



エネルギー環境フォーラム  
2010 in 愛知教育大学  
平成22年5月22日

# これからのエネルギーの課題

日本原子力学会シニアネットワーク

齋藤伸三

# 本日の内容

- 1 . エネルギー問題とは何か？
- 2 . エネルギー消費の現状と将来
- 3 . 地球温暖化とCO<sub>2</sub>排出量
- 4 . これからのエネルギーは？
- 5 . 原子力発電の原理と安全性
- 6 . まとめ

# エネルギー問題とは何か？

1. エネルギー源に求められる3要件
  - ・ 安定供給の確保
  - ・ 地球環境への適合
  - ・ 市場原理の活用 - 経済性
2. エネルギー需要供給の現状と将来(価格変動含む)
3. 地球温暖化とCO<sub>2</sub>排出量問題

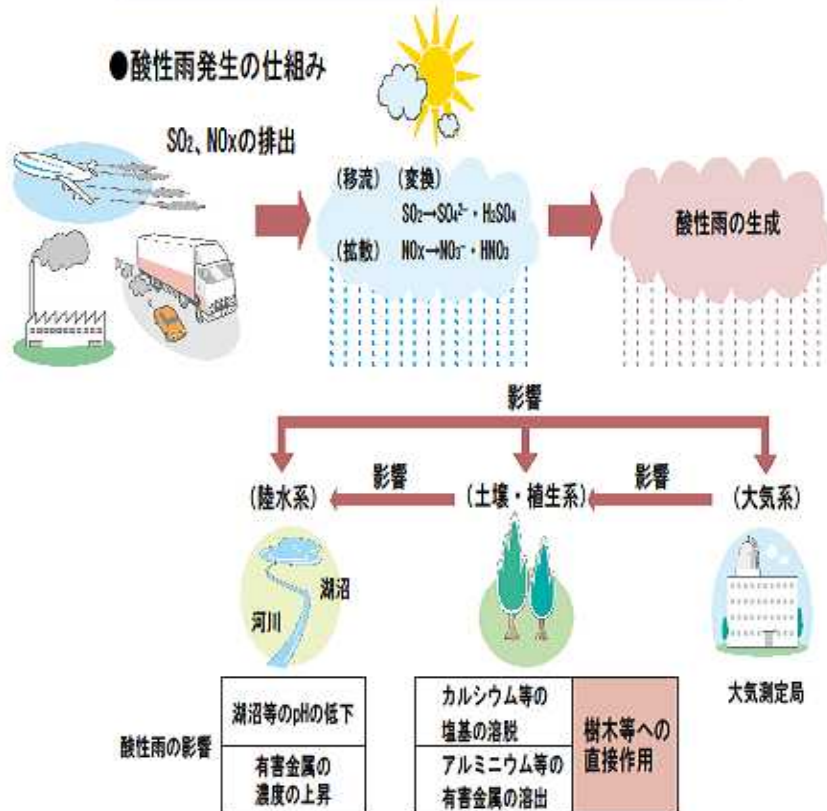
 これからのエネルギーは？

# 地球環境への適合

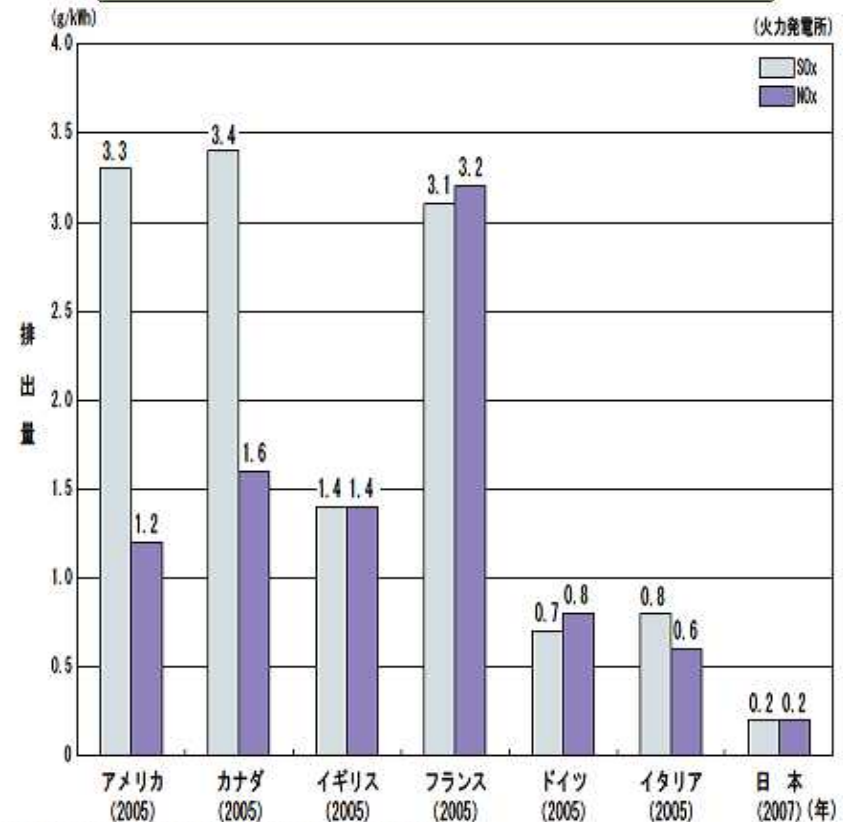
化石燃料等の使用により、地球温暖化の他に酸性雨、喘息、光化学スモッグ等の発生が考えられる。

## 酸性雨の発生

### ●酸性雨発生の仕組み



## 主要国の発電電力量あたりSOxとNOx排出量

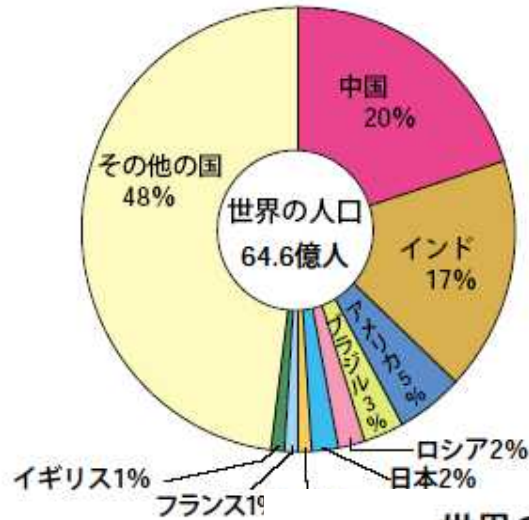


# エネルギー消費の現状と将来

1. 世界的に見たエネルギー需要
2. 国・地域的に見たエネルギー需要の推移と見通し
3. エネルギー源別の消費の推移と見通し及び化石燃料の可採年数
4. 化石燃料の価格変動
5. 我が国の一次エネルギー供給実績

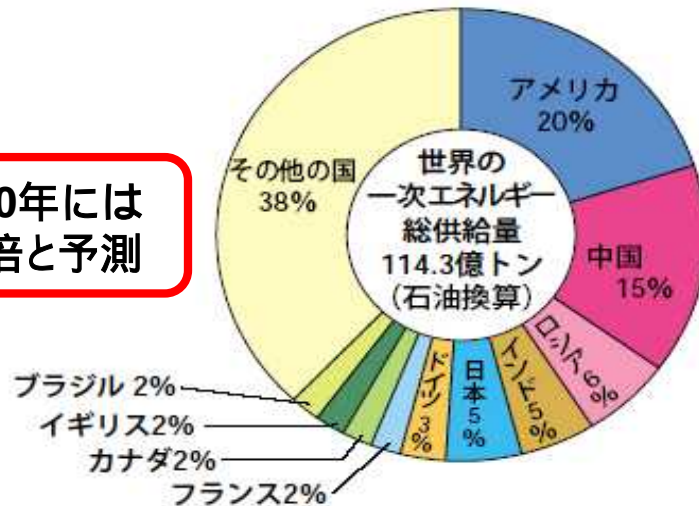
# 世界の人口とエネルギー消費量

世界の人口 (2005年)

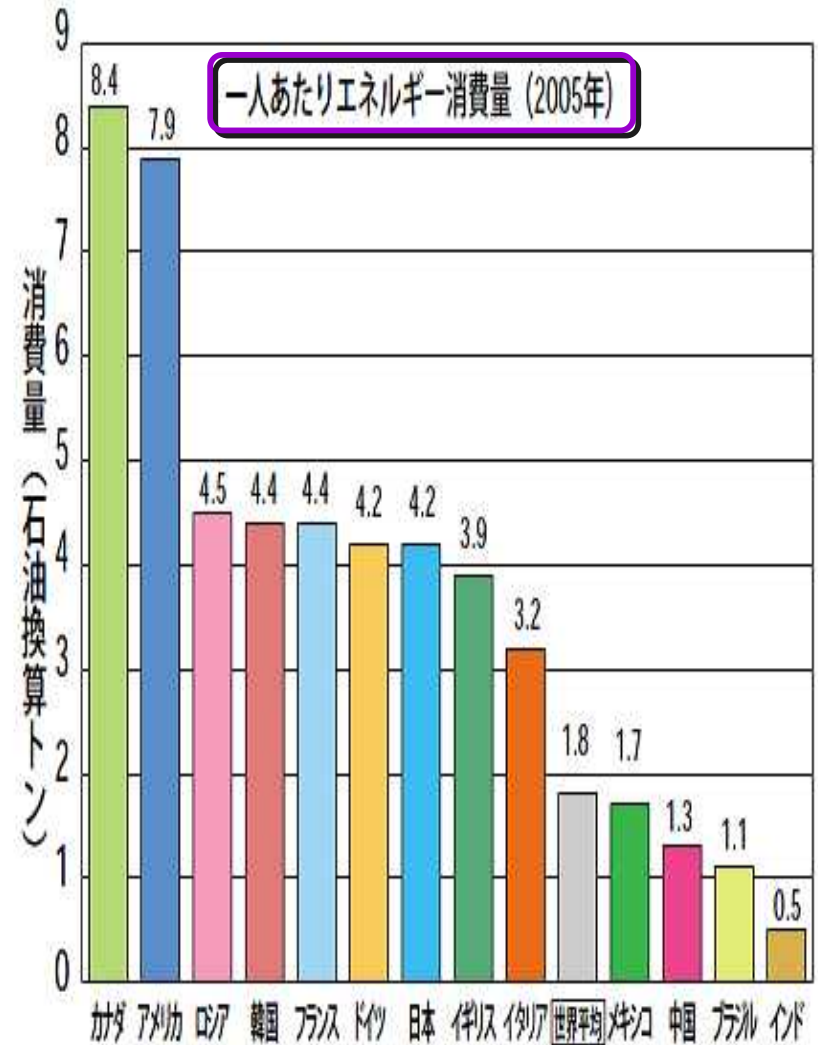


2050年には  
92億人と予測

世界の一次エネルギー消費 (2005年)

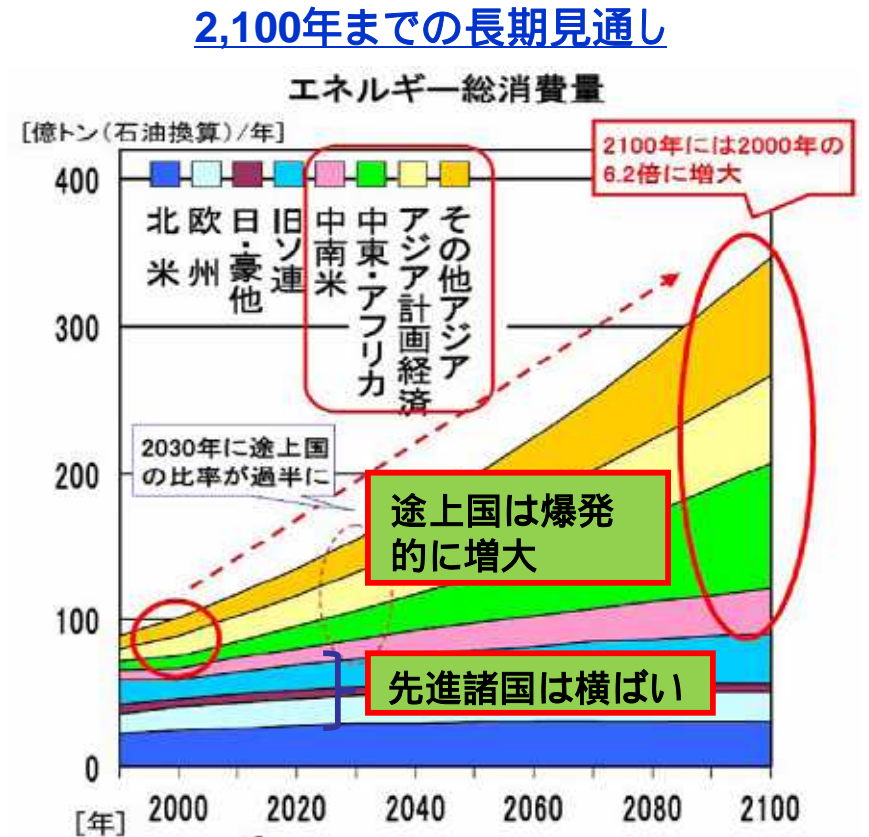
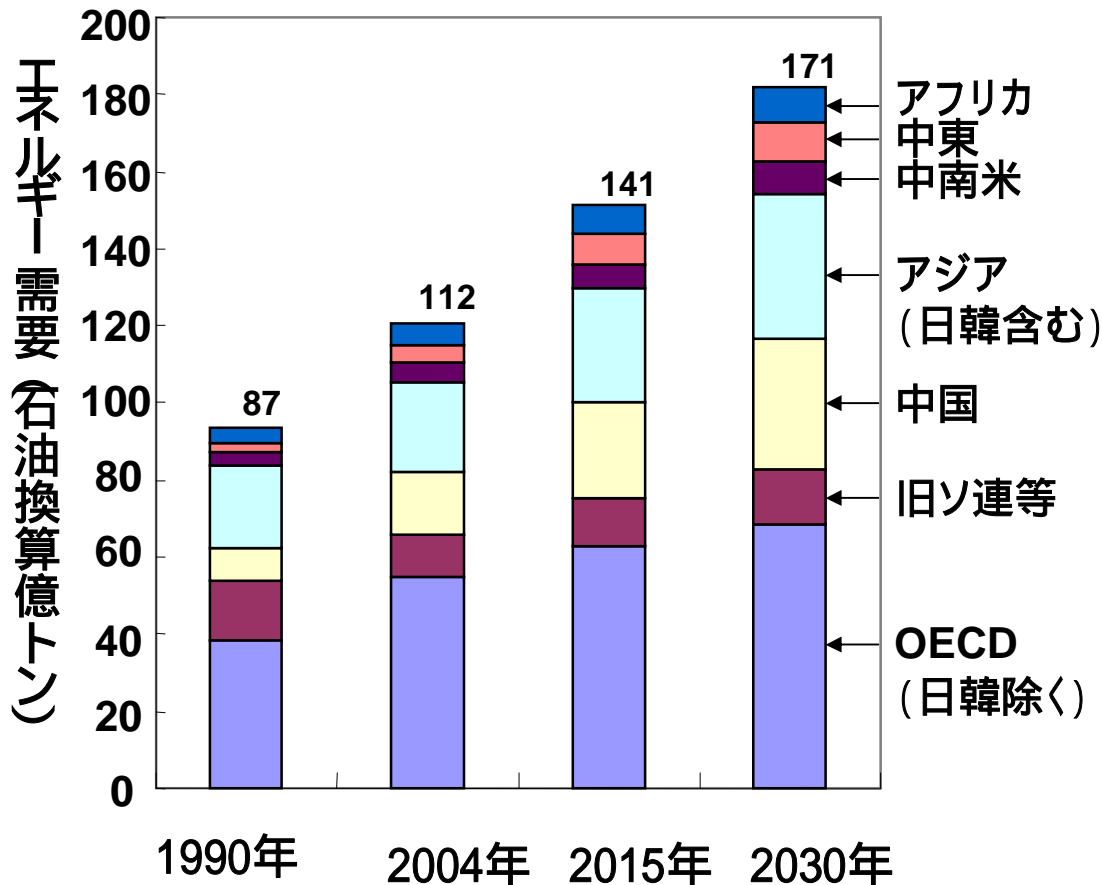


2030年には  
1.6倍と予測



# 世界の国・地域別エネルギー需要の推移と見通し

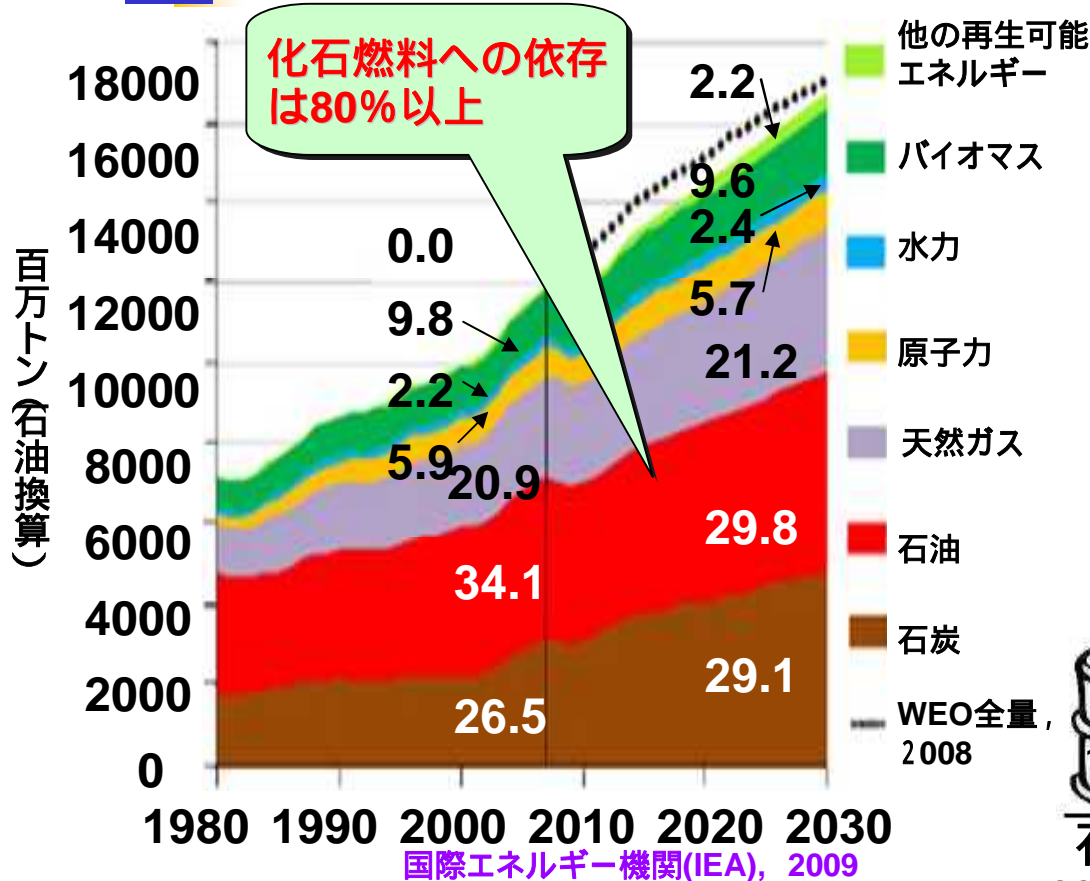
- ✓ 世界のエネルギー需要は、アジア、中東・アフリカを中心に増大する見込みとなっており、2030年には2004年比で約60%、2100年には6.2倍に増加する見込み。
- ✓ アジアでは、2030年に31億トンから62億トンに増大し、その62%は中国、インドで消費



