

太陽エネルギーの利用効率からみた太陽光発電，風力発電，水力発電の比較

中村 健治

要旨

水力発電は従来からよく使われている再生可能エネルギーである。しかしこれを太陽エネルギーの利用効率からみると意外に低い効率である。それにもかかわらず、水力が使い易い再生可能エネルギーとなっていることの原因としては、広い領域の太陽エネルギーが狭い領域に集められていることがある。風力にも似たような面がある。再生可能エネルギーの問題の一つは出力が自然状態により変動してしまうことである。このため大電力の貯蔵技術が必要である。貯蔵を実感するために、極く単純な電力貯蔵の例として動輪による貯蔵を考えてみると、これはあまり現実的ではないことが示される。

1. はじめに

地球温暖化の進む中で、再生可能エネルギーの利用が進んでいる。再生可能エネルギーとしては太陽光発電と風力発電が有力とされている。あまり目立たないが、従来から使われている水力発電も再生可能エネルギーである。再生可能エネルギーの元は太陽光のエネルギーであるが、化石燃料も太陽エネルギーが元である。しかし、化石燃料は長期に蓄積された太陽エネルギーであるが、再生可能エネルギーは短期のエネルギーであり、蓄積部分はない。

水力発電は小電力発電以外は既開発としてあまり話題に上らない。太陽光発電と風力発電はその利用効率や建設費用、騒音や生態系への影響などからの利害得失については多くの書物や報告書がある（例えば、太田，2012，細野，2012，本間，他，2012，（株）エックス都市研究所，2011）。しかし、大もとの太陽エネルギーの利用効率から見た比較はあまりなされていない。本稿では太陽エネルギー，水力発電，風力発電を太陽エネルギーの利用効率から比較してみる。また自

然エネルギーによる発電では電力貯蔵が一つのキーテクノロジーとなる。簡単な電力貯蔵システムを想定し、その現実性を考えてみる。ここでの結果は、長い目で見たときの利用可能性、あるいは潜在エネルギーとしての量の検討に資することができよう。

2. 水力発電と太陽光発電の簡単な比較

水力発電はダムなどに貯めた水を落下させてその運動エネルギーから電力を得ている。水力発電の発電量は、貯めた水のポテンシャルエネルギーから求められ、貯めた水の質量をM，落下高度をH，重力加速度をgとして、 MHg と表される。この効率を太陽光発電と比較するため、簡単な例を考える。太陽光発電はよくビルの屋上に設置される。同様に高さ100mのビルの屋上に雨水を貯めて、それを落下させて発電することを考えよう（図1）。現実的なものとして、屋上の広さは20m×30mとする。日本を考えると一年間に1500mmの雨があるとすると、屋上に貯まる水の量は、 $20m \times 30m \times 1500mm = 900m^3$ となる。この質量は900トンとなる。水の比重を1としてこの水を落下させて得られるエネルギーは、この水のポテンシャルエネルギー（ MHg ）であるから、 $900 \text{トン} \times 100m \times 9.8m/s^2$

