

2023年9月25~26日

# 深層防護別にみる安全設計の具体例

村上 健太 <murakami@n.t.u-tokyo.ac.jp>

東京大学大学院工学系研究科 レジリエンス工学研究センター

この講義は、北大・工・修士の集中講義「新型軽水炉安全工学」として実施しました

# 考えてみよう

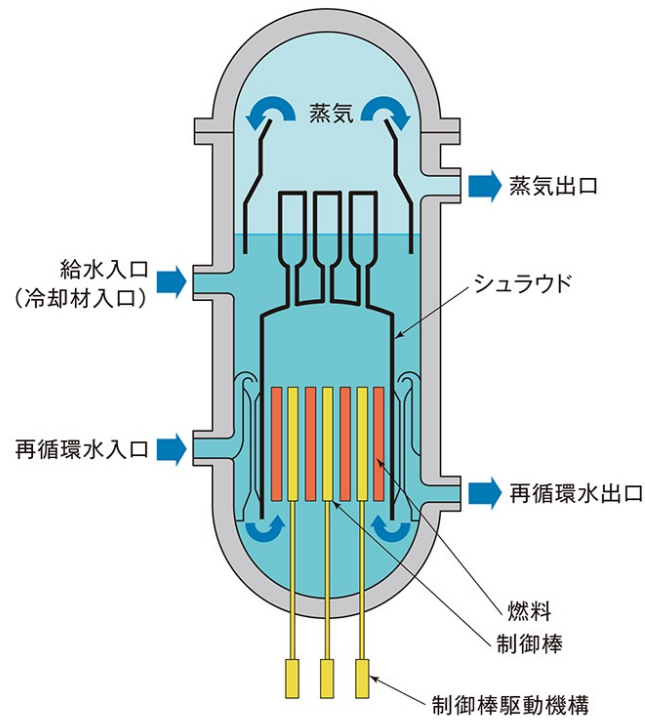
- 深層防護の五つのレベルと、5重の壁は、どのような関係にありますか？
  - 通常運転
  - 異常な過渡変化
  - 設計基準事故
  - 設計拡張状態
  - 防災対策
  - 燃料ペレット
  - 被覆管
  - 原子炉压力容器
  - 格納容器
  - 原子炉建屋

### 3 設計基準事象 (Design Basis Events)

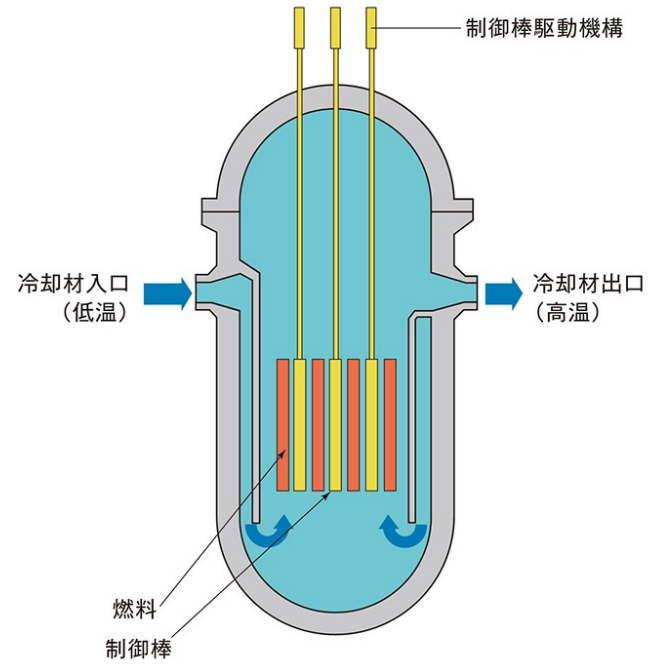
- AOOが拡大することや、想定起因事象が発生して設計基準事故に進展する場合を想定する。
  - 想定起因事象：発生頻度が十分低いが、発生すると深刻な影響を与える事象。一次冷却系配管の破断など $10^{-7}$ 炉年程度までスクリーニングして分類する
- 固有の安全性、工学的安全設備、手順のさまざまな組み合わせによって、事故を超える状態に拡大することを防止し、発電所を安全な状態に戻す
  - 工学的安全設備：緊急炉心冷却系、原子炉格納容器など、通常運転には使用せず、安全の目的だけのために要求される設備
- 保守的な仮定に基づく評価によって、検証する
- 炉心に著しい損傷が生じることを防ぐことを最大の目標として設計する

# 原子炉压力容器断面図

沸騰水型原子炉 (BWR)



加圧水型原子炉 (PWR)



