

2022年度 第2回エネルギー講演会

みんなで考えよう!!

明日のエネルギーと原子力



奈良林 直氏 プロフィール

東京工業大学工学部卒、同大学院修了。株式会社東芝の電力・社会システム技術開発センター主幹、北海道大学大学院教授、工学研究院エネルギー環境システム部門長、原子力規制委員会福島第一原子力発電所事故の分析検討チーム外部識者、東京工業大学先導原子力特任教授を経て、現在は同大学科学技術創成研究院ゼロカーボンエネルギー研究所特任教授、北海道大学名誉教授。工学博士。内閣府原子力安全委員会専門委員、日本原子力学会理事などを歴任。

浅野 浩志氏 プロフィール

東京大学工学部卒、同大学院修了。専門はエネルギーシステム工学。東京大学大学院教授、電力中央研究所社会経済研究所長などを経て、現在は電力中央研究所研究アドバイザー、岐阜大学高等研究院特任教授、東京工業大学ゼロカーボンエネルギー研究所特任教授、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム「ToE社会のエネルギーシステム」サブ・プログラムディレクターなどを務めている。第12代エネルギー資源学会会長などを歴任。

2022年10月27日(木)に、一般社団法人九州経済連合会と一般社団法人日本原子力学会九州支部は、エネルギー講演会を開催しました。カーボンニュートラル達成に向けて世界が協力して取り組みを進める中、原子力発電の役割や現行の電力システムの課題、カーボンニュートラル達成のためのイノベーション等について、東京工業大学科学技術創成研究院特任教授の奈良林直氏と、一般財団法人電力中央研究所研究アドバイザーの浅野浩志氏のお二人にご講演いただきました。

<開催概要>

- ◆開催日時：2022年10月27日(木)13:30~17:00
- ◆開催場所：電気ビル共創館カンファレンスA大会議室
- ◆参加者：112名
- ◆主催：一般社団法人九州経済連合会、
一般社団法人日本原子力学会九州支部
- ◆後援：福岡県教育委員会、福岡市教育委員会、
福岡経済同友会エネルギー・環境委員会

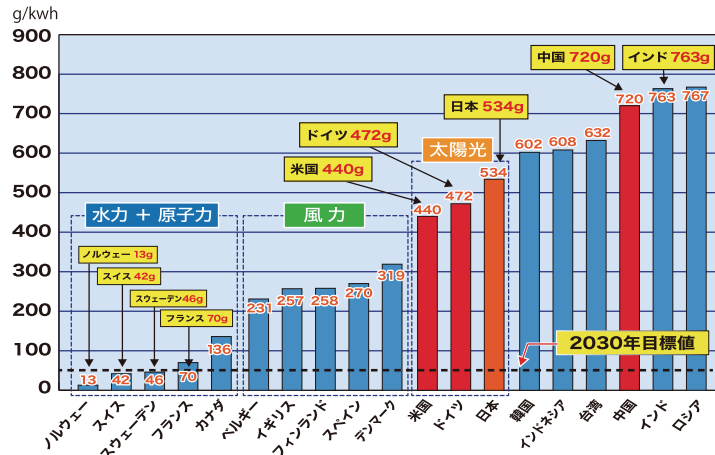
カーボンニュートラルにおける 原子力の役割と次世代炉への期待

奈良林 直氏

日本の産業の凋落は世界一高い電気料金が一因

◇日本が輸入している化石燃料がどの分野で使われているのかその内訳を見ると、発電事業に使用されているのは僅か26%。残りの74%は運輸部門や一般家庭、製紙・製鉄などの様々な産業用のエネルギーとして使用されています。そうした中で2050年にカーボンニュートラルを達成するためには、電化を推進し、日本全体で使用しているエネルギーを脱炭素電源に替えなければなりません。

世界のCO₂排出係数(発電+熱供給) ランキング(2018年)



