

# 太陽の光で電気を作る ～太陽電池のしくみと使いかた～

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
櫻井 啓一郎

2008.6.20

k-sakurai@aist.go.jp

# 産総研 太陽光発電研究センターの構成



## 場所

つくば、梅園

## チーム構成

- 結晶シリコン
- 薄膜シリコン
- 化合物薄膜
- 評価・システム
- 有機
- 産業化戦略

## 人員構成:

- 研究員
- ポスドク
- 学生、院生(連携大学院)
- テクニカルスタッフ
- 企業
- etc. 百数十名

<http://unit.aist.go.jp/rcpv/>

# 櫻井略歴

京都市育ち。

子供の頃から機械好き。10歳からハンダゴテとパソコンを仕込まれる。

子供の頃からなんとなくハカセになろうと思っていた。

1985年のつくば万博の頃には科学少年に。

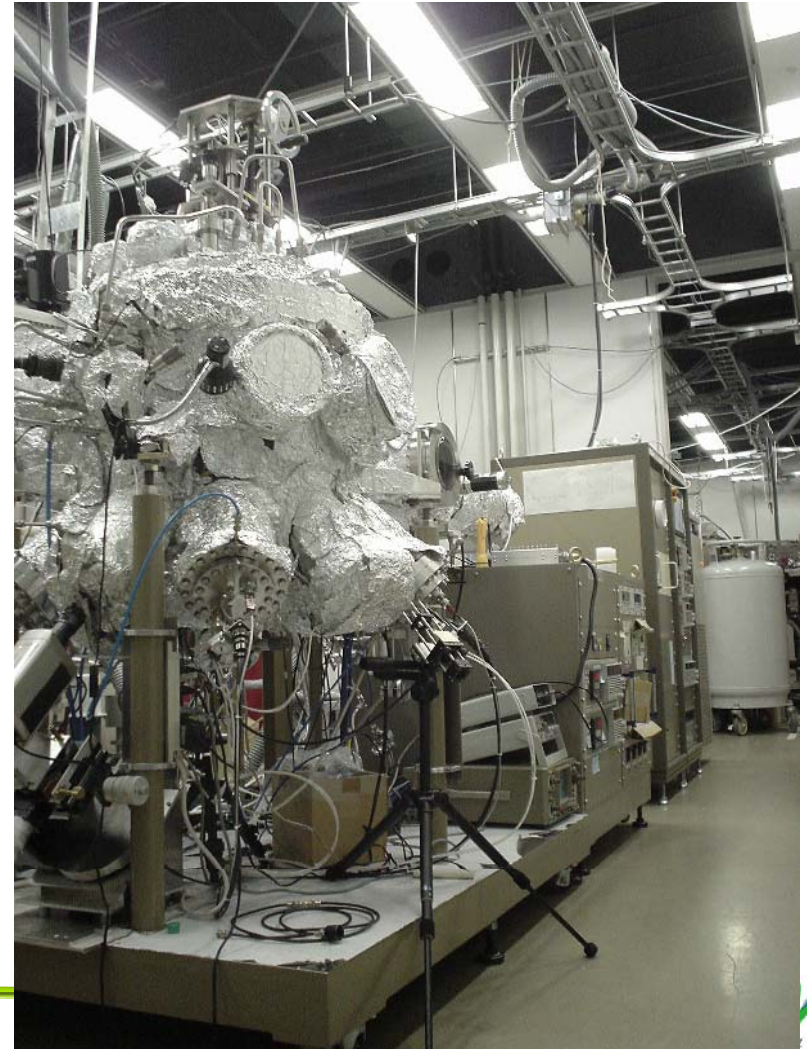
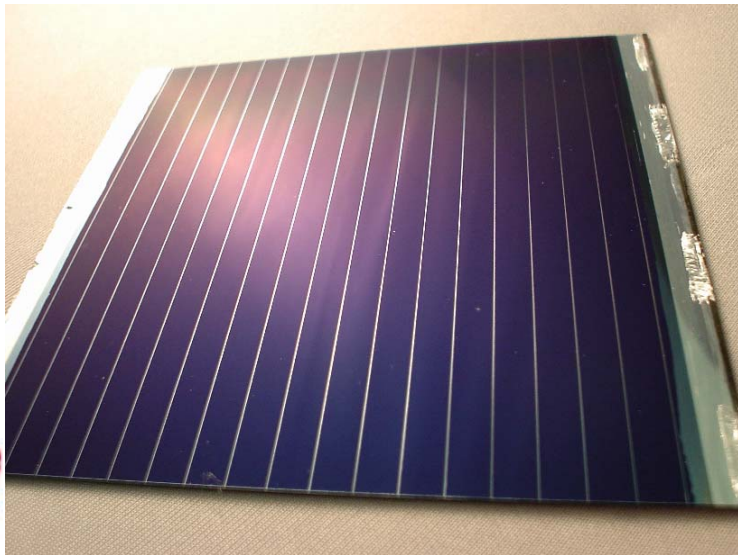
そのまま工学部に入学。

そのまま工学ハカセの道へ。

7年前に万博の街へ。

面白そうなので太陽電池のお仕事を始める。

そのままハマって現在に至る。





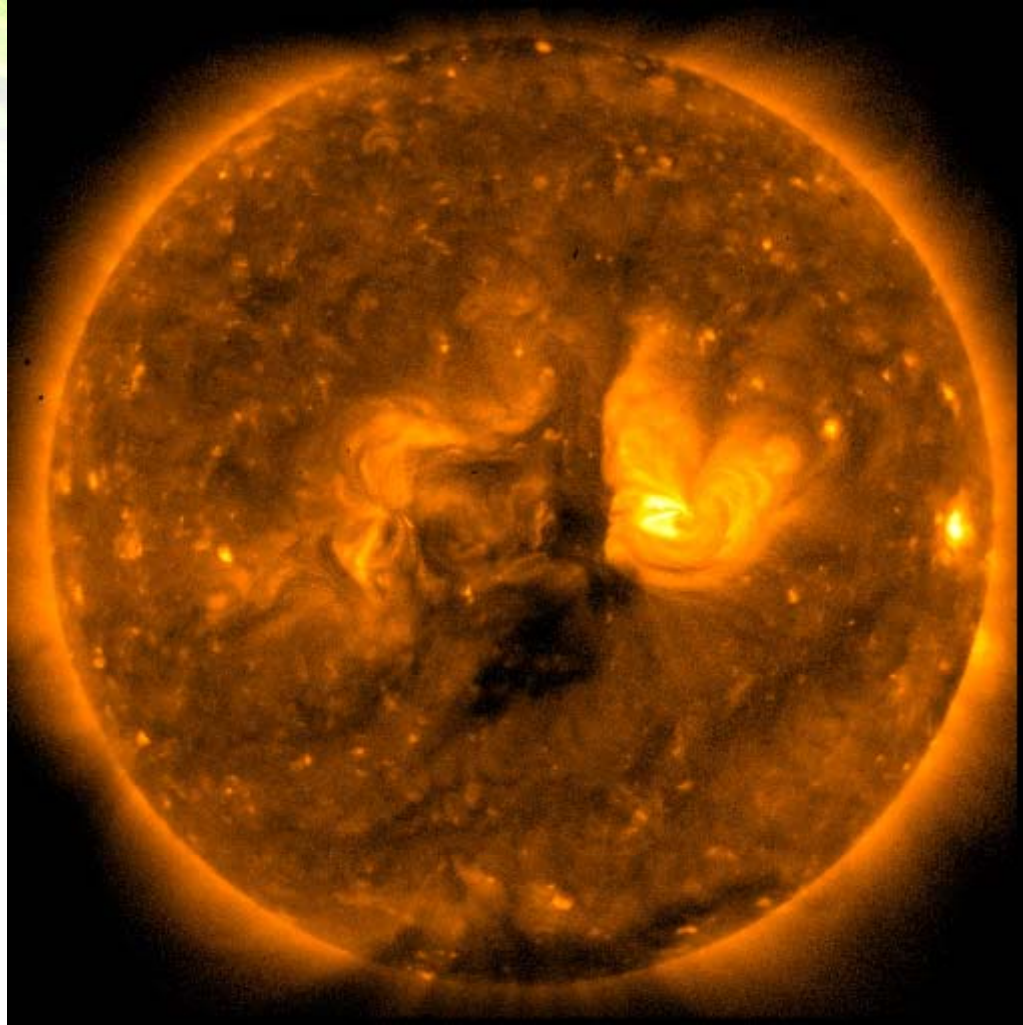
## 本日の構成

### 太陽電池の原理 (太陽電池もいじって頂きながら)

### 地球温暖化と太陽電池の役割 (問いかけを交えながら)

### まとめ: 太陽電池の将来

# 太陽とは？



直径140万キロ(地球218個分)の  
水素やヘリウムの固まり

水素からヘリウムを生成する反応で  
燃え続けている  
(天然の核融合炉)

中心温度:1560万°C

表面温度:6000°C

コロナの温度:~数百万°C

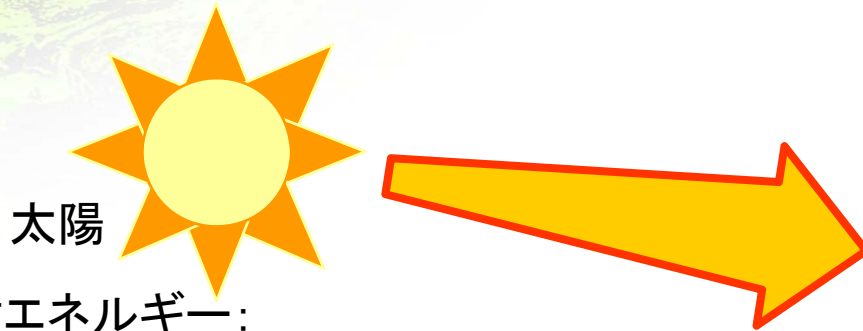
現在の年齢:約46億歳

推定寿命:約100億年

太陽観測衛星「ひので」XRT太陽全面画像

提供:国立天文台/JAXA

# 地球に降り注ぐ太陽エネルギー



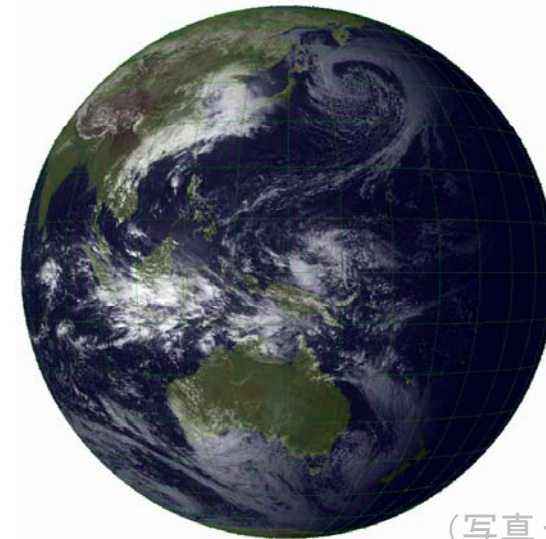
太陽

総放射エネルギー：  
 $3.8 \times 10^{26} \text{W}$

地球の大気圏に到達するエネルギー：  
約  $1.8 \times 10^{17} \text{W} = 180 \text{PW}$

(1PW(ペタワット) = 1000TW(テラワット) =  $10^6 \text{GW}$ (ギガワット)  
=  $10^9 \text{MW}$ (メガワット) =  $10^{12} \text{kW}$ (キロワット))

地表面に到達するエネルギー：  
約  $8.5 \times 10^{16} \text{W} = 85 \text{PW}$



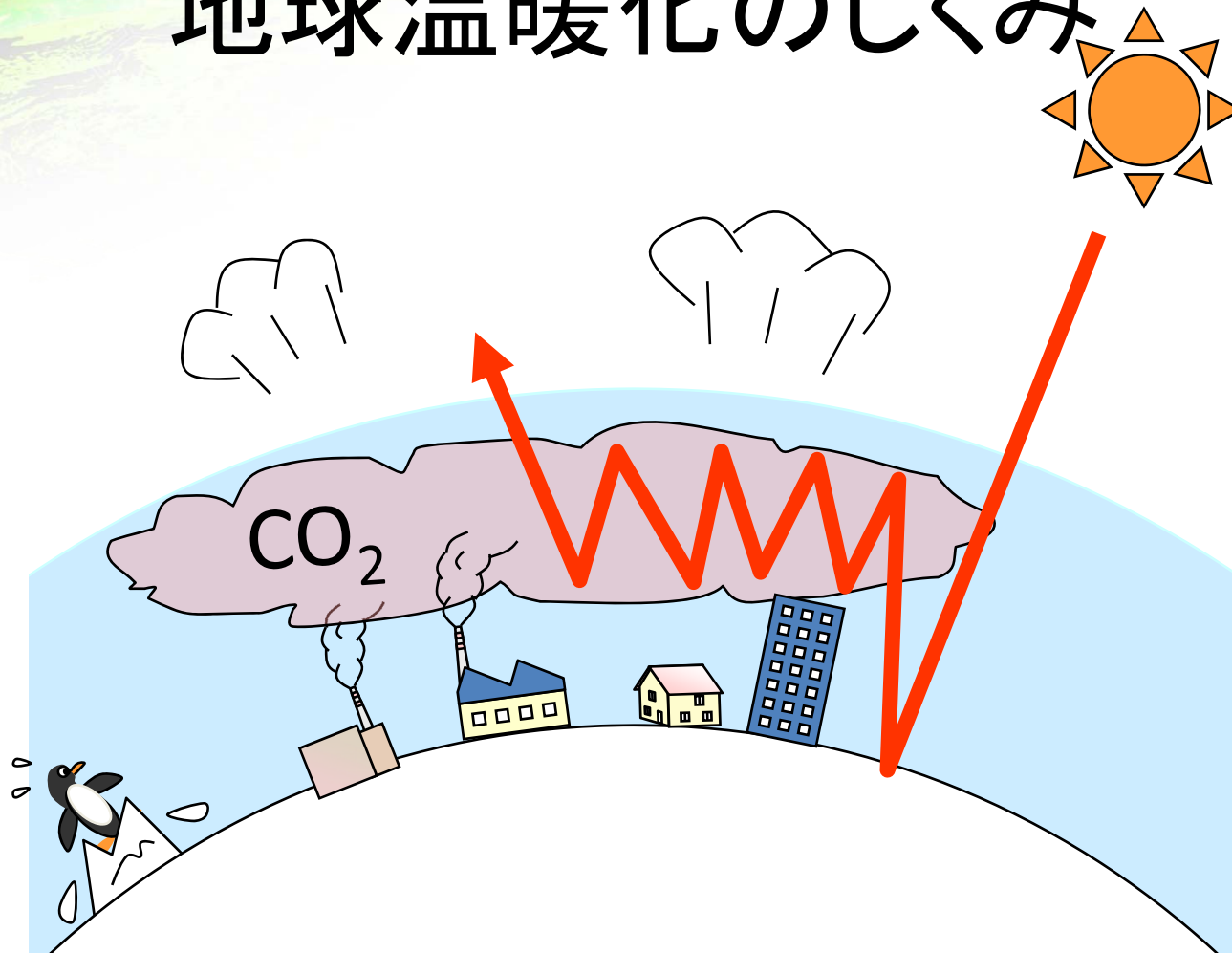
(写真: 気象庁提供)

人類が消費するエネルギー：  
約  $13 \text{TW}$ (テラワット)  
=  $0.013 \text{PW}$ (ペタワット)

実際に人類が地上で収集可能な太陽エネルギー：  
約  $1 \times 10^{15} \text{W} = 1 \text{PW}$  (世界のエネルギー需要量の数十倍)

(B.Sorensen, Energy Policy (1991) 386-391.)

