

# 東北港湾における再生可能エネルギー利活用促進検討について

笹井 剛\*・金正 富雄\*\*・昌子 一郎\*\*\*・遠藤 源\*\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

\*\*\* パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土保全事業本部 港湾部長

\*\*\*\* 前 国土交通省 東北地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課長

港湾地域は大型船舶が入出港し、港湾に関係する企業が立地している。また、海上・陸上の物流システムが交錯する拠点であることから、温室効果ガス排出量削減のために低炭素化が求められている。また、東日本大震災を受け、災害時の港湾機能の維持が重要な課題となっており、電力等の安定した供給が求められている。このような状況の中、東北地方の港湾（陸域及び海域を含む、以下「東北港湾」と称する）において再生可能エネルギーの利活用を促進し、港湾機能を維持するための方策について検討を行った。

キーワード：再生可能エネルギー、地球温暖化対策、港湾機能の維持

## 1. はじめに

再生可能エネルギーとは、エネルギー源に永続的に利用することができる非化石エネルギー（太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱等）を利用するもの<sup>1)</sup>で、利用にあたり地球温暖化の原因の一つとなる温室効果ガスをほとんど排出しない。

近年、地球温暖化対策や、東日本大震災における東京電力福島第一原子力発電所の事故を契機とした我が国のエネルギー政策の見直し等により、再生可能エネルギーの利用拡大が求められている。

一方、港湾地域は大型船舶が入出港し、港湾に関連する企業が立地し、海上・陸上の物流システムが交錯する産業活動の拠点としての機能を有しており、温室効果ガスの排出量も多く効果的な温室効果ガスの排出削減が求められている。また、港湾地域は災害時における緊急物質輸送などの重要な拠点となるため、災害時においても必要な機能を維持することが求められており、災害時の電力確保の観点からも再生可能エネルギーの利活用促進が必要とされている。

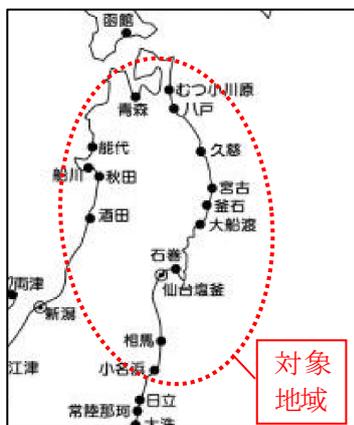


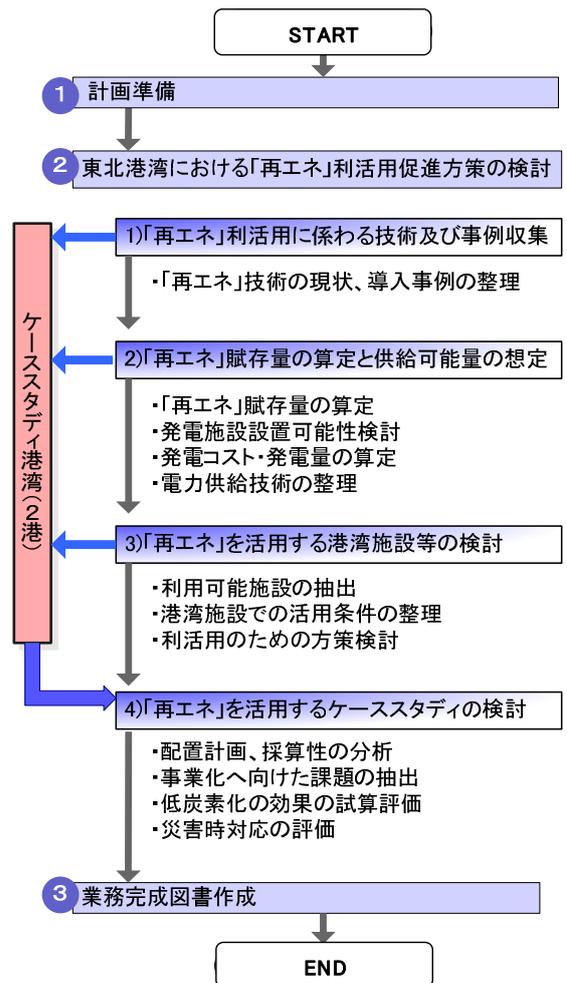
図-1 対象地域

(国土交通省(港湾局)HPに加筆)

