

持続可能な社会の建設（Ⅰ）

洋上太陽光発電基地

真の環境教育に向けて

*草 野 清 信

Construction of a sustainable society (Ⅰ) Ocean photovoltaic power generation base For a true environmental education

KUSANO Kiyonobu

Abstract

In this thesis, it is clarified to be able to construct CO₂ free society for prevention of “Global warming”, that is, “Sustainable society” on the base of the photovoltaic power generation plant.

All power generation capacity 274 million kW of Japan can be covered by this plant, that can be constructed with about 100 trillion yen. This amount of money is as the same as this facility is constructed by the nuclear power plant. As the installation location, the Ogasawara Islands neighboring waters is a prime candidate. The area necessary for the installation is 12,700km². Moreover, some data for “True environmental education” are being offered.

Key words : (1)持続可能な社会 (Sustainable society)
(2)CO₂フリー社会 (CO₂ free society)
(3)洋上太陽光発電基地 (Ocean photovoltaic power generation base)
(4)燃料電池 (Fuel cell)
(5)環境教育 (Environmental education)

1. はじめに

本年2010年の東北地方の梅雨明けは7月18日であった。全国的にもこの近傍で梅雨明けをしている。梅雨明け後の高温が今年の夏の特徴である。連日35度を超える観測地点が多数あり、40度を超える地点も連日ある有様である。「地球温暖化」の現れであろうが、「地球灼熱化」と表現した方が実態に合っている。人間を

含めた動植物の生存条件は瀕死の状態である。

2009年12月7日から12月18日の日程で、デンマークにおいて第15回気候変動枠組条約締約国会議（コペンハーゲン会議（COP15））が開催された。世界が温暖化防止に向け、初めて交わした約束「京都議定書」の、第一約束期間が終わる2013年以降、国際社会がどのような目標を定め、約束するのか、確かな枠組み合意は実現されなかった。

* 技術教育講座

このとき、鳩山首相（当時）が合意が成立したとの条件で、2013年から2020までの温室効果ガス削減目標を「1990年比25%減」とする約束をした。日本の産業界はこれに猛反発したが、この約束はそれほどの内容のものなのであろうか。

よく考えてみると、1990年段階で3年間に排出していた温室効果ガス量（10億8,300万トン×3＝32億4,900万トン）を2020年段階で4年間かけて薄めて排出することに過ぎないのである。大気中の温室効果ガスは増え続けるのである。それも1年間に8億1,230万トンという猛スピードで。

ところで環境問題はごみ問題やリサイクル活動など各方面で盛んに取り上げられている。教育界も例外ではなく、ここでもごみ問題、リサイクル活動などが中心になっているようである。ビオトープなど疑似自然を使った活動や‘いぐね’など古来の生活の知恵を紹介する活動なども大きく取り上げられている。ただ、これらは環境問題を情緒・情操問題にすり替えている感が否めない。環境問題は大気中のCO₂の急激な増加にその本質があり、情緒・情操問題では解決できないことは明らかである。

本論文は気温・日照時間、大気中のCO₂の排出量などの環境指標の経時変化をまず明らかにする。日本の全発電設備能力を太陽電池で置き換えるとする、どれ程の太陽電池が必要か、それには如何ほどの費用と期間が必要かを明らかにする。さらに、原子力発電で日本の全発電設備能力を置き換えるための費用と比較して、ほぼ同額であることを明らかにしている。太陽光発電基地を洋上に設置することを想定してその候補地も提案している。発電した電力を使い、水の電気分解を行って水素と酸素を発生させる。この水素と燃料電池を基盤とするCO₂フリーの社会、水素社会の建設を提唱している。

2. 身の回りの地球環境の現状

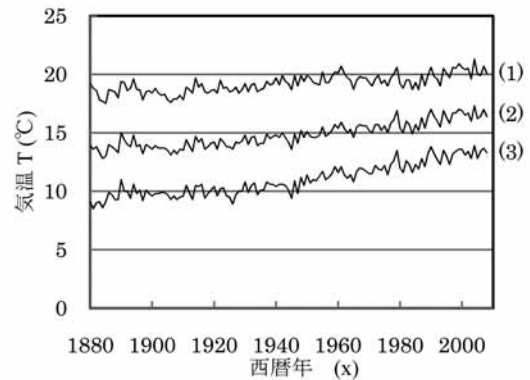
2.1 気温

地球の温暖化防止が21世紀の最大の課題であることが広く認識されてきた。それはCOP15での中心議題であることでも明らかである。

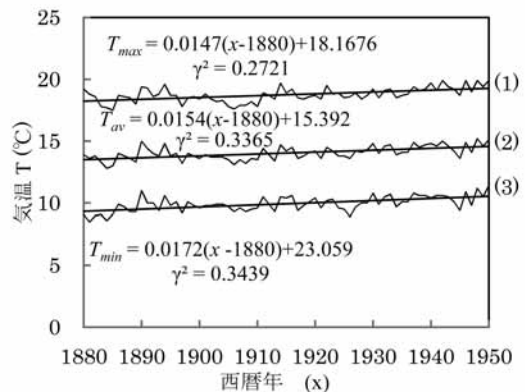
ところで、地球温暖化の現状はどのようになっているのだろうか。それを身の回りから検証してみよう。

幸い、気象庁の永年にわたる蓄積記録¹⁾があるので、それを利用する。

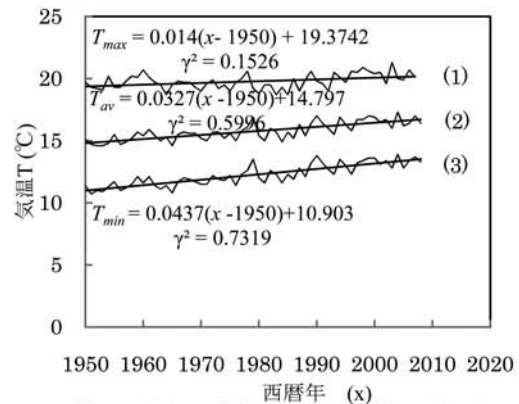
1950年を境にして、気温の急上昇が起こっていることが知られているが、これをもう少し詳しく見ることにする。図1は東京都の気温の推移を示している。同図(a)は1880年から2008年までの全体の気温推移、(b)は



(1) 日最高気温, (2) 日平均気温, (3) 日最低気温
(a) 1880年から2008年までの気温



(1) 日最高気温, (2) 日平均気温, (3) 日最低気温
(b) 1880年から1950年までの気温



(1) 日最高気温, (2) 日平均気温, (3) 日最低気温
(c) 1950年から2008年までの気温

図1 東京都の気温の推移

1880年から1950年までのそれ、そして、(c)は1950年から2008年までのそれを、それぞれ、示している。

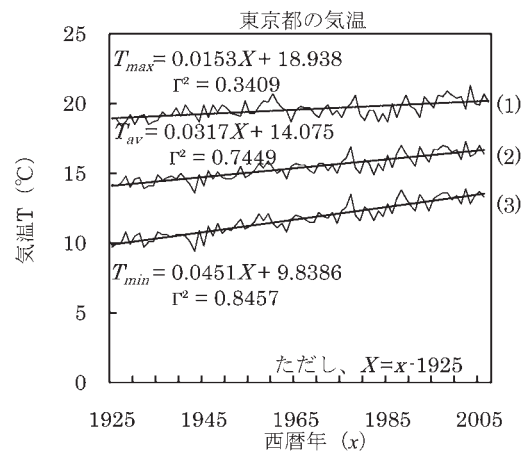
ここで気温の上昇率を図1(b)および1(c)の中の最小二乗直線の傾きとする。これに従えば、1950年までの平均日最高気温、平均日平均気温および平均日最低気温の上昇率は、それぞれ、100年に1.47度、1.54度そして1.72度であって、ほぼ同率である。ところが1950年以後のそれらは、それぞれ、1.4度、3.27度そして4.37度に変化している。平均日最低気温の上昇率の増加が顕著である。このことは他の都市でも見られ、東京都の気温の推移は全国的な気温上昇の代表的な例となっている。

