

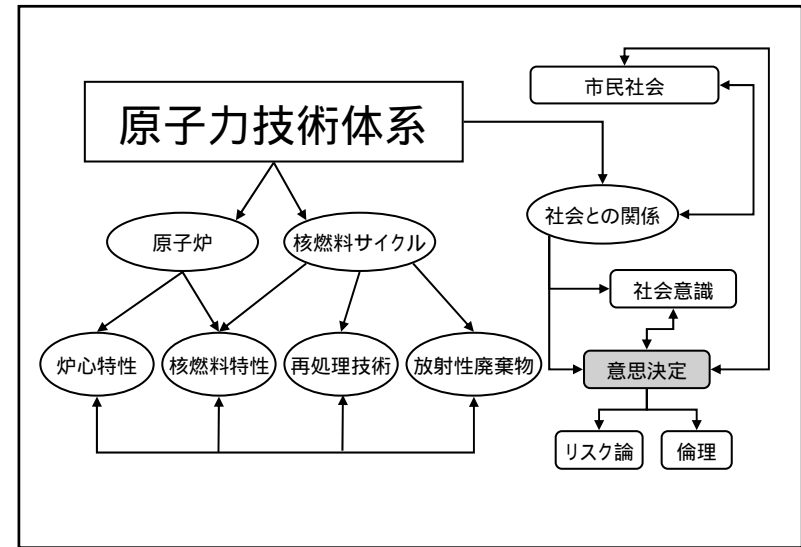
# 原子科学と倫理 12月22日

## 原子力技術の基礎 2限

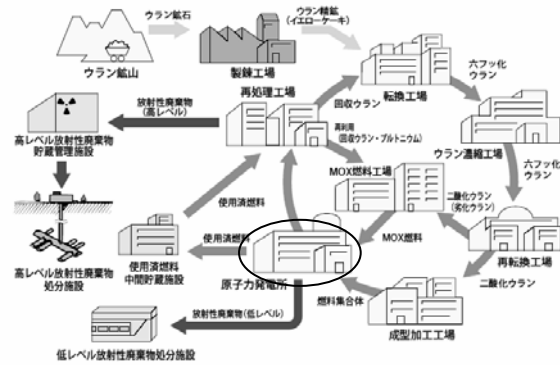
篠田 佳彦

shinoda.yoshihiko@plum.plala.or.jp

本資料では、ことわりのない図については「原子力図面集」より、引用しています。電事連に感謝いたします。  
以下の事項に当てはまる件に関しては、その範囲を逸脱しないことを条件に、文書による電気事業連合会の許可を得ずに、本サイトの著作物を利用することが許可されています。大学(院を含む)等の教育機関における学校教育の補助教材又は主教材として、教材を配布する講師自身が作成利用する。



# 原子(核)燃料サイクル(軽水炉)

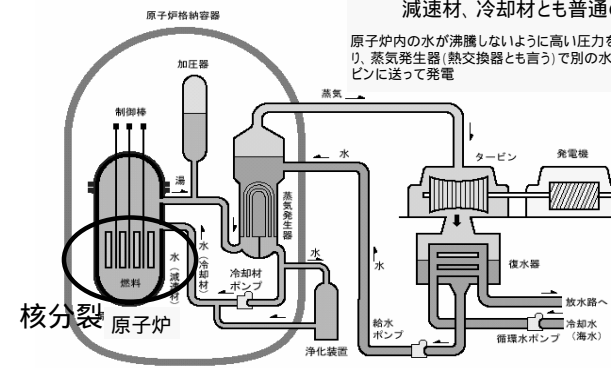


# 原子炉の仕組み

加圧水型軽水炉 (PWR: Pressurized Water Reactor)

