

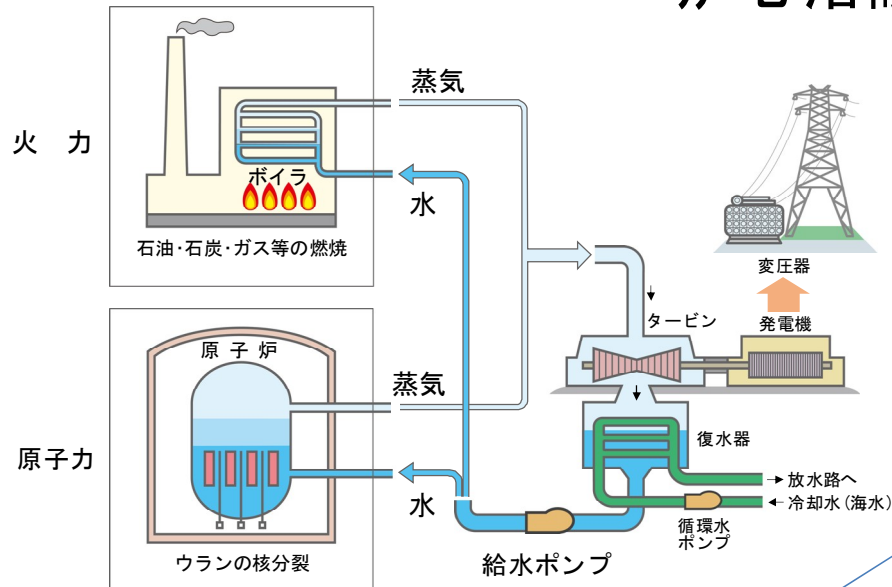


原子炉の炉心溶融

日本原子力研究開発機構
安全研究センター
工藤 保

平成23年6月6日
日中科学技術交流協会
講演会「東電福島事故と中国の原子力安全」

炉心溶融に至るまで



原子力発電では、燃料棒内のウランの核分裂反応により発生する熱で水を蒸気に変え、その蒸気によりタービンを回して発電している。

燃料棒は、運転中に発生した熱や核分裂生成物の崩壊熱によりすぐには冷えない。

冷却水を循環させて冷却し続ける必要がある。

燃料棒は運転を停止しても発熱し続ける。

電気出力1,100MWe級原子力発電所の停止後熱出力

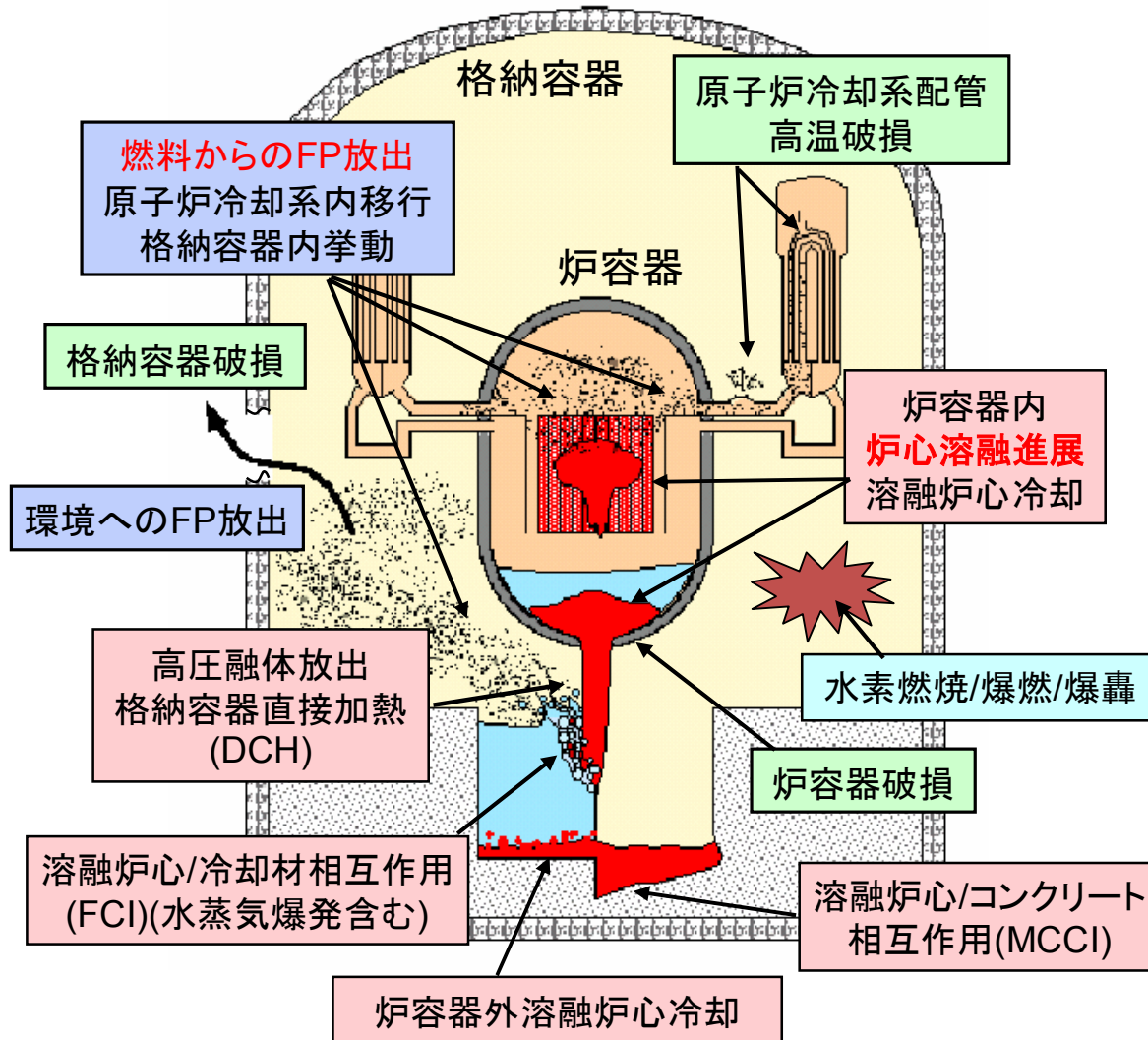
1時間後	約1%	約35MW
1日後	約0.5%	約18MW
100日後	約0.1%	約4MW

