

## 海洋資源・エネルギーに関する科学技術の動向

### 要 旨

#### I 洋上風力発電、波力・潮流発電等の海洋エネルギー開発

##### <洋上風力発電>

海外では2005年以降に導入が加速化、近年は成長率約40%で推移。2010年の累積導入量は約3,000MW。欧州風力発電協会の見通しでは、2030年の累積導入量は150,000MWに達する。陸上風力の約2倍の初期コストが必要であるが、洋上は風況が良いため陸上風力とほぼ同水準の発電コストが実現可能と見られている。風車の大型化、浮体式洋上風力の開発、系統連系が課題。

##### <潮流発電、波力発電>

潮流発電は、潮流の運動エネルギーを利用し一般的には水車により回転エネルギーに変換させて発電するシステム。波力発電は、波のエネルギーを利用した発電システム。いずれも商用プラントは稼動しておらず、研究開発・実証研究の段階。IEAは、2020年に1,000MWの世界導入量と試算。基礎技術の確立、高効率化、低コスト化、離島への導入促進が課題。

##### <海洋温度差発電>

海洋温度差発電は、表層の暖水（表層水）と深海の冷水（深層水）との温度差を利用する発電技術。商用プラントは稼動しておらず、研究開発・実証研究の段階。赤道付近の特定の国・地域に導入が進むと想定される。MW級プラントの実証試験、基礎技術・キーテクノロジーの確立、低コスト化が課題。

なお、全ての海洋エネルギーに共通する課題として、環境影響、関連ステークホルダーとの調整がある。

#### II メタンハイドレート・熱水鉱床等の海底資源

##### <メタンハイドレート>

メタンハイドレートは低温高圧となる海底面下や極地の凍土地帯の地層など世界に広く分布。南海トラフ海域を中心に相当量の賦存が見込まれており、国内エネルギー資源として期待されている。回収技術が確立されておらず、可採量や経済性に係る評価は、まだ行えない状況である。

##### <熱水鉱床>

海底熱水鉱床は、沖縄トラフや伊豆・小笠原海域において発見されている。世界的に銅、鉛、亜鉛の金属消費量が増大する中、我が国固有の資源として開発が期待されている。我が国周辺海域の資源量は5,000万tと試算されているが、試算の不確実性が大きく、更なる調査が必要である。

##### <その他海底鉱物資源（マンガン団塊、コバルトリッチクラスト）>

マンガン団塊は直径2~15cmの鉄・マンガン酸化物の塊で、海底面上に分布。コバルトリッチクラストはマンガン酸化物と類似した鉄・マンガン酸化物であるが、海底の岩盤を厚さ数mm~数10cmでアスファルト状に覆うように存在。開発コストが巨大であり、技術動向等を踏まえた検討が予定されている。

#### III 海洋資源・エネルギーの開発のための基盤技術

##### 1 海洋エネルギー開発に関する基盤技術

###### <作業船>

現在は、石油等、海底資源開発に使用されている船舶を転用している事例が多いが、洋上風力市場の拡大に伴い、洋上風車専用船舶のニーズが高まっている。

###### <海底ケーブル>

洋上風力プラントを構成する重要部材の一つ。大規模かつ遠距離に位置するウィンドファームについては、送電損失の少ない高圧直流送電（HVDC）が有利。

##### 2 海底資源開発に関する基盤技術

###### <深海探査技術>

船舶の音波測定装置などを用いた広域探査、AUV（海中ロボット）を用いた高精度調査等、

探査状況に応じた技術が活用されており、センサー及び探査プラットフォームの技術の高度化の検討が行われている。

＜海洋構造物技術＞

海洋油田開発の大水深化に伴い、生産設備や貯油タンクは様々な浮体技術が開発されている。技術は設置形式で大別され、海底に固定されるジャッキ・アップ型や浮体式のTLP（緊張係留式プラットフォーム）等の形式があり、水深や用途に適した構造物技術が利用されている。

## I 洋上風力発電、波力・潮流発電等の海洋エネルギー開発

### 1 海洋エネルギー開発の概説

近年、地球温暖化対策や原油価格の高騰、エネルギーセキュリティ向上の必要性等から、有望な再生可能エネルギーの一つとして、海洋エネルギーに対する関心が高まっている。

表1に、主要な海洋エネルギー利用技術を示す。海洋エネルギーには、風、波、潮流、潮汐、海流、温度差、濃度差等、様々なエネルギー形態があり、それぞれに異なる発電技術が開発されている。

表1 主要な海洋エネルギー利用技術

技術名	利用エネルギー
洋上風力発電	洋上の風エネルギー
波力発電	波エネルギー
潮流発電	潮流エネルギー
潮汐力発電	潮汐に伴う潮位差エネルギー
海流発電	海流エネルギー
海洋温度差発電	表層水と深層水の温度差エネルギー
塩分濃度差発電	河川水・海水間の濃度差エネルギー

(出典) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.94, 311, 365, 476, 489, 須田不二夫「塩分濃度差発電の開発動向・要素技術」木下健監修『海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向』サイエンス&テクノロジー, 2011, p.233.をもとに筆者作成

陸上の適地が減少していることや、洋上は風況が安定していることから、欧州を中心に大規模な洋上風力発電プラントの建設が始まっている<sup>(1)</sup>。また、洋上風力と同様にすでに商用運転がされている技術として、潮汐力発電が挙げられる。フランスにあるランス潮汐力発電所は1967年から発電を開始しており、その他カナダのアンナポリス潮汐力発電所（1984年～）やキスラヤ潮汐力発電所（1968年～）等が代表例として挙げられる。しかしながら、日本においては、実用化の目安となる潮位差5mを得ることが難しく、導入実績はない<sup>(2)</sup>。

実海域における実証試験が行われている技術としては、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電が挙げられる。特に波力発電と潮流発電は、現在欧州を中心に多くの実証プロジェクトが進

(1) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.94.

(2) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.490-491.

行している<sup>(3)</sup>。また、現在は基礎研究段階、小規模な実証試験段階にある技術としては、海流発電、塩分濃度差発電が挙げられる。

本章では、商用化段階あるいは現在実海域における実証試験が進行しており近い将来商用化が期待される段階にあり、かつ日本における導入可能性の大きい、洋上風力発電、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電に着目し、概要を取りまとめる。

## 2 洋上風力発電

### (1) 技術動向・利用動向

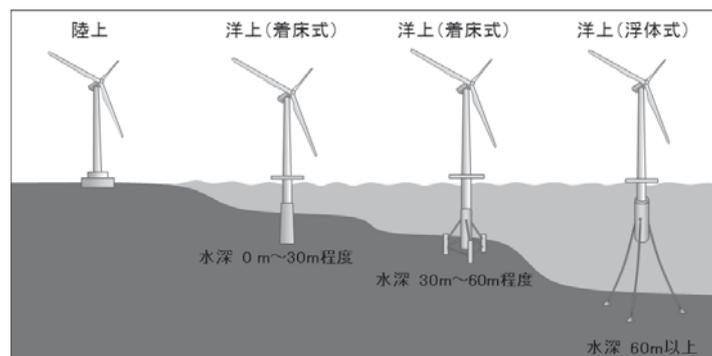
風力発電は、風の運動エネルギーを風力タービンにより回転エネルギーに変え、その回転を直接、または増速機を経た後に発電機に伝送し、電気エネルギーへ変換するシステムである。

風の持つ運動エネルギーは風を受ける面積に比例し、風速の3乗に比例して増大する性質を持っており、理論的には風速が2倍になると風力エネルギーは8倍になる。従って、より風の強い場所に設置すること、大きい翼で効率よく風を受けることが重要となる。

洋上風力発電（以下、洋上風力とする）は、陸上風力発電の応用技術であり、洋上における風エネルギーを利用して発電を行う技術である。陸上における適地が減少していること、陸上と比較して洋上は風況が安定していることから、洋上風力が注目されている。

洋上風力は、海底に直接基礎を設置する「着床式」と、浮体を基礎として係留等で固定する「浮体式」に分類される（図1）。水深60m以浅の海域では着床式風力が採用され、実証試験用を除き、欧州で導入されている洋上風力はほとんどが20m以下の浅水域に設置されている着床式である（図2）。水深が60m程度にまで達すると、浮体式の方が経済的とされている。現在ノルウェーにおいて、世界初の2MW級浮体式洋風力の実証試験が行われている<sup>(4)</sup>。

図1 洋上風力発電の種類



(出典) J. M. Jonkman, "Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine," Technical Report NREL, TP-500-41958 (November 2007), p.3. を基に筆者作成

(3) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.323-335, 376-382, 479-482. および木下健監修『海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向』サイエンス&テクノロジー, 2011年3月29日, pp.115, 243.

(4) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.89-95, 118.

図2 洋上ウィンドファームの例（ドイツ、着床式）



（出典）EWE, e.on Vattenfall “Best of alpha ventus”  
 <<http://www.alpha-ventus.de/index.php?id=118>>,  
 [last accessed: 2013/2/8]

洋上ウィンドファームは、風力発電機、運転監視施設、陸上変電所、送電ケーブル、海底送電ケーブル、港湾設備、洋上変電所等により構成される。洋上ウィンドファームの建設や運転・保守にあたっては、作業船の出航・停泊や関連設備を運送・保管する港湾設備が必要となる。また、海底送電ケーブルコストの削減等を目的として、洋上変電所が建設される場合もある<sup>(5)</sup>。

図3に世界における洋上風力発電累積設備容量を示す。現在導入されている洋上風力のほとんどが欧州に立地している。世界初の洋上風力は、1991年にデンマークの沖合2.5kmの海域に設置された。その後20年を経て、2010年末には45か所の発電所において、設備容量にして2,946MW（294.6万kW）の洋上風力が導入され、発電電力量としては10.6TWh（1,060,000万kW）が欧州各国に供給されている。

2000年初頭は、風力発電市場全体に占める洋上風力の割合は小さく、2001年の単年度導入量は50.5MW（5万kW）で、欧州全体の風力発電単年度導入量の約1%に過ぎなかったが、その後順調に市場は拡大しており、2010年の単年度導入量は883MW（88万kW）で、欧州全体の風力発電単年度導入量の約9.5%に達している<sup>(6)</sup>。

また、現在洋上風力の大半をデンマークのVestas社、ドイツのSiemens社の2社が供給しているが、その他欧米メーカーに加え、中国や韓国等の新興メーカーも洋上風力市場参入に向けた技術開発を行っており、市場競争は激しくなることが予想される<sup>(7)</sup>。

## (2) 将来予測

図4に、2020年までの欧州における洋上風力累積設備容量の将来見通しを示す。

欧州においては、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（2009年）<sup>(8)</sup>により、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%にする目標が掲げられており、加盟各国別に具体的な導入目標が設定されている。加盟各国には、同目標達成に向けたアクションプラン（National Renewable Energy Action Plans：NREAPs）の作成が義務づけられており、本アクションプランに設定された各国の洋上風力の導入目標を

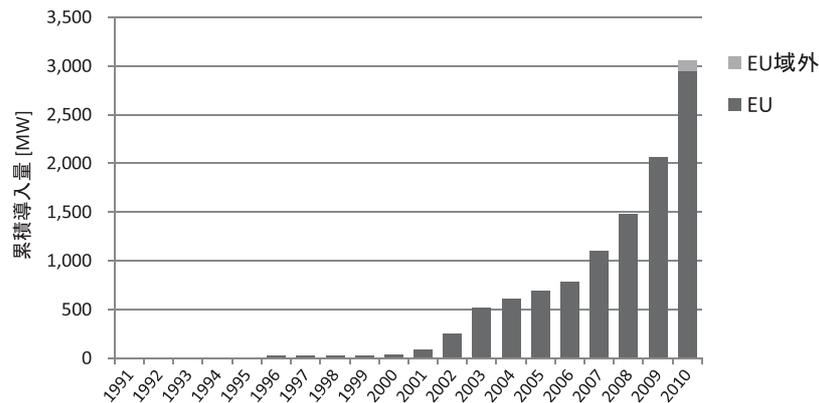
(5) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, pp.35-41<[http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/reports/23420\\_Offshore\\_report\\_web.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/23420_Offshore_report_web.pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

(6) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.11.

(7) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, pp.46-50.

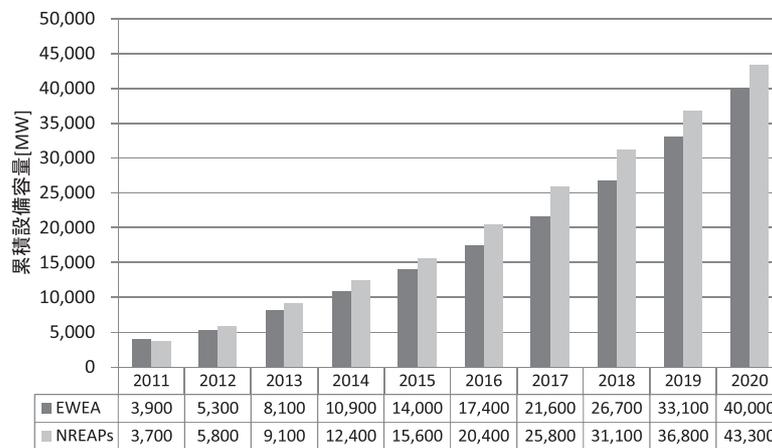
(8) Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC

図3 洋上風力発電累積導入量



(出典) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.11.を基に筆者作成

図4 欧州における洋上風力導入量の将来見通し



EWEA：欧州風力発電協会による予測値

NREAPs：National Renewable Energy Action Plansを元にした予測値

(出典) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.17.を基に筆者作成

積み上げると、2020年時点で43,300MW（4,330万kW）に達する見込みとなっている。

欧州風力エネルギー協会（EWEA：European Wind Energy Association）は、2020年までに欧州全体の累積設備容量は約40,000MW（約4,000万kW）に達するとの見通しを示している。また、2020年以降も欧州市場における導入量は堅調に拡大し、2030年の累積設備容量は150,000MW（15,000万kW）に達すると見られている<sup>(9)</sup>。

### (3) 賦存量・導入ポテンシャル

風力エネルギーは風速の3乗に比例して増大するため、経済性の向上には風況の良い場所の選定が必要である。洋上は陸上よりも一般に風況が良く、導入可能面積も広いことから、大きな導入ポテンシャルを有している。北半球冬期は、特に米国東海岸や連合王国・ノルウェー沖の北海、日本沖等の風況が良い。また、豪州沿岸、南アフリカ、アルゼンチン南部等は1年を

(9) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, pp.17, 26.

通して風況に恵まれている<sup>(10)</sup>。

日本における風力発電の導入ポテンシャルおよび導入可能量<sup>(11)</sup>については、経済産業省及び環境省が詳細な試算を行っている(表2)。洋上風力の導入ポテンシャル(既設+新增設)について、経産省は150,000MW(15,000万kW)、環境省は160,000MW(16,000万kW)と試算している<sup>(12)</sup>。電力供給エリア別の導入ポテンシャル分布状況を見ると、九州エリアが最も大きく全体の29%を占めており、北海道エリアが26%、東北エリア14%でそれに続いている(図5)。

表2 導入ポテンシャル及び導入可能量試算例(洋上風力)

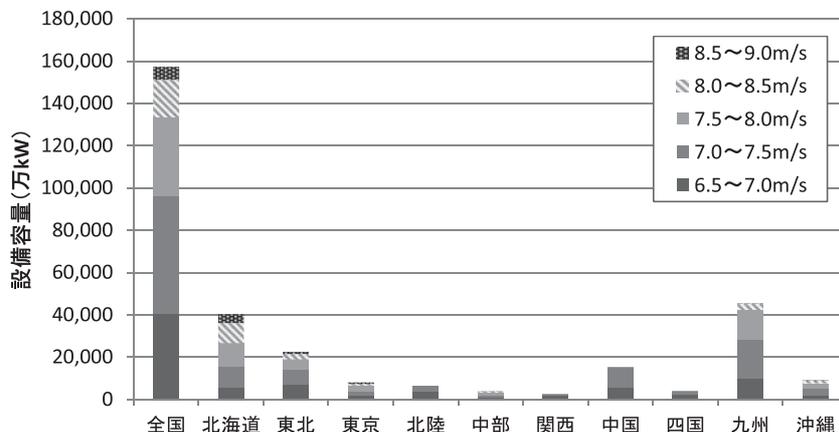
		経済産業省		環境省
		開発不可能地 <sup>*1</sup> を除く	漁業権が設定されていない区域も開発不可とした場合	開発不可能地 <sup>*1</sup> を除く
導入ポテンシャル(既設+新增設)		15,000万kW (4兆4000億kWh)	4,000万kW (1兆2,000億kWh)	16,000万kW (4兆3,000億kWh)
導入可能量 <sup>*2</sup>	FITシナリオ 20円×20年	6,600万kW	3,600万kW	300万kW
	上記に自治体の導入意欲係数(52%)、社会的受容性係数(75%)を乗じた場合	2,000万kW	1,100万kW	

※1 開発不可能地:自然条件(風速6.5m/s未満、陸上から30km以上、水深200m以上)、法規制(経産省調査では、自然公園(特別保護地区、第1種特別地域、海中公園地区)、原生自然環境保全地域、自然環境保全地域、鳥獣保護区のうち特別保護地区、世界自然地域、区画漁業権区域。環境省調査では、国立・国定公園(海域公園))水域利用等(経産省調査では送電線から40km以上)

※2 事業収支シナリオとして、設備利用率31%(風速7.5m/sの場合。風速によって異なる。)、面積当たり出力1万kW/km<sup>2</sup>、風車システム装置・工事費・送電線敷設費等を含んだ建設コストは、水深50m以浅(着床式を想定)は水深に応じて増加、50m以深(浮体式を想定)は水深にかかわらず一定と想定。

(出典) 国家戦略室 エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会『コスト等検証委員会報告書参考資料3』2011, p.6.

図5 洋上風力の電力供給エリア別の導入ポテンシャル分布状況



(出典) 環境省『平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査』2011, p.109.

(10) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.96

(11) 導入ポテンシャルとは「自然要因(標高、傾斜等)、法規制(自然公園、保安林等)等の開発不可能地を除いて産出したエネルギー量」、導入可能量とは「経済性(固定価格買取制度、収益率など)を考慮して、導入ポテンシャルから絞り込んだエネルギー量」と定義されている。

(12) 国家戦略室 エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会『コスト等検証委員会報告書参考資料3』2011, p.6.