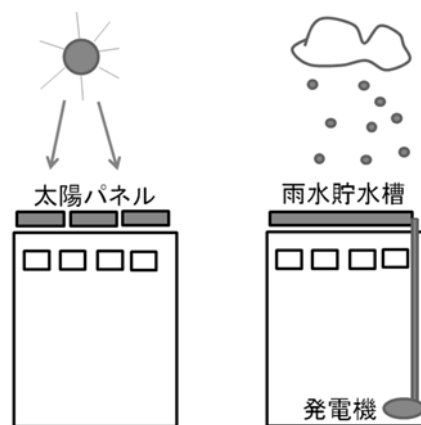


図1 太陽光発電と貯水発電

で約900MJとなる。1年は約30M (30×10^6)秒であるので、仕事率にすると30Wとなる。これは1平米当たりではわずか0.05Wにしかない。この屋上に太陽パネルを並べて発電することを考えよう。太陽に正対した面の受ける太陽エネルギーは 1.4kW/m^2 弱である。太陽が斜めに当たることや夜を考えると平均では4分の1の 340W/m^2 となる。曇りの日などで発電できない時間が半分あるとし、また太陽パネルの効率を15%とすると、平均の発電量は、約 20W/m^2 となる。屋上の $20\text{m} \times 30\text{m}$ の広さでは 12kW となる。これを水力発電と比較すると、太陽光発電は単位面積当たりでは水力発電に比べて400倍もの発電量を持っていることになる。ともに太陽エネルギーを元にして再生エネルギーとして使用されるものでありながら、なぜこのように大きな差があるのであろうか。

3. 水力発電の効率

水力発電は大気の循環により上空に運ばれ、地上に落下した水を高所に貯め、その重力ポテンシャルエネルギーを使っている。この構造について考える。太陽エネルギーは地上を温め、対流を起こし、上空あるいは寒い地方で放射冷却により、宇宙に逃れる。この間に大気に運動を引き起こすので太陽エネルギーを元にした熱機関といえる。ここで発生した仕事の一部を水力発電や風力発電に使っている。また化学エネルギーとして蓄えられ、薪炭や化石燃料として使われている。熱機関ではその最大熱効率は高温源と低温源で決まる。ここでは太陽エネルギーに温められた高温源と放射冷却により冷やされた上空を考えその間での熱機関を考える。ただし、地球全体としては、太陽エネルギーを受け、これを冷たい宇宙空間に流すだけで、外部に対しては何も仕事をしないので、熱効率は0となっている。

水蒸気を含んだ大気が地上付近で温められ、上空に上がり、そこで冷やされ、また地上に降りる熱サイクルを考えると、地上での絶対温度 T_s (s: surface) と上空での絶対温度 T_u (u: upper) により熱効率の上限が $(T_s - T_u) / T_s$ となる。 T_s として300K, T_u として270K (0度C) をとれば熱効率の上限が10%となる。

実際の気では、太陽エネルギーにより地表面が温められ、水が蒸発して水蒸気になる。また顕熱として大気が温められる。水は気体となることで密度が小さくなり、また大気は温められることで軽くなる。これにより、大気は水蒸気を含んだままで上昇する。上空では大気は断熱膨張と放射冷却により冷やされる。これにより水蒸気は凝結し、雲粒となり、さらには雨となり落下する。大気また水が上昇、落下することにより対流が引き起こされる (図2)。

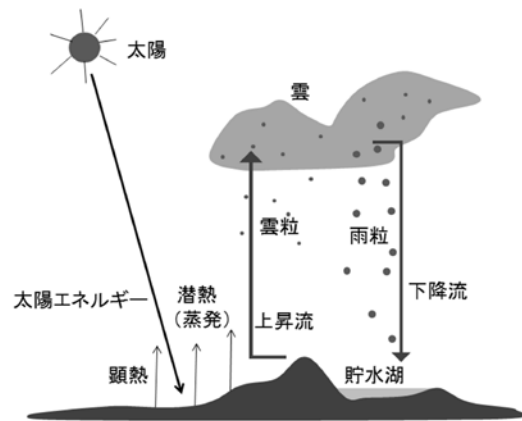


図2 太陽エネルギーと水の蒸発

雨粒の落下は大気を引きずり、対流を助長する。もし雨粒が大気の抵抗を受けずに落下すると大きな落下速度となる。現実的な値として高度3kmで雨粒となり落下が開始されたとすると地表では250m/秒と音速に近い速度となる。実際の雨粒の落下速度は大きくても10m/秒であり、雨粒は空気抵抗を介して大気を下方へ引っ張っていることがわかる。実際、降水システム内部の下降気流の一部は降水粒子による引きずり効果によっている。降水システムの計算機シミュレーションでも降水粒子のloadingという言い方で考慮されている。この雨水を貯蔵して水力発電により電力を得ることを考えると、その落差は100m程度である。すると、もともと3kmの高度にあった水の重力ポテンシャルエネルギーのうち、ほとんどは落下途中で大気を引きずることに費やされ、わずか100mの高度分のみが発電に使われることになる。つまり潜在エネルギーの30分の1のみが使われている。熱効率の最大値が10%程度であることから、総合では300分の1以下の

