

# 苛酷原子炉事故における ソースターム評価



福井大学附属国際原子力工学研究所  
宮原信哉

# 内容

## 概要

- 原子炉内での原子核反応
- 苛酷原子炉事故 (Severe Reactor Accident) 時の諸現象
- ソースタームの定義とその評価の必要性
- ソースターム評価で重要となる放射性核種

## 解説

- 原子炉事故とソースターム評価の歴史
- 我が国の規制体系におけるソースターム評価の変遷
- 苛酷原子炉事故 (Severe Reactor Accident) 時のソースターム関連事象の進展
- 化学的プロセスとソースターム評価への適用
- 物理的プロセスとソースターム評価への適用
- ソースターム評価用の解析コードと現象確認実験

# 原子炉内での原子核反応

- ➡ 錬金術 (Alchemy) : (化学的な方法で) 卑金属 (base metal) (鉛や水銀) から貴金属 (noble metal) (特に金) を作ろうとする試み



『*The Alchemist*』  
Pieter Bruegel de Oude (-  
1569)

【1】パブリック・ドメイン



『*The Alchemist*』  
Pieter Bruegel de Jonge(-  
1636)

【2】パブリック・ドメイン



# 化学反応と原子核反応

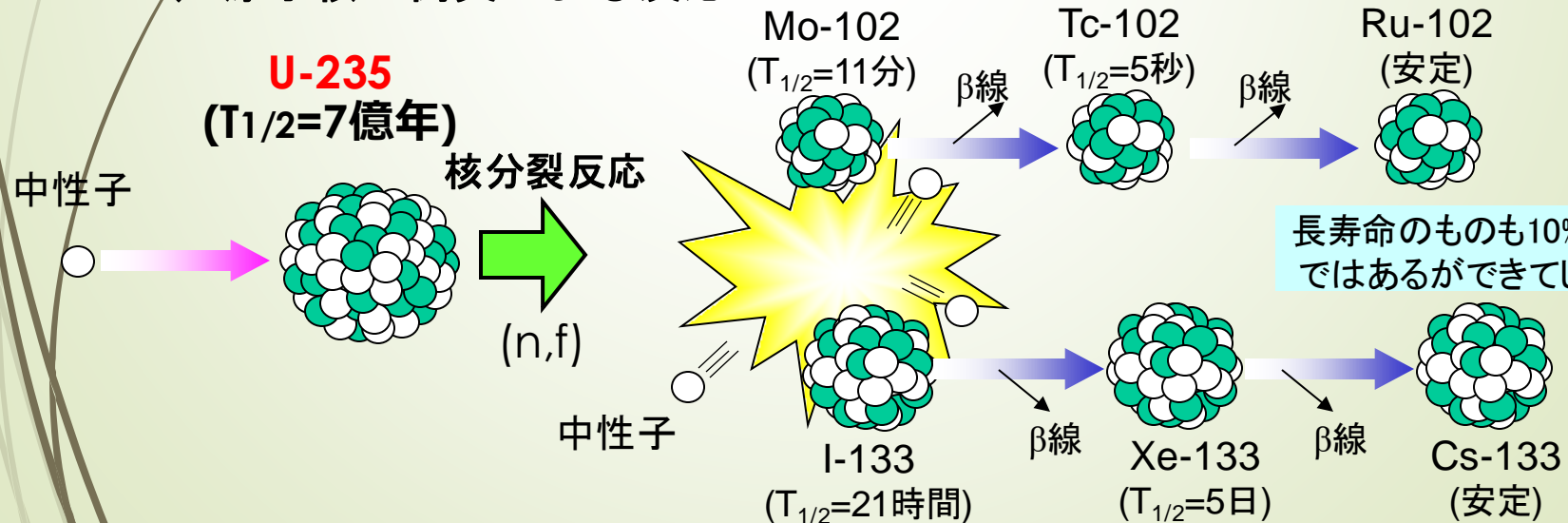
- 化学反応：反応の前後で物質の化学形態は変わるが、原子は不変



- 原子核反応：反応の前後で原子が別の原子に変化する（物理的、化学的性質が変化する）

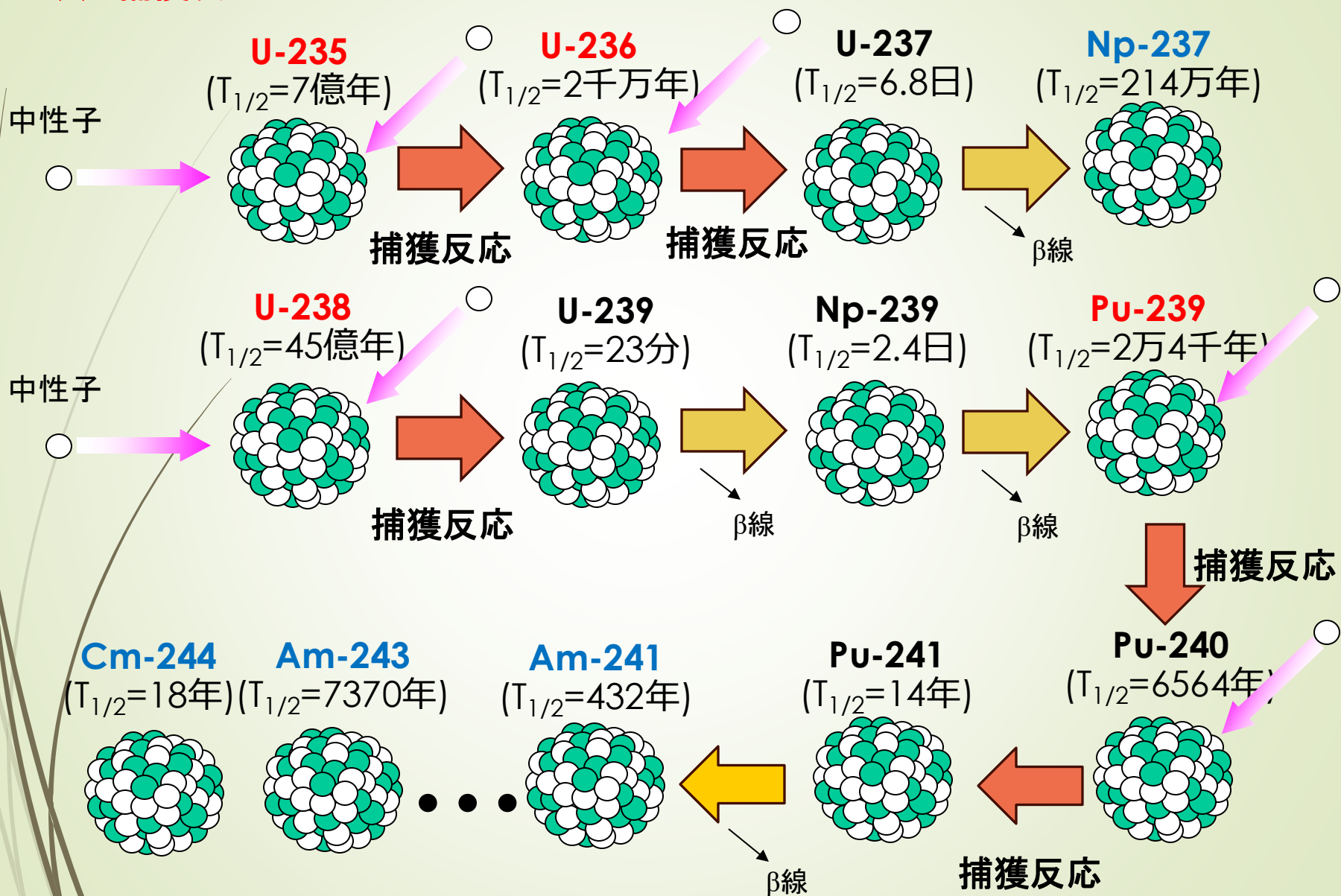
## (1) 核分裂反応

### 1) 原子核の衝突による反応

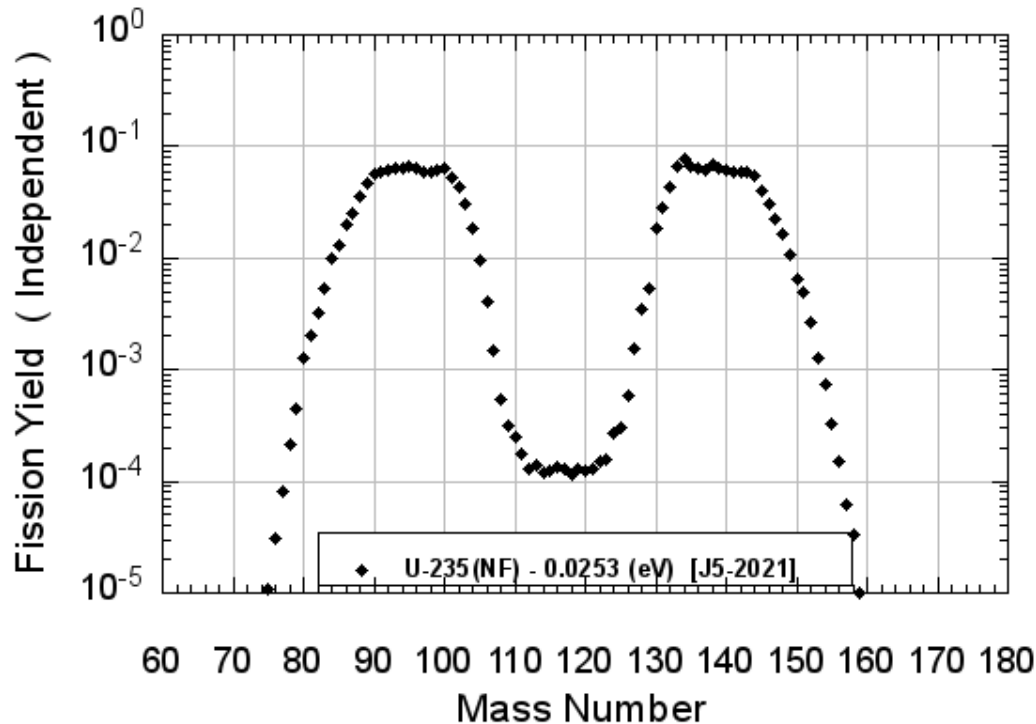


### 2) 原子核の自発崩壊

## (2) 捕獲反応



### U-235 Neutron-induced Fission Yields



- ・ 原子炉は錬金術であり、核分裂生成物の約3/4は非放射性（安定）核種
- ・ しかし、残りの約1/4は放射性核種であり、技術的に分離は不可能

# 使用済燃料中の主な長寿命核種

核種	半減期	線量換算係数 ( $\mu$ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
U-235	7億年	47	10kg
U-238	45億年	45	930kg

核種	半減期	線量換算係数 ( $\mu$ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
Pu-238	87.7年	230	0.3kg
Pu-239	2万4千年	250	6kg
Pu-240	6,564年	250	3kg
Pu-241	14.3年	4.8	1kg

核種	半減期	線量換算係数 ( $\mu$ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
Np-237	214万年	110	0.6kg
Am-241	432年	200	0.4kg
Am-243	7,370年	200	0.2kg
Cm-244	18.1年	120	60g

核種	半減期	線量換算係数 ( $\mu$ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
Se-79	29万5千年	2.9	6g
Sr-90	28.8年	28	0.6kg
Zr-93	153万年	1.1	1kg
Tc-99	21万1千年	0.64	1kg
Pd-107	650万年	0.037	0.3kg
Sn-126	10万年	4.7	30g
I-129	1,570万年	110	0.2kg
Cs-135	230万年	2.0	0.5kg
Cs-137	30.1年	13	1.5kg