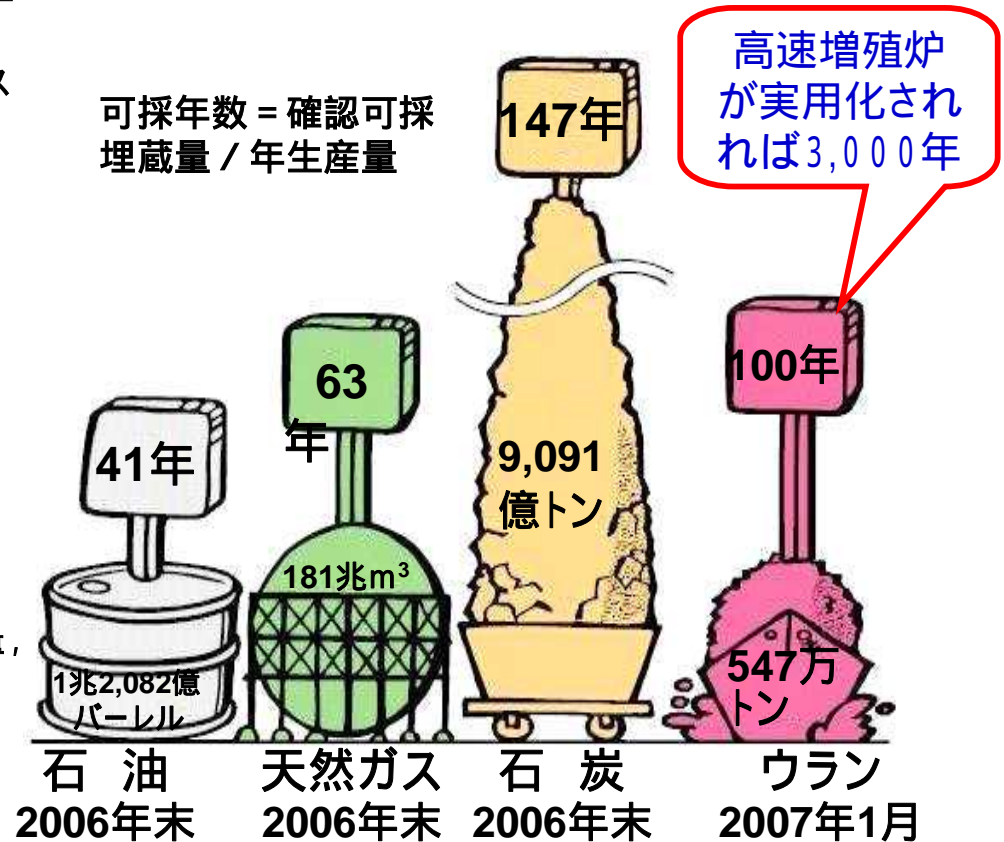
【出典：OECD/IEA, "World Energy Outlook 2006"】

# 世界の一次エネルギー消費の現状と将来

## エネルギー源別



## 資源確認埋蔵量と可採年数



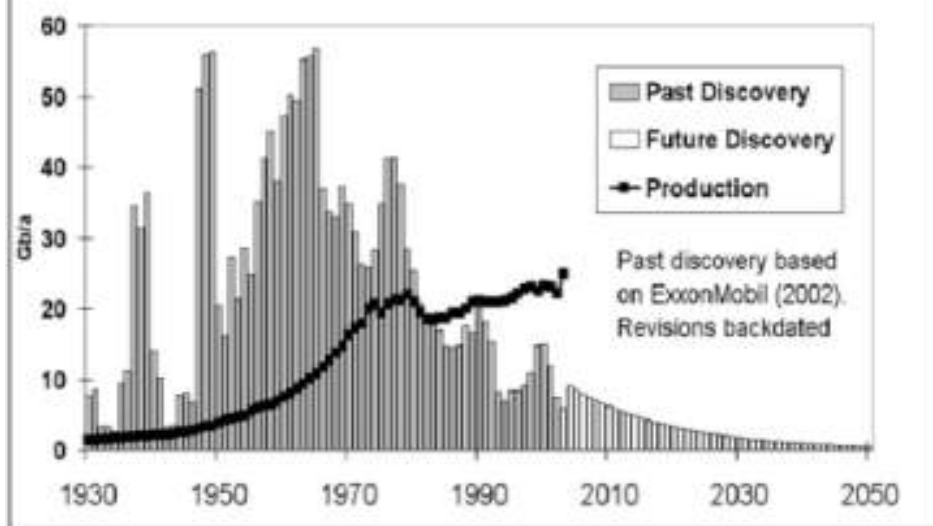
中国・インド等人口超大国、新興国等の需要拡大により世界的にエネルギー危機、資源争奪となる！

出典 (1) BP統計2007  
(2) URANIUM2007

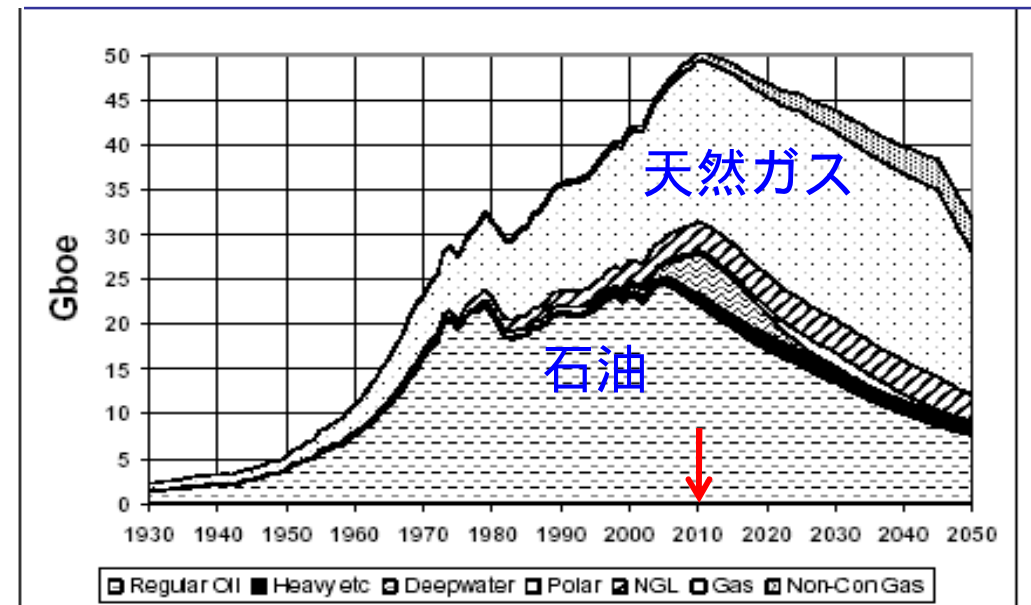


# 石油はいつまで供給できるか？

・最近の10年間は巨大油田の発見は殆どない



石油、天然ガスの生産量の推移と予測

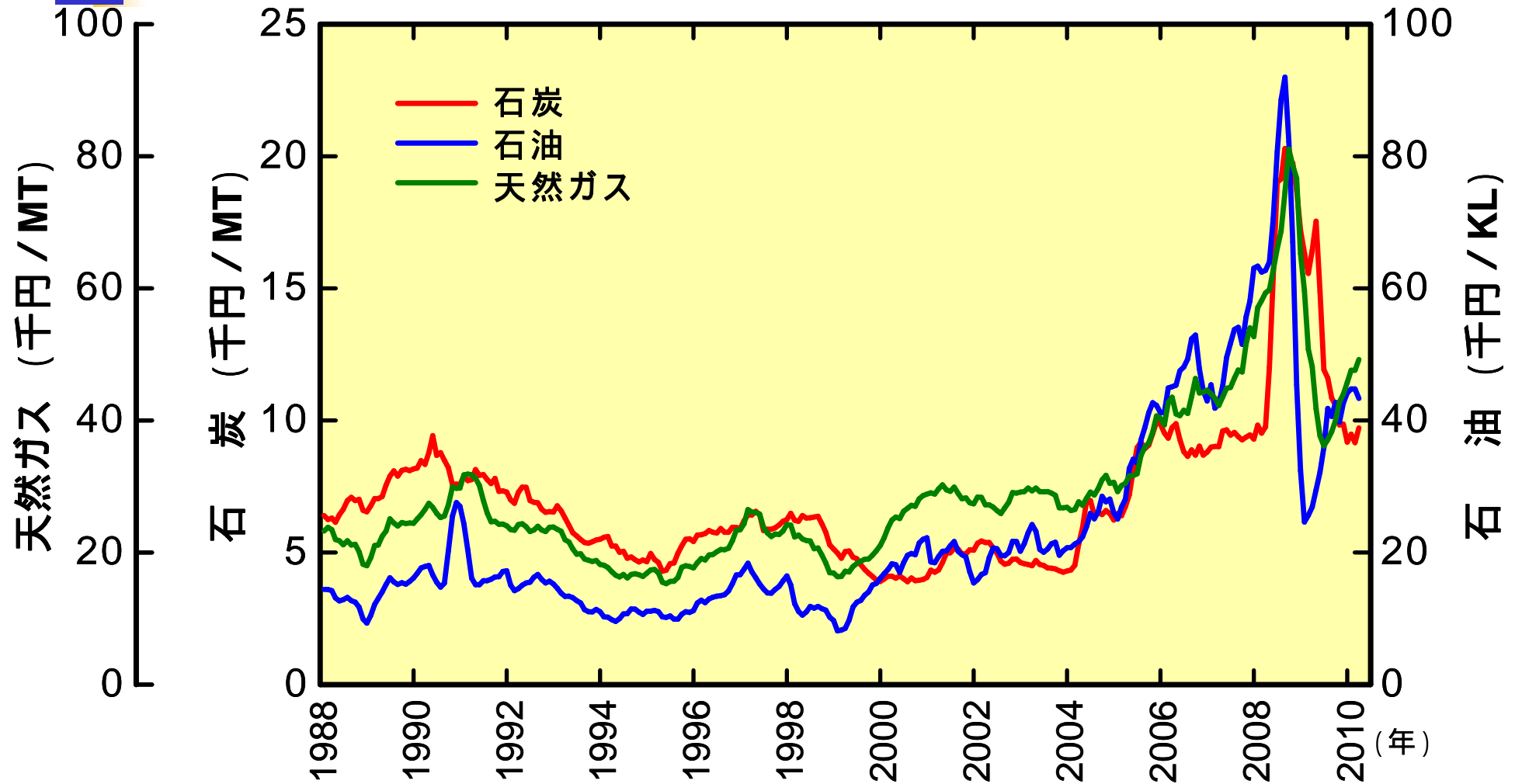


- ・世界の石油生産総量の85～90%は120箇所の巨大油田から生産
- ・巨大油田の発見は1960年がピーク

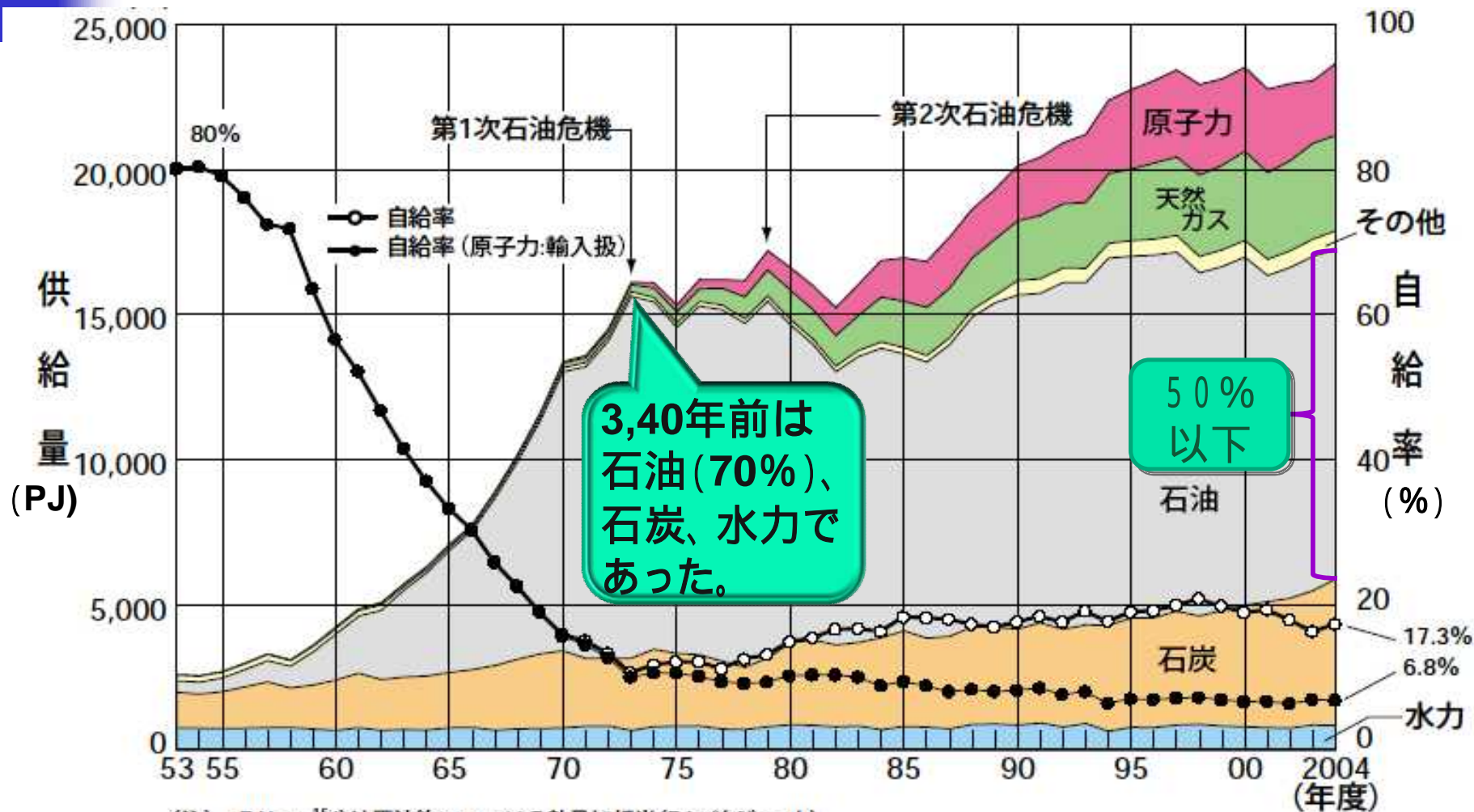
世界の石油も天然ガスも生産量のピークは近い。ピークオイルと言われている！

安くて豊富な石油時代の終焉

# 化石燃料の価格変動



# 日本の一次エネルギー供給実績



(注) 1PJ(=10<sup>15</sup>J)は原油約25,800klの熱量に相当(PJ:ペタジュール)

出典: 総合エネルギー統計(平成16年度版)

資源エネルギー庁「2004(平成16)年度におけるエネルギー需給実績について」

# エネルギー消費の現状と将来のまとめ

1. エネルギー消費の80%は化石燃料(石油、石炭、天然ガス)に依存しており、この構造は簡単には変わらない。
2. 化石燃料の確認埋蔵量には限度があり、一方、今後、開発途上国の消費量は爆発的な増加が見込まれ、厳しい資源争奪が行われている。
3. 安い化石燃料の時代は終わりつつあり、特に、石油価格において顕著である。
4. 地球環境問題も含め、化石燃料の代替エネルギーが求められているが、量的、経済的に満足できるエネルギーはあるか？(後述)

# 地球温暖化とCO<sub>2</sub>排出量問題

- 1 . IPCC第4次報告書の要点
- 2 . 地球温暖化の影響
- 3 . エネルギー消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量の推移
- 4 . 京都議定書後の国際取り決め

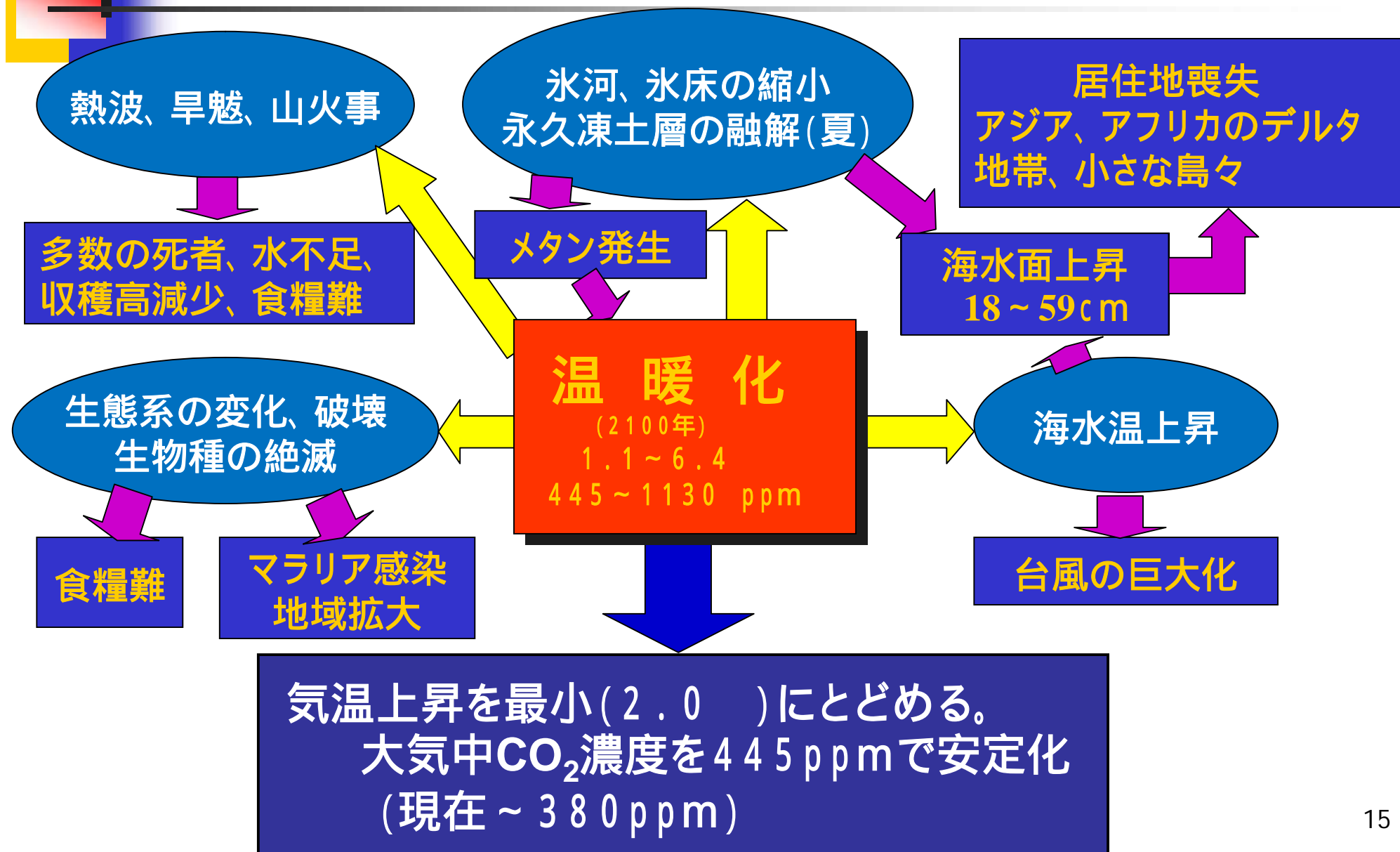
# IPCC第4次報告書WG1(自然科学的根拠)の要点

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)は、1988年に設立された国連の組織で地球温暖化に関する科学的・技術的・社会経済的な評価を行い、得られた知見は政策決定者、一般の利用に供する。

