

原子力プラントの
地震・溢水の複合事象に関する
動的リスク評価

東京大学

張 承賢

Sunghyon Jang

研究背景

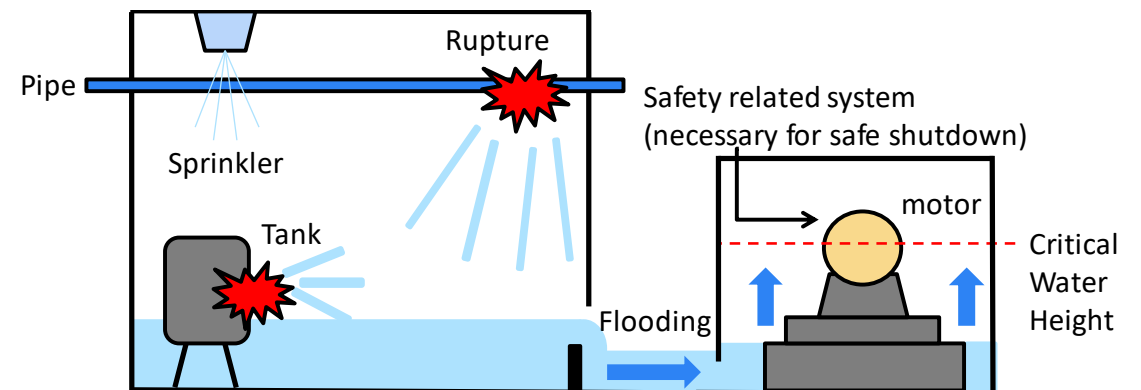
- 地震によって非耐震性配管の破断し、内部溢水により安全上重要な機器が水没する可能性があり、アクシデントマネジメント策の整備が求められる
- 内部溢水シナリオでは、安全上重要な設備の機能喪失確率が水位上昇(時間進展)に伴い変化する

水位上昇等の物理モデルを組み込み、時間進展による水位上昇を考慮した安全上重要設備の機能損傷確率を評価し、事故シナリオを定量化[1,2]

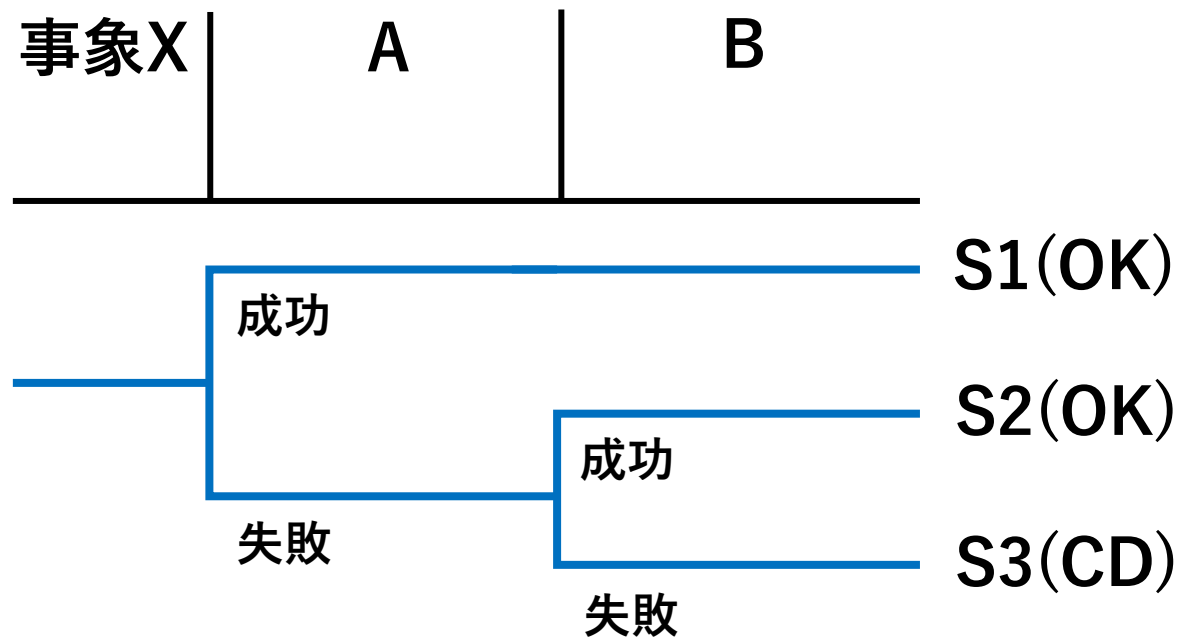
複数の地震動における地震フラジリティ評価に基づく安全上重要設備の機能損傷確率評価

地震・内部溢水の複合シナリオの定量化手法を構築する

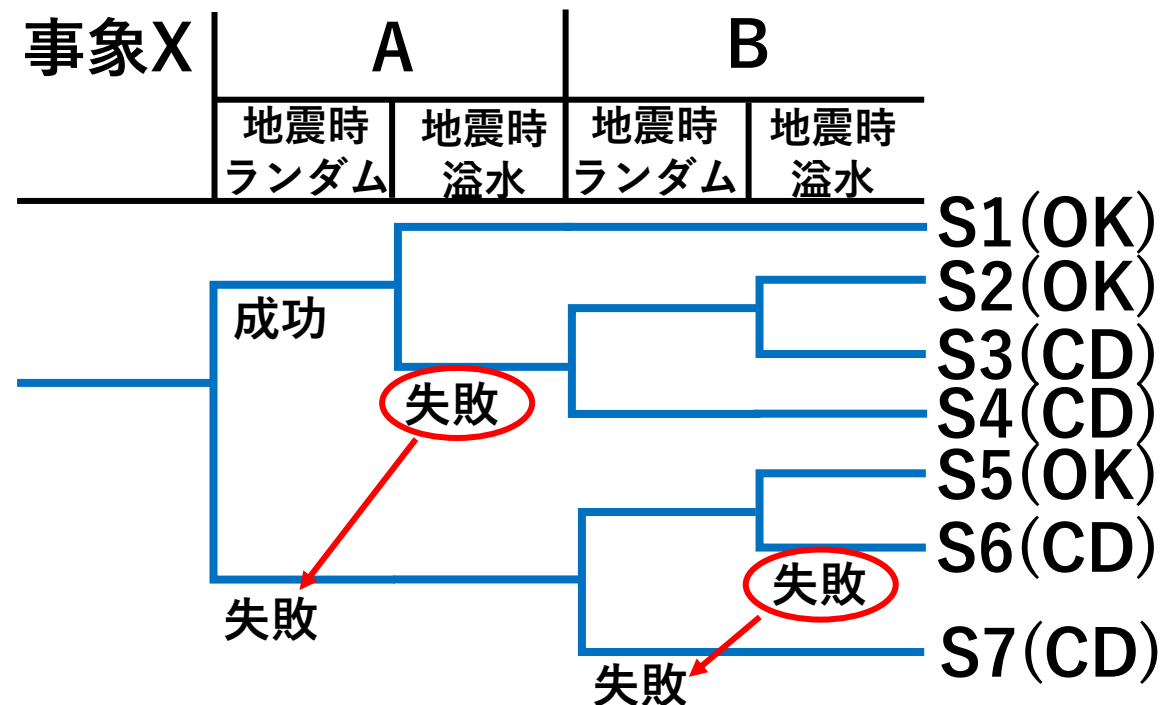
- [1]松田他、N21、原子力学会2014年春の年会
[2]張他、1F13、原子力学会2016年秋の大会



