



特集記事・12

カーボンニュートラルに向けた日本の各産業の取り組み

カーボンニュートラルに向けた 火力発電業界の取り組み

Initiatives and Future Prospects of the Thermal Power Industry towards Carbon Neutrality

一般社団法人
火力原子力発電技術協会
理事・技術部長

高木愛夫
Yoshio Takagi

一般社団法人
火力原子力発電技術協会
技術アドバイザー

船橋信之
Nobuyuki Funahashi

1 はじめに

気候変動への対応は人類共通の喫緊の課題とする認識が高まり、わが国も2020年10月に「2050年カーボンニュートラルを目指す」と宣言し、その目標を見据えた新たな方針「第6次エネルギー基本計画」が2021年10月に発表された。第6次エネルギー基本計画では、2050年のカーボンニュートラルへの道筋として、2030年に向けた政策の基本的な考え方、電源構成などの目標が掲げられた。この計画を踏まえ、化石エネルギー中心の産業構造・社会構造をクリーンエネルギー中心へ転換する「グリーントランスフォーメーション (GX)」実現に向けた検討が続けられ、2023年2月に「GX実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～」(GXロードマップ) が閣議決定され、同年5月には「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律」(GX推進法) が成立した。このようにカーボンニュートラル社会の実現に向けて国は積極的な施策を矢継ぎ早に展開しているが、その背景には、気候変動への取り組みを誤れば国際社会で産業競争力を失墜させる可能性があるという危機感もある。

GXロードマップでは、電力については非化石電源である再生可能エネルギー (再エネ) の主力電源化、原子力の活用とともに、水素・アンモニアの導入を促進して火力発電からのCO₂排出量の削減を促すことも明記されている。現在、電力供給の約3/4を担う火力発電はまさに主力電源であり、カーボンニュートラルへのトランジション期間においても火力発電は電力の安定供給を担う重要な役割を負うことは否めず、そのCO₂排出削減はGXにおける重要な課題である。

本稿では、我が国のエネルギー基本政策、GX指針について概説するとともに、GXに向けた火力発電に関する技術開発、カーボンニュートラル時代の電力供給における火力発電が担う役割について紹介する。また海外のカーボンニュートラル

への取り組み事例として欧州の電力業界のカーボンニュートラルに向けた取り組みと課題について紹介する。

2 エネルギー基本政策、 GX基本方針

第6次エネルギー基本計画¹⁾では、2030年度に温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減することを目指して、徹底した省エネルギーと非化石エネルギーの拡大を掲げている。電力供給部門 (電源) については、エネルギー政策の基本的視点であるS (Safety : 安全性) + 3E (Energy Security : エネルギーの安定供給、Economic Efficiency : 経済効率性、Environment : 環境への適合) を大前提に再エネの最大限の導入、化石燃料比率の引き下げと火力発電の脱炭素化、原子力発電依存度の可能な限りの低減を基本方針としている。第6次エネルギー基本計画に示された2030年度の電源構成を図1²⁾に示す。図1には、2019年度の電源構成、すなわち各電源の発電電力量の実績と第4次エネルギー基本計画策定時

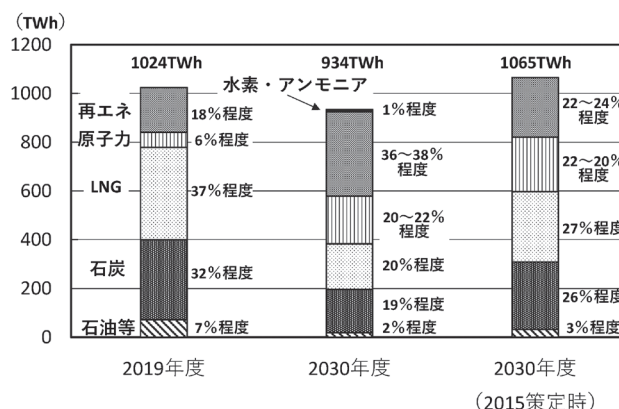


図1 エネルギー基本計画の電源構成目標と2019年度発電実績²⁾

(2015年、2018年作成の第5次エネルギー基本計画も数値は同じ)の目標値も示す。2030年度は徹底した省エネルギーにより、電力需要は2019年度に比べて約9%低減すると予測している。再エネの導入は各省の施策強化の効果などにも期待して電源構成として36~38%を見込んでいる。原子力発電については、安全性をすべてに優先させることを大前提に、これまでのエネルギーミックスで提示してきた20~22%程度を見込んでいる。火力発電については、再エネの変動性を補う調整力としての活用に加えエネルギーの安定供給確保という役割を担うとして電源構成の約41%を見込んでいる。