- ・冷却水配管の破断
- ・全交流電源喪失等

冷却に失敗

炉心溶融

シビアアクシデント時に想定される主な現象



止める
冷やす
閉じ込める

炉心損傷・溶融炉心挙動

- 主な熱源(崩壊熱)
- 冷却材、構造材との相互作用で機械的負荷(衝撃力)や格納容器加圧(ガス発生)
- **冷却の可否と防護壁への影響が重要**

FPの移行挙動

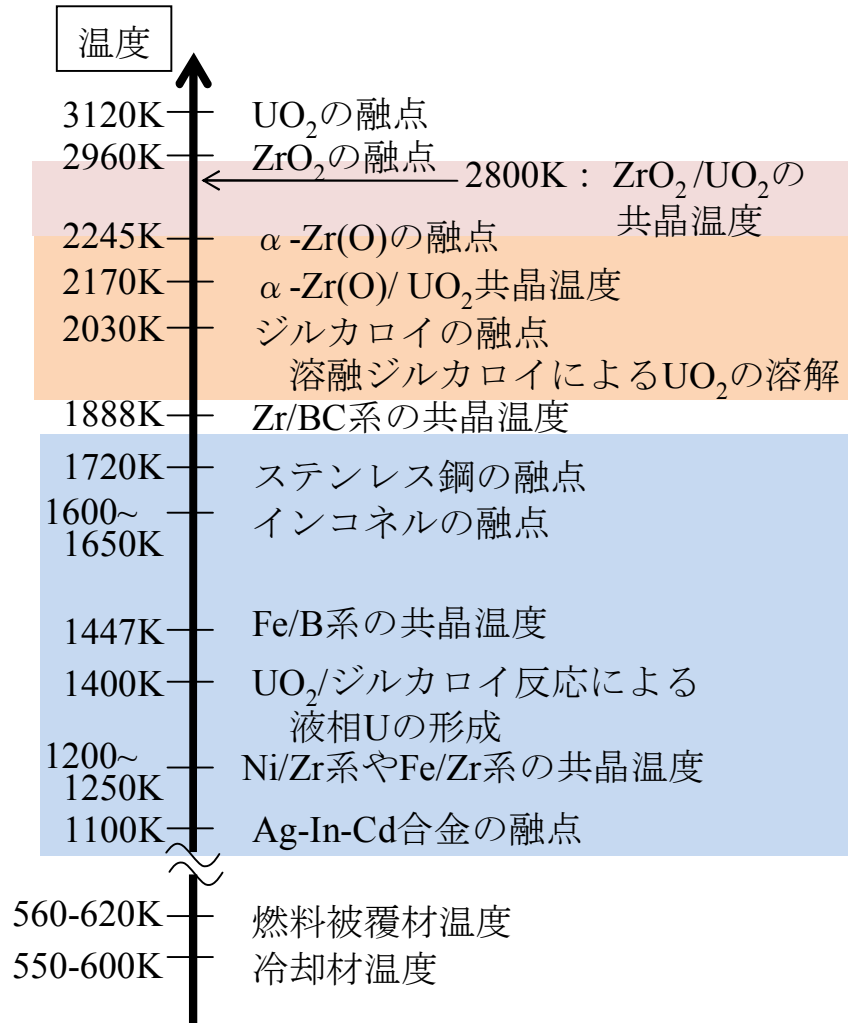
- ガス、エアロゾル等として移行
- **冷却系→格納容器内→環境への放出時期・量・化学形が重要(ソースターム)**

防護壁の耐性

- とくに格納容器は最後の障壁
- 破損モード、時期が重要

炉心における高温での現象

炉心構成材料に生じる高温での現象



シビアアクシデント時:

