

みんなで考えよう!! 明日のエネルギーと原子力



秋元 圭吾氏 プロフィール

1999年、横浜国立大学大学院工学研究科博士課程を修了し、財団法人地球環境産業技術研究機構に入所。2012年よりシステム研究グループリーダー・主席研究員を務める。2010～2014年度には東京大学大学院総合文化研究科客員教授を、またIPCC第5次および第6次評価報告書代表執筆、経済産業省総合資源エネルギー調査会基本政策分科会委員、環境省中央環境審議会地球環境部会気候変動影響評価等小委員会委員などを歴任。

小宮山 涼一氏 プロフィール

2003年、東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。日本エネルギー経済研究所主任研究員、カリフォルニア大学バークレー校客員研究員等を経て、現在、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻准教授。専門はエネルギーシステムの数値シミュレーション分析、エネルギー・環境政策に関する分析。日本機械学会原子力・再生可能エネルギー調和型エネルギーシステム研究会主査、経済産業省総合資源エネルギー調査会臨時委員などを務める。

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、2019年10月25日(金)にエネルギー講演会を開催しました。世界全体で地球温暖化問題への対策が進められている中、パリ協定の目標達成に向けた日本の長期戦略や各国の取組み、また低炭素電源として原子力発電に求められる役割や要件などについて、公益財団法人地球環境産業技術研究機構の秋元圭吾氏と、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻の小宮山涼一氏の両名にご説明いただきました。具体的なデータや事例、提言などを交えた解説に、約100名の参加者が熱心に耳を傾けました。

< 開催概要 >

- ◆ 開催日時：2019年10月25日(金)13:30～17:00
- ◆ 開催場所：電気ビル共創館カンファレンスA
- ◆ 参加者：108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

パリ協定の目標達成に向けた日本の長期戦略 秋元 圭吾氏

パリ協定後の世界と日本のエネルギー・温暖化対応戦略の動向

◇1997年に京都議定書が採択され、2030年に向けた温室効果ガス(GHG)の削減目標が定められましたが、基本的には先進国だけに削減義務が課されたため、世界のCO₂排出量を抑制することはできませんでした。そのため新しい枠組みとして2015年にパリ協定が合意されました。これは世界中のほぼすべての国が参加するという点では「歴史的合意」と言えます。今回の協定では自主的に削減目標と達成方法を定め、その実施状況を報告してレビューを受けることになっていますが、同時に地球の平均気温の上昇を産業革命以前と比べ2°C未満に十分抑制するという長期目標も定められました。更には1.5°Cまで抑える努力を追求するとされています。既に平均気温は1°C上昇しており、2°C目標を達成するためには今世紀後半、1.5°C目標にいたっては2050年には温室効果ガスの排出を正味ゼロにしなければならず、非常に厳しい目標となっています。

◇日本はパリ協定の目標達成に向けて、2019年6月に「長期成長戦略」を策定しました。最終到達点としての「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指しています。しかしながらイノベーションなくしてこの目標を達成するのは難しく、ビジネス主導の非連続なイノベーションを通じた環境と成長の好循環を実現し、気候変動問題の解決だけではなく、経済を含めた持続可能な発展(SDGs)に向けた、より高度な目標を達成していくためには、どのようにしてイノベーションを実現していくかが重要な課題です。また具体的な目標として、主要先進国は一様に2050年までの温室効果ガス80%削減を掲げていますが、2019年9月の国連気候行動サミットでは、66カ国・地域が2050年までの排出ゼロを宣言するなど、削減の動きは加速しています。