2019年度の発電量実績と比較すると、第6次エネルギー基本計画の再エネ構成比は2倍以上であり、技術開発に加えて積極的な施策による導入推進が必要である。GX実現に向けた基本方針³⁾では、例えば洋上風力の導入促進に向けて地元理解の醸成を前提とした案件形成加速にむけて「日本版セントラル方式」の確立、排他的経済水域 (EEZ) への拡大に向けた制度的措置の検討を掲げている。火力発電については、電力発電量に占める割合を2019年度の76%程度から2030年度には41%まで低下させる目標である。また燃料の内訳としてLNG火力20%程度、石炭火力19%程度、石油火力2%程度を見込んでいる。火力発電比率の削減に向けては、エネルギーの使用の合理化及び非化石エネルギーへの転換等に関する法律(省エネ法)⁴⁾の規制強化などにより非効率石炭火力のフェードアウトを推進するとしている。その一方、ガス偏重のリスク、石炭の安定供給性・備蓄性のメリットなども考慮してエネルギー安全保障上の観点から高効率設備を中心に石炭火力を維持し、電力の安定供給に向けた適切なポートフォリオとすることとしている。

第6次エネルギー基本計画では、水素・アンモニアによる発電量の目標として電源構成比1%が明示された。水素・アンモニアによる発電量がエネルギー基本計画に掲示されたのは初

めてであり、水素、アンモニアに関する期待の高まりを示している。資源エネルギー庁の電力トランジション・ロードマップ(図2)⁵⁾には、電力分野の脱炭素化に向け、脱炭素電源、トランジション電源などのロードマップが示されている。このロードマップでは、火力発電に関して脱炭素電源としてアンモニア専焼、水素専焼とともにCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage; 二酸化炭素回収・利用・貯留) と火力電源の休廃止が、トランジション電源としてアンモニア混焼、水素混焼、バイオマス混焼が示されている。水素、アンモニアはCO₂を排出しない燃料であり、変動電源である再エネの導入を拡大する中で必要とされる供給力、調整力及び慣性力を担う火力発電から排出される温室効果ガスの削減に向けて、重要な要素を担うと期待されている。

3 2050年のカーボンニュートラル達成に向けた火力発電業界の取り組み

エネルギー基本計画においては、2050年の正確な予測は困難であるためカーボンニュートラルに向けた取り組みは様々な可能性を排除せずに脱炭素化のための施策を展開するとされている。またイノベーション実現に向けた技術開発に取り組む中であっても、常に安全の確保を大前提としつつ、安定的で安価なエネルギー供給を目指すとされている。図2に示すように、電力分野の脱炭素化に向けたロードマップでは火力電源の休廃止が挙げられている一方、水素・アンモニアによる発電の導入についてグリーンイノベーション (GI) 基金⁶⁾による技術開発や実機実証が着実に進められており、2030年度以降は商用化、本格導入を進め、2050年には温暖化効果ガスを排出しないゼロエミッション火力がカーボンニュートラル達成の一翼を担うことが期待されている。

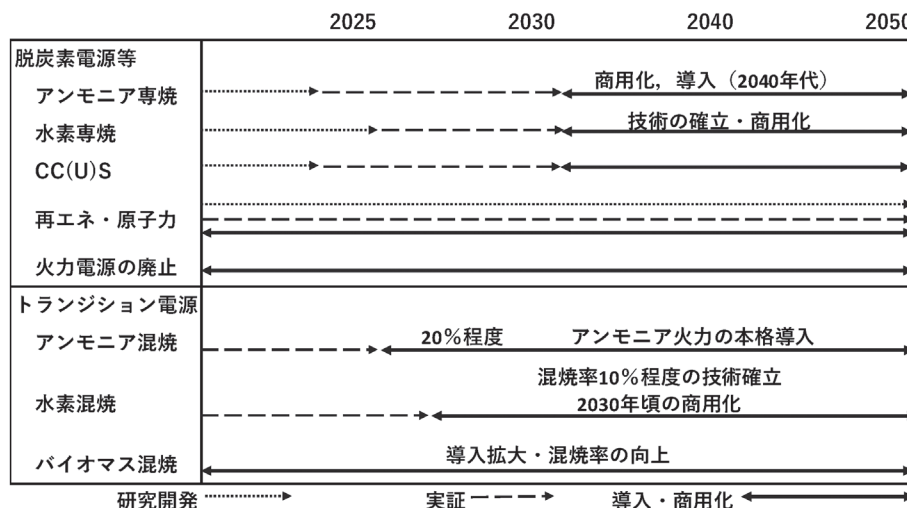


図2 電力トランジション・ロードマップ⁵⁾

3.1 水素発電

図3には新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）がGI基金事業で実施している水素発電技術に関するプロジェクトの実施スケジュールを示す⁷⁾。水素発電技術に関しては、ガスタービンでの混焼（天然ガスと水素の混焼）／専焼利用を対象に最早で2025年からの実機実証を目指している。水素発電は水素をガスタービンで燃焼させて発電するが、技術的な主な課題は水素の燃焼技術である^{8,9)}。水素は天然ガスと比べて燃焼速度が速く、逆火（フラッシュバック）が生じやすい。逆火とは、燃焼器内の火炎が投入される燃料を伝って逆戻りしてしまう現象であり、水素の燃焼速度はメタンの約8倍のため従来の天然ガス用の燃焼器では逆火が生じる可能性があり、水素用の燃焼器が必要になる。また高効率化に伴う燃焼温度の上昇はNOx排出量の増加をもたらし、水素混合割合の増加によりわずかにNOx排出量が増加することも報告されている⁸⁾。逆火防止とNOxの抑制が水素発電に関する技術開発の鍵である。

