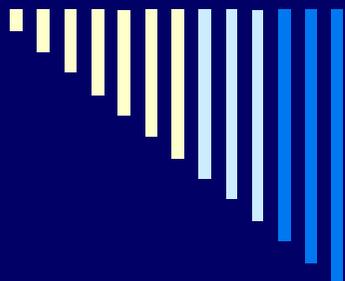
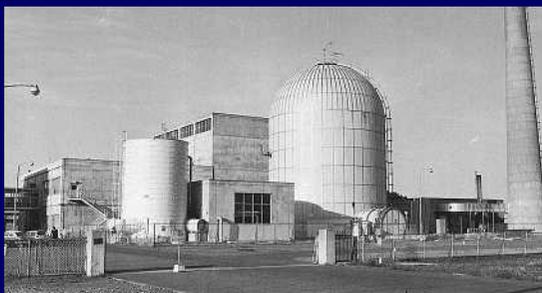


# 原子力発電

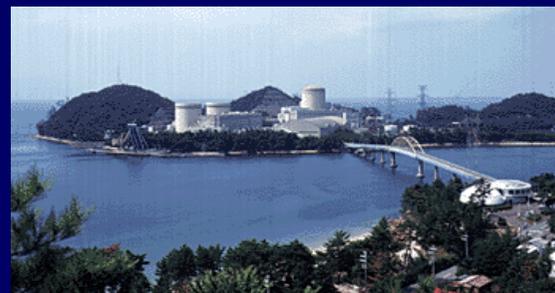
---



チェレンコフ光  
(日本原子力研究所: NSRR)



我が国初の原子力発電炉  
(日本原子力研究所: JPDR)



美浜原子力発電所  
(関西電力)

日本原子力学会シニアネットワーク

齋藤伸三

---

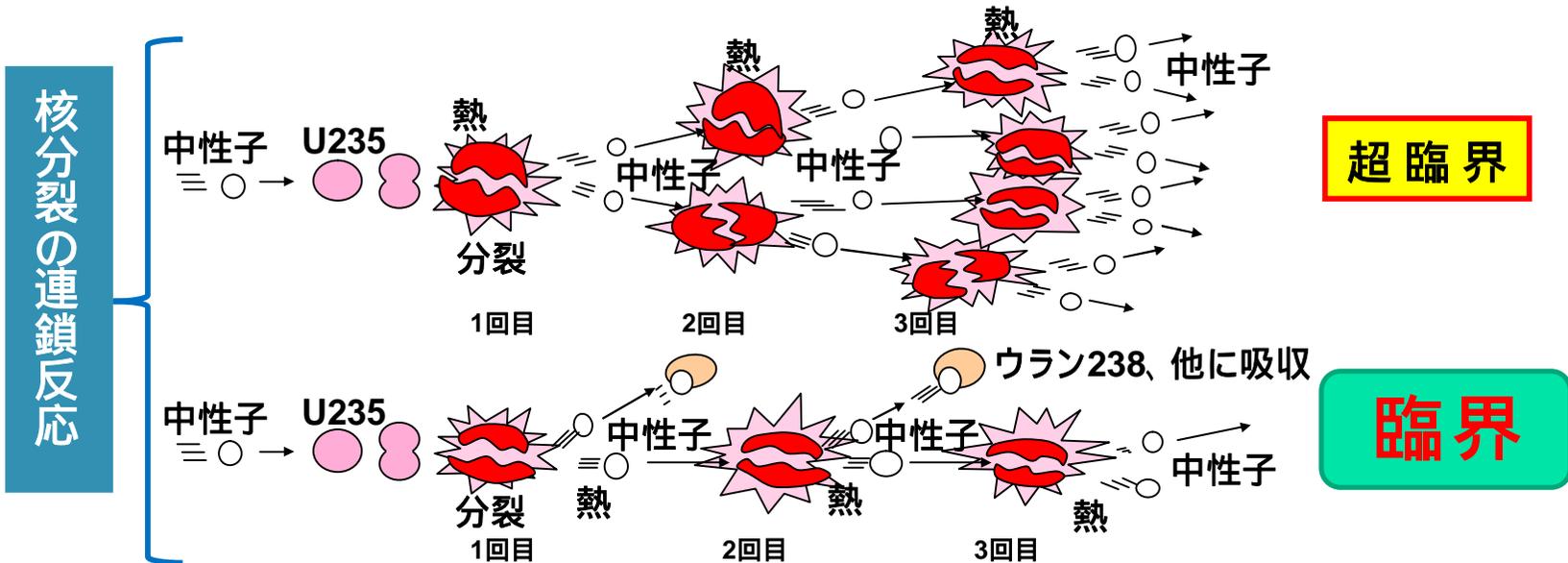
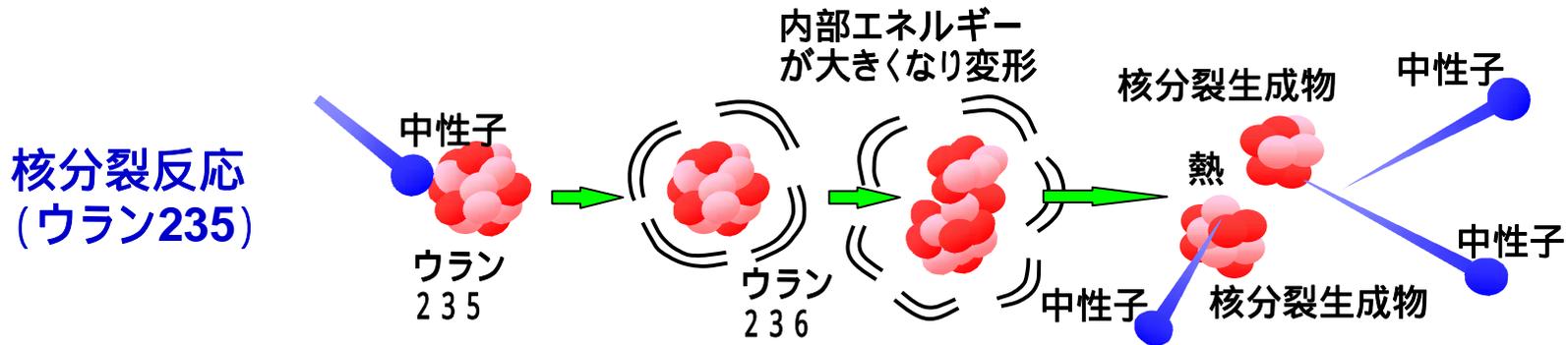
山形大学 平成22年7月17日

# 本日の内容

- 1 . 原子炉の原理と種類
- 2 . 原子力発電のしくみ
- 3 . 原子力発電所の安全性
- 4 . 核燃料サイクル
- 5 . 原子力エネルギーは必要か
- 6 . 我が国及び世界の原子力発電の現状と計画

# 原子炉の原理 ( 1 )

原子炉の原理は、一言で言えば、核分裂の連鎖反応を起させ、臨界状態を維持すること。



# 原子炉の原理 ( 2 )

核分裂によって、2または3個の中性子が発生し、核分裂生成物は多種類(核分裂収率)である。核分裂反応によって発生するエネルギーの約80%は核分裂生成物が持ち去り、5 μm程度の範囲内で周辺の原子と力を及ぼし合い、熱エネルギーとなり、核燃料の温度上昇となる。

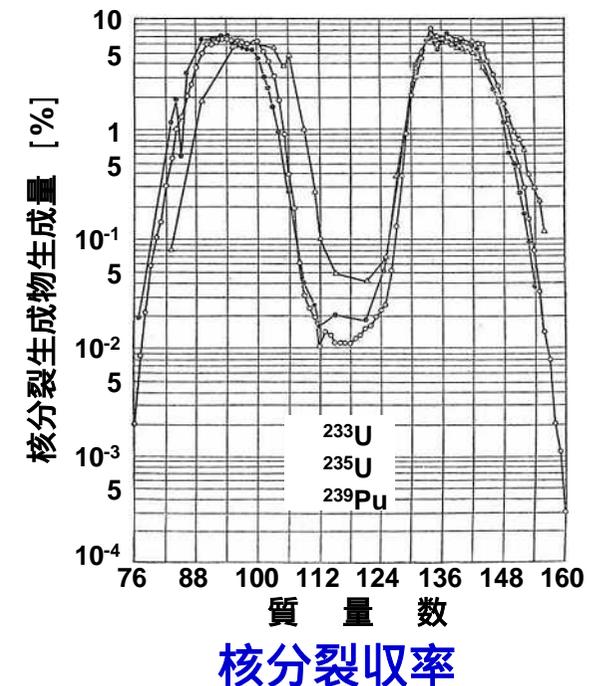


核分裂により発生するエネルギーは、アインシュタインの質量(m)とエネルギー(E)の等価則で説明される。

$$E = mc^2 \quad (c \text{は光の速度})$$

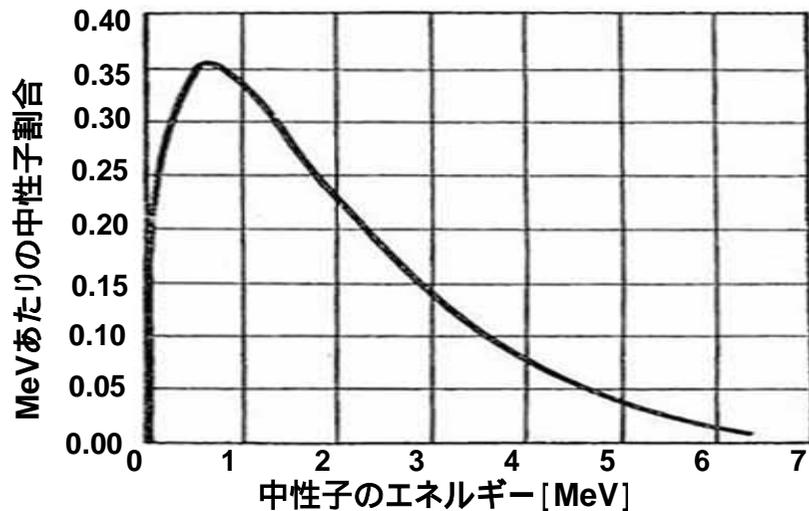
1回の核分裂による発生エネルギーは、核分裂反応による質量欠損(上の式の左辺の和から右辺の和の差)から計算され、約200 MeV(=3.2×10<sup>-11</sup>J)である。

1電子ボルト(eV)とは、真空中で、1価の荷電粒子を1V 高電位側へ移動させたときの仕事量 = 1.6 × 10<sup>-19</sup>J

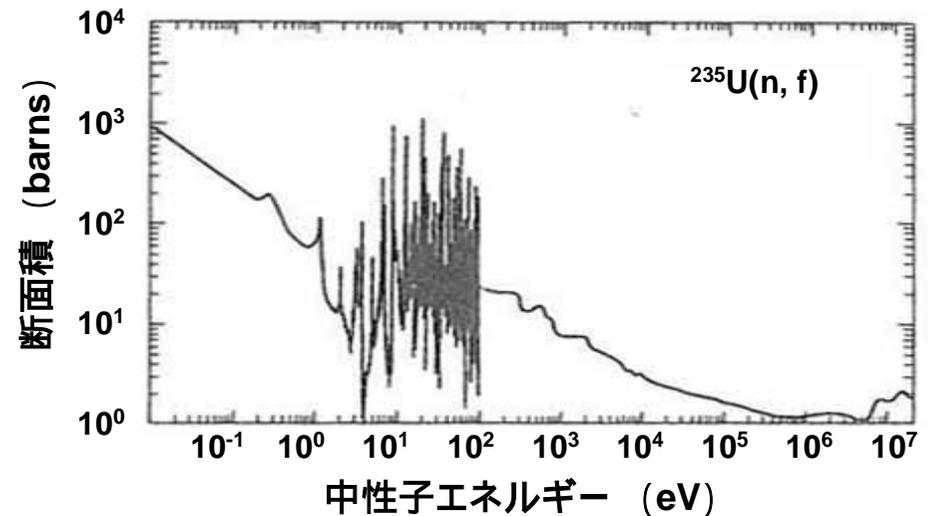


# 原子炉の原理 ( 3 )

核分裂反応によって生成される中性子のエネルギーは非常に高く(高速:約1,000万m/秒)、核分裂反応の起こり易さ(核分裂断面積)は、中性子のエネルギーによって異なる。一般には**熱中性子**(約2,200m/秒:この運動エネルギーが常温の物体の原子の熱運動エネルギーと平衡)まで減速して**反応を起しやすくする**。この**減速材**としては、軽くて中性子を吸収しないで弾き飛ばす原子である水素(水)や炭素(黒鉛)等が選ばれている。



核分裂により発生する中性子のエネルギー



核分裂断面積

# 原子炉の種類 ( 1 )

原子炉は使用する中性子のエネルギー、燃料、減速材、冷却材や使用目的等によって分類される。

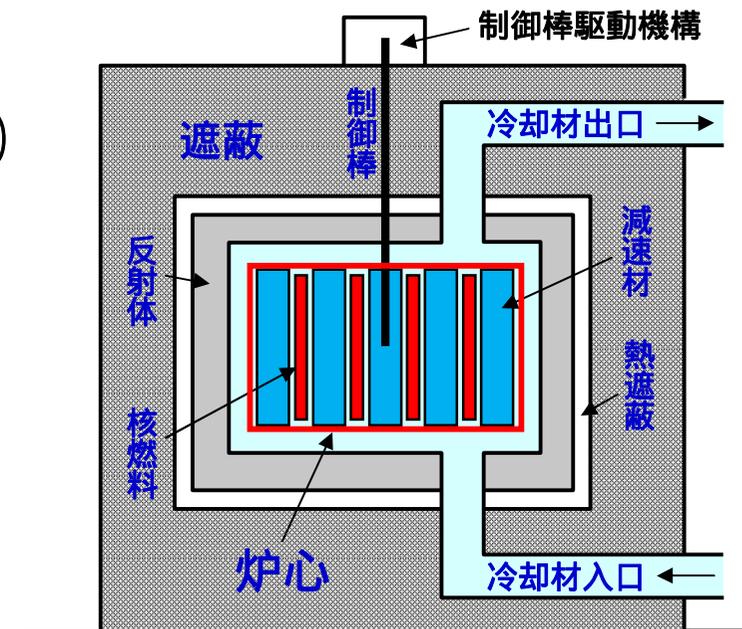
中性子エネルギー： 高速炉、熱中性子炉

燃料： 天然ウラン、低濃縮ウラン、高濃縮ウラン、プルトニウム、トリウム ( $U^{233}$ )  
金属燃料、酸化物燃料(混合)、炭化物燃料、液体燃料、...