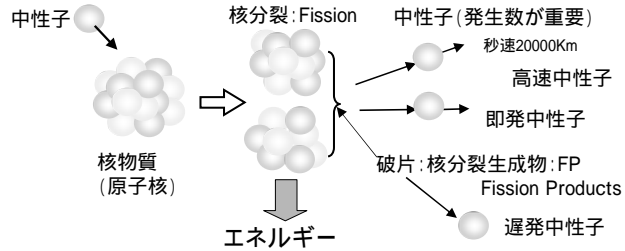
燃料:濃縮ウラン  
減速材、冷却材とも普通の水

原子炉内の水が沸騰しないように高い圧力をかけて高温の水を作り、蒸気発生器(熱交換器とも言う)で別の水を蒸気に変えて、タービンに送って発電



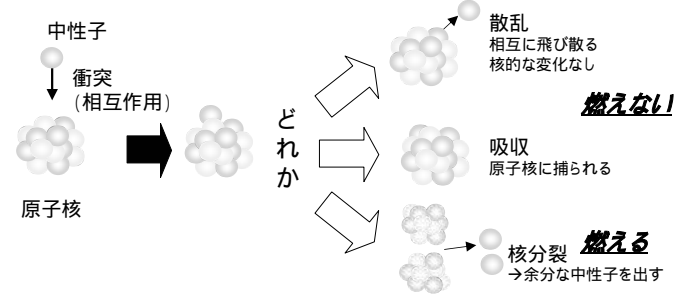
# 核分裂

→核分裂のことを「燃焼・燃える」とも表現  
そこから、核物質を「核燃料」と表現



法律での定義  
核燃料: 原子炉に入れたとき、核分裂反応を起こしエネルギーを発生する可能性のある物質  
核物質: 天然ウランやそこから派生するPu239,U233等政令で定めたもの

# 中性子の反応: 燃える、燃えない



「散乱」、「吸収」、「分裂」などが起こる。  
どの反応が起こりやすいかどうかは、原子核の種類で異なり、衝突する中性子の衝突速度(エネルギー)で大きく変化する。

# 中性子の衝突速度 (エネルギー)

高速中性子(核分裂で生じる中性子など) 約 秒速 20000km

高速中性子に対して、遅い中性子約 秒速2km

← 熱中性子 Thermal Neutron

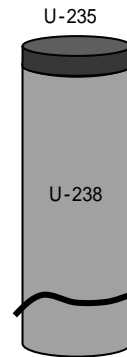
普通の温度(常温)で中性子は、

→周囲の熱と同じくらい、常温での原子の運動(秒速2km)と同程度

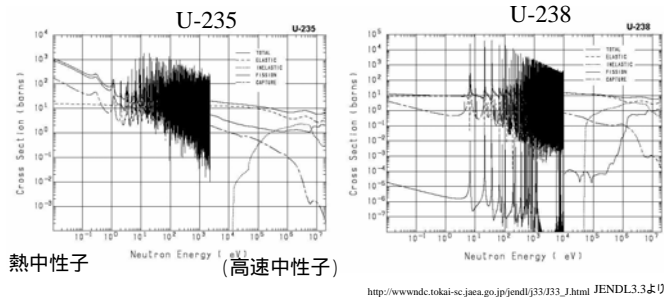
# 天然にまだ存在する核分裂が可能なもの 核燃料→ウラン=U

ウラン (自然界の中で一番大きくて重い元素)  
原子番号92、2つの同位元素が存在する。

同位元素	ウラン235	ウラン238
質量数	235	238
中性子数	143	146
	↓	↓
存在比	U-235 0.7%	U-238 99.3%
	↓	↓
	燃える (核分裂する) やすい	燃えない (核分裂しない) にくい



## ウラン235(U-235)、238 (U-238)の性質



- ・U-238は、中性子吸収反応が支配的→分裂しにくい→燃えにくい
- ・U-235は、遅い中性子がぶつかるほど分裂しやすい→燃えやすい

## 原子炉

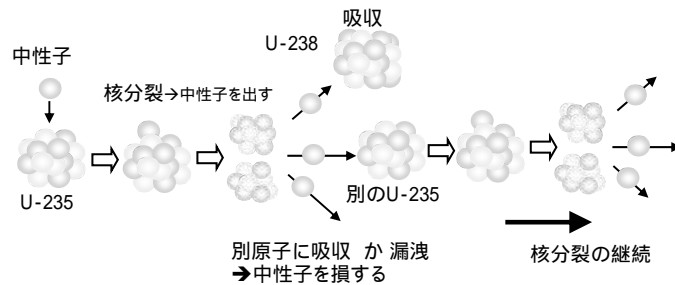
核燃料物質を使用して、  
核分裂連鎖反応を制御しながら持続させる装置

核分裂して、エネルギーを発生する源 = 核燃料が必要

→ 日本で稼動している原子炉のほとんどは、  
核燃料として、ウラン(原子番号92)を用いている！

## 連鎖反応(核分裂反応の継続→原子炉)

核分裂が継続する条件  
核分裂で生成した中性子の内の少なくとも1個以上は次の核分裂に使われること  
臨界→核分裂の連鎖反応が一定の割合で持続している状態



天然ウランを核燃料にして原子炉を作るには、  
遅い中性子で、次の核分裂に活かされる中性子数が約1.3個程度  
→連鎖反応が可能ではあるが(←足りない)  
速い中性子では、1個をかなり下まわり、連鎖反応が進まない。

