特別セッション 「海洋再生可能エネルギー利用技術」まとめ

米山 治男¹

¹正会員 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 海洋利用研究チームリーダー
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
yoneyama@pari.go.jp

東日本大震災における原子力発電所の事故の影響により、再生可能エネルギーを利用した発電技術への要請が非常に高まってきている。波力発電をはじめとする海洋エネルギーの利用に関してはこれまでに多くの取り組みがなされてきており、欧米などでは既に実用化されているものも少なくないが、我が国においては発電コストの問題もあり、本格的な実用化に至ったものはほとんどない。しかしながら、東日本大震災を契機として我が国においても海洋再生可能エネルギーを利用した発電技術が見直されつつある。

本セッションでは、海洋再生可能エネルギーを利用した発電技術について、国内外における最新事例の現況をレビューするとともに、このような発電技術の実用化を我が国で進めるにあたって必要となる技術開発課題について検討を行った。

Key Words : offshore renewable energy, power generation, wave, tidal current, offshore wind

1. はじめに

東日本大震災における原子力発電所の事故の影響により、再生可能エネルギーを利用した発電技術への要請が非常に高まってきている。波力発電をはじめとする海洋エネルギーの利用に関してはこれまでに多くの取り組みがなされてきており、欧米などでは波力発電や潮汐力発電が既に実用化されているとともに、洋上風力発電に至っては北海周辺域において大規模な商業的展開が着々と進められている状況にある。一方、我が国においては、台風や地震などの厳しい環境条件や急峻な海底地形などの地理的条件といった制約による発電コストの問題もあり、波力発電などの研究も数十年前から実施されてきているものの、本格的な実用化に至ったものはほとんどない。しかしながら、東日本大震災を契機として我が国においても再生可能エネルギーとしての海洋エネルギーを利用した発電技術が見直されつつある。

今回の特別セッションでは、海洋再生可能エネルギーを利用した発電技術について、我が国や海外における最新の研究や実用化の事例の現況をレビューするとともに、このような発電技術の実用化を我が国で進めるにあたって必要となる技術開発課題について検討することを目的として、3編の論文の発表とパネル討論を行った。

以下、セッションレビュー、発表論文およびパネル討

論の概要を総括する。

2. セッションレビューの概要

セッションレビューでは、海洋再生可能エネルギーを利用した発電技術についての現状を把握することを目的として、国内外での最新の研究や実用化の事例の現況について概説した。

海洋エネルギーを利用した発電技術には、波力発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電、潮汐力発電などがある。このうち最も実用化されているのは、有名なフランスのランス潮汐発電所をはじめとする潮汐力発電であり、イギリス、アメリカ、カナダ、韓国などで既に商業発電がなされている。また、波力発電についても、イギリス、ノルウェー、ポルトガルなどで実用化されている例があるが、本格的な商業化ではなく小規模な事例が多い。これらと比較して、潮流・海流発電、海洋温度差発電は、いずれも実証研究を進めている段階であり、まだ実用化はなされていないといった状況にある。一方、海洋エネルギーを利用した発電技術として洋上風力発電も含めるとすると、洋上風力発電については特に北海周辺域のデンマーク、ドイツ、イギリスなどの欧州諸国で大規模な商業的展開が進行中である。このような世界的状況の中で、海洋エネルギーを利用した発電技術の導入に遅れを

取っている我が国でも、洋上風力発電や波力発電などの我が国でも利用可能な再生可能エネルギー発電技術の開発を積極的に進めていく必要がある。

洋上風力発電の基礎形式としては、着床式と浮体式があり、水深50m以下の浅海域では着床式が、水深50m以上の深海域では浮体式が適していると言われている。着床式洋上風力発電については、(独法)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(以下、NEDOと称す。)が銚子沖および北九州市沖で本格的な現地実証実験を実施中である。我が国では、瀬棚港、酒田港、鹿島港などで着床式洋上風力発電の実用化がなされているが、いずれも海岸近くの水深の浅い場所であり本格的な施設とは言い難い。海外の着床式洋上風力発電の事例としては、デンマークのコペンハーゲン沖のミドルグレンデン(Middelgrunden)が、世界初の商業洋上ウインドファームとして有名である。一方、浮体式洋上風力発電については、海外ではノルウェーなどが先行して実証研究を実施してきているが、我が国でも環境省が長崎県五島列島において大型浮体式風車の実証研究を行っており、また、経済産業省が福島県沖において浮体式洋上ウインドファームの現地実証実験を進めている。沿岸域に遠浅の海岸の少ない我が国では、大水深海域に適用可能な浮体式洋上風力発電の将来性が高いと考えられている。

