

# 軽水炉の安全確保からみた核融合炉

日本原子力学会2025秋の大会

核融合工学部会・原子力安全部会合同企画セッション **フォローアップセミナー**  
核融合におけるリスクとは何か？—定義・評価・語り方をめぐる多分野対話

2025.10.30

日本エヌ・ユー・エス(株) 宮田浩一

本資料は、企画セッションの議論の対象として示された以下の項目について、軽水炉の状況に照らして論点を上げたものである

- リスクの定義
- 評価手法
- 制度設計
- 実践
- ストーリー

# リスクの定義

(原子力安全の目的は、人と環境を放射線の有害な影響から防護することであり、軽水炉では炉心、使用済み燃料プール、放射性廃棄物処理施設に大量の放射性物質があるが、事故進展性が高い炉心起因のリスクが支配的)

✓ 一般にリスクは以下で定義

影響 × 頻度 (確率) : シナリオ毎に評価し合算

risk triplet: SECY-98-144 White Paper on Risk-Informed and Performance-Based Regulation

- 事故シナリオ – What can go wrong?
- 事故の発生頻度 – How likely is it?
- 事故の被害や影響度 – What are the consequences?

✓ 影響の指標を何で表すか

- 放射線被ばくによる健康影響、ソースターム (放出放射性物質の量やタイミングなど)、格納容器破損頻度、炉心損傷頻度
- 財産影響 (施設使用制限、土地利用制限など)
- 運転停止頻度

✓ 核融合炉と軽水炉の比較

健康影響、環境影響、財産影響、運転停止などについては軽水炉と比較可能 (ソースタームは核種が異なる、また、設備の違いから格納容器破損や炉心損傷は比較できない)

⇒安全の観点からは健康影響・環境影響

✓ 頻度は詳細設計がないと評価できない?

✓ なお、ここでは事故時のリスクを議論するが、平常時のトリチウム放出 (金属透過含む) や放射化生成物も注意が必要

# 評価手法：決定論的評価と確率論的評価（リスク評価）

- ✓ **決定論的評価**：発生し得る事象を同定し、事象進展を評価するもので、事象進展を左右する条件を代表的・保守的に設定することで不確実さを考慮して**安全設計の妥当性を評価**する（設計比較には不向き、AもBも合格だがA>BなのかA<Bなのか不明）
- ✓ **確率論的評価**：発生し得る事象とその進展の組み合わせ（**シナリオ**）を網羅的に同定し、その**発生頻度と影響をセットで評価**する（リスクによる設計比較が可能）

## 軽水炉の決定論的評価（設計基準事象）

- ✓ 事象発生頻度のカテゴリーごとに**炉心（バリアー）の健全性を脅かす現象に対する代表事象を選定**し、判断基準を満たすことを確認する
- ✓ 頻度：運転時の異常な過渡変化（ $\sim 10^{-2}$ /年）、事故（ $\sim 10^{-4}$ /年）
- 代表事象（現象）：反応度投入、水位の低下、圧力の上昇など
- 代表的な設計基準事故：**LOCA**（大量の放射能を有する炉心燃料のバリア（被覆管）の健全性（冷却）を脅かす最も厳しい**事故進展**のある事象）
- 事故進展性の低い事故事象：燃料集合体落下、オフガス系の破損⇒ECCS不要

## 核融合炉では

- ✓ 軽水炉と異なり**炉心（プラズマ）の放射エネルギーは少なく、崩壊熱も小さい**ことから、**事故進展性が低く**、炉心を対象とする評価は安全設計の妥当性を判断するには不向きでは
- ✓ **放射能保有量の多い箇所を同定**し、何らかの評価をすることは可能であろうが、軽水炉のような**事故進展性はない**ことから、設計条件を逸脱しないことを確認することになるのでは（設計確認）

