

2050年カーボンニュートラルの実現に向けた 再生可能エネルギーの展開

—太陽光発電の新たな可能性—

京都大学名誉教授
研究・イノベーション学会
持続可能エネルギー環境分科会主査
吉川 暹

国のエネルギー基本計画(2003年～)

第5次 基本計画 (2018年)

- エネルギーミックス(2015年): 資源エネルギー基本計画を受けて
- 2030年を目標にRE22～24%を示唆
- NE20～22%を予定
- 2050年 CO2排出量80%削減を提案
- S+3E: 安定供給、安全保障、コスト、環境性

第6次 基本計画 (2021年)

- 基本的には5次を踏襲
- 2030年目標としてRE46%が急に提案されることとなった。(4月22日気候変動サミット)
- NE20-22%は変らず
- 2050年 CO2排出量100%削減を提案
- 環境目標FIRST、コスト負担
- パリ協定が共有した目標は、今世紀後半の温室効果学実質ゼロであり、安定供給を生命線とすべき。

エネルギー基本計画：将来の電源構成

- 経産省と環境省で再生可能エネルギーと火力の比率に差がある。
- 2050年代を想定したものは環境省以外にない。

電 源	経産省(2017)	環境省(2014)	
	2030年	2030年	2050年代
再生可能エネルギー	22.2～23.6	31.2	60.0
太陽光	7.0%	11.7	27.9
風力	1.7%	5.4	10.8
バイオマス	3.7～4.6%	3.3	3.5
地熱	1.0～1.1%	1.4	3.8
水力	8.8～9.2%	8.6	10.7
その他		0.8	3.3
原子力	20～22%	20.0	20.0
火 力	56%	48.8	20.0
LNG	27%		
石炭	26%		
石油	3%		
省エネ	2,130億kWh		
総発電量	10,650kWh		
総必要電力量	12,780kWh		

・2011年以降、安価な石炭火力の計画が多く、国の火力発電でのCO2排出係数目標(0.37kg/kWh)達成は困難。
 ・削減策はCCS(CO2地中貯留)期待である。

2つのシナリオの比較・融合

●太陽光発電は収益を生み出す

【簡単な計算】

必要な電力

2,800億kWh÷

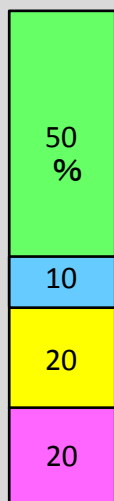
平均日射量 太陽電池効率 発電日数/年
(3.35kWh/m² × 0.25 × 0.8 × 300日)
総合効率

設置面積
= 139,303 × 10⁴m² ⇒ 14万ha

電力を生み出す。4～5兆円*の収益を生む

*1kWh=15～18円と仮定

(太陽電池)



太陽光:28%
風力:11%
その他:11%



太陽光発電を中心とする
再生可能エネルギー

太陽電池の効率

現在	2050年	理論限界
15～20%	25%	30%

●一定のバックアップ電源が必要

【簡単な計算】

1kWh当りの
火力発電量

CO₂排出量

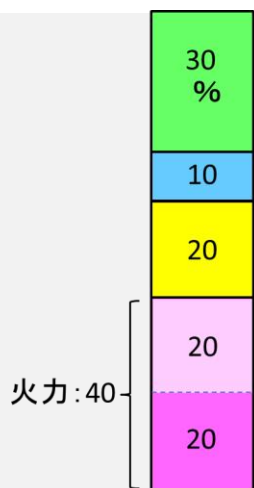
2,000億kWh × 0.5kgCO₂/kWh*

= 1億トンCO₂/年を地中貯留

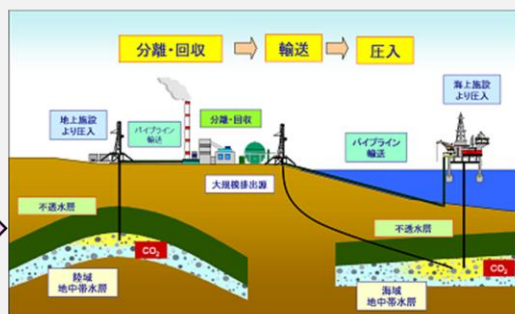
国内貯留可能量: 301億トン(RITE)

*現状0.5～0.9kgCO₂

(二酸化炭素地中貯留)



火力: 40%



火力発電所で排出されるCO₂を分離回収し地中に貯留する技術(CCS事業)

費用: 数千円/t-CO₂

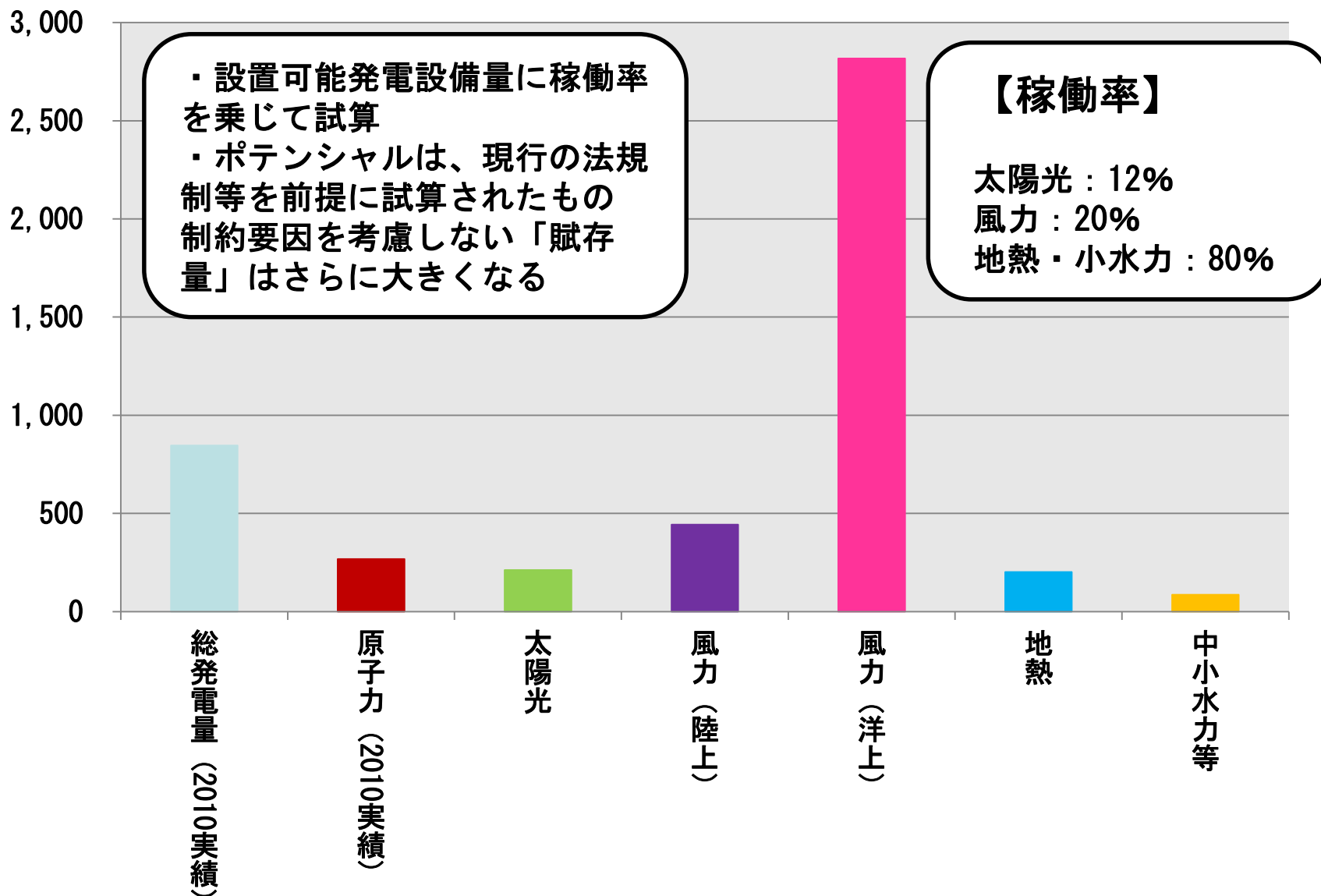
CO₂を地中に埋める。分離回収貯留に数千億円/年のコスト

2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて

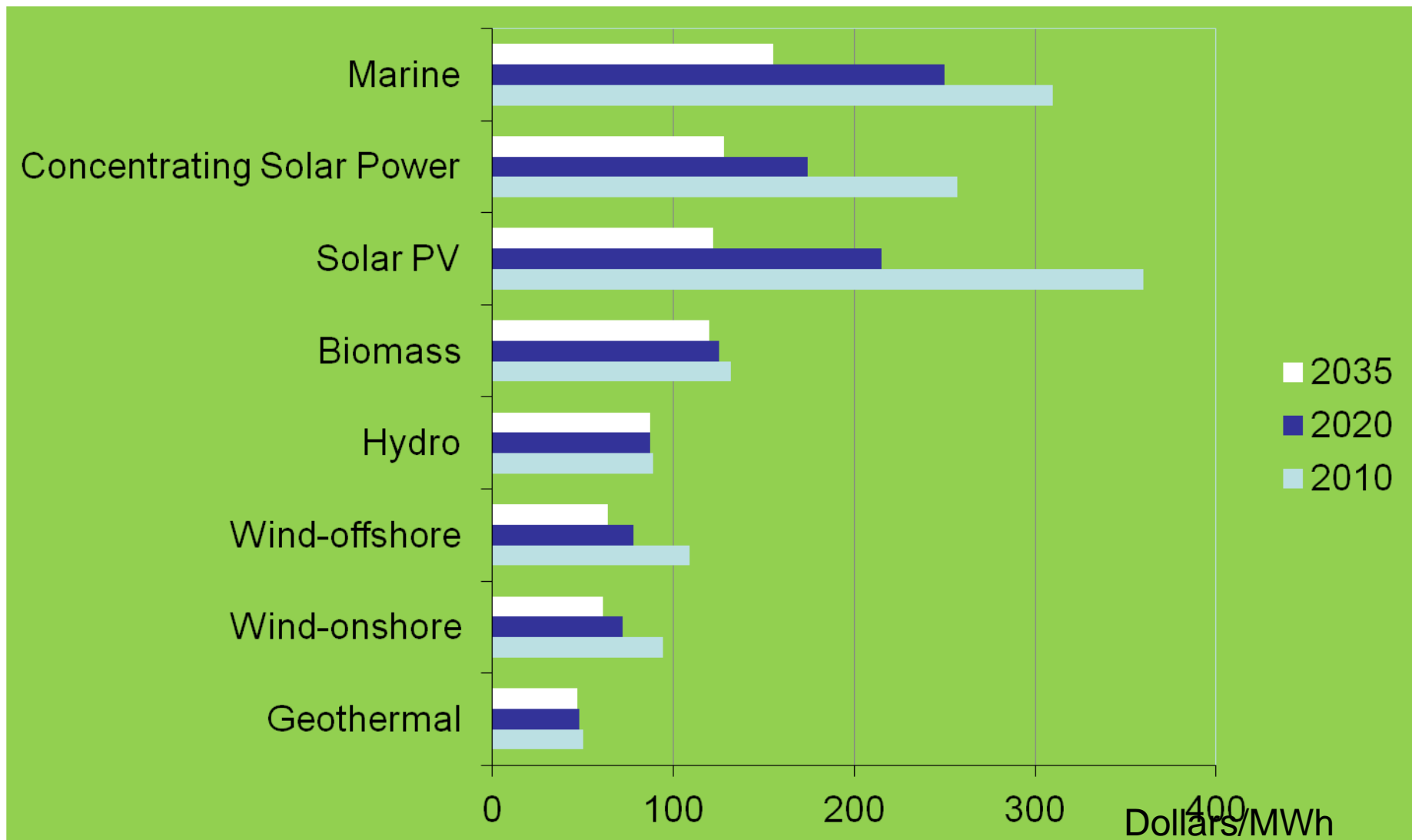
1. エネルギー基本計画が目指すところ
2. 再生可能エネルギーの展開
3. 次世代太陽電池の新たな可能性ーPVK,OPV
4. ソーラーシェアリングが重要
5. EV, 電力貯蔵, 宇宙太陽光発電その他
6. New Energy Initiative

