

## 特集

## 日出づる国から太陽について考える

新年のはじめにふさわしく、太陽にターゲットを絞り、次世代の太陽利用について総括したい。地球という閉じた殻のなかで、熱力学第一および第二法則によりエネルギーは保存されエントロピーは増大し続ける。すなわち、化石資源を利用し続ける限り、全ては熱となり失われていく。閉じた殻に唯一外部から入るエネルギー、それが太陽である。サステナビリティを考えると、我々は究極的には太陽をとことん利用する以外に手はない。そこで、太陽光のエネルギーとしての利用、物質変換のための太陽光利用などについて、現状を総括し、今後を考える礎としたい。

(編集担当：関根 泰)<sup>†</sup>

## (総論) 太陽光利用について考える

小島 紀 徳

## 1. はじめに

宇宙船地球号(って大昔の化学工学にこんな連載記事<sup>1)</sup>がありましたね。古くからの会員は、覚えておられるかもしれません)に住む私たちにとって、その宇宙船が太陽から飛び立った後、そしてそのなかで生命が生まれ、太陽からの大部分の紫外線がオゾン層により食い止められるようになり、そのおかげで地上にも生物が進出し、そしてそのたった一つの種が地球上での優占種となり、地球上に存在する化石資源を食いつぶしながら生物多様性をもぶちこわし、その地球の歴史に取り返しもつかないほど「大きな」足跡(フットプリント)を刻みつつある、そんな人類にとって、その生まれたときから神と敬ってきた、非常に大きな存在が太陽である。太陽なくしてはその化石資源すらうまれなかったはずであるし、なによりこの暖かい地球の気温も太陽あればこそであり、そして淡水すら太陽がもたらす恩恵である。

## 2. エネルギー資源と再生可能エネルギー

人類が手元に持っているエネルギー資源としては、化石

燃料がまず頭に浮かぶ。しかし、その前にウラン資源と地熱および潮力とのことを述べておく必要があるだろう。これらは太陽からのいわば生前分与のような形で地球に与えられたものである。まずは地熱は地球のなかの核反応。そして潮力は月の運動エネルギー。これらはいずれも徐々に使い尽されてしまうはずであるが、再生可能エネルギーとされている。

一方ウラン。ウランは現在ウラン鉱石から採取されるが、これも生前分与分である。そして最後に化石燃料は太陽からの月々の小遣いを億年単位で地球の生物がため込んだものである。起源は異なるが、いわゆるエネルギー資源といえるものは両者のみとってよい。

**表1**<sup>2)</sup>は化石燃料などのエネルギー資源量を年生産量と比較したものである。よく知られているように確認経済可採埋蔵量を年生産量で割ったR/P比はあくまで現在わかっている資源を使い尽くす時間である。本当にどれだけあるのかは、確認可採埋蔵量ではなく、推定残存資源量で評価すべきである。そしてそれぞれの資源だけですべてのエネルギー需要をまかなったときに枯渇する時間(E/T)を出し、これを足し合わせるにより全資源の枯渇年数が与えられる。この数字は、表の右下に与えられている。

この値は、推定値に基づくこと、年生産量も増大してゆくだらうこと、を考えても数百年とっていいだろう。ただ、この数字の問題は、非常に短期的な視点にはなるが、地球温暖化問題がこれらの期間を短くしていることだ。一方、メタンハイドレートや海水ウランなどの「新たな」資源は含まれていないし、確かに高速増殖炉と海水ウランま



Critical overview: Utilization of Solar Energy  
Toshinori KOJIMA (正会員)  
1975年 東京大学工学部化学工学科卒業  
現在 成蹊大学理工学部 教授  
連絡先; 〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1  
E-mail [kojima@st.seikei.ac.jp](mailto:kojima@st.seikei.ac.jp)  
URL <http://www.ch.seikei.ac.jp/kojima/index.html>