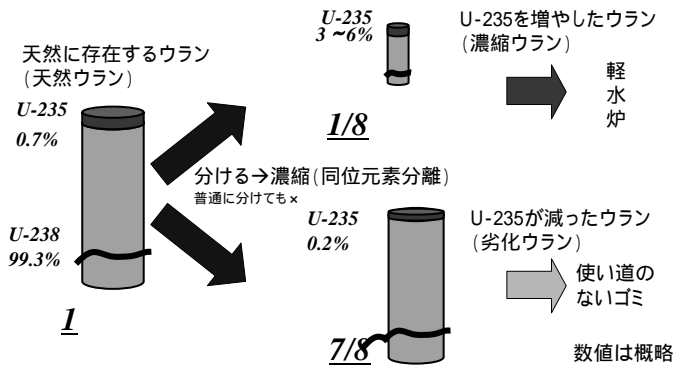
原子炉内では、連鎖反応が継続することが必要  
ウランで核分裂を継続させるためには、工夫が必要となる

- ・核分裂の際に放出される速い中性子を遅く。遅いほど分裂しやすくなる
- ・燃えやすいU-235を増やす 当たる割合を増やす

ウランで原子炉を作るためには、  
中性子を遅くする。→ 減速  
燃えやすいU-235を多くする → 濃縮  
ウラン以外のものに中性子を横取りされない。(他の物質を少なく)  
中性子を漏らさない。→ 大きな、丸い炉の形 → 中性子を損しない

