

Potential of substitution of fossil resource consuming materials with biomass - aiming for 80% reduction of CO₂ emission by the year 2050 -

Fujinori HANAWA

化石資源消費型材料の木質バイオマスによる代替のポテンシャル — 2050年CO₂排出量80%削減を目指して —

埜 藤徳

Abstract

To attain 80% reduction of CO₂ emission from fossil energy consumption (FEC) of the year 2013 (19.339 EJ) in 2050, the FEC must be less than 3.868 EJ in 2050. Assuming the following three paradigm shifts (PS), 1) reduction of energy demand of all energy consuming sections (including the loss of material production processes but except the energy used for materials themselves) to 70% of those of 2013 in 2050, 2) electrification of all of the transportation, and 3) introduction of CO₂ non-emitting electricity generation that is equivalent to 1000 GW photovoltaic power plant (PVPP), and the expected population reduction to 80% of that in 2013, the energy demand of Japan in 2050 still exceed 1.818 EJ from the energy supply of FEC (3.868 EJ) added to the energy from the PVPP (3.600 EJ). The fourth PS, substitution of part of iron and cement mainly used for construction by 16 million tons of cutting edge woody biomass materials such as cross laminated timber (CLT) that could be used for mid-to-high rise buildings, could reduce another 0.845 EJ for materials leaving 0.973 EJ of energy demand that should be supplied by non fossil energy or eliminated by carbon capture and carbon fixing technologies in the future.

Keywords: Wood, Biomass, Cross Laminated Timber, Cellulose, Materials, Carbon dioxide, Substitution of Steel
キーワード：木，バイオマス，直交集成板，セルロース，材料，二酸化炭素，鉄代替

1. はじめに

化石資源の枯渇対策および地球温暖化防止を目的に日本政府は、2050年までに温室効果ガス排出の80%削減目標を掲げた。しかしながらこの目標の達成は、エネルギーの供給と消費の両面で技術的にも社会的にも大きな変革を伴う極めて困難なものである事が予想される。中央環境審議会地球環境部会が2017年3月に公表した「長期低炭素ビジョン」⁽¹⁾においても、現在ある技術分野を網羅的に紹介した上で、カーボンプライシングの導入に

よる国民の活動の成り行き的な社会変化後の「長期大幅削減の絵姿」が描かれているのみである。しかしながら、2050年までに温室効果ガス排出の80%削減目標を達成するためには、カーボンプライシングによる国民活動の低炭素化への誘導も大切ではあるが、今ある、あるいは今後発展が期待されるどの技術を如何に使い、どの程度の再生可能エネルギー等の二酸化炭素を排出しないエネルギー源の導入による化石燃料の代替が必要なのか、あるいはどの程度の省エネ、エネルギー消費の削減を行えば当該目標が達成できるのかという観点からの具体的な見込みは示されていない。

Department of Forest Resource Chemistry, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan
e-mail: fujinori@ffpri.affrc.go.jp

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
森林資源化学研究領域
(〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1)
e-mail: fujinori@ffpri.affrc.go.jp

Table 1 Energy balance flow of Japan in 2013 (EJ)

Primary energy supply	Conveyed energy, conversion consumption and loss	Sub total	Final energy consumption by sector	Sub total	Final energy consumption by energy sources	Sub total
Nuclear power gen.* 0.080	Utility generation		Household		Electric power	
Hydroelectric, Geothermal and Alt.*Power gen.* 1.580	Electric power 2.982		Electric power 1.027		Household 1.027	
Natural gas 5.085	Generation loss 4.630		City gas 0.410		Business 2.389	3.416
Oil 8.977	In-house power gen.*		OBP* 0.558		Transportation	
Coal 5.277	Electric power 0.498	3.480	Others 0.018	2.013	Passenger 1.977	
Fossil energy sub total 19.339	Generation loss 0.819		Transportation./passenger		Freight 1.259	3.236
Total 20.999	IHC* and TD* loss 0.281	5.730	Gasoline 1.538		OBP*	
20% of fossil fuel 3.868	City gas** 1.134	1.134	Diesel oil 0.129		Household 0.558	
	Conversion loss** 0.570	0.570	Jet fuel 0.127		Business 3.111	3.669
	Household		LPG and EP* 0.183	1.977	Gas	
Abbreviations	Kerosen, LPG* 0.558	0.558	Transportation./Freight		Household 0.410	
BFB*: blast furnace blowing	Transportation		Gasoline 0.310		Business 0.724	1.134
CB*: cement bakig	Gasoline 1.847		Diesel oil 0.811		Coal and Heat	
CBP*: Coal-based products	Diesel oil 0.940		Heavy oil, & others 0.138	1.259	S & H* for IH* 0.898	
CL*: conversion loss	Others 0.380	3.167	Business		Coal and CBP* 1.585	2.483
EP*: electric power	Power gen., Industry, heavy oil etc.		City gas 0.654		Others	
IH*: In-house	Conversion loss 1.797	1.797	Natural gas 0.070	0.724	Household 0.018	
IHC*: In-house consumption	OBP* for Industry 3.111	3.111	Alternative energy 0.090		Alt. energy 0.090	0.108
LPG*: liquefied petroleum gas	S & H* for IH* use 0.898	0.898	Electric power 2.389		Total 14.046	
OBP*: Oil-based products	Conversion loss 0.269		OBP* for Industry 3.111			
S & H*: Steam and heat	Conv.* consumption 0.137	0.406	S and H* for IH* 0.898			
TD*: transmission and distribution	Coal for BFB* and CB* 0.462		Coal and CBP* 1.585	8.073		
alt*: alternative	CBP* for Industry 1.123	1.585	2.214			
conv.*: conversion	Conv.* consumption 0.629	0.629				
gen*: generation						
	Total 23.065		Total 14.046			
	Total loss 9.132					

City gas**, Conversion loss**: The converted energy for city gas (1.704 EJ) shown the original flow chart was very larger than that of final consumption (1.134 EJ) and no conversion loss was shown in the chart. The difference of them (0.570 EJ) was therefore added as a conversion loss and 1.134 EJ was used as a converted energy for city gas in this table.

