

本資料で示した内容は著者の見解であり
原子力規制委員会の見解を示したものではありません

原子力規制検査の重要度評価における 外部事象リスクの簡易的な評価

濱口 義兼 主任技術研究調査官

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

シビアアクシデント研究部門

令和6年9月

目次

- ① 背景と目的
- ② 簡易的な評価の概要
- ③ 簡易的な評価で得た計算結果
- ④ 地震PRAと簡易的な評価との差
- ⑤ 今後の予定

この資料におけるPRAモデルとは、イベントツリー及びフォールトツリーを用いて炉心損傷となる原因の組合せを構築したロジックモデルを指し、炉心損傷発生頻度を算出するためのパラメータ(起因事象発生頻度、機器故障率等)を含むものを指す。

また、この資料における内部事象とは、原子炉施設のサイト内において発生する機器の故障等を起因とするトラブル事象または事故を指し、配管等からの水の漏れ(溢水)や火災は含まない。

① 背景と目的

① 背景と目的 (1/4)

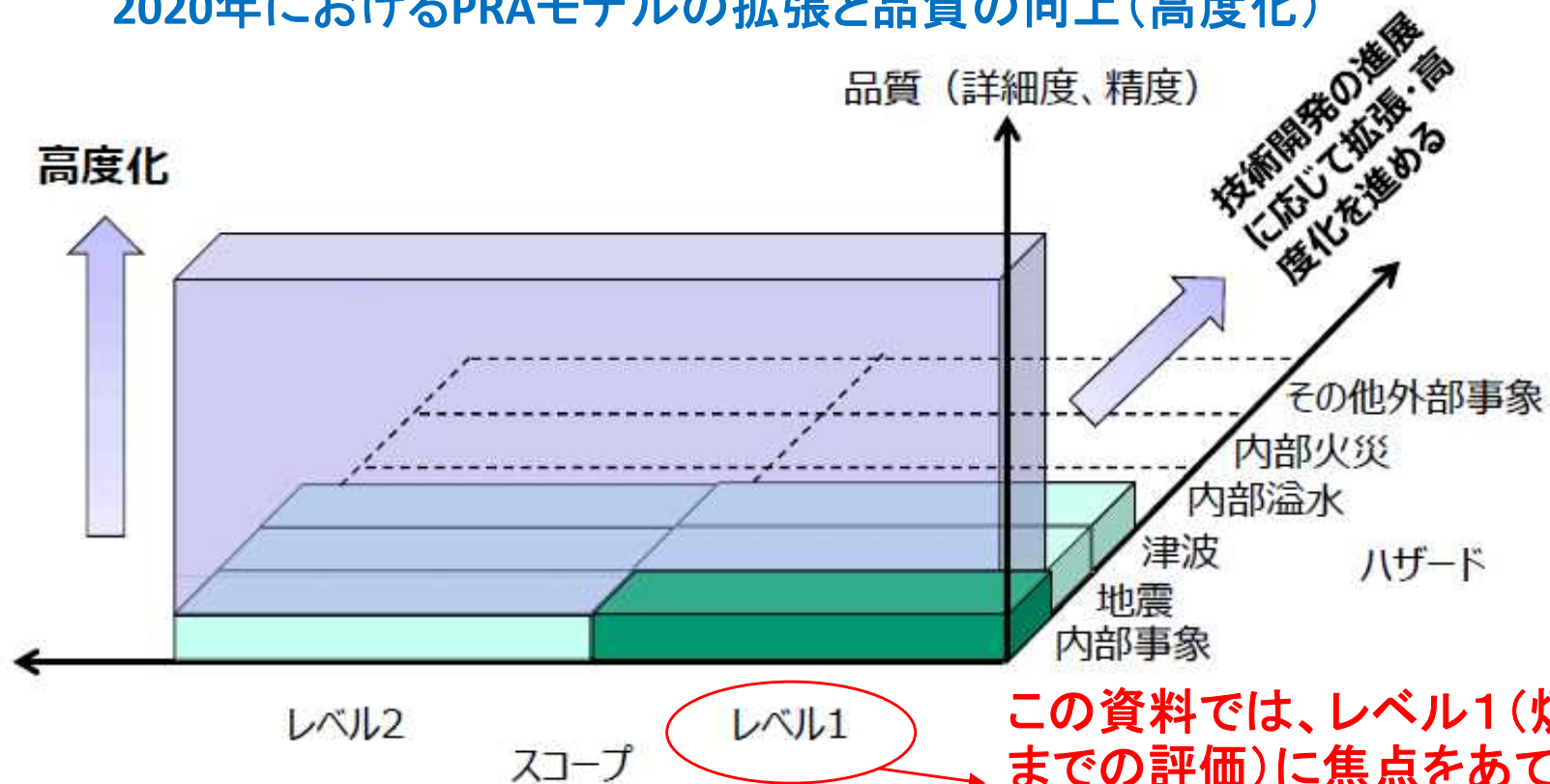
令和2年4月から監視及び評価をベースとした検査制度(原子力規制検査)がスタートした。

