

物理学科3・4年次
応用物理学第1
第3回 光を電気に変える

佐藤勝昭

第3回で学ぶこと

光電変換：光を電気に変える

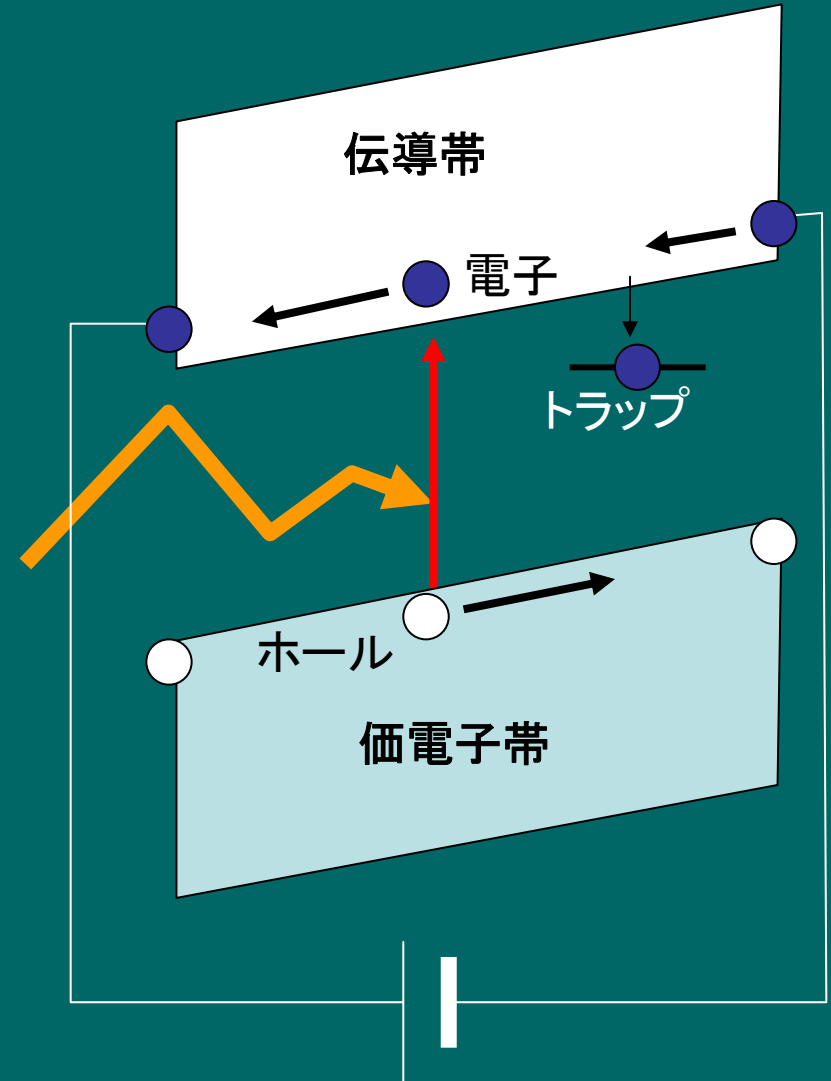
1. 光伝導(photoconductivity)
2. 光電子放出(photoelectron emission)
3. 光起電力効果(photovoltaic effect)
 - － 太陽電池
 - － フォトダイオード、フォトランジスタ

1. 光伝導(内部光電効果)

- 半導体において光照射により導電率が上がる(電気抵抗が下がる)効果
- 光によって生成されたキャリアが伝導に寄与
- 街灯の自動点灯用センサとして使用される。
- 光電流は必ずしも光強度に比例しない。真性半導体では光強度の2乗に比例

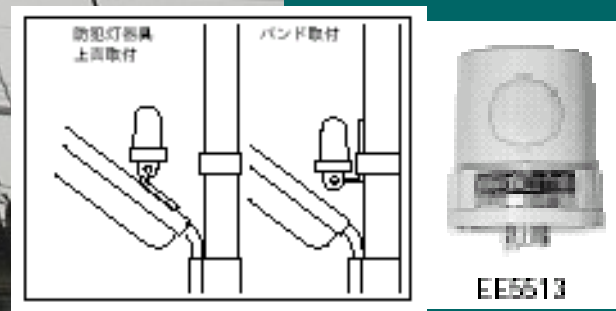
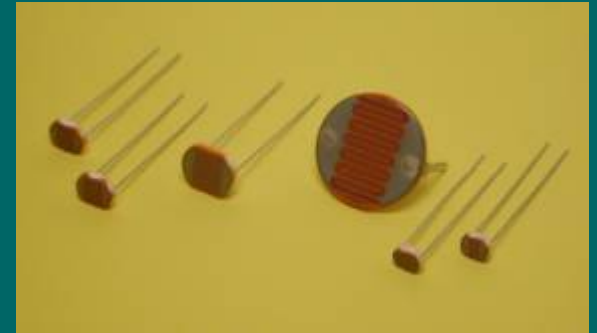
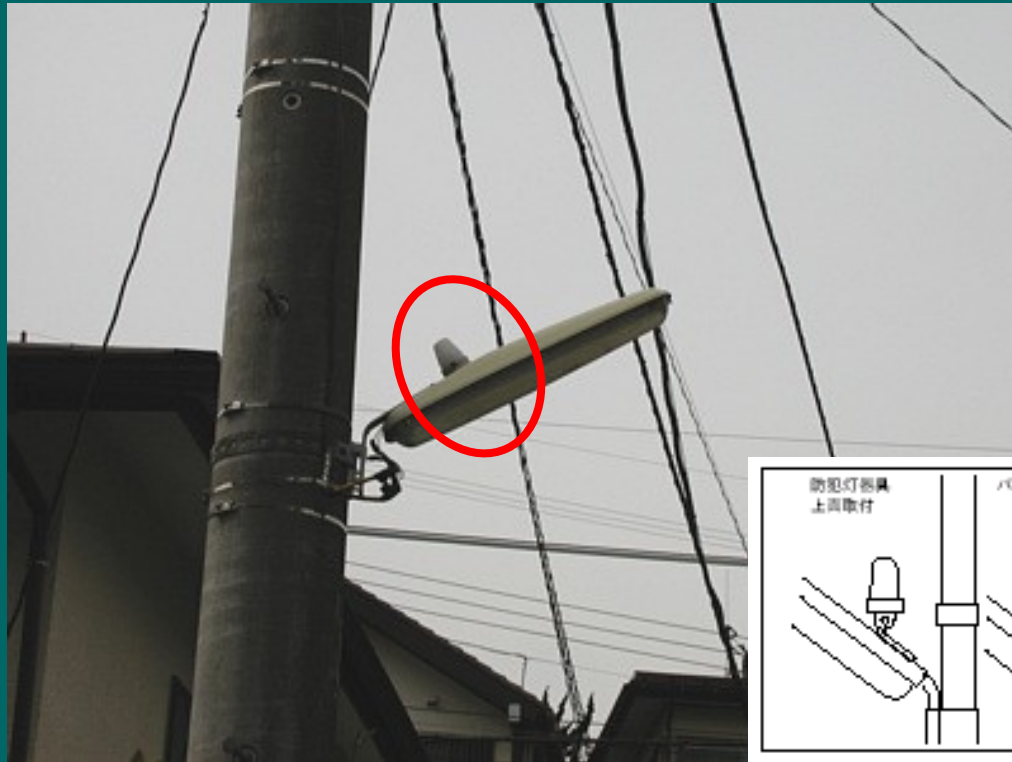
光伝導のしくみ

- 光によってキャリア生成
- 電界によって移動する
- 再結合するまで伝導に寄与
- トラップ準位があると、キャリアはいったん捕捉され、熱的に解放されて再度伝導に寄与



街灯の自動点灯

- 夕方になると街灯がひとりでに点灯しますが、光導電素子を使って固体リレーを働かせ、電灯をオンオフしています

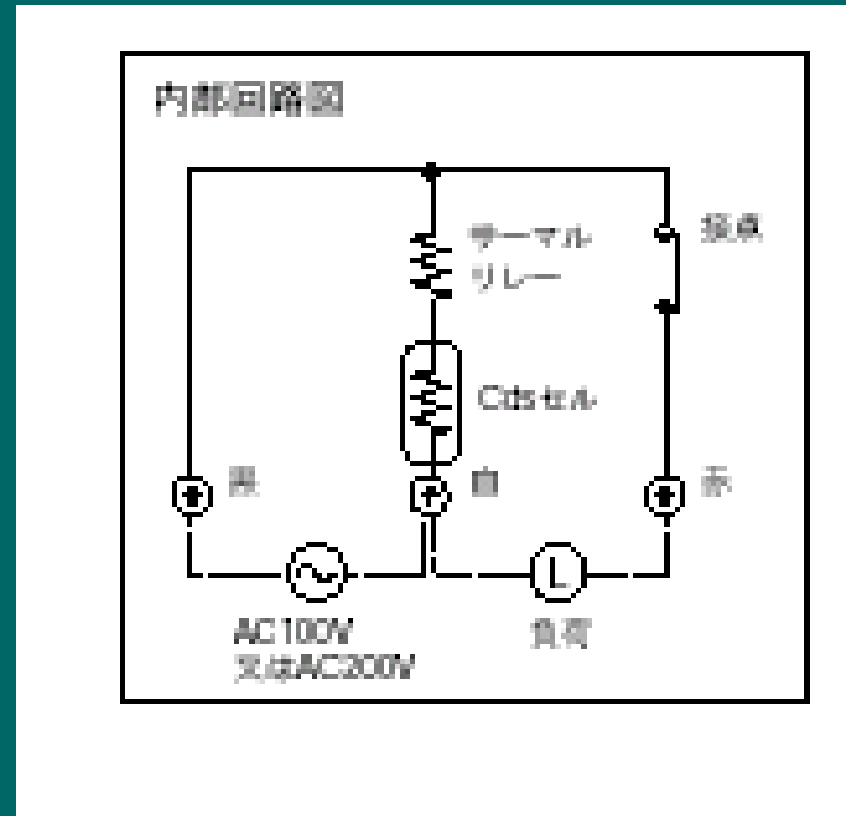


CdS光導電セル
モリリカのHPより

街灯自動点滅器(EEスイッチ) 松下電工のHPより

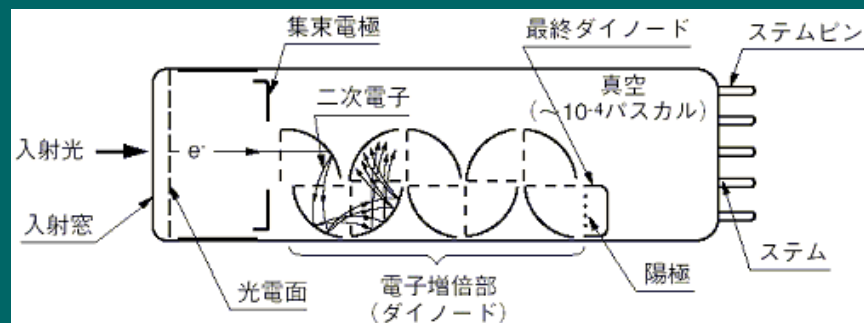
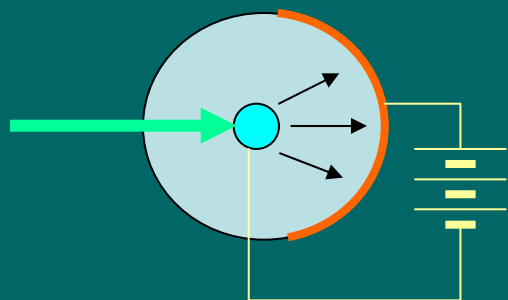
自動点灯するわけ

- 光を受けて抵抗が低くなるCdS光伝導センサーと固体リレーが接続されており、明るいときにはランプの回路が開くようにしておく。暗くなるとリレーの電流がoffになり、接点が閉じてランプが点灯する。



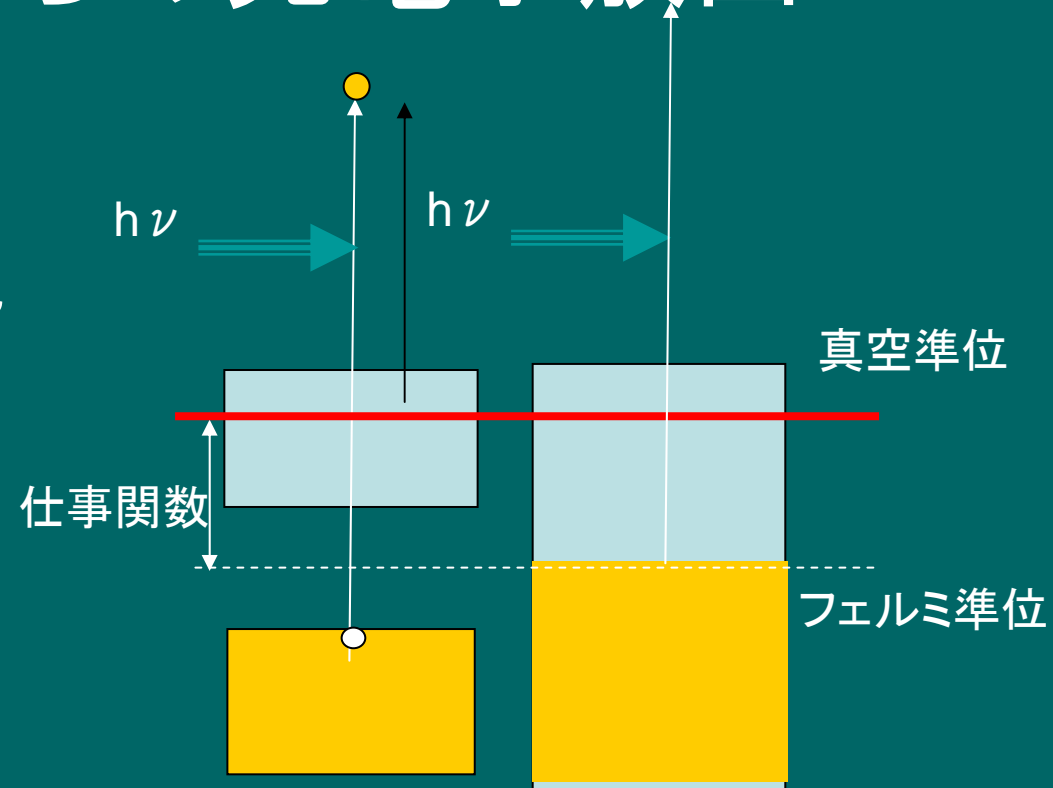
2. 光電子放出(外部光電効果)

