



戦略的広報タスクフォース 科学リテラシー講座第1回

さきがけ次世代デバイス研究総括
研究広報主監
佐藤勝昭

戦略的広報タスクフォース2011 科学技術リテラシー教室について

- 科学の知識アップを目指す新たな取り組みとして、「科学リテラシー教室」をスタートしました。
 - JSTで働く皆さんは、「この技術ってどうなってるの？（”科学技術”振興機構で働いているんだよね。）」と、家族や友人から問われたことはありませんか？
 - 科学リテラシー教室では、話題になっている技術を取り上げて、専門家(なるべくJST関係者)を講師にお願いして、原理や仕組み、開発の歴史、最先端の状況など基礎から分かりやすく説明してもらうことになりました。
 - 佐藤勝昭がこの教室のオーガナイザを拝命しました。
 - この教室は、戦略広報TF以外のJST職員に開放します。

科学技術リテラシー教室 今後の予定



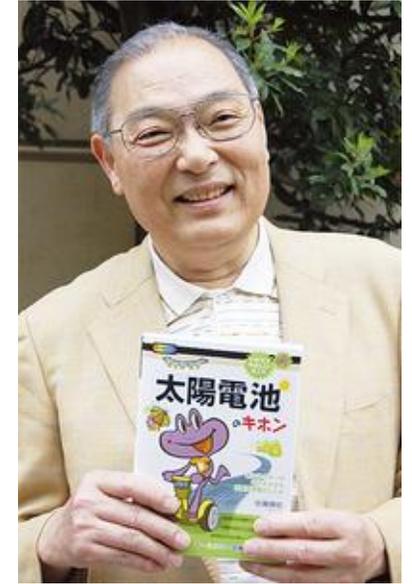
	時期	テーマ（予）	講師（予）
第1回	6月16日（木） ※本会	太陽電池のキホン	佐藤勝昭
第2回	8月	原子力発電	鳥井弘之
第3回	10月	life scienceの最前線	石井哲也
第4回	12月	超伝導の最近の話題	古川雅士
第5回	2月	立体視（3D）・脳の視覚情報処理メカニズム	未定

その他、話題の新技术などに応じて適宜開催予定。

戦略広報タスクフォース
科学リテラシー教室第1回

太陽電池のキホン

— 半導体デバイスとしての太陽電池 —



さきがけ次世代デバイス研究総括
研究広報主監
佐藤勝昭

知っていますか？



1. 太陽光のパワーは 1m^2 あたりいくら？
2. 目に見える光の波長は何nmから何nm？
3. なぜ光を当てて電気が起きるの？
4. 電気になるのは太陽光のパワーの何%？
5. 最近話題のCIGS太陽電池って何？
6. 1kW 発電するのにシリコン何kg必要？CIGSなら？
7. 宇宙用の太陽電池は何でできている？
8. 太陽電池のエネルギー回収期間は何年？



太陽光のパワーは 1m²あたりいくら？



太陽のパワーは
 3.85×10^{23} kW

太陽から地球までの距離は
 1.496×10^{11} m

太陽定数は
 1.37 kW/m^2

地球に届く太陽光のパワー
(太陽定数)は 1.37 kW/m^2
これがAMO)のパワー密度です

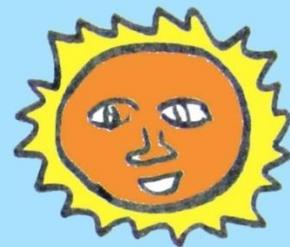
地表に届く太陽光のパワーは
約 1 kW/m^2 (AM1.5)



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J]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。



地表における太陽光AM1.5とは？

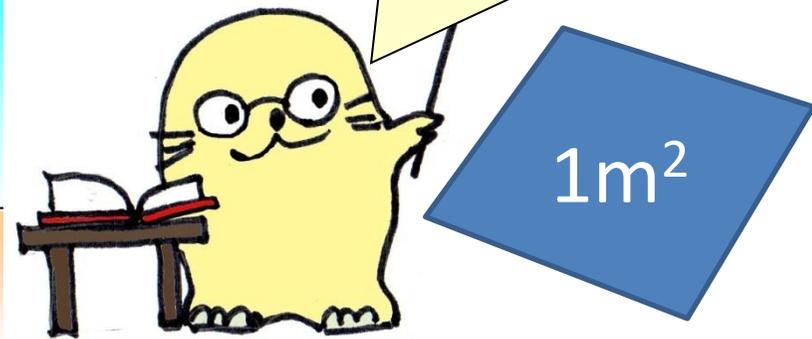
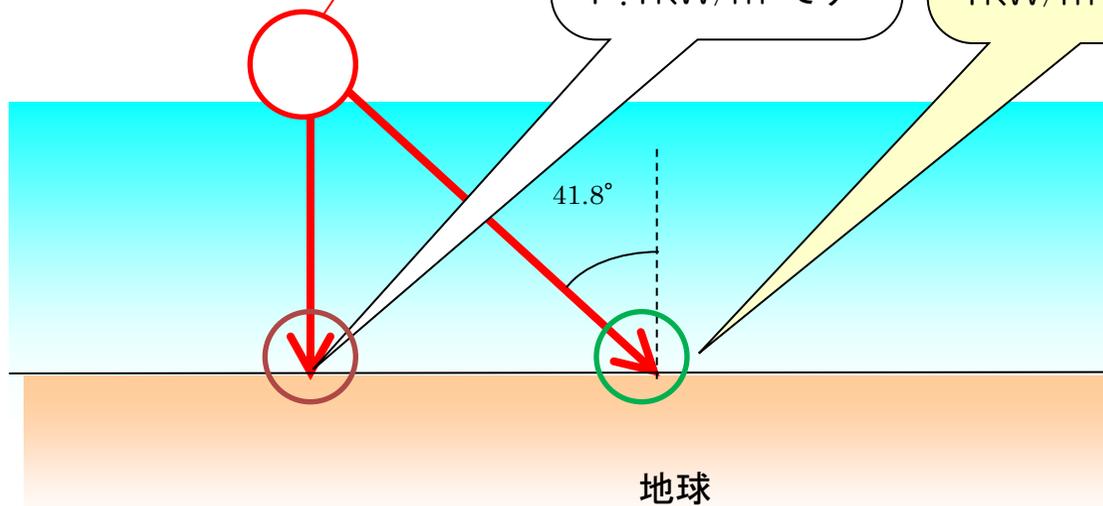
- 通り抜けてくる空気の量をエアマスAMといい、大気圏外ではAM-0、天頂から垂直に入射する場合をAM-1、中緯度地帯では1.5倍の空気層を通過して来ると考えてAM-1.5と呼んでいます。AM-1.5の太陽光のパワー密度は約 $1\text{kW}/\text{m}^2$ です。

空気層に入る前の太陽光のパワー(AM0)は太陽定数 $1.37\text{kW}/\text{m}^2$ 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 $1.1\text{kW}/\text{m}^2$ です

