

# 確率論的リスク評価(PRA)

(確率論的安全評価(PSA))

---



# PSAグループ概要

当社では、原子力プラントを熟知した解析者によって原子力発電所のリスク情報を得るために定量的なリスク評価(PRA※)の技術を用い、そのリスク情報を活用して安全確保活動を実施し、原子力発電所の安全性の維持や向上に有用な情報をご提供するとともに、PRAを活用した各種受託業務、共同研究への参画等の豊富な経験を背景に、原子力発電所におけるリスク情報活用のための様々なサービスの提供を行っています。

(※PRA: Probabilistic Risk Assessment, PSA: Probabilistic Safety Assessmentと呼ばれることもあります。)

# 確率論的リスク評価(PRA)とは

PRAとは設備故障等が重なった場合に、発生しうる事故を対象として、その発生頻度と影響を定量的に評価し安全性の度合いを検討する手法であり、航空分野や海洋分野など様々な分野で活用されています。原子力発電所においては、過酷事故(炉心損傷など)のリスクを算出しています。

過酷事故には事故のきっかけとなり得る出来事(起因事象)に対し、その出来事から事故に至るのを防ぐための様々な安全装置が存在します。PRAではその起因事象の発生頻度に、各種安全装置が故障などで機能しない確率を掛け合わせる事により、最終的な事故に至る頻度を評価しています。

それでは、身近なケースを例にPRA手法の概要をご紹介します。

困ったことが起こるのはどんな時??  
○どんな原因の組み合わせ?  
○どのくらいの確率?

## 1年間に寝坊する回数は?



PRA手法を用いて寝坊する頻度を評価してみます。

まず、寝坊のきっかけになる出来事(起因事象といいます)はどのようなものがあるでしょうか?例えば、夜更かし、深酒、疲労などが挙げられます。



では、夜更かしをした場合、必ず寝坊するでしょうか?  
普通は目覚まし時計をセットしておきますね。

もし目覚まし時計が故障していて鳴らずに起きられなかったら?  
母親が起こしてくれる事に期待できます。



もし母親が起こしてくれなかったら?  
父親に起こしてもらおう事にも期待できます。  
父親が起こしてくれなくて初めて寝坊となります。

このように、夜更かしは寝坊の原因となりますが、すぐには寝坊とはならず様々な寝坊防止策に期待することができます。PRAではこれらの防止策の成否による寝坊に至るまでの進展を以下のようなイベントツリーで表現します。

寝坊にいたるイベントツリー

起因事象	寝坊防止策			No.	状態	発生頻度 (／年)
夜更かし	目覚まし時計	母親	父親			
	→成功			1	起床	89.70
年に100回	0.103			2	起床	8.24
	↓失敗	0.2		3	起床	1.03
			0.5	4	寝坊	1.03
					寝坊頻度	1.03

イベントツリーの左端の“夜更かし”が寝坊のきっかけ(起因事象)、右隣の“目覚まし時計”“母親”“父親”が寝坊防止策を現わします。

まず“夜更かし”からスタートし次に“目覚まし時計”に向かいます。目覚まし時計が鳴り、起床出来た場合上側のパスを通り、目覚まし時計が鳴らなかった場合下側のパスに進みます。

目覚まし時計が鳴らなかった場合、次の“母親”に起こしてもらい必要があり、目覚まし時計の場合と同様に、成否によって進むパスが変化します。

各防止策の下にある数字は、防止策の失敗確率を示します(起因事象…ここでは夜更かし…の場合には発生頻度)。例えば目覚まし時計が鳴らず下のパスに進む確率は0.103、目覚まし時計が鳴って上のパスに進む確率は(1-0.103)となります。

上の例では4つのパターンが考えられます。

- No1. 目覚まし時計が鳴り起床する。
- No2. 目覚まし時計が鳴らないが、母親に起こしてもらい起床する。
- No3. 目覚まし時計が鳴らず、母親にも起こしてもらえないが、父親に起こしてもらい起床する。
- No4. 目覚まし時計が鳴らず、母親にも父親にも起こしてもらえず寝坊する。

No4は寝坊防止策全てが失敗し寝坊となります。

寝坊の発生頻度の求め方ですが、起因事象の発生頻度に、各寝坊防止策が失敗する確率を掛けることで算出します。今回の例ですと、夜更かしの発生頻度(100 回/年)×目覚まし時計が鳴らない確率(0.103)×母親に起こしてもらえない(0.2)×父親に起こしてもらえない(0.5)=1.03 回/年となります。

