

原子力エネルギー

—原子力発電と原子爆弾—

工学系 原子力専攻

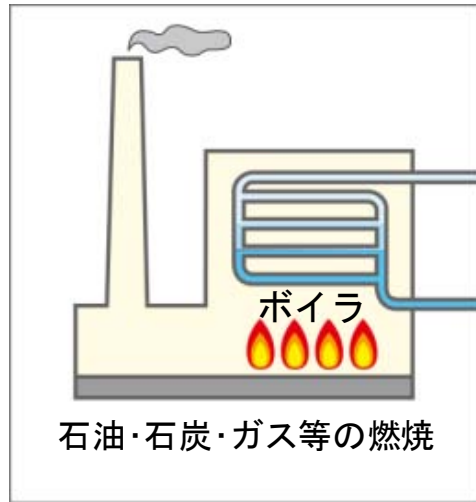
岡本孝司

okamoto@n.t.u-tokyo.ac.jp

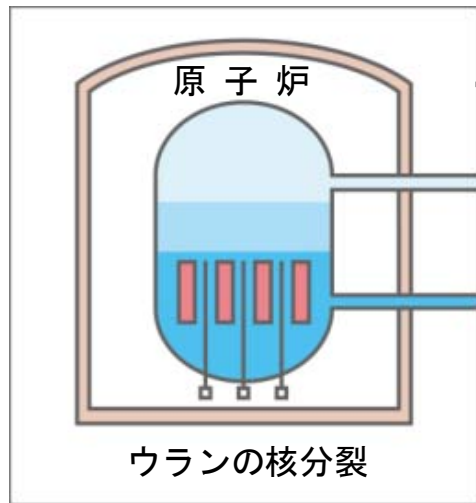
エネルギー変換

化学エネルギー

火力



原子力



核エネルギー

熱エネルギー

電気エネルギー

運動エネルギー

蒸気

水

熱エネルギー

蒸気

水

給水ポンプ

循環水ポンプ

復水器

タービン

変圧器

発電機

放水路へ

冷却水(海水)

エネルギー変換

火力発電所

燃料(石炭、天然ガス等)

- 化学エネルギー
↓ 酸化反応(燃焼)
- 熱エネルギー
↓ 蒸気(お湯を沸かす)
- 運動エネルギー
↓ タービン(回転運動)
- 電気エネルギー

原子力発電所

燃料(ウラン、プルトニウム等)

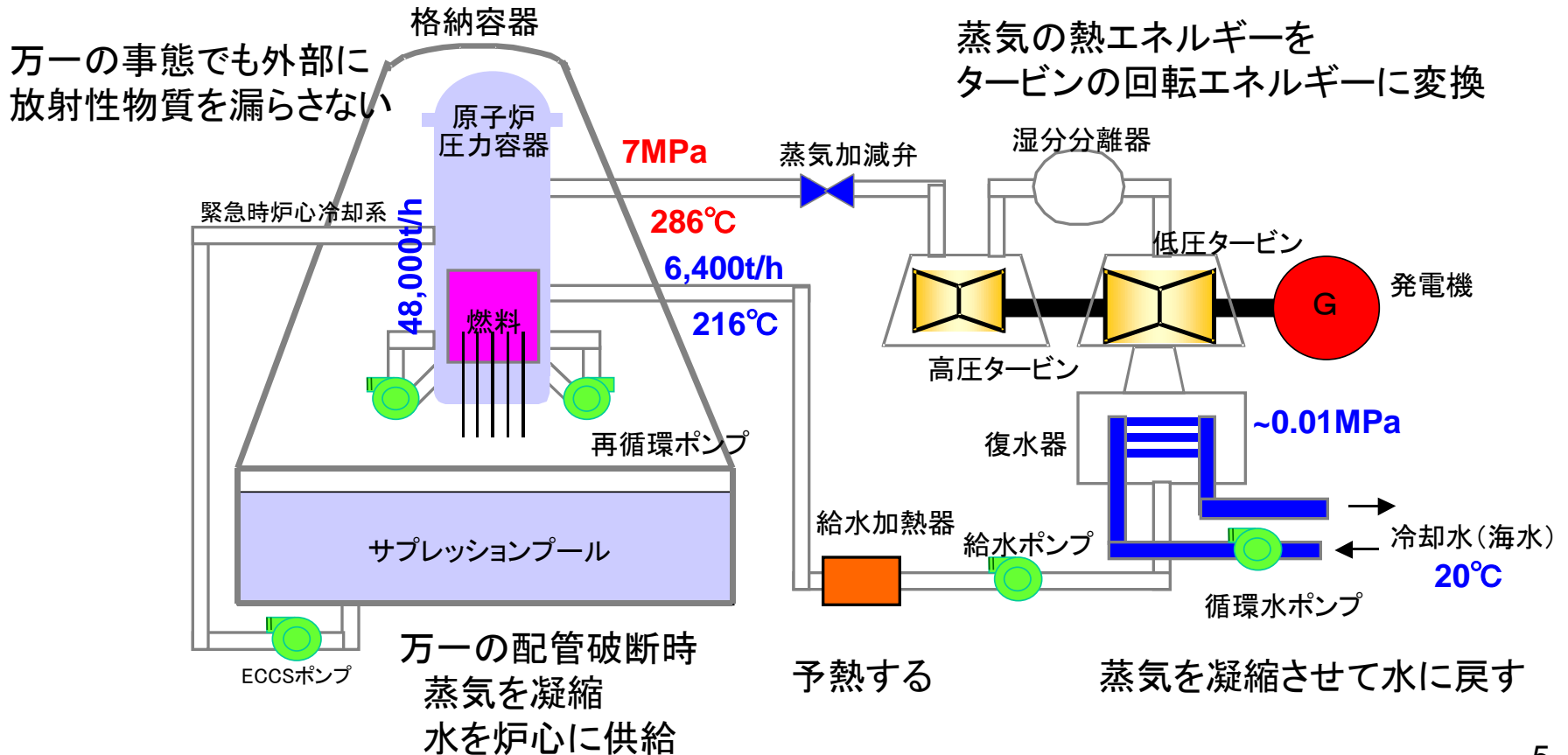
- 核エネルギー
↓ 核分裂
- 熱エネルギー
↓ 蒸気(お湯を沸かす)
- 運動エネルギー
↓ タービン(回転運動)
- 電気エネルギー