効率しかないことになる。

ここでは凝結高度を3kmとしたが、このような計算では、気温減率（高度1km当たりの気温の減少率） Γ が与えられれば、熱効率は水蒸気の凝結高度にはよらないという少し面白いことがある。地表面温度を T_s 、凝結高度を H 、気温減率を Γ 、水力発電の落差を h とすると、熱効率は $\Gamma H/T_s \times h/H = \Gamma h/T_s$ となって凝結高度 H には依らなくなる。

この議論を使うと重力ポテンシャルエネルギーについてももう少し考えることができる。運動エネルギーにかなりの部分が費やされることを考えると、凝結高度 H_c と熱機関として発生するエネルギーがすべて重力ポテンシャルエネルギーとなった場合の高度 H_p とは必ずしも一致しない。この比 $\alpha (=H_p/H_c)$ を見積もることができる。水の蒸発に使われる単位面積当たりのエネルギーを E 、蒸発量を M_v とする。また E を地表で大気に与えられるエネルギーと等しいとしよう。実際の大气でも蒸発に使われるエネルギーは顕熱として大気に直接与えられるエネルギーの3倍程度ある。散逸の無い理想的な過程（可逆準静過程）として解放されるエネルギーは $E\Gamma H_c/T_s$ であり、これがすべて高度 H の重力ポテンシャルエネルギー（ $M_v g H_p$ ）になると考える。一方、 M_v と E とは水の蒸発熱（潜熱） L により $LM_v = E$ と関係しているので、最終的に $\alpha = L\Gamma/gT_s$ という簡単な式が得られる。蒸発熱 L として2.5MJ/kgを、気温減率として6.5K/kmを使えば α は5程度となる。理想的ならば、温まった大気は周囲と混合や拡散が起こらず、また高くまでオーバーシュートすると考えられるが、実際の大气では、他の対流運動のエネルギーとなる分などもあり、重力ポテンシャルエネルギーになる部分は理想的な場合に比べて20%程度となっていると理解される。

上は非常に粗い考え方である。詳しく考えると、細かい話がたくさんある。水が蒸発する時には液体から気体へと変化し体積が大きく変化する。この分も含めて潜熱の形でエネルギーが蓄えられるが、それが低温の上空で凝結するときに吐き出される。この部分はClausius-Clapeyron則で気温、蒸気圧と蒸発熱の関係として表されている。現象的には、上空で水蒸気が凝

結すると雲粒、雨粒となり、重力ポテンシャルエネルギーが突然現れてくるように見える。その一方乾燥大気は冷却された後に下方に動き、これも対流を引き起こす。ここでのエネルギーの分配のされ方も調べる必要がある。作業媒体として水蒸気と乾燥大気の混合大気の簡単なモデルを考えたいのであるが、水蒸気の密度は乾燥大気の密度よりも小さいので水蒸気があることだけでも大気は軽くなる、雲粒は乾燥大気と一緒に動くが、雨粒は乾燥大気から抜け落ちる、などのことがあり、なかなか複雑である。水蒸気と乾燥大気との関係、気温減率、地表面の水の蒸発には太陽光ばかりでなく、雲などからの赤外線もかなりある。またどこまでを可逆準静過程とすることができるか、それに関連して散逸するエネルギー量の見積もりも必要である。これらは今後の検討課題である。

