


苛酷原子炉事故における ソースターム評価



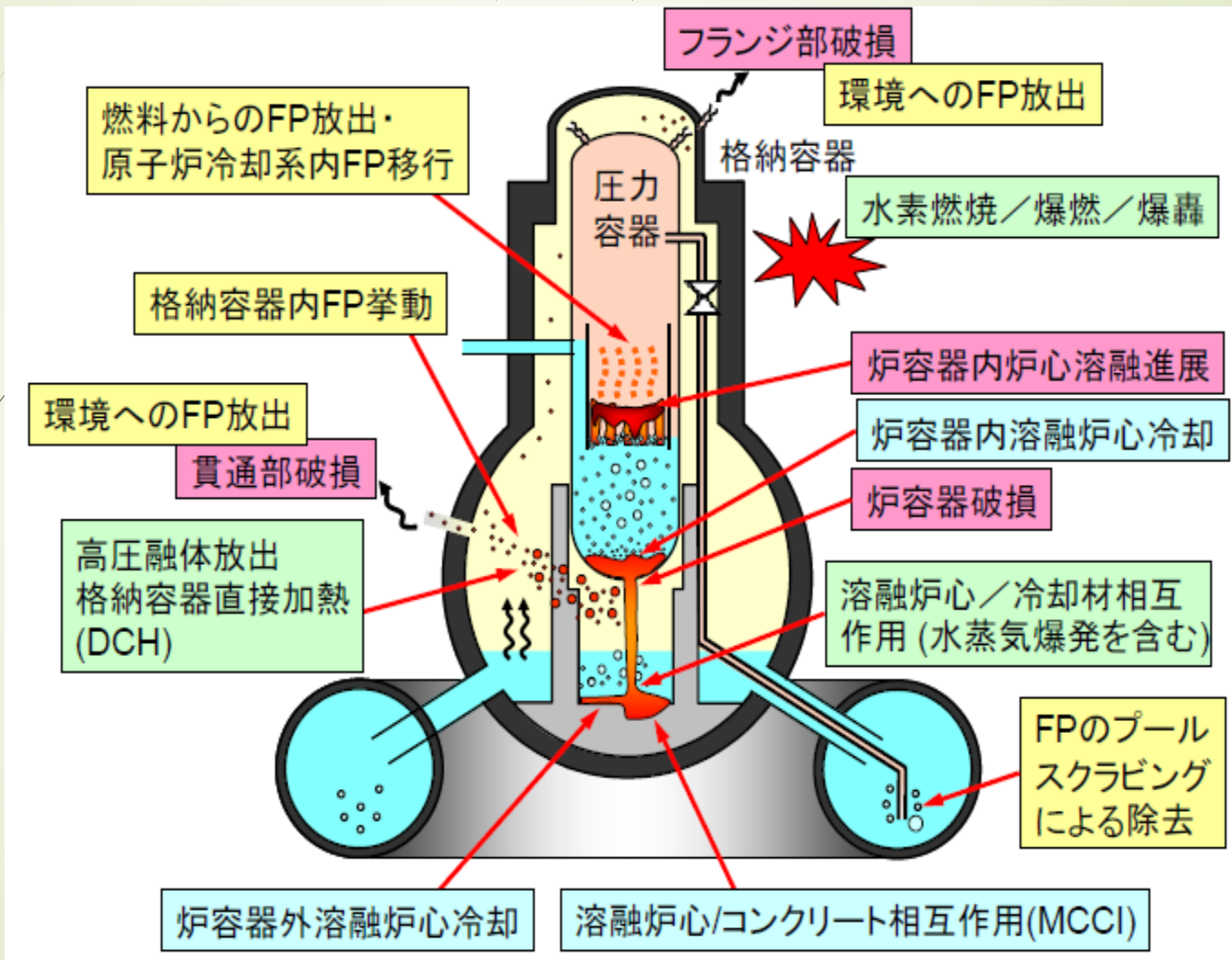
福井大学附属国際原子力工学研究所

宮原信哉



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

苛酷原子炉事故時に起こる諸現象 (BWR)



【20】 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

- ➡ 軽水炉で燃料破損を伴う事故が起こると、炉心構成要素から放出された物質のほとんどが気体もしくは凝縮性の蒸気となる
- ➡ 低蒸気圧成分は、冷却系の中で低温の流体（水蒸気、水滴、水素ガスの混合物）と接触して核生成を起こし、エアロゾルを生成するか、周囲の壁等に凝縮する
- ➡ 生成したエアロゾルは熱流力学的なプロセスや減衰プロセスを経て、一部が気体とともに格納容器に漏えいする
- ➡ 格納容器から環境への漏えいについては、漏えいの間もエアロゾルは種々の減衰プロセスを受ける
- ➡ 事故後しばらく時間が経つと、破損した燃料が熔融し、この冷却に失敗すると炉容器の底部を貫通して熔融燃料とコンクリートとの反応が起こり、この際に新たなエアロゾルが生成される



化学的プロセスと ソースターム評価への適用

苛酷原子炉事故シーケンスにおいて、燃料からのFP放出や冷却系内及び格納容器内でのFPの輸送及び挙動に影響を与える化学的プロセス（燃料中）

- 核分裂によって生成したFPの殆どは UO_2 燃料の格子内にとどまり、一部がペレットの表面や燃料中のボイドへ移行し集積
- そこで生じる化学反応は、FPの濃度や化学的性質、熱力学的条件に依存し、健全な燃料で影響を与える最大の要因は酸素の化学ポテンシャル
- また、FPの化学形態は、それ自身の化学的性質に大きく依存⇒グループに分類
- 希ガスは、照射中に酸化燃料格子の粒界、クラック、ボイドに従って部分的に放出されるが、燃料、構造材、他のFPとは化学反応しない
- ハロゲン化セシウム、ジルコニウム等の金属と反応するが、熱力学的見地からするとハロゲン化アルカリが最も安定で、特にCsIはセシウムがヨウ素の約10倍存在するため生成されやすい
- アルカリ金属は反応性に富み、しかも揮発性である。通常運転時の燃料（1200 K以下）では化学形態としては Cs_2UO_4 （固体）が安定で、より高い温度になると Cs_2MoUO_4 （固体または液体）が生成され、また Cs_2UO_4 は $Cs_2U_2O_7$ となる。セシウム単体は固体化合物と平衡なガス相に存在し、ハロゲンと反応してハロゲン化アルカリを生成する
- イオウ族では、核分裂収率と毒性からテルルが重要であるが、テルルは金属性が強く他の金属と合金を作り易い。このため、ZrTeの合金を形成するが、放出される場合はSnTeとなる。テルルはステンレス鋼中の成分元素とも強い親和力を示す

