



放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎
著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
 - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
 - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
 - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
 - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
 - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
 - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
 - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
 - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
 - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
 - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会是非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

放射線

を

科学的に

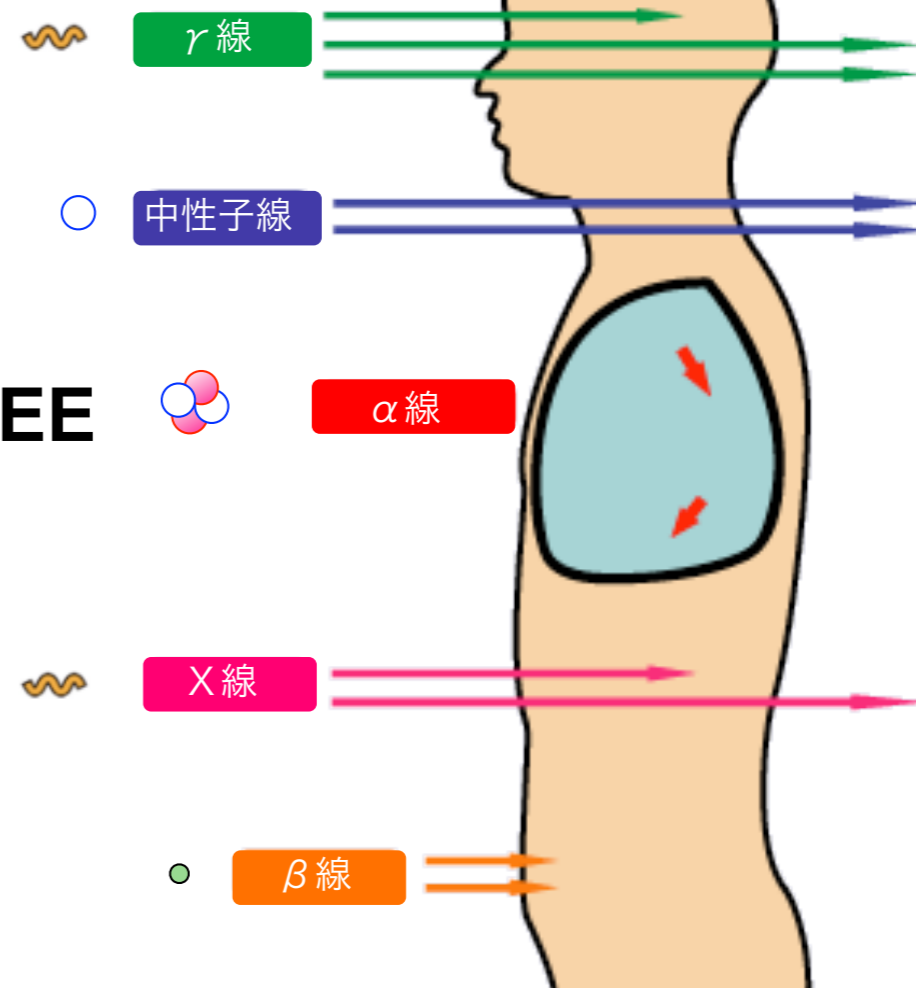
理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

& @ Zoom



担当教員 鳥居 寛之 (粒子線物理学)

理学系研究科

小豆川 勝見 (環境分析化学)

総合文化研究科

渡邊 雄一郎 (生命環境応答学)

総合文化研究科

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

& @ Zoom

放射線

を

科学的に

理解する

2021 / 12 / 10 (金)

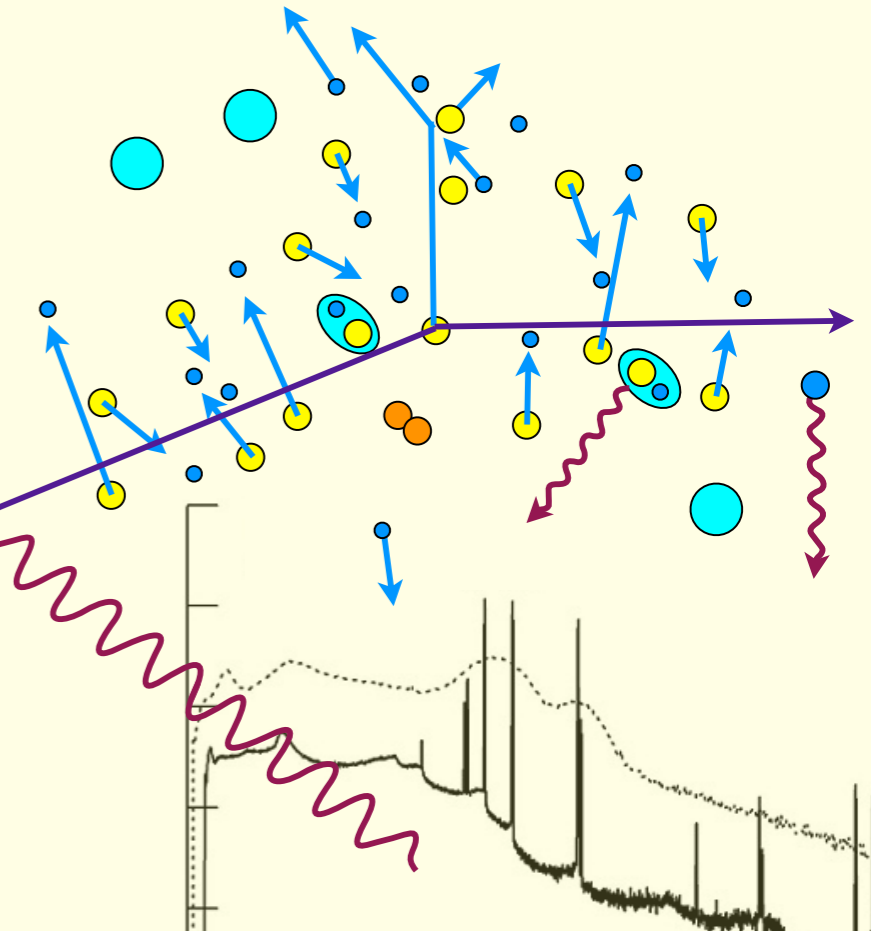
第9回

原子力工学と原子力事故

原子力発電の原理、原子力事故、放射性廃棄物処理問題

鳥居 寛之

東京大学理学部



放射線を科学的に理解する

- 10/ 8 放射線入門 【鳥居】
- 10/15 放射線物理学 【鳥居】
- 10/22 放射線計測学 【小豆川】
- 10/29 放射線物理・化学 【鳥居】
- 11/ 5 放射線生物学 【渡邊】
- 11/12 環境放射化学 【小豆川】
- 11/19 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 12/ 3 原子核物理学 【鳥居】
- 12/10 原子力工学と原子力事故 【鳥居】
- 12/17 環境放射化学 【小豆川】
- 12/24 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 1/ 7 放射線の利用 【渡邊】
- 1/18* 加速器科学・放射線防護学
・まとめ 【鳥居】

* 印：火曜振替

鳥居 寛之 《理学部》

渡邊 雄一郎

小豆川 勝見

《教養学部》

坪倉 正治 《福島県立医大》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

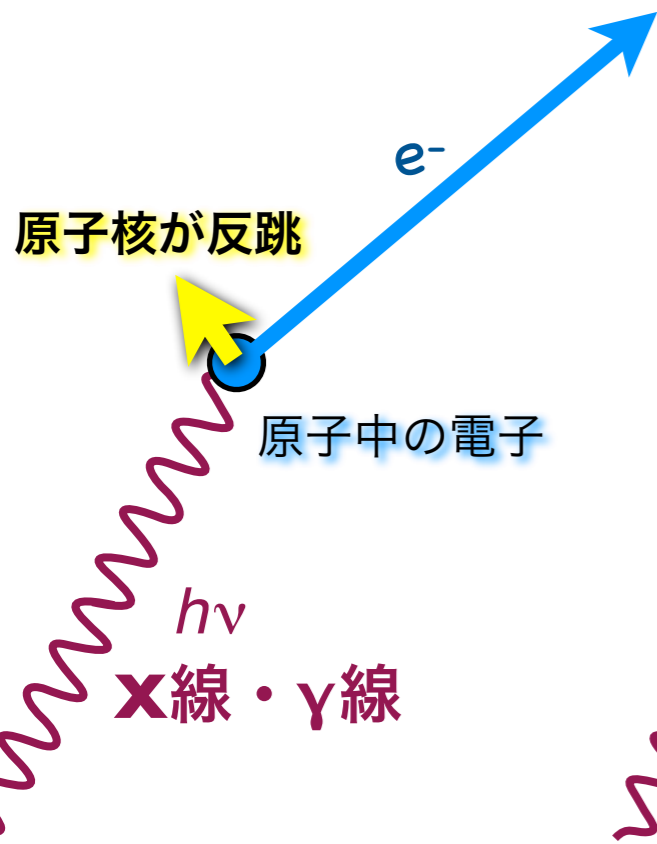
ゲスト講師

放射線と物質との相互作用

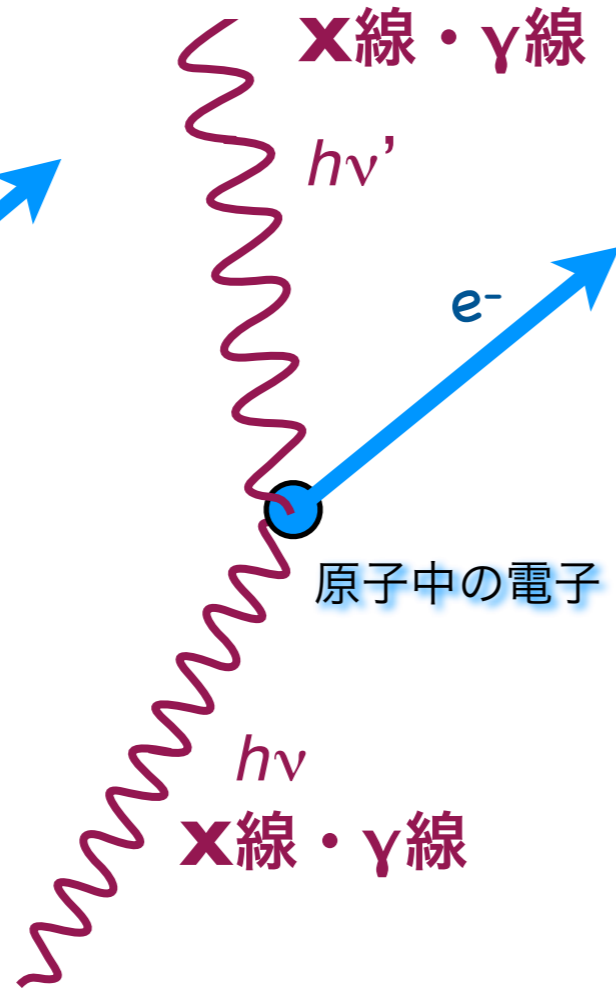
制動放射

光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

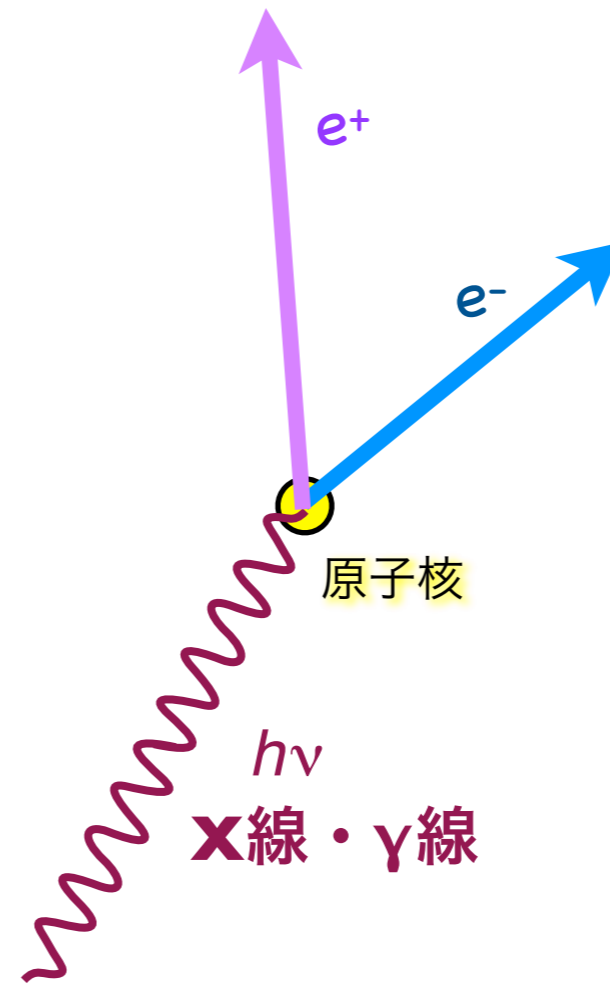
光電効果



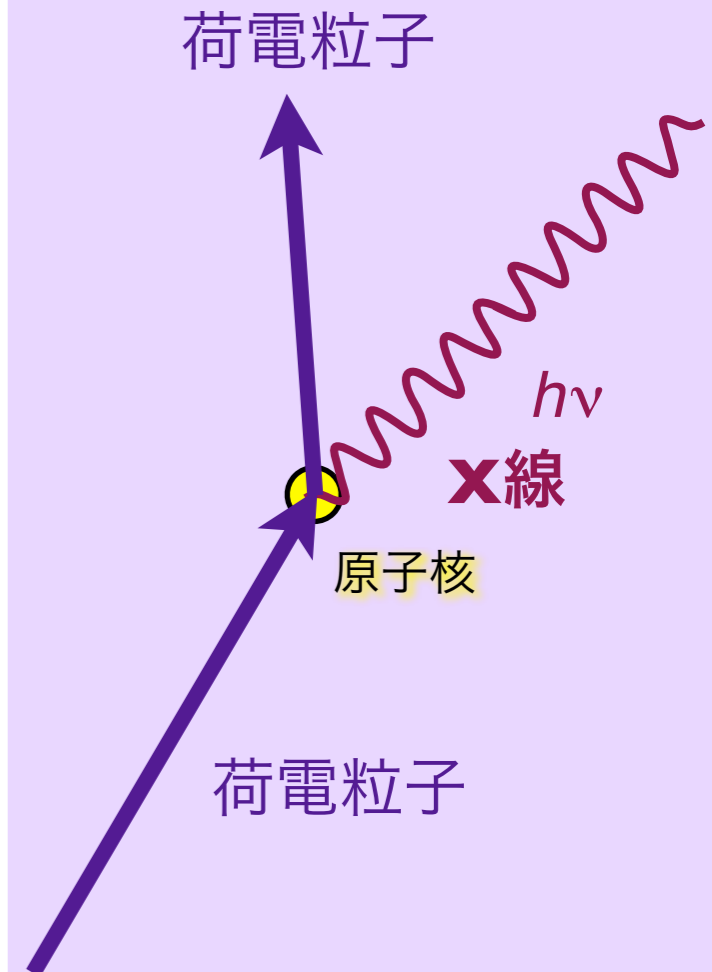
コンプトン散乱



電子対生成



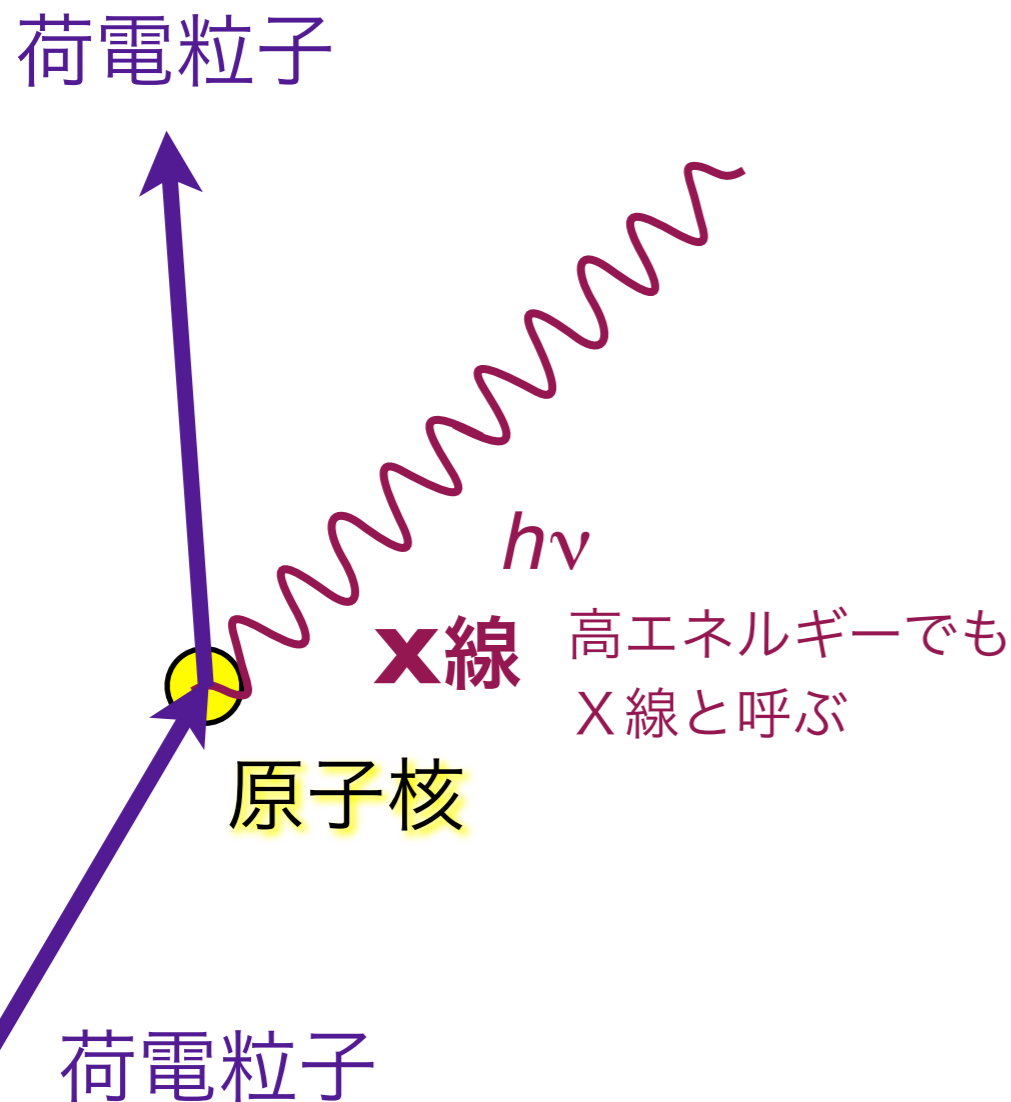
制動放射



高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

制動放射

(Bremsstrahlung)



X線

制動放射

荷電粒子が加速度を受けて
光子 (X線, γ 線) を放出

$$\Delta E \propto Z^2$$

制動放射：放射阻止能 S_{rad}

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} = \frac{(E + m_e c^2) Z}{1600 m_e c^2}$$

衝突阻止能 S_{col} との比

電子 (β 線)

Pb (鉛; $Z = 82$)

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} \approx \frac{E Z}{800 \text{ MeV}} \approx \frac{E / \text{MeV}}{10}$$

β 線 (電子線) を鉛で止めてはいけない

陽子・ α 線

S_{col}

制動放射は無視できる。電子衝突阻止能が
支配的。(ただし、GeV を超える場合は別。)

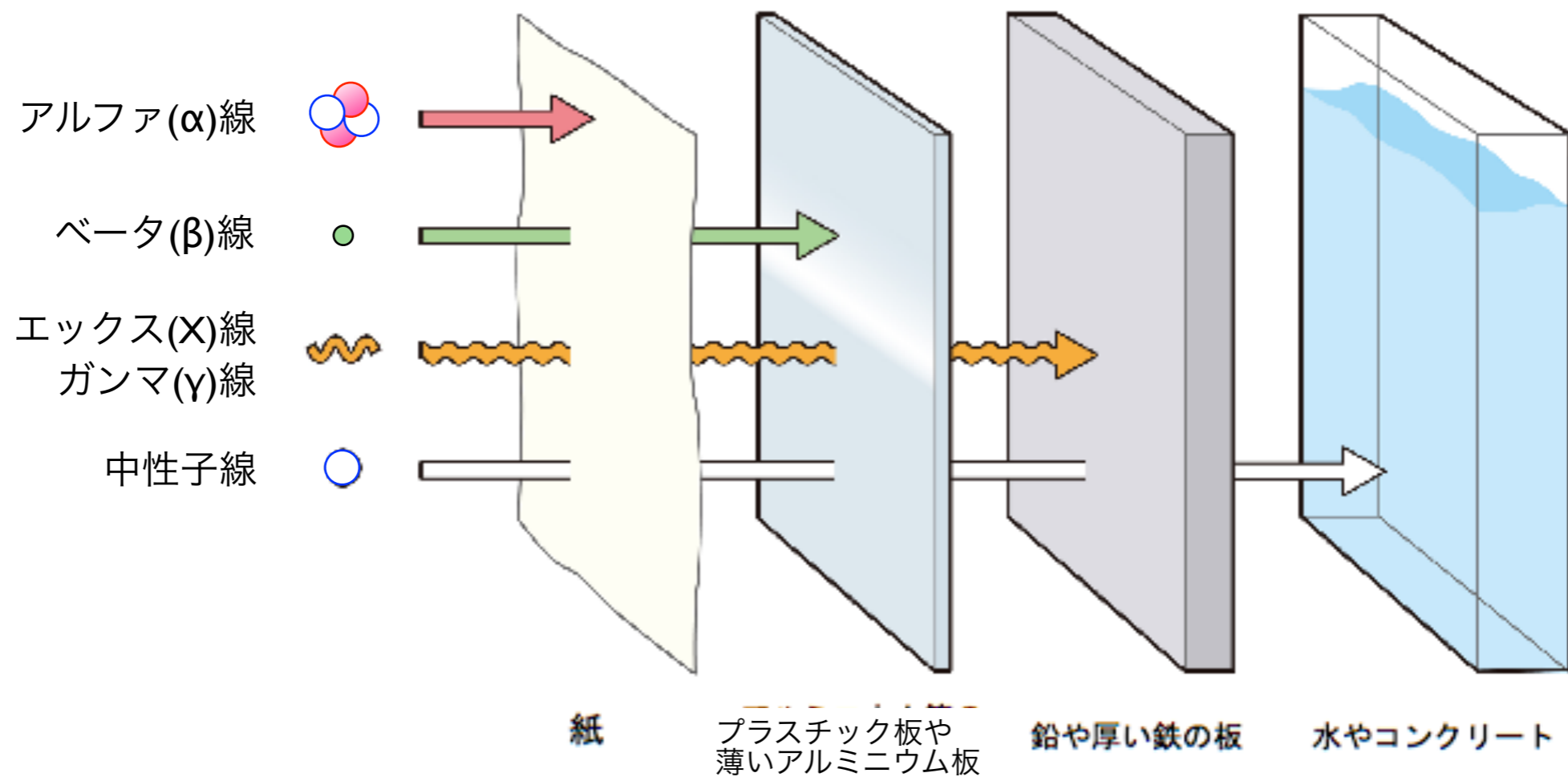




中性子の性質と核分裂反応

原子力発電の原理

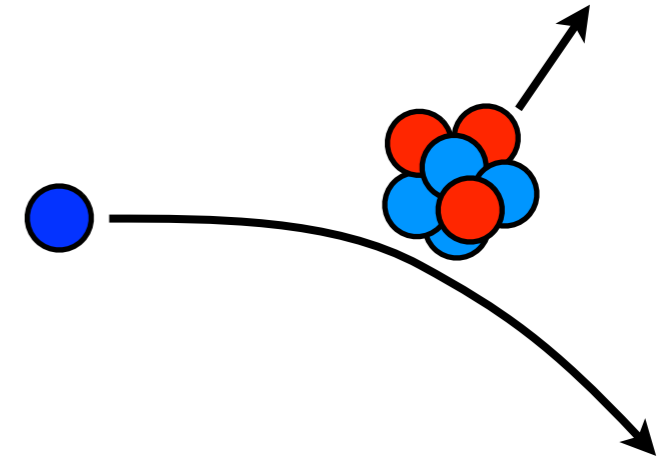
放射線の種類と透過力



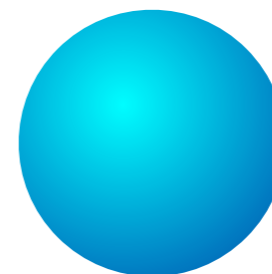
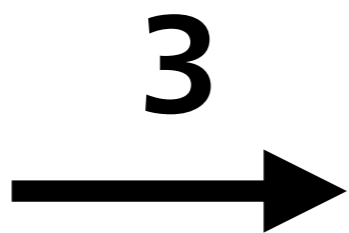
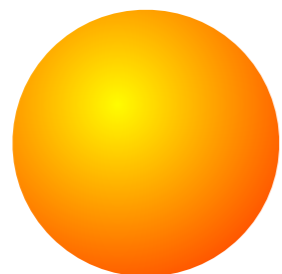
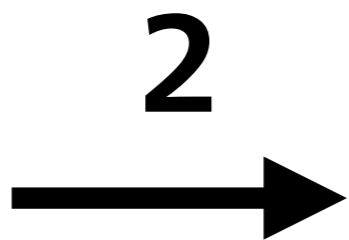
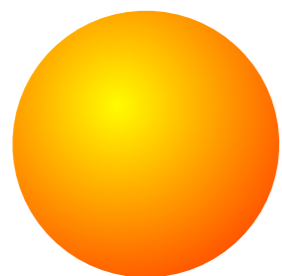
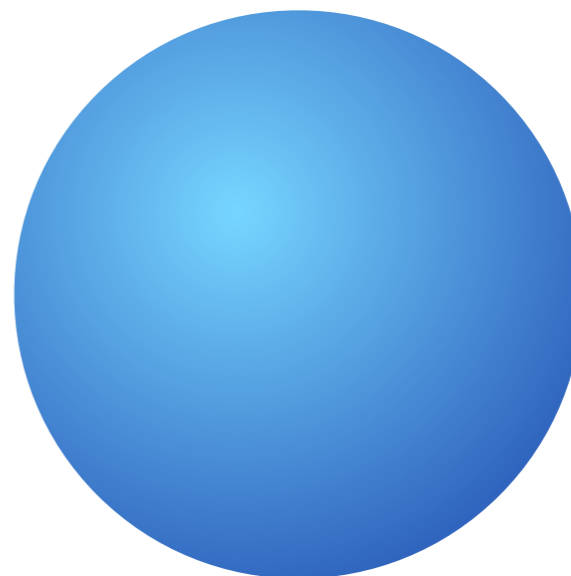
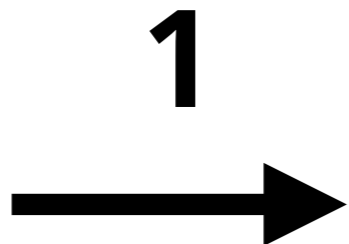
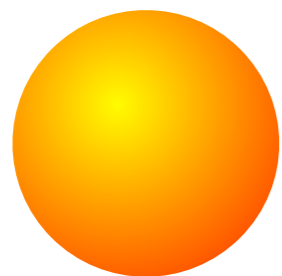
中性子の減速

中性子の弾性散乱

高速中性子は原子核と衝突を繰り返して減速する。
衝突毎にエネルギーを指数関数的に減らす。



散乱された原子核が高 LET の荷電粒子として原子・分子をイオン化する。



中性子の減速

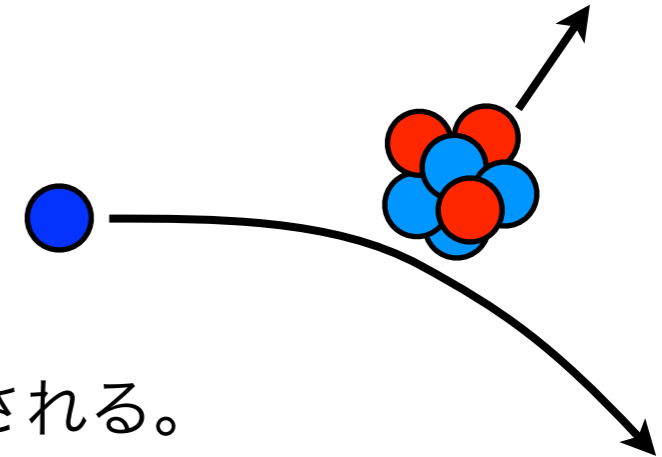
中性子の弾性散乱

高速中性子は原子核と衝突を繰り返して減速する。
衝突毎にエネルギーを指数関数的に減らす。

中性子は、同じ質量をもつ**陽子**により最も効率的に減速される。

中性子の遮蔽には、水やコンクリートなど、**水素原子**を含む物質を用いる。

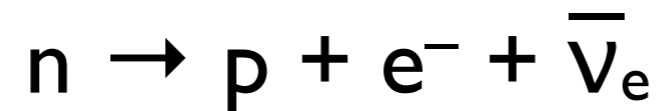
陽子など散乱された原子核が高 LET の荷電粒子として原子・分子をイオン化する。



中性子の寿命と質量

中性子の真空中での半減期は約10分、寿命は約15分。

数多くの原子核中では中性子は安定に存在する。

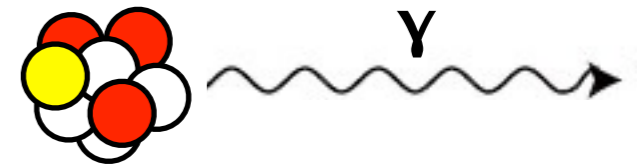


$$(M_n = 940 \text{ MeV}/c^2) > (M_p = 938 \text{ MeV}/c^2) + (m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2)$$

中性子の反応と放射化、核分裂反応

中性子の吸収と核反応

質量数が1つ大きい原子核を形成したあと、 γ 線などを放出。
放射化の原因となる。



放射化

放射性物質でないものが放射線照射によって放射性を帯びること。

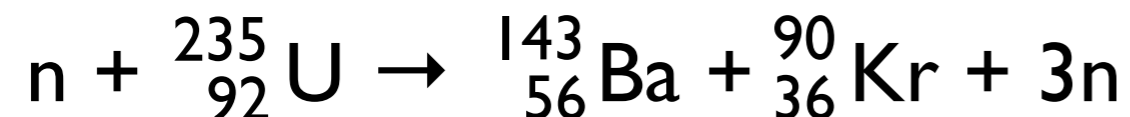
中性子や、**10 MeV 以上の γ 線**による核反応で放射性核種が生じることがある。

通常の放射性核種による β 線や γ 線、原子からの X 線などでは起こらない。

加速器施設や原子炉などの第一種管理区域では放射化に注意が必要。

核分裂反応の発見

$n + {}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{92}^{239}\text{U} \rightarrow {}_{93}^{239}\text{X} + \beta^-$ により超ウラン元素の生成が研究されていた。