- いわゆる光電管という真空管
- 金属側を負に、対抗する電極側を正にする。
- 真空中で金属に光を当てると、その光子エネルギーが金属の仕事関数より大きいとき、電子が真空中に放出され、陽極に向かう。
- フォトマル(光電子増倍管)では、放出された光電子をダイノード(電子増倍電極)にぶつけ、電子の数を増倍する。



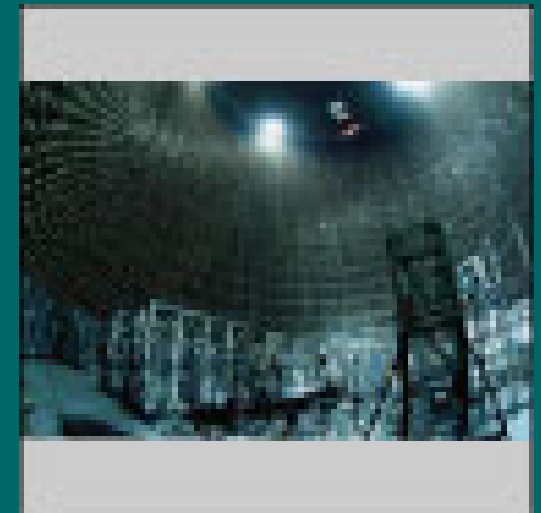
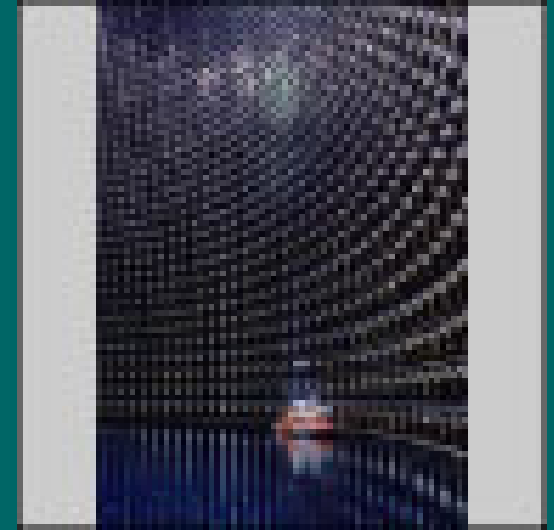
金属・半導体からの光電子放出

- 励起光より仕事関数だけ低いエネルギーの電子が放出される。



光電子増倍管の応用

- スーパーカミオカンデでは、地球に大量に飛んできている**ニュートリノ**をとらえる研究をしている。
- ニュートリノが水槽を通過する時、水の中の電気を帯びた粒子にぶつかることがあり、このとき微かな光を放つ。この光をチェレンコフ光と言う。陽子崩壊の時にもチェレンコフ光が発生する。スーパーカミオカンデではこのチェレンコフ光を監視している。
- 光電子増倍管は捕まえた微かな光を電子に変え、それを**ネズミ算式に増やして**電気信号に変える。
- スーパーカミオカンデには直径50cm、世界一大きくて高性能な光電子増倍管が**11200個**もついている。
- この世界一の光電子増倍管は、月から地球に向けた懐中電灯のあかりさえも検出できる。



3. 光起電力効果 (PV)

- 半導体のpn接合に E_g 以上のエネルギーをもつ光を照射すると、p形側が正に、n形側が負に帯電する。
- 太陽電池や通信用フォトセンサは光起電力効果を利用している。



太陽電池について

- 第1部：エネルギー需要の伸びと新エネルギーの役割
- 第2部：太陽電池とは
- 第3部：我が家は太陽光発電所
- 第4部：これからの太陽光発電の課題

第1部：エネルギー需要の伸びと 新エネルギーの役割

- 増え続けるエネルギー消費
- 増加する民生部門の消費
- 化石燃料に頼るエネルギー供給
- 新エネルギー目標値：
太陽光は2010年に500万kWh



世界的な電力危機

29 潮流 Sunday Nikkei 3/8/24

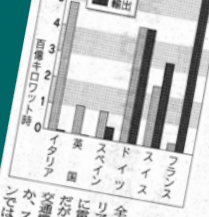
日米中の電力危機

原子力発電の増産、需要の急増による輸送網の不足、今夏、日本、米国、中国はそれぞれ形の違う電力危機に見舞われる。電力自由化の問題は、電力会社の個別の問題ではなく、電力の輸送体制や電力の供給体制など、足元を揺るがせる原因は、世界的な電力不足の問題が、直接的に電力供給を妨げていることが懸念されている。

伸びる需要への備えを

一を止め、冷房需要の上給能力を30%程度回復させる。冷房需要の上給能力を30%程度回復させる。冷房需要の上給能力を30%程度回復させる。冷房需要の上給能力を30%程度回復させる。

停電に泣く欧州



【ソフィア＝小森】欧州各地、日本初の天然ガス全量電力供給が、一歩、遠くはアメリカ、スペイン、フランスなどに広がる。電力供給の多様化が進む。国境を越えた電力供給体制も進む。

他国依存もろと露呈

【ソフィア＝小森】欧州各地、日本初の天然ガス全量電力供給が、一歩、遠くはアメリカ、スペイン、フランスなどに広がる。電力供給の多様化が進む。国境を越えた電力供給体制も進む。

電力自由化に慎重論も台頭

【ソフィア＝小森】欧州各地、日本初の天然ガス全量電力供給が、一歩、遠くはアメリカ、スペイン、フランスなどに広がる。電力供給の多様化が進む。国境を越えた電力供給体制も進む。

電力供給なお綱渡り

東電、火力や節電頼み

【東京】東電は、原子力発電による供給不足を補うため、火力発電を増やし、節電を呼びかける。電力供給は引き続き綱渡り状態が続く。

核燃再処理、1年延期

【東京】日本原燃は、核燃再処理の延期を発表。再処理の延期は、燃料不足の懸念を軽減する効果がある。

不正溶接補修が理由

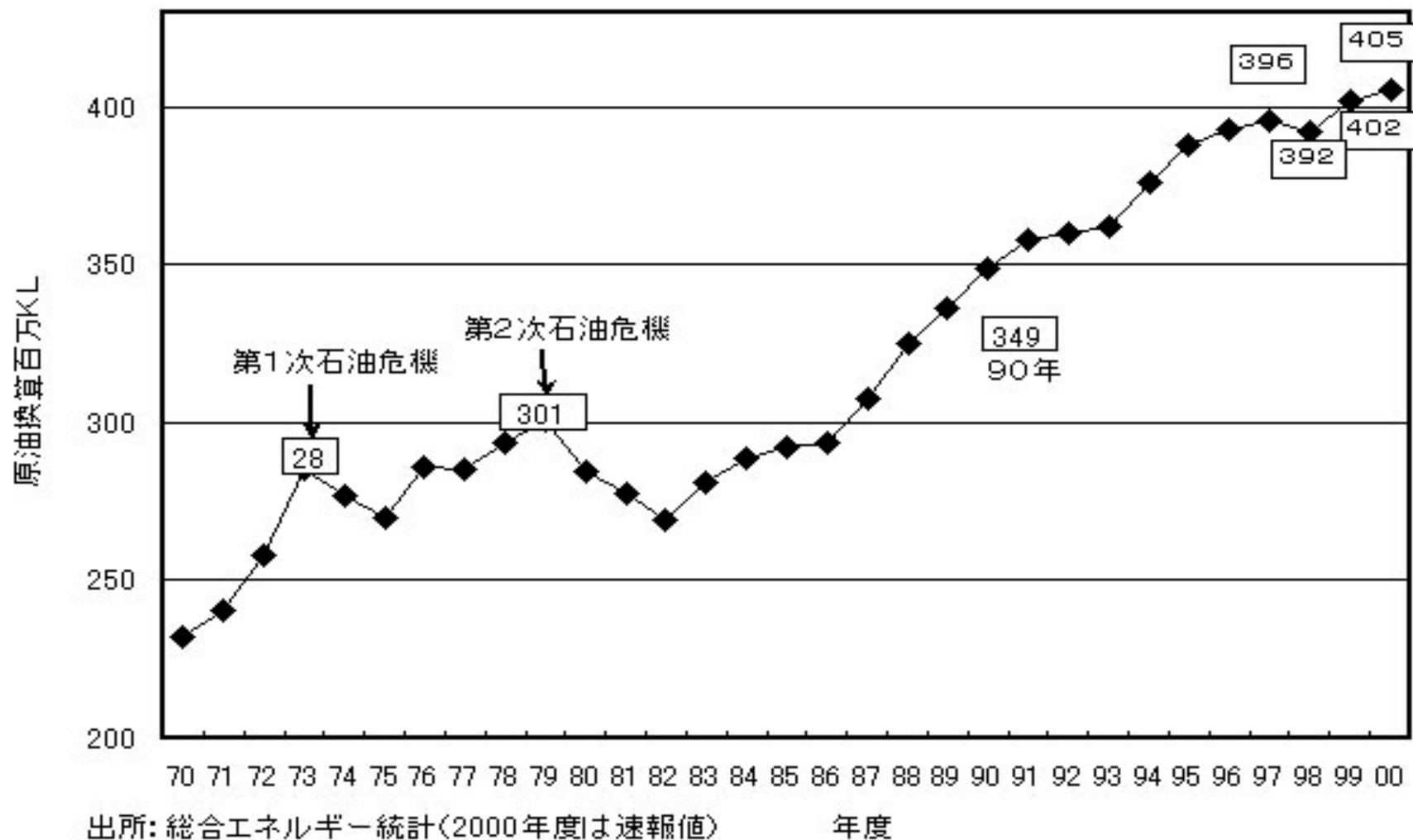
【東京】電力会社の設備検査で、不正溶接の補修が必要と判明。電力供給の安定性が脅かされる。

再処理開始時期	再開可能性
1月	間に合わず
2月	間に合わず
3月	間に合わず
4月	間に合わず
5月	間に合わず
6月	間に合わず
7月	間に合わず
8月	間に合わず
9月	間に合わず
10月	間に合わず
11月	間に合わず
12月	間に合わず