※出典:世界の電力発電量国別ランキング・推移(BP)から奈良林氏が各国の年間発電量で除して作成

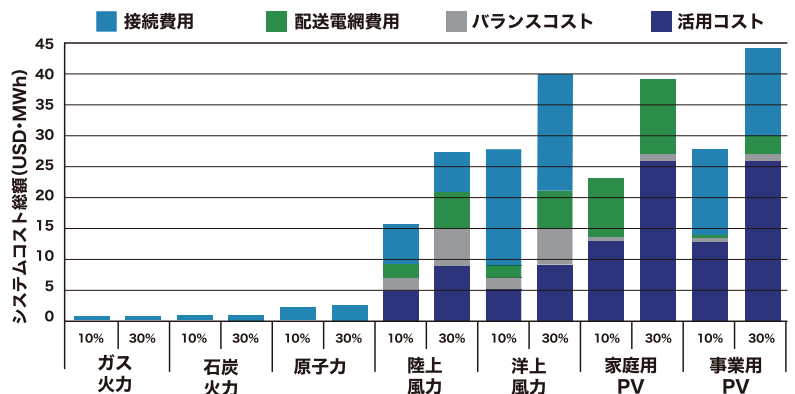
のCO₂削減効果が大きく、2030年以内に1kWhあたりのCO₂排出量を50gに抑えるという目標を達成しています。この結果からも、日本が2050年までにカーボンニュートラルを達成するためには再エネ等の特定の電源に頼らない、各電源の特徴を生かしたエネルギー供給システムの構築が必要だということが明らかです。

◇一例として、再エネ先進国と言われていたドイツですが、電源構成(2019年実績)中、再エネ電源が約40%あるものの、火力が約44%と、現状では石炭や天然ガス火力に頼らざるを得ない状況になっています。欧州では天候不順のため風力発電の出力が低下したことに加え、ロシアのウクライナ侵攻による天然ガスの供給不足などにより、ドイツは更に石炭火力に頼らざるを得ない状況になっています。このため、2023~24年のCO₂排出量は日本より多くなると予想されます。

◇日本では太陽光発電が先行していますが、その設備利用率は13%程度です。仮に国中の電気を太陽光発電で100%賄おうとすると電力需要の約7.7倍の発電設備が必要となり、かつ、電力需要を超えた余剰電力はバッテリーに蓄えなければなりません。これらの設備を構築する費用は1,000兆円程度必要で、しかも、天候に左右されるため出力が安定しません。天候によって急激に発電量が下がった場合の停電リスクも

◇まずは再生可能エネルギー(再エネ)について考えていくと、世界の太陽光発電規模1位は中国で254GW(1GW=100万kW)、出力100万kWの原子力発電所に換算すると254基分となります。そして2位が74GWのアメリカ、3位が67GWの日本と続きます。更に、1km²あたりの太陽光パネル密度を見ると日本は177kW/km²で中国、アメリカを抜いて1位。一方、1kWhあたりに排出される二酸化炭素量(CO₂)で比較すると、太陽光発電が多い国々では排出量が多く、ベルギーやイギリスといった風力発電を活用している国の方が少ない数値となっています。さらにノルウェーやスイスなどのように水力発電と原子力発電を組み合わせた国

変動する太陽光・風力のシステムコストは高い

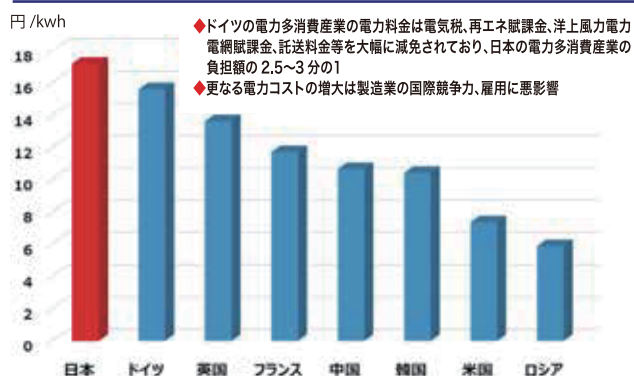


※出典:OECD/NEA Full Cost of Electricity Provision 2018

視野に入れると、風力発電や太陽光発電だけで電気を安定的に供給することは困難であると言わざるを得ません。また、仮に、これら変動性再エネの不確実性に備えるために火力発電所を使用するのであれば、その分の人員や設備維持などのコストが必要となるため、結果、原子力や火力発電の発電原価の方が遥かに安価であることが分かりました。