地震PRAにおけるET法



地震起因内部溢水PRAにおけるET法



地震起因溢水現象により成功から失敗への移行を考慮する必要がある
 →ETが複雑になり、膨大な計算が必要

従来の手法による事故シナリオ定量化の限界 2

内部溢水シナリオにおける炉心損傷頻度の算出

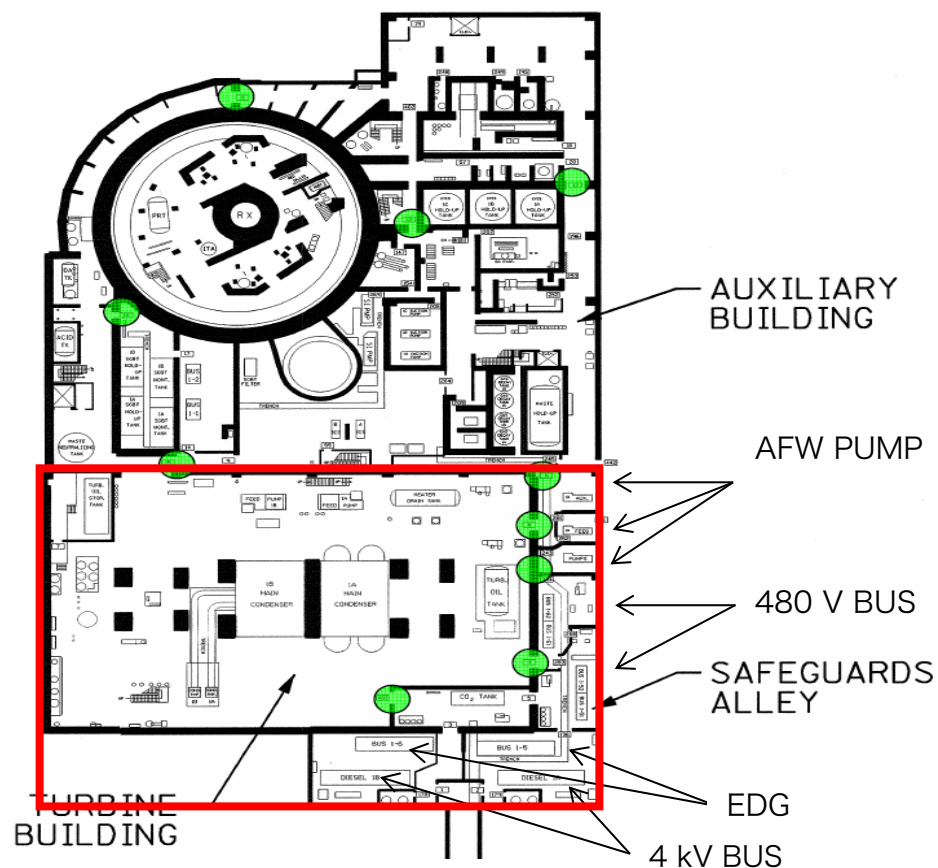
溢水源	溢水源機器の 溢水発生 確率	溢水影響 範囲	影響確率 因子	溢水発生 頻度	条件付き 起因事象 発生確率	条件付き 炉心損傷 確率	シナリオ 炉心損傷 確率
機器 A	R or P_1	B	J_i	W_{ib} $= R \times J_i$ or $P_1 \times J_i$	I_{ib}	S_{ib}	T_{ib} $= W_{ib} \times I_{ib} \times S_{ib}$

R : 溢水源損傷頻度、 P_1 : 内部溢水発生頻度、 J_i : 溢水による周辺機器の機能喪失確率

地震時内部溢水シナリオにおける炉心損傷頻度の算出

溢水源	地震発生 頻度	地震損傷 確率	溢水影響 範囲	影響確率 因子	溢水発生 頻度	条件付き 起因事象 発生確率	条件付き 炉心損傷 確率	シナリオ 炉心損傷 確率
機器 A	ハザード H	フラジリティ f_b	B	J_i	W_{sb} $= H \times f_b \times J_i$	I_{ib}	S_{sb}	T_{sb} $= W_{sb} \times$ $I_{sb} \times S_{sb}$

地震時溢水シナリオとして地震による溢水源機器の同時損傷を考慮する必要がある
 → 時間依存性を考慮したシナリオ定量化が困難



● 止水板

● 溢水区画

米国キウオーニー発電所のタービン建屋 (NRCのレポートを参考*)

● 溢水源

循環水配管1箇所への破損時 $\frac{1}{4}$ の流出量を
平均値とした
正規分布により溢水量に不確かさを与える

● 溢水伝播経路

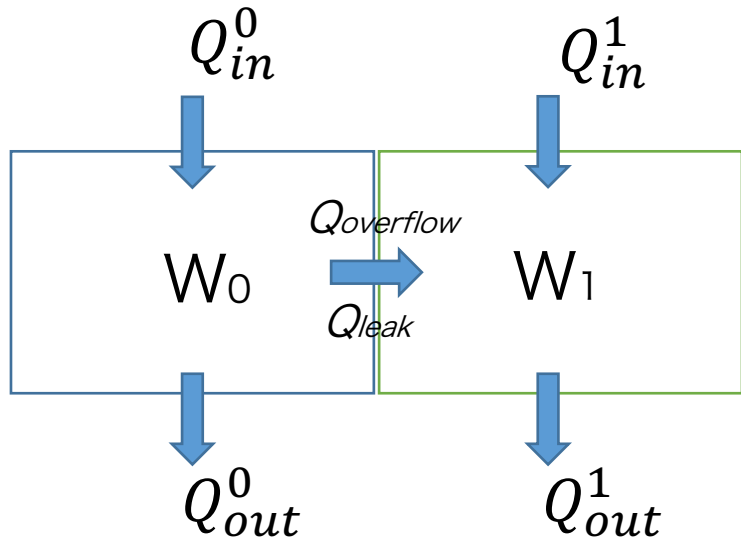
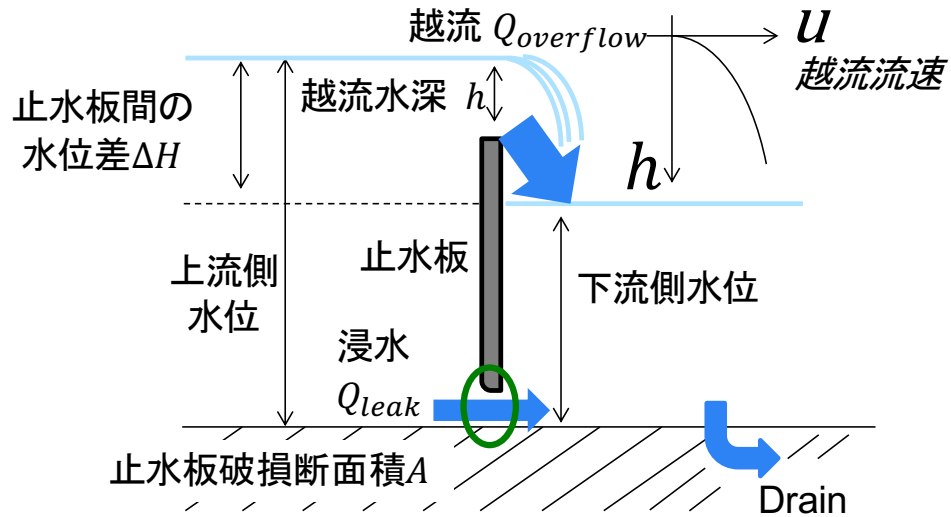
各部屋に設けられた止水板の破損
(破損断面積 10cm^2)を仮定する

● 重要緩和設備

補助給水ポンプ (AFW PUMP)
(タービン動 $\times 1$ 、モーター動 $\times 2$)
非常用ディーゼル発電機 (EDG) $\times 2$

*Dominion report on internal flooding risk reduction activities at Kewaunee power station, November 30, 2006

*NRC, NRC INSPECTION REPORT 05000305/2005011(DRP) PRELIMINARY GREATER THAN GREEN FINDING
KEWAUNEE POWER STATION, 2005



● 流量計算

各部屋の水位差を用いて
越流、浸水現象をモデル化する

$$\text{越流 } Q_{overflow} = \frac{2}{3} \times W \times \sqrt{2g} \times h^{3/2}$$

$$\text{浸水 } Q_{leak} = c \times A \times \sqrt{2g\Delta H}$$

(W : 水路幅, c : 流量係数, g : 重力加速度)

● 水位計算

各部屋における水の質量収支を基に計算

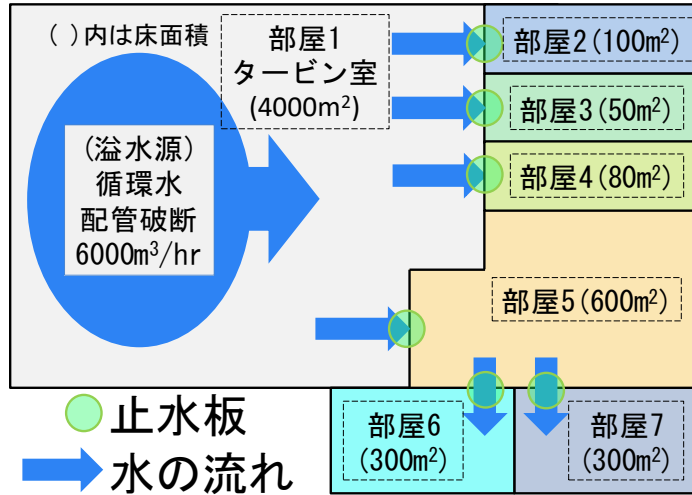
$$\frac{\partial W_0}{\partial t} = Q_{in}^0 - Q_{overflow} - Q_{leak} - Q_{out}^0$$

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = Q_{in}^1 + Q_{overflow} + Q_{leak} - Q_{out}^1$$

