解説

100年にわたるエネルギー需給構造の変革シナリオ

日本原子力研究開発機構 立松 研二, 川崎 弘嗣, 根本 正博

日本原子力研究開発機構は、わが国のエネルギー需給構造が原子力主体に移行することによって、わが国の二酸化炭素排出量を大幅に削減できる「2100年原子力ビジョン」を2008年10月に発表した。地球温暖化の議論が高まる中で、将来のエネルギーに関する社会的な議論の一助とすることを狙い、2100年までの超長期間での原子力の貢献度を具体的かつ定量的に推定し、地球温暖化問題の解決に対する原子力分野の潜在的ポテンシャルを顕示したものである。

I. 2100年原子力ビジョンの含意

アカデミアの世界では、この10年間で持続可能な社会の構築に関する議論が急激に高まってきている。これは、1999年にブタペストで開催された世界科学者会議において「科学と科学的知識の利用に関する世界宣言」(ブタペスト宣言)が採択されたことに起因するとみることができる。また、IPCCが地球温暖化への警鐘を鳴らし続け、数次にわたって報告書を取りまとめ広く情報発信をしていることも、日本学術会議をはじめとするアカデミアでの議論に大きな影響を与え続けてきている。かつてエネルギーと環境は距離の離れた研究分野であったが、それらが属する研究領域では近年、不可分の課題として活発に議論されており、さらには関連施策の議論においても地球温暖化抑制における原子力への期待が高まっている。

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は、国の原子力の研究開発を担う中核機関であり、人類社会の福祉などに資する原子力に関する研究開発遂行に加えて研究開発の成果による社会への貢献も組織の目的としている。とりわけ、「社会のための科学」を体現するものとして、エネルギー環境問題で原子力が果たすことのできる役割を社会に説明する責務を負っているといえる。

原子力機構では、2050年より前に実用化を目指した高速増殖炉をはじめとして、核融合、高温ガス炉の研究開発を精力的に進めており、いずれもエネルギー環境問題に対処できる能力を内蔵した科学技術である。これらの科学技術はエネルギー環境面で定量的にどれだけの負託を受ける能力があるのだろうか。日本原子力学会に籍を置く読者からは、研究開発や社会科学など多くの専門的な視点に立った多くの考え方が示されるであろう。その

ような議論や検討を誘起するために、われわれがひとつの仮説に基づいてひとつの道すじを示すことは、各人が地球温暖化抑制方策での原子力の係わりを自らの問題として考えるという面で大きな意義があると考えられる。また、原子力以外のさまざまな研究領域で活動する方々や専門家でない一般の社会人の方々に対する具体的議論の喚起のメッセージとなることを期待している。

本稿では、「2100年原子力ビジョン」¹⁾の内容および検討事項などを概説しながら、第Ⅱ章でエネルギー需給分析の全体像、第Ⅲ章でエネルギー需給像の実現によって期待できる低炭素社会での環境・資源の有様、第Ⅳ章で本ビジョンへの反響を踏まえた今後の取組みを述べる。

Ⅱ. 超長期エネルギー需給シナリオ

1. 定量分析の方法

持続可能な低炭素社会の実現に向けたわが国のエネルギー需給像を定量的に示すため、まず目標とする将来社会におけるエネルギー利用の姿を想定し、そこに到達するためのエネルギー需給のあり方を遡って描くことにした。分析に際して最終エネルギー需要からエネルギー変換を経て、1次エネルギー供給に至るエネルギー需給分析の枠組みを構築した(第1図)。需要側では将来人口²⁾、世帯数および1人あたりの国内総生産(GDP/人)などを想定して長期的な最終エネルギー需要を推計した。他方、供給側ではさまざまな1次エネルギー源やエネルギー技術の利用の可能性を考慮に入れて、化石燃料や天然ウランなどのエネルギー資源消費量および二酸化炭素や高レベル放射性廃棄物などの環境排出量に配慮しながら、エネルギー技術の選択およびその利用規模を決定した。その際、本分析では、化石燃料依存への低減、積極的な電化および原子力利用の推進を通じて、二酸化炭素排出削減およびエネルギー安定供給を両立させた持続可能な低炭素社会の実現を目指しており、これを念頭に

Revolution Scenario of Energy Demand—Supply Structure for 100 Years: Kenji TATEMATSU, Hirotsugu KAWASAKI, Masahiro NEMOTO.

