

2. 安全・安心社会の電気エネルギーシステムを考える

2.1 バランスのとれたエネルギー利用を目指して

身体の健康を維持するためには、栄養バランスのとれた食事をとることが重要とされる。それと同様に、健全なエネルギーシステムを構築するには、石油などの化石燃料や、水力や太陽光などの自然から得られるものなど、様々なエネルギーをバランス良く組み合わせることが求められる。各種エネルギー資源や供給方式にはそれぞれ長所や短所があり、複数のエネルギーをうまく組み合わせることで、あるエネルギーの短所を他のエネルギーの長所で補える。表 2.1 には、特に各種エネルギーの主な問題点を示すが、現時点では万能なエネルギー資源や供給方式はない。

表 2.1：各種のエネルギー資源や供給方式の主な問題点

エネルギー資源 や供給方式	主な問題点など
石炭	豊富で安価だが環境面で問題が多い
石油	使い勝手が良いが資源量が限られ高価
天然ガス	比較的環境に優しいが輸送や備蓄が難しい
水力・地熱	安定しているが開発余地が限られる
バイオマス	生態系に依存し利用可能量は限られる
風力	多くが遠隔地にあり出力も不安定
太陽光	夜間・曇天時には利用できず季節変動もある
原子力（核分裂）	事故時の社会的な影響が大きい
核融合	技術的にまだ困難
水素	生産するために一次エネルギーが必要

日本のエネルギー政策を立案する際には、各種のエネルギーをどのように組み合わせるのが良いかを判断するために、「経済性」、「環境性」、「供給安定性」、そして「安全性」の4つの観点から検討されている。そして、もっともバランスのとれたエネルギーの組み合わせをエネルギーのベストミックスと呼ぶ。

経済性については、発電単価や燃料価格などが具体的な指標となる。発電単価は、燃料価格やプラントの稼働率、そして技術進歩などに大きく依存し、将来の不確実性も大きい。環境に良いエネルギーであっても、価格が高いと社会での利用は進まない。政府による税金や補助金で、エネルギー間の相対価格は人為的に変えられる。エネルギー価格の上昇は、家計や企業の光熱費の支出を増やすが、これまでは事業性を有しなかった省・新エネルギー技術を用いた新規ビジネスを生み出す可能性があり、必ずしも悪いことばかりではない。

環境性については、主に単位エネルギー当りのCO₂排出量が主な指標となる。CO₂は代表的な温室効果ガスであり、長期的には大幅な排出削減が必要とされている。天然ガス複合発電の単位発電電力量当たりのCO₂排出量は、石炭火力発電の約半分で済む。水力、地熱、バイオマス、風力、太陽光などの再生可能エネルギーや原子力の活用によってもCO₂排出量を削減できる。温暖化対策を取ることによって得られる便益は、現時点の科学では定量化できないため、温室効果ガスの排出目標は実際には政治的に設定されている。

供給安定性を脅かす最大の要因は、日本の場合、海外での不測の事態によるエネルギー資源の供給途絶である。そのため、主に一次エネルギー資源の調達における「国内自給率」、「輸入先の政治的安定性と残存資源量」、「輸入先の分散の程度」、「貿易契約の形態」、「海上輸送ルートの安全性」、「国内備蓄量」などが評価指標とされる。しかし、国内自給率、石油の中東依存度、国内備蓄量などを除いては、定量的評価は難しい。供給途絶時の経済損失や人的被害に関する定量的な分析はなされておらず、供給安定性向上で得られる便益は大きいと思われるが、必ずしも明確ではない。

安全性という指標は、東京電力福島第一原子力発電所の過酷事故が起きたことを受けて、追加されたものである。工学的には、安全とは受容できないリスクが無いこととされ、リスクとは一般に、「リスク＝危害のひどさ×危害の発生確率」と表現される。個別技術の安全性を高めるとともに、総合的なリスクを小さくすることが重要である。ただ総合的なリスクの推計は対象範囲が広がると難しい。

エネルギー資源や供給方式別に見てみると、まず太陽光発電などの再生可能な自然変動電源については、その導入拡大に伴う系統安定化対策のための費用増大が懸念される。将来的には、これらの出力の季節変動による余剰電力対策には、需要側での省エネルギー対策にもよるが、桁違いに安価で大容量のエネルギー貯蔵装置が必要となると考えられ、最も困難な技術経済的な課題となろう。再生可能エネルギーの利用割合は増えていくとしても、それを100%とすることは簡単ではない。

化石燃料については、気候変動問題に関する環境政策の不確実性が、その見通しを悪くしている。温暖化だけでなく資源枯渇も考慮すると、化石燃料への依存度は、いずれは下げていかざるを得ない。自然変動電源の大量導入が実際に進展している国や地域では、CO₂排出量が少ない新型の天然ガス火力発電さえも廃止へ追い込まれ、火力発電全般への投資が躊躇される状況となっている。

