

# 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 邦

# 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。

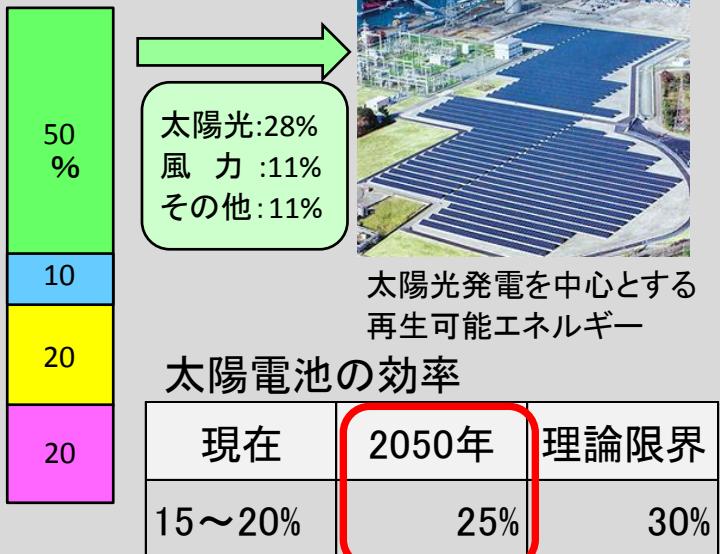
電 源	経産省(2017)	環境省(2014)	
	2030年	2030年	2050年代
再生可能エネルギー	22.2～23.6	31.2	60.0
太陽光	7.0%	11.7	27.9
風力	1.7%	5.4	10.8
バイオマス	3.7～4.6%	3.3	3.5
地熱	1.0～1.1%	1.4	3.8
水力	8.8～9.2%	8.6	10.7
その他		0.8	3.3
原子力	20～22%	20.0	20.0
火 力	56%	48.8	20.0
LNG	27%		
石炭	26%		
石油	3%		
省エネ	2,130億kWh		
総発電量	10,650kWh		
総必要電力量	12,780kWh		

・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CO<sub>2</sub>排出係数目標(0.37kg/kWh)達成は困難。  
・削減策はCCS(CO<sub>2</sub>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

(太陽電池)



### 【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

( $3.35\text{kWh}/\text{m}^2 \times 0.25 \times 0.8 \times 300\text{日}$ )

発電台数/年

総合効率

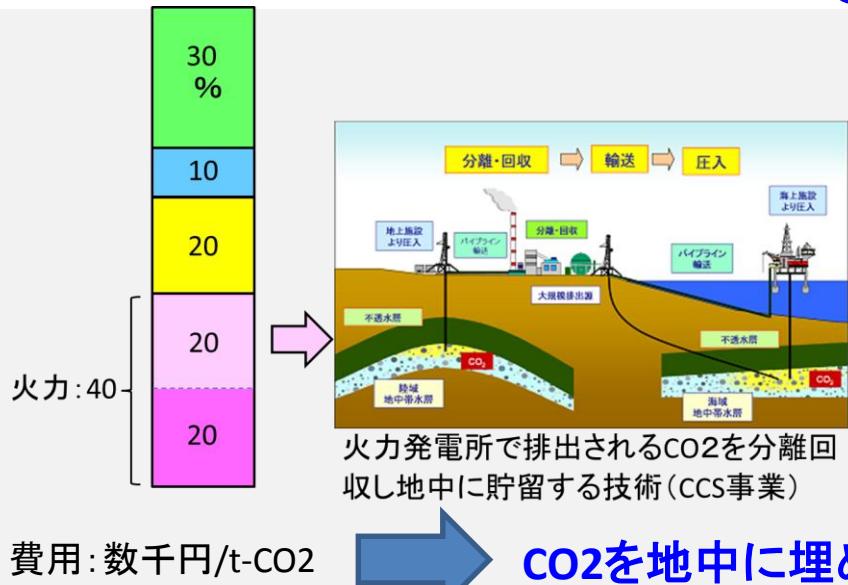
設置面積

$$= 139,303 \times 10^4 \text{m}^2 \Rightarrow 14\text{万ha}$$

電力を生み出す。4～5兆円\*の収益を生む

\*1kWh=15～18円と仮定

(二酸化炭素地中貯留)



## ●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

$2,000\text{億kWh} \times 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh}^*$

= 1億トンCO2/年を地中貯留

国内貯留可能量: 301億トン(RITE)

