

この国に必要なエネルギーとは

東京海洋大学大学院 刑部真弘



1980 年 東京大学大学院工学系研究科修了

同年 日本原子力研究所研究員

米国ロスアラモス国立研究所研究員等を経て

1990 年 東京商船大学助教授

1999 年 東京商船大学教授

2008 年 東京海洋大学教授

工学博士 日本機械学会フェロー 現在に至る。

主な著作に「エネルギーのはなし」、「地域分散エネルギー技術」、「エンジニアの流体力学」、「ターボ動力工学」、「エネルギー技術者の熱流体トレーニング」など。番外編で「サハがマグロを産む日」

はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により多くの発電所が被害にあい、深刻な放射性物質の放出や計画停電等が行われ、改めてエネルギーの安全性や重要性が多くの方々に認識された。一方、この 40 年で日本人の肉摂取量は 4 倍、家庭の電気使用量は 2 倍と豊かになり、東京湾の海水温度は 2~3℃上昇した。しかし、40 年でガスタービンの入り口温度は 900℃も上昇し、これによって我が国の火力発電は世界最高効率となるなど、エネルギー技術（熱工学）が豊かな文明を支えている。

大震災後、今後のエネルギー政策・戦略を急転換すべきだとの意見や要望も多いが、エネルギーをふんだんに用いる文明に組み込まれた我々現代人および社会は、すぐには変わらない。その結果、旧式のモデルにもとづいて政策や戦略が実行されることが多く、社会的な不満となっている。毎週金曜日の夜に官邸前で行われている反原発デモに代表されるように、特に原子力政策に関しては国民的な議論を巻き起こしている。原発事故のしっかりとした総括を行った上で、国としての戦略を作成すべきである。

世界の中の日本という視点でみると、日本のエネルギー自給率は 18%（原子力を除くと 4%）であるが、ドイツを除く主要先進国は 50%以上となっている。日本と同じだと思っていたドイツも、再生可能エネルギー増加等により自給率 40%以上になっているようである。また、ドイツはいざとなれば自国の石炭のみで 300 年間エネルギーを自給可能ともいわれている。また、特にヨーロッパ各国は電力グリッドで相互につながり、電力融通することが可能であり、島国で孤立した我が国とは大いに異なる。

再生可能エネルギーを上手に使う画期的なエネルギーシ

ステムが構築できれば、少なくとも自給率を上げることができる。本稿では、東日本大震災による停電およびエネルギーの現状について概説しながら、新たなエネルギーシステムであるスマート構想⁽¹⁾を紹介したい。

東日本大震災による停電

図 1 に示したのは、東北電力全体、岩手県および今回集中的に現地調査を行った久慈市エリアの停電復旧率である。90%が回復するのに 1 週間程度を要したことがわかる。一方で、ガス供給は、3 月 23 日に新潟と仙台間のガスパイプラインで緊急供給されたが、平均的には 1 月程度供給されなかった。電力供給は比較的迅速な復旧が可能であることが示されたが、更なる迅速性の追求が重要であることは言うまでもない。

久慈市エリアの被災地は数日以上の長期停電となり、人命・財産の保全が著しく侵された。津波や地震による直接被害のほかに、停電による二次的被害により通信、暖房、交通、医療、調理、トイレなどの機能が喪失し、住民の不安を増長すると共に、早期復旧に遅れが生じた。

このエリアの重要な産業である漁業を支える冷凍倉庫では、温度維持が不能になり在庫品の被害が生じた。また養鶏場においても、生育不調による殺処分を余儀なくされた。

電力会社等の事業者からの停電に対してある程度自家発電機によるバックアップが準備されていたが、長期間にわたり十分な電力供給ができる仕様となっていないために、例えば病院等でも CT スキャナ等の機器が使用できなかった。我々の生活に電気やガス等のエネルギーはなくてはならないものであることが多くの方々に認識された。

