Japan Atomic Energy Agency

Development of a Simulation-Based Dynamic PRA Methodology（シミュレーションに基づく動的PRA 手法の開発）

日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
シビアアクシデント研究グループ

鄭　嘯宇

令和2年度　安全研究センター報告会
令和2年11月27日
ZOOMウェビナー

本件は、原子力規制庁から受託した「平成31年原子力施設等防災対策等委託費（動的レベル1確率論的リスク評価手法の開発）事業」の成果を含む。

背景

- リスク: 安全の達成状況の評価と弱点を見つけるための一つの指標 。
- 日本では、リスク情報を活用した意思決定が原子力プラントの安全を向上させるために実際に活用されている。

確率論的リスク評価 (PRA):

リスク: 頻度（Frequency） と 影響（Consequence）

JAEAの役割

リスク情報の信頼性の向上に貢献するために、JAEAはPRA手法高度化のための提案、ツールの提供及びそれらのJAEAの施設への適用を実施中。

実施

JAEA は 、動 的 か つ シ ミ ュ レ ー シ ョ ン に 基 づ く 先 進 的 な PRA 手法の構築及びそのためのシミュレーション・プラットフォームの開発を行っており、一般的な適用への汎用性と拡張性を念頭に改良中。

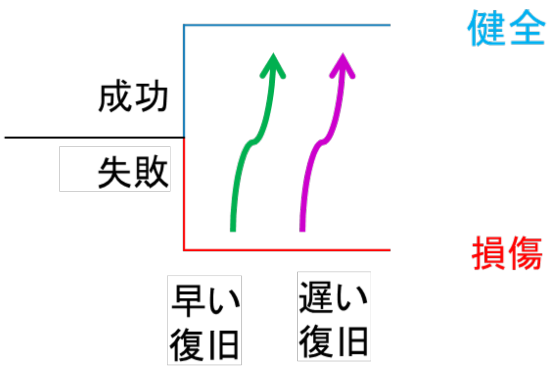
動的PRAとその利点

動的PRA: システム・ダイナミックスとその統計的な傾向を決定論的なシミュレーションと確率論的な手法を用いて忠実にモデル化。

従来のPRA

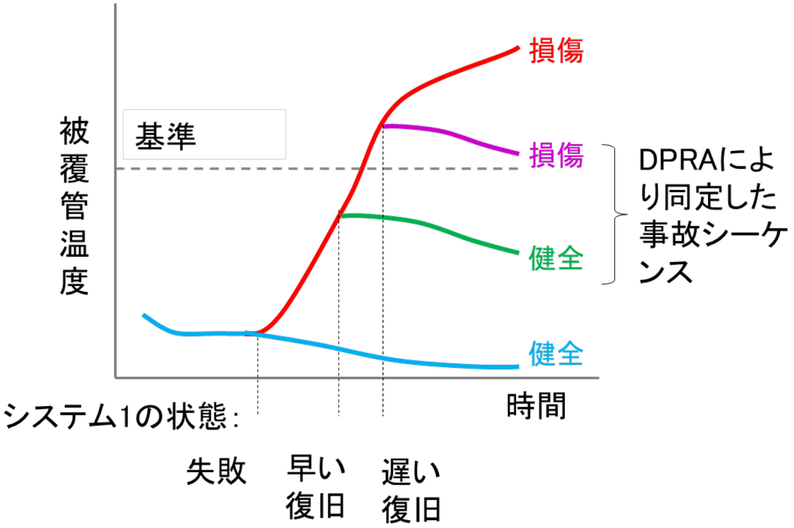
- 「タイミング」の情報の取り扱いが困難
- 一般的なプラント運転情報に基づき、シナリオに依存しない機器故障確率

