

特集 海のロマンへの挑戦 「海洋温度差発電の現状と展望」

—2030年のロードマップへの貢献を目指して—

文：池上康之(佐賀大学海洋エネルギー研究センター)

平成22年7月、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は我が国初めての本格的な「再生可能エネルギー技術白書」を発表した。2030年に向けた再生可能エネルギーの技術的な課題、そこに至るロードマップなどが示されたものである。そのなかで太陽光発電、波力発電などとともに紹介されているのが海洋温度差発電(OTEC=Ocean thermal energy conversion)である。聞き慣れないばかりか、その技術の先端を行くのが日本であることはもっと知られていないが、環境にやさしい発電技術として国際的な評価は高いという。国のエネルギー政策の見直しが急務である今、我々も再生可能エネルギーについてもっと学ぶべきではないかと、そのひとつである海洋温度差発電の最前線で研究を率いる佐賀大学の池上康之准教授に、その現状と展望についてレポートしていただいた。

1.はじめに

海洋温度差発電(OTEC)は、再生可能なエネルギー資源のなかで、地熱発電のような「安定性」と「高稼働率」、海洋深層水との「複合利用」、メガワット級の「スケールメリットによる経済性」などが注目され、近年、米国をはじめ海外で本格的な導入が検討されている。

最初に考案されたのは今から約127年も前のフランスでのことだが、その後、1973年の第一次エネルギーショックをきっかけにして、日本と米国で実証プラントが相次いで建設され、本格的な研究が行われるようになった。当初は、正味出力が得られないのではないかと懸念されていたが、ハワイでのMINI-OTECプロジェクトをはじめ、数々の実証プロジェクトによって海洋温度差エネルギーのみで正味出力が得られることが検証された。

一方、海洋温度差発電の大きな特徴のひとつとして、発電する際に汲み上げる「海洋深層水」の利用があげられる。海洋温度差発電とこの動力源を利用した大規模海洋深層水利用技術は、高知県や沖縄県の海洋深層水利用をはじめ国際的に見ても我が国が卓越した技術と実績を有している分野である。

このような状況の中、我が国は、持続

可能な発展を目指し、日本が有する海洋のポテンシャルの高さを重視し、その利用・開発の本格的な推進のために、平成19年度に「海洋基本法」を施行。以降、海洋エネルギーを含む海洋技術の研究開発の飛躍的な推進が図られている。そのひとつが、NEDOの「再生可能エネルギー技術白書」の発表である。

本稿では、海のロマンへの挑戦として海洋温度差発電のこれまでの成果とともに今後の展開と技術の最前線について概説する。

2. 海洋温度差発電とその複合利用

海洋温度差発電(以下OTEC)は、海洋の表層部の温海水と深層部600~約1,000mの冷海水との間に約10~25℃の温度差として蓄えられている熱エネルギーを、電気エネルギーに変換する発電システムである。基本的には火力発電や原子力発電と仕組みは同じ。熱で水(作動流体)を水蒸気にしてタービンを回すのに対し、これは水の代わりに沸点の低いアンモニアを使うこと

で、高温の熱を必要とせず、海水のわずかな温度差でもタービンを回せるというものの。

図1に、海洋温度差発電システムの原理を示す。主な構成機器は、蒸発器、凝縮器、タービン、発電機、ポンプからなる。これらの機器はパイプで連結され、パイプの中には液体状のアンモニアが封入されており、ポンプによって蒸発器に送られる。そこで、表層の25~30℃の温海水によって加熱された沸点の低いアンモニアは蒸発し、蒸気となる。蒸気はタービンを通過することによって、タービンと発電機を回転させて発電する。タービンを出た蒸気は、凝縮器で深層より汲み上げられた4~10℃の冷海水によって冷却され、再び液体となる。この繰り返しを行うことで、化石燃料やウランを使用するこ