- この検査では、リスク情報を活用して、重点的に検査する機器を選定している。
- 機器を選定する際、確率論的リスク評価(PRA)から得られるリスク重要度を用いている。
- 現在使用しているPRAモデルは、事業者が作成した内部事象を対象としたものである。

① 背景と目的 (2/4)

事業者が作成したPRAモデルにより得られるリスク情報の活用は、段階的に範囲を拡張していくことになっている。

2020年におけるPRAモデルの拡張と品質の向上(高度化)



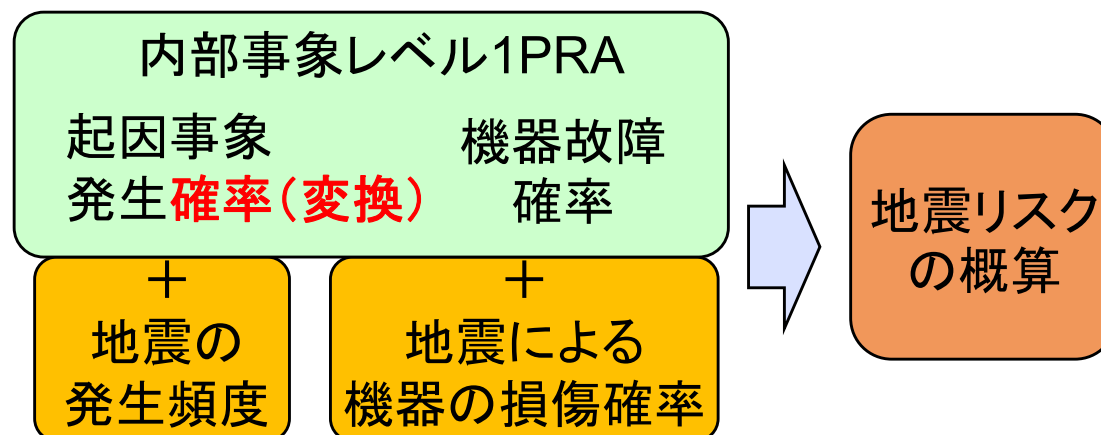
第三回主要原子力施設設置者の原子力部門の責任者との意見交換会 (CNO会議) 資料3「事業者のPRA整備計画について」より抜粋

<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022011481?contents=NRA022011481-002-004#pdf=NRA022011481-002-004>

① 背景と目的 (3/4)

原子力発電所のリスクの要因の1つに、地震による影響がある。原子力規制検査においても、機器等の重要性を見るためには、このリスク要因を考慮することが好ましい。このことから、第74回原子力規制委員会*(令和2年3月)において、事業者の準備が完了するまでの代替の評価方法として、地震時の原子力発電所のリスクを簡易的に算出する方法(以下「簡易的な評価」という)が議論された。議論では、適切性の確認を終えた内部事象レベル1PRAモデルに地震ハザード及び機器脆弱性を入れて、地震発生時のリスクを概算する方法案が示された。

地震発生時のリスクの概算イメージ



*: <https://www.da.nra.go.jp/detail/NRA001001279>

① 背景と目的 (4/4)

簡易的な評価を原子力規制検査の活動の中で活用することを旨とし、安全研究として評価の技術的課題及び検査活動への導入方法の検討をしている。

この資料で示す検討内容は、令和5年度までに実施した検討内容をベースとしている。



原子力規制検査における運用では、事業者の作成する内部事象レベル1PRAを活用する予定であるが、この資料では、評価の方法に係る安全研究の一環として、規制庁が作成した内部事象レベル1PRAモデルに、米国NRCが整理した地震ハザード及び機器 fragility を組み込んで試算した結果を示す。

② 簡易的な評価の概要

② 簡易的な評価の概要(1/6)

