

## ■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。  
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

**\*** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

**CC** : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

**Ⓒ** : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。  
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義  
Copyright 2013, 瀬川 浩司

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series  
Copyright 2013, Hiroshi Segawa

# 学術 俯瞰 意義

主題科目 / テーマ講義 2単位 1、2年生対象

## 物質の神秘

—その生い立ちから私たちの未来まで—

コーディネーター: 小島憲道 (教養学部)

ナビゲーター: 永田 敬 (教養学部)



### 宇宙になぜ我々が存在するのか

村山 斉 (国務省宇宙研究所 カプセル宇宙物理宇宙研究機構)

- 第1回 4/8 宇宙誕生
- 第2回 4/15 物質誕生
- 第3回 4/22 銀河誕生



### 物質科学とははじめ

家 康弘 (物性研究所)

- 第4回 5/7 現代社会と物質科学、原子・分子・物質の構造
- 第5回 5/13 物質の個性(物性)はどこから生まれるか
- 第6回 5/20 奇妙な量子の世界



### 現代社会と物質



- 第7回 5/27 金属の科学と材料としての応用 小関敏彦 (工学部)
- 第8回 6/3 アクアマテリアル—持続性社会実現のための我々の挑戦 相田卓三 (工学部)
- 第9回 6/10 半導体量子ドット—電子や光子を操るナノの世界 荒川泰彦 (生産技術研究所)
- 第10回 6/17 放射線のリスクと防護の科学 阪本武志 (基礎医学本部)
- 第11回 6/24 チューインガムの物理 土井正男 (薬学部化学研究所)
- 第12回 7/1 光機能性材料の科学—化学に基づく新医療技術の創出 浦野泰照 (医学部)
- 第13回 7/8 物質科学が拓く新エネルギーとサステナビリティの未来 瀬川浩司 (先端科学技術研究センター)

駒場キャンパス 21 KOMCEE 月曜日 2 時限 00:40-12:10  
<http://www.gfk.c.u-tokyo.ac.jp/>



東大ナビ

utnav.jp





# 物質科学を理解するための視点

素粒子 原子 分子 無機化合物 有機化合物  
宇宙や天体を構成する物質 生命を形作る物質  
金属 半導体 高分子 医用材料 エネルギー

## 空間

陽子の大きさ =  $1.7 \times 10^{-15}$  m

ナノ構造 =  $\sim 10^{-9}$  m

量子ドット =  $10^{-9} \sim 10^{-8}$  m

...

## 時間

最初期宇宙 =  $10^{-43} \sim 10^{-12}$  秒

レーザー分光 =  $10^{-15} \sim 10^{-3}$  秒

分子の回転 =  $\sim 10^{-12}$  秒

蛍光発光寿命 =  $10^{-10} \sim 10^{-7}$  秒

...

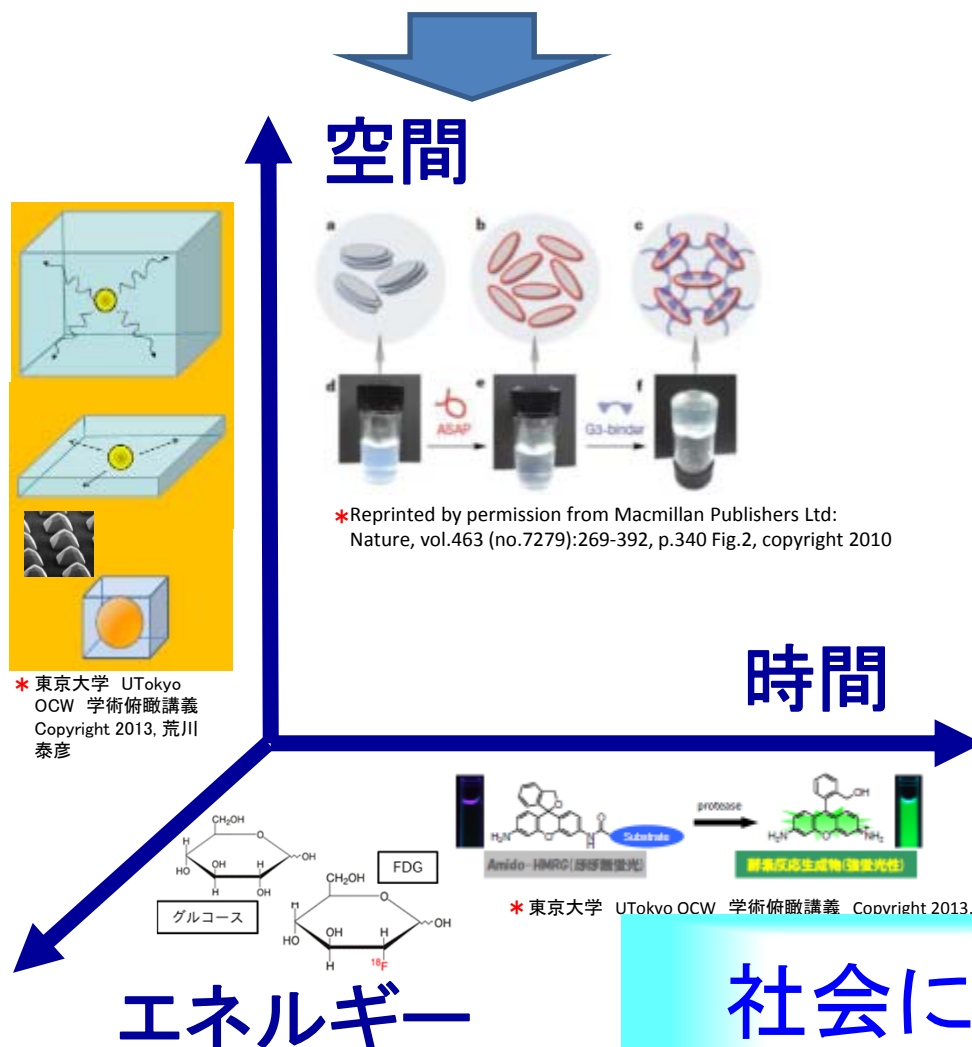
## エネルギー

新星爆発のエネルギー =  $10^{36}$  J

太陽エネルギー =  $1.2 \times 10^{34}$  J/年

世界エネルギー消費  $2.3 \times 10^{20}$  J/年

...



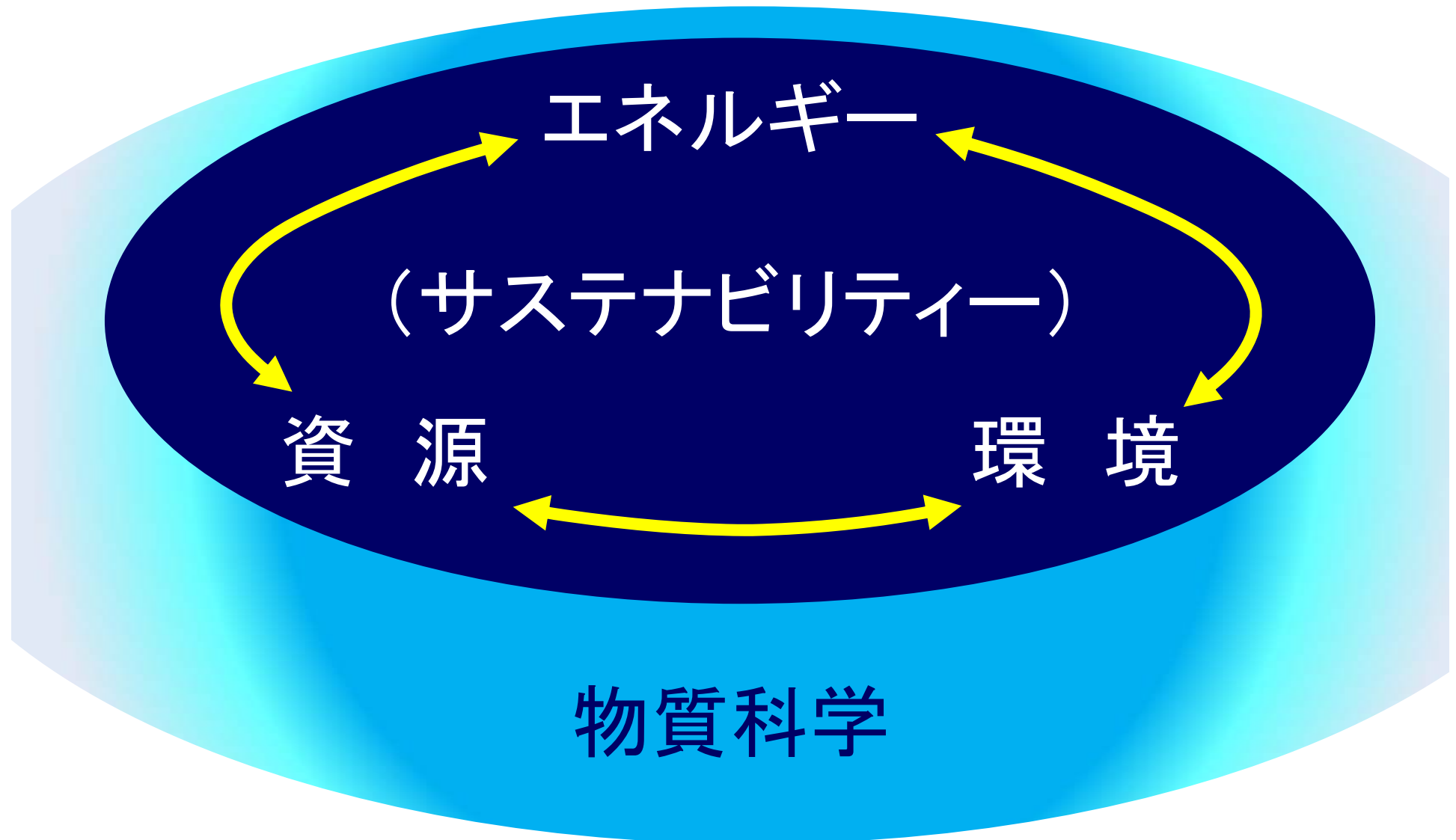
\* 東京大学 UTokyo  
OCW 学術俯瞰講義  
Copyright 2013, 荒川  
泰彦

\* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd:  
Nature, vol.463 (no.7279):269-392, p.340 Fig.2, copyright 2010

\* 東京大学 UTokyo OCW 学術俯瞰講義 Copyright 2013, 浦野 泰照

社会に貢献する物質科学

持続可能な社会の実現に向けて



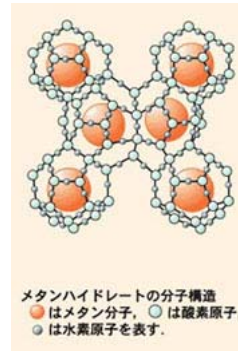
# 物質科学が拓く新エネルギーとサステナビリティの未来

瀬川 浩 司 先端科学技術研究センター エネルギー・環境分野  
教養学部 学際科学科 地球システムエネルギーコース

20世紀の物質科学の進歩は、人類に豊かで多彩な生活をもたらしてきた。しかしながら21世紀に入った今、われわれはそのスタイルに限界を感じ始めている。これからの物質科学はどのような方向に進むのだろうか。

本講義では新エネルギーとサステナビリティに焦点を当て、これにチャレンジする物質科学のトピックスを紹介する。

## ●新しい資源の発見と低炭素化技術

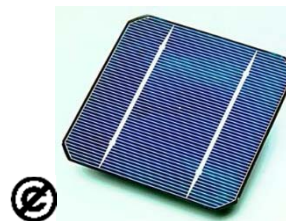


奥田義久(1997)  
「メタンハイドレート特集にあたって」『地質ニュース』第510号、6-11、p.6 図1。  
CC BY



\* USGS/Photo by J. Pinkston and L. Stern

## ●再生可能エネルギー電力への貢献



©



\* 画像提供: ソニー株式会社



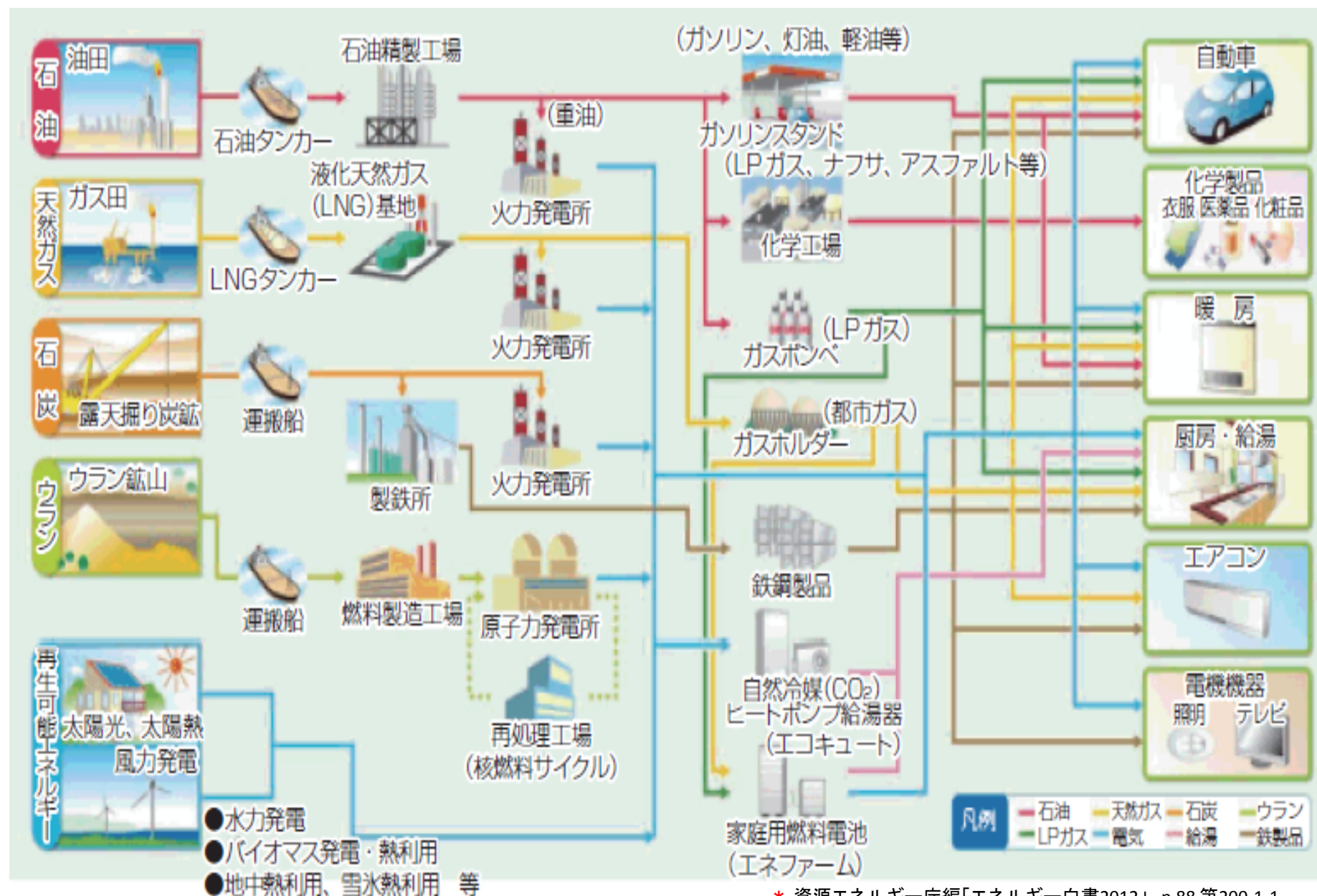
\* 画像提供: アイシン精機株式会社



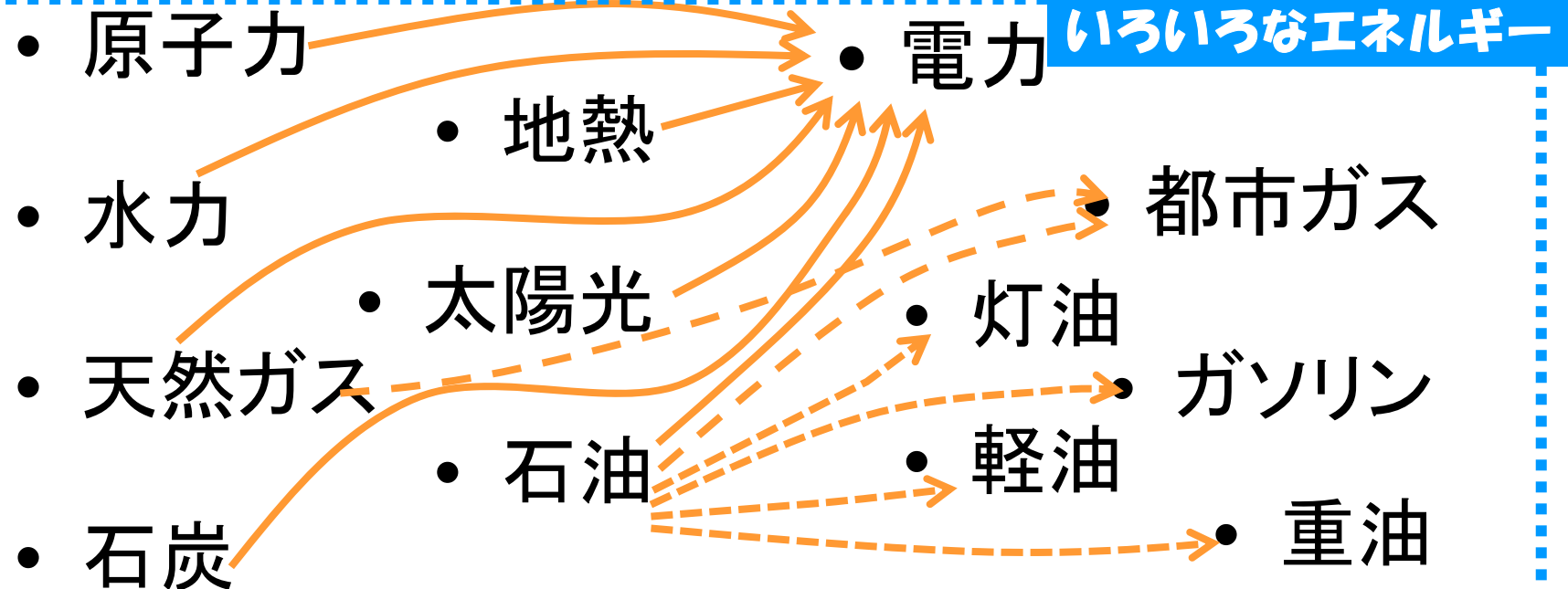
Photo by Leaflet, from Wikimedia Commons (2013/09/24)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GreenMountainWindFarm\\_Fluvanna\\_2004.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GreenMountainWindFarm_Fluvanna_2004.jpg)  
CC BY-SA 3.0



