

## 変わり行く発電事業と計測技術への期待

Expectation for measurement technology from changing power generation industry



伊藤 茂男

Shigeo ITO

財団法人 電力中央研究所  
エネルギー技術研究所長  
Director, Energy Engineering  
Research Laboratory  
Associate Vice President

発電事業を取り巻く環境は変化の途上にあり、電力自由化、発送電分離、再生可能エネルギーの大量導入、地球温暖化防止対策などは、特に火力発電事業に大きな影響を持つ。これからの火力発電事業は、火力プラントの保守・運用の合理化、再生可能エネルギーの大量導入を可能とする技術、将来のCO<sub>2</sub>の大幅削減に貢献する技術が必要としており、計測技術の果たす役割は大きい。

The business environment of electric power industries has been changing in response to the deregulation of electric utilities, unbundling of power generation and transmission sectors, diversification of variable renewable energy (VRE), global warming countermeasures, etc., which have particularly large effect on the thermal power generation business. The future thermal power generation business will encounter challenges such as the rational operation and maintenance of the power plants, further diversification of VRE, and large reduction of CO<sub>2</sub> emission. The measurement technologies will play a significant role toward resolution of them.

### はじめに

我が国の電気事業は、東日本大震災以降、大きな変革の途上にある。原子力発電所の停止によって、火力発電が電力需要の大半を賄うようになり、その後の再生可能エネルギーの導入拡大下では、再生可能エネルギーの変動調整とバックアップをも担っている。さらに電力自由化、発送電分離といった競争環境が厳しさを増す中で、低炭素化、脱炭素化への取組が求められるようになり、火力発電の将来が模索されている。

電力需要の変化を中長期的な視点で見ようとすると、人口減少と電化の進展が重要な影響因子となる。わが国の人口はピークを過ぎ減少に向かっており、それにより電力需要も減少するとの見方がある一方、電気自動車に代表されるようにCO<sub>2</sub>削減に向けた一環として産業、民生の電化が進むと予想され、電力需要を押し上げる要因もある。その結果、2030年から2050年に向けての電力需要は、やや低下するからやや増加するまでの、幅のある予測となっている<sup>[1, 2]</sup>。人口の大幅減少は、土地の利用や産業構造、社会のあり方を変え、電力の供給に対しても従来の考え方を変える要因となる。将来の社会をどのように支えていくのか、電気事業にとって、難しい課題が突きつけられることになろう。

また、デジタル技術の進歩によって電気事業の形態が変わっていくことを予想するものもある。総括原価、地域独占に支えられたUtility\*<sup>1</sup>1.0、電力システム改革により効率

性が求められるUtility2.0を経て、電力を購入するのではなく、それによって得られる効用を購入する形態Utility3.0<sup>[3]</sup>が提唱されており、電力の収益構造が変わってしまう懸念がある。

\*1：電気事業のビジネスモデル変遷は、段階ごとにUtility1.0, 2.0, 3.0と呼ばれている。

このような状況下で電気事業の将来を予想することは極めて困難であるが、あえて私見を交えて、火力発電を中心に変化を論じてみたい。

### 電源構成の変遷

我が国は、エネルギー資源の大半を輸入に頼っており、リスク分散のために各種電源の適切なバランスをとるエネルギーミックスを基本としているが、電源構成<sup>[4]</sup>は、2011年以降、大きく変化している。Figure 1に示すように、東日本大震災以前は原子力、種々の化石燃料による火力、および再生可能エネルギーの水力で、バランスを保ってきた。このうち水力はほぼ上限に達しており、脱石油に向けた石油火力の減少分を石炭火力、液化天然ガス(LNG)火力、原子力で補ってきたが、震災以降、停止した原子力発電所を代替するためLNG火力、石油火力の稼働率が高まり、化石燃料に極度に依存する構造となっている。2012年のFIT(Feed-in Tariff, 固定価格買取制度)<sup>[5]</sup>の導入以降、太陽光を中心に新エネルギーが増加しているが、新エネルギーと水力をあわせた再生可能エネルギーは主力電源になるまで

