

代替燃料創出を目指した浮体式風力 発電施設に関する基礎的研究

A BASIC STUDY OF FLOATING WIND POWER SYSTEM
FOR PURPOSE OF ALTERNATIVE FUEL PRODUCTION

大川豊¹・矢後清和²・太田真³・山田義則⁴・高野宰⁵・関田欣治⁶
Yutaka OHKAWA, Kiyokazu YAGO, Makoto OHTA, Yoshinori YAMADA,
Osamu TAKANO, Kinji SEKITA

¹工修 (独)海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

²正会員(独)海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

³(財)日本造船技術センター 浮体(カブート)技術部 (〒112-0004 東京都文京区後楽2-1-2)

⁴石川島播磨重工業株式会社 鉄構事業部 (〒478-8650 愛知県知多市北浜町1番地の1)

⁵工修 (株)三井造船昭島研究所 技術統括部 (〒196-0012 東京都昭島市つつじが丘1-1-50)

⁶正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水折戸 3-20-1)

This paper describes the technical feasibility study and the economical evaluation of the floating wind power system. The box-girder type floating structure installed three wind turbines is proposed as a concept. The 5MW class propeller type turbines are adopted. The box girder with simple structures is favorable in the cost performance. Moreover, the wave induced motion and the righting moment can be optimized easily. The estimations of the static inclination and the wave induced motion were carried out in technical study. The relations between wind loads and motions or inclinations were investigated by the wind tunnel test. On the numerical analysis of motions, the fluid dynamic forces were calculated using the potential theory with zero draft assumption in the estimation of motion. The floating structure model was consisted by beam elements of FEM. The calculation result showed that the motion and the inclination in an operation condition are less than 5 degrees. According to the economic estimation, it was presumed that the proposed concept can be attained to the equally cost of water-power generation and others.

Key Words : Wind Power, Alternative Energy, Floating Structure, Methane, hydrogen

1. 緒 言

地球温暖化など環境問題の顕在化に伴い、再生可能エネルギーに対する期待が世界的に高まっている。中でも、CO₂排出比率が他に比べ低いとされる風力発電は、環境負荷が小さいエネルギー資源として注目されており、欧州を中心に大規模な導入が進められている。我が国の風力発電導入目標は2010年度までに300万kWという数値が掲げられている。しかし、陸上の適地の減少により規制区域への設置なども検討されているものの、現在の達成度は1/6程度に過ぎず、今後、海上への大規模な開発に移行せざるを得ないと目されている。欧州では、沿岸から数10kmの範囲に広大な遠浅海域を有しているため、着底基礎構造による大規模風力発電ファームの建設が進んでいるが、我が国の沿岸は急

峻な海底地形のため着定式による開発にも限界があると考えられる。

本研究では、大水深域に適用でき、動揺安定性と経済性に富む浮体式風力発電ユニットを提案し、技術的成立性と経済性について検証する。また、風力発電の短所とされる不安定性を解消するため、得られた電力を用いた海水の電解により水素・メタンを生成し、化学エネルギーとして貯蔵供給するシステムを考え、その実現可能性について評価を試みる。

なお、本研究は(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の平成15年度公募で採択され、3カ年計画で開始されたプロジェクトである。研究1年目の15年度は、全体システムとしての基本計画の確立を目指した広範な要素研究を行った。本論文は、この中から代表的な成果を選び報告するものである。

