

「あさお自然エネルギーセミナー」

2003.6.21



太陽光エネルギー を考える

東京農工大学

工学部

佐藤勝昭

お話の内容

- 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

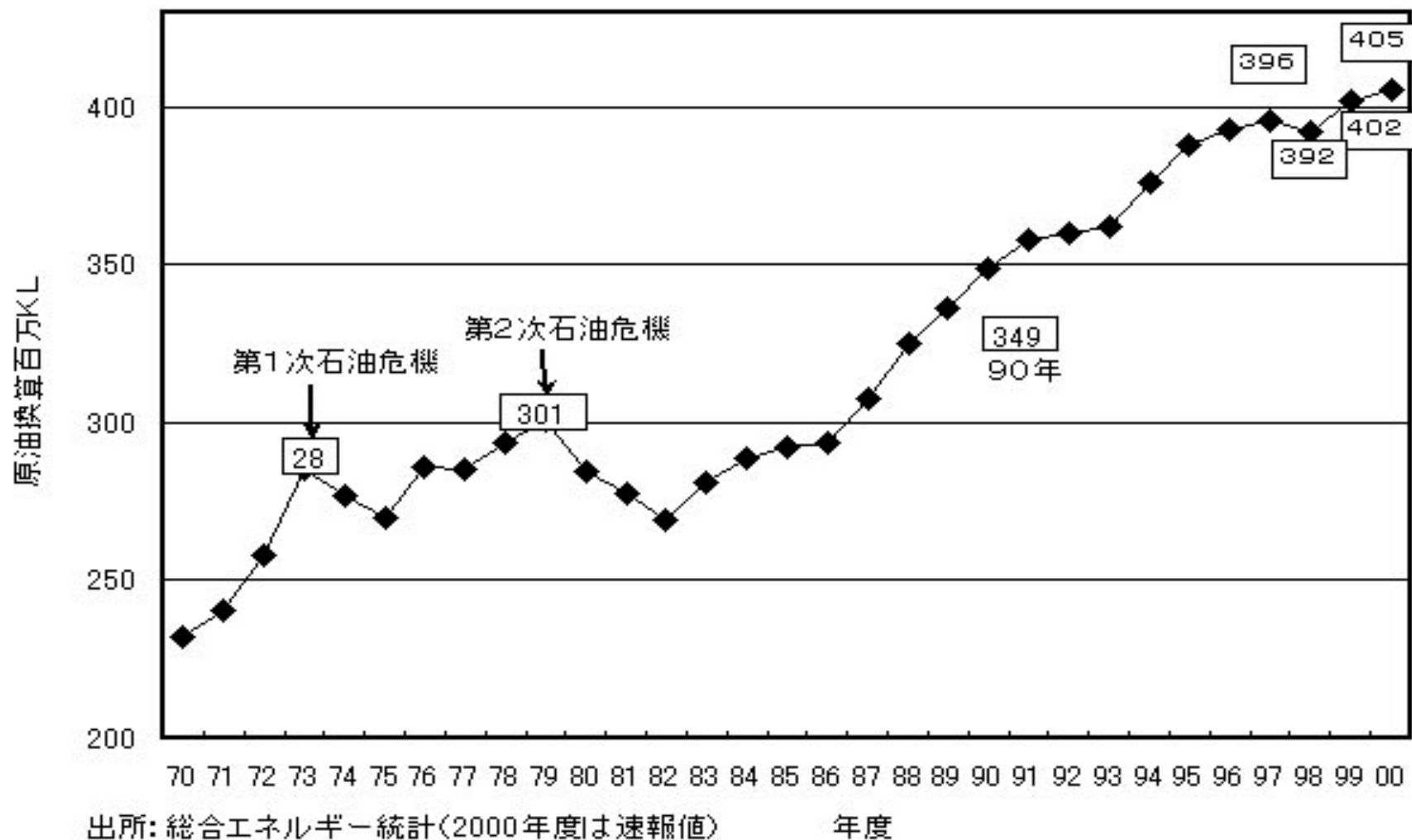
区役所屋上の太陽光発電パネル



区役所前広場の外灯

増え続けるエネルギー消費

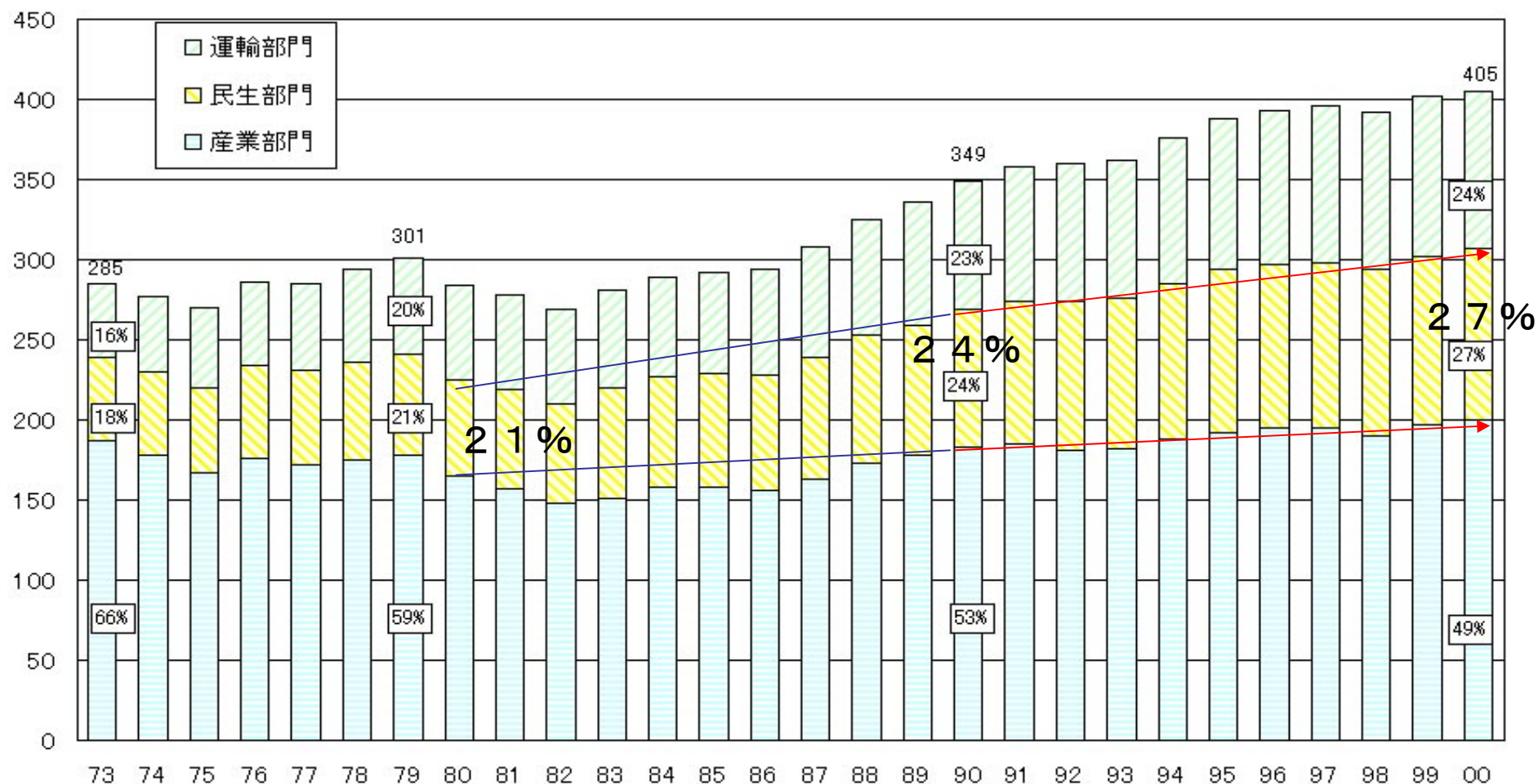
最終エネルギー消費の推移



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)



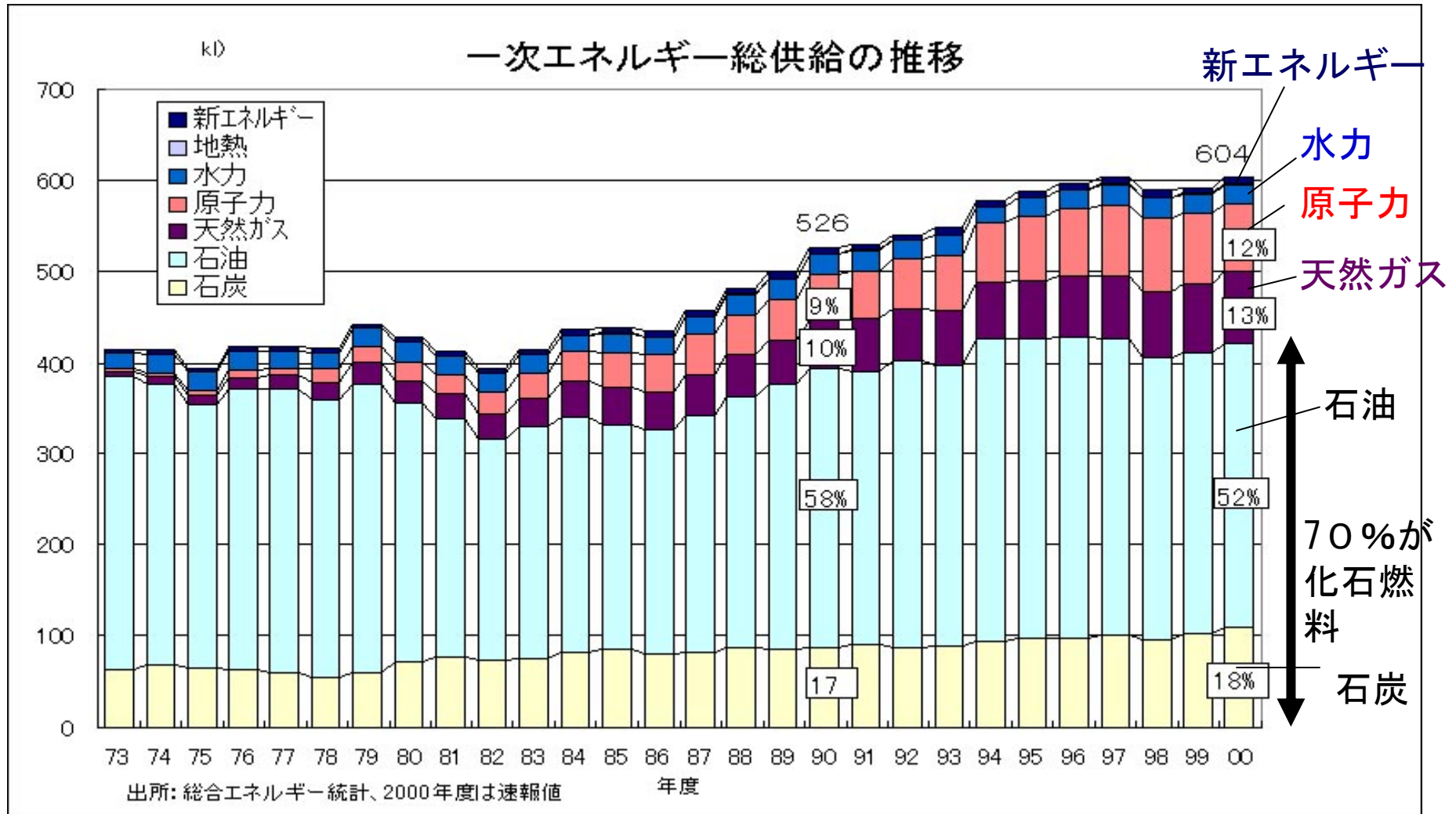
出所: 総合エネルギー統計、2000年度は速報値

80年

90年

2000年

化石燃料に頼るエネルギー供給



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

発電電力量(一般電気事業用)の推移(%)