原子力エネルギー図面集

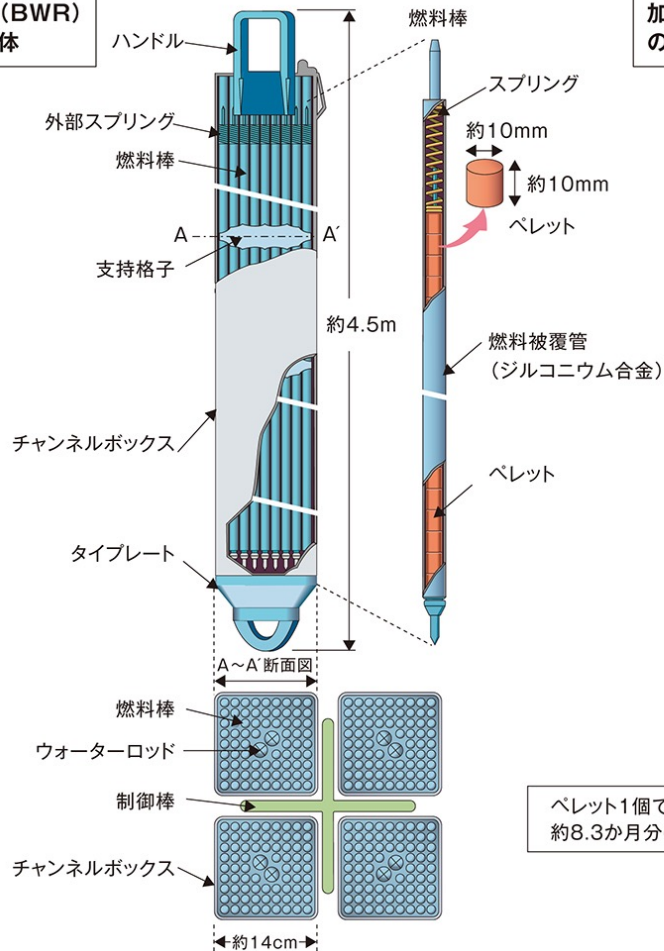
<https://www.ene100.jp/zumen/5-1-6>

# クリフエッジ効果

- プラントパラメーターのわずかな偏差によって、あるプラント状態から別のプラント状態へと急激に移行するような特徴
- 例えば、
  - 核燃料の出力がわずかに大きくなると冷却性能が大幅に低下する
  - 洪水の高さが想定をわずかに超えると、発電所全体が浸水する

