

六稜トークリレー【第133回】  
平成27年9月5日(土)

六稜トークリレー  
Rikuryo Talk Relay

# 太陽光発電のキホンと将来



佐藤勝昭(72期)

東京農工大学名誉教授

(国研)科学技術振興機構研究広報主監

研究開発戦略センターフェロー

# 自己紹介1



- 1966京大工修士修了
- 1966-1968 NHK大阪放送局
- 1968-1984 NHK基礎研
- 1984-2007 東京農工大
- 2007-現在 科学技術振興機構
- 1994年から自宅に3kW太陽電池を設置(現在も稼働中)
- 2011年「太陽電池のキホン」出版

# 自己紹介2 (著書)



# はなしの進め方

1. なぜいま太陽電池？
2. 太陽光のパワーは1m<sup>2</sup>あたりいくら？
3. なぜ光を当てて電気が起きるの？
4. 発電するには半導体のしかけが必要
5. 電気になるのは太陽光のパワーの何%？
6. 太陽電池のできるまで
  1. シリコン系太陽電池
  2. 化合物半導体太陽電池
7. これからの太陽電池
8. 固定価格買い取り制(FIT)導入の効果と課題
9. 太陽光発電の将来



- 1.1 化石燃料は大昔の太陽の恵みで作られた
- 1.2 待ったなし、温室効果ガスによる地球温暖化
- 1.3 原子力発電には頼れない
- 1.4 自然の恵みがもたらす再生可能エネルギー

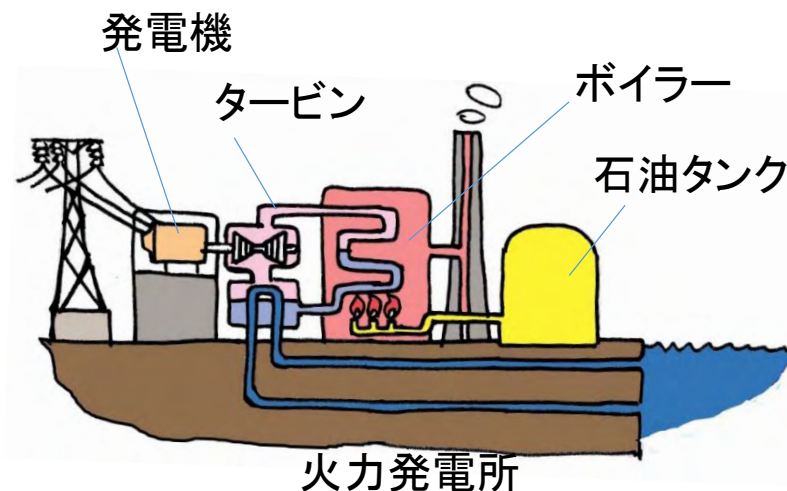
## 1. いまなぜ太陽電池



# 1.1化石燃料は大昔の太陽の恵みで作られた



何億年も前の生物が化石燃料になったので、いわば化石燃料は太陽光の缶詰である

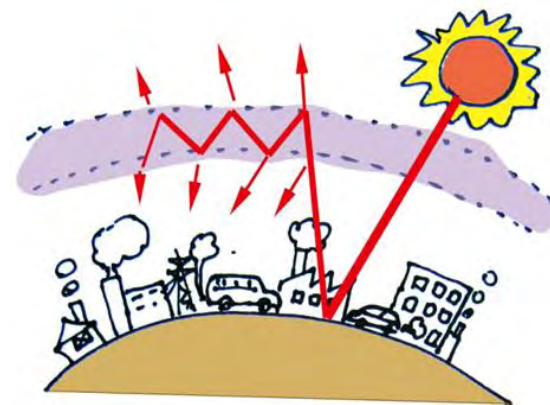
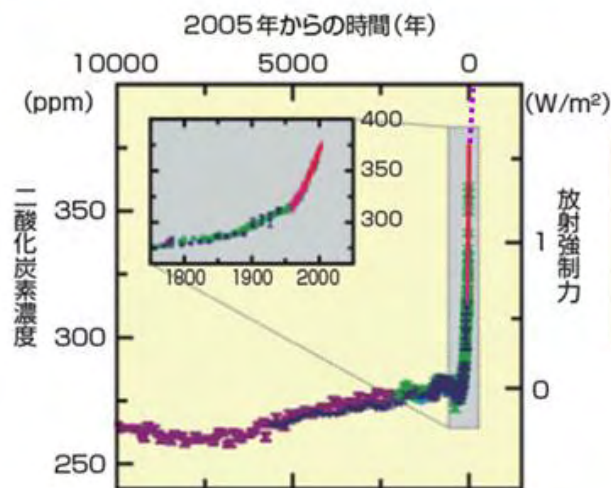


地球に降り注いだ光はやがて地面や海に吸収されて熱に変わります。これによって、風が吹き、雨が降り、植物が育ち、それを食べる動物が育ちます。大昔の植物が枯れたり、動物が死んだあと、それらが地中の中で石炭や石油になりました。これが化石燃料です。

私たち人間は、大昔の太陽の恵みを燃やして文明をつくりました。

# 1.2 待ったなし、温室効果ガスによる地球温暖化

図3 大気中の二酸化炭素濃度の推移

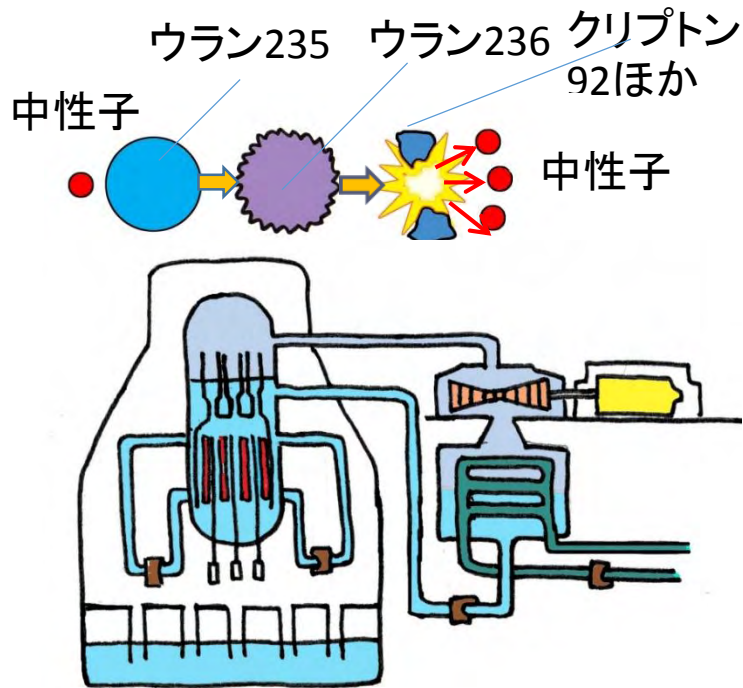


その結果、たくさんの二酸化炭素が生じ、それが地球の全体をおおって、地球の温度を高くしています。

ことし、はじめて400ppmを超えたと国連の機関が発表しました。

これを温室効果ガスによる地球温暖化といいます。

## 1.3 原子力発電には頼れない

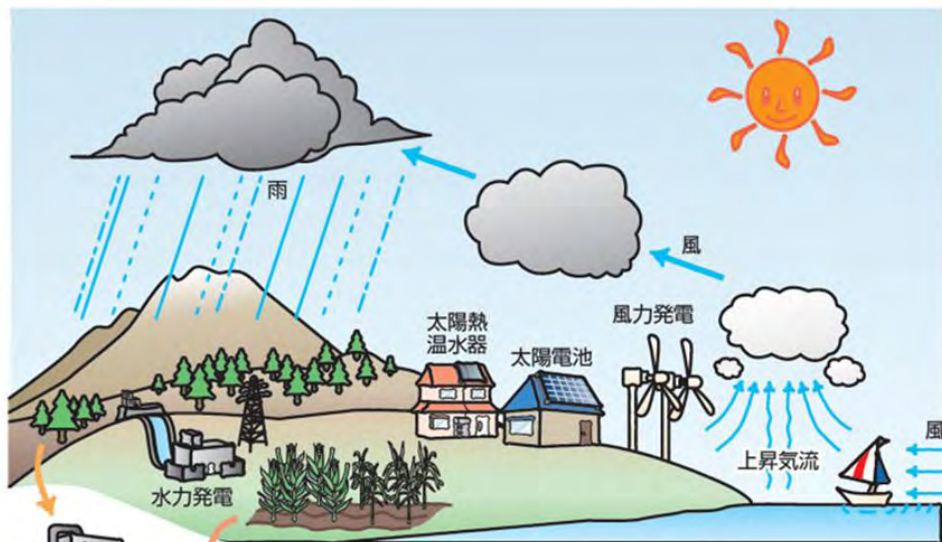


- 化石燃料を使わない発電として原子力発電が注目されました。
- しかし、3.11東日本大震災に伴う福島第1原子力発電所の炉心溶融事故の結果、その安全性に疑問が投げかけられました。
- 日本は、今後、これまでのように原子力発電に頼るわけにはいきません。

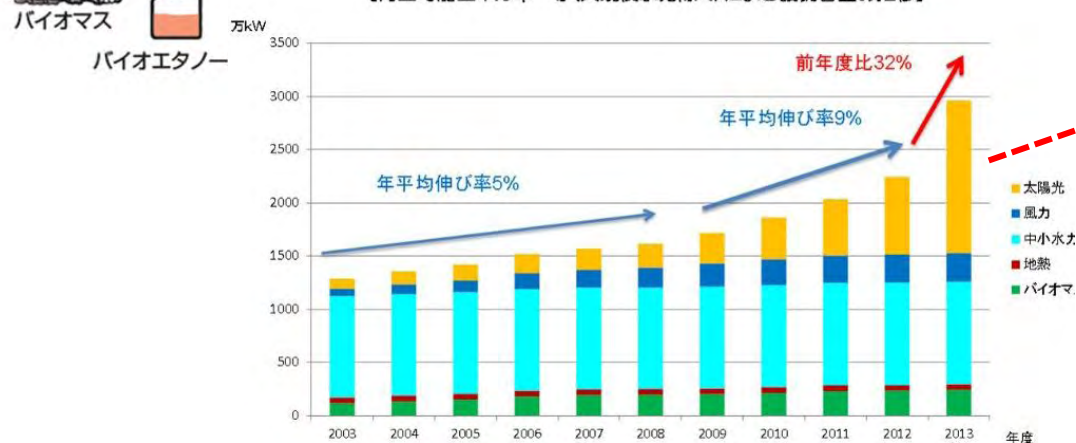


# 1.4 自然の恵みがもたらす再生可能エネルギー

図4 太陽など自然の恵みがもたらす再生可能エネルギー



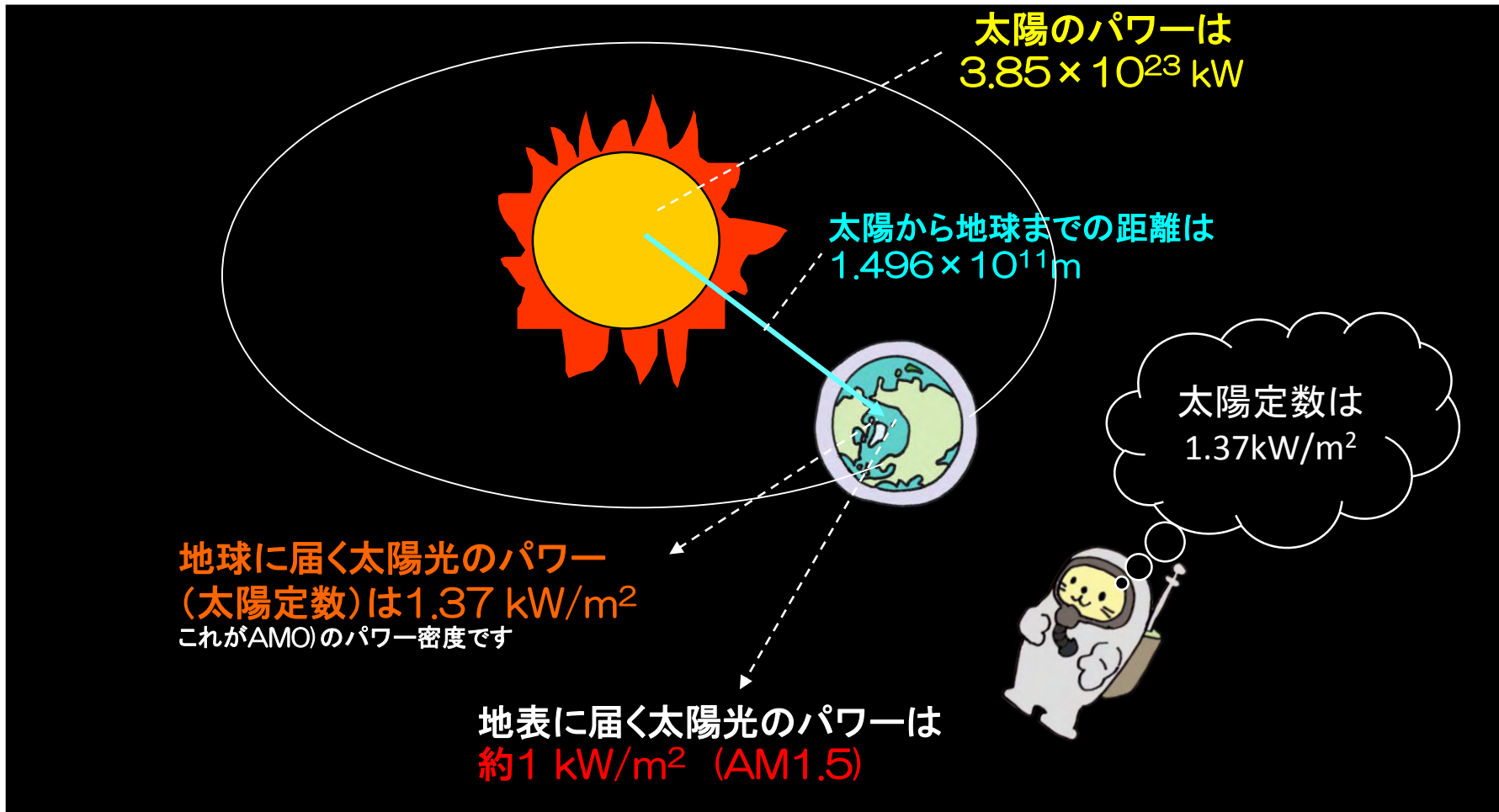
【再生可能エネルギー等(大規模水力除く)による設備容量の推移】



私たちは、なるべく石炭や石油を燃やさないで、エネルギーを作り出さねばなりません。このため、水力発電、風力発電、波力発電、太陽光発電などさまざまな自然のエネルギーを電気に変える技術が使われるようになってきました。

**グラフに示すように、最も導入が進んでいるのは太陽光発電です。**

今回は太陽光発電にしようとお話しします。



2. 太陽光のパワーは  
 $1\text{m}^2$ あたりいくら？

## 2.1 パワーとエネルギー



パワー(電力)とは、単位時間[1秒]のエネルギー[単位]の流れを表します。100Wの電球は1秒間に100Jのエネルギーを消費します。 $W=J/s$ です。

単位面積[ $1m^2$ ]を単位時間[1秒]に流れるエネルギーをパワー密度といい、単位は $W/m^2$ です。

パワーに時間をかけるとエネルギーになります。100Wの電球が1時間に消費するエネルギーは100Whです。 $1Wh=3600J$ です。



## 2.2 地表における太陽光AM1.5とは？

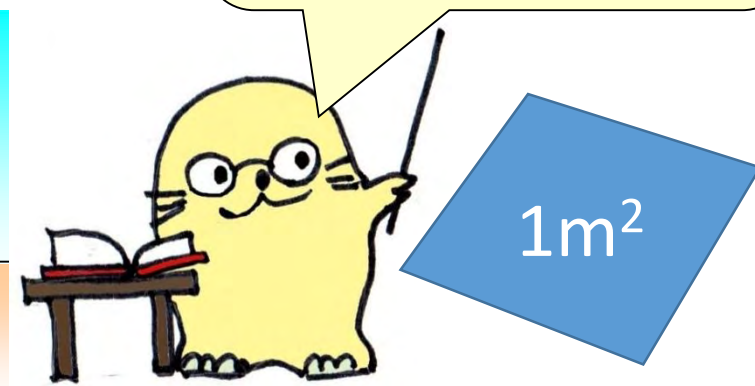
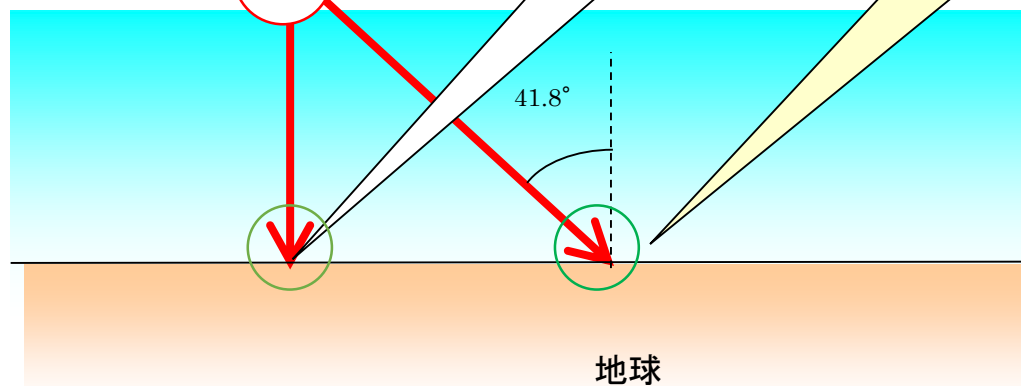
通り抜けてくる空気の量をエアマスAMといい、大気圏外ではAM-0、天頂から垂直に入射する場合をAM-1、中緯度地帯では1.5倍の空気層を通過して来ると考えてAM-1.5と呼んでいます。**AM-1.5**の太陽光のパワー密度は**約1kW/m<sup>2</sup>**です。

空気層に入る前の太陽光のパワー(AM0)は太陽定数1.37 kW/m<sup>2</sup>です。

地表に垂直に照射する場合をAM1.0といいます。パワーは約1.1kW/m<sup>2</sup>です

地表に斜め41.8度で照射する場合をAM1.5といいます。パワーは約1kW/m<sup>2</sup>です

**太陽光のパワーは1m<sup>2</sup>あたり1kWとおぼえておこう**

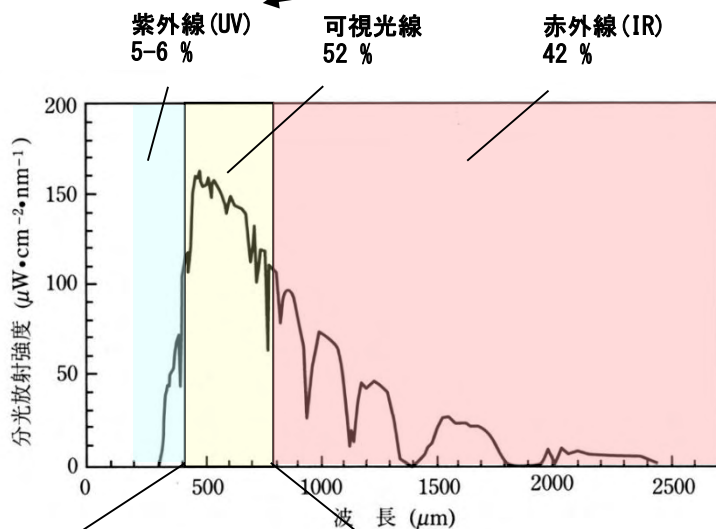


# 2.3 目に見える光の波長は何nmから何nm？ — 太陽光発電では目に見えない光も利用します —

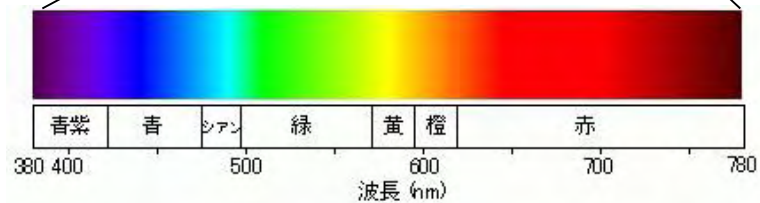
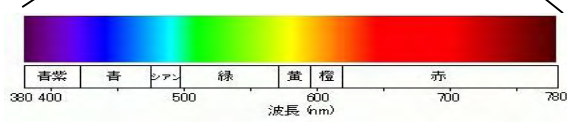
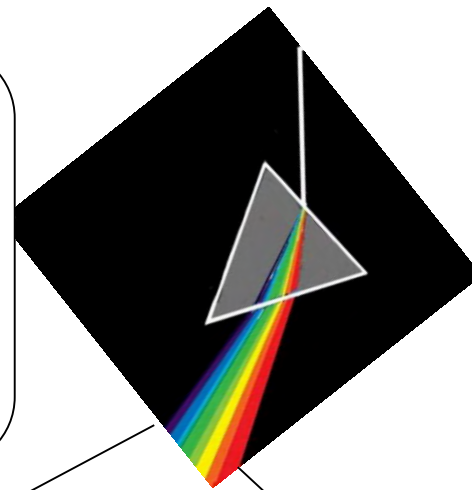
## 可視光線は380nm～780nmの波長範囲

地上での太陽光の分光放射  
強度スペクトル(AM1.5)

目に見えない光



光をプリズムに入れると虹のように多くの色にわかれます。青や紫など波長の短い光は、赤や黄色など波長の長い光より大きなエネルギーをもちます。



- 3.1 光はエネルギーの粒
- 3.2 光を当てると物質の電子がエネルギーをもらう
- 3.3 金属と半導体 何が違うの？
- 3.4 半導体の導電率はコントロールできる
- 3.5 半導体を特徴付けるバンドギャップ
- 3.6 半導体のバンドギャップと光吸収
- 3.7 半導体のバンドギャップと色
  - (1) 透過色、(2) 結晶の色、(3) 絵の具の色
- 3.8 固体に光を照射しても電力は取り出せない

3. なぜ光を当てて電気が起きるの？

## 3.1 光はエネルギーの粒

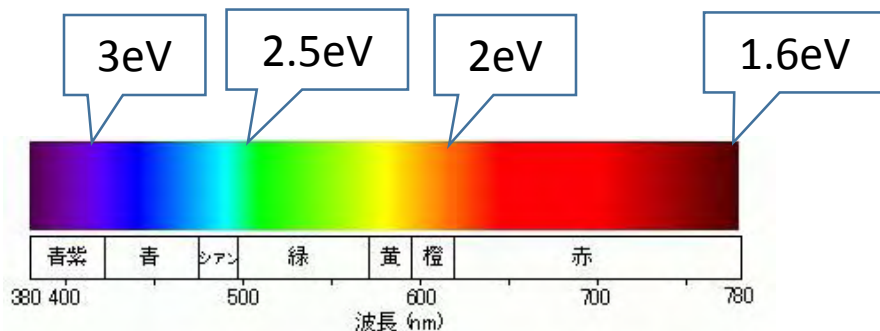
- 光はエネルギーの粒です。この粒のことを**光子**と  
いいます。光子は $E=h\nu$ で表されるエネルギーをもっ  
ています。

( $h$ はプランク定数、 $\nu$ は光の振動数です)

- 光子のエネルギー $E$ と波長 $\lambda$ の関係は、 $\nu=c/\lambda$ を用い、  
 $E(\text{eV})=hc/\lambda=1239.8/\lambda(\text{nm})$   
と表されます。

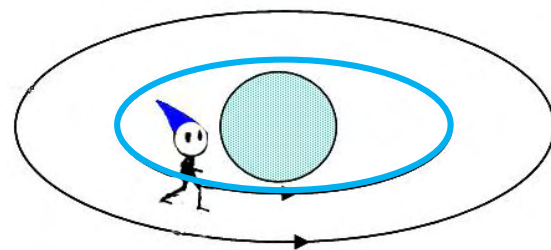
この業界では、エネルギーの単位として  
eV(電子ボルト)を使うのが普通です。