	73年度	90年度	2000年度
発電電力量(10億kWh)	379	738	940
石油等火力	73	29	11
石炭火力	5	10	18
LNG火力	2	22	26
原子力	3	27	34
水力	17	12	10
新エネルギー	—	—	0.2

資源エネルギー庁のHP

<http://www.enecho.meti.go.jp/energy/japan/japan02.html>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：太陽電池について

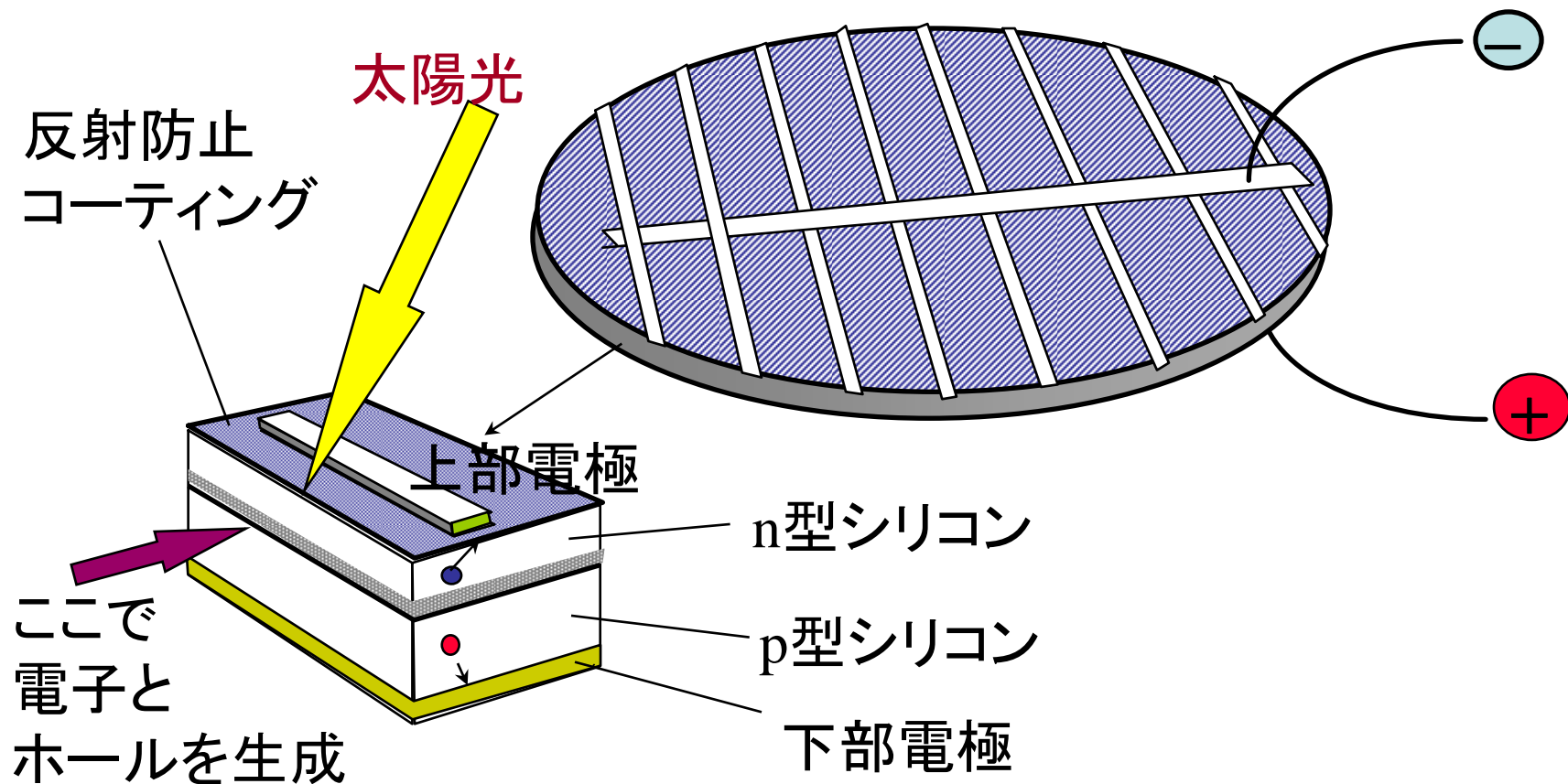


- 太陽電池とは
- 太陽電池の仕組み
- 太陽電池の原理
- 太陽電池の材料

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

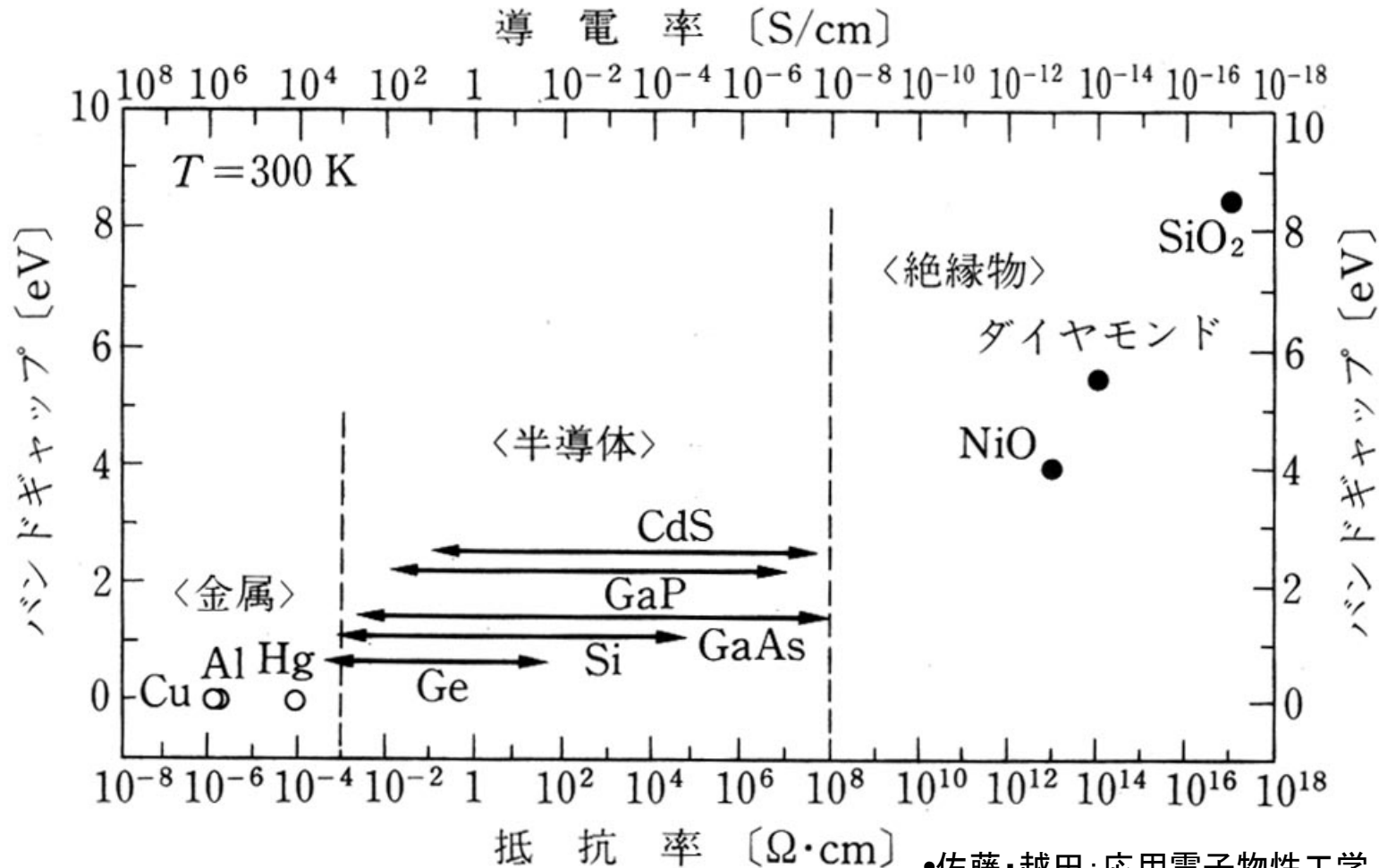


太陽電池の材料

- 太陽電池材料は半導体
- 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, 低効率, 劣化
 - 薄膜多結晶シリコン: 省資源, 中効率(開発途上)
- 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(開発途上)

半導体とは何か

- 半導体とは、導体(金属)と不導体(絶縁物)の中間の抵抗率をもつ固体である。半導体にはIV属元素半導体と化合物半導体がある。
- 半導体の電気の流れやすさは人工的に制御することができる。



(参考)半導体とは

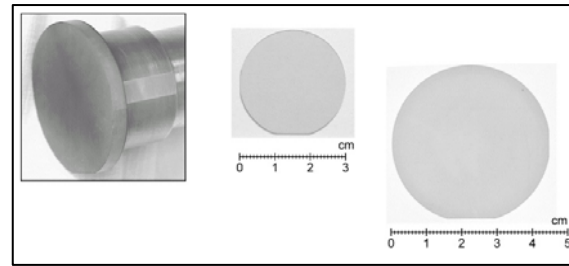
- 半導体というのは、導体(金属)と不導体(絶縁体)の中間の電気伝導率をもつ物質という意味。
- 金属は温度が上がると電気が流れにくくなる性質を持つが、半導体は逆に、温度が高いほど電気が流れやすくなる性質をもつ。
- 半導体の電気伝導性は金属と違って人為的に制御でき、抵抗値は金属に近いものから、絶縁体に近い値までをとる。

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...)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...)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...