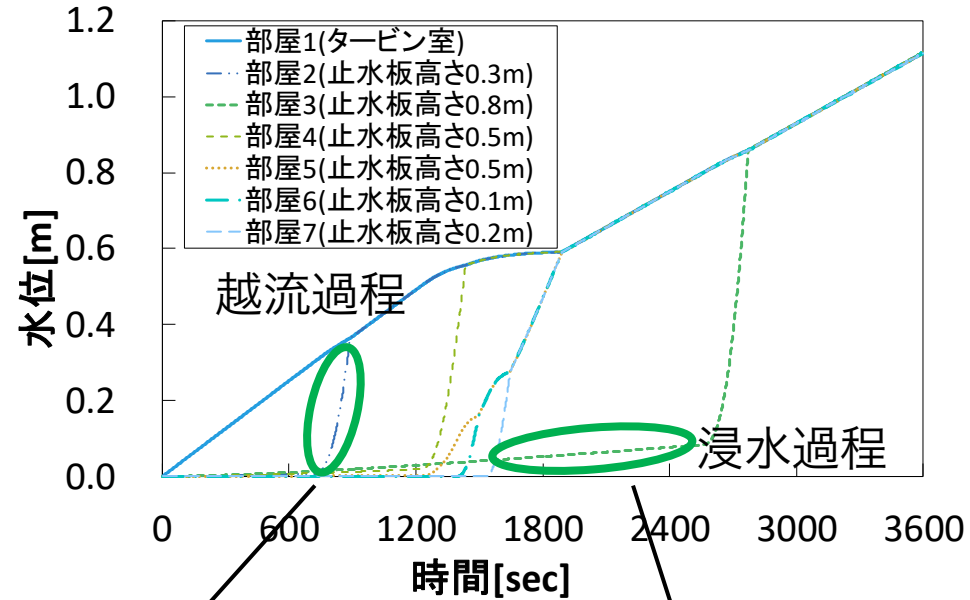
各部屋における水の質量を各部屋の断面積で除する

流量計算の解析結果

標準体系での各部屋の水位の時刻歴変化



止水板高さ [m]	
部屋1 ⇒ 部屋2	0.3
部屋1 ⇒ 部屋3	0.8
部屋1 ⇒ 部屋4	0.5
部屋1 ⇒ 部屋5	0.5
部屋5 ⇒ 部屋6	0.1
部屋5 ⇒ 部屋7	0.2



