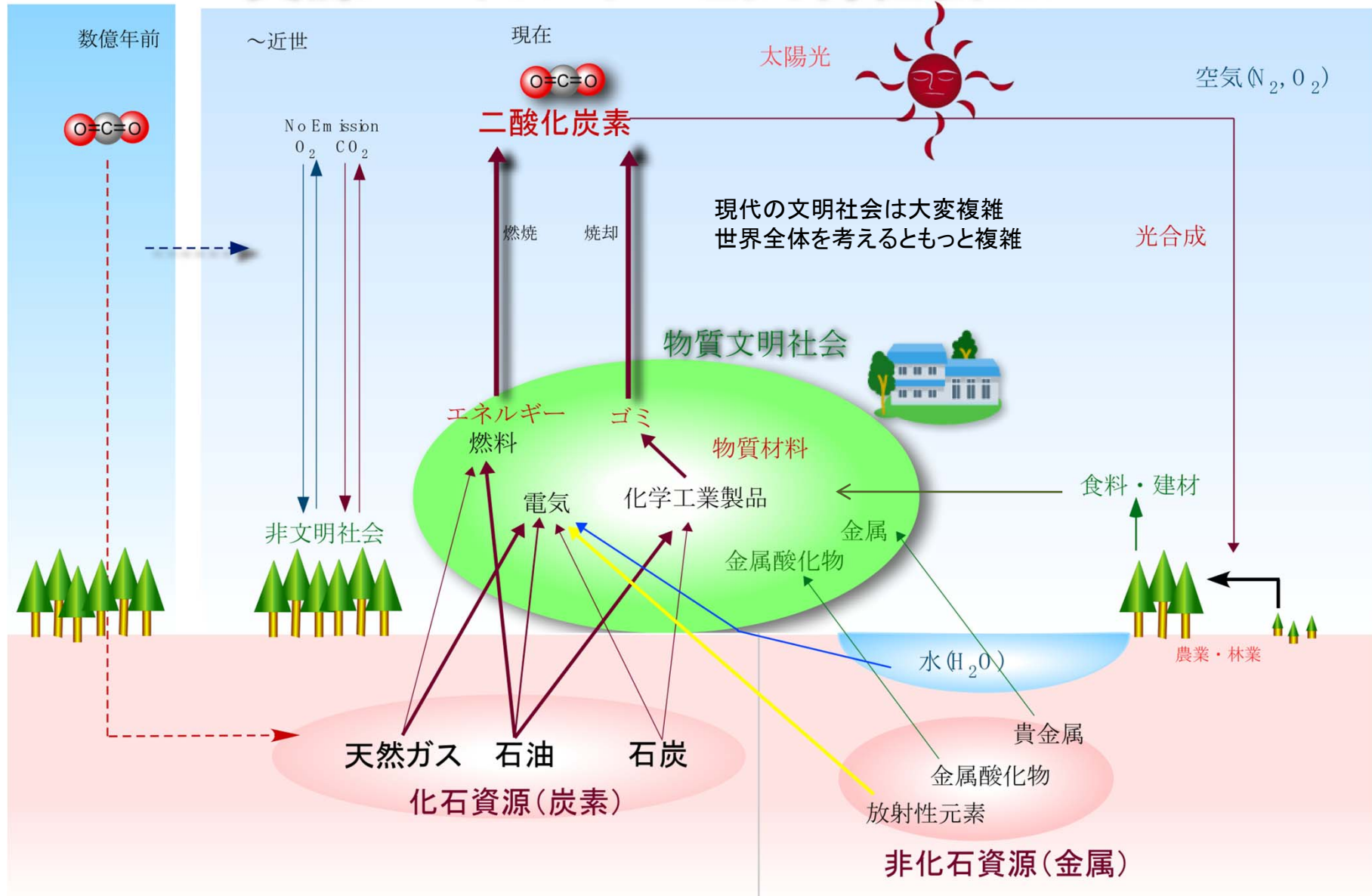


# 資源・エネルギー

資源やエネルギーの将来(問題)を  
科学的視点で考えるための基礎知識と  
関連する先端科学技術を紹介する

2010.9.6  
IBU先端技術  
担当・棚瀬知明  
奈良女子大学理学部化学科

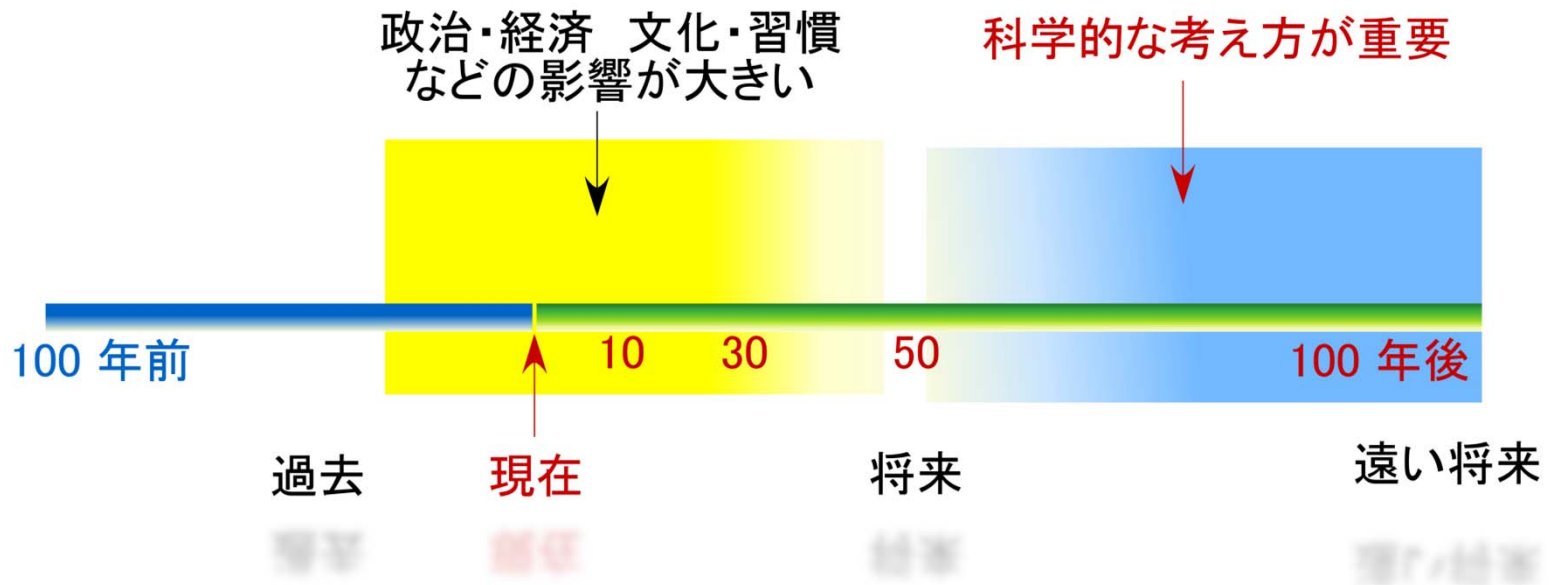
# 資源・エネルギーと文明社会



# 資源・エネルギーの未来を考えるには

惑わされないためにはどうすればよいのか？

将来進むべき正しい方向を見失わないためには？



# 講義の内容

## 1) エネルギー資源と今後の課題

資源・エネルギーに関する現状と将来像

## 2) 太陽エネルギー

太陽電池

## 3) 水素エネルギー

燃料電池、人工光合成(水の光分解)

## 4) 炭素資源の有効利用

石炭の利用と触媒、二酸化炭素の地中貯留

## 5) 省エネルギー技術

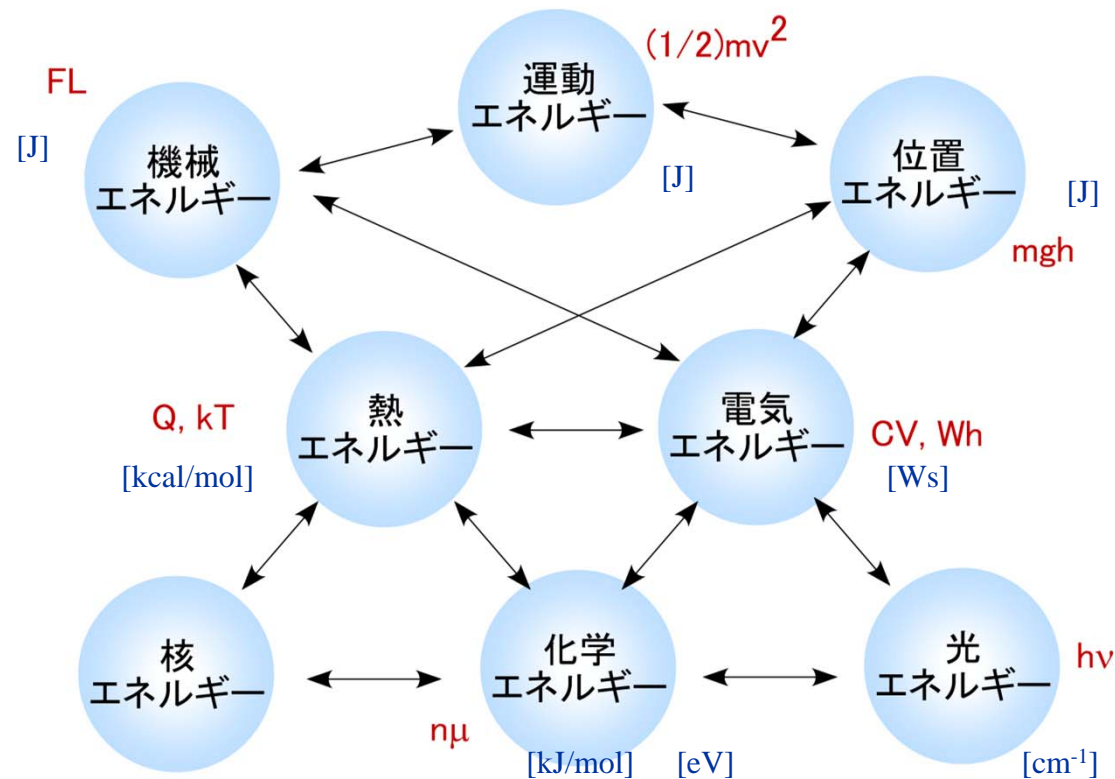
高温超電導材料

## 6) 原子力エネルギー

核燃料、核融合

# エネルギーとは

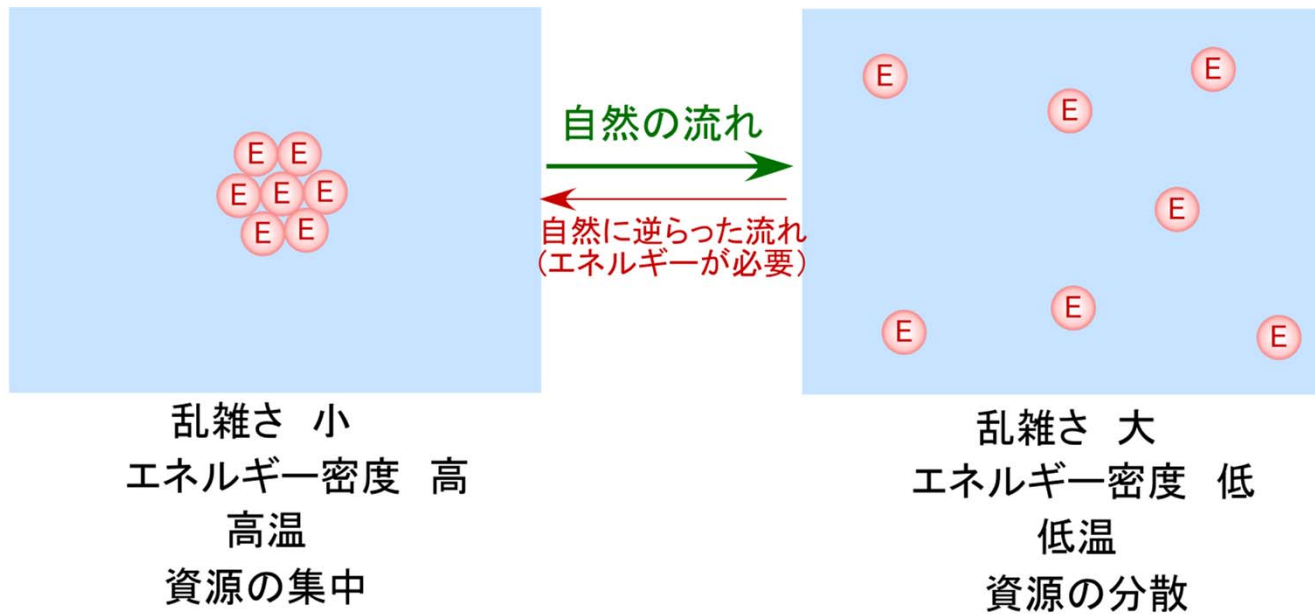
エネルギーとは何らかの**仕事**をすることができる能力(量)で、様々種類がある



エネルギーは相互変換可能だが、無から生じることはない！  
(エネルギー保存則・熱力学第一法則)

# エネルギーとは

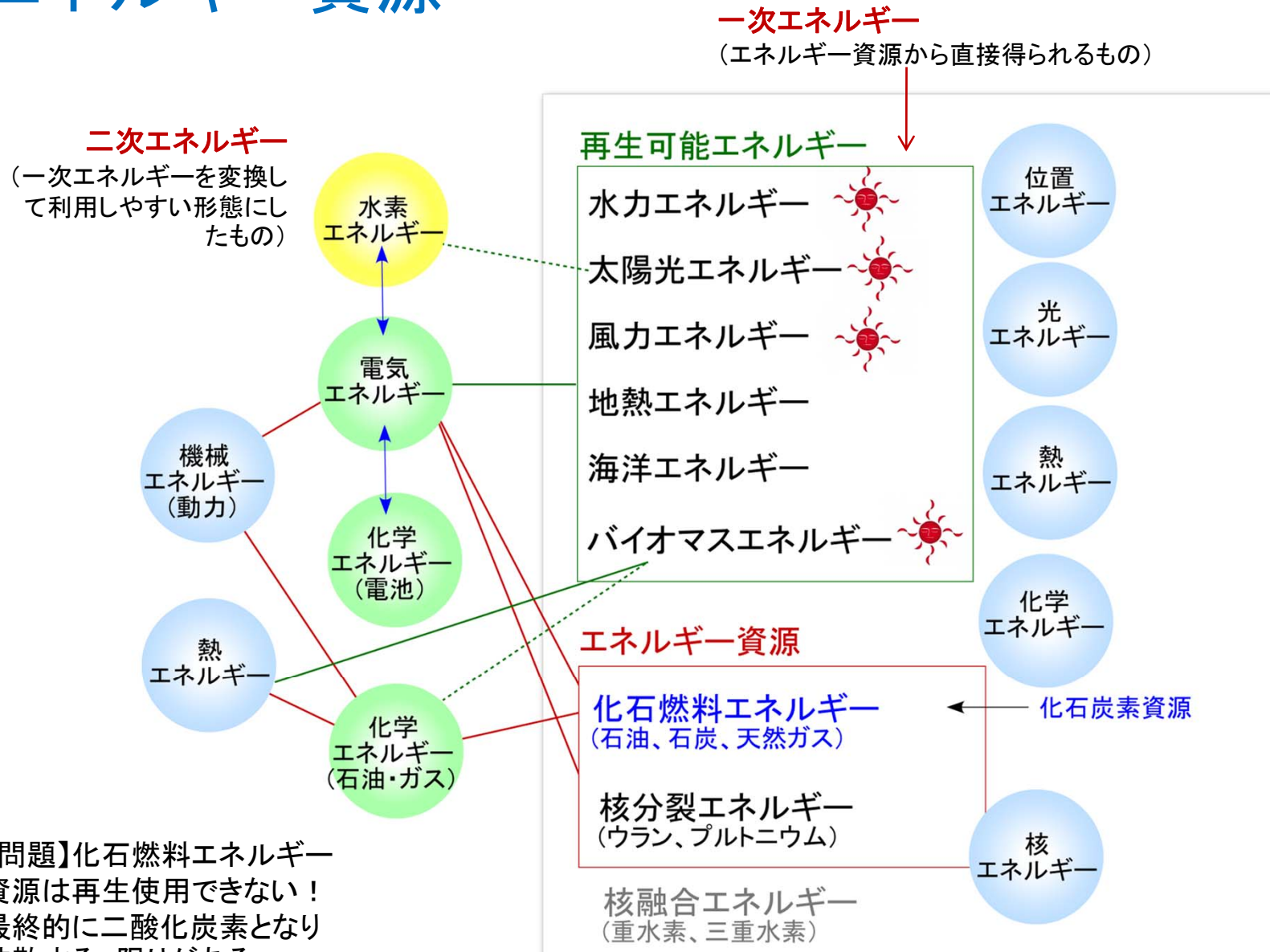
エネルギーの流れと質には一定の方向がある(熱力学第二法則)