原子力については、低線量被曝の健康影響に対する不安や、その不安を背景にした脱原発を志向する世論がその前途に暗い影を落としている。福島原発事故では、事故を起こした原発周辺の住民への放射線被曝による明らかな健康影響は甲状腺がんも含めて現時点では見出されていないが、その一方で、住民避難の過程で高齢者や入院患者を中心に少なからずの人命が失われてしまった。原発事故の結果として、実際に何が起きたかを冷静に確かめる必要がある。

現時点では、特効薬的なエネルギー資源や供給方式は見出されておらず、「経済性」、「環境性」、「供給安定性」、そして「安全性」の4つの指標を念頭に置きつつ、バランスのとれたエネルギー利用を目指して努力するしかない。

3. 安全・安心社会に向けての課題と将来の取り組み

3.1 日本のエネルギーベストミックスについて

3.1.1 はじめに

2011年3月の福島第一原子力発電所の事故以来、エネルギー基本計画の見直しや電気や都市ガス供給事業に関するシステム改革など、エネルギー政策に関する議論は喧しい。エネルギー政策は、様々な観点から包括的に考えて構築する必要がある。特に重要となる評価の基本的視点としては、3Eと呼ばれる、「経済性 (Economic Efficiency)」、「環境性 (Environment)」、「供給安定性 (Energy Security)」が挙げられる。そして特に原発事故後は「安全性 (Safety)」も社会的に関心が高まっており、上記の視点は3E+Sと拡張されている。

3E+Sの全ての点で優れる万能なエネルギー資源や供給方式は残念ながら見いだせない。そのため、様々なエネルギーを合理的に組み合わせて利用することが望まれるが、その組み合わせがいわゆるエネルギーミックスである。ベストミックスを求めるには、それぞれのエネルギー資源や供給方式の長所短所を包括的に検討する必要がある。

3.1.2 エネルギー資源・供給方式の評価

3E+Sという基本的視点から、主なエネルギーの特徴や課題について整理する。

(1) 経済性

(a) 各種電源の発電コスト 発電コストは、燃料価格やプラントの稼働率などに大きく依存し、将来の不確実性も大きい。図3.1.1には、経済産業省の長期エネルギー需給見通し小委員会に設置された発電コスト検証ワーキンググループでの2030年時点の発電コストの分析例⁽¹⁾を示す。社会的費用(CO₂対策費用、事故リスク対応費用)と政策経費を除くと、石炭火力発電と原子力発電(使用済み燃料の処分費用も含む)の発電コストの間に大差はなく、将来の石炭輸入価格やCO₂対策費用に応じて、互いの大小関係は入れ替わる。天然ガス火力発電の発電コストは、燃料費の割合が大きく石炭や原子力と比較してやや割高になると予想されている。

非在来型石油資源の生産量の増加と世界的な石油消費量の増加率の鈍化などから、2014年後半から原油価格が大幅に下落しており、短期的には化石燃料価格全般の低下が期待されるが、中長期的には石油の需給は逼迫し、その価格上昇が予想される。

(b) システム安定化費用 太陽光や風力の発電単価は現状では高いものの、太陽光に関しては将来的に、太陽電池価格の低廉化に伴い、システム全体の費用も安価になると期待される。しかも、太陽光の供給可能量は極めて大きく、例えば日本国土の2%の面積に太陽電池を設置すれば、その発電量の年間累積値は日本の年間電力需要量を越えるものと推定される。風力についても、経済的利用可能ポテンシャルは、北