2010年9月27日受理

<sup>†</sup> Sekine, Y. 平成21, 22年度化工誌編集委員(1号特集主査)  
早稲田大学理工学術院

表1 化石燃料などからのCO<sub>2</sub>放出と資源量<sup>2)</sup>

	炭素	石炭	石油	天然ガス	水素 / ウラン	計
熱量 [kcal/kg] (H/C 比からの計算値)	7800	7000	10000	13000	34000 / 10 <sup>8</sup>	
H/C 比 [atm/atm]		0.9	1.8	3.9		
H/C 比 [kg/kg]		0.075	0.15	0.325		
CO <sub>2</sub> 放出 [g-C/kcal]	0.128	0.103	0.0781	0.0564	0 / 0	
確認埋蔵量 [Ttoe] : R		0.329	0.142	0.131	0 / 0.045	0.65
推定資源量 [Ttoe] : E		3.42	0.311	0.295		4.03
E (低品位鉱を含む)		5.30	(0.824)	0.295?		(6.42)
年生産量 [Gtoe] : P		2.29	3.15	1.91	0 / 0.60	{T = 7.95}
枯渇年数 (R/P 比)		144	40	69	- / 75	81.4
(E/P 比)		2310	99 (262)	154 (?)	- / 300?	743 (808)
(E/T 比)		667	39 (104)	37 (?)	- / 23?	{831}

で考えると、原子力資源は万年のオーダーにまでなるかもしれないがしかし、それでも「人類」にとっては短い期間であると信じたい。だとすれば、地球温暖化問題、資源問題を越えて、結局太陽にエネルギーの源を求めざるを得ない、とすべきだろう。太陽の寿命が億年オーダーとすれば桁が数個違う。

### 3. 太陽からエネルギーはどう流れてゆくのか

熱力学第一法則は、エネルギー保存則とも言われる。しかし、エネルギーは循環利用することはできない。一方、物質はエネルギーさえかければ循環利用することができる。なぜか？それは、エネルギーは使われるたびに、あるいは形を変えるたびに、そのエネルギーの質が低下するからである。環境条件中に仕事として取り出すことができるエネルギー量（有効エネルギーまたはエクセルギーと呼ばれる）の割合を、エクセルギー率と呼び、エネルギーの質を表す指標として使う。これを図1<sup>2)</sup>に示す。電気や機械的エネルギーはエクセルギー率が100%であるし、化石燃料のエクセルギー率は高いが、熱源はその温度が下がるとともにエクセルギー率が減少してゆく。

こんな常識的なことをなぜ今更持ち出したのかといえ、それは太陽エネルギーが流れてゆく過程こそエクセルギー率が減少してゆく過程だからである。（ちなみに世の中では、エントロピー増大の法則と呼ぶことが多いが、しかし、筆者は昔からエントロピーという「漠」とした用語が大嫌い。エクセルギーという用語なら意味はわかるので。）

さて、話を「再生可能エネルギー」にもどそう。「再生可能エネルギー」の英文は“renewable” energy であるが、renewable の意味は、何度でも循環して使えるという意味であるはずはない。図2<sup>2)</sup>では太陽エネルギーを例にとり、再生可能エネルギーの意味を説明する。蛇口(太陽)から供給された水(エネルギー)は、バケツ(地球)に至り、最後は地面(宇宙)に広がる。太陽エネルギーは図1にあるようにエクセルギー率も80%と高い。このエネルギーが地表に到達し、しばらくすると地球上の平均気温の熱に形を変え、すなわち地球上にいる我々にとってはエクセルギーゼロとなる。太陽光発電とは、地球にはいる前のエクセルギーを電気と