起因事象	システム 1	炉心状態



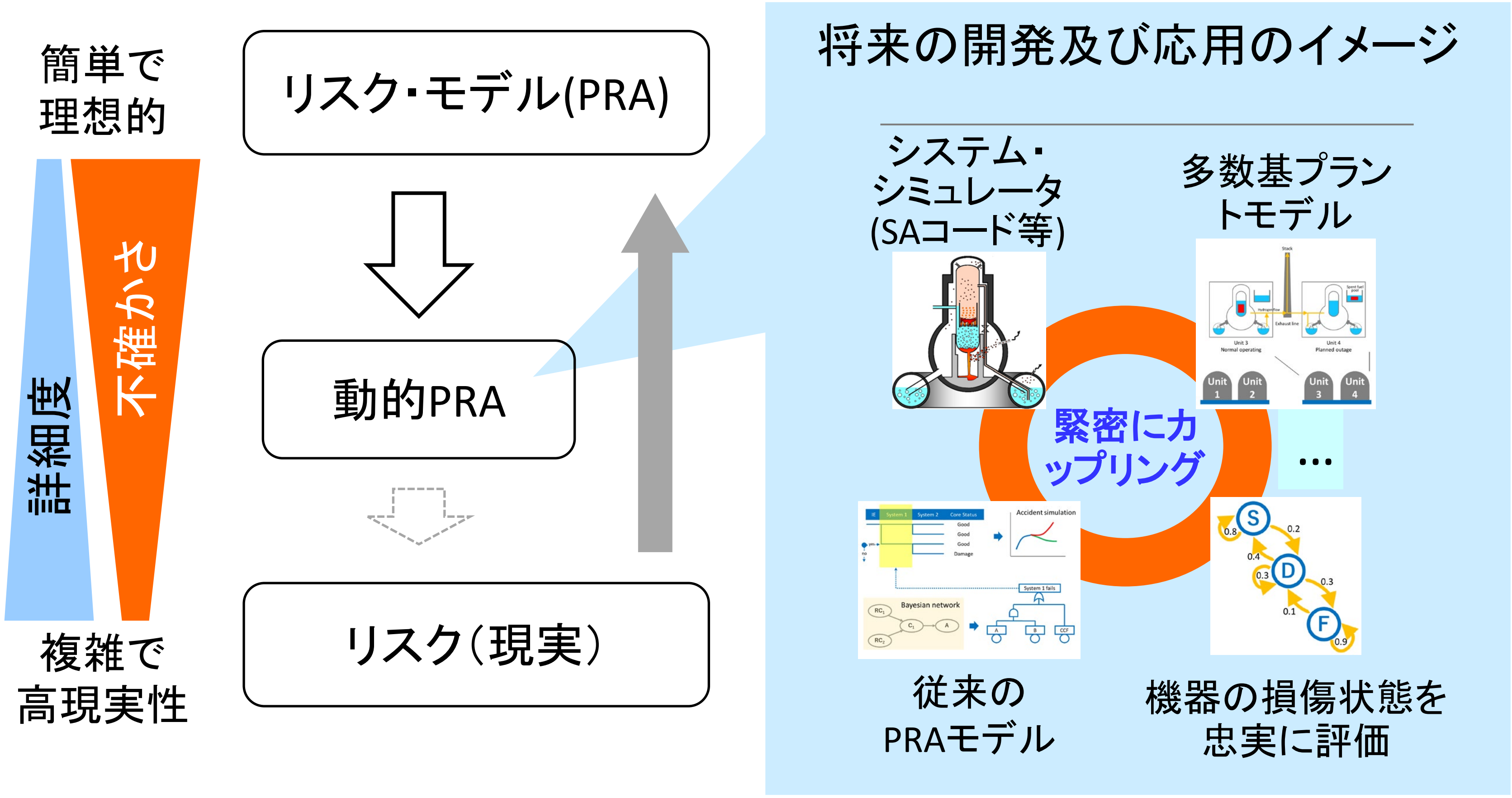
動的PRA

- 「タイミング」の情報を統計的手法を用いて取り扱う
- シナリオに依存した故障のモデル化



動的PRAによるPRAの不確実さの低減

一般的にシミュレーションを活用することにより、動的PRAは詳細な情報を包括かつ不確実さを低減することにより、リスク情報の信頼性を向させる



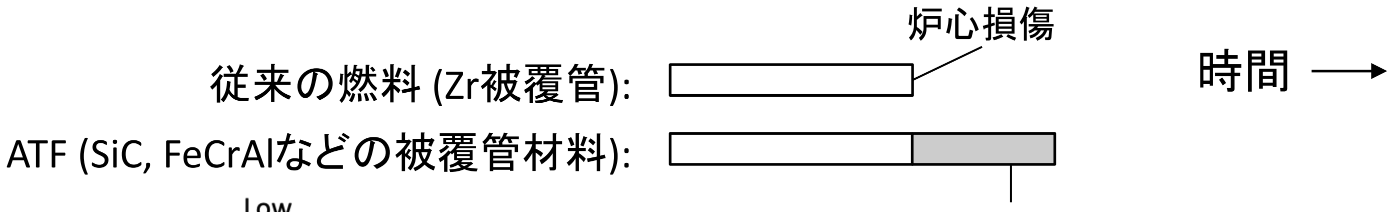
動的PRAの例: 事故耐性燃料の利点の評価

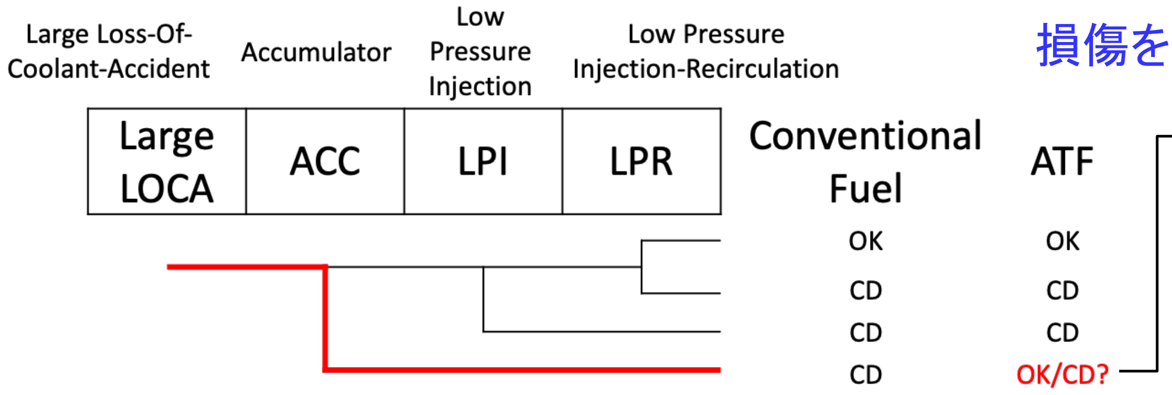
LWRS (Light Water Reactor Sustainability) Program, INL/USDOE