簡易的な評価の検討

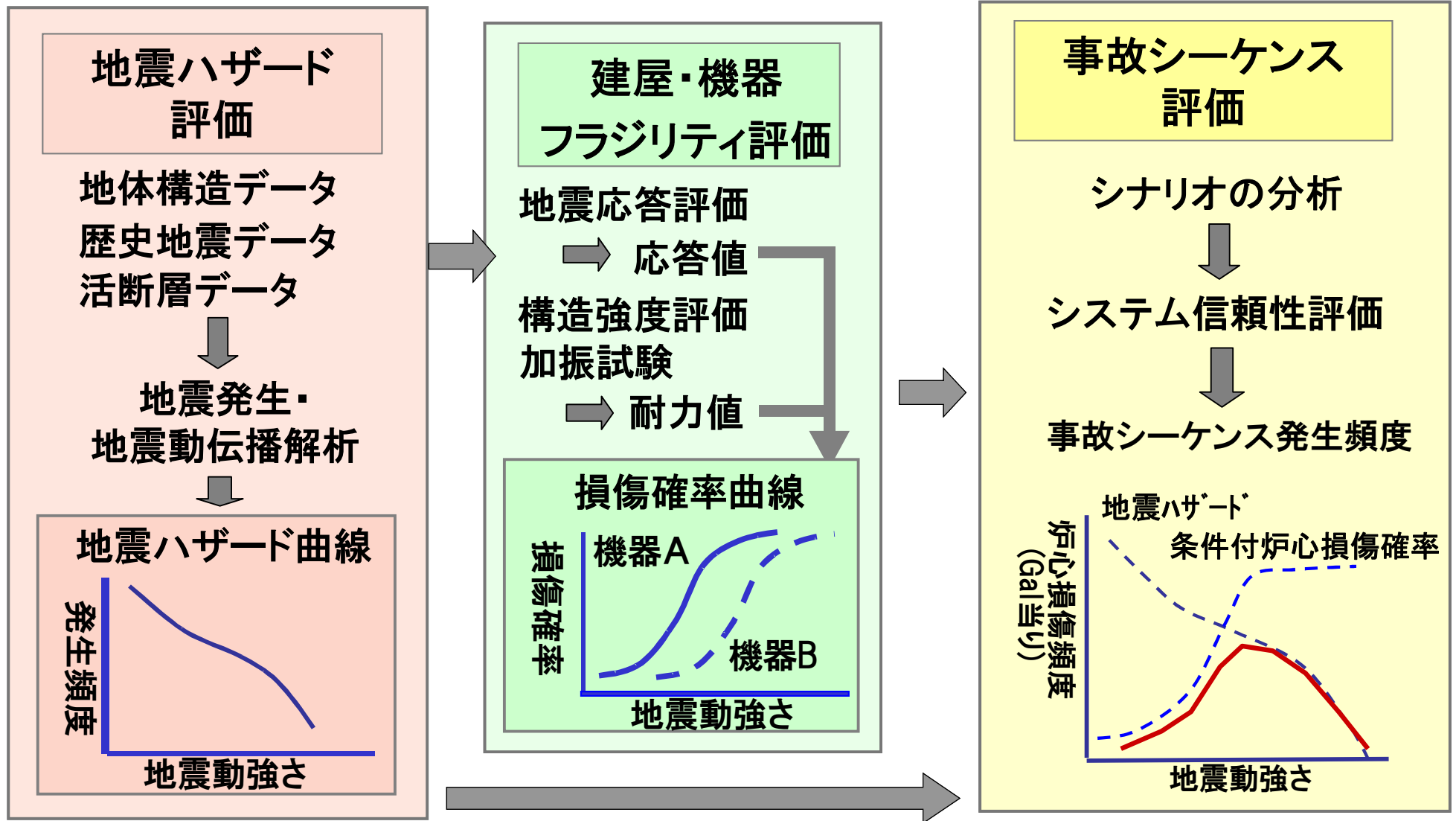
地震PRAを行うには、地震の影響をいろいろな面から検討していく必要がある。簡易的な評価は、事業者が地震PRAを準備するまでの代替となる評価であるため、簡便に地震の情報を組み込み地震のリスクを計算できるものが好ましい。

地震PRAの主な流れは次スライドに示すように、地震ハザード評価、建屋・機器フラジリティ評価、事故シーケンス評価の3つ評価からなる。簡易的な評価では、地震ハザード評価及び建屋・機器フラジリティ評価は事業者が実施した評価結果を活用し、事故シーケンス評価において内部事象PRAモデルを活用することにした。

② 簡易的な評価の概要(2/6)

簡易的な評価の検討

地震PRAの評価の流れ



② 簡易的な評価の概要(3/6)

簡易的な評価の検討

地震ハザードや機器フラジリティをPRAモデルに組み込む事はできるが、機器損傷の相関(耐力の相関、応答の相関、両者の相関等)を考慮するには、その根拠となるものは整理できていない。



簡易的な評価では、以下のように仮定した。

- 1つの機器が損傷すると、冗長の機器も必ず損傷するとする(完全相関)。
- 地震で損傷する機器は、内部事象レベル1PRAモデルで考慮している機器を対象とする。

地震による機器損傷を追加した内部事象PRAモデルに地震ハザード及び機器フラジリティを入力することで、地震のリスクを簡便に計算することとした。

② 簡易的な評価の概要(4/6)

地震PRAモデルの構築方法を参考に、内部事象レベル1PRAモデルを活用した簡易的な評価は、以下のように行った。

内部事象レベル1PRAモデルに地震損傷の基事象を追加する。(使用するPRAモデルの準備)

