



## 再生可能エネルギー大量導入時代の電力システム

### ～蓄電技術と分散型エネルギー源の活用～

株式会社H&Sエナジー・コンサルタンツ パートナー

石丸 美奈

#### 目次

はじめに

1. エネルギー貯蔵技術

2. 分散型エネルギー源 (DER)

おわりに

#### はじめに

地球レベルでの温暖化対策、国家レベルでのエネルギー自給自足・安全保障、地域レベルでのエネルギー自立や非常用電源の確保といった様々な観点から、再生可能な資源を活用したエネルギー供給は今後ますます増大する。2015年7月に閣議決定された日本のエネルギーミックス（電源構成）では、2013年度に10.7%であった再生可能エネルギー（RE）の割合を2030年度には22-24%まで高める目標が掲げられており、7.0%を占める太陽光発電による発電量は749億kWh、1.7%の風力発電では182億kWhになると推計されている。合計した931億kWhは2013年度（141億kWh）の6.6倍にもなる<sup>1</sup>。しかし、太陽光や風力のように気象条件に左右される不安定な電源には、需要に合わせて発電量を制御することができないという欠点がある。一方、安定した電力システムを維持するためには電力需給が常に均衡（同時同量）し、周波数の変動が適正範囲内に抑えられている必要がある。このバランスが崩れると、家庭や産業で使用している機器

に影響が及ぶ可能性があり、最悪の場合は大規模停電につながる。

系統安定化のための業務はアンシラリーサービスと呼ばれ、現在のところ、電力会社が水力や火力発電設備を使って行っている<sup>2</sup>。ところが、間欠性のRE由来の電力が大量に供給されると、系統安定化の必要性が増す反面、その調整役を担っている水力や火力による電力供給の割合が相対的に減少してしまう。このような課題を解決し、高効率・低コストかつ環境負荷が少ない形で安定した電力供給を維持してゆく鍵となるのがエネルギー貯蔵技術と家庭やオフィス、工場などに分散して導入が進むエネルギー源（Distributed Energy Resources, DER）の活用である。

