



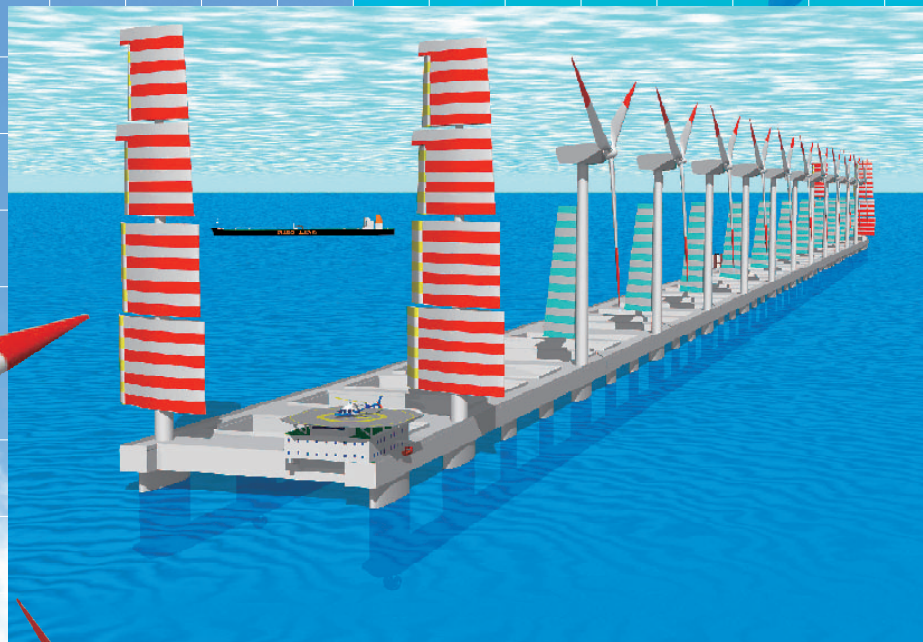
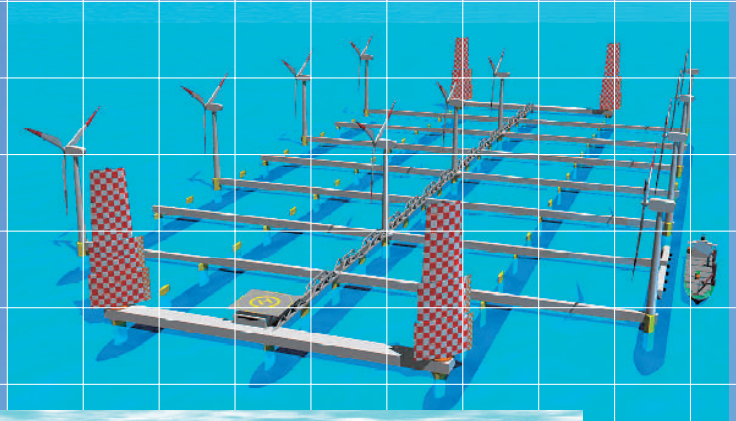
環境儀

NO. 34 MARCH 2010

国立環境研究所の研究情報誌

セイリング型洋上風力発電システム構想

海を旅する
ウィンドファーム



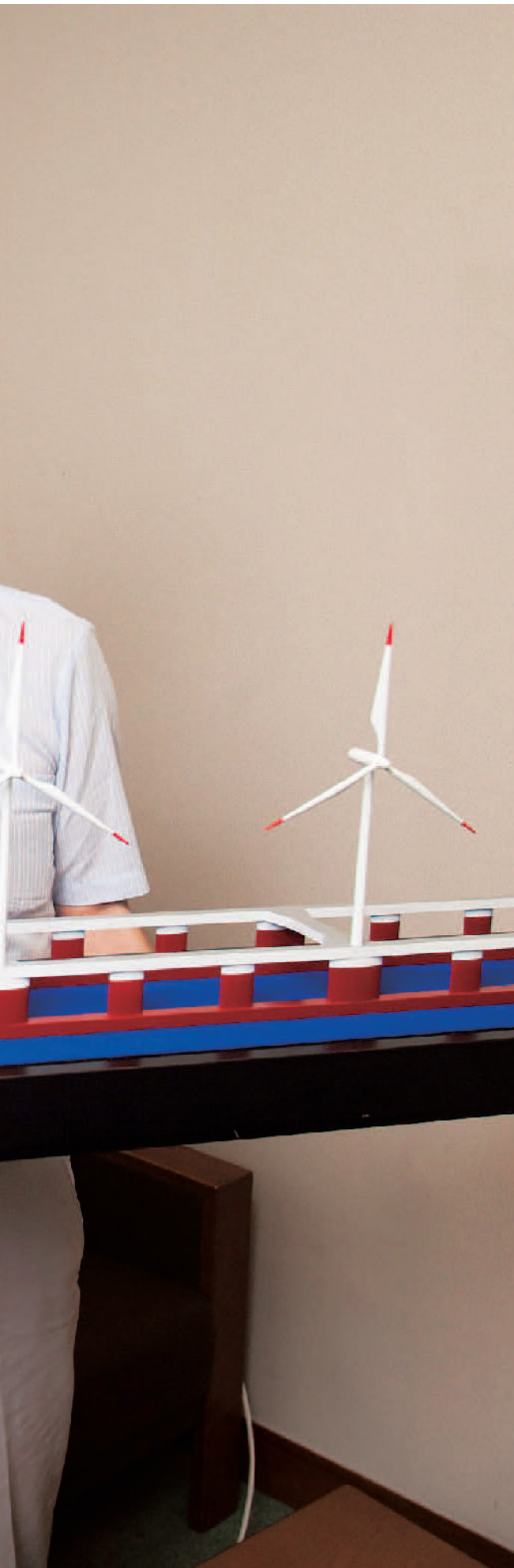
独立行政法人

国立環境研究所

<http://www.nies.go.jp/>



クリーンでエネルギー収支比の高い
セイリング型洋上風力発電システムの
研究と基本設計を行いました。



地球温暖化を食い止めるには、二酸化炭素の排出量を大幅に削減しなければなりません。日本では、一次エネルギーの80%を二酸化炭素の排出量が多い化石燃料が占め、この見直しが急務となっています。他方、近未来に化石燃料資源が枯渇し、石油・天然ガス価格の世界的高騰が避けられないと予測されています。

国立環境研究所では、この問題をエネルギーの観点からとらえ、化石燃料の使用を抑制する省エネルギー化はもちろん、エネルギーの生産方法を工夫してクリーンエネルギーを活用すべきと結論付けました。クリーンエネルギーとして何を取り上げるか?を考えるにあたっては2つの視点を設定しました。1つは自然の力を「奪う」のではなく「借りる」こと、つまり、自然のエネルギー循環を乱すようなものは使わないという点です。もう1つは「お金」よりも「環境とエネルギー」という視点、すなわち、化石燃料との価格競争よりもエネルギーコストや環境コストから判断すべきであるという点です。

クリーンエネルギーを生産する技術の開発にあたっては、既に実用化されているものからまだ研究段階のものまで、あらゆる代替エネルギーを比較検討し、資源持続の可能性とエネルギー収支比(EPR)の高さを併せ持つ移動式の洋上風力発電システムを検討対象としました。大学、産業界の協力をいただき、風車11基を搭載し、4ノットで帆走する、全長1880m幅70mの巨大浮体モデルの基本設計をしました。

今号では、このセイリング型洋上風力発電システム構想の研究成果と実用化に向けての課題などについてご紹介します。



セイリング型洋上風力発電システム構想 海を旅するウィンドファーム

- Interview
研究者に聞く!!.....p4～9
- Summary
日本に適した
洋上風力発電システムの検討.....p10～11
- 研究をめぐって
洋上風力発電—世界での取り組みと
日本での取り組み.....p12～13
- 「洋上風力発電を利用した
水素製造技術開発」に関する
研究のあゆみ.....p14

●本研究に関する成果は以下のURLで紹介されています。
http://www.nies.go.jp/video_lib/index01.html

(環境科学特別講座No.1)

●表紙：セイリング型洋上風力発電システム。中央は最終設計案の2胴タイプ、その上は研究初期の5胴タイプ。

●2～3ページ：セイリング型洋上風力発電システムの600分の1の部分模型

Interview 研究者に聞く!!

