

# エネルギー・環境問題と原子力

---

**Dr. N. Nakae**  
**JNES**

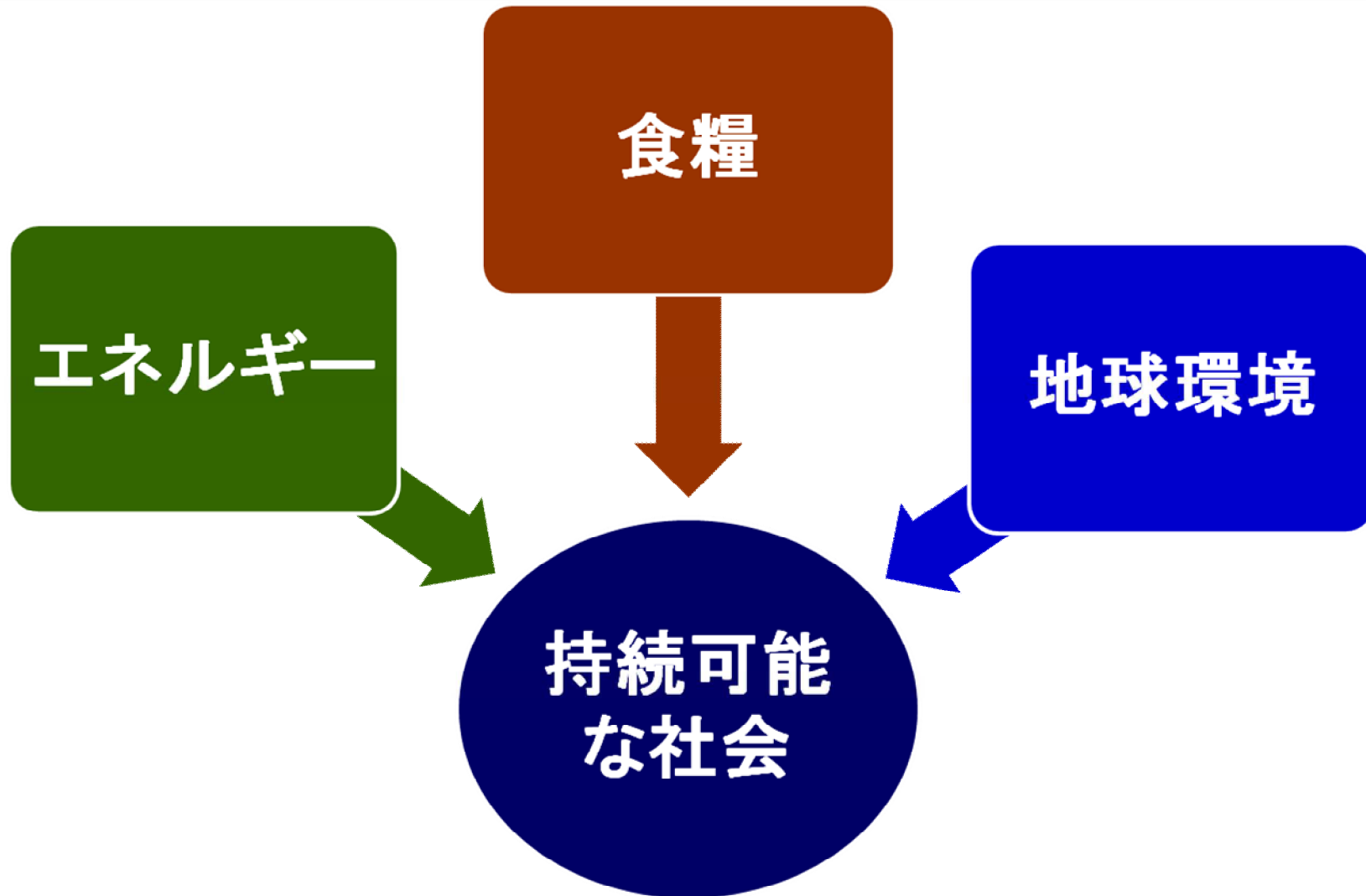
2011年12月26日 茨城大学大学院 理工学研究科

# 講義内容

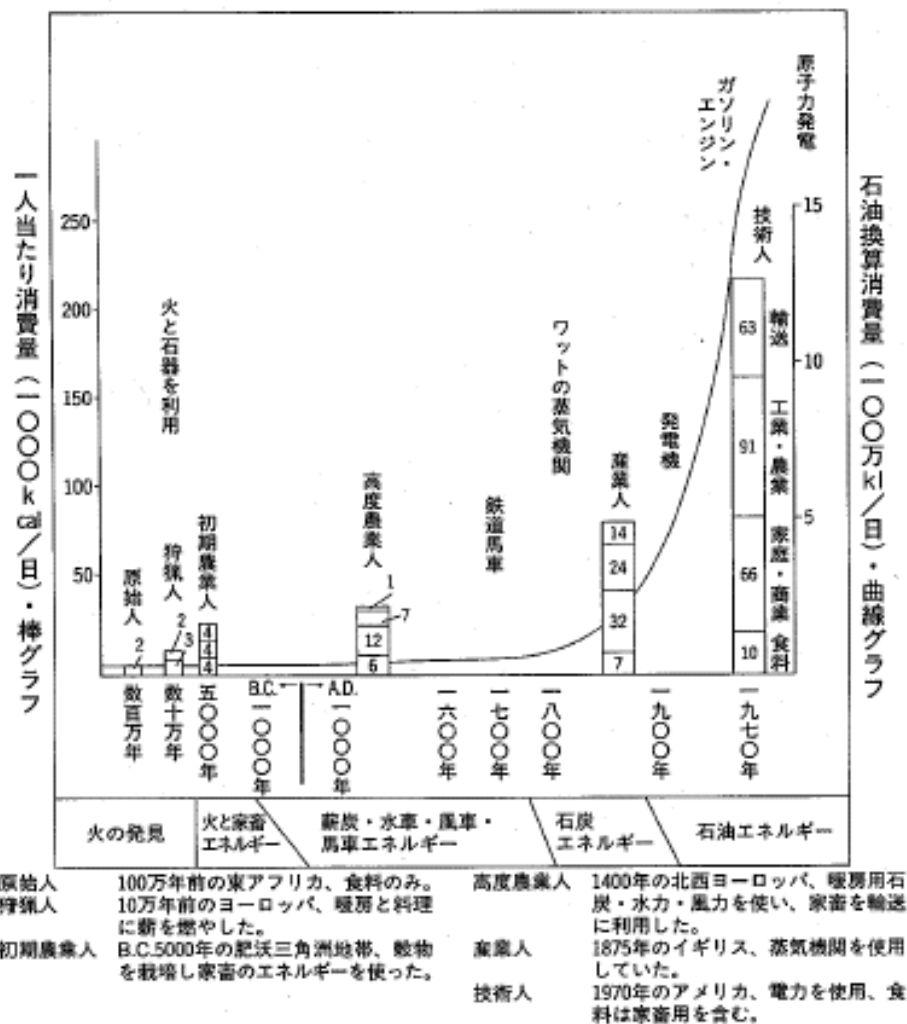
---

1. エネルギー利用の現状と問題点
2. 再生可能エネルギー
3. 革新的原子力利用システム

# 人類の持続可能に必要なものは・・・



# エネルギー消費量の変遷



- 19世紀に入り蒸気機関が発明されてからエネルギー消費量は飛躍的増加の一途を辿っている。
- 20世紀に入り発電機が導入されてからその勢いはうなぎ昇りである。
- 科学技術の発展は人類に豊かさを提供したが、膨大なエネルギー消費を引き起こし、地球環境は破壊されつつある。