ではこの値はどのように決定するのでしょうか？

## ■ 失敗確率の算出方法 ■

このイベントツリーを評価するために以下の4つの値を設定しています。

夜更かしの発生頻度・・・100 回/年

目覚まし時計が鳴らない確率・・・0.103

母親が起こすのに失敗する確率・・・0.2

父親が起こすのに失敗する確率・・・0.5

各々の値は次のように設定します。

○夜更かしの発生頻度

今までの経験から設定する事ができます。

ここでは年に100回と仮定しましたが、例えば1年間を52週間として、

週に3回夜更かしする人を想定すると、発生頻度は

$3\text{回/週} \times 52\text{週間} = 156\text{回/年}$

となります。

○目覚まし時計が鳴らない確率

後述するフォールトツリー解析によって求めます。

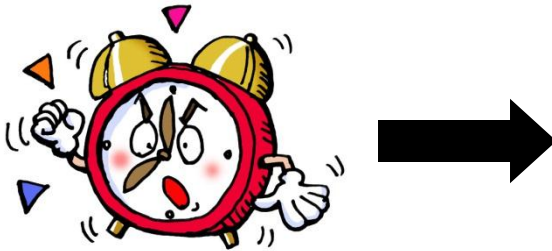
○母親、父親が起こさない確率

機械ではなく人が係わる場合には、人間信頼性手法等を用い失敗確率を算出します。

※ここでは、適当な値を設定しています。

# ■ 目覚まし時計が鳴らない確率は？ ■

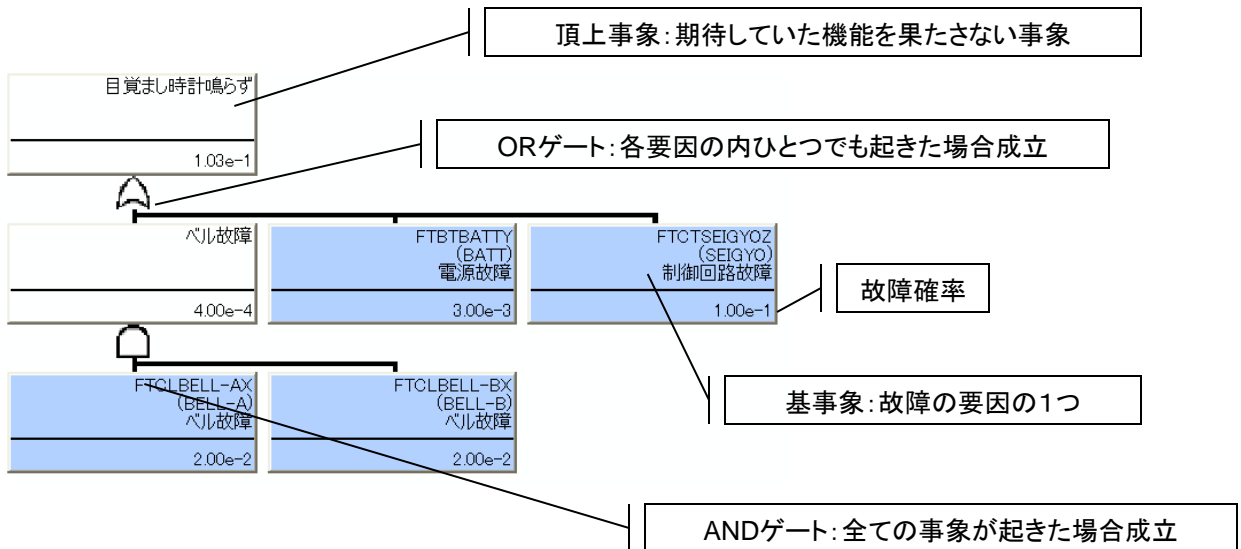
では目覚まし時計が鳴らない確率をフォールトツリー解析によって求めてみます。



目覚まし時計をパーツ毎に分解してみると上右図のようになります。  
制御回路が故障した場合、電源が故障した場合、ベルが故障した場合は目覚ましは鳴りません。

期待していた機能を果たさない事象(ここでは目覚まし時計が鳴らないという事象)を、その要因(基事象といいます。ここでは制御回路の故障、電源故障等)を分けて図式化したものをフォールトツリーといいます。このフォールトツリーを計算することにより、目覚まし時計が鳴らない確率を算出することが出来ます。

