

# 再生可能エネルギーの動向と今後の課題

## Trends in Renewable Energies and Their Future Prospects



(技)開発企画室  
水 上 俊 一  
Shunichi Mizukami

地球温暖化問題が現実になろうとしている今日、再生可能エネルギーの開発と導入による問題解決への努力が、世界の各地で推進されている。本報では、来たる21世紀における世界的規模のエネルギー転換のシナリオ、各種再生可能エネルギーの特性およびそれに水素を組合わせた二次エネルギーシステムの開発状況について紹介した。さらに、現在直面している課題を、公開されている資料をもとに整理し、今後の更なる普及に対して展望した。

As the global warming effect becomes more of a reality, many efforts are being made across the world to help solve the problem by developing and introducing renewable energy technologies. In this report are shown the scenario of the world-wide energy conversion during the coming 21st century, the characteristics of each type of renewable energy and secondary energy system projects in which renewable energy and hydrogen are combined. Finally, the subject of the future spread of renewable energy with which we are now confronted is considered, on the basis of published material.

### Key Words :

再生可能エネルギー	Renewable energy
クリーンエネルギー	Clean energy
太陽光発電	Photovoltaic power generation
風力発電	Wind power generation
廃棄物発電	Waste power generation

### まえがき

人類が本格的に化石燃料を使い始めた産業革命のころから、地球規模でCO<sub>2</sub>濃度が増し始め、近年の急激な増加は地球温暖化をもたらす大きな問題となってきた。この問題は、従来の排ガス公害と異なり、世界的に資源・環境・経済の3分野にわたる課題を有するため、21世紀のエネルギーシステムの根

元に係わるものである。このような背景のもと、1997年12月に温暖化防止京都会議（COP 3）が開催され、2008～2012年に向けて先進各国の温室効果ガス削減目標値が定められた。

本稿では、前述の問題の解決手段の一つである再生可能エネルギー導入の必要性と動向を概観し、それらエネルギーの貯蔵媒体としての水素を組合わせ

たクリーンエネルギーシステムのプロジェクト開発状況、さらには、これら技術の導入に際しての課題について言及する。

## 1. 再生可能エネルギー導入の必要性

### 1.1 地球環境変化の予測

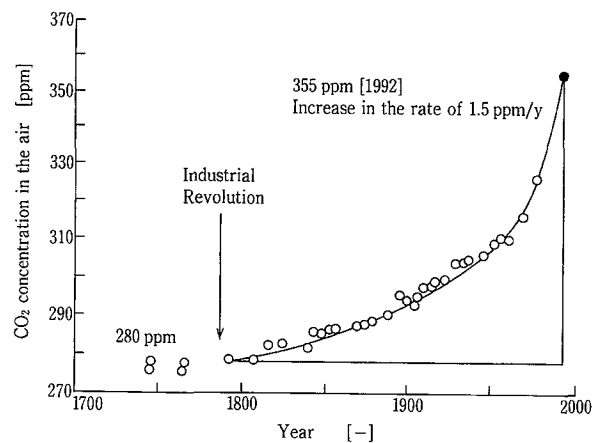
第1図<sup>1)</sup>に示すように、産業革命時(1800年頃)に280 ppm程度であった地球上のCO<sub>2</sub>濃度は、当初1年あたり約0.1 ppmで増加していた。しかし、現在は約370 ppmのCO<sub>2</sub>濃度となり、その増加割合も1.5 ppm/年となっている。このまま制約なく、経済原則に則ってCO<sub>2</sub>が排出され続ければ、2070年には550 ppm、2100年には700 ppmになると予測されている。550 ppmの時点で、地球の平均気温は約2℃上昇し、海面水位は50 cm程度上昇するとの予測もある。その後も温室効果ガスの排出を無制限に許容し続ければ、国土の水没、台風の巨大化、大干ばつによる凶作や疫病の蔓延などが起こるものと推測されている。