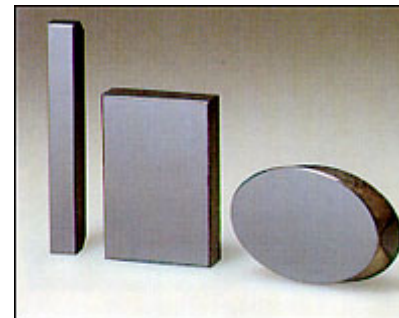
SiC

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



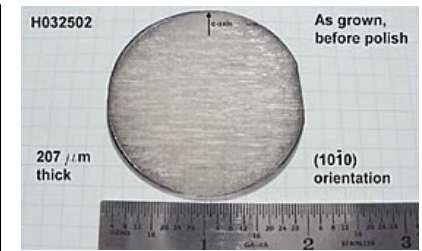
Si

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

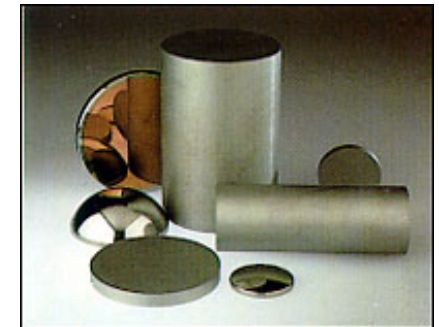


GaAs

<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

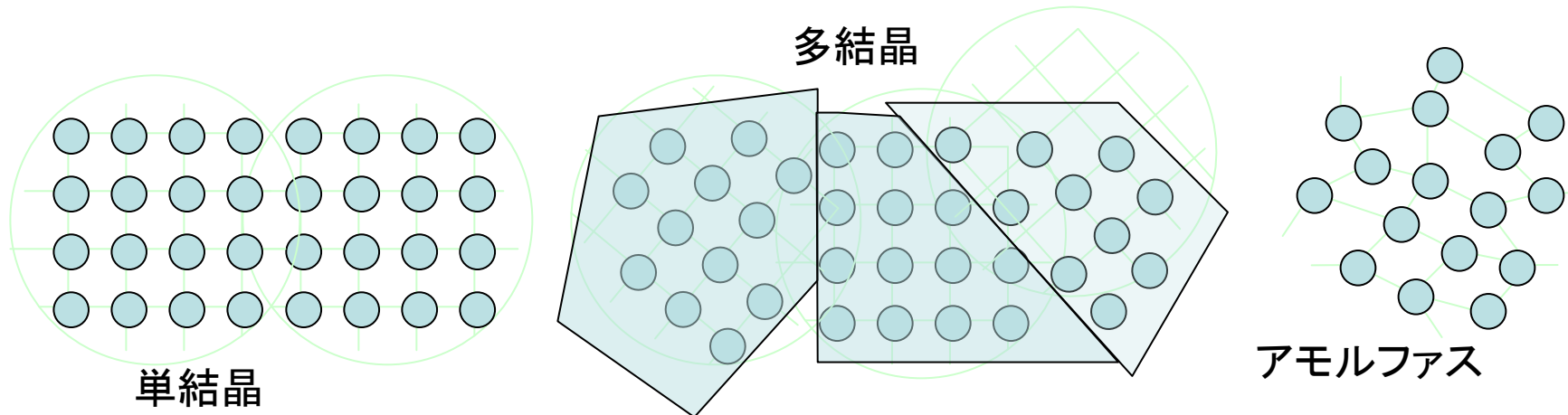
IV属を挟んで両側にある元素を組み合わせた半導体の性質をもつ物質ができる

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



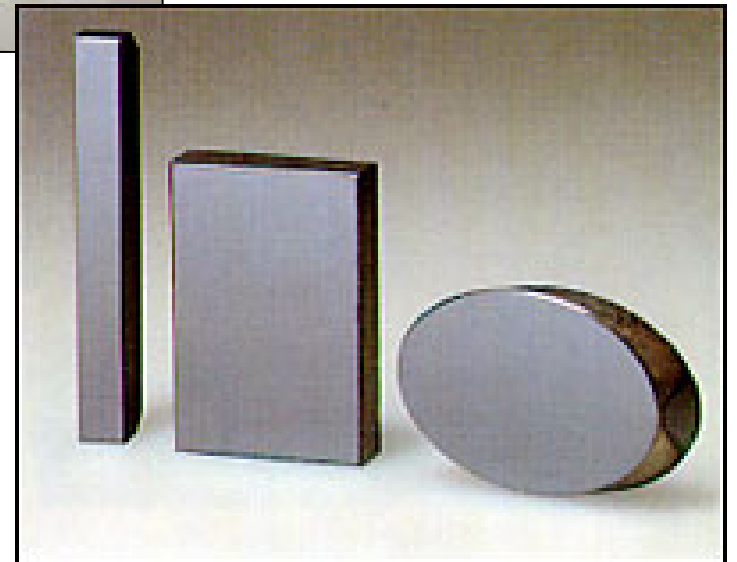
シリコン

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



ガリウムヒ素

- 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

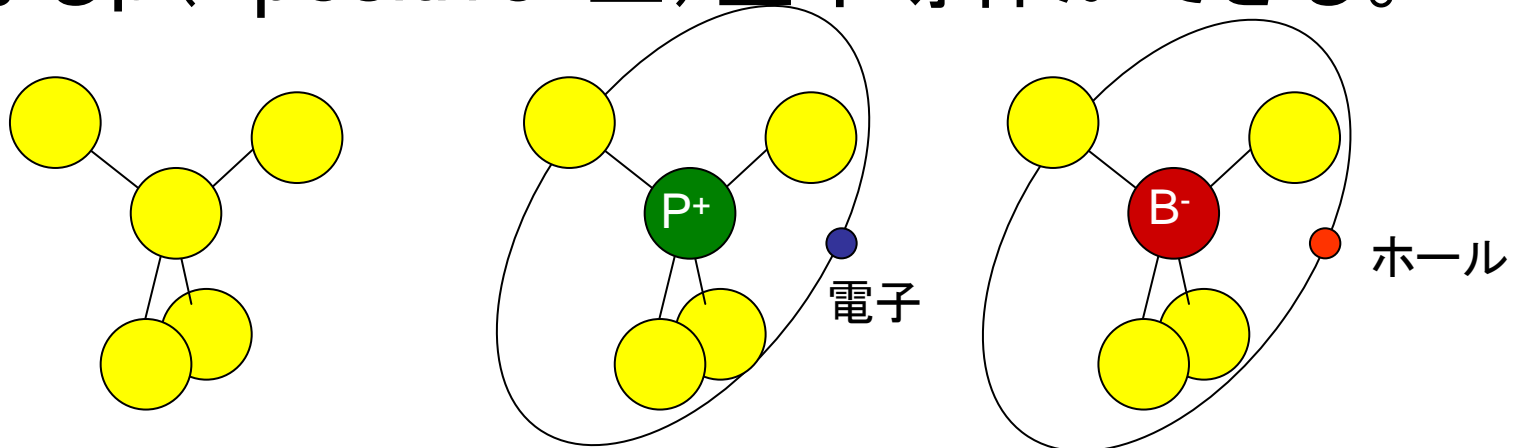


太陽電池の原理

- 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型半導体とn型半導体を接合した構造は、電流を一方向にのみ流す「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。

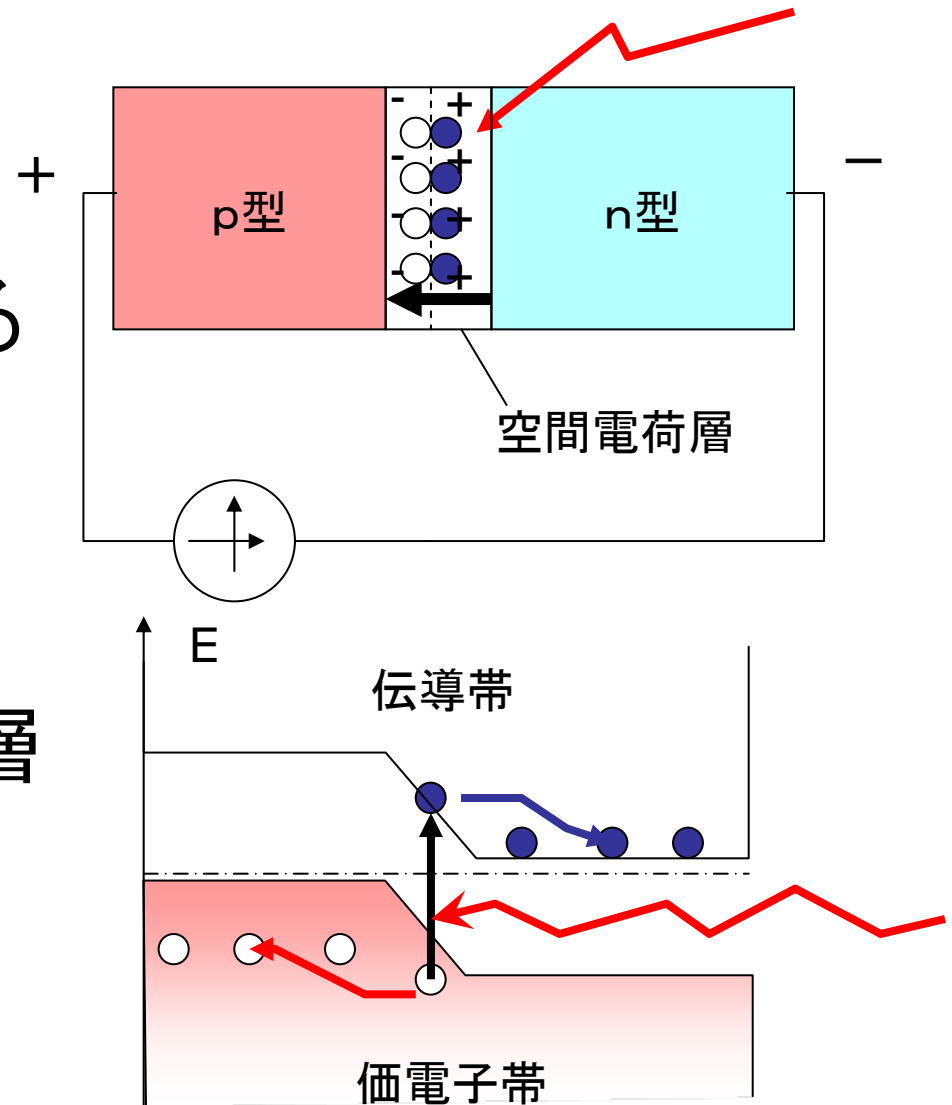
n型、p型半導体

- 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)型半導体ができる。
- 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)型半導体ができる。