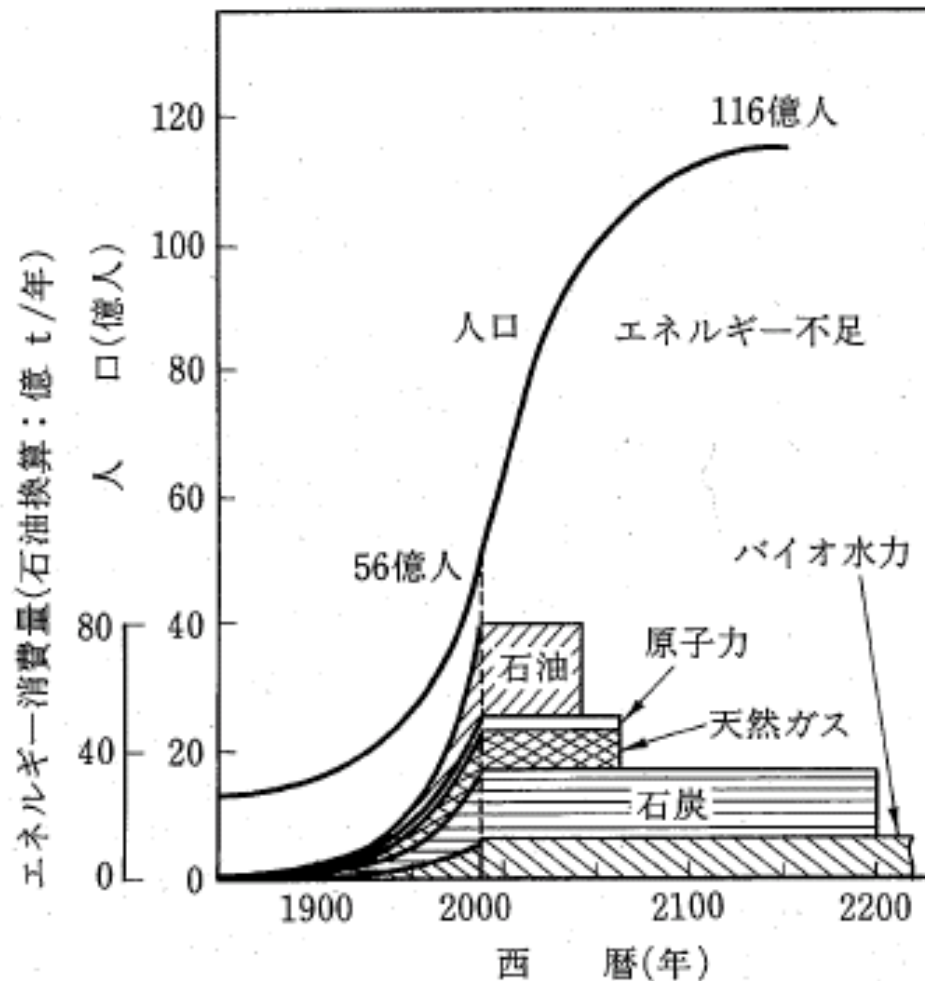
再び地球を救うのは人類の英知 (科学) であり、それを実践するのは我々人間である。



「この解を見出すのが我々の使命」

# 各種エネルギーの消費限界は・・・

可採年数: 現状のペースで消費を続けることの可能な年数



石油 :50年  
天然ガス:70年  
石炭 :220年  
ウラン :70年(軽水炉)  
(注) 確定値ではない

図は、人口の増加に対しエネルギー供給ができず多くの人がエネルギーの不足を余儀なくされる。

**新しいエネルギー源を開発する必要がある。**

# エネルギー・食糧供給における地球の限界



## 一人当たりの年間エネルギー消費量と供給可能人口

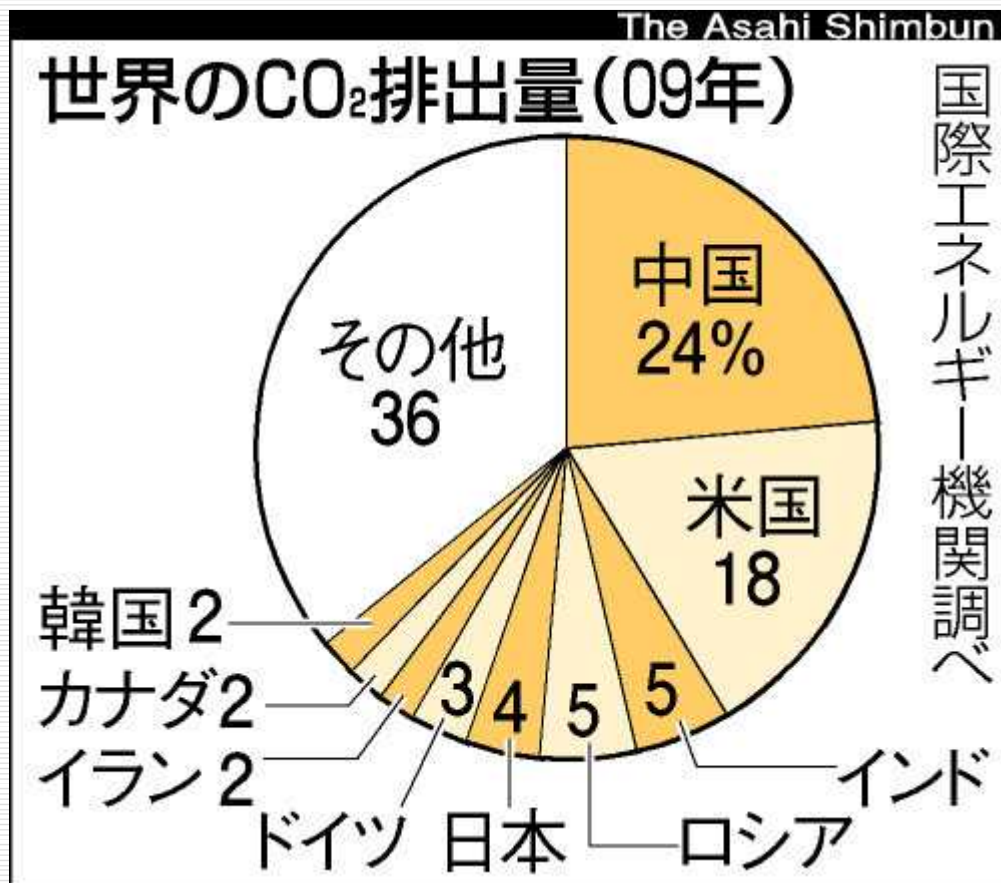
アメリカ人並み	8TOE	10.5億人
日本人並み	4TOE	21億人
世界平均	1.4TOE	60億人