## (4) 経済性

表3に世界および日本の風力発電の発電コストを示す。

世界の陸上風力の発電コストは、概ね10円/kWh前後であり、従来型電源に対してコスト競争力を持つ水準にある。風況がよく（稼働率40%程度）、システム価格が安い場合には、5円/kWh前後の発電コストを実現する場合もある。火力発電等の従来電源や、その他の再生可能エネルギーに対してコスト競争力を持つ水準である。

洋上風力のシステム価格は陸上風力の約2倍であるが、陸上よりも風況が良く、約50%程度多い発電量を得られるため、陸上風力とほぼ同水準の発電コストが実現可能とされている<sup>(13)</sup>。ただし、この値は水深が50m未満の遠浅海域に広く導入が進んでいる欧州の着床式洋上風力を前提としたものであり、浮体式洋上風力の発電コストが同水準の発電コストを達成可能かは留意が必要である。また、鋼材価格の上昇や、専用作業船の不足、風車メーカー間の競争環境の不足等により、近年洋上風力のシステム価格が上昇傾向にあるとの情報もある<sup>(14)</sup>。

表3 風力発電の発電コスト

	場所	発電コスト (円/kWh) <sup>1)</sup>	資料No
陸上風力	世界	3.2~12.8 <sup>2)</sup> (0.04~0.16ドル/kWh)	(1)
		5.6~10.4 (0.07~0.13ドル/kWh)	(2)
	日本	9.9~17.3 <sup>3)</sup>	(3)
洋上風力	世界	8.0~15.2 (0.1~0.19ドル/kWh)	(1)
		8.8~10.5 (0.11~0.131ドル/kWh) ※2005~2008年の価格	(2)
	日本	9.4~23.1 <sup>3)</sup>	(3)

1) 換算レートはドル=80円を使用。

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

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

(出典) (1) IEA, *Deploying Renewables - Best and Future Policy Practice*, Paris: IEA, 2011, p.44-46.

(2) IEA, *Technology Roadmaps Wind energy*, Paris: IEA, 2009, pp.11-12.

(3) エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会『コスト等検証委員会報告書 参考資料1 各電源の諸元一覧』2011, pp.10-11.

## (5) 技術的課題等

NEDO等により示されている洋上風力に係る主要な技術的・社会的課題を以下に示す。

## (i) 風車の大型化に係る技術課題

風力発電のエネルギー変換効率は40%を超えて太陽光発電よりはるかに高いが、エネルギー密度は風速8m/sで約0.3kW/m<sup>2</sup>と低いため、単機出力を増大させるためには風車の外形は大型化せざるを得ない。

近年ではドイツにおいて、5MW風車を用いた洋上ウィンドファーム（alpha ventus）の商用運転を開始しており、スケールメリットを指向する大型風車の時代となっている。特に洋上風

(13) IEA, *Technology Roadmaps Wind energy*, Paris: IEA, 2009, pp.11-12.

(14) IEA, *Deploying Renewables-Best and Future Policy Practice*, Paris: IEA, 2011, p.45.

力は、陸上風力より設置コストがかかるため、1基あたりの発電量の増加が採算性確保に必要であること、また船があればどこへでも機材の運搬は可能なことから、大型化が重要課題となっている<sup>(15)</sup>。

(ii) 浮体式洋上風力に係る技術課題

現在商用化レベルにあるのは着床式洋上風力であるが、さらなる導入量拡大に向けては、深い水域において設置が可能な浮体式洋上風力が必要となる。現在、ノルウェーのカルモイ沖において、世界初となる2MW級浮体式洋上風力のフルスケール実証試験が実施されている(Hywindプロジェクト)<sup>(16)</sup>。

浮体式洋上風力に関しては、世界的にスタートラインに立っているところであり、日本が市場に参入する余地は充分に残されている。2010年3月、IEC(International Electrotechnical Commission)の国際会議において、韓国から浮体式風車の標準化の提案が行われており、世界的にも浮体式風車の実用化に向けて開発競争の時代に入りつつある。従って、浮体式洋上風力に関しても早急に技術開発を開始し、世界を先導することが重要とされている<sup>(17)</sup>。

(iii) 系統連系に係る技術課題

風力発電をはじめとする再生可能エネルギーの普及が進展するにつれ、系統電力へ接続した際の、系統側の電圧、周波数等の電力品質に与える影響が懸念されている。系統連系対策として、監視・予測技術や電力事業者間連系、蓄電池等の系統側対策と発電側対策の両者を連携させて対策を実施することが重要とされている<sup>(18)</sup>。

(iv) 環境影響、関連ステークホルダーとの調整

風力発電の導入量拡大に伴う懸念事項として、各種環境影響が挙げられる。洋上風力の環境影響としては、「流れや水質への影響」「生物への影響」「騒音と振動」「景観への影響」等が挙げられ、これらの事項に対する対策が必要とされている。

また、洋上風力特有の課題としては、漁業者との調整が挙げられる。漁業との連携を計画当初から意識し、漁業関係者との協働のもとで取り組みを進めることが重要とされている<sup>(19)</sup>。

### 3 波力発電

(1) 技術動向・利用動向

波力発電は、波のエネルギーを利用した発電システムである。波力発電システムは、主に「振動水柱型」、「可動物体型」、「越波型」の3種類に区分される。また設置形式としては、防波堤や海底に固定設置する固定式と、海面または海中に浮遊させる浮体式に分けられる<sup>(20)</sup>。

(15) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.115.

(16) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.118.

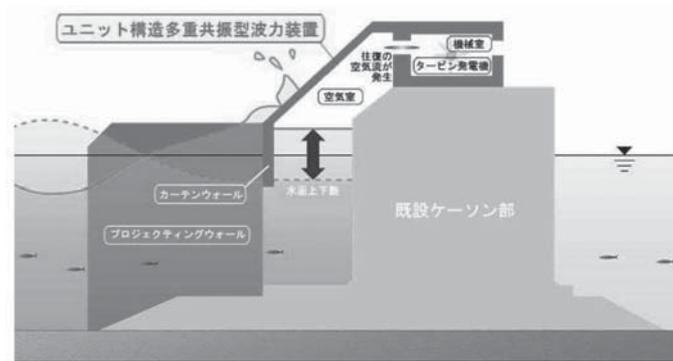
(17) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.120.

(18) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.160-161.

(19) 多部田茂「海洋利用の環境影響評価」木下健監修『海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向』サイエンス&テクノロジー, 2011, p.383.; 小路泰広「酒田港における海洋再生可能エネルギー実海域実験場に向けた取り組み」同, p.425.

(20) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.311-313.

図6 振動水柱型波力発電システムの例（固定式）



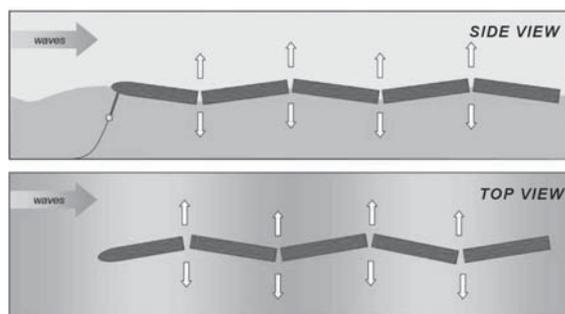
(出典) 三菱重工鉄構エンジニアリング (株) 『高効率波力発電システムの実証研究に着手、発電単価40円/kWh目標 三菱重工鉄構エンジニアリング、東亜建設工業と共同で』 <[http://www.mhi-bridge-eng.co.jp/topics/news\\_1115.pdf](http://www.mhi-bridge-eng.co.jp/topics/news_1115.pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

図7 可動物体型波力発電システムの例（Oyster波力発電装置、固定式）



※振り子構造で、波の動きにより発電機上部を上下させることで高圧水を発生させ、陸上水力発電タービンへ送り込む方式  
 (出典) Aquamarine Power “Projects”, <<http://www.aquamarinepower.com/projects/>>, [last accessed: 2013/2/8] , L. Cameron, R. Doherty et al, “Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter,” 3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao発表資料, 2010, p.4.を基に筆者作成

図8 可動物体型波力発電システムの例（Pelamis波力発電装置、浮体式）



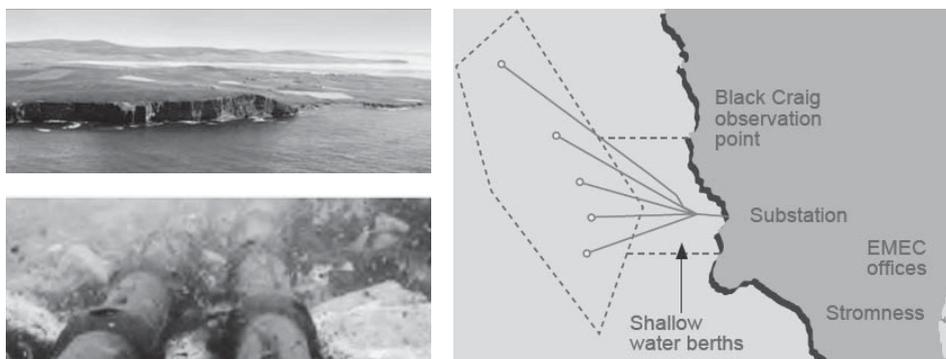
※波の蛇行運動を回転運動に変換し発電機を回転させる方式  
 (出典) Pelamis Wave Power “Image Library”, <<http://www.pelamiswave.com/image-library/>>, [last accessed: 2013/2/8] , Pelamis Wave Power “Plamis Wave Power brocher”, <<http://www.pelamiswave.com/downloads/>>, [last accessed: 2013/2/8]

- 振動水柱型：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。OWC（Oscillating Water Column）システムとも言う。
- 可動物体型：可動物体を介して波力エネルギーを油圧に変換した後、油圧モータ等を用いて発電するシステム。沖合に設置される波力発電装置の主流。
- 越波型：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。

波力発電システムで実用化されているものは少なく、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）が運転開始したが、数週間で故障が発生し、また資金面でも問題が生じたことから、運転を中止した<sup>(21)</sup>。

現在は、欧州のスコットランドを中心に複数のフルスケール装置の実証試験が進行している。スコットランドのオークニー諸島では、波力発電および潮流発電の実海域における実証試験サイトとしてEMEC（European Marine Energy Centre）が2003年に設立されている。EMECは、スコットランド政府、ハイランド開発公社（Highlands and Islands Enterprise）等、複数の公的機関・組織から約3,000万ポンドの出資を受け、2004年8月に開設された<sup>(22)</sup>。波力発電のテストサイトは5つ用意されており、陸上までの海底ケーブル、変電所、風速・波高等の計測所、オフィス・データ解析施設等を備えている<sup>(23)</sup>。本実証試験サイトは波力発電の適地であり、平均有義波高<sup>(24)</sup>2～3mを得られる<sup>(25)</sup>。

図9 EMEC実証試験サイト（波力発電サイト）



(出典) Pelamis Wave Power “full scale prototype testing”, <<http://www.emec.org.uk/download/EMEC%20fullscale%202012.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(21) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.322.; Development History. Pelamis Wave Powerウェブサイト <<http://www.pelamiswave.com/development-history>> [last accessed: 2013/2/8]

(22) EMEC “FUNDERS”, <<http://www.emec.org.uk/about-us/funders/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(23) EMEC “FACILITIES”, <<http://www.emec.org.uk/facilities/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(24) 連続する波を定点観測し、波高の高いほうから順に全体の1/3の個数の波を選び、これらの波高および周期を平均したもの

(25) EMEC “WAVE TEST SITE”, <<http://www.emec.org.uk/facilities/wave-test-site/>>, [last accessed: 2013/2/8]

## (2) 将来予測

IEAのWorld Energy Outlook 2012では、世界の海洋エネルギー（潮流発電を含む。海洋温度差発電、洋上風力は含まない）の導入量は、2020年に1,000MW（100万kW）、2035年に15,000MW（1,500万kW）に達すると試算されている（表1）。一方、欧州海洋エネルギー協会（European Ocean Energy Association:EU-OEA）は、欧州海洋エネルギーロードマップ2010-2050<sup>(26)</sup>において、海洋エネルギー（潮流発電、海洋温度差発電等を含む。洋上風力は含まない）の導入量は2020年までに3,600MW（360万kW、欧州の設備容量の0.4%<sup>(27)</sup>）、2050年には188,000MW（18,800万kW）近くに達すると見通している。

表4 IEAによる再生可能エネルギーの発電容量見通し

	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年	2035年
海洋エネルギー	0	1,000	1,000	3,000	7,000	15,000
太陽光発電	38,000	153,000	266,000	378,000	491,000	602,000
風力発電	198,000	390,000	586,000	760,000	924,000	1,098,000
バイオマス・廃棄物 発電	72,000	98,000	135,000	170,000	208,000	252,000
地熱発電	11,000	14,000	20,000	29,000	38,000	46,000
太陽熱発電	1,000	6,000	14,000	24,000	40,000	72,000

※New Policies Scenario（現状より政策的支援を強化したシナリオ）における計算結果  
 （出典）IEA, *World Energy Outlook 2012*, Paris: 2012, p.554.

## (3) 賦存量・導入ポテンシャル

世界においては、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おり、特に欧州周辺の波力エネルギー密度は50~70kW/m<sup>(28)</sup>と高い。

日本の波力エネルギー密度は、沿岸で10kW/m未満、沖合で10~20kW/m未満と、諸外国と比較して大きくないが、局所的には理想的な波が得られるエリアも存在する<sup>(29)</sup>。

NEDOによるポテンシャル調査<sup>(30)</sup>では、現状技術を想定した場合の発電可能量は19TWh/年（1,900,000万kWh/年、年間電力需要の約2%<sup>(31)</sup>）と試算されている（表5）。

(26) EU-OEA, *Oceans of energy European Ocean Energy Roadmap 2010-2050*, Brussels: EU-OEA, 2010, pp.20-21.

(27) “Electricity Information 2012”（IEA）による2010年の数値を元に試算

(28) 波を受ける単位長さあたりのエネルギー

(29) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.314.

(30) NEDO『海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務』2011, pp.6-8, 18

(31) 電気事業連合会 電力統計情報

表5 波力発電のポテンシャル試算例

試算結果		前提条件等
賦存量 <sup>※1</sup>	195,000 MW (19,500万kW) ※沖合100kmまで	【賦存量】 離岸距離100kmの外周ラインで平均波力エネルギー密度を線積分して算出。
導入ポテンシャル <sup>※2</sup>	現状技術： 54,000MW (5,400万kW) 将来技術： 249,000MW (24,900万kW)	【導入・発電ポテンシャル】 ・ 沖合係留方式：波に対して垂直方向に複数設置し、更にそれらを波の進行方向に多段に設置。
発電ポテンシャル <sup>※3</sup>	現状技術： 19TWh (1,900,000万kWh) 将来技術： 87TWh (8,700,000万kWh)	・ 現状技術では離岸距離30km以内かつ100m以内の外周ラインの距離から算出。エネルギー密度が15 [kW/m] 以上の外周ラインのみ利用。 ・ 将来技術では離岸距離100kmの外周ラインの距離から算出。エネルギー密度が10 [kW/m] 以上の外周ラインのみ利用。

※1 海水のもつ物理的な位置エネルギー・運動エネルギー・熱エネルギー

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

※3 地理的条件を考慮し、発電デバイスを“理想的に”海上または陸上に敷設した場合に得られる年間を通じた総発電量 (出典) NEDO『海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務』2011, pp. 6-8, 18.

#### (4) 経済性

波力発電のシステム価格および発電コストの試算例を表6に示す。

システム価格について、実証プロジェクトの段階では53～74万円/kW程度だが、商用プロジェクトの段階では、36～51万円/kW程度までコストダウンが進むと見られている。

発電コストについては、実証プロジェクトの段階では52～72円/kWhと他の再生可能エネルギーと比較して高いが、2020年には28円/kWhまで削減されると試算されている。

表6 波力発電のシステム価格・発電コスト試算例

	プレ実証プロジェクト	実証プロジェクト <sup>※2</sup>	商用プロジェクト <sup>※3</sup>
システム価格 [万円/kW] <sup>※1</sup>	79～112	53～74	36～51
発電コスト [円/kWh] <sup>※1</sup>	72	52	28 (2020年時点)

※1 1ポンド=130円として換算 ※2 最初の10MWプロジェクトにおける価格

※3 50MW以上設置実績を積んだ後の10MWプロジェクトにおける価格

(出典) Ernst & Young LLP, *Cost of and financial support for wave, tidal stream and tidal range generation in UK*, U.K: 2010, pp.ii, 12.

#### (5) 技術的課題等

NEDO等により示されている波力発電に係る主要な技術的・社会的課題を以下に示す。

##### (i) 基礎技術の確立、高効率化、低コスト化

第一に、日本の自然条件で、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）の開発が必要であり、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。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<sup>(32)</sup>。

(32) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.358.

## (ii) 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ているのが、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とされる<sup>(33)</sup>。

## (iii) 環境影響、関連ステークホルダーとの調整

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とともに、波力発電の環境影響を検証していく必要がある<sup>(34)</sup>。また、漁業を含む地域社会とのコンセンサス、エネルギー事業者と地域の協創が重要である<sup>(35)</sup>。

## 4 潮流・海流発電

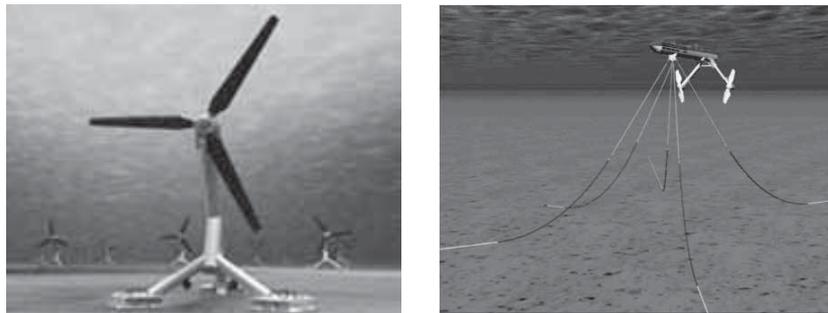
## (1) 技術動向・利用動向

潮流発電は潮流の運動エネルギーを利用し、一般的には水車により回転エネルギーに変換させて発電する方式である。潮流は月と太陽の引力で生じる周期的な変動である潮汐によって起こる水平方向の流れであり、潮の干満によって規則的に流れるため、発電に利用する場合には予測が可能であり信頼性の高いエネルギー源となる。

潮流発電システムにおけるエネルギー変換装置には一般的に水車が用いられ、海水の流れる運動エネルギーをタービンの回転を介して電気エネルギーに変換する<sup>(36)</sup>。

潮流発電は、主に欧米において実証プラントの設置が進んでおり、一部で商用プラントの運転が開始されたところである。日米欧、および韓国、台湾等において各種装置の技術開発が進められている<sup>(37)</sup>。

図10 潮流発電システムの例（左：固定式、右：浮体式）



(出典左) Hammerfest Strom, “Technology developer and supplier of turn-key tidal power arrays”, <<http://www.hammerfeststrom.com/about-us/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(出典右) Scotrenewables Tidal Power, “SR250 Technology”, <<http://www.scotrenewables.com/full-scale-prototype/the-technology/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(33) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.358.