目覚まし時計をフォールトツリーで表すと以下の図のようになります。先ほども述べたように、制御回路故障、バッテリー切れ、ベル故障のいずれかが起きても、目覚まし時計は鳴ってくれません。このように、1つでも、起きてしまったら機能が喪失してしまう場合、これら各要因をORゲートで結びます。



各要因の下に記載されている数字は故障確率を表し、ORゲートで結んである場合、各基事象の故障確率を足し合わせる事により、目覚まし時計が鳴らない確率を求めることが出来ます。目覚まし時計が鳴らない確率=ベル故障確率(0.0004)+電源故障の確率(0.003)+制御回路故障確率(0.1)=0.004+0.03+0.1=0.1034≒0.103と求めることができます。

また、ベル故障はさらに2つのベルの故障に分解することができます。ベルが1つだけ壊れても、他方のベルが壊れていなければベルの機能は果たします。このように、全てが壊れて初めて機能喪失となる場合は、ANDゲートで各要因を結び、故障確率は、各要因の確率を乗じることにより求めます。ベルの故障確率=ベルA故障確率(0.02)×ベルB故障確率(0.02)=0.0004と求めることができます。先ほどのベル故障確率はこの値を用いています。

なお、各パーツの故障確率は過去の故障件数から算出され(ここでは適当な値を設定していますが、原子力発電所では故障データを集めて計算しています)、フォールトツリーによって算出された頂上事象の発生確率を先ほどのイベントツリーの失敗確率に用います。

# ■ 評価結果の活用 ■

以上の方法を用いて、寝坊の発生頻度を評価することができました。

この結果はどのように活用するのでしょうか？

例えば、原子力発電所の場合では、炉心損傷が発生する頻度を0.0001回/年程度(1万年に1回)未満とするように目標が定められています。

このように発生頻度に、ある指標を設定しておけば、事故に対する防止策が十分であるかを判断することが可能となります。

また、目覚まし時計を2つセットする事を考えてみます。目覚まし時計が2つ有る場合、寝坊する可能性が減ることは直感的に分かります。しかし、以前に比べてどれくらい寝坊の回数が減るのか、という事はわかりません。

では、イベントツリーに、目覚まし時計2を加えてみましょう。

目覚ましを増やしたイベントツリー

起因事象	寝坊防止策				No.	状態	発生頻度(／年)
夜更かし	目覚まし時計1	目覚まし時計2	母親	父親			
					1	起床	89.700
年に100回	0.103				2	起床	9.240
		0.103			3	起床	0.850
			0.2		4	起床	0.106
				0.5	5	寝坊	0.106
						合計値	0.106

計算結果を目覚まし時計が1つの場合と比較すると以下ようになります。

目覚まし時計が1つの時の寝坊頻度:1.03 回/年

目覚まし時計が2つの時の寝坊頻度:0.106 回/年

1つの時と2つの時を比較すると寝坊頻度は1/10程度に減りました。

このように、PRA手法を用いるとある防止策を追加した場合にどれだけ効果があるか(寝坊のリスクが減るか)などを数値化(定量化)することが可能となります。

# ■原子力発電所のPRA■

原子力発電所のPRAは主に以下の目的で行っています。

- ・原子炉施設の新規制基準適合性の確認
  - ・運転保守管理の適正化(リスク上重要な設備を適切に管理)
  - ・重点投資事項の抽出(設計変更に伴うリスク低減効果の比較)
- 等

先ほどは簡単なモデルで説明しましたが、原子力発電所のPRAモデルはもっと複雑なものとなりますが、以下に単純なイメージを紹介します



# ■ イベントツリーの例 ■

トランジェント(過渡事象)のイベントツリー例

起因事象	スクラム系	給水系	高圧注水系	原子炉減圧	低圧注水系	除熱系	炉心状態
トランジェント	C	Q	U	X	V	W	
							安全停止
							安全停止
							TW
							安全停止
							TW
							TQUV
							TQUX
							TC