BWRとPWR

- 沸騰水型原子炉(Boiling Water Reactor)
 - 炉心で相変化(水→蒸気)
 - 炉心を流れる水量で制御
- 加圧水型原子炉(Pressurized Water Reactor)
 - 炉心では水のまま(低温→高温)
蒸気発生器で相変化(水→蒸気)
 - 炉心を流れる流体中のボロン濃度で制御

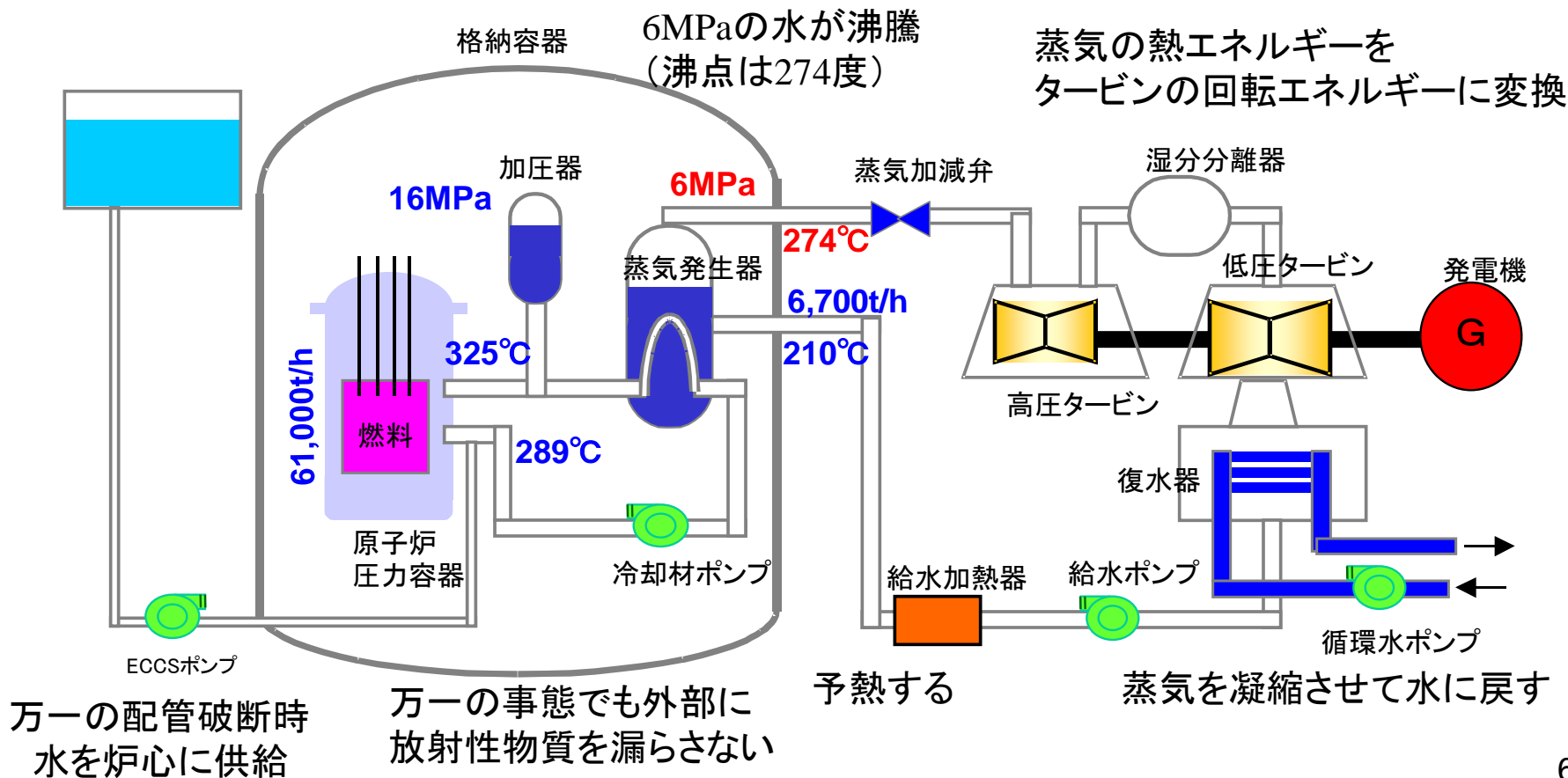
沸騰水型軽水炉(BWR)