わが国の再生可能エネルギーのポテンシャル（年間発電量に換算）

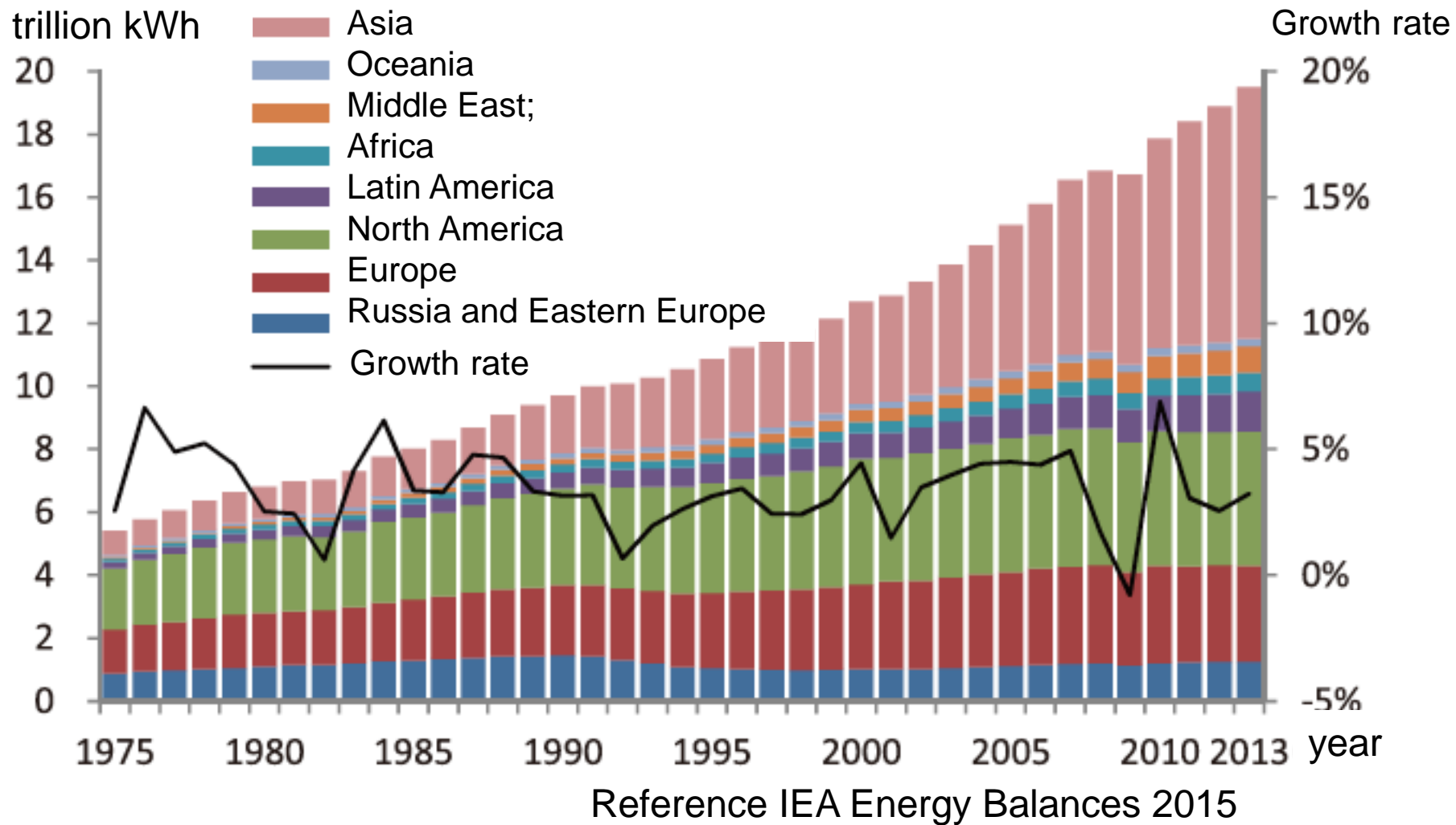
発電量（TWh）



Costs of Renewable Energy



Source: IEA WEOC 2010



21C当初より世界が新エネルギー開発に舵を切り始めた。

- **仏** : 2007年、今後原子力/RE投資を同額にすると宣言
 - **英** : 13兆円の大規模洋上風力計画で電力の3割賄う
 - **独** : 2004年、RE固定価格買取制度でPV80円/kWh
 - **中** : 2010年、次の5力年計画で65兆円。1億kW風力導入
昨年度の風力導入・PV生産世界一。
 - **米** : 2005年、Green Energy Policy 3点 (風力300GW計画)
- 世界エネルギー機構は、2060年までの新エネルギー投資を5000兆円と試算。我が国では、毎年10兆円の投資となる。**
- 世界白書:2010年、REへの投資は20兆円を超えた。**
- 電力設備容量増の半分、300GWはREとなる。**
- 風力は累積159GWとなり、NEの389GW(432基)の1割の能力。**

次世代太陽電池の可能性

—PVK(ペロブスカイト型太陽電池)とOPV(有機薄膜太陽電池)—

京都大学名誉教授・元エネルギー理工学研究所
次世代太陽電池研究拠点教授
有機太陽電池コンソーシアム代表
吉 川 暹

太陽電池の分類

太陽電池

Solar Cells

バルク太陽電池

単結晶Si, HITセル、多結晶Si

III-V族化合物半導体 (GaAs, InP)

薄膜太陽電池

Si系薄膜太陽電池

- ・アモルファスSi薄膜
- ・結晶系Si薄膜 (単結晶, 多結晶, 微結晶)
- ・結晶/アモルファス・ハイブリッド

II-VI族化合物半導体薄膜

CdTe

カルコパイライト薄膜 (CIS系)

CuInSe_2 , $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$,

有機太陽電池

Organic Solar Cells

有機材料

色素増感太陽電池 (湿式太陽電池 DSC)

有機半導体 (有機薄膜太陽電池 OPV)

有機ペロブスカイト結晶 (APV)