【東京】電力供給の安定性が脅かされる。電力会社の設備検査で、不正溶接の補修が必要と判明。電力供給の安定性が脅かされる。

増え続けるエネルギー消費

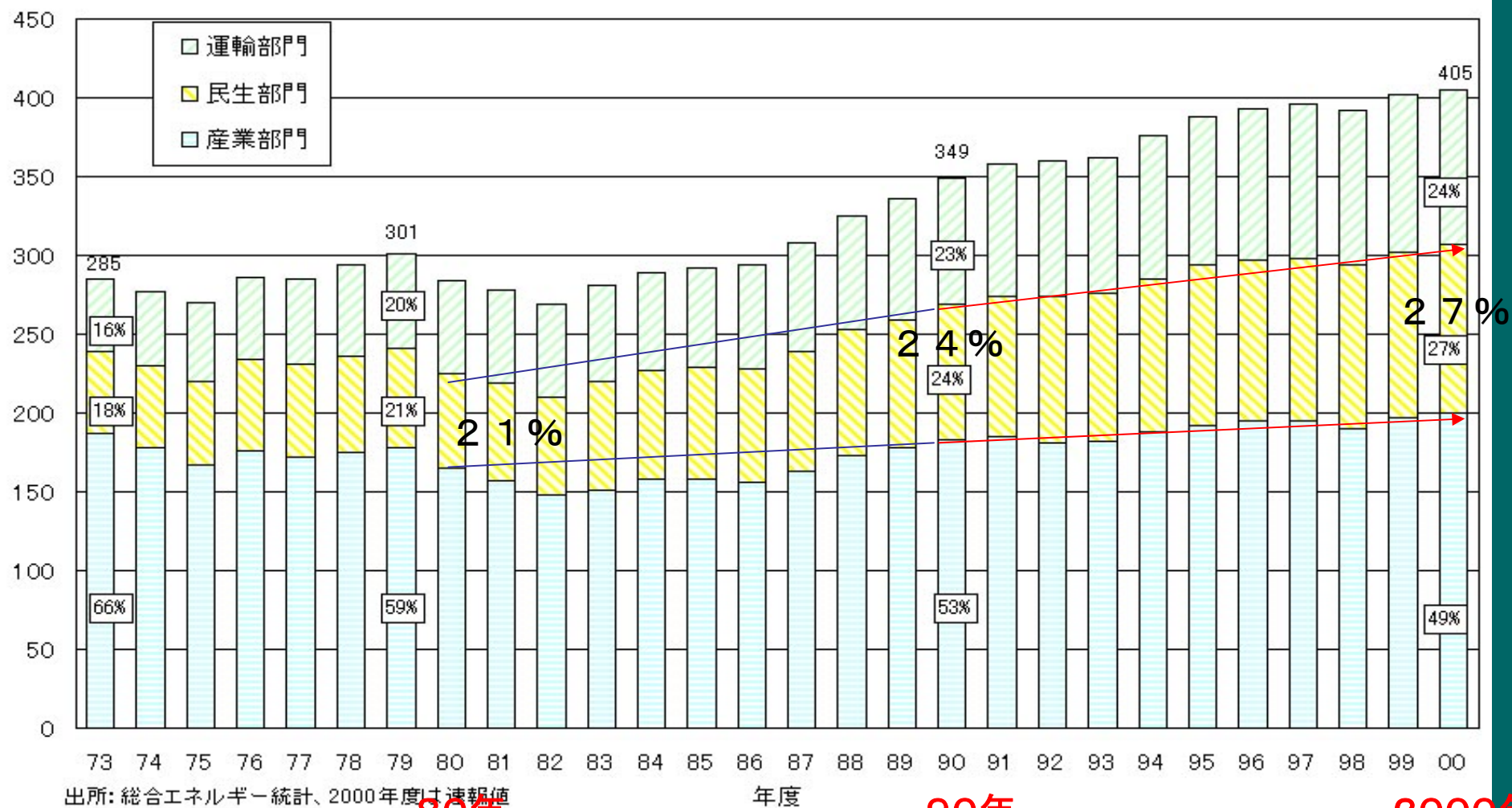
最終エネルギー消費の推移



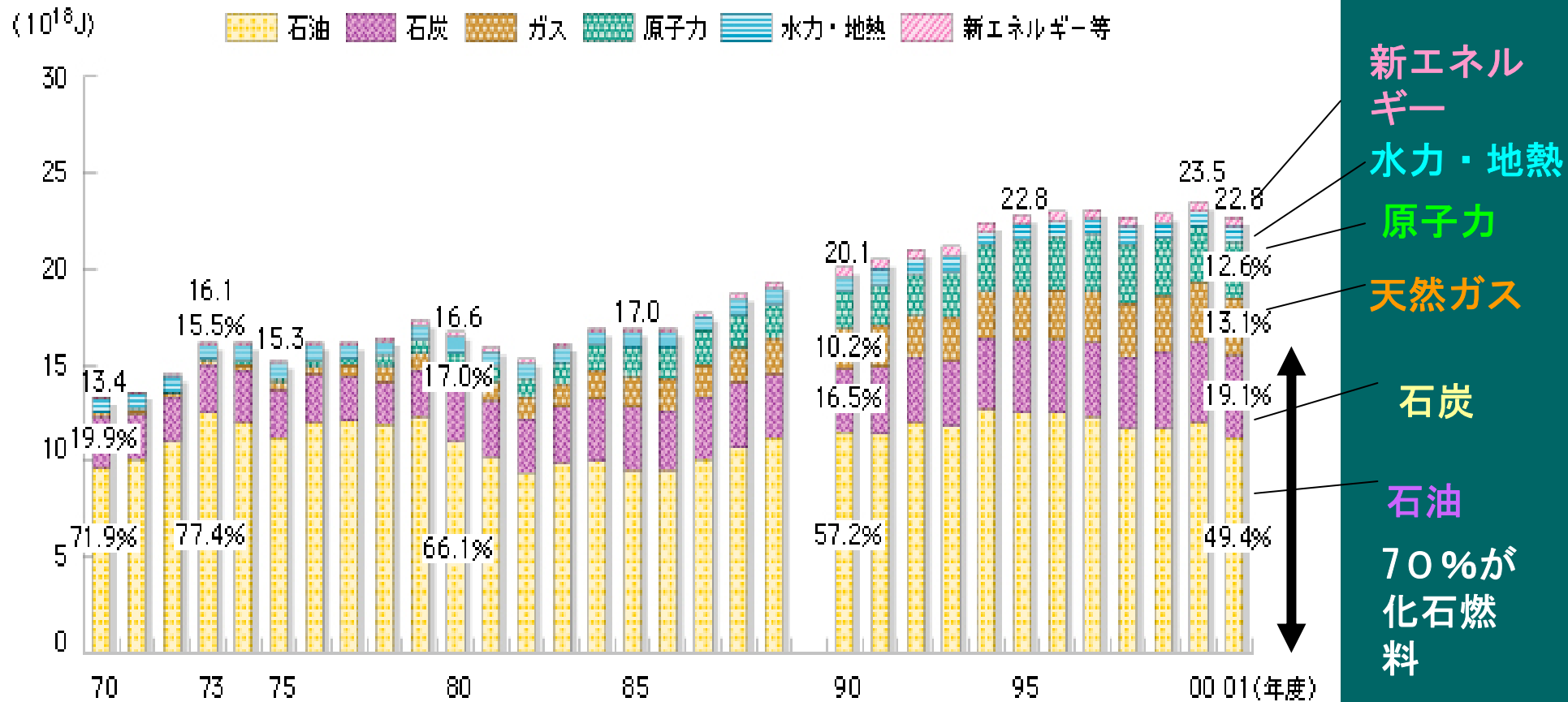
増加する民生部門の消費

最終エネルギー消費の推移

(原油換算百万kl)



化石燃料に頼るエネルギー供給

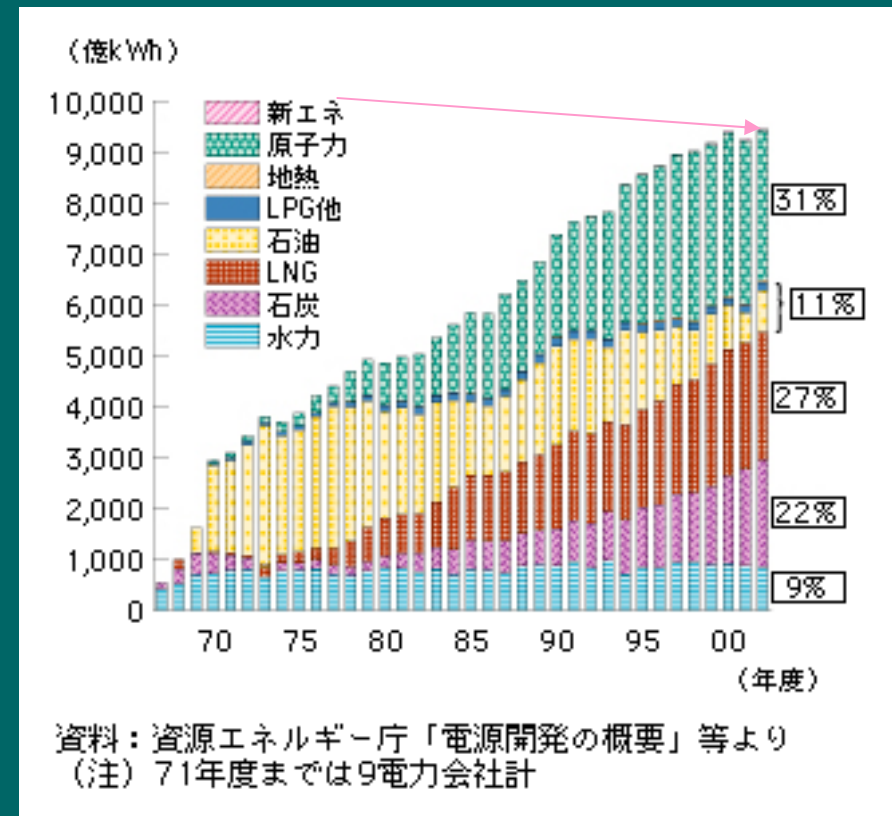
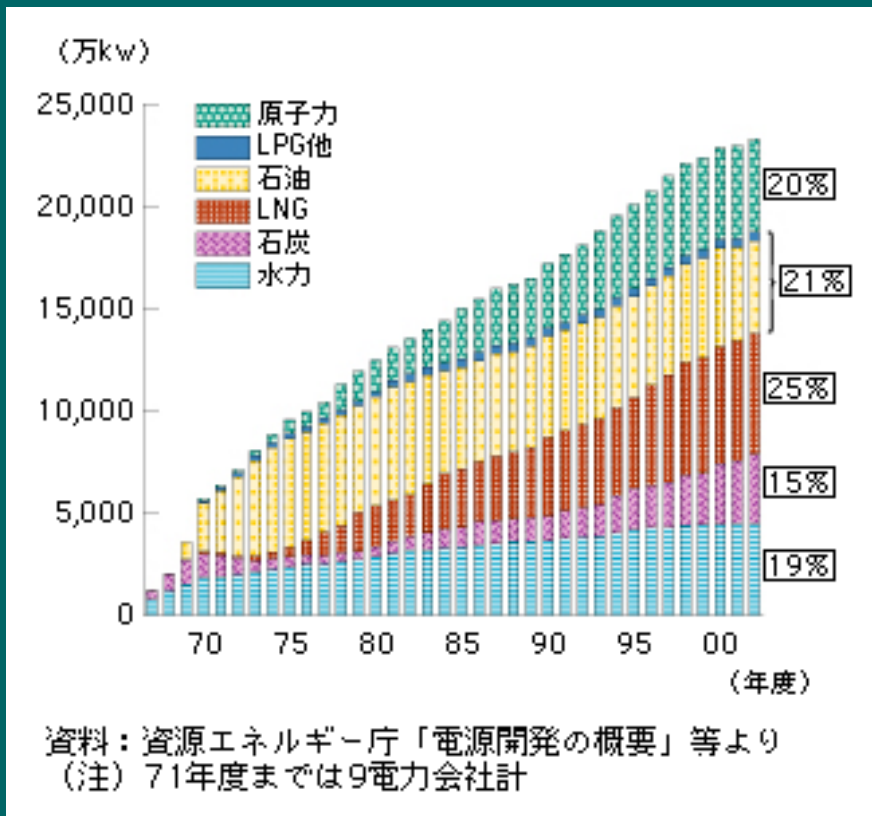


資料：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」

電力構成の推移

石油火力・水力の割合は減少、石炭・LNG・原子力の割合が増加

発電電力・総発電エネルギーの推移（％）









資源エネルギー庁のHP

<http://www.enecho.meti.go.jp/energy/japan/japan02.htm>による。

新エネルギー目標値

●供給サイドの新エネルギー

	1999年度（実績）		2010年度				
	原油換算 （万k l）	設備規模 （万kw）	現行対策維持ケース		目標ケース		
			原油換算 （万k l）	設備規模 （万kw）	原油換算 （万k l）	設備規模 （万kw）	2010/ 1999
 太陽光発電	5.3	20.9	62	254	118	482	約 23 倍
 風力発電	3.5	8.3	32	78	134	300	約 38 倍
 廃棄物発電	115	90	208	175	552	417	約 5 倍
 バイオマス発電	5.4	8.0	13	16	34	33	約 6 倍
 太陽熱利用	98	-	72	-	439	-	約 4 倍
 未利用エネルギー （雪氷冷熱を含む）	4.1	-	9.3	-	58	-	約 14 倍
 廃棄物熱利用	4.4	-	4.4	-	14	-	約 3 倍
 バイオマス熱利用	-	-	-	-	67	-	-
黒液・廃材等	457	-	479	-	494	-	約 1.1 倍
新エネルギー供給計	693	-	878	-	1910	-	約 3 倍

資源エネルギー庁のHPによる

第2部：太陽電池の仕組み

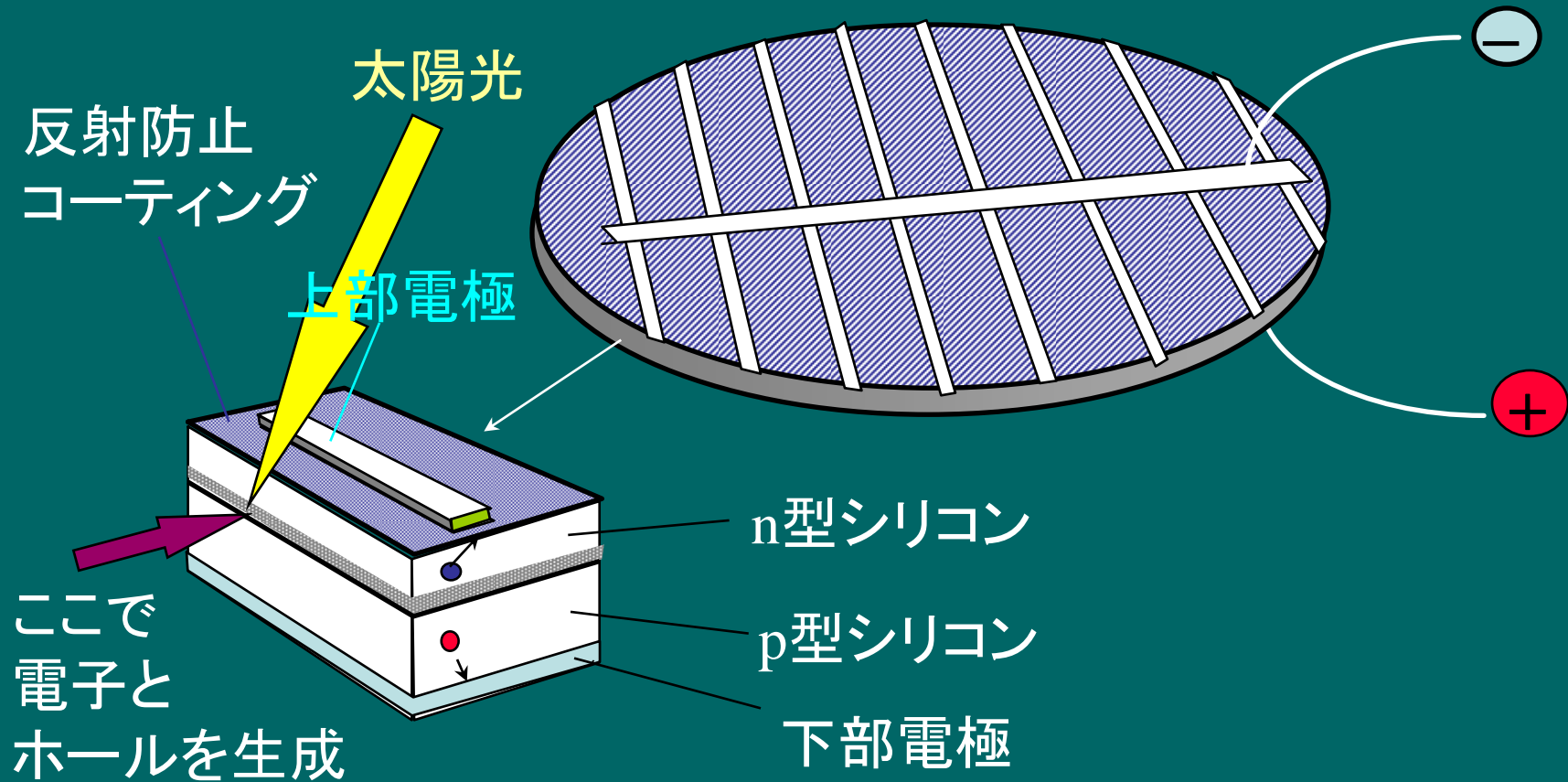


- 太陽電池とは
- 太陽電池の仕組み
- 太陽電池の原理
- 太陽電池の材料

太陽電池とは

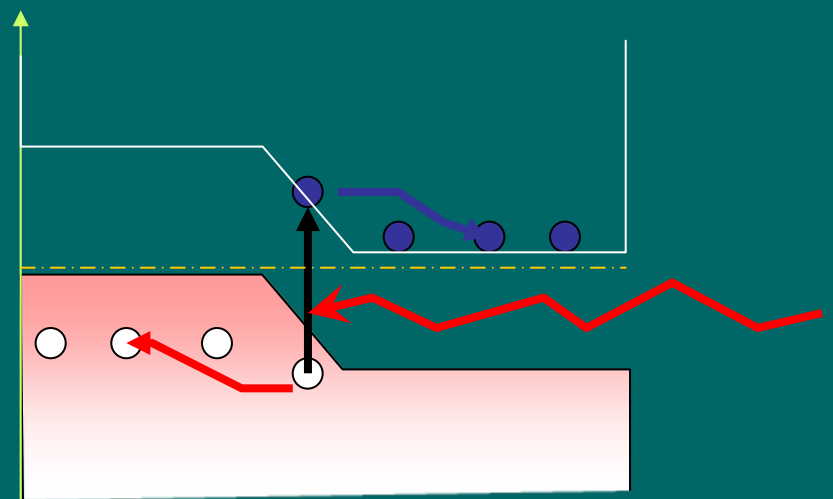
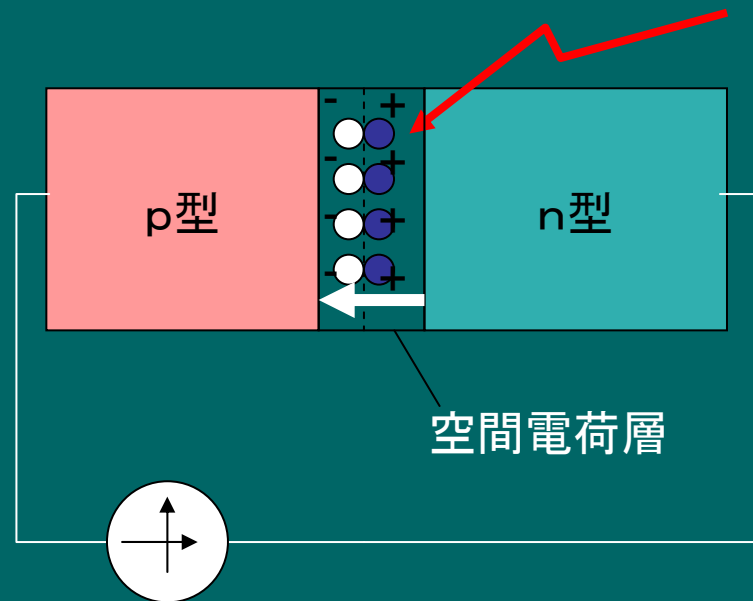
- 太陽電池は光を電気に変える半導体の素子である。太陽光のエネルギーの10%程度を電気に変える。
- 太陽電池は乾電池や蓄電池と違って電気を貯める性質はない。光がないと全く発電しない。太陽光発電器というべきである。
- 太陽電池の出力は直流である。そのままでは、家庭用の電源(交流)として使えない。そのためインバータという仕掛けを使って交流に変換している。