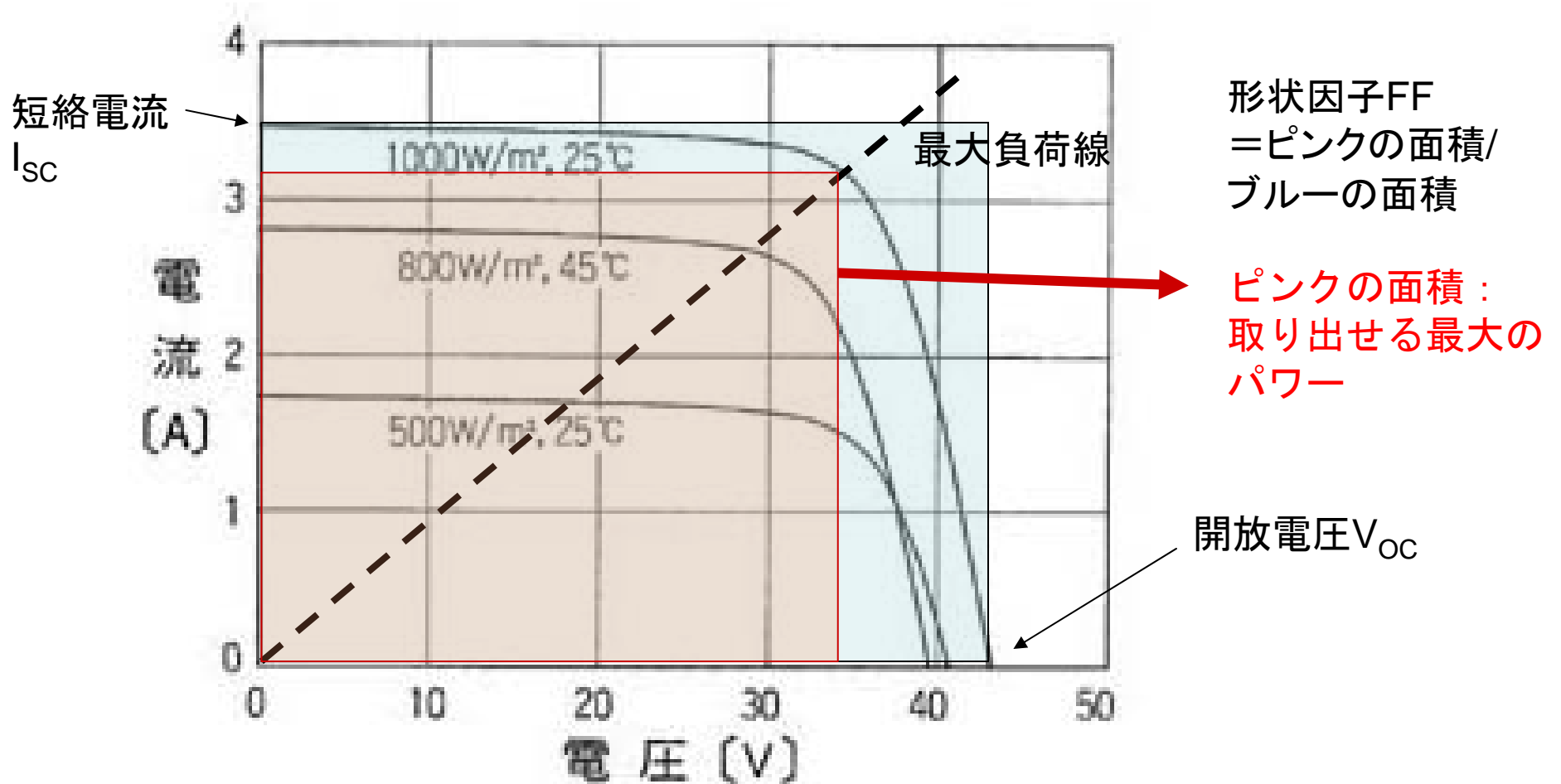


光起電力効果の原理

- 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



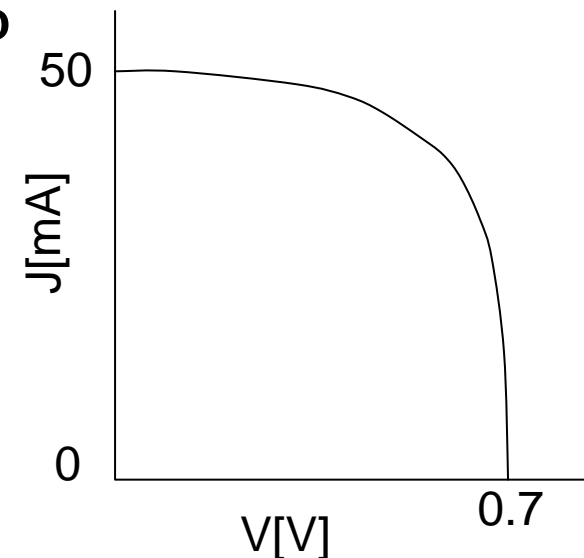
太陽電池セルの効率

- $\eta = V_{oc} \times J_{sc} \times FF / D_s$
- D_s : 太陽光エネルギー密度 = 100 mW/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。

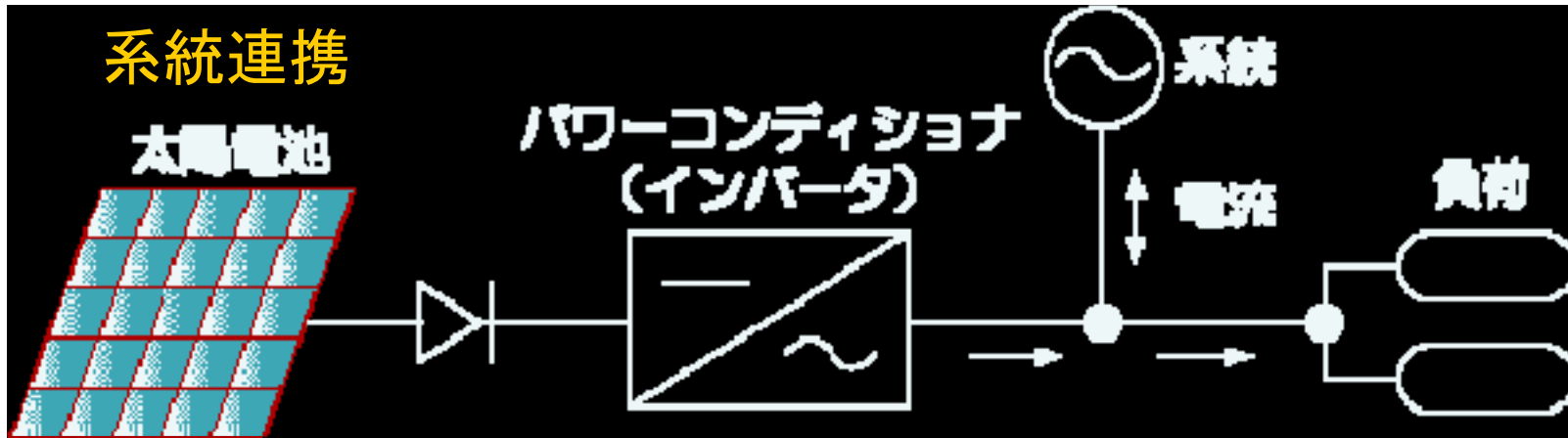
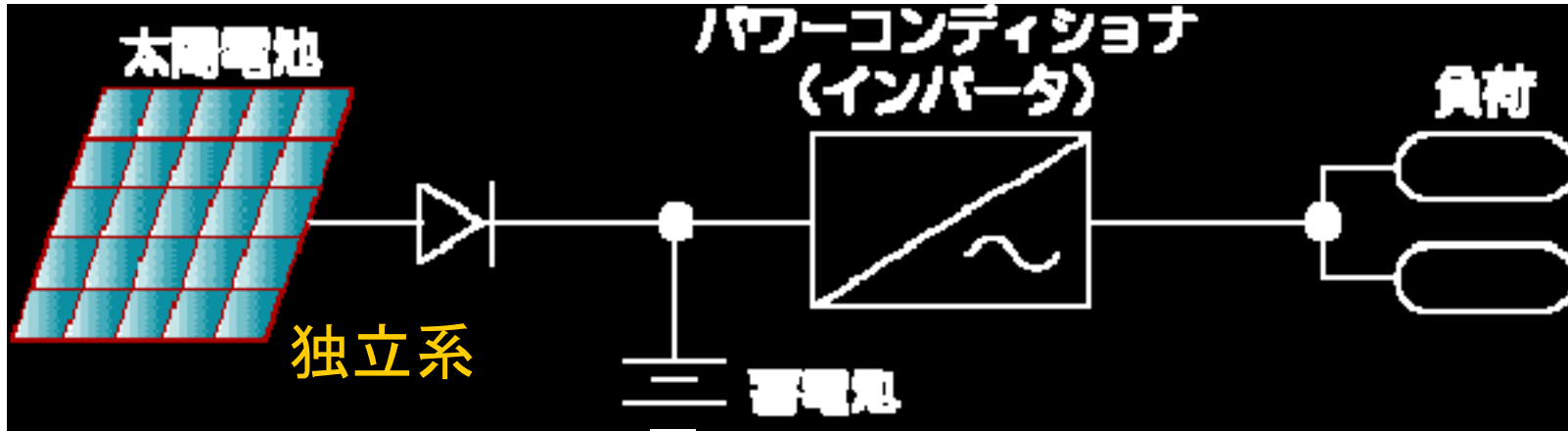


太陽電池の変換効率の 実験室チャンピオンデータ

- 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)

太陽光発電システム

●

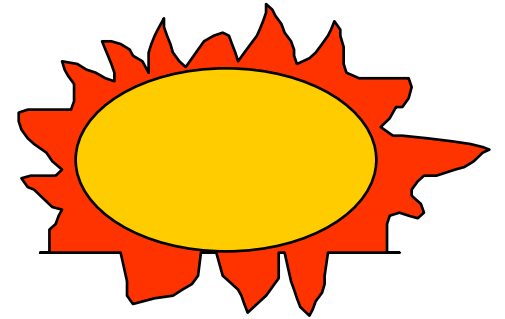


系統連携

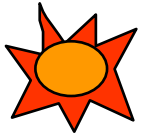
- 分散型の電源を電力系統(ネットワーク、グリッド)に接続する技術。
- 逆潮(分散型電源から系統に電気を送り出す)
- 工事のため系統で電源を切っても、分散電源からの供給が続くと危険なので、停電すると系統連携スイッチで系統との接続は遮断される。(従って停電の時、電気は使えません。)
- 系統と独立に電源とユーザが自己完結するアイランディング現象が起きることもある。

第3部：我が家は太陽光発電所

- 家を建てたいきさつ
- 省エネルギーと創エネルギー
- 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
- オール電化のよい点、改善すべき点
- 未来の太陽光発電



家を建て替えたいきさつ



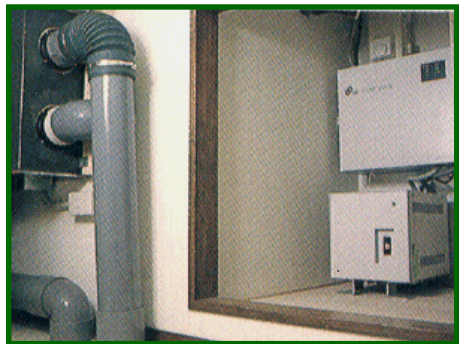
- 18年前に建てた家(軽量鉄骨系プレハブ)が老朽化してきたため立て替えを検討。
- 1992年電力10社は分散型電源からの「余剰電力購入制度」を開始。
- 1993年通産省資源エネルギー庁「**低圧逆潮流ありの系統連携ガイドライン**」を策定。
- 1993年M社「**省エネルギー太陽光発電住宅**」発売を発表。
- 1993年に設計、着工、1994年3月入居

