

【個別報告1】

電力安定供給を支える原子力発電 におけるリスク情報活用の役割

電力中央研究所 原子力リスク研究センター

副所長・参事 吉田 智朗

研究報告会2022

2022年11月10日

RI 電力中央研究所

© CRIEPI 2022

RI 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 原子力発電は炭素を排出しない大容量電源であり、2050年のカーボンニュートラルに寄与できるポテンシャルをもつ。
- 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓から、原子力発電に潜在するリスクを直視し、**十分な安全性確保を前提**とした発電所運用により、一般からの信頼を獲得することが不可欠。
- 2050年に「原子力+CO₂回収前提火力」で総発電電力量の約30-40%（第6次エネルギー基本計画）を可能とする設備容量確保のためには、**既存炉の早期再稼働、長期運転の実現、新增設/リプレース**が必要。
- さらに、高い安全性の下でより経済性の高い原子力発電を実現するには、従来の**決定論的判断のみでは限界**があり、**安全規制と発電所運用にリスク情報活用意思決定の導入**が重要。
 - **安全重要度の高い分野**に、より多くの規制資源・運用資源を投入
 - **不要な保守性を排除**して投入資源から最大限の安全性向上効果

© CRIEPI 2022

1

報告内容

1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子力リスク研究センターの取り組み
7. まとめ

報告内容

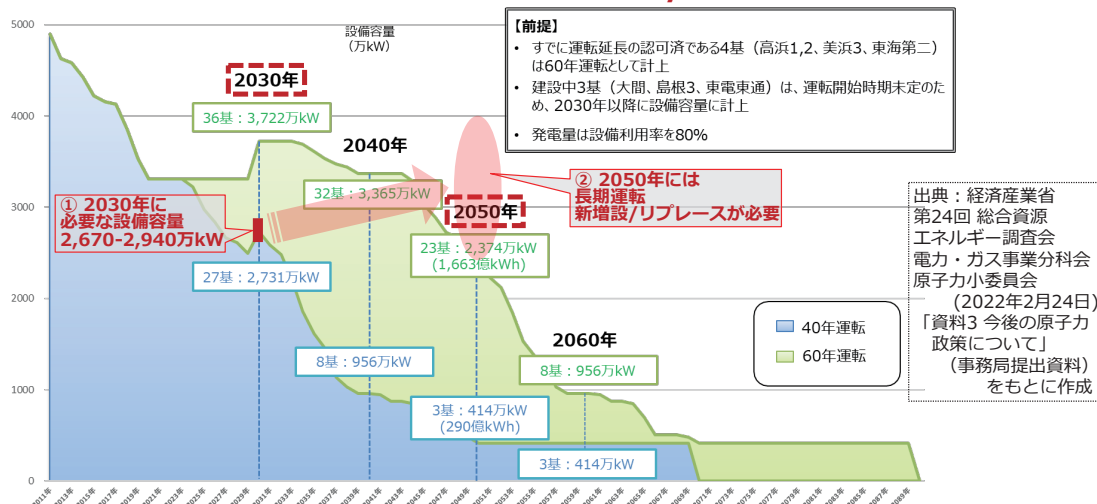
1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子力リスク研究センターの取り組み
7. まとめ

将来の電力需要と 国内原子力発電の設備容量

第6次エネルギー基本計画

- ① 2030年 原子力で総発電電力量の20-22%
- ② 2050年 原子力+CO₂回収前提火力で総発電電力量の約30-40%

- ①に対して… 2030年に27基（未申請以外）稼働が必要
- ②に対して… 2050年に長期運転、**新增設/リプレースが必要**



© CRIEPI 2022

4

原子力発電の 長期運転、**新增設/リプレース**のために

- 十分な安全性の確保
 - 新規制基準対応による安全性強化
 - 安全性向上への取り組みを継続
 その一方で
 - ✓ 新規制基準対応のための建設・改造・運用の経済的負担大
- 限られた資源を最も効果的に安全性向上の取り組みに投入
 - リスク情報活用**により、
 - 安全性向上に寄与しない**不要な保守性を排除し、**
 - 安全性向上に寄与する分野へ**資源を集中して**
 経済性を向上しつつ安全性の向上を図ることができる
(海外産業界に先行例あり)

