

2. 再エネ主力エネルギー化に向けた施策

2-1 日本の再エネ大量導入に向けたパラダイムシフト：技術からのアプローチ

東京大学 瀬川浩司

はじめに - 世界の脱炭素化と再エネ導入拡大の流れは止まらない

2015年のCOP21におけるパリ協定の採択は、世界が地球温暖化対策として脱炭素化へ大きく舵を切ったことを象徴する出来事となった。ただしパリ協定以降に策定された各国の目標が順調に達成されたとしても、世界の平均気温の上昇を1.5°C以内に抑えることは困難であることが指摘されており、各国の様々な利害を色濃く反映した協定自体に抵抗感を抱く人々も多いだろう。また、これから起こるかもしれない気候変動による想定被害より、既に目の前にある貧困や飢餓、経済格差拡大などを解消するほうが先で、不合理な政策により自国の首を絞めて国際的地位の低下につながるようなことはすべきでなく、ましてや既存の産業構造を大きく変えることで企業の存続を危うくするようリスクは取りたくないという考えもわかる。これに加えて、ロシアのウクライナ侵略でより明確になった「エネルギー安全保障」とのジレンマに、各国は直面している。少しでも炭酸ガス排出を抑制できる安価な天然ガスにシフトしようとした結果、ロシアのしたたかな資源戦略に翻弄されてしまった欧州、それに対抗するために原子力発電の新增設にまで踏み込み180度方針転換をしたフランス、そうした各国を助けるために石油や天然ガスの増産に踏み切った米国、その流れで化石資源の増産を迫られている中東諸国など、エネルギーをめぐる世界の状況はまさに混迷を深めていると言えよう。

しかしながら、そのような状況とは無関係に、世界の多くの科学者は「もはや地球温暖化対策に時間的な余裕はない」と警告する。米国で甚大な被害をもたらした冬季の巨大竜巻や夏季の森林火災を例示するまでもなく、欧州、オーストラリア、東南アジア、中国、日本など世界各地でさまざまな気象災害が頻発しており、少なくとも国連を中心とする国際社会では科学者が指摘する危機感は共有されている。産業分野でも環境に配慮するESG投資が当然であり、新規石炭火力発電への新規投資などをもっての外で、2022年2月時点で世界の大手の金融機関やIT企業など350社以上がイニシアチブRE100(企業活動に必要なエネルギーの100%を再生可能エネルギーで調達することを目指す企業連合)に加盟するとともに事業運営全体の脱炭素化を達成できない企業は世界のサプライチェーンから排除されるという、従来では想定できなかった事態になりつつある。

一方で再生可能エネルギー導入では世界をリードしてきたドイツの現状はどうなっているかという点、2020年まで拡大を続け5割に達したドイツの再生可能エネルギー電力比率が、2021年は天候の関係で45%まで5ポイントも下がっている。そうすると、必ず登場するのが「だから再生可能エネルギーは頼りにならない」という意見である。しかしこれは完全に間違った話である。再生可能エネルギーは、100%国産エネルギーであり、最も低コストになり得るエネルギーであり、エネルギー安全保障に貢献するエネルギーなのである。もっと増やさなければならない。例えば、今回のロシアの暴走は、再生可能エネルギーの導入拡大がもっと進んだ世界であればおこらなかつたかもしれない。ロシアの天然ガスが無用の長物になっていけば、世界のエネルギーは今ほどの危機的状況にはならなかつたのだ。これは自国資源の乏しい日本にとってより重要である。日本のエネルギー安全保障のためにも、国内自給が可能な再生可能エネルギーの導入拡大はもっと急がねばならない。