ガスタービンの燃焼器には、予め燃料と空気を混合して燃焼器内に投入する予混合燃焼方式、燃料と空気を別々に噴射する拡散燃焼方式がある⁸⁾。拡散燃焼方式は逆火のリスクは低いものの、火炎温度が高い領域が発生してNOx量が高くなる可能性がある。蒸気や水を噴射することにより発生するNOxの量を低減させることも可能であるが効率が低下する。

一方、予混合燃焼方式はNOx発生量が低く蒸気や水の噴射による効率の低下は避けられるものの、逆火のリスクが高くなる。予混合燃焼方式では、ノズルの改良などにより逆火を防止し、かつNOxの発生を抑制した燃焼器の開発が進められているが、この技術開発には後述する石炭ガス化複合発電で培った技術が活かされている。

図3に示す水素発電に関するNEDOの実施スケジュールでは、早ければ2025年度から水素混焼／専焼の実証試験が既設火力発電所で開始されるが、すでに2022年6月には米国の発電所で日本のメーカーが開発した予混合燃焼器を装備した2,520MWの大型ガスタービンで天然ガスと水素20%（体積比）の混合燃料による燃焼試験に成功している¹⁰⁾。長時間の安定運転が残された実証課題かと思われる。また中小型のガスタービン（例えば30MWクラス）では、希薄予混合燃焼と追焚き燃焼を組み合わせ水素を天然ガスに体積比で30%まで混焼可能なガスタービンがすでに商品化されている¹¹⁾。水素専焼に向けた技術開発も着々と進展しており、製造、輸送、貯蔵などの水素サプライチェーンの早期構築が望まれる。

3.2 アンモニア発電

図4にはNEDOのアンモニアの発電利用に向けた実施スケジュールを示す¹²⁾。アンモニアは沸点が-33℃で取り扱いが比較的容易であり、水素輸送のキャリアとして有望視されてい

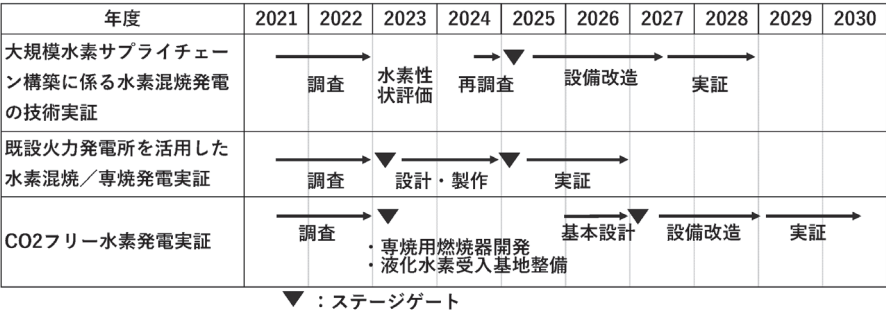


図3 水素発電技術に関するプロジェクト実施スケジュール（NEDO）⁷⁾

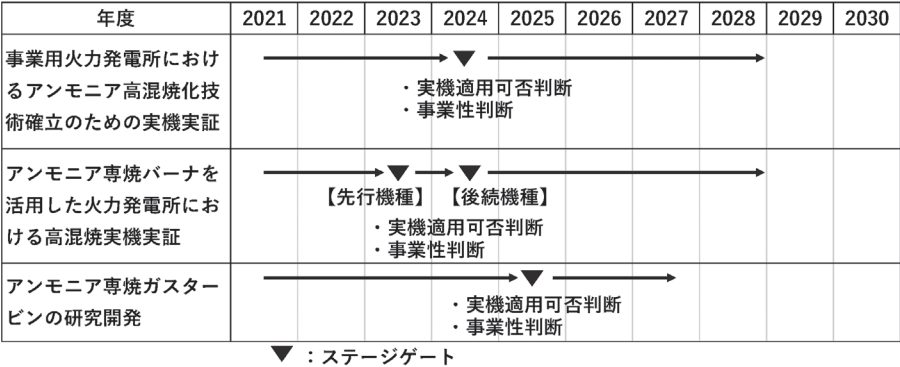


図4 アンモニア発電技術に関するプロジェクトの実施スケジュール（NEDO）¹²⁾

ることに加えて、燃焼してもCO₂を排出しない燃料としても期待されている。またすでに工業用、肥料用としてのインフラがあり、それを活用できるメリットもある。当初のスケジュールでは、2024年度から(株)JERA碧南火力発電所4号機でアンモニアを微粉炭に20% (熱量比) 混焼する実証事業を開始する計画であったが、2023年度に前倒しする予定である¹³⁾。

アンモニア混焼の技術的な課題は、NO_xの発生である。微粉炭燃焼においても、石炭に含まれる窒素が酸化してNOが発生するため、強い還元雰囲気を生成してNOの発生を抑制する燃焼技術が開発されている¹⁴⁾。この技術をもとにアンモニアと微粉炭の混焼でもNO_xの発生を抑制する燃焼技術が開発された^{14,15)}。図5¹⁴⁾にアンモニア20%混焼におけるNO_x発生量を示す。低NO_x燃焼方法としてすでに採用されている二段燃焼法(燃焼用空気を2段階で供給する燃焼方法)における二段燃焼率の調整などによりNO_x発生量も微粉炭燃焼時と同等に抑制することが可能である。