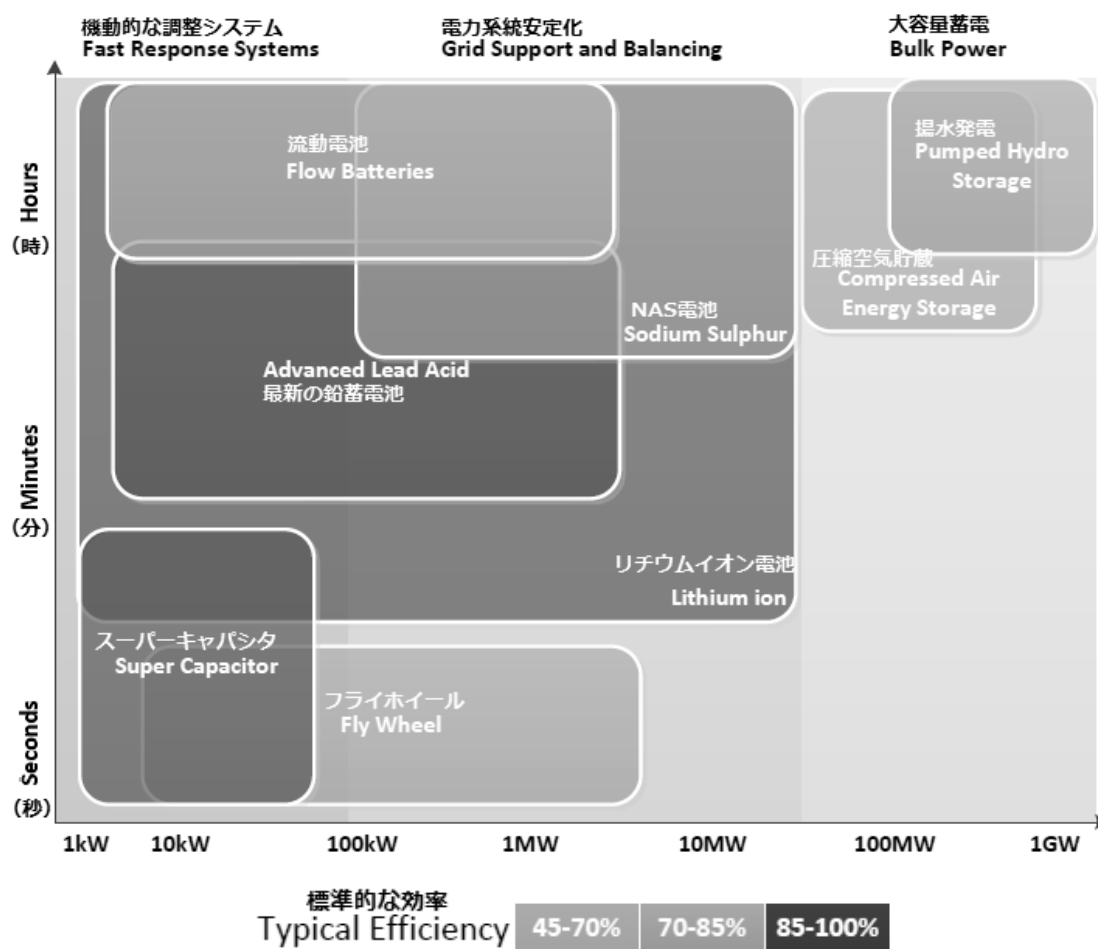
#### 1. エネルギー貯蔵技術

蓄電の技術には様々なものがあるが、系統に接続されて常時利用されているのは、電気エネルギーを物理・機械的なエネルギーに変えて蓄える方法と、電気化学的なエネルギー

1 電源構成の割合と発電量は資源エネルギー庁の資料に基づく。

2 周波数の制御は回転系の発電機でなければならない。

(図表 1) 様々な蓄電技術<sup>3</sup>の比較－出力・放電時間（容量）・効率での対比



(出所) AECOM, “Energy Storage Study”, 13 July 2015の図<sup>4</sup>に筆者加筆

として蓄える方法がほとんどだ。

### (1) 物理・機械的エネルギー貯蔵技術

#### ① 揚水発電

電力貯蔵で最も普及しているのは伝統的な揚水発電で、高度に差のある二つの貯水池の水を、夜間の余剰電力を使い下池から上池に

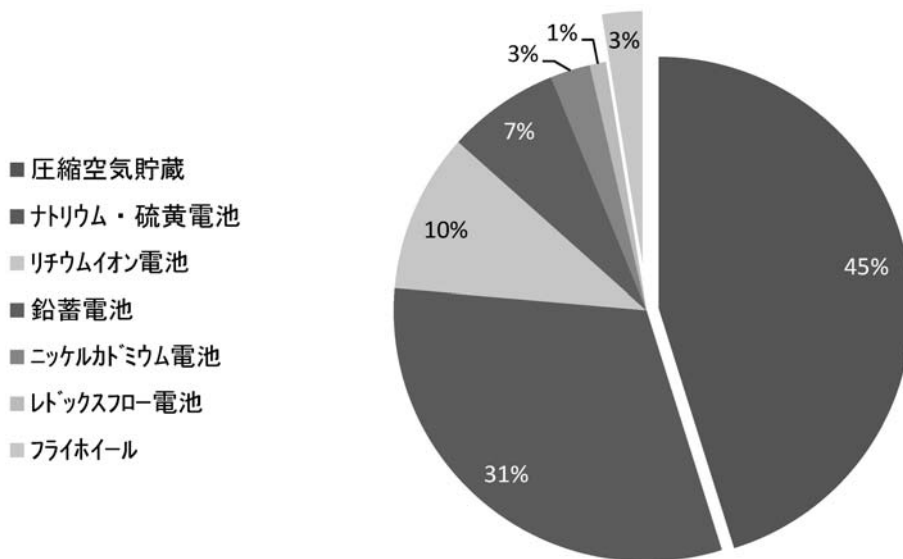
汲み上げ、電力需要のピーク時に水力発電する。大容量（メガワット（MW<sup>5</sup>）級）のエネルギーを長時間貯蔵するのに適しており、設備寿命が長いので発電コストは安価だ。世界の電力系統に連結されている大規模な蓄電設備の合計出力の99%は、揚水の技術を使ったものになっている。

