

5-3 自然エネルギー利用水素供給基地導入構想

(1) 離島地域での風力発電導入の問題点と水素利用

離島地域で新エネルギー、特に風力発電を導入する場合の現状と問題点を以下のように整理してみた。

- ・一般的にみて、新エネルギーで、減価償却費などの固定費を負担して唯一経済性があると見られているのは、少なくとも定格出力が 500 kW 以上の中～大型風力発電システムを、最低 1 / 3 以上の事業費補助を受けて導入する場合だけである。
- ・離島では発電燃料をディーゼル油に依存しており、燃料価格の高騰を受けて、発電コストは、大きな離島で 25 円 / kWh 前後、小離島では 35～45 円 / kWh という高い水準にあり、ここ久米島でも 30 円前後になっているものと考えられる。
- ・このような離島の発電コストとの比較の上で新エネルギー導入の経済性を考えると、新エネ導入は経済的合理性を有する場合が多々生じてくる。
- ・しかし、どんな離島でも電力のユーザーは発電コストとは関係なく地域全体の所定の料金で電力を購入でき、これらユーザーからみると、新エネ導入の意思決定はあくまで所定の料金との比較においてなされるために、経済性の判断は沖縄地域全体と共通である。
- ・では、唯一経済性があるとされる中～大型風力発電を久米島で電力会社以外の会社や団体が導入可能かどうかをみると、その導入条件は運用上非常に厳しい。
- ・まず、風力発電は基本的に独立運転は出来ず、配電線に繋いで系統連系運用を行なう必要がある。系統連系による運用で不足分は配電線から購入し、余剰分は配電線に流す（＝売電）ことによって需給のバランスをとっている。
- ・しかし風力発電は風まかせの発電であるため、発電電力は不規則不安定で、わずかな風の振る舞いのちがいで、発電電力は乱高下し、特に強風時には定格出力の 1.5 倍の出力を瞬間的に示すことがある。
- ・離島では、電力の需要変動を発電所の出力調整で吸収し電力需給の「同時同量」を実現している。しかし激しい出力変動の風力発電が供給ラインに組み込まれた場合、その規模によっては、発電所の負荷調整能力を超え、電力供給全体のバランスを壊す危険性もある。
- ・このことから、配電線の電力の「質（周波数、電圧など）」を維持するため、商用電力会社は風力発電の新たな系統連系に厳しい条件を課し、電力の「質」が所定の範囲を逸脱すると予想されるときは、風力発電の運転を中断する措置＝解列をとっている。
- ・久米島で、仮に大型風力発電、1,000 kW × 3 基を導入したとすると、強風時には 3 基の風車から瞬間的には 4,000 kW もの出力が発生する。久米島の最大負荷は 10,000 kW 以下と考えられるので、その 4 割もの突発的な電力は配電線ではもちろん、発電所でも吸収は困難である。
- ・そこに出てきたのが、電力貯蔵システムの併設である。系統の電力の質を落とさないよう、風力発電の出力変動（±）の大きな部分を電力貯蔵システムで調整し、系統の

電力需要の同時同量をサポートさせようとするのである。

- ・電力貯蔵システムには、従来からの「鉛バッテリー」、新規開発の「ナトリウム・硫黄電池」や「レドックスフロー電池＝V電池」そして「電解水素」などがあり、離島の事情を精査すると、「電解水素」に大きな可能性が生じている。
- ・最近の研究によれば、水の電気分解システムのうち、固体高分子型の電解装置による風力発電電力の負荷変動吸収能力がすぐれているとの実証研究があり、この仕組みを利用すると、系統の「質」を乱す恐れのある変動部分はその大半を水素にして貯蔵できるとされている。
- ・水素は気体であるので貯蔵や輸送が問題であったが、最近水素を芳香族（トルエン、ナフタレン等）に吸収させ、「有機ハイドライド」にして安全に輸送できることもわかってきた。
- ・水素は有機ハイドライド化すれば、どこにでも輸送でき、そこで燃料電池などの燃料にも利用できる。久米島からさらに小離島に運搬し、小離島での燃料電池発電に利用することも可能になる。
- ・久米島新エネルギービジョンでは、久米島の未来構想として『風力発電利用水素製造供給基地』のプランを掲げることとした。