## 食糧供給可能人口

アメリカ人並み		30億人
日本人並み		50億人
世界平均		77億人

地球全体のエネルギー供給構造は、食糧供給構造と同様に非常に脆弱化している。  
美しい地球を救っているのは誰か？ また、これから救うのは誰か？

# 二酸化炭素排出量



国	排出量 億トン	前年比 %
世界全体	290	-1
中国	68	+5
米国	52	-7
日本	11	-5

朝日新聞より

# 京都議定書とは

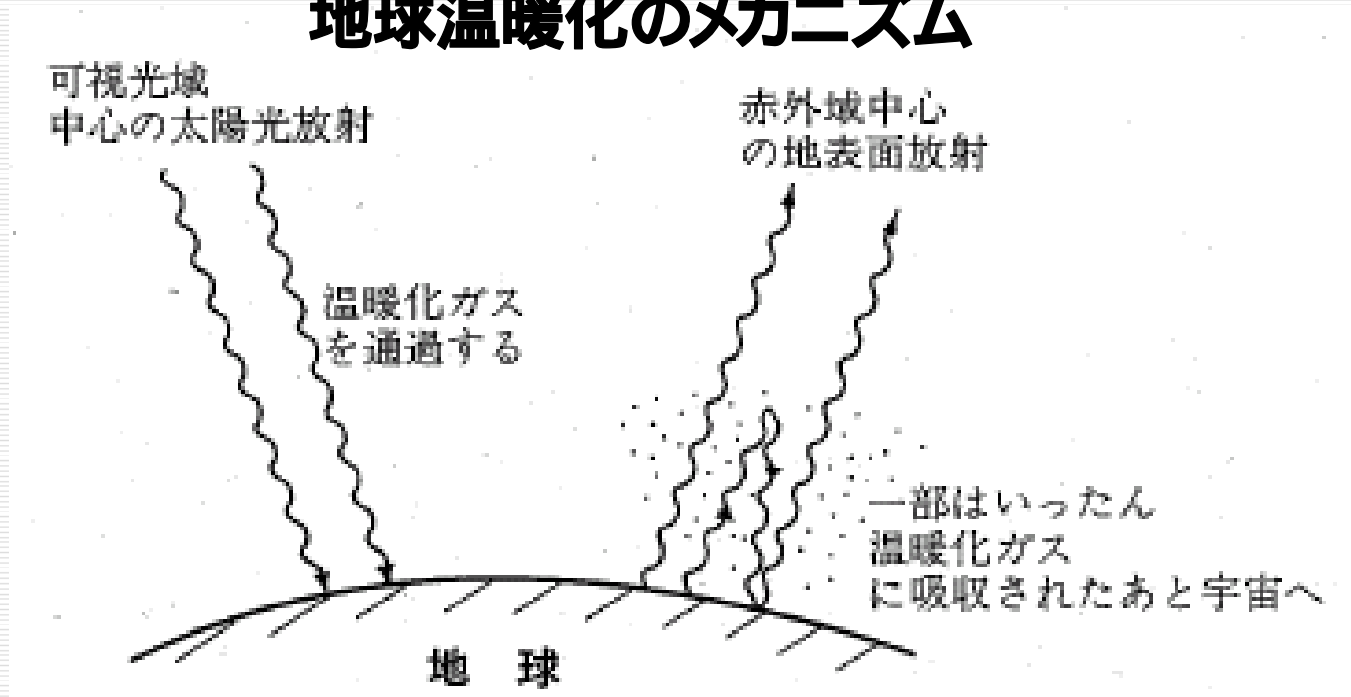
---

- 先進国の温室効果ガス排出量について、法的拘束力のある数値目標を各国毎に設定
- 国際的に協調して、目標を達成するための仕組みを導入（排出量取引、クリーン開発メカニズム、共同実施など）
- 途上国に対しては、数値目標などの新たな義務は導入せず
- 数値目標  
対象ガス：二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>  
吸収源：森林等の吸収源による温室効果ガス吸収量を算入  
基準年：1990年（HFC、PFC、SF<sub>6</sub> は、1995年としてもよい）  
**目標期間：2008年から2012年**  
目標：各国毎の目標 **日本 6%、米国 7%、EU 8%**等  
先進国全体で少なくとも5%削減を目指す。



# 化石エネルギー消費と地球環境問題

## 地球温暖化のメカニズム



- 太陽光の平均波長は可視光(0.3 ~ 1  $\mu\text{m}$ )
- 地球からの放射光の平均波長は赤外域(7 ~ 15  $\mu\text{m}$ )
- $\text{CO}_2$ 、メタン、亜酸化窒素(温暖化ガス)は、赤外域の電磁波を吸収し、宇宙への熱の放出を妨げる。