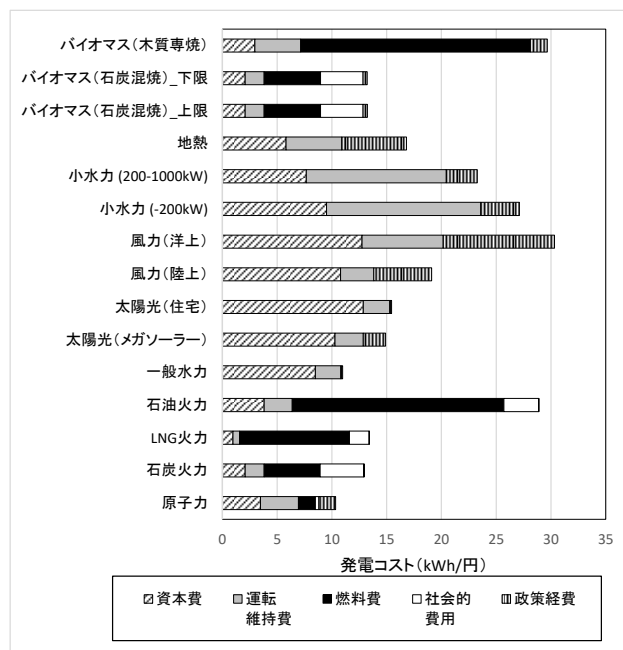


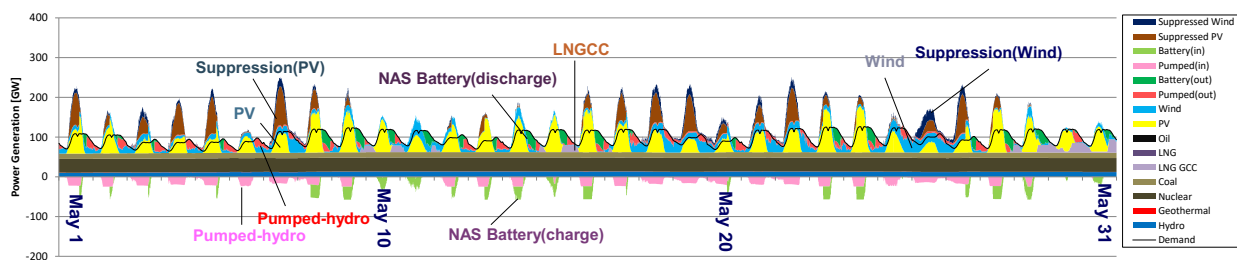
図 3.1.1 2030 年の発電コスト (資料⁽¹⁾から作成)

海道、北東北、南九州などに偏在しているが、国内の総和は十分に大きいと推測される。

電力は時々刻々の需給をバランスさせなくてはならないため、太陽光や風力という自然変動電源の大規模導入は、電力系統の供給信頼度を損ねる恐れがある。自然変動電源の全系統に占める割合が高まると、余剰電力の発生や出力変動への対策が必要となる。蓄電池による出力の平滑化は一般に費用が高く、補助金がなければ電気事業としての実施は経済性の観点で難しいと判断され、むしろ自然変動電源の出力抑制や、出力制御が俊敏に行える火力発電所の導入を進めることが実用的な解決策となると予想される。

前述の発電コスト検証ワーキンググループ⁽¹⁾でも、火力発電・揚水発電の調整運転費用を中心にした系統安定化費用の試算がなされており、自然変動電源の導入規模が約 6,000 万～1 億 kW の場合、安定化費用の合計額は概ね年間 3,000 億円～7,000 億円程度(揚水固定費分は除く)が必要との結果が示されている。自然変動電源の経済性の評価には、それ自身の発電コストだけでなく系統安定化費用も考慮しなくてはならないが、具体的な技術や方策が必ずしも確立されているとは言えず、不確実性は大きい。

海外には風力発電の割合が比較的高い国々がある。デンマークとドイツは隣接国間の電力融通が、スペインとポルトガルは自国内の水力発電設備の活用が安定化対策となっている。アイルランドは、グレートブリテン島との連系線容量も小さく、水力発電設備もほとんどないことから、主に天然ガス火力発電の俊敏な運用と風力発電の出力抑制などが系統安定化対策となっていると考えられる。風力発電で先行するこれらの国々が、特に北海道と状況が比較的似ているアイルランドが、どこまで風力の割合を高められるのかはとても興味

図 3.1.2 日本の5月を想定した電力需給の計算例⁽²⁾

深く、日本が参考とすべき制度や対策技術もあるように思われる。

図 3.1.2 には、自然変動電源の大量導入を想定した時間解像度 10 分の最適電源構成モデルの計算結果の例⁽²⁾を示す。この図からは、自然変動電源の大量導入時には、昼間を中心とした不規則な余剰電力の大量発生や、自然変動電源の出力変動に応じた火力発電所の激しい負荷追従運転など、従来の常識を超えた系統運用が必要となるであろうことが見て取れる。石炭火力と原子力は、システム総コストの最小化の結果、ベースロード電源として運用されている。グラフの負側は電力貯蔵のための充電を表しているが、経済性を考慮すると余剰電力の全てを貯蔵することにはならない。

自然変動電源の割合を増やす際の本質的な課題は、天候や昼夜による時間単位の出力変動ではなく、季節変化による月単位の出力変動なのかもしれない。桁違いに安価で大容量のエネルギー貯蔵技術が必要となるからである。

そのようなエネルギー貯蔵技術のアイデアとして、自然変動電源の余剰電力を用いた水素製造という話を良く聞くが、余剰電力の累積発生時間が短いことから、水電解装置の設備利用率は高くても 5%程度に留まると予想される。このことから、余剰電力対策は、その可変費よりも固定費（設備費）を安価にすることの優先度が高いと判断され、水素製造は残念ながら経済性は低いと推測される。極端な話、余剰電力の有効活用などは諦めて、電気抵抗などの安価な設備で熱に変換して消費することが経済的には有効と考えられる。より具体的には、汽力発電所のボイラーや復水器に、100 万 kW 級

の電熱器を設置し、余剰電力を集中的に消費することなども考えられる。ボイラーでの電熱は、最低負荷運転時の燃料の焚き減らしを想定している。これは、百万軒単位の家庭を対象に、スマートグリッドによるデマンドレスポンスを実装するのと同規模の余剰電力対策となると考えられる。さらには、時間的に変動する電熱を高温の耐火レンガの塊に貯蔵して、時間的に安定して利用可能な熱源とすることも考えられる。