波力発電の実用化の事例としては、我が国では、益田式航路標識ブイがある。このブイは、海上保安庁に採用された小型ながらも最初に実用化された浮体式の波力発電装置であり、世界で広く用いられている。波力発電の設置方法として固定式と浮体式の2方式がある。我が国では、固定式の波力発電としては、運輸省第一港湾建設局と港湾技術研究所が酒田港において実証研究開発を行った波力発電ケーソン防波堤が広く知られている。また、浮体式の波力発電としては、海洋科学技術センターが三重県五ヶ所湾沖において実施したマイティホエールが挙げられる。一方、海外においては、固定式の波力発電としては、ノルウェーのベルゲン近郊に建設されたタブチャン(TAPCHAN)があり、岩礁を越波してきた波を利用して発電を行う方式で既に実用化されている。また、イギリスにて、円筒型浮体を5台連結させたペラムス(Pelamis)という浮体式の波力発電装置について、現在実証実験が行われている。

潮流発電については、国内外ともに波力発電と比較して技術開発が遅れており、未だ本格的な実用化はなされていない状況にある。我が国の潮流発電の事例としては、日本大学が来島海峡で行った世界初の潮流発電成功例である海底設置型潮流発電装置の実証実験があり、近年でも北九州市が潮流発電システムの現地実験を関門海峡で実施している。海外の潮流発電の事例としては、イギリス海峡のプリマスやノルウェーハンメルフェスト近郊の

クバルサンド海峡において、それぞれイギリスやノルウェーの企業が海底設置型潮流発電装置の実証実験を行ったものがある。

我が国においては、現在、NEDOにおいて、波力発電、潮流・海流発電および海洋温度差発電の実証研究や要素技術開発も行っている。また、海洋温度差発電については、佐賀大学の海洋エネルギー研究センターにおいて先導的に開発研究が行われており、沖縄県久米島の沖縄県海洋深層水研究所では世界唯一の海洋温度差発電の実用実証プラントが現在稼働している。一方、文部科学省では、先の東日本大震災で被災した三陸沿岸へ導入可能な波力などの海洋再生可能エネルギーについて研究開発しており、岩手県久慈市での波力発電装置の実用化と宮城県塩竈市での潮流発電装置の実用化を目指して検討している。

3. 発表論文の概要

(1) 洋上風力発電の実用化をめざした北九州市沖洋上風況観測塔による気象・海象観測

鷲尾朝昭氏(電源開発株式会社)が、NEDOが推進している洋上風力発電実証研究のうち、北九州市沖に新たに建設された洋上の総合的な気象・海象観測システムの経緯と現況を紹介するとともに、2012年10月の観測開始後の気象・海象観測データの一部について報告した¹⁾。概要は以下の通りである。

- ・北九州市沖海域における洋上風況観測システム実証研究では、洋上風況観測塔および海象計による気象・海象観測、洋上風の特性把握、波浪と洋上風の同時生起性の検証を通じた最適な風作用と波作用の組合せ方法の構築、気象・海象条件を数値シミュレーションで適切に評価するシステム(統合解析システム)の構築などを研究目的としている。

- ・本実証研究では、実海域に国内初の洋上風況観測塔を設置し風況観測を行うことにより、洋上風の出現特性を直接的かつ空間的・定量的に評価することが可能となった。

- ・観測塔の支持構造には、重力式の経済面における利点とジャケット式の構造安定性・施工性における利点を活かしたハイブリッド重力式支持構造を採用した。

- ・2012年10~12月までの高度別の平均風速変化(ウインドシア)の観測結果によると、この地点では、陸からの風よりも海からの風、すなわち洋上風の方がウインドシアが小さいことが確認できた。

- ・北九州市沖近傍のNOWPHAS藍島観測点との波浪観測結果の比較から、詳細な時空間変動に着目すれば波高・周期が大きく異なる場合もあるが、概ね両地点での

波浪は良好な対応を示すことが明らかになった。

- ・観測された流れは最大でも25cm/s程度であり、濁りの拡散などのような環境影響評価にとっては重要であるが、風車や観測塔などの洋上構造物の設計外力としては小さい値であることが確認できた。

- ・波浪と洋上風の相関性については、平均風速と有義波高に直線的な相関性が確認されたが、これは北九州市沖の海域が、遠方からのうねりが来襲することが太平洋側に比較して少ない日本海（玄界灘）沿岸に位置しているためと思われる。