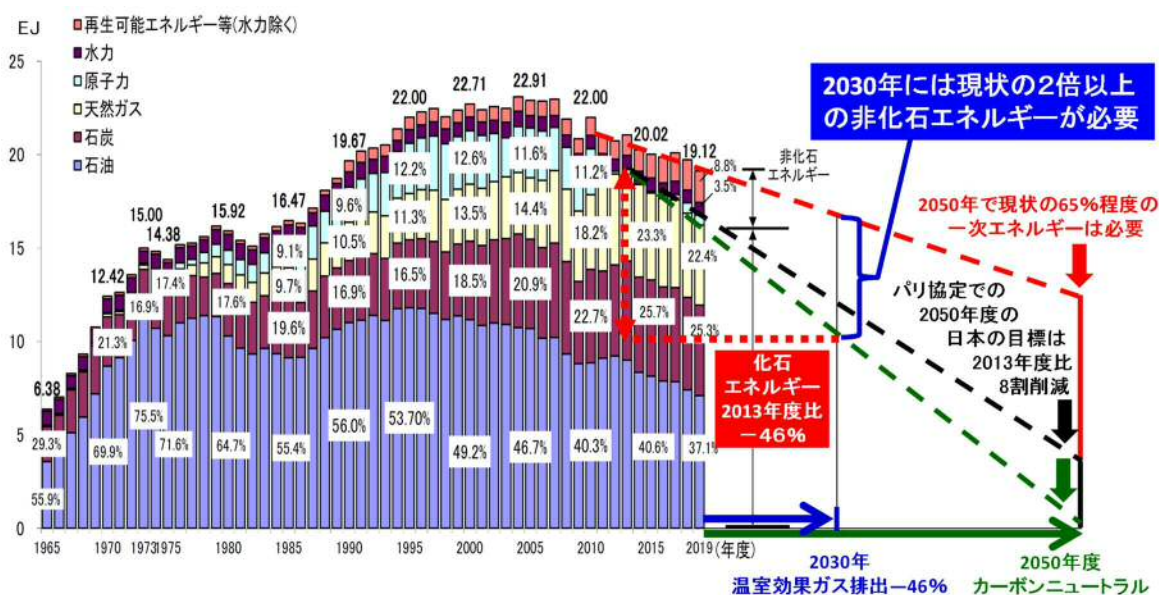
EUは、2021年7月に「国境炭素税(国境炭素調整措置)」の概要を発表し5年後の本格導入と世界標準化を目指す一方、持続可能な経済活動の分類体系である「タクソノミー」に合致する企業活動を示した「グリーン・リスト」を作成し2022年1月から適用を開始した。このリストには、脱炭素化までの過渡的な段階では一定の条件を満たす原子力の活用や天然ガスの利用も盛り込まれたが、最終的には再生可能エネルギーの導入拡大を目指す方針は変わっていない。EUは、既にカーボンプライシングでも先行しETS(Emission Trading Scheme)を導入していたが、それにしても動きが速い。コロナ禍からの経済回復に向けた「グリーンリカバリー」や、その先の「サーキュラーエコノミー」まで見据えて先手を取る戦略が透けて見える。こうした動きに対し、日本の政府や企業は常に後手に回っており実に心許ない。世界の企業が、既存のスタイルを大きく変えなければ、その存続

すら危ぶまれる事態を認識している。これが現在起こりつつある気候変動対策を軸としたパラダイムシフトであり、日本の産業界も遅ればせながらその状況を認識し始めた。

2-1-1 カーボンニュートラル実現には非化石電力の拡大が必須

気候変動の主因と考えられる温室効果ガスの約9割は二酸化炭素が占めており、その排出源の殆どはエネルギー由来である。このため地球温暖化対策には、まずエネルギー分野の変革が必須であり、この点では既存技術に加え合理的に導入可能な新技術への転換が求められるが、やはり欧米がかなり先行している。日本でも2020年10月に菅義偉内閣総理大臣（当時）が「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、2020年12月にグリーンイノベーション戦略が纏められた。2021年5月には地球温暖化対策推進法の一部改正案が成立し、2050年までのカーボンニュートラルの実現の明記、地方創生につながる再エネ導入の促進、企業の温室効果ガス排出量情報のオープンデータ化など3つの政策の柱が盛り込まれた。鍵になるのはまず科学技術、そしてそれらを活かす政策であり、それらを包含する政策パッケージが求められる。しかし、前章でも述べられたように2021年10月に閣議決定された日本の第6次エネルギー基本計画では、エネルギーミックスの目標割合があるだけで具体的戦略が描かれておらず、欧米の戦略とは比べようもない。いくら2030年に再生可能エネルギーを36~38%に増やすという目標を立てても、現状では具体的な導入支援策が示されておらず、まさに絵に描いた餅である。これが実現されなければ、第6次エネルギー基本計画は崩れ去る。本稿では、まず技術的視点から押さえておくべきポイントを述べ、次にこれを実現するための政策パッケージについて触れたい。

