

## 潮目を迎えたエネルギー技術

### Trends Changes in Energy Technology

辰巳 国昭

Kuniaki TATSUMI

独立行政法人産業技術総合研究所  
イノベーション推進本部  
首席イノベーションコーディネータ 博士（工学）  
Director  
Technology Marketing Office, Research and Innovation Promotion Headquarters  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
Ph. D.



日本の全エネルギー消費は、2000年頃をピークとして漸減傾向にあるが、大規模集約系の多い製造業での減少幅に較べ、分散系である民生部門や運輸部門での減少幅が少なく、分散系需要の比率が高まっている。一方、CO<sub>2</sub>排出量はエネルギー消費の減少ほど下がっておらず、再生可能エネルギーの比率を高めることが求められる。2012年の再生可能エネルギー全量固定価格買取制度により、太陽光発電の増加率は高まっており、再生可能エネルギーの増大に合わせて必要性の増す電力貯蔵技術やPower-to-Gasなどの蓄エネルギー技術を概観する。

Total energy consumption in Japan has gradually decreased since 2000; compared to the decrease of energy consumption in the manufacturing industry sector, the decrease in the consumer and transport sector is small. On the other hand, total CO<sub>2</sub> emission has not been as small as the energy consumption decline. It is, thus, important to increase the proportion of renewable energy, such as solar photovoltaic (PV) and wind power. In 2012, Feed-in Tariff (FIT) policy for renewable energy was enacted in Japan, and then increase rate of the cumulative capacity of solar PV has been remarkably high. Energy storage technologies for renewable energy will be reviewed.

### 日本におけるエネルギー需要

18世紀の産業革命以後、世界のエネルギー消費は増大し、さらに第2次世界大戦以後の石油利用の拡大にともない、エネルギー消費の増大率はさらに高まった。日本においても、1950年代に始まる高度成長期に、特に、産業部門のうち製造業においてエネルギー消費は急拡大し、1973年の第1次オイルショックまで年率10%以上の伸びを示していた（Figure 1）。

しかし、製造業の分野においては、その後の二度のオイルショックや世界的な分業の進展など日本国内の産業構造転換にともなうエネルギー消費の変化などにより、最終エネルギー消費は第1次オイルショック直前の水準を上限として、それを大きく越えることはなかった。さらに2000年以降は、経済動向の影響、資源・環境の持続性の観点からのエネルギー利用合理化などから、製造業分野の最終エネルギー消費は減少傾向となっており、2011年以後は年間6 EJを切る範囲で推移している。

非製造業分野は、製造業ほどの大きな変動はないものの、1990年代中頃をピークにエネルギー消費は漸減している。この傾向は、民生部門のうちの業務分野、運輸部門においても同様で、ピークが2000年代前半にあるものの、ここ10年は漸減している。

一方、民生家庭部門は2000年頃まで増加を続け、その後、ほぼ横ばいを続けている。この部門は分散系であり、またエネルギー消費の1日の中での時間帯や天候の影響、季節による変動が大きい。

さらに、分散系としては民生家庭部門に加え、上述の運輸部門や民生業務部門が含まれる。集約系である産業・製造部門が1970年頃には最終エネルギー消費全体の6割に達していたが、1990年代以降は、分散系部門のエネルギー消費比率が5割を越えており、エネルギー利用の各種課題の解決を考える上では、分散系にも適用可能な方法の検討も重要となってきている。