## 炉心状態の解説

TC: 原子炉の停止に失敗し、炉心損傷に至る事象

TQUV: 高圧注水系に失敗後、原子炉減圧には成功するが、低圧注水系による注水に失敗し、炉心損傷に至る事象

TQUX: 高圧注水系に失敗後、原子炉減圧に失敗し、低圧注水系による注水ができず、炉心損傷に至る事象

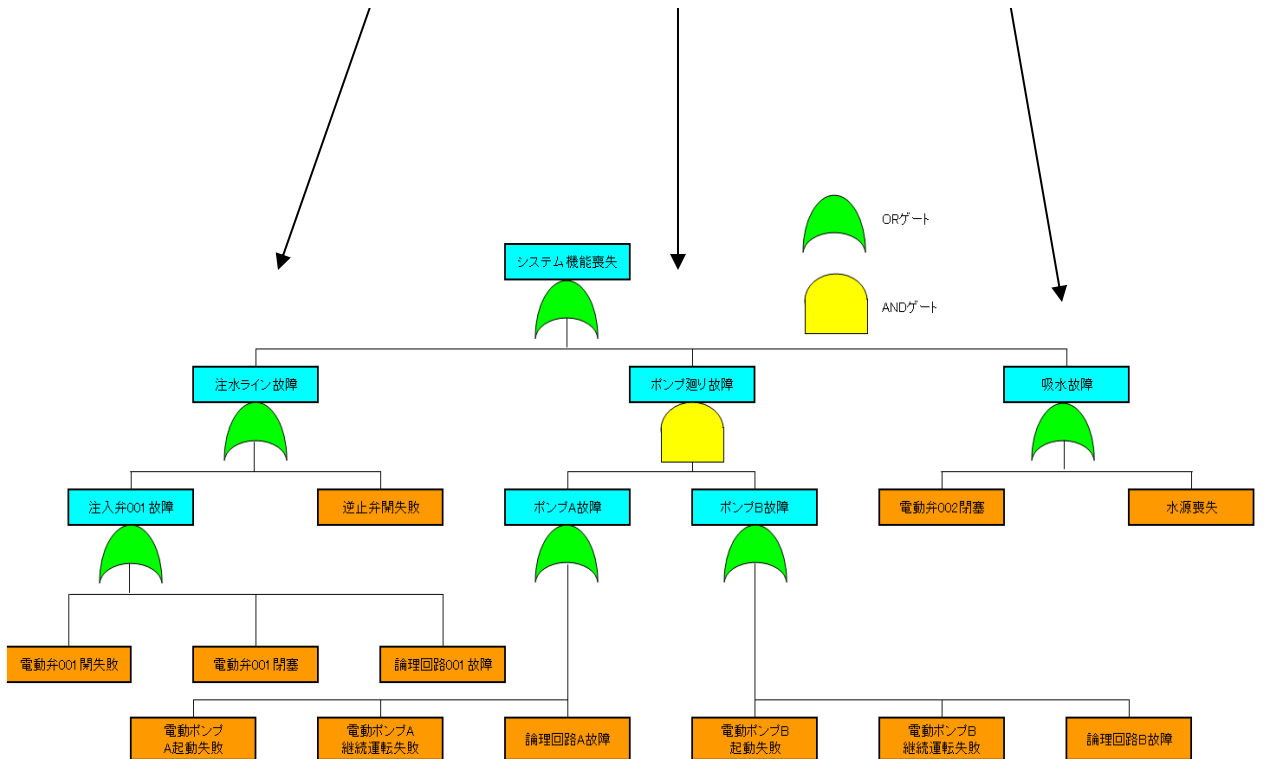
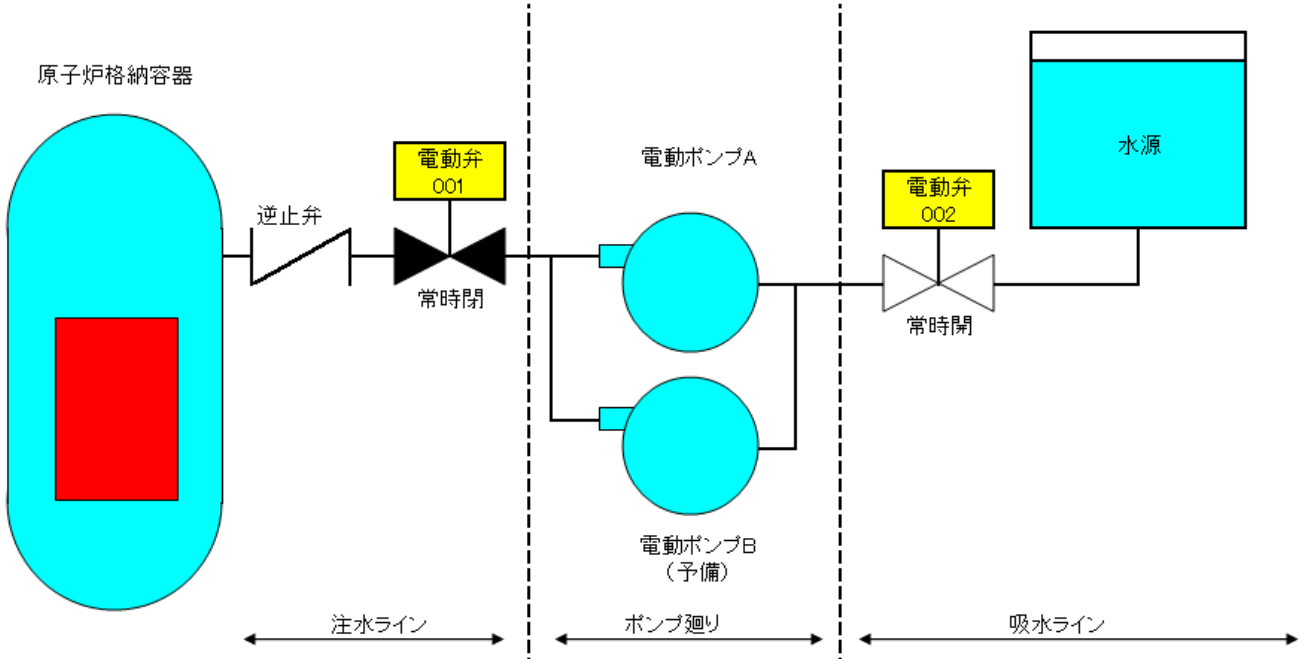
TW: 原子炉への注水には成功するが、格納容器の除熱に失敗し、炉心損傷に至る事象