まず、風力発電の出力変動部分を電解プラントが水素製造に結び付ける研究成果を以下に示すことにする。

(2)風力発電利用電解水素製造システムの研究開発事例と課題

①風力発電電力の水電解装置への投入実証試験

（日立造船のレポートから）

この調査は、日立造船と三重大学が共同で「風力発電出力変動分の水電解による水素エネルギー化技術」に関する研究調査を実施し、平成17年11月、日本風力エネルギー協会のシンポジウムで発表したものを日立造船の了解の下に参照・引用しまとめたものである。

基本的な考え方は、水素製造方式として一般化している化石燃料利用方式が水素を製造する過程で二酸化炭素を排出し、必ずしもクリーンエネルギーにはならない点に注目し、化石燃料ではなく再生可能エネルギーを利用した水素製造を目指すべきとの考えから、風力発電を利用した水素製造を取り上げている点にある。

この趣旨であれば、風力発電電力をそのまま水電解水素製造装置に投入することが理想的になるが、風力発電出力の不規則不安定性と電解装置の入力負荷変動追従性の問題、風力発電の直接投入の場合の電解装置稼働率と水素製造コストの問題など、多くの疑問点が生ずる。以下でこれらの問題を取り上げてゆく。

両者による共同研究の成果によれば、「水電解水素発生装置の利用は、風力発電によって発生した電力を貯蔵する有望な手段の一つと考えられる。この装置は基本的に電力と水のみで水素を製造できるため、二酸化炭素などの温室効果ガスは発生せず、環境負荷

のほとんどないシステムを構築することができる」とし、「三重大学と共同で、風力発電と水電解水素発生装置を結合して実証実験を行った結果、水電解水素発生装置は風力の変動に良好な追従性を示し、期待通りの成果が得られ、十分な実用性を有していることが確認された」とのことである。

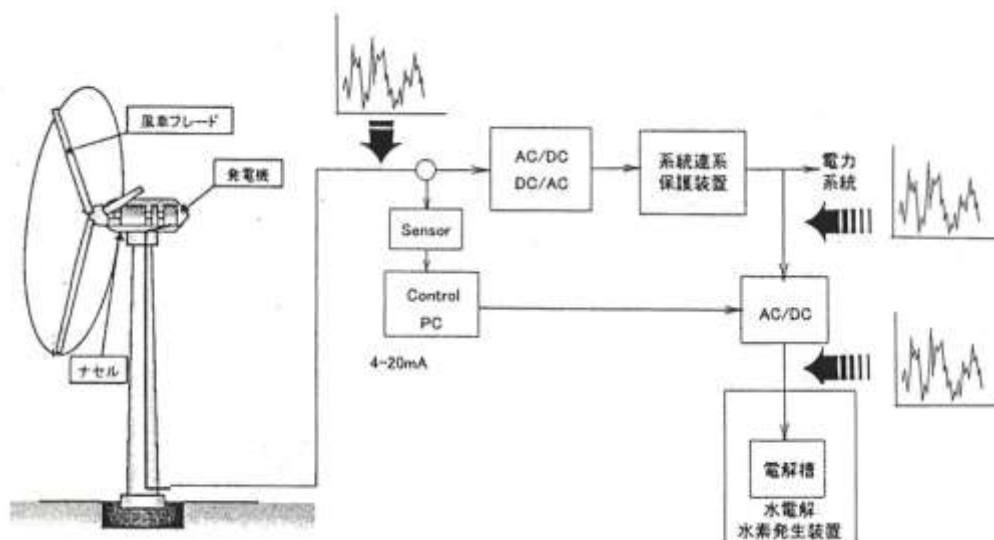
実験実施要領、実験の様子を以下に示す。

実験実施要領

実験場所	三重大学農場（三重県津市）
実施時期	H17.3
風力発電定格出力	100 kW
発電機型式	永久磁石式同期型発電機
水電解装置水素発生量	4 Nm ³ /h
電極面積	約 250 cm ²
セル数	20

風力発電機は三重大学農場に設置されている出力 100 kW のものを利用し、水素発生装置を接続して実験を行った。100 kW 級の風力発電機側にプレハブ倉庫に収納した水電解水素発生装置を設置した。