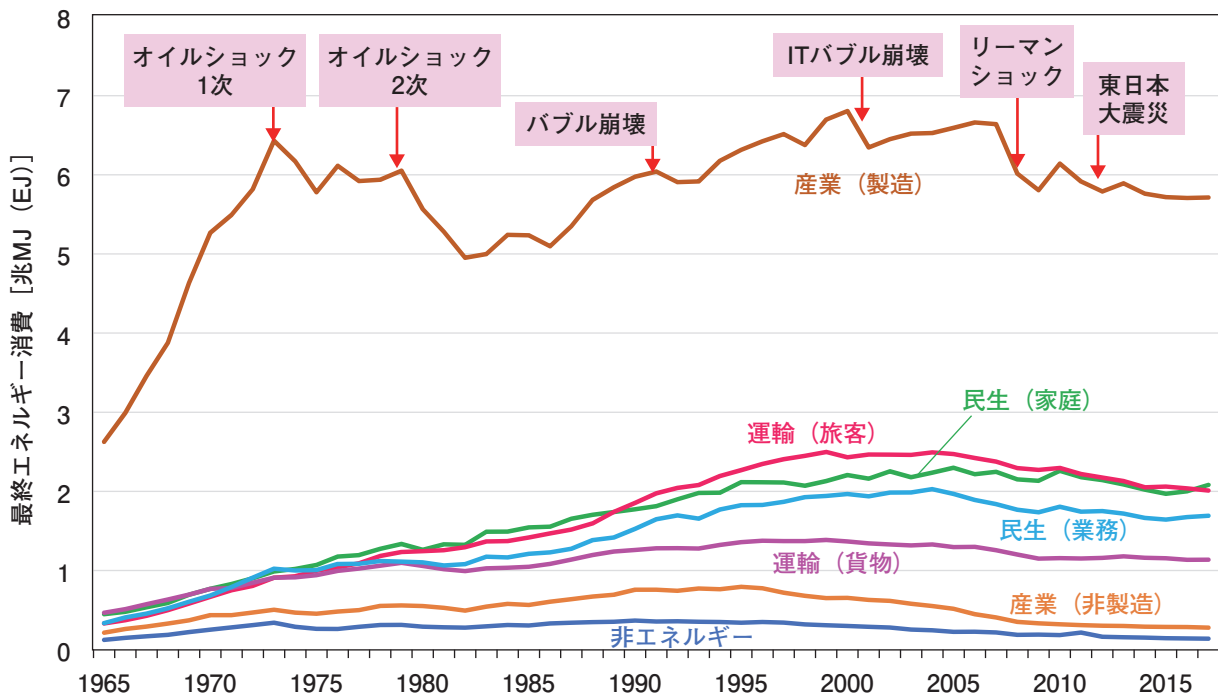


Figure 1 Total energy consumption by sectors in Japan<sup>[1]</sup>

### 日本における部門別CO<sub>2</sub>排出量

前節で概観したとおり、1990年以降、部門によってピークの時期に違い(1990年代中頃から2000年代前半)があるものの、最終エネルギー消費は減少傾向にあった。ところが、CO<sub>2</sub>排出量は最終エネルギー消費ほど低減していないのが現状である (Figure 2)。この間、1997年にCOP3で採択され

た京都議定書において、日本は温室効果ガス排出量を2008～2012年に1990年度比6%減じる目標を掲げていたが、リーマンショックの翌年2009年に1990年とほぼ同量のCO<sub>2</sub>排出量(1990年比+0.09%)にまで近づいたものの、1990年実績を未だに下回ることはないままである。