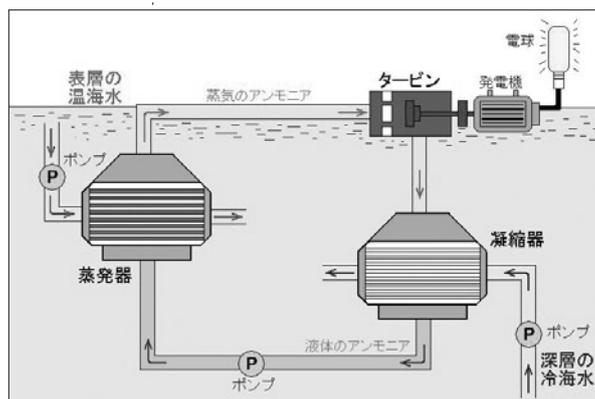


図1 海洋温度差発電の原理

となく海水で発電することができる。

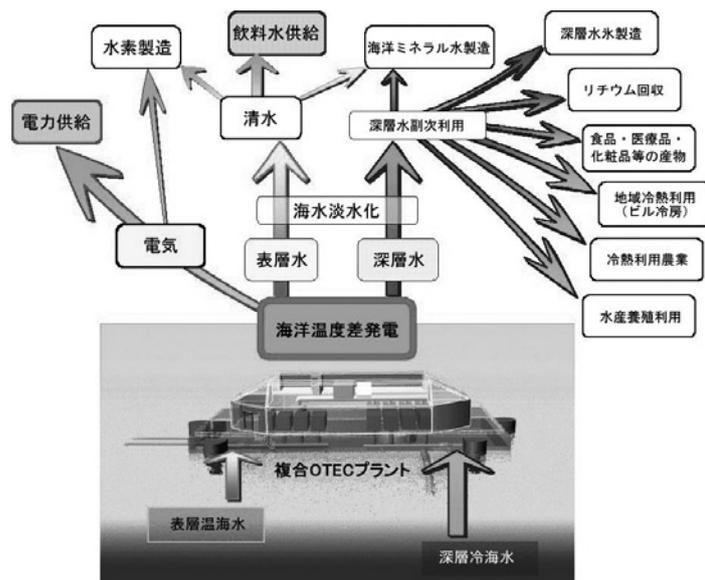
海洋温度差エネルギーの資源量については、これまで多くの学者たちによる種々の試算があるが、世界各地の海水の温度分布を調査し、OTECの設置に適している海域を発表したものがある。それによると表層と深度1,000mの海水との温度差が22℃以上ある海域だけでも、6千万km²になり、世界の海で1兆kWのOTECが可能とされている。

日本の経済水域での海洋温度差エネルギーの総量は、省エネルギーセンター(旧日本熱エネルギー技術協会)の試算によると1年間に1,014kWhになる。これは石油に換算すると約86億トンに相当する。仮に、日本経済水域内の温度差エネルギーの1%を利用するとすれば、年間8,600万トンの石油を節約できることになる。エネルギー大量輸入国であり、海洋国家である我が国にとって貴重なエネルギー資源のひとつなのである。

このエネルギーの源は、地球の3分の2を占める海に降り注いだ太陽からのエネルギーである。このエネルギーの量は膨大であるが、化石燃料と比較するとそのエネルギー密度は極めて小さいため、その複合利用が重要である。

OTECは、発電とともに持続的に海水淡水化や水素製造、リチウム回収などの複合利用が可能である(図2)。この際には製造した水素は「Blue Hydrogen」として米国で提案されている。情報化社会に不可欠なリチウムイオン電池の原料であるリチウムは、我が国にその資源はなく100%輸入しているのが現状である。さらに、発電の際に利用する海洋深層水を用いて、乱獲や環境変化で水産資源が減少している魚場を回復し、持続可能な水産資源の確保を目指した海洋牧場などへの複合利用も期待され、多くのプロジェクトが進められている。

図2 海洋温度差発電の複合利用



3.現状と成果

1) 海洋温度差発電の方式

海洋温度差発電(以下OTEC)の発電方式には、オープンサイクル方式とクロードサイクル方式と大きく2種類ある。我が国ではオイルショックのあとのサンシャイン計画やNEWサンシャイン計画のときにOTECが取り組まれたが、その際、佐賀大学以外の研究機関は、オープンサイクルを主流に研究。米国でも当初はオープンサイクルが採用された。しかし佐賀大学は、オープンサイクルでは課題が多く実現が難しく、OTECの実用化推進のためにはクロード方式が不可欠と、その技術研究に特化した。佐賀大学の懸念通りオープンサイクルはうまくいかず、現在は、クロードサイクル方式が国際的に主流である。にもかかわらず我が国におけるOTECの評価はオープンサイクルに対するものが多く、結果、OTECはうまくいかないと誤解され、過小評価されていることは残念でならない。