図2の電力トランジション・ロードマップでは、アンモニア専焼は2020年代に技術開発、実証を行い、2030年以降の実用化を目指すこととなっている。アンモニア専焼の場合、効率に優れたガスタービンをを用いた発電方式になると想定され、技術開発が展開されている。中小型ガスタービンを対象に、アンモニアを直接燃焼させる方式が開発されているが、課題はやはりNO_xの生成である。この問題についても燃焼方式の改良などで低NO_x化に向けた技術開発が盛んに行われている

る^{8,12,14,15)}。大型ガスタービンの場合には、排熱を用いてアンモニアを水素と窒素に分解し、ガスタービンで水素を燃焼させる方式が検討されている^{8,16)}。この場合には、水素ガスタービンがそのまま利用でき、またフューエルNO_xの発生に対する懸念もない。図4に示すスケジュールでは、2025年度にアンモニア専焼ガスタービンの実機適用可否の判断が行われることになっているが、発電分野で本格的にアンモニアを使用するためにはサプライチェーンの構築が必要である。GI基金事業の一つとして「燃料アンモニアのサプライチェーンの構築」プロジェクトが実施されており、NEDOによる技術開発に加え、クリーン燃料アンモニア協会による国際標準化に向けた活動など精力的な取り組みが繰り返されている^{6,12,17)}。

3.3 GENESIS松島計画

水素やアンモニアの専焼は2050年のカーボンニュートラルに向けた取り組みであるが、水素・アンモニア混焼は既設発電所のアセットを活用して電力の安定供給を保ちつつ温室効果ガスの発生を抑制するカーボンニュートラルへのトランジションを担う技術である。トランジションを担うプロジェクトの一つに電源開発(株)が松島火力発電所(長崎県)で計画しているGENESIS松島計画がある¹⁸⁾。この計画では、既設の石炭火力発電所に新たに石炭ガス化設備、ガスタービンを付加し、更にバイオマスやアンモニア混焼により環境負荷の低減を目指している。GENESIS松島計画は大崎クールジェンプロジェクト(OCG)¹⁹⁾で培った石炭ガス化複合発電技術などを商用化するものであるが、OCGは酸素吹きによる石炭ガス化技術を採用しており、そのガスには20%を超える水素が含まれている¹⁹⁾。そのため、OCG用に水素混焼用の燃焼器が開発され、その技術が水素燃焼ガスタービンの燃焼器開発に活かされている。またOCGではCCUSも視野にカーボンキャプチャー技術も開発している。これらの開発成果を活用するGENESIS松島計画はCO₂フリー電力の供給に留まらず、CCUSやバイオマス燃料なども活用したネガティブエミッションも視野に入れており、2050年のカーボンニュートラルに繋がるプロジェクトである。

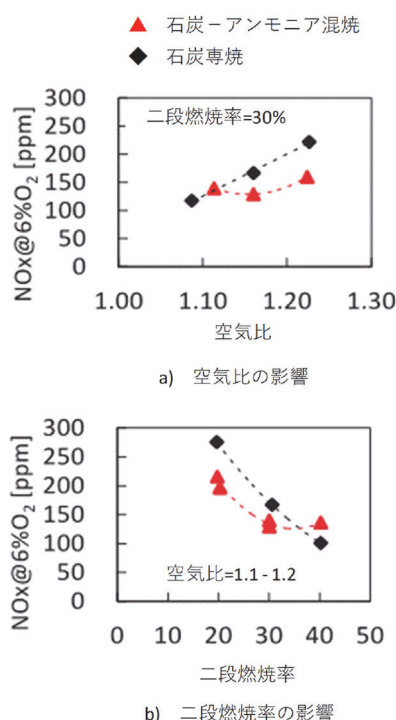


図5 アンモニア-微粉炭混焼における排気ガス中のNO_x濃度の変化¹⁴⁾ (Online version in color.)

4 カーボンニュートラル時代の火力発電の役割

再エネや原子力を活用することにより温室効果ガスを排出しない電力を供給することが可能であるが、水素やアンモニアを燃料とする火力発電の技術開発が精力的に進められているのはなぜだろうか。日本は自然エネルギー資源に恵まれないため再エネだけでは十分な電力供給が担えないという本質的な問題もあるが、発電量が天候、気象条件に依存する太