## 2. 検討内容

東北港湾において再生可能エネルギーの利活用を促

進し、災害時に港湾機能を維持するための方策について検討を行った。対象地域を図-1に、検討フローを図-2に示す。



※ 「再エネ」:再生可能エネルギー

図-2 検討フロー図

## 2.1 再生可能エネルギーの利活用促進方策

再生可能エネルギーの利活用は、発電した電力を全て電力会社に販売するといった事業形態ではなく、港湾地域における温室効果ガスの排出量削減と、災害時における電力確保を目的に検討を行った。

## 2.2 事例収集および地域特性の整理

再生可能エネルギー技術の現状を整理するとともに、港湾における国内外の導入事例を収集し、活用する際の役割、利点、課題、留意すべき事項等について整理した。収集整理した事例を基に、東北港湾で導入可能な再生可能エネルギーを、太陽光、風力、波力、潮流、潮汐力、海洋温度差とし、対象地域での適合性を確認した。発電方式の概要と対象地域での適合性を以下に記す。

### ○太陽光発電

太陽光発電は、太陽電池を用いて太陽光を直接的に電力に変換する発電方式であり、日射量が大きい程、発電効率がよい。対象地域の日射量は、冬季日本海側は低く、太平洋側では日本海側に比較して高い。特に小名浜港が年間を通じて高い傾向にある(図-3)。

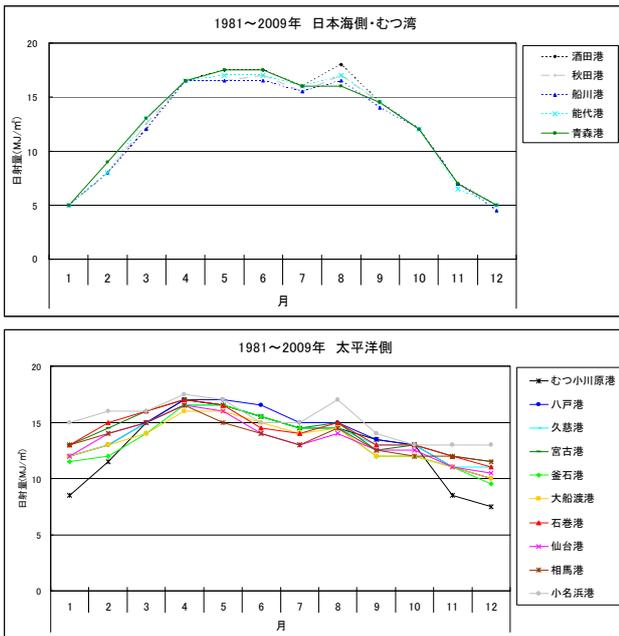


図-3 平均日射量

### ○風力発電

風力発電は、風の力で風車をまわし、その回転運動を電力に変換する発電方式である。経済性の向上には風況の良い場所の選定が必須であり、その目安は年間平均風速7m/s以上<sup>2)</sup>とされている。対象地域の地上高さ70mの風速を見ると、能代港、酒田港、秋田港、八戸港が高く、八戸港、石巻港を除く太平洋側は全般的に低い(図-4)。

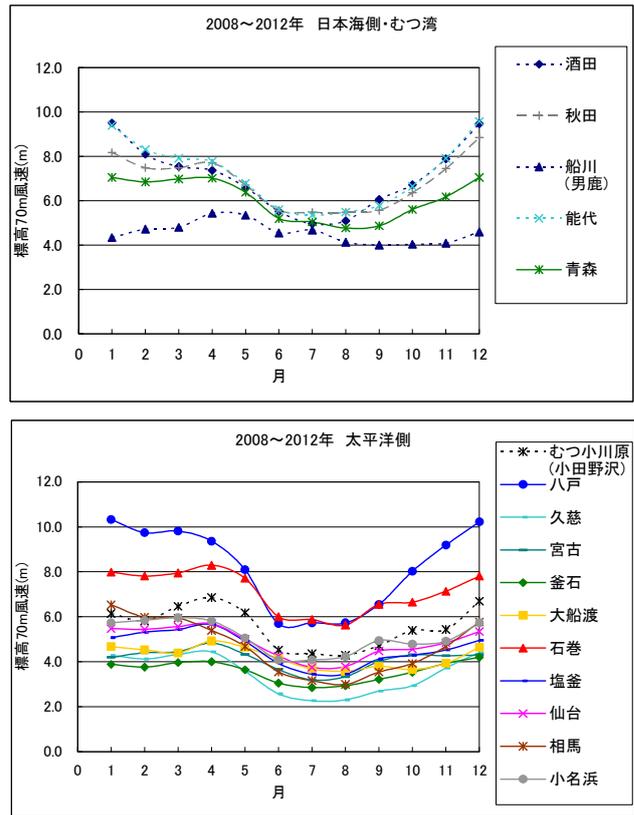


図-4 平均風速(高度:70m)