- 短い波長の光子は、長い波長の光よりエネルギーが高い  
のです。

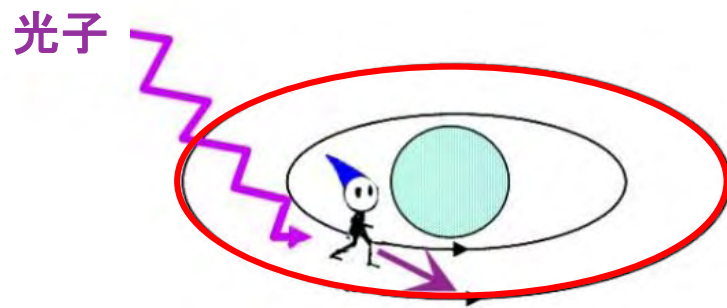


## 3.2 光吸収で物質中の電子のエネルギーが増加

- 物質が光子を吸収すると、物質中の電子は光子エネルギーをもらって、高いエネルギーの状態（励起状態）になります。
- この**電子のエネルギー**を何らかの方法で外に取り出せば、電気が起きます。



基底状態

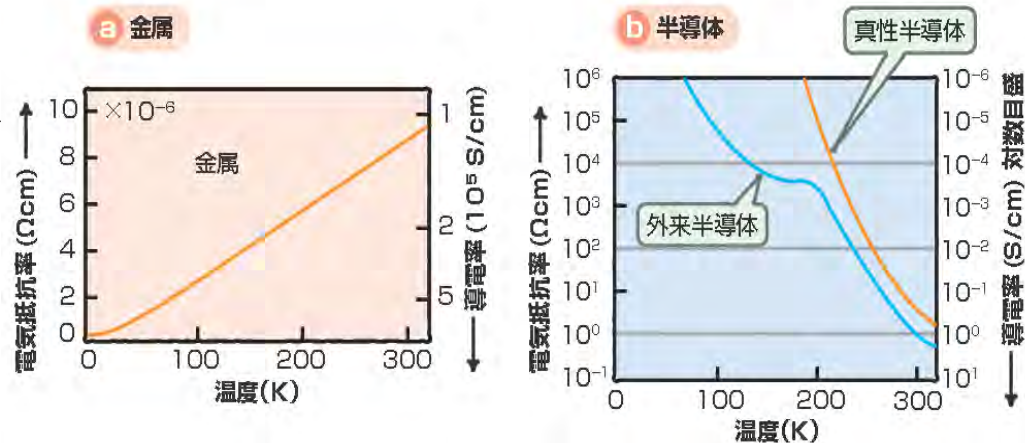
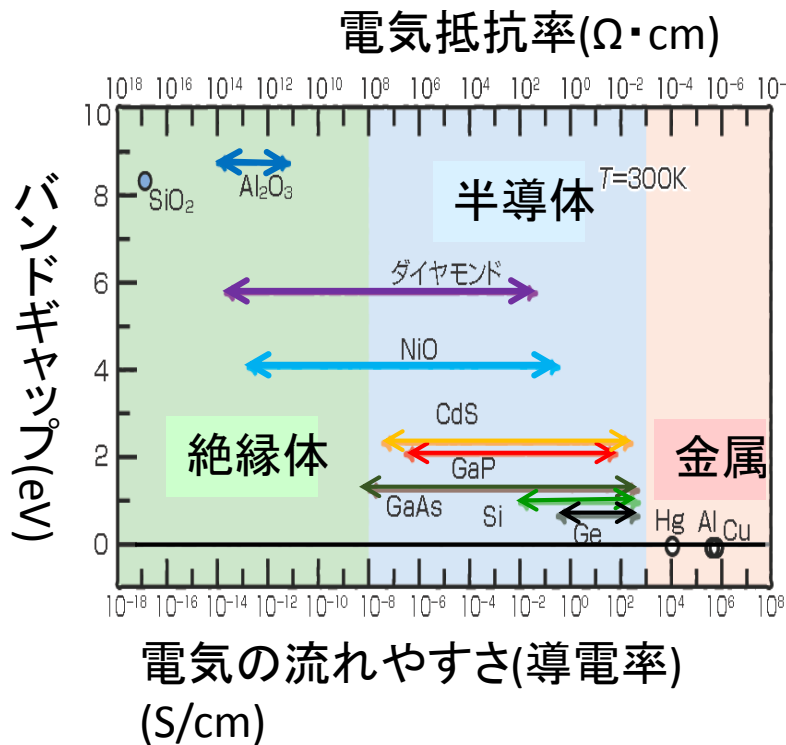


励起状態





# 3.3 金属と半導体、何が違うの？



金属は温度を上げると電気抵抗が高く(電気が流れにくくなる)のに対し、半導体では温度を上げると電気抵抗が低く(電気が流れやすくなります)。

- 半導体は、電気の流れやすさ(導電率)が導体(金属)と不導体(絶縁体)との中間の物質です。
- 不純物を100億分の1以下しか含まない純粋の半導体は、絶縁物のように電気を通しません。
- 逆に、純粋の半導体に100ppm程度の不純物を加えるだけで、金属に近い導電率をもちます。

## 3.4 半導体の導電率はコントロールできる

- 純粋の半導体は、低温では絶縁体と同様電気をとおしません。
- 純粋の半導体に微量の元素を添加すると、元素の種類を変えることで電子が電流を運ぶn型、あるいは、ホール(電子の抜け孔)が電流を運ぶp型になって、電気を通すようになります。
- 添加元素のことをドーパントといいます。n型にするドーパントをドナーといい、p型にするものをアクセプターといいます。
- ドーパントの濃度を増やすと、導電率が増加します。1cm<sup>3</sup>あたり10<sup>18</sup>個を超えると金属のような電気特性になります。

## 3.5 半導体を特徴付けるバンドギャップ

- 半導体中の電子は、雲のように結晶全体に広がっていると考えられます。このとき、電子のエネルギーは幅をもち、**エネルギーバンド**と呼ばれる帯になります。
- 電子がもつことのできるエネルギーは、電子で満たされた価電子帯と、電子が空の伝導帯からなり、2つのバンドの間には、電子の占めることのできない**バンドギャップ**があります。**金属にはバンドギャップがありません。**

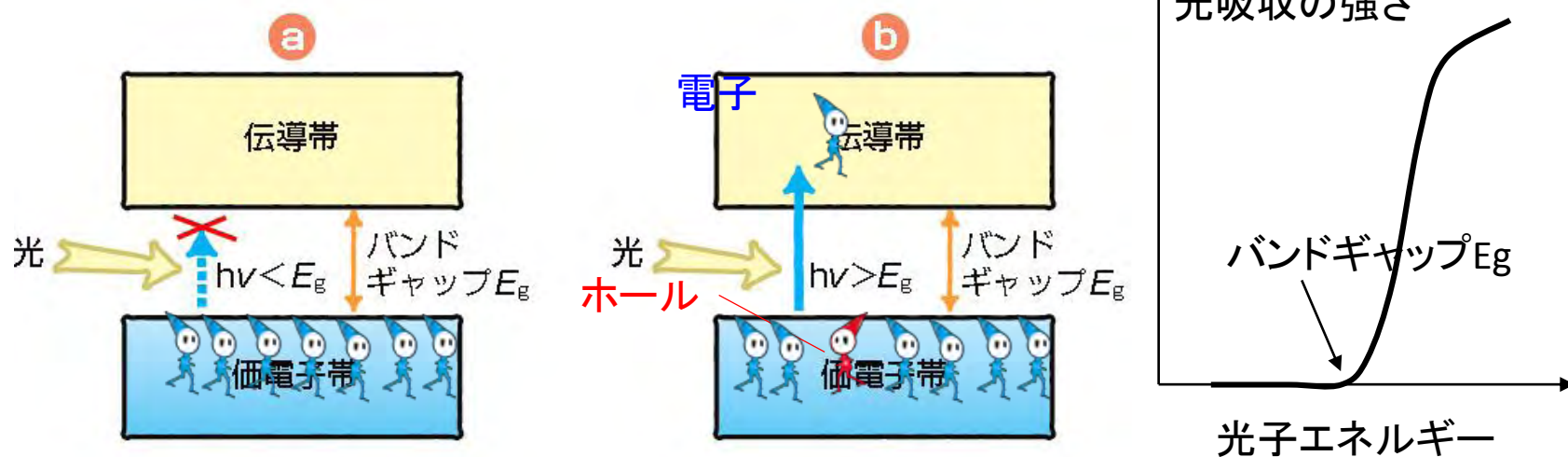


半導体	バンドギャップ
シリコン Si	1.1eV
ガリウムヒ素(GaAs)	1.5eV
ガリウムリン(GaP)	2.2eV
硫化亜鉛(ZnS)	3.5eV
窒化ガリウム(GaN)	3.4eV

## 3.6 半導体のバンドギャップと光吸収

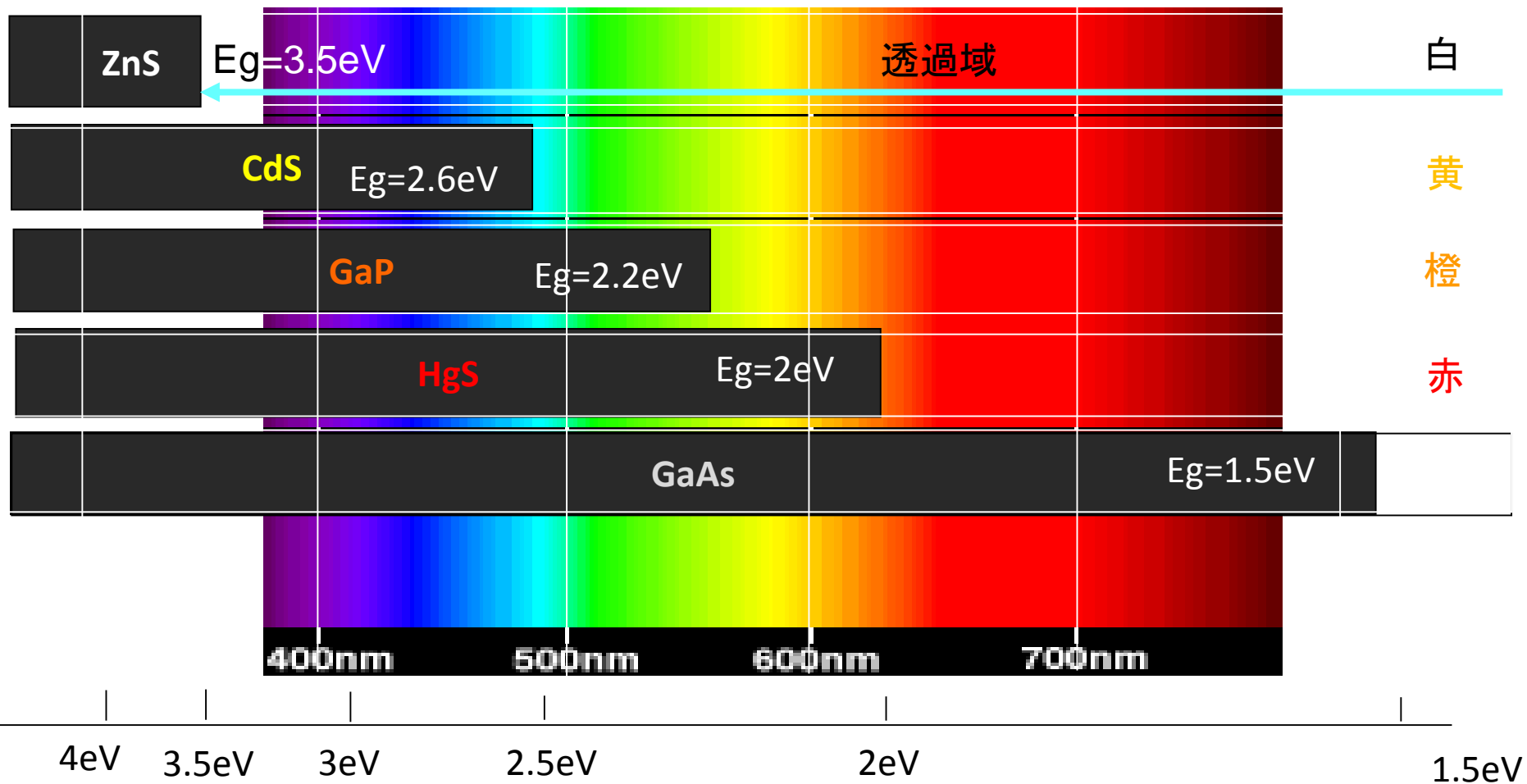
(a)のように、入射光の光子エネルギー( $h\nu$ )がバンドギャップ( $E_g$ )より小さければ、価電子帯の電子は伝導帯に飛び移ることができず、半導体は光を吸収しません。

これに対して、(b)のように $h\nu$ が $E_g$ より大きくなると、価電子帯の電子は光のエネルギーをもらって伝導帯に飛び移り、価電子帯にホールを残します。



# 3.7半導体のバンドギャップと色(1)透過色

- 吸収される色の補色が見える

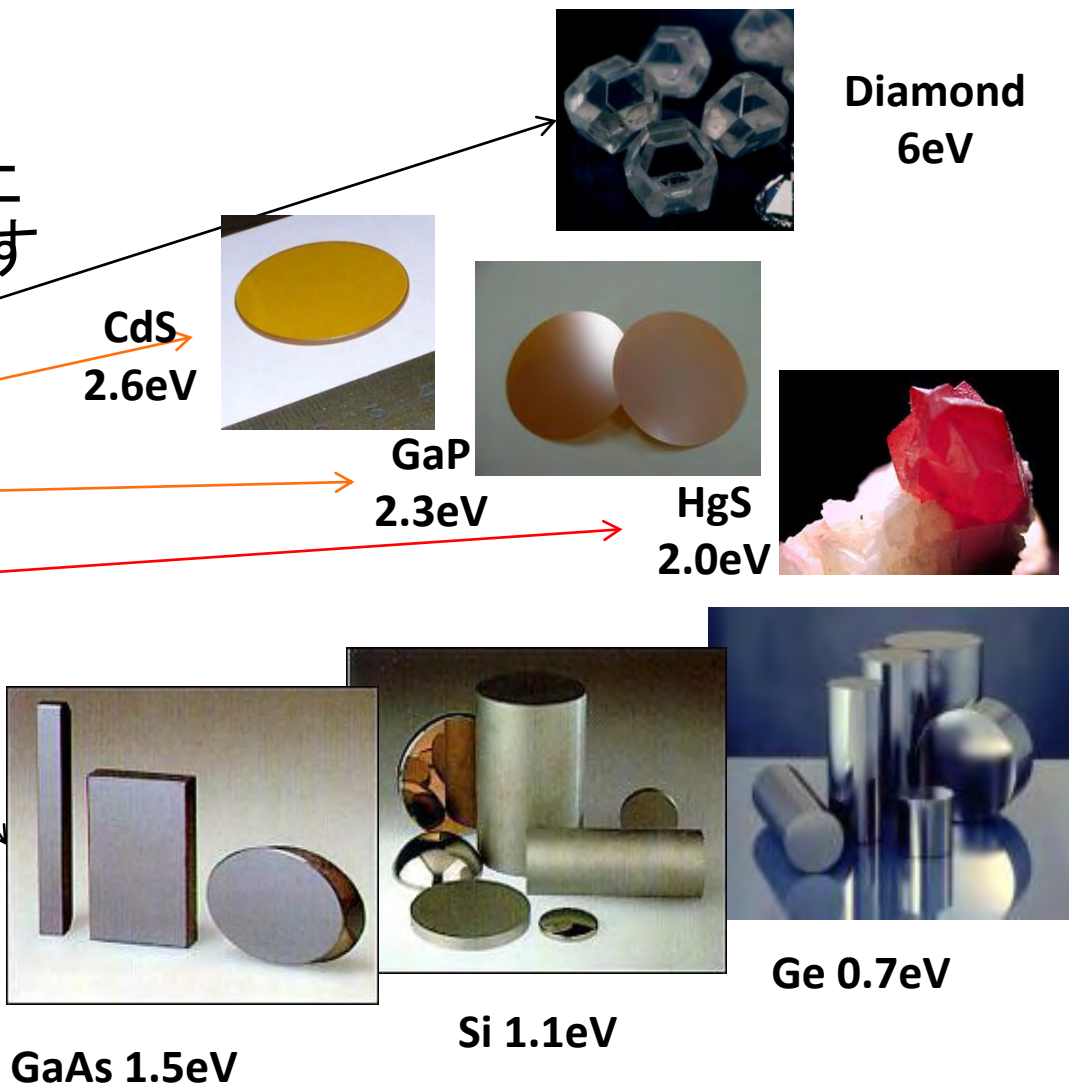


# 3.7半導体のバンドギャップと色(2)結晶の色

## • 透過光の色

バンドギャップより低いエネルギーの光を全部通す

- $E_g > 3.3\text{eV}$ : 無色透明
- $E_g = 2.6\text{eV}$ : 黄色
- $E_g = 2.3\text{eV}$ : 橙色
- $E_g = 2.0\text{eV}$ : 赤色
- $E_g < 1.7\text{eV}$ : 不透明



# 3.7半導体のバンドギャップと色(3)絵の具の色

図は、いくつかの半導体についてバンドギャップと色の関係を示したものです。

- 硫化亜鉛(ZnS)のバンドギャップは3.5eVなので、光学吸収端の波長354nmより短い光が吸収されそれより長い波長は全部透過します。このため、可視光のすべての波長が透過するので無色透明で、粉末は白です。
- 硫化カドミウム(CdS)では $E_g=2.6\text{eV}$ に相当する波長477nmより短波長の紫と青が吸収され、赤から緑の波長が透過するので黄色です。
- リン化ガリウム(GaP)では、 $E_g=2.2\text{eV}$ に相当する564nm(緑)より短い波長が吸収され、黄色と赤が透過するので橙だいたい色です。
- 硫化水銀(HgS)は $E_g=2\text{eV}$ に相当する620nm(赤橙)より短波長が吸収されて赤色です。
- ガリウムヒ素(GaAs)は吸収端が826nmにあり、可視光(380~780nm)をすべて吸収するので、透過光は目に見えませんが色は黒です。

化学式	鉱物名	絵の具名	バンドギャップ (eV)	色
C	ダイヤモンド	—	5.4	無色
ZnO	紅亜鉛鉱	ジンクホワイト	3	無色
CdS	硫カドミウム鉱	カドミウムイエロー	2.6	黄
CdS <sub>1-x</sub> Sex	—	カドミウムオレンジ	2.3	橙
HgS	辰砂	パーミリオン	2	赤
HgS	黒辰砂	—	1.6	黒
Si	—	—	1.1	黒
PdS	方鉛鉱	—	0.4	黒

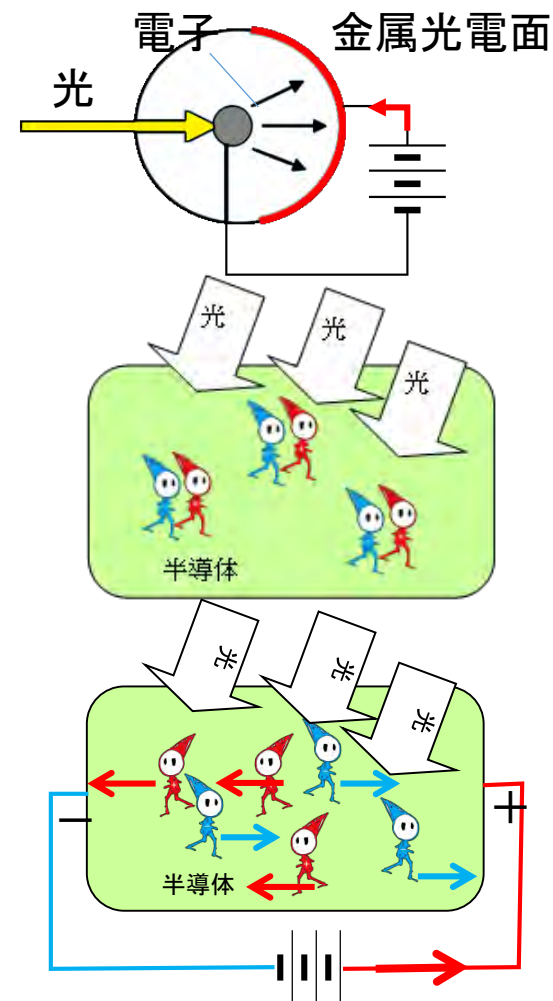


## 3.8 固体に光を照射しただけでは電力は得られない

金属に光を当てると**外部光電効果**が起き真空中に電子が放出されますが、電圧を加えないと電流は流れません。発電には使えません。

半導体に光をあてると、**内部光電効果** (光伝導)により電子とホールが生じます。電圧を加えると電気が流れます。これは光スイッチにつかえますが発電にはつかえません。