太陽光発電、風力発電による電力供給の変動を補完する電力が必要になるという問題への解決策として、非化石燃料による火力発電への期待があるためである。

図6⁵⁾には、2019年5月3日の九州エリアの電力需給曲線と電源別の発電量を示す。太陽光発電設備の導入量の多い九州地区では、その発電量の多い日の日中には出力制御（出力抑制）が実施されている。これは、原子力や地熱などのベースロード電源（天候などに左右されずに安定的に発電できる電力源）と太陽光などの再エネによる発電、火力発電による電力供給が、揚水発電所でのポンプアップ（蓄電）、中国地方など他のエリアへの供給を行っても需要を上回るからである。ガスタービン発電所の運転停止、石炭火力発電所の最低負荷運転など火力発電量を減らす対策も導入されているが、太陽光による発電量が減る夕方以降は、その減少分を補って電力供給を行う必要があり、その役目を主に火力発電が担っている。そのため、火力発電所は太陽光による発電量が低下する夕方以降の需給に対応するためにスタンバイさせておく必要がある。なお、太陽光による発電が不十分な朝方の需要に対応するためガスタービン発電所を起動させる場合もあり、そのような日は1日に2回の起動停止運用を実施している。

日本だけでなく全世界で再エネの導入を促進する動きが活発である。特に欧州ではロシアのウクライナ侵攻によりガス価格が高騰し、短期的には石炭火力の再稼働などを実施した国もあるが中長期的な政策として再エネの導入促進を掲げている。しかしながら再エネだけで電力供給を担うことは不可能である。船橋²⁰⁾は2022年のドイツの電力需給を分析し、2030年にドイツが目標とする電力需要の80%を再エネで担うとした場合の電力供給について試算した。再エネで供給ができない電力需要を「残余需要」と呼ぶが、2022年で最大需要を記録した12月14日の需給実績にもとに太陽光発電、風力発電の設備容量を2倍とした場合（再エネ率80%に相当）の残余需要を試算した結果を図7²⁰⁾に示す。2022年12月14日は、風が弱く日が陰り始めた15時に最大残余需要として

61.9GWを記録した。再エネ率80%を担える太陽光、風力発電設備を導入しても、船橋の試算では残余需要は56.2GWであり依然として大きな残余需要がある。昨年発表されたドイツの再エネ設備導入目標²¹⁾では2030年には太陽光と風力発電設備容量を2020年度の3倍以上としているが、2022年12月14日の気象条件ではおおよそ50GWの残余需要があり、単に再エネ設備を導入するだけでは残余需要への対応が不十分である。発電に適した気象条件に恵まれれば、現在でも再エネによる電力供給が需要の約90%以上を担う日もあり残余需要は少なくなるが、再エネによる発電は気象条件に左右されるため設備稼働率が不安定、すなわち電力供給が不安定であり、常に再エネ以外の電源もしくは蓄電などで残余需要に対応する供給力を備えておく必要がある。

電源別に常に供給可能な発電量を評価する指標の一つに確保発電容量（Secured Capacity）がある。これは火力発電や原子力発電などの発電設備の場合は平均故障率、太陽光発電や風力発電などの再エネの場合は非稼働（夜間や無風時の稼働していない時間）率をもとに発電していない時間を想定し、設備容量に対して確実に期待できる発電量を示す数値である。Schifferら^{22,23)}は、欧州の送電事業者、電力系統管理者の数値をもとに確保発電容量を試算し、ドイツにおける供給可能な確実な発電量を試算して電力供給の信頼性を評価している。この文献によれば火力発電・原子力発電の確保発電容量は設備容量の90～95%、風力発電は1～4%、太陽光発電は0%である。すなわち無風、夜間などの気象条件では再エネによる発電量は限られ、単に再エネ設備容量を増加するだけでは残余需要への対応、供給力の確保は不可能である。そのため、蓄電池をはじめ、残余需要に対する供給力を確保するために蓄電、蓄エネルギー技術の開発も盛んである。

電力の需給変動に対応する供給力は、図6に示すような日照量のデイリーな変動への対応もあるが、曇天あるいは微風が数日間続くようなケース（Dark doldrums）への対応も必要である²⁴⁾。蓄電能力を評価する場合には、どれだけの量の

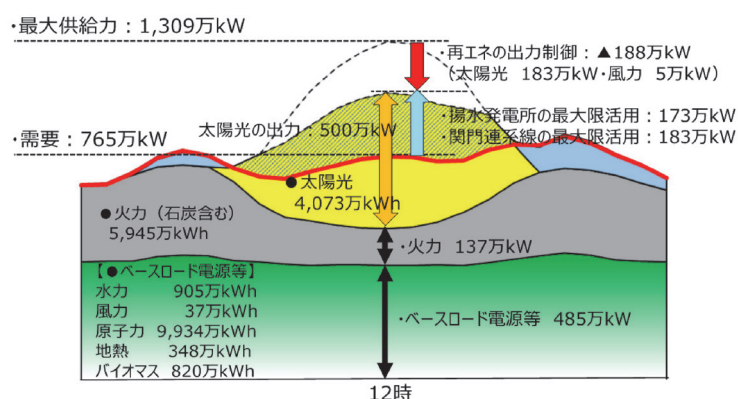


図6 九州エリアの電力需給イメージ (2019年5月3日の例)⁵⁾ (Online version in color.)

