電所は、1994 年に建設された 12.7km の既存の海の堰 (sea dyke) を改造中である。このプロジェクトは発電を行いつつ、貯水池のフラッシングを実施して水質も向上させる。

始華発電所の稼働を前提とした場合でも、2011 年末までの世界の潮汐発電の設備容量は依然として 600MW を下回る。ただし、多数のプロジェクトが確認され、そのなかには、イギリス (セバン河口)、インド、韓国、及びロシア (白海及びオホーツク海) など非常に大きな容量を備えるものもある。検討中の設備容量全体は約 43.7GW または 64.05TWh/年 (233PJ/年) である (Kerr, 2007)。

6.4.4 潮流発電及び海流発電

概念設計または試作品開発の段階にある潮流装置は、おそらく 50 以上あると思われるが、大規模装置の開発コストはまだ実証されていない。最も進んでいる例はシーゲン¹⁶の潮流タービン (容量 1.2MW) である。アイルランド北部に設置されており、1 年以上にわたって送電網に電力を供給している。アイルランドの企業 Open Hydro¹⁷が、スコットランドで、さらに最近では中国でダクト付きタービンの試験を行っている。2 つの企業が、ノルウェー及びスコットランドの EMEC で、より最近ではカナダ (ファンデー湾) でリング付きのタービンの試験を行っている。多数の装置が中国でも試験されている (Zhang and Sun, 2007)。

Hammerfest Strom¹⁸ (ノルウェー) 及び Atlantis Resources Corporation¹⁹ (スコットランド) の 2 つの企業が、実証規模の垂直軸タービン²⁰を、Straits of Messina (イタリア) が垂直軸タービンを実証した。最後に、イギリスの Pulse Tidal Limited²¹が 2009 年にハンバー河口沖で往復稼働装置を実証した。

潮流発電エネルギー資源は広く存在するわけではなく、潜在的に経済的実現可能性のある場所は、岬の周辺または島々間の海峡を通じて潮流の速度が加速される場所である。こうした場所が、ヨーロッパ (特にスコットランド、アイルランド、イギリス、及びフランス)、中国、韓国、カナダ、日本、フィリピン、オーストラリア、及び南アメリカで確認されている。この 10 年で多数の開発プロジェクトが開始され、ここから得られた経験と規模拡大によりコスト低下が見込まれる。

外洋の海流 (メキシコ湾流など) は、開発に向け調査が進められている。外洋の海流は低速で一方向に流れるため、外洋の海流の利用には、流速が速くより限定的な潮流に対応する現在開発中の技術とは異なる技術が必要になるだろう (MMS, 2006)。これまで、パイロットまたは実証プラントの情報はまったくない。外洋の海流の規模を考えると、潮流発電に比べ非常に多量の水が必要なため、技術開発で低速の海流も利用可能になれば、かなり規模は大きくなると想定される。

6.4.5 海洋温度差発電²²

現在、海洋温度差発電の試験施設については、世界的にごく少数しか試験されていない。1979 年、アメリカで小型の「Mini-OTEC」試作プラントの試験が行われた。このプラントはバージ浮体上に建設され、アンモニア系のクロードサイクルシステムを使用し、28,200rpm のラジアルタービン 1 機を備えていた。この試作プラントは定格容量 53kW だったが、ポンプ効率の問題で出力は 18kW に低下した。二番目の浮体式海洋温度差発電プラント (OTEC-1) は、1980 年に建設された。同じクロードサイクルシステムを使用した、タービンは設置されなかった。定格容量は 1MW で、1981 年に 4 か月間運転され、熱交換器や送水管の課題に関する研究など、主に試験と実証のために使用された。

ナウル共和国では 1982 年及び 1983 年に、120kW のプラントが数か月間運転された。フロン系の密閉システムを使用し、水深 580m に冷却水パイプが設置された。送電系統に接続され、ピーク発電は 31.5kW だった。

オープンサイクルの海洋温度差発電プラントは、1992 年にハワイに建設され、1993~1998 年に運用された。ピーク発電は 103kW で、脱塩水は 0.4ℓ/秒だった。運用上の課題として、真空室の海水ガス抜き、真空ポンプの問題、ターボ発電機の出力の変動、及び送電系統への接続などがあった。

¹⁶ 技術解説については、www.marinecurrentturbines.com 参照。

¹⁷ 技術解説については、www.openhydro.com/home.html 参照。

¹⁸ 技術解説については、www.hammerfeststrom.com 参照。

¹⁹ 技術解説については、www.atlantisresourcescorporation.com 参照。

²⁰ 技術解説については、www.pontediarchimede.it/language_us 参照。

²¹ 技術解説については、www.pulsetidal.co.uk/our-technology.html 参照。

²² 6.4.5 節の内容は、特に言及がない限り、主に Vega (1999) 及び Khan and Bhuyan (2009) から引用。

インドでは 1984 年、1MW のアンモニア系のクローズドサイクルの海洋温度差発電システムが設計された。建設は 2000 年に開始されたが、長い冷却水パイプを吊り下げることが困難だったため、竣工には到らなかった（Ravindran and Raju, 2002）。2005 年には、トゥティコリン沖の同じ浮体バージで 10 日間の実験が行われ、海洋温度差を利用した淡水化実験が浅海域で実施された。

日本では、2000 年代前半までに多数の海洋温度差発電プラントの試験が行われた（Kobayashi et al., 2004）。2006 年には、佐賀大学海洋エネルギー研究センターが 30kW のハイブリッド海洋温度差発電の試作プラントを建設した。このプラントでは、海水とアンモニアの混合作動流体が使用され、発電が継続されている。

大規模な海洋温度差発電の開発は、技術が費用対効果の高いエネルギー供給装置となる段階まで進めば、太平洋諸島、カリブ諸島、中央アメリカやアフリカ諸国を含む熱帯の海洋国家において大きな市場を形成する可能性がある。

6.4.6 塩分濃度差発電

塩分濃度差発電は今も構想段階であり（Scråmestø et al., 2009）、2 つの異なる技術コンセプトを用いた 2 つの研究実証プロジェクトが進行中である（6.3.6 節）。淡水などの関連技術と並行開発すれば、浸透圧発電の開発に便益となると予測される。

浸透圧発電の研究はノルウェーで進められており、2009 年からの商業規模の浸透圧発電プラントの実現に向け、その一部として運転している（Statkraft, 2009）。同時に、逆電気透析発電技術は、オランダで 75 年間使用されている締切大堤防に組み込む改修策として提案されている（Willemse, 2007）。

6.4.7 政策の影響²³

現在、海洋エネルギー技術の開発を主導しているのは、北西ヨーロッパの沿岸諸国で、南北アメリカ、北西の太平洋諸国、及びオーストラレーシア（南洋州）諸国も関わっている。海洋エネルギー技術は、排気ガスゼロの発電と飲料水生産の可能性があり、多数の政府が海洋エネルギーの取り込みを推進加速させる政策イニシアチブを導入している。第 11 章では、再生可能エネルギー技術の取り込みを推進する政策及びイニシアチブをより詳細に示す。これらの政策及びイニシアチブの一部は、海洋エネルギーに適用され、主に 6 つのカテゴリに分類される。

1. 容量または発電の目標
2. 補助金及び財政的インセンティブ（賞金を含む）
3. 市場奨励策
4. 産業開発
5. 研究及び試験用の施設、インフラ
6. 許可、スペース、資源の割り当てに関する制度、標準、及び協定

一般に、海洋エネルギー独自の政策を実施中の国々は、技術開発と普及に関して最も先進的であり。技術が初期段階であることを考えると、技術やプロジェクトの進展に歩調を合わせた海洋エネルギーに対する政府支援は重要である。

意欲と規制の双方から様々な目標が存在する。海洋エネルギー独自の目標の大半は、提案された設備容量と関連し、他の再生可能エネルギー発電に比例した増加など、一般的な目標を補完している。ポルトガルやアイルランドなどの一部のヨーロッパ諸国では、固定価格買取制度（特定技術による発電への追加支払い）などの「市場引上げ」型の優先メカニズムを設けている。一方、イギリス政府とスコットランド政府は、拘束力のある再生可能エネルギー使用証明書の強化スキームを活用している。これは、海洋エネルギー技術を使用した発電者に与えられる取引可能な証明書である。スコットランド政府は 2008 年にサルタイヤ賞（Saltire Prize）を導入した。この賞は、累積発電目標の 100GWh に 2 年間継続達成できた初の装置開発者に与えられる。

大半の国々が、再生可能エネルギー技術に対して研究開発の補助金を行っているが、海洋エネルギー独自の補助金プログラムは一部の国々しか設けていない。イギリスは最初に、最も包括的なプログラムを最大規模で提供しているが、アメリカ連邦政府は 2008 年以降、投資を増加させている。装置開発に対する補助金は「供給プッシュ」型のメカニズムとして、イギリス及びニュージーランドの両国が実施しているが、両国とも幅広い政策手段を実行している（表 6.2）。表 6.2 は、2010 年末に存在した海洋エネルギー政策の例のみを示した点に留意を要する。

²³ 非技術的な政策上の課題については、本報告書の第 11 章で取り上げる。

表 6.2: 海洋エネルギー独自の政策の例 (Huckerby and McComb, 2008 の修正版)。

政策手段	国	説明
容量または発電の目標		
意欲的な目標及び予想	イギリス スペイン (バスク政府) カナダ	2020 年までに海洋エネルギー発電をイギリスの電力の 3% に 2020 年までにバスク沿岸沖で 5MW カナダは 2050 年に向けたロードマップ作成中 (Ocean Renewable Energy Group) ²⁴
法定目標 (エネルギー全体または電力全体)	アイルランドポルトガル	海洋エネルギー設備の特定の目標 2020 年までにアイルランド沖に 500MW 2020 年までにポルトガル沖に 550MW
補助金及び財政的インセンティブ		
研究開発プログラム・供与	アメリカ 中国	エネルギー省の Wind&WaterPowerProgram (研究開発及び市場加速のための補助金) 国家ハイテク研究開発プログラム (No.863)
試作品導入補助金	イギリス ニュージーランド 中国	Marine Renewables Proving Fund Marine Energy Deployment Fund Ocean Energy Major Projects
プロジェクト開発補助金	イギリス	Marine Renewables Deployment Fund
賞金	スコットランド	サルタイヤ賞 (累積発電目標の 100GWh に 2 年間継続達成できた初の海洋エネルギー装置に対し、1,000 万ポンド授与)
市場刺激策		
固定価格買取制度	ポルトガル アイルランド・ドイツ	海洋エネルギー発電の電力を価格保証 (\$/kWh または相当で)
取引可能な証明書及び再生可能エネルギー購入義務	イギリス	再生可能エネルギー購入義務のスキーム。海洋エネルギー発電の電力に対する取引可能な証明書 (\$/kWh または相当で)
産業開発		
産業及び地域の開発供与	スコットランド、イギリスなど	集団開発
業界団体の支援	アイルランド ニュージーランド	業界団体設立に対する政府の財政的支援
研究及び試験用の施設、インフラ		
国立の海洋エネルギーセンター	アメリカ	2 つのセンター設立 (オレゴンとワシントン (波と潮汐)、ハワイ (海洋温度差と波))
海洋エネルギー試験センター	スコットランド、カナダなど	European Marine Energy Centre ²⁵ 及び Fundy Ocean Research Centre for Energy (カナダ) ²⁶
洋上のハブ	イギリス	波力ハブ、装置の接続インフラ
許可、スペース、資源の割り当てに関する制度、標準、及び協定		
標準・協定	国際電気標準会議	波、潮汐、及び海流に関する国際標準の開発
許可制度	イギリス	Crown Estate 社によるペントランド海峡ライセンスの競争入札
スペース・資源割り当て制度	アメリカ	内務省によるアメリカ連邦大陸棚の許可制度

²⁴ ロードマップの詳細については、www.oreg.ca 参照。²⁵ センターの詳細については、www.emec.org.uk 参照。²⁶ センターの詳細については、www.fundyforce.ca 参照。

6.5 環境及び社会的影響²⁷

6.5.1 ライフサイクル温室効果ガス排出

海洋エネルギーは、運転中に二酸化炭素を直接排出することはないが、原材料の抽出、構成要素の製造、建設、保守、解体など、海洋エネルギーシステムのライフサイクルの別の過程において、温室効果ガスが排出される場合がある。1980 年以降に発表されたライフサイクル評価研究の包括的な検討によって、波・潮汐発電システムからのライフサイクル温室効果ガス排出量は $23\text{g CO}_2\text{eq/kWh}$ 以下であり、波力発電ではライフサイクル温室効果ガス排出量の推定中央値は約 $8\text{g CO}_2\text{eq/kWh}$ となっている（図 6.11）。（図 6.11 に示した分布は、尤度の評価ではないことに留意する。この図は単に、現在発表済みの文献の分布が質及び関連度のスクリーニング合格した推定値を報告しているだけである。文献の調査方法及び参照リストの詳細については、Annex II を参照）。