地表に斜め 41.8° で照射する場合をAM1.5といいます。パワーは約 $1\text{kW}/\text{m}^2$ です

太陽光のパワーは 1m^2 あたり 1kW とおぼえておこう



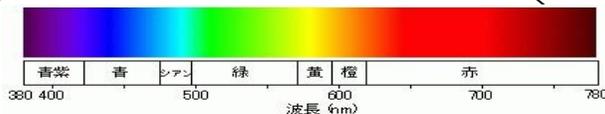
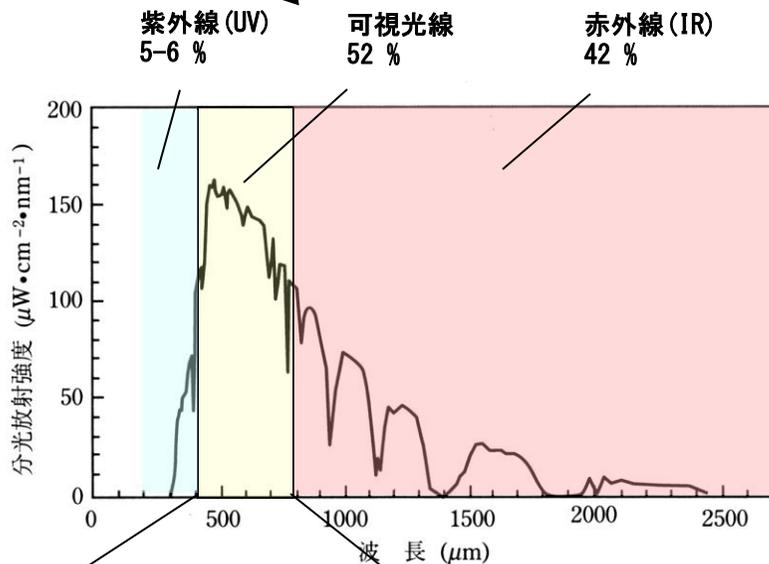
目に見える光の波長は何nmから何nm？ — 太陽光のスペクトル —



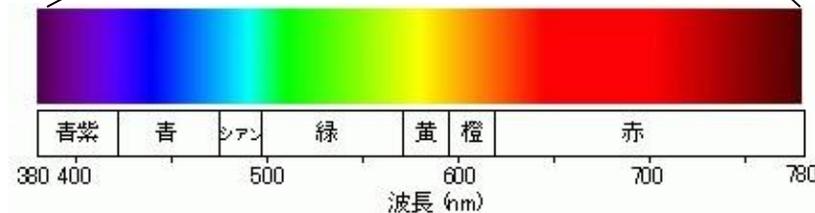
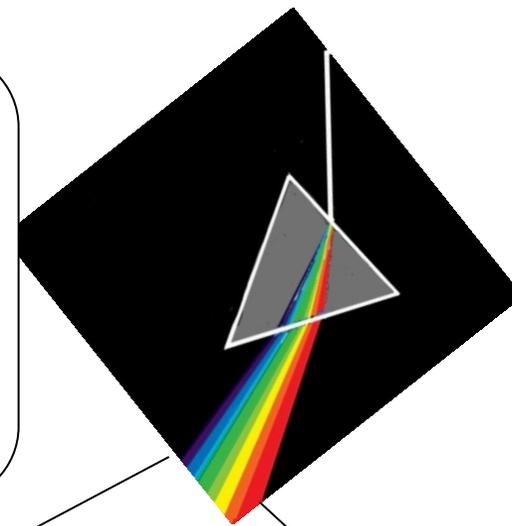
- 可視光線は**380nm**～**780nm**の波長範囲

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



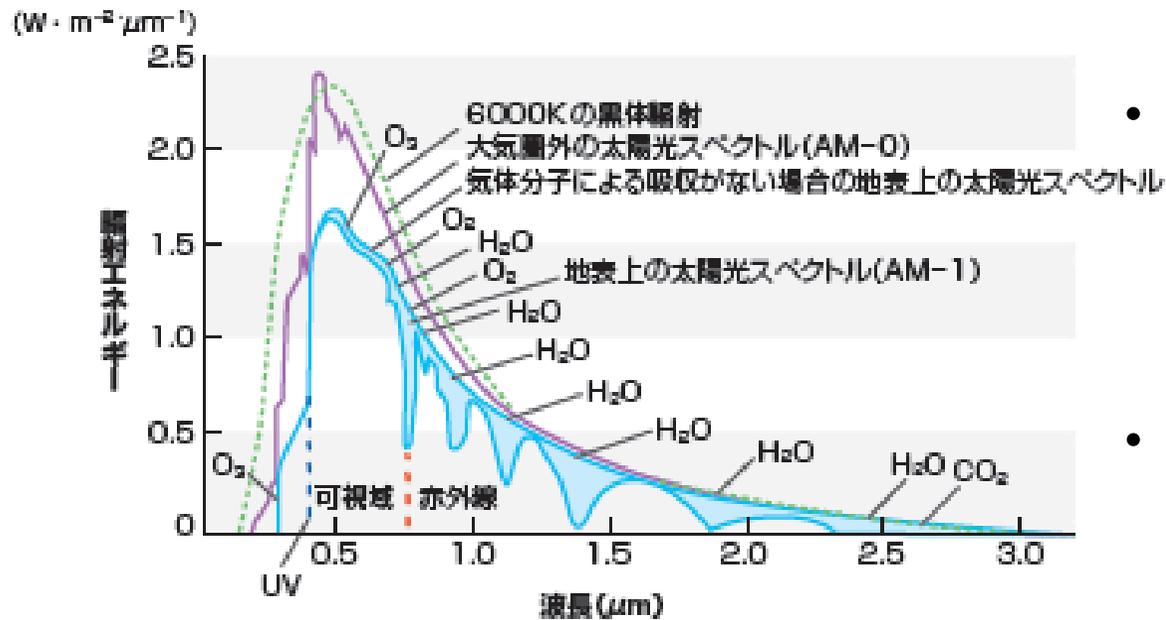
光をプリズムに入れると
虹のように多くの色にわ
かれます。青や紫など
波長の短い光は、赤や
黄色など波長の長い光
より大きなエネルギーを
もちます。



太陽光のスペクトルはなぜでこぼこなの？



図2 大気を通過したときのスペクトルの落ち込み



地球上の大気を通過すると、水 (H₂O)、酸素 (O₂)、二酸化炭素 (CO₂) による吸収がディップ(落ち込み)となって見られる

(参考：『太陽光発電入門』濱川忠弘 著、オーム社、1981年)