苛酷原子炉事故シーケンスにおいて、燃料からのFP放出や冷却系内及び格納容器内でのFPの輸送及び挙動に影響を与える化学的プロセス（燃料中）

- アンチモンは単体で残るが、他の金属と合金を作ることも可能
- アルカリ土類は燃料中で一酸化物、ウラネート、モリブデート、ジルコネートを形成するが、一酸化物とモリブデートが最も安定な化合物で、一般にストロンチウムの化合物はバリウムの化合物より安定
- 貴金属は合金を作り易いため、他の金属を溶かすのに役立っているが、モリブデン、ルテニウム、テクネチウムは揮発性の酸化物も形成し易い。また、モリブデンは次亜化学量論的条件下ではテクネチウム、ルテニウム、ロジウム、パラジウムと合金を作り易く、超化学量論的条件下では酸化されたモリブデンがセシウム、バリウム、ストロンチウムと結合してモリブデートを形成
- イットリウムを含む希土類元素は最も大きな核分裂収率（約50%）を示し、ジルコニウムは燃料格子中でバリウムやストロンチウムとジルコネートとして固溶する。さらに、ジルカロイ被覆管は燃料の酸素過剰によって酸化ジルコニウムを形成

軽水炉の燃料（燃烧度：2 at. %, 1500 K）における平衡FP分布

Fission Product	Form as First Phase		Form as Second Phase			
	In solution in UO ₂	Gas	Oxides	Halide	Telluride	Alloy
Xe		Xe				
Kr		Kr				
Cs, Rb		0.3% CsI, CsBr, RbI, RbBr	80% Cs ₂ MoO ₄ , Rb ₂ MoO ₄	5% CsI, Cs, Br, RbI, RbBr	15% Cs ₂ Te, Rb ₂ Te, Cs ₂ Se, Rb ₂ Se	
I, Br		5% CsI, CsBr, RbI, RbBr		95% CsI, CsBr, RbI, RbBr	55% Cs ₂ Te, Rb ₂ Te, Cs ₂ Se, Rb ₂ Se	
Te, Se		8% Te ₂ , Se ₂				
Mo			38% Cs ₂ MoO ₄ , 2% Ba, SrMoO ₄			60% Mo
Tc						Tc
Ru						Ru
Pd						Pd
Ag						Ag
Cd						Cd
In						In
Sn						Sn
Sb						Sb
Sr			96% SrO, 4% SrMoO ₄			
Y	100%Y ₂ O ₃					
Zr	98%ZrO ₂		2% BaZrO ₄			
Nb			100% Nb ₂ O ₅ , 59% BaO			
Ba			35% BaUO ₄ , 4% BaMoO ₄ , 2% BaZrO ₄			
Rare Earths	100% (R. E.) ₂ O ₃					

苛酷原子炉事故シーケンスにおいて、燃料からのFP放出や冷却系内及び格納容器内でのFPの輸送及び挙動に影響を与える化学的プロセス（冷却系内）

- ➡ 被覆管が破損すると、燃料やFPは新たな化学的環境（例えば水蒸気、水素、金属酸化物表面）に曝される
- ➡ このため、FPの成分は、その放出速度、温度、流れの分布の影響を受ける
- ➡ また、冷却系内では化学反応によって化学的に安定で水に不溶性の化合物が形成されるため、冷却系から放出されるFPは揮発性の高いFPとなる
- ➡ 冷却系内の化学的プロセスで重要なFPは、ハロゲン（I, Br）、アルカリ金属（Cs, Rb）、カルコゲン（Te, Se）、アンチモン（Sb）、アルカリ土類（Ba, Sr）
- ➡ ハロゲンは強酸化剤で、冷却系内では他のFPであるセシウムや銀、構造材の構成元素である鉄、ニッケル、銅、被覆管の構成元素であるジルコニウム、スズ、発生した水素、PWRの制御棒の構成元素である銀、インジウム、カドミウムなどとハロゲン化物を形成
- ➡ これらの反応を支配するものは、系の酸素ポテンシャルと元素の量、化学反応速度とガスの流動（TMI-2号炉事故ではヨウ素は冷却系内に保持され、一部はヨウ化物として移行）

苛酷原子炉事故シーケンスにおいて、燃料からのFP放出や冷却系内及び格納容器内でのFPの輸送及び挙動に影響を与える化学的プロセス（冷却系内）

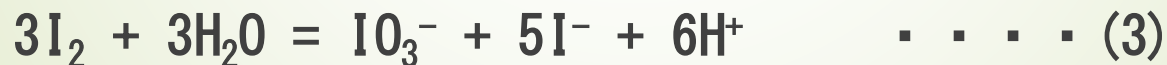
- ➡ アルカリ金属ではセシウムが重要。燃料ピンからのセシウムとヨウ素の放出率は類似し、ヨウ化物の生成速度も速い。セシウムはヨウ素の約10倍存在し、このためセシウムの90%が単体で存在することになるが、それらはCsOH（融点：273℃，沸点：990℃）となる。
- ➡ よって、セシウムの殆どはCsI，CsOHの形で存在していることになる。セシウムとCsOHは共に冷却系の基礎金属とは反応しないが、合金の酸化物とは反応する。CsOHはステンレス鋼を腐食し、TMI-2号炉の制御棒でも確認されている
- ➡ イオウ族のテルルはジルコニウム、スズ、ニッケルの合金と反応し、苛酷事故時の炉容器内のような還元条件下では85%のテルルが溶融ステンレス鋼中に留まるため、テルルのエアロゾルは放出されない
- ➡ テルルの水素化物は揮発性物質であるが、これは高い水素分圧下でのみ安定な化合物
- ➡ テルルは沸点が1390℃であるため、冷却系内ではエアロゾル状で移行し、構造材表面に沈着する