越流による水位上昇

浸水による水位上昇

止水板の高さに応じた順序で

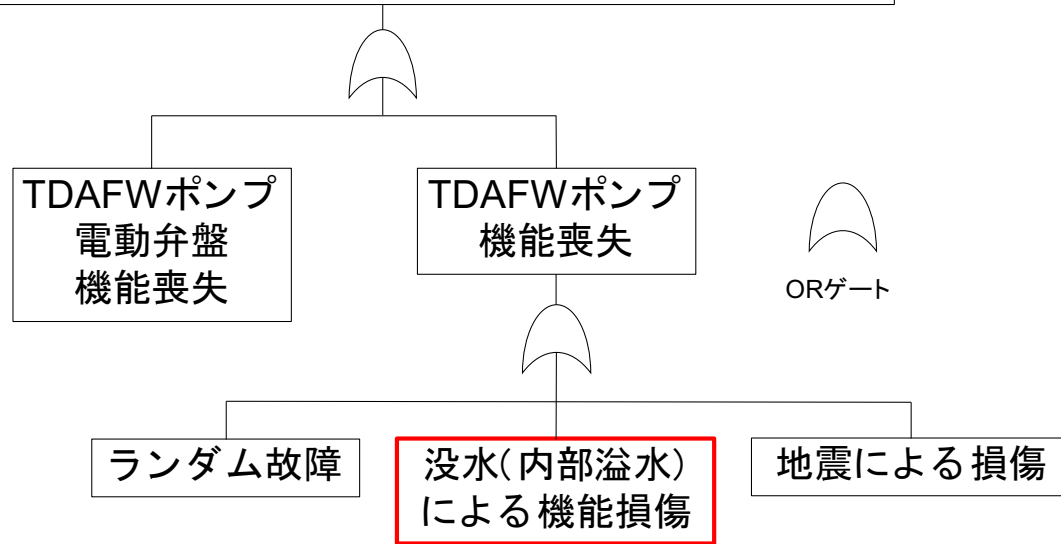
流量計算により複数の部屋への水の伝播を解析することができる

※止水板破損面積 10cm², 解析時間3600sec

フォールトツリー解析

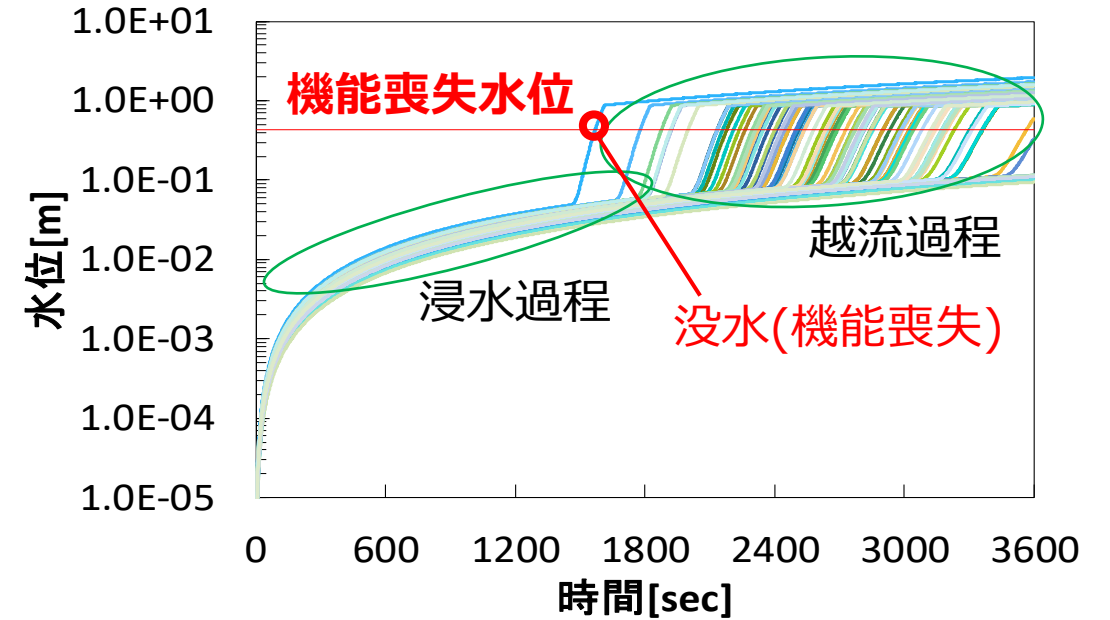
没水、地震による損傷とランダム故障を想定する

タービン動補助給水(TDAFW)ポンプによる補助給水失敗



没水までは地震損傷確率とランダム故障率を考慮する

没水後は、機能喪失確率は"1"とする

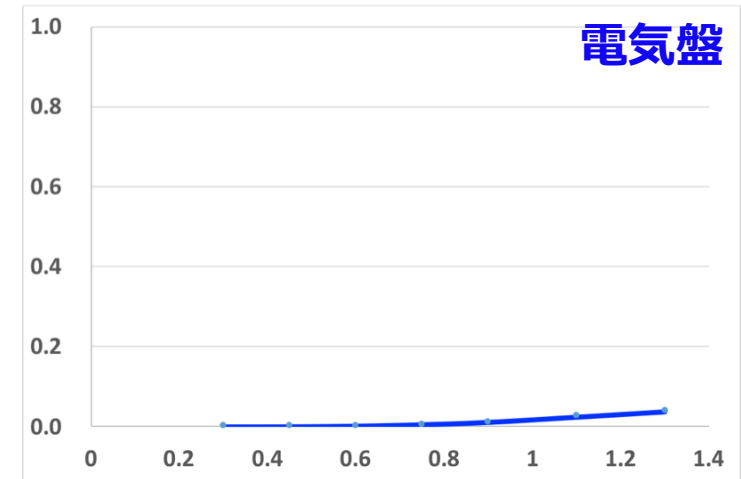
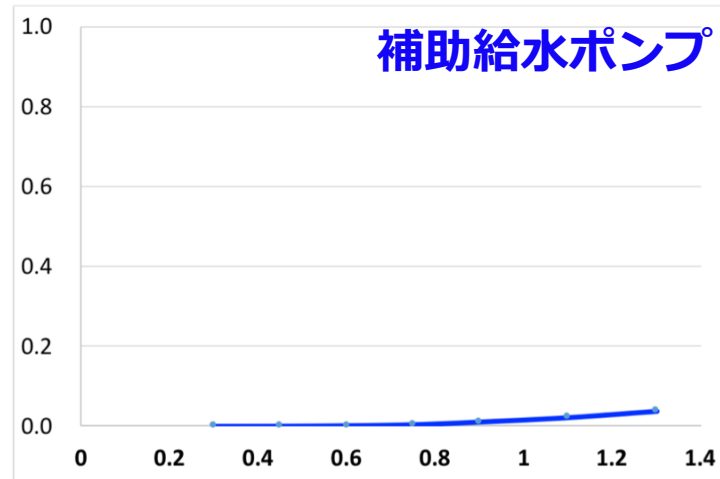
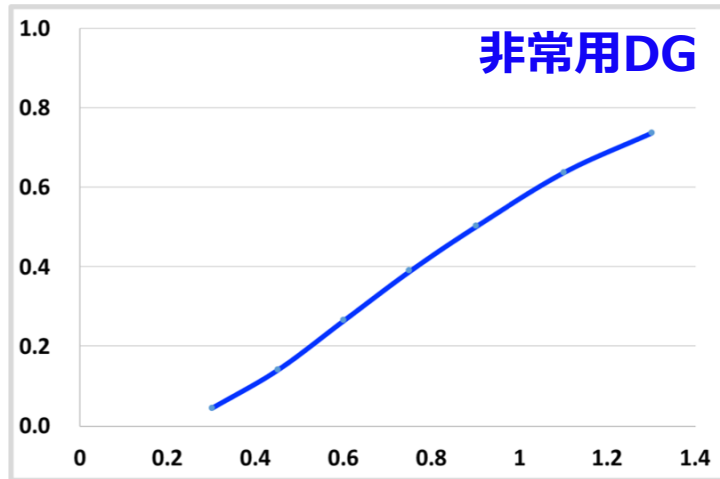
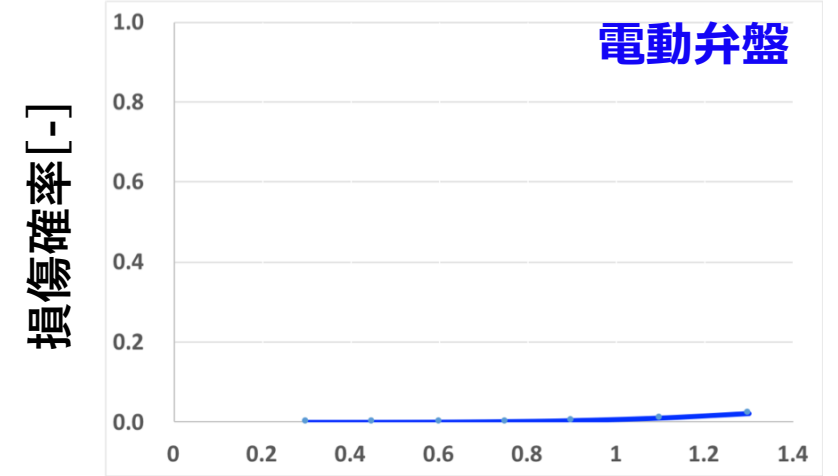


機能喪失水位[m]	
MDAFW	0.33
TDAFW	0.45
電動弁盤(EOV)	0.10
EDG	0.23
電気盤(ELE)	0.10

現実的な応力及び現実的な耐力を用いたフラジリティ評価*

$$F(\alpha) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\ln(Sm) - \ln(Rm(\alpha))}{2\sqrt{\beta_S^2 + \beta_R(\alpha)^2}}\right)$$

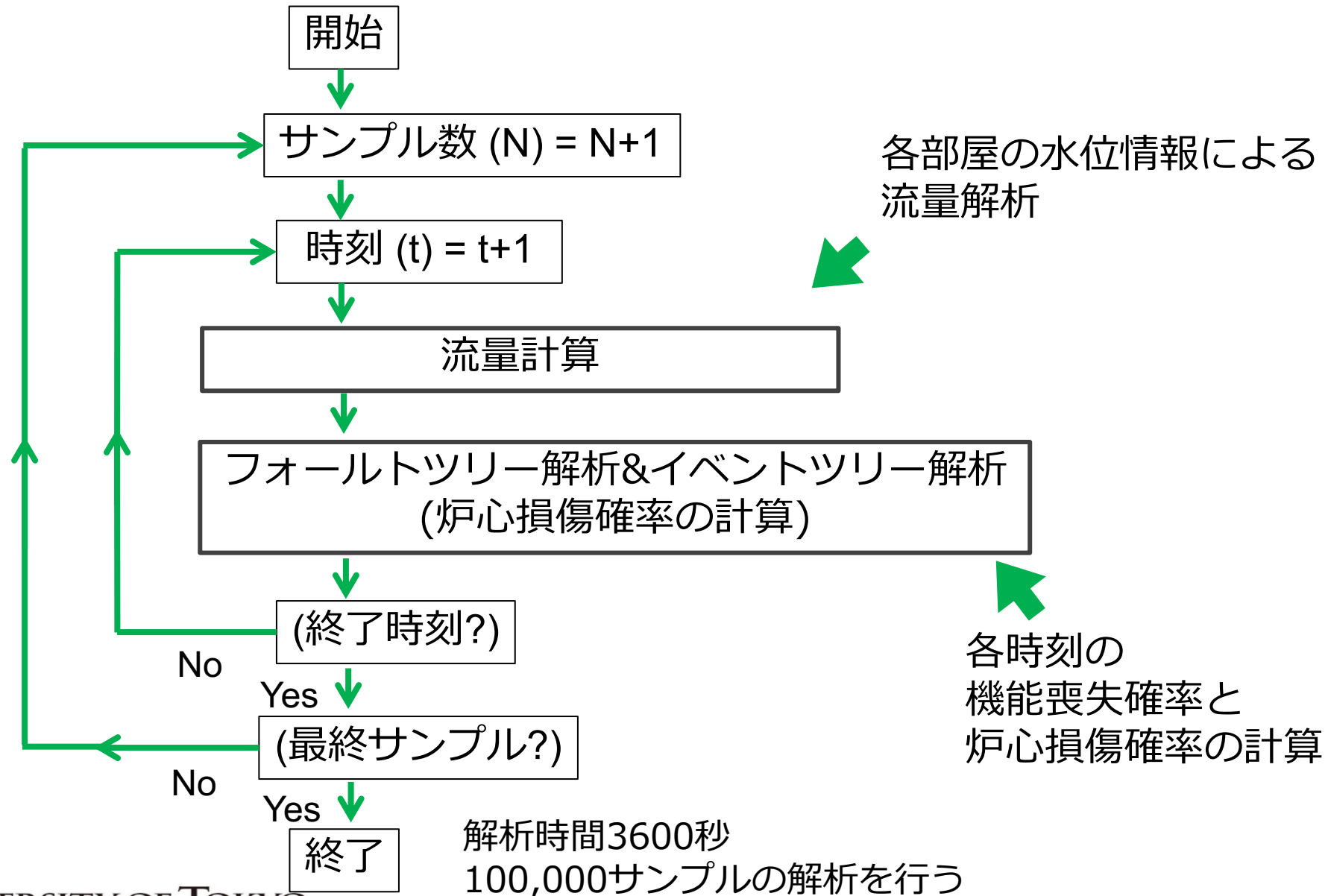
$F(\alpha)$:地震動強さ α のときの損傷確率、 α :地震動強さ、
 Sm :現実的な耐力の中央値、 β_S :現実的な耐力の対数標準偏差、
 $Rm(\alpha)$:地震動強さ α のときの現時的な応答の中央値
 $\beta_R(\alpha)$:地震動強さ α のときの現時的な応答の対数標準偏差



地震動強さ [G]