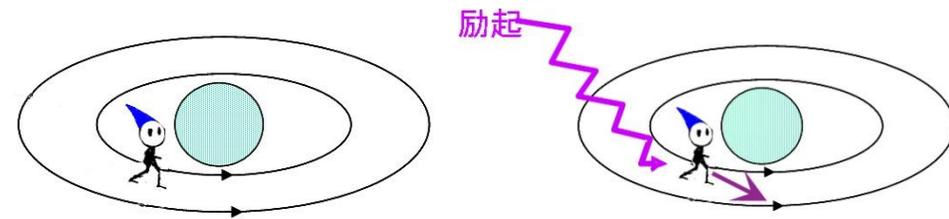
- 空気中を進んでくると、レイリー散乱のため、図2の青く塗った部分の外側の線のように1.0μmより波長の短い可視光から紫外光が減衰します。
- さらに、オゾン層のオゾン (O₃)、空気中の水 (H₂O)、酸素 (O₂)、二酸化炭素 (CO₂) などの気体の分子振動 (薄い青の部分) による吸収を受けるため、地表に届く光は、青く塗った下側の線のようにでこぼこしたAM-1のスペクトルになります。

なぜ光を当てて電気が起きるの？



- 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。(ここに h はプランク定数、 ν は光の振動数です)
- 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。

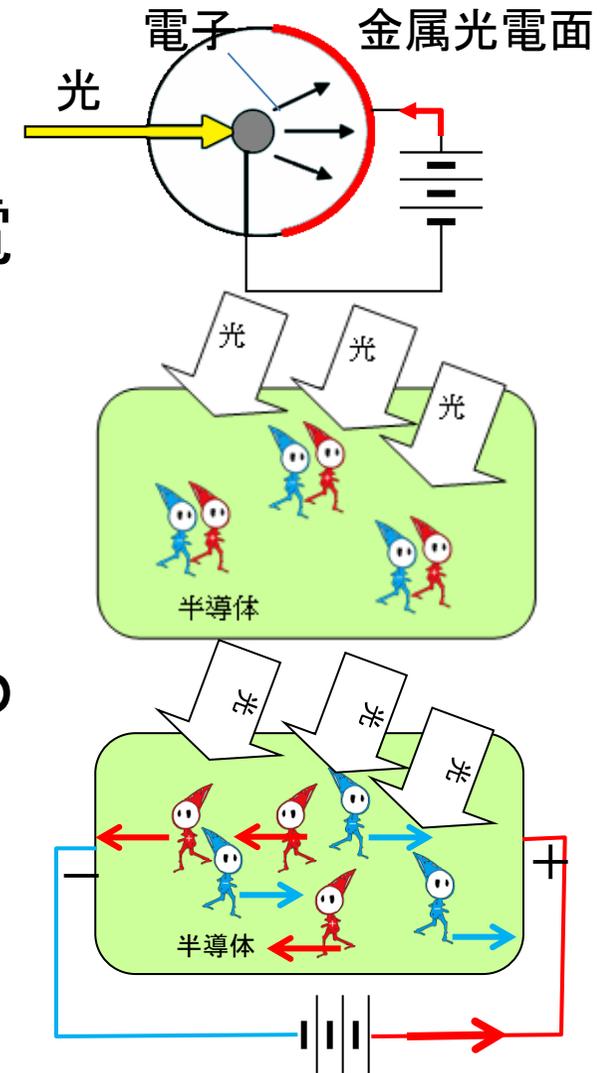
- この電子のエネルギーを何らかの方法で外に取り出せば、電気が起きます。



- 光子のエネルギー E と波長 λ 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。

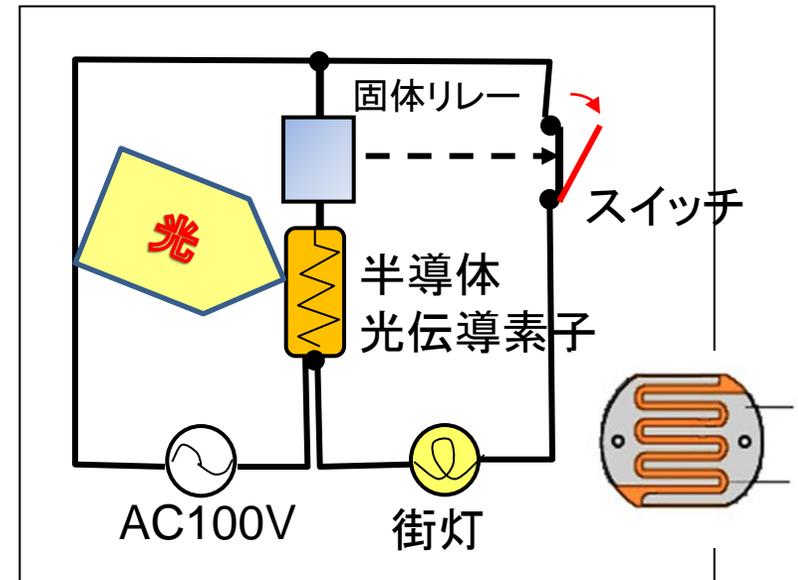
金属や半導体に光を当てると？

- 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。これは次のスライドに示すように光スイッチにつかえますが発電にはつかえません。

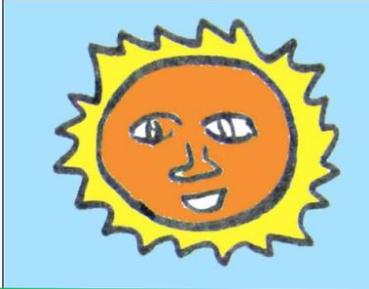


夜になると街灯が自動点灯するわけ

- 夕方になると街灯がひとりでに点灯します。これには半導体の光伝導素子がつかわれて電灯をオンオフしています。
- 半導体光伝導素子が光を受けると抵抗が下がり固体リレーに電流が流れ、街灯のスイッチがオフになります。暗くなると素子の抵抗が高くなってリレーの電流が切れて、スイッチがオンになり街灯が点きます。