地球温暖化という環境問題に対応するには、エネルギー問題として側面からのアプローチが不可欠——企画部門に在籍していた2人の研究者の議論が基となり、新たなクリーンエネルギー開発の挑戦が始まりました。クリーンエネルギーの生産技術として移動式の洋上風力発電というシステムに実用化の道筋をつけた、2人の研究者の開発にまつわるエピソードを織り交ぜながら、新しい発電システムの全容を紹介します。



自然にやさしい セイリング型風力発電のモデルを設計

1：2人の「雑談」から生まれた海上風力発電

Q：最初にお2人の研究歴について、お話をうかがいたいと思います。

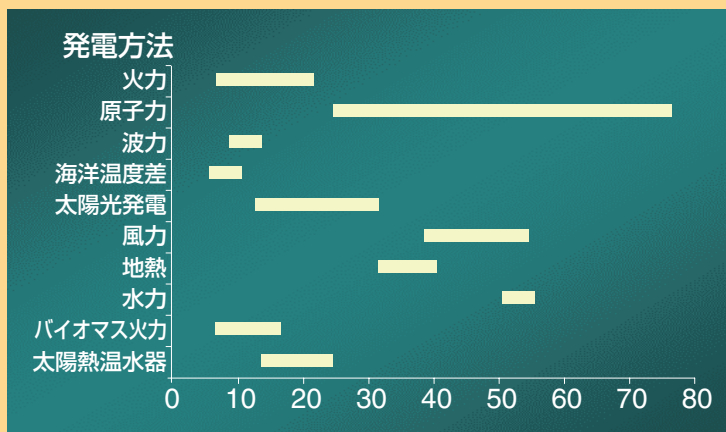
植弘：2人とも化学の出身で、2年ぐらい違うのですが、ちょうど東大の宇井純さんが公害原論などをなさっていた頃で、公害問題にはそれなりに興味もっていました。私は博士課程に行った後、ポスドクや予備校の先生をやって、この研究所へ来たのが1979年の1月です。大学時代は錯塩（色が付く金属の化合物）を研究対象としていましたが、研究所では主に環境分析です。そういう意味でいうと、洋上風力発電とは何も関係ない……。

内山：私は理学部の化学で触媒化学を専攻していましたが、大気汚染を研究している講座の助手として就職しました。今も主に大気汚染の問題を扱っています。この研究所では研究者が企画に関する仕事に携わ

ることがあります。私が企画部門配属となった時に植弘さんが同部門の国際室に居られ、1年間、環境問題全体について議論をしていました。

Q：専門の研究を離れて、企画の仕事をするというのは、新しいことを始めるという点で有益なのではないでしょうか。植弘さんと内山さんのように、研究分野の異なる方が出会って話をされたことが、洋上風力発電の構想につながっていったわけですね。

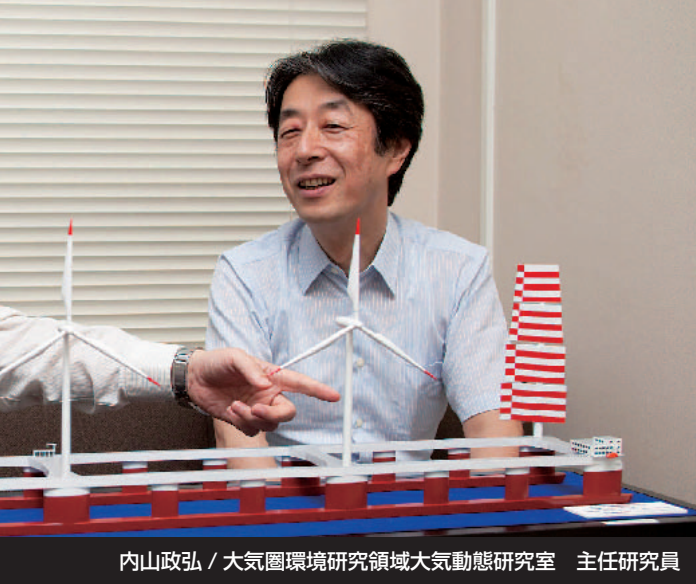
内山：企画を離れた後も、植弘さんの部屋を訪ねては議論をしていました。その時の話題の中に、自然エネルギーでも大規模に取り出すと、環境に悪影響を与える可能性があると言うことがありましたが、風車は環境への負荷が最も少なそうだと結論になりました。後は単純な技術論です。風力発電は広大な面積を必要とする。どこに求めるか。洋上しかない。浅い所は魚の産卵場所であったり、海水浴場だったりする。そういうところは使わずに思い切って外洋に出る。洋上を移動して風の条件のよいところで発電し、台風が



■ 図1 様々な発電システムのエネルギー収支比 (EPR)

EPR とは

EPRはエネルギー発生システムの性格を評価する最重要指標の1つです。あるシステムが生産するエネルギー (Eout) とシステムの製造・維持・運用・廃棄に必要なエネルギー (Einp) の比 (Eout/Einp) として定義されます。EPR が大きいほど投入エネルギーに対して大きなエネルギーを得られることとなります。それぞれのエネルギーはシステムの製造に係る原材料の採掘から、稼働期間を終えて廃棄に至るまでの全ライフサイクルを勘定しますが、個々の技術の選択や技術革新によりEPRが変動することもあるため、その比較には注意が必要です。

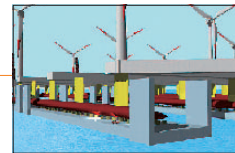


内山政弘 / 大気圏環境研究領域大気動態研究室 主任研究員

きたら避難する。具体的にはどんな技術を使えるかと言う雑談を1年ぐらいやっていました。

植弘：平成14年（2002年）に、この雑談からのアイデアに理事長が調査費を認めてくださったことからスタートし、平成15年度（2003年度）に環境省で石油特別会計を活用した技術開発を実施することになり、そこに組み入れられました。

内山：大きな研究費が獲得できるとはまったく思っていませんでした。しかし、研究を始めるとなると定量的な目標設定をしなければなりません。計量の単位としてEPRを用いることにしました。技術的には日本が開発していたメガフロート（超大型浮体式構造物）に風車を載せればそれで一件落着だろうと、安直に考えていました。私たちはコアな技術をもっていないので企業、大学の協力を仰ぎました。たとえば、それまでに洋上風力発電を研究されていたJOIA（日本海洋開発産業協会）さんに行って、「今度、予算が付いてこういう研究始めたのでよろしくお願いします。ついてはこういうものの設計をお願いします」とか。外に出てみたらわかったのですが、意外と国立環境研究所とい



う看板が大きい。「国立環境研究所です」と言って企業に行くと、向こうも専門の技術者ができて対応してくださる。共同研究をお願いした造船や重工業の業界からすると、われわれの予算はとても小さいのですが夢の技術として面白いからと優秀な人材に参加してもらえました。

Q：それはやはり夢のあるアイデアだったからでしょうね。

植弘：そうですね、風車メーカーさんは、日本は陸上の風車のマーケットが小さいのであまり売る気はないが、これがちゃんと実現できるのであれば、話は別だと言ってくれました。何かの解決に向けて新たなコンセプトを出していくことが大事なのだと思います。

Q：今後のエネルギー問題を解決する上で、どのような方法ならどれくらいのEPRが実現できるかという点については、わかっていたのでしょうか。

植弘：洋上に進出するに当たって、洋上の自然エネルギーについての概要は把握しました。普遍的に存在し大きなエネルギーを獲得できるのは、現時点では風と太陽光が双璧だと判断しました。太陽光発電のパネルについては、われわれが始めた2003年ごろには薄膜型のパネルがほとんどなくて、EPRが非常に悪かった。当時は、薄膜型パネルをつくるためにかかるエネルギーを回収するのに、3年から5年かかるといわれていたのです。風車については、ヨーロッパやアメリカでは実用化されていました。風車をつくるために必要なエネルギーよりも風車が生み出すエネルギーの方がずっと大きいというデータはあり、風車は1つの答えだと思ったのです。そこで、実際に自然エネルギーだけで日本が生きていけるかどうか考えてみようとい