# 地球温暖化のしくみ



太陽からのエネルギーは膨大。  
地球は微妙なバランスで今の温度を保ってきた  
→そのエネルギーを使わない手はない！



## 質問

身の回りで太陽の光や熱が  
どのように使われているか、  
思いつく限り挙げてみて下さい。

（日光浴、乾燥 ...  
地球規模ではどうでしょう？）



# 太陽エネルギーの使われ方(1/2)



光



採光、太陽光発電、殺菌、浄化  
(植物の光合成) → 農林業、バイオマス  
ほぼあらゆる生物のエネルギー源  
(日光浴) → ビタミンD形成  
日時計  
オゾン層の形成 → 紫外線を遮断

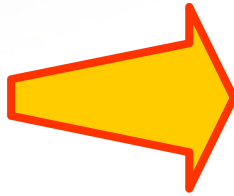
熱



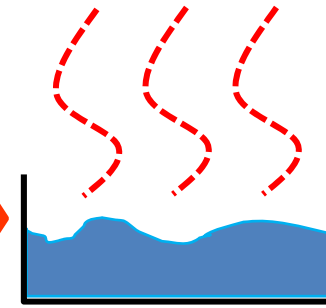
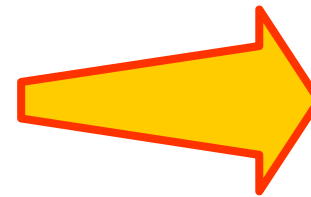
暖房、乾燥  
太陽熱温水器、太陽熱発電  
(大気の循環) → 風力、波力  
(水の循環) → 水力、潮力

# 太陽エネルギーの使われ方(2/2)

## 太陽熱利用



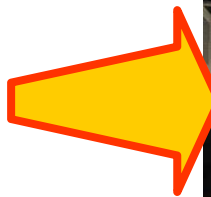
### 集熱器



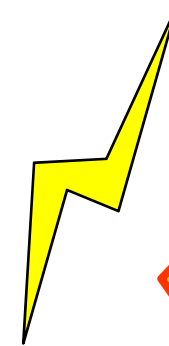
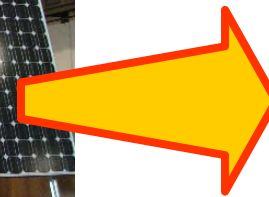
温水、暖房など

変換効率が高い、蓄熱できる

## 太陽光発電 (& 太陽熱発電)



### 太陽電池など



照明  
家電

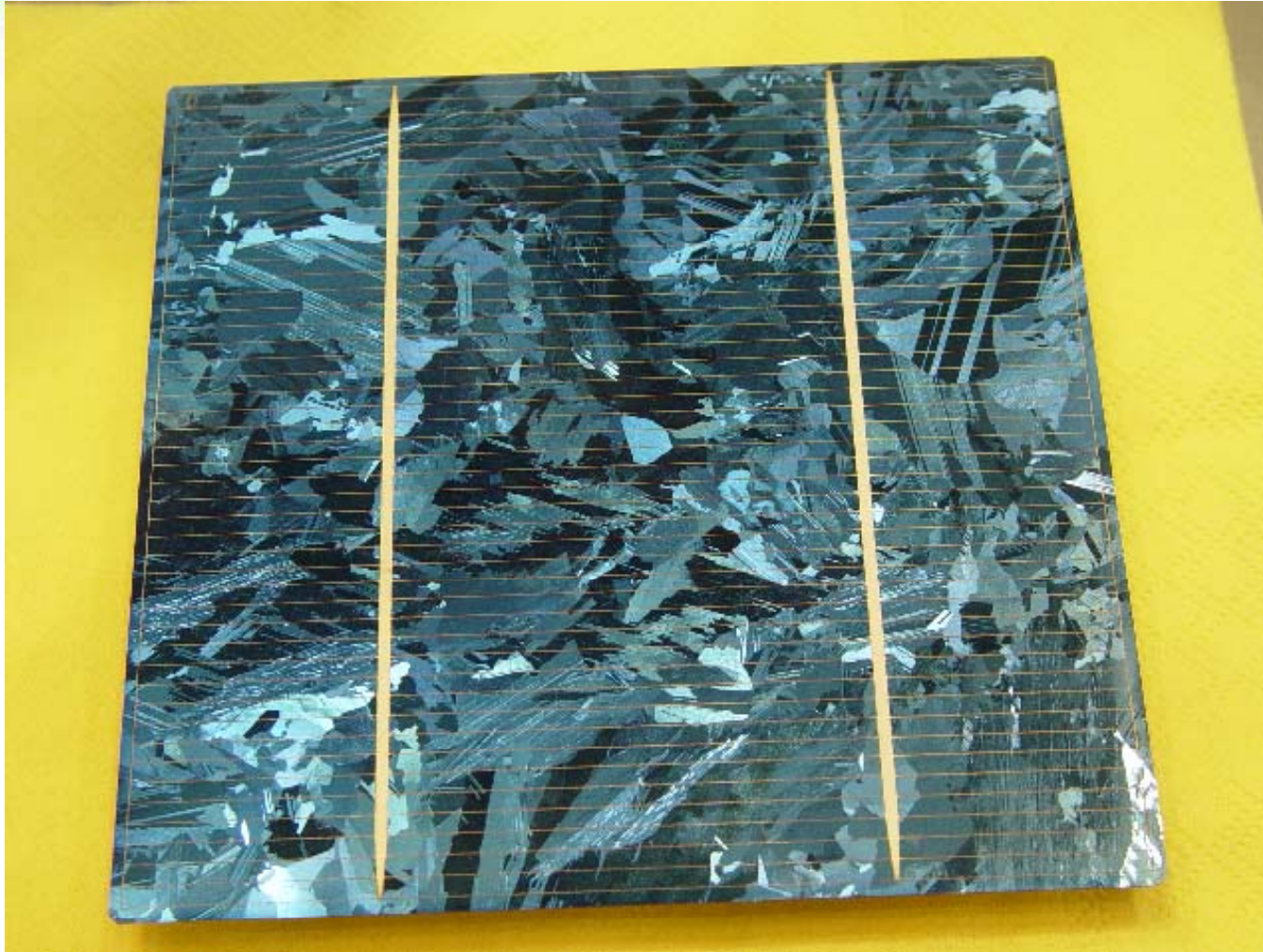
通信

冷房

動力

用途が広い  
(価値が高い)

そもそも太陽電池って、なんででしょう？



?

# 太陽電池のはじまり

## ご先祖:セレン光電池

セレンにごく薄い金をコーティングしたもので、1883年に米国で発明。  
当時の効率は1%ほど。でも、原理は不明だった。不明だけど、  
光を当てると電気ができる現象＝光電効果として、照度測定などに使われた。  
(最近まで、カメラの露出計などにも使われていた)

## 原理の理論付け:アインシュタインの「光量子仮説」

1905年ごろ、アインシュタインが光電効果を、量子論を用いて理論付け。  
ここから現代科学の基礎、「量子力学」や「相対性理論」が発達。  
「半導体」についての理解も進展。

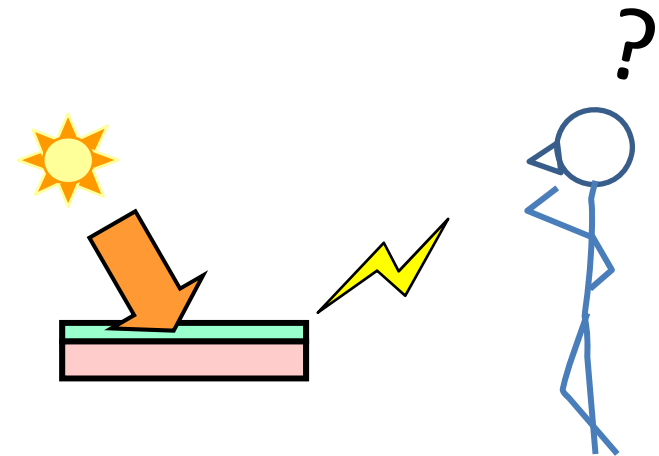
## 最初の現代的「太陽電池」:ベル研究所の"Solar Battery"

1954年、最初の結晶シリコン太陽電池(効率:6%)

## 最初の太陽電池付き人工衛星:バンガード衛星

1958年打ち上げ

以後、灯台や宇宙用に使われるように

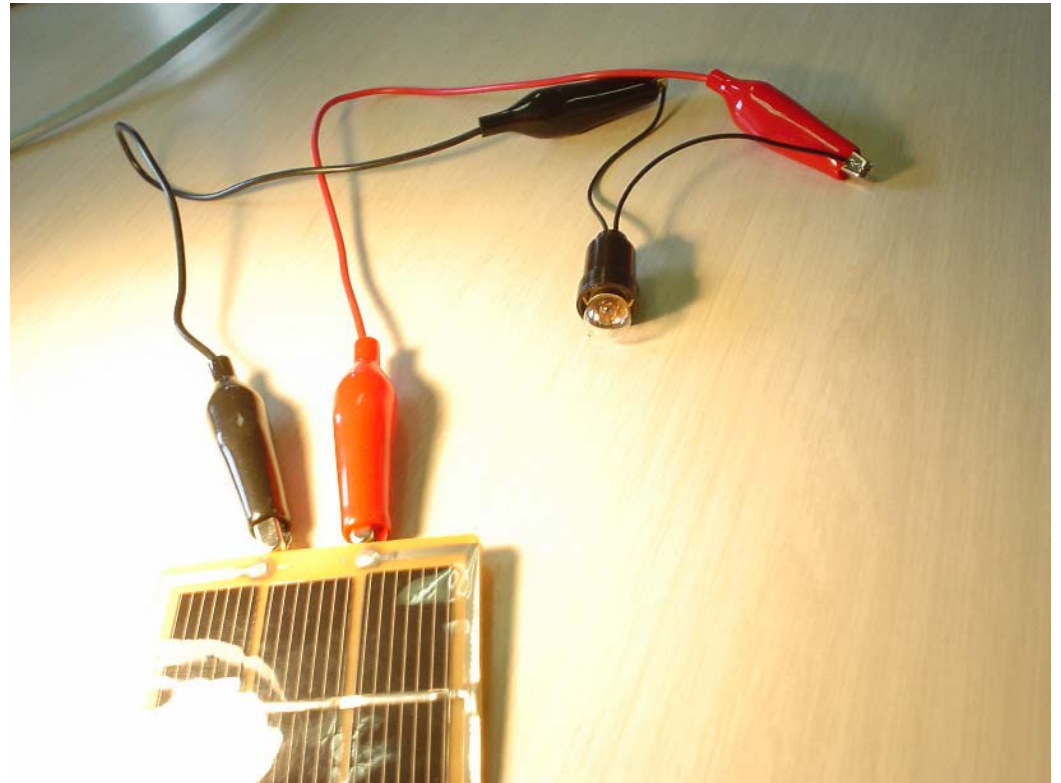


# 動かしてみましよう(1)

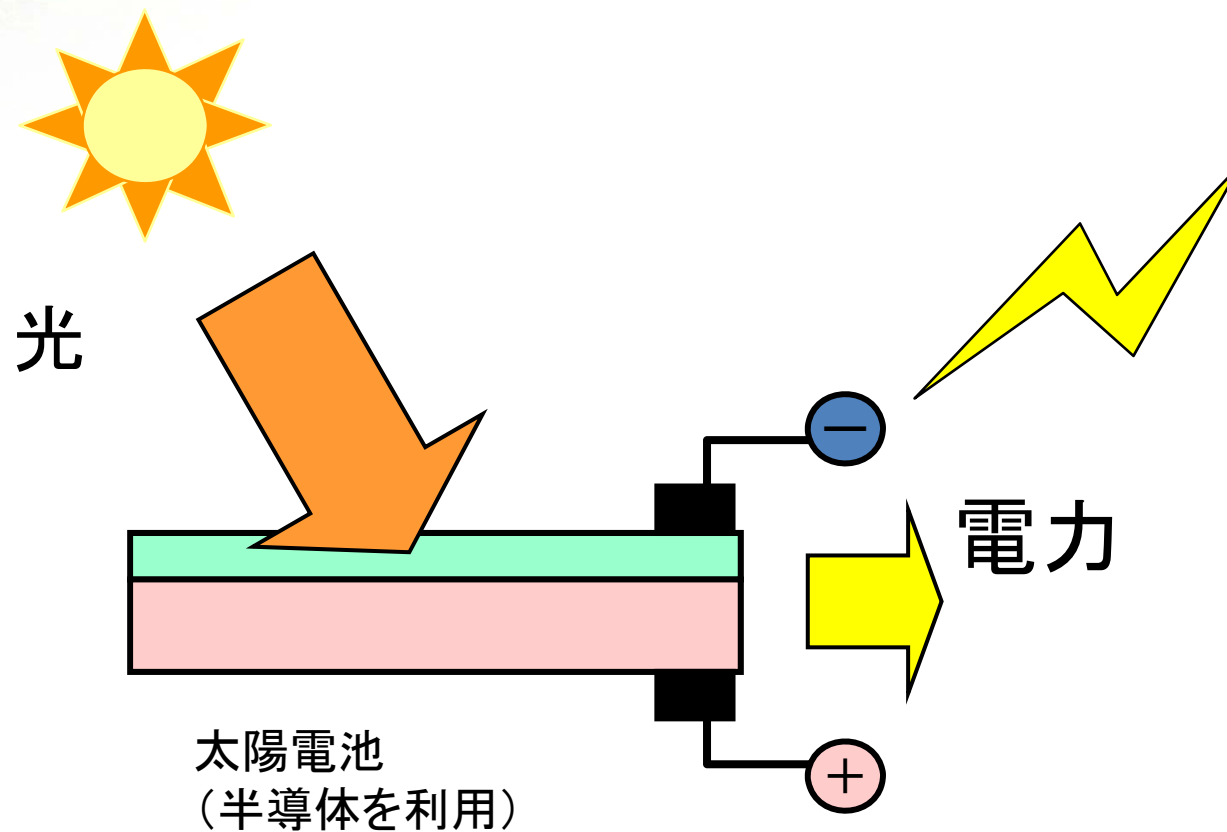
何はともあれ、動作を体感。

豆球を繋いでみて下さい。  
ランプを適当な距離で当てて、  
光るのを確認して下さい。

ランプは熱くなります、やけどしないようにご注意を！



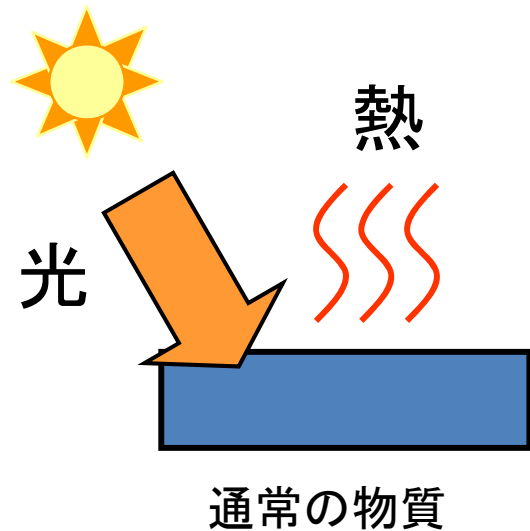
# 太陽電池とは：一言で言うと？



光のエネルギーを電力に変える

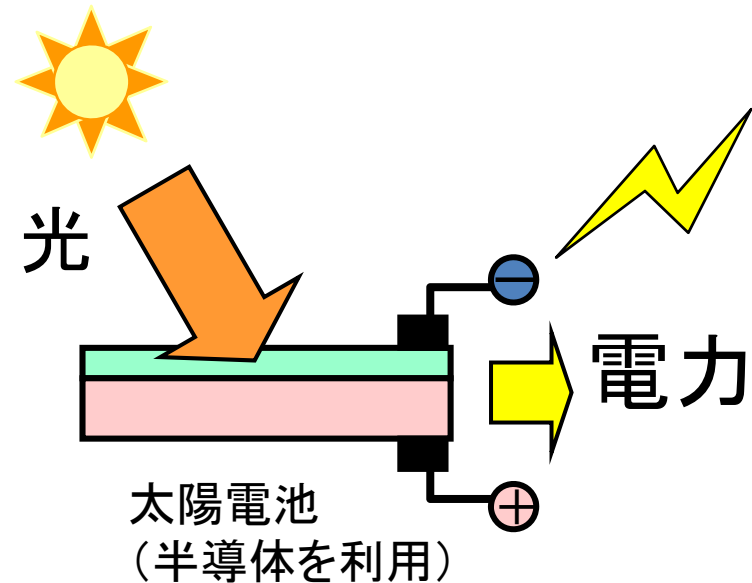
# お日さまにあたると...？

## 普通の物の場合



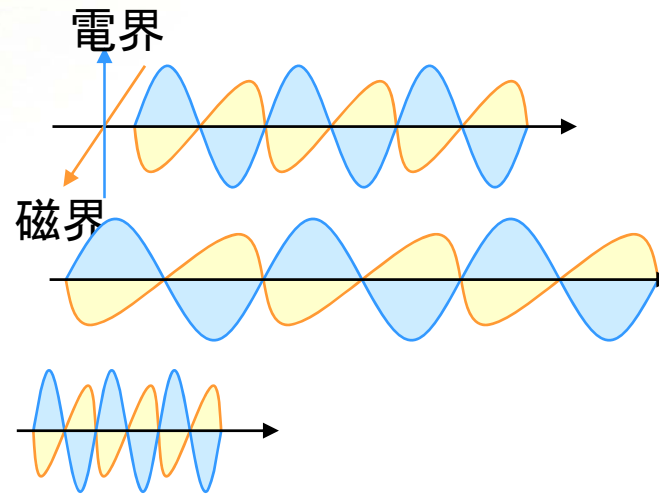
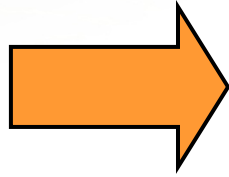
太陽光のエネルギーが**熱**に変わる