まず、過去半世紀ほどの日本の一次エネルギー供給の推移（図1）を振り返り2030年と2050年を展望してみよう。1960~70年代には、わが国の一次エネルギーの石油依存度は約7割で、これに石炭を加えると9割近くが化石エネルギーであった。その後、1973年と1978年の2度にわたるオイルショックを契機として「石油代替エネルギー」である原子力と天然ガスの利用拡大は進んだものの、2000年ごろまでは石油と石炭の使用量自体はさほど減っていない。一次エネルギー需要全体は2005年頃をピークに減少に転じたものの2011年東日本大震災以降の原子力発電の停止もあり、2013年には再び化石エネルギー依存が進み過去最大の二酸化炭素排出量になった。この2013年がパリ協定における日本の削減目標の起点である。この2013年を起点にして図1には化石エネルギーの2050年8割削減を黒点線、2050年10割削減を緑点線（仮想カーボンニュートラル）で加筆してある。もちろん、化石エネルギーの種別で二酸化炭素排出量は異なるし、ブルー水素を削減に加えるかどうかでも線の引き方は変わるが、大まかな目安として見てほしい。このようなとても粗い見積もりでも2030年の緑点線の削減率を見ると2013年比でびたりとマイナス46%になり、2021年4月に日本政府が出した方針と一致する。



（出所）経済産業省資源エネルギー庁のエネルギー白書2021の図に著者加筆

図1 日本の一次エネルギー供給の推移（1965年～2019年）と2050年までの予測

一方、2050年でもエネルギー消費はゼロにはできないので、現在の一次エネルギー総需要の減少傾向をそのまま直線で2050年まで伸ばすと赤点線（これも省エネ率の見積もりを直線で引くのは乱暴だがご容赦いただきたい）のようになり、2050年には最低でも現在の65%程度の一次エネルギーは必要になる。この赤点線と緑点線の差が、想定される非化石エネルギー（脱炭素エネルギー）需要ということになる。まず2030年に注目すると、10年も無い短期間でCCSと組み合わせたブルー水素やそのサプライチェーン構築、FCV(Fuel Cell Vehicle)などの普及などが一斉に進む見込みは無く、2030年時点では「脱炭素化＝現状で使える非化石電力の導入拡大」と考えざるを得ないだろう。これは「非化石電力の絶対量を増やす」ということに他ならない。ところが、第6次エネルギー基本計画では「比率のつじつま合わせ」のために2030年の電力消費を現状と比べても低く見積もっており、輸送用燃料の脱炭素化が全く進まない計画になっている。非化石電力にカウントできる一般水力発電によるエネルギー供給は1960年代以降全く変わっておらず、今後の増加は期待できない。また、原子力発電も仮に再稼働が進み最大60年までの運転延長が認められたとしても、2050年には主要なエネルギー源にはならない。そうすると、非化石電力の拡大は太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーで賄う必要が出てくる。例えば、2030年の温室効果ガス排出マイナス46%の達成には、非化石エネルギー全体で少なくとも現状の2~3倍、一般水力や原子力が増えない前提を受け入れると太陽光発電や風力発電などは現状の3~5倍は必要になる。これは、過去9年間のFIT(Feed-in Tariffs)以上の導入促進政策を打たねばならないことを意味する。しかしその具体策は全く見えてこない。

ここで、ドイツの最新の電力政策を見てみよう。ドイツ連邦政府が発表したClimate Action Programme 2030「Lower CO₂ emissions from energy generation」によれば、2030年温室効果ガスの削減目標を日本のそれよりはるかに高い63%削減とし、2030年には太陽光発電1億kW(100GW)、陸上風力発電7100万kW(71GW)、洋上風力発電2000万kW(20GW)、バイオマス発電840万kW(8.4GW)を導入し、再生可能エネルギー電力の割合を65%まで引き上げる目標を発表している。ドイツの場合、現在の最大電力需要日でも8000万kW(80GW)程度なので、2030年の再生可能エネルギー電力導入目標合計が約2億kW(200GW)で現在のピーク需要の約2.5倍というのはかなり大きな数字で、電力需要の大きな増大を見込んでいるのがわかる。これに加え、2020年6月、ドイツ連邦政府は「国家水素戦略」を採択しているが、その中で対象とする水素は「グリーン水素」すなわち再生可能エネルギー電力で作る水素であることを明示している。具体的には、2030年までに水素電解プラントを500万kW(5GW)に拡大しグリーン水素14TWhを供給し、2040年までにこれを1000万kW(10GW)規模まで拡大するとしている。再生可能エネルギー電力を増やすと同時にグリーン水素でエネルギー貯蔵・活用を促すという政策をパッケージで進めているのである。このように、カーボンニュートラルの実現には、再生可能エネルギー電力の導入拡大と輸送用エネルギーの電化に向けた電力消費拡大がセットで必要なのである。これは、特にドイツに限ったことではなく自明の話であり、世界でも日本でも同じ道を進まざるを得ない。

