

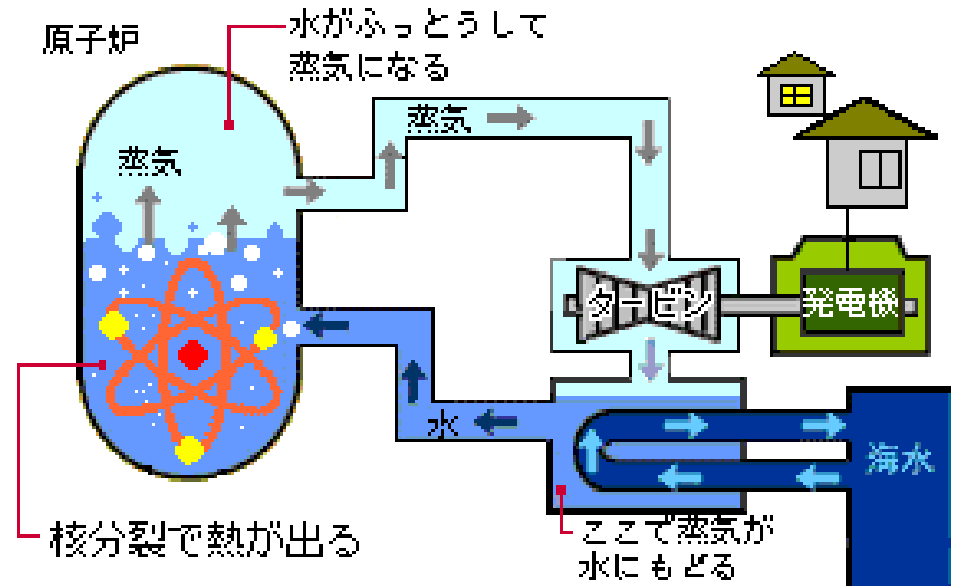
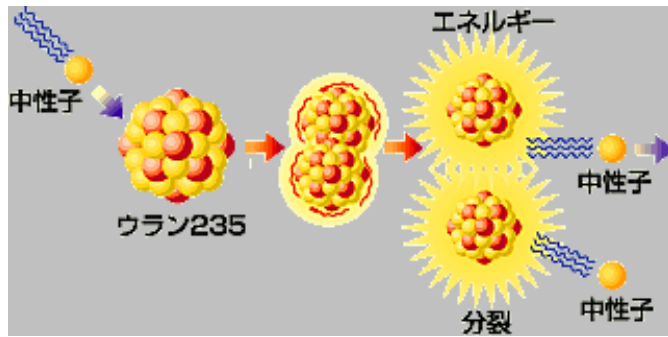
# 原発システムの構造と仕組み

## 目次

- § 1 原子炉とは何か
- § 2 原子炉の構成要素
- § 3 原子炉の種類と世代
- § 4 原子炉中の莫大な放射能—巨大な潜在的危険性—
- § 5 崩壊熱とその冷却の死活的な重要性
- § 6 原子力発電と火力発電との比較
- § 7 原子炉と核兵器との相違と関係
- § 8 複雑系としての原発システム

# § 1 原子炉とは何か？

(1)核分裂連鎖反応を出力を定常に維持するように制御しながら原子核エネルギーを取り出す装置が原子炉(nuclear reactor)である。



(2)原子炉の副産物: 低濃縮ウラン燃料の97%のウラン238からプルトニウム239(239Pu)が生成される。

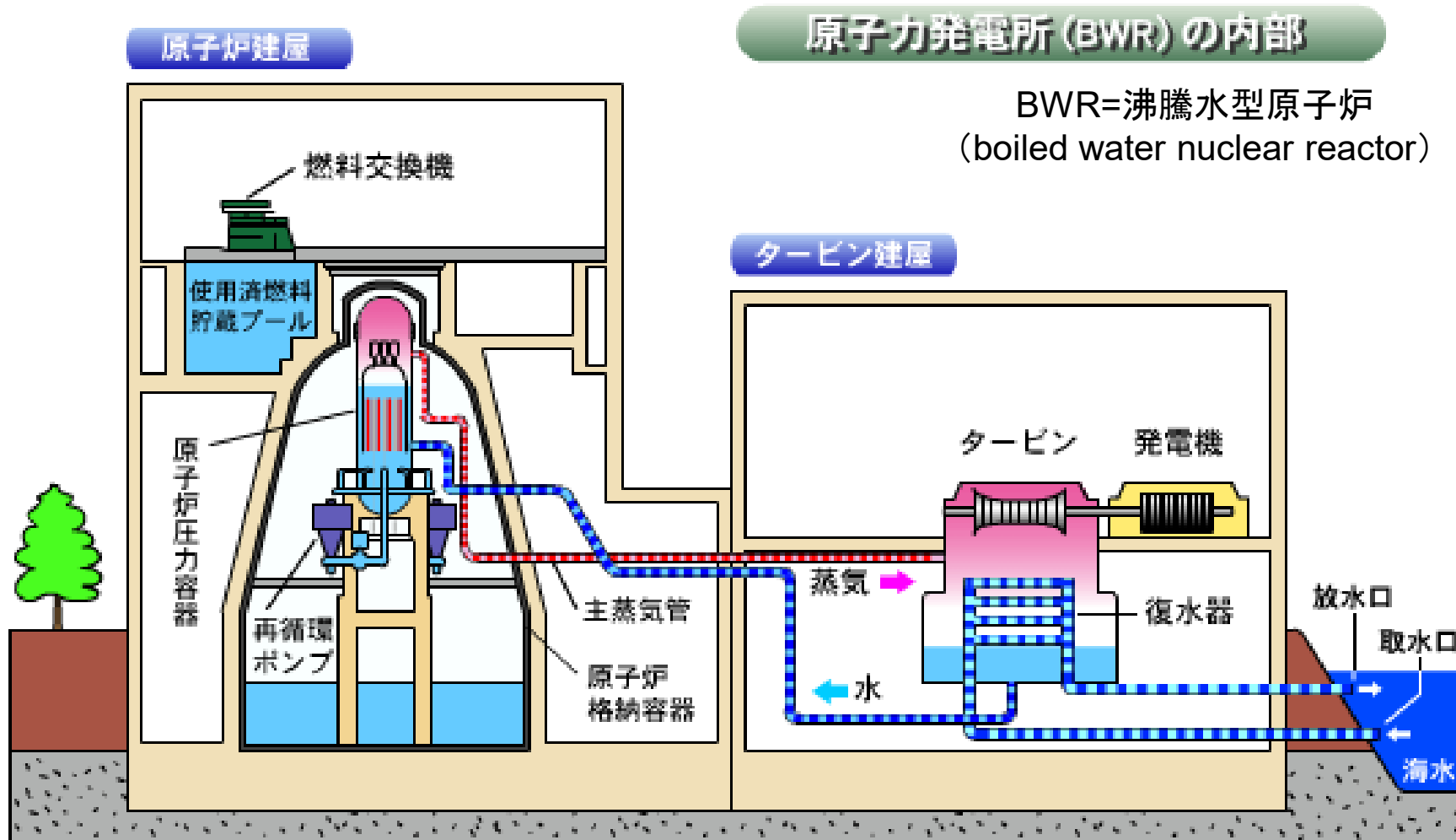
これは核燃料と「核弾頭の原料になりうる!？」

→高速増殖炉のアイデア

→核兵器の拡散問題

<http://www.geocities.jp/tobosaku/kouza/sikumi.html>

# 原子力発電のしくみと構造—簡略化された説明—



出典: <http://www.tepco.co.jp.cache.yimg.jp/nu/knowledge/system/index-j.html>

## § 2 原子炉の構成要素

### A) 炉心

#### 燃料棒:

ウラン235を3%程度まで濃縮した錠剤状の酸化ウランを、直径1cm、長さ4mの燃料被覆材(ジルコニウム)のさやに詰めたものが燃料棒

**燃料棒集合体:** 燃料棒を数十から数百集めたもの

#### 冷却水

##### 炉心中の水の3つの役割

1) 冷却媒体(熱運搬媒体):