### 1.2 世界規模のエネルギー転換シナリオ

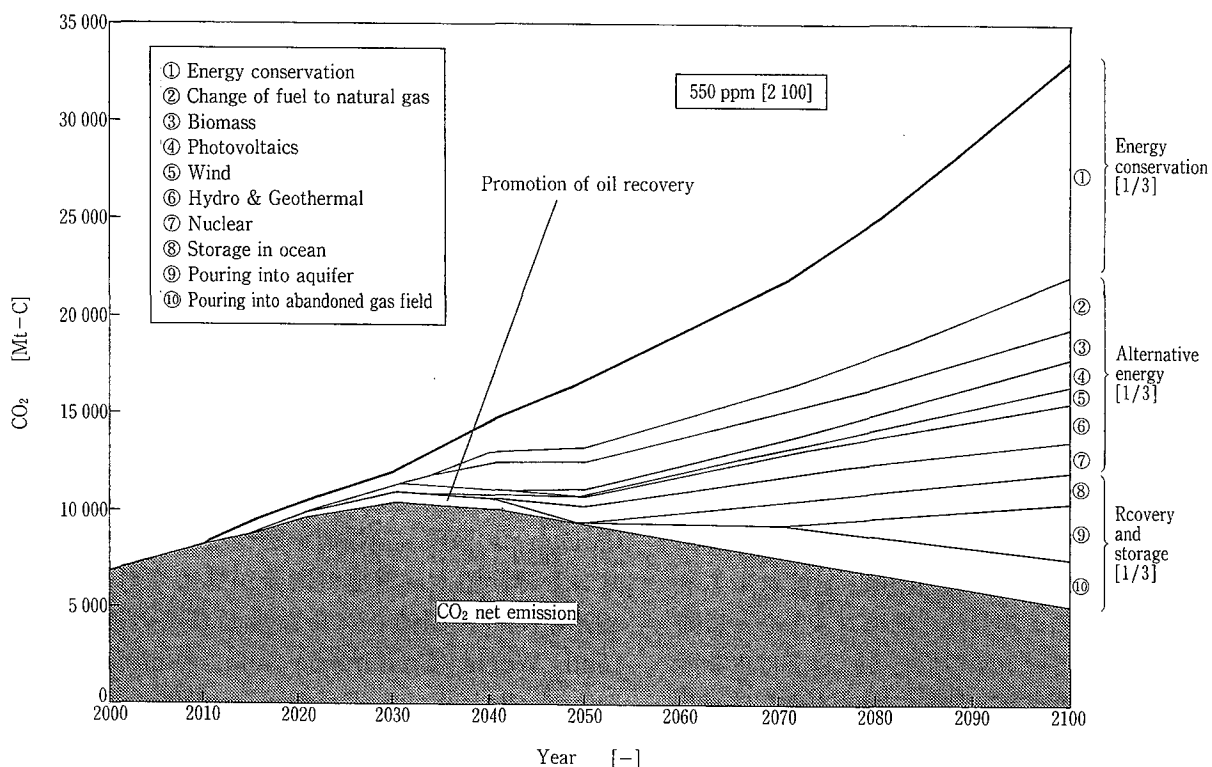
前節の環境変化を抑制するためには、CO<sub>2</sub>に代表される温室効果ガス濃度の増加を止めなければならない。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により地球環境産業技術研究機構(RITE)が実施した調査研究<sup>2)</sup>では、世界エネルギー

需給モデル(DNE 21モデル: Dynamic New Earth 21)でCO<sub>2</sub>排出量と削減・貯留量を予測計算し、各種CO<sub>2</sub>対策技術の総合的評価と将来の具体的対策シナリオの作成を行った。

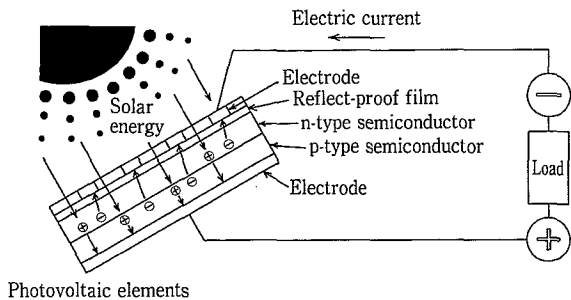
そのシナリオによれば、まず、世界の経済活動を維持し、かつ環境の壊滅的破壊に至らない現実的なレベルのCO<sub>2</sub>濃度を550 ppmと設定した。そして、2100年のCO<sub>2</sub>濃度を550 ppmまでの上昇にとどめ、その後は550 ppmのレベルを維持するものとした。



第1図 大気中二酸化炭素濃度の経年変化  
Fig. 1 Secular change of CO<sub>2</sub> concentration in the air



第2図 CO<sub>2</sub>削減対策の効果  
Fig. 2 Effect of various countermeasures for CO<sub>2</sub> reduction