(34) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.361.

(35) 黒崎明「海洋の利用権・実証実験フィールドの実現と社会的コンセンサス」木下健監修『海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向』サイエンス&テクノロジー, 2011, pp.408-409.

(36) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.476.

(37) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.479-480.

なお潮汐力発電は、潮汐に伴う潮位差を利用してタービンを回し発電する方式である。水力発電と同様の原理を用いて、潮位差が大きい湾や河口の入り口等にダムと水門を建設して水位差により発電を行う。基本的には満潮時には貯水し、干潮時に水門を開いて水を放出することにより発電機を回して発電を行う<sup>(38)</sup>。

また海流発電は、一般的にエネルギー変換装置として水車を用い、海流の運動エネルギーをタービンの回転を介して電気エネルギーに変換する発電システムである。海流の流速や流量、および流路は季節等により多少変化はあるが大きくは変わらず、幅100km、水深数百m程度と大規模で安定したエネルギー源である。しかし、流れの強い地点は陸地から数km以上離れており、大水深であるため装置の設置や管理が難しいこと、送電距離が長くなること等により、これまであまり開発は行われてこなかった<sup>(39)</sup>。

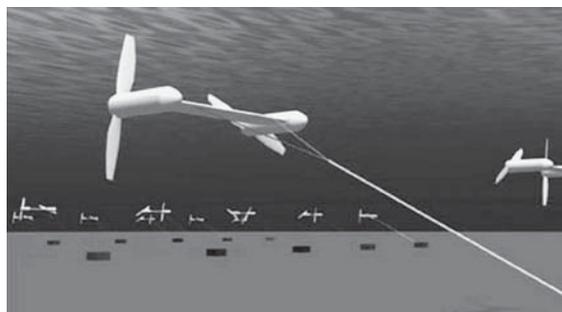
図11 潮汐力発電システムの例(ランス潮汐力発電所)



(出典左) Wyre Tidal Energy, “La Rance Barrage”, <<http://www.wyretidalenergy.com/tidal-barrage/la-rance-barrage/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(出典右) IHI 『海流発電システム』の開発に着手』 <<http://www.ihico.jp/ihico/press/2011/2011-11-28/index.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

図12 海流発電システムの例



現在は、欧州のスコットランドを中心に複数のフルスケール装置の実証試験が進行している。先述のとおり、スコットランドのオークニー諸島では、波力発電および潮流発電の実海域における実証試験サイトとしてEMEC (European Marine Energy Centre) が2003年に設立されている。潮流発電のテストサイトは8つ用意されており、波力発電サイトと同様に、陸上までの海底ケーブル、変電所、風速・波高等の計測所、オフィス・データ解析施設等を備えている<sup>(40)</sup>。本試験サイトは潮流発電の適地であり、4.0m/sの潮流を得られる<sup>(41)</sup>。

また、カナダのファンディ湾にあるFORCE (Fundy Ocean Research Center for Energy) においても、潮流発電の実証試験が実施されている。ファンディ湾は、潮の干満差が大きく、潮流発電の適地であり、最大で5.1m/sの真っ直ぐな海流が得られる<sup>(42)</sup>。

(38) NEDO 『NEDO再生可能エネルギー技術白書』 2010, p.489.

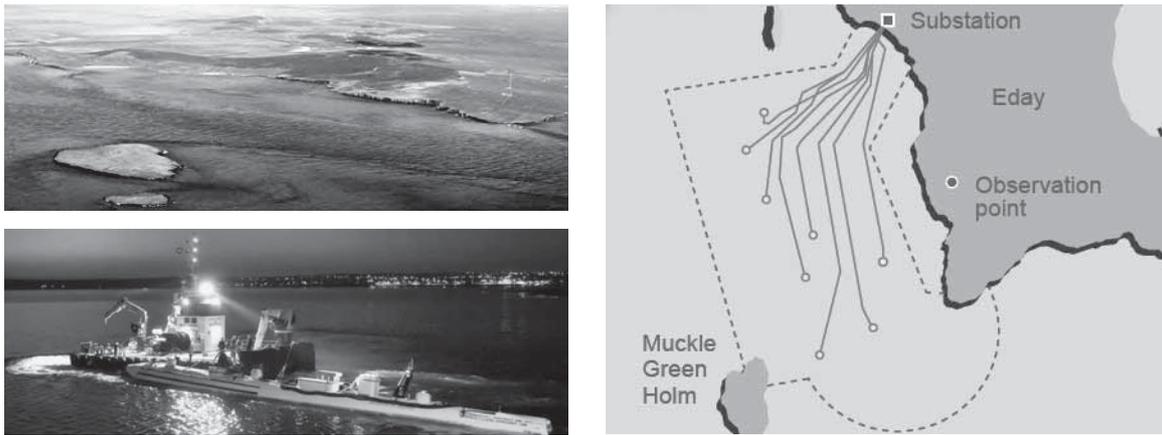
(39) NEDO 『NEDO再生可能エネルギー技術白書』 2010, p.476

(40) EMEC “FACILITIES”, <<http://www.emec.org.uk/facilities/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(41) EMEC “TIDAL TEST SITE”, <<http://www.emec.org.uk/facilities/tidal-test-site/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(42) FORCE “The Bay of Fundy” <<http://fundyforce.ca/renewable-and-predictable/the-bay-of-fundy/>>, [last accessed: 2013/2/8]

図 13 EMEC実証試験サイト（潮流発電サイト）



(出典) Pelamis Wave Power “full scale prototype testing”, <<http://www.emec.org.uk/download/EMEC%20fullscale%202012.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

## (2) 将来予測

IEAのWorld Energy Outlook 2012では、世界の海洋エネルギー（波力発電を含む。洋上風力、海洋温度差発電は含まない）の導入量は、2020年に1,000MW（100万kW）、2035年に15,000MW（1,500万kW）に達すると試算されている（表7）。一方、欧州海洋エネルギー協会では、海洋エネルギー（波力発電、海洋温度差発電等を含む。洋上風力は含まない）の導入量は2020年までに3,600MW（360万kW、欧州の設備容量の0.4%<sup>(43)</sup>）、2050年には188,000MW（18,800万kW）に達すると見通している<sup>(44)</sup>。

表7 IEAによる再生可能エネルギーの発電容量見通し

	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年	2035年
海洋エネルギー	0	1,000	1,000	3,000	7,000	15,000
太陽光発電	38,000	153,000	266,000	378,000	491,000	602,000
風力発電	198,000	390,000	586,000	760,000	924,000	1,098,000
バイオマス・廃棄物発電	72,000	98,000	135,000	170,000	208,000	252,000
地熱発電	11,000	14,000	20,000	29,000	38,000	46,000
太陽熱発電	1,000	6,000	14,000	24,000	40,000	72,000

※New Policies Scenario（現状より政策的支援を強化したシナリオ）における試算結果  
 (出典) IEA, *World Energy Outlook 2012*, Paris: IEA, 2012, p.554.

## (3) 賦存量・導入ポテンシャル・経済性

潮流は海峡・水道・瀬戸といった2つの海面を結ぶ狭い水路で強くなる。日本の潮流が強い箇所のほとんどは、瀬戸内海と九州西岸に存在している。津軽海峡でも強い潮流が見られる。

NEDOによるポテンシャル調査<sup>(45)</sup>では、実際の機器の設置や、導入に適した流速（1m/s以上）を得られる地域等を考慮すると、現実的な導入量は約19,000MW（1,900万kW）、発電可能量は

(43) “Electricity Information 2012”（IEA）による2010年の数値を元に試算

(44) EU-OEA, *Oceans of energy European Ocean Energy Roadmap 2010-2050*, Brussels: EU-OEA, 2010, pp.20-21.

(45) NEDO『海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務』2011, pp.6-8, 18.

6TWh/年（600,000万kWh/年、年間電力需要の約0.7%<sup>(46)</sup>）と試算されている<sup>(47)</sup>。

図14 日本の潮流エネルギー密度 [kW/m<sup>2</sup>]（月齢周期平均）



※ [kW/m<sup>2</sup>]：潮流をうける単位断面積あたりのエネルギー  
 ※海図に記載のある日本沿岸の海峡・瀬戸・水道等281地点のうち、流速表示のある150地点  
 (出典) NEDO『海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務』2011, p.60.

#### (4) 経済性

潮流発電のシステム価格および発電コストの試算例を表8に示す。

システム価格について、実証プロジェクトの段階では46～56万円/kW程度だが、商用プロジェクトの段階では、42～43万円/kW程度までコストダウンが進むと見られている。

発電コストについては、実証プロジェクトの段階では23～32円/kWhと、現状でも太陽光発電と同水準にあるとされている。2020年には23～26円/kWhまで削減されると試算されている。

表8 潮流発電のシステム価格・発電コスト試算例

	プレ実証プロジェクト	実証プロジェクト <sup>※2</sup>	商用プロジェクト <sup>※3</sup>
システム価格 [万円/kW] <sup>※1, ※4</sup>	112～146	46～56	42～43
発電コスト [円/kWh] <sup>※1, ※4</sup>	59～70	23～32	23～26 (2020年時点)

※1 1ポンド=130円として換算 ※2 最初の10MWプロジェクトにおける価格

※3 50MW以上設置実績を積んだ後の10MWプロジェクトにおける価格

※4 設置水域（浅水域、深水域）により価格が異なる

(出典) Ernst & Young LLP, *Cost of and financial support for wave, tidal stream and tidal range generation in UK*, U.K: 2010, pp.iV, 26.

#### (5) 技術的課題等

NEDO等により示されている波力発電に係る主要な技術的・社会的課題を以下に示す。

##### (i) 発電コストの削減

潮流発電装置のエネルギー変換効率は20～45%と比較的高いが、発電コストを下げるために

(46) 電気事業連合会 電力統計情報

(47) NEDO『海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務』2011, pp.26, 60.

は更なる高効率化が必要となる。また、構造体や機械・電気機器等に係るイニシャルコストの削減およびメンテナンス等のランニングコストの削減が重要となる。また、高耐久化も重要となる<sup>(48)</sup>。

#### (ii) 管理・運用

タービンなどは常に海水中に没した状態で運用することになるため、モニタリング、遠隔操作が重要となる。また、機器の定常的なモニタリングにより、故障の有無や前兆を把握するとともに、機器故障時に安全にシステムを管理するための遠隔操作システムが必要となる。また、海洋条件は気象によって大きく変わるため、気象条件に合わせた最適運転制御システム、海洋状況の予測システムの開発等が必要である<sup>(49)</sup>。

#### (iii) 環境影響、関連ステークホルダー間との調整

海洋環境を利用することによる生態系等の環境への影響については、今後実用化に向けた実証試験を行っていく過程で、問題・課題を抽出する必要がある。また、漁業を含む地域社会とのコンセンサス、エネルギー事業者と地域の協創が重要である<sup>(50)</sup>。

## 5 海洋温度差発電

### (1) 技術動向・利用動向

海洋温度差発電は、表層の温かい海水（表層水）と深海の冷たい海水（深層水）との温度差を利用する発電技術である。海洋の表層100m程度までの海水には、太陽エネルギーの一部が熱として蓄えられており、低緯度地方ではほぼ年間を通じて26～30℃程度に保たれている。一方、極地方で冷却された海水は海洋大循環に従って低緯度地方へ移動する。移動に従い、周辺の海水との間に温度差が生じ密度が相対的に大きい極地方からの冷たい海水は深層へと沈み込んでいく。この表層水と深層600～1,000mに存在する1～7℃程度の深層水を取水し、温度差を利用して発電する。主な発電方式として、オープンサイクル、クローズドサイクル、ハイブリッドサイクルの3種類があり、現在はクローズドサイクルが主流となっている<sup>(51)</sup>。

クローズドサイクルのシステム概念図を図15に示す。クローズドサイクルでは、封入された沸点の低い作動流体（アンモニア等）が、ポンプによって蒸発器に送られ、そこで表層水の熱によって蒸気となり、これがタービンに送られて発電した後、凝縮器において、汲みあげられた深層水によって冷却されて液体に戻るというサイクルを繰り返す仕組みとなっている<sup>(52)</sup>。

現在、商用運転を行っている海洋温度差発電プラントは国内・海外とも存在しない。実証試験プラントについては、日米欧、およびアジアにおいて建設されたが、現在も稼働しているのは、佐賀大学の伊万里実験プラントのみである<sup>(53)</sup>。日本では、2012年度に、沖縄県久米島町に

(48) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.484-485.

(49) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.485.

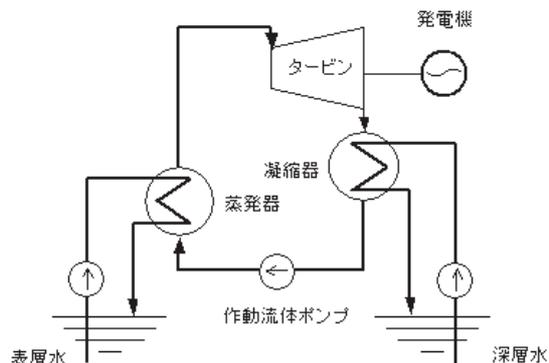
(50) 黒崎明「海洋の利用権・実証実験フィールドの実現と社会的コンセンサス」木下健監修『海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向』サイエンス&テクノロジー, 2011, pp.408-409.

(51) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.365-367.

(52) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.367.; 池上康之「海洋温度差発電の開発動向・要素技術と経済性評価」木下健監修『海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向』サイエンス&テクノロジー, 2011, p.203.

(53) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.375.

図15 クローズドサイクル海洋温度差発電の概念



(出典) 佐賀大学海洋エネルギー研究センター『海洋温度差エネルギーについて』,  
 <[http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about\\_otec\\_01.html](http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about_otec_01.html)>, [last accessed:  
 2013/2/8]

においても実証事業が開始した<sup>(54)</sup>。

これまで継続して研究開発が行われてきた日本の技術力は世界に先行している。我が国の海洋温度差発電技術の優位性は、コア技術となる海洋温度差に特化した熱交換器、世界最高レベルの効率を誇る発電サイクル（ウエハラサイクル：1994年 上原ら）、システム制御技術およびそれらを組み合わせた高度なプラントシステムの設計技術にあるとされる。また、日本は海洋深層水の汲み上げ実績は世界トップレベルであり、取水技術の信頼性は高いとされる。

一方で、1990年代の実証試験を境に一時研究開発が行われていなかった海外においても、近年各国で研究開発を再開する動きが見られる。2009年より海軍施設本部（U.S. Naval Facilities Engineering Command）はロッキード・マーティン（Lockheed Martin）社に1億2,500万ドルを支援し、同社はハワイ州立自然エネルギー研究所（NELHA）においてマカイ（Makai）社と協同で実証試験を実施している<sup>(55)</sup>。フランス、台湾、韓国など数多くの国々においても数MW級の開発プロジェクトが計画されている<sup>(56)</sup>。

## (2) 将来予測

IEAのWorld Energy Outlook 2012では、世界の海洋エネルギー（波力発電および潮流発電。洋上風力は含まない）の導入量は、2020年に1,000MW（100万kW）、2035年に15,000MW（1,500万kW）と試算されているが、海洋温度差発電は試算の対象となっていない。

## (3) 賦存量・導入ポテンシャル

海洋温度差発電では、経済性を成立させるためには平均的に20℃程度の温度差が必要とされている。海の表層と深層1,000mとの温度差は赤道付近で大きく、インド、東南アジア、オーストラリア南部、メキシコ、ブラジル、アフリカ中部等の沖合が、温度差に恵まれている。日

(54) 「海洋温度差発電、稼働へ/来年3月 県が久米島で」『沖縄タイムス』2012.10.4.

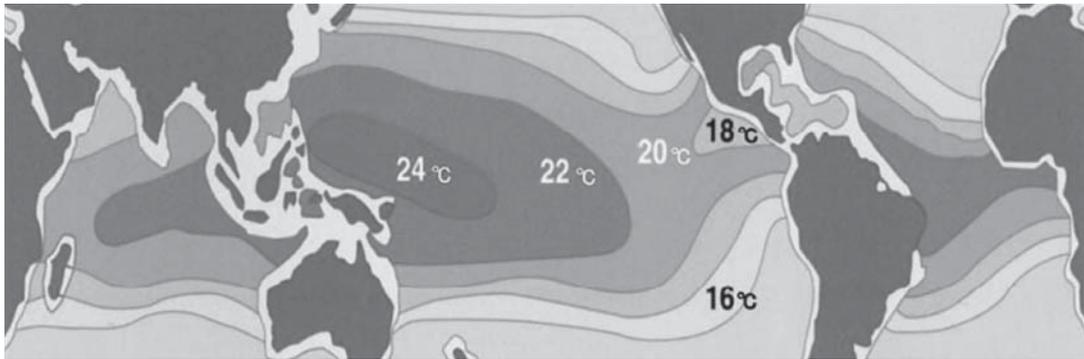
(55) Lockheed Martin “Aloha, OTEC heat exchangers”, <<http://www.lockheedmartin.com/us/mst/features/110426-aloha-otec-heat-exchangers.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

(56) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.399.

本では沖縄、鹿児島、小笠原諸島などが適地に挙げられるが、本州においても理想的な温度差のもと発電を行うためには、発電所や工場等の温水排熱の活用が有効と考えられる<sup>(57)</sup>。

平成22年度NEDO「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」では、現状の技術を想定すると、現実的な導入量は5,952MW（595万kW）、発電可能量は47TWh/年（年間電力需要の約5%）と試算されている<sup>(58)</sup>。

図16 世界の海の表層と深層1,000mとの平均温度差分布

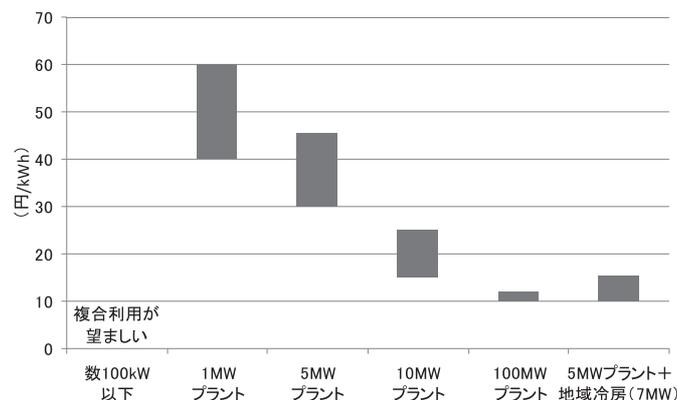


(出典) 佐賀大学海洋エネルギー研究センター『海洋温度差エネルギーについて』, <[http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about\\_otec\\_01.html](http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about_otec_01.html)>, [last accessed: 2013/2/8]

#### (4) 経済性

海洋エネルギー資源利用推進機構の海洋温度差分科会が試算した海洋温度差発電の発電コストを図17に示す。数100kW以下の規模では発電のみで経済性を成り立たせるのは難しく、海水淡水化技術や海洋深層水の利活用、リチウム回収などの複合利用が望ましいとされる。プラント規模が大きくなるほど発電コストは低減され、1MWプラントは約50円/kWhであるのに対し、10MWプラントでは約20円/kWh、100MWプラントでは約10円/kWhまで低減されると試算されている。経済性向上策として、地域冷房などとの組合せも提案されている。<sup>(59)</sup>

図17 海洋温度差発電の発電コスト



データ元：OEAJ海洋温度差発電分科会資料

(出典) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.383. 技術的課題等<sup>(59)</sup>

(57) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, p.372.