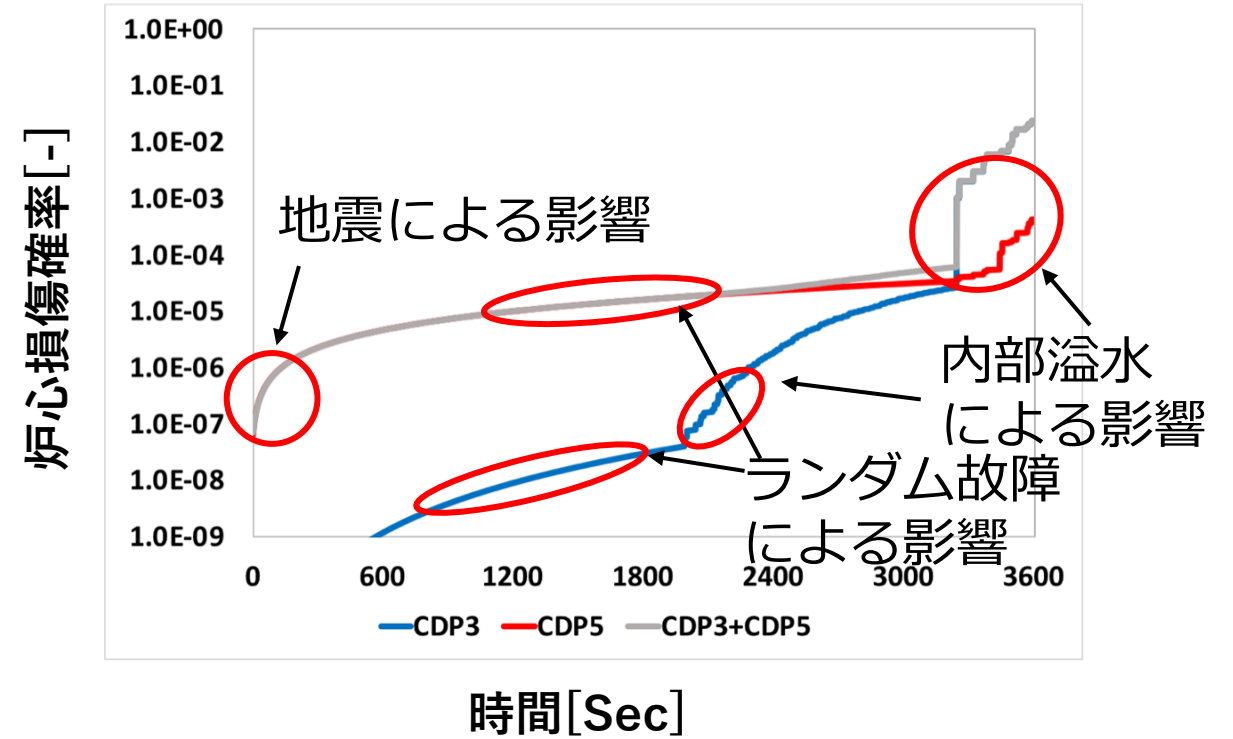
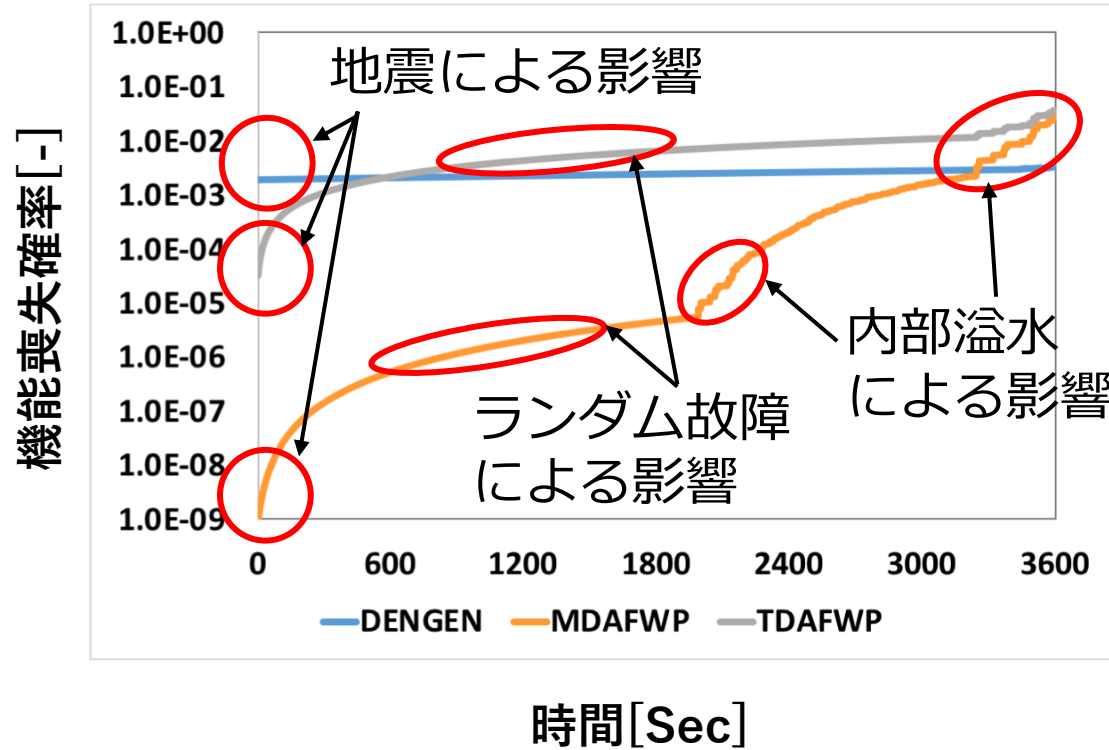
損傷確率 [-]





安全設備機能喪失確率と炉心損傷確率の時間推移

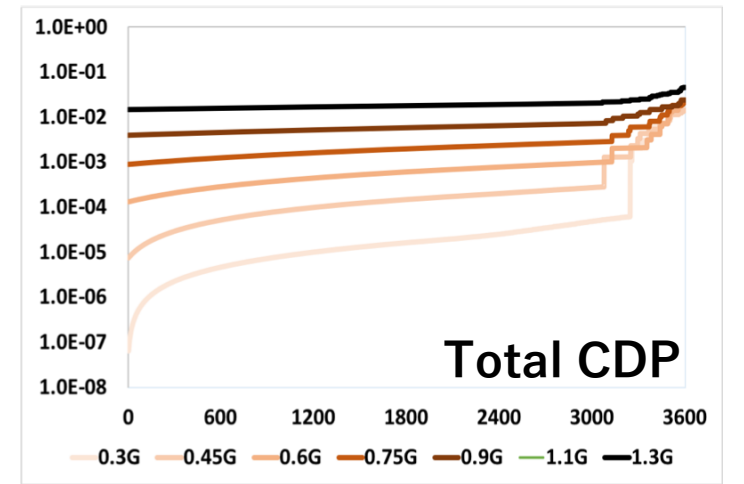
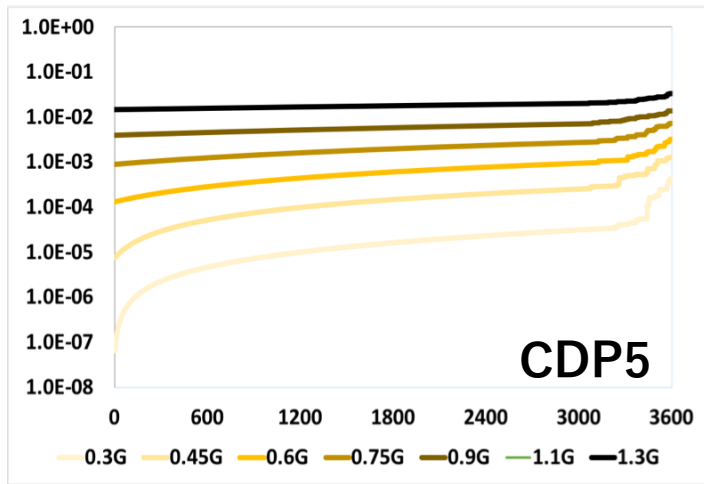
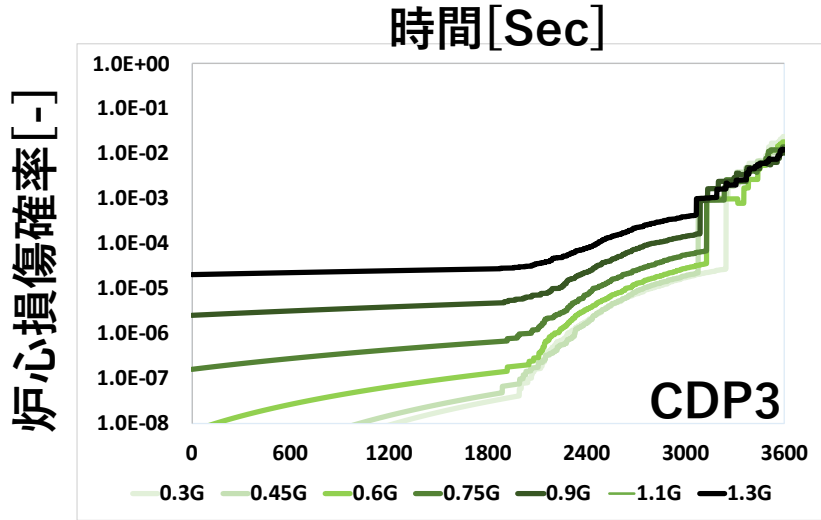
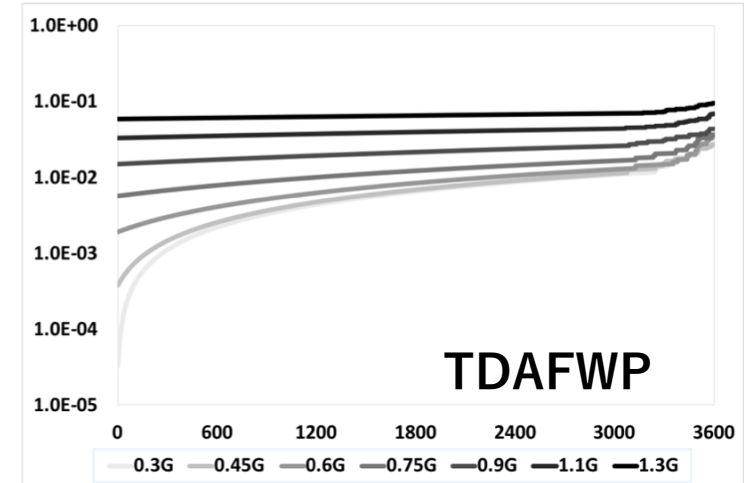
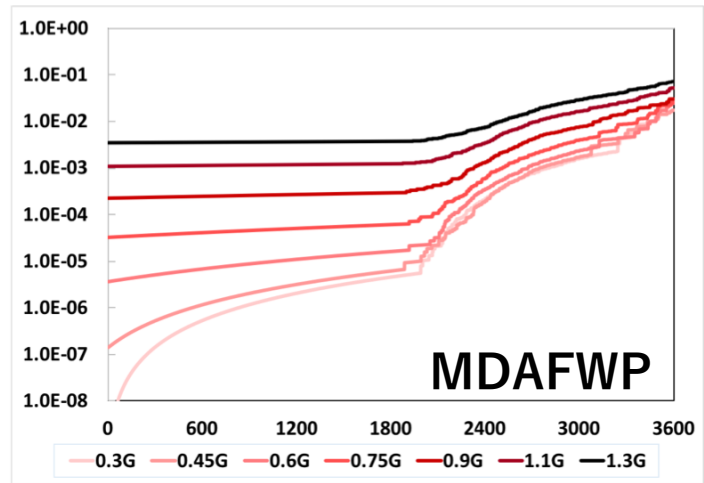
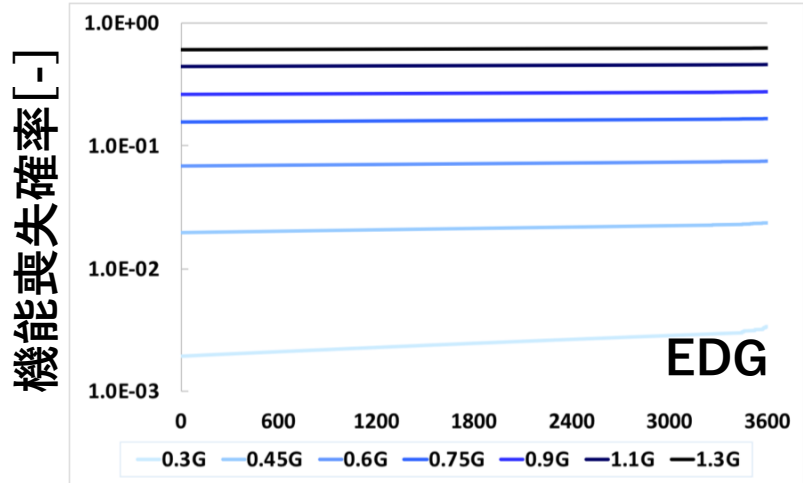
(地震動レベル0.3G)