3 本稿では取り上げないが、図表1の「最新の鉛蓄電池」では鉛蓄電池とスーパーキャパシタの組み合わせなどが想定されている。「スーパーキャパシタ」は電気二重層という物理現象を利用して、電気エネルギーをそのまま貯める蓄電器（コンデンサ）。

4 オリジナルの出所はSchlumberger SBC Energy Institute, “Leading the Energy Transition, Electricity Storage,” 2013。

5 1 MWは1,000kW、1 GW（ギガワット）は100万kW。

(図表 2) 世界の電力系統に連結している蓄電設備の技術別出力割合  
(但し、99%を占める揚水発電を除く1%の内訳)



(出所) IEA, “Technology Roadmap – Energy Storage”, 2014の図に基づき筆者作成

### ② 圧縮空気貯蔵

図表 2 は揚水発電を除いた残りの1%に使われている技術の内訳だが、最も活用されているのは圧縮空気貯蔵(45%)で、これも古くからある手法だ。余剰電力を使い空気をコンプレッサで圧縮し、地下の空洞やタンクに貯めておく。電力が必要になった時にはその圧力を利用してタービンを回し発電する。こちらも大容量のエネルギーを長時間貯蔵できる。近年はエネルギーの変換効率や利便性を高めるため、空気圧縮時の方法に工夫を加えた技術の開発<sup>6</sup>が行われている。

### ③ フライホイール

3%を占めるフライホイールは「はずみ車」とも呼ばれる円盤型の機械部品で、連結されたモーターを高速回転させることで電気エネ

ルギーを運動エネルギーに変えて貯蔵する。電気が必要な場合はモーターが発電機となる。瞬時に大きな力を出すことができるので、短い周期での系統安定化に役立つ。基本構造は単純で、機器の劣化や回転による摩擦でのエネルギーロスを抑制できれば極めて長寿命で効率が向上するため、回転機器を真空容器に格納し、超電導磁気軸受を採用するといった試みが行われている<sup>7</sup>。

現在のところ、技術的に確立し実績もある、大容量かつ安価な蓄電方法は揚水発電と圧縮空気貯蔵しかない。しかし、自然環境保護の観点から揚水発電に必要なダムを新規に建設できる適地はなくなってきている。開発が可能な場合でも、計画から稼働までには長い年月がかかり、工事費が莫大なため、100MW(10万kW)以上でなければコストに合わない。圧

6 たとえば米国のベンチャー企業Lightsail社 (<http://www.lightsail.com/>) のプロジェクトや、NEDOの支援により神戸製鋼所、早稲田大学、エネルギー総合工学研究所が進めている「断熱圧縮空気蓄電システム」。