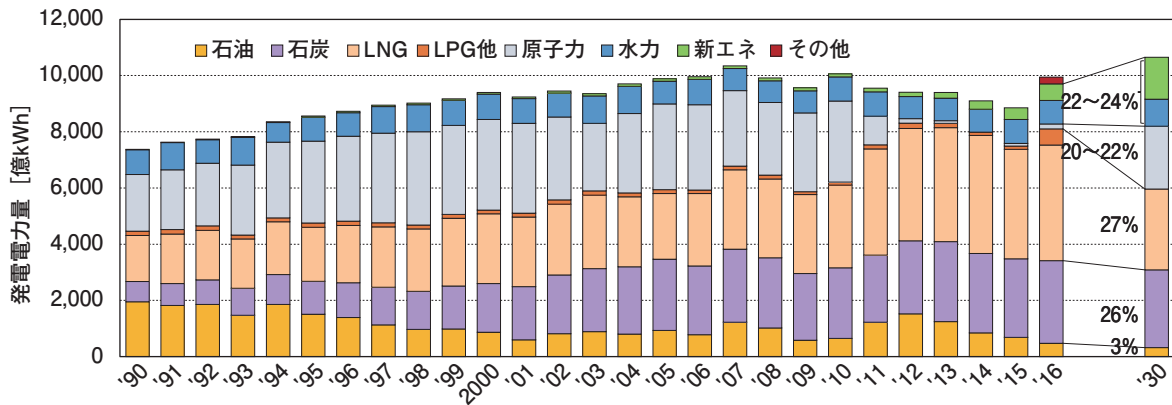


Figure 1 電源別の発電電力量  
電気事業のデータベース(FEPC INFOBASE 2017)より作成。2015年度までは電事連調べによる10電力計。地熱は新エネルギー(新エネ)に含めた。2016年度は資源エネルギー庁「電力調査統計」による10エリア計、2030年度は資源エネルギー庁の電力需給構造の見通しによる。

には至っていない。なお2011年以降の発電電力量の低下傾向は、省エネ意識が定着してきた効果とみられる。

2016年の統計は、それ以前とは出展が異なるため、過去の数値と直接比較することは難しいが、依然として火力が需要の80%以上を支えている状況にあることが分かる。再生可能エネルギーの占める割合は十数%に過ぎないが、後述するように再生可能エネルギーの拡大に起因する問題が出始めている。

2030年の構成は長期エネルギー需給見通しにおいて示された電源構成であり<sup>[6]</sup>、CO<sub>2</sub>の削減に向けて原子力の再稼働、再生可能エネルギーの拡大が見込まれているが、目標達成には各種の課題解決が必要であろう。

### 競争環境下の火力発電

電力自由化の下で、競争環境にある発電事業では、コスト低減が強く求められている。これは喫緊の課題であり、火力分野では燃料コストの抑制、プラントの合理的な保守・運用による経費節減等が鍵となる。

火力発電プラントは、震災以降、電力不足に対応するため、定期検査を延期しながら高い稼働率を維持した。この結果は、日常の管理を適切に行うことによって定期検査間隔の延長が可能であることを示すものであり、検査制度の見直し<sup>[7]</sup>につながった。これを受けて、既設プラントの保守の合理化のため、重点的に投資していく部分とそうでない部分を選別しながら、IoT<sup>\*2</sup>、ビッグデータ<sup>\*3</sup>解析などのデジタル技術を活用することによって定期検査間隔を延長する取組が進められている。さらにAI(Artificial Intelligence: 人工知能)とセンサー、通信技術を融合させた予兆診断、状態診断、コンピュータの仮想空間内にプラントを構成し挙動を予測するデジタルツイン<sup>\*4</sup>など、保守運用の一層の合理化、高度化に向けたデジタルトランスフォーメーションが始まっている。

- \*2: IoT(Internet of Things):モノ(物)のインターネット、身の周りのあらゆるモノがインターネットにつながる仕組みのこと
- \*3: ビッグデータ:インターネットの普及とIT技術の進化によって生まれた、これまで企業が扱ってきた以上に、より大容量かつ多様なデータを扱う新たな仕組み(HITACHI ビッグデータ×AI より、<http://www.hitachi.co.jp/products/it/bigdata/column/column01.html>: 2018/08/08)
- \*4: デジタルツイン:工場や製品に関することなど、現実世界の出来事をデジタル化し、仮想世界にリアルタイムに再現する技術で、現実の工場における理想的な運営・管理の実現を目的に構築される。