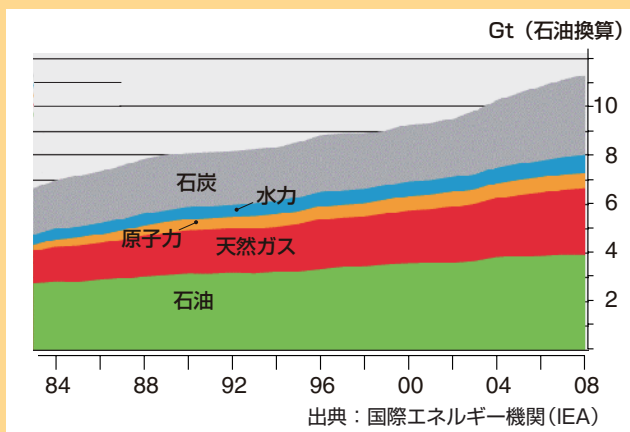
有限なエネルギー資源

地球に埋蔵されているエネルギー資源にはウラン（原子力）のように46億年前の地球誕生時に宇宙塵から集まったもの、石炭・石油（化石燃料）のように数億～数千万年前の太陽エネルギーを生物活動により地球に蓄積したものがあります。これらのエネルギー資源は、再生産されない資源であり、利用すると無くなってしまいます。しかしながら、グラフに示されるように、現代社会はこれらのエネルギー資源を大量に消費しています。

国際エネルギー機関(IEA)のデータでは、これら資源を現行と同じように消費し続けた場合の確認埋蔵量は、石油42年分、天然ガス60年分、石炭122年分、そしてウラン80年分とされています。今後の新たな資源の発見や生産手法の変化など、予測が難しい面が多々ありますが、今世紀から次世紀には資源を使い切ってしまうおそれがあります。

また、資源が枯渇する以前に、資源生産コスト（経済的だけでなくエネルギー的観点も含めた）が、資源から回収

できる利益よりも大きくなって、「資源はあっても、使わない。使えない」状態になってしまうことも危惧されます。その時期は枯渇時期よりもずっと早くなるという議論もされています。



■ 図2 世界の一次エネルギー消費（資源別）の推移

う気になりました。

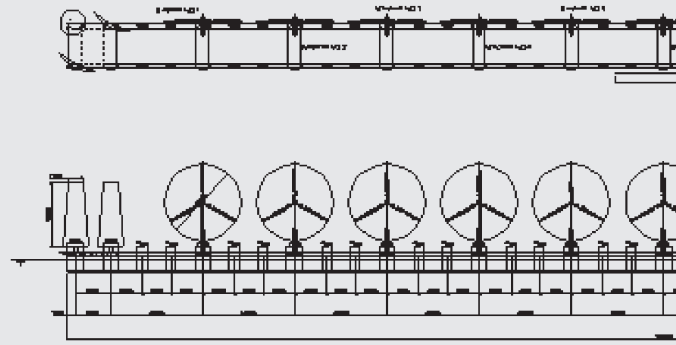
内山：たとえば、アラビア半島の砂漠に太陽光パネルを並べれば人類に必要な十分なエネルギーが取れるという議論がありました。しかし、反射で宇宙に戻っているエネルギーの10数%もエネルギーを取ってしまった時、半島の気象がどう変わるかは、たぶん、わからないで議論していたと思います。その点、風のエネルギーは、最終的に地表面で熱エネルギーになってしまうので、大規模に取ってもそんなには地球環境に影響を与えないだろうと考えました。

Q：日本でどのくらいの洋上風力発電が行えるかを議論する場合、EEZ（排他的経済水域）の面積を考えると、かなりの資源量があるということになりますね。

植弘：水深が100m、1000m、1万mと深くなるごとに高い風速が得られる海域面積が増えていきます。6000mを超えるようなところまで使うという前提に立つと、平均風速7m以上の海域はEEZ面積の40%を超えています。EEZ面積は陸地面積の約10倍ですから、40%ということは、日本の陸地面積の4倍になります。

Q：洋上に浮かべる構造としては、当時、日本にはメガフロートの技術があったということですね。

植弘：ところが、メガフロートは波の静穏なところに置くものとして考えられていたので、風があるとこ



洋上風力発電システム、浮体システムの設計図

ろは波も荒いはずなので使えないことがわかりました。新たに設計し直す必要はなくなりました。

Q：浮体の形が長方形型から、すごく細長い形になりました。これはどうしてなのでしょう。

植弘：動き回る浮体の制御を考えると、浮体の数は減らしたい。そのためには1浮体当たりなるべくたくさんの風車を載せたい。ということで、長方形の浮体上に風車を陸上よりも密に千鳥配置に並べてみました。ところが、風洞実験をやってみると風下の風車が風上の風車の影響を受けて発電量が半分以下になってしまうのです。「それなら風車の搭載数を減らすか」ということになるのかもしれませんが、浮体へ載せる風車の数を減らすというのは、どう見てもおもしろくありません。浮体はもともと3つの胴体があるようなものだったので、それを分断して縦につなげばいいのではないかということになりました。風車の配列も1列にしました。粗設計の段階で、このようにしても強度にそれほどの変化が起きないということが大体わかっていました。

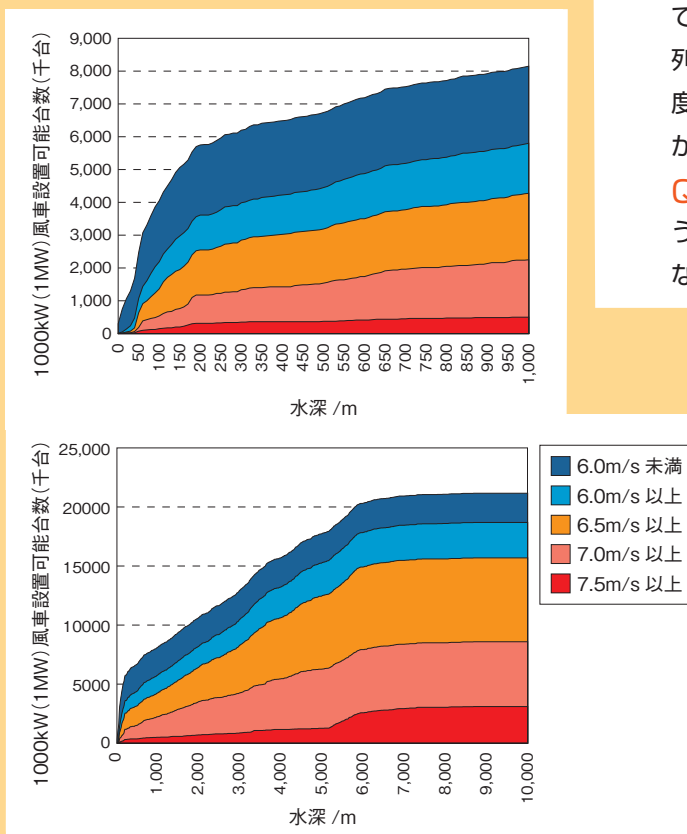
Q：この構造物を移動させる方法ですが、ヨットのような帆がついています。どうしてこのような方法になったのですか。

風車の設置可能台数

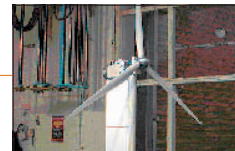
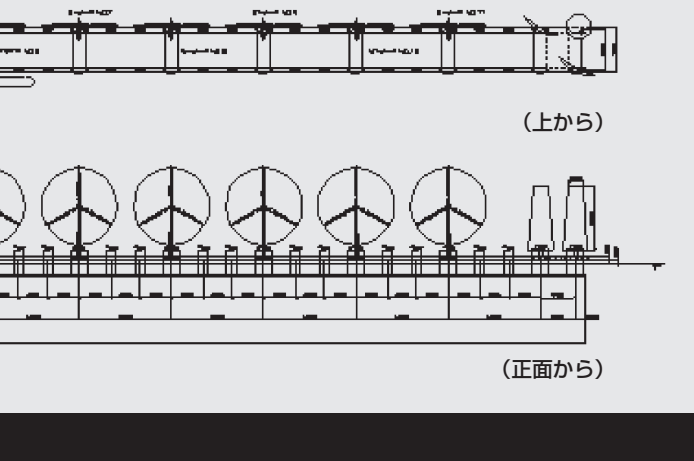
日本近海では北欧の海に比べて遠浅の海が少なく、陸棚と呼ばれる水深200m以下の浅い海がありません。このため、北欧の陸棚で大規模に行われている着底型の洋上風力発電は日本の非常に限られた海域にしか適用できません。さらに係留型の洋上風力発電を比較的容易に設置できる水深500m以下の浅海域も限られています。