2) インドにおける実証研究

前述したように、オイルショック以降、100kWレベルでの実証研究は行われ、海洋の温度差エネルギーのみを利用し

て正味出力(EPRが1以上)が得られることは検証された。しかしながら経済性を高め、実用化の推進には、1,000kW以上での実証が不可欠である。そのような状況の中、OTECの実用化に積極的だったインド政府は、1,000kW以上の商用化施設を目指すプロジェクトをインド国立海洋技術研究所(National Institute of Ocean Technology)を中心にスタートさせ、注目された。

発電プラントは、インド工科大学や佐賀大学などの協力により完成したが、1,000mの深さから汲み上げる取水管に問題があったため、当初は海水の温度差を利用した海水淡水化の研究が重点的に行われた。それでも2005年6月には、陸上型で日量100トンの海洋温度差エネルギーを利用したフラッシュ式海水淡水化を世界で初めて実用化させ、今日まで約6年間継続して淡水を造水している(写真1)。また、かねてより課題であった取水管に関しては、2007年4月、我が国の「拓海」プロジェクトの取水管の係留技術の成功事例などを参考に、管形1mの新しい取水管の設置を行い、530mの深さからの取水による日量1,000トンの海洋温度差エネルギーを用



写真1 日量100トンの淡水化装置
2005年6月実用化(インド)



写真2 日量1,000トンの実証実験装置
2007年4月(インド)

いたプロジェクトを成功させた(写真2)。昨年は同規模のものが3基新設され、最終的には8つの島に日量100~300トン規模の海洋温度差エネルギーを利用した淡水化プラントの建設計画があるという。また、現在動力源としてディーゼル発電を用いているが、海洋温度差エネルギーを利用した日量1万トンの海水淡水化を目指すプロジェクトもすでに動き始めている。

3)その他の地域

インドだけにとどまらず、現在、米国、台湾、南太平洋島嶼国、キューバなどで新たなプロジェクトが提案されたり、実際進行中である。

紙面の都合上、主なものだけを概説する。

■米国の動向

米国では、50kWクローズドサイクル「mini-OTEC」、200kWのオープンサイクルシステムの実証試験以降、原油の価格低迷とともに、約15

年近くOTECの研究は低迷していた。当時、米国では、原油1バーレル49ドル以上にならないとOTECの経済性はないと評価していた。しかし、2007年からの米国エネルギー政策の転換によって、エネルギー省を中心にOTECの本格的な導入の検討を始めている。2008年には、ハワイに1万kWのOTECの検討に関してLockheed Martin社を支援することを発表している(図3)。特に、米国エネルギー省の海洋エネルギー推進プロジェクト中に、OTECが盛り込まれ、米国防衛省も参加のNAVFAC(Naval Facilities Engineering Command)ではOTECの情報収集及び情報交換を目的としてセミナーを開くなど、積極的に情報の収集を始めている。民間では、1970年代に世界で最初の浮体式の海洋温度差発電実証設備「mini-OTEC」を建設したロッキード・マーチン社が上記のような政府の支援を得て、本格的な取り組みを再開した。2008年にはエネルギー省から120万ドル、2009年には防衛省から812万ドル、さらに2010年にもエネルギー省からの助成金を得て、OTECの要素技術開発(取水管や熱交換器など)や



図3 ロッキード社のハワイにおける10MW OTEC 構想
<http://www.lockheedmartin.com/products/OTEC/>

市場調査を実施している。ハワイ州のOTECは、再生可能エネルギーの導入計画に基づき、ハワイ電力やエネルギー省とともに、2015年までに35MW、2030年までに365MW以上の導入を計画に盛り込んでいる。

■フランスの動向

フランスでは、政府主導でOTECの推進が行われている。欧州における海洋再生可能エネルギーのリーダー的役割を波力、海流の分野でイギリスが担っている中、フランスは、OTECの研究において欧州で先導的役割を担っている。フランスにおけるOTEC研究の歴史は古く、1881年に世界で最初にOTECを考案したことに始まる。1950年以降、石油価格の下落などにより研究開発は沈静化していたが、近年になって地球温暖化問題、石油価格の高騰などの影響から、再びOTECへの関心が高まっており、フランス政府は国をあげて研究開発を推進する意向を示している。