◇発電原価を含めた電気料金は経済活動に大きな影響を与えます。主要国の産業用電力料金を比較すると、日本は主要国の中では一番高く、次いでドイツとなり、逆に、アメリカ、ロシアは安い国となります。このため、例えば、日本の製鉄業を見ますと、以前は「鉄は国家なり」で、世界一の生産量でしたが、今では中国に押され、電気代が安い国で生産しないと製品としての競争力を確保できなくなっています。電気代が高いということは全ての産業に影響を与え、国内産業を衰退させます。結果、GDPも低下し、今の日本は一人あたりのGDPにおいて韓国にも抜かれるような状態です。成長力ある産業を輩出し、世界から投資が集まる国、元気な日本となるためには、低廉で高品質な電気を供給することがとても大切なのです。これらの点を踏まえると、今後、原子力発電の活用は避けては通れない選択だと考えています。

産業用電力料金の国際比較(2016年)



※出典：エネルギー白書2020

安全対策を前提とした原子力発電所の再稼働、新增設、革新軽水炉や小型モジュール炉(SMR)などの次世代炉の開発

◇再エネが増えた国では大停電が起きています。スウェーデンは世界で初めて国民投票により脱原発を決め、国を挙げて様々な取り組みを行いました。暴風雪により大停電が発生し、最終的に政府は正式に脱原発政策を破棄しました。アメリカではカリフォルニアで熱波発生時の電力不足による計画停電がありましたし、テキサスでは寒波で風力発電が凍結、稼働しなくなり大停電が発生。ガレージの中で自動車のエンジンをかけて暖をとっていた方々が一酸化炭素中毒で60人ほど亡くなったという悲劇が発生しました。日本も例外ではなく、殆どの電力会社が発電設備利用率99%と大停電寸前というケースが毎年起きています。しかも、太陽光発電の出力低下分をLNG火力発電で補うため、LNGを高額なスポット価格で調達することになり、電力会社は電気を売れば売れば赤字が増えてしまうという状況に陥っています。このような状況ですので、世界中で原子力活用への気運が高まっていますが、一方で、福島第一原子力発電所で過酷事故が発生したことから原子力発電所の安全対策についての関心も高まっています。日本では岸田政権が再稼働促進、運転期間延長など電力安定供給に向けた原子力活用の方針を掲げましたが、その安全性を疑問視する根強い声があります。

◇日本の原子力発電所においては、新規制基準に基づき安全対策を行い合格することが大前提であり、その方策としては防潮堤や水密扉の設置はもちろん、万一事故が起きた時に放出される有機ヨウ素などの放射性物質を吸着するフィルタベントなどの設置が必要です。こうした様々な安全対策を行うことで、事故リスクが1億分の1以下に大きく減少します。これは仮に、事故が発生しても人々に影響を与えるリスクが大きく減少するということです。

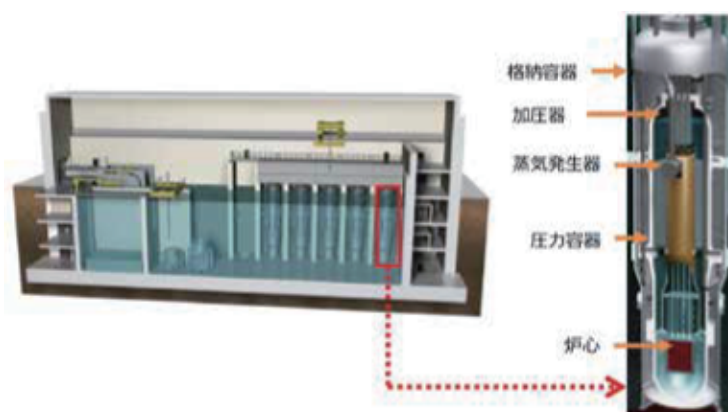
◇日本の再稼働状況を見ると、九州電力で4基、関西電力で5基、四国電力で1基と西日本では順調に再稼働が進んでいますが、全国的にはまだまだ再稼働の目処が立たない原子力発電所が数多くある状況です。関東地方や東北地方で再稼働できなければ、電力の需給逼迫が現実味を帯びてきます。東日本大震災の時、東北地方などのほとんどの火力発電所は津波で運転できなくなった中、柏崎刈羽原子力発電所から首都圏へと電気が送られていました。このおかげで、首都圏は大停電せず、計画停電のみで乗り切ることができたのです。電源を一箇所に集中するのではなく、送電線網を繋いで電気が必要なところに供給できる体制を構築することが重要になります。