# ウラン濃縮

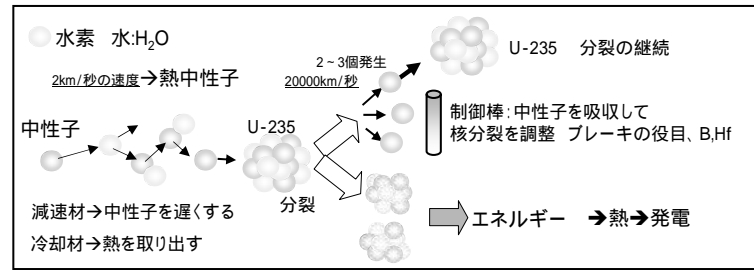
燃えやすいU-235の割合を増やす→源の確保



# 水(水素)の利用

軽水炉LWR Light Water Reactor

熱中性子炉 Thermal Reactor

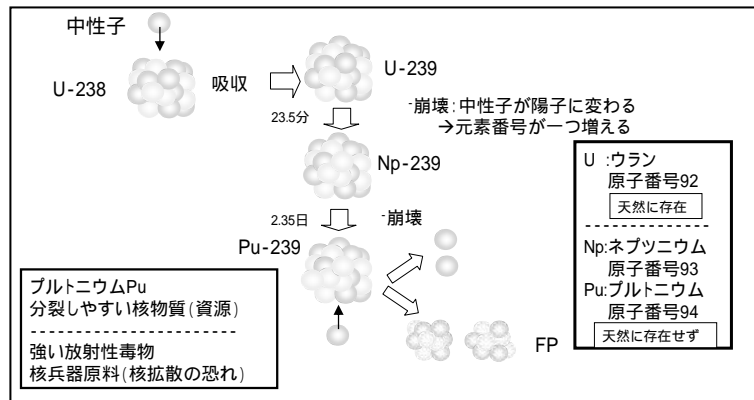


水(軽水)で中性を遅くして核分裂しやすくし、水(軽水)で熱も取り出す

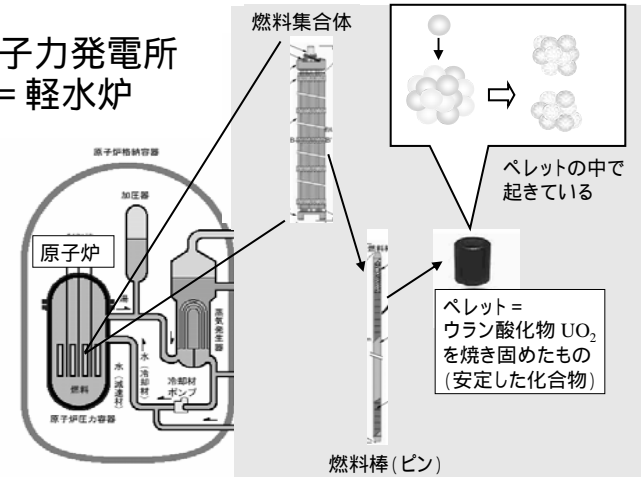
軽水: 普通の水素(陽子が一)でできた水

遅い中性子 = 熱中性子

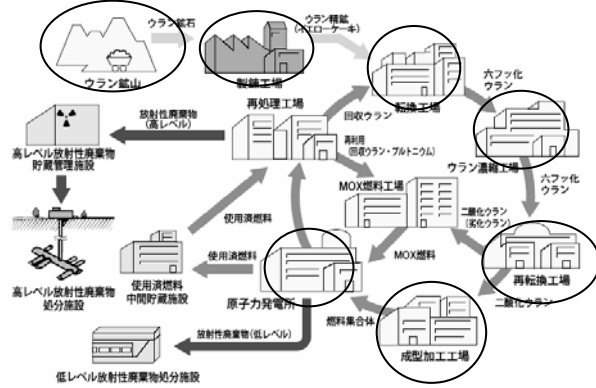
軽水炉の中では、分裂しにくいU-238は、中性を吸収し、燃えやすいプルトニウムに変わっていく



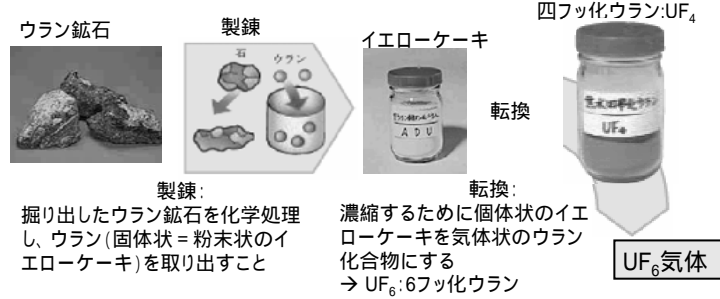
# 原子力発電所 = 軽水炉



## 軽水炉を運転するまで



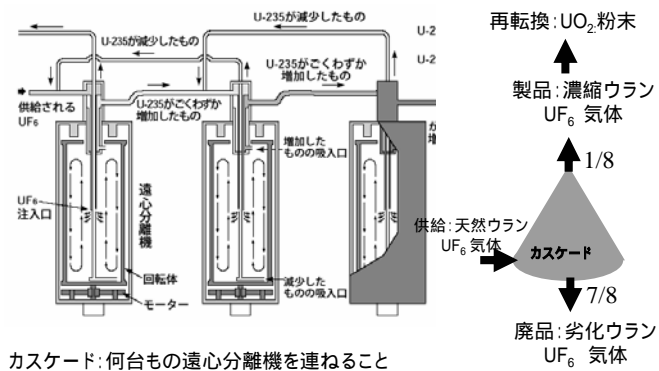
## ウラン鉱山から転換まで



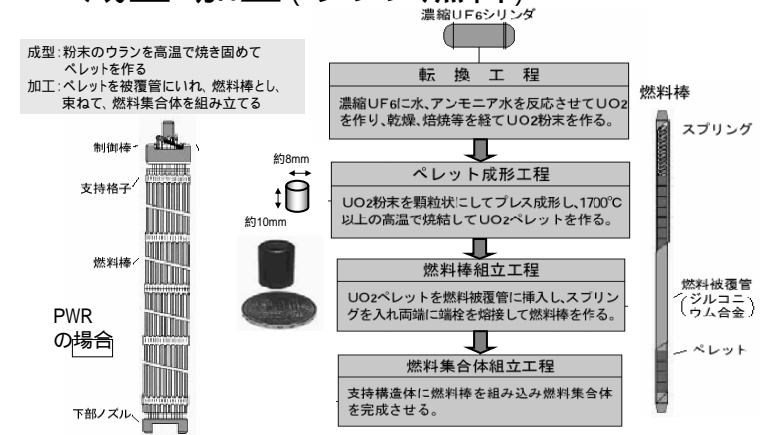
金属ウランは、空気中で加熱すると酸化される。粉末だと常温でも反応し、発火も酸化物UO<sub>2</sub>は、安定なので、利用しやすい → 原子炉燃料としてよく用いる