被覆管が酸化した場合、約2800Kに到達するとZrO₂とUO₂は共晶により溶ける。

被覆管が酸化していない場合、UO₂の融点より約1000K低い温度で、溶融ジルカロイによりUO₂が溶ける。

UO₂やジルカロイの融点よりずっと低い温度で、炉心構成材料であるAg-In-Cd合金(制御棒)や鉄などが溶ける。

原子力発電所は、安全に「止める」「冷やす」ことにより、「閉じ込める」機能が失われないように作られている。

しかし、機器の故障、運転員の誤操作などが重なり、大事故に至り、**炉心溶融**を引き起こした例がある。

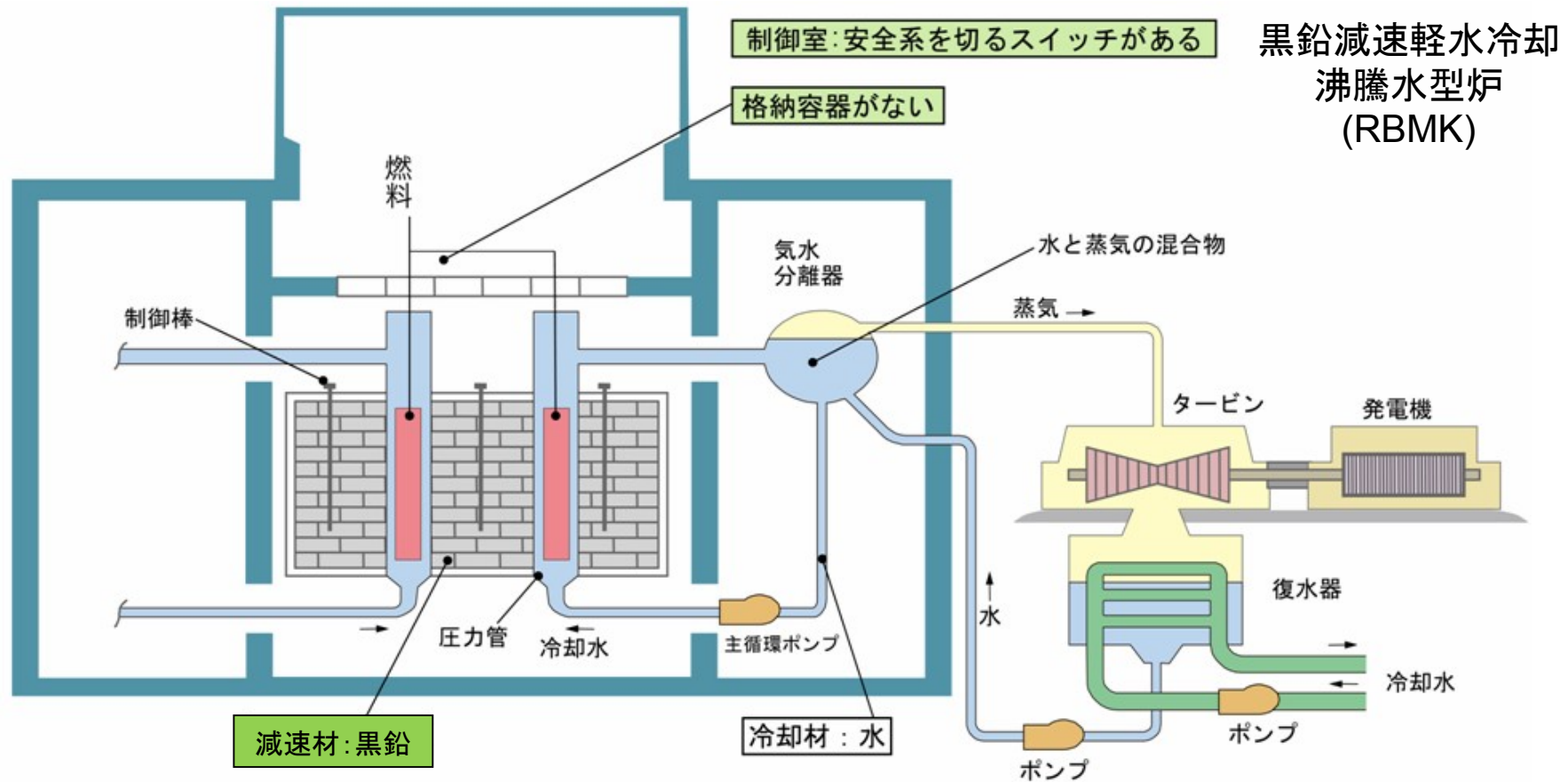
「止める」の重大な失敗

➡ チェルノブイリ原子力発電所の事故

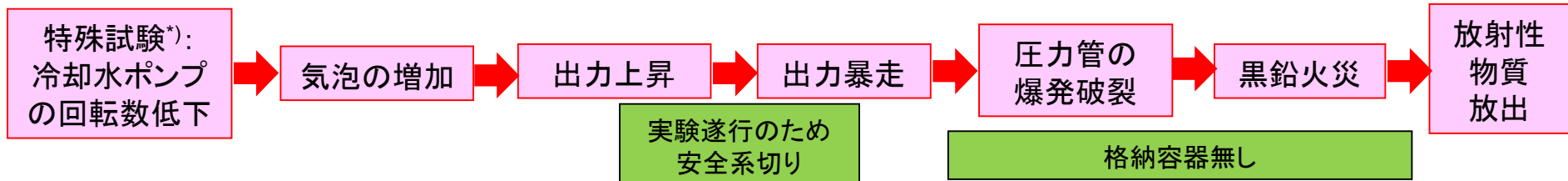
「冷やす」の重大な失敗

➡ スリーマイルアイランド原子力発電所の事故

チェルノブイリ原子力発電所の事故(1986年4月)



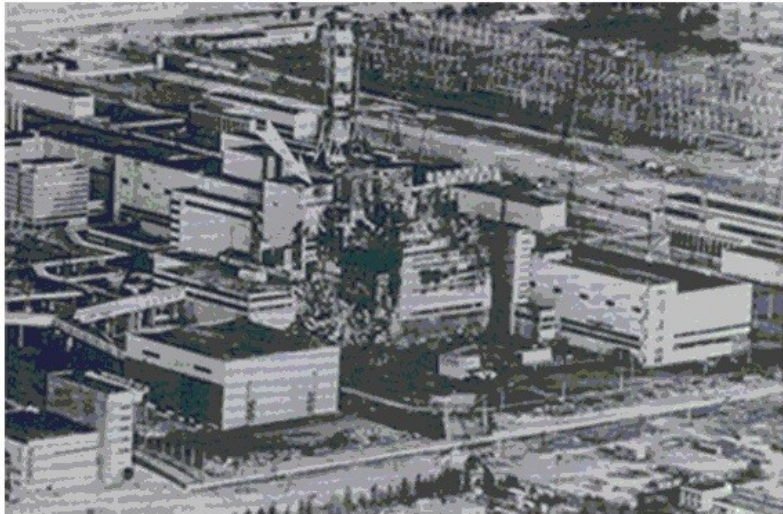
黒鉛減速軽水冷却
沸騰水型炉
(RBMK)