◇発電時にCO₂を排出しない原子力発電については革新軽水炉やSMRの開発も注目されています。カーボンニュートラル達成を目指す国々の中には将来にわたって原子力発電を利用する国が多数あり、新增設への機運が高まっています。中でも中国は100万kW級の原子炉を自主開発し、海外輸出も決定しています。このままでは日本は太陽光や風力発電だけではなく原子力発電でも中国に後れを取ることが危惧されます。

◇そのような中、北海道電力、関西電力、四国電力、九州電力と三菱重工がSRZ-1200(出力120万kW級)という加圧水型革新軽水炉の共同開発を発表しました。この原子炉は今までの安全対策を集大成し、更に万一に備え、コアキャッチャー(溶融燃料の受け皿)を装備、事故時の放射性物質の放出防止を強化した仕様となっています。また沸騰水型原子炉については、日立GE社が欧州の安全基準を満たしたパッシブ(静的)安全系を装備した改良型沸騰水型革新軽水炉UK-ABWRを開発し、輸出プラントの候補になっています。

◇UAEのアブダビで開催された先進原子炉国際会議(ICAPP2021)で日立GE社のSMRとしてBWRX-300(出力30万kW)が発表されました。カナダを中心に10基が受注段階にあり、建設開始に向けて安全審査が進んでいます。NuScale社では最大で12基繋ぐと92万kW発電できるSMRの開発が進んでいます。原子炉本体は、格納容器を含めプールに並べて配置されており、万一、原子炉で事故が発生した場合、原子炉の熱が格納容器内の水や蒸気を通じて外部のプールに伝わることで、自らを冷却して安全な状態で停止することができます。このことがSMRの設計思想の根幹です。これら以外にも、世界では70~80のアイデアや実際の設計が進んでおり、例えば、高級車で有名なロールスロイスは原子力潜水艦やジェットエンジンも手掛けていますが、SMRの開発を推進していますし、フランスではNUWARDというSMRを建設中です。ロシアではロスアトム社がSMRを船に積んで実際に発電し、エジプトへの輸出も進んでいましたが、ウクライナ侵略により輸出事業が影響を受けるでしょう。

NuScale SMR概念図



※出典: 第24回原子力小委員会資料

◇このSMRができる前にウェスティングハウス・エレクトリック・コーポレーション(WH社)が開発したAP1000という加圧水型原子炉がありますが、これが非常に良くできており、価格も安いという特徴があります。このAP1000では、鋼鉄製の容器と原子炉建屋のコンクリートの間に空気を吸い込み、格納容器を冷やして煙突から温められた空気を出すという自然冷却システムを採用しています。SMRも同様の構造を持っており、冷却をプール(水)で行うか、空気で行うかの違いはありますが、冷却系が簡素化されています。従来の加圧水型原子炉には安全系のシステムが多数装備されていますが、SMRでは非常にシンプルなシステムが採用されています。また私自身2000年代に東芝で30万kWのSMRを開発しましたが、商品として使われることがなかったため、学生の勉強のために使わせてもらいました。このSMRですが、東京工業大学で更に改良を加えて、インターナルポンプを使い、いざという時は強制循環で出力を80万kWまで増やせるようにしています。天候不順などで再エネの電気が足りなくなったとしても、このような新しいSMRを活用することができれば変動を抑え込むことも可能になるでしょう。