苛酷原子炉事故シーケンスにおいて、燃料からのFP放出や冷却系内及び格納容器内でのFPの輸送及び挙動に影響を与える化学的プロセス（冷却系内）

- アンチモンは燃料から単体で放出され、水蒸気-水素ガス相でも反応しない。アンチモンの沸点も 1380°C であるため、冷却系内ではエアロゾル状で移行し、構造材表面に沈着する。また、他の金属と合金を作り易い
- アルカリ土類のストロンチウムとバリウムは、それらの酸化物の沸点がそれぞれ 3000°C 、 2000°C であるため、燃料ピンから放出されにくい。これらの酸化物は水蒸気と反応して揮発性の水酸化物を形成し、水溶性となるが、炭酸塩になると水に不溶となる。この性質を利用して、TMI-2号炉事故ではアルカリ土類元素を沈殿させている

苛酷原子炉事故シーケンスにおいて、燃料からのFP放出や冷却系内及び格納容器内でのFPの輸送及び挙動に影響を与える化学的プロセス（格納容器内）

- ➡ ヨウ化物は不揮発性化合物として水中に存在し、エアロゾルとなってもAgI以外は水溶性
- ➡ 通常の格納容器内の酸素 O_2 は I^- を酸化しIとするのに十分な量が存在するが、温度とpHからその反応は遅い
- ➡ 他の化合物が I^- をIに酸化することは殆どないことから、格納容器内のヨウ化物は安定
- ➡ I_2 は低い濃度でも水に溶けて不揮発性のIとなる



- ➡ 以上の反応ではヨウ素が水中でヨウ化物を形成すると(1)～(3)式の平衡は右へ強くシフトする
- ➡ さらに Cs^+ のようなイオンの存在はIの水中からの放出をさらに抑制

苛酷原子炉事故シーケンスにおいて、燃料からのFP放出や冷却系内及び格納容器内でのFPの輸送及び挙動に影響を与える化学的プロセス（格納容器内）

- ➡ 水素燃焼は有機化合物と反応しやすいヨウ素単体の濃度を上昇させ、揮発性有機ヨウ素の量を増加させるが、揮発性有機ヨウ素そのものが水素燃焼に対して不安定
- ➡ ヨウ化物は有機ヨウ素にはならない
- ➡ IとHOIは有機ヨウ素となる可能性があるが、全ヨウ素のわずか0.03%程度
- ➡ 放射線による効果は、水系では活性度の高い短寿命のフリーラジカルを生成し、I⁻を酸化させてIやI₂を生成するが、Iはほかの物質と反応して不揮発性物質を作り易く、I₂も液相から放出されるよりH₂Oとの反応速度の方が速い
- ➡ 気相では、有機塗料や潤滑油からガス状フリーラジカルが生成し、ガス状I₂を生成するが、元々の気相濃度を変化させるほどではない