# エネルギー資源の供給過程と利用形態



## 高校までに勉強してきた「エネルギー」との関係は？





# エネルギー問題を理解するうえで必要な知識

エネルギーを生み出せる  
地球上で獲得できる  
天然エネルギー資源

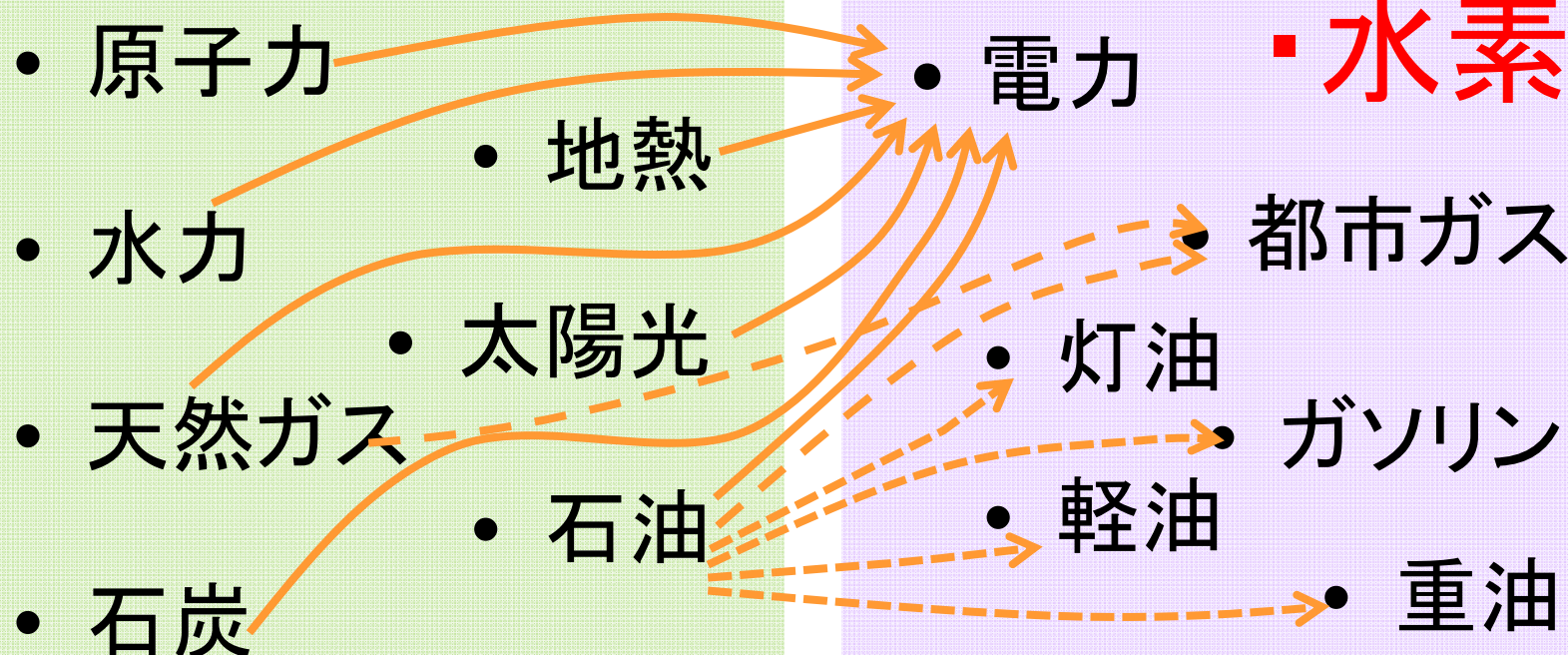
## 1次エネルギー

- 原子力
- 水力
- 天然ガス
- 石炭
- 地熱
- 太陽光
- 石油

エネルギーを運ぶために  
加工されて作られる  
人工的エネルギーキャリア

## 2次エネルギー

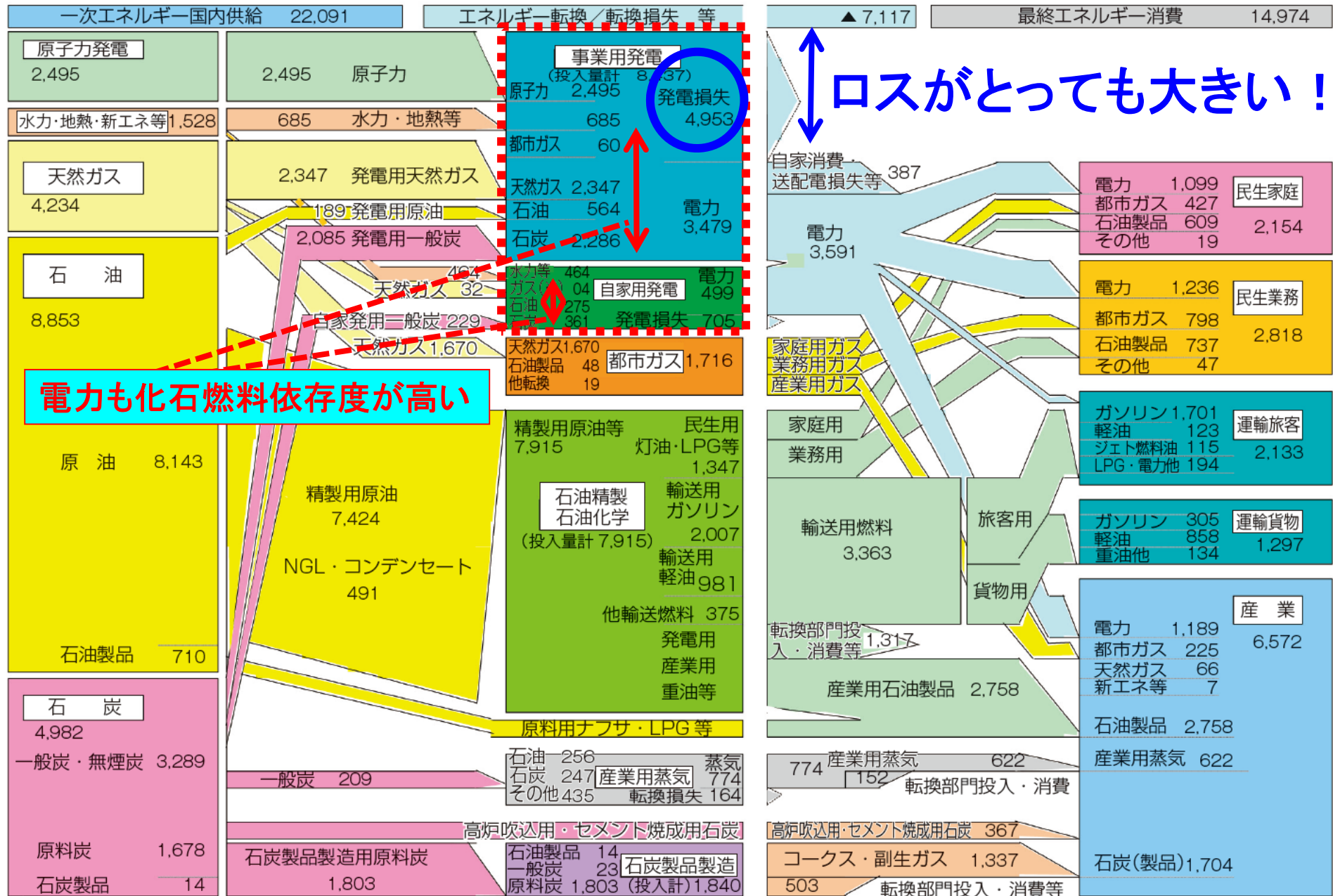
- 電力
- 水素
- 都市ガス
- 灯油
- ガソリン
- 軽油
- 重油



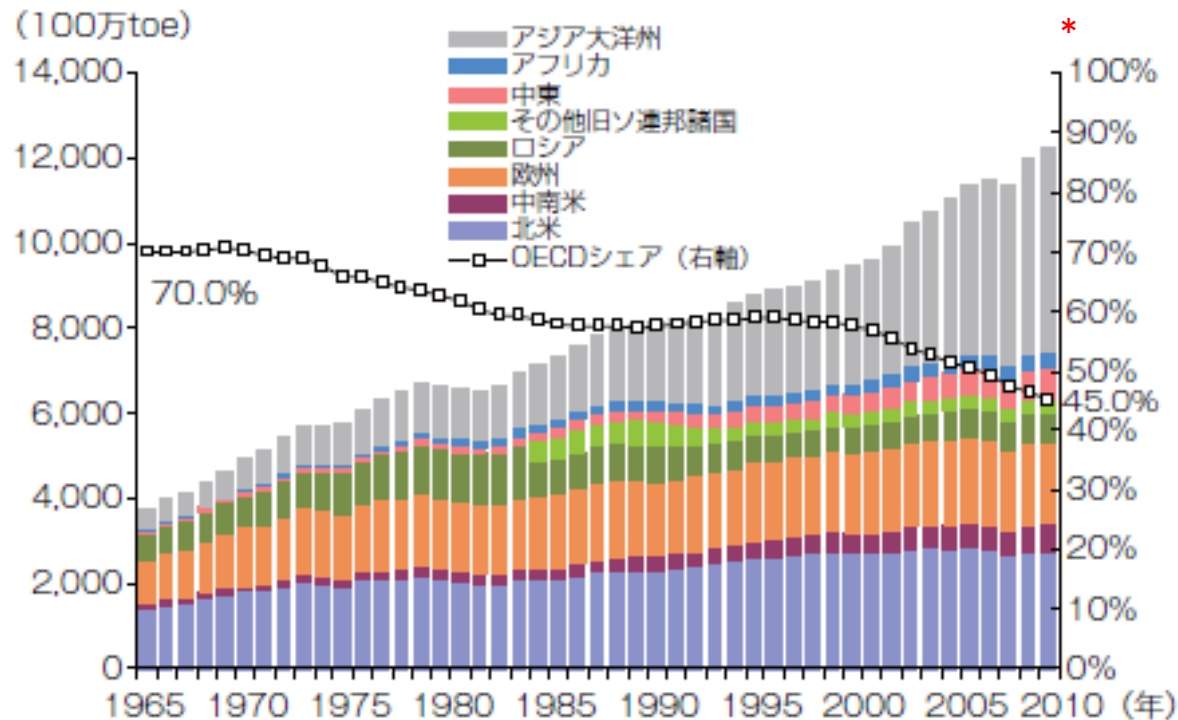
# 日本のエネルギーバランスとフロー(2010年度)

単位:  $10^{15}$ J

\* 出典: 資源エネルギー庁「エネルギー白書2012」、p.90 第200-1-3



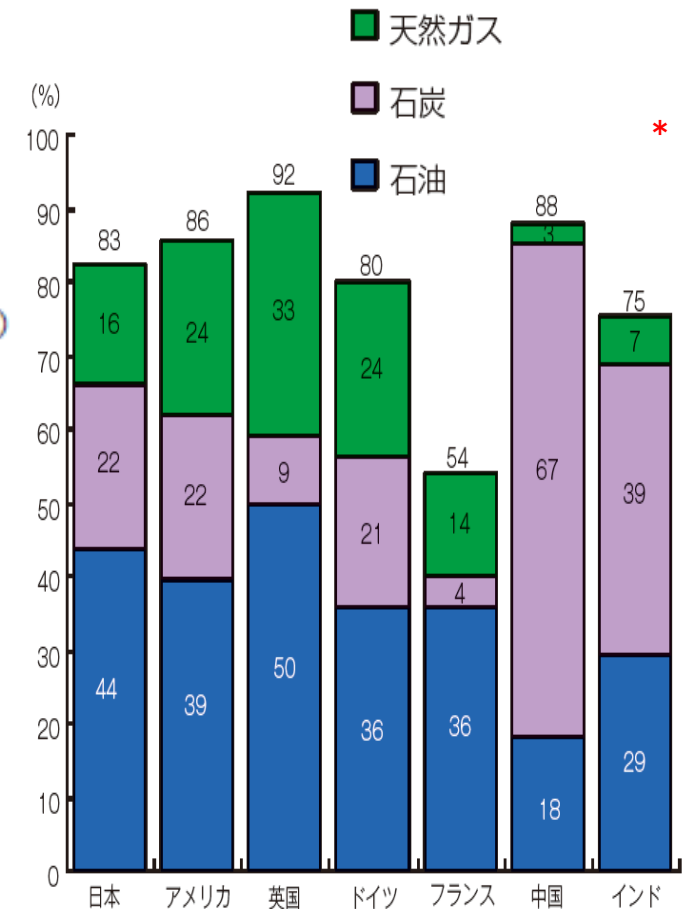
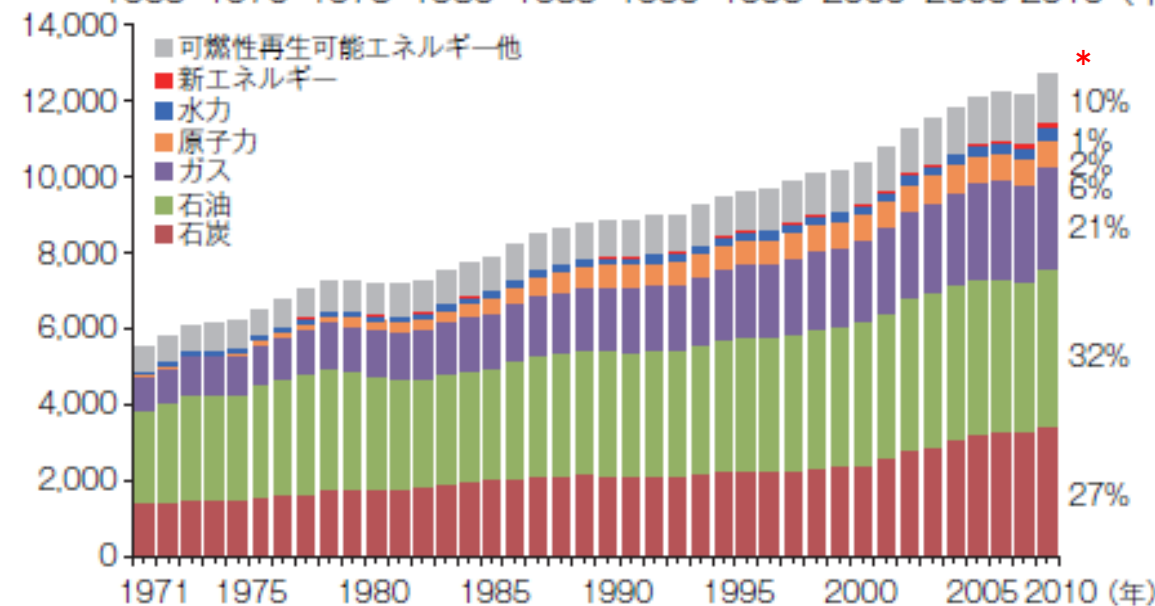
# 世界の一次エネルギー消費動向



図表出典: 資源エネルギー庁「エネルギー白書2012」、  
 [左上] p.139 第221-1-1; [左下] p.140 第221-1-2;  
 [右] p.97 第211-3-2

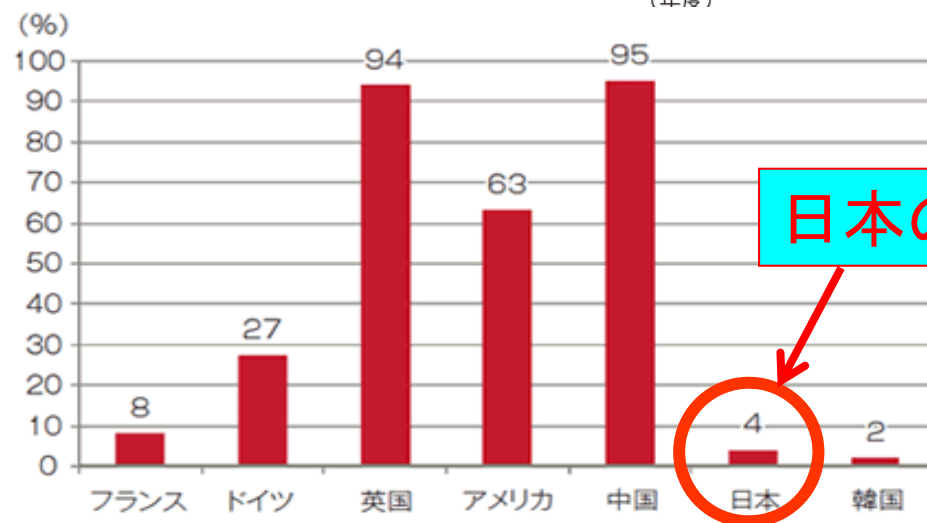
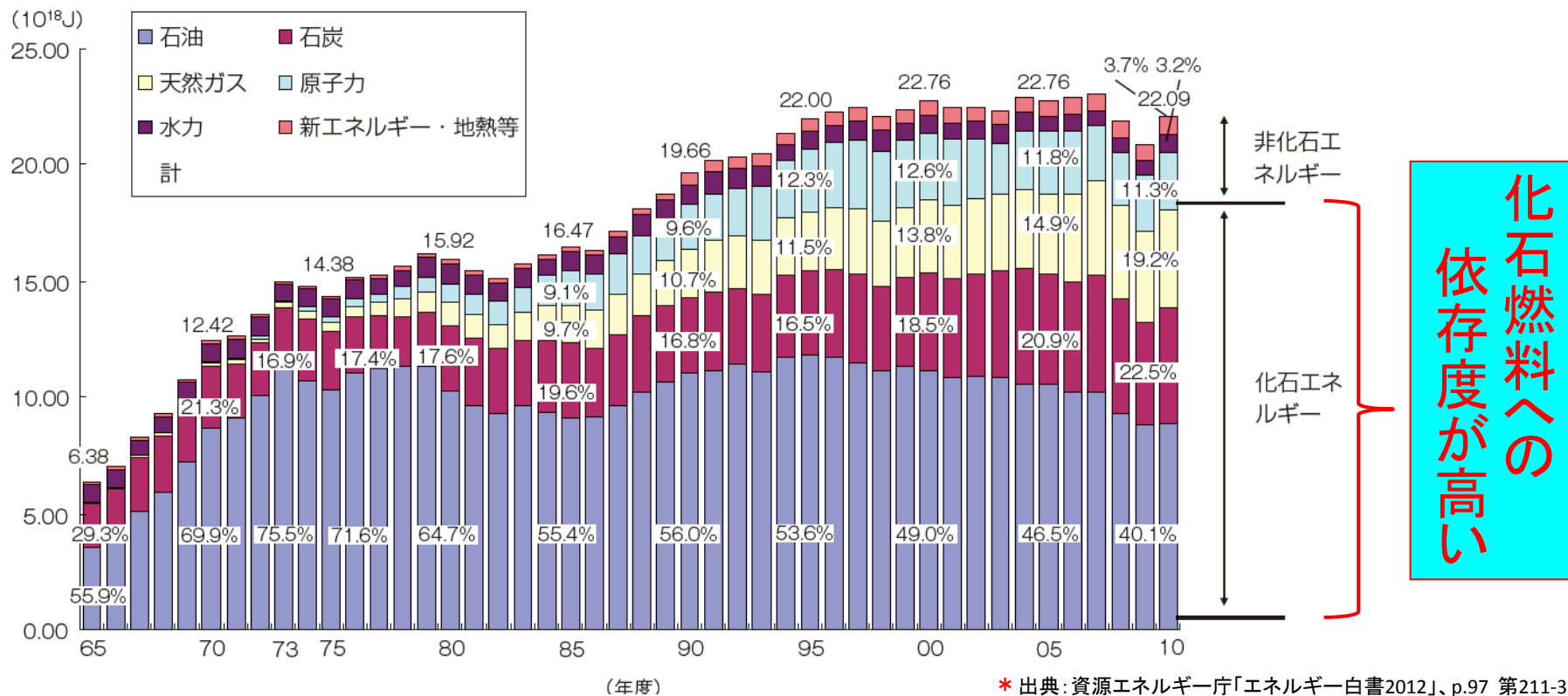
## 主要国の化石エネルギー依存度 (2010年)

IEA報告 OECD諸国のエネルギー  
 バランス2011をもとに作成





# 日本の1次エネルギー供給の推移と化石資源依存度

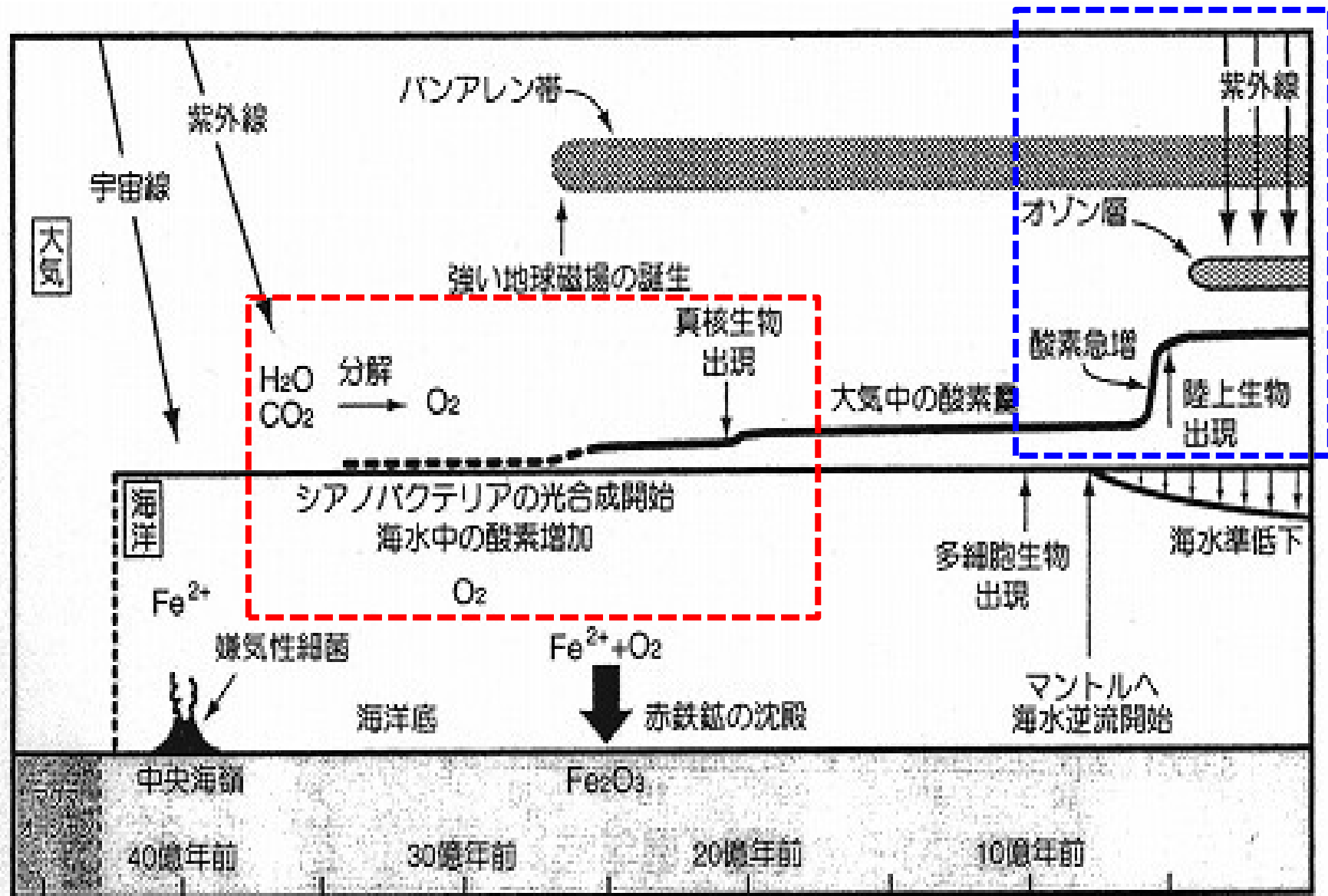


日本のエネルギー自給率は僅か4%

世界の主要国の一次エネルギーの自給率比較

\* 出典: 資源エネルギー庁「エネルギー白書2010」、p.68 第114-3-1-3

# 化石資源を生み出した地球の進化

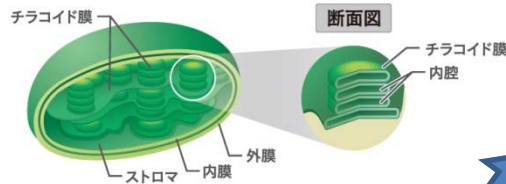


\* 出典: 丸山茂徳・磯崎行雄『生命と地球の歴史』岩波新書、1998年、p.164 図6.2

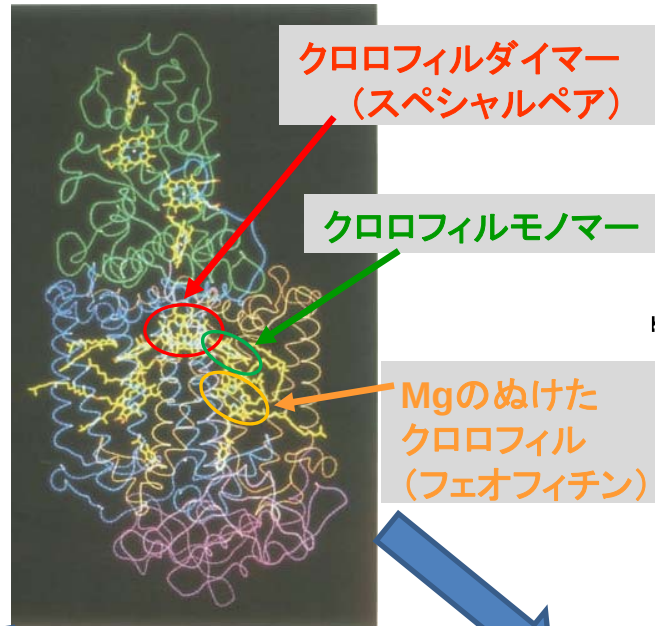
# 光合成反応中心蛋白(RC)が光エネルギーを取込む仕組み



Photo by NEON at  
ja.wikipedia, from  
Wikimedia Commons  
CC BY-SA 2.5  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oscillatoria\\_sp.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oscillatoria_sp.jpg)