© CRIEPI 2022

5

報告内容

1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子力リスク研究センターの取り組み
7. まとめ

リスクとは

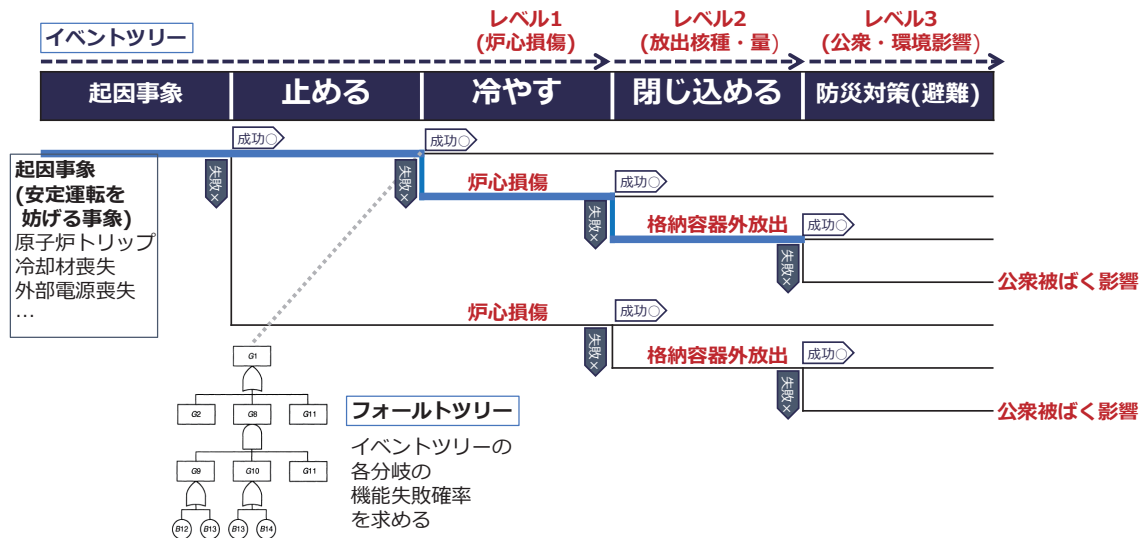
- リスクとは？ 以下の3つの問いへの答え
 1. **どのような悪いことが起こるのか？** - シナリオ(Scenario)
(What can go wrong?)
 2. **それが起こる確からしさはどれくらいか？** - 発生可能性(Likelihood)
(How likely is it?)
 3. **その結果・影響はどのようなものか？** - 影響(Consequence)
(What are the consequences?)
- リスク評価は、「3つの問いへの答え」の組合せを見出すこと。
{シナリオS, 発生可能性L, 影響C} (リスク三重項 : risk triplet)
- 「影響C」原子力発電所のリスク評価では
 - レベル1…炉心損傷
 - レベル2…格納容器外に放出される放射性核種とその量
 - レベル3…公衆・環境への放射線影響

出典：Kaplan, S, Garrick, B. J. "On The Quantitative Definition of Risk," Risk Analysis, Vol. 1, No.1, 1981.

リスク評価とは

■ レベル1/2/3 確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment, PRA)

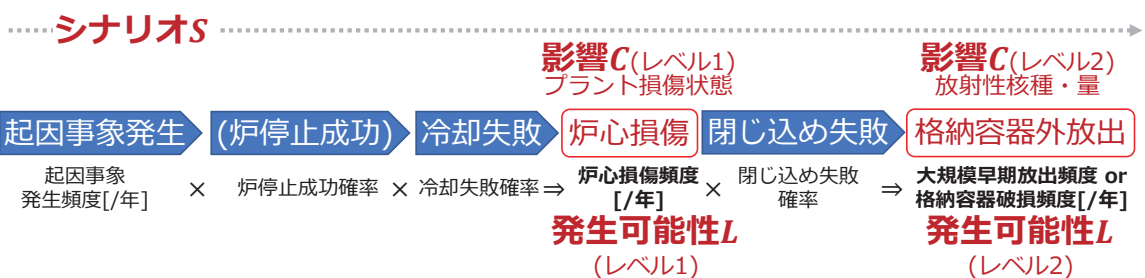
原子炉の安定運転を妨げる事象(起因事象)が起こった場合に、
「連鎖反応を止める機能」「炉心を冷やす機能」「放射性物質を閉じ込める機能」
が失敗するシナリオとその可能性を網羅的に調べる。