2. 浮体式風力発電施設のコンセプト

全体システムのコンセプトの概要を図-1に示す。現在、水素社会を標榜する考え方がある一方で、水素の運搬貯蔵や利用機材などの社会基盤が整備されるには年月を要するものと考えられ、即応性のあるものとは言えない。本研究では、現在のインフラに大きな変更を与えることなく、化石燃料に変わるエネルギーを供給するコンセプトの提案を目指した。風力発電装置から供給される電力エネルギーは海水の電気分解に使われ水素を生成する。地球上に存在する水の97.2%は海水で、2.15%が極地に氷であり、残りの0.65%が陸域に存在する。すなわち、真水は貴重資源であるため海水から水素を製造する必要がある。近年、塩素などの有害物質を発生することなく水素のみを電解できる触媒が開発されている¹⁾。本研究でもこの技術を採用する。得られた水素は一時貯蔵され、CO₂と反応させメタンに改質するが、これに関しても99%以上の反応効率を持つ触媒が開発されている¹⁾。CO₂は火力発電所などで回収液化し専用船で運搬する。メタンは天然ガスの主成分であり、この運搬技術が応用できる。CNG（圧縮ガス）、LNG（液化ガス）、ハイドレート化などの方式が考えられるが、製造運搬量の規模、液化等に関するエネルギー収支などを考える必要があり、本研究では最適な方法を決定するに至っていない。陸上に運搬されたメタンは、既存のLNG貯蔵施設に結ばれ供給される。

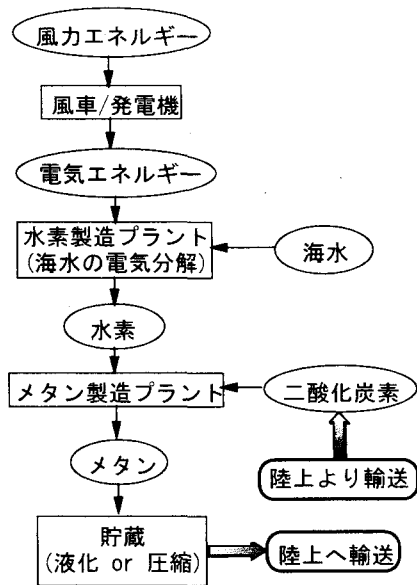


図-1 全体システムのコンセプト

3. 設計条件の設定

(1) 設置適地の抽出と自然環境条件

本研究では、大規模展開を考えるのではなく、テストプラントによる実証を当面の目標に置き、適地

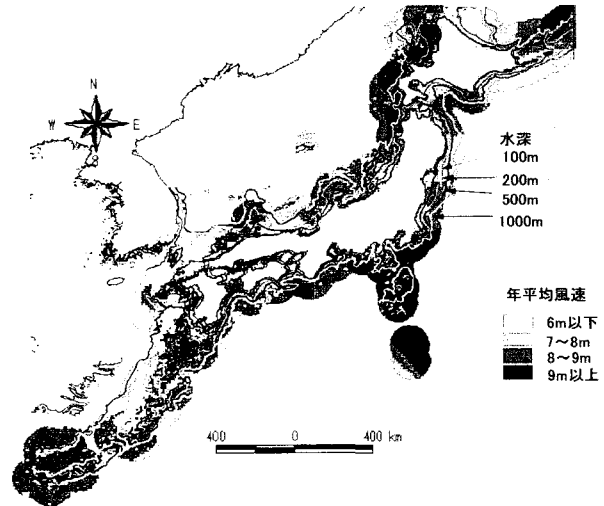


図-2 日本周辺海域の風況と等深線図

を以下の条件に沿って抽出することとする。

- ・ 事業採算性のある年平均8m/s以上の風速。
- ・ 浮体係留可能底質を有す100～200mの水深海域。
- ・ 浮体設計・設置に必要な沖合観測資料がある。

日本周辺海域の風況予測に関して、いくつかの研究があるが、SSM/I衛星と海岸線の風速にGISを援用して作成された長井の風況データ²⁾を用いる。沿岸域100kmの年平均風速の分布に等水深線を重ねた結果を図-2示す。

年平均8m/s以上の海域の中から、100～200mの水深域について絞り込むと、次の13海域が候補地となる。水深データは日本近海等深線図を用いた。

- 留萌沖 瀬棚沖 秋田沖 輪島沖 境港沖
- 屋久島沖 那覇沖 平良沖 石垣沖 和歌山沖
- 御前崎沖 伊豆大島周辺 鹿島沖

この内、海象データの入手困難な海域等を除外すると以下の5海域となる。

- 留萌沖、秋田沖、那覇・石垣沖、御前崎沖、鹿島沖

浮体設計条件として供用期間30年として60年再現期間を設定し、選定海域の波高波長傾度表の包絡線および確率分布より設計波浪条件を設定した。また、風力発電では稼働時と暴風停止時の分けがあり、設計条件も異なるため陸上風車の基準を参考に定めた。設計条件を表-1にまとめて示す。