日本近海で洋上風力発電が陸上風力発電に対して優位となる風況の良い（年間平均風速の大きい）海域を探すと、係留型でも不得手とされる水深1000m以上の海域を有効に利用できるシステムが必要です。

年平均風速が7m/sを超える海域では設備利用率が40%を超えるため、1MWの風車を2,500台設置すればフル稼働の100万kWの火力や原子力発電所と同等の年間発電量を確保できます。



■図3 日本のEEZ（排他的経済水域）の水深と風車設置可能台数



つくるわけですね。

植弘：最初は、蓄電池を考えましたが、今の性能の大体10倍の能力がないと足りないことがわかりました。それなら、化学エネルギーに変換しようということになり、技術的にも容易な水素をターゲットにしました。浮体上で水素の形に変換して消費地に送るのが、基本的な考え方です。ただし水素をつくるに当たって、塩水を電気分解すると、陽極にとんでもない量の塩素が出てきます。2人とも化学出身でしたので、塩素の出ない電解システムを考えようかということになりました。ところが調べてみたら、既にあったのです。

内山：研究テーマが1つなくなってしまいました(笑)。

植弘：東北工業大学の橋本先生が、海水を電気分解しても陽極に塩素ではなく酸素が出てくる電極を開発しておられました。早速お会いして、砂漠に太陽電池を並べて電気をつくり、海岸まで送電して海水を電気分解して水素をつくり、その水素とCO₂を反応させてメタンにするという話をうかがいました。大学の屋上で、実際に太陽電池で発電して海水を電解して水素をつくり、CO₂と反応させてメタンにして燃焼させるまでのテストプラントも稼働させておられました。それは非常にインパクトがありました。橋本先生はエネルギー問題に関しても熱心で、なんとかして自然エネ

植弘：動き回る浮体にしようというコンセプトはあったのですが、それについては、大阪大学の高木先生に、ヨットのように揚力を使うことで移動できるかどうか検討いただきました。風車でつくったエネルギーの15%くらい使えばなんとかなりそうだというところがスタートでした。スクリューで回してもよかったです。スクリューで回してもよかったです。東京大学の木下先生が、国立環境研究所がやるならやっぱり帆船にしよう、ということでセイリング型になりました。

内山：風車の高さは羽根のトップまでが140mで、帆はそれと同じくらいの高さにしてあります。あれだけ巨大な帆をどうコントロールするかというのはずいぶん議論になりました。

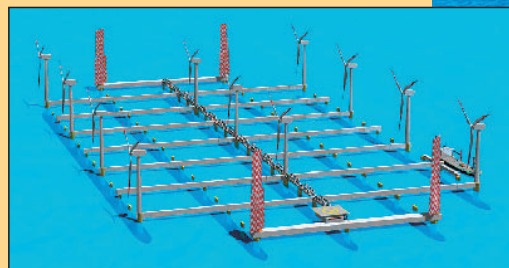
植弘：三菱重工さんが帆の台座として提案してきたのは、戦艦大和の主砲の砲台回転の設計図でした。

Q：風車でつくった電気で海水を電気分解して水素を

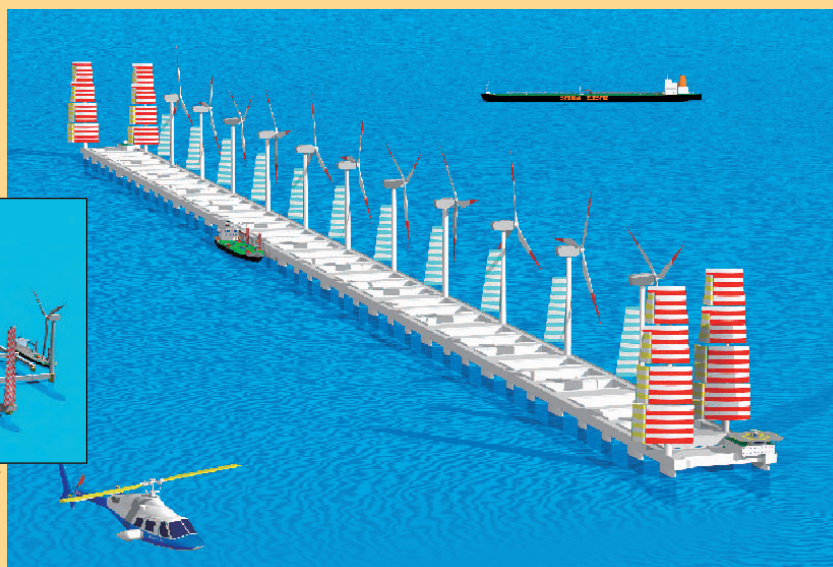
海洋現象や気象に耐えて長期間使用できる浮体構造を求めて

浮体については、研究の初期段階では、いかだ型の浮体上に風車を3列に並べることを考えていましたが(図4)、前列の風車による風の流れが後列の風車に影響を与えることから、横長浮体に風車を1列に並べることにしました。浮体構造としては、波浪の高い外洋を航行するため、水面下にローワーハルがあるセミサブ型(半潜水型)を選択しました。揚力を受け持つストラットの断面積が小さくなり、波から受ける力を小さくできます。研究段階の半に、強度不足が判

明したため、アッパーハルを設けることにした。これにより、強度が求められる横桁部に高張力鋼を用いれば、降伏強度、疲労強度を満足する、長期耐用が可能な浮体をつくる見通しが立ちました(図5)。



■ 図4 研究初期段階で考えていた5 胴タイプ



■ 図5 最終案となった2 胴タイプ

ルギーをやらなくてはいけないとおっしゃいます。その強い意志には感銘を受けました。

内山：橋本先生は水素は扱いにくいのでCO₂と反応させてメタンに転換して使用することを提唱されています。

植弘：水素をつくるためには水の電気分解で作りますね。1分子のCO₂と4分子の水素から1分子のメタンをつくるのですが、その時に水が2分子できるのです。だから水を電気分解してつくった水素の半分がまた水に戻ってしまう。つまり半分くらいロスをしていることになる。ですからこのやり方はできれば使いたくないというところがあります。

内山：ただし、社会のインフラ全体を考えた時に、メタンは天然ガスですから、そのまま自動車の燃料にもなります。

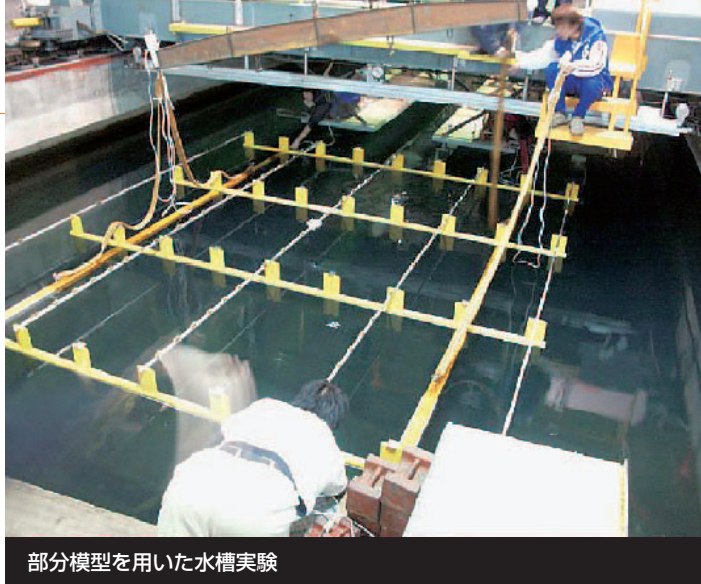
Q：EPRをもう少し上げる工夫というのはできるものなのですか。

植弘：水の電気分解で水素にする時のエネルギー効率はたぶん90%を超えるような値で、これをメタンにするともとのエネルギーの70%になる。そのメタンを輸送するためのエネルギーを考えるともう半分。EPRは5割は上がるかもしれないけれども、2倍にはならないでしょう。

内山：システム的设计をしてみて、製造時のエネルギーの大半は浮体の鋼材の製錬に使われる事がわかりました。設計者からすれば、開発初期は安全なモノ、頑丈なモノを設計します。運用して実績を積み重ねれば鋼材の厚さは1割、2割くらいは減らせるかもしれません。