そもそも、部門別に見てもCO<sub>2</sub>排出量はどの部門において

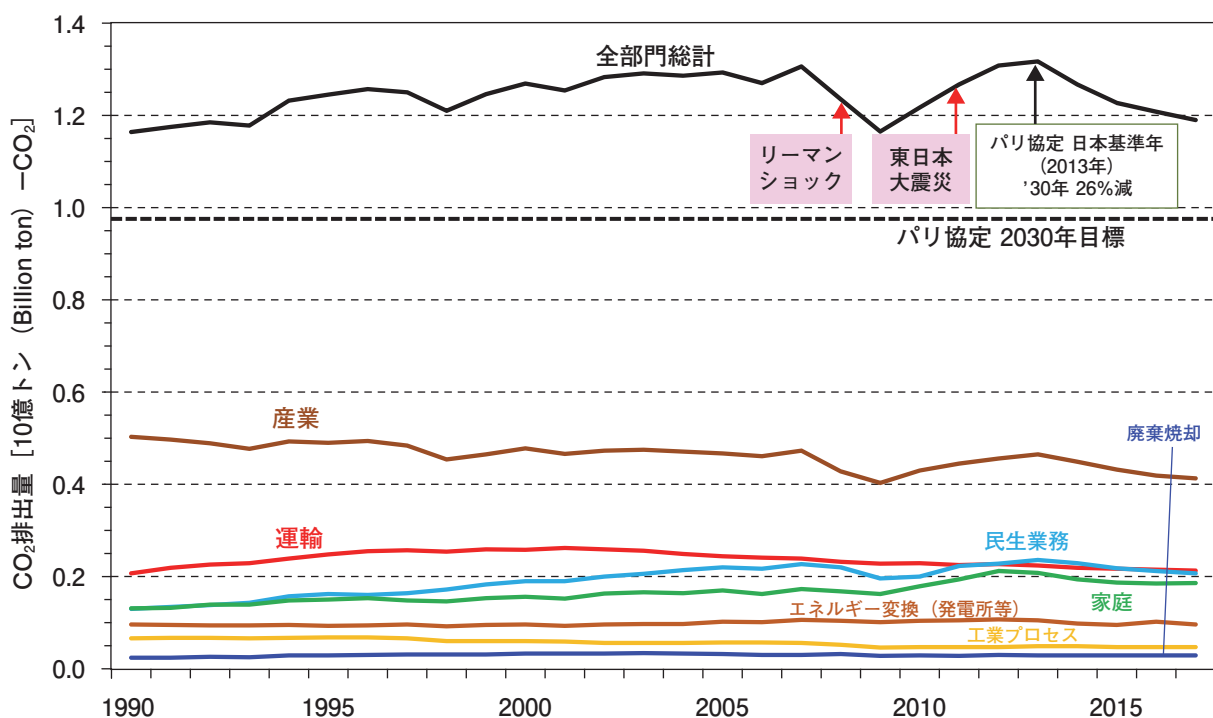


Figure 2 Trend of CO<sub>2</sub> emission in Japan<sup>[2]</sup>

もエネルギー消費の減少ほどには減っていない。産業部門、民生業務部門において、リーマンショックによる経済活動の低減に関連すると考えられるCO<sub>2</sub>排出量の低減が見られるが、経済活動の回復、そして後述する東日本大震災による一次エネルギー供給ポートフォリオの再構築により、CO<sub>2</sub>排出量が一時的とはいえ戻ってしまっている。

それでも、産業部門は1990年比で見ると減少傾向にあるといえる。しかし、民生業務部門と家庭部門は、同期間で見ると増加しており、最近ではそれぞれ産業部門のほぼ半分の排出量を占めるに至っている。しかも、2013年をピークに漸減しているものの低減量は大きくない。

一方、運輸部門では、2000年頃をピークにCO<sub>2</sub>排出量が漸減しているものの、他部門で見られる経済動向や一次エネルギーポートフォリオの変化に関連するCO<sub>2</sub>排出量の変動はほぼ見られない。日本の2017年度のCO<sub>2</sub>排出の17.9%を占める運輸部門のうち86%が乗用車や貨物車など、現状、主に石油を燃料とする車両部門からの排出となっている<sup>[3]</sup>。2018年3月末時点での登録自動車数81,563,101台のうち、低CO<sub>2</sub>排出車となるハイブリッド車で7,539,094台(8.1%)、電気自動車においては93,145台(0.1%)<sup>[5]</sup>と、まだ大きな割合となっておらず、更なる普及が期待される。

なお、2015年にCOP21にて新たに採択されたパリ協定で、日本は2030年までに温室効果ガス排出量を2013年比26%減とする目標を新たに掲げた。この目標に対しては、全部門において2017年比で見ても年間2億トン-CO<sub>2</sub>の排出削