波力発電と潮汐発電の装置については、両方の装置で温暖化効果ガス排出に有意差があるかを決定する研究が、十分に行われているとは言えない。潮流発電と海流発電、海洋温度差発電、及び塩分濃度差発電についても、品質のスクリーニングは不足している。すべての海洋エネルギー技術の推定数を増加させるために、さらにライフサイクル評価が必要である。それでもなお、化石エネルギー発電技術に比べれば、海洋エネルギー装置からのライフサイクル温室効果ガス排出量は低いと考えられる。

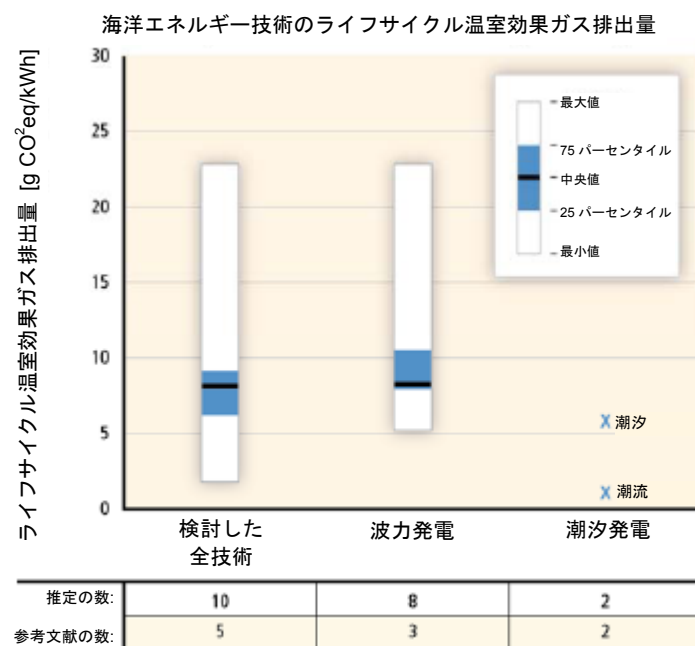


図 6.11: 波力発電技術及び潮汐発電技術のライフサイクル温室効果ガス排出量の推定値（文献の値は未修正。品質スクリーニング済み）。表示した推定値に貢献した文献の調査及び引用の詳細については、Annex II を参照。

6.5.2 その他の環境及び社会的影響

海洋エネルギープロジェクトは長寿命で一般に 25 年、潮汐発電の場合は 100 年を超えると思われるため（Sustainable Development Commission, 2007）、開発の長期的影響を検討する必要がある。他の洋上技術（石油やガスの運用、洋上風力発電など）からの経験移転が妥当であろうが、海洋エネルギー技術の場合は導入や運用の経験に乏しいため、現在は地域の環境に与える影響または社会的影響についての情報はほとんどない。

イギリス政府は 2001 年、「波力発電装置及び潮汐発電装置による環境への悪影響は最小限であり、ほぼすべてのその他のエネルギー源に比べてかなり小さいが、実際の設置による影響を特定するには、さらに調査が必要である」との結論を出した（House of Commons, 2001）。同時に、ヨーロッパ及び北アメリカの一部の政府は、戦略的な環境評価を実施し、海洋エネルギープロジェクトの潜在的な環境への影響を特定しようとしている。このなかには一般に、導入規模、設計、設置、運転保守（O&M）、及び解体が物理的及び生物環境に与える影響が含まれている。大規模な海洋エネルギー開発はどのような種類であっても、あらゆる開発の選択肢を完全に評価し、社会と環境への影響を詳細に評価しなければならない。潜在的な環境への影響は、Boehlert and Gill (2010) が説明している（2010）。

²⁷ 本報告書で取り上げたすべての再生可能エネルギー源の環境及び社会的影響に関する包括的評価は、第 9 章で参照可能である。

気候変動緩和に加え、海洋エネルギー技術の環境及び社会への影響は、それぞれの技術によって異なっている。海洋エネルギーの可能性のある好ましい影響としては、海洋装置周辺の海域においては他の人間の活動を減らすことによる海洋生物に対する悪影響を回避し、エネルギー供給と地域の経済成長、雇用、観光の増強などが挙げられる。この一例として、スコットランドでは 2020 年までに海洋エネルギーで 630～2,350 の雇用創出の可能性があると推定されている（AEA Technology & Poyry Energy Consulting, 2006）。別の例では、海洋エネルギーシステムはそれ自体、観光名所になっており、観光及びサービスで雇用を提供している（La Rance 潮汐発電など: Lang, 2008; De Laleu, 2009）。

マイナスの影響は、景観の悪化とその場所の利用へのアクセスの低下、建設中の騒音、地域の生態系へのその他の限定的であるが特殊な環境影響などがあるだろう。プロジェクト特有の影響は、プロジェクトの特質、プロジェクトの立地環境、プロジェクト周辺のコミュニティなどにより異なる。技術特有の戦略、環境影響を集中する事で限定する稼働式海洋温度差発電プラントなどは、可能性のあるマイナスの影響を緩和する方法の 1 つである。海洋エネルギー技術に特有な環境的影響及び社会的影響はその技術に一部依存する。このため、以下の節で、各エネルギー源の潜在的な影響を取り上げる。

6.5.2.1 波力発電

波力発電技術の環境への影響は、導入経験が乏しいことから、評価が難しい。潜在的な影響は技術及び立地により多様になるが、空間の競合、騒音と振動、電磁場、生物相と生息環境の破壊、水質の変化、及び化学物質または石油流出などによる汚染の可能性などが考えられる。パイロットプロジェクト及び商用前の導入試験の実施により、潜在的な環境への影響及びその緩和について、有益なデータが得られる可能性が高い。

波力発電装置が景観に与える影響は無視出来る可能性が高い。装置を大規模に沿岸近くに配列する場合を除き、大半の装置は一部または全部水没するためである。同様の理由で、渡り鳥の経路、食餌、及び巣作りへの潜在的な影響も、無視出来ると推測される。

波力装置の導入はその他の既存の海洋構造物と同様の影響を持つだろうし、一部の影響の範囲は、既存の使用に比べて小さくなるだろう（Boehlert et al., 2007 参照）。騒音と振動は、建設と解体の期間に最も悪影響を与え、装置や陸地と装置をつなぐ電力輸送ケーブル周辺の電磁場は、電磁場を使用して餌の位置を特定しているサメ、ガンギエイ、及びエイ（板鰐類）には問題になるだろう。磨耗（塗装及び防汚化学物質の）や、たとえば油圧動力取り出しシステムからの油漏れなどによる化学物質の漏洩が考えられるが、潜在的な環境影響である。これらの影響はすべて、研究開発段階で理解し、なくすか緩和する必要がある。エネルギー回収とそれによる下流の影響は、堆積物（海底洗掘、堆積増加など）を変化させたり、波の高さを低下させたりするだろう。波力発電ファームは、後方の浜のうねりの状況を低下させ、海岸線の波のダイナミクスを変化させるだろう。これらの側面は、数値研究や水槽試験研究を通じて評価可能である。

ライフサイクル温室効果ガス低排出の発電に加え、波エネルギーの可能性のある便益として、地域の造船所に関する産業刺激（装置建造、組み立て）、輸送、設置、及び保守などがある。また、波力発電ファームの排除区域で野生生物の保護区を創設すれば、漁業資源にプラスの便益となるだろう（House of Commons, 2001）。

6.5.2.2 潮汐発電

河口は、複雑で独特でダイナミックな自然環境であり、非常に特殊な注意を要する。この自然環境への影響は、建設段階及び将来の運用と解体の双方で、解決されなければならない。

建設の影響は、使用される建設技術により異なり、一部の長期的な影響では、種の多様性と豊富さにプラスである（Retiere and Kirby, 2006）。La Rance 発電所の場合、建設中は河口を閉鎖したが、近隣の河口と比較した生物多様性は運用開始から 10 年たらずに回復したと報告されている（De Laleu, 2009）。その他の建設方法として、沈設させるフローティングケーソンなどがあるが、短期的影響及び長期的影響をさらに低下させるだろう（Lang, 2008）。始華発電所建設中の環境への影響は、非常に限定的で、これは主に、プラントを設置した堰が既に存在していたためである。

堰の運用は、貯水池の潮汐の規模とタイミングに影響を与え、河口内の魚類や鳥類の生活と生息環境、塩分濃度、及び堆積物の動きを変化させる（Bonnot-Courtois, 1993）。これらの影響の一部は、適切な運用慣行を適用すれば緩和出来る。たとえば、La Rance 潮汐発電所では、貯水池の干満が 1 日 2 回維持されており、貯水域の「自然の」生物多様性の回復につながっている。ただし、貯水池上流の方角に蓄積する堆積物は定期的に浚渫が必要である。

沿岸の潮汐ラグーンの建設と運用は、繊細な沿岸の生態系にそれほど悪影響は与えない。ただし、新たにラグーンが設置される場所は影響を受ける。

社会的影響に関しては、現在までに建設された潮汐発電プロジェクトでは、近隣の居住者の移転はまったく必要なかった。これは今後のプロジェクトでも同様のはずである。さらに、地域のコミュニティには、建設段階で地域の雇用機会及び関連する便益が生じる。建設後の堰は、堰の上部に新たな短い道路輸送経路になるだろう。これも、地域のコミュニティの社会経済的状況を向上させるだろう。

6.5.2.3 潮流発電及び海流発電

潮流発電

海流発電技術は、大規模な没水構造物が関係する可能性が高いが、一部の装置は半没構造物となる。環境への影響はいくらか限定的である。装置は、既にエネルギーがあり流れがある環境に設置されるためである。こうした場所では、種の多様性及び豊富さは低い。

現在の技術は、海洋生物に害を与えかねない稼動部品（回転する回転翼または上下動する水中翼）が使われているものの、現在のところ、海流発電装置が、鯨、イルカ、アシカ、サメといった海洋生物に与える害について、証拠はまったくない。装置導入の数及び期間が限定的であることもあるだろうが、船舶の推進力に比べ（海洋生物の逃走速度に関して）回転速度が遅いことも一因だろう。

海流発電

海流発電システムを本格的に商用導入することによる可能性のある影響は、4つの広いカテゴリに分けられる。物理的環境（海洋自体）、底生生物（海底）群集、海中の海洋生物、及び海洋空間の競合使用である（Charlier and Justus, 1993; Van Walsum, 2003）。

海洋への物理的影響は限定的と推測される。海流発電装置は、海洋の循環または正味質量の輸送を変化させるほどの規模ではない。たとえば、風成循環における赤道偏流では、西岸境界流が極方向への還流にあたるが、海底の散逸機構とは無関係である（Stommel, 1966 など）。しかしながら、システムは蛇行パターン及び海洋上層の混合プロセスを変化させるだろう。これらの影響は、本格的なサイト開発前に完全に評価を行う必要がある。これらの潜在的な影響を評価するため、フロリダ海流のモデリング研究が進行中である（Chassignet et al., 2007）。

外洋のエネルギー発電システムは、最大船舶の喫水以下で運用される可能性が高い。このため、商用船舶航行への危険は最小になる。海軍潜水艦の運用は影響を受けるだろうが、システムは固定されているため、回避は比較的容易である。水中の構造物は、魚類の生息環境と行動に影響を与えるだろう。水中の構造物は浮魚礁になることで知られているため（Relini et al., 2000）、可能性のある使用者同士の競合（line entanglement など）は検討しなければならない。特に大規模な設置の場合、浮遊生息域の付随する変化が同様に問題になるだろう（Battin, 2004）。

6.5.2.4 海洋温度差発電

海洋温度差発電のポンプ運用による海水の地域的特性の変化については、環境上の懸念になるだろう。深層水域の冷水と浅水域の温水が熱交換器に大量に送られ、混合される。混合により、設置場所近くの周辺の海水に排水される前に、これらの水の温度と栄養塩の特性は変化する。このため、大量の排水が排水場所に長期的な影響を与えないよう、船上（または短期間設置の）海洋温度差発電プロジェクトが提案されている（Nihous and Vega, 1993）。深層水域における排水で環境への影響は最小化されるかもしれないが、確実な証拠は現在利用不可能である（Marti, 2008）。