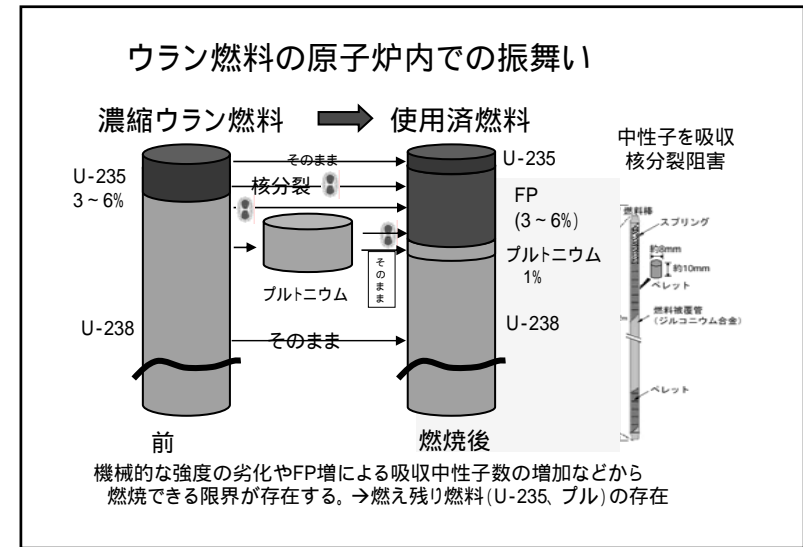
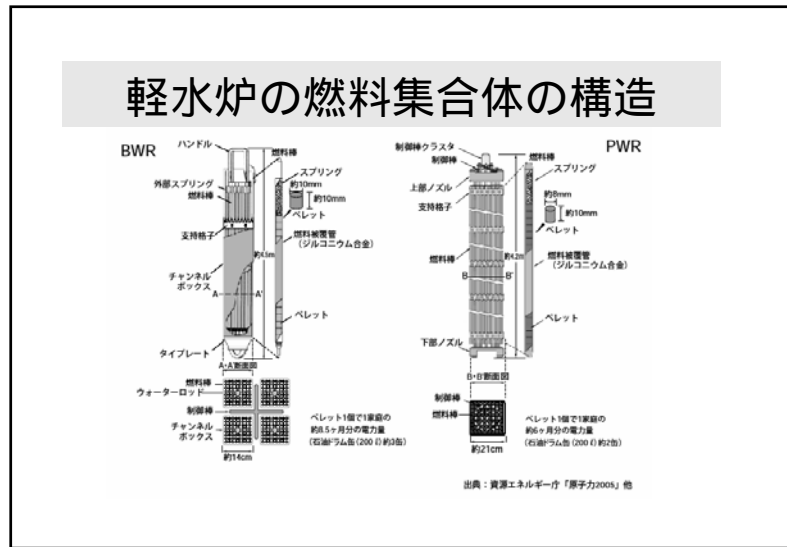
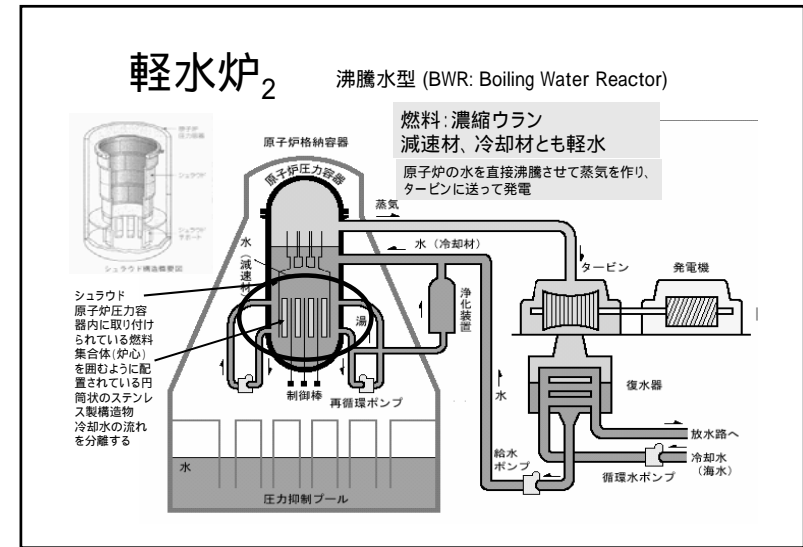
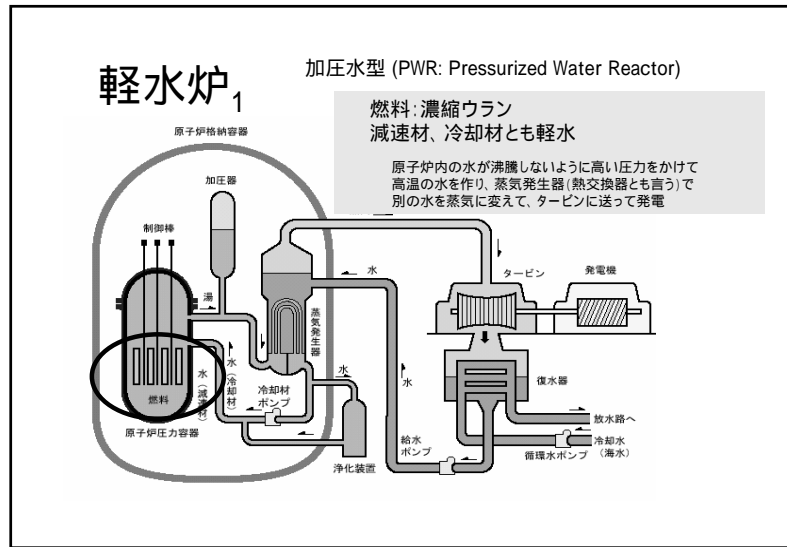
ADU:重ウラン酸アンモニウム (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>U<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