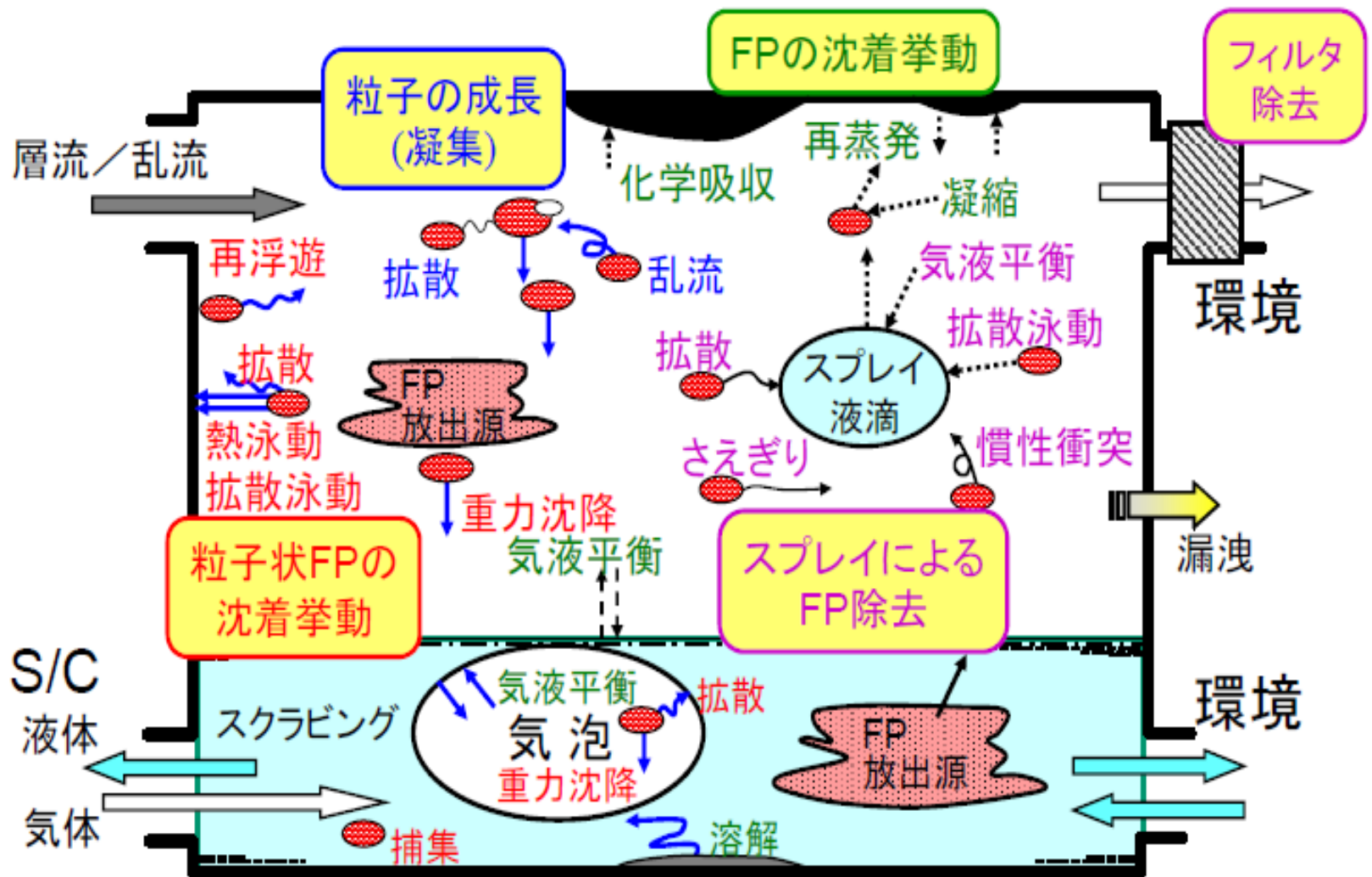
物理的プロセスと ソースターム評価への適用

冷却系内のFPやエアロゾルの輸送と沈着

- ➡ 多相多成分系の熱/物質伝達、化学反応およびエアロゾル挙動が関与
- ➡ 流動については、層流と乱流の2つが考えられるが、多くの事故シーケンスでは自然対流が主となる
- ➡ モデル化には、流動、熱伝達、エアロゾル挙動、FP蒸気の壁面吸着、壁に対するエアロゾル沈着および水蒸気凝縮などを考慮に入れる必要

格納容器内のFPやエアロゾルの輸送と沈着

- ➡ 冷却系内と同様な配慮
- ➡ 温度が低いことから、FP蒸気の挙動は問題とならず、むしろエアロゾルの凝集、沈降、拡散泳動、粒子への水蒸気凝縮等の挙動が重要



【21】 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）
 熔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

エアロゾル挙動評価で考慮すべきプロセス

- 原子炉システムでは、あらゆる大きさの粒子が以下の4つのプロセスで供給される

- (1) 粒子の発生（ソース）
- (2) 隣接空間からの漏えいによる流入
- (3) 小粒子の凝集
- (4) 粒子への水蒸気凝縮

- 一方で、以下のような除去プロセスがある

- (1) 重力沈降などによる沈着プロセス
- (2) ほかの粒子との凝集により大粒子側へ移行するプロセス
- (3) プラント内の隣接空間への漏えい
- (4) 粒子表面からの蒸発による対象粒径範囲からの消滅