7MPaの水が沸騰(沸点は286度)



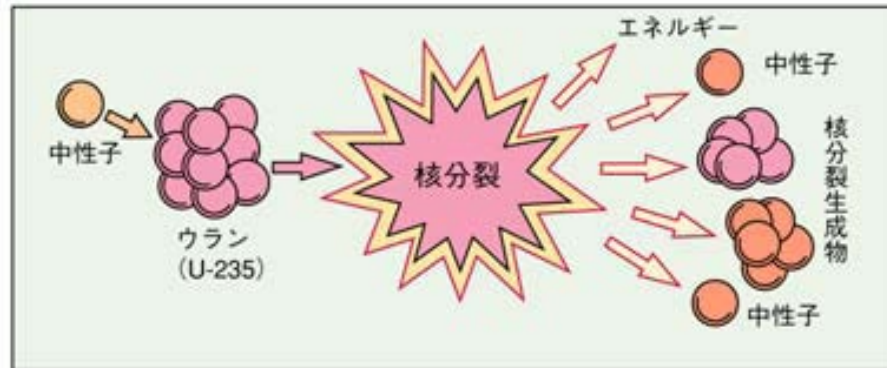
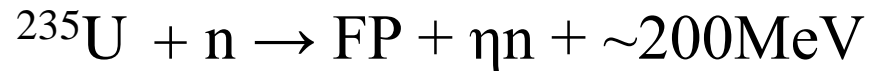
加圧水型軽水炉(PWR)