8

リスク三重項の分析

■ イベントツリー/フォールトツリーより、体系的・網羅的に {シナリオS, 発生可能性L, 影響C} の組合せが得られる。



- 発生可能性の大きいシナリオ
⇒ どのような事故が起こりやすいか? がわかる。
- 各構成機器について、常に故障している[健全である]と仮定したときのリスクが増える[減る]割合 … リスク増加[低減]価値
⇒ どの構成機器がリスク重要度(安全上の重要度)が高いか? がわかる。

「リスク情報」は、リスク三重項の理解により得られる。

リスク情報を活用した意思決定とは

- **確率論的リスク評価の知見を工学的知見と共に考慮して**設計・運用・保守などの意思決定をすること。
 - **PRAの知見** (リスク三重項の分析より)
 - ✓ どのような事故が起こりやすいか？
 - ✓ どの構成機器がリスク重要度が高いか？
 - **工学的知見** (特にPRAで分析しにくい部分に関して)
 - ✓ どのような深層防護策がどのように機能しているか
 - ✓ 十分な安全余裕があるかどうか
 - **安全目標** 意思決定の“よりどころ” (国際原子力機関のガイドあり)
 - ✓ 定性的目標 「重大なリスクの増加がないこと」
 - ✓ 定量的補助目標 (定性的目標の達成可否を判断するもの)
 - 炉心損傷頻度 CDF, core damage frequency
 - 大規模早期放出頻度 LERF, large early release frequency
 - 格納容器破損頻度 CFF, containment failure frequency

リスク情報活用・確率論導入のメリット

決定論的手法(従来)	確率論的手法
<p>支配的と思われる代表的事象を想定し、不確かさに対し大きな余裕を重ねることにより、起こりうる事象全体を包絡しているとみなす。(保守的)</p>	<p>実際に起こると考えうるあらゆる事象を体系的・網羅的に分析し、不確かさを可能な限り確率論で定量的に取り扱う。(現実的)</p>
<ul style="list-style-type: none"> □ 代表的事象の想定では、全体の安全性が本当に包絡されているかどうかわかりにくい。 □ 保守的設定のため、どのくらい安全余裕があるかわかりにくい。 	<ul style="list-style-type: none"> □ 体系的・網羅的な想定により、安全への潜在的脅威をより幅広く検討できる。 □ 安全への脅威をリスク重要度に基づいて優先順位付けできる。 □ 安全への脅威に対する防護措置をより現実的にかつ幅広く検討できる。
<p>【例】決定論による設計基準事故設定 大口径配管破断冷却材喪失の際に炉心損傷しないよう安全系を設計し、緊急時対応を計画する。</p>	<p>1975年 米 原子炉安全研究(世界初のPRA) 「実際には小口径配管破断に起因する炉心損傷の可能性のほつが高い」 1979年 米スリーマイル島原子力発電所事故</p>

