

不確かさがあるPRAの結果を
意思決定に用いることはできるのか

東北電力株式会社
佐藤 大輔

2024年11月12日



1. 東北電力におけるRIDMの取組み
2. 不確かさの考え方
3. 東北電力のこれまでの取組み
4. PRAを様々な判断に適用していく考え方
5. 結論



1.東北電力におけるR I D Mの取組み

1.1 R I D M計画

- 電事連大の取組として、RIDM導入はフェーズ1（RIDMに必要な機能の整備等）、フェーズ2（RIDMプロセスの適用範囲の拡大等）の2段階で進める計画としている。
- これまでフェーズ1ではPRAの高度化に取り組んでおり、フェーズ2への移行前に、女川2号のリスクの理解とその活用に向けた教育を実施する。
- 再稼働後のフェーズ2では、ROPへの確実な対応に向けた「安全性向上」に資する検討を優先し、その後、電事連大で検討しているAOTの延長・OLMの実施の達成に向けて、「運用の効率化」を進めていく考えである。

東北電力のリスク情報活用に向けた取組み

<電事連 RIDM戦略プラン及びアクションプランを踏まえ作成>



1.2 RIDMに必要な機能整備の例：PRA・RIDM教育

- プラントを安全に安定に維持、管理して運用するため、PRAを活用する取り組みを推進する上で重要な事項。
- 確率論的評価には、不確かさがあると理解し決定論等と組み合わせて、運用ルールの見直し、保全のあり方の検討、安全対策の向上検討に活用。
- PRAについては、使う側がCDFやCCFを定量的に表し安全度を図るツールではない事を理解するための教育を実施。



1.東北電力におけるR I D Mの取組み

1.3 RIDMに必要な機能整備の例：PRA・RIDM教育

- 再稼働後のフェーズ2への移行に向けて、「発電所員全員」に対する基礎的な教育と「技術系所員」に対するプロセスの導入と運用に必要な教育を実施する。（2024年6月頃より順次開催）

① PRA基礎教育

【教育内容・目的】

- PRAでどのような評価をしているか。
- PRAから何が分かるのか。
- PRAがどのように活用されているか。

【効果】

- 日々の業務のリスクに対する感度を向上させる。

【対象】

- 発電所員全員

【教育資料の例】

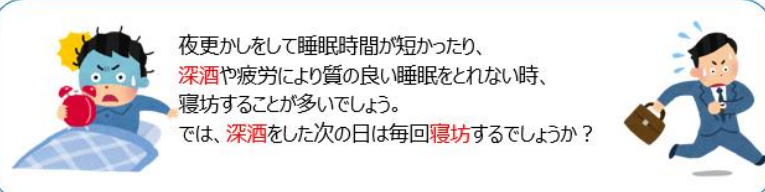
身近な例を用いたPRAのイメージ 1

PRAは、**望ましくない事象が発生する頻度を定量的に評価する手法**です。

どのような「**望ましくない事象**」がどの程度の「**頻度**」で発生するかを知ることにより、その事象を受け入れるか、それともその事象の発生や影響を抑えるために対策を講じるかの判断に活用することができます。

このような事象の「**影響（被害）の大きさ**」と「**発生頻度**」の積を、工学的な定義で「**リスク**」と言い、PRAは、「**リスクを定量化する手法**」と言い換えることができます。

ここでは、身近な望ましくない事象である「**寝坊**」を例に、PRAでどのような評価をし、その結果を活用しているかのイメージを説明します。



夜更かしをして睡眠時間が短かったり、**深酒**や疲労により質の良い睡眠をとれない時、寝坊することが多いでしょう。

では、**深酒**をした次の日は毎回寝坊するでしょうか？

東北電力

② RIDMプロセス導入に向けた教育

【教育内容・目的】

- どの事故シナリオにより炉心損傷等に至りやすいか（リスクプロファイル）
- RIDMプロセスの事例

【効果】

- 発電所員が習熟することで、RIDMプロセスの導入を促進する。

【対象】

- 発電所技術系所員

【教育資料の例】

3. L1PRAモデルの高度化結果について 3

- 起因事象別炉心損傷頻度（図2）
 - 起因事象を精緻化[※]した結果、「従属性を有する起因事象」および新たに抽出された「高エネルギー配管破断」が起因事象の上位を占めている。（表2）
 - これらの起因事象が発生した結果、複数の緩和機能の喪失または隔離失敗により炉心損傷に至るシナリオが抽出されている。こうした特徴はBWRの共通的なものとして確認されている。