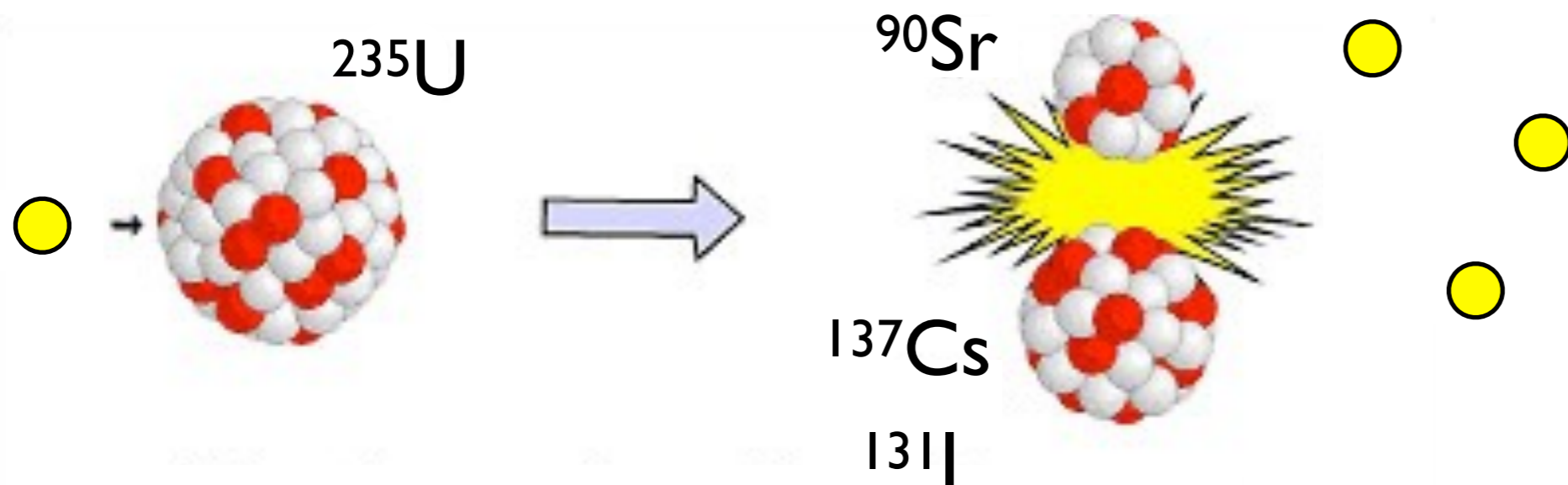


Otto Hahn & Fritz Straßmann (1938)

Lise Meitner 理論的解釈

実験

原子核分裂反応

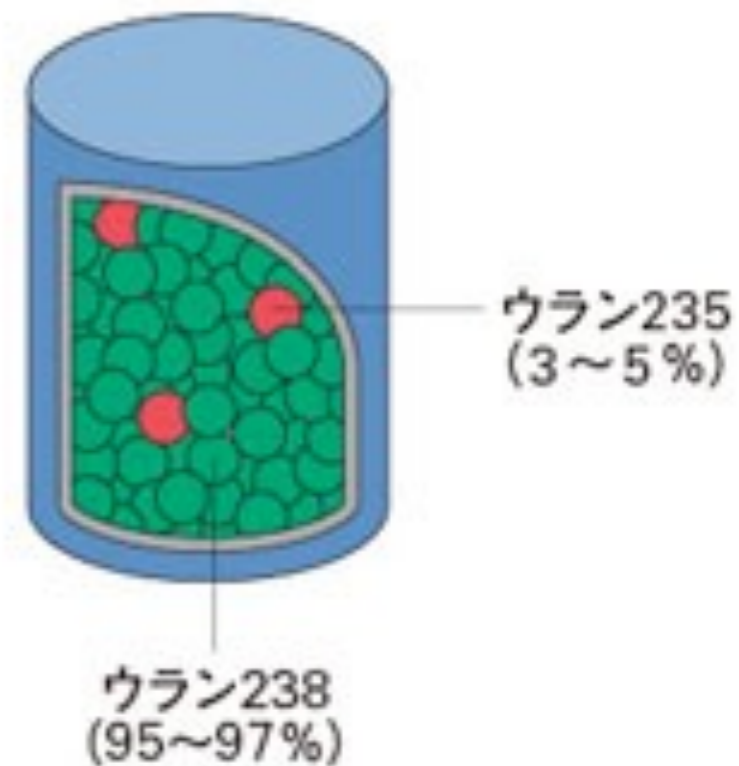
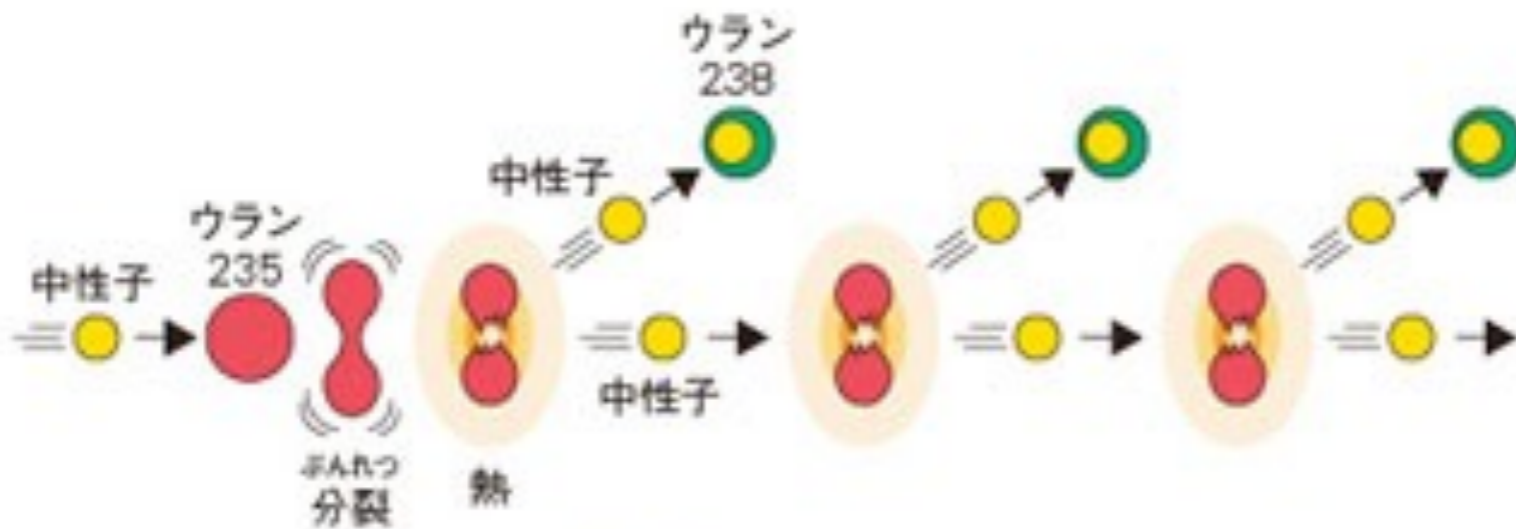


粒子の運動エネルギーとして放出

熱中性子

減速

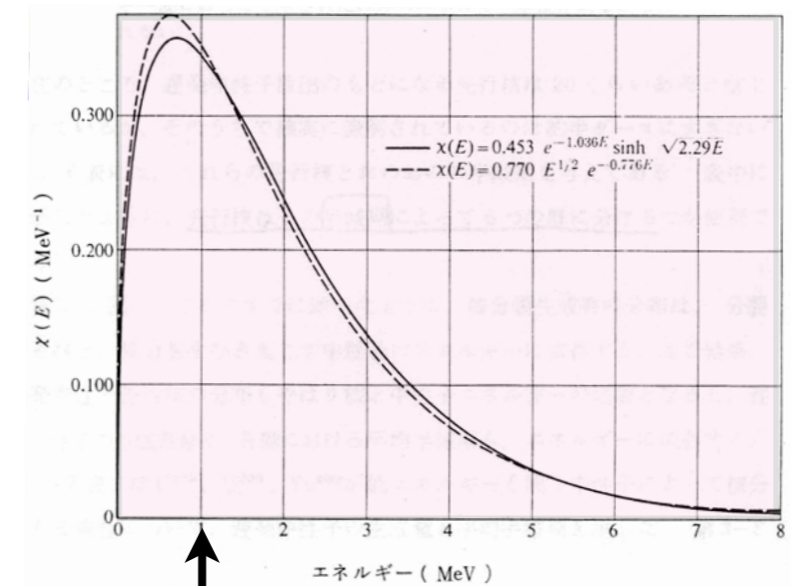
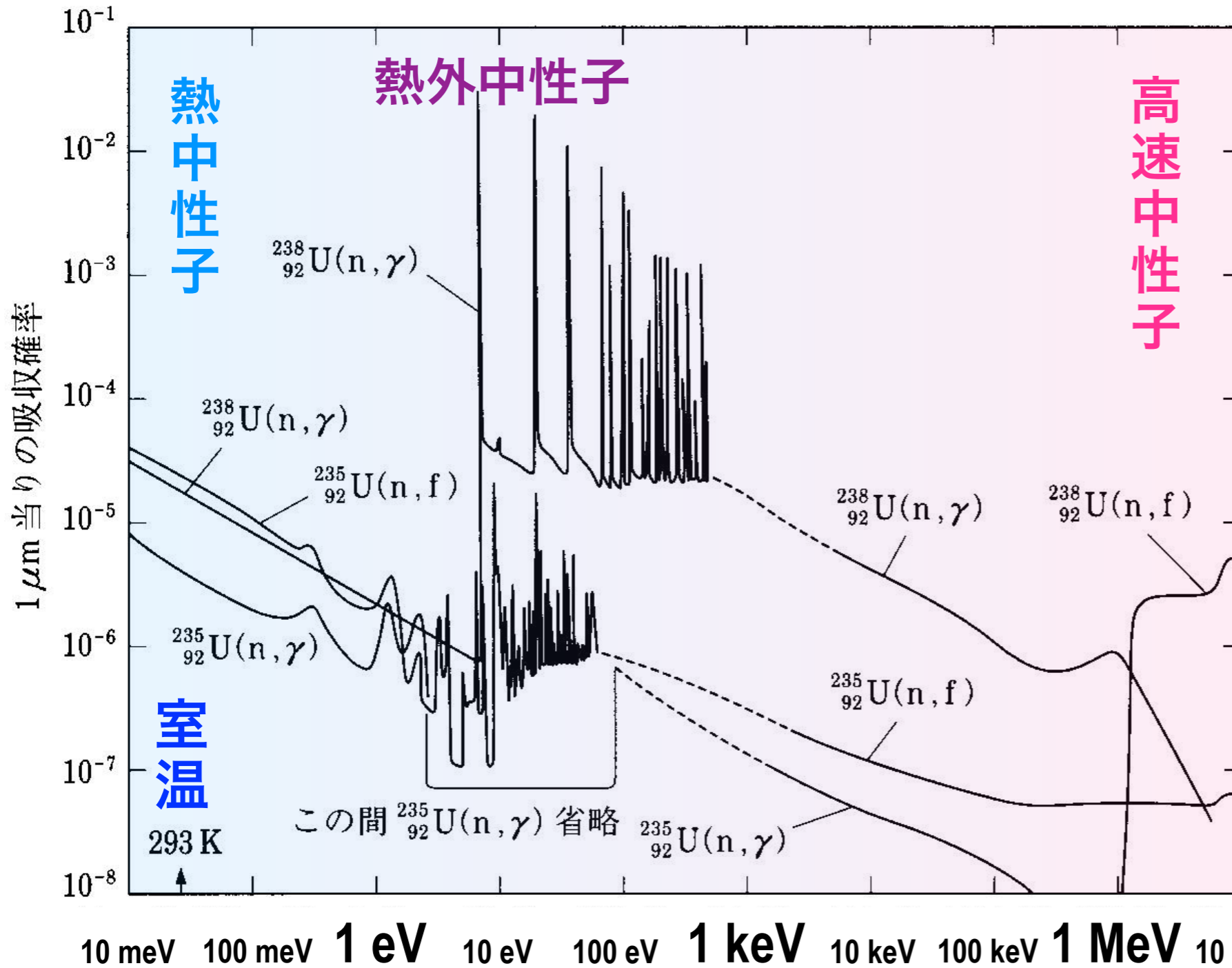
高速中性子



中性子 + ウラン 235 / 238

中性子の吸収断面積 (吸収確率)

即発中性子のエネルギースペクトル



$E_n < 1 \text{ eV}$ では

$$\sigma \left[{}^{235}\text{U}(n, f) \right] \propto \frac{1}{v_n}$$

... 中性子が原子核内を
ゆっくり通り過ぎると反
応が起きやすい



粒子の運動エネルギーとして放出

熱中性子

減速

高速中性子

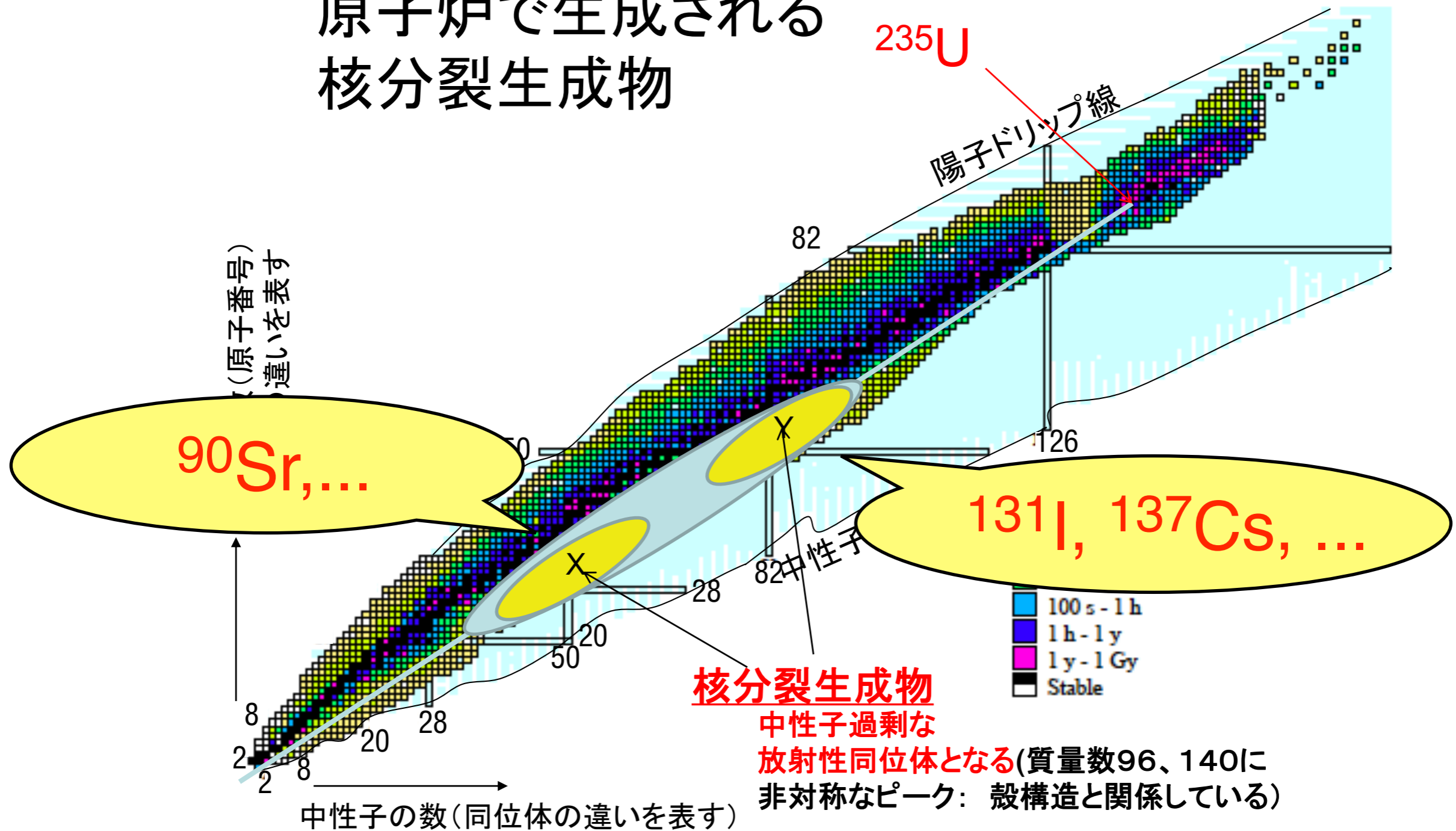
核分裂

Nuclear fission

原子核物理学

Nuclear Physics

原子炉で生成される
核分裂生成物



Nuclear Chart 核図表

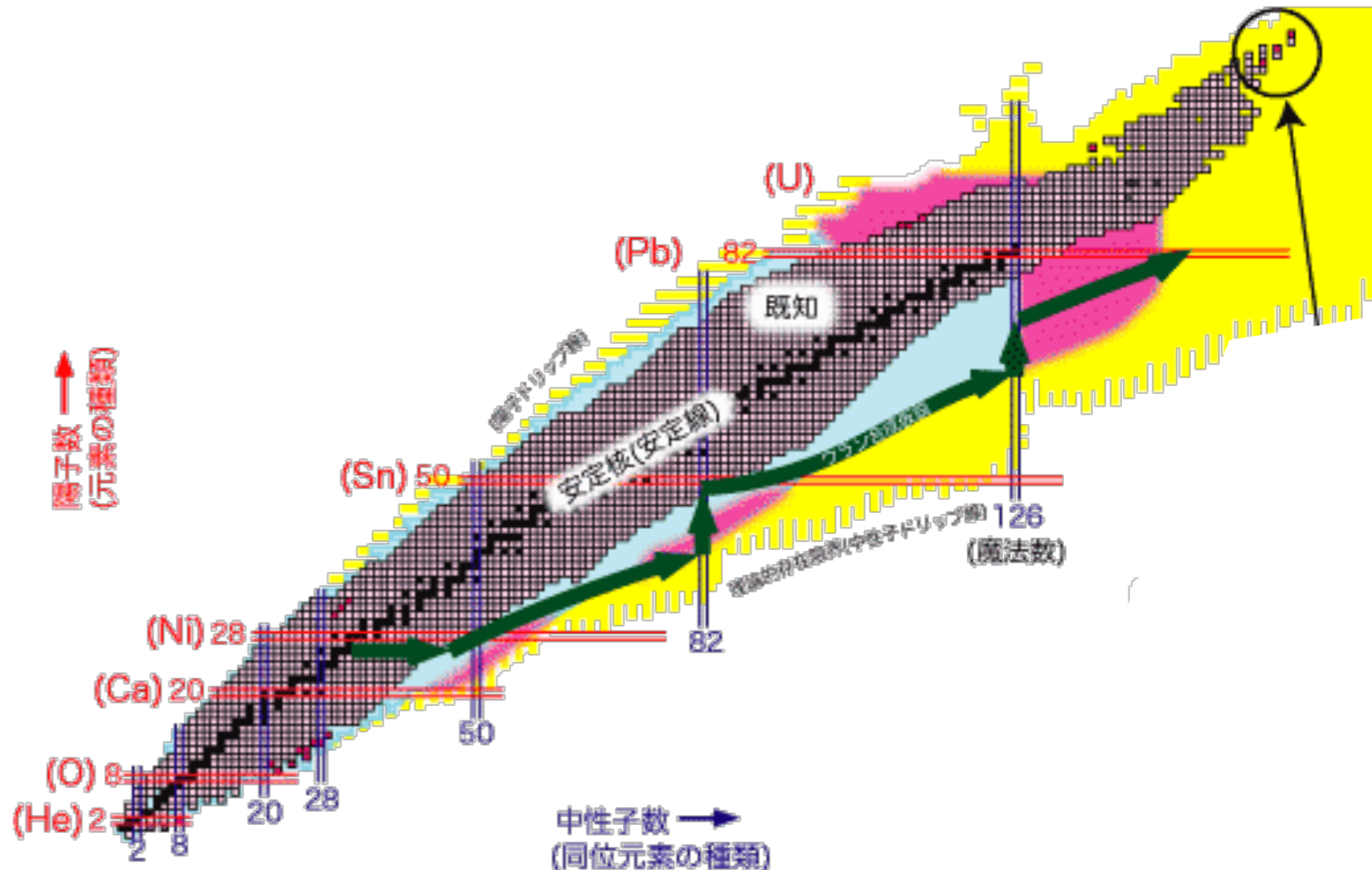
$${}_{92}^{235}\text{U} \quad (235 - 92) / 92 = 1.55$$

stable ${}_{55}^{133}\text{Cs} \quad (133 - 55) / 55 = 1.42$

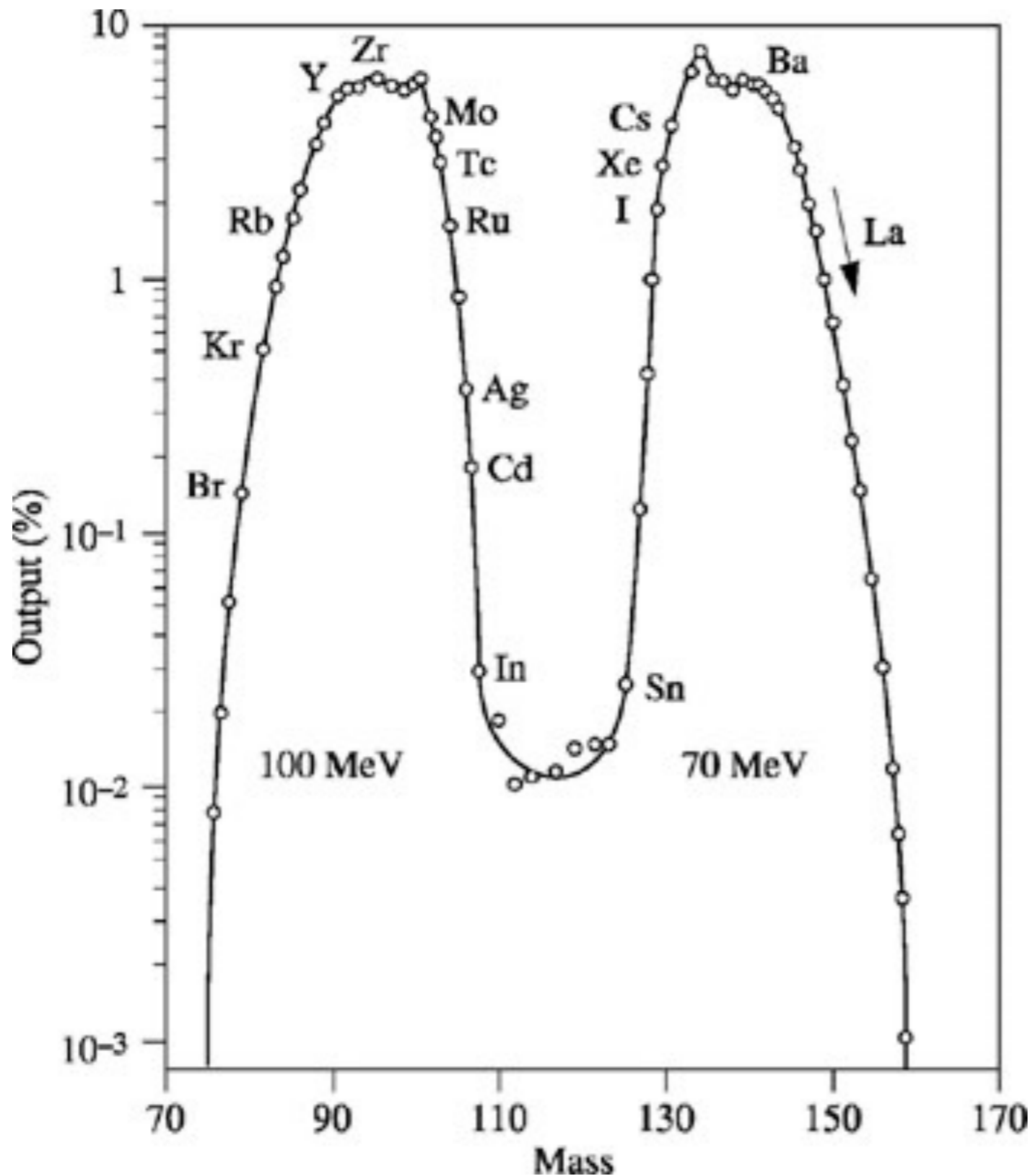
84, 86, 87, 88
stable ${}_{38}\text{Sr} \quad ((84-88) - 38) / 38 = 1.21-1.32$

radioactive ${}_{55}^{137}\text{Cs}$

radioactive ${}_{38}\text{Sr}$



生成率 [%] (対数目盛り)



核分裂生成物

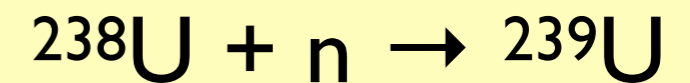
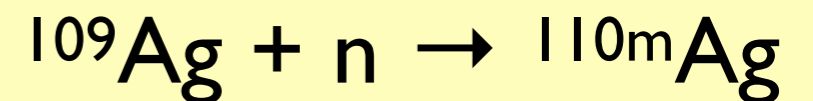
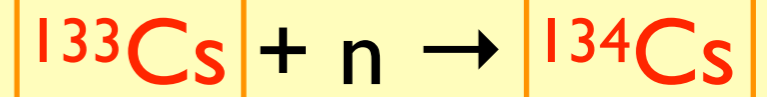
fission products

非対称分裂

放射化生成物

activation products

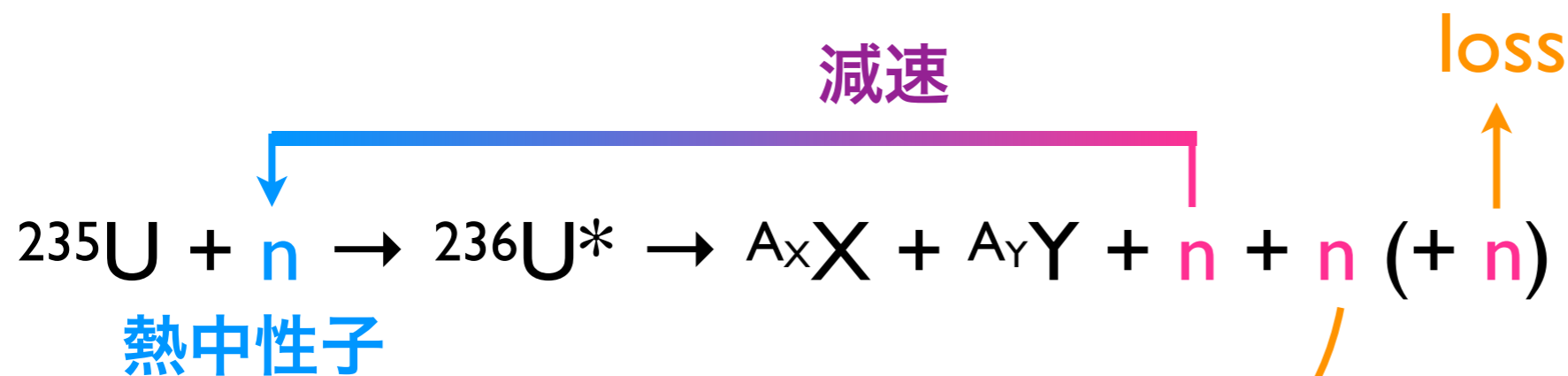
中性子捕獲反応



半減期が数日～数十年のものが特に問題。揮発性・水溶性のものほどより遠くまで運ばれる。稀ガスはあまり気にしないでいい(雲散霧消)。

核分裂生成物 ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{85}Kr , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{99}Mo

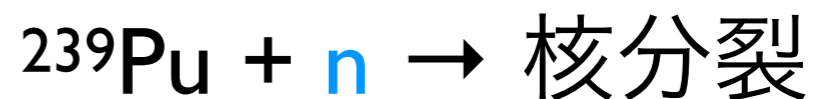
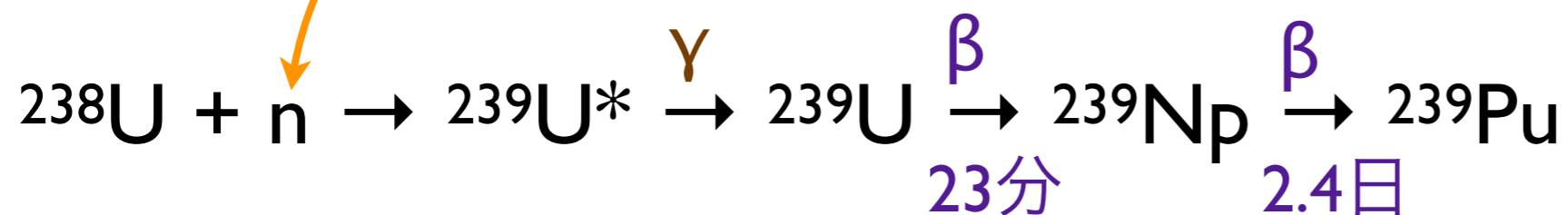
ウランの核分裂と超ウラン元素の生成



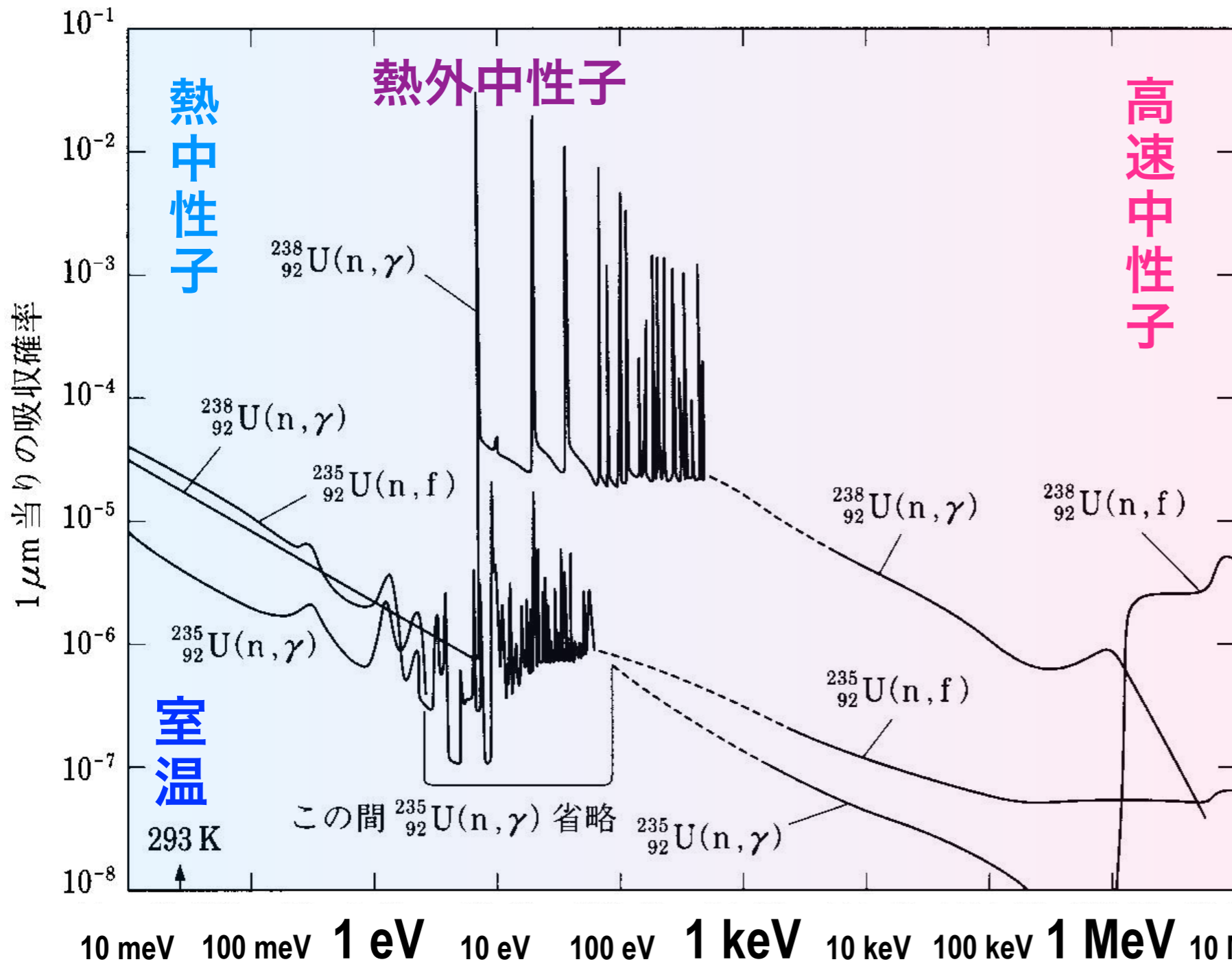
^{235}U : 0.72%, 半減期 7.03億年

^{238}U : 99.3%, 半減期 44.6億年

👉 ^{235}U 濃縮燃料を使う



中性子の吸収断面積 (吸収確率)



f : fission 核分裂
(n,f) と記述

$E_n < 1 \text{ eV}$ では

$$\sigma \left[{}^{235}\text{U}(n, f) \right] \propto \frac{1}{v_n}$$

... 中性子が原子核内を
ゆっくり通り過ぎると反
応が起きやすい

1 eV ~ 1 keV での ²³⁸U による吸収ピークを避けるため、燃料棒は格子状に入れ、間の減速材で一気に熱中性子まで冷えるように設計されている。

^{235}U の核分裂によるエネルギーの内訳

	放出 エネルギー	回収可能 エネルギー
核分裂片の運動エネルギー	168 MeV	168 MeV
核分裂中性子の運動エネルギー (2~3個)	5 MeV	5 MeV
即発 γ 線 (約5本)	7 MeV	7 MeV
核分裂生成物の崩壊		
β 線 (約7本) のエネルギー	8 MeV	8 MeV
γ 線 (約7本) のエネルギー	7 MeV	7 MeV
ニュートリノが持ち出すエネルギー	12 MeV	—
捕獲 γ 線 (^{235}U 以外の中性子吸収)	—	3~12 MeV
合計	207 MeV	198~207 MeV