# 地球温暖化が顕著になると・・・

## 健康

蚊の分布域の拡大

## 水資源

降水雪量の減少による水不足

## 海面の上昇

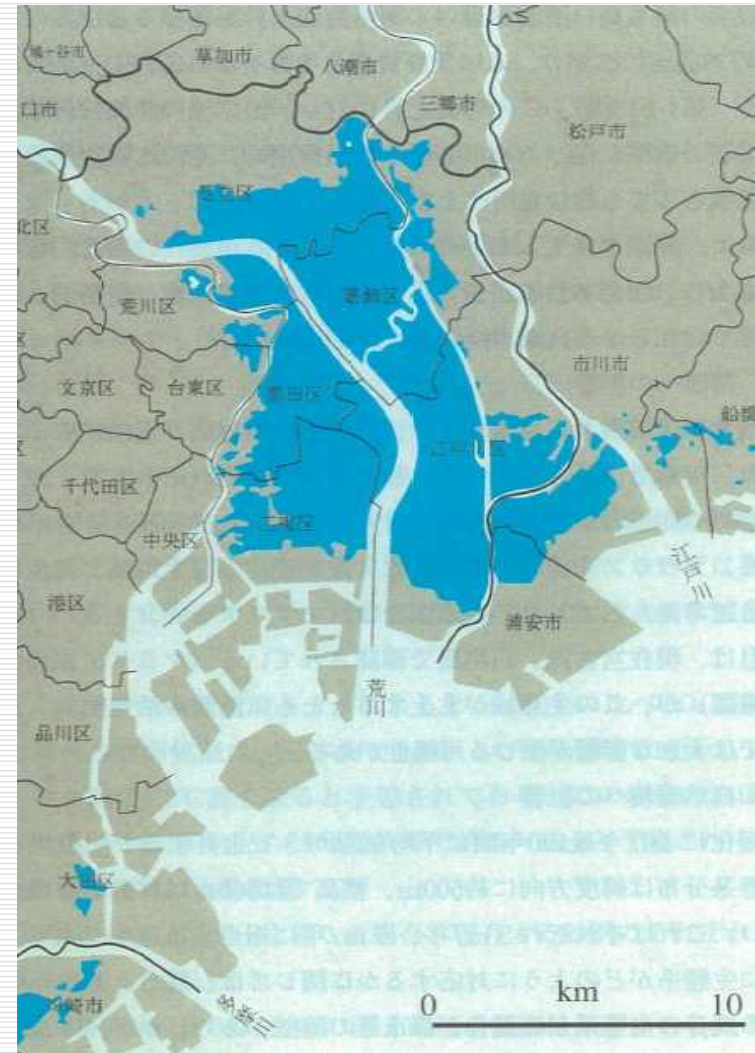
都心部でも水没

## 食生活

洪水、干ばつによる食物生産の減少

## 気候変動

ハリケーン、突風、竜巻、台風、集中豪雨の多発



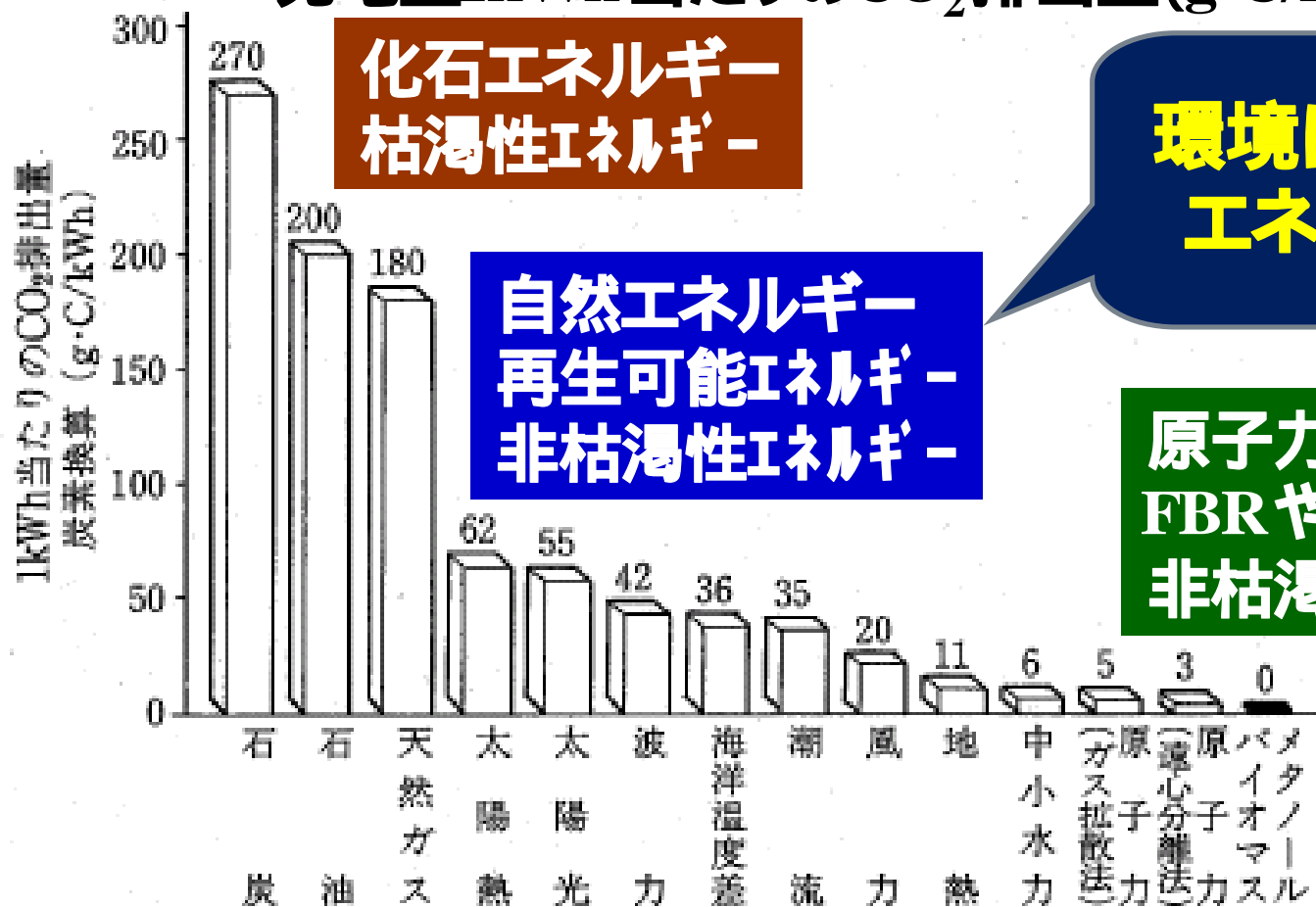
# 地球温暖化を防止する方策・・・

---

- **温暖化の原因となる二酸化炭素排出量の削減**
- **二酸化炭素を排出する化石燃料の使用制限**
- **化石燃料に代替するエネルギー源の利用促進**

# 各種エネルギーの消費とCO<sub>2</sub>排出量

発電量1kWh当たりのCO<sub>2</sub>排出量(g-C/kWh)



出典：電力中央研究所 (1994年6月)

# 再生可能エネルギーとは・・・

---

再生可能エネルギーは自然エネルギーのことであり、非枯渇性のエネルギーのことである。

太陽熱、太陽光、風力、地熱、水力、波力、潮流、海洋温度差、バイオマスが再生可能エネルギーである。

再生可能エネルギーの特徴は、低いエネルギー密度、高い発電コストであり、市場導入に対して課題がある。

# 太陽エネルギー

## 太陽エネルギーの利用方策: 太陽熱発電と太陽光発電

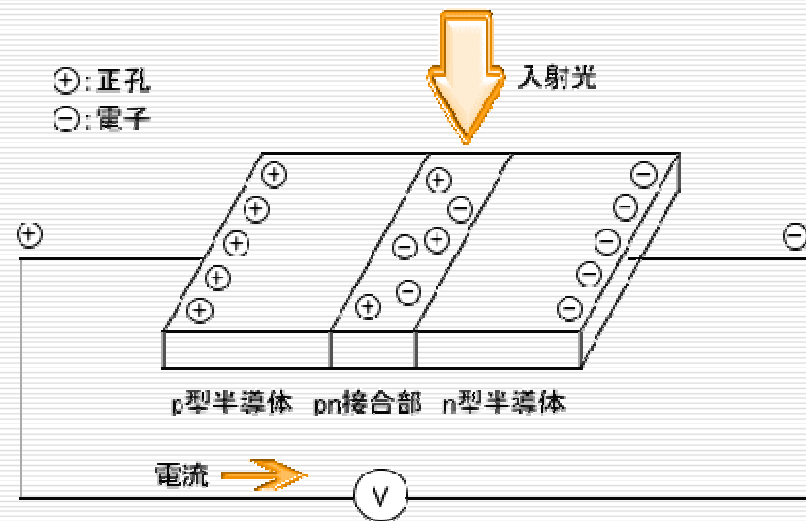
### 太陽熱発電

太陽エネルギー全てを直接熱エネルギーとして利用する。  
すなわち、太陽熱により水蒸気を発生させ蒸気タービンを駆動させ発電する。

### 太陽光発電

太陽電池を用いて太陽エネルギーのうち可視領域の光子を利用する。

経済性向上が最重要課題



# 風力エネルギー

## **風力発電**

風力エネルギー(風の運動エネルギー)を風車の運動エネルギーに変換し、これを電気エネルギーに変換して利用する。

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$

$E$ : 風の運動エネルギー

$\rho$ : 空気密度

$A$ : 風車の回転面積

$V$ : 風速

$C_p$ : 出力係数(理論値は0.6、実際には0.3~0.45)

# 風力エネルギー

---

**2009 年末の風力発電導入量は昨年に対して約1 %**

**の増の1 億790 万kW** (100万kWの原発150基分相当)

世界風力エネルギー会議(GWEC) 情報

## **1 年間の増加量**

1位: 中国 1300 万kW (2008年比207 %)

2位: アメリカ 1000 万kW (2008年比140 %)

18位: 日本18 万kW (2008年比109 %)

## **累積設備容量**

1位: アメリカ

2位: ドイツ

3位: 中国 (2010年末には、中国が世界の2位(または1位)になる勢い)

13位: 日本(205.6 万kW、設備容量は世界の1.3%)

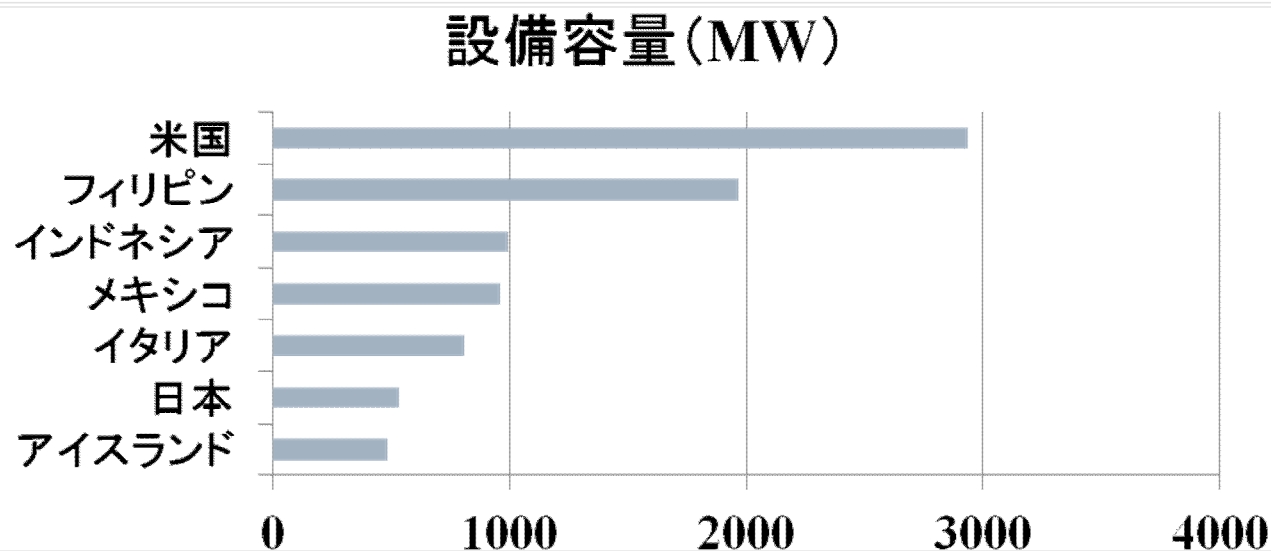
日本風力発電協会資料より



# 地熱エネルギー

## 地熱発電

マグマのもつ熱エネルギーを地下水の熱エネルギー(熱水や蒸気)に変換し、これを電気エネルギーに変換して利用する。



各国総発電量に占める  
地熱発電量の割合(%)