超高効率太陽電池

量子効果型素子・多接合セル

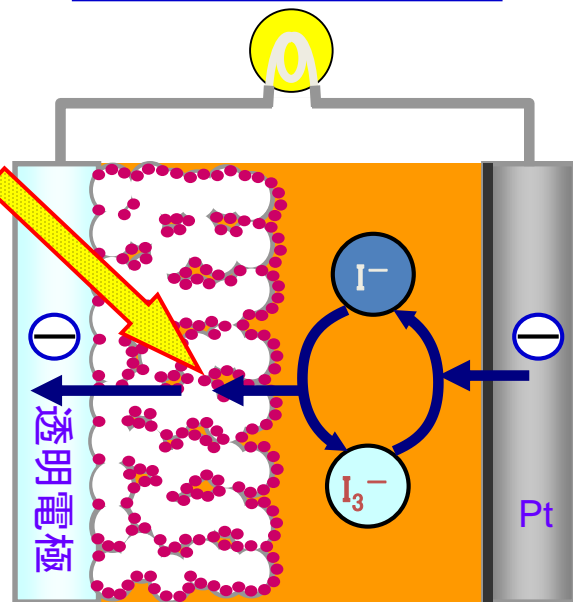
量子井戸, 量子ドット, 超格子

PVK:Ambipolar PVの発見

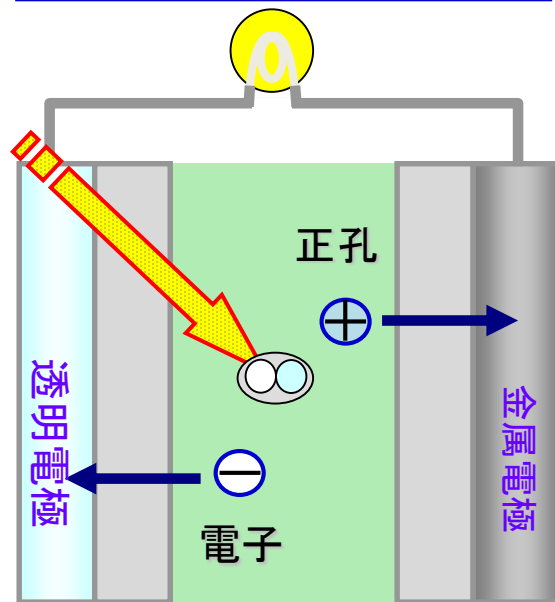
色素増感太陽電池
DSC

ペロブスカイト太陽電池
APV

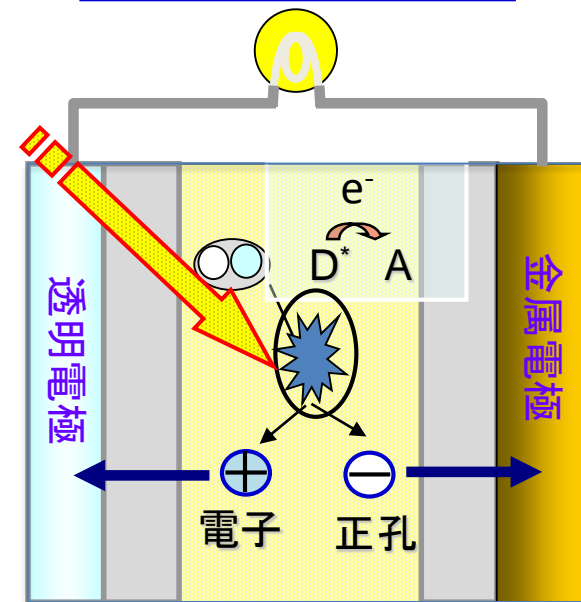
有機薄膜太陽電池
OPV



色素吸着
酸化チタン層 電解質



ペロブスカイト層
ホール
ブロック層 正孔輸送層



有機薄膜層
正孔輸送層 (D/A) 電子輸送層

色素増感型

ペロブスカイト型

有機薄膜型

光吸収

色素

ペロブスカイト

導電性ポリマー

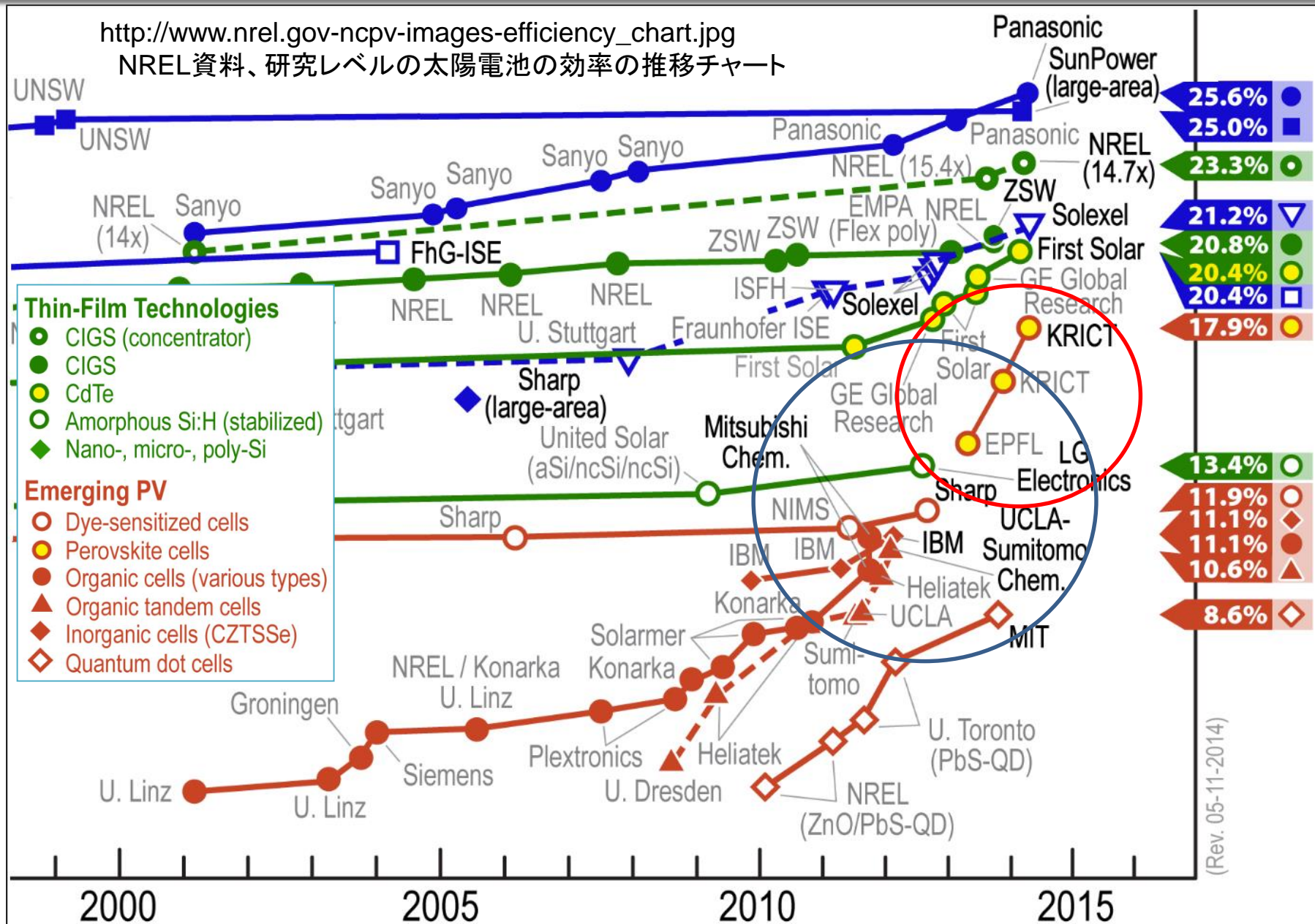
電荷分離

TiO₂/色素界面

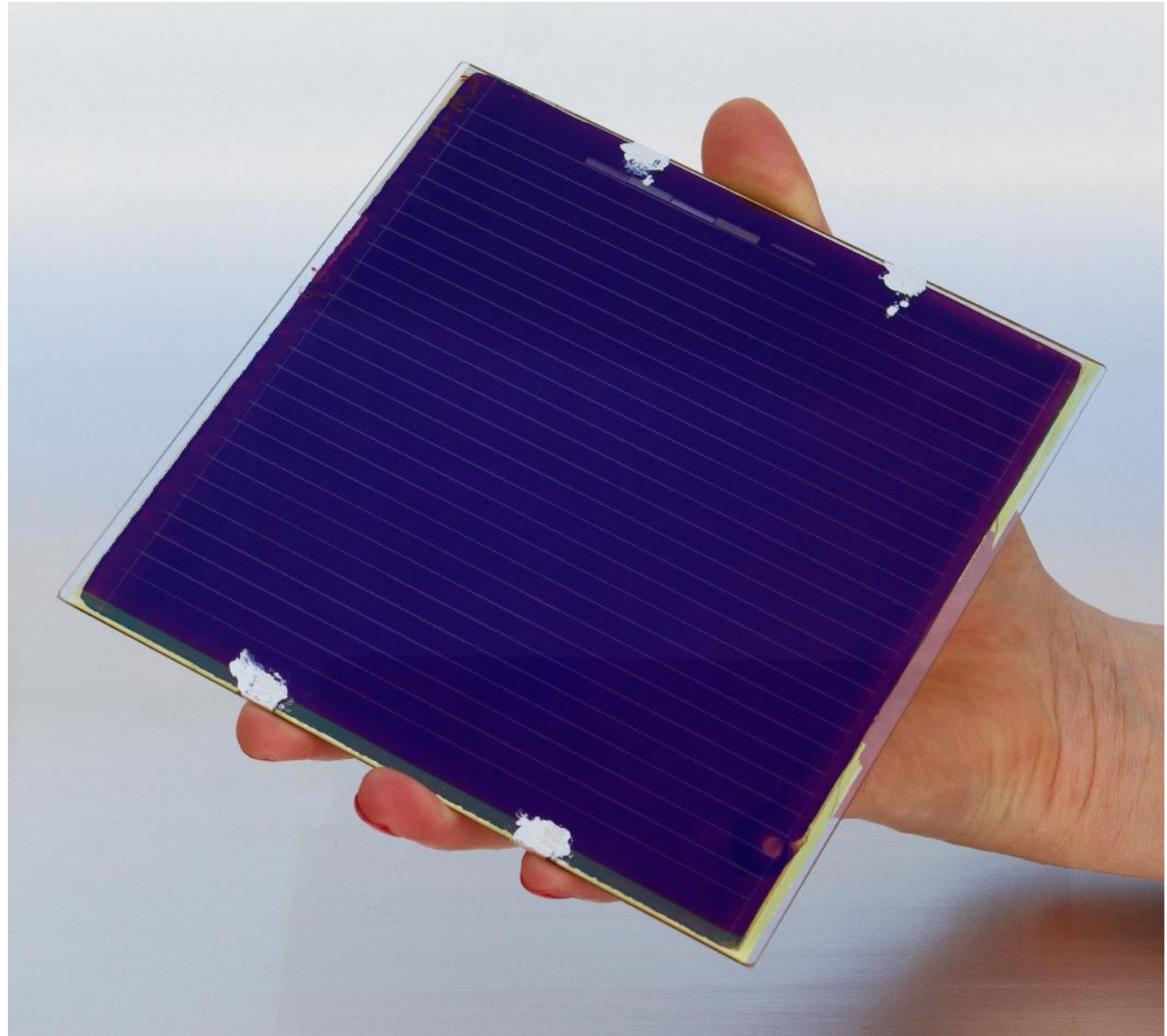
ペロブスカイト結晶内

D/A界面

NREL, Best Research-Cell Efficiencies



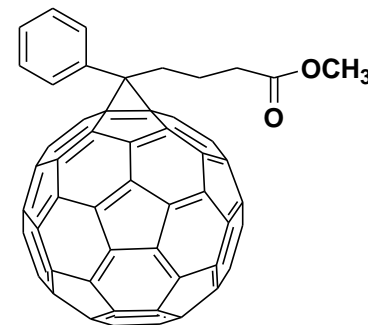
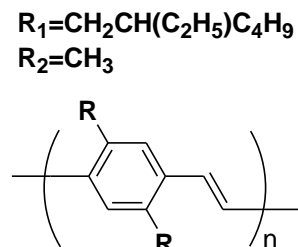
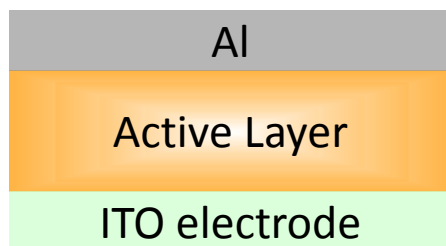
Sollianceが発表した
6インチ角ガラス基板
上のペロブスカイト
太陽電池モジュール



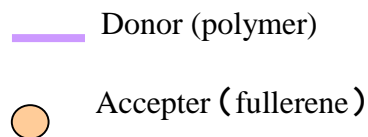
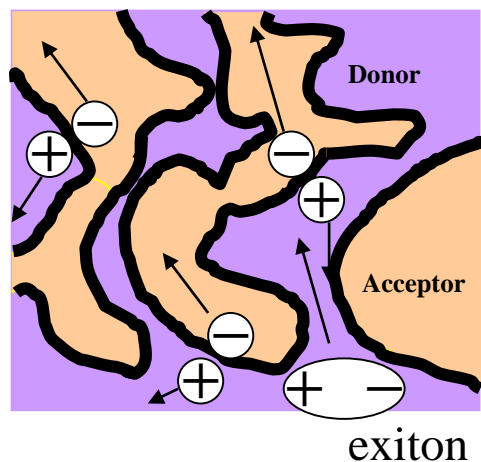
出典: Solliance(オランダ)のプレスリリース(2016年5月9日)

http://www.solliance.eu/news/item/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=374&cHash=9cca0703becbdfb276110aa258244a5e

Bulkheterojunction Solar Cell (2.5 %)



Bulk heterojunction model



Conjugated Polymer

P type (electron donor)