ところで、平均日最低気温の上昇度合いが平均日最高気温のそれより大きいのであるから、あと何年後かに両者が一致する。その年は $T_{min} = T_{max}$ を満たすはずであるから、西暦2235年と算出される。2010年を基点すれば、あと225年後のことである。この数値は近未来の出来事になることを強く主張している。その時の気温は23.37度である。これ以後の気温はどのように推移するのであろうか。著者は四季のない世界が始まるとは考えておらず、西暦2235年より前に気象の激変が起こることを懸念している。今年の梅雨や夏に起こった異常気象はその激変の前触れではないだろうか。

それでは東京都以外の各都市では、平均日最高気温と平均日最低気温が一致するのは何年後なのであろう

か。1950年を境に気温の上昇率が変化することを考慮して、1925年近辺を基点にしたときの日本各地の気温推移を基にしてそれを推理する。

図2は1925年を基点とした東京都の気温の推移を示している。このような図をいくつかの都市についても作り、まとめたものが表1である。これに依れば、福岡市が最も早く、179年後に平均日最高気温と平均日最低気温が一致する。次いで、札幌市191年、鹿児島市219年そして東京都220年と続く。いずれも200年ほどという近未来であり、回避するためには一刻の時間的猶予もない。



(1)日最高気温, (2)日平均気温, (3)日最低気温

図2 1925年を基点にした気温の推移の例

表1 日本各地の気温上昇を示す基礎データ表

都市名	気温	a	T ₀	2010年を基準としたときの一致までに要する年数	一致時の気温(°C)	計算の開始年(x ₀)	都市名	気温	a	T ₀	2010年を基準としたときの一致までに要する年数	一致時の気温(°C)	計算の開始年(x ₀)
札幌市	最高	0.0071	12.306	191 (西暦 2201年)	14.27	1925	旭川市	最高	0.0034	11.490	505 (西暦 2515年)	13.49	1925
	平均	0.0251	7.0951					平均	0.0161	5.7022			
	最低	0.0439	2.1396					最低	0.0219	0.5806			
仙台市	最高	0.0078	15.892	321 (西暦 2331年)	19.04	1927	秋田市	最高	0.0105	14.771	428 (西暦 2438年)	27.61	1925
	平均	0.0221	10.886					平均	0.0205	10.220			
	最低	0.0304	6.7615					最低	0.0273	6.1567			
東京都	最高	0.0153	18.938	220 (西暦 2230年)	23.61	1925	前橋市	最高	0.0178	18.362	1578 (西暦 3588年)	47.95	1925
	平均	0.0317	14.075					平均	0.0231	12.893			
	最低	0.0451	9.8386					最低	0.0237	8.5532			
名古屋市	最高	0.0102	19.849	287 (西暦 2297年)	23.64	1925	高山市	最高	0.0146	15.986	715 (西暦 2725年)	14.27	1925
	平均	0.0272	13.871					平均	0.0202	9.5314			
	最低	0.0390	9.1393					最低	0.0291	4.3380			
京都市	最高	0.0092	20.128	283 (西暦 2293年)	23.52	1925	金沢市	最高	0.0150	17.713	665 (西暦 2675年)	28.97	1925
	平均	0.0278	13.938					平均	0.0228	13.012			
	最低	0.0394	9.0021					最低	0.0264	9.1613			
大阪市	最高	0.0164	19.924	301 (西暦 2311年)	26.26	1925	高知市	最高	0.0145	20.923	860 (西暦 2870年)	34.62	1925
	平均	0.0281	14.905					平均	0.0233	15.306			
	最低	0.0409	10.458					最低	0.0252	10.815			
福岡市	最高	0.0144	19.838	179 (西暦 2189年)	23.64	1925	下関市	最高	0.0154	18.808	308 (西暦 2318年)	24.65	1925
	平均	0.0309	14.806					平均	0.0249	14.791			
	最低	0.0518	9.9756					最低	0.0331	11.658			
鹿児島市	最高	0.0135	21.779	219 (西暦 2229年)	25.88	1925	那覇市	最高	0.0180	24.872	1073 (西暦 3083年)	45.23	1952
	平均	0.0309	16.174					平均	0.0218	22.058			
	最低	0.0486	11.112					最低	0.0225	19.782			

気温 T は西暦年 (x) の一次式によって次のように近似されると仮定している。 $T = a(x - x_0) + T_0$

2.2 日照時間

太陽電池の動作環境としては気温よりは日照時間の方が重要かもしれない。そこで、本節では日照時間の現状を明らかにする。ここでも気象庁の永年にわたる蓄積記録を利用する。

図3は6都市の年間累積日照時間の、1925または1927年を基点とする年次推移を示す。図中には最小二乗直線が引かれている。相関係数 $|\gamma|$ は気温のそれに比較して小さいものの、大気が濁ってきたのであろうか、年間累積日照時間が減少傾向にあることは否定

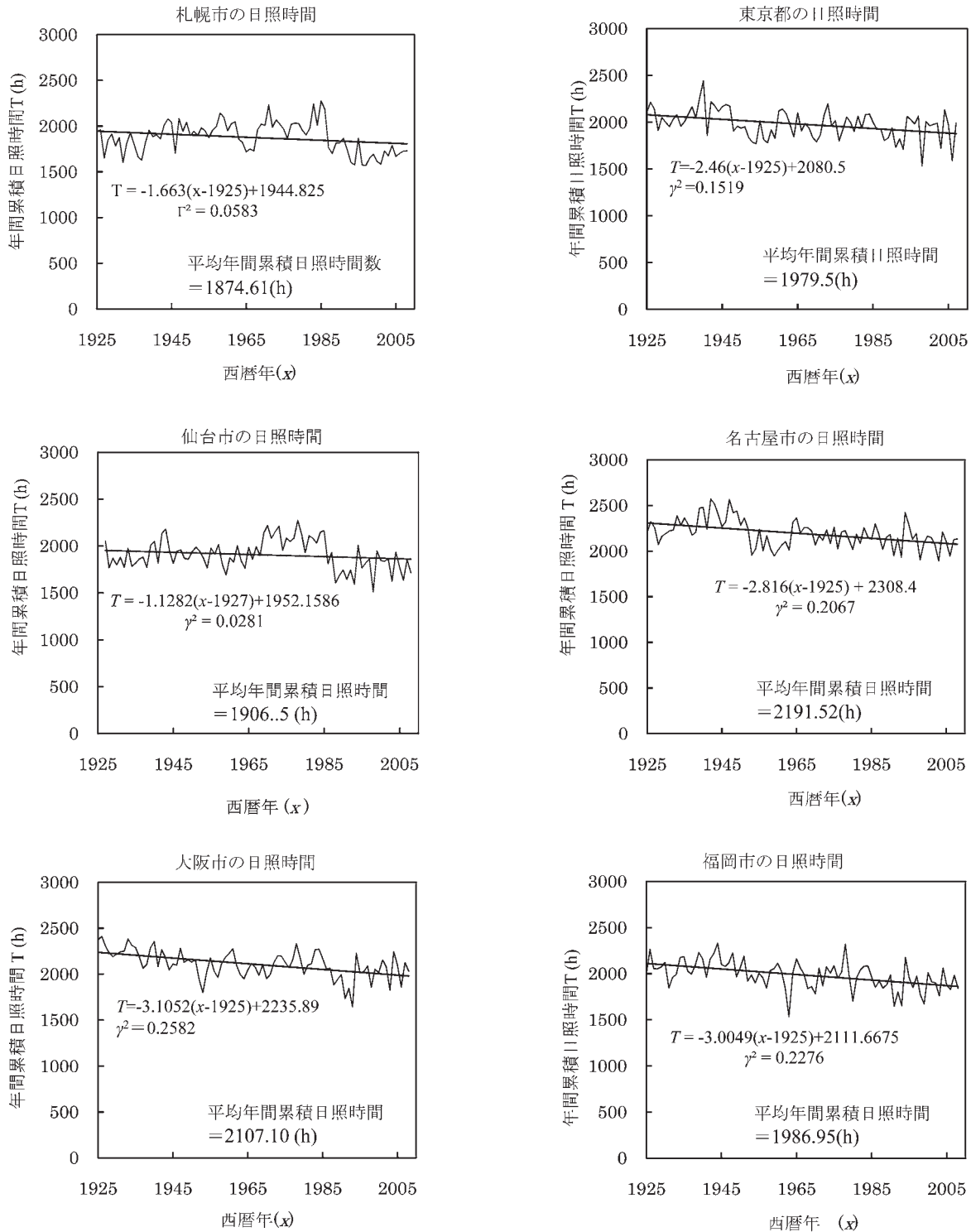


図3 日本各都市の日照時間の推移 (1925年または1927年から2008年まで)