2：国家プロジェクトで取り組まなければ実現は困難

Q：火力発電や原子力発電の資源が枯渇して自然エネルギーを使わざるを得ないという議論について、話を



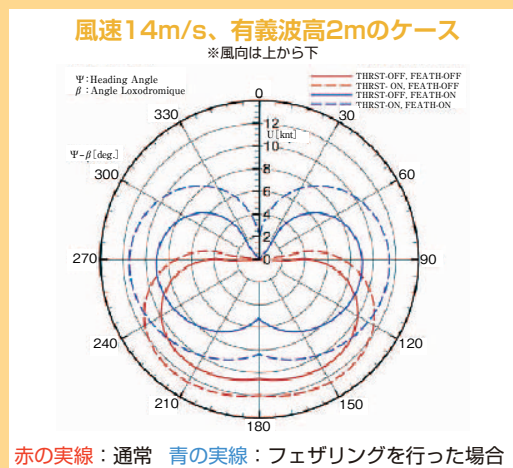
部分模型を用いた水槽実験

お聞きしたいと思います。

内山：発展途上国もそれなりにエネルギーを使うということを前提にした橋本先生の分析では化石燃料も、ウランも50年後には枯渇する。もちろん、それよりもっと早い時期に価格が暴騰し燃料として使えなくなる。橋本先生曰く、「自分たちの孫の時代ではなくて、子の時代にエネルギーがなくなる」ということです。

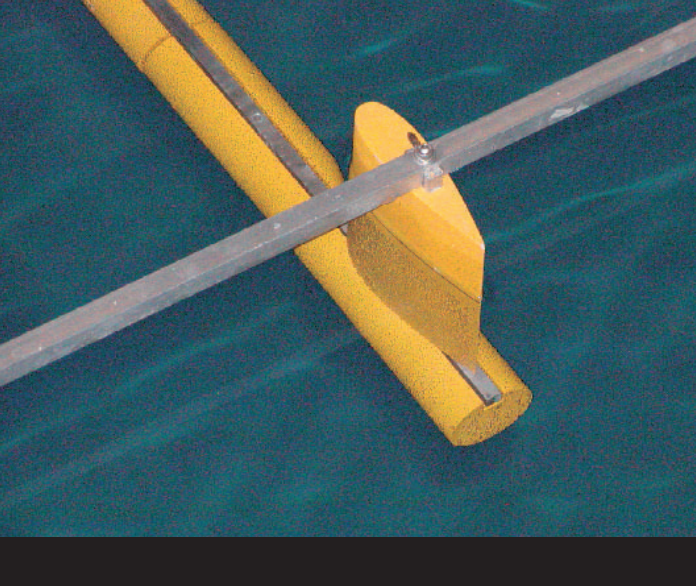
植弘：石炭はどこまで掘るかということですが、日本にもまだまだたくさんある。それでも、あと200年ももつと思っている人はいないので、持続可能な社会をつくるという観点からいえば、太陽のエネルギーを使うべきです。洋上風力発電も最初は届かないかなと思ったのですが、机上とはいえ設計してみると何とかかなりそうなので、最後はここに逃げ込めばある程度発電はできそうです。ただ、まだEPRは20です。システムが一生(100年)稼働し終わった後に浮体がなくなってしまうわけではないので、それを原料としてもう1回システムをつくと、EPRは今の2倍以上よくなります。今のところ、鉄鉱石から計算しているので、くず鉄からこれがつくれるという計算するとずいぶんよくなる。

Q：これから解決すべき次の技術的な課題としてはど



浮体の性能を評価するためのポーラー曲線

今回設計した浮体は、巨大な帆船と考えることができますが、帆船としての性能を評価するのがポーラー曲線(図6)です。風は図の上から下向きに吹いているとして、帆船がどの方向にどの位のスピードで航行できるのかを表しています。左右対象なのは浮体に前後がないからです。赤の実線が風車で発電し、電動モーターは使わない時の性能で、風上への航行は無理ですが、風と垂直方向には4ノット(約2m/s)を超えるスピードで航行できます。また、緊急時に風車による発電を停止して電動モーターも活用して走ると、風上45度の方位でも9ノット(約4.6m/s)程度で航行可能です(青破線)。



んなことがありますか。

植弘：それもありますが、社会の中でこういうものをつくるということを理解してもらうことが非常に大事です。造船メーカーさんはうまくいかなかったプロジェクトがたくさんあって、国家プロジェクトはやりたくないと思っているみたいです。そういうことも含めて、これはやったほうがよさそうだと思うように、どういうプレゼンをしていくかを考える必要があります。

Q：内山さんどうですか。

内山：洋上風力を基幹エネルギーとして考えると、ここで考えたような発電システムが1000台規模で必要になる。現在の日本の造船能力でも 数艘/年 くらいしかつくれない。そうすると、かつて海軍工廠で計画的に軍艦を造船していたようなシステムを考えないと必要な量はつくれない。

Q：国立環境研究所でそういう壮大な構想を打ち上げたというのは画期的なことなんじゃないでしょうか。

植弘：どちらが画期的かという、脱温暖化2050プロジェクト（注）も画期的だと思います。2050を打ち上げてくれたから、たとえばこういうのが出て来ましたよね。あれないと、本当に20%にしなくてはいけないの、80%にしなくてはいけないのと議論

して、ぐちゃぐちゃになるところです。本当に80%にしなくてはいけなくなるとすると、自然エネルギーをもち込まないことにはできないですね。

Q：ほかのエネルギー、太陽電池パネルとか、ほかのものとは比べた時にはどうでしょうか。

植弘：洋上にどういう形で太陽パネルを張るかという技術的な議論はしてないのですが、洋上では太陽光パネルなら同じ面積で風車の1.5倍程度の発電ができる。ただし、風車の場合は基部だけに浮体があればよいのですが、太陽パネルの時にはその全面にわたって浮体をつくらなくてははいけません。もちろん、薄いものでいいし、枠組みだけでいいので、重さでは軽いものが出てくるだろうと思っています。相当広い面積、全エネルギーを太陽パネルで賄うとすると陸地面積の10%、EEZの1%に展開することが必要となります。

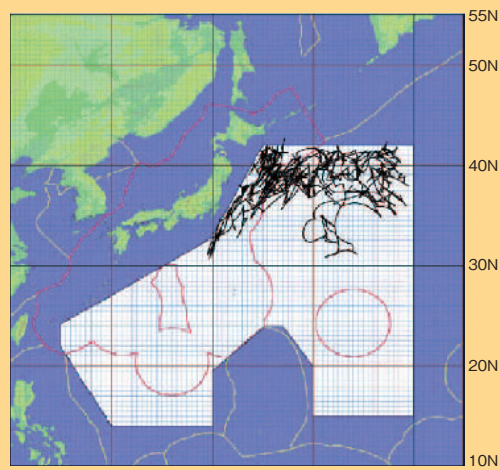
内山：現状の発電単価とEPRが反比例しているとなると、EPRからみた時に、太陽光パネルは風力の1/4の効率です。

Q：地熱エネルギーの可能性はどうでしょうか。

植弘：たくさん出ている所で使うのは、環境問題を解決しながらやればあると思います。環境問題は2つあって、1つは景観問題、もう1つは地熱に伴って出てくるヒ素等の有害物質をどうするかという問題。それからメンテナンスとして、水蒸気を取り出すパイプはかならず詰まるのでその詰まりをどうするか。それらをすべて考えた時に、果たしてEPRがいくらになるか。今のところ、発電単価は高いですね。基幹エネルギーとして地熱を大々的にやるのは難しいといえます。

Q：どうもありがとうございました。

（注）平成16年度～20年度に行われた地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクトとして実施。2050年までを見越した日本の温室効果ガス削減水増シナリオ等を提示することを目的としている



■ 図7 気象予報を用いた1年間の運行シミュレーション結果

気象予報を用いて1年間の運行をシミュレーションする

太平洋上で良い風を求めながら帆走した場合、どれくらいの発電量が得られるのか、1年間の気象予報を使ってシミュレーションしてみました。6日間先までの風と波の予報値を用い、浮体が壊れない波の高さとより多くの発電量が得られるように操舵するという条件で、1年間コンピュータ上で仮想的に航行させてみました。その結果、年間発電量は280GWhとなり、設備稼働率として約58%の値を得ることができました。これは、固定地点に留まっていたは得られない高い値です。