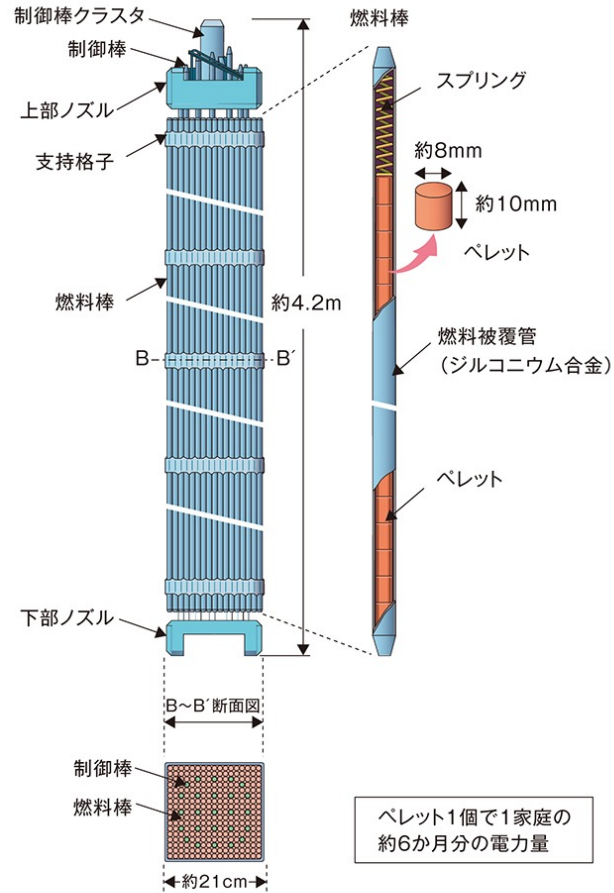
# 燃料集合体の構造と制御棒

沸騰水型炉 (BWR) の燃料集合体



ペレット1個で1家庭の約8.3か月分の電力量

加圧水型炉 (PWR) の燃料集合体



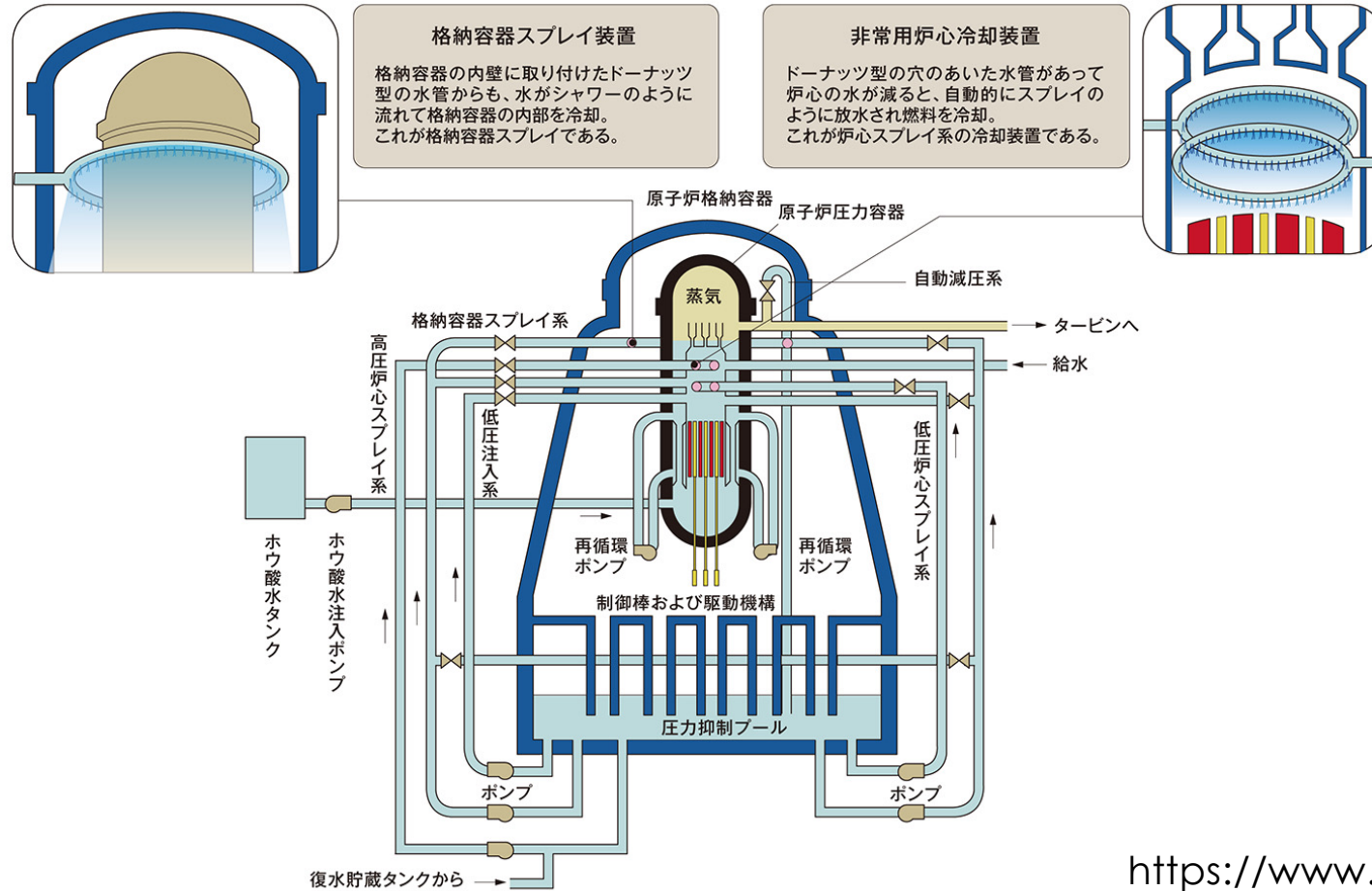
ペレット1個で1家庭の約6か月分の電力量

<https://www.ene100.jp/zumen/5-1-7>

# 安全保護系

- 原子炉運転中に、異常を検知して、原子炉緊急停止系を作動して自動的に（あるいは手動で）原子炉停止する
- 事故時に、炉心及び格納容器バウンダリを保護するため、工学的安全施設を作動させる
- 単一故障基準を満たす設計とする
- 原子炉の制御システムからは分離した設計とする
- 事故時の正しい対応を阻害しない設計とする

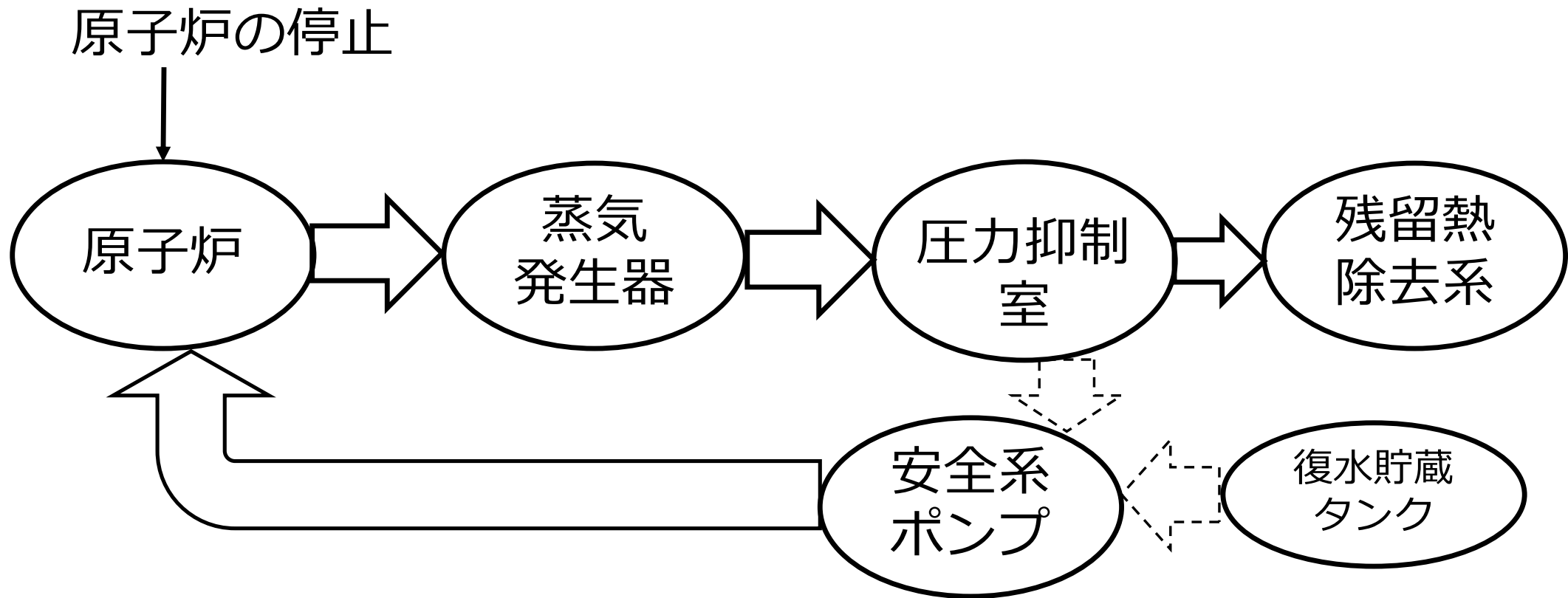
# 非常用炉心冷却装置等の例 (BWR)