### 再生可能エネルギーの導入

再生可能エネルギーには複数の定義があるが、エネルギー供給構造高度化法<sup>[8]</sup>では、エネルギー源として持続的に利用することができる太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然界に存在する熱、バイオマスが挙げられている。その中で、二酸化炭素の排出量が少なく、エネルギー源の多様化に貢献するエネルギーを「新エネルギー」と呼び、Figure 2に示すように「技術的に実用段階に

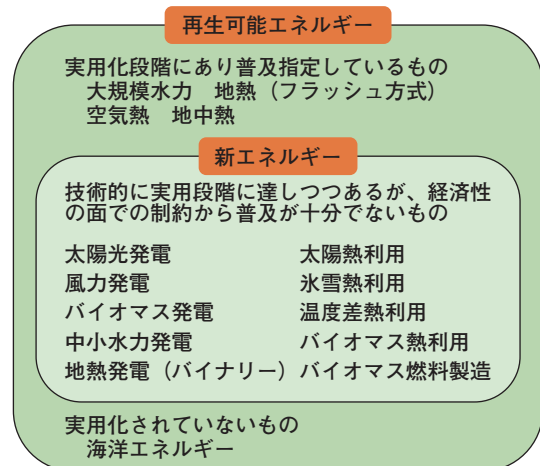


Figure 2 再生可能エネルギー、新エネルギーの種類

達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、非化石エネルギーの導入を図るために必要なもの」として、10種類が指定されている。

再生可能エネルギーによる電源のうち、出力規模の大きいものは水力、地熱であるが、水力は大規模化が可能な地点の開発は終了しており、既設水力の出力向上、小規模水力の開発が中心となろう。地熱は、国立公園内の立地、温泉への影響の問題などから開発が進まず、大規模化も難しい状況にある。バイオマスは利用が進んでいるが、持続性や量の確保とコストの問題が大きく、現状では、大規模なエネルギー資源とすることは難しい。再生可能エネルギー大量導入の主力と目されるのは太陽光と風力であり、いずれも変動性の電源である。これらの変動性の電源は、出力がほとんど0から100%までの変化がありうるため、地域の気象を予測し発電量を予測するシステムの重要性が指摘されている<sup>[9, 10]</sup>。また、同程度の出力規模のバックアップ電源が必要となり、現状では火力発電がその役割を担っている。

再生可能エネルギーの導入は、これまで電力不足を回避するため、設備の連続運転を如何に維持するかに苦心してきた火力の状況を一変させた。再生可能エネルギーが今以上に増えていくと、火力プラントの起動停止回数、出力変化の頻度が増えることによって、設備の疲労が進むことが懸念され、先行する欧州では、起動停止の増加とともに計画外停止が増えていることが報告されている<sup>[11]</sup>。従って、火力プラントのトラブルの予防、設備の保全は、従前に増して重要な課題となろう。

### 再生可能エネルギー拡大の影響

最近の電力需要曲線は、Figure 3の需給構造の概念図に示すように、自家消費用の太陽光発電の導入によって、ピークが昼から朝、夕にシフトするケースが生じている。現状は、左側の図のように、ベースロード(水力、原子力等)、火

力、再生可能エネルギー、揚水発電で需要を賄い、火力は再生可能エネルギーの変動を補うように出力調整を行っている。

太陽光や風力などの変動性の再生可能エネルギーが増大すると、夏冬の需要が大きい時期に再生可能エネルギーが急変し、火力機によるバックアップが間に合わないケース、春秋などの需要が高くない時期に電力供給の大半を占めることによって、火力の割合が下がり、火力機による電圧、周波数の調整力が不足するケース、などが想定される。

需要に供給が追いつかない場合、需要家側に消費の抑制を要請するデマンドレスポンス(DR)で対応する。再生可能エネルギーの供給力が大きい場合、一部を揚水発電の水の汲み上げに使い、それでも余剰が出て火力発電の下げ代が不足する場合は、再生可能エネルギー側に出力抑制を要請することになる。2017年度には、日本全体で1時間あたりの電力需要に対して、再生可能エネルギーの占める割合が50%を超える状況が生じている<sup>[12]</sup>。要因は太陽光発電の導入拡大で、同時時間帯で太陽光が40%を賄っている。概して西日本において再生可能エネルギーの割合が大きくなっており、地域を限れば、九州地区、四国地区では2018年には短時間ながら発電量の80%を超えるケースも生じており<sup>[13]</sup>、電力需給の安定のため、再生可能エネルギー側に出力抑制を求める蓋然性が高まっている。