減速材： 軽水、重水、黒鉛

冷却材： 軽水、重水、ガス(ヘリウム、炭酸ガス)、液体金属(ナトリウム、鉛等)

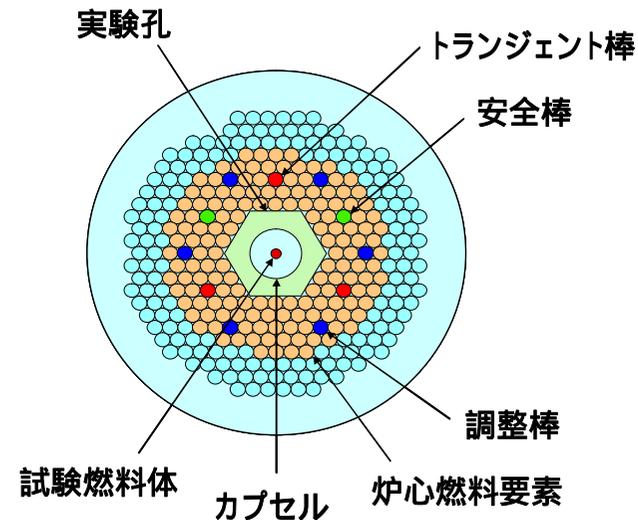
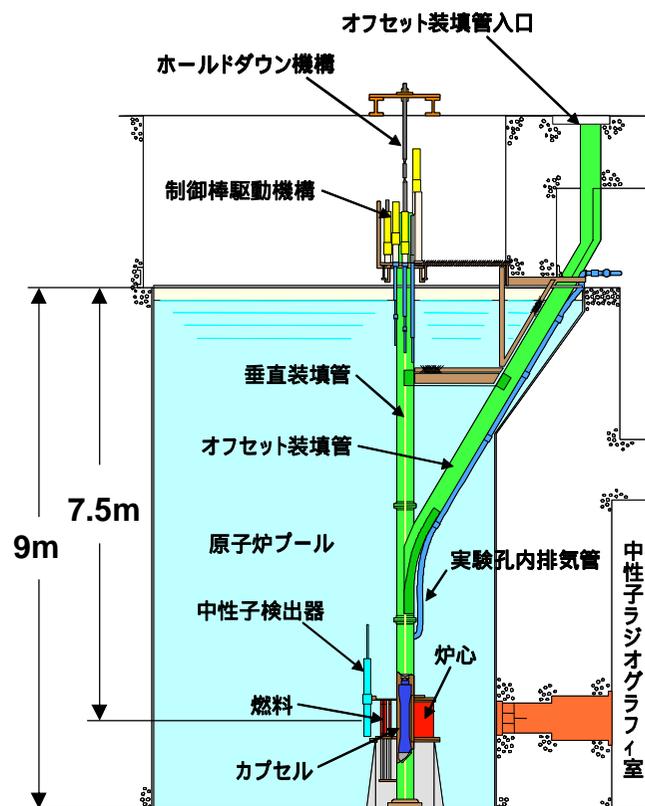
使用目的： 研究炉、試験炉、実験炉、発電炉、船用炉、RI生産炉、軍用炉



原子炉の模式図

# 原子炉の種類(2)

NSRR(原子炉安全性研究炉)は、出力急上昇(反応度事故)時の原子炉燃料の安全性を研究するための研究炉で、数ミリ秒で23,000MWまでのパルス運転を行える。原子炉はスイミングプール型で原子炉上部に対しては水が遮蔽の役割を果たしているため、運転中でも炉心を見ることが出来る。



**チェレンコフ光:** エネルギーの高い荷電粒子が物質内を通過するとき、この粒子の速度が物質内の光速より大きい場合、放射光(チェレンコフ光)を放射する。チェレンコフ光は、波面の進行方向と粒子の進行方向とのなす角度の中に放射され、角度の大きい方向に青い光として進行する。

# 原子炉の種類 ( 3 )

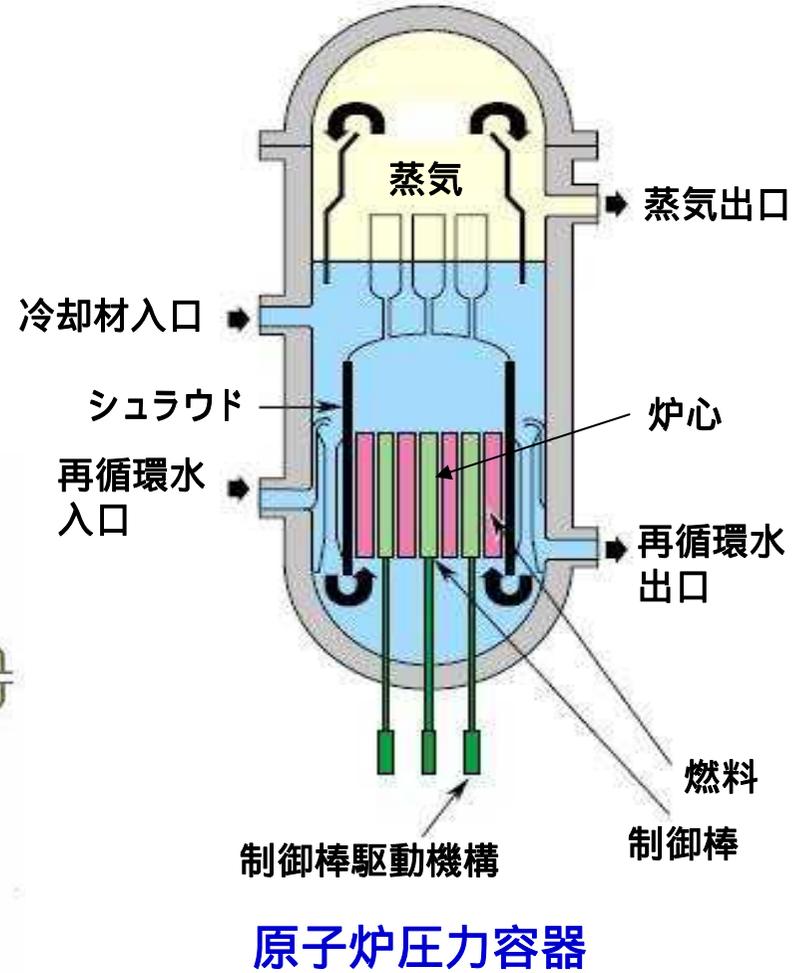
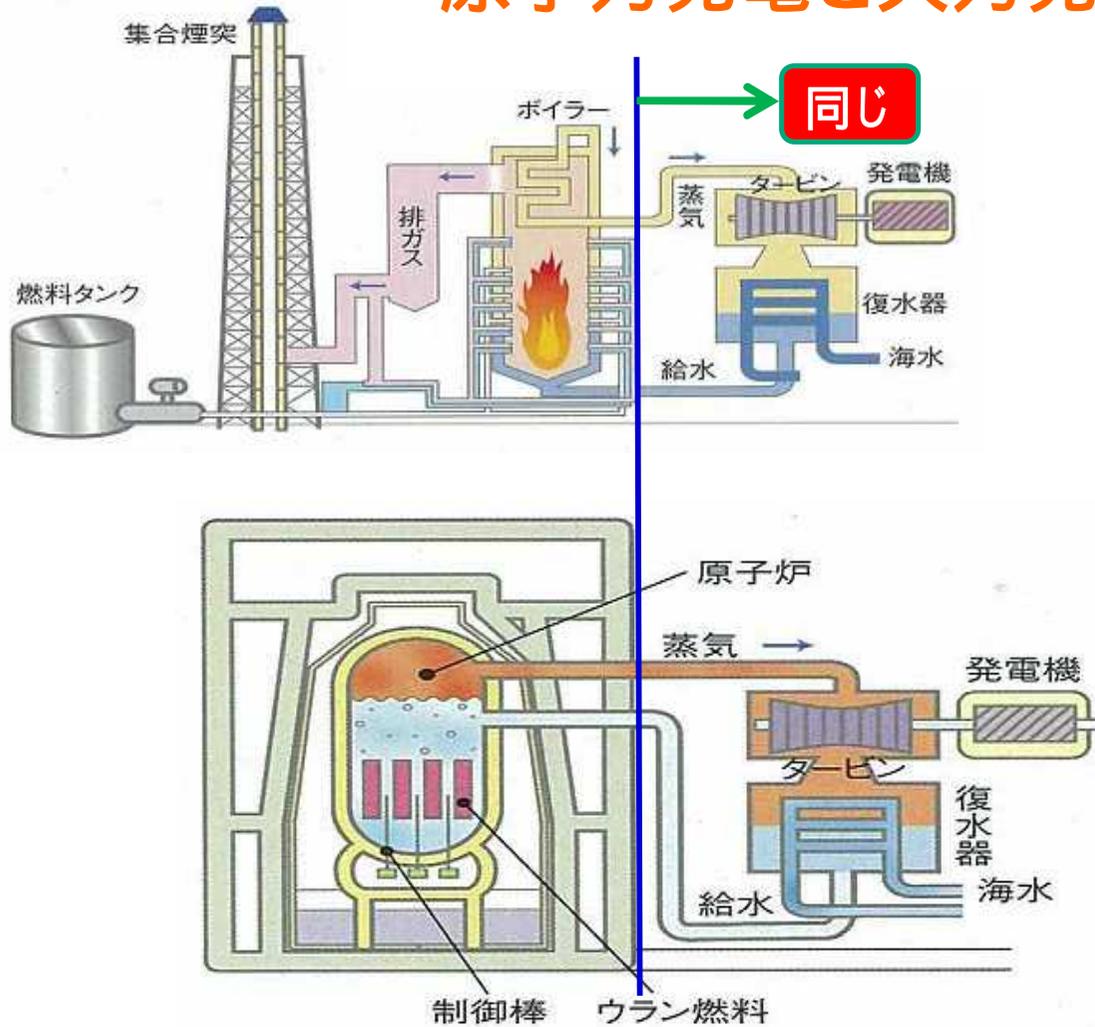
## 主要な原子炉の種類

原子炉の種類	燃料	減速材	冷却材	備考
ガス冷却 黒鉛炉	天然ウラン 金属	黒鉛	炭酸ガス	コールダ ホール、AGR
水冷却 黒鉛炉	濃縮ウラン 酸化物	黒鉛	軽水	RBMK (チェルノブイリ炉)
重水炉	天然、濃縮 ウラン酸化物	重水	重水、軽水	CANDU炉、ふげん
沸騰水型 軽水炉	濃縮ウラン 酸化物	軽水	軽水	世界の 約8割
加圧水型 軽水炉	濃縮ウラン 酸化物	軽水	軽水	
高速炉	Pu - U混合 酸化物	なし	液体ナトリウム	増殖 MA核変換
高温ガス炉	濃縮ウラン 酸化物	黒鉛	ヘリウムガス	原子炉出口 温度950

MA: アクチノイドの中、半減期の長いAm, Cm等を言う。

# 原子力発電のしくみ(1)

## 原子力発電と火力発電の違い



# 原子力発電のしくみ(2)

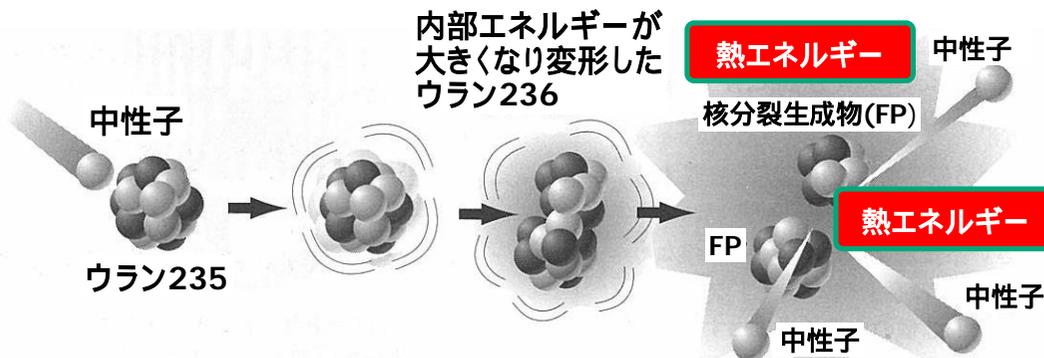
## 化学エネルギーと原子力エネルギーの比較

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

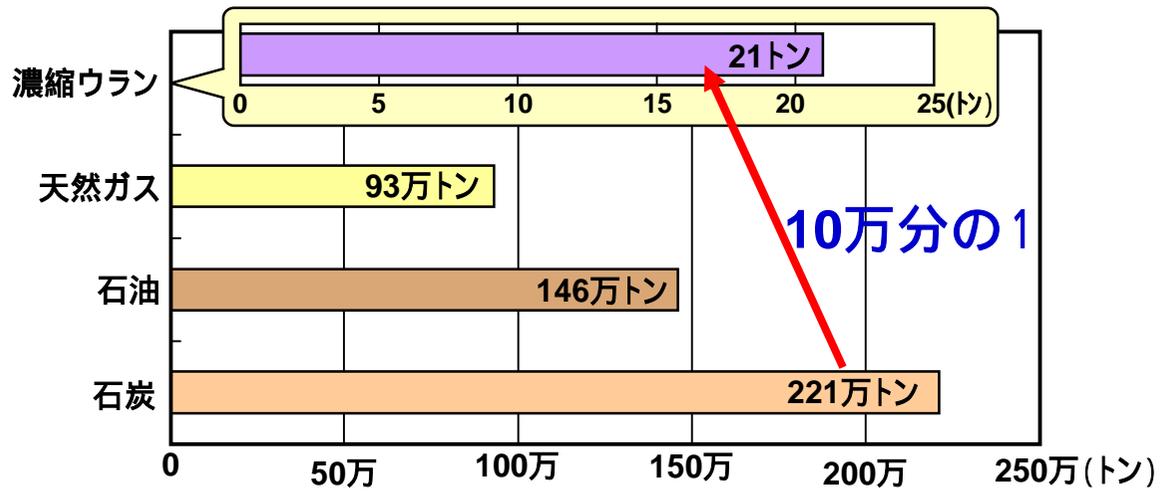
### 100万kWの発電所に必要な燃料量 原子力

$$3.2 \times 10^{-11} \times \frac{235}{6.02 \times 10^{23}} \times \frac{1}{0.34} \times 365 \times 24 \times 3600 \times \frac{1}{0.05} = 2.27 \times 10^7 \text{ gr} = 22.7 \text{ トン (93\%稼働率で21トン)}$$