2-1-2 日本の電力の脱炭素化に必要な条件は何か

日本の場合、電力の脱炭素化をどのように進めるべきか考えてみよう。ここで、2020年末の日本の再生可能エネルギー導入状況(表1)を確認しておこう。表1は、2021年5月に経済産業省資源エネルギー庁から発表された2020年末の日本の再生可能エネルギー電力のデータをもとに著者が作成した設備導入状況の纏めである。まず目を引くのが、FIT開始以降の太陽光発電の急拡大である。FIT開始前は、合計で約500万kWであったが、現在は約6000万kWと9年ほどで約12倍になっている。その内訳をみると、住宅用が約2.4倍であるのに対し、非住宅用の大規模設備が約180倍で、全体の約8割を占めている。日本の場合、どこの地域でも日照条件にあまり差は無く、失敗事例は極めて少なく安定した事業収益が期待できるためにファイナンスも付きやすかったという事情もある。

これに対し、風力発電は FIT 開始前の 2 倍にも到達しておらず、太陽光発電に比べると一桁小さい。これは、日本国内で年間平均風速 7 m/秒以上の風が期待できる風力発電適地が限られており、そのような適地に限って電力系統が弱い接続が難しく、また環境アセスメントなどの手続きや工期などの問題でリードタイムが長くかかることが原因になっている。このため、風力発電の導入拡大には着床式の洋上風力に期待が集まっている。その他の再生可能エネルギーの中では、中小水力発電の導入量は風力発電のそれに比べても五分の一程度にとどまり、地熱発電ではさらに厳しく合計導入量で 10 万 kW にも届かず、全体から見ればほぼ誤差範囲である。地熱発電も、計画から発電開始までの期間が長く、認可にかかる手続きも大変で、ファイナンスも付きにくく、よくメディアで取り上げられている「日本は地熱大国」といった話とはかけ離れている。2030 年までにこのような状況が改善する可能性は殆どなく、きちんと現実を見た上でのエネルギー戦略が必要になる。一方、最近急拡大を始めたのがバイオマス発電である。バイオマス発電はほぼ既存技術で対応でき、リードタイムも短いため、その設備容量は既に風力発電に迫っている。しかしながら、燃料の調達については海外からの安い木材チップが使われるなど、本当に脱炭素化に繋がるかどうかといった問題もあり、慎重な対応が求められる。

表 1 日本の再生可能エネルギー電力設備導入状況（単位万 kW、2020 年末一般水力を除く）

分類	20 年末の 導入量 制度前後計	12 年 6 月迄 の導入量 買取制度前	12 年 7 月以 降の導入量 買取制度後	20 年末の 未稼働設備	買取制度認 定設備容量	20 年末の 認定設備の 稼働割合	認定済設備 100 % 稼働 時の導入量
分類記号	A+B	A	B	C	B+C	B/B+C	A+B+C
太陽光発電合計	5,984	499	5,485	1,982	7,467	73.5%	7,966
* 住宅用太陽光発電	1,218	472	746	34	780	95.6%	1,252
* 非住宅用太陽光発電	4,766	27	4,739	1,948	6,687	70.9%	6,714
風力発電	448	252	196	788	984	19.9%	1,236
中小水力発電	90	23	67	75	142	47.2%	165
地熱発電	9.2	0.1	9.1	3.3	12.4	73.4%	12.5
バイオマス発電	403	142	261	539	800	32.6%	942
合計	6,934	916	6,018	3,387	9,405	64.0%	10,321