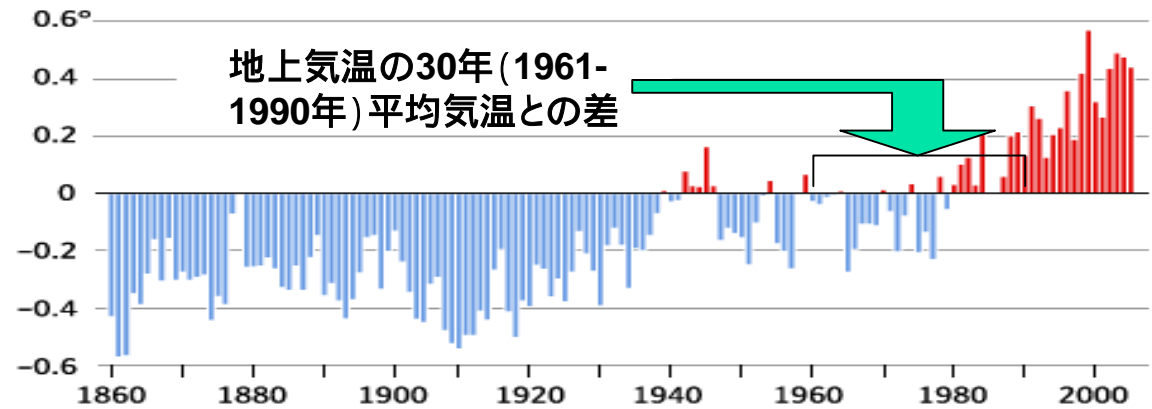
1. 温暖化の原因は人為起源の温室効果ガスとほぼ断定
2. 2006年までの12年間は最も高い気温
3. 過去100年間で0.74 気温上昇
4. 21世紀末で1.1 ~ 6.4 気温上昇
5. 海面上昇18 ~ 59cm
6. 2030年までは10年あたり0.2 気温上昇
7. 熱帯低気圧が強まる
8. 21世紀後半で、北極海氷消滅
9. 海洋の酸性化
10. 海洋、陸地とも二酸化炭素の取り込み減少

しかし、二酸化炭素が主要因か？ 自然変動要因説もあり、更には寒冷化という説もある。科学的には論争中！ クライメイトゲート事件

# 地球温暖化の影響



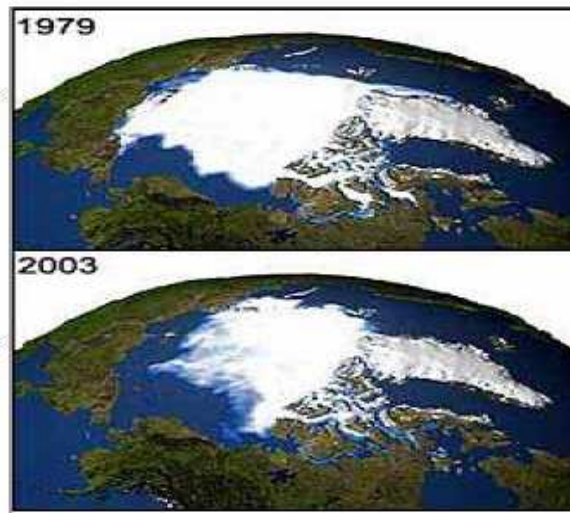
# 地球温暖化は起こっているか？



【出典: IPCC第三次報告書】



巨大台風「カトリナ」による被害



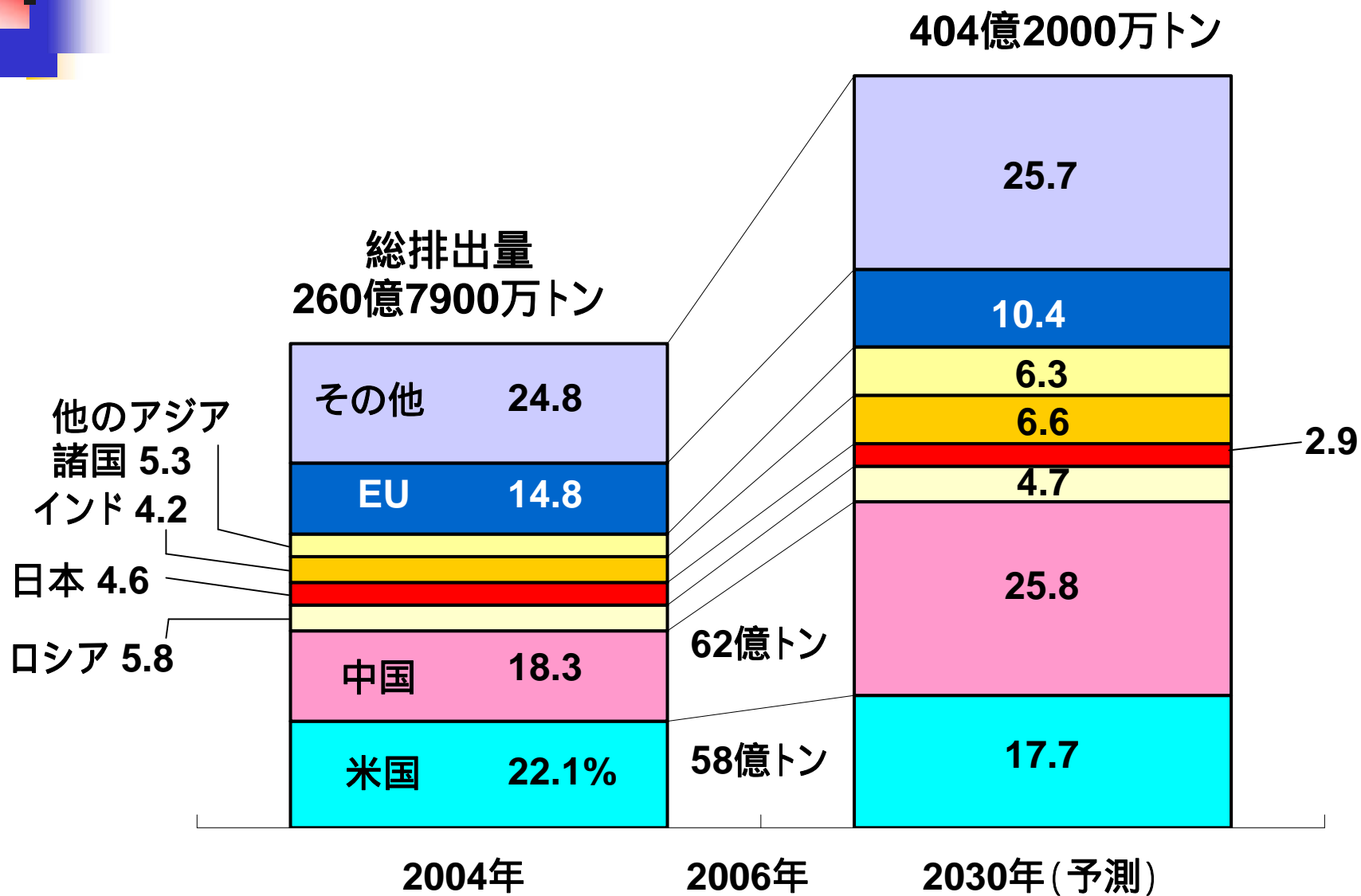
北極の氷の変化(NASA)



ツバルでの家の水没 16

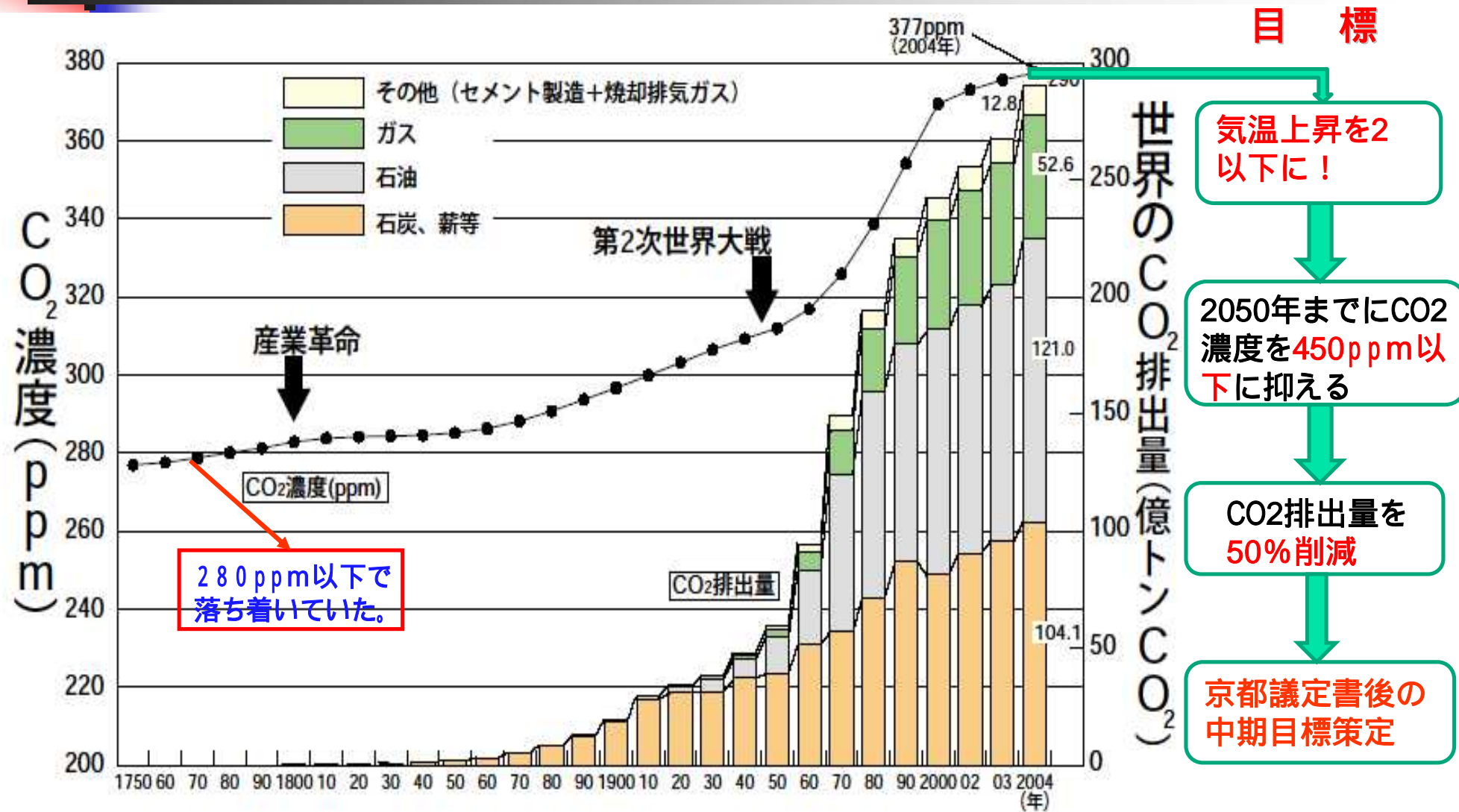


# エネルギー消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量



IEA 2006年予測

# 化石燃料等からのCO<sub>2</sub>排出量と大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変化



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

出典：二酸化炭素情報分析センター (CDIAC, ORNL) -HP

# 主要国が提出したCO<sub>2</sub>削減中期目標

京都議定書後(2013~)の対応

2020年までに

	削減率	基準(年)
日本	25%	1990年
EU	20~30%	1990年
米国	17%前後	2005年
ロシア	15~25%	1990年
オーストラリア	5~15%(または25%)	2000年
中国	40~45%	2005年比のGDP当たり CO <sub>2</sub> 排出量
インド	20~25%	同上
ブラジル	36.1~38.9%	対策を取らなかった場合の 20年時点の排出量見込み
南アフリカ	34%	同上

# 地球温暖化問題のまとめ

1. **大量の化石燃料の消費により莫大なCO<sub>2</sub>が排出され、**今後も加速的に増加すると懸念されている。
2. IPCCは、温暖化の原因は人為起源の温室効果ガスの排出によるとほぼ断定し、不可逆的な温暖化を防ぐためには**気温上昇を2℃以下に抑える**ことが必要であり、このためには**2050年までにCO<sub>2</sub>排出量を50~80%削減**する目標で国際的な中期目標策定の交渉が実施されている。  
(IPCC報告書に対する疑念も持ち上がっている。)
3. **国際交渉は、先進国と途上国間の意見の相違、CO<sub>2</sub>大量排出国の思惑、経済発展に及ぼす影響等の問題**があり難航している。

# これからのエネルギーは？

1. 新エネルギーへの期待は？
2. 原子力発電はどの程度寄与するの？
3. 化石燃料利用によるCO<sub>2</sub>は閉じ込められるの？
4. 省エネは重要
5. 我が国のエネルギー政策

# 新エネルギーの定義



## 革新的なエネルギー高度利用技術

再生可能エネルギーの普及、エネルギー効率の飛躍的向上、エネルギー源の多様化に資する新規技術であって、その普及を図ることが特に必要なもの

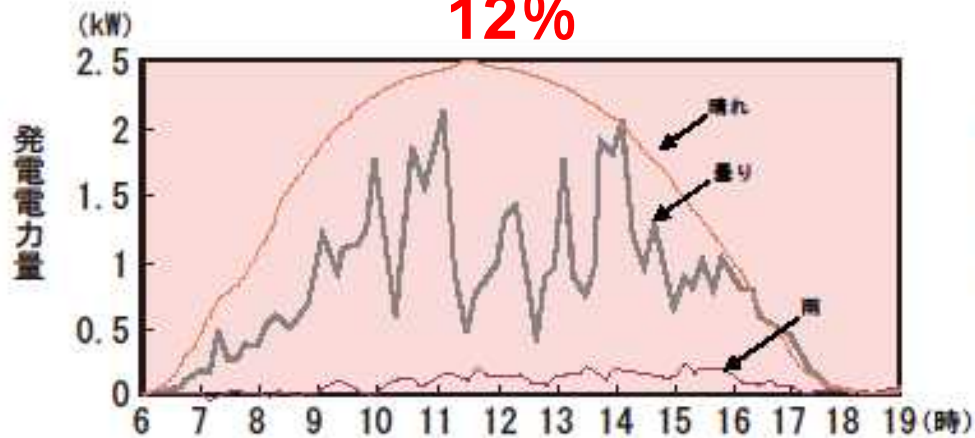
(例) クリーンエネルギー自動車、天然ガスコジェネレーション、燃料電池等

化石原料由来廃棄物発電・熱利用・燃料製造  
化石原料由来廃棄物発電・熱利用・燃料製造については、省エネルギーの一手法として位置付けられる。

# 太陽光・風力発電の出力変動

太陽光発電の出力変動（春季）

年間平均設備利用率  
**12%**

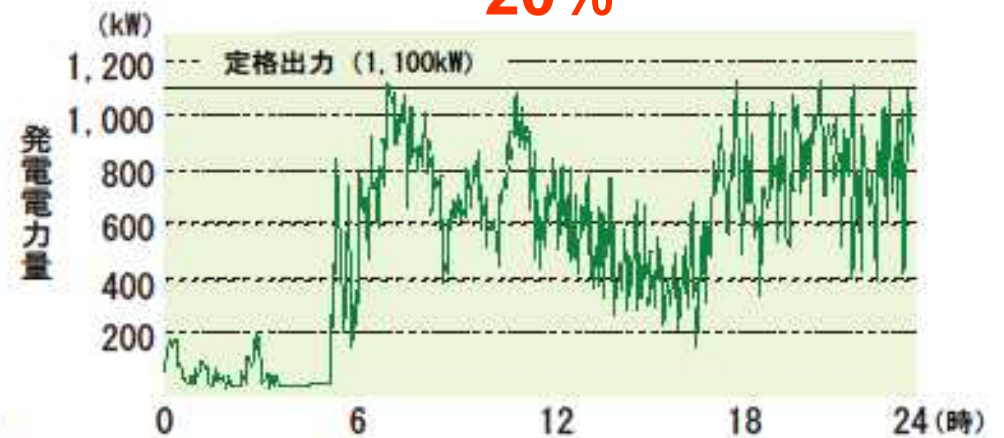


容量3.2kW、北緯34.4°、東経132.4°、方位角0°(真南)、傾斜角30°の場合

太陽光発電は  
時間と天気で  
発電量が変わる

風力発電の出力変動（冬季）

**20%**

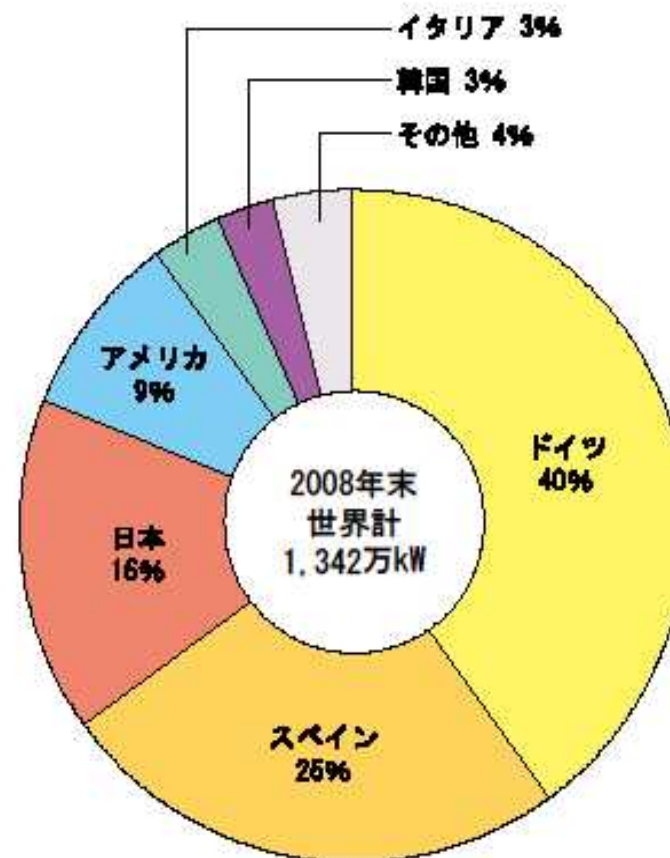
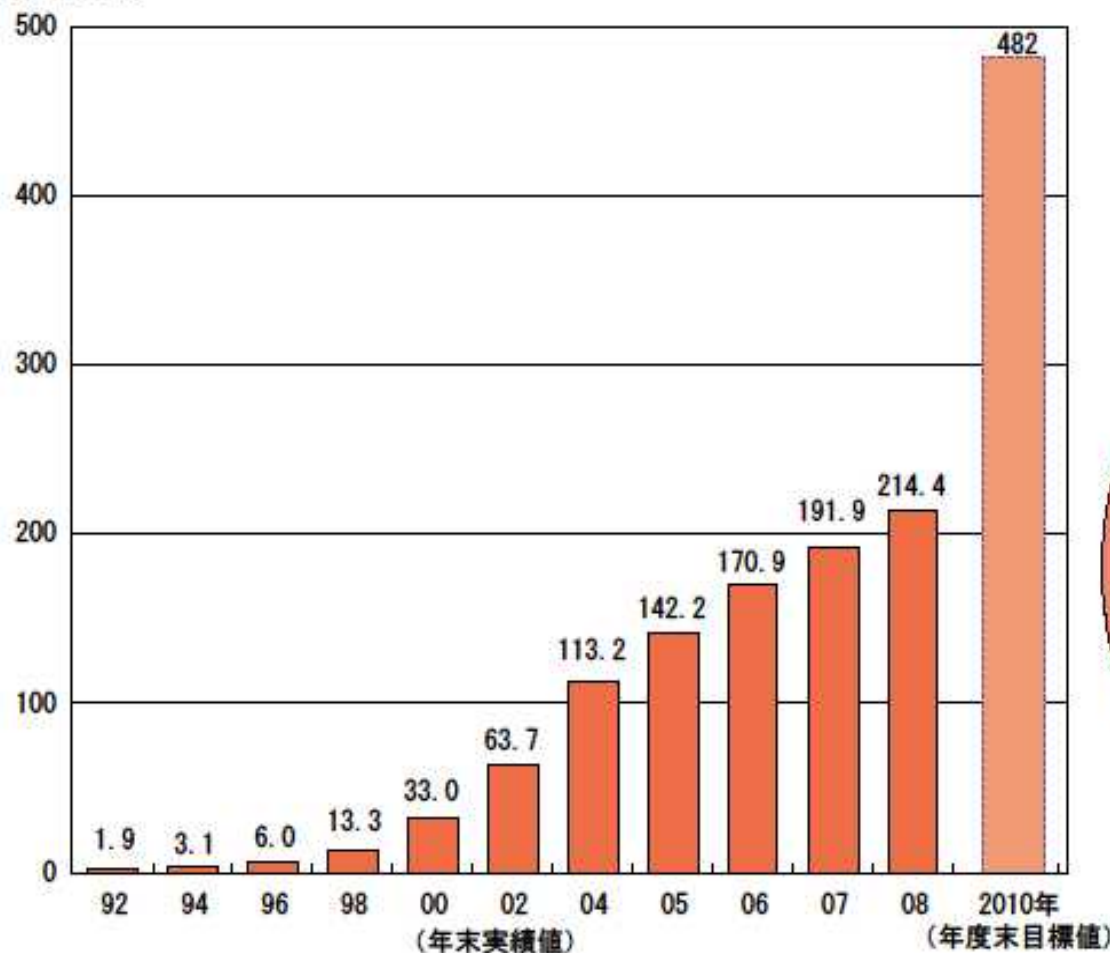