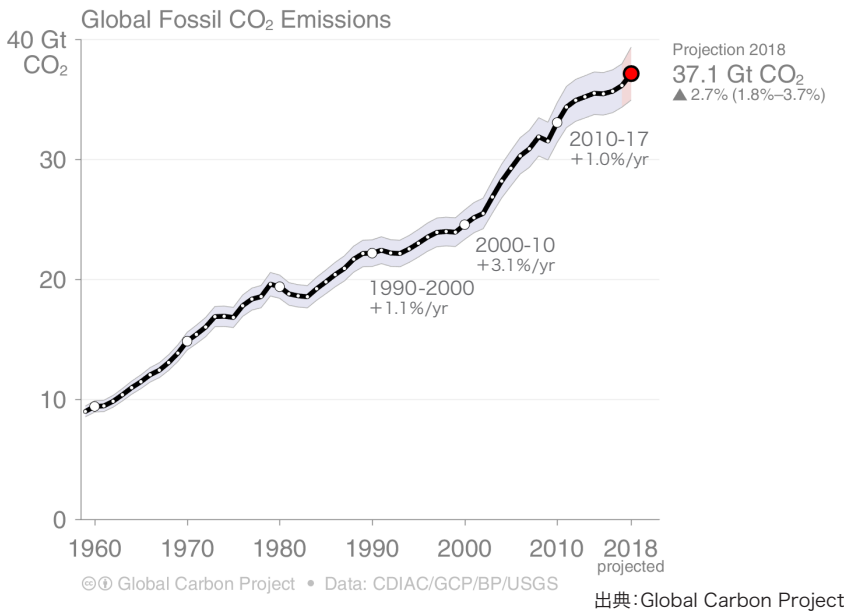
◇そうした世界全体で気候変動問題に対し強い動きがある一方、国際政治には不安定さがあります。代表的なのが米国のトランプ政権です。産業・経済・雇用にも悪影響を与え他国を有利にするものとして、2019年11月にパリ協定からの離脱を正式に通告しました。また英国は温暖化対策に積極的でしたが、ブレグジット(EU離脱)で揺れており、製造業の雇用問題とも深く関係しているため、今後も引き続き取り組みが進むのかは不透明です。この他にも2019年1月に誕生したブラジル新政権もパリ協定には否定的だと言われており、世界が一枚岩で対応することは難しい局面にあります。

ただし世界で最もCO₂排出量を削減してきたのは米国であることも事実です。イノベーションにより、シェールガス開発費用が抑えられ、価格が安くなったことから経済自律的に石炭からガスにシフトしたことが、CO₂排出量削減に大きく繋がりました。またIT産業などが発展し、製造業が中国などに移転したことで、見かけ上CO₂排出量が減っているという側面もあります。地球規模でCO₂排出量を削減していくためには、世界全体が協調していかなければ効果はなかなか上がりません。今後どのように協調を図っていくかが課題であり、また協調ができない可能性も認識しながら対策を考えていかなければなりません。

地球温暖化問題及びCO₂排出の現状

◇世界の年平均気温は、年によって上下はあるものの、全体として上がり続けています。海水温の上昇に伴い、海水が蒸発することで大気中の水蒸気が増加し、日本各地で豪雨や大型台風が多発し被害も出ています。これが全て人為的なCO₂排出によるものとは今の科学では断言できませんが、欧州など海外でも猛暑が発生しており、日本だけではなく世界中で影響被害リスクが高まっています。

◆世界のCO₂排出量の推移



世界のCO₂排出量は、実は京都議定書採択後の2000年あたりから急速に伸びています。これは中国を中心とした途上国の発展が影響したもので、インフラ整備やエネルギー消費の増加によるものだと考えられます。リーマンショック後の経済危機によって世界のCO₂排出量も一時期減りましたが、目指すのは経済発展をしながらCO₂排出量を削減することであり、これは必ずしも望ましい形ではありません。再生可能エネルギー（以下再エネ）が増えてCO₂削減に貢献しているものの、世界全体で見ると