再生可能エネルギーが主力電源となるケースでは、Figure 3右図のように、需要を大幅に上回る電力が発生するようになり、発電を抑制するのではなく、余剰分を積極的に活用する、二次電池、水素等のガスに変換するP2G (Power to Gas)、ガス以外に液体燃料等への変換も含めたP2X (Power to X)といった、蓄エネルギー、エネルギー変換が必要となる。既に火力発電所や変電所の敷地に二次電池を置き、再生可能エネルギーの電力を貯蔵するプロジェクトが始まっている<sup>[14-16]</sup>。現状の二次電池は十分な性能と

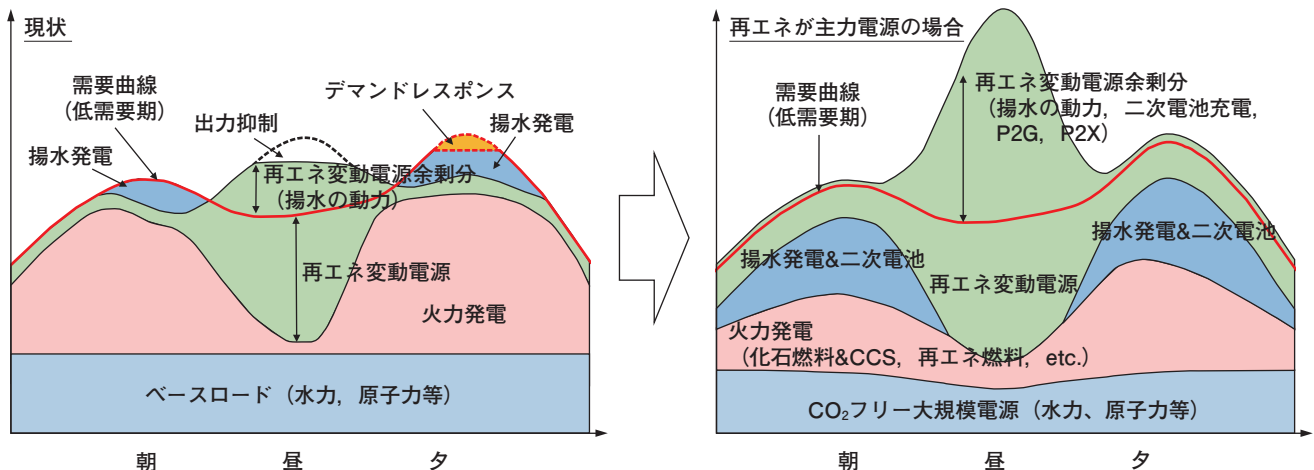


Figure 3 再生可能エネルギー(再生エ)大量導入時の需給構造の変化

はいえないが、性能向上、コストダウンは従来の予想を上回るスピードで進んでいるため、今後の進展に期待したい。二次電池が短時間の変動に対応するのに対し、P2Gは水素などの燃料ガスに変換するので、長期間の貯蔵によって季節をまたぐ変動に対応でき、さらにP2Xは発電以外の用途向けの液体燃料や化学原料の製造につながる。P2Gの水素から再び発電を行うと、二次電池を用いるケースよりも効率は低下するが、再生可能エネルギーが主力電源となる時代に向けて、挑戦する価値は大きい。

水素の供給に関しては、再生可能エネルギーを用いた水の電気分解以外に、海外で製造した水素の輸入なども検討されており、水素の輸送、貯蔵、利用までのエネルギーチェーンとしての調査が進んでいる<sup>[17,18]</sup>。水素以外には、メタン、有機物、アンモニアなど、各種の物質が検討されており、エネルギーキャリア、化学原料など、用途の視点からより適したものを選定する必要がある。再生可能エネルギーの本当のポテンシャルを把握すると共に、余剰分を積極的に活用する構造を考えていくことが鍵であろう。