* 「住宅用太陽光発電」は 10 kW 未満、「非住宅用太陽光発電」は 10 kW 以上として整理

以上の点を考慮すると、2030 年時点で再生可能エネルギーの導入拡大を進めるには、太陽光発電の導入拡大が最も現実的であろう。太陽光発電協会（JPEA: Japan Photovoltaic Energy Association）は、現状の国内設置太陽光発電 6000 万 kW に対し、2030 年に 1 億 2500 万 kW の導入目標を示している。この目標は、住宅用太陽光発電が 3100 万 kW（現状の約 2.5 倍）、非住宅用太陽光発電が 9400 万 kW（現状の約 2 倍）である。これら以外の太陽光発電、例えば耕作放棄地の活用や農地を利用するソーラーシェアリング、都市部の ZEB（net Zero Energy Building）や ZEH（net Zero Energy House）なども積み上げていく必要がある。日本では 2020 年から従来の FIT に変わりフィードインプレミアム（FIP）がスタートし太陽光発電投資に対してはブレーキがかかってしまったが、こうした問題を打開し産業部門の再生可能エネルギー需要をカバーするだけの太陽光発電の導入拡大を行うには、企業の内部留保を活用しやすくする大胆な税控除やオンサイト・オフサイト PPA（Power Purchase Agreement）に対する支援、自治体による遊休地提供などを組み合わせた政策パッケージが必要になるだろう。

ちなみに電力の脱炭素化は、再生可能エネルギーの導入拡大以外にも、「火力発電に CCS を導入する」、「原子力発電の利用拡大（新增設含む）」なども考えられる。しかしながら 2030 年までに火力発電に CCS を導入する

ということは可能であろうか。これには、CCS を行うための適地確保・環境アセスメント・経済的合理性など、いずれも高いハードルがあり、2030 年までの本格実用化は不可能である。仮に、ある程度の実証事業が進んだとしても、二酸化炭素排出量削減に対する貢献は微々たるものと言わざるを得ない。これまで日本政府が各国に売り込んできた「高効率石炭火力」も実際には最高出力で運転しているときのみ効率が高いだけであって、出力調整には不向きで効率も悪くなることが判っており、「脱炭素化」のキーワードの下では受け入れがたい技術である。日本だけで盛り上がりを見せるこのような技術は、欧米では「石炭火力の延命」と見做されており期待が高まらないのは当然のことであろう。

次に第3の選択肢である原子力発電の利用拡大はどうか。これは、この後の章でも触れられるが、現在の政策を続ける限りは2030年にも、その先の2050年にも日本の電力のボリュームゾーンを担うことはないであろう。最近話題を集めるSMR (Small Modular Reactor) は、あたかも新技術の様に宣伝されているが、実は1950年代からある古い技術であって既存の大規模原子力発電よりあまりメリットが無く経済性にも劣るため導入が進んでこなかったことを忘れてはならない。最近では日本の資金を充てにして海外からの共同開発の案件が来ているようだが、日本の独自開発でもない限りとても合理的な選択には見えない。もちろんこれらの技術開発をすすめることは、選択肢を増やすという意味で否定はしないが、どの時点で実現可能なのか(時間軸)、どのぐらいの供給量を担えるのか(定量軸)、の2点を客観的かつ冷静に見極めて施策に反映させる必要がある。