核分裂生成物

アクチノイド

超ウラン元素

(TRU)

マイナーアクチノイド

(MA)

## 線量換算係数:

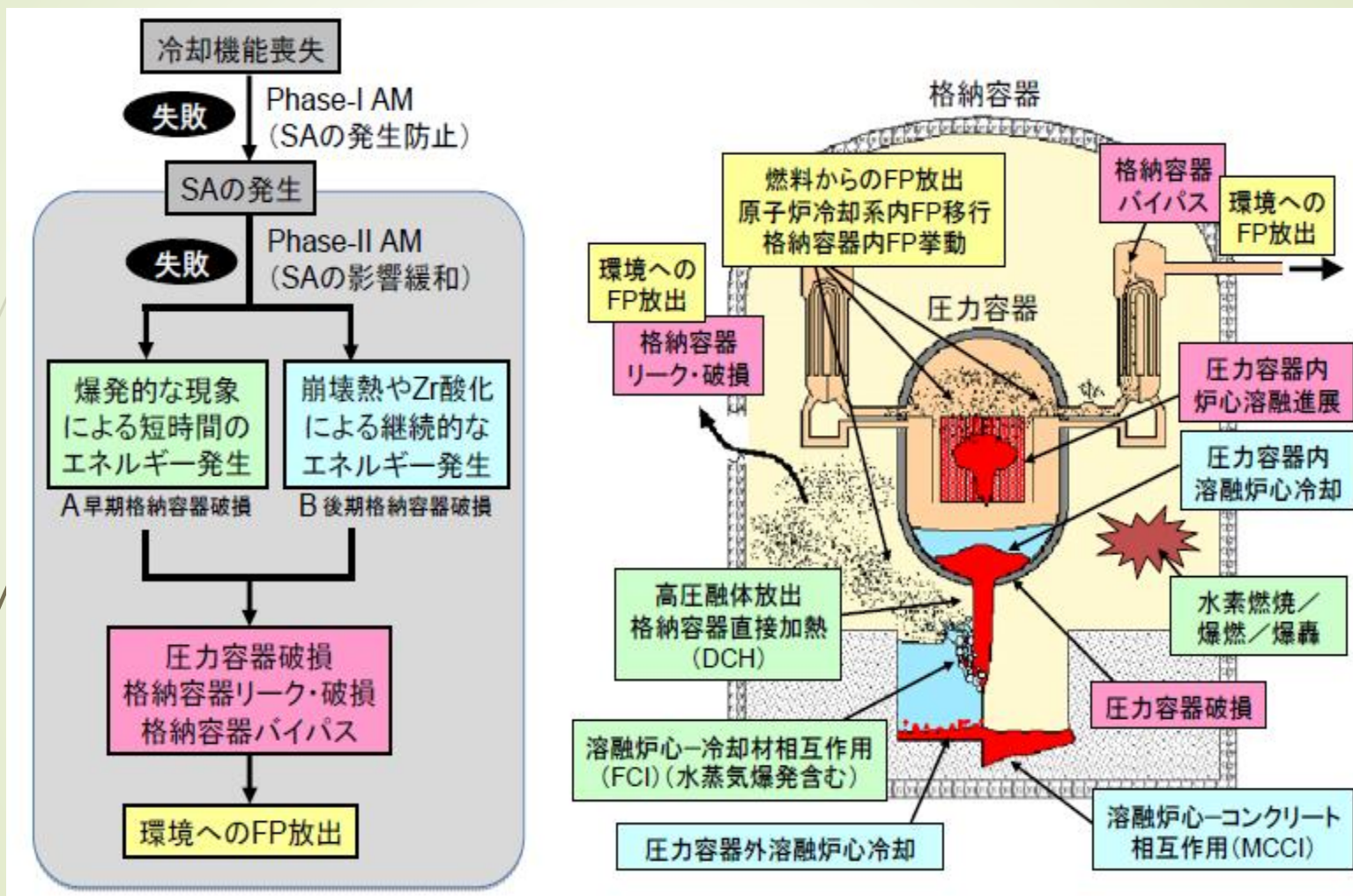
放射性核種を人体に摂取した時の影響を示す指標。放射能(ベクレル)あたりの被ばく(シーベルト)で示す。