凝集

- ➡ ブラウン運動による衝突
- ➡ 重力による沈降速度差による衝突
- ➡ 乱流（流れの乱れ）による衝突
- ➡ 慣性力による相対速度差による衝突

重力沈降

- ➡ 全てのエアロゾルは重力の影響で水平面上および傾斜面上に沈降

ブラウン拡散沈着

- ➡ 壁面近傍の粒子濃度差による拡散による沈着

熱泳動沈着

- ➡ ガスと壁の温度差による高温部から低温部への気体運動量の差による沈着

拡散泳動沈着

- ➡ 壁面に蒸気が凝縮することによって発生するステファン流による沈着

慣性沈着

- ➡ 壁面近傍のガス流の運動方向急変による沈着

乱流沈着

- ➡ 壁面近傍での流れの乱れに起因する速度変動による沈着

再浮遊（舞い上がり効果）

- ➡ 沈着したエアロゾルが、その区画が急激に減圧されて局部的な高速流が生じたり、プールのフラッシングが起こることにより、舞い上がる現象

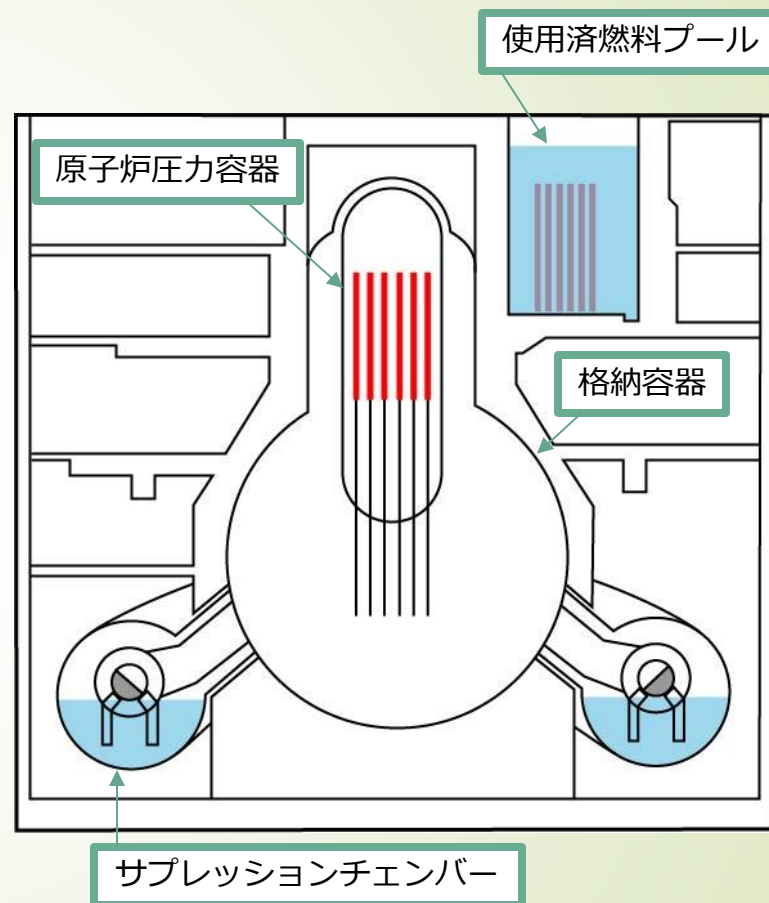
再蒸発

- ➡ FPが崩壊熱を放出して周囲の断熱が十分に達成された場合に、FPが沸点以上にまで温度が上昇し、再び蒸発する現象

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

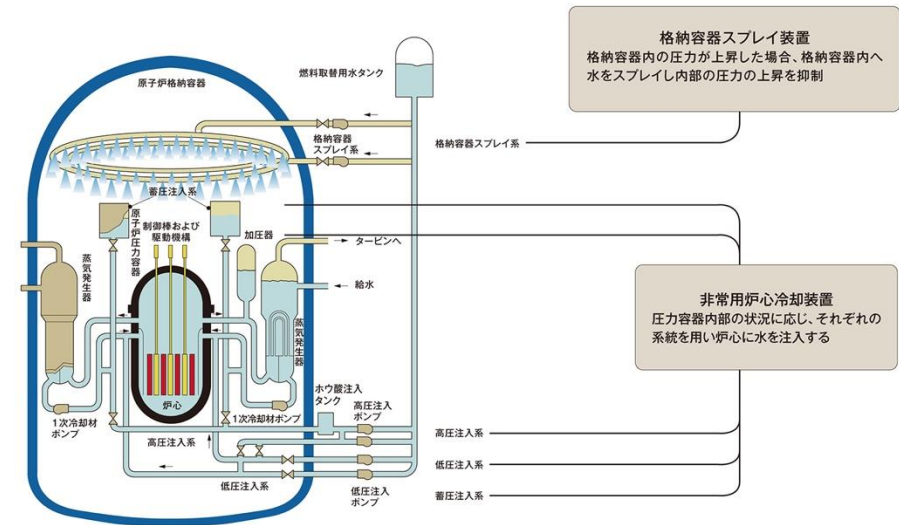


工学的安全施設によるエアロゾル除去(2)

格納容器スプレイ

- ➡ PWRでは、格納容器内の圧力を低下させ、FPを空気中から除去するための、BWRでは、ウェットウェルからFPを除去するための、水スプレイ設備が設けられている

非常用炉心冷却装置等の例 (PWR)



5-2-3

原子力・エネルギー図面集

【22】 出典：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」

工学的安全施設によるエアロゾル除去 (3)

アイスベッドコンデンサー

- ホウ素入りの氷が非常に多くの穴が開いたスチール製のバスケットの中に収められた設備で、表面積が非常に大きくかつ温度が低いのでエアロゾルの捕獲に有効

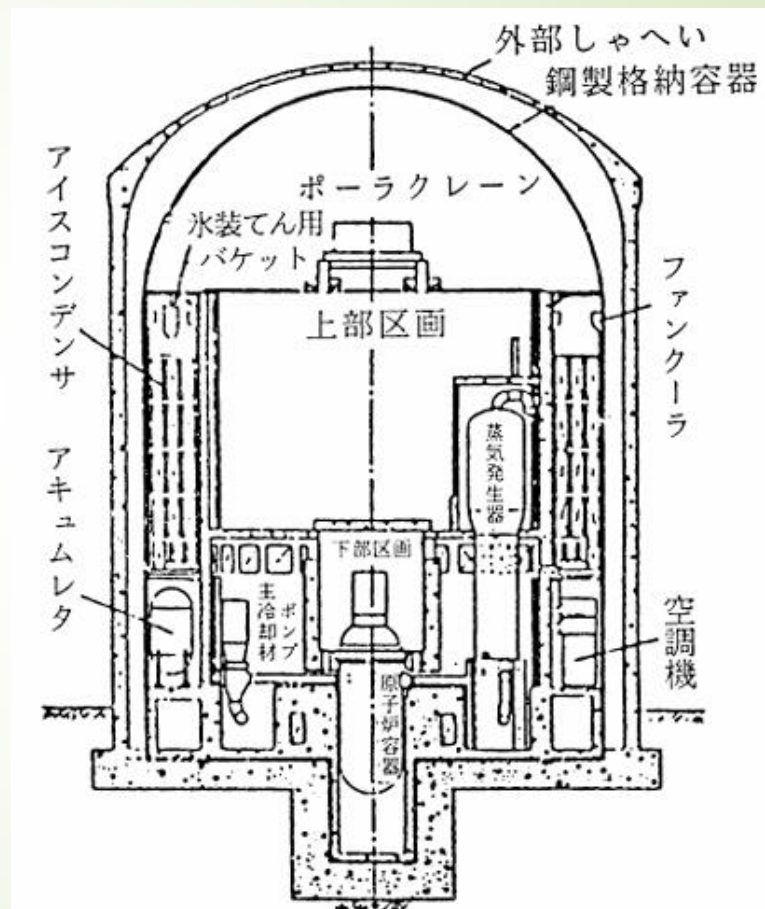


図 3 アイスコンデンサー形原子炉格納容器

【23】 出典：吉川孝三. (1987).
大型プラントにおける氷の利用技術. 雪氷, 49(4), 217-220.

工学的安全施設によるエアロゾル除去(4)

フィルターシステム

- 水分分離器、相対湿度を低下させるためのヒーター、プレフィルター、高効率フィルター、活性炭フィルター、2次高効率フィルター、ファンから成る設備で、エアロゾルとヨウ素単体、ヨウ化メチルの捕獲に有効

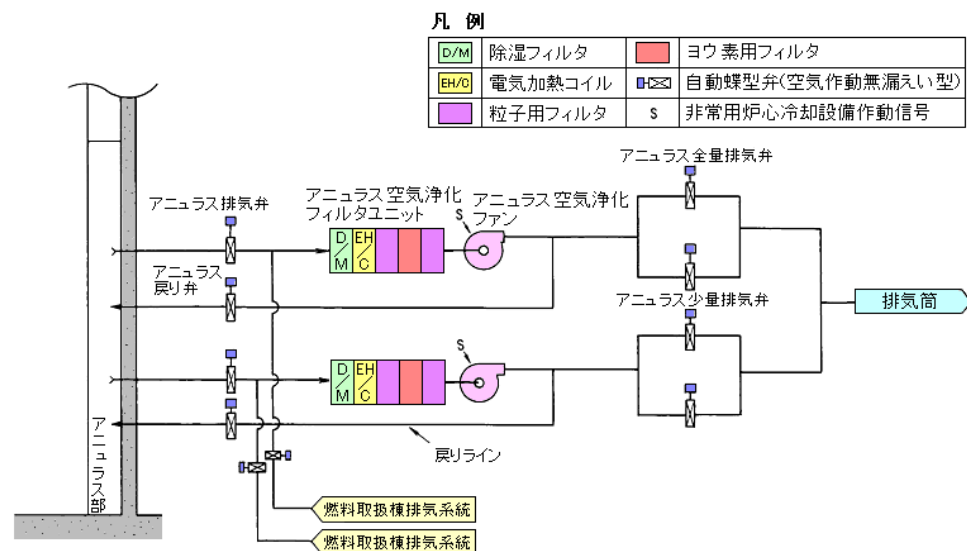


図6 アニュラス空気浄化設備系統図

【出典】原子力安全研究協会(編):軽水炉発電所のあらまし(改訂版)、原子力安全研究協会(1992年10月)