通常の運用条件下では、海洋温度差発電プラントは大気への排出がほぼなく、地域の空気質に悪影響は与えない。プランクトン（及びおそらく食物連鎖）の成長は、栄養素の豊富な深層水の流出に伴い起こる。（一般に排水の深さより深い）安定的なプルームの深さで十分な光も届く場合、これが生じるだけかもしれない。海洋有機物（主にプランクトン）が海洋温度差発電プラントの排水パイプの海洋栄養素に引き寄せられ、生物付着や腐食の原因になる可能性がある（Panchal, 2008）。

6.5.2.5 塩分濃度差発電

海水と淡水の混合は、河口環境では自然のプロセスであり（van den Ende and Groeman, 2007）、塩分濃度差発電プラントは、希釈水を海洋に戻す前に淡水と海水を混合することで、このプロセスを複製したものである。通常の希釈水は主要な廃棄物であるが、濃縮された排水は環境を変化させ、排水場所の動植物の生息に影響を与えるだろう。

主な都市及び産業地域は、主要河川の河口に位置することが多く、発電プラントも「ブラウンフィールド」に建設されるだろう。プラントの一部または全体を地下に建設すれば、景観が地域の環境に与える影響も低減出来るだろう。

6.6 技術の向上、イノベーション、及び統合の展望²⁸

新規技術として、海洋エネルギー装置は大きな技術的進歩のポテンシャルを持っている。この進歩を達成するためには、装置に特有の研究開発及び発展が重要である、海洋エネルギー変換装置の技術の向上及びイノベーションには、関連する分野の開発による影響も受ける可能性も高い。洋上風力発電プラントの急速な展開は、波力発電プロジェクトまたは海流発電プロジェクトが風力とインフラを共有する可能性につながるだろう（Stoutenburg et al., 2010）。同様に、防波堤に固定した波力発電装置が、ポルトガルの Mutriku プラント（Torre-Enciso et al., 2009）や中国（Liu et al., 2009）など、その他の目的で使用する新たな建設との相乗効果から利益を受けるだろう。

より広範囲の電力ネットワークへの海洋エネルギーの統合には、様々な資源の多種多様な発電の特徴を理解することが必要になる。たとえば、潮汐資源による発電は 1～4 時間では非常に変動性が高くなるが、一ヶ月以上の期間では変動性は非常に限定的となる（Sinden, 2007）。ちなみに、波力発電の一時間単位での変動性は、風力発電に比べ低く、潮汐発電でも多くの場合は低いものの、しかし季節の変動性及び年間の変動性は大きい（Sinden, 2007）。こうした資源利用可能性のパターンは、電力ネットワークへの海洋エネルギーの大規模な統合（第 8 章参照）、送電容量の要件及び活用を示唆する。

6.6.1 波力発電

波力発電技術は今も開発の初期段階のものが多く、すべて商用前である（Falcão, 2009）。コスト予測または信頼性予測はどれも、不確実性が高い。それは実証されていないか、試作品レベルも超えていないため、最適なシステムに関して想定を必要とするためである。試作品の波力装置については「海での時間」が極めて重要なため、開発事業者は十分な運用経験を得ることが必要である。厳しい海象条件での生存性が技術開発の進展に必要である。風力タービン発電機と同様に、波力発電装置は最大の実用機の規模にまで発展すると予測される。これが実現すると、運転保守サービスの訪問回数全体は最小限になり、また設置解体コストが削減され、係留も必要最小限になる。

コスト削減は、配列に展開された場合でも、個々の波力発電装置による発電でも、最大発電出力や製造と設置の経験によっても実現するだろう。これは専用の精度の高い製造設置インフラで、効率性の良い変換システムの製作で、エネルギー取得が良く信頼出来る装置を必要とする可能性が高い。

6.6.2 潮汐発電

潮汐発電プロジェクトは、河口環境に建設され運用される立証済みの水力発電技術に依存する。技術向上が今も達成可能な分野は、基本的に 3 つある。河口の潮汐ラグーン開発により、プロジェクトがコスト効率良く実施出来るだろう（Friends of the Earth, 2004）。複数の貯水池の設置で、出力変動の減少とベースロード電力や配電さえ可能にすれば、プロジェクトの価値が向上するだろう（Baker, 1991）。また、タービンの効率向上（Nicholls-Lee et al., 2008 など）、特に双方向の流れに対応できること（ポンプ利用）などが、売電のコスト全体を低下させるだろう。

技術はさらに向上し、たとえば、タービンの様々な回転速度を可能にするギアや可変周波数発電機で、出力は向上する。発電プラントは、ダム内のオンサイトに建設されるか、（鋼鉄または強化コンクリートの）ケーソン内に組み込むか、現場まで浮かせて運ぶことになるだろう。

6.6.3 潮流発電及び海流発電

波力発電と同様に、潮流発電技術及び海流発電技術は開発の初期段階である。動作原理が水平軸の風力タービンと似ていることから、その運用経験を活用すれば、軸流の水流タービン開発にメリットがあるだろう。将来の設計では、流れを受ける面積（ローター直径）が最大の実用機規模に拡大し、発電容量の増大、運転保守サービス訪問総数の最小化、設置解体コストの削減、及び基礎構造の必要性の最小化につながる可能性が高い。研究開発の重要な分野は、機器の設置と回収の改良のなかにある可能性が高い。海峡の潮が遅くなるのは非常に短い時間の可能性があるためである。同様のことが、運転保守の要件にも該当する。

潮流発電及び海流発電のエネルギー資源全体は、商用時の必要な流れ速度が低下可能であれば、増加するだろう。潮流発電装置の最適化は、低い流れの中で運転出来るタービン大型化が進んだ後になる（BWEA, 2005）。同様の傾向が、アメリカの風力発電産業で、文書で十分に立証されるだろう。アメリカでは、風力発電タービン技術の開発でエネルギー的に劣る場所が対象とされ、利用可能な資源が 20 倍増加した（Wiser and Bolinger, 2010）。

²⁸ 10.5 節では、再生可能エネルギー全体の技術的進展の駆動要因及び傾向について包括的な見方を提示する。第 8 章では、より幅広くその他の統合上の課題を扱う。

将来の潮流発電装置及び海洋発電装置の配列にとって、波浪影響は、性能及び信頼性の最優先事項である。商用化及び経済的実行可能性は、最小のサービスを必要とし、コスト高の保守が不要な状態で安定的な発電を行うシステムに左右されるためである。腐食、キャビテーション、流れ吸収、及び海洋の流れてくる瓦礫の衝撃による劣化に対抗する新たな材料が、運用コストを削減し得る。

6.6.4 海洋温度差発電

海洋温度差発電も開発の初期段階である。クローズドサイクル海洋温度差発電プラントでは、熱交換器システムが重要な要素の1つである。蒸発器とコンデンサのユニットは、作動流体を液体相からガス相に効率的に変換し、低い温度差で液体相に戻さなければならない。熱変換効率は熱交換器性能に大きく依存するため、発電の観点では大幅な損失によりシステムの経済的に生き残りが低下する可能性がある（Panchal, 2008）。蒸発器とコンデンサのユニットはプラントコスト全体の20～40%になるため、研究開発の取り組みの大半では、熱効率性能の向上を目的としている。海洋温度差発電プラントの二番目の重要な要素は、直径の大きいパイプで、これにより深層水域の冷水を表層に運ぶ（Miller, 2010）。過去10年、洋上の石油やガス生産用の大直径ライザーパイプで得られた経験は、冷水パイプの設計に流用出来る。

クローズドサイクルの作動流体には、多数の選択肢が使用可能である。ここでは、表層の海水を低温沸騰させ、深層の海水で液化する必要がある。3つの主な候補は、アンモニア、プロパン、及び商用冷媒のフロン R-12/31 である。

6.6.5 塩分濃度差発電

浸透圧発電の初の試作プラントが2009年10月、ノルウェー南東のオスロ近郊の Tofte で運用開始になった。この場所は、海水だけでなく、近隣の湖からの淡水も十分に得ることが出来る（Scråmestø et al., 2009）。

この試作プラントの主な目的は、設計されたシステムが1日24時間、信頼出来る発電を行えるかを確認することにある。このプラントは、効率性向上を目指して開発された技術をさらに試験するために、使用される。これらの活動は、膜モジュール、圧力交換装置、及び発電（タービンと発電機）に注目する。制御システム、水の事前処理機器、及び水の取排水口については、さらに開発が必要である（Scråmestø et al., 2009）。

オランダの逆電気透析システムの開発事業者は、200MWの発電プラントの設置場所として、オランダの Afsluitdijk の堰を特定している。この堰は、北海の海水と汽水気味の IJsselmeer 湖を分離している（Ecofys, 2007）。研究開発ではさらに、膜の効率性及び水流の浄化に必要な素材の選択に注力する。

6.7 コストの傾向²⁹

6.7.1 序論

商業的な市場はまだ海洋エネルギー技術の開発を進めていない。政府の支援による研究開発及び国家政策インセンティブは重要な動機づけとなる（IEA, 2009）。ほとんどの海洋エネルギー技術のコスト評価は難しい。コストの想定を評価する際に利用可能な製造経験及び導入経験が、ほぼないためである。表6.3は、代表的な海洋エネルギーのそれぞれの均等化発電原価に影響する主なコスト要因に関する、入手可能なものの中で最良のデータを示している。

²⁹ 本節のコストの議論は主に、民間投資家の見方に限定されている。第1章、第8～11章では、コスト上の課題に関する包括的な見方（たとえば、統合コスト、外部コストと外部便益、経済全体のコスト、及び政策コストなど）を提示している。

表 6.3: 全ての代表的な海洋エネルギー技術のにおいて中心となる利用可能なコスト及びパフォーマンスのパラメータの要約

海洋エネルギー技術	投資コスト (US ドル/kW (2005 年)) ⁱ	年間運転保守コスト (US ドル/kW (2005 年))	設備利用率 (CF) ⁱⁱ	設計寿命 ⁱⁱⁱ (年)
波	6,200~16,100 ^{iv,v,vi}	180 ^{v,vi}	25~40 ^{v,vi}	20
潮汐	4,500~5,000 ^{vi}	100 ^{vi}	22.5~28.5 ^{vi}	40 ^{vii}
潮流	5,400~14,300 ^{iv,vi}	140 ^{vi}	26~40 ^{vi}	20
海流	該当なし	該当なし	該当なし	20
海洋温度差	4,200~12,300 ^{viii}	該当なし	該当なし	20
塩分濃度差	該当なし	該当なし	該当なし	20

注及び参照: i 海洋温度差エネルギーのコスト数値は、様々な年のドルで表示されている。ii 設備容量は、実際のハードウェア運用経験ではなく、技術及び資源の特性に基づく推定である。iii 設計寿命は専門家の知見に基づく推定である。標準的な想定では、海洋エネルギー装置の設計寿命を 20 年までとしている。iv Callaghan (2006)。投資コストの高い範囲は、この出典に基づく。v Previsic (2004) は将来のコスト想定を公表した。213 x 500 kW Pelamis 波力発電装置で、投資コスト 2,620US ドル (2005 年) /kW、年間運転保守コストは 123US ドル (2005 年) /kW、10 年後の追加の改造コストは 264US ドル (2005 年) /kW である。想定 CF が 38%、設計寿命 20 年。vi ETSAP (2010b)。波力、潮流、及び海流発電の投資コストの低い範囲はすべて、この出典に基づく。ETSAP (2010a) では、投資コストは波力の場合 5,200US ドル (2005 年) /kW、潮流発電技術の場合 4,500US ドル (2005 年) /kW に低くなると推定していることに留意を要する。ただし、同年のうちに、ETSAP (2010b) は、波力技術及び潮流技術の推定値を大幅に上げ、表に示した下限としたが、潮汐発電の推定投資コストは安定的とした。CF に関しては、直近の出典 (ETSAP, 2010b) はより楽観的である。表に示した範囲は、両方の参照に基づく。vii 潮汐発電は水力プラントと類似しており、一般に設計寿命は非常に長い。水力発電の場合、電気機械システムの定期更新を行いつつ、最も費用のかかる土木構造 (ダム、トンネルなど) はまったく大掛かりな更新をせず、100 年を超えて運用される例は多数ある。このため、潮汐発電では、安全に最低 40 年設定可能な大規模な水力プラントと同様の経済的設計寿命が想定される (第 5 章参照)。viii 海洋温度差発電のコスト推定値は、様々な年のドルで表示されており、様々な技術及び立地を対象としている。大半は 100MW 規模のプラントが対象である。多くは非常に不確かな推論である (Francis, 1985; SERI, 1989; Vega, 2002; Lennard, 2004; Cohen, 2009 など)。海洋温度差発電で利用可能な最新のコストは Lockheed-Martin 社によるもので、10MW のパイロットプラントの投資コストを 32,500US ドル (2005 年) /kW と推定している。これは、100MW の商用プラントの推定値である 10,000US ドル /kW に収斂している (Cooper et al., 2009)。