(c) 経済性の指標について 経済性はエネルギーベストミックスを検討する際に最も重要な評価指標と考えられる。環境性、エネルギー供給安定性、安全性という視点も、損害や被害などを金銭で表現できれば、広い意味での経済性に還元できるからである。

経済性の指標として代表的なものはコストである。コストを議論する際には、経済主体の境界を明確にする必要がある。誰かが支払ったコストはその支払いを受け取る相手が必ずいる。国境を境界とすると、国内の相互の支払は相殺され、原材料の輸入額が支払うコストとなる。燃料輸入額の増加は国富の流出が増えるとして、国民経済への悪影響が懸念されているが、国際貿易を介した国外からのフィードバック効果もあるため、正味の影響は簡単には評価できない。

割高な再生可能エネルギーの普及による電力価格の上昇も心配されているが、前述した通り、国内のコストの支払は相殺され、これも国民経済への影響は簡単には予想できない。電力価格の上昇は、家計や企業の光熱費の支出を増やすが、これまでは事業性を有しなかった省・新エネルギー技術の導入を促進させるなどの新規ビジネスを生み出す可能性がある。

(2) 環境性

(a) CO₂ 排出量 エネルギー利用に伴う環境問題には様々なものがあるが、最も懸念されるのは大気中 CO₂ 濃度増加に起因すると考えられる地球温暖化と気候変動の問題であろう。人為的な地球温暖化の程度やその悪影響については不確実性が大きく、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) の場でも未だに専門家の間で議論が続けられている。その一方で、かつての京都議定書の温室効果ガス排出目標などのように、今後も国際社会から具体的な排出削減対策を迫られる可能性はある。実際、2015 年にはパリ協定が採択され、国際社会として気候変動対策の取り組みは進んでいる。

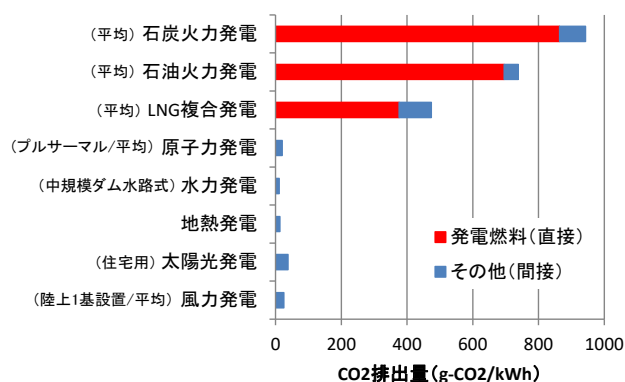
図 3.1.3 電源種別の CO₂ 排出原単位 (資料⁽³⁾から作成)

図 3.1.3 には、電源種別の CO₂ 排出原単位の推計例⁽⁴⁾を示す。CO₂ 排出量の削減を考えると、火力発電の中では LNG (Liquefied Natural Gas : 液化天然ガス) 複合発電が最も優れており、石炭火力の約半分の排出量で済む。CO₂ 排出原単位の観点では、原子力や再生可能エネルギーも確かに効果的である。出力調整運転が制限される原子力が減少し、柔軟な負荷追従運用が可能な火力が増えると、再生可能エネルギーの導入可能量を引き上げられるが、原子力の減少分を再生可能エネルギーと火力の合わせ技で補うため、系統全体としての CO₂ 排出削減効果は割り引く必要がある。

(b) CO₂ の回収貯留 原子力を抜きにして、CO₂ 排出量の大幅削減 (例えば 80%削減) を実現しようとする、エネルギー消費量自体の大幅削減、再生可能エネルギーの大規模導入という対策に加えて、火力発電所での CCS (CO₂ Capture and Storage : CO₂ の回収貯留) の利用も考えざるを得ない。CCS は、化石燃料やバイオマスなどの炭素を含む燃料を利用する際に発生する CO₂ の大部分を分離回収し、それを地中や海洋に貯留することで大気中への CO₂ 排出量を削減する技術である。CCS は CO₂ の「回収」、「輸送」、「貯留」という要素技術から構成され、これらの要素技術は既に実用化されているものが多い。しかし、実際に CCS が商業利用された実績は、経済的な負担も大きいのか世界でもほとんどない。CO₂ 貯留サイトの候補地では、漏えい事故に対する懸念などから、住民の反対運動も起きている。CO₂ の空気中濃度が 3~4%を越えると頭痛など人体に危害が及び始め、15%以上になると致命的な仮死状態を引き起こすとされる。日本国内での経済的な貯留可能量については未知な部分も多く、後述する経産省の長期エネルギー需給見通し小委員会でも、2030 年の国内における CCS の実施は想定されていない。地理的・地層的に好条件が揃う特定の国や地域では、厳しい CO₂ 排出制約下でも化石燃料の継続的な利用を可能とする「つなぎの技術」にはなるかもしれない。