第3図 太陽光発電の原理  
Fig. 3 Principle of photovoltaic power generation

このケースにおける2100年までのCO<sub>2</sub>排出量の変遷が、まったく制約のない場合の排出量との比較で、第2図<sup>3)</sup>に示されている。両者の差である排出削減量への寄与についても、各種の対策別に示されている。

550 ppm ケースのCO<sub>2</sub> 正味排出量を見ると、2030年頃までは増加し続けるが、その後は550 ppm の維持に向けて減少することになる。CO<sub>2</sub> 削減への各種対策の寄与予測を見ると、2100年時点では、省エネルギー 1/3、代替エネルギー 1/3、CO<sub>2</sub> 回収・処分 1/3 とほぼ均等である。経年的には2030年頃まで省エネルギーの寄与が主体であり、21世紀半ばになると再生可能エネルギーの寄与が大きくなる。この時期は、技術の進歩もあろうが、天然ガス可採年数(56年)や石油可採年数(45年)の終了時期とも関係があると考えられる。

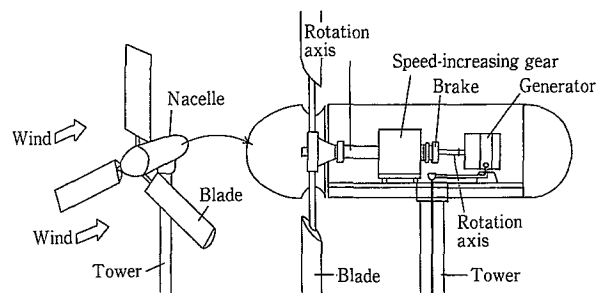
このシナリオには多くの仮定が前提にあり、実際には予測を大きく下回るものや、予想以上の技術のブレークスルーで大きく寄与するものも出てくるであろう。その中で再生可能エネルギーは、長期的に環境への負荷がきわめて小さく、その多くは賦存エネルギー量に限りがないという特徴をもつため、確実な対策として最も期待されている。

## 2. 再生可能エネルギーの特徴と導入状況・計画

再生可能エネルギーとは、太陽光、風力、水力、バイオマス、などである。先に述べた特徴を持つにもかかわらず普及が十分でないのは、いずれもエネルギー密度、気候による変動、発電コストなどに問題点を持ちあわせているからである。以下に主な再生可能エネルギーの現状と日本における導入見通しについて述べる。

### 2.1 太陽光発電

太陽光発電は第3図<sup>3)</sup>に示すように、シリコンな



第4図 風力発電機の構造  
Fig. 4 Structure of wind power generator

どの半導体に光が当たると電気が発生するという光電効果を応用したものである。市販のシリコン単結晶モジュールの電力変換効率は最大で14%、多結晶モジュールでは12%程度である。この発電方式は、騒音もなくメンテナンスがほぼ不要であることが長所であるが、気候や時間によって発電量が大きく変動することが短所である。また、現状の生産規模では設備費が周辺設備を含めて約100万円/kWであるため、火力発電設備コストの20~30万円/kWにどれだけ近づけられるかが課題である。現在、政府は「住宅用太陽光発電導入基盤整備事業」として個人住宅への太陽光発電システムに1kW当たり、上限で34万円を補助し、普及に伴うコストの低減を誘発するなど、需要拡大に向けた支援策を講じている。

1997年のわが国における太陽光発電導入量は5.7万kWである(全世界で約20万kW)。1994年12月に閣議決定された新エネルギー導入大綱によると、今後の導入計画は、2000年目標40万kW、2010年460万kWとされ、1998年6月の通産省長期需給見通しでは、2010年500万kWとさらに上方修正された。ただし、2000年における発電モジュール目標コスト(周辺設備含まず)として10~20万円/kW、発電コスト20~30円/kWhも設定されており、目標値達成には相当厳しいものがあると思われる。

より安価な太陽電池製造の可能性を求めて、CVDなどの薄膜製造技術を使ったアモルファスシリコン薄膜型太陽電池の開発が進められている。1998年7月に開催された太陽光発電の国際学会(2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion (Wien, Austria))では、3層薄膜で単結晶シリコン並みの15%の変換効率を実現したとの報告もあり、将来の大幅なコストダウンが期待されている。