LOCA: 配管破断後、高圧注水系、低圧注水系のいずれの注水にも失敗し、炉心損傷に至る事象

TB: 電源の喪失により、必要な緩和系が起動できず、炉心損傷に至る事象

ISLOCA: 原子炉への注水に成功するが、破断口の隔離に失敗し、長期的な水源確保のための原子炉水位の制御に失敗したことにより炉心冷却機能が喪失し、炉心損傷に至る事象

# ■注水系のフォールトツリーの例■

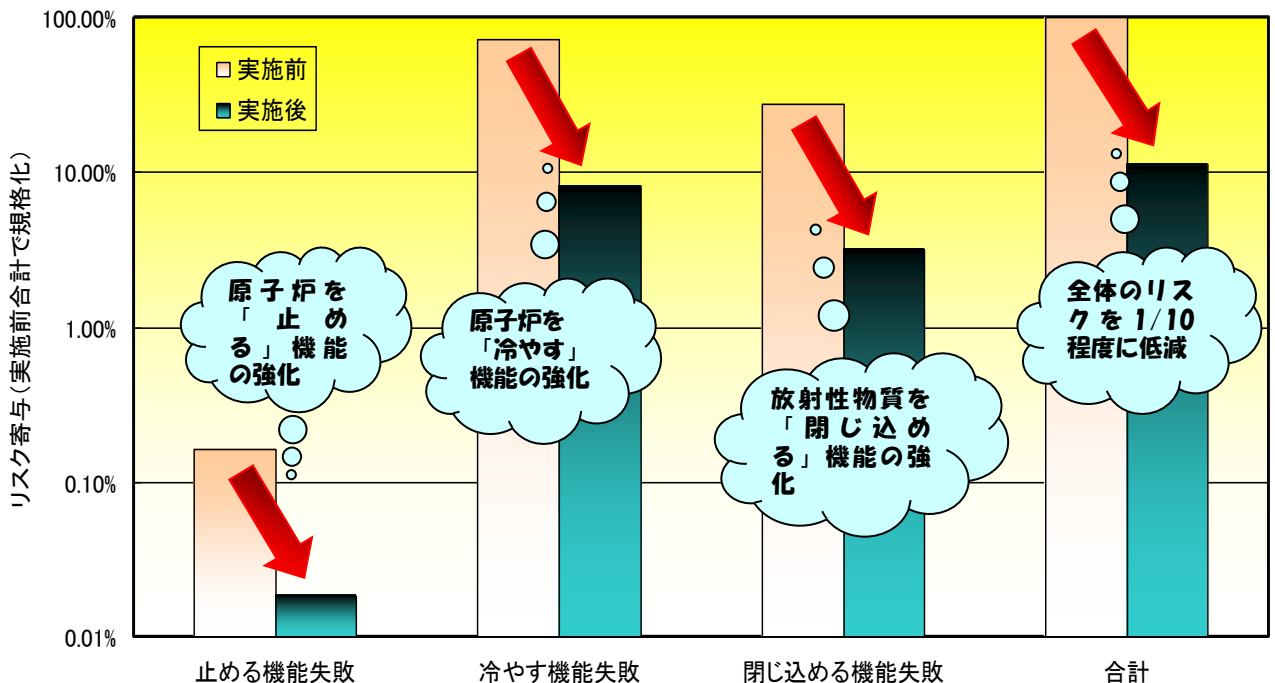


# リスク情報活用

- わたしたちはPRAの専門家集団として、リスクの観点から
- 原子力発電所の安全性向上と効率的、経済的な運用を支援していきます

## リスク活用事例1: 原子力発電所の安全性向上策

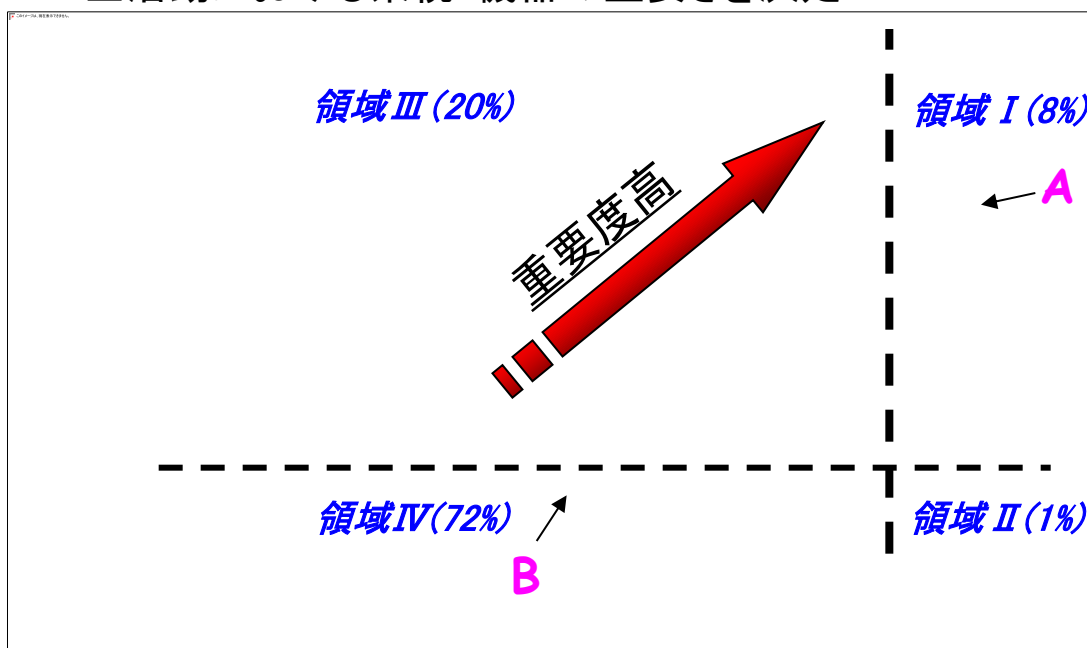
- 電気事業者は1994年までに国内全てのプラントを対象にPRAを実施
  - プラントにおけるリスクの特徴を把握
- PRAの結果を参考にして、リスクをバランスよく低減するための効果的な対策を立案・実施
  - 設備改造や手順書の整備
- 実際に原子炉の安全性が大幅に向上したことが確認された