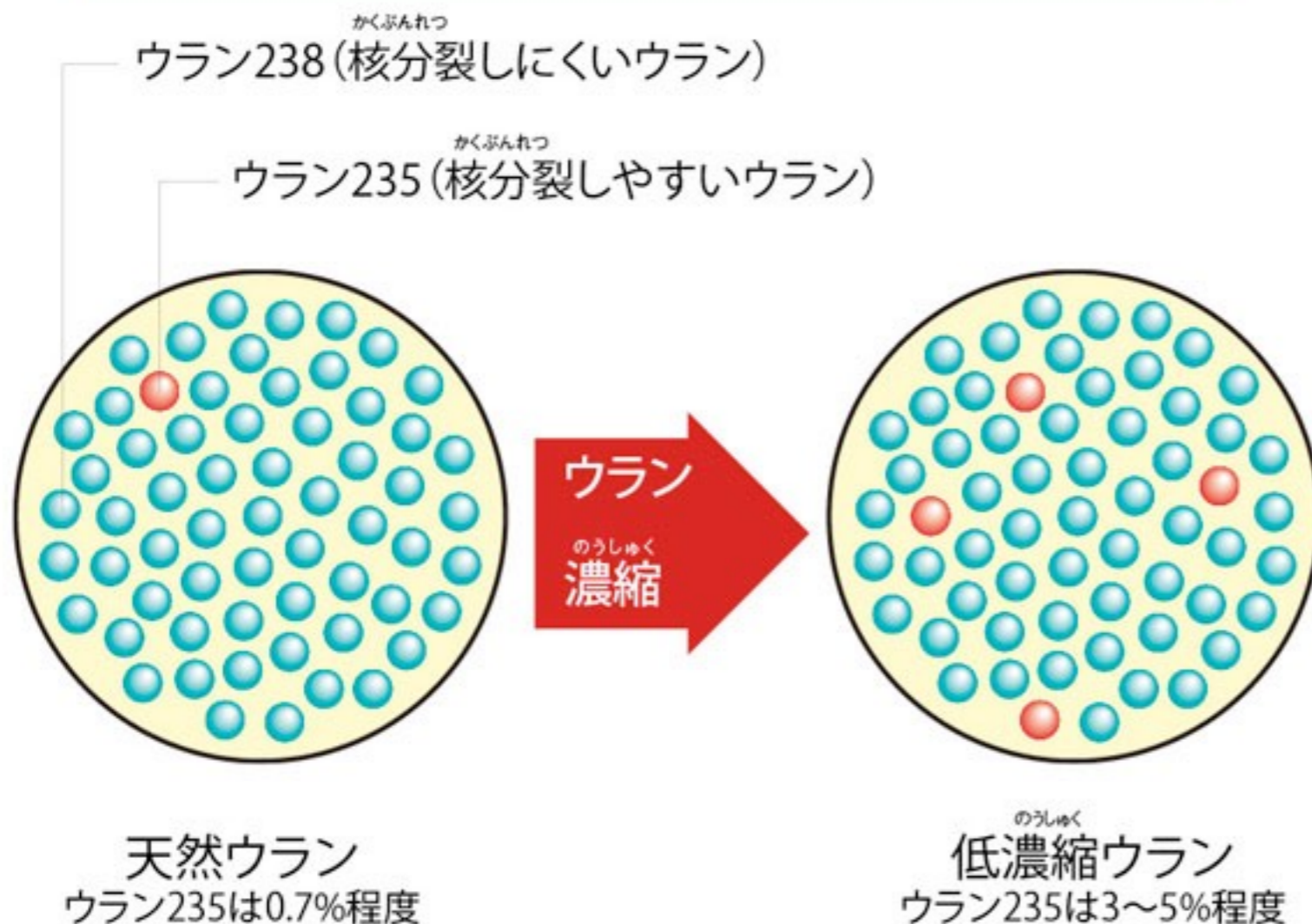
原子力工学

原子力発電のしくみ

《 ウランの濃縮 のうしゆく 》

天然のウラン鉱石にはウラン238が99.3%とウラン235が0.7%の割合でふくまれています。
天然ウランのままでは、原子力発電所で使う燃料としてウラン235の割合が低すぎるので、
これを3~5%程度になるよう濃度 のうど を高めます。これを「ウランの濃縮 のうしゆく」といいます。

天然ウランと低濃縮ウランのちがい のうしゆく



同位体分離技術

- ☀ ガス拡散法
 - ☀ 遠心分離
 - ☀ レーザー法
 - ☀ ノズル法、
 - ☀ 化学法 (イオン交換法)
- UF₆ (気体)

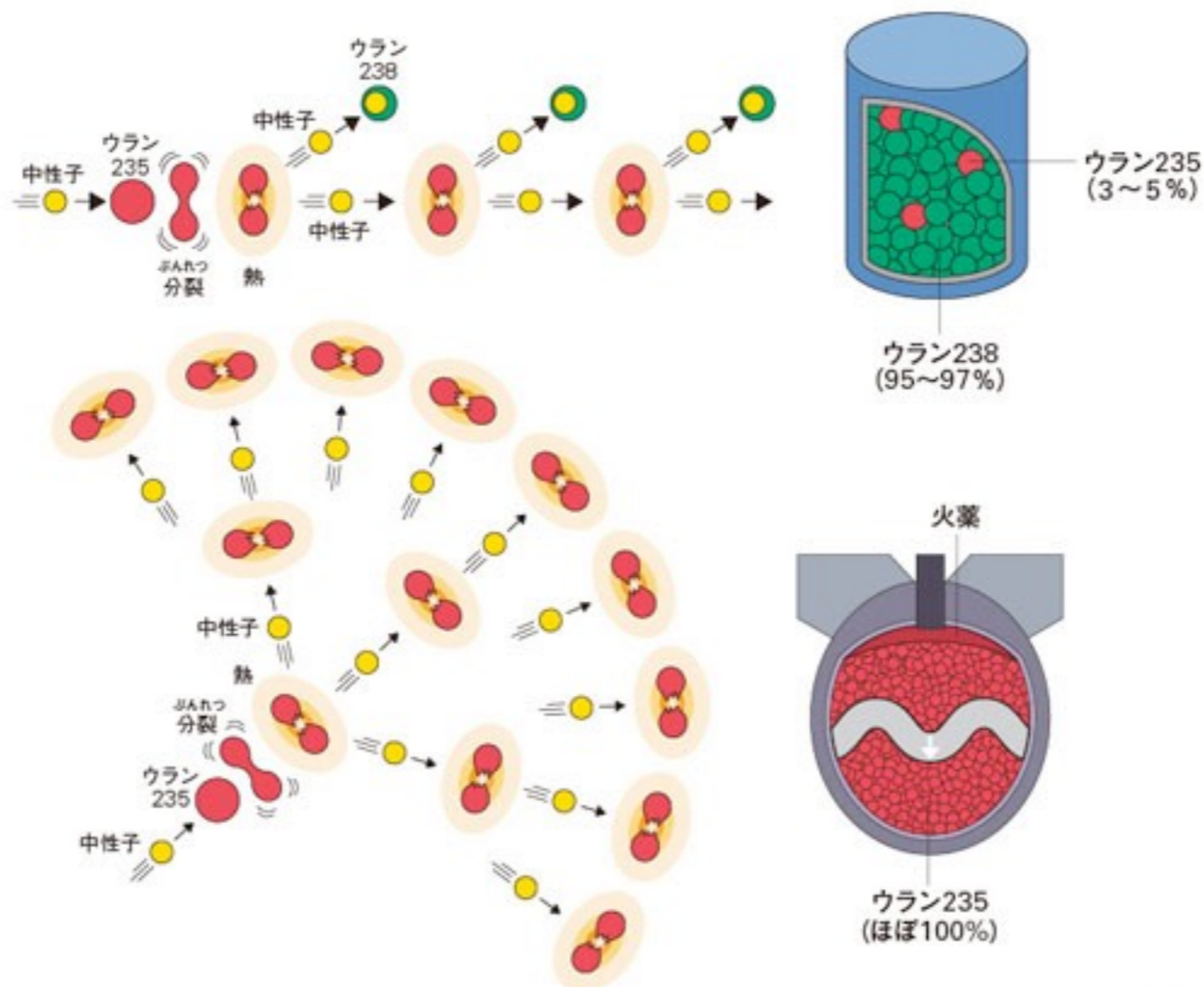
(原子力教育支援情報提供サイト「あとみん」より図表を借用。)

出所: チャレンジ! 原子力ワールド (以下のページも。)

《 原子力発電と原子爆弾の違い 》

原子力
発電

原子
爆弾



連鎖反応
臨界

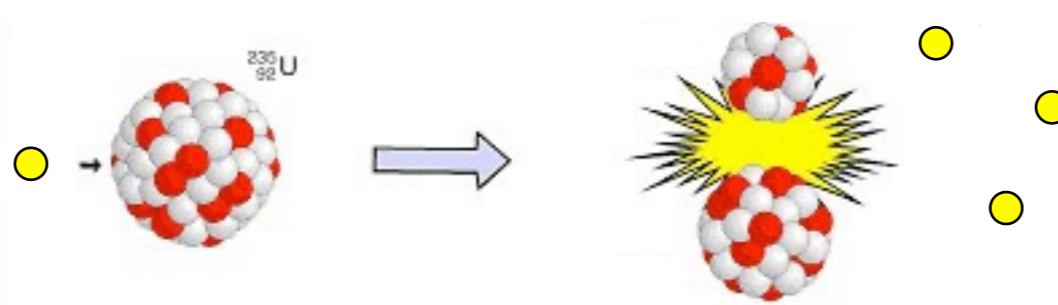
低濃縮ウラン
235U : 3~5%

高濃縮ウラン
235U : ~100%

連鎖反応
爆発

ちがう点	原子力発電	原子爆弾
ウラン235の割合	3~5%	ほぼ100%
かくふんれつ核分裂のしかた	かくふんれつウランを少しずつ核分裂させます。	いっしゆん かくふんれつ 一瞬のうちにほとんどのウランを核分裂させます。
調節のしかた	せいぎよ かくふんれつへいさ 制御機能を持ち、安定した核分裂連鎖反応となるように調節します。	かくふんれつへいさ せいぎよ 核分裂連鎖反応を制御する装置がありません。

臨界の制御



粒子の運動エネルギーとして放出

熱中性子

減速

高速中性子

制御棒：熱中性子の吸収断面積が大きい元素 (B, Cd)

遅発中性子

1% 未満だが、遅れて出る中性子がある。原子炉の制御に重要な役割。

55秒の遅れ：制御に現実的な時間的余裕を与える。



反応度係数が負

(沸騰水型原子炉)

温度上昇 \Rightarrow 蒸気の泡 (ボイド) が増える \Rightarrow 中性子減速が弱まる \Rightarrow 核分裂が減る \Rightarrow 温度が下がる。

燃料集合体の温度上昇 \Rightarrow ドップラー効果によりウラン238の中性子吸収確率が増加 \Rightarrow 核分裂が減る。

中性子毒：原子炉内で ${}^{135}\text{Xe} + n \rightarrow {}^{136}\text{Xe}$ (中性子捕獲反応)



反応断面積 (反応確率) が桁違いに大きい

中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら安定核までたどり着く。

$$1.01 \times 1.01 \times 1.01 \dots \times 1.01 = 1.01^{70} = 2.0$$

$$2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 16 \rightarrow 32 \rightarrow \dots \rightarrow \infty$$

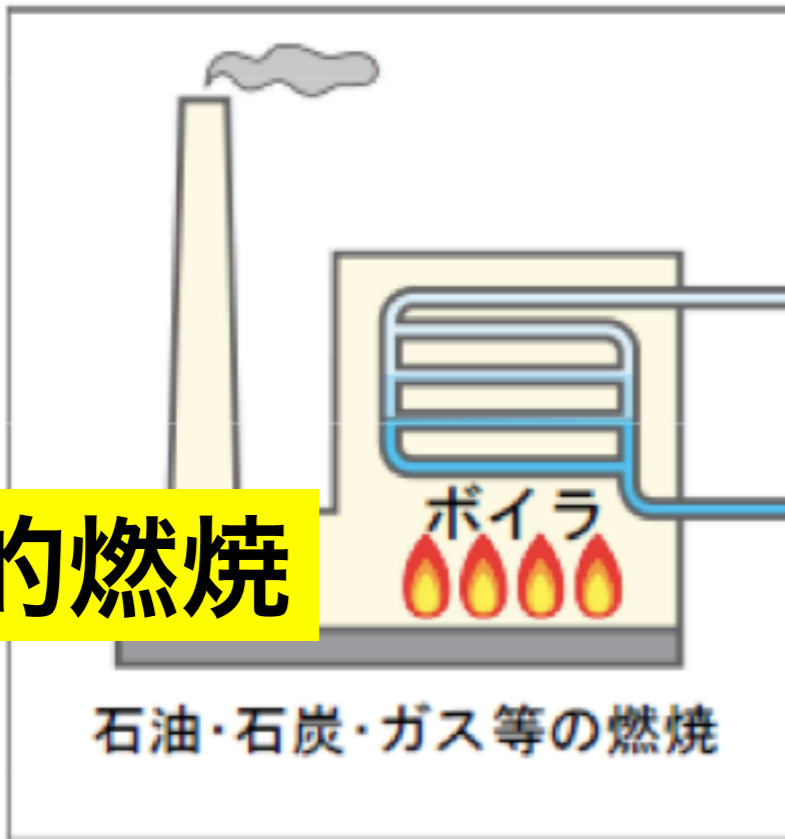
$$0.99 \times 0.99 \times 0.99 \dots \times 0.99 = 0.99^{70} = 0.5$$

$$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{4} \rightarrow \frac{1}{8} \rightarrow \frac{1}{16} \rightarrow \frac{1}{32} \rightarrow \dots \rightarrow 0$$

火力発電と原子力発電の違い

火力

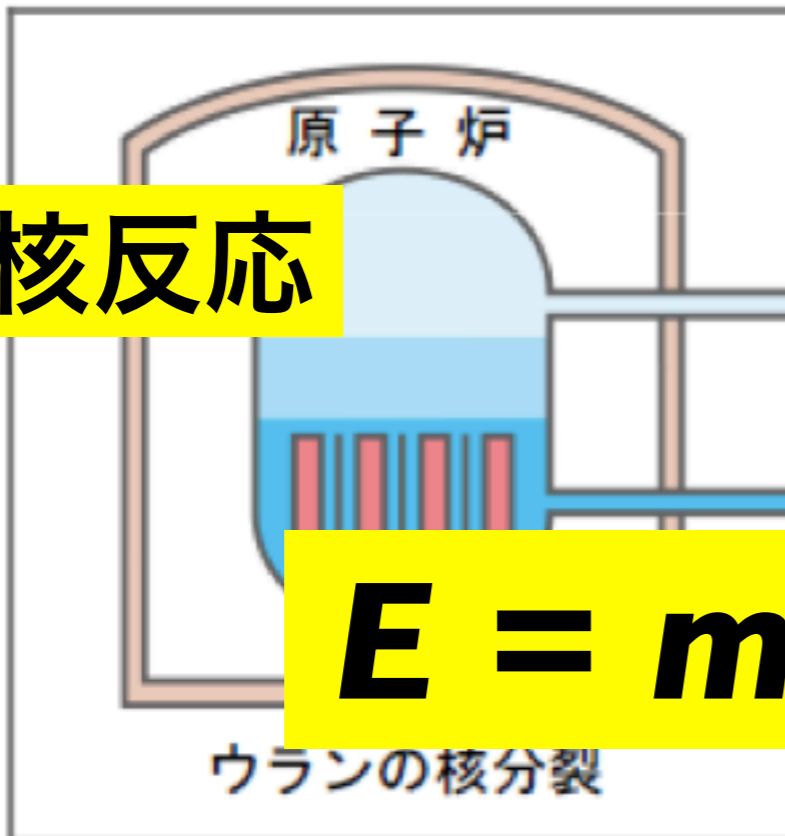
化学的燃焼



原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$



蒸気

水

蒸気

給水ポンプ

タービン

復水器

循環水ポンプ

変圧器

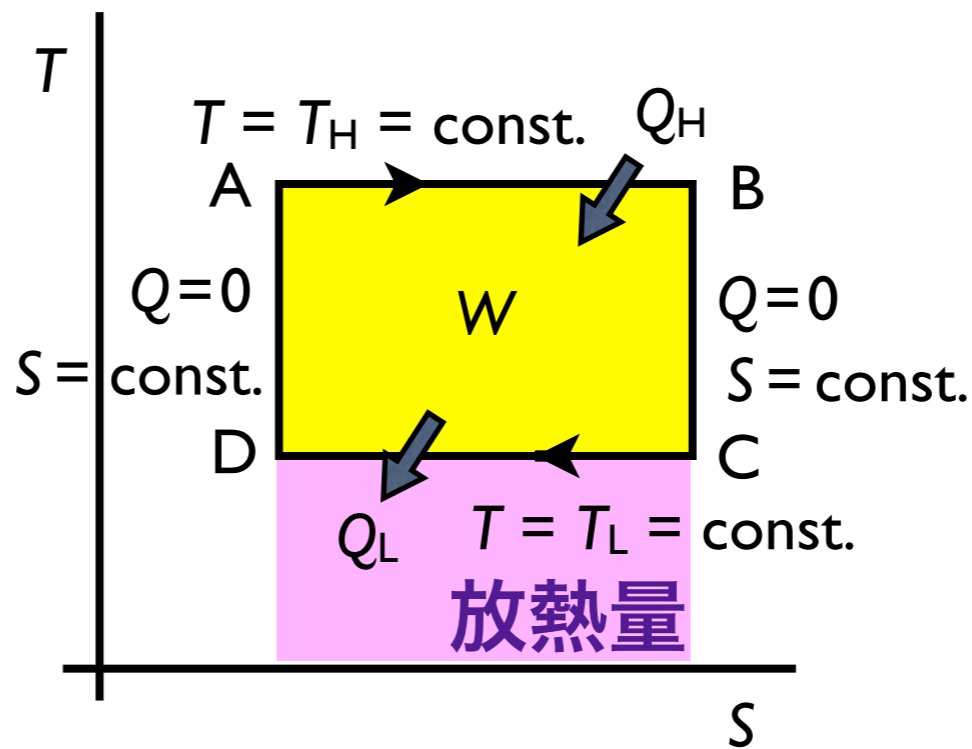
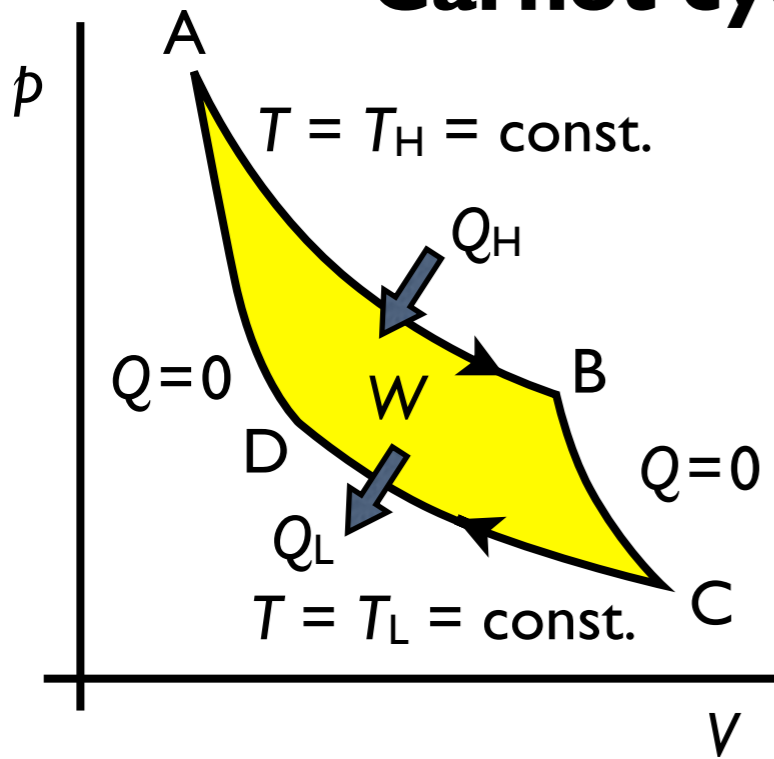
発電機

→ 放水路へ

← 冷却水(海水)



Carnot cycle



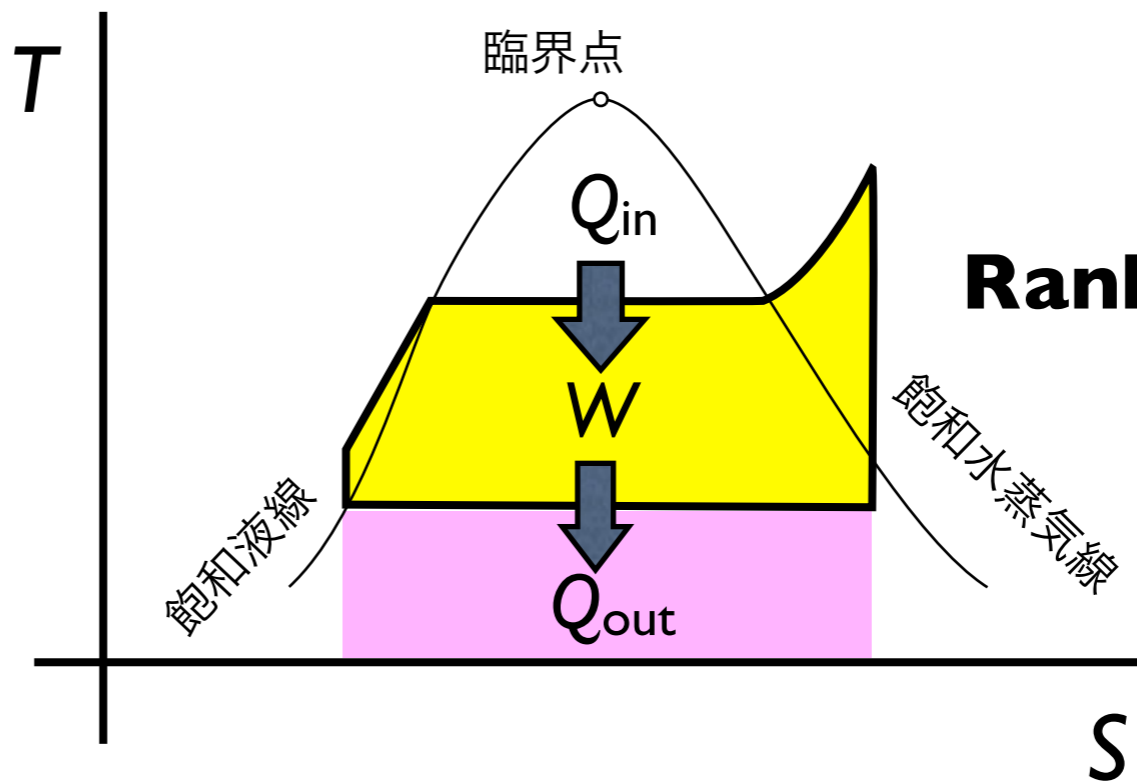
$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Entropy
エントロピー

カルノーサイクル

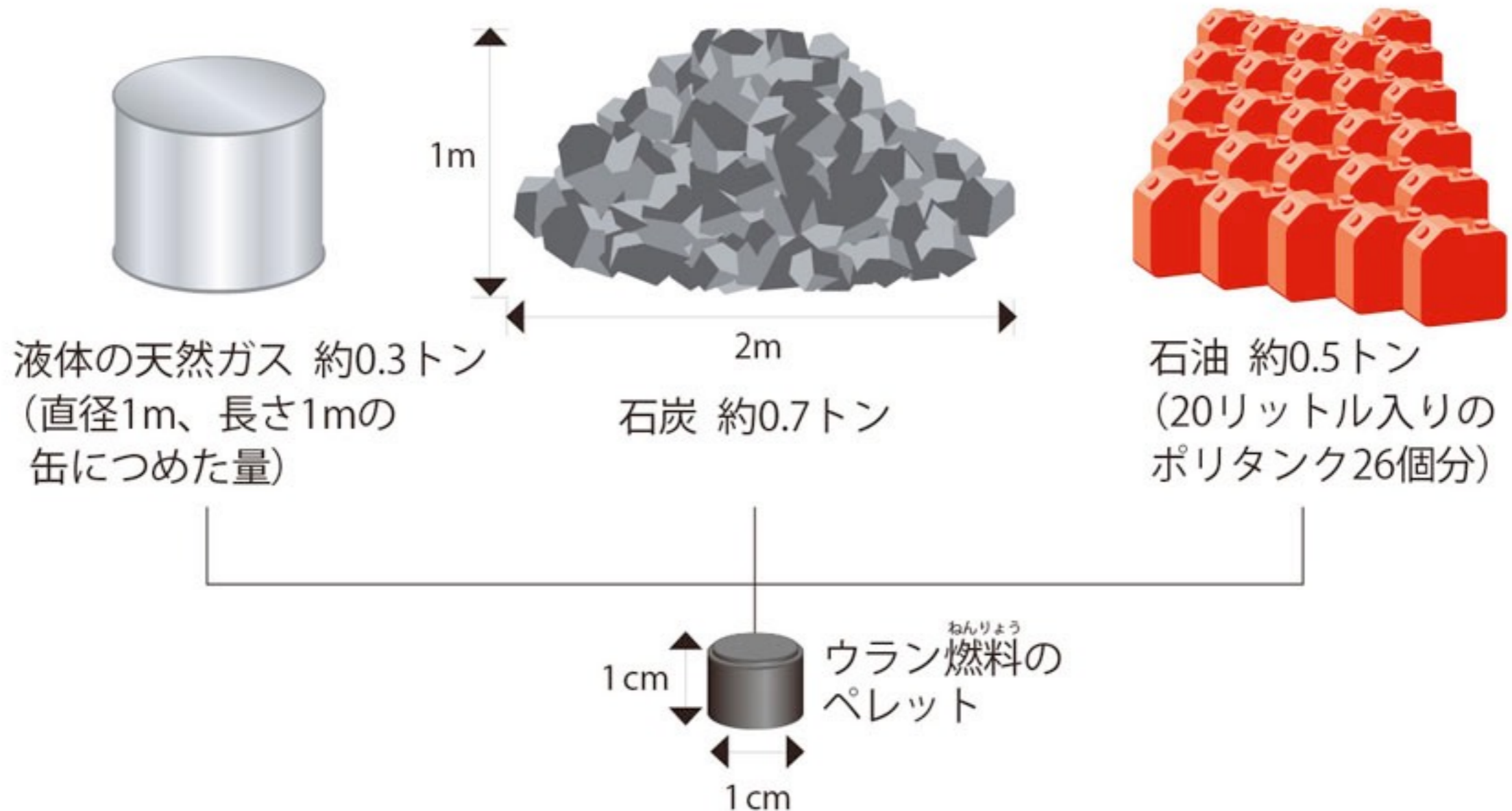
$$dQ = T dS$$

蒸気機関 ランキンサイクルの T-S 線図



Rankine cycle

《 エネルギー源の比較(原子力発電と火力発電) 》



液体の天然ガス 約0.3トン
(直径1m、長さ1mの
缶につめた量)

1m

2m

石炭 約0.7トン

石油 約0.5トン
(20リットル入りの
ポリタンク26個分)

1cm

ウラン^{ねんりょう}燃料の
ペレット

1cm

原子力発電のエネルギー源であるウラン燃料は、直径1cm、高さ1cmのペレットに焼き固めて使います。このペレット1個で一般の家庭で使う8~9か月分の電力(2,600kWh)を発電できます。これは天然ガスで約0.3トン、石炭で約0.7トン、石油で約0.5トンを燃やして発電できる電力量に相当します。

原子炉	燃料	減速材*	冷却材*
軽水炉	濃縮ウラン	軽水 (H ₂ O)	軽水 (H ₂ O)
重水炉	天然ウラン 微濃縮ウラン プルトニウム	重水 (D ₂ O)	軽水 (H ₂ O) 重水 (D ₂ O)
黒鉛炉	濃縮ウラン	黒鉛 (グラファイト)	軽水 (H ₂ O)
ガス炉	天然ウラン 濃縮ウラン トリウム	黒鉛 (グラファイト)	二酸化炭素 ヘリウム

運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒* (炭化ホウ素、カドミウム合金)、ホウ酸水



(*) 放射化しにくい物質

原子炉	原子炉施設
軽水炉	日本の原子力発電所（沸騰水型／加圧水型）
重水炉	新型転換炉の原型炉「ふげん」 カナダの原子力発電所 CANDU
黒鉛炉	チェルノブイリ原発（РБМК (RBMK) 型）
ガス炉	日本初の実用原子炉「東海発電所」 発電のほかにも化学工業など

