

再処理施設の確率論的リスク評価
-2023年度実施内容について-

2023年4月18日
日本原燃株式会社

1. はじめに
 2. 2023年度のPRA整備計画
- 別紙. 複数貯槽モデル化方針検討

1. はじめに



- 2023年1月17日の再処理施設およびMOX燃料加工施設の安全性向上評価に係る面談において、当社の安全性向上評価の取組み方針等を説明した。
- この中で、再処理施設を対象とする確率論的リスク評価（PRA）の実施にあたり、以下のご意見をいただいた。
 - ご意見：確率論的リスク評価の整備状況については発電炉の検討状況も参考にしながら遅延することなく進めるとともに、令和5年度の具体的な検討の計画を整理して改めて説明すること。
- ここでは、2023年度に実施を予定している代表貯槽PRAモデル整備、および複数貯槽を対象とするPRAモデルの検討方針について説明する。

2. 2023年度のPRA整備計画



(1) 代表貯槽PRAモデル整備

➤ PRAモデルの対称化

これまでは起因事象の発生箇所及び常時運転している系統において、特定の運転トレンに限定したモデルを作成していたが、2023年度からは起因事象発生箇所及び緩和系機器の対称性を考慮し、対称化モデルの作成を行う。

➤ 設計情報の更新(As is化)

2022年度までに代表設備の冷却機能の喪失及び水素掃気機能の喪失を対象として設計基準設備および安全審査に基づく重大事故等対処設備の構成と重大事故対応手順を基にモデル【代表貯槽概略モデル】を作成した。2023年度からは重大事故等対処設備に係る手順書等の情報を基に代表貯槽に対するモデルの更新（As is化）に着手する。

（先に進めるモデルの対称化の整備状況により評価時期が変わる可能性がある。）

(2) 複数貯槽モデル化方針検討

別紙参照

複数貯槽モデル化方針検討

1. 再処理施設におけるPRAの課題
2. 評価手法の検討
3. 軽水炉におけるマルチユニットPRAの検討状況
 (“Multi-unit Event Combination Approach”)
4. “Multi-unit Event Combination Approach”を
 用いた複数貯槽に係る検討
5. 実施計画

1. 再処理施設におけるPRAの課題(1/2) (PRA上の再処理施設の特徴)

- 再処理施設を対象とするPRAにおいては、以下の特徴への考慮が必要。
- 特徴① 同一の起因により複数箇所（異なる貯槽など）で同時に事故が発生するおそれがある
⇒複数貯槽での同時発生への考慮が必要
- 特徴② 同一の起因により複数の事故が発生するおそれがある
⇒複数事故の同時発生への考慮が必要

| 重畳の分類（原子力学会標準※から抜粋） | 事象の例 |
|--------------------------|--|
| 同一起因事象による複数の事故シーケンスの同時発生 | 非常用電源が偶発的に全喪失し、複数貯槽で冷却機能の喪失事象および水素掃気機能の喪失事象が同時発生 |

※ 日本原子力学会標準「核燃料施設に対するリスク評価に関する実施基準：2018」解説5.1.6を参照

1. 再処理施設におけるPRAの課題 (2/2)

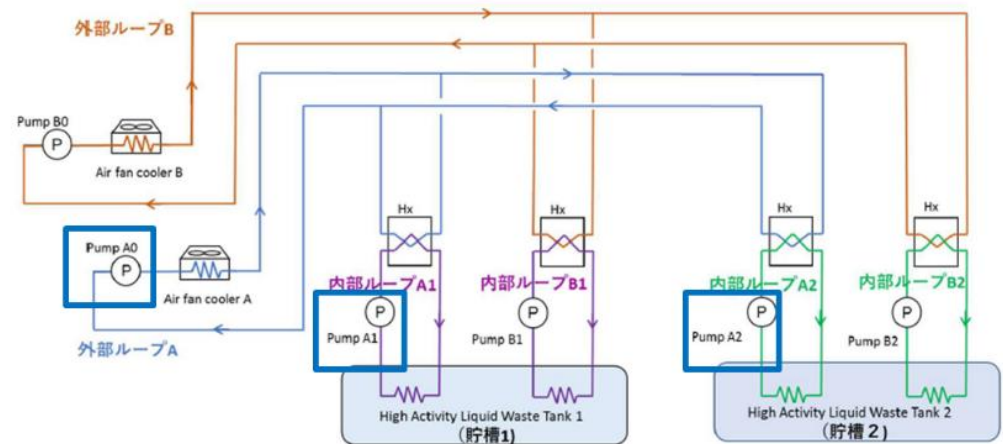
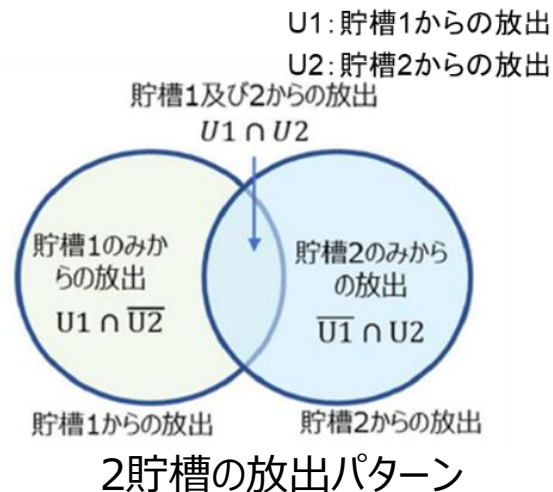
(複数貯槽に対する検討の必要性)