体系的・網羅的かつ現実的な安全上の知見が得られる
不要な保守性を排除かつ安全上重要度の高い分野に重点⇒資源の有効利用も

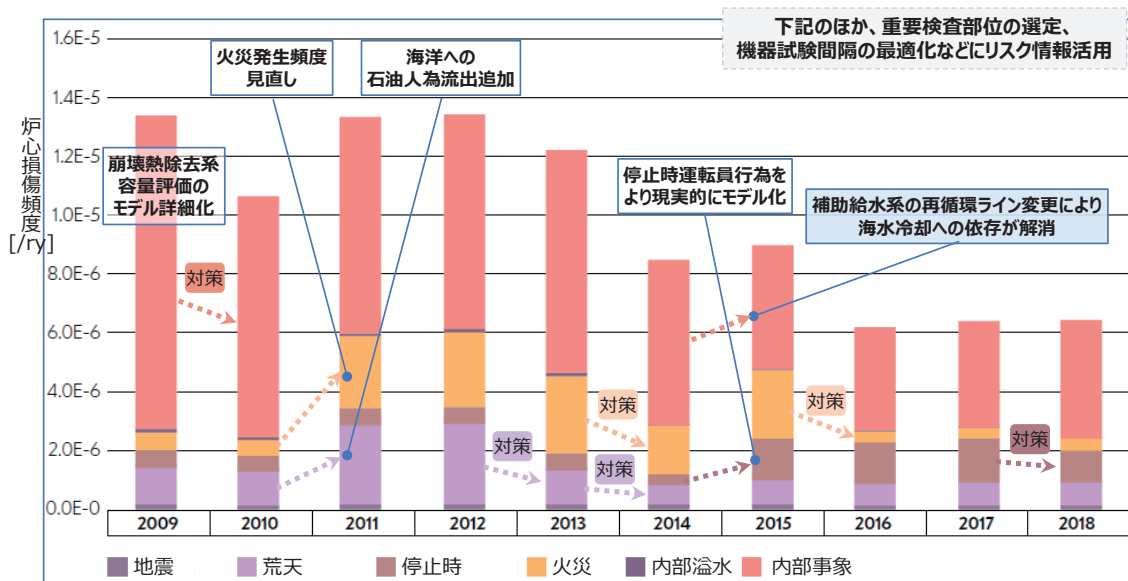
報告内容

1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子力リスク研究センターの取り組み
7. まとめ

3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価

継続的安全性向上の好例

フィンランド Olkiluoto 1 原子力発電所 (TVO社, BWR, 860MWe, 1979～) の例



出典：“Finnish report on nuclear safety.” Finnish 8th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety STUK-B 237, Helsinki 2019. をもとに作成

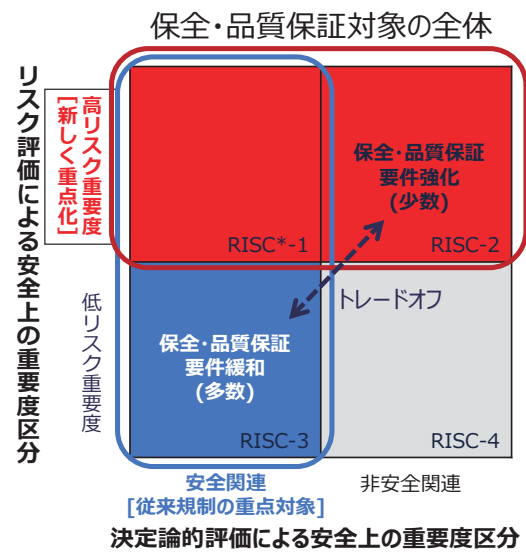
報告内容

1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子力リスク研究センターの取り組み
7. まとめ

4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守

安全上重要な機器に 保全・品質保証資源を重点化

- 機器の安全上の重要度
 - 従来、決定論により定める [安全関連]
 - PRAにより再評価する [高リスク重要度]
- 保全・品質保証の重点を [安全関連]機器から [高リスク重要度]機器へ