## 2.2 風力発電

風力発電は第4図<sup>4)</sup>に示すように、風力エネルギーをブレードで回転エネルギーに変換し、増速ギアを経由して電力を得るものである。太陽光発電と異なり、1基当たりの発電量が数百kW~1.5MWと大きく、個人住宅よりも事業用に適した発電方式である。しかし、気候や季節により発電量が変化することや、風況、騒音、景観などの点で設置場所に制限があることが課題となっている。

風力発電の導入状況は、第1表<sup>1)</sup>で示すとおり1996年末で世界で約6200MW(620万kW)に達している。地域別に見ると、アメリカ、ヨーロッパ諸国、インドなどでの発電量が多く、日本は1.4万kW(約70基)ときわめて少ない。地形的に日本国内への設置は必ずしも不適とは言えず、1995年あたりから急激に導入量が増している。先に述べた新エネルギー導入大綱では、2000年で2万kW、2010年で15万kWの導入が計画されたが、1997年で2.3万kWと、すでに2000年目標を上回っていることから、長期需給見直しで2010年30万kWと大幅に目標が引き上げられた。

設備建設コストは、比較的安価な海外(デンマーク、オランダ、ドイツなど)の大型風力発電機を導入することで、かなり低減され、最近の新聞では25~40万円/kWという値が報道されている。ただし、日本では風況のよい場所つまり、常に風が強い所は

第1表 世界の風力発電設備

Table 1 World-wide totalization of wind power generators

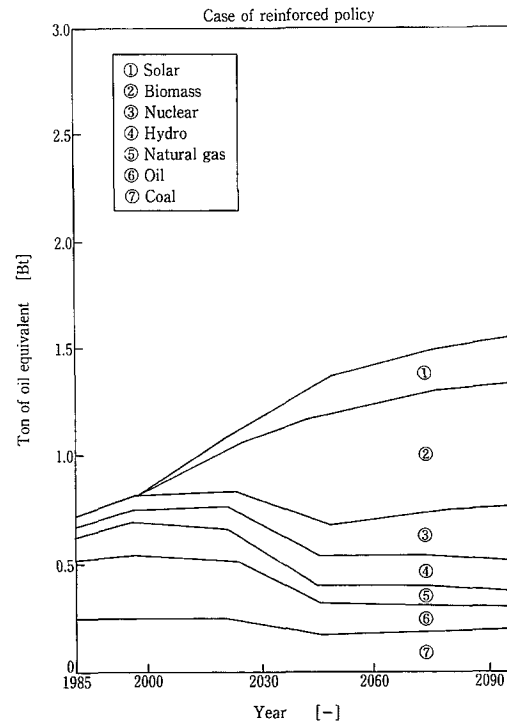
Region	Country	Total scale of power generation (MW)
Europe	Germany	3 384
	Denmark	1 576
	Netherlands	785
	United Kingdom	305
	Spain	264
	Sweden	216
	Italy	105
	France	70
	Greece	28
North America	U. S. A	1 839
	Canada	1 794
	Costa Rica	23
		20
Asia	India	820
	China	57
	Japan	14
Others		58
Total		6 172

電力需要のある場所から離れているため、多額の据付工事費や送電設備費を要することが多く、発電コストを引き上げる要因となっている。風力発電にも通産省の「導入促進対策補助金制度」が適用されており、民間事業では800kW以上の設備に1/3、地方公共団体では1200kW以上の設備に1/2の補助金が支給される。

## 2.3 バイオマスエネルギー

バイオマス(生物体)エネルギーとは、農林水産資源や有機性産業廃棄物、都市ゴミ、汚泥などの有機物を利用して得るエネルギーである。有機物を燃やすとCO<sub>2</sub>が発生するが、利用と同時に同量のバイオマスを育成すればCO<sub>2</sub>は固定されるため、大気中のCO<sub>2</sub>バランスを崩すことはない。これが再生可能エネルギーと言われる所以である。ただし、太陽光や風力エネルギーと異なり、植林などの人間活動によって再生産環境を維持していかなければならない。

地球上のバイオマス賦存量は約2兆トンで、この内毎年2000億トンが光合成により再生産されている。



第5図 IPCCによる将来の一次エネルギー供給シナリオ  
Fig. 5 Scenario of future supply of primary energy by IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

この再生産量をエネルギーに換算すると世界総エネルギー消費量の約7倍にもなるが、実際はごく一部が利用されているに過ぎない。いっぽう、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の報告<sup>5)</sup>によれば、CO<sub>2</sub>抑制政策を強化した場合は、第5図に示したように21世紀後半ではバイオマスエネルギーがエネルギー生産の最大シェアを占めることになる。