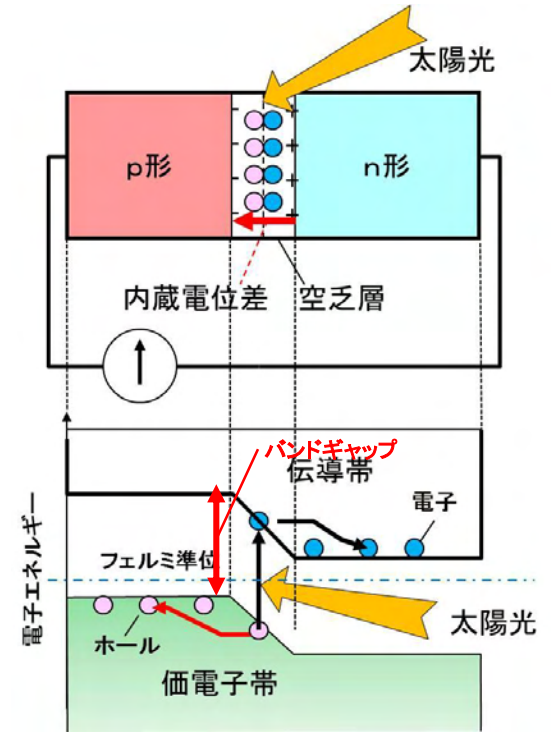
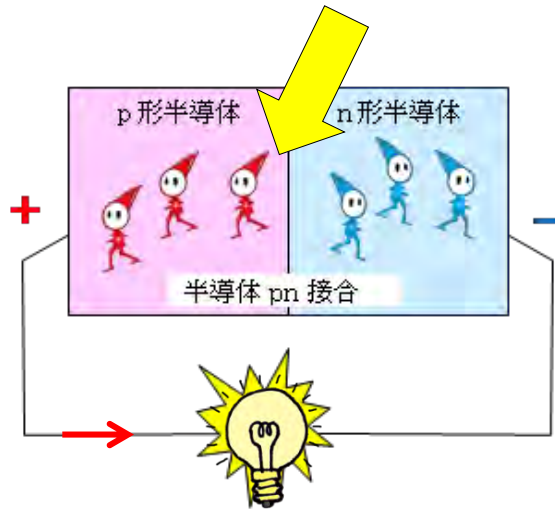
電力を取り出すには、半導体のpn接合ダイオードという仕掛けが必要です。





pn接合ダイオードという半導体のしかけを作って初めて、光起電力が得られます。

p形半導体とn形半導体の接合を作ると、接合界面付近に**内蔵電位の勾配**ができて電子とホールが分離され、光起電力が生じます。

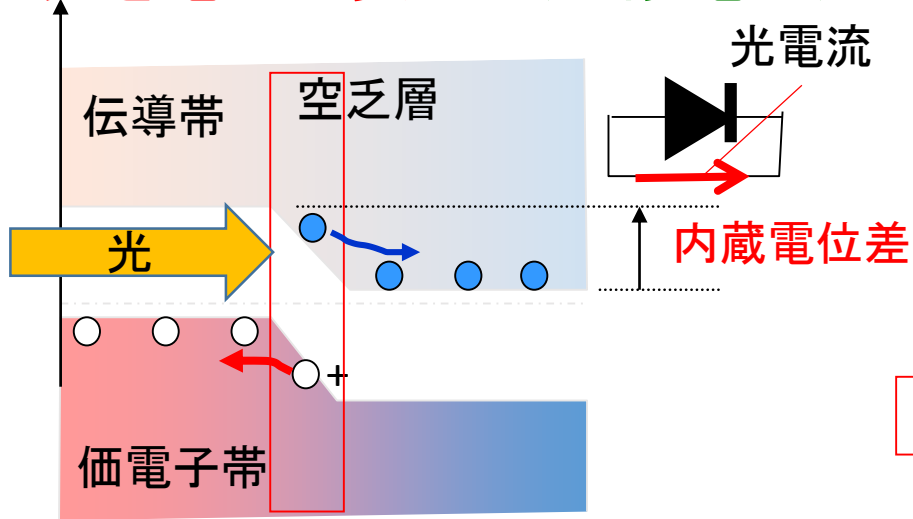


4. 太陽光で発電するには半導体のしかけが必要です

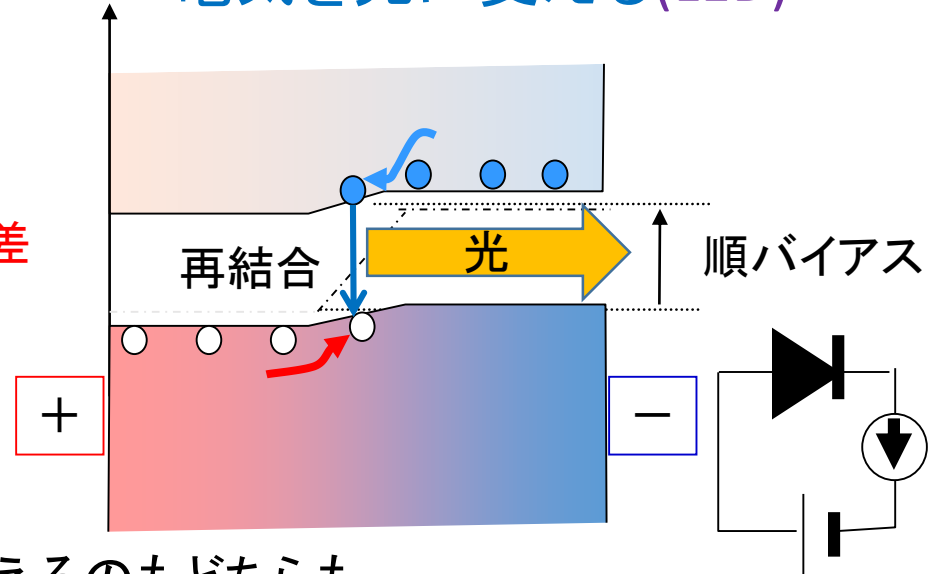


## 参考

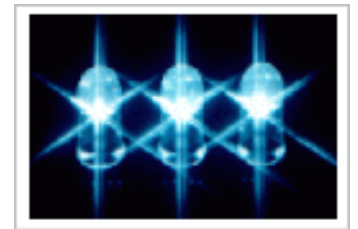
### 光を電気に変える(太陽電池)



### 電気を光に変える(LED)



- 光を電気に変えるのも電気を光に変えるのもどちらも **pn接合ダイオードの働き**です
- 光で作った電子とホールを **内蔵電位差**(電位の坂道)で分離するのが太陽電池です。
- 順方向バイアスをかけて電子とホールを再結合させ、エネルギー差を光に変えるのが発光ダイオードです。



# 太陽電池と発光ダイオード



太陽光のパワー( $1\text{kW}/\text{m}^2 \times \text{受光面積}$ )に対する太陽電池から取り出せる最大パワーの比率(百分率)を**変換効率**といます。

- シリコン単結晶太陽電池の変換効率の最高値は  
小面積セルで**25.0%**(UNSW; $1\text{cm}^2$ )、大面積モジュールで**22.7%**  
HIT型で**25.6%**(Panasonic; $144\text{cm}^2$ )←2014.4.10
- ガリウムヒ素系多接合太陽電池の変換効率は小面積セルで  
**44.4%**(Sharp;集光 $0.16\text{cm}^2$ )←2013.6.14、35.8%(Sharp;非集光)  
大面積モジュールで**36.1%**
- CIGS系薄膜太陽電池の変換効率は  
小面積セルで**20.9%**(Solar Frontier)、サブモジュールで**17.8%**、  
大面積モジュールで**13.6%**

5. 電気になるのは太陽光のパワーの何%？

# 5.1 変換効率の定義

変換効率とは、太陽光のエネルギーを太陽電池から取りだせる電気エネルギーに変える能力を表すための尺度です。

グラフは太陽電池の出力電圧と出力電流の関係です。このグラフで $I_{sc}$ と記したのは短絡電流です。短絡電流は①のように太陽電池の端子間を電流計で短絡したときに流れる電流です

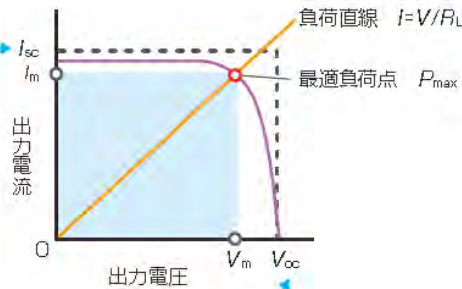
一方、 $V_{oc}$ と記したのは開放電圧です。開放電圧は、②に示すように、太陽電池から電流を取りださずに電圧計で測定した電圧です。

取りだせる電力は、実際の電圧－電流関係が曲線状になっているので、点線で示した長方形の面積 $V_{oc} \times I_{sc}$ より小さな電力しか取りだせません。

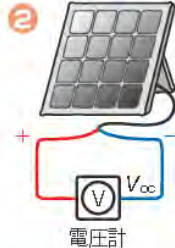
③に示すように、太陽電池に負荷抵抗 $R_L$ をつないだとき、両端の電圧と流れる電流の関係は $I = V/R_L$ で表される負荷直線になります。

負荷直線と電圧－電流特性曲線の交点に内接する長方形の面積 $V_m \times I_m$ を最大にする負荷のとき、最適負荷点に最大出力電力 $P_{max}$ が取りだせるのです。

この値を受光パワー（ $1\text{kW}/\text{m}^2$ と受光面積の積）で割って百分率で表したものが、式①に示される変換効率 $\eta$ です。



短絡電流 $I_{sc}$ とは、太陽電池の出力端をショートしたときに流れる電流のこと



開放電圧 $V_{oc}$ とは、太陽電池の出力端に負荷をつながず、電流を流さない状態で測定した電圧のこと



負荷直線は、負荷抵抗 $R_L$ をつないだときに抵抗の両端に現れる電圧と流れる電流の関係

## 5.3 変換効率には理論的に限界がある

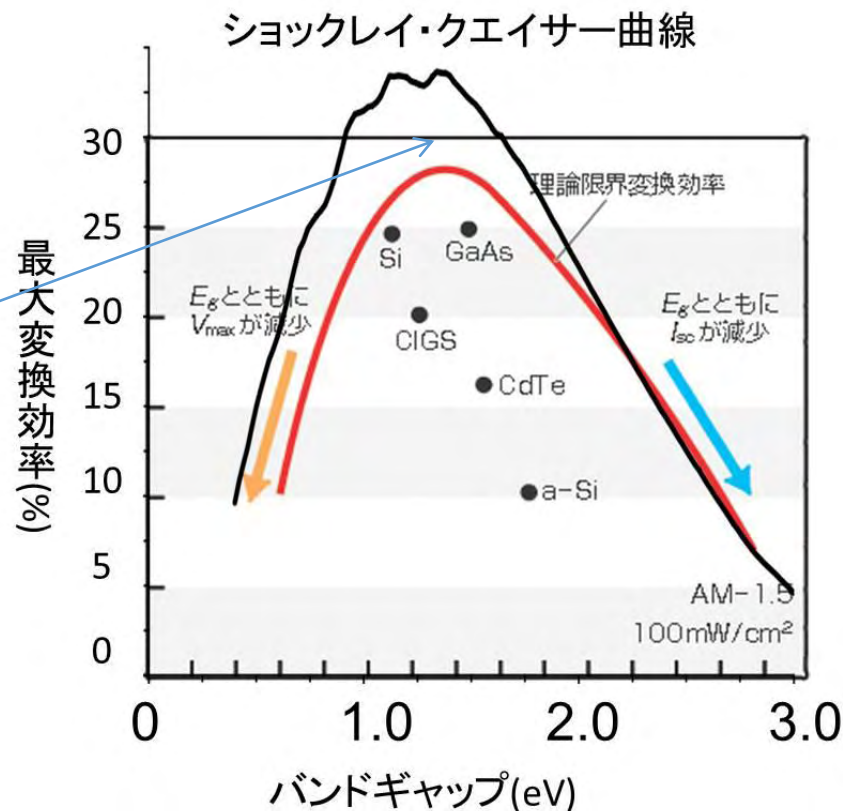
理論的に予測できる太陽電池の最大の変換効率(25°C)をバンドギャップ $E_g$ の関数として表した曲線を「理論限界変換効率曲線」といいます。

$E_g$ の低い側では、 $E_g$ が下がると $V_{max}$ が低下します。 $E_g$ の高い側では、 $E_g$ とともに $I_{sc}$ が低下します。それで、理論限界変換効率は $E_g=1.4\text{eV}$ 付近で最大値30%をとります。

逆に言えば、pn接合1個の変換効率は、せいぜい30%しかありません。

シリコンの限界値は27%ですが、実現されている最大値は25%なので、ほとんど限界までできていることがわかります。

一方、CIGSで実現している変換効率の最大値は20%だが、研究開発によって28%くらいまで改善できる余地があります。



# 5.4 太陽電池の比較

表1 太陽電池の比較

材料による分類	小分類	現状の変換効率(%)**		モジュールコスト***	資源	特徴
		モジュール	セル			
シリコン系	単結晶系	22.9	25.0	1.1	△	高い変換効率。安定。Si材料の多消費に難
	多結晶系	19.5	20.4	1.08	△	比較的高効率、普及。材料供給に難
	薄膜系	8.2	10.8	0.84	○	低コストで大面積可能。省資源。低効率と光劣化に難
化合物半導体系	Ⅲ-V族	38.5	44.4	集光	△	超高効率。宇宙用。高コスト、資源問題に難
	CIGS系	17.8	21.7	(0.99)*	○	低コストで大面積可能。省資源。大面積効率に難
	CdTe系	16.1	21.5	0.98+	△	低コスト、大量生産。中効率。Cd使用が問題
化学系	色素増感系	8.9	11.9	(0.75-3.3)#	○	低コスト、省資源。中効率。液体使用が難。光劣化も
	有機半導体系	6.8	10.7	2.84)#	○	低コスト、省資源。中効率
	有機無機ペロブスカイト		20.1		○	

表1はさまざまな材料の太陽電池のセル効率およびモジュール効率、コスト、材料に関連する資源問題と毒性、各電池の特徴をまとめたものです。

多結晶シリコンのモジュールは、かなりの高効率でコストも低く、長い伝統に支えられて性能も安定しています。これまでの普及型の家庭用太陽電池モジュールは、ほとんどこのタイプでした。

\* 2010年12月の最低価格(<http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm>)  
 & 2008年: Nanosolar社の発表(role-to-role)  
 + 2009年: First Solar社発表

# Estimation: Joseph Kalowekamo, Erin Baker: Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells; Solar Energy 83, 1224-1231 (2009)

\*\* M.Green et al., Solr cell Efficiency tables (version 43)  
 Prog Photovolt. ReAppl. 2014 22, 1-9s.

\*\*\* ビークパワー 1Wあたりのモジュールコストを米ドルで表したもの

種々の太陽電池のセル変換効率・モジュール変換効率のチャンピオンデータ(2010年時点)および記載のあるモジュールコスト\*\*\*の一覧表

# 5.5 最高変換効率の変遷

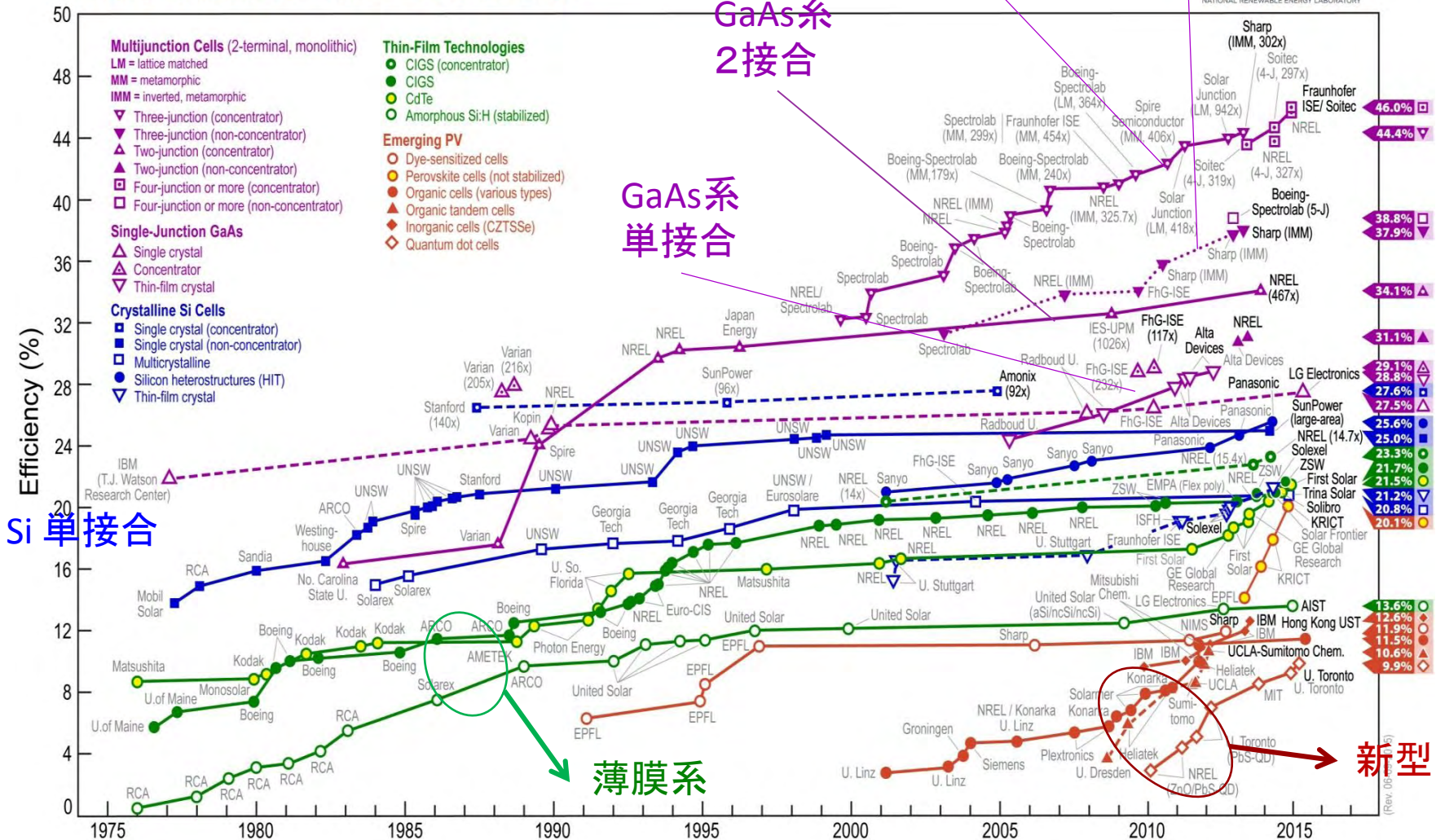
GaAs系3接合

非集光

集光



## Best Research-Cell Efficiencies



## 5.6 セル・モジュール・アレイ

セルの電圧(開放電圧)は半導体によって決まっています、乾電池の電圧より低い1V足らず、Siでは0.8Vしかありません。

これを25個直列につないだモジュールにすると出力電圧は約21Vになります。

このモジュールを7個直列につないだモジュール列の電圧は150Vとなり、電灯線の電圧と同レベルになります。

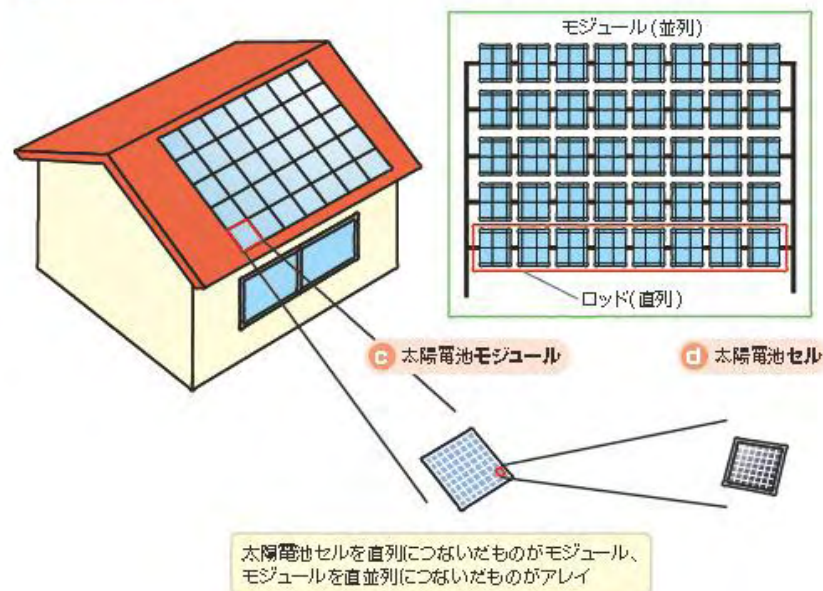
また、1辺10cmの正方形セルを流れる電流は、せいぜい4Aですが、5つのモジュール列を並列にすれば20A流せます。

7直列5並列のアレイにすることで、150V、20Aすなわち約3kWの太陽電池発電機になるのです。

図1 太陽電池モジュールと太陽電池アレイ

a 太陽電池アレイ

b 太陽電池アレイの配線列(7直列5並列)





# 5.7 実際のモジュールの変換効率

1m<sup>2</sup>あたりに換算すると、多結晶で128W、単結晶で136Wです。地上1m<sup>2</sup>の面積に、南中時に真上から降りそそぐ太陽光のパワーは約1kWでしたから、受けた光の13~15%くらいしか電気に変わっていません。

結晶シリコン基板上に薄膜アモルファスシリコンを形成したハイブリッド型のHIT太陽電池モジュールの出力は1m<sup>2</sup>あたりに直すと152Wもあります。

セル効率からの低下の原因は、①セルを並べてモジュールにするときにどうしても隙間ができること、②電極の下には光が届かないこと、③モジュール外周にフレームが必要なので実効面積が小さくなってしまうこと、などです。

a 多結晶シリコン高出力タイプ



外形 1650×994mm  
公称最大出力 210W

b 単結晶シリコン高出力タイプ



外形 1318×1004mm  
公称最大出力 180W

c HITタイプ



外形 1320×895mm  
公称最大出力 180W



オーストラリアのレースで優勝した東海大学チームのソーラーカーに搭載されたInGaP/InGaAs/Ge太陽電池の変換効率は35%という高い値でした。

# 5.8 建材としての太陽電池(1)

- 屋根に設置する太陽電池パネル(モジュール)は、その設置方法によって、**図1**に示すように、大きく分けて屋根置き型と屋根建材型の2つに分類することができます。

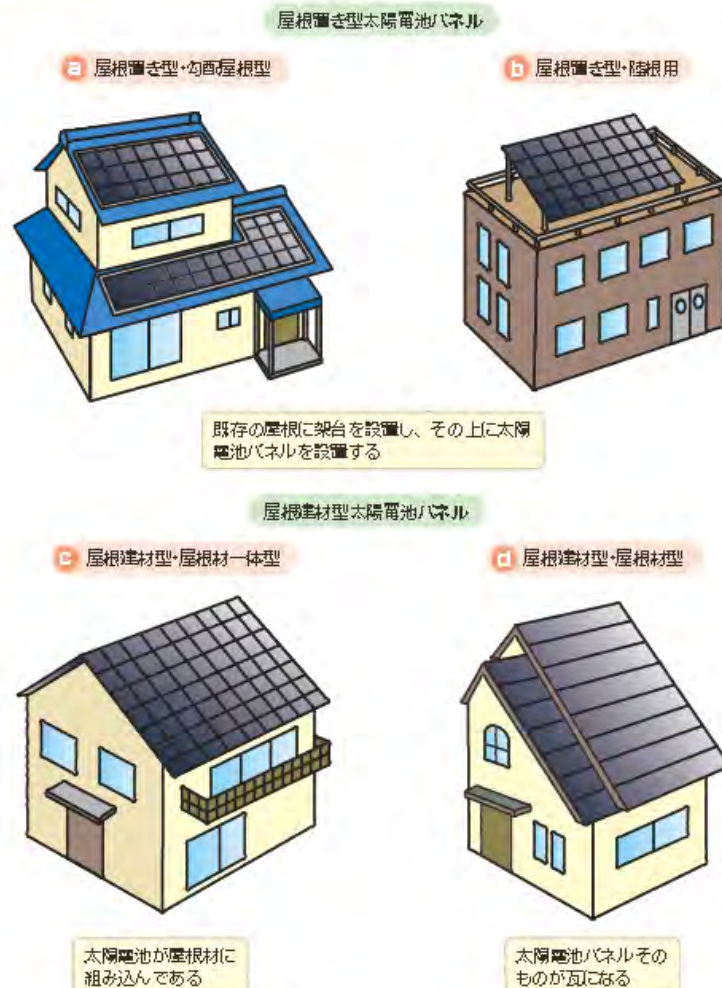
## 屋根置き型

- 屋根置き型は、既存の屋根に太陽電池パネルを追加して設置するタイプで、これにも、勾配屋根の瓦の上に枠型の架台を置いてパネルを設置するものと、陸屋根(フラットな屋根)の屋上に傾斜架台を置いてパネルを設置するものの2種類があります。どちらの場合にも、標準的な太陽電池パネルを用いることができます。架台の設置が太陽電池設置のコストを増やす原因になるほか、既存住宅の耐重量工事が必要になる場合があります。また、屋根置き型・陸屋根の場合、強風対策が重要です。

## 屋根建材型

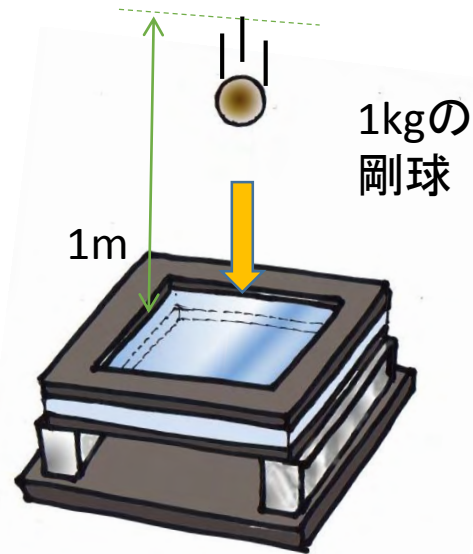
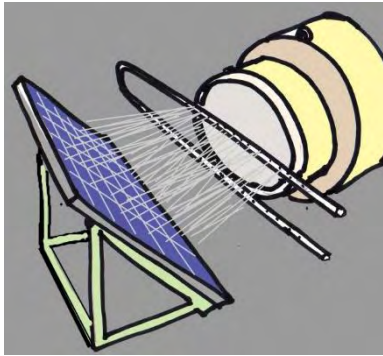
- 新設住宅の場合には、瓦の代わりに(b)に示すような防火性能と屋根材機能をもたせた屋根建材型パネルを設置できるので、瓦を葺くためのコストが不要になりますし、架台の重量の問題も回避できます。屋根建材型にも、太陽電池を屋根材に組み込む屋根材一体型と、太陽電池自体が屋根材となる屋根材型(瓦型太陽電池モジュール)があります。
- 壁に設置する太陽電池パネルにおいても、屋根と同様に、壁設置型(壁に架台を取りつけてパネルを設置)と壁建材型(太陽電池が壁建材となる)の2種類があります。