風力発電は  
風の強さで  
発電量が変わる

# 我が国の太陽光発電導入量の推移

(設備容量)

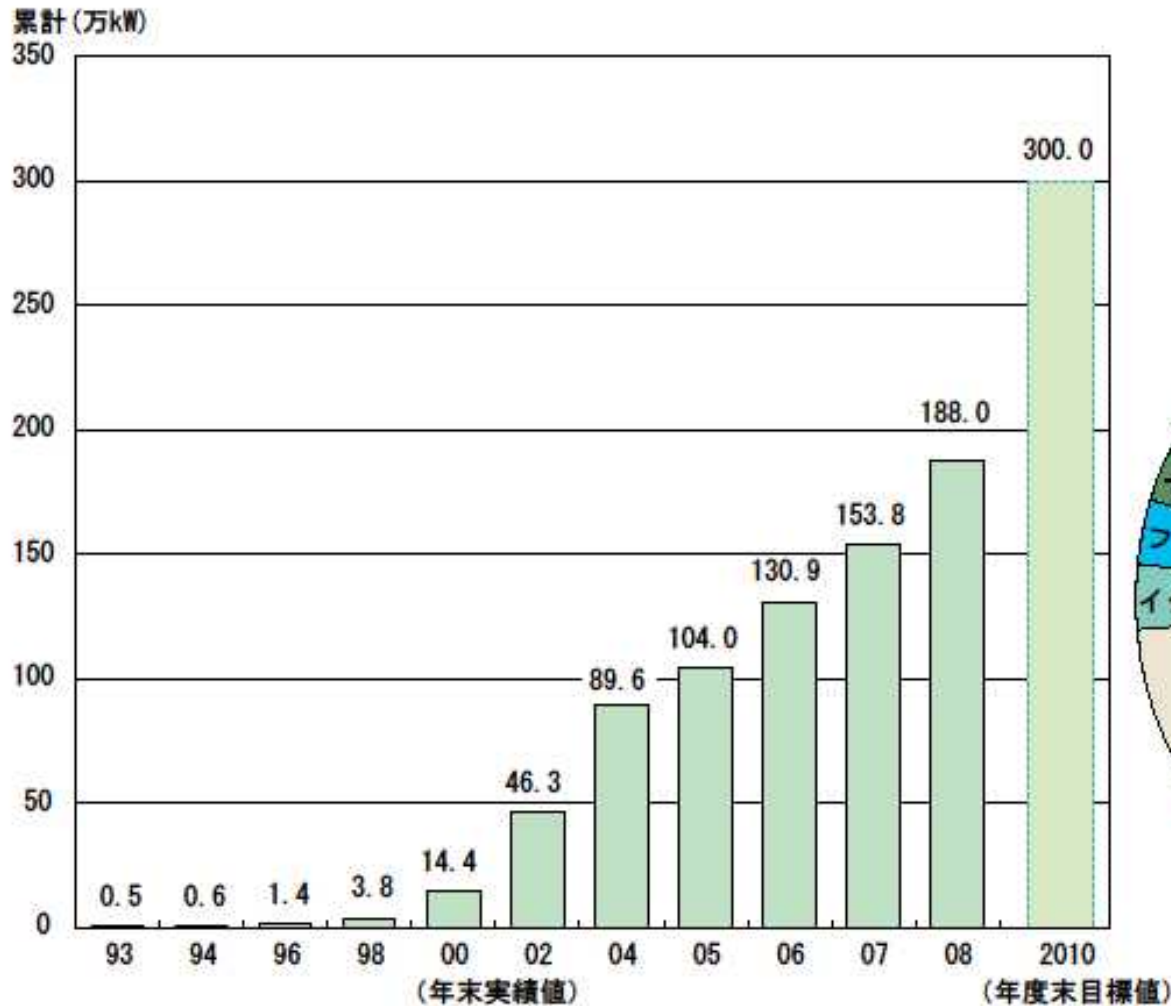
累計(万kW)



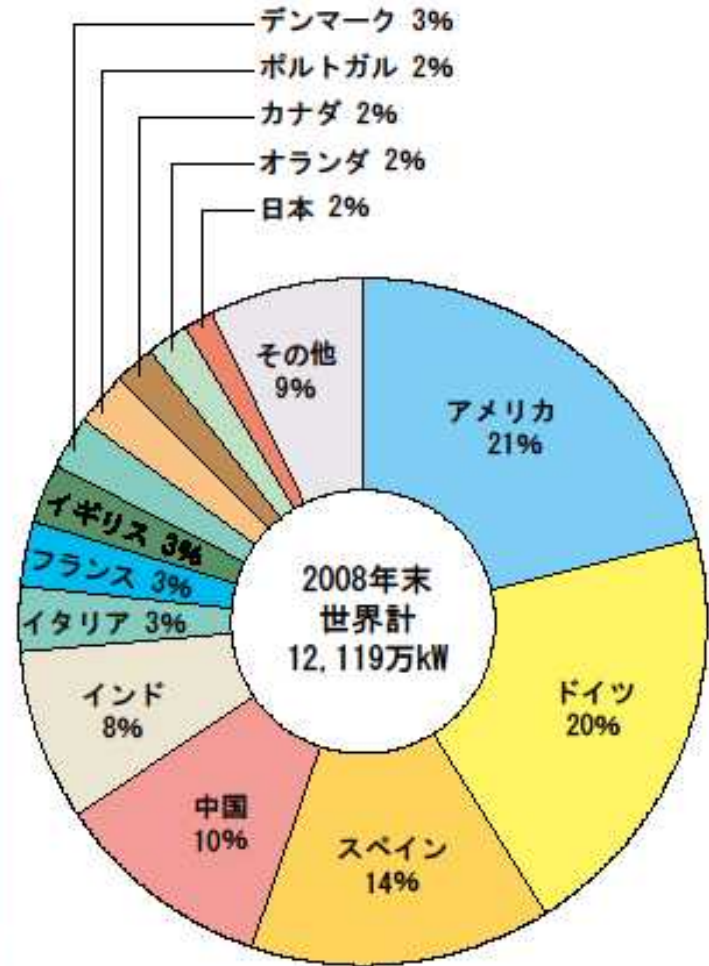
(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある



# 我が国の風力発電導入量の推移 (設備容量)



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある



# 新エネルギーの導入と課題

- ✓ CO<sub>2</sub>の排出量削減には、太陽光や風力など新エネルギーの導入も非常に有効な手段
- ✓ ただし、現時点では経済性や供給安定性などの課題が存在することも事実

## 各種発電(100万kW級)の比較

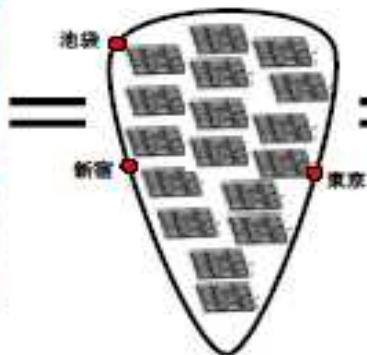
### 原子力発電所一基

~1km<sup>2</sup>  
(3000億円)



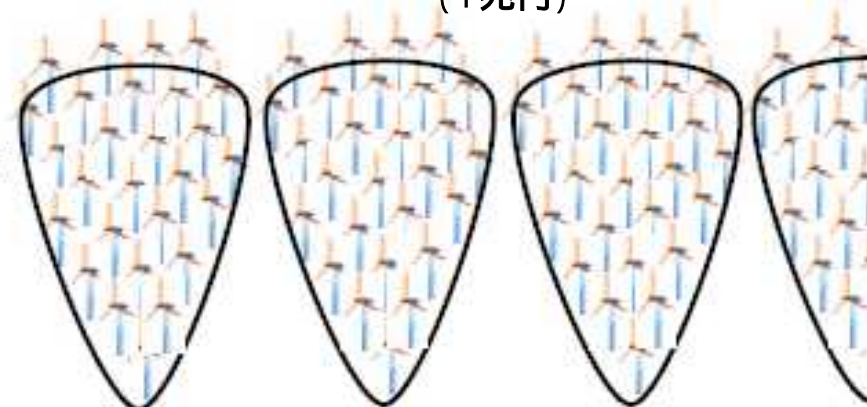
### 太陽光発電

山手線一杯の面積(約67km<sup>2</sup>)  
(6~7兆円)



### 風力発電

山手線の3.5倍の面積(約264km<sup>2</sup>)  
(1兆円)





# バイオマスエネルギー

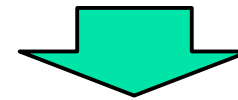
- 建築廃材、作物残余物、間伐材、生ごみ等の燃焼による熱利用や発電、家畜糞等の利用が主体
- 現在のバイオエタノール生産量は0.5億トン（石油換算）（米国、ブラジル他）  
世界全体のエネルギー（100億トン）の0.5%
- 食糧高騰、森林伐採などを伴う穀物原料のバイオエタノールは好ましくない。  
バイオ廃棄物、雑草、木材等によるバイオエタノールの生産が望まれる。

# 我が国の地熱発電の可能性



## 現状

日本の地熱発電は全国18箇所、20プラント、最大出力**53.4万kWe**、全電力の**0.3%**、風力+太陽光発電と同等。



## 経産省 支援強化

開発・発電施設費補助: 2割 3分の1

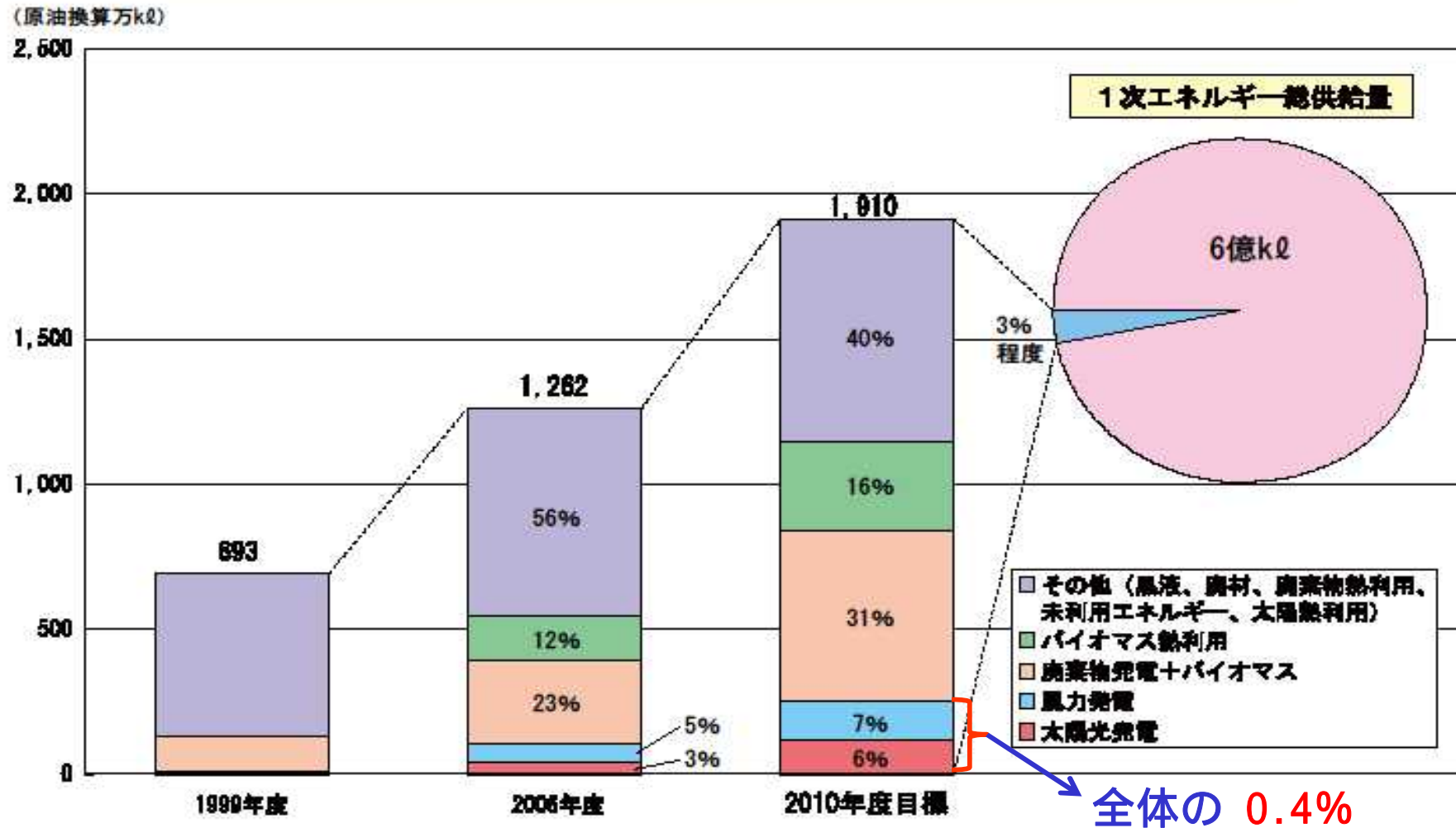


## 経産省試算

2020年 **120万kWe**

2030年 **190万kWe**

# 我が国の新エネルギー導入実績と目標



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

# スマートグリッドの導入課題

スマートグリッドとは、人工知能や通信機器を搭載した計測機器等を設置して電力需要を自動的に調整する機能を持たせることにより、電力供給を人の手を介さず最適化できるようにした電力網である。

課題： 新エネルギーの効率的活用方法(蓄電池、電気自動車等)、IT技術の信頼性、コストパフォーマンス、消費者のプライバシー等

スマートグリッドによる“新しい世界”





# 原子力発電はどの程度寄与できるか

## 全発電電力量の約30%を供給

### 1 . 安定供給の確保

燃料のウランは、政情安定な国から輸入出来、資源量も比較的十分に存在する。また、原子炉に一度燃料を装荷すれば3年以上使用出来る。

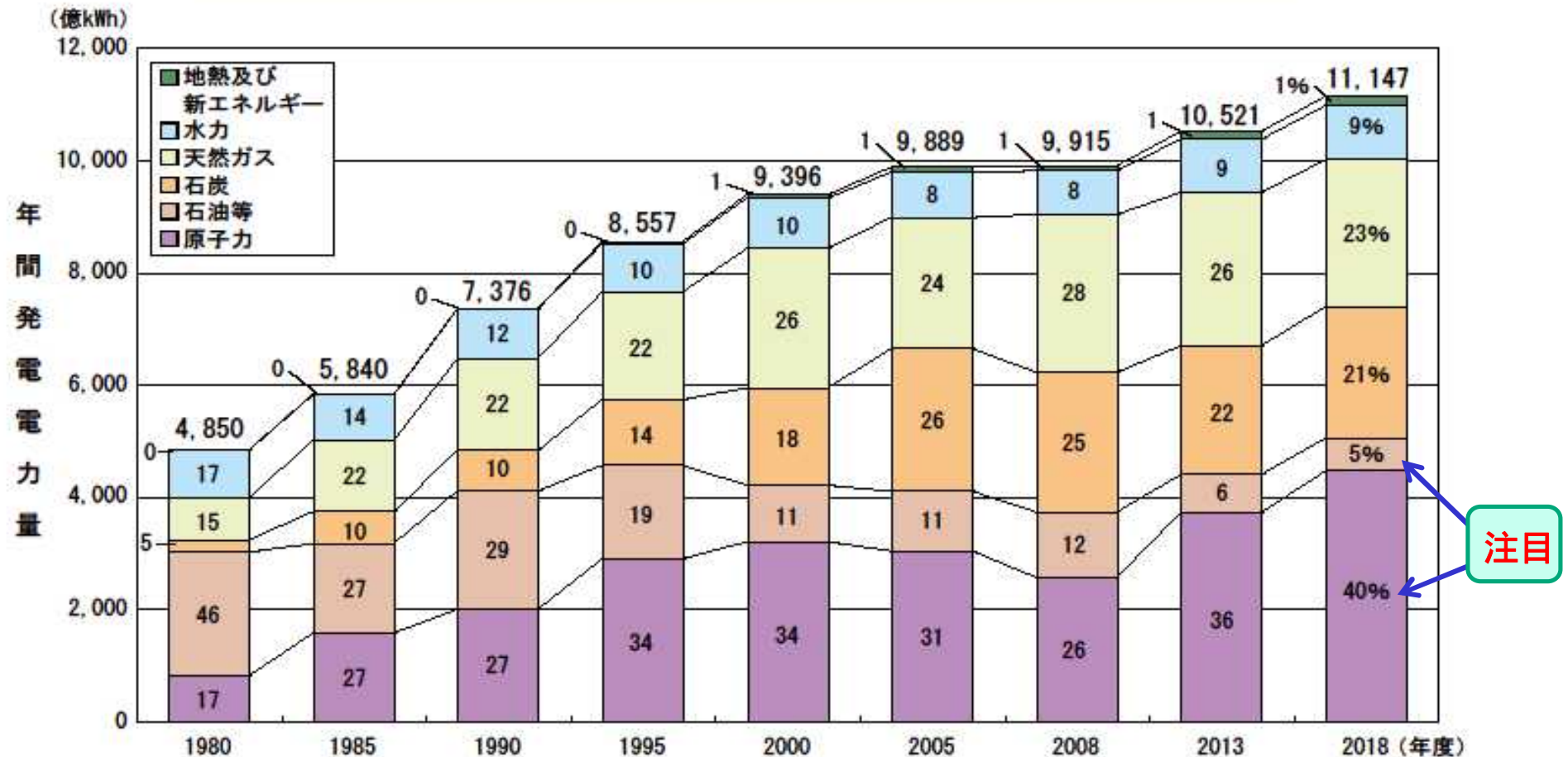
### 2 . 地球環境への適合

発電過程でCO<sub>2</sub>を排出せず、SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, 煤塵も放出しない。