表-1 設計条件

	暴風時	発電稼働時
有義波周期	15sec	7.2sec
有義波高	12.5m	3.0m
風 速	50m/s (Max80m/s)	25m/s
流速	2.0knot	
水深	200m	

(2) 機能面におけるクライテリア

風力発電装置では、構造が破壊しないことを前提とした安全性とは別に発電に支障のない機能面でのクライテリアを決める必要がある。特に、浮体では定常外力による傾斜と波による動揺が問題になると考えられ、これらに対する許容範囲を明らかにする必要がある。

このため、風洞模型試験³⁾を実施して、風車を傾斜および動揺させた時の特性変化を計測した。

図-3は、傾斜角に対する発電出力の変化を表している。正対した時を100%として示している。図中の実線は傾斜角の余弦の3乗を表すカーブであるが、ほぼ、このカーブで近似できる事がわかる。95%以上の発電力を維持しようとするれば、許容角は約10°となる。但し、風車の回転軸は、撓みによる翼のタワーへの接触を避けるため5°程度の上向き角(Rotor tilt)をつけるのが一般的であり、これを考慮すれば浮体の許容傾斜角は5°となる。

図-4は動揺に対応した風荷重の変動成分を、位相を考慮し、浮体流体力学で用いられる付加質量力と減衰力と同様に分けて表現したものである。図の縦軸に注目すれば減衰力に比べ付加質量力は微小であることがわかる。また、減衰力は動揺速度にほぼ比例して変化しており、動揺解析において線形減衰係数の形で考慮できる事がわかる。

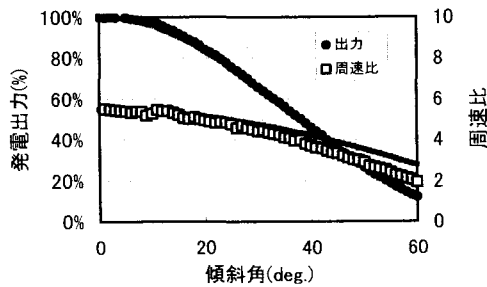


図-3 傾斜角による発電出力の変化

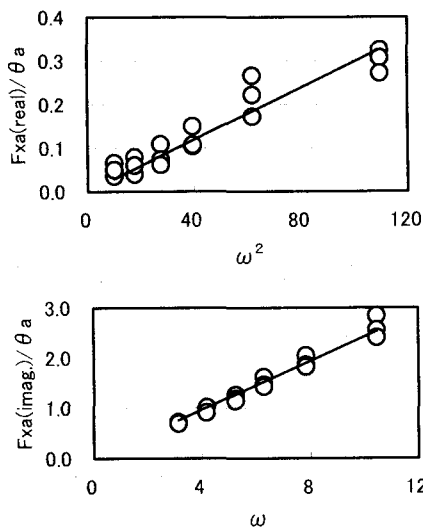


図-4 動揺周波数 ω に対する動的空気成分

4. 技術的成立性の検証

(1) 浮体式風力発電ユニットの提案

経済性を考えると、スケールメリットのある大型風車を既存ドックで一体建造できる規模の支床浮体に複数集約搭載することが好ましい。一例として、図-5および表-2に示す浮体式ユニットを提案し、技術面での成立性検証の対象とする。風車は現在最大級の5MWクラス（開発中）3基を搭載する。風車幅方向の設置間隔は最低でも風車直径の3倍以上とされるが、浮体式では経済性を考え1.3倍程度の構想も提案されていることから1.5倍とした。浮体は、矩形断面を持つ格子構造を有する形式を採用した。浮体幅、断面寸法を変えることにより動揺特性を設置海域の波浪特性に応じて最適化することができるという特徴を持つ。初期検討では喫水1.5mとした。

係留は大水深であることと施工性を考慮して、繊維ロープを用いたトート係留を考えている。アンカーは船上から投げ込み設置可能なVertical Loading Anchorを採用する計画である。なお、係留についての検討結果について本論文では触れず、別の機会に譲ることとする。