図1 太陽電池モジュールと設置方法



## 5.8 建材としての太陽電池(2)

### 30m/sの強風下での散水テスト



太陽電池の上を人が歩く

### 太陽電池パネルは建材

- 建材型太陽電池パネルは瓦の代わりに葺くことができるので、瓦を葺くためのコストが不要となりますし、架台の重量の問題も回避できます。しかし実際には、瓦に代わる建材として建築基準法に合致する防水・防火・強度の要求を満たしていることが求められます。

### 防水機能

- 建材一体型パネルは、屋根瓦と同等の防水機能が要求されます。屋根板の上に防水シートを貼り、レールを敷いてパネルの外枠を固定しますが、レール側面の防水のほか、パネル間の目地のシールが必要です。図1のように、台風を想定して、風速30m/s、散水量240mm/hの散水試験に耐える防水機能と排水機能がテストされます。

### 防火機能

- モジュールはセルをガラスに貼りつけ、樹脂でシールした上にフィルムでカバーしますが、近隣火災の場合にフィルムが燃えたり、高温で融解したりして野地板に着火することを防ぐために、難燃性のフッ素樹脂系フィルムを使ったり、鋼板を組み合わせたりして防火機能を高めています。

### 強度

- パネルには強化ガラスが使われますが、JIS R 3206-2003に従って、約1kgの剛球を高さ100cmから落とす落球テストに合格する強度が求められます。パネル上を人が歩いて設置工事を行いますから、人が乗って歩けるのに十分な強度が保証されていなければなりません。



6. 太陽電池のできるまで

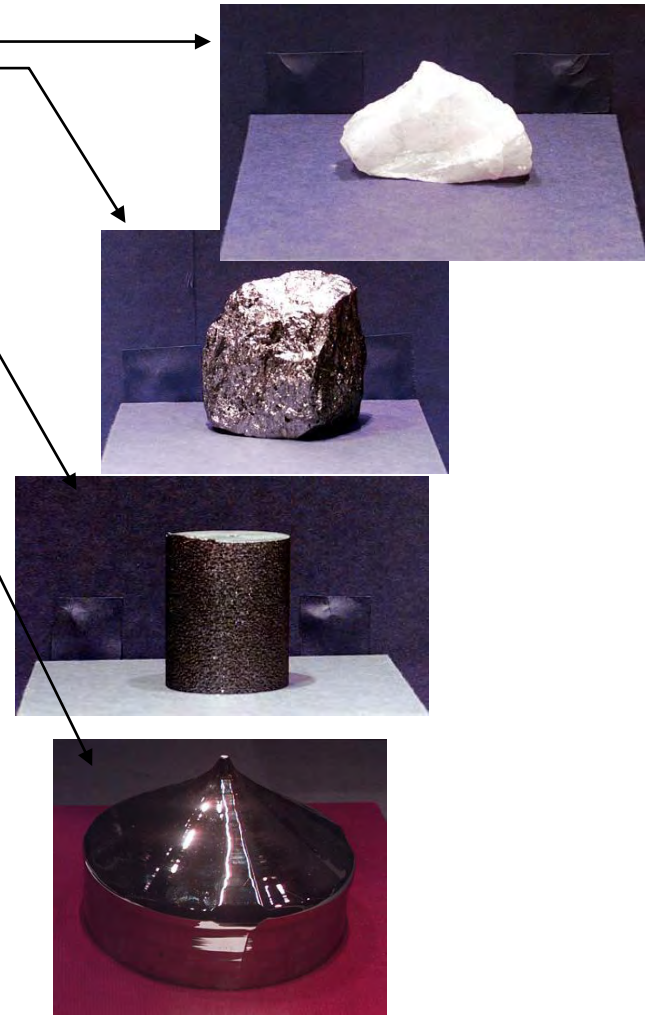
# 6.1シリコン太陽電池ができるまで(1)

ケイ石から**金属シリコン**を得る

金属シリコンを高純度多結晶シリコンにする (eleven nine)

高純度多結晶シリコンの結晶を整え単結晶にする (インゴット)

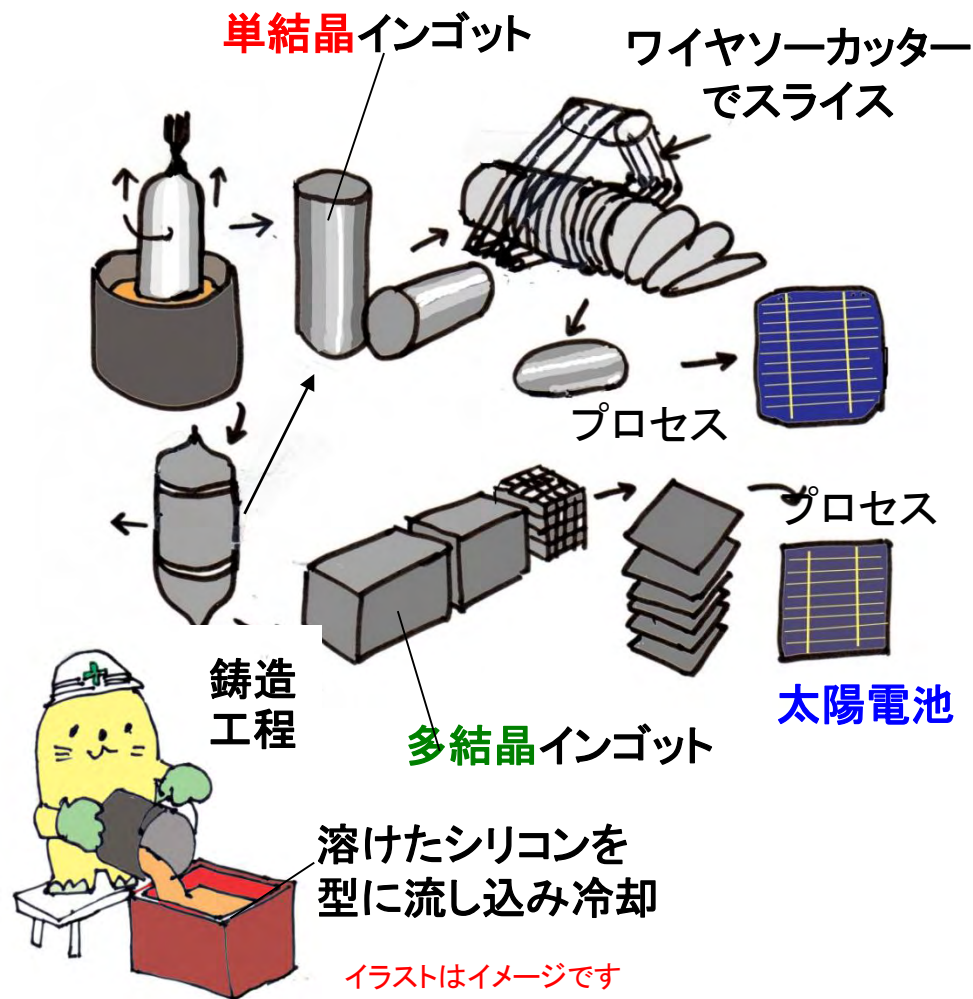
単結晶 (インゴット) をスライスし、表面を磨くなどの処理をしウエハが完成する



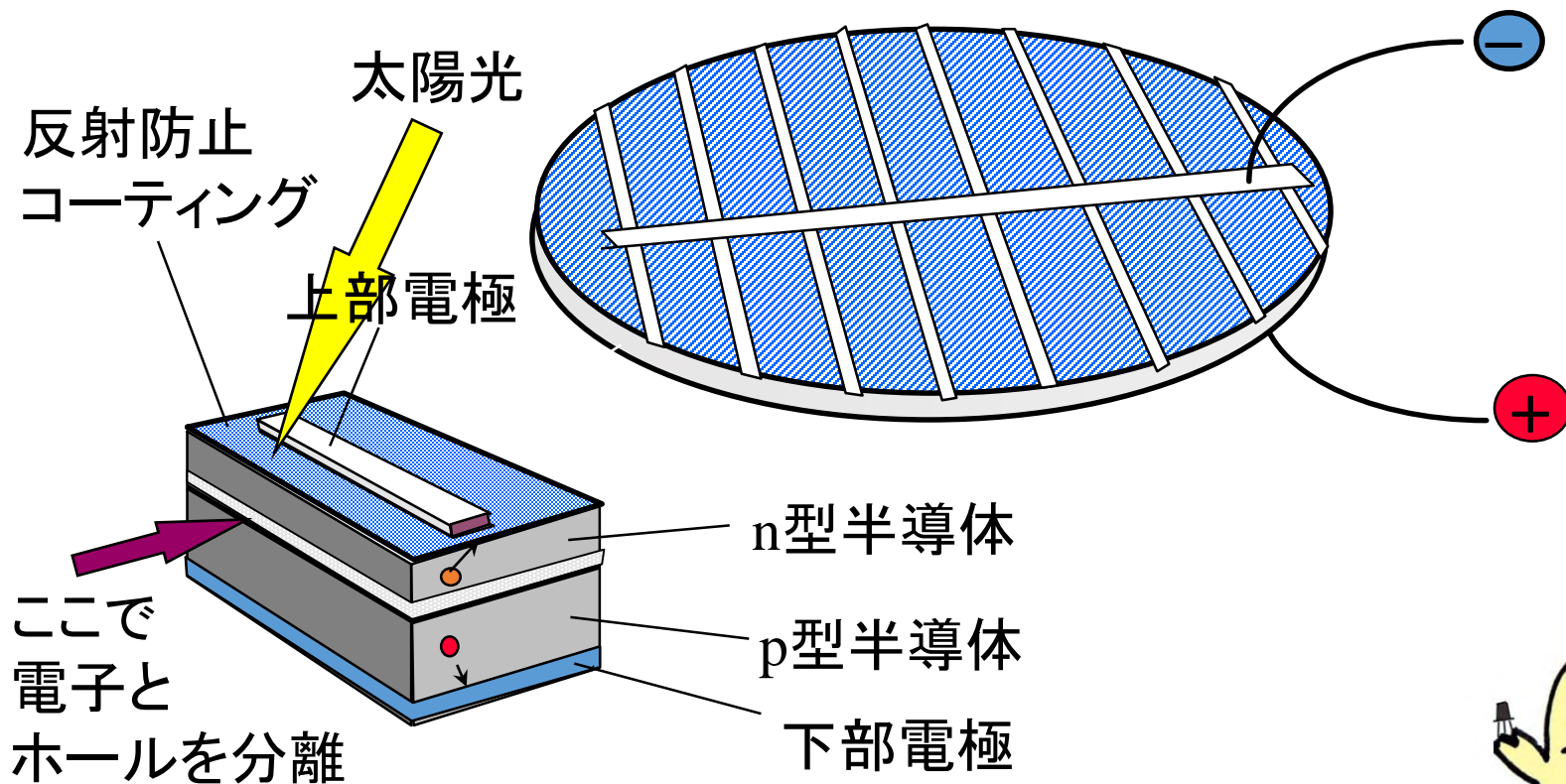
# シリコン太陽電池ができるまで(2)

**単結晶系**：単結晶インゴットをワイヤソーカッターなどでスライスしてウェハーに加工し、セル形成のプロセス（不純物の拡散によるpn接合を形成し、電極を形成するなど）に送ります。ウェハーの厚みは0.2mm程度です。

**多結晶系**：単結晶インゴットの両端部や切断くずを再融解して固化した多結晶インゴット（いわばシリコンの鋳物）をスライスしてウェハーに加工し、太陽電池セルに仕上げます。ウェハーの厚みは0.3mm程度です。



# 太陽電池の仕組み



# セルからモジュールへ

ソーラーパネル(太陽電池モジュール)は、太陽電池セルの集積によってつくります。図には、多結晶シリコン太陽電池モジュールの製作過程を示しています。

## セルを強化ガラス上に配列

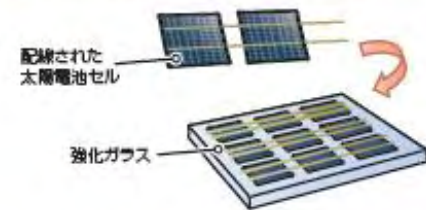
太陽電池セルは0.2~0.3mmの薄さですから、支えになるものがなければなりません。通常はガラス板を用います。まず、直列に配線された太陽電池セルの受光面をガラス側に向けて、ガラス板上に配列します。

## 樹脂と保護フィルムで封止

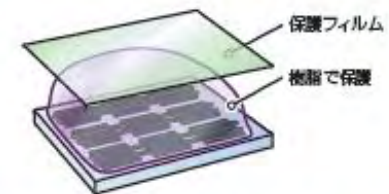
この上に樹脂を載せ、さらに保護フィルムで覆って、セルの配列を封止します。太陽電池セル自体の寿命はかなり長いのですが、封止に用いる樹脂の劣化が太陽電池モジュールの寿命を決めるといわれています。

## フレームで覆って固定し、電極をつけて完成

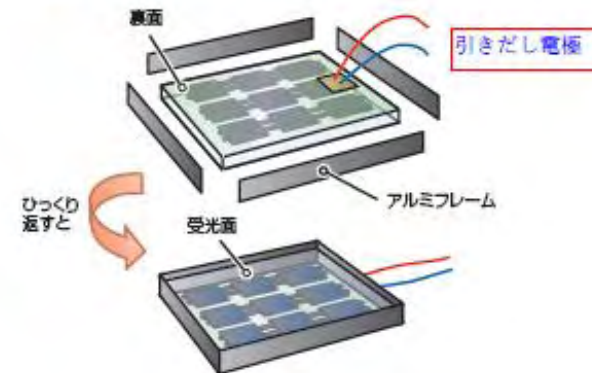
a 配線されたセルを、強化ガラス上に受光面を下にして配列



b セルの上に樹脂を載せ、保護フィルムで覆って封止

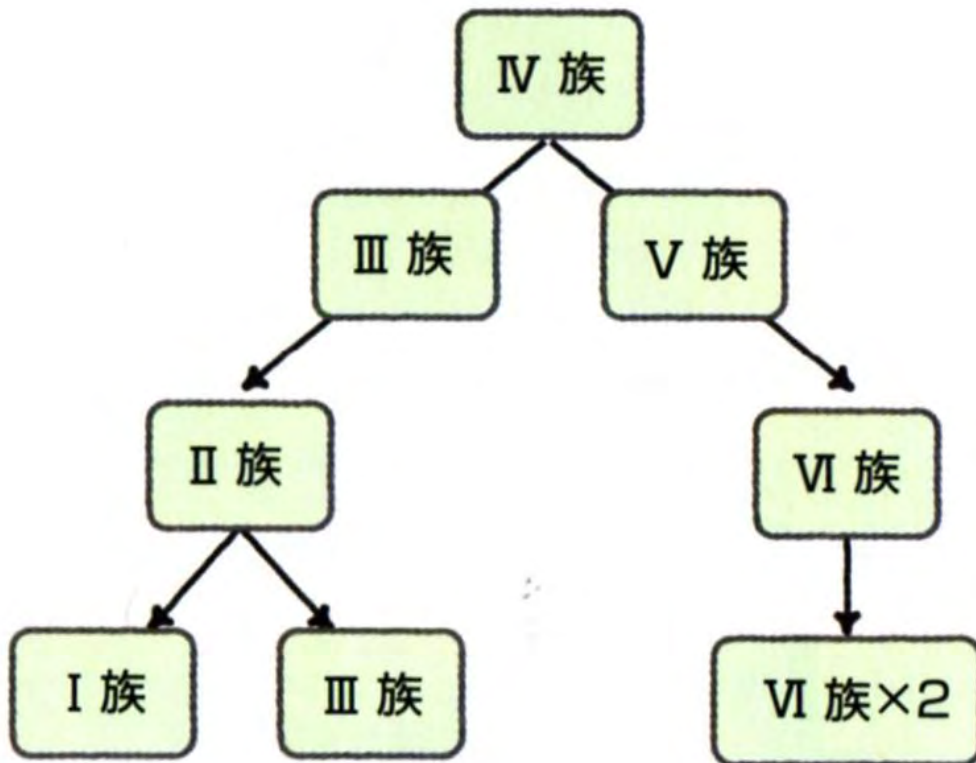


c フレームと電極をつけて太陽電池モジュールの完成





## 6.2 化合物太陽電池太陽電池



例 シリコン  
(Si)

例 ガリウムヒ素  
(GaAs)  
閃亜鉛鉱構造(ZB)

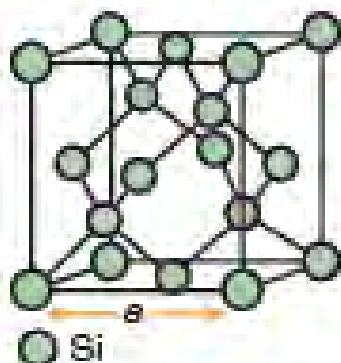
例 テルル化カドミウム  
(CdTe)  
閃亜鉛鉱構造(ZB)

例 セレン化銅インジウム  
(CuInSe<sub>2</sub>)  
カルコパイライト構造(CH)



# 半導体の結晶構造

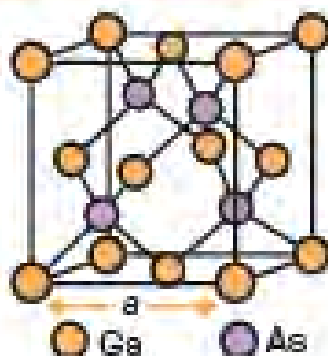
① シリコン



格子定数  $a = 5.431 \text{ \AA}$

ダイヤモンド構造

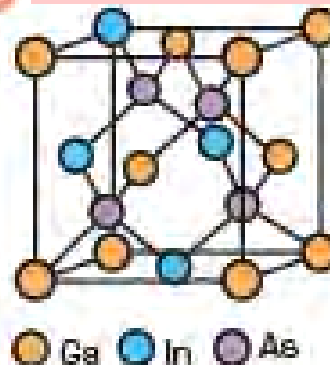
② ヒ化ガリウム



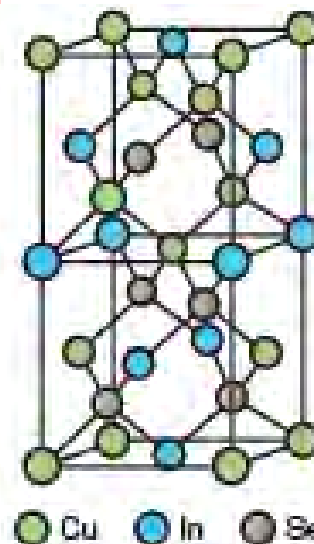
格子定数  $a = 5.653 \text{ \AA}$

閃亜鉛鉱構造 (ZB)

③ ヒ化ガリウムインジウムアロイ (混晶)



④ セレン化銅インジウム



カルコパイライト構造 (CH)

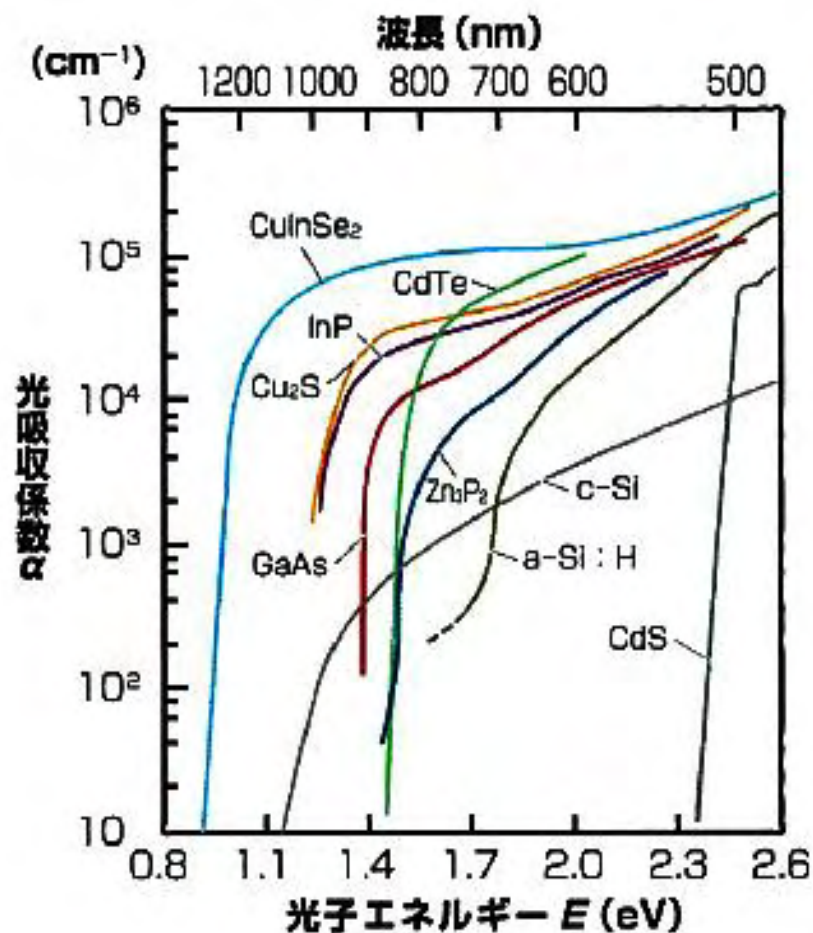
# 1.0～1.7eVの間のバンドギャップをもつ半導体

半導体名	Eg (eV)	直接／間接	結晶構造	半導体名	Eg (eV)	直接／間接	結晶構造
<b>CuInSe<sub>2</sub></b>	1.04	直接	CH	<b>GaAs</b>	1.42	直接	ZB
Si	1.12	間接	D	<b>CdTe</b>	1.47	直接	ZB
ZnGeAs <sub>2</sub>	1.15	直接	CH	CuInS <sub>2</sub>	1.53	直接	CH
AgGaTe <sub>2</sub>	1.15	直接	CH	CdSiAs <sub>2</sub>	1.55	直接	CH
CdSnP <sub>2</sub>	1.17	直接	CH	AlSb	1.62	間接	ZB
CuGaTe <sub>2</sub>	1.23	直接	CH	<b>CuGaSe<sub>2</sub></b>	1.68	直接	CH
AgInSe <sub>2</sub>	1.24	直接	CH	CdGeP <sub>2</sub>	1.72	直接	CH
InP	1.34	直接	ZB	a-Si:H	1.7	—	非晶質

D:ダイヤモンド構造、ZB:閃亜鉛鉱構造、CH:カルコパイライト構造

# 主な半導体の光吸収スペクトルの比較

結晶シリコン(c-Si)は間接遷移型吸収端をもつため光吸収係数が小さいのに対し、直接吸収端をもつ GaAs, CdTe, CIS(CuInSe<sub>2</sub>) などの化合物半導体はSiより2桁近く大きな吸収係数を示します。特にCISは近赤外域の吸収が強いという特徴をもちます。



# 化合物系太陽電池のパフォーマンス

3種類(III-V族、CIGS系、CdTe系)の化合物系太陽電池のモジュールとセルにおける変換効率のチャンピオンデータをます。

CdTeもCIGSもセルの効率は高いのに、モジュール効率になると17%程度しかありません。化合物がもつ高いポテンシャルを生かし切れていないのです。

このギャップを埋めるには、結晶工学的アプローチが必要です。

表. 化合物太陽電池の比較

小分類	現状の変換効率(%)**		モジュールコスト***	資源	特徴
	モジュール	セル			
III-V族	241.	28.8	単接合非集光	△	超高効率。宇宙用。高コスト、資源問題に難
	38.7	46.8	多接合集光		
CIGS系	17.6	21.9	(0.99)&	○	低コストで大面積可能。省資源。大面積効率に難
CdTe系	16.1	20.1	0.98+	△	低コスト、大量生産。中効率。Cd使用が問題

& 2008年：Nanosolar社の発表 (role-to-role)

+ 2009年：First Solar社発表# Estimation: Joseph Kalowekamo, Erin Baker: Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells; Solar Energy 83, 1224-1231 (2009)

\*\* M.A.Green et al.: Solar cell efficiency tables (version 35); Progress in Photovoltaic Research Application, vol.18 (2010) pp.144-150.