(58) NEDO『海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務』2011, p.60.

(59) NEDO『NEDO再生可能エネルギー技術白書』2010, pp.401, 404-405.

(5) 技術的課題等

NEDO等により示されている波力発電に係る主要な技術的・社会的課題を以下に示す。

(i) MW級プラントの実証試験

海洋温度差発電は、他の再生可能エネルギーとは異なり、スケールメリットが極めて大きいという特性を有している。世界初となる1MW級の実証試験を実施し、日本の技術的優位性を維持することが重要であるとされる。

(ii) コア技術の確立、低コスト化

コア技術となる海洋温度差発電に特化したチタン製プレート型熱交換器、制御技術およびそれらを組み込んだ高度なプラントシステムの設計技術について、性能強化、競争力の確保が重要である。また、海洋温度差発電の国内外における導入を図るには、事業性の向上、発電コストの低減が重要である。

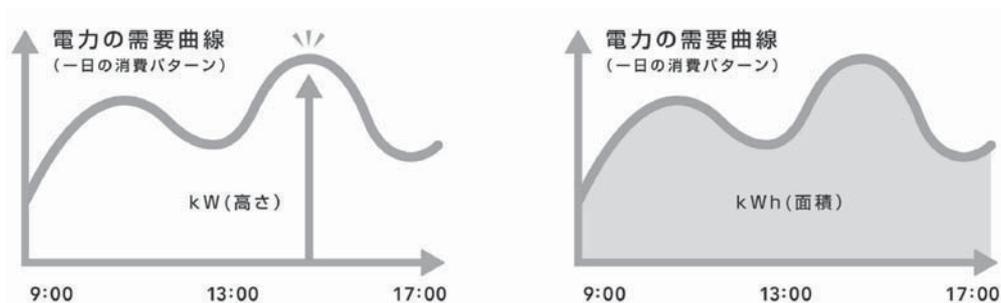
(iii) 環境影響、関連ステークホルダー間との調整

海洋温度差発電は大量の水を汲み上げるため、海水循環の変化、熱の移動は、海洋環境に様々な変化を及ぼす可能性がある。海洋環境への影響を実証試験による基礎データの収集、各種シミュレーションによる予測との比較等により検証していく必要がある。また、プラント規模に応じた環境影響評価手法が必要となる。

《コラム①：ワット (W) とワットアワー (Wh) の違い》

ワット (W) は、電力の大きさを表す単位。一方、ワットアワー (Wh) は、1時間当たり電力がどれだけの時間仕事をしたか、その仕事量 (エネルギー量) を表す単位。1Wの電気器具を1時間利用すると1Whの電力消費量 (仕事量) となる。1,000W = 1kW。1,000Wh = 1kWh (k: キロは1,000倍を表す補助単位)<sup>(60)</sup>。

図18 ワット (W) とワットアワー (Wh) の違い



(出典) 経済産業省 “節電パンフレット (家庭向け)”, <<http://www.meti.go.jp/setsuden/pdf/east03.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

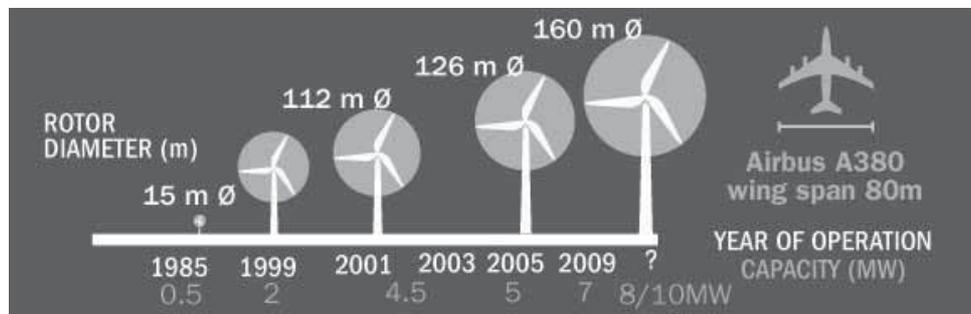
(60) 電気事業連合会 “電力用語集 その他”, <<http://www.fepec.or.jp/library/words/other/index.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

### 《コラム②：風力発電の単機サイズおよびウィンドファームの大規模化》

先述のとおり、風の持つ運動エネルギーは風を受ける面積に比例し、風速の3乗に比例して増大する性質を持っており、より風の強い場所に設置すること、大きい翼で効率よく風を受けることが重要となっている。現在世界で最も大きな風力発電のサイズは直径約154mに達しており、風力発電機の単機サイズの大型化が進んでいる<sup>(61)</sup>。

また、単機サイズの大型化に加えて、ウィンドファーム（複数の風力発電機を集めたプラント全体）の大型化も進んでいる<sup>(62)</sup>。現在連合王国において、世界最大級のLondon Array 洋上風力発電所が建設されている。同発電所の総発電容量は1,000MW（100万kW）となる予定で<sup>(63)</sup>、国家戦略室のコスト等検証委員会にて設定されているモデルプラントの規模は、LNG火力プラントが1,350MW（135万kW）、原子力プラントが1,200MW（120万kW）であることから<sup>(64)</sup>、London Arrayは従来電源プラントのおおよそ1基分に相当する。

図19 風力発電のサイズの変遷



(出典) EWEA “Wind Energy Basics”, <<http://www.ewea.org/wind-energy-basics/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(61) EWEA “Wind Energy Basics”, <<http://www.ewea.org/wind-energy-basics/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(62) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.27

(63) London Array “Harnessing the power of offshore wind”, <<http://www.londonarray.com/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(64) 国家戦略室 エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会『コスト等検証委員会報告書参考資料1』2011, p.1.

## II メタンハイドレート・熱水鉱床等の海底資源

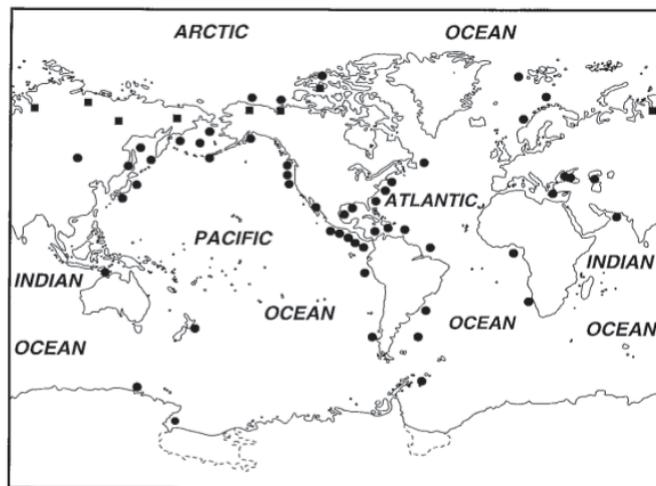
### 1 海底資源の概説

#### (1) メタンハイドレート

メタンハイドレートとは、メタン分子が低温高圧の条件下で水分子の結晶構造に取り込まれることで氷状になっている物質である。温度を上げる、または圧力を下げるなどの変化によりメタン分子が気体となって水分子より分離する。メタン分子は在来型天然ガスの主成分と同じであり、炭化水素資源として期待されている<sup>(1)</sup>。

メタンハイドレートは低温高圧となる水深の深い海底面下や極地の凍土地帯の地層など世界に広く分布している(図1)。我が国の排他的経済水域・大陸棚(以下、EEZ)では南海トラフ海域を中心に相当量の賦存が見込まれており、大きな国内エネルギー資源として期待されている<sup>(2)</sup>。しかしメタンハイドレートは前述のように固体の状態では賦存しているため、在来型の石油・天然ガス資源のように井戸を掘っても自噴せず、安定的かつ経済的な生産を可能とするためには新たな技術開発が必要となる<sup>(3)</sup>。

図1 メタンハイドレートの世界分布図



(出典) KEITH A. KVENVOLDEN, "Potential effects of gas hydrate on human welfare", USA: Proc. Natl. Acad. Sci., Vol. 96, March 1999 Colloquium Paper, pp. 3420-3426.

#### (2) 海底熱水鉱床

海底熱水鉱床とは、海底にある多金属硫化物鉱床であり、銅、鉛、亜鉛、金、銀等の重金属が含まれている。またゲルマニウム、ガリウム、カドミウム、セレン、テルル等のレアメタルも含有している。海底深部に浸透した海水がマグマにより熱せられ、地殻に含まれる有用元素を抽出しながら噴出し、冷却される過程で沈殿して多金属硫化物鉱床が生成される。

(1) 松本良「メタンハイドレート-海底下に氷状巨大炭素リザーバー発見のインパクト」『地学雑誌』118(1), 2009, pp.7-42.  
 (2) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレートの探査と資源量評価, <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/03-2/#6>> [last accessed: 2013/2/8]  
 (3) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレートの開発と経済性, <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/06-2/>> [last accessed: 2013/2/8]

水深1,000～3,000mの中央海嶺の海底拡大軸や西太平洋の島弧や海溝系の背弧海盆等にあり、世界では350か所程度発見されている。我が国周辺海域では、沖縄トラフ及び伊豆・小笠原海域において、多くの海底熱水鉱床が発見されている。これらは水深が700～1,600mと比較的浅く、また中央海嶺に分布するものと比較して金、銀の品位が高いことから、技術的、経済的にも開発に有利であると考えられる。世界的に銅、鉛、亜鉛の金属消費量が増大する中、我が国固有の資源として開発が期待される<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>。

### (3) その他のエネルギー・鉱物資源等（マンガン団塊、コバルトリッチクラスト）

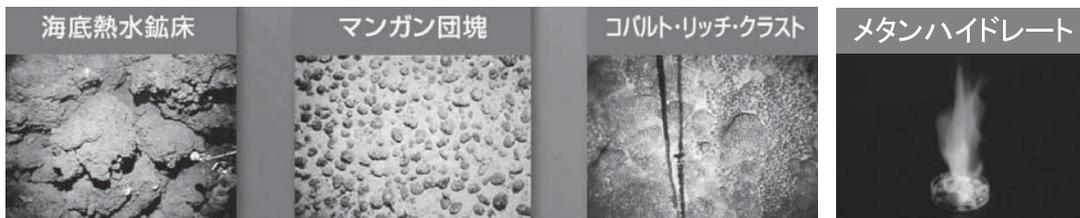
マンガン団塊は直径2～15cmの球形または楕円形の形状を持つ、鉄・マンガン酸化物の塊で、海底面上に分布している。主成分は鉄とマンガンであるが、銅、ニッケル、コバルト等30種類以上の有用金属が含まれている。成因には諸説あるが、海水に含まれる金属が長い年月をかけて沈殿したと考えられる<sup>(6)</sup>。

水深4,000～6,000mの大洋底の堆積物上に分布しており、特にハワイ沖やインド洋の公海上に広く分布している。我が国では1987年にハワイ沖の公海域で鉱区を取得したが、分布水深が5,000m程度と他の鉱物資源より更に深い事から開発は容易ではない。

コバルトリッチクラストとはマンガン酸化物と類似した鉄・マンガン酸化物であるが、海底の岩盤を厚さ数mm～数10cmでアスファルト状に覆うように存在する。マンガン団塊と比較してコバルトの品位が3倍程度高く、また微量の白金を含むという特徴を持つ<sup>(7)</sup>。

水深800～2,400mの海山の斜面や頂部に分布しており、我が国の周辺海域を含む中部・西太平洋の海山に賦存している<sup>(8)</sup>。我が国では、1987年に公海域を中心に賦存状況調査をしている<sup>(9)</sup>。

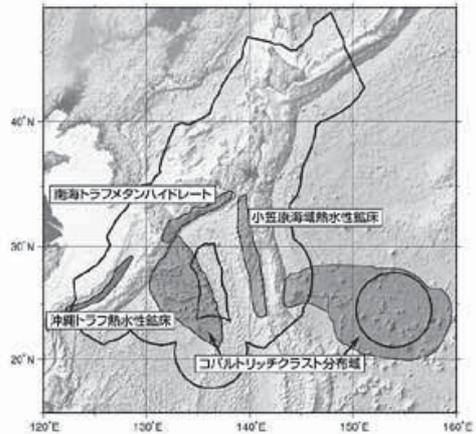
図2 代表的な海洋資源・エネルギー



(出典) 古幡哲也 (JOGMEC 総務部総務課課長) 『JOGMECの海洋資源開発への取り組みについて』平成24年9月21日

- (4) 経済産業省『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』平成21年3月, p.21.  
 (5) 資源エネルギー庁鉱物資源課『海底熱水鉱床の開発に向けた取り組み状況について』平成20年8月1日, p.3.  
 (6) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構Website 深海底鉱物資源開発深海底鉱物資源調査の概要<[http://www.jogmec.go.jp/jogmec\\_activities/technology\\_metal/seabed/seabed01.html](http://www.jogmec.go.jp/jogmec_activities/technology_metal/seabed/seabed01.html)>, [last accessed: 2013/2/8]  
 (7) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構Website 深海底鉱物資源開発深海底鉱物資源調査の概要<[http://www.jogmec.go.jp/jogmec\\_activities/technology\\_metal/seabed/seabed01.html](http://www.jogmec.go.jp/jogmec_activities/technology_metal/seabed/seabed01.html)>, [last accessed: 2013/2/8]  
 (8) 資源エネルギー庁『最近における鉱物資源需給の動向と鉱物資源政策の状況について』平成18年10月, p.41.  
 (9) 経済産業省『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』平成21年3月, pp.29, 30.

図3 日本列島の200海里排他的経済水域（実線）と海底資源分布域



(コバルトリッチクラストは分布域内の海山斜面に分布する)

(出典) 玉木賢策「海底資源開発で世界をリードしよう」OPRF『ニューズレター』第150号, <[http://www.sof.or.jp/jp/news/101-150/150\\_1.php](http://www.sof.or.jp/jp/news/101-150/150_1.php)> [last accessed: 2013/2/8]

## 2 メタンハイドレート

### (1) 技術動向、利用動向

メタンハイドレートは低温・高圧条件下で熱力学的に安定しており、水深500m以深の海域の海底面下数百mの地層内の孔隙を埋める形で固体として存在している<sup>(10)</sup>。従って、井戸を掘っても自噴せず、在来型天然ガスとは異なる概念の生産手法とそれを現場適用するためのフィールド開発技術が必要である<sup>(11)</sup>。また技術開発においては、環境に調和し<sup>(12)</sup>、経済性を有する技術を確認することが求められている<sup>(13)</sup>。

#### (i) フィールド開発

フィールド開発技術はメタンハイドレート層の上部地層に坑井を仕上げ、その坑井を利用して地層内のメタンハイドレートを分解させてガスを生産する技術である<sup>(14)</sup>。日本が実施及び計画しているフィールド産出試験を以下に纏める。

- (10) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレートとは何か, <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/02-2/>> [last accessed: 2013/2/8]
- (11) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレートの開発と経済性, <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/06-2/>> [last accessed: 2013/2/8]
- (12) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレート開発と環境, <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/07-2/>> [last accessed: 2013/2/8]
- (13) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレートの開発と経済性, <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/06-2/>> [last accessed: 2013/2/8]
- (14) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteフィールド開発技術Gの目標と課題, <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh21/05-2/>> [last accessed: 2013/2/8]

表1 メタンハイドレートの産出試験

産出試験概要	試験成果
2002年第一回陸上産出試験 カナダ北西部・マッケンジー・デルタの永久凍土地帯にて ガスハイドレート産出研究井プログラム <sup>(15)</sup> が実施	深さ約1,200mの調査井から温水循環法にて55日間で累積 470m <sup>3</sup> を生産。世界初のメタンハイドレートからのガス生 産。
2007、2008年度第二回陸上産出試験 マッケンジー・デルタにて実施 <sup>(16)</sup>	継続的に2,000-4,000m <sup>3</sup> /日とほぼ安定したガス生産量により 6日間累計で約13,000m <sup>3</sup> を「減圧法」にて生産。
2013年第一回海洋産出試験（予定） 東部南海トラフ海域をモデルフィールドとして愛知県から 三重県の沖合の第二渥美海丘近傍で実施。事業主は経済産 業省、事業主体は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資 源機構（JOGMEC）、オペレータは石油資源開発株式会社 （JAPEX）にて実施予定	メタン濃集帯の面積は12.3km <sup>2</sup> 、平均層厚39.6m、海域の水 深は857～1,405m（試験地点近傍1,007m）、離岸距離70- 80km。「減圧法」にて生産。海洋でのメタンハイドレート 層からのガス産出試験は世界初。翌年度に長期産出試験を 行い、経済性を含めた開発可能性を提示することが目標。

（出典）メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム『フェーズ1 総括成果報告書 平成20年8月版総括成果報告書』，  
p.25-26.

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム『平成20年5月29日－メタンハイドレート第二回陸上産出試験  
とその意義について』，p.2. <[http://www.mh21japan.gr.jp/pdf/2nd%20production%20test%20\(JE\).pdf](http://www.mh21japan.gr.jp/pdf/2nd%20production%20test%20(JE).pdf)>，[last  
accessed: 2013/2/8]

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）『第一回メタンハイドレート海洋産出試験の概要』，  
<[http://www.jogmec.go.jp/news/bid/docs/2012/at2\\_120507\\_02.pdf](http://www.jogmec.go.jp/news/bid/docs/2012/at2_120507_02.pdf)> [last accessed: 2013/2/8]、産業構造審議会産  
業技術分科会 評価小委員会『メタンハイドレート開発促進事業（フェーズ2中間時）中間評価報告書』平成24年3月，  
p20.