ほとんどの場合、ピア・レビューされた参照データ及び実際の運用経験が不足しているため、これらのコスト及びパフォーマンスのパラメータはわずかな情報に基づいており、そのため工学知識に基づく推定コスト及びパフォーマンスを反映している場合が多い。少数ながら現在の投資コストが見られるものもあるが、それらはわずかなプロジェクト及び研究の例に基づいており、産業全体を代表するものとは言い難い。しかしながら、これらのパラメータ設定は、ピア・レビューされていない文献で提示された均等化コスト値の全体的な妥当性、ある程度は基礎となる想定妥当性と尤度を評価するために使用可能である。Annex II で概説した標準的な方法に基づく均等化発電原価及び上記の入力データを 3%、7%、10% の割引率で再計算してから、以前に公表されたデータと結果を比較した。完全なパラメータ設定が表 6.3 で示された 3 つの海洋エネルギー技術に注目し、図 6.12 で結果としての均等化発電原価の値を示す。

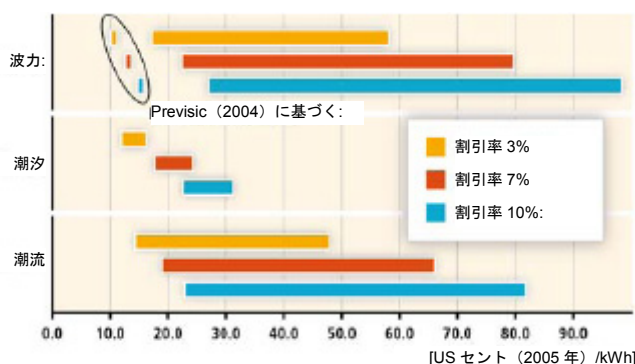


図 6.12: 主要なコスト及びパフォーマンスのパラメータに基づく波力発電、潮汐発電、及び潮流発電技術の均等化発電原価。これらのコスト及びパラメータは様々な研究から引用され、表 6.3 に示されている。

Callaghan (2006) の計算では、波力発電の均等化発電原価は 21~79US セント (2005 年) /kWh の範囲であり、表 6.3 及び図 6.12 に示したデータセットに基づく値とおおよそ一致している。EPRI の研究 (Previsic, 2004) では、特定のプロジェクト設計 1 つを評価しており、こちらはより楽観的である。加えて、Callaghan (2006) は、潮流発電の均等化発電原価を 16~32US セント (2005 年) /kWh と計算している。潮流発電の均等化発電原価については、California Energy Commission (2010) が 1~3US セント (2005 年) /kWh という同様の値を得ているが、約 2,000~

3,000US ドル (2005 年) /kW という 2018 年の予想投資コストに基づく、と Callaghan (2006) 及び ETSAP (2010b) が現在の条件で推定した値に比べ非常に低い (表 6.3 参照)。入力データの一貫したセットと算出された均等化発電原価は、ETSAP (2010b) に記載されている。波力、潮汐、及び海流発電のプロジェクトの均等化発電原価の中央値 (割引率 10%) はそれぞれ、kWh 当たり 36US セント (2005 年) 24US セント (2005 年)、及び 31US セント (2005 年) である。ETSAP (2010b) の値は、波力技術及び潮流発電技術の双方とも、表 6.3 のデータに基づき割引率 10% で決定した範囲の下限である。図 6.12 に示した潮汐発電の均等化発電原価の計算値は、ETSAP (2010b) の入力データのみに基づき、ETSAP の報告値に沿っている。

1.3.2 及び 10.5 節で示され、Annex III に記載された均等化発電原価は、潮汐発電システムのみである。商用可能な段階に成熟した唯一の海洋技術だったためである。

将来のコスト推定値は、かなり大きな不確実性が伴い、非常に不確かな推論と見なされるべきである。しかしながら、可能性のある将来のコストを導き出すために使用可能な方法の 1 つは、学習のコンセプトに基づく。新技術の普及拡大による経験の蓄積は通常、コスト削減につながる。経験論の研究では、いわゆる学習率を生み出す累積普及度及びコスト削減の値の関係を定量化している³⁰。海洋エネルギーに広く類似した技術で見られるこうした学習率の適用で、一定の普及シナリオに基づく将来のコスト推定が可能になる。海洋エネルギー技術の将来のコストについては、複数の推定値が公表されている。しかしながら、基礎となる普及シナリオ及び詳細なコスト想定は大部分が不透明なままである。以下の小節では、コストレベルが達成可能な条件を検証し、公表された将来のコストの一部を評価する。

6.7.2 波力発電及び潮流発電

一部の研究では、波力発電装置及び潮流発電装置のコスト推定値を、使用可能な試作品のコストデータから外挿している (Binnie Black & Veatch, 2001; Previsic, 2004; Callaghan, 2006; Li and Florig, 2006)。

波力発電装置及び潮流発電装置は、ほぼ同じ開発の初期段階である。投資コストは、風力発電などの他の再生可能エネルギー技術が達成するコストの経験に伴い、潜在的に減少可能だろう (Bedard et al., 2006)。これは、実際の運用経験が限定的なことから、いくつかの限定的なデータから外挿により求めただけである。現在の投資コストは、単一の試作品から導き出されたもので、より成熟した将来の商用装置に比べ高い可能性が高い。波力発電及び潮流発電の一部の運転保守データは、表 6.3 に示されているが、このデータは限定的な運用データ量から外挿されたことは、確認するべきである。

将来のコスト分析を行ういくつかの研究の 1 つが、アメリカの Electric Power Research Institute (EPRI) により開始された。商用規模のプロジェクトの理論的コストを検証するため、カリフォルニア沖沿岸で Pelamis 波力発電装置を利用する (Previsic, 2004)。プラントの全体規模は 213 x 500kW の装置 (106.5 MW) と想定された。均等化発電原価は、20 年の設計寿命及び 95% の使用可能性に基づき計算された。エネルギー回収の技術的ポテンシャルは、短期の研究開発の改良機会を利用すると想定した。この機会は、今のところ実現されていないが、現在の想定投資コストで達成可能と考えられた。研究では、13.4 US セント (2005 年) /kWh の均等化発電原価が達成可能だろうと結論付けている。これは、投資コスト 2 億 7,900 万 US ドル (2005 年) (2,620US ドル (2005 年) /kW)、割引率 7.5%、設備利用率 38%、及び年間運転保守コスト 1,310 万 US ドル (2005 年) (123US ドル (2005 年) /kW/年) に基づき、10 年後の改造の想定コストを 2,810 万 US ドル (2005 年) (264US ドル (2005 年) /kW) としている。

2006 年、イギリスの Carbon Trust (Callaghan, 2006) は、波力発電装置及び潮流発電装置を対象にした現在のコスト調査の結果を公表した。これは、試作品及び商用前の装置のコストで、投資コストデータの大半がこの結果から引用されている。波力発電装置の投資コストは、7,700~16,100US ドル (2005 年) /kW の範囲で、中央値は 11,875US ドル (2005 年) /kW だった。同様に、潮流発電装置の試作発電機のコストは、8,600~14,300US ドル (2005 年) /kW の範囲で、中央値は 11,400US ドル (2005 年) /kW だった。一部の潮流発電装置のコンセプトでは、さらに多額の投資コストになるだろう。同一の研究では、イギリスの初期の波力発電ファームで生産したエネルギーは、その均等化発電原価が 21~79US セント (2005 年) /kW であり、初期の潮流発電ファームの均等化発電原価は 16~32US セント (2005 年) /kW と推定した。Carbon Trust の研究は、経済規模、研究開発による向上、または学習曲線効果を考慮していない (Callaghan, 2006)。

California RE Transmission Initiative が実施した近年の研究では、潮流発電 (カリフォルニアで展開) のコストは 1~3US セント (2005 年) /kWh である (Klein, 2009)。

波力発電装置の理論的分析は、短期的な波力発電プロジェクトは 1980 年代の風力発電と比較可能な均等化発電原価になるだろうということを実証するため、妥当なベンチマークを提供すると思われる。Callaghan (2006) 及び Klein (2009) が公表した均等化発電原価がどのように達成され得るか、公表されたコスト範囲を下回るか、または

³⁰ 学習の理論と経験則の概要は、たとえば 10.5 節で示される。複数の技術の章でも、学習効果の技術特有の評価に関する情報を示している。

パフォーマンスのパラメータがこの公表範囲を大幅に上回ったかしない限り、若干不透明である。海洋エネルギーの均等化発電原価推定にあたり、最大の不確実性は設備利用率及び運転保守コストの長期的推定にあり、決定には運用データが必要になる。経済的に競合可能な均等化発電コストの推定値を達成するには、波力発電装置の場合、成熟した技術に見合った設備利用率 40%前後、優れた場合は（95%前後）、及び高い効率性を想定しなければならない（Previsic, 2004; Buckley, 2005）。

学習曲線は、均等化発電原価を引き下げる重要なコスト駆動要因になり得るが、推定に使用する産業経験が乏しいことから、不確実性の度合いは高い。導入が複数になれば、生産効率の自然な伸び、同化経験、規模の経済性、及び研究開発のイノベーションによる学習から、コストは削減可能だろう。1980 年代前半から 2008 年にかけての 30 年のスパンにおける風力発電プラントの学習率は、研究開発の要因を含まない場合、11%と推定されている（Wiser and Bolinger, 2009）。一次推定値として、海洋エネルギー産業（潮汐発電除く、既に比較的成熟しているため）は、同じ 11%の学習曲線を追従可能だろう³¹。Callaghan（2006）による投資コストの中央値に始まり、こうした学習曲線は、2010 年の容量レベルからほぼ 9 回の容量増倍に対応し、ほぼ 3 回の投資コスト削減を暗示している（図 6.13）。

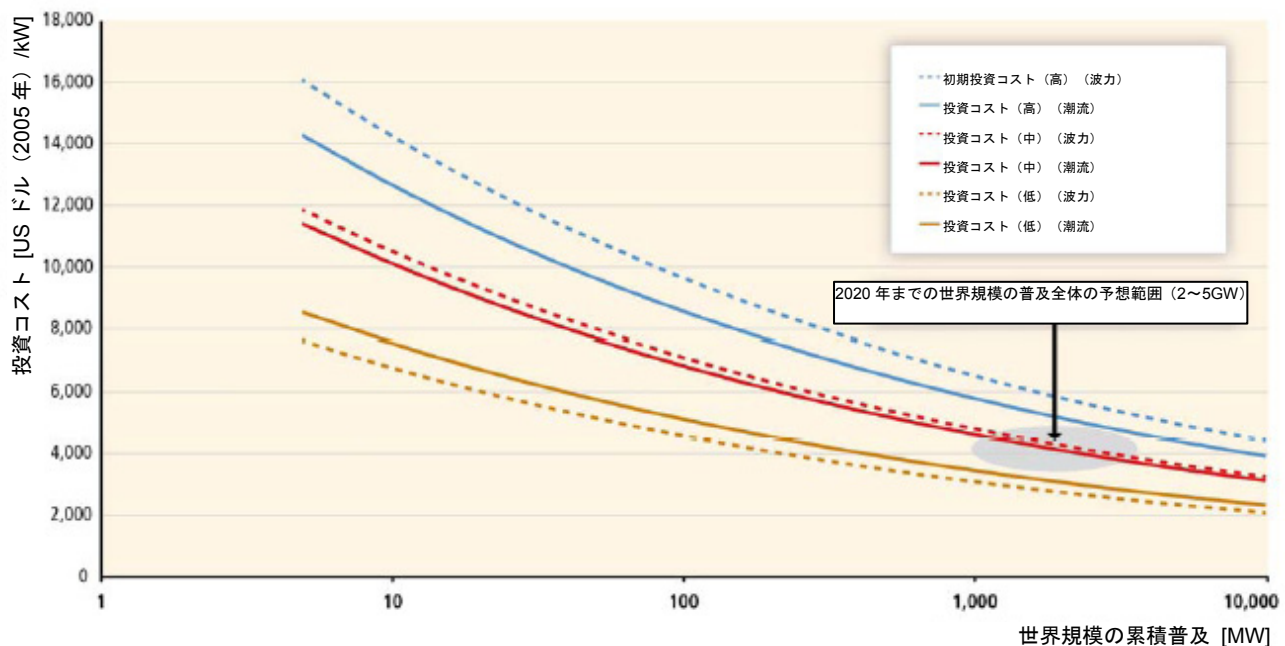


図 6.13: 波力発電装置及び潮流発電装置の投資コストの潜在的減少。現在のコスト推定（Callaghan, 2006）及び、累積設備容量が倍増するごとに 11%のコスト削減（Wiser and Bolinger, 2009）に基づく。