現在は再生可能エネルギーの正の側面のみが強調されているが、導入がさらに拡大すれば負の影響も見えてくるであろう。FITに起因する電力市場や発電設備の経済性への影響<sup>[19]</sup>は既に問題視されている。再生可能エネルギーの拡大が更に進めば、火力プラントの利用率、稼働率の低下によって発電電力量が減少し、いわゆるkWhの減少による収益の低下が生じてくる。そのため設備の維持が困難になりバックアップの電源が不足することから、再生可能エネルギーの変動を補完する調整力の価値( $\Delta$ kWh)、待機電源として設備を維持する価値(kW)をどのように評価するか議論されるようになっていく。

また再生可能エネルギーが主力電源まで成長すれば環境への影響も顕著になってくるであろう<sup>[20]</sup>。既に風力発電所の景観や騒音に関する問題は指摘されているし、バードストライクなど野生生物への影響も懸念されている。再生可能エネルギーによる電源が広大な土地を占有すれば、地域環境への影響も考える必要がある。例えば太陽光発電では、設置場所に降注ぐエネルギーを回収し他の場所に移動させるため、発電効率を上げ、なおかつ大面積に設置すれば、設置場所周辺の環境を変化させることになる。また、沿岸あるいは洋上に風力発電機が大量に設置された場合、沿岸付近の海流への影響が懸念材料となる。再生可能エネルギーの負の側面を意識し、それをカバーしながら拡大を進めるインテリジェントな対応が必要である。

## 低炭素化、脱炭素への対応

長期エネルギー需給見通しと整合を取るように、パリ協定の約束草案では2030年のCO<sub>2</sub>の削減目標として2013年比マ

イナス26%が示された。これを受け、電気事業は自主的枠組みとして2030年度の排出係数0.37 kg-CO<sub>2</sub>/kWhを掲げている。この低炭素化に向けた取り組みを促すために、エネルギー供給構造高度化法(高度化法)において2030年の非化石電源の導入目標44%を掲げ、エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)においてはベンチマークA指標、B指標を用いた火力発電効率の達成目標を設定している。低炭素化の目標値は、電力需給構造における原子力、再生可能エネルギー導入の目標値の達成、旧型の微粉炭火力やLNG火力発電の更新を前提としているが、それらの前提条件が満たされない可能性や、再生可能エネルギー拡大の下で火力の部分負荷運転の増加による効率の低下が懸念される。この場合、CO<sub>2</sub>削減効果が限定されることから、バイオマス混焼、水素混焼等の燃料側の低炭素化が重要な選択肢に入ってくるであろう。

地球温暖化対策計画における2050年のCO<sub>2</sub> 80%削減は、2030年目標とはレベルの異なる設定値で、現在取り組まれている発電効率向上の延長上で達成できるものではない。また、80%削減は国全体の目標であり、電気事業には更に高い削減率が要求されることも考えられ、化石燃料を使うには、CO<sub>2</sub>を回収し利用または処分するCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)の導入が必須となる可能性がある。

排ガスからのCO<sub>2</sub>回収には実用段階の技術があるが<sup>[21]</sup>、更なる所要動力の低減も進められている<sup>[22]</sup>。次世代火力技術では、CCUSを前提としたCO<sub>2</sub>回収型火力発電方式の開発も進められている<sup>[23]</sup>。

CO<sub>2</sub>を回収・処分するCCSを実施するには、CO<sub>2</sub>の回収、輸送、地中処分などの技術的課題以外に、貯留場所の探索と確保、CO<sub>2</sub>の回収、処分、処分後のモニタリング等の実施体制、CCSのファイナンス、法制度などの整備が必要である。現在、CO<sub>2</sub>の地中処分として実施されているのは、石油の回収増進を狙ったEOR(Enhanced Oil Recovery)に代表されるように、CO<sub>2</sub>に価格がつく場合である。単に廃棄物として処分するCCSでは実施に向けたインセンティブが働かないため、カーボンプライシング<sup>\*5</sup>などのドライビングフォースが必要かもしれない。

一方CO<sub>2</sub>を有効利用するCCUでは、再生可能エネルギーを用いて製造した水素と反応させ燃料に戻す方法<sup>[24]</sup>や、藻類等のバイオマスの増殖に用いるなどの検討がなされている。しかしながら、大量のCO<sub>2</sub>を使用する再生品とその用途、CO<sub>2</sub>の再生に必要なエネルギーや投入資源をどのように確保するのか、CO<sub>2</sub>再生プロセスあるいは再生品利用のための場所の確保など、いくつかの大きな課題があり、CCUのためにエネルギーや資源を投入することの価値を正当化するコンセプトが重要である。廃棄物と再生可能エ