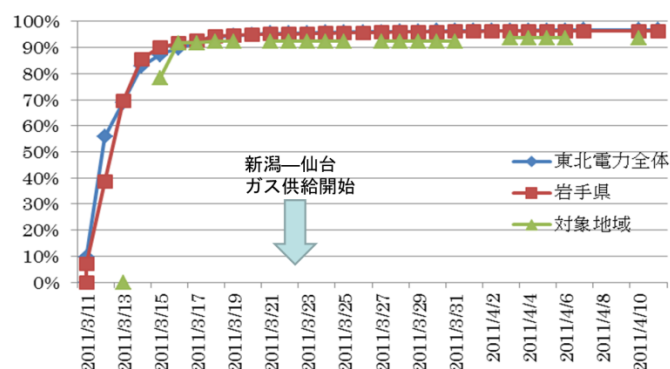


図 1 停電復旧率

発電にともなう二酸化炭素放出量

我々の生活を支える各種燃料を用いた発電方法があるが、1kWhの電力を得るのに、どれだけの二酸化炭素(CO₂)を排出するかを調べたものが図2のライフサイクルCO₂排出量⁽¹⁾である。発電装置の建設、運転および廃棄等によって排出されたすべてのCO₂排出量が含まれる。石炭、石油、天然ガスと燃料中の水素分が増加するとともに、CO₂排出量は低くなる。また、当然ではあるが、化石燃料を用いた発電に比べて、太陽光、風力、原子力および水力発電のCO₂排出量は少ない。

2009年度の我が国のエネルギー白書によれば、総発電量が約9500億kWh、そのうち火力が62%、原子力が29%、水力が8%、太陽光、風力や地熱等の再生可能エネルギーが1%という構成であった。震災後は、大飯原発2基を除いたすべての原発52基が停止しているが、その代わりに火力の稼働率が上昇し安定した電力供給が行われている。この中で注目すべきは、再生可能エネルギーの中の地熱発電である。現状(2010年)における地熱発電容量は、大型原発0.5基分である50万kW程度であったが、環境省等の試算によると、23.5基が開発可能とのことである。また、日本各地の温泉で廃棄している低温熱を発電に利用することになれば、その量は莫大なものとなる。不安定な太陽光や風力のバックアップとして、従来のように大型火力発電所を用いると稼働率および発電効率がどうしても低くなり減価償却が難しくなる。排熱利用ができる小さな火力や安定した出力の再生可能エネルギーである小水力・地熱やバイオマス発電が必要である。小さくても数あれば大量になる。省エネに関しても、白熱電球からLEDへ交換することによって、我が国全体で922億kWhの削減が可能だと試算されており、これは総発電量の10%にも相当する。

可採埋蔵量

国際石油メジャーBPが公表しているエネルギー地下資源の可採埋蔵量が、図3(2008年度版)である。地下資源の可採年数は、石油が42年、石炭が133年、天然ガスが60年、ウランが100年とされている。毎年、講義で「石油はあと何年もつだろうか?」と学生に質問しているが、20年以上にわたって答えは約40年である。技術力の向上や産出物の価格上昇に伴って技術的・経済的に採掘が可能になる地下資源が増加することで、可採埋蔵量は増加してきた。ただし、2009年くらいから石油の生産量自体が減少する兆しを見せ始めており、石油は本当に40年くらいしかもたないかもしれない。また、エネルギーに関する議論をしていると、原発があれば将来も大丈夫だという人が結構いるが、核燃料を再処理しないで使うと100年くらいしかもたない。

地下資源の可採埋蔵量としては、石炭が一番多く、今後、技術的・経済的に採掘が可能になる量も増えると考えられる。また、石油の埋蔵量が中東(約6割)、天然ガスがロシアや中東(両地域で約7割)に偏在しているのとは比べると、石炭の埋蔵量は世界全体にバランスよく存在している。石炭は、単位発熱量当たりの二酸化炭素排出量が最も高い化