### ○波力発電

波力発電は、波のエネルギーを利用した発電システムで、主に振動水柱型、稼働物体型、越波型の3種類の発電方式に区別される。対象地域の有義波高をみると、酒田港、秋田港と冬季の日本海側が高い。太平洋側では、久慈港、小名浜港、むつ小川原港が高く、かつ年間を通じて変動が少ない(図-5)。

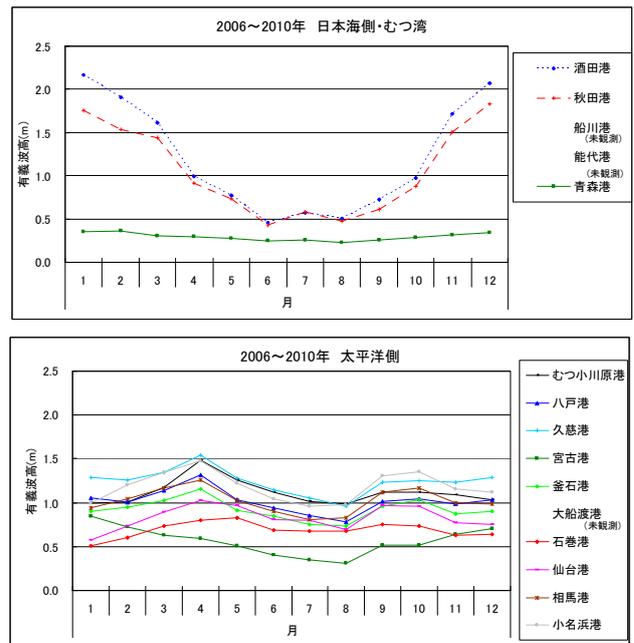


図-5 平均有義波高

○潮流発電

潮流発電は、海水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。今回の検討では、潮流発電に必要な潮流速を、1.5ノット(0.77m/s)<sup>3)</sup>以上とした。対象地域では、大間港沖(津軽海峡)、仙台塩釜港塩釜地区の代ヶ崎水道で潮流発電可能な流速分布となっている。なお、代ヶ崎水道は重要な航路であると共に、航路から外れた場所では水深が2m程度であり発電装置の設置が困難である。

○潮汐力発電

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。潮位差が大きい程大きな潮汐力エネルギーが得られ、一般に潮位差5m以上が実用化の目安となっている<sup>4)</sup>。国内において最も好条件なのは有明海であり、潮位差は4.9mである。対象地域では潮位差が小さく、賦存量(発電ポテンシャル)は低い。

○海洋温度差発電

海洋温度差発電は、表層の温かい海水(表層水)と深層の冷たい海水(深層水)との温度差を利用する発電技術であり、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<sup>4)</sup>。対象地域では、酒田港で一時期(9月)に約20℃の温度差が生じる程度であり、海洋温度差は小さく賦存量は低い。

2.3 賦存量の算定と供給可能量の想定

対象地域における再生可能エネルギーの賦存量を算定し、発電施設設置の可能性、供給可能電力、発電コストの検討を行った。なお、発電コストの算定は次の計算方法により算出した。

発電コスト

$$= (\text{建設コスト} \times \text{年経費率} + \text{運転維持費}) / \text{年間発電量}$$

$$\text{年経費率} = r / (1 - (1+r)^{-n})$$

r: 金利, n: 耐用年数

1) 検討条件

代表的な事例として、太陽光発電、風力発電、波力発電の検討条件を以下に示す。

○太陽光発電

太陽光の賦存量は平均日射量とし、供給可能電力は、「平均日射量」(kWh/m<sup>2</sup>/年)、「電力換算効率」(8.75%)、「太陽光パネル設置可能面積」(m<sup>2</sup>)を乗じたものとした。