*: 電源喪失した際のタービンの回転慣性エネルギーによる電源供給の評価

チェルノブイリ原子力発電所の炉心溶融

3号炉タービン発電機建屋 ↓
 3号炉 ↓
 3,4号炉用排気筒 ↓
 事故を起した4号炉 ↓
 4号炉タービン発電機建屋 ↓



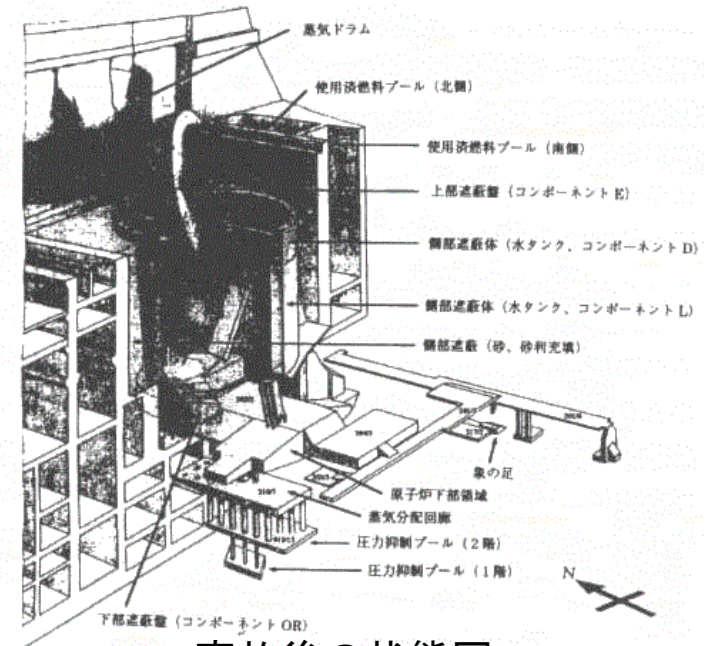
事故後の写真



象の足

← 屋外開閉所

← 4号炉タービン発電機建屋

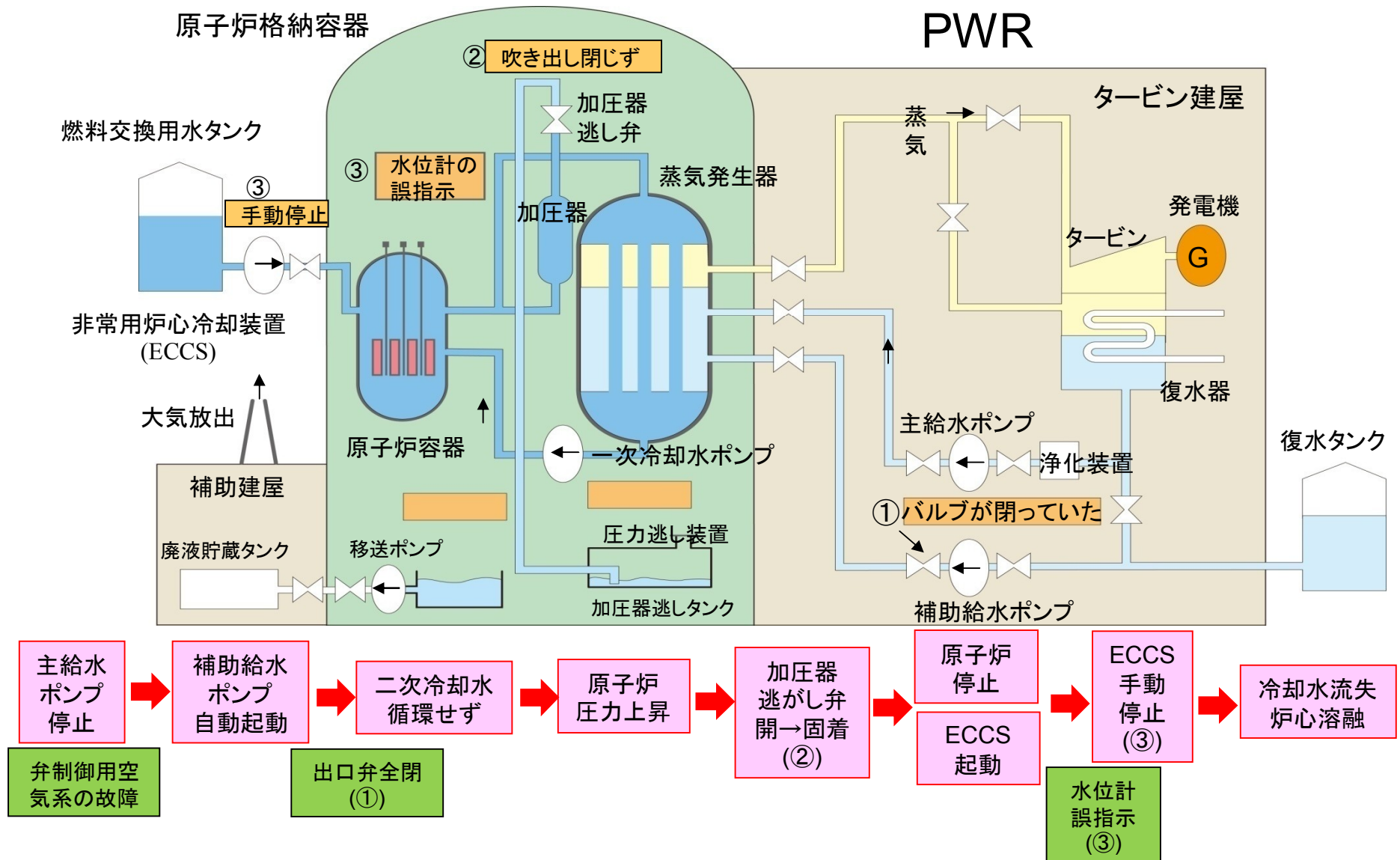


事故後の状態図

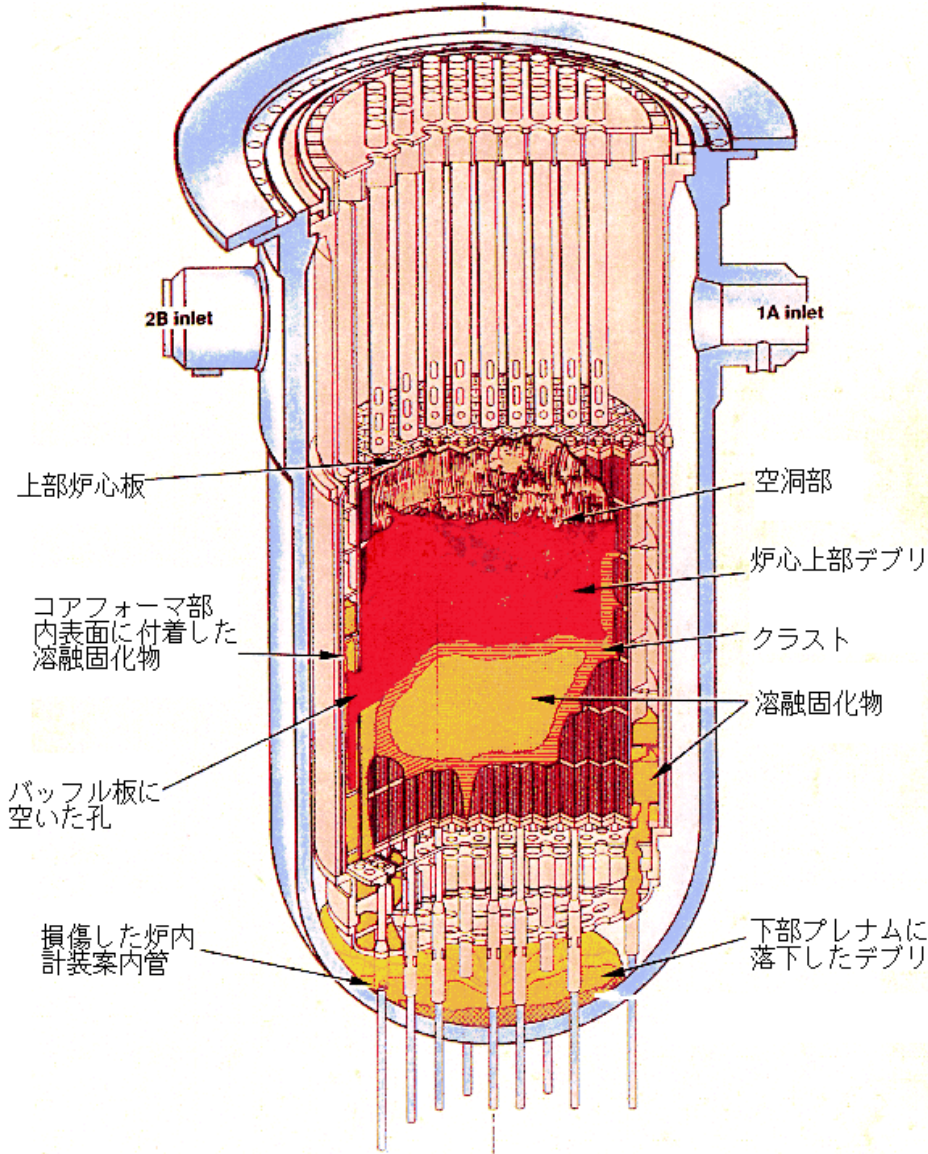
上部遮蔽盤は爆発により持ち上がって回転・落下し、垂直に対し15°の角度で原子炉に引っかかっている。

炉心は溶融してコンクリートや他の構造材とともに溶岩状になり、原子炉下部から垂直方向並びに水平方向へ流出し固化。原子炉下部から水平に東側方向に最大50m移動した溶融固化体の先端が「象の足」。

スリーマイルアイランド原子力発電所の事故(1979年3月)