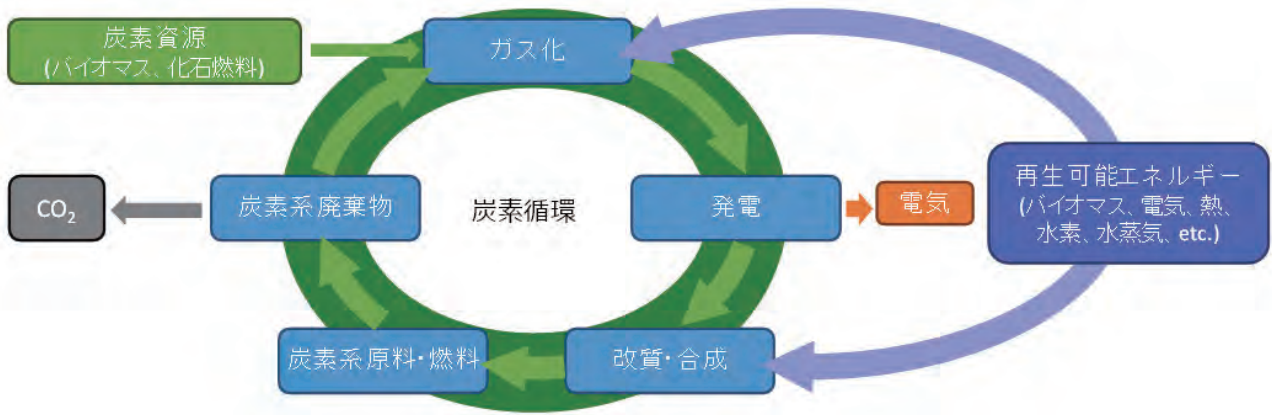


Figure 4 炭素循環の概念の例

エネルギーを組み合わせたCO<sub>2</sub>の再生循環は、その答えになる可能性がある。Figure 4は炭素循環の概念の一例を示したもので、炭素系廃棄物と最小限の炭素資源をガス化し、CO、H<sub>2</sub>系の燃料ガスに変えて燃料電池などで高温発電を行う。発電後の燃料成分を含む排ガスに再生可能エネルギーを投入し、改質、合成を行って炭素系原料を作る。炭素系製品が廃棄されると、再びガス化しCO、H<sub>2</sub>に戻す。炭素の循環を多くし、新たに加える化石燃料、排出するCO<sub>2</sub>を最少にするよう、再生可能エネルギーで炭素の循環を維持するものである。

再生可能エネルギーの拡大が進むと、系統連系に頼るのではなく、再生可能エネルギーの自立、分散型発電など独自の需給ラインを持つケースも必要となってくる。火力発電で培われたガス化技術や化学合成の技術と再生可能エネルギー由来の炭素資源(バイオマス)、電気、熱、水素、水蒸気などを組み合わせたシステムは、分散型のシステムにも適合することから、今後の発展に期待したい。

\*5：カーボンプライシング：排出する炭素に価格を付けること。  
炭素税(気候変動税)や排出量取引制度等が該当する。

## 今後の発電システムに求められる計測技術

これまで述べたように、自由化による競争、低炭素化、脱炭素化の社会的な要請の下で、発電プラントは構成、役割ともに、時代と共に変化していくが、2030年時点では火力発電は依然として主力電源である。そこで必要とされる計測は、法令順守に関わる排ガス、排水等の計測、プラントの運転制御、保守・運用のための計測などである。排ガス、排水の計測は従来通りであるが、測定対象によっては手分析と連続測定のどちらが良いのか、データサンプリングの頻度、測定に関わるコスト、装置の信頼性などから、測定法が変わっていくと思われる。また、副製品の品質管理のために、石炭灰の成分分析など、ほぼオンタイムで測定できる分析装置が望まれるケースも出てきている。