\*\*\* ピークパワー1Wあたりのモジュールコストを米ドルで表したものの

# III-V 族太陽電池の変換効率

## III-V 族化合物系太陽電池の変換効率のチャンピオンデータ

材料	非集光/集光	接合数	端子数	変換効率(%)	発表者、発表年
GaAs (薄膜)	非集光	単接合	2	26.1	Radboud U.2009
GaAs	集光 (232sun)	単接合	2	28.8	Fraunhofer,2009
GaAs (多結晶) /Ge基板	非集光	単接合	2	18.4	RTI,1997
InP (エピ薄膜)	非集光	単接合	2	22.1	Spire,1990
GaInP/GaAs	非集光	2接合	2	30.3	Japan Energy,1996
GaInP/GaAs/Ge	非集光	3接合	2	32.0	Spectrolab.,2003
GaAs/CIS	非集光	2接合	2	25.8	Kopin/Boeing,1988
GaInP/GaAs/Ge	集光 (364sun)	3接合	2	41.6	Spectrolab.,2009
InGaP/GaAs/InGaAs	集光 (302sun)	3接合	2	44.4	Sharp, 2013

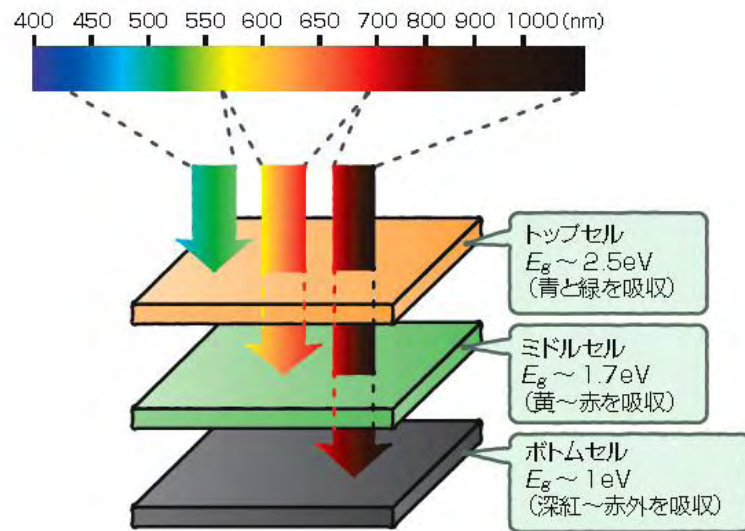
# 宇宙用の太陽電池は何でできている？

宇宙ステーションや人工衛星の電力は高効率の太陽電池から供給されます。

主としてIII-V族半導体が使われます。

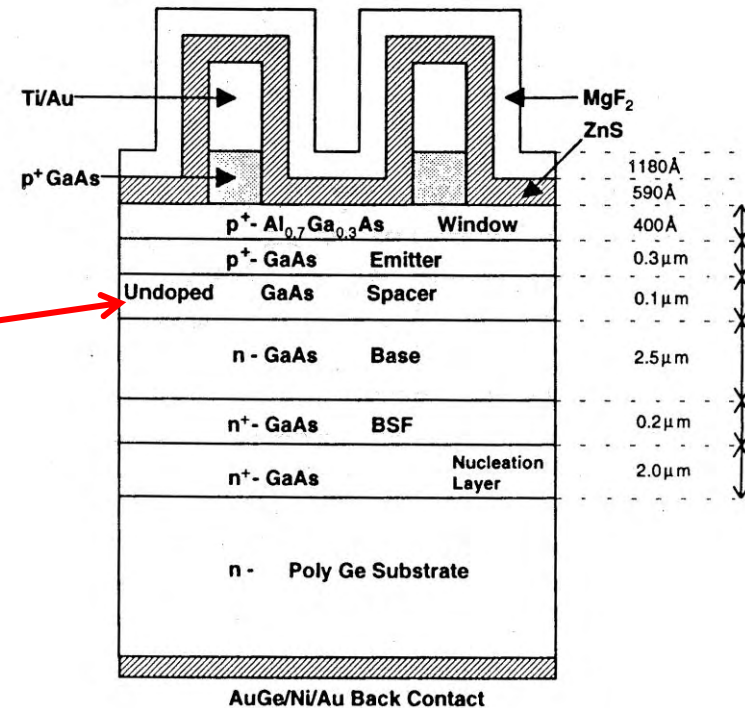
単接合ではせいぜい30%なので、3接合タンデムセルで波長域を分担して、40%以上の変換効率を達成しています。

MBE、MOVPEなどのハイテクで作製されるので高価です。



# III-V族多結晶太陽電池の構造と薄膜形成プロセス

- キャスト法で作製した光学グレードの大粒径Ge多結晶基板上にMOCVD法でGaAsを堆積します。
- 基板直上には高濃度のAsを含む $n^+$ 核発生層、次いで薄い $n^+$ 裏面障壁層、厚い $n$ ベース層、薄い無添加スペーサ層、薄い $p^+$ エミッタ層、 $p^+$ AlGaAs窓層、 $n^+$ オーミック接触層、Ti/Au上面電極という複雑な構造を製作します。
- 開放端電圧はスペーサ層厚が薄い程大きな値になります。



多結晶Ge基板上的多結晶 $p^+/n$ 接合GaAs太陽電池の構造

R. Venkatasubramanian, B.C. O'Quinn, E. Siivola, B. Keyes, R. Ahrenkiel: Conf. Rec. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. pp.811-814 (1997)



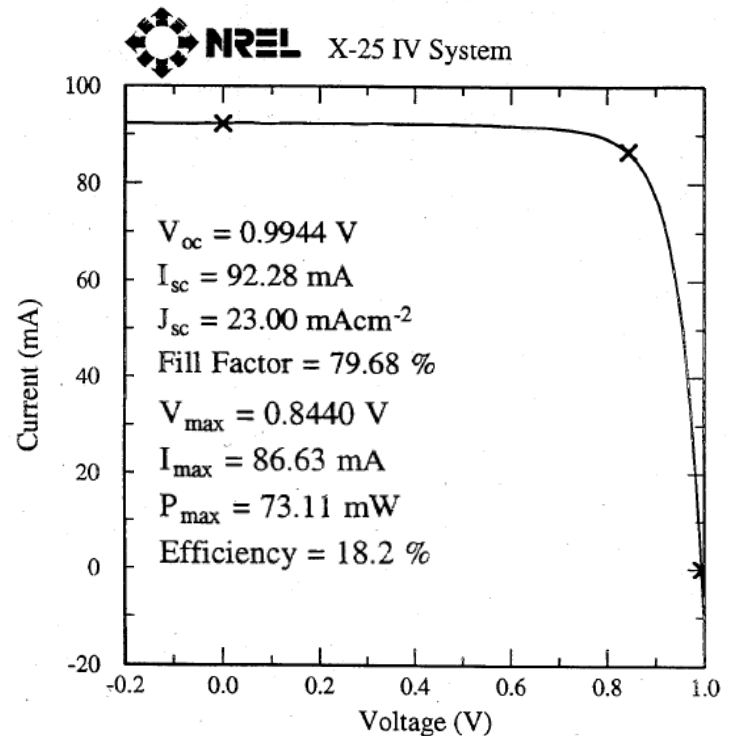
# 多結晶Ge基板上的のGaAs太陽電池のI-V特性

サブmmサイズの粒径を有する多結晶Ge基板上にGaAs太陽電池が作製され、4cm<sup>2</sup>セルで20%、0.25cm<sup>2</sup>セルで21.2%の効率(AM1.5)が得られていることが報告されている

R·Venkatasubramanian, et al.: Proc·26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (IEEE, New York, 1998)

Sample: 1-2505-a  
Nov 22, 1995 9:00 AM  
ASTM E 892-87 Global

Temperature = 25.0°C  
Area = 4.011 cm<sup>2</sup>  
Irradiance: 1000.0 Wm<sup>-2</sup>



サブmmの粒径を有する多結晶Ge基板上的の多結晶GaAs太陽電池のI-V特性

# CdTe太陽電池のプロセス

図は、CdS/CdTe太陽電池の構成図です。透明導電膜をつけたガラス基板にn-CdSの薄膜を堆積したものを基板として、近接昇華法でCdTeを堆積し、カーボンを裏面電極として塗布するという、大量生産に向きわめてシンプルなプロセスで作製します。



太陽光はガラス基板から入射する

CdTeペーストを塗布・乾燥することによりCdTe乾燥膜を形成したガラス基板と、CdS膜を成膜したガラス基板とを、CdTe乾燥膜とCdS膜が相対する向きに向かい合わせて密着させて熱処理する方法も報告されています。

# 最近話題のCIGS太陽電池って何？

CIGSとは $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ の頭文字をとった略号です。

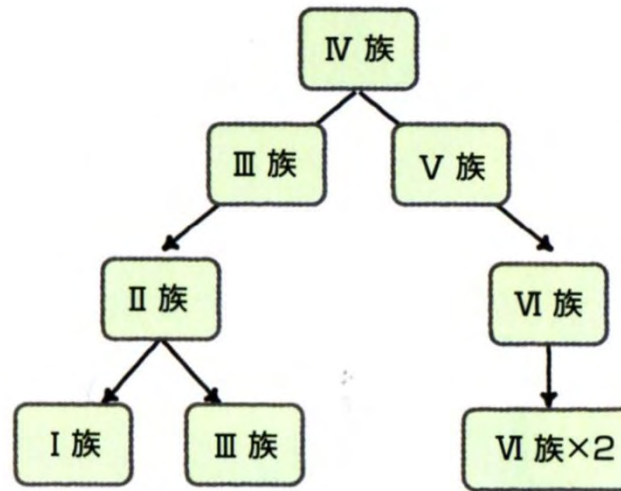
- $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{S}_2$ もCIGSと書けるので紛らわしいのですが市場にあるのは $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ のみです。
- $\text{CuInSe}_2$ のバンドギャップは1.04eV、ギャップ直上の吸収係数が半導体の中で最も高いといわれています。
- $\text{CuGaSe}_2$ (バンドギャップ1.53eV)との混晶を作ってVocを上げています。
- CIGS太陽電池のセル効率の最高値は20%です。
- 材料コストが低く、セル製造も容易です。

# CIGSについて

CIGSとは、CIS( $\text{CuInSe}_2$ )とCGS( $\text{CuGaSe}_2$ ) 混晶である  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  の略称です。

CISはIV→III-V→II-VI→I-III-VI<sub>2</sub>とつづくダイヤモンド一家の末裔なので四面体配位の共有結合です。

I-III-VI<sub>2</sub>族には、太陽電池材料の候補となるものが多数あります。



例 シリコン (Si)

例 ガリウムヒ素 (GaAs)  
閃亜鉛鉱構造 (ZB)

例 テルル化カドミウム (CdTe)  
閃亜鉛鉱構造 (ZB)

例 セレン化銅インジウム ( $\text{CuInSe}_2$ )  
カルコパイライト構造 (CH)

化合物	バンドギャップ (eV)	格子定数 (Å)		化合物	バンドギャップ (eV)	格子定数 (Å)	
		a	c			a	c
$\text{CuInSe}_2$	1.04	5.79	11.60	$\text{CuInS}_2$	1.53	5.52	11.08
$\text{CuGaSe}_2$	1.6	5.61	11.01	$\text{CuGaS}_2$	2.5	5.35	10.48
$\text{CuAlSe}_2$	2.7	5.60	10.91	$\text{CuAlS}_2$	3.5	5.32	10.43
$\text{AgInSe}_2$	1.04	6.10	11.68	$\text{AgInS}_2$	1.9	5.82	11.18
$\text{AgGaSe}_2$	1.9	5.82	11.18	$\text{AgGaS}_2$	2.7	5.75	10.29
$\text{AgAlSe}_2$	2.55	5.96	10.74	$\text{AgAlS}_2$	3.13	5.70	10.26

VI族がテルルのものは省略

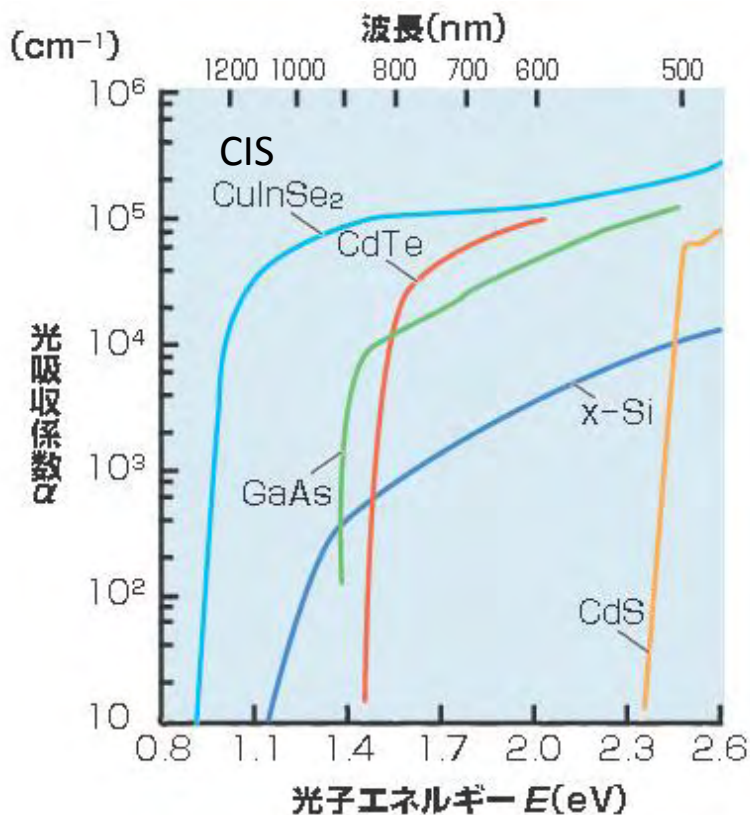
# CIGSの光吸収をシリコンと比較

図は、いくつかの半導体の光吸収スペクトルを比較したものです。

シリコンは、「間接遷移型吸収端」をもつので光吸収が弱いのです。

これに対し、CIGS、CdTe、ガリウムヒ素などは「直接遷移型吸収端」なので光吸収が強いのです。

波長の長い(赤外)光をよく吸収するので、朝・夕の発電量が多いのです。



# 1kW発電するのにシリコン何kg必要？ CIGSなら？

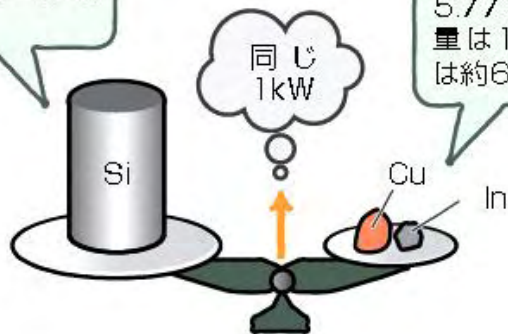
同じ1kW発電するのにシリコンは5kg必要だが、CISなら銅＋インジウム60gでOK

シリコンの太陽電池では、約 $200\mu\text{m}$ の厚さのシリコン結晶が必要なので、1kWの出力を得るにはシリコンが約5kg必要です

CIGS薄膜では $2\mu\text{m}$ の薄さで十分なので、同じ1kWを発電するのに**金属原料の総重量は60g**でよく、はるかに省資源です。

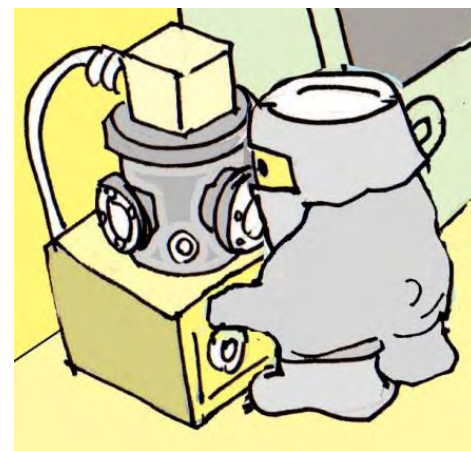
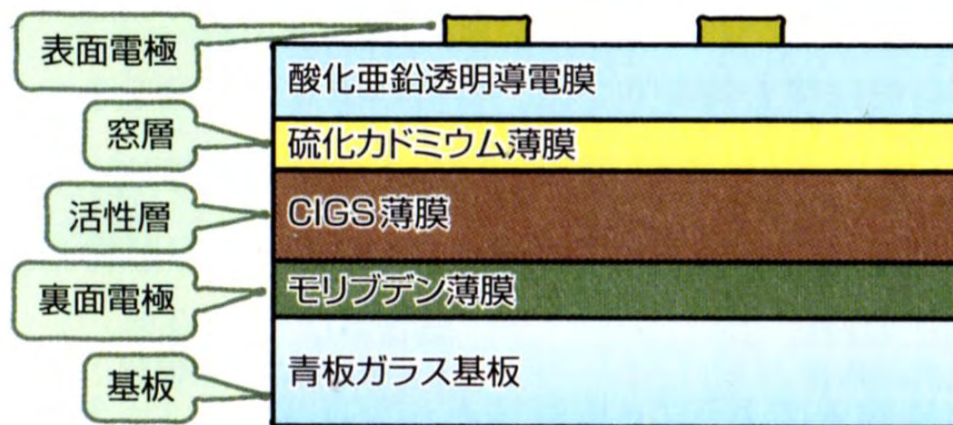
効率が10%として、1kWの電力を得るには $10\text{m}^2$ の面積が必要。シリコンの厚みを $200\mu\text{m}$ とすると、体積は $2000\text{cm}^3$ となり、シリコンの密度は2.34であるので、必要なシリコンの重量は約5kg

効率が10%として、1kWの電力を得るには $10\text{m}^2$ の面積が必要。CISの厚みを $2\mu\text{m}$ とすると、体積は $20\text{cm}^3$ となる。CISの密度は5.77であるので、必要なCISの重量は115g、金属(Cu+In)の重量は約60g



# CIGS系多結晶太陽電池の構造と薄膜形成プロセス

- CIS ( $\text{CuInS}_2$ ) は直接遷移型半導体なので、光吸収係数はほかの半導体と比べて非常に大きく、このため、たった $1\sim 2\mu\text{m}$ という薄さの膜でも太陽光を強く吸収します。
- インジウム (In) の一部をガリウム (Ga) で置換したCIGSは、バンドギャップを $1.25\text{eV}$ 付近にもち、変換効率が高く、小面積セルでは20%という高い効率が報告されています。
- 大面積のモジュールにしても、シリコン多結晶太陽電池の変換効率と遜色ない16.7%の効率が得られます。



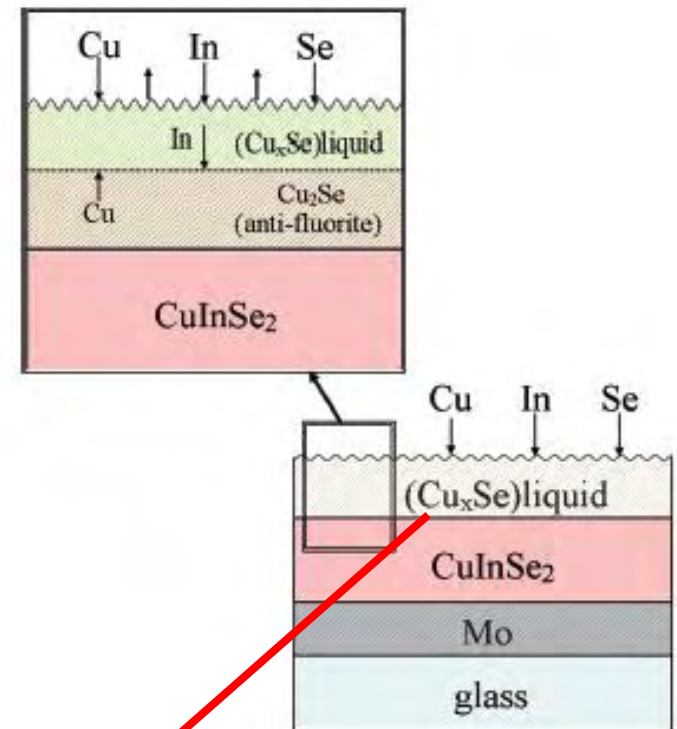
# CIGSの製造プロセス (1)バイレーヤー法

CIS結晶はCIS膜の表面に存在するCu-Se系液相を介して成長します。

薄膜表面の拡大図に示したようにCu-Se系液相が固相の $\text{Cu}_2\text{Se}$ と共存し、この $\text{Cu}_2\text{Se}$ と、表面から拡散してきたInとSeが反応してカルコパイライト型のCISが生成します。

$\text{Cu}_2\text{Se}$ とCISの間には、3次元的な結晶学的方位関係が存在します。

出発物と生成物の間に3次元的に結晶学的な関係が存在する化学反応のことをトポタクティックといいます。



$\text{Cu}_x\text{Se}$ はKCN処理などで除去します。

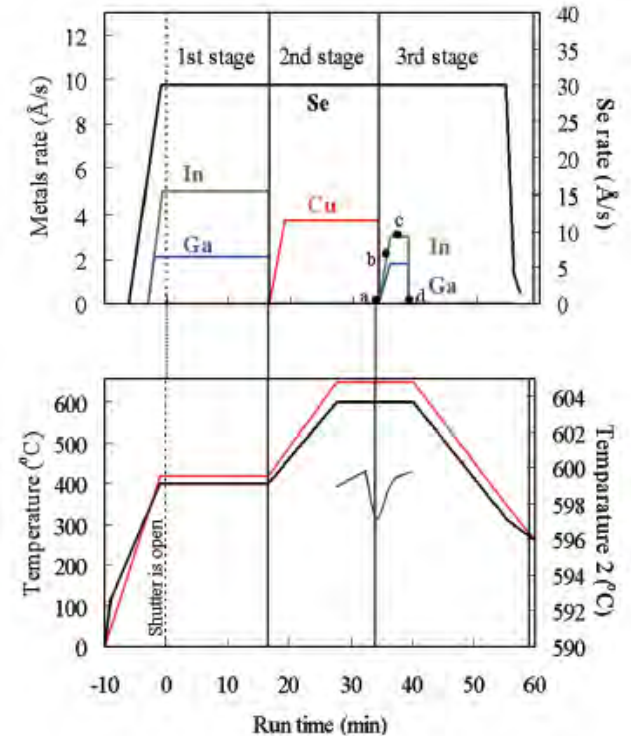


# CIGSの製造プロセス (2) 三段階法

第一段階: 比較的低い400 °C程度の基板温度でIn,Ga,Seを蒸着して(In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>膜を形成します。

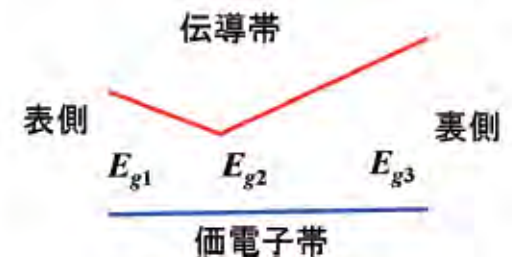
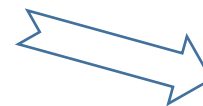
第二段階: 基板温度を600 °C程度まで上昇させてCuとSeを蒸着して膜全体をCu過剰(Cu/(In+Ga) > 1)組成にします。

第三段階: 再びIn,Ga,Seを照射して膜の最終組成をCu不足(Cu/(In+Ga) < 1)にします。

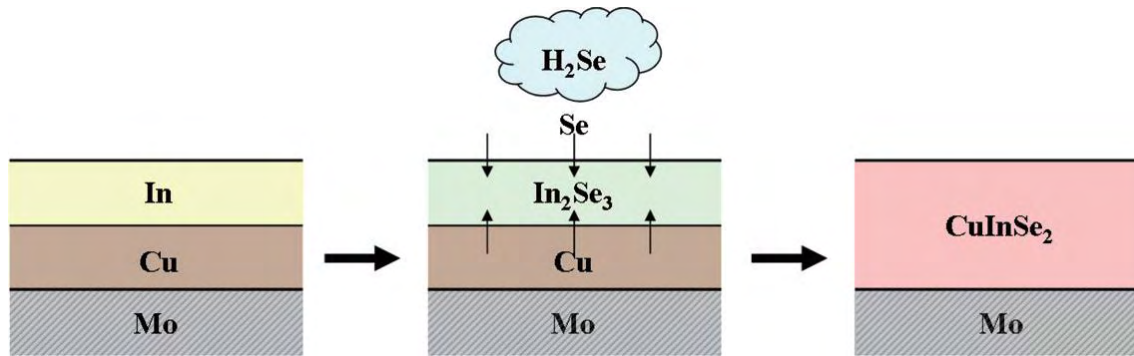


ダブルグレーデッドバンドギャップにより、開放端電圧( $V_{oc}$ )と短絡電流密度( $J_{sc}$ )の両方を大きくできる。

和田: 日本結晶成長学会誌Vol. 36, No. 4  
(2009) 282による



# CIGSの製造プロセス (3) セレン化法

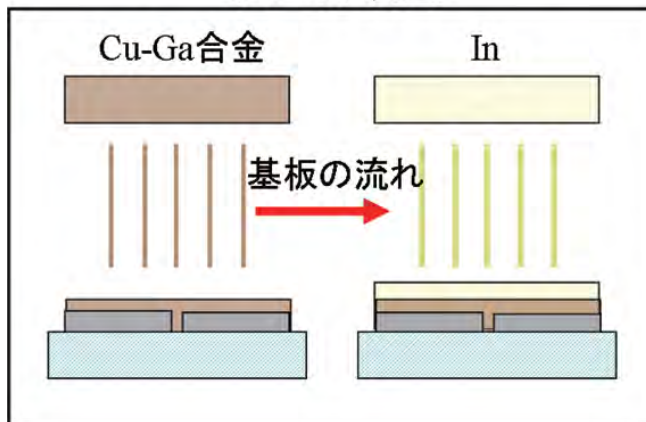


Mo 裏面電極の上にCu, In の順に金属膜を形成.