注: 初回の導入は、双方の代表型で 5MW を想定している。

このシナリオに基づく波力発電技術及び潮流発電技術の投資コストは、2020 年までに世界規模で 2~5GW 普及すると想定した場合、2,600US ドル（2005 年）/kW から 5,400US ドル（2005 年）/kW（平均: 4,000US ドル（2005 年）/kW）に低下する。この普及レベルは、イギリス、アメリカ、カナダ、及び他の海洋技術諸国における持続的な政策に大きく依存することを記す。

図 6.14 は、2020 年における波力発電及び潮流発電の均等化発電原価の予想を示す。これは、設備利用率及び投資コストの関数として表示され、Annex II に概要を示した方法を、均等化発電原価の値の計算で以前に使用したその他の推定とともに使用する。

³¹ 11%の学習率は、風力発電市場の分析に基づき、海洋エネルギーの将来のコストポテンシャルを予備的に予想する際に使用されるだけである。実際の学習率は今も不明である。コスト削減の駆動要因としての学習に関する理論的経験論的文献は、10.5.2 節に示されている。

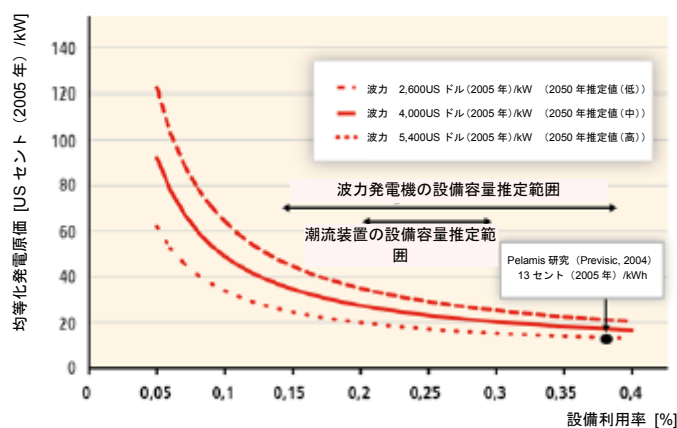


図 6.14: 2020 年の波力及び海流発電の投資コスト推定値に関し、設備利用率が均等化発電原価に与える影響。EPRI の構想設計を示すデータポイントは、Pelamis の 500kW の機器を 38%の設備利用率で使用し、Previsic (2004) に基づく。

図 6.14 は、設備利用率が均等化発電原価に与える可能性のある影響を示すが、図示の目的のみである。これらの結果は単一の参照 (Callaghan, 2006) だけで、普及率 2～5GW を想定した 2020 年の可能性のあるコストの推定に適用された以前の学習曲線分析に基づく。これらの 3 つの曲線は、高 (5,600US ドル (2005 年) /kW)、中 (4,000US ドル (2005 年) /kW)、低 (2,600US ドル (2005 年) /kW) の 2020 年の推定投資コスト曲線に対応する。

図 6.14 はさらに、波力発電装置及び海流発電装置が、上記の投資コスト水準 (2,600～5,600US ドル (2005 年) /kW) と設備利用率 30～40%の範囲で運用されるように開発可能であれば、その他の再生可能技術の一部と比較可能な率で潜在的に発電可能であることを示している。こうした設備利用率を達成するには、装置が信頼出来るものでなければならない。質の高い波資源または潮流資源のある場所に設置されなければならない。必要な投資コストレベルの実現にはコスト削減が必要になるだろうし、この削減は製造の経済性、新規の技術設計、他の産業からの知識と経験の移転、運用と経験による設計の修正から潜在的に可能になるだろう。

海流発電技術の場合、明確なコスト研究で公知に利用可能なものはまったくないが、外洋海流発電技術のコスト及び経済性は、潮流発電技術と類似の属性があるだろう。

6.7.3 潮汐発電

潮汐発電は、本報告書で検討した海洋エネルギー技術のなかで最も成熟した技術と考えられる。これは継続的なプラント運用の例が多数あるが、利用出来るコストデータがほとんど無い。潮汐発電プロジェクトは通常、非常に多額の資本投資が必要であり、建設期間も比較的長い。海洋環境における土木建設は、厳しい海洋条件から保護する追加インフラも伴い、複雑で割高になる。その結果、潮汐発電技術関連の投資コストは、他のエネルギー源と比べて高い。革新的な技術は、沿岸での大規模な土木要素の建設や現場への浮遊設置などがあるが、リスク及びコストの大幅な削減が可能になると予測される。現在のところ、潮汐発電プロジェクトの規模は、他の海洋エネルギーに比べ大きい。規模が発電の単位コストを低下させるためである。

潮汐発電のコストは 4,500～5,000US ドル (2005 年) /kW、運転保守コストは約 100US ドル (2005 年) /kW/年と推定された (ETSAP, 2010b)。潮汐発電エネルギープロジェクトの設計寿命は 20 年を超えると予測され、水力発電施設と比較可能である。経済的寿命は 40～100 年超に達する可能性がある。

6.7.4 海洋温度差発電

海洋温度差技術については、長期的で持続的な実地経験がまったくないことから、現在のコスト及び将来の傾向を予測するのは難しい。個別プロジェクトの投資コストが高いため、技術開発もゆるやかである。公表されたコスト推定値は表 6.4 に示されている。これらのコスト推定値は、現在まで文書で立証された事柄に関して、いくつかの洞察を提示するために示されている。これらは、海洋温度差技術はかなり成熟したとは唆していない。提示された数値は、US ドル (2005 年) には換算されていないため、様々な年のドルで表示され、様々な技術及び場所を対象にする。また、その多くは、かなり不確かな推定である。

海洋温度差発電で利用可能な最新のコストは Lockheed-Martin 社によるもので、10MW のパイロットプラントの投資コストを 32,500US ドル (2005 年) /kW と推定している。これは、100MW の商用プラントの推定値である 10,000US ドル/kW まで低下している (Cooper et al., 2009)。

近年、新たな材料及びその他の分野の建設技術の進歩で、海洋温度差技術の経済的実現可能性及び技術的実現可能性は改善するだろう。

表 6.4: 海洋温度差発電のパイロットプロジェクト及びコンセプトに関する公表された投資コスト及び均等化発電原価

コストデータの 出典	投資コスト (US ドル /kW)	均等化発電原価 (US セント/kWh)	注
Vega (2002)	12,300	22	100MW 密閉クローズドサイクル、400km 沖
SERI (1989)	12,200	-	オアフのカヘ・ポイントで計画された 40MW のプラント
Cohen (2009)	8,000-10,000	16-20	100MW の初期の商用プラント
Francis (1985)	5,000-11,000	-	
Lennard (2004)	9,400	18 [11]	10MW クローズドサイクル。括弧内の均等 化発電原価は、飲料水生産にも適用
SERI (1989)	7,200	-	洋上、オープンサイクル
Vega (2002)	6,000	10	100MW クローズドサイクル、100km 沖
Vega (2002)	4,200	7	100MW クローズドサイクル、10km 沖
Plocek et al. (2009)	8,000	15	プエルトリコ沖 75MW の商用浮体式プラント の推定値

注: 表に掲載した均等化発電原価は、公表された文献から引用した。基礎となる推定は常に明白なわけではない。投資コストも均等化発電原価も、US ドル（2005 年）には換算していない。

6.7.5 塩分濃度差発電

塩分濃度差発電技術は未成熟で、現在のコストは利用不可能である。Statkraft は、現在の水力発電の知識、一般的な脱塩（逆電気透析）工学、及び特殊な膜技術に基づき、塩分濃度差発電の将来の均等化発電原価は、他のより成熟した再生可能技術（風力など）と同一範囲に下がるだろうと推定した。しかしながら、競争力のあるコストを達成するには、信頼でき、大規模で低コストの膜の開発に依存する。Statkraft は、投資コストは他の再生可能エネルギー技術よりかなり高くなるが、設備利用率は非常に高く、年間で 8,000 時間の運用になり得ると推定している（Scråmestø. et al., 2009）。

6.8 普及のポテンシャル³²

海洋エネルギーは、長期的な炭素排出量削減のポテンシャルを秘めているが、開発が初期段階であるため 2020 年までに短期的に大きな貢献をする可能性は低い。2009 年には、追加の海洋の設備容量は世界で 10MW 以下であり（Renewable UK, 2010）、累積の設備容量は現在、約 300MW（REN21, 2010）である。

6.8.1 海洋エネルギーを対象とした普及シナリオ

2008 年くらいまで、海洋エネルギーは主要な世界エネルギー・シナリオ・モデル化活動において全く検討されてこなかったため、将来の世界エネルギー供給及び気候変動緩和に対するその潜在的な影響はまだ調査が始まったばかりである。そのため、潜在的な成果が多様になることもあって、発表された海洋エネルギーに関するシナリオ文献の結果は少なく、まだ導入レベルである。

具体的には、海洋エネルギーの普及のシナリオは、ここでは 3 つの主要な出典でしか検討されていない。それは、Energy [R]evolution（以下 E [R]）2010、IEA の World Energy Outlook（以下 WEO）2009、及び Energy Technology Perspectives（以下 ETP）2010 である。E [R] 及び ETP では複数のシナリオが検討されているが、WEO では単一の参照シナリオが情報提供されている。E [R] 参照シナリオは WEO2009 参照に基づいているため、2030 年までの普及レベルは非常に近いことに留意を要する（Teske et al., 2010）。検討されたシナリオの主な特徴は、海洋エネルギーの普及レベルなどがあるが、表 6.5 にまとめられている。

³² エネルギーシステムの多数のモデルシナリオの包括的評価に基づく潜在的な普及の包括的な見方は、第 10 章及び 10.2 と 10.3 節に提示されている。

表 6.5: 海洋エネルギーを含む主要な発表された研究の中長期的シナリオの主な特徴

シナリオ	出典	普及 TWh/年 (PJ/年)				GW	注
		2010	2020	2030	2050	2050	
E [R] (参考)	(Teske et al., 2010)	該当なし	3 (10.8)	11 (36.6)	25 (90)	該当なし	政策変更なし
E [R]	(Teske et al., 2010)	該当なし	53 (191)	128 (461)	678 (2,440)	303	50%の炭素削減を想定
E [R] (高度)	(Teske et al., 2010)	該当なし	119 (428)	420 (1,512)	1,943 (6,994)	748	80%の炭素削減を想定
世界エネルギー展望 2009	(IEA, 2009)	該当なし	3 (10.8)	13 (46.8)	該当なし	該当なし	E [R]のケースの基礎
ETP BLUE map 2050	(IEA, 2010)	該当なし	該当なし	該当なし	133 (479)	該当なし	電力部門は実質的に脱炭素化される
ETPBLUE map no CCS 2050	(IEA, 2010)	該当なし	該当なし	該当なし	274 (986)	該当なし	BLUE Map Variant: 二酸化炭素回収・貯留が不可能であると判明している。
ETPBLUE map hi NUC 2050	(IEA, 2010)	該当なし	該当なし	該当なし	99 (356)	該当なし	BLUE Map Variant: 原子力の割合が 2,000GW まで増加する。
ETP BLUE map hi REN 2050	(IEA, 2010)	該当なし	該当なし	該当なし	552 (1,987)	該当なし	BLUE Map Variant: 再生可能エネルギーの割合が 75%に増加する。
ETP BLUE map 3%	(IEA, 2010)	該当なし	該当なし	該当なし	401 (1444)	該当なし	BLUE Map Variant: 発電プロジェクトの割引率を 3%に設定