(2009年 2月6日 受理)

第1図 エネルギー需給分析の枠組み

第2図 エネルギー利用の変遷

行っている。

このような分析から、われわれが導き出した将来社会のエネルギー利用の姿として、民生、産業および運輸分野で利用される、現在から2100年に至るエネルギー技術やエネルギー媒体の変遷を図式化した(第2図)。各分野とも化石燃料の直接燃焼の低減を目指し、積極的に電化や水素化を進めることとした。例えば、民生分野ではオール電化住宅や太陽光発電の推進、産業分野では鉄鉱石の還元に使うコークスを核熱水素で代替、化学コンビナートにおける自家発電や蒸気供給の熱源として多目的高温ガス炉の導入、ナフサなど原料用の石油製品を天然ガスや核熱水素で代替、化石燃料への依存が極めて高い運輸分野では現在普及が進んでいるハイブリット車の利用を経て、最終的には電気自動車や燃料電池車などの無公害車の利用を想定した。

2. 最終エネルギー消費量の推計

エネルギー需要は、総人口やGDPなどの社会経済指標に比例すると考えて、分野/部門ごとにそれぞれ推計した。具体的には、民生/家庭は世帯数、民生/業務、産業およびトラックを除く運輸/貨物はGDP、乗用車とバスを除く運輸/旅客は総人口にそれぞれ比例するとしてエネルギー需要を推計した。また、運輸の乗用車は15歳以上の人口、バスは総人口、トラックは総人口とGDPの両方に車両保有台数が比例するとして、乗用車、バスおよびトラックなどの各輸送機関の保有台数と燃費からエネルギー消費量を推計した。なお、各分野とも資源エネルギー庁の「長期エネルギー需給見通し」³⁾に準拠した省エネルギーを考慮して最終エネルギー消費量を推計した。ここで、推計の基準となる将来人口は、厚生労働省が参考値として公表している2100年までの推計人口のうち高位ケースを使用した。ただし、高位とはいえ、人口は減り続け2100年に約6,400万人である。また、経済活動レベルは将来の生活の豊かさを想像でき、かつ必要十分な産業基盤を維持し得る水準として、GDP/人を2100年で約2倍と想定した。この将来推計人口およびGDP/人より算出されるGDPは、今世紀半ばまで増加した後減少に転じ、2100年で現在(2005年)とほぼ同じ水準とな

る。このように分野/部門ごとに推計された最終エネルギー消費量に対して、エネルギー利用シナリオとしてエネルギー媒体のシェアなどを設定し、エネルギー媒体別の最終エネルギー消費量を推計した。

民生分野では積極的な電化を進め、2100年において家庭部門では95%、業務部門では98%を電力が占める。家庭部門は中期的には省エネルギー効果、長期的には人口の減少に伴い最終エネルギー消費量が減少し、2100年には現状の55%減となる。他方、業務部門は2100年において現状の23%減にとどまる。産業分野は中期的には省エネルギー、長期的には水素還元製鉄などの導入に伴い最終エネルギー消費量が減少し、2100年には現状の24%減となる。運輸分野では自動車によるガソリンや軽油などの化石燃料の直接利用から電気や水素などの合成燃料の利用へエネルギー媒体の中心が移る。燃料電池車や電気自動車はTank-to-Wheel(燃料タンクから車両走行まで)効率が極めて良いため、最終エネルギー消費量を著しく削減でき、2100年において現状の78%減となる。最後に、3分野全体の2100年における最終エネルギー消費量は、省エネルギーに加え、運輸分野における無公害車の導入により、現在の42%減の水準になる。電化が大幅に進み、電力のシェアは現在の24%から62%に増える。水素は2100年において最終エネルギー消費の8%を占める。

3. エネルギー供給システム像

わが国の将来の1次エネルギー供給量は削減できると推計された。2100年では1次エネルギー供給量に占める化石燃料の割合が現在の85%から30%に減る一方で、再生可能エネルギーおよび原子力の割合が現在の15%から70%に増える(第3図)。原子力利用の拡大は、二酸化炭素の排出削減に配慮した大幅な電化および核熱水素利用によるものである。また、2100年に向けて大幅に減る石油の消費は、最終的には非エネルギー利用および運輸分野の一部(航空機や船舶)に限られる。