## (ii) 生産手法開発

地層内でメタンハイドレートを分解させ、その際に発生するメタンを生産する方法をメタン  
ハイドレート分解採取法と呼ぶ。低温・高圧条件下で熱力学的に安定しているメタンハイド  
レートを分解させる方法には主に「加熱法」、「減圧法」、「インヒビタ圧入法」などがある<sup>(17)</sup>。

「加熱法」とは、熱を加える事によりメタンハイドレートからメタンガスを生産する手法で  
ある。同手法の一つである「温水循環法」では、坑井内に温水を循環させることでメタンハ  
イドレートを加温・分解し、メタンガスを生産する<sup>(18)</sup>。

「減圧法」とは、生産坑井から水を汲み上げて地層圧力を低下させることでメタンハイドレ  
ートの分解を促す方法である。分解は吸熱反応なので、メタンハイドレート層を減圧すると分解  
が始まり地層温度が低下する。その後は、地層の顕熱（メタンハイドレート層の初期温度と分解  
温度の差に相当する熱量）と周囲地層からの熱伝導によりメタンハイドレート分解エネルギーが  
自然と供給されるので、在来型天然ガスの場合と同程度のエネルギー利得率でのガス生産が可  
能になる。減圧法では、常にメタンハイドレート層圧力は初期圧力よりも低く維持されるの  
で、地層の崩壊を招くことなく環境に調和した開発が可能である<sup>(19)</sup>。

(15) 同プログラムは、日本の石油公団（JNOC）、カナダ地質調査所（GSC）、米国地質調査所（USGS）、ドイツ地球科学研  
究所（GFZ）、米国エネルギー省（USDOE）、インド石油天然ガス省（MOPNG）、国際大陸掘削プログラム（ICDP）、  
マッケンジー・デルタ探査共同体を形成するBPカナダ、シェブロンカナダ、パーリントン資源カナダ等の協同により  
実施。現場作業は石油資源開発（株）（JAPEX）と石油資源開発カナダ（株）、科学プログラムをGSCが担当。

(16) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）とカナダ天然資源省（NRCan）が出資と研究の主体、オー  
ロラレッジ（Aurora）がIOFS（Inuvialuit Oilfield Services）社の支援を受けてオペレータを務めた。

(17) 渡辺俊樹（名古屋大学環境学研究所附属地震火山・防災研究センター）『メタンハイドレート開発研究の最前線』，会  
岩盤力学委員会ニュースレターNo.3，2004年4月，p.3. <<http://www.jsce.or.jp/committee/rm/News/news3/MH.pdf>>，  
[last accessed: 2013/2/8]

(18) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsite メタンハイドレートからのガス生産，<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/05-2/>> [last accessed: 2013/2/8]

(19) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsite メタンハイドレートの開発と経済性，<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/06-2/>> [last accessed: 2013/2/8]

「インヒビタ圧入法」とは、分解促進剤の注入により生成・解離平衡条件自体を低温高压側にシフトする方法である<sup>(20)</sup>。

現在までの研究ではメタンハイドレートの分解採取法として「減圧法」が最も有効と考えられており<sup>(21)</sup>、カナダの陸上産出試験にて実際のフィールド（陸域）で機能することが明らかになった。MH21研究コンソーシアムでは、AIST（独立行政法人産業技術総合研究所）が日本オイルエンジニアリング株式会社、東京大学との協力のもと日本独自のメタンハイドレート生産シミュレータ「MH21-HYDRES」を開発しており、今後産出試験の解析結果を組み込んでいくことにより、精度の向上が期待できる<sup>(22)</sup>。

### (iii) 資源量評価

我が国の資源量評価については、メタンハイドレート開発促進事業<sup>(23)</sup>において賦存状況の把握と特性の明確化が進められている。その結果、メタンハイドレートが周辺よりも濃集する「メタンハイドレート濃集帯」の存在が明らかとなり、また濃集帯からのコア資料を取得により、その物理的特性を明らかとなった。この検討結果を踏まえて、日本周辺海域のBSR（海底擬似反射面：Bottom Simulating Reflector、地震探査法によって地層の重なりを把握する時に、天然ガスなどの特異な物質に対して特有の反射記録を残す事が知られている<sup>(24)</sup>）の解釈を行い、特徴によるエリア分けがされた。また濃集帯を示唆する3海域について、三次元地震探査（後述）による分布状況の評価を行った。

詳細な資源量評価は東部南海トラフ海域を対象として、坑井データ及び地震探査データに基づき原始資源量（総資源量、技術的に採取できる可採量ではない）が11415億 $m^3$ と算定された。坑井データ及び地震探査データがないため同様の評価を他の海域に適用することはできないが、東部南海トラフ海域のBSR分布域は日本周辺の1割に相当する<sup>(25)</sup>。

### (iv) 環境影響評価

メタンハイドレートの開発に際しては、開発作業自体の安全性への影響、海洋生態系への影響、漏洩メタンガスが試験サイト及び周辺海域等に与える影響などを考慮する必要があるため、環境影響を予測・評価するために技術開発が必要である<sup>(26)</sup>。

資源エネルギー庁において実施されているメタンハイドレート開発促進事業の技術開発では、賦存海域の基礎情報の把握を目的とした海域環境調査（東部南海トラフ海域で実施）や、メタンハイドレート開発に伴う影響（メタン漏洩と地層変形）についての事前評価のための基本モ

(20) 渡辺俊樹（名古屋大学環境学研究科附属地震火山・防災研究センター）『メタンハイドレート開発研究の最前線』，会岩盤力学委員会ニュースレターNo.3，2004年4月，p.3. <<http://www.jsce.or.jp/committee/rm/News/news3/MH.pdf>>，[last accessed: 2013/2/8]

(21) 栗原正典ほか『東部南海トラフメタンハイドレート資源の生産性評価』，石油技術協会誌，74（4），2009，pp.311-324.

(22) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsite メタンハイドレートからのガス生産 <<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/05-2/>> [last accessed: 2013/2/8]

(23) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム『我が国におけるメタンハイドレート開発計画フェーズ1 総括成果報告書』平成20年8月版

(24) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレートの探査と資源量評価，<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/03-2/#6>> [last accessed: 2013/2/8]

(25) 産業構造審議会産業技術分科会 評価小委員会『メタンハイドレート開発促進事業（フェーズ2中間時）中間評価報告書』平成24年3月，p.16.

(26) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsiteメタンハイドレート開発と環境，<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/07-2/>> [last accessed: 2013/2/8]

デルやセンサー類の開発などが実施されている。また海洋産出試験で予測される環境リスクの抽出・分析によって把握された環境影響（地層変形、メタン漏洩、生産水の処理など）について、シミュレーションによる挙動の予測・事前評価を実施し、海洋産出試験では大規模な環境影響は生じないことが予測された。掘削作業だけでなく、海洋産出試験全体を網羅した検討書を平成24年度中に完成させる予定である。また将来の開発を見据えた総合評価と最適化検討を実施するに当たり、メタンハイドレート研究、環境などに関する最新情報の収集を継続的に実施している<sup>(27)</sup>。

またメタンガスは燃焼する際に放出する二酸化炭素の放出量は石炭や石油より少なく、硫黄酸化物はほとんどゼロ、窒素酸化物も石油や石炭に比べて少ないことから、クリーンなエネルギーであると評価されているが、メタンガスそのものは二酸化炭素の21倍（100年間で見た場合）の強力な地球温暖化物質である。大気中においてメタンは二酸化炭素よりも分解するのに要する時間は短く、メタンが環境に与える影響については研究途上であるが、メタンが大量に大気中に放出されるのは好ましくない。また、生産によりメタンハイドレートを失った地盤が不安定になり、地盤沈下や海底地滑りを引き起こす可能性なども指摘されている<sup>(28)</sup>。

## (2) 将来予測

### (i) 我が国のロードマップ

平成21年度から平成27年度までの7年間では、陸上における、より長期にわたる産出試験の実施、及び我が国周辺海域での海洋産出試験の実施等の技術開発を通じて、メタンハイドレートの開発技術の整備に必要となる技術課題の抽出を行う。その後、本計画の最終段階である平成28年度から平成30年度までの3年間は、『商業化の実現に向けた技術の整備』段階と位置付けられ、平成13年度から蓄積した我が国周辺海域のメタンハイドレートに関する研究成果について、技術課題、経済性評価、周辺環境への影響等の観点から総合的な検証とまとめを行い、全体最終評価を実施することとなっている。

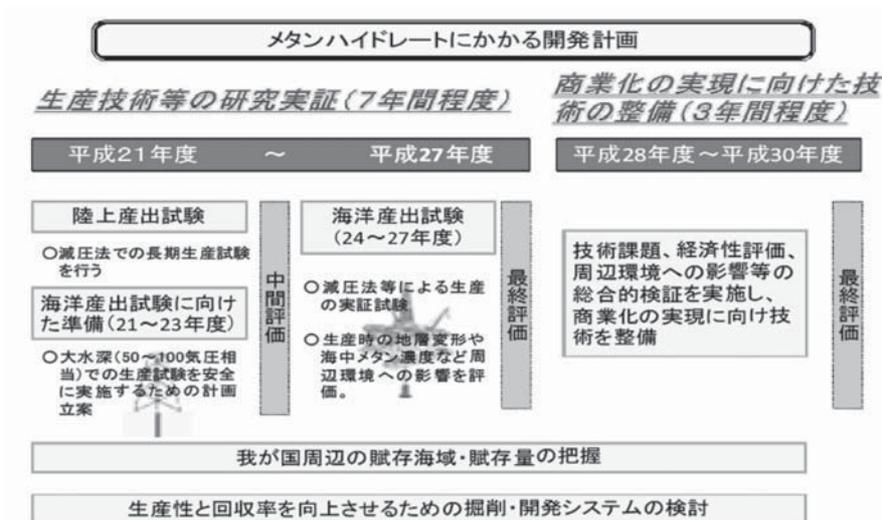
特に平成24年度から平成27年度までの4年間の間に、我が国周辺海域で実施される海洋産出試験が、開発プロジェクトの評価において重要な鍵を握る。産出試験では、我が国近海のメタンハイドレート層を対象とした生産手法と生産技術の検証を行うとともに、産出試験前後における海底地形、海中メタン濃度、試験実施サイト周辺の生態系などへの環境等に与える影響等に係る評価もあわせて行い、生産技術の確立に必要な課題の抽出及び課題の克服に取り組む。現時点でのメタンハイドレート開発プロジェクトの評価には、多くの不確実性が存在する。これらの不確実性に対して、海洋産出試験は、ガス生産能力など経済性に直結する重要な情報を明らかにすることから、同産出試験の終了時を目処にプロジェクト評価を実施し、技術開発の進捗状況に応じ、目標、内容及びスケジュールの評価と見直しを行う予定である<sup>(29)</sup>。

(27) 産業構造審議会産業技術分科会 評価小委員会『メタンハイドレート開発促進事業（フェーズ2中間時）中間評価報告書』平成24年3月p.30-31.

(28) 渡辺俊樹（名古屋大学環境学研究所附属地震火山・防災研究センター）『メタンハイドレート開発研究の最前線』、会岩盤力学委員会ニュースレターNo.3, 2004年4月, p.3. <<http://www.jsce.or.jp/committee/rm/News/news3/MH.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(29) 経済産業省『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』平成21年3月, pp.9-10.

図4 メタンハイドレートにかかる開発計画



(出典)『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』(平成21年3月経済産業省), p.12.

(ii) 米国の動向と将来予測

米国DOE (エネルギー省: Department of Energy) が1982年から1992年にかけてメタンハイドレートに係る研究を実施 (予算約800万ドル) した。米国政府はメタンハイドレートを経済的、環境的に有望な新エネルギーとして捉え、米国国内での生産を目指し研究を推進した。また2005年8月8日にブッシュ大統領はDomenici氏とBarton氏による Energy Policy Act of 2005 (2005年エネルギー政策法案) に署名。これによりThe Methane Hydrate R&D Act of 2000 (2000年メタンハイドレート研究開発法) を2010年まで延長し、更に1億5500万ドル (5年間の合計) の追加支出が承認された。しかし、シェールガスの開発が進む中、現在は長期的な開発戦略として位置づけられ、継続的な研究が行われている。

アラスカ (陸域) とメキシコ湾 (海域) で研究を進めており、当面の開発対象として浸透性砂質層中のメタンハイドレートに焦点をあてている。現在、BP (ビーピー: British Petroleum) 社、シェブロン社との共同研究体制の下、エネルギー省傘下のNETL (国立エネルギー技術研究所: National Energy Technology Laboratory) 等が主体となり研究を進めている<sup>(30)</sup>。

また、2011年からは、米コノコフィリップス社と日本のJOGMECがアラスカ・ノーススロープにおける永久凍土層下のメタンハイドレートをCO<sub>2</sub>で置換して回収する実証プロジェクトをDOEの支援によって実施している<sup>(31)</sup>。

(30) 成田英夫 (独立行政法人産業技術総合研究所メタンハイドレート研究センター長) 「メタンハイドレート資源開発を巡る最新の状況」季報エネルギー総合工学Vol.32.No.2,2009年7月, p.6. <[http://www.iae.or.jp/publish/kiho/pdf/200907\\_Vol32\\_No2.pdf](http://www.iae.or.jp/publish/kiho/pdf/200907_Vol32_No2.pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

(31) JOGMEC 『アラスカ・ノーススロープでのCO<sub>2</sub>置換ガス回収実証プロジェクトへ参加』, <[http://www.jogmec.go.jp/news/release/docs/2011/newsrelease\\_111019.pdf](http://www.jogmec.go.jp/news/release/docs/2011/newsrelease_111019.pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

表2 その他の海外の動向

カナダ	1970年代から研究を行っており、物性の研究が進んでいる。1972年に北方の永久凍土地帯であるマッケンジー・デルタ、マリック地域でメタンハイドレートを確認し、マリック地域で1998年には掘削試験を、2002年には実証試験を国際協力研究にて実施した。2005年8月～10月にバンクーバー島沖合でガスハイドレート調査を実施している。
インド	1996年にインド石油天然ガス省がガスハイドレート研究計画（NGHP）を発表。翌1997年にインド東岸の深海石油ガス探鉱区で探査中に広範囲にメタンハイドレートの存在を確認。メタンハイドレート賦存有望海域として、東岸沖合、西岸、アンダマンタン諸島周辺海域等の合計8万km <sup>2</sup> にメタンハイドレート資源を特定したほか、2006年の米国と共同による坑井掘削航海により21坑井から総計2,850mのコア採取を実施した。
韓国	韓国石油公社とガス公社、地質資源研究院で構成されたガスハイドレート開発事業団を組織し探査を推進している。2007年6月には地質資源研究院の物理探査船を利用して浦項の北東方向135km、鬱陵島南方向約100kmの海域でメタンハイドレートを採取している。韓国政府は、今後5か所で本格的に試錐を行う予定であり、さらに2014年末まで2257億ウォンの予算を投じ探査と商業生産技術を開発する計画とされている。
中国	2004年3月に「中国科学院広州天然ガスハイドレートセンター」を設立し、その本格的開発を開始している。2007年4～6月に南シナ海北部の掘削航海によって最深1,500m、8カ所の掘削・検層を行った。その内3カ所において厚さ10～25mのメタンハイドレートを胚胎する堆積層が海底下250mの深度において確認された。

(出典) 経済産業省 資源エネルギー庁 石油・天然ガス課『メタンハイドレート開発について』平成18年1月、エネルギー総合工学『季報』Vol.32 No.2, 2009.7, 成田 英夫 (独) 産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター長『メタンハイドレート資源開発をめぐる最新の状況』<[http://www.iae.or.jp/publish/kiho/pdf/200907\\_Vol32\\_No2.pdf](http://www.iae.or.jp/publish/kiho/pdf/200907_Vol32_No2.pdf)> [last accessed: 2013/2/8], U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, *Fire in the Ice, Spring/Summer 07*, 2007.6より筆者作成

### (3) 賦存量・可採量

世界中のメタンハイドレート中のメタン量について、USGS（米国地質調査所：U.S. Geological Survey）のKvenvoldenら<sup>(32)</sup>は陸域と海洋を含め地圏表層部に存在する量を約10,000Gt<sup>(33)</sup>と推定しており、大凡のコンセンサスとなっているが、もっと少ないと考える説<sup>(34)</sup>もある。佐藤ら<sup>(35)</sup>は、このメタン量のうち「原始資源量」を約2%、404兆m<sup>3</sup>と見積もっている。なお、この量は佐藤氏らの算定による在来型天然ガスの「原始資源量」約328兆m<sup>3</sup>（累計生産量を除くと278兆m<sup>3</sup>）とほぼ等しい量といえる。これらの数字は、掘削調査や物理探査のデータのほか、堆積物中の有機炭素含有量、堆積物の厚さなどから見積もられたものである。資源量のより精度高い推定には今後一層の研究が必要であるが、メタンハイドレートによる天然ガス資源量は在来型天然ガス枯渇時代の次世代を担える膨大な量が存在すると期待される<sup>(36)</sup>。

一方、可採量は、上記の賦存量に対して技術的に取りだせる可採埋蔵量を示す。メタンハイドレートについては技術が確立されていない為に回収率が確定できず、現時点では評価ができない<sup>(37)</sup>。

(32) Kvenvolden, K.A., Lorenson, T.D., 2001. The global occurrence of natural gas hydrate. In: Paull, C.K., Dillon, W.P. (Eds.), *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, vol. 124, pp. 3-18.

(33) 松本良「総説メタンハイドレートー海底下に氷状巨大炭素リザーバ発見のインパクト」『地学雑誌 Journal of Geography』118 (1), 2009, pp.7-42.

(34) Alexei V. Milkov, "Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there?," <<http://biodav.atmos.colostate.edu/kraus/Papers/Methane%20Clathrate/Milkov-clathratereserves.pdf>> [last accessed: 2013/2/8]

(35) 佐藤幹夫ほか「天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定」『地質学雑誌』Vol.102, No.11, 1996, pp.959-971.