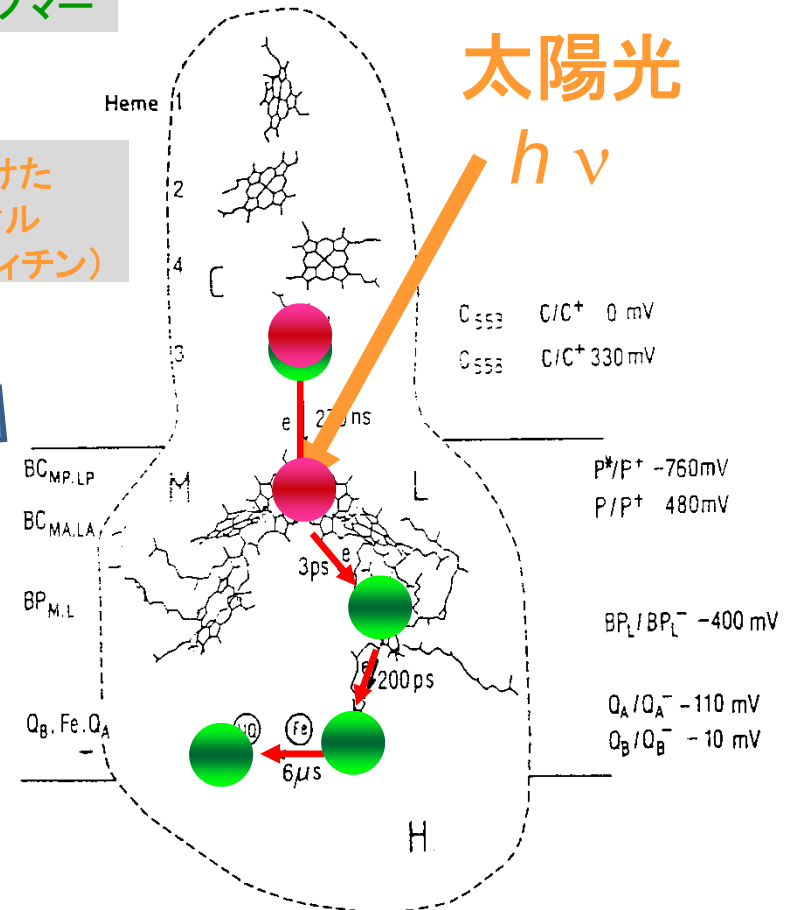
\* 出典: 東京大学  
生命科学教育用  
画像集  
<http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/>



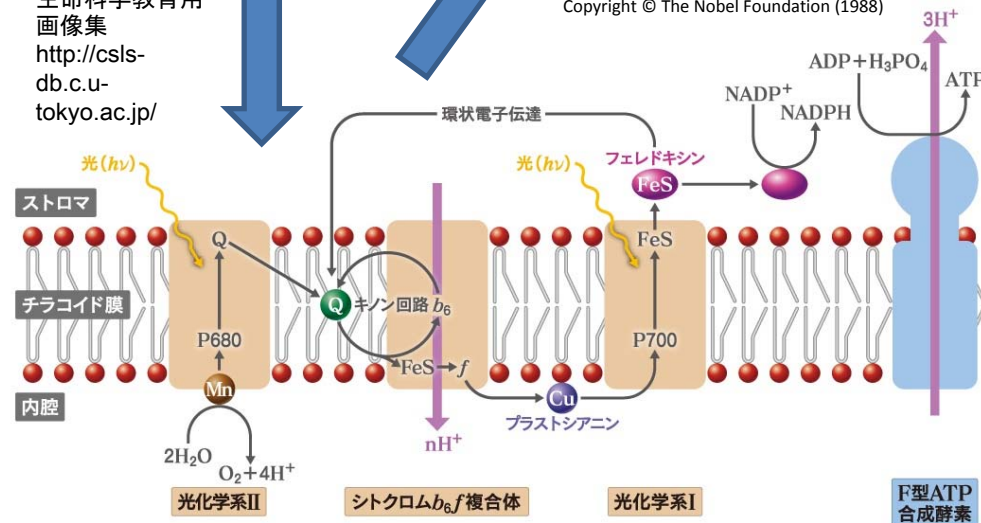
\* Johann Deisenhofer, Hartmut Michel (1988)  
The Photosynthetic Reaction Center from the  
Purple Bacterium Rhodospseudomonas viridis,  
Nobel Lecture, Dec. 8, 1988, Fig.6  
Copyright © The Nobel Foundation (1988)

光合成反応中心タンパク(RC)は  
ナノサイズの太陽電池のように  
生体膜の両端に電位差を発生

太陽光  
 $h\nu$



光を吸収して電子が移動  
光誘起電子移動



\* 出典: 東京大学生命科学教育用画像集  
<http://csls-db.c.u-tokyo.ac.jp/>



# 化石資源(石油・天然ガス・石炭)

石油や天然ガスのでき方(シェールガスやメタンハイドレートも基本的に同じ)

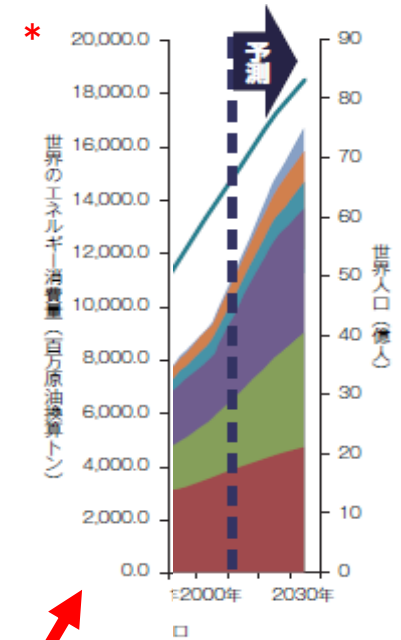
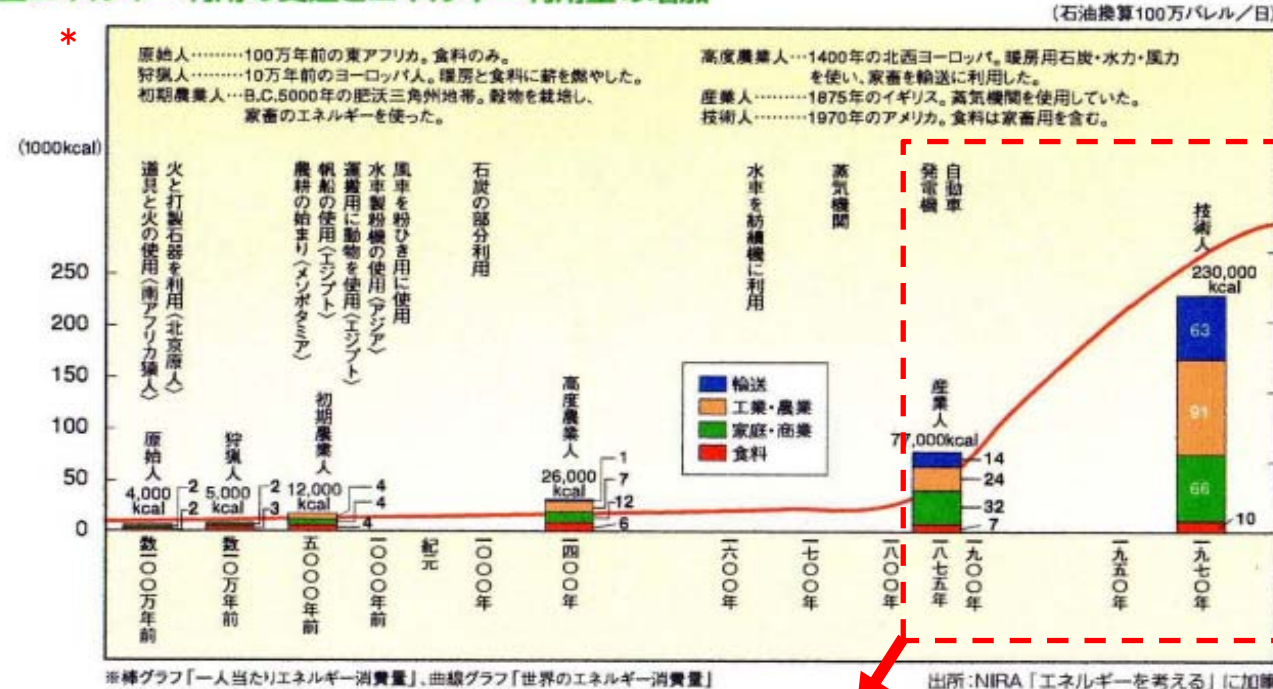
- 海や湖で繁殖したプランクトンや藻などの死骸が土砂とともに積もり、岩石になる途中で石油を生み出すのに適した有機物が重合し、ケロジェン(油母)という高分子化合物になる。このケロジェンを含む岩石が堆積するとき、地熱や圧力の作用を受けてケロジェンが分解し、石油系炭化水素となったものと考えられている。85℃ぐらいで石油が、145℃ぐらいで天然ガスが主になると考えられている。石油は、砂岩や石灰岩の隙間に閉じこめられている。

石炭のでき方

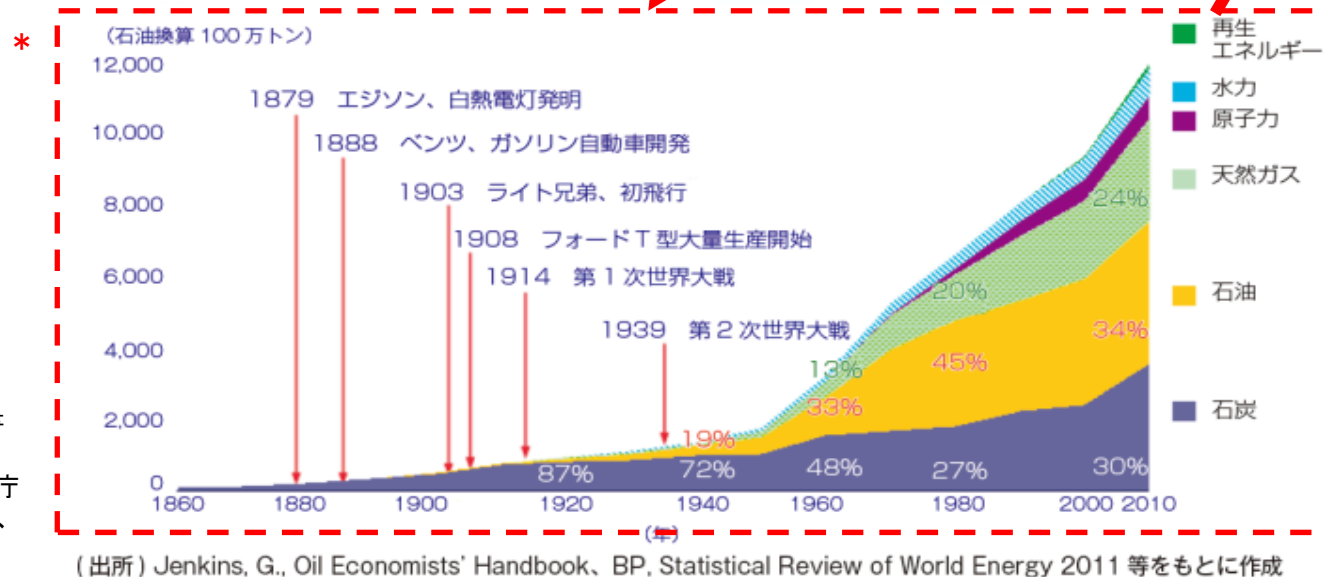
- 石炭は、数億年から数千万年前のシダ類、針葉樹などの植物が水中、地中に堆積し、微生物により分解され、植物を構成するセルロース、リグニンなどが地中に埋没し、温度と圧力の作用を受けて、重合、炭化されたもの。大昔の植物が地中に埋もれ、炭素分が多く残ってできたため、石炭の成分は植物に近く、地下に埋もれているうちに酸素や水素分が減り、炭素分が多くなる。泥炭(草炭)→褐炭→レキ青炭→無煙炭と炭化が進み、燃えるときに出る煙が少なくなる。

# 人類のエネルギー使用量の推移

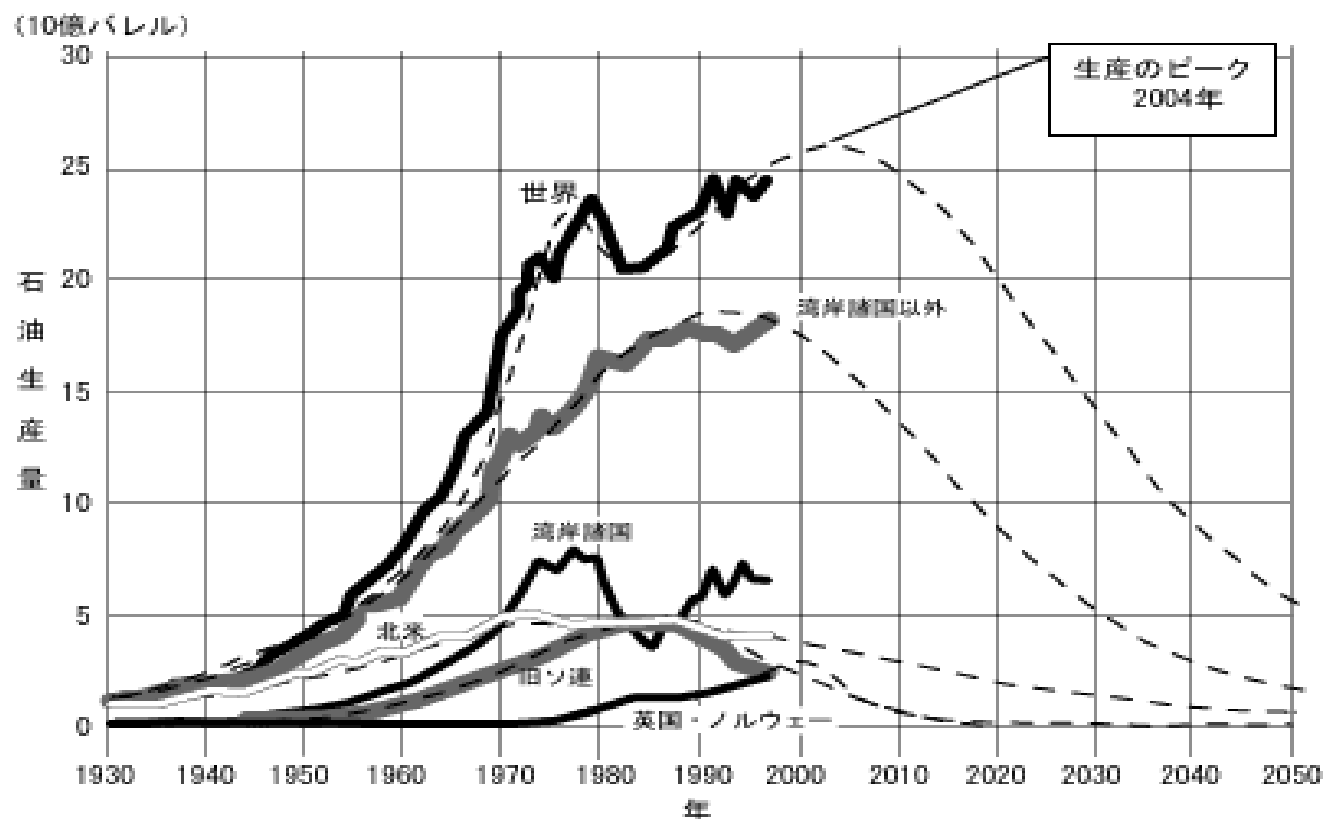
## ■エネルギー利用の変遷とエネルギー利用量の増加



出典:  
[左上・下]資源エネルギー庁「エネルギー白書2012」、p.91 第200-1-4  
[右上]資源エネルギー庁「エネルギー白書2013」、p.8 第111-1-1より

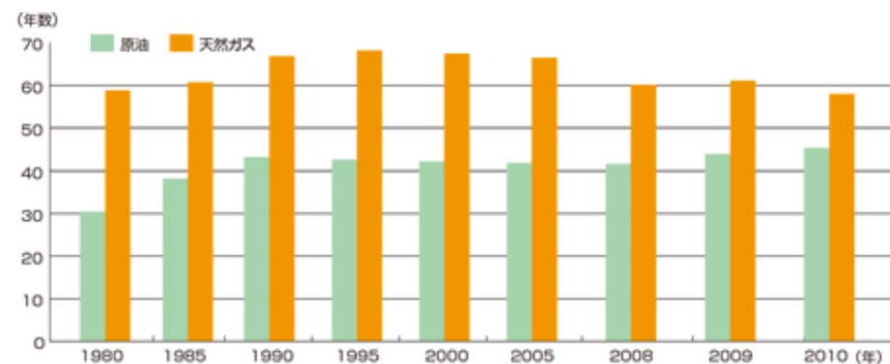


# 化石資源は有限： 原油生産量の推移



\* 画像出典：石井吉徳(2003)「エネルギーから見た環境・食料問題」『季報 エネルギー総合工学』Vol26 (No.2) 図4  
<http://www.iae.or.jp/publish/kihou/26-2/03.html>  
 (Data source: C.J. Campbell and J.H. Laherrere (1998) The End of Cheap Oil, *Scientific American*, March 1998)

[天然ガスの可採年数 (確認埋蔵量/生産量)]



※石炭の可採年数は150年以上とされています

\* 出典：BP Statistical Review of World Energy, June 2010



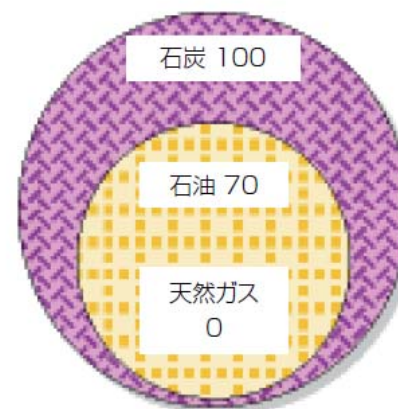
# 化石資源の比較：CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、などの排出量



二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)



窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)

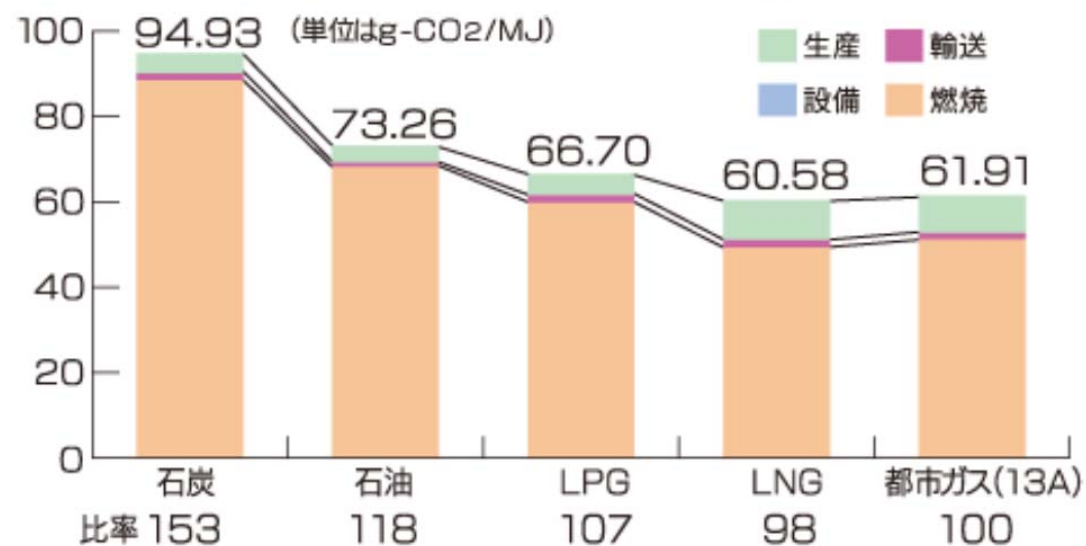


硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)

(出所) IEA [Natural Gas Prospects to 2010] (1986)

\* 出典：資源エネルギー庁「エネルギー白書2012」、p.210  
第334-3-1

【ライフサイクルCO<sub>2</sub>からみた優位性】



都市ガスを100としたHHV（高位発熱量：燃料を燃焼させた時の水蒸気の凝縮潜熱を含めた発熱量）基準

\* 出典：「エネルギー・資源」2007年3月

# エネルギー安全保障

自国民の生活や経済・社会活動の維持（発展）と  
国家防衛に必要不可欠な『量』の各種エネルギー  
を『国際紛争や環境破壊のリスクを回避』しながら  
安定的に『受容可能な価格』で確保する必要がある

## 背景

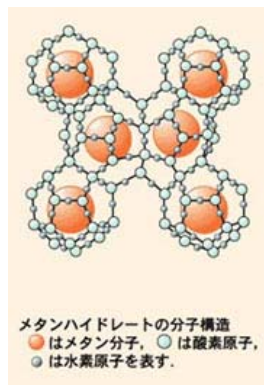
- 世界的なエネルギー需要急増（BRICS等）
- 資源ナショナリズムの高揚（資源生産国と国際エネルギー企業の関係）

## 具体的なリスク

- 政治的リスク（資源ナショナリズム、資源紛争、資源外交、国家利益の道具）
- 経済的リスク（需給バランス、投機マネーリスク、為替変動、契約不履行等）
- 科学的リスク（資源の偏在と埋蔵量、環境要因、環境破壊、廃棄物処理等）
- 技術的リスク（設備投資減退でインフラ老朽化、技術開発の遅延で更新停滞等）
- 天災/事故/テロのリスク（海底油田事故、輸送事故、プラント事故、原発事故等）

# メタンハイドレートとは

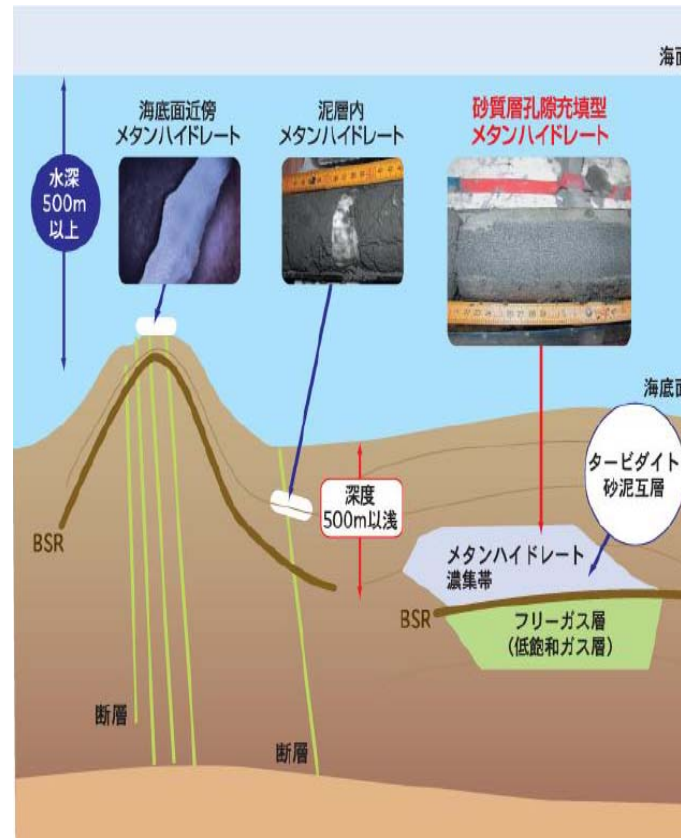
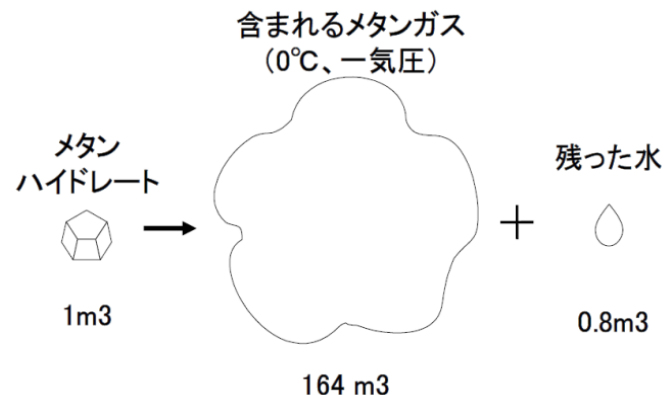
- メタンハイドレートは水分子のカゴ構造の中にメタン分子が閉じ込められた物質であり、分解後のメタンは火が付くと燃え、あとには水が残る(このため、燃える氷と呼ばれる)
- メタンハイドレート1立方メートルが分解すると、160~170立方メートル(0°C・1気圧)のメタンガスが発生する