※起因事象を精緻的に抽出するために、文献調査、前非事象分析、FMEA、保安規定の調査等を実施。従属性を有する起因事象（サポート系故障等）の追加およびLOCAの細分化などを行い、適合性審査時の16事象に対し50事象を定義。

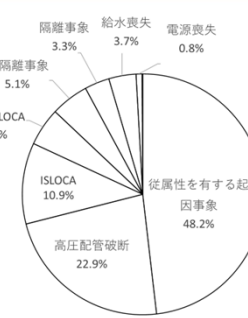


図2 起因事象別炉心損傷頻度

表2 上位起因事象と主なシナリオ

上位起因事象	主なシナリオ	補 足
従属性を有する起因事象	空調／冷凍機／補機冷却喪失 + 電源喪失 + 注水失敗	・フロント・サポート間の従属性を詳細にモデル化したことによりシナリオが増加 ・空調等の喪失に伴い室温が設置機器（主に電源機）の設計条件を超過し、複数の緩和機能の喪失につながるもの
高圧エネルギー配管破断（格納容器外）	主蒸気配管等破断 + 隔離失敗	・格納容器外の蒸気流出を考慮するとともに、蒸気流出により機能喪失する機器を詳細にモデル化した結果抽出されたシナリオ
ISLOCA	ISLOCA + 隔離失敗	・同上

東北電力



1.東北電力におけるR I D Mの取組み

1.4 安全性の向上に資するRIDMプロセスの例

- 再稼働後のフェーズ2への移行に向けて、「発電所員全員」に対する基礎的な教育と「技術系所員」に対するプロセスの導入と運用に必要となる教育を実施。（2024年6月頃より順次開催）

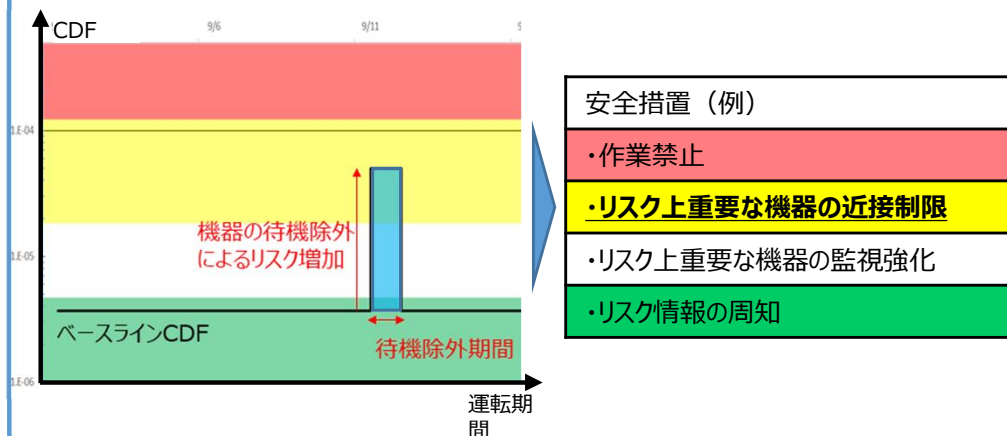
運転時リスクモニタ（再稼働までに導入）

【実施内容】

- プラント運転時のリスクの変化をモニタリングし、発電所関係者に周知する。
- 機器の待機除外等によりリスクが増加する場合には、リスクの増加量に応じた安全措置をとる。

【効果】

- リスクの増加量に応じた適切な安全措置を講じることで、**プラント安全性が向上**する。
- 明確な基準に基づき、**所員が共通の尺度でリスクを認識する。**



運転時リスクモニタと安全措置（イメージ）

リスク重要度を活用したエリアマップの作成

（2024年度内に導入）

【実施内容】

- リスク上重要な機器が設置されたエリアを視覚的に確認できるエリアマップを整備し、発電所関係者（関係会社含む）に共有する。
- エリア内で作業を行う場合には、重要な機器について防護を設置するとともに作業員に対しての注意を促す。