日本に適した洋上風力

国立環境研究所では、大学や産業界の協力を得て、平成15年度から5カ年計画で、海上を吹く風を利用して風車を回し、陸上へエネルギーを供給するというシステムの研究に取り組んできました。このシステムのEPR (Energy Profit Ratio: システムの廃棄までに得られる総エネルギーを、システムの構築と維持に必要とするエネルギーの和で除した値)は十分に大きく新しいエネルギー供給源としての検討する価値があることがわかりました。そこで今号では、これまでの研究の内容、課題と期待、さらに、今後の研究の取り組み方についてご紹介いたします。

●大量に使っても自然の循環を乱さない海上風力発電

地球温暖化や石油、石炭の枯渇懸念などを背景に日本の一次エネルギーシステムの見直しが焦眉の急となっています。

国立環境研究所では、環境に与える影響が少なく、設備の寿命が長く、効率が高いエネルギー生産システムで、しかも地勢、技術面において日本の優位性が発揮できることをコンセプトに、太陽光、風力、地熱、潮流など、実用化の研究が行われている自然エネルギー全般にわたって検討を加えました。

その結果、非係留大型浮体構造物上に風車を搭載し、得られた電力を化学エネルギーに変換して消費地に輸送するシステムを構想しました。海上を吹く風は大量に使っても自然にほとんど影響を与えないし、面積447万km²という世界第7位の広い排他的経済水域内を最適な風を求めて動き回れば、生産効率を高めることができます。さらに、日本のユニークな技術であるメガフロ-

ト技術や、海水を直接電気分解する技術などが有効活用できます。

この研究を進めるにあたって、航行する巨大海上浮体物、大型の風車など専門性の高い見識が必要な上に、“物づくり”の技術などが不可欠なため、これらの分野に精通するエキスパートの方々とプロジェクトを組み、構想の具体化を目指しました。

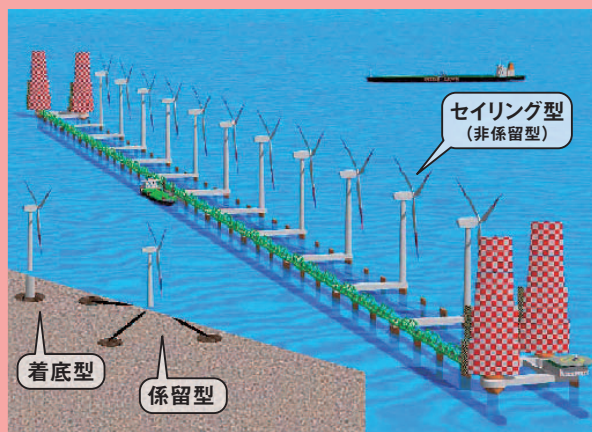
●海洋現象や気象に耐えて長期間使用できる浮体構造

研究の初期段階では、筏型の浮体上に風車を3列に並べることを考えましたが、前列の風車が後列の風車の効率を下げることから、細長い浮体に風車を1列に並べることにしました。波浪の高い外洋を航行するため、波浪エネルギーの大きな海面とその下部10mに位置する構造物の断面積を小さくすることで波から受ける力を小さくできるセミサブ型(半潜水型)を選択しました。

錨で係留されていない浮体は風に押し流されて発電できないのでは? という疑問も生じましたが、風向きに対して直角になるように浮体を航行させ、水中に装備したストラットに発生する揚力で風の抗力に対抗すれば、浮体の姿勢と位置の制御が可能で風車を発電可能な状態に維持できることがわかりました。シミュレーションの結果、浮体の運行速度は帆走のみで風に対して真横方向に航行する場合は4ノット; エンジン併用なら7ノット; 風車をフェザリングすれば、それぞれ9ノット、11ノットが期待できることがわかりました。

●陸上の風車にはない要件が求められる浮体上の風車

浮体に搭載する風車はローター径:120m、発電容



■図8 洋上風力発電のタイプ

- Q 風況が良いとされる洋上に風車をどのように設置するのか?
A 対象となる海域の水深によって方法が異なります。

	海の深さ (m)						海底ケーブル送電	好風況海域へ移動
	0	30	50	100	1000	3000		
着底型	←	→					○	×
係留型浮体		←	→				○	×
非係留型浮体			←	→			×	○

解説
北欧では水深30m程度までの浅い海域が広く存在するため、海底に基礎を設置し、その上に風車を乗せるタイプ(着底型)が多く採用されています。しかし、水深が深くなると基礎工事のコストが膨大になるため、浮体上に風車を設置する「浮体型」が有力になります。水深1000m程度までは錨等を海底につなぎ止める「係留型浮体」が可能ですが、さらに深い海域では係留コストが高くなり、「非係留型浮体」に対応することになります。「着底型」と「係留型浮体」の場合は、風車の位置がほぼ固定されるためケーブルによる送電が可能ですが、「非係留型浮体」ではできません。今回は、浅い海域が少ない日本近海の状態を考慮して「非係留型浮体」の一形態である「セイリング型浮体」を採用しました。



発電システムの検討

量:5MWを想定しています。風車の設置間隔と浮体の揺れの影響を検討しました。設置間隔は風向に対して直角にローター径の1.2倍の間隔で配置すれば風車間の干渉の影響を避けることが出来ることがわかりました。浮体の揺れは風車タワーの疲労強度に影響しますが、風の乱れによる影響の方が大きいことがわかりました。

洋上発電では浮体の向きを変えることで風車の受ける風向を常に同じに保つことができます。つまり風車のヨー制御(ローターの向きを変えること)を±30°に抑えることができるのでタワー形状を軸対称にする必要がなくなり、タワー背後に帆走の補助のための翼を取り付けることができます。

台風に遭遇する危険もあります。荒れた海洋を避け、風のある海域を移動しながら発電できれば効率よくエネルギーを取得することができます。荒天海域を避けながら発電する1年間の運用シミュレーションを行い、年間最大58.2%の設備利用率が得られる運用方法も開発しました。

●エネルギーシステムの1つとして 実用化の価値は十分

海上で発電した電力をそのまま陸上まで運搬できればよいのですが、現状では困難です。このため、海水を電気分解して水素に変換します。普通に海水を電気分解すると、毒性の高い塩素が水素と同量発生しますが、東北工業大学の橋本功二教授らは、塩素ではなく酸素が発生する電極を開発しています。エネルギー効率や耐久性に課題はありますが、白金などの希少資源を使わない点でも魅力のある技術です。

水素を運ぶ方法としては、液体水素、圧縮水素、有機ハイドライドなどが考えられますが、輸送は容易ではあ

りません。研究プロジェクトでは、火力発電所などから回収した二酸化炭素を浮体上で水素と反応させメタンをはじめとする炭化水素を合成することにも注目しています。これらの輸送は水素に比べ格段に容易だからです。

蓄電池についても検討しましたが、水素等の化学変換と比べると、現状で最高性能のもの10倍ほど高い1kWh/kgという性能が必要になりました。

セイリング型洋上風力発電のエネルギーシステムとしての評価は、エネルギー収支比を表すEPRで、石油火力発電21、石炭火力発電の17(出典:電力中央研究所)と同等程度の19を目標にしましたが、浮体上発電ではEPRは19.9となりました。また、電力で海水を直接電気分解して水素を作り、液体水素で輸送する場合は7.1、液体メタンでは6.2、有機ハイドライドでは7.3となりました。

一方、発電単価は、資本費、燃料費、運転維持費の合計額を発電電力量で除した数値ですが、現状では1kWhあたり16.6円となり、家庭用販売単価同16円~22円程度の範囲内にあります。

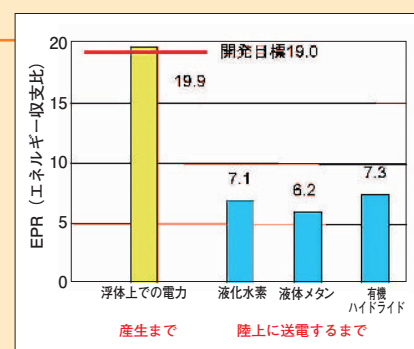
5年間にわたっての研究成果は、風力発電システム、水素製造・貯留システムを搭載した全長1880m、幅70m、重量約15万t、の浮体として纏められました。浮体は前後に2本ずつの帆と出力5MWの風車を等間隔に11基を持っています。