スリーマイルアイランド原子力発電所の炉心溶融



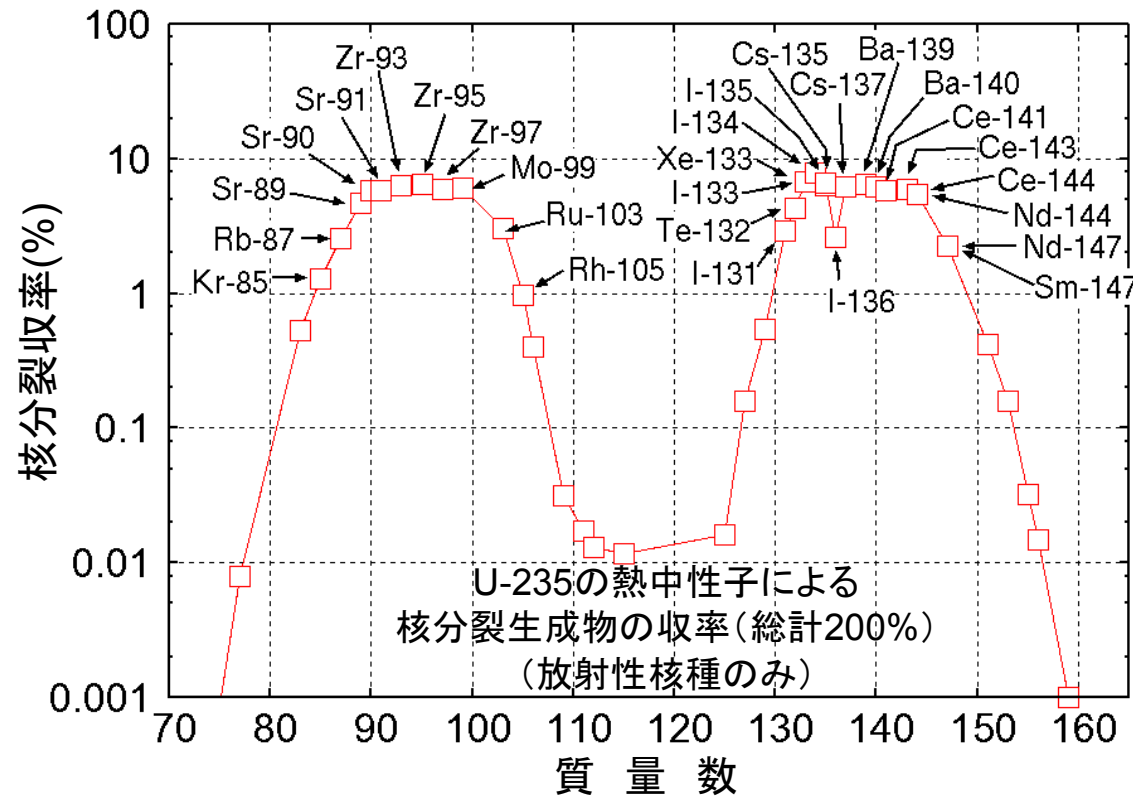
炉心の約2/3が1時間以上冷却水から露出し炉心の半分近くが溶融した。このため、放射性ガスは放出されたが、原子炉圧力容器及び格納容器の閉じこめにより、放出量は限定的で周辺住民及び環境への影響は殆ど無かった。

事故後の分析によって炉心は2800K以上の温度になったと考えられる。

チェルノブイリ事故とTMI事故で放出されたFP量の比較

FP元素	チェルノブイリ	TMI		
	環境	圧力容器内	圧力容器を除く 原子炉建屋内	環境
Xe, Kr	100%	51%	48%	1%
I	15~20%	0~70%	30~100%	$3 \times 10^{-5}\%$
Cs	10~13%	53%	47%	検出されず
Ru	2.9%	99.5%	0.5%	検出されず
Ce	2.3~2.8%	100%	0%	検出されず

核分裂生成物(FP)の分類と性質



FPの半減期

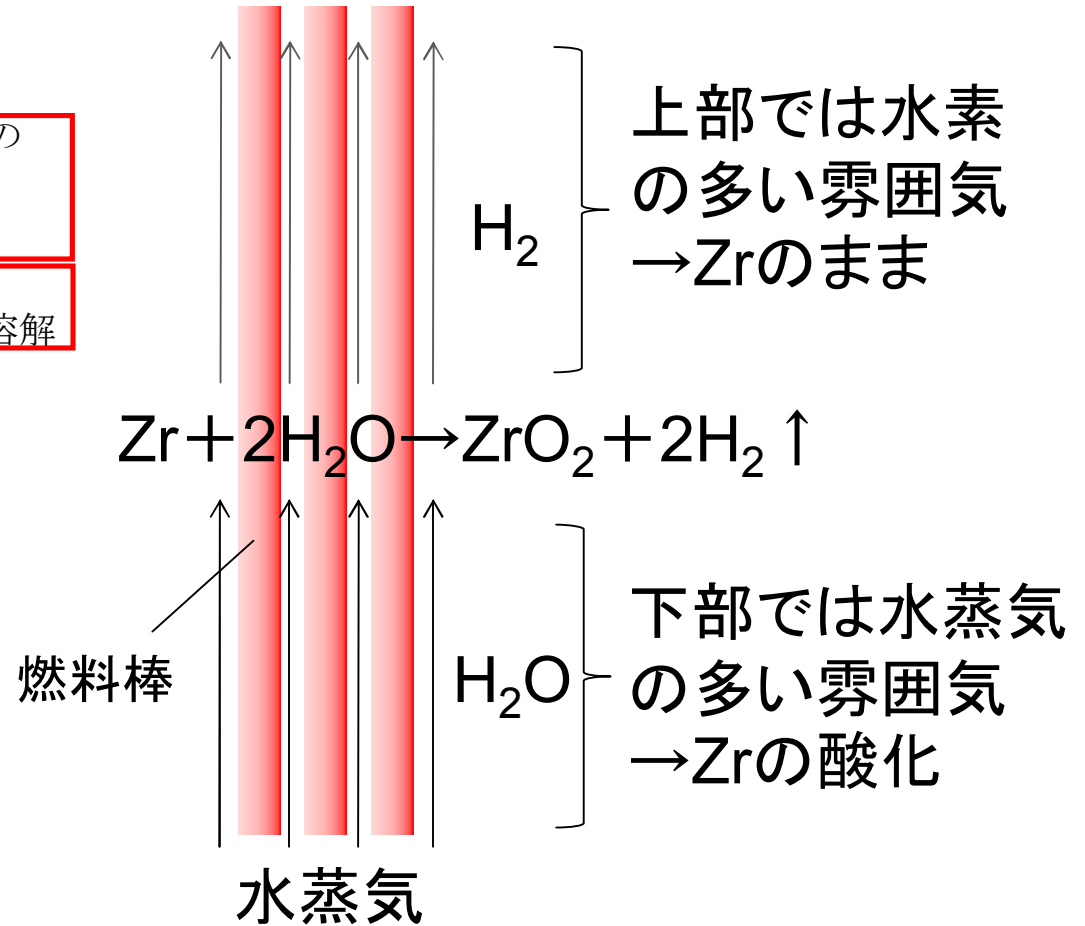
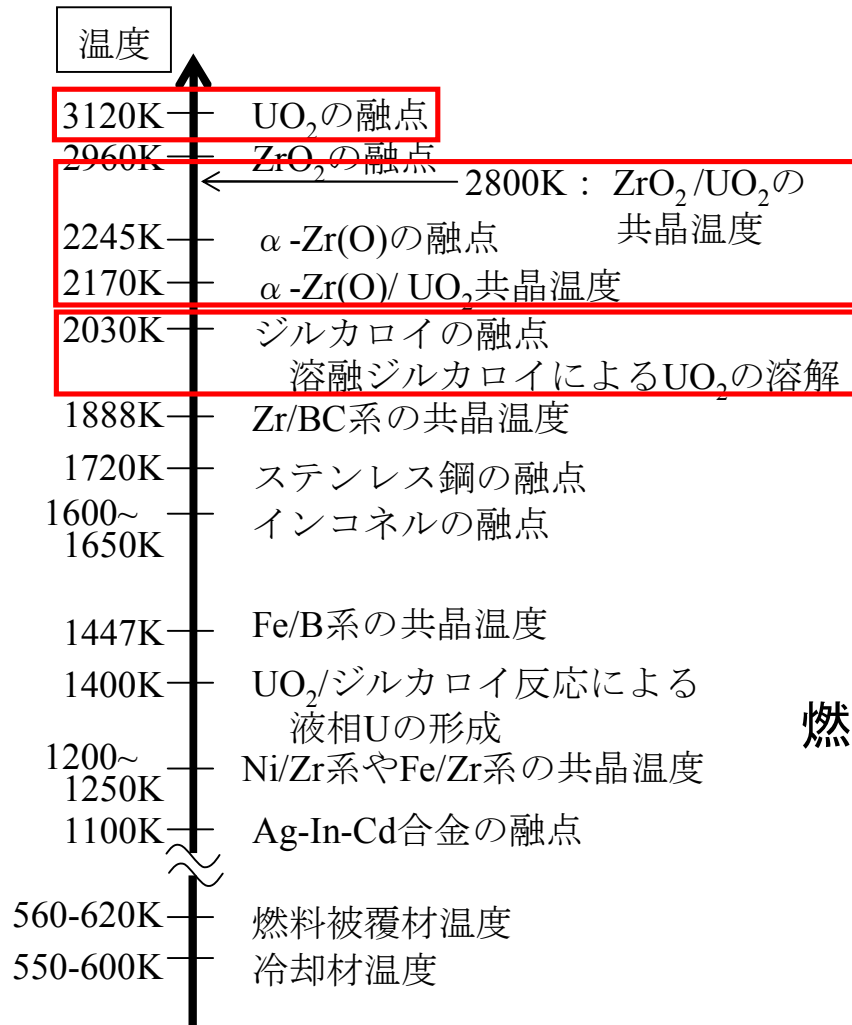
<1時間	I-134,136
<1日	Sr-91, Zr-97, I-133,135 , Ba-139
<10日	Mo-99, Rh-105, I-131 , Te-132, Xe-133 , Ce-143
<1月	Ba-140, Nd-147
<1年	Sr-89, Zr-95, Ru-103, Ce-141,144
<50年	Kr-85, Sr-90, Cs-137
>50年	Rb-87, Zr-93, Cs-135, Nd-144, Sm-147