【効果】

- **リスク上重要なエリアにおける作業管理あるいは防護措置を強化し、作業に起因した機器の故障を防ぐ。**



エリアマップ（イメージ）



2. 不確かさの考え方

2.1 深層防護と不確かさの関係

深層防護の考え方			
第1層	異常運転および故障の防止	異常・故障の発生防止	決定論に基づいた影響評価と対策の実施
第2層	異常運転の制御及び故障の検出	運転時の異常な過渡変化	
第3層	設計基準内への事故の制御	設計基準事故(DBA)	
第4層	事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和	炉心損傷防止 格納容器破損防止	確率論に基づいた影響評価と対策の実施
第5層	放射性物質放出による放射線影響の緩和	格納容器機破損による放射性物質の環境放出 周辺環境汚染	

- 不確かさは、ある意味で決定論的評価にも存在している。故に、決定論ではその影響を評価する過程で保守性を確保している(不確かさが評価上の保守性に置き換えられている)
- 確率論的リスク評価では不確かさとして存在している。故に、その不確かさを認識しつつ、精緻化や高度化に取り組む必要がある。
 - ある側面では保守側でリスクを過大に評価しているかもしれない(精緻化理由)
 - ある側面では潜在的なリスクを浮き出させて認識できていない可能性がある(高度化理由)



2. 不確かさの考え方

2.2 不確かさとリスク及び決定論との関係

大事な事

不確かさを理解して使う。決定論に依存しすぎると、分かっている事、リスクとして認識された事に限定した影響度を見て判断することになり、潜在的なリスクを見過ごしてしまう可能性がある。

東北電力のこれまでの取り組み

確率論に対しては、不確かさがあると理解して使ってきた……活用例は9頁～12頁

⇒ 【決定論では見えないもの、見落としをPRAで評価】

(例)

津波PRAでは不確かさが大きい事を理解して対策検討を行ってきた

ここでの不確かさは……

ハザード評価におけるロジックツリーの算定

機器フラジリティー

人的過誤 etc.

このように、PRAには様々なところに不確かさは存在することは、広く理解されている又はよく耳にすることではあるが、不確かさがある事を理解しつつ意思決定に使えるのかという問いかけは、非常に難しい

⇒ 【この正解はこうだよ、こうすべきだよ、こう理解すべきだよと、単純には判断できない】

ただし、如何なる評価にも不確かさはあり、決定論的な評価においても、そうした背景から保守性が取られるこうした決定論で保守性を確保しても見えてこないものもある

⇒ 【こうした決定論では見えない部分をPRAでは補うことができると理解して事業者では活用を推進している】

- ① プラントの脆弱点
- ② 手順の不備や改善点
- ③ ヒューマンエラーの影響の大きさから訓練や教育の必要性
- ④ 判断や操作に対する時間的余裕
- ⑤ 保全上の重要な機器を明らかにし、交換頻度、点検頻度を故障実績からだけでなく示唆



3.1 女川1号非常用補機冷却系の多重化（PRA概念取込み初期）

■経緯

- ・女川1号機は、非常用補機冷却系は独立した2系統を有していたが、系統内でのポンプ・弁の動的機器に予備機が設置されていなかったため、予備機を追設することにより信頼性の強化を図っている。
- ・この対策は、平成6年(1994年)のPRA結果に基づき、**非常用補機冷却系(ECW/ECWS)ポンプ等を多重化対策の実施判断を行っており**、原子炉への注水機能の信頼性が向上し、炉心損傷頻度が低減している。
- ・2012年4月に非常用補機冷却海水ポンプ(A)電動機の故障が発生した。この時、B系は点検中で待機除外されていたが、PRAの結果を受け増設していた非常用補機冷却海水ポンプ(C)が自動起動し、プラントの安全性が保たれた。
(対策を施していなければ、非常用炉心冷却装置等が作動しない状況(残留熱除去機能喪失)に陥っていた可能性有り)