地震損傷の基事象のデータを地震動ごとに作成する。

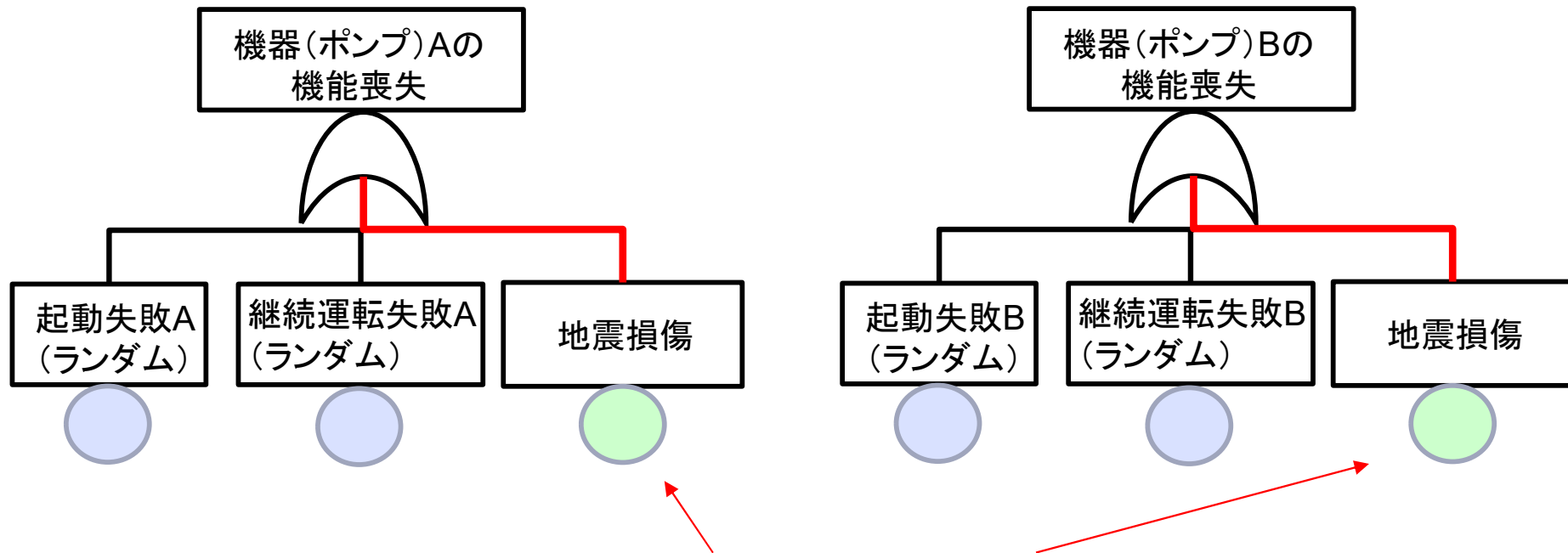
計算する地震動ごとの基事象データをPRAモデルにインポートし、地震動ごとにCCDPを計算する。

算出したCCDPに地震動ごとの地震発生頻度をかけてCDFを算出する。

② 簡易的な評価の概要(5/6)

使用するPRAモデルの準備

内部事象レベル1PRAモデルのフォールトツリーに地震による機器損傷の基事象を追加する。



同じ基事象を追加することで、完全相関を模擬する。

② 簡易的な評価の概要(6/6)

今回の簡易的な評価の検討では、規制庁が作成した内部事象レベル1PRAモデル、米国NRCが公開している地震ハザード及び機器フラジリティを用いた。原子力規制検査では、事業者の内部事象PRAモデル、地震ハザード及び機器フラジリティを用いる予定である。

今回検討した組合せ

	作成者		
	事業者	規制庁	米国NRC
内部事象PRAモデル	—	○	—
地震ハザード	—	—	○
機器フラジリティ	—	—	○

原子力規制検査で用いる組合せ(参考)

	作成者		
	事業者	規制庁	米国NRC
内部事象PRAモデル	○	—	—
地震ハザード	○	—	—
機器フラジリティ	○	—	—

③ 簡易的な評価で得た計算結果

③ 簡易的な評価で得た計算結果(1/9)