太陽電池の仕組み



光起電力の原理

- pn接合に光照射
- バンドギャップを超える光によって電子とホールが生成される
- 空間電荷領域の拡散
電位差によって、電子はn層に拡散、ホールはp層に拡散



太陽電池の等価回路と特性

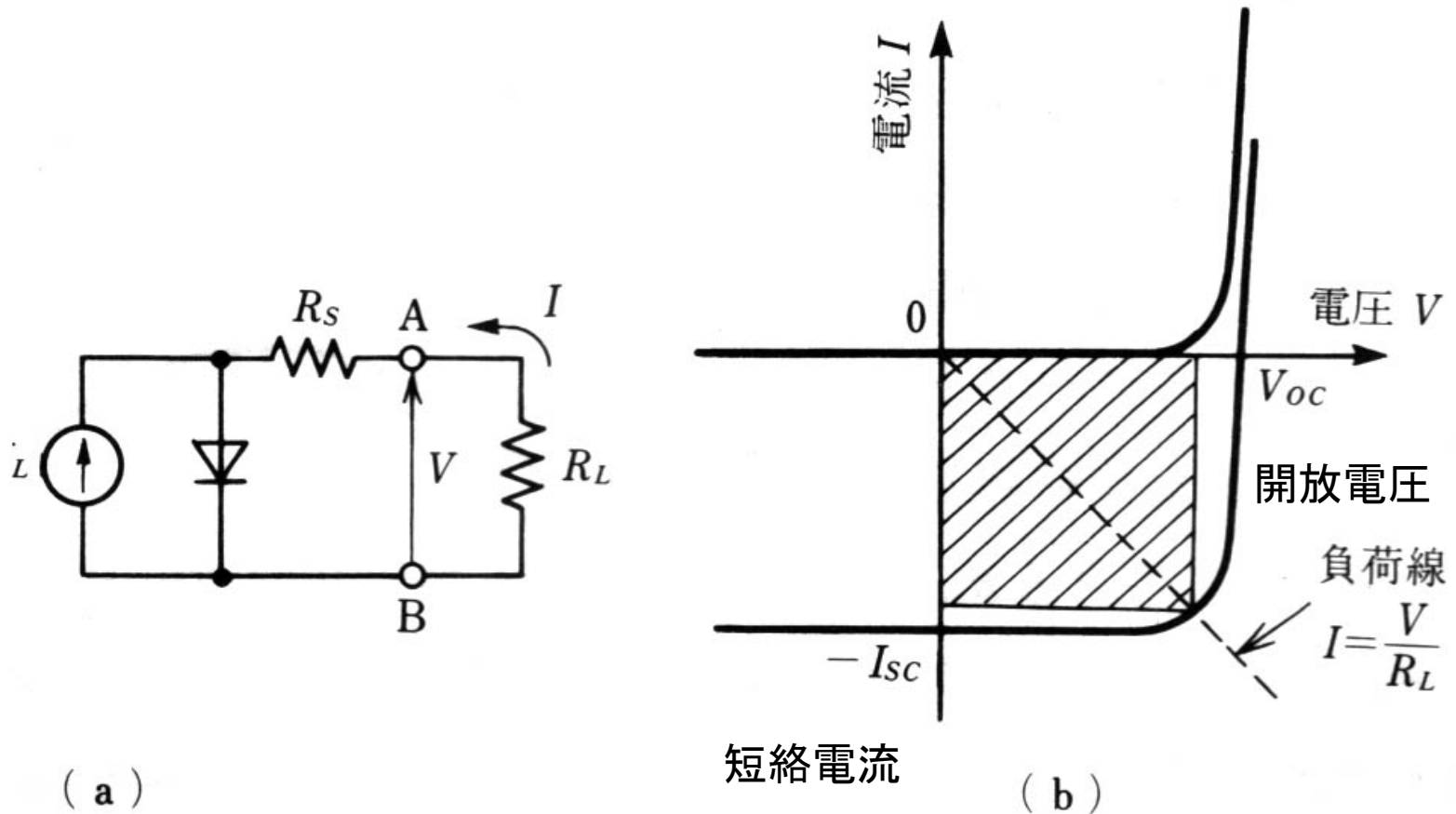


図 3・54 太陽電池の (a) 等価回路と (b) I - V 特性

太陽光スペクトルと理論効率

- AM(Air mass) 1.0または1.5の太陽光のエネルギー密度スペクトル

AMって？

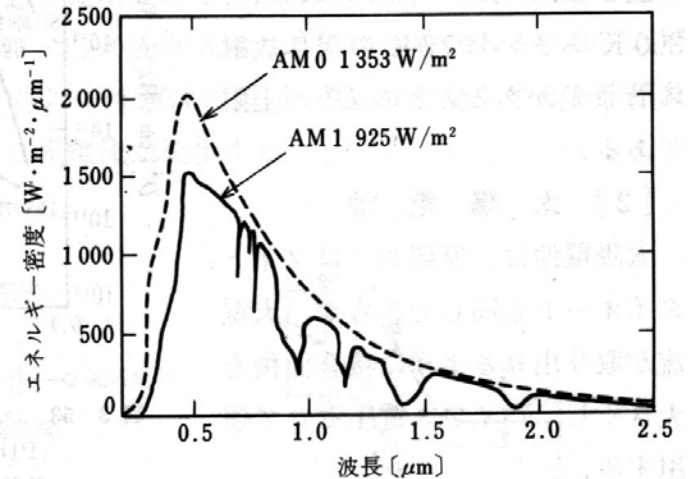


図 3・55 太陽光のエネルギースペクトル (AM : air mass)

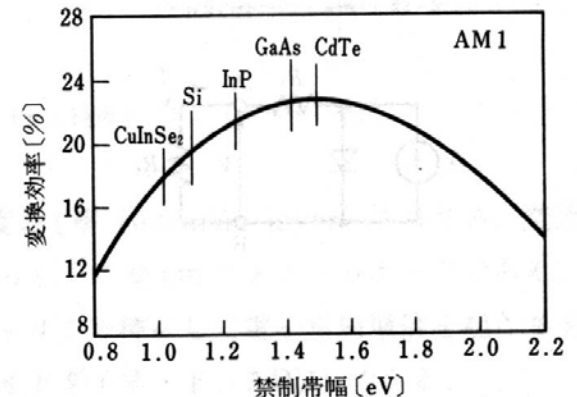


図 3・56 太陽電池の理論変換効率

太陽電池の材料

シリコン系

- 単結晶シリコン: 材料高コスト, 比較的高効率
- 多結晶シリコン: 材料低コスト, 中効率
- 薄膜アモルファスシリコン: 省資源, 劣化が問題
- 薄膜多結晶シリコン: 省資源, 中効率

化合物系

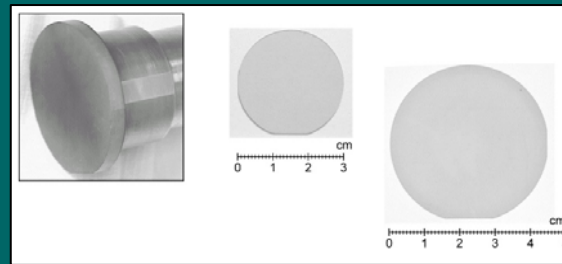
- 単結晶GaAs: 超高効率, 高コスト, As含有→宇宙
- 薄膜多結晶CdTe: 高効率, 低コスト, Cd含有
- 薄膜多結晶CuInSe₂系: 高効率, 低コスト

半導体のいろいろ

- 半導体の主役はIV属元素のSi(珪素:シリコン):PCのCPUやメモリ(DRAM)の材料は、すべてSi。
- IV属をIII属元素とV属元素で置き換えたIII-V族化合物(GaAs, InAs, GaP, GaN \cdots)も半導体の性質をもつ。II属とVI属に置き換えたII-VI族化合物(CdTe, ZnSe \cdots)も半導体である。
- II-VI族化合物のII属金属をI属とIII属に置き換えたI-III-VI₂族化合物(CuInSe₂)も半導体の性質をもつ。

半導体のいろいろ

- 窒化ガリウム(GaN)
青紫レーザ材料
- 炭化珪素(SiC)
高耐熱
- 珪素(Si):シリコン
標準的半導体
- ゲルマニウム(Ge)
ナローギャップ
- 化合物半導体
GaAs, ZnSe...



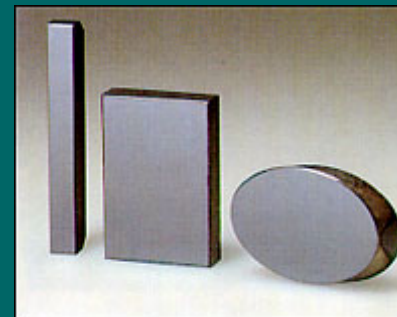
SiC

<http://www.ifm.liu.se/>



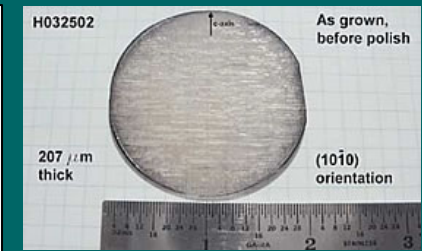
Si

<http://www.anstro.gov.au/>



GaAs

<http://www.ii-vi.com/>

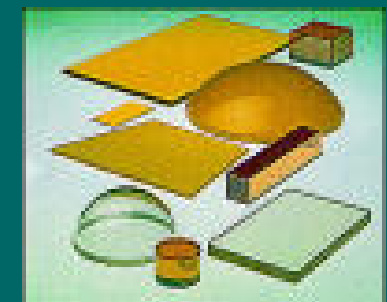


GaN



Ge

<http://www.ii-vi.com/>



ZnSe, ZnS

<http://www.ii-vi.com/>

半導体と周期表

IIB	IIIB	IV	V	VI
	B	C	N	O
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg	Tl	Pb	Bi	Po

IV族元素半導体

Si, Ge

化合物半導体

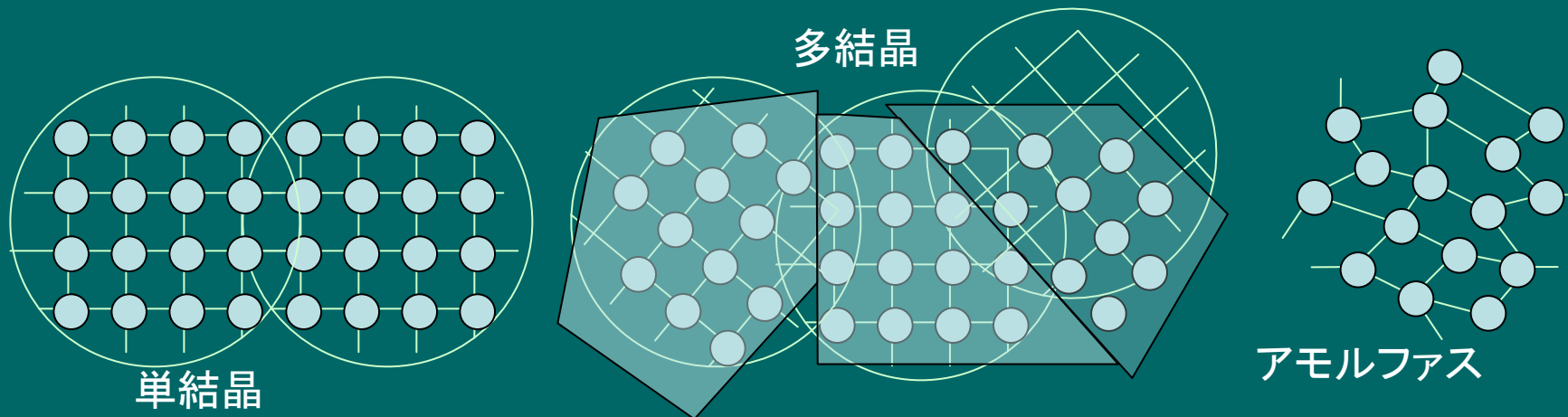
IV属を挟んで両側にある元素を組み合わせた半導体の性質をもつ物質ができる

III-V族(GaAs, GaN, InP, InSb)

II-VI族(CdS, CdTe, ZnS, ZnSe)

結晶(単結晶・多結晶)・アモルファス

- 結晶：固体の原子が規則正しく配列している場合
 - － 単結晶：固体全体が単一の原子配列の結晶でできている
 - － 多結晶：固体がいくつかの単結晶の粒(grain)からなる
- アモルファス：固体の原子配列が長距離規則をもたない。(液体が凍結した状態)「非晶質」ともいう