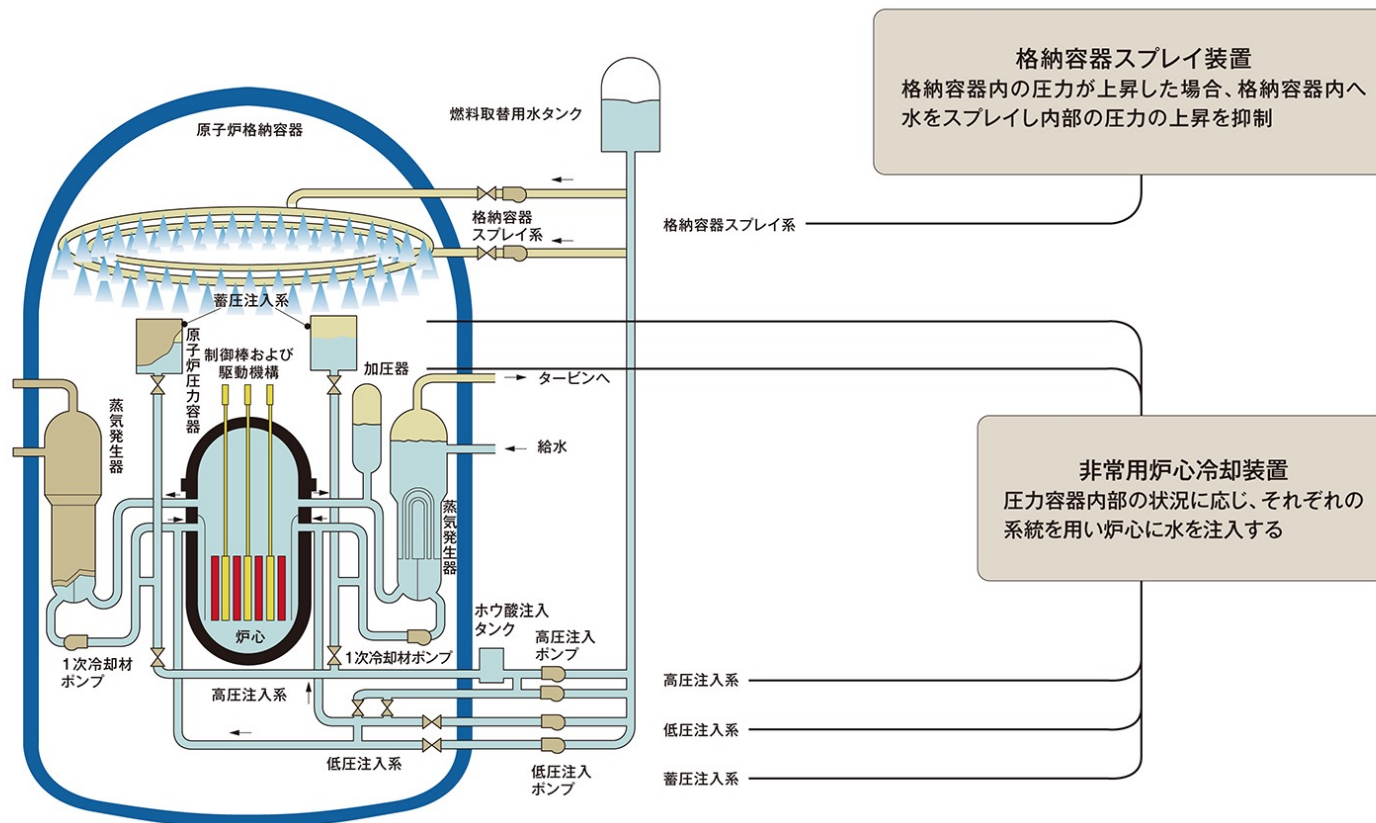
<https://www.ene100.jp/zumen/5-2-2>



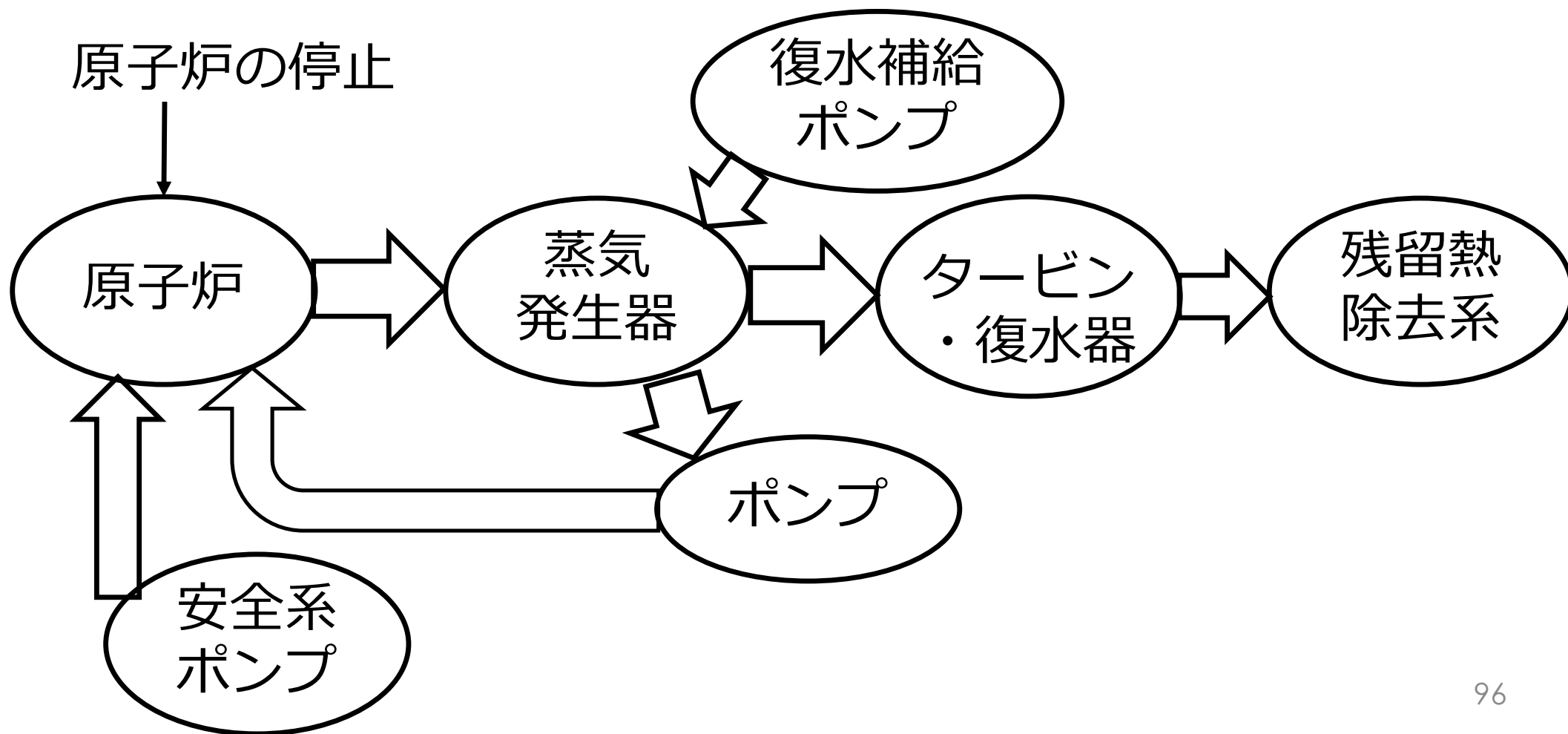
# 沸騰水型軽水炉プラントの安全設計



# 非常用炉心冷却装置等の例 (PWR)



# 加圧水型軽水炉プラントの安全設計



# 緊急時炉心冷却系

- 一次冷却系の圧力バウンダリの完全性が維持されないときに、原子力発電所の事故条件下で燃料の冷却を回復し、維持する
- 被覆管や燃料の健全性に関する制限パラメータを超えない（例えば  $<1200^{\circ}\text{C}$ ）
- 化学反応の可能性を許容範囲内に抑える（例えば、被覆管の酸化量が15%以内）
- 炉心を冷却する手段の有効性は、燃料や炉心内部の形状が変化する可能性を補償する
- 炉心の冷却は十分な時間確保される。
- 必要な容量等は、単一故障基準を満足する

# 水化学の管理

- 反応度への影響の評価
- 放射性物質等のモニタリング