簡易的な評価の検討で用いた内部事象レベル1PRAモデルは、以下のようなものである。

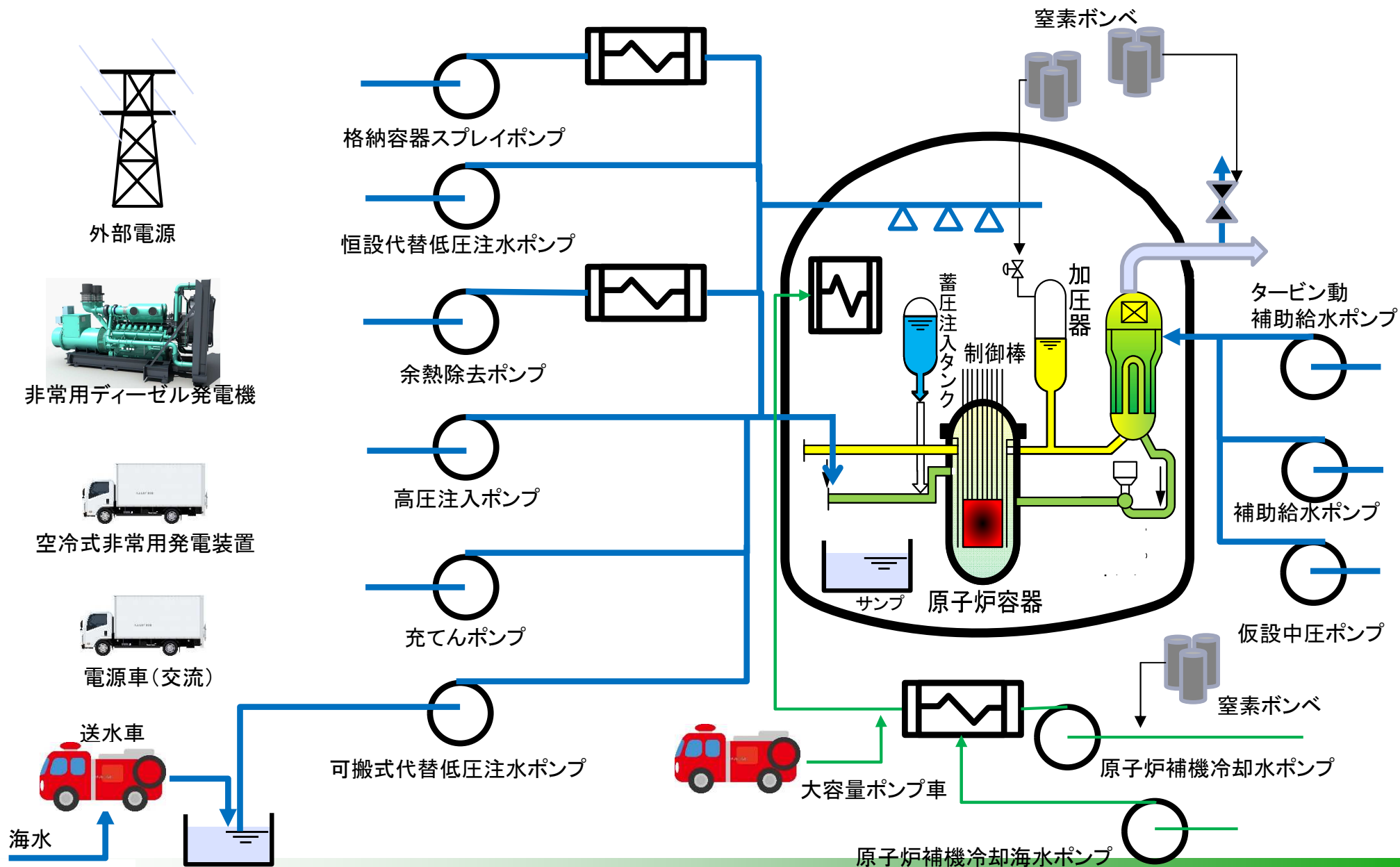
PRAモデルの主な仕様(内部事象)

- 米国のASME/ANSのPRA標準*で要求している技術レベルを満足するように作成
- 代表的な4ループPWRプラントを対象
- モデル化の範囲は内部事象レベル1PRA(炉心損傷頻度まで)のみ
- 機器故障率は米国NRCが算出した平均故障率を採用
- 人的過誤確率は米国EPRIが開発したHRA Calculatorを採用
- 新規制基準で要求されているSA設備を導入

*American Society of Mechanical Engineering and American Nuclear Society, "Addenda to ASME/ANS RA-S-2008, Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications," ASME/ANS RA-Sb-2013, 2013

③ 簡易的な評価で得た計算結果(2/9)