今後、計測技術として変わりうるものは保守・運用のためのものであろう。発電設備の最適運用に向けて、プラントの自動運転、遠隔監視・操作、設備異常の予兆検知、プロセスの状態診断につながるデータを取得し、それらを知識、知恵に変え、判断につなげることが次世代のニーズと考える。我が国の事業用火力発電所は、多くの信号を取り込んでいる。これらのデータを処理し、知識から知恵に変えることが重要であり、ベテランの運転員や作業員に代わって診断、判断を行うシステムが求められる。ビッグデータ解析、ディープラーニングなどのアプローチが取られているが、どの情報から何を診断し、防止できるのかを見出すことが鍵である。またIoT、AIを支援するセンシング技術への関心も高い。センサーと信号伝送の進歩は診断の高度化に貢献するものであり、外部電源を要しない自立型のセンサー、ケーブルフリーの信号の伝送などが注目を集めるであろう。

## おわりに

電力自由化の中で、発電事業には、競争力を高める高度な保守・運用技術が不可欠である。また、再生可能エネルギー拡大の中で火力発電の姿、役割は変貌していく。これらを円滑に進めるために、各種計測技術の果たす役割は大きく、益々の発展を期待するものである。

## 参考文献

- [1] <https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/report/researchfocus/pdf/10462.pdf>
- [2] [https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka/plan\\_05.pdf](https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka/plan_05.pdf)
- [3] 竹内純子他, エネルギー産業の2050年 Utility3.0へのゲームチェンジ, 日本経済新聞出版社(2017)
- [4] FEPC INFOBASE 2017, <http://www.fepec.or.jp/library/data/infobase/>
- [5] [http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/fit\\_old.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_old.html)
- [6] 長期エネルギー需給見通し, 平成27年7月, 経済産業省, [http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004\\_2.pdf](http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf)
- [7] 発電用火力設備に係る安全管理検査制度見直し検討会における検討結果概要, [http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20170113001\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20170113001_01.pdf)
- [8] <http://www.enecho.meti.go.jp/notice/topics/017/>
- [9] 山田芳則, 太陽光発電における気象予測の重要性, ながれ35(2016)7-11, <http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=35-1tokushu3.pdf&dir=42>
- [10] 高木哲郎, 気象予測システムと風力発電の出力予測システム, [http://jwpa.jp/2013\\_pdf/88-24tokushu.pdf](http://jwpa.jp/2013_pdf/88-24tokushu.pdf)
- [11] <https://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/03-India%20December%20VGB%20.pdf>
- [12] <https://www.denkishimbun.com/archives/28519>
- [13] <https://www.denkishimbun.com/archives/27954>
- [14] [https://www.tohoku-epco.co.jp/news/normal/1191223\\_1049.html](https://www.tohoku-epco.co.jp/news/normal/1191223_1049.html)
- [15] [http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/180320/180320\\_3.pdf](http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/180320/180320_3.pdf)
- [16] [http://www.jera.co.jp/information/20180529\\_223.html](http://www.jera.co.jp/information/20180529_223.html)
- [17] CO2フリー水素ワーキンググループ報告書, 平成29年3月7日 水素・燃料電池戦略協議会, <http://www.meti.go.jp/press/2016/03/20170307003/20170307003-1.pdf>
- [18] 水素エネルギー利活用のあり方に関する調査報告書, 平成27年2月, 日本エネルギー経済研究所, <http://www.meti.go.jp/meti-lib/report/2015fy/000823.pdf>
- [19] 小山, 欧州に見る, 再エネ発電拡大下における電力市場の課題, IEEJ:2016年8月, <https://eneken.ieej.or.jp/data/6866.pdf>
- [20] [https://loop.club/editorials/detail/58?popin\\_recommend\\_link](https://loop.club/editorials/detail/58?popin_recommend_link)
- [21] 平田他, 「排ガスからのCO2回収装置の当社実績と最近の取組み」, 三菱重工技報 環境特集, Vol.55, No.1, p.42(2018), <http://www.mhi.co.jp/technology/review/abstractj-55-1-42.html>
- [22] RITE Today Annual Report, vol 13, p.28(2018), [http://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2017\\_kagaku\\_j.pdf](http://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2017_kagaku_j.pdf)
- [23] 次世代火力発電に係る技術ロードマップ 技術参考資料集, [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment/jisedai\\_karyoku/pdf/004\\_02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/004_02_00.pdf)
- [24] ALIGN CCUS, <https://www.alignccus.eu/about-project/work-package-4-co2-re-use>