- 導電性の管理
- 腐食等を低減するための水質管理
- 放射性物質等の除去と被ばくの低減

# 格納容器

- 運転状態および事故状態で、放射性物質を閉じ込める
- 外的事象から原子炉を保護する
- 運転状態および 事故状態で、放射線を遮蔽する
- 事故時の放射性物質の放出が合理的に達成可能な限り低くなるような対策を整備する（格納容器スプレイ等）
- 漏洩検査ができる
- 耐圧強化ベントとの関係（貫通部の隔離弁の設計）

# 非常用の電源

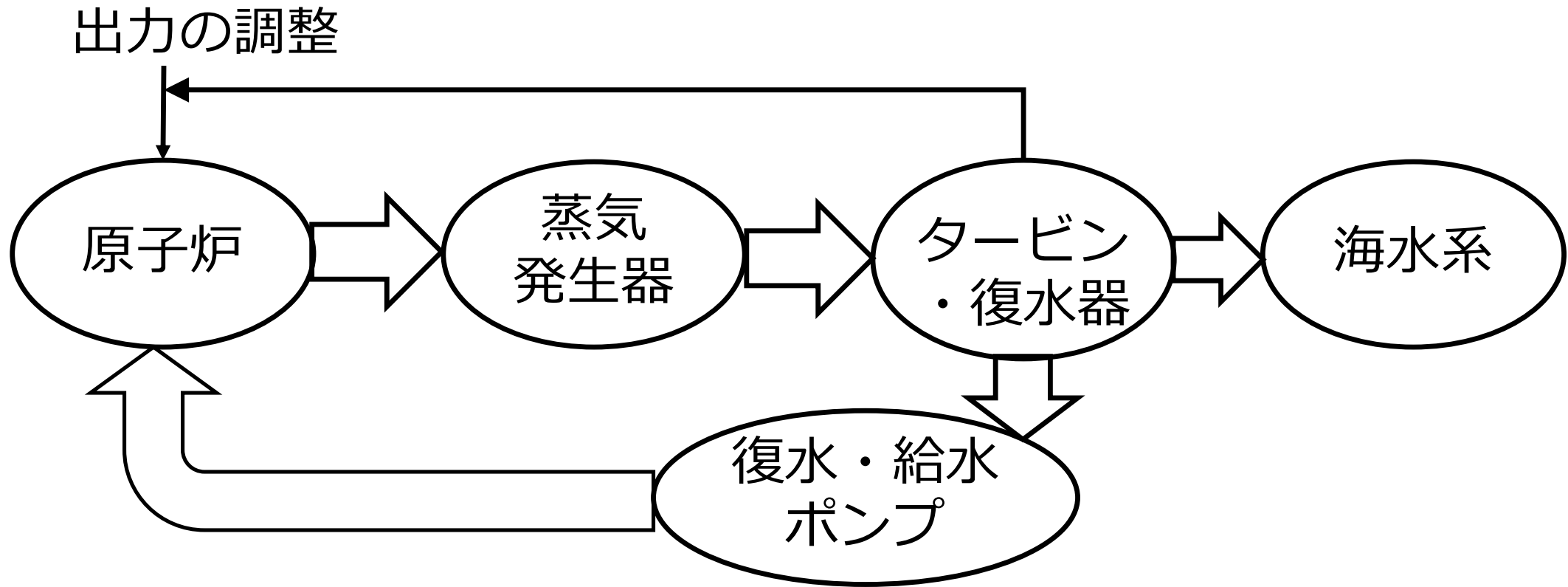
- 電力網からの電源は、事故時に期待しない
- 非常用の電源は、AOOやDBAにおいて必要な電力を供給できなければいけない
- DECで必要な電力を供給するための代替電源も準備する
- 炉心溶融の影響を緩和するための電力は、すべての電源から供給できなければいけない。
- 交流電源が喪失したとしても、プラントパラメータの監視ができるような（直流）電源を設ける
- 緊急時に使用する制御用圧縮空気などを供給するために、原動機等を準備する