乱雑さ(エントロピー)は増大する

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

# エネルギー資源



# エネルギー資源の消費

## 世界の一次エネルギー消費量 (石油換算億トン, 2003年現在)

石油	35.3 (37.5%)	アメリカ	22.98 (23.6%)
石炭	24.0 (25.5)	中国	11.78 (12.1)
天然ガス	22.9 (24.3)	ロシア	6.71 (6.9)
原子力	6.1 (6.5)	日本	5.05 (5.2)
水力	5.9 (6.3)	インド	3.45 (3.5)
		ドイツ	3.32 (3.4)
		カナダ	2.91 (3.0)
		フランス	2.61 (2.7)
		イギリス	2.23 (2.3)
		韓国	2.12 (2.2)
		その他	34.19 (35.1)
世界計	94.05 (100)	世界計	97.41 (100)

BP統計2003

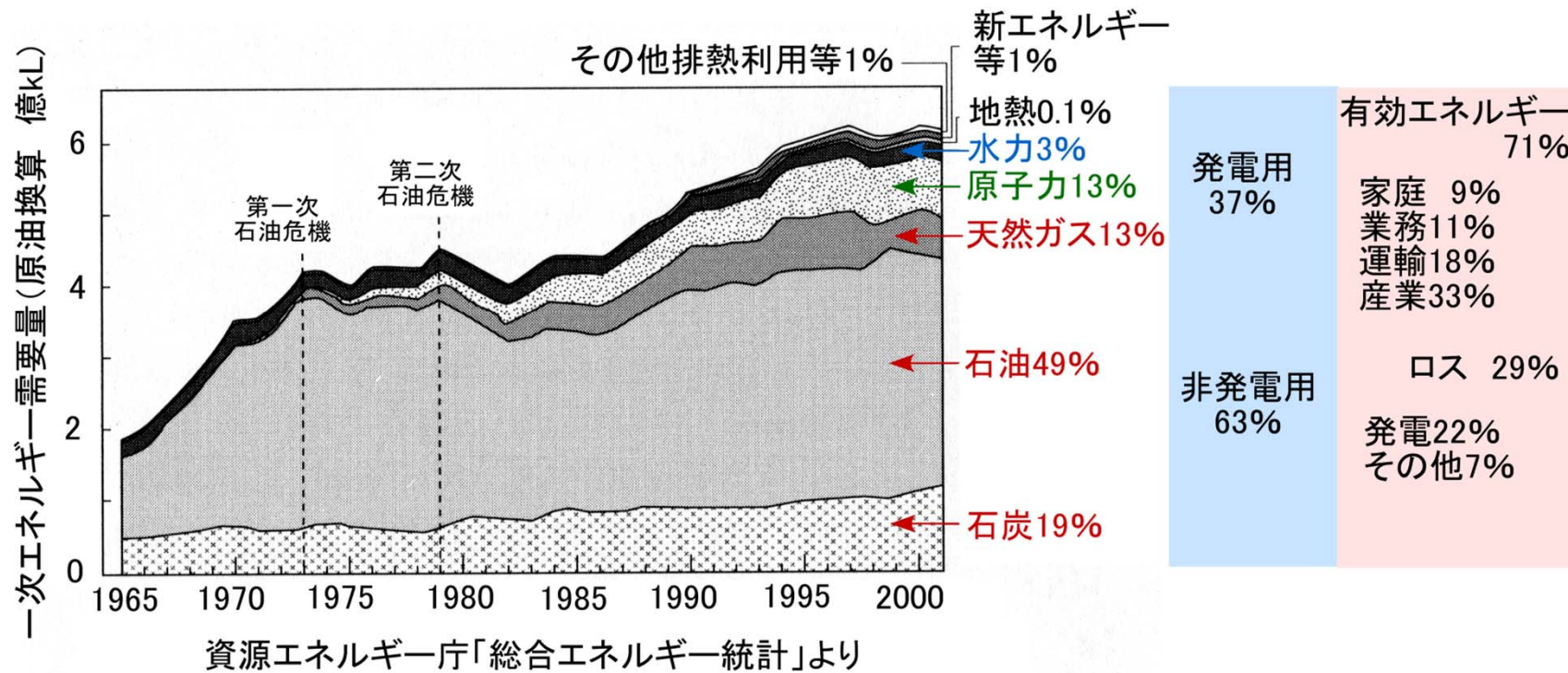
BP統計2004

再生できない化石資源と原子力で  
90%以上を占めている。

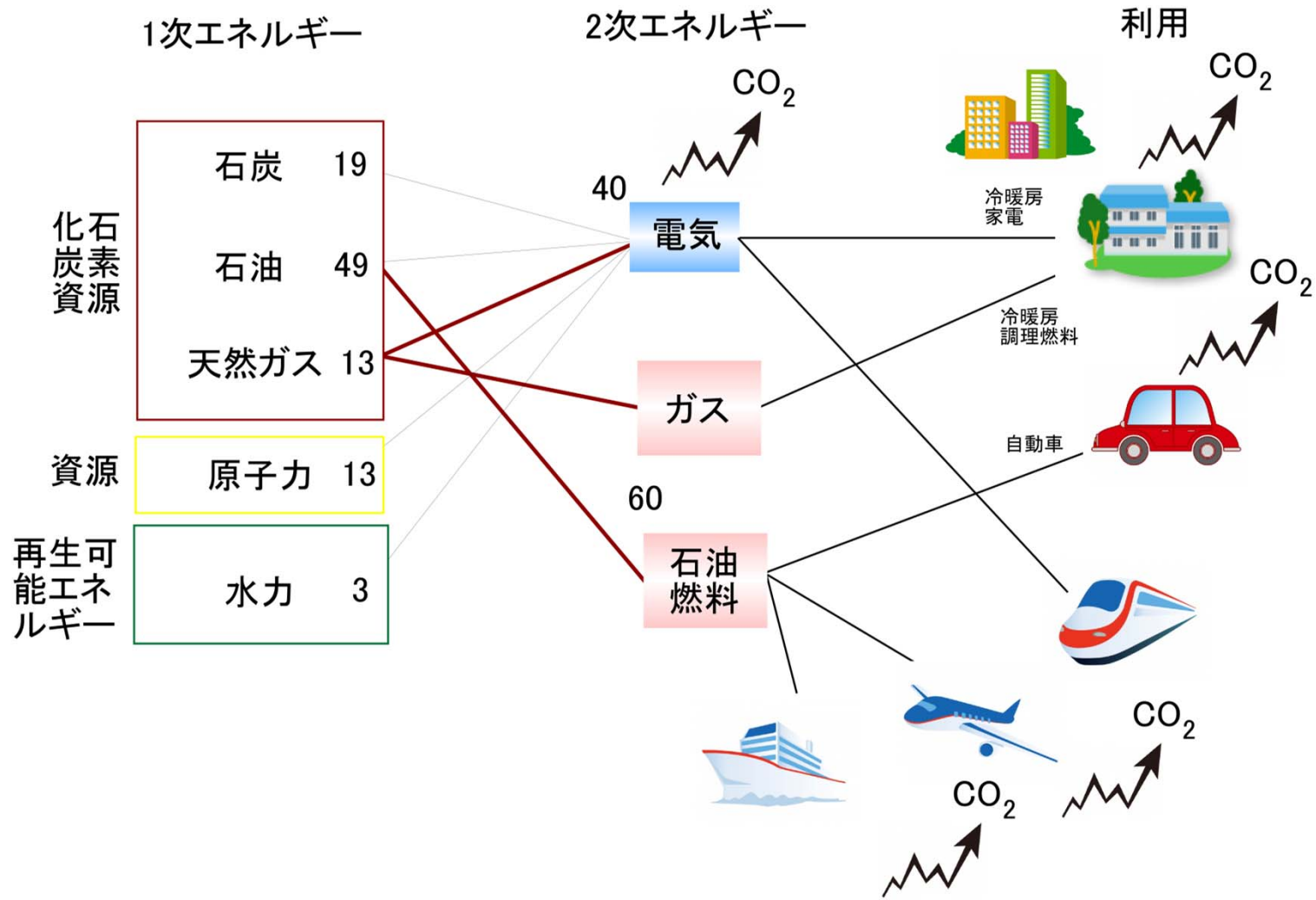
Cf) 石油換算億トン(MTOE = 10<sup>6</sup> tons oil-equivalent)



# わが国の一次エネルギー需要の推移



# わが国の現在のエネルギー利用



# エネルギー資源の枯渇

## 主な資源の埋蔵量と寿命(可採年数)

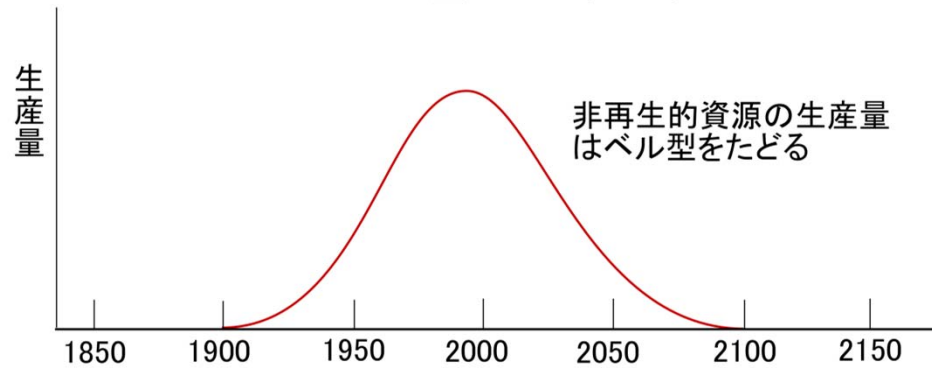
資源	確認可採埋蔵量 (R) <sup>a)</sup>	年間生産量 (P)	寿命 (R/P)
石油	1.05兆バレル	250億バレル	41年(41年)
石炭 <sup>b)</sup>	5200億トン	35億トン	148年(164年)
天然ガス	156兆m <sup>3</sup>	2.5兆m <sup>2</sup>	61年(67年)
ウラン <sup>c)</sup>	393万トン	6.2万トン	61年(85年)
鉄	700億トン	11.2億トン	63年
銅	4.7億トン	1390万トン	34年
ニッケル	0.62億トン	140万トン	44年

a)現在の技術と経済性に見合っ採掘されうる量。B)高品位炭の量。c)経済性のある資源の量  
d)1バレル=159リットル

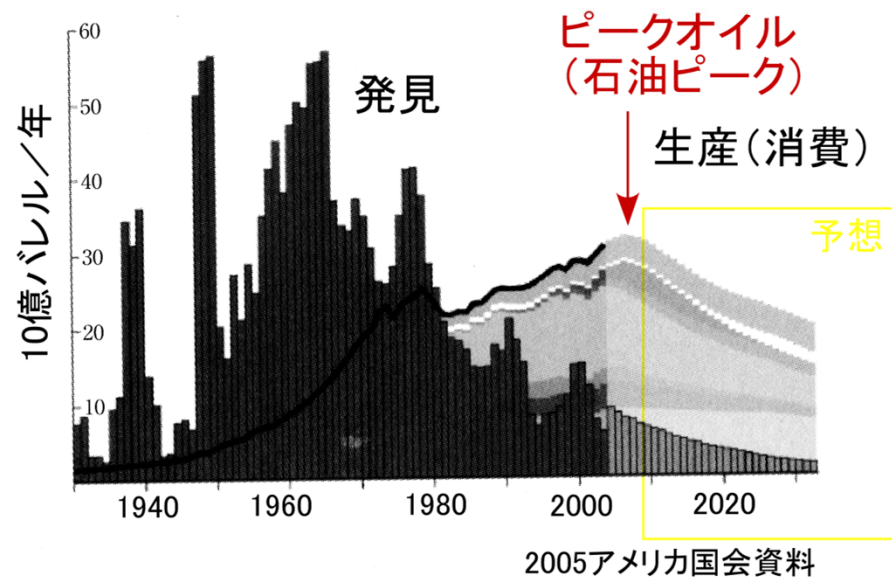
2004米国地質調査資料、2003(2005)年BP統計  
「資源・エネルギー工学要論」第2版 世良力 東京化学同人(2005)

# 非再生エネルギー資源の生産と消費

ハバートのベル型カーブ(1976)