一方の太陽光発電の効率を考えてみよう。太陽光は6000Kの温度を持っており、一方、環境は300Kの程度であるので、準静可逆過程ならば95%の熱効率を与える質の高いエネルギーといえる。太陽光発電の効率は現在では最高で50%近く、通常使われるものでも15%程度の効率を持っている。このため、太陽光発電は太陽エネルギー利用の効率の面からは非常に効率が高いといえる。

水力発電と太陽光発電を再度比較してみよう。水力発電では地表面から大気に入るエネルギー量は太陽放射の30%程度で約100W/m²である（例えば小倉、1999）。これが最大熱効率10%で仕事あるいは重力ポテンシャルエネルギーに変わり、そのうち重力ポテンシャルエネルギーになる分は先ほどの α の議論から20%となる。さらに高度差100mとして30分の1が水力発電に使われるとすると、0.06W/m²となる。この値は先に示した0.05W/m²にほぼ一致する。全球平均の降水量は900mmであり、日本の約1500mmの6割程度でファクター2程度の誤差はあると考えられるものの、太陽光発電の20W/m²との大きな差のかなりは説明できたといえよう。

風力発電は、熱機関としての大気が発生する大気の運動エネルギーを使っている。熱機関の効率は10%でよいであろう。さらに運動エネルギーから乱流へのカ

スケードにより消散するエネルギーは10%程度とされる(松田, 2014)。乱流エネルギーの消散は地表付近での地面摩擦によるとすると、これが風力発電の潜在エネルギー量となろう。すると風力発電の太陽エネルギーの利用効率は1%で数W/m²となる。

このように水力発電の太陽エネルギー利用の効率は非常に低い。それではなぜ、水力発電が広く利用されているのであろうか。一つの答えは、自然の力で広い領域の太陽エネルギーを集めてくることができるからであろう。例えば、日本の巨大重力ダムの原点として知られる天竜川の佐久間ダムの流域面積は約4200km²であり(Wikipedia)、この広い領域の降水を地形を利用して集めている。またこの広い領域に降る雨は、その場で蒸発した水ではなく、太平洋や日本海で蒸発した水がおおくを占め、より広い領域からの蒸発といえる。佐久間ダムの発電は落差は133mであり、年間発電量は13億kWhである(Wikipedia)。この量は4200km²の領域の年間1500mmの総雨量の133mの高さの重力ポテンシャルエネルギー23億kWhにオーダ的には対応している。また年間13億kWhは平均15万kWに相当する。なお佐久間ダムの最大出力は35万kWであるので最大出力の約40%で運転されていることになる。このように広い領域からエネルギーを集めることができる、ということはエネルギー密度が高いという考え方に通じる(太田, 石原, 2012)。太陽光は広い範囲に薄く広がっておりエネルギー密度が低い、貯水地には狭い範囲に多量のエネルギーが貯まっております、エネルギー密度が高く使い易い。

同じことは風力発電でもいえよう。風が広い領域での気温の差から生じており、これは広い領域の太陽エネルギーの結果である。風力発電が無くても風のエネルギーは地面摩擦などで消散するので風力発電はもともと散逸するエネルギーを利用することになっており、この意味では筋の良い方式といえよう。

太陽光発電は太陽エネルギーを高い効率で利用するが、その一方、太陽パネルの下は太陽光が弱まるため、植物の生長が阻害されるなどの面があろう。もともと緑の広がっていたところに太陽パネルが敷き詰められているような状態は新たな人為的な土地改変となり

持続的発展にはそぐわないであろう。このため都会のように、すでに人工的な土地被覆変更がなされてしまったようなところで使用すべきではないかと思われる。この意味からは、太陽光発電は、都会における地産地消型発電とすることが適当ではないかと思われる。

