

総合科目

# 『放射線の基礎と応用』

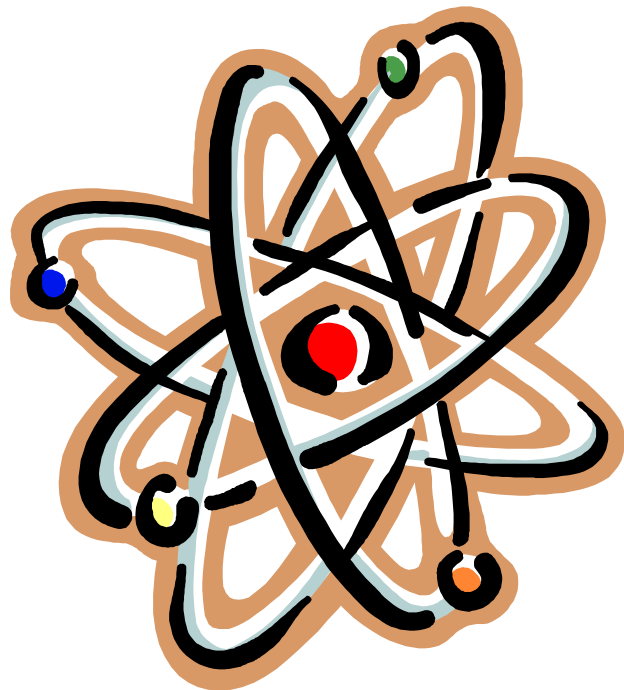
## ～ 原子力エネルギー～

筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻

【筑波大学 理工学群 物理学類 担当】

三明康郎

- 第1章 光と影
- 第2章 原子核物理入門
- 第3章 原子力発電（原理、利点、問題点）
- 第4章 放射線の人体に及ぼす影響
- 第5章 リスク管理という考え方



レポート（来週の授業前に回収します）

# 放射線を用いた医療（診断と治療）



ウィキメディアコモンズ

[http://www.pi.hitachi.co.jp/Div/power/atom\\_report/2009463\\_17320.html](http://www.pi.hitachi.co.jp/Div/power/atom_report/2009463_17320.html)



レントゲン夫人の手のX線写真

## 陽子線治療装置

入射器



照射治療室



回転ガントリー



陽子シンクロトロン



高エネルギー輸送系



ビーム取り出し部

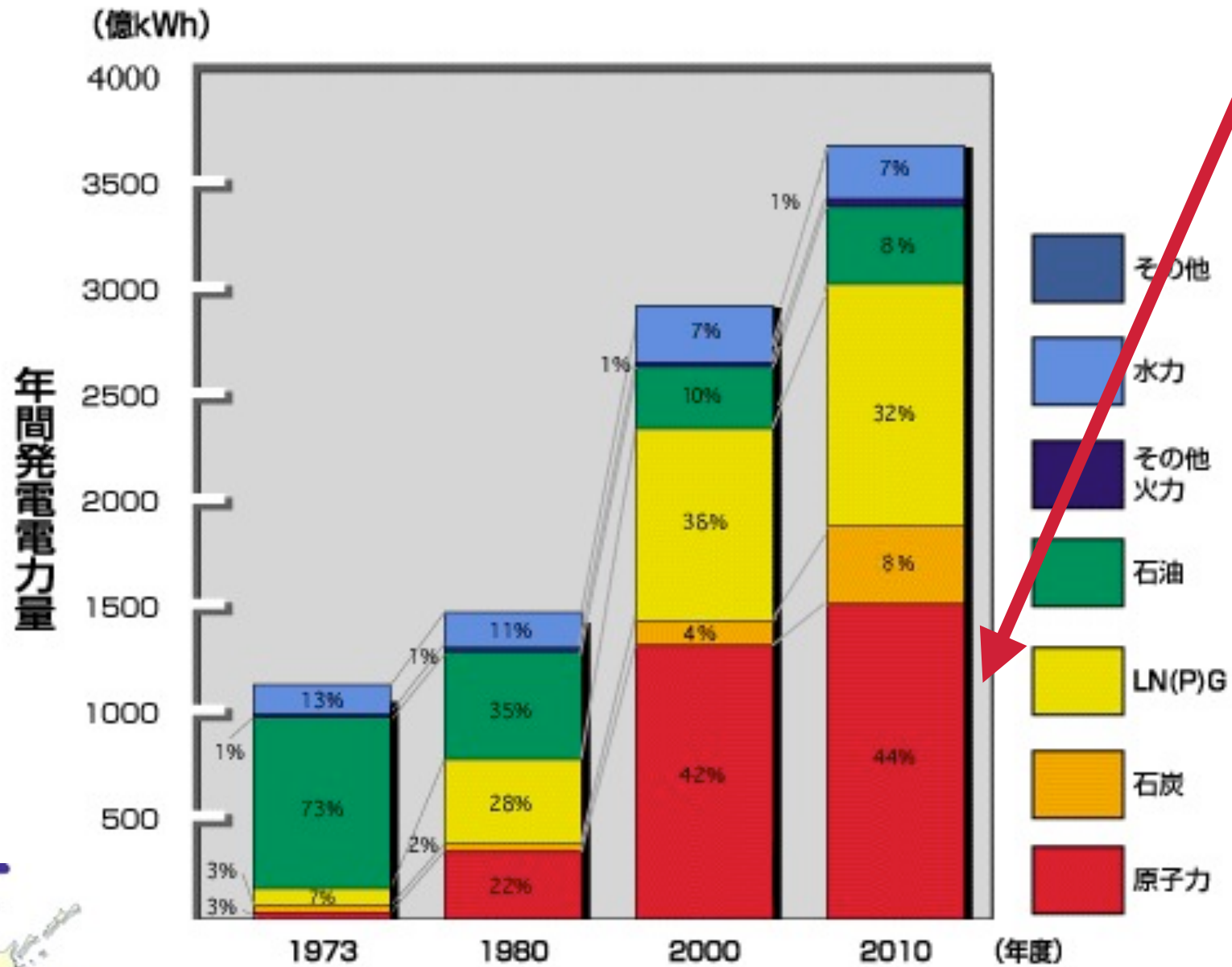
筑波大学陽子線医学利用研究センター

- 診断；透過写真、断層写真
- 治療； $\gamma$ 線照射、陽子線照射、重イオン線照射



**使っている電力の約半分が原子力！**

東京電力



# 原子力って 大丈夫？

## ✓ JCO事件

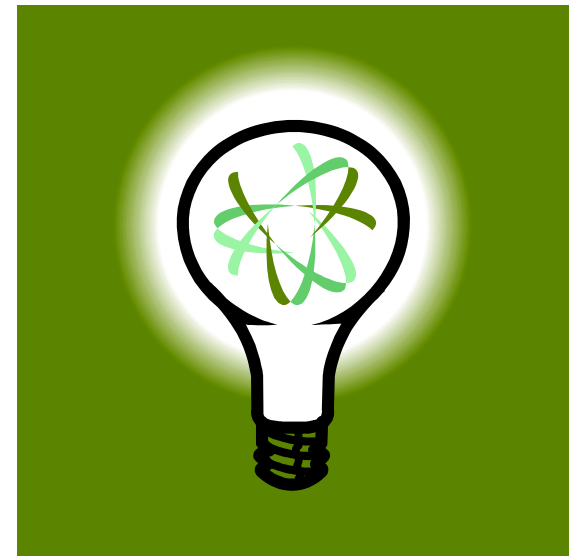
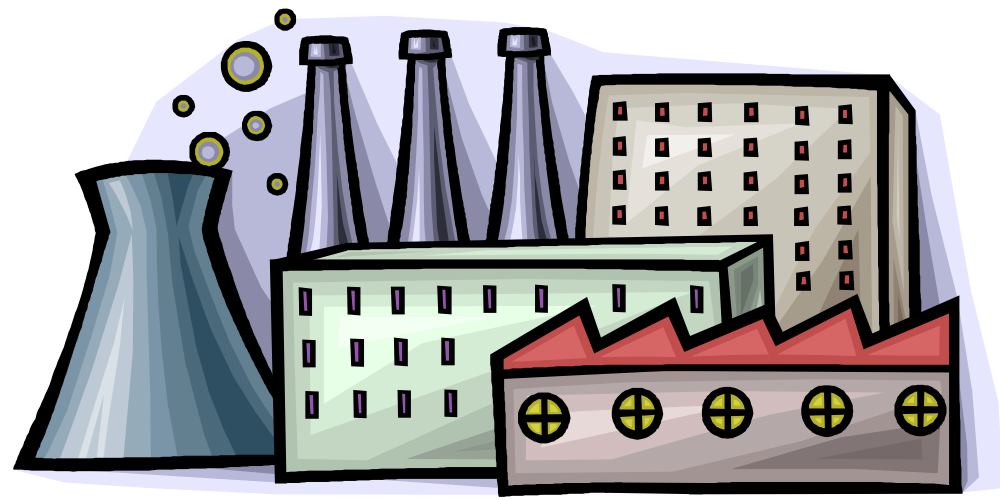
## ✓ チェルノブイリ事故

- **天然素材の石炭や石油の方がいいんじゃないの？**

- 放射線って怖い！？

よく知り  
正しく怖がる





# 第2章 原子核物理入門

## ～原子力エネルギーとは？～

# 物質の成り立ち

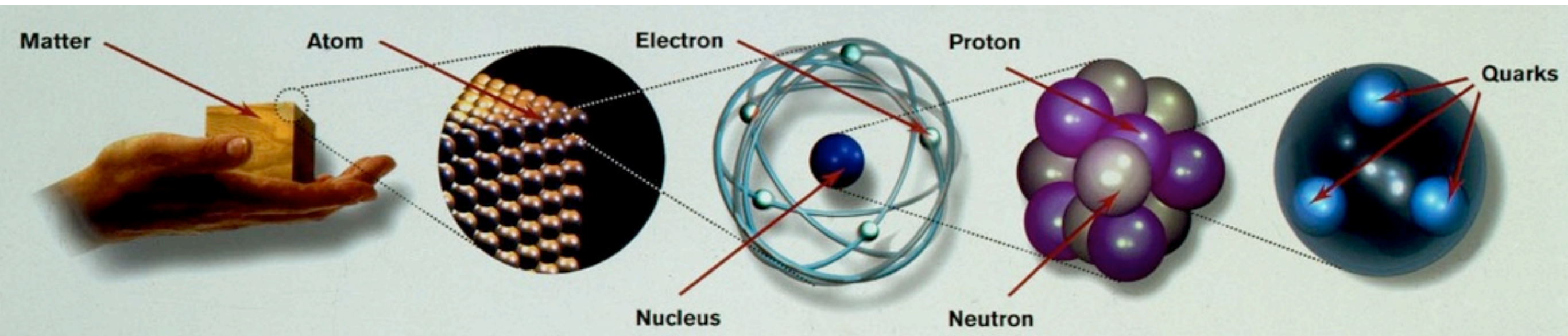
クォーク

電子

分子・原子

原子核

陽子・  
中性子



10 cm

$10^{-6}$  cm

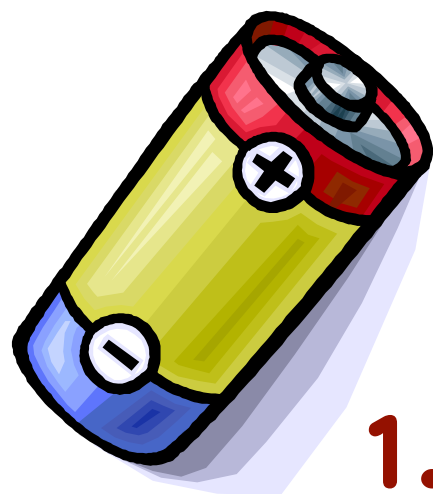
$10^{-8}$  cm

$10^{-12}$  cm

$10^{-15}$  cm

$$10^{-6} = \frac{1}{1,000,000}$$

# 化学反応と原子核反応

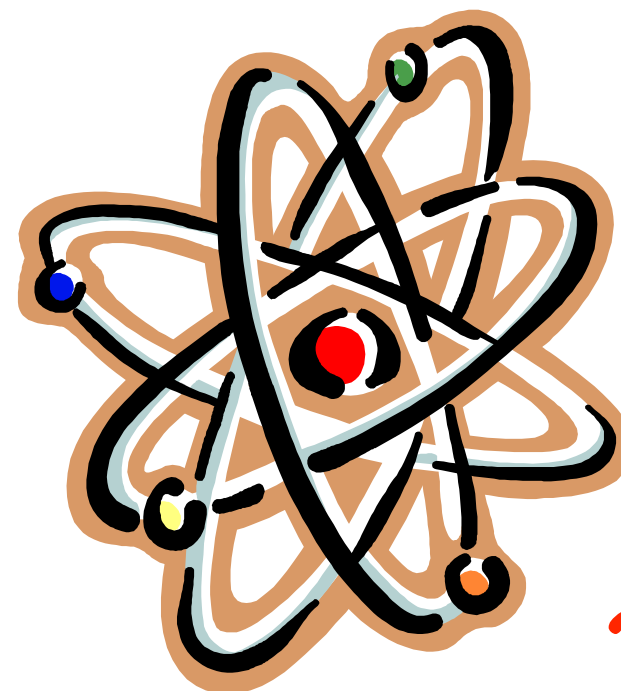


1.5 V

エネルギーの単位；eV

1 eV；1個の電子が1Vの電圧から  
得るエネルギー

[1 eV =  $1.6 \times 10^{-19}$  J]



~MeV

- 個々の化学反応は、~eV
- 原子核反応は、~MeV =  $10^6$  eV
- → 100万倍！
- 物質の階層によってエネルギースケールが変化



# 様々な原子核

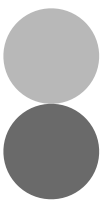
原子核； 原子量  
原子番号 元素

${}^1_1\text{H}$



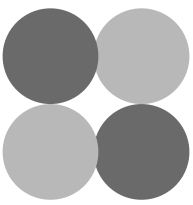
陽子  
 $Z=1$   
 $N=0$

${}^2_1\text{H}$



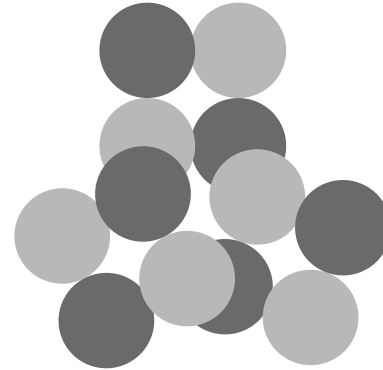
重陽子  
 $Z=1$   
 $N=1$

${}^4_2\text{He}$



ヘリウム  
 $Z=2$   
 $N=2$

${}^{12}_6\text{C}$

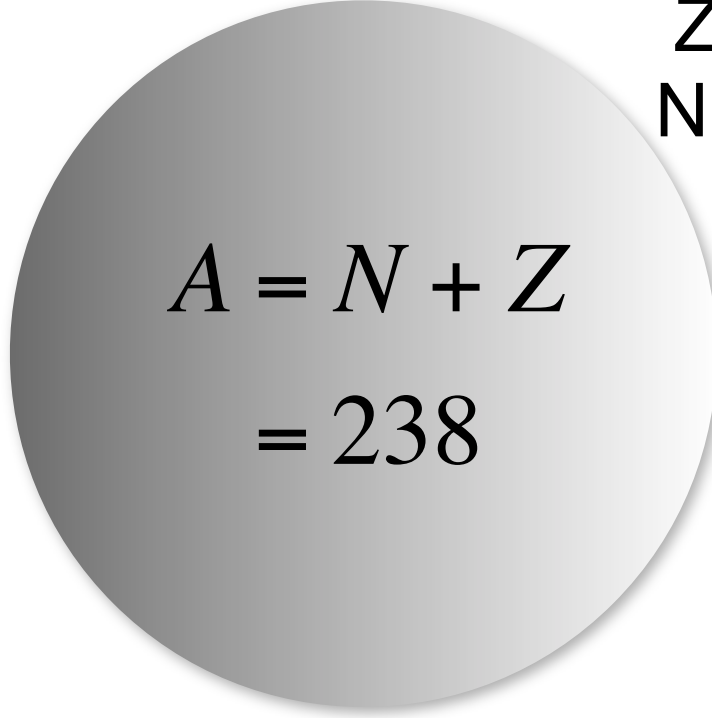


炭素  
 $Z=6$   
 $N=6$

...