奥田義久(1997)  
「メタンハイドレート特集にあたって」『地質ニュース』第510号、6-11、p.6 図1。  
CC BY



\* USGS/Photo  
by J. Pinkston  
and L. Stern



\* 画像提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

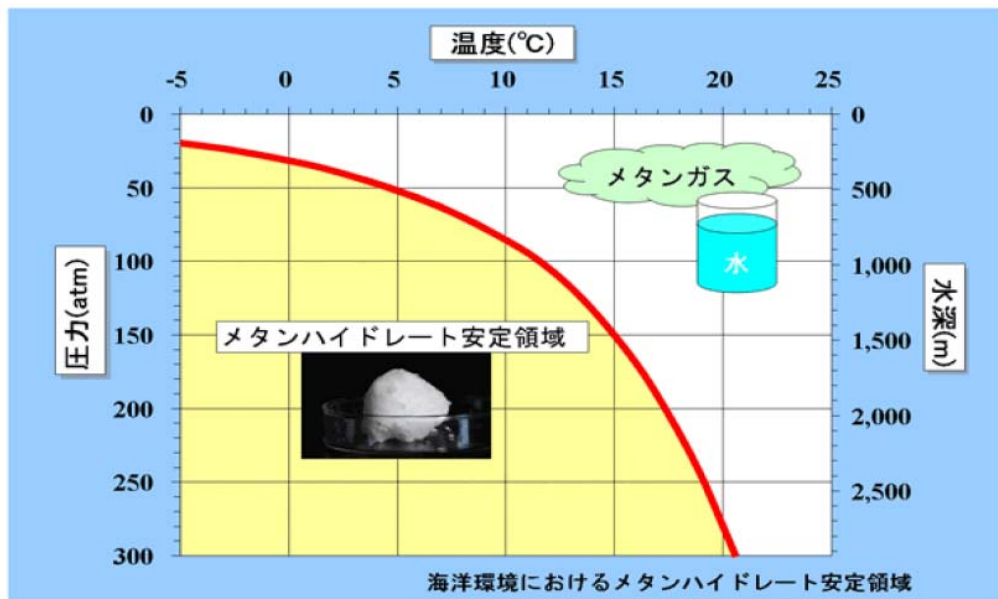
## 三重県沖で採取したメタンハイドレート



\* 画像提供: メタンハイドレート資源  
開発研究コンソーシアム

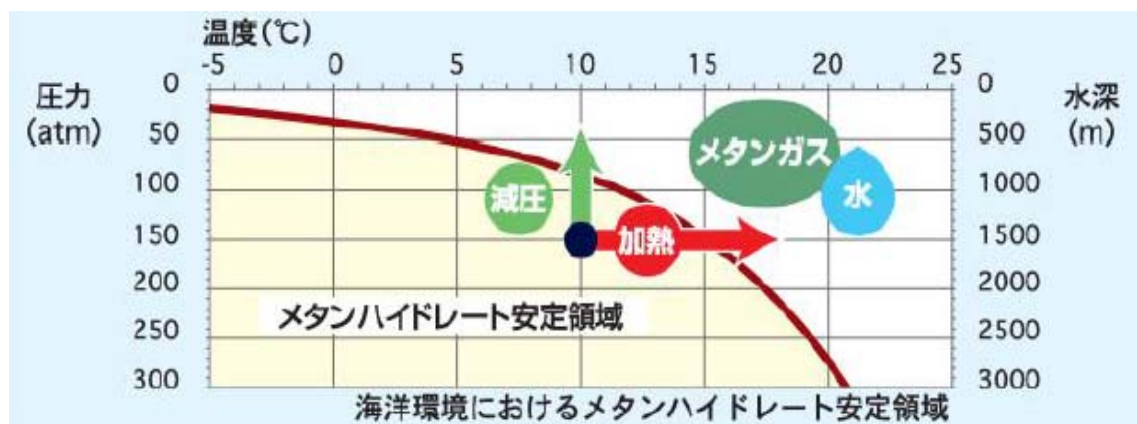


# メタンハイドレートからメタンを取り出すには

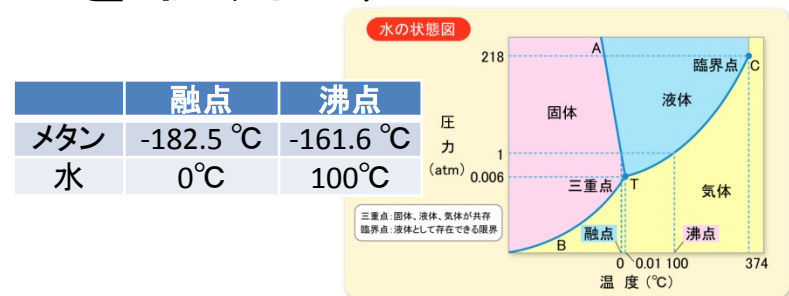


- メタンハイドレートは「低温・高圧」の条件で安定な物質であり、自然界では主に極地の永久凍土地帯の地底と、水深500m以深の海底面下に存在する

\* 資料提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

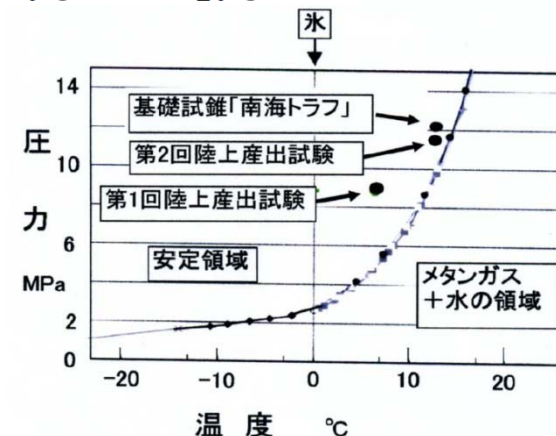
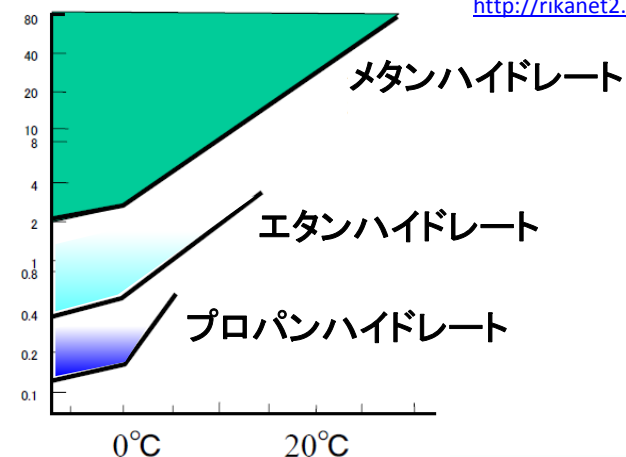


\* 画像提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム



\* 提供: (独) 科学技術振興機構  
「理科ねっとわーく」

<http://rikanet2.jst.go.jp/>



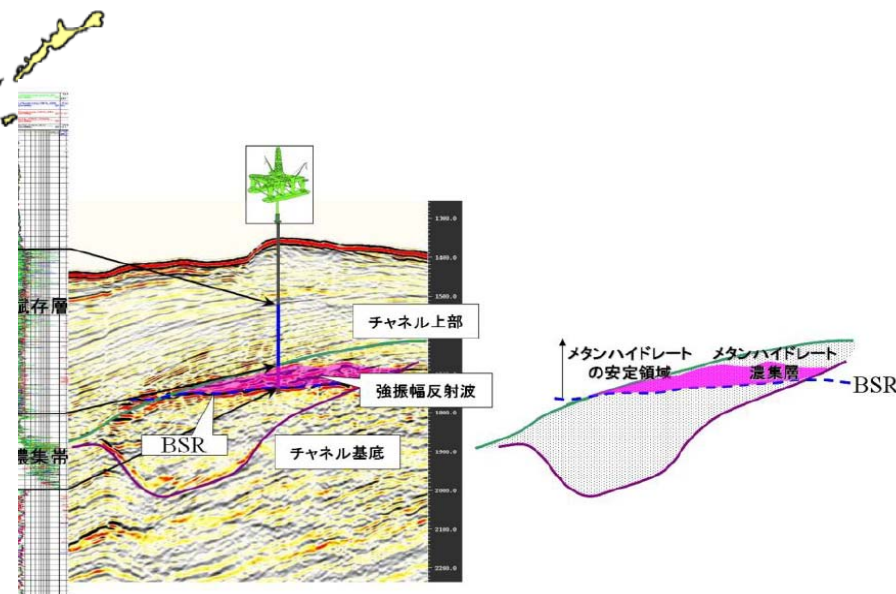
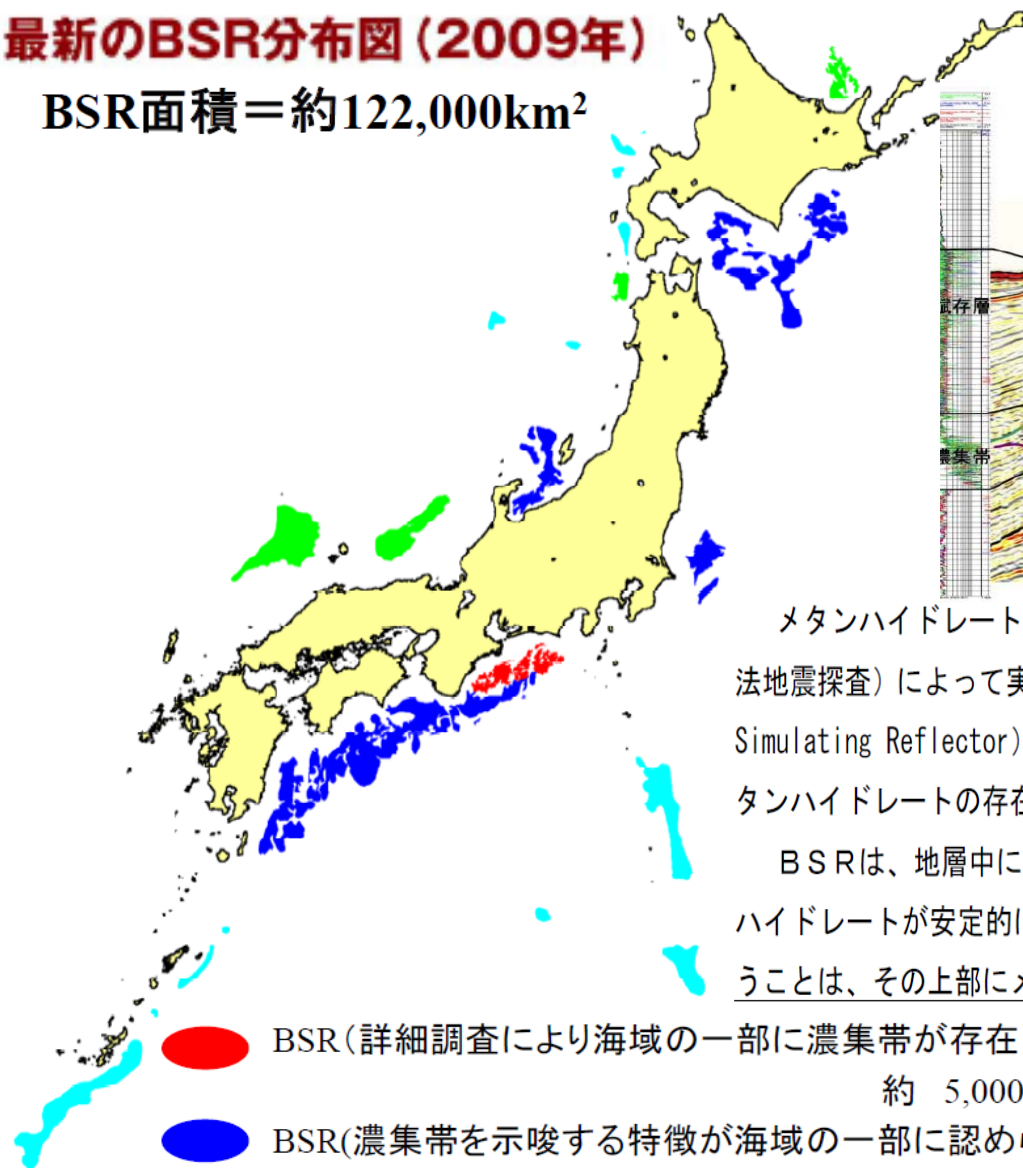
\* 画像提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム



# メタンハイドレートが存在する可能性のある日本近海

最新のBSR分布図(2009年)

BSR面積=約122,000km<sup>2</sup>



メタンハイドレートの調査は、石油や天然ガスと同様に、音波を使った物理探査（反射法地震探査）によって実施されます。この調査データからBSR（海底擬似反射面：Bottom Simulating Reflector）と呼ばれる特徴的な反射面を確認することによって、地層中のメタンハイドレートの存在を推定しています。

BSRは、地層中に海底とほぼ並行する形で表れます。地質学的には、BSRはメタンハイドレートが安定的に存在する領域の基底部に相当します。つまり、BSRがあるということは、その上部にメタンハイドレートが存在することを知る手がかりとなります。

- BSR(詳細調査により海域の一部に濃集帯が存在)  
約 5,000 km<sup>2</sup>
- BSR(濃集帯を示唆する特徴が海域の一部に認められる)  
約 61,000 km<sup>2</sup>
- BSR(濃集帯を示唆する特徴がない)  
約 20,000 km<sup>2</sup>
- BSR(調査データが少ない)  
約 36,000 km<sup>2</sup>

\* 資料提供：メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

# メタンハイドレートを取り出す試験研究

カナダ北西部・マッケンジーデルタ（永久凍土地帯）で、地下のメタンハイドレートを分解し、メタンガスを連続的に取り出す試験を世界に先駆けて実施。

## 第一回陸上産出試験(2001年度)

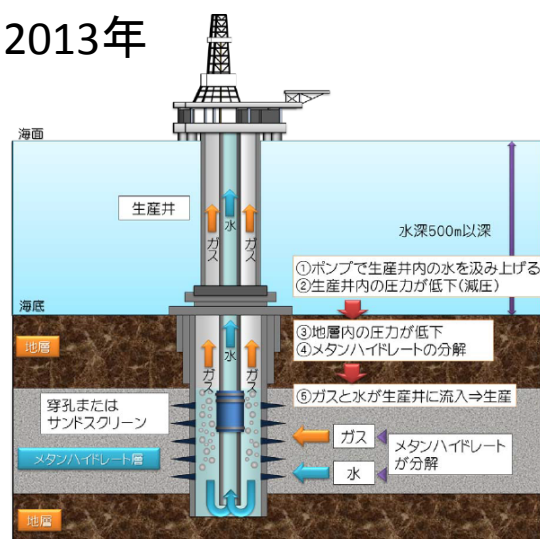
## 第二回陸上産出試験(2007・2008年度)

|       | 第1回試験<br>(2001年度)       | 第2回試験<br>(2007・2008年度)     |
|-------|-------------------------|----------------------------|
| 参加国   | 5カ国(日加米独印)              | 2カ国(日加)                    |
| 生産手法  | 温水循環法                   | 減圧法                        |
| 結果    | メタンガス生産に成功<br>(世界初)     | 減圧法の連続生産に成功<br>(世界初)       |
| 累計生産量 | 470m <sup>3</sup> (5日間) | 13,000m <sup>3</sup> (6日間) |
| 課題    | 生産の継続性<br>エネルギー効率       | 長期生産試験の必要性※                |



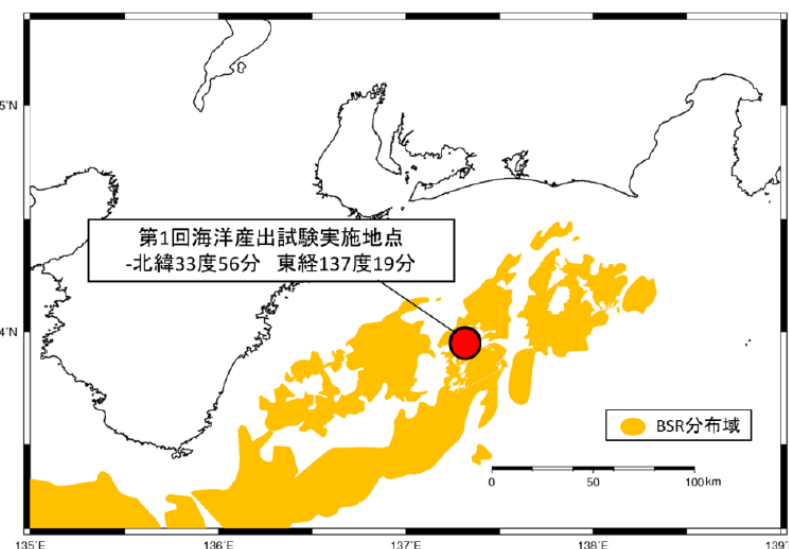
\* 資料提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

2013年



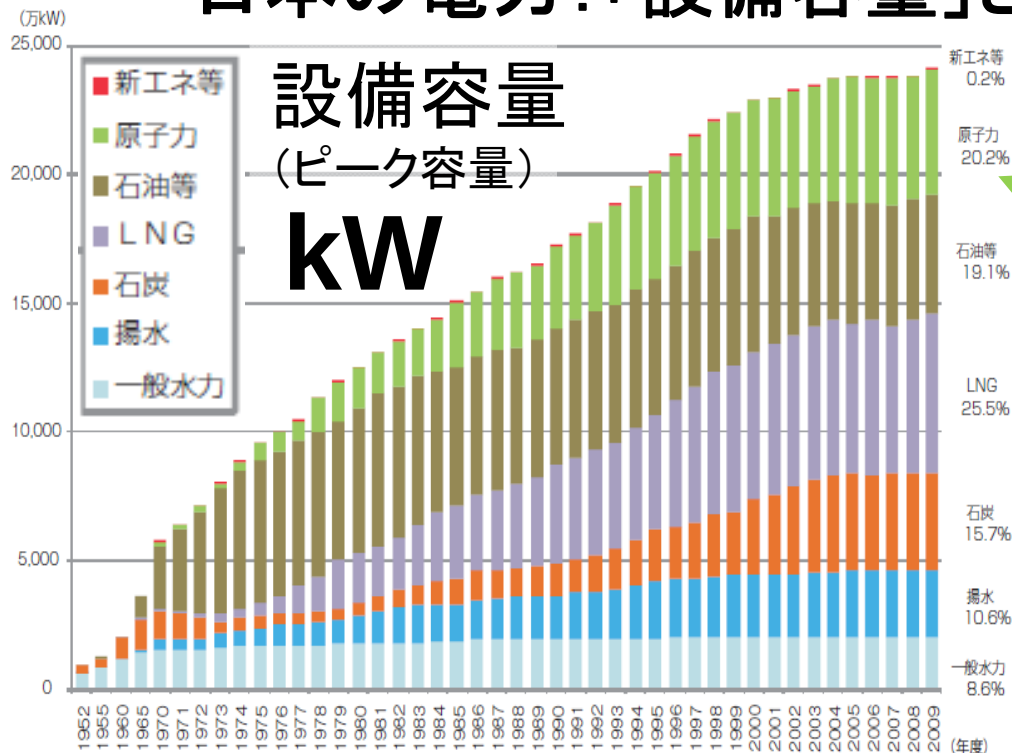
- 第1回海洋産出試験では、左に示す減圧法を用いて生産試験を実施する。
- 減圧法ではメタンハイドレートを地層中でメタンガスと水に分解し、メタンガスを回収する。