検討例：「共有設備を有する、類似した2貯槽における冷却機能の喪失」
(冷却機能の喪失により、放射性物質が放出となる場合)

- 仮に、貯槽1のみ存在する場合は、外部ループポンプA0のリスク上の重要性は内部ループポンプA1と同等。
- 一方、貯槽2も存在する場合は、外部ループポンプA0の重要性（事故の発生頻度および事故時の影響への寄与）が高くなる。



「施設外での『被ばくリスク』に対する設備または操作の重要度」を考慮するためには、複数貯槽の同時放出に対する発生頻度を評価できる手法を選択する必要がある。



2貯槽に対する冷却設備の系統構成の例

2. 評価手法の検討 (1/3) (各手法の概要)



- 複数貯槽の同時放出に係る事故の発生頻度を評価する方法として、以下の3つの手法が考えられる。
 - 手法① “Master Event Tree Approach” を準用する方法¹⁾
 - ✓ イベントリーの終端に他貯槽のイベントツリーを接続し、複数貯槽事故に至る事故シーケンスをモデル化する手法
 - 手法② “Single Top Fault Tree Approach” を準用する方法¹⁾
 - ✓ 各貯槽の事故シーケンスを一つのフォールトツリーに変換したうえで、それらフォールトツリーをAnd結合する手法
 - 手法③ “Multi-unit Event Combination Approach” を準用する方法²⁾
 - ✓ 複数貯槽に影響を与える事象の組み合わせ（共回事象シナリオ）を特定したうえで、単独貯槽PRAのカットセットを用いて複数貯槽放出頻度を算出する方法
- 手法①および手法②は軽水炉のマルチユニットPRA実施例があるが、多数貯槽に適用するうえで課題があり、適用は困難であることから、手法③の適用検討を進める（詳細は後述）。

【出典】

1) IAEA, “Multi-unit probabilistic safety assessment”, IAEA Safety Report Series No.110 (2021)

2) O. Bäckström, P. Krcal, X. He, “Use of PSA for small modular reactors”, Proceedings of PSAM 16, Honolulu, USA (2022).

2. 評価手法の検討 (2/3)

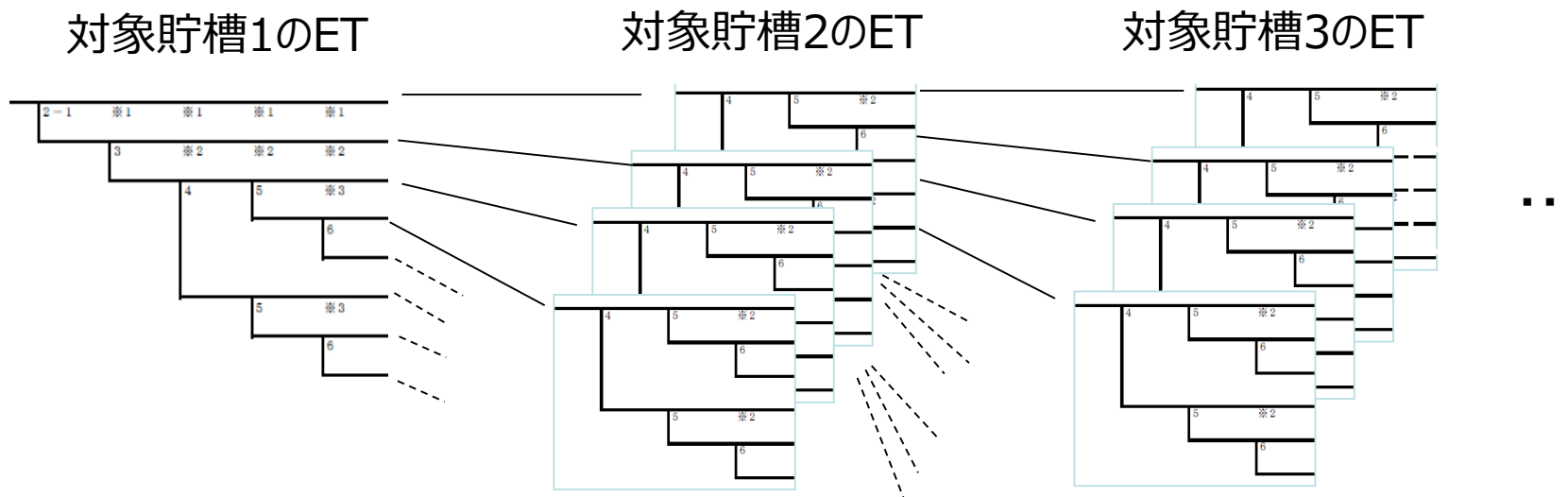
("Master Event Tree Approach"の課題)



