

# アドバンス・シミュレーション 第5回 ・セミナー 2024

2024年 8月23日(金) 離

## プログラム

1. アドバンスソフト株式会社についてと、先生のご紹介 ..... 1

### 招待講演

2. 「シミュレーション技術のリスク評価への適用」 ..... 3

東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻 教授 高田 孝 様

3. アドバンスソフトからの情報提供 ..... 17

## 講演概要

### 「シミュレーション技術のリスク評価への適用」

東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻 教授 高田 孝 様

リスクとは、「目的に対する不確かさの影響」(ISO31000 : 2018、リスクマネジメント - 指針)であり、想定されるシナリオや発生頻度/確率、およびその影響について、不確かさを含めた評価が重要となる。近年、これらの不確かさをシミュレーション上でモデル化し、多数の解析を統計処理することでリスクを評価する、動的リスク評価手法の適用が検討されつつある。

本講演では、主に原子力分野で用いられているリスク評価とシミュレーション技術との関係、動的リスク評価手法や今後の課題等について概説する。



アドバンスソフト株式会社 セミナー事務局

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング 17階西

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580

URL: <http://www.advancesoft.jp/> E-mail: [office@advancesoft.jp](mailto:office@advancesoft.jp)

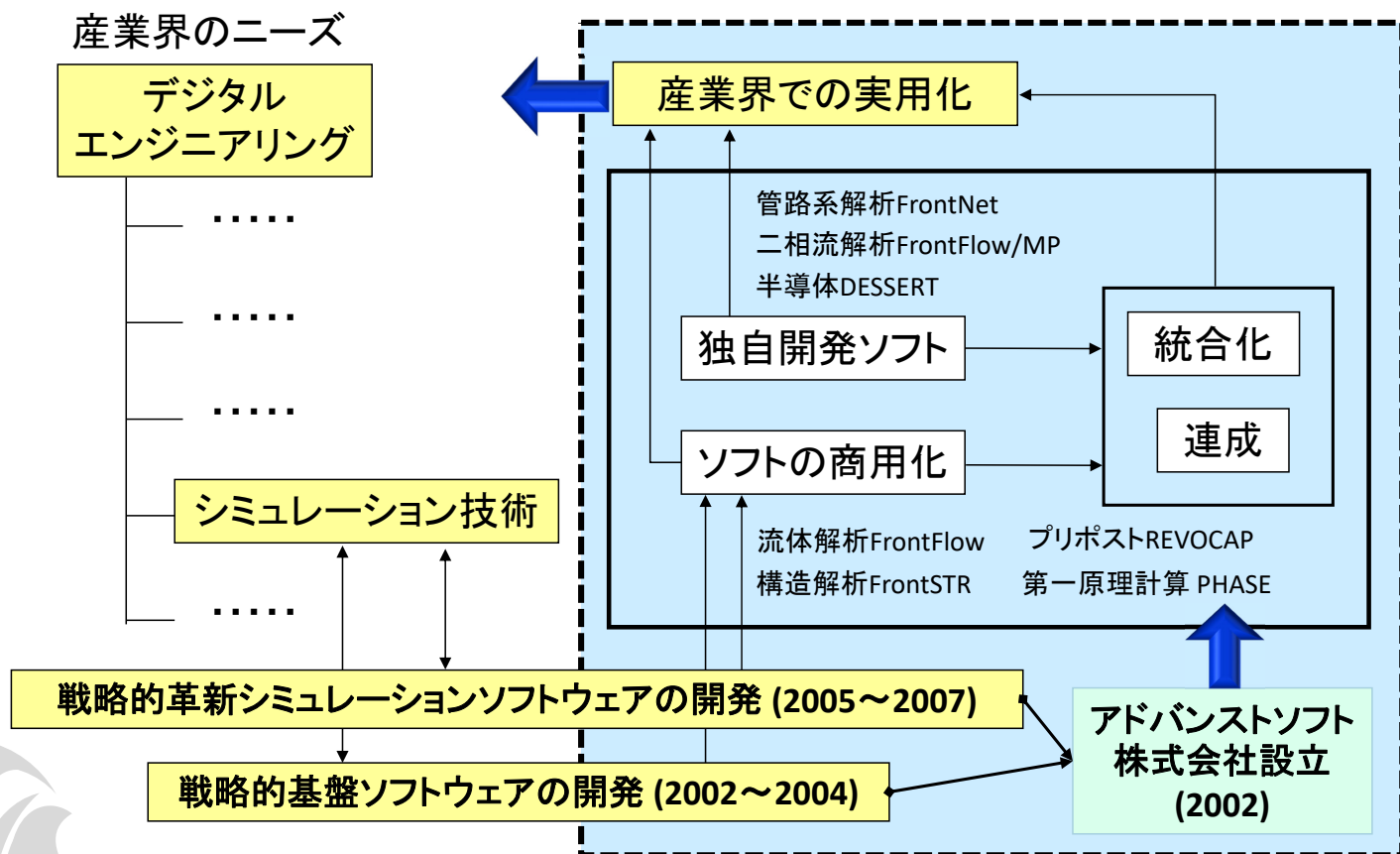


# アドバンスソフト株式会社についてと 先生のご紹介

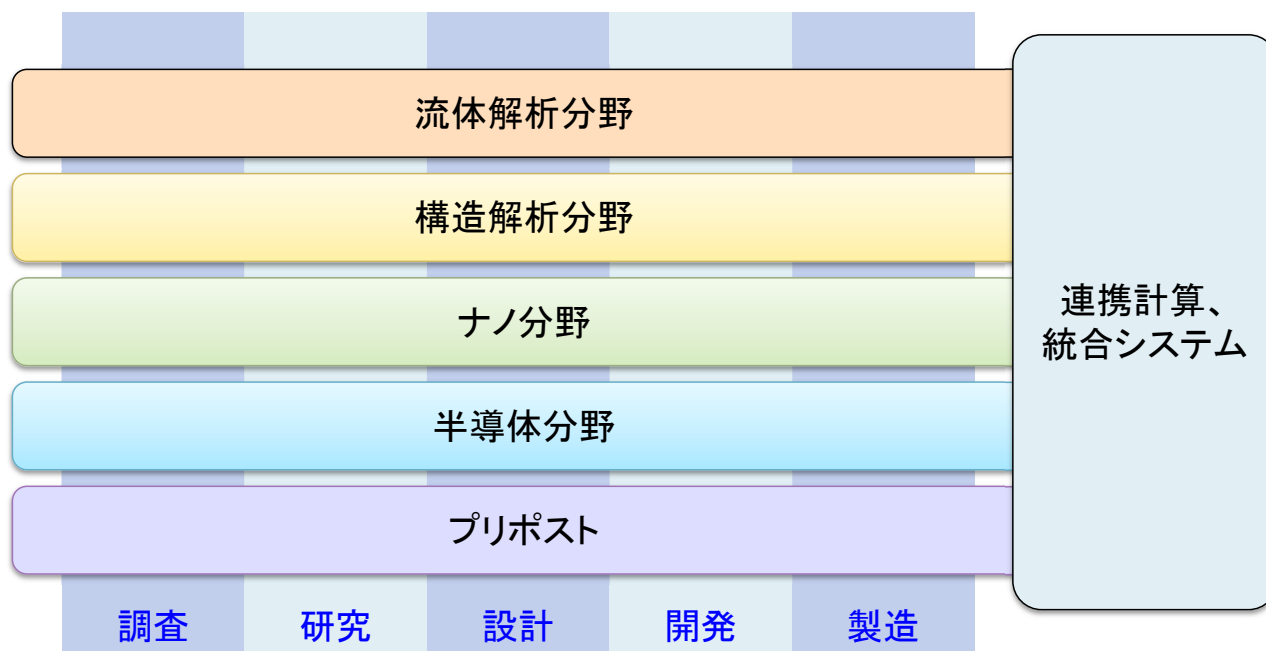
第5回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2024  
(東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻  
教授 高田 孝 様)