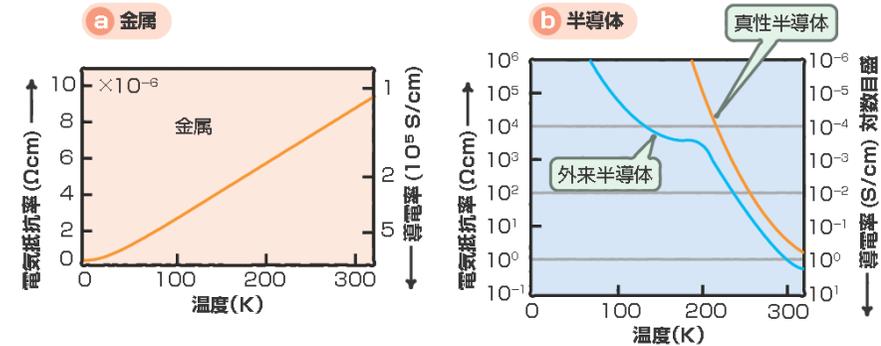
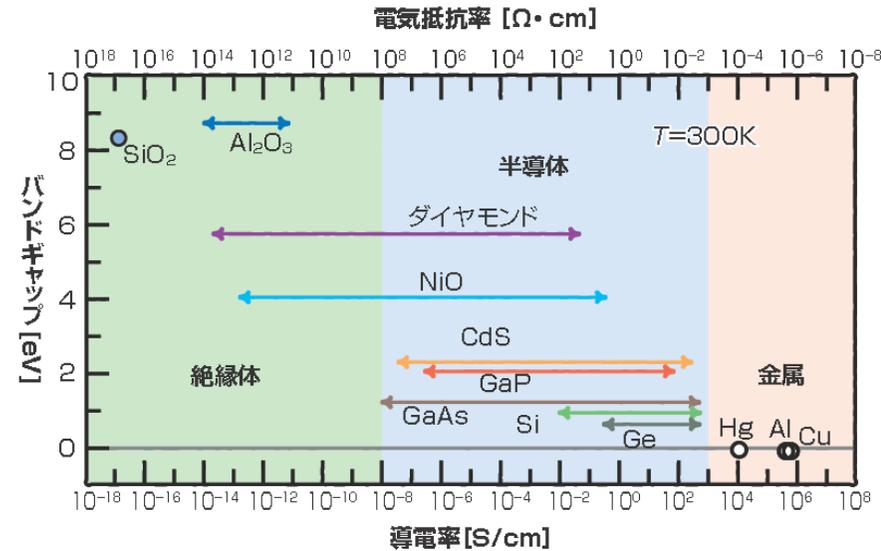


半導体はスイッチとして働くが
光起電力は生み出さない



半導体とは？

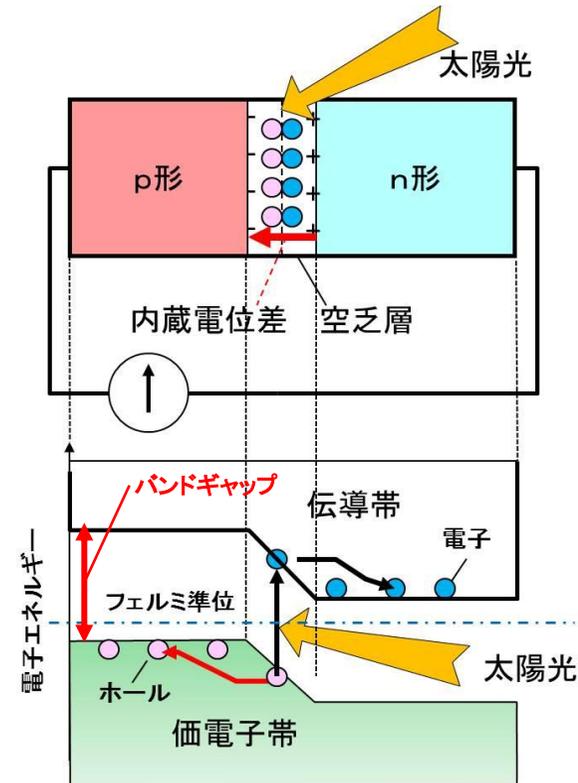
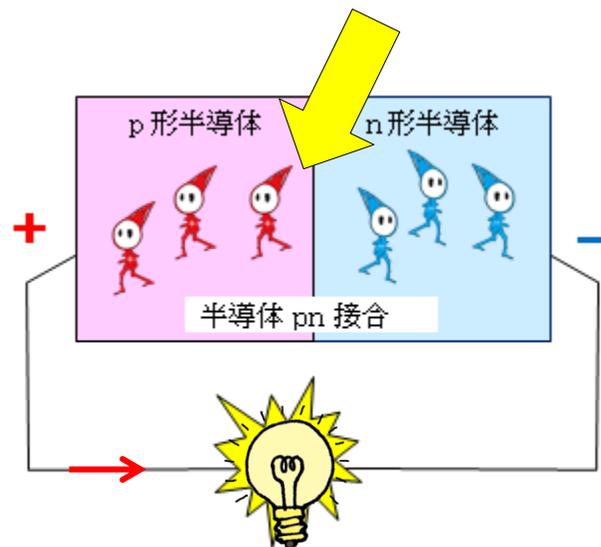
- 電気抵抗率が、導体(金属)と不導体(絶縁体)の中間の値をとる物質
- 電気抵抗率が温度上昇とともに、指数関数的に低下する物質(金属は、温度上昇とともに抵抗率が上昇。)
- 電子がもつことのできるエネルギーは、電子で満たされた価電子帯と、電子が空の伝導帯からなり、2つのバンドの間には、電子の占めることのできない**バンドギャップ**がある



太陽光で発電するには 半導体のしかけが必要です



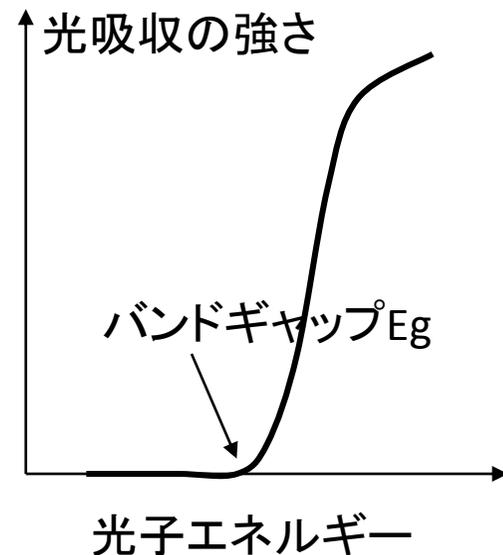
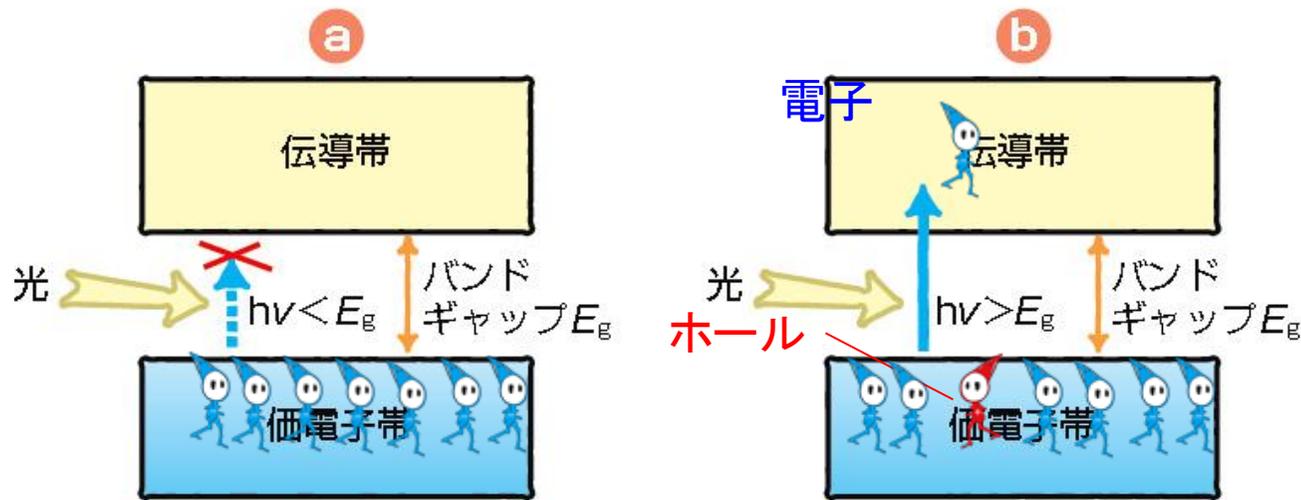
- pn接合ダイオードという半導体のしかけを作って初めて、光起電力が得られます。
- p形半導体とn形半導体の接合を作ると、接合界面付近に**内蔵電位の勾配**ができて電子とホールが分離され、光起電力が生じます。