東京都区部は620km²の広さがある(Wikipedia)。ここの建物の屋根、屋上すべてで太陽光発電をしましょう。発電効率を考慮して年間平均20W/m²とすれば、発生電力の平均は1200万kWとなる。東京域の火力発電所の出力は300万kWの規模であるので、1200万kWは4施設分に当たる。なお東京電力の火力発電出力は5千万kW、水力などを含めた総発電出力は7千万kWである。太陽光発電量を区部940万人で割れば、一人当たり1.3kW、一世帯4人として世帯当たり5kWとなる。これらから太陽光発電を大々的に使用すると必要電力の数十%を賄うことはできるが、全部を賄うことはできないことがわかる。東京都区部のような人工環境の中では、人々が自分に割り当てられている面積に入ってくる太陽エネルギーだけでは必要エネルギー量を賄えない、ということになる。そして石油などの既存のエネルギー源は小さい体積の中に多量のエネルギーを蓄積しており、それを使っていることになる。

4. 電力の貯蔵

再生可能エネルギーの利用では自然の変動による出力電力の変動に対処するため、電力貯蔵が重要となる。再生可能エネルギーだけでなく通常の火力発電でも、1日の中での電力需要の変化への対応や瞬停への対応が必要であり、大型システムとしては揚水発電が実用化されている。例えば富山県の常願寺川にある中部電力の多々良木ダムは発電能力が200万kWに近い大きなシステムである。また小型システムではリチウムイオン電池などを利用した蓄電システムが少数ながら実用化されている。比較的大型のシステムとして燃料電池(二次電池)の一つであるレドックスフロー電池も一部実用化されている。またフライホイールや磁気エネルギー利用、水素利用などが検討されている。

再生可能エネルギーは小型システムが多いと考えら

れることから、そのシステムに付随させる電力貯蔵システムも小型で多数であることが想像される。このため安全性、耐久性やシステムの維持経費面から、高い専門性や複雑なシステムは不相当で、できるだけ単純なシステムが良いと考えられる。この方向の一つとしてフライホイール（動輪）が検討されている。ここではこのフライホイールによる電力貯蔵を考えてみる。フライホイールは回転する車輪であり、電力が余っているときにはこの余剰電力により車輪を加速し、電力が足りないときには、車輪から発電機で電力を発生させるという簡単な原理である（図3）。システムが簡単であるだけ、製作また維持も簡単であろうと考えられる。また、具体的に動くシステムであるので、電力を蓄えることの実感を伝える一つの手段ともなろう。つまり、フライホイールの回転エネルギーが電気を介して洗濯機を回したり、電車を動かしたりすることが実感できよう。

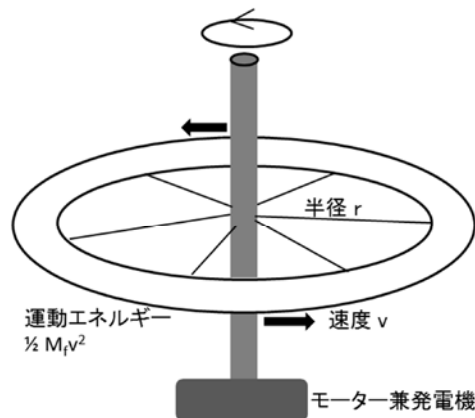


図3 フライホイール型電力貯蔵器

フライホイールの半径を r 、単位周長当たりの質量を m 、総質量を M_f とし、フライホイールの太さは半径に比べて十分に小さいとすると、慣性モーメント L は $2\pi r m \times r^2$ となる。回転角速度を ω 、とすると、その運動エネルギー（ E ）は $(1/2)L\omega^2 = (1/2)r^2 M_f \omega^2$ となる。これは速度 $v = r\omega$ から $E = (1/2)M_f v^2$ と見慣れた形となる。ここで例として以下のような小型と大型の二つのケースを考える。