7 山梨県で実施されているNEDOの「次世代フライホイール蓄電システム」プロジェクト。

縮空気貯蔵にも立地や効率面での制約がある。そこで、これらに代わり電力貯蔵で重要な役割を担ってゆくと予想されるのが化学電池だ。

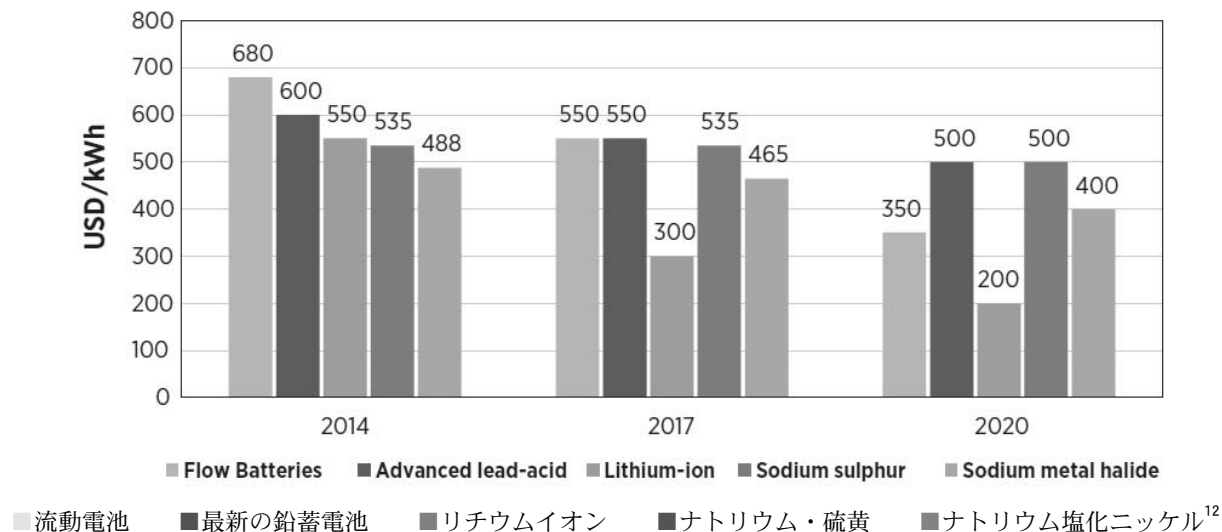
## (2) 電気化学的貯蔵技術

化学エネルギーを電気エネルギーに変換する化学電池のうちで、充電して繰り返し使用できる二次電池<sup>8</sup>は蓄電池と呼ばれる。物理・機械的な手法に比べてコストはかかるが、RE増加に伴い必要となる系統安定化への迅速な対応から大容量の蓄電まで、幅広い用途に対応できる。ここではナトリウム・硫黄電池（NAS電池）、流動電池（フロー電池）、そしてリチウムイオン電池を取り上げる。

### ① ナトリウム・硫黄電池（NAS電池）

蓄電池による貯蔵は図表2の半分以上（52%）を占めているが、そのおよそ6割でナトリウム・硫黄電池（NAS<sup>9</sup>電池）が利用されている。伝統的な蓄電池である鉛蓄電池（ガソリン自動車などに用いられるいわゆるバッテリー）に比べてエネルギー密度<sup>10</sup>が3倍と高いので小型化できるMW級の大容量蓄電池<sup>11</sup>だ。およそ4,500回（約15年）の充放電が可能で長寿命、常温での自己放電がほとんどない、原材料に希少資源を用いないので量産による低コスト化が可能、十分なスペースさえあれば設置場所を選ばない、などメリットは多い。しかし、高温下（300–350℃程度）で動作するため、外部の熱源が不可欠なのが

(図表3) 系統レベルでの蓄電に使用されている蓄電池セル価格の現状と今後  
(最低価格による比較)



(出所) Jaffe, S. and Adamson, K.A., “Advanced Batteries for Utility - Scale Energy Storage”, 2014, Navigant Consulting, Boulder, CO.の図に筆者加筆

8 化学電池は使い切りの一次電池、二次電池（蓄電池）、外部から化学反応を起こす物質を供給されることで発電する燃料電池に大別される。

9 NAS電池は日本ガイシと東京電力の共同開発で2003年に世界で初めて量産化されたナトリウム・硫黄電池。「NAS電池」は日本ガイシの登録商標。

10 単位当たりの電力容量。

11 標準システムは定格出力1,200kW（1.2MW）、定格容量8,640kWhと7時間相当のエネルギー利用が可能。

12 ゼブラ電池。

欠点だ。2010年と2011年に日本で起こった火災事故の後、安全面での懸念から本格的な普及に課題が残り、価格面での競争力向上は今のところあまり期待できない（図表3）。