事故耐性燃料 (ATF): シビアアクシデントへの耐性を向上させた新しい設計の軽水炉燃料,

- 核分裂生成物閉じ込め能力の向上
- 燃料-熱物理性能、燃料-被覆管特性が向上

比較:





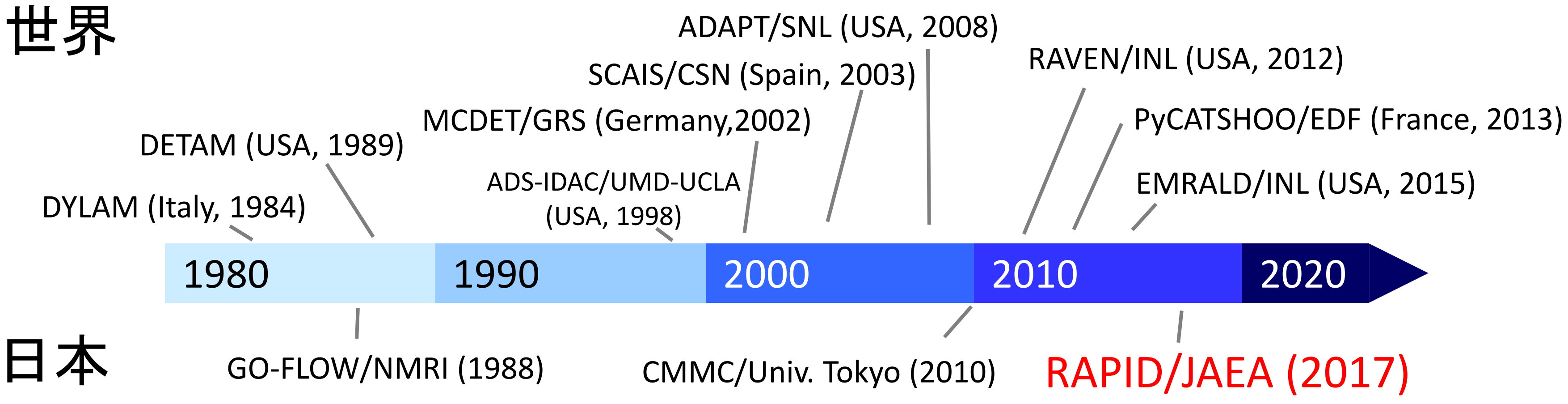
動的PRAの結果①：OK

再構築したしベントツリーにより、炉心損傷が回避できることを確認

- 動的PRAの結果②: 炉心損傷までの時間余裕と水素発生量の低減効果を定量化

Reference: Mandelli, Accident tolerant fuels: a PRA comparison, IRUG Meeting (2019)

JAEA以外の動的PRAの研究状況



JAEAにおける開発状況

	2017-2019	2020	2021	Future
手法	システム間の相互作用を明確にモデル化する方法を構築			
計算ツール	コードの設計, シナリオ生成部	サンプリング手法, 計算の効率化		
適用	簡易的な事故シナリオのレベル1動的PRA	全交流電源喪失事象のレベル1動的PRA		具体的な適用: レベル2動的PRA, マルチユニット動的PRAなど