${}^{238}_{92}\text{U}$

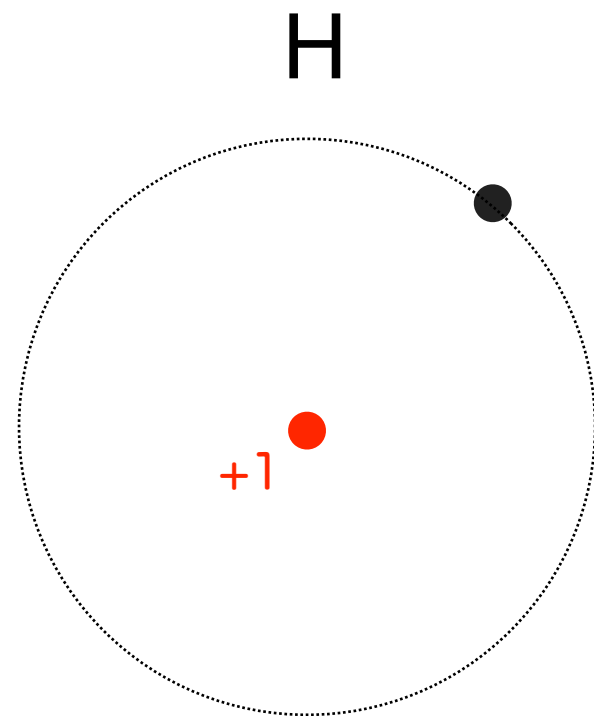
ウランウム  
 $Z=92$   
 $N=146$



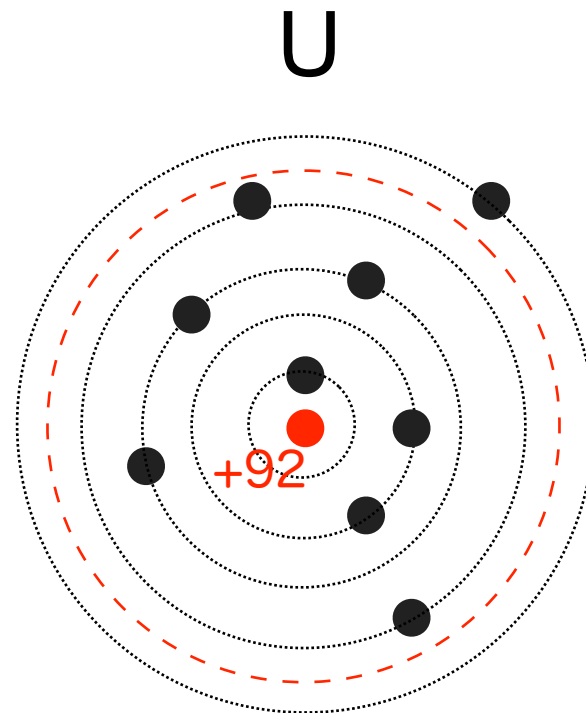
$$A = N + Z = 238$$

- 陽子と中性子が集まった原子核
  - ✓ 鉛やウランウムなど原子核は球状
  - ✓ 多くの核子（陽子や中性子）が集まった原子核ほど大きい

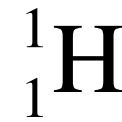
# 原子と原子核の違い



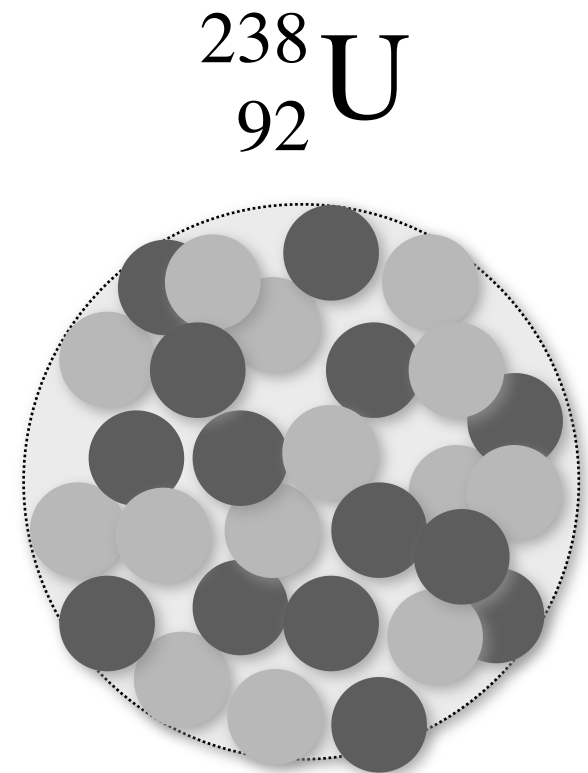
$r \sim 10^{-10}\text{m}$



$r \sim 10^{-10}\text{m}$



$r = 1.2 \text{ fm}$   
 $= 1.2 \times 10^{-15}\text{m}$

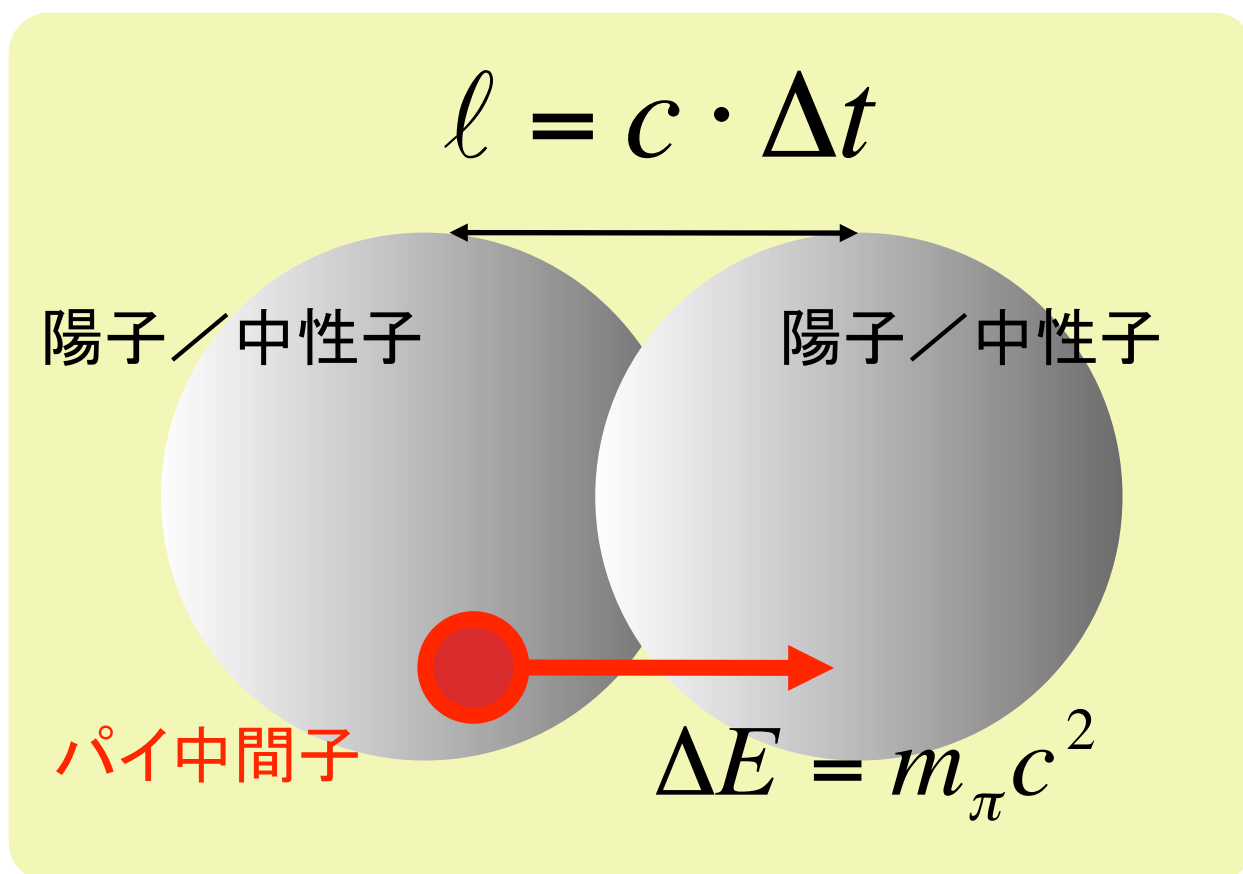


$r = 7.4 \text{ fm}$

- 原子の大きさは、HからUまでほぼ同じ
  - ✓ 原子の大きさ＝原子電子の分布の拡がり
  - ✓ 電子と原子核の間に働く力は電氣的な力
    - 電磁氣力の到達距離は無限遠まで (光子の質量； 0)
- 原子核は、核子の数に比例した体積
  - ✓ 原子核は核子というパチンコ玉を結合させたようなもの
  - ✓ 核子と核子の間に働く力は、核力
    - 核力の到達距離は短い (湯川の中間子論→中間子の質量； 130MeV)



# 核力と湯川中間子論



不確定性関係(量子力学)

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim h$$

核力を媒介する粒子(特殊相対論)

$$\Delta E = m_{\pi} c^2$$

核力の到達距離

$$\ell = c \cdot \Delta t \sim \frac{h}{m_{\pi} c} \approx 2 \text{ [fm]}$$

$$\therefore m_{\pi} \sim 100 \text{ MeV}/c^2$$

- 湯川の中間子論

- ✓ 核力は中間子をやりとりすることによって生ずる

- ✓ 核力の到達距離は中間子の質量によって決まる

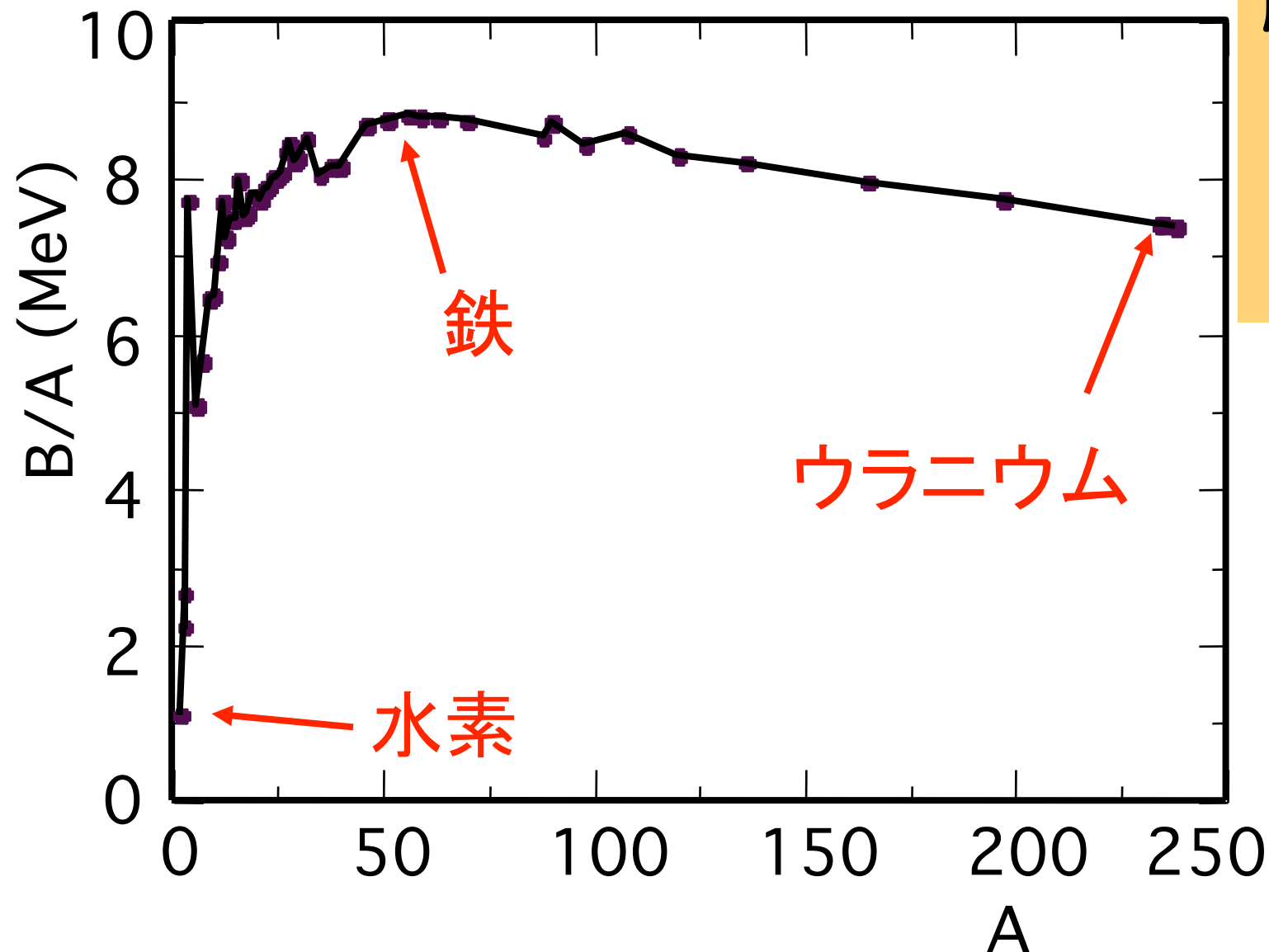
- 原子を構成する力は電氣的な力 (クーロン力)

- ✓ クーロン力は光子をやりとりすることによって生ずる

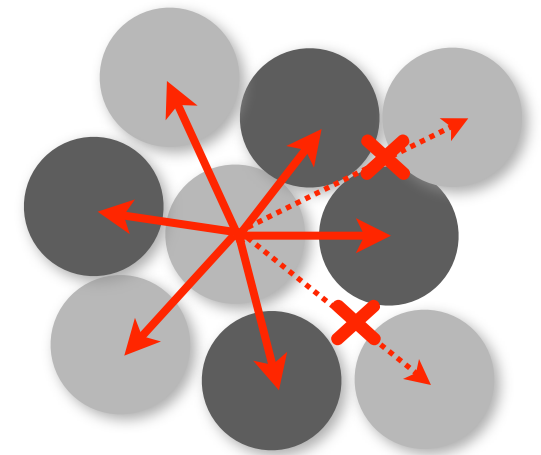
- ✓ 光子は質量が零なので、クーロン力は遠方まで到達する

# 原子核の結合エネルギー [B]

↑ 核子あたりの結合エネルギー

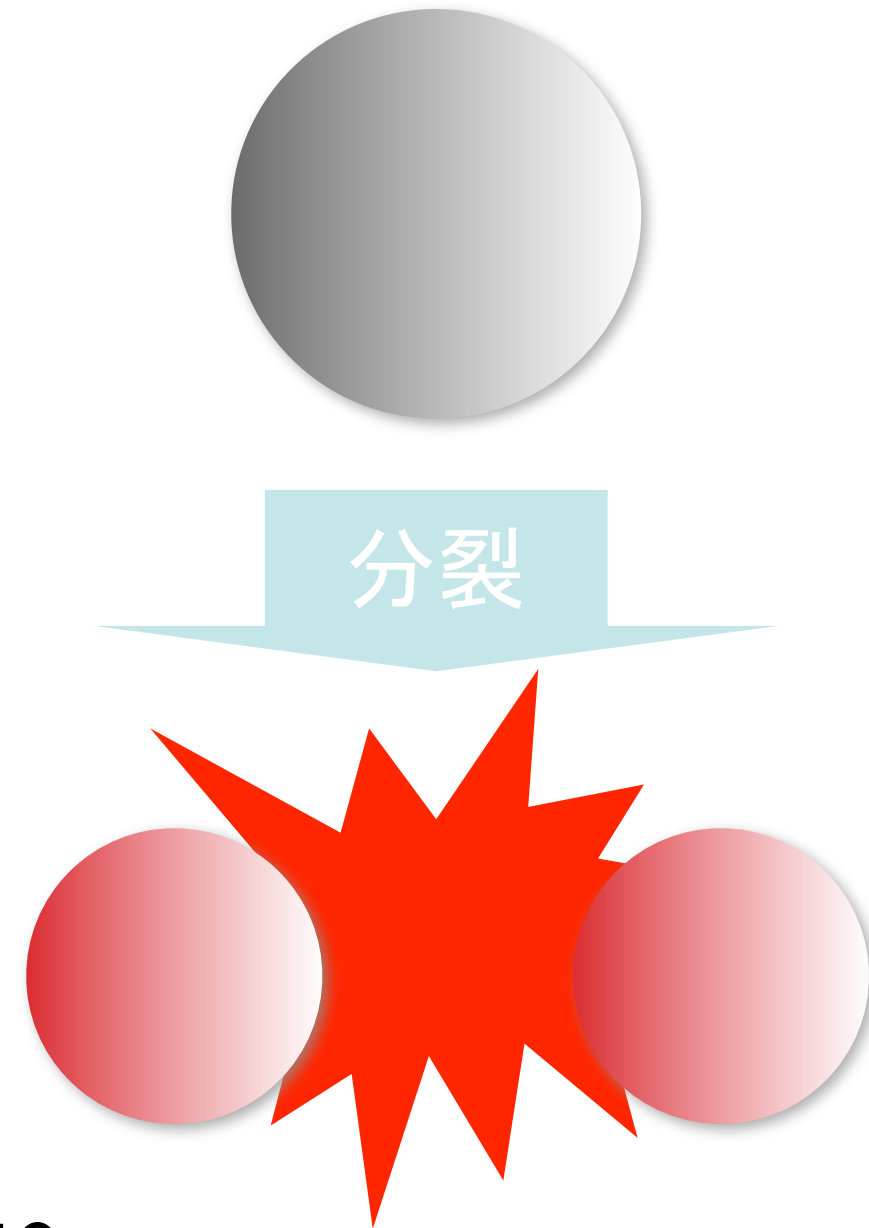
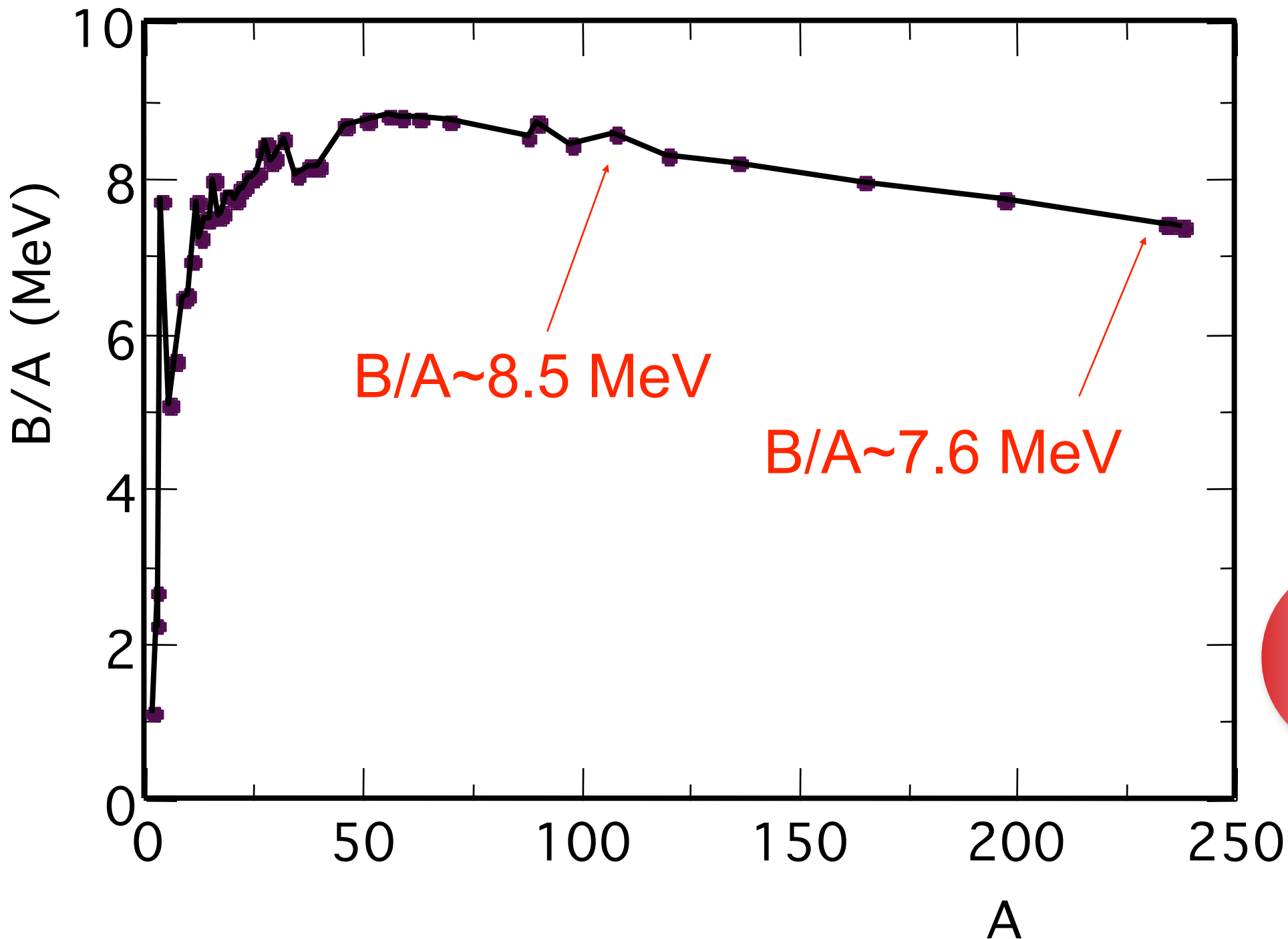


原子核の結合エネルギー；  
原子核の核子をばらばらにするために必要なエネルギー。  
どのくらいしっかりと核子が結合しているかを示す。



- 核子（陽子や中性子） 1 個あたりの結合エネルギー
  - ✓ 隣り合った核子間で強い引力が働く → 一定の値 ~ 8 MeV
  - ✓ 陽子と陽子の間には電気的な斥力が働く
  - ✓ 鉄あたりが最も安定な原子核