### 3 . 経済性

発電原価は化石燃料、水力、自然エネルギーと比較して最も安価である。

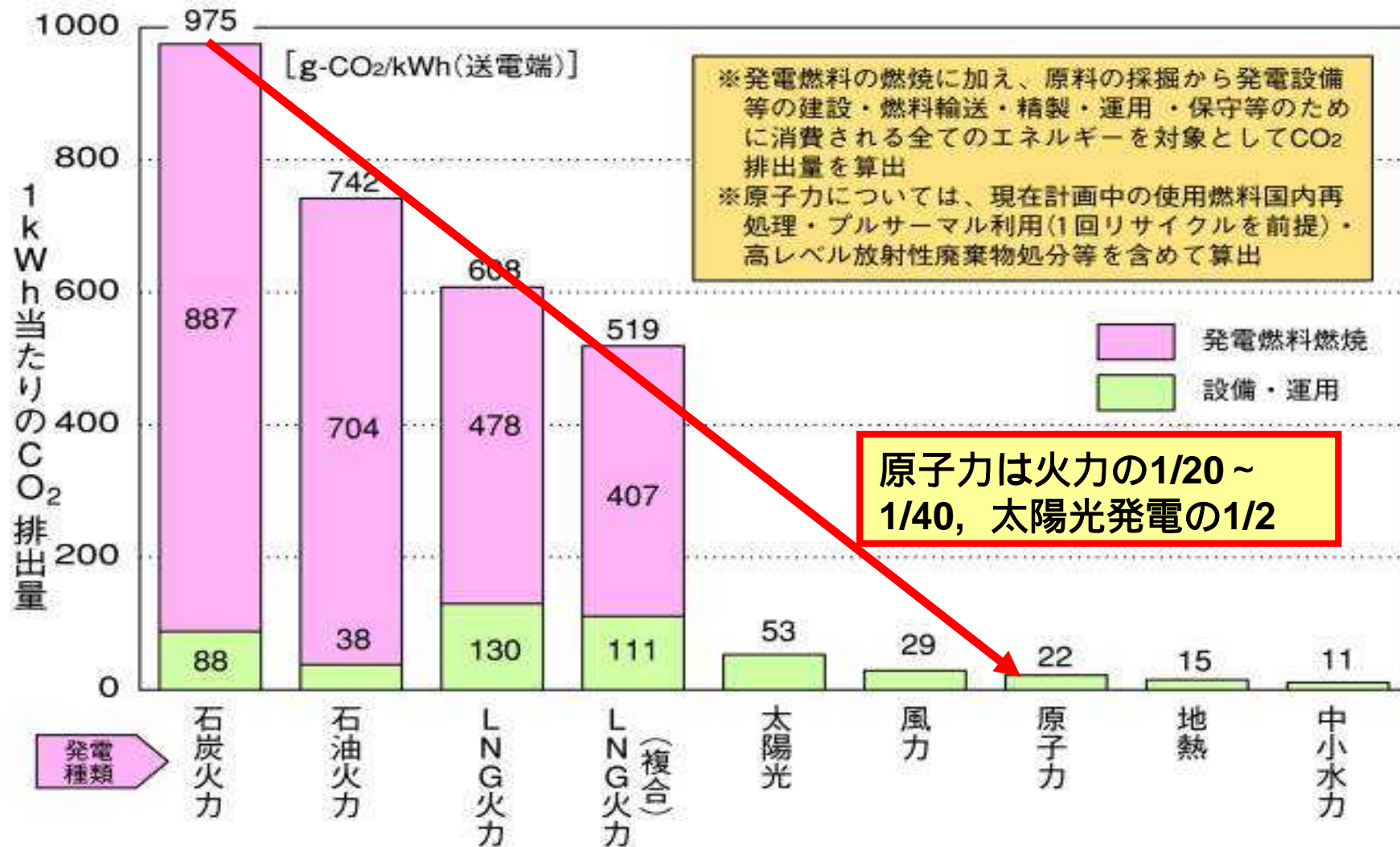
# 電源別発電電力量の実績と見通し



(注) 石油等にはLPG、その他ガスおよび瀝青質混合物を含む  
 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある  
 発電電力量は10電力会社の合計値(受電を含む)  
 グラフ内の数値は構成比(%)

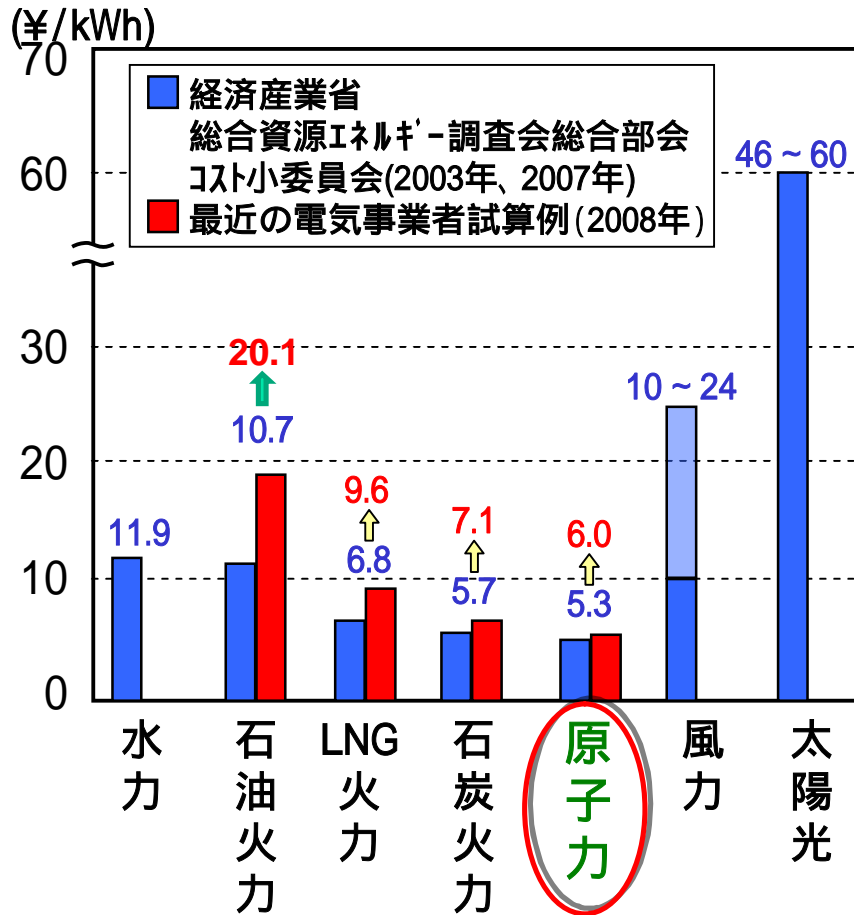


# 各種電源別のCO<sub>2</sub>排出量の比較



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

# 各種電源の発電原価



## 条件

耐用年数 : 40年  
 設備利用率 : 80% (水力45%)  
 燃料価格 :  
 石油 = 27.4 → 90.7 \$/バレル  
 石炭 = 35.5 → 76.5 \$/トン  
 LNG = 2.8 → 5.3 万円/トン  
 ウラン = 10.1 → 95.0 \$/lbU3O8  
 (鉱石)

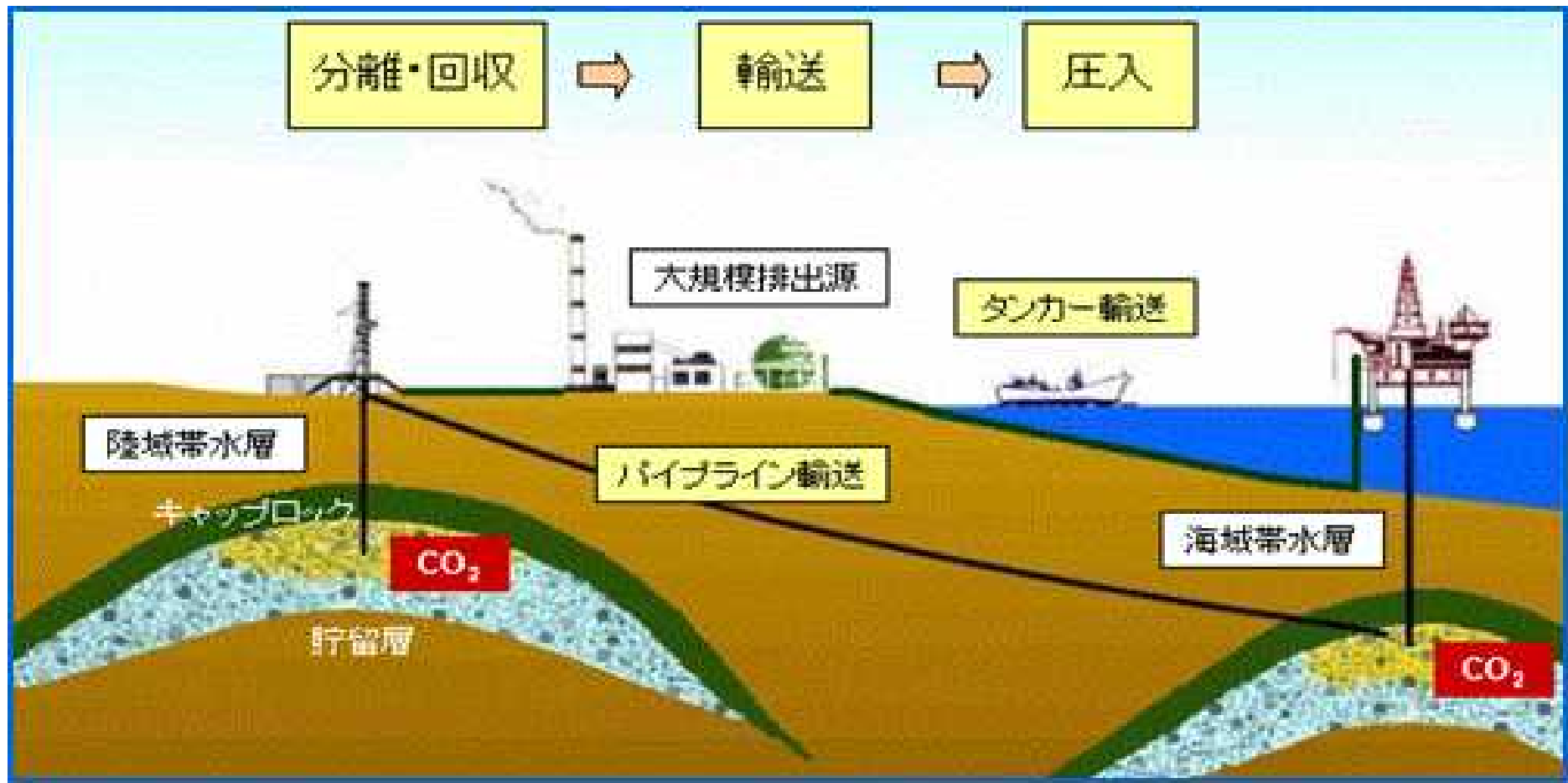
2002年度平均  
(コスト小委のベース)

2008年2月  
(試算例のベース)

原子力: 再処理費用、再処理設備廃止費用、  
高レベル廃棄物処理・処分費等含む

# CO<sub>2</sub>回収・貯蔵技術

排出されるCO<sub>2</sub>を回収し、海洋や地中に貯蔵する技術(CCS)



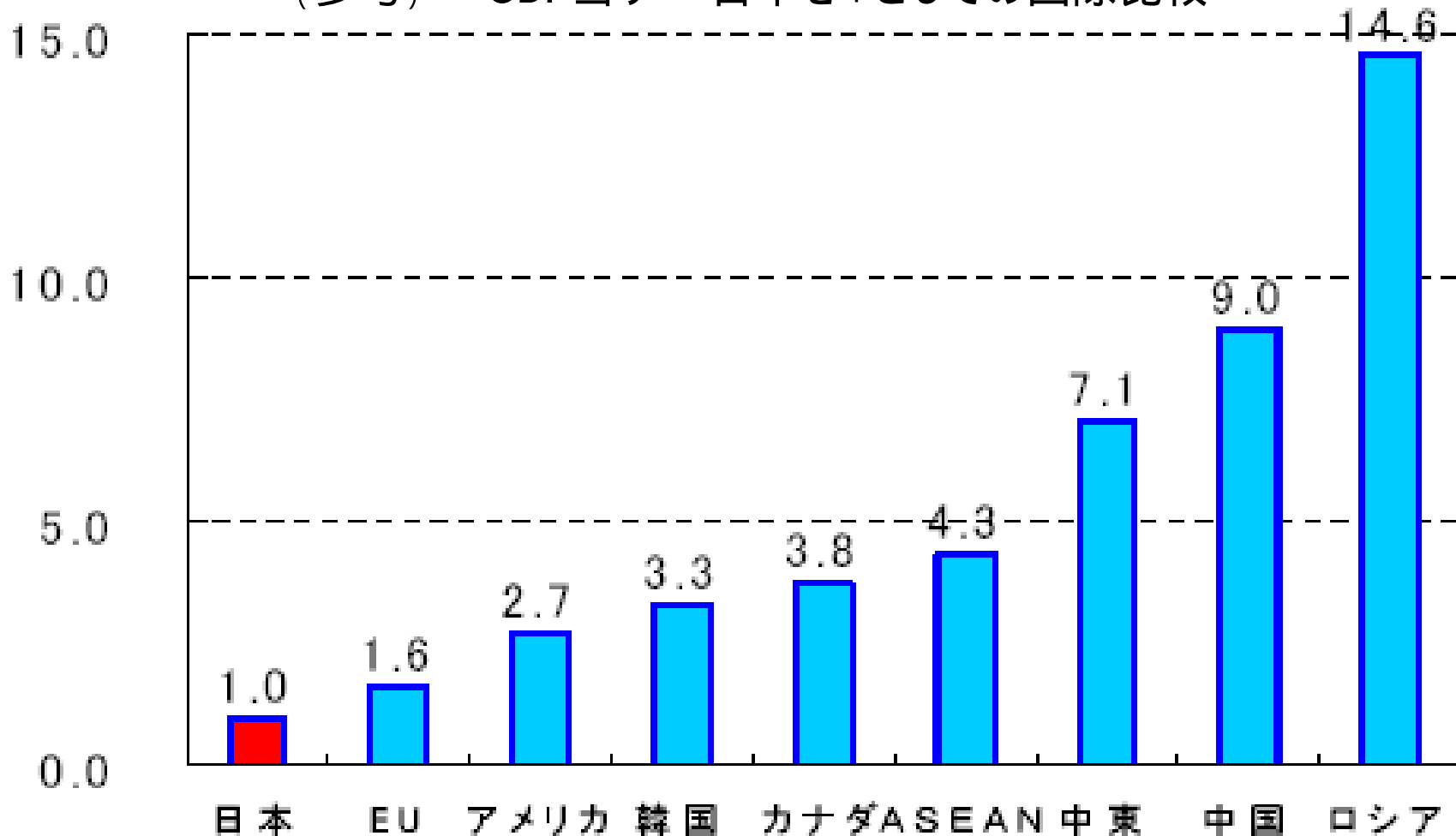
課題：各技術の開発、貯留地点の選択、コスト、安全性、法整備等

# 各種エネルギーの総合評価

	原子力	石油 天然ガス	石炭	太陽光 風力等	バイオ
資源量					
経済性					
CO <sub>2</sub>			×		
社会受容					
課題	安全・安心への社会受容性 廃棄物処分	資源に限界	CO <sub>2</sub> 固定 技術開発	経済性・大規模 開発の限界	
解決策	技術的 解決策あり	エネルギー 源は他に シフト	技術的解決 かなり困難	中小規模分散 電源として拡大	

# エネルギー利用効率の比較

(参考) GDP当り 日本を1としての国際比較



(出典) IEA Energy Balance 2004

# 将来の日本のエネルギー基本計画

## 化石燃料の利用

石油:依存度 50% → 40%  
 海外権益 15% → 40%  
 石炭:CO2回収・貯蔵等  
 天然ガス:シベリアパイプライン等権益確保  
 運輸:石油 100% → 80%  
 電気自動車、バイオ燃料

省エネルギーの充実・強化  
 エネルギー利用効率向上  
 モーダルシフト

## 原子力発電の積極的推進

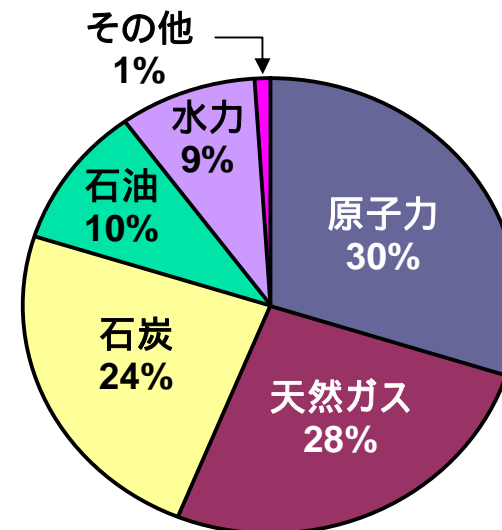
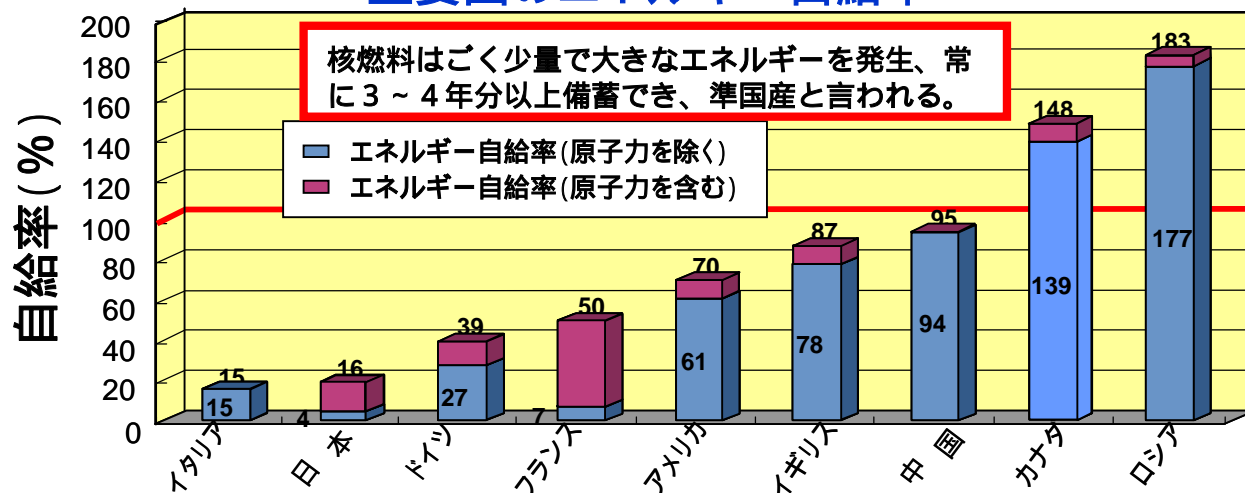
30～40%程度以上  
 核燃料サイクルの推進  
 高速増殖炉の実用化を目指す

## 新エネルギーの着実な導入拡大

風力、太陽光発電等

(主として「新・国家エネルギー戦略」より)

## 主要国のエネルギー自給率

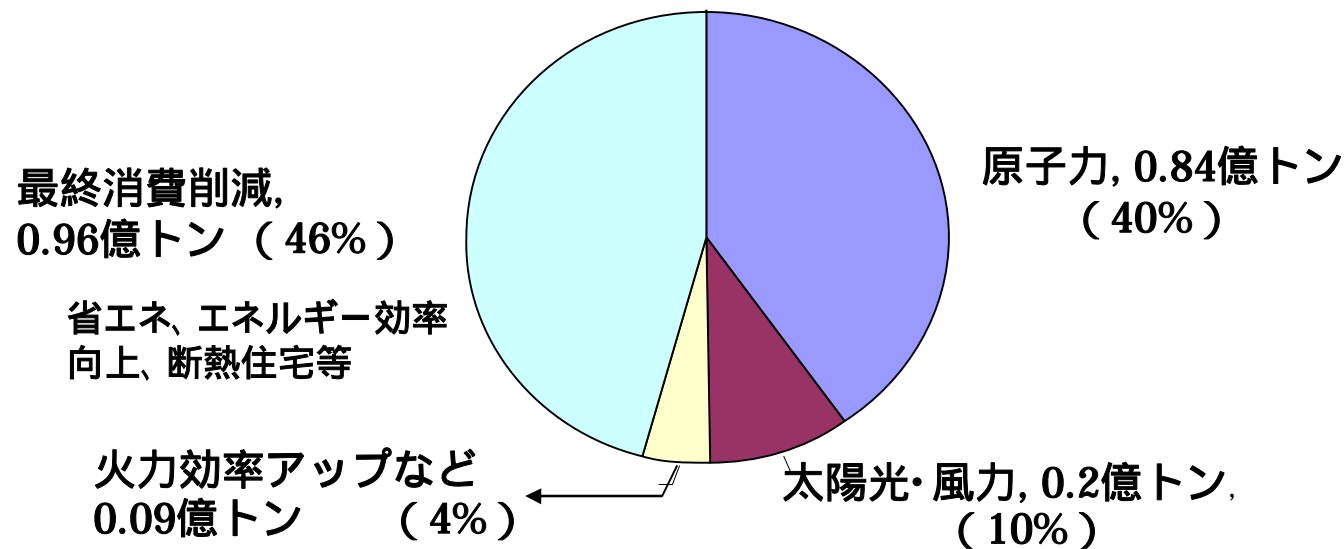


電源別発電電力量の割合  
(2006年)