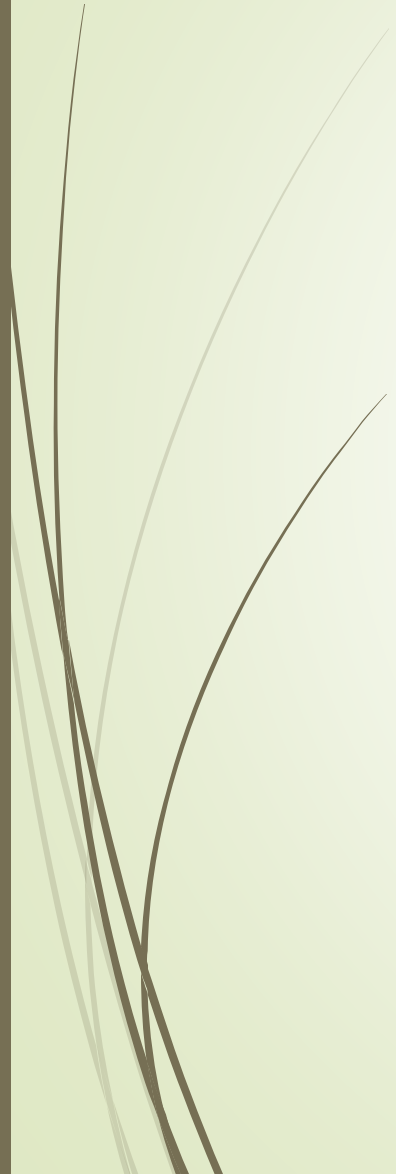


# 苛酷原子炉事故 (Severe Reactor Accident) 時の諸現象

# 苛酷原子炉事故時に起こる諸現象 (PWR)



【5】 出典：丸山結「シビアアクシデント進展解析コードMELCORについて」日本原子力学会（核燃料部会）  
溶融事故における核燃料関連の課題検討ワーキンググループ第三回（平成24年2月20日）資料



# ソースタームの定義と その評価の必要性

## ソースタームとは

- ➡ 苛酷原子炉事故 (Severe Reactor Accident) 時に炉心から格納容器や環境へ放出すると想定される放射性物質の量と種類

(The Report of the American Nuclear Society's Special Committee on Source Terms, September 1984)

## ソースターム評価の必要性

- ➡ 原子炉施設の安全評価では、周辺監視区域や敷地境界近傍の線量が一つの指標
- ➡ この線量を求めるためには、原子炉施設から大気中へ放出される放射性物質の種類、量、性状、放出開始時期、放出継続時間などのソースタームの評価が必要



# ソースターム評価で重要となる放射性核種

# 原子炉の苛酷事故時に放出される放射性核種が、公衆の健康や安全性にとって重要となる要因

- ➡ 原子炉中での放射性核種の全存在量  
核分裂収率や放射性壊変連鎖、半減期、原子炉の運転履歴に依存
- ➡ 放射性核種の有する放射能の性質  
中性子、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線等の粒子、放射線と熱エネルギーを放出
- ➡ プラントや環境中での放射性核種の挙動を決定づける物理的、化学的性質  
固体か気体か、水溶性か非水溶性か、化学反応性（放射性核種と安定核種に違いはない）等
- ➡ 放射性核種の生物学的特性  
生物学的な半減期や臓器への特殊な効果