本報告では、我が国において過去に化石資源の消費に基づく二酸化炭素の排出量が最も多かった 2013 年を基準に、そこからエネルギー起原の二酸化炭素の排出量の 80% 削減を行うために、何が必要であるのか、あるいは、我が国のエネルギー消費活動のどの部分をどのように変化させれば、その目標が達成可能なのかという事について論じてみたい。この際、当該目標の達成のために、電気やガス、ガソリン、灯油、石炭、コークス、熱などの「燃料」の利用法としてのエネルギー使用量の削減に目が行き勝ちであるが、実際には化石資源を基に生産される鉄やセメント、合成樹脂等の「材料」の生産方法の省エネ、あるいは材料そのものの低炭素素材への代替、軽量化などが重要な意味合いを持っている。このため今回は、鉄を中心とした化石資源消費型材料の木質バイオマスによる代替のポテンシャルについて考察する事で、2050 年に二酸化炭素排出を 80% 削減した社会を実現するための議論の叩き台を提供してみたい。

2. 我が国の 2013 年のエネルギー消費構造

表 1 に、2015 年度「エネルギー白書」⁽²⁾ に掲載された 2013 年度の日本のエネルギーバランス・フローの概要を表にしたものを示す。この年日本は、石炭・石油・天

然ガスを合わせた 19.339 EJ に加え、水力・地熱・新エネ・原子力を用いて合計 20.999 EJ の一次エネルギーを使って(表の左列)、エネルギーの転換・精製を行い、この際、自家消費を含む 9.132 EJ の損失を伴いながら、3.480 EJ の電力、1.134 EJ の都市ガス等、3.167 EJ の輸送用燃料、0.558 EJ の家庭用灯油・LPG、3.111 EJ の産業用石油製品、0.898 EJ の産業用蒸気・熱、1.585 EJ の高炉吹込・セメント焼成用石炭およびコークス・副生ガス等石炭製品のエネルギーを供給した(左から 2 番目の列)。(ただし、供給エネルギーと転換損失等の合計は 23.065 EJ で、これは一次エネルギー総供給量 20.999 EJ よりも約 2 EJ 近く大きい。)家庭部門、運輸部門、業務・産業部門では、これらから夫々 2.013 EJ、3.236 (=1.997+1.259) EJ、8.797 (=0.724+8.073) EJ のエネルギーを消費した(右から 2 番目の列)。後者を元に最終エネルギーとして消費されたエネルギーを、エネルギーの形態別に再度編成し直して見ると、電力(3.416 EJ)、輸送用燃料(3.236 EJ)、石油製品(3.669 EJ)、ガス(1.134 EJ)、石炭と熱(2.483 EJ)、その他(家庭のその他の消費エネルギー、0.018 EJ および、新エネ 0.090 EJ)に分類することができる(右側の列)。ただし、右から 2 番目の列で旅客用欄に一括計上されている LPG と電力(0.183EJ)は、右側の列でもそのまま旅客用として計上した。

Table 2 Final energy demand (EJ) in 2013 and an example of final energy demand in 2050, and virtual photovoltaic plant capacities (GWpv) to meet those demands supposing 1000 GW PV produce 1 PWh/year of electricity.

Electric power		2013		Demand reduction by 2050 (70% of 2013)		Population reduction by 2050 (0.8 times of 2103)		Population reduction by 2050 (0.8 times of 2103)		
		Demand	PV plant capacity	Demand	PV plant capacity	Demand	PV plant capacity	Demand	PV plant capacity	
Household	Household	1.027	285.278	0.719	199.694	0.575	159.756	0.575	159.756	
	Business	2.389	663.611	1.672	464.528	1.338	371.622	1.338	371.622	
	Subtotal	3.416	948.889	2.391	664.222	1.913	531.378	1.913	531.378	
Trans- portation		2013		Demand example at 2050 (EV efficiency 3.25 times*)		Population reduction 0.8 times of 2103		In case of 50% HV and 50% EV		
		Demand	PV plant capacity	Demand	PV plant capacity	Demand	PV plant capacity	Gasoline Demand	Electricity Demand	PV plant capacity
Passenger	Passenger	1.977	549.167	0.608	168.974	0.487	135.179	0.295	0.243	67.590
	Freight	1.259	349.722	0.387	107.607	0.310	86.085	0.188	0.155	43.043
	Subtotal	3.236	898.889	0.996	276.581	0.797	221.265	0.483	0.398	110.632
Required virtual PV capacity					940.803		752.643	642.010		
		2013 Demand		0.56 times*		2013 Demand		0.56 times		
Oil-based products	Household	0.558		0.312		Conversion loss				
	Business	3.110		1.742		Steam and heat		0.269	0.151	
Gas, Coal, Heat	Household	0.410		0.230		Conversion consumption				
	Business	0.724		0.405		Oil		1.797	1.006	
	Heat	0.898		0.503		Coal		0.629	0.352	
	Coal-based	1.585		0.888		Steam and heat		0.137	0.077	
Subtotal		7.285		4.080		Subtotal		2.832	1.586	
Total		13.937		6.789						

3.25 times*: Expected efficiency improvement obtained from table3.

0.56 times*: Reducrion rate obtained from demand reduction by energy saving (0.7) multiplied by population reduction (0.8).

なお、右側と右側から 2 番目の列の夫々の最終消費エネルギー合計値 14.046 EJ は、左側から 2 番目の列の転換部門からの総供給エネルギー (23.065 EJ) から、転換ロスの合計 (9.132 EJ) を減じた値より 0.113 EJ 大きな値になっているが、これは白書のエネルギー収支フロー図において上述の家庭のその他の消費エネルギー、0.018 EJ および、新エネ 0.090 EJ が転換部門を経ずに最終消費エネルギーに計上されているためであり、これを考慮すれば、表 1 の 転換部門からの供給エネルギーとの差は 0.005 EJ となり、表 1 中の各値は、ほぼ矛盾のないものとなっている。また、白書のエネルギー収支フロー図を表にするにあたり、フロー図に記載されていなかった都市ガスの転換ロス (0.570 EJ) は、フロー図中に示された転換部門からの供給量 1.704 EJ から最終消費された都市ガスの量 (1.134 EJ) を減じたものとした (なお、2015 年エネルギー収支を掲載した 2017 年度版の白書には、ほぼ同等の都市ガス転換ロス、0.675 EJ が計上されている為、2015 年度版の白書の記載ミスと考えられる)。