CDP3: EDG○、TDAFWP×、MDAFWP×
 CDP5: EDG×、TDAFWP×

安全設備機能喪失確率と炉心損傷確率の時間推移

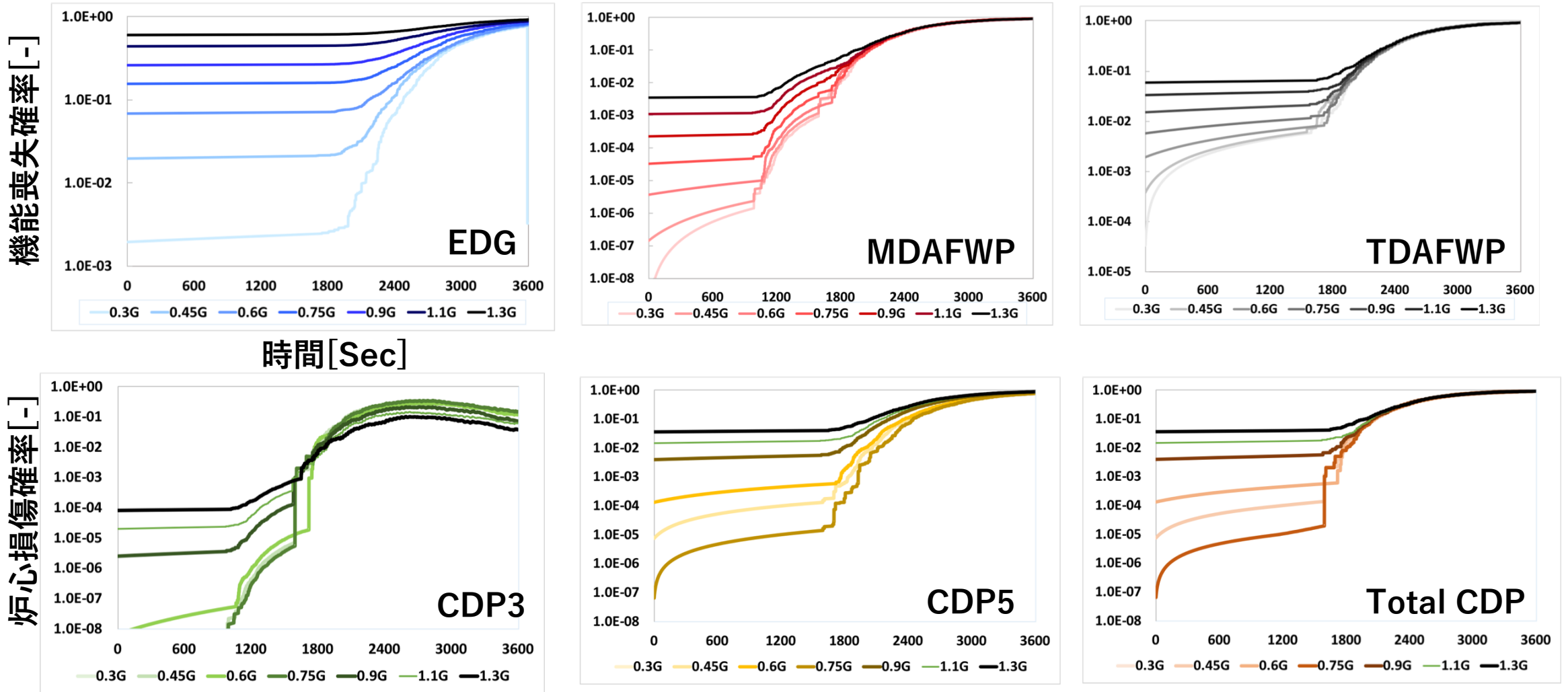
(0.3G, 0.45G, 0.6G, 0.75G, 0.9G, 1.1G, 1.3G時) 溢水源：6,000m³/hr (配管1/4破断)



地震加速渡に応じて炉心損傷に至るシナリオの変化が評価できる

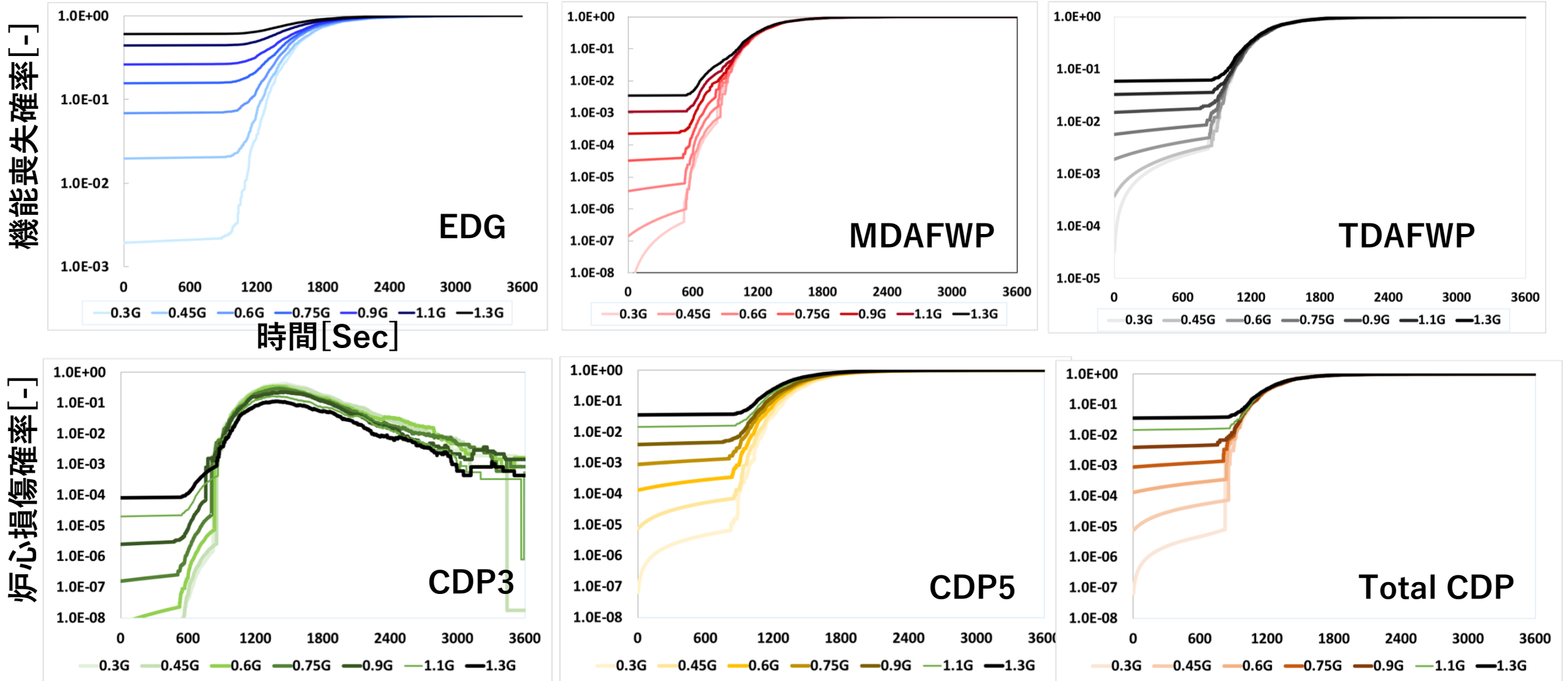
安全設備機能喪失確率と炉心損傷確率の時間推移

(0.3G, 0.45G, 0.6G, 0.75G, 0.9G, 1.1G, 1.3G時) 溢水源：12,000m³/hr (配管1/2破断)