省エネルギー & 太陽光発電

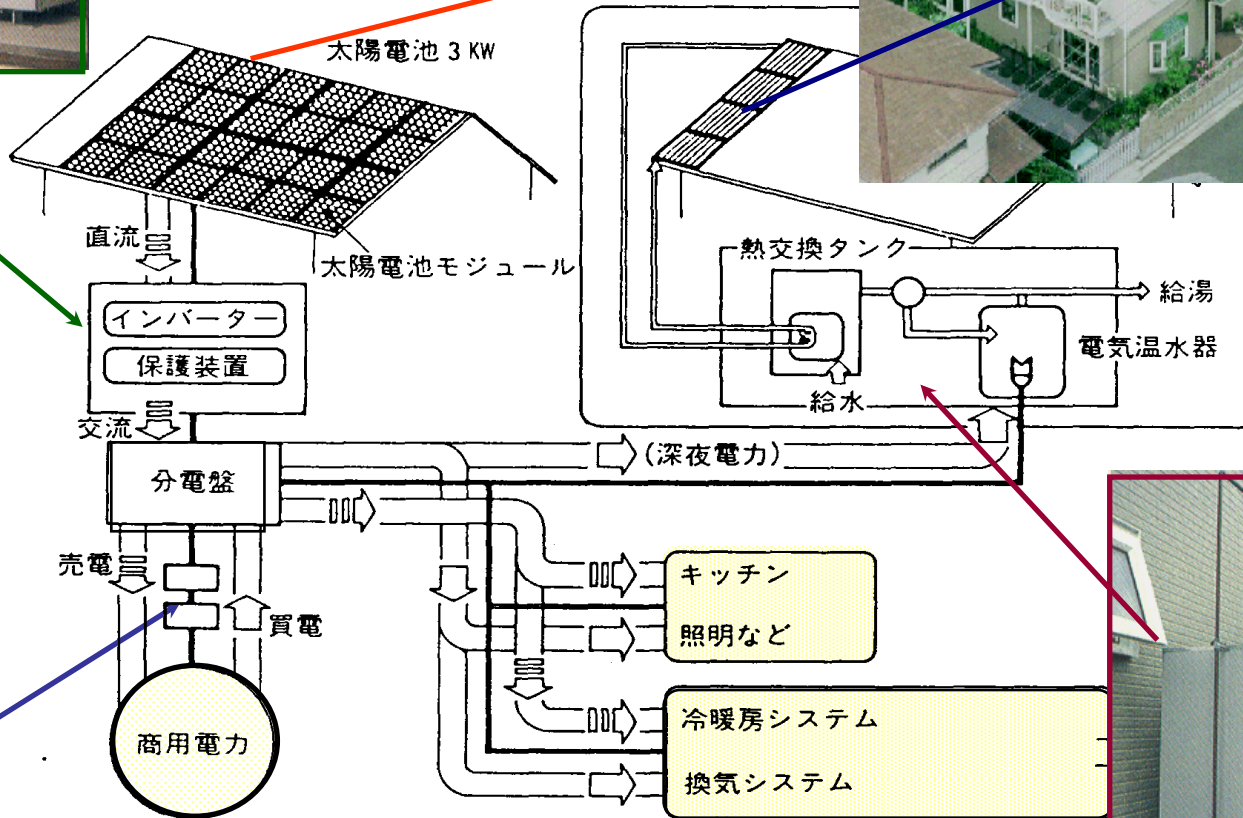
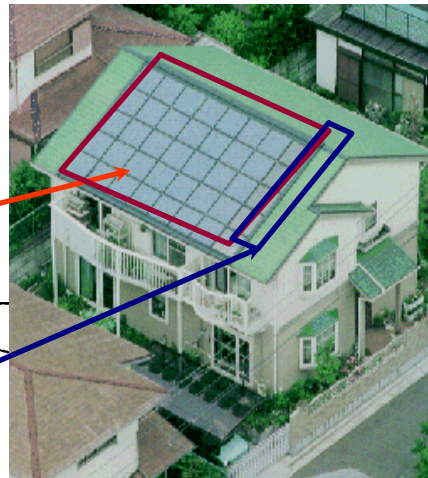
- 木質パネル接着工法2階建て(床面積140m²)
 - 高気密・強断熱(熱損失率:1.19kcal/m²h,気密:2cm²/m²)
 - 壁、床:グラスウール100mm(外壁の厚み120mm)
 - 天井:ロックウール200mm
 - 窓:樹脂サッシ、2重ガラス、低放射コーティング
 - 空調:セントラル換気(0.2回/h)・冷暖房(各室風量調整)
- 太陽光発電
 - 3kW京セラ多結晶モジュール35枚(7直列×5並列)
 - 最高電圧205V, 最適電流14.7A, 総出力3.014kWp
 - インバータ:GS製 効率90%
 - 給湯:太陽熱温水器+深夜電力利用電気温水器
 - 調理:全電化台所(ハロゲンヒータ)

発電・売電/買電データ収集

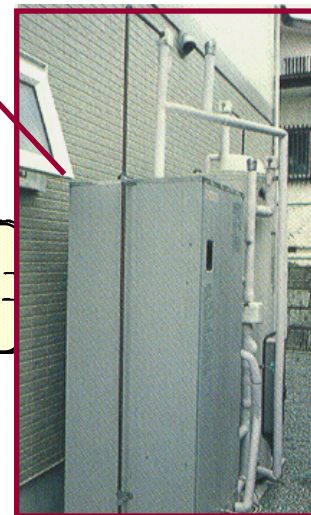
- 1994.5-1997.9: 自作データ収集システム
(PC9801F2で測定)
- PC故障
- 1999.3-現在: JQA(現在: JET)が計測



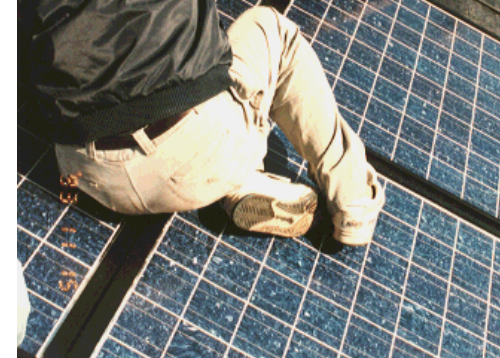
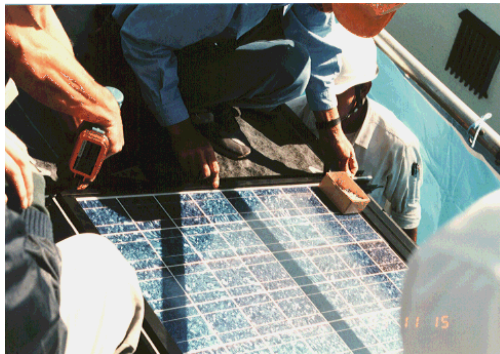
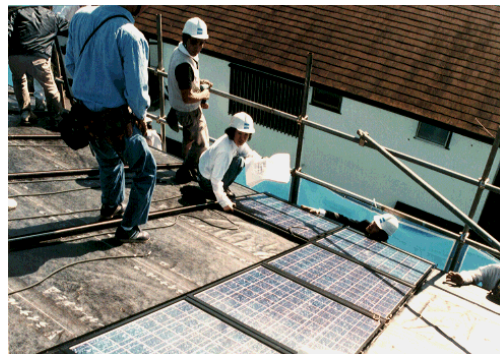
屋根裏部屋の
インバーター



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、 $K_1=1-.005 \times 25=0.875$ となる。)

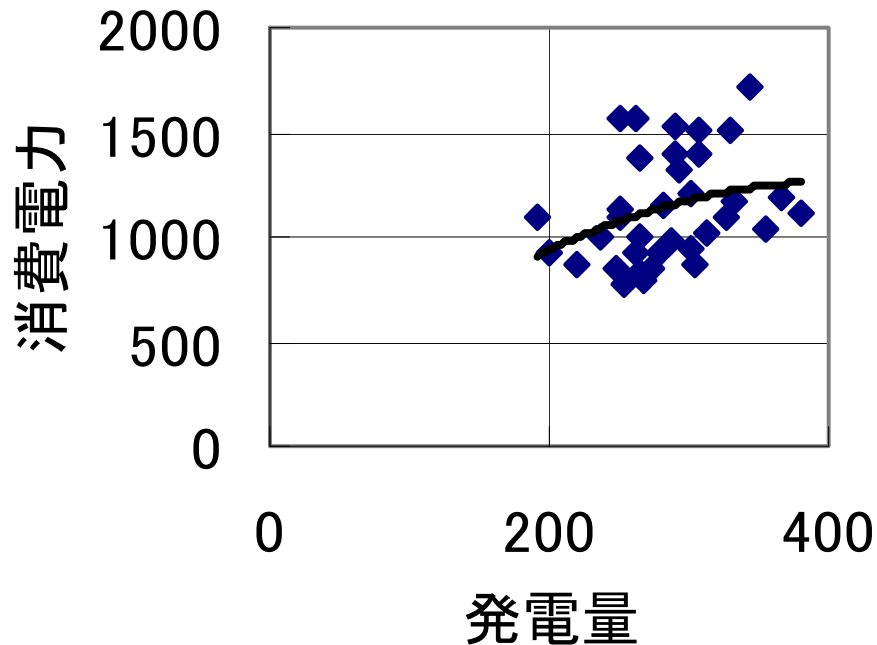
太陽電池の発電実績 (2)

(9年平均)

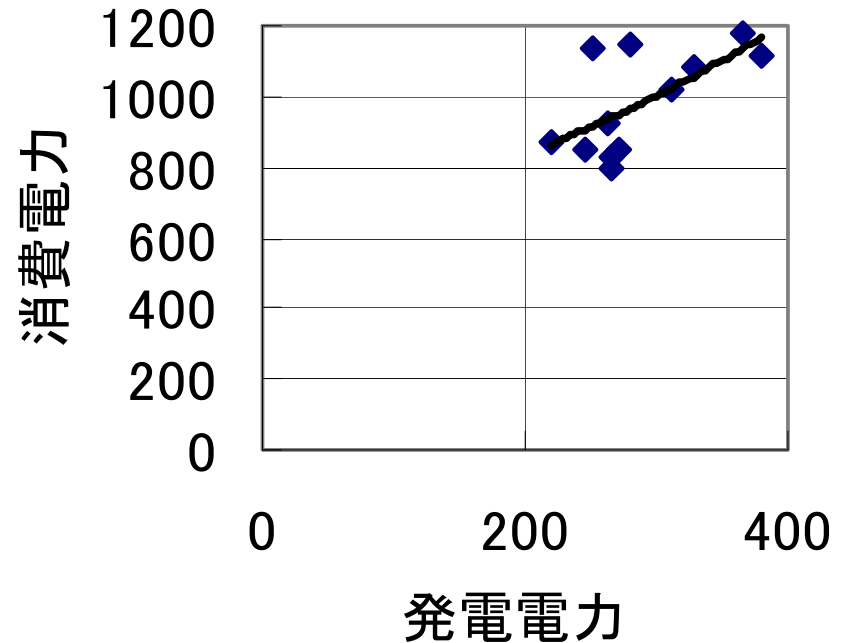
- 最大発電月: 8月 332kWh
- 最小発電月: 11月 224kWh
- 平均月発電量: 248kWh
- 平均年発電量: 2, 979kWh
- 平均月売電電力量: 100kWh
- 平均年売電電力量: 1, 184kWh
- 積算総発電電力量: 26, 811kWh