## 太陽電池の場合

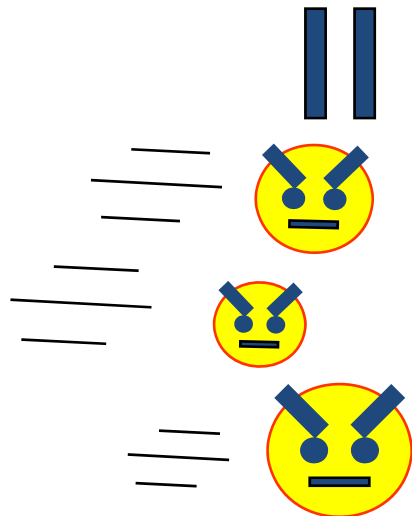


**電力**に変わる

# 「光」ってなんなの？



光は波（電磁波）の一種  
つまり、「波」の性質を持つ



ところが電子や原子の大きさで見ると、  
光は無数の小さな粒子のように振る舞う。  
この”光の粒”は「光子」と呼ばれる。

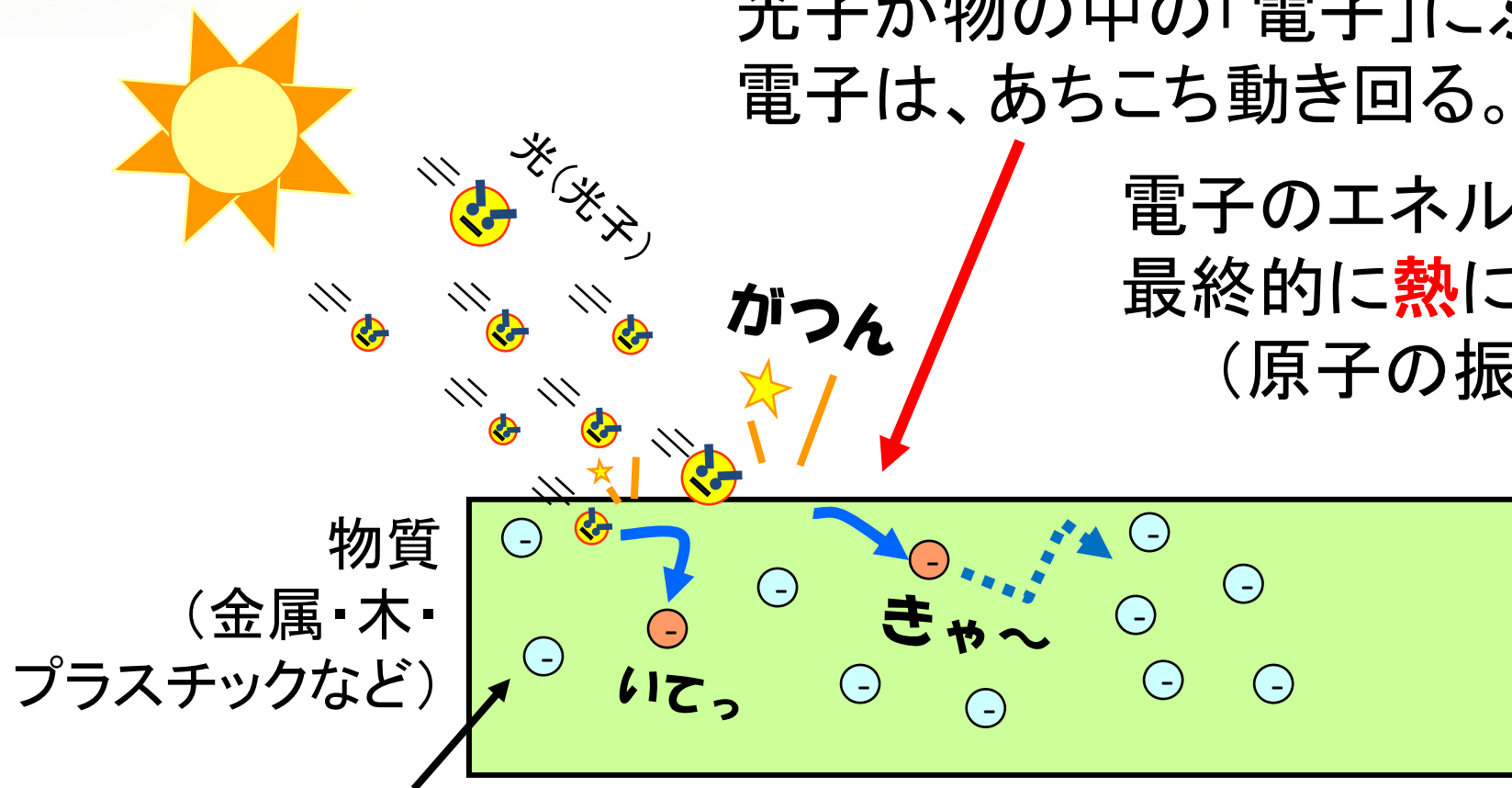
補足:「光子」(光量子)はアインシュタインが提唱した概念で、  
その後の「量子論」の基礎。ノーベル賞の受賞理由にもなった。



# 光が物に当たると何が起こる？

光を当てると、  
光子が物の中の「電子」にぶつかる。  
電子は、あちこち動き回る。

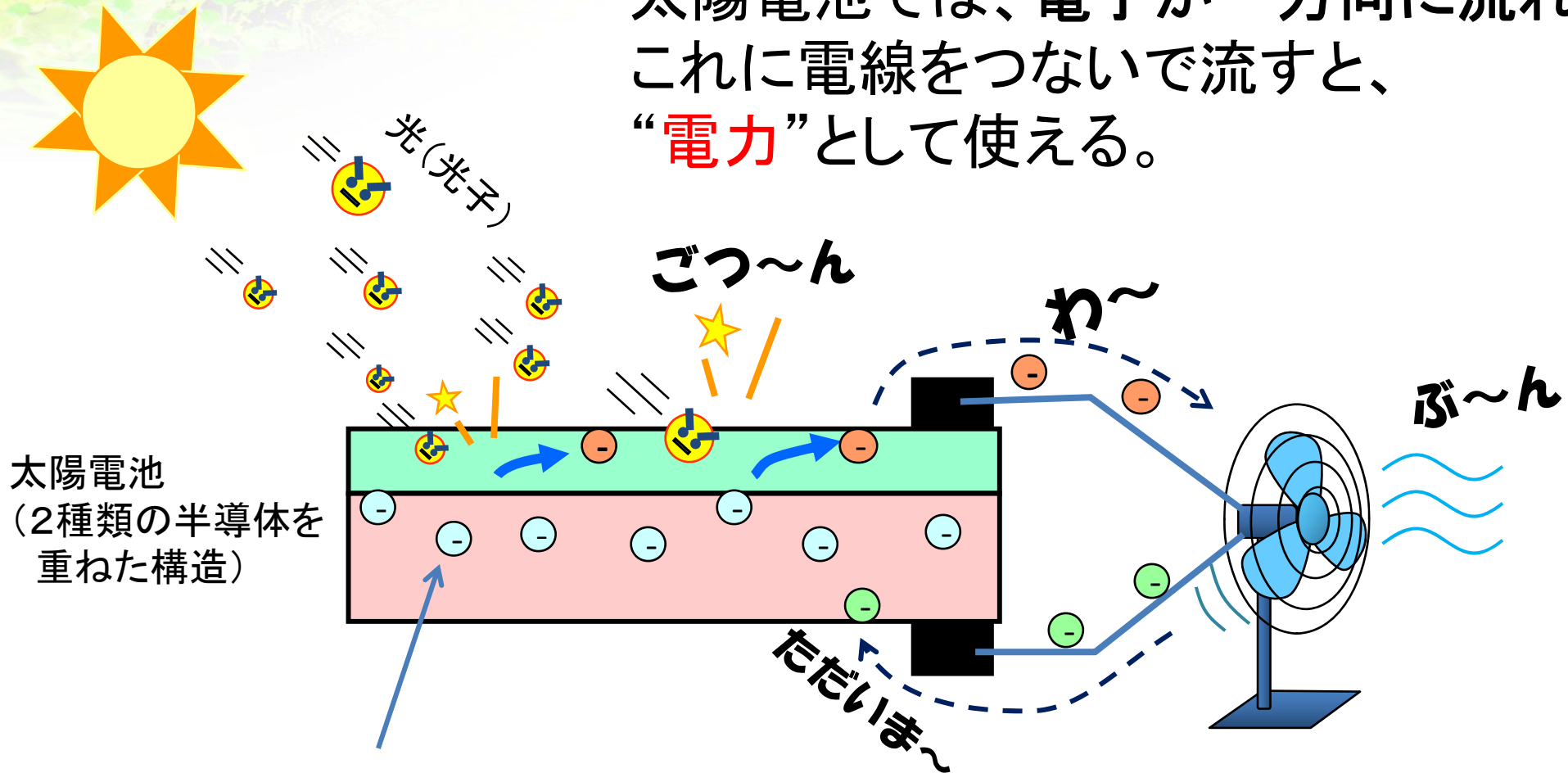
電子のエネルギーは、  
最終的に**熱**になる。  
(原子の振動)



電子：物質の中にた〜くさんあり、マイナスの電荷を帯びている

# 光が太陽電池に当たると何が起こる？

太陽電池では、電子が一方向に流れる。  
これに電線をつないで流すと、  
“**電力**”として使える。



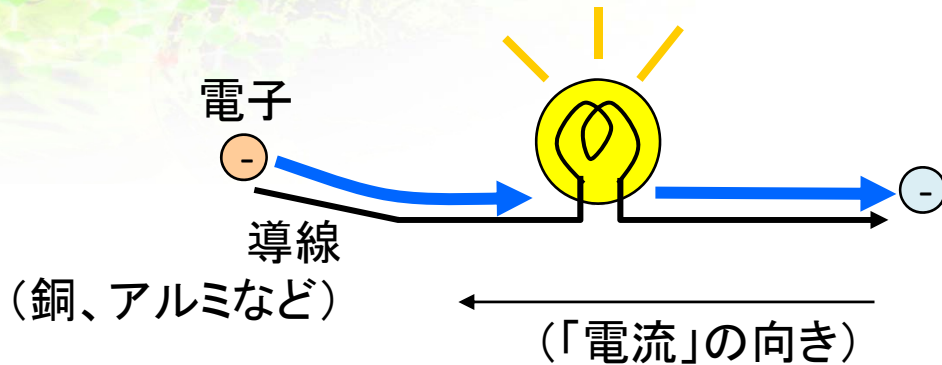
太陽電池  
(2種類の半導体を  
重ねた構造)

水色: 原子と結びついて動かない電子 (「価電子」)

オレンジ色: 光子にぶつかられてエネルギーを持った電子 (「自由電子」または「伝導電子」)

# そもそも「電力」ってなに？

負荷(電球、モーター、ヒーターなど)



電力 = 電圧 × 電流 = 電氣的なエネルギー

電圧 = 電子を押し流そうとする力

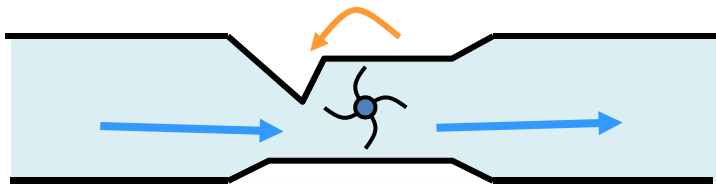
電流 = 単位時間あたりに電子が流れる量

(ただし定義上、「電流の向き」と

「実際に電子が流れる向き」は逆)

電力量 = 電力 × 時間 = 電氣的なエネルギー量

負荷(水車)



水に例えるならば、

電圧 = 水圧

電流 = 流量(単位時間あたりに流れる量)

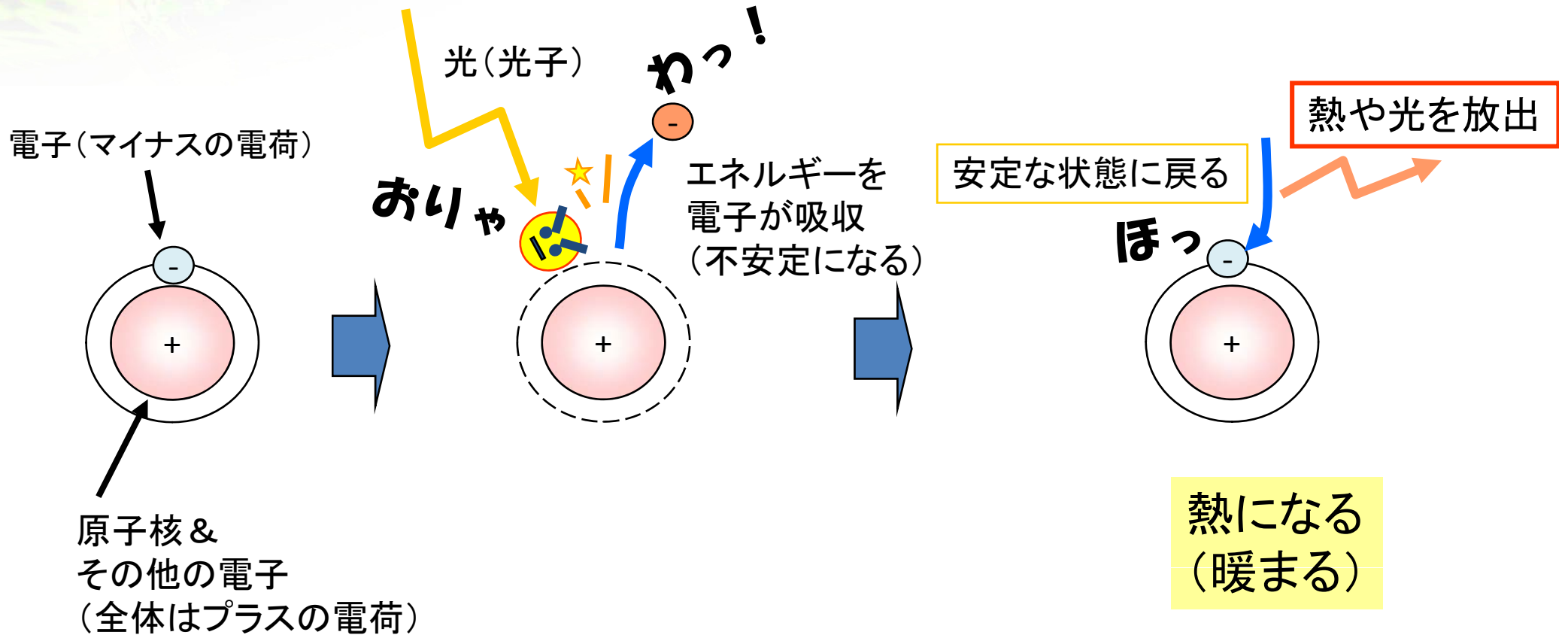
電力 = 水圧 × 流量(水車の出力に対応)

電力量 = 水圧 × 流量 × 時間(水車にさせた仕事量に対応)