手法① "Master Event Tree Approach"

課題：評価対象貯槽・事故事象数の増加にともない事故シーケンス数が指数関数的に増大する。

- イベントツリーにM個の事故シーケンスがモデル化されている場合、評価対象貯槽 n個のモデルで生成される事故シーケンスは M^n 個となる。
- 軽水炉において2ユニットプラントの評価事例はあるが、3ユニット以上の評価例はない。



Master Event Tree Approachの例

2. 評価手法の検討 (3/3)

“Single Top Fault Tree Approach”の課題



手法② “Single Top Fault Tree Approach”

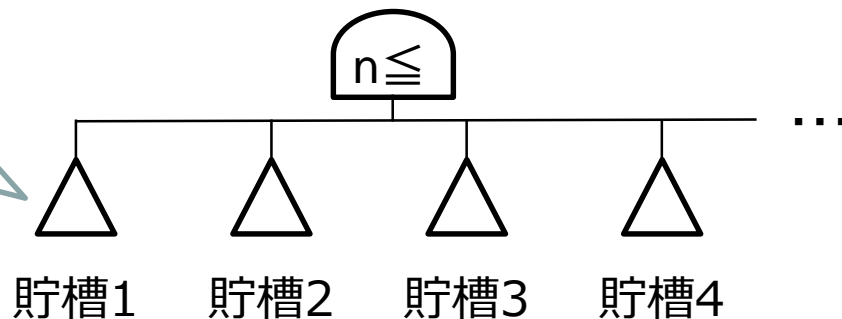
課題：貯槽ごとのPRAモデルをフォールトツリーとして連結するため、フォールトツリーが非常に大きくなる。

- フォールトツリー定量化の計算負荷を低減するため、リスク影響が小さい事故シーケンスの省略などの工夫が必要。
- 軽水炉において6ユニットプラントまでの評価事例あり。ただし、計算効率化のために一部の評価を簡素化している模様。