とそれほど大きな効果は出ていません。今後は大国であるインドのインフラ整備が控えており、更なるCO₂排出量増加が懸念されています。

2 030年の低炭素化、2050年の脱炭素化に向けて

◇2030年の温室効果ガス削減目標について、2013年を基準として各国の状況を比べてみると、日本が26%減に対し米国が18～21%減、EUが24%減で、日本が最も厳しい目標設定になっています。中国は削減目標を原単位としていますが、経済成長率を織り込むと実は2倍ほど増加する見込みです。次に費用の面から見ると、各国の目標に対するCO₂限界削減費用※はスイスが非常に高い数値になり、日本、EUと続きます。一方、中国やウクライナ、インドの限界削減費用はゼロとなっており、これは追加で対策を取らなくても、このままで目標を達成できることを意味しています。これだけ限界削減費用が違ってくると、国際競争力を歪めることにも繋がり、先進国から途上国への製造業等の国際移転が進んでくるため、結局、世界全体ではCO₂を減らせない可能性があります。

日本の現状を見ると、FIT(固定価格買取制度)導入による再エネ拡大などにより、エネルギー自給率やゼロエミッション電源の比率は上がってきているものの、目標からするとまだ相当に低い状況です。一方で再エネ賦課金などの負担は増大しており、今後いかに負担を抑えながらCO₂を減らしていくかが大きな課題になっています。

※CO₂限界削減費用:温室効果ガスの排出量を追加的に1t削減するために必要な費用

◇2°C目標を達成するためには、現在せいぜい数十ドル程度のCO₂限界削減費用が2050年には200～1000ドルほどにまで高騰するという推計があります。これは途上国を含めた全ての国がこれだ



け高額な対策を取らなければ2°C目標は達成できず、思いもつかないような技術イノベーションがなければ実現は不可能です。CO₂累積排出量と気温上昇には強い相関関係があり、気温を安定化させるためには脱炭素化(CO₂排出量ゼロ)は避けられません。

そのためには一定規模の原子力の利用等も進めていかなければならないと考えていますが、現状では厳しく、そうした中で水素を中心とした蓄エネルギー技術や人工光合成などのCO₂固定・原料化技術などのイノベーションに期待が高まっています。

◆エネルギー・環境イノベーション戦略での検討例



V. システム基盤技術

あらゆる分野の技術開発に貢献する革新的な基盤材料・デバイス等の新技術

【具体例(要検討・要精査)】

- 様々な厳しい環境下での技術・製品の状態をリアルタイムに把握し常に最適化を可能とするIoT技術の適用、そのために必要な多様環境下(高温、高圧、高温、腐食環境等)で耐性のあるセンサーの開発
- 再生可能エネルギーの電力変換に不可欠なタービンやパワコンの効率を大幅に向上する超軽量材料、モニタリング技術、パワエレなどのデバイス等
- 材料開発やシステム最適化を図るための人工知能(AI)、ビッグデータ、IoTの積極的活用

出典:総合科学技術会議

A I・IoTによるエネルギー需要の変化と脱炭素化への期待

◇ICTなどの情報通信技術が進展する中で、将来的にエネルギー需要が下がるという予測があります。AIやIoTがさらに進化しモノやサービスが所有から利用へと変わること、シェアリングエコノミーやサーキュラーエコノミーが誘発され、結果的にエネルギー需要を減らし、費用を抑えながらCO₂排出量削減へと繋げられる可能性があります。例えば、これまで複数の家電製品を使い分けていたものがスマートフォン1台で代替できるようになったり、自動車の分野でも完全自動運転車の実現すれば、自動車自体を所有する必要性が小さくなり、カーシェアリングが進みます。生産台数が減り、材料も含めて生産におけるエネルギーが大幅に縮小します。さらにシェアリングで稼働率が高まれば、これまで高額であった電気自動車の導入が進み、低炭素電源の拡大と合せてCO₂排出量の削減が波及的に進んでいきます。

◇また世界の温室効果ガス排出量の3~4割は食料由来によるものと言われています。現状で食料の3割は廃棄されており、情報通信技術などによりそうした無駄を省くことができればバリューチェーンの簡素化に繋がり、エネルギーの消費は大きく抑えられます。エネルギーの無駄の多くは最終需要に近いところで発生しており、必要ではない照明や空調の制御など、様々な点において情報通信技術の活躍が期待できます。情報通信技術の進展によって様々なイノベーションが誘発され、経済合理的・自律的に新たな技術が選択されていけば、社会変化をもたらす、SDGsの同時達成にも好影響を与えるはずで