石燃料ではあるが、豊富な埋蔵量や地域偏在がない等の利点も多く、これをどのように使っていくかは、人類の重大な選択肢の一つである。

我が国は、温室効果ガスを2012年までに6%削減することを義務付けられ、自主目標として2020年までに25%削減を掲げたこともある。このため二酸化炭素排出量を削減するために、石炭火力発電所を超臨界圧で運転したり、石炭ガス化コンバインド発電による高効率化を行ったりするようになってきた。また、石炭にバイオマスである木質ペレットを混焼させることや、CCS(carbon capture & storage, 二酸化炭素分離貯留)まで検討されている。さらに、世界的視野に立てば、石炭火力の排出量削減のために、日本の高効率技術を開発途上国に輸出することも重要である。

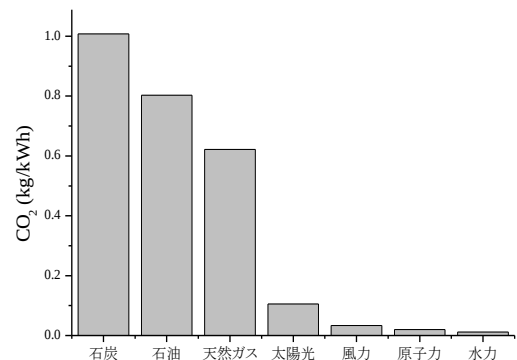


図2 ライフサイクルCO₂排出量(2007年)

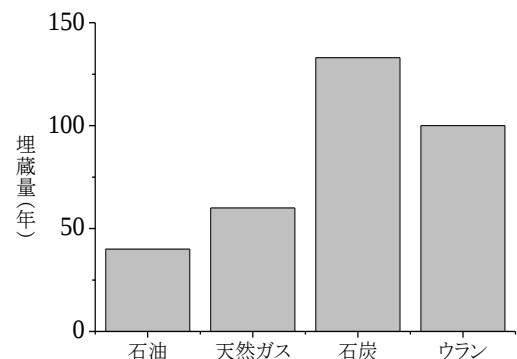


図3 エネルギー地下資源の可採埋蔵量(BP2008年度版)

図3に示したのは、従来の採掘方法による可採埋蔵量であった。最近、今まで採算が合わなかった頁岩(シェール)層の天然ガスが、新技術により採取されるようになってきた。このため、米国のガス価格は日本の1/9にまでなっている。日本のガスは、液化して輸入されるため高コストとならざるを得ないが、この価格差が産業競争力に与える影響は無視できない。さらに、海底等には天然ガスと水の水和物であるメタンハイドレートが存在し、試験的な採取が行われるようになってきた。海洋国日本の排他的経済水域の広さは世界第6位であり、この海底に眠っている天然ガス量は、現在の日本が使っている量の100年分あるとの見解もある。シェールガスやメタンハイドレートを合わせると、可採埋蔵量は数百年増えると予想される。この与えられた数100年の間に、地球が太陽エネルギーを利用してた

め込んでくれていた化石燃料に替わる次のエネルギーを確立しなければならない。

核燃サイクル

再処理しないで使うと、核燃料は100年くらいしかもたない。中国においては原発100基を建設する計画もあり、その他の発展途上国が使い始めたら50年くらいになる可能性も否定できない。海にあるものを含めると4倍ぐらい大丈夫という意見もあるが、核燃サイクルが確立されれば莫大な量になる。

現状では、米国をはじめとして使用済み核燃料は「廃棄物」としてそのまま捨ててしまう方式が一般的である。我が国、フランスおよびイギリスだけは、使用済み核燃料を再処理してプルトニウムとウランを取り出し、それぞれ原子炉で再利用する再処理方式を目指している。後者の方式では、ウラン資源の有効利用になるのは自明であるが、廃棄物の量が格段に少なくなる利点もある。かつて、半減期100万年もの核廃棄物を高速中性子で燃やしてしまうことを検討したことがあったが、材料や制御技術の進展を待つしかないという結論になった。核廃棄物の最終処分をどのようにするかは、非常に悩ましいところであるが、量的に少なくなれば処分は比較的容易になると考えられる。我が国は、再処理を進める政策により、青森県下北半島の六ヶ所村に約2兆円もの巨費を投じて商業用再処理工場を建設してきた。建設工事は数年前に事実上完了したようであるが、最終的な試運転段階で発生したトラブルにより、操業開始は凍結されている。この再処理工場は、非核兵器国で唯一のものであり、世界から特別に認められたものである。