\* 資料提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム



\* 資料提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

# 日本の電力:「設備容量」と「発電電力量」の推移



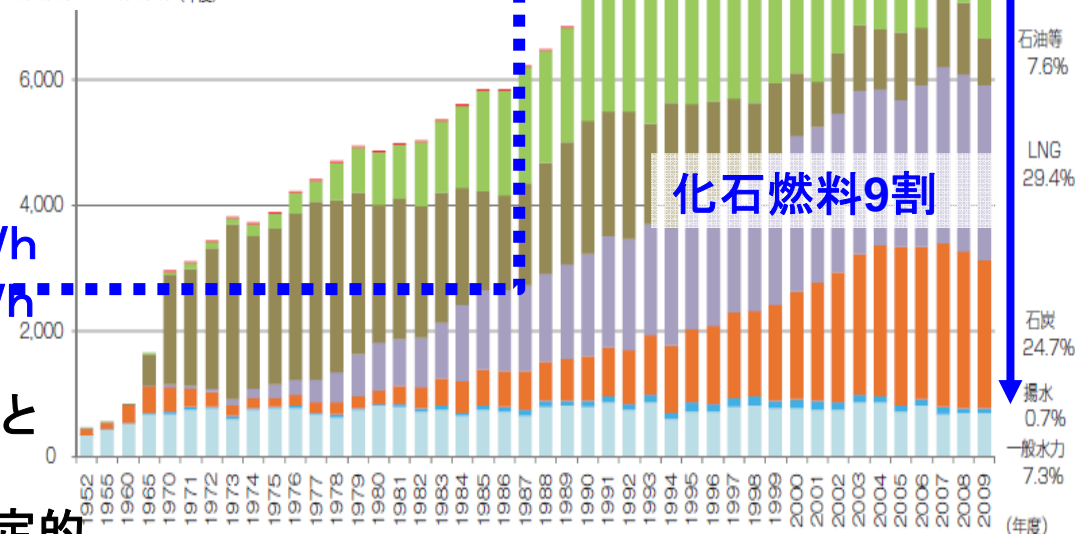
新工ネ等: わずか0.2%  
原子力: 約20%⇒1%

## 発電電力量 (消費エネルギー量)

**kWh**

1兆  
kWh

8000億  
kWh



\* 資源エネルギー庁「エネルギー白書2010」、p.190 第214-1-5

設備容量は2005年以降横ばい

発電電力量は2007年から急減

2010年電事連発表値: 9064億kWh

2011年電事連発表値: 8598億kWh

原子力停止分の短期的代替は

景気低迷による電力消費の減少と

火力稼働率向上で乗り切った

新エネの寄与は僅か、省エネも限定的

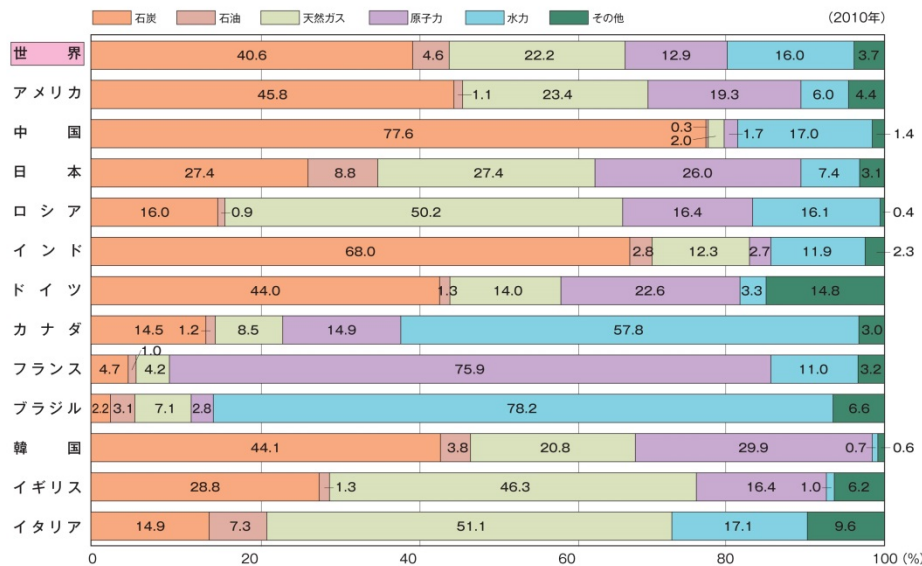
\* 資源エネルギー庁「エネルギー白書2010」、p.191 第214-1-6



# 主要国の発電構成と再生可能エネルギー

再生可能エネルギー(自然エネルギー)  
⇒ 太陽光、風力、地熱、水力、など  
= 国内で自給できるエネルギー

主要国の電源別発電電力量の構成比



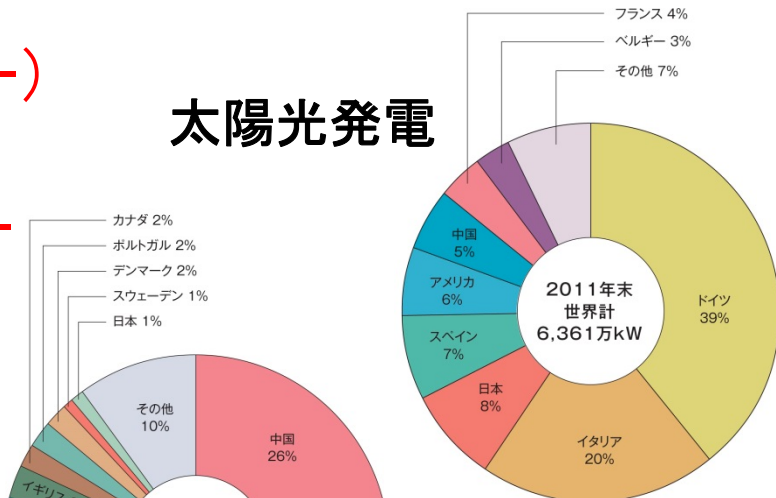
(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

4-3

出典: IEA [ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES (2012 Edition)] / [ENERGY BALANCES OF NON-OECD COUNTRIES (2012 Edition)]

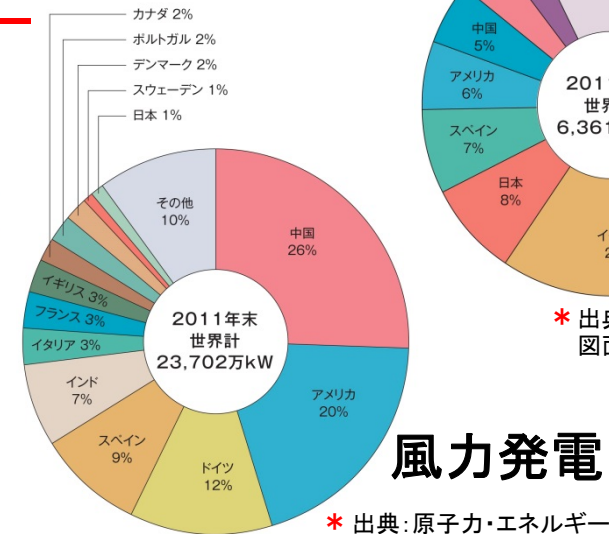
\* 出典: 原子力・エネルギー図面集2013

太陽光発電



\* 出典: 原子力・エネルギー図面集2013

風力発電



\* 出典: 原子力・エネルギー図面集2013

国際再生可能エネルギー機関憲章では、「再生することが可能な資源から持続可能な態様で生産されるあらゆる形態のエネルギー」をいい、バイオエネルギー、地熱エネルギー、水力電気、海洋エネルギー、太陽エネルギー、風力エネルギーなどを含むとされている。



# 2012年7月1日再生可能エネルギー固定価格買取制度 開始

平成24年度(2012年度)買取価格(※年度ごとに見直されます)

\* 資料提供: 資源エネルギー庁



| 太陽光  | 10kW以上 | 10kW未満 | 10kW未満<br>(ダブル発電) |
|------|--------|--------|-------------------|
| 調達価格 | 42円    | 42円    | 34円               |
| 調達期間 | 20年間   | 10年間   | 10年間              |



| 風力   | 20kW以上 | 20kW未満 |
|------|--------|--------|
| 調達価格 | 23.1円  | 57.75円 |
| 調達期間 | 20年間   | 20年間   |



| 水力   | 1,000kW以上<br>30,000kW未満 | 200kW以上<br>1,000kW未満 | 200kW未満 |
|------|-------------------------|----------------------|---------|
| 調達価格 | 25.2円                   | 30.45円               | 35.7円   |
| 調達期間 | 20年間                    | 20年間                 | 20年間    |



| 地熱   | 15,000kW以上 | 15,000kW未満 |
|------|------------|------------|
| 調達価格 | 27.3円      | 42円        |
| 調達期間 | 15年間       | 15年間       |



| バイオマス | メタン発酵<br>ガス化発電 | 未利用木材<br>燃焼発電<br>(※1) | 一般木材等<br>燃焼発電<br>(※2) | 廃棄物<br>(木質以外)<br>燃焼発電<br>(※3) | リサイクル<br>木材燃焼発電<br>(※4) |
|-------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 調達価格  | 40.95円         | 33.6円                 | 25.2円                 | 17.85円                        | 13.65円                  |
| 調達期間  | 20年間           | 20年間                  | 20年間                  | 20年間                          | 20年間                    |

(※1)間伐材や主伐材であって、後述する設備認定において未利用であることが確認できたものに由来するバイオマスを燃焼させる発電

(※2)未利用木材及びリサイクル木材以外の木材(製材端材や輸入木材)並びにパーム椰子殻、稲わら・もみ殻に由来するバイオマスを燃焼させる発電

(※3)一般廃棄物、下水汚泥、食品廃棄物、RDF、RPF、黒液等の廃棄物由来のバイオマスを燃焼させる発電

(※4)建設廃材に由来するバイオマスを燃焼させる発電

※最新の買取価格については次を参照:「なっとく! 再生可能エネルギー」

[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/kakaku.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html)

# 再生可能エネルギー固定価格買取制度の実績

平成24年度(2012年度)買取価格(※年度ごとに見直されます)

\* 資料提供: 資源エネルギー庁



| 太陽光  | 10kW以上 | 10kW未満<br>(余剰買取) | 10kW未満<br>(ダブル発電) |
|------|--------|------------------|-------------------|
| 調達価格 | 42円    | 42円              | 34円               |
| 調達期間 | 20年間   | 10年間             | 10年間              |

| 風力   | 20kW以上 | 20kW未満 |
|------|--------|--------|
| 調達価格 | 23.1円  | 57.75円 |
| 調達期間 | 20年間   | 20年間   |



表. 再生可能エネルギー固定価格買い取り制度導入後の2012年7月1日～9月30日に認定を受けた設備容量(経済産業省・資源エネルギー庁の公開資料より作成)

| 発電設備区分          | 設備容量／kW       |
|-----------------|---------------|
| 太陽光(10kW未満)     | 25% 443,811   |
| 太陽光(10kW以上)     | 58% 1,035,646 |
| うちメガソーラー(1MW以上) | (41%) 733,393 |
| 風力(20kW未満)      | 0             |
| 風力(20kW以上)      | 291,710       |
| 水力              | 1,551         |
| 地熱              | 0             |
| バイオ             | 5,725         |
| 合計              | 1,778,444     |

83%

16%

※2014年3月末までの実績に関しては次を参照:「再エネ設備認定状況(件数、出力)」  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/dl/setsubi/201403setsubi.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/setsubi/201403setsubi.pdf)

\* 画像提供: 資源エネルギー庁

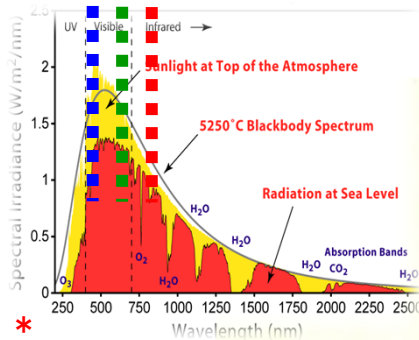
太陽光発電が再生可能エネルギー固定価格買取制度の中心になっている

# 太陽光は無尽蔵なクリーンエネルギー

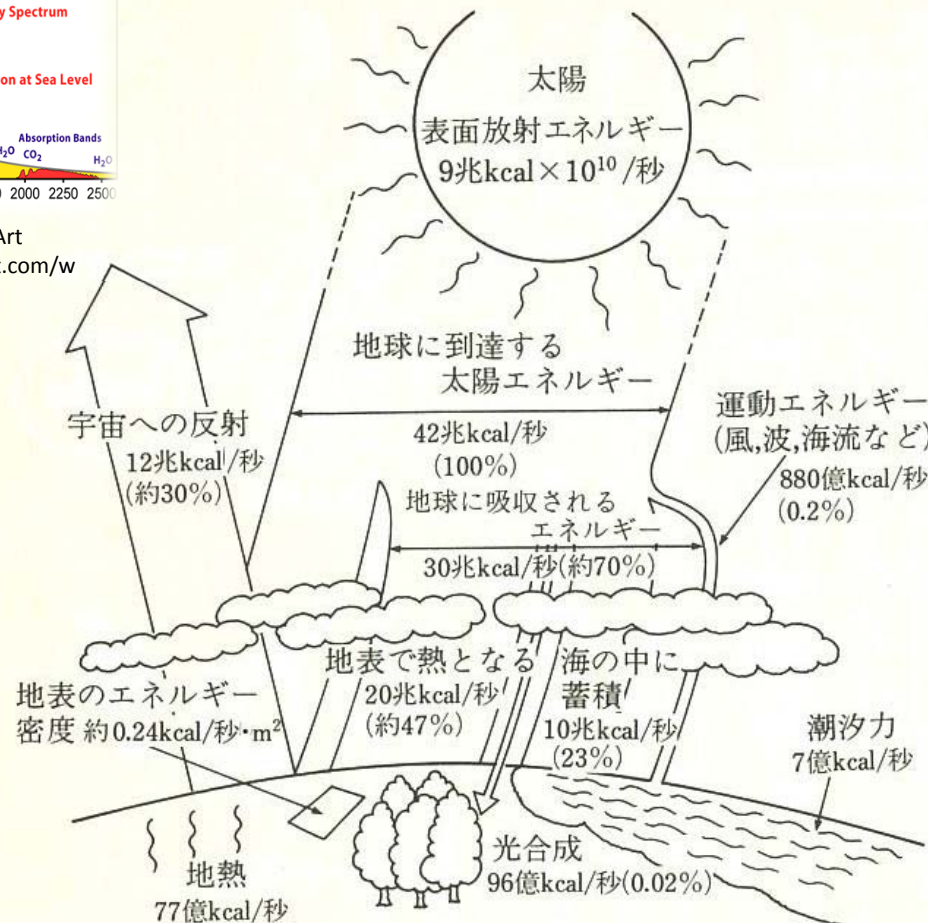
## 地球上に降り注ぐ太陽エネルギーとその収支

太陽エネルギー1時間分(176 P Wh) >

世界の年間エネルギー消費量(129 P Wh)



\* Image from Global Warming Art  
[http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Solar\\_Spectrum\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Solar_Spectrum_png)



\* 画像出典: 桑野幸徳『新・太陽電池を使いこなす』講談社ブルーバックスB-1246、1999年、p.33 図1-12

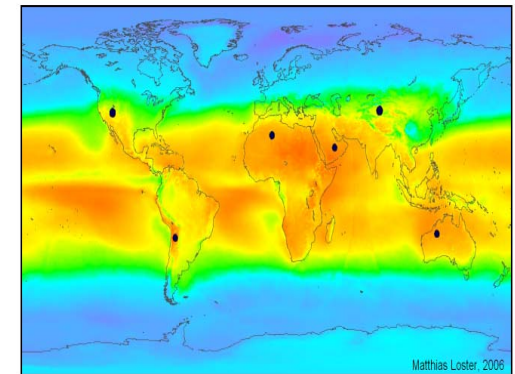


Image by Matthias Loster, from Wikimedia Commons  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_land\\_area.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_land_area.png) CC BY-SA 3.0

太陽エネルギー資源量の分布(1991-3年平均、昼夜変化と天候影響を考慮)。黒点は、太陽光発電の変換効率を8%と仮定して世界の主要エネルギー源を賄うために必要な面積を表す。

# 太陽電池の種類と特徴

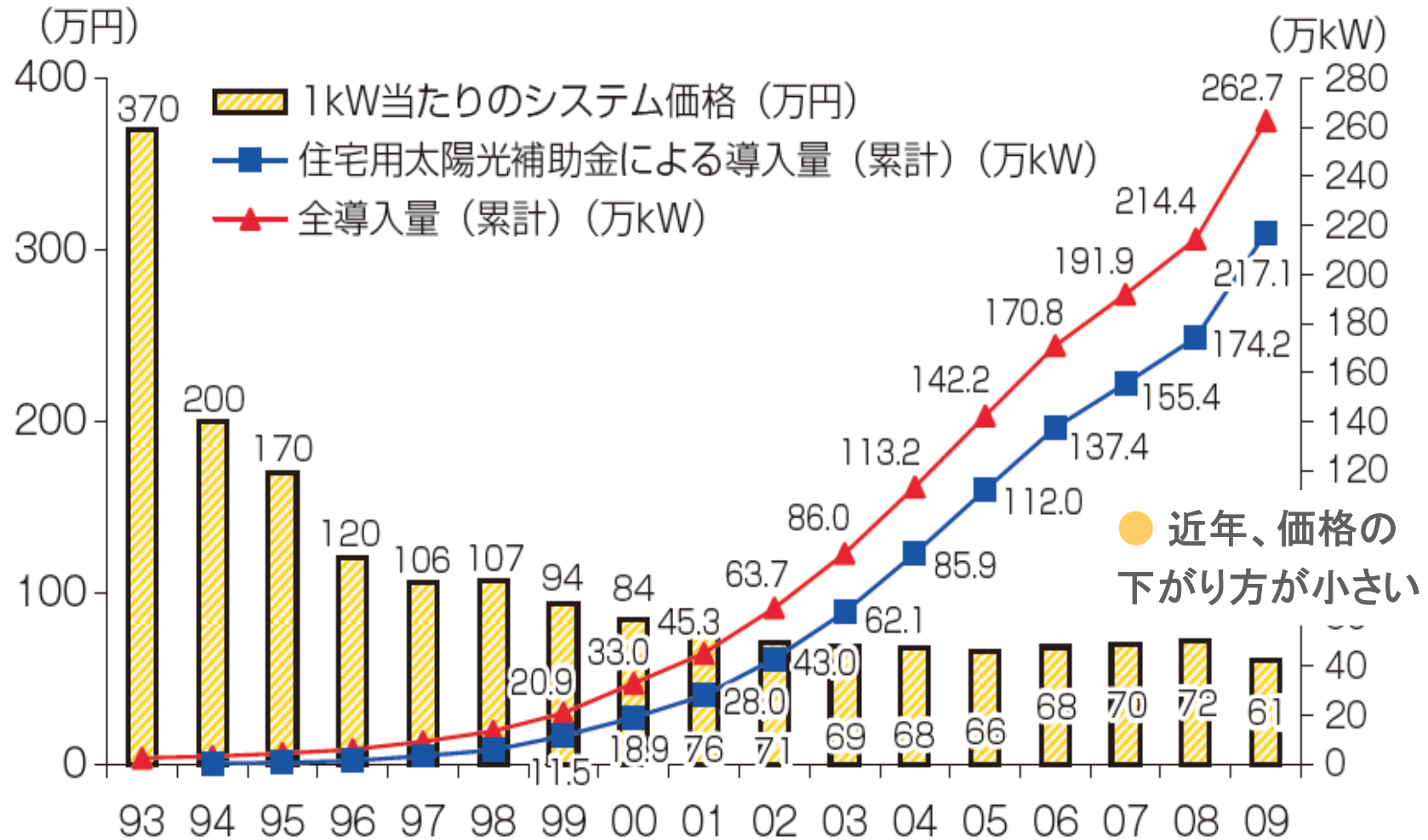
| 種類         | シリコン系                                                                                                                       |                                                                                                                          |                                                                                                                                   | 化合物系                                                                                                                               |                                                                                                                             |                                                                                                                                | 有機系                                                                                                                               |                                                                                                                          |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | 結晶系                                                                                                                         |                                                                                                                          | 薄膜系                                                                                                                               | CIS系                                                                                                                               | CdTe系                                                                                                                       | III-V族系                                                                                                                        | 色素増感                                                                                                                              | 有機薄膜                                                                                                                     |
|            | 単結晶                                                                                                                         | 多結晶                                                                                                                      |                                                                                                                                   |                                                                                                                                    |                                                                                                                             |                                                                                                                                |                                                                                                                                   |                                                                                                                          |
| 特長         | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 160～200μm程度の薄い単結晶シリコンの基板を用いる</li> <li>● 特徴: 性能・信頼性</li> <li>● 課題: 低コスト化</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 小さい結晶が集まった多結晶の基板を使用</li> <li>● 特徴: 単結晶より安価</li> <li>● 課題: 単結晶より効率が低い</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● アモルファス（非晶質）シリコンや微結晶シリコン薄膜を基板上に形成</li> <li>● 特徴: 大面積で量産可能</li> <li>● 課題: 効率が低い</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 銅・インジウム・セレン等を原料とする薄膜型</li> <li>● 特徴: 省資源・量産可能・高性能の可能性</li> <li>● 課題: インジウムの資源量</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● カドミウム・テルルを原料とする薄膜型</li> <li>● 特徴: 省資源・量産可能・低コスト</li> <li>● 課題: カドミウムの毒性</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● III族元素とV族元素からなる化合物セルに多接合化・集光技術を適用</li> <li>● 特徴: 超高性能</li> <li>● 課題: 低コスト化</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 酸化チタンに吸着した色素が光を吸収し発電する新しいタイプ</li> <li>● 特徴: 低コスト化の可能性</li> <li>● 課題: 高効率化・耐久性</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 有機半導体を用いて、塗布だけで作製可能</li> <li>● 特徴: 低コスト化の可能性</li> <li>● 課題: 高効率化・耐久性</li> </ul> |
| 効率         | ～20%                                                                                                                        | ～15%                                                                                                                     | ～9%                                                                                                                               | ～14%                                                                                                                               | ～13%                                                                                                                        | (セル効率)～38%                                                                                                                     | (セル効率)～14%                                                                                                                        | (セル効率)～12%                                                                                                               |
| 実用化状況      | 実用化                                                                                                                         | 実用化                                                                                                                      | 実用化                                                                                                                               | 実用化                                                                                                                                | 実用化                                                                                                                         | 研究段階                                                                                                                           | 研究段階                                                                                                                              | 研究段階                                                                                                                     |
| 主要な国内外メーカー | シャープ<br>三菱電機<br>パナソニック<br>(HIT型)<br>Yingli(中)<br>JASolar(中)<br>Trina(中)<br>Hanwha-Qcells(韓独)                                | 京セラ<br>シャープ<br>三菱電機<br>Yingli(中)<br>Trina(中)<br>JASolar(中)                                                               | カネカ<br>シャープ<br>富士電機<br>GS Solar(中)<br>NexPower(台)                                                                                 | ソーラーフロンティア<br>Hanergy(中)<br>Mia Sole(米)                                                                                            | 国内: なし<br>First Solar(米)                                                                                                    | シャープ<br>Amonix(米)<br>Soltec(仏)                                                                                                 | アイシン精機<br>シャープ<br>フジクラ<br>G24Innovations(英)<br>Dysol(豪)                                                                           | 三菱化学<br>住友化学<br>JXエネルギー<br>Heliatek(独)                                                                                   |

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)『NEDO再生可能エネルギー技術白書』第2版、2013年、第2章、p.8 表2-1 を基に作成