炉心は冷却水で満たされ、その冷却水は、炉心が加熱しないように毎秒3mという速さで強制的に循環している。

2) 中性子の減速

3) 放射能の遮蔽: 特に、定期検査時。

**制御棒:** 中性子を吸収し核分裂を抑制する。

### B) 圧力容器(原子炉容器):

核燃料, 制御棒, 冷却水を保持するボイラー状の分厚い鋼鉄製の容器

### C) 格納容器:

事故発生時に、放射性物質のある炉心からの漏洩, 放出をふせぐための分厚いコンクリート製の容器

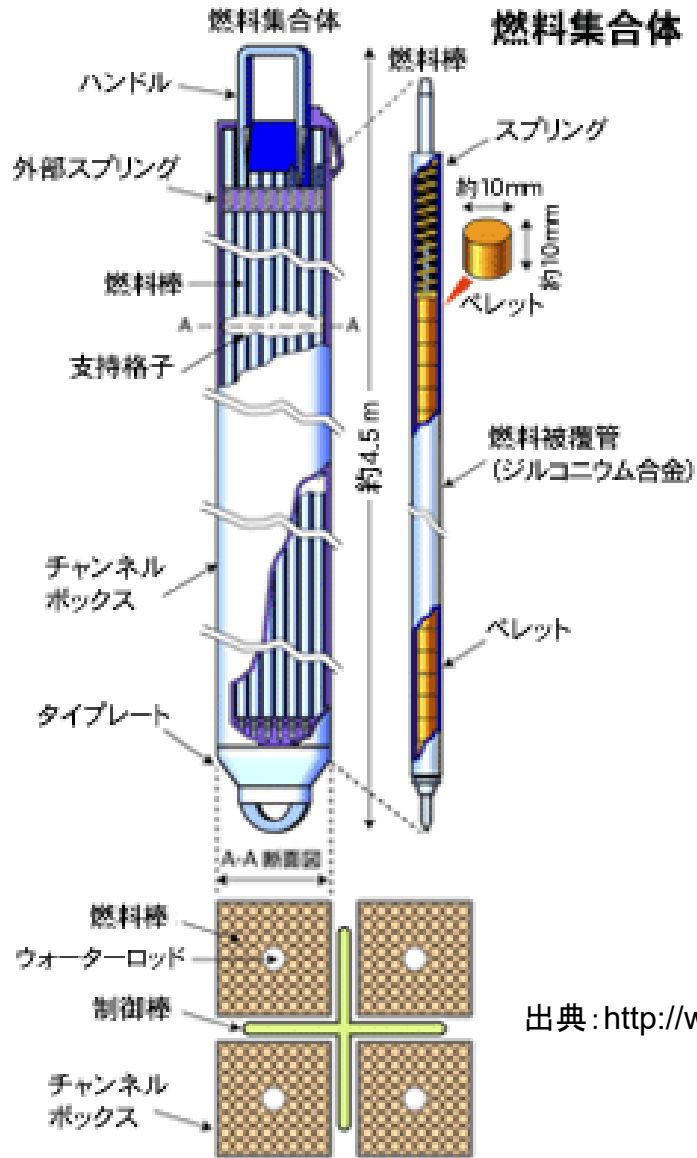
## § 2.1 燃料棒とその集合体

- 天然ウラン[U238(99.3%) + U235(0.7%)]  
→重水炉(Candu炉など)
- 低濃縮ウラン[U238(96%) + U235(4%)]  
→日本国内ではほとんど低濃縮ウラン
- 高濃縮ウラン
- ウランとプルトニウムの混合(MOX燃料, Mixed Oxide)



日本国内でのプルトニウムの集積, 民事用に消費する目的で考案された.