再処理方式では、抽出されたプルトニウムは、高速増殖炉（FBR）の燃料として使用される。そのために福井県敦賀市に原型炉「もんじゅ」が建設されたが、約20年前のナトリウム漏れ事故で止まったままの状態である。なお、FBRが実用化されるまでの繋ぎとして、プルトニウムをウランと混合したMOX燃料の形で普通の原子炉で燃やすプルサーマルは、数年前からいくつかの原発で使われ始めている。かつて、このプルサーマルを提案したときは、電力業界を中心として相当な反対意見がだされたが、FBRの開発停滞によりやむなく行われるようになってきた経緯がある。なお、最近、プルサーマル専用の大間原発の建設工事が再開されているが、残念なことに核燃サイクルに関する将来ビジョンは示されていない。

スマート構想

エネルギー関係の講演会を行うと、原発を廃棄し再生可能エネルギーの導入をもっと真剣にやって欲しいと、一般の方々から要請される。晴耕雨読という言葉があるが、晴れたらエネルギーをいっぱい使って仕事をし、雨なら本でも読もうという生活には憧れる。しかし、我々の生活は、すでに風任せ、おてんとうさま任せではなくなっている。風力や太陽光発電の大量導入を図るのであれば、あの不安定な出力をどうするか考えなければならない。

風力発電を積極的に導入しているスペインでは、全電力に占める風力発電の割合が、2012年4月16日早朝に60%を記録した。ところが、2011年5月21日には1.3%であった。この変動分は、フランスの原発を含めたヨーロッパ全体の電力グリッドで吸収している。再生可能エネルギーを積極的に導入し、電力買い取り制度等に関しては日本のお手本となっているドイツでも、変動出力である風力や太陽光発電を補てんするために、2013年までに100万kW級の火力発電を10基、2023年までには20基建設する計画がある。なお、日本がお手本にした太陽光全量買い取り制度はすでに破綻し、2012年度から買い取り価格を順次下げ、最終的には発電容量5200万kWで買い取りをやめるようである。5200万kWというと、大型原発52基分であるが、夜の出力は0になることを忘れてはいけない。

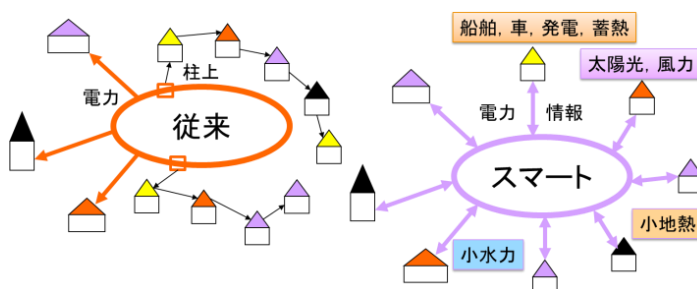


図4 従来との比較

スマートグリッドは、これまでのように電力をユーザー側に一方的に供給するシステムではなく、情報通信技術（ICT）によりユーザー側と電力・情報のやりとりをする。我々が提案している「船舶を利用した防災スマートグリッド」⁽¹⁾⁽²⁾は、三つの重要な機能を有している。一つは、地域生産された再生可能エネルギーを、容易に地域で利用できる環境を整える。再生可能エネルギーは最も期待されるエネルギーであるが、出力変動が大きく使用するのに工夫がいる。二つ目は、市民力を生かせる道具を提供する。従来よりも進化したユーザー側の需要制御が省エネを更に促進する。これまでのように個人や一つの家庭だけでなく、400軒程度の顔の分かる規模のコミュニティ全体の電力調整行動に注目している。三つ目は、緊急時や災害時に電力システムから独立して、船を含む分散電源から電力供給を行う。