# 化学的性質と揮発度による 核分裂生成物の分類

WASH-1400

1	希ガス	Xe, Kr
2	ハロゲン	I, Br
3	アルカリ金属	Cs, Rb
4	カルコゲン	Te, Se
5	アンチモン	Sb
6	アルカリ土類	Ba, Sr
7	貴金属	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc
8	希土類	Ce, Sm, Pm, Pr, Nd, La
9	難溶性酸化物	Y, Zr, Nb

NUREG-1465

1	希ガス	Xe, Kr
2	ハロゲン	I, Br
3	アルカリ金属	Cs, Rb
4	テルルGr.	Te, Sb, Se
5	アルカリ土類	Ba, Sr
6	貴金属	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
7	ランタノイド	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am
8	セリウムGr.	Ce, Pu, Np

# 希ガス

- ➡ 化学的に不活性でガス状であるため、環境中に放出されやすい
- ➡ 人が呼吸しても体内への吸収はそれ程無く、生物学的影響は限定される
- ➡ 大気中に拡散した希ガス放射能による全身被ばくは、肺の短時間被ばくと同程度である
- ➡ このため、たとえ事故時に全希ガスが放出されたとしても、初期死も晩発死も無く、財産等の破壊も無い
- ➡ TMI-2号炉事故では、プラントから2～10%の希ガス（Xe-133：200万～1300万Ci）が放出されたが、住民への全線量は無視できる程度



# ハロゲン

- ➡ ヨウ素は放出率が高く、化学反応性や比放射能、揮発性が高く、さらに甲状腺への生物学的効果が大きい等の理由から被ばく評価上最も重要な核種とされている
- ➡ 臭素は半減期が短く放出される前に減衰するため、その寄与は少ない
- ➡ ヨウ素は、I-131（半減期8日）、I-133（半減期21時間）、I-135（半減期7時間）が重要であるが、I-132（半減期2時間）もTe-132（半減期78時間）の娘核種として重要
- ➡ WASH-1400では、ヨウ素はガス状で放出されるとし、水による捕捉効果も無視されていたが、実際の事故例から見てこれは非常に保守側の仮定
- ➡ ウィンズケールとTMI-2の事故例を比較すると、前者は水が存在しなかった為に多量のヨウ素が放出され、後者は水があったためにヨウ素の放出はごく少量（ヨウ素がCsI等の化合物となって水に溶解し、放出が抑制された）

# アルカリ金属

- セシウムはルビジウムと比べて半減期が長く、核分裂収率が大  
きいためにより重要度が高い
- WASH-1400では、セシウムの沸点 (940 K) が熔融 $\text{UO}_2$  (3100 K) よ  
りも低いため、燃料から完全に放出されると仮定
- しかし、セシウムは化学的に活性で、かつその化合物が水溶性  
であるため、他のFPや被覆管の成分、不純物等と化合物を形成  
すれば上記仮定は保守的
- 炉心内では、セシウムはヨウ素1原子に対して約10原子の割合  
で生成され、ヨウ素と結合して $\text{CsI}$ となる
- 残りのセシウムは被覆管と反応したり酸化物となったりするが、  
多量の水が存在すれば $\text{CsOH}$ となる
- $\text{CsI}$ と $\text{CsOH}$ は水溶性であるため、セシウムの放出は抑制される

# カルコゲン（イオウ族）

- テルルはセレンと比べて半減期、核分裂収率、娘核種の観点からより重要
- WASH-1400では、溶融燃料から放出されるテルルは、テルルと化合したジルコニウムが酸化されることによってその一部（5～20%）が放出されると仮定
- その後の研究では、テルルはジルコニウムと反応するばかりでなく、ステンレス鋼中の成分とも反応することが確認されており、これは比較的低い温度でしかも速く進行
- 炉心にはテルルと比べて多量のジルコニウムやステンレス鋼が存在するため、テルルの放出が抑制される