(36) 財団法人エネルギー総合工学研究所-The Institute of Applied Energy『新エネルギーの展望 非在来型天然ガス（メタンハイドレート編）』1998年3月 <<http://www.iae.or.jp/publish/tenbou/1997-HIZAIRAI/>> [last accessed: 2013/2/8]

(37) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムメタンハイドレート探査と資源量評価<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/03-2/>>, [last accessed: 2013/2/8]

## (4) 経済性

メタンハイドレートは世界でも実用化の例がなく、経済性の評価に必要な情報が得られていない。このため十分な精度での経済性評価は出来ないが、概念設計から概算したメタンハイドレートからのガス生産原価は46～92円/m<sup>3</sup>程度とされている。しかし、この数値を出すには不確定要素が多く、フェーズ2における海洋生産試験の結果までは経済性の見通しを評価すべきではないとされる<sup>(38)</sup>。

原油価格は需給バランスや世界経済の動向に入り乱高下しながらも2011年は90～120ドル/バレル程度で推移していた。原油価格に連動する形で日本のLNG輸入価格も16.43ドル/MMBTU(約50円/m<sup>3</sup>、2011年8月)まで上昇している。一方で、米国の天然ガス価格の指標となるヘンリーハブ価格は国内でのシェールガス生産拡大により需給が緩和し、価格が3.98ドル/MMBTU(約12円/m<sup>3</sup>、2011年8月)へと下落しており<sup>(39)</sup>、4倍以上の乖離となっている。シェールガスの生産価格は、水圧破砕や水平坑井といった技術が確立したことでコスト低下を実現した。また3,685億m<sup>3</sup>の可採埋蔵量<sup>(40)</sup>を持つ南関東ガス田は、地下水にメタンガスが溶けている水溶性ガス田であるが、生産コストの見積もりは行われていない。

※ 原油価格 60\$/バレルに対応する熱量等価の天然ガス価格は42円/m<sup>3</sup>

1 MMBTU = 252,000 kcal=25m<sup>3</sup><sup>(41)</sup>、ドル換算レートは2011年8月末TTM 76.74 ¥/\$

## (5) 技術的課題等

資源開発においては、技術的にメタンハイドレートが採取できるかだけでなく、経済的側面においても成立する事業である事が求められる。メタンハイドレート層からメタンガスを経済的に生産回収するためには、フィールドでの産出試験に加え、最終的に経済性を確保するためのより効率的な生産を可能とする技術の高度化に向けた取組が必要である。これには生産レートの増加、開発生産コストの低減、水生産量の低下等が主要な課題であると考えられている<sup>(42)</sup>。また長期の生産性挙動、安定性の評価が必要であると考えられている<sup>(43)</sup>。

フィールド開発においては、低コストで開発可能な良質なフィールドの選定が求められる。実フィールドでは地層の不連続性、不均質性により、実用的な回収率は実験室と比べて極めて小さい事が懸念されるため<sup>(44)</sup>、海洋産出試験から得られるフィールドの知見により、高精度の貯留層モデリングや技術の実証を適用した海洋開発システムが必要となる。また低コスト化のために、安価で安全な坑井仕上げ、最適な生産機器・海底生産機器の設計が求められる<sup>(45)</sup>。

(38) 産業構造審議会産業技術分科会 評価小委員会『メタンハイドレート開発促進事業(フェーズ2中間時)中間評価報告書』平成24年3月, p67.

(39) 経済産業省資源エネルギー庁『石油・天然ガスをめぐる最近の動向』2011年11月<[http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/shigenjuyou\\_kaihatsu\\_wg/001\\_01\\_03a.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/shigenjuyou_kaihatsu_wg/001_01_03a.pdf)> [last accessed: 2013/2/8]

(40) 関東天然瓦斯開発株式会社『600年分の埋蔵量』<<http://www.gasukai.co.jp/gas/index4.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

(41) 東京ガス『Achieving Sustainable Growth in a Low-Carbon Society』<<http://www.tokyo-gas.co.jp/IR/library/pdf/investor/igl0total.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(42) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムメタンハイドレート開発と経済性<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/06-2/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(43) 産業構造審議会産業技術分科会 評価小委員会 メタンハイドレート開発促進事業(フェーズ2中間時)中間評価報告書』平成24年3月 p.VII.

(44) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsite 生産手法開発Gの目標と課題<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh21/06-2/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(45) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsite フィールド開発技術Gの目標と課題<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh21/05-2/>>, [last accessed: 2013/2/8]

生産手法については、大量かつ安定的に生産する手法の開発や坑井のガス生産性の向上が求められる。「減圧法」の見極めを行うとともに、その他の産出手法についても幅広い見地から可能性の検討を行う必要がある。減圧法と加熱法の併用や効率的な熱供給などによるメタン増進回収や、浸透率改善などによる生産性向上について、坑井あたりの生産量を増加させる生産手法が必要と考えられる。また生産挙動を高い精度で予測・解析する技術も求められる<sup>(46)</sup>。

環境影響評価については、海底崩壊や地すべりを回避しながらメタンハイドレート井の掘削や長期生産を安全に行うための環境モニタリング手法の確立と新しい「海底工学」の知見が必要と考えられている。これは日本の海洋資源開発全般に共通するシステム技術となる<sup>(47)</sup>。

商業生産を目指すためには、民間の石油・天然ガス資源開発企業の持つ石油開発オペレーションの経験と技術を活用することが望ましいとされる。また、非在来型の未開発資源を開発・生産するマネジメント体制についても、検討が進むべきと考えられている<sup>(48)</sup>。

また我が国周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存海域・賦存量のより詳細な把握に向けた取組みも今後の課題であるとされる。これまでの東部南海トラフ海域の技術開発で蓄積された知見と経験を踏まえて、東部南海トラフ海域以外の海域における有望賦存海域の抽出と賦存量の推定が必要であるとされる<sup>(49)</sup>。

### 3 熱水鉱床

#### (1) 技術動向、利用動向

##### (i) 資源量評価

沖縄海域及び伊豆・小笠原海域において、海底熱水鉱床（徴候）が確認されている区域を中心に、ボーリング調査、物理探査等を実施し、鉱徴の垂直方向の連続性や品位等の資源情報が取得され、沖縄海域で「伊是名海穴」については、約500万tという概略資源（鉱石）量を得た。また伊豆・小笠原海域で「ベヨネース海丘」については、深部のデータが不足しているため、概略資源量の推定までは到っていない。日本周辺海域で20数か所程度の海域で海底熱水鉱床の鉱徴が確認されており、まだ増える可能性もある。伊是名同様の鉱床が10か所程度存在することが予測されるとの考えの下、日本周辺海域での概略資源（鉱石）量は約5,000万tと推定された。これは、秋田県北の黒鉱鉱床地帯における累積鉱石産出量に匹敵する規模である<sup>(50)</sup>。平均品位については両鉱床のボーリング調査によって明らかになっている。伊是名海穴鉱床は、ベヨネース海丘に比べて品位は高くないが、資源量としては大きいと考えられる<sup>(51)</sup>。

##### (ii) 環境影響評価

海洋における保護区設定の動きや生物多様性基本法の成立など環境保全に対する重要性が高

(46) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsite 生産手法開発Gの目標と課題<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh21/06-2/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(47) 産業構造審議会産業技術分科会 評価小委員会『メタンハイドレート開発促進事業（フェーズ2中間時）中間評価報告書』平成24年3月 p70.

(48) 産業構造審議会産業技術分科会 評価小委員会『メタンハイドレート開発促進事業（フェーズ2中間時）中間評価報告書』平成24年3月 p71.

(49) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムWebsite 資源量評価Gの目標と課題<<http://www.mh21japan.gr.jp/mh21/07-2/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(50) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月, pp.5, 13-14.

(51) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月, pp.5, 35.

まる中で、海底熱水鉱床の開発においても、開発域での生態系の保全のための科学的な知見の蓄積、根拠の提示が不可欠となっている。またロンドン条約においても鉱業廃棄物の海洋投棄を禁止するという議論がされている<sup>(52)</sup>。

伊是名海穴及びベヨネース海丘を含む周辺海域において、第2白嶺丸及びJAMSTEC（独立行政法人海洋研究開発機構：Japan Agency for Marine Earth Science and Technology）調査船を用いて海洋環境基礎調査、環境ベースライン調査を実施し、環境影響評価に必要な海流、水質、生息生物の状況等の当該海域の基礎的な環境特性、環境情報が把握された<sup>(53)</sup>。これらの結果等を踏まえ、生物遺伝子構造の研究による環境保全策の検討から、海洋環境実証試験海域が選定された。環境ベースライン調査で採取した大型底生生物を対象に遺伝子解析を行い、この2鉱床には固有の種は存在しないことが明らかとなった<sup>(54)</sup>。

### (iii) 資源開発技術

海底熱水鉱床の技術開発には、採鉱、集鉱、揚鉱の要素がある。また採鉱、集鉱、揚鉱に到る一体的な全体システムに関する技術開発も求められている。

採鉱技術は、広範囲に海底熱水鉱床の徴候が確認されている海域での採鉱を想定した採鉱システムの検討が必要である。ここでは資源量評価分野等から得られる掘削対象の地盤特性、マウンドの内部構造やマウンド周辺部の堆積物下に存在する硫化物の採鉱についての新たな知見やデータ等が必要となる。資源エネルギー庁が実施する海底熱水鉱床開発計画では、これまでの海底熱水鉱床に関する知見からマウンドの地山モデルを設定したオペレーション条件の検討が行われた<sup>(55)</sup>。

採掘技術については、独立行政法人海上技術安全研究所などにおいて既に2種類の採掘要素試験機が製作された。高圧タンクなどでの実験結果により、耐圧・動作性能、走行・採掘性能、耐摩耗性能を初めとするデータが取得されている<sup>(56)</sup>。

揚鉱技術については、これまで各種動向調査の結果などを基にシステム検討が行われ、運用面・技術面・コスト面の検討から、ターボ型水中ポンプとリジッド・ライザー管の組み合わせによる揚鉱システムが適切と考えられている<sup>(57)</sup>。

### (iv) 製錬技術

海底熱水鉱床は、かつて秋田などで採掘していた火山性塊状硫化物鉱床である黒鉱鉱床と地質成因的に類似しており、その有用金属の分離・精製には、黒鉱処理で培われた「浮遊選鉱-乾式製錬法」の技術の応用が出来ると考えられている。しかし、海底熱水鉱床は海底表面に噴き出し、沈積されていることから黒鉱鉱床のように地中深部の高圧による圧密が進んでおらず、個々の鉱物粒子が通常の黒鉱鉱床（鉱石）よりも細粒である。このため、有用鉱物と非有用鉱物の相違が現れず、通常の浮遊選鉱法では、有用鉱物の分離が阻害される可能性がある

(52) 経済産業省『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』（平成21年3月）、p.22。

(53) 金属資源技術部運航計画課・深海底調査課『海洋鉱物資源の開発に向けた調査の取組状況』p8. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-07/MRv42n2-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(54) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月、pp.5, 36。

(55) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月、pp.5, 23。

(56) 独立行政法人海上技術安全研究所Website『海底鉱物資源開発の現状と海技研の取り組み』, p.6-11. <[http://www.nmri.go.jp/main/publications/newsletter/fy2012/2012-summer-pagebetu/4p-11p\\_2012summer\\_web.pdf](http://www.nmri.go.jp/main/publications/newsletter/fy2012/2012-summer-pagebetu/4p-11p_2012summer_web.pdf)>

(57) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月、pp.5, 26。

される。また海底熱水鉱床にはガリウム、セレン、テルル等の有用なレアメタルが含まれる一方、砒素等の不純物も多く含むが、既存の乾式製錬法では、銅、鉛、亜鉛といったベースメタルの製錬・精製を主体としたプロセス設計をしていることから微量に含まれるレアメタルの回収ができず、また有害物質の除去が阻害される可能性がある。

近年、乾式製錬法とは異なる製錬プロセスである「湿式製錬法」に注目が集まっている。湿式処理は乾式製錬法に比べ、大きな施設を必要とせず、またレアメタルを含む多種多様な金属の回収が可能であり、さらにバクテリアを使うことで有用金属の分離速度を高める研究などが行われる等、将来的に非鉄製錬において大きな比重を占めるものと期待されている<sup>(58)</sup>。

## (2) 将来予測

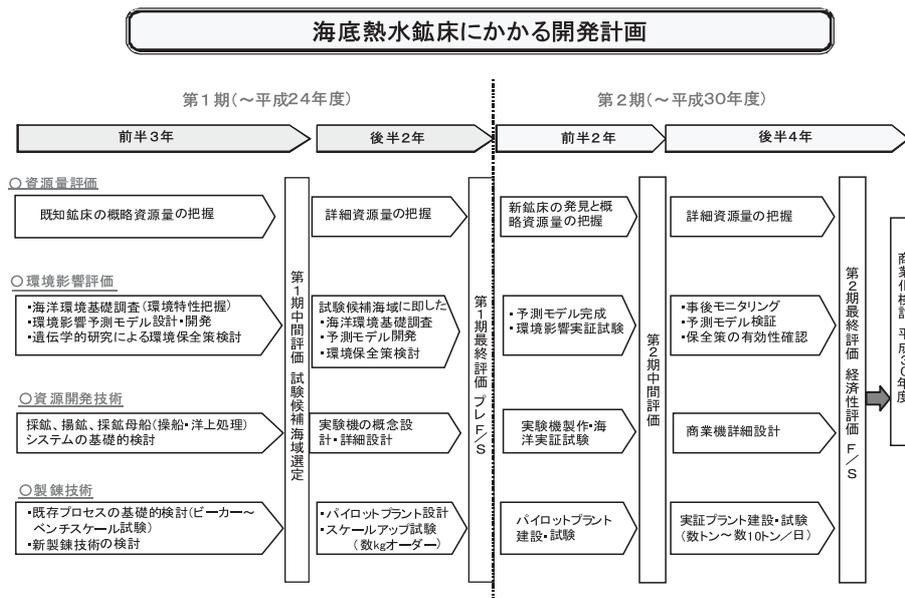
海底熱水鉱床の開発は、日本はもとより世界的にも開発事例のない未踏の分野であり、多くの課題が存在することから、中長期的な観点での取組が必要である。「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」では平成30年度にそれまでの開発計画を評価して、商業化の検討を行うとしている。

開発に当たって取組が必要な分野は、資源量評価、環境影響評価、資源開発技術、製錬技術等、多岐に亘る。また海底熱水鉱床の開発には、技術的要素のみならず、金属価格、陸上資源の生産コスト、環境規制等、不確定要素が多く、こうした海底熱水鉱床の開発を取り巻く諸条件を踏まえて、開発を進めていく必要がある。国連海洋法条約に基づき、公海域の海底鉱物資源を一元的に管理している国際海底機構において、現在、公海域の海底熱水鉱床に関する鉱業規則（マイニングコード）が審議中であるが、我が国の取組の成果等を踏まえ、これら国際的な検討にも積極的に関与・貢献していくことが重要である。これらの検討は、専門家等の意見を踏まえつつ実施することとされている<sup>(59)</sup>。

(58) 経済産業省『「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画（案）」のうち海底熱水鉱床等海底鉱物資源に係る開発計画』（平成21年1月）、p.4.

(59) 経済産業省「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」平成21年3月、p.24.

図5 海底熱水鉱床にかかる開発計画



(出典) 経済産業省「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」平成21年3月

近年、各国において民間、国営機関で深海底鉱物資源の探査・開発の機運が高まっている。民間レベルでの深海底鉱物資源開発活動としては、海外ベンチャー企業のNautilus Minerals (ノーチラスミネラルズ) 社が2013年に海底熱水鉱床の採掘開始を目指し、現在生産システムの開発中である。また石油掘削メーカーや浚渫メーカーも深海底鉱物資源に注目しているという情報があるとされる。国家レベルでは、海洋権益確保に向けた活動が活発化している。中国とロシアは現在保有しているマンガング塊鉱区に加え、新たに熱水鉱床鉱区を取得した。マンガング塊採鉱試験中である韓国は、新しくトンガ、フィジー海域で熱水鉱床の探査鉱区を取得し、インド洋公海域の熱水鉱床鉱区取得申請を2012年5月に行っている<sup>(60)</sup>。

### (3) 賦存量・可採量

沖縄海域の1つの鉱床の情報から、日本国内における総概略資源量は5,000万tと見積もられている。ただし沖縄海域においても、マウンド部では用いた深海用ボーリングマシンの掘削限界を越えて金属硫化物が存在する可能性があること、及び海底面下にマウンドの形態を呈さない金属硫化物が確認されたものの、その把握が十分ではないこと等の理由から、陸上の鉱山で鉱量計算に用いられている国際基準を用いた計算法は適用できていない。

海底熱水鉱床と同様の過程で生成し、かつて商業的に採掘された秋田県北部の「黒鉱鉱床」の平均的規模は単位鉱体として数10～100万t、ひとまとまりの鉱体群として合計500～1,000万t(鉱石重量)程度であった。秋田県北部には10あまりの鉱床群が知られており、その総鉱石重量は5,000万tであり、海底熱水鉱床の推定量と同規模である<sup>(61)</sup>。陸上鉱山と海底熱水鉱床の品位の

(60) 金属資源技術部運航計画課・深海底調査課『海洋鉱物資源の開発に向けた調査の取組状況』, p.97. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-07/MRv42n2-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(61) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月, p.15.

違いの例を表7に示す<sup>(62)</sup>。ここで海底熱水鉱床の品位はサンプルの品位であり、平均値ではない。

可採量については、メタンハイドレート同様に回収技術が確立されていない現状から、回収率が確定できず、現時点では評価されていない。

表3 陸上鉱山と海底熱水鉱床の品位例

### ■ 陸上の鉱山開発鉱床例

地域名・国名・鉱山名	鉱床名	品位					鉱床の規模	
		Cu(%)	Zn(%)	Pb(%)	Au(g/t)	Ag(g/t)	水平的な広がり(m)	垂直的な広がり
秋田	松峰	2.39	3.6	1.0	0.5	57	600 x 400	100m
秋田	深沢角掛沢	1.13	15.4	3.3	0.6	93	500 x 300	5m
秋田	小坂内岱東	2.0	4.4	1.5	0.8	160	400 x 300	40m
チリ・エスコンディダ		1.21					3km x 3-4km	600m
チリ・カセローネ (2011年生産開始)		0.43					2km x 1.5km	400m

※秋田県の鉱床は塊状硫化物鉱床(黒鉱型鉱床)、チリの鉱床はポーフィリー型銅鉱床(大規模低品位)

### ■ 日本近海の海底熱水鉱床

海域名	鉱床名	サンプル品位					鉱化・変質の可能性範囲	
		Cu(%)	Zn(%)	Pb(%)	Au(g/t)	Ag(g/t)	水平的な広がり(m)	垂直的な広がり
伊豆・ベヨネース海丘	白嶺鉱床	1.25	43.3	3.9	30.6	1118	550 x 440	不明(20m仮定)
伊豆・明神海丘	サンライズ	6.5	2.4	0.07	1.1	39.7	500 x 400	不明(20m仮定)
沖縄・伊是名海穴	Hakurei Site	4.7	26.4	15.3	4.0	150	500 x 1,000	不明
南部マリアナトラフ	Pike Site	1.04	0.88	0.08	0.13	59.2	150 x 500	BMS > 5.6m
小笠原	水曜海山	6.5	4.6	0.23	7.3	173.3	250 x 300	BMS 0 - 1m

(出典) 柴崎洋志『海底熱水鉱床の賦存状況及び鉱物特性について』独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部深海底技術課, 平成21年9月3日, p.8.