太陽光パネルの敷設面積は、各港の港湾計画図に計画される利用区分のうち、埠頭用地、緑地、道路を除く区域を対象とし、空中写真による土地利用状況より設定した。

○風力発電

風力の賦存量は、高度70mにおける年間平均風速による風力エネルギーとし、供給可能電力は、「2MW級の

風車の発電量」(kWh/基/年)、「稼働率」,「風車設置可能基数」(基)を乗じたものとした。

なお、風車の設置位置に関しては、対象港湾の風向風速図から、全風、強風(10m/s以上)とも卓越風向が明瞭であることから、風向き直角方向に3D、風下方向に10D程離すこととした(D:風車ローターの直径、100mとした)。

また、対象港湾の港湾区域内の水深は、最深部で20~30m程度であることから、海底基礎部からの風車の高さは150m程度となる。このため、万が一、風車が倒壊した場合を考慮して、外郭施設、岸壁、航路・泊地等から150m以上離れた位置に計画することとした。

○波力発電

波力の賦存量は、波力エネルギーとし、供給可能電力は酒田港波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験<sup>5)</sup>より、電力変換効率を10%、有義波高1.0m以上5.0m未満を発電可能とし算定した。

波力発電の設置位置は、外郭施設のうち第一線防波堤を中心とした卓越波高に対して波当たりが強い箇所を選定した。

2) 検討結果

賦存量と供給可能量の想定、発電コストの検討結果について、秋田港の事例を表-1に記す。

秋田港では、固定価格買取制度(FIT)による買取価格(平成24年度)と発電コストを比較した場合、風力発電(陸上)と太陽光発電について発電コストが下回る可能性がある結果となった。

表-1 賦存量、発電量と発電コスト(秋田港)

	太陽光	風力	波力
賦存量	3.41 (kW/m <sup>2</sup> ・日)	0.22 (kW/m <sup>2</sup> )	8.6 (kW/m)
設置可能性	38.0 (ha)	77 (基)	3,818 (m)
年間供給可能発電量	41,419 (MWh/年)	373,075 (MWh/年)	22,277 (MWh/年)
発電コスト	37 (円/kWh)	13(陸上) 29(洋上) (円/kWh)	71 (円/kWh)
買取価格	42 (円/kWh)	23.1 (円/kWh)	— (円/kWh)

2.4 利用可能施設等の検討

1) 利用可能施設の抽出

対象地域のうち電力需要の大きい地域を選定し、再生可能エネルギーによる発電電力の利用可能施設の抽出を行った。

港湾における設備容量の大きい施設としては、ガントリークレーン(約700kW)や冷凍・冷蔵コンテナ、照明設備を有するコンテナターミナル、アンローダー(約1,000kW)やベルトコンベア、照明設備を有する石炭等

バルクターミナル、100~300kWの製氷・冷蔵・冷凍施設などの漁業関連施設が挙げられ、公共的な建築物として、フェリーターミナルや各種集客施設等が挙げられ、これら施設の電力需要について調査を行った。

2) 利用条件の整理

調査により、港湾荷役関連施設は昼間に需要が大きく、集客施設においては夏場の需要が大きいなどの傾向がみられ、対象地域における需要量の大きな施設の電力需要のパターンを以下の4通りに整理した。

- ①昼間振動型 : 昼間の需要が主で、安定的でなく、激しく変動が見られる。
- ②昼間年中安定型 : 昼間の需要が主で、年間を通じて安定している。
- ③24時間年中安定型: 年間を通じて24時間継続して安定した大きな需要がある。
- ④昼間夏季変動型 : 昼間の需要が主で、夏季の需要の変動が大きい。

秋田港コンテナターミナルの電力需要の例では、コンテナ関連の電力需要に月による変動が少なく、アンローダー等のバルク関係の変動が大きい(図-6)。また、コンテナターミナル(コンテナ関連)の電力消費量は、1時間当たり100~200kWh程度であり、アンローダーやベルトコンベア等のバルク関係が1時間当たり760kWh(荷役機械メーカーヒアリング)と突出して大きくなっており(図-7)、電力需要パターンでは、①昼間振動型に分類される。