◇私は原子力発電所の新增設やリプレイスに関して、20基程度は可能だと考えています。そのためには国会での法整備に加え、様々な安全対策に取り組むとともに、その取り組みについて立地地域の住民の方々を中心に地道にわかりやすく説明することで、原子力の必要性和安全性についてご理解いただくことが大切です。そのような活動が原子力の再稼働や新增設に繋がると思います。

2 050年カーボンニュートラル達成に向けて

◇今後、日本では再エネと原子力が協力することで、電力の安定供給が実現できるのではないかと考えています。単に電気を供給するだけではなく、余剰電力で水素を製造し、その水素からアンモニアを製造する、あるいはメタンやジメチルエーテルを製造して自動車の燃料に転用することもできるでしょう。原子力発電で発電した電気を多くの産業で必要な燃料の製造等に活用するという広い視点が必要です。このように2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、様々な知恵を出し合って取り組むことが必要ですし、若い学生たちが未来の原子炉開発やカーボンニュートラルに向けた燃料開発に関する研究に取り組み、新しい技術を産業界に導入していけば、日本の未来は決して暗いものではなく、もう一度成長軌道に復帰できると考えています。

◇他方で高レベル放射線廃棄物の問題もありますが、高速炉で放射性廃棄物を燃焼させることで、無害化や半減期が短い物質に変換することができることから、高速炉に関しても諦めるのではなく、核のごみ焼却炉として活用するという選択ができます。そうすればウラン燃料のリサイクルも可能になるので、人類2000年程度のエネルギーは供給できるはずで、こういった取り組みを世界中で協力し合いながら、来るべき2050年のカーボンニュートラルを達成することができるよう頑張っていかなければなりません。

◇地球環境危機の時代にあつては原子力発電を止めると人類や生物の存続に関わる将来的なリスクに直面します。再エネだけでは決して全てのエネルギーは賄えません。日本やドイツは再エネと火力発電を組み合わせることで対応しようとしていますが、この方法だとCO₂排出量を削減できません。そのため、より効率的なエネルギーの供給方法を検討しなければなりません。再エネだけで電気を賄えるというのは錯覚です。太陽光発電の設備利用率が13%程度しかないという事実、温暖な日本には曇り、雨、雪の日もあり、太陽光発電が機能しない日の対策を考える必要があります。このようなことを踏まえた上で私が主張したいのは、カーボンニュートラル達成のためには、再エネも必要ですが、再エネのみに軸足を置くのではなく、原子力とともに活用して、再エネが発電できない時でも電気を安定的に供給できるような体制を構築することが重要だということです。そして2050年のカーボンニュートラルを達成しなければなりません。



電力システムの安定供給の課題と カーボンニュートラルに向けたイノベーション 浅野 浩志氏

エネルギー危機が発生した背景

◇2050年にCO₂を含むGHG排出ネットゼロを目指すためには、それを達成する具体的な技術やそのコスト削減効果などが重要で、今後10年間のエネルギーイノベーションが大切です。であるにもかかわらず、殆ど議論がされていません。もちろん最新の技術を使えばCO₂削減は可能ですが、経済性のないものでは持続できません。大切なことは削減費用を考慮したCO₂削減の技術オプションを開発し、エネルギー効率を最大化できるエネルギーポートフォリオを構築することです。そして、エネルギーの転換部門

と需要部門を組み合わせ、需給一体で最適なCO₂排出量削減を目指すべきです。例えば、電力部門と電化を進める交通部門などとのセクターカップリングです。具体的には、EVの普及とEVの充放電制御を行うことで電力やエネルギー貯蔵コストが大幅に削減できるというようなことが代表例として挙げられます。つまり、「業界を横断して様々な事に取り組まないとCO₂を安価に削減できない」ということです。これは単に電力コストを下げるだけではなく、付加価値や利便性の最大化とCO₂削減を併せ持った超スマート社会「ソサエティ5.0」実現に向けたエネルギーマネジメントということになります。

◇日本の場合、2019年度のエネルギーフローでは、原子力と再エネは1次エネルギーの10数%に留まり、その他は化石燃料。そのうち電力が使用するの約4割、残りは非電力部門で使用する熱需要や燃料です。そのため、この非電力部門はできるだけ電化を進め、電化が難しい高温の熱を必要とするプロセスなどは水素やアンモニアなど脱炭素エネルギーを使用する方向で検討するといった2本立てで進めるしかないと思います。