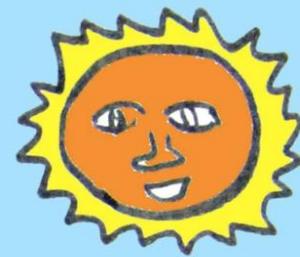




半導体のバンドギャップと光吸収

- (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。

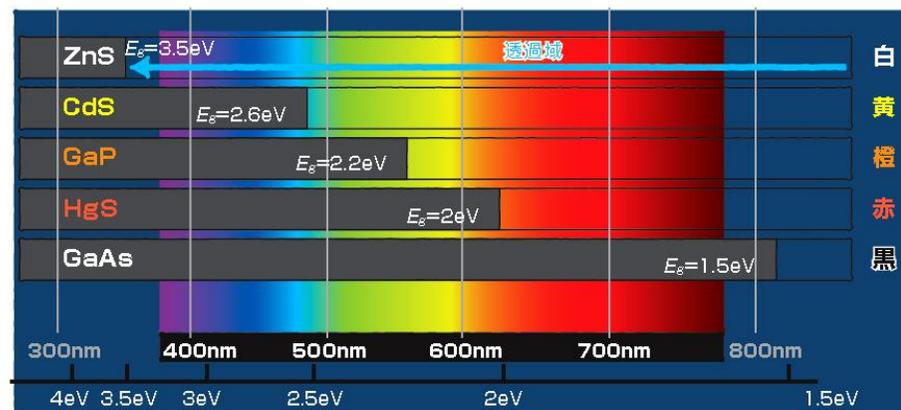




半導体のバンドギャップと色

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 _{1-x} 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

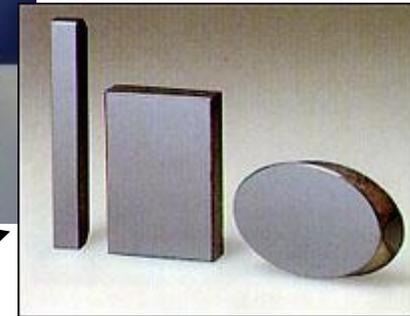
半導体にはどんな物質 があるか

- シリコン(Si) (化学名: 珪素)
電子デバイス材料、太陽電池材料
- ガリウムヒ素(GaAs) (化学名: 砒化ガリウム)
LED材料、光通信用レーザ材料、高周波デバイス材料
- 窒化ガリウム (GaN)
青色LED材料、青紫色レーザ材料
- カドミウムテルル(CdTe)
太陽電池材料
- シーディーエス(CdS)
光センサ材料

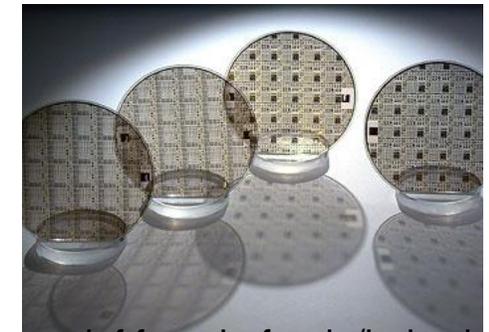
シリコン



ガリウムヒ素



GaN

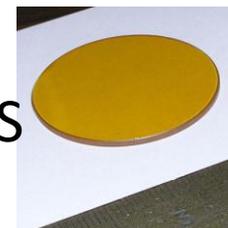


<http://www.iaf.fraunhofer.de/index.htm>

CdTe



CdS



シリコン結晶の作り方

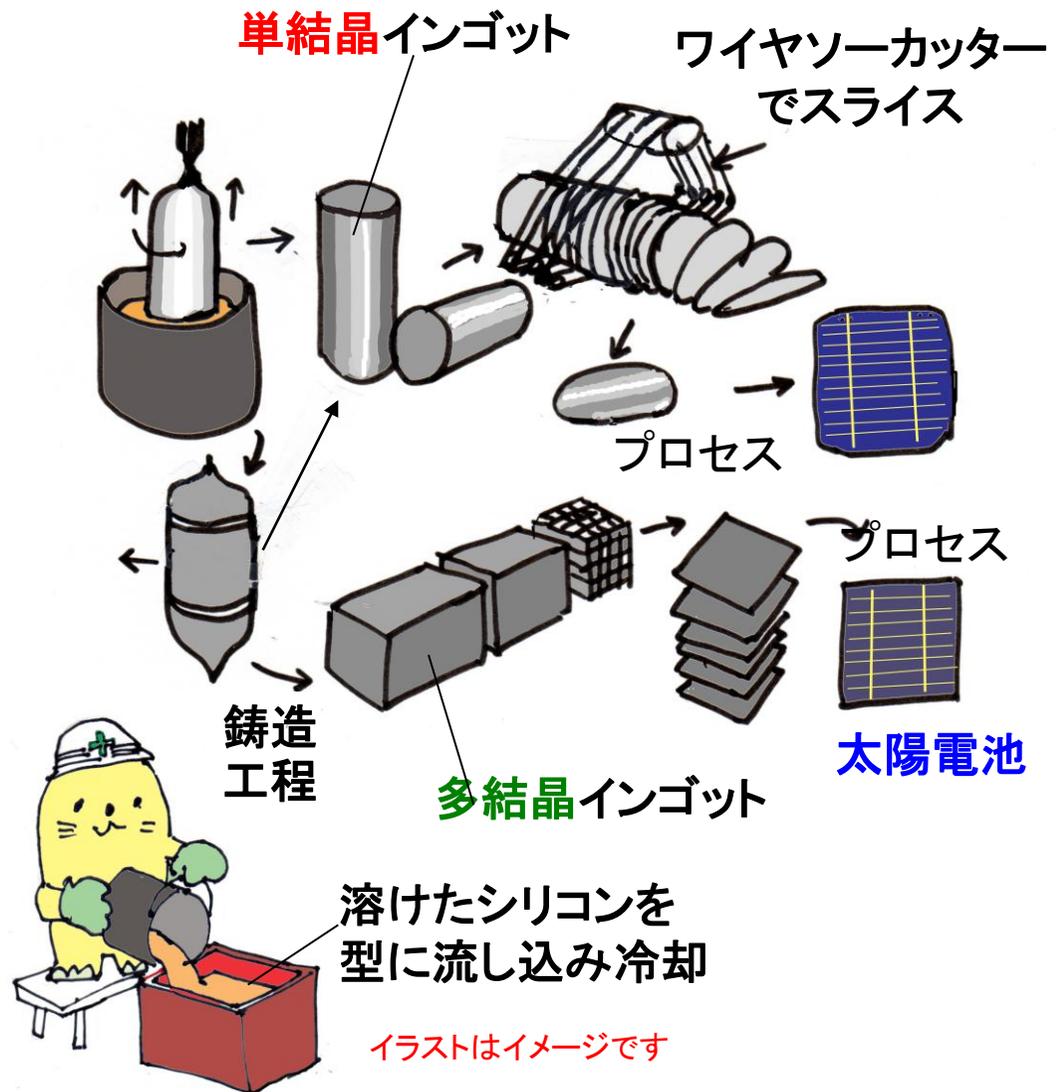
- ケイ石から**金属シリコン**を得る
- **金属シリコン**を高純度多結晶シリコンにする (eleven nine)
- 高純度多結晶シリコンの結晶を整え**単結晶**にする (インゴット)
- **単結晶 (インゴット)**をスライスし、表面を磨くなどの処理をしウェアが完成する