持 続可能な発展と調和した気候変動対策へ

◇気候変動問題の解決、さらにはSDGsの実現というより高位の目標を達成するための万能な発電方法はなく、3E(安定供給、経済性、環境)+S(安全性)の総合的なバランスを図り、それぞれの特徴を活かしながら長期的に世界のCO₂排出量削減に貢献していく方法を考えなければなりません。そのためには様々なりリスクがあり、例えば原子力については、東日本大震災時の事故の映像が鮮明に記憶に残り、その一点にリスクの目が集中します。しかし知らない間にエネルギー安全保障上のリスクが高まったり、エネルギーコストが上昇すれば経済リスクが高まったりするため、全体を俯瞰してリスクを最小化していく必要があります。

◇一部の国ではCO₂排出量が減少し、一見成功しているように見えていても、実際には産業の国際移転によるところが大きく、全体としてCO₂も世界を移転しているだけです。地球温暖化による影響被害のリスクは増大し切迫した状況にあるものの、大幅な削減のための費用は膨大であり、対策を一気に進めてしまえば経済リスクを高める可能性もあります。気候を安定させるためには、長期的に世界で協調したCO₂排出ゼロが必要ですが、各国間の調整は難しく、調整できないことも前提としながらリスクマネジメントを行い、イノベーションをうまく活用した対応策を模索しなければなりません。脱炭素化を果たすためには比較的低廉でCO₂削減効果の大きい原子力の利用や再エネの拡大、CO₂回収・貯留のCCS技術などの開発も重要です。経済と環境を両立しながら気候変動問題に取り組むためには、イノベーションが不可欠であり、AIやIoT、ビッグデータなどを活用し、技術革新と社会変化を起こしていくことが求められています。

低炭素電源としての原子力の役割

小宮山 涼一氏

原子力が地球環境問題に果たす役割

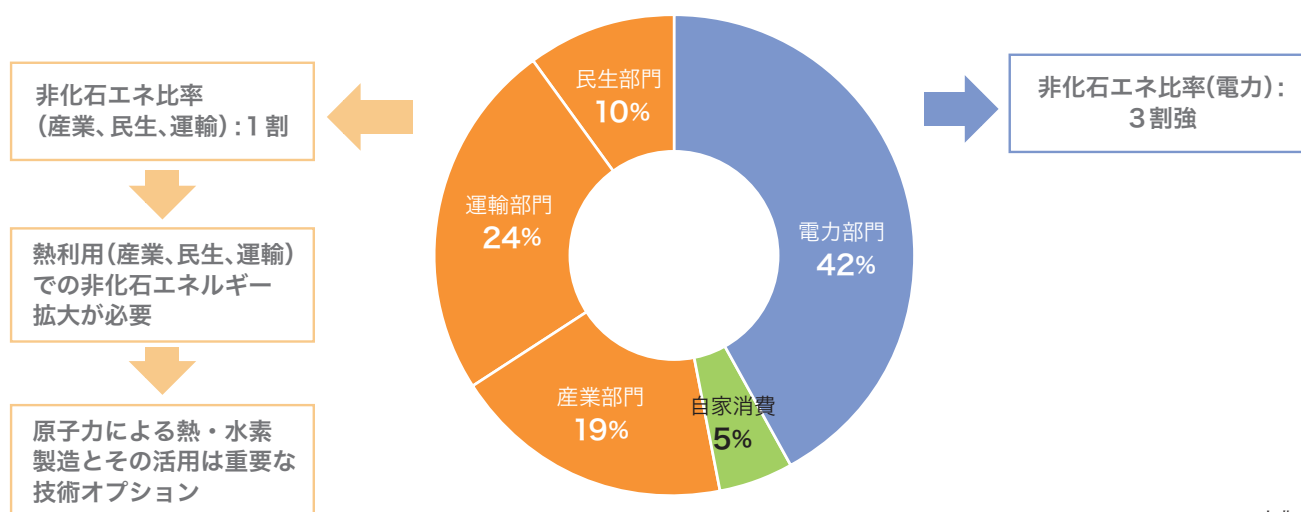
◇地球環境問題に対処するためには、単一の技術でゼロエミッション、ネガティブエミッションのような大規模なCO₂削減を行うのは極めて難しく、すべての技術選択肢を総動員させることが重要です。その中で原子力発電(以下原子力)は重要な役割を担い、IEA(国際エネルギー機関)によると、パリ協定の2°C目標を達成するためには現行の2倍くらいまで原子力による発電量を拡大させる必要があるとした試算もあります。また1.5°C目標の実現にはさらに原子力が必要とされ、国際的にも原子力はCO₂排出量削減のために不可欠な電源と認識されています。日本におけるCO₂排出量は、福島原発事故以前に比べ再エネが9倍(2017年)に拡大したにも関わらず微増しており、これは原子力の停止によるものです。抜本的なCO₂排出量削減や脱炭素化を進めるためには、原子力の再稼働・安定稼働は重要なオプションとなります。