16MPaの水で冷却し
原子炉内部では沸騰しない



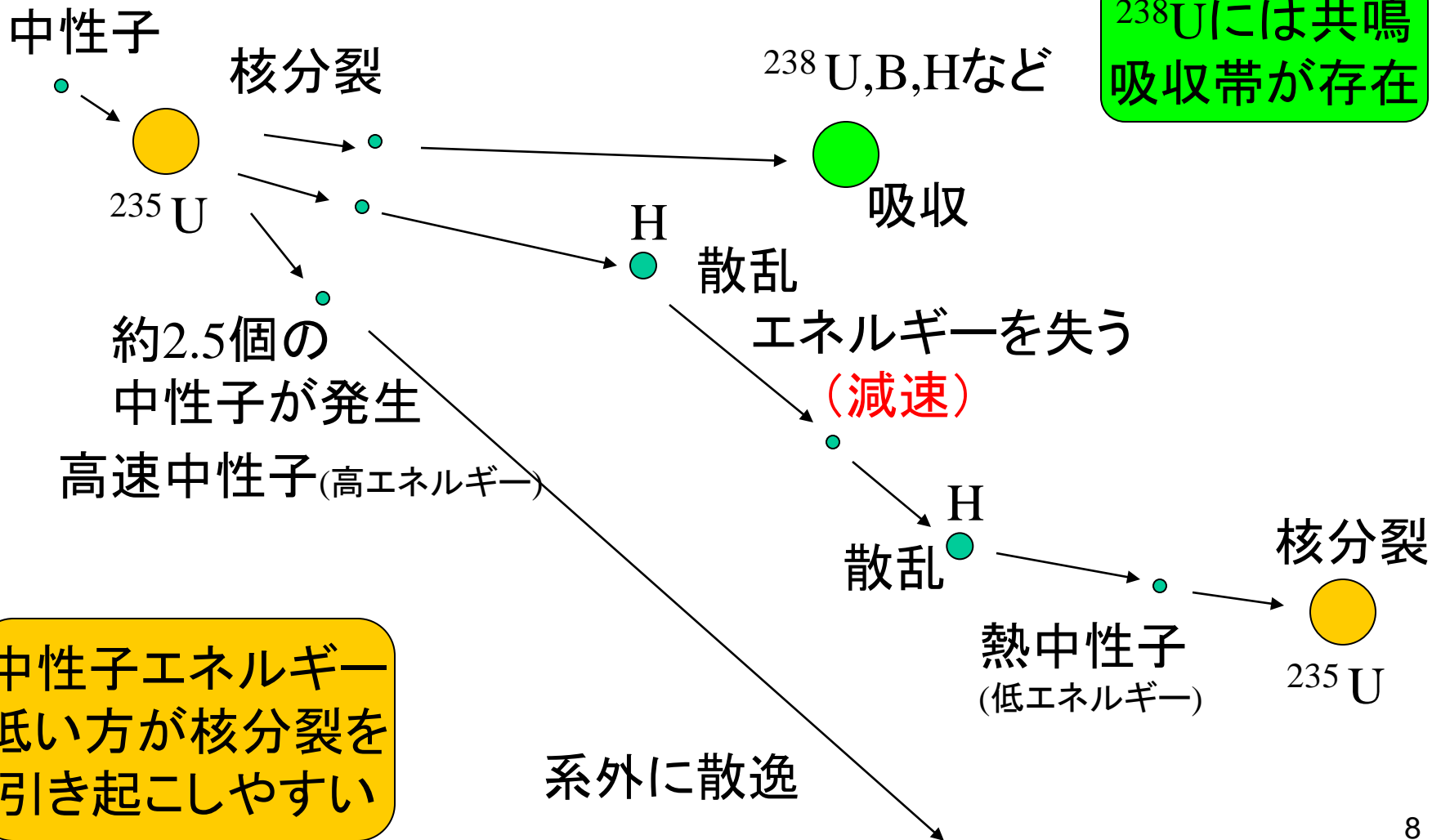
原子力発電のしくみ

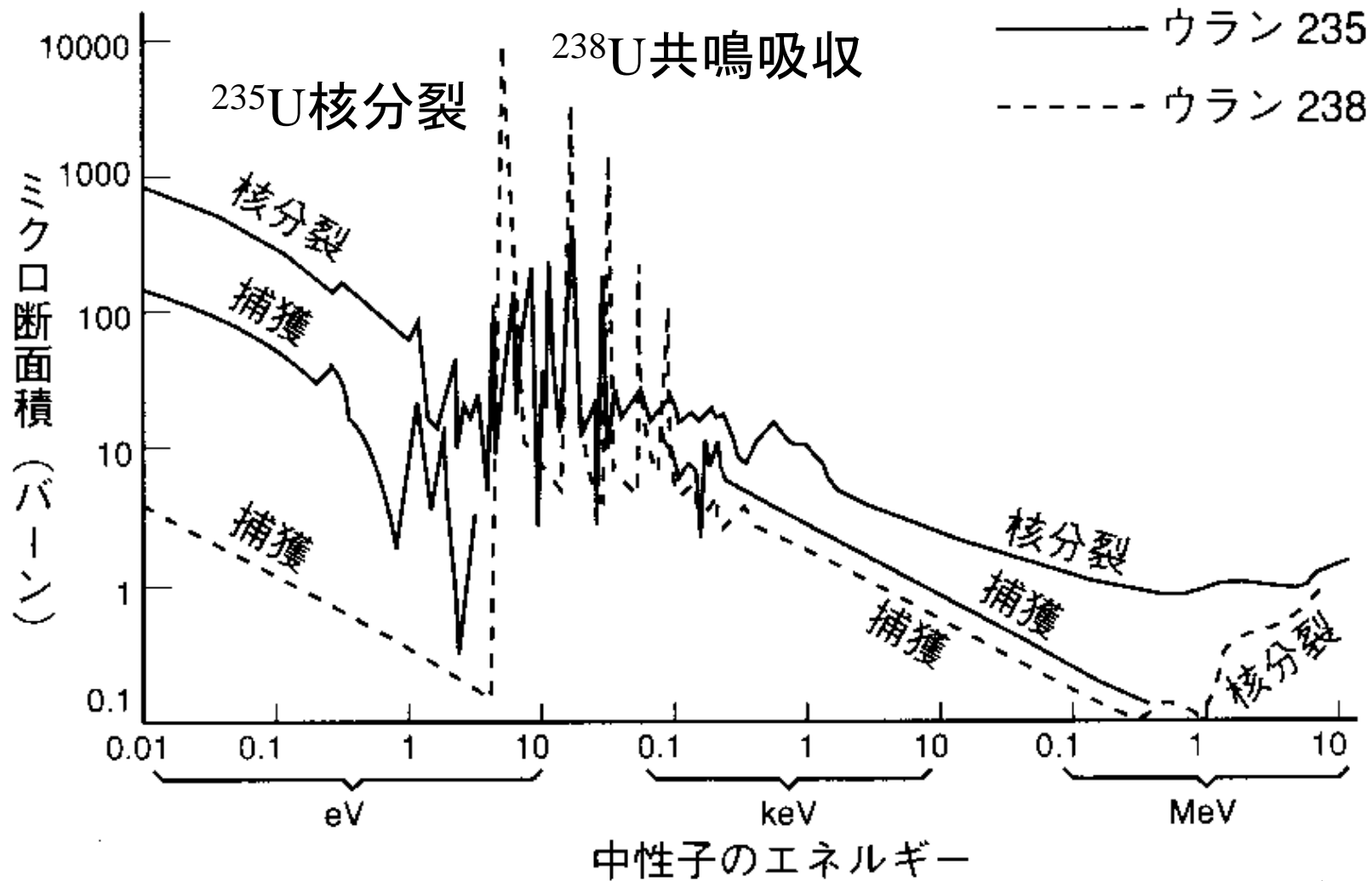
核分裂によるエネルギー生成



連鎖反応によって核分裂を継続させ
エネルギーを連続的に取り出す

中性子の一生





出典: 原子力がひろく世紀

原子炉の種類

種類	燃料	減速材	冷却材	
軽水炉	酸化ウラン	水(軽水)	水(軽水)	BWR PWR
重水炉	酸化ウラン	重水(D ₂ O)	水(軽水/重水)	ふげん CANDU
黒鉛減速炉	酸化ウラン	黒鉛	水(軽水)	RBMK (チェルノブイリ)
高速炉	酸化ウラン	無し	ナトリウム	もんじゅ

その他、燃料にトリウムや金属ウランを使う炉、
減速材に炭素を用いる炉、
冷却材にHe, CO₂を用いる炉などがある。

核分裂反応の制御

- 一回の核分裂で生成した中性子が k 個の核分裂を引き起こす場合

k : 中性子増倍係数	$k = 1$	臨界
	$k > 1$	超臨界
	$k < 1$	亜臨界

四因子公式

$$k_{\infty} = \eta f \varepsilon \rho$$