【24】転載元図書:実務テキストシリーズNo.1 軽水炉発電所のあらまし(改訂版) 1992.10 P190, 図3.7.7 アニュラス空気浄化設備系統図

ソースターム評価用の 解析コードと現象確認実験

解析コードを用いる安全評価

分類	質的安全評価	確率論的安全評価	決定論的安全評価
目的	安全保護系や工学的安全設備などの妥当性を確認するため、大きな影響を引き起こす代表的事象を想定して評価	現実的な評価のため、発生し得るあらゆる事故を対象として、その発生頻度や発生時の影響を評価	深層防護が十分であることを示すため、重要で発生のある事象の進展をシナリオとして想定して影響を評価
適用	DBA（設計基準事故）評価	確率論的リスク評価（PRA）	DBA評価と苛酷事故（SA）評価
方法	保守的な初期条件及び境界条件	不確定性の評価	保守的または現実的な入力値

解析コードの種類と特徴

➡ MELCORコード

米国NRCによって開発されたコードで、CSARP (Cooperative Severe Accident Research Program) 計画の一環として、SA時の最適予測解析コード開発を国際協力で進めている。各国の研究機関等で実機評価に用いられているだけでなく、解析モデルの妥当性確認も進められている。

➡ SAMPSONコード

我が国のエネルギー総合工学研究所が開発を進めているコードで、機構論的モデルによって原子炉容器内から格納容器内までの一連の事象を一貫して解析可能。

➡ THALES2コード

日本原子力研究開発機構が開発を進めているSA時の総合解析コードで、FPの移行挙動解析に詳細な解析モデルを適用。

➡ MAAPコード

米国産業界が協力して開発したSA総合解析コードで、NRCの要請で実施した米国全ての実機プラントのPRA評価で使用した。我が国でも産業界が代表プラントのSA事故進展評価に使用。

➡ ASTECコード

フランスとドイツで共同開発されたコードで、EU諸国で利用。

FP挙動モデル

燃料からの放出モデル

$$M(I, T) = M_i(I, T) \times (1 - e^{-k(I, T) \times \Delta t})$$

$M(I, T)$: 温度 T における核種 I の Δt 間に放出される量

$M_i(I, T)$: 温度 T における核種 I の存在量

➡ NUREG-0772モデル*

$$k(I, T) = A(I, J) \times \exp(B(I, J) \times (T - 273.15))$$

$k(I, T)$: 温度 T における核種 I の放出率速度係数 (1/分)

$A(I, J), (B(I, J))$: 核種 I の温度領域 J に対する定数

* U.S. Nuclear Regulatory Commission;
“Technical Bases for Estimating Fission
Product Behavior During LWR Accidents,”
NUREG-0772, June 1981.

BNL解析における放出速度定数

TABLE 2. VALUES USED FOR THE CONSTANTS A AND B IN THE DEFAULT METHOD FOR CALCULATION OF THE RELEASE RATE COEFFICIENTS

Fission Product Group	900 C < T < 1400 C		1400 C < T < 2200 C		2200 C < T < 2760 C	
	A	B	A	B	A	B
I, Xe, Kr	7.02E-09	0.00886	2.02E-07	0.00667	1.74E-05	0.00460
Cs	7.53E-12	0.0142	2.02E-07	0.00667	1.74E-05	0.00460
Te ^(a)	1.62E-11	0.0106	9.04E-08	0.00522	6.02E-06	0.00312
Ag	3.88E-12	0.0135	9.39E-08	0.00630	1.18E-05	0.00411
Sb	1.90E-12	0.0128	5.88E-09	0.00708	2.56E-06	0.00426
Ba	7.50E-14	0.0144	8.26E-09	0.00631	1.38E-05	0.00290
Mo	5.01E-12	0.0115	5.93E-08	0.00523	3.70E-05	0.00200
Sr	2.74E-08	0.00360	2.78E-11	0.00853	9.00E-07	0.00370
Zr ^(b)	6.64E-12	0.00631	6.64E-12	0.00631	1.48E-07	0.00177
Ru	1.36E-11	0.00768	1.36E-11	0.00768	1.40E-06	0.00248
Fuel ^(b) , La group	5.00E-13	0.00768	5.00E-13	0.00768	5.00E-13	0.00768
Cladding ^(b) , Zr	6.64E-12	0.00631	6.64E-12	0.00631	1.48E-07	0.00177
Sn	1.90E-12	0.0128	5.88E-09	0.00708	2.56E-06	0.00426
Structure ^(b) , (Fe, Cr, Ni, Mn)	6.64E-10	0.00631	6.64E-10	0.00631	1.48E-05	0.00177

(a) Temperature range boundaries for Te are 1600 and 2000 C.

(b) The values for A and B for these species were altered from those in Reference 1.

【26】 出典 : Kuhlman, M R, Lehmicke, D J, & Meyer,
R O. CORSOR user's manual. United States.

➡ アレニウス型のCORSOR-MとCORSOR-0モデル*

$$k(I, T) = K(I) \times \exp\left(-\frac{Q(I)}{R \cdot T}\right)$$

$k(I, T)$: 温度 T における核種 I の放出率速度係数 (1/分)

$K(I)$: 核種 I の係数 (1/分)

$Q(I)$: 核種 I の活性化エネルギー (kcal/mol)

R : 気体定数 = 1.987×10^{-3} (kcal/(K·mol))

T : 絶対温度 (K)

CORSOR-Mにおける放出率速度定数を求めるためのアレニウス型定数*

Species	$K(I)$	$Q(I)$
Cs,I,Kr, Xe,Te	2.00E+05	63.8
Ag	7.90E+03	61.4
Ba	2.95E+05	100.2
Sn(clad)	5.95E+03	70.8
Ru	1.62E+06	152.8
UO2	1.46E+07	143.1
Zr(clad)	8.55E+04	139.5
Zr	2.67E+08	188.2
Sr	4.40E+05	117.0

【27】 出典 : Kuhlman, M R, Lehmicke, D J, & Meyer, R O. CORSOR user's manual. United States.