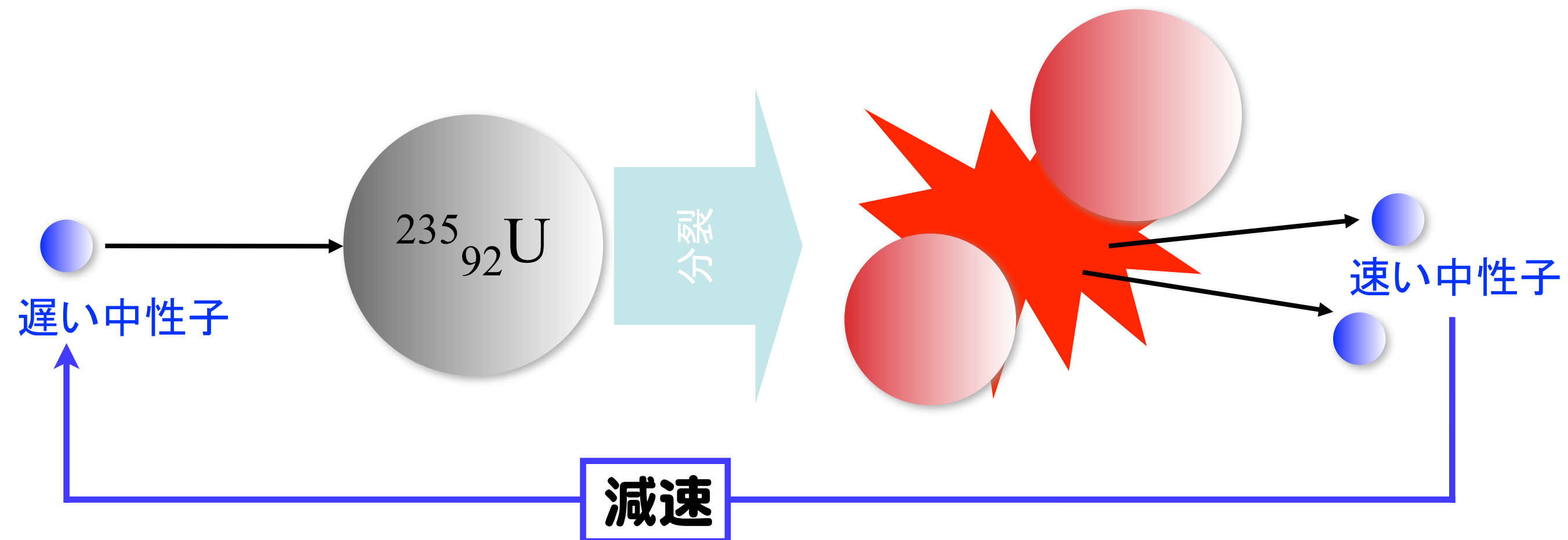
# 核分裂反応



- U( $B/A \sim 7.6$  MeV)を半分( $B/A \sim 8.5$  MeV)にすると  $240 \times (8.5 - 7.6) \sim 200$  [MeV] が得られる。  
✓ 化学反応 ;  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  ( $\sim 4.2$  eV) に比べると **40万倍!**

# 核分裂反応を引き起こす

存在比0.7%

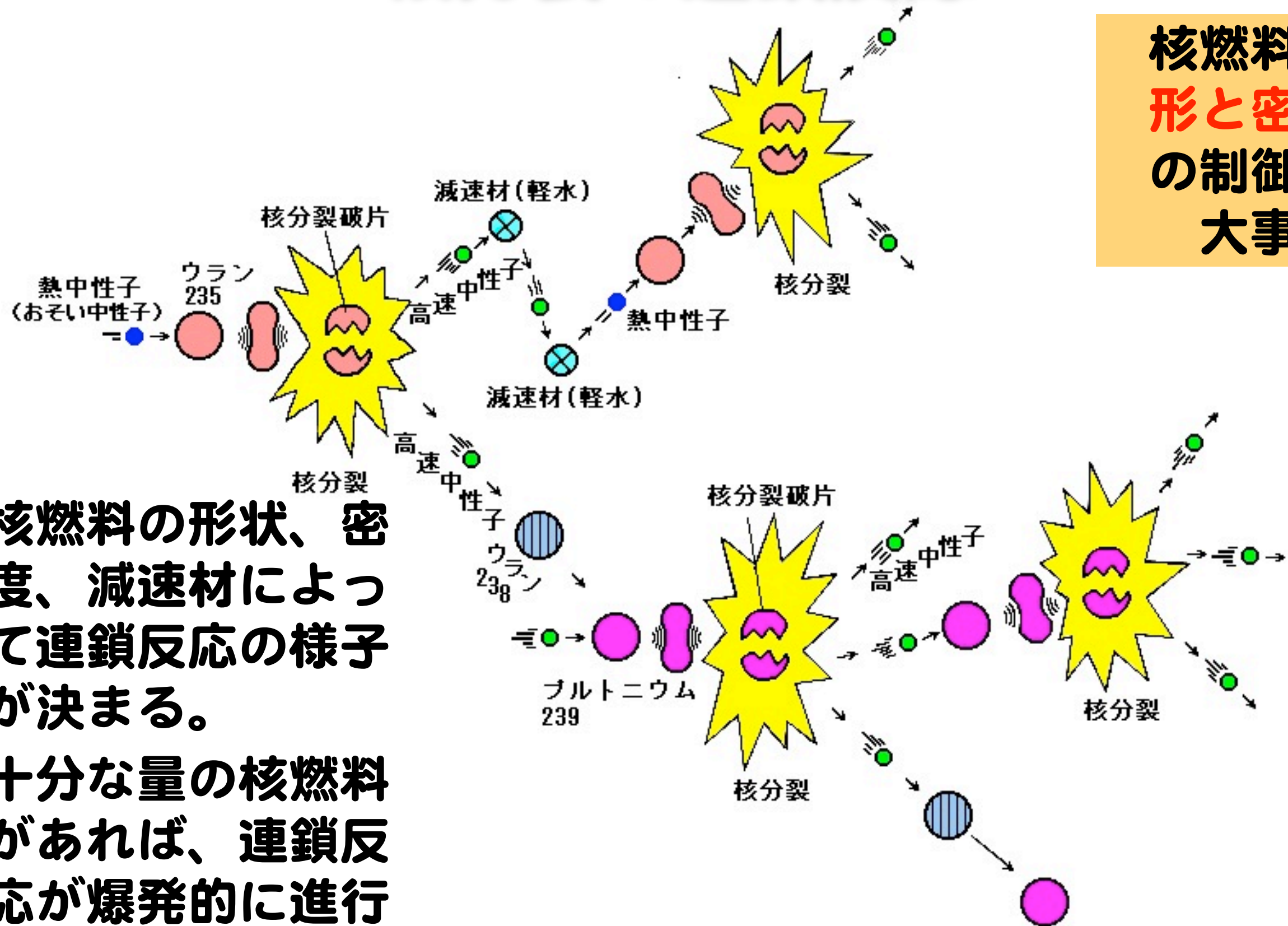


- ・ ウラニウム-235やプルトニウム-239は遅い中性子を当てると速い中性子を2個以上放出して核分裂反応を起こす都合のよい核種



# 核分裂の連鎖反応

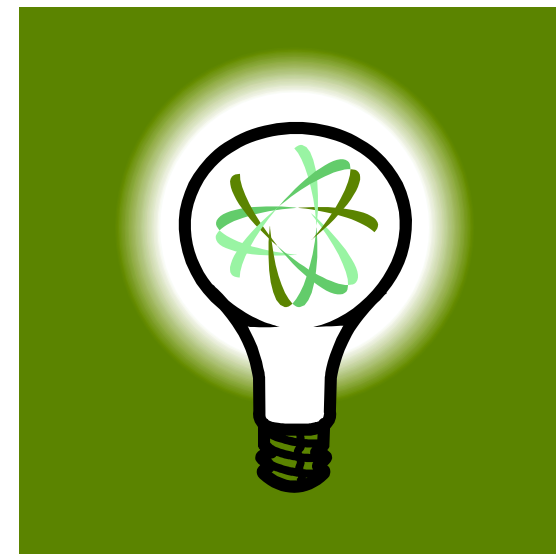
核燃料の  
形と密度  
の制御が  
大事



- 核燃料の形状、密度、減速材によって連鎖反応の様子が決まる。
- 十分な量の核燃料があれば、連鎖反応が爆発的に進行

図1 ウランの核分裂とプルトニウムの生成・核分裂

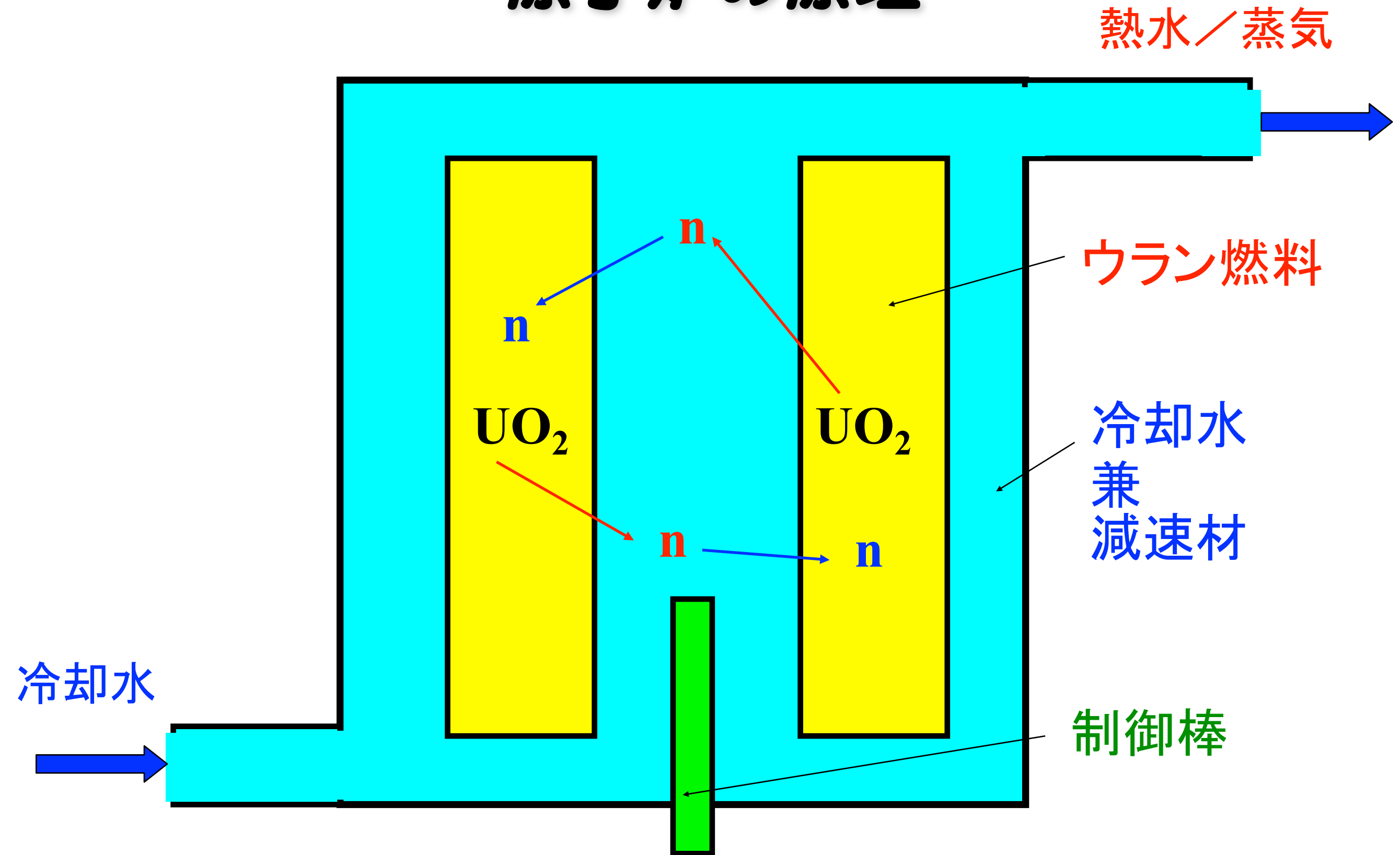
〔出典〕電気事業連合会：原子力図面集－1998年版－、1998年10月、p 155



# 第3章 原子力発電

## ～原理、利点、問題点～

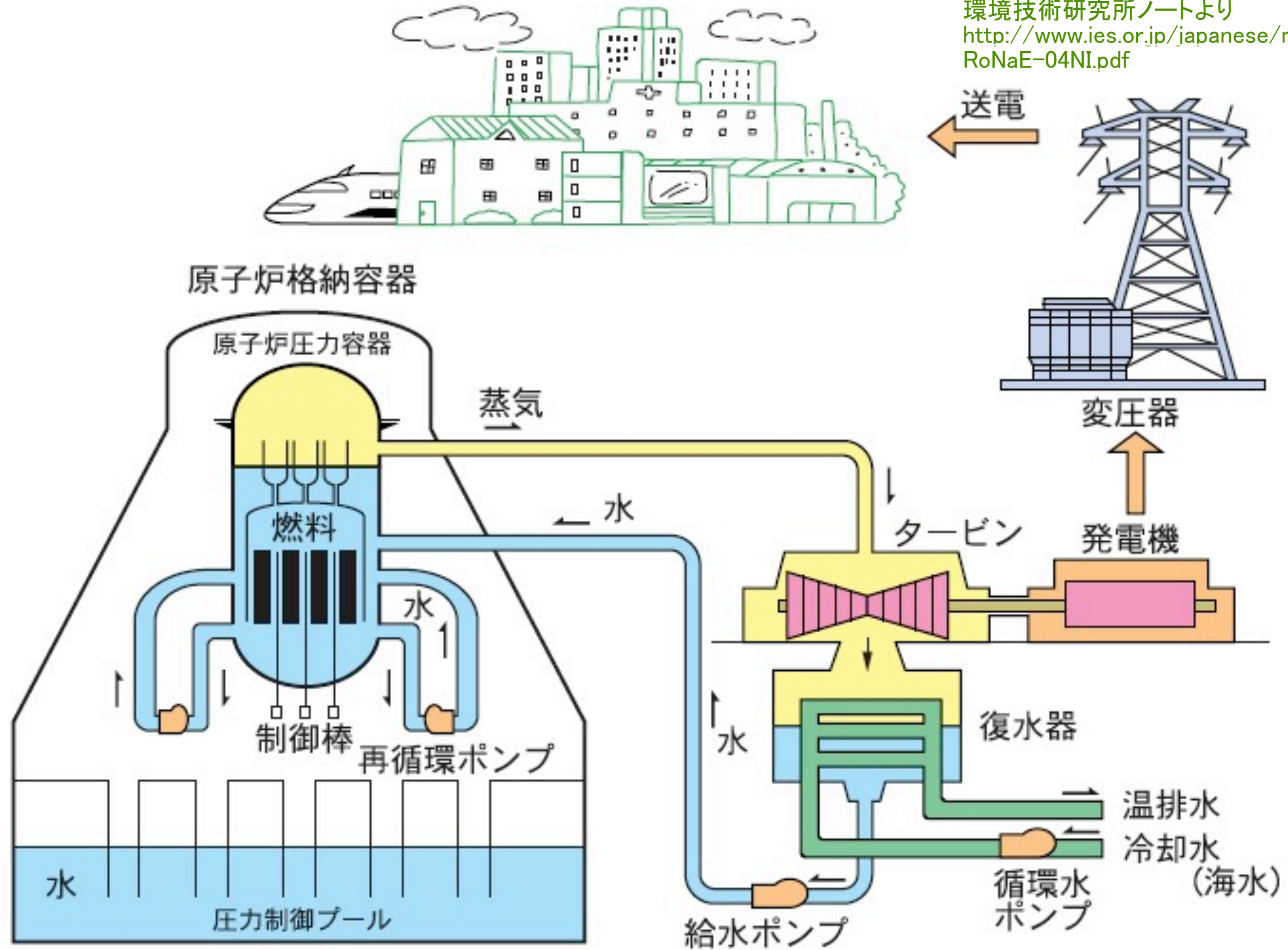
# 原子炉の原理



# 沸騰水型原子炉

環境技術研究所ノートより

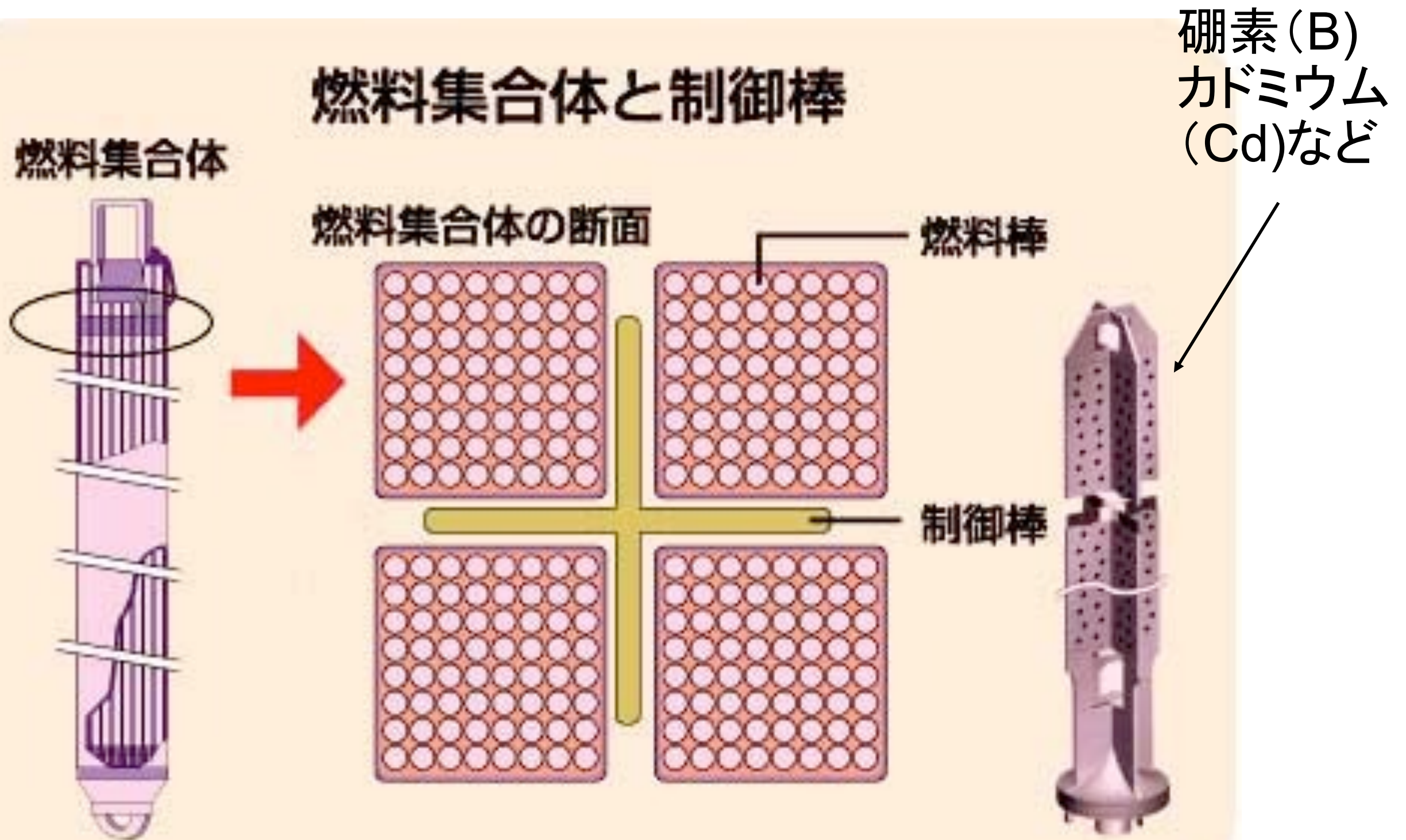
<http://www.ies.or.jp/japanese/mini/RelationPDF/RoNaE-04NI.pdf>