できない。

これら6都市に22都市を加えて28都市とし、そして年次の基点を可能な限り古くとることにして、図3と同様なグラフを作る。これら結果をもとにしてまとめたものが、表2である。平均年間累積日照時間は基点年次から2008年までの年間累積日照時間の平均値である。したがって、2008年時点の値よりやや大きめになっている。日照率は、この平均年間累積日照時間を年間の時間数である8760時間で除したものである。これもやや大きめに見積もられている。図4はこれを棒グラフで表したものであって、数値だけでは感得できない実感を与えてくれる。

日照率は太平洋側で大きく、日本海側で小さくなる

表2 各都市の年間累積日照時間、平均年間累積日照時間および日照率

都市名	年間累積日照時間: $T = a(x - x_0) + b$				期間 ($x_0 - x_1$) (年)	平均年間 累積日照時間 T_0 (h)	日照率 (%) ($T_0/8760$)
	a (h/年)	b (h)	x_0 (年)	相関係数 r^2			
1 札幌市	-0.4689	1897.33	1895	0.01	1895-2008	1870.9	0.21357
2 旭川市	0.8034	1619.12	1900	0.0251	1900-2008	1662.5	0.18978
3 網走市	-1.4874	2050.57	1910	0.0936	1910-2008	1977.6	0.22575
4 網走市	-0.4671	2052.14	1910	0.0084	1910-2008	2029.2	0.23164
5 函館市	-0.8738	1920.28	1900	0.0296	1900-2008	1872.7	0.21378
6 留萌市	-1.5264	1670.90	1943	0.0417	1943-2008	1621.3	0.18508
7 秋田市	-1.1318	1753.95	1901	0.05	1901-2008	1693.1	0.19328
8 八戸市	-2.7166	2095.15	1937	0.1063	1937-2008	1998.7	0.22816
9 仙台市	-1.1282	1952.16	1927	0.0281	1927-2008	1906.5	0.21764
10 酒田市	-6.4458	1963.49	1937	0.5668	1937-2008	1734.5	0.19807
11 前橋市	-3.0632	2387.42	1900	0.3159	1900-2008	2222.9	0.25376
12 東京都	-2.3039	2131.59	1900	0.2103	1900-2008	2008.3	0.22926
13 名古屋市	-1.3357	2266.37	1900	0.083	1900-2008	2194.3	0.25049
14 高山市	-0.9652	1815.34	1905	0.0466	1905-2008	1764.0	0.20137
15 大安市	-1.462	2209.52	1890	0.1013	1890-2008	2124.2	0.24249
16 京都市	-3.8181	2200.29	1890	0.4872	1890-2008	1975.1	0.22547
17 高知市	0.7073	2170.52	1900	0.0231	1900-2008	2208.8	0.25214
18 松山市	0.0303	2100.47	1900	0.00004	1900-2008	2102.0	0.23995
19 宮崎市	1.5291	2087.57	1895	0.0743	1895-2008	2173.6	0.24813
20 鹿児島市	-0.6134	2100.44	1900	0.0121	1900-2008	2066.8	0.23594
21 那覇市	-8.2703	2157.10	1953	0.4453	1953-2008	1929.7	0.22028
22 福岡市	-0.5269	1997.89	1900	0.0114	1900-2008	1969.5	0.22483
23 浜田市	-1.9827	2015.87	1900	0.1467	1900-2008	1908.8	0.21790
24 広島市	-0.7817	2200.97	1900	0.0227	1900-2008	2158.7	0.24643
25 敦賀市	-3.6901	1947.71	1915	0.3334	1915-2008	1776.2	0.20277
26 金沢市	-0.6373	1781.53	1900	0.0191	1900-2008	1747.1	0.19943
27 松本市	0.7968	2176.21	1900	0.0172	1900-2008	2219.1	0.25333
28 新潟市	0.1196	1760.94	1900	0.0004	1900-2008	1767.4	0.20176

年間累積日照時間の計算式: $T = a(x - x_0) + b$

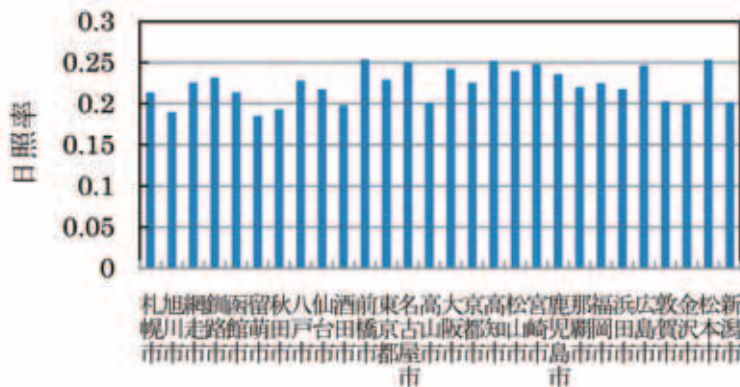


図4 28都市の日照率

ていることが、表2および図4から分かる。28都市の平均値は0.223であるが、この値を、以後、日照率として採用することにする。日の差す時間は、4.5日あたり1日ということになる。太陽電池は常に最高の発電状態にあるわけではないので、有効に利用できる日射はこの半分の9日あたり1日と見積もる。すると、太陽光の利用率は0.111である。実際の利用率は0.12²⁾とされている。以後、この数値0.12を採用する。

3. 世界および各国の二酸化炭素の排出量³⁾

温暖化の元凶は大気中の二酸化炭素の増加であることは気象庁の公式見解である。2009年の世界の二酸化炭素排出量は290億トンを超えたとされている。2006年のそれは273億4700万トンであるが、1971年からの推移は図5に示すとおりである。アメリカと日本の排出量は頭打ちであり、欧州は減少傾向を示している。これに対して、中国の増加が目立ち、全世界の増加傾向を代表している。図中に示していないが、中東、中南米、アフリカなど途上国の排出量も急増している。

2050年までの排出量見通しが図6に示されている。増加が加速されると予測されている。そして、2050年のそれが2009年のその2倍ほどの560億トンと見込まれている。地球環境、とりわけ、気温の上昇を抑制することにとっては悲観的な状況である。

図7では、2006年の国別排出量の割合の詳細に示している。中国とアメリカが排出量全体の4割を占めており、削減努力が期待される場所であるが、両国ともその義務を拒否続けている。