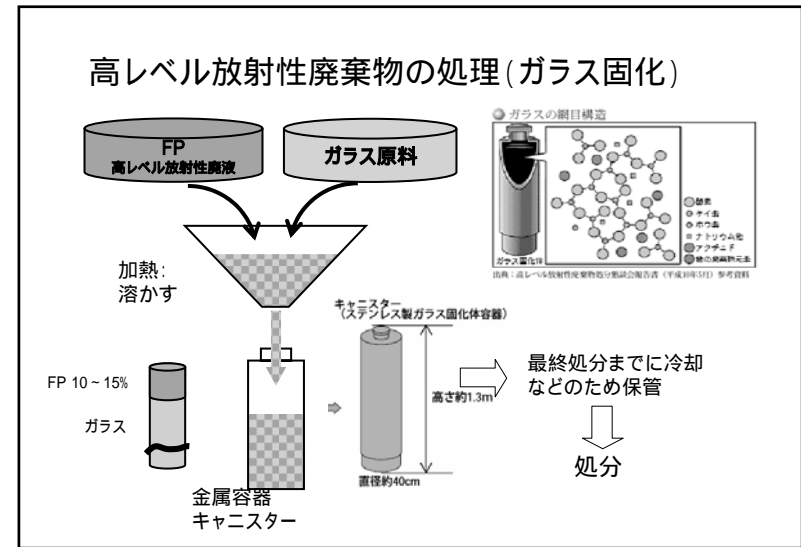
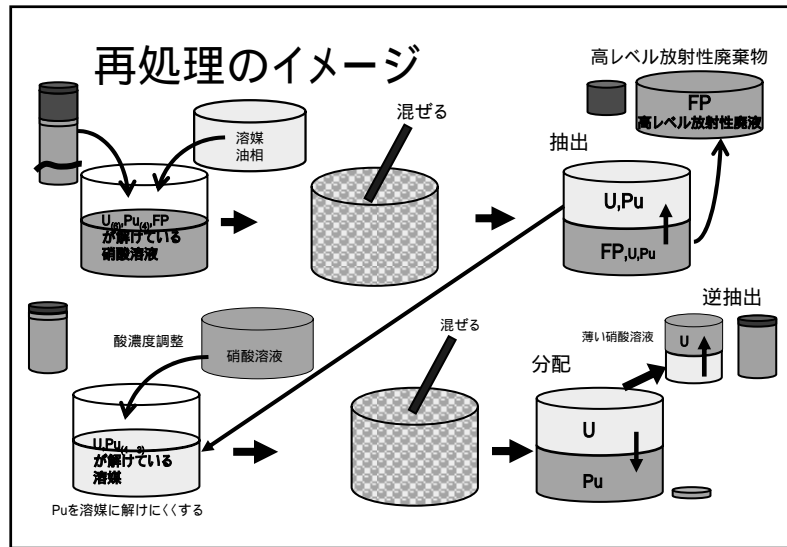
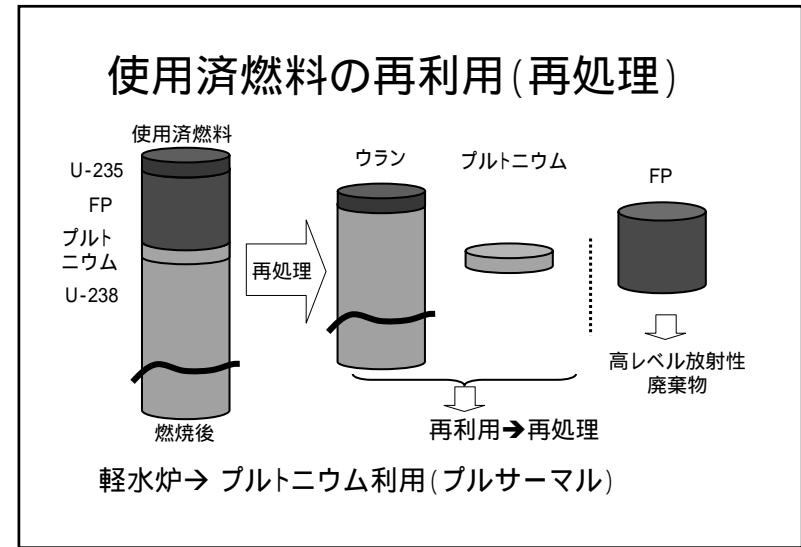
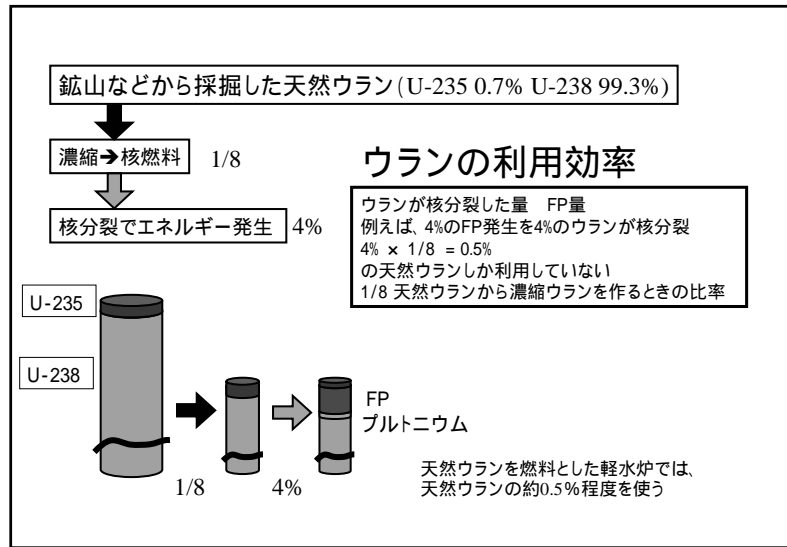
## ウラン濃縮 (遠心分離機)