Fullerene derivative

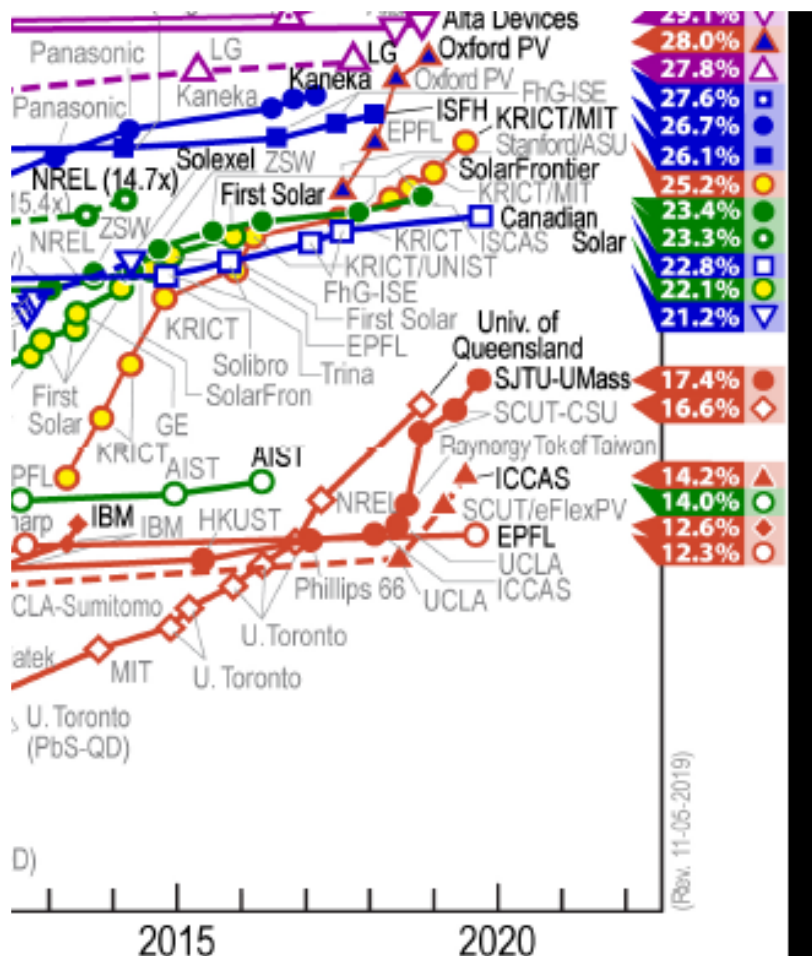
N type (electron acceptor)

Segregated D and A molecules makes bulk heterojunction structure. Phase sizes are no longer than exciton diffusion length.

Highly efficient exciton diffusion to D-A interface

Higher efficiency of over 2.5 %

ペロブスカイトに目を奪われる間に



Emerging PV

- Dye-sensitized cells
- Perovskite cells
- ▲ Perovskite/Si tandem (monolithic)
- Organic cells (various types)
- ▲ Organic tandem cells

Best Research-Cell Efficiencies, NREL, 2019年11月6日版

**有機薄膜太陽電池の最高変換
効率17.4%**

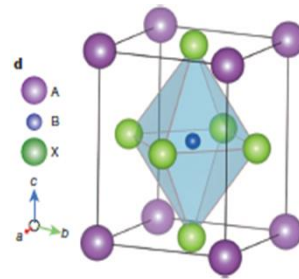
**ラダー型アクセプタY6
(ノンフラーレンアクセプタ)
可視光領域に強い吸収**

ペロブスカイト太陽電池の最高変換効率25.2%

ペロブスカイト／結晶Siタンデム構造太陽電池の最高変換効率28.0%

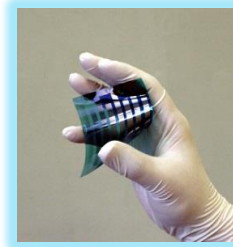
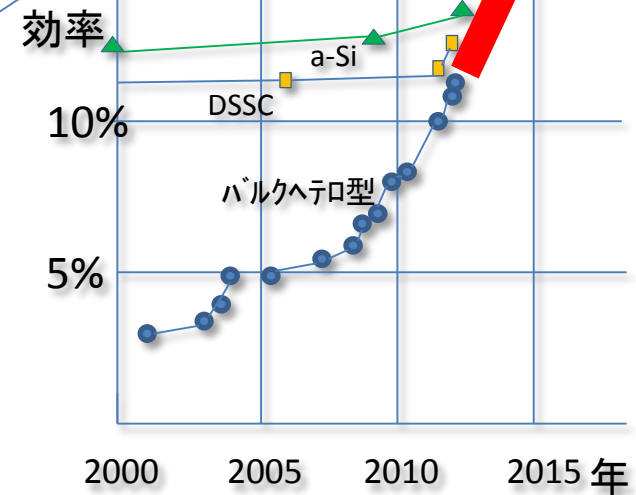
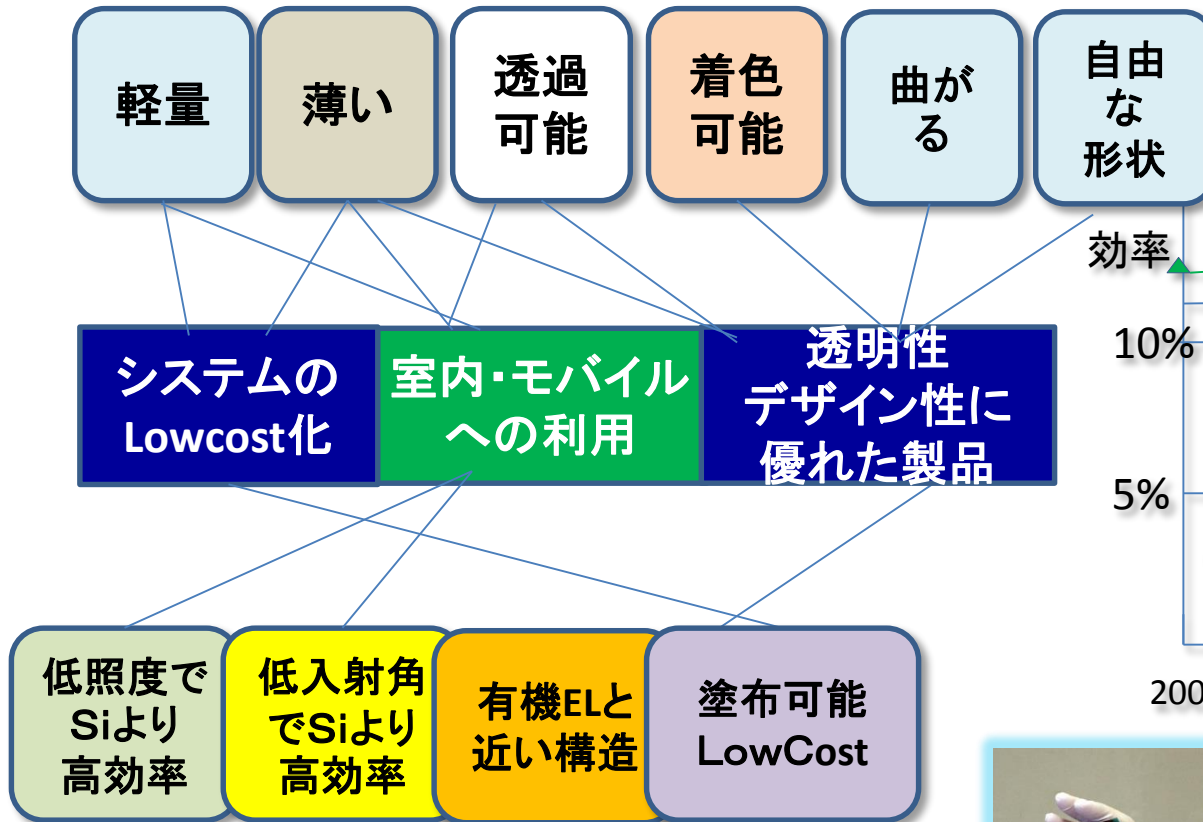
次世代太陽電池開発がすすんでいる

Recent sky-rocket improvement of PVK
(バルクヘテロ&ペロブスカイト型の特徴)