$$k_{eff} = \eta f \varepsilon \rho P$$

η : 平均中性子数

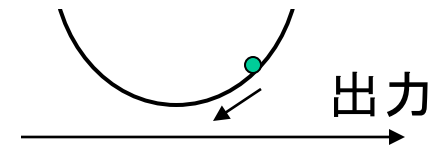
f : 熱中性子利用率

ε : 高速中性子による核分裂係数

ρ : 共鳴吸収を逃れる確率

P : 系外に漏れない確率

核分裂の物理現象として
出力(核分裂反応数)が増大



→ 温度が上昇して核分裂数は減少 → 安定

密度効果

膨張によってウラン235の数が減るので核分裂を起こしにくくなる

ドップラー効果

ウラン238の温度も上昇し中性子が共鳴吸収されやすくなる
結果として核分裂に寄与する中性子数が減る

ボイド効果

水が沸騰して気体になり、水素原子の密度が減り中性子が減速しにくくなる。
結果として核分裂に寄与する中性子数が減る

自己制御性

軽水炉では核暴走を物理的に起こすのは困難

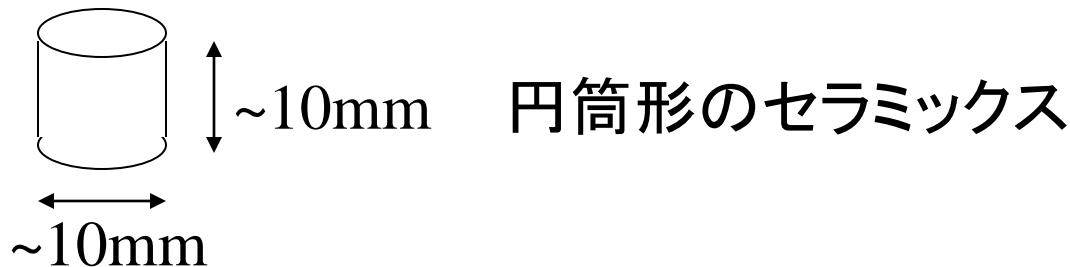
燃料

- UO_2 ペレット

濃縮度は約3~5%

濃縮度: 燃料に含まれる核分裂を引き起こす ^{235}U の割合
(残りの95~97%は核分裂に関与しない ^{238}U)