上記より、2050 年までに 2013 年度比で温室効果ガス排出 80% 削減目標を達成する場合でも、2013 年度の石炭・石油・天然ガスによる一次エネルギー供給量 19.339 EJ の 20%、すなわち 3.868 EJ の化石エネルギーが使える事になる。(ただし、化石燃料の種類とその利用方法、利用装置の効率により各化石燃料の単位量当たりの二酸化炭素排出量は異なるが、ここでは二酸化炭素排出量を化石燃料の供給量で概算するものとする。) しかしながら、これだけでは 2013 年度に消費した最終エネルギー 14.046 EJ を賄うことは到底不可能であり、我が国におけ

るエネルギー消費のかなりの部分を占めるエネルギーの転換損失および自家消費 9.132 EJ を含めエネルギー消費を極力減らなければならない。

3. 2050 年、化石資源使用に基づく二酸化炭素 80% 削減達成の見込み (2013 年度比)

上述のエネルギー転換損失の内、電力に関しては、電力源を二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーを中心とした非化石電源に代える事により当該損失 5.730 EJ をゼロに近づける事が理論的に可能であるが、石油の精製、石油・石炭製品の生産に関するエネルギー効率を上昇させるのは容易ではなく、これらの転換損失 (各々、1.797 EJ および 0.629 EJ) は、石油製品や石炭製品の生産の減少に比例して減少すると考えるのが妥当であろう。

初めに、2050 年までに対 2013 年度比で二酸化炭素排出 80% 削減目標を達成するためのシミュレーションを試みた結果を表 2 に示した。ここでは議論を理解し易くするために、二酸化炭素を発生しない非化石電源の代表として太陽光発電を考え、1 TW (1000 GW) の太陽光発電設備で年間に 1 PWh のエネルギーが供給できるものとし、各部門のエネルギー需要を賄うために必要とされる温室効果ガスを発生しない非化石電力生産設備量を、太陽光発電設備に換算した場合の発電設備量 GWpv として計算した (ただし、太陽光発電設備 1000 GW 相当の非化石発電設備の発電方法とその導入量や割合については本稿では議論しない)。

2013 年度の家庭部門と業務・産業部門の電力需要 3.416 EJ および運輸部門のエネルギー需要 3.236 EJ を賄うためには、各々の部門に対し 949 GWpv および 899 GWpv の太陽光発電換算の発電設備が必要となる。仮に現状で考えうるあらゆる手段を尽くして 2050 年までに家庭部門および業務・産業部門の省エネが進みエネルギー需要が 2013 年の夫々の 70% になると仮定し（パラダイムシフト 1）、さらに自動車を中心に電気自動車の普及が 100% になり運輸部門のエネルギー効率が 3.25 倍（第 6 章参照）になると仮定した場合（パラダイムシフト 2）の前 2 者の部門、および後者部門の電力需要は各々 2.391 EJ および 0.996 EJ となり、これらを賄うためには各々 664 GWpv および 277 GWpv の太陽光発電換算の非化石発電設備が必要となる。（なお、パラダイムシフト 1 については、経済産業省が経済成長率、人口推計を踏まえ、産業部門、業務部門、家庭部門、運輸部門において、技術的にも可能で現実的な省エネルギー対策として考えられ得る限りのものを、夫々積み上げて行った 2030 年度にかけて 35% の大幅なエネルギー効率の改善³⁾ を参考に設定した。）従って、仮に家庭及び業務・産業部門の電力需要 3 割削減および運輸部門の完全電化が達成されれば、当該部門のエネルギー供給に必要な発電設備容量は 941 GWpv であり、これは、2013 年度の全ての電力需要を賄うために必要と計算される 949 GWpv を下回っている。このため、本論考では、当面の目標として 1000 GWpv の非化石発電設備を 2050 年までに導入する事（パラダイムシフト 3）を基に議論を進める。

上記の省エネの進展による対 2013 年度比 70% へのエネルギー需要の低下に加え、現状の 80% になると予想される 2050 年の我が国の人口⁴⁾ を考慮すると、家庭及び業務・産業部門の電力需要および運輸部門のエネルギー需要は、各々 1.913 EJ（必要発電設備容量 531 GWpv）及び 0.797 EJ（必要発電設備容量 221 GWpv）となる。このため、1000 GWpv の太陽光発電設備換算の二酸化炭素を排出しない発電設備が導入できれば、後者から前 2 者の和を差し引いた 248 GWpv の設備から生産される 0.248 PWh（0.893 EJ）のエネルギーを他の部門で使える事になる。2050 年の電力および運輸用エネルギー外のエネルギー需要（石油製品、ならびにガス・石炭・熱）に対する需要も、電力および運輸用エネルギーと同様に省エネおよび人口減により 2013 年度（7.285 EJ）の 0.56 倍（4.080 EJ）に、それらを生産するための損失および自家消費分（2013 年、2.832 EJ）も同 0.56 倍（2050 年、1.586 EJ）になると夫々仮定した場合、その合計は 5.666 EJ とるが、これは 2013 年度に一次エネルギーとして供給した化石燃料の 2 割である 3.868 EJ を 1.798 EJ 超過している。仮にこの超越分に対し、前述の 1000 GWpv の二酸化炭素非排出の発電設備から生産されるエネルギー

と、上記で仮定した家庭及び業務・産業部門の電力需要および運輸部門のエネルギー需要の差（0.893 EJ）を補充したとしても、0.905 (=1.798-0.893) EJ 足りない。この差を埋めるための一つの方法として、さらに 251 GWpv 分の二酸化炭素非排出エネルギー生産設備を増設すれば理論的には、2050 年の日本のエネルギー起原の二酸化炭素の排出量を 2013 年度の 20% に抑えることが計算上は可能であるが、発電設備を増設するか、省エネを進めるか、あるいは二酸化炭素排出を伴わないエネルギー生産もしくは二酸化炭素循環技術を開発するか、もしくはそれらの全てを取り入れるかは、社会の動向次第である。

ただし、上記のうち材料生産に関するエネルギー需要に関しては、その生産工程の省エネ化を進める事は可能であるが、材料その物については、当該材料の消費が減らない限り、エネルギー需要を減じる事はできないので、他のアプローチが必要となる。