減をする必要がある。この実現には、当然、産業部門だけでなく、民生業務部門、家庭部門そして運輸部門に対しても有効なCO<sub>2</sub>排出削減誘導策を図っていく必要がある。

## 日本における一次エネルギー供給の動向に見える潮目

CO<sub>2</sub>排出量を考える上では、一次エネルギー供給の動向を見る必要がある。Figure 3に1990年以降の日本の一次エネルギー供給の動向を示す。

### 化石燃料

石油、石炭、天然ガスに関しては、最大の一次エネルギー源である石油が1995年頃から減少傾向にある一方、石炭と天然ガスについては増加傾向にある。特に、後述する原子力エネルギーが東日本大震災以後に急激に減少する中で、天然ガス、そして石炭の火力発電の増加で電力供給を主にカバーしてきたため、日本でのCO<sub>2</sub>排出量が一時的に増大することになった。総発熱量当りのCO<sub>2</sub>排出量は分子中の主に水素と炭素の比率に依存し、石炭：石油：天然ガスでおよそ1.26：1：0.74であり<sup>[5]</sup>、石炭も増えていることは石炭利用時のエネルギー変換効率を高めたり、CO<sub>2</sub>回収・貯留(Carbon dioxide Capture & Storage；CCS)などの対策を併せていくことが求められると考えられる。