わが国の将来の発電電力量は、2100年において現在の1.5倍に増える中で、石炭、石油、天然ガスなどの火力発電のシェアは、現在の66%から19%に大幅に減る(第4

第3図 1次エネルギー供給量

第4図 電源別発電電力量

図)。原子力発電は、電力需要の増分の供給に加え石油火力を代替し、また蓄電設備の導入や天然ガス火力を負荷調整電源として利用するなどにより、高い利用率を維持しつつそのシェアは26%から67%に大幅に増える。なお、新エネルギーは2100年において総発電電力量の6%を占め、これに水力発電を含めた再生可能エネルギーは総発電電力量の14%に達する。原子力発電が大幅に増える中で、その供給形態は当面、核分裂炉である軽水炉が電力供給の主力となるが、今世紀中頃から今世紀末にかけて徐々に高速増殖炉に入れ替わることを想定している。また、今世紀中頃からは核融合炉の利用も始まることを想定した。

積極的利用を想定した原子力および再生可能エネルギーについて、個別発電技術の利用に関する概略を述べる。核分裂発電炉(軽水炉および高速増殖炉)の最大設備規模は2075年で145 GWeであり、2100年には116 GWeとなる。これは1基あたりの設備規模を1.5 GWeとした場合、現在、わが国で運転中の原子炉の2倍である約100基分に相当する。この中で高速増殖炉は、2045年に導入開始とし、ウラン資源節約のため、プルトニウムバランスに応じて最大限導入した。ただし、分析に際して、年間の建設基数は過去の最大値を参考に過大にならないように配慮して各年の新規建設を決定している。多目的高温ガス炉は運輸分野および産業分野への水素供給を中心に、化学コンビナートへの併設などさまざまな用

途およびエネルギー形態で利用することを想定した。2040年から商用ガス炉の利用を開始し、2100年までに120基(600 MWt/基)導入する。当初は、燃料電池車用の水素製造および化学コンビナートの自家発・熱供給から導入し、順次、化学コンビナート用水素製造、製鉄用水素製造に導入していく。核融合炉の導入計画は、原型炉が2036年頃から運転されており、技術的成立性が確認されていることを前提にした。今世紀前半には原型炉を中心とした実用化に向けた準備を完了し、実用1号炉の送電開始は2056年とした。その後、軽水炉を代替しつつ、2100年において33基(1 GWe/基)の導入を想定している。

太陽光および風力発電についても最大限の利用を考慮した。本ビジョンの2040年以降の太陽光発電の設備規模(37.5 GWe)は、わが国の太陽光発電の物理的限界潜在量の約4分の1に相当する。これは家庭用の3 kWe太陽光発電パネル12.5百万基に相当する設備規模であり、本ビジョンでの2100年の総世帯数26百万世帯の約半数に設置されることに相当する。また、風力発電の2040年以降における設備規模(3.0 GWe)は、現状における最大規模1,000 kWeの風車3,000基に相当する。これは、日本列島(本土)の脊梁山脈に沿って1列に設置するとした場合では約600 mに1基、また太平洋および日本海沿岸部に設置するとした場合では約1.5 kmに1基の間隔で設置が必要な設備規模である。更なる利用拡大の達成には、①日照条件および風況条件の悪い地点への立地の拡大(設備利用率の低下)、②需要変動への対応および供給安定性確保のための大規模蓄電設備の増強(経済性の低下)などの課題に取り組んでいく必要がある。

Ⅲ. 低炭素社会を実現する原子力

本ビジョンで示したエネルギー需給シナリオは、低炭素社会を実現するためにどの程度貢献しているのだろうか。これを定量的に把握するため、環境排出抑制と化石燃料消費削減の観点から、地球温暖化抑制のための二酸化炭素排出量や、エネルギー安定供給のための資源消費量を概観する。