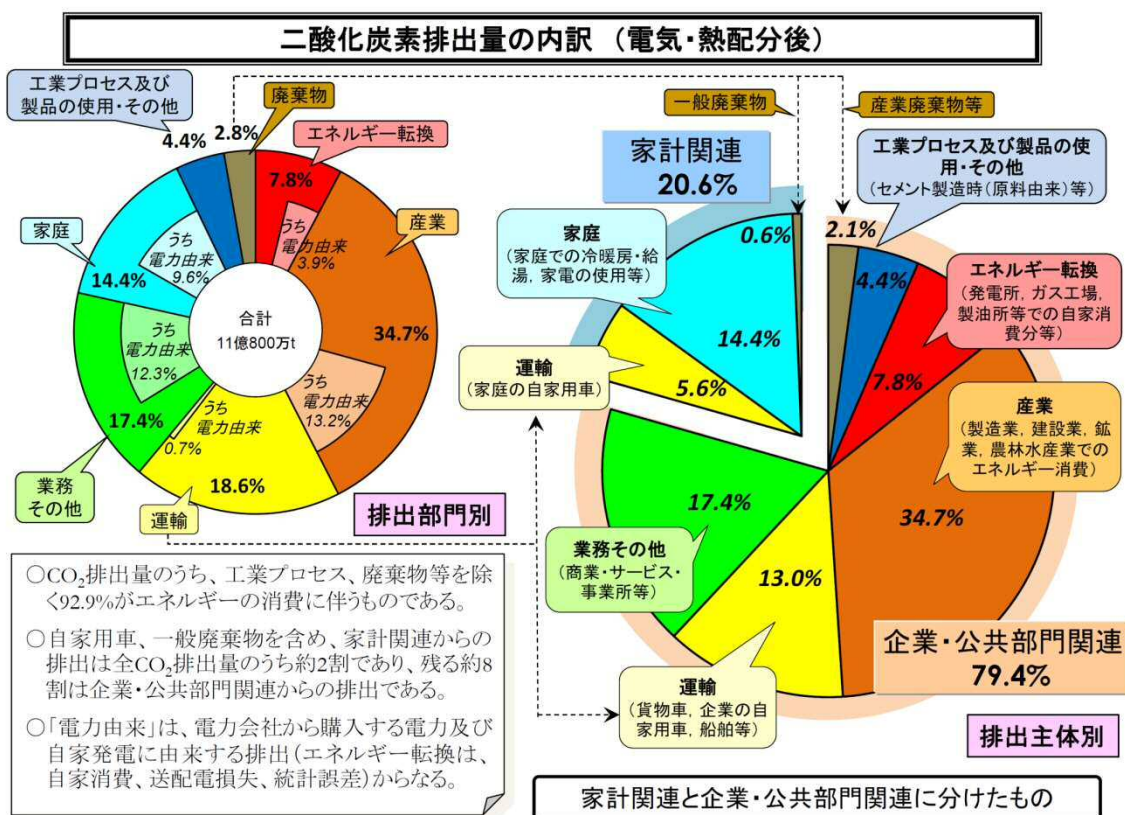
以上の脱炭素電源の構成を考えることは、戦略的な系統整備を考える上でとても重要である。ともすると、系統に流せる再生可能エネルギーには上限があるかのような間違った議論を聞くこともあるが、系統安定化に向けた電源構成を考える上では発電と電力消費の同時同量さえ達成すれば良いのであり、それに向けた最小限の系統整備で余計な負担を削減することができる。例えば、北海道の再エネは北本連携や東北電力を経由するのではなく直接海底直流送電で調整力が豊富にある東京電力に繋いだ方が低コストである。VPP (Virtual Power Plant) の利用も脱炭素電源の構成を先に決めた方が単純化できる。慣性力不足の問題も、PCS (Power Conditioning System) の高性能化で解決できる見通しもある。変電所に設置する大型蓄電池もこれから低コスト化が進むだろう。系統制御に関する技術は割と短期間に進歩するものと考えられる。

2-1-3 セクター別アプローチではなく「セクターカップリング」が役に立つ

ここで、環境省から発表されているわが国の二酸化炭素排出量の内訳(図2)を見てみよう。左の排出部門別の二酸化炭素排出量の円グラフには、電力由来の二酸化炭素排出を内数%で記載してある。電力部門の脱炭素化も一筋縄ではいかないことを既に述べたが、それでもその他の部門に比べれば技術的なハードルは低く、政策的な後押しさえあればなんとか可能である。一方、電力を除いた場合の最大のボリュームゾーンである産業部門の二酸化炭素排出(約21%)の削減は容易ではない。特に、鉄鋼業やセメント業のように生産を減らす以外に10年やそこらでは二酸化炭素排出の削減ができない業種があることにも注意が必要である。次のボリュームゾーンは、運輸部門の二酸化炭素排出(約18%)である。運輸部門については、小型自動車のEV化、大型輸送車両のFCV化、鉄道輸送の拡大等により脱炭素化を進めることができれば、産業部門に比べればハードルは低いと考えられる。このことは、日本だけでなく欧米でも同じであり、特に欧米でガソリン車廃止とEV普及策が進んでいるのは合理的であり、世界的に見ても今後10年で急速なEVシフト(ハイブリッドを除く)が起こることは間違いない。このような運輸部門の脱炭素化加速は、急な脱炭素化が困難な産業部門の技術開発に時間的余裕を与える意味でも必要な施策なのである。この点では、何のメッセージも出さない日本政府は、無責任と言わざるを得ない。このような姿勢は結果的には日本の産業部門と運輸部門の双方にダメージを与えることになる。既に、日本の大手自動車メーカー自体はEV化は避けられないと見て実質的な活動をスタートしている。一方、トラックなど大型車両での利用拡大が見込まれるFCVについては、燃料の水素の供給が問題となる。一般には「ブルー水素から入ってグリーン水素がゴール」というような意見もあるが、サプライチェーン構築の観点では両者は相いれず、おそらくブルー水素への投資は無駄になるであろう。このため、ドイツは最初からグリーン水素である。グリーン水素も元は再生可能エネルギー電力から作らざるを得ないので、結局電力需要の増大に行きつく。