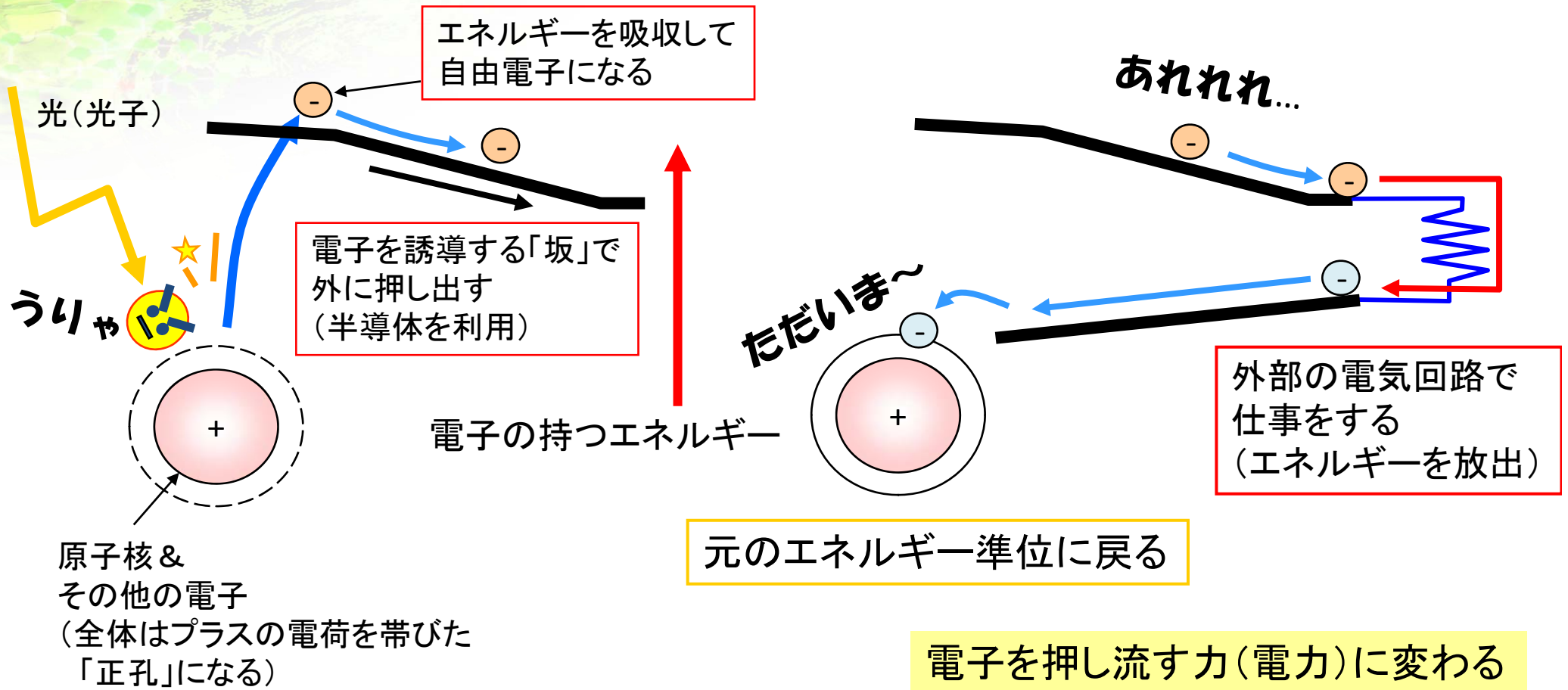
のような概念。

電力とは、電子を抵抗に逆らって押し流すエネルギー

# 太陽電池以外の物の場合 (イメージ)



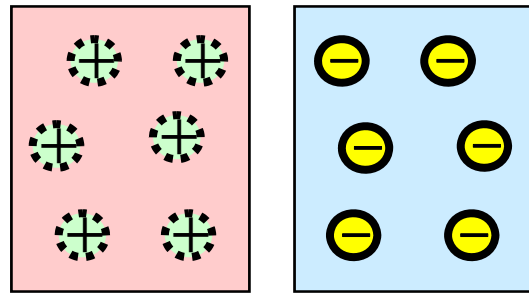
# 太陽電池の場合（イメージ）



# 専門的な説明(1/4; 参考)

p型半導体  
電子の足りない場所(正孔)  
が多い

n型半導体  
動きやすい電子(伝導電子)  
が多い



接合する



電荷が打ち消し合う



p型とn型の半導体を  
接合したもの  
=いわゆる「ダイオード」

帯電する

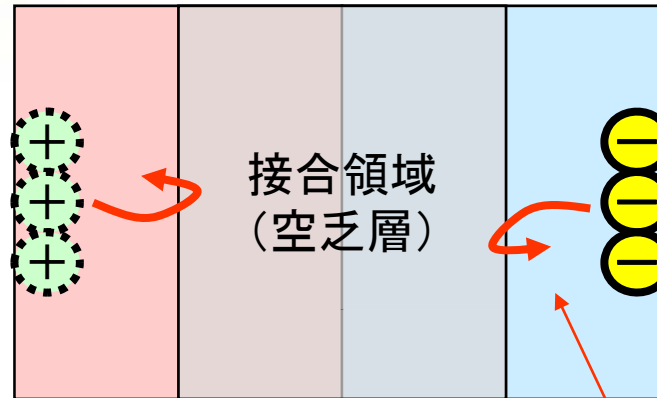


反発して  
追い返される

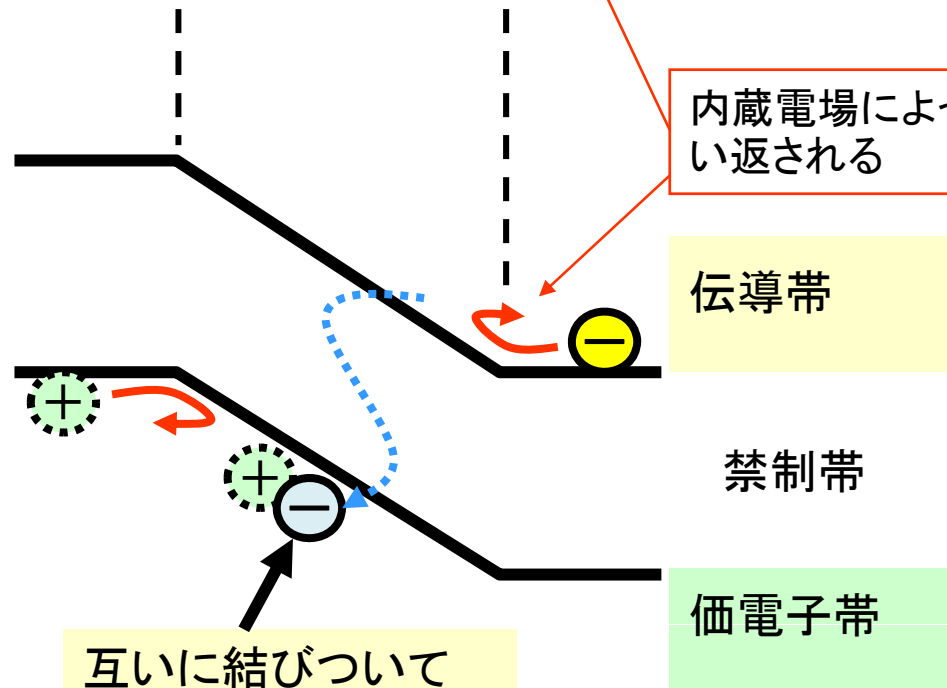
電界

# 専門的な説明(2/4)

p型半導体      n型半導体



電子の持つエネルギー  
(電位差)



内蔵電場によって追いつ返される

伝導帯

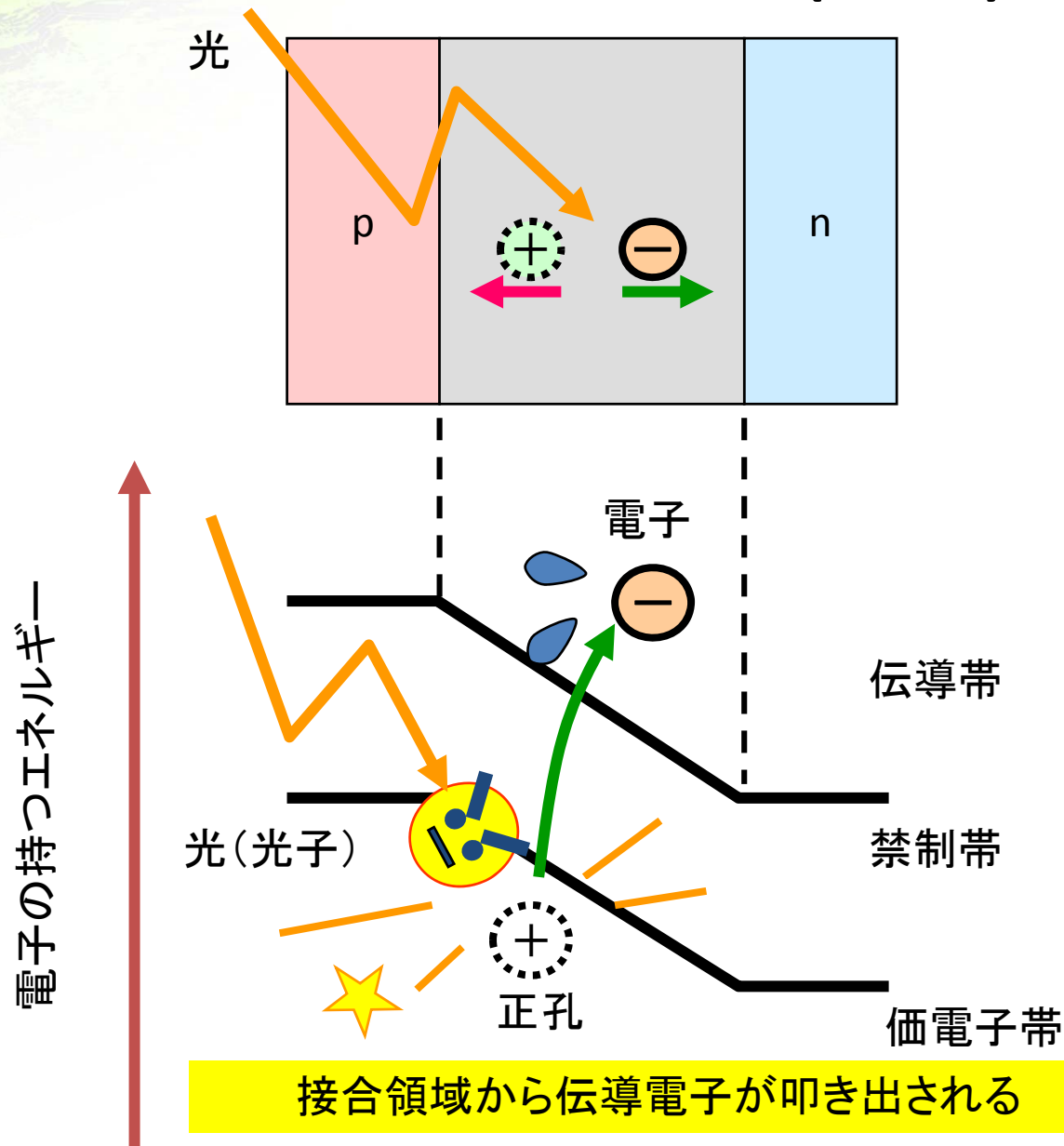
禁制帯

価電子帯

互いに結びついて動けない電子と正孔

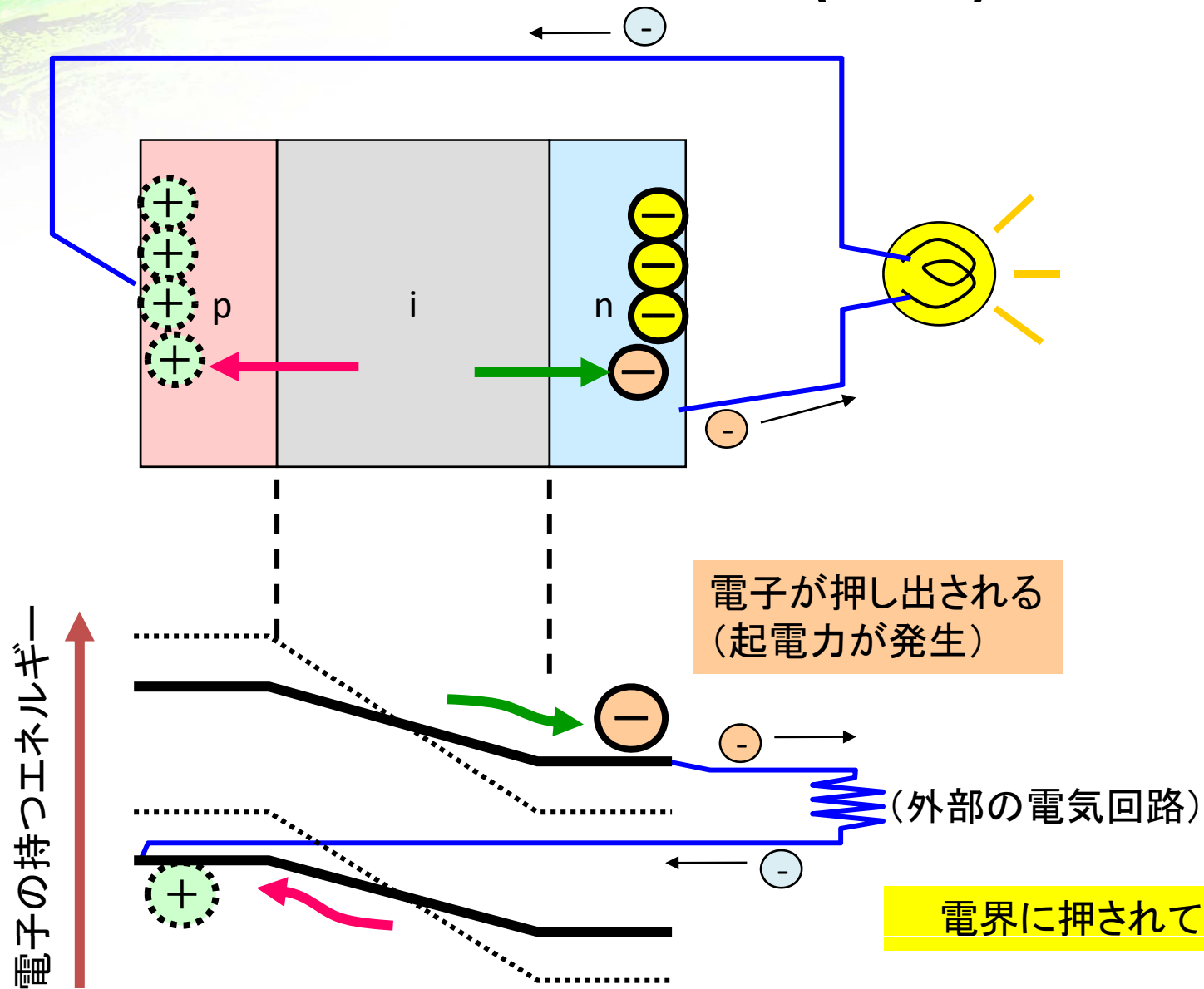
接合部分に電界が出来て安定する

# 専門的な説明(3/4)

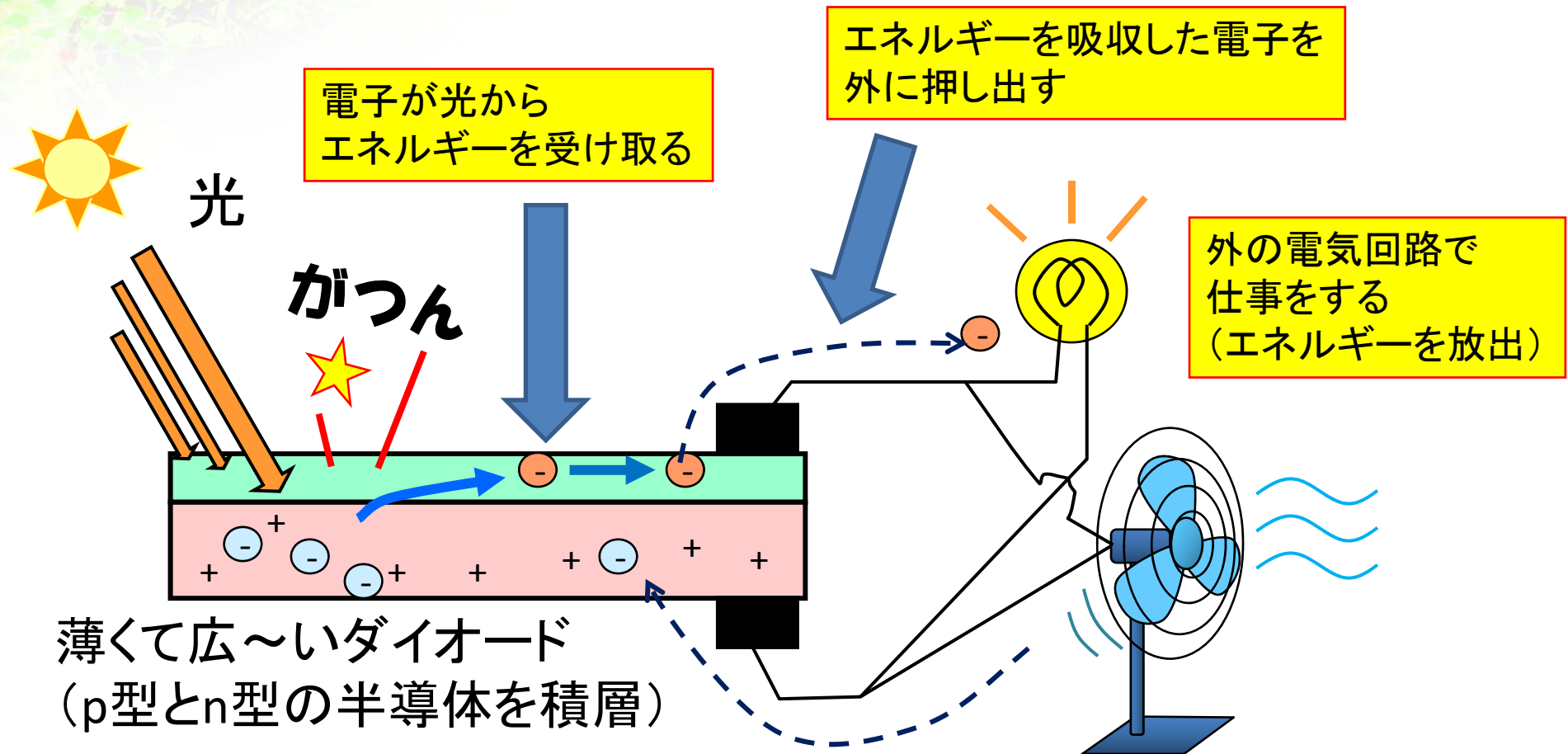




# 専門的な説明(4/4)



# 太陽電池の動作(まとめ)



半導体を利用して、光エネルギーを電力に直接的に変換する

# 科学技術の固まり、太陽電池

太陽電池に関連する学問：

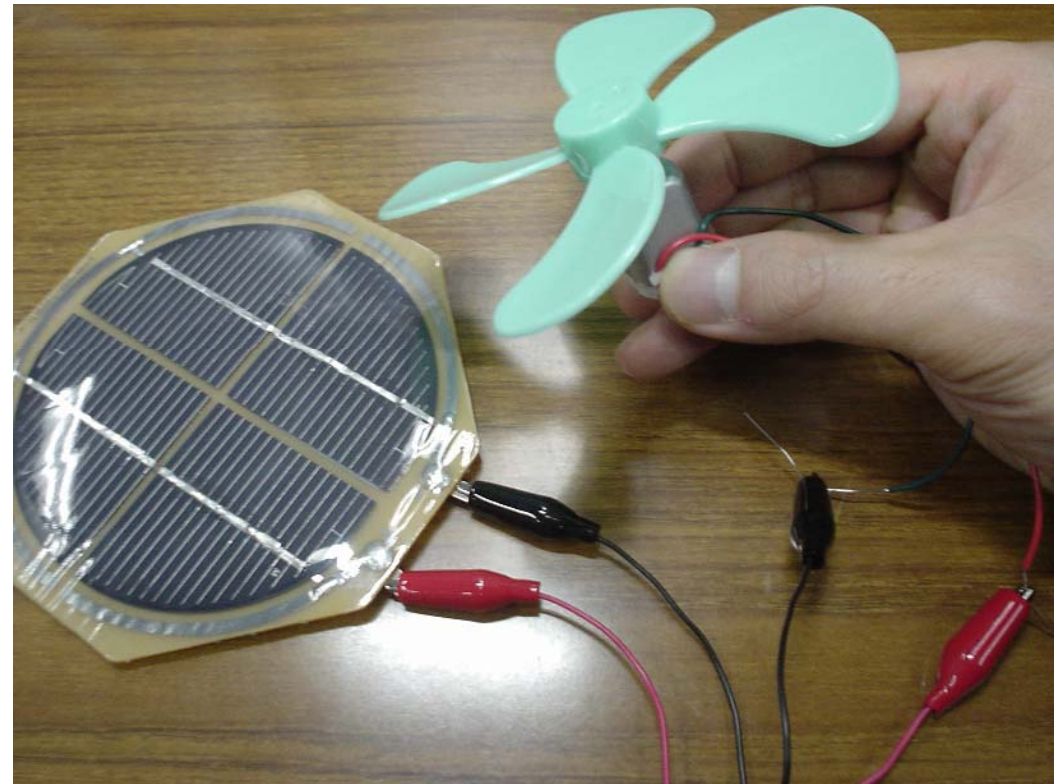
数学全般、電子物性工学、光物性工学、  
電磁気学、半導体工学、光工学、量子力学、  
電気工学、電力工学、制御工学、情報工学...