シリコン

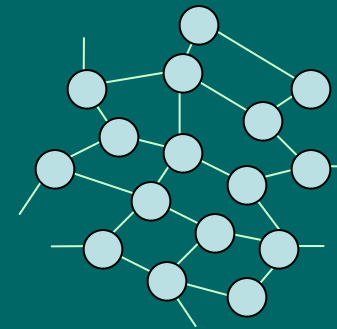
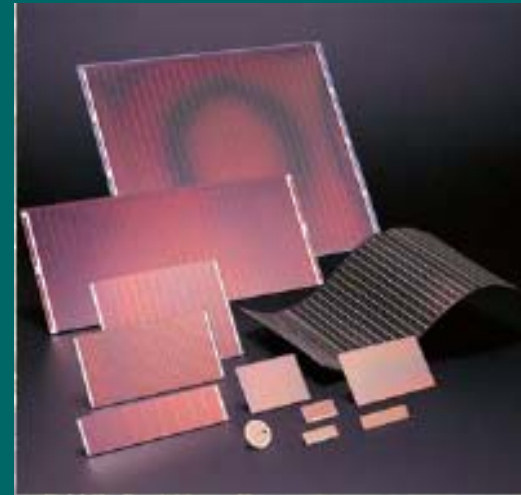
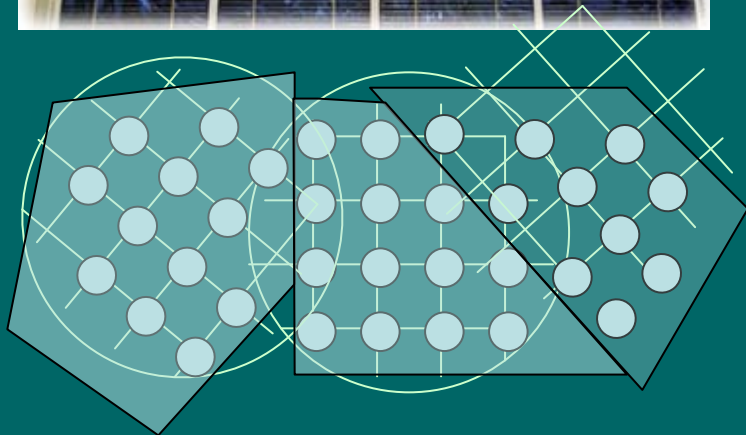
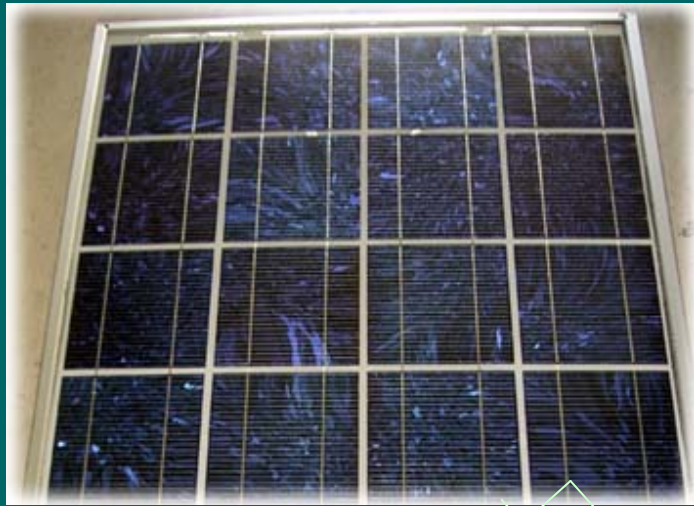
- 珪素(Si):シリコン
- 純度 : eleven nine
99.999999999
- 半導体素子の材料



シリコン太陽電池

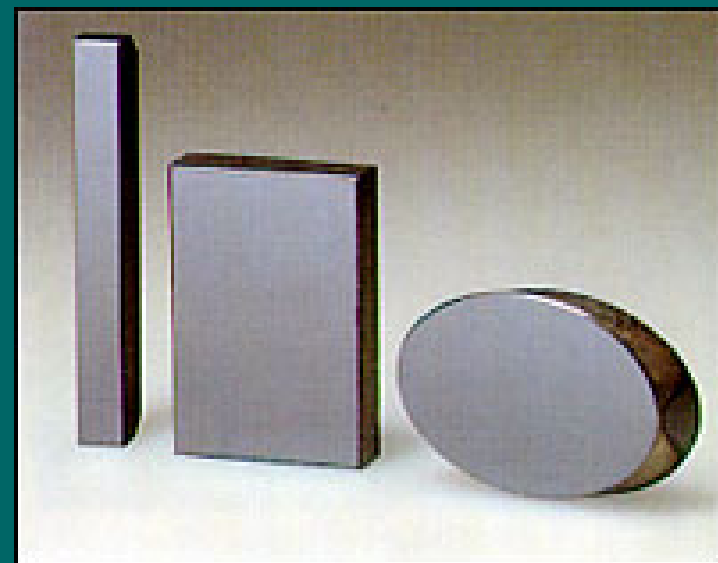
多結晶シリコン太陽電池

アモルファスシリコン太陽電池

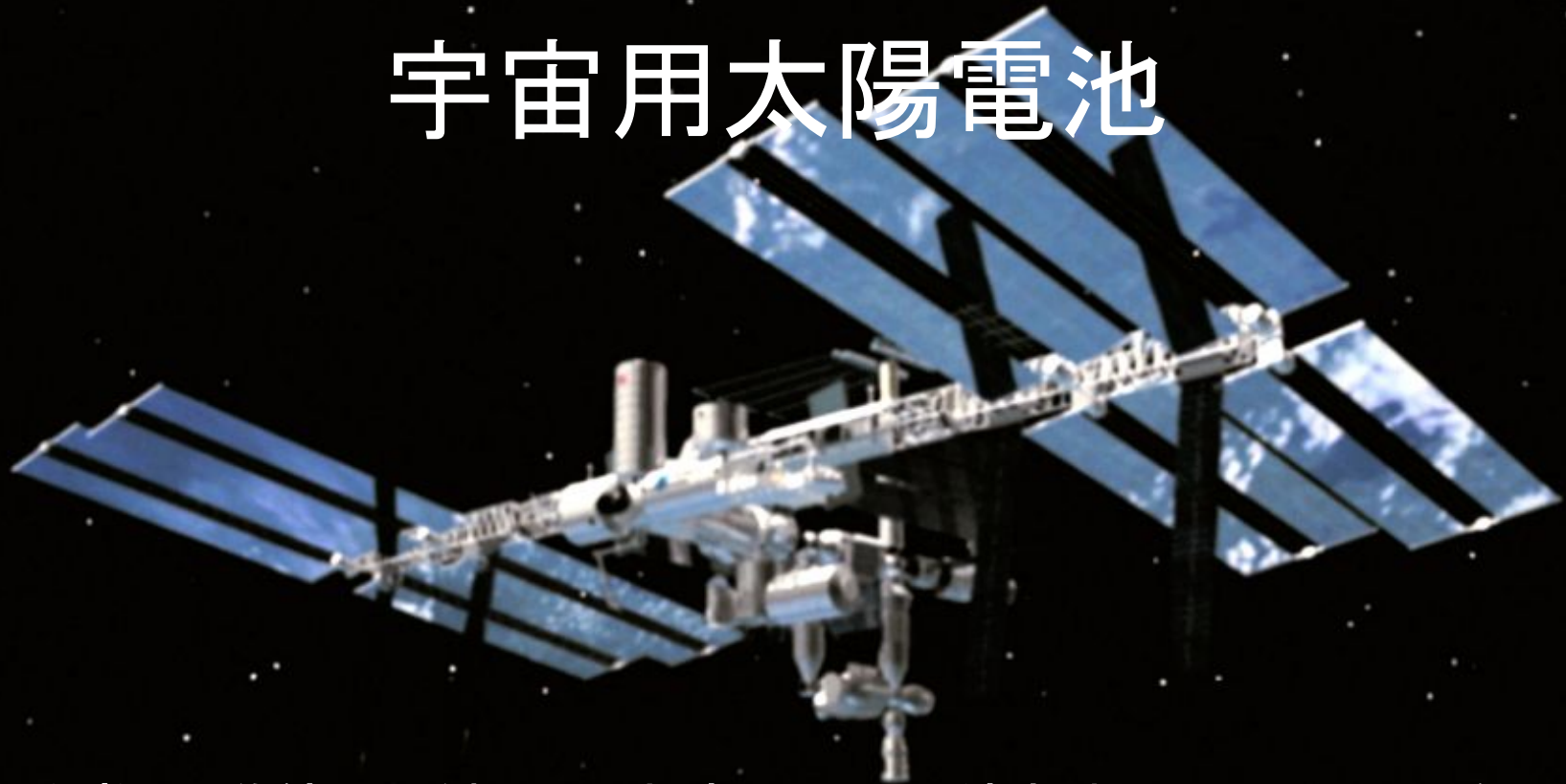


化合物半導体太陽電池

- GaAs
 - InGaP, InGaAs
などの混晶半導体が主に宇宙
用太陽電池材料として活躍
 - 36%の高効率
- CIS
 - $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ ヘテロ接合太陽
電池(つばさに搭載)



宇宙用太陽電池



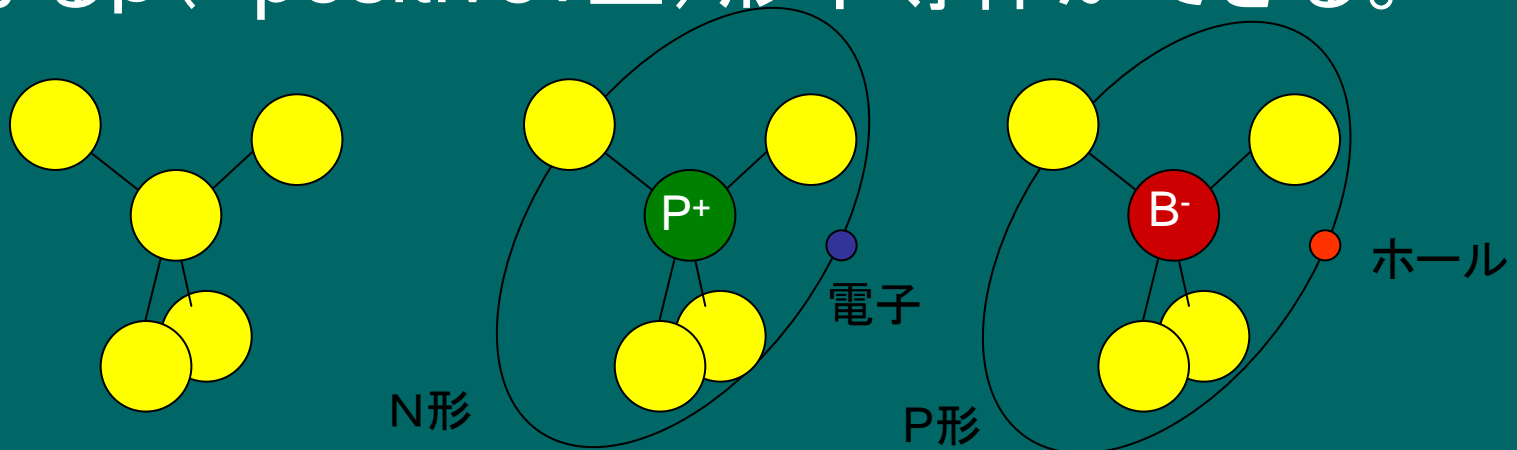
- 化合物半導体の種類は、宇宙用として使われているのは、例えば2002年に宇宙科学研究所(現JAXA宇宙科学研究本部)が打ち上げる小惑星探査機ミューゼスCに使用予定のものは、**GalnP2/GaAs/Geの3層構造**で、3つの太陽電池が直列につながった構造のものになっています。トリプル・ジャンクション・セルという、今のところ最高効率のもので、他に、GaAs、InPなども使われています。

太陽電池の原理

- 太陽電池の材料は半導体である。
- 半導体にはn型半導体とp型半導体がある。
 - n型: 電子が電気伝導の主役になる半導体
 - p型: ホールが電気伝導の主役になる半導体
- p形半導体とn形半導体を接合した構造は、電流を一方方向にのみ流す「ダイオード」となる。
- pn接合ダイオードのp/n界面付近には、電子もホールもない空乏層という領域が生じ、そこに「内蔵電界」という強い電界が生じる。
- pn接合ダイオードに光をあてると界面で電子ホール対が生じ、内蔵電界によって電子はn型に、ホールはp型に引きよせられる。これを光起電力効果という。

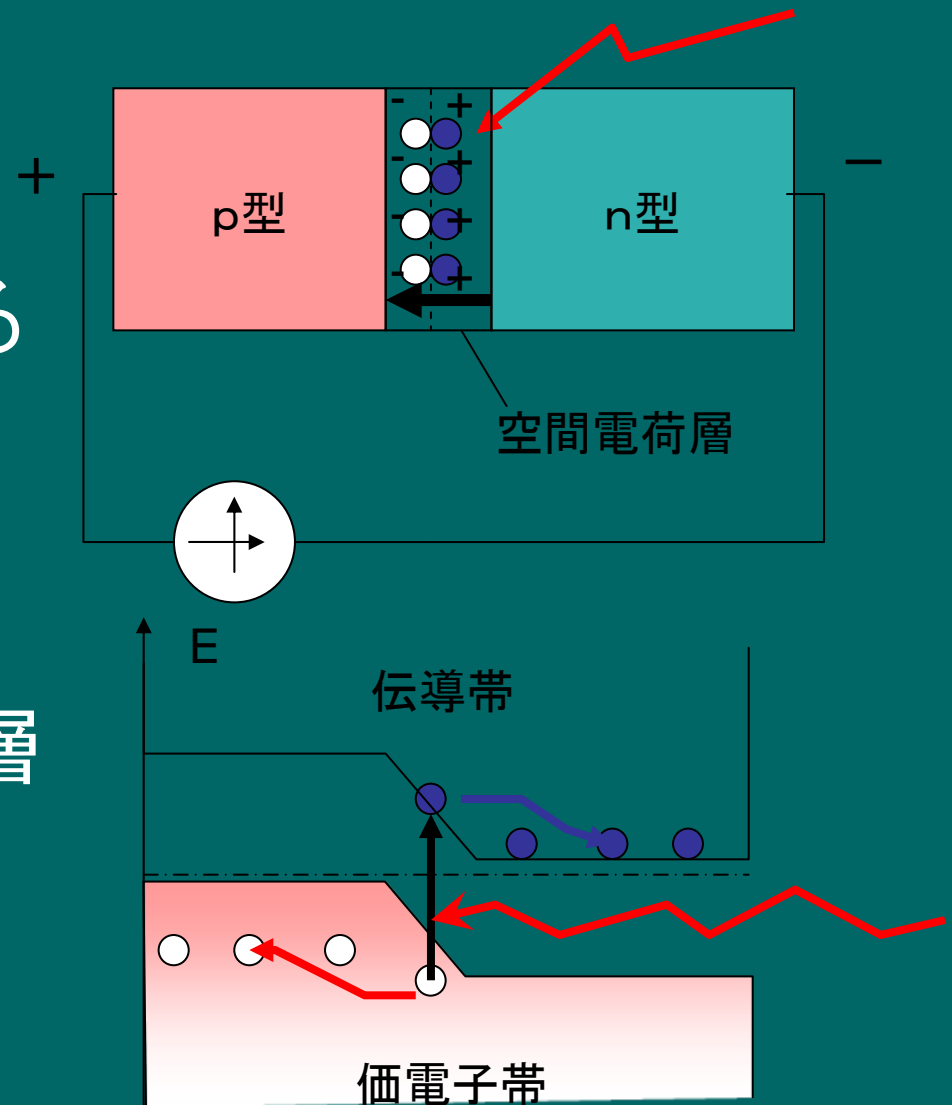
n形、p形半導体

- Si(シリコン)にP(リン)を添加すると、電子がキャリア(電気の運び手)となるn(=negative: 負)形半導体ができる。
- Si(シリコン)にB(ホウ素)を添加すると、ホール(電子の抜け孔: 正の電荷をもつので正孔という)がキャリアとなるp(=positive: 正)形半導体ができる。