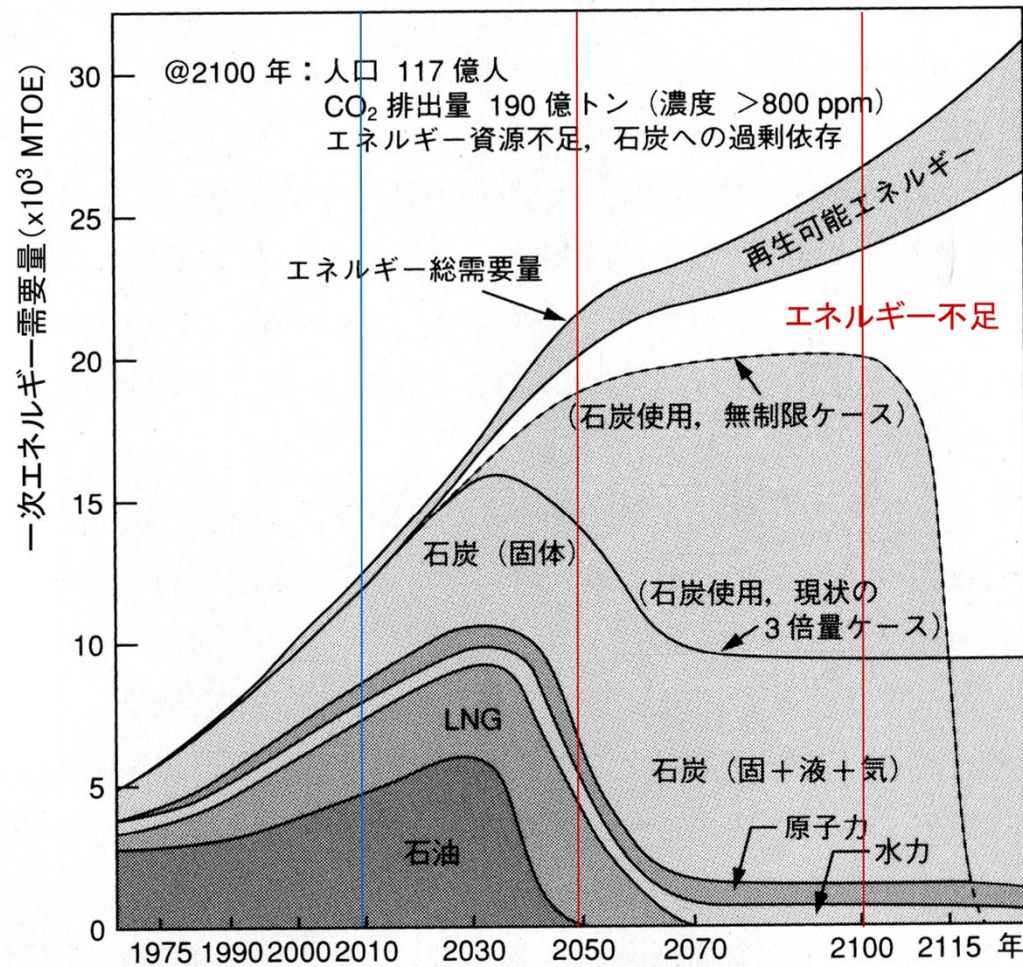


油田の発見と消費量の差





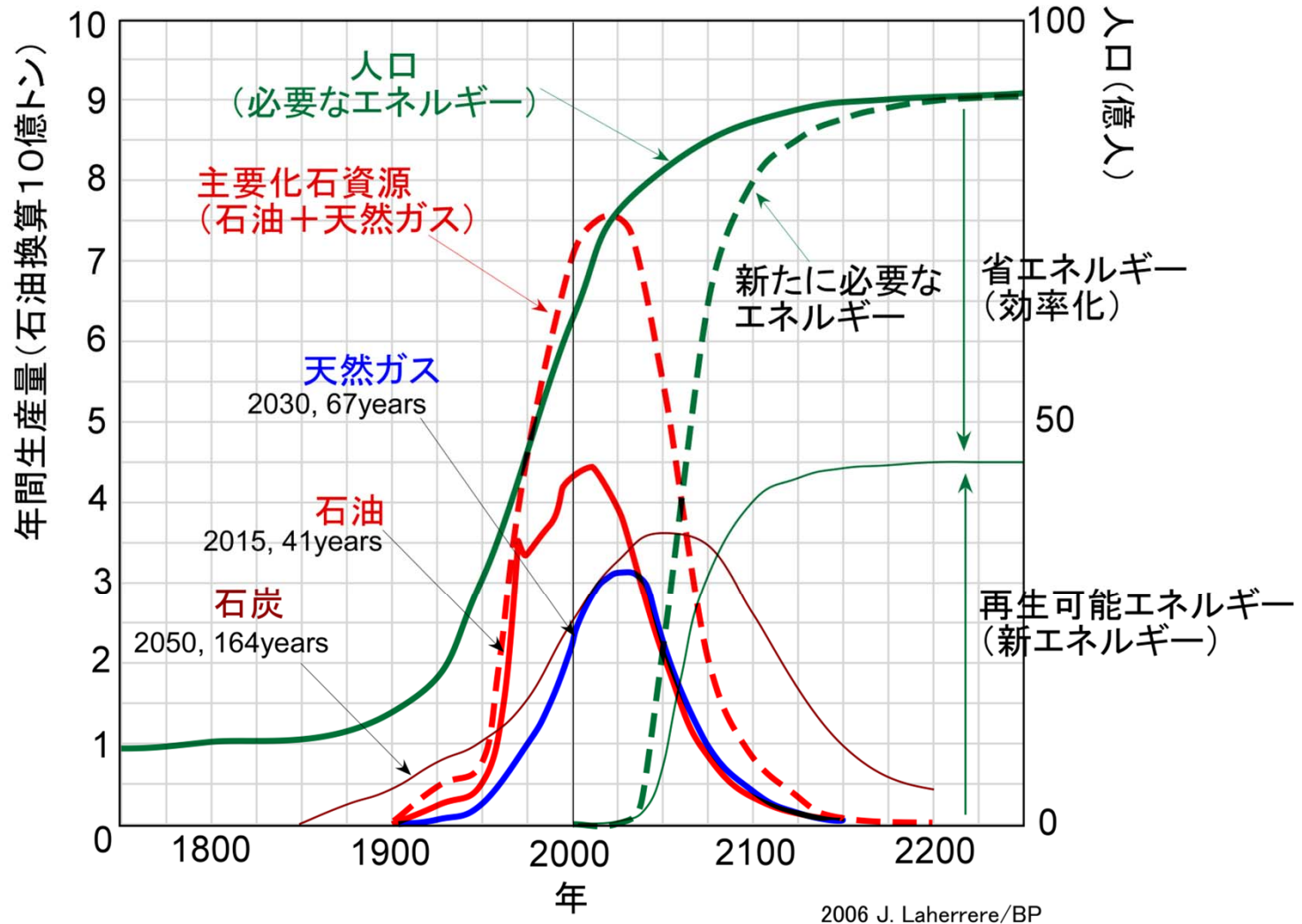
# 21世紀のエネルギー需要予測(現状推移モデル)



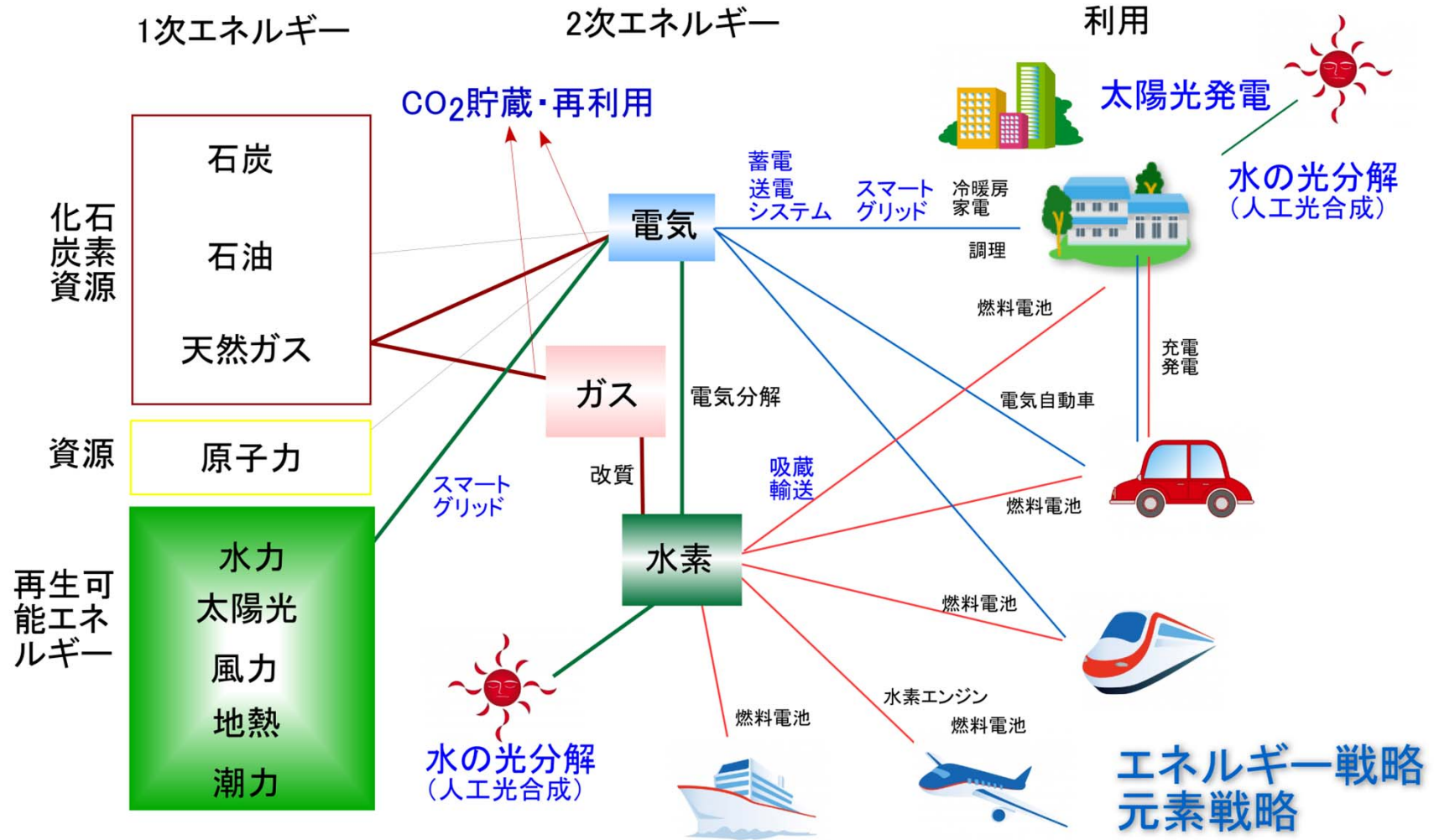
(財)日本エネルギー経済研究所資料より

# 21世紀のエネルギー需要(単純化したもの)

世界の一次エネルギー生産と人口予想



# 将来目指すべきエネルギー社会



# 資源エネルギー問題を解決するための課題

## 1) 再生可能エネルギーの利用

太陽光発電、風力発電、地熱発電など

## 2) 機能的な電力供給利用システムの開発

スマートグリッド、超伝導送電システム、モーター

## 3) 蓄電システムの開発

二次電池、キャパシタ

## 4) 水素エネルギーの利用

燃料電池、水素発生(人工光合成)、水素貯蔵・運搬

## 5) 省エネルギーシステムの開発

高効率化(電子デバイス、触媒など)、資源ごみのリサイクル

## 6) 二酸化炭素の貯留と利用

地中貯留、人工光合成、触媒

## 7) 石炭やメタンの有効利用

New C1 Chemistry

## 8) 核エネルギーの安全利用

## 9) 核融合エネルギーの開発



# 太陽エネルギーの利用

## 特徴

- 1) 太陽エネルギーは無限の再生可能エネルギー
- 2) 地球に注がれる太陽エネルギー1時間分( $173 \text{兆kW} \times 70\% = 120 \text{兆kW}$ )が世界の1年分のエネルギー消費量に相当！  
  
1.38 kW/m<sup>2</sup>(大気圏外) 約1 kW/m<sup>2</sup>(地表・晴天昼間平均)
- 3) 太陽光には様々な波長の光(電磁波)が含まれている
- 4) エネルギー密度が低い(分散型利用に向いている)
- 5) 時間・場所・気候変動が大きい(蓄電との組み合わせが必要)
- 6) 太陽エネルギーの変換効率は依然低い(研究開発が必要)

# 太陽光について

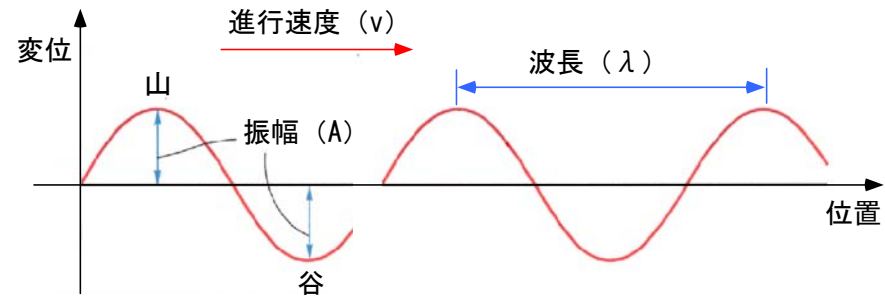
光は光速で進む電磁波、つまり「波」

$$\begin{aligned} \text{光速 } c &= 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \\ &= \lambda \times \nu \end{aligned}$$

光はエネルギーは振動数に比例する

$$E = h \nu = hc / \lambda$$

光のエネルギー [J]      プランク定数  $h = 6.6 \times 10^{-34}$  [Js]      振動数 [1/s]



波長(λ): 波の繰り返し単位の長さ [m]

振動数(ν): 1秒間にいくつの波がやってくるか [s<sup>-1</sup>] = [Hz]

波の速度(v): 1秒間に波が進む距離 [m/s]

$$= \text{波長} (\lambda) \times \text{振動数} (\nu)$$

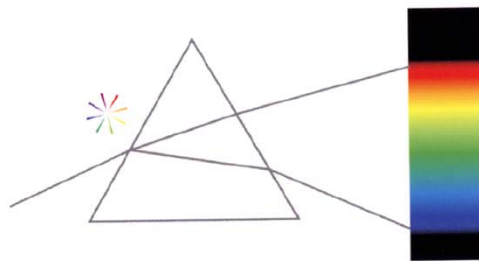
光量子 (photon) 説 アインシュタイン



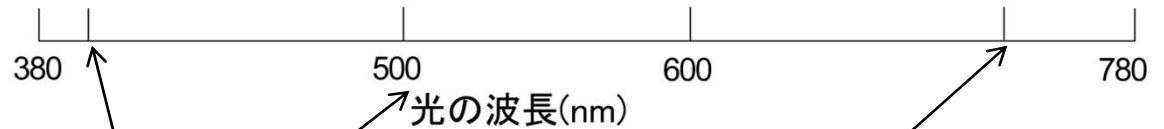
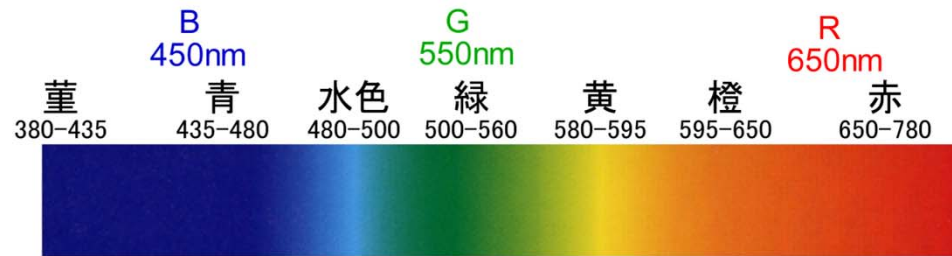
光は  $E = h\nu$  のエネルギーをもつ粒子

# 太陽光について

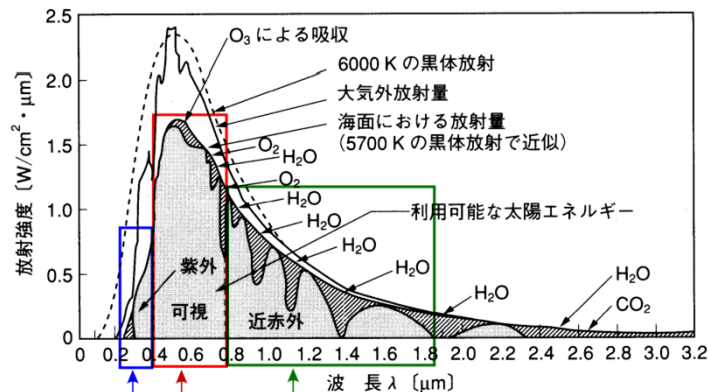
エネルギーによっていろいろな性質(種類)の光(電磁波)がある



プリズムで太陽光(白色光)を分解すると



太陽光の分光強度特性



紫外 UV  
可視 Vis  
近赤外 Near IR

300 kJ/mol (3.1 eV)      240 kJ/mol (2.5 eV)      170 kJ/mol (1.8 eV)

電磁波のエネルギー

大 ←      小

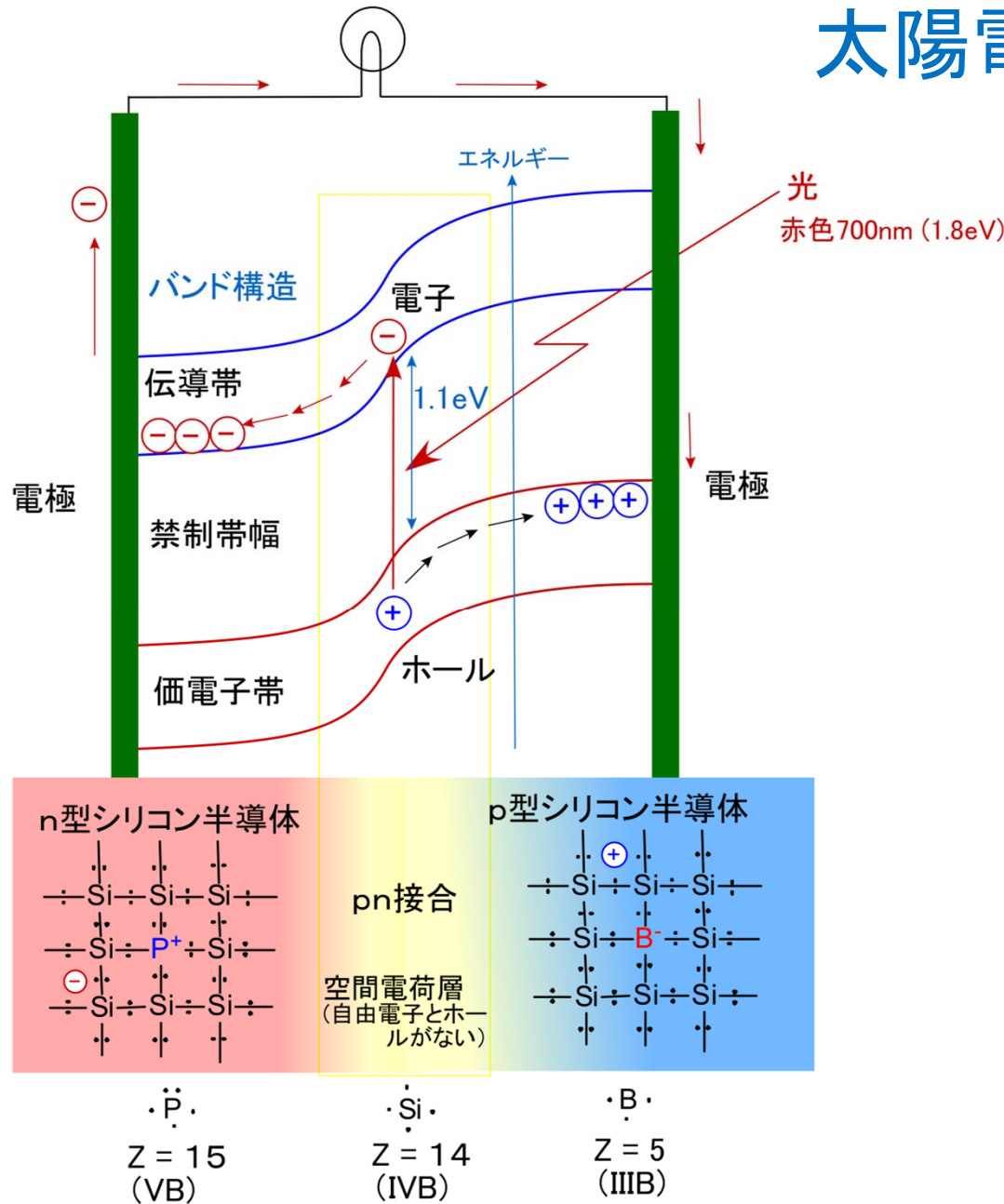
高い ←      低い

短い ←      長い

振動数 (ν)