米国	0.2
フィリピン	12.7
インドネシア	2.2
メキシコ	1.9
イタリア	1.0
日本	0.2
アイスランド	20.5

自然公園や温泉地との競合による制約が多く、探査リスクや企業化リスクが高い。経済性を見通すことは困難である。

2007年のデータ

# 水力エネルギー

## 水力発電

太陽エネルギーにより海水が温められて蒸発し、雨地なって高い山に降る。これは、太陽の熱エネルギーが水の位置エネルギーに変換したことになる。この水の位置エネルギーが水力機械の運動エネルギーとなる。これを電気エネルギーに変換して利用する。



黒四ダムの水力発電所の発電設備容量は33.5万kWである。通常の原子力発電所は100万kWである。

# 海洋エネルギー

## **波力発電**

太陽エネルギーを吸収した海洋が海水の運動エネルギーとして波の形に変換される。この波の上下運動が位置エネルギーと運動エネルギーになり最終的にはこれが電気エネルギーとなる。これを利用した方式として以下様な発電方式が考えられている。

- ・ 岸壁固定空気室方式
- ・ 貯水池方式
- ・ 浮体式波力発電装置方式

## **海洋温度差発電**

水深によって海水の温度に差が生じる。すなわち、表層温水でガスを温め、温められたガスによりタービンを回転させ発電する。高温のガスは深層冷水によりガスを液化する。

# 潮力エネルギー

---

## **潮汐発電**

潮の干潮によって起こる海水の移動を利用して発電するものである。

フランスのロワール川の河口では15m近い干満の差を利用して20万kWの発電所が稼働している。

日本では干潮の差が大きくても3m程度なので潮汐発電の実用化の見込みはほとんどない。

# バイオマスエネルギー

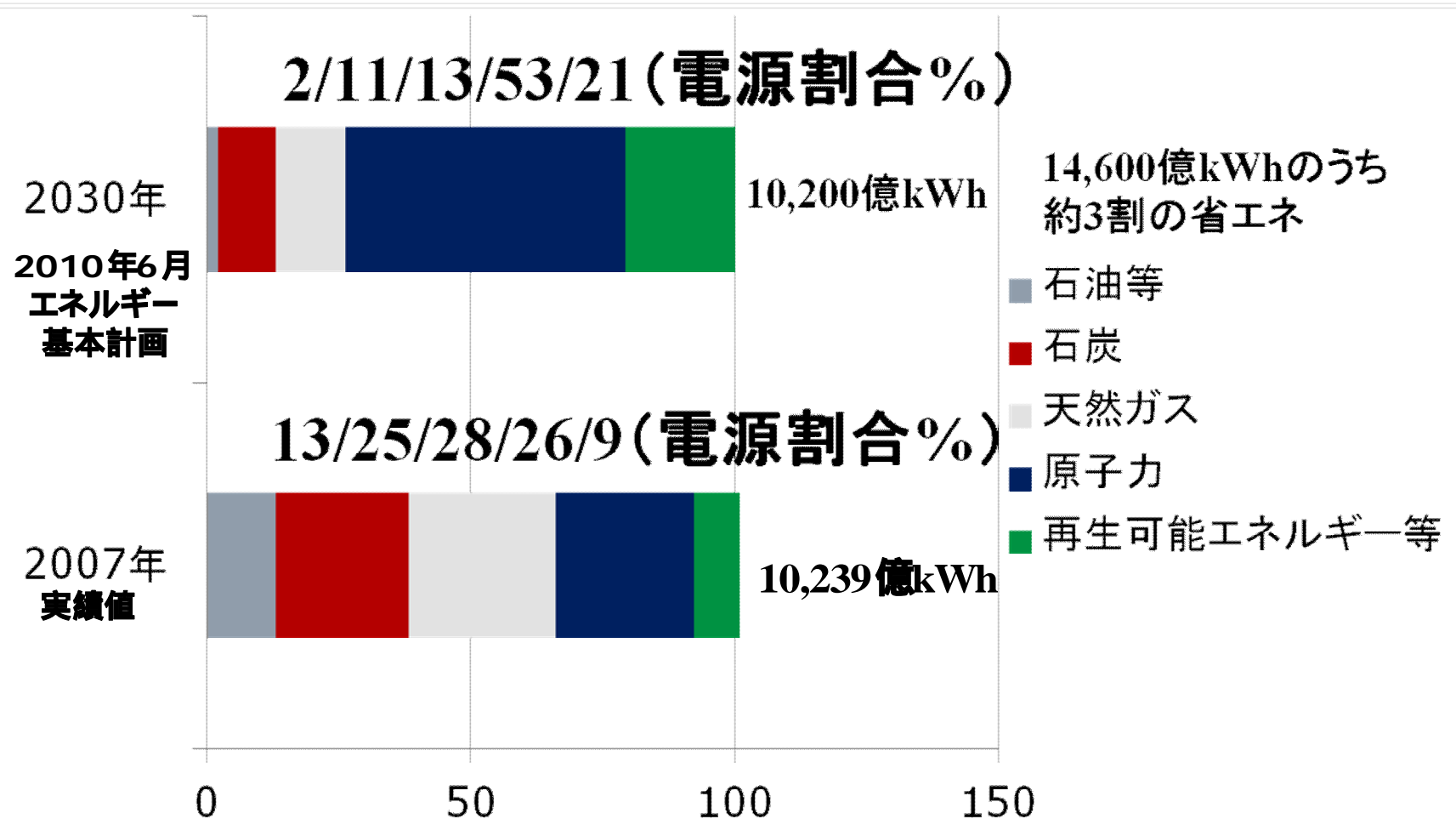
---

バイオマスエネルギーとは、食物の葉の葉緑素の中で大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を取り込み根から吸い上げた水(H<sub>2</sub>O)を太陽のエネルギーによって植物体(バイオマス)に変換することにより生成される。

2011年3月11日に起きた東北地方を中心とする地震・津波により大きな災害を受けた。その時、多くの「がれき」ができた。この「がれき」の大部分はバイオマスである。これを利用した発電が進められている。

バイオマスエネルギーは光合成による二酸化炭素の吸収と燃焼による二酸化炭素の放出がバランスするため、二酸化炭素放出量ゼロを達成していることから再生可能エネルギーと位置付けられている。

# 2007年及び2030年の電力需要と電源構成



# **エネルギー・環境問題を解決するには**

**再生可能エネルギーの経済性向上**

**核エネルギー(原子力)の安全性向上**



**再生可能エネルギーと原子力のベストミックス**



**核エネルギーは有力な候補**

**問題は高速炉(FBR)システムの構築**

**FBRシステム の研究開発が21世紀エネルギー・  
環境問題解決への鍵**

# 地球環境に優しい持続可能なエネルギー

---

## 考え得る候補

候補1: 再生可能エネルギー(太陽熱・光、風力など)

候補2: 非枯渇型の原子力(核融合、**FBR**)