### 原子力エネルギー

CO<sub>2</sub>排出抑制効果の極めて大きい原子力エネルギーについては、1990年代後半から2000年代にかけて日本の全一次エ

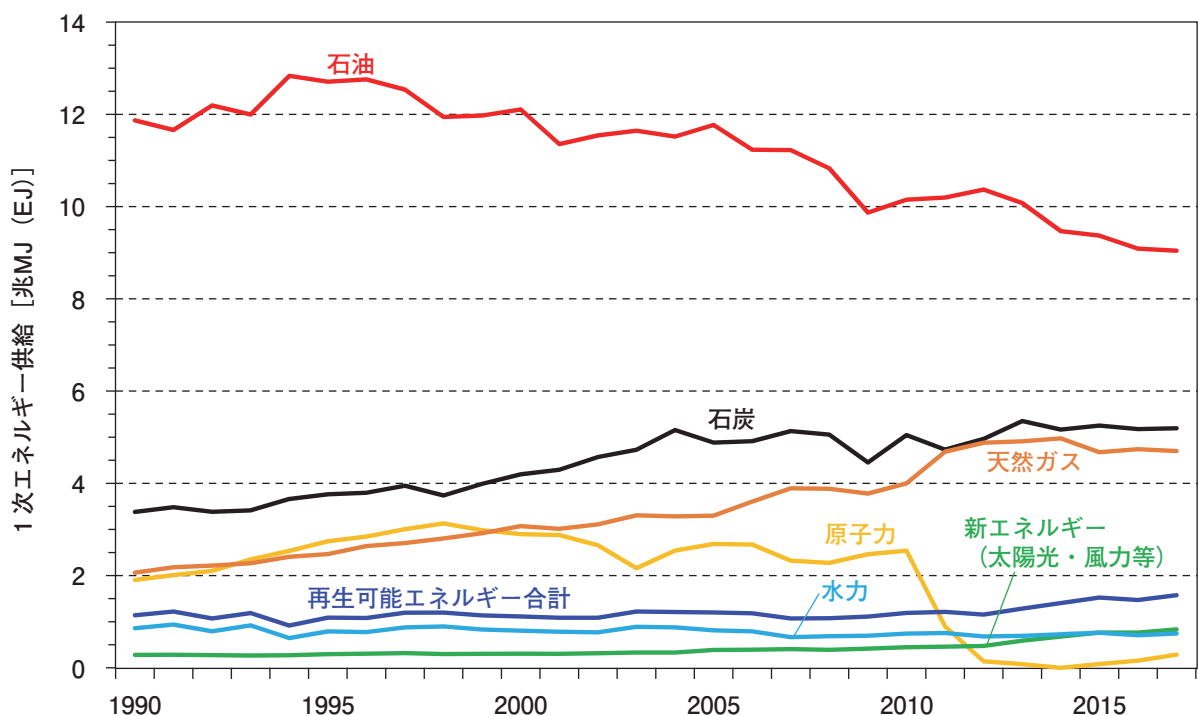


Figure 3 Trend of primary energy supply in Japan<sup>[1]</sup>

エネルギー供給の10~14%を占めるまでに高まっていた。しかし、2011年3月の東日本大震災での福島第一原子力発電所事故およびその後の原子力発電所の安全性確保規制の見直しなどによって、一次エネルギー供給源として一翼を担うレベルに回復するには厳しい状況が続いている。

### 再生可能エネルギー（新エネルギー）

一方、旧来より再生可能エネルギーの代表である水力は年間0.64~0.94 EJで推移し、全一次エネルギー供給の3~5%を占めてきた。さらに2010年以降は再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電などの新エネルギーが水力エネルギーと肩を並べるところまで増大してきている。水力と新エネルギーを合わせた再生可能エネルギー合計としては、2017年には全一次エネルギー供給の7.6%を占めるところまで伸びてきた。

新エネルギーの導入量としては（Figure 4）、廃棄物発電に加え、2000年以降、風力発電と太陽光発電が増えている。太陽光発電による余剰電力買取（2009年）や再生可能エネルギー全量固定価格買取（2012年）が始まって以降、特に、太陽光発電は顕著な伸びを示しており、新エネルギーが水力を越える水準にまで導入が増えた要因となっている。太陽光発電による電力の固定買取価格は年々低減しているが、太陽光発電システム設置に掛かるコストも世界的に低減しており、太陽光発電の導入に対するコスト障壁も下がってきている。

この太陽光システム設置コストの低減は、世界的な導入量、

特に中国での導入量が増えていることにも起因している。2018年には、日本では6.5 GWの新規導入があったが、中国では45.0 GW、インド10.8 GW、米国10.6 GWがあり、積算導入量も既に中国では日本（56 GW）の3倍以上（176.1 GW）となっている<sup>[6]</sup>。

一方、風力発電については、日本では、風況と立地条件に適した地点が必ずしも多くないことから導入は太陽光発電ほど進んでいない。しかし、世界的には風力発電も、太陽光発電とほぼ同等の風力発電設備の導入が進んでいるのが現状であることは指摘しておきたい<sup>[7]</sup>。

### 見えてきた一次エネルギー供給の潮目

このように、日本国内においても、2010年以降、固定価格買取制度の下ではあるが、発電システム導入コストの低減も相まって経済的に成り立つ形で再生可能エネルギーの導入量が確実に増え、全一次エネルギー供給の1割程度を担うところまで来ている。これは2000年初頭に、COP3での京都議定書への対応が議論されていた頃に比べ、再生可能エネルギー導入の環境が大きく改善していることにも拠ると考えられる。さらにCOP21のパリ協定のCO<sub>2</sub>排出量削減目標は京都議定書よりも厳しく、その達成には、再生可能エネルギーの導入量の増加は欠かせないと言える。