現在

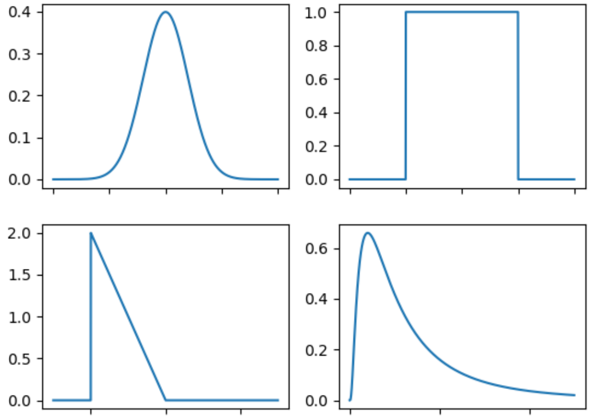
典型的な動的PRAの手順

1. サンプリング手法によるシナリオ生成 → 2. 事故シーケンスの分岐を考慮したシミュレーション → 3. シミュレーション情報のまとめ：影響と頻度

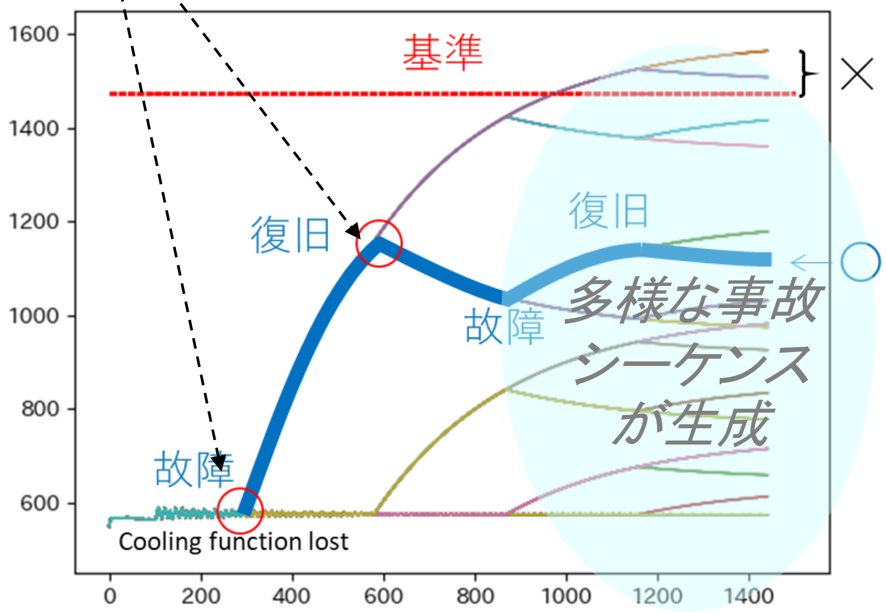
事故進展にともなう分岐:

- 故障時刻,
- 回復時刻, …

確率密度関数



被覆管最高温度(K)



時間(min)

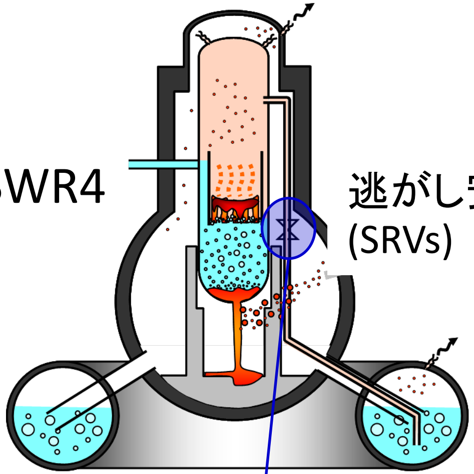
課題: 故障確率は、 事故進展に依存しないよう簡略化

▶ JAEA における解決策: シナリオに依存した故障のモデル化 (**相互作用**)

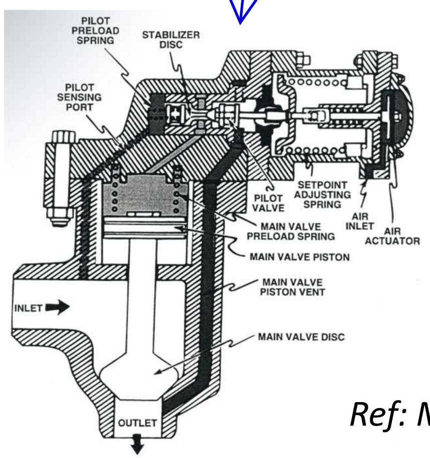
JAEAでの相互作用を有するSRV故障のモデル化

1. 従来の簡略化されたモデル: $prob = g(Number\ of\ Demands)$
2. しかし、もし故障のメカニズムを考慮すると: SRVは高温ガス条件下での作動において、開固着故障を発生 $prob = f(Temperature)$

BWR4



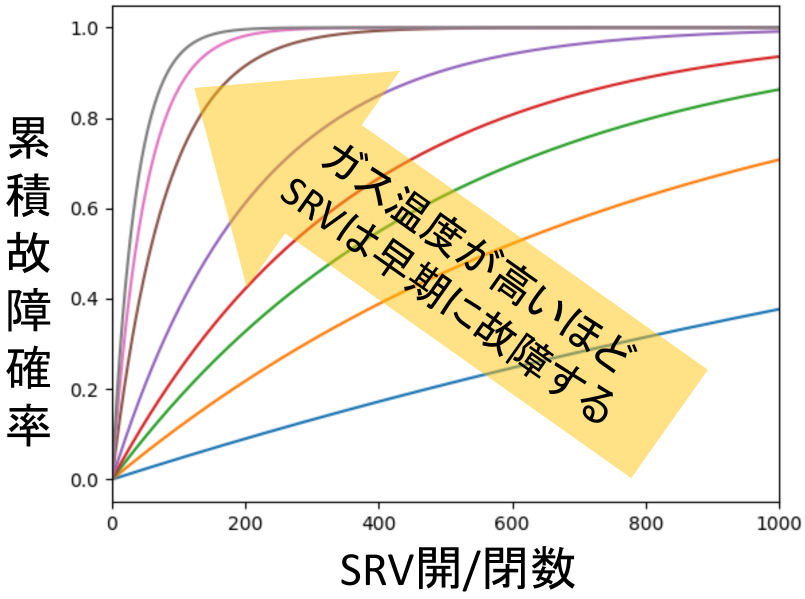
逃がし安全弁 (SRVs)