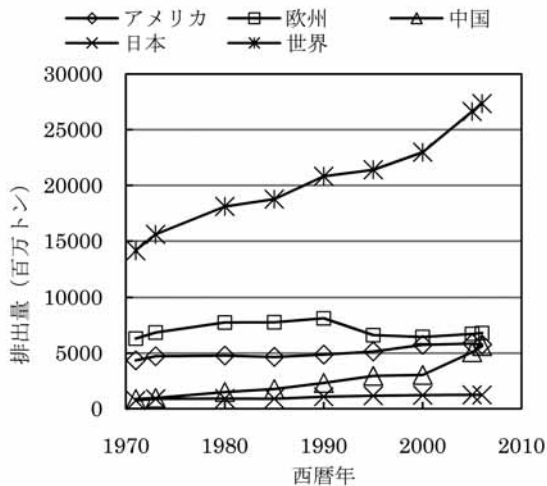


図5 世界の二酸化炭素排出量⁴⁾

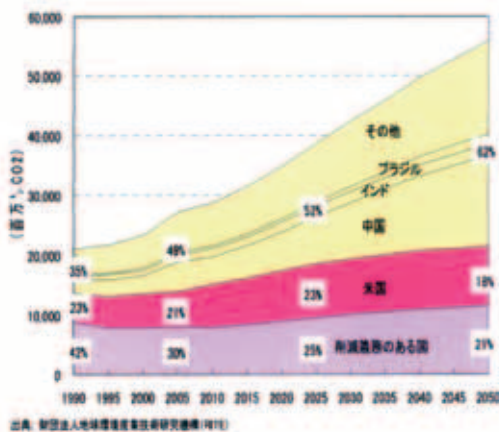


図6 世界の二酸化炭素排出量の見通し

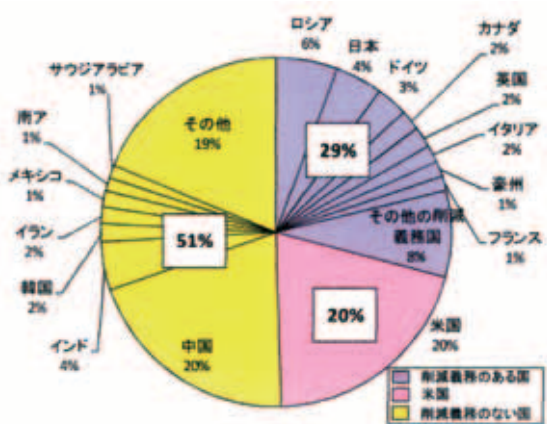


図7 世界のエネルギー起源二酸化炭素排出量 (2006年) の割合

4. 日本の発電設備能力について⁴⁾

本論文では太陽電池をもちいて発電設備能力をすべて賄うことを考えているので、その現状を知る必要がある。図8がその現状を示している。発電設備能力は頭打ち傾向にあって、2007年度のそれは2億7千400万kWである。以後、この数値を基準にして検討を加える。

5. 太陽電池発電基地建設のコスト予測

図9はIPCC第四次報告書^{5), 6)}に掲載されている太陽光発電、風力発電およびバイオエタノール発電の累積導入量に対するkW (エタノールはm³) 当たりの導入コストを表している。

ここでは太陽光発電に注目する。1981年までの累積生産量は1万kWであって、当時1kW当りの発電コストは1万6,100USドルであることが分かる。また、2000年でのそれらは100万kWおよび3,690USドルである。累積生産量が100倍に達するとコストは4.36分の1に低下していることになる。

5.1 習熟率⁷⁾

太陽光発電に関しては、累積生産量が2倍になるとコストが20%低下するという習熟曲線が知られている。図9に示す太陽光発電コストの低減はまさにそれ示している。

前述のとおり、太陽光発電の累積生産量が100倍に達するとコストは4.36分の1に低下している。まず、100は2の何乗であるかを明らかにする。

$$2^n = 100 \quad n \log 2 = 2$$

$$\therefore n = 2 / \log 2 = 6.64$$

6.64乗であることが分かる。2倍ごとのコスト低減を a とすると、 a は次の方程式を満たさなければならない。

$$(1-a)^{6.64} = 1/4.36$$

$$\log(1-a) = -0.0963$$

$$1-a = 0.801 \quad \therefore a = 0.199$$

明らかに20%の習熟曲線となっている。この a は習熟率と呼ばれている。

3,690 (US米ドル/kW) であるが、これを100万kW (1GW) 当りのコストに換算すると、36.9 (億USドル/GW) となる。

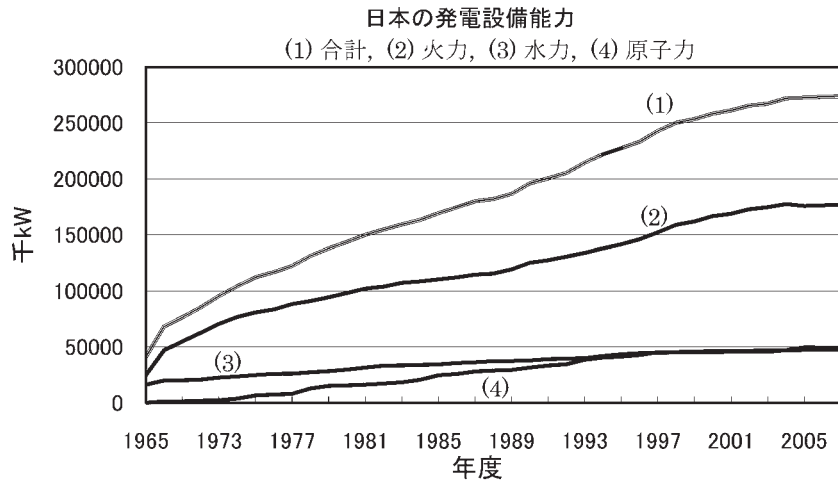
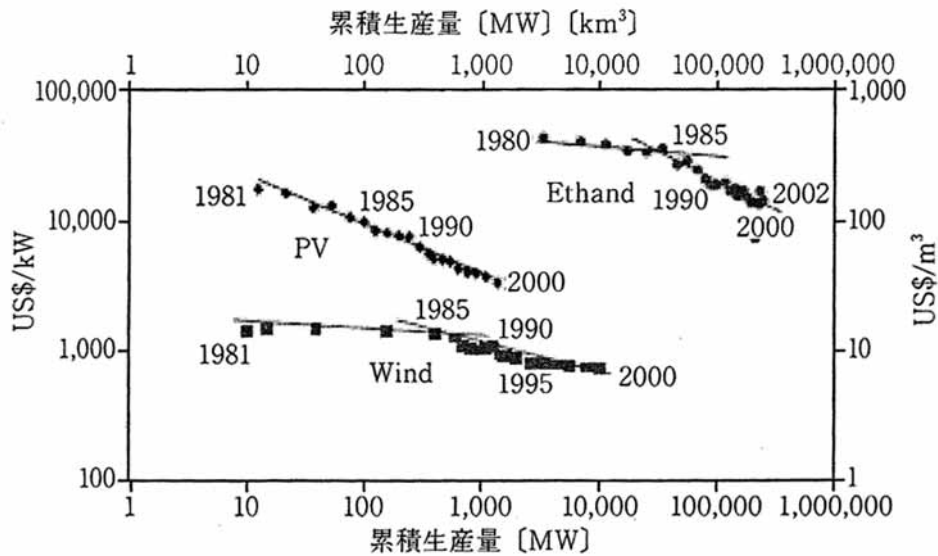


図8 日本の発電設備能力の年次推移



Ethand : バイオエタノール, PV : 太陽光, Wind : 風力

図9 各種発電方式のkW当りの導入コスト^{5), 6)}

この値を k_0 と置く。

さて、1 US ドル=100円と仮定すれば、1GW の太陽光発電所の建設費用は3,690億円ということになる。これは1GWの原子力発電所のそれとほぼ同額である²⁾。

習熟曲線を考慮して、1GW を単位とした累積発電量が X (GW) であるときの発電所建設コスト k を見積もる。 X を1GWの 2^n 倍とすれば、 n は次のように得られる。

$$X = 2^n \quad \therefore n = \log X / \log 2$$

X (GW) 時点のコスト k は、2000年時点のそれ k_0 に対

してつぎの大きさになっている。

$$\begin{aligned} k &= k_0 (1-a)^n = k_0 (1-a)^{\log X / \log 2} \\ &= k_0 (10^{\log(1-a)})^{\log X / \log 2} \\ &= k_0 10^{(\log(1-a) / \log 2) \log X} \\ &= k_0 (10^{\log X})^{(\log(1-a) / \log 2)} \\ &= k_0 X^{(\log(1-a) / \log 2)} \end{aligned}$$

図10は、習熟率 a を0.15、0.2および0.25とおいたときの X (GW) 時点におけるコストを、2000年時点のそれ k_0 (36.9億米ドル) を初期値として低減する様子を描いている。

日本の総発電容量は274GW（2億7400万 kW）であるから⁴⁾、習熟率を0.2とすると、この時点でのコスト k は $0.1641k_0=6.06$ （億 US ドル /GW）となる。1 US ドル = 100円と仮定すれば、606（億円 /GW）である。100万 kW の発電所を約600億円で建設できることになる。2000年時点の建設費用の6分の1である。