加えてIEAでは、これまでの世界のCO₂排出抑制量という観点からも原子力の貢献度は極めて大きいとしています。原子力は過去半世紀の間で累積約600億tのCO₂排出量を回避しており、これは世界の電力部門のCO₂累積排出量の20%、全体に対しては6%に相当し、継続的にCO₂を削減していくためには原子力を一定量維持することが重要だとしています。こうした実績を見ても、現在実用化している脱炭素化技術の有力な選択肢です。

◇世界の部門別のCO₂排出量を見てみると、電力部門が4割を占めていますが、そのうち非化石エネルギーの割合は3割強あります。一方、残り6割を占める産業や運輸部門など主に熱利用に関する非化石割合は1割に過ぎず、多くを占める熱利用によるCO₂排出量を抜本的に抑制しないと、世界全体の削減にはつながりません。そうした中で、原子力は電力ばかりでなく、熱や水素など他のエネルギーキャリアを市場に供給

できる潜在的な能力もあります。原子力に加えて再エネを有効活用して、全てのエネルギーキャリアを作ることができれば、ゼロエミッションを実現するエネルギーシステム全体のイノベーションに貢献できます。

◆世界の部門別CO₂排出量(2015年)



出典:IEA

原子力の活用に向けた評価の視点

◇今後も原子力を活用していくためには、まずは原子力の環境価値が市場において適切に評価される枠組みをつくる必要があります。米国ではシェール革命と拡大した再エネによって、既設原子炉の早期閉鎖が進んでいますが、原子力比率が高いニューヨーク州などでは安定供給やCO₂排出量削減の観点から小売電気事業者にゼロ排出クレジットの購入を義務付け、原子力に非化石価値の対価(報酬)を与える制度を導入しています。日本においても非化石電源比率の目標を定め(2030年に44%以上)、非化石価値取引市場を創設するなど重要な制度設計が進んでいます。

また原子力の新增設が社会的に厳しい環境にある中、米国では80年運転を目指すような発電所も出始めています。原子炉の運転期間延長には安全対策など多額の費用が必要ですが、そうしたコストを踏まえても、運転延長後の原子力コストは太陽光や風力と経済的に競合できる水準であるとされています。コスト面から見て既設原子炉の維持も脱炭素化には有効なオプションだと言えます。

