



NRA JAPAN

令和6年度JAEA-NRA安全研究成果報告会

再処理施設等における構造重要度を用いた 設置機器の簡易重要度評価手法の検討

原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門 ○横塚 宗之、森 憲治

1 背景・目的

【背景】

- 令和2年4月に施行された原子力規制検査では、例えば検査の実施方針として、各監視領域内で具体的に検査する安全活動の選定、立会い等の程度の選定等に当たって、合理的な範囲でリスク情報を活用し、より効率的かつ効果的な検査の実施に努めることなどが示されている。^[1]
- 上述のリスク情報には、確率論的リスク評価(PRA)により得られる定量的な情報も含まれており、実用発電用原子炉では炉心損傷頻度や格納容器機能喪失頻度を活用した検査指摘事項の重要度評価(△CDF・△CFF)やFussell-Vesely重要度、Risk Achievement Worth等の指標を活用した重要度評価が実施されている。一方、核燃料施設では詳細評価モデルや故障率データが十分整備されていないなどの理由により、リスク評価の実施が困難又は実施に相当な時間がかかる場合が想定される。

【目的】

- 本研究では、**再処理施設及び加工施設を対象として、故障率データ等を用いずに機器の重要性に関するリスク情報を得るための簡易重要度評価手法を整備すること**を目的とする。また、**再処理施設を対象に、簡易重要度評価手法を用いた評価手順の作成及び試解析を行い、同手法に関する留意点・課題等を確認する。**

2 簡易重要度評価手法の整備

【整備方針】

- Birnbaum構造重要度を活用した評価手法とする。
- 放射性物質が分散している施設の特徴を踏まえ、各貯槽類のインベントリ及び安全系に関するシステム構造の違いに応じた補正係数を導入する。