波長 (λ)

# 太陽電池 (Solar Cell)



pn接合シリコン単結晶を用いた太陽電池(太陽光発電)の仕組み

1954 Person(米国)  
 起電力 1.0-1.2 V  
 変換効率 ~20% (10-16 %)  
 全太陽電池の約80%(2008)  
 (単結晶34%、多結晶48%)

エネルギー償還年数  
 (EPT = energy payback time)  
 = (年間生産されるエネルギー/製造に要したエネルギー)  
 2-3年(住宅用)、3-5年(産業用)

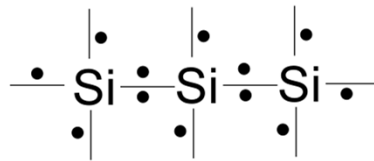
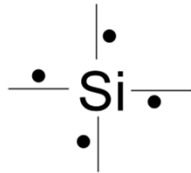
経済収支  
 (年間生産されるエネルギー価値) x (使用年数) - (設置コスト)

発電コスト 45-65円/kWh (2003)  
 (住宅用電力料金 20-30円/kWh)  
 買い取り制度 50円/kWh

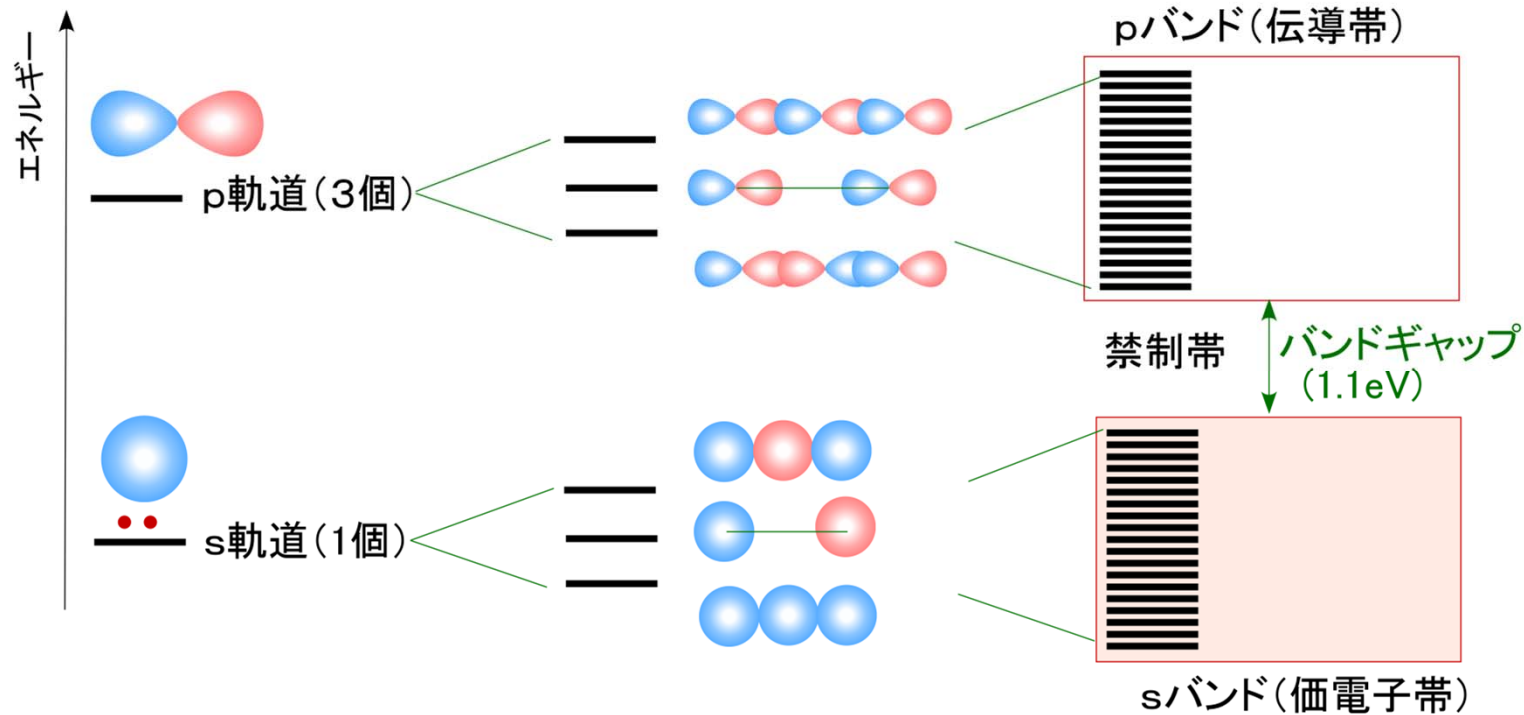
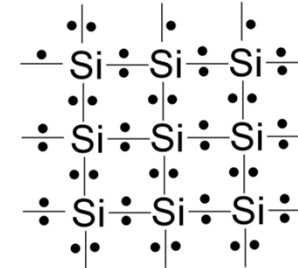
シリコン結晶はかなり高価

# シリコン結晶の電子状態(バンド構造)

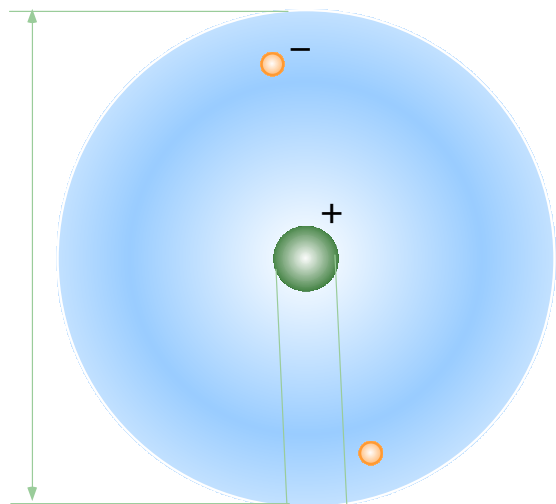
シリコン原子



シリコン結晶



# 【復習】 原子の基本構造



~ $10^{-10}$  m  
 ~0.1 nm  
 ~1 Å

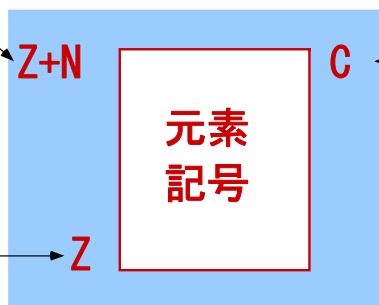
~ $10^{-14} \sim 10^{-15}$  m

	記号	数	質量	電荷
電子	$e^-$	Z	$9.1096 \times 10^{-31}$ kg	$-1.60218 \times 10^{-19}$ C
原子核	陽子	Z	$1.6726 \times 10^{-27}$ kg	$+1.60218 \times 10^{-19}$ C
	中性子	N	$1.6749 \times 10^{-27}$ kg	

$e$  ( $1.60218 \times 10^{-19}$  C) : 電気素量

Z+N : 質量数

Z : 原子番号



電荷/e (イオンの場合)



陽子の数で原子の種類 (元素) が決まる!

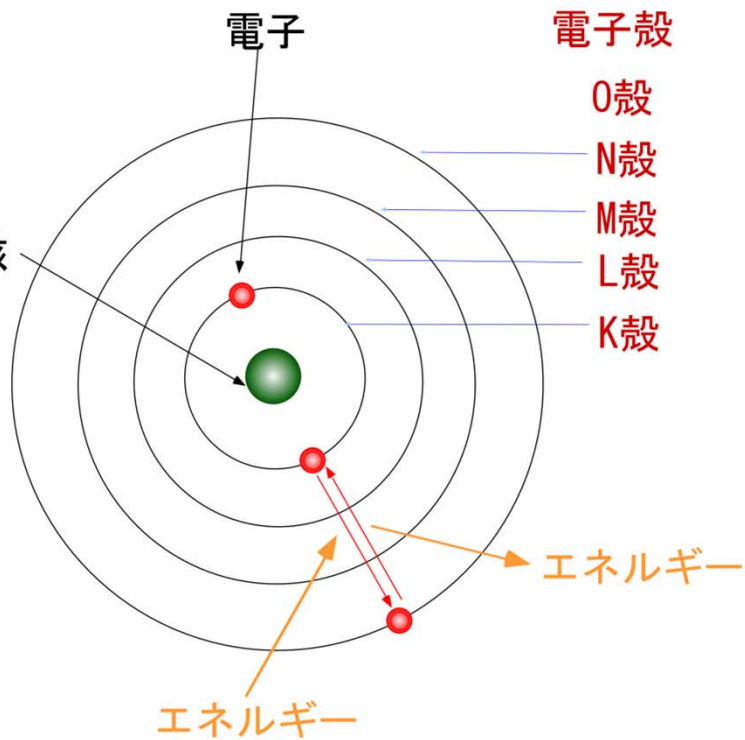
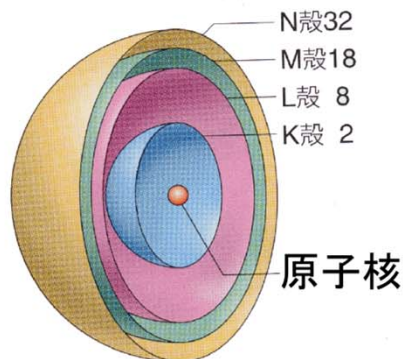
【復習】

# 電子殻と電子配置

ボーアの原子模型  
(1911)