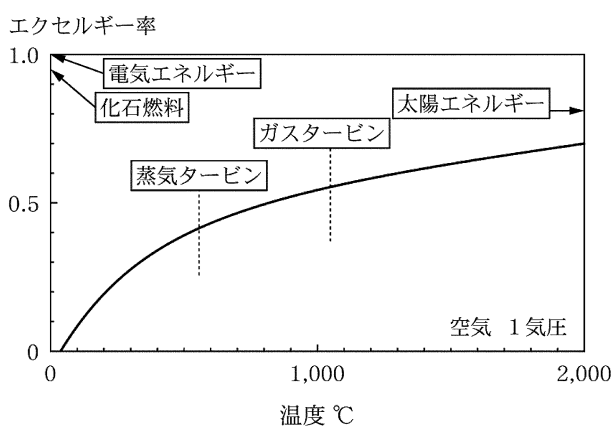


図1 さまざまなエネルギー源のもつ有効エネルギーの割合<sup>2)</sup>

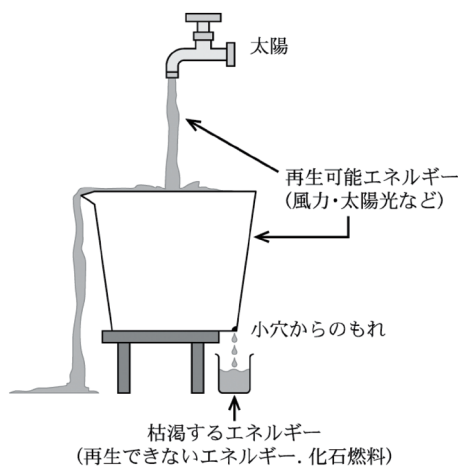


図2 再生可能性とは<sup>2)</sup>

して取り出すことであるが、その電気エネルギーもいずれ地球上で環境温度の熱に変換される。すなわち何のことはない、人間が使っても何も変わらない。水力や風力などの、太陽エネルギーが形を変えたエネルギーも、これを人間が使ってもいずれ地球に帰る。そしてそのエネルギーは、今度は地球から宇宙に放出され、地球の明日は、昨日と何も変わらない。

結局、再生可能とは、宇宙で脈々と続くエネルギーの流れのなかで、有効性が失われてゆく過程のなかで、この課

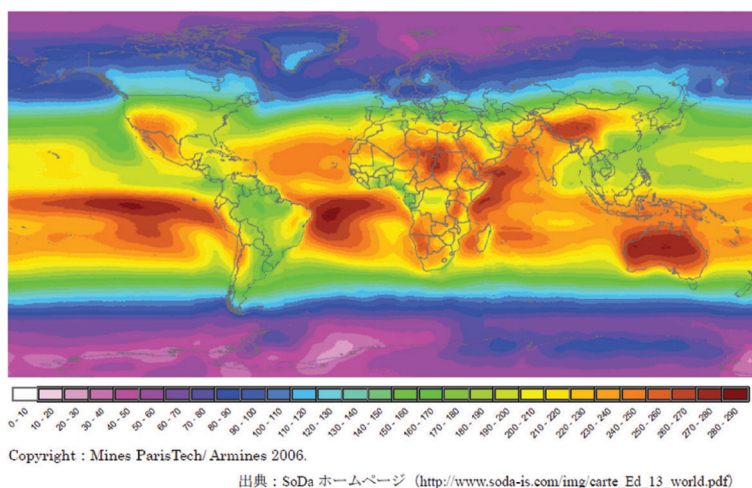


図3 世界の年間平均日射強度マップ(W/m<sup>2</sup>)<sup>3)</sup>

程を「うまく」人類が利用するということであり、原理的には環境(まさに広い意味の)には何も影響を残さない。このような定義こそ再生可能エネルギーの定義であり、決して無限のエネルギーをさすわけではない。そして、使っても使わなくても、翌日にはほぼ同じエネルギーが「再生」される。極論を言えば、太陽が起こしている核反応を仮に人類が制御でき、欲しいときに取り出せるようになったときには、太陽は再生可能エネルギー源ではなくなる。そのエネルギー放出を人間が制御できないからこそ、再生可能と呼ばれるのである。

なおこのような定義に基づけば、ゴミこそ人工的な再生可能エネルギーである。下水などの都市廃熱も同様である。

#### 4. 太陽光の量とその分布

地球に降りそそぐ太陽エネルギー。太陽定数として1.382 kW/m<sup>2</sup>という数字が与えられている。これはすべての波長についての積算値で、地球大気の外側に、太陽に垂直においた面での話である。これが実際地表面積あたりに直すと、仮に地球が球であるとするならば、面積あたりでは1/4(断面積 $\pi r^2$ と球の表面積 $4\pi r^2$ との比)となる。赤道上では地軸の傾きやいびつさを無視して計算すれば $1/\pi$ (円周と直径との比)となる。さらに大気で一部、たとえば成層圏(オゾン層)のオゾンにより紫外線が一部吸収され、さらに雲や塵により吸収、散乱され、直達する量は、場所にもよるがさらにその数分の一となる。図3<sup>3)</sup>には、世界各地域における平均の日射強度を一日あたりで示す。すべての日射が失われることなく地球に降り注ぐなら、地球上での平均値は $1382/4 = 345.5 \text{ W/m}^2$ であるし、最大値は $439.9 \text{ W/m}^2$ に近いはずである。しかし実際には最大、 $300 \text{ W/m}^2$ 以下であり、この最大に近い $250 \sim 300 \text{ W/m}^2$ の値は、雲ができ、雨が降る赤道付近ではなく、南北 $20 \sim 30$ 度付近に分布している。陸地でいえばここそまさに沙漠のど真ん中である。沙漠のど真ん中で発電することのメリットは、同じ太陽電池能力の電池であっても、たとえば日本で設置する場合よりも2倍近い性能が得られることになる。なお、上記に $24\text{h/d} \times$