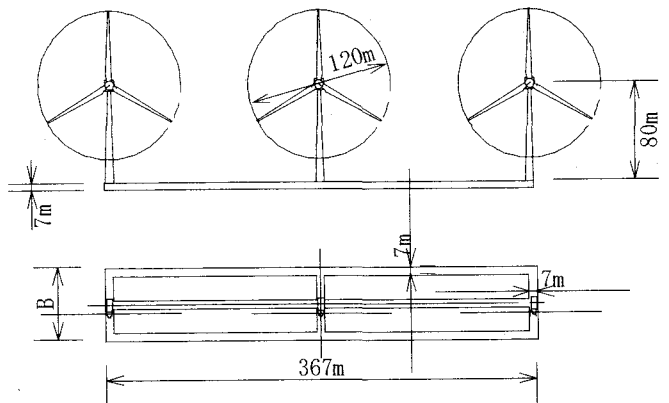


図-5 提案構造物の概要

表-2 提案構造物の主要目

形式		格子構造浮体式風力発電装置	
支床浮体	長さ		367m
	幅		40-70m
	型深さ		7m
	喫水		1.5m
	排水容積		12,200-13,100m ³
風力発電装置	定格出力		5MW
	風車直径		120m
	ハブ高さ		80m
	重量	タワー含	6,370kN
		タワー除	3,136kN

(2) 支床浮体の傾斜・動揺性能

浮体幅と重心高さを変化させた時の風荷重による傾斜角の変化を図-6に示す。浮体幅50m以上では差異は小さくなり、約1°以内に納めることができる。評価に用いた風荷重の値を表-3に示す。5MWクラスの風車は開発中のため外力等の詳細資料が公表されておらず、ここでは既存風車の資料を外挿して推定した。

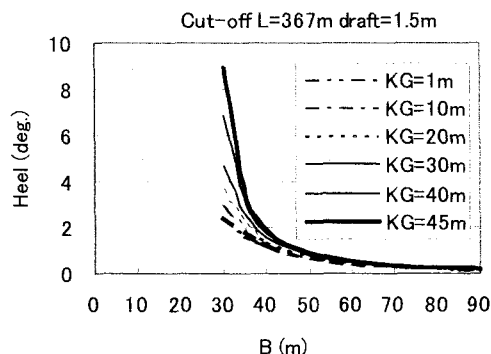


図-6 浮体幅Bと重心高KGに対する風荷重による傾斜角の変化

表-3 5MW風車に作用する風荷重

状態		風速	ナセル上水平荷重
暴風時	10分平均	50m/s	781kN
	瞬間最大	80m/s	2,000kN
発電稼働時	定格運転	14m/s	1,100kN
	稼働時最大	25m/s	1,200kN

次に、波浪による動揺量を推定する。対象とする浮体は、比較的長大で型深さの浅い形状をしているため、弾性変形が顕著となると考えられる。従って、浮体剛性を考慮した流弾性解析法（直接法）⁴⁾を適用し、まず、規則波中の周波数応答関数を求めることにする。計算において、風車質量および動的空気荷重を考慮した。動的空気荷重は、等価線形減衰力の形で回転軸中心位置に加えた。この際の抗力係数は実機風車設計で用いられる $C_d=0.8$ を適用した。但し、比較計算した結果、風車慣性力の影響は多少認められたが、空気減衰力の影響は微小で、無視するものであった。

図-7に、弾性運動による上下振幅の分布の計算例を示す。長手方向から波が入射する場合には（上図）弾性変形が大きく、横手方向（下図）では剛体運動が卓越する様子がわかる。

周波数応答関数と波スペクトルを用い、線形重ね合わせ法により動揺期待値を求める。波スペクトルは、Bretschneider-Mitsuyasu型を用い、稼働時についての1/3期待値を求めてみた。波は一方向不規則波（Long crested wave）として扱い、波方向0°～90°の範囲について15°刻みで計算した。また、浮体幅を40～70mの間変化させ幅の効果を調べた。表-4に結果を示す。計算結果中最も大きい期待値を抽出して示している。これらの数値は、上下動について