なおこの 100 kW 風力発電機は三重大学が独自で開発した機種である。



三重大学での実証試験システム

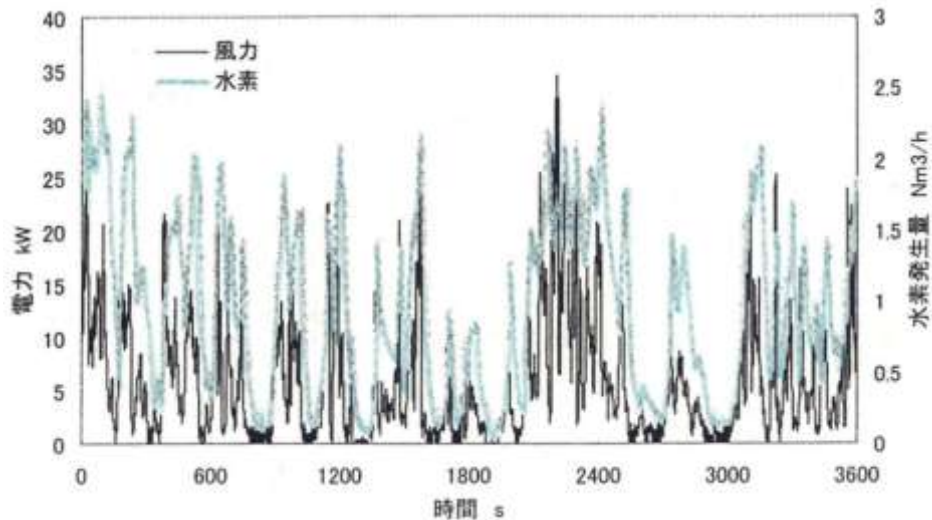
出力変動パターンをそのまま電解プラントに投入する制御方式がとられた

実験で使用した風力発電機は同期発電機搭載型であり、AC/DC、DC/AC および系統連系保護装置を介して系統電力に連系されている。この実験では、コンバーター等の風力発電側の機器類を改造することなく水電解水素発生装置を接続するために DC/AC 変換後の 60 Hz 交流に変換された箇所を接続点とした。風力発電機の発電量は電力計で計測して制御用 PC に入力される。発電量に応じて制御用 PC から水電解水素発生装置内の AC/DC

コンバータに指令信号が出力され、発電量に応じた電解電流が供給させる。すなわち、発電量相当の電力で水を電気分解して水素を製造するシステムである。

実証実験結果をまずグラフで示す。

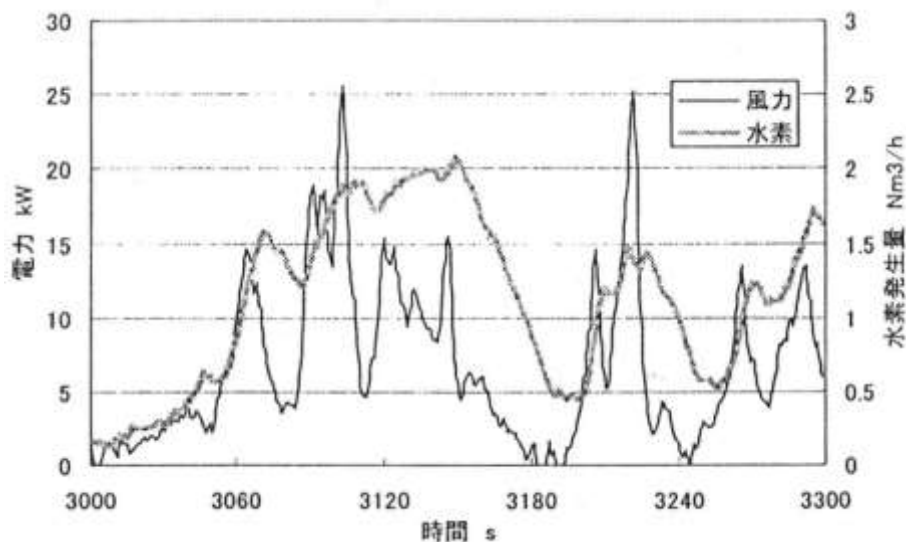
下図は、実験結果の一例で、1時間の風力発電電力および水素発生量の変化を記録したもので、数10秒単位で大きく風力発電が大きく変動するのに対して、水電解水素発生装置による水素発生は高い追従性を有していることが確認される。



電解プラントの電力入力変動への追従性測定結果

水素貯蔵タンクでの測定のため、追従性は実際よりも甘く表示されており、現実にはかなり良好な追従性を示していると考えられる

次の図は、上図の3000秒付近のデータを時間方向で拡大して示したものである。本システムは詳細データからもわかるように電力変動に対して十分な応答性を有している。なお、水素発生量に若干の応答遅れが見られるのは配管や気液分離器などの配管系によるものである。