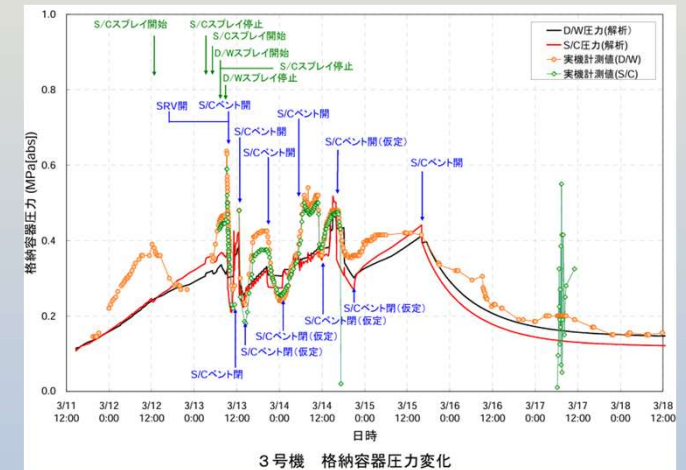
# 確率論的評価の手法（影響評価）

## 影響の評価（放射性核種、影響核種）

- ✓ 軽水炉の炉心（燃料）には、希ガス、ヨウ素、セシウム、ストロンチウムなど**多種多様な放射性物質が多量にある**
- ✓ 核融合炉では**トリチウム**が主たる影響核種、**複数個所に存在**（放射化生成物も要注意）

## 影響の評価（放出ポテンシャル、崩壊熱）

- ✓ 軽水炉では、安全設備が多重故障することで**崩壊熱の除去が不十分**となり炉心燃料が溶融、原子炉容器損傷、格納容器破損といった**多重に設けたバリアーが段階的に喪失し**、大量の放射性物質の放出に至る（**事故進展性が高い**）
- ✓ 核融合炉では、崩壊熱は小さく、放射性物質の放出に至るプロセスは軽水炉と異なる（ブランケットは溶けない？）  
⇒容器に閉じ込められているトリチウムというのが実態的か



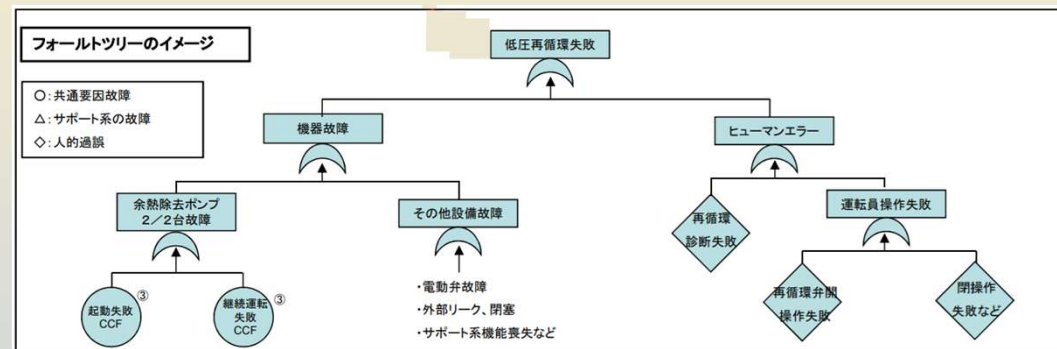
## 影響の評価（大気拡散）

- ✓ 大気拡散については、軽水炉では気体状の希ガス、有機ヨウ素、エアロゾル状のCsIなどの評価手法が確立されている
- ✓ 核融合炉では、トリチウムが気体状であり大気拡散は同様に扱うことができると考えるが、空気中の酸素とトリチウムの化学反応等でトリチウム水(THO)ができるのが特徴？
- ✓ トリチウムによる外部被ばくの影響は**軟β核種**のためほとんど問題にならないものの、内部被ばくは考慮が必要で、**分子状トリチウム(TH)とトリチウム水(THO)では影響度が大きく異なる(TH<<THO)**、また有機結合型トリチウム（OBT）の影響も考慮する必要あり

# 確率論的評価の手法（頻度評価）

## 頻度の評価

✓ 事故シーケンスの頻度評価には、**起回事象発生頻度、機器故障率やヒューマンファクタ**が必要となり、**軽水炉では運転経験も豊富**でこれらの評価手法も成熟しており、米国では事業者だけでなく規制においても活用されている（わが国でも活用が進みつつある）