# 麻生案の真水でCO<sub>2</sub>排出量15%削減内容

麻生前総理の2020年までに2005年比でCO<sub>2</sub>を15%削減するという中期目標(2.09億トン削減)の内訳は下図に示すものであった。

原子力発電が低炭素化の切札であることが良く分かる。



「原子力発電所新規建設9基、稼働率81%への向上」は全ての検討ケースの前提とされていたため表面には出てきていないが、一番重要な要素であることの認識が必要である。

# これからのエネルギーのまとめ

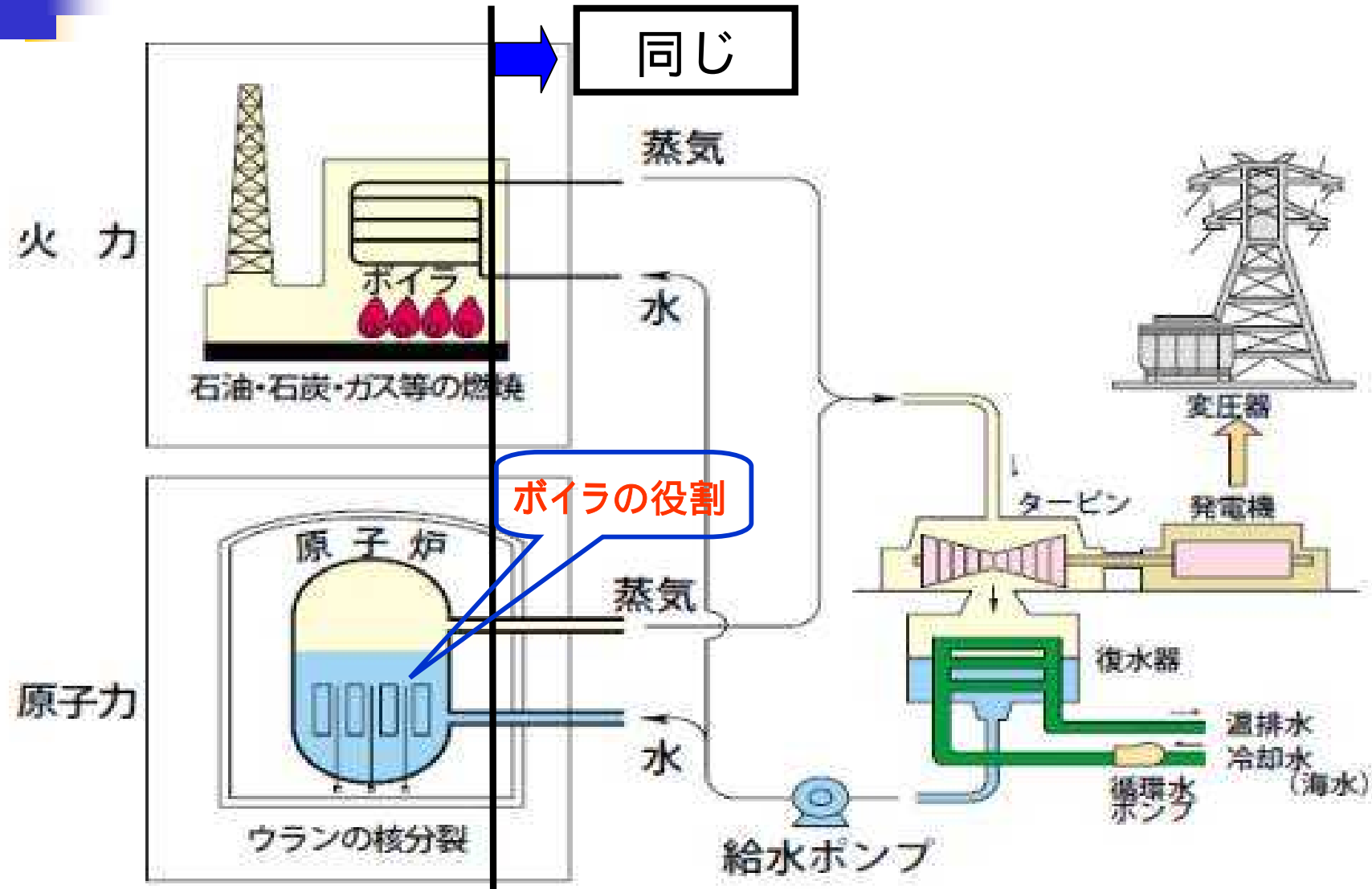
- 1 . **化石燃料への依存度は容易に下げられず**、海外からの資源確保には十分に努める必要がある。**石油、天然ガス**は**安定供給**（オイルピーク、政情不安定な国々）、**質**（地球温暖化問題）、**経済性**などから、**熱エネルギー源としては今後削減に努めるべき**である。航空機や船舶輸送用、化学材料用に長期確保しておくことが重要である。**石炭**は**資源量は豊富**、**経済性もあるが**、**地球環境適合性が問題**があり、**クリーンガス化やCO<sub>2</sub>回収固定化技術**などの開発、**実用化促進が重要**となる。
- 2 . **新エネルギー**、特に**バイオマス、太陽光、風力、地熱**は**地球環境に適合し**、**国産エネルギー**となるので**開発、実用化は積極的に推進する必要がある**。ただし、**経済性、出力不安定性などの課題**の克服と共に、**量的な限界を認識する必要がある**。
- 3 . **原子力**は**質、量、経済性の全てを満たし**、**長期備蓄と燃料リサイクル**により**準国産エネルギー**となり、**今後も基幹エネルギーと位置づけられる**。ただし、**高レベル廃棄物地層処分問題、社会受容性**など**解決すべき課題は大きい**。



# 原子力発電の原理と安全性

1. 原子力発電の原理
2. 原子力発電の安全性
3. 核燃料サイクルの重要性

# 火力発電と原子力発電の相違



# 原子力発電の原理 ( 1 )

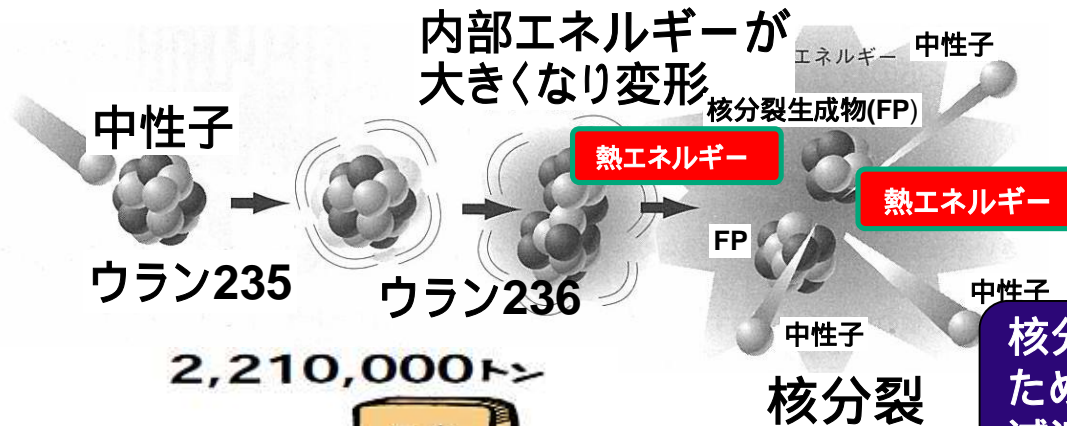
## 化学エネルギーと原子力エネルギーの比較

石炭  
石油  
天然ガス



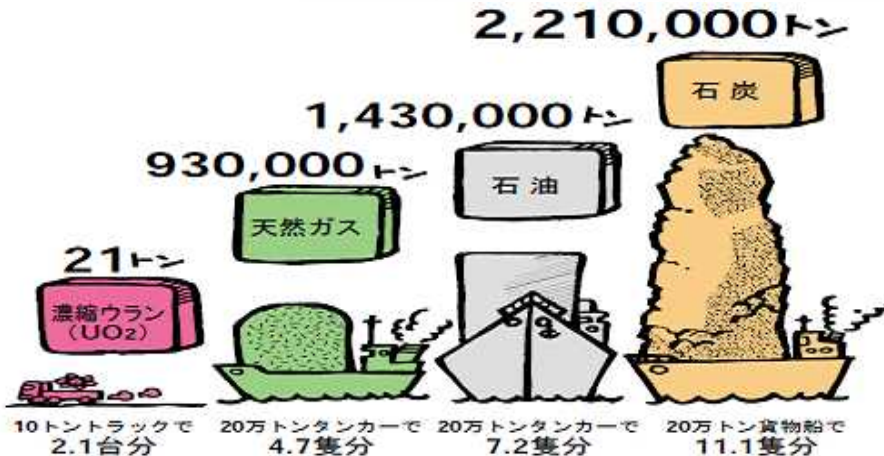
原子の結びつき方が変化するとエネルギーが発生

ウラン



原子の本体が変化するとエネルギーが発生

核分裂反応を起こしやすくするために、中性子の速度を落とす減速材(水)を用いる。



100万kWの発電所を1年間運転するために必要な燃料

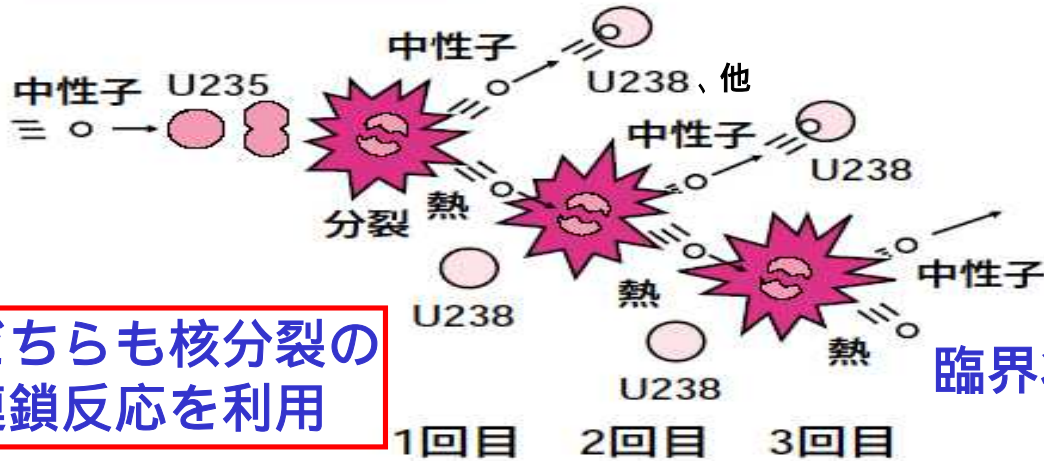


# 原子力発電の原理(2)

原子力発電の場合

原子力発電と原子爆弾の違い

どちらも核分裂の連鎖反応を利用

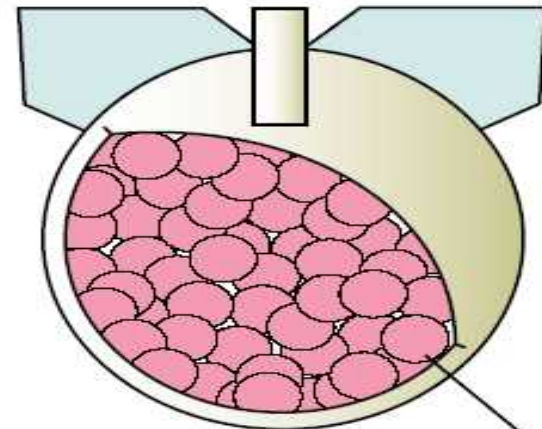
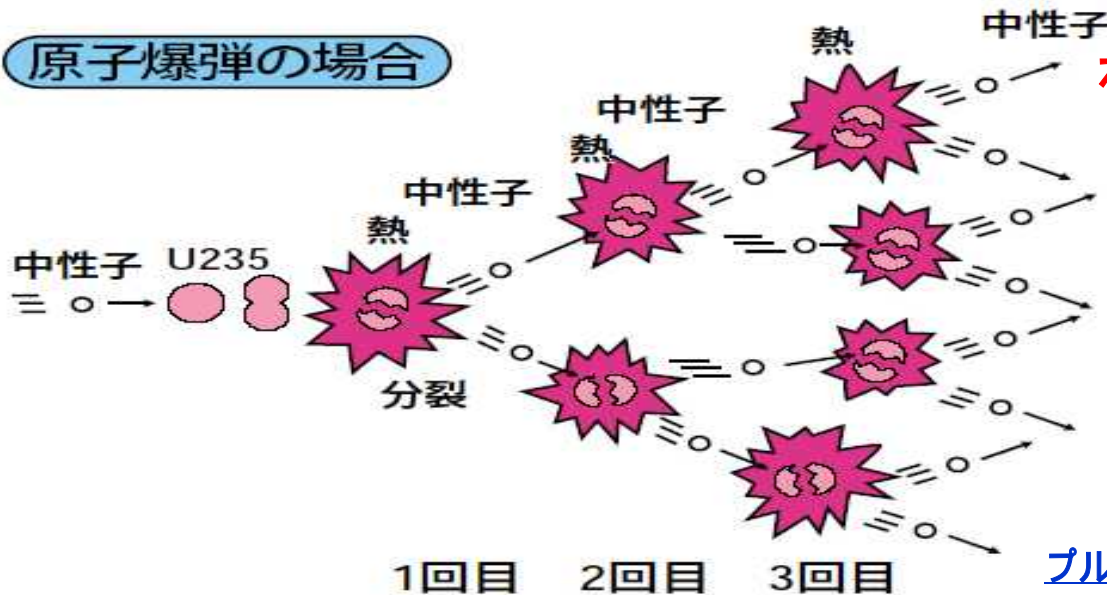


ウラン235 (3~5%)  
ウラン238 (95~97%)

臨界状態を維持

原子爆弾の場合

ねずみ算式な連鎖反応



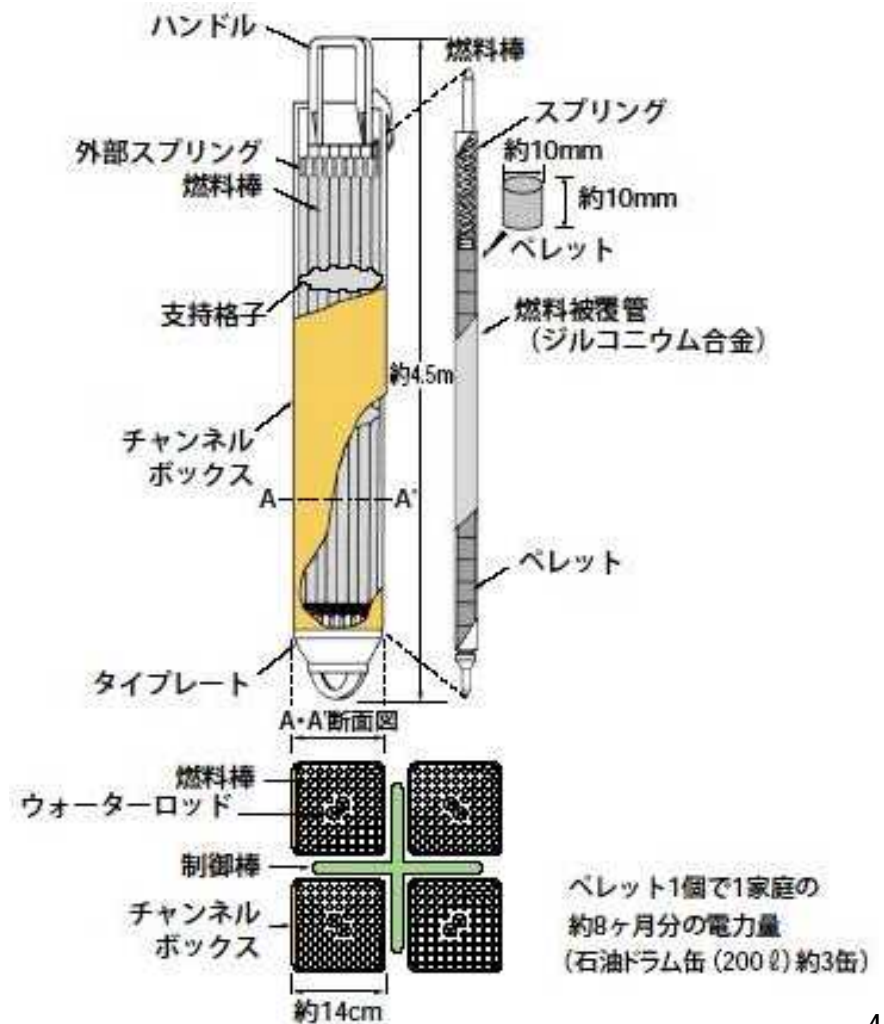
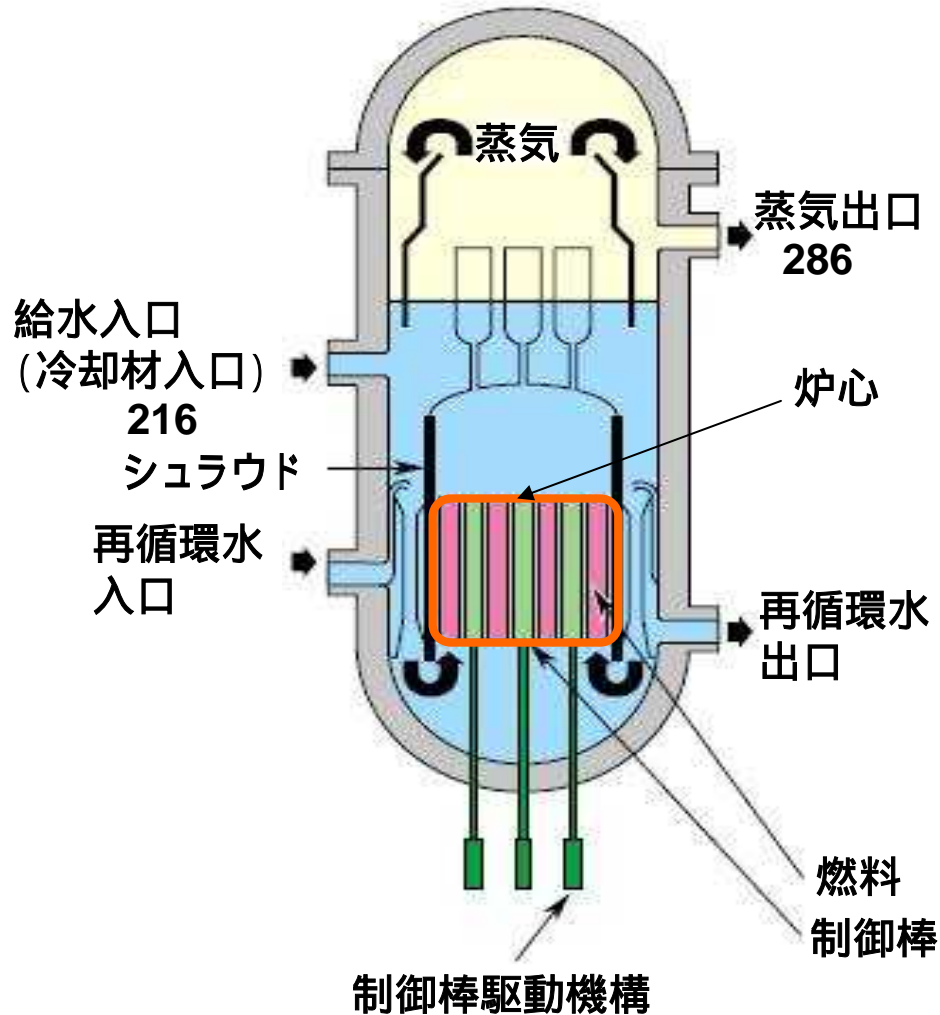
プルトニウム爆弾では、Pu-239が93%以上のものが使われる。