厳しい温度抑制目標を達成するために、CO₂ 濃度を人為的に下げることが必要と考えられる。そのための方策の一つが、バイオマスを燃料とする火力発電所に CCS を適用する方策である。大気中の CO₂ を植物に光合成で吸収させてバイオマスを生産し、そのバイオマスの燃焼時に発生する CO₂ を回収貯留するのである。この他に、CO₂ を大気から直接回収する方策 (Direct Air Capture : DAC) もある。利用可能なエネルギー資源がバイオマスに限定されないこと、回収プラントの設置場所の自由度を高められることなどのメリットがある。回収された CO₂ と水素から石油に近い液体燃料を合成できれば、航空機や長距離トラックなどで現状の内燃機関をそのまま利用しても、正味の CO₂ 排出量をゼロにできる。

(c) 地球温暖化の不確実性 地球温暖化問題は、1988 年のトロントでの第 14 回先進国首脳会議から国際政治の場で注目を集め始め、その後の気候変動に関する国際連合枠組条約の採択を経て、現在では人類共通の深刻な脅威として広く認識されるに至っている。しかし当初から、人為起源の地球温暖化に関しては科学的な不確実性が付随している。

大気中 CO₂ 濃度の上昇は、化石燃料の燃焼に伴って排出される大量の CO₂ が原因であることはほぼ確実であり、産業革命以前には 280ppm であったものが現在では 400ppm を越えるようになっている。しかし、大気中 CO₂ 濃度の上昇と温暖化との間には、依然大きな不確実性が残っていると言える。IPCC による最新の第五次評価報告書でも、CO₂ 濃度倍増時の全球平均気温の上昇幅は、1.5~4.5℃の不確実性の範囲で推定されている。この 1.5~4.5℃という範囲は、実は 1979 年の米国の文献⁽⁴⁾にも見出され、この間 30 年以上のスーパーコンピュータの長足の進歩を以てしても、我々はこの不確実性を解消できずにいる。

その一方で、地球温暖化の研究者の間では、昨今はハイエイトス (Hiatus) と呼ばれる気温上昇の停滞現象が話題となっている。気温上昇率の観測値が、コンピュータによる予測値を下回り、21 世紀に入ってから全球平均気温がほぼ横ばいの状態となっている現象である。(ただし、2016 年の世界年平均気温は、エルニーニョ現象の影響もあるが、1891 年の統計開始以降では最高値となった。) もし仮に、ハイエイトスの状態が今後 5~10 年継続したとすると、地球温暖化問題に対する人々の関心が薄れることも予想され、それは温暖化対策にも何らかの影響を及ぼすかもしれない。いずれにしても今後 10 年くらいの間で、コンピュータによるこれまでの温度上昇の予測値を観測値で検証することが可能となり始めるため、様々な不確実性が解消され、科学的論争のいくつかにも終止符が打たれることになるであろう。

(d) 環境性の指標について 環境性の指標として CO₂ 排出量を考慮することが多い。また、最近の気候変動枠組条約の締約国会議では、気温上昇 2℃目標が欧州諸国を中心に象徴的に繰り返し主張され、気温そのものも指標となりつつある。しかし、CO₂ 排出量や気温などの指標は、環境性の指標としては根拠が薄く、単純化された代替指標である。環境性を真面目に考慮するとなれば、温暖化や気候変動による環境リスクやその人間の生命価値への影響などを深く掘り下げた評価や検討が本当は必要である。またさらに掘り進めば、人間と人間以外の生物 (珊瑚やホッキョクグマなど) の間の生命価値のトレードオフという厄介な問題にも遭遇する。もちろん簡単な作業ではないが、これらの検討を等閑にすると、温暖化緩和策や適応策による便益を適切に評価できず、その帰結として排出目標や気温目標なども科学的根拠を以て決められなくなる。恣意的な対策目標は、長期的には様々な矛盾に直面し、いずれ覆ってしまう恐れが高い。

(3) 供給安定性 日本は、化石燃料のほぼ全量を海外から輸入しており、自給率は 6%程度 (2012 年) と低いのが特徴である。

(a) 石炭利用 経済性と供給安定性を考慮すると、原子力発電を代替する発電方式として最も適しているのは、石炭火力である。燃料費が安価なため、ベースロード電源としての運用に向いているからである。しかし、単位発電量当たりの CO₂ 排出量は、最新の高効率石炭利用技術を用いても、天然ガス火力ほどには低減できない。石炭火力発電所の新設

は、プラントの寿命が数十年と長いため、中長期的な CO₂ 排出量削減を困難にする可能性がある。ただし、具体的な排出量は、将来の排出規制、炭素税、燃料価格などに応じて、ある程度適応的に変化させられる自由度がある点には留意が必要であろう。