近年、フランス政府造船局(Direction des Constructions Navales, DCN)を前身とするDCNS社が2015年までに10MW規模の実証機を建設する計画を発表した(図4)。2009年4月にインド洋の仏領レ・ユニオン島地方政府とR&D(研究・開発)に関する合意を締結し検討を開始するとともに、2010年からはタヒチ島における実施可能性調査も行っている。特に、このタヒチにおける5MW規模のOTECのFS(事業可能性の検証)では、日本のOTECのエンジニアリング会社が、フランス政府からの依頼で協力・参画している。

フランスの海洋エネルギー開発の中心的な役割を担っている海洋開発研究機構(IFREMER)は、2020年までに最終消費エネル



図4 フランス DNSC社の仏領レ・ユニオン島における10MW OTECの構想
<http://en.dcnsgroup.com/>

ギーに占める再生可能エネルギーの割合を20%に引き上げるといふ環境グレネ会議6で提示された目標の達成を前提に、海洋エネルギーの寄与度について試算している。試算は4つのシナリオ別に行われており、ベストシナリオにおいて、200MWのOTECが導入されると試算されている。

■南太平洋

南太平洋などの島嶼国では、原油の高騰や水問題が深刻で、持続可能な発展のためには再生可能なエネルギーの開発が急務となっている。我が国をはじめ各国から支援で導入されたディーゼル発電機の運用が困難となり、持続可能な発展のためのエネルギーの転換が迫られている。このような状況の中、世界的にも海洋温度差に恵まれているこの地域は、海洋温度差エネルギーを利用した持続可能な発展が検討されている(図5)。実績のある我が国の海洋技術が、大いに貢献できる分野としても重要である。

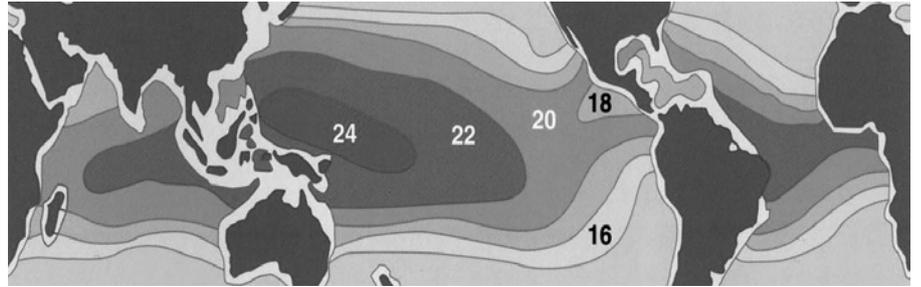


図5 表層と深層1,000mとの平均温度差

4)佐賀大学の研究

OTECの高性能化については、佐賀大学海洋エネルギー研究センターにおいて、作動流体として従来のアンモニアからアンモニアと水の混合媒体を用いた研究が行われている。これまでの成果として、アンモニア+水を作動流体として用いた30kWのシステムにおいては、安定した正味出力が得られている(写真3)。さらにはOTECを推進するための複合利用に取り組み、海水淡水化、リチウム回収などで、実際の海水を用いて実証試験を行い、その可能性を示している。特に、リチウム回収においては、約半年の連続運転で実海水からのリチウム回収に成功している(写真4)。

佐賀大学では、アンモニア+水を用いた30kW海洋温度差発電において、現在、2週間の連続運転では、安定した運転を確認している。理論的な最大出力に対して、約25%程度の正味出力が得られている。また、これまでの実験において、正味出力比(正味出力/発電出力)として最大70%を得ている。詳細は、参

考文献を参照のこと。

編集者注)佐賀大学の研究技術は现阶段では卓越したものであり、世界的にも比較できるような装置がない。そのため、この数字が何を意味するのかを説明することができないのだが、米国やフランス、インドなどの海外の研究者が、協力依頼や視察に佐賀大学を訪れていることは、付け加えておきたい。