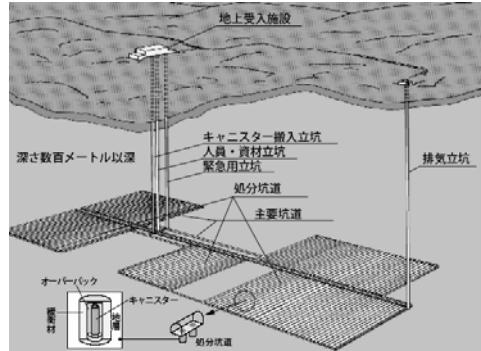
## 成型・加工 (ウラン燃料)





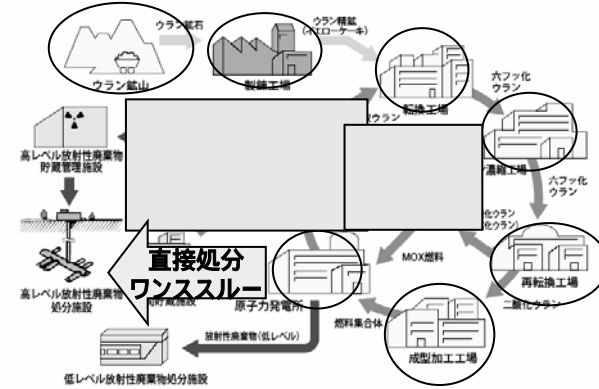


## 高レベル放射性廃棄物処分場概念

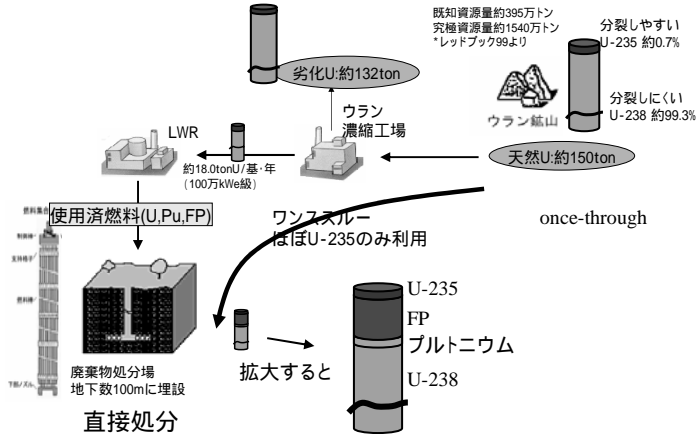


人間の生活圏から切り離す(隔離する)