なお、習熟率が0.15および0.25のときの建設費用は、それぞれ、990億円そして359億円である。

5.3 太陽光発電建設費用予測

太陽光発電システムのコスト低減については前節で明らかになった。それでは日本の総発電容量274GW（2億7400万 kW）をすべて太陽光発電に置き換えるために要する費用を見積もることとする。このとき太陽光発電の太陽光利用率が12%であるので²⁾、274GWの8.33（ $=1/0.12$ ）倍である2283GWの発電所を建設する必要がある。この前提で見積もりを行う。

累積生産量が X (GW) 時点のコストを k (billion

US\$/GW) とする。この時点で dX (GW) だけ発電容量を増加させるに要する費用 dY (billion US\$) は kdX である。図11では、網掛け部分の面積になる。この面積を $X = 1$ (GW) から $X = X_0$ (GW) まで集積したものが、発電所を建設するために必要な累積費用である。すなわち、

$$Y = \int_1^{X_0} kdX = \int_1^{X_0} k_0 X^{(\log(1-a)/\log 2)} dX$$

$$= (k_0 / (1 + \log(1-a)/\log 2)) \cdot (X_0^{(1 + \log(1-a)/\log 2)} - 1)$$

ただし、 a は習熟率 である。

図12には太陽光発電所の予想建設費用の見積もりが、習熟率 a をパラメータとして、示されている。波線は $Y = k_0(X_0 - 1)$ に対応しており、累積生産量と建設費用が正比例の関係にある。この線との差異が生産に伴う習熟によってもたらされる費用低減の効果

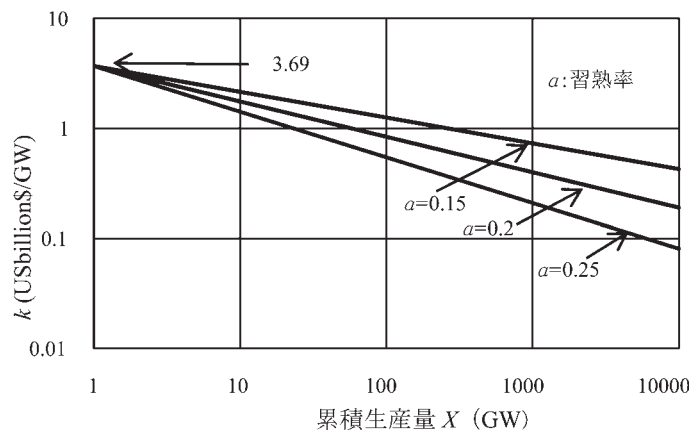


図10 習熟曲線の習熟率依存性

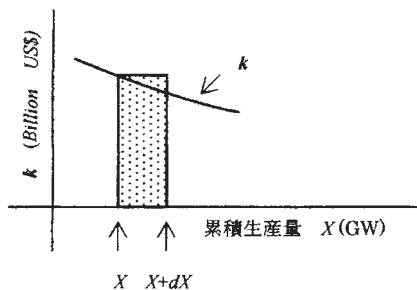


図11 太陽光発電所の予想建設費用の考え方

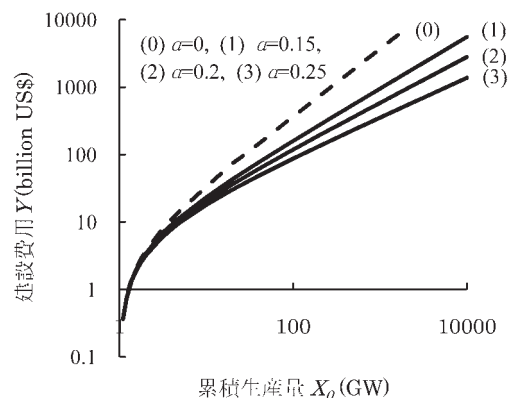


図12 太陽光発電所の予想建設費用

を表す。

習熟効果をより直接的に見ることにする。習熟効果がないときの建設費用 Y_0 は $k_0 (X_0 - 1)$ であるが、図13は Y_0/Y を表している。各曲線は建設費用が何分の1になるかを示している。たとえば $a = 0.2$ のとき、 $X_0 = 1000$ (GW) の発電所を建設する費用は6.32分の1になっている。日本の総発電容量は2億7400万 kW であるが、これを賄う太陽光発電所の容量は、太陽光利用率が12%であることを考慮すると、2283GW 必要である。このときの建設費用は103兆円となるが、習熟効果が働かないとき ($a = 0$) の842兆円の8.21分の1になっている。同じ条件で習熟率を0.15と0.25とすると、それぞれ、4.71分の1の180兆円および14.6分の1の57.5兆円に低減される。このように、習熟効果の効用は顕著である。

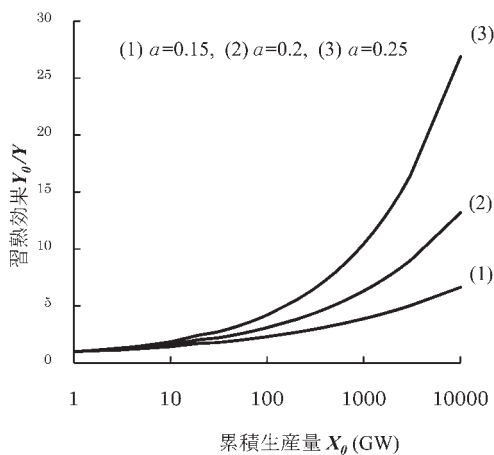


図13 太陽光発電所建設費用の習熟効果

6. シリコン (Si) の需要予測

シリコンは地殻の25%を占め、酸素に次いで2番目に多い元素である。その比重は2.33と軽く、アルミニウムと同じく電気分解で精製される。大量の電力を要するために供給国は限られる。北米、ブラジル、ノルウエー、フランス、中国等。最近ではオーストラリア、南アフリカ、マレーシアそしてベトナムも注目されている。

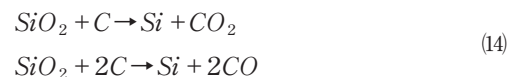
全世界の金属シリコン生産量は現在年間120~130万トンである。日本では金属シリコンを毎年25~26万トン全量輸入する。そのうち高純度シリコンに加工され

るものは、半導体用シリコンが1.9万トン、太陽電池用シリコンが8千トンとされている^{8), 9)}。(2008年の太陽電池の生産量は110万kWである¹⁰⁾)

1GWの太陽電池を製造することに要するシリコンは約0.72万トンである。日本の総発電容量は274GWであるので、これを全量賄うに要するシリコンは197万トンである。太陽電池の利用率が12%であることを考慮すれば、1644万トンが必要となる。ただし、習熟率を考慮すると、必要量はこの数分の1である300~400万トンになるものと考えられる。

7. シリコン 精製に伴って発生する CO₂

金属シリコンは、カーボン電極を使用したアーク炉を用いて、二酸化ケイ素(珪砂、石英等)を還元して得る。その精製純度は99%程度のものである。その還元過程は次のとおりである。



ところで、Siの原子量: 32.07, Cの原子量: 12.01, Oの原子量: 16.00, CO₂の分子量: 44.01である。このことと式(14)の還元過程から次のことが言える。シリコンを197万トン生産するとき、270万トン (197 × (44.01/32.07)) から541万トン (2 × 197 × (44.01/32.07)) 程度のCO₂が発生する。当然、安定的に電力供給を保障する1644万トンのシリコンを生産するとき、2250万トンから4510万トン(実際は1000万トン)程度の二酸化炭素が発生する。これは膨大な量であるが、日本の年間二酸化炭素排出量12億4,200万トン(2006年)と比較すれば微量といえる。

8. 太陽電池のエネルギー・ペイバック・タイムについて¹¹⁾

太陽光発電で問題とされる点は多々あるが、発電システムの製造・設置・廃棄に投入されるエネルギーとシステムが発生するエネルギーの大小関係もその1つである。この問題を的確に表現するものがエネルギー・ペイバック・タイム (EPT) である。