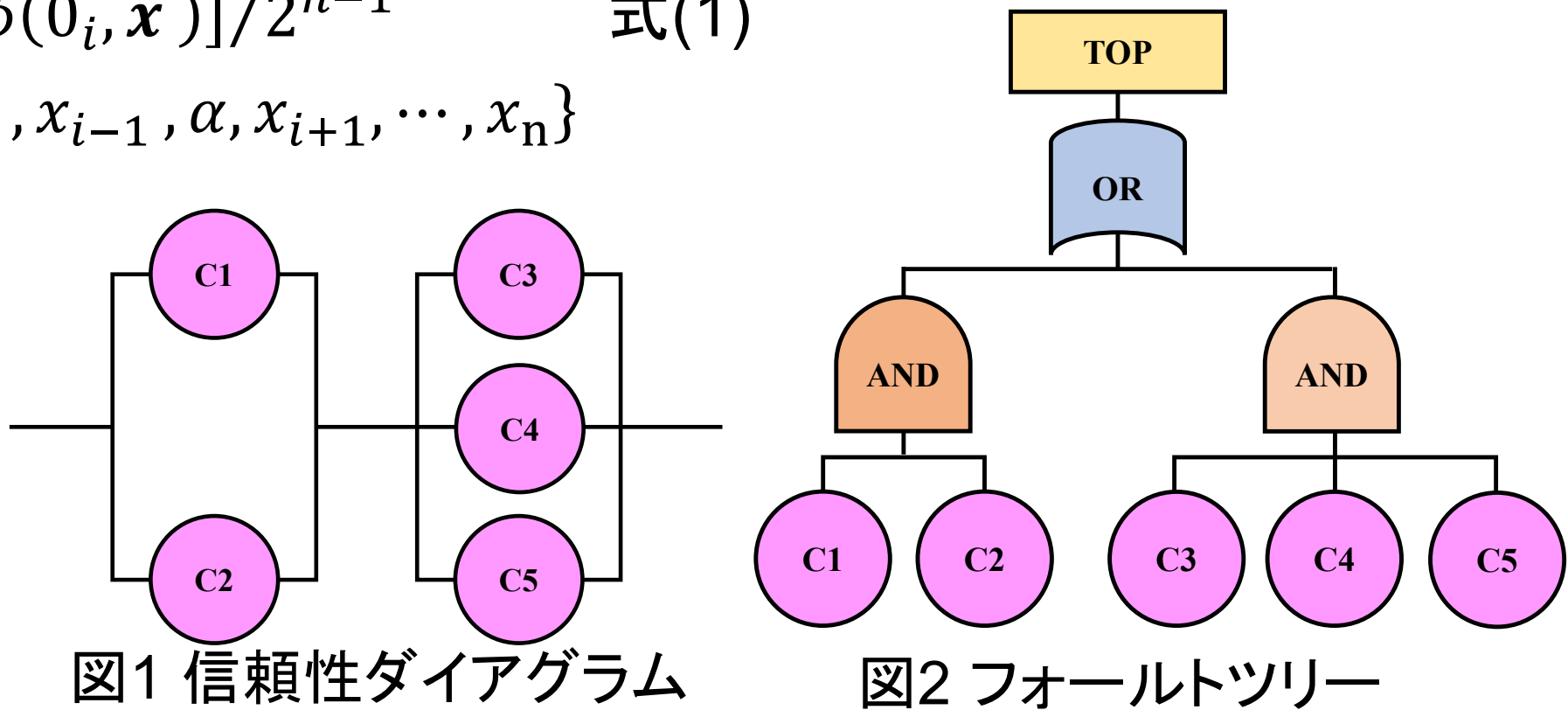
【Birnbaum構造重要度^[2]】

- 正常・異常の2つの状態をとる n 個の機器($\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, x_i は機器 i の状態)から構成される安全システムについて、Birnbaumはその状態を構造関数 $\phi(x)$ として定義し、機器 i の相対的な重要度を構造重要度 $I_B^i(\phi)$ として式(1)で定義した。
- 構造関数の具体的な形はフォールトツリー(FT)等から定式化して表現できる。

$$I_B^i(\phi) = \sum_x [\phi(1_i, x) - \phi(0_i, x)] / 2^{n-1} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $(\alpha_i, x) = \{x_1, \dots, x_{i-1}, \alpha, x_{i+1}, \dots, x_n\}$

- 図1及び図2のシステム構造に対する構造関数の例は以下のとおり(両図は同じシステム構成を表現)



$$\text{構造関数 } \phi(x) = \{1 - (1 - x_1)(1 - x_2)\} \{1 - (1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5)\}$$

3 評価手順の作成・試解析

【実施内容】

- 具体的な評価手順を作成した上で、**同手順に基づく試解析を実施した。その結果、本評価条件における各機器の相対的な重要度の高低が得られた。**(重要度評価結果は表4参照)

手順①: 評価対象事象を選定し、評価モデルを作成の上、ミニマルカットセット(MCS)を同定

<試解析>

蒸発乾固事象(安全冷却水系機能喪失)(図3)^{注1}、公開FTモデル(図4)が対象

<注1: 再処理施設の安全冷却水系の補足>

- 崩壊熱により沸騰の恐れのある機器(貯槽類)が複数存在し、常に冷却が実施
- 冷却水系は共用(外部)ループと個別(内部)ループで構成
- 沸騰までの時間余裕に応じ、2系列で冷却される貯槽類と1系列で冷却される貯槽類が存在

手順②: MCSを用い、式(2)に基づき、貯槽類ごとに構造重要度を評価

<試解析>

- 下記条件で構造重要度を算出(表2、表3)