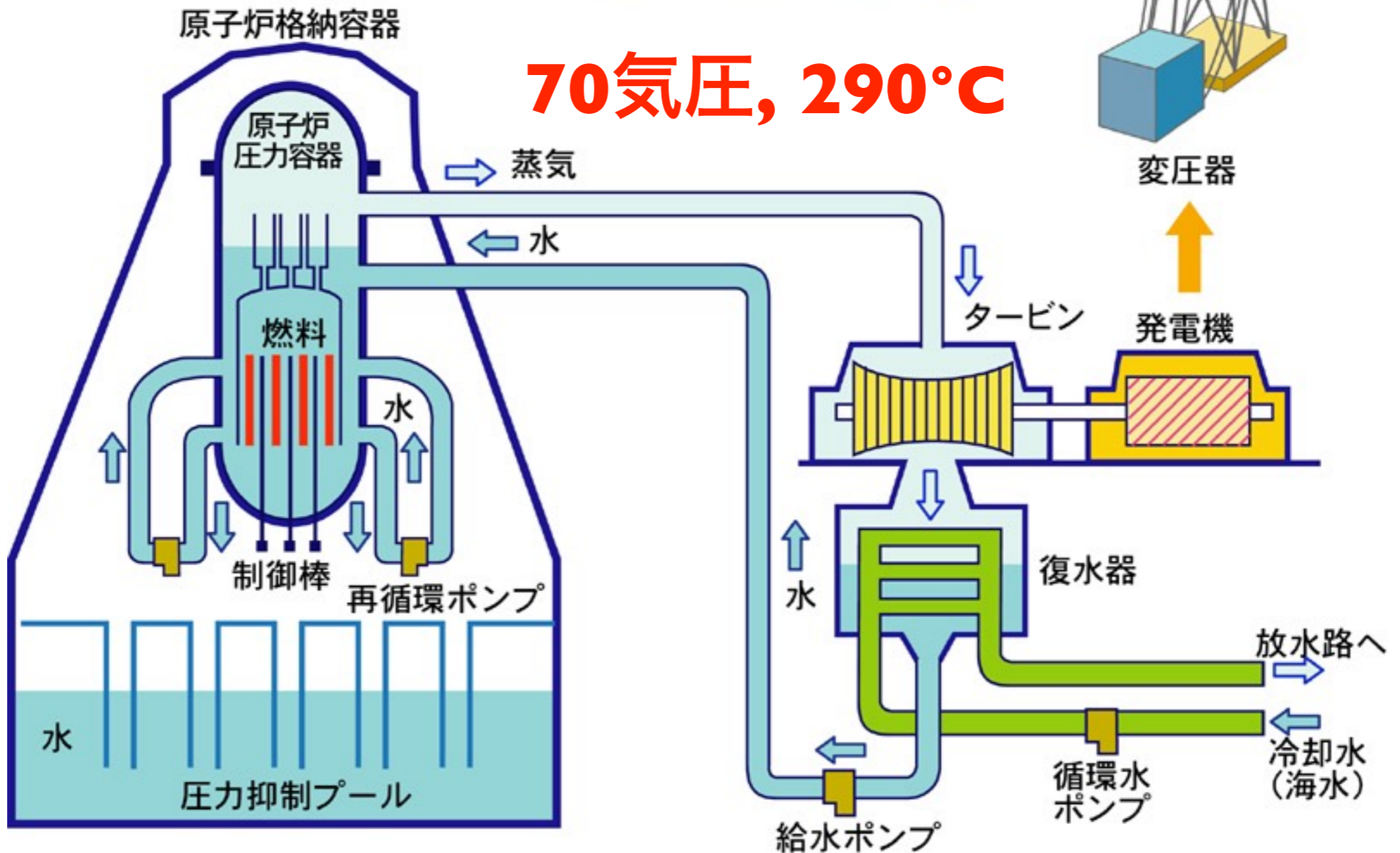
運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒（炭化ホウ素、カドミウム合金）、ホウ酸水



沸騰水型原子炉

BWR (Boiling Water Reactor)

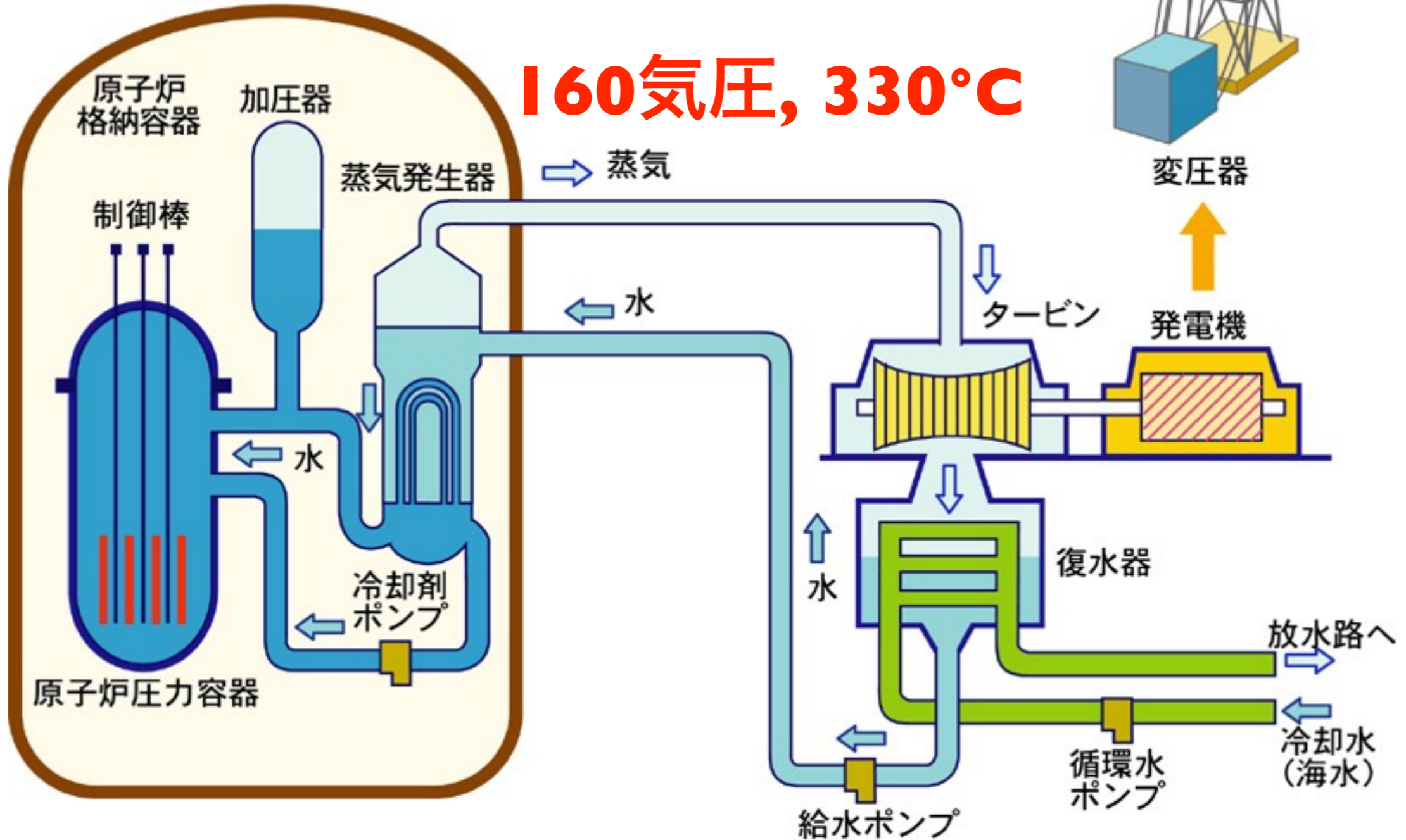


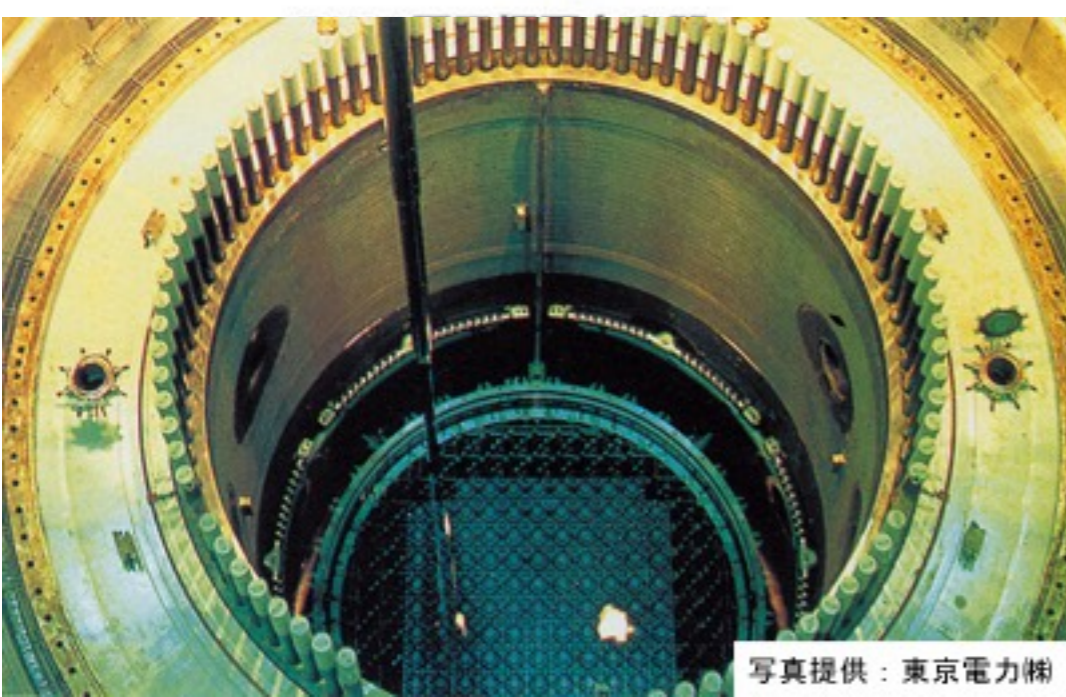
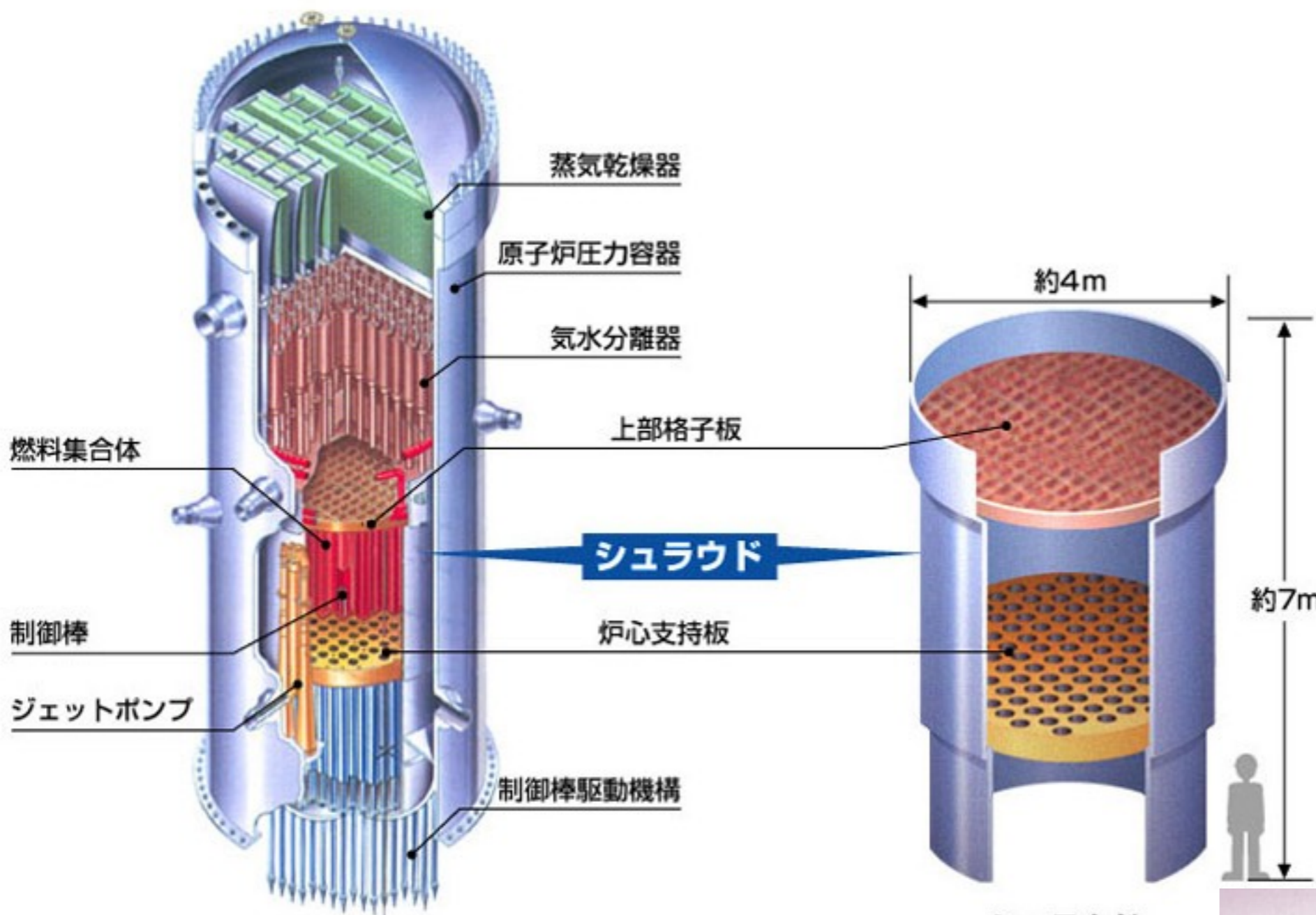
加圧水型原子炉

PWR (Pressurized Water Reactor)



160気圧, 330°C

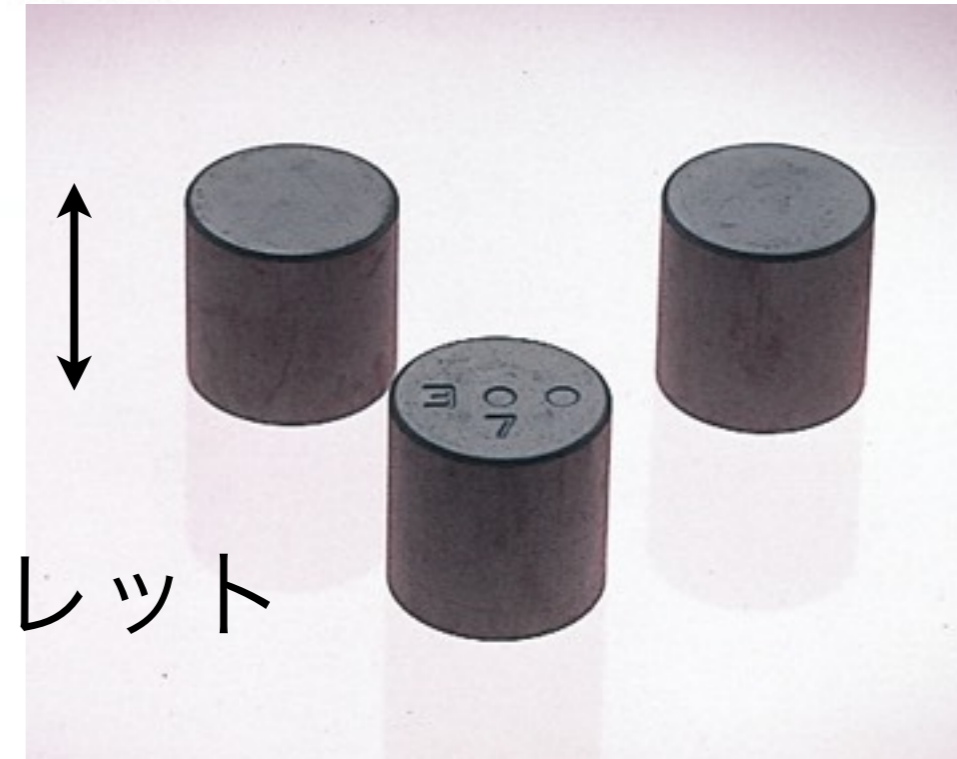




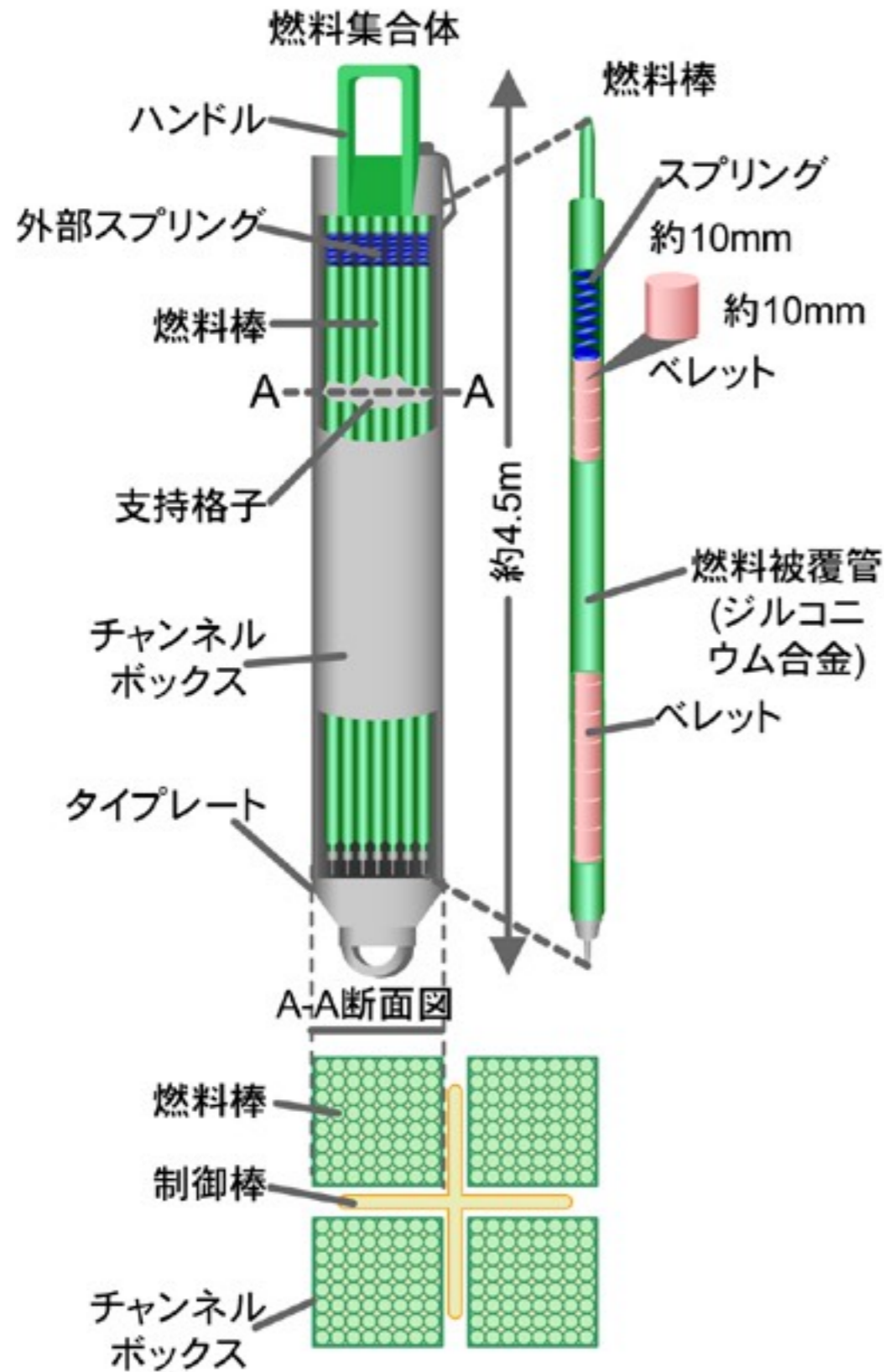
シュラウド

1 cm

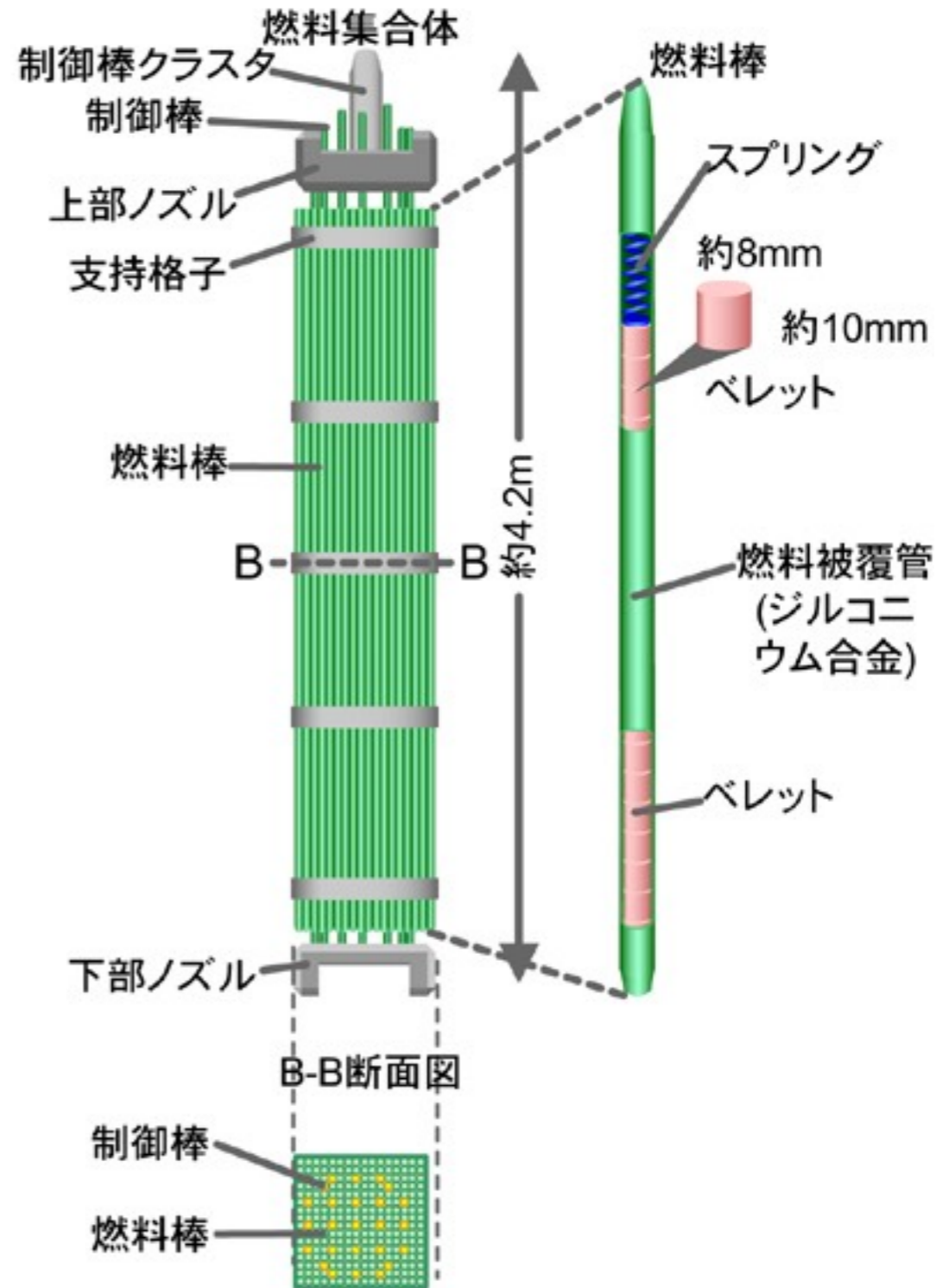
UO₂ ペレット



BWR



PWR



原子力事故

原子力事故

国際原子力事象評価尺度
(INES)

スリーマイル島原子力発電所事故 (1979)	レベル5
チェルノブイリ原発事故 (1986)	レベル7
東海村 JCO 臨界事故 (1999)	レベル4
福島第一原発事故 (2011)	レベル7

国際原子力事象評価尺度

レベル7	深刻な事故	チェルノブイリ原発事故
6	大事故	
5	事業所外へリスクを伴う事故	スリーマイル島原発事故
4	事業所外への大きなリスクを伴わない事故	東海村臨界事故
3	重大な異常事象	
2	異常事象	
1	逸脱	

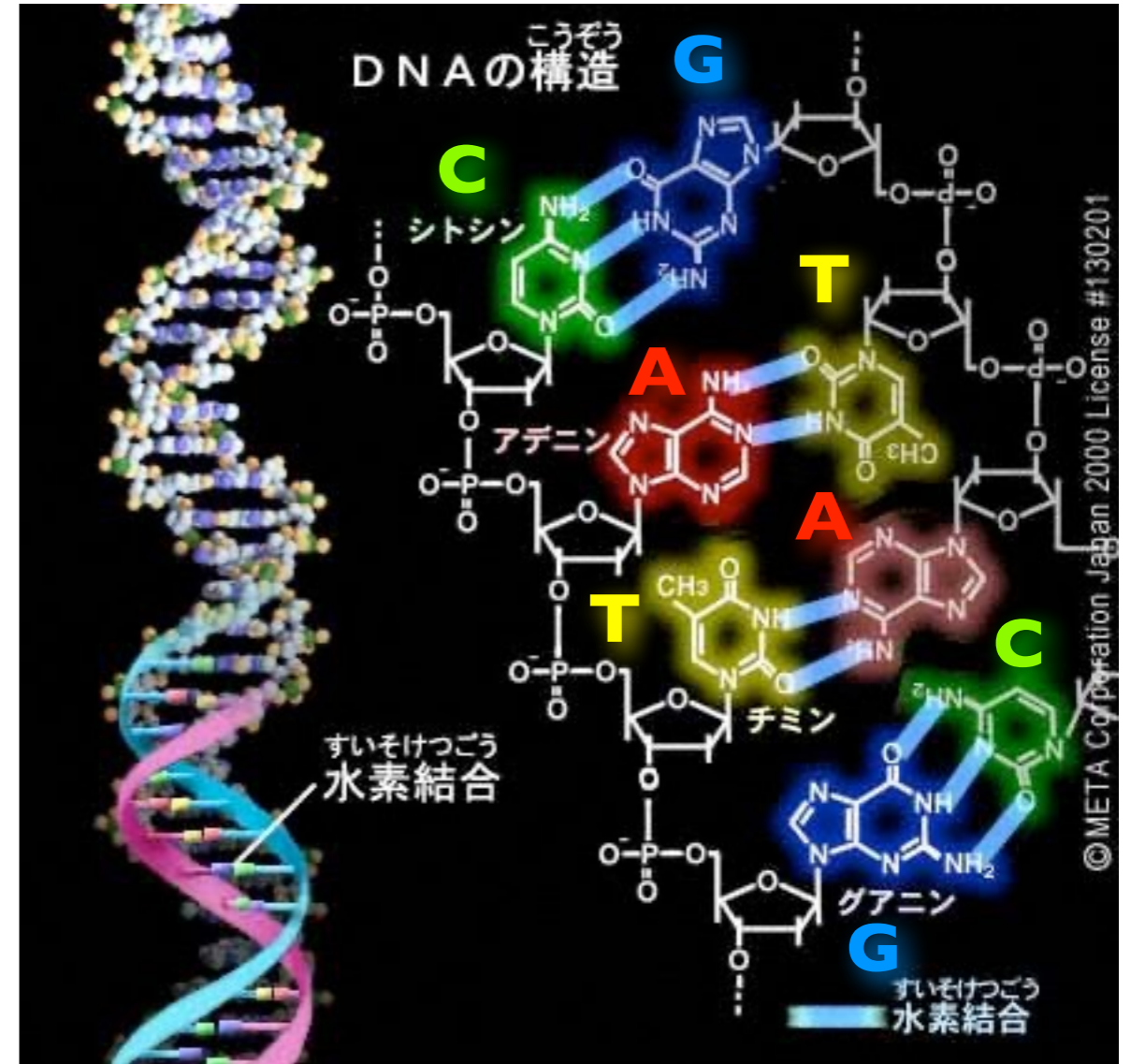
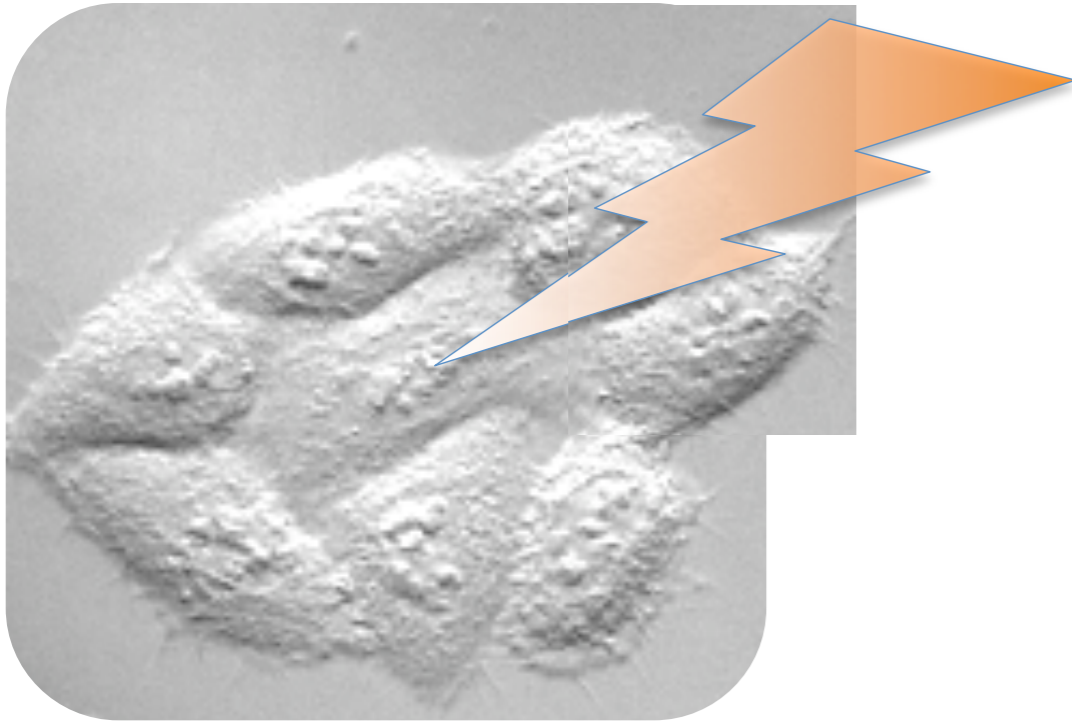
放射性物質の外部放出 (ヨウ素131等価)