1. クリーンな環境を目指して

二酸化炭素排出量の削減は、地球温暖化抑制のために必須と考えられるため、化石燃料消費の削減とともにCCS(二酸化炭素の回収・貯留システム)の技術導入の効果を考慮した。石炭火力と天然ガス火力に対して2020年からCCS導入が徐々に進み、2100年で100%導入が進むものとした。ただし、回収に必要な熱源として燃料の一部を消費するため、発電システムの総エネルギー効率は悪化することを考慮に入れている。なお、CCSについては、回収した二酸化炭素を液化した後、船舶(重油機関)でわが国から約5,000 km離れた海域まで輸送し、海

底下の帯水層へ貯留することを想定した。ここで二酸化炭素の回収・貯留率は、二酸化炭素の回収熱源や輸送燃料からの二酸化炭素排出が過大とならないよう考慮し、石炭火力およびガス火力でそれぞれ約70%および約85%とした。

また、森林吸収の効果も盛り込んでいる。森林の追加整備を行い、算入対象となる森林をさらに確保できるとし、わが国の森林吸収量の算入上限値(1,300万炭素トン)を2012年から2100年まで削減量として考慮した。

二酸化炭素の年間排出量は、2050年では現状(2005年)から54%の削減を達成しており、2100年の排出量は現状の約1割に抑えられる(第5図)。また、京都議定書における二酸化炭素排出削減の基準年(1990年)の排出量と比べても、2050年で49%、2100年で89%の削減となる。2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量の少なくとも50%を削減するというG8北海道洞爺湖サミットの合意目標において、わが国は予測される応分の負担をすることができるとなっている。今後、わが国がさらに大幅な削減目標を定めるのであれば、その達成のためには、本シナリオでは想定していない未開発の技術などによる一段と強力な省エネルギー対策の実施や産業構造における製造業のシェア大幅減など、主としてエネルギー需要側での更なる対応が必要と考えられる。

二酸化炭素総排出量削減に寄与する主な技術要因としては、原子力発電や多目的高温ガス炉の利用といった原子力エネルギーの利用により約半分の削減が得られている。なお、その他の技術要因としては、再生可能エネルギーの利用拡大、運輸分野での燃料電池車による水素化、省エネルギー、CCS導入、森林吸収などが含まれる。

原子力の積極的導入に伴い、発生する使用済燃料は多くなることが懸念される。ここで、想定した規模の原子力プラントから発生する使用済燃料を再処理する場合、必要となる再処理施設の設備容量は次のようになる。軽水炉用再処理施設は、年間処理量800 tHM/年の六ヶ所再処理工場の後、2030年に1,200 tHM/年の規模で第2

再処理施設の導入を想定している。また2047年には、年間処理量300 tHM/年の規模で多目的高温ガス炉用再処理施設の導入を想定している。他方、高速増殖炉の使用済燃料の再処理施設は、数百トン HM/年の規模で適宜増設している。濃縮ウラン使用済燃料の再処理は、ピーク時でも2,000 tHM/年の規模の施設を確保できれば、十分処理可能である。

使用済燃料の再処理により発生する高レベル放射性廃棄物については、地層処分を想定し、その発生量(ガラス固化体本数)および、その最終処分に必要となる処分場面積については、2100年までのガラス固化体の累積本数は約24万本であり、この処分に必要となる最終処分場の面積は約8 km²となる(第6図)。例えば、羽田空港の面積が約12 km²であり、本分析で想定した規模での原子力利用(核融合は除く)により発生する廃棄物の処分には、羽田空港程度の処分場を確保すれば100年以上にわたって処分が可能である。ただし、原子力の利用に伴い発生する放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物ばかりでなく、原子力発電所の廃止に伴う発電所廃棄物や再処理工場で生じる長半減期放射性廃棄物など、低レベル放射性廃棄物の処理・処分が持続的な原子力利用に支障をきたすことのないよう、処分施設の計画的整備を進めるとともに、クリアランス制度(放射能濃度が一定の基準を超えない廃棄物を通常の産業廃棄物として取り扱えるように認定する制度)の導入などにより発生量の削減を図る必要がある。

2. 資源節約とエネルギー自給

エネルギー資源のほとんどを海外からの輸入に頼っているわが国にとって、将来、化石燃料の消費量(輸入量)の削減は必須である。化石燃料依存からの脱却を目指した本エネルギー需給シナリオでは、2100年において、石油の消費量を現在より9割以上削減できる。石炭は安価で埋蔵資源量も多いため、ある程度の消費を見込んではいけるものの、CCSの利用を前提に6割程度削減できる。