出典：資源エネルギー庁「原子力2005」



# 原子炉の炉心



制御棒は110万kW級の原子力発電所では、燃料集合体764体に対して185本あります。



# 沸騰水型原子炉



蒸気乾燥器

気水分離器

原子炉压力容器

上部格子板

炉心シュラウド

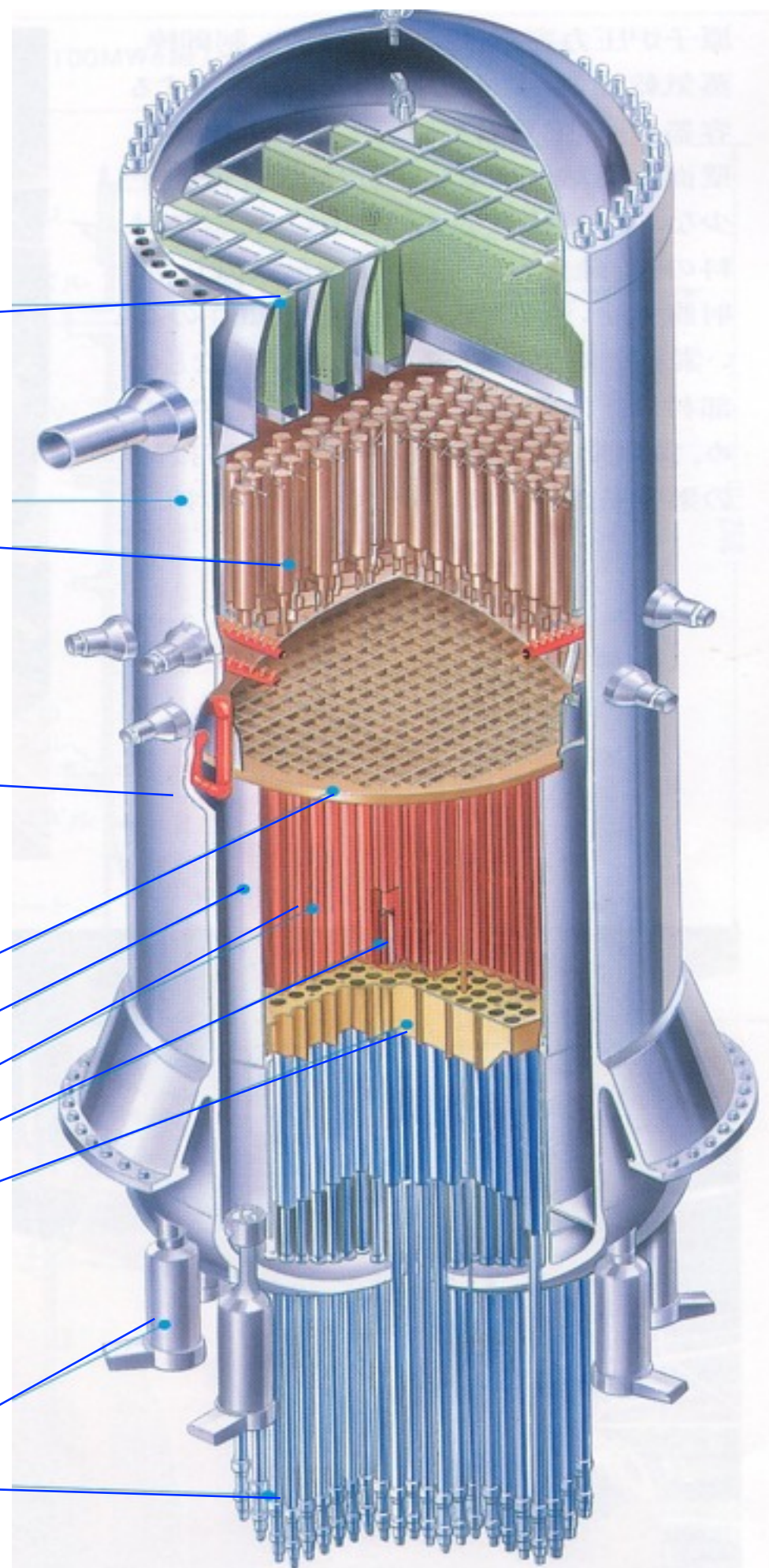
燃料集合体

制御棒

炉心支持板

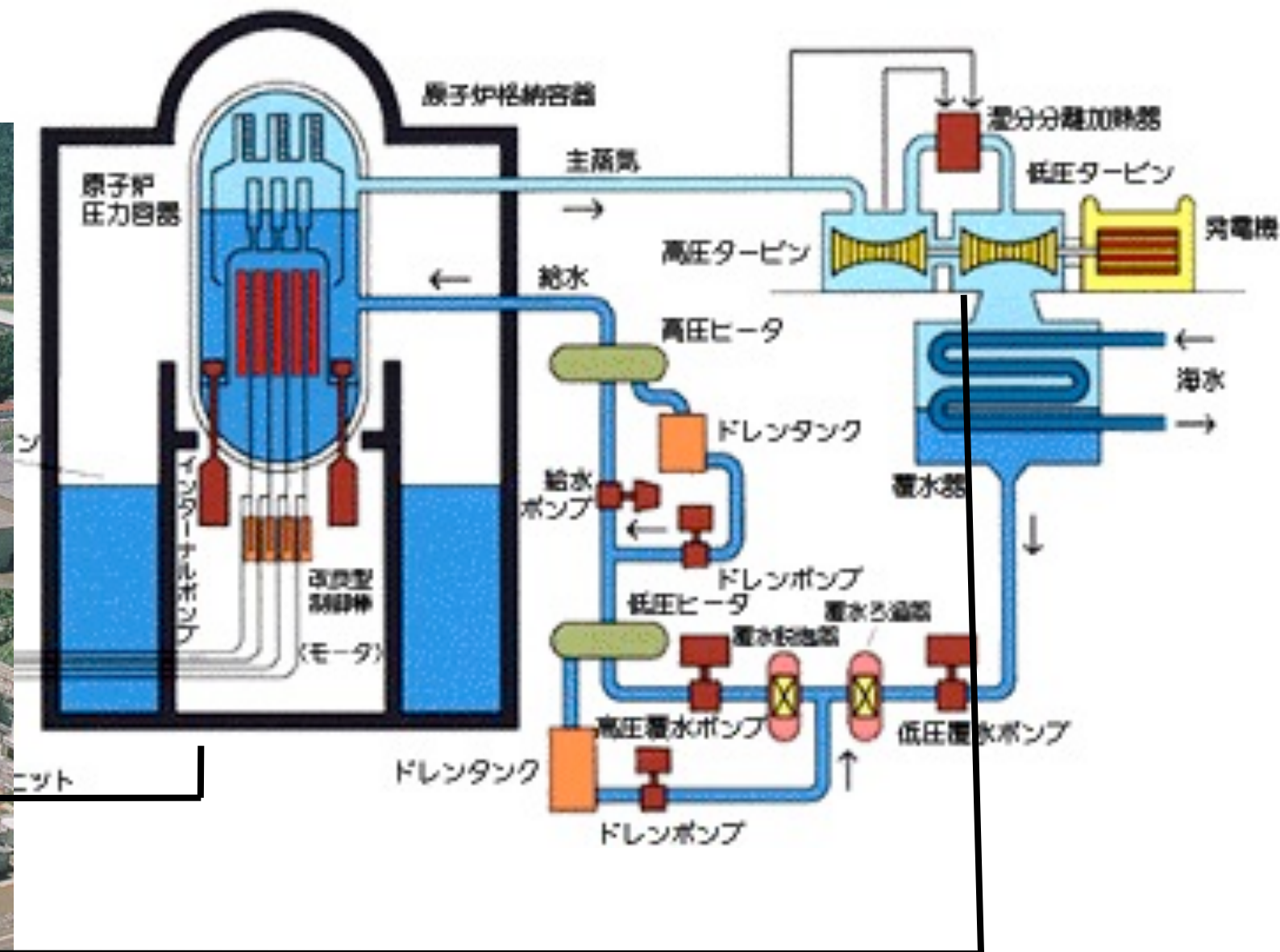
再循環ポンプ

制御棒駆動機構





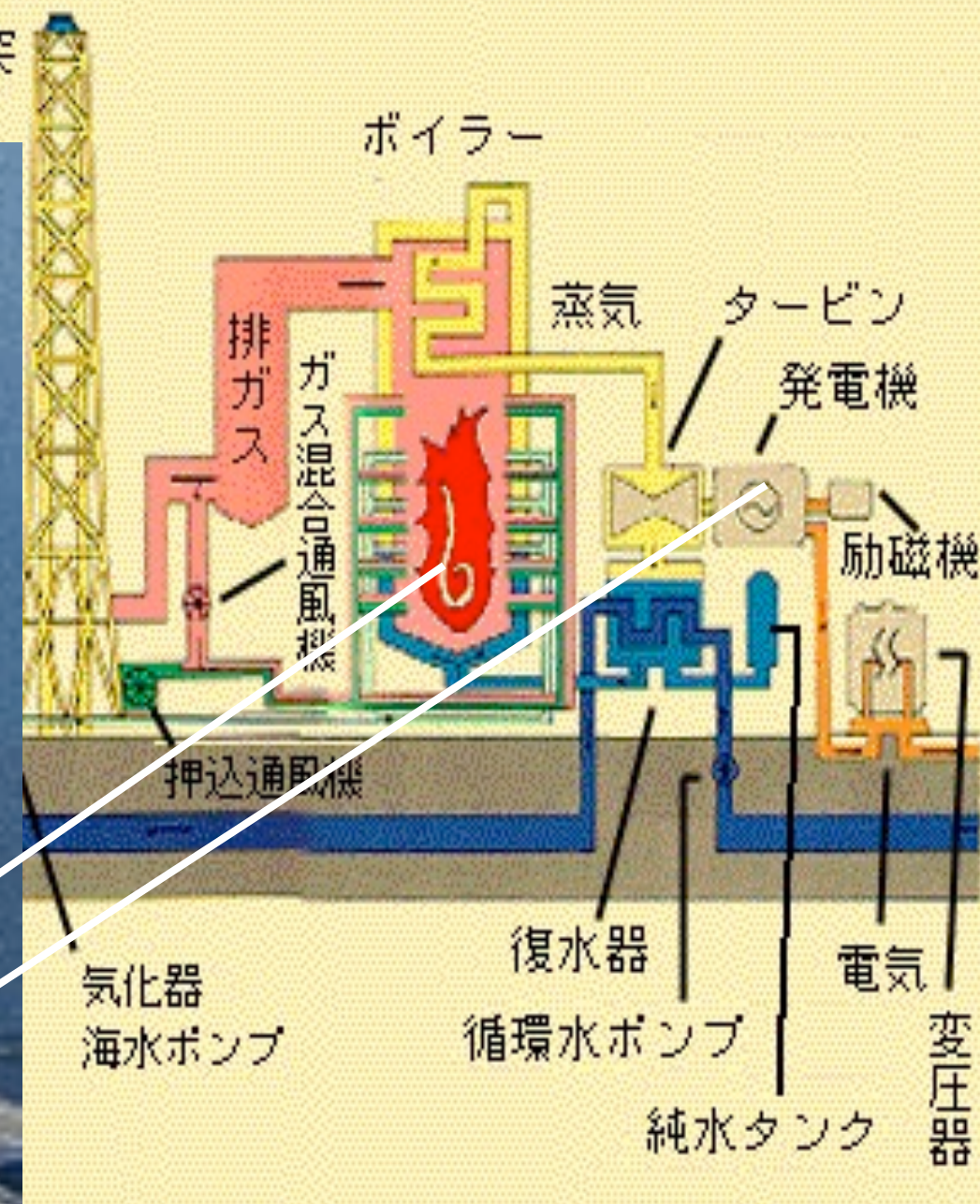
# 原子力発電所 vs.





# 火力発電所

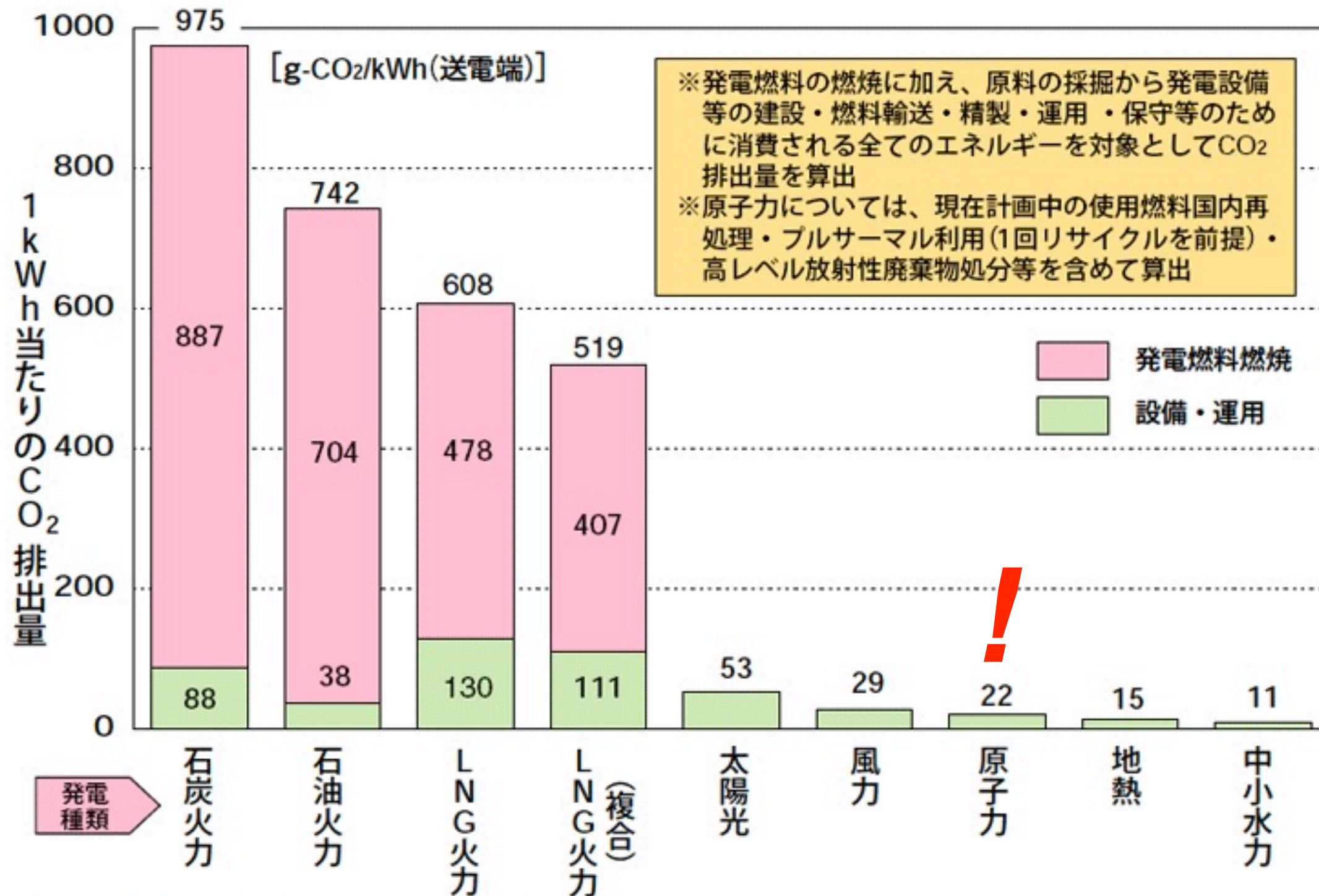
## ■一般的な火力発電のしくみ(LNG火力)



煙突！！



# CO<sub>2</sub>排出量

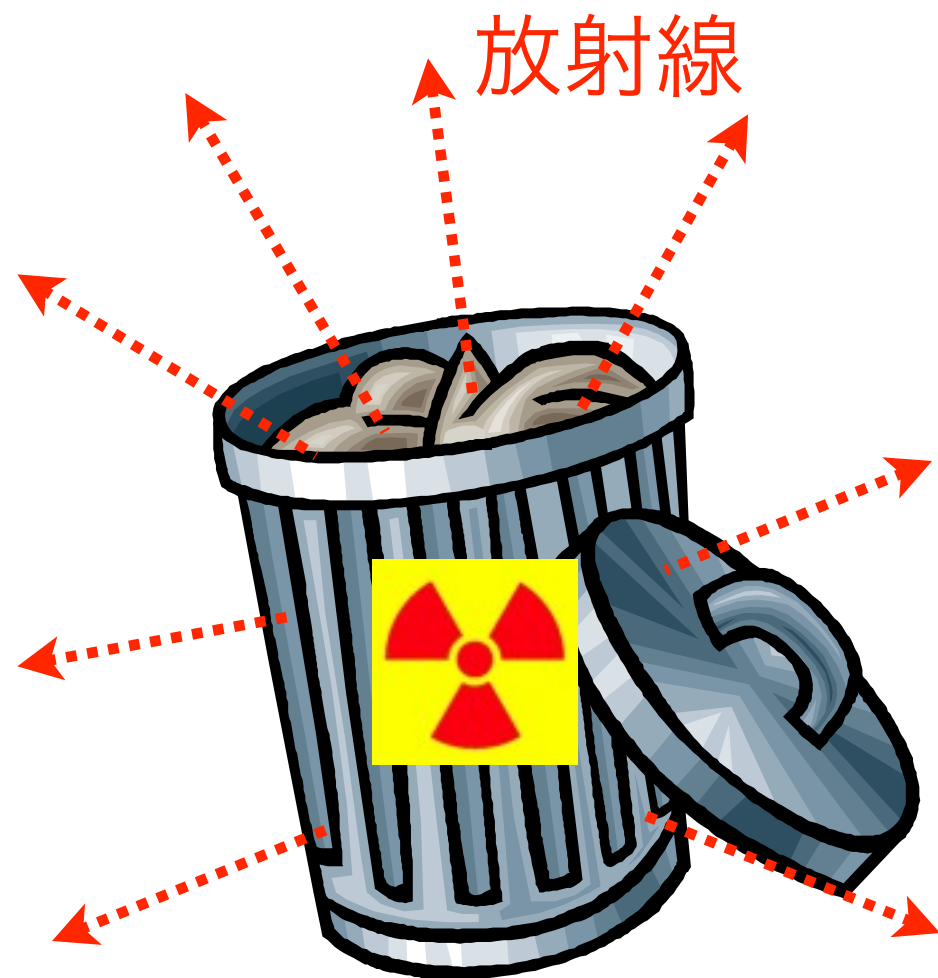


(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

図1 各種電源別CO<sub>2</sub>排出量

[出所]電気事業連合会:原子力・エネルギー図面集 2004-2005 第2章「地球規模の環境問題」

<http://www.fepec-atomic.jp/library/zumen/pdf-data/all02.pdf>、9/19



# 放射性廃棄物

- 放射性物質の廃棄物
  - ✓ 半減期；数十年～数億年
- 高レベル廃棄物
  - ✓ 核分裂生成物や超ウラン核種を含む放射能の高い廃液
  - ✓ ガラスで固化した後，30～50 年間冷却のために貯蔵、その後、地下300m 以深に地層処分
  - ✓ 100 万kW の原子力発電所を1 年間運転するとガラス固化体が30 本程度
  - ✓ 標準的な家庭10 万世帯が1 年間で、1 本のガラス固化体