従来の電力グリッドは、図4（左）のようにユーザーに一方的に電力を供給するだけであった。この場合、電力会社は、各ユーザーが使う電力の総量に、いつでも同量になるように供給しなければならない。これを「同時同容量」と呼んでおり、これが達成されないと周波数が変動し、最悪の場合は停電となる。特に、晴れたら発電するが、曇ったら発電出力が激減する太陽光発電のような再生可能エネルギーを大量に導入すると、「同時同容量」が確保されるか心配になる。

これに対し、スマートグリッドは、図4（右）に示したようにICT技術で双方向に繋がり、各ユーザーと情報や電力のやりとりをし、ユーザーの電力消費を「見える化」し

たり抑制・促進したりする。従来の電力システムが「同時同容量」で一方的に電力を供給する技術システムであったのに対し、スマートグリッドは電力や情報をやりとりし、柔軟な電力供給や消費を行う社会システムだと言える。かつての下町で、夕食時に醤油や塩が足りなくなったときは隣家から借りるのが普通だったが、このように地域社会で電力を融通し合うのである。

昼と夜間の電力需要は数倍もの差があり、また経済の変動によっても電力需要は大きく変化し、大規模集中電源をフルパワーで継続して運転することは非現実的な状況になっている。さらに、変動性の高い風力や太陽光発電等の再生可能エネルギーを積極的に導入すると、さらに需給バランスをとることが困難になる。これに対する対応策として、事業所や家庭での分散発電、電気自動車等の蓄電および下水熱や海水熱を利用した高効率ヒートポンプによる蓄熱等を広域制御することにより柔軟な対応を行うことが考えられる。この場合、多少効率の低い小型分散電源を採用しても、それらを発電群としてきめ細かに運用可能なことや、発電に伴って排出される熱を風呂等に利用できるメリットがある。企業にとってこれらの施設を保有することは、災害等による外部電源喪失時の事業継続プログラム（BCP, business continuity plan）においても重要である。

電力見える化

ユーザーの電力使用を「見える化」するための最も大事な道具がスマートメータである。2005年に東京海洋大学で最初に導入したスマートメータは、電力線を挟むセンサとデータ収集部をケーブルで結んでいた。このため、既存電気施設等において、このケーブルの引き回しが困難な場合には設置ができなかった。これに対し、図5のように無線LANを用いてセンサとデータ収集部をワイヤレスにすることに成功した。さらに、収集した電力データを別のサーバに転送し、Linuxで専用に開発したソフトウェアで処理をして、ネット上に公開するソフトウェアを開発した。

2011年夏は、電気事業法第27条に基づく電力使用制限により500kW以上の大口需要家に対して前年比15%の削減が求められた。このため、東京海洋大学越中島キャンパスを対象に、教職員、学生が電力状況を把握する事により節電行動を行うか検討した。大学というコミュニティにおいて節電行動を促すことのできる「見える化」を実現するため、Web上での表示はシンプルな棒グラフとした。また、節電目標の最大値である694kW以上をイエローゾーン、キャンパスの契約電力量をレッドゾーンで示し、危機感を喚起することにした。教職員、学生に公開した電力需要の画面を図6に示す。イエローやレッドゾーンに突入すると棒グラフも緑から黄色または赤に変わり注意を喚起する。また、10分ごとの電力の消費状況を表示した。これが、例えば1分おきではグラフがスパイク状となってしまう傾向が分かりにくい表示となる。

結果として、大学の構成員が、PC等で現在の全体電力使用量をリアルタイムに知ることにより、大きな投資なし

に15%の節電をクリアした。成功した一番大きな要因は、自分の節電行動に対する貢献がリアルタイムにわかることである。また、複数の構成員がキャンパス全体の電力を把握し、協力して具体的な節電行動を行うことにより連帯感が生じたことも重要である。これらのことから、大規模で高価なシステムの導入なしに善良な構成員の行動のみで節電が出来ることがわかった。これまでのスマートメータなしの節電では、事務室や会議室等の空調を強制的に止めていたが、「見える化」によって必要な場所では温度調整を行いながら空調等が使用可能となり、節電をする状況下にあっても省エネと快適な環境を両立出来た。