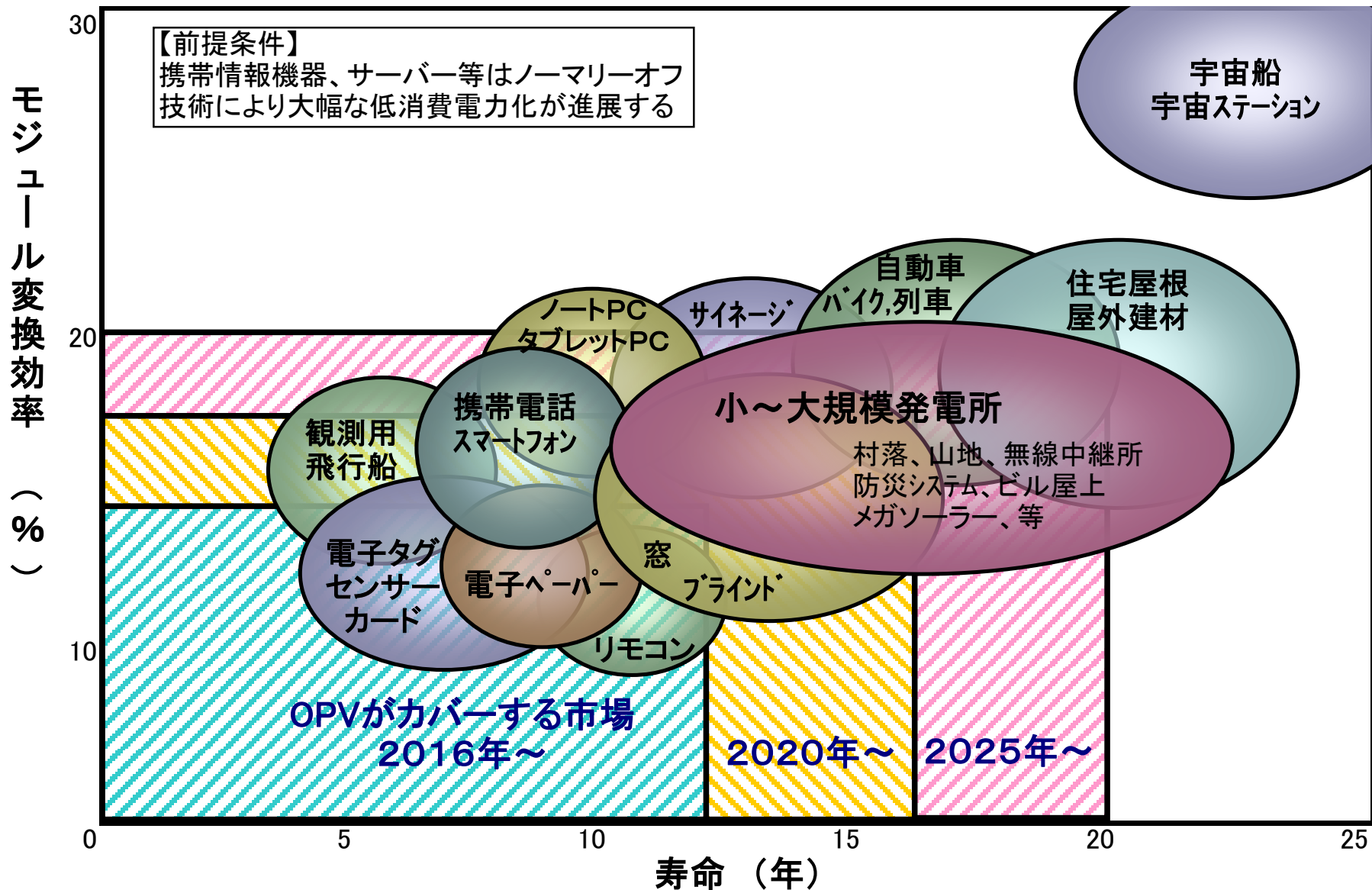


ペロブスカイト型の
突然の登場

22%



PVK, OPVのアプリケーションマップ



③可能性

2030年に向けた太陽光発電の目指す姿



NEDO-PV2030

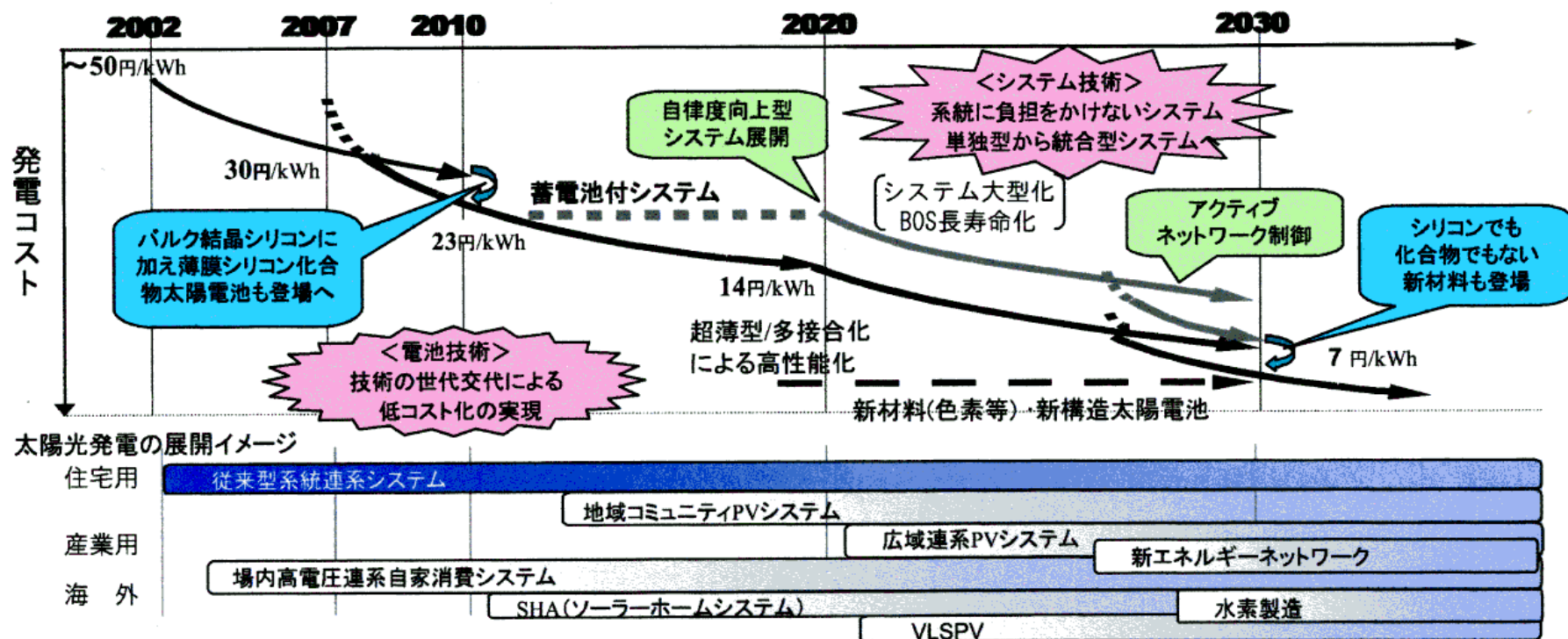
“制約のない太陽光発電の利用拡大”

汎用電源並みの経済性の確保

系統電力からの自律化と様々な用途への適用性の拡大

➤ 低コスト化のシナリオ

2030年の生産規模100GW



2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて

1. エネルギー基本計画が目指すところ
2. 再生可能エネルギーの展開
3. 次世代太陽電池の新たな可能性ーPVK,OPV
4. ソーラーシェアリングが重要
5. EV, 電力貯蔵, 宇宙太陽光発電その他
6. New Energy Initiative

ソーラーシェアリング(農電併産)のメリット

電力会社(10電力)概算*

電力販売収入=23.4兆円
販売電力量=7,970億kWh
電力単価=29円/kWh
発電単価=21円/kWh**

* 2015年を基に作成

**発電費用比率71.2%

電力の約80%を10電力で独占。

その50%を農地において生産した場合の電力売上

1,400億kWh × 15~18円/kWh
=**2.1~2.5兆円/年**

農業生産高(畜産を除く)
:5.6兆円(2015年度)

農業分野の
収入が1.4倍



富の分散



豊かな地方

全電力の28%を太陽電池
で賄った場合の発電量

発電量:2,800億kWh

* 環境省構想(2014)

発電用エネルギー輸入額の削減

・発電用エネルギー輸入額:7兆円*
・農電併産による輸入額削減
7兆円/8,800億kWh** × (6,200—
2,000億kWh)
=**3.3兆円/年**

輸入額の削減



富の蓄積

*IEEJ(2014) **火力発電量(2013年) 6,200億kWh, 2010年の概数

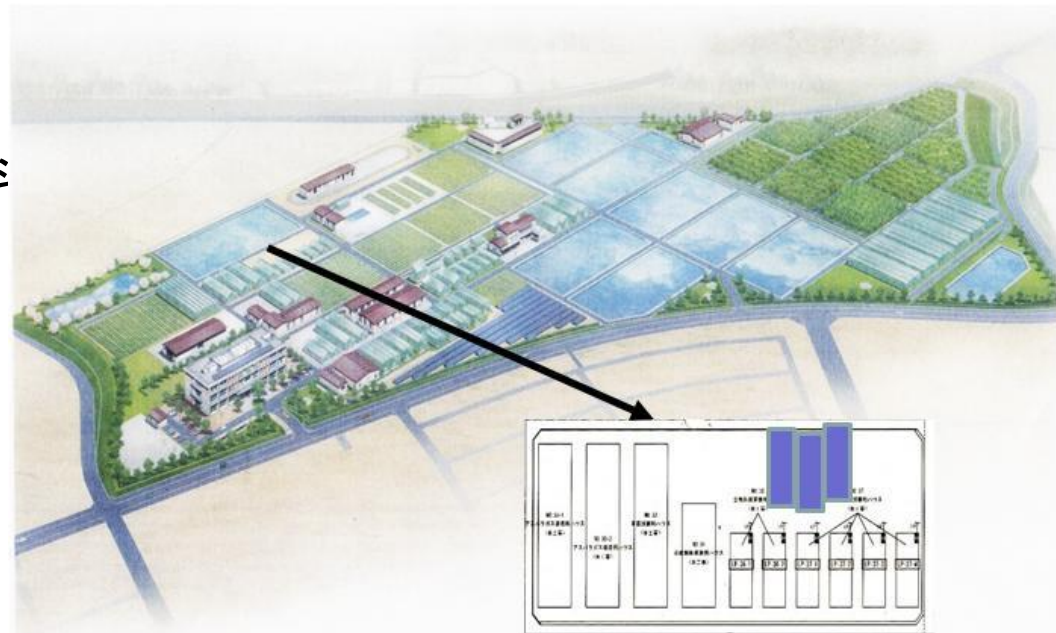
ソーラーシェアリングの展開：農工連携 ゼロエネルギーファーム(ZEF)の確立を目指して

「有機薄膜太陽電池とBACH-HPを用いた 施設園芸ゼロエネルギーファームの開発」

2014年12月17日

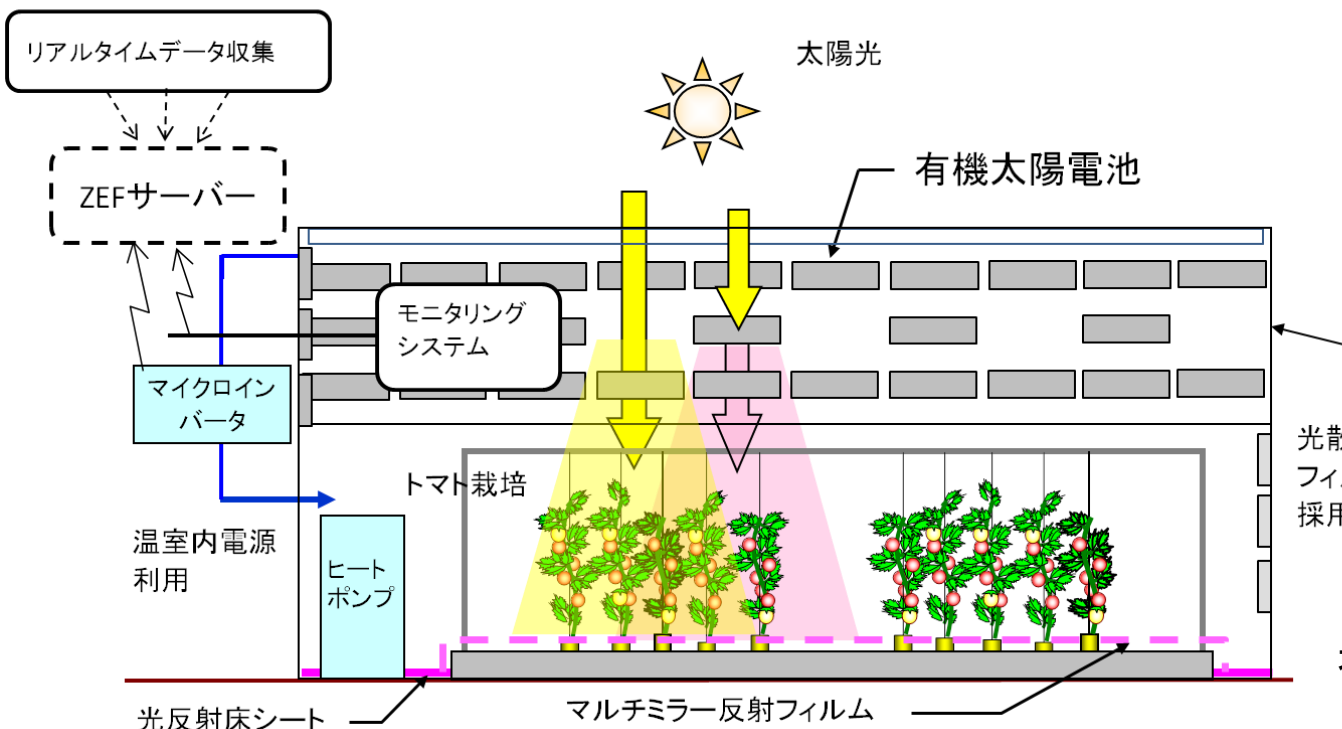
京都大学エネルギー理工学研究所
次世代太陽電池研究拠点
教授 吉川 暉

代表：京都大学大学院農学研究科
蔬菜花卉園芸学研究室
教授 土井元章

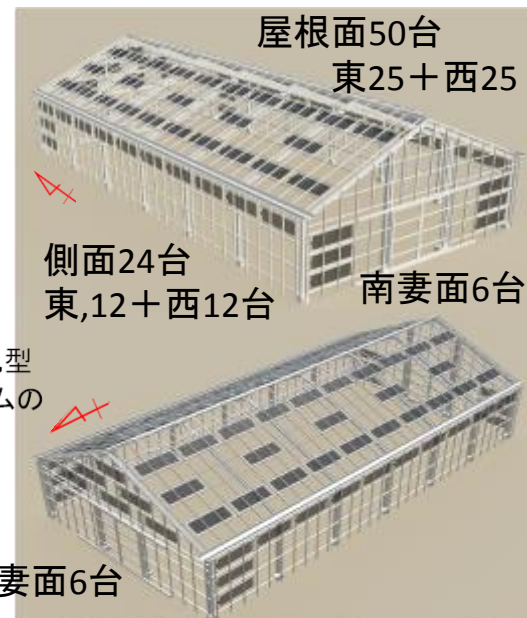


01 完成したOPV実証試験温室

(OPV試験温室)