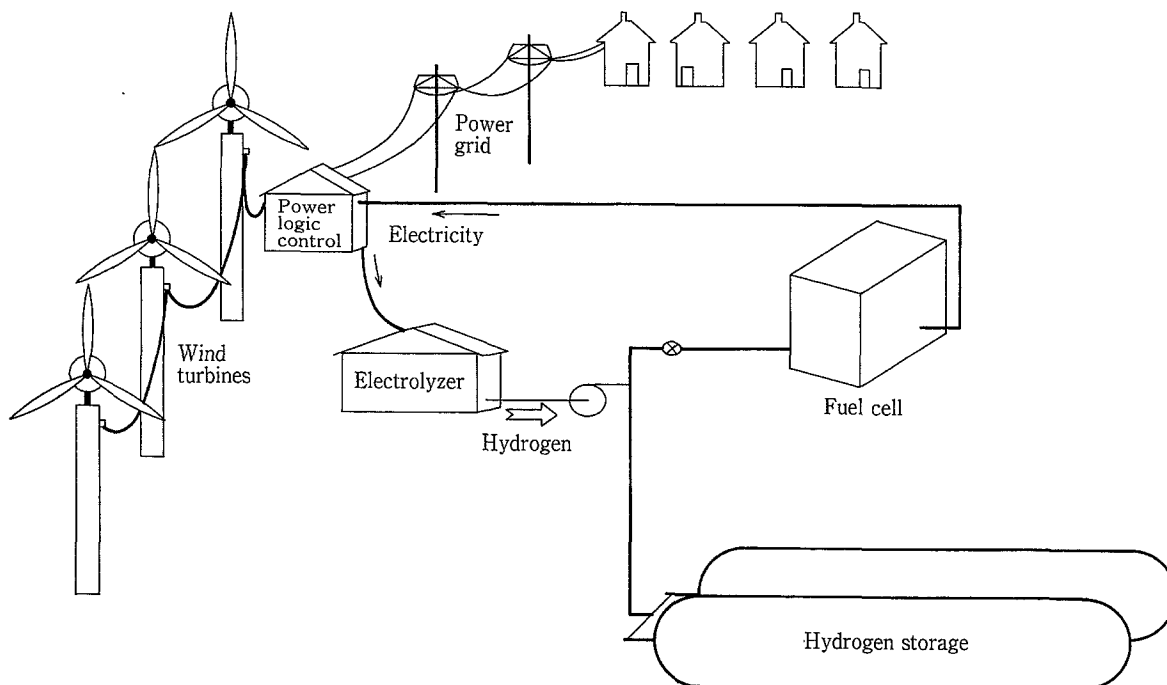
現在、わが国でエネルギーとして利用されているバイオマスエネルギーの大部分は、都市ゴミや産業廃棄物の焼却によるものである。国内の廃棄物発電量は、1995年で56万kWであり、新エネルギー大綱の2000年目標は200万kW、2010年見直し後は500万kWとなっている。諸外国では、農作物を原料とした液体燃料（エタノール等）への転換が大規模に行われている。しかし、バイオマスから得られる液体燃料コストは、化石燃料と比較して高価である。特にわが国では、立地環境から生産量とコストの両面で困難が大きい。そのため、国家としても東南アジアなどバイオ資源の豊富な国との連携を深めつつ、技術開発を進める方向にある。最近、国内のビール

工場で、排水中の有機物を嫌気発酵させて、得られたメタンガスを燃料電池に導いて発電するシステムが相次いで導入された。これなどは、民間レベルで開発された新しいバイオマスエネルギー利用形態として、今後の需要が注目されるものである。

#### 2.4 その他エネルギー（水力・地熱）

その他の再生可能エネルギーとしては、水力、地熱などがある。水力は世界の総発電量の約2割（総エネルギーの6%）を供給しているが、大規模な水力資源は環境や建設コストなどの制約から先進国ではほぼ限界にあり、小規模な建設にとどまるものと見られている。しかし、発展途上国では約2倍の発電量が期待されている。

地熱エネルギー量は、わが国だけでも2500万kWと推定（NEDO）されており、現在の世界および日本の地熱発電量はそれぞれ720万kWと52万kWとなっている。1994年6月の総合エネルギー調査会供給部会中間報告では、2000年目標60万kW、2010年目標は280万kWと設定された。しかし、発電可能地域が限られていることや発電コストの高さ