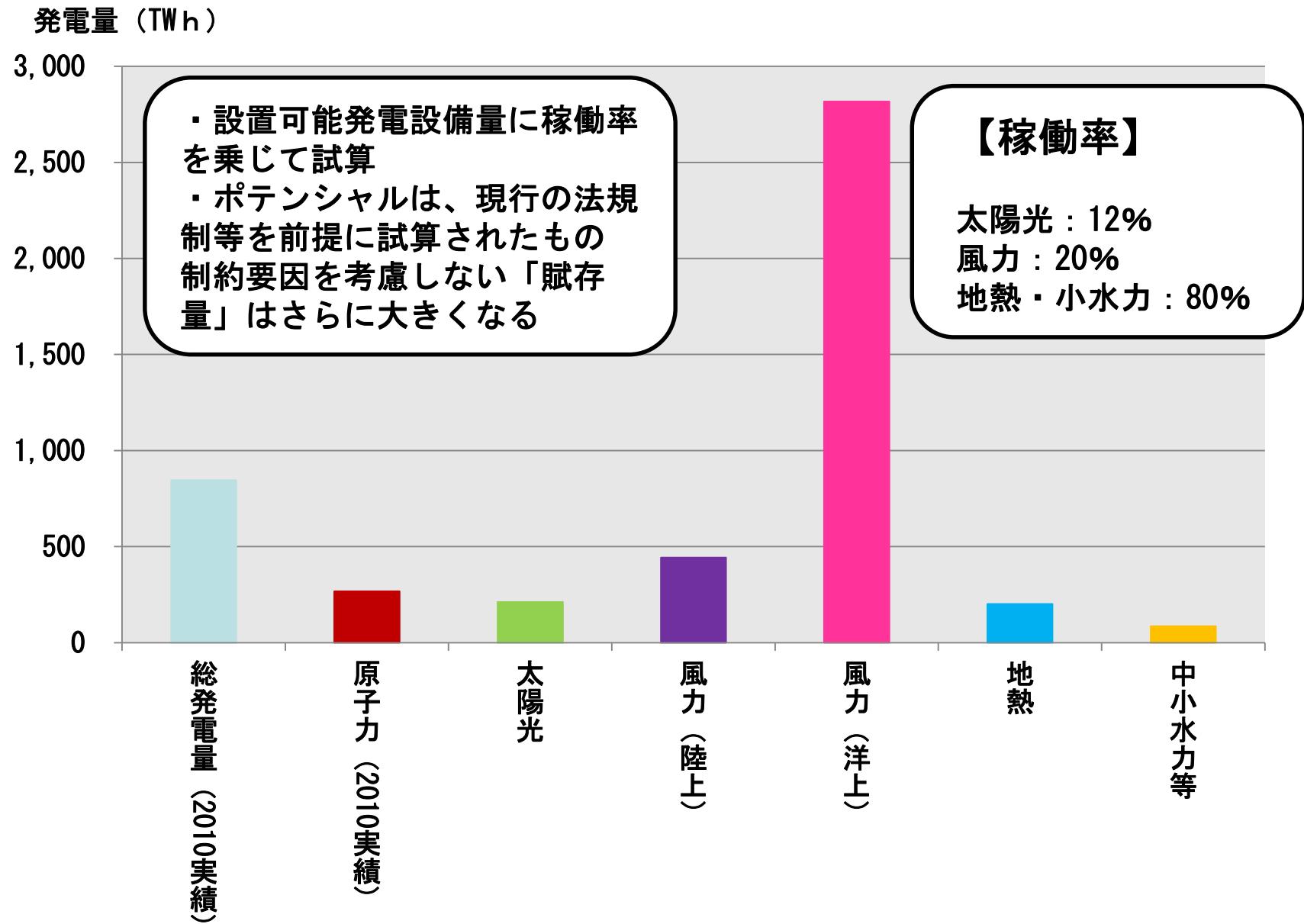
\*現状0.5～0.9kgCO2

CO2を地中に埋める。分離回収貯留に数千億円/年のコスト

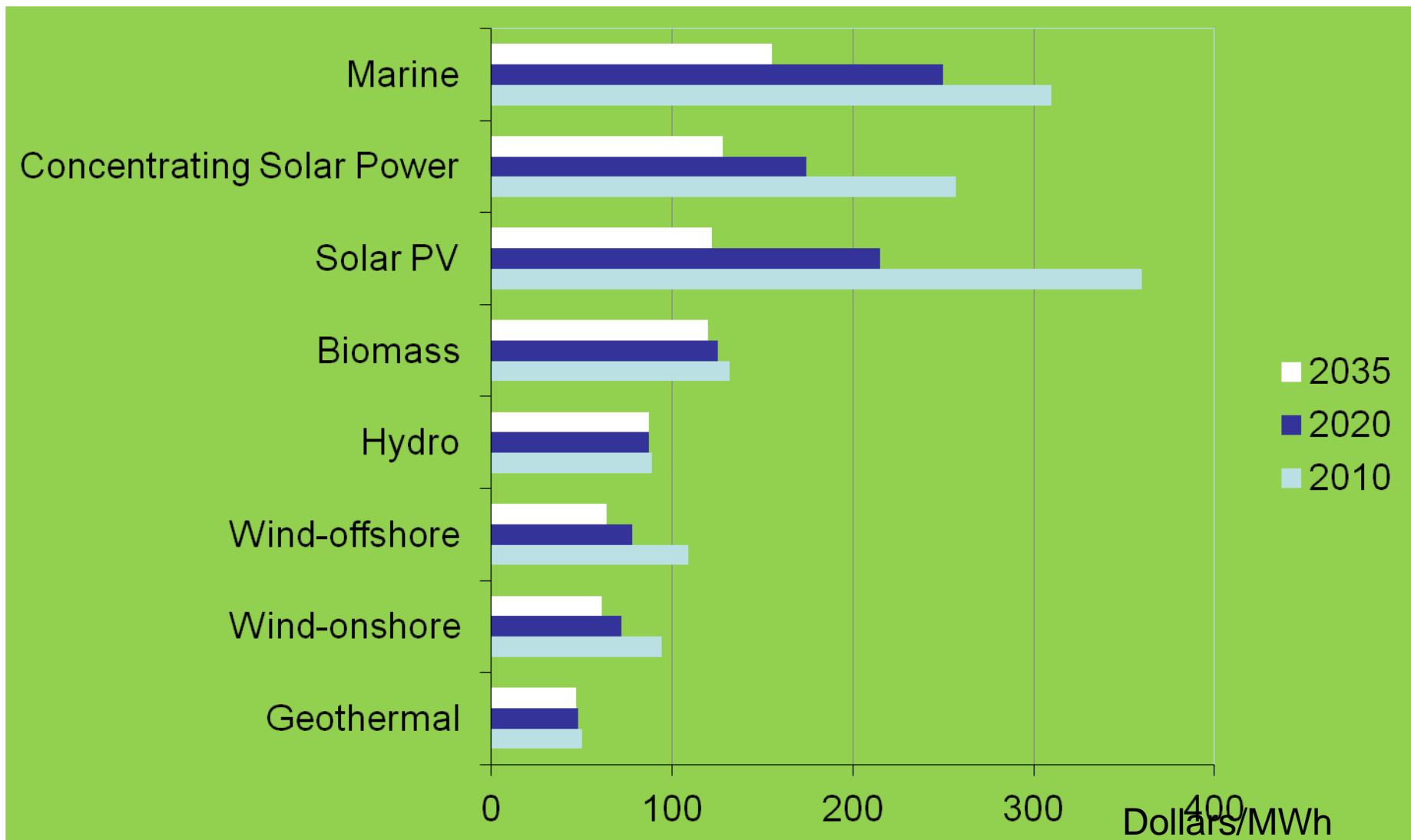
# 2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて

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—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

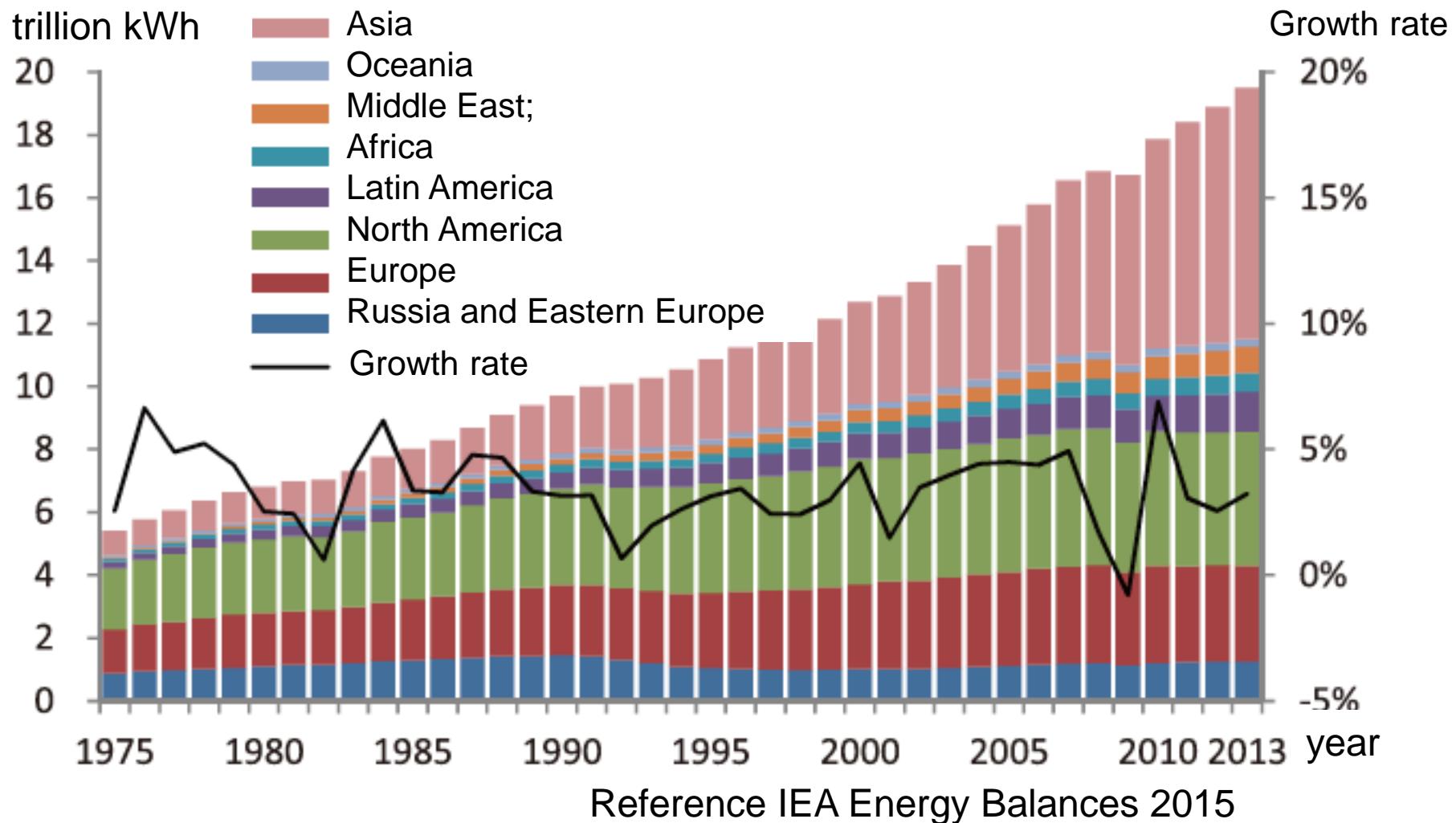
# わが国の再生可能エネルギーのポテンシャル（年間発電量に換算）



# 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カ年計画で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 還

# 太陽電池の分類

## 太陽電池

## Solar Cells

### 有機太陽電池

### Organic Solar Cells

### 超高効率太陽電池

### バルク太陽電池

### 薄膜太陽電池

単結晶Si, HITセル、多結晶Si

III-V族化合物半導体(GaAs, InP)

### 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<sub>2</sub>, Cu(InGa)Se<sub>2</sub>

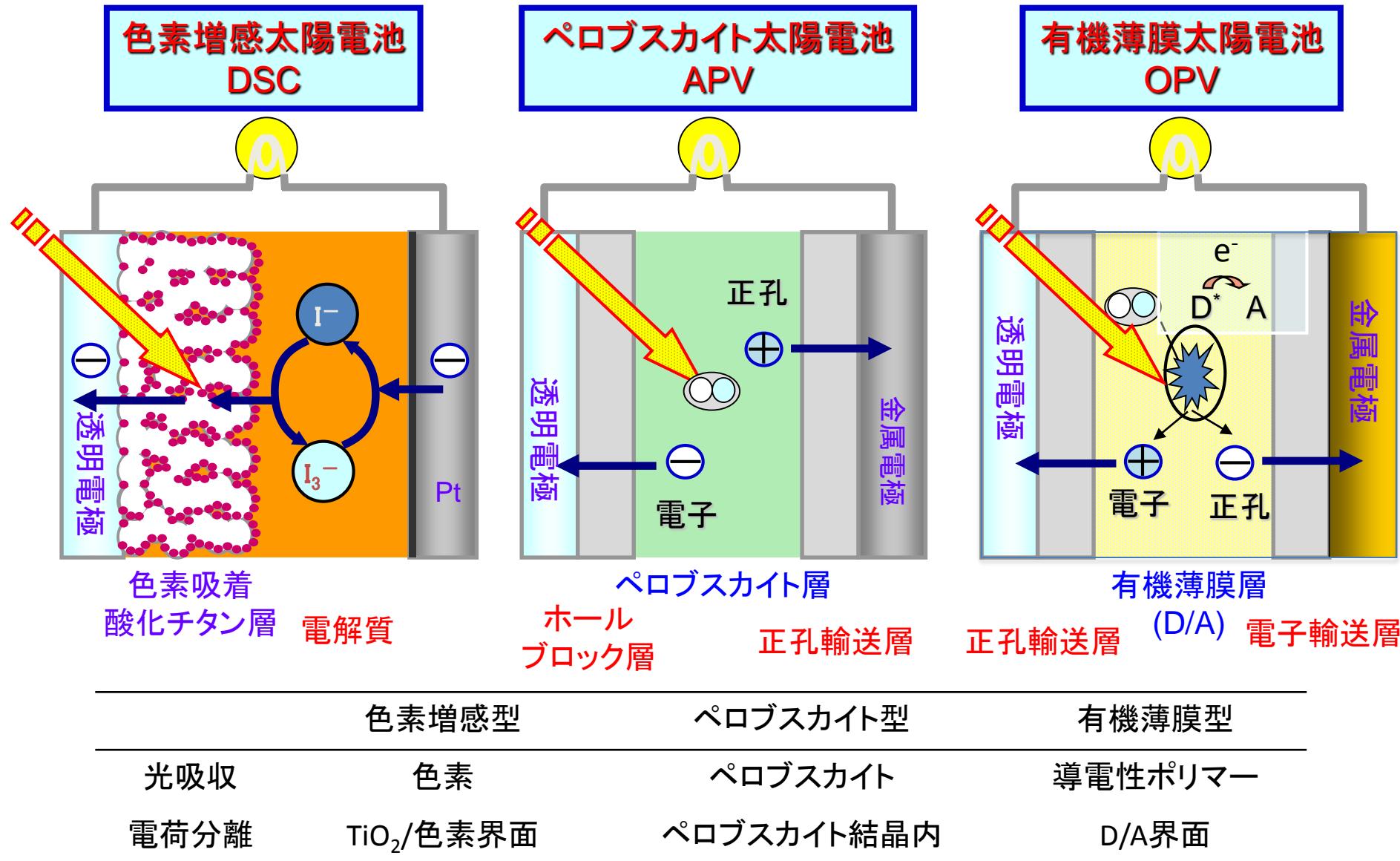
### 有機材料

- 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)