2024年8月23日 (金) 開催  
アドバンスソフト株式会社

## アドバンスソフトとは



# 事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、科学技術計算によるソリューションをご提供します。

# 高田 孝 先生 のご紹介

## ご経歴

1994年	東京工業大学 大学院理工学研究科 卒業（修士）。
2007年	学位取得（大阪大学、工学博士）。
1994～2005年	川崎重工業株式会社。
2005～2015年	大阪大学。
2015～2021年	日本原子力研究開発機構を経て、
2021年	より、東京大学 工学系研究科 原子力国際専攻 教授。

## ご研究内容

専門は、熱流動数値シミュレーション、原子炉安全工学、リスク評価。

# シミュレーション技術の リスク評価への適用

東京大学大学院工学系研究科  
原子力国際専攻  
高田 孝

Department of Nuclear Engineering and Management   
School of Engineering, The University of Tokyo



## 本日の内容

- はじめに
  - ✓ リスクの定義、リスクトリプレット
  - ✓ シミュレーション技術と不確かさ評価
  - ✓ リスク評価の変遷（原子力）
- 確率論的リスク評価とシミュレーション技術
- シミュレーション技術を援用した動的リスク評価
  - ✓ ナトリウム冷却高速炉における
    - 積雪時のリスク評価
    - 強風時のリスク評価
  - ✓ 今後の展開
- おわりに

## ➤ リスクとは（リスクの定義）

- ✓ 目的に対する不確かさの影響\*1
- ✓ 不確かさの影響\*2
- ✓ 危害の発生確率及びその危害の度合いの組合せ\*3

- \*1 JIS Q31000: 2019  
(リスクマネジメント-指針)
- \*2 JIS Q9000: 2015  
(品質マネジメントシステム-基本及び用語)
- \*3 JIS Z8051: 2015 (ISO/IEC Guide51)  
(安全側面-規格への導入指針)

## ➤ リスクの3要素（リスクトリプレット）\*4

- ✓ シナリオ（What can go wrong.）
- ✓ 確率・頻度（How likely it is to occur.）
- ✓ 影響（What the consequences might be.）

- \*4 U.S. NRC Glossary  
<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/risk.html>

リスクとは、（主に好ましくない方向への）不確かさを有するシナリオ、確率・頻度および影響を組み合わせたもの

シミュレーション技術の適用

## シミュレーション技術と不確かさ評価

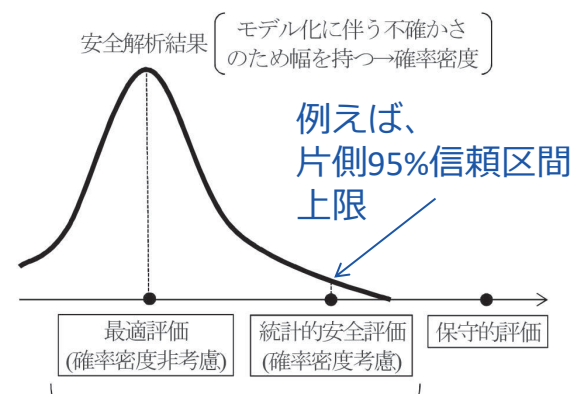
シミュレーション技術の不確かさ評価（リスク評価の一部）  
手法は既に構築されている



### 統計的安全評価手法

（シナリオは決定論的に評価されるが、  
入力の不確かさを考慮）

- ✓ 統計的安全評価手法の概略フロー
  - シミュレーション（解析コード）の適用性評価
  - パラメータの不確かさ定量化
  - 感度解析及び不確かさ評価



\* 鳥毛他, INSS Journal, 24, C-4, 2017.

従来、安全性評価は**決定論的な条件（高い保守性）**で実施

例：大規模な冷却材喪失事故（LOCA\*1）

\*1 Loss Of Coolant Accident

\*2 USNRC, NUREG-75/014, 1975.