なお、国内外の再生可能エネルギーの導入状況および将来の導入予測から我が国に於ける当該エネルギー導入を予測した「平成 26 年度 2050 年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書」⁵⁾ によると、我が国では同年における再生可能エネルギーの高位導入予測として、403.1 GW（文献中の表 4-7）の当該エネルギー設備（同文献中の表 4-9 に示された発電効率から戸建住宅用 PV 設備の発電効率を 1 として換算した太陽光発電設備換算の導入量は、678.4 GWpv と計算される）の導入が行われ、これらの設備から、7339 億 kWh（2.642 EJ）の電力が供給可能とされている。従って、2050 年において太陽光発電設備換算して 1000 GWpv 分の非化石電源の導入には、さらなる努力が必要となる。ただし、当該報告書では、この発電量（2.642 EJ）から 17059 万 kL の原油相当のエネルギーが供給され（文献中の表 4-6 から計算）、このエネルギー量と、熱として利用されるバイオマス、太陽熱、地中熱（合計 3923 万 kL の原油相当の熱量）とを合わせて 20982 万 kL の原油相当のエネルギーが供給されるとしている。報告書では、この量は（当該報告書中に明示されていないが、恐らく 2013 年の一次エネルギーに対すると考えられるエネルギー量の）61% に該当するとされているが、2.642 EJ は原油換算で 6916 万 kL でしか無く、当該表に示されたバイオマス等の熱利用分と合わせても、31.5% の一次エネルギーが供給されるのみである。恐らく電力量から熱量を経て原油換算したときの換算係数を間違えたものと考えられるが、これでは、未来の社会全体のエネルギー需給について論じる事は出来ない事を指摘したい。

4. 材料生産のためのエネルギー消費

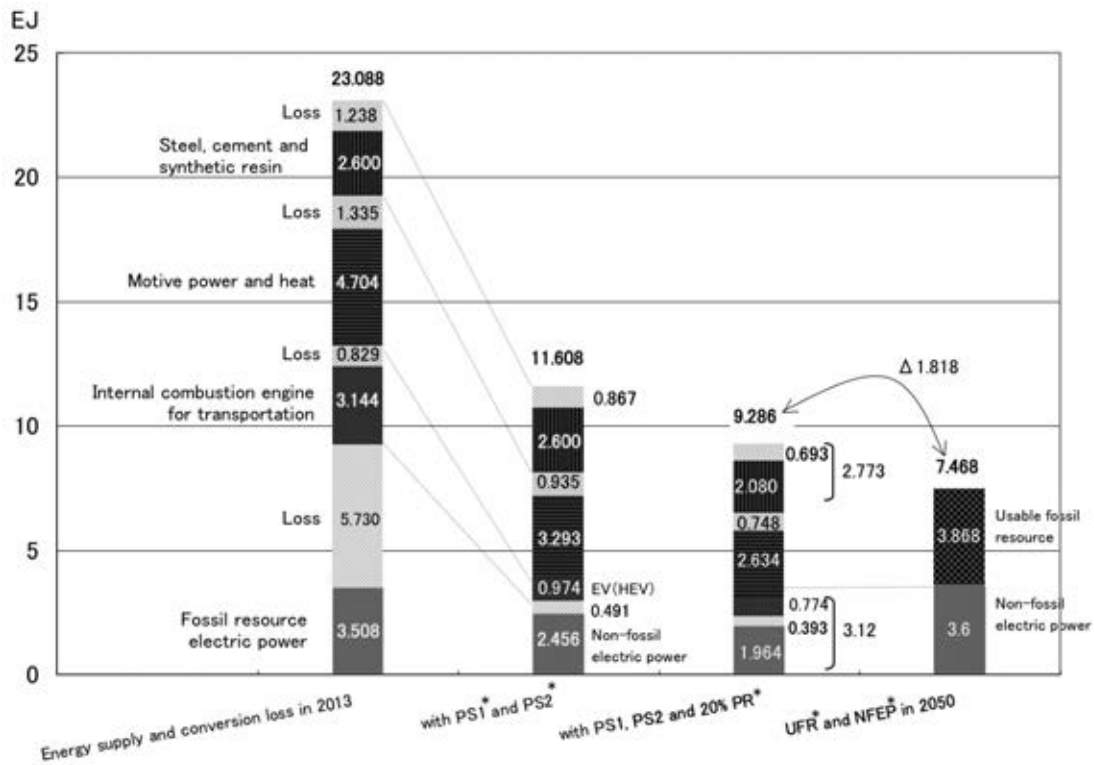


Fig. 1 Perspective of energy demands in 2050 with consideration of the energy demands for producing materials. PS*: paradigm shift, PS1*: Energy saving, PS2*: Electrification of transportation, PR : Population reduction, UFR*: Usable fossil resource, NFEP*: Non-fossil electric power (PS3).

表 1 には、材料を生産するためのエネルギーとして高炉吹込用・セメント焼成用等石炭 (0.462 EJ) およびコークスおよび石炭製品 (1.123 EJ), 合計 1.585 EJ が計上されている。また 3.111 EJ が計上されている業務・産業部門の「石油製品」については、合成樹脂 (2013 年の生産量 1058 万トン⁽⁶⁾) が含まれていると考えられるが、合成樹脂の大まかな発熱量 45 MJ/kg⁽⁷⁾ から、当該合成樹脂は 0.476 EJ の発熱量を持つと計算され、また、それらの生産工程で製品の発熱量の 6 割程度のエネルギーが使われている⁽⁷⁾ から、日本では、合成樹脂の生産に 0.762 EJ 程度の石油製品が消費されている事になる。「総合エネルギー統計 (2013 年度詳細版)」⁽⁸⁾ には合成樹脂の категорияは無いが、非エネルギー利用の category があり、その中に合成樹脂や、潤滑油、パラフィン、アスファルト等の生産、もしくは製造業や農林水産建設業等によるこれらの消費が計上され、非エネルギー利用 (石油系材料利用) 目的全体で 1.624 EJ の石油製品が消費されている。このうち、材料の生産工程で使われるエネルギーを合成樹脂のそれと同じように生産された材料の約 6 割とすれば、当該材料そのものと生産工程で使用されるエネルギーは、夫々、1.015 EJ および 0.609 EJ である。また表 1 の最終消費された石炭製品 (1.585 EJ) は、大部分が鉄やセメントなどの生産に消費されたものと考えられる (文献⁽⁹⁾ によると、2002 年度において、鉄鋼の生産に 1.720 EJ の石炭から 1.266 EJ のコークス (石炭製品) が作られ、その内の 0.945 EJ と高炉吹込み用原料炭が別途