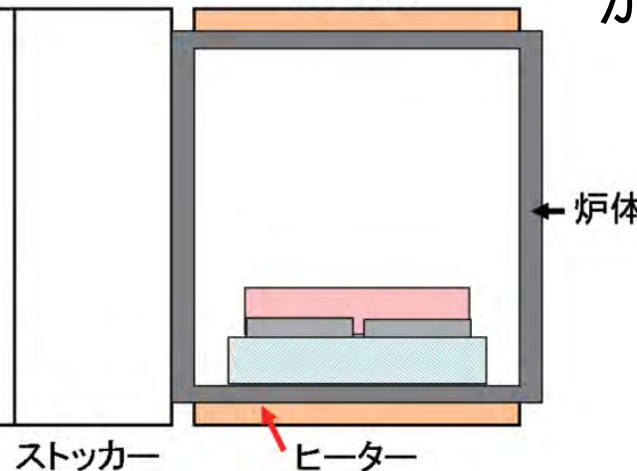
その積層膜を $H_2Se$  ガス中で熱処理→まず表面のIn が $H_2Se$  と反応して $In_2Se_3$  が生成.

次に, その $In_2Se_3$  中に裏面からCu が, 表面からSe が拡散して次第に $In_2Se_3$  がCISに変化。

金属プリカーサー膜製膜工程  
(スパッタ装置)



セレン化/硫化工程  
(反応炉)



和田: 日本結晶成長学会誌Vol. 36, No. 4  
(2009)282による

# CIS太陽電池の接合

CIS系太陽電池には、p-CuInSe<sub>2</sub>とCBD(化学浸漬法)n-CdS、n-ZnS等のヘテロ接合が用いられます。

n-CdSをCBD成膜する際にII族元素がCIS中に拡散し、CuInSe<sub>2</sub>内にburied junctionを形成しており、純粹のヘテロ接合ではないと考えられている。

単結晶CISで効率がでないのは、CIS結晶にCdSをエピしても、buried junctionができないことが一因かもしれません。

接合界面のバンドプロファイルについては、仁木らが詳細な研究をしています。(日本セラミクス協会編「太陽電池材料」5.3節)これによれば、CdS/CIGS界面での伝導帯のバンド不連続は、Ga組成が25%付近だと0.2-0.3eVであるが、40-50%では、バンド不連続が0になり、さらに増加すると負になるとのことです。

# CIGS太陽電池の課題

CIGS 太陽電池の最高の変換効率は1.1 ~ 1.2 eV の $E_g$ をもつ Ga/(In+Ga)比の膜で得られています。

単接合太陽電池での理想的な $E_g$ である1.4 eV を持つCIGS 膜を用いれば、20 %を大きく越える変換効率が期待されます。

しかし、現実には、Gaの組成比が増加すると結晶性が低下するという問題もある。また、高効率が得られているのは、薄膜においてバンドギャップの勾配をつけたものに限られているというのも本質的な問題がありそうです。

和田は、今後シングルセルで変換効率25 %、タンデムセルで40 %という高い目標を達成するためには、CIGS という多元系半導体を十分に理解して、基礎および応用の両面にわたって幅広く研究開発を推進していくことが必要であると述べています。

## 7. これからの太陽電池

# CIGSタンデムセルの課題

CIGS系タンデムセルの理論変換効率の図から、上部セルの $E_g$ が1.6~1.8eV、下部セルの $E_g$ が0.9~1.2eVの範囲で25%以上の変換効率が期待されます。

CIGS系タンデム太陽電池の実現には多くの課題があります。

- 上部セルの高効率化(16%以上)

- 上部セルの高透過率化

- 下部セルを損傷しない成膜法の開発

- 電流マッチング

(日本セラミクス協会編「太陽電池材料」5.4節)

# CZTSって何？

クラーク数を30位まで掲げます。クラーク数から見るかぎり、次世代においてもシリコンが最重要な太陽電池材料であり続けることは間違いないでしょう。

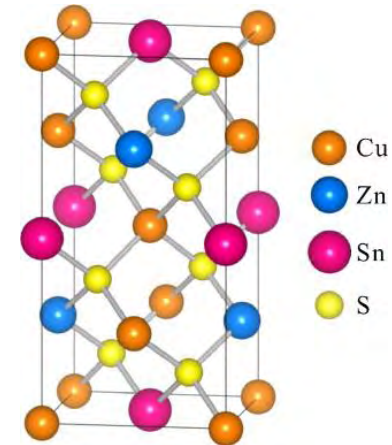
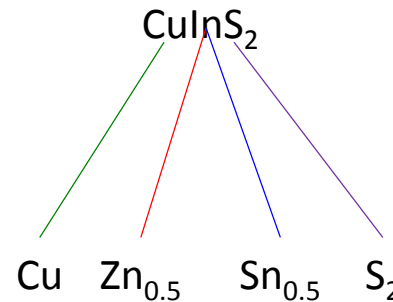
CIGSについても、かろうじて銅(Cu)が25位に入っているだけなので、インジウム(In)に代えてスズ(Sn、30位)と亜鉛(Zn、31位)を使う $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ という4元化合物に置き換える研究が始まっています。Copper zinc tin sulfideの頭文字です。

結晶構造はKesterite構造です。因みにKesteriteとは $\text{Cu}_2(\text{Zn,Fe})\text{SnS}_4$ という鉱物です。

表1 クラーク数

順位	元素	クラーク数	順位	元素	クラーク数	順位	元素	クラーク数
1	酸素(O)	49.5	11	塩素(Cl)	0.19	21	クロム(Cr)	0.02
2	ケイ素(Si)	25.8	12	マンガン(Mn)	0.09	22	ストロンチウム(Sr)	0.02
3	アルミニウム(Al)	7.56	13	リン(P)	0.08	23	バナジウム(V)	0.015
4	鉄(Fe)	4.70	14	炭素(C)	0.08	24	ニッケル(Ni)	0.01
5	カルシウム(Ca)	3.39	15	硫黄(S)	0.06	25	銅(Cu)	0.01
6	ナトリウム(Na)	2.63	16	窒素(N)	0.03	26	タングステン(W)	0.006
7	カリウム(K)	2.40	17	フッ素(F)	0.03	27	リチウム(Li)	0.006
8	マグネシウム(Mg)	1.93	18	ルビジウム(Pb)	0.03	28	セリウム(Ce)	0.0045
9	水素(H)	0.87	19	バリウム(Ba)	0.023	29	コバルト(Co)	0.004
10	チタン(Ti)	0.46	20	ジルコニウム(Zr)	0.02	30	スズ(Sn)	0.004

アメリカの地質学者クラークが算出した地球上の地殻表層部(地表部から海面下約16kmまでの岩石圏93.06%、水圏6.91%、気圏0.03%)に存在する元素の割合を質量パーセントで表した指数。この地殻表層部の質量は地球全質量の約0.7%にあたる



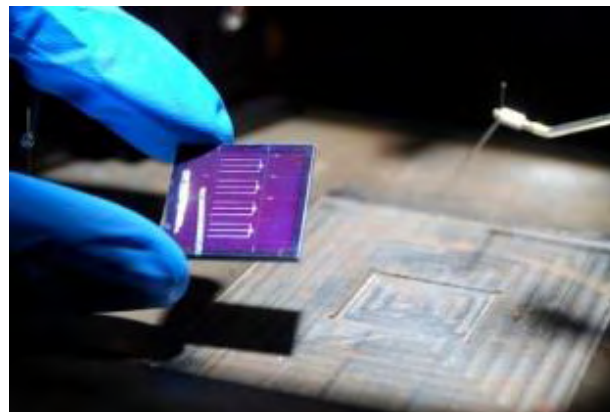
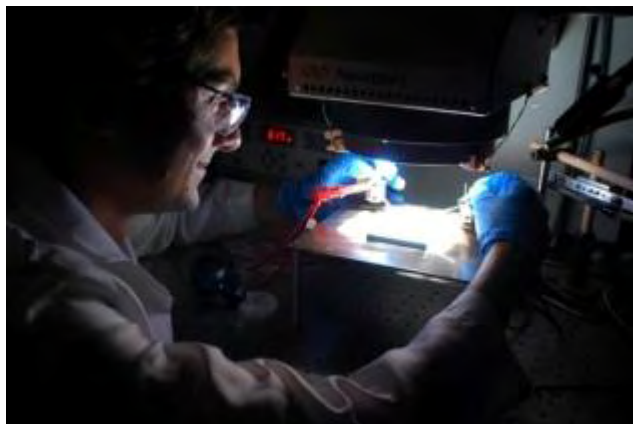
# CZTSで世界最高効率12.6%



【東京ー2013年12月10日】

ソーラーフロンティアは、IBMコーポレーション、東京応化工業株式会社とのCZTS太陽電池に関する共同研究において、CZTS太陽電池セル(0.42cm<sup>2</sup>)でのエネルギー変換効率が12.6%(米ニューポート社測定[1])に達しましたのでお知らせします。これまでの世界記録は、今回同様の共同研究チームで達成した11.1%(2012年8月当社発表済み)で、わずか一年での世界記録更新となります。

今回の研究成果は、論文誌*Advanced Energy Materials*に11月27日付で掲載済みです[2]。



写真は  
2012年8月30日  
プレスリリース

写真提供：IBMコーポレーション(www.research.ibm.com)



# 有機太陽電池・色素増感太陽電池とは？

いずれも、有機物の分子内の光励起による電子・ホール対の生成を使っています。

有機半導体は、無機の半導体とちがって本質的に高抵抗です。

n型、p型のいずれもドーピングによってキャリアが生成されるのではなく、電極の仕事関数との関係で、電子受容体(n型半導体)になるか、電子供与体(p型半導体)になるかが決まるのです。

電極 | DDDDD | AAAAA | 電極  
↓ 光励起

電極 | DDDDD<sup>+</sup> | A<sup>-</sup>AAAA | 電極  
↓ 電荷輸送

電極 | D<sup>+</sup>DDDD | AAAAA<sup>-</sup> | 電極  
↓ 起電力発生

(+)電極 | DDDDD | AAAAA | 電極(-)  
↓ \_\_\_\_\_ 電流発生 \_\_\_\_\_ ↑

D: 電子供与体(p型); A: 電子受容体(n型)

# 有機太陽電池の仕組み

電子供与体(p)を光励起するとHOMOにあった電子がLUMOに上がる。

電子供与体(p)のLUMOから電子受容体(n)のLUMOへ電子が移動し、電荷分離状態が達成される。

この状態で、電子供与体(p)のHOMOにホールがあり、電子供与体(n)のLUMOに1つ電子が入っている。

ホールはエネルギーダイアグラムの上へ向かって障壁なく流れ、電子供与体分子から仕事関数の大きなITO電極へ到達する。

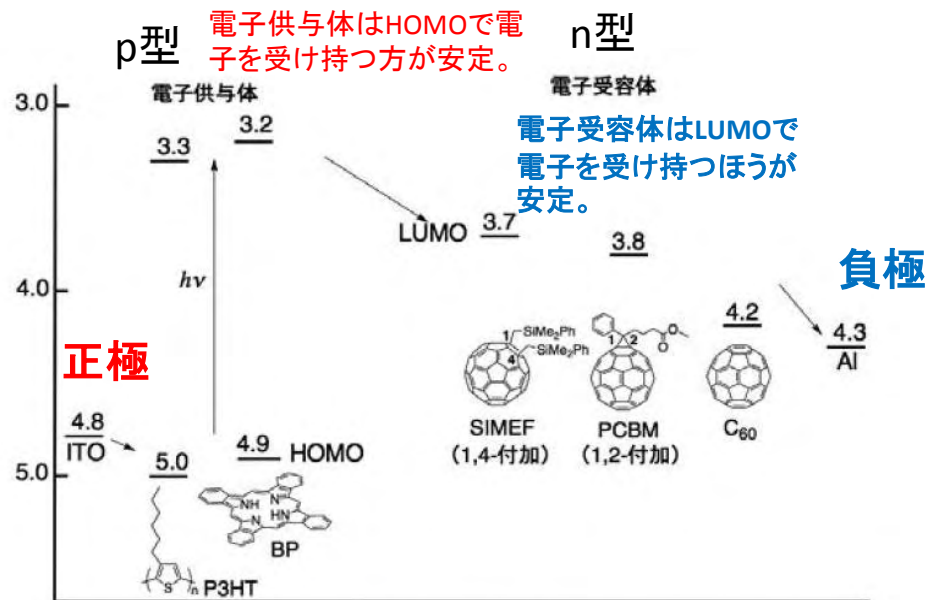


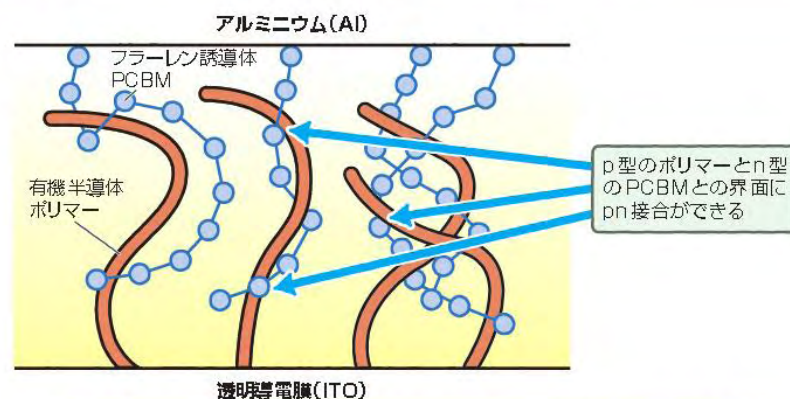
図 有機薄膜太陽電池のエネルギーダイアグラム

- 電子は、電子受容体のLUMOから仕事関数の小さなAl電極に捕捉される。

# 塗布型有機太陽電池

- 最もよく使われているのがバルクヘテロ型太陽電池です。
- 塗布型太陽電池では、無機太陽電池のようにp型領域とn型領域とははっきりと分離されておらず図に示すように両者が絡み合った**バルクヘテロ構造**をとります。
- 両材料の界面のみが光を電気に変換するのに寄与しており、電極との仕事関数の関係で、電子ホールを分離できるのです。

図1 バルクヘテロ構造有機太陽電池の内部構造の模式図



バルクヘテロ型有機太陽電池では、透明導電膜ITOをつけたガラス基板の上に、電子受容体(p型)の有機半導体ポリマーと電子供与体(n型)のフラーレン誘導体PCBMとの混合物を塗布し、裏面電極としてアルミニウムをつける。照射によって、有機半導体で光キャリアのペアが生じ、ポリマーとPCBMが絡み合っていて接触する界面の内蔵電位差で分離され、ITOがマイナス、アルミニウムがプラスになる

# 色素増感太陽電池

- 光をあてると色素分子の電子が光エネルギーをもらって色素の励起分子軌道LUMOに入る。LUMOのエネルギー準位は、酸化チタンの伝導帯の底よりエネルギーが大きいので、電子は伝導帯に移り、透明電極を経て外部回路に流れる。
- 一方、色素の分子軌道HOMOに残されたホールは、ヨウ化物イオン $I^-$ に移ってヨウ素になる。ヨウ素は対極から電子をもらって還元され、 $I^-$ に戻る。
- 外部回路を接続しないときの開放電圧 $V_{oc}$ は、n型側のフェルミ準位(酸化チタンの伝導帯の底)とp型側のフェルミ準位(ヨウ素の酸化還元電位(REDOX))の差となる。

図1 色素増感太陽電池の構造と動作原理

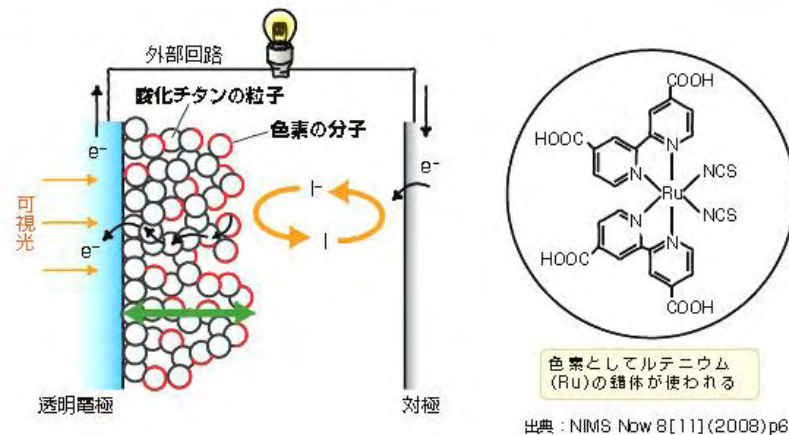
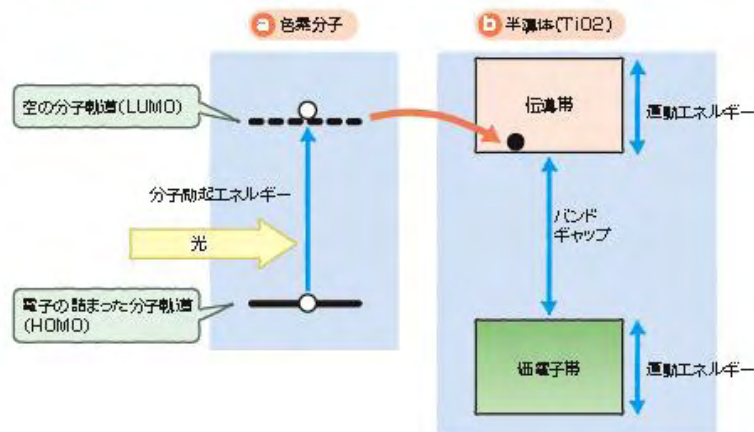


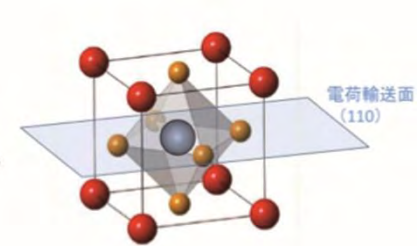
図1 分子と半導体のエネルギー準位の違い



# 有機無機ペロブスカイト 太陽電池



- X: ハロゲン
- A:  $\text{CH}_3\text{NH}_3$
- B: Pb



- 有機無機ハイブリッド構造のペロブスカイト結晶を光吸収に用いることにより、太陽電池のエネルギー変換効率が16%を超える効率に届いている。
- $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  (X = ハロゲン) の組成から成るペロブスカイトは、溶液塗布と乾燥によって容易に薄膜が形成される。
- 1990年代に我が国でそのユニークな物性と発光特性が研究され、2009年にこれを光電変換に使った最初の研究を宮坂らが報告した。
- 当初は色素増感太陽電池の固体増感剤として酸化還元電解液を組み合わせた系であったが、2012年にはこれを有機の正孔輸送材料と接合した全固体の素子で10%を超える効率を実現した。
- その後、層構成に改良が加えられて1ヵ月単位で高効率化の成果が続々と発表され、2013年にはScience誌のBreakthrough of the yearに選ばれている。高効率の原資となっているのは強い光吸収(集光)能力と、1Vを超える高い出力電圧である。

# 量子ドット太陽電池って？

量子ドットは図2(a)のように、バンドギャップの大きな半導体に囲まれたバンドギャップの小さな半導体のナノサイズの箱です。電子の波は(b)のように、3方向に閉じ込められて運動の自由度がなくなるために、(c)エネルギー状態は幅のない量子準位になります。

この量子準位のエネルギーは、量子ドットのサイズ $w$ を変えることによって制御できます。また、図3の(a)のように、量子ドット超格子をつくると、(b)のような**ミニバンド**が生まれ、バンドギャップを人工的に制御することができます。

光をあてると、いくつかのミニバンド間の遷移が起きるので、広い波長範囲の光を吸収し、効率よく電気に変えることができます。理論的には60%を超える高効率率が期待されていますが、サイズのそろったドットを均一に並べることが技術的に難しく、いかに外部に電気を取り出すかも未解決で、高効率を実現するまでの道のりはまだまだ長いようです。

図2 量子ドットの電子状態

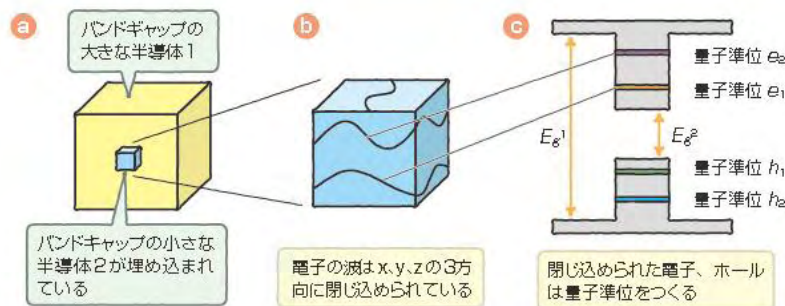
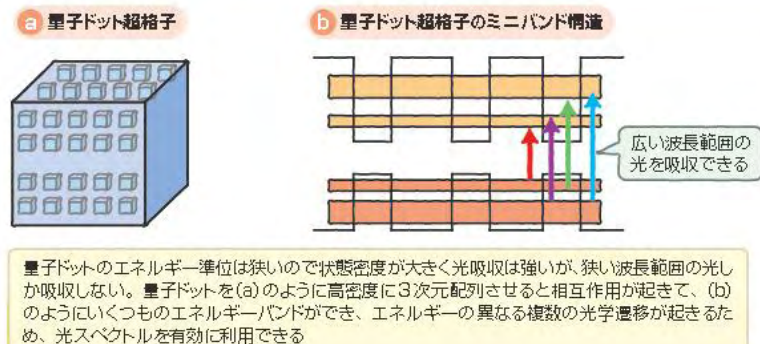