5)海洋深層水利用

実用化の点では、OTECより海洋深層水利用が先行している。1986年に科学技術庁のプロジェクトとしてスタートした海洋深層水利用は、1989年に日本最初の陸上型海洋深層水施設が設置されて以来、全国的規模で利用され、新たな産業の創出に貢献している。我が国の陸上型取水施設は、取水量が日量数100トンから約13,000トン(久米島の総計)規模である。我が国の海洋深層水利用技術は、米国とともに先導的な役割を担っており、その成果は台湾をはじめ国際的にその普及が広がっている。

海洋深層水の主な特徴は、低温安定性、富栄養性、清浄性であり、電力のみでなく、食品・飲料への利用、医療分野への利用、豊かな魚場造成のための海洋肥沃化などが注目されている。

海洋深層水を利用した海洋肥沃化への利用分野では、マリノフォーラム21のプロジェクト「拓海」において、世界で初めて浮体型で日量10万トンの海洋深層水を汲み上げる実証に成功し、台風な

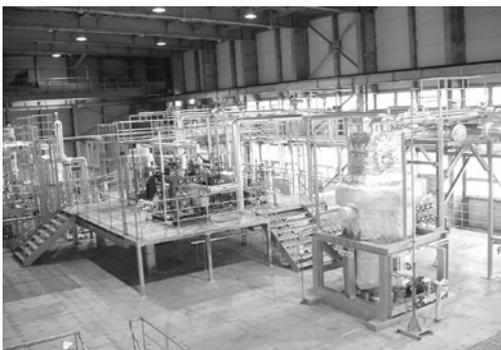


写真3 30kW海洋温度差発電システム(佐賀大学)



写真4 リチウム回収システム(佐賀大学)

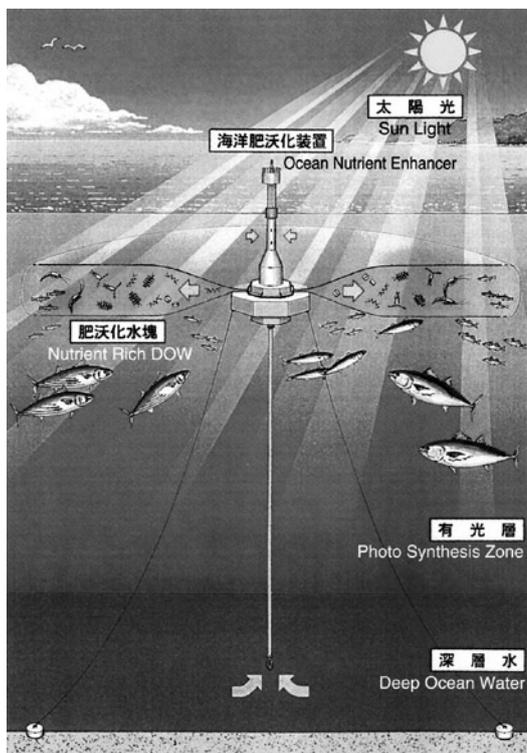


図6 海洋深層水を利用した海洋肥沃化

ども耐える技術であることが検証された(図6・写真5)。国際的にも卓越した技術として高い評価を得ており、海洋深層水利用技術の分野では多くの成果が得られている。一方、海洋深層水を利用した海洋肥沃化を効果的に行うためには、日量50万トンから100万トン以上の汲み上げによる検証が必要といわれている。

4.経済性

OTECの経済性、いわゆる発電コストは、設置する地域において得られる温度差、その季節的変動や設置形式、海底地形、送電方法などによって大きく変わるため、一概には算出できない。これを踏まえて、海洋エネルギー資源利用推進機構(OEA-J)の海洋温度差発電分科会は、OTECの経済性を算出している(参考文献1)。

数百kW以下の規模では、発電のみで経済性を成立させることが困難であるため、海洋深層水利用などと複合さ



写真5 マニフォーラム21「拓海」

せることが推奨されている。1,000kW規模では太陽光発電並みで、離島などディーゼル発電を用いている地域では、その電力の安定性と合わせてメリットを活かせる。一方、スケールメリットが大きい