貯槽類の数: 27

基事象数の合計: 125

冷却系の構成: 27の貯槽類全てが内部ループ2系列冷却系

単一貯槽類のFTに対する

MCS数: 146

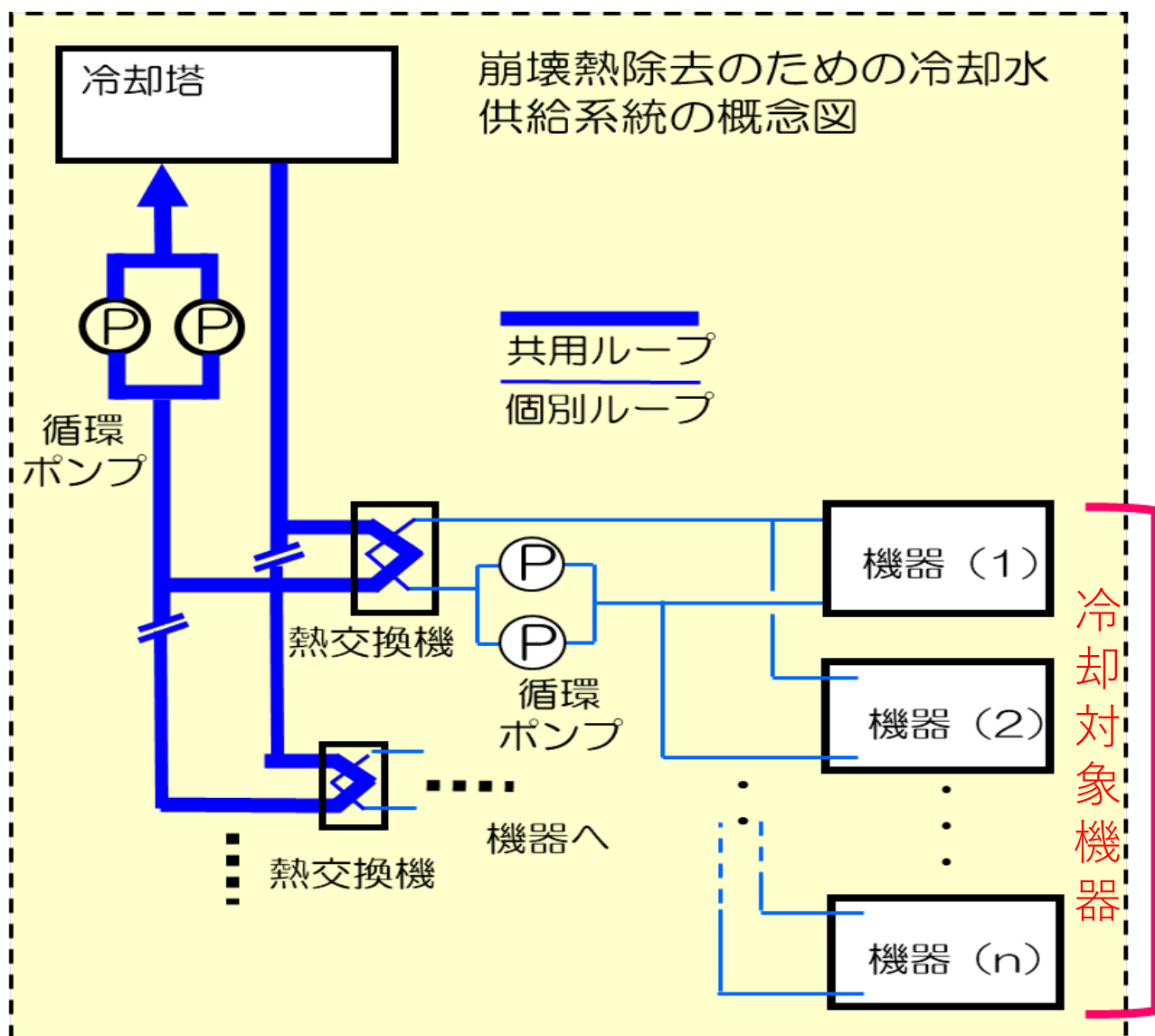


図3 安全冷却水系のイメージ^[5]、^[6]を参考に作成

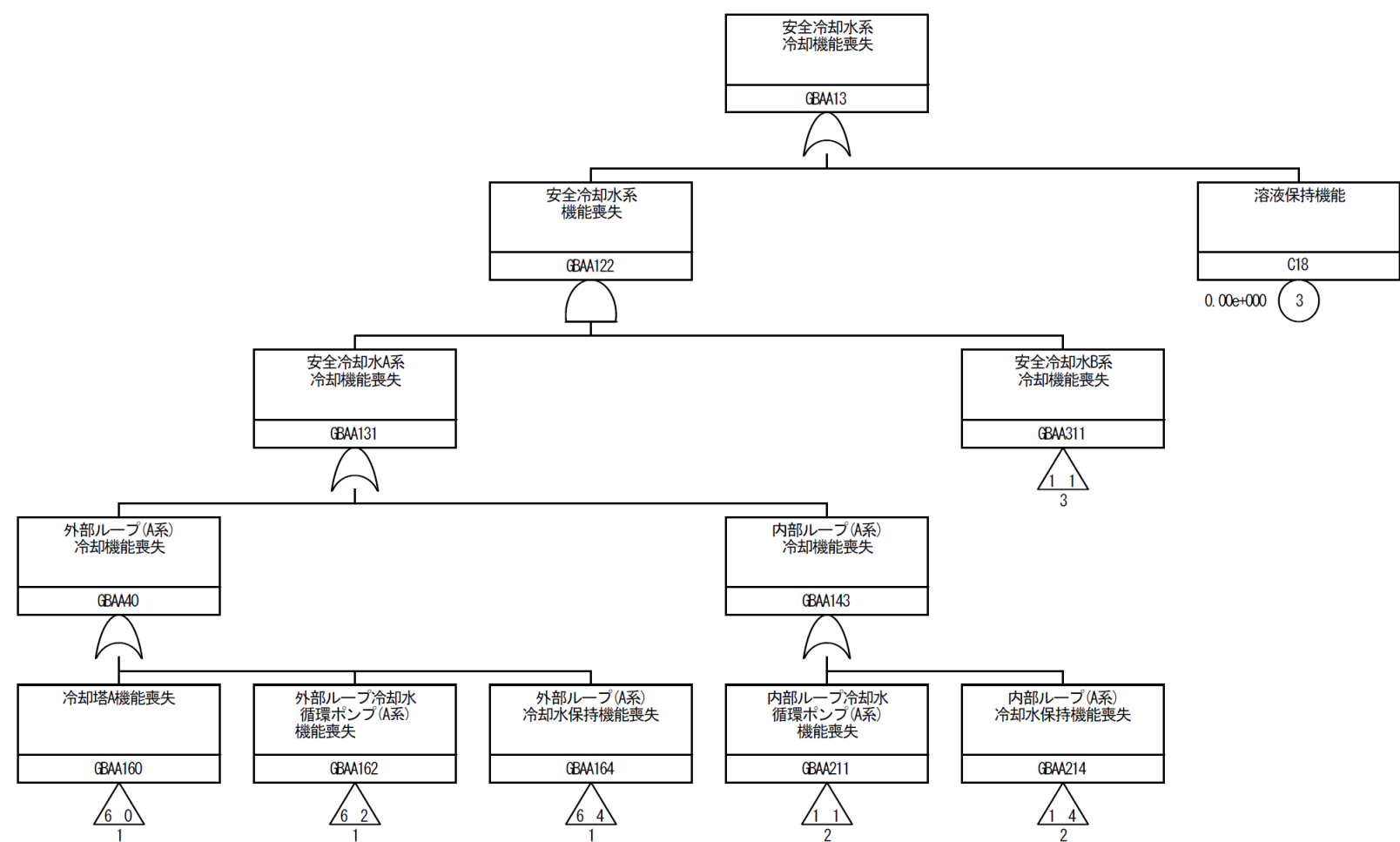


図4 FTモデルの一部^[6]の公開FTモデルに基づき作成

4 留意点・課題

【簡易重要度評価手法に関する留意点(一例)】

- 本手法で得られる重要度は相対的な評価結果である。
- 本手法では厳密な重要度を評価しておらず、あくまで簡易評価結果である。
- 機能喪失確率が大きく異なる基事象が混在するモデルに対しては、本評価手法を単純に適用することはできない。

- Birnbaum構造重要度は式(2)のようにも表現でき、機器の正常・異常の全ての組合せを考え、着目する機器に異常が生じたときに、システムが正常から異常になる組合せの数を数え上げることにより算出できる。

$$I_B^i(\phi) = \{ (i \text{ が異常である場合にシステムが異常である場合の組合せ数}) - (i \text{ が正常である場合にシステムが異常である場合の組合せ数}) \} / 2^{n-1} \quad \text{式(2)}^{[3]}$$

表1 FT(図2)の真理表

	C1	C2	C3	C4	C5	TOP		C1	C2	C3	C4	C5	TOP
1	0	0	0	0	0	0	17	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0	18	1	0	0	0	1	1