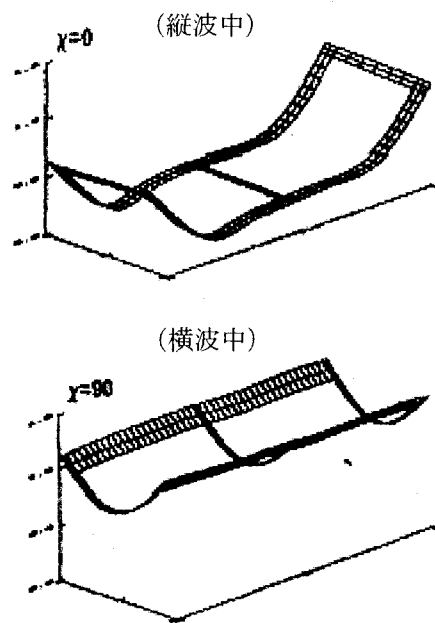


図-7 波浪弾性応答の計算例

表-4 動揺量の1/3期待値

浮体幅	発電稼働時 ($H_{1/3}=3.0\text{m}$, $T=7.2\text{sec.}$)		
	上下揺 (m)	横揺 (deg)	縦揺 (deg)
40m	0.95	2.4	1.1
50m	0.95	1.9	1.1
60m	0.96	1.6	1.1
70m	0.97	1.4	1.1

は両振幅、縦揺角、横揺角は片振幅に相当する量として表している。発電稼働時に関しては、全ての条件で3.°で示した機能面の許容量を満たしていることがわかる。

(3) 油圧式風力発電装置の基本概念設計

現在開発が進められている5MW級風力発電装置は、ナセル上重量だけでも1基当たり約320ton(3,136kN)、タワーを含めると約650ton(6,370kN)にもなる。この重量が水面上80mに位置するため、浮体安定性の面で不利な要素となる。そこで、油圧技術を用いた重量軽減の可能性を油圧設計者の手により検討した。まず、油圧駆動風車に与えられる基本要件を以下のように定めた。

- ・回転数=12～13rpm
- ・油圧装置入力段7MW（油圧効率低下を考慮）
- ・寿命=稼働率70%として約17年間

検討にあたり増速機採用の有無が課題となった。5MW級風車では超低回転となるため、増速機無しの場合には吐出油量を増大させる必要があり、送り側の油圧ポンプが超大型・大重量となるため、目標達成が困難であることがわかった。それに比べ、増速機を採用した場合は、65ton(637kN)の増速機と1.5ton(14.7kN)の高速油圧ポンプ6台の採用により、

上部油圧装置重量を100ton(980kN)以下に抑えることができた。付帯設備を考慮しても陸上仕様機の50～100ton(490～980kN)の軽減が見込める。基本設計された油圧装置の主要目を表-5に示す。なお、既存の陸上風車と比較すると、現状では最終発電効率は20～25%程度落ちると試算される。

表-5 油圧装置の主要目

	油圧ポンプ	油圧モータ
形 式	定容量ピストン型	可変容量ピストン型
回転数	0～1500rpm	0～1500rpm
吐出圧力	約22.0MPa	約21.5MPa
台 数	6台	6台
合計吐出量	17,300 l/min.	17,300 l/min.
単体重量	約1.5ton(14.7kN)	約1.6ton(15.7kN)

(4) 代替燃料製造能力の予測⁵⁾

海水の電気分解による水素生成とメタンへの改質に関する研究が東北大学の橋本教授のグループにより行われてきている¹⁾。ここでは、この研究の成果に基づいて製造能力を予測する。通常、海水の電解では陽極から酸素、陰極から水素が発生し、酸素と共に塩素が発生するが、酸化マンガンにモリブデン、タングステン等を添加した電極を用いることにより塩素の発生を抑えられる。

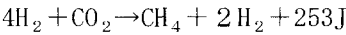
この時の変換効率は両極に作用させる電力量と水素のエネルギー量の比で表す。橋本教授のテストプラントの実績では、現状で3V×7,200Aの電力により、毎時4Nm³の水素が生成されるので、変換効率は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{水素変換効率} &= \frac{\text{製造された水素のエネルギー量}}{\text{極板に作用させた電力量}} \\ &= 4 \text{ Nm}^3 \times \gamma \times E / (3\text{V} \times 7,200\text{A} \times 1\text{h}) \\ &= 0.55 \end{aligned}$$