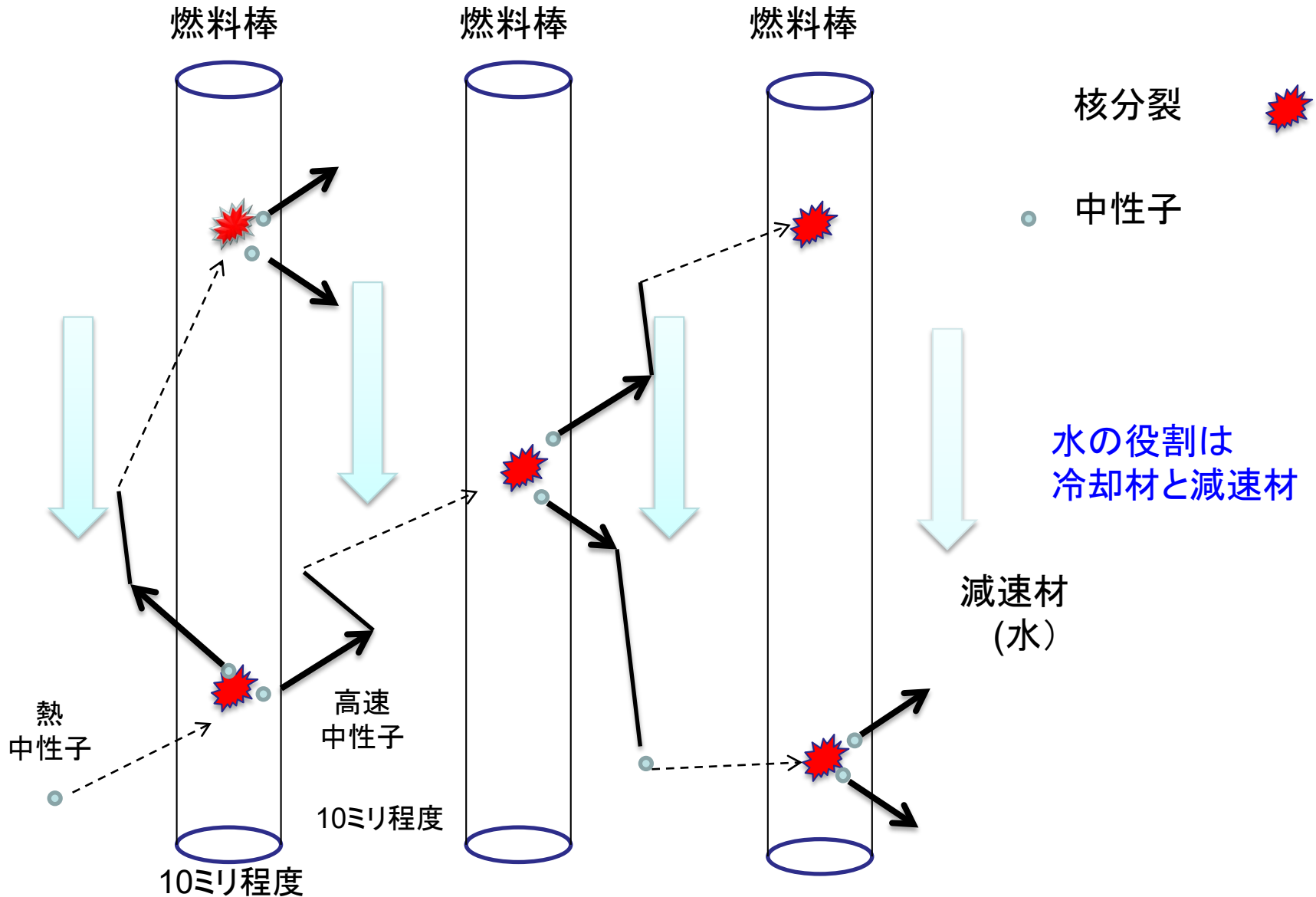
# 燃料棒・燃料被覆材と燃料集合体



**融点:** 燃料棒(2700度)、  
燃料棒被覆材(ジルカロイ2、1850度)、  
制御棒(Hf, 2222度)、  
鋼鉄(1535度)

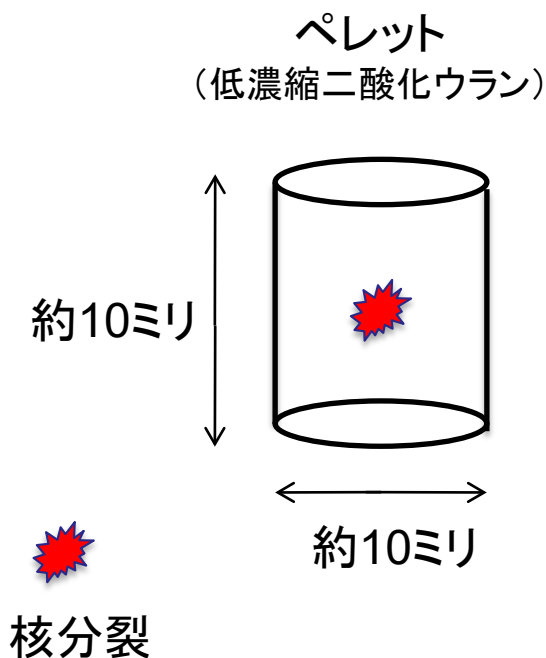
出典 : <http://www.tepco.co.jp.cache.yimg.jp/nu/knowledge/system/system01-j.html>

# 原子炉のどこでエネルギーが発生するのか



原子炉中には、細長い燃料棒が10ミリ程度の隙間を空けて、5-6万本びっしり並んでいる。

# 燃料棒と燃料被覆材は，原発運転中は過酷な環境下



運転中の場合

通常運転中は燃料の中心部は約2000°Cにもなる。燃料被覆材のジルコニウムの融点は1900°Cだが、1000°Cを越えると水蒸気との反応が始まるので、さやの表面は300°Cに抑えている。つまり、わずか5mmで1700°Cの温度勾配をつくらなくてはならない。そのために冷却水を毎秒3mで循環させている。

燃料棒の中心と表面のわずか約5ミリ足らずの間に、千度以上の温度差(非常に高い温度勾配)

冷却水は温度300度で高圧(沸騰水型原子炉で70気圧など)がかかっている。

運転中は、細長い燃料棒1本あたり約50キロワットの熱を発生する。

→100ワット電球の500個相当

→1センチ当たり、約125ワット



# 核燃料の燃焼度が3分の1位で，燃料を交換する

理由：

運転継続とともに，核分裂生成物が蓄積され，熱中性子吸収断面積の非常に大きい $^{135}\text{Xe}$ ， $^{149}\text{Sm}$ なども生成され．核分裂連鎖反応の効率が著しく低下する．

$$\sigma(n, \gamma) = 3,500,000 \text{ barn} = 3.5 \times 10^6 \text{ barn} \left( {}^{135}_{54}\text{Xe} \right)$$

$$\longleftrightarrow \sigma(n, \text{fission}) = (500 - 600) \text{ barn} \left( {}^{235}\text{U} \right)$$

このことを「キセノン135の毒作用」と言うことがある．

この結果，熱中性子利用率が低下するので，核燃料の燃焼度が3分の1程度で燃料を交換する．

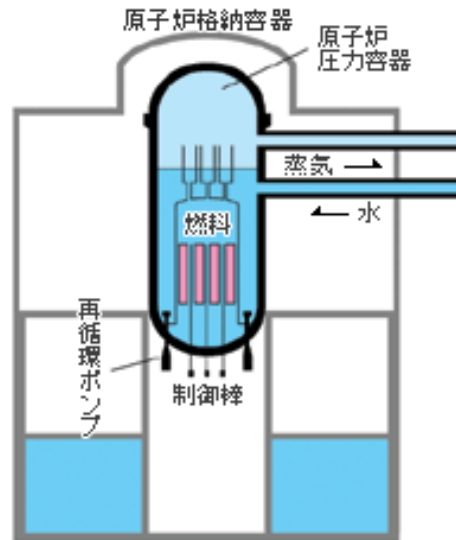
## § 2.2 制御棒および制御材

- 核分裂反応を制御する(抑止する)ための装置や薬剤のこと.
- 中性子の吸収反応が容易に起こる材料を用いる.
- ハフニウム(Hf), ホウ素(ボロン、B)、カドミウム(Cd)、キセノン(ゼノン、Xe)、などの元素、またはこれらを含む物質。
- ただし、ウランなどの核燃料物質も中性子を吸収して、核分裂反応を起こして、さらに(高速の)中性子を放出するが、その目的が異なるので中性子吸収材とは呼ばない。

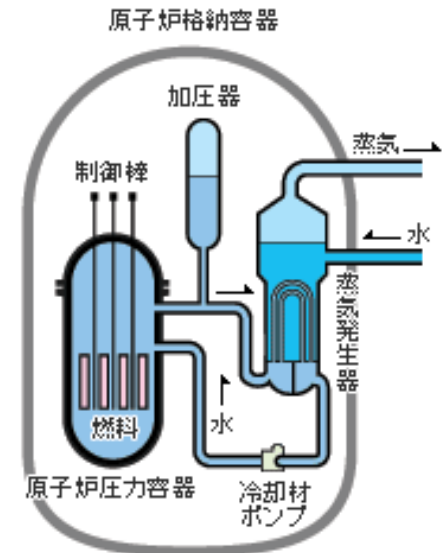
## § 3 原子炉の種類と世代

熱中性子炉; 熱中性子による核分裂連鎖反応を利用  
低濃縮ウラン軽水型炉

沸騰水型軽水炉 (BWR)



加圧水型軽水炉 (PWR)



新型転換炉(原型炉「ふげん」→実証炉は開発中止)