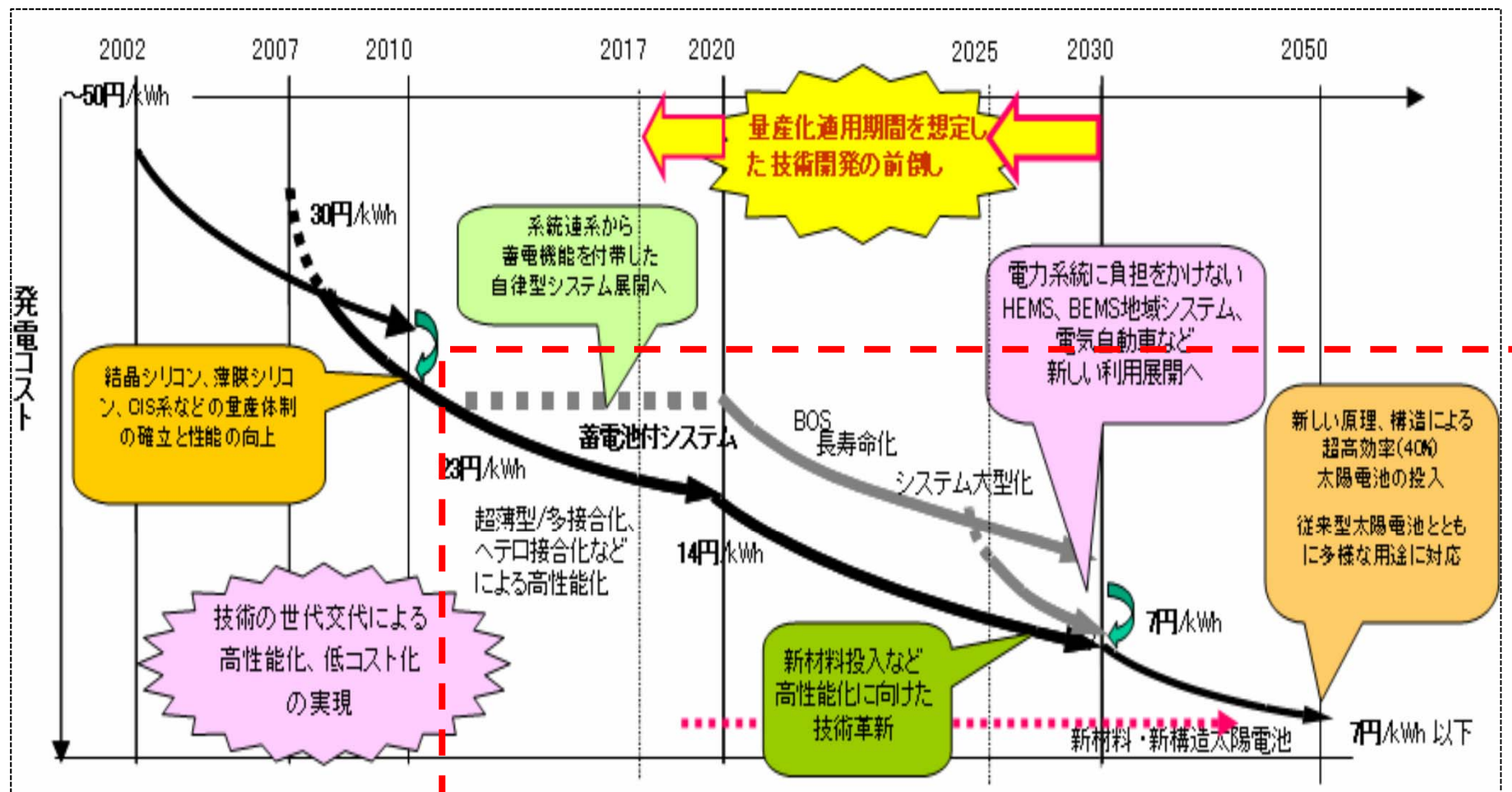
# 太陽光発電のコストは本当に下がるのか

\* 出典: 資源エネルギー庁「エネルギー白書2011」、p.107 第213-2-11



最近の10年程は、日本企業の製品価格は下げ止まり。円高や海外企業(中国)の太陽電池の低価格化に押され、日本の太陽電池の輸出は苦戦。国内にも外国製品が2割。

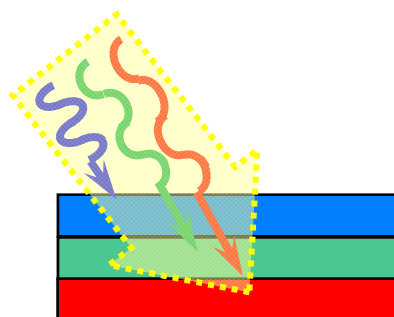
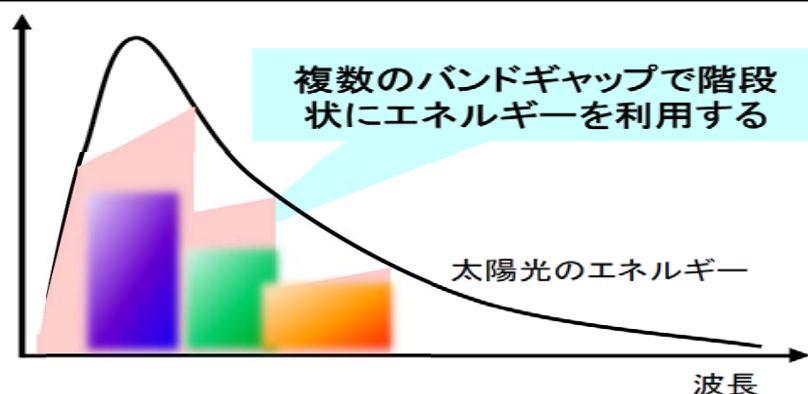
# 太陽光発電の導入拡大に向けた技術研究開発の 新ロードマップ「PV2030+」のシナリオ(2009年6月)



- 長寿命化、高効率化、集光システム利用など高性能化で低コスト化
- 全く新しい太陽電池材料、製造プロセスの革新など新概念で低コスト化
- スマートグリッド、直流送電、蓄電などシステム全体の革新で低コスト化

\* 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)『太陽光発電ロードマップ(PV2030+)』図2のデータの一部を使って新たに作成

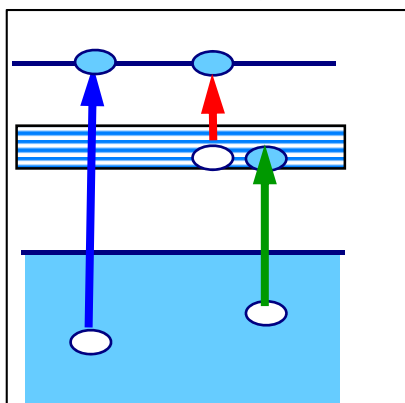
# 超高効率太陽電池をめざして



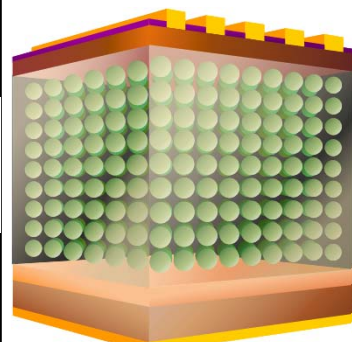
タンデム型(多接合型)

シャープ(株)  
豊田工大、東大

**35.8%**



中間バンド型



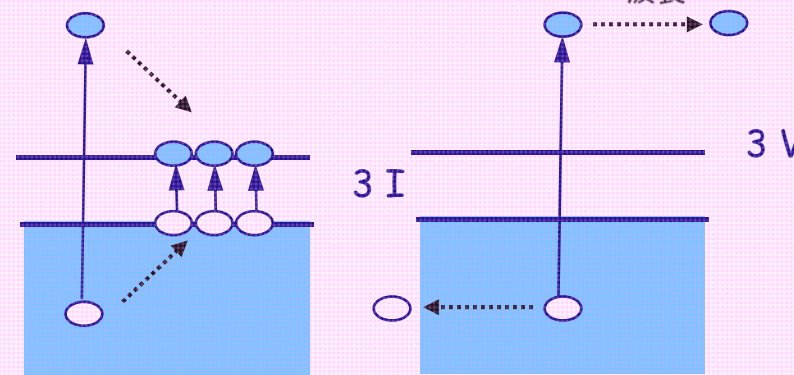
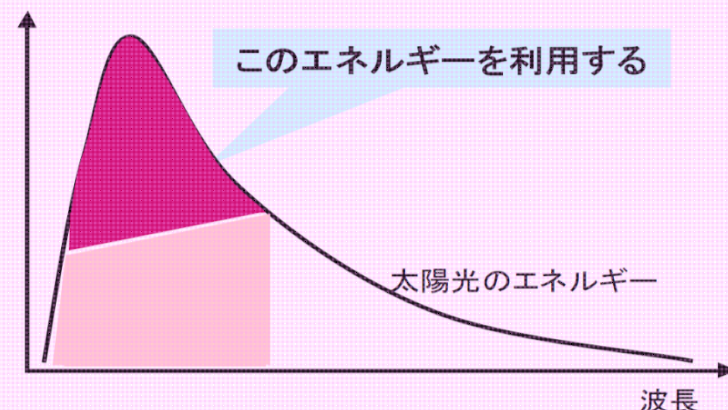
\* 画像提供: 岡田至崇氏(先端研)

東大先端研

量子ドット型

**16.1%**

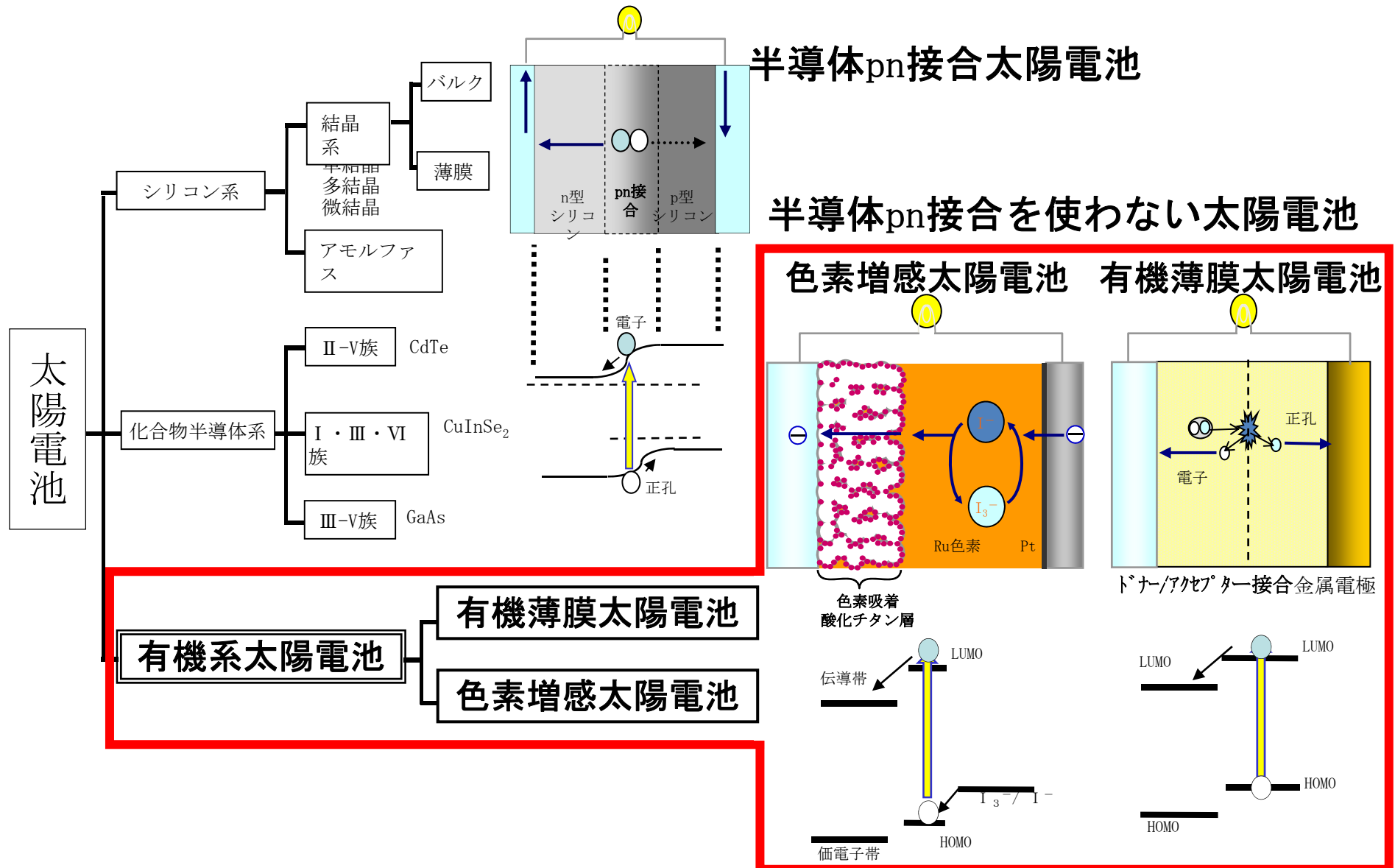
※2014年2月現在では17.3%



多励起子生成型(MEG型) ホットキャリア型

さらに未来の技術  
にむけて基礎研究  
も進行中

# 太陽電池の分類と有機系太陽電池 (有機薄膜太陽電池、色素増感太陽電池)

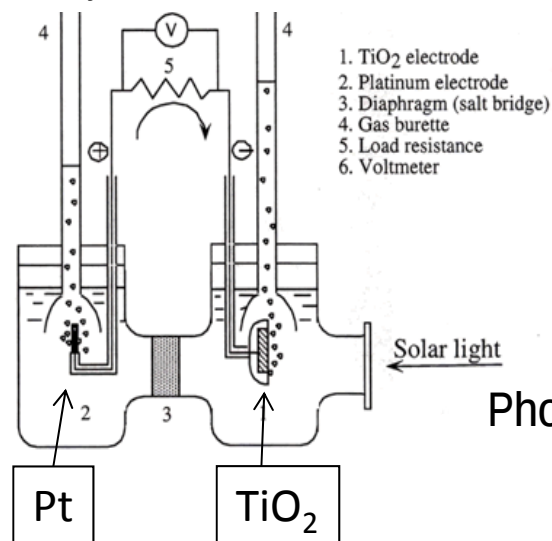




# 電気化学反応を利用する有機系太陽電池の歴史

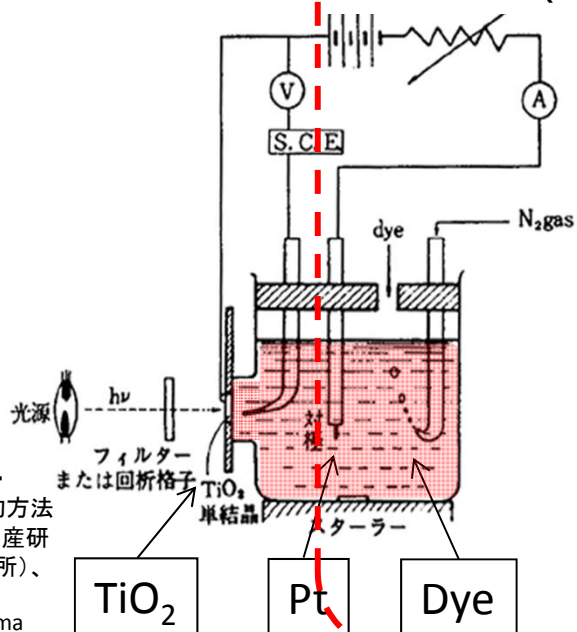
## Honda-Fujishima Effect

A. Fujishima and K. Honda, *Nature*, 238, 37 (1972).



\* Courtesy of Prof. Akira Fujishima

Photo-electrochemical Cell (1971)



\* 画像出典: 藤嶋昭・林谷英司・本多健一(1971)「電気化学的方法による分光増感の研究」、『生産研究』(東京大学生産技術研究所)、vol.23、p.363 図1。  
Courtesy of Prof. Akira Fujishima

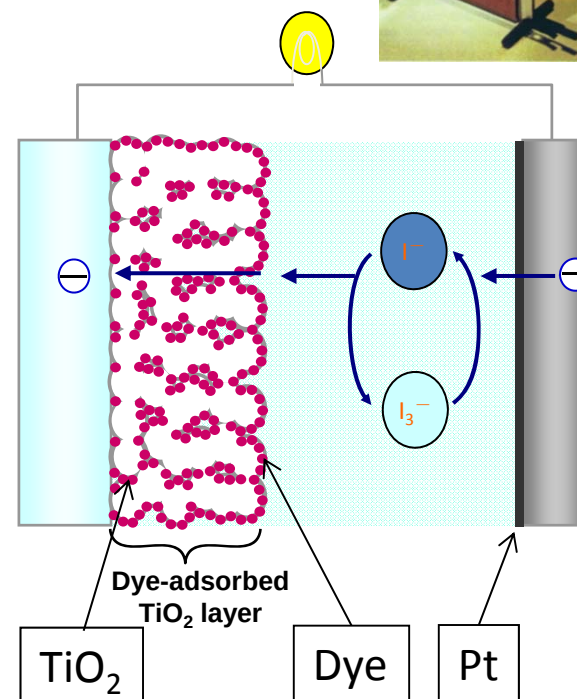
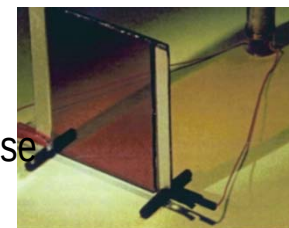
## Dye-sensitized Solar Cell

B. O'Regan and M. Graetzel, *Nature*, 353, 737 (1991).

20 years

## "Graetzel Cell"

Solar Cell for Practical Use



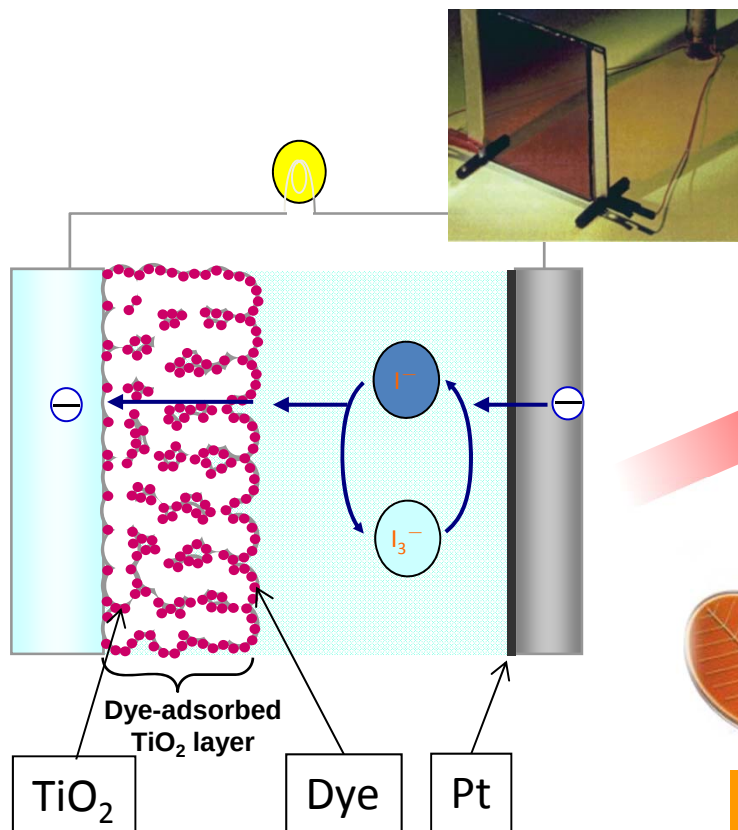
# 電気化学反応を利用する有機系太陽電池の進化

## Dye-sensitized Solar Cell (DSSC)

B. O'Regan and M. Graetzel, *Nature*, 353, 737 (1991).

“Graetzel Cell”