(b) 天然ガス利用 環境性を考慮すると、天然ガス火力が優れているが、その供給安定性には難がない訳ではない。天然ガス調達方法としては、米国からのシェールガスの輸入もある程度は期待されるが、将来的には石油と同様に中東依存度が高まっていくことが予想される。また、天然ガスの備蓄は、石油や石炭などと比較して、気体燃料であることから物理的にも経済的にもそれほど簡単ではない点にも注意が必要である。国内の LNG タンク容量の総和は、現状では国内 1 か月分の消費量程度と推計されるが、実際の平均的な貯蔵量は流通上のバッファとしてタンク容量の半分程度と考えられる。(原油の場合は、民間備蓄と国家備蓄を合計すると約 180 日分の備蓄があるとされている。)

天然ガス火力の割合が全電源中で最大となり、天然ガス火力を他の発電設備で代替することが物理的に不可能となる状況では、軍事紛争等による 2 週間程度の LNG 供給途絶で、日本の電力と都市ガスの供給は危機的状況に陥る恐れがある。対策としては、輸入先の多様化に加え、廃ガス田などの利用により天然ガスの備蓄量を大幅に増やすことや、緊急時には天然ガス火力発電所で石油も燃焼できるようにすることなどが考えられる。

対馬海峡や宗谷海峡を縦断する海底ガスパイプラインの設置は技術的には不可能ではないと考えられる。ただし、韓国が日本に比べて LNG 調達の観点で特段有利な立場にある訳ではないこと、サハリンからの LNG 供給も開始されたことなどから、パイプラインの国際連系のメリットは明らかではない。ただし、北朝鮮政府の動向次第では、東シベリアから朝鮮半島を経る天然ガスパイプラインのルートの政治経済的な状況が大きく変化する可能性はある。日本国内を縦横断するパイプライン網の構想もあるが、LNG で供給されている天然ガスを国内パイプラインで融通することのメリットは平時にはほとんどないと考えられ、経済的な観点から事業化は難しいと思われる。

なお、自然変動電源の大量導入が実際に進展している国や地域では、CO₂ 排出量が少ない新型の天然ガス火力発電さえも十分な設備利用率を確保できないことから廃止へ追い込まれ、火力発電全般への投資が躊躇される状況となっている。

(c) 再生可能エネルギー利用 日本国土の 3 分の 2 は森林であり、国全体のエネルギー消費量の 2 年分に相当するバイオマスエネルギーが木材として蓄積されている。木々の成長年数として 40 年を想定すると、木材の年間利用可能量は国全体のエネルギー消費量の約 5% となる。ただ実際には全ての森林を利用することはできない。日本で発生する可燃性の廃棄物(廃木材、古紙など)の全発熱量は、国全体のエネルギー消費量の 3% 程度に相当すると推計される。バイオマスエネルギーへの期待は大きいですが、人口密度の低い北欧諸

国などと比較すると、日本での一人当たりの供給可能量は上述の通りとても小さい。昨今は、海外からの木材輸入も調達手段として検討されるようになってきているが、温暖化対策を主目的とするのであれば、日本への輸出は行わず、木材生産国にて地産地消するのが最も効果的であろう。

地熱発電や海洋発電については、その詳細は省略するが、これらの資源を広範に活用したとしても、それぞれの貢献度は最大でも現在の水力発電(日本のエネルギー供給量の約 5%) 程度以下に留まるものと思われる。

(d) エネルギー安定供給の指標について 日本の場合、供給安定性を脅かす最大の要因は、海外での不測の事態によるエネルギー資源の供給途絶である。そのため、供給安定性の評価指標としては、主に一次エネルギー資源の調達における「国内自給率」、「輸入先の政治的安定性と残存資源量」、「輸入先の分散の程度」、「貿易契約の形態」、「海上輸送ルート安全性」、「国内備蓄量」などが挙げられる。しかし、国内自給率、石油の中東依存度、国内備蓄量などを除いては、定量的評価は難しい。安定供給確保のためには、技術的な対策のみならず、何よりも国際政治的な対策が重要である。排他的経済水域を接する中国との友好関係の維持は特に重要と思われる。

ところで、エネルギー供給安定性の議論を行うには、国内のエネルギー不足によって引き起こされる経済損失や人的被害に関する包括的かつ定量的評価がまず必要のように思われる。そのような評価の結果がなくては、合理的な国内対策や国際交渉もできないであろう。

(4) 安全性 爆発事故、感電事故、環境汚染など 100% 安全なエネルギー供給方式はない。工学的には、「安全とは受容できないリスクがないこと」とも定義され、リスクは一般に、「リスク = 危害のひどさ × 危害の発生確率」と表現できる。

(a) 原子力事故と避難 東京電力福島第一原子力発電所の事故の教訓から、非常用電源の更なる多重化やフィルター付きベント設備の設置など多くの新たな安全対策が原子力発電所には講じられ、2011 年 3 月と同程度の事故影響が起きる確率は大幅に低減されている。しかし、事故確率は 0 にできない。微小であっても 0 ではない事故確率を社会が受容できるか否かは、エネルギー利用に係る他の様々なリスクも考慮して、総合的評価で決められるべきであろう。