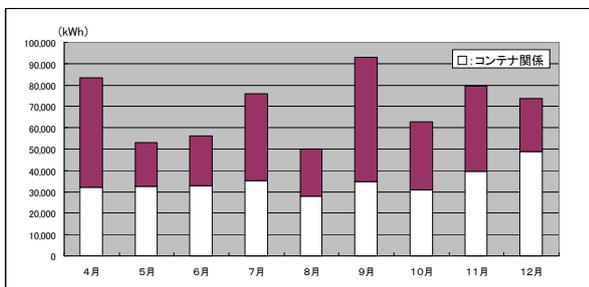


図-6 秋田港コンテナターミナルの月別電力消費量

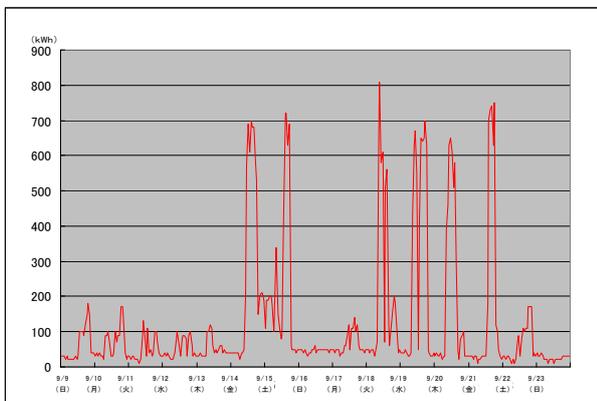


図-7 秋田港コンテナターミナルの電力消費量の時間変動

調査の結果、対象地域の電力需要量の大きな施設は単独で6,600Vの高圧配電線で受電しており、再生可能エネルギーによる発電規模が2MW以上になると、(一般的な電柱にみられる)高圧配電線での配電ができず、送電線(66,000Vなど)での配電や、受送電設備等が必要となることが明らかになった。

3) 利活用の方策検討

再生可能エネルギーによる発電規模を2MW未満とし、対象地域の港湾荷役関連施設等での活用を検討した結果、以下の方策が必要であることが明らかになった。

- ①発電量と電力需要は一致しないため、余剰電力の売電や不足分の買電、蓄電池システムや需給マネジメントなど、受供給の変動を吸収し平滑化する仕組み。
- ②共同受電や一括受電、スマートグリッド(次世代送電網)など、小口の需要家をまとめて1口の需要量を拡大する仕組み。
- ③荷役機械、電気機器の省エネ化や蓄電池システムによるピークカットなどによる、単発的な大需要を抑制する仕組み。

2.5 ケーススタディの検討

港湾における再生可能エネルギー活用を検討事例として、秋田港での検討結果を以下に記す。

1) 秋田港の概要

秋田港は、環日本海地区の港湾としては最大規模となり、コンテナターミナルが整備され、定期就航フェリーの寄港地となっている。隣接した道の駅「あきた港」には、多目的ホールや集客施設(覆い付緑地「セリオンリスタ」)等がある。

2) 再生可能エネルギーの活用検討

対象施設を秋田港コンテナターミナルとして活用検討を行った。コンテナターミナル電力契約は、6,600Vとなっているため、現状の契約電圧で接続可能な発電総量は2MW未満となる。本検討では、再生可能エネルギーによる発電を、風力発電1.5MW、太陽光発電0.3MWとした。秋田港における配置計画を図-8に示す。

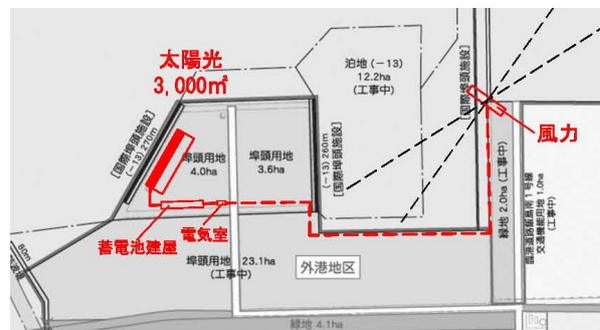


図-8 配置計画

電力需要と発電による供給電力の関係を確認するため、平成24年9月9日から2週間分の電力需要のデータと、同期間の気象条件から求められる発電量の比較を行った。図-9に電力需要量と発電量の関係を示す。