固体高分子型水電解装置において、水電解の電気化学的反応は数 msec 程度の時定数で行われていると考えられており、風力発電の出力変動の時定数に対して3桁以上小さなものである。従って、変動分をほぼ完全に水素へ変換することが可能である。また、今回の実験では出力を全て水素化したが、任意の出力以上のみを水素化するようなことも制御的に簡単に行うことが可能である。(以上、日立造船のレポートより)

②風力発電電力の水電解装置への直接投入の問題点

風力発電システムからの出力は、きわめて不規則不安定である。風況によっては瞬間的に定格出力の140%前後の出力を示す。この実証試験の風車は100 kWであるが、瞬間的には140~150 kWの出力を示すであろう。

しかし、年間を平均すると、平均風速5~6 m/sの場合、100 kWの風車は16~18 kWの発電を記録し、定格容量に対する平均利用率は16~18%程度になると考えられる。

このことは、風力発電電力をまるまる水電解装置に投入するシステムを組んだ場合には、水電解装置に入力される電力は、0から150 kWまで変動し、平均的には16~18 kWということになる。

電解装置の過大電力投入限界を瞬間的に120% (想定) とすれば、150 kWの電力入力に対応できる電解装置は、125 kW対応であり、その装置の年間平均稼働率は

$$16\sim 18 \text{ kW} \div 125 \text{ kW} = 12.8\sim 14.4\%$$

にまで低下することが予想される。

風力発電のコストを仮に8円/kWhとし、水電解装置の設備容量を80 Nm³/h、設備費を160百万円(現状価格)、補助金を50%とすると、水素の製造コストは約50円/Nm³、コストのうちの固定費の割合は50%程度=25円なので、仮に年間操業度が50%になると、固定費は2倍の50円、水素の製造コストは50円から75円に増加する。

上述のように、操業度が12.8~14.4%になると、水素の固定費は200円になり、水素の製造コストは50円から230円以上、4~5倍に跳ね上がる。

このことは、風力発電電力を直接投入し、かつそれをすべて水電解装置に投入し、そしてなお、水電解装置には風力電力以外の電力を投入しないというシステムは、技術的には成り立つも、経済的には成り立たないということを意味する。

③風力発電利用の考え方:「みなし風力発電」

風力発電利用の考え方の根底には、「二酸化炭素の排出を伴わない水素製造」という狙いがある。しかし、そこには時間の概念はなく、量の概念だけが存在する。このことから、1年間を通して風力発電で得た電力量のうち、ほぼそれに等しい電力量を水素製造に投入すれば、年間を通して、二酸化炭素を排出しない水素製造が可能であった、ということになるだろう。いわゆる「みなし風力発電」である。

この考え方に従えば、風力発電は商用電力との系統連系にて運用し、年間予想発電量を予め設定して、その電力を計画的に水素製造に利用すれば、その水素はクリーンな水素ということになるだろう。

系統連系による風力発電電力の投入を前提とすれば、水素製造装置は、電力投入の制

約から解放され、本来の合理的な設備容量設定が可能になる。製造コストも最適化が図れることになる。

④風力発電電力と電力貯蔵装置との組み合わせによる解決策

風力発電電力の出力変動を、電力貯蔵装置によって吸収し、出力を安定化させて利用するという案が最近登場し、系統連系に商用電力側から問題提起を受けている地方の風力発電サイトで採用の動きがある。国もこのプランに補助金交付を決定した。

しかし、併設する電力貯蔵装置の容量によっては、出力平滑化の効果が限定的になり、水電解装置の操業度を劇的に改善するのは困難になる。

最近NEDOが調査した結果によれば、系統連系に支障を来たさない程度の電力貯蔵装置を併設しただけで、風力発電コストは40%～60%上昇するとのシミュレーション結果が報告されていて、経済性問題が大きく浮上しつつある。

ドイツのウインドファームでは、瞬間的に突出した電力はバッテリーによる充放電はせず、突出分を電気ヒーターで大気中に投棄しているケースがある。理由は、投棄する方がはるかに経済的であるとのことであった。

このことから、水素の問題に電力貯蔵装置を直接組み合わせることは適切ではなく、もし系統連系上の問題がある場合は、電気給湯器を併設するか電気自動車用の給電ステーションを併設するなど、別途の対策を考えるべきだろう。