## ② 流動電池（フロー電池）

流動電池はNAS電池同様にMW級の蓄電池で、日本では住友電気工業がレドックス・フロー電池として製品化している。一般的な蓄電池では固体の電極そのものが酸化還元反応して変化するが、流動電池では電極に化学変化が起きないため劣化がほとんどない。電解液<sup>13</sup>にも劣化がないので、充放電を繰り返しても寿命が短くならず、20年間稼働する。出力の増加は電池本体（セルスタック）を、蓄電容量の増加は電解液を入れたタンクをそれぞれ増設すればよく、用途に応じた構成が可能だ。また、室温で動作するためNAS電池と比べて運用時のエネルギーロスはないが、装置の大きさが短所だ<sup>14</sup>。価格面では2014年の680米ドル/kWh（2014年）から2020年には350米ドル/kWhへと50%近い値下がりが見込まれている（図表3）。

## ③ リチウムイオン電池

今、世界的に最も注目されているのは何と云ってもリチウムイオン電池である。大規模な定置用であるNAS電池や流動電池に対して、従来は民生用のとりわけモバイル機器を支える基本技術で、出力・エネルギー密度が高い、充放電の効率がよい、自己放電が少ない、などメリットは多いが高価格であり、高性能製品の生産には先進的な設備が必要な点が一番のネックになっていた<sup>15</sup>。

しかし、ハイブリッド車や電気自動車（EV）用市場が急拡大し、大量生産による大幅な価格低下（2020年には200米ドル/kWhと2014年比で60%以上の低下（図表3））が見込まれるようになり、より大容量の蓄電市場での可能性が開けてきた。昨年4月30日に米国のEVメーカー、テスラモーターズのCEOイーロン・マスクが一般家庭向けの「パワーウォール（Powerwall）」と法人・電力会社向けの「パワーパック（Powerpack）」を発表し、リチウムイオン蓄電池によるエネルギー貯蔵事業への参入を表明したのがそれを象徴する出来事だ。同社はパナソニックも事業参画する形で、総額50億ドルを投じ、年間55GWh（5,500万kWh）のリチウムイオン電池セルの生産を可能にする大規模な蓄電池工場（通称ギガファクトリー）をネバダ州リノ近郊に建設中だ（2017年稼働予定）。2015年の世界の生産能力は100GWh（1億kWh）相当と推計されており、この工場が計画通り完成すれば、それだけで現在の生産能力の50%を超えることになる<sup>16</sup>。

こうした蓄電池を活用する取り組みは日本各地で進んでいる。例えば、島根県の隠岐諸島では2015年9月から、太陽光発電の長時間の大きな出力変動にはNAS電池（出力4,200kW、容量25,200kWh）が、短時間の小さな変動にはリチウムイオン電池（同2,000kW、同700kWh）が対応する「ハイブリッド蓄電池システムによる技術実証事業」<sup>17</sup>が実施されており、2015年12月には北海道電力の北電南早来変電所（北海道勇払郡安平町）でレドックス・フロー電池（同15,000kW、同60,000kWh）