自然界に存在する ^{235}U の割合は0.7% (^{238}U :99.3%)
原子爆弾の濃縮度はほぼ100%に近い

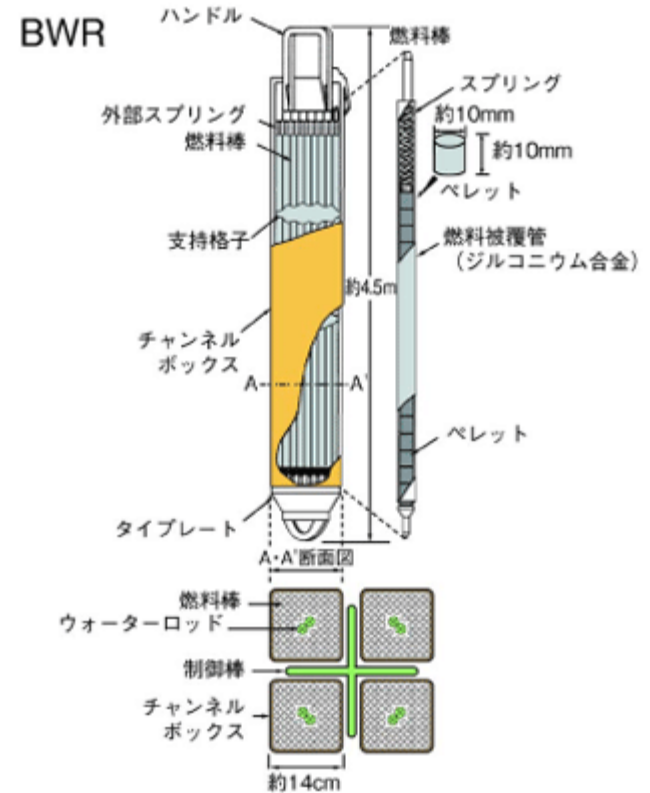


- 燃料棒

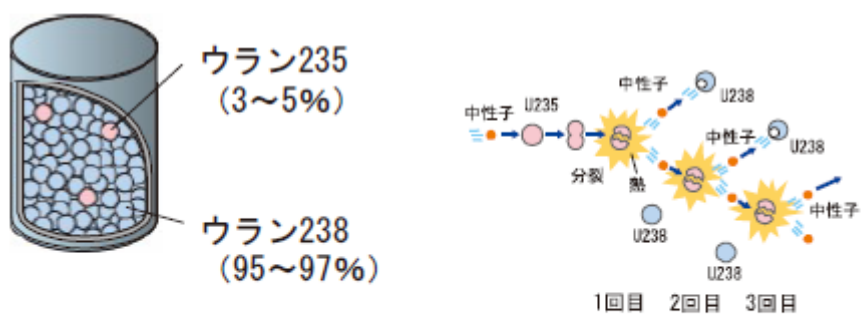
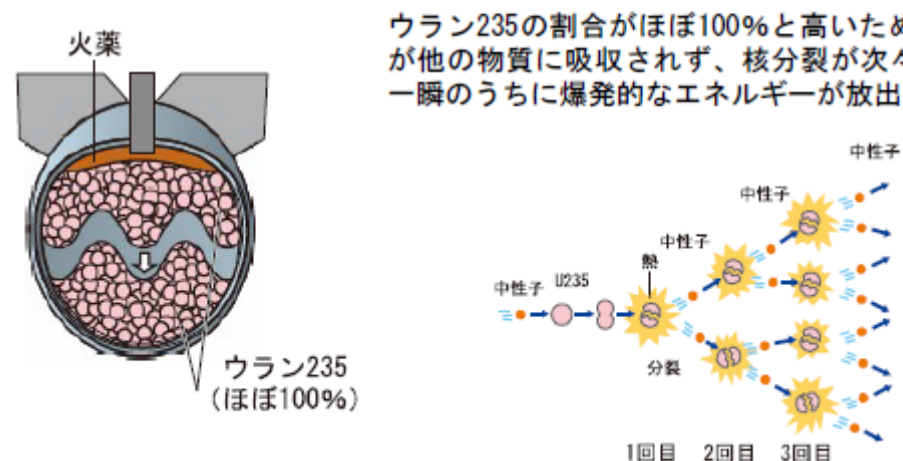
- 燃料ペレットが詰まった管
 - ペレットの発熱を水に伝える
 - ペレット内部の核分裂生成物を閉じ込める