エアロゾル挙動モデル

■ スモルコフスキー方程式

$$\frac{\partial n(v,t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^v K(v', v-v') n(v', t) n(v-v', t) dv' \\ - n(v, t) \int_0^\infty K(v, v') n(v', t) dv' - R(v) n(v, t) + S(v, t)$$

$n(v, t)$: 粒子体積 v から $v + dv$ の粒子数密度 (1/cm³)

$K(v, v')$: 粒子体積 v と v' の粒子衝突頻度 (1/s)

$R(v)$: 粒子体積 v の除去速度 (1/s)

$S(v, t)$: 粒子生成速度 (1/cm³s)

$$K(v, v') = K_B(v, v') + K_G(v, v') + K_T(v, v') + K_I(v, v')$$

$K_B(v, v')$: ブラウン運動による衝突頻度

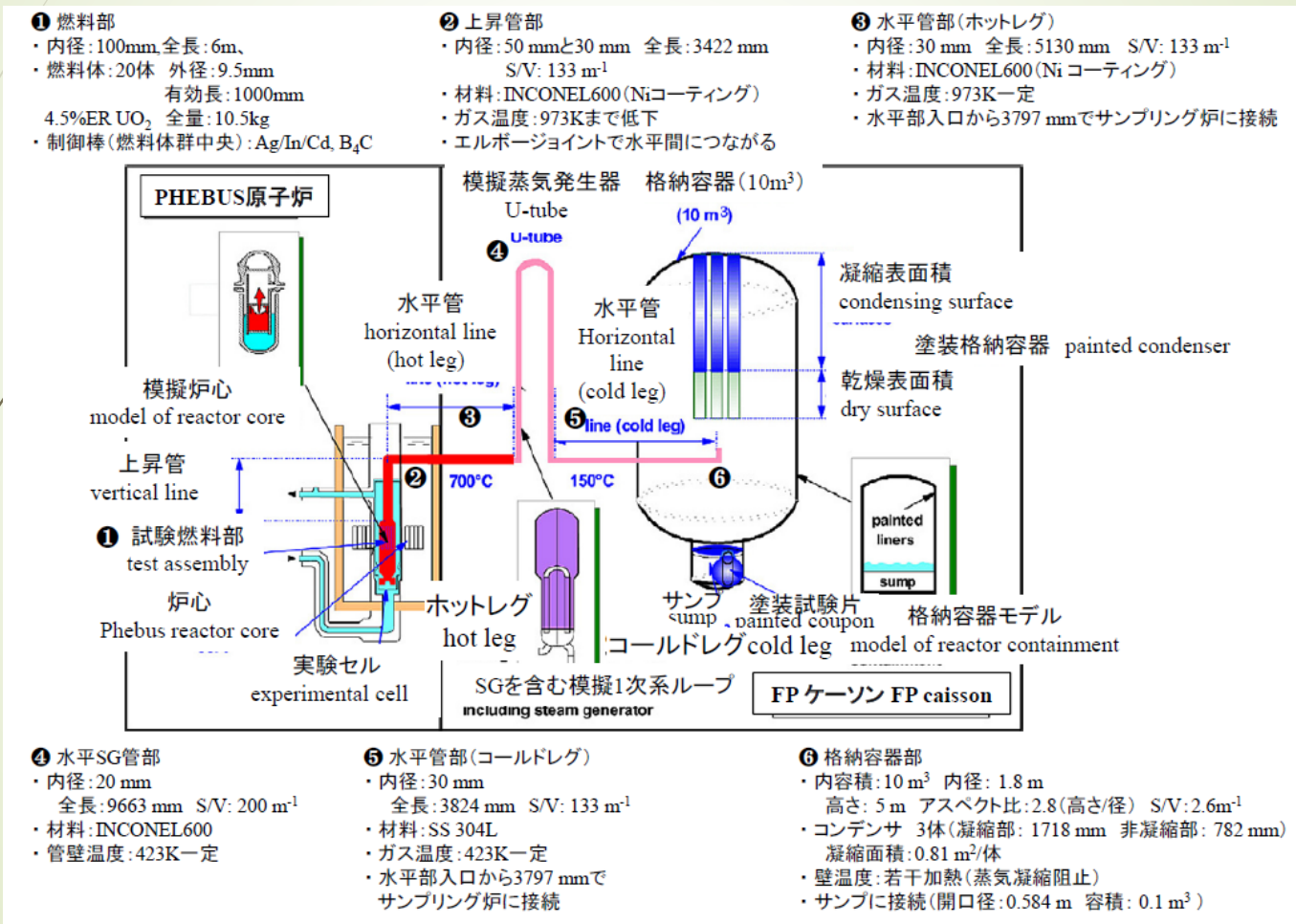
$K_G(v, v')$: 重力による沈降速度差による衝突頻度

$K_T(v, v')$: 乱流（流れの乱れ）による衝突頻度

$K_I(v, v')$: 慣性力による相対速度差による衝突頻度

Phébus-FP実験の概要

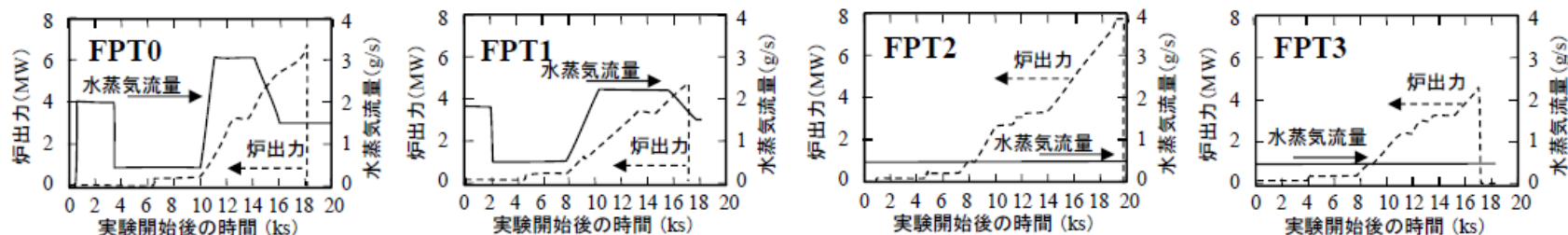
- フランス放射線防護原子力安全研究所 (IRSN) と欧州共同体が共同で主催するPHEBUS-FP計画は、カダラシュ研究所のPHEBUS研究炉を用いる苛酷原子炉事故 (シビアアクシデント) 時の燃料損傷とFP放出移行に関する大規模な総合実験計画



【28】 Reprinted from Nuclear Engineering and Design, Vol /edition number, B Clément et al, LWR severe accident simulation: synthesis of the results and interpretation of the first Phebus FP experiment FPT0 / Fig.4, P12, Elsevier (2003), with permission from Elsevier.

Phébus-FPプロジェクトの試験マトリックス

試験#	燃料集合体	燃料劣化と実験条件	研究目的		実験日
			(1次系)	(格納容器)	
FPT0	新燃料棒20体 (9日間予備照射) AgInCd制御棒1体	燃料溶融まで出力増大 低圧・高蒸気雰囲気 でFP放出	配管-SG管までの FP滞留 付着量評価	エアロゾル評価 ヨウ素放射化学 サンプル水pHの影響	1993/12/2
FPT1	BR3燃料(~23GWD/t) (6日間予備照射) AgInCd制御棒1体	FPT0に同じ	FPT0に同じ	FPT0に同じ	1996/7/26
FPT2	BR3燃料(~23GWD/t) AgInCd制御棒1体 (9日間予備照射)	FPT0に同じ ただし高蒸気雰囲気	FPT0に同じ エアロゾルに及ぼす ホウ酸の影響評価	FPT0に同じ サンプル水pH: 9一定	2000/10/12
FPT3	BR3燃料(~24GWD/t) B ₄ C制御棒1体	FPT2に同じ	FPT2に同じ	FPT2に同じ pH:5 H ₂ 再結合クーポン	2004/11/18
FPT4	UO ₂ -ZrO ₂ 粒子 EDF燃料(~38GWD/t) AgInCd制御棒1体 追照射無	デブリベッドでの 溶解進展 低揮発性FPと アクチノイドの放出	ループ上部フィルタ でのエアロゾル滞留 上記の試験後検査		1999/7/22
FPT5	FPT1に同じ	空気混入下のFP放出	FP付着、化学形態	FPT1/FPT2に同じ	未実施



FPT0-4の実験条件の比較(流動条件)

Phébus-FP実験解析で得られているFP挙動モデルに関する課題

- ➡ FP放出
 - ・ 中/低揮発性FP放出モデルの高度化
 - ・ 溶融制御材からのAg/In/GdとBの放出
 - ・ 被覆管からのSnの放出
- ➡ 化学形態
 - ・ Cs/Iの化学形と物理形状
 - ・ B-FP反応
- ➡ FP蒸気
 - ・ 壁への凝縮、再蒸発モデルの高度化
- ➡ ヨウ素化学