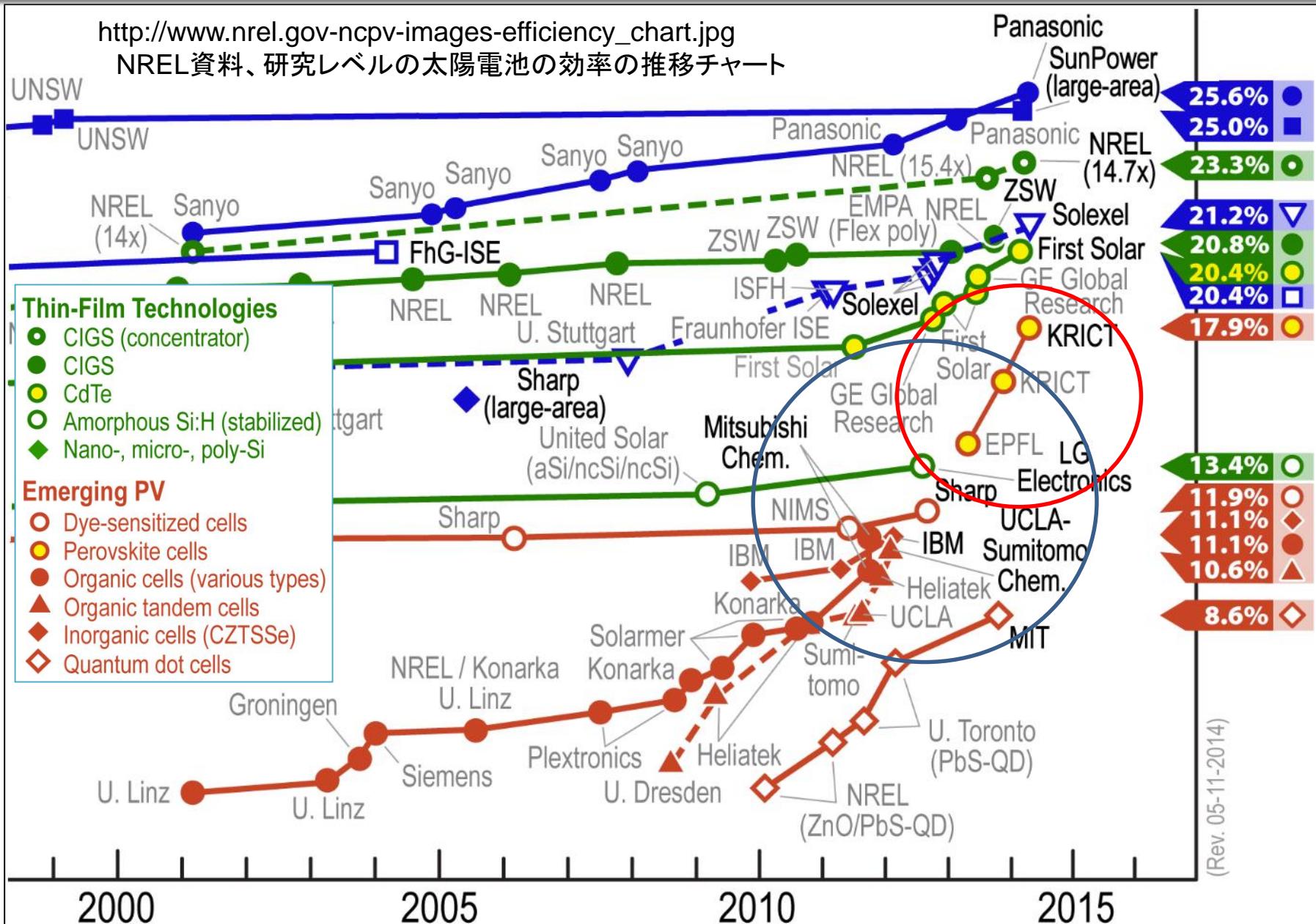
### 量子効果型素子・多接合セル

量子井戸, 量子ドット, 超格子

# PVK:Ambipolar PVの発見

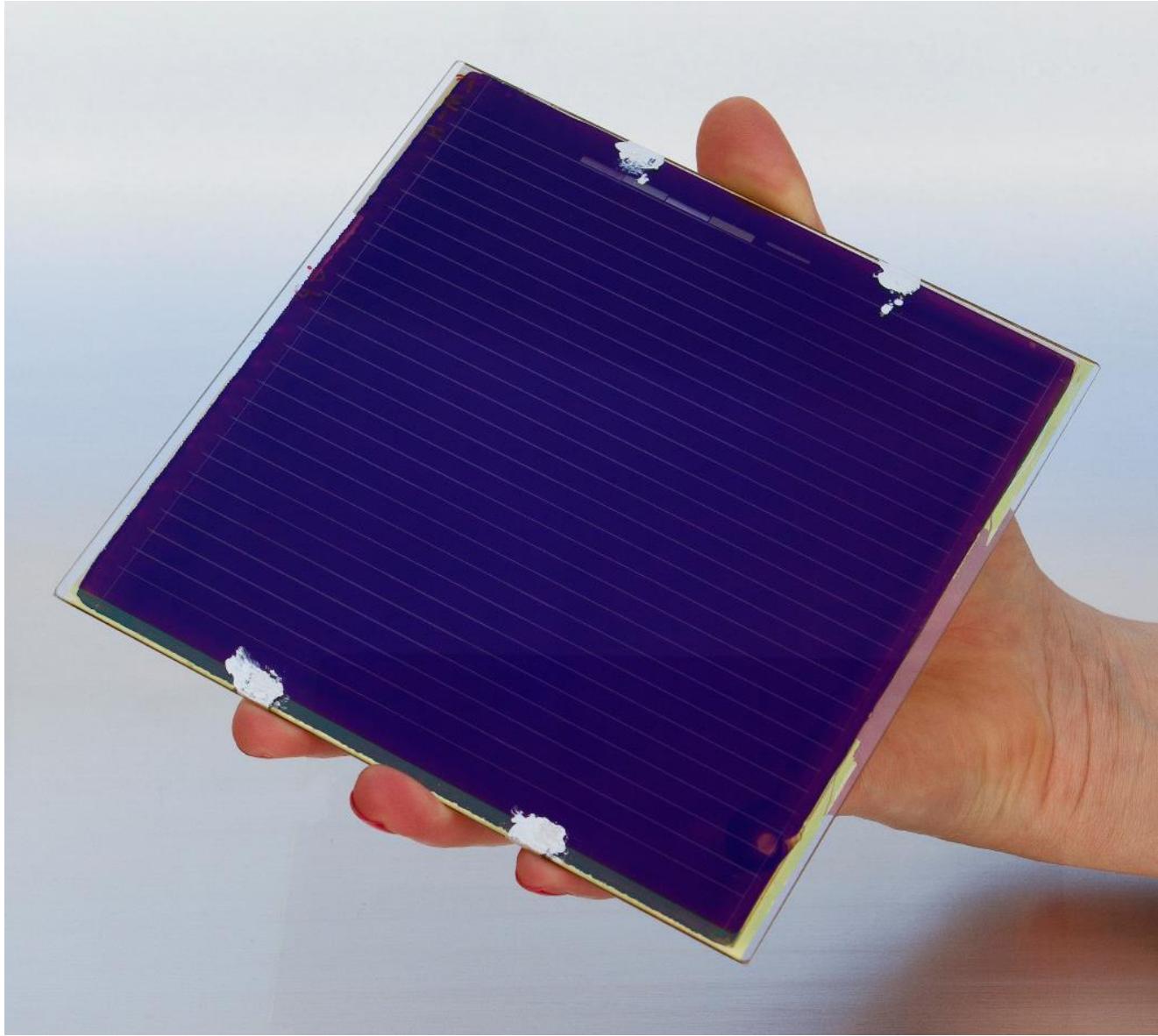


# NREL, Best Research-Cell Efficiencies



# ペロブスカイト太陽電池の市場参入の課題と方策

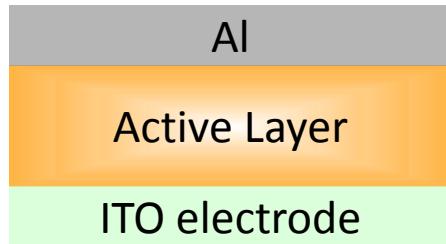
Sollianceが発表した  
6インチ角ガラス基板  
上のペロブスカイト  
太陽電池モジュール



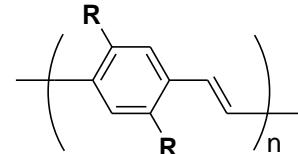
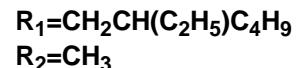
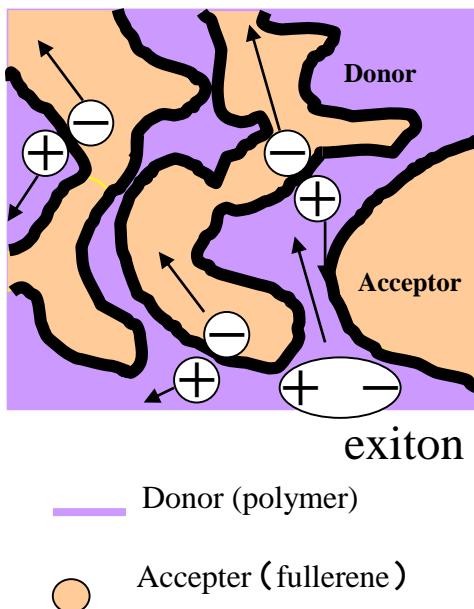
出典: Solliance(オランダ)のプレスリリース(2016年5月9日)

[http://www.solliance.eu/news/item/?tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=374&cHash=9cca0703becbdfb276110aa258244a5e](http://www.solliance.eu/news/item/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=374&cHash=9cca0703becbdfb276110aa258244a5e)