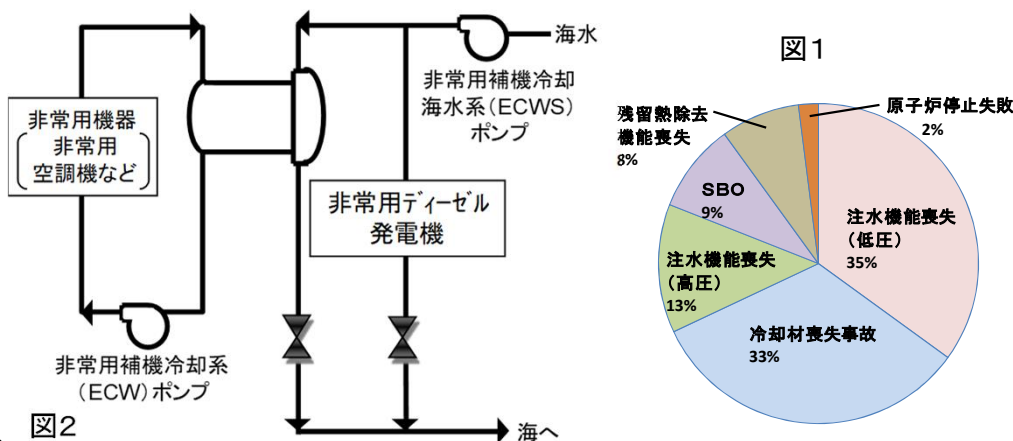
■当時の判断

- ・基本設計にない設備を追加するという点、追設ポンプを設置する部屋のスペースが限られており工事の困難性があること、相応のコストが掛かるという理由から、本対応には社内議論があった。さらに**当時はPRAの理解が十分ではなかったという背景**があった。
- ・しかし、**他プラントの炉心損傷頻度との比較、安全性を向上させるという意義を踏まえ、本判断**を行った。

対策前

炉心損傷頻度： 1.2×10^{-6} / 炉年

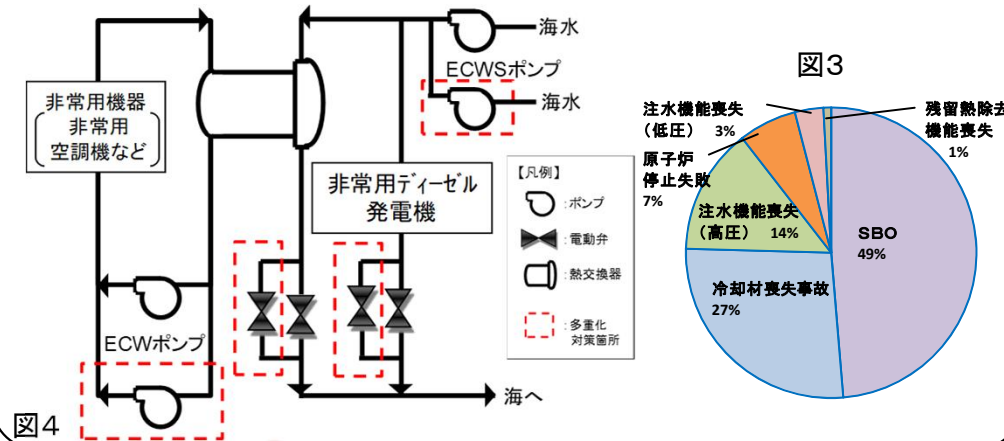
- 平成4～6年に実施したPRAの結果、炉心損傷頻度および事故シナリオ別の寄与割合は図1の通り。
- この結果は、他社プラントに比べても、炉心損傷頻度が高いものであった。要因が非常用補機冷却系の構成にあることから、平成9年にポンプおよび弁の多重化を実施。(図2および図4参照。)



対策後

炉心損傷頻度： 3.7×10^{-8} / 炉年

- 非常用補機冷却系のポンプおよび弁の多重化を行ったことで、炉心損傷頻度は左記のとおり改善。(図3参照)



3.2 女川2号津波PRAを踏まえた対策検討（新規制基準適合性審査におけるPRA活用）

■経緯

- ・女川2号津波PRAでは、O.P.+33.9m津波発生時には図1に示すとおり、津波が防潮堤を超えて敷地内への浸水が発生する結果となった。
- ・当初、可搬型設備の設置場所として、海側の高台を可搬型設備保管エリアと設定していたが、**津波PRAの敷地内浸水解析結果を踏まえ、浸水の不確かさを考慮し、保管エリアの場所を変更した。**
- ・また、当初「全交流動力電源喪失後、逃がし安全弁の開固着により、原子炉隔離時冷却系が停止する事故シーケンス」の対応として、低圧代替注水系(可搬型)による注水を検討していたが、**津波PRAの敷地内浸水解析結果を踏まえ、浸水の不確かさを考慮し、低圧代替注水系(常設)(直流駆動低圧注水ポンプ)による注水に変更した**