### 火力

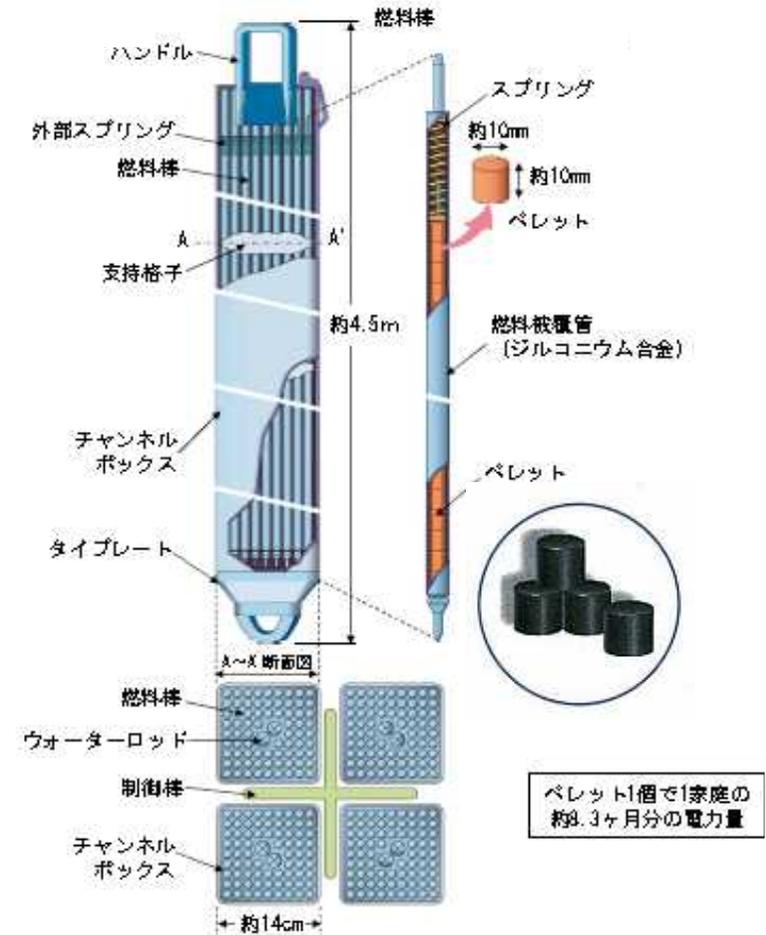
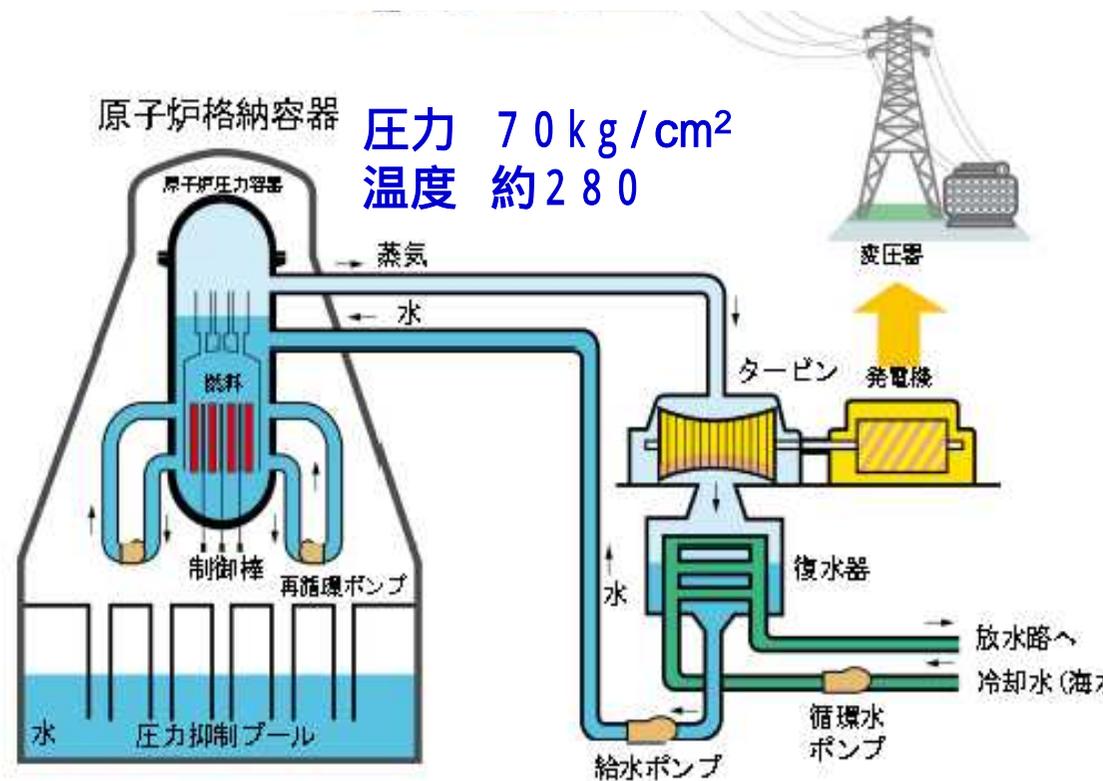
1個のウラン235原子の核分裂は、5,000万個の炭素原子の燃焼に匹敵するエネルギーを出す。

100万kWの発電所を1年間運転するために必要な燃料の量



# 原子力発電のしくみ ( 3 )

## 沸騰水型軽水炉 ( BWR )

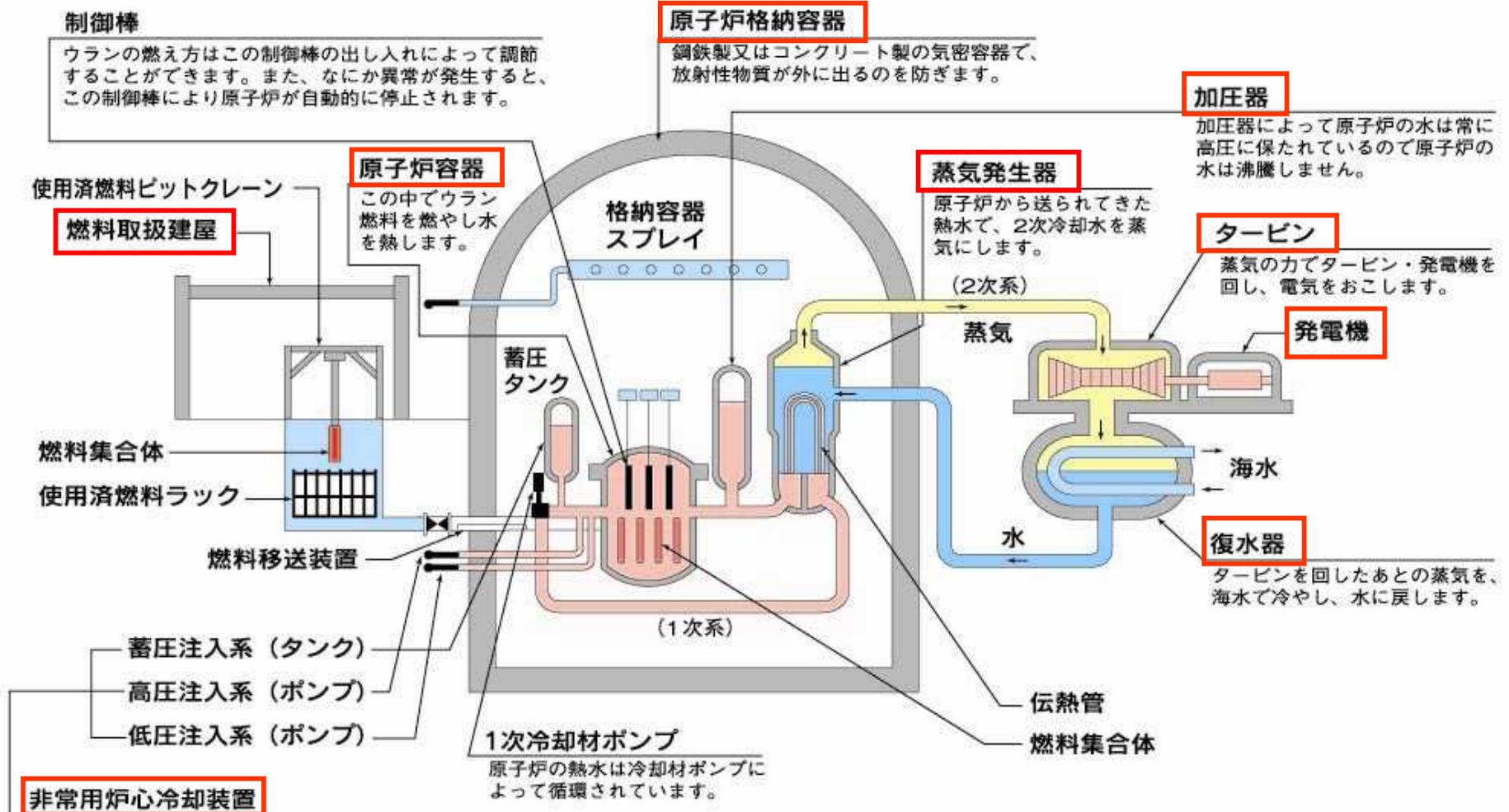


燃料棒と燃料集合体



# 原子力発電のしくみ(5)

## 加圧水型原子力発電所系統図

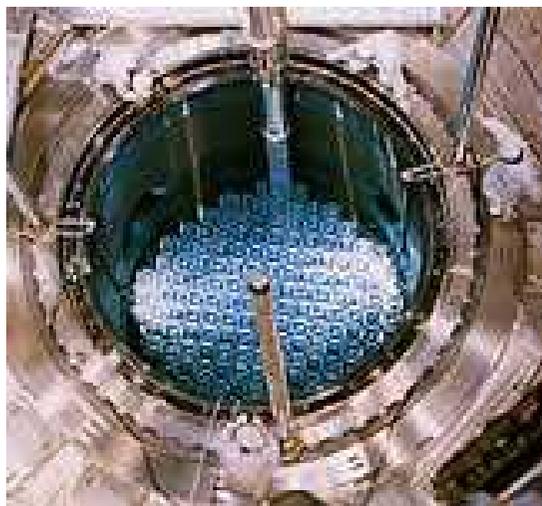


# 原子力発電のしくみ(6)

## 写真で見る原子炉压力容器とタービン



据付け中の原子炉  
压力容器



燃料集合体を装荷した  
原子炉压力容器



### タービン・発電機

蒸気によりタービンを1分間に1,800回  
の高速で回転させ、このタービンに直結  
した発電機を回転させて電気をつくる。

# 原子炉設置に係る安全設計審査

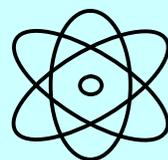
電気事業者が原子力発電所を建設するに当たっては、**国の厳格な安全審査を受けることになっている。**ここでは、**原子炉施設の概要を把握する意味で安全設計審査指針の骨格を示す。**

- 1 . 原子炉施設全般：準拠規格・基準、自然現象、火災等10項目
- 2 . 原子炉及び原子炉停止系：自己制御性、停止能力等8項目
- 3 . 原子炉冷却系：圧力バウンダリの健全性、非常用冷却系等9項目
- 4 . 原子炉格納容器：機能、隔離機能、雰囲気制御等6項目
- 5 . 安全保護系：多重性、独立性、試験可能性等7項目
- 6 . 制御室及び緊急時施設：機能、制御室外原子炉停止等6項目
- 7 . 計測制御系及び電気系統：計測制御系、電気系統の2項目
- 8 . 燃料取扱系：新燃料・使用済燃料の貯蔵・取扱、臨界防止等3項目
- 9 . 放射性廃棄物処理施設：気体、液体、固体廃棄物に関し4項目
- 10 . 放射線管理：周辺、従事者の放射線防護・監視・管理等4項目

# 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

止める

冷やす

閉じこめる

自動的に  
原子炉を  
停止する装置

非常用  
炉心冷却  
装置

原子炉  
格納容器

異常を早期に  
検出する装置

余裕の  
ある  
安全設計

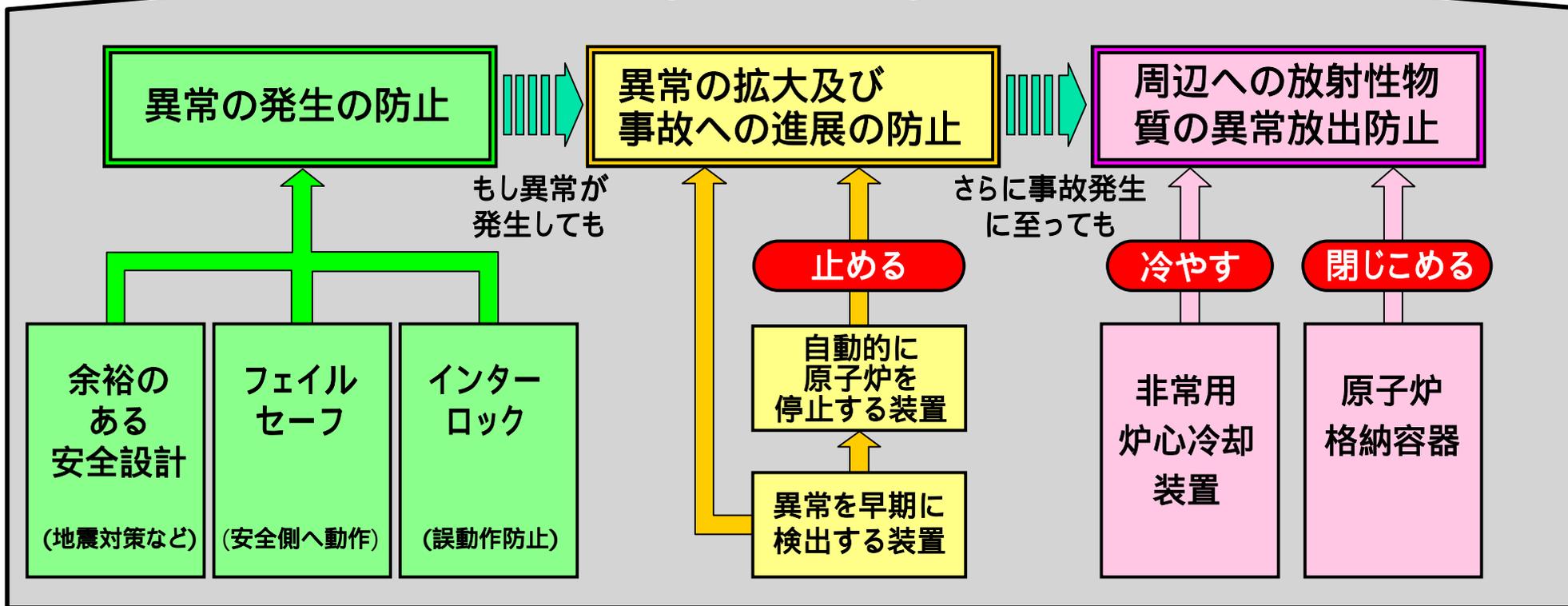
フェイル  
セーフ

インター  
ロック

(地震対策など)

(安全側へ動作)

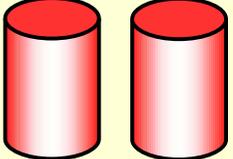
(誤動作防止)



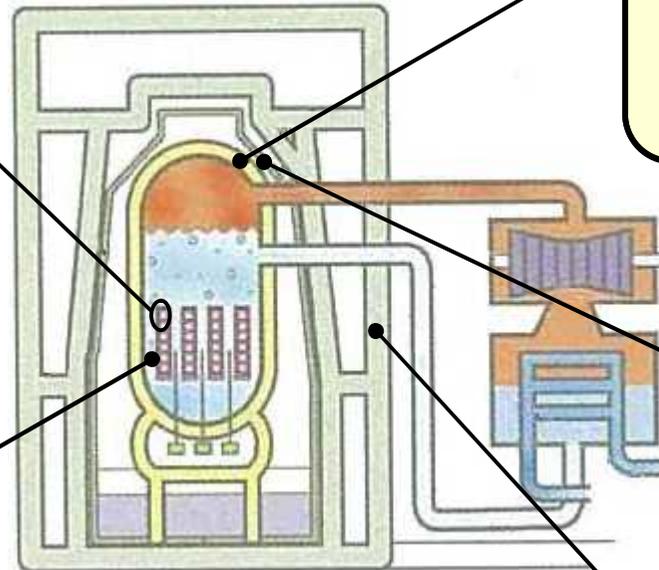
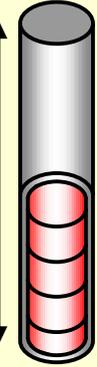
# 原子力発電所の安全性(2)