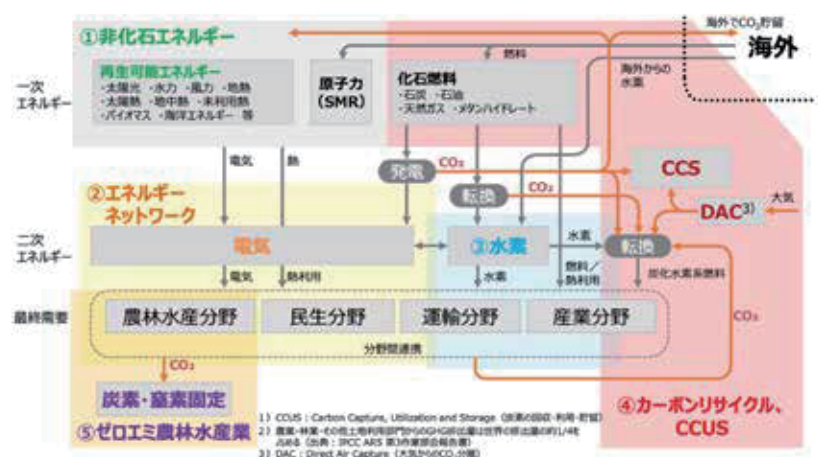
◇日本ではエネルギー自給率が低い中、エネルギー危機、電力危機が生じています。これは短期的には燃料の確保と価格高騰の問題ですが、その背景には脱化石燃料、カーボンニュートラル実現に向けた対策の影響があります。時代の状況変化に応じて、石油主体からLNG、原子力、再エネを加えてベストミックスを適応させていくという対策の方向性は正しいのですが、その実施過程において、エネルギー安定供給を犠牲にして進めたところに問題があると考えます。脱炭素を考えた場合、日本では再エネ、とりわけ太陽光や風力発電等の変動電源に投資します。このため、電力会社で制御できない電源が主力化し、供給側ではなく需要側で需給バランスを調整するしかなく、長期的な需給バランスを確保できないということになります。一般的に電源は可変費が安いものから高いものまであり、特に需要が増えると限界費用が増える供給特性を持っています。火力発電所については、現時点で投資回収が終わっていない発電所が多数ある中で、限界費用ベースでの市場への供給が求められるような状況です。そのような中、電気の販売単価より発電単価のほうが高いという逆転現象が起きています。電力会社はタイムリーに電気料金を上げることができないので、小売部門は赤字状態です。加えて、再エネを急激に増やし過ぎてしまったので、市場から火力発電が追い出されてしまい、いざという時に調整電源として動かせる火力発電がなくなってしまうという状況でもあります。この調整電源確保の問題は世界中で起きており、しかも、この問題は電源投資の固定費回収の予見性を高めない限り続くと考えています。

エネルギー危機を乗り越えて2050年ネットゼロを達成するイノベーションとは

◇それでは、このような問題を抱えている中で、2050年ネットゼロを達成するためにはどのようなソリューションがあるのかを考察したいと思います。ネットゼロ達成のためには、消費者の行動変容や省エネ、再エネのほか、火力発電等からCO₂を分離・回収するCCSや水素、アンモニアの混焼、余剰再エネでの水素製造などがあると思います。その中でも安いオプションから選択し、高いオプションについてはコストを下げた後に活用することが「エネルギーイノベーション」です。

◇例えば、CO₂を分離・回収するCCSについては現状CO₂回収量1tあたり数万円のコストが必要ですが、これも数千円までに抑えないと導入できません。しかも、ソリューション単体のコストだけではなく、カーボンプライスの動向も考慮する必要があります。