### 再生可能エネルギーと蓄エネルギー技術

化石燃料は、火力発電での電気エネルギーへの変換以外に、利用サイト・ポイントで需要に応じて変換される分散系利

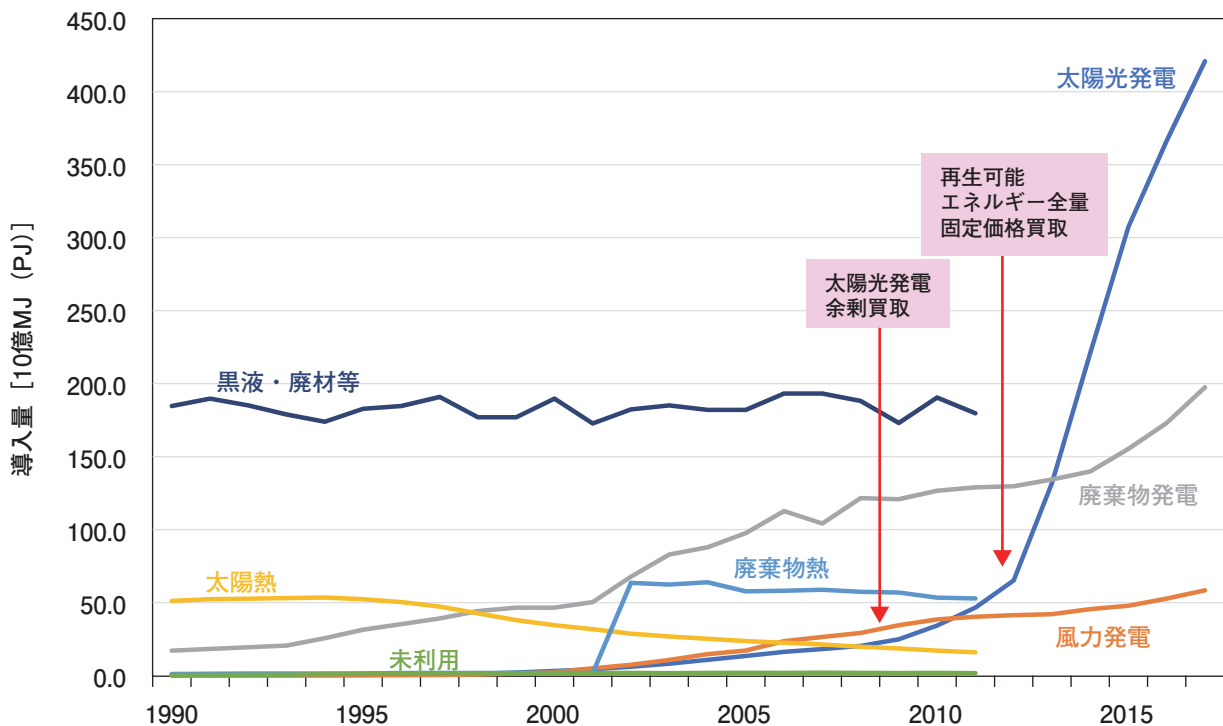


Figure 4 Cumulative installed capacity of each renewable energy (new energy) in Japan<sup>[1]</sup>

用にも有効である。一方、水力発電や太陽光発電、風力発電は言うまでもなく電力として出力されることから、これを需要者に送るために電力系統線に繋ぐ。ところが、電力系統で接続された系の中では、電力の供給と需要が常に等しくなるようバランスさせなければ、交流の周波数が許容範囲を超えて変動したり、場合によっては大規模停電を引き起こしたりする怖れもある。水力発電は水量によって発電量を制御できるが、太陽光発電や風力発電は、需要とは連動しないだけでなく、そもそも発電量が変動する。そのため、この変動にともなう需要との差を電力系統内にある火力発電や水力発電などの出力制御が可能な発電電源で調整する必要がある。

そのため、電力系統内の出力調整能力や接続箇所での設備容量を超えて再生可能エネルギー発電を接続するためには、蓄エネルギー技術と組み合わせる必要がある。

## 蓄エネルギー技術

### 電力貯蔵技術

電力貯蔵技術としては、Table 1にあるとおり、幾つかの技術が実現若しくは検討されており、それぞれ得失を持つ。超電導技術以外は、電気エネルギー以外のエネルギーに変換されて貯蔵され、出力時に再度電気エネルギーに変換されるという往復で2度の変換が必要となるが、揚水発電においても70%の貯蔵効率(貯蔵した電力量のうち取り出せる電力量の比率)を持っており、この70%の貯蔵効率が電力貯蔵技術のベンチマークとなっている。