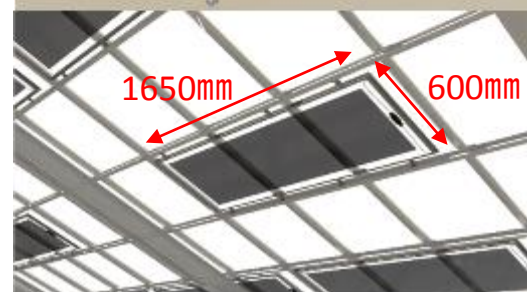
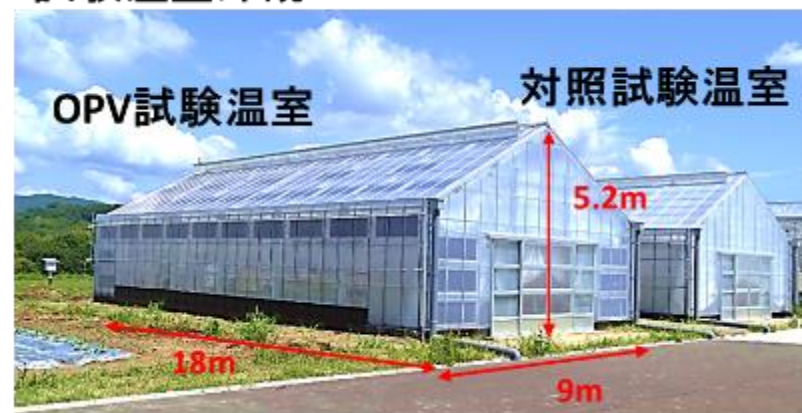


OPV試験温室



試験温室外観

OPV試験温室内部



秋冬仕様設置台数: 86台
総出力2.4kW

◆農業・園芸での有機薄膜太陽光発電の活用に向けて

技術的・工学的課題

- ・植物に必要な波長と不要な波長を使い分ける技術開発(ソーラーシェアリング)
- ・発電セルを農業用プラスチックフィルムに加工する技術開発
- ・夜間利用(主に暖房・補光)に向けた蓄電・蓄熱の効率化
- ・環境制御機器との効率的な組み合わせ
- ・台風とう自然災害への対策(自動収納)

・

経済的・社会的課題

- ・生産物への新たな付加価値の付与(機能性食品)
- ・農業資材としての利用のしやすさと低価格化
- ・売電と買電の制度設計
- ・技術普及に向けた投資への支援

・

汎用性のある農業技術体系
として確立する

農業的・農村的課題 —— 強靱な農業・活気ある農村

- ・農業生産者の負担軽減(ロボット化)
- ・農業・エネルギー産業並立による農村における若年雇用の拡大
- ・農村の環境保護への貢献

太陽光発電による電源確保の可能性

区分	潜在発電容量 (百万kW)	推定発電量 (億kWh/年)	設置可能面積 (×万ha)	国内土地利用面積 (×万ha)	比率
住宅地	65	653	5.4	107	5.1%
工場・商業施設	44	442	3.7	72	5.1%
農地	403	4,050	33.6	491	6.8%
園芸施設	7	70	0.6	5.7	10.2%
耕作放棄地	34	342	2.8	34	8.3%
その他(湖沼・ダム, 河川敷,駐車場等)	127	1,276	10.6		
合 計	680	8,315	56.7	3,779	
出典等	NEDO(2014)	今回試算		園芸施設:農水2012,そ れ以外は国交省2013	

光電変換効率=15%
で計算
(やや低い効率)

- 太陽電池の最大の潜在的設置場所は農地にある。
- 農業と発電を適正に組み合わせれば【農電併産】、農業と電力生産が同時に可能。
⇒地方が豊かになる。
- 自営農地で発電すれば、土地代が不要となり安価な電力が供給できる。
⇒電力料金を低く設定できる。

農電併産の展開

FITを目的とした農業分野でのソーラーシェアリングはすでに始まっている。

- 電力生産に重きをおき、農業が疎かにされている。
- 将来、主電従農になり、農地が荒廃しそうだ。

農業生産と電力生産が**協調的**に発展する技術は？

- 農業と協調的に適用可能な太陽電池は？
- どのように設置すれば、農業への影響を軽減できるか？
- 農業への影響は？ 協調できる方策はあるか？
- 農業側での変革が必要！
- 魅力的な農業を創出できれば、主電従農にならないのでは・・
- 経済性は？ CO2排出削減効果は？

社会的メリット

- 自前の電力供給：1400億kWh/年の電力供給に貢献。
- CO2排出量削減：最大7,000万t-CO2/年の削減に貢献。
- 国の貿易収支：1.6兆円の輸入削減に貢献。
- 農電併産事業体：2兆円/年規模の収益の地方への分散。
- 太陽電池メーカー：1.6兆円/年規模のマーケットの創出。