ここで、 $\gamma = 0.88\text{N/m}^3$: 水素ガス比重
 $E = 3.38\text{kWh/N}$: 水素エネルギー量

なお、現在効率向上に向けての研究が進められており効率0.8が可能と目されている。ちなみに、純水を用いた場合の効率は約0.91である。

次にメタンの合成について論ずる。新開発のアモルファス触媒により、水素とCO₂を通すだけで、99%のメタンが合成可能である。化学反応式は次のようになる。



合成は発熱反応であるため、1モルあたり253Jの熱放散が生じ、水素のまま使用する場合に比べエネルギー的には約22%損失する。

以上の知見を基に、15MWの風力発電装置を用いた時のメタン製造量を試算すると表-6のようになる。風車の設備利用率は、陸上では30%程度であるが、

海上であることを考慮して40%とした。1ユニットで年間1,741ton(17,062kN)のメタンが製造できる。一般配置を行った結果、提案浮体へのメタンおよびCO₂の貯蔵は可能であり、1～3ヶ月の頻度で陸上への輸送が行われると予想できる。現時点で、LNG、CNG技術の応用が考えられるが、運搬システムや装置の開発が今後の課題となる。

5. 経済性の評価

本研究の主目的は代替燃料創出であるが、現時点では開発中の燃料製造装置のコスト積算ができないので、浮体と風力発電装置を含めた建造費を算出し、既存の陸上発電コストとの比較を行う事とする。

浮体建造費は、鋼材使用量および排水量から概略推算できるという考え方がある。この考え方に基づき(社)日本海洋開発産業協会が提案した積算基準の1例⁶⁾を表-7に示す。提案浮体の建造費も、この基準に従って算出する。なお、慣用表現に従い重量単位にはトを用いる事とする。風車単価は支持構造を除き、現状資料より12.3万円/kWとした。浮体幅が40～70m変化するとして、鋼材使用量4,800～5,170ト、排水量12,160～13,100m³である。これより、建造費は平均36.2億円となる。コスト評価のため、定額償却法を用い、償却期間20年、金利3%、維持費3%(対総建造費比)と仮定すると、発電コ

表-6 化学燃料製造量の試算

項目		数量	単位
発電容量		15	MW
設備利用率		0.4	
年間総時間		8,760	h
年間発電量		52,560	MW・h
水 素	製造効率	0.55	
	年間製造量(重量)	8,536	kN
メ タ ン	年間製造量(重量)	17,062	kN
	ガス密度(常温,常圧)	6.66	N/m ³
	年間製造量(容積)	256	万m ³
	液密度(-162°)	4.12	kN/m ³
	年間製造量(液化)	4,196	m ³
CO ₂	必要重量	46,932	kN

注)設備利用率=年間発電量/(定格出力×年間総時間)

表-7 評価に用いた浮体コストの算定基準

項目	算定基準
設計費	3,000万円/1式
浮体建造費	20万円/鋼材重量ト
防食費	150万円/鋼材重量の3%ト
艀装関係費	64万円/排水量の1%ト
モニタリング機器等	3,000万円/1式
係留機材(鉄鎖相当)	40万円/ト
アンカー(コンクリート相当)	2.5万円/ト
曳航設置費	6,000万円/1式

ストは以下になる。ここで、風車設備利用率は0.4とした。

単年度費用 $36.2 \text{ 億円} \times (1/20 + 0.03) = 2.9 \text{ 億円}$
維持費 $36.2 \text{ 億円} \times 0.03 = 1.09 \text{ 億円}$
発電量 $15 \text{ MW} \times 24 \text{ h/日} \times 365 \text{ 日} \times 0.4 = 52,560 \text{ MW} \cdot \text{h}$
年間総費用/発電量 $= 7.6 \text{ 円/kW} \cdot \text{h}$