貯槽1の事故発生を頂上事象としたフォールトツリー



n貯槽以上からの放出



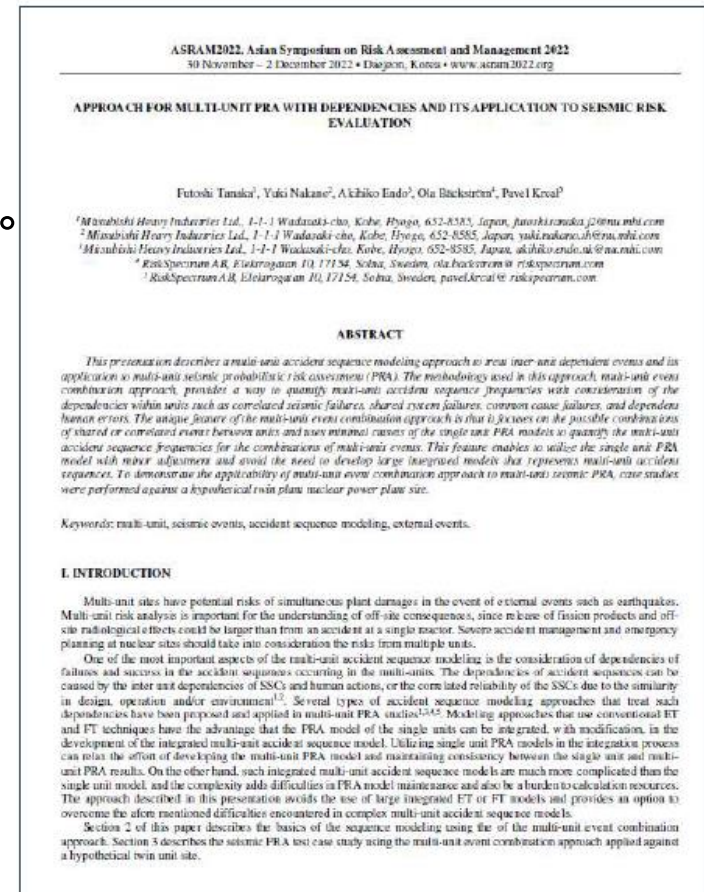
Single Top Fault Tree Approachの例

3. 軽水炉におけるマルチユニットPRAの検討状況 (“Multi-unit Event Combination Approach”)



手法③ “Multi-unit Event Combination Approach”

- 小型モジュール炉への適用を睨みPRA評価コード開発元であるRiskSpectrum AB社が開発中のマルチユニットPRA手法¹⁾²⁾。
- 各ユニットにおけるPRAモデルのミニマルカットセットを活用することにより、PRAモデルの連結を回避しつつ同等精度の結果が得られる。
- RiskSpectrum AB社と三菱重工業との共同開発案件として、軽水炉の実機リスク評価適用に向けた検討およびツール改良が進められている³⁾。



1) NKS-419, “Site risk analysis for nuclear installations”, Nordic nuclear safety research (2019).
2) O. Bäckström, P. Krcaľ, X. He, “Use of PSA for small modular reactors”, Proceedings of PSAM 16, Honolulu, USA (2022).
3) F. Tanaka, Y. Nakano, A. Endo, O. Bäckström, P. Krcaľ, “Approach for Multi-unit PRA with Dependencies and its Application to Seismic Risk Evaluation”, Proceedings of ASRAM2022, (2022)

4. “Multi-unit Event Combination Approach”を用いた複数貯槽に係る検討 (1/3) (定量化イメージ (1/2))



➤ 次の2段階で複数貯槽の事故発生頻度を定量化

① 共通事象の展開

複数貯槽に影響する事象の組み合わせ (共通事象シナリオ) の展開と発生頻度の算出。

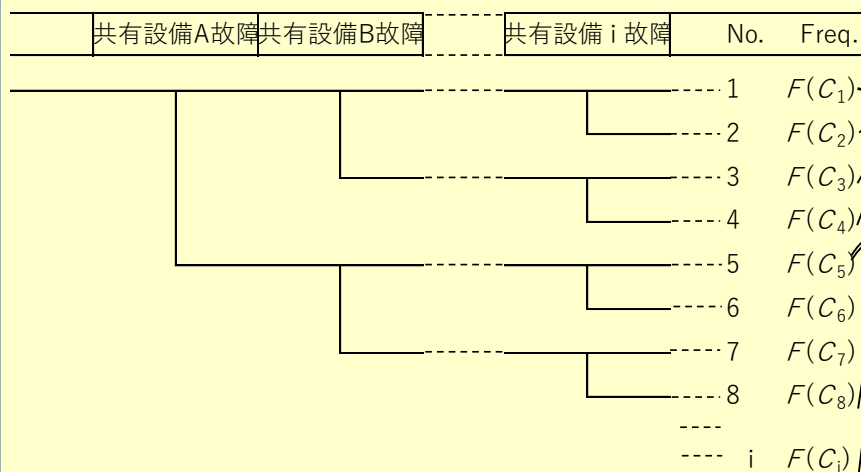
② 事故発生頻度の定量化

共通事象シナリオ発生条件下における各貯槽の事故発生頻度を定量化

➤ 複数貯槽への影響が異なるシナリオを事前に展開する点が特徴的

➤ ②の定量化においてPRAモデルを連結する必要はない (次スライド参照)