CNイノベーションの全体像



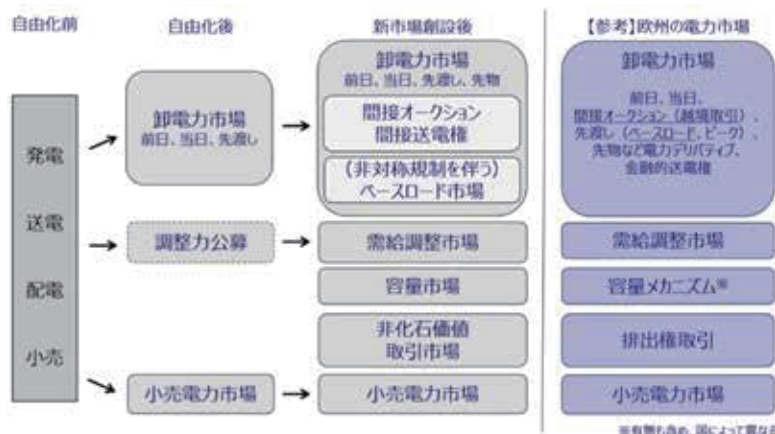
ます。カーボンプライスはCO₂排出に対する規制が厳しくなるほど高騰します。炭素税やキャップアンドトレードについては産業界の反対で実現していませんが、東京証券取引所では試験的にカーボンクレジットの取引が始まりました。

◇日本では、化石燃料の利用を減らしゼロエミッション電源の割合を増やすこと、化石燃料を使うのであればCCSの併用や脱炭素燃料である水素やアンモニアの混焼比率を上げるということなどを目指しています。一方で、CO₂を有用な元素としてリサイクルする(CCUS)という考えもあります。更に、DAC(Direct Air Capture)という、空気中のCO₂を直接回収するという技術が開発されていますが、これは現時点で現実的なソリューションではありません。他にも、エネルギーネットワーク(系統)を再編した上で、活用しきれない再エネ由来の電気で水素を製造するようなPower-to-Xというエネルギー転換技術などの取り組みを通してエネルギー指数全体を最適化しないとネットゼロは実現できません。また、電気の使用量を計測するスマートメーターなどが普及し、それらのデジタルデータを蓄積することで、エネルギーの需給予測やリアルタイム制御の精度向上が期待できます。

重要なエネルギー・環境政策

◇電力自由化政策は1990年代から始まり、2020年にほぼ完成しました。その動きの中で、2000年ごろから小売の自由化が始まり、2005年にはkWhを対象にした卸売市場がスタートしました。2016年に発電、流通、小売とそれぞれのライセンスに分けられました。自由化以前は電力会社単位で需給バランスをコントロールしていましたが、2021年に需給調整市場が開設され、全国一体的に調整力を取引できるようになりました。2022年に入ってから配電ライセンスが新設され、ネットワーク会社が持っている配電系統の一部を切り出して、譲渡や貸借ができるようになりました。

電力市場は欧州型を採用



◇しかしながら、発電コストと流通コストを併せたトータルコストの最小化の観点に立つと、このように分離すると情報共有や総合的な計画立案ができないというマイナス面があります。この制度の導入評価は難しいところです。これに加えて、もう一つ、制度面での最大の問題は2012年に固定価格買取制度(FIT)という補助金制度を入れてしまったことにあります。これは再エネの発電電力量に対して補助金を支給するという制度で、毎年3兆円もの国民負担が増えています。その影響は経済面だけではなく、安定供給の面においても顕在化しています。例えば九州電力管内の再エネ、主に太陽光の1日平均出力を見ると、多い時で300万kW、少ない時で50万kWと出力変動が大きく、火力などの運転予備力が欠かせません。また、予測誤差も大きく、これらを前提とした系統運用が必要です。長期的には偏在する風力発電などのため広域ネットワークとローカルグリッドの再構築の必要性が生じることもあります。