I：半径：10m、回転速度：10m/s、断面：半径約30cmの円形、周長1m当たりの質量：2トン

II：半径：100m、回転速度：30m/s、断面：半径約1mの円形、周長1m当たりの質量：20トン

フライホイールは極く普通の鉄でできているとして比重を8としている。ケースIでは二つのケースでの運動エネルギーはそれぞれ、6.3MJ、5.6GJとなる。またフライホイールを支えるためには遠心力も考えておく必要がある。周長1mにかかる遠心力 F は $F = m r \omega^2$ から、二つのケースではほぼ2万N（=2000kg重）、20万Nとなる。この力（重量）は実現可能な構造であろう。このホイールに蓄えられたエネルギーが日周変化を考えて12時間で消費されるとすると、その仕事率はそれぞれ150W、130kWとなる。この量はシステムの規模から考えて、大容量の電力貯蔵としては全く物足りないものである。

もう一つ、揚水発電と同様に、ビルの屋上に水を貯める方式を考えてみよう。現実的な形として高さ100mの屋上の5m×5m×1mの小さいプールのような貯水槽を考える。この重力ポテンシャルエネルギーは25MJとなる。12時間で消費するとしてその仕事率は580Wにしかない。この出力はフライホイールよりはかなり良いが、システムの大きさの割にはこれも全く物足りない。また水を落として発電するため、始動に時間がかかることを考えると、瞬停対策にもならない。しかし、高層マンション等では建物維持は生活用水を高くまで上げており、ここで使われるエネルギーの一部を蓄えた水の重力ポテンシャルエネルギーから回収するアイデアはあるようである（細川博昭, 2012）。

二次電池としてレドックス・フロー電池と比べてみよう。レドックス・フロー電池は50J/g程度の容量を持っている（Wikipedia）。これを先の屋上の貯水槽の水の質量25トンに対応させると、1.25GJとなる。これは単位質量当たりのエネルギー量では50倍になる。単体の水素ならばこの倍以上になるが、水素は体積が大きくなるので加圧する必要があり、また水素は漏れやすく漏れた場合の安全性の課題がある。

一方、化石燃料の単位質量当たりのエネルギー量は、石炭が28MJ/kg、ガソリンが46MJ/kg、天然ガスが35MJ/kgとなっている。また穀物は15MJ/kg程

度であり、化学エネルギーのエネルギー密度は数十MJ/kgである。ちなみに将来期待されている水素は114MJ/kg、原子力の燃料であるウラン235では 6.6×10^7 J/kgとされている (<http://kabuto.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~higashij/lecture/coe07/shibata1.pdf>)。これらに比べると慣性方式の電力貯蔵がいかに不便であるか、逆に化石燃料などの単位質量当たりのエネルギー量がいかに高いかが実感される。また原子力は化学エネルギーではなく原子核のエネルギーであり、全く異なる性質であることもわかる。

5. まとめ

再生可能エネルギーを太陽エネルギーの利用効率の観点から評価してみた。水力発電は従来からよく使われている再生可能エネルギーであるが、太陽エネルギーの利用効率からみると意外に低い効率である。実用として使われている太陽パネルの電力変換効率はそれほど高くないが、太陽光を直接に電力に変換するため、結果としては高い効率を持っている。太陽エネルギーの利用効率からみると、高い順に、太陽光発電、風力発電、水力発電となる。太陽光発電に近いものとして人工光合成も研究されているが、光合成の変換効率は意外に低く数%しかないようであり (井上, 2016)、太陽光発電には遠く及ばない。人工光合成では直接に発電するよりもエネルギーを持った化学物質を生産する方が適当のようである。

水力発電は上空に上がった水の重力ポテンシャルエネルギーの一部を使っているが、このエネルギーの生成のされ方を簡単なモデルにより考えた。これから、理想的な熱機関として変換されるエネルギーの中で重力ポテンシャルエネルギーへ変換される部分の比率についての簡単な関係式が得られた。

水力発電が低い効率にも関わらず、使い易い再生可能エネルギーとなっていることの原因としては、広い領域の太陽エネルギーが狭い領域に集められていることがある。風力発電にも同様の面がある。なお水力発電の効率は高い、ということが言われるが、これは貯めた水の重力ポテンシャルエネルギーを電力に変換する時の効率が非常に高いということであり、太陽エネ