高速中性子炉: 高速中性子による核分裂連鎖反応を利用

→高速増殖炉: 実験炉「常陽」

→原型炉「もんじゅ」: 2017年に廃炉決定

パイプに穴があき、液体金属ナトリウムが漏れて  
しまったという事故を起こしている(1995年12月)。

# 原子炉(核分裂炉)の構成要素と形式と世代

## 構成要素:

**炉心**: 核燃料(燃料棒, 燃料集合体), 制御棒, 冷却材, 減速材,  
原子炉压力容器, 反射材

**保安装置**: 原子炉格納容器, 緊急炉心冷却装置

## 形式:

**熱中性子炉**: **軽水炉**: 加圧水型原子炉(PWR), 沸騰水型原子炉(BWR),  
重水炉:  
黒鉛炉:

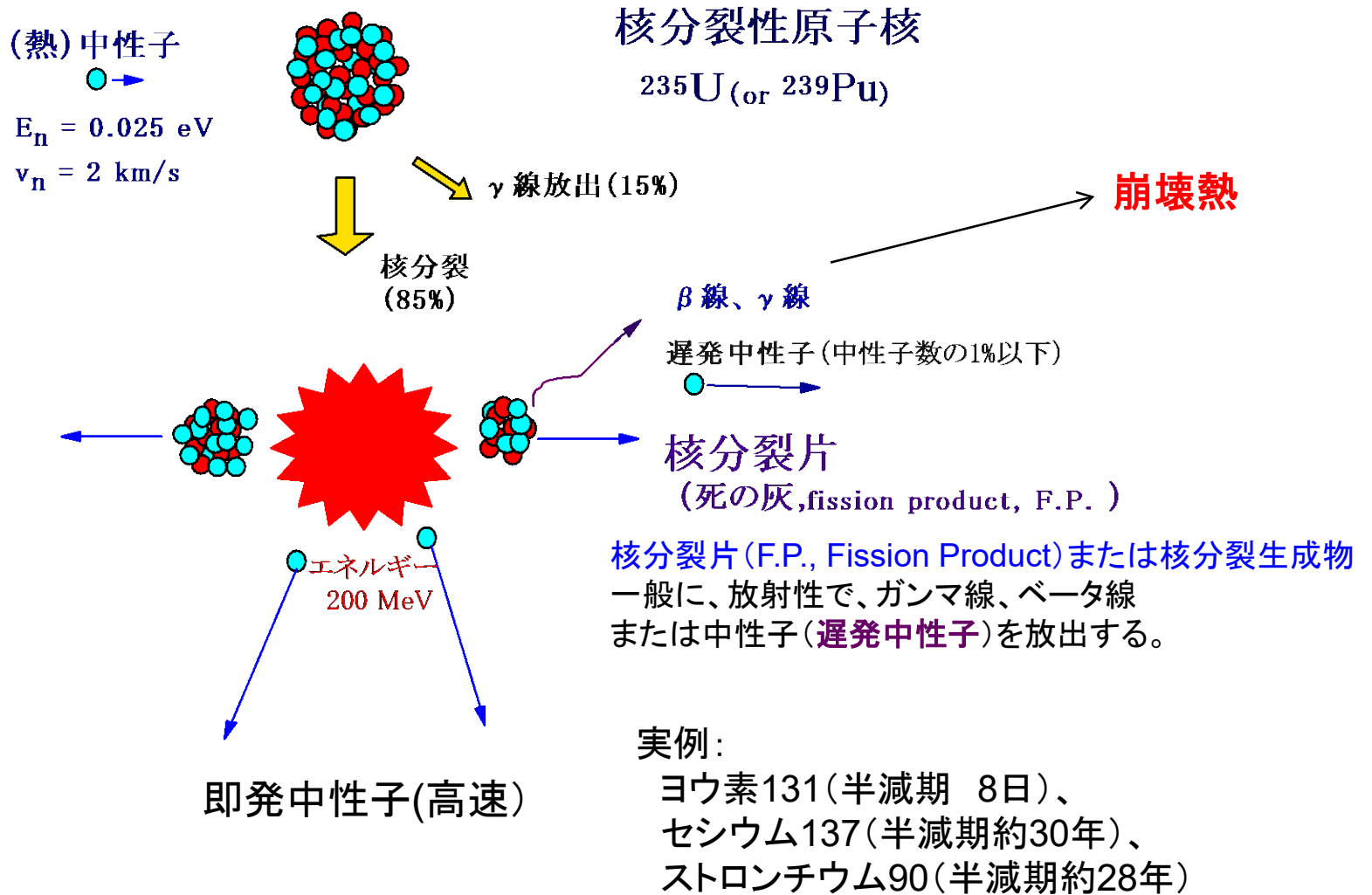
**高速中性子炉**:

高速増殖炉  
加速器駆動未臨界炉(ADS)

## 世代

第1世代原子炉 - 第2世代原子炉 - 第3世代原子炉 - 第4世代原子  
炉

# 核分裂により生成されるもの



エネルギー(化学反応の100万倍以上)  
+ 放射性物質 + 崩壊熱

## § 4 原子炉中の莫大な放射能—巨大な潜在的危険性—

100万キロワット電気出力の原発を1年稼働するときの放射能  
= 広島原爆の1000発分以上(重量比)

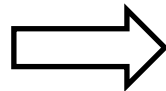
福島第一原発事故でこれまで放出された放射能は  
原子炉中の全放射能の高々1~2%程度(推定)

核燃料1トンあたり、燃焼前と燃焼後の変化

燃焼前:

U-235=34kg

U-238=966kg



燃焼後:

U-235=10kg

Pu= 10kg

核分裂生成物=34kg

U-238=945kg

福島第一原発の  
核燃料の総重量  
約600 トン

$$966 + 34 = 1000 \text{ [kg]}$$

$$945 + 10 + 10 + 34 = 999 \text{ [kg]}$$

$$\Delta m = 1\text{kg} \rightarrow \Delta E = \Delta mc^2 \approx 10^{17} \text{ J}$$

100万キロワット電気出力の原発から生じる放射能と1メガトン  
の核爆発の放射能の比較:

- (はじめ): 核爆発の放射能が原発の放射能よりはるかに強い。
- (2) 約100時間経過ころ、核爆発の放射能と原発のそれとほぼ等しい。
- (3) 100時間から遠ざかるほど、原発の放射能が格段に強い。

## § 5 崩壊熱とその冷却の死活的な重要性

(原子炉において)