- 7 : 数万テラベクレル相当以上
- 6 : 数千～数万テラベクレル相当
- 5 : 数百～数千テラベクレル相当

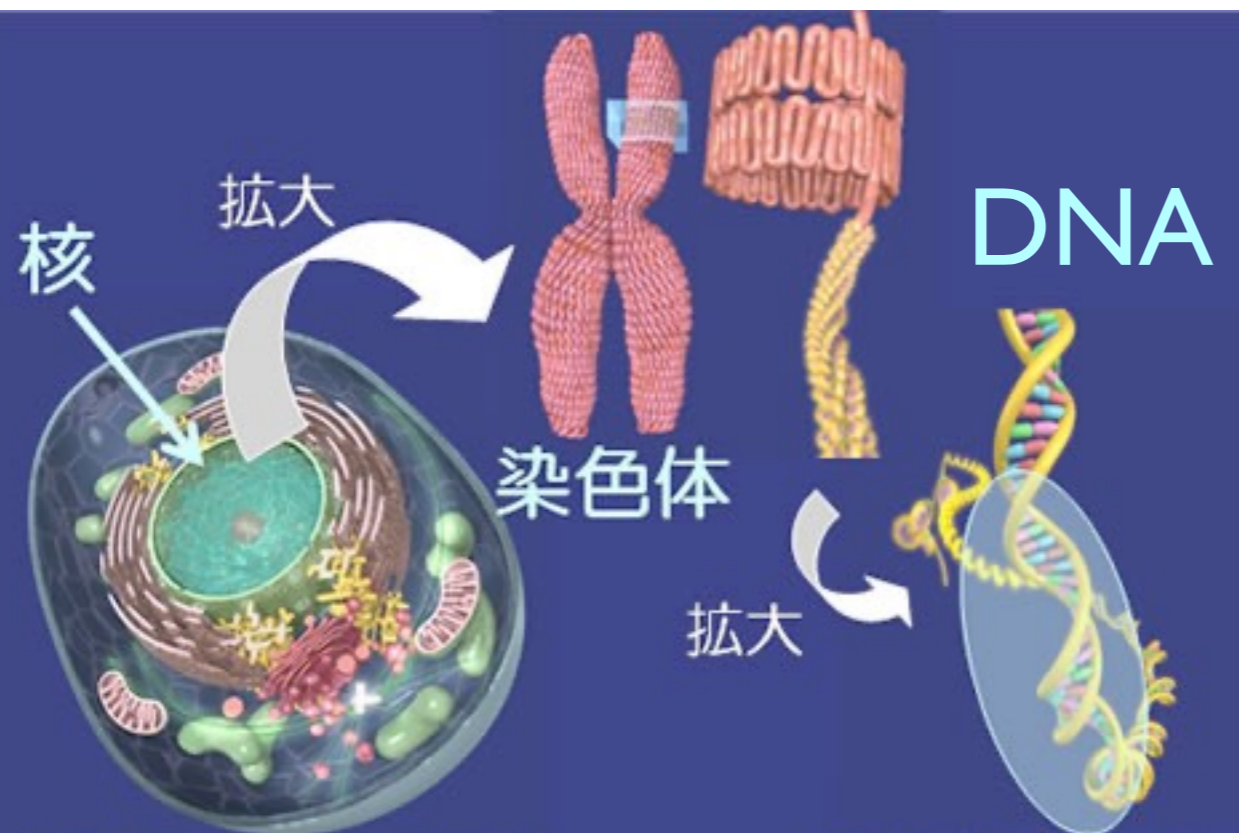
広島・長崎
第五福竜丸
スリーマイル
チェルノブイリ

細胞の核に放射線が照射

DNA



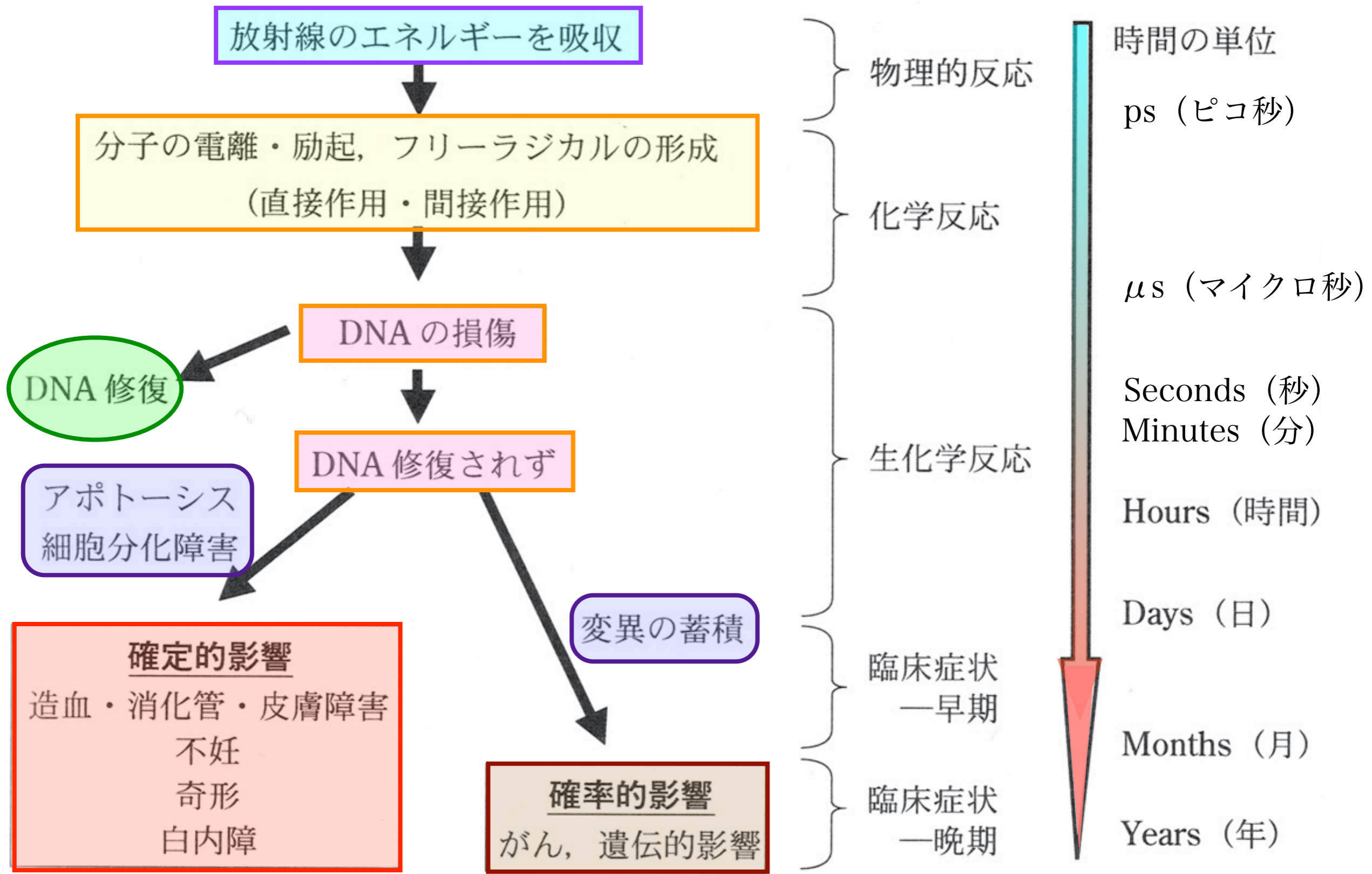
出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



細胞(60兆個)

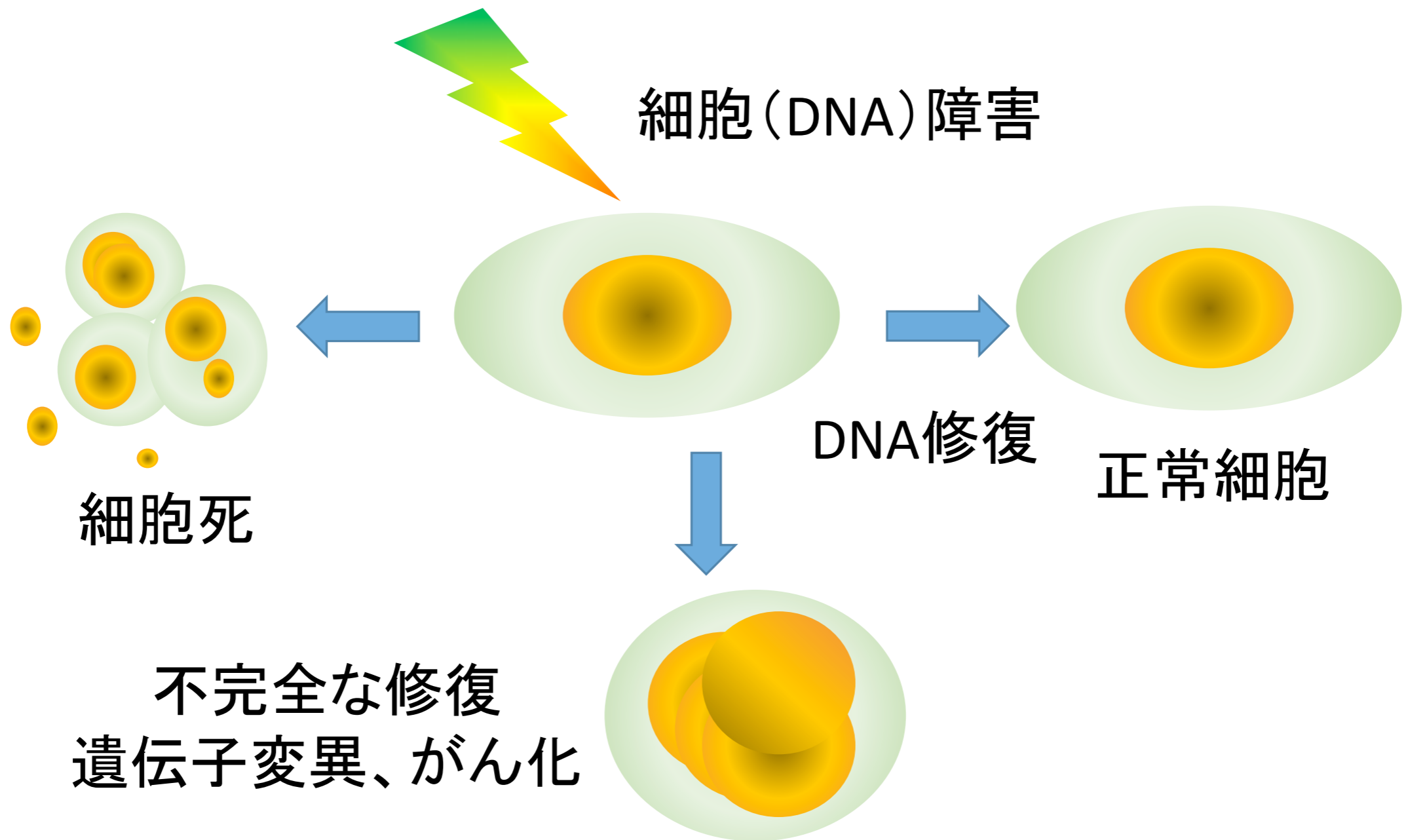
一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

細胞死とがん化

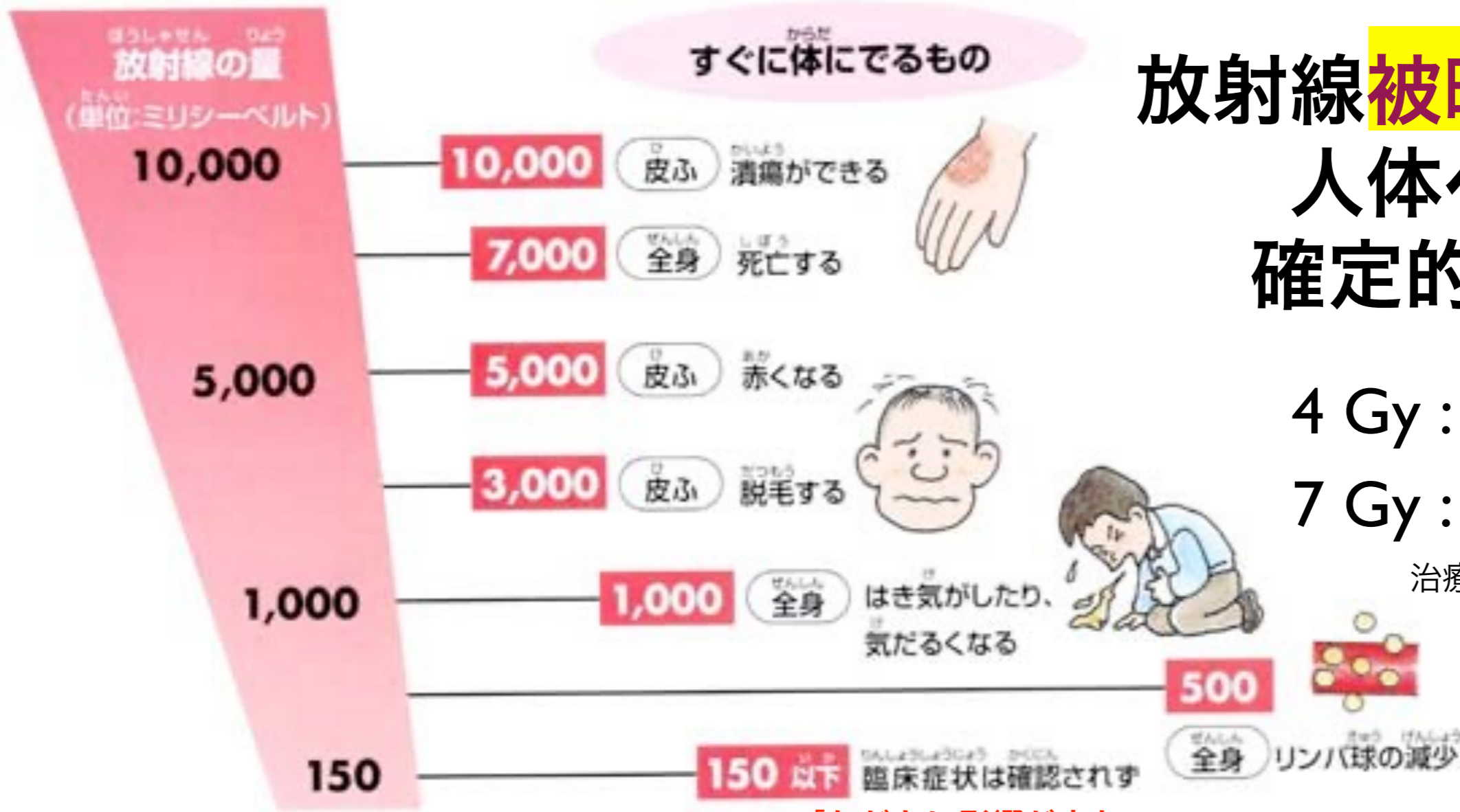


放射線被曝による 人体への 確定的影響

4 Gy : 半数死亡
7 Gy : 全員死亡

治療により助かることも。

すぐに体にできるもの



「ただちに影響が出ないレベル」

東海村 JCO 事故
チェルノブイリの
消防隊員

細胞再生系	造血組織				腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)	幹細胞 リンパ球 好中球 赤血球 血小板				腺窩 (幹細胞) 絨毛	基底細胞 (幹細胞) 角質層	幹細胞 精子	上皮 (幹細胞) 水晶体繊維 赤道部
正常な分化過程	4	4	4	4日	2日	2週間	3-4週間	1/2-3年
正常な成熟過程	1	7-10	7	100日	2日		7-8週間	
照射による変化	免疫能力低力	血液凝固時間延長	食作用低力	酸素輸送低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障

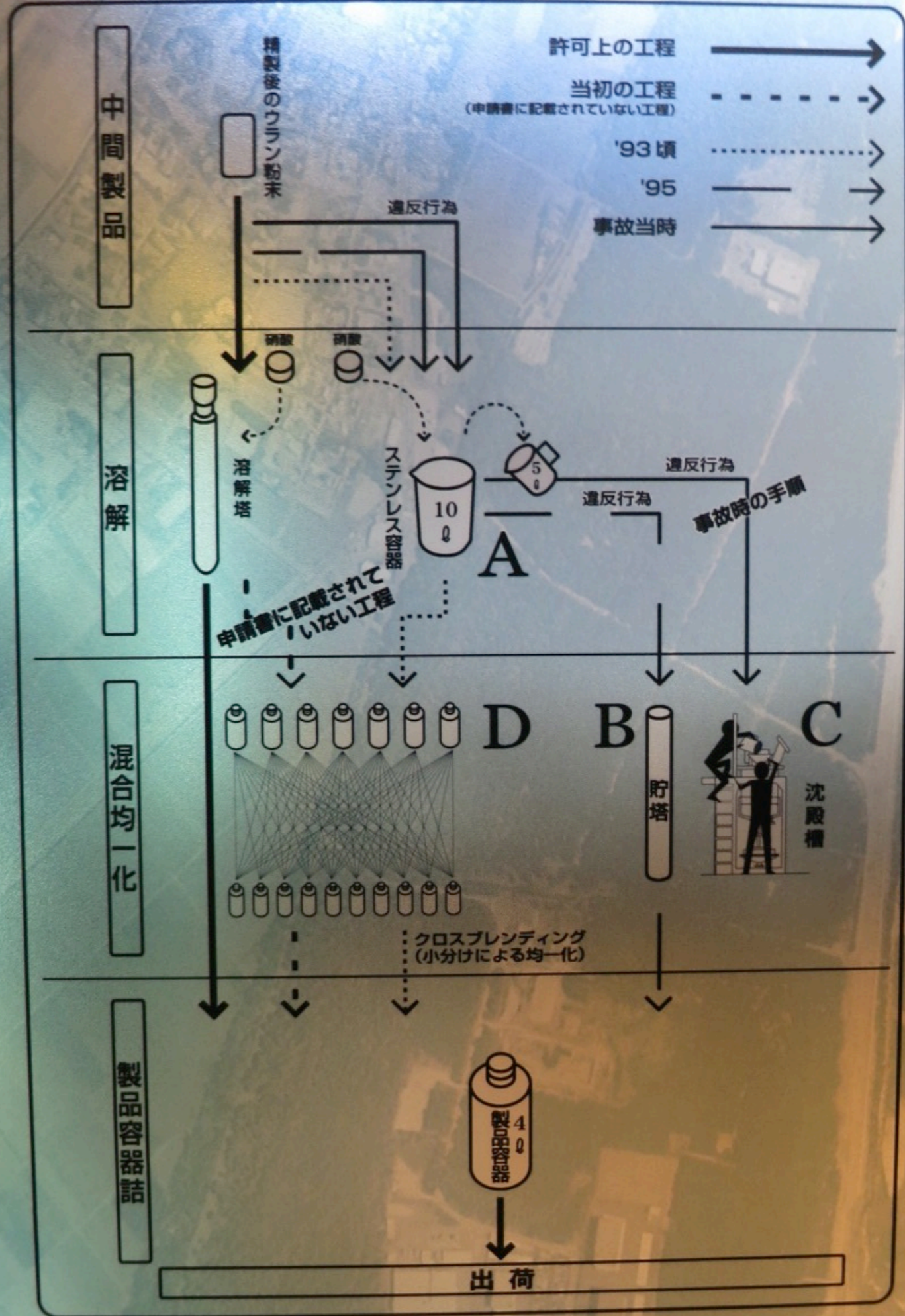
JCO 臨界事故

The JCO Criticality Accident

この事故は、株式会社ジェー・シー・オー (JCO) 東海事業所のウラン転換試験棟で発生した。当時、この建物では高速実験炉「常陽」の燃料原料となる濃縮度18.8%のウランを硝酸に溶かし、均一にする作業が行われていた。

この作業に使用すべきでない沈殿槽と呼ばれる設備に、制限量を大幅に上回るウラン溶液を投入した結果、内部でウランがひとりりてに核分裂し始めた。このような事態を「臨界事故」とよぶ。

その結果、核分裂連鎖反応による放射線（中性子線およびガンマ線）が敷地外にまで放出され、このような状態が約20時間にわたって継続した。事故の最初の瞬間には激しい核分裂が起こったため、沈殿槽を使って作業していた2名の方が亡くなるといういたましい結果となった。

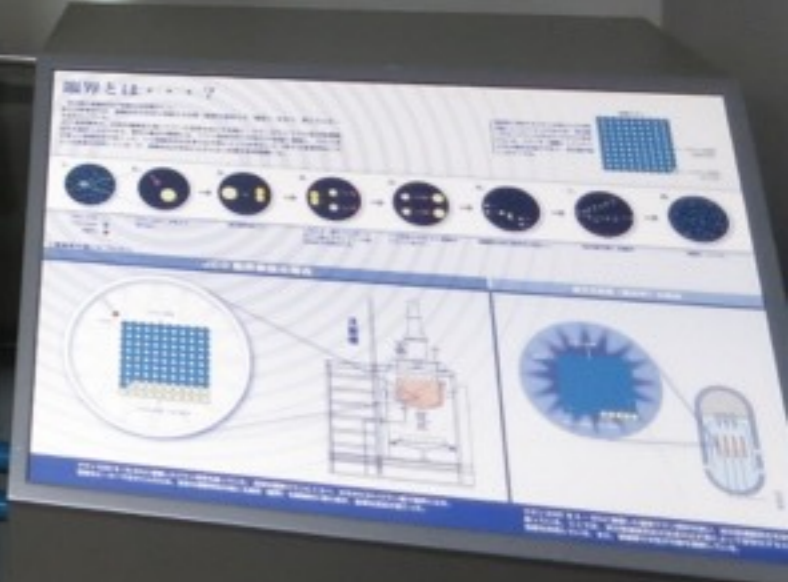




沈澱槽B



ウラン溶液をステンレス製ビーカーと
漏斗を使い、手作業で投入していった。



放射線被曝の確定的影響

線量閾値あり

細胞再生系	造血組織	腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
<p>幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)</p>	<p>幹細胞 リンパ球 粒球 好中性球 赤血球 球(血小板)</p>	<p>腺窩 (幹細胞) 絨毛</p>	<p>基底細胞 (幹細胞) 角質層</p>	<p>幹細胞 精子</p>	<p>上皮 (幹細胞) 水晶体繊維 赤道部</p>
正常な分化過程	4 4 4 4日	2日	2週間	3-4週間	1/2-3年
正常な成熟過程	1 7-10 7 100日	2日	2週間	7-8週間	
照射による変化	免疫能力低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障
	血液凝固時間延長				
	食作用低力				
	酸素輸送低力				

図1 細胞再生系

(造血組織、腸上皮、皮膚、精巣、水晶体の分化、成熟過程による変化)

[出典]吉井義一:放射線生物学概論[第2版](1922)

放射線の健康影響

確定的影響

放射線によって細胞や組織が障害される

線量の高いところで生じる（**閾値がある**）

重篤度が線量に依存する

急性：消化管障害、造血障害、不妊（生殖細胞）など

晩発性：白内障

確率的影響

放射線によって細胞の DNA に損傷が生じる

ほとんどは修復されるが、修復できなかった場合、他の発がんメカニズムと合わさって、長期間かかってがんが生じる可能性がある。

線量に応じて確率が増す（**閾値はないとする**）

線量と発症後の重篤度とは関連しない

晩発性：**がん**と、遺伝的影響（生殖細胞）の可能性

低線量被曝では確定的影響は起きない。

「ただちに影響が出ないレベル」

確率的影響(の可能性)が議論の対象となる。

❖ **がん**

❖ **遺伝的影響の有無**

あくまで確率でしか議論できない。

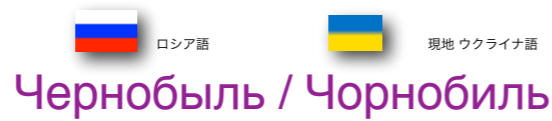
リスクの確率。

しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。

(日本人の死亡者の3人に1人はがんが原因。)

疫学調査の結果から結論を導きだすのは**統計学的**に困難。

低線量・低線量率の被曝とガン死亡



チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリ原発
黒鉛炉
格納容器なし
1週間燃え続けた

福島第一原発
沸騰水型軽水炉
格納容器あり
水素爆発・汚染水流出

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) **total 200京ベクレル !!**

初期消火に当たった原発作業員・消防隊員が
致死・亜致死量の被曝。28人死亡。

事故処理に当たった軍人ら“リクビダートル”
60万人が数百 mSv 被曝

3 km にあるプリピャチ市民は翌日に強制避難
半径 10 km 圏内の避難が1週間遅れた。

(最大で 750 mSv の被曝)

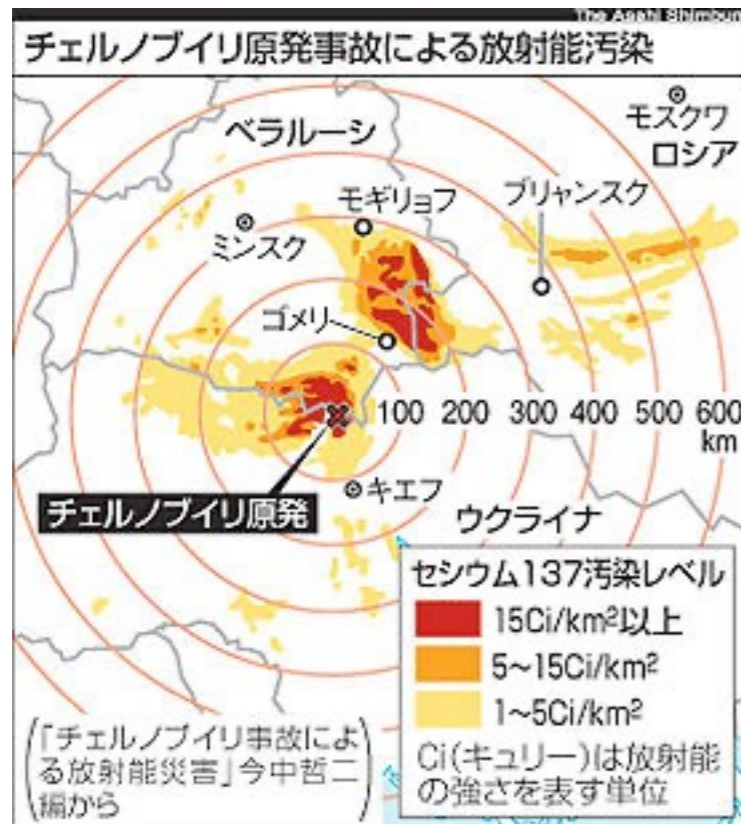
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

一般住民で確認された健康への影響は
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人
(患者数 5000人、死亡 15人)

甲状腺平均被曝量 2 Gy !!

と、ずっと大きいストレスによる失調



低線量・低線量率の被曝とガン死亡



ロシア語
Чернобыль / Чорнобиль



チェルノブイリ原発事故

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) total 200京ベクレル !!



チェルノブイリでは、小児甲状腺がんだけが、増えた。
約6000名、死亡は15名

一般住民で確認された健康への影響は
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。
(地産地消の牛乳による摂取が問題)

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人
(患者数 5000人、死亡 15人)

甲状腺平均被曝量 2 Gy

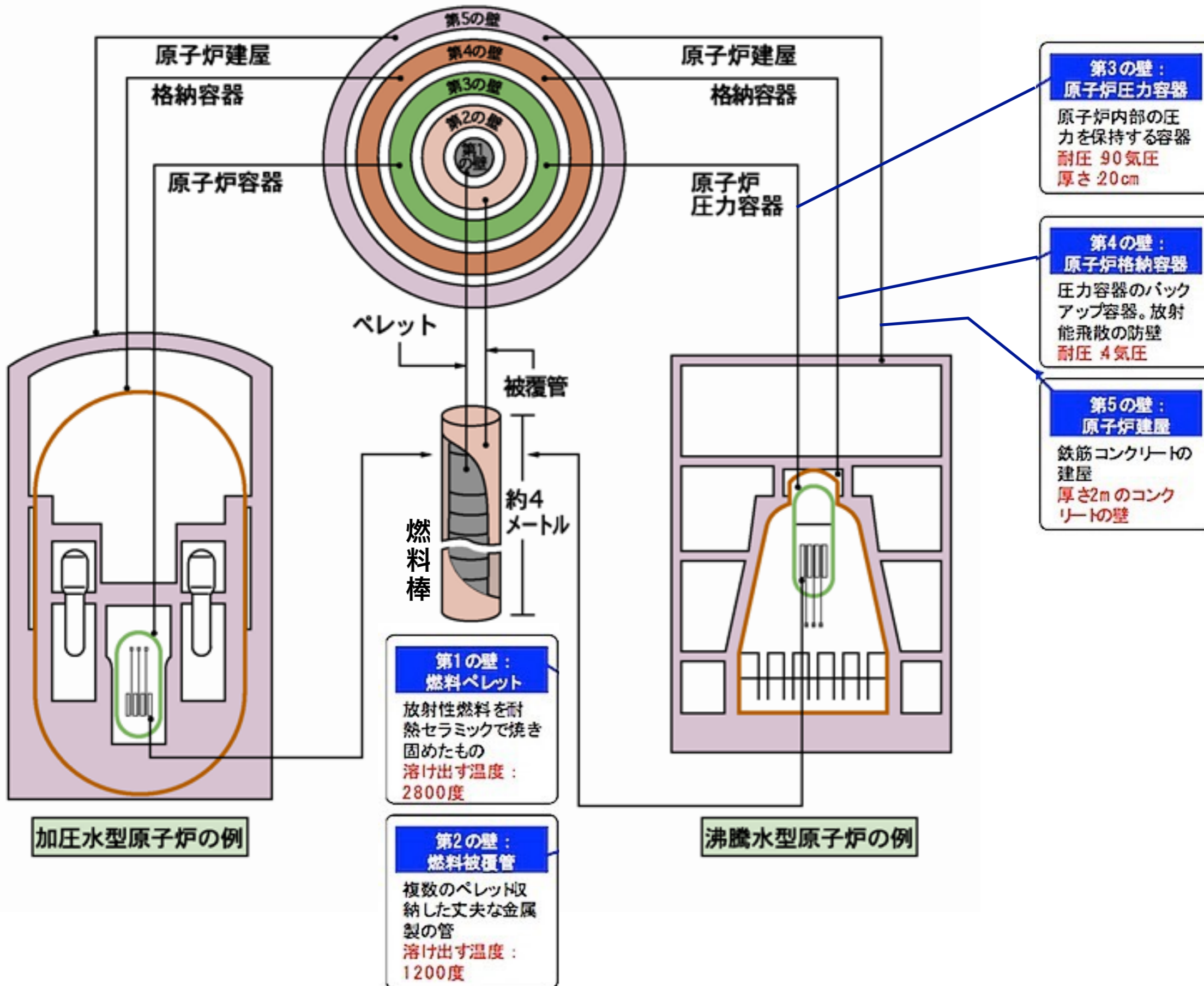
= 2000 mSv !! (10 Gy 以上の被曝も!)
と、ずっと大きいストレスによる失調

いわき市、飯舘村のこどもの甲状腺被曝調査
最大で **35 mSv** の被曝 (甲状腺等価線量)

震災・事故による喪失感は共通

“五重の壁”

原子炉の放射性物質を閉じ込める多重防護



深層防護の考え方による安全確保

欧州の規制

日本の
規制

1. 異常の発生防止：異常を起こさない
2. 異常の拡大防止：異常が起きた場合でも、異常を拡大しない
3. 異常の影響緩和：異常が拡大した場合でも、影響を緩和する
4. 事故への対応：影響が緩和できなくても、事故に対応できるようにする
炉心損傷が起こっても放射性物質を環境へ放出しない
5. 人を守る：事故に対応できなくても、人を守る
放射性物質が放出したとしても、公衆被ばくを抑制するように備える