- ・気象場、波浪場、流れ場および水面の状態を統合的に解析するシステム（統合解析システム）を構築し、過去の事例における再現性の検証や観測塔による観測データとの検証を実施中である。

また、本発表に対する質疑応答は以下の通りである。

- ・ハイブリッド重力式基礎を選択したとあるが、欧州での実績も多いモノパイル基礎を選択しなかったのはなぜか。

→観測塔および風車の設置位置の地盤は強固であり、モノパイルのような杭式の基礎を選択した場合、工期とコストが高くなることから、より合理的な基礎形式である重力式を選択することにした。

- ・環境調査について、鳥についてはイメージができるが魚についてはどのように調査するのか。

→観測塔および風車の設置前後における魚の数の増減が分かったといいが、定量的に把握することは非常に難しい。そこで潜水士による海中点検の際には、支持構造物の周辺を調査して魚の集まり具合を確認するようにしている。

(2) NOWPHASのGPS波浪計と沿岸波浪計の観測値に基づく日本沿岸の波パワー

河合弘泰氏（港湾空港技術研究所）が、日本沿岸域の波パワーに関して、NOWPHASのGPS波浪計と沿岸波浪計の観測データを用いて、年あるいは月単位で20分平均波パワーの累積分布曲線や統計量を求め、波パワーの海域特性や季節変化、年変動を調べた結果を紹介した²⁾。概要は以下の通りである。

- ・NOWPHASの波浪観測台帳を元に、太平洋の12基、日本海の5基のGPS波浪計と沿岸波浪計の波浪観測データから各時刻の20分平均波パワーをまず求め、各地点の各年・月平均波パワーや波向を算出し、地点・海域、季節・年による比較を実施した。

- ・20分平均波パワーの累積分布曲線から、20分平均波パワーが年・月の平均値を超える確率は20～40%であることが分かった。

- ・日平均波パワーと20分平均波パワーの統計値の比較

から、日平均と20分平均のどちらの波パワーで統計するかによって年・月の最大値や最小値は倍半分も異なることが明らかになった。

- ・大水深の沖合における波パワーの月別統計量の年変動は無視できないほど大きく、波パワーの統計量の年平均值をある程度正確に求めるためには、多年のデータを用いる必要がある。

- ・東北地方の太平洋沿岸と日本海沿岸のGPS波浪計群では、それぞれ波パワーの平均値も中央波向も空間的にほぼ一様である。また、沿岸波浪計の波パワーはGPS波浪計より小さく、岬・島などの沿岸波浪計を取り囲む地形や設置水深の影響で地点間の違いも顕著である。

- ・波パワーは、波浪観測だけでなく、気象GPVと波浪推算モデルを用いても算出できることから、波浪観測の欠測期間のデータの補完も試みた。

また、本発表に対する質疑応答は以下の通りである。

- ・防波堤に波力発電装置を付けるのではなく、沖合に発電装置を単独で設置するような形式でも事業化できそうか。

→波力発電装置の変換効率やコストも考慮する必要がある。波力発電の方式にも依存しているため、波エネルギーの値だけで判断することは難しいと考えられる。

(3) 潮流発電の高効率化のための新型流向制御板に関する研究

阿部洋士氏（愛媛大学大学院）が、潮流発電について、基本的な性能に優れる直立型サボニウス式水車に着目して、その変換効率を高めるため新規に水車の周囲に流向制御板を取り付ける増速装置の付設工法を提案し、その有効性について実験的に検証した結果を紹介した³⁾。概要は以下の通りである。

- ・既に外輪型流向制御板を導入することで、直立型サボニウス式水車による潮流エネルギーの変換効率が有意に改善できることを示しているが、発電用水車の支持構造や実海域を想定した場合などを含め、さらなる潮流エネルギー変換効率の改善工法について検討を加えた。

- ・水理実験結果によると、渦流型流向制御板の付加により、サボニウス式水車による潮流エネルギー変換効率は単独水車の場合の3倍以上の50%程度にまで改善されることが分かった。このとき、利用可能な回転力も4倍以上と大きくなり、より負荷の大きい大容量の発電機を使用することが可能となる。

- ・従来の外輪型流向制御板と比較して、変換効率、回転トルクが共に2倍程度に改善され、さらに全体支持構造を含めて簡単化できることから、潮流発電の高効率化において効果的である。

- ・渦流型流向制御板は軸対称であるため、上げ潮と下

げ潮で流れが逆転する場合でも同一の能力を発揮できる。構成する流向制御板の傾斜角は、鉛直板を隅角頂点から辺中央でかつ円周上に伸びるように設置するときの角度が最適であることが判明した。