#### (4) 経済性

資源エネルギー庁において実施されている海底熱水鉱床開発計画の技術開発では、2008～2010年度の3年間で、予備的経済性評価、対象海域の海気象条件設定等の検討を実施し、経済的に成立させるためには5,000t/日の掘削量が必要との設計条件を設定するとともに、各ユニットに係る既存技術について動向調査・机上検討を実施した<sup>(63)</sup>。また韓国では、トンガ政府から付与されている海底熱水鉱床の探査鉱区についてプレフィージビリティスタディにて経済性の評価などを実施している<sup>(64)</sup>。

資源量や分布・形状、環境影響、採掘手法及び製錬手法などは経済性を見極めるためにも重要であるが、まだ不確実性が高く、経済性が見積もれない状態である<sup>(65)</sup>。

#### (5) 技術的課題等

海底熱水鉱床の開発には、技術開発課題だけでなく、資源量推定の不確実性や環境影響リスク、また関連国内法やロンドン条約などによる法規制もボトルネックとして存在する。

資源量は「伊是名海穴」、「ベヨネース海丘」の2か所のみから推定されており、不確実性が大きい。資源量を正しく評価する為には、ボーリング調査を水平方向、垂直方向に展開する事

(62) 柴崎洋志『海底熱水鉱床の賦存状況及び鉱物特性について』独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部深海底技術課, 平成21年9月3日, p.8.

(63) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月, p.36.

(64) 金属資源技術部深海底技術課『JOGMECの海底熱水鉱床の開発に向けた取り組みの状況と国際状況』, p.2. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2011-11/MRv41n4-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(65) 経済産業省資源エネルギー庁『総合資源エネルギー調査会鉱業分科会 (第7回) - 議事要旨』2011年1月. <<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0002319/index07.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

により詳細な資源量把握が必要である。また更なる潜在鉱物資源量を明らかにするため、未探査海域での新たな海底熱水鉱床の発見に向けた広域調査の推進が求められる<sup>(66)</sup>。

技術開発課題としては、採鉱、集鉱、揚鉱の個別要素の開発に加えて、一体的なシステムに関する研究開発、実証試験が求められている。現時点では海気象条件やマウンドの内部構造が正確に解っていないため、今後の調査結果を反映した採鉱方法を検討していく必要があると考えられる<sup>(67)</sup>。また採掘、揚鉱、採鉱母船システムの各要素において、技術開発も必要である<sup>(68)</sup>。

製錬技術では浮遊選鉱法を含めた物理選別法や乾式製錬法等から最適な技術を検討することが求められている。また日本国内には鉱石を一次処理するための選鉱施設が存在しないため、選鉱パイロットプラントの建設を目的とした設計が必要であるとされる。また、海上での処理を効率的に進めるため海底物理選別の実現可能性、選鉱残渣処理法、選鉱実施場所等の検討も引き続き実施する必要があるとされる<sup>(69)</sup>。

環境影響については、鉱床ごとに生物相は異なるため、実証や開発の実施海域における調査が求められる。また環境影響予測シミュレーションに係る我が国独自のモデルについても、今後行われる採掘要素試験にて、現場で得られるデータから同モデルの妥当性を検証する必要がある<sup>(70)</sup>。

海底熱水鉱床の開発に関わる法律に鉱業法があるが、同法は、1950年の制定後初めて根本的な改正が行われ、鉱区に関する先願主義や許可要件が見直された。これにより適切な主体により合理的な資源開発が行われるよう、鉱業権の設定等における許可基準に技術的能力及び経理的基礎を有する者であることや、鉱業権の設定を受けようとする者が実施する鉱業が公共の利益の増進に支障を及ぼす恐れがないこと等を新たに許可の要件として定めることとした<sup>(71)</sup>。

沖縄海域は、恒常的にマグロ延縄漁やイカ漁が行われているため、洋上調査において、延縄の接近により度々調査を中断する事態が生じている。同様の事態は、開発段階においても想定されるため、利害関係者との調整を踏まえた調査・開発計画の立案、調整体制の一元化等が必要とされる。また国際法の観点では、前述のように、ロンドン条約においても鉱業廃棄物の海洋投棄を禁止するという議論がされている<sup>(72)</sup>。

#### 4 その他のエネルギー・鉱物資源等

##### (1) 技術動向、利用動向

###### (i) 利用動向

マンガン団塊は19世紀末にシベリア沖の北極海（カラ海）にて初めて発見された。連合王国

(66) 経済産業省資源エネルギー庁『海底熱水鉱床開発計画にかかる第1期中間評価報告書』平成23年3月, p.37.

(67) 金属資源技術部運航計画課・深海底調査課『海洋鉱物資源の開発に向けた調査の取組状況』, p8. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-07/MRv42n2-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(68) 山本耕次「海底熱水鉱床の採鉱システムの検討について」独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部深海底技術課, 平成22年5月27日

(69) 金属資源技術部運航計画課・深海底調査課『海洋鉱物資源の開発に向けた調査の取組状況』, p8-9. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-07/MRv42n2-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(70) 金属資源技術部運航計画課・深海底調査課『海洋鉱物資源の開発に向けた調査の取組状況』 <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-07/MRv42n2-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(71) 経済産業省資源エネルギー庁資源燃料部『鉱業法改正について』(2012年1月 金属資源レポート), <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-01/MRv41n5-05.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(72) 経済産業省『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』(平成21年3月), p.22.

の海洋調査船チャレンジャー号の航海<sup>(73)</sup>により、世界中のほぼ全海域に存在する事が明らかとなった<sup>(74)</sup>。その後の調査により、ハワイ南方沖のクラリオン団列帯とクリッパートン団列帯に挟まれた海域（通称マンガン銀座）にマンガン団塊の高密度分布域が存在する事が明らかとなった。その後、1970年代において国際企業連合によるマンガン団塊開発技術の研究が実施され、採鉱や製錬技術の開発が行われた<sup>(75)</sup>。

我が国においては、1975年以降、マンガン銀座において探査活動に着手するとともに、1982年には深海底鉱業暫定措置法を制定し、同年、開発の推進母体となる深海資源開発株式会社（DORD）を設立し開発体制の整備を図ってきた<sup>(76)</sup>。マンガン銀座における鉱区登録に関し、1987年には、国連海洋法条約の枠の中でハワイ南東沖において深海資源開発株式会社が先行投資者として7.5万km<sup>2</sup>の鉱区を取得した<sup>(77)</sup>。

1985年からメキシコ沖の東太平洋海域で海底熱水鉱床、1987年から中部・西部太平洋海域でコバルト・リッチ・クラスト鉱床の調査活動を行っている。他方、1985年より資源開発協力基礎調査事業の一環としてSOPAC（南太平洋応用地球科学委員会：South Pacific Applied Geoscience Commission）に対し、クック諸島、キリバス共和国、ツバルにおいてマンガン団塊及びコバルト・リッチ・クラスト鉱床の探査協力を実施している<sup>(78)</sup>。

2001年6月にISA（国際海底機構：International Seabed Authority）との間で15年間の探査契約を締結して以来、10年間机上検討が中心であったが、2011年からの最終5ヵ年計画では、洋上調査を含む計画を立案し、調査航海において資源量の調査および環境調査を実施する事とした。これと併せて採鉱及び選鉱・製錬に関わる技術開発を実施し、最終的には経済評価を実施することとしている<sup>(79)</sup>。

我が国以外にもフランス、ロシア、旧共産圏諸国連合（ブルガリア、キューバ、ポーランド、ロシア、スロバキア）、インドなどが同時期に鉱区を取得し、その後中国、韓国、ドイツが鉱区を取得している。連合王国、ベルギー、キリバスは初めてISAにハワイ沖のマンガン団塊の鉱区申請を行っている。フランスも2012年5月に大西洋中央海嶺の熱水鉱床鉱区をISAに申請済みである。マンガン団塊の鉱区保有国は年々増えており、今後も増加することが予想されるという<sup>(80)</sup>。

(73) Great Britain. Challenger Office. & Murray, John. & Thomson, C. Wyville. & Nares, George S. & Thomson, Frank Tourle., Report on the scientific results of the voyage of H.M.S. Challenger during the years 1873-76 under the command of Captain George S. Nares, R.N., F.R.N., and late Captain Frank Tourle Thomson, R.N. <<http://www.19thcenturyscience.org/HMSC/HMSC-Reports/1891-DeepSeaDeposits/PDFpages/0372.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(74) 一般財団法人日本船主協会Website 海運雑学ゼミナール100年以上前にマンガン団塊を発見した海洋調査船「チャレンジャー号」<[http://www.jsanet.or.jp/seminar/text/seminar\\_149.html](http://www.jsanet.or.jp/seminar/text/seminar_149.html)>, [last accessed: 2013/2/8]

(75) 松本勝時「白嶺丸と深海底の資源探査」『地質ニュース550号』, pp.13-17, 2000年6月<[http://www.gsj.jp/data/chishitsunews/00\\_06\\_03.pdf](http://www.gsj.jp/data/chishitsunews/00_06_03.pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

(76) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構Website 深海底鉱物資源開発深海底鉱物資源調査<[http://www.jogmec.go.jp/jogmec\\_activities/technology\\_metal/seabed/seabed02.html](http://www.jogmec.go.jp/jogmec_activities/technology_metal/seabed/seabed02.html)>, [last accessed: 2013/2/8]

(77) 松本勝時「白嶺丸と深海底の資源探査」『地質ニュース550号』, pp.13-17, 2000年6月<[http://www.gsj.jp/data/chishitsunews/00\\_06\\_03.pdf](http://www.gsj.jp/data/chishitsunews/00_06_03.pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

(78) 岡本信行「南太平洋における深海底鉱物資源調査の成果-21年間のSOPAC調査-」金属資源技術グループ深海底技術チーム2006年1月 <[http://mric.jogmec.go.jp/kouenkai\\_index/2006/briefing\\_060124\\_okamoto.pdf](http://mric.jogmec.go.jp/kouenkai_index/2006/briefing_060124_okamoto.pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

(79) 独立行政法人海上技術安全研究所Website『海底鉱物資源開発の現状と海技研の取り組み』, p.4. <[http://www.nmri.go.jp/main/publications/newsletter/fy2012/2012-summer-pagebetu/4p-11p\\_2012summer\\_web.pdf](http://www.nmri.go.jp/main/publications/newsletter/fy2012/2012-summer-pagebetu/4p-11p_2012summer_web.pdf)>

(80) 金属資源技術部運航計画課・深海底調査課『海洋鉱物資源の開発に向けた調査の取組状況』, p.1. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-07/MRv42n2-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(ii) 採鉱技術

インド、中国、韓国によるマンガン団塊開発技術の研究は自走式採鉱機を核とする採鉱システムの開発を目指しており、インドは2000年に水深410mでのクローラー推進式採鉱機とフレキシブルチューブによる揚砂実験に成功している。中国は2001年に水深150mの湖で、模擬マンガン団塊を用いた採鉱実験を実施し、韓国でも浅海域での実験に取り組んだ<sup>(81)</sup>。

我が国では、マンガン団塊の採鉱技術については、海洋資源総合基盤技術（マンガン団塊採鉱システム）のプロジェクトにおいて1981年度より9年間の計画で検討されている。技術開発においては、商業的規模で効率的かつ経済的に採鉱すること、また海洋法条約の交渉においてマンガン団塊の開発権獲得の条件として挙げられていた独自採鉱技術の保有を目的としていた。当時検討されていたのはマンガン団塊を流体ドレッジ方式で効率よく採集し、整粒し、海底堆積物を分離除去しつつ、次の揚鉱システムに安定供給するための曳航式集鉱機であった。しかし予算不足や経済性の課題、また海洋法条約上の技術移転義務消失等によって開発権獲得のための採鉱技術開発の必要性が薄れたこともあり、商業化に向けて十分な取組みは実施されていない<sup>(82)</sup>。

(iii) 製錬技術

マンガン団塊やコバルトリッチクラストは酸化物として賦存している為、硫化物鉱床とは異なる製錬技術の開発が求められる。コバルトリッチクラストからの白金回収、また微生物が持つ機能を用いて、金属を抽出しようとするバイオリッチング技術等を試みているのは日本だけであり、要素技術では世界をリードしている。

インドでは0.5t/日規模のマンガン団塊製錬パイロットプラントを建設し、2002年から亜硫酸アンモニウム浸出法など数種類の湿式製錬法の比較実験を実施した。韓国では熔錬硫化塩素浸出法とほぼ同じ製錬法にて、0.2t/日規模の製錬パイロットプラントを建設し、実験を2006年に開始した。製錬技術開発において重要なスケールアップの点では、インドや韓国が進んでいる<sup>(83)</sup>。

(iv) 環境影響評価

マンガン団塊の開発では、海底で集鉱機を引きずりまわす事によって海底がかく乱されるため、これが環境に与える影響を評価する必要がある<sup>(84)</sup>。

日本はハワイ沖のマンガン団塊賦存有望海域において、1994年に海底かく乱実験を実施したが、2年後以降モニタリング調査は中断していた。自然かく乱の少ない深海での環境変化を把握するためには、長期モニタリングが必須であり、過去の海底かく乱実験地点において環境調査を2011年に再開し、環境の現状を把握した。17年後において、底質性状などは回復していると考えられるが、マクロベントスについてはかく乱1年前の組成とは大きな違いがみられ、かく乱の影響により群集組成が変化した可能性が考えられるなど、環境影響は今後も検討すべき

(81) 山崎哲生『深海底鉱物資源開発技術の現状』p.64, <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2007-03/MRv36n6-09.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(82) 経済産業省Website『産業技術審議会・研究開発プロジェクト評価報告書（産業科学技術研究開発制度 海洋資源総合基盤技術（マンガン団塊採鉱システム）最終評価報告書）海洋資源総合基盤技術（マンガン団塊採鉱システム）最終評価報告書概要』<<http://www.meti.go.jp/report/data/ghyok14j.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

(83) 山崎哲生『深海底鉱物資源開発技術の現状』pp.65, 70, <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2007-03/MRv36n6-09.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(84) 森脇久光「マンガン団塊開発に伴う環境への影響予測」『資源と素材』Vol.112, 1996, pp.1021-1025.

課題である<sup>(85)</sup>。

## (2) 将来予測

マンガン団塊については、その分布水深が5,000m程度と他の深海底鉱物資源と比較して深く、現時点では経済性などの理由から開発機運が高まっていないのが現状である。しかし、中長期的な観点から、「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」においては、当面は、我が国の権益を維持し、各国の活動状況や生産技術等の動向も注視しつつ、情勢の変化に機動的に対応していくことが必要であるとされた。

コバルトリッチクラストについては、同開発計画の策定時点では、ISAの探査規則や国際的なルール（マイニングコード）が未採択であり（2012年7月に採択された）、この動向を踏まえた検討が行われる予定である<sup>(86)</sup>。

## (3) 賦存量・可採量

全海洋のマンガン団塊の資源量については、1977年にArcher博士による全海洋底の15%に5,000億トン分布しているという試算例がある。また商業的開発の対象となり得る最有望密集海域の賦存量は230億トンと発表されている<sup>(87)</sup>。

コバルトリッチクラストはロシア、中国、韓国等が調査活動を行っているが、探査規則が策定されたばかりであり、調査を行ってきたロシア、韓国、中国等は有望海域の公表を控えていると考えられている<sup>(88)</sup>。このため、資源量を評価するために十分な知見が揃っていない状況である。

## (4) 経済性

金属鉱業事業団から産業技術総合研究所への受託研究（平成13年度及び14年度）と産業技術総合研究所の自主研究（平成16年度）において、マンガン団塊及びコバルトリッチクラストの予察的経済性検討が実施された。そこでは、マンガン団塊及びコバルトリッチクラストは、金属によっては経済的開発の可能性があるとしている。しかし両者とも開発コストは巨大であり、またコバルトの市場規模が小さいため、リスクが大きいとしている。

ここでは廃棄物処理などの環境対策費用の見積もりも検討されておらず、鉱区取得前の探査費用や環境対策コストを含まないという前提において検討された。またコバルトリッチクラストについては、賦存状況や有望鉱床の場所、鉱量などに関する情報の集積がマンガン団塊よりも不十分であるとしており<sup>(89)</sup>、精緻な経済性評価にはデータが不十分であると考えられる。定性的には、技術的な難しさ（採鉱、揚鉱や製錬技術等）に加えて、経済的な問題（初期投資が大き

(85) 金属資源技術部運航計画課・深海底調査課『海洋鉱物資源の開発に向けた調査の取組状況』<<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2012-07/MRv42n2-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(86) 経済産業省『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』（平成21年3月）pp.30-31.

(87) 尾山哲生「マンガン団塊採鉱システムの概要」『石油技術紹介誌』52巻5号, 1987.9, pp.77-78. <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/japt1933/52/5/52\\_5\\_457/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/japt1933/52/5/52_5_457/_pdf)>, [last accessed: 2013/2/8]

(88) 金属資源技術部 深海底技術課「JOGMECの海底熱水鉱床の開発に向けた取り組みの状況と国際状況」『金属資源レポート』2011.11, p.2. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2011-11/MRv41n4-01.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(89) 山崎哲生「深海底鉱物資源開発技術の現状」『金属資源レポート』36巻6号, 2007.3, p.71. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2007-03/MRv36n6-09.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

い、高コスト等)等の理由により商業化に至っていない<sup>(90)</sup>。

(5) 技術的課題等

(i) 技術的課題

マンガン団塊については、軟弱な粘土質の深海底堆積層の上における採鉱機の推進機構などが課題となる。コバルトリッチクラストについては、斜面の微地形変化が激しい基盤岩に薄く付着しているマンガン酸化物を採鉱、掘削する技術が必要である。また海底熱水鉱床と共通の基盤技術が多いため、賦存水深が浅い海底熱水鉱床の技術が確立された後に、その発展・応用により開発が実現する事が想定されている。

製錬技術においては、同鉱物資源は酸化物として賦存する鉱物資源であるため、新たな製錬手法の確立が求められる。またコバルトリッチクラストについてはレアアースも含有しており、その回収も含めた製錬方法が期待されている<sup>(91)</sup>。

(ii) 国際海洋法条約に関わる課題

国連海洋法条約（我が国は1983年に国連海洋法条約に署名した。1994年11月16日に発効）には、公海域（沿岸国の管轄権の及ぶ排他的経済水域（EEZ）・大陸棚の外側の海域）の深海底鉱物資源は人類共同の財産であると規定されており、ISA（国際海底機構：International Seabed Authority）という国際機関（設立：1994年、本部：ジャマイカ共和国キングストン）が一元管理している。国連海洋法条約のすべての締結国を構成国とする<sup>(92)</sup>。

ISAでは公海域での探査規則や国際的なルール（マイニングコード）を策定しており、2000年にマンガン団塊、2010年に海底熱水鉱床について採択された。マンガン団塊については表4に示すように、各国の鉱区登録の動きがある。また審議が続いていたコバルトリッチクラストについても、2012年7月に採択され<sup>(93)</sup>、鉱区申請が益々活発になる事が予想される。

表4 マンガン団塊の鉱区登録の動き

年	動き
昭和62年(1987)	日本、フランス、ロシア(ソ連)、インドの登録
平成 3年(1991)	中国、旧共産圏諸国連合の登録
平成 6年(1994)	韓国の登録
平成17年(2005)	ドイツの登録

(出典) 資源エネルギー庁 『海洋エネルギー・鉱物資源開発計画』のうち海底熱水鉱床等海底鉱物資源に係る開発計画  
平成20年10月、<<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81031a05j.pdf>> [last accessed: 2013/2/8]

(90) 高井隆三・大川 豊「海洋資源利用に関する基礎研究－深海底鉱物資源調査」『独立行政法人海上技術安全研究所研究発表会講演集』4号, 2004, p.3. <<http://www.nmri.go.jp/main/publications/paper/pdf/2A/04/00/PNM2A040020-00.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(91) 山崎哲生「深海底鉱物資源開発技術の現状」『金属資源レポート』36巻6号, 2007.3,p.71. <<http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2007-03/MRv36n6-09.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(92) 外務省Website. 国際海底機構 (ISBA : International Seabed Authority) , <<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kaiyo/isba.html>>

(93) International Seabed Authority Press Release (26 July 2012) , *Eighteenth Session Kingston, Jamaica 16 - 27 July 2012*, <<http://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Press/Press12/SB-18-15.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

### Ⅲ 海洋資源・エネルギーの開発のための基盤技術

#### 1 海洋エネルギー開発に関する基盤技術

##### (1) 作業船

洋上風車の据付には、下図に例示する作業船が用いられている。洋上風力市場の拡大に伴い、洋上風車専用船舶のニーズが高まっているが、引き続きジャッキ・アップ型の作業船が主要な役割を果たすと考えられている<sup>(94)</sup>。

図6 主要な洋上風力据付用船舶



ジャッキ・アップ型



足固定型



DP2 重量物運搬船



半潜水型海洋掘削作業船



クレーン船



クレーン船

(出典) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, pp.78-79.