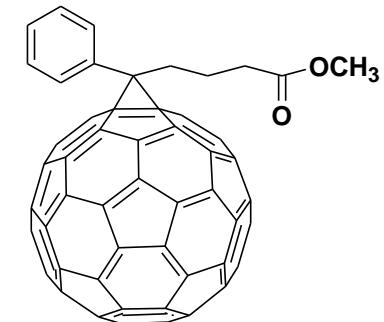
# Bulk heterojunction Solar Cell (2.5 %)



Bulk heterojunction model



Conjugated Polymer  
P type (electron donor)



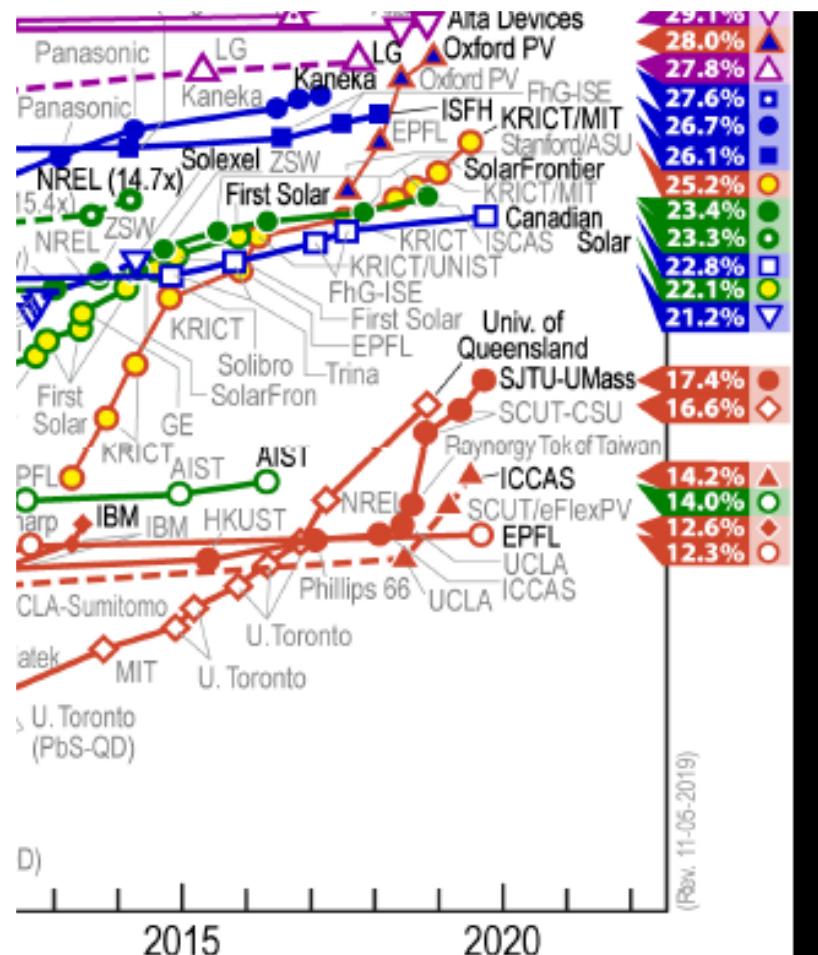
Fullerene derivative  
N type (electron acceptor)

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%**

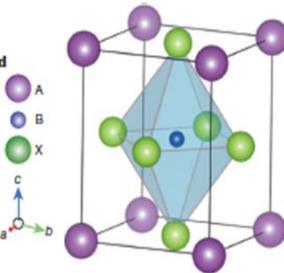
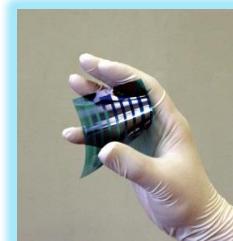
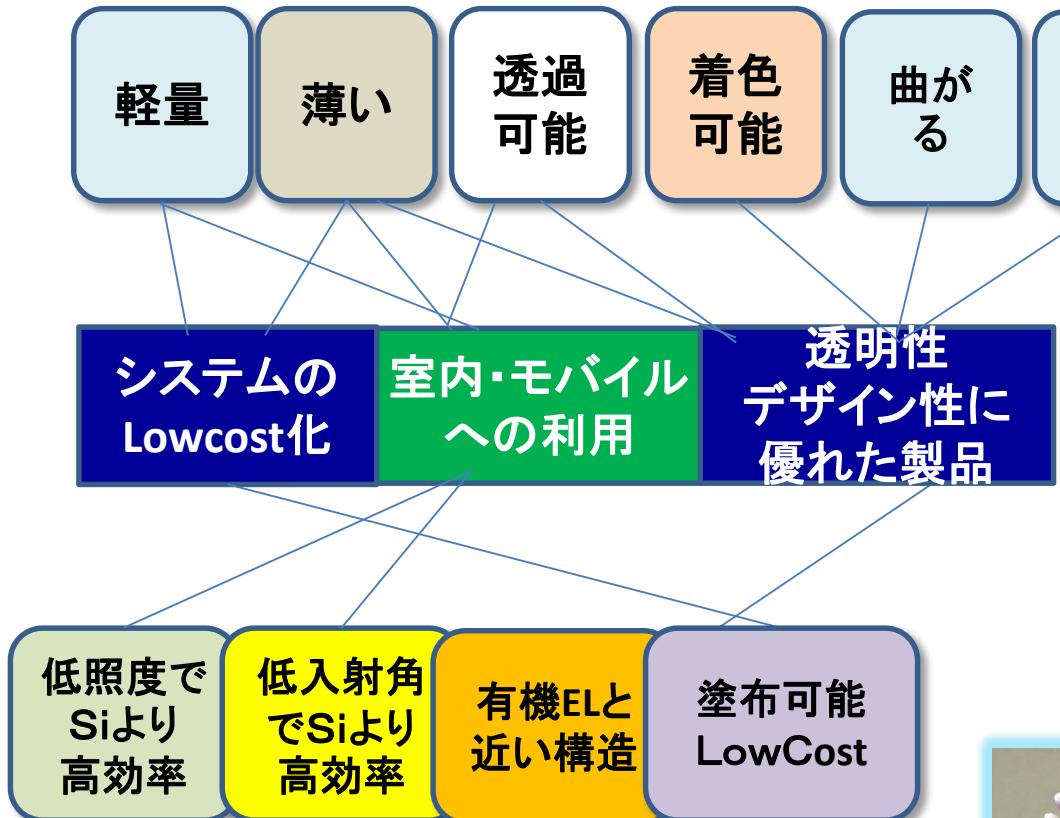
**ラダー型アクセプタY6  
(ノンフラーレンアクセプタ)  
可視光領域に強い吸収**

**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%**

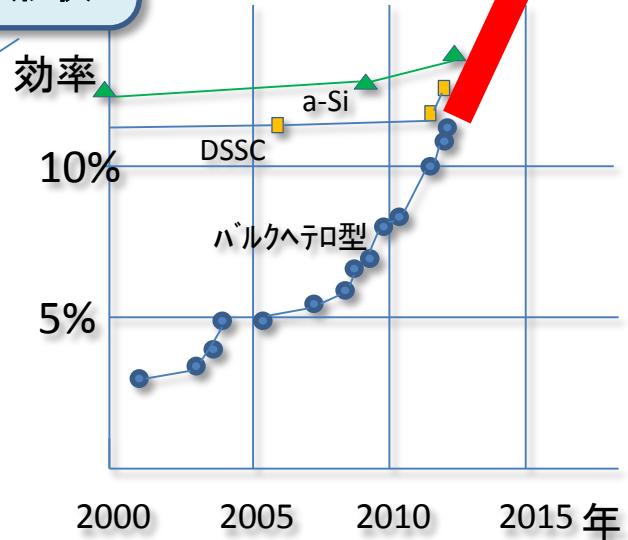
# 次世代太陽電池開発がすすんでいる

Recent sky-rocket improvement of PVK

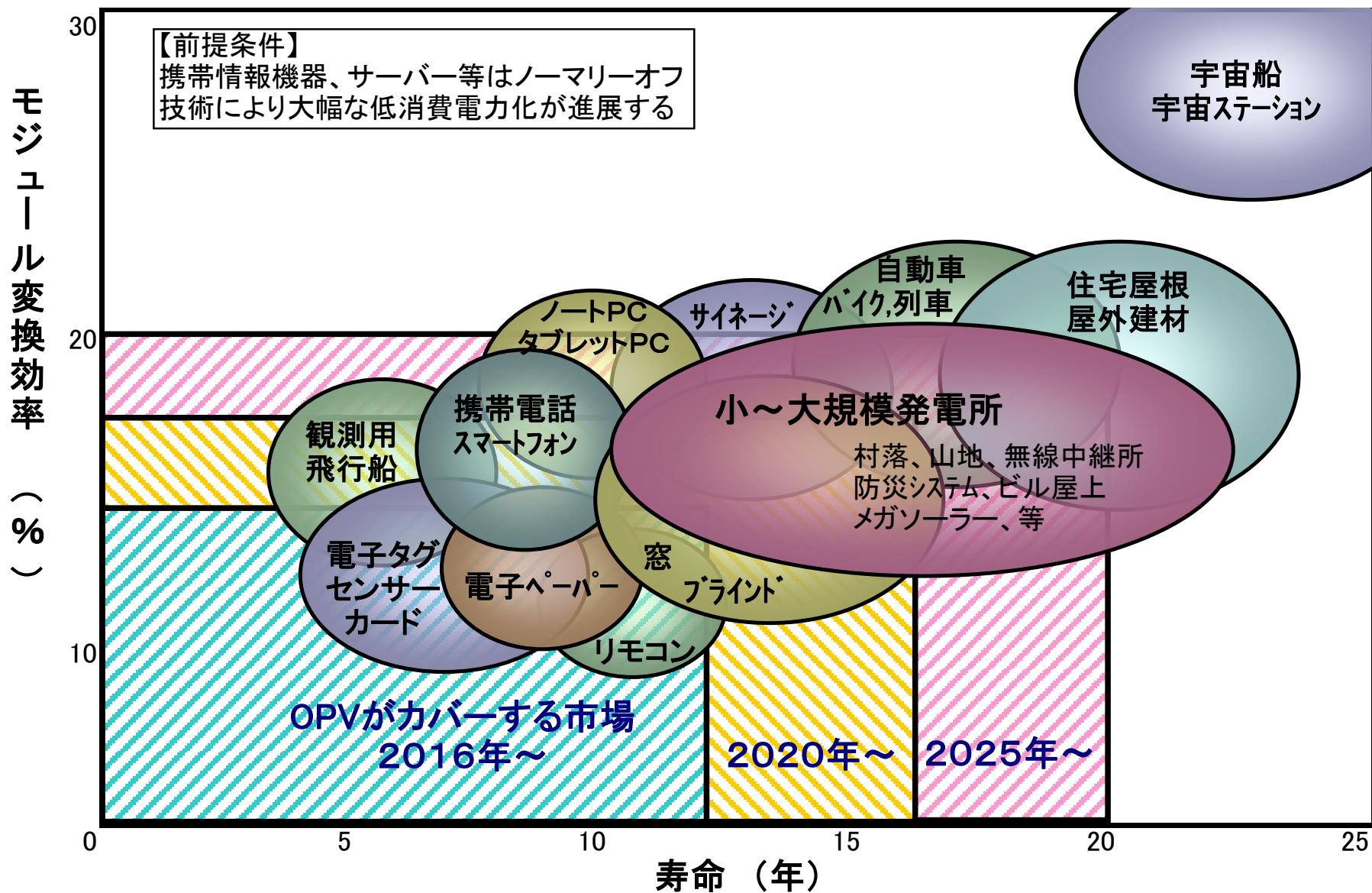
(バルクヘテロ&ペロブスカイト型の特徴)