0.3110 EJ 使われている) 事から、2013 年における「材料」生産に関する石炭製品および石油製品の転換損失・自家消費ロスを除く 2 次エネルギー消費量は、3.209 (= 1.585 + 1.624) EJ と計算される。なお、財) セメント協会⁽¹⁰⁾ によると、2012 年度において、セメントの生産に 0.201 EJ の電力を含むエネルギーが使用されており、エネルギー起源の二酸化炭素排出量 (1741.8 万トン) は全体から見ればそれ程多くはないが、セメントの生産には石灰石からの脱炭酸が必要であり、この工程で 2505.8 万トンの二酸化炭素が排出されている。

石油製品の家庭部門、企業・事業所部門、運輸部門における 2 次エネルギー消費は表 1 から夫々 0.558 EJ, 3.111 EJ および 3.114 EJ (運輸部門の 3.236 EJ から旅客用として一括計上されている LPG と電力 0.183 EJ の半分の 0.092 EJ を電力分と仮定して差し引いた値) なので、石油起原エネルギーの転換損失・自家消費に係る 1.797 EJ をこの割合で按分すると、家庭と企業・事業所部門、および運輸部門で消費される石油製品製造のための転換損失・自家消費分は、夫々 0.968 EJ および 0.829 EJ と計算されるが、企業・事業所部門で消費される 2 次エネルギーには石油系材料の持つエネルギーが含まれている。また、石炭製品生産に関する転換損失・自家消費に係るエネルギーは表 1 から 0.629 EJ である。

5. 材料消費を考慮した 2050 年のエネルギー需要の展望

以上を基に、材料消費を考慮した 2050 年までの化石資源使用に基づく二酸化炭素の排出を 2013 年度比 80% に近づけるため、その展望をグラフ化した (図 1)。左端の棒グラフは、表 1 の右から 2 番目の列を基に最終消費エネルギーを電力、運輸、動力・熱用エネルギーおよび材料と材料生産用のエネルギーに分け、各々に対してエネルギーや材料を作る際の転換・自己消費によるロスを書き加えた物である。ただし、電力と運輸に関しては、旅客用として一括計上されている LPG と電力 0.183 EJ の半分の 0.092 EJ を電力分と仮定し、これを前者に加え、後者から差し引いた値 (夫々、3.508 EJ および 3.144 EJ) とした。この際、ガス、石油製品、石炭製品から運輸用のエネルギーを差し引いたものを材料用と熱・動力用エネルギーに分割した。鉄、セメントを作る為の石炭と石炭製品 (1.585 EJ) および石油系材料への利用分 (1.015 EJ、第 4 章参照) の合計を材料利用 (2.600 EJ) とし、家庭用および企業・事業所用石油製品 (各 0.558 EJ および 3.111 EJ)、都市ガス (1.134 EJ)、自家用蒸気と熱 (0.898 EJ)、家庭用の他のエネルギー (0.018 EJ) から石油系材料利用分を除いた分を動力・熱用エネルギー (4.704 EJ) とした。材料用と熱・動力用エネルギーに関する精製・転換ロスについても同じ方法で計算した。これが、このグラフの要点の一つである。

図 1 の左から 2 番目の棒グラフは、左の棒グラフに対し、電力は全て再生可能エネルギーなどの非化石電源とし、再生可能エネルギーを平準化して利用する為の蓄電池を備えるものとして、その蓄放電効率を 0.8 と仮定した場合の 2 割の電力ロスを計上した。化石資源の消費に関しては、運輸と材料に関するもの以外について採用可能なあらゆる省エネを行い 3 割のエネルギー消費を削減するパラダイムシフト 1 を想定し、かつ、運輸部門については全ての車両が電化されるものとし、その際のエネルギー利用効率が 3.25 倍 (第 6 章参照) になるパラダイムシフト 2 を想定して計算した。この際、材料そのものについては消費が減らなければ材料その物に関するエネルギーは減少しないため、2.600 EJ は、そのままとし、材料の生産に関するロスの分のみ、その生産性の向上を 3 割と見込んだ。なお、運輸用の電力の送電・蓄放電ロスについては、運輸部門のエネルギー効率の推定 (表 3) で考慮されているので、本図中には記載されていない。

図 1 の左から 3 番目のグラフは、左から 2 番目のグラフに対し、人口の 2 割減少を加味し、各部門のエネルギー需要、材料需要およびそれらに関する転換ロス・自家消費など生産に必要とされるエネルギーの全てにおいて一律に 2 割減としたものである。これによって見込まれる最終エネルギー需要は、9.286 EJ となった。しかしながら、このエネルギー需要は、2050 年に使用が許容される 3.868 EJ の化石資源に、先に想定した太陽光発電換算で 1,000 GW の非化石発電設備から供給される 3.600 EJ

(パラダイムシフト 3) を加えた 7.468 EJ との間に、1.818 EJ ものギャップがある。この差を埋める為には、さらなる大きな社会変革が必要と成る。

6. 材料代替による二酸化炭素排出量削減 (木による鉄とコンクリートの代替)

上記「材料」のうち鉄とセメントは、建築・土木および自動車や機械などに主に消費されるが、これらの分野では、製鉄やセメント業の発達前は主に木がその材料としてふんだんに使われていた。建築分野への利用に関しては、総務省統計局⁽¹¹⁾によると 1978 年に 81.7% であった木造住宅戸数の比率が 2008 年には 58.9% に低下しているものの、依然として住宅の 6 割弱が木造である (棟数では、住宅の総棟数 3303 万棟のうち 88.3% が木造で、11.7% が非木造である)。住宅全体の 41.7% を占める共同住宅のうち 72.4% を占める 3 階建以上の建物は非木造住宅と考えられるが、最近では、直交集成板 (CLT: Cross laminated timber) と呼ばれる引き板を並べた層を交互に直交させて張り合わせた厚さ数十 cm、縦横数メートルに及ぶ分厚い板や、柱を使った木材の出現により、これらの中高層住宅・建物においても木材を積極的に使用して行こうという機運が高まりつつあり、国内の木造住宅メーカーが高さ 350 m (70 階建て) の木造ビルの構想を公表している⁽¹²⁾。