これらの各シナリオにおける海洋エネルギーの扱いは、分析が非常に予備的な状態である点を反映している。大半の場合、入力は完全に確認されておらず、複数の海洋エネルギー資源技術の多様な特性を表していないだろう。大半のシナリオでは、すべての海洋エネルギー技術はひとくくりとして示されている。この方法は便宜上のものであり、関連する非集計のデータ（世界規模の詳細な資源評価など）が限定的である（より詳細な議論については 10.2.4 節参照）。海洋エネルギー技術の多くは今も初期の開発段階であり、現在と将来の投資コスト、運転保守コスト、及び設備利用率、または技術的ポテンシャルさえも完全に推定が確立されていない。将来のシナリオ研究において類似型の技術を集めないことにより、海洋エネルギーの可能性のある役割にさらに洞察が必要とされるだろうが、これにより、海洋エネルギー技術ではまだ存在しないデータの忠実性のレベルが必要になる。

既存のシナリオは、制限があるにもかかわらず、より高度な分析構築のための、海洋エネルギー技術普及の可能性の一次解析と言える。具体的には、シナリオは、IEA WEO 2009 の保守的なベースラインの例から最も意欲的な Advanced E[R] シナリオまで、海洋エネルギーの展開の可能性を幅広く示す。Advanced E[R] は 2050 年までに 80% の二酸化炭素排出削減を想定している。

6.8.2 短期的な予想

短期的な海洋エネルギー普及の大半は、海洋エネルギー推進を目的とした政府支援の研究プログラム及び政策インセンティブが実施されている国々で、政策により牽引される可能性が高い (IEA, 2009)。これらの場合、海洋エネルギー普及の短期的な予想は、海洋エネルギーに対して設定された国独自の普及目標に関連するだろう。一部の国では事実、達成する拘束力のない普及目標及び時間枠が提案され、そのなかに海洋エネルギーの容量が盛り込まれている。イギリス政府は、2020 年までの目標を 2GW としている (Mueller and Jeffrey, 2008)。カナダ、アメリカ、ポルトガル、及びアイルランドは、同様の時間枠で普及目標を設定するため協力している。しかしながら、かなりの海洋資源を持つ国々の大半は、その資源ポテンシャルをまだ定量化しておらず、国の普及目標も設定していない。また、海洋エネルギーの目標を設定した国々でも、あまり目標を義務化していない。

短期的な普及の駆動要因にもかかわらず、本章で検討され表 6.5 にまとめたシナリオ間では一般に、海洋エネルギーの短期的な予想として、短期的には炭素緩和に大幅な貢献はしないとしている。表 6.5 のシナリオによると、海洋エネルギーの短期的（2020 年）普及は 3～119TWh/年（10.8～428PJ/年）であり、Advanced E[R] シナリオが最も

高い見込みを示す。このような幅広い範囲は、シナリオの想定に高い不確実性があること、分析の異なる枠組みを反映している。ここでの参照例は、新規政策の発効のない通常のビジネスの例を目的としており、意欲的な Advanced E[R] シナリオは炭素排出の劇的な削減を模索している。

6.8.3 二酸化炭素抑制からみた長期的普及

海洋エネルギー供給が気候変動緩和に果たす貢献のポテンシャルは、長期的にはより大幅なレベルに上昇すると予測される。2050 年までに、表 6.5 に示した普及シナリオの範囲は、Reference E[R] のわずか 25TWh/年（90PJ/年）から Advanced E[R] の 1,943TWh/年（6,994PJ/年）である。海洋エネルギー技術は現在、開発の初期段階であることから、現在の普及は非常に限定的である。大幅な普及は 2030 年以降まで予想されていないが、商用導入は 2050 年のモデリング展望を超えて継続すると思われる。

長期的にこれらの高い普及レベルを達成するには、海洋エネルギーの成長に対して様々な課題が浮上する可能性があり、これらは議論の価値がある。

資源ポテンシャル: 海洋エネルギーの資源ポテンシャル評価は、予備的段階である。それでもなお、上記に示した長期的（2050 年）海洋エネルギー供給の最も高い推定値（7EJ/年）でさえ、海洋エネルギー資源の理論的、技術的ポテンシャル内に収斂することから、少なくとも世界規模で、技術ポテンシャルは海洋エネルギー普及の限定的要因にはならない可能性が高いことが分かる。以前に示したように、海洋温度差発電は、使用可能な海洋エネルギーの選択肢のなかで最も高い技術ポテンシャルを持つだろうが、海洋温度差発電を除いた場合であっても、海洋エネルギーの技術ポテンシャルは 7EJ/年を超えることがわかっている。さらに、利用可能な文献は限られているが、気候変動が海洋エネルギーの技術的ポテンシャルに与える影響は中程度と予測される。それにもかかわらず、資源供給には、一定の地域的な限定の可能性はある。たとえば、波エネルギーの場所は世界規模ですべて沿岸付近に分布しているが、季節的な変動も低く、十分な波エネルギーがあり、中緯度（30～60°）の場所の利用可能性はある。そこは需要の中心地と近く、高い洞察シナリオまたは競合使用を伴う人口集中地域の一部では障壁になるだろう。同様に、場所の利用可能性が限定的であれば、潮流発電プラント、潮流発電エネルギー、及び一定の地域にまたがる海流発電エネルギーの幅広い普及が妨げられるだろう。海洋温度差発電及び塩分濃度差発電の機会も世界規模で均等に分散していない。

地域の普及: 表 6.5 で検討したよりさらに意欲的レベルでの普及が実行可能かは、海洋エネルギーの資源ポテンシャルのある場所が部分的に海洋エネルギーのサービスを要求する地域と相関しているかに左右される。波力発電技術及び潮流発電技術は、北大西洋及び北太平洋、オーストラレーシアの沿岸諸国で開発中である。これらの国々では、政府支援のプログラムが、初期段階のプロジェクトを推進する積極的な政策インセンティブとともに、研究開発及び普及を支えている。海洋温度差発電は、熱帯の島々及び州の沿岸沖合で開発される可能性が高い。潮流発電、海流発電、及び塩分濃度差発電のプロジェクトは、資源の質が高い特定の地域に限定される可能性が最も高い。これらの場所は、技術の効率性の成熟に伴い、より多数で広範になる可能性が高い。全体的に、技術的ポテンシャルは海洋エネルギー普及にとって一次的な世界規模の障壁にならないと予想されるものの、資源の特性は、将来の地域のコミュニティが地域の資源状況に適した複数の使用可能な海洋技術のなかから選択する必要がある。

サプライチェーンの課題: 波力、潮流、及びその他の一部の海洋エネルギー技術では、コストに有効な十分な規模の洗練された運転保守インフラが必要である。取り付けや取り外しの方法が様々なため、様々な技術で多様な支援船舶が必要になる。一部の海洋エネルギー技術で普及が本格化するまでは、十分なインフラがないことが産業の成長にとって大きな障壁になりかねない。一部の便益は洋上風力発電の開発で実現し、海洋エネルギーの大幅な普及に先立ち（普及用の船舶、係留、及び送電ケーブルの敷設という点で）このインフラの要件に貢献するだろう。

技術及び経済性: すべての海洋エネルギー技術は、潮流発電を除き、構想段階、研究開発中、または商用前の試作品実証段階にある。海洋エネルギー技術の技術的性能は、経験の取得が進み、新たな技術が品質の低い資源にアクセス可能になるにつれ、時の経過とともに着実に向上すると予想される。技術向上により、資本コストの低下、効率性向上、運転保守の必要性低下、及び設備利用率の上昇が可能になるため、より遠距離の場所へのアクセスが実現し、より質の低い資源を利用する方法も改善されてくる。これらの技術向上と同時に、海洋エネルギー技術の均等化発電原価も低下するはずである。技術的進歩による十分な関連コストの削減で幅広い海洋エネルギー普及が可能になるかは、意欲的な長期の普及目標達成における海洋エネルギーの将来の役割を評価するうえで、最も重大な不確実性である。

統合及び送電: 海洋エネルギーを広いエネルギーネットワークに統合するには、様々な資源に起因する幅広い発電特性を認識する必要がある。資源の利用可能性に見られるこれらのパターンからは、洋上送電ネットワークの必要性及び価値を含め、海洋エネルギーを大規模に電力ネットワークに統合する際の示唆（第 8 章参照）、送電容量の要件と活用への示唆も得られる。普及が高いレベルになった際に一部の海洋エネルギー源の変動性を効率よく管理するには、風力発電技術及び太陽光発電技術で検討されている同様の技術的、制度的な解決策が必要になるだろう。

具体的には、容量の予測、システム全体の柔軟性向上、連系の標準、需要の柔軟性、及び大量のエネルギー貯蔵などが挙げられる。他方、その他の海洋エネルギー技術は、ベースロードまたはさらに部分的に送電可能な熱発電機と似たような特性を持つことから、運用の統合に関する懸念はないが、新たな送電インフラは依然として必要だろう。

社会的影響及び環境的影響: 海洋エネルギー技術の社会的影響及び環境的影響は、実際の導入の増加に伴い、評価が行なわれている。リスク分析及び緩和は、環境影響評価を使用し、初期の普及には必要不可欠な要素である。競合使用は、一部の質の高い場所の使用可能性を排除するだろう。また、環境や生態系に対する懸念も、普及場所に影響を与える可能性が高い。魅力的な沿岸コミュニティには均衡したアプローチが必要になると同時に、既存の沿岸の使用及び海洋生態系に対しては、公平で責任ある関係を維持しなければならない。海洋エネルギーの一部の形態は環境に対する高い可逆性を有するため、将来の開発には魅力的だろうが、海洋エネルギー普及の初期段階では、社会的懸念及び環境的懸念が最終的に開発をどの程度制約するかは不確かである。

6.8.4 普及に関する結論

海洋エネルギー普及の選択肢を記述したシナリオの初期の発表は、将来のエネルギー供給及び気候変動緩和における海洋エネルギーの貢献の可能性を示すことを目的とした、中長期的シナリオにおける海洋エネルギーの潜在的役割を検討する初めての試みである。限られた既存のシナリオが示すように、海洋エネルギーは、温室効果ガス排出を相殺して長期的な気候変動の緩和を助け、普及予測によると 2050 年までに最大 1,943TWh/年（～7EJ/年）のエネルギー供給を実現するポテンシャルを持っている。他の開発されたシナリオでは、海洋エネルギーから 25TWh/年（0.9EJ/年）の普及しか想定していないものもある。結果にばらつきが大きいのは、気候変動緩和がエネルギー部門の変革をどの程度促すかという不確かさによるものであるが、海洋エネルギーの場合は、様々な海洋エネルギー技術が有効なコストで商業的に利用可能になる時期と、その可能性についての特有の不確かさも原因となっている。気候変動緩和における海洋エネルギーの潜在的な役割をより良く理解するには、継続的な技術の進歩が必要となるだけでなく、シナリオのモデル化過程において、資源ポテンシャル、現在と将来の投資コスト、運用・保守コスト、及び予想される設備利用率の良いデータを用いて、様々な代表的な可能性のある海洋エネルギー技術をさらに織り込む必要がある。世界及び地域規模でのデータの利用可能性が広がることは、シナリオの文献でカバー出来る海洋エネルギーを広げるために重要な要素である（10.2.4 節も参照）。

REFERENCES

- AEA Technology and Poyry Energy Consulting (2006).** *Additional Support for Marine Electricity Generation in Scotland*. Consultants report to Scottish Executive, Volume 1 – Summary Report ED02360. AEA Technology, Glengarnock, Scotland, 43 pp.
- Allender, J., T. Audunson, S.F. Barstow, S. Bjerken, H.E. Krogstad, P. Steinbakke, L. Vartdal, L.E. Borgman, and C. Graham (1989).** The WADIC Project: a comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation. *Ocean Engineering*, **16**(5-6), pp. 505-536.
- Andre, H. (1976).** Operating experience with bulb units at the Rance tidal power plant and other French hydro-power sites. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Power Apparatus and Systems*. **PAS-95**, pp. 1038-1044.
- Aqua-RET (2008).** *Case study – European OWC pilot plant Pico/Azores* Aquatic Renewable Energy Technologies (Aqua-RET) Revision. Available at: www.wisions.net/files/tr_downloads/Aquaret_Pico_OWC.pdf.
- AWATEA (2008).** *Marine Energy Supply Chain: 2008 Directory*. Aotearoa Wave and Tidal Energy Association, Wellington, New Zealand.
- Baker, A.C. (1991).** *Tidal Power*. Peter Peregrinus Ltd. (pub.), London, UK.
- Barber, N.F., and F. Ursell (1948).** The generation and propagation of ocean waves and swell. I. Wave periods and velocities. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **240**(824), pp. 527.
- Battin, J. (2004).** When good animals love bad habitats. *Conservation Biology*, **18**(6), pp. 1482-1491.
- Bedard, R., M. Previsic, and A. Casavant (2006).** *North America Tidal In-Stream Energy Conversion*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- Bernitsas, M.M., K. Raghavan, Y. Ben-Simon, and E.M.H. Garcia (2006).** VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy from Fluid Flow. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE '06)*, Paper #92645, 4-9 June 2006, Hamburg, Germany. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- Binnie Black & Veatch (2001).** *The commercial prospect of tidal stream power*. ETSU - T/06/00209/REP, UK Department of Trade and Industry New & Renewable Energy Programme in association with IT Power Ltd., London, UK.
- Boehlert, G.W., and A.B. Gill (2010).** Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: A current synthesis. *Oceanography*, **23**: 68-81.
- Boehlert, G.W., G.R. McMurray, and C.E. Tortorici (2007).** *Ecological Effects of Wave Energy Development in the Pacific Northwest. A Scientific Workshop*. Technical Memorandum NMFS-F/SPO-92, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, DC, USA.
- Bonnot-Courtois, C. (1993).** Comparative study of dredging and flushing effects on sedimentation in the upper part of the Rance estuary. *La Houille Blanche*, **8**, pp. 539-550.
- Bosc, J. (1997).** Les groupes bulbes de la Rance après trente ans d'exploitation : Retour d'expérience; The Rance bulb turbines after 30 years' service: feedback of experience. In: *Congrès Colloque du 30e anniversaire de l'Usine Marémotrice de la Rance*, Société Hydrotechnique de France, Paris, France, pp. 18-24.