(94) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.83.

## (2) 海底ケーブル

風車間および洋上風力発電所と陸上の変電所間をつなぐためには海底ケーブルの敷設が必要となる。なお、海底ケーブルには、送電線に加えて通信用ケーブルが組み込まれるのが一般的である<sup>(95)</sup>。

中圧の海底ケーブルが一般的に大規模かつ遠距離に位置する洋上風力発電所については、送電損失の少ない高圧直流送電（HVDC）が有利である。HVDCの導入事例として、ドイツにおいて複数の洋上風力発電所の連系（総設備容量800～900MW）に使用されている。HVDCは、連合王国における大規模かつ遠距離の洋上風力発電所に採用される見通しで、総設備容量が500MW程度、海底ケーブルの総延長が100km程度のプロジェクトにおいて、コスト効率が良いと考えられている<sup>(96)</sup>。

図7 海底ケーブル設計図  
(Anholt洋上風力発電所、デンマーク)

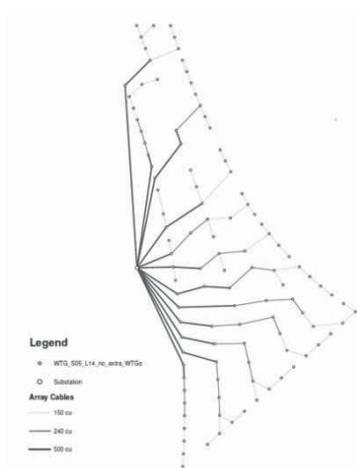


図8 海底ケーブル敷設の様子



(出典左) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.66.

(出典右) DONG Energy "Anholt Offshore Wind Farm - Newsletter", <[http://www.dongenergy.com/anholt/EN/News/anholt\\_nyheder/News/Pages/AnholtOffshoreWindFarm-Newsletter-December2012.aspx](http://www.dongenergy.com/anholt/EN/News/anholt_nyheder/News/Pages/AnholtOffshoreWindFarm-Newsletter-December2012.aspx)>, [last accessed: 2013/2/8]

## 2 海底資源開発に関する基盤技術

### (1) 深海探査技術

マンガン団塊は19世紀末にシベリア沖の北極海（カラ海）にて初めて発見された。連合王国の海洋調査船チャレンジャー号の航海<sup>(97)</sup>により、世界中のほぼ全海域に存在する事が明らかとなった<sup>(98)</sup>。宇宙と並ぶ人類未知の世界である深海の探査技術はその後大きく発展し、船からの

(95) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.67.

(96) EWEA, *WIND IN OUR SAILS*, Brussels: EWEA, 2011, p.69.

(97) Great Britain. Challenger Office. & Murray, John. & Thomson, C. Wyville. & Nares, George S. & Thomson, Frank Tourle., Report on the scientific results of the voyage of H.M.S. Challenger during the years 1873-76 under the command of Captain George S. Nares, R.N., F.R.N., and late Captain Frank Tourle Thomson, R.N., <<http://www.19thcenturyscience.org/HMSC/HMSC-Reports/1891-DeepSeaDeposits/PDFpages/0372.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(98) 一般財団法人日本船主協会Website 海運雑学ゼミナール100年以上前にマンガン団塊を発見した海洋調査船「チャレンジャー号」 <[http://www.jsanet.or.jp/seminar/text/seminar\\_149.html](http://www.jsanet.or.jp/seminar/text/seminar_149.html)>, [last accessed: 2013/2/8]

物理探査や潜水機器による探査技術が開発された。

現在の海底鉱物資源における探査手法は、海洋鉱物資源の深海探査は広域探査（100km 四方）から始まり、鉱床存在域（10km 四方：カルデラ内等）、更に有望鉱床域（1km 四方）を特定し、そこから詳細な資源量を評価するという順序で行われる。各探査において用いられる技術は様々で、広域探査では、船舶の音波測定装置などを用いた比較的粗解像度での地形情報を基に鉱床域を絞り込む。次にAUVやROV（後述）を用いた、高解像度での地形調査や海底熱水活動由来の海水成分の検出による海洋鉱物資源が存在する可能性の高い地点の絞り込みを行う。資源量評価の段階では、サンプリングや試掘井からの規模、形態、品位が総合的に検討される。このような総合的な探査実施システムを踏まえて、海洋資源探査技術実証計画（文部科学省）では、センサー及び探査プラットフォームの技術開発を計画している<sup>(99)</sup>。

#### (i) 物理探査船、掘削船

鉱床や油・ガスの存在をボーリング調査などで直接確認する前に、より広域を効率的に探査するためには、AUV（自律型無人探査機：Autonomous Underwater Vehicle）やROV（遠隔操作無人探査機：Remotely Operated Vehicle）等を活用したりリモートセンシング技術による探査が有効である。これらの探査は、大きく分けて、海水に溶存する金属成分等に着目した探査、海底地形に着目した探査、海底下構造・物性に着目した探査に分類できる<sup>(100)</sup>。

地震探査は、微弱な人工地震を発生させてその反射波を計測することにより地層境界面の震度や形状を調べる方法である。従来は地下の一つの断面を調査する手法であったが、最近では複数の受振ケーブルを曳航する3次元地震探査が主流となっている。経済産業省資源エネルギー庁は三次元物理探査船「資源<sup>(101)</sup>」を2008年にノルウェーのPGS Geophysical社より購入し、日本仕様に改造して使用している。最長6,000mのケーブル12本曳航できるよう、船尾の広がった独特の形をしている。

海底下のサンプリングには、海底掘削装置（BMS）が必要となる。BMSにより海底岩石コアが掘り出され、品位や形態に関する詳細な評価が行われる。JAMSTECが所有する地球深部探査船「ちきゅう<sup>(102)</sup>」は世界有数の海底下掘削装置を持ち、大深度の地下構造を科学的に調査する事ができる。2012年9月に海底下からの掘削深度は科学技術調査としては世界記録となる2,466mに到達した。「ちきゅう」はIODP（統合国際深海掘削計画：Integrated Ocean Drilling Program<sup>(103)</sup>）においても主力掘削船として機能している。

現在JOGMECが所有する「第2白嶺丸」は昭和55年に建造された、マンガング塊等の深海底鉱物資源探査を目的とする専用船である。本船は海底ボーリングマシン、ドレッジャー、パワーグラブの他に大型ウインチ、Aフレーム（船尾の大型クレーン）や自動位置保持システムを装備

(99) 文部科学省 科学技術・学術審議会 海洋開発分科会『海洋資源探査技術実証計画』平成23年9月16日

(100) 文部科学省、海洋開発分科会『海洋鉱物資源の探査に関する技術開発のあり方について（中間とりまとめ）』平成21年6月12日, p. i, ii

(101) 資源エネルギー庁資源・燃料部石油・天然ガス課独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構「国内石油天然ガス基礎調査-三次元物理探査船『資源』の概要」平成24年3月28日

(102) JAMSTEC地球深部探査センターWebsite <<http://www.jamstec.go.jp/chikyuu/jp/CHIKYU/index.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

(103) 2003年10月から始動した多国間国際協力プロジェクト。日米が主導となり、現在、欧州、中国、韓国、豪州、インド、ニュージーランド、ブラジルの26ヶ国が参加している。「ちきゅう」と米国が運航する掘削船ジョイデス・レゾリューション号を主力掘削船とし、欧州が提供する特定任務掘削船を加えた複数の掘削船を用いた深海底を掘削により、地球環境変動、地球内部構造、地殻内生命圏等の解明を目的とした研究を行う。

している<sup>(104)</sup>。2012年には新海洋資源調査船「白嶺」が完成し、更なる資源調査が期待される。

(ii) 潜水探査機器

潜水機器は大きく有人潜水機器と無人潜水機器に分けられる。

有人潜水調査船は、深海を人間の目で直接観察できる点で有効な手段であり、世界の主要国において開発が進められてきた。2012年現在において、4,000m以深の深海に潜航可能な有人潜水調査船を保有しているのは、日本、米国、フランス、ロシア、中国の5カ国に限られる。

日本は最初の深海潜水調査船の「しんかい2000」について、1989年に「しんかい6500」を建造し、1989年に当時の世界最深記録である6,527mまで潜航した。この世界最深記録は、2012年6月24日に中国の有人潜水調査船「蛟竜」(こうりょう)の7,020mの潜航により更新された<sup>(105)</sup>。

無人潜水機器には、ROVとAUVがある。母船とアンビリカルケーブルで結ばれ調査観測範囲が限定されるROVに比べ、AUVは無索で自律航行できることから広範囲の海洋(海中、海底、海底下地層)データを調査するためのセンサプラットフォームに適しており、海底熱水鉱床やメタンハイドレートなどの探査が期待される。日本は、深海巡航探査機「うらしま」(JAMSTEC、AUV)などを所有している。

図9 (左から) 三次元物理探査船「資源」、地球深部探査船「ちきゅう」、深海潜水調査船「しんかい6500」、深海巡航探査機「うらしま」



(出典) 経済産業省資源エネルギー庁 JAMSTEC Website『三次元物理探査船「資源」の一般公開について 2010年8月』<<http://www.jamstec.go.jp/j/>>, [last accessed: 2013/2/8]

(2) 海洋構造物技術

海洋における油田開発、風力エネルギー利用など、海洋における様々な活動において海洋構造物が利用される。海洋油田開発の大水深化に伴い、生産設備や貯油タンクは様々な浮体技術が開発されている。洋上風力発電も欧州を中心に着定式のものが多く普及しているが、水深が深い海域での設置を狙った浮体式設備の研究、実証が進められている。日本では埋め立てに代わる新たな国土開発の手法として、メガフロート(超大型浮体式構造物)の研究開発が行われている。メガフロート工法は羽田空港における新滑走路設置に際して選定はされなかったが、工法として認められた(羽田空港再拡張事業工法評価選定会議)。

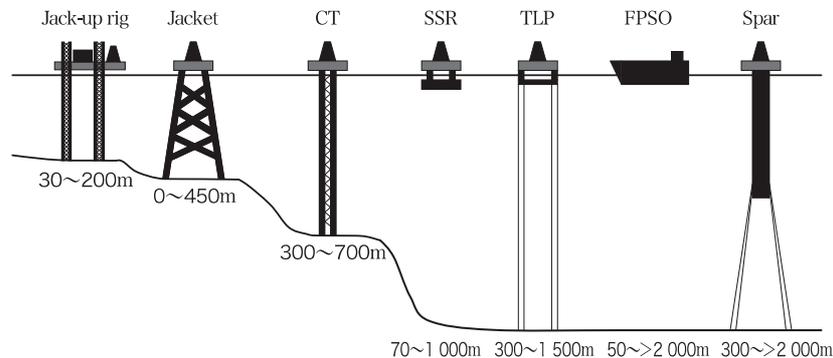
海洋構造物の技術は、海洋における設置形式で大別される。海底に固定される固定式構造物にはサブマージブル型やジャッキ・アップ型があり、浮体式にはセミサブ、Spar、TLP等の

(104) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構Website 深海底鉱物資源開発深海底鉱物資源調査の概要<[http://www.jogmec.go.jp/jogmec\\_activities/technology\\_metal/seabed/seabed01.html](http://www.jogmec.go.jp/jogmec_activities/technology_metal/seabed/seabed01.html)>, [last accessed: 2013/2/8]

(105) 独立行政法人科学技術振興機構『現地調査報告・中国の世界トップレベル研究開発施設(その2) 有人潜水調査船「蛟竜」』, <[http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/1209/r1209\\_ueta.html](http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/1209/r1209_ueta.html)>, [last accessed: 2013/2/8]

形式があり、水深や用途に適した設計の構造物が利用されている<sup>(106)</sup>。

図10 海洋構造物の種類と稼働水深



(出典) 関田欣治「海洋構造物-その設計と建設」『成山堂書店』2002. 及び『石油公団技術部編：海洋工学ハンドブック 第2版』2002. より末長らが神戸製鋼技法, Vol.53, No.2, Sep. 2003にて作成

#### (i) 固定式プラットフォーム

コンクリートや鋼鉄の脚により海底に固定されており、重力式とジャケット式と2種類がある。大水深ではジャケット式が有利となる一方で、水深が深くなるにつれて鋼材重量が指数関数的に増加し、また固有周期が長くなり波周期と重なるという欠点もある<sup>(107)</sup>。

#### (ii) コンプライアントタワー型

コンプライアントタワー型はジャケット式プラットフォームの脚を細く柔軟にして、重量の低減、固有周期の長期化を実現している<sup>(108)</sup>。

#### (iii) セミサブ型

浮体構造で、海中の脚部で構造物を浮かせられるだけの浮力と、構造物の垂直向きを保つ重さを持っている。場所を移動させることが可能で、浮力タンクに水を入れることで上下させることも可能である。通常の場合、掘削作業中は錨を入れて固定するが、自動船位保持装置によっても場所を設定することができる。セミサブ型は揺れが少ないのが特徴で、沖合などの波の荒い海域に設置しても安定しているという利点がある。

セミサブの主要な用途は水深の深い海底油田の掘削リグであり、ブラジルや北海を中心に多くの勢みサブ式プラットフォームが稼働している。近年では石油・ガスの生産設備として利用されるケースも多い。またメガフロートについても、セミサブ工法がある<sup>(109)</sup>。

(106) 長縄成実『最新の坑井掘削技術 (その4)』東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻, <<http://www.kelly.tu-tokyo.ac.jp/~naganawa/jiho0611s.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(107) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構Website 石油・天然ガス用語辞典「海洋プラットフォーム」<<http://oilgas-info.jogmec.go.jp/dicsearch.pl>>, [last accessed: 2013/2/8]

(108) 長縄成実『最新の坑井掘削技術 (その4)』東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻, <<http://www.kelly.tu-tokyo.ac.jp/~naganawa/jiho0611s.pdf>>, [last accessed: 2013/2/8]

(109) 三井海洋開発 Website セミサブとは<<http://www.modec.com/jp/business/semisub/index.html>>, [last accessed: 2013/2/8]

(iv) TLP (Tension Leg Platform) 型

TLP (緊張係留式プラットフォーム) は1980年代より普及してきた技術であり、大水深に適している。浮体構造物はセミサブに類似しているが、係留のために海底に打設された基礎杭に天井と呼ばれる鋼管で係留し半潜水させる点が異なっている。強制浮力により常に緊張力が生じており、水平・垂直方向への動揺が小さいという利点がある。

TLPは1980年代から使用されるようになった大水深海域(水深1,000m超)の開発に適した海洋石油・ガス生産設備で、現在メキシコ湾を中心に世界で約20基のTLPが稼動している。また洋上風力発電の浮体技術としても着目されている<sup>(110)</sup>。

(v) FPSO (Floating Production, Storage and Offloading system)

FPSO/FSOは固定式のプラットフォームに代わる新しい海洋油田生産方式として、1970年代から使用されるようになった技術で、洋上で石油・ガスを生産し、生産した原油を設備内のタンクに貯蔵して、直接輸送タンカーへの積出を行う設備である。

FPSOは浮体式の海洋石油・ガス生産設備の6割以上を占める最もポピュラーな生産設備で、現在世界で約160基のFPSOが稼動している<sup>(111)</sup>。

(vi) Spar型

Spar型は縦長の円筒形の大型ブイを係留策で係留した浮体構造物であり、通常時にはTLPと異なり係留索に緊張力は発生してはいない。TLPと比較して、小型や中型のプラットフォームで経済的であり、垂直の向き下部の錘によって保つために本質的に安定している。Spar型は大水深の開発に適している。構造は大きく3種類の形式が存在する。

- 従来型 (conventional) : 1つの垂直な円筒状の構造
- トラス・スパー (truss spar) : 上部の浮力構造物 (ハード・タンクと呼ばれる) と下部のバラストを入れた構造物 (ソフト・タンクと呼ばれる) を結ぶトラス構造
- セル・スパー (cell spar) : 複数の垂直な円筒状の構造

浮体式洋上風力発電で唯一実用化されているノルウェーのHywind (2.3MW基) はSpar型であり、水深200m程度の海域に設置されている<sup>(112)</sup>。

株式会社三菱総合研究所	科学・安全政策研究本部	主任研究員	つのだ ともひこ 角田 智彦
株式会社三菱総合研究所	科学・安全政策研究本部	研究員	むとう まさのり 武藤 正紀
株式会社三菱総合研究所	環境・エネルギー研究本部	研究員	てらさわ ちひろ 寺澤 千尋

(110) 三井海洋開発 Website TLPとは <<http://www.modec.com/jp/business/tlp/index.html>>, [last accessed: 2013/2/8]  
 (111) 三井海洋開発 Website FPSO/FSOとは<<http://www.modec.com/jp/business/fps/index.html>>, [last accessed: 2013/2/8]  
 (112) Statoil Website <<http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/RenewablePowerProduction/Offshore/Hywind/Pages/HywindPuttingWindPowerToTheTest.aspx>>, [last accessed: 2013/2/8]