候補3: 化石に代替する**水素**エネルギー

## FBRと水素を本命と考える理由

理由1: 太陽熱・光、風力などはエネルギー密度低

理由2: 核融合は原理実証の段階、実用化は将来

FBRは実証炉段階、実用化を見通せる

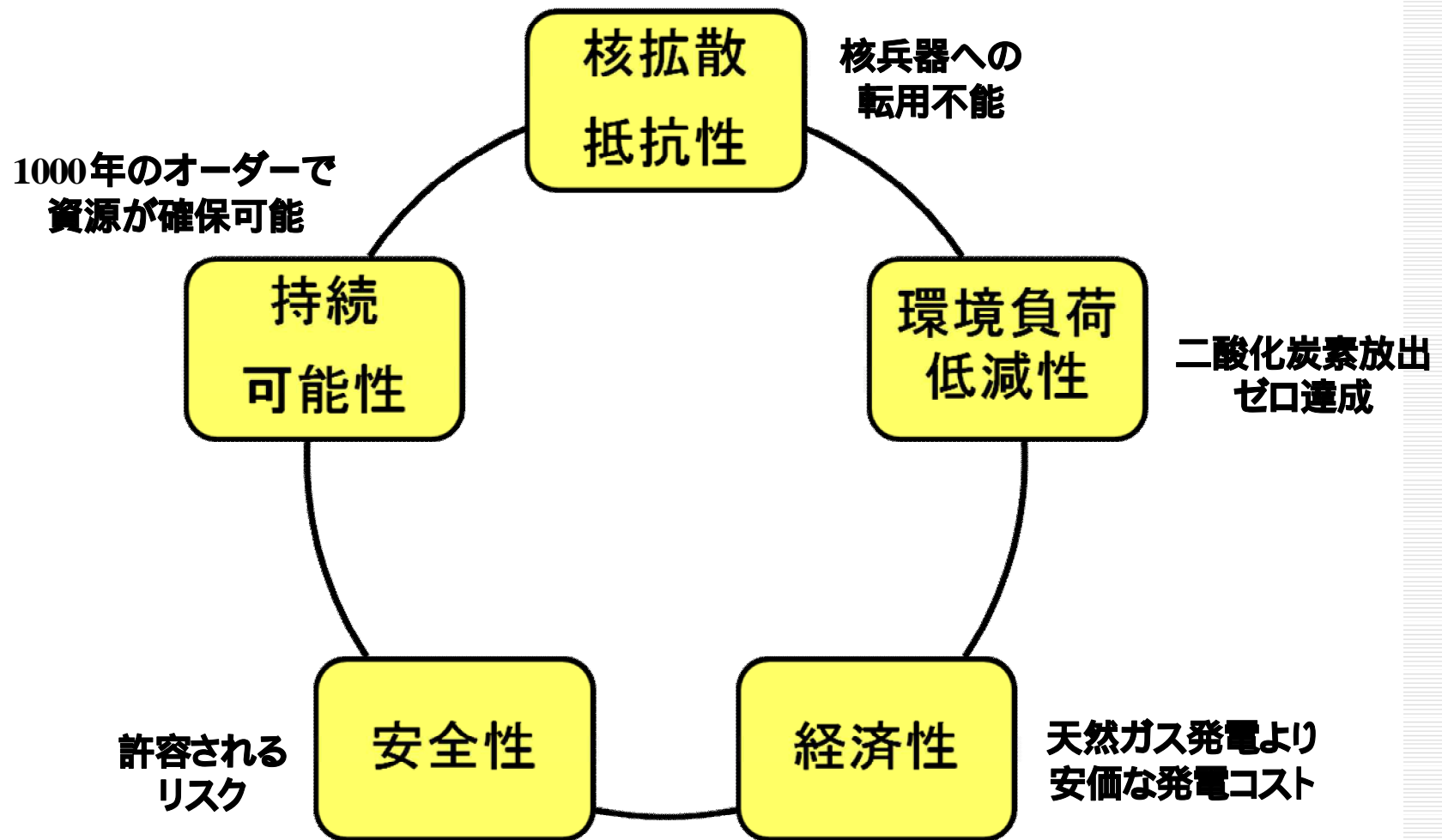
理由3: H/C値が大きいほど発熱大

Hは無量大

**結論: 「FBRによる発電と水素製造」**



# FBRシステムでは・・・



# 軽水炉での天然ウラン利用効率

軽水炉はワン・スルー、ウラン利用効率は1%未満



$$4x+0.2y=0.7(x+y)$$

x : 濃縮ウラン量

y : 劣化ウラン量

4 : 濃縮ウランの濃縮度

0.2: 劣化ウランの濃縮度

0.7: 天然ウランの濃縮度

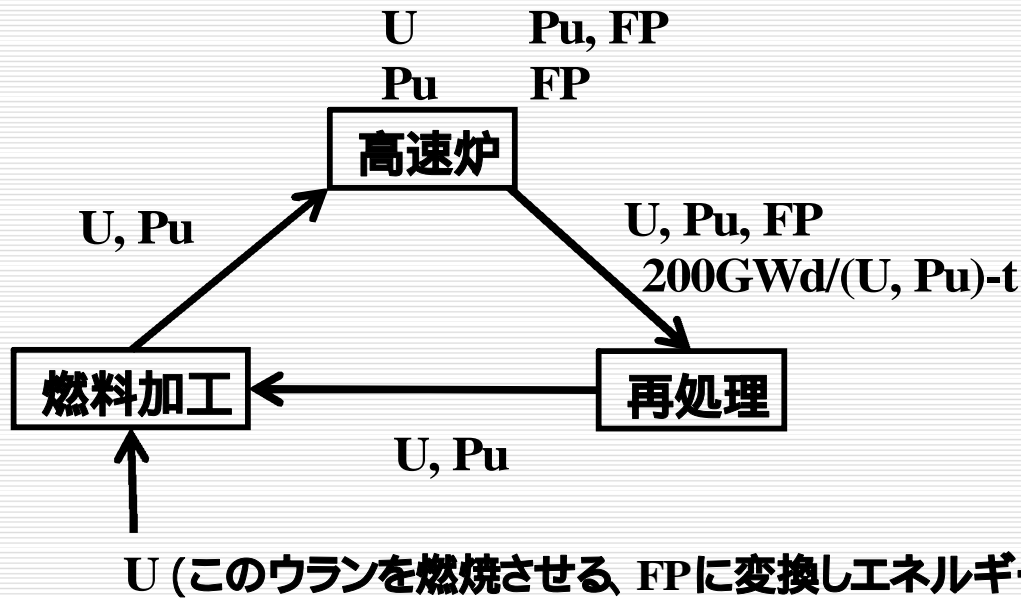
この場合、濃縮ウラン1に対し、天然ウラン7.68が必要

$$\text{天然ウラン利用効率} = \frac{60\text{GWd}/^E\text{U}-t}{1000\text{GWd}/^N\text{U}-t} \times \frac{1}{8} = \frac{60}{1000 \times 8} = 0.75\%$$