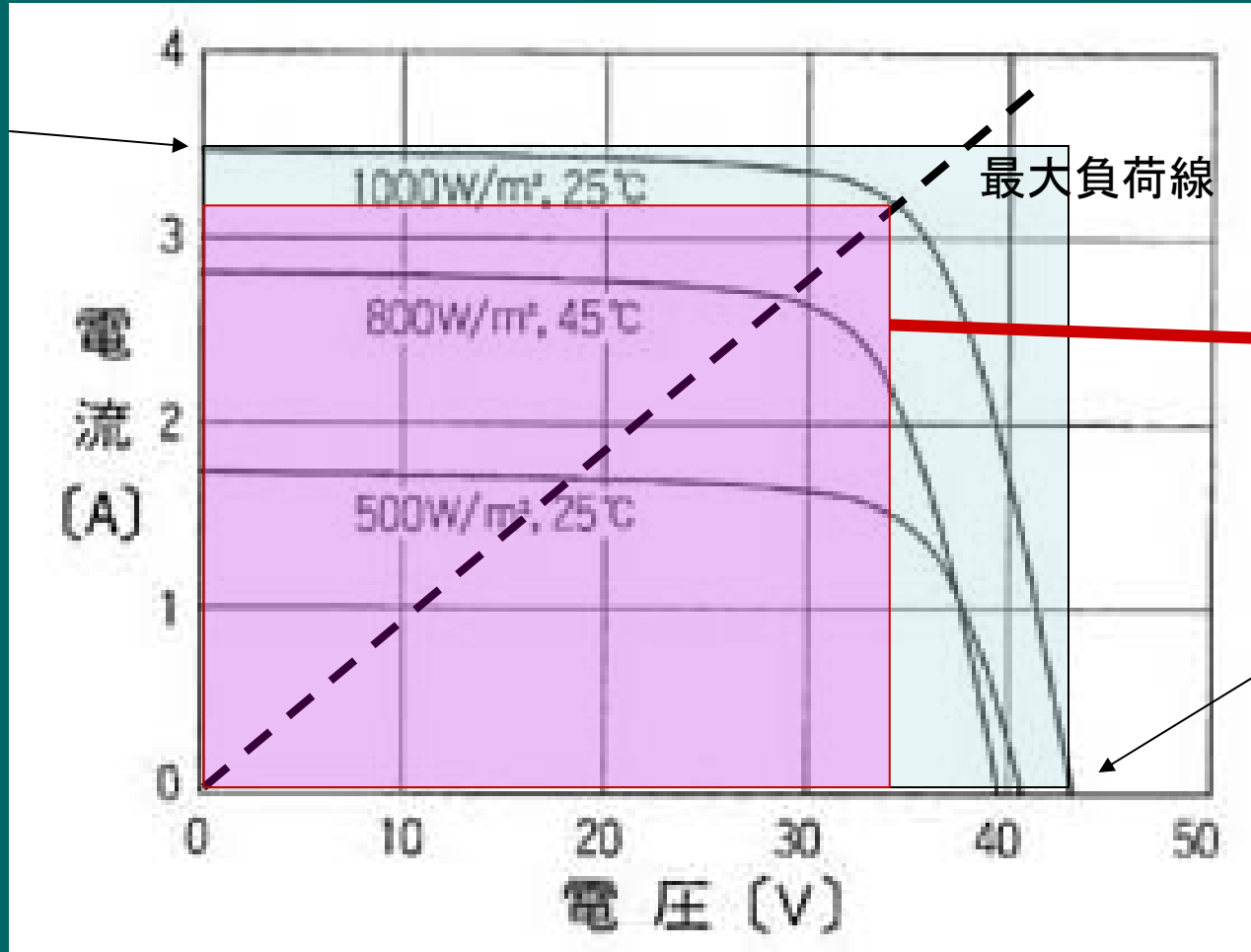


光起電力効果の原理

- pn接合に光照射
- バンドギャップを超える光によって電子とホールが生成される
- 空間電荷層の内蔵電界によって、電子はn層に拡散、ホールはp層に拡散



太陽電池モジュールI-V特性



形状因子FF
=ピンクの面積/
ブルーの面積

ピンクの面積：
取り出せる最大の
パワー

開放電圧 V_{oc}

短絡電流
 I_{sc}

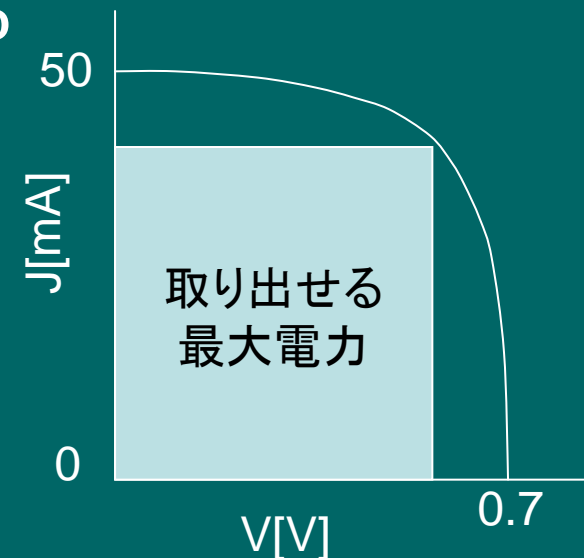
太陽電池セルの効率

- $\eta = V_{oc} \times J_{sc} \times FF / D_s$
- D_s : 太陽光エネルギー密度 = 100mW/cm^2
- たとえば、 $V_{oc} = 0.7 \text{V}$, $J_{oc} = 50 \text{mA}$, $FF = 0.7$

のとき、変換効率 η は

$$\eta = V_{oc} \times J_{sc} \times FF / D_s = 24.5\%$$

となる。



太陽電池の変換効率の 実験室チャンピオンデータ

- 単結晶シリコン: $\eta = 21.3\%$ (三洋電機)
- 多結晶シリコン: $\eta = 19.8\%$ (New South Wales大)
- アモルファスシリコン: $\eta = 13\%$
アモルファス・マイクロシリコン: $\eta = 14.1\%$ (カネカ)
- InGaP/InGaAs/Ge 3接合型: $\eta = 36.5\%$ (Sharp)
- CIGS(CuInGaSe₂/CdS): $\eta = 19.5\%$ (NREL)

体験コーナー

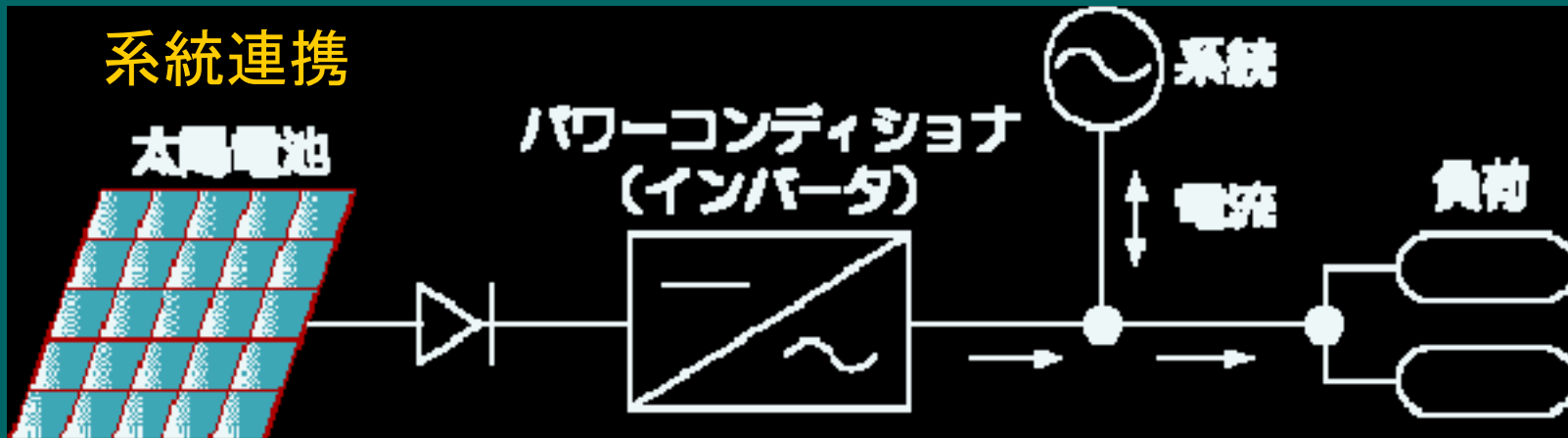
第3部：我が家は太陽光発電所

- 太陽電池パネルの設置作業
- 佐藤勝昭太陽光発電所の誕生
- 発電と売電の実績



太陽光発電システム

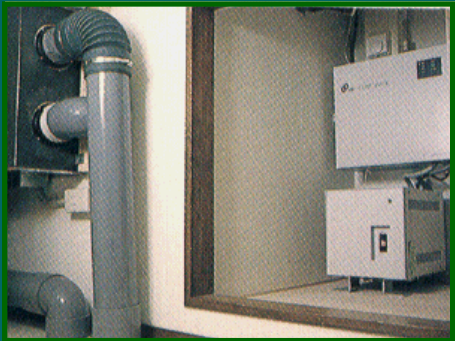
— 独立系と系統連携 —



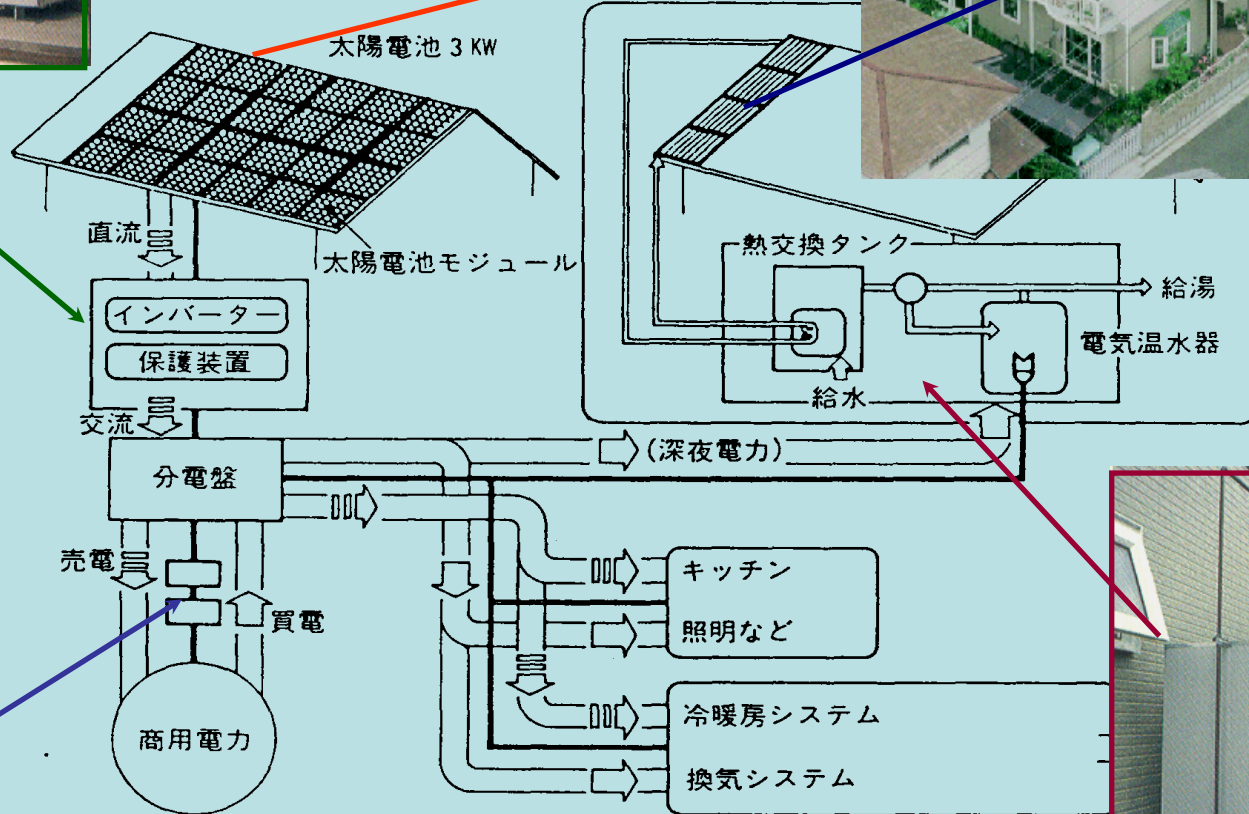
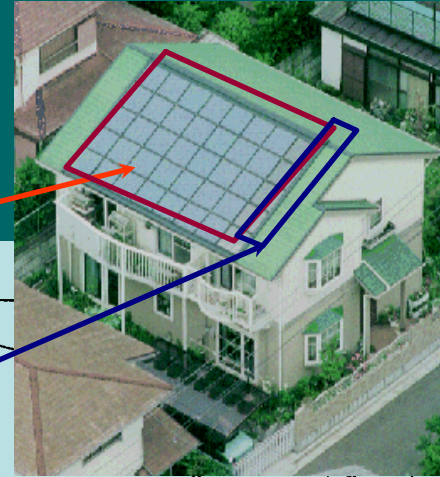
ちょっと耳学問

系統連携とは？

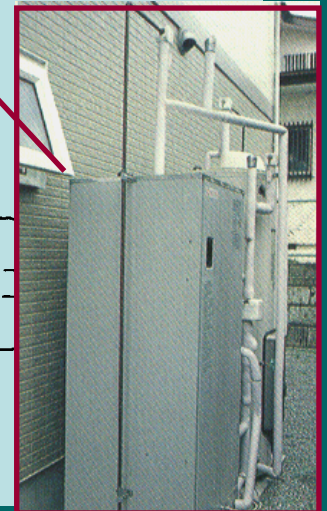
- 分散型の電源を電力系統(ネットワーク、グリッド)に接続する技術。
- 逆潮(分散型電源から系統に電気を送り出す)
- 工事のため系統で電源を切っても、分散電源からの供給が続くと危険なので、停電すると系統連携スイッチで系統との接続は自動的に遮断される。(従って停電の時、電気は使えません。)
- 系統と独立に電源とユーザが自己完結するアイランディング現象が起きることもある。