13 電解液は電解質（イオン）を含んでいる溶液で、電解質は水に溶けると電気を通す物質。

14 2016年度中にコンパクトでコストダウンしたコンテナタイプの発売を予定している。

15 有機溶媒を使用しているために発火の危険があるなどの欠点もある。

16 Sam Jaffe, “2015: A Turning Point for Batteries”, 30 Jan. 2015

17 環境省の補助事業。

の設置が完了し、実証実験<sup>18</sup>が始まっている。

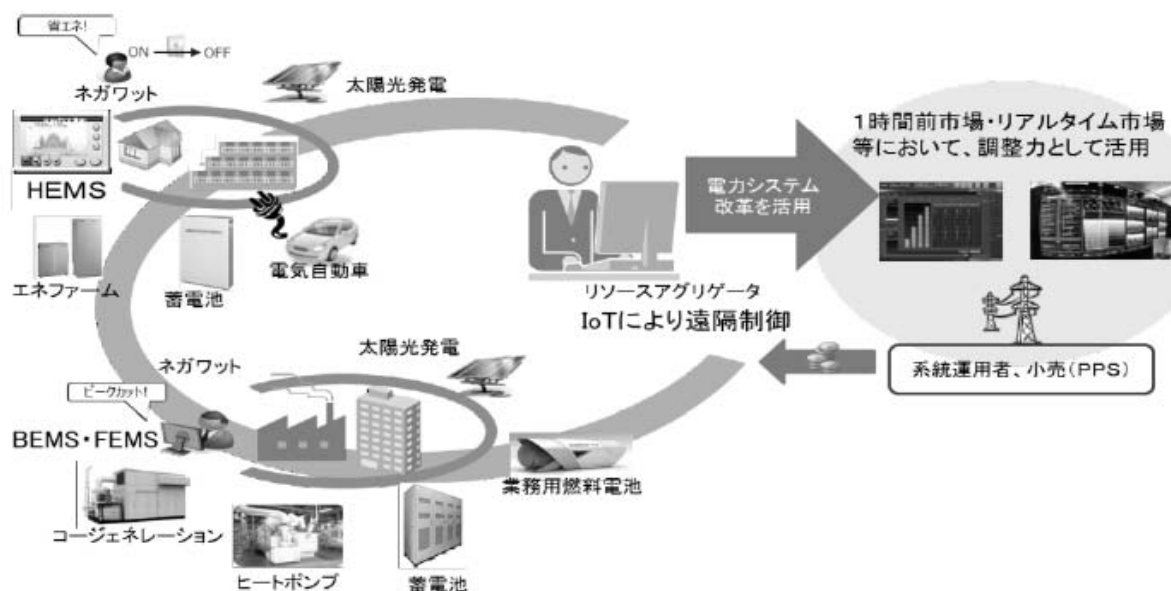
## 2. 分散型エネルギー源 (DER)

技術やハードウェアと並んで、今後、重要性を増してくるのが、家庭やオフィス、工場など需要家側に分散しているエネルギー源の活用である。従来の電力システムでは、供給サイドが発電や蓄電能力の増強などを通じて供給量をコントロールし、需給バランスを一致させてきた。しかし、電力自由化の進む先進諸国では発送電の分離が進み、垂直統合型の電力会社の内部で行われていた系統運用が独立した事業者の責務となっている。そのため、系統運用事業者には既存のDERを有効活用し、系統安定化のコストを最小限に抑えようとするインセンティブが働く。市場メカニズムの利用を通じて、これまで供給側が担っ

てきた需給調整の一端を需要家側に委ね、安定した電力供給を維持するために掛かる社会的コストの最適化を図る取り組み<sup>19</sup>が進んでいる。

電力需給の逼迫に呼応して、需要家サイドが空調や照明機器などの電力消費を抑制することをデマンドレスポンス (DR) といい、削減された電力量をネガワットと呼ぶが、見方を変えればこれは需要家による電力供給に他ならない。現在、需要家側にはこのようなネガワットに加えて自家発電装置や蓄電池 (EVを含む) などのエネルギー源がある。アグリゲーターと呼ばれる事業者がこうしたDERを束ねて (アグリゲートして) 需給を制御できれば、仮想発電所 (Virtual Power Plant、VPP) が生まれ、何らかの対価と引き替えに、DRによるピークカット<sup>20</sup>を含む

(図表 4) 需要家側のエネルギー・リソース・アグリゲーションの概念図



(出所) 経済産業省「第1回エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会」資料3、2016年1月29日の図を筆者が加工

18 経済産業省の補助事業。

19 経済産業省「第1回エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会」資料4、2016年1月29日に米国、ドイツ、カナダの例が紹介されている。

20 夏の冷房や冬の暖房、炊事などによる電力需要のピークを低く抑えるように電力消費を制御すること。

アンシラリーサービスの提供などが可能になる(図表4)。供給側としては、燃料費や環境負荷の高い火力発電の代替や、多額の投資を必要とする新規の発電・蓄電設備導入の抑制ができることになり、結果として系統維持のためのコストが削減される。