日本で発生する廃棄物の量

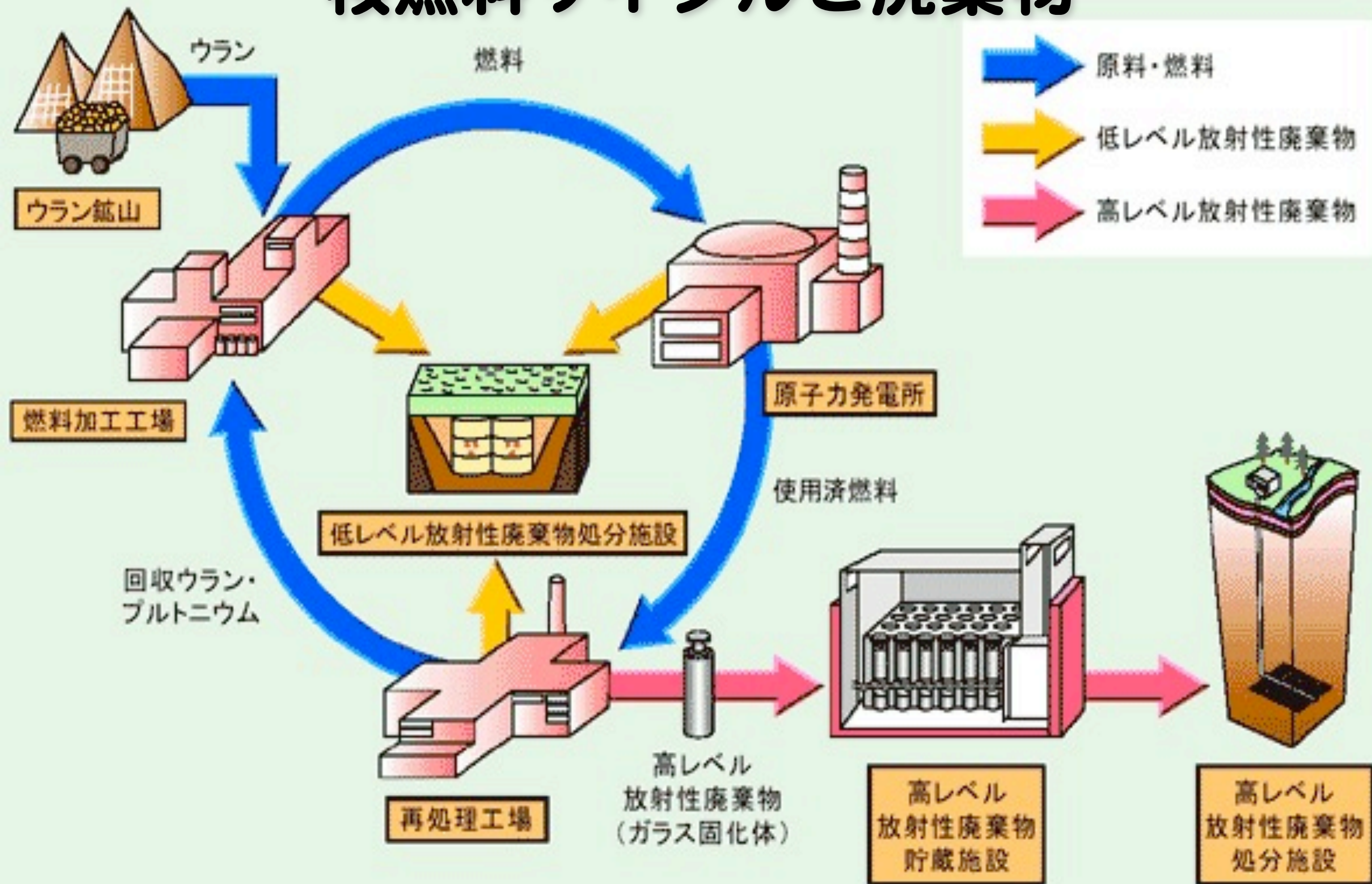
	発生廃棄物量 (t/日)		備考
一般廃棄物	主に家庭から排出される生ゴミ、粗大ゴミ及びオフィスから排出される紙くずなど	227,000	平成13年度実績
産業廃棄物	事業活動に伴って生じた廃棄物のうち、廃油、廃プラスチック、廃酸、廃アルカリなどの19種類	1,100,000	平成13年度実績
放射性廃棄物	原子力施設の運転、保守などに伴って発生する放射性の廃棄物	高レベル 1.5	平成15年度推定
		低レベル 59	平成15年度実績

出典：原子力図面集

TEPCOホームページより



# 核燃料サイクルと廃棄物





# 高レベル廃棄物処理装置(ガラス溶融炉)

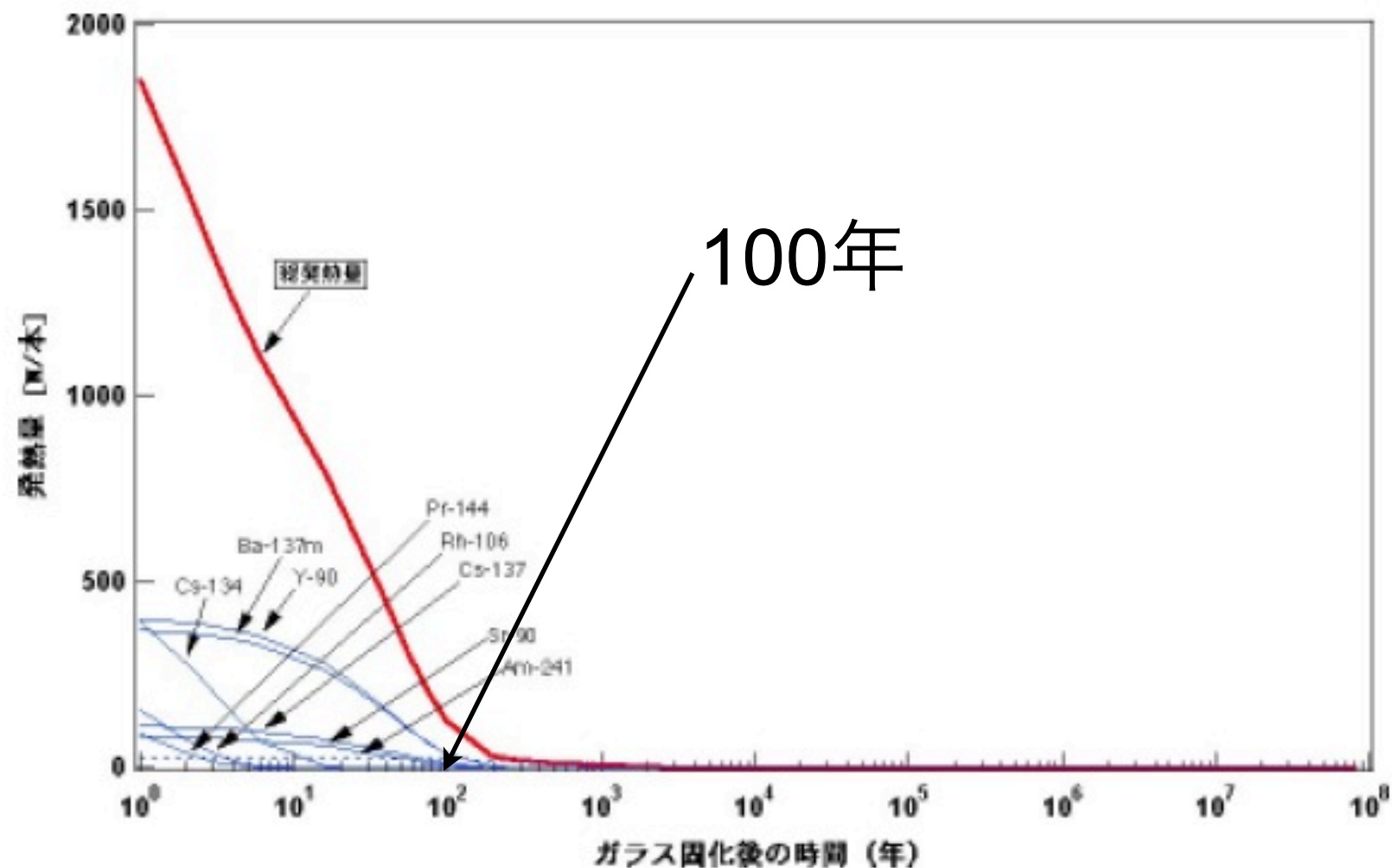
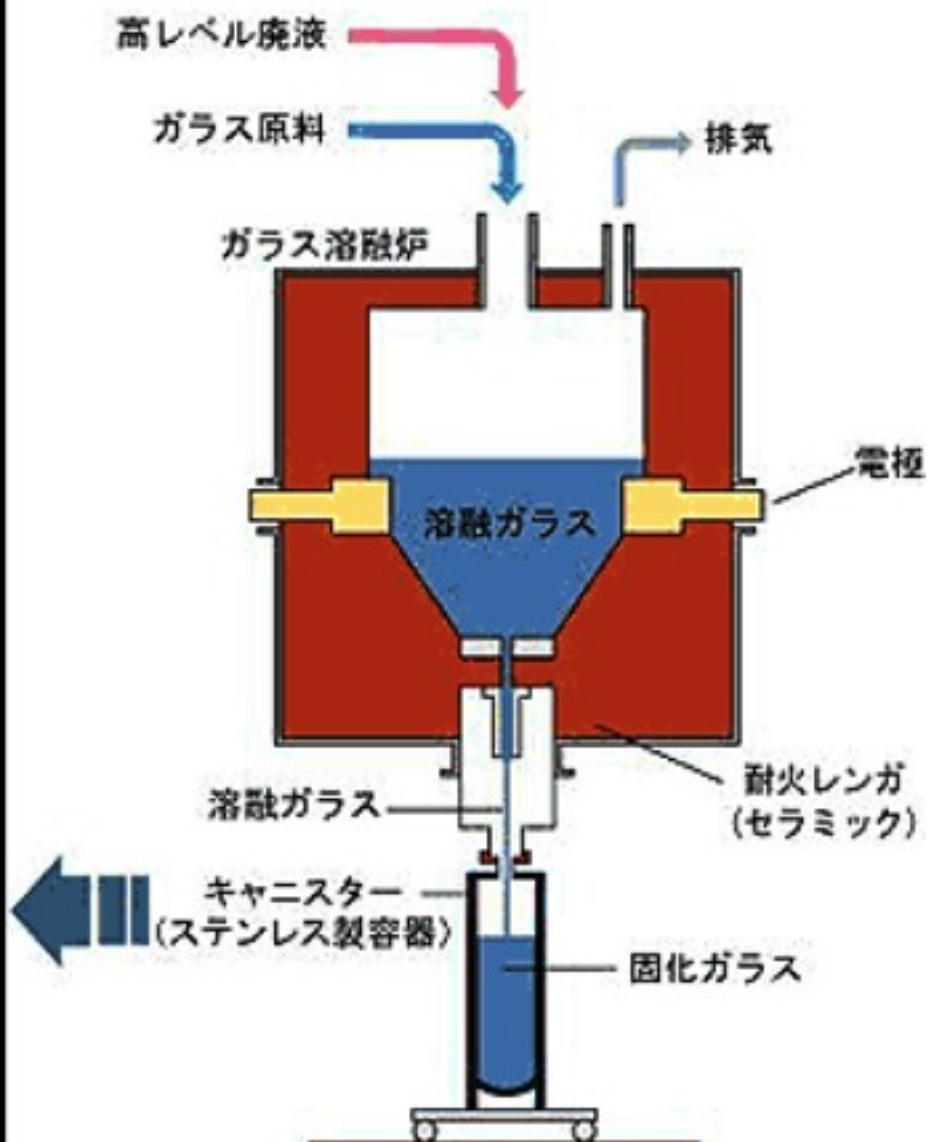
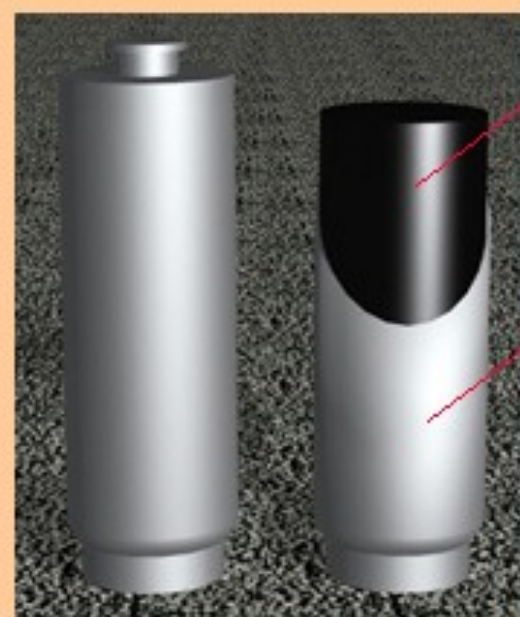


図 2.2.4-4 ガラス固化体の発熱量の経時変化

(日本原燃のガラス固化体仕様を基に設定された条件 (核燃料サイクル開発機構, 1999a) による計算値, 図 2.2.4-3 に示した 1 トンの使用済燃料は 1.25 本のガラス固化体に相当)

## 高レベル放射性廃棄物 (ガラス固化体)



### 固化ガラス

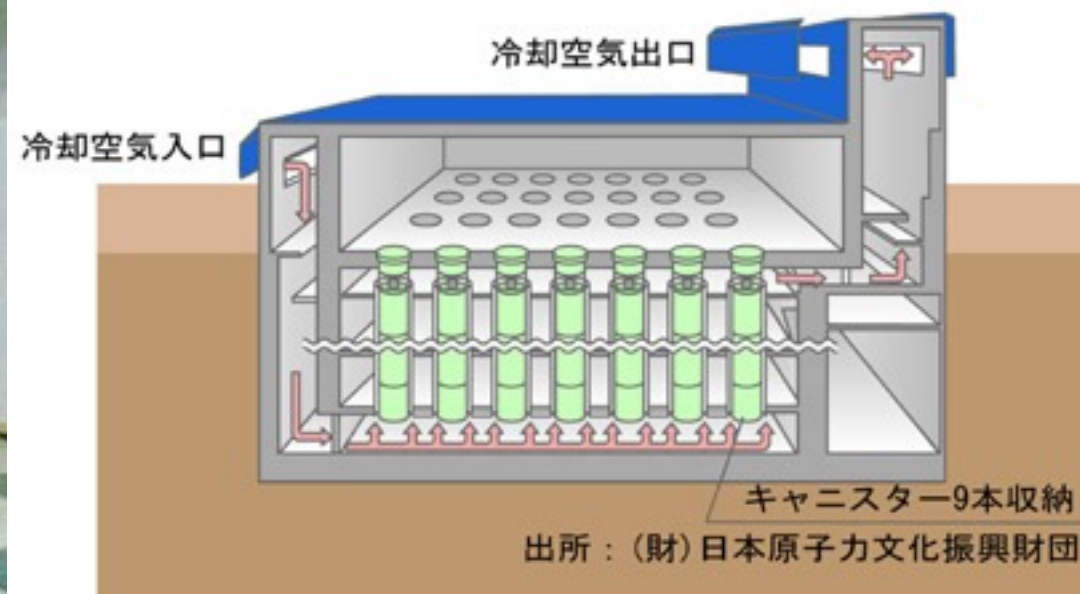
ホウケイ酸ガラスを使用して高レベル放射性廃液をガラス状に固めたもの

### キャニスター

ステンレススティール製容器

寸法: 外径/約 40 cm  
高さ/約 1.3 m  
総重量: 約 500 kg

## 高レベル廃棄物貯蔵管理施設の構造



出所: (財) 日本原子力文化振興財団

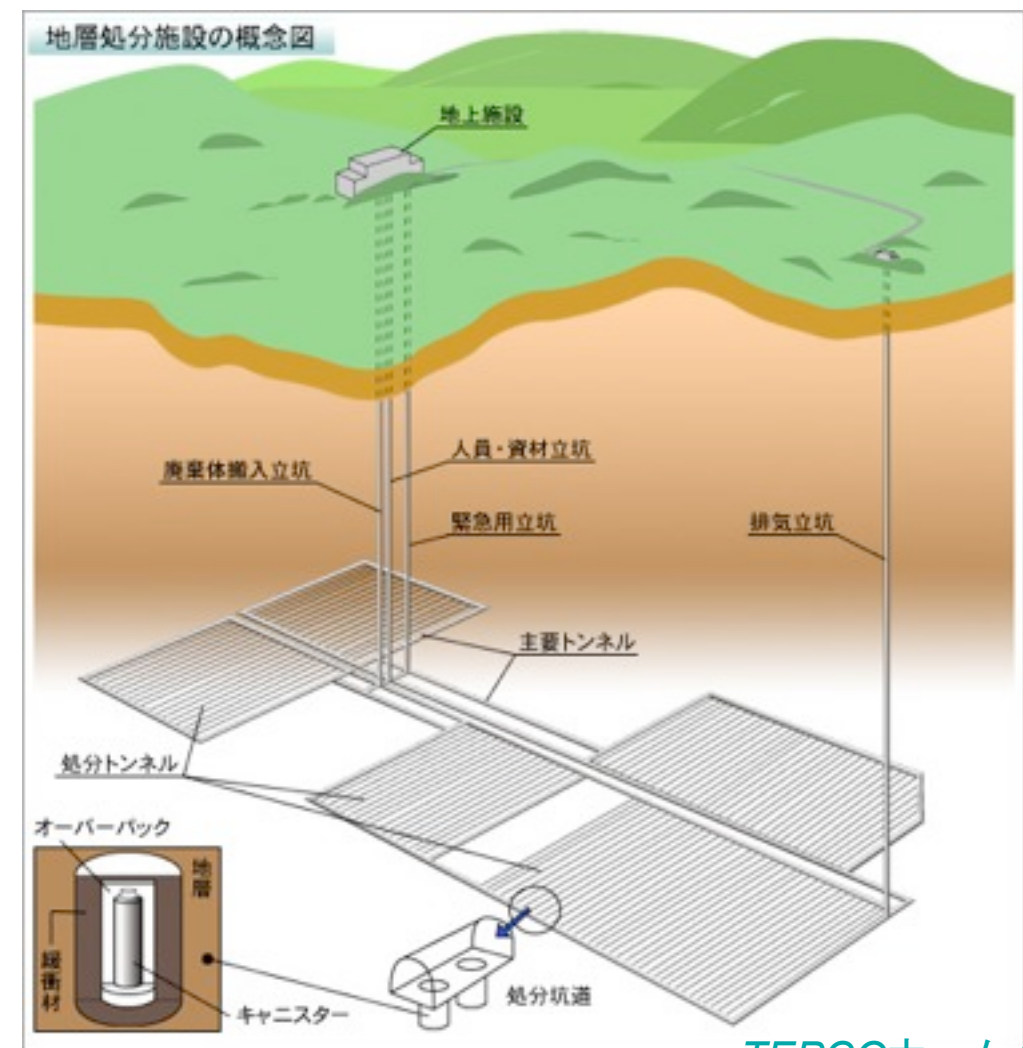


# 地層処分

- ガラス固化体、2020年には4万本の処理！
  - ✓ 現代文明の古墳（負の遺産）
  - ✓ 最終処分場
- 但し、火力発電でも
  - ✓ 100 万kW 程度の石油・石炭プラントからは、化石燃料の燃焼に伴って排ガスとともに重金属や放射性物質を含む微粒子が廃棄物として年間数十万トンも発生するとされている（Rhodes and Beller, 2000）
- 放射性物質を消滅させる技術開発
  - ✓ オメガ計画



堺市博物館HPより



TEPCOホームページより

# 放射能消滅処理の可能性

原子力百科事典HPより

[http://www.atomin.gr.jp/atomica/07/07020103\\_1.html](http://www.atomin.gr.jp/atomica/07/07020103_1.html)