現実: シナリオに依存したSRV故障のモデル

$prob = F(Temperature, Number\ of\ Demands, Time)$

動的PRA はシミュレーションにより故障確率を評価

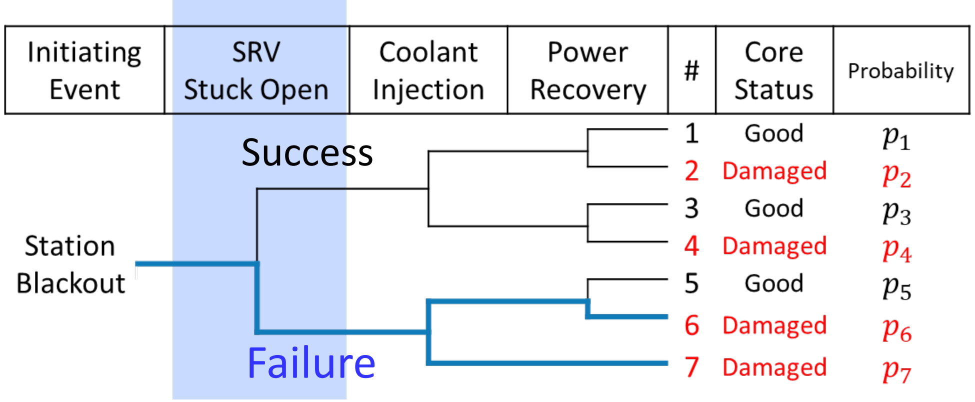


Ref: MELCOR Best Practices - An Accident Sequence Walkthrough, 2008 EMUG, Swiss

従来のPRAと動的PRAの比較

Ref: NUREG/CR-6928, Industry-average performance at US commercial NPPs

簡略化したBWRの全交流電源喪失のイベントツリー

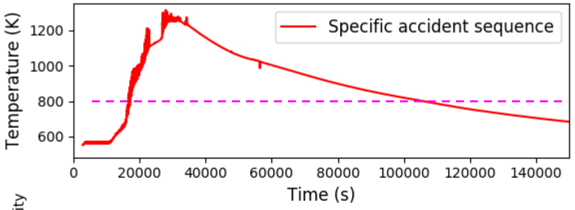


従来: シナリオに依存しない故障確率

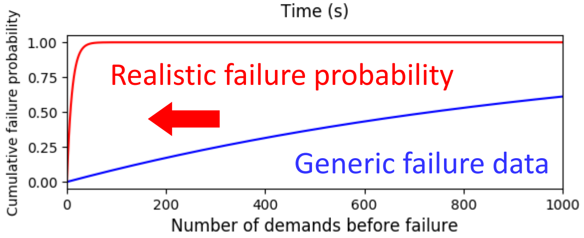
↓

提案: シナリオに依存した故障確率

主蒸気管のガス温度

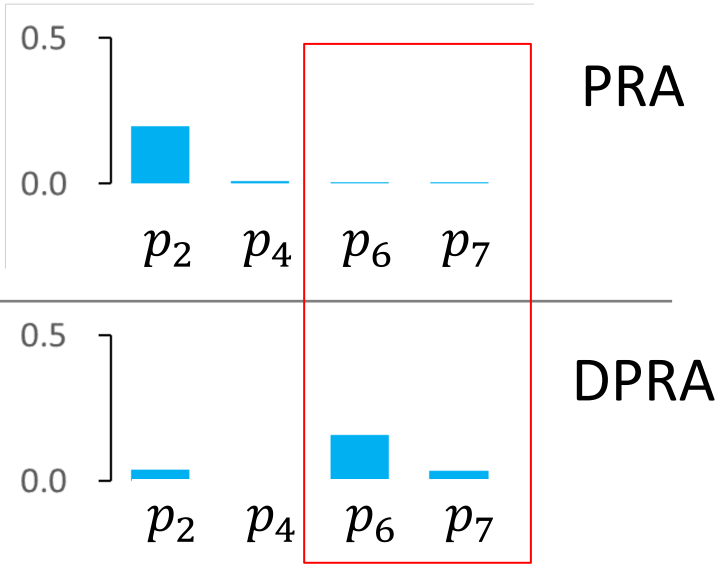


SRVの故障確率



SRVのデマンドに対する開固着確率
(一般プラントのデータベースより)

$\mathrm{Prob}_{(\mathrm{Failure})}$ ~ Beta(α:0.5, β:628.1)
平均値: 7.95E-04



高温化においてSRVは少ない開/閉数で故障する傾向($p_{srv|SBO} > p_{srv}$)があり, これにより条件付炉心損傷確率の分布が変化

動的PRAはPRAの結果を変化させる可能性あり

JAEA独自の動的PRA手法の開発

シミュレーションを厳密にカップリングすることにより、JAEAは統合的な動的PRAフレームワークを構築

頻度

確率論的解析

- シナリオ生成
- サンプリング
- ポストデータ処理(機械学習)
  - 代替統計モデル作成
  - 分類, 回帰

影響

決定論的解析

- シミュレーションによるシステム解析
- プラント運転
- ソースターム解析

SAコード, システムコード, ...