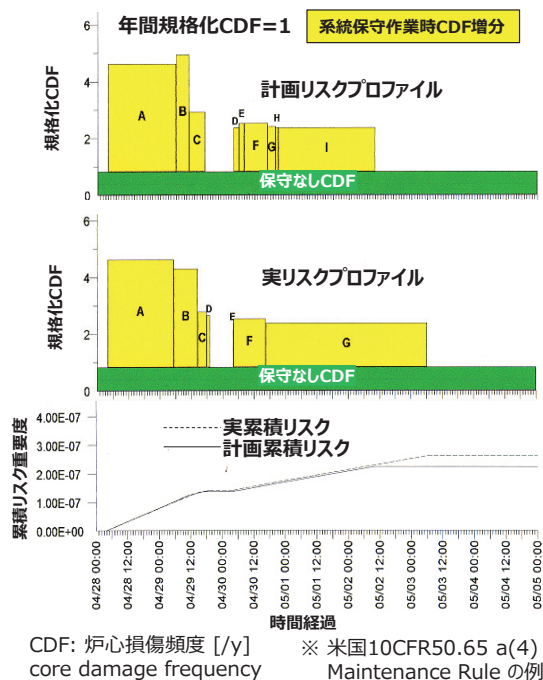
安全性が向上、かつ
保全・品質保証対象機器数が
減少する

*RISC: Risk-Informed Safety Class
米国10CFR50.69 重要度分類 の例
(連邦規則)

安全システムの保全を停止時から出力運転中へ 運転中保全 On-Line Maintenance

- 通常、安全システムは停止時に保全
 - 停止時でも一定のリスクあり
- 出力運転中に安全システムを予防保全
 - (“待機除外許容時間”を利用)
 - 安全システム待機除外により**リスク増**
 - ⇒ 構成リスク管理プログラム(右図)により許容水準に抑える
 - 保全計画立案と**事前リスク評価**
 - 保全作業実施と**実リスクの監視**
- 停止時は安全システム保全作業削減
 - 安全システム機能維持により**リスク減**
 - 運転中リスクとのトレードオフ

運転中と停止時のリスク管理による
安全性向上、かつ、
停止期間の**短縮**による**稼働率向上**



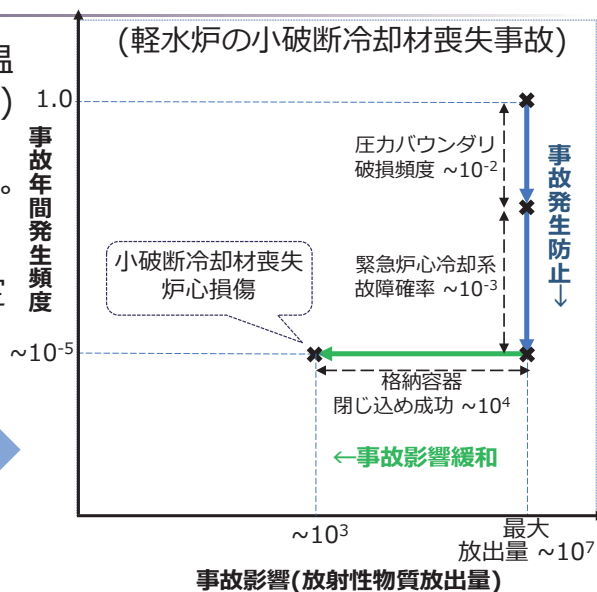
報告内容

1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子力リスク研究センターの取り組み
7. まとめ

新增設炉・次世代炉の深層防護設計最適化

- 米国では、非軽水型原子炉(高温ガス炉、ナトリウム冷却炉など)の設計をPRAにより最適化する制度化の取り組みが進んでいる。

- 認可基準事象(設計基準事象、設計基準超事象、など)の決定
- 機器重要度分類
- 原子炉設計仕様によらない深層防護バランス
事故発生防止機能と
事故影響緩和機能
とのバランスが適切にとれているかどうかを事故シーケンスごとに確認



出典：Karl N. Fleming, Fred A. Silady, "A risk-informed defense-in-depth framework for existing and advanced reactors," Reliability Engineering and System Safety 78 (2002) をもとに作成

報告内容

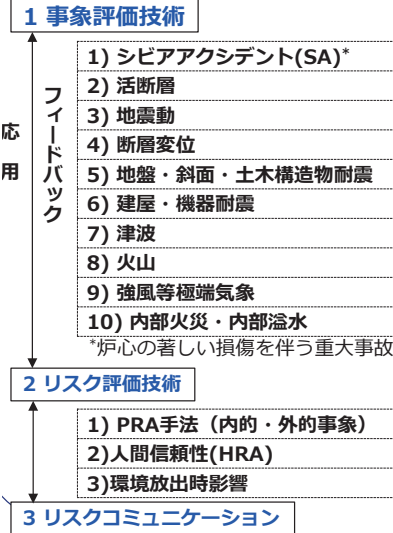
1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子力リスク研究センターの取り組み
7. まとめ