エネルギー・ペイバック・タイム (EPT) とは、太陽光発電システム等のエネルギー生産システムの製造から廃棄に至るライフサイクルを通して投入されるエ

エネルギー量（機械や装置の製造から運用に必要なエネルギー）が、システムによって発電されるエネルギーにより回収されるまでの期間を表したものである。

太陽光発電の製造等に必要な投入エネルギーを B とし、太陽光発電によって、1年間で発電されるエネルギーを A とすれば、次式によって求められる。

$$EPT = B/A \text{ (年)} \quad (10)$$

つまり、製造等に投入するエネルギーを、発電等で回収に要する年数を示す。 EPT が小さいほど効率的なエネルギー生産システムである。表3には各種太陽電池の規模別 EPT の試算例を示す。 EPT は、概ね、1年から2.5年であることが分かる。太陽電池の寿命を20年とすれば、その寿命の1割程度の期間で投入エネルギーを回収し、残りの9割の期間で投入エネルギーの9倍のエネルギーを生産する。太陽光発電は極めて効率的な発電システムであるといえる。

表3 太陽電池のエネルギー・ペイバック・タイム (EPT) の試算例⁽¹¹⁾

生産規模	多結晶シリコン		アモルファスシリコン		CdS/CdTe	
	層積設置型	層積一体型	層積設置型	層積一体型	層積設置型	層積一体型
10MW	2.4年	2.1年	2.2年	1.8年	1.7年	1.8年
30MW	2.2年	2.0年	1.7年	1.5年	1.4年	1.4年
100MW	1.5年	1.4年	1.1年	1.0年	1.1年	1.0年

出典：太陽光発電評価の調査研究（2000年3月，新エネルギー・産業技術総合開発機構）

9. 原子力発電との建設費用面での比較

地球温暖化で注目を集めているのは太陽光発電ばかりではない。原子力発電も注目されている。これは、スリーマイル島原発およびチェルノブイリ原発の重大事故を受けて、危険な発電方式ということになり、フランスや日本以外の諸国では脱原発の動きが主流となっていた。

ただ、二酸化炭素の排出量が少ないという一点で、地球温暖化対策の1つのカードとして注目されているのである。この発電方式には事故が起こったときの汚染範囲が広いことそして汚染除去までの期間が長いという弱点がある。さらに、核廃棄物の処理方法や廃炉の方法も模索中という、未確立の発電方式であるという弱点もある。地震が多発する日本にはもっとも不向きな方式であるといえる。

本節では建設費用の面で、この原子力発電と太陽光

表4 原子力発電、太陽光発電および風力発電の比較⁽²⁾

	原子力発電	太陽光発電		風力発電
		業務用	住宅用	
1基当たり設備容量	100万kW	100kW	3.5kW	2,000kW
利用率	80%	12%	12%	20%
1基当たり年間発電量	70億kWh	11万kWh	0.37万kWh	350万kWh
1基当たり設備投資額	3,600億円	6,000万円	250万円	6.0億円
100万kW当たり設備投資額	3,600億円	6,000億円	7,140億円	3,000億円

表5 原子力発電所建設費用の例⁽¹⁴⁾

発電所	最大出力 (万kW)	工事費用等		工事期間
		概算工事費 (億円)	100万kW 当り工事費 (億円)	
東京電力 福島第一 原子力発電所	1号機	46.0	391	1967年9月-1971年3月 (42ヵ月)
	2号機	78.4	562	1969年5月-1974年7月 (62ヵ月)
	3号機	78.4	624	1970年10月-1976年3月 (65ヵ月)
	4号機	78.4	803	1972年9月-1978年10月 (73ヵ月)
	5号機	78.4	905	1971年12月-1978年4月 (76ヵ月)
	6号機	110.0	1,754	1973年5月-1979年10月 (77ヵ月)
東京電力 福島第二 原子力発電所	1号機	110.0	3,650	1975年11月-1982年4月 (77ヵ月)
	2号機	110.0	2,763	1979年2月-1984年2月 (72ヵ月)
	3号機	110.0	3,146	1980年12月-1985年6月 (66ヵ月)
	4号機	110.0	2,914	1980年12月-1987年8月 (80ヵ月)

為替交換レートが市場任せになる変動相場制に移行したのは1973年2～3月である。第一発電所は固定相場の下に建設され、第二発電所は変動相場制の下に建設されている。固定相場：1ドル360円

発電を比較する。比較するためのデータはあまりないが、資源エネルギー庁のパンフレットに掲載されているものが⁽²⁾、表4である。100万kW発電所の建設には原子力発電では3,000億円（文献12でも3,000億円）、太陽光発電では6,000億円（第5節では3,690億円）とされている。太陽光発電の建設費が原子力発電のその2倍と見積もられている。

電気事業連合会発行の文献13では100万kWの太陽光発電所を建設するには67km²の土地を購入する必要があるが、同規模の原子力発電所建設が3,600億円であるのに対して、合計6～7兆円の費用がかかると試算している。これは、文献2で提示されている10倍の額であって、また、原子力発電所の20倍ほど多額の費用が必要としている。

現在日本の発電容量は2億7400万kWであるから、これを賄うためには100万kW発電所を274基建設する必要がある。原子力発電では98.64 (0.36×274) 兆円の建設費が、そして太陽光発電では1,644 (=274×6) 兆円から1,918 (274×7) 兆円の建設費が必要になる。

これでは原子力発電が圧倒的に有利であるが、果たしてそうであろうか。表5を見ていただきたい。これ

は東京電力福島第一原子力発電所と同第二発電所の建設費用と建設期間を示している。100万 kW 当りに換算すると、第一発電所 1 号機は850億円で建設されたことになる。この発電所建設期間では為替レートは固定されており、1ドル360円であった。多くの機材をアメリカの GE 社や WH 社から輸入しての建設であったが、この程度の費用で建設できた。ところが、6号機の建設費は2倍に近い1,595億円に達している。

同第二原子力発電所の建設費は為替レートが変動制に移行していたにも関わらず、さらに2倍の3,000億円ほどに膨れ上がっている。原子力発電所建設には習熟効果が働いていないことになる。

これに対して太陽光発電は第5章に述べたごとく、半導体製品の特徴でもあるが、習熟効果が働くのである。習熟率を0.2としたときの太陽光発電所の建設費は、前述の1,644兆円から1,918兆円ではなく、103兆円となる。原子力発電所建設費用である100兆円とほぼ同額である。太陽光発電に伴う土地購入の問題は発電所を洋上に建設することによって解決できる。

10. 太陽光発電の敷設面積について

前節までは太陽電池の敷設面積についてなにも言及してこなかった。本節ではこの点を検討する。その前提として、太陽電池の変換効率 (η) を18%と仮定する。そのような太陽電池はすでに市販されている。

太陽に正対する $1 \text{ (m}^2\text{)}$ の面積に降り注ぐ太陽光のエネルギーは 1 (kW) である。したがって、総合平均変換効率が18%の太陽電池からは $180 \text{ (W/m}^2\text{)}$ の電気エネルギーが取り出せる。この太陽電池を用いて日本の総発電設備能力274(GW) を賄うとすれば、太陽電池の面積は $1.52 \text{ (Gm}^2\text{)} (= 274 \text{ (GW)} / (180 \text{ (W/m}^2\text{)}))$ 必要になる。第2.2節で述べたように太陽光の利用率が12%であるので、その面積はさらに増えて、 $12.7 \text{ (Gm}^2\text{)} (= 1.52 / 0.12)$ の太陽電池を用意しなければならない。つまり、 $1 \text{ 万} 2 \text{ 千} 700 \text{ (km}^2\text{)}$ である。これは新潟県の面積 ($12,582 \text{ (km}^2\text{)})$ と同程度である。

電気事業連合会では、第9節に述べたごとく、100万 kW の太陽光発電所を建設するには 67 km^2 の土地を要するとしていたから¹³⁾、必要面積はこの274倍である $18,400 \text{ (km}^2\text{)}$ ということになる。電気事業連合会の見解でも四国の面積 ($18,300 \text{ (km}^2\text{)})$ の太陽電池があ