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)

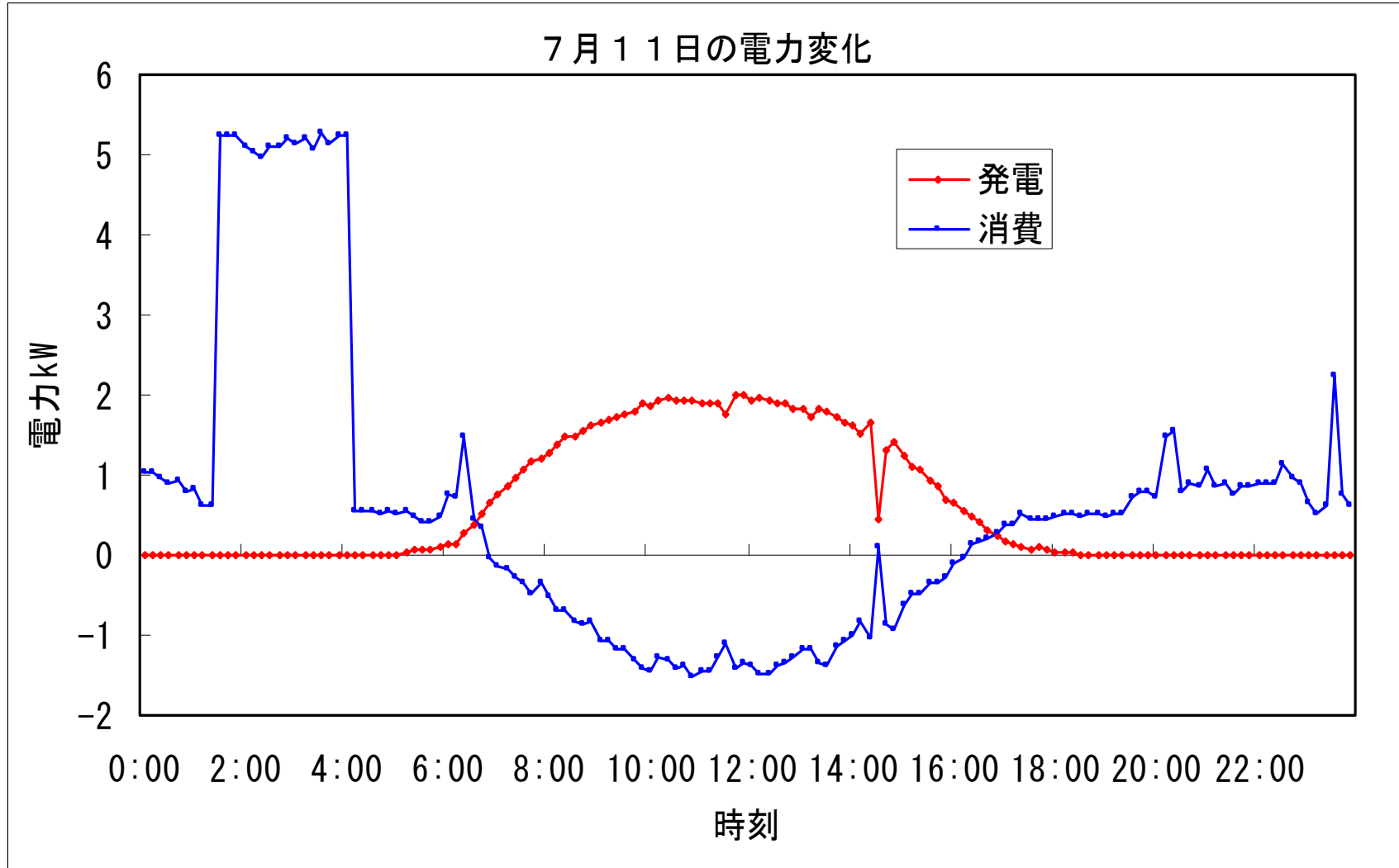


太陽光発電、売電、買電、その他の電力データ

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

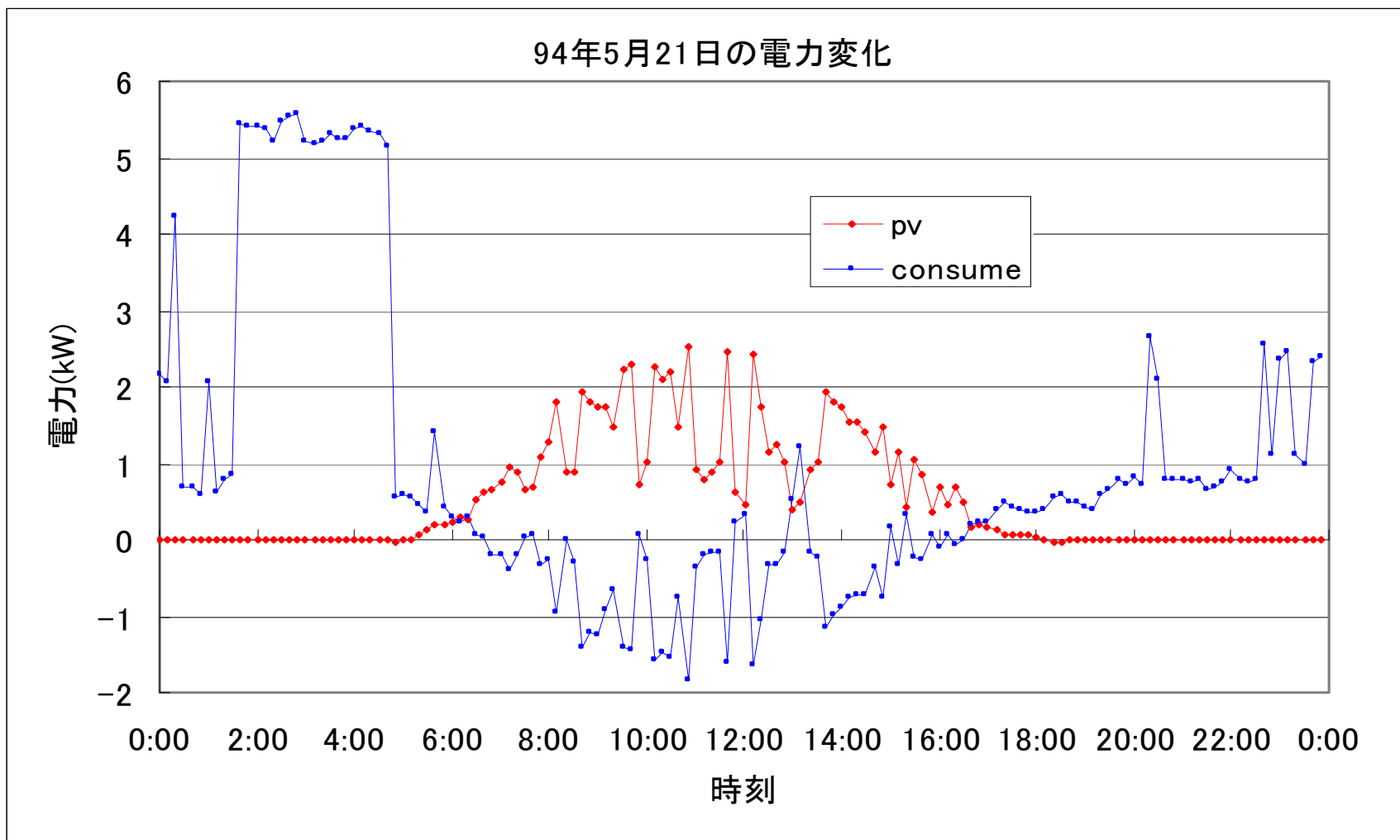
発電量・受電/供電量の時間変化(夏・晴の日)



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(春・晴時々曇り)



振り込みと 引き落とし

普通預金		(兼お借入明細)		4	
日付 (年月日)	お支払金額	お預り金額	摘要 (印字された)	差引残高	符号
1	9. 2.20L		繰越残高	****464,821.0	843
2	9. 2.21L		現金		843
3	9. 2.21L	*20,625	電気料		843
4	9. 2.24L		現金		843
5	9. 2.24L		郵便手数料		843
6	9. 2.27L		カード		843
7	9. 2.27L		カード手数料		843
8	9. 3. 3L		カード		843
9	9. 3. 6L		現金		843
10	9. 3. 6L		郵便手数料		843
11	9. 3.10L		クレジット		843
12	9. 3.10L		電気料		843
13	9. 3.11L		現金		843
14	9. 3.14R		現金		360
15	9. 3.17R		現金		360
16	9. 3.17R		クレジット		360
17	9. 3.17R		カード		360
18	9. 3.17R		カード		360
19	9. 3.17L		カード		843
20	9. 3.19L		現金		843
21	9. 3.21L		振込	****420,208.0	843
22	9. 3.21L	*10,000	カード		843
23	9. 3.21M	*17,904	電気料		843
24	9. 3.21L		電気料	****530,792.0	843

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。

同じシリコンでも

分類	不純物濃度	用途
金属級シリコン	百分の1	(原料)
太陽電池級シリコン	百万分の1*	多結晶太陽電池
半導体級シリコン	十億分の1	LSI, 単結晶太陽電池

*Ti, Vについては十億分の1以下にする必要あり

金属級シリコンに含まれる主な不純物

Al 1500-4000ppm, B 40-80ppm, P 20-50ppm

Ti 160-250ppm, V 80-200ppm

Cr 50-200ppm, Ni 30-90ppm, Fe 2000-3000ppm

太陽光発電によるCO₂削減効果

比較対象	米国・エネルギー 一省試算* (g・C/kWh)	日本・電中研試算** (g・C/kWh)
石炭火力 と比べて	261	210
石油火力 と比べて	196	150
LNG火力 比べて	130	110

光発電設備製造時のCO₂排出量:

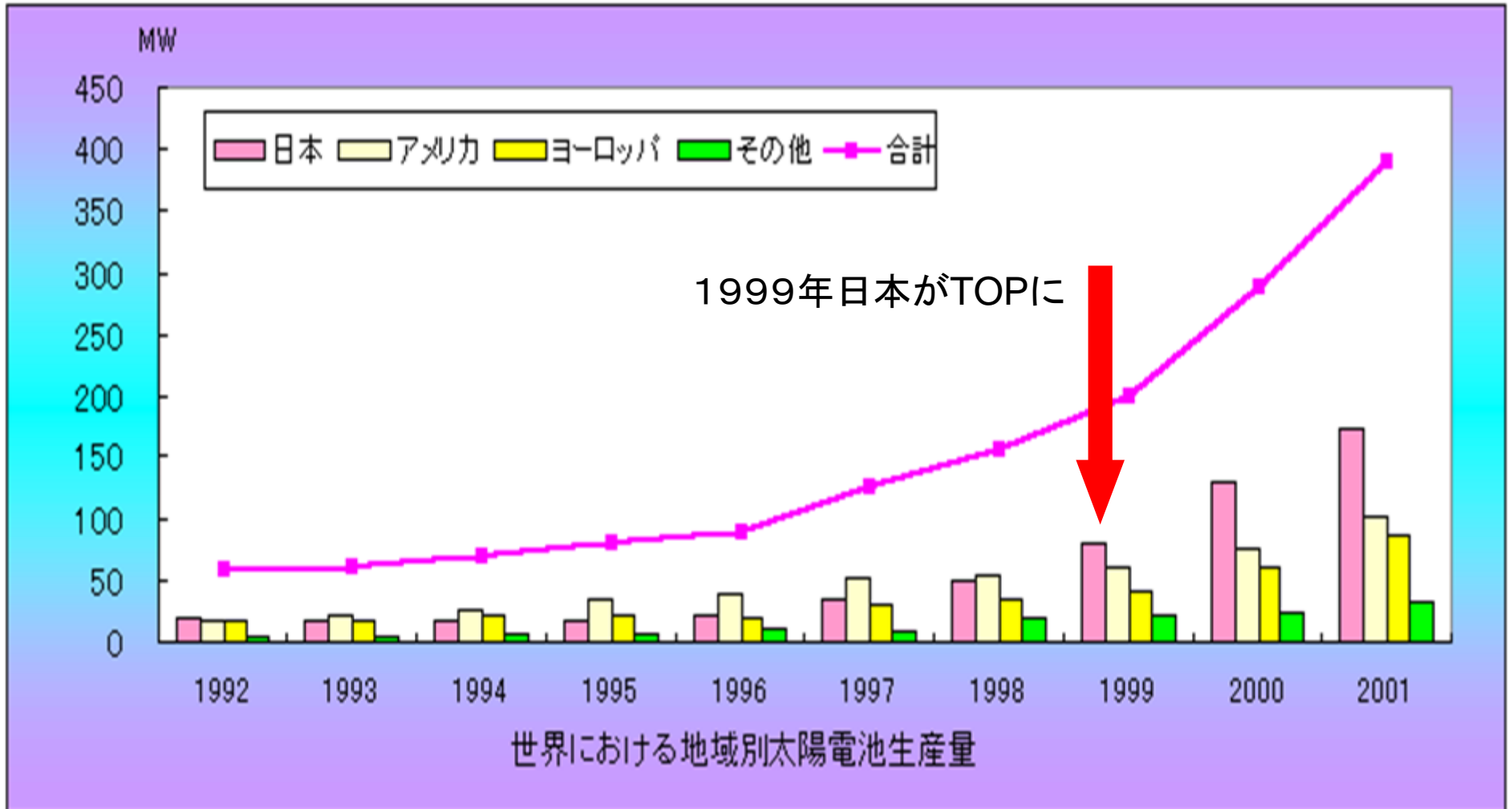
*1.5 gC/kWh, **50gC/kWhとして試算

エネルギー・ペイバックタイム

多結晶 シリコン	製造に要する エネルギー MWh	19.176	9.042
	年間発電量 MWh/年	2.590	2.590
	エネルギー回 収に要する年	8.2	4.3
薄膜 アモルフ ァス・シリ コン	製造に要する エネルギー MWh	9.142	7.504
	年間発電量 MWh/年	2.590	2.590
	エネルギー回 収に要する年	3.5	2.9

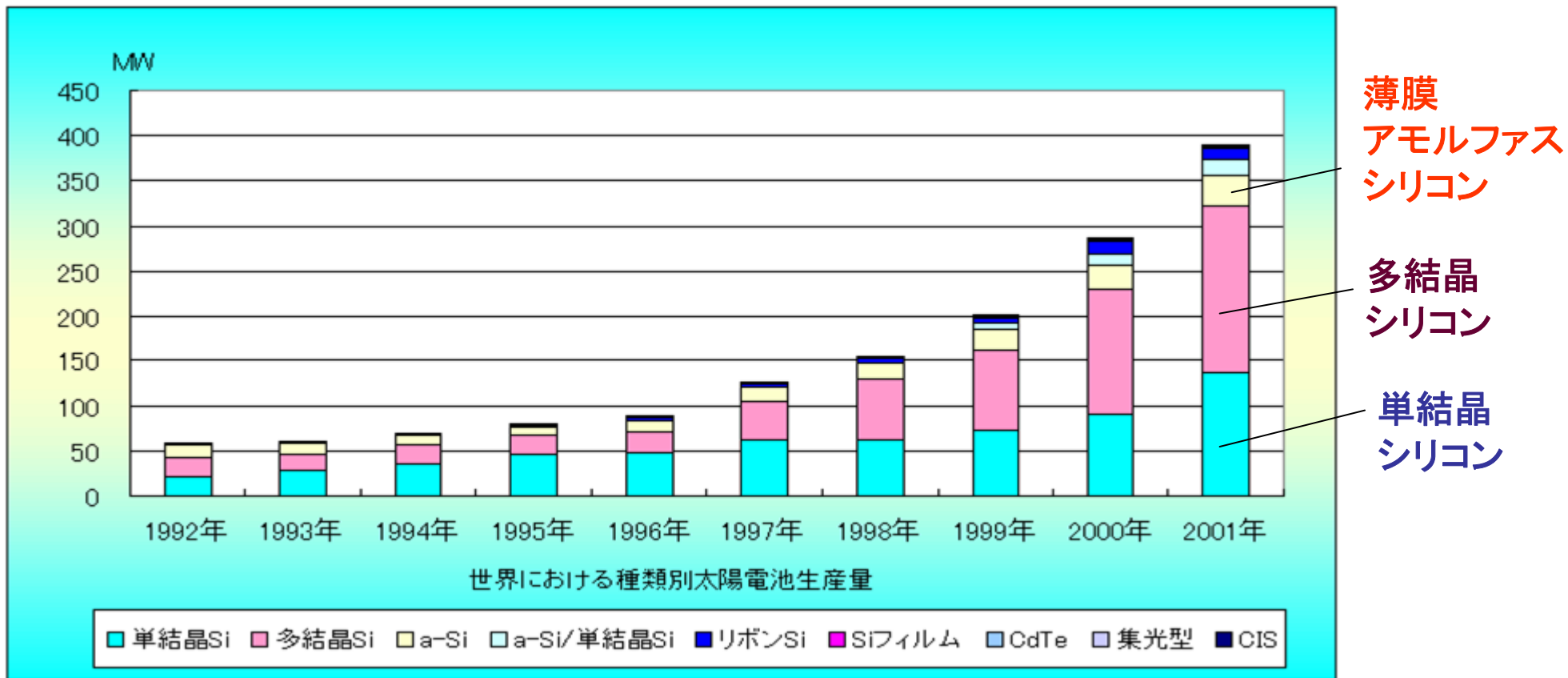
2. 1

世界の太陽電池生産

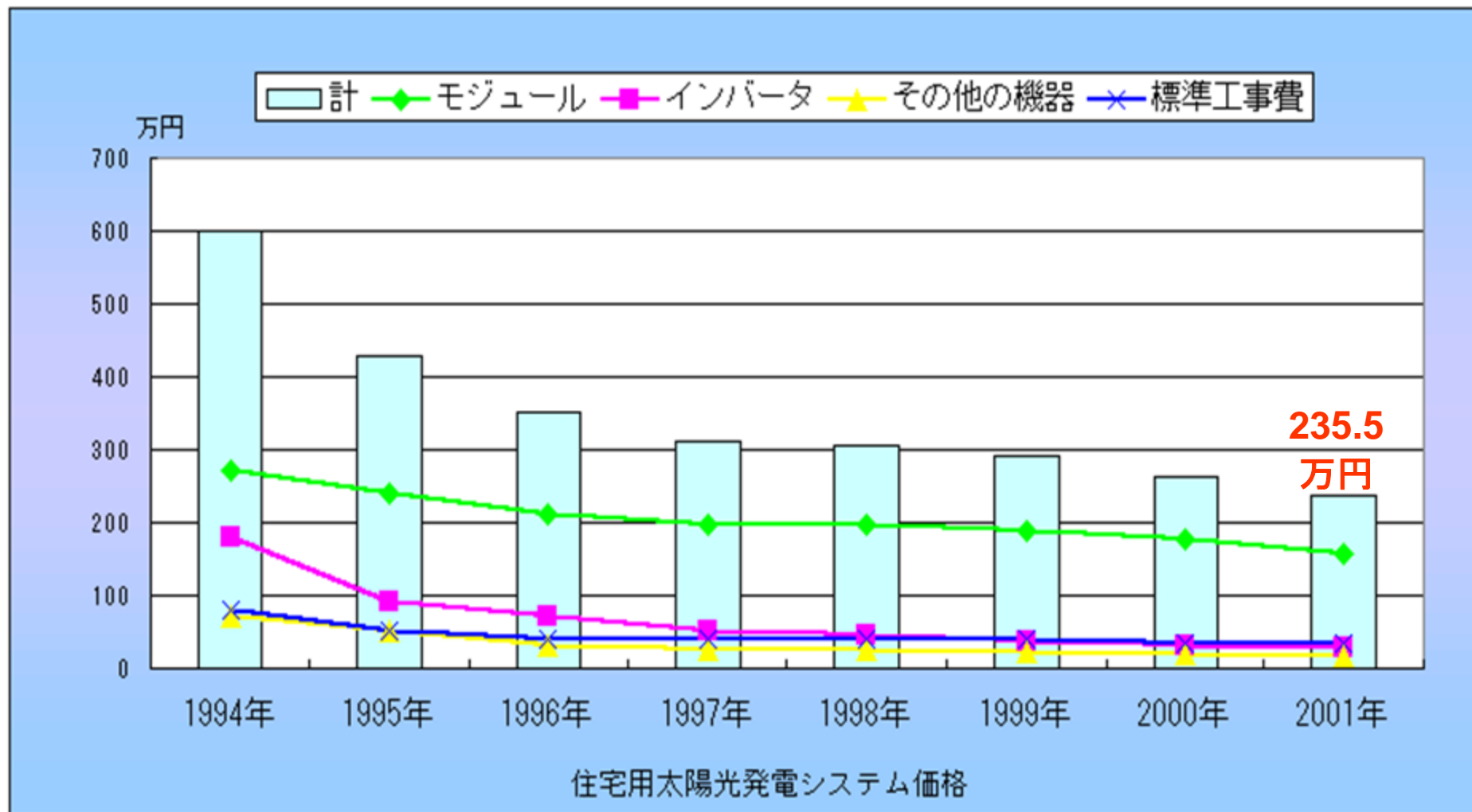


薄膜太陽電池生産が急伸

- 世界の太陽電池生産量



システムコスト



太陽電池システムの価格構成の推移

住宅用太陽光発電システム価格 (3kW標準工事のケース)