第6図 風力発電・水素・燃料電池接続型独立給電システム  
Fig. 6 Wind, hydrogen, fuel cell isolated power system

(補助金による掘削コスト低減を考慮しても15円/kWh程度)などが障害となり、2010年目標の達成はかなり厳しいと言われている。

### 3. 再生可能エネルギーを用いた水素利用エネルギーシステム—各国のプロジェクト—

再生可能エネルギーに共通する一次エネルギーとしての問題の多くは、発生量に時間的変動が大きいことと、地域的な偏在にあることが、前章での概観で理解していただけたと考える。この再生可能エネルギーを効率的に利用するために、究極のクリーンエネルギーである水素をエネルギー変換媒体として輸送や貯蔵に用いる二次エネルギーシステムの開発が各国で精力的に推進されている。次にそのいくつかを紹介する。

#### 3.1 U. S. DOE 水素プロジェクト

アメリカでは、1996年に Hydrogen Experts Future 法が制定され、水素の製造、貯蔵、利用等に関する技術開発を促進することになった。U. S. DOE (Department of Energy) は上記の法律のもとに20年ビジョン<sup>6)</sup>を策定し、民間企業や研究所、大学に多くの研究補助金を提供して、個別に研究開発を進めている。予算は1998年は16百万ドル(22.4億円)、1999年は24百万ドル(33.6億円)である。これら開発プログラムの中には、次の項目が含まれている。

- ①再生可能エネルギーの導入による水素製造
- ②水素による電力貯蔵および発電システムの開発
- ③都市部における自動車用水素燃料供給システムのデモンストレーション
- ④水素製造コストダウン技術の開発
- ⑤安全性、信頼性ある水素エネルギーシステムの普及に向けた法律や標準規格の整備

②のテーマの中には第6図<sup>7)</sup>に示すように、アラスカの村落向けの独立した電力供給システムの開発がある。そこでは、燃料費が高いことや送電設備が完備していないなど、遠隔地特有のエネルギー事情がある。DOE レポート<sup>8)</sup>によれば、現在の技術レベルであっても、風力+水素製造+貯蔵+燃料電池(リン酸型)の組み合わせで、ディーゼル発電設備を新設する場合と比較して、運営経費が50%以下に削減できるという予測計算結果が報告されている。今後の技術開発による水素価格のコストダウンで、このシステムは地球上のより広い地域で適用される可能性がある。現実には、エネルギー供給設備の整備されていないインドなど、発展途上国への設置計画が進められている。

#### 3.2 太陽—水素—バイエルン(SWB)プロジェクト

SWBは、1986年に水素エネルギー利用の研究会社としてドイツで設立された。資本金はバイエルン州が70%、BMW、Linde、Siemensの各社がそれぞれ10%出資している。総予算は145百万DM(約120億円)である。このプロジェクトは先のU. S. DOEの場合と異なり、一箇所に個々の単体機器を集合して、システムとして実証しようとするものである。プロジェクト全体の設備概要を第7図<sup>9)</sup>に示す。主な設備は次の通りである。

- ①太陽光発電(受光面積4000m<sup>2</sup>、Si単結晶、多結晶等合計372kW)
- ②水電解水素製造装置(3基、低圧アルカリ型、低圧固体高分子型、高圧アルカリ型、各22~25Nm<sup>3</sup>/h水素製造、100~111kW)
- ③ガス貯蔵タンク(水素2基計5000m<sup>3</sup>、酸素1基500m<sup>3</sup>)
- ④リン酸型燃料電池(79kW、水蒸気リフォーマおよび水素PSA装置による水素供給形式)
- ⑤熱量調整ガス燃焼ボイラー(天然ガスに水素を5~95%混ぜて燃焼)
- ⑥高分子電解質膜燃料電池搭載フォークリフト(10kW、8時間連続稼動、20Nm<sup>3</sup>水素タンク搭載)
- ⑦自動車用液体水素燃料供給設備(タンク容量3m<sup>3</sup>、120L(ガソリン34L相当)を2.6minで供給)