みかけは単純だけど奥が深い(ハマる)！

# 動かしてみましよう(2)

LEDやモーターを繋いでみて下さい。

プラスとマイナスを繋ぎ換えてみて、  
極性があることを確認して下さい。



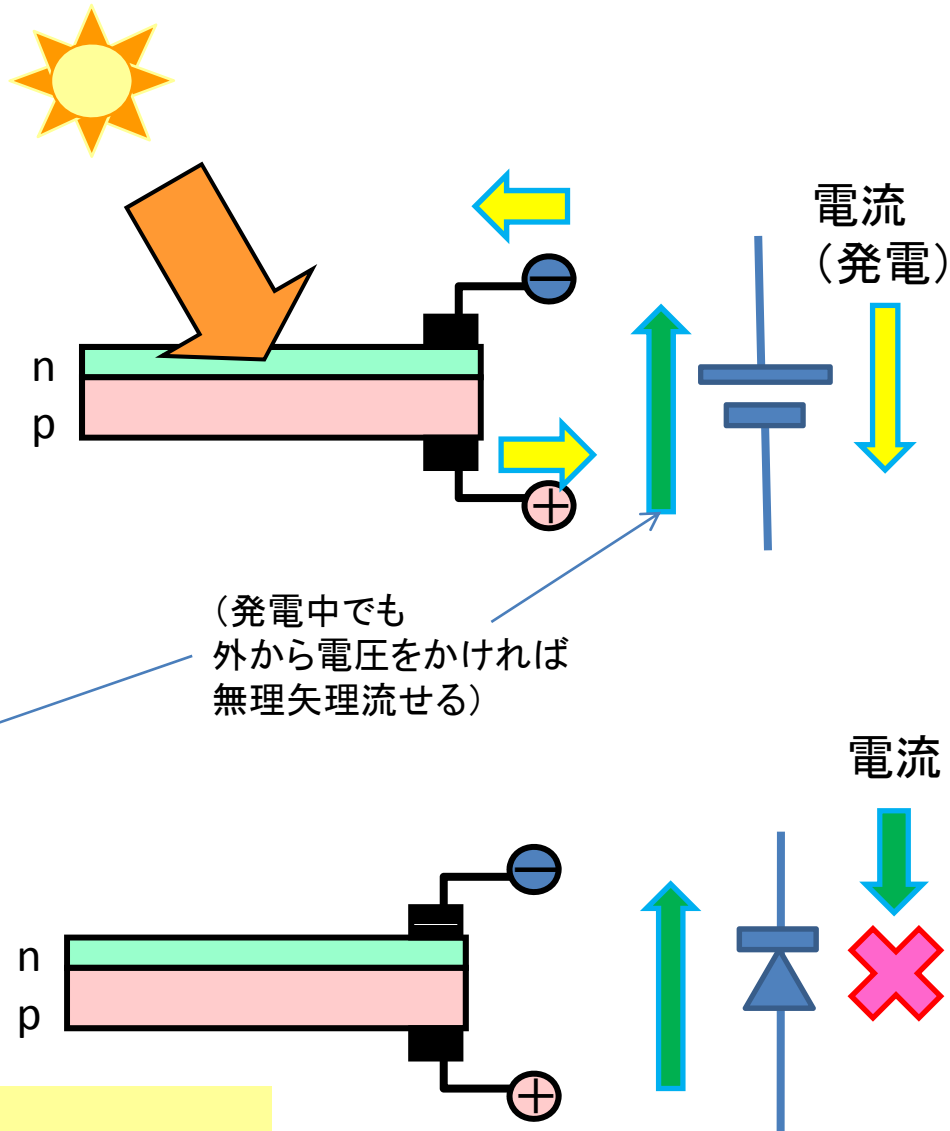
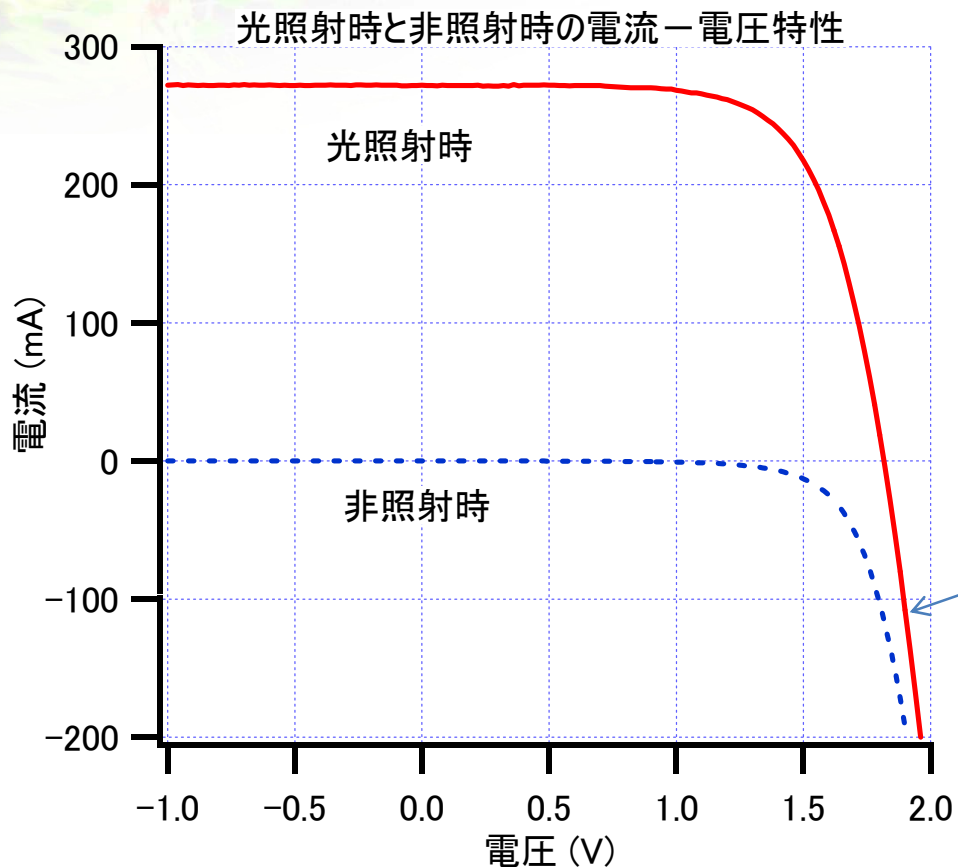
LED(発光ダイオード)は長い足がプラスです。  
モーターは繋ぎ換えると逆方向に回ります。

# + $\alpha$ な実験

- ・どの辺りに照明を当てたときが一番良く回る？
- ・一部のセルを完全に影にしたら、どうなる？

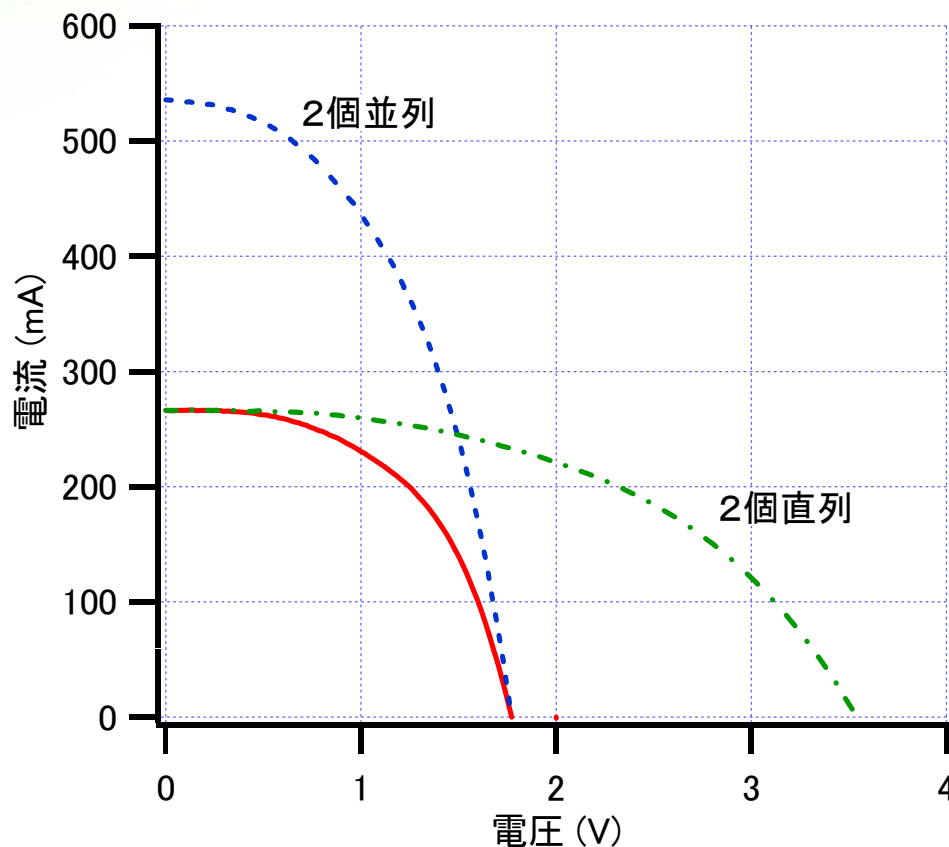
...ここで、一休み！

# 参考：太陽電池の特性



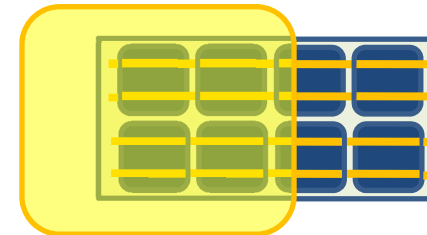
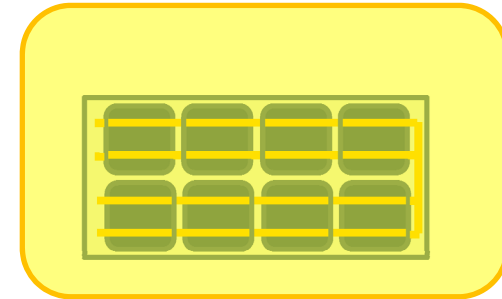
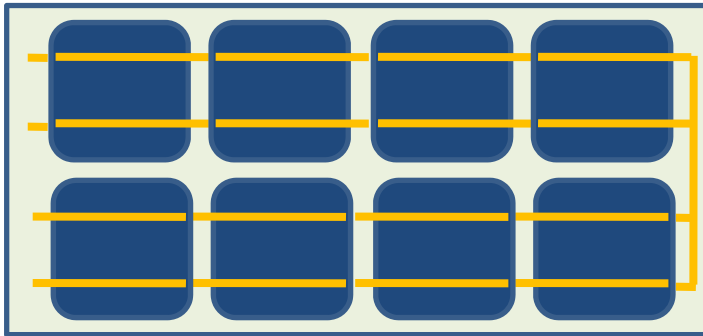
光が当たっていない太陽電池は普通のダイオードとして作用する(逆方向には流れない)

# 参考：太陽電池を複数繋いだ時の特性



直列にすると電圧方向に、並列にすると電流方向に  
I-V曲線が引き延ばされる

# 参考：影の影響



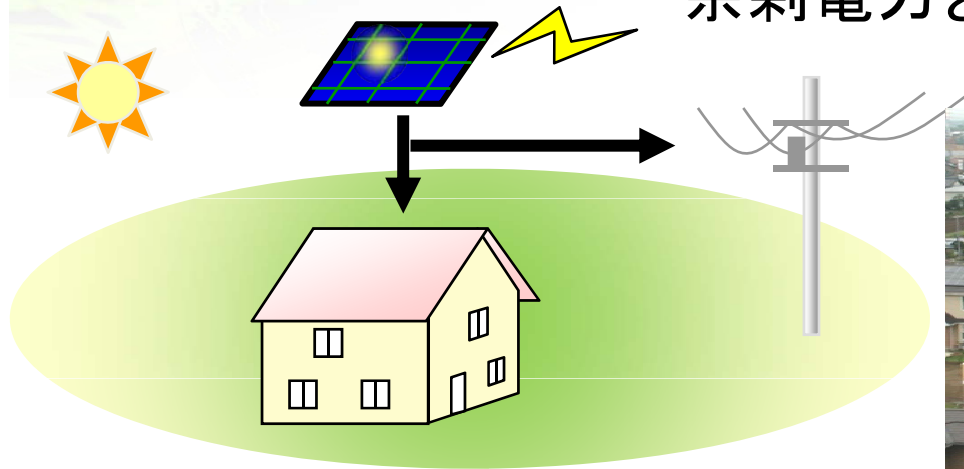
全部直列になっている  
→1つでも完全に影になると電流が流れなくなる

(ただし、実際の製品では「バイパスダイオード」などを付けて影の影響を緩和することも多い。)