日本版シュタットベルケによるエネルギーの地産地消

— 湖南省のエネルギー政策を例に —

滋賀県湖南省環境経済部

環境政策課

地域エネルギー室

湖南省地域自然エネルギー地域活性化戦略プラン

地域新電力が核となって事業を推進していく取組

(1)小規模分散型市民共同発電プロジェクト



- FITに頼らない事業展開・小規模分散型でのソーラーシェアリング・自家消費型屋

(2)家庭用太陽光発電買取プロジェクト



- 家庭での自然エネルギー活用に寄与する取組推進

(3)自家消費型太陽光発電プロジェクト



- 屋根借り太陽光発電事業によるエネルギーの地産地消推進

(4)イモエネルギー活用プロジェクト



- 農福連携の取組推進による芋製品の開発等六次産業化への検討・ソーラーシェアリ

(5)木質バイオマス活用プロジェクト



- 林福連携の取組推進による木質バイオマス燃料の供給実施

(6)公共施設の脱炭素化プロジェクト



- エネルギーを主眼に置いた効率的な公共施設の維持管理について検討

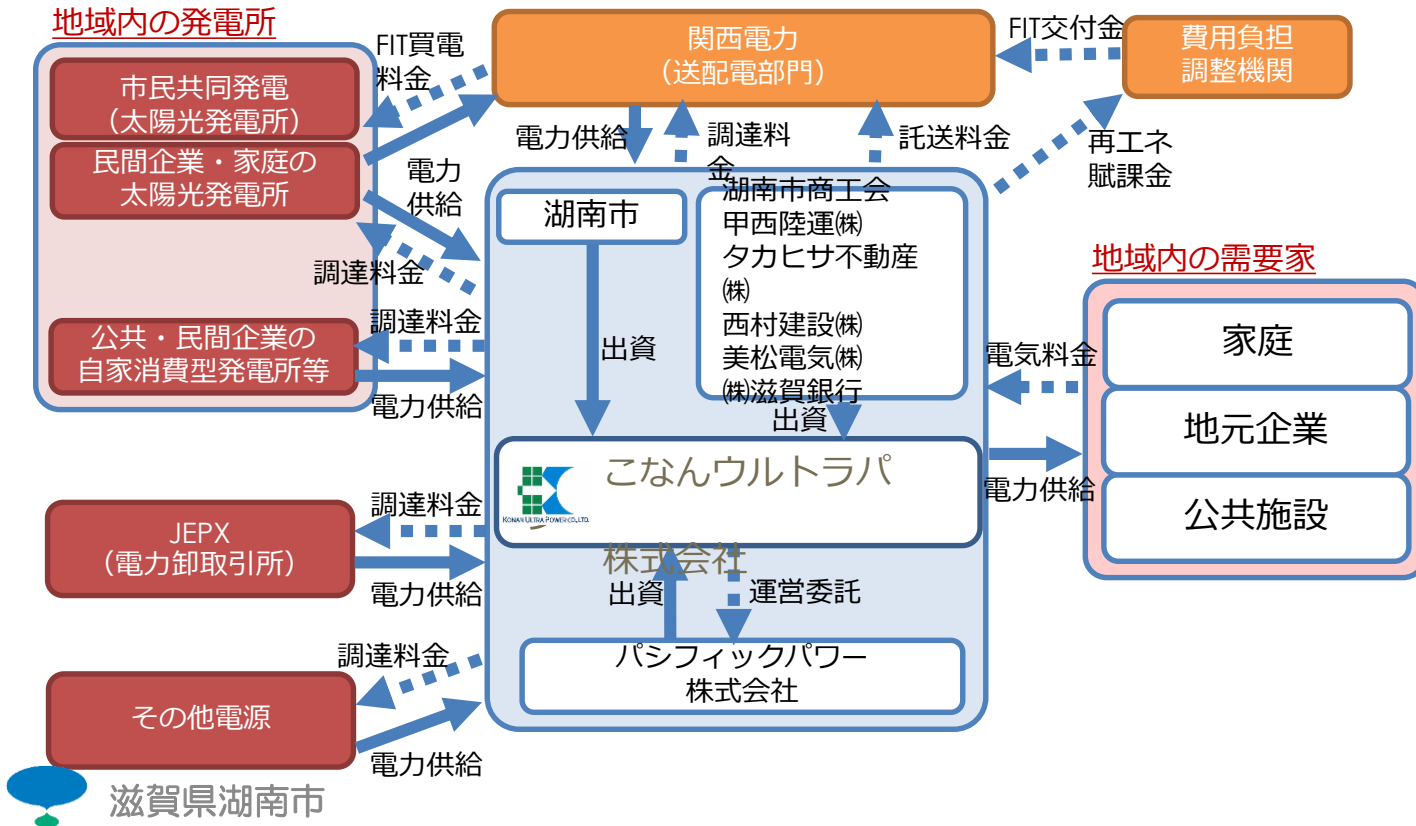
(7)地域マイクログリッド構築プロジェクト



- 災害時でもエネルギー供給が途切れない防衛エリア検討

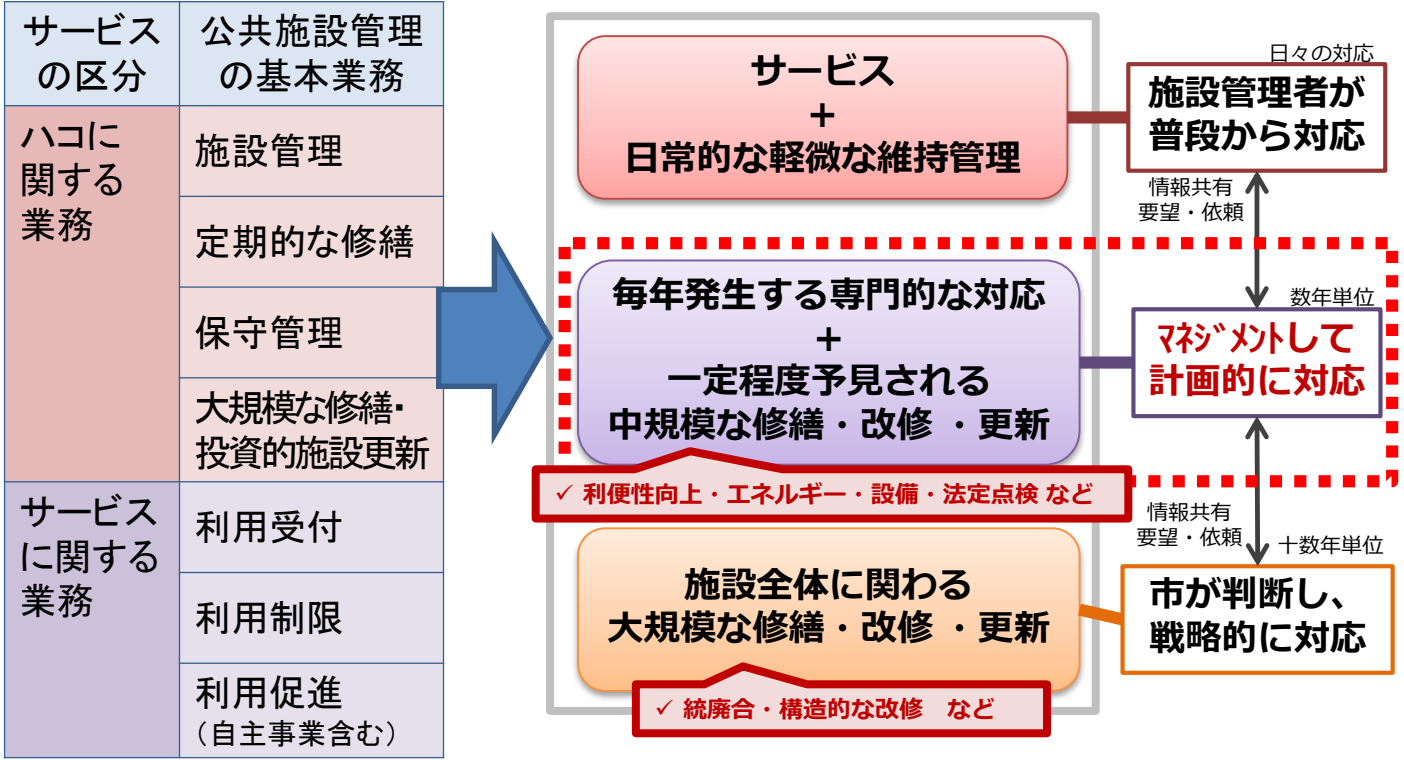
こなんウルトラパワーの事業スキーム

- ① 湖南省と民間企業の共同出資で「こなんウルトラパワー」を立ち上げ
- ② 地域内の発電所から「こなんウルトラパワー」が電力を購入
- ③ 地域内の需要家に「こなんウルトラパワー」が電力を供給



湖南省版シュタットベルケ（案）

公共施設管理の考え方を再編



⇒ 現行の役割分担の中では、市-事業者共に担いきれないマネジメント業務（中段項目）を明確に位置付けることで、より効果的な公共施設管理を目指す

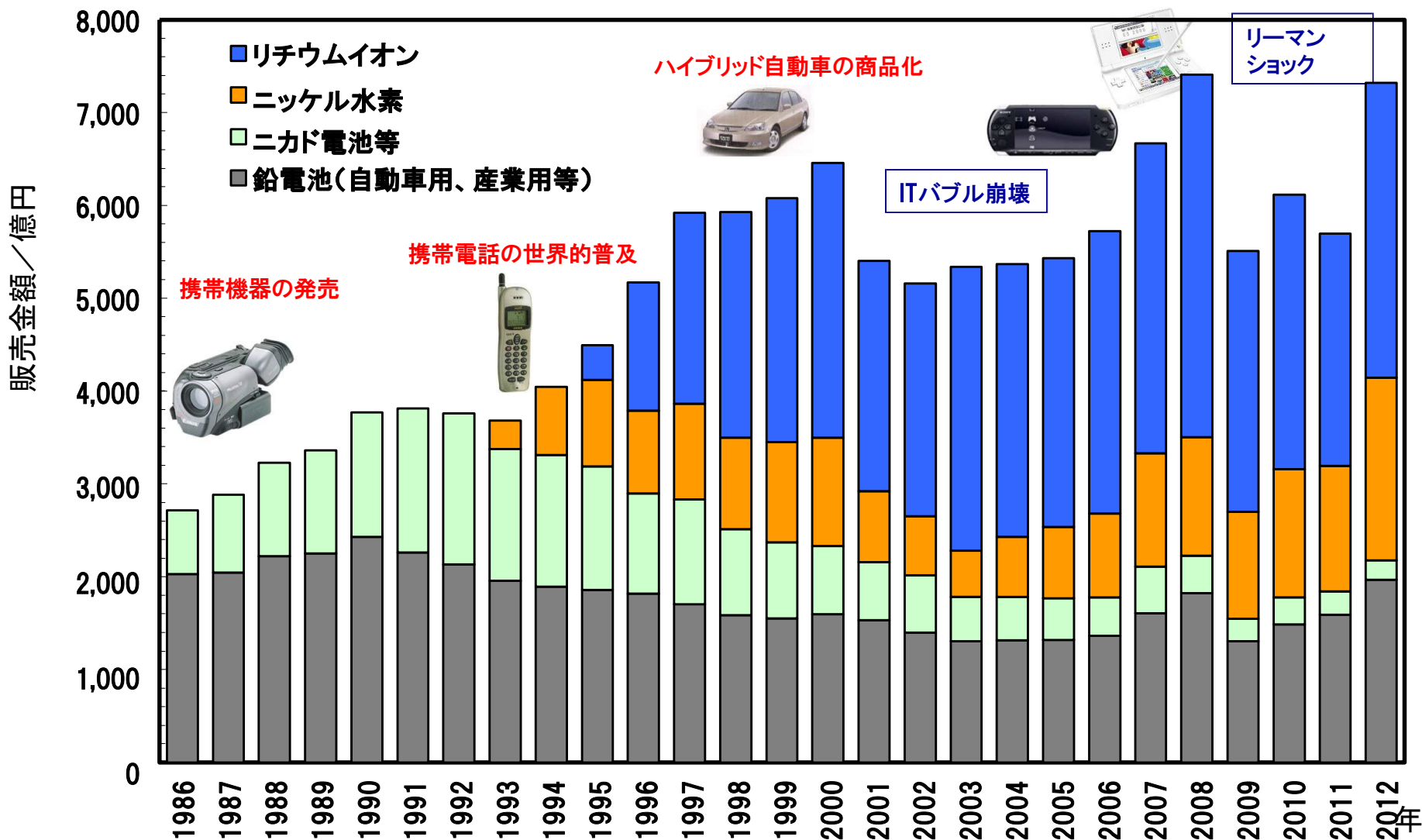
我が国、新エネルギー研究開発課題

New Energy Paradigm Shift

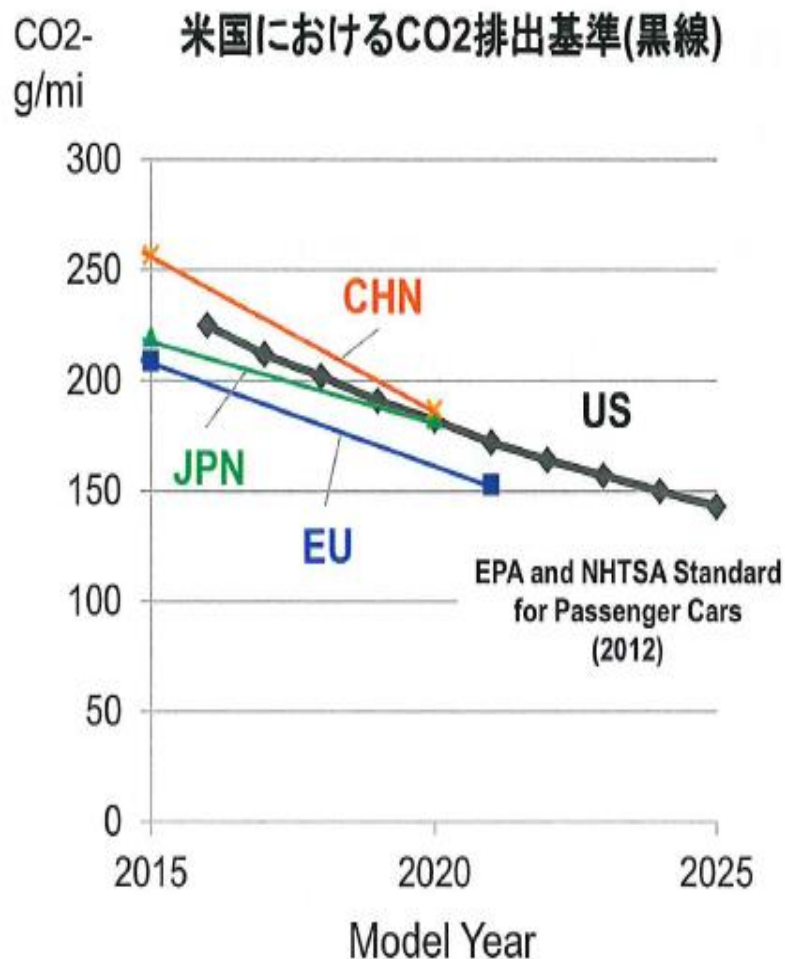
- ・バッテリー
- ・EV: 電気自動車
- ・ソーラーカー
- ・宇宙太陽光発電その他