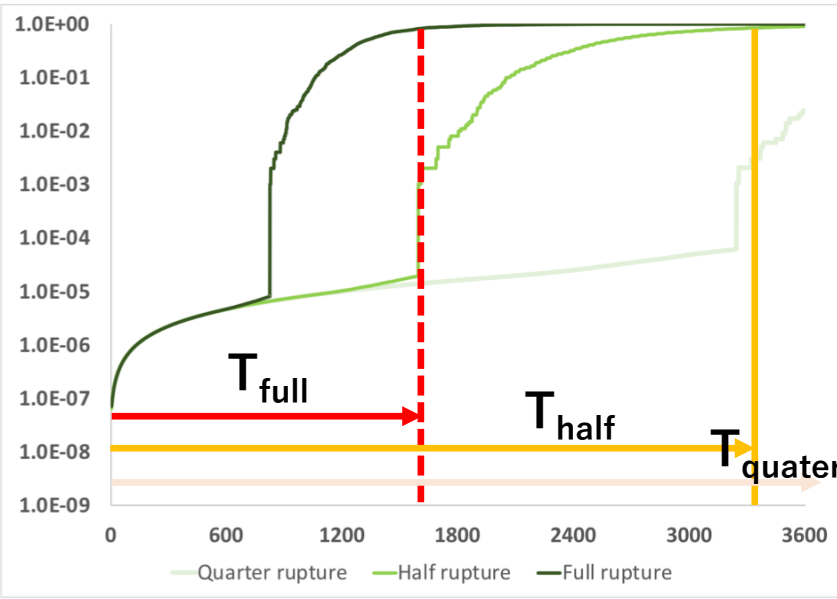
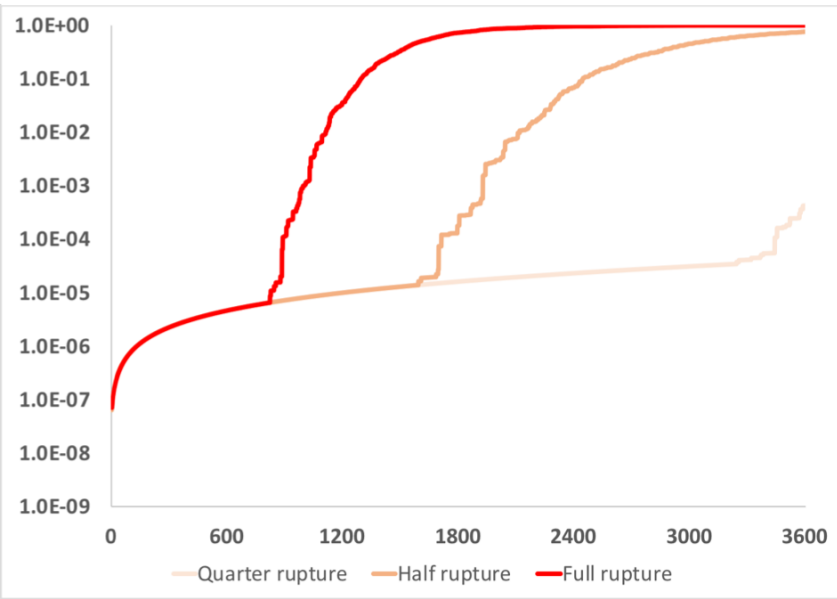
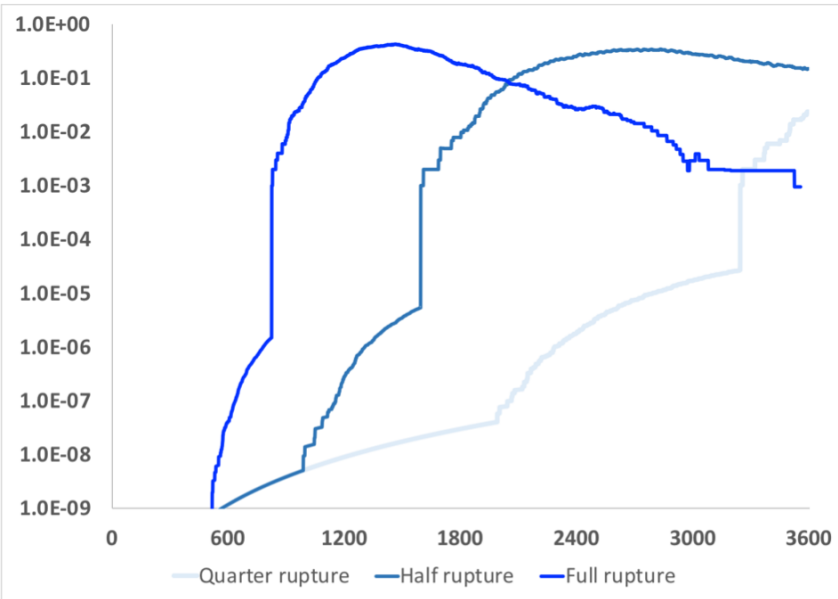
安全設備機能喪失確率と炉心損傷確率の時間推移

(0.3G, 0.45G, 0.6G, 0.75G, 0.9G, 1.1G, 1.3G時) 溢水源：24,000m³/hr (配管全破断)



溢水源の大きさによる事故進展評価

6,000m³/hr (配管1/4破断) 、 12,000m³/hr (配管1/2破断) 、 24,000m³/hr (配管全破断)