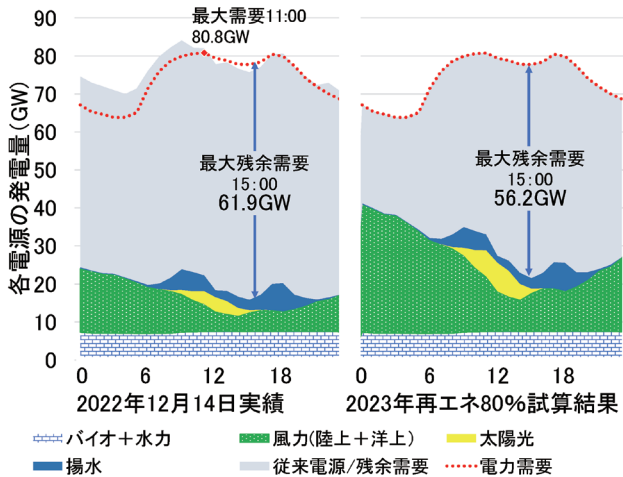


図7 再エネ率80%の電力需給推定（ドイツの残余需要試算結果）²⁰⁾
(Online version in color.)

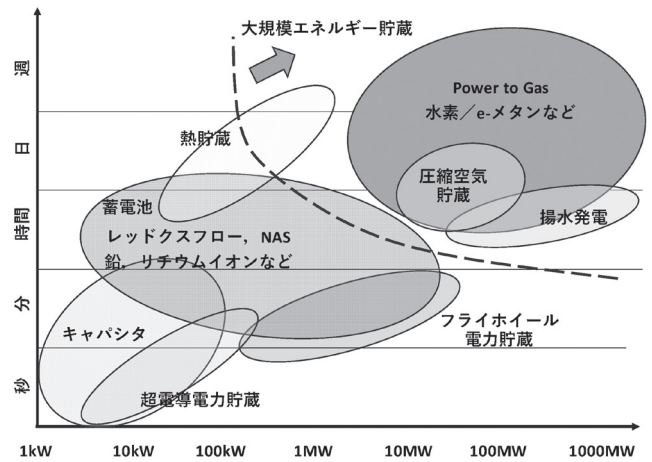


図8 エネルギー貯蔵技術の位置づけ²⁴⁾ (経済産業省資料を参考に作成)

電気を供給できるかということとともに、どれだけの時間供給し続けられるかという「供給時間」に関する評価も含めて、蓄電量として評価する必要がある。図8²⁵⁾には、様々な蓄電技術の適性を供給容量と供給時間で評価した図を示す。蓄電池は100MWで数時間から1日程度の蓄電に適した技術である。量を増やすことにより供給容量あるいは供給時間を増やすことも可能であるが、エネルギー密度あるいは放電特性などの点で大容量、長時間の供給力は揚水発電、あるいはメタンなどの合成燃料や水素として貯蔵するほうが適している。Schifferら^{22,23)}は、ドイツにおける電力需給を日、週ごとの安定供給に加え、太陽光発電、風力発電の季節変動を加味した分析を行い、蓄電池でDark doldrumsに対応するには非現実的な量の蓄電池が必要になり、日、週、月単位の残余需要への対応には水素あるいは合成燃料を用いた火力発電が供給力、需給調整の面でも最も適していると報告している。日本とドイツの状況は異なり、また最適な蓄電方法は経済性を加味した評価とともに将来の電力システムの構成に大きく依存するが、供給量、供給時間、更には供給信頼性（確保発電容量）の面で優れた機能を有する水素や合成燃料などを燃料とする火力発電は、再エネが主力電源になった時代においても残余需要に対応する供給力として期待の大きな技術である。

5 欧州の動向

周知のように、欧州ではカーボンニュートラルに向けて脱炭素の動きが活発である。図9にはEU各国の石炭火力廃止に向けた動きを示す²¹⁾。ポルトガルやベルギーのようにすでに石炭火力を廃止した国も多数あり、またフランスは2024年には石炭火力を廃止する計画である。図にはないがイギリ

スも2024年には石炭火力を廃止する計画である。ドイツは、2038年に石炭火力を廃止すると宣言しており、さらにその目標を2030年に早めることを検討している。ドイツの2022年の発電量の電源別割合を図10²⁰⁾に示す。石炭、褐炭による発電は総発電量の30%であり、2023年4月に完全に停止した原子力も6%であった。ドイツは、これらの電力を再エネで担うべく、太陽光発電、風力発電などの設備容量を増強する目標である。図11にはドイツの太陽光発電、洋上風力及び陸上風力の2020年までに導入された設備容量、2024年までに計画されている設備容量、2030年までの導入目標設備容量を示す^{21,26)}。いずれの発電設備も2030年に向けて大量に導入する必要があることが一目瞭然である。Then^{21,26)}は、この目標がいかにチャレンジングな目標であるかを定量的に示した。例えば太陽光発電は1日（労働日）あたり90MWを増強し続ける必要があり、これは現在のドイツ最大のメガソーラーの50%の容量を毎日（労働日）導入することを意味していると説明している。また洋上風力発電は2か月ごとに900MWのウインドファームを、陸上風力発電は毎日7基の風車を導入するという数値であり、ドイツは非常にチャレンジングな目標に向けて取り組んでいる。これらの高い目標を達成するためには、環境規制、住民の合意などへの対応に加え、機器の製造・供給、労働力の確保などの課題が山積している^{21,26)}。