原子力発電所の定量的リスク評価の試み（WASH-1400\*2）

（確率論的リスク評価, PRA\*3）

✓ リスクへの寄与は小規模なLOCAの方が重要

\*3 Probabilistic Risk Assessment



（Probabilistic Safety Assessment, PSAとも呼ばれる）

スリーマイルアイランド事故（1979）

事故としては**小規模なLOCA**



リスク評価に基づく**対策が合理的で効果的**

（ただし、全ての事象に対し定量的リスク評価をする必要はないことに留意）

➤ 3つのレベルの確率論的リスク評価（PRA）

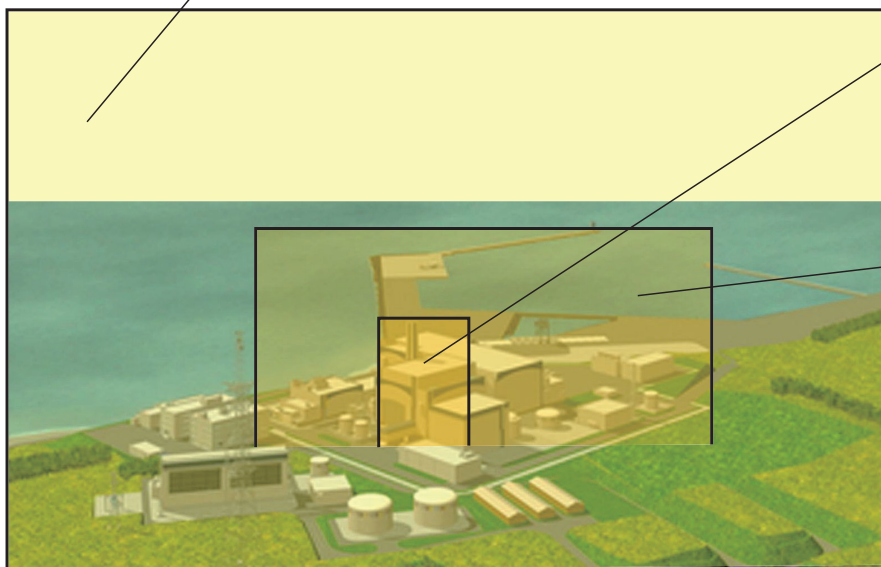
周辺の住民、環境への被ばくを防ぐ

\* 核分裂生成物

Fission Products

**レベル3PRA**

指標：被ばく量等（赤字がシミュレーション技術を利用）



炉心の損傷を防ぐ

**レベル1PRA**

指標：炉心損傷頻度

放射性物質を外に

出さない

**レベル2PRA**

指標：格納容器機能

喪失頻度、

早期大規模

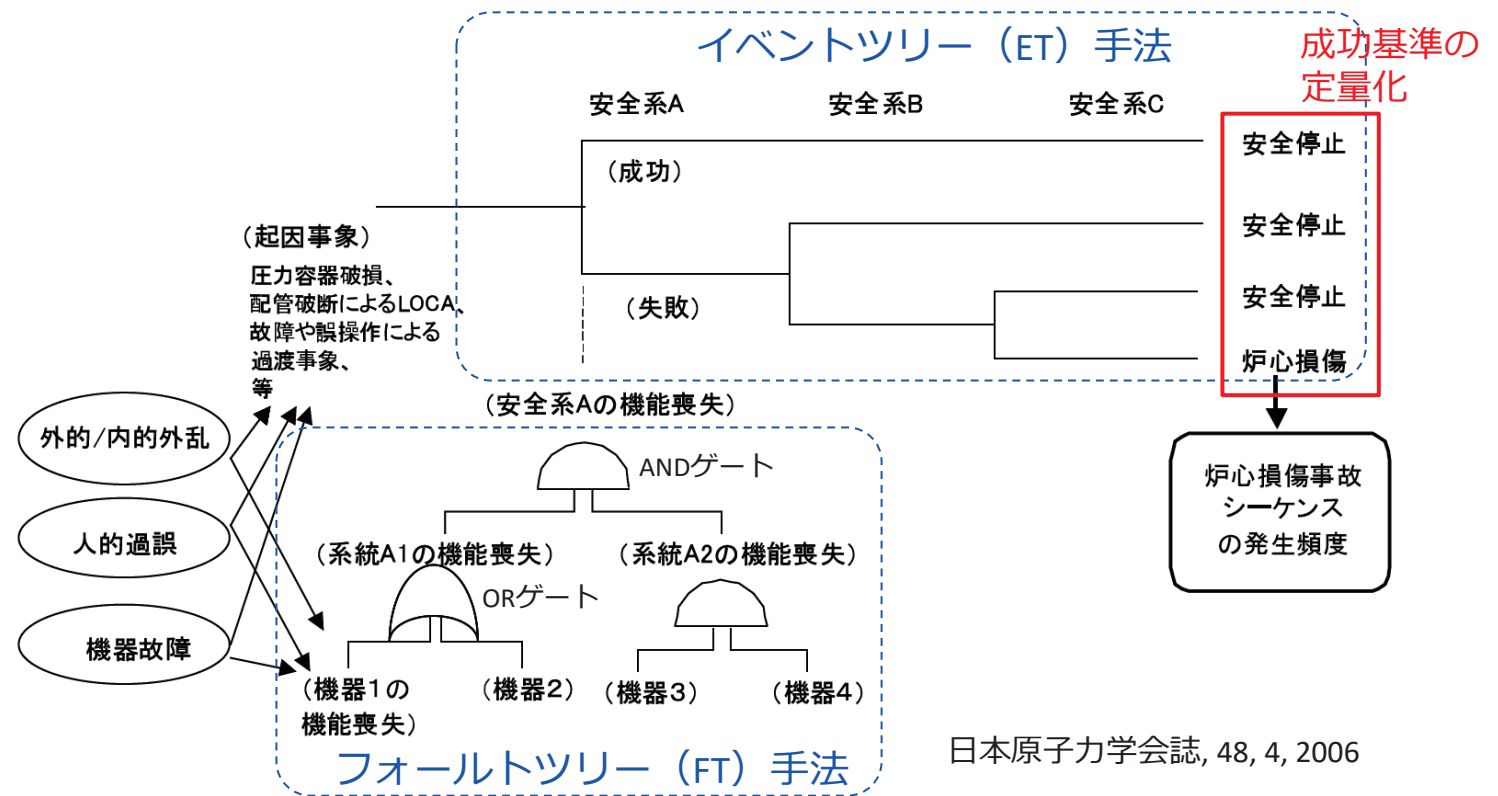
放出頻度

**FP\*放出量**

イメージは大間原子力発電所完成予想図

<https://www.jpower.co.jp/bs/nuclear/>

(赤字がシミュレーション技術を利用)



### シナリオの網羅性

- ✓ ETでは、工学的判断によりその生起順序を決定
  - 場合によっては生起順序が変わりうる
- ✓ シナリオの時間依存（各イベントの発生時刻等）は無視
  - 成功基準を満たさない条件でも、発生時刻次第では成功となる場合もある

### 影響度の網羅性

- ✓ PRAは確率・頻度の評価、各イベントの重要度評価に有効である一方、影響度の定量化は代表シナリオのシミュレーション（時系列は決定論的に与える）のみの評価



シミュレーション技術を更に援用した  
動的リスク評価手法の開発

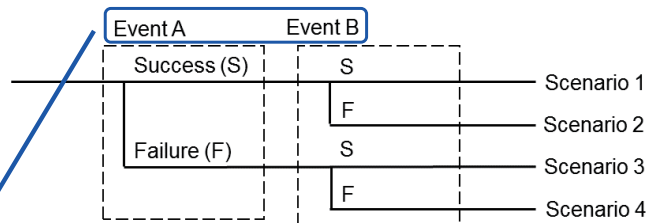
シミュレーション技術を援用した動的リスク評価では、イベントの生起そのものをシミュレーションで再現し、サンプルを統計処理することでリスクを定量化する

- ✓ ADAPT\*<sup>1</sup>, RAPID\*<sup>2</sup> : 多様なシナリオを入力として準備
  - ✓ CMMC\*<sup>3</sup> : シミュレーション内でシナリオを構築
- 等

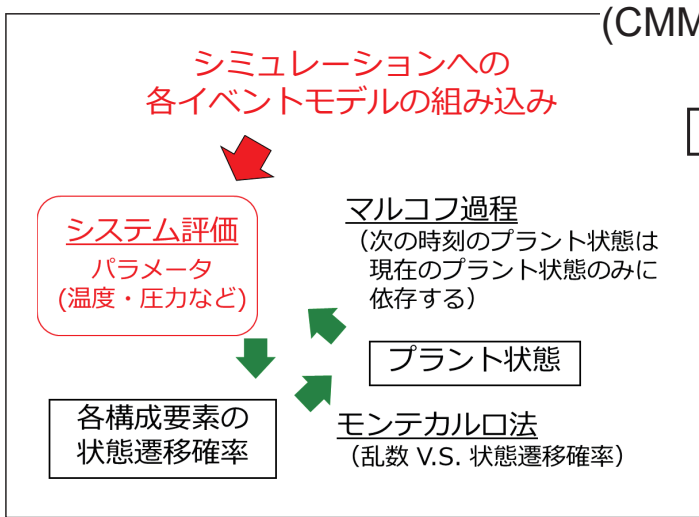
\*1 <https://www.sandia.gov/adapt/>  
 \*2 鄭他, 日本原子力学会2020年秋の大会, 1L02, 2020.  
 \*3 高田他, Journal of Nuclear Science and Technology, 1749-1757, 53, 11, 2016.