浮体重量の軽減によるEPR値向上、水素製造・貯留・輸送体系の改善、電力多消費型産業の浮体上設置など課題は多いものの、セイリング型風力発電による水素製造研究は近未来の日本における一次エネルギー生産の基幹エネルギーの1つになりうる技術として今後のさらなる研究が待たれます。

基幹エネルギーとしてふさわしいEPRを目指す

今回の発電システムを基幹エネルギーとして使うにあたり、現行の基幹エネルギーのEPR値を参考として、EPR目標を設定しました。当時の電力中央研究所データによれば、化石燃料発電所のEPRは17~21でしたので、今回検討する洋上風力発電の発電時EPRの目標値を19としました。

洋上で風の良いところを目指して移動した場合、風車稼働率が陸上の場合に比べ2倍以上(60%弱)になるため、発電時のEPRがほぼ20になりました。電力を陸上で消費する場合には送電のためのエネルギー変換(液化水素など)が必要になるため、EPR値が下がります。数値は海水の直接電気分解で水素を製造したケースで、淡水化後電気分解では1.5程度の値が得られます。



■ 図9 洋上での電力産生時と陸上送電時のEPR

〈洋上風力発電—世界での

欧州を中心として洋上風力発電の実
一方、日本では研究段階の取り組みはみられるものの、産業界



■世界では

洋上風力発電は世界の多くの国々で導入されていますが、なかでも、欧州がもっとも進んでいます。欧州の2009年1月時点における洋上風力の設備容量は1.5GW弱ですが、2015年には約25倍の37.4GWになるとみられています。欧州風力エネルギー協会(EWEA)によると、欧州では2030年までに300GWの風車が導入され、このうちの120GWは洋上風車であり、全世界では、1,400GWのうち、360GWが洋上風車であると予測しています。しかし、これらの洋上風力発電設備は、現状で広く用いられている着底型が殆どを占めるとされています。より深い海域に適用可能な係留型浮体の洋上風車については、研究開発から実証試験へと移行している段階です。また、今回の環境儀で紹介した非係留型洋上風車については、世界的にも研究は殆どなされていません。

係留型浮体に関する世界規模の研究としては、国際エネルギー機関(IEA)の研究タスク23(洋上風力研究分野)のサブタスク2“Research for Deeper Water”が挙げられます。米国国立再生エネルギー研究所(NREL)が中心となって、NRELが設計した5MW風車を緊張係留式プラットフォーム(TLP)型、円柱ブイ(スパー)型、はしけ型の3種類の浮体に搭載した場合について、風車と浮体の連動した運動を数種のシミュレーションプログラムにより解析しています。これは、シミュレーションプログラム相互間の比較によりプログラムの改善を目指すとともに、各種浮体の特徴を明確にすることを目的としています。

この結果では、

TLPが陸上と同等の堅固さを有することから風車にとっては最も望ましいものの、海底との緊張係留に係るコストが高い。

スパー型は風車との相性は悪くないが、製造と設置海域に関しては制限要因となる。

はしけ型は浮体側としては製造も容易でコストも安い

が揺れが大きく風車側には厳しい条件となる。

としています。

シミュレーションによる検討とともに、実海域に浮体型風車を設置する実証試験研究も始められています。Blue H USA, LLC社は、提案中のプロジェクトがイタリア政府のIndustria2015による政府支援制度に採用され、2009年2月イタリアのプーリア州沖合約20km、水深108mの海域で実証試験を始めました。基本的にはTLP構造をした浮体を採用し、風車はGamma社のGamma60(60kW)、さらに次期実証機はGamma2000(2MW)を予定しています。また、水深の目標は30m～300mです。

ノルウェーのStatoil社は、ノルウェーのカルモイ島沖合にスパー型の浮体型洋上風力プラントを設置し、2年間の試験を行う予定です。同社はこのパイロットプロジェクトの研究、建設費として4億ノルウェークローネ(日本円にして約60億円)を投資し、2009年夏から秋にかけて設置を行い、発電を始める予定です。水深はコストを考慮して120m～700mまでの海域を想定しています。風力発電容量は2.3MWで、発電電力は海底ケーブルで陸上へ送電されます。

また、従来の浮体形状にとらわれずに、新たな構想で風車—浮体システムの提案も出ています。ノルウェーのStatKraft社、NLI Innovation社、FORCE Technology社による合併事業WindSeaは、次世代浮体式風力プラントを考案しています。WindSeaの特徴は、風力プラントを安定させ、修理・保守のアクセスを容易にし、設置と移動が迅速かつ効率的に実現できるように、三角形の浮体式プラットフォームの角に風車をたてるものです。プラットフォームあたりの発電容量は10MWであり、30プラットフォーム(90タービン)から構成される風力プラントで、年間1200GWhの電力を生産します。早ければ、2011年にプロトタイプを設置を行うように計画しています。デンマーク工科大学のVitaは、重い機器を下部に設置できる垂直軸型風車を採用したシステムを検討しています。

取り組みと日本での取り組み

用化に向けた取り組みが進んでいます。

の協力も含めた具体事業化にはまだ至っていない状況です。



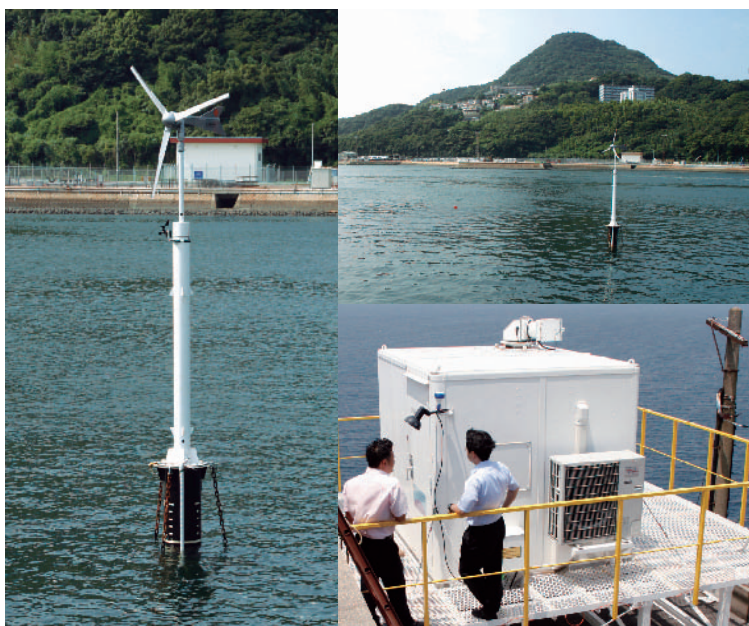
日本では

日本では21世紀初頭に、日本海洋開発産業協会（JOIA）により浮体型洋上風車についての統括的な検討がなされました。当時までに大学、民間、国立試験研究機関等で行われていた研究をとりまとめ、複数の浮体構造について設計・製造シナリオを作成し、経済コスト等の試算まで行われましたが、発電単価が高く事業性の目途が立たないという結論が得られました。しかし、この時の検討を元にして、東京大学及び海上技術安全研究所などを中心として係留浮体型の洋上風車について更なる研究開発が続けられています。東京大学においては東京電力技術開発研究所等との共同研究により、コンクリート製の擬三角形のセミサブ型浮体上に3台風車を搭載するタイプの開発研究を行っています。海上技術安全研究所においては、東京大学・東海大学や三井造船等との共同研究で、揺れの少ない改良型はしけ型浮体の研究開発が行われました。また、京都大学においても、戸田建設、佐世保重工、海上技術安全研究所等との共同研究で、スパーク型浮体を用いた洋上風車の開発研究が行われています。

しかし、開発研究の進捗状況は欧州に比べると遅れていて、机上の詳細設計まで進んだ研究はあるのですが、数十億円規模の予算が必要となるMWクラスの風車を搭載した実機サイズの浮体型風力発電システムの実証実験はできていません。しかし、2009年には京都大学チームによる1/10モデルの実海域実験が行われました。