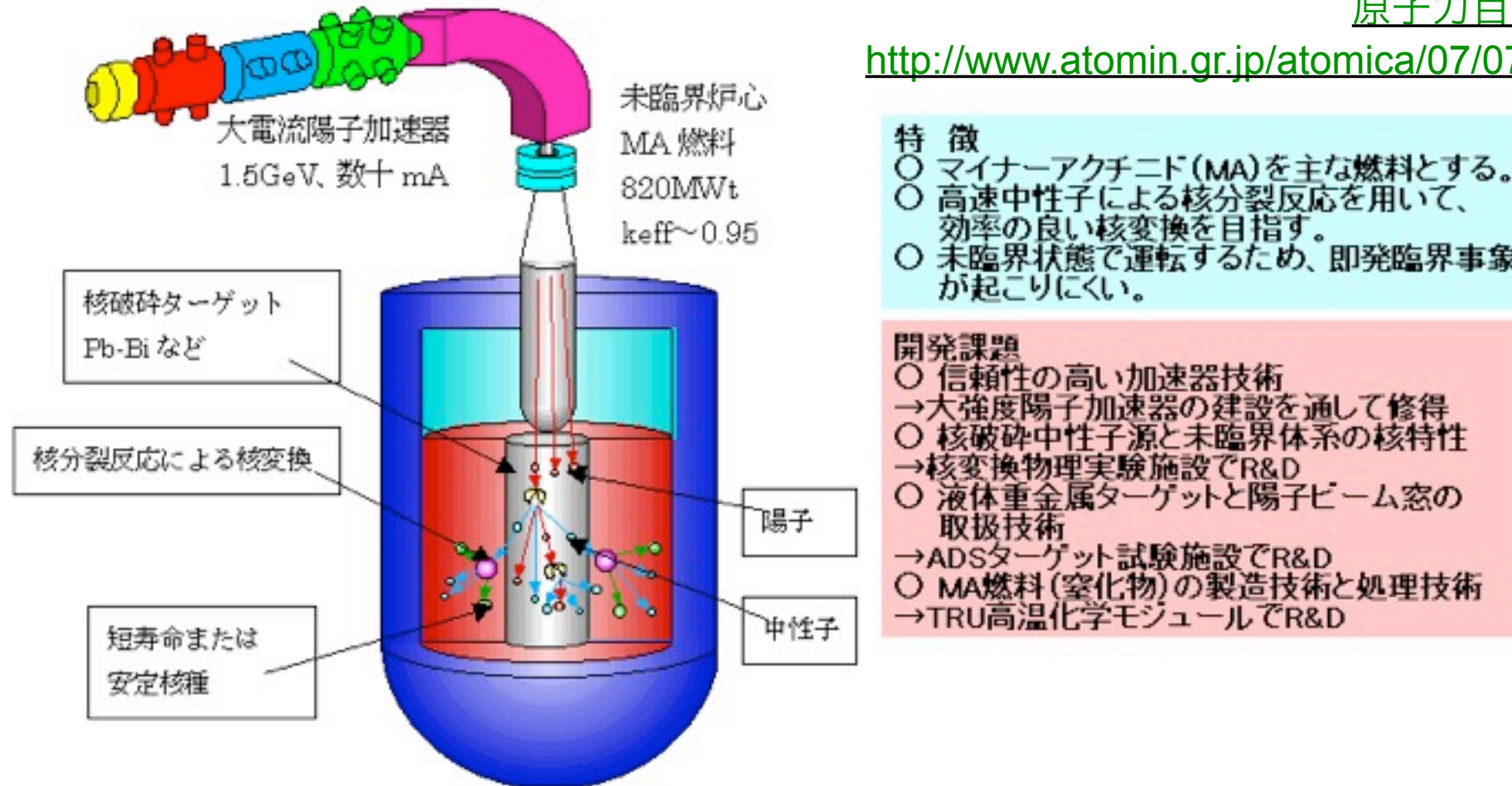


図2 陽子加速器による核破砕反応を利用した核変換システム概念

[資料提供] 日本原子力研究所

- ・ 陽子ビームを照射して、長い半減期をもつ核種を破壊すると半減期の短い核種が発生
  - ✓ 発生した熱を利用してエネルギー回収も可能か？





# スリーマイルアイランド 原子炉事故

1979

## • 冷却水喪失による炉心溶融

- ✓ 原子炉で最も恐ろしい事故
- ✓ 装置故障と人的判断ミスが重なった事故。
- ✓ 冷却水が失われ、炉心上部の2/3が蒸気中にむき出しになり、燃料が冷却されなくなったために温度が上昇し炉心溶融！
- ✓ 燃料の45%、62トンが原子炉圧力容器の底にたまった。

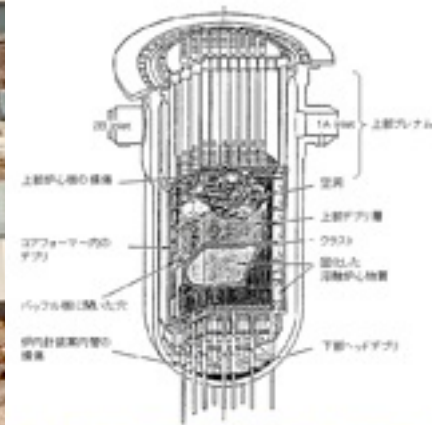


図2 TMI-2事故終息後の炉心損傷状況推定図  
ATOMICA HPより

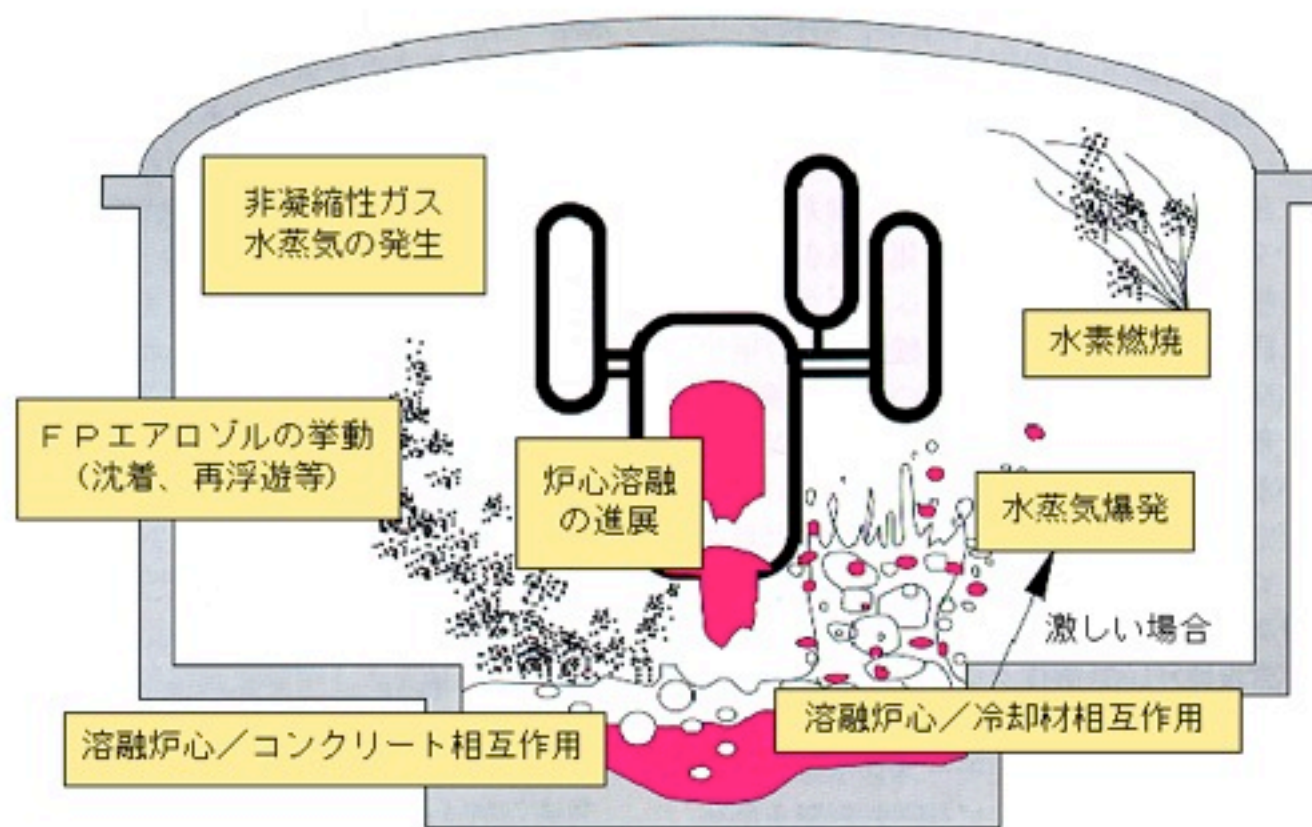


図1 シビアアクシデント時の原子炉格納容器内の主要な現象

【出典】日本原子力研究所：原子力安全性研究の現状 平成7年（1995年10月）、p38

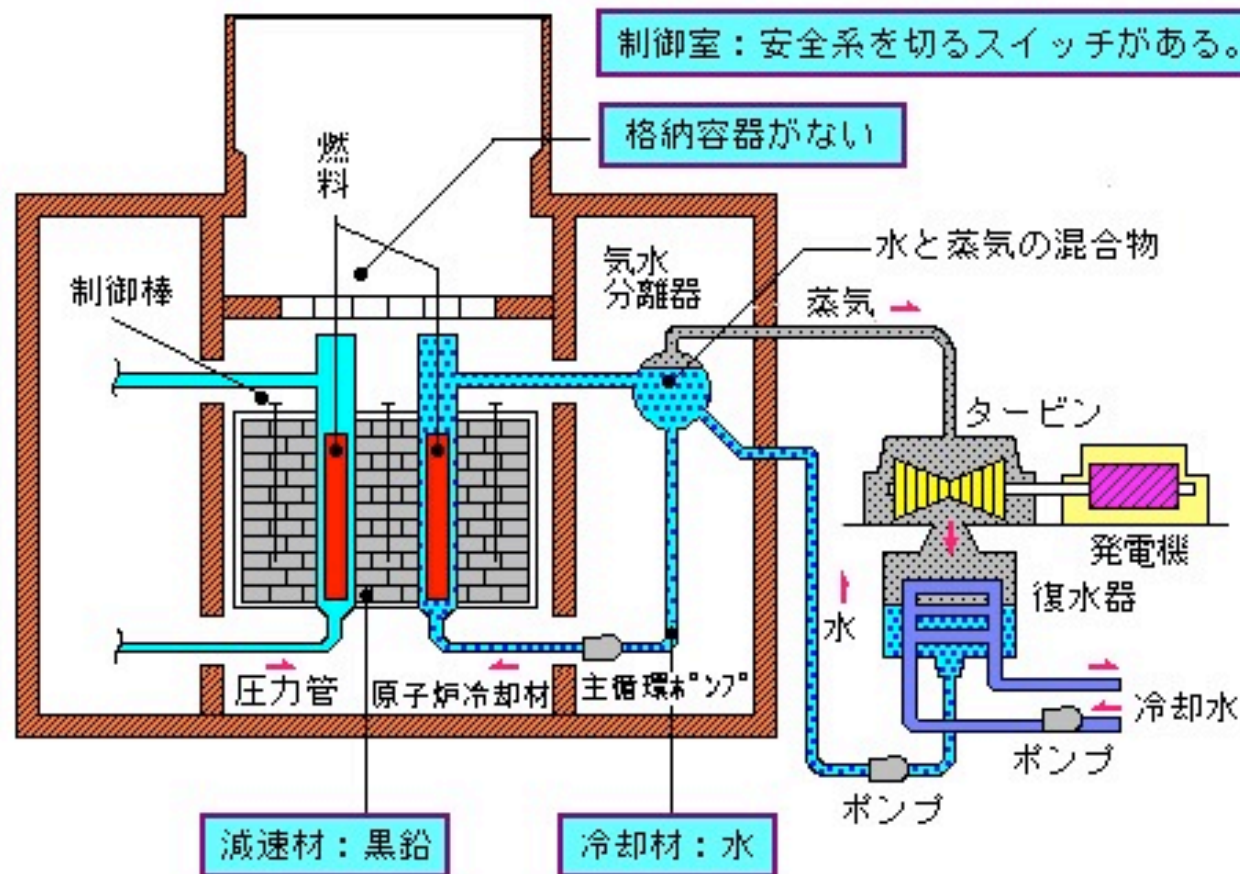
→ チャイナ・シン드ローム  
炉心溶融、メルトダウン



# チェルノブイリ事故

1986

(黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉 RBMK)



- ・ 黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉の暴走
  - － 動作が不安定な低出力実験を様々な安全装置を切った上で強行したために原子炉が暴走
  - － 爆発、火災炎上

	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
原子炉冷却材	水	水
中性子の減速	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

図2 チェルノブイリ原子力発電所の構造

[出典] 電気事業連合会(編): 原子力図面集-1997年版-, p121





**広島原爆の400倍の  
放射性物質が飛散**



ウィキメディアコモンズ



**流れだした炉心**



**「象の足」**



# JCO事故

1999

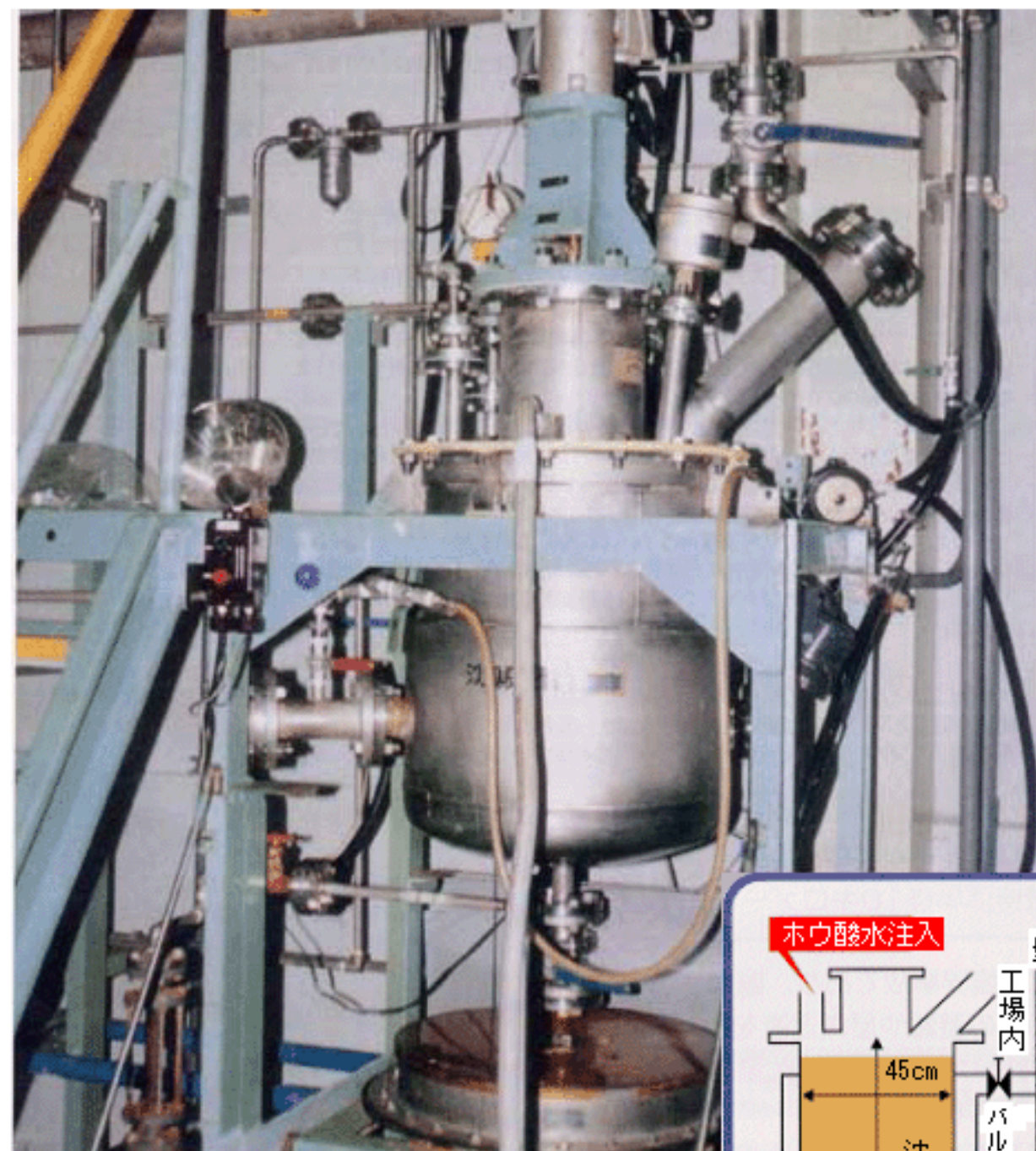
- 燃料加工作業中に  
ウラン溶液が臨界
- 約20時間臨界状  
態が継続
- 作業員3名中2名  
が死亡

核燃料の  
形と密度  
の制御が  
大事

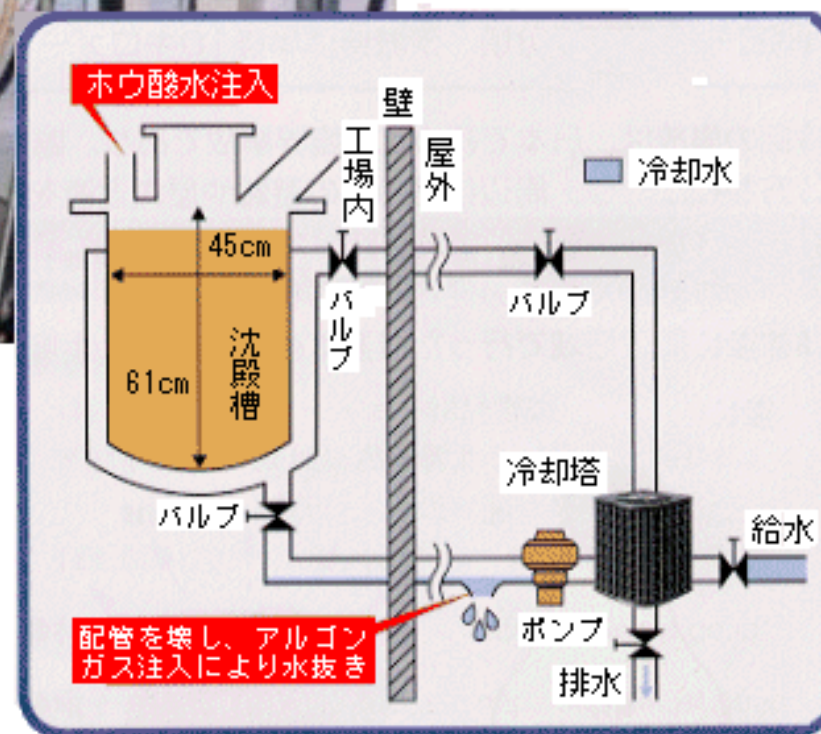
無視した作業

- 高濃度溶液
- 貯塔とタンク

30



JCO転換試験棟内の沈殿槽



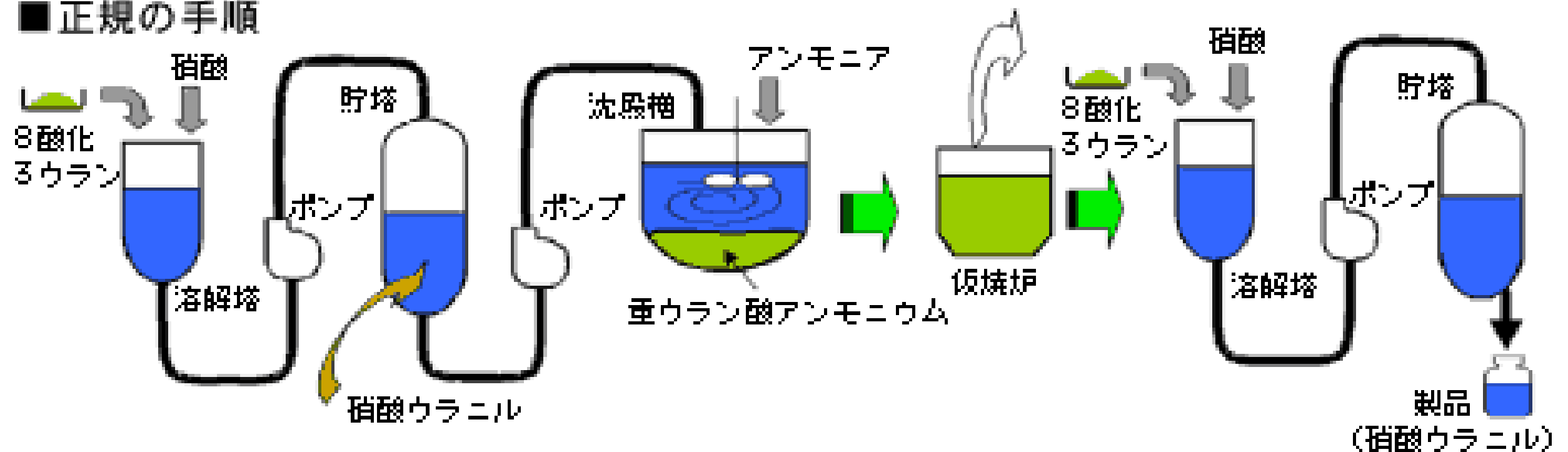
臨界事故終息方法

図5 JCO転換試験棟内の沈殿槽  
と臨界事故終息概要

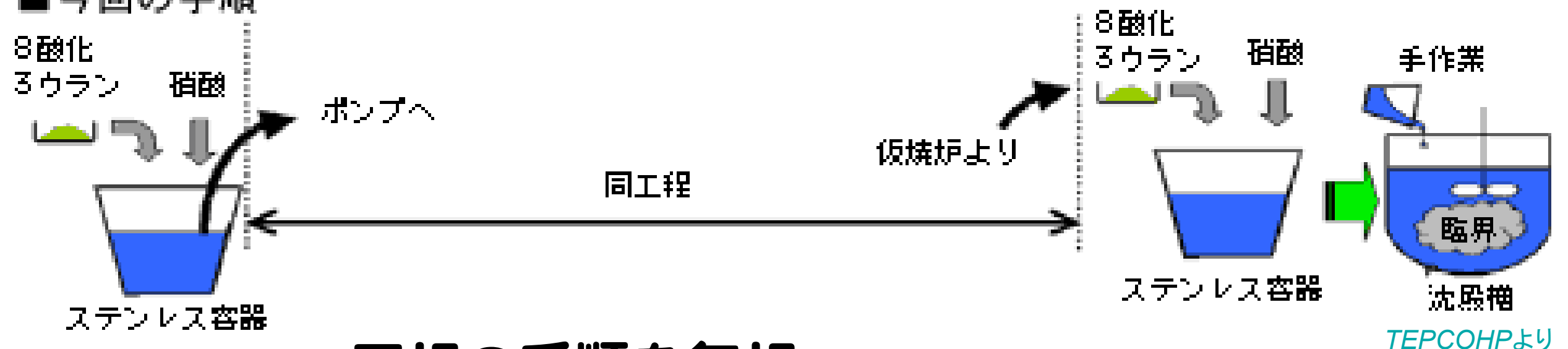
【出典】 (社)茨城原子力協議会：原子力広報「あす」 No.101(1999年11月) および  
科学技術庁(現 文部科学省) ニュースレター(1999年10月15日)