- FPの揮発性による分類の例
 - 希ガス: Kr, Xe
 - 揮発性FP: I, Cs, Rb等
 - 中揮発性FP: Sr, Ba, Ru等
 - 難揮発性FP: Rh, Zr, Nd等

安全上の重要度は、量、揮発性、放射線エネルギー、生物影響、半減期等による

燃料の溶融に関連した事象

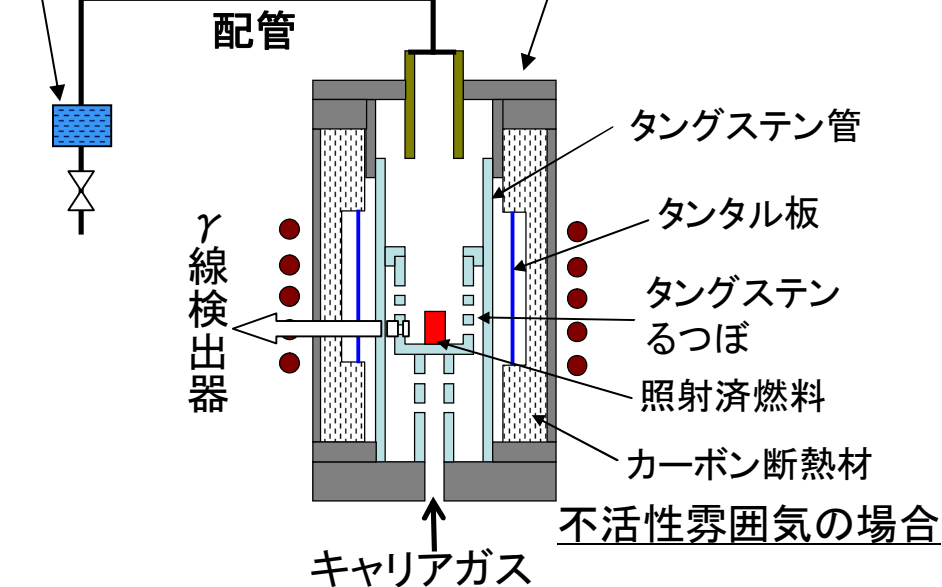
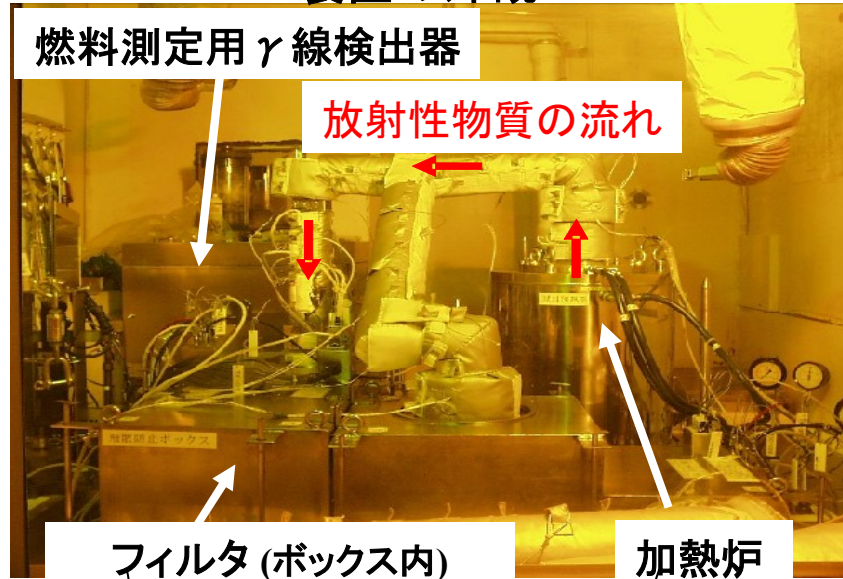
炉心構成材料に生じる高温での現象