- ・渦流型流向制御装置を設けたサボニウス式水車による変換効率は、多少ながら潮位の影響を受ける。このため、設置水深は、水車の羽根が水没し、かつ流向制御板の天端を静水面付近に位置させるのが良いと考えられる。

- ・水理実験結果によると、渦流型流向制御装置を設けたサボニウス式水車を二基並列配置することで、潮流エネルギー変換効率や水車の回転力が有意に増加することが明らかとなった。

- ・並列配置時の水車間距離や干渉効果について、実験水槽の水路幅の影響と併せて検討することが今後の課題である。

また、本発表に対する質疑応答は以下の通りである。

- ・流れの剥離に関して、新型流向制御板の鉛直板に丸みを帯びさせると良いと思うが、それについてどのように考えるか。

→流向制御板は、PCコンクリートで作製することを想定しており、丸みを帯びさせると作製が難しくなるため直線形にしている。剥離を低減させる方法については、今後の研究課題としており、流向制御板の形状も含めて検討したい。

4. パネル討論の概要

各論文の発表者（(3)については共著者の中村孝幸氏（愛媛大学大学院））の3名をパネラーとして討議を行った。海洋再生可能エネルギーを利用した発電技術と言っても、洋上風力発電、波力発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電など多種多様な発電方法があるため、パネル討論では、技術開発的観点からの議論を考えて、以下の3つの視点から討論を行った。

- ・気象・海象の観測と予測 ⇒ 適地の選定
- ・装置の高効率化・低コスト化 ⇒ 発電単価の低減
- ・実海域での実証試験 ⇒ 実用化への展開

海洋エネルギーを発電に利用する上では、まず発電に適した場所の選定が必要となる。そのためには、風、波、潮流などの海洋エネルギーのポテンシャルを場所ごとに求めなければならない。そこで、気象・海象の観測や観測地点以外の場所の予測モデルによる推定、およびこれらの観測や予測を元にした風況マップ、波浪マップ（波パワーマップ）、潮流マップなどの海洋エネルギーポテンシャルマップの作成が大変重要になる。このとき、より信頼性の高い海洋エネルギーポテンシャルマップを作成するためには、風、波、潮流などの観測機器の精度向上や数値シミュレーションによる予測モデルの高精度化

に関する技術開発研究がさらに求められてくる。

都市部を対象とした大消費地向けの大規模商業発電や離島を対象とした地産地消型の小規模発電などのように電力を使用する目的にも依存するが、発電を行う上では、発電単価が可能な限り小さい方が望ましい。そのためには、発電装置の高効率化、低コスト化などに関する技術開発が必要になる。装置の変換効率をなるべく向上させる高効率化、装置の構造や機器の材料費、設置に要する施工費などのコストをなるべく低減させる低コスト化を実現することが重要である。技術開発的には、これまで発電装置の変換効率の向上を中心に研究が進められてきている状況であるが、我が国の厳しい環境条件や地理的条件に対応できるような安価かつ高強度な構造材料の開発や効率的な施工方法の発案も検討すべき課題である。

現状において実証試験段階にある洋上風力発電はともかく、波力発電や潮流発電などは、今後の実用化への展開を考えると、実海域における実証実験が必要となる。現地実証実験をより推進していくためには、法的側面や費用的側面などから発電装置の技術開発を進めやすい実証実験サイトを整備することが一つの方策として考えられる。欧州の事例として、2003年に設立された欧州海洋エネルギーセンター（European Marine Energy Centre (EMEC)）は、スコットランドのオークニー諸島に波力発電や潮流発電の実証実験サイトを有しており、民間企業による発電装置の技術開発が積極的に実施されている。我が国でも、内閣官房総合海洋政策本部が海洋再生可能エネルギーの実証実験のための海域を提供する「実証フィールド」の公募を都道府県などの地方自治体を対象に行っているところである。このような実証実験サイトが我が国にも複数整備されていくことにより、これまで長年にわたり技術研究開発が進められてきた波力発電や潮流発電などの海洋エネルギーを利用した発電についても、近い将来、早い段階で実用化されることが期待できる。

また、会場とパネラーの間で、以下のような質疑応答が交わされた。

- ・波力発電を実施する適地を選定する上で、波浪の観測や推算についての課題は何があると考えるか。

→波浪の観測・推算において、さらに精度を高める必要があると考えている。波力発電を普及させるためには、波力発電装置の技術開発者や商業化検討をしている研究者などと連携して、必要となる波浪データベースの内容について議論した方がよい。