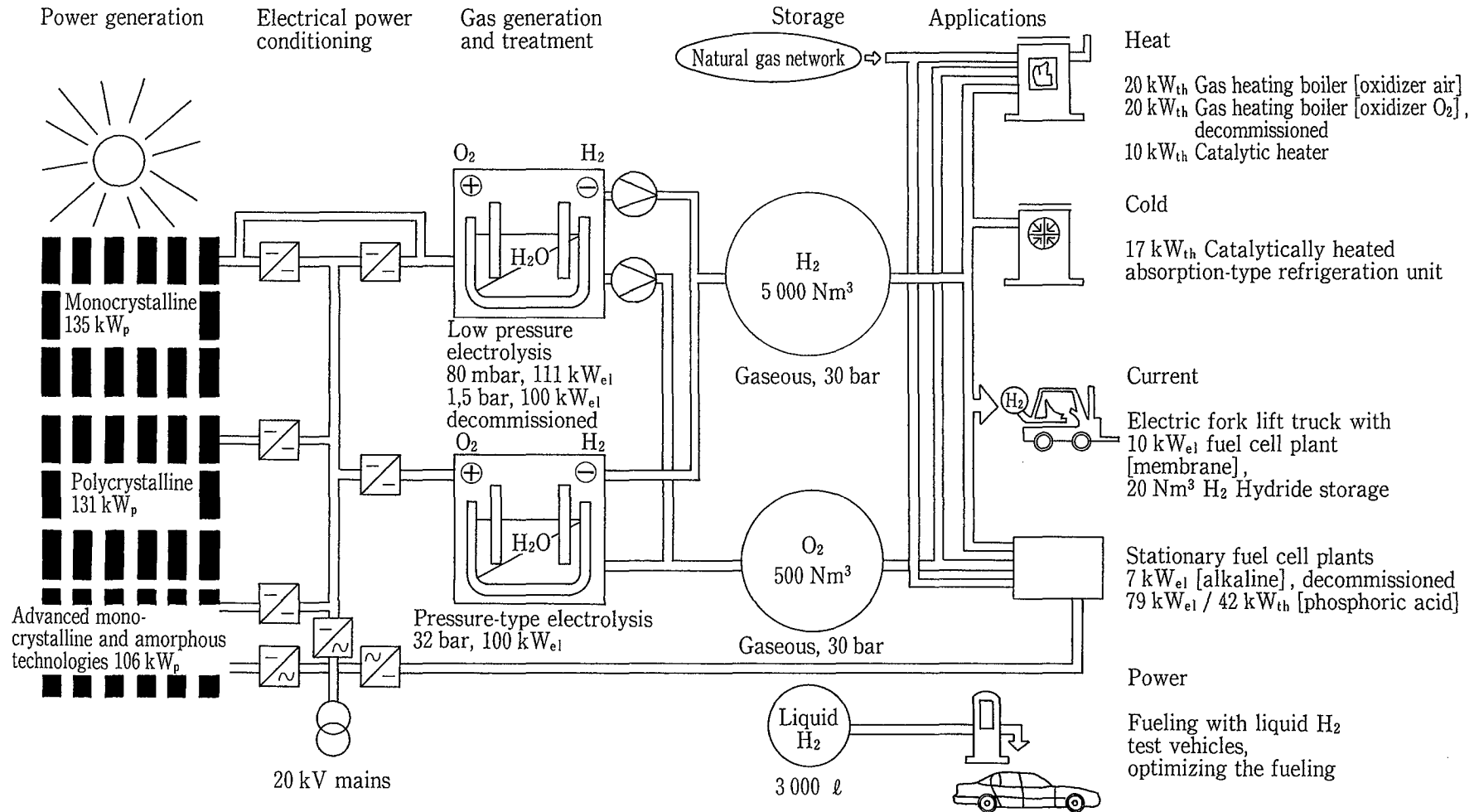
SWBにおける研究の成果として、1999年にはMunich空港内の輸送に、液体水素を燃料とする自動車システムが採用される予定である。

#### 3.3 WE-NET(World Energy Network)プロジェクト

このプロジェクトは、わが国で1993年から2020年までの28年間に1兆5500億円の総研究開発費で実施する大規模なプロジェクトである。再生可能エネルギーに恵まれた地域で、水電解技術によって安価に水素を製造し、需用地へ輸送・貯蔵して燃料ガスや電力として利用することで、世界規模のクリーンエネルギー利用ネットワークを構築することを目的としている。本プロジェクトの詳細は、本誌Vol. 40, No. 1(1996) p35-42に記述しているので参照していただきたい。