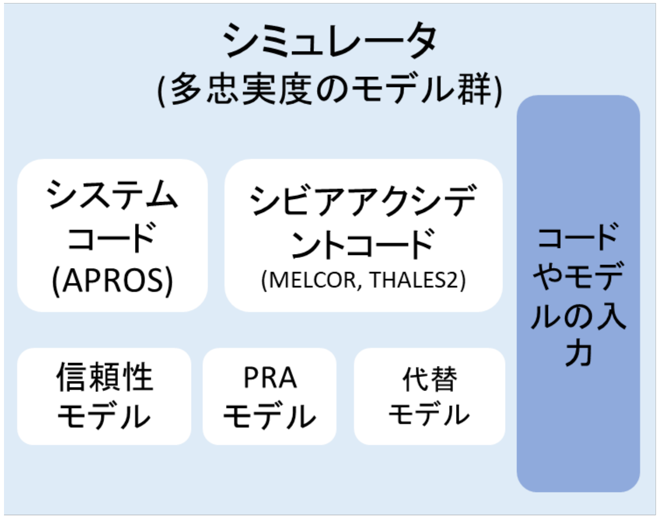
発生確率, 事故の影響, リスク

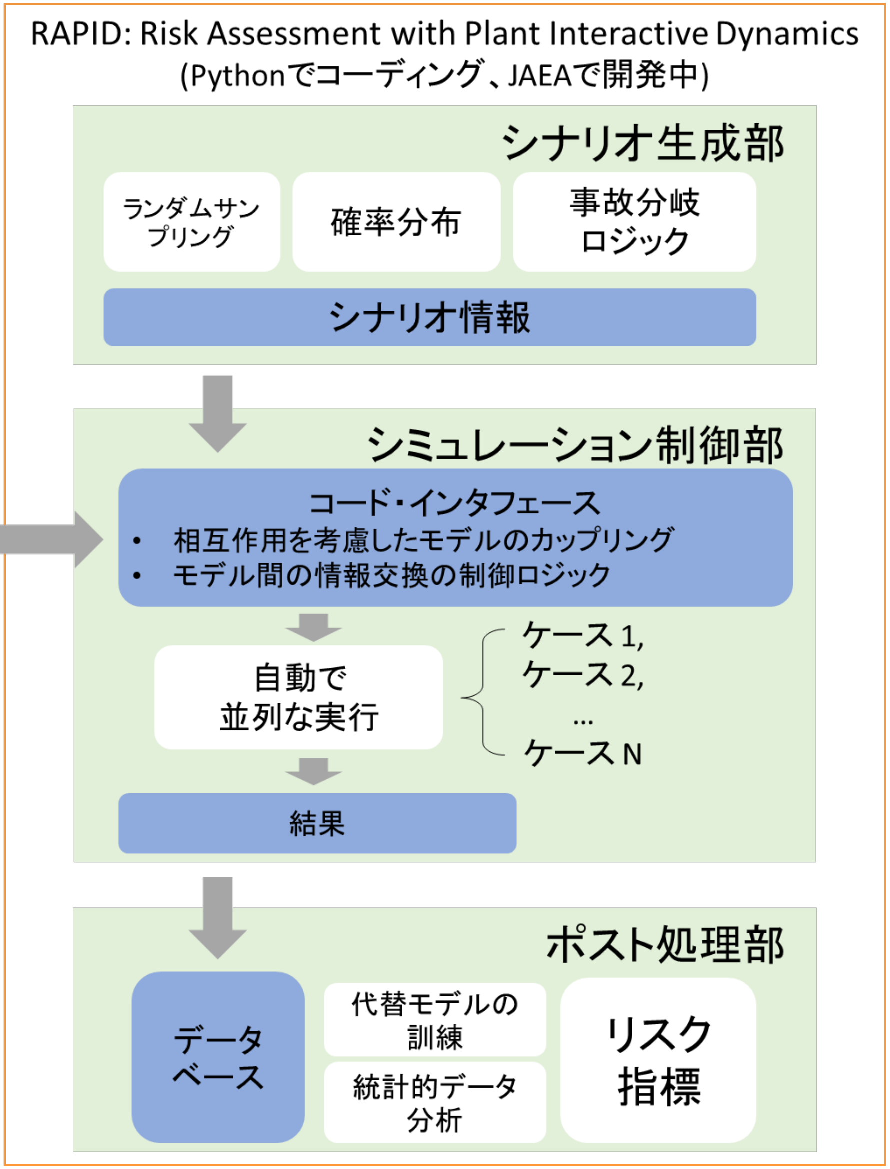
↓

シミュレーションに基づくリスク情報を活用した意思決定 (RIDM)