■当時の判断

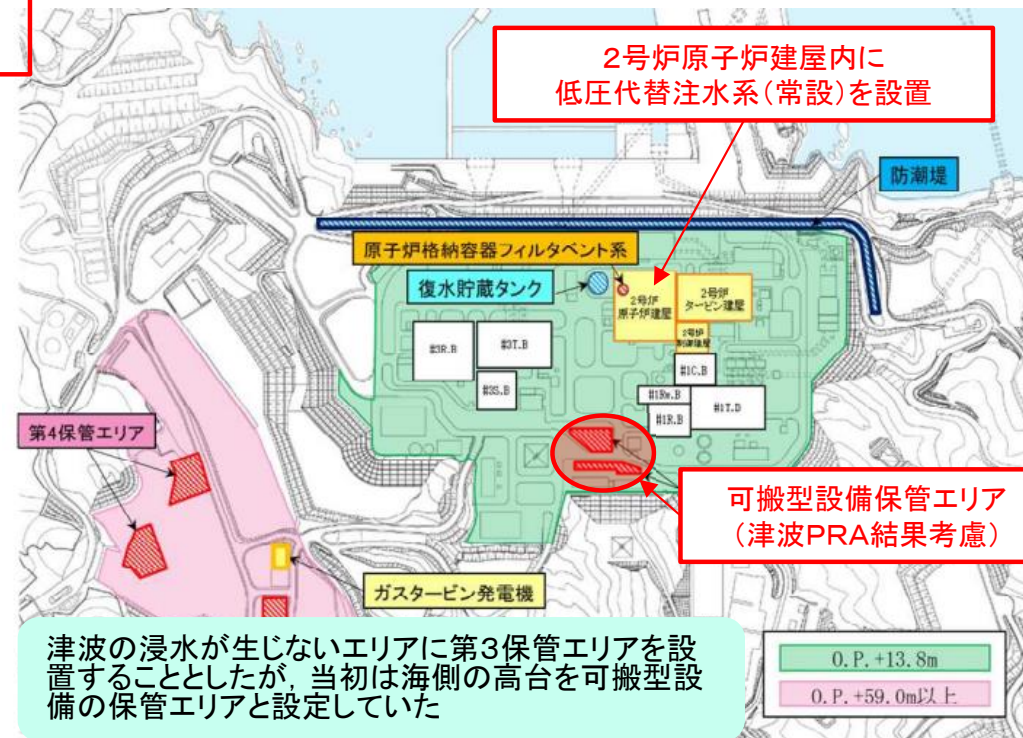
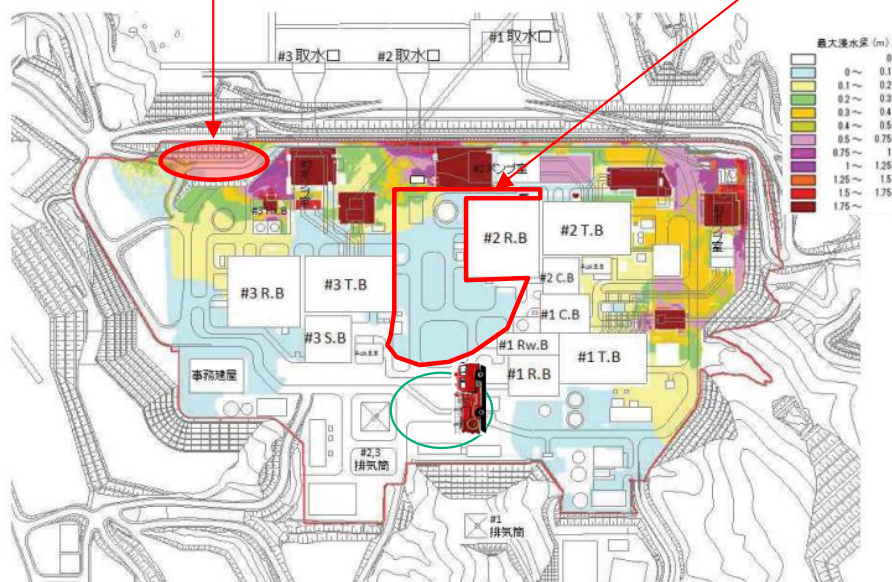
- ・社内検討においては、津波PRAの敷地内氾濫解析結果から、浸水高さは数10cm以下であり、可搬型設備の移動に支障はないと評価していた。しかしながら、自然現象に対する**不確かさ(津波ハザード(ロジックツリー)、浸水深さ、津波流速の不確かさ)**が大きく、多様化したSA設備の機能確保をより確かなものとするため、保管エリアの変更、可搬型設備ではなく建屋内の常設ポンプ(直流駆動低圧注水ポンプ)による注水手段確保を判断した。