# 最終ヒートシンク

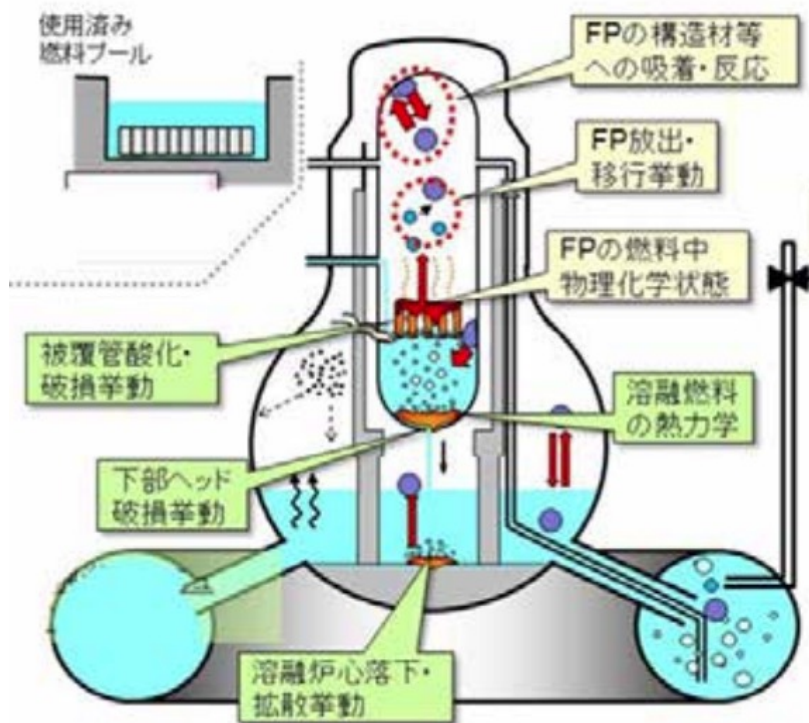
- 最終ヒートシンクへの伝熱能力は、すべての運転状態で確保する
- 最も厳しい、施設外誘因事象の影響を考慮して設計する



# BWRプラントのシステム構成



# シビアアクシデント



## 核燃料

- ウランなどを含む固体（セラミクス）
- 表面が 900℃ 以上に達すると、FPが表面へ拡散して、揮発する

## 原子炉容器・配管・格納容器

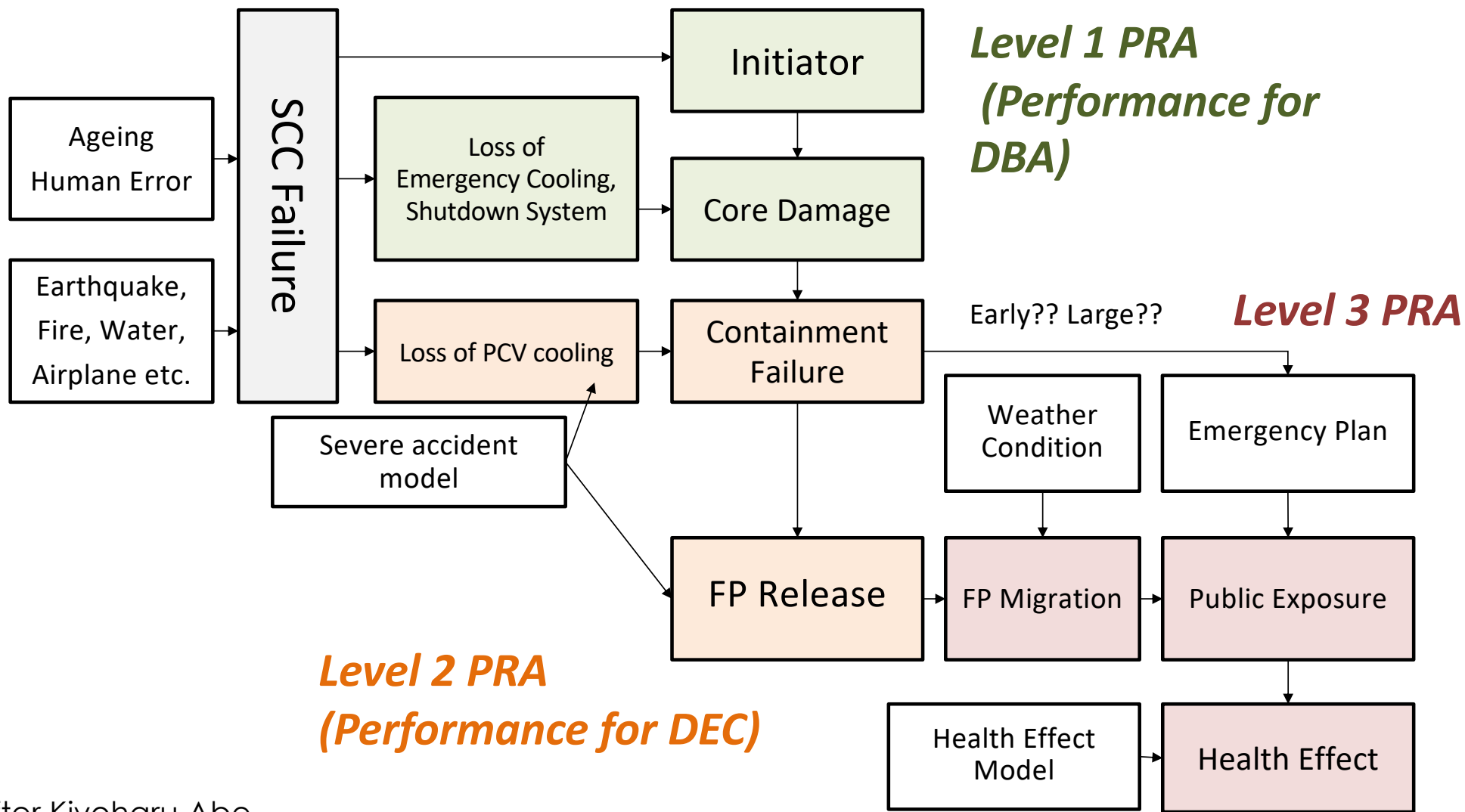
- FPの一部は、壁面と化学反応を起こし吸着する
- FPは、核燃料から離れると低温になる
  - 一部は霧のような状態になり、沈降する
- 容器中の水分を使って、溶解・保持する