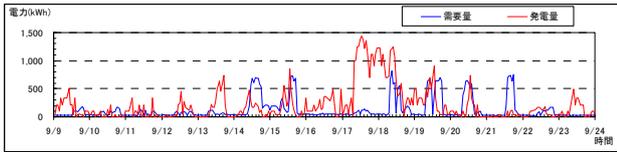


図-9 電力需要量と発電量の関係

電力需要量と発電量の関係から、両者は一致していない。そのため定置型蓄電池を用いた需給調整について以下の5ケースについて検討を行った。

各ケースの検討結果の一部を表-2に示す。

Case-1: 全量再エネ利用とし蓄電池で賄う

Case-2: 需要量の1時間分は再エネで補給し蓄電池で賄う

Case-3: Case-2に加え災害時の供給量として1時間分容量を常に保有

Case-4: 蓄電池なし

Case-5: 需要ピーク時のピークカットを蓄電池で賄う

表-2 蓄電池の利用と発電コスト

Case	蓄電池 (kWh)	再エネ利用率 (%)	発電コスト (円/kWh)
1	8100	100.0	154
2	800	70.3	40
3	1600	70.3	53
4	—	51.5	21
5	200	63.8	31

### 3) ケーススタディ検討結果

秋田港の再生可能エネルギーの活用検討では、以下の項目が明らかになった。

○需要量を全て発電で賄うためには、8,100kWh (約30億円)の蓄電池システムが必要となり、実現性が低い (Case-1)。

○需要量ピークの1時間分の蓄電池の容量 (800kWh) を持ったとしても再エネ利用率は70.3%と18.8%の向上にとどまり、投資 (約5億円) に対する効果は低い (Case-2)。

○蓄電池なし (Case-4) では、再エネ利用率が51.5%と低いため、余剰電力量が大きく系統への連携が必要。年間売電推計量は、発電量の87%と高くなる。

○ピークカット (需要量が600kWhを超えた時のみ蓄電池より放電) を目的とした蓄電池 (200kWh) を持つことにより、再エネの利用可能率は63.8%に向上し、契約電力量 (基本料金) を210kWh下げ、年間約476万円の電気代を節約する可能性がある。また、最も需給が逼迫した9月の2週間においても蓄電池は98.3%とほとんどフル充電の状態にあることから災害時における非常用電源として利用できる可能性が高い (Case-5)。

### 3. 今後の課題

今回の検討により明らかになった課題を以下に記す。

#### 1) 事業手法による課題

事業手法には、次の2つの手法が考えられそれぞれ課題が生じる。

(1) 民間事業者が再生可能エネルギーによる発電事業を行う場合

民間事業者が再生可能エネルギーによる発電を行い、平時は電力会社の系統へ電力を売電 (FIT を活用) し事業収入を得る一方、停電時は電力会社系統を解列して港湾側へ電力を供給する発電システムである。発電出力の変動抑制や停電時のバックアップとして蓄電池を組み合わせ、停電など非常時対応として利用ができるメリットがある。但し、蓄電設備のコスト増が課題となるほか、非常時の電力融通契約を民間発電事業者と締結する必要がある。

(2) 民間事業者が再生可能エネルギーによる発電を行う場合 (余剰電力は売電する)

民間事業者が再生可能エネルギーによる発電事業を行い、港湾荷役関連施設等の全需要量を供給する。また、洋上風力発電などで電力会社への売電事業も行う。

港湾荷役関連施設等と電力会社の需給契約が高圧 (6.6kV) であるため、接続可能な発電総量は2000kWとなる。そのため、港湾荷役関連施設等向けの発電事業と売電事業との系統を分けた発電システムが必要となる。また、発電を行う民間事業者の事業採算性を考慮すると、港湾荷役関連施設等がFIT相当額で電力を買い取る事が望ましい。

#### 2) 技術的課題

(1) 高圧需給契約による上限

港湾荷役関連施設等が電力会社と高圧需給契約 (6.6kV) を結んでいることから、電力会社と系統連系可能な発電出力は2000kW程度にする事が望ましく、これを超える場合は電力会社との協議が必要となる。また、既存配電線の許容量を考慮すると、特別高圧の需給契約へ変更を求められる場合も想定され、設備コストの発生や上位資格者 (電気主任技術者) の配置が必要となる。

(2) 軽量の太陽光パネルの設置

太陽光発電事業は大規模な用地を必要とすることから、遊休地の少ない港湾部では倉庫など大規模施設の屋根を活用することが有効である。太陽光パネルの設置にあたっては、その建築物の構造や強度に影響を与えない重量で設置する事が必要となり、地面に直接設置する場合と比較して、軽量の太陽光パネルの導入や工法の検討が必要となる。