- わたしたちはPRAの専門家集団として、リスクの観点から
- 原子力発電所の安全性向上と効率的、経済的な運用を提案していきます

## リスク活用事例2: 保全重要度の決定

- 新しい保全プログラムがスタート
- PRAの結果(リスク重要度)を参考にして、電気事業者が保全活動における系統・機器の重要さを決定



### リスク重要度分類結果例

#### Fussell-Vesely (FV) 指標

ある事象が全く発生しないと仮定した時にリスクがどれだけ低下するかを表す指標

$$FV = \text{リスク}_A / \text{リスク}$$

リスク<sub>A</sub>: 事象Aの発生が寄与して発生するリスク

#### リスク増加価値 (RAW)

ある事象が必ず発生すると仮定した時にリスクがどれだけ増加するかを表す指標

$$RAW = \text{リスク}_{A=1} / \text{リスク}$$

リスク<sub>A=1</sub>: 事象Aの生起確率が1の場合のリスク

A点は、電源系の重要度であり、機能喪失すると様々な機器が使用不能となるため、重要度の高い領域に属する

B点は、ほう酸水注入系電動ポンプの重要度であり、類似の機能を有する設備が他にもあるので、重要度の低い領域に属する

# 参加委員会

- 当グループは様々な委員会に参加し技術の標準化
- リスク情報の効果的な活用について貢献しています

機関名／名称	役割
日本原子力学会標準委員会 リスク専門部会	委員
日本原子力学会標準委員会リスク専門部会 レベル1PRA分科会	委員
日本原子力学会標準委員会リスク専門部会 レベル2PRA分科会	委員
日本原子力学会標準委員会リスク専門部会 地震PRA分科会／事故シーケンス評価作業会	常時参加者／委員
日本原子力学会標準委員会リスク専門部会 内部溢水PRA分科会	委員
日本原子力学会標準委員会リスク専門部会 津波PRA分科会	委員
日本原子力学会標準委員会リスク専門部会 火災PRA分科会	委員
日本原子力学会標準委員会リスク専門部会 PRA品質確保分科会	委員
日本原子力学会 男女共同参画委員会	委員
一般社団法人原子力安全推進協会 PRA用パラメータ専門家会議	委員

# 公開論文(1997年以降)

No.	題名	会名／誌名 (論文集, 雑誌名, 出版社)	発表年／ 掲載年 ／出版年
1	発電所におけるPSA支援用ツールFT-FREEの開発(その1) -ツールの構築と機能-	日本原子力学会 1997年秋の大会	1997
2	Development of PSA Support tool "FT-FREE" at Nuclear Power plants -Automatic FT Generation Function	PSAM4	1998
3	Development of PSA Support tool "FT-FREE" at Nuclear Power plants -Automatic FT Generation Function	日韓PSAワークショップ 第5回	1999
4	リビングPSAツールFT-FREEの運転/停止中における安全性管理への適用	日本原子力学会 2000年春の大会	2000
5	BWRプラントのスクラムFT作成とその妥当性評価	日本原子力学会 2000年春の大会	2000
6	PSAを適用した合理的な運転保守管理の評価手法の検討	日本原子力学会 2000年秋の大会	2000
7	Application of Living PSA Tool FT-FREE to Safety Management during Operation and Shutdown Nuclear Power Plant	PSAM5	2000
8	Development of FT Linking ET Analysis Method	PSAM5	2000
9	Construction and Assessment of Appropriateness of SCRAM Fault Tree for BWR Plants	PSAM5	2000
10	Preparation of SCRAM Fault Tree for BWR Plants and Evaluation of Its Appropriateness	PBNC12	2000
11	スクラムFTのBWRプラントへの適用性研究	日本原子力学会 2001年秋の大会	2001
12	Improvement of Plant Trip Frequency Evaluation Using Scram Fault Tree	日韓PSAワークショップ 第7回	2002
13	Development of Safety Management Support Tool Using FT-FREE	ANS PSA'02	2002
14	The PSA evaluation methodology development of a MOX fuel fabrication Plant	ANS PSA'02	2002
15	Improvement of Scram Fault Tree of BWR Plant	PSAM6	2002
16	保安規定条項の論理構造による分類とFT-FREEを用いた評価	日本原子力学会 2003年秋の大会	2003
17	長期サイクル運転のリスク情報を用いた支援に関する検討(3) -総合評価-	日本原子力学会 2003年春の年会	2003
18	Development of Configuration Risk Management Tool	ICONE11	2003
19	Development of risk monitor for outage configuration management	WANOワークショップ 03	2003
20	リスク情報を活用した定例試験頻度の評価に関する検討(2) -評価及び結果-	日本原子力学会 2004年春の年会	2004
21	レベル3PSAによる原子力施設の防護対策に関する一考察	日本原子力学会 2004年春の年会	2004
22	Improvement in performance of FT-FREE employing Binary Decision Diagram	日韓PSAワークショップ 第8回	2004
23	Application of Probabilistic Risk Assessment Methodology to Medical Risk	PBNC14	2004
24	Evaluation of Shutdown Risk Using FT-FREE Risk Monitoring Function	PSAM7	2004
25	Improvement of FT-FREE using the BDD method	PSAM7	2004