国立環境研究所及び環境省では

2003年に開始した環境省のエネルギー特別会計を活用して、国立環境研究所において今回の環境儀で



(左・右上) 京都大学チームによる洋上風力発電1/10モデル実験、長崎県佐世保の海上にて
(右下) 洋上での風況測定調査・観測機器、長崎市池島町

紹介したプロジェクトを5年間にわたり実施しました。国立環境研究所は、この分野のシーズとなる技術は持ち合わせていませんので、民間企業や大学などの風車、浮体、海水電気分解、浮体航行を専門とされている研究者、技術者の方々にご協力を頂いてプロジェクトを進めました。国立環境研究所からは、環境保全特に二酸化炭素の排出削減という観点で、外部条件に制限を加えた要求仕様を提示させて頂きました。この仕様は、通常の速く航行したり、可載重量を大きくしたり、コストの切り詰めなどという、通常の要求とは異なるものであったため、参加メンバーにはご苦勞をかけました。

このプロジェクトの終了後、環境省でも洋上風力発電のポテンシャル拡大に興味を持って頂け、2008年度には係留型浮体を設置すべき海域を検討する研究、2009-2010年度には洋上風を広範囲に観測・評価する研究に対して、エネルギー特別会計経費を充当して頂きました。また、実証試験の呼び水となる経費が2010年度政府予算において認められることになりました。今後の日本における浮体型洋上風力発電に係る研究開発の進展が期待されます。

「洋上風力発電を利用した水素製造技術開発」に関する研究のあゆみ

本研究は以下の4課題を中心として、平成15年度から5年間にわたり産学の協力を得て実施しました。システム設計から始まり、数値シミュレーション、模型実験、システム開発等を行ったものです。

課題名

外洋水素製造ウィンドファームシステム詳細設計 外洋における浮体上の風力発電－海水電解水素製造－

水素貯蔵・運搬システムの全体像の詳細設計と要素技術間のインターフェース開発研究、設置海域の風況や海象などの評価、システムの資源・エネルギーに関するライフサイクルアセスメント、環境影響評価、社会経済的受容性について調査検討しました。

課題名

外洋利用大型浮体システムの開発

数値シミュレーションや模型実験により大型浮体システムの最適化、位置の保持、安全性の検討を行いました。

課題名

海水電気分解システムの開発

電解セルによる耐久性試験、水素発生プラントのフィージビリティスタディー、アノード耐久性改善、白金族金属の使用量を軽減した電極開発について検討しました。

課題名

水素貯蔵・輸送システムの開発

二酸化炭素と水素から炭化水素へ変換する技術の適用可能性について詳細な検討を行いました。

これらの研究は以下のスタッフ・組織によって実施されてきました（所属は当時、敬称略）。

<研究担当者>

国立環境研究所……………植弘崇嗣、内山政弘、江崎宏至、松本幸雄、須賀伸介

東北工業大学……………橋本 功二

東京大学……………木下 健

大阪大学……………高木 健

広島大学……………田中 進

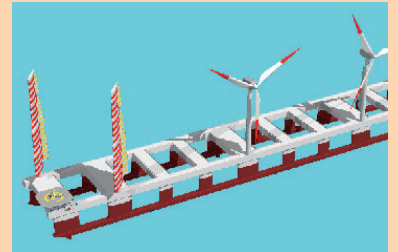
東海大学……………寺尾 裕

<参加企業（委託先）>

三菱重工業

マリンフロート推進機構

アタカ大機株式会社



将来の地球温暖化を防ぐために大幅な温室効果ガスの削減が必要な状況の下、国土の狭い日本でどのように自然エネルギーを得るかに着目し、「こんなことを検討したらどうか」という研究者のアイデアが、大きなプロジェクトにつながりました。

このプロジェクトの発端は、本号インタビューにあるとおり、研究所企画部門において研究者同士が分野を越えて研究テーマを議論（雑談）したことにありました。

海に移動型の巨大風力発電所を浮かべ、台風の被害に遭わないよう「セイリング」するというコンセプトは、荒唐無稽に見えるかもしれませんが、しかし、環境保全に役立つ研究のシーズは民間企業や大学等に数多く存在しており、様々な可能性を秘めています。研究所が環境保全のニーズから研究開発の方向を提案し、多くの関係者と協力して有効な技術開発に結びつけていくことはとても重要です。

本号では、この研究プロジェクトにおける試行錯誤が、研究者とインタビュアーとの会話の中で、詳しく語られています。自然エネルギーの可能性や資源の有限性も考慮した地球温暖化対策についての理解がさらに進むことを期待しております。

2010年3月
理事長 大垣真一郎

環境儀 No.34

—国立環境研究所の研究情報誌—

2010年3月31日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当 WG: 植弘 崇嗣、内山 政弘、増井利彦、原島 省、西川 雅高、
滝村 朗)

発行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

問合せ先 (出版物の入手) 国立環境研究所情報企画室 029 (850) 2343

(出版物の内容) // 広報・国際室 029 (850) 2310

環境儀は国立環境研究所のホームページでもご覧になれます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

編集協力 財団法人日本宇宙フォーラム

〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-2-1 新大手町ビル 7階

「環境儀」既刊の紹介

NO.1	環境中の「ホルモン様化学物質」の生殖・発生影響に関する研究	2001年 7月
NO.2	地球温暖化の影響と対策— AIM: アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル	2001年 10月
NO.3	干潟・浅海域—生物による水質浄化に関する研究	2002年 1月
NO.4	熱帯林—持続可能な森林管理をめざして	2002年 4月
NO.5	VOC—揮発性有機化合物による都市大気汚染	2002年 7月
NO.6	海の呼吸—北太平洋海洋表層のCO ₂ 吸収に関する研究	2002年 10月
NO.7	バイオ・エコエンジニアリング—開発途上国の水環境改善をめざして	2003年 1月
NO.8	黄砂研究最前線—科学的観測手法で黄砂の流れを遡る	2003年 4月
NO.9	湖沼のエコシステム—持続可能な利用と保全をめざして	2003年 7月
NO.10	オゾン層変動の機構解明—宇宙から探る 地球の大気を探る	2003年 10月
NO.11	持続可能な交通への道—環境負荷の少ない乗り物の普及をめざして	2004年 1月
NO.12	東アジアの広域大気汚染—国境を越える酸性雨	2004年 4月
NO.13	難分解性溶存有機物—湖沼環境研究の新展開	2004年 7月
NO.14	マテリアルフロー分析—モノの流れから循環型社会・経済を考える	2004年 10月
NO.15	干潟の生態系—その機能評価と類型化	2005年 1月
NO.16	長江流域で検証する「流域圏環境管理」のあり方	2005年 4月
NO.17	有機スズと生殖異常—海産巻貝に及ぼす内分泌かく乱化学物質の影響	2005年 7月
NO.18	外来生物による生物多様性への影響を探る	2005年 10月
NO.19	最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」	2006年 1月
NO.20	地球環境保全に向けた国際合意をめざして—温暖化対策における社会科学的アプローチ	2006年 4月
NO.21	中国の都市大気汚染と健康影響	2006年 7月
NO.22	微小粒子の健康影響—アレルギーと循環機能	2006年 10月
NO.23	地球規模の海洋汚染—観測と実態	2007年 1月
NO.24	21世紀の廃棄物最終処分場—高規格最終処分システムの研究	2007年 4月
NO.25	環境知覚研究の勧め—好ましい環境をめざして	2007年 7月
NO.26	成層圏オゾン層の行方—3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	2007年 10月
NO.27	アレルギー性疾患への環境化学物質の影響	2008年 1月
NO.28	森の息づかいを測る—森林生態系のCO ₂ フラックス観測研究	2008年 4月
NO.29	ライダーネットワークの展開—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して	2008年 7月
NO.30	河川生態系への人為的影響に関する評価—よりよい流域環境を未来に残す	2008年 10月
NO.31	有害廃棄物の処理—アスベスト、PCB処理の一翼を担う分析研究	2009年 1月
NO.32	熱中症の原因を探る—救急搬送データから見るその実態と将来予測	2009年 4月
NO.33	越境大気汚染の日本への影響—光化学オキシダント増加の謎	2009年 7月

「環境儀」

地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、「環境儀」という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。「環境儀」に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月 合志 陽一
(環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字N.I.E.Sで構成されています。
N=波(大気と水)、I=木(生命)、E・Sで構成される○で地球(世界)を表現しています。
ロゴマーク全体が風を切って左側に進むように動くのは、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。