図3 量子ドット超格子の電子状態



# MEG太陽電池って？

MEGとはmulti exciton generation(多励起子生成)

NRELのノジック、ビヤドらは、100%を超える外部量子効率(EQE)をもつ太陽電池を開発しました[1]。(高いEQEは必ずしも高い変換効率を意味しません、なぜなら電力の変換は、出力電流と出力電圧の両方に依存するからです。)

鍵となるプロセスである「多励起子生成(MEG)」が半導体ナノ結晶、半導体量子ドットにおいておきることは、ノジックが2000年代初期に予言していました[2]。

Q.E. Semonin et al. Science 334, 1530 (2011)

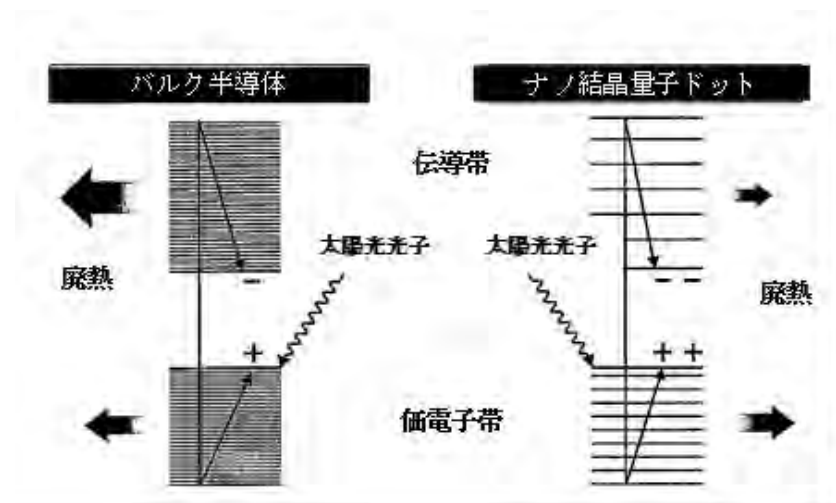
A.J. Nozik: Physica E 14, 115 (2002)



# ナノ結晶ドットにおけるMEG

- MEGは、衝突電離の仲間です。高速で走行する電子が他の電子に衝突して、その電子を伝導帯に励起する現象に相当します。衝突電離現象は、バルクの半導体太陽電池にはあまり大きな効果をもたらしません。なぜなら、強く励起された電子はフォノンを励起してエネルギーを失うからです。
- 太陽電池がバンドギャップより高いエネルギーの光子を吸収すると、1つの光子は高エネルギーの電子正孔対を生成します。左図に示すバルク太陽電池では電子も正孔も非常に短時間のうちに伝導帯底と価電子帯頂に緩和して、もとのエネルギーの大部分を熱として失います。
- これに対し右図に示すナノ結晶系の太陽電池では、伝導帯の電子状態はバルクより大きなエネルギー間隔をもって分離しており、フォノンを媒介した冷却は起こりにくく、第2の電子を衝突励起することができるのです。

D. J. Binks: Phys. Chem. Chem. Phys. 13, 2693 (2011)





# 太陽電池のエネルギー回収期間は？

- エネルギーペイバックタイム(エネルギー回収時間)とは、太陽電池を製造するために使うエネルギーを太陽光発電によって回収するために、どのくらいの時間が必要かを表す数値です。エネルギーペイバックタイムは、システムを構成するすべての機器類の製造エネルギーと、システムから毎年得られる発電量の比率から計算されます。
- 製造エネルギーは製造技術の改良、製造規模の拡大などによって次第に減少します。後者は太陽電池の変換効率やシステムの利用効率の改善によって増大するため、技術革新の途上にある太陽光発電のペイバックタイムは年々急激に短くなっています。

表1 太陽電池の製造に要するエネルギーと住宅用太陽電池(3kW)

太陽電池種類	多結晶シリコン	薄膜シリコン	CdTe	CIGS
製造に必要なエネルギー(GJ/kW)	15	10	9	8
エネルギーペイバックタイム(年)	1.5	1.1	1.0	0.9

(製造規模100MWの場合)

## 8.固定価格買い取り制(FIT)導入の効果 と課題

# 電源別発電電力量構成比

2015年5月22日  
電気事業連合会

## 電源別発電電力量構成比

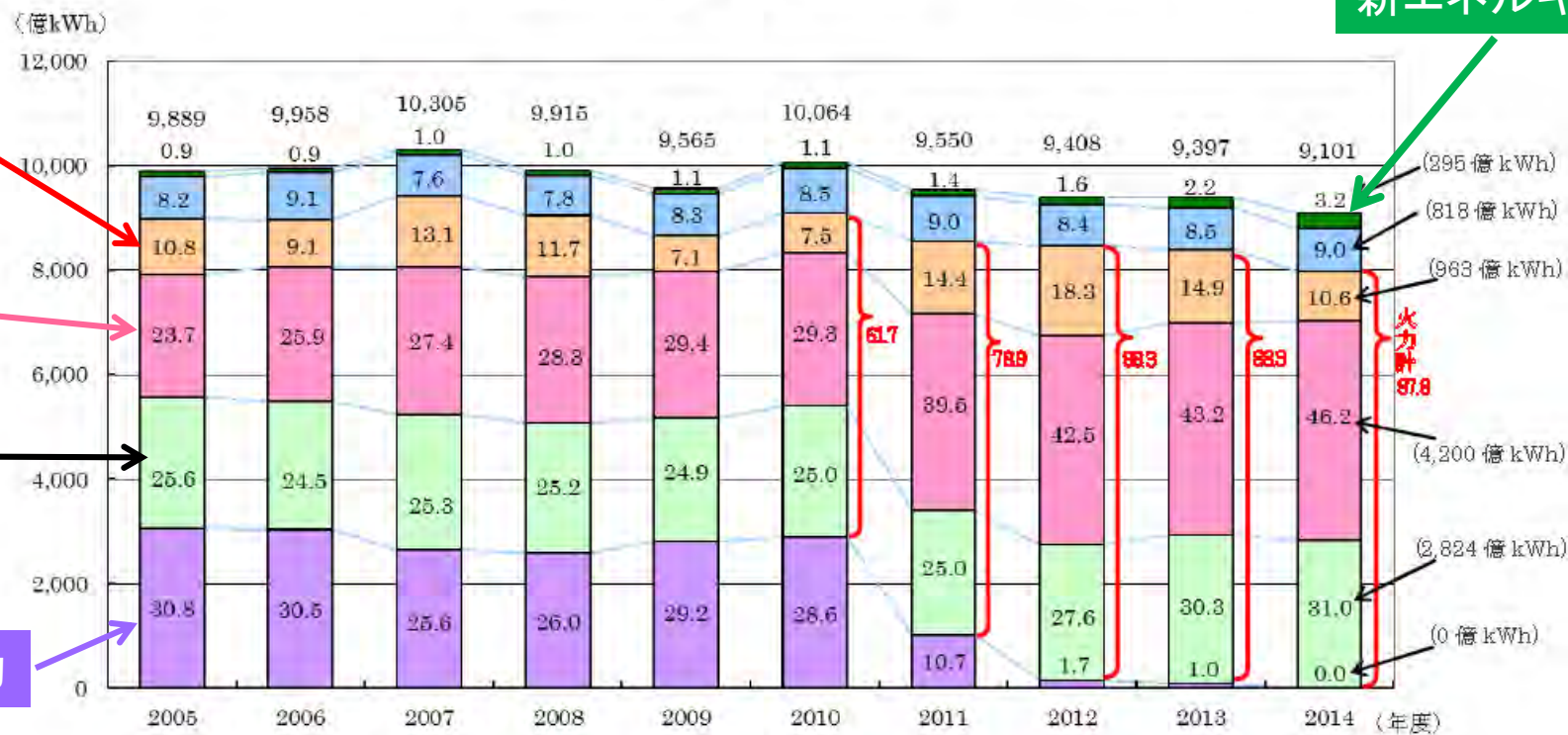
新エネルギー

石油

LNG

石炭

原子力



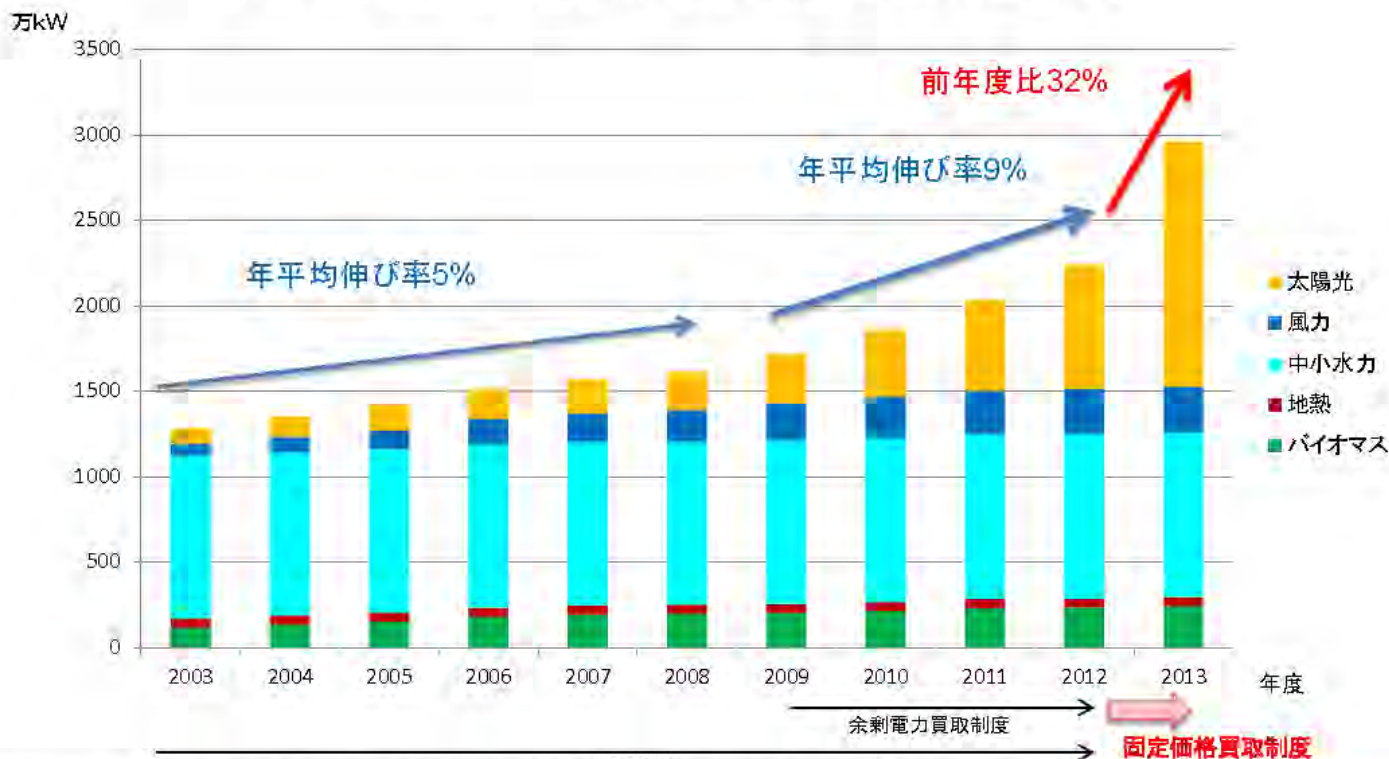
原子力
  石炭
  LNG
  石油等
  水力
  地熱及び新エネルギー

(注) 10 電力計、他社受電分を含む。石油等には LPG、その他ガスを含む。  
 グラフ内の数値は構成比 (%)。四捨五入の関係により構成比の合計が 100%にならない場合がある。

# 再生可能エネルギー等（大規模水力除く）による設備容量の推移

- 2009年に500kW未満の太陽光を対象に余剰電力買取制度を開始して以降、大規模水力を除く再生可能エネルギー等による設備容量の年平均伸び率は5%から9%に上昇。
- 2012年7月に固定価格買取制度を開始して以降は、2014年3月末時点で既に2955万kWに達するなど、設備容量は前年度比32%上昇。

【再生可能エネルギー等（大規模水力除く）による設備容量の推移】



(JPEA出荷統計, NEDOの風力発電設備実績統計, 包蔵水力調査, 地熱発電の現状と動向, RPS制度・固定価格買取制度認定実績等より資源エネルギー庁作成)

※2013年度の設備容量は2014年3月末までの数字

# 各地に次々登場するメガソーラー

図1 稼働中または建設中のメガソーラー発電所



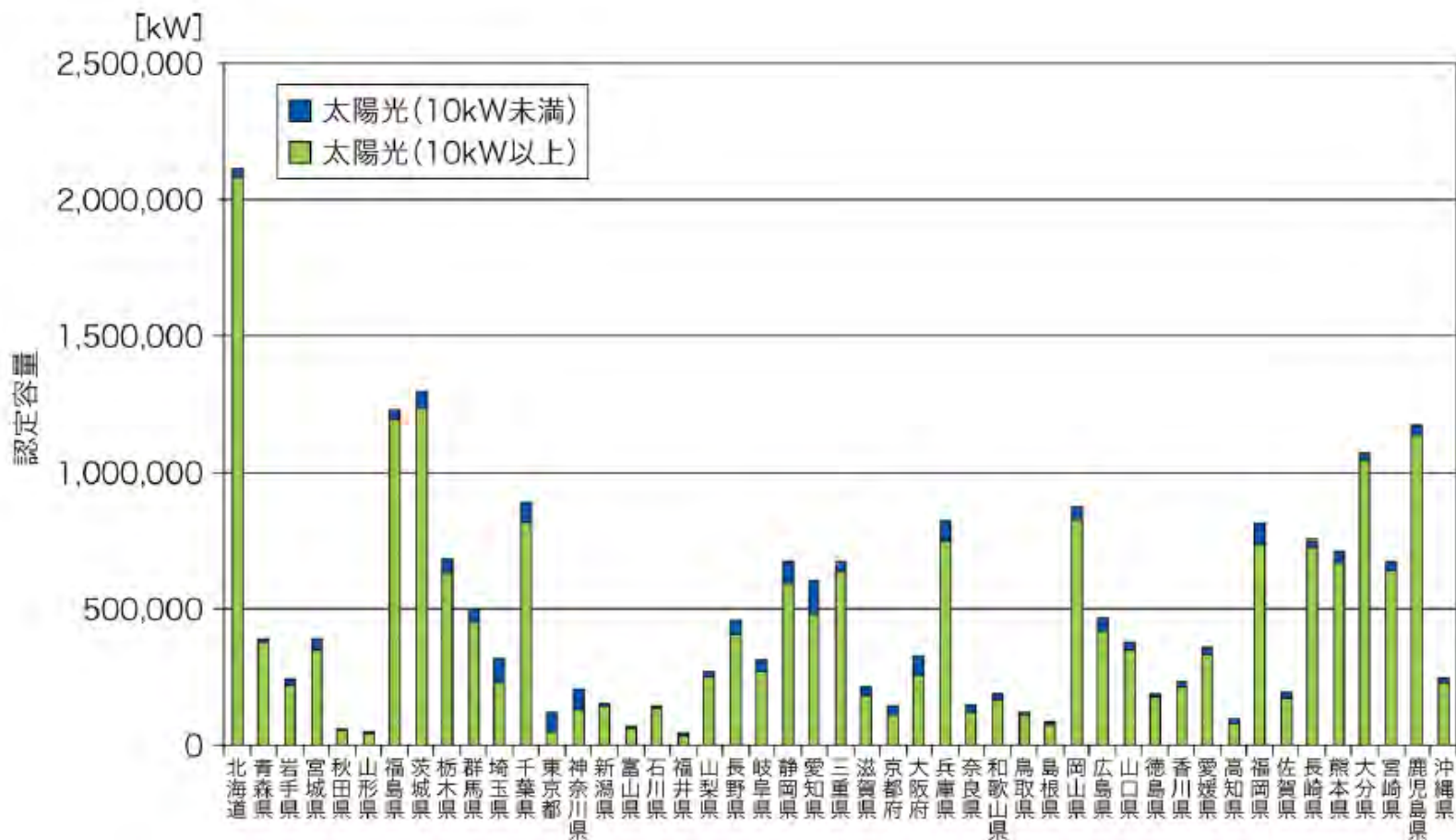
東京電力と川崎市が共同で建設している浮島太陽光発電所の俯瞰図

# 再生可能エネルギー導入実績

## 固定価格買い取り制度導入前後

分類	FIT 導入前	FIT導入以降		
	積算計(- 2012.6)	2012.7- 2013.3	2013年度	2014年度
太陽光 (住宅用)	4.7GW	0.969GW	1.307GW	0.821GW
太陽光 (非住宅用)	0.9GW	0.704GW	5.735GW	8.572GW
風力	2.6GW	0.063GW	0.047GW	0.221GW
小規模水力	9.6GW	0.002GW	0.004GW	0.083GW
バイオマス	2.3GW	0.021GW	0.045GW	0.158GW
地熱	0.5GW	0.01GW	0	0.004GW
総計	20.6GW	1.769GW	7.13GW	9.86GW
		18.75GW		

# 地域差が大きい太陽光導入



(a) 太陽光発電設備導入状況(都道府県別認定設備容量)

# 系統への接続容量の限界も顕在化

- 太陽光発電のような天候による出力変動のある電源が大量に接続された場合、安定した電力供給に支障を来す可能性がある。欧州では、そのような例がすでに発生し問題化している。
- 我が国においても、北海道における大規模太陽光発電の接続については限界に近付きつつあるとされる。
- 都道府県別の導入予定量（固定価格買取制度，認定設備容量）は、特定地域に偏っている様子が分かる。
- こうした状況を踏まえ，資源エネルギー庁および北海道電力では，①接続可能量拡大のための特定地域に限った接続条件の改正，②大型蓄電池の変電所への導入による再エネ受け入れ枠の拡大，③電力システム改革に則った広域系統運用の拡大，の対応策を採ることとした



# どこまで下がる？発電コスト

## 非住宅用システム メガソーラーなど

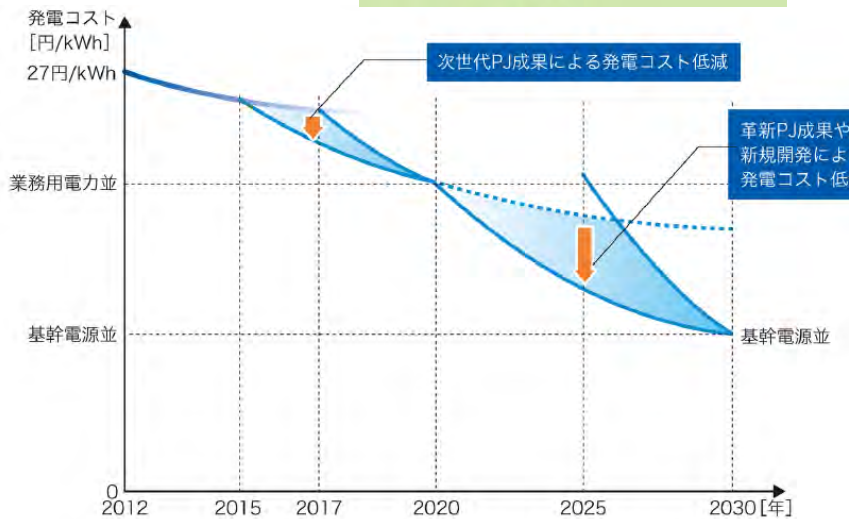
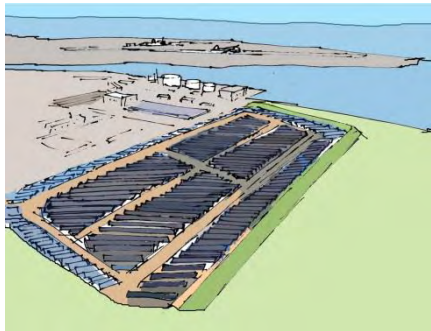


図 2-53 非住宅用システム（メガソーラー）の発電コスト低減シナリオ

出典：NEDO 作成資料

## 住宅用システム

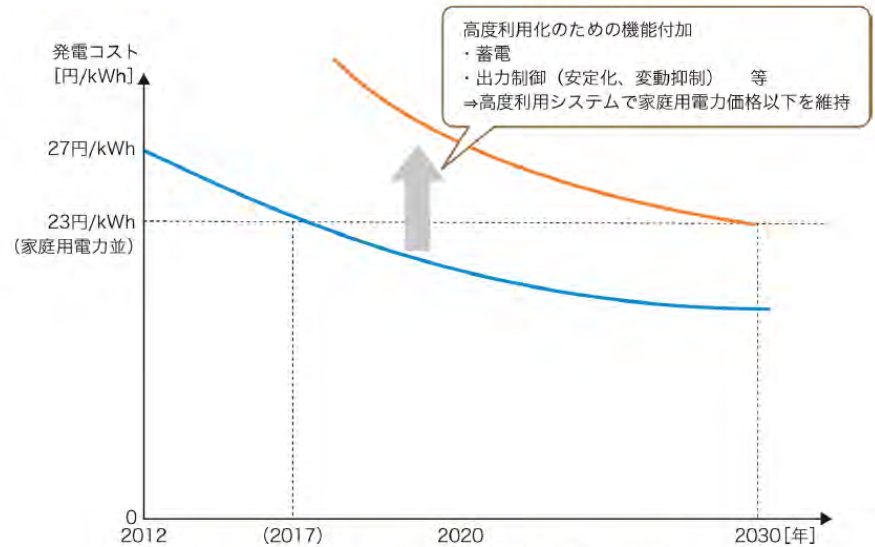


図 2-54 住宅用システムの発電コスト低減シナリオ

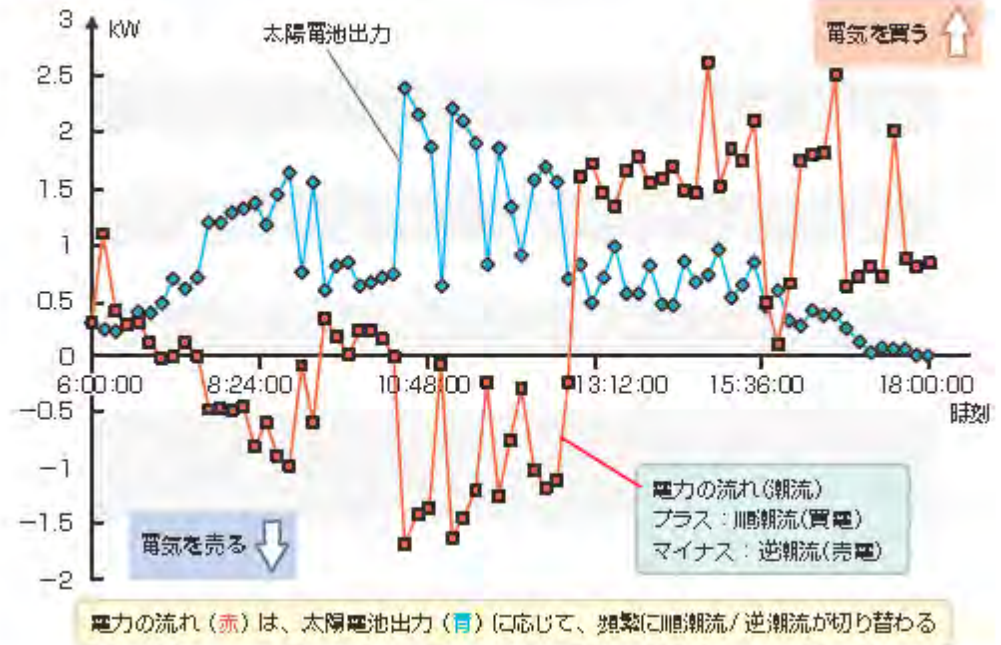
出典：NEDO 作成資料

# 太陽電池は不安定な電源

## 個別系統連系は不安定な発電所

- 通常の家計用太陽電池の場合、各戸が発電した電力を戸別で消費した残りの余剰電力を系統に供給しますが、図に例示するように、各戸で戸別に系統連携すると、各戸からの出力と系統との間の電気の流れ(潮流)は、逆潮流(売電)と順潮流(買電)が頻繁に切り替わります。
- つまり、余剰のある場合は系統に供給されますが、不足だと系統から購入することになりますから、出入りの激しい不安定な発電所であることがわかります。