発電設備であることから、100MW以上の規模では10円/kWh程度の競争力のある発電コストが見込まれている。また、安定性を活かした太陽光発電や風力発電とのハイブリッド化は、太陽光および風力の安定性向上に貢献できるため、これらを融合させた経済性の評価も重要と考えられる。

一方、経済産業省は2015年までに海洋エネルギーの実用化を目指す方針を打ち出した。経済産業省傘下である独立行政法人 NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が2010年7月に刊行した「再生可能エネルギー白書」では、OTECの目指す姿が掲げられている。

○OTECの商用化に向けた技術開発を加速し、海外市場を創出するとともに世界最先端の技術的地位を維持し、国内企業の育成、国際競争力の強化を図る。

○国内産業の育成、低炭素社会の実現、エネルギーセキュリティ等の観点から、国内での導入促進、新規産業の創出を実現する。

これを受け、同白書では技術開発のロードマップを表1および図7の通り設定している。

5.今後の展望と課題

OTECは、他の自然エネルギーと異なり、スケールメリットが極めて大きい特性を有するシステムである。逆に評すると、小さいシステムでは商業的な展開を考える場合、経済的に成立することが困難となるため、1,000kW以上のシステムでの実証が不可欠であると考えられるが、これまでの実証試験は100kWレベル。海外、とくに米国とフランスではその実用化推進は、積極的に検討されているが、我が国では実績ベースの傾向が強く、まず、国などの支援を得たプロジェクトの成功事例が不可欠と考える。

また、OTECの商用展開の推進を考えた場合、我が国においてはまず、発電単独ではなく、大規模海洋深層水の利用の実証が重要と考えられる。この海洋深層水のメリットを活かした、豊かな水産資源を目指す「海洋肥沃化」、自立型の「海水淡水化」、「水素製造」、100%海外に依存している「リチウムやストリチウムの回収」などとの複合的プロジェクトの実現が効果的である。500~1,000kW規模の実証的研究プロジェクトを立ち上げ実績を積むことが、商用化推進にとって極めて重要であると思われる。このときの重要なキーは、「係留」と「浮体」の経済的な実証とそれぞれの技術の統合化の実証と考えられる。「係留」と「浮体」については、これまでの我が国における「拓海」プロジェクトなどの実績を鑑みると実現可能と評されているが、こちらもスケールメリットの大きな技術であるので、そのスケールでの実証が極めて重要である。

また、OTECに留まらず、海洋エネルギーの実用化推進には、単独の技術

項目	2015年	2020年	2030年
国内企業の育成、国際競争力の強化	・1MWプラントの実証試験	・商用プラントの運用開始 ・国内導入の促進	・プラント出力の大型化 ・世界市場シェアの拡大
プラント規模	～1MW	～10MW	～50MW
発電コスト	40～60円/kWh程度	15～25円/kWh程度	8～13円/kWh程度

表1 海洋温度差発電の技術開発目標(NEDO)