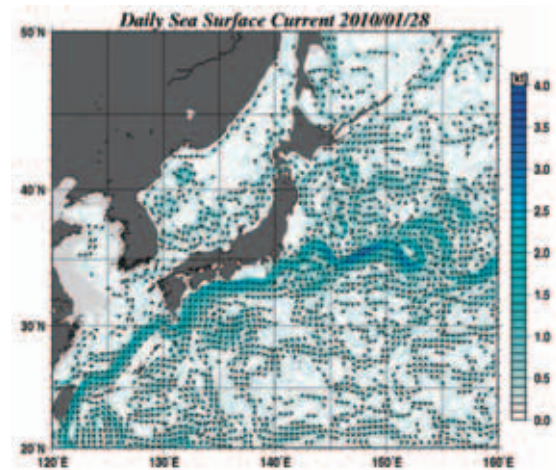
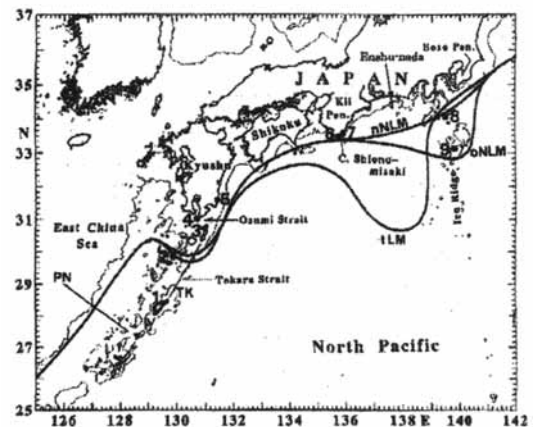


図14 黒潮の流路(1)¹⁵⁾



tLM：典型的な大蛇行流路、nNLM：非大蛇行接岸流路、oNLM：非大蛇行離岸流路

図15 黒潮の流路(2)¹⁶⁾

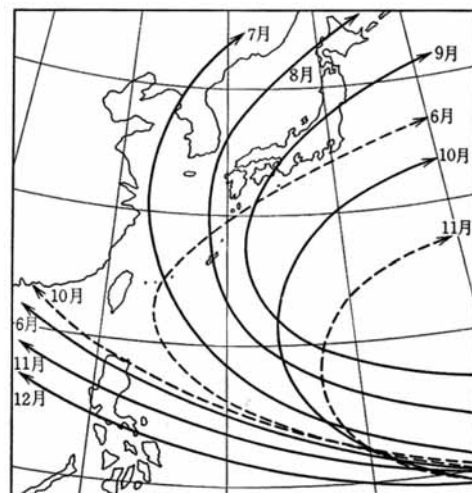


図16 台風の主な進路¹⁷⁾

れば、日本の総発電設備能力を賄うことができる。

問題はこの面積をどこに確保するかである。第9節末に述べたように、これを洋上に確保すればよいのである。候補海域は日本南方の日射の強い太平洋上がよいであろう。この海域には、図14に示すとおり¹⁵⁾、複雑な海流が存在している。とりわけ、図中に東西に帯のように伸びた黒潮の存在は大きい。その流路は日々激しく変化している。時には図15のように¹⁶⁾、大きく蛇行することもしばしばである。設置海域はこれらの影響が少ない所が良い。さらに、図16に示す台風の進路も避けたいので¹⁷⁾、小笠原近海がその候補海域であろう。ここに50km四方の発電基地5基を建設すればよい。

11. 建設費用の回収に要する年数

さて、太陽電池のエネルギー・ペイバック・タイムについては第8節で言及しており、1年から2.5年であるとされていることを紹介した。ここではこの数値の妥当性を明らかにする。

図17は国内での電気料金の年次推移を示したものである。2008年に料金が跳ね上がったのは、リーマンショックの前触れとなった石油価格の高騰に伴うものである。それ以外は総じて低落傾向を示している。ここでは電灯（小口）と電力（大口）を合算した平均料金を低めの16(円/kWh)と設定する。

洋上太陽光発電基地の発電能力は2億7400万kWである。1日で生産する電力の売上高は $2.74 \times 10^8 \times 24$ (kWh) $\times 16$ (円/kWh) = 1052(億円)である。1年間の売上高はこの365倍であるから、38兆4000億円とな

る。したがって建設費用の103兆円は2.68年で回収できることになる。

洋上太陽光発電基地の耐用年数を仮に20年としてみよう。残りの17.32年の売上総額は665兆円となるが、それは基地の補修や更新に充てることができるばかりでなく、日本そして世界の人民に大きな富と可能性をもたらすことであろう。

12. 洋上太陽光発電基地の建設費用予測

最近、太田俊昭氏が、図18に示す大型洋上ハイブリッド発電構想を発表した¹⁹⁾、²⁰⁾。この構想を子細に点検すれば次のことが分かる。

- ①発電設備能力（2億7千400万kW）ではなく、年間総発電量（8,800億kWh）の10%を基礎として試算している。
- ②発電量を太陽光：風力=16：1と想定している。したがって、この発電基地は太陽光発電とみなしてよい。
- ③太陽電池の変換効率は18%である。
- ④太陽光の利用率は0.13である。
- ⑤浮体建設費は全体の45%である。

この構想では基準発電所（面積 1.552×10^6 (m²))の年間発電量は365日 $\times 24$ 時間 $\times 0.13 \times 1.552 \times 10^6 \times 0.18$ (kW) = 3.18×10^8 (kWh)である。日本の年間総発電量の10%である880億 (kWh) = 8.8×10^{10} (kWh)はこの太陽光発電所277基で賄うことができる。一基の建設費用は580億円であるので、年間総発電量を賄う太陽光発電基地は16兆円で建設できるとしている。

年間総発電量（8,800億kWh）を賄うための太陽光発電基地の建設費用は16兆円の10倍の160兆円という

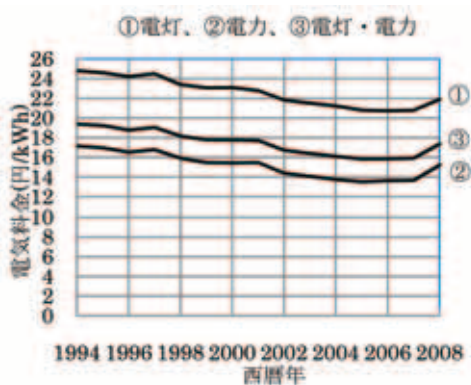


図17 電気料金の推移¹⁸⁾

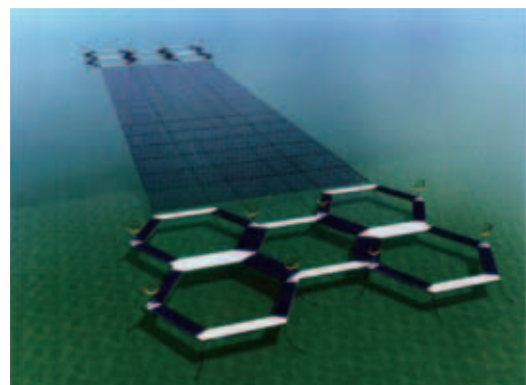


図18 大型洋上風力・太陽光発電基地²⁰⁾

ことになる。なお、前述の160兆円の内訳は、浮体が72兆円（=160×0.45）そして太陽電池関係が88兆円（=160×0.55）である。

8,800億 kWh に対応する発電設備容量は1.00億 kW である。日本の発電設備能力は2.74億 kW であるから、これをすべて賄うためには160兆円の2.74倍、すなわち、438兆円を要することになる。この金額は本論文第9節に示した費用は103兆円と大きな開きがあるが、これは習熟効果を考慮していないことに起因している。第5章で述べたように習熟率20%での効果は8.21分の1であったから、太陽光発電基地の建設費を103兆円と見積もったことは太田氏の見積もりと矛盾するものではないと考える。

ここで太田氏の構想に従ったときの洋上太陽光発電基地の面積を計算する。その広さは1.552(km²/基)×277(基)×10(倍)×2.74(倍)=11,800(km²) である。第10章で算出した値である12,700 (km²) との差は太陽光の利用率の差 (0.12と0.13) の反映である。