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

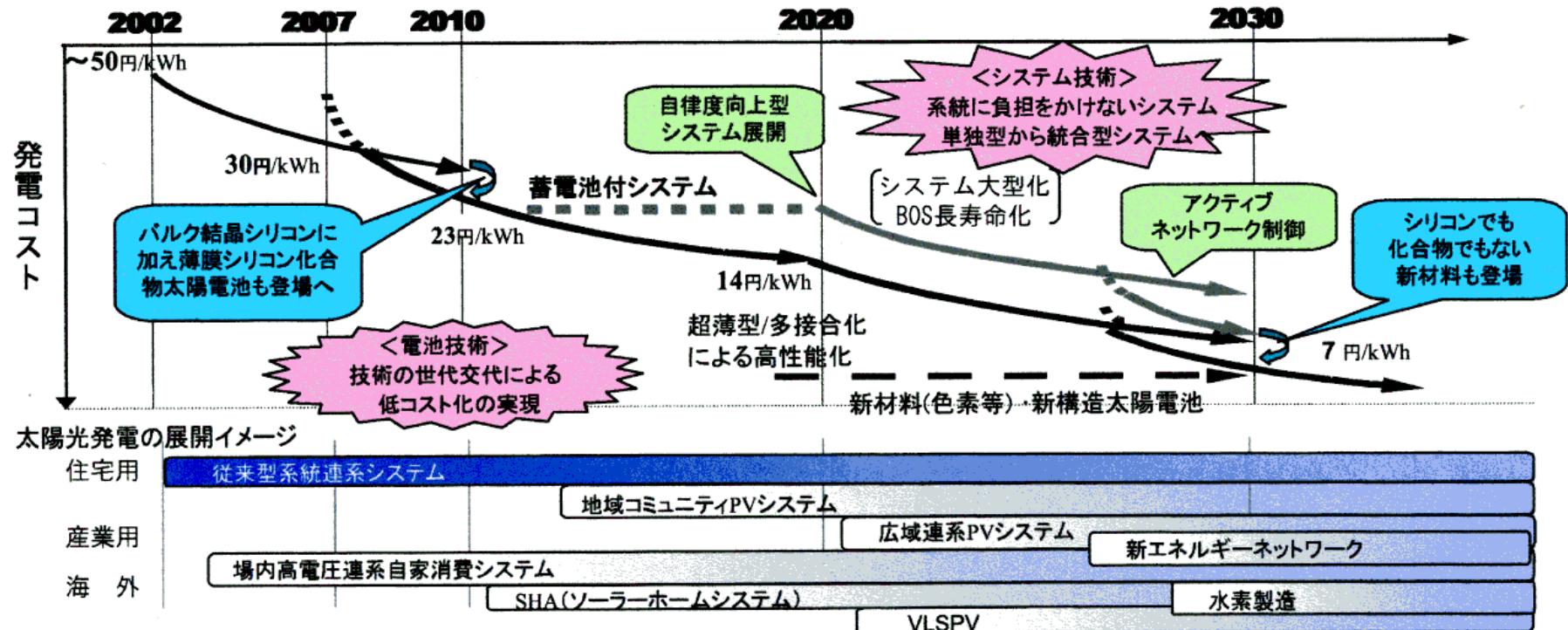
“制約のない太陽光発電の利用拡大”

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—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**

農業分野の収入が1.4倍



**富の分散**



**豊かな地方**

農業生産高(畜産を除く)  
: 5.6兆円(2015年度)

## 全電力の28%を太陽電池で貯った場合の発電量

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

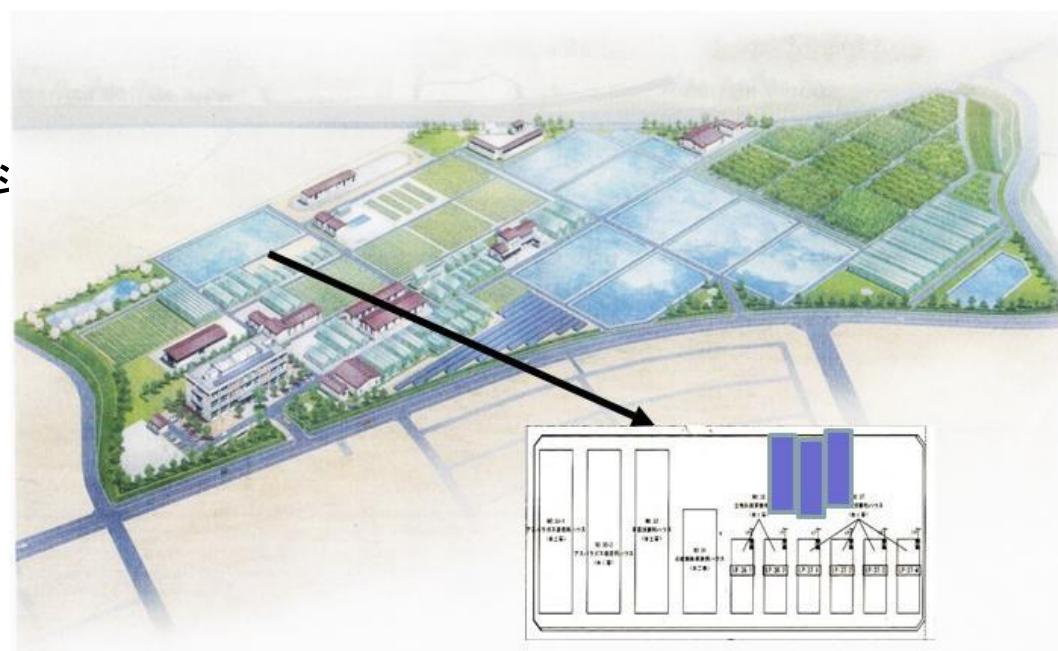
# ソーラーシェアリングの展開: 農工連携 ゼロエネルギー農場(ZEF) の確立を目指して