## 軽水炉を運転するまで



## 軽水炉(ワンスルー)リサイクルしない場合



## 軽水炉を運転し続けるためには！

ウラン資源を常に確保しつづける必要

→ウラン埋蔵量の限界、価格変動

→海水中に含まれる微量のウラン

海水1トンの中に3ミリグラム

黒潮から約500万トン/年

使用済燃料をうまく処分できない可能性

→使用済燃料を、燃料集合体のまま処分する(直接処分)

→アメリカ、スウェーデン、フィンランドなどは直接処分

日本、フランスなどは、再処理してガラス固化



## 使用済燃料をそのまま処分すると

### 処分

- ・危険の大きな(毒物である)プルトニウムも処分してしまう
- ・核兵器原料であるプルトニウムを処分し、悪用される恐れ

(高レベル廃棄物及びその処分場の負荷は、処理方法、処分概念などに左右され、優劣を判断するのは難しい)

### 資源利用

——プルトニウム(資源でもあるが毒物・危険物でもある)を捨てることになる。——

資源として使用できるプルトニウムを捨てることになり、鉱山からのウラン資源が枯渇する恐れがある。



資源は、使ったほうがよい。←→ 他に使えるものがあれば使わなくとも毒物・危険物は、処分(隔離)したほうがよい←→使っているほうがよい

(資源と処分が問題となるかどうかは別にし)、解決策は？

33

## 高速増殖炉

- ・Pu-239は、速い中性子(=高速中性子)でも核分裂はする。
- ・Pu-239は、U-235より、核分裂時に多くの中中性子を出す。
- ・核分裂で生成した中性子のうちの次の核分裂に使われる中性子は、高速中性子でも1以上(速くなればなるほど出す中性子が豊富になる)  
→高速中性子でも臨界にできる。→原子炉を作れる
- ・高速中性子は、FP元素などによる中性子吸収が少ない。→中性子損が小

### 高速中性子を使った原子炉

プルトニウムを核燃料に用いる  
中性子を減速させず、高速のまま使う  
プルトニウムと高速中性子を効率的に使う

34

## 高速増殖炉

**FBR** (Fast Breeder Reactor)

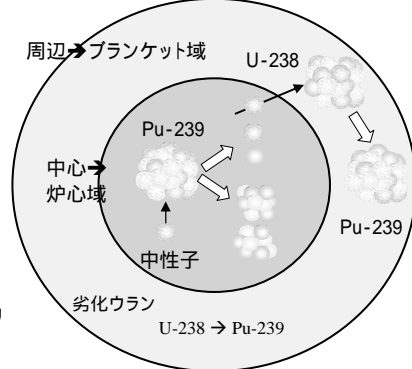
中心で核分裂、  
周辺で核燃料生成

消費した以上のPu-239を炉心部及びブランケット域のU-238から生産する能力 = 増殖 (核分裂で生じる中性子数が多いことを活用)

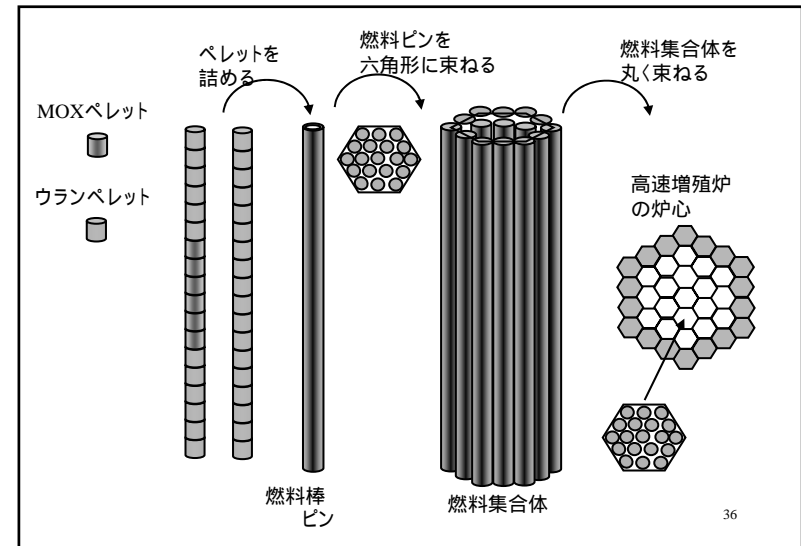
軽水炉では、利用しにくいU-238を分裂するPu-239に変え、使い続けられる能力 = ウラン利用率の圧倒的向上

中性子を減速せず、熱を取り出しやすい冷却材(減速効果無)  
→液体金属(Na, Pb, Pb-Bi)やガスCO<sub>2</sub>, He 或いは水でも可能

### 原子炉の中のイメージ



35



36