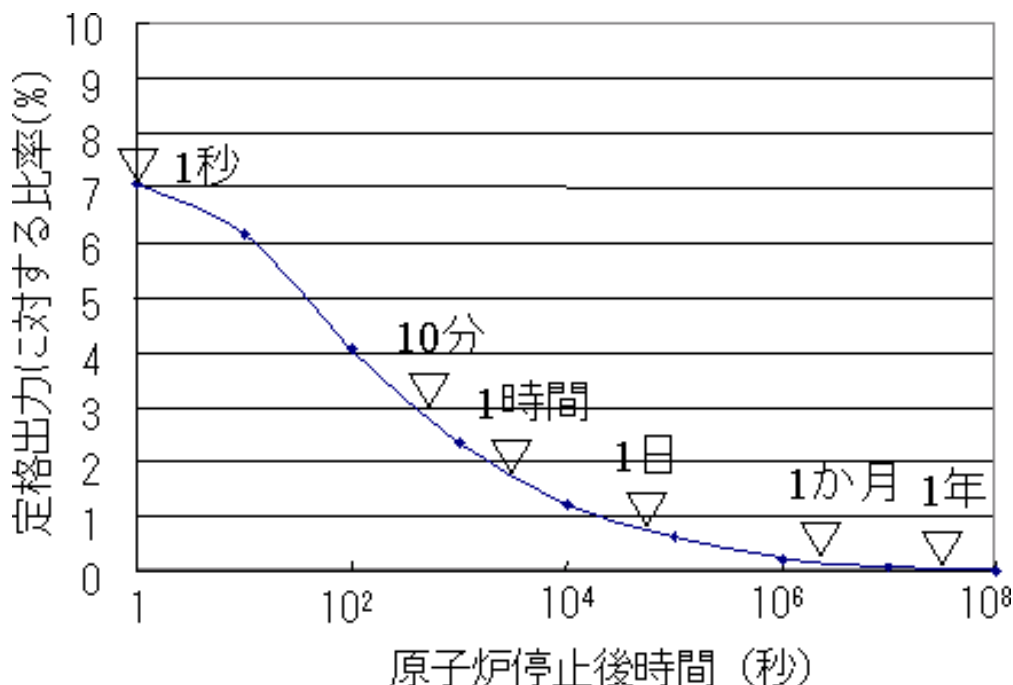
- ・原子炉が核分裂を停止しても、炉心内にはそれまでに生成された核分裂生成物が蓄積している。
- ・それらの核分裂生成物はそれぞれの物理的な特性に従って崩壊し、放射線を出す。
- ・放射線エネルギーの大部分は原子炉内で熱に変換される。その熱を崩壊熱と呼ぶ。
- ・その発熱の割合は原子炉の運転期間に依存している。
- ・この発熱があるということは原子炉の安全性に関してきわめて大きな意味を持つ。
- ・なぜなら、原子炉内の核分裂反応を停止させることができ、核分裂による発熱をゼロにすることができたとしても、

すでに炉心に蓄積して発熱を続けるこの崩壊熱は決して人為的に止めることができないからである。

- ・自動車にたとえて言うならば、  
運転手不在で、走行中にハンドル、ブレーキ、アクセルが効かず、ガソリンが尽きるまで車は走り続けなければならないといった状態になるのである。

# 原子炉停止後も核分裂生成物からの 崩壊熱の冷却は重要！（大略）

下のグラフは、制御棒が挿入され原子炉が停止した後も、かなりの期間、原子炉から発生する熱（崩壊熱）の時間的変化を表しています。



崩壊熱は原子炉を停止させれば  
最初は急激に減少し、1秒後には定格  
出力で運転する際に発生する熱量の  
約7%、1日後には1%以下となります。

しかし、かなり長期間にわたって発熱  
が続く！

中国電力HPより

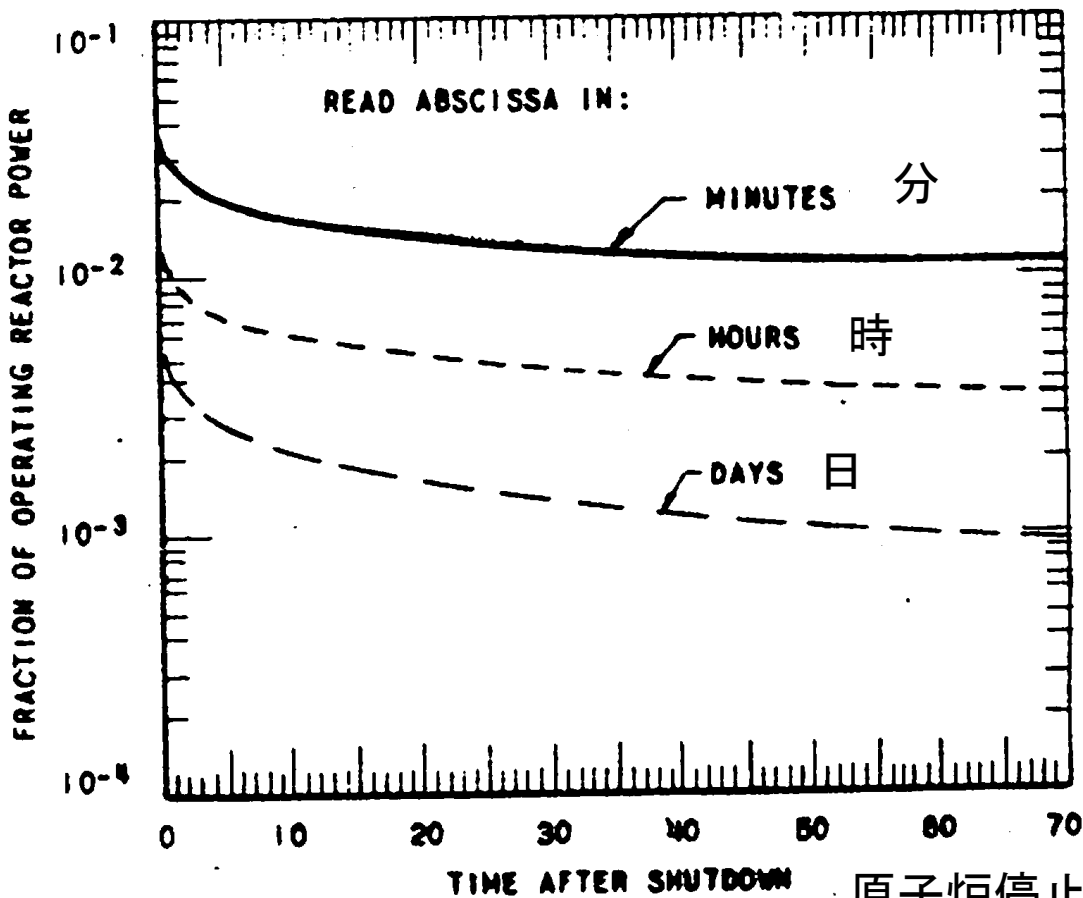
横軸は対数であることに注意

[http://www.chuden.co.jp/faq/faq\\_hama\\_jishin/3005607\\_7711.html](http://www.chuden.co.jp/faq/faq_hama_jishin/3005607_7711.html)



# 原子炉における崩壊熱の時間経過(詳細)

ある時刻における  
崩壊熱出力  
÷  
原子炉停止  
直後の熱出力



縦軸は対数であることに注意

Reactor Physics Constants, ANL-5800, 1958, p.636.  
ANL=Argonne National Laboratory, USA.

## § 6 原子力発電と火力発電との比較

### (1) 蒸気を発生させる仕組みの違い

原子力発電: **原子核エネルギー(原子力)**で蒸気を発生させ、蒸気ので発電タービンを回して発電する。

火力発電: 石油または石炭など**化学エネルギー**によって蒸気を発生させ発電タービンを回して発電する。

### (2) 出力密度は原発が非常に大きい。

(3) 稼働中の火力発電ではCO<sub>2</sub>などが発生する、  
稼働中の原子力発電ではCO<sub>2</sub>などは発生しないが、  
放射能をもつ核分裂生成物が生成される。

(しかし、原発運転の場合、ほぼ同じ規模の火力、揚水発電など補完電源が作られてきて、原発運転により、CO<sub>2</sub>は必ずしも減少してはいない)

(4) 原子力発電の出力変動は容易ではないが、火力発電の出力変動は容易である。  
特に、原発は停止後も崩壊熱の冷却のため外部電源が必要不可欠である。

電源喪失(station blackout)の発生の確率は無視できるほど小さいと主張されていた!