国土面積 3,779 万 ha のうち 66% (2,510 万 ha) を森林が占める日本には現在約 50 億 m³ の森林資源の蓄積があり、毎年 8000 万 m³ の蓄積増加がある⁽¹³⁾。このうち国産材として供給されているのは毎年約 2000 万 m³ であり、約 6000 万 m³ (2400 万トン) が使われずに山に眠っている事になる。木 (例えばスギ) は、35 N/mm² の圧縮強度および 90 N/mm² の引張強度を持ち⁽¹⁴⁾、鉄に対して重量あたり約 2 倍の圧縮強度および 4 倍の引張強度があるため、仮に 1600 万トンの木材 (4000 万 m³) を鉄筋コンクリートによる建築分野に使うと仮定し、その倍の 3200 万トンの鉄を木材で代替できると仮定すれば、2013 年に日本では高炉鉄生産量 8385 万トン⁽¹⁵⁾ 対して高炉用吹込石炭と石炭製品 (1.585 EJ) と石炭製品製造のための転換損失 (0.629 EJ) に相当するエネルギー (表 1) が使用されているため、この合計の内の 0.845 EJ の化石燃料が削減可能となる。なお、環境省作成の排出原単位データベース⁽¹⁶⁾によると、製材、合板、生コンクリート、粗鋼 (転炉) の二酸化炭素は排出原単位は、夫々 0.176 t-CO₂eq/m³、0.563 t-CO₂eq/m³、0.316 t-CO₂eq/m³ および 2.04 t-CO₂eq/t となっているが、新しい材料である CTL のデータは記載されていない。この材料については、林野庁の報告書⁽¹⁷⁾に国産スギを使用した場合の植林から製品化までの CLT 製造に関する二酸化炭素排出原単位 0.510 t-CO₂eq/m³ (内 0.201 t-CO₂eq/m³ は工場内から排出させる木屑を使用) が、一つの CLT 生産工場の事例として紹介

Table 3 An estimation of well to wheel energy efficiency of automobiles by power train differences.

Efficiency factor Power train	Mining #		Gasoline purification #	Power generation †	Transportation #	Battery charge & discharge	Power transmission #	Charge #	Moter	Engine	Power train to wheel	Total efficiency	Ratio against ICE
	Import #												
ICE (Internal combustion engine)	0.982	0.987	0.87	-	0.995	-	-	-	-	0.3 [§]	0.5 [§]	0.125	1.00
HV (Hybrid vehicle)	0.982	0.987	0.87	-	0.995	-	-	-	-	0.3	0.8	0.201	
HV+good thermal efficiency ICE	0.982	0.987	0.87	-	0.995	-	-	-	-	0.4	0.8	0.268	2.14
H-ICE (High thermal efficiency ICE)	0.982	0.987	0.87	-	0.995	-	-	-	-	0.5	0.5	0.209	
HV+H-ICE	0.982	0.987	0.87	-	0.995	-	-	-	-	0.5	0.8	0.334	2.68
HV+very H-ICE	0.982	0.987	0.87	-	0.995	-	-	-	-	0.55	0.8	0.368	2.94
EV*/Coal fired power generation	0.936	0.976	-	0.40	-	-	0.95	0.86	0.9	-	0.9	0.242	
EV/Coal fired power generation	0.936	0.976	-	0.40	-	-	0.95	0.86	0.9	-	0.7 [‡]	0.188	1.47
EV/Coal, IGFC *	0.936	0.976	-	0.55	-	-	0.95	0.86	0.9	-	0.9	0.332	
EV/Coal, IGFC	0.936	0.976	-	0.55	-	-	0.95	0.86	0.9	-	0.7	0.258	2.02
EV/LNG*, GTFC *	0.960	0.967	-	0.63	-	-	0.95	0.86	0.9	-	0.9	0.387	
EV/LNG, GTFC	0.960	0.967	-	0.63	-	-	0.95	0.86	0.9	-	0.7	0.301	2.35
EV/NF*power generation	-	-	-	1	-	0.81	0.95	0.86	0.9	-	0.9	0.535	
EV/NF power generation	-	-	-	1	-	0.81	0.95	0.86	0.9	-	0.7	0.416	3.25

EV*: Electric vehicle, IGFC*: Integrated gasification fuel cell generation, LNG*: liquefied natural gas, GTFC*: Gas turbine fuel cell generation, NF*: Non-fossil. Data with a superscripts “#” and “†” are from reference⁽²²⁾, and reference⁽²³⁾ respectively. Power train to wheel efficiency 0.5[§] was estimated from tank to wheel efficiency of 15% reported in reference⁽²⁴⁾ with an estimation of thermal efficiency of 0.3[§] of ICE in 2013. The other figures are estimated by the author. The reduced lower power train to wheel efficiency of 0.7[‡] was set for the case of air conditioner usage.

されている。CLT などの大断面集成材を用いた中高層建築物の LCA は、低炭素社会を目指す上で不可欠であるが、当該材料を用いた中高層建築の事例そのものがほとんど無く、これらの材料を使用した建築物の LCA は今後の重要な課題である。これに対し岡崎ら⁽¹⁸⁾は、木造（在来軸組工法）224 棟、鉄筋コンクリート造（RC 造）477 戸、鉄骨プレハブ造（S 造）177 戸に対し、材料（製材・合板、鋼材、コンクリート・セメント）使用量から一戸当たりに使われる材料製造時の二酸化炭素排出量を計算した結果、木造では、使用する木材（製材と合板）、鋼材およびコンクリート・セメントの製造時に、夫々 5.7, 2.9 および 10.3 t-CO₂eq, RC 造では、同 2.4, 26.0 および 51.7 t-CO₂eq, S 造では、同 1.8, 32.3 および 20.0 t-CO₂eq,（原文では kg-C 単位）の二酸化炭素を放出しており、一戸当たりでは、RC 造と S 造の住宅は木造に対して、夫々 4.2 倍と 2.9 倍の二酸化炭素を放出する材料を使用していると報告している。建築物の建築時の二酸化炭素排出量は、使用する材料の種類と量により大幅に異なってくる事から、その設計が CLT 等の大断面集成材を用いた中高層建築物についても大きな意味を持つ事になることは言うまでもない。第 4 章でも述べたようにセメントの生産工程（石灰石の脱炭酸工程）において 2012 年度には、2505.8 万トンの二酸化炭素が排出されており、木質バイオマスによるセメントの代替は、我が国の非エネルギー起原の二酸化炭素排出削減にも寄与するものと考えられる。