圧縮空気エネルギー貯蔵(Compressed Air Energy Storage; CAES)は、海外では空気貯留槽として岩塩層を用いる例が知られているが、日本ではタンクを用いたシステム実証がNEDOによって行われている。

また、蓄電池としては、電力貯蔵向けとして、ナトリウム硫黄電池(Na-S電池)やレドックスフロー電池、そしてリチウムイオン電池によるシステムが実証事業を含めて用いられている。特に、リチウムイオン電池は、電気自動車普及すれば、家庭などで電力系統に電気自動車が多数接続された状態で、電気自動車の蓄電池が電力貯蔵に用いられるのではないかとの検討(Vehicle-to-Grid)もされている。

### Power-to-Gas (P2G)

もう一つの電力貯蔵として期待されている技術がPower-to-Gas (P2G)である。電力を燃料となり得る気体化学物質に変換し貯蔵する技術で、気体化学物質としては特に水素が有力候補である。電力で水を電気分解し水素として貯め、水素を燃料電池等で電力に変換するシステムが考えられている。

ただ、水の電気分解は一般に効率が高い(~90%)ものの、燃料電池は効率が高いと言われる固体酸化物形燃料電池でも60%程度であり、電力貯蔵効率としては70%には満たない。それでも、季節を越えるほどの長周期変動に対応する超大容量の電力貯蔵としては蓄電池では対応が難しく、P2Gでタンク容量を増やすシステムが注目されている。

## おわりに

日本のエネルギー消費は、産業部門を中心とする大規模集約型から民生部門や運輸部門の分散型での需要の比率が高まっている。しかも、CO<sub>2</sub>排出削減に向けて再生可能エネルギー導入量を高めること、すなわち電力比率が高まり、これを社会の中で使いこなす範囲を拡げる技術が求められる。

ただ、その実現には技術オリエンテッドの議論だけではなく、太陽光発電の普及で見えたように、投資に対する経済

Table 1 Comparison of power storage technologies<sup>[8, 9]</sup>

		揚水発電	圧縮空気 (CAES)	蓄電池	超伝導 (SMES)	フライホイール
貯蔵特性	規模	中~大	中	小~中	小~中	小
	容量(万kWh)	50~1,000	50~250	~80	~10	~1
	密度(kWh/m <sup>3</sup> )	~1	8	100	10	50
	貯蔵効率(%)	70	70~80	70~80	80~90	~70
運転特性	起動・停止	1~数分	20~30分	瞬時	瞬時	瞬時
	負荷追従性	大	中	大	大	大
	信頼性	有	海外で有	有	確立中	一部で有
	寿命	40年以上	20年以上	5~17年	30年程度	20年程度
安全・立地	環境保全性	環境との調和			磁気対策	振動騒音対策
	安全性		空気漏れ対策必要	漏洩防止	クエンチ対策	回転以上対策
	立地	限定される	限定される	制約なし		制約少ない

合理性の観点でのシステム構築や普及施策も求められる。また、そのような新しいシステムの実現には、これまでにない標準化や評価・計測システムも必要であり、普及を考える上でその対応も重要となる。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省/EDMC「総合エネルギー統計」, EDMC推計
- [2] 全国地球温暖化防止活動推進センター (<https://www.jccca.org/>)
- [3] 温室効果ガスインベントリオフィス 日本の温室効果ガス排出量データ 2019年公開版(確報値: 1990~2017年度)
- [4] 一般財団法人自動車検査登録情報協会
- [5] 経済産業省資源エネルギー庁「総合エネルギー統計: エネルギー源別標準発熱量及び炭素排出係数(2018年8月30日改訂版)」
- [6] IEA Photovoltaic Power Systems Programme統計
- [7] IEA Wind Technology Collaboration Programme 2017 Annual Report
- [8] 電中研レビュー No. 17, 「複合エネルギー時代に向けて」, 表3-3-1(1987).
- [9] 内山 洋司, 「エネルギーの貯蔵・輸送」, p.12, エヌ・ティー・エス(2008)