福島原発事故が起きてから 7 年近くが経つが、事故に伴う避難者数はまだおよそ 8 万人も存在し、極めて甚大な悪影響を社会に及ぼしている。さらに、人命を守るためになされた住民避難の結果、高齢者を中心に、逆に多くの人命が失われてしまったことは忘れてはならない。しかしその一方で、事故を起こした原発周辺の住民への放射線被曝による明らかな健康影響は甲状腺がんも含めて、現時点では見出されていない。

(b) 放射線被曝の影響 原発事故による危害で、社会的にも影響が大きいものは、環境中に放出された放射性物質による低線量率被曝による健康や生命への悪影響であろう。この悪影響を端的に述べると、それは「細胞内に到達した放

射線の電離作用で引き起こされる DNA の二重鎖切断が原因となっており、がんや白血病による死亡者が増えることである。

DNA の二重鎖切断自体は、実は放射線の有無とは無関係に体内の代謝過程で発生する活性酸素によっても引き起こされる。日常的に発生する活性酸素によって、細胞一日当たり平均 8 か所ほどの二重鎖切断が起きている。放射線で同数の二重鎖切断を引き起こす被曝線量は 200 ミリシーベルト（原文^⑤では 200mGy）程度とされている。（ただし、放射線による DNA 損傷はより複雑とされる。）人間の細胞はある程度の二重鎖切断には耐えられるように、DNA 修復機能を有している。

最新の分子生物学的知見や疫学調査に基づいて、放射線防護の判断基準を適宜見直していくことも必要である。1986 年のチェルノブイリ原発事故では当初、低線量率被曝による白血病やがんの死亡者が数万人単位で増加すると予想されたが、その後 4,000 人程度に下方修正された^⑥。そして低線量被曝者の中には、甲状腺がん以外のがんや白血病が多発している証拠は結局見いだせておらず^⑦、また甲状腺がんについては、大規模な検査で約 6,000 人という多数の小児にがんが発見されたが、そのうち 15 人が死亡したとされる^⑦（甲状腺がんの死亡率は他の一般のがんと比べると低いといえる）。原発事故後の福島でも、小児に甲状腺がんが発見されているが、これは甲状腺がん特有の性質に起因する集団検診の感度による可能性が高いとされ、放射線の影響とは考えられていない^⑧。そうすると、チェルノブイリで発見された甲状腺がんについてもこのような集団検診の影響を調べる必要があるように思われる。

（c）安全性の指標について 2014 年 4 月に公表されたエネルギー基本計画^⑦には、「原発依存度については…可能な限り低減させる。」と記載され、日本の原子力政策は大きく方針転換された。低減させる理由は、原子力発電の危険性が飛びぬけて高いと認識されたからであろう。この認識は合理的なものなのか、原子力発電のみならずそれ以外の種々の発電方式の安全性やリスクも横並びに評価する必要がある。リスクとしては、過酷事故による直接的な死亡者数だけでなく、環境汚染による健康影響被害も含めるべきである。そうすると前述の環境性指標のそれと同様に不確実性が大きくなり、安全性指標の厳密な評価は簡単ではなくなると考えられる。

受容できないリスクとは何か、この間に答えるために、科学的根拠に基づく発電方式全般の安全性やリスクに関する国民的なコンセンサスの形成が望まれる。その際に注意すべきことは、科学的根拠の検討の場では、世論に迎合した勧善懲悪的な視点からの議論は避けることである。人間の願望、感情、信義に応じて、制度や法律は改正できても、物理法則は曲げることはできないからである。

3.1.3 長期エネルギー需給見通し

政府は 2030 年度を対象とした長期エネルギー需給見通し^⑨を発表した。そこでは、今後の経済成長等によるエネルギー需要の潜在的な増加を想定しつつも、1970 年代の石油危機

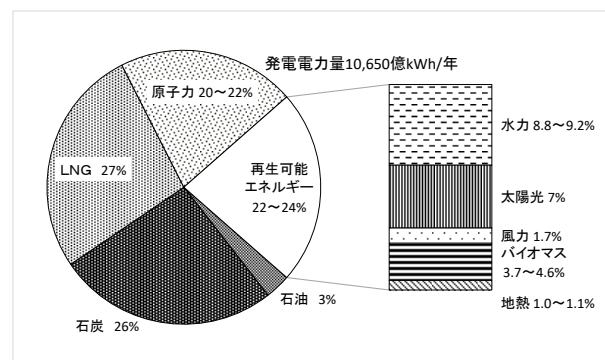


図 3.1.4 2030 年度の電源構成（資料^⑨から作成）

後並みの徹底した省エネルギーの実施により、単位 GDP 当たりのエネルギー消費量を 2030 年までに 35%低減させ、総エネルギー需要を減少させていくことを見込んでいる。電力需要に関しても、最終消費端での電化率の上昇にも関わらず、2013 年度と比較して 2030 年の需要は微増するだけに留まると想定されている。