## 放射能を閉じ込める5重の壁

**第1の壁**  
ペレット  
ウラン燃料を  
焼き固めた物



**第2の壁**  
被覆管  
合金製の  
細長い筒  
約4m



**第3の壁**  
原子炉压力容器  
(鋼鉄製容器)  
厚さ  
約15cm



**第4の壁**  
原子炉格納容器  
(鋼鉄製容器)  
厚さ  
約4cm

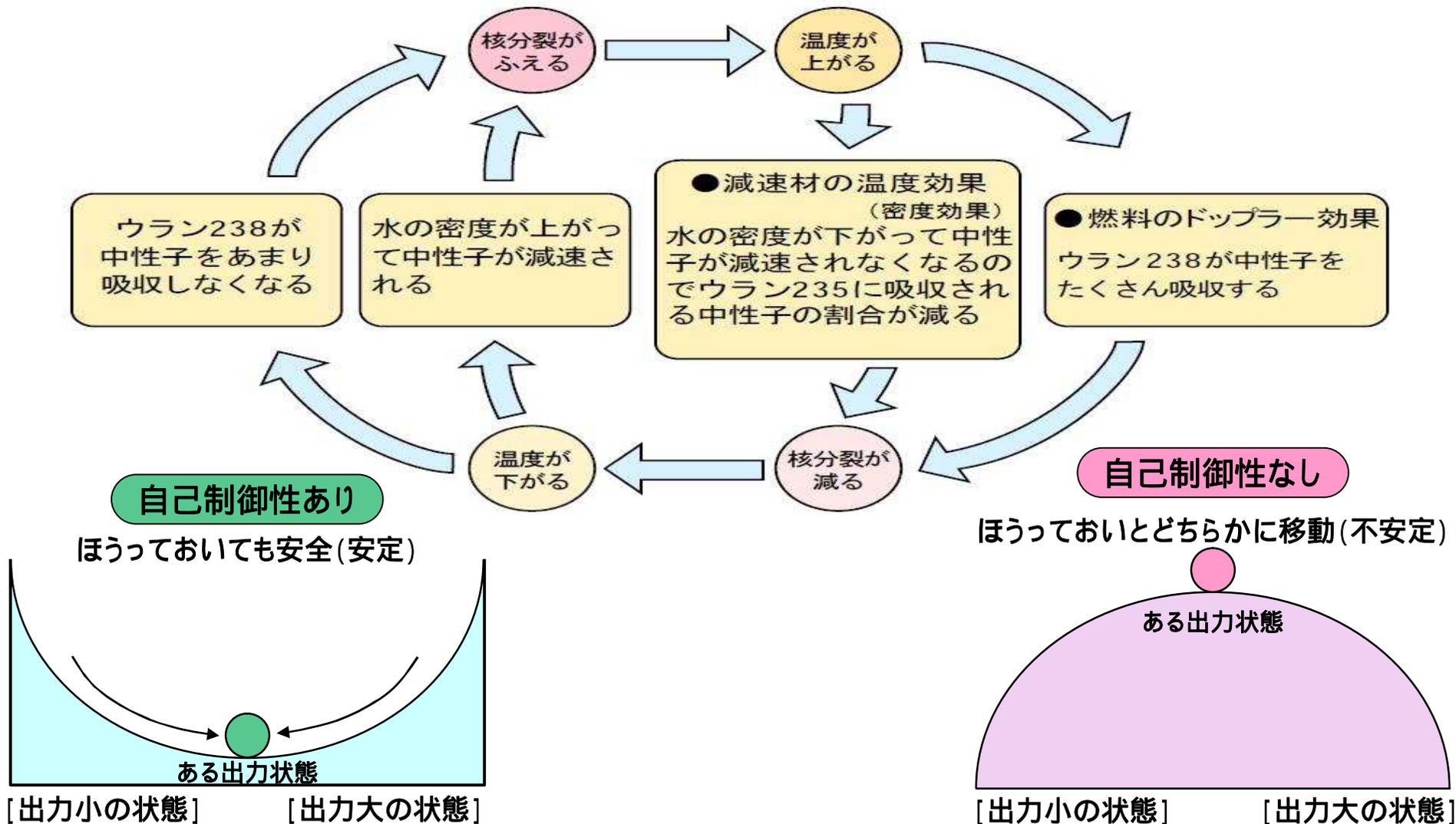


**第5の壁**  
原子炉建家  
(鉄筋コンクリート)  
厚さ  
約1m



# 原子力発電所の安全性(3)

## 原子炉の固有の安全性(自己制御性)



# 原子力発電所の安全性(4)

## 原子力施設周辺の環境放射線モニタリング



**モニタリングカー**  
放射線や放射能を測定する機器を積んで、広い地域でモニタリングをしています。

**モニタリングステーション**

環境放射線の測定に加えて空気中に浮遊する塵に含まれる放射能や気象データを測定しています。



**環境試料採取(陸上)**

葉菜, 牛乳, 土壌  
雨水, 河川水等をサンプリングし、放射能を測定しています。

原子力施設を有する道府県では、4半期ごとに評価会議を開き、審議・評価し、すべて公表している。

**環境試料採取(海洋)**

魚介類, 海藻, 海水等をサンプリングし、放射能を測定しています。

周辺監視区域

原子力施設

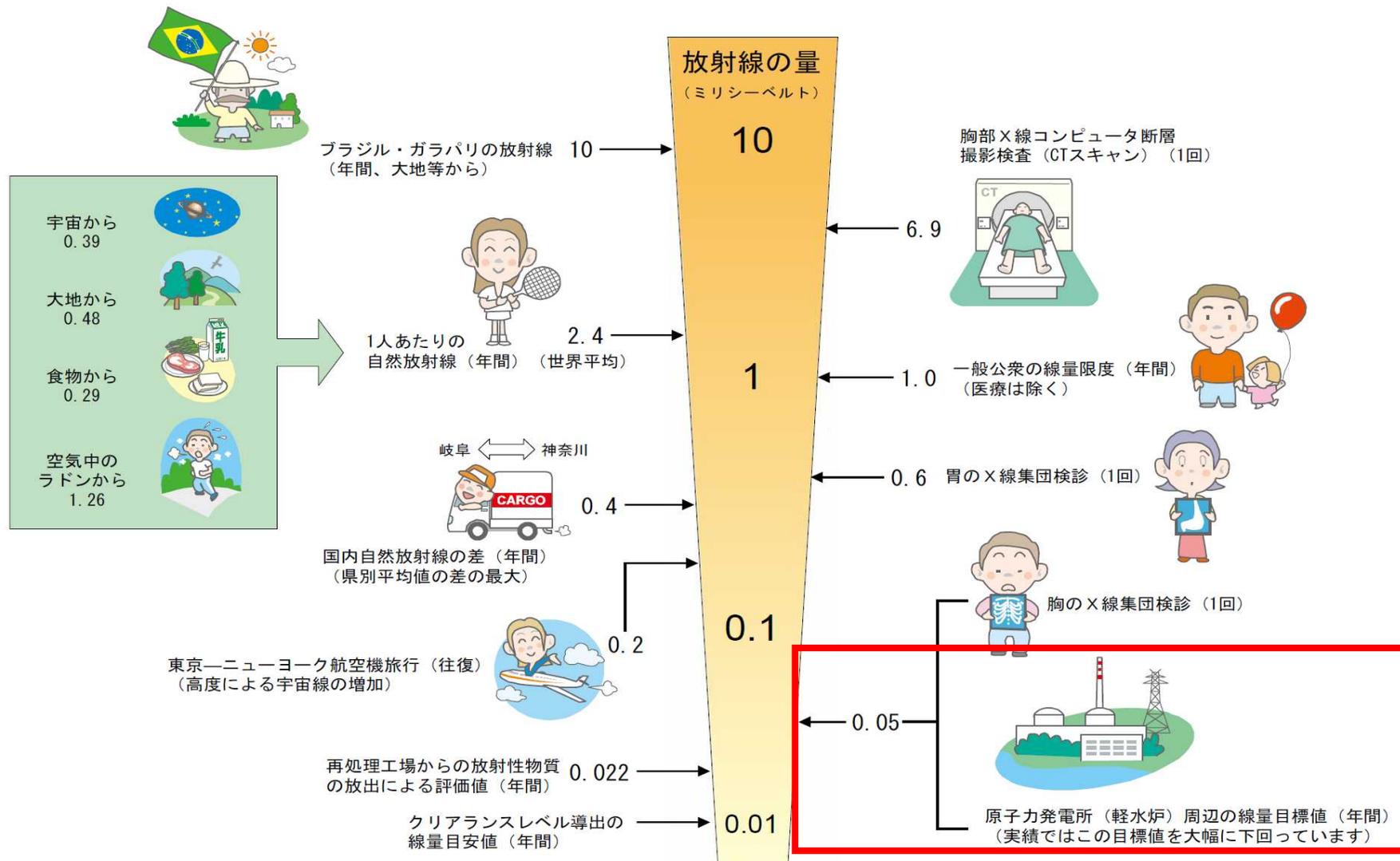
**モニタリングポスト**

原子力施設の敷地周辺では、環境放射線を連続して測定しています。



# 原子力発電所の安全性(5)

## 日常生活と放射線



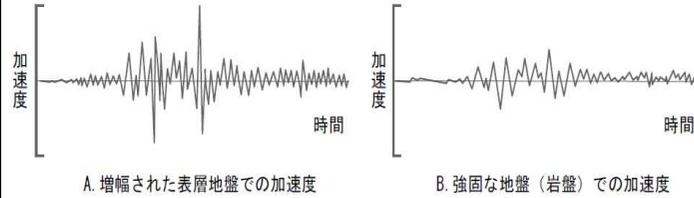
# 原子力発電所の安全性(6)

## 原子力発電所の地震対策と一般建築物の揺れの差

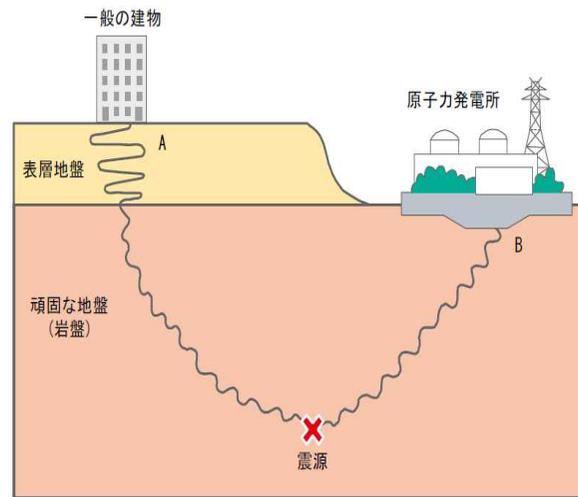
### 耐震設計と地震対策

1. 徹底した調査  
活断層、地質構造、過去の地震
2. 振動台や加振機による耐震実証試験
3. 詳細な解析評価
4. 強固な岩盤上に設置
5. 安全上の重要度に応じた耐震設計  
止める、冷やす、閉じ込める
6. 原子炉の自動停止

堅固な地盤（岩盤）上に設置した原子力発電所と一般の建物の揺れの伝わり方

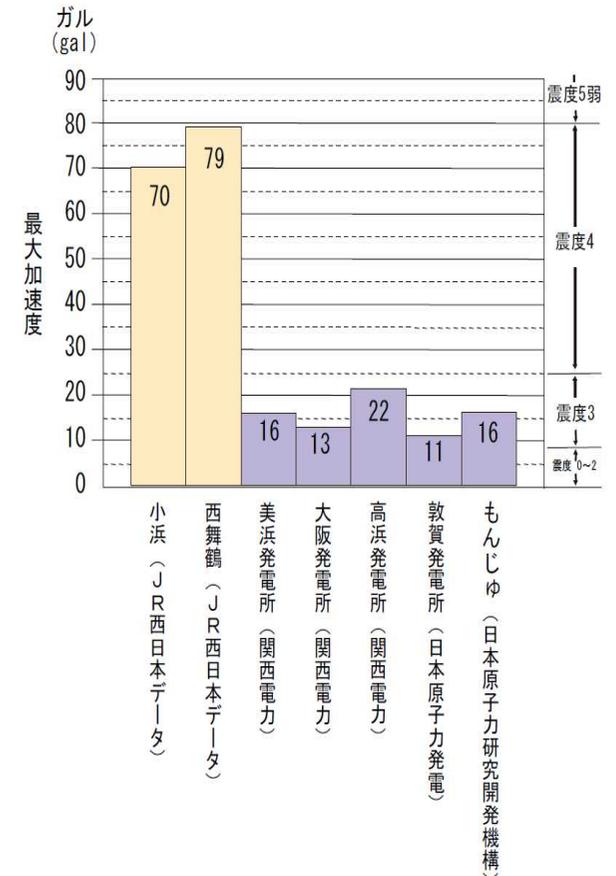


(注) 地震波形は模式図



堅固な地盤(岩盤)での揺れは表層地盤に比べ1/2~1/3程度

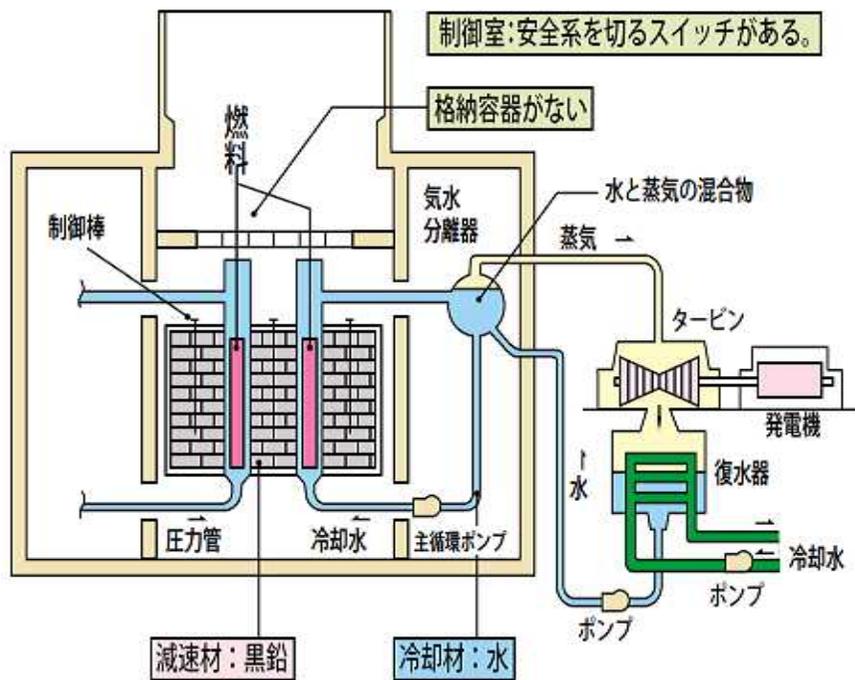
1995年兵庫県南部地震による若狭湾周辺の最大加速度観測値



# 原子力発電所の安全性(7)

## チェルノブイリ原子力発電所の構造と事故経過

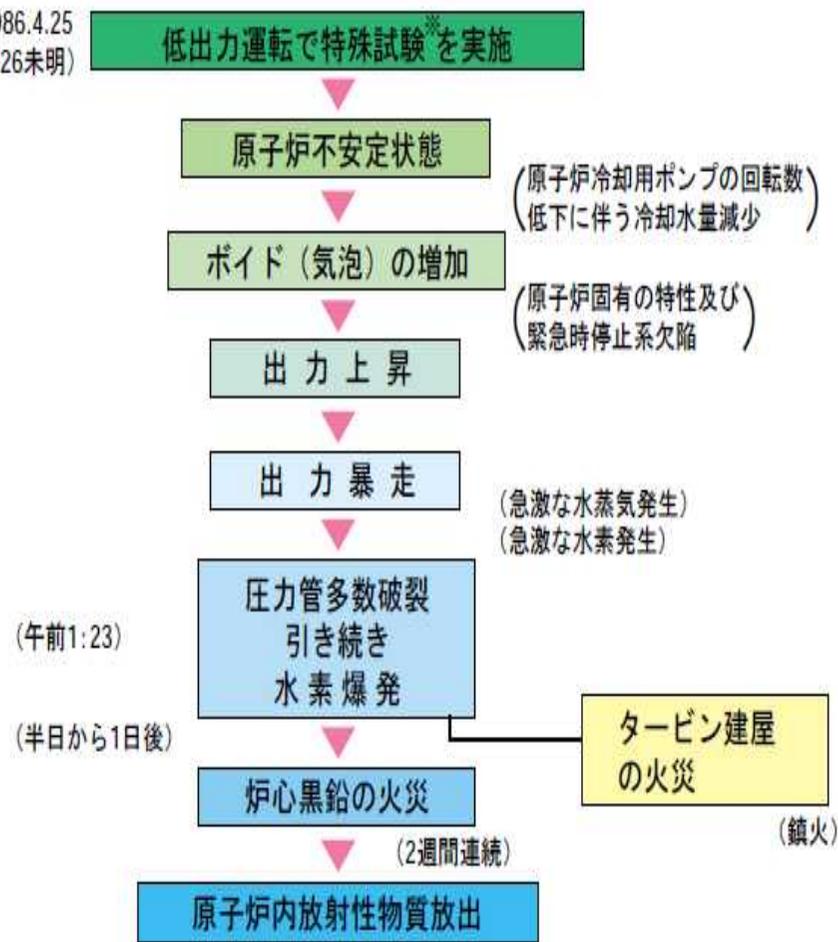
(黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉 RBMK)