ウラン235 44 (ほぼ100%)

# 原子力発電の原理(3)

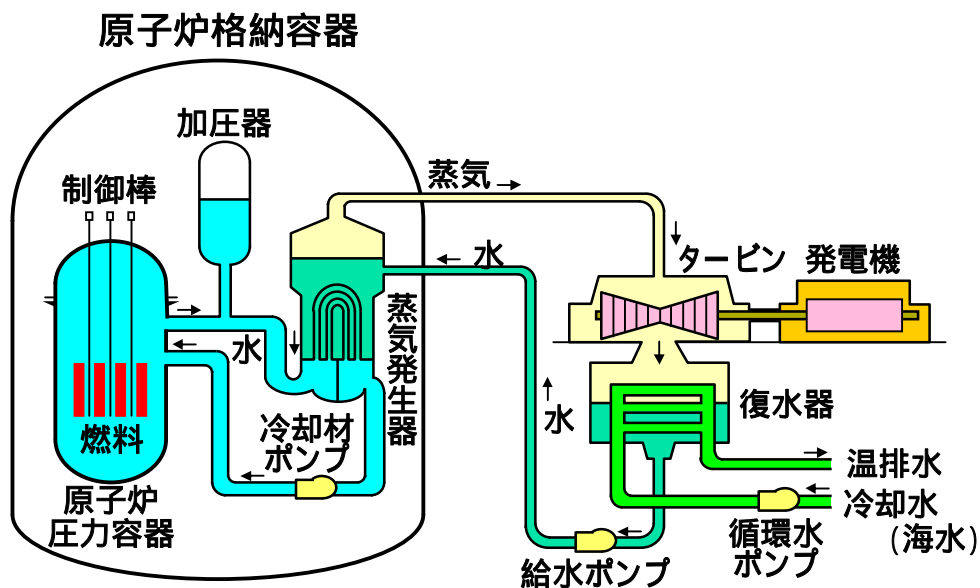
## 原子炉压力容器と燃料集合体

沸騰水型炉(70気圧、約280℃)



# 加圧水型と沸騰水型原子力発電のしくみ

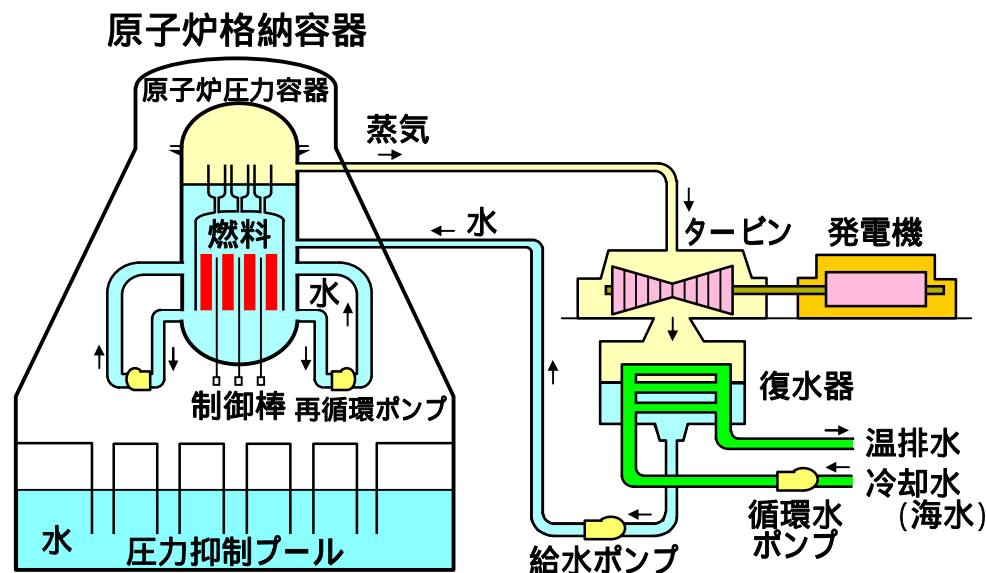
## 加圧水型炉 (PWR)



温度約320、圧力約160気圧

運転中： 24基

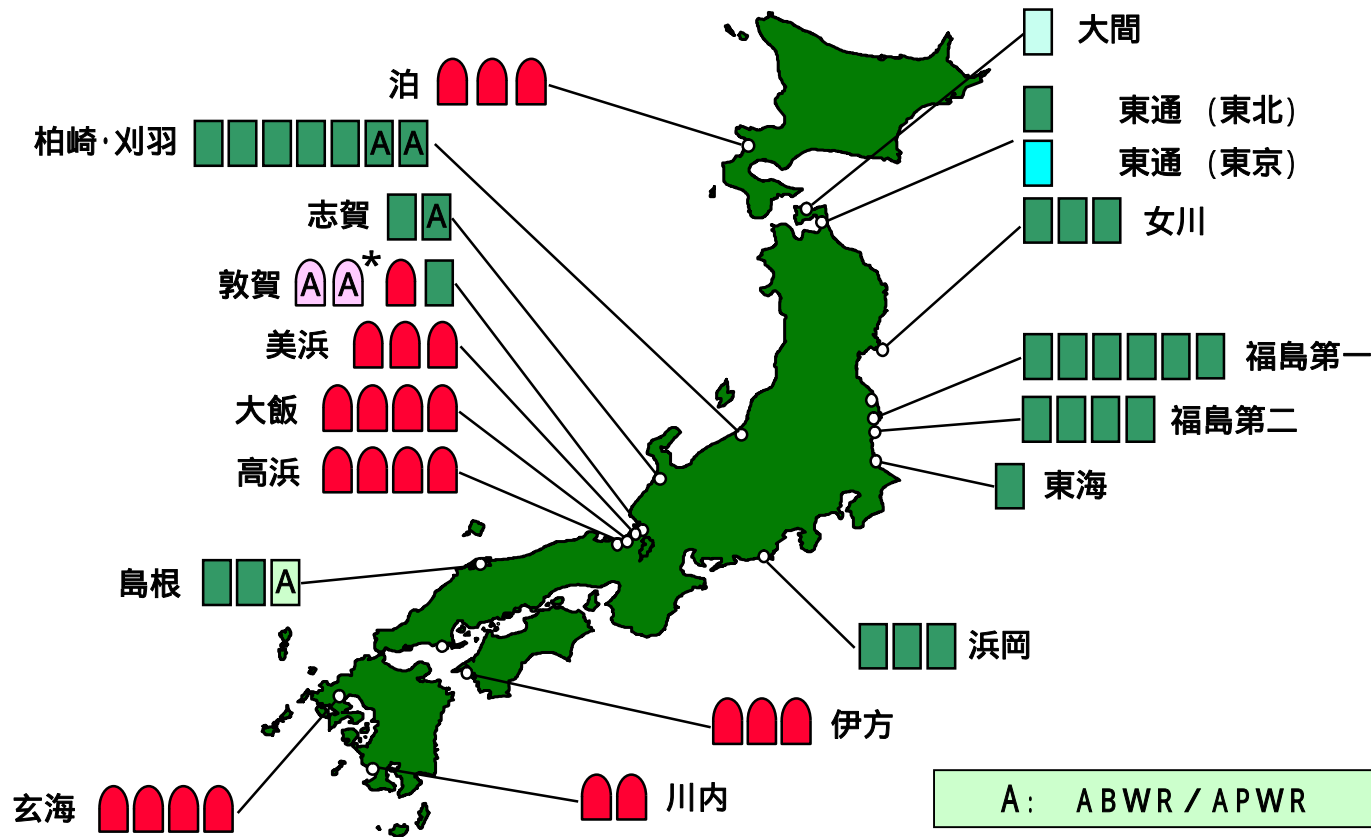
## 沸騰水型炉 (BWR)



温度約280、圧力約70気圧

30基

# 我が国の原子力発電所の運転・建設状況



## 運転中の原子力発電所

	MWe	基数
アメリカ	102,750	103
フランス	66,020	59
<b>日本</b>	<b>48,839</b>	<b>54</b>
ロシア	23,550	31
ドイツ	21,370	17
韓国	11,710	20

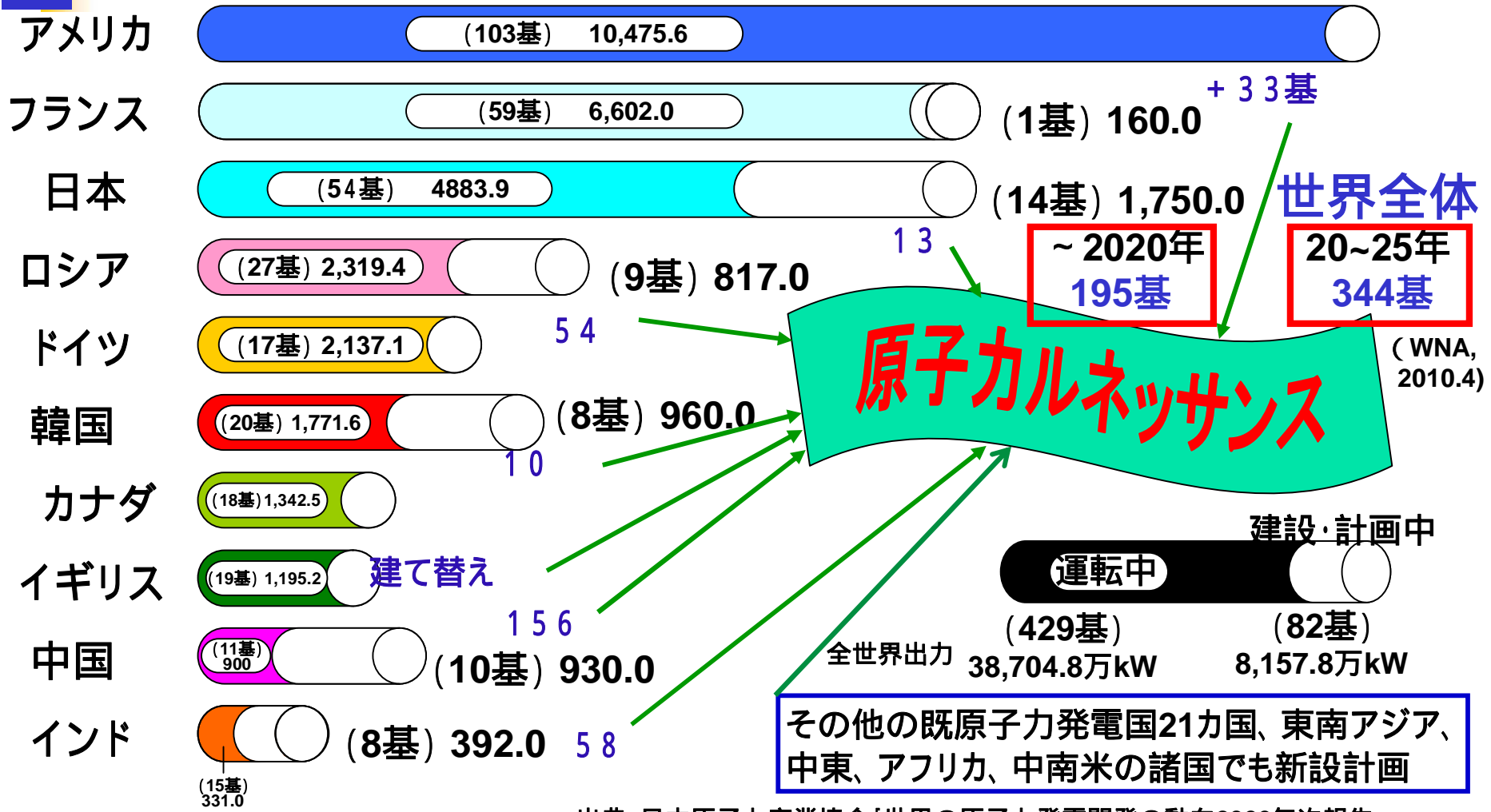
<b>世界全体</b>	<b>386,412</b>	<b>440</b>
-------------	----------------	------------

出典) 日本原子力産業会議「世界の原子力発電開発の動向 2005年次報告」

ただし、日本は2010年3月現在のデータ(世界全体にも反映)

# 世界は原子力エネルギー時代

単位:万kW



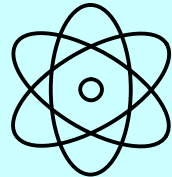
出典: 日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発の動向2006年次報告 一部改訂、追加」



# 原子力発電所の安全性(1)

## 安全確保のしくみ

運転・保修員の  
資質向上



原子力  
発電所の  
安全性

厳重な品質管理  
入念な点検, 検査

多重防護の設計

異常の発生の防止

異常の拡大及び  
事故への進展の防止

周辺への放射性物  
質の異常放出防止

もし異常が  
発生しても

さらに事故発生  
に至っても

余裕の  
ある  
安全設計

(地震対策など)

フェイル  
セーフ

(安全側へ動作)

インター  
ロック

(誤動作防止)

止める

自動的に  
原子炉を  
停止する装置

異常を早期に  
検出する装置

冷やす

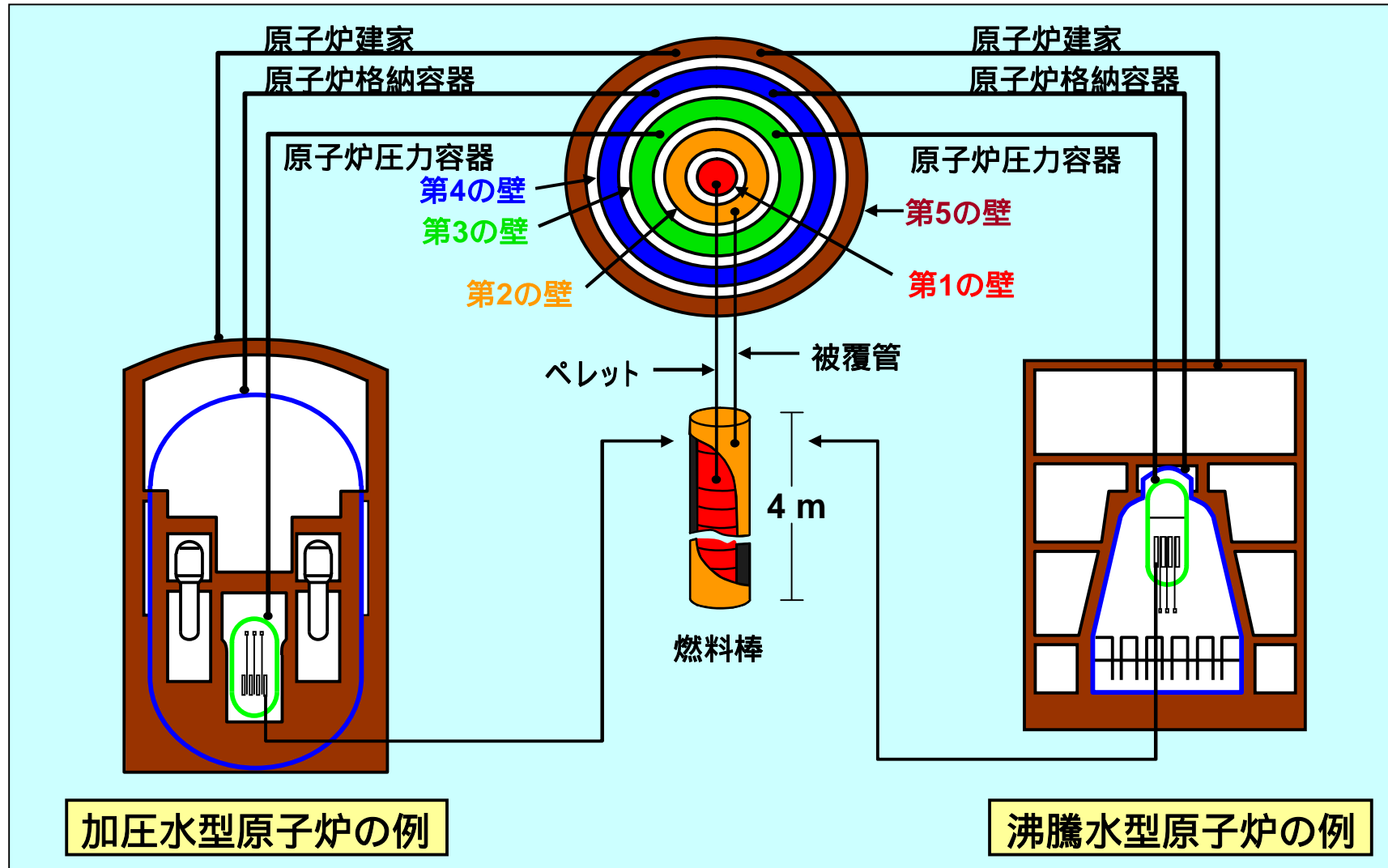
非常用  
炉心冷却  
装置

閉じこめる

原子炉  
格納容器

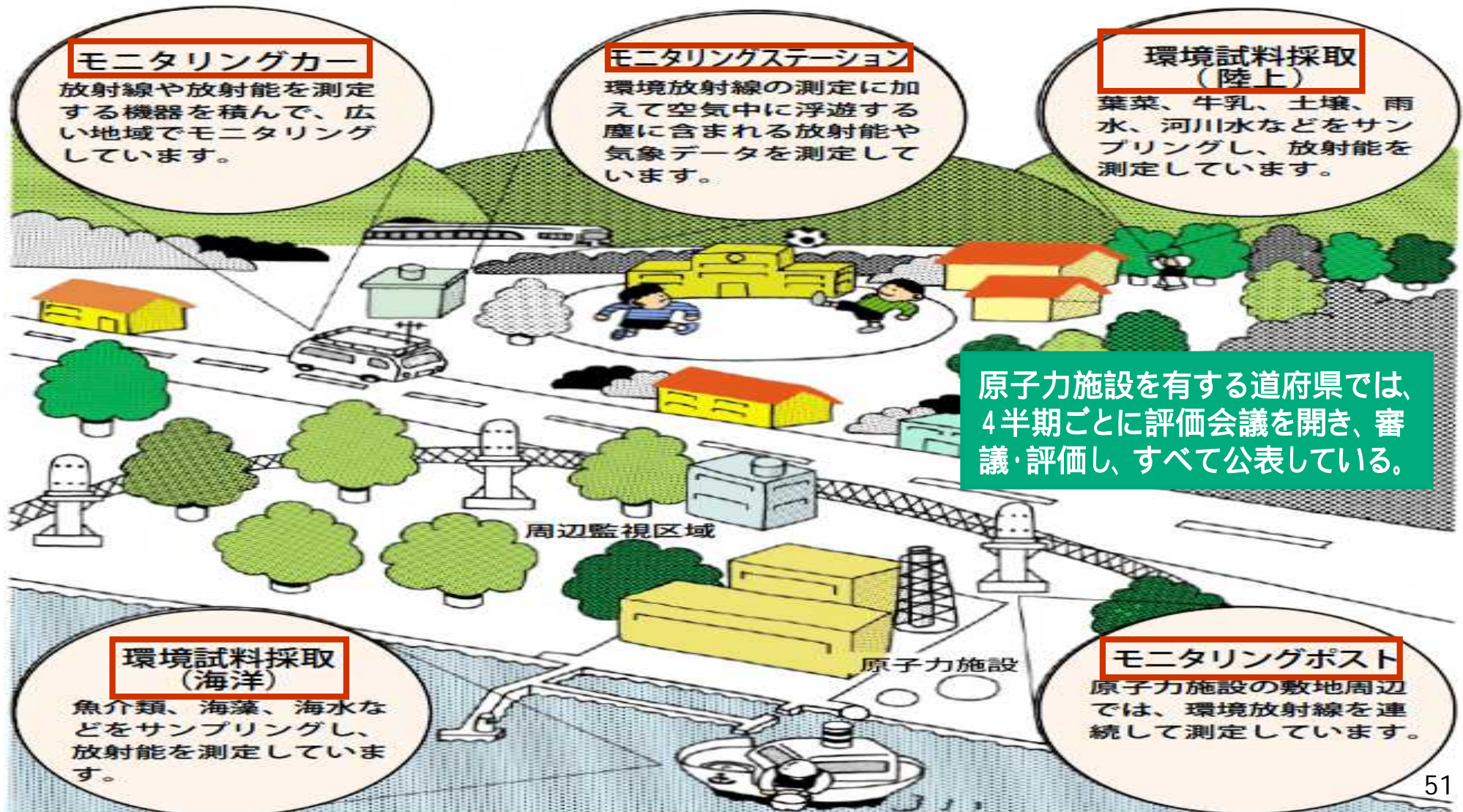
# 原子力発電所の安全性(2)