開発した手法はINLのRISMC法(LWRS, USDOE)を参考したが、頻繁なシミュレション相互作用を考慮した独自の事故シナリオ生成メカニズムを有する。

動的PRAツール RAPID の設計と開発



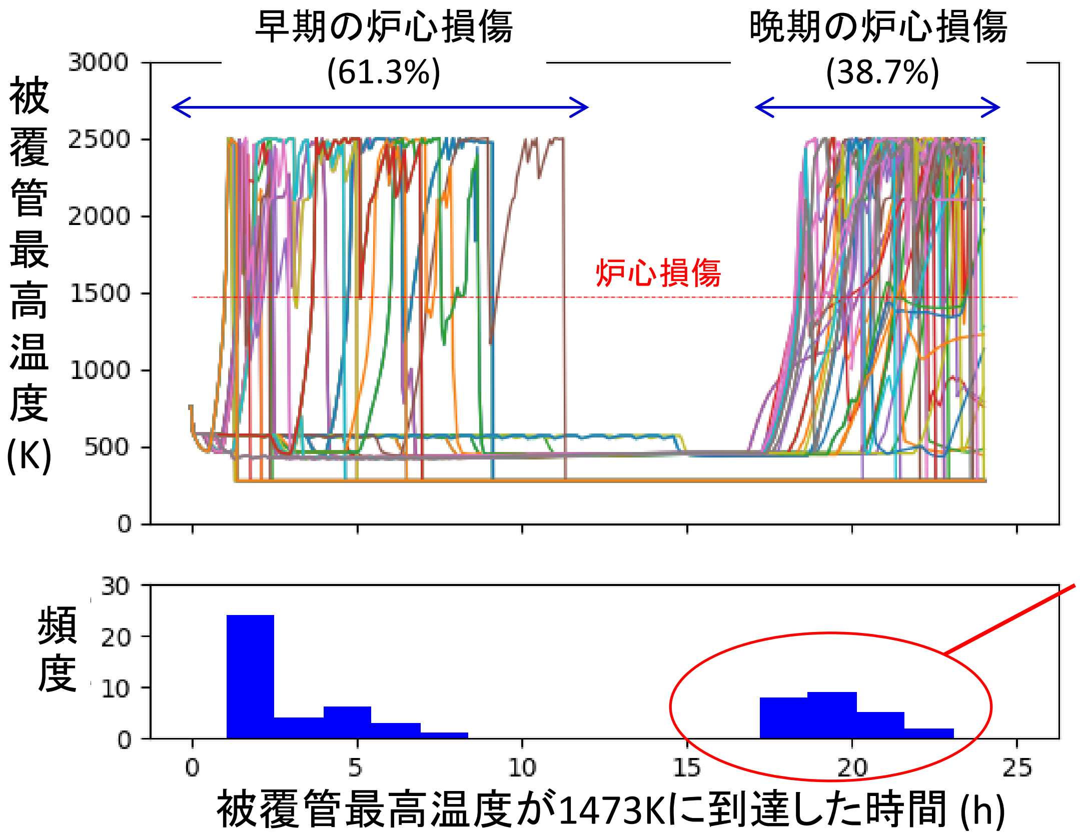


主として動的PRAのためであるが、他分野へも適用可能な汎用的なプラットフォーム

- シビアアクシデントの不確実さ解析及び感度解析,
- 事故対策の最適化

THALES2 及び RAPIDによる予備的な動的PRA

全交流電源喪失(SBO)により炉心損傷に至るシナリオ



不確実性を有するシステム 及び影響因子 システム間の相互作用を考慮したモンテカルロサンプリング	
EDG	回復時間
DC	枯渇時間
SRV	閉失敗 (熱誘因故障など) 及び開固着面積
Pump	シール故障率及び漏洩面積
その他: RCIC, HPCS, 減圧操作, LPCI.	

S/C水温上昇により低圧炉心注水系が機能喪失した。
残留熱除去系を早期回復できれば、炉心損傷を回避可能。

事故緩和対策の「タイミング」の違いを忠実にモデル化し、
動的PRAによる確率論的なシミュレーションと決定論的なシミュレーションの統合に成功

結論及び今後の展望

結論

- 動的PRAは従来のPRAに対する利点を有する
- JAEA はシミュレーションに基づく手法と動的 PRA のためのプラットフォーム（RAPID）を構築:
  - 決定論的解析と確率論的解析を統合,
  - 分野の異なるモデルとツールを結合 (システムコード, PRAモデル, 信頼性評価モデル, …)
  - システマティックな取扱い : (1) 先進的なサンプリング手法, (2) シナリオ生成, (3) 不確実さの伝播, (4) 現象に係るシミュレーション, (5) 代替統計モデル構築を含む総計的なデータ分析

今後の展望

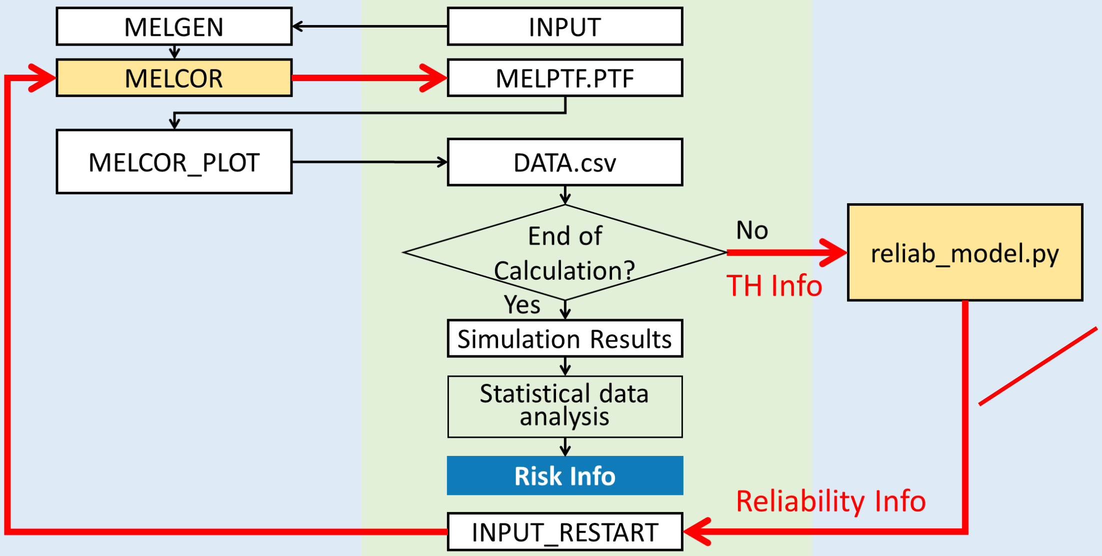
- RAPIDの開発は、特に汎用なプラットフォームを目標として継続中
- 他のPRAや不確実さ解析に係る有用なツールとして開発 (例えば、マルチユニットPRA、HRA、外部事象PRA、…)