PRAでモデル化した主な設備の範囲

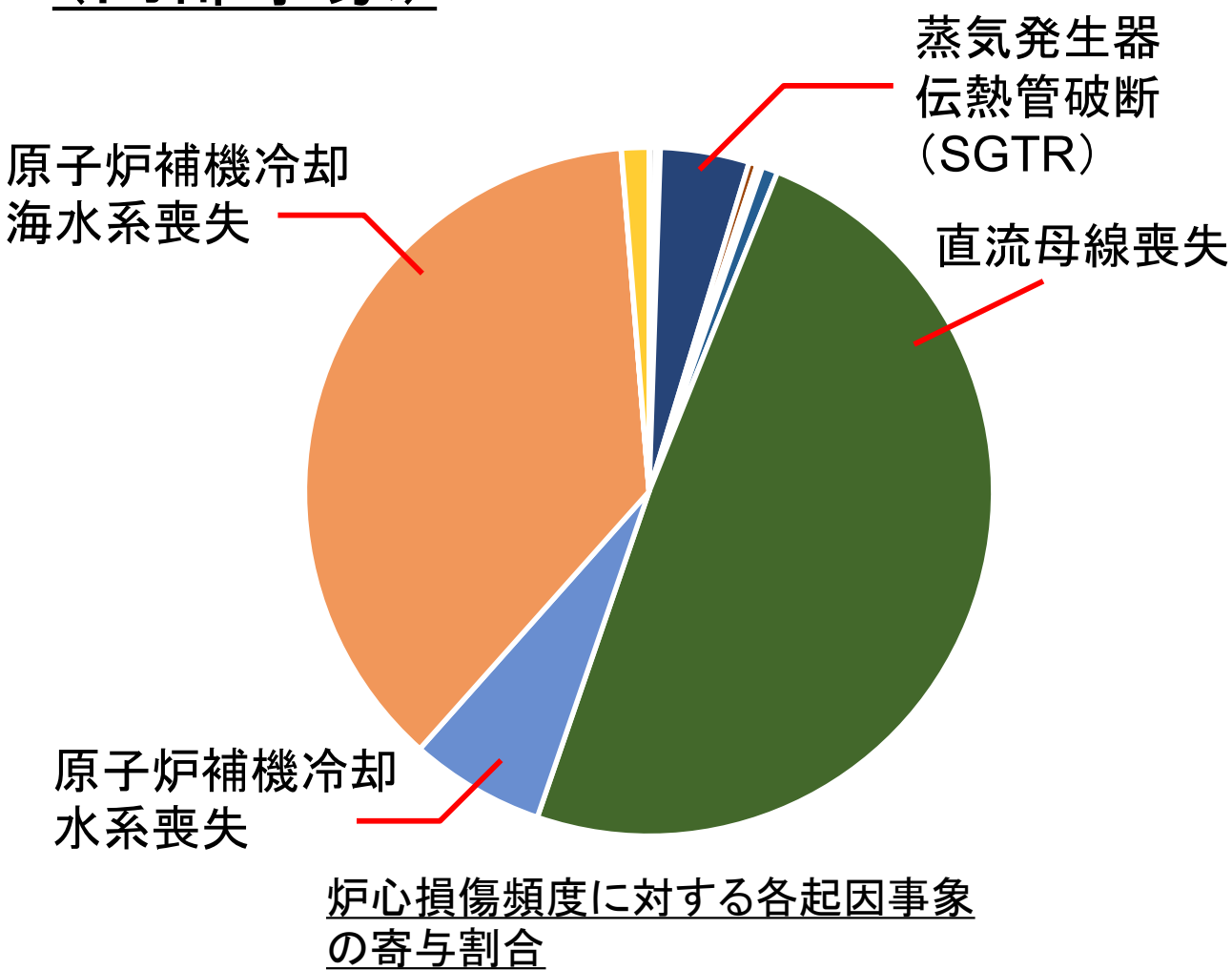


③ 簡易的な評価で得た計算結果(3/9)

4ループPWRプラントの試算結果 (内部事象)

起因事象毎の炉心損傷頻度

起因事象	炉心損傷頻度
原子炉容器破損	2.9E-08
大破断LOCA*	4.7E-10
中破断LOCA*	1.9E-07
小破断LOCA*	5.1E-08
加圧器逃がし弁-LOCA*	1.0E-07
インターフェイスシステムLOCA*	7.3E-09
SGTR	3.0E-06
主給水管破断	2.7E-07
主給水喪失	7.1E-08
主蒸気管破断	1.2E-07
外部電源喪失	5.4E-07
直流母線喪失	3.5E-05
補機冷却水系喪失	4.5E-06
補機冷却海水系喪失	2.7E-05
制御用空気系喪失	9.4E-09
過渡事象	9.2E-07



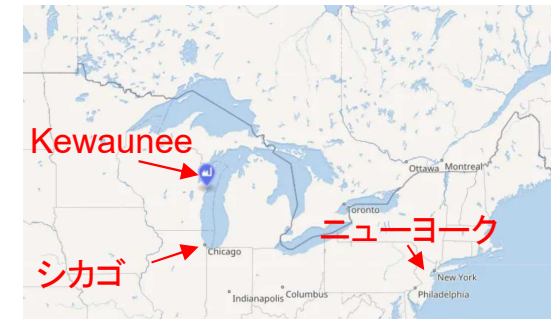
全炉心損傷頻度(CDF): 7.2×10^{-5} [/炉年]

* LOCA: 一次冷却材喪失事故

③ 簡易的な評価で得た計算結果(4/9)

使用した地震ハザード

Risk Assessment of Operational Events Handbook (RASP Handbook)のVolume 2に記載されている地震ハザードを使用した。



Ground Acceleration (g)	Exceedance Frequency	Seismic Bin	Bin Acceleration	Bin Frequency
0.05	3.040E-04	1 (0.05-0.3g)	0.122474	2.842E-04
0.08	1.777E-04			
0.15	6.422E-05			
0.25	2.748E-05			
0.30	1.979E-05	2 (0.3-0.5g)	0.387298	1.258E-05
0.40	1.141E-05			
0.50	7.212E-06	3 (>0.5g)	0.707107	7.212E-06
0.65	4.043E-06			
0.80	2.474E-06			
1.00	1.409E-06			
			Sum =	3.040E-04

低地震動 (Bin 1)
 中地震動 (Bin 2)
 高地震動 (Bin 3)

(Kewauneeサイトの地震ハザード)

③ 簡易的な評価で得た計算結果(5/9)

使用した機器フラジリティ

Risk Assessment of Operational Events Handbook (RASP Handbook) のVolume 2に記載されているの一般的な機器フラジリティ(NUREG/CR-6544)*を使用した。

一般的な機器フラジリティの例

系統	機器			
		Bin 1	Bin 2	Bin 3
高圧注入系	高圧注入ポンプ	6.53E-10	1.83E-04	1.20E-02
	電動弁	8.82E-09	9.10E-05	2.93E-03
	逆止弁	8.82E-09	9.10E-05	2.93E-03
余熱除去系	RHRポンプ	6.53E-10	1.83E-04	1.20E-02
	熱交換器	1.30E-09	2.79E-04	1.60E-02
	電動弁	8.82E-09	9.10E-05	2.93E-03
	逆止弁	8.82E-09	9.10E-05	2.93E-03
格納容器 スプレイ	格納容器スプレイポンプ	6.53E-10	1.83E-04	1.20E-02
	熱交換器	1.30E-09	2.79E-04	1.60E-02
	電動弁	8.82E-09	9.10E-05	2.93E-03
	逆止弁	8.82E-09	9.10E-05	2.93E-03