(3)久米島での風力発電～水素供給基地建設構想

久米島での大型風力発電と水素製造利用との「複合プロジェクト」の構想は以下の通りである。

①複合プロジェクト導入の目的

- ・発電コストの安い中～大型風力発電システムを導入し、地域社会のエネルギーコストを削減する。
- ・エネルギーコスト削減の足かせになる「解列」の回避のため、水素製造システムを導入し、少なくとも解列対象分はその大半を水素にして貯蔵する。
- ・水素は久米島地域の分散型電源に利用するほか、周辺の小離島に輸送し、そこでの分散型発電に利用する。
- ・分散型電源は災害時の非常用電源としても役立つ。
- ・水素製造過程で副生される酸素は、地域医療に役立つほか、ごみ焼却場での吹き込みによる完全燃焼、ダイオキシン対策として活用したり、養殖漁業用にも用途は広がる。

②複合プロジェクトの構成

- ・久米島の風況のよい沿岸部に定格出力1,000 kWの大型風車を3基導入する。
- ・大型風車の設備利用率を計画値として20%とする。
- ・よって、年間発電期待量は：

$$1,000 \times 3 \times 8,760 \text{ 時間} \times 20\% = 5,265,000 \text{ kWh}$$

で、久米島全体の電力需要量の約 10%に達する。

- この年間発電期待量のうち仮に 30%が「解列」対象になるものとすれば、その電力量は $5,265,000 \text{ kWh} \times 30\% = 1,576,800 \text{ kWh/年}$ となる。

- この電力を水素にした場合には

$$\text{水素の生産量} : 1,576,800 \text{ kWh} \div 4.5 \text{ kWh/N m}^3 = 350,400 \text{ N m}^3/\text{年}$$

$$\text{酸素の生産量} : \quad (\text{副生率 } 50\%) \quad \quad \quad 175,200 \text{ N m}^3/\text{年}$$

- 水素は芳香族炭化水素のトルエンに吸蔵させメチルシクロヘキサン（有機ハイドライド）にして貯蔵する。
- メチルシクロヘキサンは灯油に近い性状であり、輸送～貯蔵などの取り扱いはし易く、離島地域での利用に問題は少ない。
- $350,400 \text{ N m}^3/\text{年}$ からのメチルシクロヘキサンの生成量は、

$$1 \text{ N m}^3 \longrightarrow 1.96 \text{ kg より、約 } 687 \text{ トン/年 (水素にして } 350,400 \text{ N m}^3)$$

- このうち、 $3/4 = 515$ トンを久米島で分散型発電システム（燃料電池）に利用し、残り $1/4 = 172$ トンは周辺の小離島に運搬して同じく燃料電池に利用する。
- 燃料電池による発電量は久米島では：

$$350,400 \text{ N m}^3 \times 3/4 \div 0.514 \text{ N m}^3/\text{kWh} = 511,284 \text{ kWh}$$

で、仮に稼働率を 60%とすると、設備容量は：

$$511,284 \text{ kWh} \div 8,760 \text{ 時間} \div 60\% = 97 \text{ kW}$$

約 100 kW となる。

- 一方の小離島では $350,400 \text{ N m}^3 \times 1/4 \div 0.514 \text{ N m}^3/\text{kWh} = 170,428 \text{ kWh}$