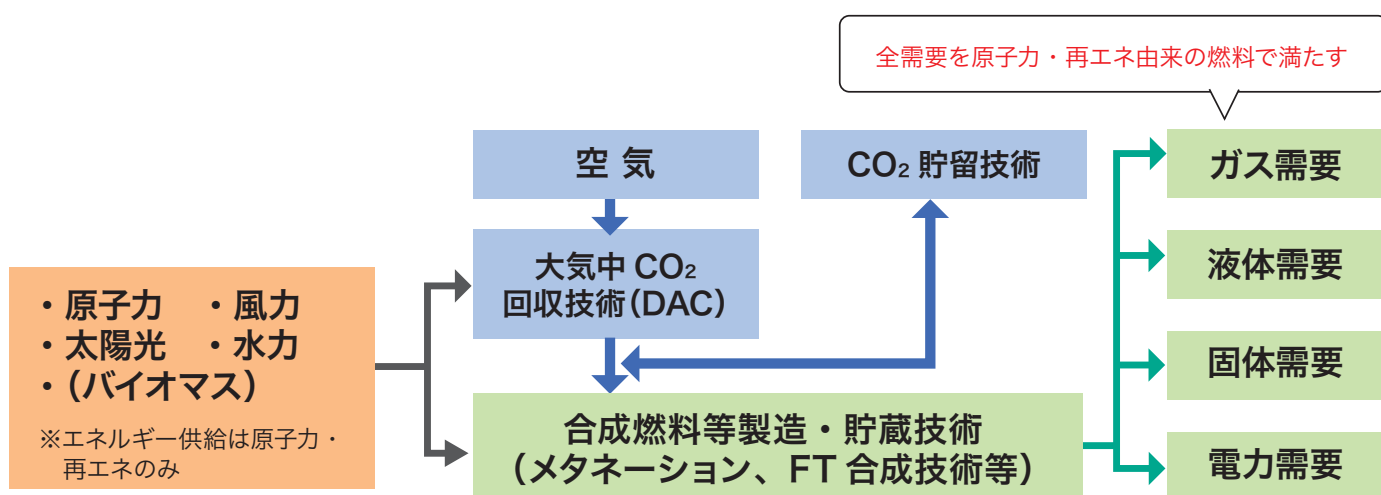
再生可能エネルギーの拡大と原子力の共存

◇世界中で脱炭素化に向けて導入が進んでいる再エネにも、メリットとデメリットがあります。設置コストが全般的に下がってきており、ゼロエミッション化や環境問題、エネルギー自給率に貢献する反面、エネルギー密度が低く分散しているため送配電線の増強が必要であり、出力の変動や予測の不確実性があつたりと、主力電源化のためには課題も残ります。再エネが進んでいるドイツでは卸電力価格は下がっていますが、送電線の維持・運用コスト、FIT(固定価格買取制度)による再エネ賦課金などの費用が増加しており、家庭用でみると、結果として世界で最も高い電気料金になってしまいました。

◇他方で、再エネは電力の需給運用にも大きな影響を与えています。九州電力では2018年10月に需要を上回る供給力が見込まれることから、本土で初となる太陽光の出力制御を行いました。今後、さらに再エネが拡大していけば、革新的な需給の運用マネジメント技術や蓄電池などの貯蔵技術の開発が必要になります。再エネのみで電力部門の脱炭素化を図るには現在の技術ではハードルが高いと言わざるを得ません。

◇そのため、原子力と再エネを調和・共存させた電力のゼロエミッション化が必要なのです。原子力は経済的な観点からもベースロード運転が基本ですが、再エネの更なる導入拡大のためにも潜在的に有する高度な出力調整(負荷追従)機能を活用していくという長期的な視点が重要となってきます。また蓄電池と比べ比較的安価な蓄熱技術を利用して、原子力と再エネをフル稼働してコストの最小化を目指し、原子力の柔軟性や稼働率を向上させることや、投資リスクを抑え、安全性が高く、事故対策コストも少ない小型炉や高温ガス炉など、再エネとの共存に資する原子力の技術開発が必要です。これから再エネの拡大、卸電力価格の低下・変動のもと、原子力はベースロード運転だけではその価値を最大限に発揮できなくなるリスクもあります。電気をつくるだけでなく、原子力と再エネで熱をはじめ、液体燃料や合成ガスなど様々なエネルギーキャリアを作ることができれば、それを産業や運輸など幅広い分野で利活用し、エネルギーシステム全体でCO₂を削減することができます。