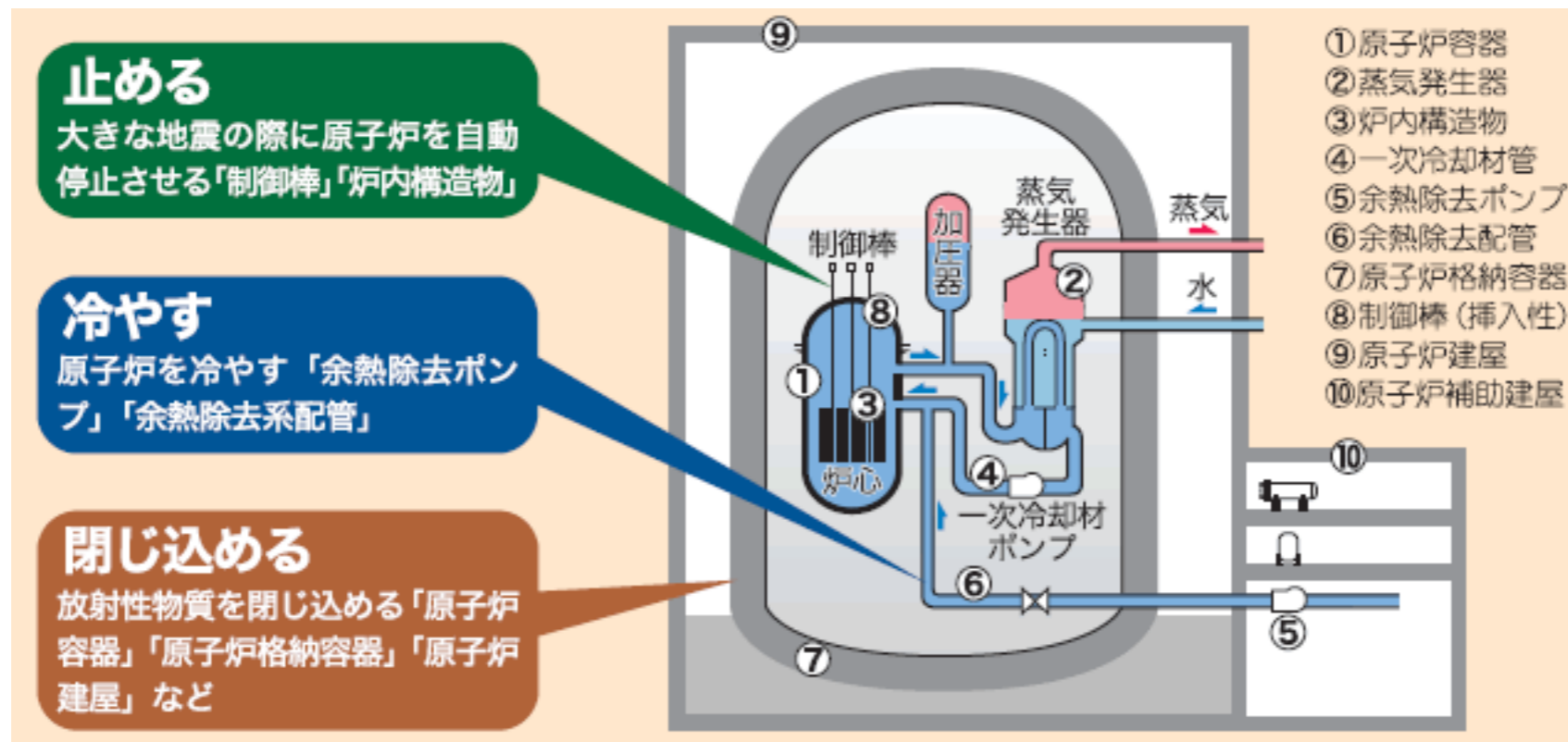
安全神話？

過酷事故 (severe accident) の発生防止を最終目標として、
「想定を超える事象」への対策が考えられていなかった。
過酷事故に対する Accident Management の不備。

100% の安全は存在しない

ゼロリスクを求めると安全神話に陥ることになる。
リスクコミュニケーション

止める、冷やす、閉じ込める



*ただし福島第一原発は古いので、1～4号機の発電出力は1 GWe より小さいが、ここでは典型的に1 GWe として説明。

福島原発事故の場合

止める：制御棒により運転停止。成功。

冷やす：全交流電源喪失により炉心冷却できず失敗。

閉じ込める：水素爆発により放射性物質が広範囲に飛散。

なぜ冷やし続ける必要があるのか。

1 GWe \Leftarrow 3 GW

発電効率 30% 残りは熱

運転停止後も**崩壊熱**が7% がある！

放射性核種の崩壊に伴う熱

福島第一原子力発電所の原子炉

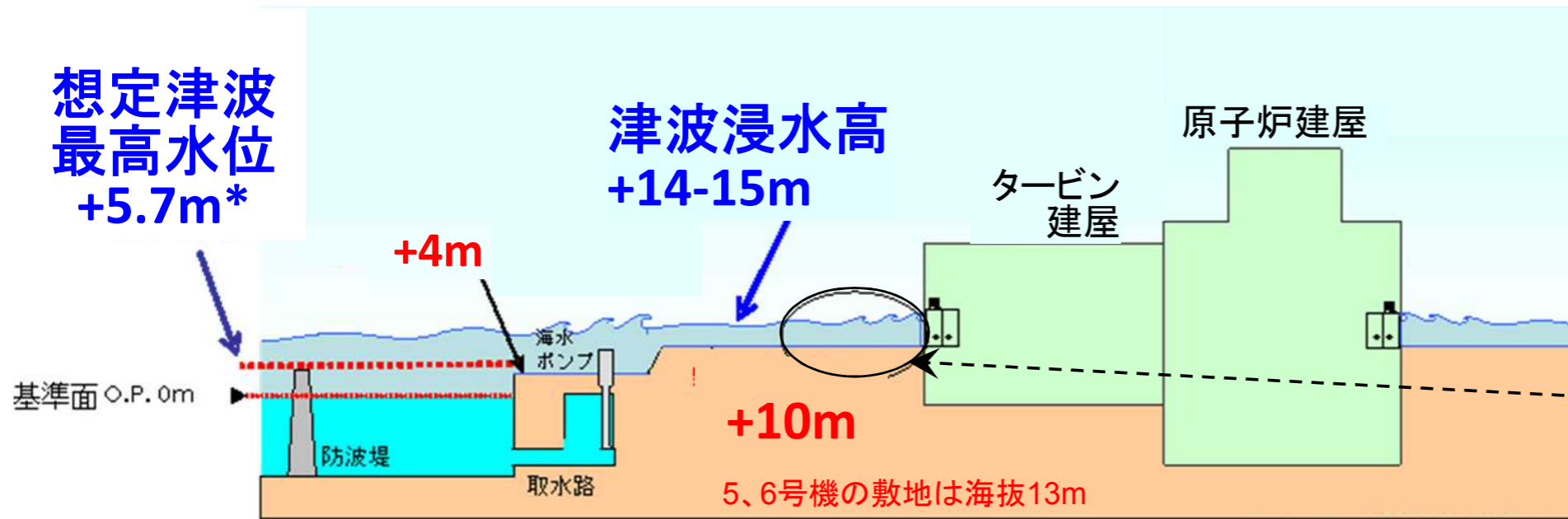
	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-5
格納容器型	Mark-I	Mark-I	Mark-I	Mark-I	Mark-I	Mark-II
電気出力	460MWe	784MWe	784MWe	784MWe	784MWe	1100MWe
圧力容器運転圧力	6.89MPa	6.93MPa	6.93MPa	6.93MPa	6.93MPa	6.93MPa
圧力容器設計最大圧力	8.24MPa	8.24MPa	8.24MPa	8.24MPa	8.62MPa	8.62MPa
圧力容器設計最高温度	300℃	300℃	300℃	300℃	302℃	302℃
格納容器設計最大圧力	384kPa	384kPa	384kPa	384kPa	384kPa	279kPa
格納容器最高圧力*	427kPa	427kPa	427kPa	427kPa	427kPa	310kPa
格納容器最高温度	140℃	140℃	140℃	140℃	138℃	171℃:D/W 105℃:S/C
営業運転開始日	1971.3.26	1974.7.18	1976.3.27	1978.10.12	1978.4.18	1979.10.24
非常用ディーゼル発電機数	2	2**	2	2**	2	3**
外部電源系統数	275kV×4				500kV×2	
3月11日の運転状態	運転中	運転中	運転中	定期検査中(炉内 構造物交換のため 長期停止中)	定期検査中	定期検査中

* 典型的な格納容器内圧力は、約 5 kPa

** 内、1機は空冷型

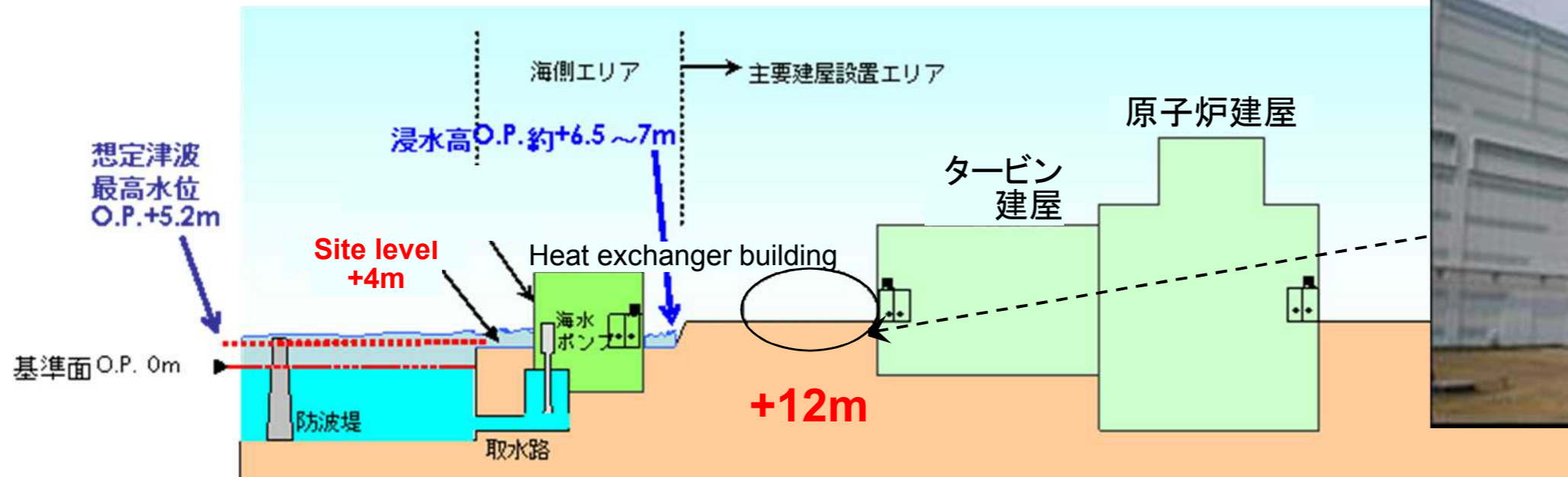
津波

福島第一原子力発電所

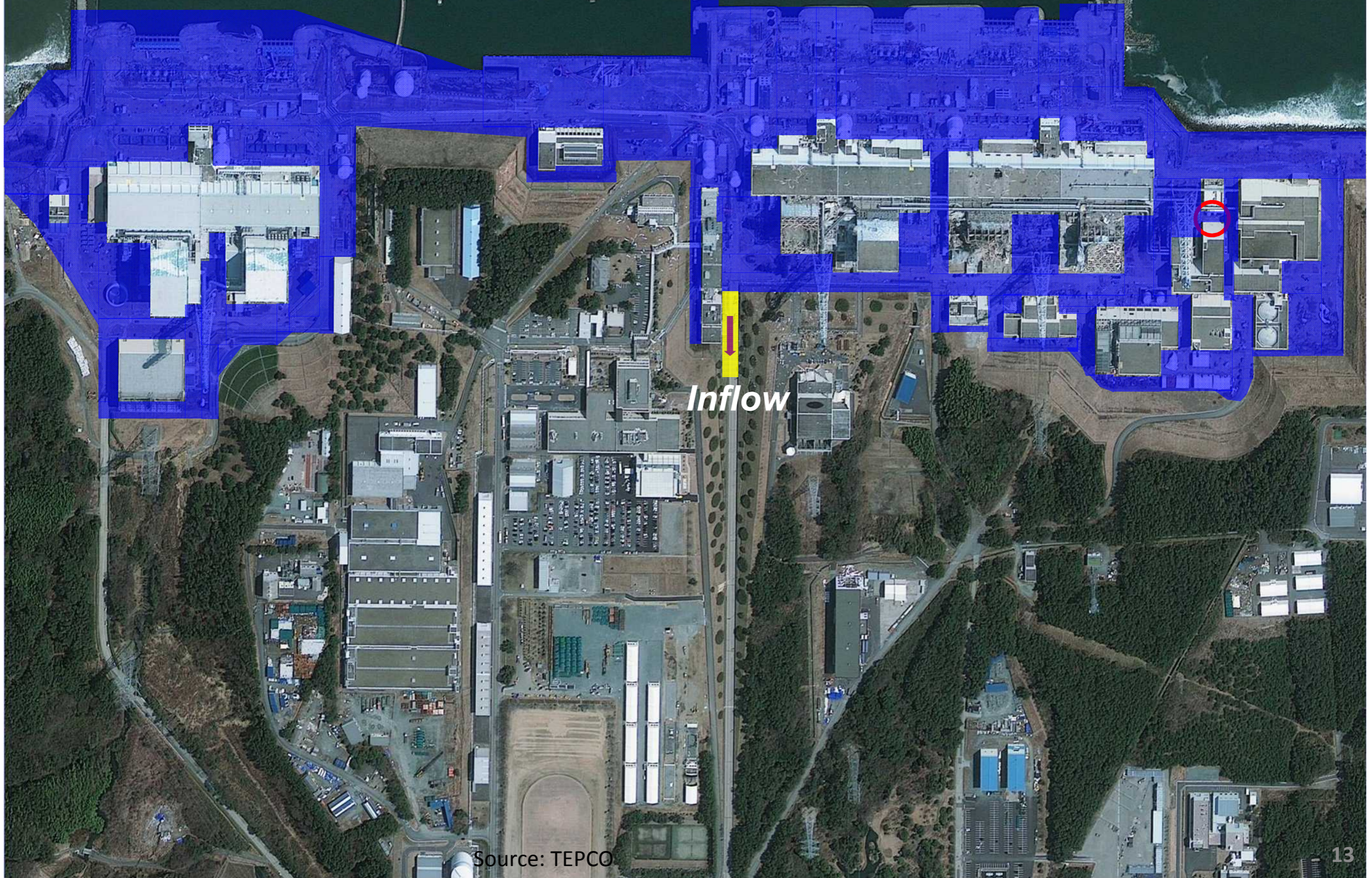


* 2002年日本土木学会原子力土木委員会発行ガイドラインに基づく

福島第二原子力発電所



福島第一原子力発電所の津波影響範囲





2013年10月21日（共同通信）



事故の原因: 1~4号機における全交流電源喪失

全交流電源喪失

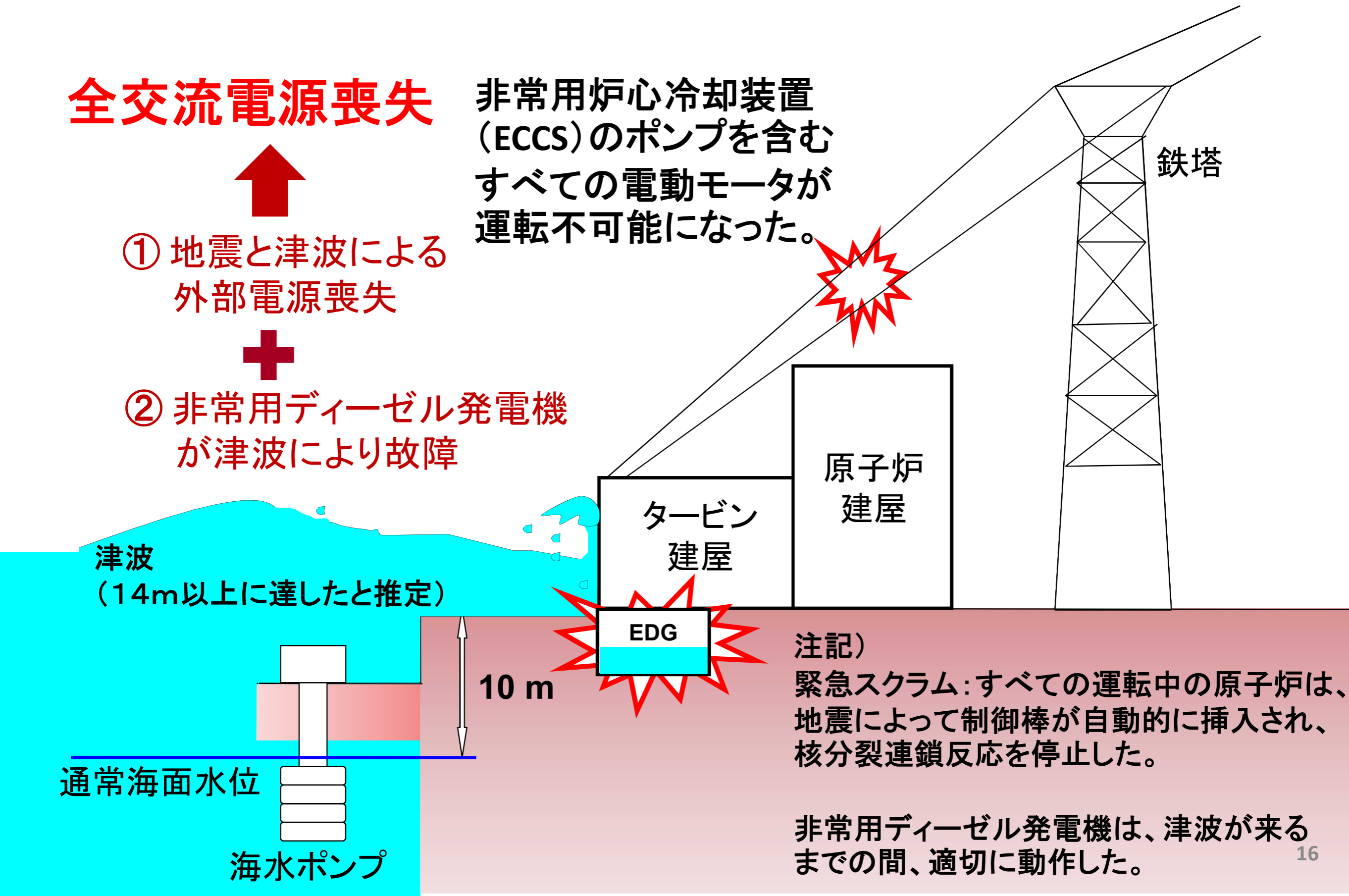


① 地震と津波による外部電源喪失



② 非常用ディーゼル発電機が津波により故障

非常用炉心冷却装置 (ECCS) のポンプを含むすべての電動モータが運転不可能になった。



注記)

緊急スクラム: すべての運転中の原子炉は、地震によって制御棒が自動的に挿入され、核分裂連鎖反応を停止した。

非常用ディーゼル発電機は、津波が来るまでの間、適切に動作した。

福島第一原発事故の不幸中の幸い

環境中に漏洩した放射性物質は原子炉内の1割程度。
うち多くは海に流れた。

👉 **陸地に降ったのは全体の数%程度。**

免震重要棟が8ヶ月前に完成していた。本館は地震で損傷。

👉 対応の前線基地として使えた。でなければ撤退？

4号機の**使用済み燃料プール**に流れ込む水が存在した。

👉 4日前に抜かれるはずが作業の不手際で残っていた。

現場の必死の**努力**。

“次”が起きたら、30 km 圏の**避難**で済むのか？

除染

写真：福島大学キャンパスのモデルケース

セシウム元素：土壌表層

土壌の引き剥がし、天地返し

拭き取り、高圧洗浄

吸着剤（ゼオライト・プルシアンブルー・粃殻・稻藁）

除染物の保管
焼却処分

飯舘村



浪江町



大熊町



双葉町

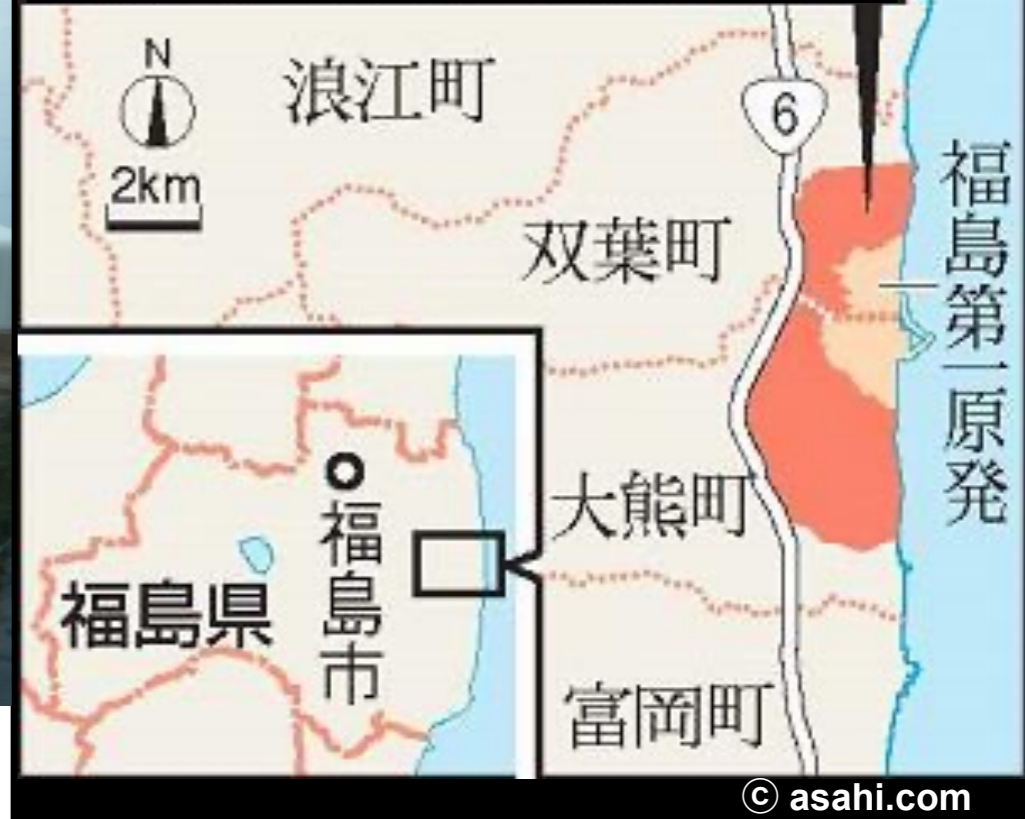


富岡町





中間貯蔵施設の建設地

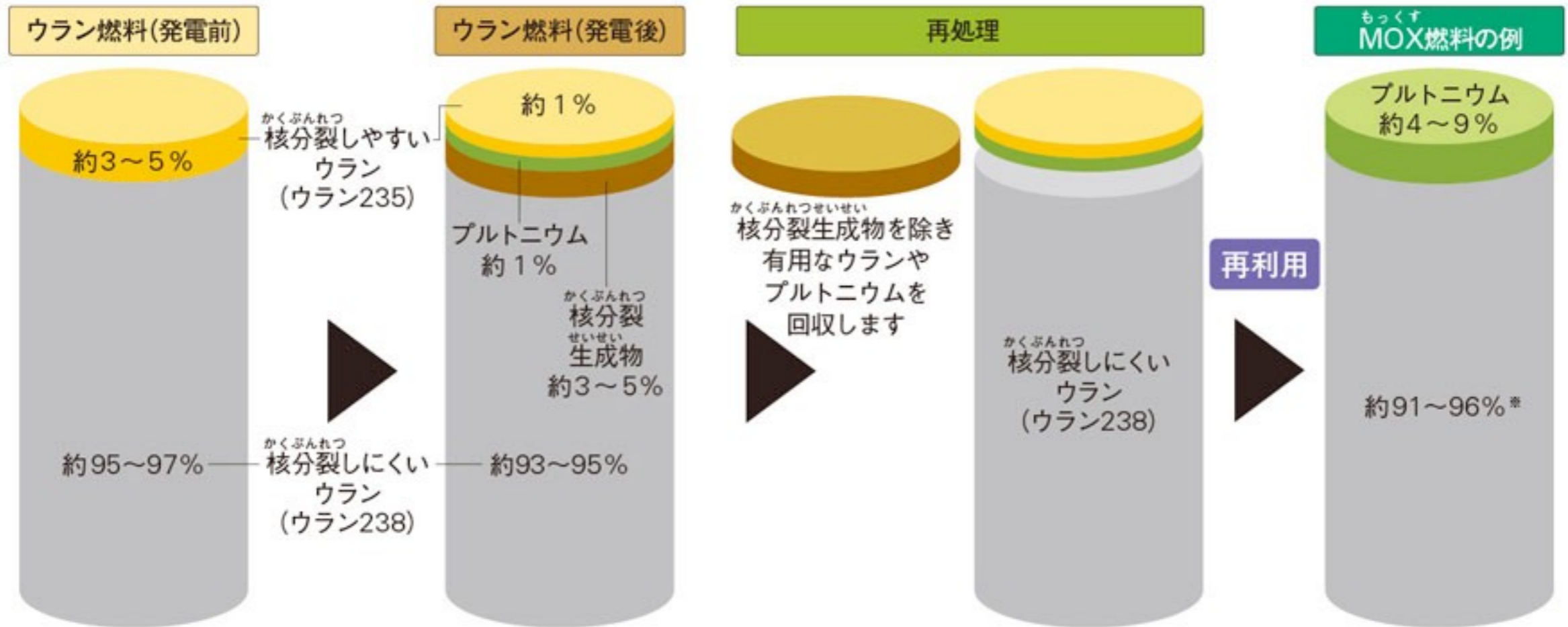




核燃料サイクル

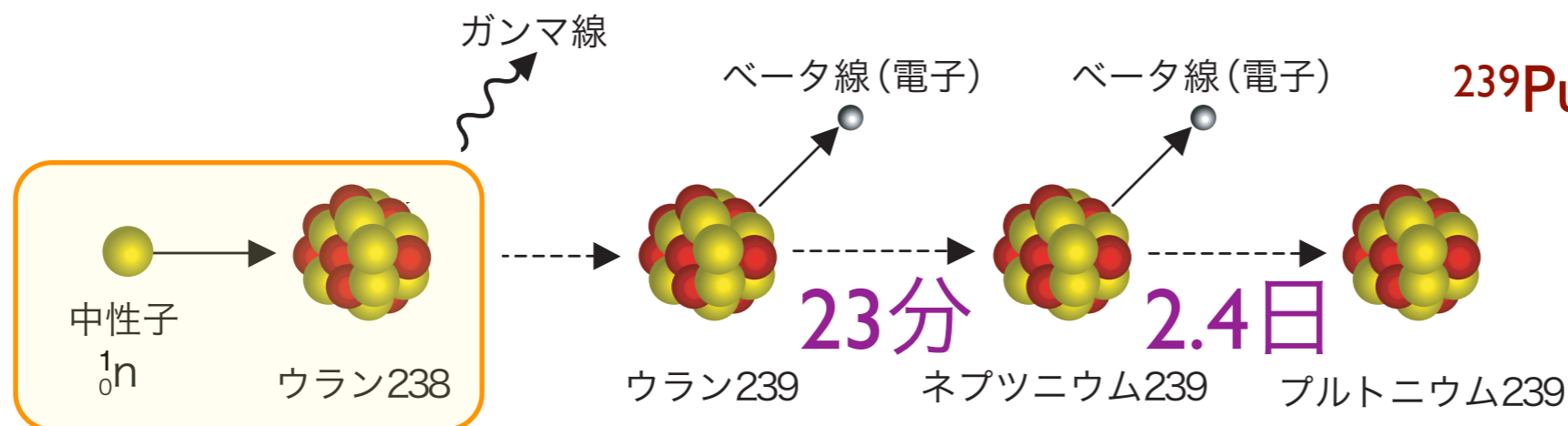
高レベル放射性廃棄物処理問題

《 ウラン燃料とMOX燃料 》



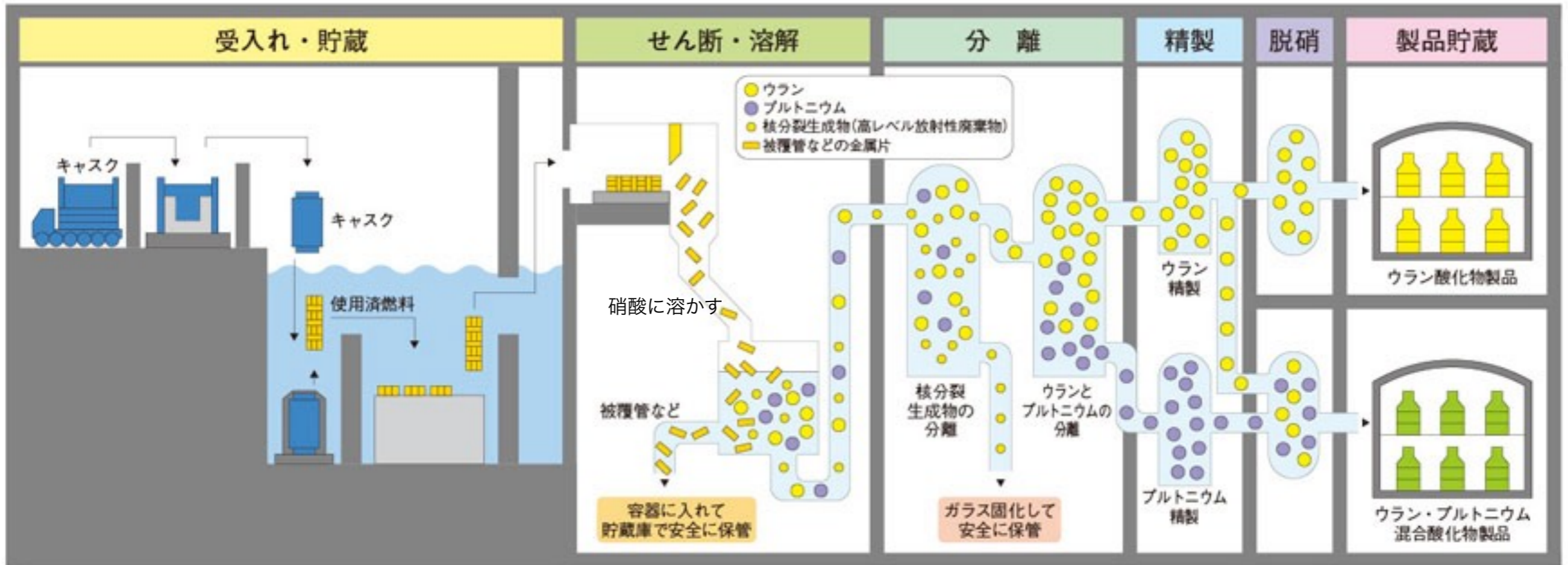
かくぶんれつ核分裂生成物 非常に高いレベルの放射線を発生する元素がふくまれています。