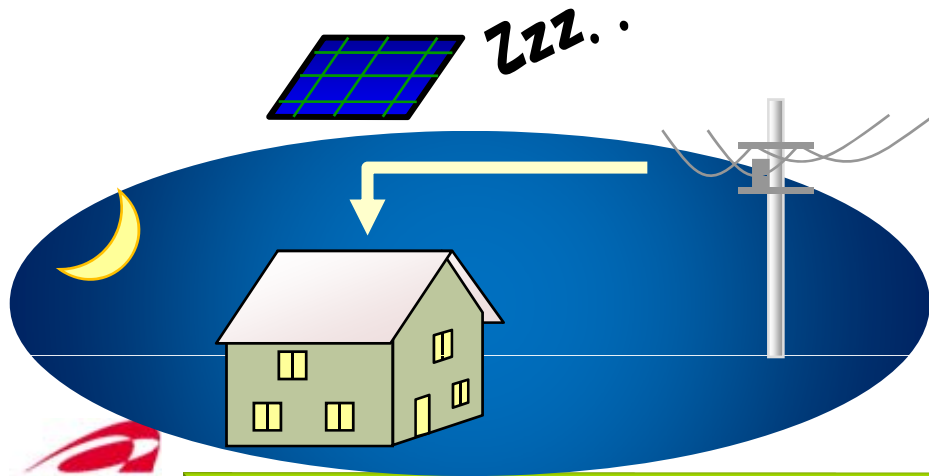


# 太陽光発電の利用法

昼間：  
余剰電力を売電

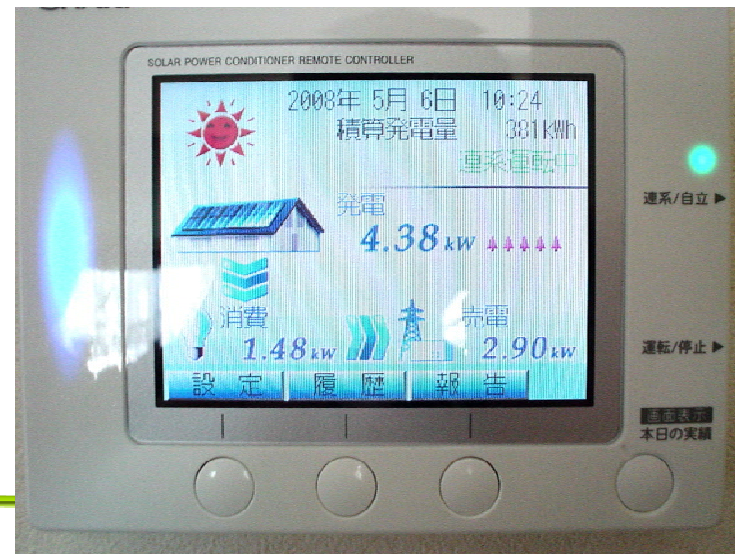
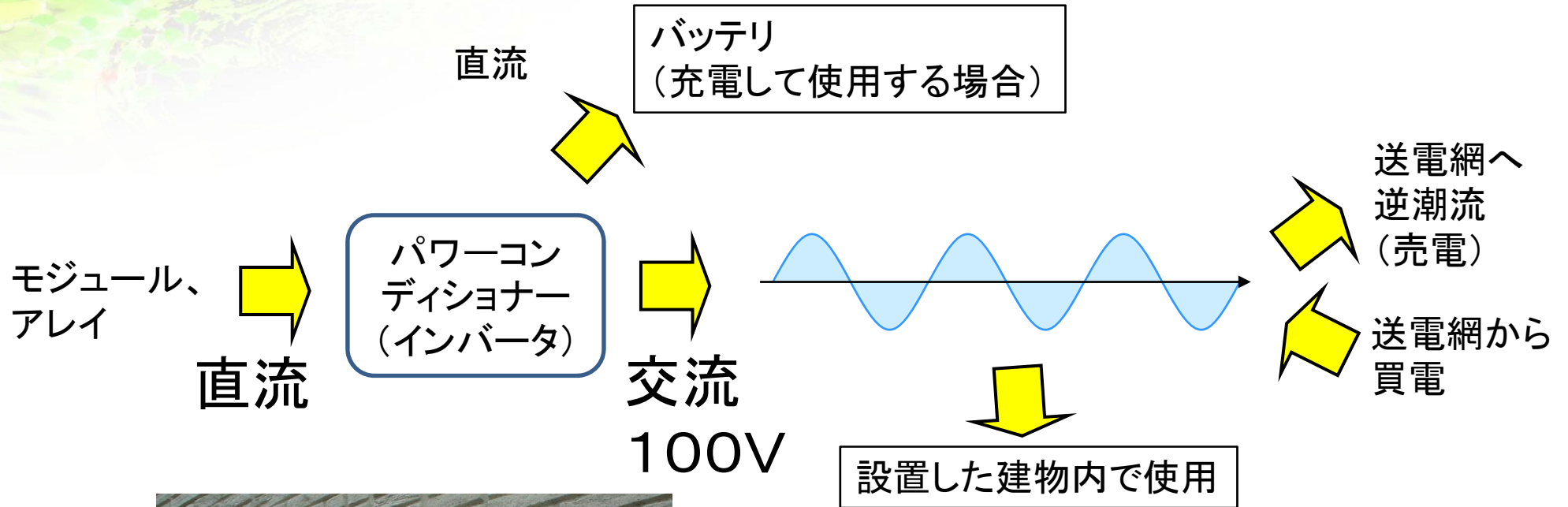


太田市「パルタウン城西の杜」  
(太田市土地開発公社webページより引用)



夜間、雨天：  
系統から買電

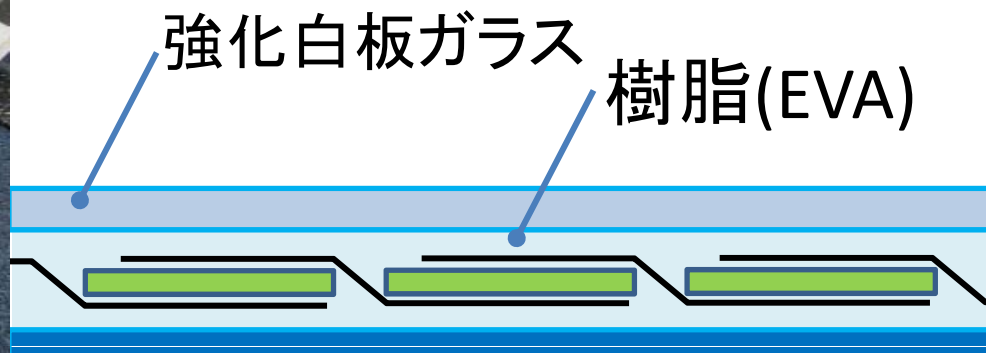
# 実際のシステムでは？



# モジュール(パネル)の構造



必要な電圧を得るため、  
複数の太陽電池を直列接続



裏面：樹脂やガラスで保護

一般的に、20～30年以上の耐久性。強風や雹にも耐える



# 質問

太陽光発電が使われてる例を、  
思いつく限り挙げてみて下さい。

# 使用例

電卓



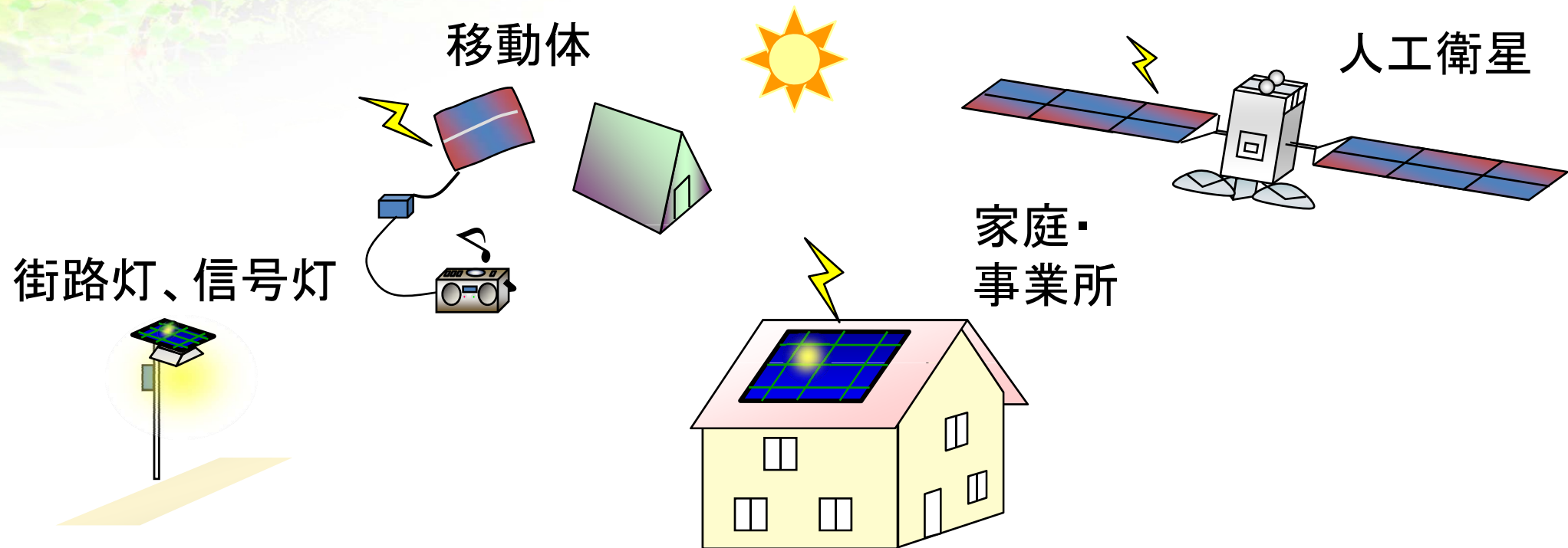
駐車券販売機



建物の屋根



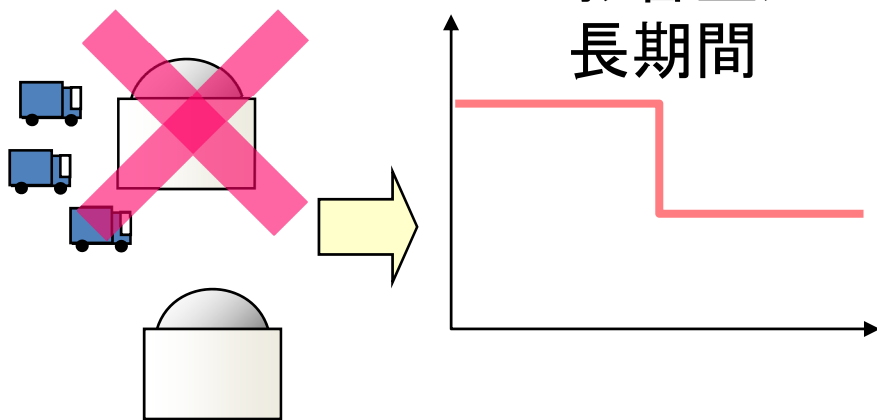
# どこにでも設置できる



- 壁でも屋根でも
- 冷却水がいらぬ、騒音や排ガスもない
- メンテナンスも基本的に不要で、高信頼性
- 規模を選ばない(効率変わらない)

# 事故や災害に強い

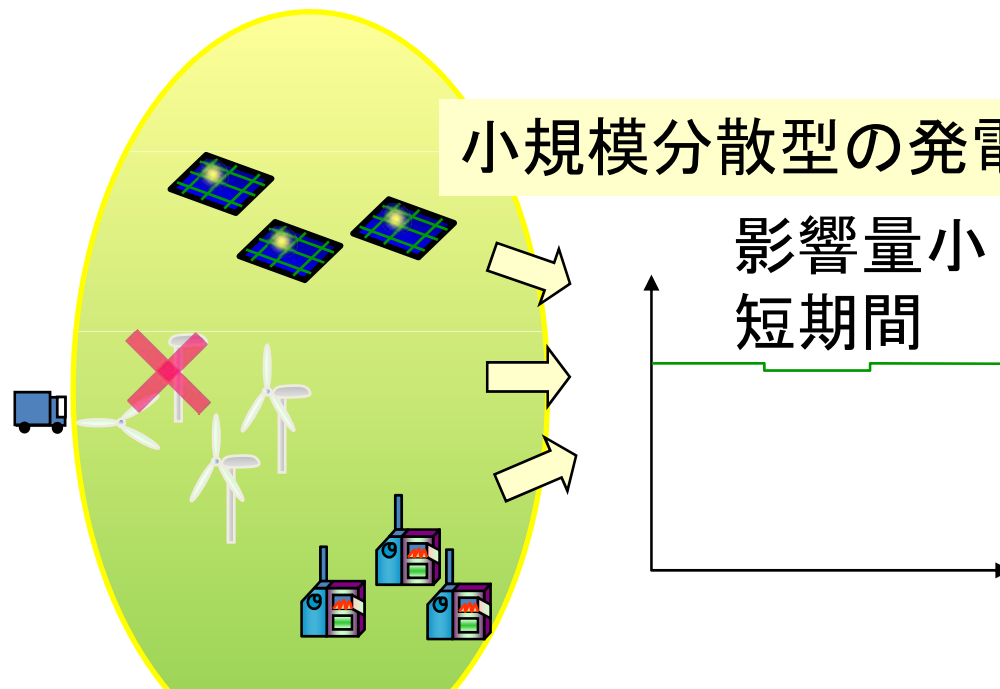
## 集中型の発電



### 弱点:

- ・想定外のトラブルで止まりやすい
- ・影響範囲が広く大きい
- ・復帰するまでの期間が長い

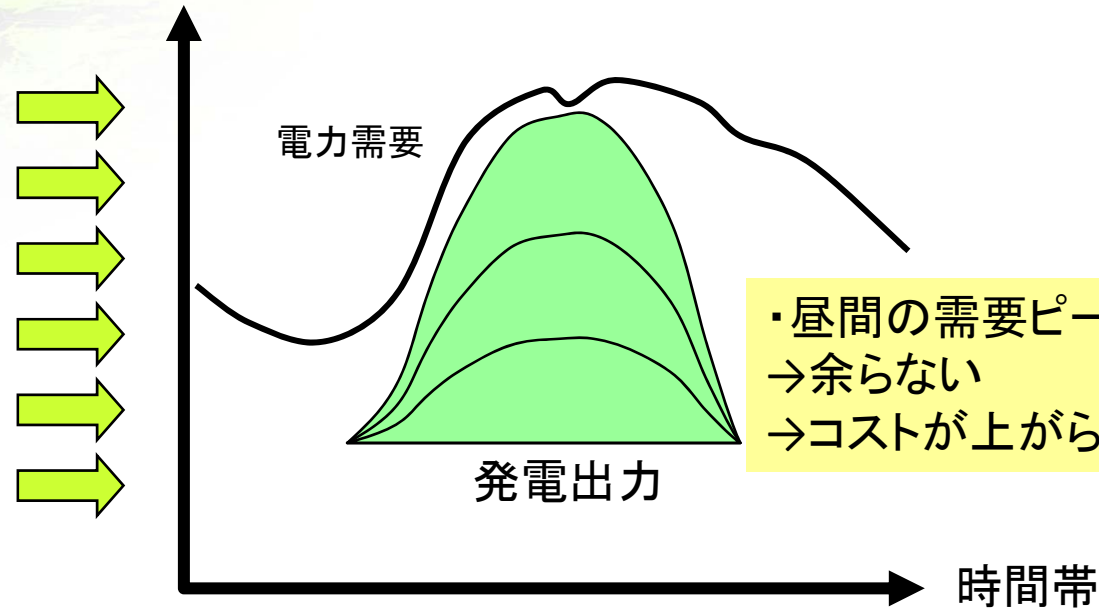
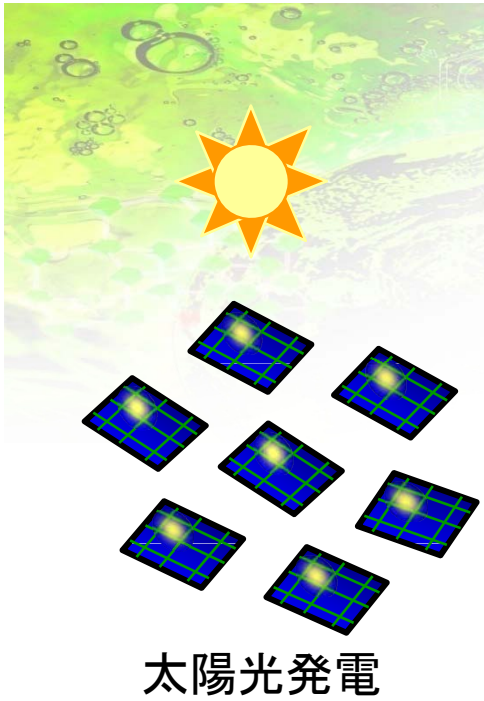
## 小規模分散型の発電



### 長所:

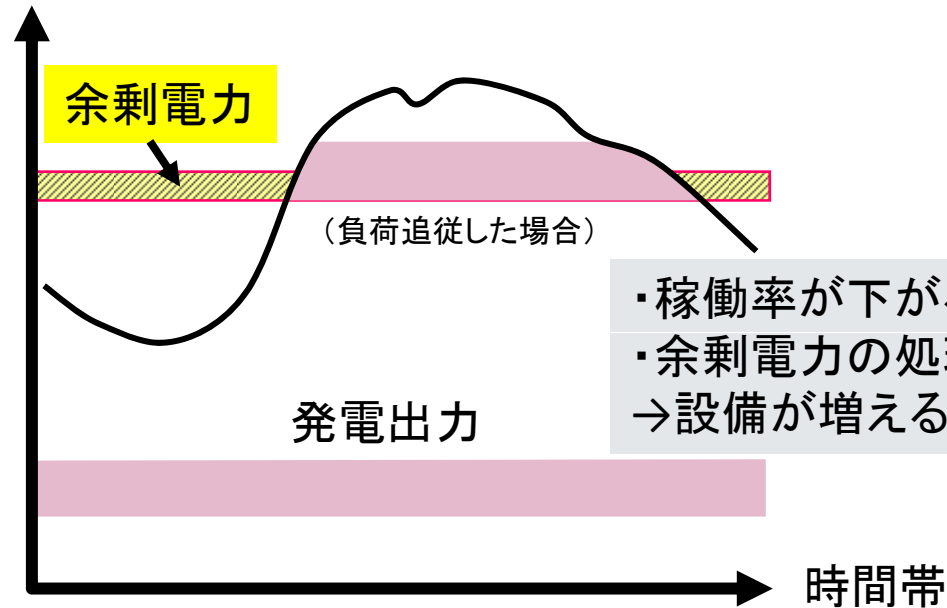
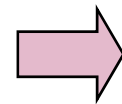
- ・システムが単純で止まりにくい
- ・個々のトラブルの影響範囲が狭くて小さい
- ・復帰するまでの期間が短い