図1 戸別系統連系は不安定な電源(1996年8月9日筆者測定)



- 戸別にパワーコンディショナーを置くのも非効率です。また、各戸が余剰電力を系統へ送る際に、送電の総電力が限界値を超えると、システム効率が低下します。

## 9. 太陽光発電の将来

# 世界の太陽光発電導入推移

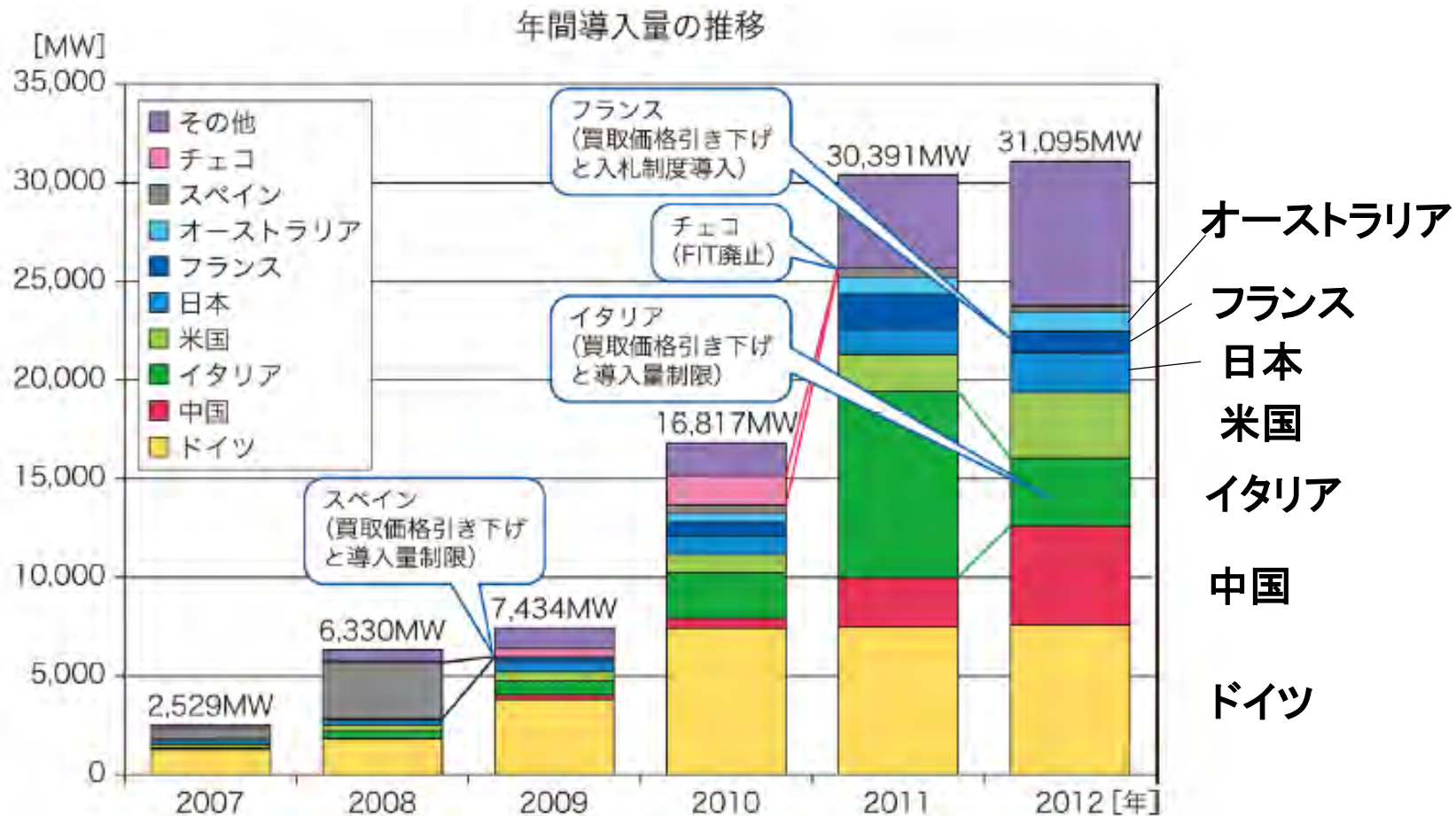



図 2-31 世界の太陽光発電の導入量推移

# 再生可能エネルギー・太陽光発電導入目標

	再生可能エネルギー全体	太陽光発電
日本	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「2030年のエネルギー需給展望」（総合資源エネルギー調査会 需給部会，2005）において，2010年の新エネルギーの対一次エネルギー供給比を，3.0％に引き上げる導入目標を設置。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2008年の福田ビジョンにおいて「2020年までに現在の10倍，2030年までに40倍」，2009年の麻生総理（当時）スピーチにより，「2020年までに現在の20倍」という目標を設定。</li> </ul>
EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2007年に，2020年までにEU全体の最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合を20％とする戦略を決定。</li> <li>・2009年の「再生可能エネルギー導入促進に関する欧州指令」で，上記目標達成のための国別目標値を設定。</li> <li>・欧州連合加盟各国は国家再生可能エネルギー行動計画（NREAP）を提出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欧州再生可能エネルギー評議会は，左記指令の目標を達成するために必要な太陽光発電導入量を，2010年に20 TWh，2020年には180 TWhと試算。</li> <li>・欧州エネルギー技術戦略計画（SET-Plan）において，2020年までにEUの電力消費量の12％を太陽光発電でまかなう目標を設定。</li> <li>・NREAPによる2020年の導入目標は80 GW。</li> </ul>
米国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多くの州で，電力部門における再生可能エネルギー利用義務制度（RPS）を策定。オバマ大統領は，2025年までに25％導入という連邦RPS制度を提案。</li> <li>・オバマ大統領は「New Energy for America」で再生可能エネルギー由来の電力量割合を，2012年に12％，2025年に25％とする目標を発表。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・RPSについて，16の州が太陽光発電でまかなうべき電力の割合を規定。</li> </ul>
中国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「再生可能エネルギー中長期発展計画」（2007年9月），「再生可能エネルギー発展第11次5ヵ年計画」（2008年3月）において，エネルギー消費総量に占める再生可能エネルギー消費量の割合を，2010年までに10％に，2020年に15％に引き上げる目標を設定。</li> <li>・第12次5ヵ年計画において，2015年までにエネルギー消費量に占める新エネルギーの割合を9.5％にするという導入目標を設定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・左記「中長期発展計画」において，2020年までに太陽エネルギー利用の発電設備容量を2.0 GW（うち太陽熱発電を0.2 GW）とする目標を設定。</li> <li>・第12次5ヵ年計画において，太陽エネルギー利用（太陽光・太陽熱発電の合計）の発電設備容量を21 GW，2020年50 GWを目標として設定。</li> </ul>

# 日本におけるFIT買い取り価格と再生可能エネルギー導入状況

表 2-23 固定買取価格制度の買取価格・期間



太陽光	10kW以上	10kW未満	10kW未満 (ダブル発電)
調達価格	37.8円(36円+税)	38円(税込)	31円(税込)
調達期間	20年間	10年間	10年間

注：平成 24 年度までは、太陽光発電システムの買取価格は 10kW 以上 42 円、10kW 未満 42 円、ダブル発電（10kW 未満）は 34 円であった。

出典：資源エネルギー庁ホームページ

([http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/kakaku.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html)) より NEDO 作成

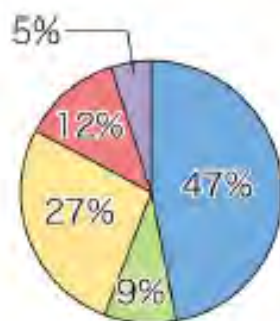
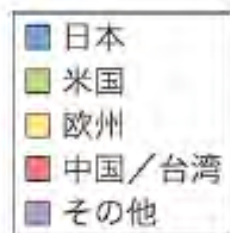
表 2-24 2013 年 7 月末までの再生可能エネルギー発電設備の導入状況

再生可能エネルギー発電設備	固定価格買取制度導入前	固定価格買取制度導入後	
	平成 24 年 6 月末までの累計導入量	平成 24 年度 (7 月～3 月末)	平成 25 年度 (4 月～7 月末)
太陽光(住宅)	約 470 万 kW	96.9 万 kW	55.2 万 kW
太陽光(非住宅)	約 90 万 kW	70.4 万 kW	169.1 万 kW

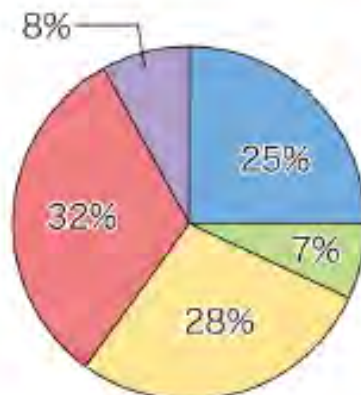
出典：資源エネルギー庁，2013/11/18 プレスリリース，

<http://www.meti.go.jp/press/2013/11/20131118003/20131118003-1.pdf> より NEDO 作成

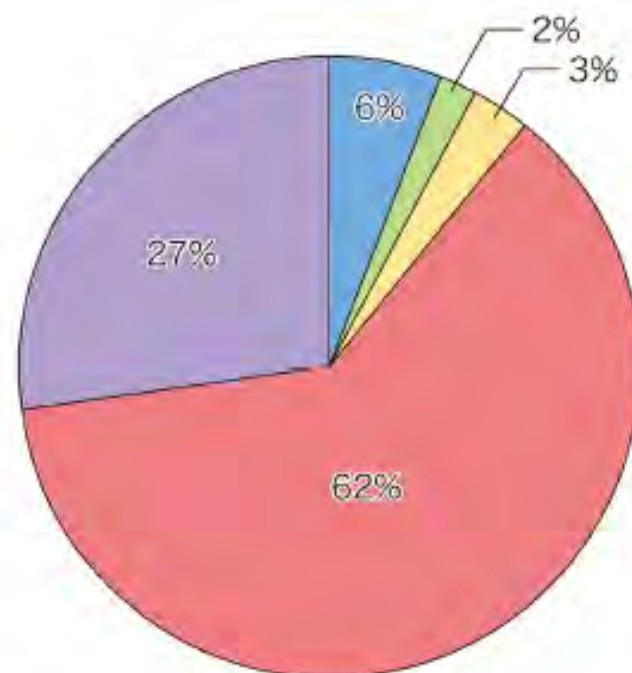
# どんどん下がる日本のシェア



2005年  
(合計1,758MW)



2007年  
(合計3,733MW)



2012年  
(合計31,898MW)

図 2-35 太陽電池セル生産量地域別シェアの推移

# NEDOのプロジェクト

## 第2章 太陽光発電

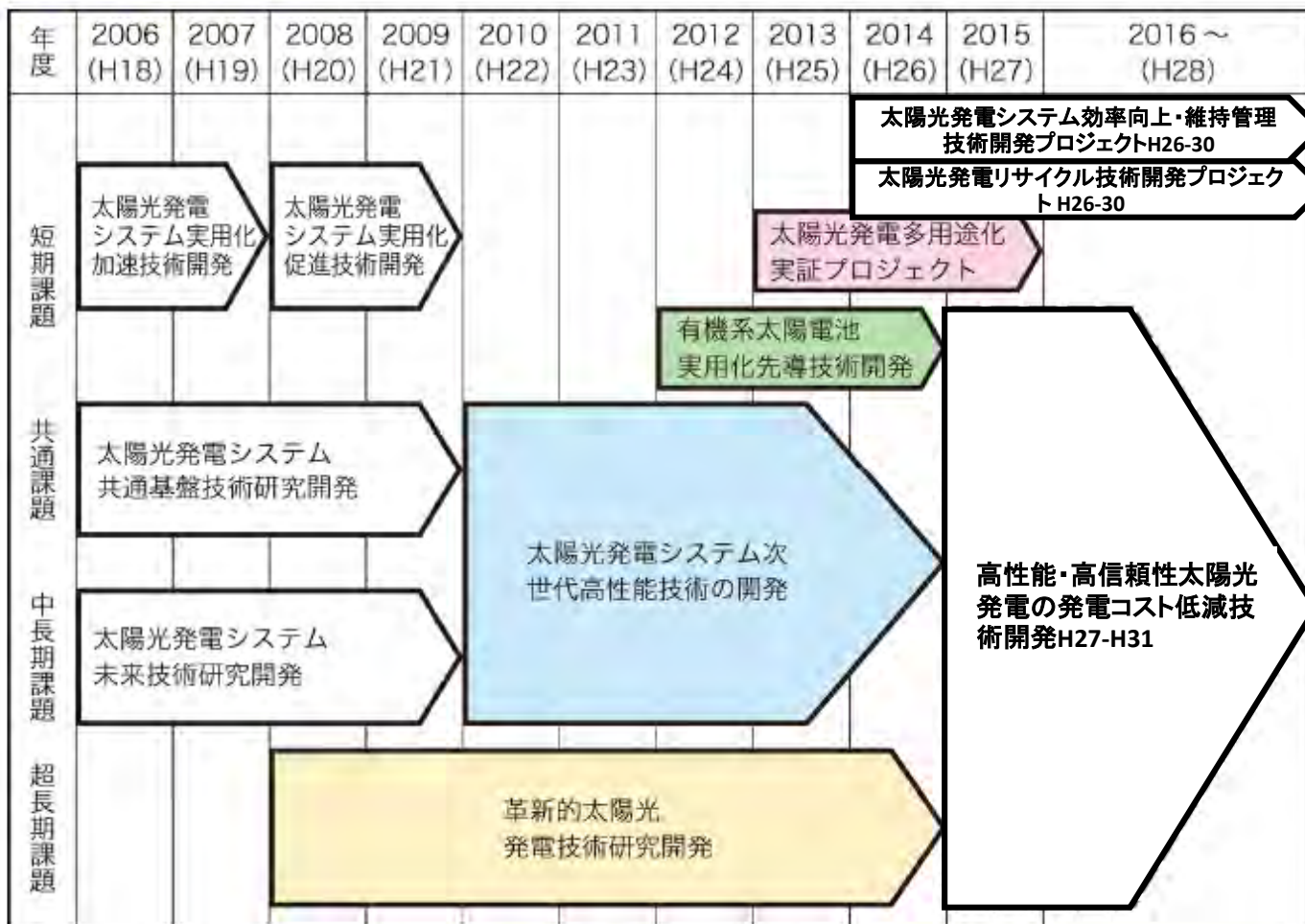


図 2-38 NEDO の太陽光発電技術開発プロジェクト



# 新たな付加価値の創造〈我が国の太陽光発電産業の競争力強化〉(1)川下展開の動き

- 固定価格買取制度の開始を受け、太陽光発電市場に新規参入する事業者が増えている。異分野からの参入も多い。
- これまで太陽光発電を支えてきたセル・モジュールメーカーも、発電事業への展開を急いでいる。これには、太陽電池モジュールの低価格化の進展が影響している。
- 太陽光発電分野の市場規模の推移を見ると、加減速はあるものの市場成長を続けていると評価できるが、生産量・出荷量の伸びに比べ、生産額・出荷額の伸びが小さい。これは「セル・モジュールを作って売る」市場に依存している場合は、市場の成長にいずれ限界がくることを示唆している。

# 新たな付加価値の創造〈我が国の太陽光発電産業の競争力強化〉(2)川下展開(発電事業へ)

- これまで、日本の太陽光発電市場は、住宅屋根置き型の太陽光発電システムを中心に発展してきた。2012年に開始した固定価格買取制度によって、当初から大規模な発電設備の設置が進むことは予想されていたが、当初の想定を超え、住宅屋根置き型以上「メガ」サイズ未満の中規模太陽光発電所(10～1,000kW未満)の設置申請が急増した。
- こうした新たなボリュームゾーンの誕生によって、工場・マンション・アパート・遊休地などのオーナーを対象とした販売・施工ビジネス、O&Mビジネス、保険商品などの新たなビジネスを生みつつある。また、一部の地域では住民が資金を出し合い、共同で太陽光発電所を建設し、売電収入を得るといった事例も増えつつある。
- 固定価格買取制度導入前の市場の主な担い手は大手のセル・モジュールメーカーやハウスメーカーであったが、固定価格買取制度導入後は業種を超えた参入、地場企業の参入が相次ぎ、産業全体の裾野が大きく広がりにつつある。

## 新たな付加価値の創造〈我が国の太陽光発電産業の競争力強化〉(3) 技術開発の方向性(太陽光発電を使いこなす)

- 太陽光発電産業・市場の動向を踏まえ、太陽光発電分野における新たな事業・産業創出を加速するためには、これまでと異なるアプローチが必要となってくる。すなわち、太陽光発電のための技術開発ではなく、太陽光発電を使うための技術開発である。発電コストとは異なる新たな高付加価値モジュールの開発や、新たな「使い方」の創造によって、価格競争からの脱却を目指す。
- こうした取り組みの第一歩として、NEDOでは、「有機系太陽電池実用化先導技術開発」を2012年度から開始している。このプロジェクトは、さまざまな付加価値創造が期待できる有機系太陽電池の実用化促進を主眼とした事業であり、さまざまな応用例が提案されている。

# スマートグリッドがもたらす電カイノベーション

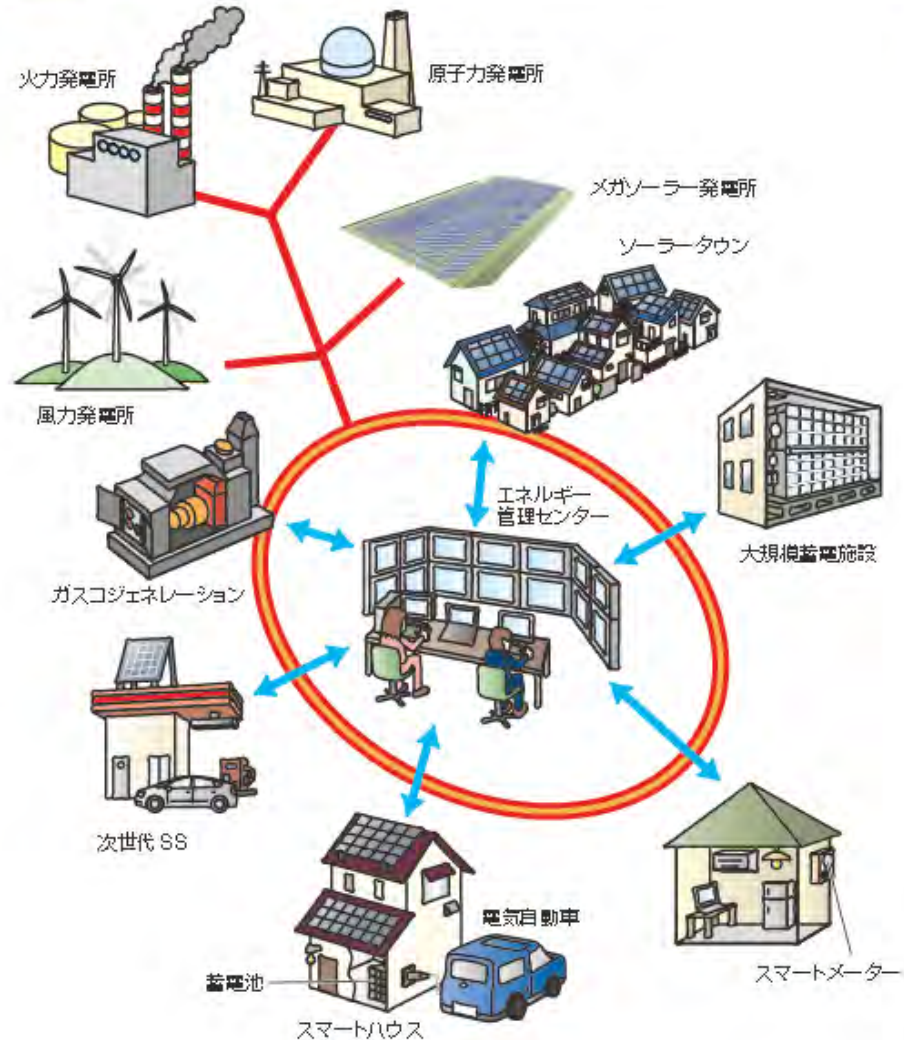
## スマートグリッドとは

- 太陽電池や風力発電など、絶えず変動する自然エネルギーが送電網(グリッド)に供給されると、電圧や周波数の変動を生じることがあります。また、多数の分散型電源から系統への逆潮があると、その付近で配電線の電圧が高くなって、せっかく発電した電力を系統に供給できないという事態が生じることがあります。これを防ぐために、専用の機器やソフトウェアを組み込んだITの技術を使って、供給側と需要側のミスマッチをなくすとともに、電気自動車の電池を利用するなど、蓄電機能を系統全体に分散することによって安定化を図るのが、スマートグリッド(賢い送電網)の考え方です。

## 自然エネルギー導入で注目されるスマートグリッド

- 現在では、この技術は停電を防ぐだけでなく、ピークシフト効果、自然エネルギー導入、電気自動車の充電インフラ整備などにも役立つというので注目され、世界中でスマートシティ、スマートコミュニティの実証実験が行われています。
- 図1は、スマートコミュニティの概念図です。スマートグリッド実証試験は、中国の天津、アラブ首長国連邦、韓国の済州島などで先行しましたが、日本でも横浜市、豊田市、けいはんな学研都市、北九州市の4地域で行われています。

図1 スマートコミュニティの概念図



# ソーラーブリーダー計画 太陽電池でつくった電気を世界中に

- サハラ砂漠を利用して太陽光発電を行い、地域に電力を供給する「サハラブリーダー計画(SSB)」という構想が日本学術会議に提案され、推進されようとしています。
- サハラでつくった電力を使って、サハラの豊富な砂( $\text{SiO}_2$ )からシリコン、および太陽電池をつくり、これによって太陽光発電所を増殖(ブリード)するのです。
- つくられた電力は、現地のエネルギー供給や海水淡水化による水供給に使われ、余剰電力は超伝導ケーブルで地中海を越えてヨーロッパに供給されます。このために科学技術ODAによって、日本とサハラ諸国が共同研究するのを支援しようとしています。
- 2010年に前科学技術振興機構理事長故北澤宏一氏はその著書で、サハラブリーダー計画こそ、日本の科学技術の世界への貢献として国際的に評価されるものだとしています

図2 科学技術ODAで推進を検討しているサハラブリーダー計画



サハラ砂漠に太陽光発電所を設置し、ここで発電した電力を使って、砂漠の豊富な砂( $\text{SiO}_2$ )からシリコンを取りだし、これを用いて太陽電池をつくり、これによって太陽光発電所を増殖(ブリード)する計画。ここで発電された電力は、現地のエネルギー供給や海水淡水化による水供給に使われ、余剰電力は超伝導ケーブルで、地中海を越えてヨーロッパに供給される

# おわりに

太陽電池の将来は、いかに低コスト、省資源で高効率のモジュールをつくるかにかかっています。

化合物半導体多結晶薄膜は、この候補として有力ですが、現在のところ未だに理論限界効率に達していません。ブレークスルーには、結晶欠陥の働きなどに関する基礎的な研究が必要です。

有機太陽電池・ペロブスカイト太陽電池など、塗布が可能な電池も開発されています。これらの電池は、低コストながら、寿命の問題が未解決です。今後の開発が求められます。

太陽光を系統に安定に供給するためには、スマートグリッドに搭載する大容量蓄電池の開発も求められています。