可搬型設備保管エリア(当初設計)

低圧代替注水系(可搬型)による注水には浸水領域がある

2号炉原子炉建屋内に低圧代替注水系(常設)を設置

可搬型設備保管エリア(津波PRA結果考慮)



津波の浸水が生じないエリアに第3保管エリアを設置することとしたが、当初は海側の高台を可搬型設備の保管エリアと設定していた

図1 O.P.+33.9m津波時の敷地内最大浸水分布

3. 東北電力のこれまでの取り組み

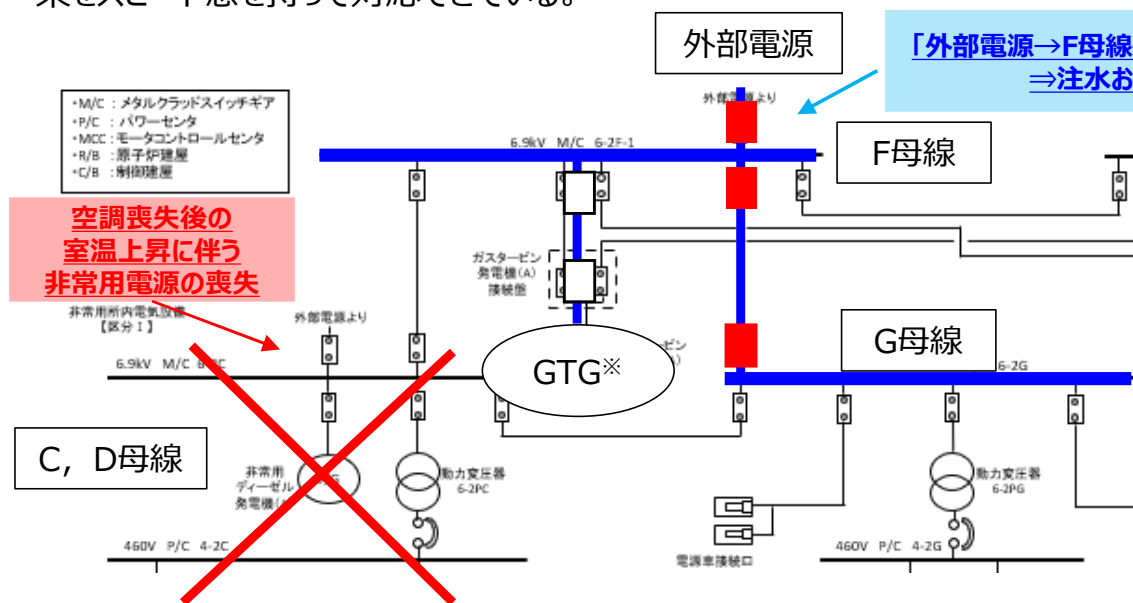
3.3 電源確保の多様化に係わる運用対策の実施（PRAの概念の定着後）

■経緯

- ・女川2号において新規制基準適合性審査にて追加したSA設備等を反映し、再稼働のプラント状態を把握し、更なる安全性向上のため、L1内の事象PRAを実施した。
- ・本PRAの結果、炉心損傷頻度に与える寄与割合が大きいシナリオとして「**空調喪失後の室温上昇に伴う直流／交流電源の喪失**」を抽出。（本シナリオは「交流電源切替盤操作失敗」に関する操作であり、この操作に期待しない場合炉心損傷頻度が2倍に増加する重要な操作）
- ・炉心損傷頻度に与える寄与割合が大きい要因を分析した結果、「**G母線の受電成否**」が炉心損傷頻度への寄与が高いことを特定。
- ・G母線の受電経路を冗長化するために、GTGからの受電に加えて「**外部電源→F母線→G母線の受電**」の**手順追加**をサイトに提案し、実現性等について社内で議論。電源確保操作を**非常時操作手順書（EOP）**等に追加し、PRAモデルに反映した。

■当時の判断

- ・新規制基準適合性審査を経て、PRAに対する理解が深まり、PRAから抽出されるリスク上重要なシナリオについては、不確かさを含んでいることを理解した上で、リスクを低減していく取組が重要との共通理解が得られている。このため、PRAから抽出されたリスクに対して、運用の見直し等の対策をスピード感を持って対応できている。