### (5) 熱効率(熱から電気への変換効率)の違い

原子力発電: **熱効率34%程度**

最新型火力発電: **熱効率約61%(2014年現在)**

(6) 原子力発電システムは設備費が巨大(数千億円)であるが、燃料費は相対的に安価である。  
逆に、火力発電システムは燃料費が大きい設備費は相対的に安価である。

電力事業者としては、**原子力発電の稼働率を高めたいという利潤動機が強まる**



事故対策、廃炉、高レベル核廃棄物の処理処分など社会的費用は外部化(アウトソーシング)および未来世代に負の遺産とされてきたが……

# 原発の出力密度の大きさ

原子炉炉心のおよその大きさと出力密度

原子炉の形式	直径 (m)	高さ (m)	出力密度 (kW/ℓ)
天然ウラン黒鉛炉 (GCR)	16.0	8.0	1.0
濃縮ウランAGR	10.0	8.3	2.5
高温ガス炉HTGR	8.4	6.1	8.5
重水炉CANDU	3.1	6.0	10.0
軽水炉BWR	4.7	3.8	70.0
軽水炉PWR	3.3	3.8	100.0
高速炉FBR	1.8	1.0	300.0

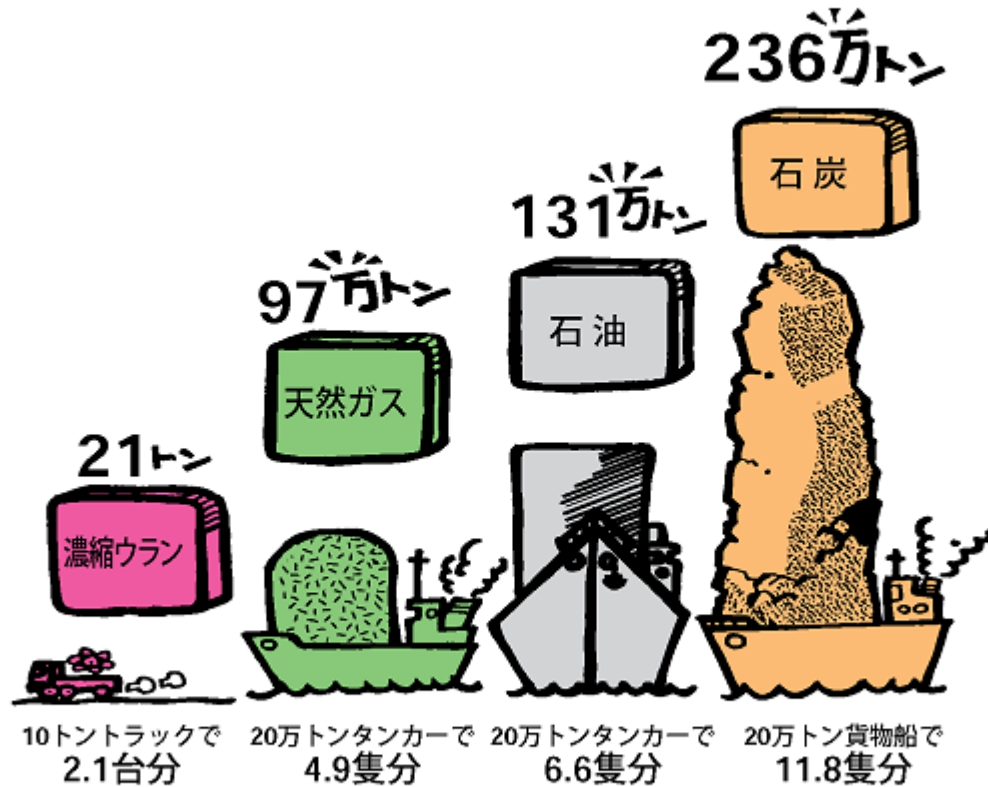
日本原子力学会編「原子力がひらく世紀」1999年、p.242より。

ボイラーの出力密度=0.5-10kW/ℓ

(大山彰「現代原子力工学」オーム社、1985年。P。199)