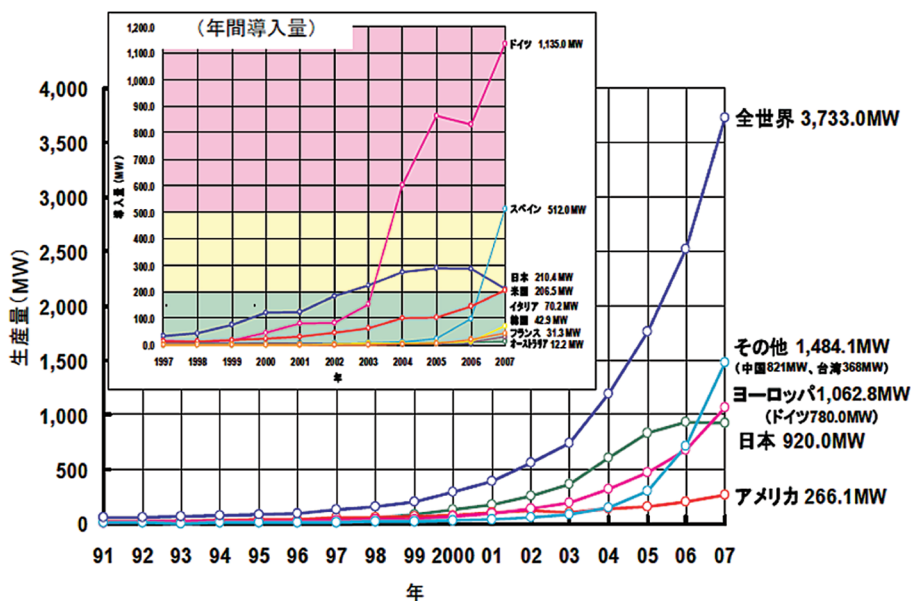
$365\text{d/y}$ をかけ、1000で割れば、年間の日射量が $\text{kWh/m}^2$ で表わされるが、これらの沙漠地域では年間 $2000 \sim 2500 \text{ kWh/m}^2$ 程度となるのに対し、日本では年間 $1000 \sim 1500 \text{ kWh/m}^2$ 程度となる。全地球表面では、全世界での発電容量14.5 TWの2万倍の太陽光が地上に達していることになる。ただ、人がいないところで発電しても、その電気は無駄になるばかりである。

図4<sup>4)</sup>には各国での太陽電池発電の年間導入実績を示す。2003年までは、日本がトップを走っていたはずである。しかし、欧米各国の導入政策により設置容量がどんどん増しているのに比べ、日出づる国日本の地盤低下が激しいことがわかる。政策の問題である。これについては、随所で思うことを述べ、そして最後にもう一度まとめてみたい。

#### 5. 開発すべき技術

まず、図4<sup>4)</sup>をもう一度みてみたい。結局太陽エネルギーは先進国で主に導入されてきたことが理解できる。なぜ途上国ではないのか?そして沙漠ではないのか?

- 1) そこで第一の視点は、太陽光発電の長所を生かすこと。長所とは、どこでも設置でき、系統につながなくとも電気が得られるという点。リチウム電池の利用が最近ホットではあるが、系統につながらない地点での利用こそ、電気をためるための二次電池開発が必要である。地球上で、まだ十億以上の人口が、系統から切り離されているとの点が忘れ去られている気がする。もう一度再認識すべきだろう。ODAなどのあり方も含め、そして日出づる国の産業振興のためにも。
- 2) 第二の視点である。前項では沙漠のポテンシャルについて述べた。このような日射が大きい沙漠のようなところでなぜ、発電しないのか?それは電気特性。安定な(すなわち実は貯められる)形でのエネルギー輸送技術開発、広い視点からの、グローバルシステムとしての効率向上、そしてその将来像を描き、その着地点を目指した長期的リロケーションに今から取り組む必要がある。リロケーションというのは、まさに沙漠に人が住む、ということ