図5 無線スマートメータ

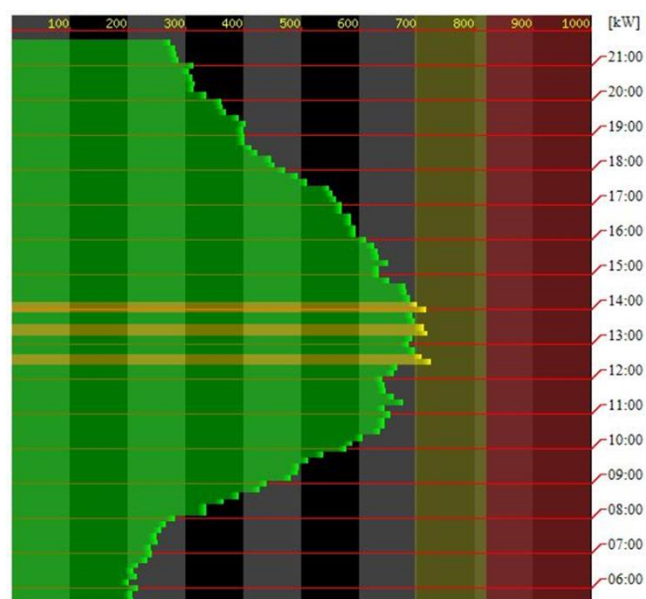


図6 公開した電力情報（海洋大）

2011年夏、横浜八景島では夏休みの来場者ピークに備え、一部空調等を強制的に止める節電と共に、大型非常用発電機を導入して電力ピークカットをおこなった。2012年夏における省エネ実験は、図7に示した八景島内の商業施設および管理棟、水族館の全体電力使用量をリアルタイムで示すことにより構成員に節電行動を促すだけとした。これらに含まれる50店舗のレストラン等は、経営者が異なる営利目的施設であり、これらが省エネ行動をどのように展開するかが問題である。

公開した電力需要の画面を図8に示す。システムおよび画面構成は、海洋大学で実施した際とほぼ同様であるがLinuxで開発したソフトウェアの改善を図り、2分間隔で

電力の状況を分かるように設定した。そのため、より迅速な節電行動が期待できる。これらの取組により、最大電力量の約 10% の削減を達成することが出来た。この結果、電気料金に含まれる基本料金を大きく下げることが可能となり、年間約 400 万円のコスト削減ができた。商業施設で省エネ行動を実施する場合、来場者の快適性や安全性確保との両立が必要となるが、この両立を「見える化」で実現することができた。

我々の社会は、いろんな業種や多様な人で構成されている。人工呼吸器等の電気が必要な人もいるし、一律には節電できない業種もある。スマートグリッドであれば、適切なある地域内を「見える化」し節電を行なう方法を提供できる。良識ある方々が、「うちは我慢するから、困っている人たちに電気をあげて！」と行動すると期待をしている。まさに、人のための我慢は喜びであるという下町文化の復活である。

非常時の船舶電源活用

停泊時船舶のコスト削減策として、陸上からの電力供給（陸電）に注目している。図 9 は石炭運搬船の電力供給線および装置である。これは、停泊時にエンジン発電を行わないことになり排ガスを放出せず、岸壁周辺の環境上も望

ましいことになる。陸電を行えば、横浜港全体で年間 20 万トンの CO₂ 削減が可能である。

このシステムを採用すれば、震災時等における電源喪失時には、逆に陸上に電力供給を行う発電所となることも可能である。特に病院、公共施設や原子力発電所の非常用発電装置は、震災時等に最後の砦となる重要機器であるが、これが不動作の場合に船の電力が役に立つ。

図 10 は、3.11 の震災時において、津波が来る直前に福島第一原発港内を退避するタンカーを捕えた写真である。沖合に出て津波を避けた、このタンカーの電力が使われていたら、原発の重大事故は防げた可能性がある。震災時に津波を避けた船が、続々と港に帰り陸上に電力を供給することを検討する必要がある。3.11 の震災においても、クルーが乗船している船の被災はなかった。