## CMMC法概要

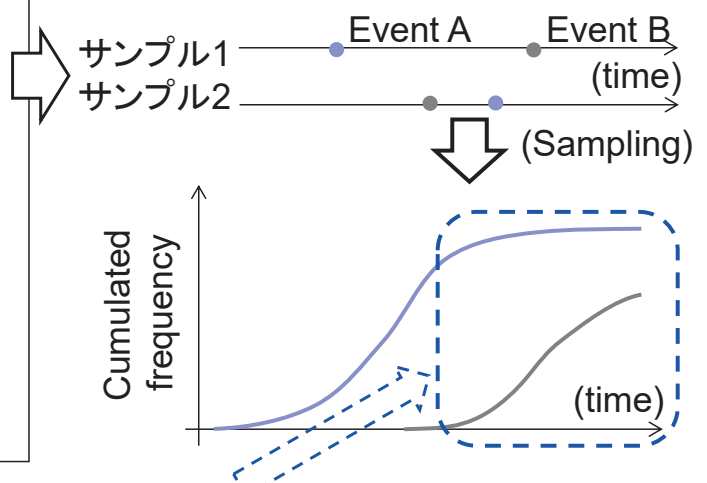
CMMC  
 (Continuous Markov-chain Monte Carlo, 連続マルコフ過程モンテカルロ法)



(ET法)

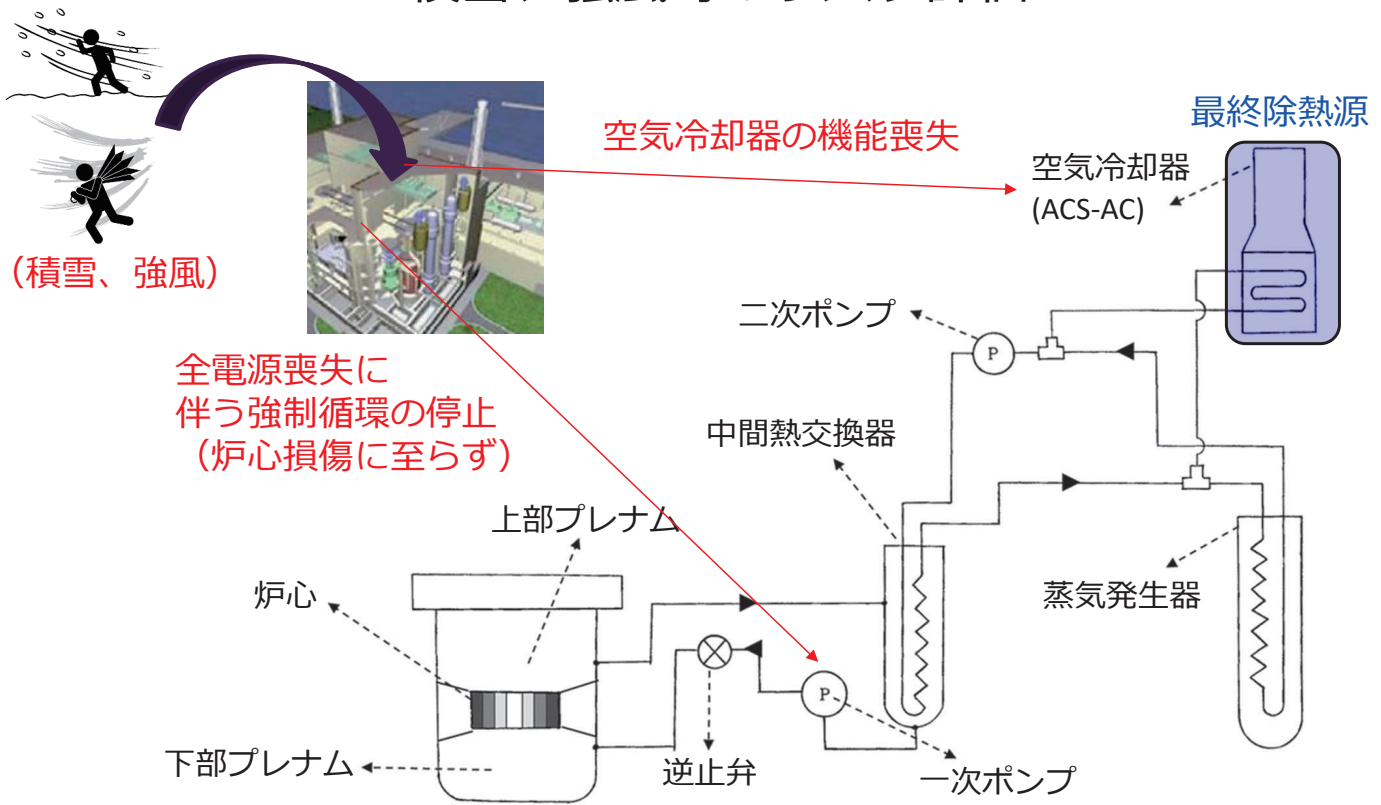


(CMMC法)



統計処理による定量化等

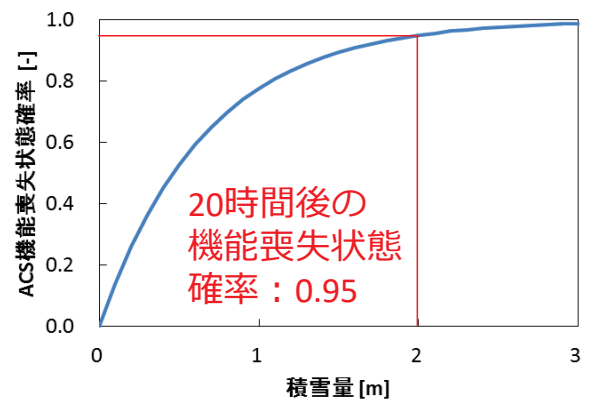
## ナトリウム冷却高速炉（ループ型3系統）における積雪、強風時のリスク評価



## 積雪時のリスク評価

### ➤ 事象進展

- ✓ 積雪に伴う全電源喪失  
(炉心停止に成功、以降自然循環による除熱)
- ✓ 積雪速度10cm/h
- ✓ 積雪に伴う空気冷却器機能喪失  
(3ループ独立)
- ✓ 除雪 (8時間おき)  
成功確率：0.5/demand  
除雪成功時は積雪量0m