エネルギー源別の電源構成は図 3.1.4 のように見込まれている。概要としては、経済性の視点から再生可能エネルギーの導入量の上限が決まり、環境性の視点から化石燃料による発電電力が決まる。天然ガス火力と石炭火力の割合は供給安定性に配慮してほぼ半々となっている。そして原子力発電がその残りとなる。

経済性の制約条件として、2030 年度の「火力・原子力の燃料費」、「FIT 費用」、「系統安定化費用」の総和は、2013 年度の 9.7 兆円から 0.2 兆円削減して、9.5 兆円に抑え込むとされている。2010 年度の「火力・原子力の燃料費」が 4.9 兆円（FIT 費用、系統安定化費用はほぼ 0）であったことから、2030 年度においても電気代は下がることはなく、2013 年程度に高止まることが暗黙に想定されている。また、太陽光（非住宅）は既認定量の 6 割程度のみが導入されるとされ、自然変動電源の FIT 費用は年間 2.72 兆円に抑制している。この費用の抑制が、太陽光や風力の導入量がやや控えめな数字となっている主な理由である。

2030 年度の原子力発電の発電量は 2,168~2,317 億 kWh 程度と想定されているが、設備利用率として 90%を仮定しても、設備容量として 2,750~2,940 万 kW が必要と推計される。国内全ての原子力発電プラントの寿命を 40 年とすると、2030 年度に残存する設備容量は、建設中の島根 3 号機と大間 1 号機を加えても 2,413 万 kW にしかならず、明らかに原子力発電所の設備容量は不足する。

環境性の制約条件として、2030 年度のエネルギー起源の CO₂ 排出量の削減目標は 2013 年度比 25%削減とされている。また、特に電力由来エネルギー起源 CO₂ 排出量については、原子力発電所の再稼働などにより、2013 年度比 35%の大幅削減を見込んでいる。これらの削減目標の数値自体には科学的根拠はなく、「欧米に遜色ない温室効果ガス削減目標を掲げ世界をリードする。」ことを目的に政治的に判断されている。

3.1.4 おわりに

エネルギーのベストミックスを考える上で、重要となる「経済性」、「環境性」、「供給安定性」、「安全性」の評価指標を軸として、各種のエネルギー資源・供給方式の特徴を整理し、ベストミックスに関する私見を述べた。再生可能エネルギー利用については系統安定化対策が、化石燃料利用については地球温暖化問題の不確実性が、そして原子力利用については低線量率被曝の健康影響が、これらの重大な懸念材料となり、見通しを悪くしていると考えられるが、それぞれ電力系統工学、気象学・海洋学、放射線生物学などの進歩により、長期的には克服あるいは解消されるものと期待される。現時点では、特効薬的なエネルギー供給方式は見出されず、各種のエネルギーを文字通りベストミックスする努力の継続が望まれる。

参考文献

-
- (1) 総合資源エネルギー調査会、長期エネルギー需給見通し小委員会、発電コスト検証ワーキンググループ、「発電コストレビューシート」(2015)
 - (2) R. Komiya and Y. Fujii, "Analysis on Japan's Long-term Energy Outlook considering Massive Deployment of Variable Renewable Energy under Nuclear Energy Scenario", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.132, No.9 pp.780-792 (2012)
小宮山・藤井：「原子力の長期シナリオと太陽光・風力発電の大量導入を考慮に入れた日本の長期エネルギー需給に関する分析」, 電学論 B, Vol. 132 No. 9 pp.780-792 (2012)
 - (3) 今村・井内・坂東：「日本における発電技術のライフサイクル CO2 排出量総合評価」, 電力中央研究所報告, 総合報告 Y06 (2016)
 - (4) Report of an Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate, Woods Hole, Massachusetts, July 23-27, 1979, to the Climate Research Board, Assembly of Mathematical and Physical Sciences, National Research Council, "Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment", National Academy of Science, Washington DC, USA (1979)
 - (5) Maurice Tubiana et al., "The Linear No-Threshold Relationship Is Inconsistent with Radiation Biologic and Experimental Data", Radiology: Volume 251: Number 1, April (2009)
 - (6) Chernobyl Forum, Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. IAEA, p.10, (2005)
 - (7) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. "Annex D. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident". Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2008 Report vol. II: Effects, Report to the General Assembly Scientific Annexes C, D and E. New York: United Nations. pp. 64-65 (2011)
 - (8) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響に関する UNSCEAR2013 年報告書刊行後の進展", 国連科学委員会による今後の作業計画を指し示す 2016 年白書, New York: United Nations. pp. 25-26 (2016)
 - (9) 総合資源エネルギー調査会、長期エネルギー需給見通し小委員会、第 11 回資料 3 (2015)