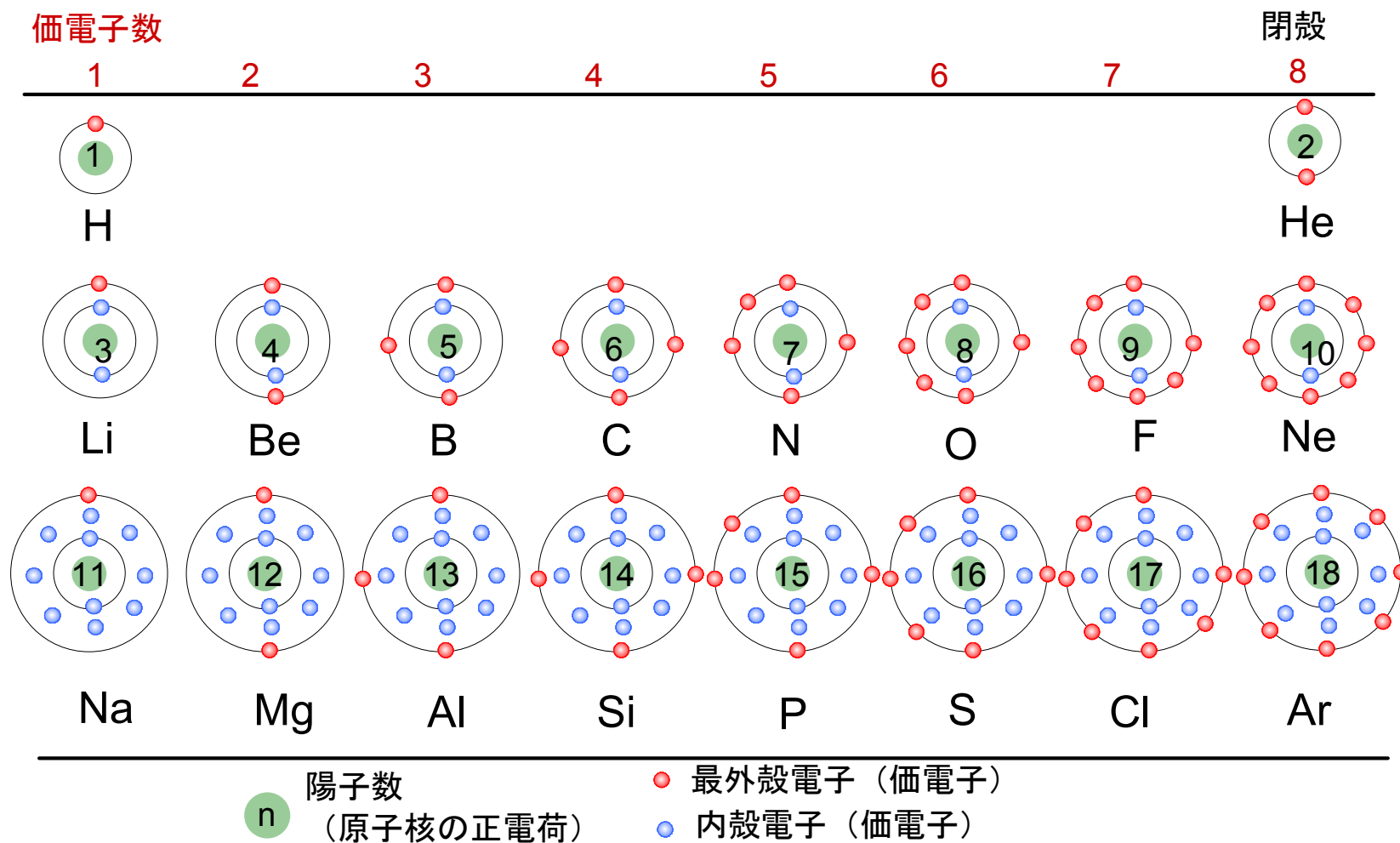
電子が原子核をとりまく半径は  
とびとびの値をとる



電子殻	収容できる電子数	半径	エネルギー
0殻	2	小	小
K殻	2		
L殻	8		
M殻	18		
N殻	32		
	32	大	大

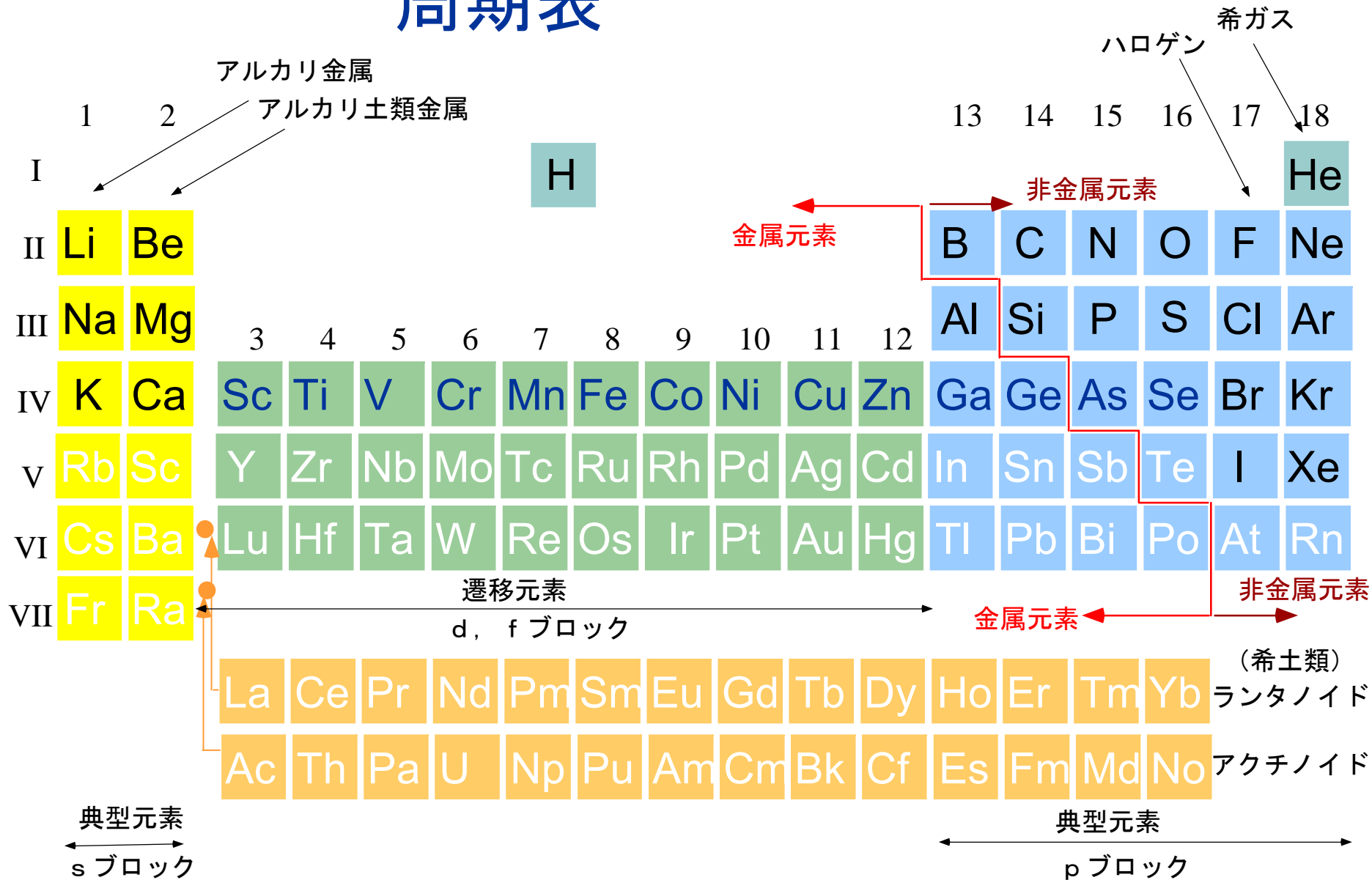
【復習】

# 電子配置と周期表





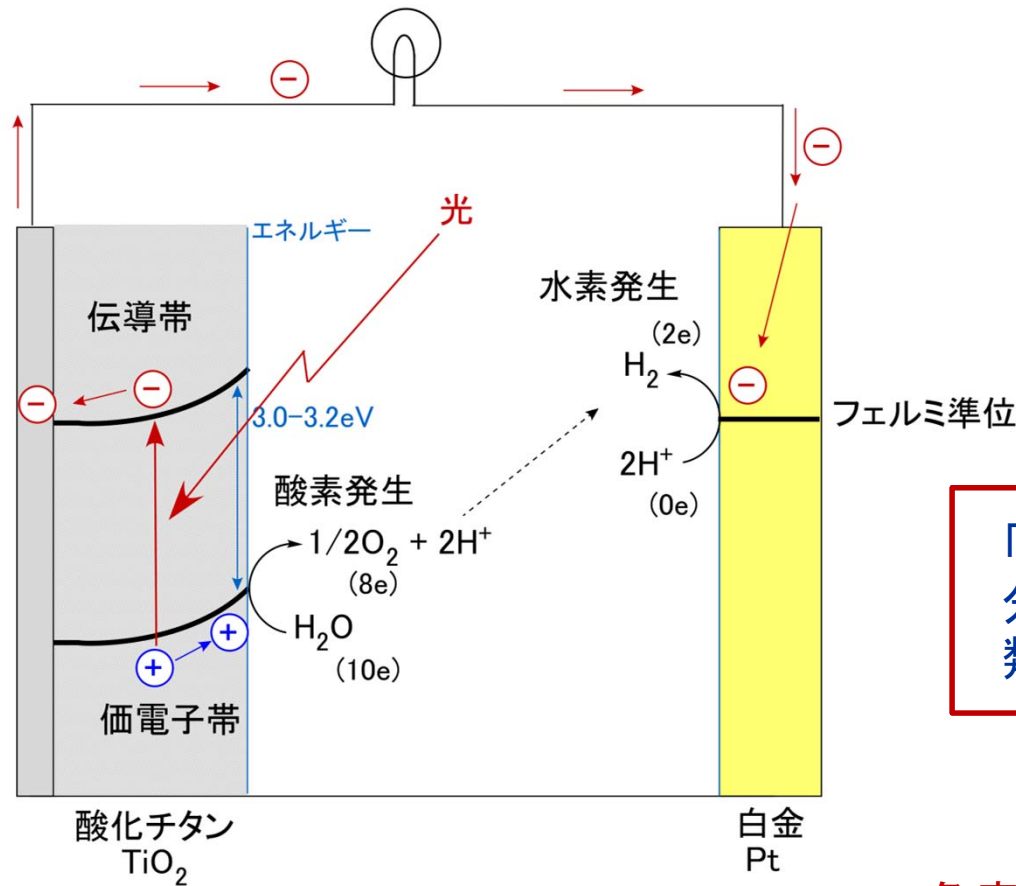
# 【復習】 周期表



# 太陽電池 (Solar Cell)

## 色素増感湿式太陽電池

本多一藤島効果 「夢の太陽電池発見か? (~1970)」



- 1) 安い酸化チタン (金属酸化物)
- 2) 水の光分解  
 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
- 3) バンドギャップが大きい (3.0-3.2 eV)  
 ため紫外線 ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) が必要  
 太陽光のたった3%

「太陽光で水を水素と酸素に分解し電力を得る」ことは人類の夢の一つ

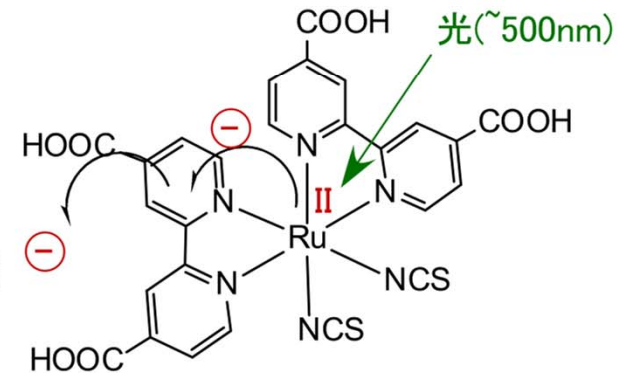
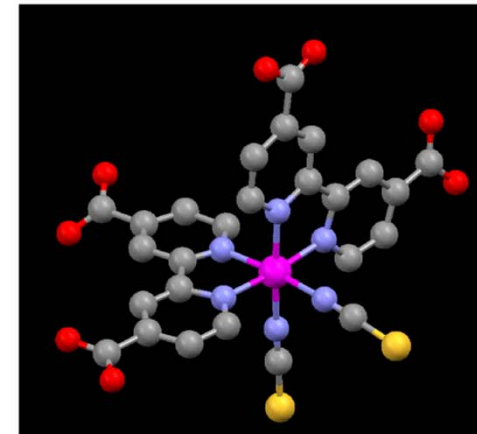
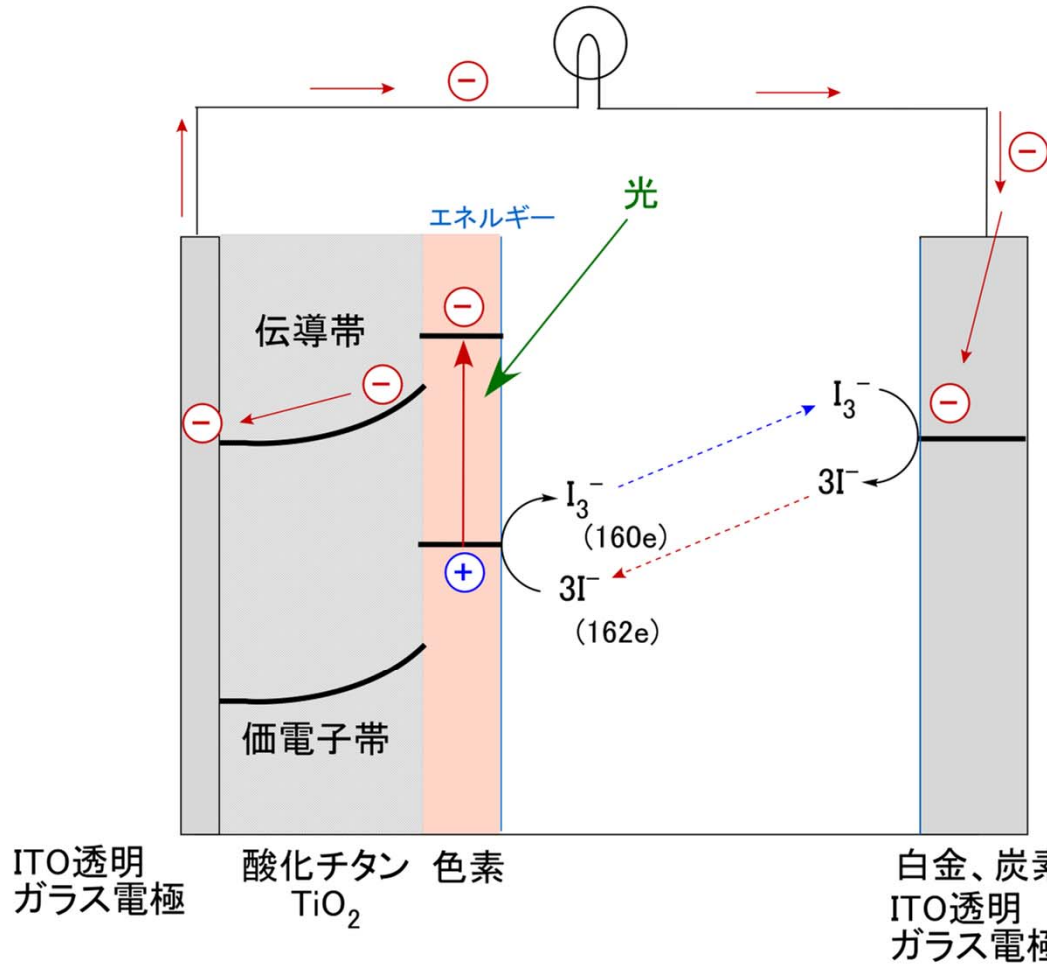
色素増感湿式太陽電池の開発

# 太陽電池 (Solar Cell)

## 色素増感湿式太陽電池

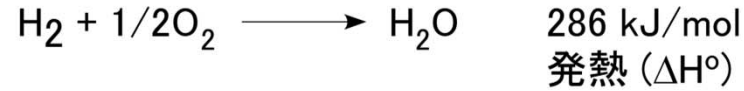
グレッツェル (Nature 1991)

ルテニウム錯体 (N3色素)



変換効率は低い (~10%) が、可視光が利用でき、安価で応用性が高い

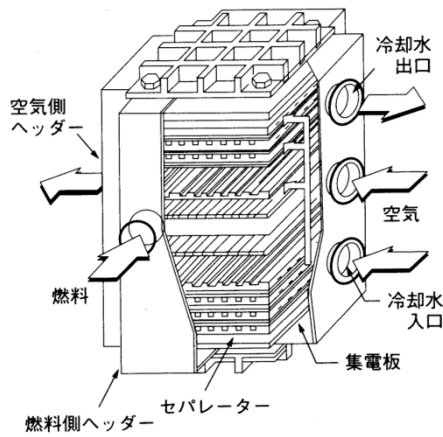
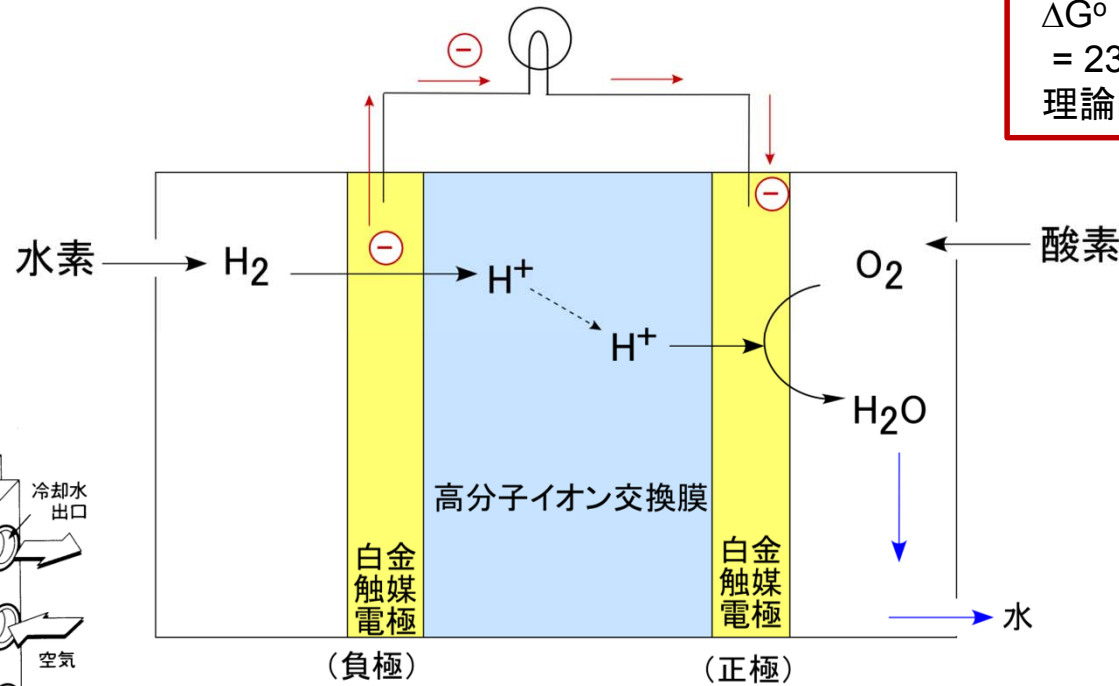
# 燃料電池 (Fuel Cell)



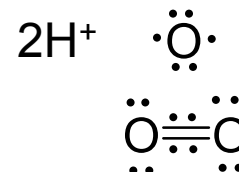
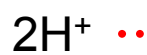
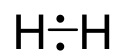
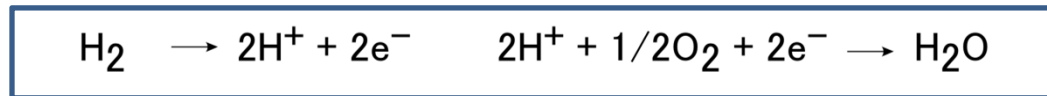
水のみが生成するクリーンな一次電池

$$\Delta G^\circ = nFE^\circ = 237 \text{ kJ/molより}$$

理論的起電力は1.23eV



ヘッダーは、燃料または空気が各セルに分配される前に入ってくる場所  
(b) スタックの構造例



# 燃料電池 (Fuel Cell)

## 燃料電池の種類と特徴

- 1) 効率や起電力は稼働条件によって異なる(35~60%, 0.6~0.8V程度)
- 2) 分散型電源として優れている(自動車、家庭など)
- 3) 燃料には水素以外にメタノール、天然ガス、石油製品などが用いられる
- 4) 問題は、「水素をどのように得るか」で、現在は化石資源の改質により得ているため  
トータルでは二酸化炭素を発生する
- 5) 触媒電極として用いる白金(カーボン担持)が高価

型式	アルカリ型 (AFC)	リン酸型 (PAFC)	溶解炭酸塩型 (MCFC)	固体高分子型 (PEFC)	固体電解質型 (SOFC)
イオン種	$\text{OH}^-$	$\text{H}^+$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{H}^+$	$\text{O}^{2-}$
電解質	KOH 水溶液	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3$	フッ素系樹脂 (陽イオン交換樹脂)	安定化ジルコニア ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ )
燃料	純 $\text{H}_2$	粗 $\text{H}_2^{\dagger 1}$	$\text{H}_2 + \text{CO}_2^{\dagger 2}$	粗 $\text{H}_2^{\dagger 1}$	粗 $\text{H}_2^{\dagger 1}$
触媒	Pt, Ni	Pt, Ni	Ni	Pt	Ni, $\text{LaMnO}_3$
作動温度(°C)	~100	160~200	600~700	80 (50~100)	700~1000
発電効率(%)	40~60	35~45	45~60	50~60	45~55
主な用途	宇宙, 海洋など	可搬型電源 分散型電気事業	分散型電気事業 大規模発電所用 コージェネレーション (エネルギー利用 効率 75~80%)	可搬型電源 自動車用	分散型電気事業 中規模発電所用 コージェネレーション (エネルギー利用 効率 > 80%)
実用化(予測) 課題	1970~ 経済性	1990~ 耐久性, 寿命	(2010~) 大型化	2004~ 製品化	(2010~) 実証研究