空気冷却器機能喪失状態確率

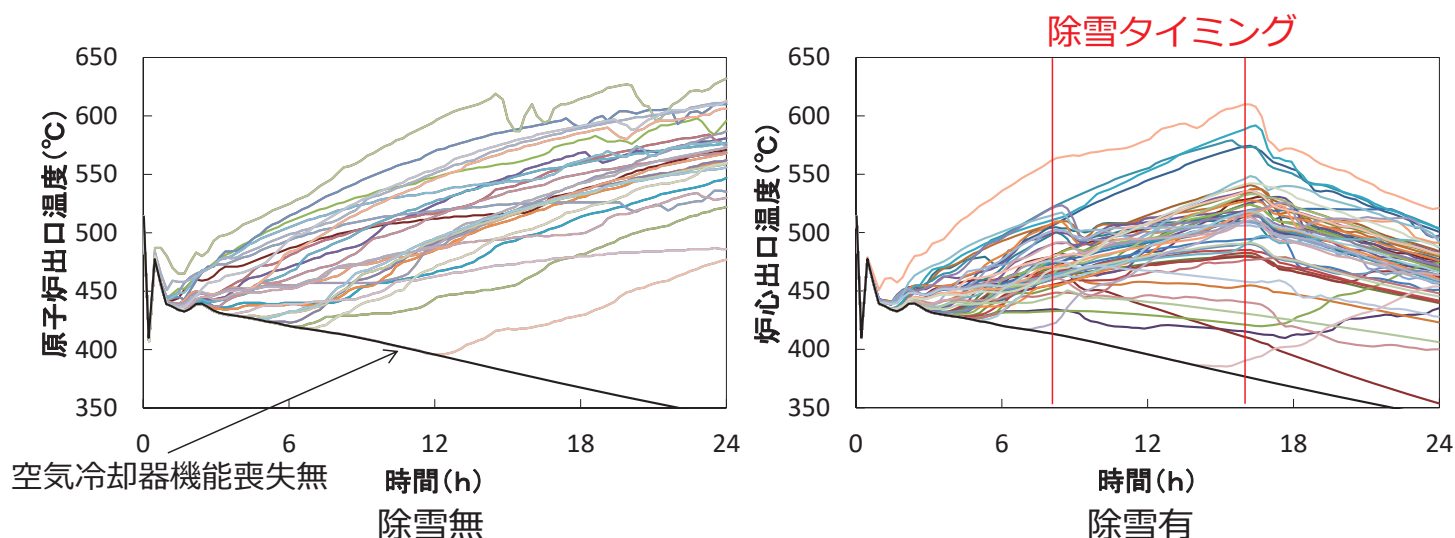
### ➤ 計算条件

- ✓ 事象発生後24hrの評価
- ✓ サンプル数100

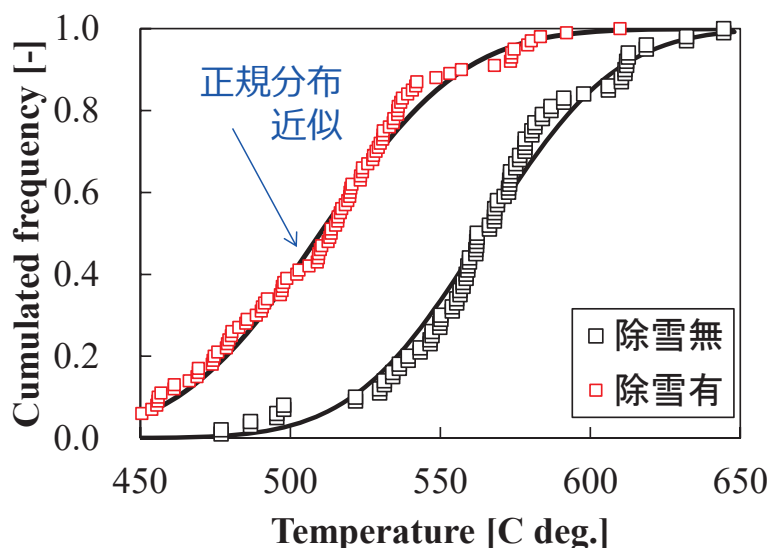
起回事象 (積雪による <u>空気冷却器機能喪失</u> +全電源喪失)	除雪失敗 (1回目)	除雪失敗 (2回目)
--	---------------	---------------

0.5	成功	0.50
0.5	成功	0.25
	失敗	0.25

対応するET



- ✓ 除雪によるプラント状態 (炉心出口温度) の定量化が可能
- ✓ 除雪 (アクシデントマネジメント) タイミングの最適化検討が可能



	平均値 [°C]	標準偏差 [°C]	到達時間平均 [hr]
除雪無	564.6	34.5	23.8
除雪有	510.0	37.4	15.1

(除雪の影響)

冷却材配管の設計制限温度を650°Cとした場合、今回のサンプルでは、損傷に至らなかった



正規分布近似から推定

✓ 24hrでの（条件付）損傷確率

除雪無： $6.6 \times 10^{-3}$ 、除雪有： $9.0 \times 10^{-5}$

⇒ 24hrではほとんど損傷とはならない（時間猶予大）

除雪が非常に有効（2桁低減、ただし数値的な意味は要注意）

✓ 統計的安全評価の適用（シミュレーション技術）

（片側95%信頼区間）

除雪無：621.4°C、除雪有：571.5°C

⇒ 合理的な安全性検討が可能（従来のPRAでは評価不可）

15

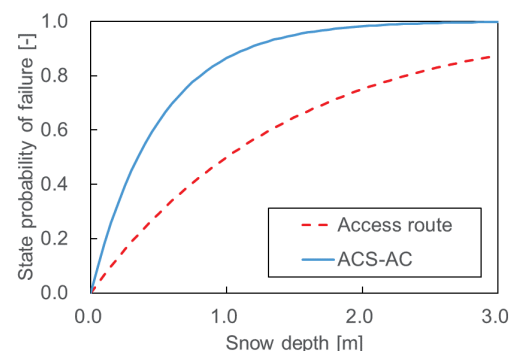
## イベントの追加

✓ 屋上アクセスの失敗（負の効果）

- 降雪により屋上ドアの開閉が不可
- 一度失敗すると以降の除雪が不可

✓ 電気ヒータの導入（正の効果）

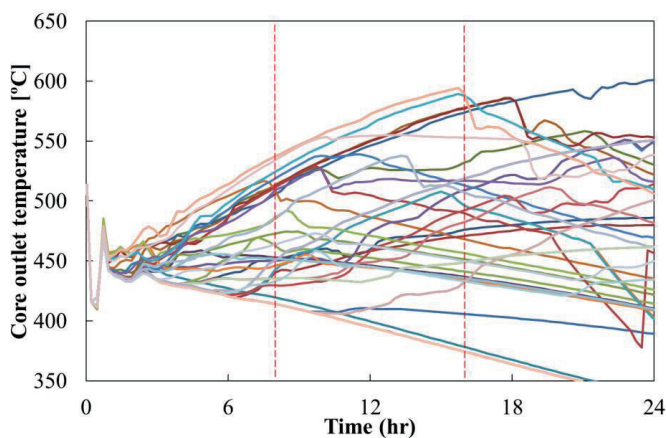
- 各空気冷却器入口に設置（追加のアクシデントマネジメント）
- 起動失敗確率：0.11（電源確保失敗も含む）
- 屋上アクセスに失敗した場合、一度だけ起動
- 起動成功の場合、全ての空気冷却器は機能回復（以降、解析終了時まで継続的に有効）