ドイツでは石炭火力を廃止するにあたり、燃料を石炭から天然ガスに変更する動きも活発である^{26,27)}。これは石炭火力発電所が電力系統に接続しているということに加え、水源、水処理設備、環境設備などが整備されていること、また労働力が確保できることなど既設発電所のメリットが活用できることが大きな要因である。天然ガス火力への改造の際には、ガスタービン発電設備を導入するが、その際、将来の水素へ

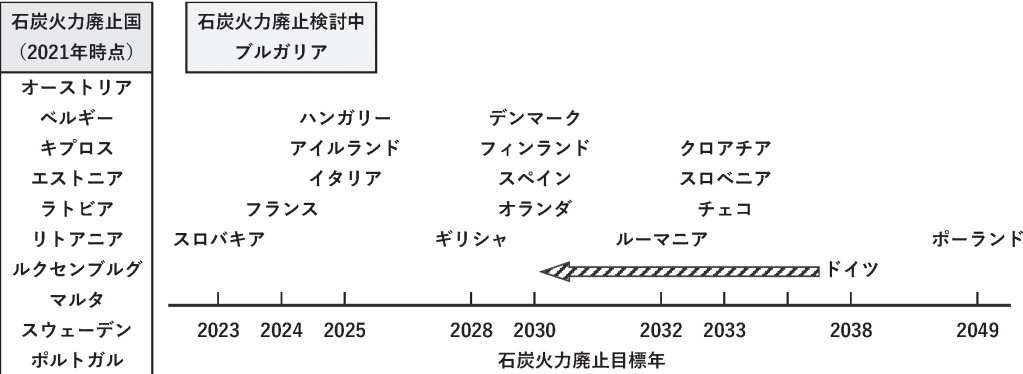


図9 EU各国の石炭火力廃止に向けた動き²¹⁾

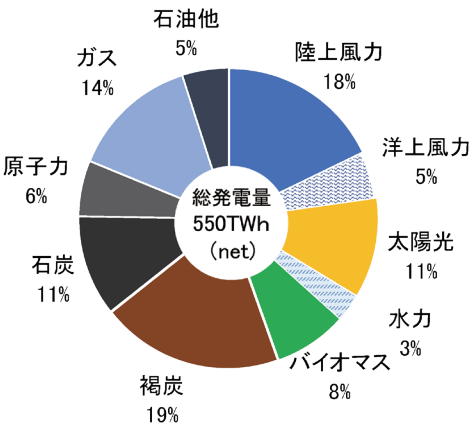


図10 ドイツの発電量の電源別割合 (2022年)²⁰⁾
(Online version in color.)

の燃料転換が可能な「水素レディ」な発電所としている。この動きに対応して、vgbe (欧州の発電事業者、エネルギー供給事業者の協会)²⁸⁾では、水素レディ発電所のガイドラインも作成し、公開されている。

欧州ではカーボンニュートラルに向けて電力だけでなく産業界が連携した取り組み、セクターカップリングも盛んである。例えば発電所で再エネ電力等を用いて水を電気分解して水素を製造する取り組みが始まっているが、その水素に加えて水素製造時に発生する酸素を製鉄所に供給する発電と製鉄が連携したプロジェクトも始動している^{26,29)}。

6 まとめ

電力についてカーボンニュートラルに向けた我が国の方針、基本計画を紹介するとともに、カーボンニュートラルに関する火力発電業界の取り組みについて紹介した。火力発電業界は2050年のカーボンニュートラル達成に向けて水素あるいはアンモニアを燃料とする発電技術の開発に精力的に取り組むとともに、本稿では紹介しなかったがバイオマス燃料、

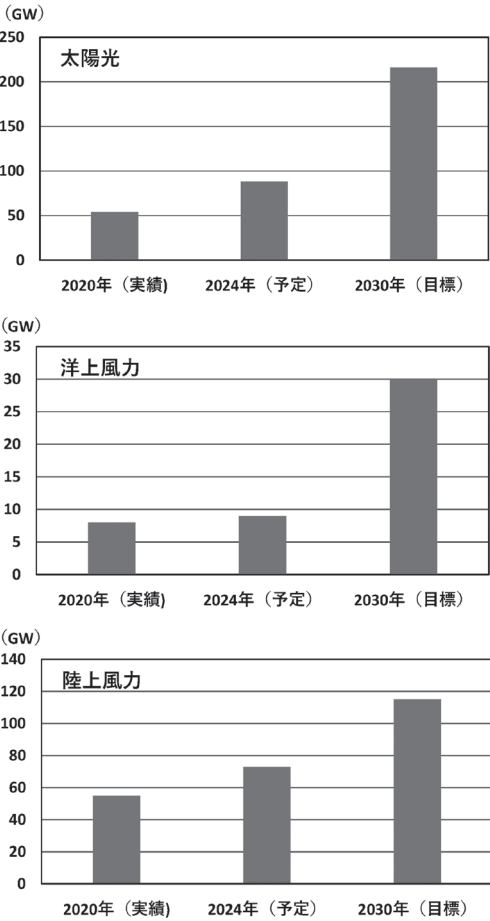


図11 太陽光発電、陸上風力、洋上風力の導入設備量と2030年までの導入目標 (ドイツ)²¹⁾

CCUSなども活用してCO₂の排出を削減させ、再エネによる電力供給を補完して安定供給を担いつつ、将来のゼロエミッションにつながる活動を展開している。2050年のカーボンニュートラルに向けては今後も様々な技術が開発され、また革新的な技術の登場も否定できない。カーボンニュートラルという目標達成に向けて、火力発電業界には弛まない努力が