 - ・ 気相放射線化学反応
 - ・ 有機ヨウ素生成、反応
- ➡ エアロゾル付着
 - ・ 重力沈降に及ぼす流れの効果
 - ・ 熱泳動モデルの高度化
 - ・ 拡散泳動モデルの高度化

まとめ

- 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を指す
- 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であり、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は、原子炉中での放射性核種の全存在量、放射性核種の有する放射能の性質、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、放射性核種の生物学的特性の観点から決まる
- 原子炉施設の安全規制におけるソースターム評価は、1972年に発生したTMI-2事故を契機として、それまでの過度に保守的な評価から、放射性物質の放出・移行挙動に影響を与える物理的、化学的プロセスを考慮した機構論的な評価になりつつある
- そのための評価ツールとして、我が国を含む世界各国において解析コード類が開発、整備しつつあり、苛酷原子炉事故を模擬した炉内実験結果との比較、検証とこれを基にしたモデルの改良が進められている

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【20】	✦	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 http://www.aesj.or.jp/~fuel/Pdf/WG_Meltdown/WG_Doc/20120220_WG-3_Maruyama.pdf
【21】	✦	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 http://www.aesj.or.jp/~fuel/Pdf/WG_Meltdown/WG_Doc/20120220_WG-3_Maruyama.pdf
【22】	✦	出典：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」
【23】	✦	吉川孝三. (1987). 大型プラントにおける氷の利用技術. 雪氷, 49(4), 217-220.
【24】	✦	実務テキストシリーズNo.1 軽水炉発電所のあらまし（改訂版）1992.10 P190, 図3.7.7 アニュラス空気浄化設備系統図
【25】	✦	「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」, 「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会（日本原子力学会）, P81, 第4章, 表5.1.1-1
【26】	✦	Kuhlman, M R, Lehmicke, D J, & Meyer, R O. CORSOR user's manual. United States. https://doi.org/10.2172/5761188
【27】	✦	Kuhlman, M R, Lehmicke, D J, & Meyer, R O. CORSOR user's manual. United States. https://doi.org/10.2172/5761188
【28】	✦	Reprinted from Nuclear Engineering and Design, Vol /edition number, B Clément et al, LWR severe accident simulation: synthesis of the results and interpretation of the first Phebus FP experiment FPT0 / Fig.4, P12, Elsevier (2003), with permission from Elsevier.
【29】	✦	内田俊介「Phébus FP プロジェクトで得られた 核分裂生成物挙動」日本原子力学会（水化学部会）第29回定例研究会資料 http://wchem.sakura.ne.jp/wp/wp-content/uploads/2019/09/第29回定例研究会_2.pdf