**出力密度が大きいと、制御失敗の場合のリスクも大きいこと**

# 100万kWの発電所を1年間運転するために必要な燃料



出典：資源エネルギー庁「原子力2001」

2-1  
45

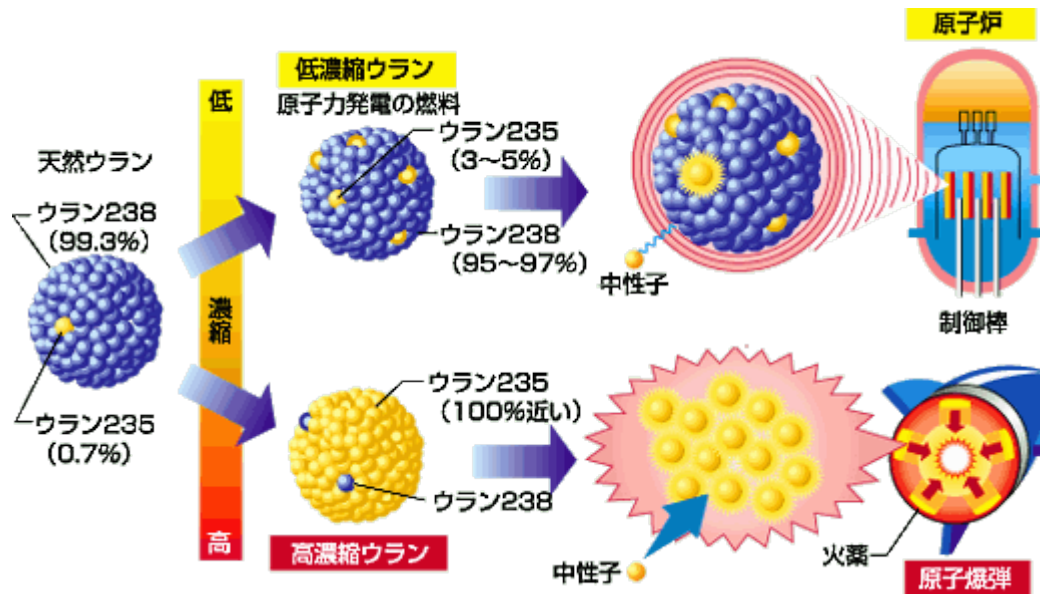
**出力密度が大きいと、制御失敗の場合のリスクも大きいこと**

# § 7 原子力発電と原爆(核分裂兵器)の違いと関連

## § 7.1 設計・仕組みにおける相違

**原子力発電**: **低濃縮ウラン**を熱中性子により、一定出力を維持するように核分裂連鎖反応を制御

**原爆(核分裂兵器)**: **高濃縮ウラン**を高速中性子により、極短時間にエネルギーを放出するように核分裂連鎖反応を制御



原子力DICTIONARYより

# 原子炉で核爆発は起こらないこと

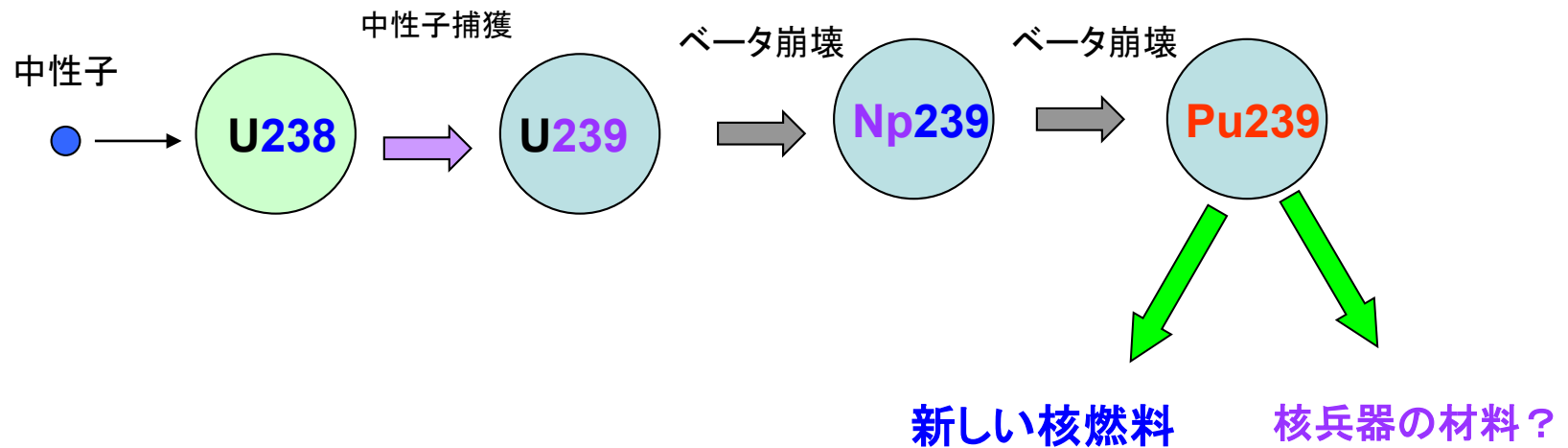
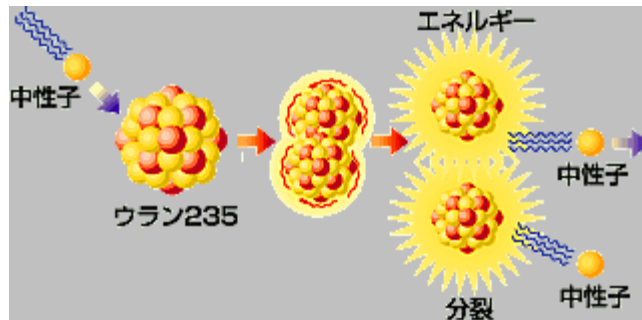
原子炉で核爆発が起こることは不可能であると思われる。以下その理由を記す。

- 1) 原子炉中の核分裂性物質(ウラン235)の濃縮度がかなり低い。軽水型原子炉の核燃料におけるウラン235の濃縮度は約4%であるが、広島原爆のウラン235の濃縮度は約90%以上である。
- 2) 原子炉では主として熱中性子(平均エネルギー=0.025 eV)による核分裂連鎖反応である。しかし、核爆発では、高速中性子(平均エネルギー=2 MeV =2,000,000 eV)による核分裂連鎖反応である。
- 3) 原子炉では核兵器に必須のタンパー<sup>5,7,8)</sup>の機能をもつ構造物はない。

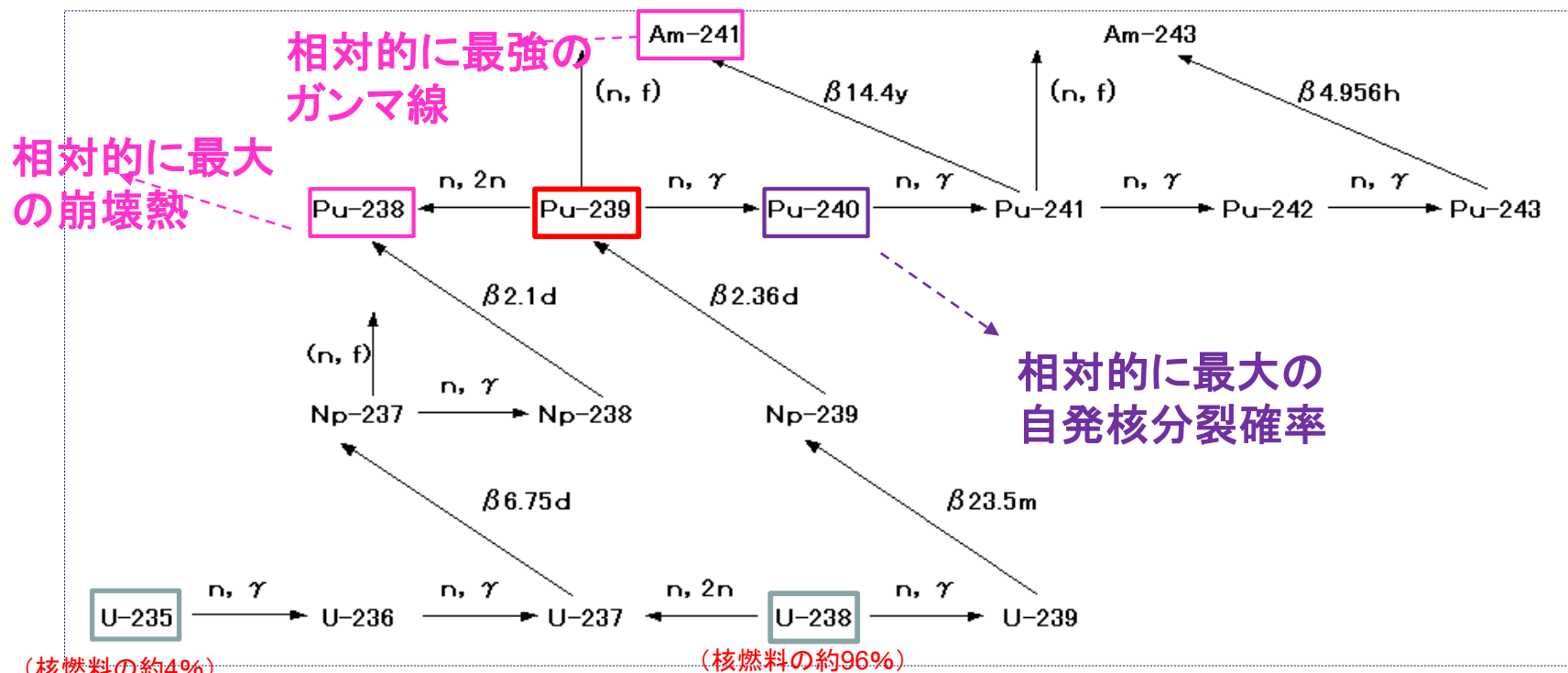
## § 7.2 原子力発電と原爆(核分裂兵器)の関連

### 原子炉でプルトニウムが生成される

- 低濃縮ウラン[U238(96%) + U235(4%)]