†1 天然ガス、メタノール、石油類などの改質ガスより分離する。

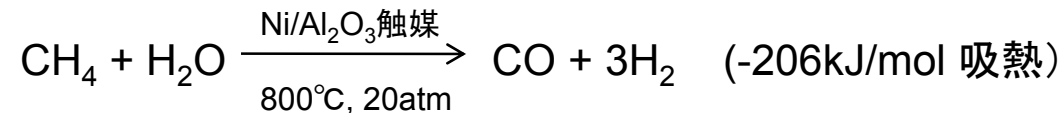
†2 天然ガス、メタノール、石油類、石炭などの改質ガス。

# 問題は「水素(二次エネルギー)をどう得るか」

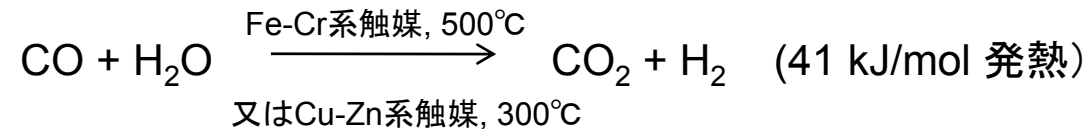
1) 現在は、メタノール、天然ガス、石油製品の改質により製造

(CO<sub>2</sub>発生を必ず伴いクリーン水素ではない、燃焼に比べての効率のよさが長所)

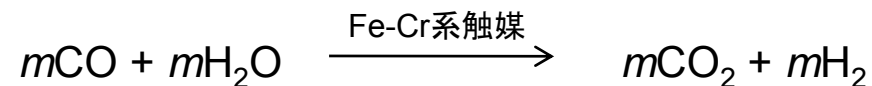
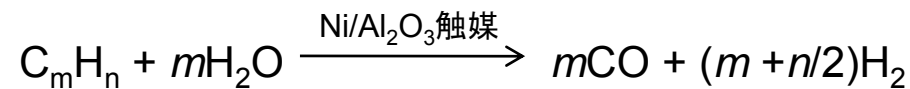
メタンの水蒸気改質



水性ガス移動反応(Water Gas Shift Reaction)



炭化水素(石油製品)一般では



生成する二酸化炭素はエタノールアミン等の塩基に吸収

# 問題は「水素(二次エネルギー)をどう得るか」

## 2) 水の電気分解も用いられている

(電力をどう得るかでCO<sub>2</sub>発生、高価な白金電極を用いる)  
(分散型の蓄電システムにつながる)

## 3) クリーンな水素を得るには、再生可能エネルギーの利用が不可欠

(水力、風力、太陽光、地熱等を利用した電力で水から水素を得る)  
(バイオマスから得たメタン(バガス)から水素を得る)

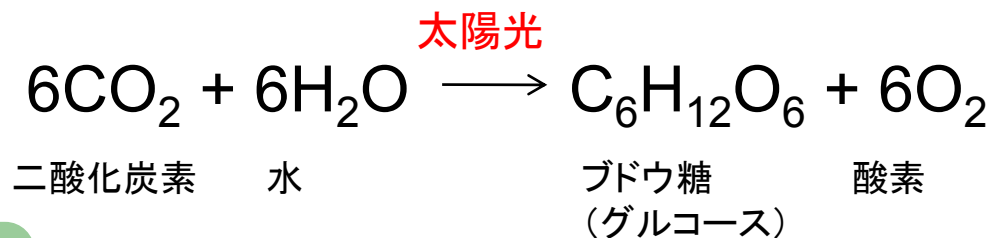
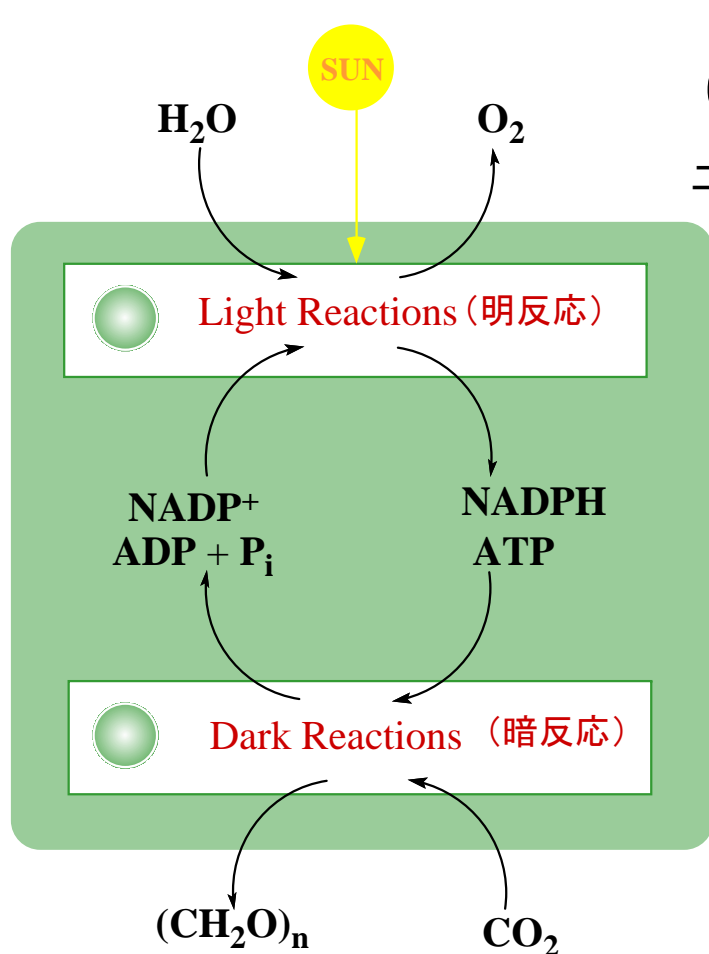
## 4) 最終的に人類が目指すべきは、

「太陽光(可視光)による水の光分解 Water Splitting」

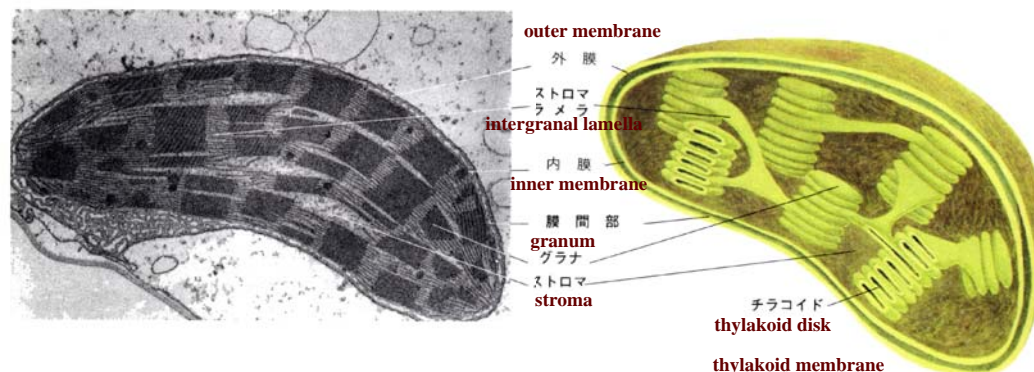
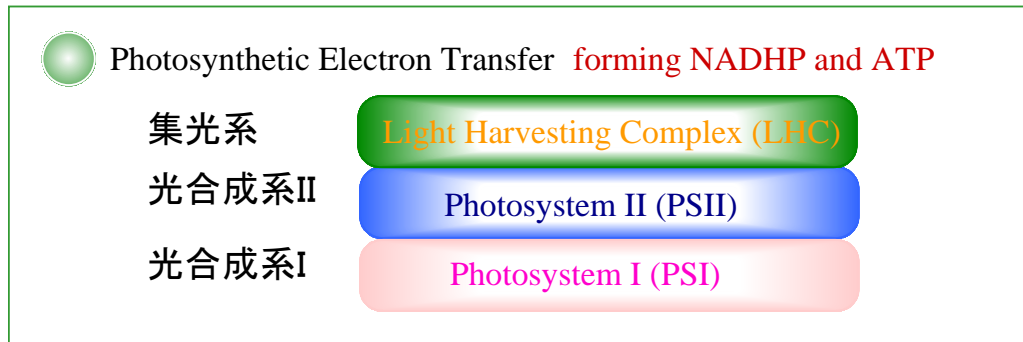
(これは、植物が行う光合成とある部分同じで、「人工光合成」の開発ともいえる)

## 5) 水素をどう貯蔵し、運搬するか(社会システムとして)も重要な課題

# 植物が行う光合成について考える

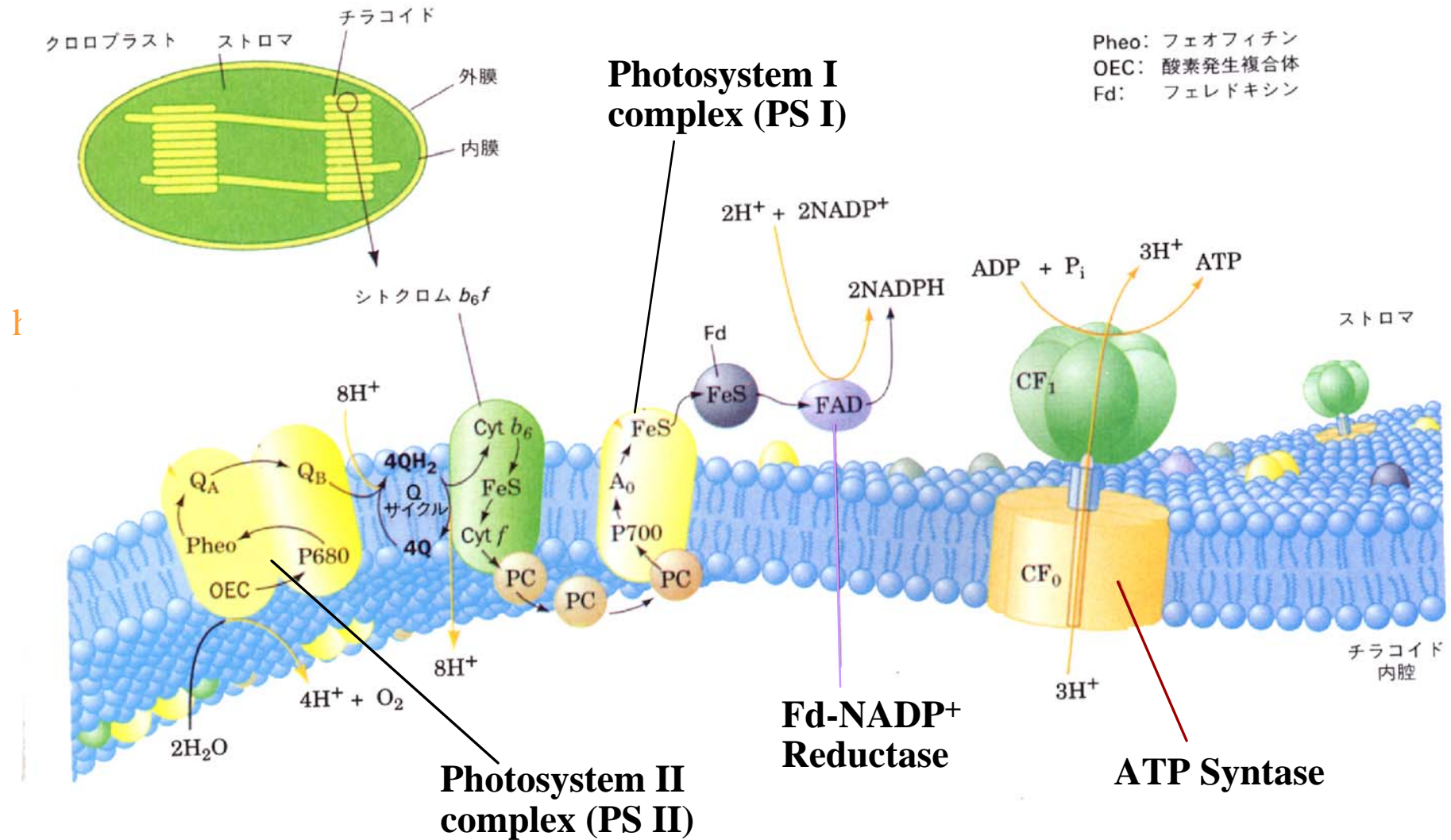


Chloroplast  
(葉緑体)

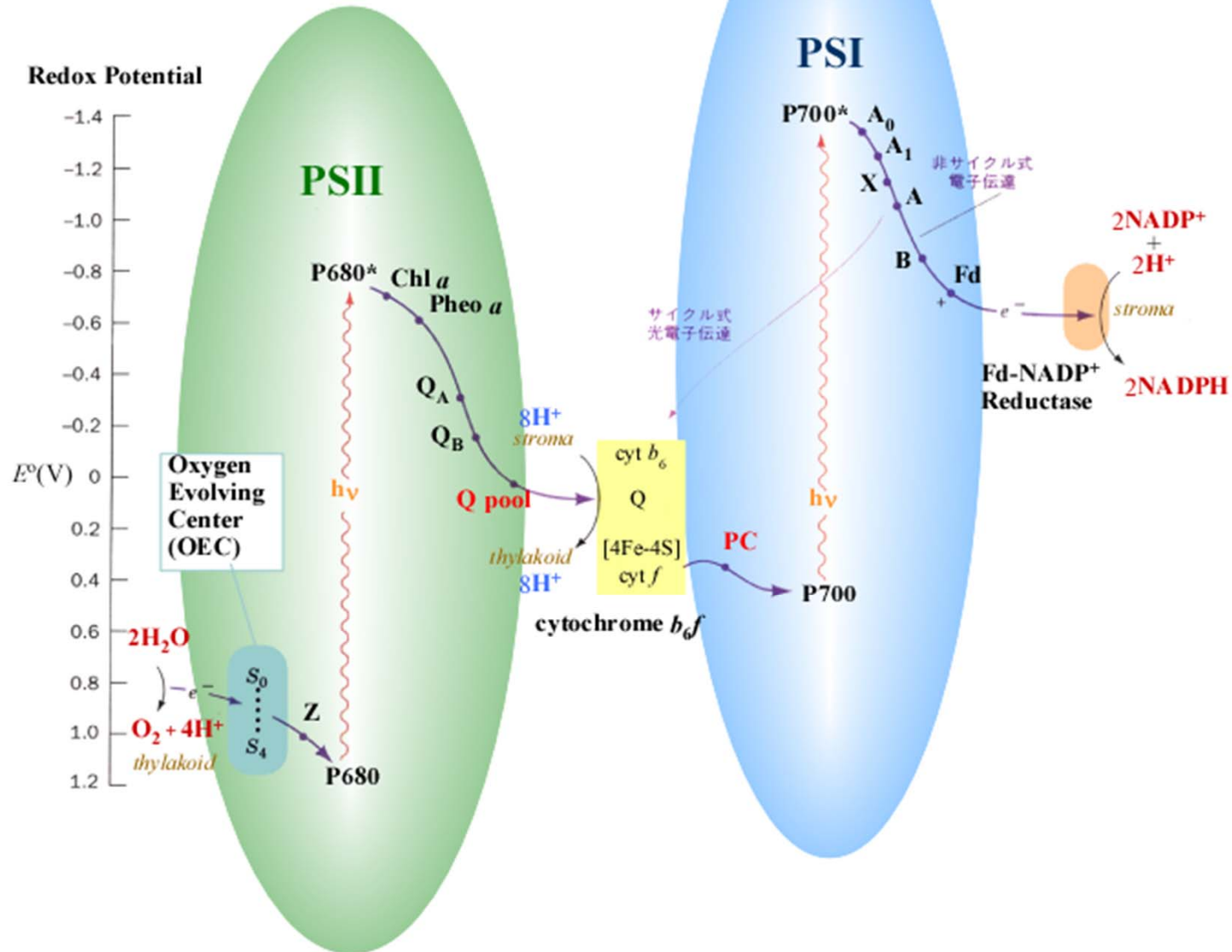
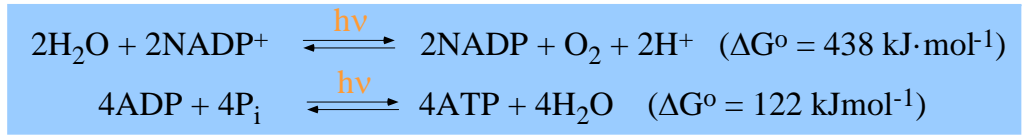