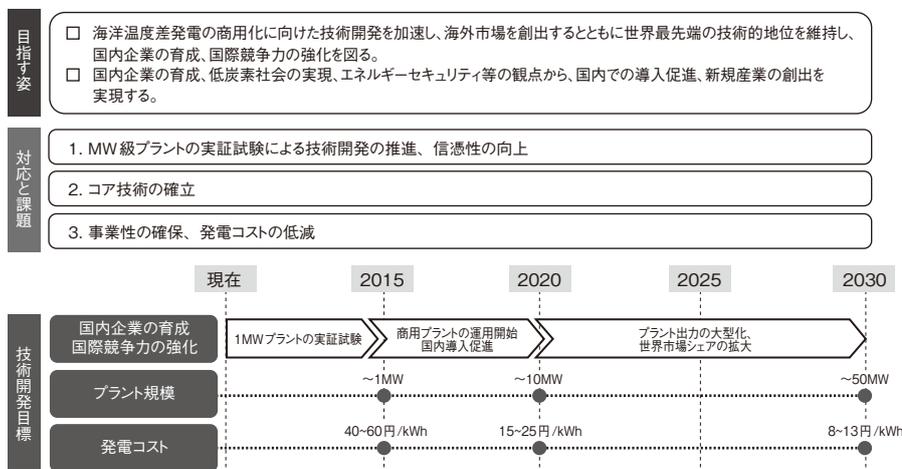


図7 海洋温度差発電の技術ロードマップ

出典: NEDO「再生可能エネルギー白書」2010年7月

して進められている「海洋温度差発電」の研究開発及び実用化が、多くの関係者の協力・ご支援のもと加速されることを強く期待する。

参考文献

- (1) NEDO 再生可能エネルギー技術白書 (2010)
- (2) 緑の分権改革推進事業「久米島海洋深層水複合利用基本調査」調査報告書 (2011)
- (3) IEA-OES Annual Report 2006, 2007, 2008, 2009
- (4) The Ocean Energy Report :TidalWaveOcean-Thermal- MarineCurrent (Edition 3 - 2007)
- (5) 永田・池上、海洋エネルギー、電気科学技術奨励会編、現代電力技術便覧、オーム社(2007)
- (6) 上原春男、海洋温度差発電読本、オーム社(1982)
- (7) 近藤淑郎編者、海洋エネルギー利用技術、森北出版(1996)
- (8) 本間琢磨他、海洋エネルギー読本、オーム社(1980)
- (9) 21世紀の海洋エネルギー開発技術、日本海洋開発建設協会、山海堂(2006)
- (10) NEDO海外レポート No.1001(2007)
- (11) 高木他、海洋エネルギー開発、マスタープラン中間報告一、海洋技術フォーラム海洋エネルギータスクフォース(2007,10)
- (12) 国際海洋エネルギーセミナー論文集、佐賀大学海洋エネルギー研究センター(2007)
- (13) 池上康之、海洋温度差発電、海洋エネルギー資源フォーラム2010(2010)

ではなく、種々の分野の総合的かつ有機的な統合が不可欠である。これらを解決し、大規模な海洋エネルギーの実用化推進を図るために、国際的には各国で本格的なロードマップが作成され、1,000kW規模での商用化推進に向けて確実に進められている。

我が国は、海洋エネルギーの高いポテンシャルと技術力を有しながら、本格的導入計画では欧米に比べて約10年以上遅れていると評され、その利用・開発が本格的な導入段階に至るまでには、戦略的かつ継続的な官民一体となったALL JAPANの取り組みが不可欠と考えられる。

6. おわりに

本年の3月11日以降、原子力エネルギーに対する再評価とともに、「エネルギー」そのものの再評価が重要となっている。7月8日にはNEDOより「風力等

自然エネルギー技術研究開発／海洋エネルギー技術研究開発」に係る共同研究や助成[未だ実用化していない海洋エネルギー発電技術に係る研究開発や実証研究等を多角的に実施することにより、これらの技術分野における新規産業の創出及び国際競争力の強化に資することを目指します]の公募が発表されるなど、大きな動きもある。もっとも「エネルギー」は単純に経済性や環境性だけではなく、持続性、社会性、安全性、安定性、安全保障、技術保全、成長戦略などを加えて、総合的戦略的な判断が不可欠である。この判断は単純ではなく、長期的な視野に立って、全国民的議論によって判断されるべきだと考える。そのようななか、我が国固有の海洋エネルギー資源の利用推進は、持続可能な発展及び環境エネルギー分野での国際貢献の点からも不可欠で、極めて重要である。なかでも「エネルギーの多様化」のひとつと



池上 康之 いけがみ やすゆき

佐賀大学海洋エネルギー研究センター 准教授
福岡県柳川市出身。佐賀大学大学院理工学研究科生産機械工学専攻修士課程、九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻博士後期課程終了。工学博士(九州大学)。新しい冷媒を用いた圧縮式ヒートポンプシステムに関する研究。佐賀大学理工学部附属海洋温度差エネルギー実験施設助教授を経て、准教授に。

- 主な受賞
「日本機械学会島山賞」
「アメリカ機械学会最優秀論文賞Best Paper Award」
「愛地球賞-Globa 100 Eco-Tech Awards」など

■所属学会
＜国際エネルギー機関海洋エネルギー委員会日本側代表(2005年より)日本機械学会、日本伝熱学会、日本太陽エネルギー学会、リニューアブルエネルギー有効利用・普及促進機構、日本化学工業学会、日本計測自動制御学会、日本エネルギー資源学会、日本熱物性学会、日本オン協会、火力原子力発電技術協会＞