- Buckley, W.H. (2005).** *Extreme Waves for Ship and Offshore Platform Design: An Overview*. T&R Report, Society of Naval Architecture and Marine Engineering, Jersey City, NJ, USA, pp. 7-30.
- BWEA (2005).** *BWEA Briefing Sheet. Wind Turbine Technology*. British Wind Energy Association, London, UK.
- California Energy Commission (2010).** *California Renewable Energy Transmission Initiative*. California Energy Commission, Sacramento, CA, USA.
- Callaghan, J. (2006).** *Future Marine Energy - Results of the Marine Energy Challenge: Cost Competitiveness and Growth of Wave and Tidal Stream Energy*. CTC601, Carbon Trust, London, UK.
- Carbon Trust (2004).** *UK, Europe and Global Tidal Stream Energy Resource Assessment*. 107799/D/2100/05/1, Carbon Trust Marine Energy Challenge, Carbon Trust, London, UK.
- Charlier, R.H. (2003).** Sustainable co-generation from the tides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(3), pp. 187-213.
- Charlier, R.H., and J.R. Justus (1993).** *Ocean Energies: Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power Sources*. Elsevier Oceanography Series, Amsterdam, The Netherlands.
- Chassignet, E.P., H.E. Hurlburt, O.M. Smedstad, G.R. Halliwell, P.J. Hogan, A.J. Wallcraft, R. Baraille, and R. Bleck (2007).** The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 65(1-4), pp. 60-83.
- Cohen, R. (2009).** An overview of ocean thermal energy technology, potential market applications, and technical challenges. In: *Proceedings 2009 Offshore Technology Conference*, Houston, TX, USA, 4-7 May 2009.
- CEC (1996).** *Wave Energy Project Results: The Exploitation of Tidal Marine Currents*. - DGXII - Report EUR16683EN, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- CEC (1998).** *Promotion of New Energy Sources in the Zhejiang Province, China, Final Report*. - DGXVII - Program SYNERGY Contract N° 4.1041/D/97-09, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- Cooper, D.J., L.J. Meyer, and R.J. Varley (2009).** *OTEC Commercialization Challenges*. In: *Proceedings 2009 Offshore Technology Conference*, Houston, TX, USA, 4-7 May 2009.
- Cornett, A.M. (2006).** *Inventory of Canada's Marine Renewable Energy Resources*. Canadian Hydraulics Centre, Ottawa, Ontario, Canada.
- Cornett, A.M. (2008).** A global wave energy resource assessment. In: *Proceedings of the Eighteenth (2008) International Society of Offshore and Polar Engineers*, Vancouver, BC, Canada, 6-11 July 2008, pp. 318-326. Available at: www.isopec.org/publications/proceedings/ISOPE/ISOPE%202008/papers/I08TPC-579Corn.pdf.
- De Laleu, V. (2009).** La Rance Tidal Power Plant. 40-year operation feedback – Lessons learnt. In: *British Hydropower Association Annual Conference*, Liverpool, UK, 14-15 October 2009.
- Denniss, T. (2005).** *Energetech Wave Energy System*. Doc No. 05-0145 O'ahu Power Plant LOL T-12, Hawaii Public Utilities Commission, Honolulu, HI, USA.
- Ecofys (2007).** *Energie uit zout en zoet water met osmose: Een visualisatie bij de Afsluitdijk*. Ecofys Netherlands B.V., Utrecht, The Netherlands.
- Engineering Business (2003).** *Stingray Tidal Stream Energy Device – Phase 2*. Report prepared for the DTI New and Renewable Energy Programme T/06/00218/00/REP; URN 03/1433. The Crown Publishing Group, New York, NY, USA.

- EOEA (2010).** *Oceans of Energy: European Ocean Energy Roadmap 2010-2050*. European Ocean Energy Association, Brussels, Belgium.
- ESF MB (2010).** *Marine Renewable Energy*. Document 2, European Science Foundation Marine Board Vision, Ostend, Belgium.
- Estefen, S.F., X. Castello, M.I. Lourenço, and R.M. Rossetto (2010).** Design analysis applied to a Hyperbaric Wave Energy Converter. In: *Proceedings 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Rio de Janeiro, Brazil, 19-24 September 2010.
- ETSAP (2010a).** *Marine Energy Technology Brief E13 - May, 2010*. Energy Technology Systems Analysis Program, Paris, France.
- ETSAP (2010b).** *Marine Energy Technology Brief E13 - November, 2010*. Energy Technology Systems Analysis Program, Paris, France.
- Falcão, A. (2009).** The development of wave energy utilization. In: *2008 Annual Report*, A. Brito-Melo and G. Bhuyan (eds.), International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, Lisboa, Portugal, pp. 30-37.
- Falcão, A., C. Travassos, N. Marques, and R. Martino (2000).** The shoreline OWC wave power plant at the Azores. In: *Proceedings of the 4th European Wave Power Conference*, Aalborg, Denmark, December 2000, Paper B1.
- Francis, E.J. (1985).** *Economics of OTEC*. Report prepared for the Solar Energy Research Institute, Golden, CO, USA, 126 pp.
- Friends of the Earth (2004).** *Severn Barrage or Tidal Lagoons? A Comparison*. Briefing, Friends of the Earth Cymru, Cardiff, Wales.
- Garrett, C., and P. Cummins (2005).** The Power potential of tidal currents in channels. *Proceedings of the Royal Society A*, **461**, pp. 2563-2572.
- Garrett, C., and P. Cummins (2008).** Limits to tidal current power. *Renewable Energy*, **33**, pp. 2485-2490.
- Hagerman, G., B. Polagye, R. Bedard, and M. Previsic (2006).** *Methodology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production by Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- Harrison, G.P., and A.R. Wallace (2005).** Sensitivity of wave energy to climate change. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20**(4), pp. 870-877.
- Holmes, B., and K. Nielsen (2010).** *Guidelines for the Development & Testing of Wave Energy Systems*. HMRC Hydraulics Maritime Research Centre report for OES-IA, Report T02-2.1, OES-IA Annex II: Task 2.1, Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Ocean Energy Systems (OES-IA), Cork, Ireland. Available at: [www.iea-oceans.org/_fich/6/Report_02-2.1\(a\).pdf](http://www.iea-oceans.org/_fich/6/Report_02-2.1(a).pdf).
- House of Commons (2001).** *Science and Technology – Seventh Report*. House of Commons Science and Technology Committee Publications, London, UK.
- Huckerby, J.A., and P. McComb (2008).** *Development of Marine Energy in New Zealand*. Published consultants' report for Energy Efficiency and Conservation Authority, Electricity Commission and Greater Wellington Regional Council, Wellington, New Zealand.
- IEA (2009).** *World Energy Outlook 2009*. International Energy Agency, Paris, France, 696 pp.
- IEA (2010).** *Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios and Strategies to 2050*. International Energy Agency, Paris, France, 708 pp.

- Johns, E., W.D. Wilson, and R.L. Molinari (1999).** Direct observations of velocity and transport in the passages between the Intra-Americas Sea and the Atlantic Ocean, 1984-1996. *Journal of Geophysical Research*, **104**(C11), pp. 25805-25820.
- Karsten, R.H., J.M. McMillan, M.J. Lickley, and R.D. Haynes (2008).** Assessment of tidal current energy in the Minas Passage, Bay of Fundy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy*, **222**, pp. 493-507.
- Kerr, D. (2007).** Marine energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences)*, **365**(1853), pp. 971-992.
- Khan, J., and G.S. Bhuyan (2009).** *Ocean Energy: Global Technology Development Status*. Report prepared by Powertech Labs for the IEA-OES, Document T0104, Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Ocean Energy Systems (OES-IA), Lisboa, Portugal. Available at: www.iea-oceans.org/_fich/6/ANNEX_1_Doc_T0104.pdf.
- Khan, J., A. Moshref, and G. Bhuyan (2009).** *A Generic Outline for Dynamic Modeling of Ocean Wave and Tidal Current Energy Conversion Systems*. Institute for Electrical and Electronic Engineering, Piscataway, NJ, USA, 6 pp.
- Klein, J. (2009).** *Comparative Costs of California Central Station Electricity Generation Technologies*. CEC-200-2009-017-SD, California Energy Commission. Sacramento, CA, USA.
- Kobayashi, H., S. Jitsuhara, and H. Uehara (2004).** The present status and features of OTEC and recent aspects of thermal energy conversion technologies. In: *24th Meeting of the UJNR Marine Facilities Panel*, Honolulu, HI, USA, 4-12 November 2001. Available at: www.nmri.go.jp/main/cooperation/ujnr/24ujnr_paper_jpn/Kobayashi.pdf.
- Krewitt, W., K. Nienhaus, C. Kleßmann, C. Capone, E. Stricker, W. Graus, M. Hoogwijk, N. Supersberger, U. von Winterfeld, and S. Samadi (2009).** *Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply*. Climate Change 18/2009, ISSN 1862-4359, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Germany, 336 pp.
- Krishna, I. (2009).** *A SOPAC Desktop Study of Ocean-Based Renewable Energy Technologies*. SOPAC Miscellaneous Report 701, Secretariat of the Applied Geoscience Commission, Suva, Fiji Islands, 94 pp. Available at: dev.sopac.org.fj/VirLib/MR0701.pdf.
- Lang, F. (2008).** The Rance Tidal Power Plant: review of 40-years operation, environmental effects. In: *2nd International Conference on Ocean Energy*, Brest, France, 15-17 October 2008.
- Leaman, K.D., R.L. Molinari, and P.S. Vertes (1987).** Structure and variability of the Florida Current at 27°N. *Journal of Physical Oceanography*, **17**(5), pp. 565-583.
- Lennard, D.E. (ed.) (2004).** Ocean Thermal Energy Conversion. In: *2004 Survey of Energy Resources*. World Energy Council, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 419-426.
- Li, Y., and H.K. Florig (2006).** *Modeling the Operation and Maintenance Costs of a Large Scale Tidal Current Turbine Farm*. Institute for Electrical and Electronic Engineering, Piscataway, NJ, USA, 6 pp.
- Lighthill, J. (1978).** *Waves in Fluids*. Cambridge University Press.
- Liu, Z., H. Shi, and B.-S. Hyan (2009).** Practical design and investigation of the breakwater facility in China. In: *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*, Uppsala, Sweden, 7-10 September 2009, pp. 304-308. **Loeb, S., and R.S. Norman (1975).** Osmotic power plants. *Science*, **189**(4203), pp. 654-655.
- Mackay, D.J.C. (2008).** *Sustainable Energy – Without the Hot Air*. UIT Cambridge Ltd., Cambridge, UK.