- ・ 軽水炉では天然ウランは99%以上燃焼せず(不完全燃焼)
- ・ 軽水炉でのプルトニウムリサイクル(プルサーマル)では多重リサイクルは技術的に不可

# 高速炉での天然ウラン利用効率

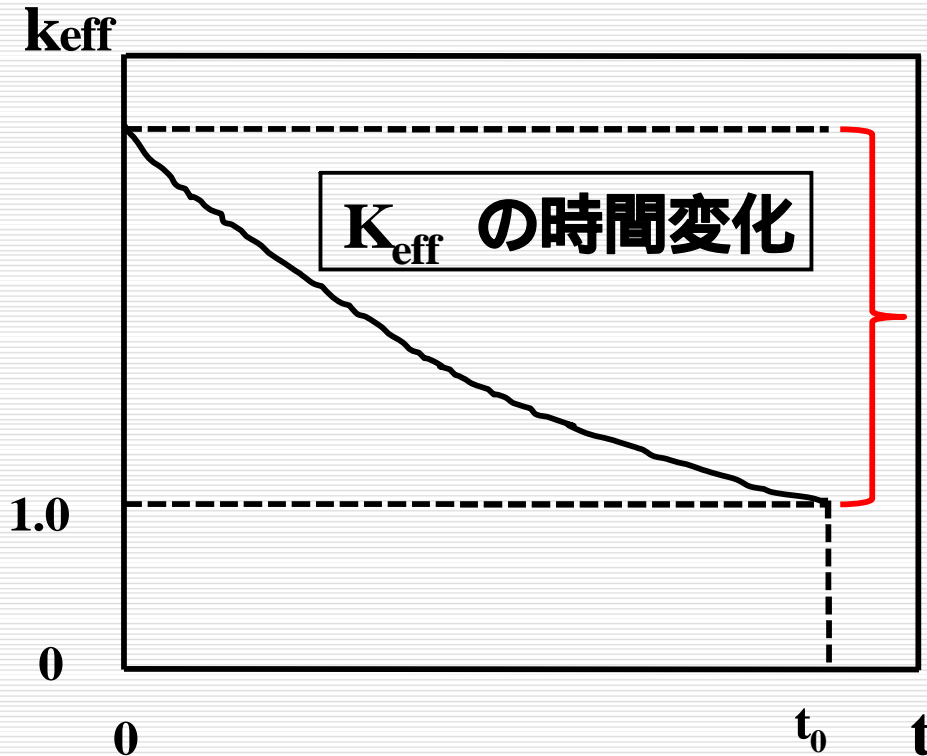
高速炉はリサイクル、ウラン利用効率100%も可能



- 高速炉とは、プルトニウムを触媒として天然ウラン( $^{238}\text{U}$ )を燃焼させるもの
- 部分的には不完全燃焼、しかし、リサイクルにより完全燃焼
- 高速炉システムは非枯渇性を有する。

# 中性子によって支配される原子炉

実効増倍率( $K_{\text{eff}}$ )は炉心内の中性子の数に依存する。



燃焼期間( $t_0$ )を確保するため、 $t=0$ で、炉心は余剰反応度を持つ必要がある。  
**濃縮ウランやプルトニウムの使用**  
初期の余剰反応度は、制御棒で抑制される。(中性子を吸収)

$K_{\text{eff}}$ が減少する原因

- ・ 核物質が減少 中性子放出が減少
  - ・ FPが増加 中性子吸収が増加
- いずれにせよ中性子数が減少  
燃料交換が必要

原子炉は中性子によって支配されている。

$\sigma_f$ 、 $\nu$  及び  $\eta$  が大きい核物質であるウラン-235 やプルトニウムが原子燃料となる。**高速炉ではプルトニウムが燃料となる。**

# FBRとは・・・

**FBR (Fast Breeder Reactor: 高速増殖炉)とは・・・**

**高速の中性子と核燃料の核反応を利用する原子炉  
プルトニウムの積極利用とは・・・**

**高速中性子と相性の良いプルトニウム(核特性)**

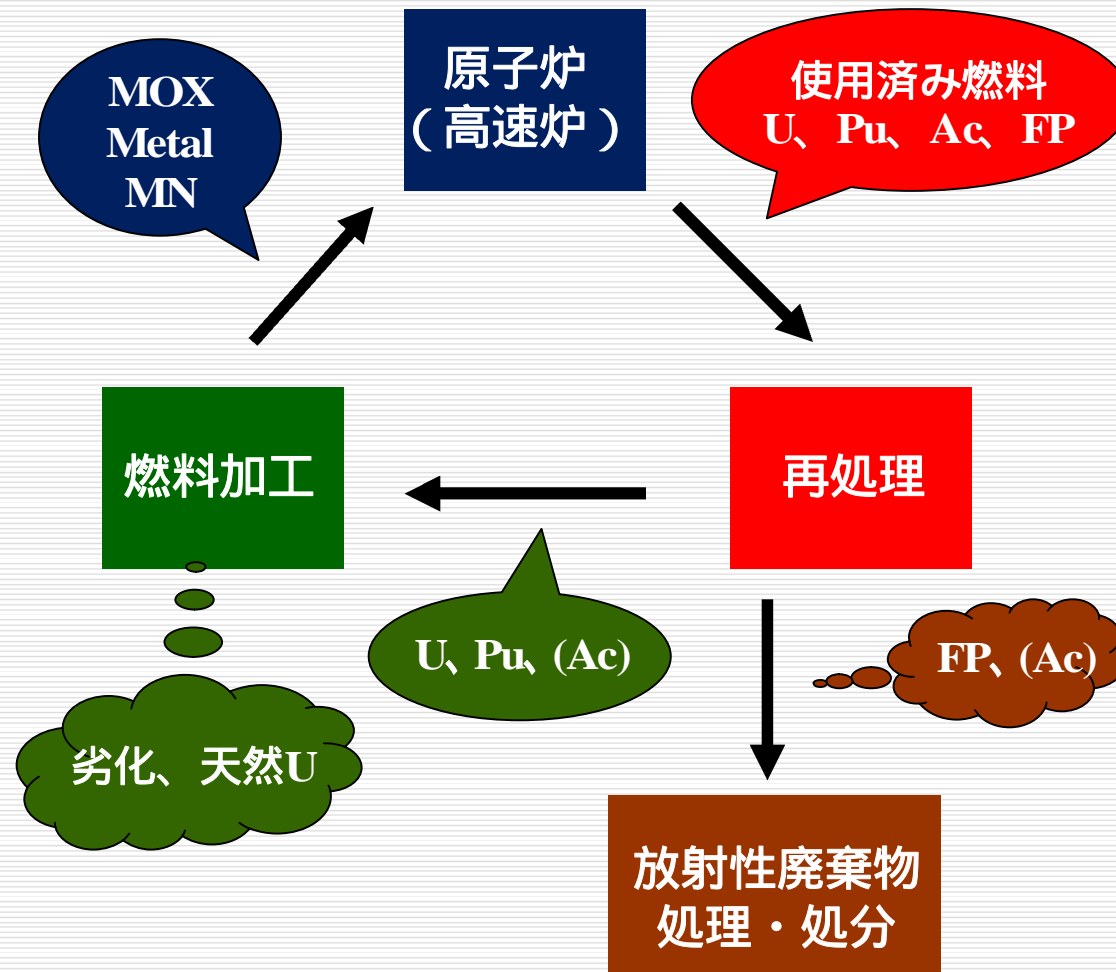
**プルトニウムは核分裂による発生中性子数多い  
核分裂以外にウランのプルトニウムへの核変換**