* 米国の一般的な機器フラジリティ: NUREG/CR-6544 <https://www.nrc.gov/docs/ML0716/ML071650470.pdf>

③ 簡易的な評価で得た計算結果(6/9)

使用した起因事象の発生確率

Risk Assessment of Operational Events Handbook (RASP Handbook)のVolume 2に記載されている起因事象の発生確率を使用した。(地震で発生する起因事象は以下の他にもあると思われるが、本検討では以下に限定している。)

起因事象	Bin 1	Bin 2	Bin 3
炉心損傷直結*	2.77E-06	3.55E-02	5.27E-01
大破断LOCA	1.23E-08	5.91E-04	1.55E-02
中破断LOCA	1.00E-07	4.00E-03	4.00E-02
小破断LOCA	1.50E-05	4.50E-02	2.50E-01
外部電源喪失	2.77E-02	5.72E-01	8.99E-01

*: 主な構築物の損傷(建屋、原子炉容器、SG等)により、炉心損傷となる事象

③ 簡易的な評価で得た計算結果(7/9)

内部事象PRAモデルを対象に、限定的ではあるものの約90個の機器に対して機器フラジリティの基事象を追加した。
また、炉心損傷頻度は以下のように算出した。

$$\text{炉心損傷頻度} = \left[\text{地震(Bin)の発生頻度} \right] \times \left[\text{地震が発生した場合の炉心損傷確率} \right]$$

地震の発生頻度(スライド17)

PRAモデルを用いて計算

起回事象	炉心損傷頻度[/炉年]		
	低地震動 (Bin 1)	中地震動 (Bin 2)	高地震動 (Bin 3)
炉心損傷直結	7.87×10^{-10}	4.47×10^{-7}	3.80×10^{-6}
大破断LOCA	ϵ	2.97×10^{-11}	1.94×10^{-8}
中破断LOCA	3.75×10^{-14}	2.66×10^{-10}	5.03×10^{-8}
小破断LOCA	6.25×10^{-13}	5.24×10^{-9}	7.28×10^{-7}
外部電源喪失	1.36×10^{-10}	1.36×10^{-9}	8.00×10^{-8}
全炉心損傷頻度	9.23×10^{-10}	4.54×10^{-7}	4.68×10^{-6}

考慮している起回事象の数が少ないことも、地震時の全炉心損傷頻度を下げている一因であることに注意が必要。

③ 簡易的な評価で得た計算結果(8/9)

主な機器のRAW重要度

RAWは炉心損傷頻度をどれだけ増加させるかという指標であるため、数値そのものだけでなく炉心損傷頻度の大きさも重要である。

RAW重要度

	内部事象 CCF	低地震動 (Bin 1)		中地震動 (Bin 2)		高地震動 (Bin 3)	
		1台	2台	1台	2台	1台	2台
HPIポンプ	5.8	1.339	1.346	1.001	1.007	1.001	1.046
RHRポンプ	18.9	1.001	5.614	1.001	1.136	1.001	1.145
CCWポンプ	-	1.009	1.009	1.005	2.216	1.002	1.408
非常用ディーゼル発電機	4.1	4.984	26.841	1.009	1.055	1.002	1.007
AFW電動ポンプ	1.7	1.015	2.352	1.0	1.004	1.0	1.001
AFWタービン動ポンプ	-	1.021	-	1.0	-	1.0	-

(参考)

	炉心損傷頻度[/炉年]			
	内部事象	低地震動 (Bin 1)	中地震動 (Bin 2)	高地震動 (Bin 3)
全炉心損傷頻度	7.2×10^{-5}	9.23×10^{-10}	4.54×10^{-7}	4.68×10^{-6}

③ 簡易的な評価で得た計算結果(9/9)

簡易的な評価により、以下の情報を得た。

- 各地震動の炉心損傷頻度の概算
- 機器重要度の高低

簡易的な評価では、詳細な地震PRAに比べ以下の
ような点で課題がある。

- 考慮する事故シナリオの詳細さ
- 地震の損傷を考慮する機器の網羅性
- 地震の影響を受けた運転員等の操作失敗確率

④ 地震PRAと簡易的な評価との差

④ 地震PRAと簡易的な評価との差(1/3)

従来の地震PRAと簡易的な評価との差異及び技術的課題を整理した。

従来の地震PRAと簡易的な評価の比較と主な技術的課題

地震PRAに必要となる情報	地震PRAで使うもの	簡易的な評価で使うもの	簡易的な評価の技術的課題
地震ハザード	事業者が評価した地震ハザードを使用する。		四国電力が国際的な基準（SSHAC: Senior Seismic Hazard Analysis Committee ガイドライン）に準じて実施した評価の扱いが決まっていない。
機器フラジリティ	事業者が評価した機器フラジリティを使用する。		内部事象PRAでモデル化していない機器損傷（例えば、電気盤の倒壊）の扱いが決まっていない。同一系統の機器等による機器損傷の確率に加算することを考えている。

④ 地震PRAと簡易的な評価との差(2/3)