# 水の光分解

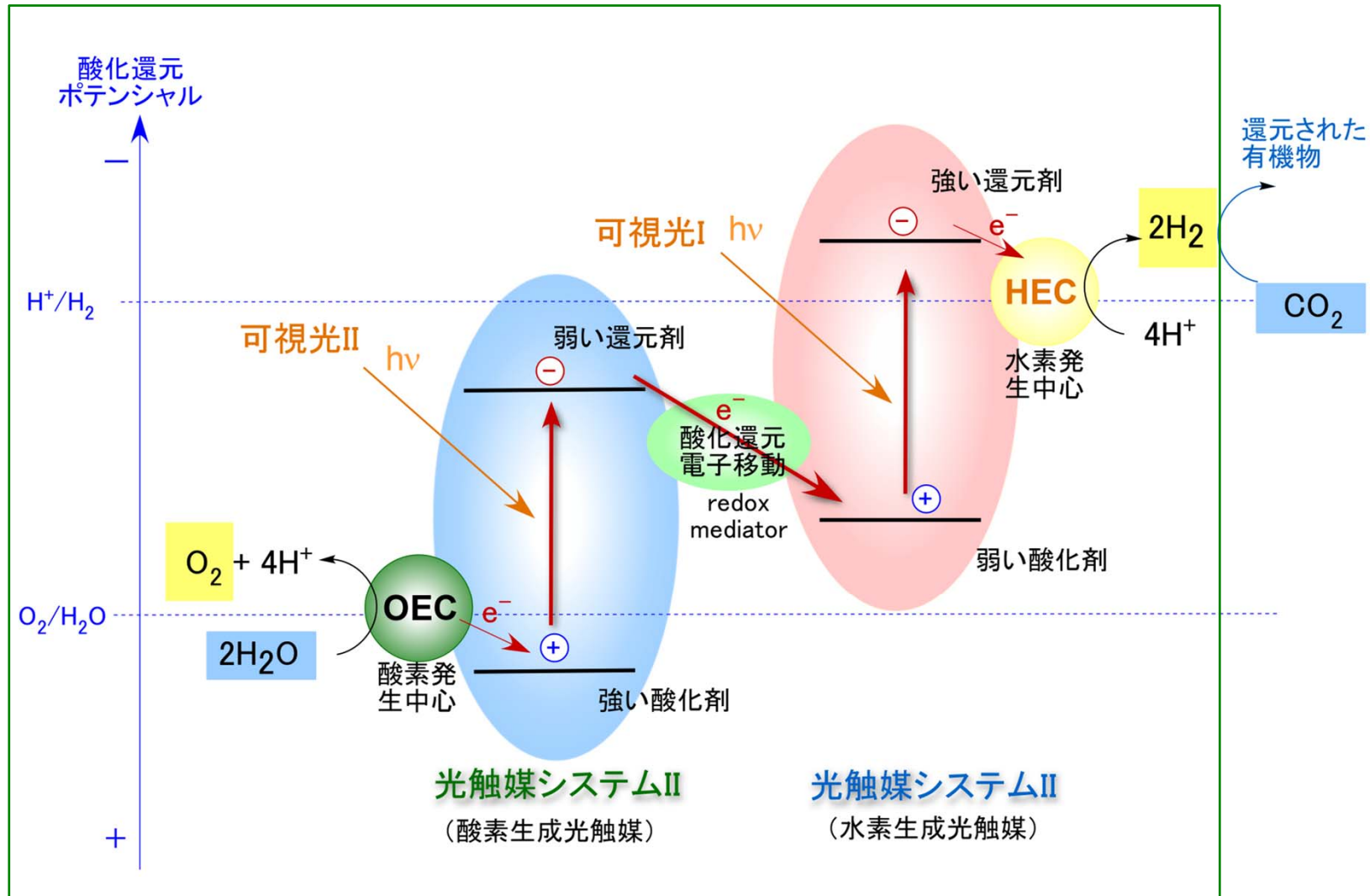


# 光合成系I, IIでの光誘起電子移動



# 人工光合成の概念 (Zスキーム)

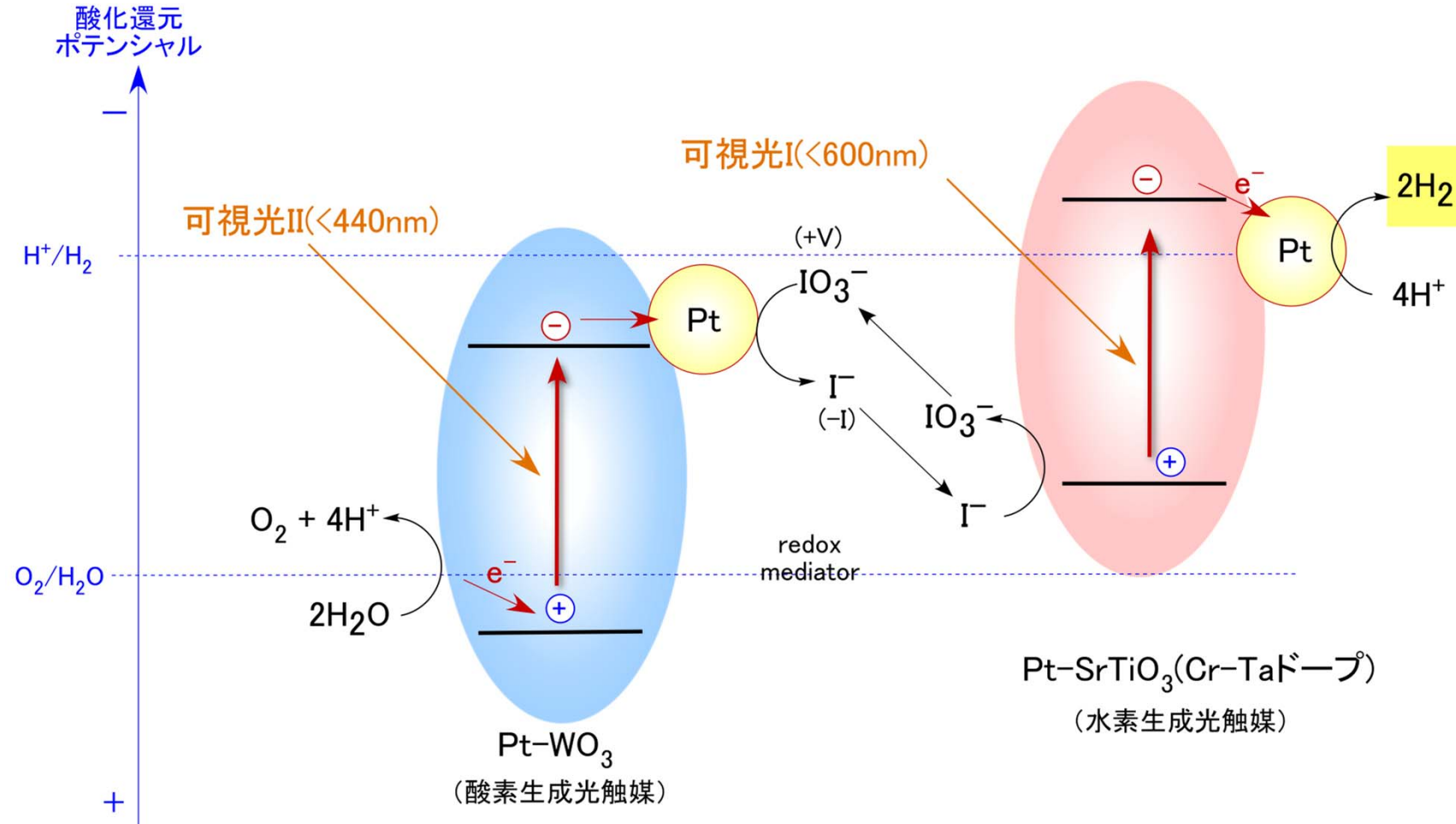
## 可視光による水の分解 (Water Splitting)



# 可視光による水の分解

Zou, Sayama, Arakawa *Nature*, 2001, 414, 625

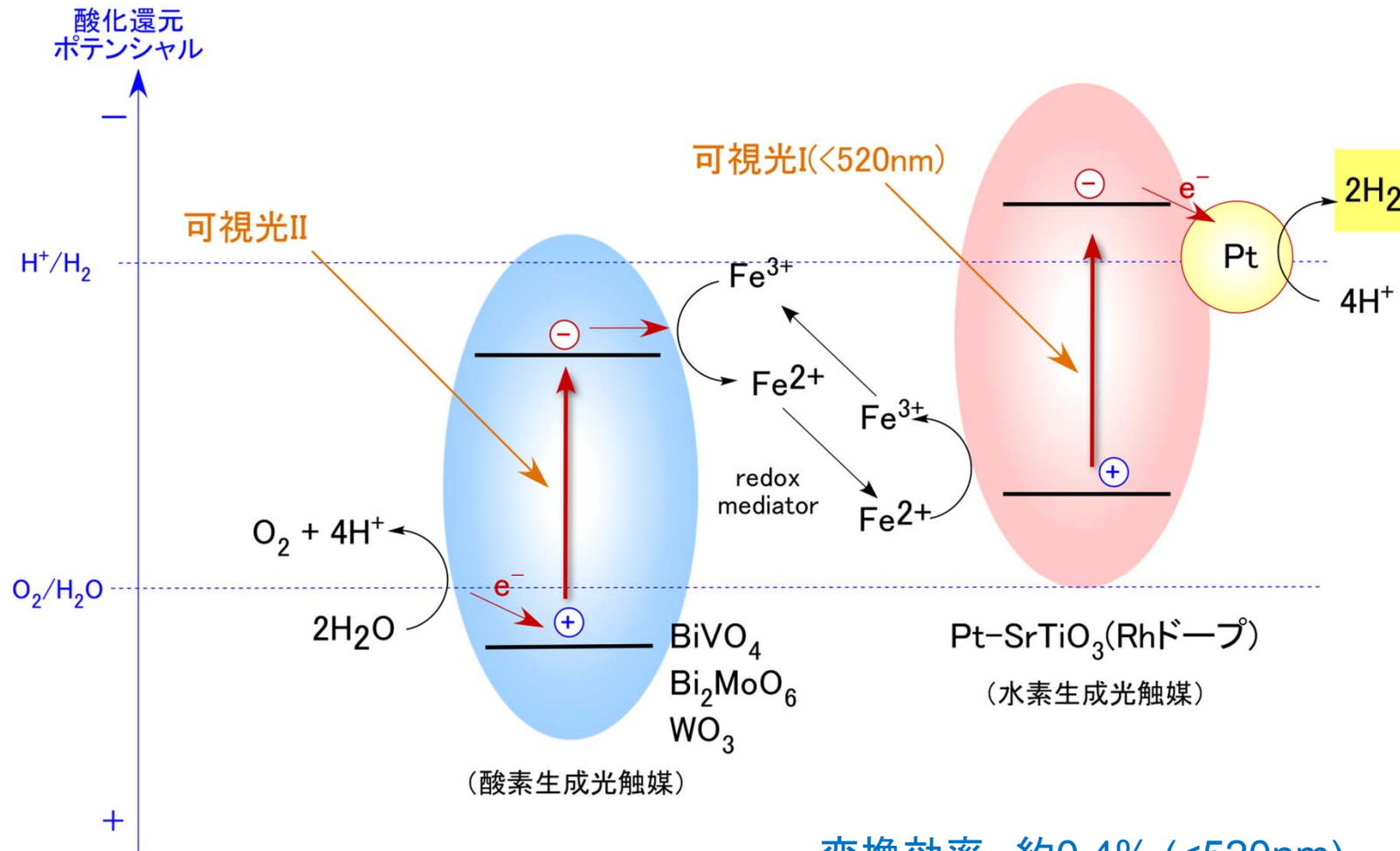
世界で初めての例(2001)



ただし変換効率 約0.1% (420nm)

# 可視光による水の分解

By A. Kudo (2002)



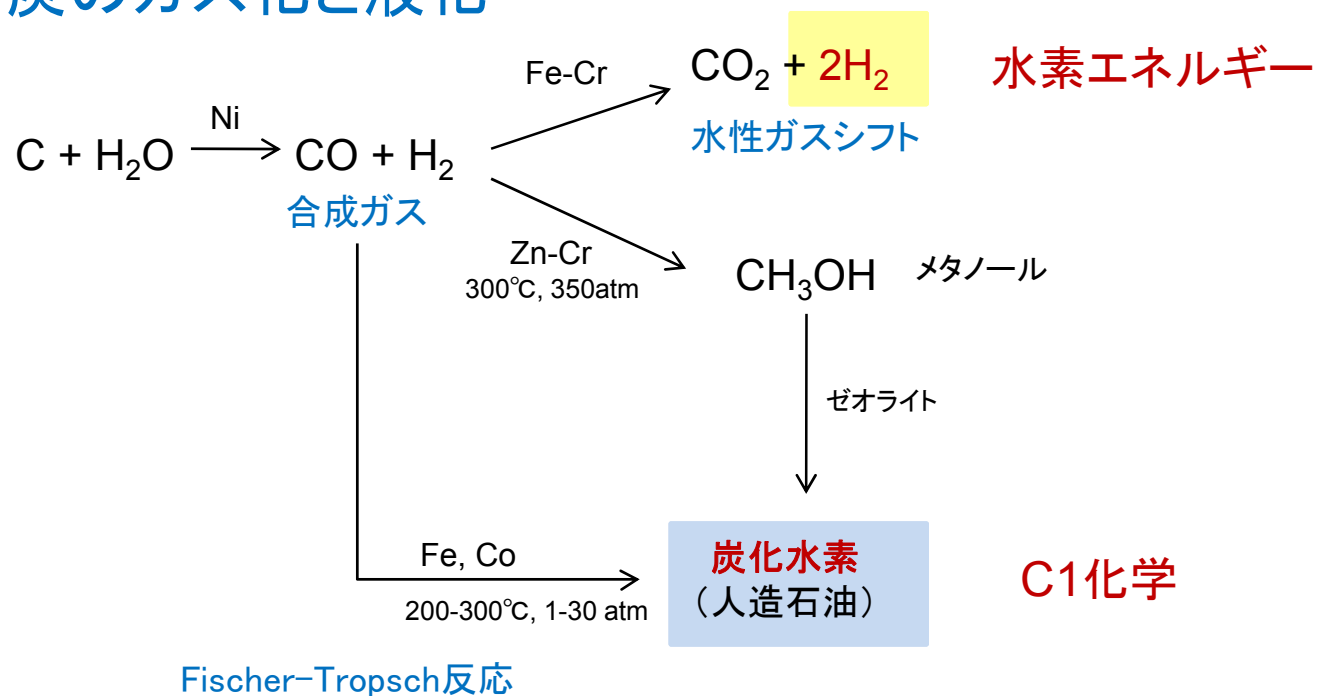
変換効率 約0.4% (<520nm)

(理論限界効率 約8% (<500nm))

# 炭素化石資源をできるだけ節約しよう

- 1) 炭素化石資源(石油、天然ガス、石炭)はエネルギーには使用せず  
物質製造の材料とする (枯渇問題・温暖化問題)
- 2) 石炭(寿命~150年)の有効利用が鍵を握るかもしれない