**FBRの特徴はエネルギーを  
生産しながら新しく核燃料を  
生産可能である。(増殖性)  
「環境に優しい」「非枯渇性」  
のエネルギーとなる。**



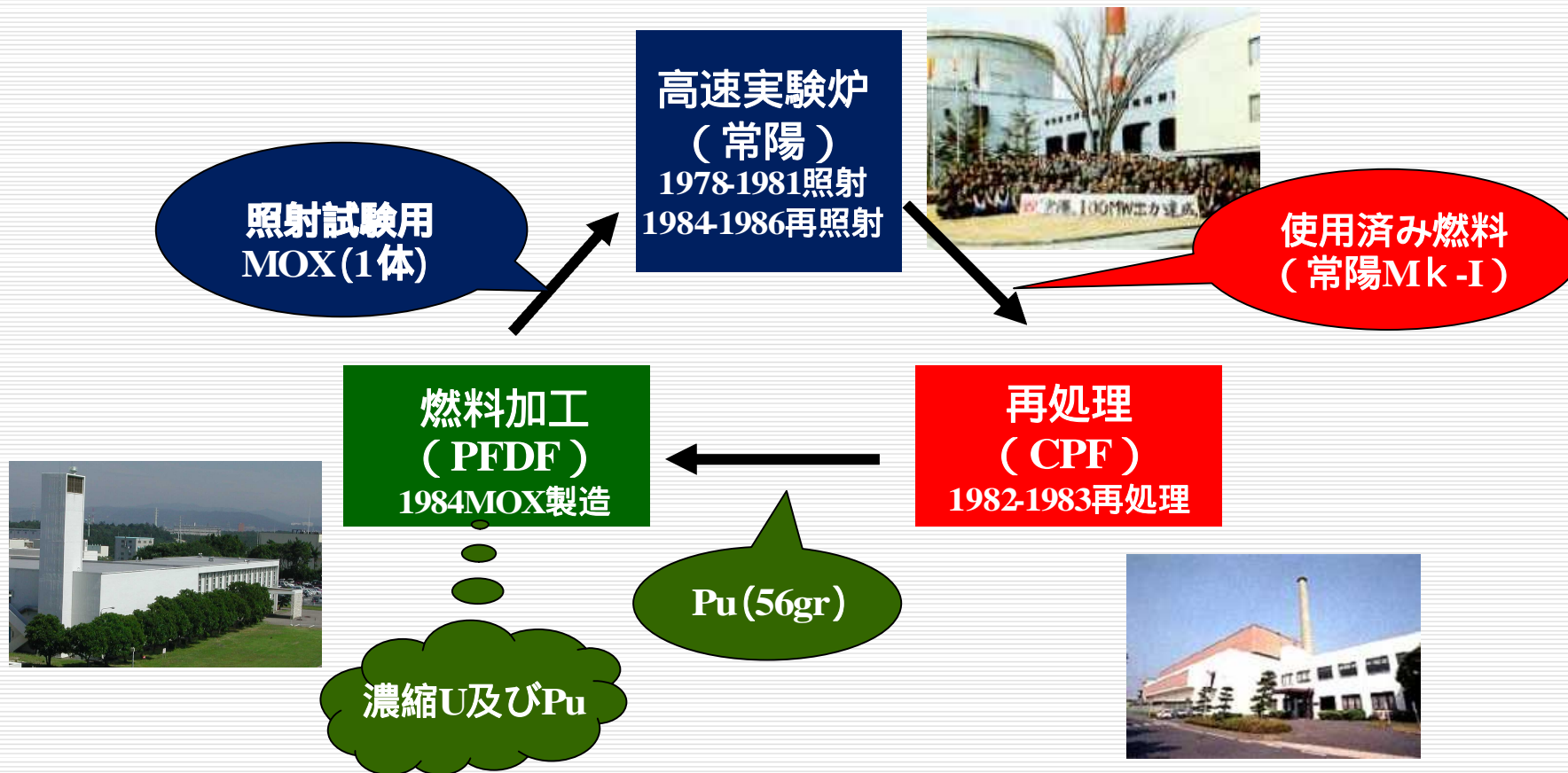
高速増殖原型炉もんじゅ

# 核燃料サイクルとは・・・



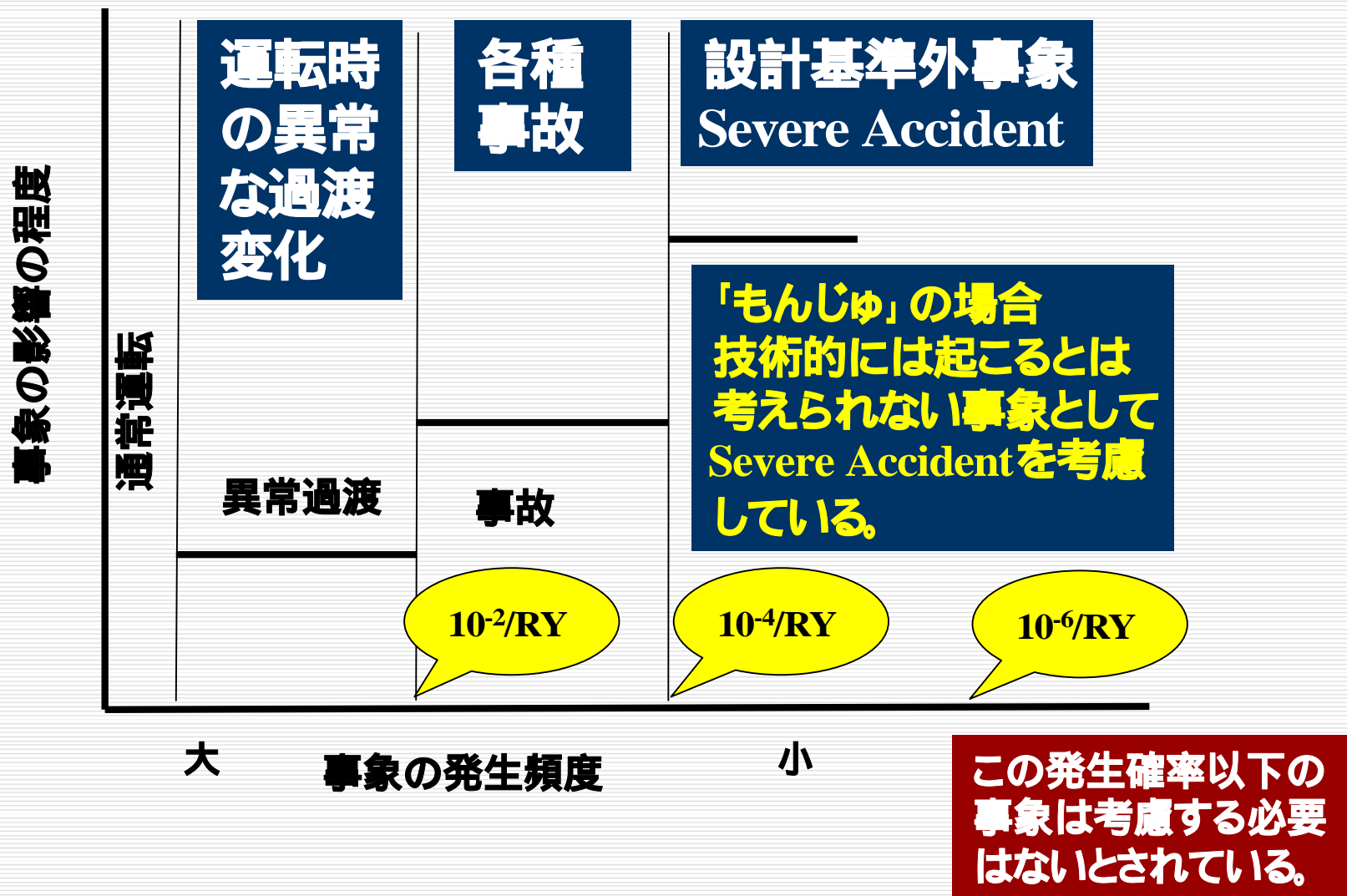
サイクルに供給する物質は劣化・天然ウラン、サイクルから排出される物質は核分裂生成物(FP)及び長半減期を持つアクチノイド元素である。

# 核燃料サイクルは閉じているか...



核燃料サイクルは、1982年から1986年の4年間かけて  
高速実験炉「常陽」、リサイクル試験施設「CPF」、及び  
プルトニウム燃料第1開発室「PFDF」で完結した。

# FBRの安全設計・安全評価





# FBRの安全設計・安全評価

運転時の異常な過渡変化

反応度挿入型(TOP: Transient Over Power)

制御棒引き抜き

冷却材喪失型(LOF: Loss of Flow)

1次系、2次系ポンプトリップ、軸固着、外部電源喪失

蒸気発生器伝熱管破損、タービントリップ

各種事故

重大事故

放射性物質の放出を伴う各種事故の中から選定しより多くの放出を想定し立地の妥当性を評価する。

仮想事故

技術的に起こるとは考えられない事象  
(Severe Accident)

局所燃料破損事象(Local Fuel Fault)

1次冷却系配管大口径破損事象(LOPI)

反応度抑制機能喪失事象(ATWS)

UTOP: 燃料分散 未臨界状態

ULOF: 炉心溶融 エネルギー放出

# 核燃料サイクルの是非について

## 21世紀社会の現状

地球温暖化や環境汚染、エネルギー問題、貧富の格差、民族抗争など多くの問題を抱え、人間社会が持続可能かどうか気になり出している。



## 問題解決のための方策

地球温暖化	原子力利用の推進
環境汚染	環境負荷低減可能な原子力システムの導入
エネルギー問題	非枯渇性の原子力システムの採用
貧富の格差、民族抗争	エネルギー安定供給による経済発展により解消



## 21世紀のエネルギー戦略

核燃料サイクル(高速炉、再処理、MOX加工)の確立