上記の試算には送電設備費用が含まれていない。陸上までの送電設備費用は送電距離により異なるが、全体の10～15%程度という試算がある^{9) 10)}。仮に15%とすると、概略8.7円/kW・hとなる。これらの試算結果から、既存発電と比較しても、石油火力、水力発電などに十分対抗できるコストを達成する可能性の高いことがわかる。

6. 結 言

浮体式風力発電を用いた代替燃料製造プラントを提案し、初期基本計画を目的とした主要要素技術研究を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 風況、波浪観測情報、係留に関わる底質等を考慮すると、浮体式風力発電テストプラント設置に適した海域として、留萌沖、秋田沖、那覇・石垣沖、御前崎沖、鹿島沖が上げられる。
- 2) 風車機能面から考えた支床浮体傾斜の許容角は5°程度である。
- 3) 風車時の変動空力荷重は速度に比例した減衰力として扱いうるが、浮体動揺への影響は微小。
- 4) 提案構造物の傾斜角、動揺角は、風車機能面で十分許容値を満たす。
- 5) 油圧駆動風車の実現性はあるが、効率が20%程度落ちる。
- 6) メタン製造に関して、1ユニットでの年間製造量は16,660kNと推定される。
- 7) 既存の発電方式との比較では、石油火力、水力発電並の経済性がある。

また、今後の課題として以下の事項があげられる。

- 1) 支床浮体の強度解析と構造最適化
- 2) 動揺する風車各部の応力解析及び疲労強度解析
- 3) 係留に関する安全性・施工方法の検討
- 4) 油圧駆動風力発電装置の設計および効率改善

- 5) 燃料製造効率と製造量推定の精緻化
- 6) 効率的な燃料貯蔵・運搬システムの検討と提案

謝辞：本プロジェクト研究の機会を与えていただきました。鉄道建設・運輸施設整備支援機構の関係者の皆様に深く感謝いたします。また、日本大学生産工学部の長井浩先生には、海上風況予測データの提供と引用のお許しをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋本功二，山崎倫昭，泉屋宏一，目黒眞作，佐々木昭仁，片桐洋，秋山英二，熊谷直和，幅崎浩樹，川嶋朝日，浅見勝彦：太陽エネルギーと海水電解を利用するグローバル二酸化炭素リサイクル：海洋開発ニュース，Vol. 28, No. 6, (社)日本海洋開発産業協会，2000.11
- 2) 長井浩，牛山泉，藤本聡：SSMI衛星と沿岸データの風況解析による洋上風力発電の賦存量：太陽／風力エネルギー講演論文集，pp573-576，2002.
- 3) 矢後清和，大川豊，鈴木英之，澤井貴之：浮体式風力発電に関する基礎的検討：第17回海洋工学シンポジウム：平成15年7月：日本造船学会
- 4) 矢後清和：超大型浮体式構造物の弾性挙動における平面形状などの影響：第15回海洋工学シンポジウム：平成12年1月：日本造船学会
- 5) 日根野元裕，高野宰，宮島省吾：浮体式風力発電用燃料製造システムの検討：日本造船学会講演会論文集第3号：平成16年5月：日本造船学会
- 6) (社)日本機械工業連合会，(社)日本海洋開発産業協会：平成13年度海洋資源・エネルギーを複合的に活用する沖合洋上風力発電等システムの開発調査研究報告書：平成14年3月
- 7) 大川豊，矢後清和，佐藤千昭，鈴木英之，関田欣治，日根野元裕：浮体式風力発電による代替エネルギー創出システムの検討：第25回風力エネルギー利用シンポジウム，2003.11：日本風力エネルギー協会
- 8) 矢後清和，大川豊：代替エネルギー創出を目的とした浮体式風力発電装置に関する研究：日本造船学会講演会論文集 第2号，2003.11：日本造船学会
- 9) (社)日本機械工業連合会，(社)日本海洋開発産業協会：平成14年度 浮遊式風力発電基地の自然エネルギーの最適輸送技術に関する調査研究報告書：平成15年3月
- 10) K.C.Tong: Technical and Economic Aspects of A Floating Offshore Wind Farm : Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. Vol.74-76,1998.4