で、仮に稼働率を 60%とすると、設備容量は：

$$170,428 \text{ kWh} \div 8,760 \text{ 時間} \div 60\% = 32 \text{ kW}$$

となる。

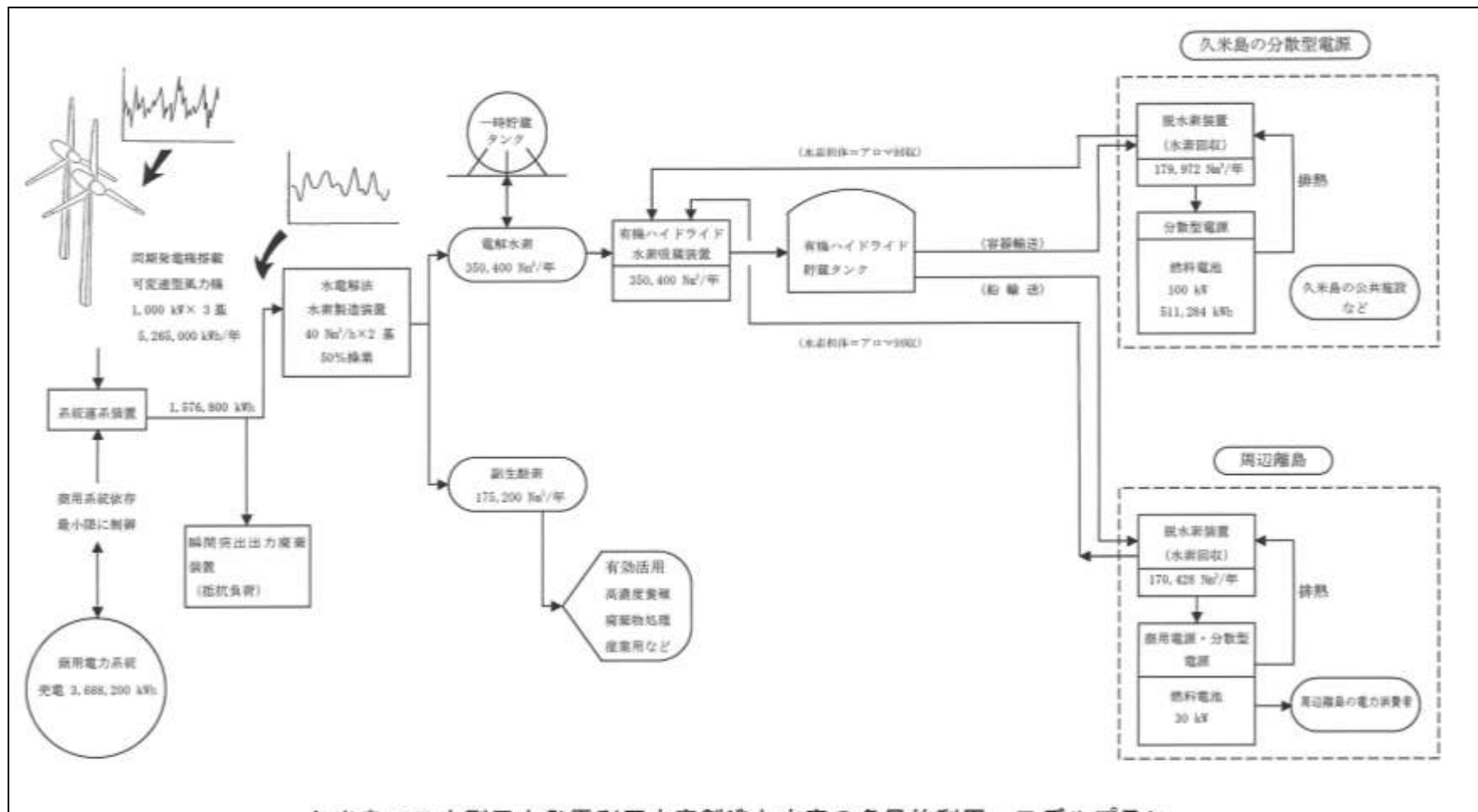
以上のデータなどを模式化したものを次に掲げる

この例では風力発電機を $1,000 \text{ kW} \times 3$ 基で解列対象を 30%とし、実質的には 900 kW 分の風力発電機、発電量にして $1,576,800 \text{ kWh}$ 分をいったん水素に貯蔵したのであるが、燃料電池による電力再生量は、 $511,284 \text{ kWh} + 170,428 \text{ kWh} = 682,712 \text{ kWh}$ で、投入量の 43%に止まり、57%は水素製造～輸送～燃料電池にて消費されたことになる。

このことから、水素による電力貯蔵はエネルギーの選択肢が豊富にある地域社会では経済性はなく、経済性が出るのは、「歩留まり 43%」をカバーするだけの地域エネルギー事情が存在する場合に限られることになる。

久米島の場合、諸般のエネルギー事情からみて、水素貯蔵～電力再生のプロセスが十分成り立つだけの地域エネルギー事情があるものと考えられる。

経済性成立の過程を見定めるにはかなりの調査研究が必要となるが、可能性があるので詳細調査が待たれるところである。



久米島での大型風力発電利用水素製造と水素の多目的利用・モデルプラン

(風力発電：系統依存ミニマム化、非連系風力発電電力の水素化)

(水素輸送：有機ハイドライドによる貯蔵と島内及び周辺離島への輸送)