出展: PV News 2009年4月号およびIEA-PVPS 2008年報告書を基に、(株)資源総合システムが作成

図4 太陽電池の年間生産量および導入量の推移<sup>4)</sup>

表2 太陽電池の種類と特徴<sup>3)</sup>

種類		特徴	変換効率*	実用化状況	主な国内メーカー
シリコン系	単結晶	・200 $\mu$ m程度の薄い単結晶シリコンの基板を用いる ・特長: 性能・信頼性 ・課題: 低コスト化	~ 20%	実用化	シャープ 三洋電機 (HITタイプ)
	多結晶	・小さい結晶が集まった多結晶の基板を使用 ・特長: 単結晶より安価 ・課題: 単結晶より効率低い	~ 15%	実用化	シャープ 京セラ 三菱電機
	薄膜系	・アモルファス(非晶質)シリコンや微結晶シリコン薄膜を基板上に形成 ・特長: 大面積で量産可能 ・課題: 効率低い	~ 9% (アモルファス)	実用化	シャープ 三菱重工業 カネカ 富士電機
化合物系	CIS系	・銅・インジウム・セレンなどを原料とする薄膜型 ・特長: 省資源・量産可能・高性能の可能性 ・課題: インジウムの資源量	~ 12%	実用化	ソーラーフロンティア ホンダソルテック
	CdTe系	・カドミウム・テルルを原料とする薄膜型 ・特長: 省資源・量産可能・低コスト ・課題: カドミウムの毒性	~ 11%	実用化	国内: なし First Solar (米)
	集光系	・III族元素とV族元素からなる化合物に多接合化・集光技術を適用 ・特長: 超高性能 ・課題: 低コスト化	(集光時 ~ 42%)	研究段階	シャープ 大同特殊鋼
有機系	色素増感	・酸化チタンに吸着した色素が光を吸収し発電する新しいタイプ ・特長: 低コスト化の可能性 ・課題: 高効率化・耐久性	(~ 11%)	研究段階	アイシン精機 シャープ フジクラ ソニー
	有機薄膜	・有機半導体を用いて、塗布だけで作製可能 ・特長: 低コスト化の可能性 ・課題: 高効率化・耐久性	(~ 8%)	研究段階	新日本石油 パナソニック電工 住友化学, 三菱化学

\*モジュール変換効率, ただし括弧内は研究段階におけるセル変換効率

に他ならない。  
第三以下の視点は、太陽光発電と言えば誰でも口にすることなので、詳しくは述べないが、最近の話題で著者自身が気になっている点のみ述べておく。以下に今度はセ

ル(太陽電池自身), ついでこれを数十枚つないで市販されているモジュール, さらにモジュールを系統につなぐためのインバーターなどをつないだシステム, そして系統電源それ自身へと話しを進めてゆこう。まず表2<sup>3)</sup>には

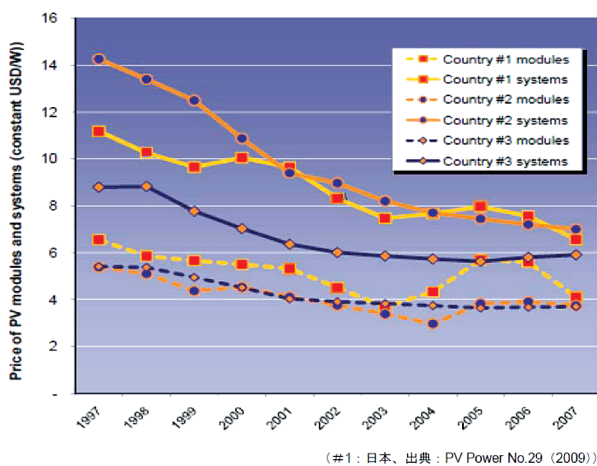


図5 太陽電池モジュールおよびシステムの代表的な市場での価格推移<sup>4)</sup>

NEDOの整理による太陽電池の種類があげてある。

- 3) 面積あたりのセル・モジュール変換効率と発電量あたりのコスト低減: 基本的なところではあるが、シリコン系では変換効率とコストとがトレードオフ関係にあるのが興味深い。そもそも多結晶系は、つい数年前までは、半導体用単結晶のくずから作られていたものであり、著者らも含めてさまざまなエネルギー消費が少なく低コストな多結晶製造プロセスの開発がなされてきたが、日の目を見なかった理由もそこにあった。