単位:万円	1994年度	1995年度	1996年度	1997年度	1998年度	1999年度	2000年度	2001年度
モジュール	270	240	210	195	195	189	177	156
インバータ	180	90	70	50	45	38	30	28.5
その他機器	70	50	30	25	25	22	20	18
標準工事費	80	50	40	40	40	40	35	33
合計	600	430	350	310	305	289	262	235.5

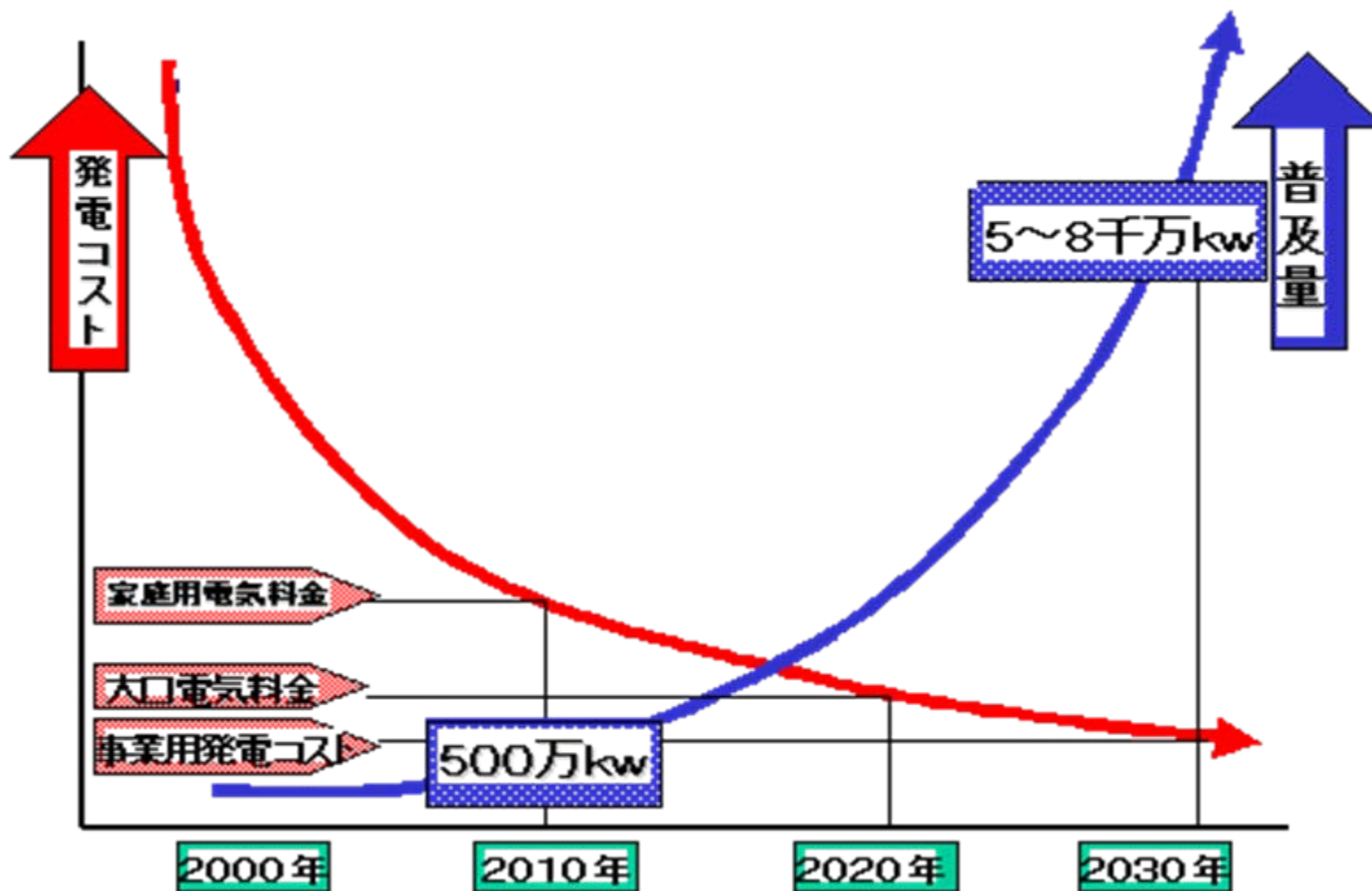
2010年482万KWhをめざす 太陽光発電

- 国の太陽光発電システムの当面の導入目標としては、**2010年482万kW**が掲げられている。
- 2010年以降は更に5～8千万kWの大量普及のシナリオが考えられておりこのシナリオを実現するためには、発電コスト目標を大幅に下げていくための技術研究開発が必要。
 - 家庭電気料金程度(23～25円/kWh)
 - 大口電気料金程度(10～15円/kWh)
 - 事業用発電コスト程度(5～10円/kWh)(PVTECのHPによる)
- 平成12年度(末)経済産業省の原価計算式で算出されたコスト:62円/kWh; 寿命20年、金利4%、発電量1051kWh/年・kW、燃料費と運転維持費はゼロと仮定

補助金を考慮し、寿命30年、金利2%で計算するとすでに24円になっているとの指摘もある。

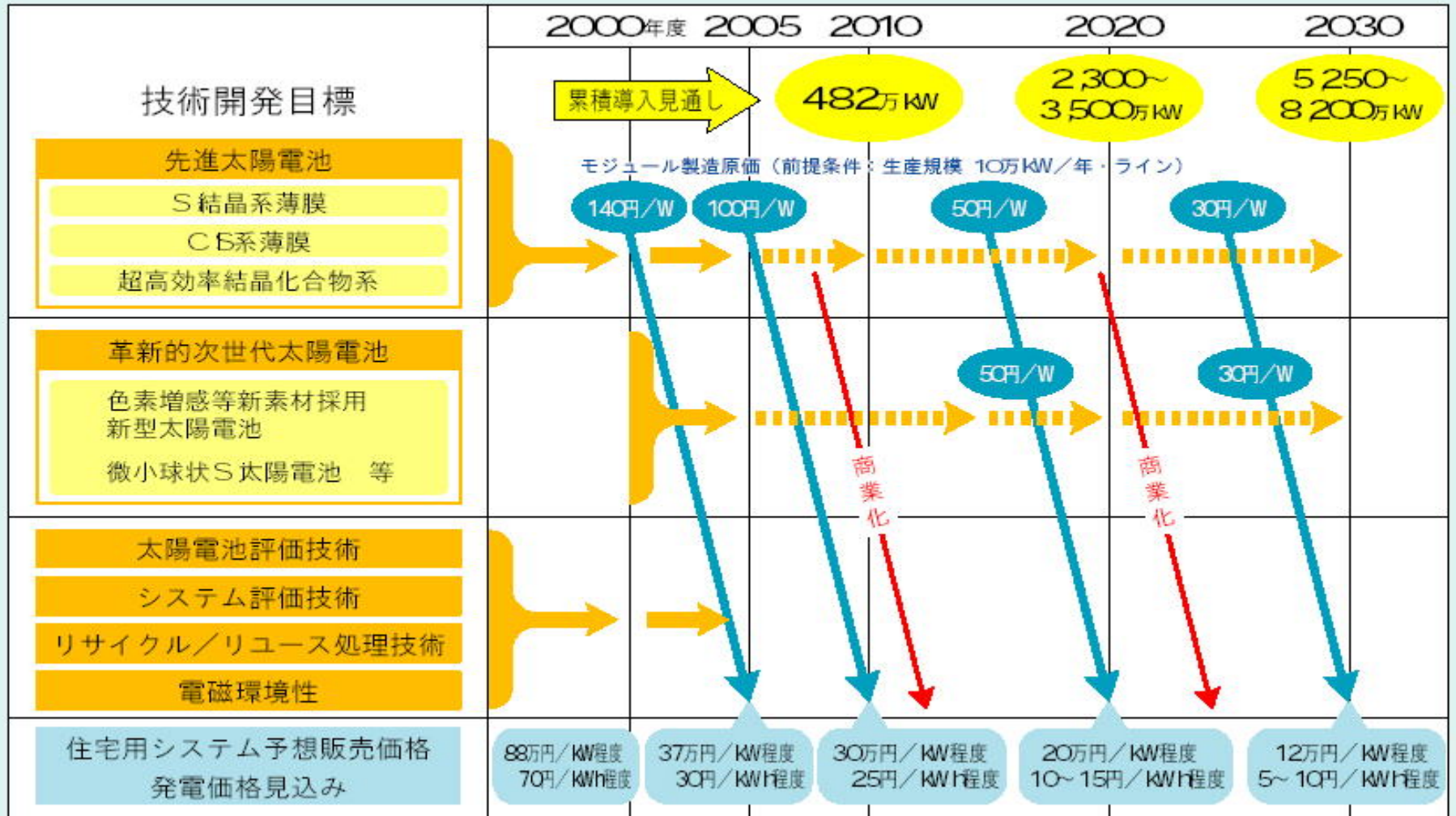
太陽光発電普及協会のHP(<http://www5b.biglobe.ne.jp/~pv-tokyo/index.html>)

普及とともに下がる太陽光発電コスト



ロードマップ

日本の太陽光発電技術開発全体イメージ図





結晶系シリコンの問題点

- 単結晶系：LSI用の高性能シリコン単結晶を利用
- 多結晶系：ソーラーグレードシリコンの導入

原料	メーカー名	製法	市場参入時期
モノシラン	AsiM/REC	BJ/流動床	2002
	Degussa/Solar World	チューブ析出	2004
トリクロロシラン	Wacker	流動床	2005
	トクヤマ	チューブ析出	2005
金属珪素	川鉄	直接精製	未定
	Elkem		未定




(参考)再生可能エネルギー目標値

●再生可能エネルギー

	1999年度（実績） 原油換算（百万k l）	2010年度		
		現行対策維持ケース 原油換算（百万k l）	目標ケース	
			原油換算（百万k l）	2010/ 1999
新エネルギー供給計	7	9	19	約 2.7 倍
 水力（一般水力）	21	20	20	約 1 倍
 地熱	1	1	1	約 1 倍
再生可能エネルギー供給計	29	30	40	約 1.4 倍

(参考) 需要サイドの新エネルギー

● 需要サイドの新エネルギー

	1999 年度 (実績)	2010 年度		
		現行対策維持ケース	目標ケース	
 クリーンエネルギー自動車 ※1	6.5 万台	89 万台	348 万台	約 54 倍
 天然ガスコージェネレーション ※2	152 万 kW	344 万 kW	464 万 kW	約 3 倍
 燃料電池	1.2 万 kW	4 万 kW	220 万 kW	約 183 倍

※1 需要サイドの新エネルギーである電気自動車、燃料電池車、天然ガス自動車、ハイブリッド車、メタノール自動車、更にディーゼル代替LPガス自動車を含む。

※2 燃料電池によるものを含む。