- ・日本海側では夏季に波浪が静穏であり、波力発電には向かないのではないか。

→日本海側の地域では暖房などの電力需要が冬季に高まると思われるため、夏季は発電装置の点検修理のための期間として割り切るのも一つの考え方である。

・海洋再生可能エネルギーを利用した発電を普及させていくためには、社会的受容性を向上させることも重要なのではないかな。

→技術開発的観点からの議論を念頭に置いたため、ここでは示していなかったが、社会的受容性については、発電事業の進め方や利益の配分、環境への影響などが絡む大変重要な課題であると認識している。

5. まとめ

今回の海洋開発シンポジウムでは、本特別セッションのほかに海洋エネルギーに関する2つのセッションが開催された。これら3つのセッションでは、波エネルギーや海流エネルギーの賦存量の評価（3偏）、波力発電装置・潮流発電装置の開発や高効率化の検討（波力発電5偏、潮流発電3偏）、洋上風力発電施設の現地実証実験（2偏）について論文発表が行われている。

このように、海洋再生可能エネルギーを利用した発電技術については、これまで数多くの技術開発が実施されてきた波力発電を中心にして研究が進められており、これに潮流発電に関する研究が追従して行われているという状況にある。また、洋上風力発電については、現地実証実験が進行中であることから技術開発段階を経て既に実用化・商業化段階へと展開していると考えられる。一方、これらの発電装置の技術開発研究を補完する形で、発電の適地の選定を行うための海洋エネルギーの賦存量の検討についても研究が行われている。

海洋再生可能エネルギーを利用した発電技術には、洋上風力発電、波力発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電など多種多様な発電方法があるため、それぞれの技術開発状況の中で進めていくべき検討課題が異なるものと考えられる。洋上風力発電は、技術的にはほぼ確立されているため実用化は時間の問題であり、商業化を進めて

いく上での法的手続きや環境影響の評価、あるいは社会的受容性についての検討などが今後の課題になると考えられる。また、波力発電や潮流発電は、実用化にはまだ時間がかかると思われるため、まずは発電単価の低減を目的とした装置の高効率化・低コスト化の技術開発を強力に進める必要があり、同時並行的に波エネルギーや潮流エネルギーなどのポテンシャルマップを作成して発電の適地を選定していくことが重要になる。これに加えて、これらの発電技術を早期に実用化するためには、我が国において実機による技術開発を容易にする実証実験サイトを整備することが急務であると言える。

以上のように、海洋エネルギーを利用した発電技術を普及させるためには、技術開発的側面からは、気象・海象の観測と予測を元にした適地の選定、装置の高効率化・低コスト化による発電単価の低減、実海域での実証試験に基づいた実用化への展開、これらについて各種の発電方法を対象としての研究を精力的に進めていくべきであろう。

参考文献

- 1) 鷲尾朝昭, 坂本 登, 中嶋周作, 川口浩二, 青木功, 永井紀彦, 仲井圭二: 洋上風力発電の実用化をめざした北九州市沖洋上風況観測塔による気象・海象観測, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, p. I_1-I_6, 2013.
- 2) 河合弘泰, 川口浩二, 関 克己, 猪俣 勉: NOWPHAS の GPS 波浪計と沿岸波浪計の観測値に基づく日本沿岸の波パワー, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, p. I_7-I_12, 2013.
- 3) 中村孝幸, 阿部洋士, Firman HUSAIN, 井内國光: 潮流発電の高効率化のための新型流向制御板に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, p. I_13-I_18, 2013.

A SUMMARY OF THE SPECIAL SESSION "UTILIZATION TECHNOLOGY OF OFFSHORE RENEWABLE ENERGY"

Haruo YONEYAMA

The request for the power generation technology using renewable energy has been greatly increasing because of the influence of the nuclear plant accident caused by the Great East Japan Earthquake. Many efforts on the utilization of offshore energy such as wave power generation have been carried out so far, and some of them have already been put to practical use in Europe and the United States. On the other hand, in Japan, the full-scale practical use of power generation has hardly been made because of the problems of power generation costs. However, the power generation technology using offshore renewable energy has been revalued in Japan after the Great East Japan Earthquake.

In this special session, the present situation of the latest examples in and outside Japan was reviewed regarding the power generation technology using offshore renewable energy. In addition, the subjects on technology development needed for advancing the practical use of such the power generation technology in our country were discussed.