◆ゼロ/ネガティブ・エミッションを実現するエネルギーシステム例



出典:小宮山氏資料

電力市場自由化における原子力の市場戦略

◇電力市場を見てみると、2020年度に本格的な発送電分離を控えています。いずれの電力の取引も競争化する中で、原子力にどのような影響があるのかを考える必要があります。原子力の収益の中核をなすのはベースロード電源としての運転形態であり、長期サイクル運転やオンラインメンテナンスを適用し稼働率を向上させることが中期的に経済性を確保することに貢献します。一方、市場の方向性としては価格メカニズムがより機能する市場へ移行していきます。今後の原子力の市場戦略としては、様々な機能を様々な市場で活用し収入を得るビジネスモデルの構築が必要となってきます。このまま再エネの導入が拡大していけば卸電力価格がゼロになるフェーズが現れて、原子力のベースロード電源収益は再エネの比率が上昇するにつれて減少していくことは目に見えています。そのため将来的にはベース



ロードであるkWhだけではなく、供給信頼度であるkWの価値や出力調整能力であるΔkWの価値によって収益を確保し、また非化石価値やゼロエミッションという環境価値、あるいは長期的には熱や水素の生産という原子力の多目的利用などによる利益も検討しながら、原子力の市場競争力を向上させる戦略が求められます。

エネルギーセキュリティと新たな社会ニーズに適合した原子力のあり方

◇CO₂削減に際しても、エネルギーセキュリティは絶対に無視できない重要な課題です。2040年でも世界の化石燃料比率は約6割と見込まれており、脱炭素化を図る中でも中長期的に化石燃料に頼らざるを得ない状況で、地政学的リスクや化石燃料市場における大国のパワーバランスの影響などが懸念されます。そうした中で、原子力のエネルギーセキュリティにおける貢献度は非常に大きいと考えられます。例えばエネルギー価格高騰の抑制、燃料の備蓄効果、核燃料サイクルによる資源の有効利用、更に天然ガスなど化石燃料の安定調達を図る上でも果たす役割は重要で、今後ますます貢献度合いは高まっていくと予想されます。



◇エネルギーセキュリティを考えた場合には、原子力の再稼働はもちろん、新增設も検討すべき事項です。セキュリティや環境など総合的な見地から電源構成における原子力の割合は2割程度が適切であると考えますが、仮に60年運転を想定しても2050年に20~22%を維持するのは困難な状況です。また80年運転でも今世紀後半にはほぼゼロになってしまいます。新增設がなければセキュリティの観点からも脆弱なエネルギーミックスになると言わざるを得ません。日本はエネルギー資源に乏しい国ですが、自前の技術として原子力があります。技術自給率という観点からエネルギーセキュリティを確保していくことも重要です。

◇また原子力が潜在的に持つ機能として単独運転機能があります。一度系統から切り離しても自立運転ができる機能が潜在的にあるため、ブラックスタート機能を拡充するという道も考えられます。自然災害が頻発し、大規模停電などが発生している中、電力のレジリエンスを高めるという意味でも大きな意義があります。情報化社会が進展し、災害時の電気の早期復旧へのニーズは高まっており、それに対応できるような技術開発も必要になってきます。

◇今後原子力は、従来からのニーズである安全性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性に加え、3R (Renewable, Resilience, Reliability) といった視点から、これからの社会ニーズに適合したあり方を検討しなければなりません。Renewableの視点は再エネとの共存。原子力と再エネの両輪で低炭素化を図っていくことが重要です。またResilienceは電力系統のレジリエンス機能強化の視点で、さらなる電化・デジタル化を迎えるにあたり、災害に強靱な電力系統構築に貢献することです。最後にReliabilityは、脱炭素化技術としての社会的信頼を獲得すること。原子力はゼロエミッションではあるものの、社会受容性を得ていないと評価されています。最近の日本の世論調査でも原子力がゼロエミッションであることを認知しているのは国民の3割程度とされ、放射線技術に関しても効用を感じているのは5割程度となっており、リスクだけではなくベネフィットもあることが認識されていません。加えてバックエンド問題も社会的信頼を獲得する上で大きな課題です。原子力の正しい価値の認識を普及していくとともに、高レベル放射性廃棄物の処分に向けた、国、原子力産業界を挙げた一層の努力が必要です。