原子力発電の建設費は100兆円であったから、洋上太陽光発電基地建設費用と同額である。建設・保守・点検・廃棄・更新などの設備のライフサイクル全体そして安全を考えれば、洋上太陽光発電は原子力発電を凌駕するとも引けを取らない極めて現実的な発電方式といえる。

13. 水素社会への道

さて、太平洋上で発電した電気をいかにして陸上まで運ぶのかの課題が残った。これには二つの解決策が考えられる。1つは直流電力ケーブルを使うということが考えられる。ただし、その長さは1,000km を超え

るので、通常の電力ケーブルでは対処できず、超電導ケーブルを採用することになる。

二つめの解決策は太陽光発電で発生した電力を使って水を電気分解して水素と酸素に分離することである。発生した水素を圧縮または液化して船で陸上まで輸送する。この水素に蓄えられていたエネルギーを、図19のように、燃料電池で電気エネルギーに変換する。あるいは水素をガソリンの代わりに内燃機関で燃焼させる方法もある。実際、アイスランドではこの方式のバスが運行されている。

水素は温室効果ガスではなく、しかも水素を燃料とすれば排気ガスは水であるので、環境に負荷をかけることはない。水素をガソリン代りに使用する社会を水素社会と呼んでいる。水素社会こそ持続型社会の具現化である。水素社会についての論考は次回に譲る。

14. まとめ

本論文は「地球温暖化」の防止のためのCO₂フリー社会の建設を太陽光発電を基盤として建設することを提唱している。同時に、「真の環境教育」のための幾つかのデータを提供している。まとめを行う。

- (1) 第2章では、地球環境の指標である気温は1950年以降急激な上昇傾向にあり、特に平均日最低気温の上昇が著しいことを明らかにしている。西暦2200頃までに平均日最低気温と平均日最高気温が一致するほどの深刻さである。また、太陽光発電で重要となる日照時間は減少傾向にあるが、2000時間程度であるも明らかにしている。
- (2) 第3章では、各国の二酸化炭素排出量の年次推移と見通しを明らかにしている。2009年の排出量は290億トンであり、2050年にはその倍の560億トンの排出が見込まれること、新興国の増加が著しいことなどが明らかにした。第4章では、日本の発電設備能力は増加傾向にあったが、2005年あたりから頭打ちの傾向が出てきたこと示している。2007年度のそれは2億7,400万 kW であるが、この数値は計算の前提となる基礎数値とした。
- (3) 第5章は本論文の核心であるが、太陽電池の製造コストが習熟率20%で低減することを示している。これを用いて、日本の発電設備能力2億7,400万 kW を太陽光電池ですべて賄うとしたとき、その建設費

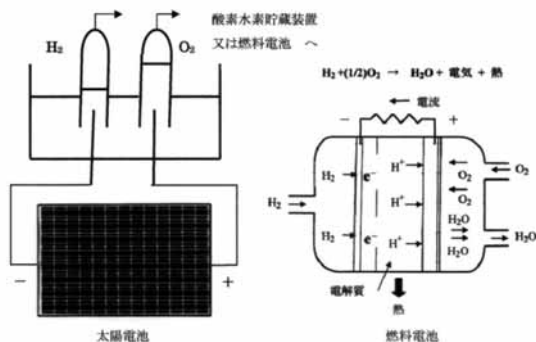


図19 水素社会の基盤技術

- 用は約103兆円であることを明らかにした。
- (4) 第6章では建設に必要なシリコンの量が1644万トン（実際は300～400万トン）であること、第7章ではシリコンの精製過程で発生する二酸化炭素の量は2250万トンから4510万トン（実際は1000万トン程度）であることを明らかにしている。第8章では、太陽電池のエネルギー・ペイバック・タイムは1年から2.5年程度であることを紹介している。
- (5) 第9章では、太陽光発電の強敵手原子力発電を用いて日本の発電設備能力2億7,400万kWを賄うとすれば、その建設費用は98.6兆円であることを明らかにしている。この数値は太陽光発電のそれ103兆円とほぼ同額である。
- (6) 第10章では、太陽電池の変換効率が18%という前提で、必要設置面積が1万2千7百km²であると導出している。その設置場所の候補地として小笠原近海を提唱している。洋上太陽光発電基地の提唱ともなっている。
- (7) 第11章では、第5章と10章で提唱した洋上太陽光発電基地の建設費用が2.68年で回収できることを明らかにしている。
- (8) 第12章では、太田俊昭氏が2008年に提唱した洋上太陽光発電基地方式でも、日本の発電設備能力2億2,700万kWを賄うためには、習熟効果なしという前提のもと、累積建設費用は438兆円であると試算している。
- (9) 第13章では、洋上太陽光発電基地で発電された電力により水の電気分解を行い、発生する水素をエネルギー源とする、持続型社会である水素社会を提唱している。

文献

- 1) 気象庁 過去の気象データ
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 2) 資源エネルギー庁、パンフレット「日本のエネルギー2009」、pp25-26 (2009)
- 3) 資源エネルギー庁：「平成20年度エネルギーに関する年次報告 概要」(2009)
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2009/gaiyou.pdf>
- 4) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編「エネルギー・経済統計要覧」、(財)省エネルギーセンター (2009)
- 5) IPCC (気候変動に関する政府間パネル) 第4次報告書、2007年11月
- 6) 近藤道雄、太陽光発電の現状と今後の課題、電気学会論文誌、Vol.129, No.12, pp.812-816 (2009)
- 7) 片岡真吾、原価見積における習熟曲線理論の活用、豊橋短期大学研究紀要、Vol.12, pp.147-161 (1995)
- 8) 経済産業省 製造産業局 非鉄金属課
http://www.meti.go.jp/policy/nonferrous_metal/strategy/semiconductor02.pdf#search='シリコンの生産量'
- 9) 日経マーケット・アクセス、業界団体の統計データ：高純度シリコン生産販売 (新金属協会),
<http://ma.nikkeibp.co.jp/ace/guests/articles/2009/02/silicon2.shtml>
- 10) 太陽光発電協会、統計・資料,
<http://www.jpea.gr.jp/04doc01.html>
- 11) NEDO 独立行政法人 新エネルギー産業技術総合開発機構、エネルギー・ペイバック・タイムについて,
<http://www.nedo.go.jp/nedata/16fy/14/e/0014e005.html>
- 12) 資源エネルギー庁：「初期投資負担・廃炉負担の軽減・平滑化、リプレースの円滑化」、小委員会第2回資料3、p.1 (2006年2月15日)
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/data/060220d-3.pdf>
140万kWの原発建設費を4200億円と見込んでいる。1kW当たり30万円と仮定している。
- 13) 経済産業省中国経済産業局 エネチエ web！；電気事業連合会パンフレット「原子力は頑張らなくても新エネルギーを頑張れば大丈夫？」
<http://www.chugoku.meti.go.jp/energy/enechie/genshi/genshi.html>
- 14) 福島県エネルギー政策検討会：「地域振興について一統計データから見た電源立地地域一」、第14回検討会資料、p.1 (2002年3月11日)
- 15) 気象庁：日本近海・海流予想図,
www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/kaiyou/daily/currentip/html
- 16) 川辺正樹：大蛇行と20年変動、日本地質学会第113年学術大会講演要旨、p.30 (2006)
- 17) 高橋幸一郎著：総観気象学、p.226、岩波書店 (1969)
- 18) 資源エネルギー庁 電気・ガス事業部 資料3「電気事業分野における報告事項」、p.8 (2009/6/25)
- 19) 九州大学広報室：「大型洋上ハイブリッド発電システムの新提案とその基礎技術」について、PRESS RELEASE (2008/07/02)
100万kW発電プラントを総建設費1,267億円、10年で可能。
<http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2008/2008-07-02-2.pdf>

持続可能な社会の建設（I）

- 20) 太田俊昭 著：持続型文明社会の幕開け「洋上風力・太陽光発電の道」、アマゾンエバーグリーンソサエティ
(2009)

(平成22年9月30日受理)