	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

(1986.4.25  
~26未明)



※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

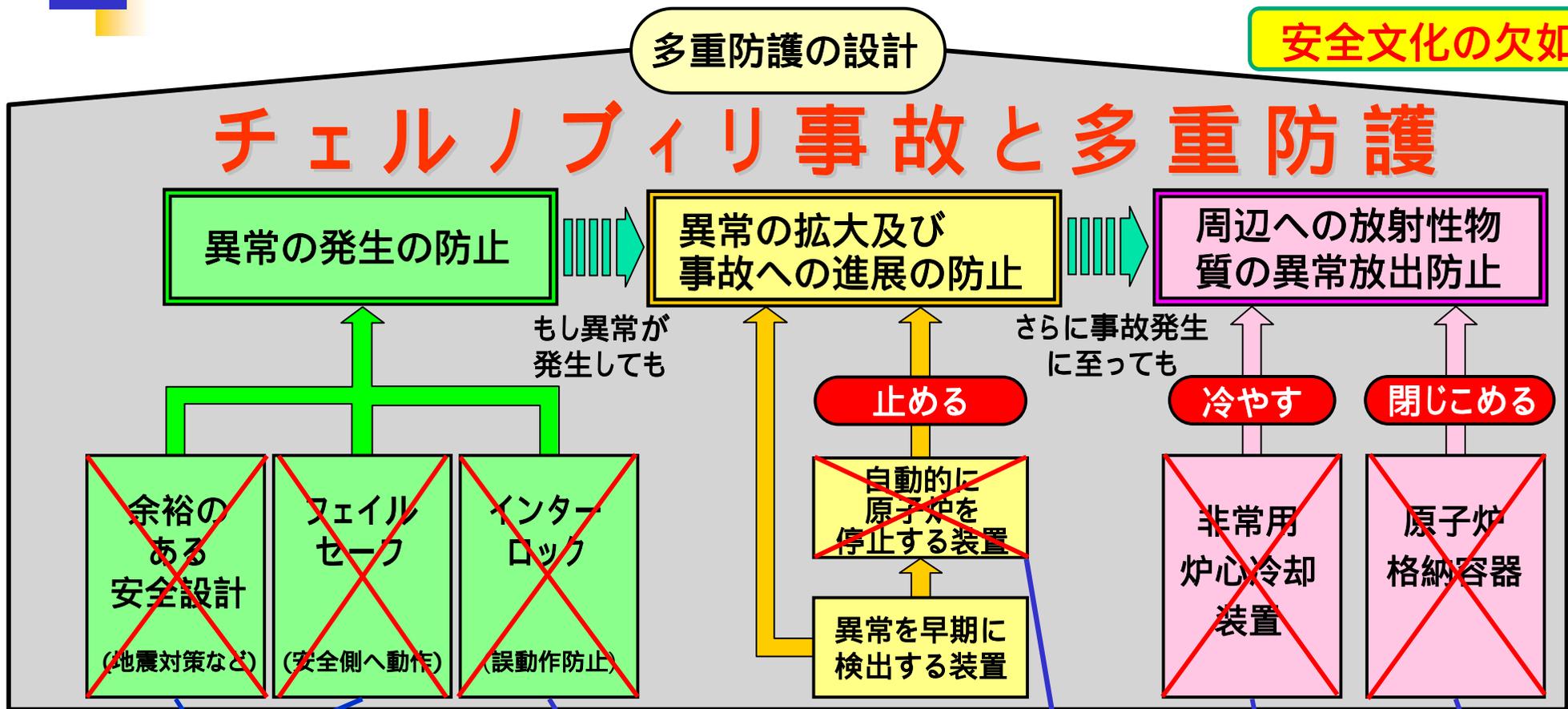
出典: 旧科学技術庁パンフレット

# 原子力発電所の安全性(8)

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

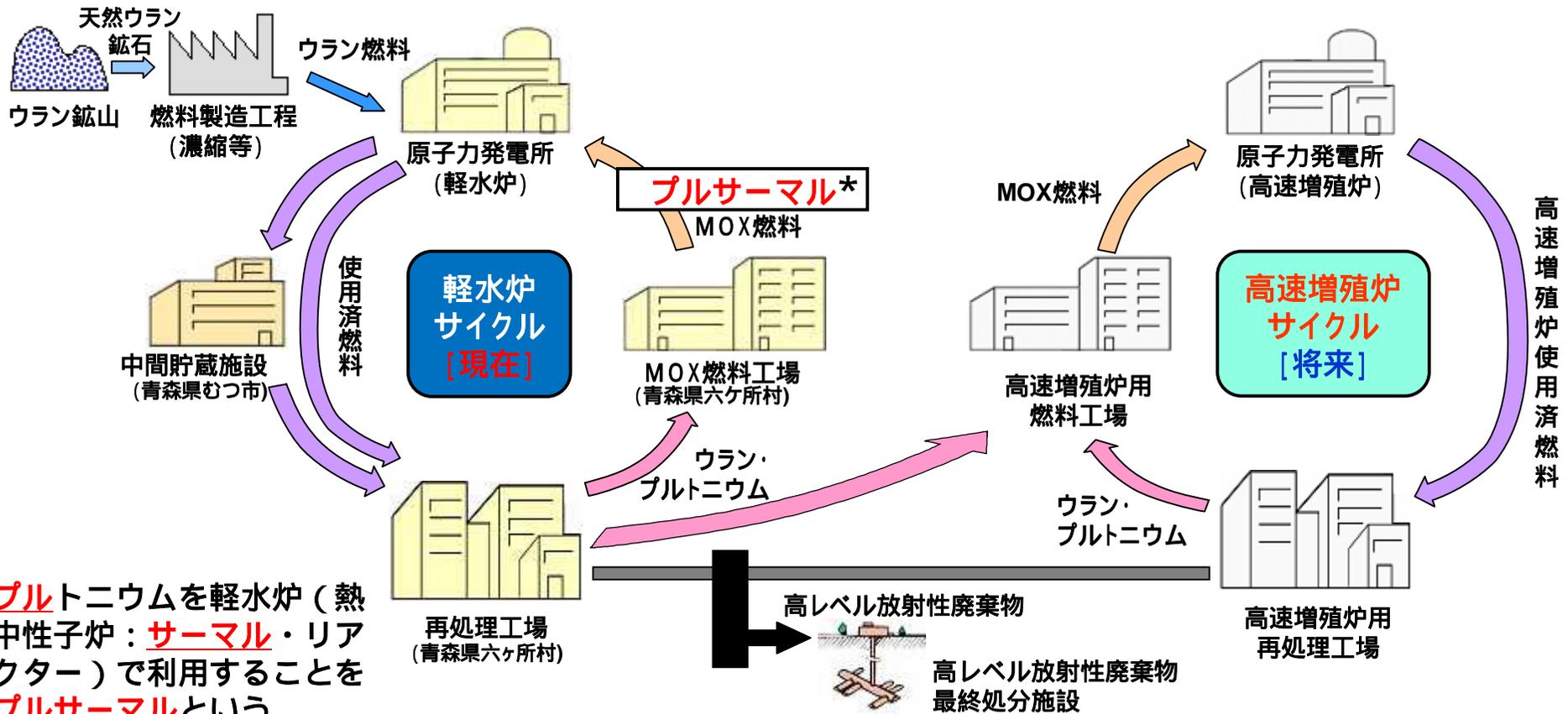
自動作動を切って運転

なし

# 核燃料サイクル(1)

- 「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。  

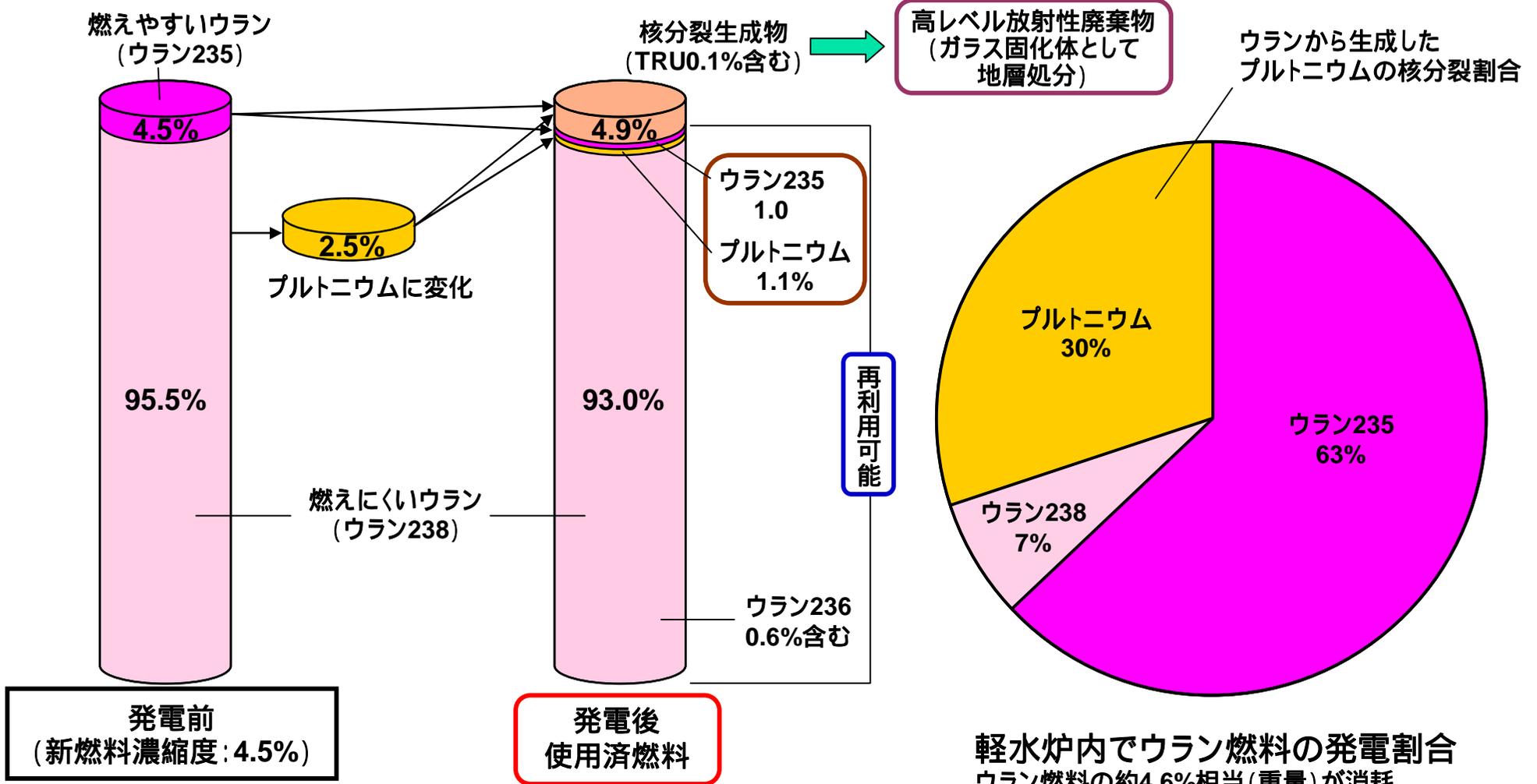
$$\text{Pu}^{239} \text{ は } \text{U}^{238} + n \rightarrow \text{U}^{239} \rightarrow \text{Np}^{239} \rightarrow \text{Pu}^{239} \text{ で生成}$$
- 限りあるウラン資源を有効利用し、エネルギーの安定確保に貢献。
- 放射性廃棄物の量を減らすことができる。



\* プルトニウムを軽水炉 (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** という。

# 核燃料サイクル ( 2 )

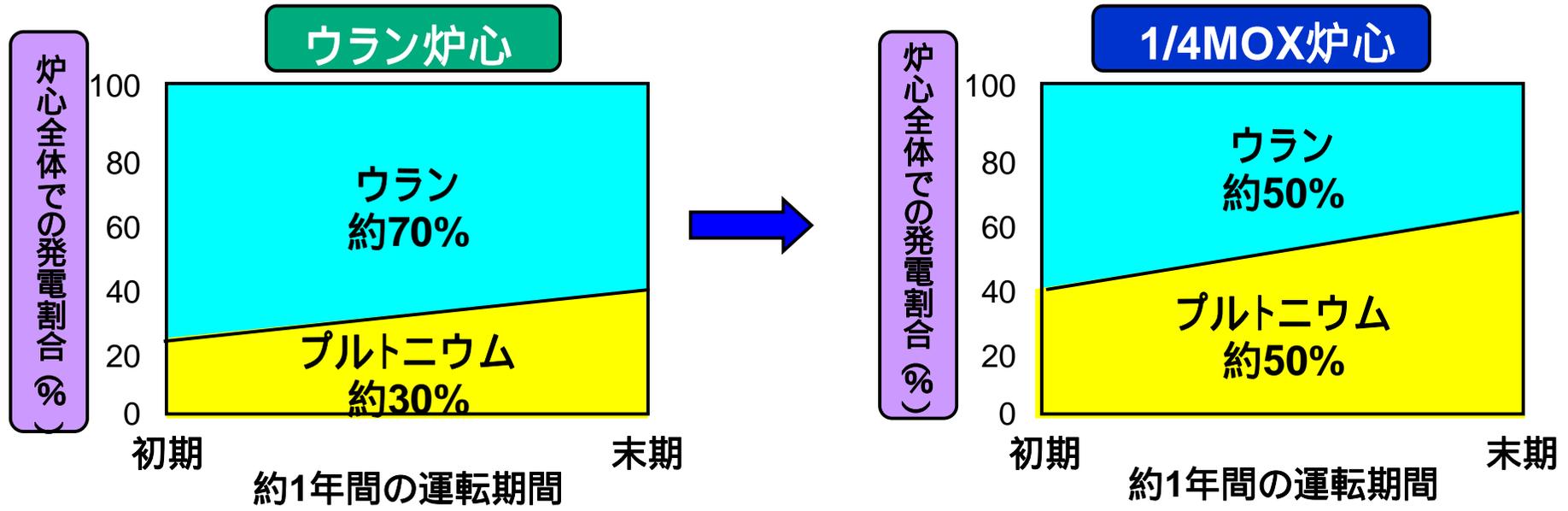
軽水炉によるエネルギー生産量：燃焼度（平均） 45,000MWD / ton・Uの場合