3	0	0	0	1	0	0	19	1	0	0	1	0	1
4	0	0	0	1	1	0	20	1	0	0	1	1	1
5	0	0	1	0	0	0	21	1	0	1	0	0	1
6	0	0	1	0	1	0	22	1	0	1	0	1	1
7	0	0	1	1	0	0	23	1	0	1	1	0	1
8	0	0	1	1	1	0	24	1	0	1	1	1	1
9	0	1	0	0	0	0	25	1	1	0	0	0	0
10	0	1	0	0	1	1	26	1	1	0	0	1	1
11	0	1	0	1	0	1	27	1	1	0	1	0	1
12	0	1	0	1	1	1	28	1	1	0	1	1	1
13	0	1	1	0	0	1	29	1	1	1	0	0	1
14	0	1	1	0	1	1	30	1	1	1	0	1	1
15	0	1	1	1	0	1	31	1	1	1	1	0	1
16	0	1	1	1	1	1	32	1	1	1	1	1	1

- 真理表を用いた構造重要度算出の例

C1, C2の構造重要度

$$= (9 - 2) / 2^{5-1} = 0.4375$$

C3, C4, C5の構造重要度

$$= (7 - 4) / 2^{5-1} = 0.1875$$

【補正係数】

- 再処理施設等では事故影響の異なる事故シーケンスが混在するため、影響も考慮した重要度指標の活用が想定されている^[4]。本手法では、簡易評価であることを踏まえ、インベントリ W_i を事故影響の大きさに代替する因子とした。
- その他、放射性物質を有する各貯槽類の安全系のシステム構造が異なる場合における補正係数 ξ_i を導入した。