PRA手法研究開発

(2022年3月NRRC研究ロードマップより)

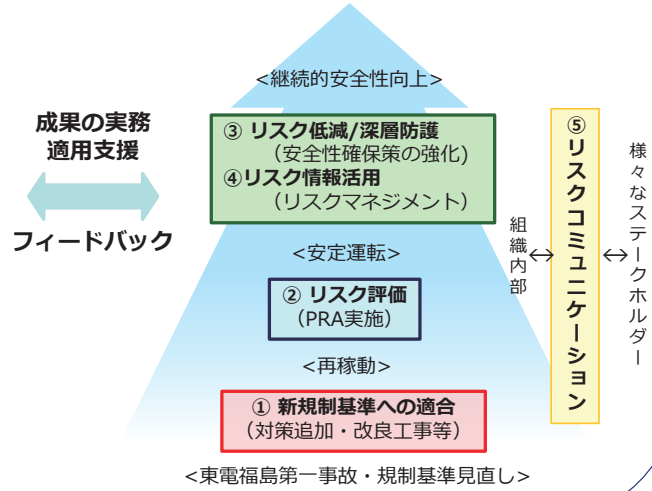
- ・ 低頻度だが大きな被害をもたらし得る事象のさらなる解明と対策立案
- ・ 従来の決定論的な手法に加えてリスク情報を活用する手法を適用

研究開発項目



継続的安全性向上の取り組み

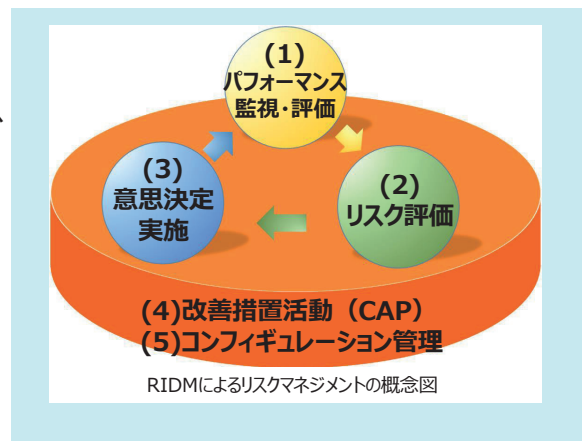
*番号①～⑤は、後述のロードマップの「成果の適用先」の番号に対応



原子力事業者の戦略・アクションプラン

- リスク情報を活用した意思決定(RIDM)を発電所のマネジメントに導入するため、その取り組みの基本方針・アクションプランをとりまとめた。
- 『リスク情報活用の実現に向けた戦略プラン及びアクションプラン』
電力会社11社 初版 2018年2月、改訂版 2020年6月