一層要求されることと思う。

本稿の最後の章でドイツを中心に欧州の取組みを紹介したが、欧州ではカーボンニュートラルに向けて電力だけでなく産業界が協力して取り組む活動が活発である。日本においてもカーボンニュートラルポートのような地域的な活動もあるが、産業界が協力してカーボンニュートラルに取り組むメリットは大きく、国際的な競争力の向上にもつながる。将来を見据えて、カーボンニュートラルに向けて産業界の協力が一層強固になることを期待する。

参考文献

- 1) 第6次エネルギー基本計画, (2021年10月), https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/ (accessed 2023-8-31).
- 2) 2030年度におけるエネルギー需給の見通し, (2021年10月), <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-3.pdf>, (accessed 2023-8-31).
- 3) GX実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～, (2023年2月), https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_1.pdf, (accessed 2023-8-31).
- 4) エネルギーの使用の合理化及び非化石エネルギーへの転換等に関する法律, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=354AC0000000049>, (accessed 2023-8-31).
- 5) 電力分野のトランジション・ロードマップ, (2022年2月), https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_roadmap_electric_jpn.pdf, (accessed 2023-8-31).
- 6) グリーンイノベーション基金, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html, (accessed 2023-8-31).
- 7) グリーンイノベーション基金事業／大規模水素サプライチェーンの構築プロジェクト 2022年度 エネルギー構造転換分野WG報告資料, (2023年2月13日), https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/014_06_00.pdf, (accessed 2023-8-31).
- 8) 川上朋, 中村聡介: 火力原子力発電, 73 (2022), 375
- 9) 水素発電ブック (第3版), https://solutions.mhi.com/sites/default/files/assets/pdf/et-jp/hydrogen_power-handbook_jp.pdf, (accessed 2023-8-31).
- 10) 第29回水素・燃料電池戦略会議 水素ガスタービンへの取り組み状況, (2023年3月24日, 三菱重工株式会社), https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/029_05_00.pdf (accessed 2023-8-31).
- 11) 例えば「水素社会の実現に向けて」, <https://www.khi.co.jp/energy/hydrogen-introduction.html>, (accessed 2023-8-31).
- 12) グリーンイノベーション基金事業／燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクト 2022年度 エネルギー構造転換分野WG報告資料, (2022年12月7日), https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/012_05_00.pdf (accessed 2023-8-31).
- 13) 碧南火力発電所のアンモニア混焼実証事業における大規模混焼時期の前倒しについて, (2022年5月31日), https://www.jera.co.jp/news/information/20220531_917 (accessed 2023-8-31).
- 14) 須田俊之: 火力原子力発電, 72 (2021), 714.
- 15) 壹岐典彦: 火力原子力発電, 70 (2019), 605.
- 16) 林明典, 川上朋: 火力原子力発電, 74 (2023), 109.
- 17) 例えば第5回燃料アンモニア導入官民協議会資料, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/nenryo_anmonia/index.html, (accessed 2023-8-31).
- 18) GENESIS松島計画, <https://www.jp-gs.co.jp/recruit/project/>, (accessed 2023-8-31).
- 19) 大崎クールジェンプロジェクトの概要, <https://www.osaki-coolgen.jp/project/overview.html>, (accessed 2023-8-31).
- 20) 船橋信之: 火力原子力発電, 74 (2023), 221
- 21) O. Then: 第14回vgbe-TENPES, (火力原子力発電技術協会) 技術交流会議, (2023年5月10日).
- 22) H.-W.Schiffer, S.Ulreich and T.Zimmermann: 火力原子力発電, 73 (2022), 718
- 23) 船橋信之, 大地昭生, 田村吉章, 福田雅文, 山本正晴, 渡辺隆: 火力原子力発電, 73 (2022), 976
- 24) 松尾雄司: 火力原子力発電技術協会2020年度第1回技術セミナー, (2020年3月22日).
- 25) CO₂フリー水素ワーキング報告書, (2017年3月7日): https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20170307001_01.pdf, (accessed 2023-8-31).
- 26) 火力原子力発電技術協会国際交流部会: 火力原子力発電, 74 (2023), 451.
- 27) N.Elze: 第14回vgbe-TENPES (火力原子力発電技術協会) 技術交流会議, (2023年5月10日).
- 28) VGB Standard “Application Guideline Part 41: Power to Gas”, <https://www.vgb.org/shop/s823-41ebook.html>, (accessed 2023-8-31).
- 29) J.Reich: 第14回vgbe-TENPES (火力原子力発電技術協会) 技術交流会議, (2023年5月10日).

(2023年8月31日受付)