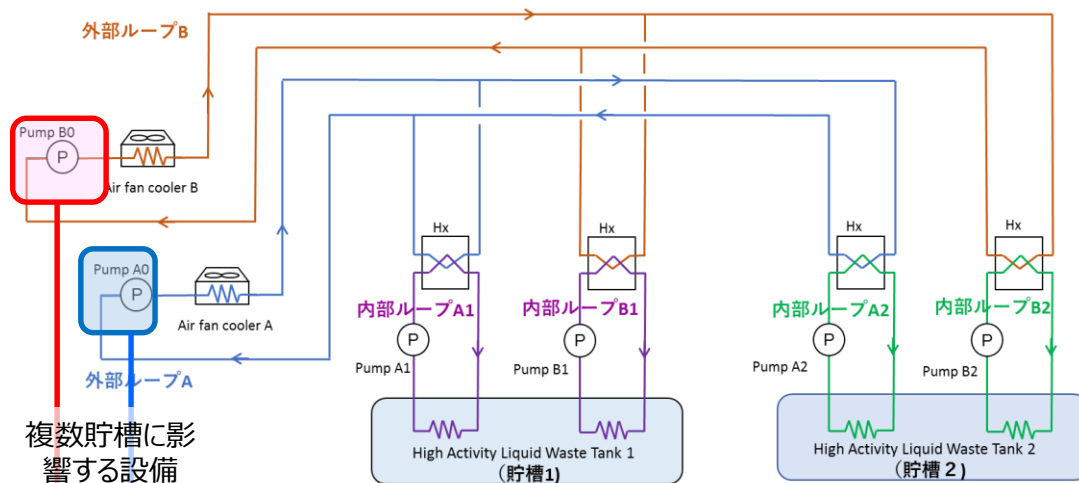
① 共通事象の展開



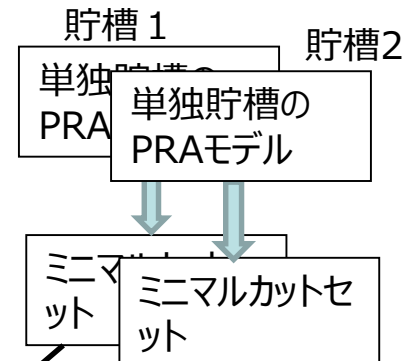
② 事故発生頻度の定量化

| 貯槽1 | 貯槽2 | 放出パターン | 発生頻度 |
|-------|-------|---------|---|
| ----- | ----- | 放出なし | $Freq(C_i) \times (1 - Pr(U_1 C_i)) \times (1 - Pr(U_2 C_i))$ |
| ----- | ----- | 貯槽 2 放出 | $Freq(C_i) \times (1 - Pr(U_1 C_i)) \times Pr(U_2 C_i)$ |
| ----- | ----- | 貯槽1放出 | $Freq(C_i) \times Pr(U_1 C_i) \times (1 - Pr(U_2 C_i))$ |
| ----- | ----- | 貯槽1&2放出 | $Freq(C_i) \times Pr(U_1 C_i) \times Pr(U_2 C_i)$ |

4. “Multi-unit Event Combination Approach”を用いた複数貯槽に係る検討 (2/3) (定量化イメージ (2/2))



複数貯槽に影響する設備



分岐確率の定量化に使用 (貯槽ごとに独立に評価)

① 共通事象の展開

| ポンプA故障 | ポンプB故障 | 共通事象シナリオ | Freq |
|--------|--------|------------------------------|-------------|
| | | C ₁ 共通事象の発生なし | $Freq(C_1)$ |
| | | C ₂ 外部ループB循環機能喪失 | $Freq(C_2)$ |
| | | C ₃ 外部ループA循環機能喪失 | $Freq(C_3)$ |
| | | C ₄ 外部ループAB循環機能喪失 | $Freq(C_4)$ |

② 事故発生頻度の定量化

| 貯槽1 | 貯槽2 | 放出パターン | 発生頻度 |
|-----|-----|---------|---|
| | | 放出なし | $Freq(C_i) \times (1 - Pr(U_1 C_i)) \times (1 - Pr(U_2 C_i))$ |
| | | 貯槽2放出 | $Freq(C_i) \times (1 - Pr(U_1 C_i)) \times Pr(U_2 C_i)$ |
| | | 貯槽1放出 | $Freq(C_i) \times Pr(U_1 C_i) \times (1 - Pr(U_2 C_i))$ |
| | | 貯槽1&2放出 | $Freq(C_i) \times Pr(U_1 C_i) \times Pr(U_2 C_i)$ |