「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農場の開発」

2014年12月17日

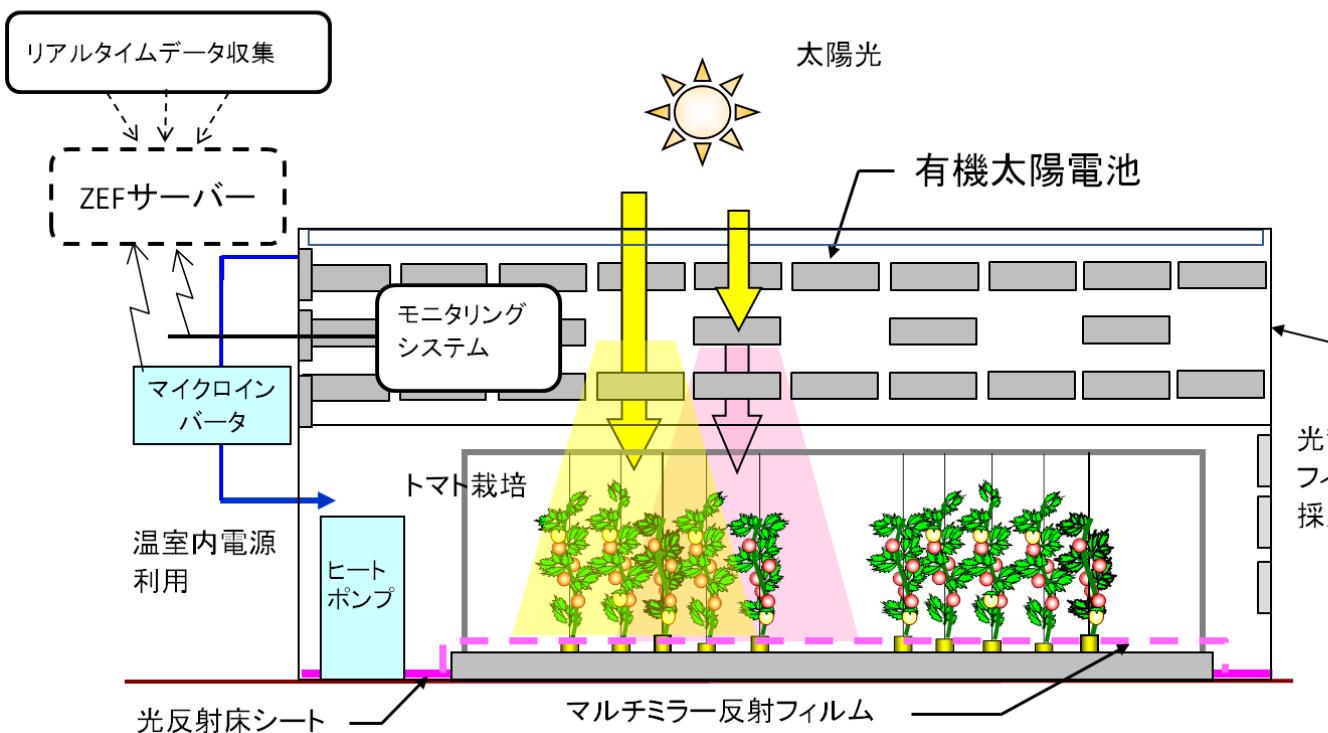
京都大学エネルギー理工学研究所  
次世代太陽電池研究拠点  
教授 吉川 遼

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

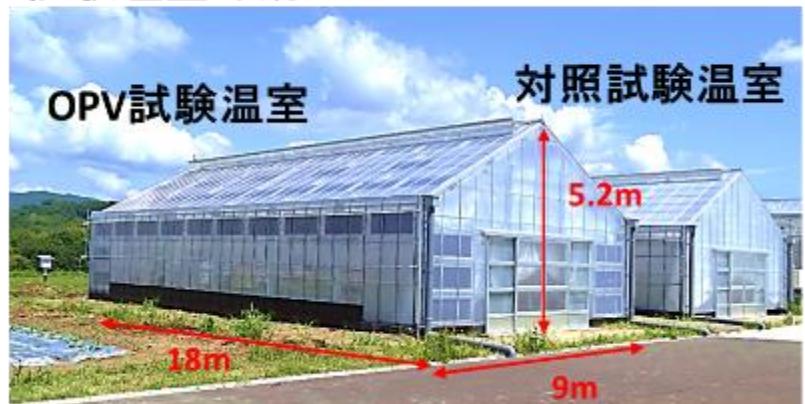


# 01 完成したOPV実証試験温室

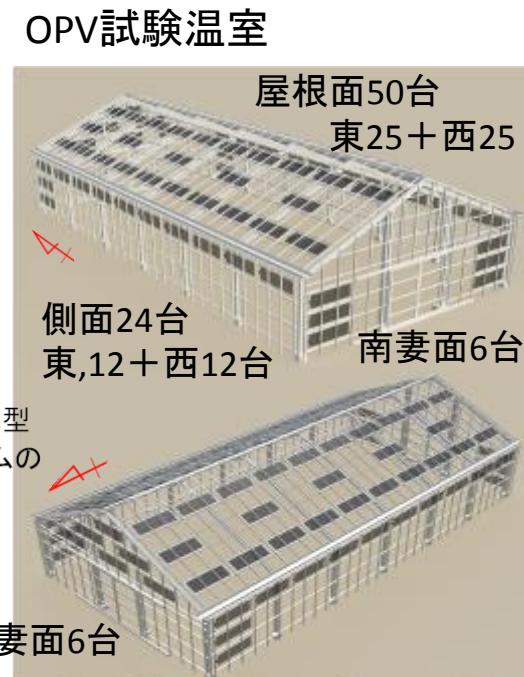
(OPV試験温室)



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 —— 強靭な農業・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	

- 太陽電池の最大の潜在的設置場所は農地にある。

光電変換効率=15%

で計算

(やや低い効率)

- 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？ CO<sub>2</sub>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。
- CO<sub>2</sub>排出量削減：最大7,000万t-CO<sub>2</sub>/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。

# 日本版シャットベルケによるエネルギーの地産地消

## —湖南市のエネルギー政策を例に—

滋賀県湖南市環境経済部  
環境政策課  
地域エネルギー室

# 湖南市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



### (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

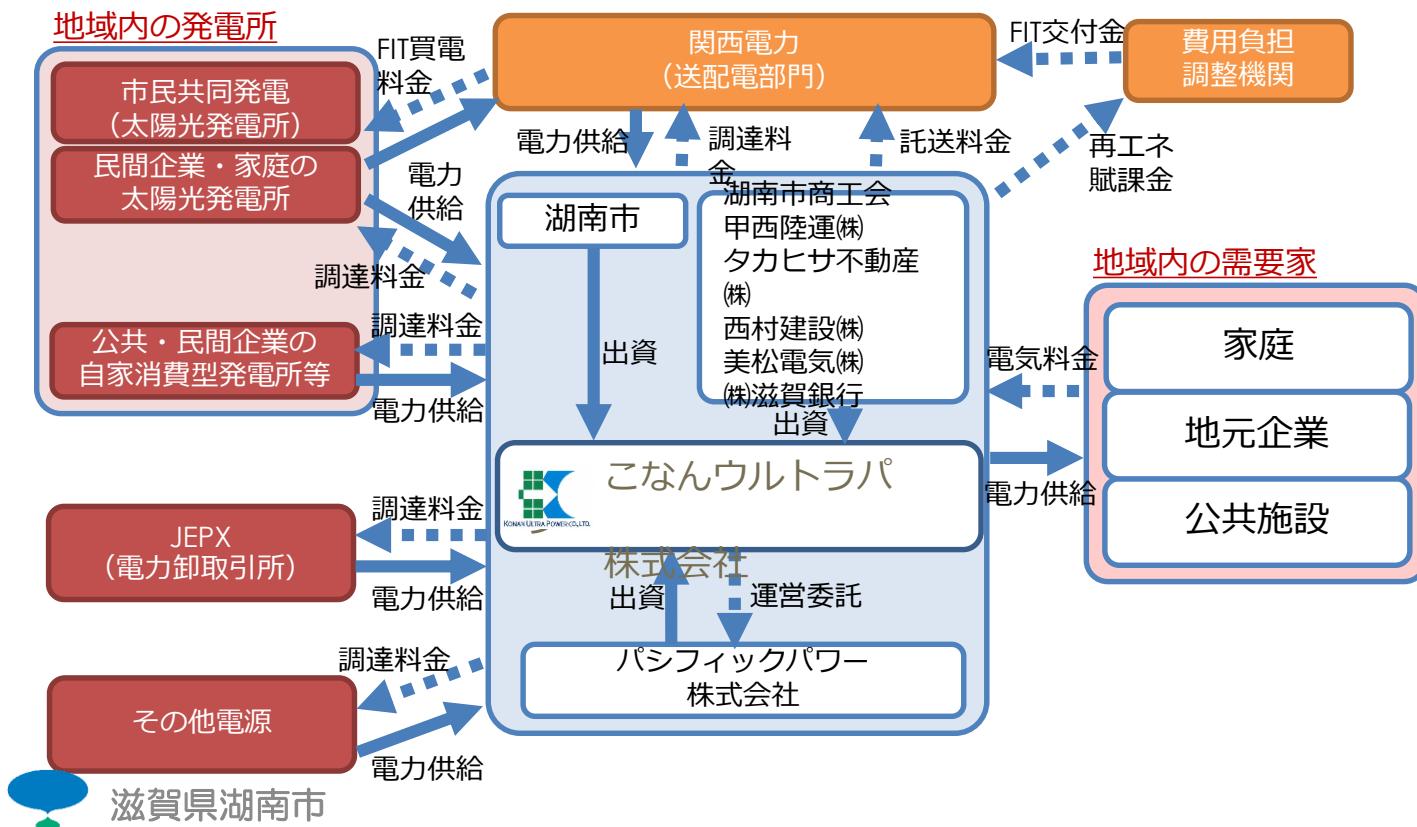
- 災害時でもエネルギー供給が途切れない防衛エリア検討



滋賀県湖南市

## こなんウルトラパワーの事業スキーム

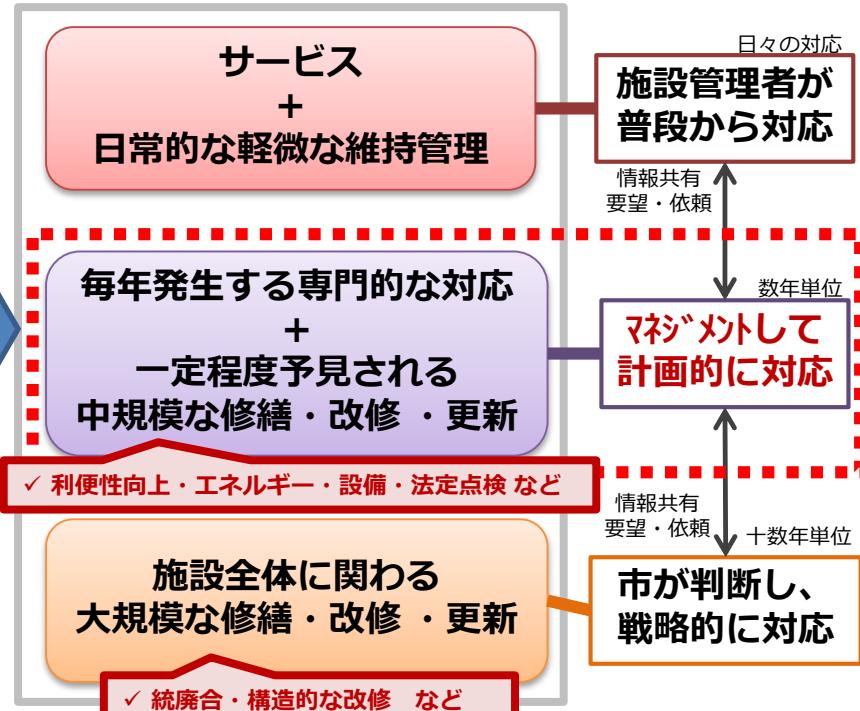
- ① 湖南市と民間企業の共同出資で「こなんウルトラパワー」を立ち上げ
- ② 地域内の発電所から「こなんウルトラパワー」が電力を購入
- ③ 地域内の需要家に「こなんウルトラパワー」が電力を供給