もっくす MOX燃料 プルトニウムとウランの酸化物を混ぜて作った混合酸化物燃料です(※わずかにウラン235をふくみます)。



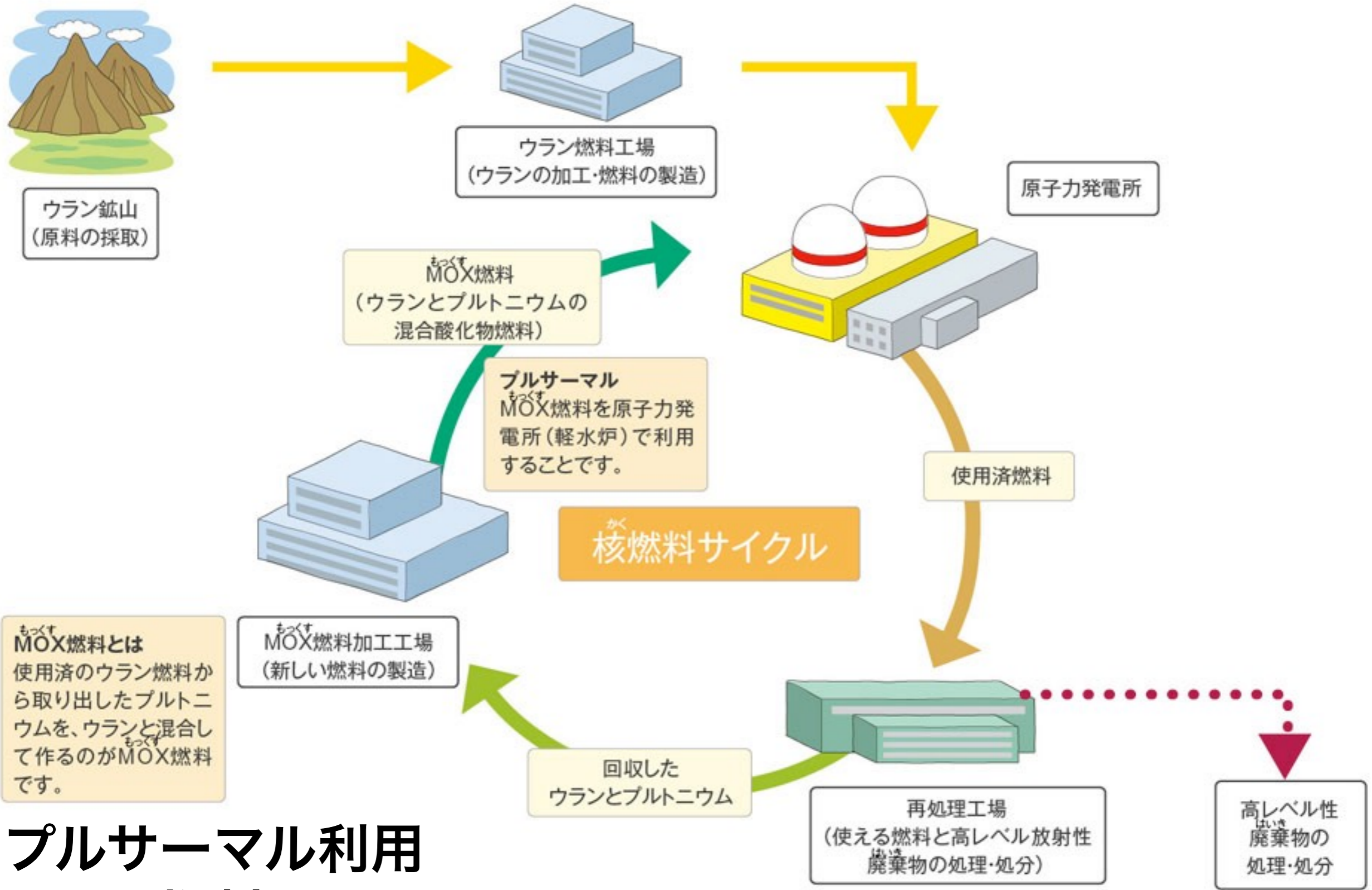
^{239}Pu , ^{241}Pu も n を吸収して核分裂する。

《 再処理の主な工程 》



原子炉の運転により燃料中に蓄積する核分裂生成物の中には、中性子の吸収断面積が莫大なものがある（ ^{135}Xe など）原子炉運転の妨害となる。その他の生成物もウラン燃料の性質を悪化させることになる。このため原子炉の燃料体は適当な時期に一部ずつ交換し、取り出した燃料棒に化学的処理を行って、核分裂生成物を分離するとともに、残っているウラン燃料および燃料内で生成したプルトニウムを回収する。これを核燃料再処理という。

《 核燃料サイクルの流れ 》



プルサーマル利用
MOX 燃料 ($UO_2 + PuO_2$)

可採年数 = 確認可採埋蔵量 / 年間生産量

技術の進歩

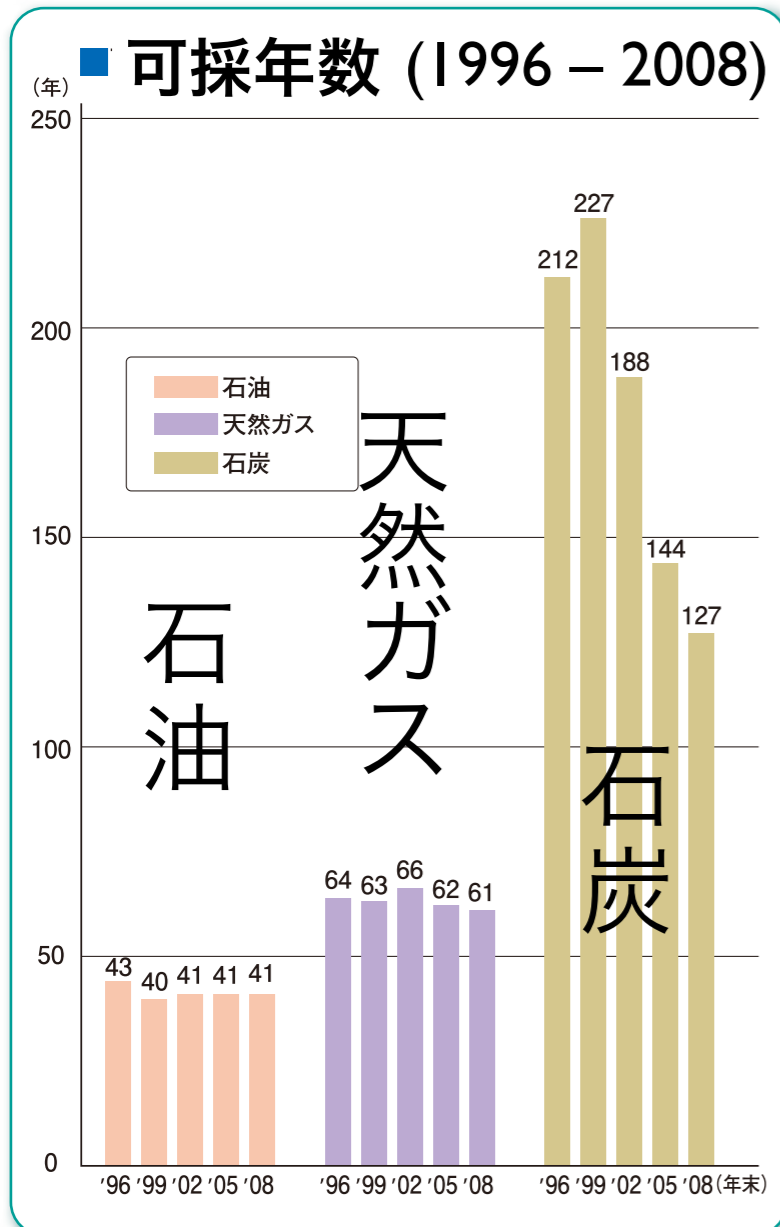
技術的
経済的に
採掘可能

その年の

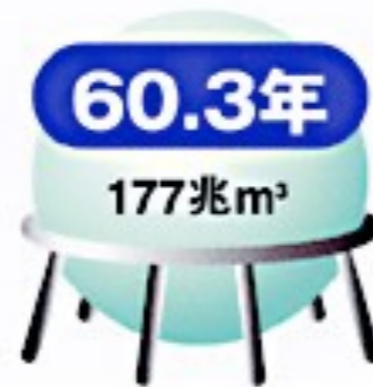
採算価格による

今後の消費の
伸びは計算外

新たな発見



石油
2007年末



天然ガス
2007年末



石炭
2007年末



ウラン
2007年1月

(2007年の評価)

軽水炉によるプルサーマル利用

長期運転すると ^{239}Pu 以外に Am など放射性の超ウラン元素が多種できてしまう。

高速増殖炉 (核燃料サイクルの当初案)

高速中性子により ^{238}U から ^{239}Pu を多数生成する計画。

放射性核種の**増殖**。(使った以上の燃料の生成：夢のエネルギー)

^{239}Pu も中性子を吸収して核分裂を起こす。

トラブル続きで技術的にも難しい。

日本：「**もんじゅ**」の二次冷却系**液体ナトリウム**漏れ事故

経済的にも軽水炉より高価だと判明。

ウランの確認埋蔵量が当初の予測より増えた。

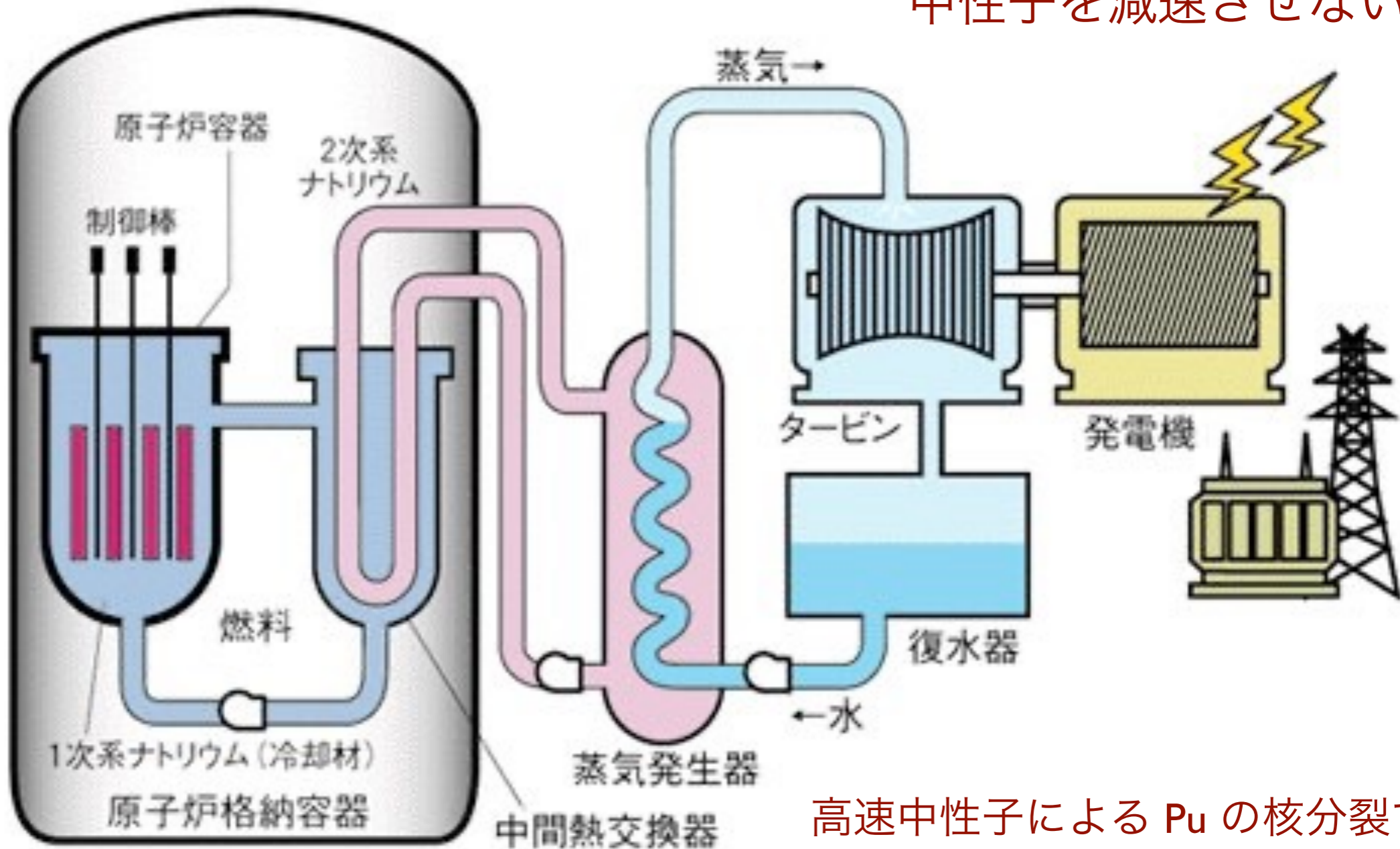
👉 米英独は高速増殖炉から撤退。

高速増殖炉

高速中性子：
中性子を減速させない

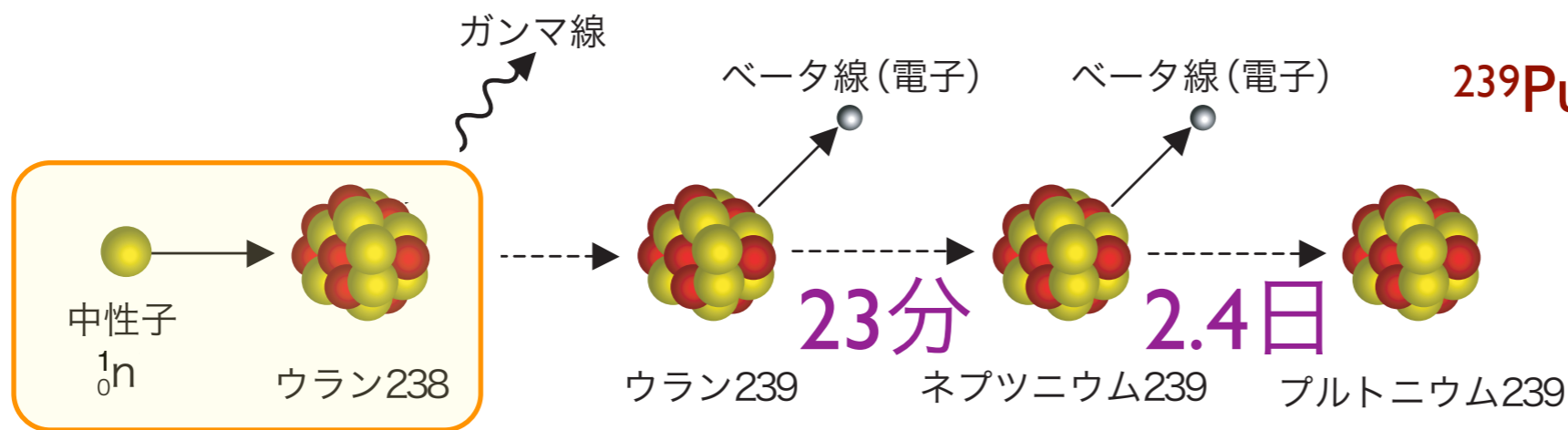
MOX 燃料
($UO_2 + PuO_2$)

冷却材：
液体金属
ナトリウム



高速中性子による Pu の核分裂で
出てくる中性子の平均個数が多い。

^{239}Pu , ^{241}Pu も n を吸収して
核分裂する。



もんじゅに異例の勧告案 規制委、運営主体の交代求める

2015年11月5日



原子力規制委員会は4日、**高速増殖原型炉「もんじゅ」**（福井県）を安全に運転する

動力炉・核燃料開発事業団 ⇒ 核燃料サイクル開発機構 ⇒

能力が **日本原子力研究開発機構** にはないと
して、新たな運営主体を明示するよう馳浩
文部科学相に勧告すると決めた。文科省は
運転再開を目指す姿勢を変えていないが、
機構に代わる主体を見つけられなければ、
もんじゅのあり方を抜本的に見直すことを
迫られる。**核燃料サイクル**政策の是非論が高
まる可能性もある。

1994年4月 初臨界

1995年12月 **ナトリウム漏れ事故**

2010年5月 14年ぶりに試験運転再開

8月 炉内に中継装置が落下し運転停止

2012年11月 約1万点の機器の点検漏れ

政府、「もんじゅ」廃炉も検討

2016年 9月14日



政府は高速増殖原型炉「もんじゅ」（福井県敦賀市）について、廃炉も含めた検討に入った。もんじゅを巡っては政府内であり方を検討してきたが、運営体制の刷新は難しく、20年以上ほとんど運転していない施設に数千億円をさらに拠出することに国民の理解を得るのは難しい、との見方が出ている。

1994年4月 初臨界

1995年12月 **ナトリウム漏れ事故**

2010年5月 14年ぶりに試験運転再開

8月 炉内に中継装置が落下し運転停止

2012年11月 約1万点の機器の点検漏れ

2015年11月 原子力規制委がもんじゅ運転に日本原子力研究開発機構以外の運営主体を明示するよう勧告

もんじゅ後継炉、開発推進へ

2016年11月30日

政府は廃炉を検討中の高速増殖原型炉「もんじゅ」（福井県敦賀市）に代わる「高速実証炉」の開発方針を示した。フランスなど海外との協力や、もんじゅなどの国内施設を活用し、今後10年程度で基本的設計を固める。

もんじゅ廃炉決定 政府、高速炉開発は維持 2016年12月22日

高速増殖原型炉もんじゅ（福井県敦賀市）の廃炉が21日、政府の原子力関係閣僚会議で正式に決まった。高速増殖炉開発が計画されてから半世紀。使った以上の燃料を生み、資源に乏しい日本の準国産エネルギーとして開発が始まったもんじゅは、多くの不祥事の末、ほとんど運転できずに役目を終える。政府は同時に、高速炉開発を進める方針も決定した。

<もんじゅ> ウランとプルトニウムを燃料に、消費した以上のプルトニウムを生む高速増殖炉。開発ステップの4段階のうち、第2段階の発電技術を確立するための原型炉だ。1994年の初臨界から運転したのは計250日。95年のナトリウム漏れ事故以降はほとんど動いていない。維持管理に年間約200億円かかり、これまでに約1兆円が投じられた。

プルトニウムの問題

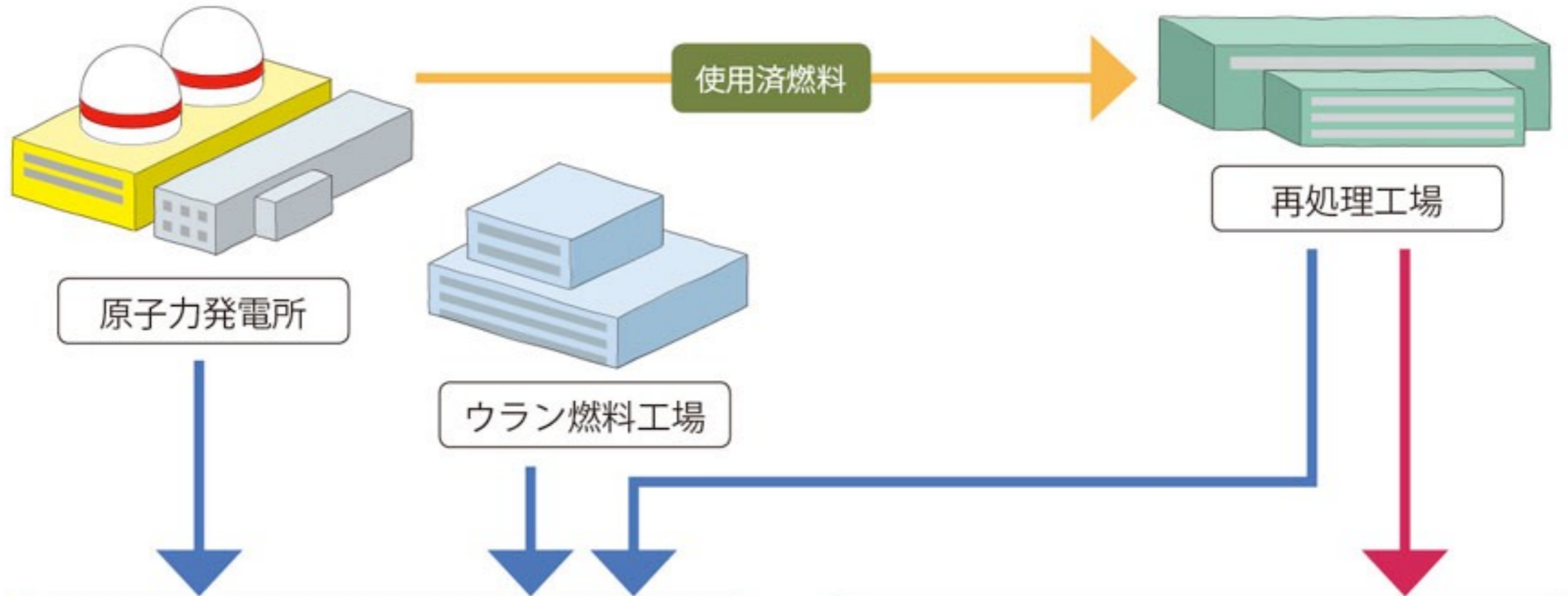
溜り続けるプルトニウム。資源かゴミか。

核武装の疑惑。日本政府は否定。

再処理の問題（日本原燃の再処理工場@青森県六ヶ所村）

未だに稼動できない。（22回目の延期）

《 放射性^{はいき}廃棄物 》



《 低レベル放射性^{はいき}廃棄物 》

低レベル放射性^{はいき}廃棄物は、原子力^{しちつ}施設の運転、点検、解体などにもなって発生するものです。コンクリート、金属、使用済みの消耗品^{しょうしょうひん}（ペーパータオル、作業用手袋、作業服）などです。これらは放射能レベルに応じて適切に処分されます。



《 高レベル放射性^{はいき}廃棄物 》

高レベル放射性^{はいき}廃棄物は、再処理工場で使用済燃料からまだ使えるウランやプルトニウムを回収した後に残る、放射能レベルの高い^{たかい}廃液のことです。これをガラスと溶かし合わせて固化したものを「ガラス固化体」といい、30～50年間、地上で冷却した後、処分します。



ガラス固化体

高レベル放射性廃液をガラス原料とともに溶かし合わせて、ステンレス容器に入れて固めたもの。

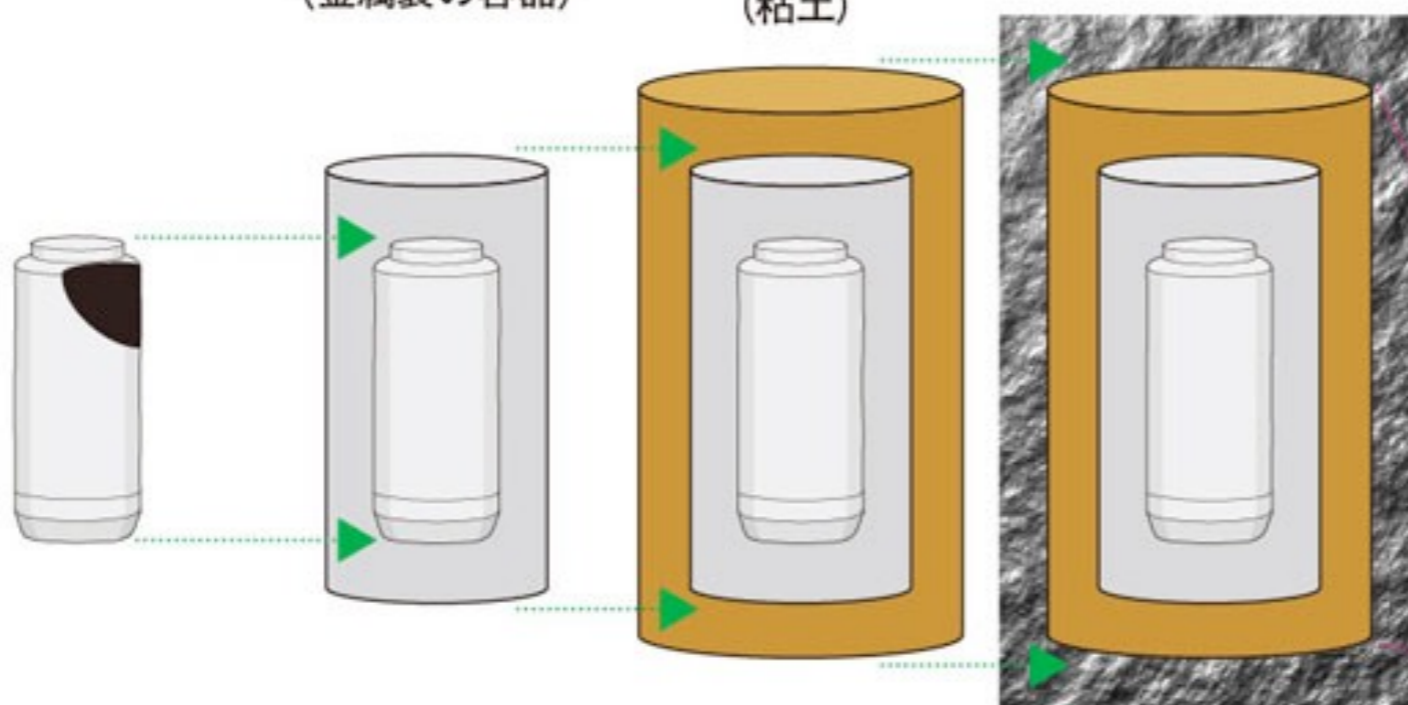
直径：約40cm
高さ：約130cm
総重量：約500kg

《 高レベル放射性廃棄物の処分方法 》

多重バリアシステム

人工バリア + 天然バリア

- | バリア 1 | バリア 2 | バリア 3 | バリア 4 |
|--------|---------------------|-------------|-------|
| ガラス固化体 | オーバーパック
(金属製の容器) | 緩衝材
(粘土) | 岩盤 |



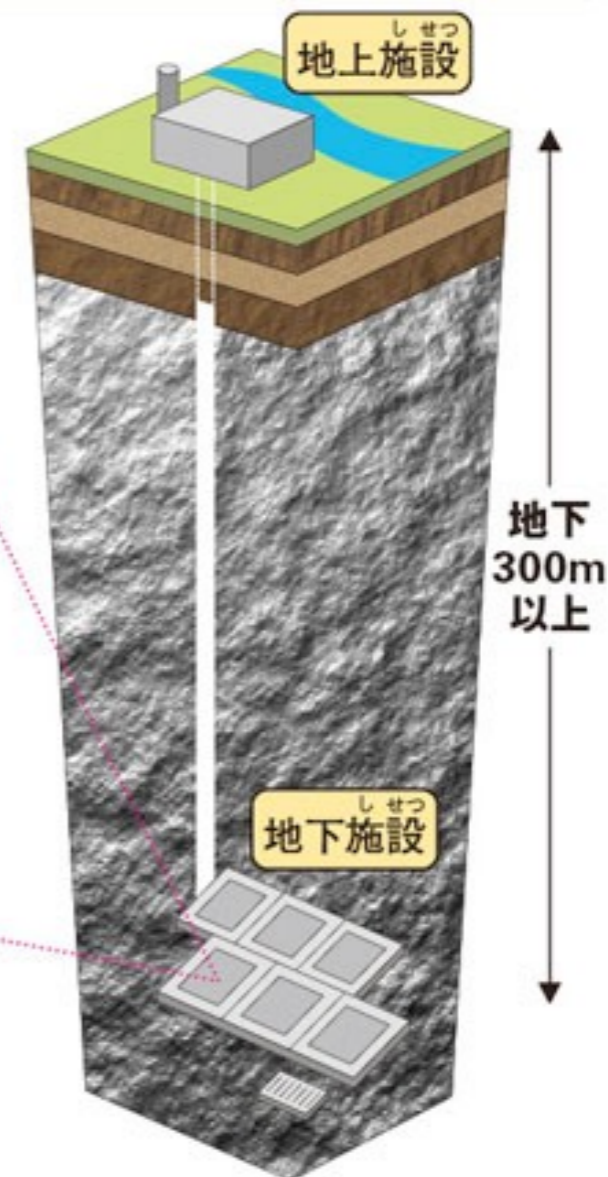
ガラスは放射性物質が地下水に溶け出しにくくします。

厚さ約20cmの金属製の容器。ガラスと地下水が接触するのを防ぎます。

オーバーパックをおお厚さ約70cmの粘土。粘土は水を通しにくく、地下水と放射性物質の移動をおそくします。

地下深くの安定した岩盤は、長期間、放射性物質を閉じ込める力を持っています。また酸素が少なく金属はさびにくくなります。

高レベル放射性廃棄物処分施設



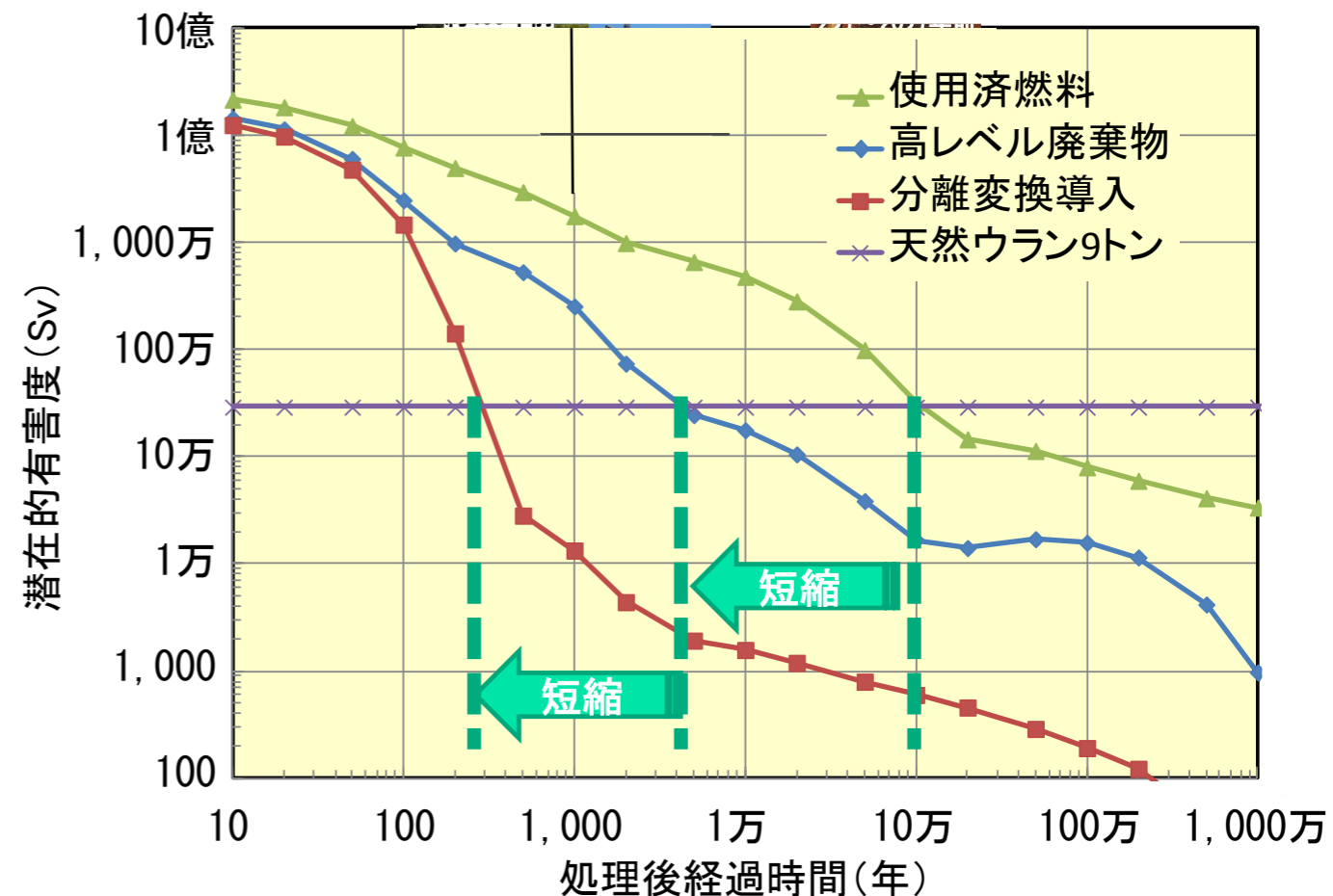
最終処分場 候補地 ゼロ

Cf. フィンランド 「オンカロ」

使用済み核燃料の核変換処理（研究段階）

- 放射性核種を群分離し、原子炉や加速器で中性子や陽子などを照射して核分裂や核破砕反応を起こし、安定核種や短寿命核種に変えることを研究中（分離変換技術）。
- 中性子による (n, γ) や $(n, 2n)$ 反応を利用。
- 高レベル放射性廃棄物のマイナーアクチノイド（プルトニウム以外の超ウラン元素）について、高速増殖炉の核燃料サイクルの中で処理する方法や、加速器駆動 (ADS) 未臨界炉や専焼高速炉による階層処理が考えられている。

- ※ 環境中の放射性物質を原子炉や加速器施設に運んで原子核反応を起こさせるのはまず不可能（原理的にもコスト的にも）。
 - 圧倒的多数の非放射性核種を放射化させてしまう。
 - 多種多様な核種に対し、うまく非放射性核種に変えるように選択的に反応を起こさせるのはまず無理。



日本の原子力発電所(2010年3月末現在)

	基数	合計出力(万kW)
運転中	54基	4,884.7万kW
建設中	2基	275.6万kW
着工準備中	12基	1,655.2万kW
合計	68基	6,815.5万kW