# 昼間の需要ピークに最適



- ・昼間の需要ピーク時だけ発電  
→余らない  
→コストが上がらない

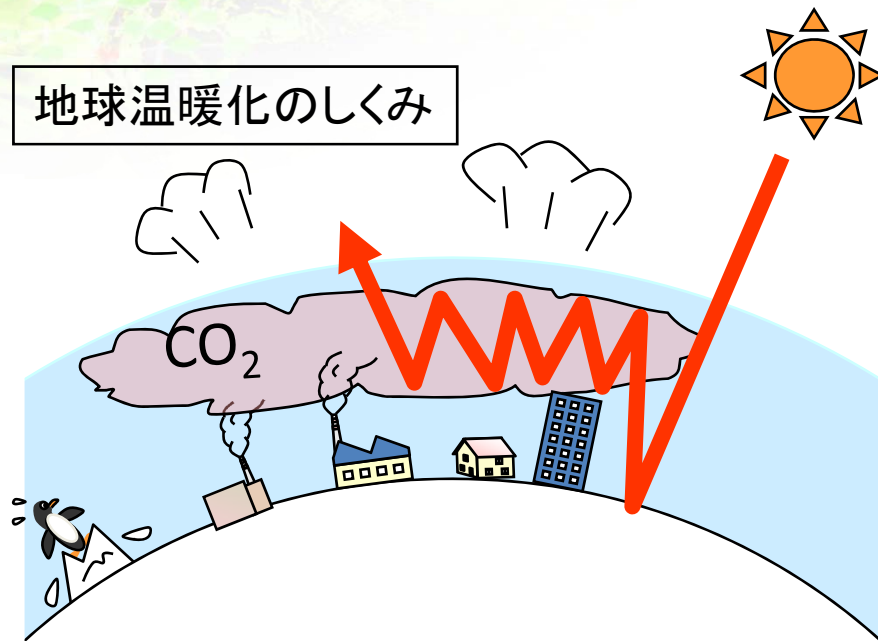
原発など



- ・稼働率が下がる
- ・余剰電力の処理が必要  
→設備が増えるほど高コストに

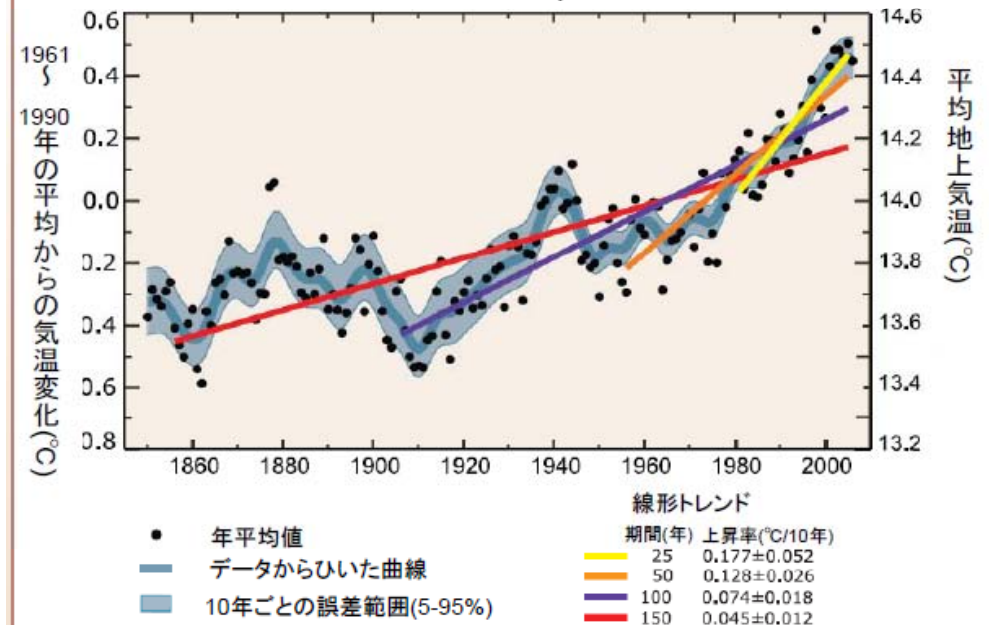


# 地球は温暖化しています



CO<sub>2</sub>が増えて保温効果が高まり、地球は確実に温暖化しています

平均地上気温（1961～1990年の平均気温との偏差）



出典:AR4 WG1 第3章 FAQ 3.1 図 1

もはや温暖化は疑いようもない事実  
(IPCC 第4次評価報告書)

# 温暖化すると日本はようになるの？

国立環境研究所などの報告：

- ・気温の上昇 ...北海道でも冷房が必要に
- ・気候の変化 ...豪雨の増加、降雪の変化  
洪水被害だけで年1兆円以上増えそう
- ・自然界の変化 ...動植物に様々な影響
  
- ・海面水位の上昇...  
地下水などへの海水混入  
海岸や河川の堤防決壊  
地下構造物への影響など
- ・農林水産業への影響...  
高温で米の作柄にも影響が出ている  
代掻き期の雪解け水が不足しそう
  
- ・世界の穀物生産に影響...  
食糧の輸入に支障？（自給率は39%）

**もう影響は出始めている→**

稲の生育不良



異常気象の増加





# 質問

温暖化を防ぐために、具体的にどんなことを心がけていますか？

# 温暖化ガスの排出を減らす手法

- 省エネルギー  
建物の断熱、車の燃費、機器の省電力化、...
- 低排出なエネルギー源に切り替える  
太陽光、風力、バイオマス、原子力、...
- 二酸化炭素を捕まえる(固定する)  
森林の育成・保全  
二酸化炭素回収貯留(CCS)
- 生活様式の工夫  
車をやめて電車・バス・自転車...

いろいろな対策を使う必要あり！

## 2. 2030年の削減可能性

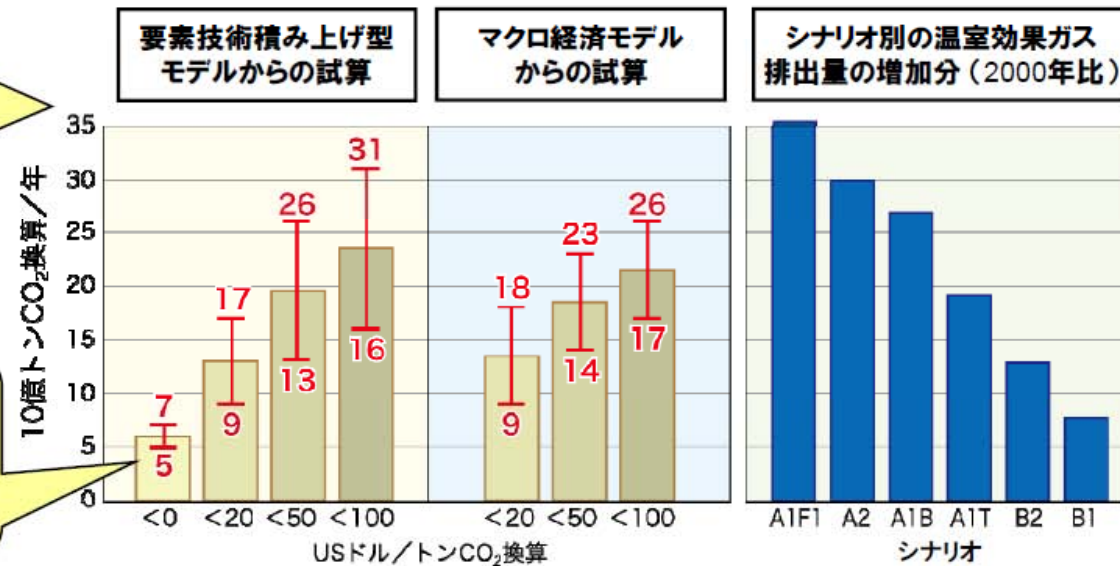
- 要素技術積み上げ型モデル及びマクロ経済モデルの試算研究によれば、今後数十年にわたり温室効果ガス排出量を緩和するだけの相当な削減可能性があり、予測される世界の排出量の伸びを相殺又は現在のレベル以下にまで削減できる可能性がある。■ ★★★

出典: AR4 SYR SPM

### 2030年の世界の削減可能性の推計値

二酸化炭素1トンの排出に対して100ドルのコストとなるような価格付けを行うことにより、2030年時点で世界の排出量の伸びを相殺または現在のレベル以下にまで削減できる可能性がある。

コストをかけない(利益が生じる)緩和対策によって、年間約60億トンCO<sub>2</sub>換算の排出量を削減できる可能性を示している。



【参考】50USDル/トンCO<sub>2</sub>換算は ~25USDル/原油1バレル、~12USセント/ガソリン1リットル、~5USセント/石炭発電1キロワット時、1.5USセント/ガス発電1キロワット時 に相当