鉄・セメントの木質バイオマスによる代替がさらにすすめば、使用される鉄・セメント等化石資源消費型材料

の生産のために使用される化石資源をさらに減少させる事は可能であるが、鉄は「産業の米」であるため、国内生産を極度に減少させる事、および生産を他国に依存する事は日本の産業構造のあり方として危惧される。今後、建築分野等で使われる普通鋼に関しては、これまで国内に蓄積されて来た鉄の電炉による再利用を行うと共に、高張力鋼など他国の追随を許さない製品の国内生産を死守して行く等の産業構造の変化が起こるものと考えられる。このため、鉄・セメント等化石資源消費型材料の木質バイオマスによる代替の割合については、二酸化炭素排出の面以外の面からの配慮も必要であろう。

この他、セルロースナノファイバー（CNF）と呼ばれる木の主成分であるセルロースのナノオーダーの結晶性繊維化技術が開発され、鉄の 1/5 の重量で 5 倍の強度を持つ利点を利用して、これまで鉄で出来ていた自動車の部品の多くを CNF 複合樹脂で代替する研究が進んでいる⁽¹⁹⁾。これにより自動車の軽量化が進み、車両効率が上昇すれば、運輸部門のさらなるエネルギー効率の改善が期待される。

また、新しい技術ではないが、これまで石油を原料として作られて来た合成樹脂によって供給されてきたカップや箸などに二酸化炭素排出抑制の付加価値を付ける為に多少のコスト上昇が考えても紙や木を使った物に代えようという機運も高まりつつあり⁽²⁰⁾、チェーン展開するコーヒー店がコーヒカップのフタを合成樹脂から紙をベースにした製品に代えるそうである⁽²¹⁾。1990 年代に森林破壊のやり玉として吊るし上げられた「割り箸」は、本当は（今は山に

放置されている) 間伐材の経済的価値を高めるものであり、山の手入れを促進し、かつ化石資源の削減に繋がる循環型社会にふさわしい木材利用法であった。化石資源消費型材料の木をベースにした材料への代替が進む事が期待される。これにより石油系材料の生産に必要な 1.015 EJ のエネルギーの一部の削減も可能であろう。

化石資源消費型材料の木をベースにしたバイオマス由来材料への代替は、4 つめのパラダイムシフトとして期待される。

7. パワートレインの違いによる自動車のエネルギー効率の試算

表 3 に、運輸部門のエネルギー需要の大部分を占める自動車のパワートレインの違いによる油井から車輪 (Well to wheel) までのエネルギー効率を、将来的に開発と普及が進むであろう電動車両 (EV) や石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC)、ガスタービン燃料電池複合発電 (GTFC)、熱効率 50% 以上の内燃機関を考慮して比較した。蓄電池の充放電効率を 0.9 と仮定する等、荒い計算ではあるが、実態とかけ離れたものではないと考える。この表から、発電に化石燃料を使っている限りにおいて EV のエネルギー効率 (0.301) は、熱効率 50% のエンジンを持つハイブリッド車両 (同 0.334) に及ばないが、非化石電源の場合、EV のエネルギー効率は大きく改善され (効率 0.416)、2013 年の車両に対して、3.25 倍のエネルギー効率になることが予想された。

運輸については、EV 化の効率が化石燃料に依存した発電に頼っている限りにおいて、高熱効率内燃機関を持つハイブリッド車の効率に劣る事から、表 2 に示したように後者のパワートレインによる車両がかなりの割合で残り、運輸用エネルギー需要が完全 EV 化された場合のように減らない事が予想されるが、同時に木質バイオマス由来のセルロースナノファイバーの利用等により車両の軽量化が測られ、更なる車両効率の改善が望める事、あるいは、車両のシェアや自動運転の普及により、自動車の個人所有から社会で共有される等の構造の変化により、車両台数そのものの大幅な削減も予想されるため、更なる運輸部門のエネルギー需要の減少も考えられる。

8. 二酸化炭素の分離・再利用技術など

上記の他、5 つめのパラダイムシフトとして、火力発電所から排出される二酸化炭素の分離・電気化学的変換による固定・再利用、あるいは、一旦大気中に排出された二酸化炭素の人工光合成による循環利用技術の開発と普及が上げられる。これらが実現すれば、理論上は (化石資源の枯渇の懸念を除けば)、化石燃料の使用制限がな

くなる事が予想される。

なお、鉄やコンクリートを木で代替する場合、木をカスケード利用した後は最終的には燃料利用することが重要である。化石燃料の中でも石炭は、ガス火力発電に比べて二酸化炭素を多く排出することから (欧州を中心に石炭火力を已めるべきという意見もあるが、森林国の我が国では) 木を都市に蓄積して行く社会が実現させるためにも、石炭混燃発電を残すべきである。3 割程度のバイオマス混燃石炭火力発電が普及すれば、ガス火力発電に比べても二酸化炭素排出の割合はひけをとらないものになる。また、化石資源による発電の大部分を長期備蓄に適さない天然ガスだけに委ねる事は、エネルギーセキュリティ上の懸念がある。

また、コンクリートを作るセメント産業は、高炉スラグ、石炭灰、汚泥、スラッジ、建設発生土、非鉄スラグ、廃プラスチック、廃油、廃タイヤ、肉骨粉などを原料や熱エネルギーとして受け入れ⁽¹⁰⁾、多くの廃棄物を原料やエネルギー源として利用しており、循環型社会を目指す日本として (建築における木材の利用が期待されるにしても) 十分な生産量を確保しなければ成らない事も自明である。