発電によるウラン燃料の組成の変化

# 核燃料サイクル ( 3 )

**プルサーマル**では、PuとUの混合酸化物 (Mixed OXide, MOX) 燃料を通常、炉心全体の1/3以下装荷する。ウラン燃料炉心と特性上大差なく、欧米で30年以上の実績があり、我が国でも九州電力、四国電力等で開始し、各電力会社が予定している。

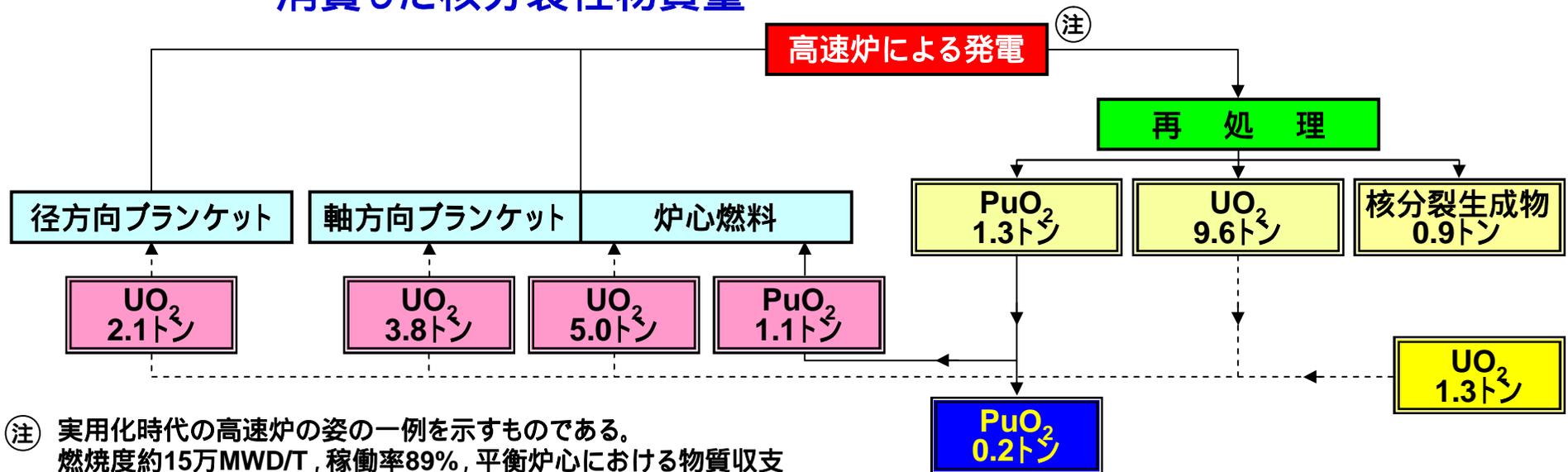


約1年間の運転毎に、炉心の燃料の約1/5から1/4を新燃料に取り替えるが、残りは継続使用するため、ウラン炉心の運転初期でも燃焼して生成したプルトニウムを含む燃料が存在している。

# 高速増殖炉とその特徴(1)

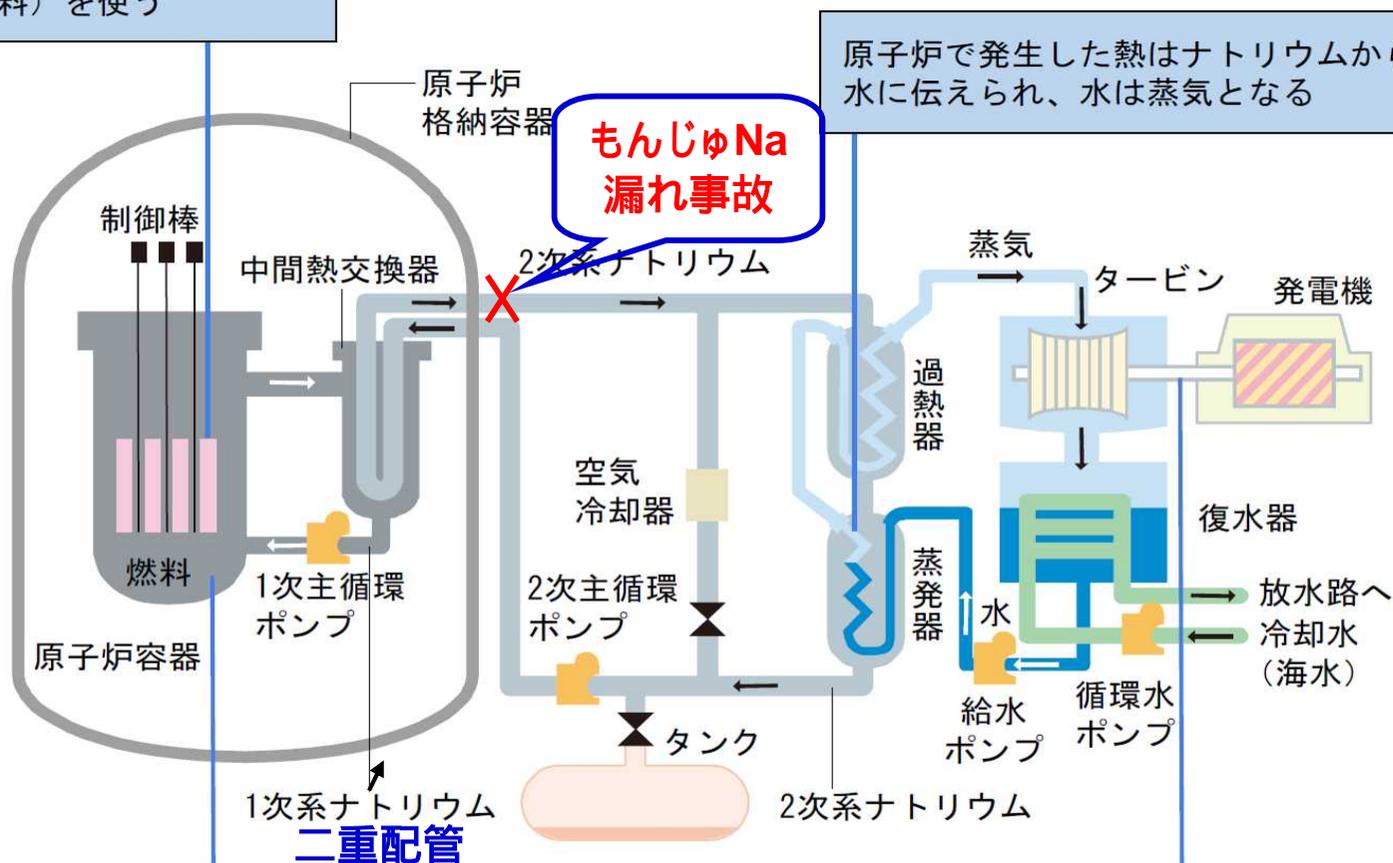
一般に、転換比が1以上である場合増殖と言う。高速エネルギー領域では、核分裂の連鎖反応に寄与しなかった中性子がウラン - 238 に吸収されて核分裂性物質のプルトニウム - 239 に変換され増殖される。一般的には、このために炉心周囲に劣化ウランのブランケットを設ける。

転換比 =  $\frac{\text{生成された核分裂性物質質量}}{\text{消費した核分裂性物質質量}}$



# 高速増殖炉とその特徴(2)

燃料にはプルトニウムとウランを混ぜたもの (MOX燃料) を使う



原子炉で発生した熱はナトリウムから水に伝えられ、水は蒸気となる

もんじゅNa  
漏れ事故

冷却材には熱のよく伝わる液体金属 (ナトリウム) を使う

蒸気でタービンを回し発電する

# 高速増殖炉とその特徴(3)

## 世界の高速増殖炉開発の現状

- ロシア: 実験炉、原型炉運転中、  
実証炉建設中
- インド: 実験炉運転中、原型炉建設中
- 中国: 実験炉建設中、  
実証炉計画中
- フランス: 原型炉計画中
- 米国: ?