# JCO臨界事故はなぜ起こった？

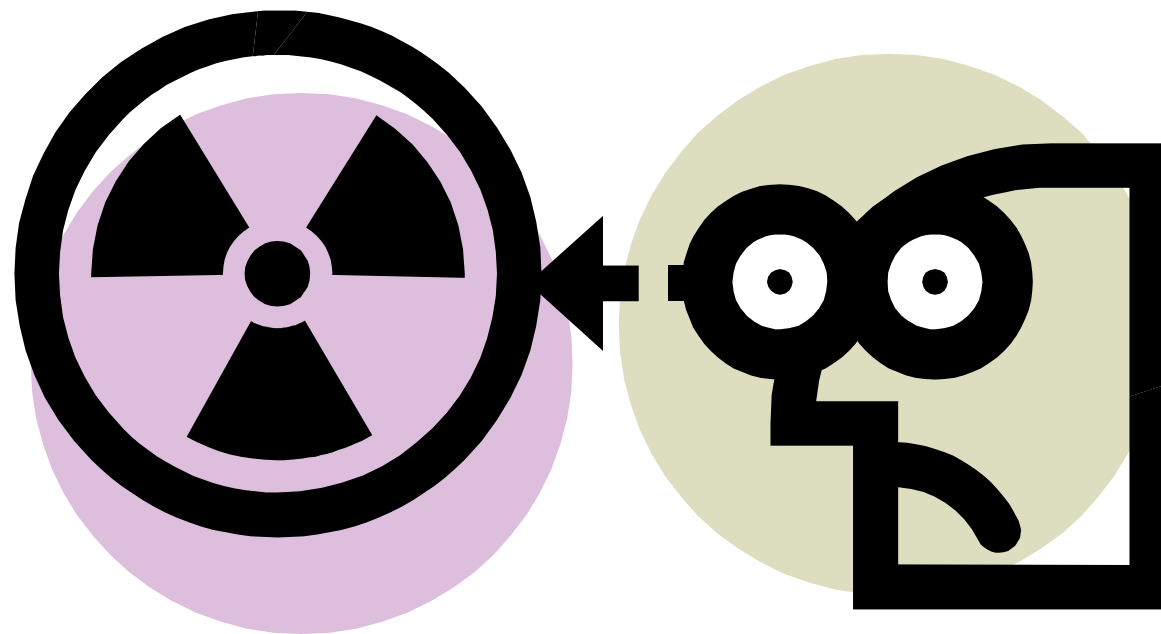
## ■ 正規の手順



## ■ 今回の手順



- 正規の手順を無視
  - ✓ 高濃度溶液の大量投入
  - ✓ 貯塔とタンクの違いの無理解



## 第4章 放射線の人体に及ぼす影響



# 放射線・放射能の単位

- **放射能；**

- ✓ 1ベックレル；1秒間に1回崩壊を起こす能力(Bq)。
- ✓ 1キュリー；ラジウム1gが持つ放射能(Ci)。  
→ ラジウムは1秒間に $3.7 \times 10^{10}$ 崩壊 ( $3.7 \times 10^{10}$  Bq)

- **吸収線量；**

- ✓ 1グレイ；照射された物質1kgあたり1ジュールのエネルギー吸収(Gy)。

- **実効線量；**

- ✓ 生体の放射線被ばくの影響を示すと考えられる量。
- ✓ 1シーベルト；(Sv)；吸収線量Gy × 線質係数 × 補正係数

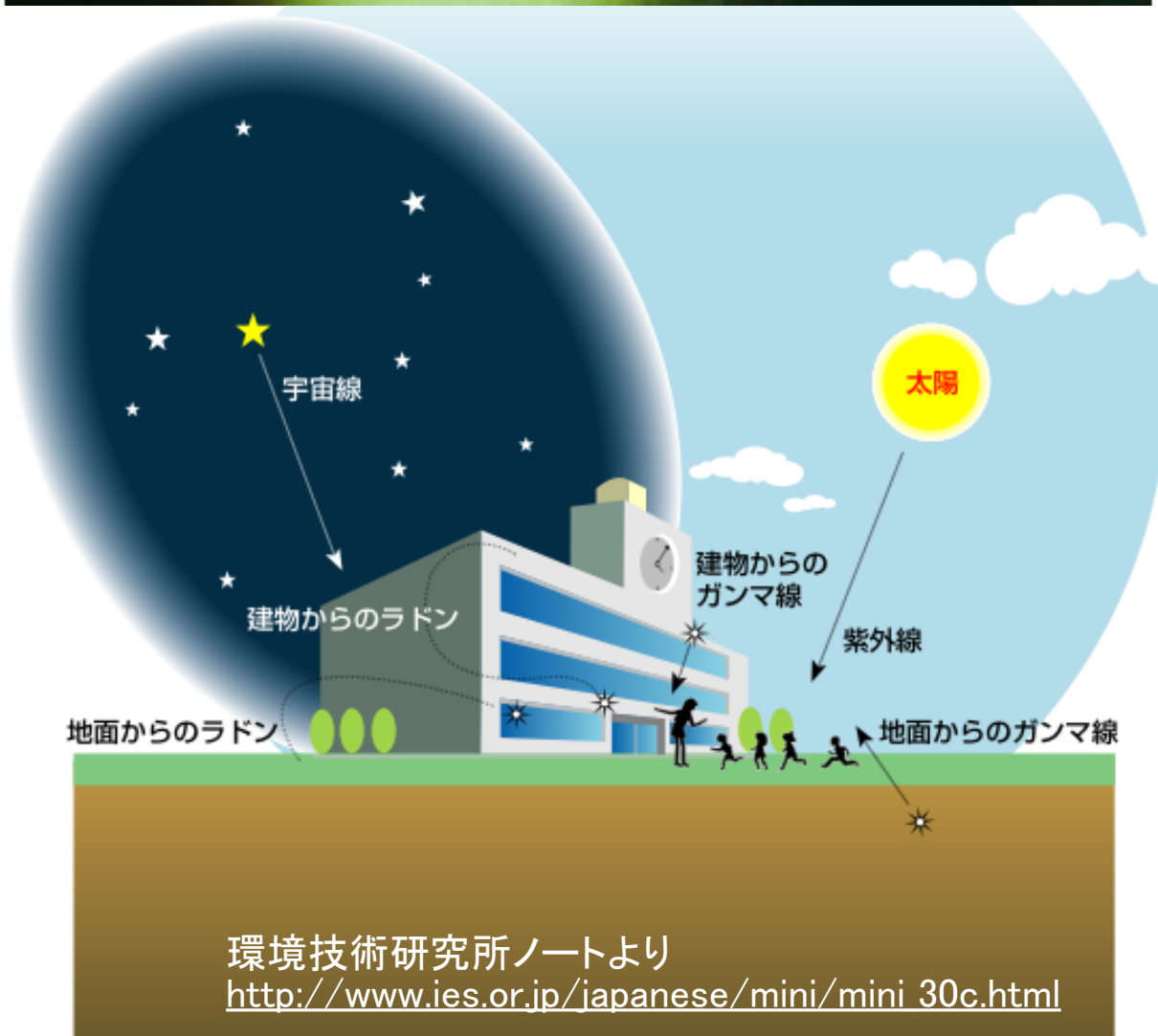
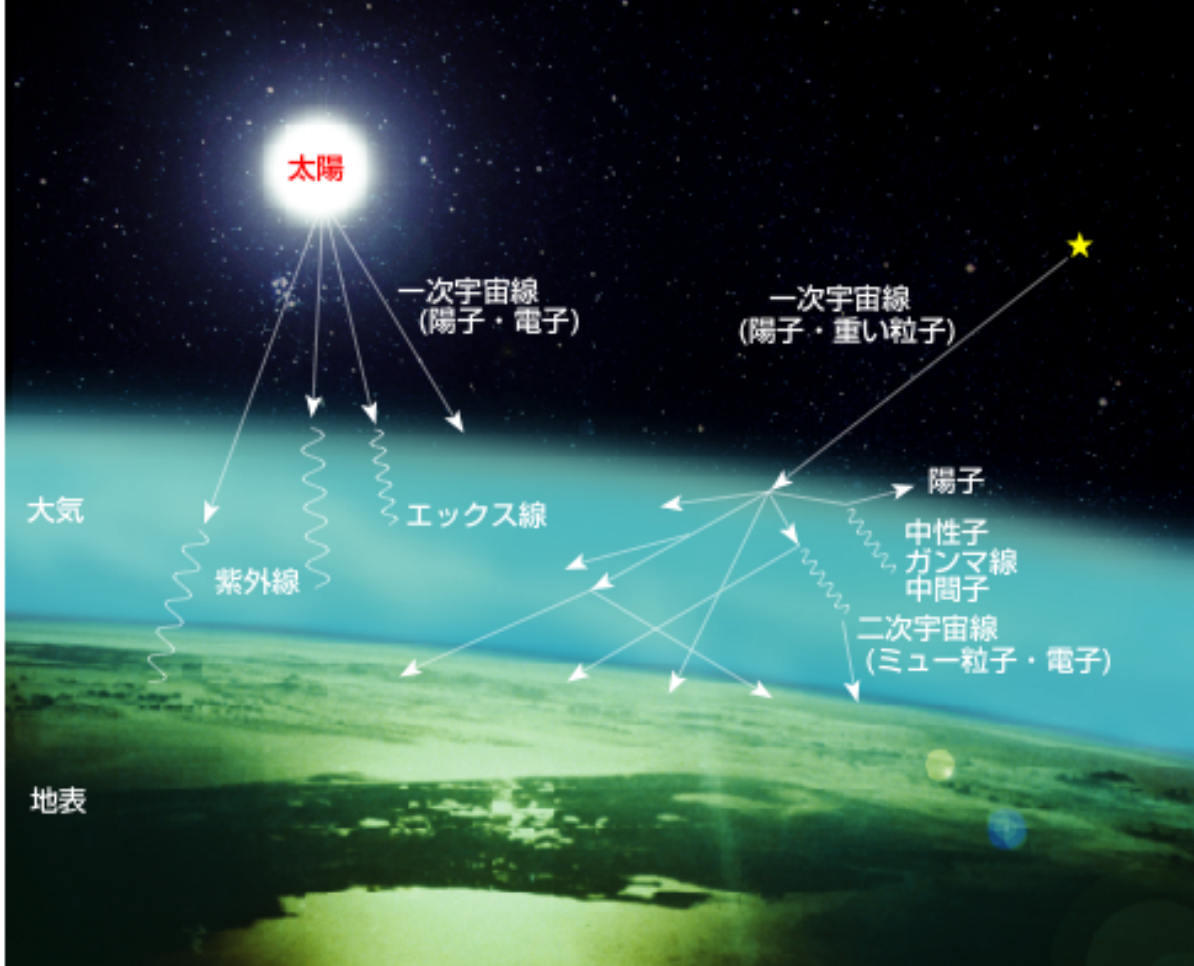
# 自然の放射線

- 世界平均； 1年間に2.4 mSv

## ✓ 内訳

- ⇒ 宇宙線； 0.38 mSv
- ⇒ ラドンガス； 1.3 mSv
- ⇒ 大地、食物； 0.7 mSv

- 生命発生以来一定
- ブラジルでは 1年間に 10 mSvの地域もある
- 東京NY間を 1回往復すると、 0.2 mSv



# ラドン

- $^{222}\text{Rn}$
- ウラン崩壊から生成される放射性のガス
- 自然からの被ばくの半分がラドン吸入による内部被ばく
- 地域により地下室に高濃度のラドンガスが蓄積することもあり注意を要する。





# 放射線被ばく量

## 被ばくの安全基準 (ICRP勧告)

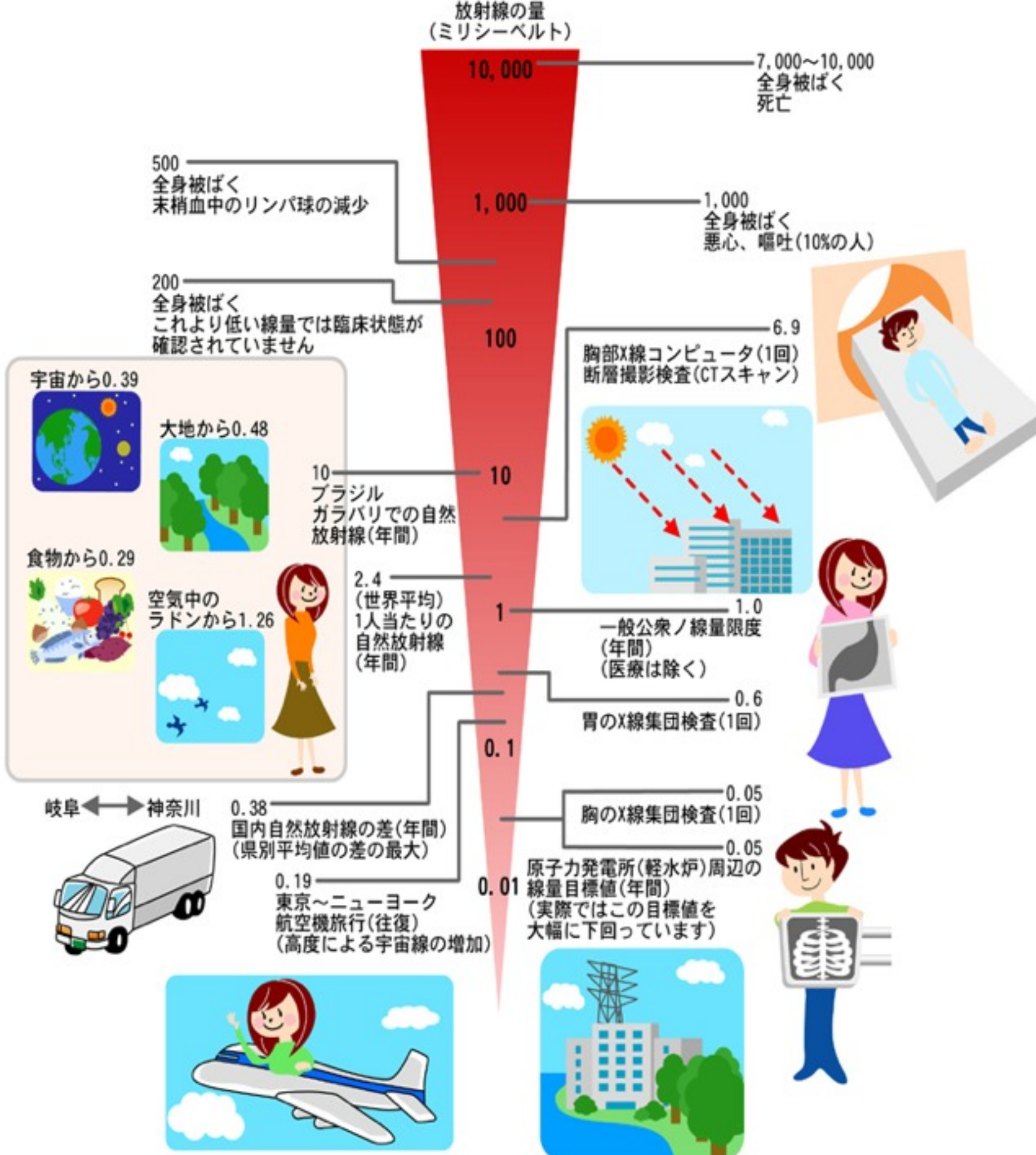
- ✓ 一般人； 1mSv/年
- ✓ 職業人； 50 mSv/年、  
100 mSv/5年