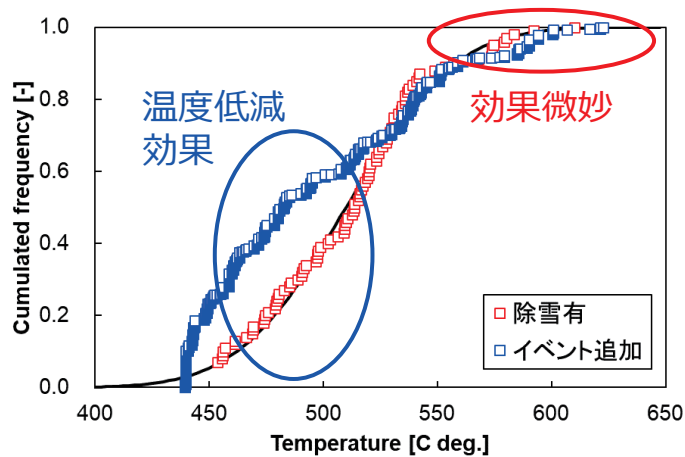
アクセス失敗状態確率

✓ サンプル数：1000

16



炉心出口温度 (50サンプル)

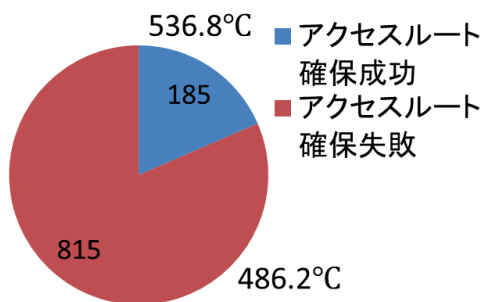


最高温度累積分布

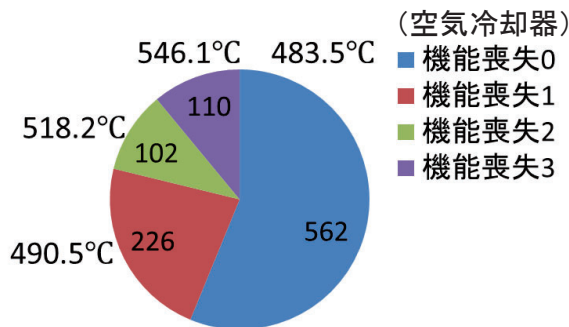
	平均値 [°C]	標準偏差 [°C]	到達時間 平均 [hr]
除雪有	510.0	37.4	15.1
イベント追加	444.0	88.9	11.7

✓ イベント増加に伴い、複雑な挙動

## シナリオ分析



アクセスルート失敗時はヒータが作動するため炉心出口温度が低い



炉心出口温度と空気冷却器は良い相関

(Worstシナリオ)

No.	最高温度(平均)	発生割合	状況
1	600.8°C	0.013	アクセスルート確保失敗、ヒータ喪失2系統 (初期除雪失敗によるACS機能喪失)
2	589.0°C	0.003	アクセスルート確保成功、ACS2系統除雪失敗
3	585.6°C	0.013	アクセスルート確保失敗、ヒータ喪失1系統 (初期除雪失敗によるACS機能喪失)

✓ 動的リスク評価は情報量が多く、効果的な分析が重要

## ➤ 事象進展

\* Saffir-Simpson hurricane wind scale

- ✓ 強風 (SSHS 5\*, 70m/s以上) 発生  
(外部電源喪失、非常用発電機(DG)作動  
緊急停止成功)

強風継続時間：12hr

- ✓ 非常用発電機燃料タンク破損に伴う非常用DGの機能喪失

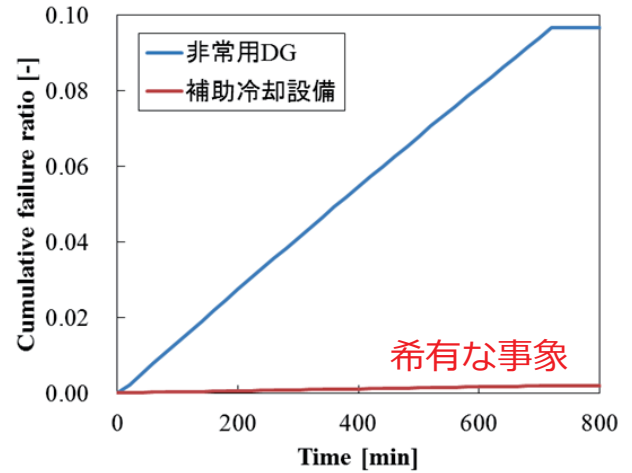
- ✓ タンク破損時の火災発生

火災発生確率：0.5

(PRAでは火災発生で空気冷却器の機能喪失を過程しているが、ここでは空気温度上昇(+100°C)に伴う機能劣化を再現)

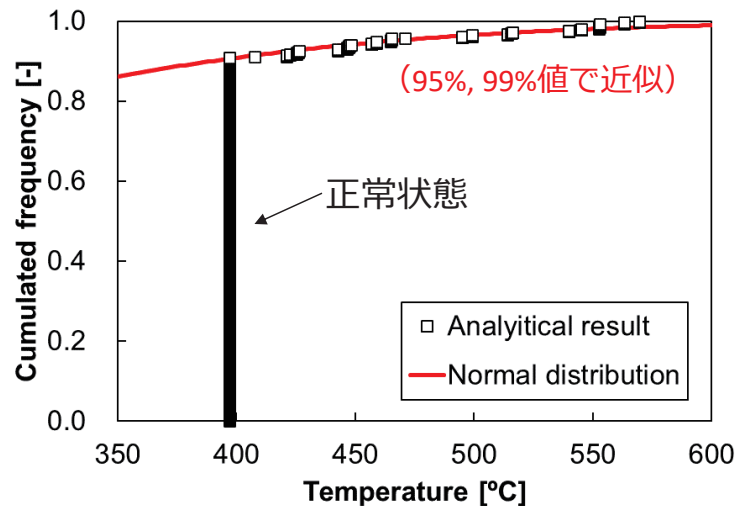
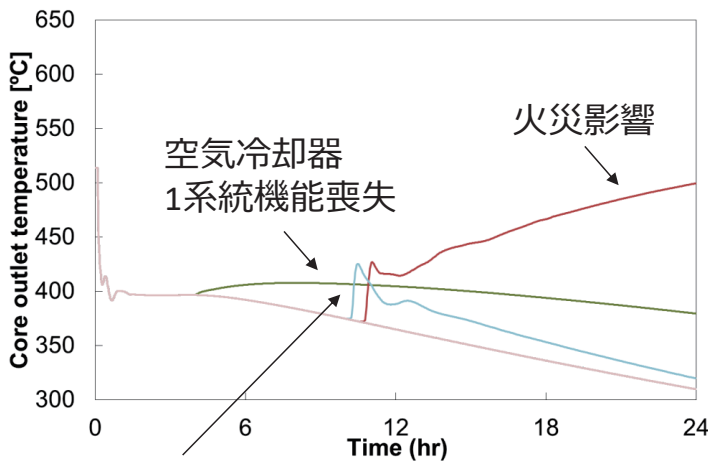
- ✓ 補助冷却設備の破損による空気冷却器の機能喪失