CDP3: EDG○TDAFWP×MDAFWP×

CDP5: EDG×、TDAFWP×

Total CDP: CDP3 + CDP5

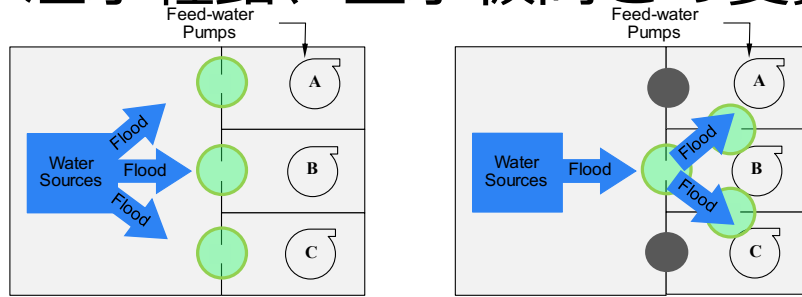
炉心損傷までの猶予時間を評価することが可能

AM策の検討

目的: タービン動補助給水ポンプの機能喪失を防止

部屋への流入水量を減らす

- 溢水経路、止水板高さの変更



深層防護を考えれば
同じ目的に対しても
多様性を持たせた対策が必要

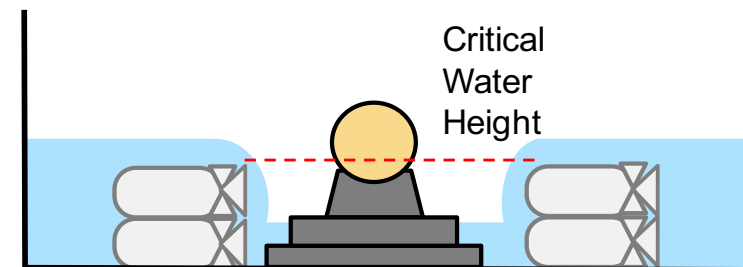
部屋への流入水を排水する

- 可搬式ポンプ導入

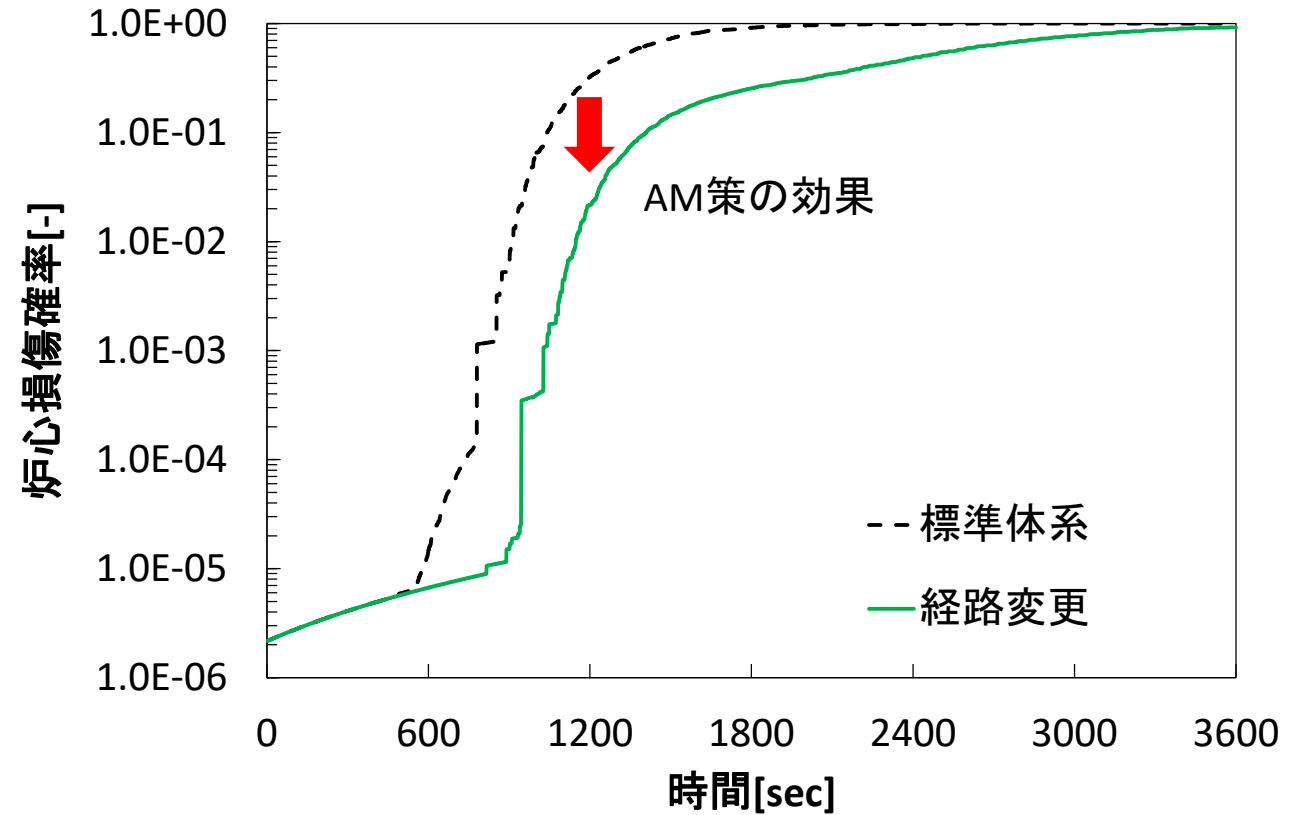
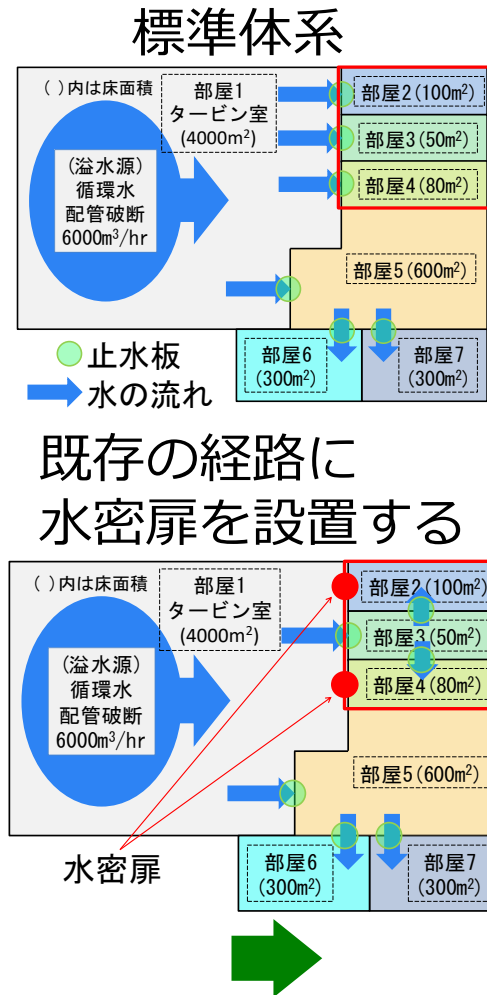


機能喪失水位を上げる

- 土嚢の積み上げ、防水対策



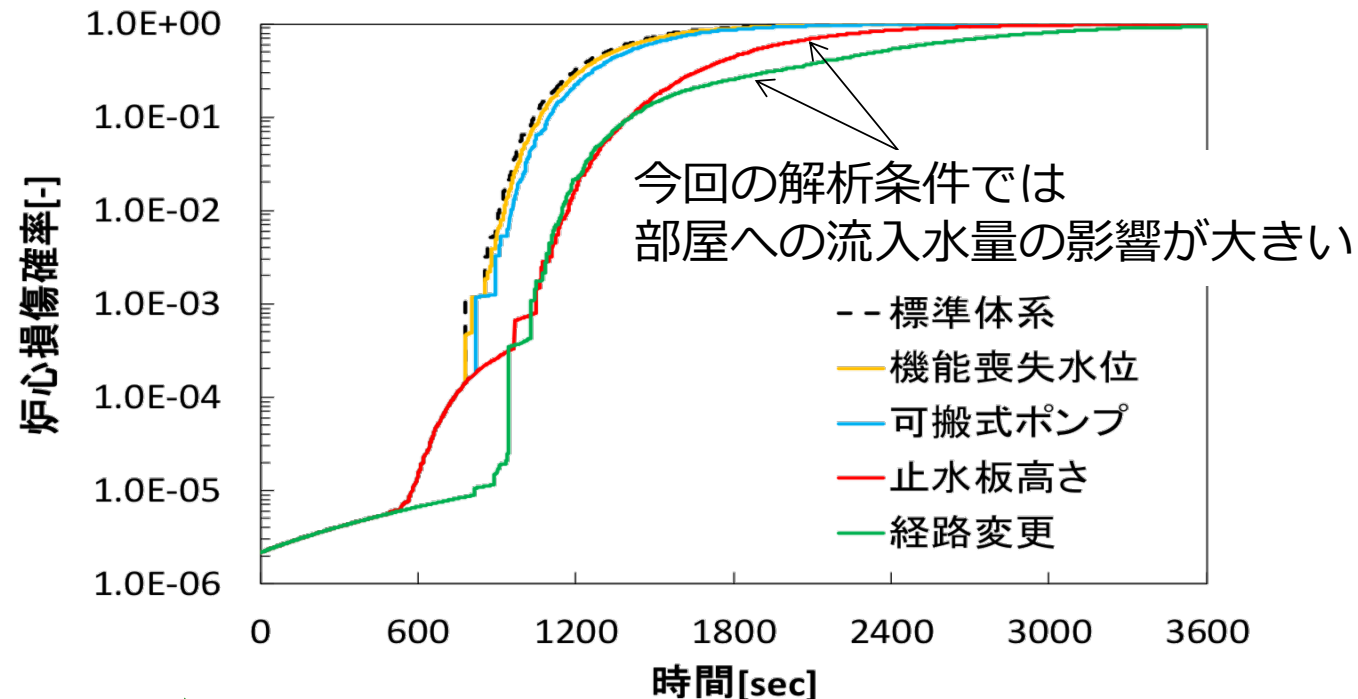
AM策の定量評価(溢水経路変更の効果)



炉心損傷確率の時刻歴変化より
AM策の効果を定量的に表すことができる

各AM策の効果

- タービン動補助給水ポンプの機能喪失水位を10cm上げる
- 可搬式ポンプ(1.5m³/min)をタービン動補助給水ポンプ室に導入する
- タービン動補助給水ポンプ室に設置された止水板高さを10cm上げる



➡ 溢水条件を決定することで
多様なAM策について定量的に評価できる

地震起因の内部溢水において各部屋の水位を考慮したシナリオの定量化が可能となった(定量化手法の構築)

溢水量に不確かさを与えたことにより炉心損傷までの時間猶予について統計的な評価が可能となった

複数の地震動に応じる安全設備の機能損傷確率を評価することで、地震によって生じる固有な内部溢水シナリオについての評価が可能となった

AM策に対応した炉心損傷確率の変化から各AM策の定量的な評価が可能となり、AM策の合理的な選択の見通しが立てられた