→ JCO臨界停止作業

## 医療のための被ばく

- ✓ 胸部X線； 0.05 mSv
- ✓ 胃X線； 0.6 mSv
- ✓ 胸部CT； 6.9 mSv

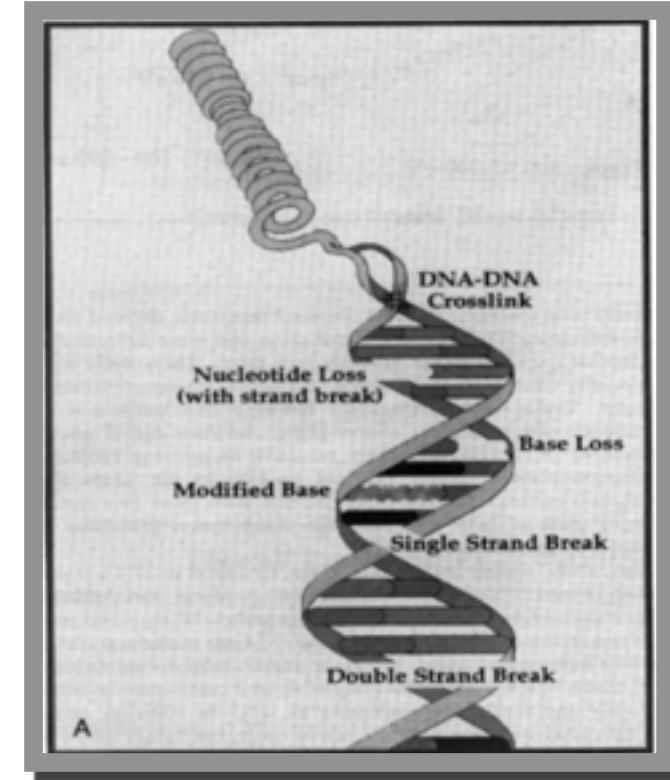
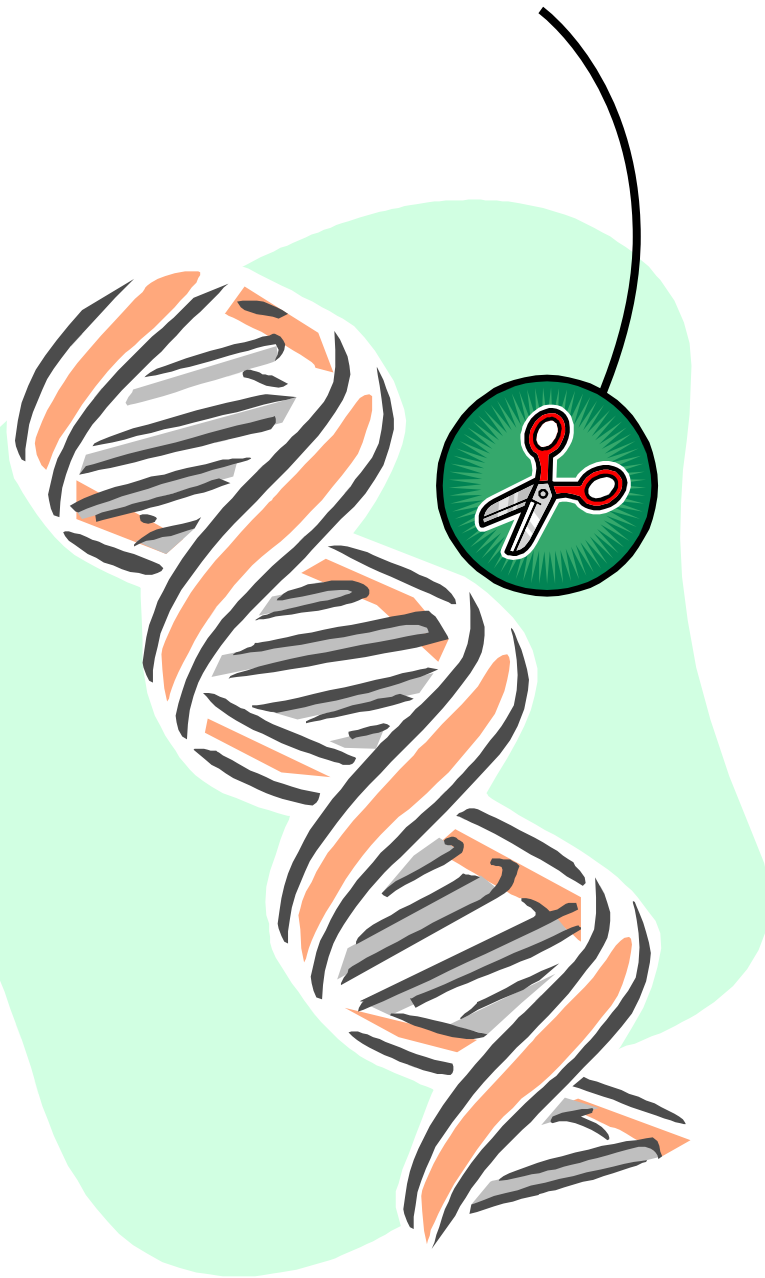
## 検査により被ばくすることのリスクと検査しないことによるリスクとの比較



(注1) 本図中の数値は (放射線医学総合研究所調べ等による。)

(注2) 自然放射線量については、呼吸によるラドンの効果を含めた場合の値。

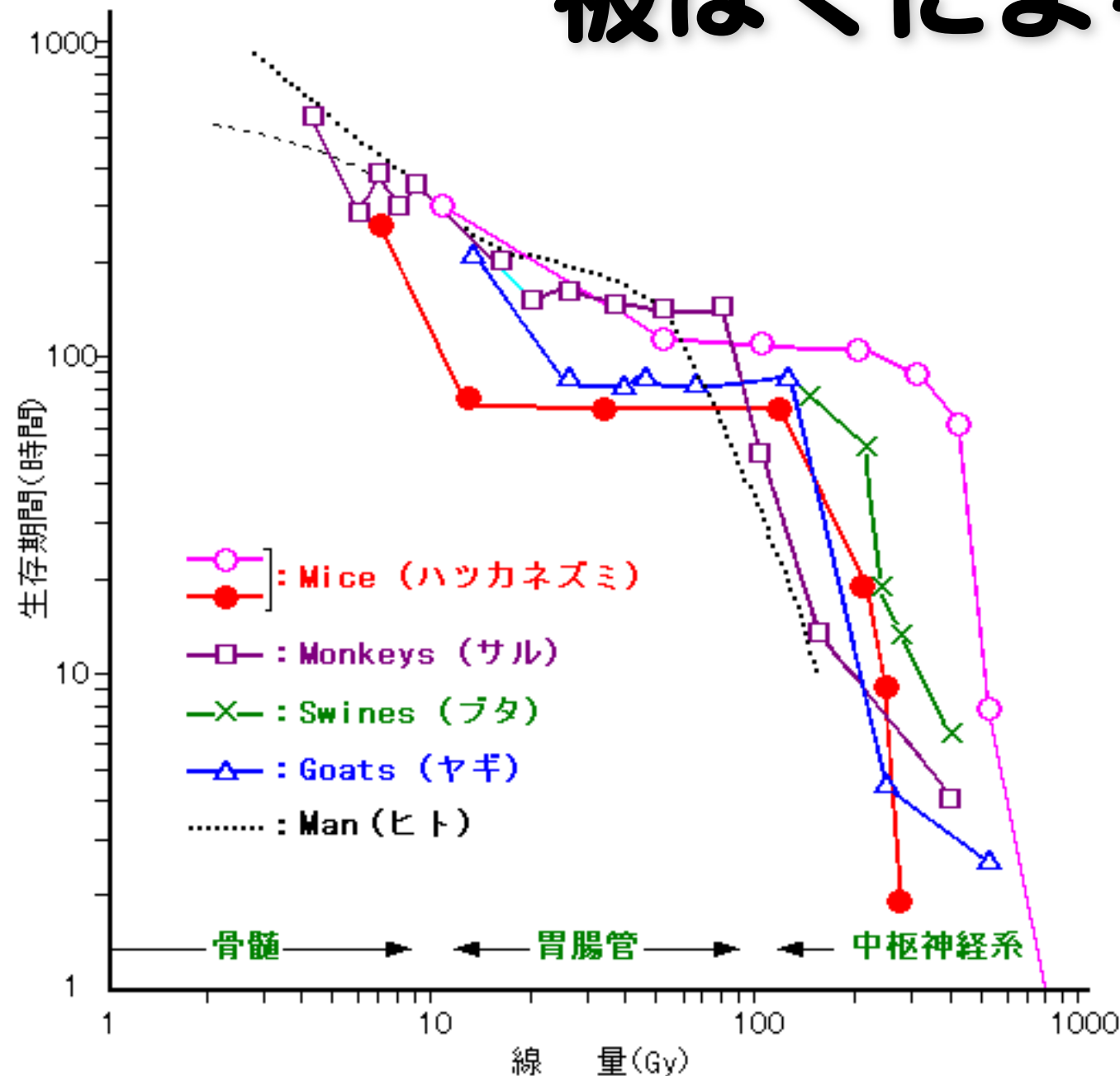
# 放射線の生体への影響



- 放射線の**電離作用**
- DNAの破損により細胞分裂が阻害される（自己修復作用もある）
  - ✓ 細胞分裂の活発な臓器への影響
    - ⇒ 骨髄（造血）、腸壁など
- 早期に現れる影響だけでなく、ガンや白血病など確率的に影響が現れる。



# 被ばくによる急性障害



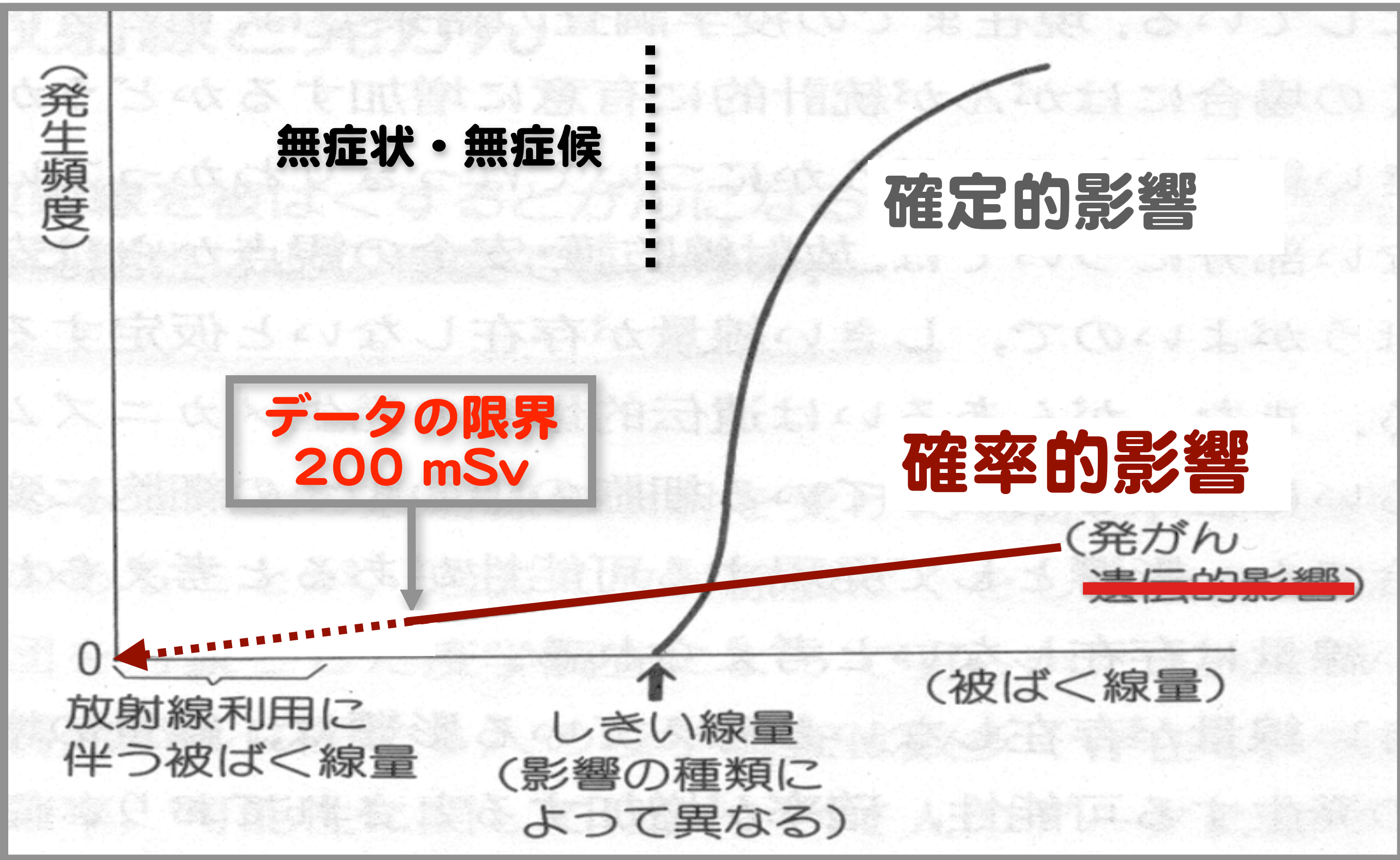
Mice: 180-200 kVp X線照射(●) (H.L.Andrews,1958)  
 2.5 -3.0 MV X線照射(○) (H.Quaster,1945)  
 Monkeys:  $^{60}\text{Co}$  γ線照射 (R.G.Allen et al.,1960)  
 Swines: 3MV X線照射 (J.N.Shiely et al.,1959)  
 Goats: γ線および中性子線混合照射 (E.Rudder et al.,1963)  
 Man: 推定値(点線) (S.J.Baum et al.,1984)

図1 ほ乳動物の全身照射後の生存期間

[出典] 米国原子力規制委員会:「放射線健康影響改良モデル」報告書  
 NRC, 1985, NUREG/CR-4214  
 または、外川織彦ほか: JAERI-M 91-005(1991年2月)、p.22

- 数10 Gy以上；神経中枢破壊で数日で死亡
- 5~15 Gy；腸管出血で約1週間で死亡
- 1~10 Gy；骨髓造血機能減少により約1ヶ月で死亡
- JCO臨界事故
  - ✓ A氏；20 Gy (死亡)
  - ✓ B氏；10 Gy (死亡)
  - ✓ C氏；4.5 Gy (生存)

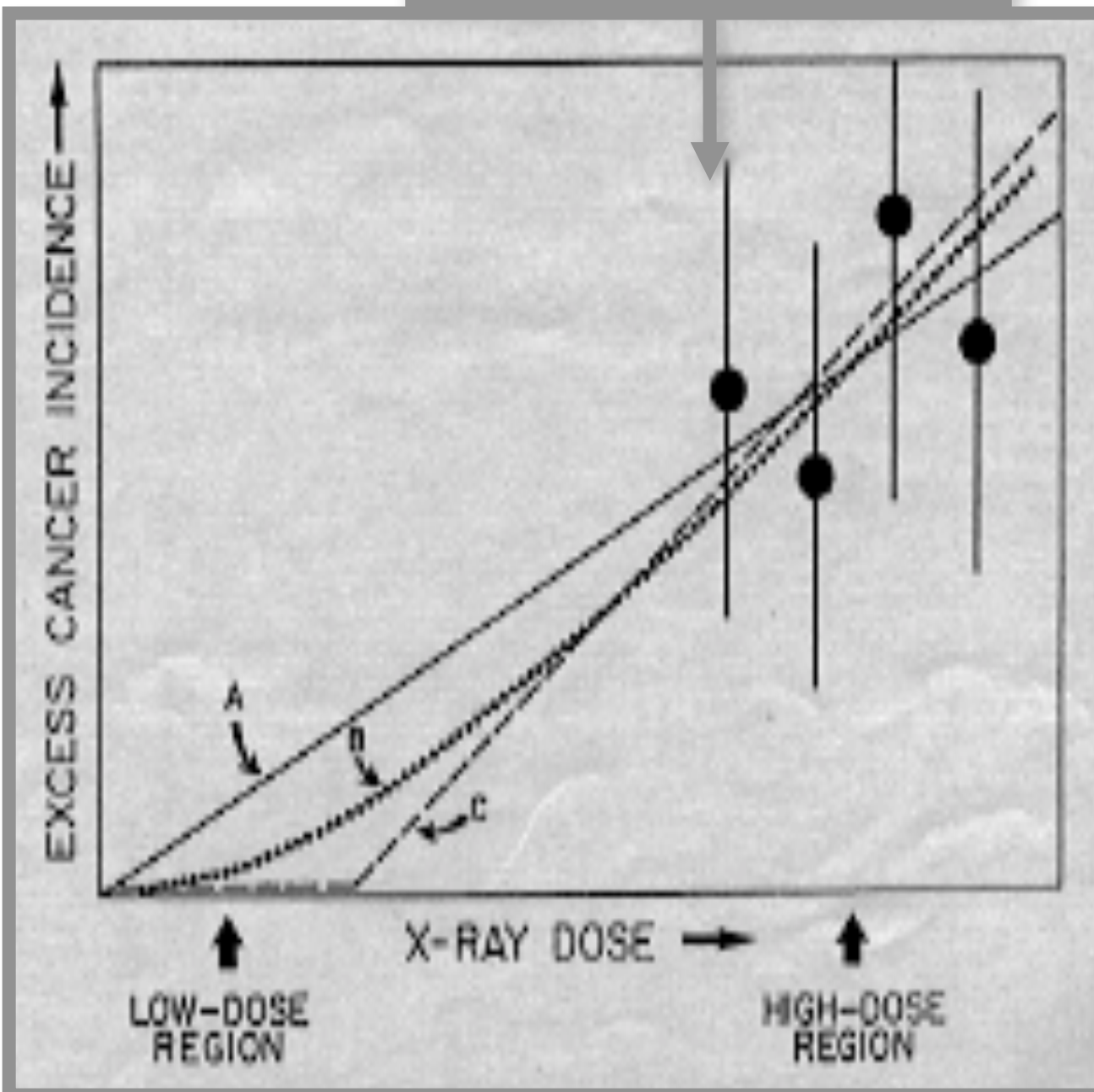
# 確定的影響と確率的影響



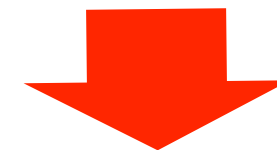


# 確率的影響を推定する

データの限界  
200 mSv



- 低レベルの放射線被ばくの影響はよくわかっていない。
  - ✓ 遺伝的影響はないらしい。
- どんなに少ない線量でも相応に危険と仮定するモデル
  - ✓ 但し低レベルの被ばくは治癒効果があるという説もある



発ガン確率；  $4 \times 10^{-2} / \text{Sv}$

10mSvあたりガンの発生率；0.04%  
但し、25%から25.04%への増加  
胸X線検査でも  $10^{-6}$  の確率

この数字をどうとらえればいいのか

# 第5章 リスクを管理する考え方

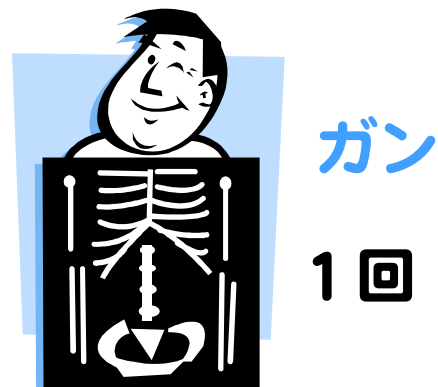
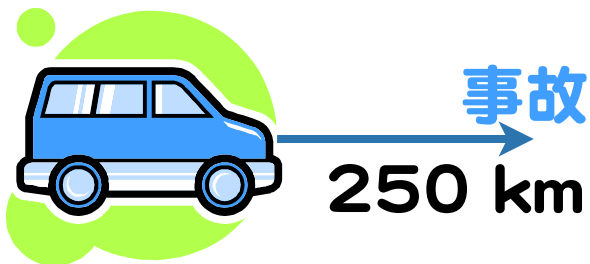
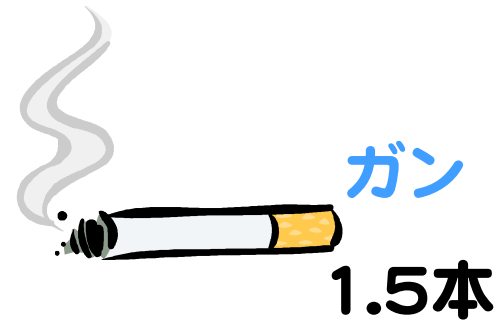
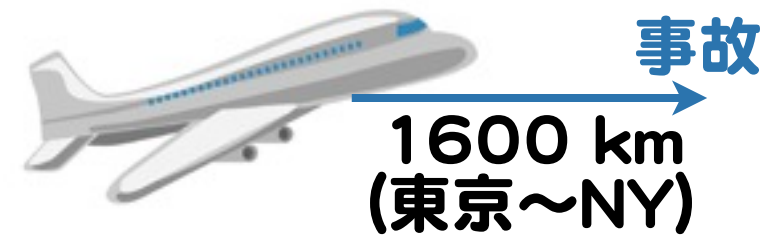


- 光
  - ✓ エネルギーの安定供給
  - ✓ CO<sub>2</sub>発生量を減らす
    - ⇒ 現代文明の発展に欠かせない
    - ⇒ 現代生活の維持に欠かせない
- 影
  - ✓ 放射性廃棄物の処理
  - ✓ 万が一の事故
- リスクを比較し、管理するという考え方が必要
  - ✓ 何と何を比較？



# 様々なリスク

10<sup>-6</sup>の危険



- 何をやっても、やらなくてもリスクがある
- リスクを比較して、「判断」  
✓ 大きさだけではない、「Quality of Life」も

# 寺田寅彦

ものを怖がらな過ぎたり、  
怖がり過ぎたりするのは  
やさしいが、正当に怖が  
ることはなかなかむつか  
しい。