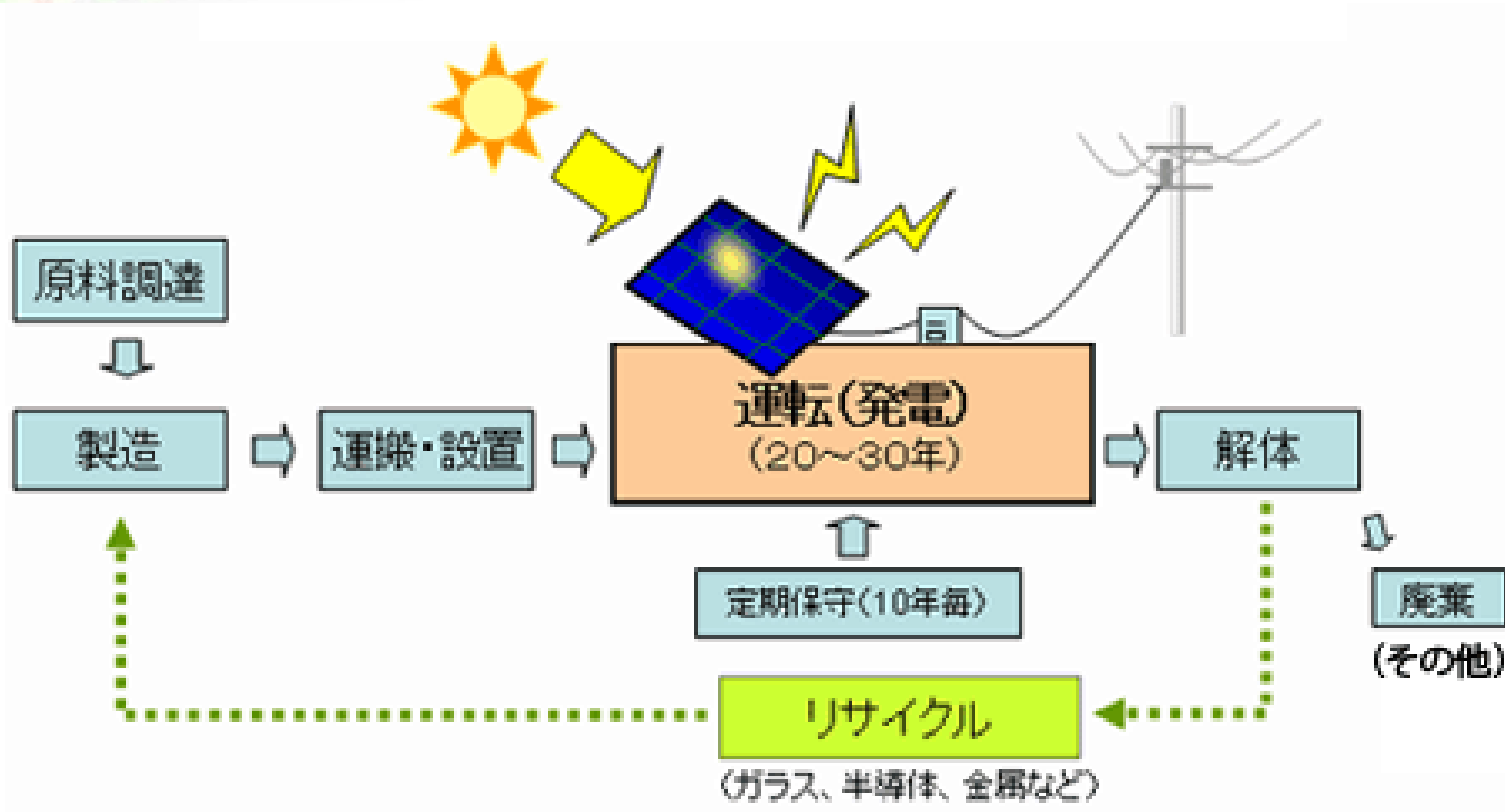


※ 予測シナリオについての説明は、p90を参照。

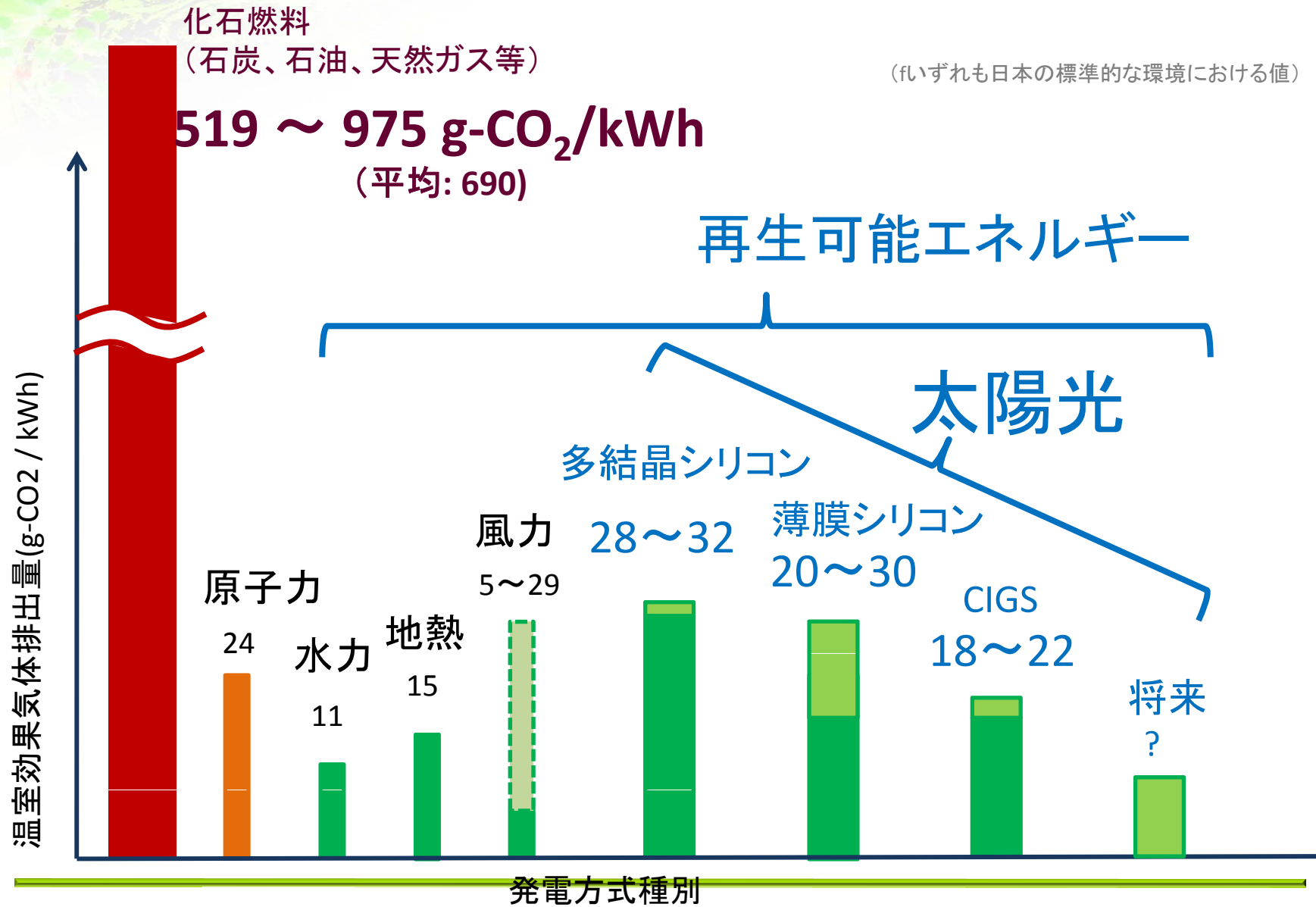
出典: AR4 SYR SPM 表SPM9より作成

ガソリン1Lあたり15円程度のコストで2030年までの世界の排出量増加を相殺したり、逆に減らしたりすることが可能

# 太陽光発電システムのライフサイクル

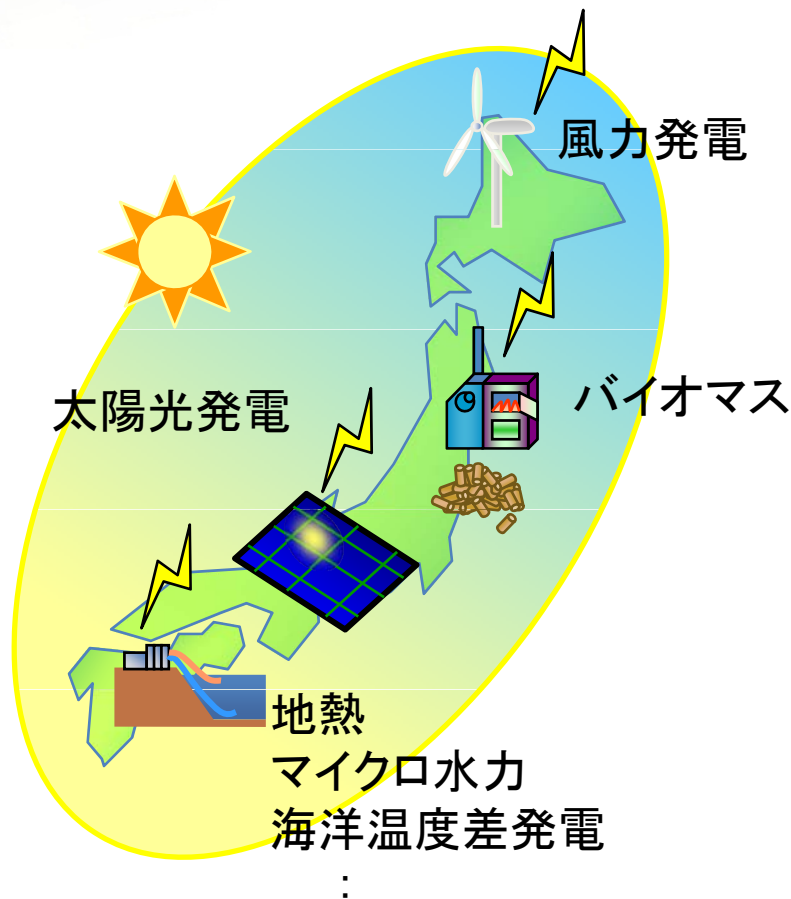


# 温暖化ガスの排出量が少ない

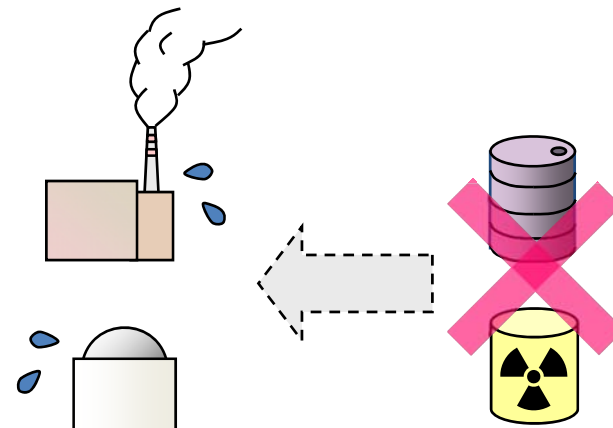


# 国内で調達できる「再生可能エネルギー」

再生可能エネルギーは資源を持続的に国内で調達でき、  
日本のエネルギー供給のリスクを低減します



枯渇性エネルギーの利用には  
将来のリスク(コスト)が伴います

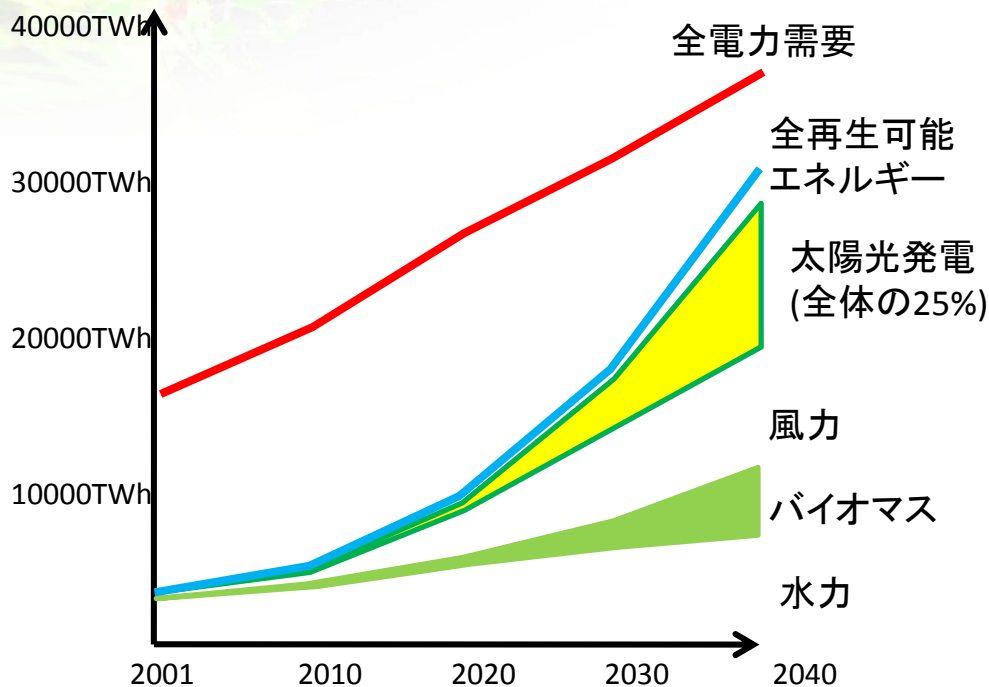


- 輸入価格の変動
  - 政治的なリスク
  - 温室効果ガスの大量排出
  - 核燃料利用のリスク
- など

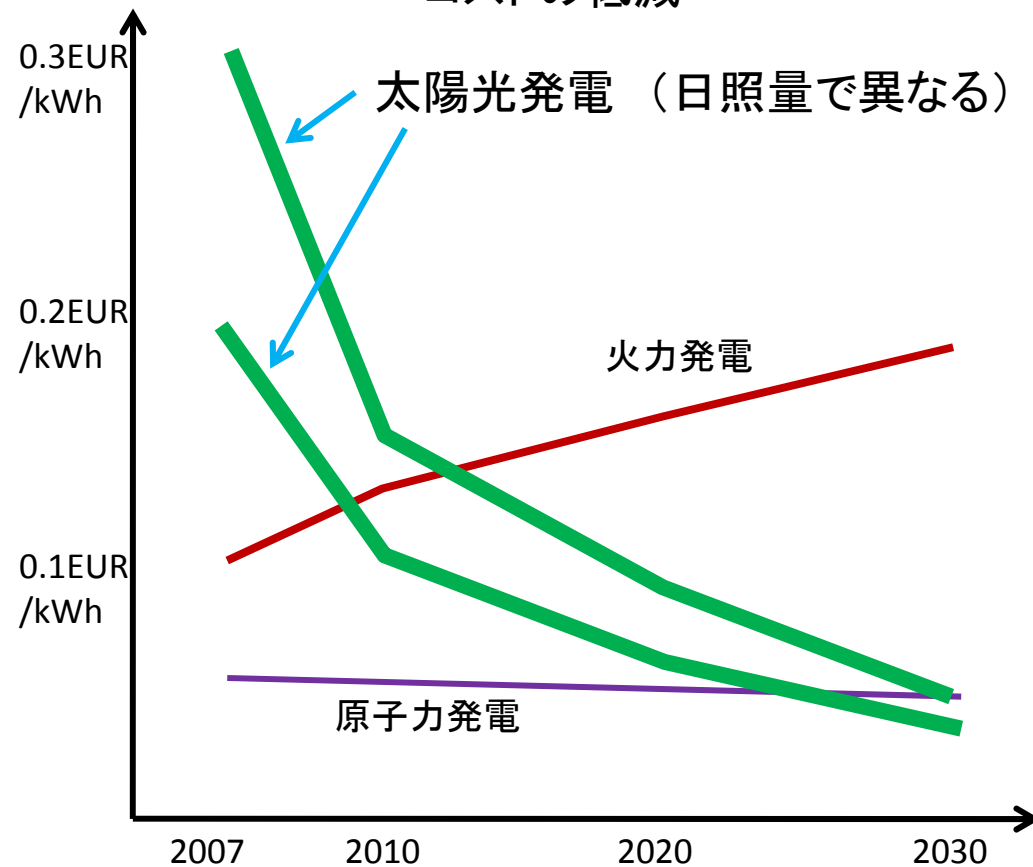


# 世界の普及ペース：予測例

## 電力需要とPVのシェアの変化



## コストの低減



2100年には全電力の半分以上  
だって供給可能

普及のペースさえ充分なら、  
劇的なコストダウンができる

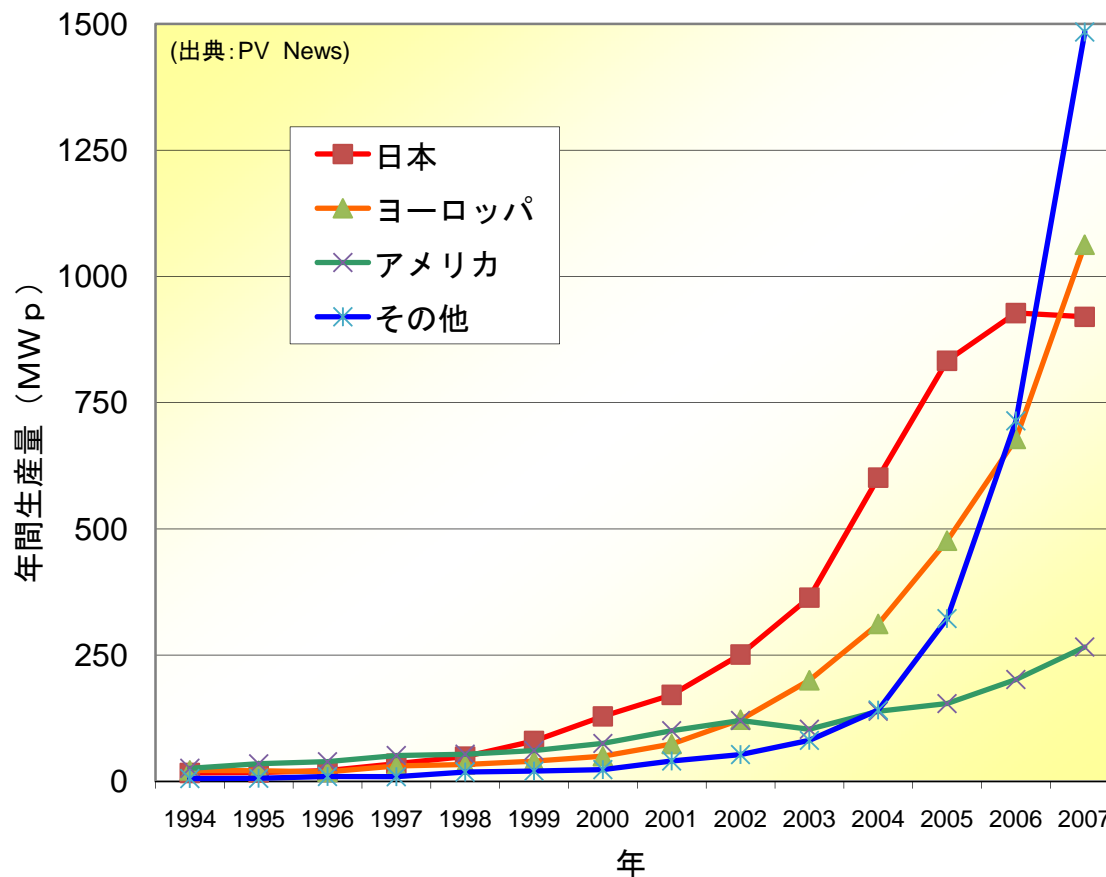
(Japanese-German Photovoltaic Energy Initiative Symposium, 2008, Hannoverでの  
大手メーカーの発表を基に作成)

# 世界の状況



米国 (Nellis空軍基地、15MW)

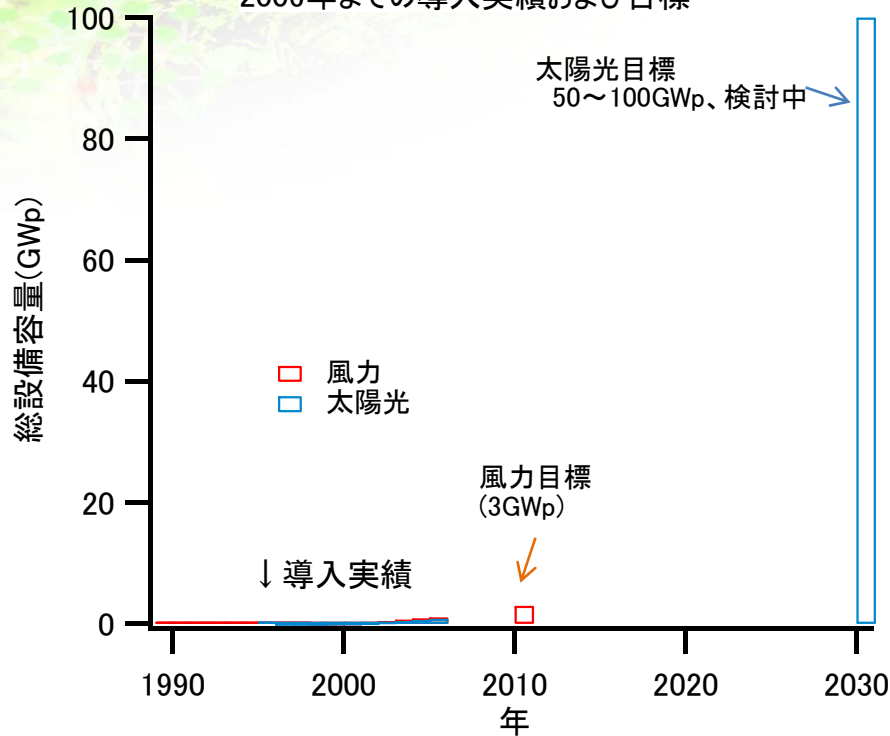
(出典: Wikipedia)



日本以外の地域は急速に増加中  
(多くは「フィードインタリフ制」を活用)

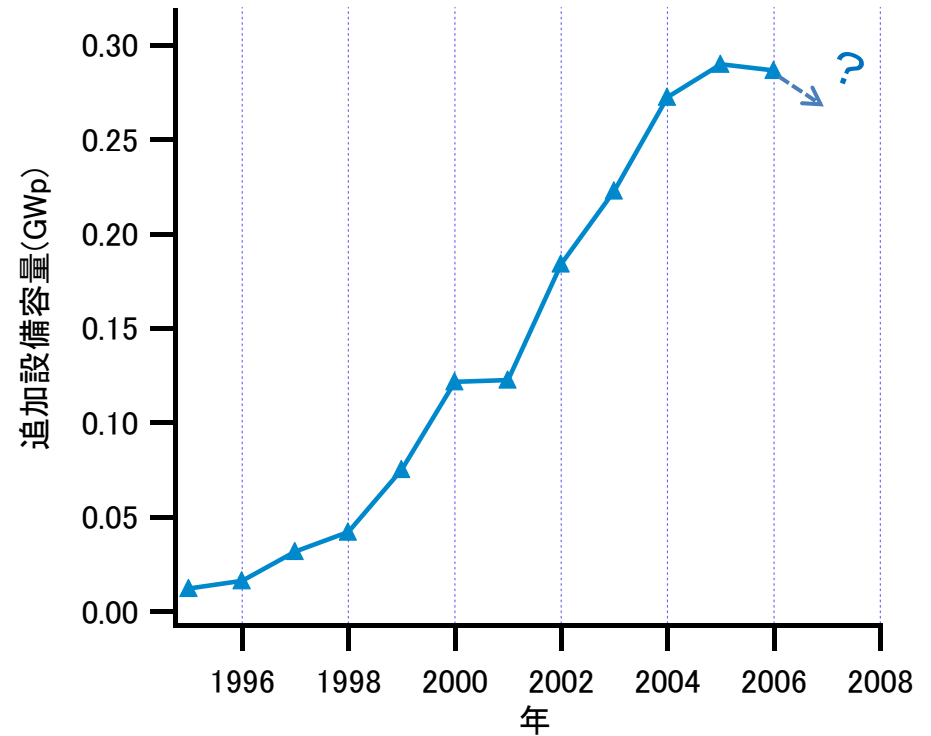
# 日本の状況

日本における太陽光発電と風力発電の  
2006年までの導入実績および目標



注:GWp = ギガワットピーク  
50~100GWp分の太陽光発電設備は  
日本の年間総発電量の約5~10%分に相当

日本における太陽光発電設備の年間導入量



出典:

- IEA-PVPS Trends in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2006
- 日本における風力発電導入量の推移(NEDO, 2007.3)

2005年まで新エネルギー財団による助成で順調に拡大  
助成制度が無くなって減速  
温暖化対策には全く足りないペース



# 問いかけ

太陽光発電を、これからどう使っていけば良いと思いますか？

# 日本の今後の課題

- 温暖化の危険性の認識：  
もう、逃げていけない
- 温暖化への対処方法を知る：  
省エネ、再生可能エネルギー、原子力、CCSなど  
たくさんの手法の長所を組み合わせる必要あり  
手間とお金をかける覚悟が必要
- 新しい市場ルールの構築：  
石油の使用量ではなく、「二酸化炭素の排出量」が  
市場の基準になる  
変化を促す政策が必要

慌てず急げ！

# ご静聴有難う御座いました