燃料が溶融した場合の放射性物質の放出

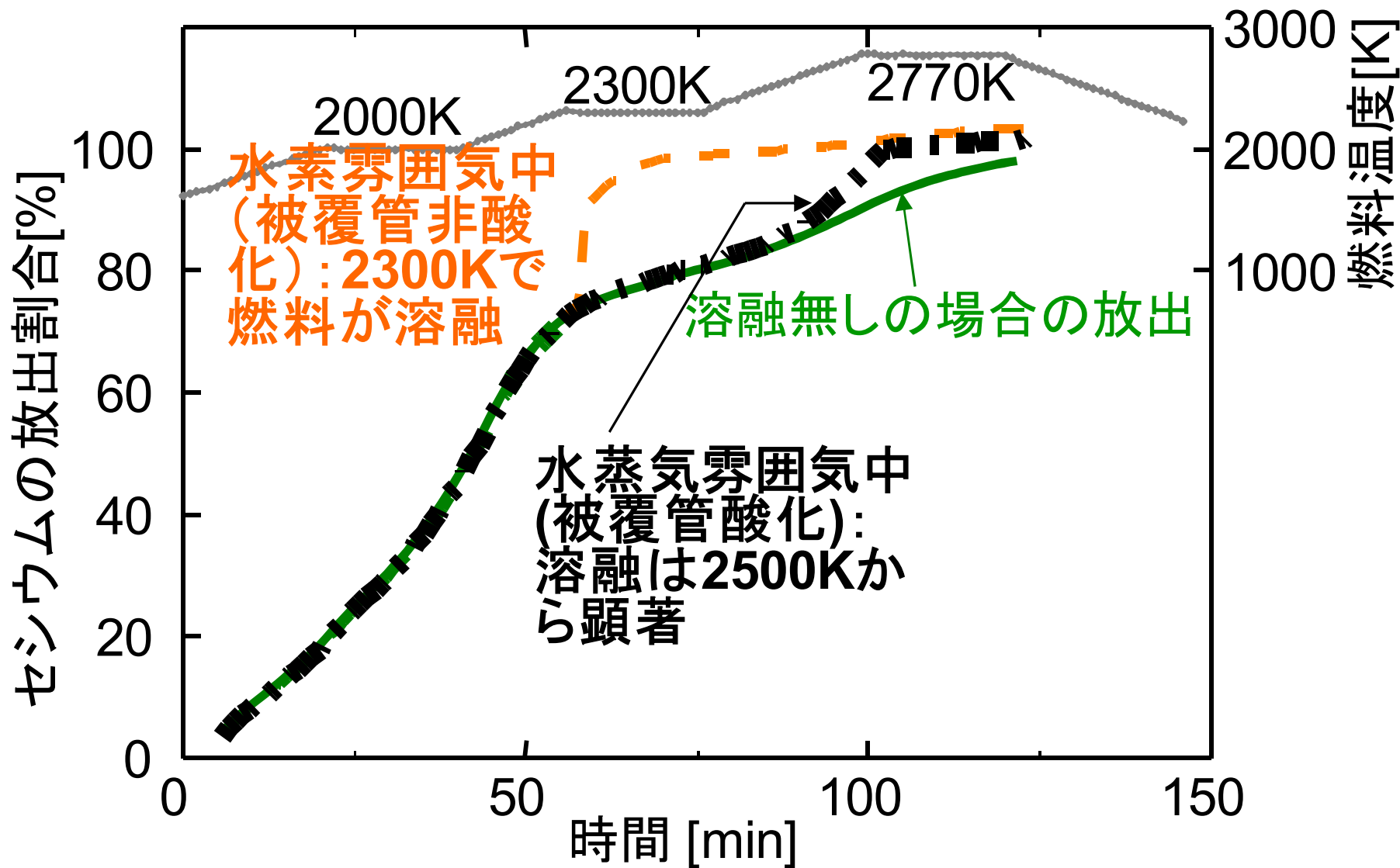
JAEAにおけるシビアアクシデント時の放射性物質放出実験

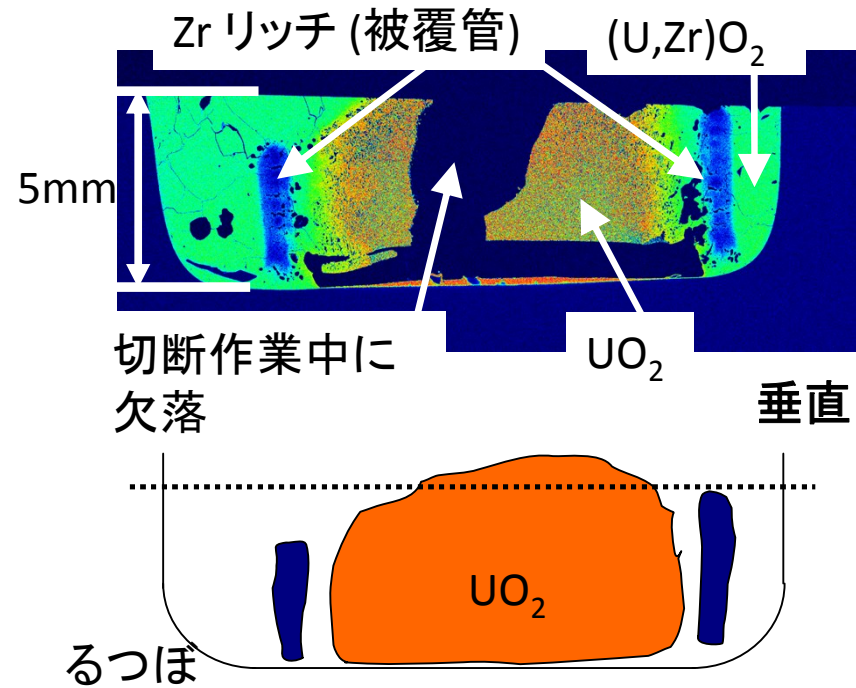
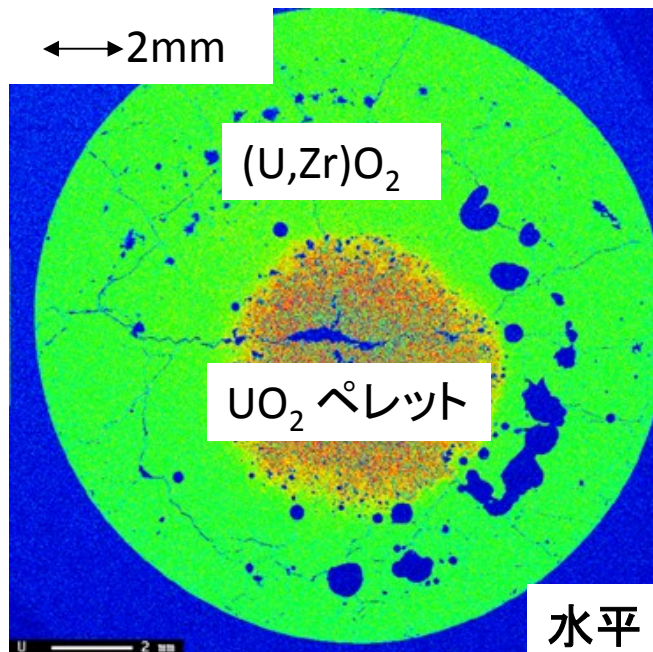
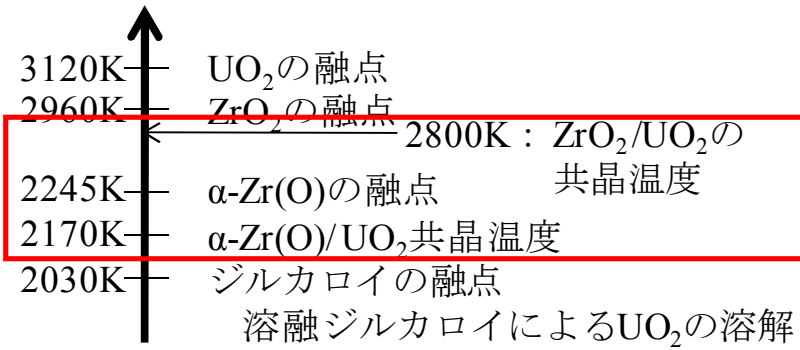
装置の外観