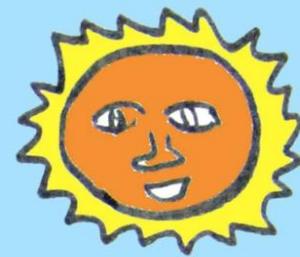




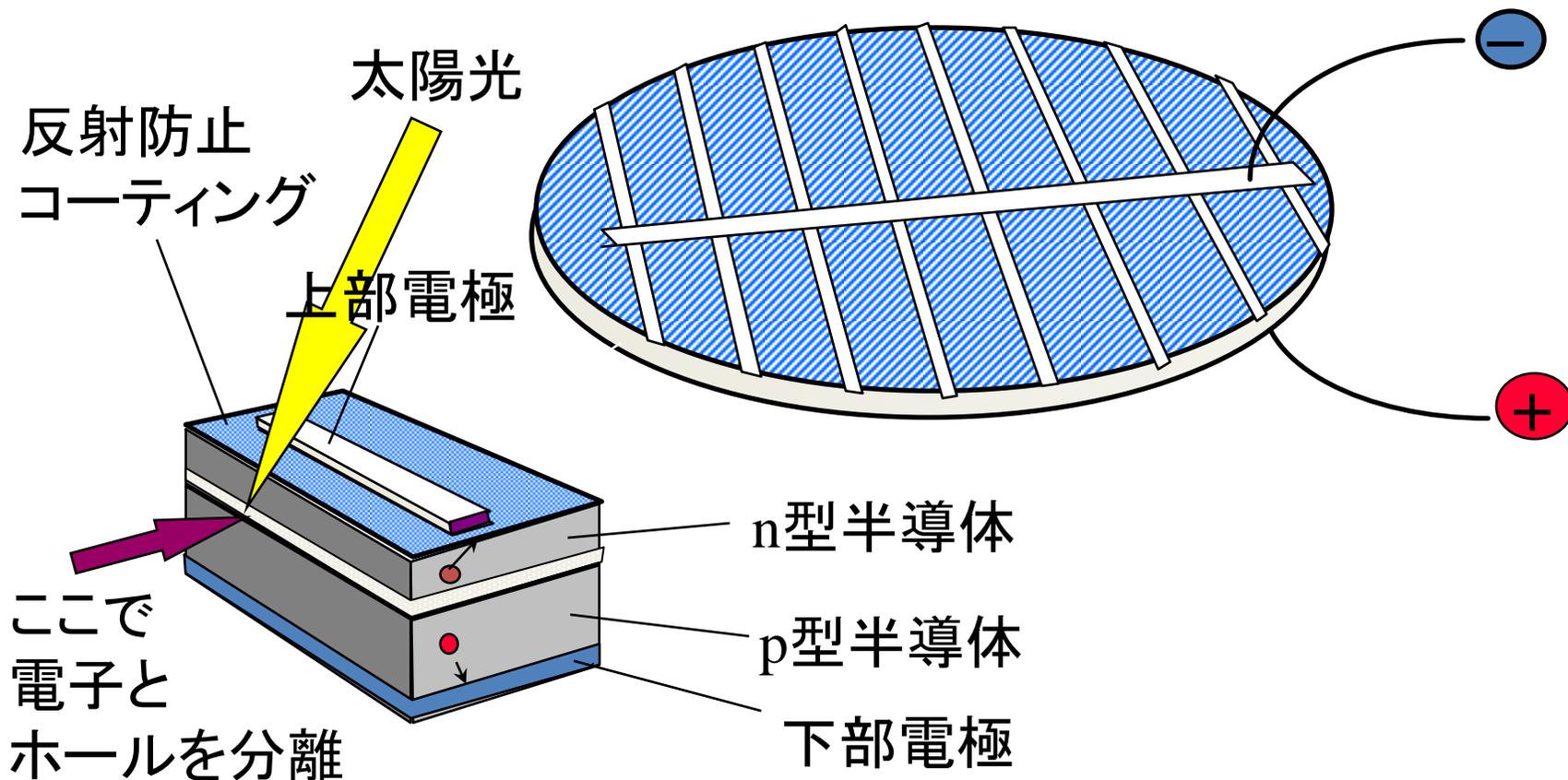
シリコン太陽電池ができるまで

- 単結晶系**：単結晶インゴットをワイヤソーで加工し、セル形成する。pn接合を形成するなどの処理を施す。ウエハーの厚みは0.2mm程度です。
- 多結晶系**：溶けたシリコンを型に流し込み冷却して固く結晶化させたインゴットをワイヤソーで加工し、セル形成する。ウエハーの厚みは0.3mm程度です。