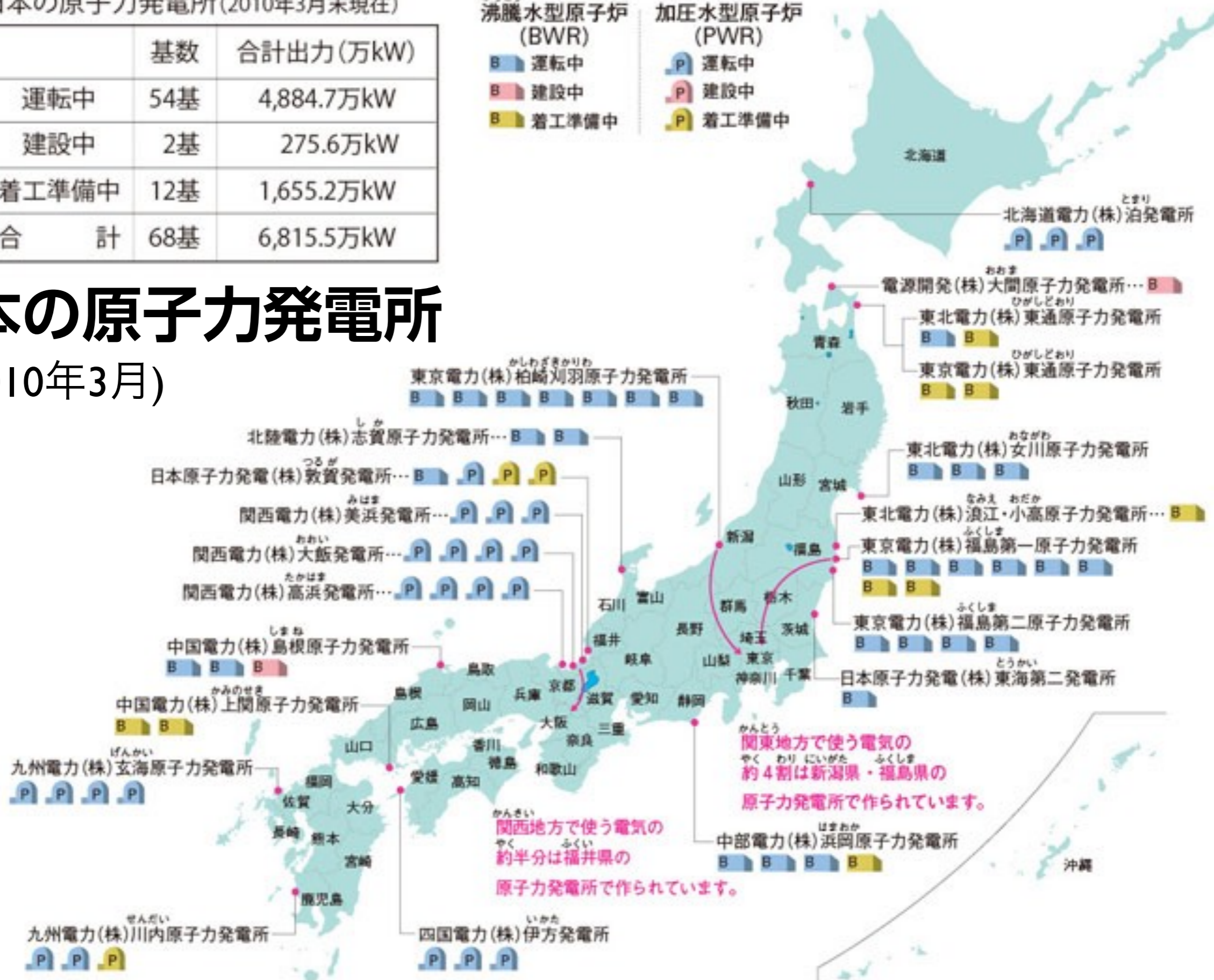
沸騰水型原子炉 (BWR)

- 運転中 (B)
- 建設中 (B)
- 着工準備中 (B)

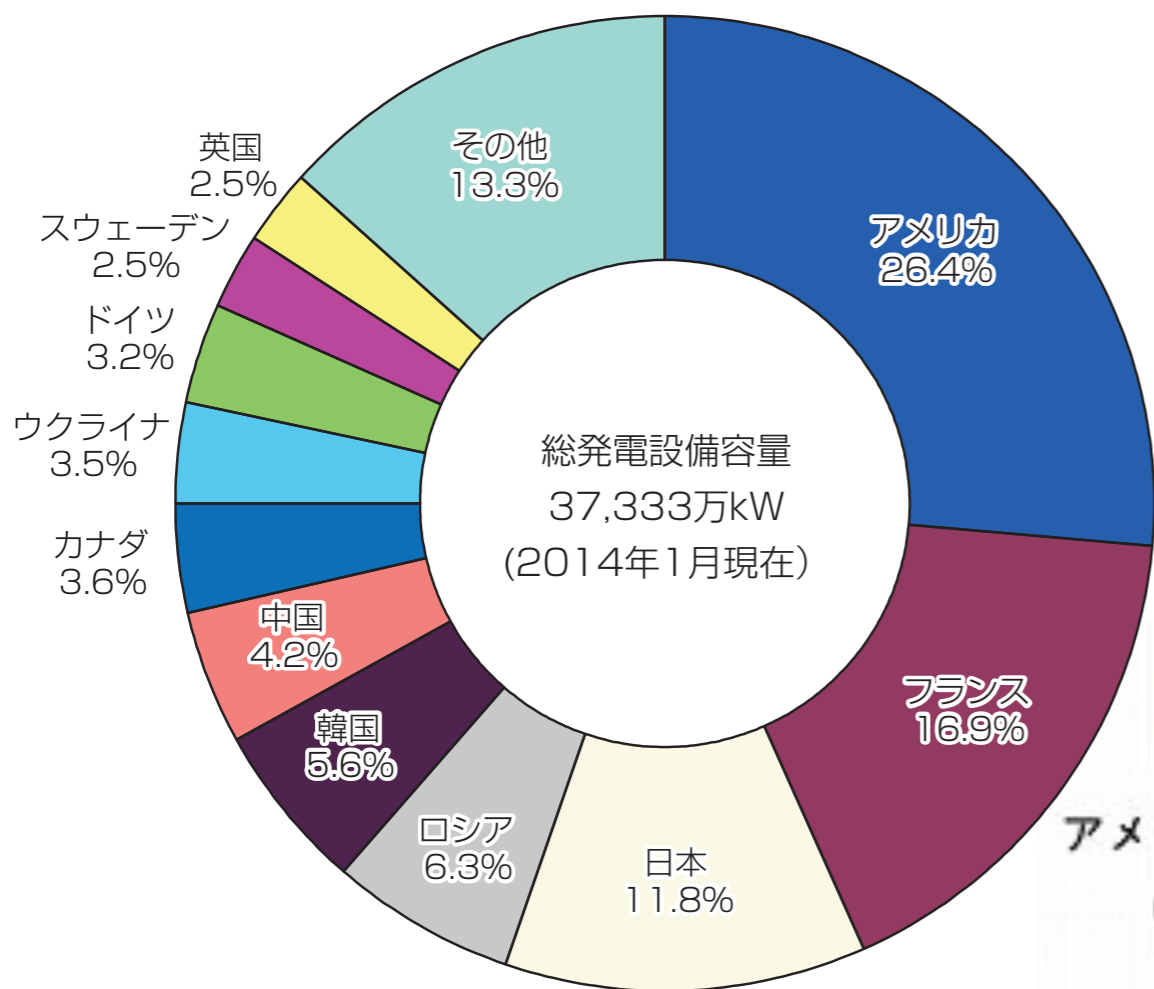
加圧水型原子炉 (PWR)

- 運転中 (P)
- 建設中 (P)
- 着工準備中 (P)

日本の原子力発電所 (2010年3月)

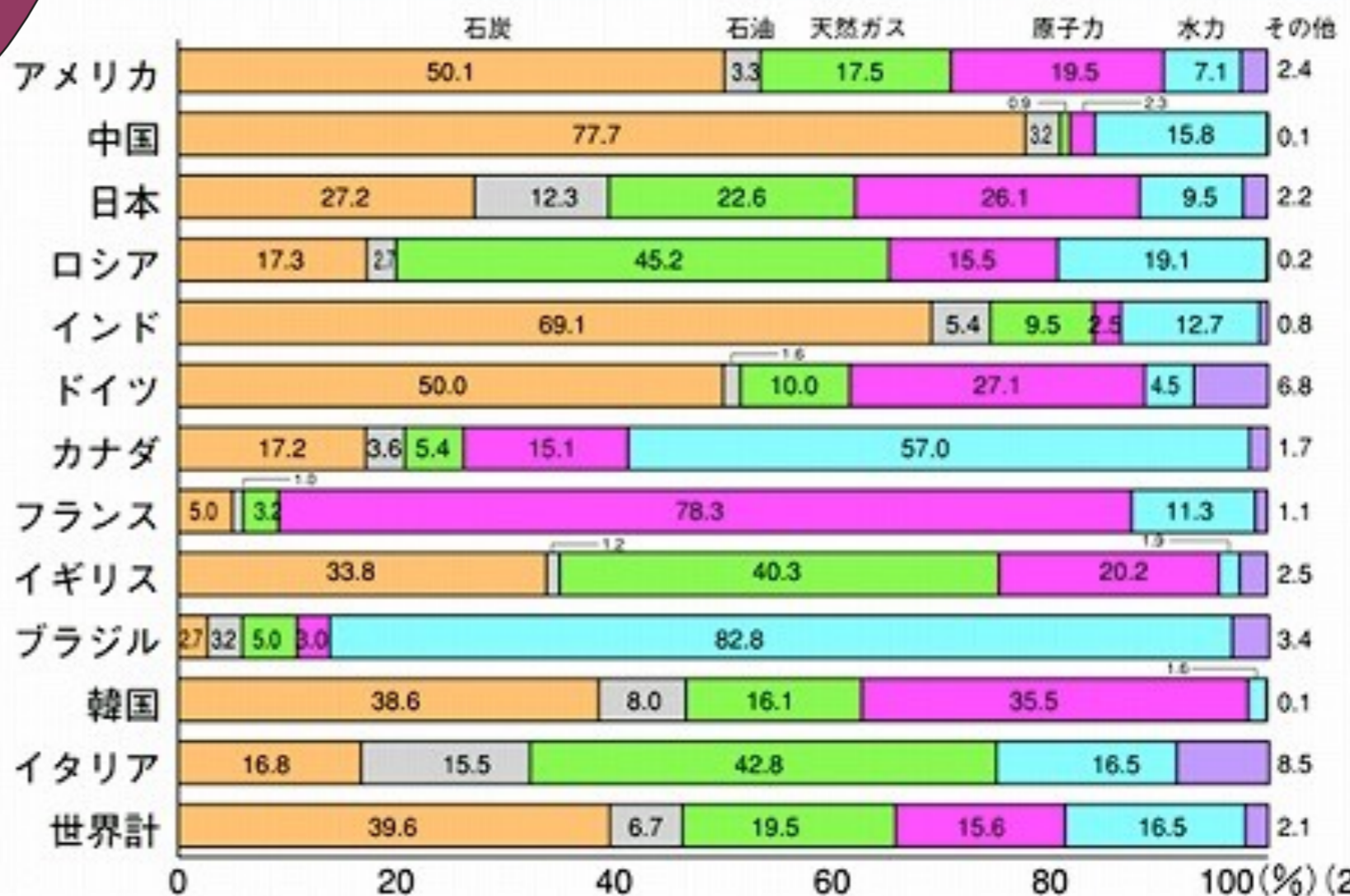


【第213-2-1】世界の原子力発電設備容量



(2004年)

主要国の電源別発電電力量の構成比



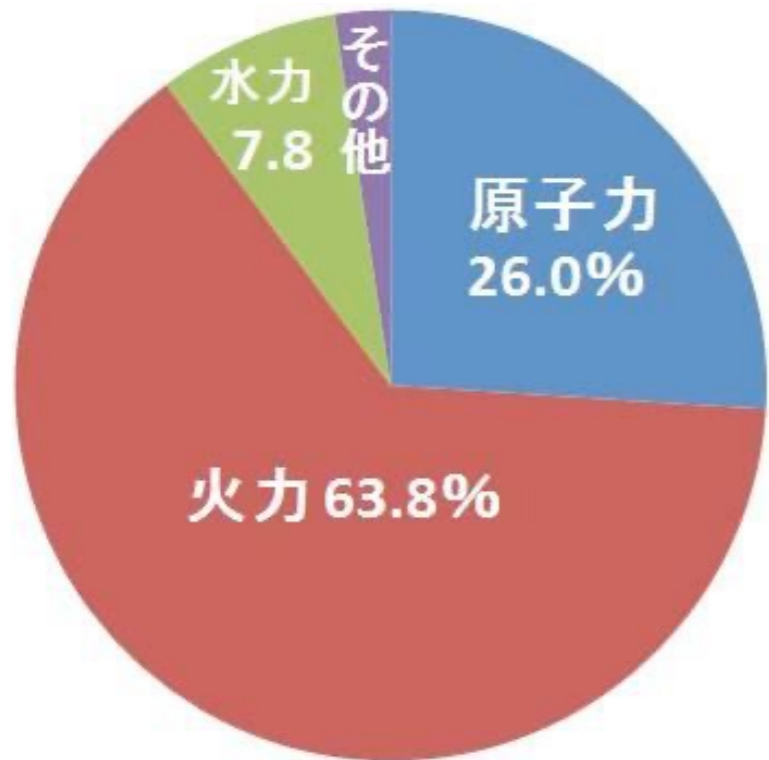
出典： IAEA-PRIS 資料を基に作成



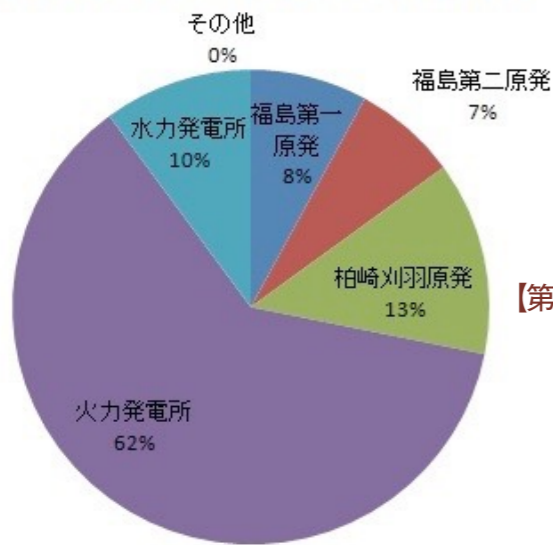
(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

出典： IEA Electricity Information 2006 Edition

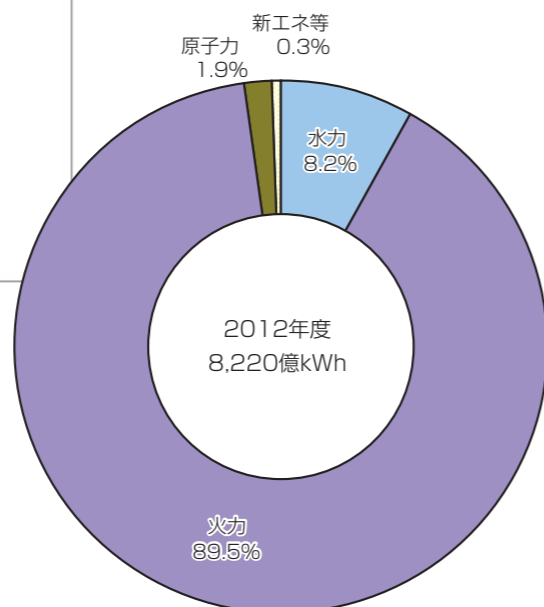
日本の発電量の比率 2008



東京電力の電力総出力の割合



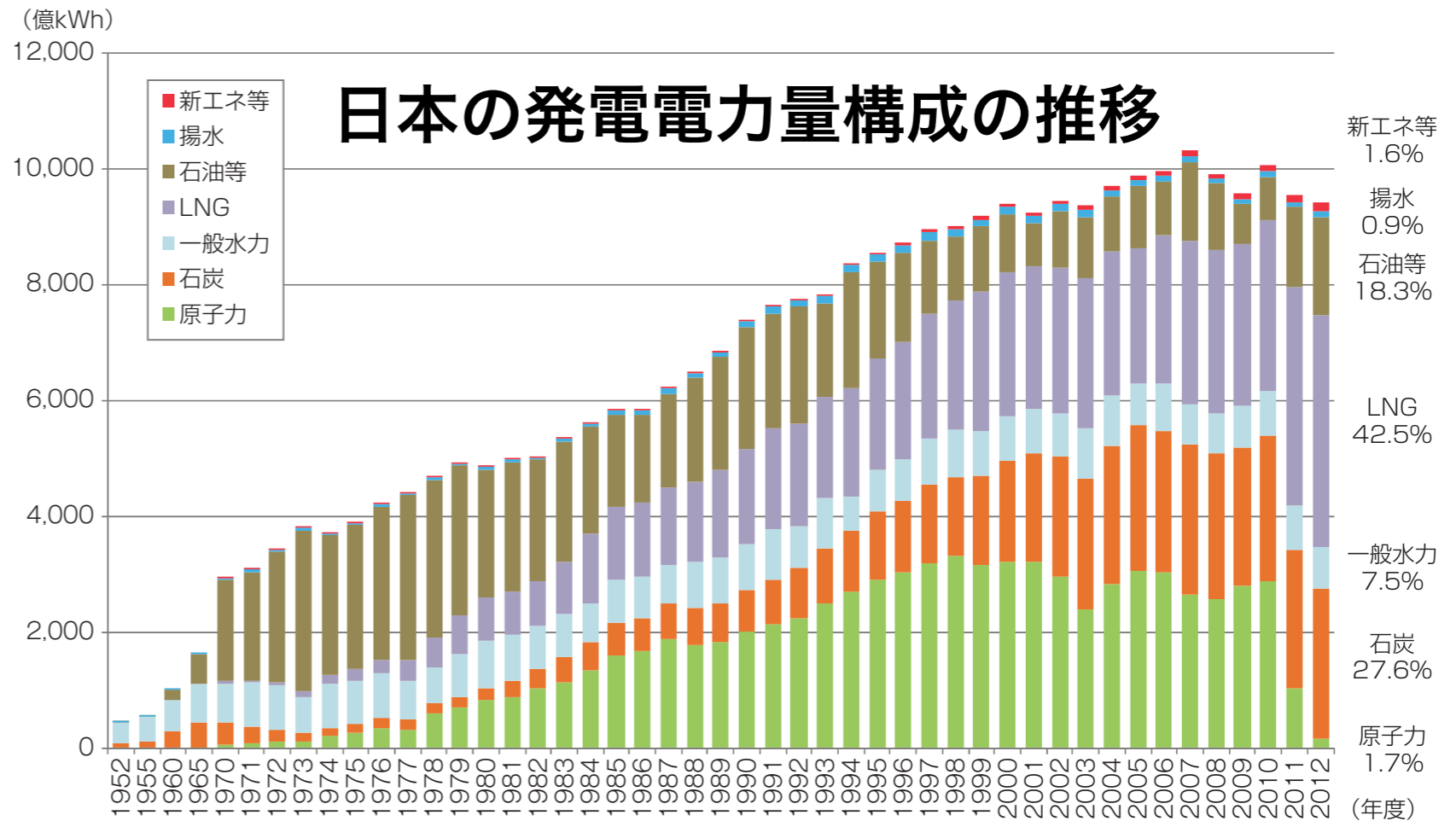
【第 213-2-2】 全国発電端電力量の構成 (2012 年度)



日本の発電量の比率 2012

出典： 資源エネルギー庁「電力調査統計平成 24 年度発電実績」を基に作成

日本の発電電力量構成の推移

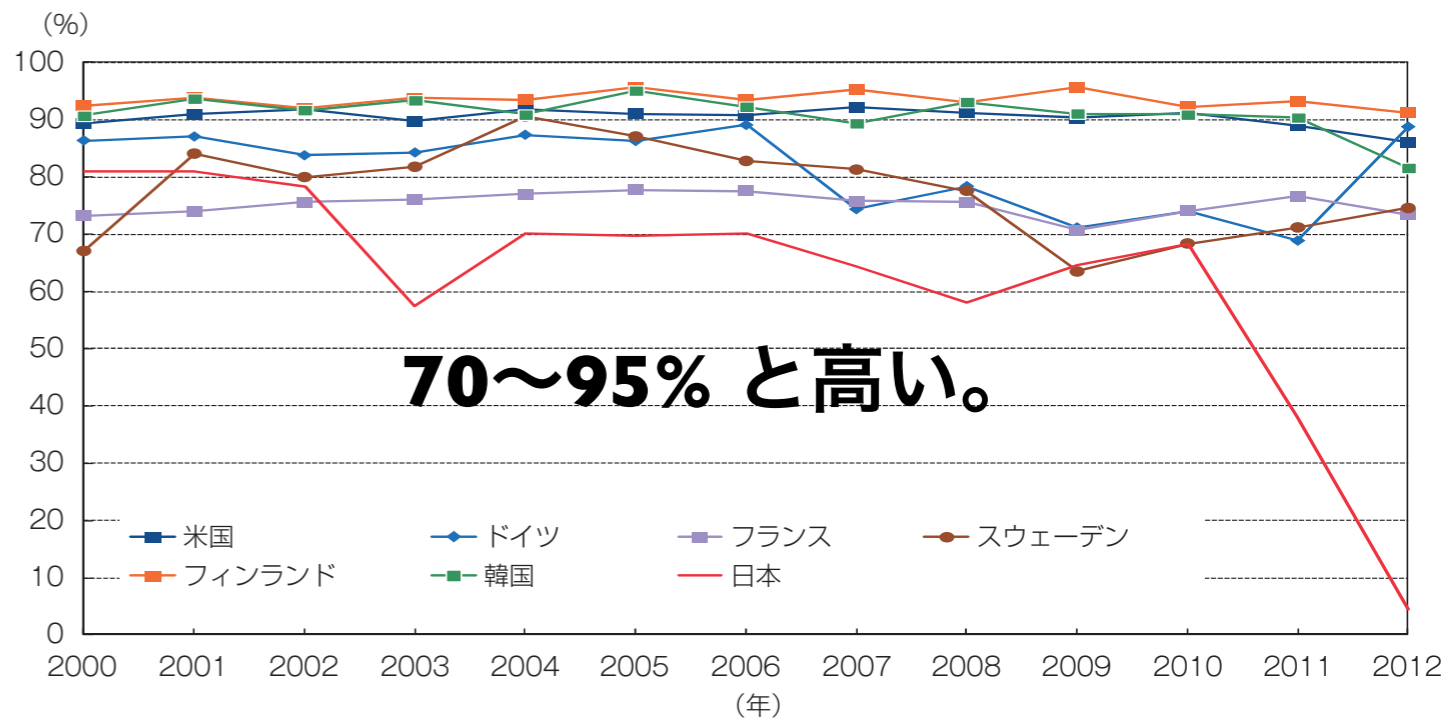


(注) 1971 年度までは 9 電力会社計。

出典： 資源エネルギー庁「電源開発の概要」、「電力供給計画の概要」を基に作成

世界の原子力発電の設備利用率の推移

【第 213-2-3】 世界の原子力発電の設備利用率の推移



出典： 原子力安全基盤機構「原子力施設運転管理年報 平成 25 年版」を基に作成

成績評価

合否判定（点数なし） 2単位

- 出席

- レポート ITC-LMS に提出

各分野ごとに1本選択、合計3本
(それより多く提出してもよい)

物理分野：鳥居 締切：12月20日(月)

環境化学：小豆川 1月11日(火)

生命科学：渡邊・坪倉・藤原 1月18日(火)

● 物理 課題 #5

原子炉内で核分裂または放射化により生成する放射性核種にはどんなものがどんな割合で存在するか。それら核種の崩壊についても説明せよ。そうした多種多様な核種のうち ^{131}I や ^{137}Cs , ^{90}Sr などが特に問題となるのはなぜか。

● 物理 課題 #6

なにかひとつ、工学・医療などに利用されている放射性核種を選び、その寿命や崩壊の種類、放出される放射線のエネルギーなどを調べてみよ。その核種が利用される特徴はどこにあるか。余力があれば、その元素の他の同位体についても調べてみよ。

この課題(#5, #6)は誰でも選択可。

● 物理 課題 #7

以下の計算課題 (A), (B) の両方に回答せよ。

(A) ^{40}K の内部被曝

体重 60 kg の人の体内にはカリウム元素が通常 130 g 程度含まれている。このうち 0.0117% は放射性同位体の ^{40}K (半減期 12.8億年)である。

- (i) この ^{40}K による放射能は何ベクレルか。
- (ii) 1 Bq の ^{40}K が体全体に与える実効線量率は何 $\mu\text{Sv/h}$ と見積もられるか。
- (iii) 体内にある ^{40}K による被曝は年間何 mSv/年 に相当するか。

(B) ^{131}I の崩壊熱

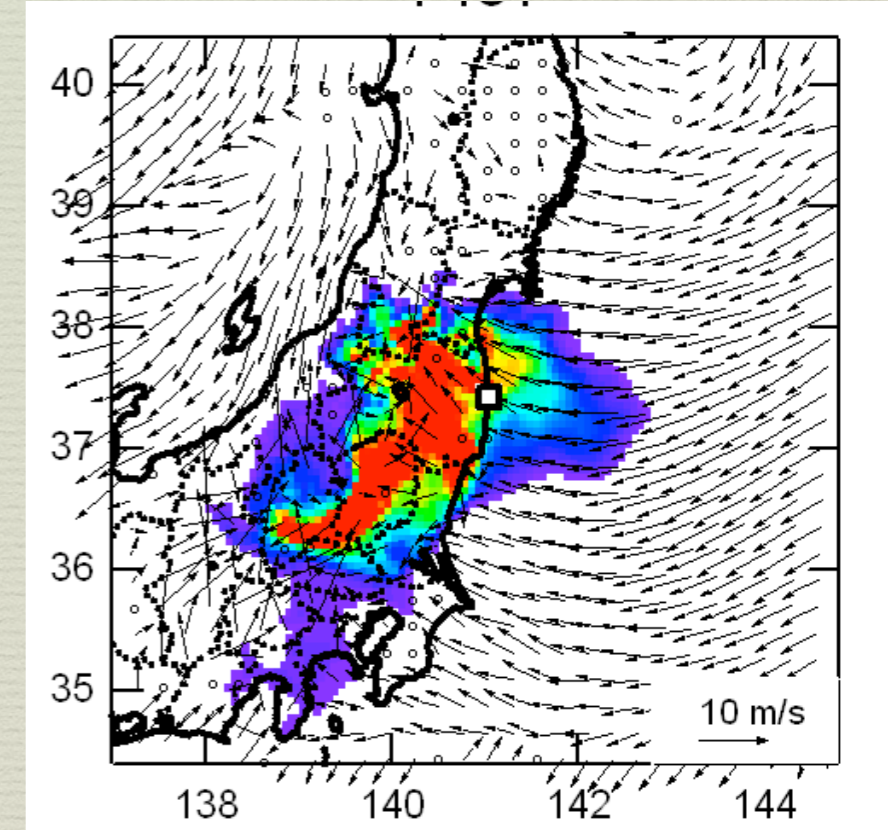
福島第一原発から放出された ^{131}I は 15万 TBq ($T=10^{12}$) と言われている。原子炉の中には、当初その10倍前後の ^{131}I が、1号機から3号機までの各々の炉内に存在していた。

- (i) 放出された ^{131}I は全部で何グラムに相当するか。
- (ii) 各炉内において、 ^{131}I による崩壊熱は当初何ワットであったと推定されるか。放出される β 線と γ 線のどちらも炉内の水で全てのエネルギーを失うとして計算するとよい。(※ 実際の炉内では他のあらゆる核種による崩壊熱が積算される。)
- (iii) 原子炉容器内の適当な水量を仮定して、 ^{131}I の寄与による温度上昇率を見積もってみよ。なお、水の冷却循環装置は電源喪失のため止まっていた。

この課題(#7)は誰でも選択可。

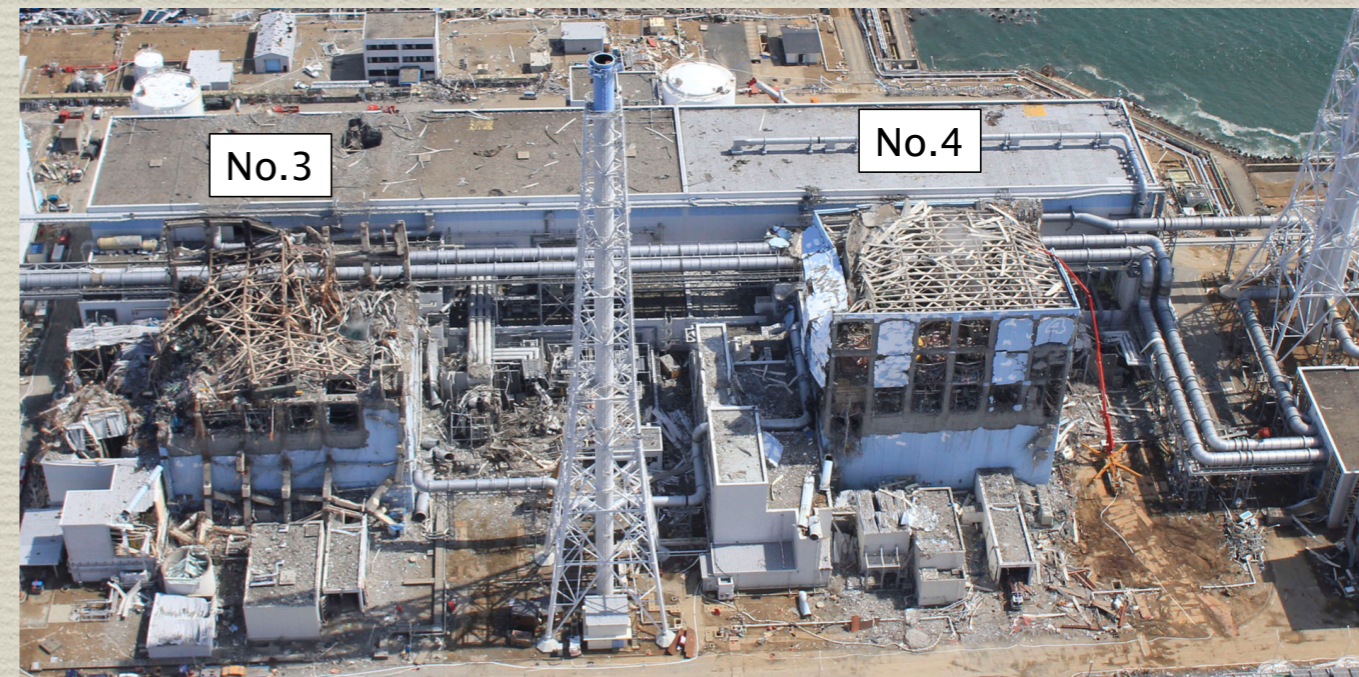
次回予告

第10回 (12/17)



● 環境放射化学

● シミュレーションと将来の放射線量



講義スライド、講義予定

ITC-LMS を参照。または、講義 web page

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

東大教養 放射線 講義



検索

連絡先

torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

担当教員：鳥居 寛之

Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Gratias ago pro audientia vestra.

Спасибо за внимание.

Dankon pro via atento.

Merci de votre attention.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Thank you for your attention.

경청해 주셔서 감사합니다.

感謝您的聆聽。

谢谢您的关注。

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A. TORII