国内電池別販売金額の推移

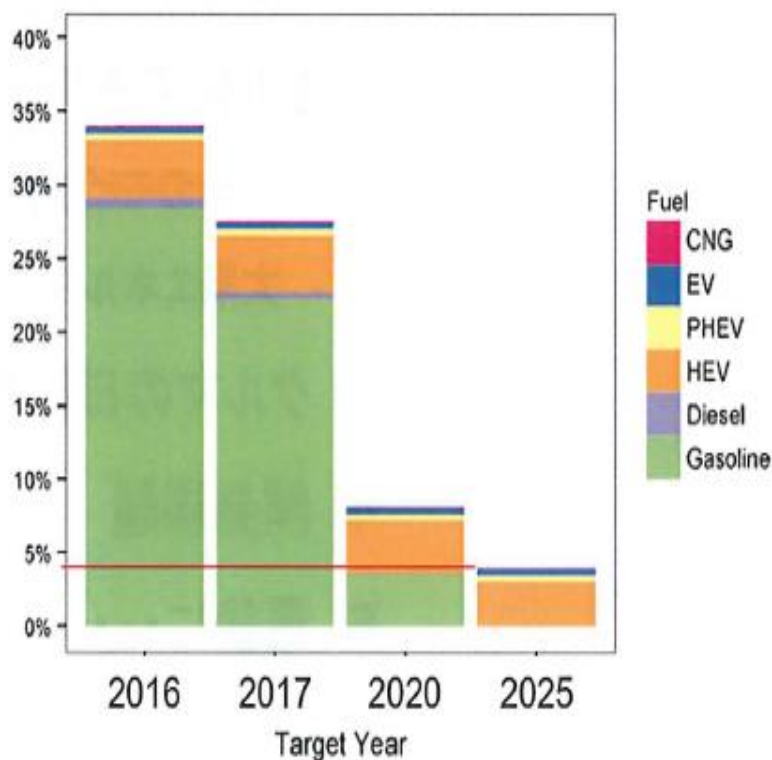
携帯機器用は、ニッカド電池からニッケル水素電池、Liイオン電池へシフト。ニッケル水素は、乾電池代替やHEV用へシフトし高い世界シェア。Liイオン電池は、韓国や中国で急成長、世界で1兆円(日本は25%)。



米国における新たな排ガス規制



米国におけるCO₂排出基準を満足する乗用車(2014年モデル)の割合



Source: <http://epa.gov/otaq/fetrends.htm>

Toyota: First Solar Car on Prius



New Plug-in Prius from Toyota

180W solar cell for charging battery
~2.9 km/day

Issues:

Increase generation capacity to 1000W

Light weight

Durability, Reliability



太陽電池のモビリティへの応用 世界初の市販Solar Car

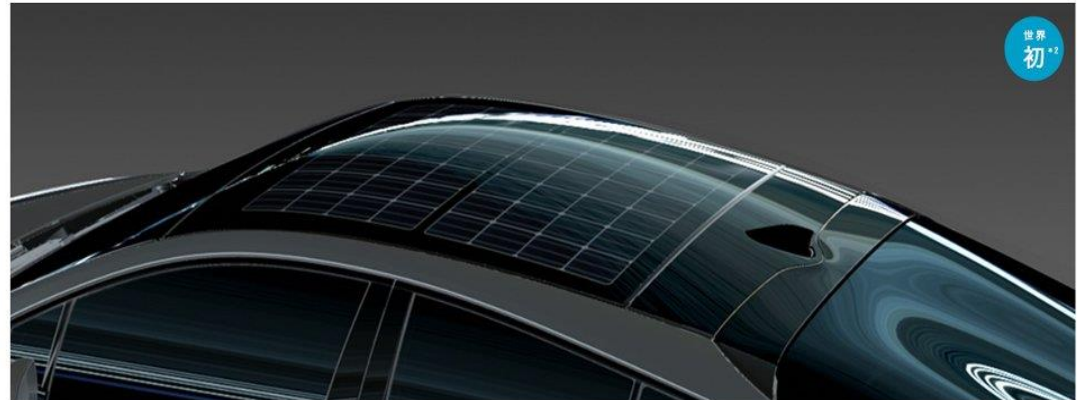
(国研)産総研 太陽光発電研究成果報告会 2016.06.15

特別講演「太陽光発電開発戦略”NEDO PV Challenges”」
NEDO 新エネルギー部太陽光発電グループ 山田宏之主任研究員/プロジェクトマネージャー
において、太陽電池の用途開拓についての言及されている



太陽光でバッテリーを充電
ソーラー充電システム

車両のルーフに搭載した大型ソーラーパネル(ソーラールーフ)により太陽光発電し、その電力を駆動用バッテリーおよび12Vバッテリー系統へ供給できます。駐車中は駆動用バッテリーを充電し、走行中は駆動用バッテリーの消費を抑えることで、EV走行距離や燃費の向上に貢献します。充電スタンドがない駐車場や災害等で停電した場合でも、太陽光があれば駆動用バッテリーの充電が可能となります。



NEDO-PJ (NEDO HPより)
シャープ 化合物3接合太陽電池
フレキシブル, PCE31.17%

トヨタ HPより

今は、コストが高い。しかし、ある程度、低コスト化できれば自動車に！
(電源電力でなく、高付加価値でPV市場が立ち上がる)

基幹エネルギーとしての宇宙太陽光発電の可能性

SPS (Space Solar Power Station)の概念図

宇宙太陽発電所SPS

宇宙空間で発電した電気エネルギーを無線で地上に送り、地上でその電気を利用する構想。静止衛星軌道(36,000km)から100万kWの電力を得る設計が主流。

[SPSの特徴]

CO₂フリーな電源

SPS : 20g-CO₂/kWh (建設時のみCO₂排出)
(SPS電力を利用し建設すれば11g-CO₂/kWh)

石油火力発電 : 846g-CO₂/kWh

原子力発電 : 22 g-CO₂/kWh

基幹エネルギー源

昼夜・雨に無関係の発電⇒地上太陽光の5.5～7倍のkWh

宇宙開放系への展開

宇宙利用により「成長の限界(ローマクラブ)」を打破

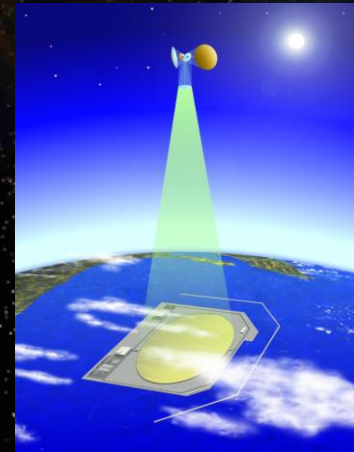
既存技術の延長で実現

異なる視点での開発(高効率・軽量・超巨大等)は必要

マイクロ波による 無線エネルギー伝送

-適正な売電価格実現のため高効率・軽量・
安価なマイクロ波送電システムが必須-

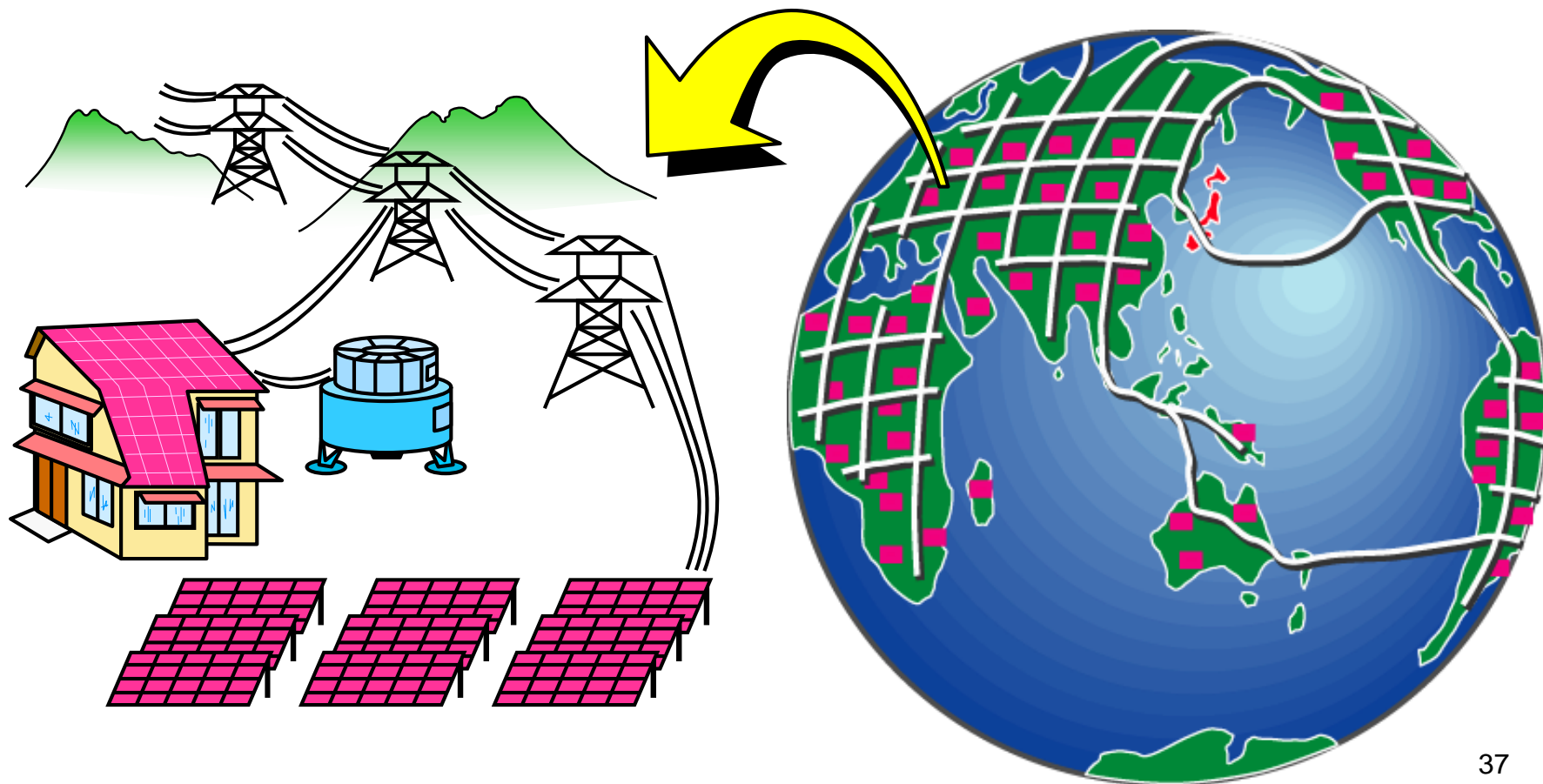
Ground Rectenna Site
2-10km Over 2GW



太陽電池と超電導ケーブルによる「世界的太陽光発電システム」

1989年発表

GENESIS (Global Energy Network Equipped with Solar Cells and International Superconductor Grids)



結論: New Energy Initiative

- 2050年カーボンニュートラル社会を機軸に
- 選択肢を広げ、多様なイノベーションを
- 地産地消のエネルギーにより強靱な国家を
- 日本版シュタットベルケによりエネルギー環境の一体的ガバナンスの実現
- 大学の研究開発を社会実装につなぐ努力を