太陽電池の仕組み

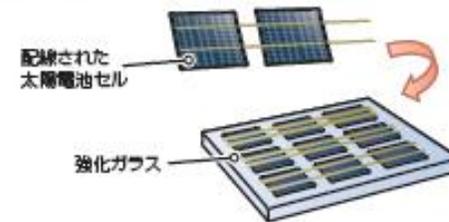


セルからモジュールへ

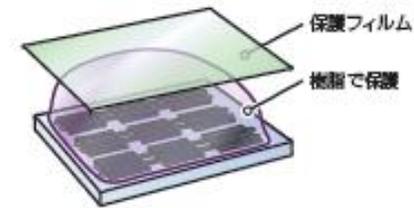


- ソーラーパネル(太陽電池モジュール)は、太陽電池セルの集積によってつくります。図1には、多結晶シリコン太陽電池モジュールの製作過程を示しています。
- セルを強化ガラス上に配列
- 太陽電池セルは0.2~0.3mmの薄さですから、支えになるものがなければなりません。通常はガラス板を用います。まず、直列に配線された太陽電池セルの受光面をガラス側に向けて、ガラス板上に配列します。ここに使うガラス板は、台風などでもものが飛んできてもらいじょうぶなように、金属球の落下試験をして強度を確認した強化ガラスを使います。太陽電池パネルの上を工事の人が歩くことも想定されています。
- 樹脂と保護フィルムで封止
- 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

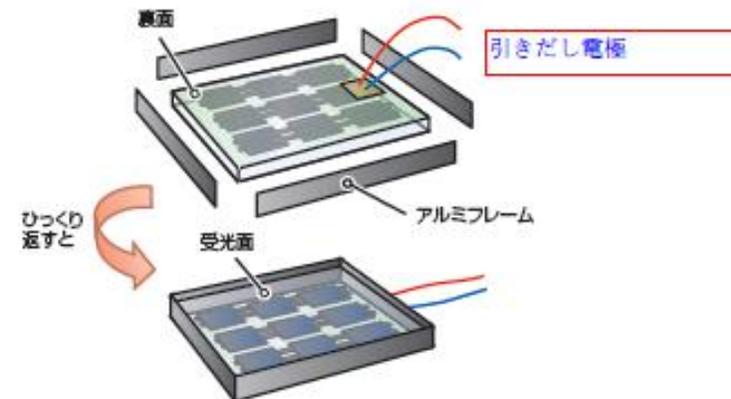
a 配線されたセルを、強化ガラス上に受光面を下にして配列



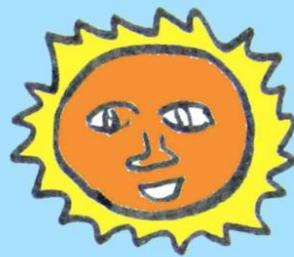
b セルの上に樹脂を載せ、保護フィルムで覆って封止



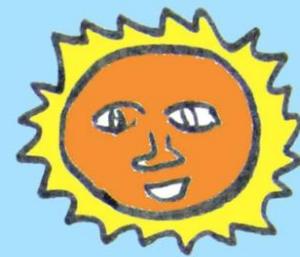
c フレームと電極をつけて太陽電池モジュールの完成



電気になるのは太陽光のパワーの何%？

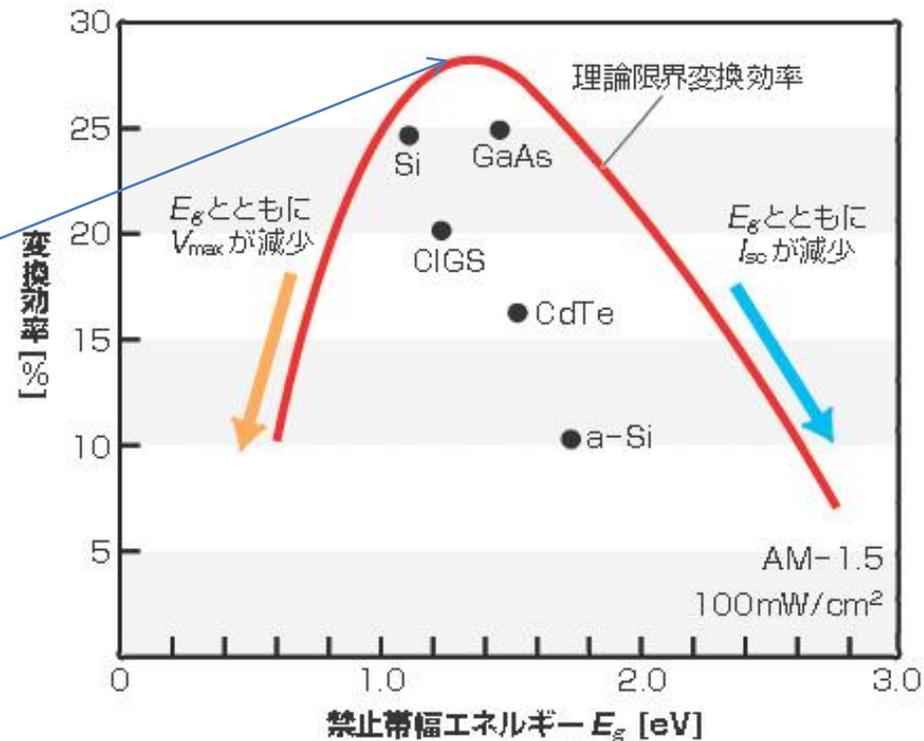


- 太陽光のパワー($1\text{kW}/\text{m}^2 \times \text{受光面積}$)に対する太陽電池から取り出せる最大パワーの比率(百分率)を**変換効率**といいます。
 - シリコン単結晶太陽電池の変換効率の最高値は小面積セルで**24.5%**、大面積モジュールで**22.7%**
 - ガリウムヒ素系タンデム太陽電池の変換効率は小面積セルで**41.6%**、大面積モジュールで**36.1%**
 - CIGS系薄膜太陽電池の変換効率は小面積セルで**20.0%**、大面積モジュールで**13.6%**



理論限界変換効率

- 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。



実際のモジュールの変換効率



- 1m²あたりに換算すると、多結晶で128W、単結晶で136Wです。地上1m²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1m²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