実施中のMELCOR2.2 及び RAPIDによるレベル2動的PRA

動的PRAによるより現実的なソースタームの不確実さの定量化

- JAEAスーパーコンピュータ内のMELCOR2.2-RAPIDによる大規模並列実行

決定論的シミュレーション	DPRAシミュレーション・プラットフォーム	決定論的シミュレーション
MELCOR 2.2	**RAPID**	**信頼性評価モジュール**
• 熱水力, • 炉心状態, • ソースターム, …	• シナリオを生成, • シミュレーションを制御, • モデルの相互作用を管理,データを処理, …	異なるモデルを選択する, e.g. • 故障メカニズム, • マルコフモデル, • 故障確率, …



動的PRAの**利点**:
離散時間でのカップリングにより相互作用を考慮したフィードバックループにより、時間依存性を有する故障確率を厳密に取り扱う。

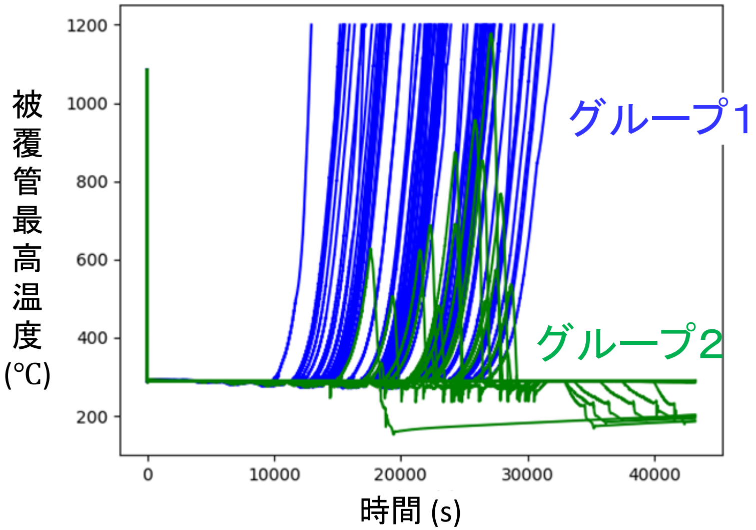
動的PRAをサポートする技術の開発

(1) シーケンスのクラスタリング:

動的PRA :機械学習を用いた解析データの分析

利点:
- 自動
- 代表を探す必要がない
- 規則に基づく(主観的でない)

RAPID-Apros (VTT-Fortum, フィンランド)



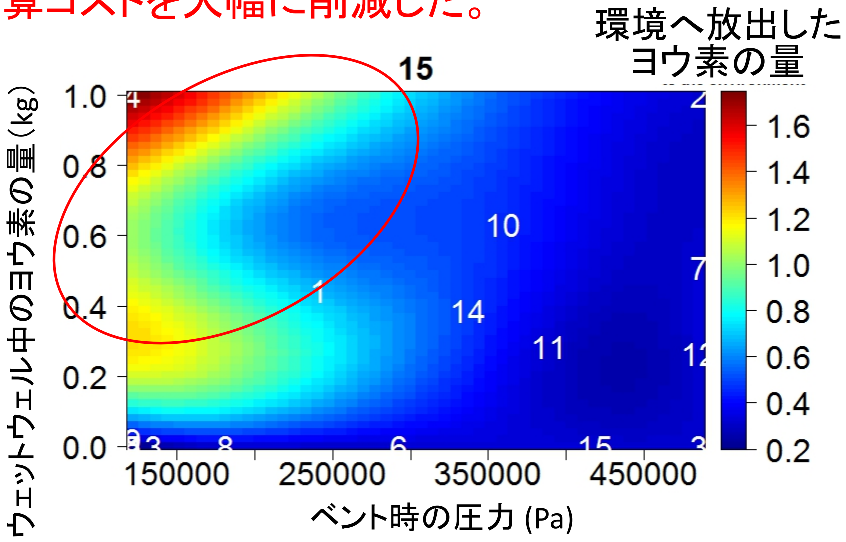
(2) サンプリングと不確実さ伝播:

動的PRA: 代替統計モデルに基づく適合サンプリングなど先進的なサンプリング技術

利点: より効率的, 高忠実度のシミュレータと低忠実度の統計モデルの組合せ

BWR格納容器ベント操作の最適化

不要なサンプリング空間を予測し、
計算コストを大幅に削減した。



ご清聴ありがとうございました。