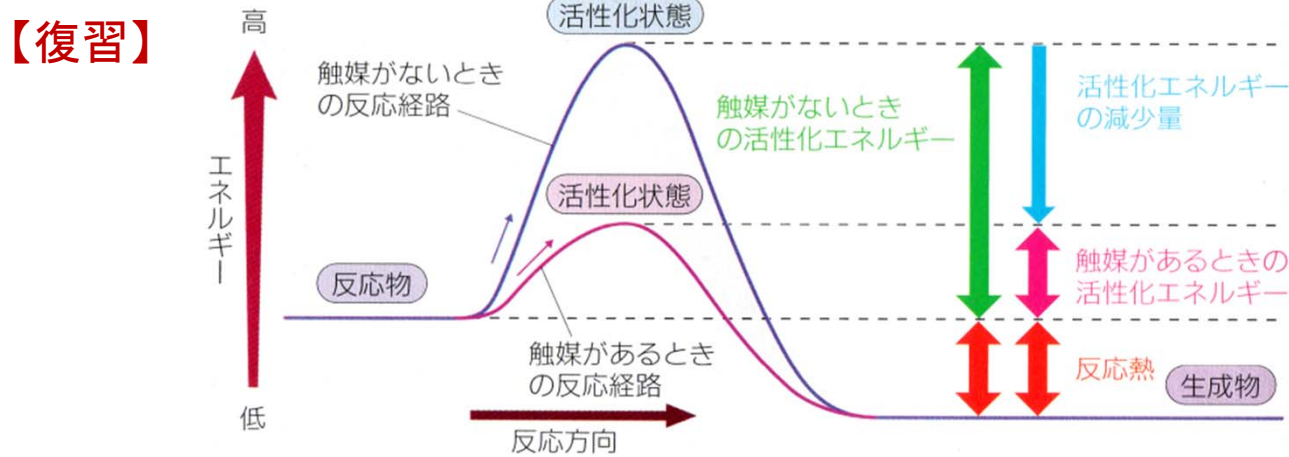
## 石炭のガス化と液化



かつて来た道(第二次世界大戦、1970年代石油危機)

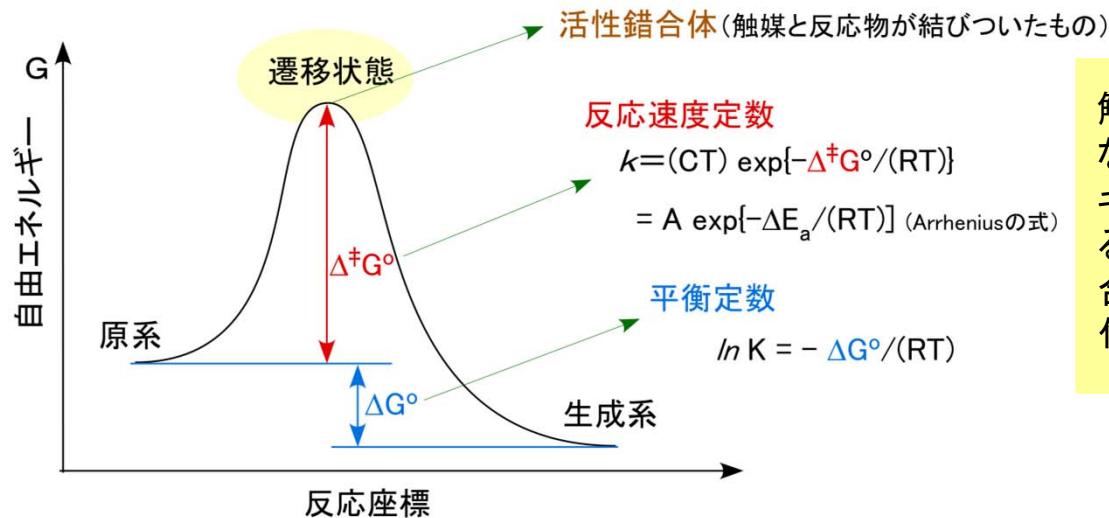


# ここでも触媒が重要



触媒は、自分自身は変化せず、活性化エネルギーを下げるにより反応を行きやすくする

## 一歩突っ込んだ理解

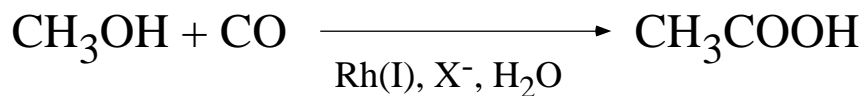


触媒は、 $\Delta G^\circ$  (反応熱) は変えないが、 $\Delta^\ddagger G^\circ$  (活性化エネルギー) を下げ反応速度を高める。反応の途中では、活性錯合体、中間体などを形成し変化している

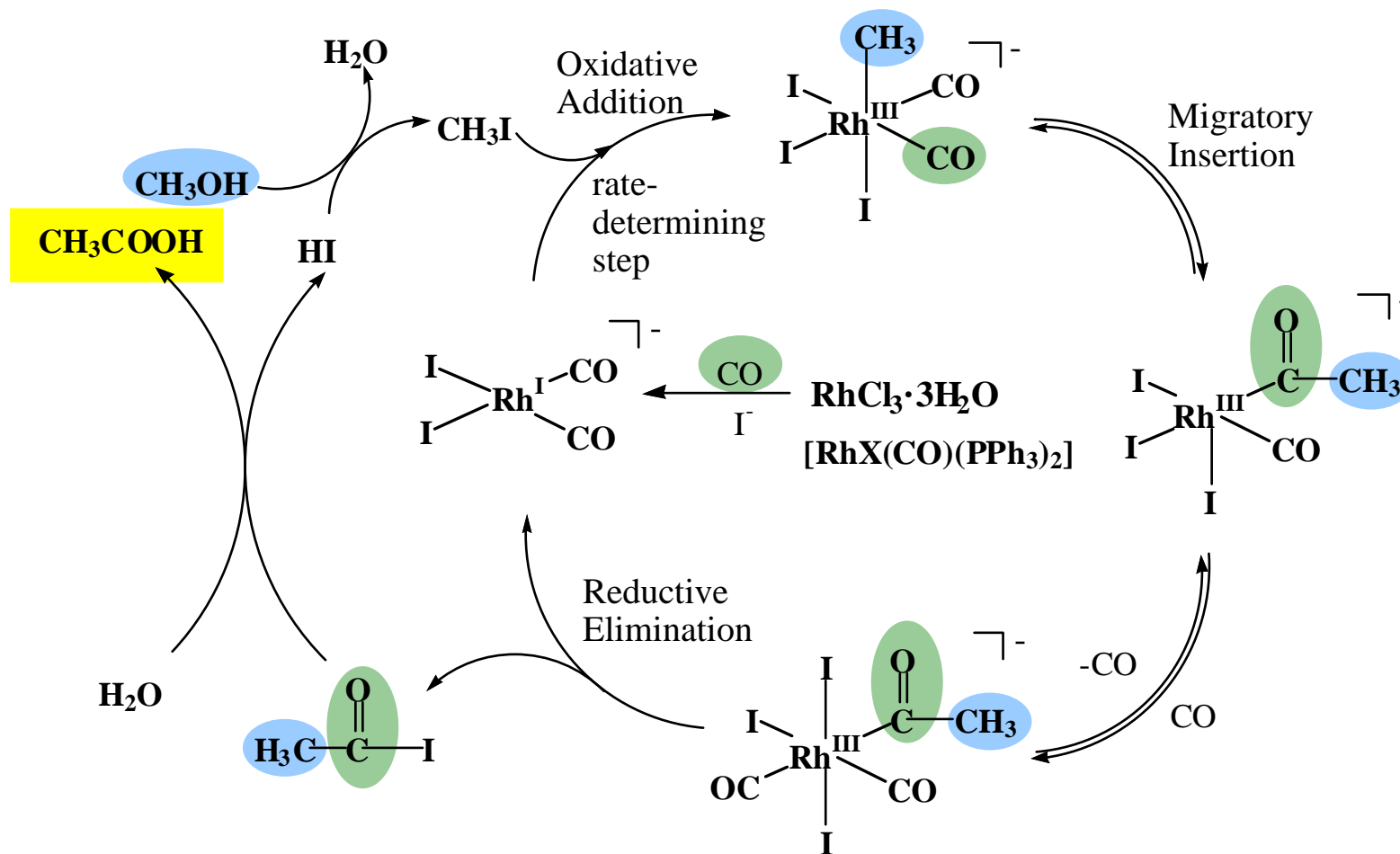
【触媒反応は複雑:例】

# 酢酸の工業的製法

## ● Monsanto法



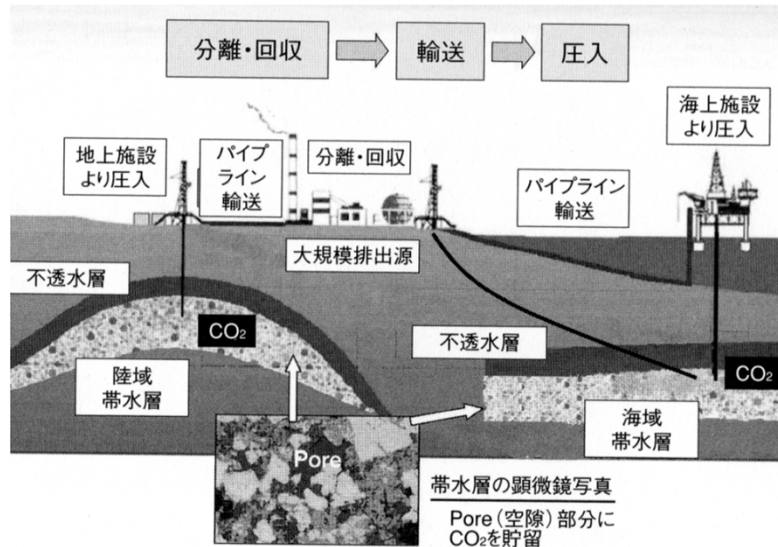
1970





# 二酸化炭素の削減(とりあえず地中に埋め込む)

## CCS (Carbon-dioxide Capture and Storage)技術



CO<sub>2</sub>地中貯留(帯水層貯留)の概要

- 1) 火力発電所、製鉄所、天然ガス田などで有効
- 2) コストが問題(経済コスト、エネルギーバランス)
- 3) 地中貯留した二酸化炭素はどうなる

↓  
**CCSは救世主にはならないが、  
 過渡的な技術として必要**

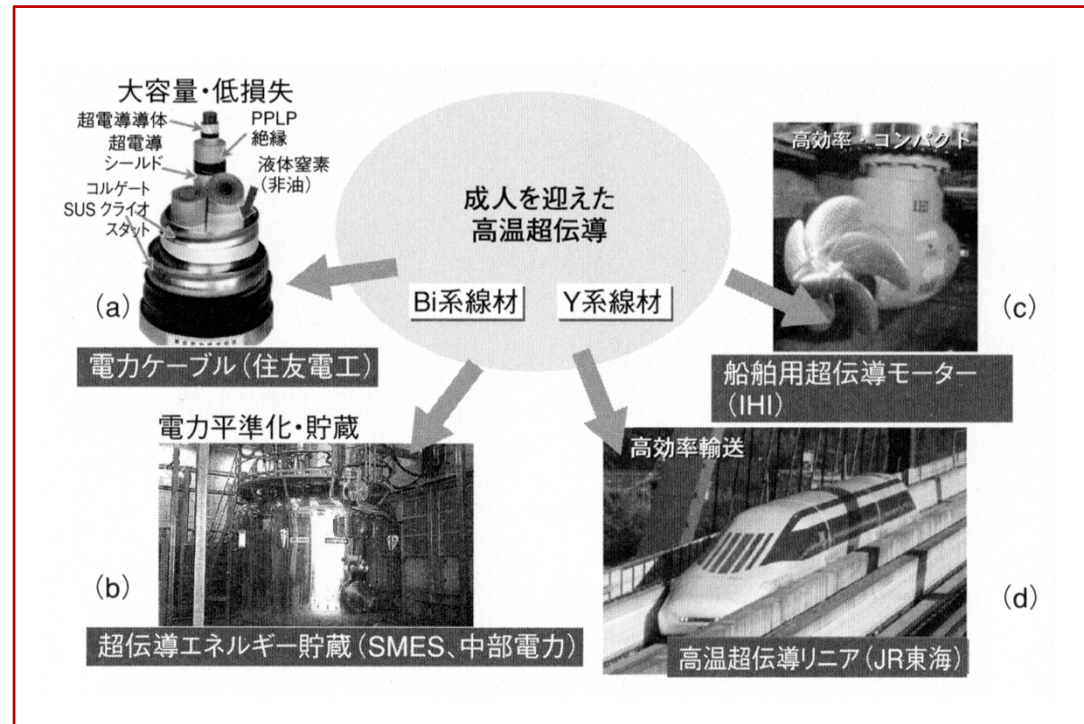
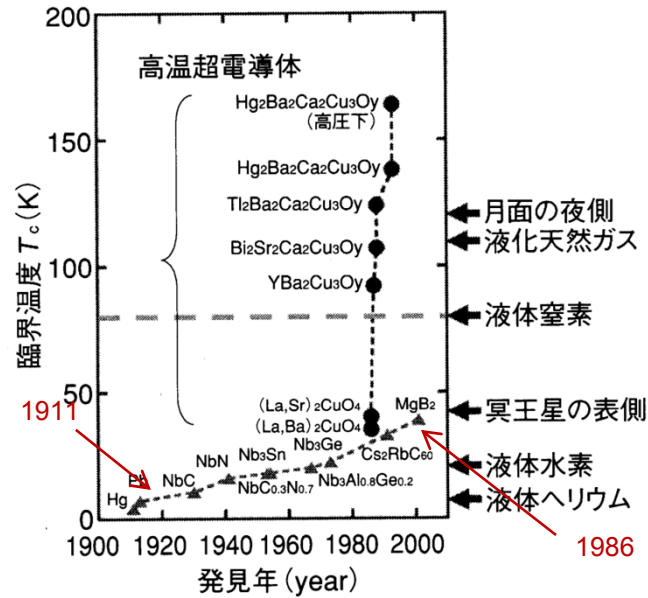
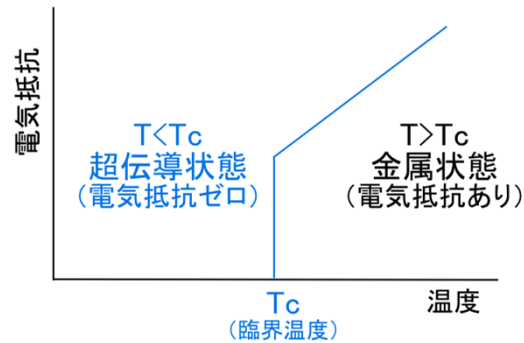
**【参考】**

わが国の年間発電電力量とエネルギー源(2002)

	億kWh	%
原子力	2947	31.2
天然ガス	2513	26.6
石炭	2097	22.2
石油	964	10.2
水力	850	9.0
地熱	38	0.4
新エネルギー	38	0.4

**最終的には、再生可能エネルギー(新エネルギー)による電力供給が不可欠**  
 真の意味での人口光合成(水と二酸化炭素から太陽光エネルギーにより炭素-水素結合を生成する)の開発も将来的に期待される

# 省エネルギーの切り札、高温超伝導材料



「次世代エネルギー研究最前線—環境低負荷型社会の創設に向けて」  
(独) 科学技術振興機構編(2008)

# 最後に、原子力エネルギーについて考える

1) 化石資源の枯渇を考えると、原子力エネルギーを頼りにせざるをえない

しかし

2) 核燃料となるウラン資源には限りがある(寿命60-80年)  $^{235}\text{U}$  (0.72%)

3) 資源の安定有効利用が不可欠(プルサーマル、高速増殖炉)

$^{235}\text{U}$   $^{238}\text{U}$   $^{239}\text{Pu}$

問題は

4) 技術的信頼性・安全性、放射性廃棄物処理、原子力発電所の老朽化など  
多くの課題を抱えている

5) 『核融合エネルギーの利用』は究極の夢、実現は100年以上先か

$^2\text{H}$  (D)  $^3\text{H}$  (T) (重水素Dは水から取り出せる0.015%)

# おわり

21世紀の科学技術はすべてのことが複雑にからみあっています。糸をほどくように様々な科学を理解し、さらに新しい科学の糸を発見し、それらの糸で未来の持続可能な文明を織り上げること、これが人類の課題です

## 【参考文献】

「資源・エネルギー工学要論」第2版 世良力 東京化学同人(2005)

「次世代エネルギー研究最前線—環境低負荷型社会の創設に向けて」(独)科学技術振興機構編(2008)