- 燃料集合体

- 燃料棒の集まりで、一度に取り扱う単位
 - 9x9正方配列(BWR)
 - 17x17正方配列(PWR)
 - 六角形配列(FBR)

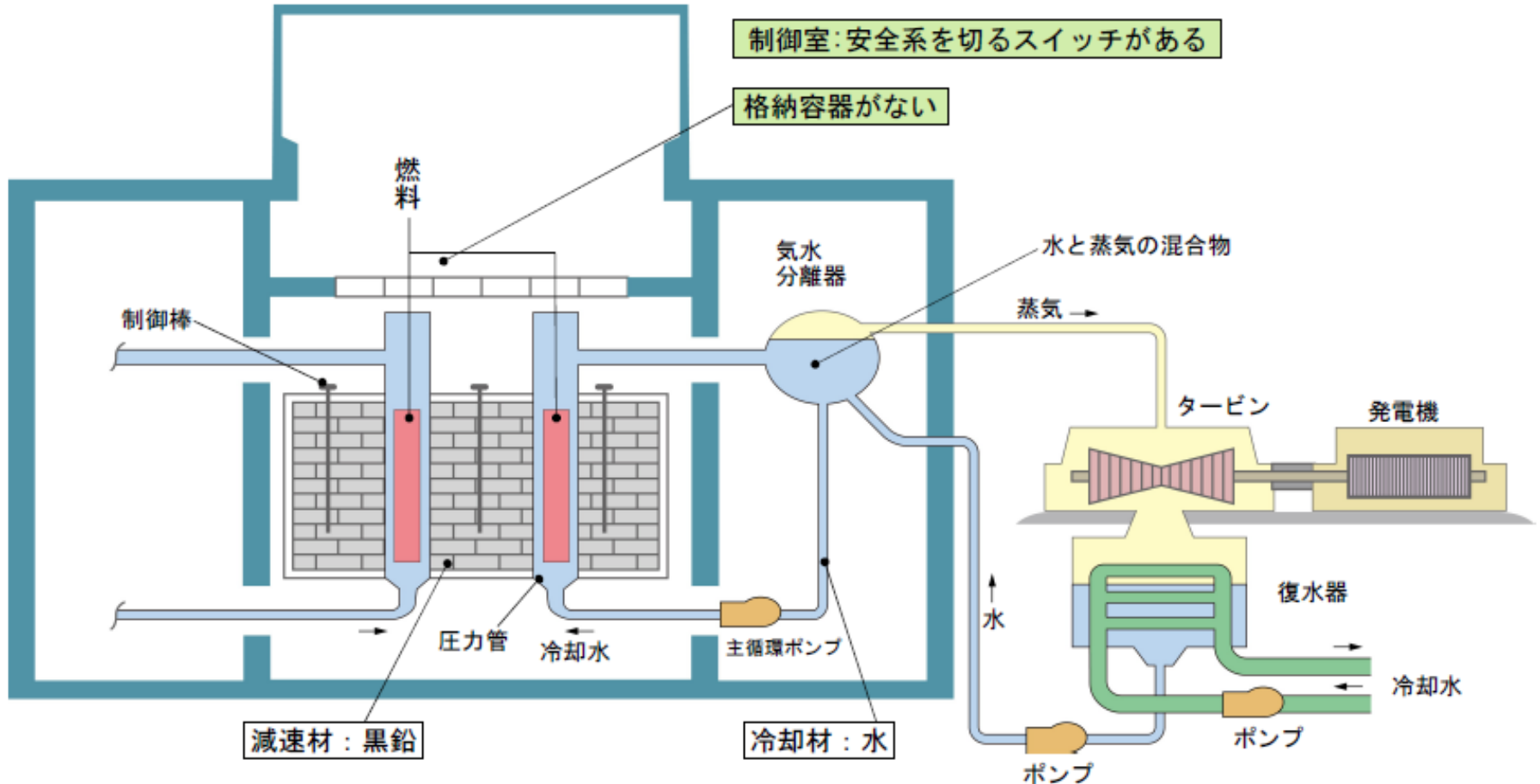


原子力発電と原子爆弾の違い

	ウラン235とウラン238の割合と核分裂連鎖反応	核分裂数の制御の方法
原子力発電の場合	<p>ウラン235の割合が低く、中性子がウラン238に吸収される等の理由により核分裂が一定の規模で継続する。</p>  <p>ウラン235 (3~5%) ウラン238 (95~97%)</p>	<p>制御棒が多数設置されており、また自己制御性があるため急激に核分裂数が増加することはない。</p>
原子爆弾の場合	<p>ウラン235の割合がほぼ100%と高いため、中性子が他の物質に吸収されず、核分裂が次々起こり、一瞬のうちに爆発的なエネルギーが放出される。</p>  <p>火薬 ウラン235 (ほぼ100%)</p>	<p>制御棒が設置されておらず、自己制御性がないため、急激に増加する核分裂を止める事は出来ない。</p>