## 大気

- 空気の流れて運ばれる。晴天時は拡散しやすい
- 霧状のFPは、雨によって早く沈降する

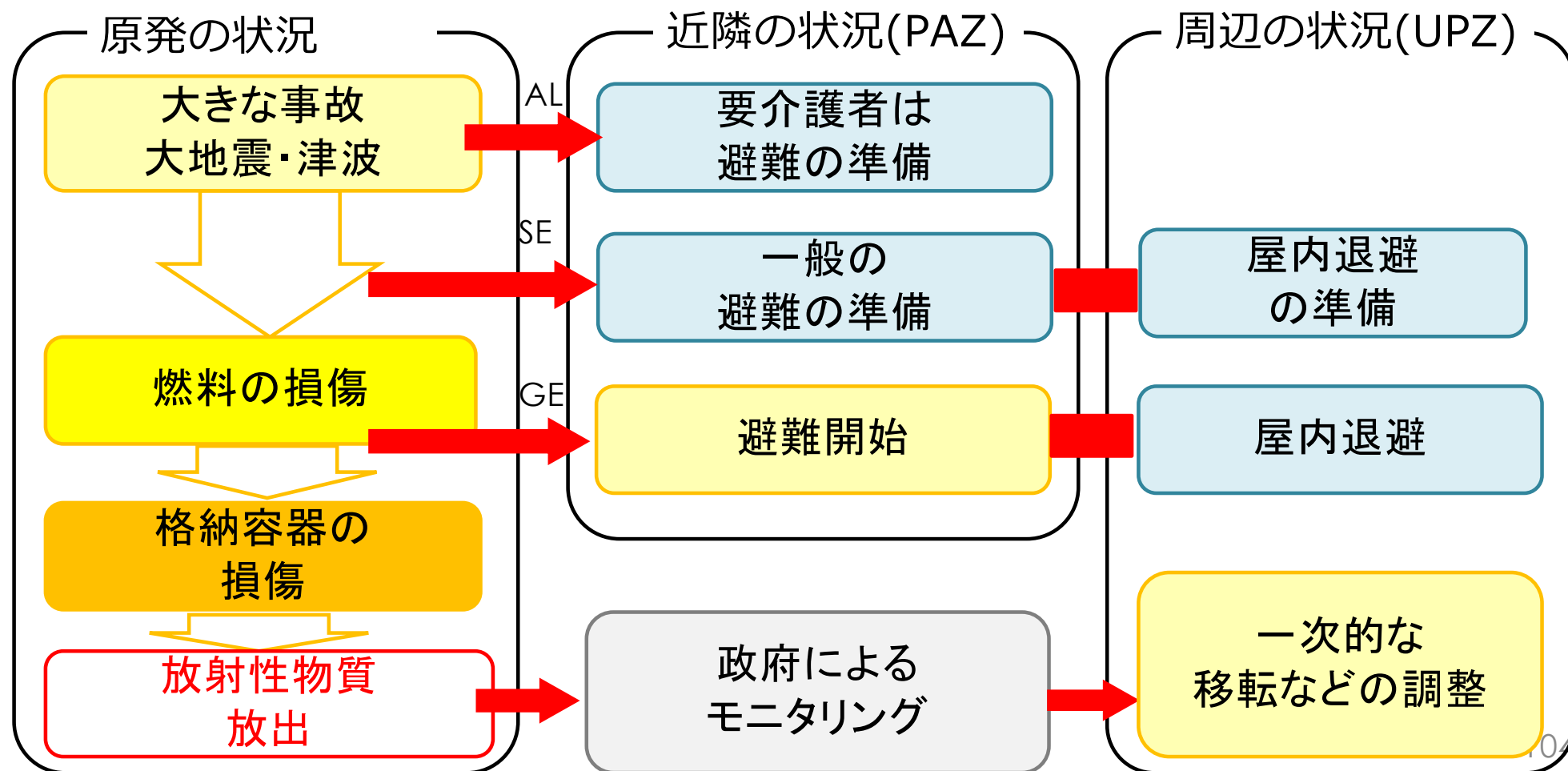
## 人体への影響

- 大気を漂うFPからの放射線
- 地面に沈降したFPからの放射線
- 呼吸で体内に入ったFPからの放射線



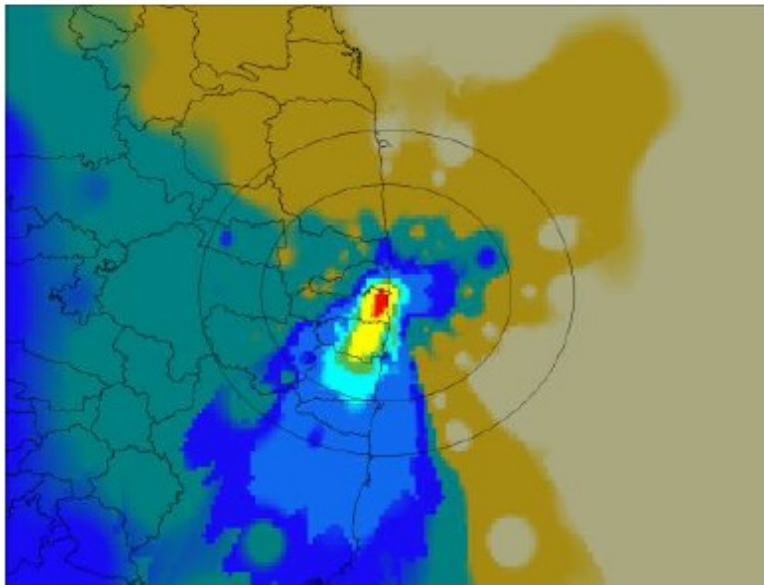
After Kiyoharu Abe

# 原子力災害対策のスキーム

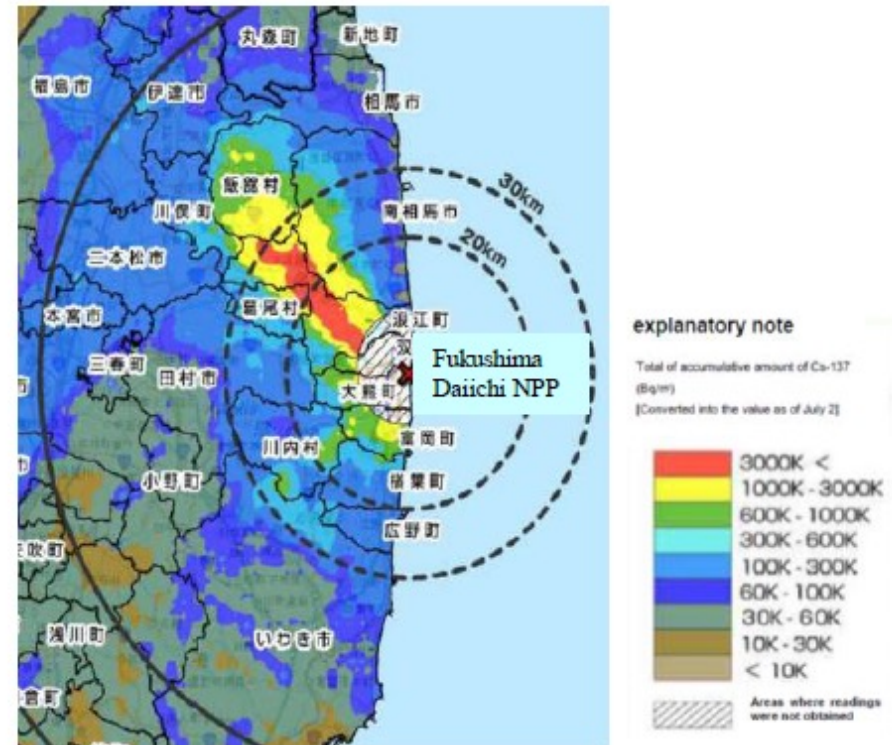


# Can simulation support government decision-making?

simulation



real



## 参考文献

- 神田誠、他、原子炉プラント工学 オーム社、2009年
  - 東大・原子力専門職大学院の教科書。プラントの安全設備の構成が詳述されている
- 田中俊一 原子力災害対策指針と新規制基準 原子力規制委員会HP  
<https://www.nra.go.jp/data/000172848.pdf>
  - 当時の原子力規制委員長が防災の案が得方を説明するために作った資料。
- Bal Raj Sehgal, Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology 2012, Academic Press
  - 軽水炉事故の物理・化学的な挙動を丁寧に紹介する教科書。