【簡易重要度評価式】

- 以上を基に、**機器 i の重要度を評価するための簡易重要度評価式を作成した。**

$$I_i = I_B^i(\phi) \times W_i \times \xi_i \quad \text{式(3)}$$

手順③: 各貯槽類の安全系システム構造及びインベントリに応じた補正係数の設定

<試解析>

- 実施設情報を踏まえた各貯槽類の放射能インベントリを基に設定。なお、安全系システム構造の補正係数は今回未設定

表2 構造重要度評価のイメージ

基事象	頂上事象が発生する組合せ数		全組合せ数	構造重要度
	当該機器が故障の組合せ数	当該機器が正常の組合せ数		
冷却塔A	66878464	66422605	134217728	0.00679
外部ループ (A系)冷却水 循環ポンプA	66726511	66574558	134217728	0.00226
貯槽類	67108864	66192205	134217728	0.01366

基事象ごとに評価 式(2)より、以下で算出 (67108864-66192205)/2⁽²⁷⁻¹⁾

表3 各貯槽類単位の構造重要度

	建屋A	...	建屋E
	貯槽類1	...	貯槽類2 貯槽類3 貯槽類4
冷却塔A	0.00679	...	0.00679 0.00679 0.00679
外部ループ(A系)冷却水循環ポンプA	0.00226	...	0.00226 0.00226 0.00226
建屋A内部ループ①(A系)冷却水循環ポンプA	0.00226	...	- - -
建屋E内部ループ①(A系)冷却水循環ポンプA	-	...	0.00226 0.00226 0.00226
...	...	...	...

計125種類

表4 簡易重要度評価結果(一部抜粋)^{注2}

機器名	簡易重要度 試解析結果	順位
冷却塔A	5.4.E-02	1
電気ケーブル(安全系A)	5.4.E-02	1
外部ループ(A系)冷却配管	5.4.E-02	1
建屋E内部貯槽類その7	4.0.E-02	7
電気ケーブル(生産系)	3.9.E-02	8
電気盤(生産系)	3.9.E-02	8
...	...	...
建屋B内部ループその1(B系)冷却水循環ポンプD	2.3.E-06	109
建屋A内部貯槽類その4	2.9.E-07	113
建屋B内部ループその2(A系)中間熱交換器	3.3.E-08	116
建屋B内部ループその2(A系)冷却配管	3.3.E-08	116
...	...	...

重要度高

重要度中

重要度低

【課題(今後の展望)】

- 規模の大きい評価モデル(FT)を対象とした評価手法の検討
- システム構成が異なる評価モデルの構造重要度を考慮する際に設定する補正係数の適切性確認
- PRAとの違いを踏まえた結果の活用方法の検討、など

【参考文献】

- 原子力規制庁, “原子力規制検査等実施要領,” 令和元年12月(最終改正: 令和4年6月22日)。
- Birnbaum, Z. W., “On the importance of different components in a multicomponent system,” Multivariate Analysis-II. Ed. By Krishnaia, P. R. Academic Press, New York, 1969, pp. 581-592.
- 田村信幸, “システムの信頼性評価技法,” 電子情報通信学会「知識ベース」, 1群-12編-2章(ver.1/2010.8.10)。
- (一社) 日本原子力学会, 核燃料施設に対するリスク評価に関する実施基準: 2018, AESJ-SC-P011:2018, 2019年3月
- (独) 原子力安全基盤機構, 再処理施設の確率論的安全評価手法の整備—溶液沸騰事象の解析手順—に関する報告書, JNES/SAE05-026 05 解部報-0026, 2005年10月
- 日本原燃株式会社, 再処理事業所再処理事業変更許可申請書本文及び添付書類の一部補正について、令和2年4月

本資料は、日本原子力学会における以下の発表内容をまとめたものです。
・森、横塚、寺垣、再処理施設等における構造重要度を用いた設置機器の簡易重要度評価手法の検討(1)簡易重要度評価手法検討の概要、日本原子力学会2024年春の年会
・横塚、森、寺垣、再処理施設等における構造重要度を用いた設置機器の簡易重要度評価手法の検討(2)簡易重要度評価手法による試解析、日本原子力学会2024年春の年会