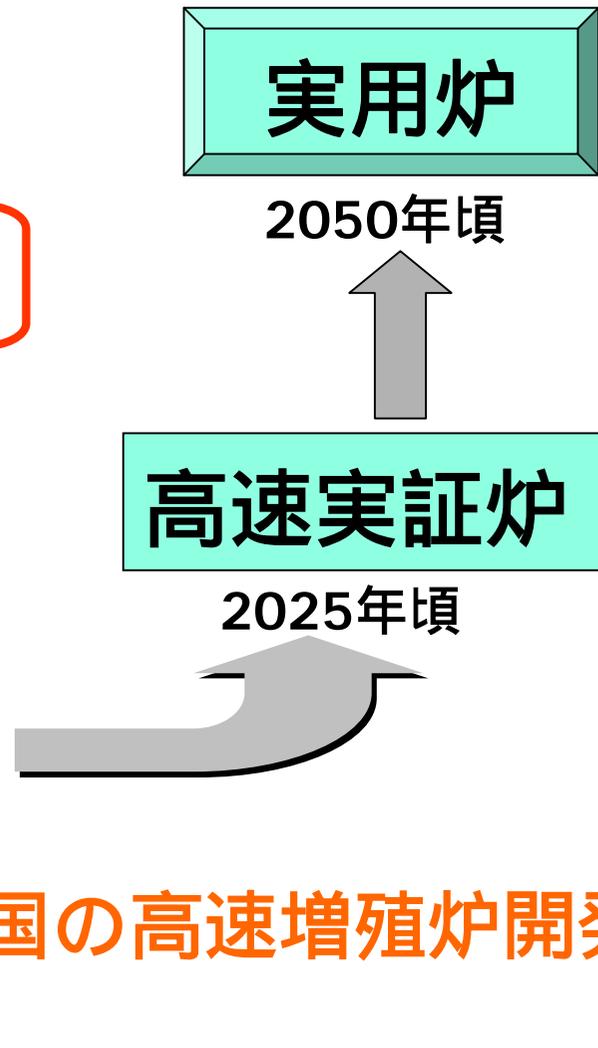


高速炉実験炉「常陽」  
昭和52年臨界



高速原型炉「もんじゅ」  
平成6年臨界

14年半ぶりに  
運転再開



我が国の高速増殖炉開発

# 原子力発電は必要か

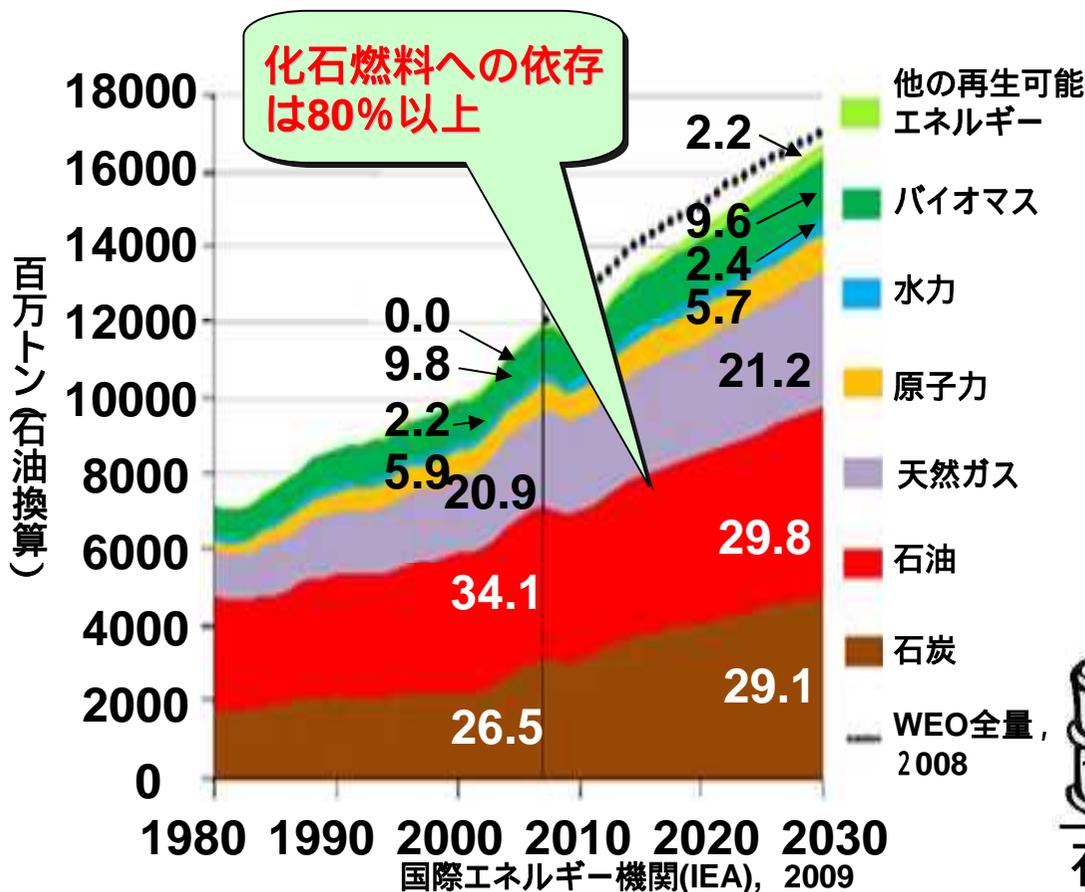
## エネルギー問題とは何か？

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

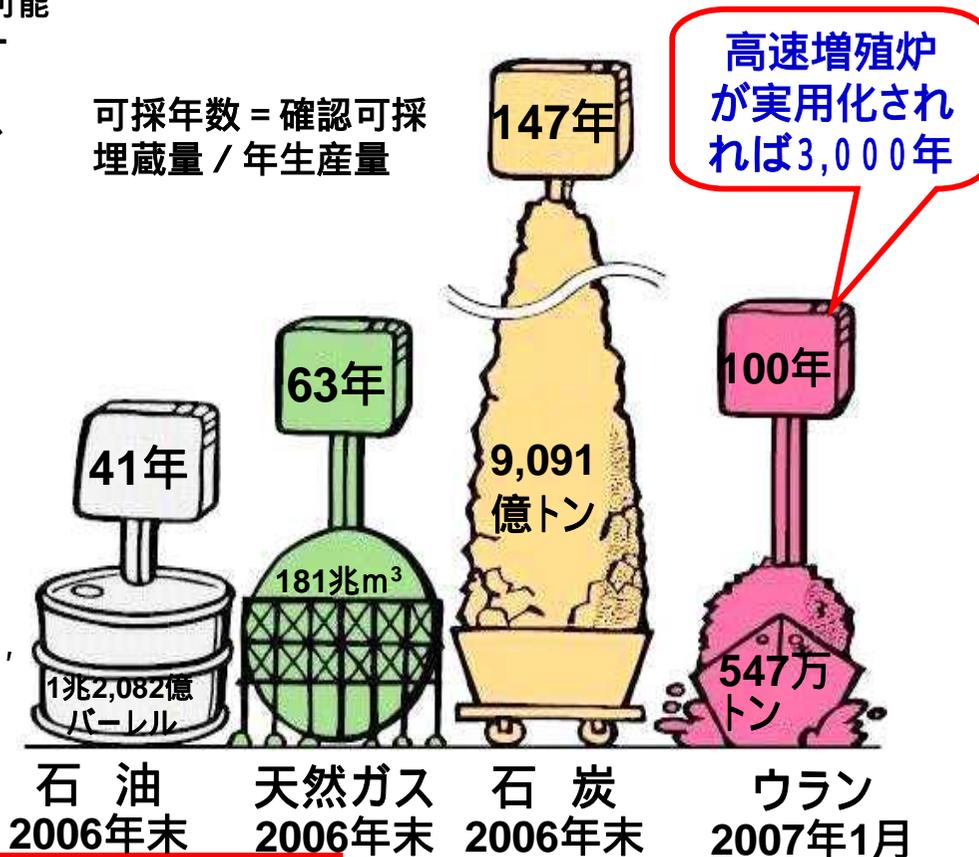
 これからのエネルギーをどうする？

# 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

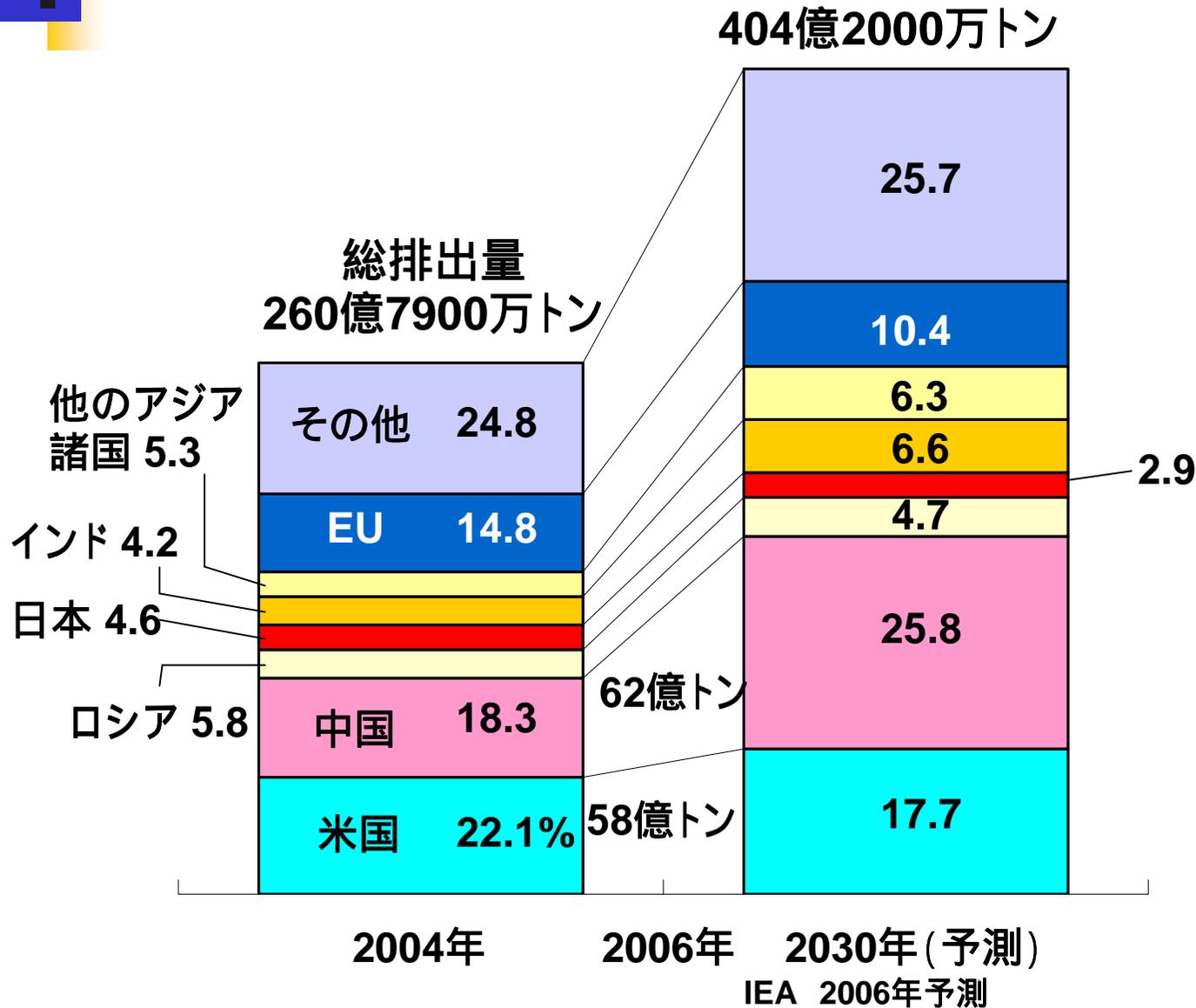
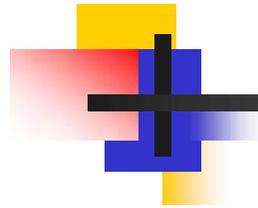


## 資源確認埋蔵量と可採年数



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！

# CO<sub>2</sub>排出量の現状と将来予測



# 新エネルギーの導入と課題

- ✓ CO2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

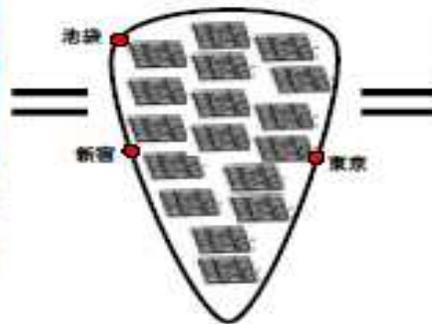
### 原子力発電所一基

0.6km<sup>2</sup>  
(~2,800億円)



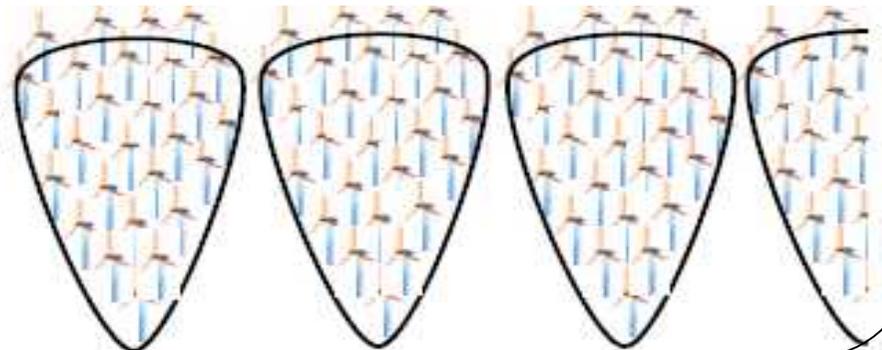
### 太陽光発電

山手線一杯の面積(約67km<sup>2</sup>)  
(~3.9兆円)



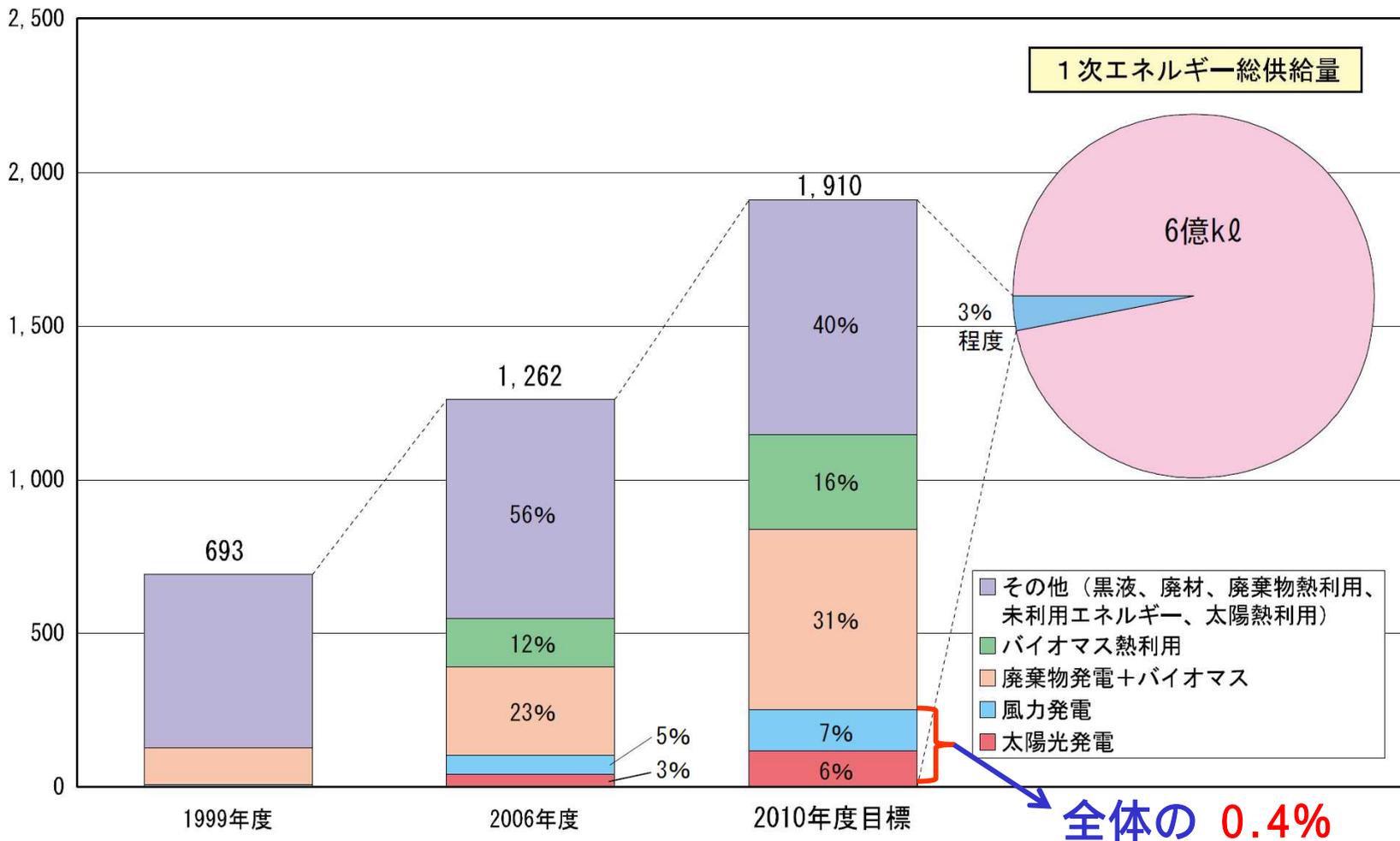
### 風力発電

山手線の3.5倍の面積(約264km<sup>2</sup>)  
(~8,700億円)



# 我が国の新エネルギー導入実績と目標

(原油換算万kℓ)



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

# 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年以上使用出来る上、備蓄が容易である。

### 2. 地球環境への適合

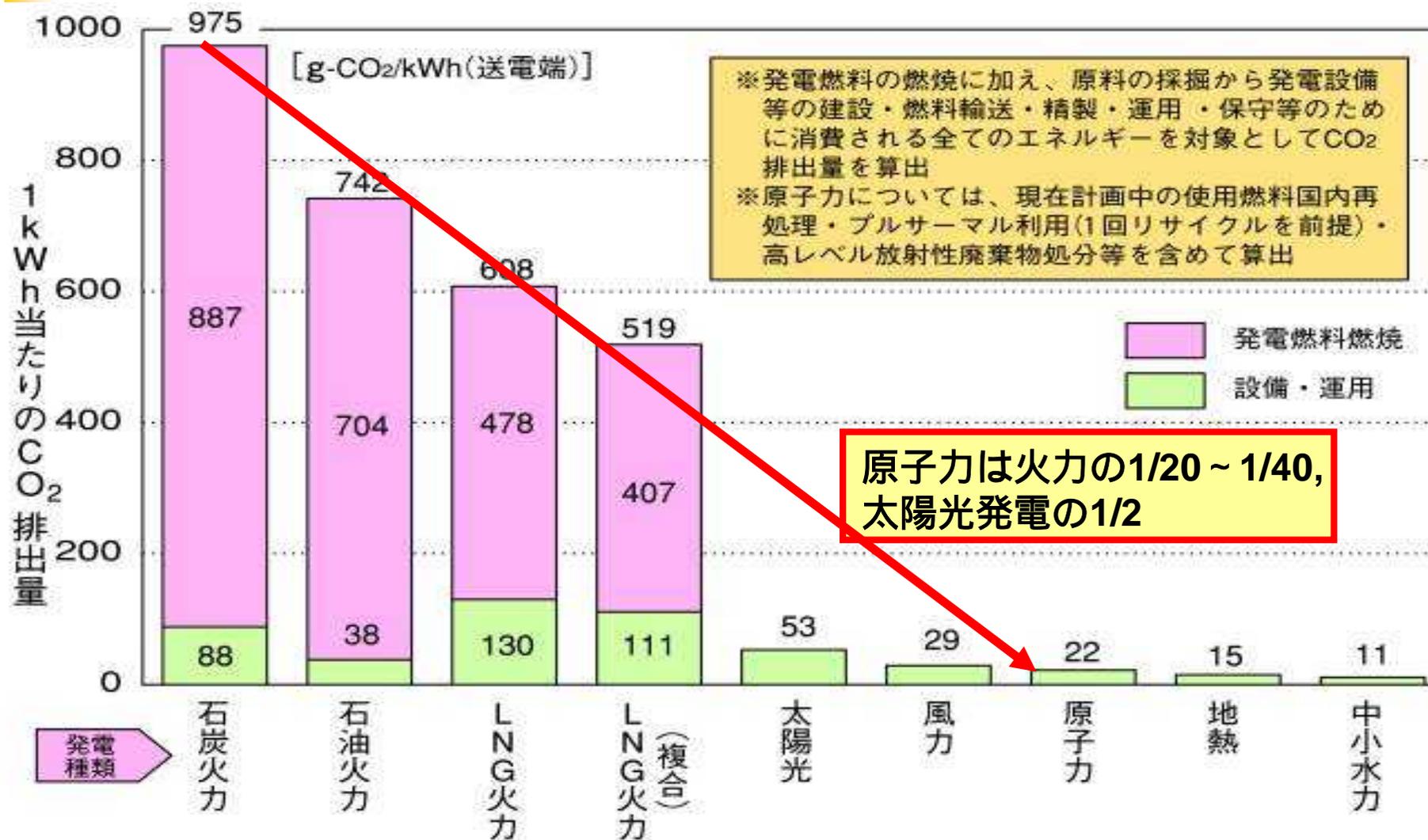
発電過程でCO<sub>2</sub>を排出せず、SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, 煤塵も放出しない。