被覆管の非酸化、酸化における燃料溶融温度の違い

雰囲気: 水蒸気
 燃料: 被覆管付
 最高温度: 2770 K

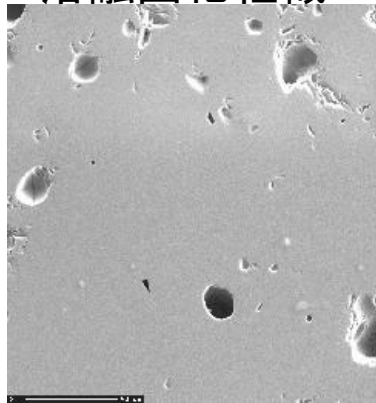




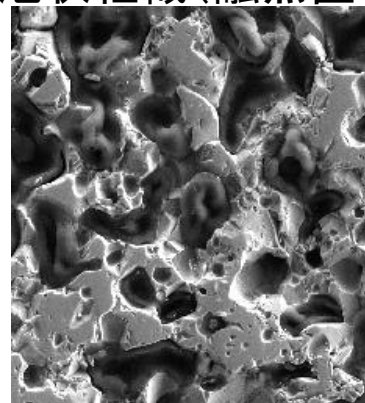
ペレットの60から75%が溶融したと評価

燃料ペレットの組織及びセシウム放出速度の変化

溶融固化組織



泡状組織(融点直下)

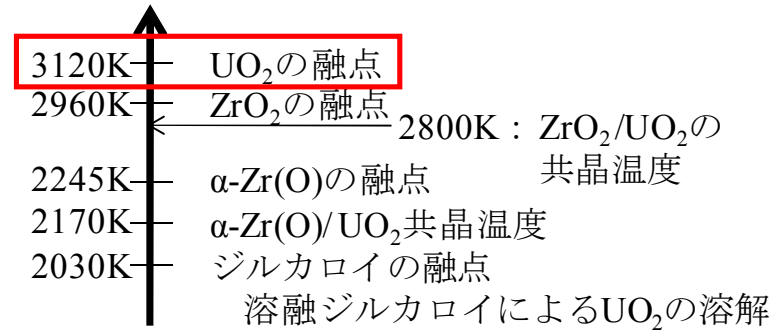


50μm

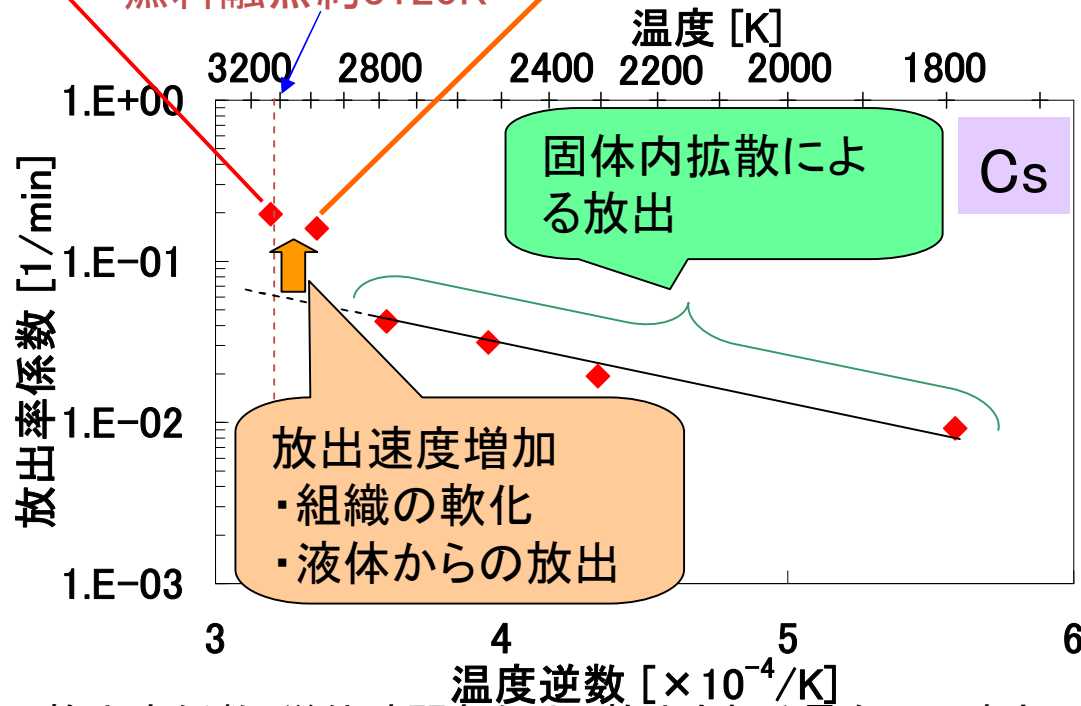
雰囲気: ヘリウム

燃料: ペレットのみ(被覆管なし)

最高温度: 3123 K



燃料融点約3120K



放出率係数: 単位時間あたりに放出される量をその時点で燃料内に残存している量で除した値

最後に

- 「止める」「冷やす」の失敗により炉心溶融が起こる可能性がある。
 - ー チェルノブイリ原子力発電所
 - ー スリーマイルアイランド原子力発電所
- 個別効果実験からは、以下のことが示された。
 - ー 燃料の溶融は、被覆管が非酸化の場合はおよそ2300Kから、ある程度酸化している場合はおよそ2500Kから増大
 - ー 燃料ペレットのみの場合、 UO_2 の融点より低い温度から組織変化のためセシウムの放出速度が大きくなる