- 複数貯槽に影響する基事象（共通事象）を抽出
- 複数貯槽への影響が異なるシナリオ（共通事象シナリオ）の展開と発生頻度の算出

- 共通事象シナリオごとに放出パターンの発生頻度を計算
- 分岐確率の定量化の際に共通事象シナリオ中の共通基事象の状態を考慮

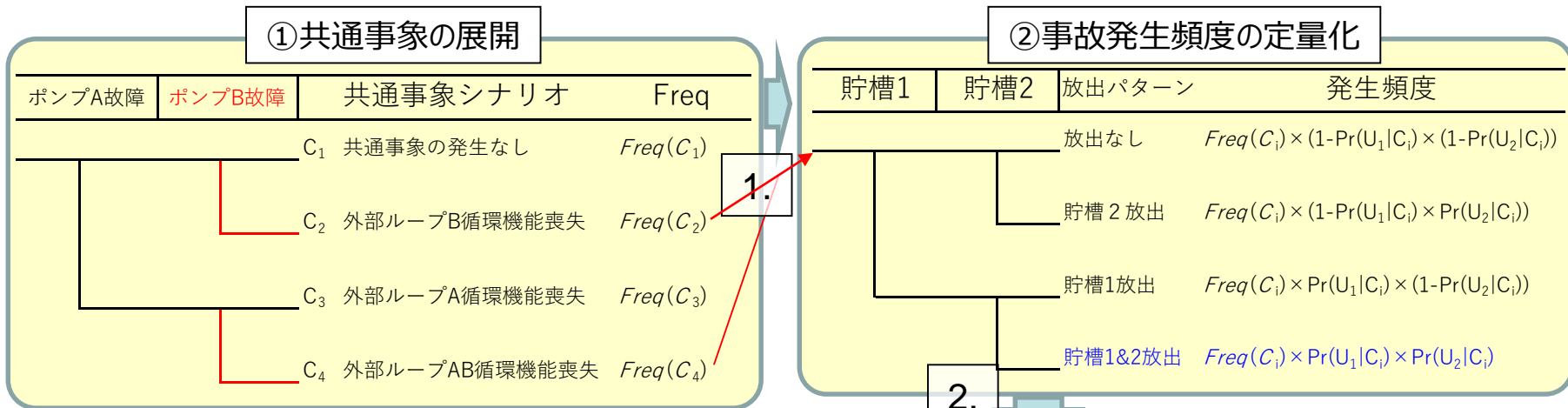
4. “Multi-unit Event Combination Approach”を用いた複数貯槽に係る検討 (3/3) (重要度の評価イメージ)



- 複数貯槽評価用ツールでは、発生頻度に対する重要度の評価も実施可能 (リスクに対する重要度は、今後の検討課題)。

同時放出頻度に係るポンプB故障の重要度の算出方法 (計算プロセスのイメージ)

1. 共通事象の組合せのうち、ポンプB故障を含む組合せを抽出する。(下図の**朱色**部分)
2. 上記1.で抽出した組合せによる同時放出頻度の合計値が、ポンプB故障を伴うシナリオの寄与分である。
3. ポンプB故障を伴うシナリオの寄与分 (下図の**青字**部分) を放出頻度合計値で除すことでポンプB故障の重要度が求まる。



3.
ポンプBの寄与分 / 同時放出頻度の全合計値 =
$$\frac{\sum_{i=2,4} Freq(C_i) \times Pr(U_1|C_i) \times Pr(U_2|C_i)}{\sum_{i=1,2,3,4} Freq(C_i) \times Pr(U_1|C_i) \times Pr(U_2|C_i)}$$

5. 実施計画（1/2）

（複数貯槽に対する検討を進める上での課題）



- “Multi-unit Event Combination Approach”の適用検討にあたっては、以下の課題に対処する必要がある。
 - 課題① 軽水炉と比較して再処理施設では共通設備の数が多い
 - 課題② 評価対象となるリスク源（貯槽）の数が多い

- さらに、再処理施設を対象とするリスク評価では、「被ばく影響を考慮した重要度（課題③）」を考慮できる手法の構築が必要。

5. 実施計画（2/2） （2023年度以降の検討スケジュール）



- 前頁3点の課題に対処するため、以下の検討を進める。
 1. 複数貯槽評価用ツールの適用性確認（2貯槽を対象として検討）
 2. 多数貯槽のモデル化方針の検討（3貯槽以上への拡張方法を検討）
 3. 被ばく影響を考慮した重要度の評価方法検討

| | 2023年度 | | 2024年度 |
|------------------------------|--------|----|--------|
| | 上期 | 下期 | 上期 |
| 1. 複数貯槽評価用ツールの適用性確認（2貯槽の検討） | | | |
| 2. 多数貯槽のモデル化方針の検討（3貯槽以上への拡張） | | | |
| 3. 被ばく影響を考慮した重要度の評価方法検討 | | | |