### 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。

原子力発電所の新增設により全発電電力量の40～50%を供給することは可能

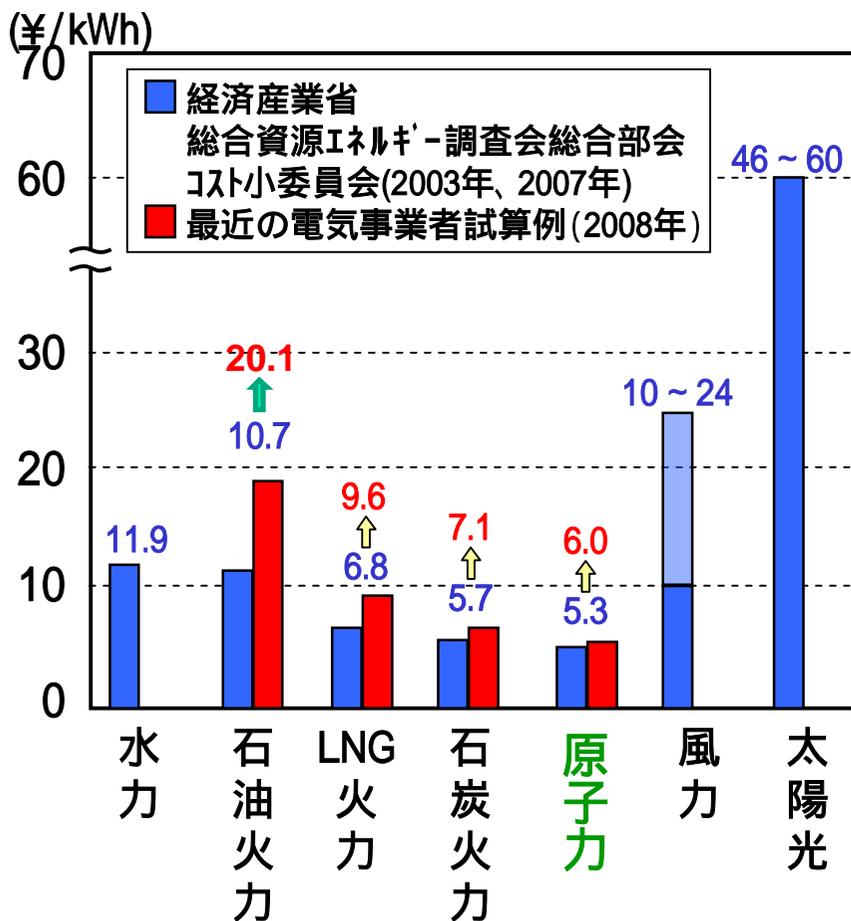
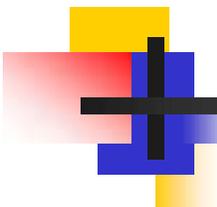
# 各種電源別のCO<sub>2</sub>排出量の比較



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

【出典:電力中央研究所報告書 他】

# 各種電源の発電原価



### 条件

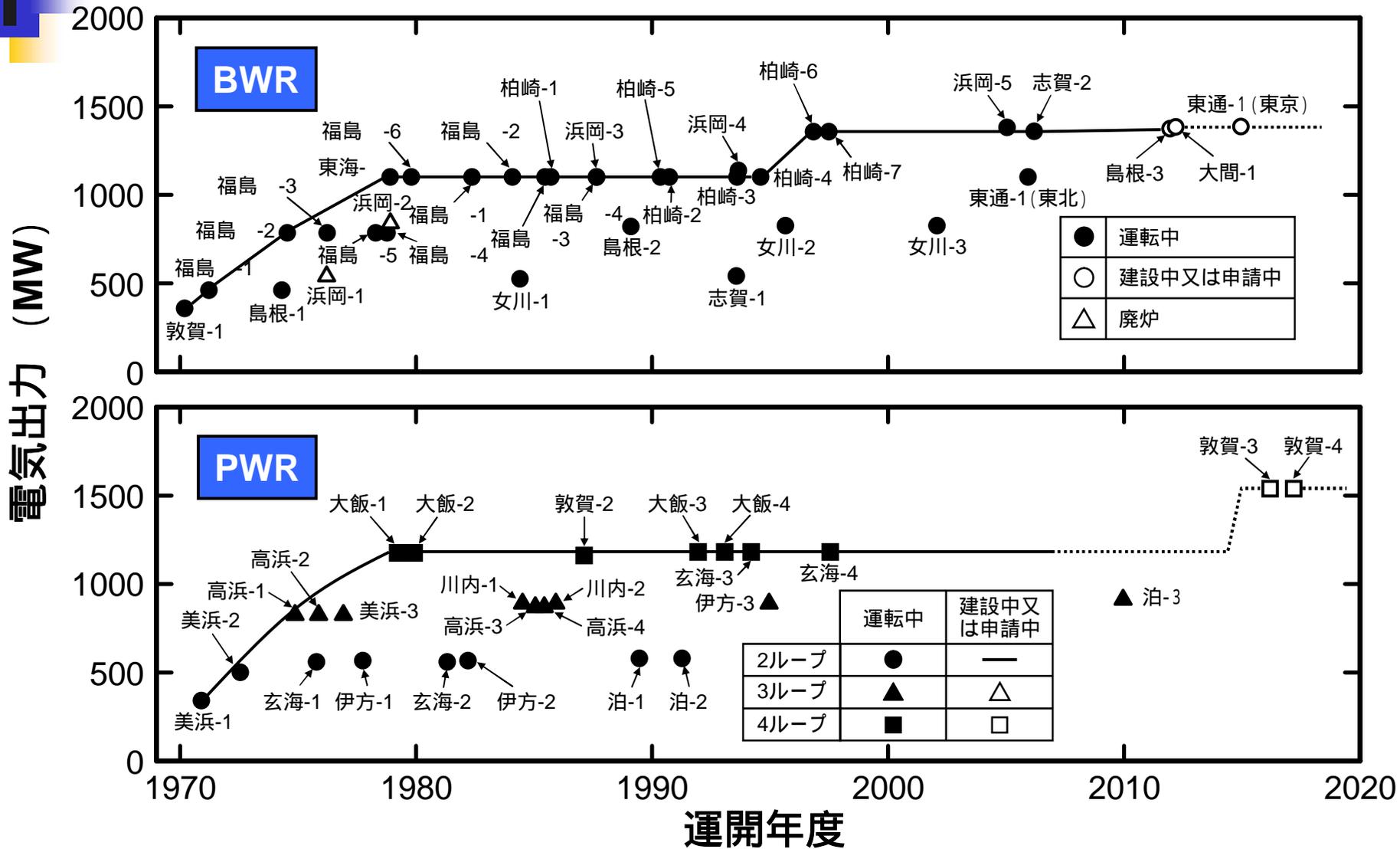
耐用年数 : 40年  
 設備利用率 : 80% (水力45%)  
 燃料価格 :  
 石油 = 27.4 → 90.7 \$/バレル  
 石炭 = 35.5 → 76.5 \$/トン  
 LNG = 2.8 → 5.3 万円/トン  
 ウラン = 10.1 → 95.0 \$/lbU3O8  
 (鉱石)

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)

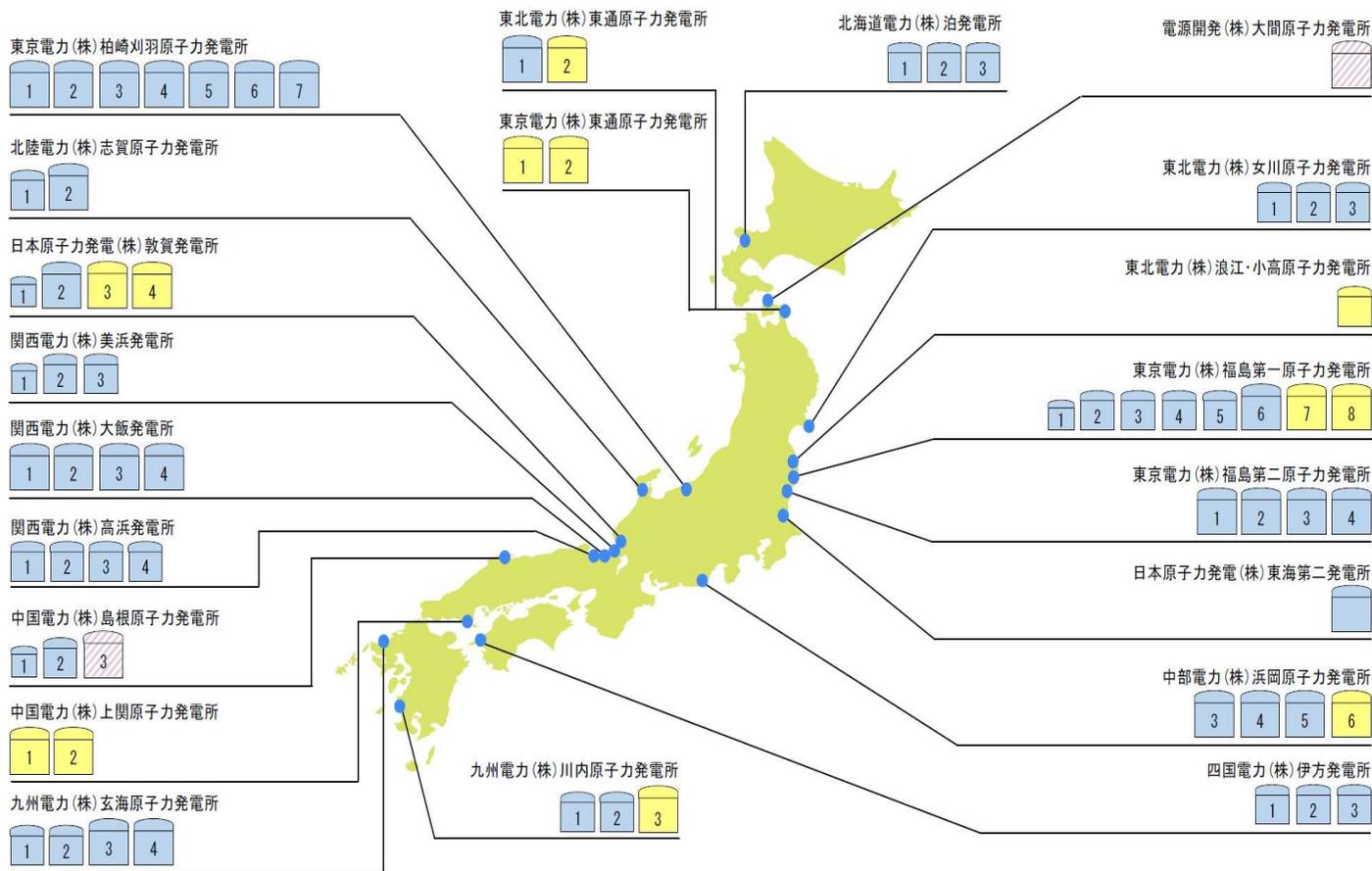
原子力: 再処理費用、再処理設備廃止費用、  
高レベル廃棄物処理・処分費等含む

# 我が国における原子力発電導入の経緯



BWR, PWRの電気出力の推移

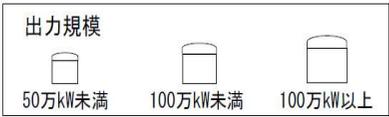
# 我が国の原子力発電所の運転・建設状況



## 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>
-------------	----------------	------------

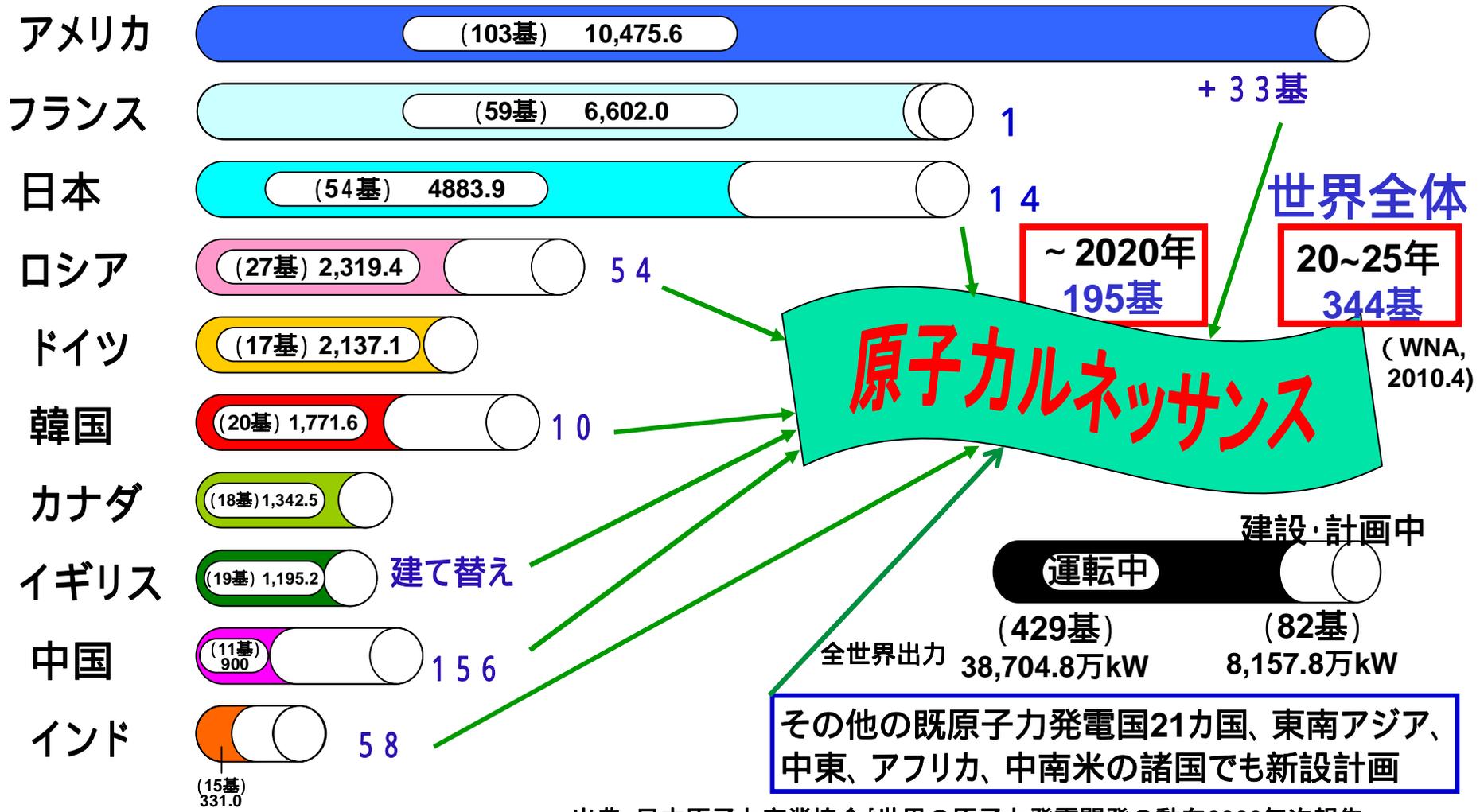


	基数	合計出力(万kW)
運転中	54	4884.7
建設中	2	275.6
着工準備中	12	1,655.2
合計	68	6,815.5

運転終了：日本原子力発電(株)東海発電所 1998.3.31 / 中部電力(株)浜岡原子力発電所1、2号機 2009.1.30

# 世界は原子力ネットワーク時代

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

# まとめ ( 1 )

- 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 . 我が国では、54基の原子力発電所が運転され、**全発電電力量の約30%**を担っている。
- 3 . 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。

## まとめ ( 2 )

4 . 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ない。**

化石燃料の枯渇への懸念、地球温暖化問題から**国民の理解を得つつ、原子力発電の拡大を図ることが妥当である。**国際的にも、同様な考えで世界各国は、**原子力利用に向け、原子力ルネッサンス時代**を迎えている。