✓ 核融合炉では、**運転経験がなく、これらを精度よく評価することは困難？**

⇒簡略評価（暫定）にならざるを得ない（保守的な扱い？）

軽水炉のような複雑さ（多種多様な安全設備、インターロック、事象進展に応じた運転員対応など）があるか？

## 保有放射性物質の影響ポテンシャル

✓ 原子力学会の「核融合炉の潜在的リスクとその評価手法」研究専門委員会では、**軽水炉と核融合炉の保有する放射性物質がほぼ全量放出された場合の健康影響を相対比較し、核融合炉の相対的影響は軽水炉より3桁以上低いと試算**

# 制度設計

- ✓ 軽水炉では、原子炉等規制法並びに関連する規則類等により確立された規制制度が出来上がっている
- ✓ 元々は米国の規制（10CFR50, Appendix-A General Design Criteriaなど）を手本に日本なりの考え方・解釈を加えて作り、運転経験等を踏まえて改善してきている
- ✓ 核融合炉では、欧米でも規制制度の整備に取り掛かっているところ、これらを参考として我が国としての制度を作っていく必要がある
- ✓ 前ページで記載したように、核融合炉の影響ポテンシャルは軽水炉より大幅に小さいことから安全設計の要求レベルも相対的に低いと考える
- ✓ 欧米の動向を踏まえるとRI法がベースになると考えるが、新たな規制制度を考える上では、軽水炉の制度の上で議論する（例えば事故を想定して単一故障基準を適用して安全性を示すなど）のではなく、恣意的な事象想定や故障の仮定を置かず、ありのままの状態（as is）を把握すること（これがリスク評価）が適当と考える

# 実践

## 防止と緩和

- ✓ 軽水炉では、異常発生防止と異常発生時の緩和をそれぞれ手厚く準備しており、単一故障や単一の誤操作を仮定した事故に対する安全評価により設計の妥当性を確認している（決定論的評価）
- ✓ 核融合炉の真空容器は運転上必須のものであり、トリチウムの閉じ込めという緩和機能を有しつつも異常発生防止設備としての性格も有し、運転継続・財産保護の観点からも、信頼性の高い設備とする必要がある
- ✓ また、核融合炉の影響の大きさ（小ささ）を考慮した場合、多重・多様な安全設備や事前の緊急時対応体制等の必要性は相対的に低いのではないか？

## 外部事象に対する配慮

- ✓ 軽水炉では、クレジットをとる安全設備は設計基準外部事象に耐える設計が必要とされ、内部事象に対する安全評価が外部事象に対しても有効になっている
- ✓ 核融合炉のリスクを考慮すると同じ枠組み（耐震設計指針、大規模損壊対応、特定重大事故対処施設など）で考える必要はないが、航空機衝突の考慮の要否も含め適切なリスク抑制が必要（テロ対象としての魅力は？）⇒財産保護との関係

## 軽水炉インフラとの関連

- ✓ 内包放射性物質や放射性廃棄物など、核融合炉の特性を踏まえ、廃炉までのライフサイクルにわたって軽水炉で整備されているインフラの範囲で収まるのか、収まらない場合にそれをコントロールする技術があるのか、明確にすべき

# ストーリー

- ✓ 欧米の議論を見ても、核融合炉のリスクは大きくないと理解されているが、「安全である」というよりも、**どういう危険がどの程度あるのかの説明をきちんとすることが重要**
- ✓ その際には、保守的評価・決定論的評価よりも**現実的なリスク評価を活用**するのが有用
- ✓ その上で、軽水炉などと比較して、どのように構えるべきなのかを説明していくのが適当ではないか

## まとめと感想

- ✓ 核融合炉の安全性について主として事故評価（周辺公衆への影響）の観点から軽水炉と比較し、概観した
- ✓ 軽水炉とは多くの点で相違があり、全体像を整理する必要性を感じている（影響核種がどこにどれだけあるのか、通常時・事故時の放出経路やシナリオ、ライフサイクルを通じた安全性確保）