(サンプル数：1000)



## 炉心出口温度、最高温度累積分布

(100サンプル)



- ✓ ほとんどが何も起きない  
(空気冷却器3系統機能喪失確率： $6.86 \times 10^{-9}$ )

No.	Pump trip	ACS-AC			Fire	Counts [-]	Fraction [-]	Av. Temp. [°C]	Category		
		A	B	C							
1	0	0	0	0	0	905	0.905	397.1	Normal operation		
2	0	0	0	1	0				No pump trip	No fire	One ACS-AC failure
3	0	0	1	0	0	4	0.004	397.1			
4	0	1	0	0	0	1	0.001	407.6			
5	0	0	1	1	0						
6	0	1	0	1	0						
7	0	1	1	0	0						
8	0	1	1	1	0						
9	1	0	0	0	0	47	0.047	444.5			
10	1	0	0	1	0						
11	1	0	1	0	0						
12	1	1	0	0	0						
13	1	0	1	1	0						
14	1	1	0	1	0						
15	1	1	1	0	0						
16	1	1	1	1	0						
17	1	0	0	0	1	43	0.043	536.8	Tank fire	No ACS-AC failure	
18	1	0	0	1	1						
19	1	0	1	0	1						
20	1	1	0	0	1						
21	1	0	1	1	1						
22	1	1	0	1	1						
23	1	1	1	0	1						
24	1	1	1	1	1						

動的リスク評価において希有な事象は大きな課題

## 希有な事象への対応

### ✓ サンプル数の増加

課題：計算負荷（シミュレーション数）の増大

⇒ より単純な代替モデル（サロゲートモデル）および機械学習を用い、効率的な計算を実施\*

希有な事象では基本的な解決にはならない...

\* Zheng X.他, Reliability Engineering & System Safety, 223, 2022/7.

### ✓ 重点サンプリングによるサンプル数低減

発生確率の変更と、重み付けの適用

- i番目のシナリオの発生確率

$$P_i = \prod_{j \in \text{failure}} Pf_{i,j} \times \prod_{j \in \text{success}} (1 - Pf_{i,j})$$

- 確率変更後の発生確率

$$P_i^* = \prod_{j \in \text{failure}} Pf_{i,j}^* \times \prod_{j \in \text{success}} (1 - Pf_{i,j}^*)$$



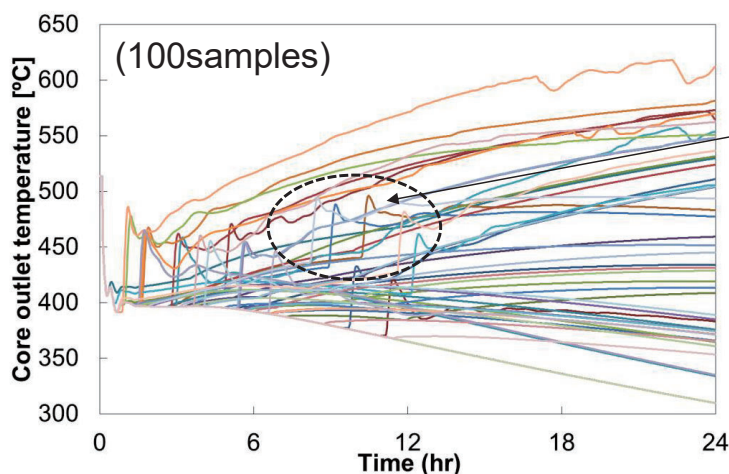
- 重み関数

$$\omega_i = \frac{P_i}{P_i^*} = \prod_{j \in \text{failure}} \frac{Pf_{i,j}}{Pf_{i,j}^*} \times \prod_{j \in \text{success}} \frac{(1 - Pf_{i,j})}{(1 - Pf_{i,j}^*)}$$

$Pf$  : 失敗確率  
 $j$  : イベント

イベントの均一な発生を考慮すると確率は0.5が望ましい

	非常用DG 機能喪失 $Pf_{\text{pump}}$	空気冷却器 機能喪失 $Pf_{\text{ACS}}$	備考
Original	0.0966	0.0019	(確率最大値)
Modified	0.483	0.475	$Pf_{\text{pump}} \times 5, Pf_{\text{ACS}} \times 250$



空気冷却器の方が先に機能喪失  
(工学的判断とは逆のケース)

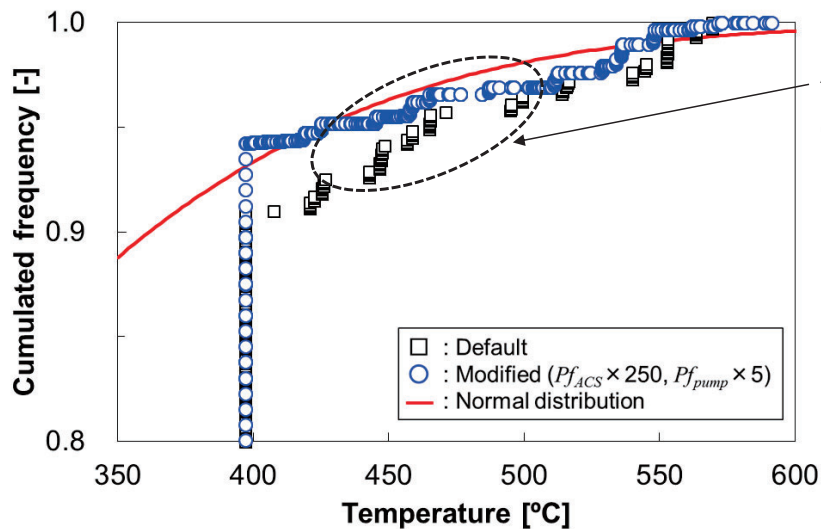
炉心出口温度

## シナリオ網羅性

No.	Pump trip	ACS-AC			Fire	Counts [-]		Fraction* [-]		Av. Temp. [°C]		* 重み関数で補正済 Category		
		A	B	C		Original	Modified	Original	Modified	Original	Modified			
1	0	0	0	0	0	905	126	0.905	0.941	397.1	397.1	Normal operation		
2	0	0	0	1	0		62		9.74E-04		401.8	No pump trip	No fire	One ACS-AC failure
3	0	0	1	0	0	4	69	0.004	0.001	397.1	402.2			Two ACS-ACs failure
4	0	1	0	0	0	1	90	0.001	0.001	407.6	403.9			
5	0	0	1	1	0		66		2.18E-06		440.8			
6	0	1	0	1	0		86		2.84E-06		424.9			
7	0	1	1	0	0		28		9.25E-07		436.9			
8	0	1	1	1	0		67		4.66E-09		516.3			All ACS-ACs failure
9	1	0	0	0	0	47	25	0.047	0.021	444.5	444.2			Pump trip
10	1	0	0	1	0		18		3.24E-05		443.0			
11	1	0	1	0	0		44		7.91E-05		456.9	One ACS-AC failure		
12	1	1	0	0	0		36		6.47E-05		448.6			
13	1	0	1	1	0		26		9.83E-08		495.9			
14	1	1	0	1	0		32		1.21E-07		471.4	Two ACS-ACs failure		
15	1	1	1	0	0		8		3.03E-08		489.6			
16	1	1	1	1	0		25		1.99E-10		556.7	All ACS-ACs failure		
17	1	0	0	0	1	43	40	0.043	0.034	536.8	530.6	Tank fire	No ACS-AC failure	
18	1	0	0	1	1		24		4.31E-05		523.7			
19	1	0	1	0	1		20		3.60E-05		529.2		One ACS-AC failure	
20	1	1	0	0	1		36		6.47E-05		540.7			
21	1	0	1	1	1		16		6.05E-08		563.9			
22	1	1	0	1	1		24		9.08E-08		539.6		Two ACS-ACs failure	
23	1	1	1	0	1		12		4.54E-08		544.4			
24	1	1	1	1	1		20		1.59E-10		563.0		All ACS-ACs failure	