No.	題名	会名／誌名 (論文集, 雑誌名, 出版社)	発表年／ 掲載年 ／出版年
26	レベル3PSAにおけるビンサンプリング手法の不確かさの調査	日本原子力学会 2005年秋の大会	2005
27	原子力発電所の運用へのリスク重要度指標の活用	日本原子力学会 2005年秋の大会	2005
28	リスク情報を活用した供用期間中検査の実用化に関する検討(その2) —リスク基準の検討と検査計画の策定—	日本原子力学会 2005年秋の大会	2005
29	Japanese Component Failure Rates Using Bayesian Approach	ANS PSA'05	2005
30	IMPROVEMENT OF SHUTDOWN RISK MONITOR FUNCTION IN FT-FREE USING BDD	ICONE13	2005
31	BWRの確率論的安全評価(レベル2, 3)における不確かさ評価の研究(4) —レベル3PSAの不確かさ評価—	日本原子力学会 2006年秋の大会	2006
32	連載講座「軽水炉の確率論的安全評価(PSA)入門」 第2回 リスク情報の活用事例について	日本原子力学会誌 Vol.48 No.4	2006
33	Experience on shutdown PSA and risk monitoring strategy in TEPCO group	PBNC15	2006
34	Discussion of Risk Significance Thresholds for Safety Activity in Nuclear Power Plant	PSAM8	2006
35	地震PSAを用いた許容待機除外時間評価における機器関連の検討	日本原子力学会 2008年春の年会	2008
36	A study on uncertainties evaluation in Containment Event Tree	ICAPP '08	2008
37	Hierarchical Bayesian Model concerned uncertainty in number of failure events for component failure rates	ICONE16	2008
38	RI-ISI導入に向けた産業界としての取り組み (3) 配管破損の影響評価とRI-ISIプログラム	日本原子力学会 2008年秋の大会	2008
39	Study on Practical Application of Risk Informed Inservice Inspection	ICAPP '09	2009
40	Upgrade of internal events PSA model using the AESJ Level-1 PSA Standard for operating state	ICAPP '09	2009
41	SUCCESSIVE ACCIDENT FREQUENCY ASSESSMENT FROM INITIATING EVENT TO CONTAINMENT FAILURE	ICONE17	2009
42	Upgrade of internal events PSA model using the AESJ Level-1 PSA Standard for operating state	日韓PSAワークショップ 第10回	2009
43	発電損失リスク評価手法の開発と活用方法	日本原子力学会 2009年秋の大会	2009
44	格納容器破損頻度に対する機器重要度評価	日本原子力学会 2009年秋の大会	2009
45	効率的RI-ISI導入に向けた産業界としての取り組み (2) 国内BWRプラントのクラス2, 3配管へのRI-ISI適用に向けた検討	日本原子力学会 2009年秋の大会	2009
46	Improvement of PSA quality including re-formation of Fault Trees to represent balance between varying heat load and heat removal capability	ICONE18	2010
47	Improvement of shutdown PSA model and examination of new practical application of risk monitor	PSAM10	2010

No.	題名	会名／誌名 (論文集, 雑誌名, 出版社)	発表年／ 掲載年 ／出版年
48	発電損失頻度と炉心損傷頻度から見た常用系設備の信頼性比較	日本保全学会 第7回学術講演会	2010
49	Main features and the development plan of risk monitor "Safety Watcher"	IYNG2010	2010
50	建屋内溢水伝播評価を考慮した津波PRA評価システムの検討	日本原子力学会 2012年秋の大会	2012
51	ベイズ統計を用いたデジタル制御機器故障率の推定	日本原子力学会 2013年春の大会	2013
52	シリーズ「柏崎刈羽原子力発電所に対するPRAの検討状況」 3. 個別プラントパラメータ推定手法について	日本原子力学会 2014年秋の大会	2014
53	シリーズ「柏崎刈羽原子力発電所に対するPRAの検討状況」 4. PRAツール「Safety Watcher」の改良	日本原子力学会 2014年秋の大会	2014
54	シリーズ「柏崎刈羽原子力発電所に対するPRAの検討状況」 6. 地震PRAにおける感度解析	日本原子力学会 2014年秋の大会	2014