9. まとめ

我が国において二酸化炭素の排出量が最も多かった 2013 年を基準として 2050 年までに二酸化炭素排出を 8 割削減することを想定する場合、2050 年までの 2 割の人口減少に加えて、材料生産のためのエネルギー需要を除いた家庭部門、企業・事業所部門におけるエネルギー需要を有無を言わず 3 割の削減 (パラダイムシフト 1)、運輸部門の電化 (パラダイムシフト 2) を達成し、かつ太陽光発電設備換算で 1000 GWpv の非化石発電設備が導入された (パラダイムシフト 3) と仮定した上で、2013 年に使用した化石燃料の 2 割分の化石エネルギー 3.868 EJ と合わせても 1.818 EJ ものエネルギーが足りない計算になった。日本の森林に毎年伐採される事無く蓄積する 1800 万トンの木材を建築物に積極的に利用し、鉄および鉄生産過程で消費されるエネルギーを 0.845 EJ 代替するパラダイムシフト 4 が達成されたとしても、まだ 0.973 EJ も足りない。

また運輸に関しては、ハイブリッド車のエネルギー効率が高い事から、一定量の液体化石燃料の需要が見込まれること、およびバイオマスの最終利用としてのバイオマス混燃の高効率石炭火力、各種廃棄物の受け入れ先として大きな役割を果たしているセメント産業を一定の割合で維持すべきことから、さらなる化石燃料の需要が残ることは容易に予想できる。これらの問題を解決するためには、5 つめのパラダイムシフトとして、火力発電所から排出される二酸化炭素の分離・電気化学変換による固定・再利用、あるいは、一旦大気中に排出された二酸化炭

素の人工光合成による循環利用技術の開発と普及が不可欠であると著者は考えている。

本稿が、2050 年を見据えた近未来の材料生産を含むエネルギー需要と供給のあり方について考えるヒントになれば幸いである。

10. 参考文献

- 1) 環境省中央環境審議会地球環境部会, 長期低炭素ビジョン (accessed Dec. 12th 2019), <https://www.env.go.jp/press/103822/105478.pdf>
- 2) 資源エネルギー庁, エネルギー白書 2015 (accessed Dec. 12th 2019), <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015pdf/>
- 3) 経済産業省 長期エネルギー需給見通し 平成 27 年 7 月 (accessed Feb. 14th 2020), https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf
- 4) 国立社会保障・人口問題研究所, 日本の将来推計人口 (平成 29 年) (accessed Dec. 12th 2019), http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp29_ReportALL.pdf
- 5) 環境省 平成26年度2050年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書 (accessed Mar. 24th 2020), <https://www.env.go.jp/earth/report/h27-01/>
- 6) 石油化学工業協会, 合成樹脂生産の推移 (accessed Dec. 13th 2019), <https://www.jpca.or.jp/statistics/annual/gousei.html>
- 7) 塩ビ工業・環境協会, 塩ビはエネルギー消費や環境負荷が少ない素材: その LCI データ (accessed Dec. 12th 2019), http://www.vec.gr.jp/kankyo/kankyo1_1.html
- 8) 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計 2013年度詳細表 (accessed Mar. 23th 2020), https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2200323
- 9) 戒能一成, 総合エネルギー統計の解説 / 2010 年度改訂版 (accessed Dec. 11th 2019), <https://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2010EBXIGRF.pdf>
- 10) セメント産業における地球温暖化対策の取り組み平成 25 年 10 月 8 日一般社団法人セメント協会 (accessed Dec. 11th 2019), http://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan02/pdf/seisan02_01.pdf
- 11) 総務省統計局, 日本の住宅・土地 —平成 20 年住宅・土地統計調査の解説— 結果の解説, (accessed Dec. 12th 2019), http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/nihon/2_1.html
- 12) 住友林業, 街を森にかえる環境木化都市の実現へ 木造超高層建築の開発構想 W350 計画始動 (accessed Dec. 11th 2019), <https://sfc.jp/information/news/2018/2018-02-08.html>
- 13) 林野庁, 平成 29 年度森林・林業白書 (accessed Dec. 11th 2019), <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/29hakusyo/index.html>
- 14) 岡野健, 祖父江信夫 (編), 木材科学ハンドブック, 158 (2006), 朝倉書店, 東京.
- 15) 一般財団法人日本鉄鋼連盟, worldsteel銑鉄・粗鋼年間生産量・時系列表 2008~2017年, 2009-2018 (accessed Dec. 11th 2019), https://www.jisf.or.jp/data/iisi/documents/summary_2018CY.pdf
- 16) 環境省, サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース (Ver.2.6) (accessed Feb. 14th 2020), https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/files/tools/DB_V2-6.xlsx
- 17) 林野庁, 平成 27 年度 木材利用推進・省エネ省CO₂実証業務 報告書 (accessed Feb. 10th 2020), https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/mieruka/attach/pdf/kanky_oukouken-5.pdf
- 18) 岡崎泰, 大熊幹章, 炭素ストック, CO₂放出の観点から見た木造住宅建設の評価, 木材工業 53 (4), 161-165, (1998).
- 19) 環境省/地球環境・国際環境協力/セルロースナノファイバー (accessed Dec. 13th 2019), <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cnf.html>
- 20) 日経新聞, 日本紙パ商事, 「脱プラ」コップ開発 (accessed Dec. 11th 2019), <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO3581418027092018X93000/>
- 21) 日経新聞, スタバ, プラ製ストロー全廃へ (accessed Dec. 11th 2019), <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO32798400Q8A710C1000000/>
- 22) 総合効率と GHG 排出の分析報告書平成 23 年 3 月総合効率検討作業部会 財団法人 日本自動車研究所 (accessed Dec. 11th 2019), <http://www.jari.or.jp/Portals/0/jhfc/data/report/2010/pdf/result.pdf>
- 23) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ 技術参考資料集 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 平成27年7月 (accessed Dec. 3rd 2019), <http://www.jari.or.jp/Portals/0/jhfc/data/report/2010/pdf/result.pdf>
- 24) 藤中雅治, エレクトリック・エンジン・カー 新しい自動車自体の始まり, 30 (2003), 東京電機大学出版局, 東京.