# ウラン核燃料の中性子照射により生成されるプルトニウム同位体

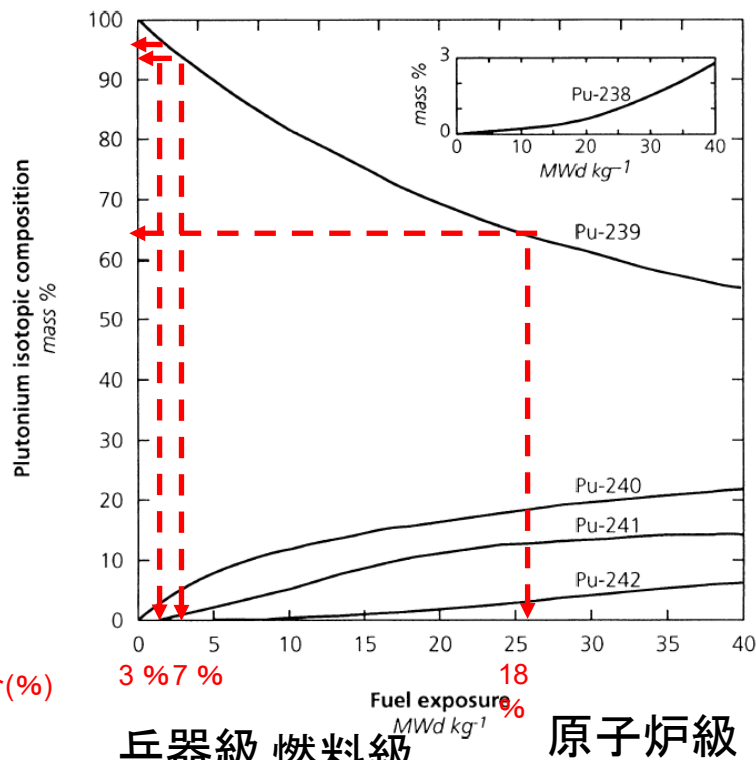


出典: Nuclear Energy Agency: Plutonium Fuel, an assessment, OECD 1989  
<https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/1989/nea6519-plutonium-fuel.pdf>  
<https://atomica.jaea.go.jp/data/pict/04/04090101/04.gif>

四角枠とカラーの文字は引用者が加筆。



# 加圧軽水型原子炉中に置かれた核燃料中のプルトニウム同位元素の構成の時間変化



Pu240の割合(%)

3 % 7 %

18

兵器級の範囲の左端(Pu240の3%)はPu241が生成し始める時点に相当している。

横軸はkgあたりのウラン核燃料の中性子のよる照射時間に対応(単位[Mega-Watt-day/kg])

Figure 1: Plutonium isotope composition as a function of fuel exposure in a pressurized-water reactor, upon discharge.

出典: [Mark1993] 赤(文字,点線)は引用者加筆。

Filename=reactor-grade-Pu-and-nuclear-weapon-n111ote20191216.ppt

## 小まとめ：

- 使用済み核燃料から分離されるプルトニウムは核兵器に使用できないという一部の識者による言説がある.
- 種々の分析と関連事実を踏まえれば，長崎原爆の設計技術を用いても原子炉級プルトニウムからつくられる兵器でも0.5キロトンから数キロトンの威力をもつ可能性がある.
- 1950年代以降の設計技術を使えば，原子炉級プルトニウムを用いて兵器級プルトニウムの場合と同等の性能をもつことが可能である.

## § 8 複雑系としての原発システム

### 原発プラントの設計と関連研究分野—その複数階層性と多重性—

**核設計**(炉心における臨界状態の維持, 起動, 停止, 核拡散防止)

原子炉工学 + 原子核物理学

**力学設計**(重量, 耐震設計, …)

構造力学 + 耐震工学 + 地震学

**熱流体設計**(エネルギー変換, エネルギー・バランス, 物理的・化学的変化)

熱工学・熱力学 + エネルギー変換工学 + 流体力学 + 流体力学

**材料設計**(炉心, 安全装置, 構造物の材料選定)

材料工学(材料科学), コンクリート工学, 岩石学,  
高温物性の工学・科学(物理学, 化学)

**原子炉安全設計**(事故防止, 事故の進行緩和・減速・収束)

原子炉安全工学など

# 巨大人工複雑系としての原発システム

「(電気出力)100万kW 級原発には

配管10,000トン(170 km),  
溶接点数65,000点,  
ケーブルの長さ1,700 km,  
各種弁30,000台,  
モーター1,300台,  
ポンプ360台,  
モニター20,000カ所,  
熱交換器140基等があり, 複雑系である。」

出典:

青木一三(プラント設計・建設・試運転・トラブルの原因究明と対策立案に従事)  
<http://www.asahi-net.or.jp/~pu4i-aok/cooldata2/politics/regulation.htm>

「・・・原子力発電所で使用されているケーブルは、1プラントあたりで全長約1000から2000kmに及ぶ。ケーブルは電動機等の機器へ電力を供給する機能や機器の監視・制御信号を伝達する機能を有し、人間に例えると血管や神経系統の役割を果たしている。ケーブルに使われている高分子化合物の絶縁体等は、通常運転時の熱・放射線環境において酸化等により徐々に経年劣化するとともに、原子炉格納容器内のケーブルは、設計想定事故時の高温水蒸気と高放射線量の過酷な環境により急激な絶縁性低下が引き起こされることが知られている。・・・

しかしながら、最近の知見によると、通常運転時の熱・放射線による経年変化を想定した電気学会推奨案の加速劣化手法は、必ずしも実機を正確に模擬できていない可能性があることが分かっている。」

(独立行政法人・原子力安全基盤機構「原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド」(JNES-RE-201302049), 2014.2,

<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000127230.pdf>)、p.1より

## 「複雑な巨大人工物システムとしての原子力発電プラント」

20140326関村直人「学会のあり方について-事故の根本原因分析に基づく」

<http://www.aesj.or.jp/jikocho/20140326/gakkai.pdf>

「原子力技術は複雑巨大人工物システムを対象としている」、「社会や経済に深く関わる巨大複雑系システムとしての特性を踏まえ、・・・」

日本原子力学会編「福島第一原子力発電所事故一学会事故調 最終報告書」

丸善出版、2014年。P.3, p.356,

# 原子力発電所(100万kW級)の物量等

熱交換器 140基

ポンプ 360台

弁 30,000台

モーター 1,300台

計器 10,000個

配電盤 1,200面

配管 10,000トン, 170 km

(東京ー静岡県清水市までの距離)

ダクト 41,000 m<sup>2</sup>

サポート類 4,000トン

溶接点数 65,000点

モニタ 20,000カ所

(BWRとPWRを平均したもの)

ケーブルの長さ1,700km

(青森から下関までの高速道路距離)

広さ 10,000~22,000 m<sup>2</sup>

(東京ドームのグランド面積くらい)

原子炉建屋の高さ 80m

原子炉圧力容器 700トン

タービン・発電機 11,000トン

部品点数 1000万個

工事最盛期の人数 3,000人/日

工事期間 4~5年

出典: 日本原子力学会編「原子力がひらく世紀」1999年. p.144

## 参考文献

- [1] 大山 彰「現代原子力工学(2版)」、オーム社、1986年。
- [2] 山本賢三、石森富太郎「原子力工学概論(上)」、培風館、1986年。
- [3] 成田正邦,澤村晃子「原子炉物理の基礎」、現代工学社, 1998年。
- [4] J.R.ラマーシュ、A.J.バラッタ「原子核工学入門(上)」、  
ピアソン・エデュケーション社, 2005年。
- [5] <http://www.atomin.go.jp/atomin/popular/atomica/index.html>