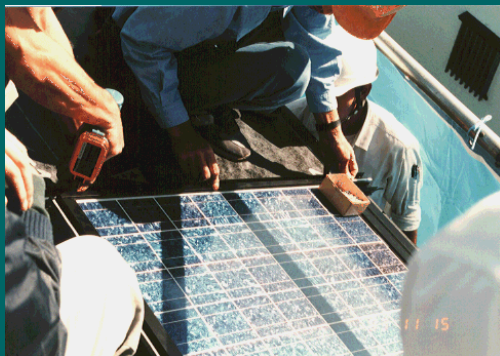
屋根裏部屋の
インバーター



買電、売電別々の
メーター



太陽電池パネル設置作業



佐藤勝昭太陽光発電所の誕生

- 1994.3 東京電力社長と契約書
 - 系統連携協議資料 91ページ
 - 太陽電池モジュール、インバータの詳細を含む
- 関東電気保安協会との保安契約
 - 1995.12 電気工作物規定の変更により解除
- 受電用メータと売電用メータ
 - 受電: 時間帯別電力契約(昼間7-23, 夜間23-7)
 - 銀行引き落としと銀行振込(別勘定)

太陽電池の発電実績(1)

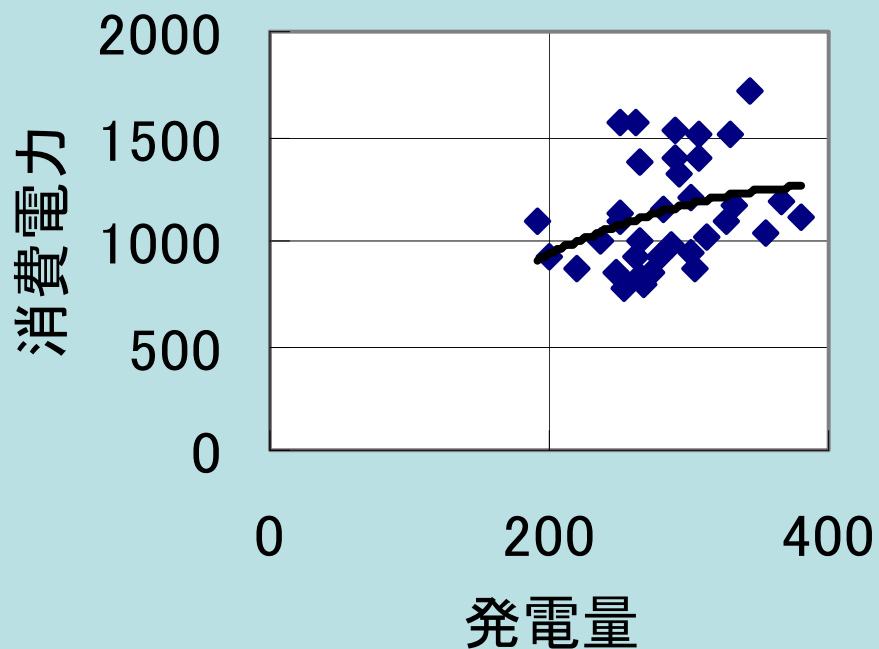
- 公称3kWのシステムの最大発電電力は晴れた日の南中時で2.2~2.4kWしかない。
 - 公称値: 標準太陽光(1kW/m²)が垂直入射したときの標準温度(25°C)での最大電力
 - 太陽電池は半導体素子なので温度が1°C上がる毎に効率がもとの値の0.5%だけ落ちる。
夏場50°C上昇:: 変換効率: 10%→8.75%
- (温度に対する補正係数 K_1 は、 $K_1=1-a(T_c-25^\circ\text{C})$ で与えられる。ここに、 a は結晶Siでは0.004~0.005である。従って、 $T_c=50^\circ\text{C}$ のとき、 $K_1=1-0.005 \times 25=0.875$ となる。)

太陽電池の発電実績(2) (9年平均)

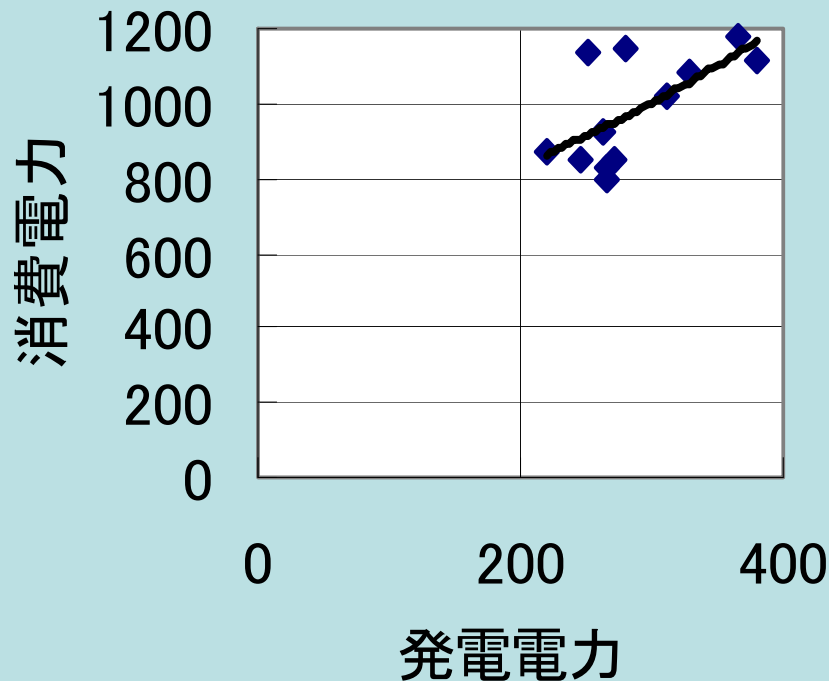
- 最大発電月: 8月 332kWh
- 最小発電月: 11月 224kWh
- 平均月発電量: 248kWh
- 平均年発電量: 2,979kWh
- 平均月売電電力量: 100kWh
- 平均年売電電力量: 1,184kWh
- 積算総発電電力量: 26,811kWh

発電電力と消費電力の相関 ピークカット効果はあるか

発電量と消費電力の相関(通年)



発電量と消費電力の相関(夏場)



太陽光発電、売電、買電、その他の電力データ

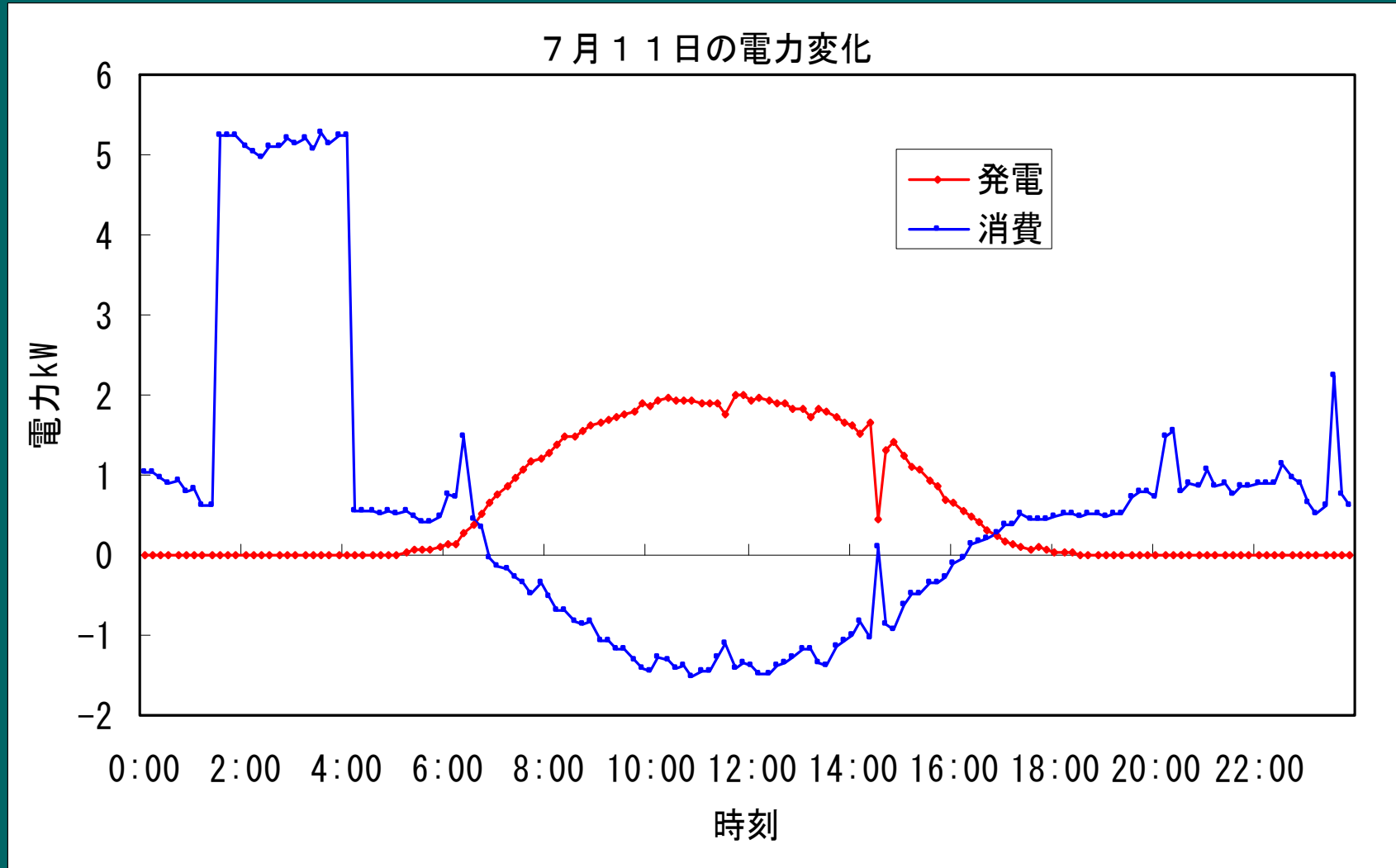
年・月	発電量 (測)	売電量	買電、 (昼)	買電、 (夜)	買電計	発電-売電	消費量	余剰量	電気料金	振込	差額
1994年3月		160	393	559	952			-792	18751	5683	13068
1994年4月		192	171	616	787			-595	11519	5442	6077
1994年5月	356	197	212	675	887	159	1046	-690	13301	5799	7502
1994年6月	272	116	215	476	691	156	847	-575	12042	3816	8226
1994年7月	328	112	402	468	870	216	1086	-758	18558	3977	14581
1994年8月	379	131	414	454	868	248	1116	-737	18882	4653	14229
1994年9月	265	103	252	417	669	162	831	-566	12936	3521	9415
1994年10月	238	91	281	563	844	147	991	-753	14958	3232	11726
1994年11月	264	141	232	645	877	123	1000	-736	13798	4677	9121
1994年12月	251	111	248	707	955	140	1095	-844	14786	3765	11021
1995年1月	343	197	430	1136	1566	146	1712	-1369	24122	6997	17125
1995年2月	291	145	332	910	1242	146	1388	-1097	19130	5140	13990
1995年3月	265	119	358	868	1226	146	1372	-1107	19755	4227	15528
1995年4月	279	150	232	565	797	129	926	-647	13250	4901	8349

1995年5月	303	145	225	478	703	158	861	-558	12407	4700	7707
1995年6月	219	74	225	503	728	145	873	-654	12579	2497	10082
1995年7月	252	54	420	514	934	198	1132	-880	19457	1917	17540
1995年8月	367	70	514	373	887	297	1184	-817	21794	2521	19273
1995年9月	267	115	277	365	642	152	794	-527	13426	3991	9435
1995年10月	254	130	229	429	658	124	782	-528	12178	4312	7866
1995年11月	288	154	287	564	851	134	985	-697	15131	5279	9852
1995年12月	306	130	434	908	1342	176	1518	-1212	22630	4617	18013
1996年1月	289	85	457	869	1326	204	1530	-1241	22181	2854	19327
1996年2月	262	95	498	896	1394	167	1561	-1299	23730	3189	20541
1996年3月	307	141	360	872	1232	166	1398	-1091	18942	4733	14209
1996年4月	332	157	279	710	989	175	1164	-832	15188	5406	9782
1996年5月	300	174	208	602	810	126	936	-636	12121	4898	7223
1996年6月	263	88	197	555	752	175	927	-664	10845	2691	8154
1996年7月	312	137	358	484	842	175	1017	-705	16649	4640	12009
1996年8月	281	78	477	467	944	203	1147	-866	20045	2776	17269
1996年9月	247	95	286	416	702	152	854	-607	11833	3129	8704
1996年10月	201	109	283	549	832	92	924	-723	13092	3367	9725
1996年11月	191	77	334	655	989	114	1103	-912	16812	3091	13721
1996年12月	250	106	456	962	1418	144	1562	-1312	23296	3599	19697
1997年1月	330	117	384	913	1297	213	1510	-1180	20625	3984	16641
1997年2月	294	125	319	839	1158	169	1327	-1033	17904	4208	13696
1997年3月	302	147	261	787	1048	155	1203	-901			
合計	9948	4216	11376	22594	33970	5732	39702	-29754	568383	137104	431279
平均(每月)	284	120	325	646	971	164	1134	-850	16717	4032	12685
年平均	3411	1445	3900	7747	11647	1965	13612	-10201	200606	48390	152216