## 放射能を閉じ込める5重の壁



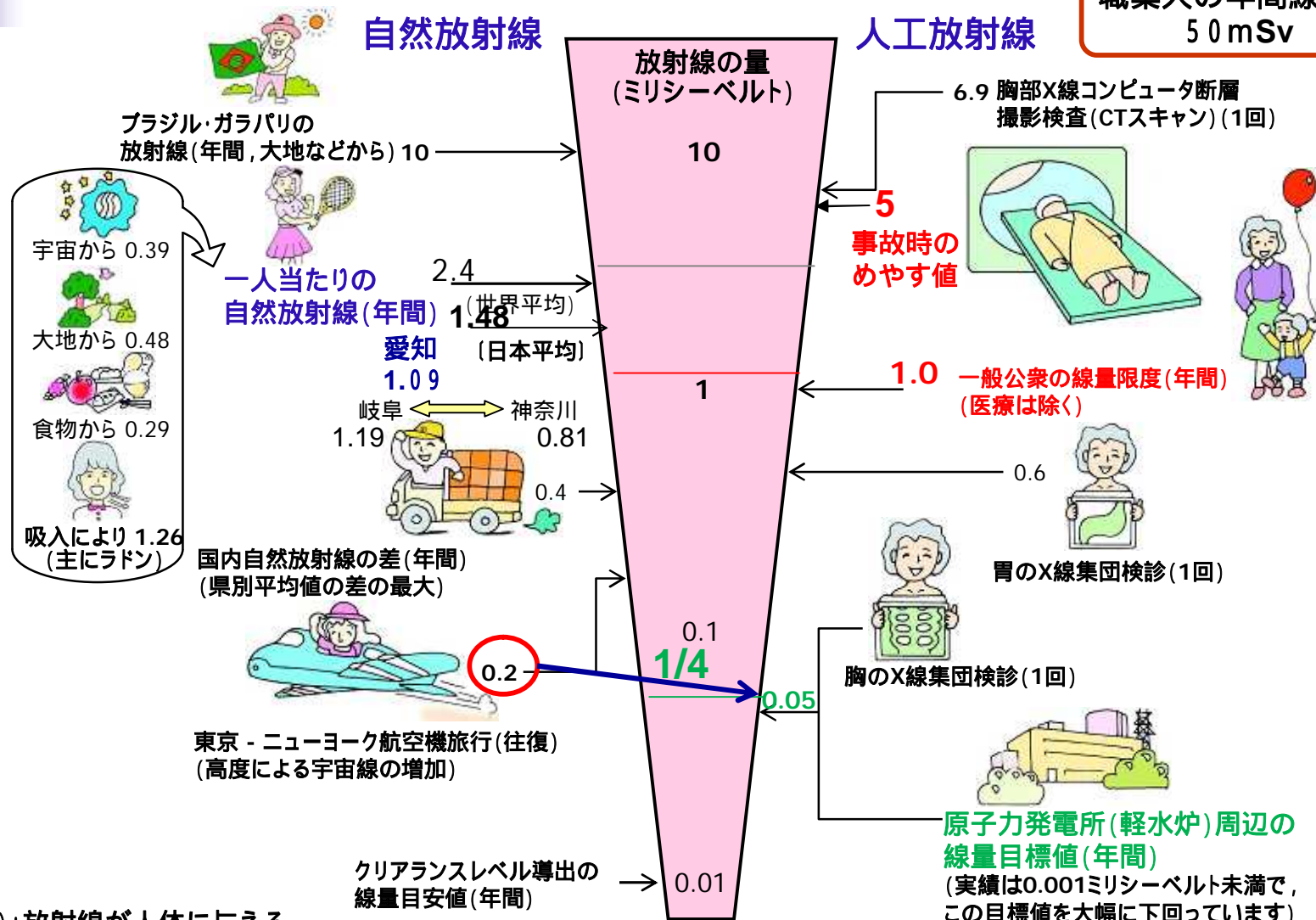
# 原子力発電所の安全性(3)

## 原子力施設周辺の環境放射線モニタリング



# 放射線と安全

職業人の年間線量限度  
50 mSv



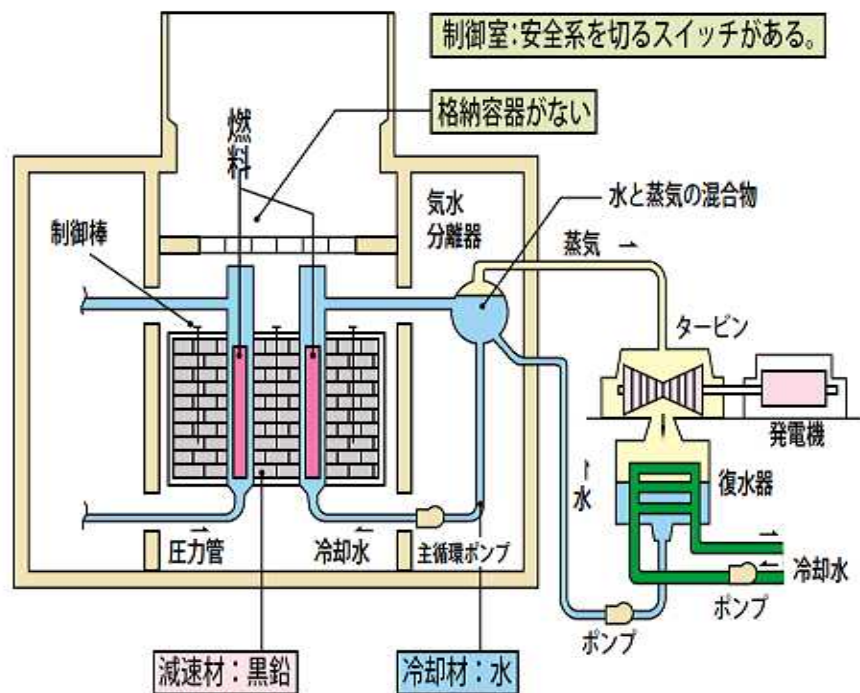
Sv(シーベルト): 放射線が人体に与える影響を表す単位

# 原子力発電所の安全性(4)

## チェルノブイリ原子力発電所の構造と事故経過

(黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉 RBMK)

(1986.4.25  
~26未明)



制御室:安全系を切るスイッチがある。

格納容器がない

減速材: 黒鉛

冷却材: 水

	日本の原子炉	チェルノブイリの原子炉
自己制御性	あり	なくなる場合がある
冷却材	水	水
中性子の減速材	水	黒鉛
安全装置	インターロックにより危険操作の防止	容易にはずせる
原子炉をカバーする丈夫な格納容器	あり	なし

出典: 資源エネルギー庁

低出力運転で特殊試験<sup>※</sup>を実施

原子炉不安定状態

(原子炉冷却用ポンプの回転数低下に伴う冷却水量減少)

ボイド(気泡)の増加

(原子炉固有の特性及び緊急時停止系欠陥)

出力上昇

出力暴走

(急激な水蒸気発生)  
(急激な水素発生)

圧力管多数破裂  
引き続き  
水素爆発

(午前1:23)

(半日から1日後)

炉心黒鉛の火災

タービン建屋の火災

(2週間連続)

(鎮火)

原子炉内放射性物質放出

※外部からの電力の供給を停止した時に、タービン発電機の慣性回転エネルギーを電気出力としてどこまで利用できるか確認するための特殊な試験

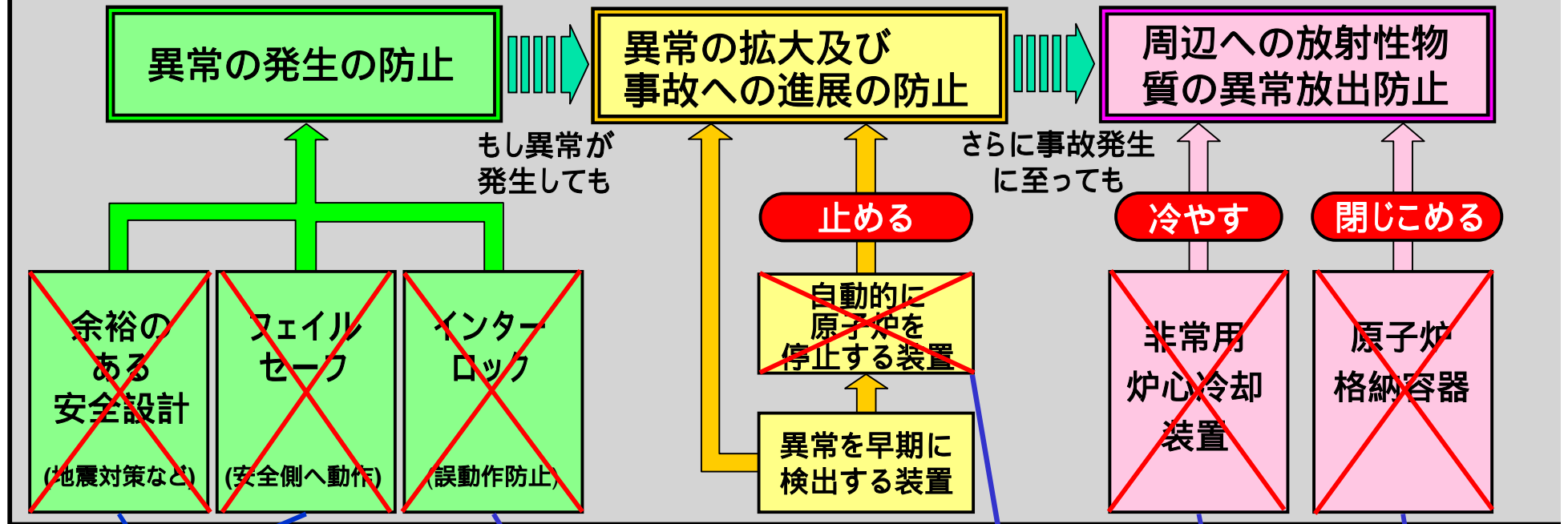
出典: 旧科学技術庁パンフレット

# 原子力発電所の安全性 ( 5 )

多重防護の設計

安全文化の欠如

## チェルノブイリ事故と多重防護



計画を下回る低出力で運転 不安定になるため連続運転は禁止されていた。

「制御棒30本以上を中間位置まで挿入」が条件であったが、インターロックなし

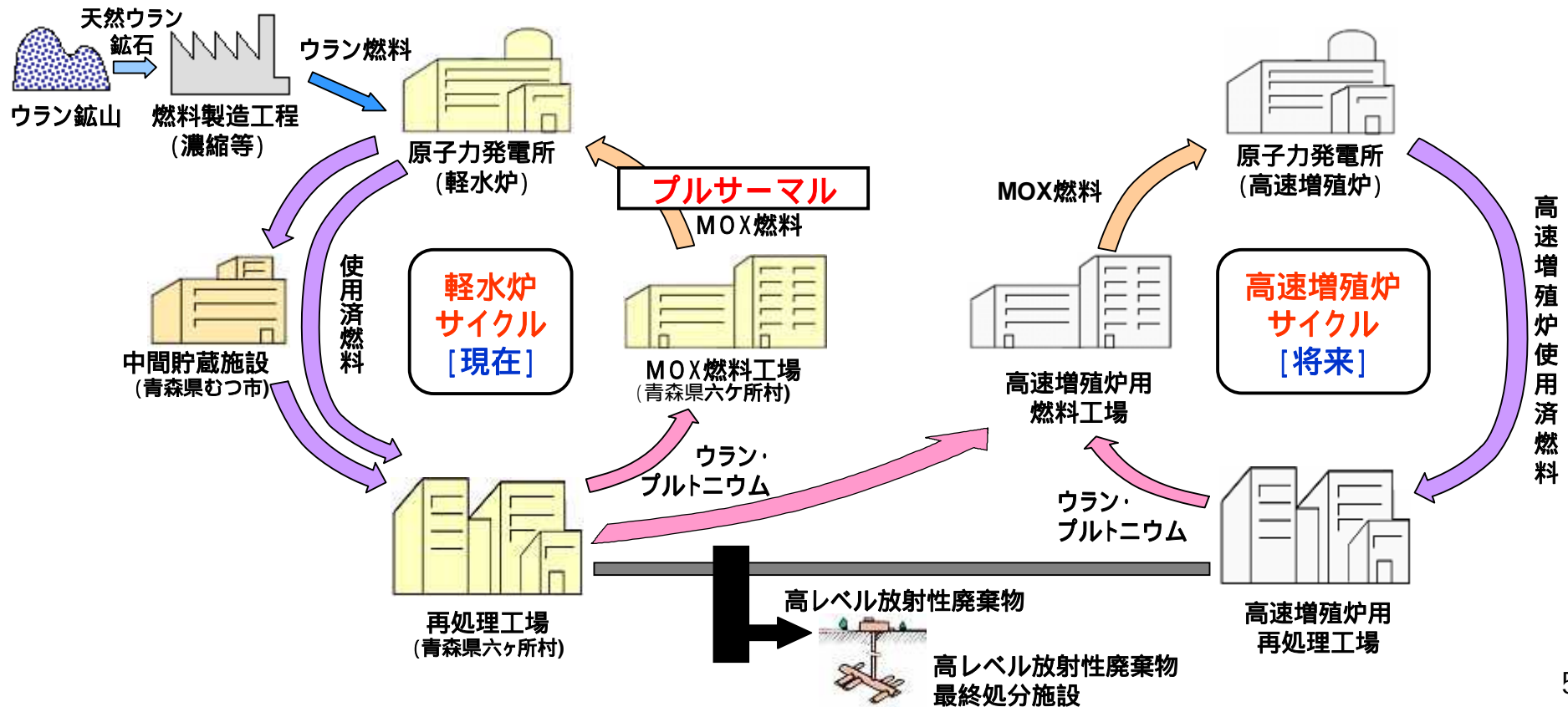
急速で信頼性高い停止系 : 不十分

自動作動を切って運転

なし

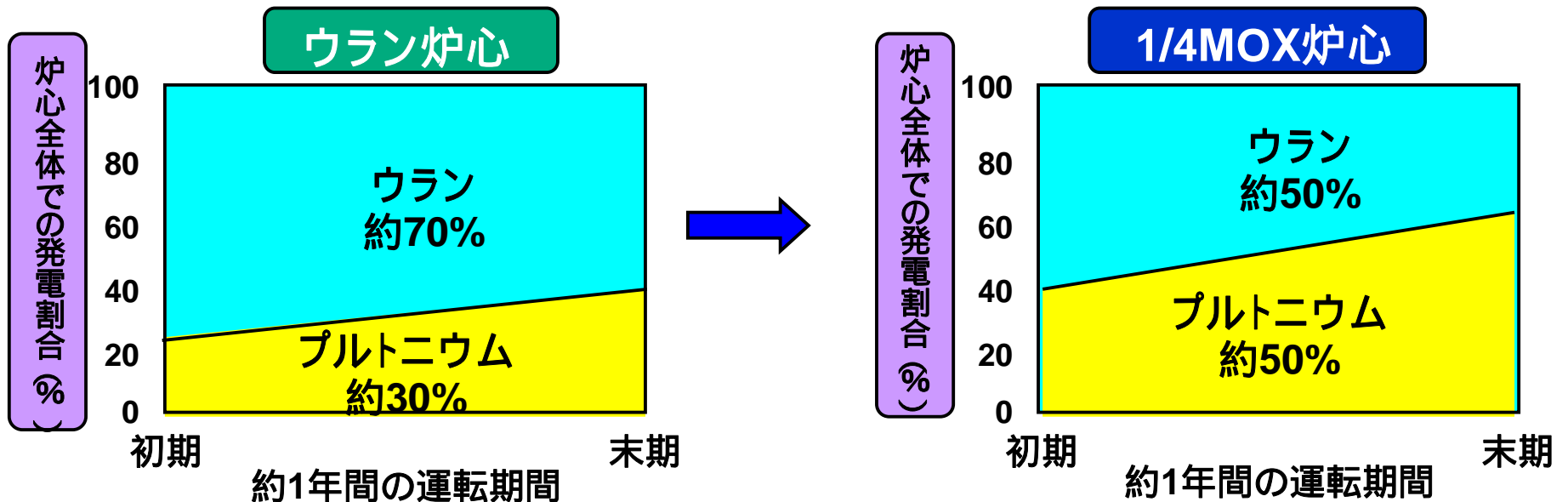
# 核燃料サイクル

- 「核燃料サイクル」とは、原子力発電所の使用済燃料を再処理することにより取り出したウランとプルトニウムを再利用すること。  
 $\text{Pu}^{239}$  は  $\text{U}^{238} + n \rightarrow \text{U}^{239} \rightarrow \text{Np}^{239} \rightarrow \text{Pu}^{239}$  で生成
- 限りあるウラン資源を有効利用し、エネルギーの安定確保に貢献。
- 放射性廃棄物の量を減らすことができる。



# プルサーマルとは

原子力発電所で使用した使用済燃料中には、有用成分（プルトニウム，ウラン）が含まれており、このうち、プルトニウムを分離・抽出・加工し、再度、軽水炉（熱中性子炉：サーマル・リアクター）で利用することをプルサーマル（我が国の造語）という。



約1年間の運転毎に、炉心の燃料の約1/5から1/4を新燃料に取り替えるが、残りは継続使用するため、ウラン炉心の運転初期でも燃焼して生成したプルトニウムを含む燃料が存在している。





# 原子力発電に関するまとめ

1. 原子力発電の原理は、**原子本体の核分裂に伴って発生するエネルギー**を利用するもので、少量のウラン、プルトニウムから莫大なエネルギーが得られ、この過程でCO<sub>2</sub>を発生しないクリーンなエネルギーである。
2. **チェルノブイリ原子力発電所事故は特異な事故**で、日本や西欧にない型であり、安全規制も厳しくしている国では**同様な規模の事故を想定する必要はない**であろう。
3. 化石燃料の枯渇への懸念、地球温暖化問題から世界各国は、**原子力利用に向け、ルネッサンス時代**を迎えている。
4. ウラン資源を有効に活用する視点から燃料をリサイクルして用いる**核燃料サイクル**は**重要**である。




# 結 論

1. 世界のエネルギー問題は、**開発途上国の旺盛な需要、化石燃料枯渇の危惧、価格高騰、資源ナショナリズム**等により各国とも安定な供給が見通せない状況になってきている。
2. 一方、化石燃料の大量消費に伴う**二酸化炭素の排出による地球温暖化**に起因し、**異常気象、農作物不作、海面上昇による居住地喪失、水不足**等が加速することが予想される。  
このため、**2050年には二酸化炭素排出量の半減**等が国際的に話し合われている。



## 結 論 (つづき)

3. 風力、太陽光発電等再生可能エネルギーの導入拡大を図るべきであるが、**低炭素の基幹エネルギー**となるものは、**原子力発電以外は考えられず、国際的に原子力カルネッサンス時代**を迎えている。
4. 我が国においても国民の理解を得つつ、**原子力発電を積極的に推進する**方針である。また、使用済燃料を再処理して抽出したプルトニウムとウランを再度原子力発電に利用する**核燃料サイクル**は、貴重なウラン資源を有効に活用することであり、特に、エネルギー資源小国の我が国においては**希求すべきこと**である。



人間が地球と共生する住みよい社会を  
創造するには、エネルギー・環境問題を  
真剣に考え、その解決策の柱となる原子  
力について正しい認識が必須となり、  
そのための教育は益々重要になります。  
皆様の今後の活躍に大いに期待します。