図 11 は、船舶の発電機出力である 3 相 3 線出力を、一般の家庭等で使われる単相 3 線に変換する可搬型スコットトランス「せんぱつクン」である。一般的な船舶電源は 60Hz であるが、50Hz 地域においても周波数変換なしで供給する。50Hz 地域の家庭や病院等においても、ほとんどの機器は対応していることを確認している。ただし、現状では 20kW（単相 3 線）供給を行う「せんぱつクン」で、重量が 200 kg 程度もあり、今後の軽量化検討が必要である。



図 7 横浜八景島

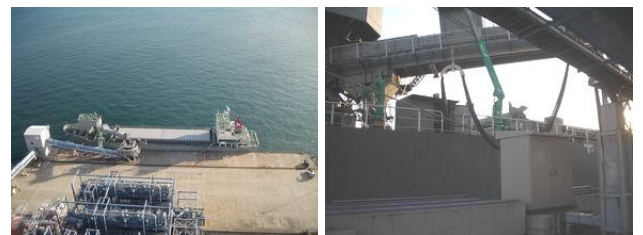


図 9 陸上からの電力供給
(左：接岸中の船、右：電力供給装置)



図 8 公開した電力情報（八景島）



図 10 福島第一原発を退避する船



図 11 可搬型電力変換器



図 12 新豊洲病院

図 12 に示したように運河に囲まれた、2014 年開院予定の昭和大学新豊洲病院では、非常時における船舶からの電力供給を目的として固定型の変換機を設置した。他の病院からも設置要望等があり、非常時の船舶派遣に関する協定等の整備が必要である。

提案

スマートメータによる「見える化」システムを用いて、以下の 3 つの特徴を持った防災スマートグリッドを提案しておきたい。

- (1) 出力変動の激しい太陽光や風力等の再生可能エネルギーの受容を容易にする。これには事業所や家庭での分散発電（風呂発電）、電気自動車等の蓄電および下水熱や海水熱を利用した高効率ヒートポンプによる蓄熱等を広域制御する。
- (2) 「見える化」により、個人個人の省エネ行動から、地域全体としての省エネへ進化させる。住民による自発的な電力調整により、再生可能エネルギーの導入がさらに容易になる。エネルギーを、かつての下町にあった醤油や塩の貸し借りのように融通しあい、緩やかな連帯感のあるコミュニティを創り出す。
- (3) 災害時等に再生可能エネルギー、船舶電源や蓄電池等

を利用して速やかに電力を供給する。非常用発電機不動作は想定内と考えるべきである。

さらに、電力使用計測による一人暮らしの高齢者の安否確認、公共バスを予約するシステム、地域回覧板等を、防災スマートグリッドに付加することも可能である。

防災スマートグリッド設置を進めるためには、以下のような具体的な施策が有効であると考えられる。

- (1) 太陽光や風力発電を売電する家庭には、エコキュートやエネファームの設置を義務付け、それらを広域制御する。再生可能エネルギーが豊富な時にはエコキュート、乏しい時にはエネファームを作動させる。そうすれば、ドイツのような買取制度破綻は避けられる可能性がある。
- (2) コミュニティ内の善良な市民による電力消費の制御はスマートな社会を実現するための第一歩となる。「見える化」したコミュニティは、バーチャル共同受電であり、電力削減可能であるので計画停電対象外とする。さらに、ピークカット等により電力会社にとってメリットも生じることから、導入コミュニティに安い電気料金を提供する。
- (3) マンション等の非常用発電機ラインに、船舶電源を直接投入することを検討する。緊急時に船舶電源を活用するためには、遊漁船組合やタグボート会社等との協定を行う。また、船舶停泊場所への送電線を準備し、電力容量等を明示することも必要である。さらに、船舶以外の電気自動車等の電源についても非常時活用を検討しておく。

引用文献

- (1) 刑部真弘、エネルギーのはなしー熱力学からスマートグリッドまでー、朝倉書店、(2011)
- (2) SMART 研究会編、刑部真弘他 17 名、地域分散エネルギー技術、海文堂、(2004)