(3) パワーコンディショナの機器寿命

パワーコンディショナは、特に高温となる夏場に変換ロスが大きくなる傾向にあり、設置環境 (温度や湿度並びに塩害等) の影響を受けやすい機器である。また、太陽光パネルの平均寿命 (20年) と比較して、パワーコンディショナの平均寿命は10年程度と事業性を

圧迫するため、機器の高寿命化が課題となっている。

#### (4) スマートグリッドの整備促進

小名浜港のケーススタディでは、大口の需要家が複数立地することから、再生可能エネルギーによる発電電力を各需要家に効率よく需給できるEMS(エネルギーマネジメントシステム)を導入し、港湾域におけるスマートコミュニティを構築する事が適するが、そのための電力網の整備が求められる。

### 3) 制度的課題

#### (1) 周辺施設との協力体制・法整備

電力需要のある施設の屋根面積が限られていることから、効率の良い需給関係を構築するために、隣接する施設で電力や設置可能施設(屋根・遊休地)を融通し、地域全体として再生可能エネルギー導入効果を高める取り組みが有効となる(スマートコミュニティ)。効率の良い需給関係を構築する事は、結果的に再生可能エネルギー発電に対する投資効率(事業採算性)を高める事にも貢献できるため、行政による制度整備や隣接する企業・地域関係者との協力体制が必要となる。

#### (2) 大規模民間事業との連携・役割分担

電力需要量の大きな港湾荷役関連施設等では、出力1,000kWを必要とすることから、PCSの費用がかさみ、単独で設置する2MW未満のみでは発電コストが下がらないことがネックとなる。そのため、民間事業者による大規模洋上ウィンドファームとセットにした港湾荷役関連施設等への電力供給や非常時の電力供給のための蓄電池システムの整備を官民の連携・役割分担による事業手法の検討も必要である。

#### (3) 需給のマッチング

港湾荷役関連施設等に設置した再生可能エネルギーによる発電量が、自家消費を上回る場合に、隣接する複数の施設に電力を融通する事が考えられる。その場合、隣接する施設同士で受電組合等を設立する事によって、初期投資や維持管理体制を共有できるため、効率的な電力の需給関係を構築できる可能性がある。組合方式を活用する際の制度・制約、対象となる個別需要との調整等を別途具体的に検討する必要がある。

#### (4) 東北地域全体での役割分担

ケーススタディにおいて、各施設における再生可能エネルギーの利活用の検討を行った結果、東北地方は全体的に利用できる再生可能エネルギーのポテンシャルが高い事が分かった。特に日本海側の地域では(秋田港・酒田港など)、冬季風浪や波浪が卓越している事から、風力発電や波力発電等による発電が効率的である。また太平洋側(小名浜港、仙台港など)においては、夏季の日照条件に優れる地域が多いため太陽光発電を中心とした発電が効率的である。従って、各地域の特性に応じた再生可能エネルギー導入に向けた類型化、ガイドラインを作成する事で、電力需給が逼迫する夏季・冬季の緩和及び温暖化対策の両面に資する。

#### (5) 逆潮流時の変動制御

余剰となる電力を無駄なく活用するためには、系統へ流す逆潮流を行う必要があり相応の売電収入を見込むことも出来る。ただし、再生可能エネルギーは変動の大きな電力であることから、系統管理者への負担が発生することに留意する必要がある。

公的機関が再生可能エネルギーを系統に逆潮流するにあたっては、変動をある程度抑えるなど、系統管理者の負担軽減のための措置も考慮しておく必要がある。そのためには、実際に確保すべき電池容量の想定、蓄電容量と運用時の放電深度の把握、系統へ与える周波数、電圧などの影響と対応策を有していることが求められる。

### 謝辞

本稿は、国土交通省東北地方整備局発注の「東北港湾における再生可能エネルギー利活用促進検討業務」の成果の一部をまとめたものである。執筆に当たり、関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律(平成二十一年七月八日法律第七十二号)
- 2) Renewable Energy Essentials: Wind, IEA, 2008.
- 3) 株式会社ノヴァエネルギーHP  
(<http://www.nova-ene.co.jp/products/index.html>).
- 4) NEDO再生可能エネルギー技術白書～新たなエネルギー社会の実現に向けて～、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、平成22年7月。
- 5) 高橋重雄ら：波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験における観測データの解析結果、港湾技術研究所報告 第31巻2号、1992。