## 出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	⚡	原子力・エネルギー図面集, 5-1-6, 日本原子力文化財団, <a href="https://www.ene100.jp/zumen/5-1-6">https://www.ene100.jp/zumen/5-1-6</a>
【2】	⚡	原子力・エネルギー図面集, 5-1-7, 日本原子力文化財団, <a href="https://www.ene100.jp/zumen/5-1-7">https://www.ene100.jp/zumen/5-1-7</a>
【3】	⚡	原子力・エネルギー図面集, 5-2-2, 日本原子力文化財団, <a href="https://www.ene100.jp/zumen/5-2-2">https://www.ene100.jp/zumen/5-2-2</a>
【4】	⚡	原子力・エネルギー図面集, 5-2-3, 日本原子力文化財団, <a href="https://www.ene100.jp/zumen/5-2-3">https://www.ene100.jp/zumen/5-2-3</a>
【5】	⚡	写真提供：日本原子力研究開発機構
【6】	⚡	「福島第一原子力発電所事故に関するセミナー」報告書 何が悪かったのか、今後何をすべきか, 図7.4-2, 日本原子力学会 原子力安全部会, <a href="http://www.aesj.or.jp/~safety/pdf/hukushimaseminar/Fukushima_Seminars_AESJ-NSD_jpn_20200601.pdf">http://www.aesj.or.jp/~safety/pdf/hukushimaseminar/Fukushima_Seminars_AESJ-NSD_jpn_20200601.pdf</a>