## アルカリ土類金属

- WASH-1400では酸化物としてその10%が放出されるものとしているが、これらの酸化物は非常に水に溶解難く、移行もしにくい

# 貴金属

- ➡ WASH-1400では酸化物として放出されるものとしていたが、酸欠雰囲気では還元される

# 希土類

- ➡ 半減期が長く、核分裂収率も大きいので重要
- ➡ WASH-1400では揮発性の低い酸化物として存在するとしていたため、放出されるのはごく限られた範囲

# 難溶性酸化物

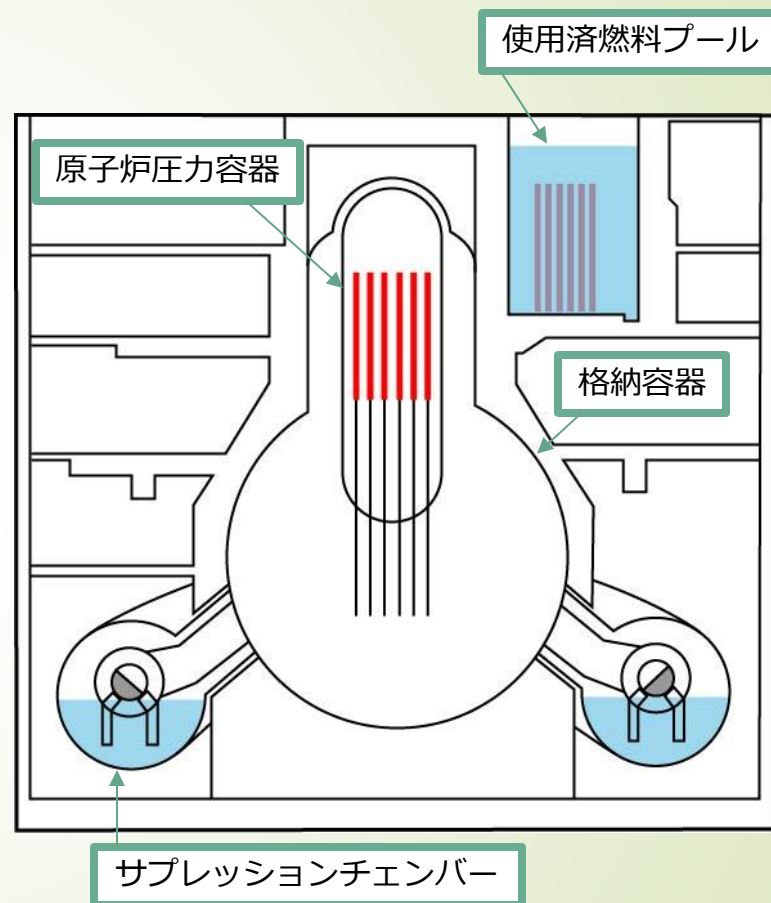
- ➡ ジルコニウムやニオブは極めて安定で揮発性の低い酸化物であるため放出量は少ない



# 工学的安全施設によるエアロゾル除去(1)

## サプレッションプール

- ➡ BWRでは、原子炉冷却系が大きく破損した場合の熱エネルギーを吸収するための設備としてサプレッションプールが設けられているが、これは水蒸気中のエアロゾルや水溶性ガスを含んだ水蒸気が気泡となって水中を上昇する間に除去するのに有効



## 出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	PD	『The Alchemist』 Pieter Bruegel de Oude (-1569)
【2】	PD	『The Alchemist』 Pieter Bruegel de Jonge(-1636)
【3】	+	画像提供：日本原子力研究開発機構
【4】	+	提供：日本原子力研究開発機構
【5】	+	丸山結「シビアアクシデント進展解析コードMELCORについて」日本原子力学会（核燃料部会）溶融事故における核燃料関連の課題検討ワーキンググループ第三回（平成24年2月20日）資料 <a href="http://www.aesj.or.jp/~fuel/Pdf/WG_Meltdown/WG_Doc/20120220_WG-3_Maruyama.pdf">http://www.aesj.or.jp/~fuel/Pdf/WG_Meltdown/WG_Doc/20120220_WG-3_Maruyama.pdf</a>