Solar Cell for Practical Use



## DSSC Module made by SONY, 2010

\* 画像提供: ソニー株式会社



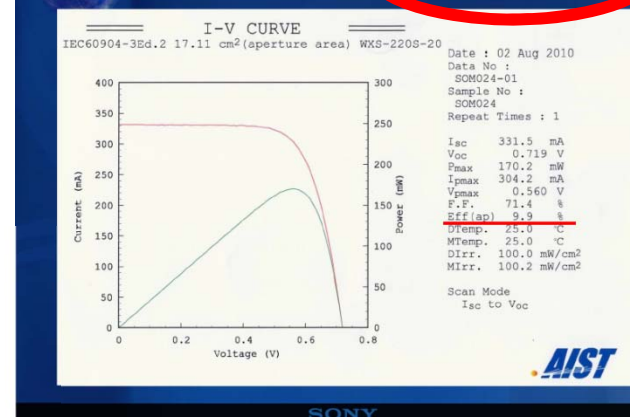
Hana-akari

SONY

\* 画像提供: ソニー株式会社



DSSC submodule: Eff (ap) 9.9%



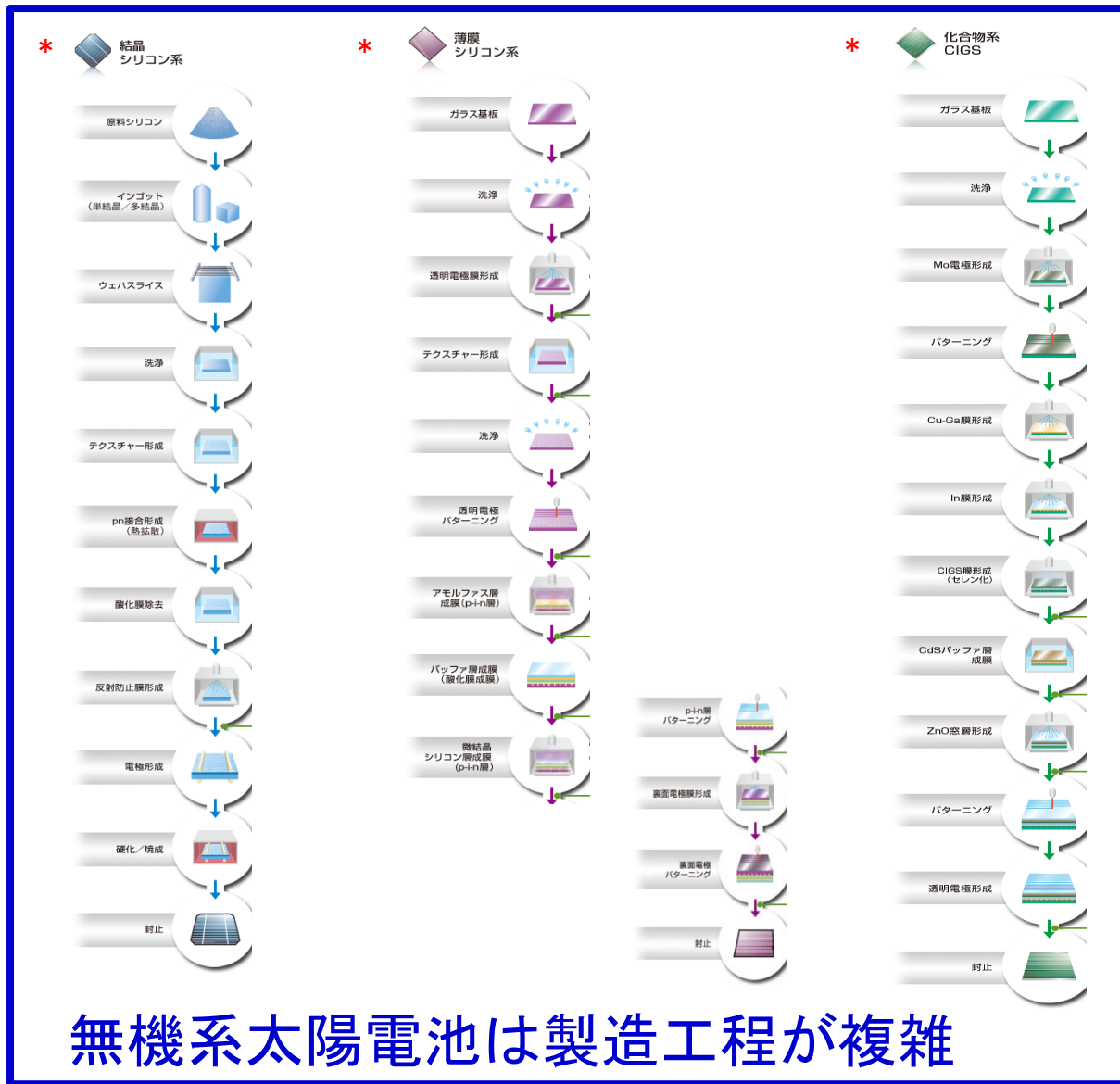
20 years

\* 画像提供: アイシン精機株式会社

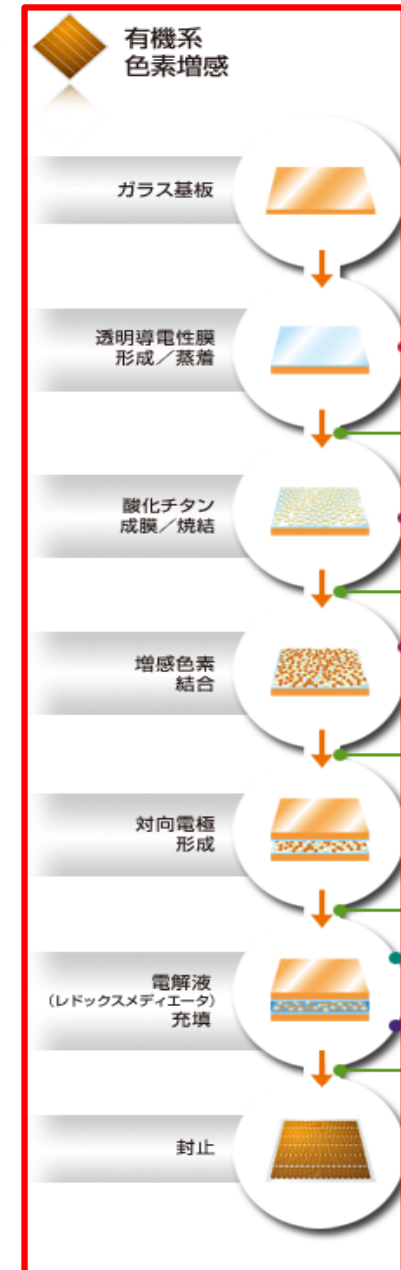


AISIN SEIKI

# さまざまな太陽電池の製造プロセス



色素増感太陽電池は製造工程が簡単



©HORIBA, Ltd. All rights reserved

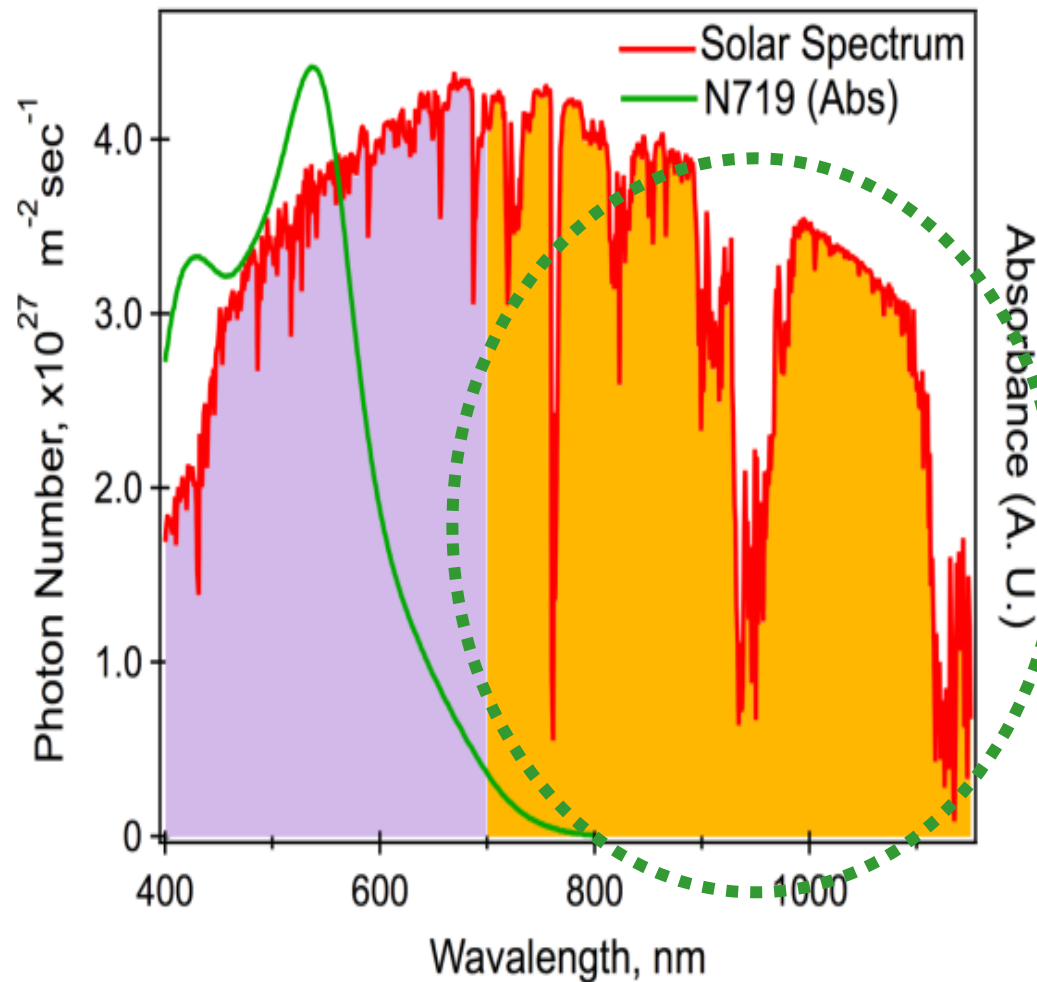
太陽電池製造プロセス: 結晶シリコン系 <http://www.horiba.com/jp/semiconductor/products/processes/photovoltaic-process/crystalline-silicon/>

太陽電池製造プロセス: 薄膜シリコン系 <http://www.horiba.com/jp/semiconductor/products/processes/photovoltaic-process/thin-film-silicon/>

太陽電池製造プロセス: 化合物系 CIGS <http://www.horiba.com/jp/semiconductor/products/processes/photovoltaic-process/compound-cigs/>

太陽電池製造プロセス: 有機系色素増感 <http://www.horiba.com/jp/semiconductor/products/processes/photovoltaic-process/organic-dye-sensitized/>

# 色素増感太陽電池の光エネルギー変換効率向上 近赤外増感色素の開発が必要



近赤外領域の光  
が使えていない

色素増感太陽電池用  
の近赤外吸収色素  
の開発が必要



## NATURE PHOTONICS | LETTER

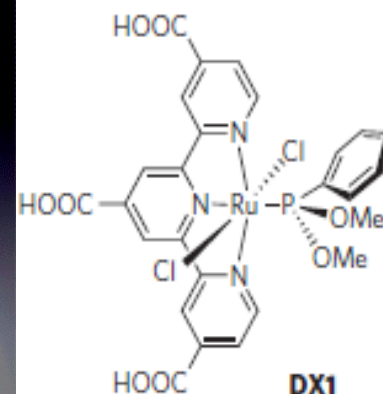
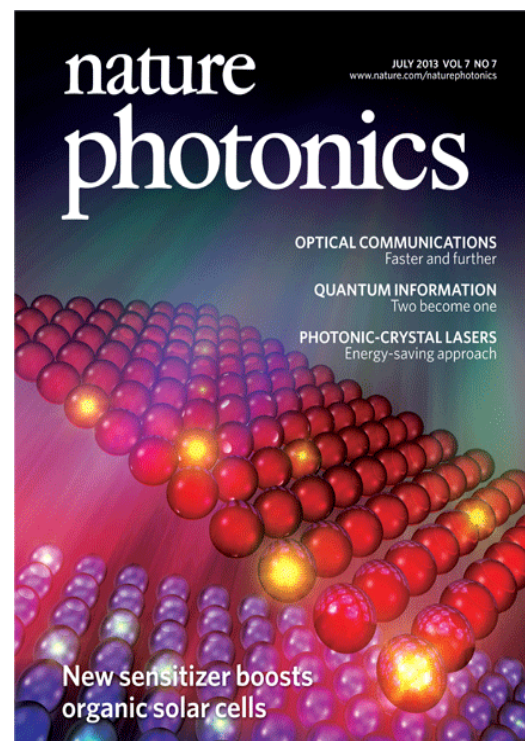
Vol. 7 (No. 7), July 2013, pp. 501–576

# Wideband dye-sensitized solar cells employing a phosphine-coordinated ruthenium sensitizer

Takumi Kinoshita, Joanne Ting Dy, Satoshi Uchida, Takaya Kubo and Hiroshi Segawa

### Abstract

Low-cost renewable energies are necessary for the realization of a low-carbon society. Organic photovoltaics such as organic thin-film solar cells<sup>1,2</sup> and dye-sensitized solar cells (DSSCs)<sup>3,4</sup> are promising candidates for realizing low-cost solar cells. However, device efficiencies are still considerably lower than those of traditional inorganic solar cells. To improve organic photovoltaic performance, approaches are needed to extend the absorption of organic compounds to longer wavelengths. Here, we report efficient DSSCs that exploit near-infrared, spin-forbidden singlet-to-triplet direct transitions in a phosphine-coordinated Ru(II) sensitizer, DX1. A DSSC using DX1 generated a photocurrent density of 26.8 mA cm<sup>-2</sup>, the highest value for an organic photovoltaic reported to date. A tandem-type DSSC employing both DX1 and the traditional sensitizer N719 is shown to have a power conversion efficiency of >12% under 35.5 mW cm<sup>-2</sup> simulated sunlight.



\* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd:  
*Nature Photonics*, vol.7 (no.7), July 2013  
<http://www.nature.com/nphoton/journal/v7/n7/index.html>

Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature Photonics*, vol.7 (No.7), 535–539, p.536 Fig.1a [above]; p.537 Fig.2d [below], copyright 2013.

# Near-IR Sensitive Dye : Spin Management

Spin-forbidden transition intensity:

$$f_T \approx \frac{\left\langle \psi_S \left| \hat{H}_{SO} \right| \psi_T \right\rangle^2}{(E_T - E_S)^2} f_S$$

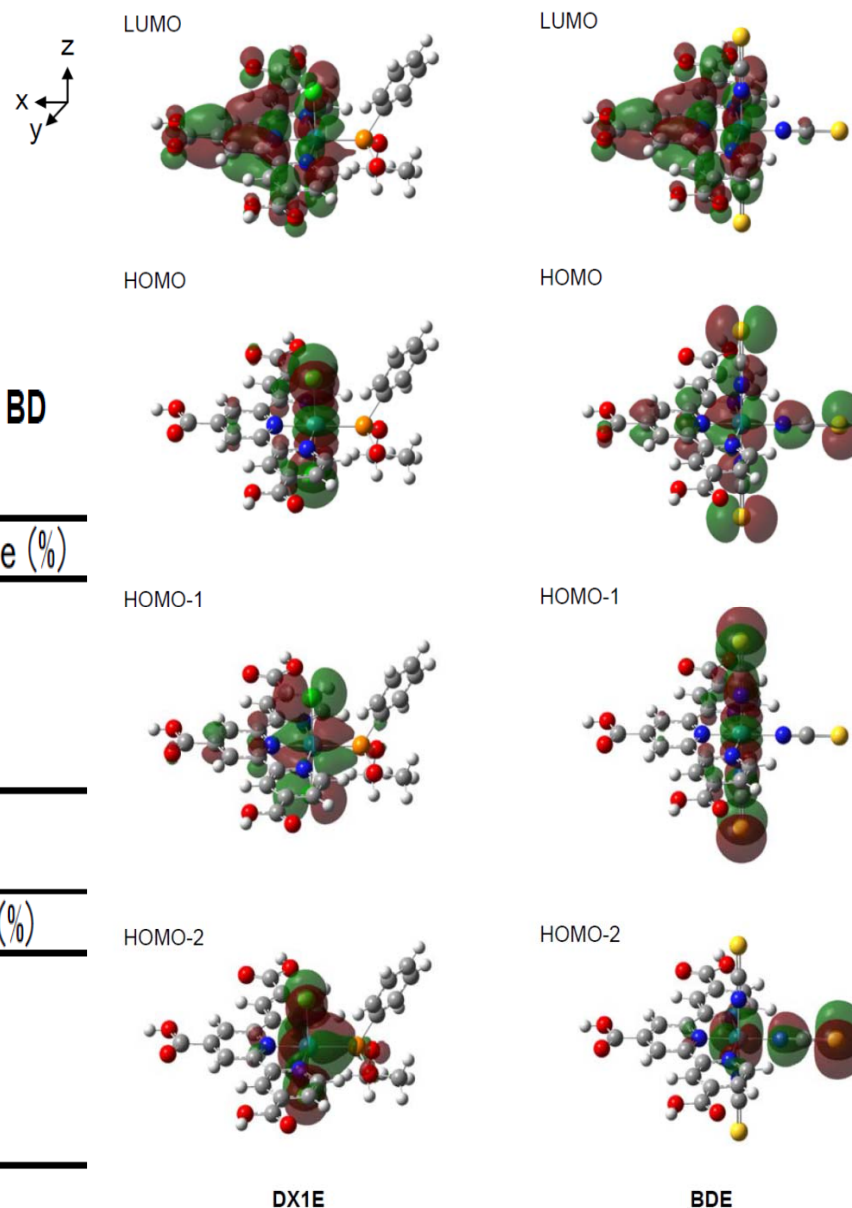
\* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature Photonics*, vol.7 (No.7), 535–539, supplementary information, p.3, copyright 2013.

Table S1. Molecular orbitals with dominant character (%) for DX1 and BD

| DX1     |                                 |        |             |               |
|---------|---------------------------------|--------|-------------|---------------|
| orbital | Ru (%)                          | Cl (%) | tcterpy (%) | Phosphine (%) |
| HOMO    | 63 ( $d_{yz}$ ), 1 ( $d_{xz}$ ) | 31     | 4           | 0             |
| H-1     | 54 ( $d_{xz}$ )                 | 40     | 2           | 3             |
| H-2     | 66 ( $d_{xy}$ )                 | 12     | 17          | 4             |

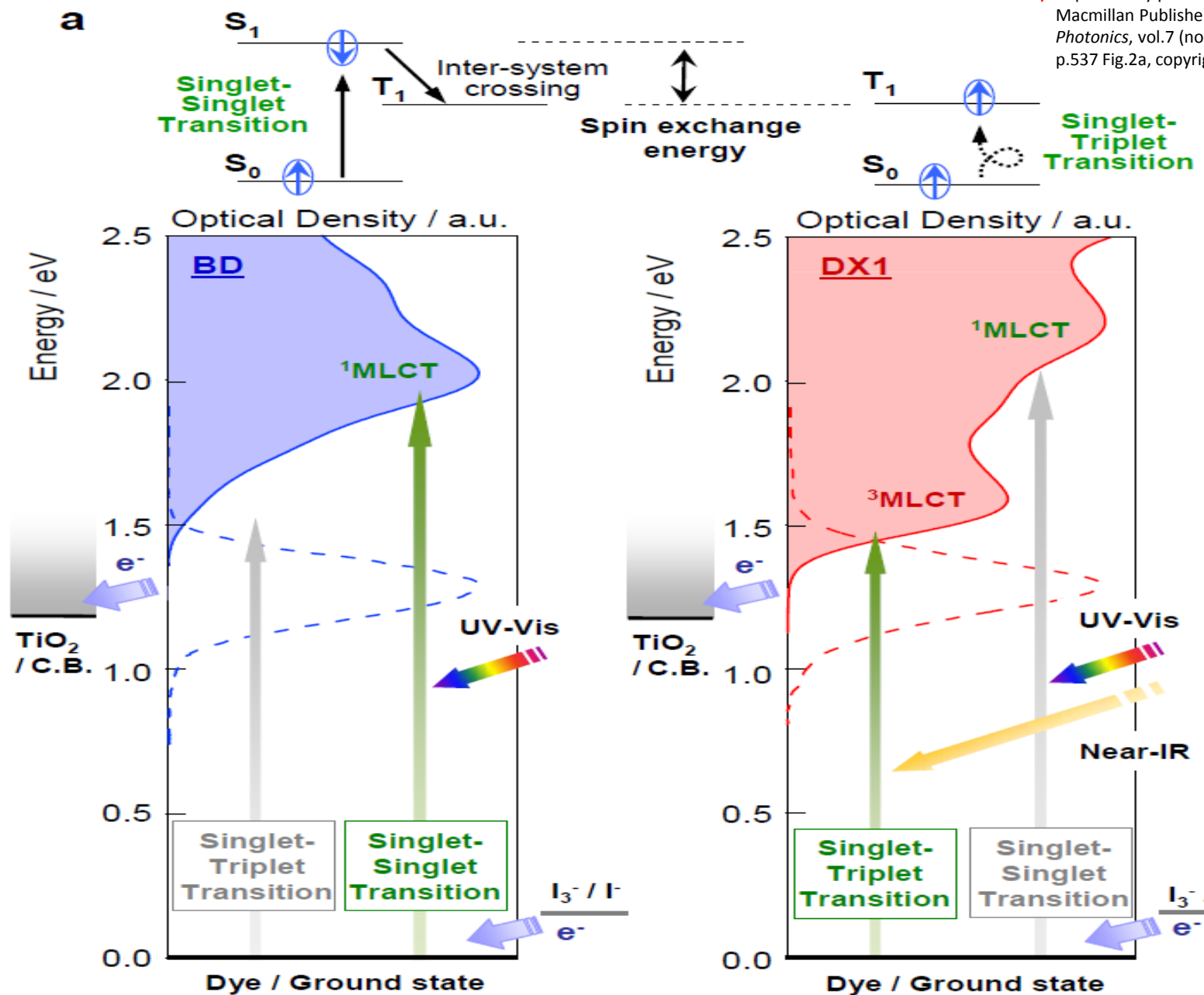
  

| BD      |                 |         |             |
|---------|-----------------|---------|-------------|
| orbital | Ru (%)          | NCS (%) | tcterpy (%) |
| HOMO    | 26 ( $d_{xz}$ ) | 61      | 12          |
| H-1     | 27 ( $d_{yz}$ ) | 69      | 4           |
| H-2     | 19 ( $d_{xy}$ ) | 69      | 11          |



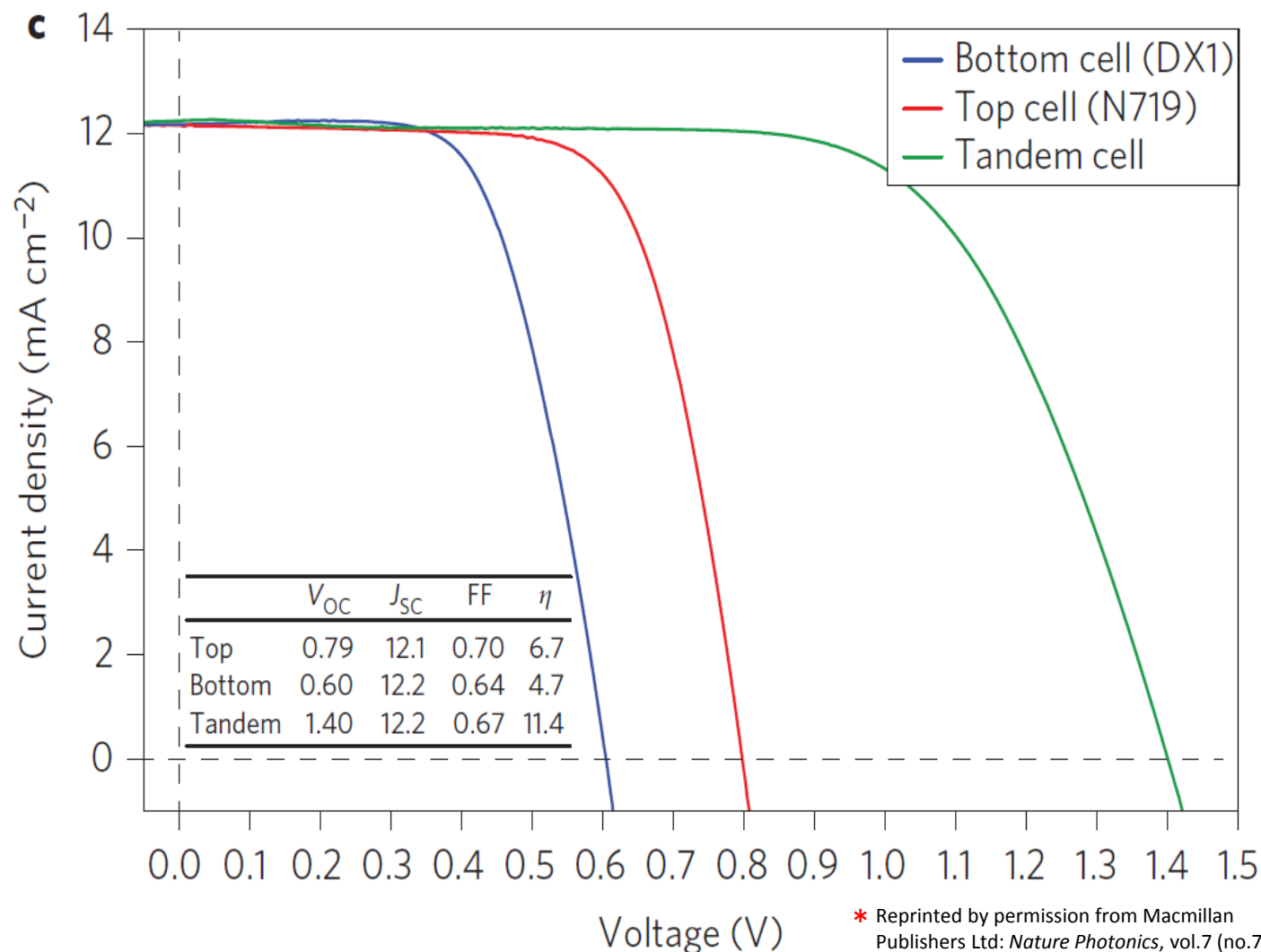
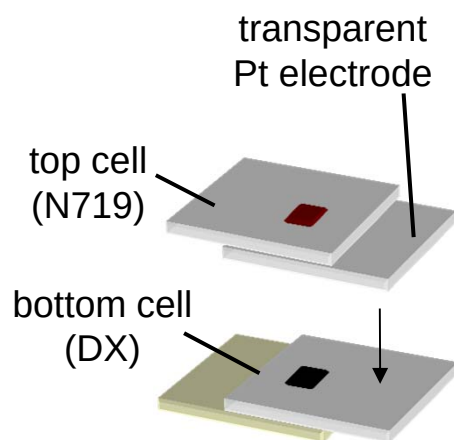
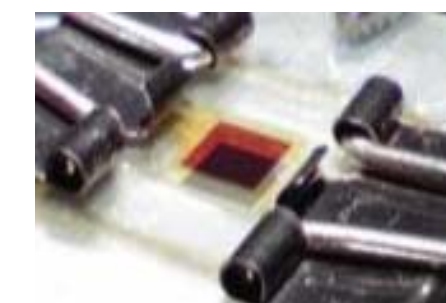
# Near-IR Sensitive Dye : Spin Management

\* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature Photonics*, vol.7 (no.7), 535–539, p.537 Fig.2a, copyright 2013



# (1) NIR-dye-sensitized Solar Cell

## Tandem DSSCs using Dye-X (DX1)



\* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature Photonics*, vol.7 (no.7), 535–539, p.538 Fig.3c, copyright 2013



# 太陽光発電のメリットとデメリット

## 1. 余剰電力の発生

【課題】 太陽光発電が増加すると、休日などの需要の少ない時期に、ベース供給力（原子力+水力+火力最低出力）と太陽光の合計発電量が需要を上回り、余剰電力が発生（右図）。

【対策】 蓄電池の設置、GWや年末年始などの低負担期における出力抑制、等

## 2. 出力の急激な変動

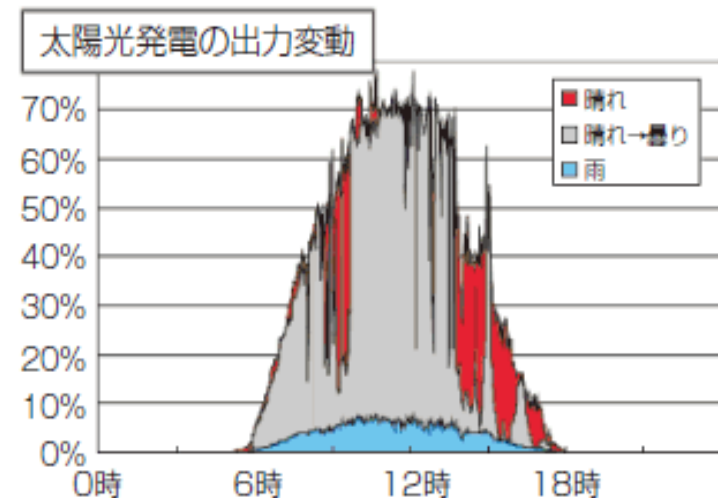
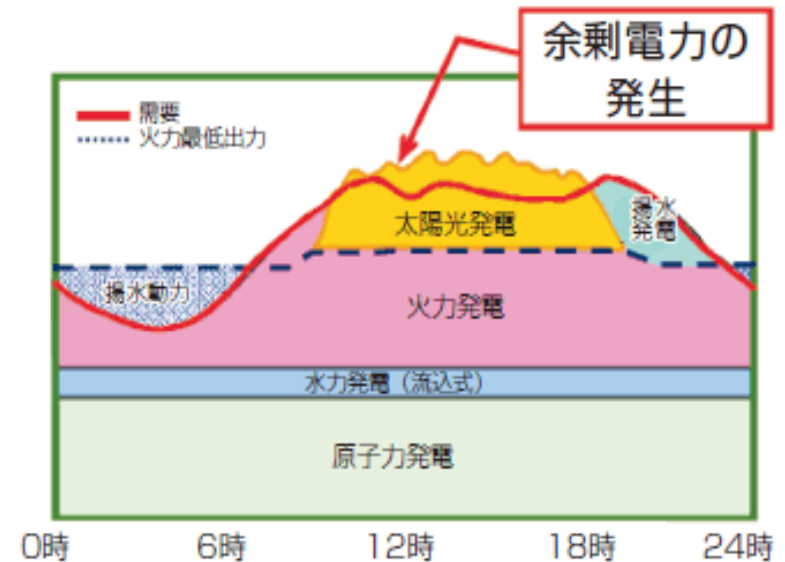
【課題】 太陽光発電の出力は、天候などの影響で大きく変動（右下図）。短期間の需給バランスが崩れると周波数が適正値を超えて、電気の安定供給（質の確保）に問題が生ずるおそれ。

【対策】 出力調整機能の増強、等

## 3. 電圧上昇

【課題】 太陽光パネルの設置数が増加した場合、配電網の電圧を適正値（ $101 \pm 6V$ ）にするため太陽光発電の出力を抑制せざるを得なくなるおそれ。

【対策】 配電網の強化（柱上変圧器の増設）、等



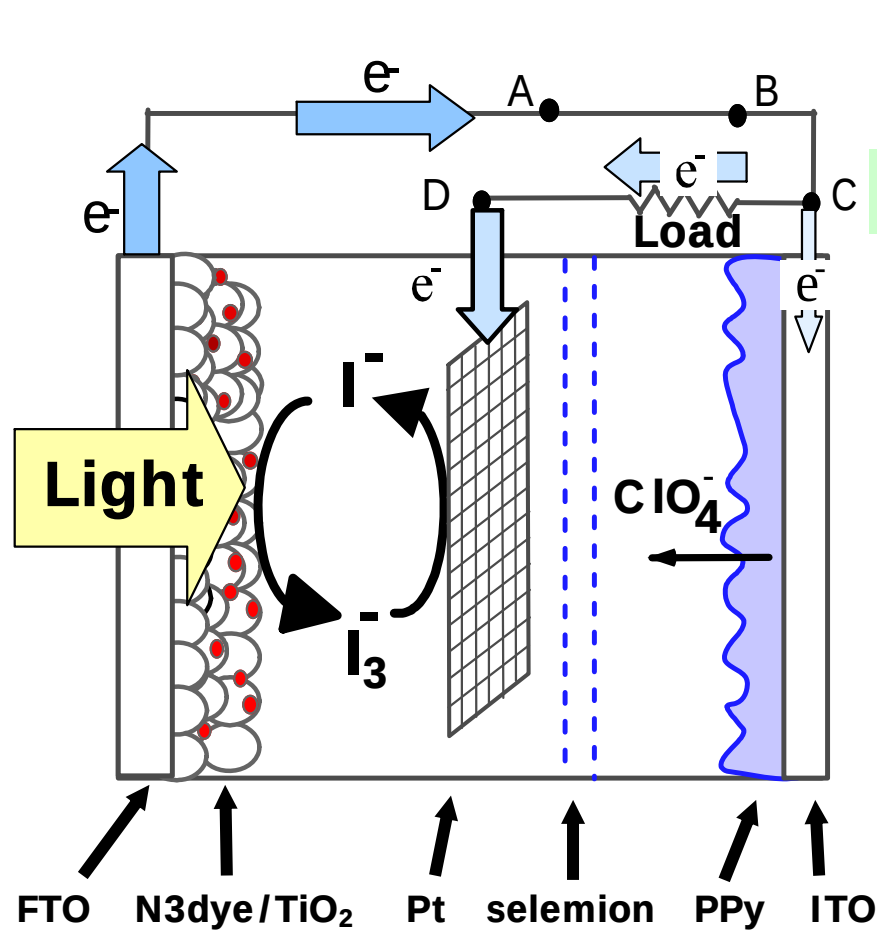
# 各種の蓄電池の性能とコスト

\* 資料出典: 経済産業省総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会(第31回)  
配付資料2-1、2009年2月、p3

※同一条件での比較ではないため、あくまで参考値

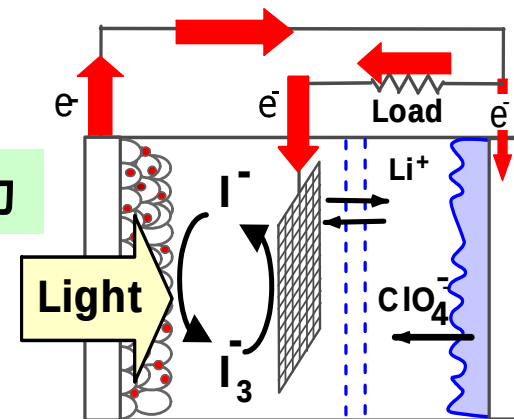
|                     | 鉛電池              | ニッケル水素電池         | リチウムイオン電池              | NAS電池               |
|---------------------|------------------|------------------|------------------------|---------------------|
| ※1<br>エネルギー密度       | 約35Wh/kg         | 約60Wh/kg         | 約120Wh/kg<br>~200Wh/kg | 約110Wh/kg           |
| ※2<br>寿命<br>(サイクル数) | 4500サイクル         | 2000サイクル         | 3500サイクル               | 4500サイクル            |
| 設置コスト<br>(万円/kWh)   | 5万円/kWh          | 10万円/kWh         | 20万円/kWh               | 4万円/kWh             |
| 動作環境                | -                | -                | -                      | 300℃程度の<br>高温環境が必要。 |
| <b>設置コスト<br/>寿命</b> | <b>11.1円/kWh</b> | <b>50.0円/kWh</b> | <b>57.1円/kWh</b>       | <b>8.8円/kWh</b>     |

# 蓄電機能を内蔵した太陽電池の基本的な機能

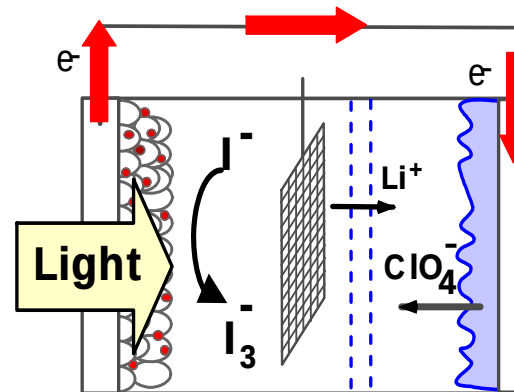


電荷蓄積電極はITO上にピロールを電解重合  
 充電状態は、ポリピロールが脱ドーブした状態  
 放電でポリピロールはドーブ(I<sub>3</sub><sup>-</sup>で電解酸化)

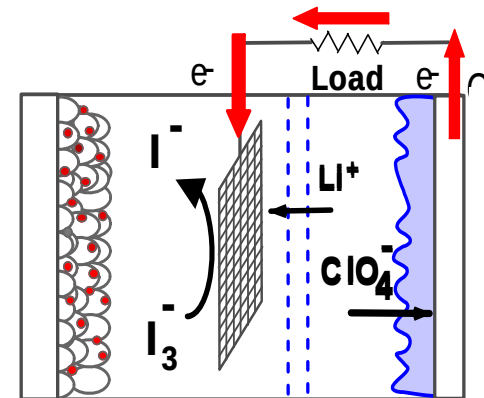
太陽電池出力



光充電



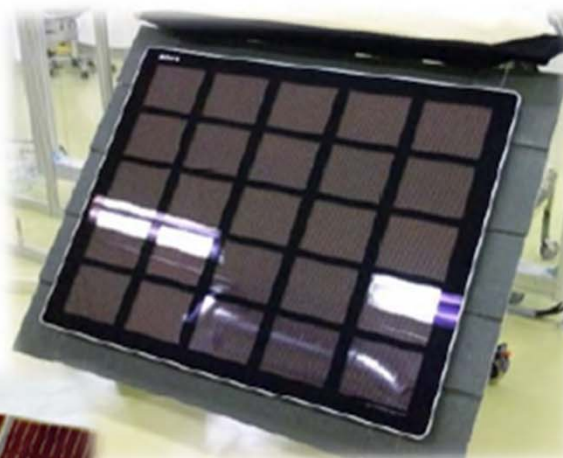
放電



# 太陽電池の分類と有機系太陽電池 (有機薄膜太陽電池、色素増感太陽電池)



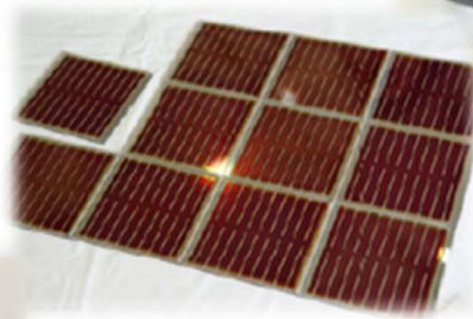
\* 画像提供: アイシン精機株式会社



\* 画像提供: ソニー株式会社



\* 画像提供: ソニー株式会社

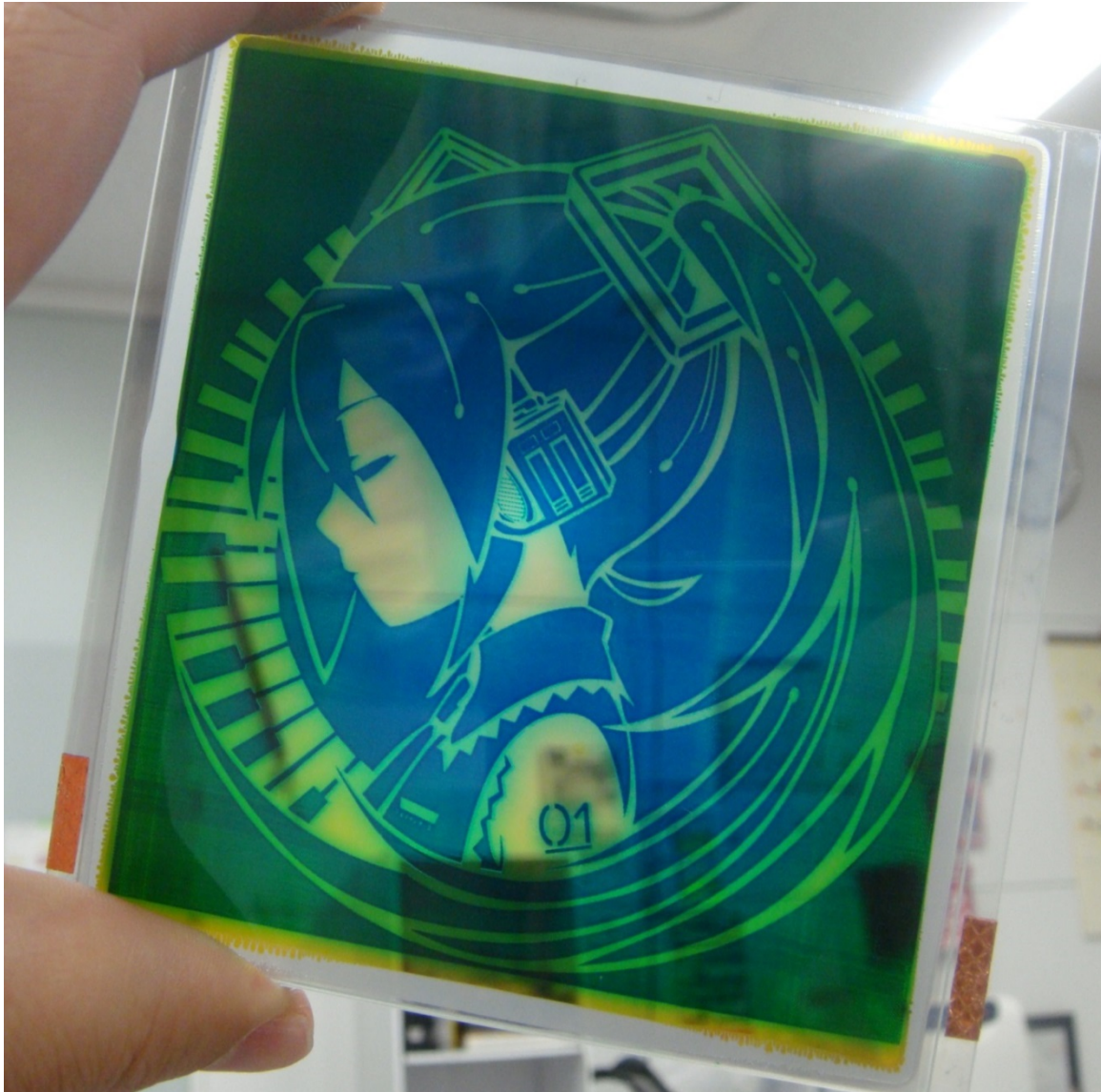


\* 画像提供: ソニー株式会社





# Hatsune Miku DSSC !



Hatsune Miku by Crypton Future Media  
CC BY-NC 3.0

Hatsune Miku is a singing synthesizer application with a humanoid persona, developed by Crypton Future Media.



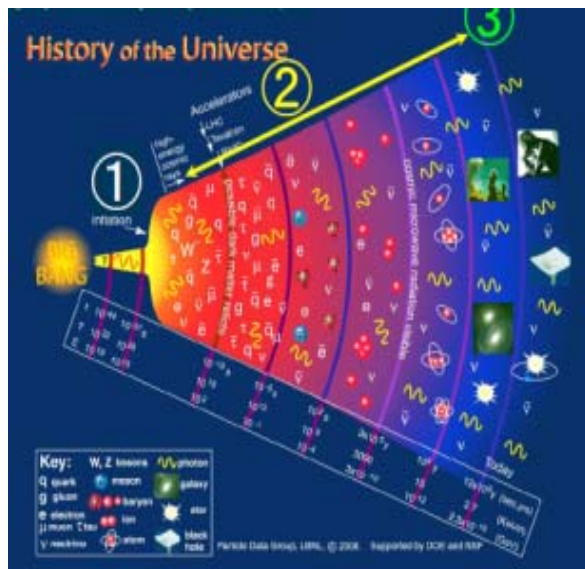
# 日仏次世代太陽電池プロジェクト Next PV (CNRS-RCAST/UT)

Mrs Fioraso, French Minister for Higher Education and Research



# 物質科学は未来の世代への贈り物.....「宝探し」

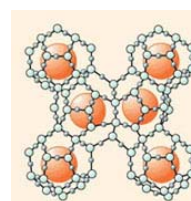
素粒子 原子 分子 無機化合物 有機化合物  
宇宙や天体を構成する物質 生命を形作る物質  
金属 半導体 高分子 医用材料 エネルギー



\* Particle Data Group, Lawrence Berkeley National Lab



\* イラスト出典: 須藤靖『ものの大きさ: 自然の階層・宇宙の階層』東京大学出版会、2006年、p.142 図6.1 作画: いずみりょう



メタンハイドレートの分子構造  
○はメタン分子、●は酸素原子、○は水素原子を表す。



\* 相田卓三教授提供

奥田義久 (1997)  
「メタンハイドレート  
特集にあたって」『地  
質ニュース』第510号、  
6-11、p.6 図1 CC BY

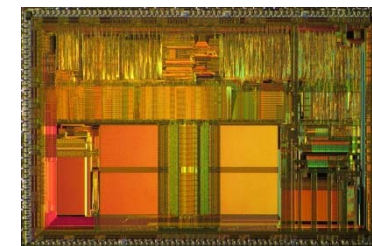
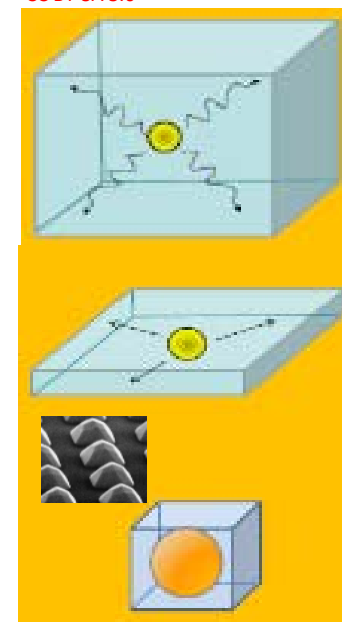
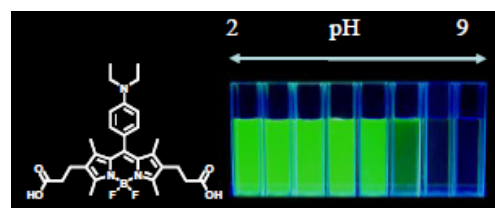


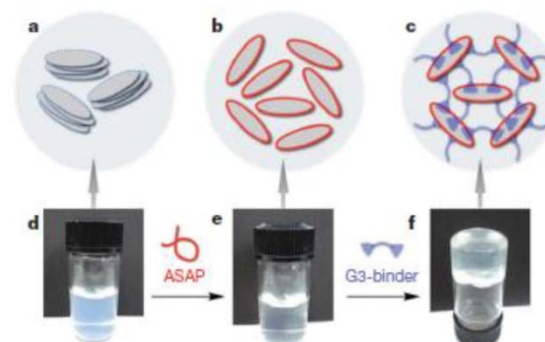
Photo by Pauli Rautakorpi, from Wikimedia Commons  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:In tel\\_80486SX2\\_die.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:In tel_80486SX2_die.JPG)  
CC BY-SA 3.0



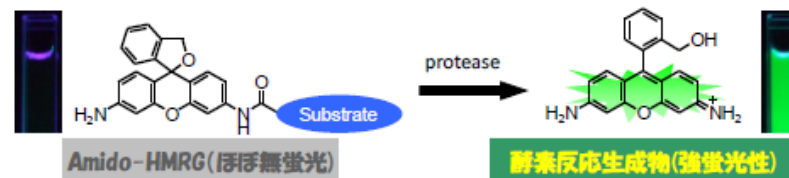
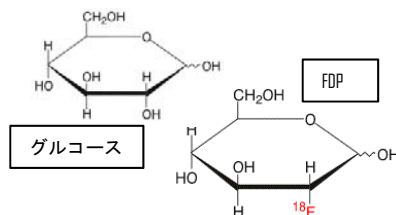
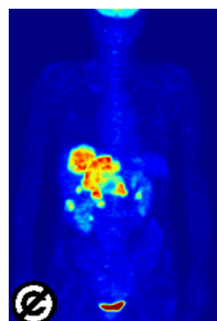
\* 東京大学 UTokyo OCV 学術俯瞰講義  
Copyright 2013, 荒川 泰彦



\* 東京大学 UTokyo OCV 学術俯瞰講義 Copyright 2013, 浦野 泰照



\* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd:  
Nature, vol.463 (no.7279):269-392, p.340 Fig.2, copyright 2010



\* 東京大学 UTokyo OCV 学術俯瞰講義 Copyright 2013, 浦野 泰照



Photo by PiccoloNamek, from Wikimedia Commons  
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBG-LED.jpg>  
CC BY-SA 3.0