空気冷却器3系統同時機能喪失確率 :

$5.02 \times 10^{-9}$  (計算) ,  $6.89 \times 10^{-9}$  (理論)



- ✓ (条件付) 損傷確率 (最高温度650°C以上) :  $1.66 \times 10^{-3}$   
正規分布近似 (95%と99%値より近似 : 目的に応じた近似が重要)
- ✓ 重み付けによりサンプル数の低減は可能  
評価精度については考察が必要  
ただし、イベント数増加時 → サンプル数増加  
⇒ 計算効率との組合せが重要

25

動的リスク評価では、シミュレーション技術の利用により、多岐にわたる情報が提供される

⇒ 効果的に活用可能な形での情報整理が重要

➤ 動的リスク評価における重要度指標の整理

PRA :

- Fussel-Vesely(FV)重要度 (リスク改善効果に関する重要度)
- リスク増加価値\* (リスク増加要因に関する重要度)

シミュレーション :

\* Risk Achievement Worth, RAW

- 相関比 (不確かさへの支配要因に関する重要度)

動的リスク評価では、同時に上記の評価が可能であり、これらを統一的に扱える重要度の構築\*\*が重要

\*\* 例えば、成川他, 原学会2023年秋の大会, 1N14, 2023.

26

シミュレーション技術のリスク評価への適用として、  
動的リスク評価手法について概説した



本技術は、シミュレーションと確率論的評価が  
可能な全ての産業への展開が可能



よりリスクの本質を見据えた、合理的な  
安全性向上に資することが期待

ご静聴、ありがとうございました

アドバンスソフト  
からの情報提供

1. 今後のセミナー予定
2. セミナー資料のダウンロード
3. アーカイブ動画のご案内

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

## 今後のセミナー予定

第6回

2024年9月20日（金）  
14：00～15：30

**「ポスト・エクス、  
ポストムーア時代の HPC と AI」**  
神戸大学 大学院理学研究科 惑星学専攻  
特命教授 牧野 淳一郎 様

**受付中**

第7回

2024年10月11日（金）  
14：00～15：30

**「建築・都市の新たな風環境デザイン」**

千葉工業大学 創造工学部 建築学科  
元教授 森川 泰成 様

**受付中**

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

下記のURLから、過去のセミナー資料をダウンロード可能です。  
<https://www.advancesoft.jp/download/>



### シミュレーション図書館 (資料ダウンロード) について

- 初めてご利用いただくお客さまは、「新規メンバー登録 (フォーラム会員登録)」をお願いいたします。ご登録いただきますと、いただいたメールアドレスあてにダウンロード用のログインパスワードをお知らせいたします。
- ログインパスワードをお持ちのお客さまは、お客さまのご登録されたメールアドレスと、こちらからお知らせしましたパスワードで、ログインしてください。ログイン中ほどの資料もダウンロードいただけます。
- 会社案内、会社概要、開発実績は、ログイン不要でダウンロードいただけます。
- ご登録いただいたメールアドレスあてに、メールマガジンやアドバンスソフトからのご案内をお送りさせていただきます場合がございますので、ご了承ください。
- 資料に含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。

### 資料カテゴリー一覧

パッケージソフトウェア▷ ナノ・バイオ 半導体 流体 管路系 二相流 防災 構造 統合環境  
 解析・コンサルティング▷ 防災・地震 二相流 2次電池 その他



### 半導体

【半導体】> セミナー資料 (アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介 ~DX、グリーンイノベーションを加速する数値解析シミュレーション~) 20221117\_all 【全体】

カテゴリー: [半導体](#) [パッケージソフトウェア](#)

【半導体】> セミナー資料 (半導体デバイス3次元TCADシステム Advance/TCAD 最新動向セミナー) 20181225\_all 【全体】

カテゴリー: [半導体](#) [パッケージソフトウェア](#)

【半導体】> セミナー資料 (半導体デバイス3次元TCADシステム Advance/TCAD 製品紹介セミナー) 20190828\_all 【全体】

カテゴリー: [半導体](#) [パッケージソフトウェア](#)

【半導体】 Advance/TCAD > セミナー資料 (オンラインセミナー「アドバンスソフトの電磁波、半導体デバイス解析のご紹介 ~IoTを支える数値解析シミュレーション~」) 20200825\_all 【全体】

カテゴリー: [半導体](#) [パッケージソフトウェア](#)

【半導体】 Advance/TCAD > セミナー資料 (半導体デバイス3次元TCADシステム発売のご紹介セミナー)

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

YouTubeにて、セミナーのアーカイブ動画を配信中  
<https://www.youtube.com/user/advancesoft>



- 1 【セミナー動画】第1回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2024年4月19日 (金) 開催『ロケットと宇宙機に関するいろいろ』 advancesoft • 235 回視聴 • 12日前
- 2 【セミナー動画】第8回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2023年10月6日 (金) 開催『爆轟から見える CAE の方向性』青山... advancesoft • 337 回視聴 • 6か月前
- 3 【セミナー動画】第6回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2023 2023年8月28日 (月) 開催『フェイクニュースと生成 AI』... advancesoft • 601 回視聴 • 8か月前
- 4 【セミナー動画】第5回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2023 2023年8月3日 (木) 開催『原子力安全に必要な計算... advancesoft • 343 回視聴 • 9か月前

- 1 【セミナー動画】 NanoLabo/NeuralMD 新機能および今後の開発計画のご紹介 2023年10月18日 (水) 開催 advancesoft • 231 回視聴 • 6か月前
- 2 【セミナー動画】 生成 AI・大規模言語モデルとCAE セミナー 2023年9月22日 (金) 開催 advancesoft • 953 回視聴 • 7か月前
- 3 【セミナー動画】 NanoLabo/NeuralMD 新機能紹介セミナー 2023年4月20日 (木) 開催 advancesoft • 385 回視聴 • 1年前
- 4 【セミナー動画】 OpenModelica 活用セミナー 2022年11月30日 (水) 開催 advancesoft • 838 回視聴 • 1年前

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.





**警告**

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。  
このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。  
このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。