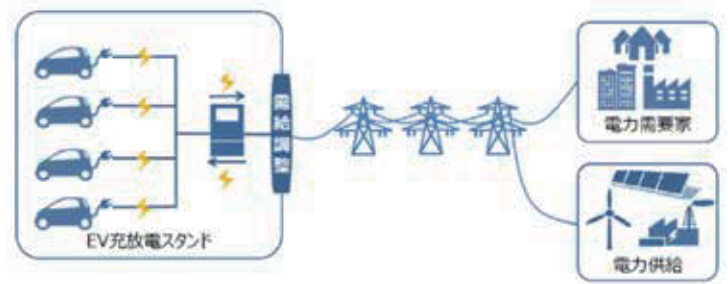
◇再エネ比率上昇に伴い、太陽が昇るスピードで火力を停止し、太陽が沈むスピードで火力を立ち上げるなどの火力運用の煩雑化や気象予測

が外れた場合の対応など系統運用が困難になっています。長期的な視点では出力抑制回避の必要があり、短期的な視点に立てば、周波数調整のリソース確保の必要があると言えます。

◇そのような中、例えば、EVが普及したらどのような影響が生じるかについて実証試験が行われました。2030年にEV規模が100万台に増えたら、どれだけの出力抑制が回避できるかについてのシミュレーションを実施しま

した。結論だけ言いますと、随時、九州電力の系統からの充電・給電可能な状態であれば最大130万kWの出力抑制を回避できるということになり、EVの普及と充電サービス会社の整備が有効であることが分かりました。

V2G(Vehicle to Grid)事業(イメージ)



※出典:浅野氏資料より作成

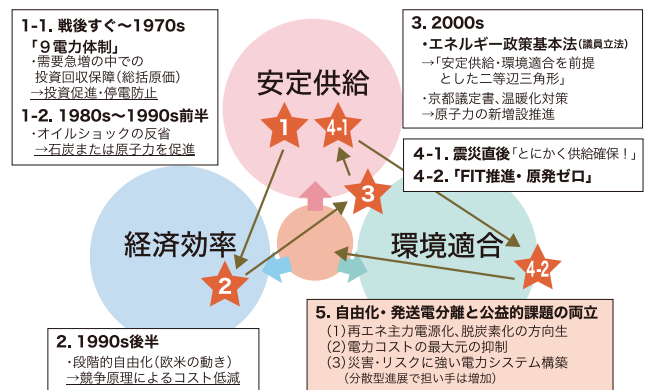
エネルギーの安定供給と経済効率性を前提としたカーボンニュートラルを

◇これからのカーボンニュートラル実現に向けた政策は安定供給、経済効率性及び環境保全の3点のバランスをとりながら推進することが重要です。そして大きな役割を担うのが気候変動政策、原子力政策、イノベーション政策、システム開発になります。2050年カーボンニュートラル達成に向け脱化石燃料、脱ロシアを志向する動きが見られますが、これはエネルギー抗争を増加させ、またエネルギー安全保障上の有効性も不確実です。持続可能な形で安い再エネを導入することは正しいのですが、一方で、火力発電等に対し限界費用ベースで市場への給電を求めることには無理があると思います。脱炭素化に偏らず、社会の変化に応じ、エネルギーを安定的に、経済的に、供給ができるのかを考えないといけません。

◇電力システム改革等、エネルギー部門や電力部門の改革は最終的に社会的な付加価値の最大化に繋がらなければなりません。住民の安全性やレジリエンスの向上、利便性の確保などを考慮し、環境政策やエネルギー政策を再検討する必要があります。この経済と環境を両立させるためにグリーン成長戦略が策定され、電力マネジメントの部分において建物の大幅な省エネルギー化を実現した上で、太陽光発電を設置することによりエネルギー収支をゼロにし、同時に分散型リソースとして太陽光発電を需給一体でコントロールするということが検討されています。

◇日本はエネルギー自給率が10%程度という国なので、まずは安定供給、エネルギーセキュリティの確保が圧倒的に重要です。その次に経済効率化があり、二つを満たした上で長期的にカーボンニュートラルを実現しなければなりません。原子力や再エネを活用することでCO₂排出量とコストの削減ができ、エネルギー分野における自立に繋がります。それらを同時に実現していくことが私たちに求められているミッションです。

変化するエネルギー政策の3Eの重点



※出典:浅野氏資料より作成

▶ これまでに開催したエネルギー講演会の講演録を九州エネルギー問題懇話会ホームページに掲載しています。ぜひご覧ください。
九エネ懇
検索