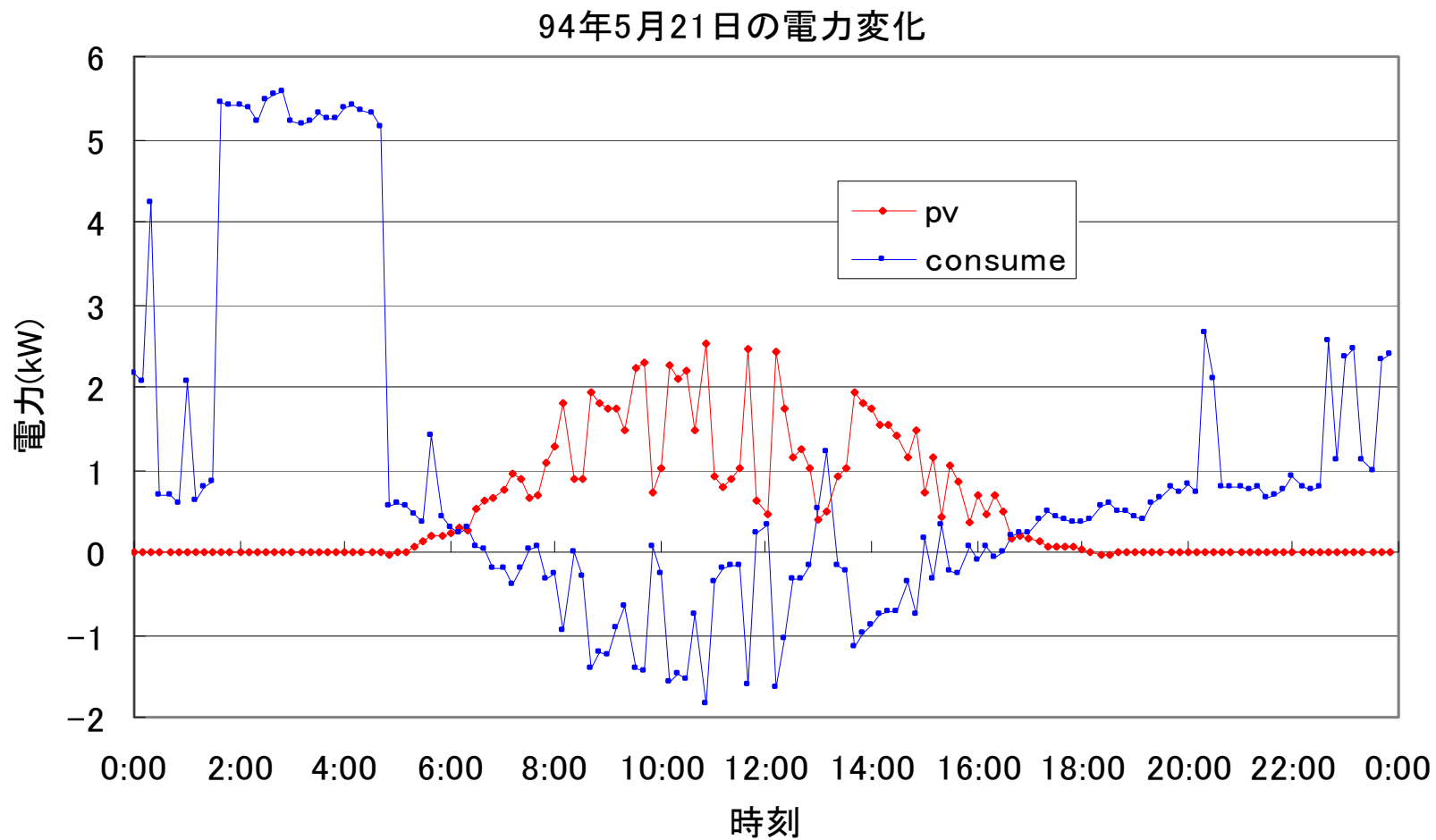
太陽光発電の日変化

- 日変化：発電6:00～18:30,最大11:40(5月)
- 1日の発電量
 - 全発電量・夏の晴れた日：15～17kWh
 - 冬の晴れた日：13～15kWh
 - 曇り：2～5kWh, 雨：1～2kWh
- 太陽光発電は不安定な電力
 - 雲の通過に伴い大きく変動する
 - 系統連携において給電・受電がめまぐるしく変化する
 - 系統は、この変化を受容できる余力が必要

発電量・受電/供電量の時間変化(夏・晴の日)



発電量・受電/供電量の時間変化(春・晴時々曇り)



第4部：これからの太陽光発電の課題

- 太陽電池材料とこれからの開発課題
- シリコン系：
 - 結晶系の課題：solar-grade silicon
 - 薄膜系の課題：劣化のない材料
- 化合物半導体
 - CIS (CuInSe_2):モジュールで20%をめざす
 - GaAs:タンデムで40%をめざす。

フォトダイオード

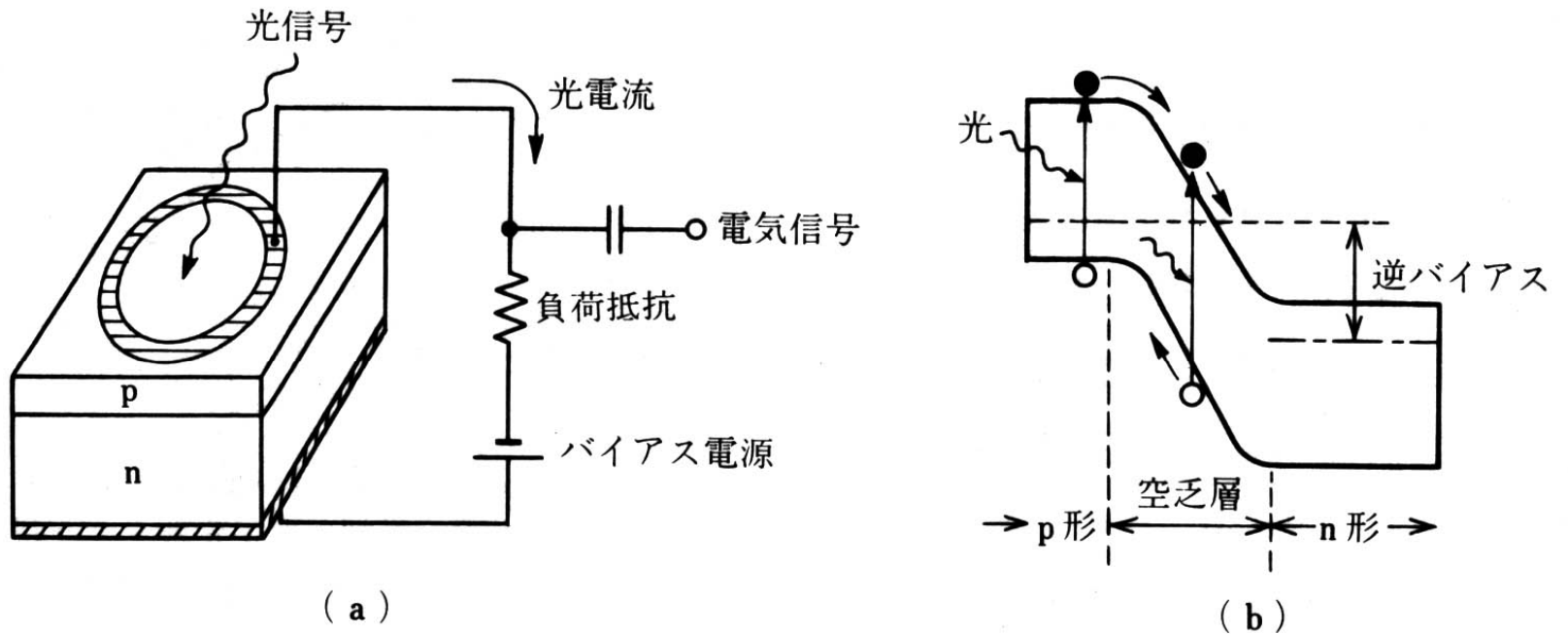


図 3・52 フォトダイオードの (a) 構造と (b) エネルギー帯図

フォトダイオードの動作

- フォトダイオードは、通常、pn接合に逆バイアスを印加した状態で使用される。空乏層でキャリア生成、拡散電位差により分離。
- pinフォトダイオード
高速動作
- アバランシェ・ダイオード：電子雪崩現象で増倍。



フォトダイオードの用途

- 光ファイバー通信：受信用光検出器
- 光ストレージ：光ピックアップ用光検出器
- 各種光センサー：自動ドア、リモコン、自動水栓等
- 計測用光検出器：赤外線計測

フォトダイオード材料

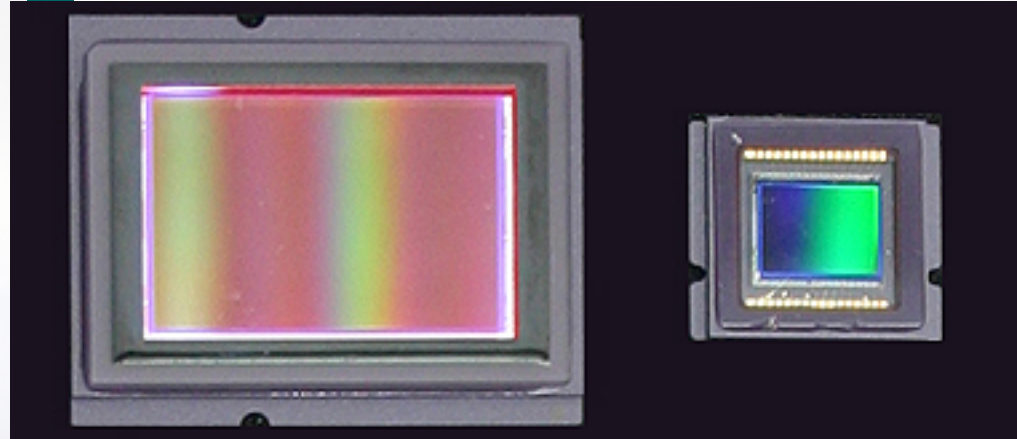
- IV族
 - Si(最もポピュラーなフォトダイオード材料)
 - Ge(近赤外線)
- III-V族材料: 例) GaInSbAs: 光通信用
- II-VI族材料: 例) CdHgTe: 赤外線計測用

撮像デバイス

- 静止画像
- 動画像
- CCD (charge coupled device) の動作
- CMOS センサー

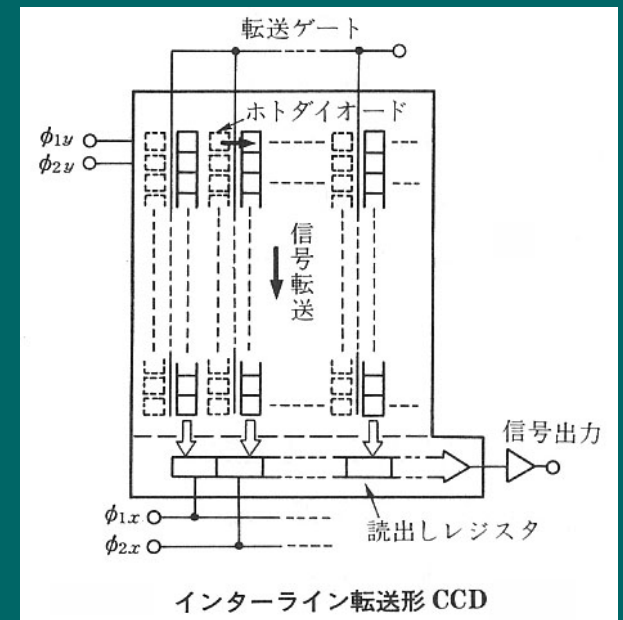
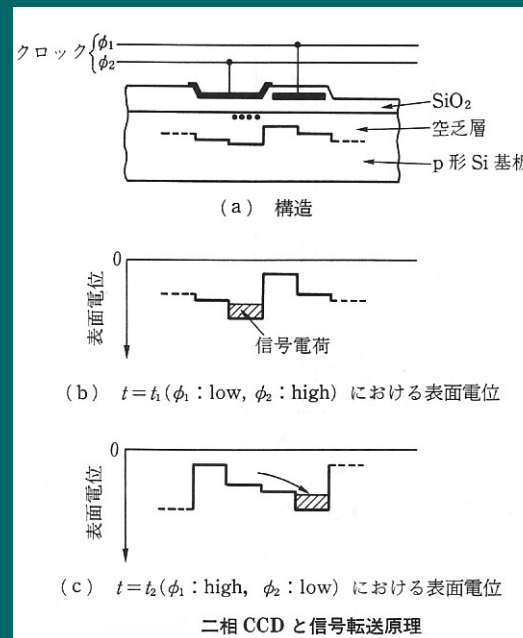
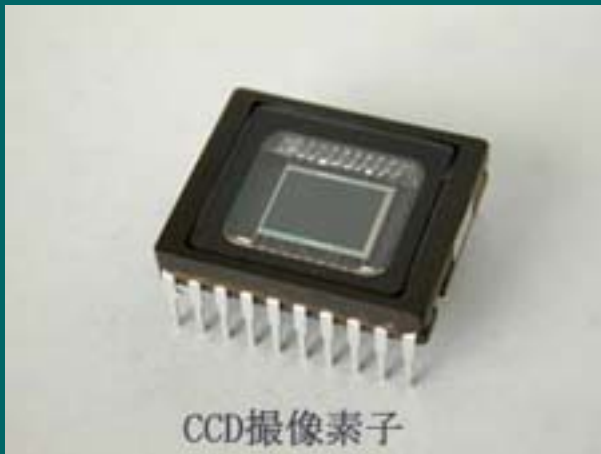
CCDカメラの中身(Asca corpのHPより)

- http://aska-sg.net/popeye/009_20040225.html



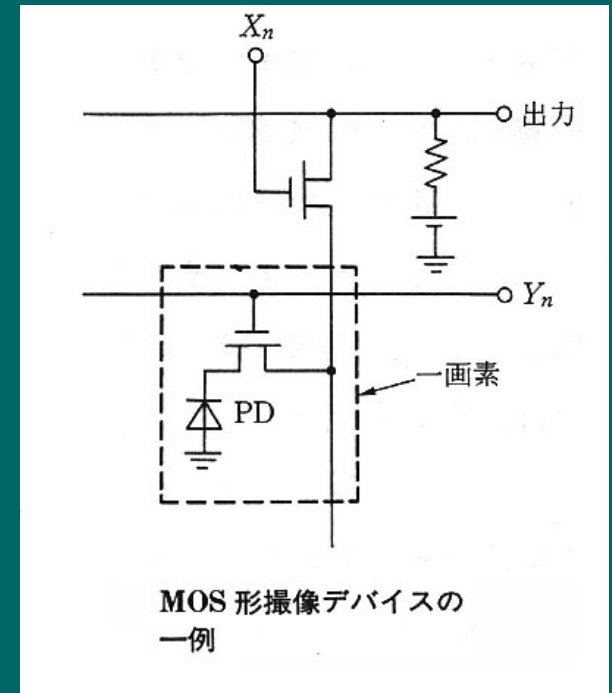
CCD撮像素子の原理

- CCDとはcharge-coupled deviceの略語
- 光センサ部で発生した電荷(charge)を次々と転送する仕組みのこと



MOS形撮像素子

- 従来のCCDセンサに比べて約1/10の電力で動作し、単一の低電圧で稼動することから、周辺回路との一体化も可能になる。
- CCDではライン毎に転送するため1つの素子でオーバーロードになるとライン全部が欠陥になるが、MOSセンサの場合、指定したアドレスの素子のみをゲートするので、他の素子に影響を与えない。



第3回の問題

- 夜になると街灯が自動的に点灯する仕組みを説明せよ。