従来の地震PRAと簡易的な評価の比較と主な技術的課題(続き)

地震PRAに必要となる情報	地震PRAで使うもの	簡易的な評価で使うもの	簡易的な評価の技術的課題
機器損傷の相関	冗長機器にのみ相関関係(完全相関)を設定する。		機器の損傷の関係性が冗長機器のみであり、考慮が限定的である。
起因事象及び事故シナリオ	事業者が選定した起因事象及び事故シナリオを使用する。		地震固有の事故シナリオの詳細検討をしていない。
運転員の操作失敗確率	地震時の操作としてモデル化して算出した人的過誤確率を使用する。	内部事象の対応操作と同じと仮定するか、地震の影響として失敗確率を2~3倍程度する。	地震等の外部事象が発生した際の操作失敗確率や重大事故等対処設備の現場操作失敗確率の算出方法が確立していない。

④ 地震PRAと簡易的な評価との差(3/3)

内部事象レベル1PRAモデルを活用した簡易的な評価は、事業者が地震PRAを準備するまでの代替評価である。

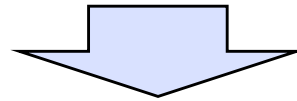
簡易的な評価には課題があることを前提に、活用する必要がある。

- 地震固有の機器損傷(電気盤の転倒等)は、簡易的な考慮方法となっている。
- 地震でのみ発生する事故シナリオの詳細検討ができていない。(例:アクセスルートを用いた対処要員の対応)
- 地震時に対応する運転員及び対処要員が失敗する確率を詳細評価できていない。

⑤ 今後の予定

⑤ 今後の予定(1/3)

地震の評価で用いる情報は自然現象がベースであるため、地震ハザードや機器フラジリティについては、大きな不確実さが伴う。



内部事象と同じように炉心損傷頻度の増分を算出して、内部事象のPRAから得られる炉心損傷頻度の増分に単純に加算する方法は検討や議論が足りない。

どのように簡易的な評価から得られる情報を使用していくか検討する必要がある。

⑤ 今後の予定(2/3)

簡易的な評価では、事業者が作成したPRAモデルに加え、事業者が評価した地震ハザードや機器フラジリティ等の入力情報を使う予定である。

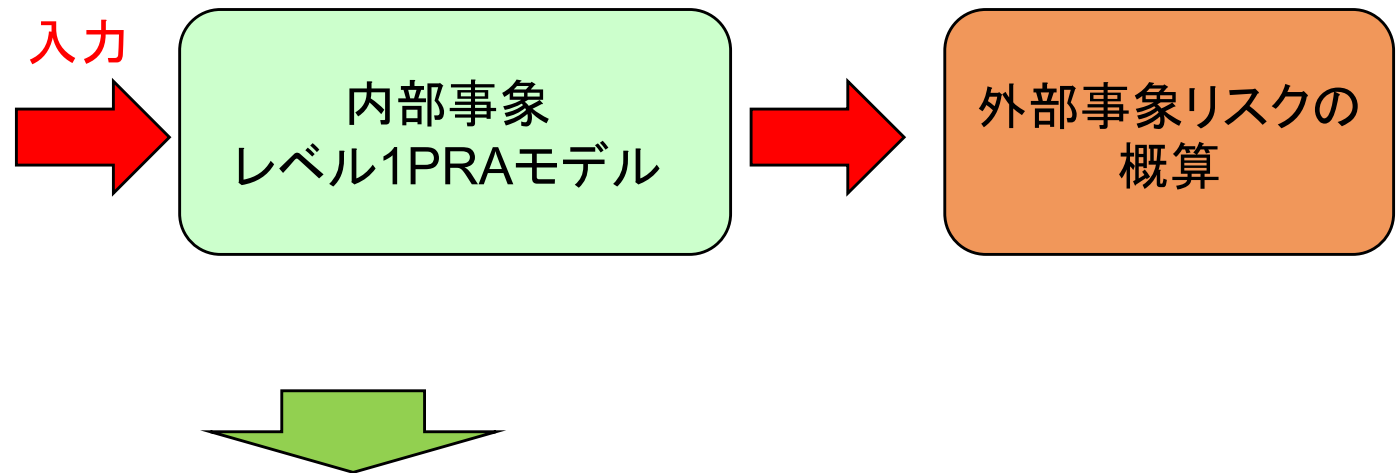
今後は、事業者が評価した以下の入力パラメータを整理していく必要がある。

- 地震ハザード
- 機器フラジリティ
- 起因事象の発生確率

⑤ 今後の予定(3/3)

- 高度化された外部事象のPRAモデルが提示されるまでは、簡易的に外部事象のリスクを計算する方法を検討する。

例	事業者の評価結果、安全研究等から得た知見
地震	地震ハザード 機器脆弱性
火災	火災発生頻度 火災進展・伝播解析結果 火災による機器への影響
溢水	溢水発生頻度 溢水伝播解析結果 溢水による機器への影響



- 内部事象PRAモデルに、安全研究の成果や公開されて確認されたデータを入力して、簡易的に外部事象のリスクを計算することができると思われる。この方法の課題を整理し、計算方法を検討していく。

ご清聴ありがとうございました。