発電所の取り組みを適切に評価し、より効果的にリスクを低減させ、安全性を向上させる仕組み

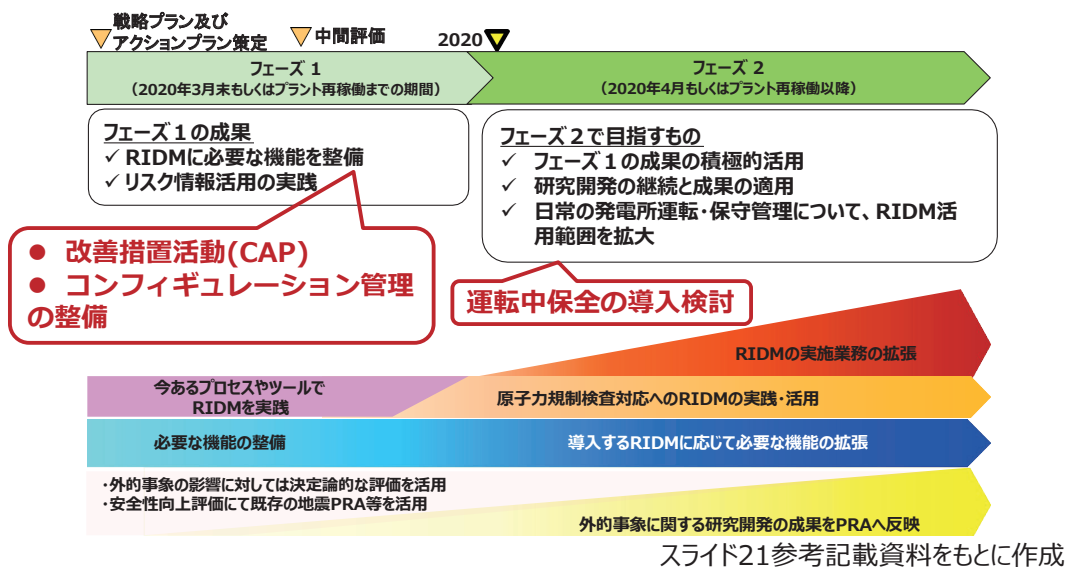


参考：原子力発電の安全性向上のためのリスク情報の活用について、電気事業連合会からのお知らせ、2020年6月19日

原子力事業者の戦略プラン

フェーズ 1 : リスク情報を活用した自律的な発電所マネジメントの高度化。⇒ **着実に進捗**

フェーズ 2 : 自律的な発電所マネジメントを継続的に改善するとともにRIDM活用範囲を拡大。
⇒ **アクションプランを策定**



報告内容

1. カーボンニュートラルを実現しうる大容量電源としての原子力発電
2. リスク評価とリスク情報活用
3. リスク情報活用によるプラントの安全性評価
4. リスク情報活用によるプラントの効率的な運転保守
5. リスク情報活用による新增設プラントの安全設計
6. 原子カリスク研究センターの取り組み
7. まとめ

まとめ

- **原子力発電は炭素を排出しない大容量電源であり、2050年のカーボンニュートラルに寄与できるポテンシャル**をもつ。
- 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓から、原子力発電に潜在するリスクを直視し、**十分な安全性確保を前提**とした発電所運用により、一般からの信頼を獲得することが不可欠。
- 2050年に「原子力+CO₂回収前提火力」で総発電電力量の約30-40%（第6次エネルギー基本計画）を可能とする設備容量確保のためには、既存炉の早期再稼働、長期運転の実現、**新增設/リプレースが必要**。
- さらに、高い安全性の下でより経済性の高い原子力発電を実現するには、従来の決定論的判断のみでは限界があり、安全規制と発電所運用に**リスク情報活用意思決定の導入**が重要。
- 原子力リスク研究センターでは、国内原子力発電へのリスク情報活用導入のため、必要なPRA技術の開発とリスク情報を活用した意思決定の事業者支援を行っている。

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献

1. 経済産業省 第24回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 資料3「今後の原子力政策について（事務局提出資料）」 2022年2月24日
(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/024_03_00.pdf)
2. S. Kaplan, B. J. Garrick, "On The Quantitative Definition of Risk," Risk Analysis, Vol. 1, No.1, 1981.
3. Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), "Finnish report on nuclear safety." Finnish 8th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety STUK-B 237, Helsinki 2019.
(https://www.iaea.org/sites/default/files/finland_nr-8th-rm.pdf)
4. The B. John Garrick Institute for the Risk Sciences, UCLA, and NRRRC CRIEPI, "Risk-Informed Decision Making: A Survey of United States Experience," 2017.
邦訳「リスク情報を活用した意思決定：米国の経験に関する調査」
(<https://criepi.denken.or.jp/jp/nrrc/publication.html>)
5. K. N. Fleming, F. A. Silady, "A risk-informed defense-in-depth framework for existing and advanced reactors." Reliability Engineering and System Safety 78 (2002) 205–225.
6. 原子力リスク研究センター「NRRRC研究ロードマップ」2022年3月
(<https://criepi.denken.or.jp/jp/nrrc/intro/roadmap.html>)
7. 電気事業連合会「原子力発電の安全性向上のためのリスク情報の活用について」電気事業連合会からのお知らせ 2020年6月19日
(https://www.fepc.or.jp/about_us/pr/oshirase/1260030_1458.html)