チェルノブイリ原子力発電所の構造

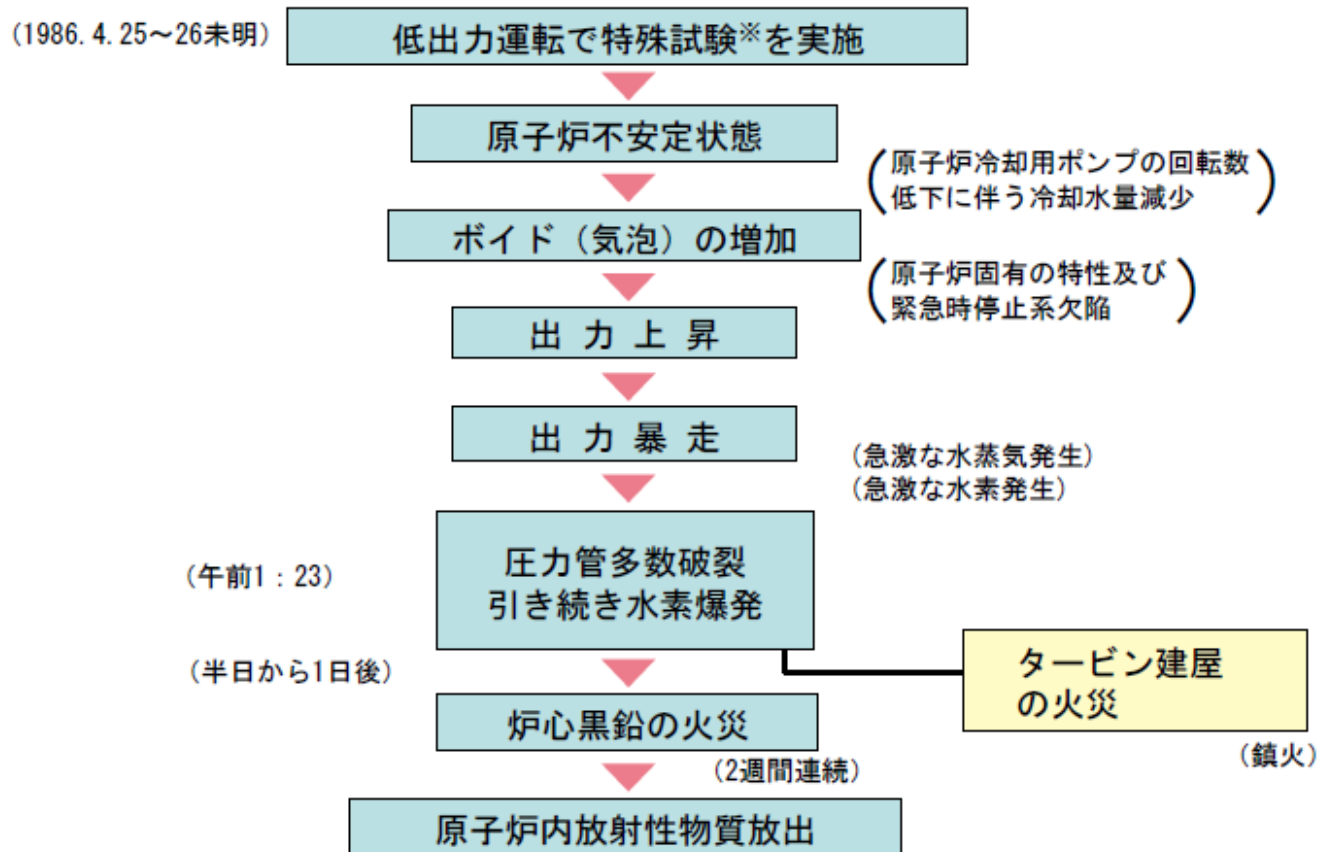
(黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉 RBMK)



低出力で不安定

自己制御性が無くなり、正のフィードバックが掛かる条件がある

チェルノブイリ原子力発電所事故の経過



※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