最近の話題は、CdTe。米国のFirst Solar社から安価に供給され、市場を席卷しつつある。昔から知られているGaAsと同様、化合物系であるが、その廃棄時の環境汚染の可能性が心配される。余談となるが、多結晶シリコン製造での筆者の周りでの話題は、四塩化ケイ素の亜鉛還元である。四塩化ケイ素は、従来法であるシーメンス法の副産物であるが、これはシーメンス法の原料であるトリクロロシランに還元再利用が可能であったはず<sup>5)</sup>である。ところが中国ではこの四塩化ケイ素が廃棄物として「そのまま」田畑に廃棄されて塩酸を放出しているというのである<sup>6)</sup>。

図5<sup>4)</sup>にはモジュールおよびシステム価格の推移を示す。ちなみに#1が日本ということのようであるが、#3はどこなのだろう?ただ、その価格差は縮小しているようにも見える。

- 4) システム価格と土地代とグリッド: まだ沙漠で発電、というのが夢とするなら、日本で太陽光発電を進めるなら、この高い土地価格を考えなくてはならない。とすれば変換効率は高い方がよい。しかし、多接合(タンDEM)型や単結晶を敷き詰めるのはセル価格が高すぎる。表2<sup>3)</sup>では集光型は化合物系に分類されているが、むしろまだエネルギーコストの問題がある結晶系でも集光システムとの組み合わせが望まれる可能性があるし、そのためのたとえば粒子状のセル開発も今後の課題だろう。

図5<sup>4)</sup>でもう一つ注目すべきは、システムになるとモジュールの約2倍の価格となっていることだろう。そしてスマートグリッド。その負荷変動追従のための制御技術も当然であるが、ハードとしてこれを支える電池技術も一つのポイントである。全く無関係に見える、ハイブリッドから電気自動車に向かう技術開発が、その廃電池の定置利用という面で、注目を集めつつあるようである。「GM社とABBグループ、PHEV「Volt」に搭載するLiイオン2次電池の2次利用を検討開始<sup>7)</sup>」とのことである。

## 6. おわりに

本当は、バイオマス<sup>8)</sup>をはじめとする他の太陽起源の再生可能エネルギーについても書かせて頂くつもりであったが、もうとっくに制限ページを超えてしまったようだ。拙著参照、ということにさせて頂き、おわりにあたり一言述べさせて頂く。それは税制の話である。前述の太陽電池が日本において生産量も導入量も増えないばかりかむしろ減り、最近再び遅ればせながら増加傾向となっているのは、補助金政策が迷走したからである。このようにいつ切られるかわからない制度は困ったものである。そもそも国の役割は、税の徴収とその利用。それぞれに役割があり、戦略が反映されるべきである。とりやすだけの消費税ではあまりに智慧がない。

私たちの未来は私たちだけのものではない。むしろ私たちのずっと先の世代のものであるはずである。このとき、私たちが多くの資源を使い尽くし、その結果「ゴミ」としてその形はいろいろと変わるが、たとえばCO<sub>2</sub>を排出し、地球温暖化を加速している。それならいっそ、大本に帰り資源をできるだけ使わないようにする施策が、包括的にとられるべきだろう。曰く、バージン資源税。輸入製品にも同様なLCA評価に基づく課税がなされるべきだろうし、一方製品輸出には同様の根拠を持って払い戻される必要はあるが・・・日出づる国が、世界で果たすべき役割は、そのような包括的政策により、世界に先駆けた省資源社会(低炭素社会をもちろん含む)に向けた技術開発を先陣を切って実施するための仕組みを作って実行し、かつ成果としてその生き様をみせるべきなのだろう。

### 引用文献

- 1) 小島紀徳ら; 化学工学, **60**, 52-56 (1996)
- 2) 小島紀徳; 「エネルギー」風と太陽へのソフトランディング, シリーズ・地球と人間の環境を考える-05, 日本評論社, 東京 (2003)
- 3) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構; NEDO再生可能エネルギー技術白書~新たなエネルギー社会の実現に向けて~ (2010)
- 4) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構; 太陽光発電ロードマップ(PV2030+)報告書 (2009)
- 5) 小島紀徳, 古沢健彦; 化学工学, **51**, 217-223 (1987)
- 6) Nath, I.; *Stanford J. International Relations*, **11**, 6-13 (2010)
- 7) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20100922/185804/>
- 8) 小島紀徳ら; 月刊「水」, **48**, 61-67 (2006)