第5図 二酸化炭素排出の削減量

第6図 高レベル放射性廃棄物発生量の推移

第7図 2100年のエネルギー自給率

天然ガスは、産業分野において化学工業用の原料として使用するナフサなどの石油製品の代替および電力需要の変動に対応するための発電設備(ピークロード電源)の燃料としての需要増を見込んでおり、2割程度削減となる。

こうした化石燃料消費の削減により、わが国のエネルギー自給率は向上できる。現在、わが国のエネルギー自給率は約4%と低い(第7図)。ただし、原子力の燃料となるウランは、エネルギー密度が高く、備蓄が容易であること、使用済燃料を再処理することで燃料として再利用(高速増殖炉やプルサーマルによるプルトニウムの利用)できることなどから、資源依存度が低いため、原子力を準国産エネルギーと考えれば、わが国のエネルギー自給率は約16%に達する。国内生産は、水力、地熱および新エネルギーなどの再生可能エネルギーに加え準国産の原子力があり、さらに僅かながらの石炭、石油、天然ガスの生産量があるのみである。ここで示した1次エネルギー供給に対し、将来のエネルギー自給率は、原子力を国内生産に含めるか否かによって大きく異なるが、原子力を国内生産に含めない場合では、2100年のエネルギー自給率は11%程度、原子力を国内生産に含めると71%程度の高い自給率となる。

いずれにせよ、2100年には化石燃料(石油、石炭、天然ガス)の輸入割合を現在の約1/3にまで削減できることが期待できる。将来的に、高速増殖炉による軽水炉の代替が進めば、原子力は完全な国内生産エネルギーとなるため、原子力開発はわが国におけるエネルギー安定供給の確保に不可欠な技術といえる。

原子力を積極的に利用する本エネルギー需給シナリオにおいては、燃料として天然ウランの消費を伴う。軽水炉による天然ウランの需要は、2045年の高速増殖炉の導入開始とともに抑制されるが、2040年から導入される多目的高温ガス炉によって新たな天然ウラン需要が生じる。しかし、高速増殖炉による軽水炉代替が進めば天然ウラン累積消費量は頭打ちとなり、さらに多目的高温ガス炉にMOX燃料を利用することでウランの消費量は抑

制され、わが国の天然ウラン究極消費量は、OECD/NEA“Uranium 2007”でいう在来型資源の10%までは増えないと考えられる。

また、世界的な原子力エネルギー開発利用の拡大に伴う天然ウランの需要増を通じて、ウラン市場の逼迫を招く可能性も否定できない。しかし、軽水炉、高速増殖炉および多目的高温ガス炉は、ライフサイクルで見れば総コストに占める燃料費の割合(3割程度)が火力発電(4~6割程度)に比べて小さく、仮にウラン価格が相当程度上昇したとしても、十分な量のウランが確保できるならば、価格上昇自体は火力発電に比べてそれほど大きな問題とはならない。さらに、海水ウランの回収技術開発の取組みは、将来のウラン需給問題の解決にもつながるであろう。

Ⅳ. 今後の取組み

本ビジョンで取り扱ったエネルギー需給の将来像は、一つのシナリオに過ぎないが、二酸化炭素の排出削減とエネルギー安定供給の両立を目指した低炭素社会実現の可能性を示すものである。今後の検討では、制度的枠組みによる開発導入の誘導や費用対効果を含めた評価を進めることが課題となる。

—参考資料—

- 1) 2100年原子力ビジョン—低炭素社会への提言,
http://www.jaea.go.jp/02/press/2008/p_08101601/
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所、日本の将来推計人口
平成18年12月推計、平成18年12月。
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁 総合エネルギー調査会
需給部会、長期エネルギー需給見通し、平成20年3月。

著者紹介

立松研二(たてまつ・けんじ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)炉型戦略/エネルギー・環境、経済性

川崎弘嗣(かわさき・ひろつぐ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)材料力学/エネルギー需給、経済性

根本正博(ねもと・まさひろ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)プラズマ計測/科学技術施策全般、イノベーション