#### 3.4 その他のプロジェクト

その他、カナダ・ケベック州とEUの間で進行中の「ユーロケベック水力—水素パイロットプロジェ



第7図 SWBプロジェクトにおける太陽光・水素設備概要  
 Fig. 7 Outline diagram of solar hydrogen facility in SWB project

第 2 表 再生可能エネルギーを用いた発電のコスト比較

Table 2 Comparison on generation cost of electric power using renewable energy

	Cost of electric power
Photovoltaic power generation	70 - 100 yen/kWh
Wind power generation	16 - 25
Waste power generation	9 - 15
Geothermal power generation	14 - 15
Hydro power generation	14 - 15

note : Current cost of fired power generation is 8 - 10 yen/kWh

クト)<sup>10)11)</sup> やドイツとサウジアラビア間で進行中の「HYSOLAR プロジェクト」<sup>10)11)</sup> が規模の大きいプロジェクトとして知られているが、本報では紙面の都合で参考文献の紹介だけにとどめておく。

#### 4. 再生可能エネルギー導入への課題

世界的に莫大な予算を費やして、再生可能エネルギーを用いた一次・二次エネルギーシステムの開発が進められている。ここで改めて、再生可能エネルギー導入への課題を整理し、今後の展望とする。

##### 4.1 経済性

各再生可能エネルギーを用いた発電コストを通産省・総合エネルギー調査会の最新資料<sup>12)</sup>等から第2表に示す。表から明らかなように、火力による発電コスト(8~10円/kWh)と比較して、2倍以上のものが大部分を占める。特に太陽光発電は、発電セルの製造コストが高いため、量産や薄膜化による低廉化が必須となっている。風力発電は、事業用電力の売電価格が当面の課題である。これまで電力会社は、風力発電による電力を事業者から購入する場合、発電技術が発展途上段階にあるものとして、販売単価と同一価格(業務用高圧:16円/kWh前後)で購入してきた。しかし、1998年4月以降に設置された風力発電機からの購入価格は、電力会社によって若干異なるものの11.5円/kWh前後と設定され、今後の導入促進に向けて、さらなるコストダウンの努力が必要となっている。

##### 4.2 性能, 安定性

最近の太陽光発電モジュール(単結晶, 多結晶)や風力発電機の耐用年数は、20年程度と見なされており、単体機器としては商品としての完成域に達している。しかし、エネルギー供給の安定性に優れた独立型の二次エネルギーシステムとして導入を促進するには、さらに信頼性ある水素製造技術の確立が求められている。

これまで、水電解による水素製造にはアルカリ水電解法が多用されてきたが、最近ではコストダウンと安定性向上の可能性が高い固体高分子型水電解法に期待が寄せられている。固体高分子型水電解法では、電気分解セル内の電流密度を1.4 A/cm<sup>2</sup>と、アルカリ水電解法の0.2 A/cm<sup>2</sup>と比較して7倍も大きくすることができる。その結果、電解槽を約1/7のコンパクトな形にできる。その他、得られる水素の純度が高く、アルカリ塩(25% KOH水溶液)による腐食の問題もないなど、普及への要件を有している。当社ではこの固体高分子型水電解装置をHHOG(High-purity Hydrogen Oxygen Generator)<sup>13)14)15)</sup>として製品化し、化学工場、半導体工場、発電所(タービン冷却用)などで実用に供しており、エネルギーとしての水素利用分野にも適用すべく、さらなる技術開発に努めている。

##### 4.3 社会制度, 評価方法の整備

再生可能エネルギーの導入に際して、制度的な整備の遅れが障壁となっているケースがわが国ではよく見られる。例えば、風力発電機は構造物としての機長が高いため、現行法下では航空法や自然公園法、建築確認申請などへの対応が必要となる。また廃棄物発電の導入の場合は、都市ゴミや産業廃棄物の遠距離運送やRDF(廃棄物固形燃料)化に対する、政令・条例への対応が必要となっている。国や地方公共団体による規制緩和が望まれている。

また、再生可能エネルギーを含む新エネルギーの導入においては、その公共性から、従来のエネルギーとの比較で、その効果を適正かつ公平に評価する必要がある。その手法として、LCA(Life Cycle Assessment)がある。再生可能エネルギーを最終的に利用するまでの機器製造・転換・輸送などの過程におけるCO<sub>2</sub>発生量を考慮して評価するのである。それがひいては、パブリックアクセプタンスへ