## 湖南市版シャットベルケ（案）

公共施設管理の考え方を再編

サービスの区分	公共施設管理の基本業務
ハコに関する業務	施設管理
	定期的な修繕
	保守管理
	大規模な修繕・投資的施設更新
サービスに関する業務	利用受付
	利用制限
	利用促進 (自主事業含む)



⇒ 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



滋賀県湖南市

# 我が国、新エネルギー研究開発課題

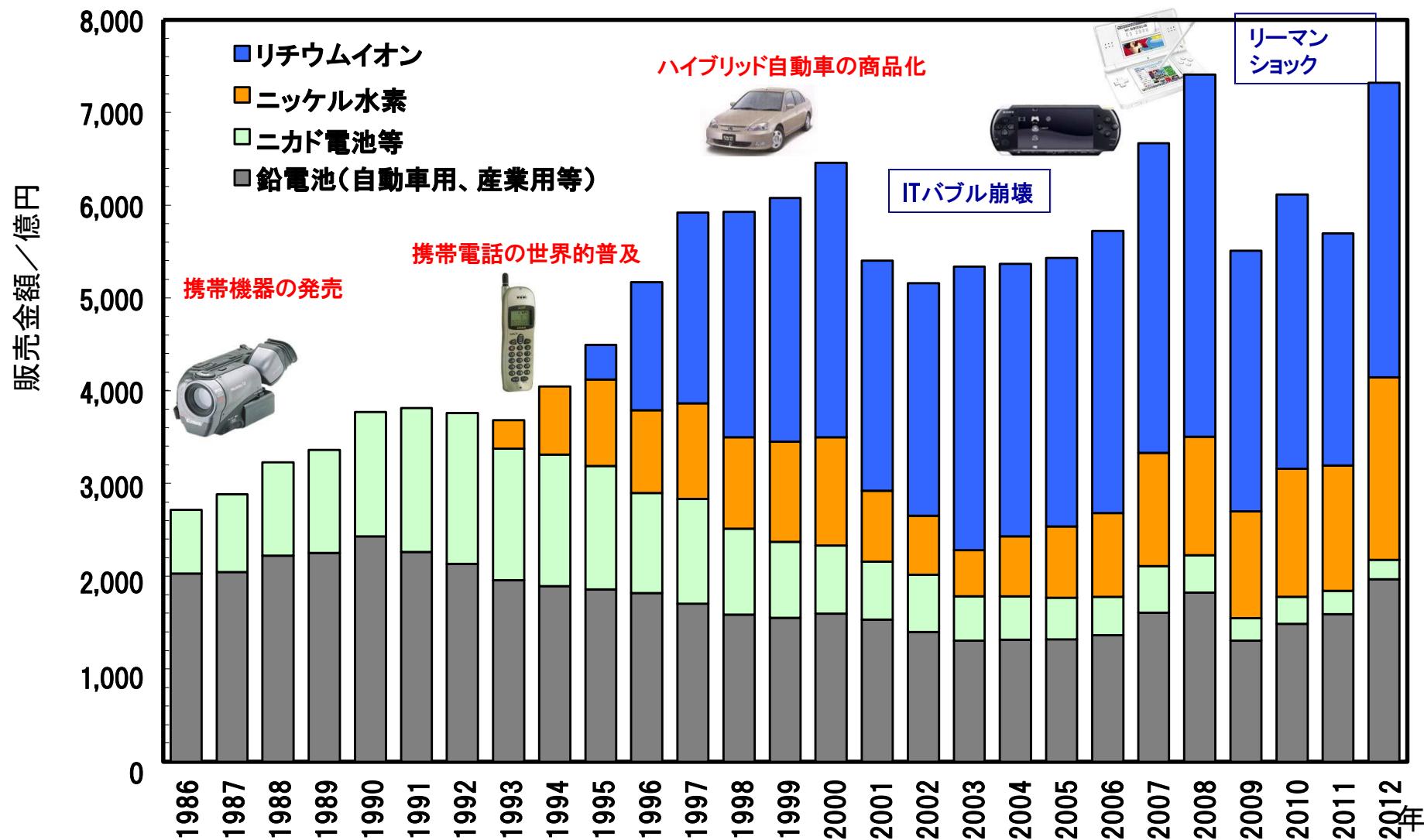
---

## New Energy Paradigm Shift

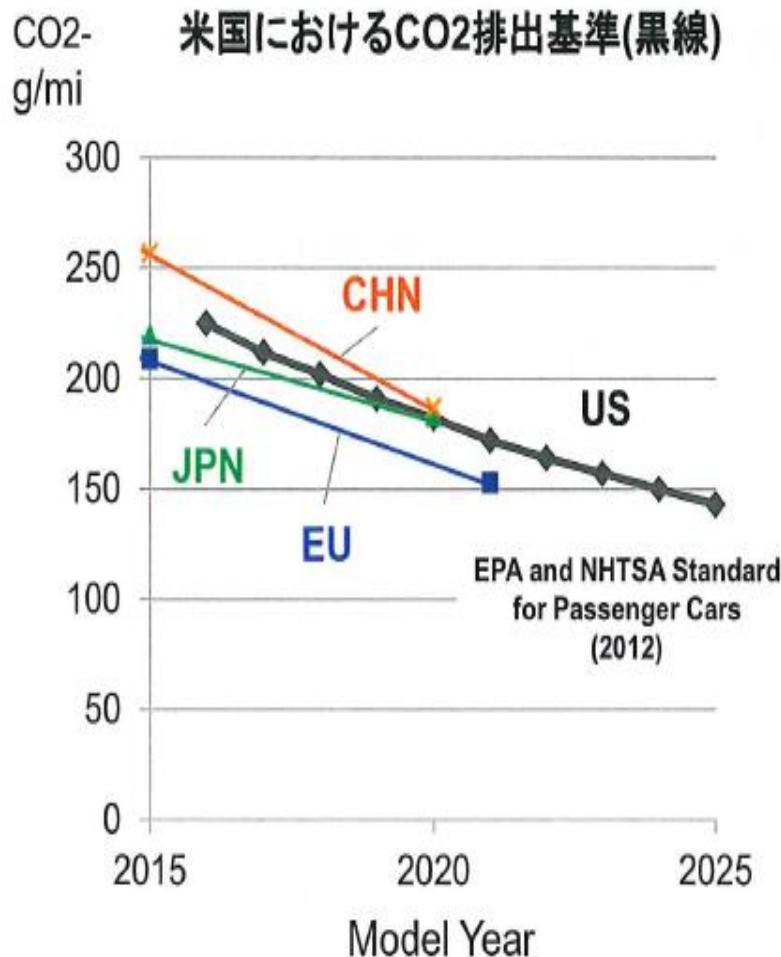
- ・バッテリー
- ・EV: 電気自動車
- ・ソーラーカー
- ・宇宙太陽光発電その他

# 国内電池別販売金額の推移

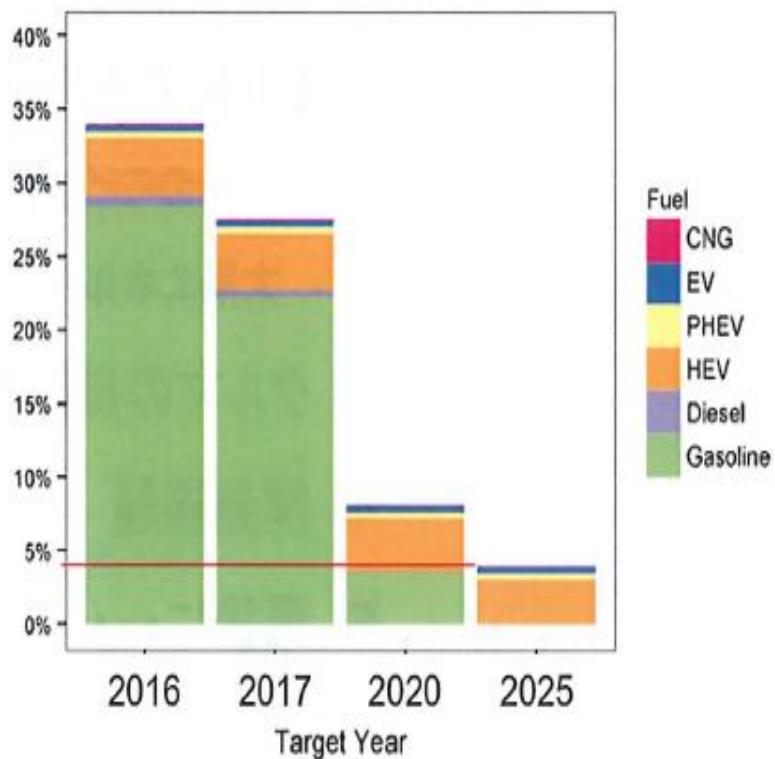
携帯機器用は、ニッカド電池からニッケル水素電池、Liイオン電池へシフト。ニッケル水素は、乾電池代替やHEV用へシフトし高い世界シェア。Liイオン電池は、韓国や中国で急成長、世界で1兆円(日本は25%)。