やはり今後も主役は電力で、水素の利用が進むとすれば電力を軸にした中で水素をどのようにうまく組み合わせて行くかということになる。例えば電力と組み合わせた「水素 FIT」のような新施策も必要になるだろう。大事な視点は、「電力 or 水素」ではなく「電力と水素のセクターカップリング」である。

図2の右の円グラフは、運輸部門の二酸化炭素排出量を家計関連と企業・公共部門関連に割り振ったものだが、前者が約2割で後者が約8割を占めている。やはりボリュームゾーンは企業・公共部門関連なので、2030年マイナス46%はこの領域の構造転換をあと10年にも満たない期間でどのように進めるのか、真剣に考える必要がある。コロナ禍で始まった在宅勤務やオンライン業務の推進は脱炭素化にも有効であるし、エネルギー消費構造の転換によるエネルギー転換部門の脱炭素化、ZEBやZEHの推進による業務部門や家庭部門の脱炭素化など、セクターを超えたアプローチが必要になる。このようなセクターカップリングには、Society 5.0が描く日本の未来図(図3)が参考になる。これを見ると、気象情報、発電所の稼働状況、EVの充放電、各家庭での使用状況といった様々な情報を含むビッグデータをAIで解析することにより、「的確な需要予測や気象予測を踏まえた多様なエネルギーによって安定的にエネルギーを供給すること」「水素製造や電気自動車(EV)等を活用したエネルギーの地産地消、地域間で融通すること」「供給予測による使用の最適提案などによる各家庭での省エネを図ること」などが想定されている。これらはまさにセクターカップリングのための技術と言い換えても良い。このような取り組みをいかに各地域に取り込むのが、脱炭素化の鍵になるだろう。



出典：環境省ホームページより

図2 二酸化炭素排出量の内訳 (2019年度)



図3 Society 5.0 新たな価値の事例（エネルギー）

2-1-4 日本に必要な科学技術を活かす政策パッケージ

日本の研究者は、これまでカーボンニュートラルに欠かせない様々な科学と技術を生み出してきた。真鍋博士は、大気と海洋を結合した物質循環モデルを提唱し、二酸化炭素濃度の上昇が地球温暖化に影響するという予測を世界に先駆けて発表し警鐘を鳴らした。吉野博士のリチウムイオン電池は、EV はもとより再生可能エネルギーの普及拡大や省エネに繋がる次世代通信、電気自動車や各種の電動モビリティには欠かせないものとなっている。赤崎博士らの青色 LED は、世界の省エネルギーに貢献している。さまざまな太陽光発電技術も水素技術もこれまで日本の技術者がけん引してきた。もしこのような日本発の研究が無ければカーボンニュートラルなど全く成り立たないし、日本の貢献は本来ならば世界的にももっとリスペクトされるべきであろう。それにもかかわらず日本が国際舞台で毎年のように「化石賞」を携えて帰ってくる姿や、日本が脱炭素化の足を引っ張っているかのような報道は、日本の科学者の一人として耐え難い屈辱である。カーボンニュートラルに貢献する日本の科学と技術は、他にも数多くあるし、今後もそのような研究が数々生み出されることだろう。良い意味でのこれからの地球の進化は、気付けば日本の研究者の貢献で成されているのかもしれない。このような研究には、何年たっても変わらない普遍的価値がある。日本に欠けているのは、このような研究を活かす産業とそれらを包含する戦略的な政策パッケージである。この政策パッケージの成否が、日本の将来を決定付けるのではないか。

参考文献

- ・「我が国の再生可能エネルギー利用拡大に向けてー日本学術会議エネルギー供給問題検討分科会平成 26 年 9 月 26 日中間報告書より」太田 健一郎, 瀬川 浩司, 学術の動向, 2016 年 21 巻 4 号 p.10-21.
- ・「カーボンニュートラルと地域のエネルギー戦略」瀬川浩司, 日本の先進技術と地域の未来, 松原宏, 地下誠二 編, 第 II 部「未来技術と地域」第 6 章, 2022 年.