<http://response.jp/>

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。

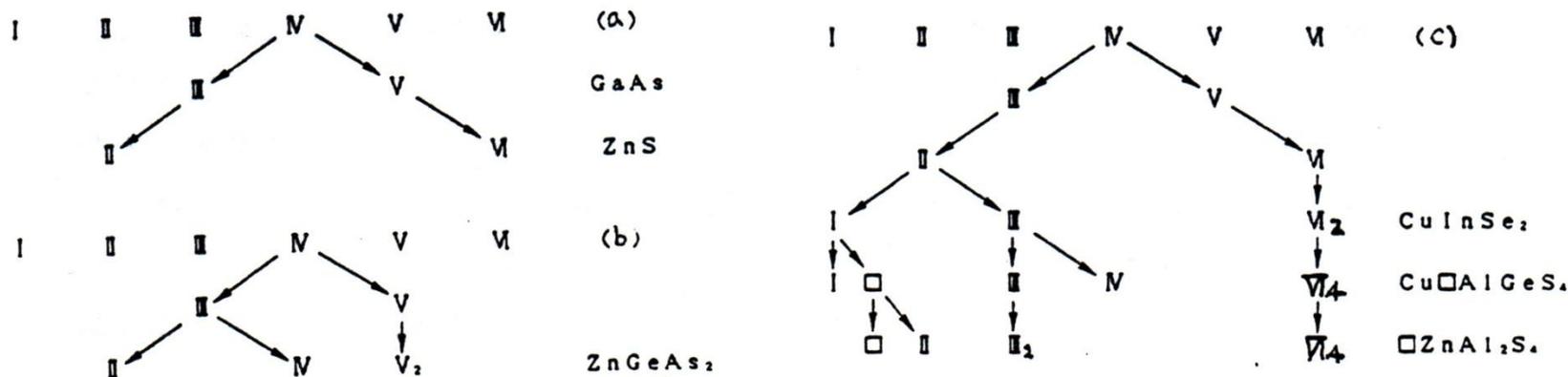
最近話題のCIGS太陽電池って何？



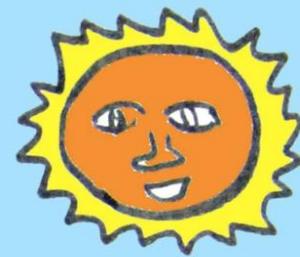
- CIGSとは $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ の頭文字をとった略号です。
 - $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{S}_2$ もCIGSと書けるので紛らわしいのですが市場にあるのは $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ のみです。
 - CuInSe_2 のバンドギャップは1.04eV、ギャップ直上の吸収係数が半導体の中で最も高いといわれています。
 - CuGaSe_2 (バンドギャップ1.53eV)との混晶を作ってVocを上げています。
 - CIGS太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。



半導体の系図

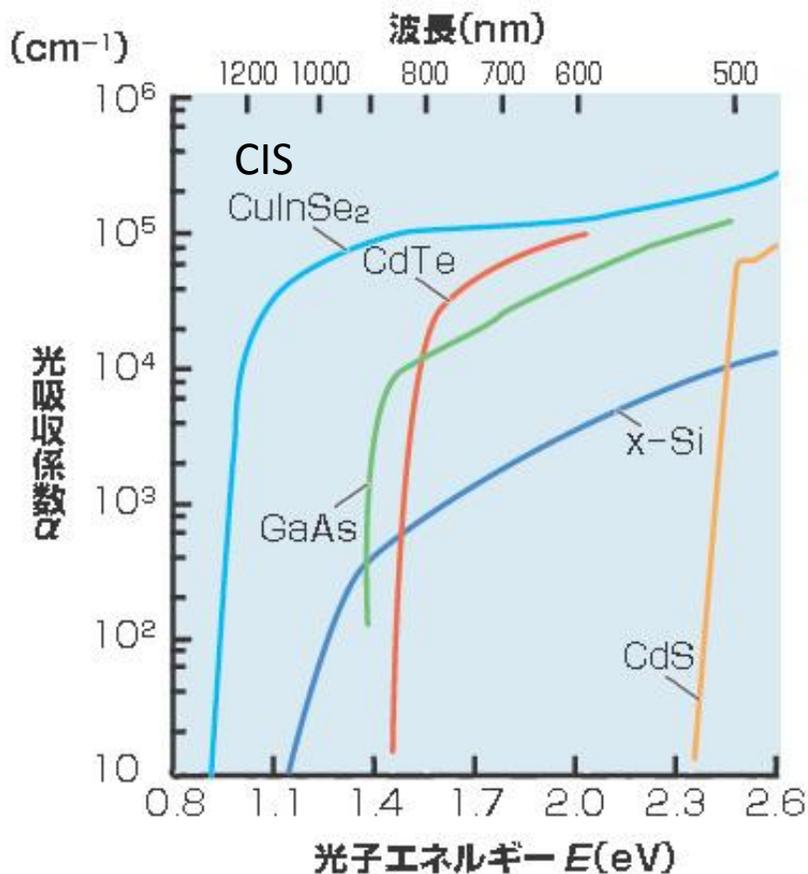


- 二元化の流れ: 外殻電子Siは4個、Gaは3個、Asは5個、Znは2個、Sは6個; GaAs, ZnSでは、合計8個の外殻電子を分け合って、シリコンと isoelectronicな状態を作っている。
- 三元化(1): III-V族のIII族をII族とIV族で置き換えたたとえばZnGeAs₂はGaAsとisoelectronic.
- 三元化(2): II-V族のII族をI族とIII族で置き換えた例えばCuInSe₂はZnSeとisoelectronic



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。



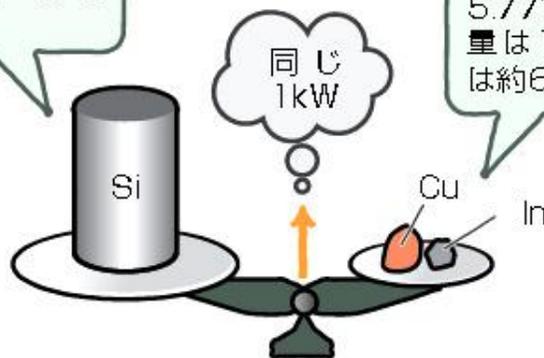
1kW発電するのにシリコン何kg必要？ CIGSなら？



- 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
 - CIS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 10m^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 2000cm^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

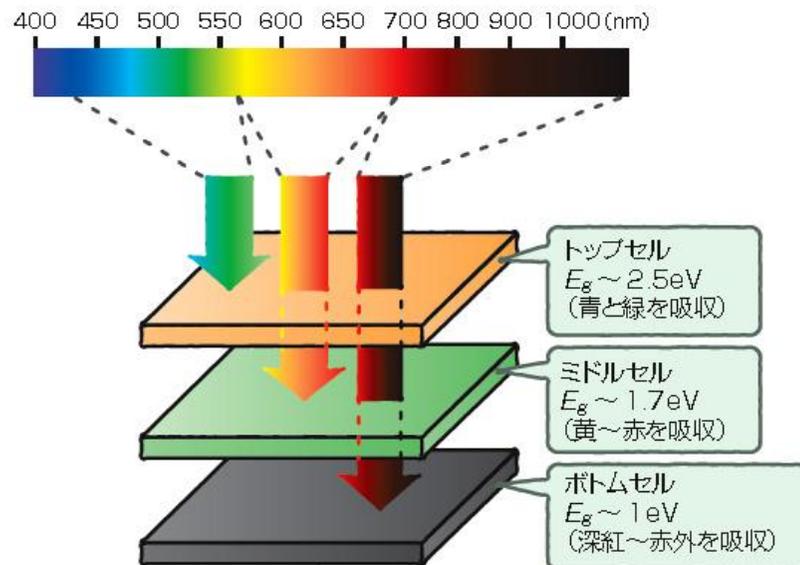
効率が10%として、1kWの電力を得るには 10m^2 の面積が必要。CISの厚みを $2\mu\text{m}$ とすると、体積は 20cm^3 となる。CISの密度は5.77であるので、必要なCISの重量は115g、金属(Cu+In)の重量は約60g



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。
- 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。



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)