# 米国における新たな排ガス規制



米国におけるCO<sub>2</sub>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

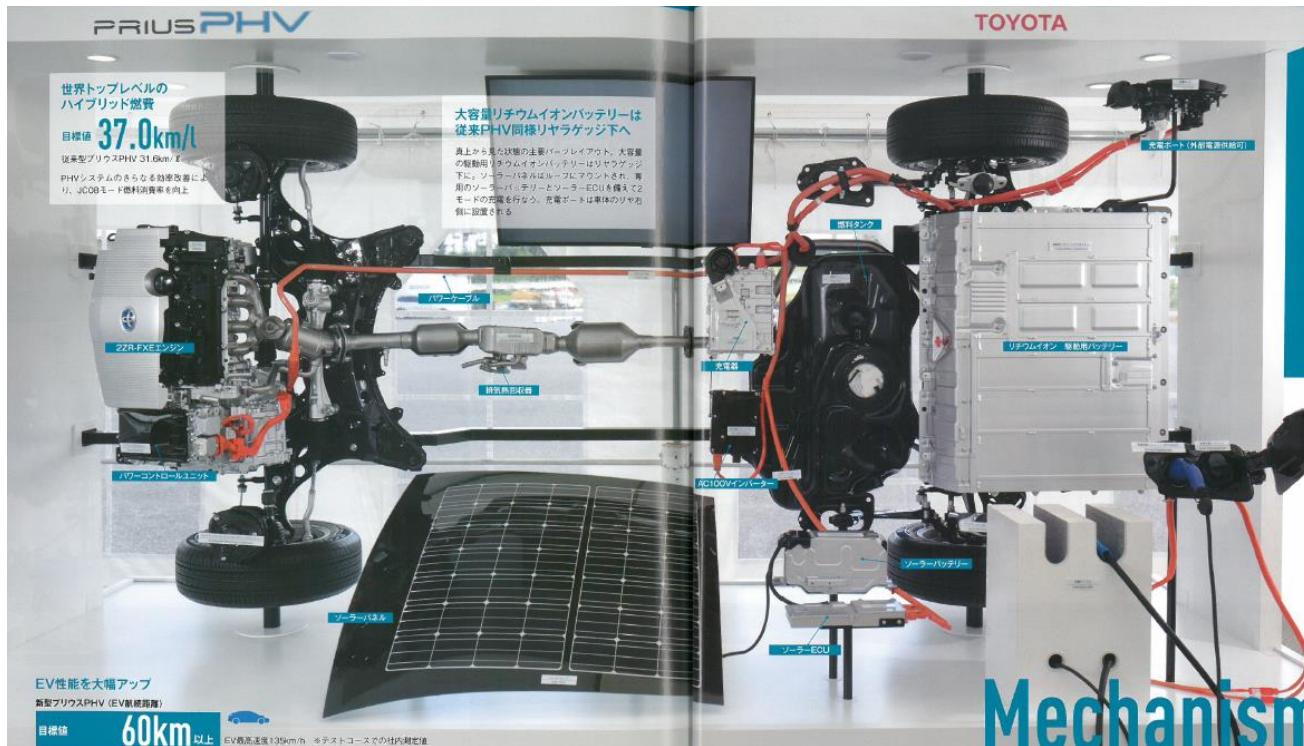


New Plug-in Prius from Toyota

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

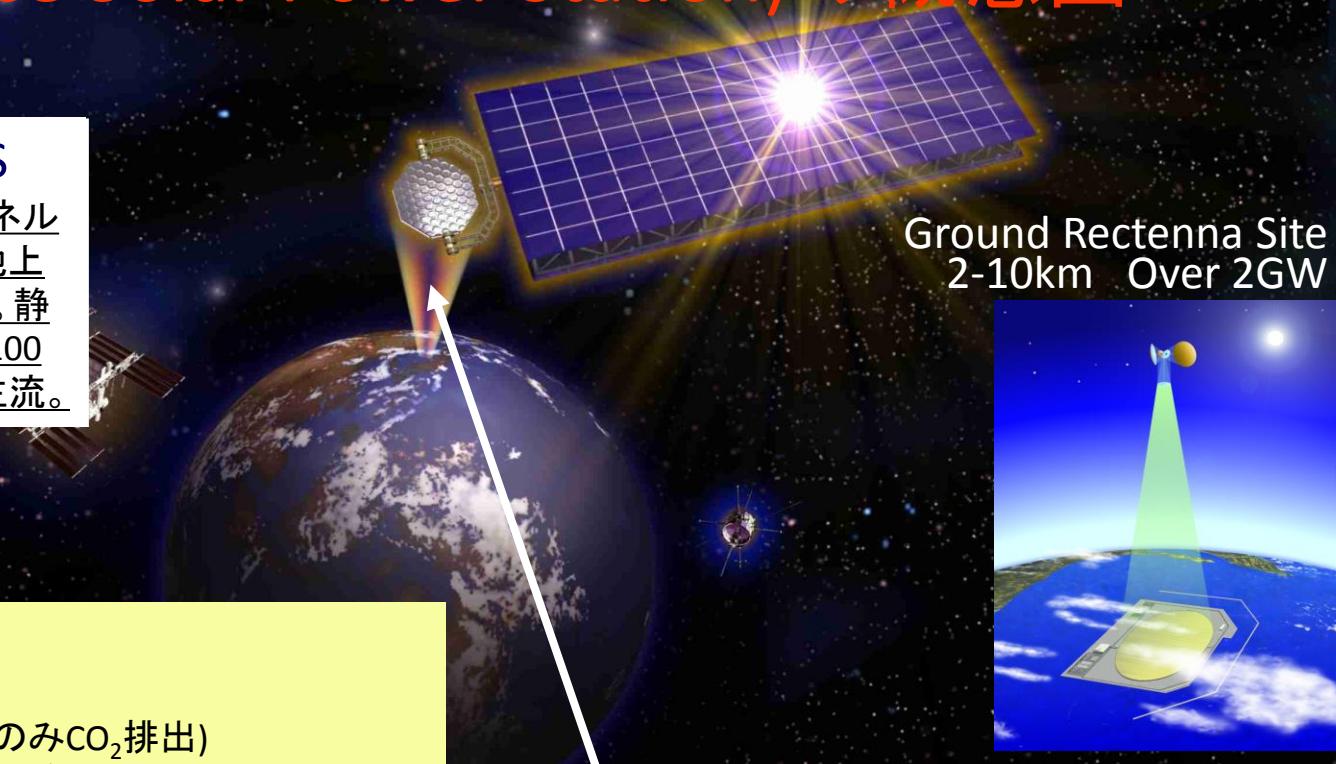
今は、コストが高い。しかし、ある程度、低コスト化できれば自動車に！  
(電源電力でなく、高付加価値でPV市場が立ち上がる)

# 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]

#### CO<sub>2</sub>フリーな電源

SPS : 20g-CO<sub>2</sub>/kWh (建設時のみCO<sub>2</sub>排出)  
(SPS電力を利用し建設すれば11g-CO<sub>2</sub>/kWh )

石油火力発電 : 846g-CO<sub>2</sub>/kWh

原子力発電 : 22 g-CO<sub>2</sub>/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

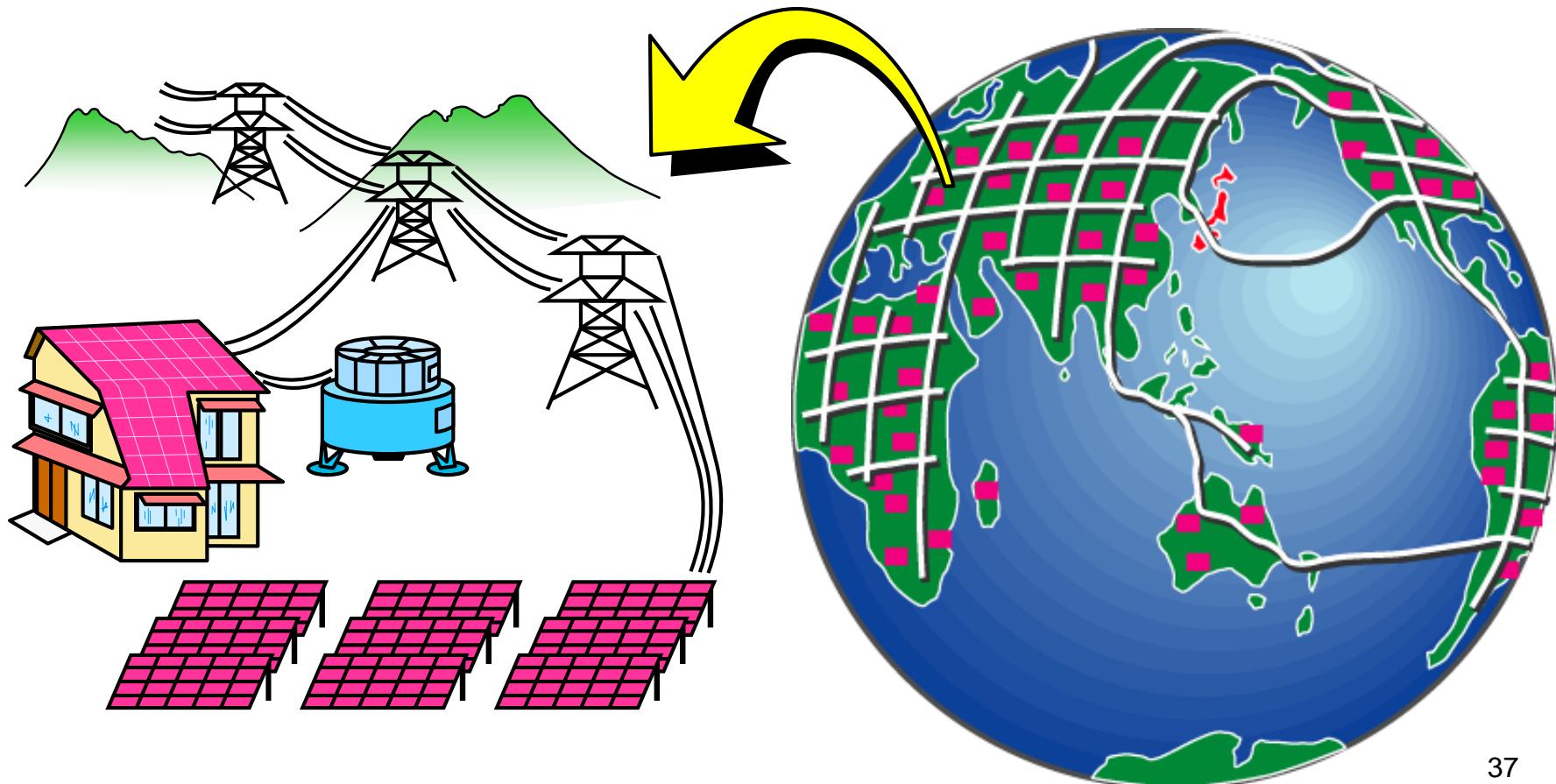
### マイクロ波による無線エネルギー伝送

-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 -

# 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靭な国家を
- 日本版シャ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