- MEG (2009).** *Marine Energy Road Map*. Marine Energy Group, Forum for Renewable Energy Development in Scotland (FREDS), Edinburgh, Scotland. Available at: www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/281865/0085187.pdf.
- Marti, J.A. (2008).** OTEC: Environmental and socio-economic aspects. Presentation at the *Convention of the College of Professional Engineers and Surveyors of Puerto Rico*, Fajardo, Puerto Rico, 7-8 August 2008. Available at: www.offinf.com/EnviroSocialCIAPR.pdf.
- MCCIP (2008).** *Marine Climate Change Impacts Annual Report Card 2007–2008*. Summary Report, Marine Climate Change Impacts Partnership (MCCIP), Lowestoft, UK.
- Miller, A.K. (2010).** Cold Water Pipe. In: *Technical Readiness of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*. Coastal Response Research Center, University of New Hampshire, Durham, NH, USA. Available at: coastalmanagement.noaa.gov/otec/docs/otectech1109.pdf.
- MMS (2006).** *Technology White Paper on Ocean Current Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf*. Minerals Management Service Renewable Energy and Alternate Use Program, U.S. Department of the Interior, Washington, DC, USA. Available at: ocsenergy.anl.gov/documents/docs/OCS_EIS_WhitePaper_Current.pdf.
- Mørk, G., S. Barstow, M.T. Pontes, and A. Kabuth (2010).** Assessing the global wave energy potential. In: *Proceedings of OMAE2010 (ASME), 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Shanghai, China, 6-11 June 2010.
- Mueller, M., and H. Jeffrey (2008).** *UKERC Marine (Wave and Tidal Current) Renewable Energy Technology Roadmap: Summary Report*. UK Energy Research Centre, University of Edinburgh, Scotland.
- NASA (2006).** *TOPEX/Poseidon: Revealing Hidden Tidal Energy*. NASA Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio, Greenbelt, Maryland. Available at: svs.gsfc.nasa.gov/stories/topex/.
- Nicholls-Lee, R.F., S.R. Turnock, and S.W. Boyd (2008).** Performance prediction of a free stream tidal turbine with composite bend-twist coupled blades. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Ocean Energy*, Brest, France, 15-17 October 2008.
- Nihous, G.C. (2007).** A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources. *Journal of Energy Resources Technology*, **129**(March, 2007), pp. 10-17.
- Nihous, G.C. (2009).** Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) and derivative technologies: Status of development and prospects. In: *2008 Annual Report*. A. Brito-Melo and G. Bhuyan (eds.). International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, Lisboa, Portugal, pp. 47-51.
- Nihous, G.C. (2010).** Mapping available Ocean Thermal Energy Conversion resources around the main Hawaiian Islands with state-of-the-art tools. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **2**, 043104.
- Nihous, G.C., and L.A. Vega (1993).** Design of a 100 MW OTEC-hydrogen plantship. *Marine Structures*, **6**(2-3), pp. 207-221.
- Niiler, P.P., and W.S. Richardson (1973).** Seasonal variability of the Florida Current. *Journal of Marine Research*, **31**, pp. 144-167.
- Paik, D.H. (2008).** Progress of the Sihwa tidal Power Project in South Korea. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Ocean Energy*, Brest, France, 15-17 October 2008.
- Panchal, C.B. (2008).** *OTEC Power Systems Developments*. Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA (internal publication).

- Pelc, R., and R.M. Fujita (2002).** Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, **26**(6), pp. 471-479.
- Peyrard, C., C. Buvat, F. Lafon, and C. Abonnel (2006).** Investigations of the wake effects in marine current farms through numerical modelling with the telemac system. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Ocean Energy*, Bremerhaven, Germany, 23-24 October 2006.
- Plocek, T.J., M. Laboy, and J.A. Marti (2009).** Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): Technical viability, cost projections and development strategies. In: *Proceedings of the 2009 Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, 4-7 May 2009, OTC 19979.
- Pontes, M.T., and M. Bruck (2008).** Using remote sensed data for wave energy resource assessment. In: *Proceedings OMAE2008 (ASME), 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008)*, Estoril, Portugal, 15-20 Jun 2008.
- Pontes, M.T., and A. Candelária (2009).** *Wave Data Catalogue for Resource Assessment of IEA-OES Member Countries*. Report from INETI for the IEA-OES, Document T0103, Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Ocean Energy Systems (OES-IA), Lisboa, Portugal. Available at: [www.iea-oceans.org/_fich/6/Wave_Data_Catalogue-_9_April__2009_\(1\).pdf](http://www.iea-oceans.org/_fich/6/Wave_Data_Catalogue-_9_April__2009_(1).pdf).
- Previsic, M. (2004).** *System Level Design, Performance, and Costs of California Pelamis Wave Power Plant*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- Pugh, D.T. (1987).** *Tides, Surges and Mean-Sea Level: A Handbook for Engineers and Scientists*. Wiley, Chichester, UK.
- Ravindran, M., and A. Raju (2002).** The Indian 1 MW demonstration OTEC plant and the development activities. In: *OCEANS '02 MTS/IEEE*, Biloxi, Mississippi, 29-31 October 2002, **3**, pp. 1622-1628.
- Ravindran, M., V. Jayashankar, P. Jalihal, and A.G. Pathak (1997).** The Indian wave energy program - An overview. *TERI Information Digest on Energy*, **7**(3), pp. 173-188.
- Raye, R. (2001).** *Characterization Study of the Florida Current at 26.11° North Latitude, 79.50° West Longitude for Ocean Current Power Generation*. M.S. Thesis, College of Engineering, Florida Atlantic University, Boca Raton, FL, USA.
- Relini, G., M. Relini, and M. Montanari (2000).** An offshore buoy as a small artificial island and a fish-aggregating device (FAD) in the Mediterranean. *Hydrobiologia*, **440**(1), pp. 65-80.
- REN21 (2010).** *Renewables 2010: Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 80 pp.
- Renewable UK (2010).** *Marine Renewable Energy. State of the Industry Report*. Renewable UK, London, UK.
- Retiere, C., and R. Kirby (2006).** Links between environmental consequences of La Rance and Severn Tidal Power Barrages. Presentation to the *South West Regional Assembly Meeting*, Taunton, UK, 20 Oct 2006. Available at: www.southwest-ra.gov.uk/media/SWRA/Assembly%20Papers/20th%20October%202006/10_LinksBetweenEnvironmentalConsequences2.pdf.
- Rogner, H.-H., F. Barthel, M. Cabrera, A. Faaij, M. Giroux, D. Hall, V. Kagramanian, S. Kononov, T. Lefevre, R. Moreira, R. Nötstaller, P. Odell, and M. Taylor (2000).** Energy resources. In: *World Energy Assessment. Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council, New York, USA, 508 pp.

- Scråmestø, O.S., S.-E. Skilhagen, and W.K. Nielsen (2009).** Power production based on osmotic pressure. In: *Waterpower XVI*, Spokane, WA, USA, 27-30 July 2009.
- SEAI (2010).** *Ocean Energy Roadmap*. Sustainable Energy Authority of Ireland, Dublin, Ireland.
- SERI (1989).** *Ocean Thermal Energy Conversion: An Overview*. SERI/SP-220-3024, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, USA, 36 pp.
- Sharmila, N., P. Jalihal, A.K. Swamy, and M. Ravindran (2004).** Wave powered desalination system. *Energy*, **29**(11), pp. 1659-1672.
- Shaw, L.T. (1997).** Study of tidal power projects in the UK, with the exception of the Severn barrage. *La Houille Blanche*, **52**(3), pp. 57-65.
- Sims, R.E.H., R.N. Schock, A. Adegbulugbe, J. Fenhann, I. Konstantinaviciute, W. Moomaw, H.B. Nimir, B. Schlamadinger, J. Torres-Martínez, C. Turner, Y. Uchiyama, S.J.V. Vuori, N. Wamukonya, and X. Zhang (2007).** Energy supply. In: *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, pp. 251-322.
- Sinden, G.E. (2007).** *Renewable Electricity Generation: Resource Characteristics and Implications of Wind, Wave and Tidal Stream Power in the UK*. Report prepared for the Renewables Advisory Board, UK Department of Energy and Climate Change, London, UK.
- Statkraft (2009).** *Crown Princess of Norway to open world's first osmotic power station*. Press release, 7 Oct 2009, Statkraft, Oslo, Norway. Available at: www.statkraft.com/presscentre/press-releases/2009/crown-princess-mette-marit-to-open-the-worlds-first-osmotic-power-plant.aspx.
- Stewart, H.B. (1974).** Current from the current. *Oceanus*, **18**, pp. 38-41.
- Stommel, H. (1966).** *The Gulf Stream*. University of California Press, Berkeley, CA, USA.
- Stoutenburg, E.D., N. Jenkins, and M.Z. Jacobson (2010).** Power output variations of co-located offshore wind turbines and wave energy converters in California. *Renewable Energy*, **35**(12), pp. 2781-2791.
- Sustainable Development Commission (2007).** *Turning the Tides: Tidal Power in the UK*. Sustainable Development Commission, London, UK.
- Sutherland, G., M. Foreman, and C. Garrett (2008).** Tidal current energy assessment for Johnstone Strait, Vancouver Island. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy*, **221**, pp. 147-157.
- TSB (2010).** *Low-Cost, Low-Risk Tidal Power Technology*. Technology Strategy Board Innovation Results, Case Study 36, Technology Strategy Board, Swindon, UK. Available at: http://www.innovateuk.org/_assets/pdf/casestudies/tsbcase_study_low_cost_low_risk.pdf.
- Teske, S., T. Pregger, S. Simon, T. Naegler, W. Graus, and C. Lins (2010).** Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency*, doi:10.1007/s12053-010-9098-y.
- Thresher, R. (2010).** *First Draft Roadmap: The United States Marine Hydrokinetic Renewable Energy Technology Roadmap*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA. Available at: <http://www.oceanrenewable.com/wp-content/uploads/2010/05/1st-draft-roadmap-rwt-8april10.pdf>.
- Torre-Enciso, Y., I. Ortubia, L.I. Lopez de Aguilera, and J. Marques (2009).** Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. In: *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 7-10 September 2009.

- UK Department of Trade and Industry (2004).** *Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources: Technical report*. UK Department of Trade and Industry, London, UK. Available at: www.renewables-atlas.info/.
- UN (1984).** *A Guide to OTEC Conversion for Developing Countries*. ST/ESA/134, UN Department of International Economic and Social Affairs, New York, NY, USA.
- UNFCCC (2005).** *Sihwa Tidal Power Plant CDM project*. CDM PDD Document, Version 2, Clean Development Mechanism, United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn, Germany.
- US DOE (2010).** *Energy Efficiency and Renewable Energy Marine and Hydrokinetic Database*. Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, Washington, DC, USA. Available at: www.eere.energy.gov/windandhydro/hydrokinetic/default.aspx.
- Usachev, I.N. (2008).** The outlook for world tidal power development. *International Journal on Hydropower and Dams*, **15**(5), pp. 100-105.
- van den Ende, K., and F. Groeman (2007).** *Blue Energy*. Leonardo Energy, KEMA Consulting, Arnhem, The Netherlands. Available at: www.leonardo-energy.org/webfm_send/161.
- Van Walsum, E. (2003).** Barriers to tidal power: Environmental effects. *International Water Power and Dam Construction*, **55**(10), pp. 38-43.
- VanZwieten, J., F.R. Driscoll, A. Leonessa, and G. Deane (2005).** Design of a prototype ocean current turbine—Part I: mathematical modeling and dynamics simulation. *Ocean Engineering*, **33**(11-12), pp. 1485-1521.
- Vega, L.A. (1999).** *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): OTEC and the Environment*. Publisher unspecified. Available at: www.otecnews.org/otec-articles/ocean-thermal-energy-conversion-otec-by-l-a-vega-ph-d/.
- Vega, L.A. (2002).** Ocean Thermal Energy Conversion Primer. *Marine Technology Society Journal*, **6**(4 Winter), pp. 25-35.
- Venezia, W.A., and J. Holt (1995).** Turbine under Gulf Stream: potential energy source. *Sea Technology*, **36**(9), pp. 10-14.
- Wang, C., and W. Lu (2009).** *Analysis Method and Reserves Estimation on Ocean Energy Resources*. Ocean Press, Beijing, China.
- Willemse, R. (2007).** *Case 27: Blue Energy (salinity power) in the Netherlands*. Create Acceptance, Petten, The Netherlands.
- Wiser, R., and M. Bolinger (2009).** *Wind Technologies Market Report*. US Department of Energy, Washington, DC, USA.
- Wiser, R., and M. Bolinger (2010).** *2009 Wind Technologies Market Report*. US Department of Energy, Washington, DC, USA.
- World Energy Council (2000).** *World Energy Assessment*. World Energy Council, London, UK.
- Zhang, L. and K. Sun (2007).** Tidal current energy developments in China, *Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Ocean Energy Systems (OES-IA) Newsletter*, May 2007, p. 2.