経済産業省は2030年における主な需要家サイドのエネルギー・リソースの規模を、創エネ設備(PV(太陽光発電)、エネファーム(家庭用燃料電池)、コジェネ(熱電併給))で出力2,450万kW(大規模火力約24基分)、DR及び蓄エネ設備(HEMS、BEMS、FEMS、EV/PHV<sup>21</sup>)では全体の10%のコントロールが可能とした場合1,320万kW(同13基分)と推定しており(図表5)、そのポテンシャルは大きい。

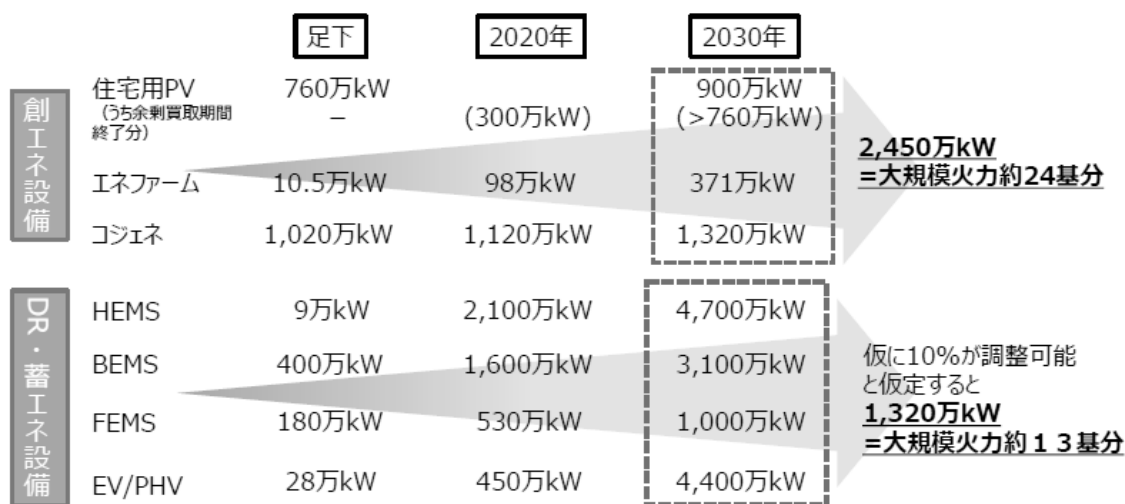
しかし、このようなアグリゲーションが経

済合理性を持つためには、機器を制御する情報通信技術(ICT)の確立のみならず、自由な電力取引市場の存在と電力取引に関するリアルタイムかつ詳細な情報の公開などが不可欠である。日本でも、一連の電力システム改革<sup>22</sup>の最終段階となる発送電分離は2020年4月1日から実施されることが決定しており、制度や環境の整備が急がれる。

### おわりに

蓄電技術やICTの発達で、これまではエネルギーの消費者だった需要者も、意図的に発電事業を手掛けるか否かに関わらず「プロシューマー(生産消費者)」となり、電力の創出や安定供給に貢献できる時代が来ている。需要家サイドの意識改革と電力リテラシー向上がますます必要となろう。

(図表5) 需要家側エネルギー・リソースの規模感



※DRについては、あくまでアグリゲーションビジネスのポテンシャルとして試算したものを。

(出所) 経済産業省「第1回エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会」資料4、2016年1月29日

21 順に住宅向け、商用ビル向け、工場向けエネルギー管理システム、電気自動車/プラグインハイブリッド車(コンセントから差込プラグを用いて直接バッテリーに充電できる電気自動車)。

22 電力システム改革は3段階で進行しており、第1段階は2015年4月の「広域的運営推進機関の設立」、第2段階がこの4月に始まった「小売の全面自由化」、第3段階が2020年4月の「発送電分離」。