ルギーの変換効率ではない。水力発電そのものは熱機関ではないので、効率の熱力学的な限界を持たない。

再生可能エネルギーの問題の一つは出力が自然状態により変動してしまうことである。このため大電力の貯蔵技術が必須である。貯蔵を実感するために、極く簡単な電力貯蔵の例としてフライホイールによる貯蔵を考えてみると、これはあまり現実的ではないことが示された。燃料電池の有効性が再確認された。

社会が地球温暖化という大きな問題に直面し、それまでの、使えるエネルギーはいくらでも使おう、使えば使うほど社会が潤う、といういわば「イケイケドンドン」型からの変更を迫られている。また地球の有限性が認識され、sustainabilityが強調されている。このような中で、再生可能エネルギーは有力な選択肢の一つとして期待されている。火力発電所の効率は、経済性などからその向上努力が重ねられてきている。炭酸ガスを多く出すとされる石炭火力もその効率を徐々にではあるが向上させている。ここでは、高温源の温度を上げると同時に、排熱を再利用し、実質的に低温源の温度を下げることにより熱力学的限界を上げている (高橋毅, 2016)。その中で再生可能エネルギーは開発が最近であり、そのため開発余地が大きく、現在、様々な技術の開発努力がなされている。その効率、経済性は従来型エネルギーには届いていないが、まだ成熟技術ではないので、今後の開発が期待される場所である。この中で、最適な方式が生き残るであろう。しかしその技術は単独技術ではなく、電力貯蔵技術や省エネ技術、「スマート」化された社会構造も伴うものとなるだろう。さらにはエネルギーを湯水のごとく使う社会からの変換という文化の変更もあろう。

東日本大震災では大掛かりな省エネが行われたが、「やればできるではないか」、「これまでいかに無駄なエネルギーを使っていたか」、ということを認識させた。再生可能エネルギーの活用も「やればできる」というように考えたくなる。しかし既存のエネルギー源の高いエネルギー密度と利便性を考えると、既存のエネルギー源が急激に減るとは考えられず、ベストミックスの考えで進んでいくであろう。

参考文献

- 井上晴夫, 他, 「人工光合成」とは何か, 講談社,
2016, 238pp.
- 小倉義光, 一般気象学, 第2版, 東京大学出版会,
1999, 308pp.
- 太田健一郎監修, 石原顕光著, 再生可能エネルギーの
本, 日刊工業新聞社, 2012, 159pp.
- (株) エックス都市研究所, 他, 平成22年度環境省委
託事業, 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査
報告書, 2011, 287pp.
- 高橋毅編著, 図解 次世代火力発電 - 環境性・経済性
を両立する実用化への道, 日刊工業新聞社, 2016,
168pp.
- 細川博昭, 知っておきたい自然エネルギーの基礎知識,
ソフトバンク クリエイティブ, 2012, 206pp.
- 本間琢也, 牛山泉, 梶川武信, 再生可能エネルギー
のキホン, ソフトバンク クリエイティブ, 2012,
198pp.
- 松田佳久, 気象学入門, 東京大学出版会, 2014,
240pp.

Comparison of Hydroelectric Power and Solar Power in terms of the Efficiency of Solar Energy Conversion

NAKAMURA, Kenji

Hydroelectric power is a conventional renewable energy and is used since long time before. It, however, is not so efficient way to use the solar energy compared with solar power. The reason why hydroelectric power is so widely used is that water is gathered from wide area. In other words, solar power is gathered from large area without any additional human work. Wind farm power has the same characteristics. One of the problems of the renewable energy is that the power depends on the natural environment, such as, solar radiation, wind, etc. To overcome this problem, storing method of electric power is required. A simple storage method of a rotating wheel is demonstrated, and it is found that the rotating wheel is not so practical.