※外電が喪失するSA時はGTG→F母線→G母線にて受電

表1 手順追加前後の炉心損傷頻度

評価条件	炉心損傷頻度（/炉年）
外部電源からG母線への受電無し	3.4×10^{-5}
外部電源からG母線への受電有り	3.5×10^{-6}

図4 手順に追加したG母線への受電経路



3. 東北電力のこれまでの取り組み

3.4 女川原子力発電所敷地高さの決定（PRAの概念の取込み前）

- ・女川原子力発電所の敷地高さ決定に際しては、文献調査や地元の方々への聞き取り調査から津波の高さを3m程度と想定していた。
- ・しかし、専門家を含む社内委員会での「貞観津波（869年）や慶長津波（1611年）などを考えれば津波はもっと大きくなることもあるだろう」という津波高さの不確かさを考慮し、敷地の高さを14.8mと決定している。
- ・サイト高さ決定以降も自然現象の不確かさが大きいという認識を持ち、新たな知見を得られた際には議論するという意識（マインド）が存在している

当初の敷地高さの決定経緯

『評価』 学識経験者による社内委員会（昭和43年～）

- ・1896年明治三陸津波、1933年昭和三陸津波等の津波記録
- ・869年貞観津波、1611年慶長津波なども考慮（文献調査）
- ・**想定津波の高さは3m程度**



『判断』 委員会の専門的な意見を踏まえて敷地高さを「**14.8m**」に決定

新知見に対する対応

『評価』 女川2号機設置許可申請時[昭和62年4月]

- ・想定津波の高さを**3m程度**から「**9.1m**」に見直し
- ・貞観津波の影響調査（地質調査）



『判断』 「**9.7m**」まで法面を強化

『評価』 土木学会手法による津波評価試算値「**13.6m**」（平成14年2月）

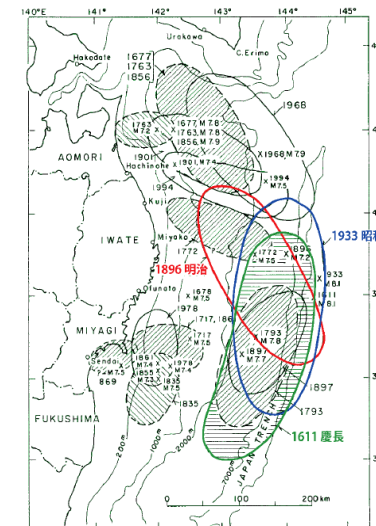


『判断』 敷地（**14.8m**）の安全性確認

『評価』 新規制基準における基準津波の策定「**23.1m**」（設置変更許可 令和2年2月）



『判断』 **防潮堤（29.0m）**を設置



三陸沖周辺で発生した主な津波の推定波源域



法面防護工



4. PRAを様々な判断に適用していく考え方

一般的に...

- 「不確かさ」があるリスクへの対応では「コストとの葛藤」、「他社との比較」、「工事困難性」等の議論となる。
- 地震、津波等の自然ハザードの「不確かさ」は、機器の機能喪失、人的過誤等の「不確かさ」の幅より大きく、これに対策を実施する事には抵抗感が生まれる。
- この「不確かさ」を含むPRAの結果に対する抵抗感は、PRAに対する理解不足があった場合、よりいっそう大きくなり、更に判断を困難にする。



- 東北電力におけるRIDMを進める上では「PRAの理解不足」を解消することが必要
- このため、「PRA基礎教育」「RIDMプロセス導入に向けた教育」を実施することで、PRA及び不確かさに対する理解を深めることにより、RIDMを進め、AOTの延長・OLMの実施の達成に向けて「運用の効率化」を進めていく



- 当社においては、過去から現在に至るまで、PRA活用以前から「不確かさ」を踏まえたサイト設計が行われてきた経緯がある。
- しかし、再稼働後のプラントの安全性を確保し、向上させていくためには、PRAの理解・浸透の重要性が増してきている。
- PRAは、CDFやCCFを定量的に表し安全度を図るツールだけではない。この事を理解するための教育が重要である。
- PRAの結果は、決定論評価では見えない潜在的なリスクを浮かび上がらせるが、他方、不確かさがあることを認識した上で真摯に向き合う必要がある。
- PRAを用いて潜在的なリスク(シナリオ)を明らかにし、このリスクに対する影響については、決定論の考え方をを用いて対策を行うことができる。こうした考え方を安全規制の中において更に浸透させることにより、安全性を向上させていくという考え方を根付かせていくことが重要である。

