文部科学省国家課題対応型研究開発事業 令和3年度「原子カシステム研究開発事業」成果報告会

# 原子炉構造レジリエンスを向上させる 破損の拡大抑制技術の開発

(中間成果報告)

### 令和4年2月2日(水)

(受託者)国立大学法人 東京大学

(研究代表者) 笠原直人 東京大学大学院工学系研究科教授 (再委託先) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

国立研究開発法人 防災科学技術研究所





- 1. 研究の背景と目的
- 2. 研究対象とする事象と研究課題
- 3. 研究実施内容
  - ▶ 超高温時に対する破損拡大抑制技術
    ▶ 原子炉構造レジリエンス向上策
  - > 過大地震時に対する破損拡大抑制技術

## 4. まとめ



# 1. 研究の背景と目的

合理的リスク低減のための構造強度の考え方の転換

- 従来の原子炉構造設計は、設計想定事象に対する破損発生防止を目的
- ■本研究では、設計想定を超える事象に対して破損が生じた場合にその影響を緩和する革新 的な構造強度技術を提示
- 破損が生じても、安全性へ影響する破損モードへの拡大を構造固有の特性により抑制することが出来れば、レジリエンス(安全性能低下に対する抵抗性と回復性)が向上



リスク低減のための構造強度の考え方の転換

破損拡大抑制による安全性レジリエンス向上



### 構造固有の特性による破損の拡大抑制(破壊制御)

 想定を超える事象に対して工学設備に頼らず、構造固有の特性により破損拡大を自己抑制
 安全性への影響の小さい破損モード(変形や小さなき裂)を先行させることによって荷重や エネルギーを低減させ、安全性への影響の大きい破損モード(崩壊や破断)へ破損が拡大 するのを抑制

軽水炉•新型炉荷 重	圧力	自重	地震
先行させる破損 モード(安全性へ の影響小)	小さいき裂 の貫通	変形	塑性変形や支 持部破損によ る剛性低下
荷重やエネルギー の低下要因	流出による 圧力低下	荷重再配 分による 部材応力 の低下	振動数比上昇 による伝達エ ネルギー低下
抑制する破損モー ド(安全性への影 響大)	延性破壊、 破裂	延性破壊、 破断	崩壊、破断



化学プラントのコーンルーフタンクのルーフと側板の接続 部の強度は側板や底板より低く制御されている。何らかの 原因で内圧が想定を超えた場合に、ルーフと側板の接続 部が先行して壊れ圧力が抜け、側板や底板の圧力による 破壊と液の流出を抑制

化学プラントにおける破損拡大抑制例

## 2. 研究対象とする事象と研究課題

自由度の高い次世代高速炉を具体例として研究を進め、その後一般化して既存炉にも展開

次世代高速炉の安全上重要な事象:崩壊熱除去系の冷却機能喪失事故





## I.超高温時に対する破損拡大抑制技術

東京大学

JAEA

防災科研

- 安全上重要な事故シナリオ: 次世代高速炉原子炉構造の冷却機能喪失事故時のナトリウム液位確保方策を対象
- レジリエンス向上のシナリオと具体策 : 容器のクリープ変形により荷重を上部吊り下げ部から床支持に再配分させ、容器破断への拡大を抑制



荷重再配分により、最大応力発生箇所がA→B→Cと変化しつつ、応力は低下(平坦化)していく。

#### ■ 確認必要項目 : 下部鏡で直ちに破断が起こらないこと、原子炉容器を支える強度が維持されていることの確認が必要

#### I-a. 超高温時に対する破損シーケンス予測・抑制技術

**原子炉容器を模擬した基本形状**に対して、弾塑性クリープ変形(応力再配分)や座屈が延性 破壊や局部破損に拡大するメカニズムと制御パラメータを解明する。







座屈強度よりも破壊強度が3~10倍大きい

東京大学

JAEA

👬 防災科研

→材料に延性があるため座屈後も大きな変形を許容。飛び移り座屈(不安定なオイラー座屈とは モードが異なる)のため変形してもすぐに破壊に至らず、耐荷能力を維持。

load

第四段階(延性破壊)

80

——半球殻(R66)

100

120

### 超高温時に対する破損拡大抑制の方法論と見通しの提示

構造不連続部付き球殻及び床接触球殻について、材料に延性があり、座屈し た後の挙動が飛び移り座屈のような安定なモードであれば、座屈後に直ちに 破壊せず、変形しながら大きな荷重を支持でき、破損拡大抑制技術が適用で きることを明らかにした。



次世代高速炉原子炉容器では、運転中および事故時の高温状態では材料が 延性(クリープを含む)に富んだ状態であり下部鏡と床や他の構造物との 接触による座屈モードは飛び移り座屈であることから、破損拡大抑制技術 の適用条件を満たし、下部鏡接触により円筒胴に生じていた荷重を再配分 して円筒胴が破壊しないよう制御できる見通しを得た。



## Ⅱ.過大地震時に対する破損拡大抑制技術

- 安全上重要な事故シナリオの抽出: 次世代高速炉の過大地震時の原子炉液位確保と崩壊熱除去機能確保を対象
- レジリエンス向上のシナリオと具体策 : 配管塑性変形や容器座屈による柔構造化による振動数比(入力振動数/固有振動数)上昇を活用し、容器破断 や配管崩壊・破断への拡大を抑制



変形による柔構造化により振動数比 (入力振動数/固有振動数)が1より 大きくなると、外部からの振動エネル ギー流入が低減し、崩壊や破断への 拡大を抑制



#### ■ 確認必要項目 :

容器座屈が直ちに破断に至らないこと、配管塑性変形が直ちに崩壊・破断に至らないことの確認必要

#### Ⅱ-a. 過大地震に対する破損シーケンス予測技術

配管や容器を模擬した基本形状に対して、振動数比(入力振動数/固有振動数)や自重による応力に応じて地震応答がラチェット変形や座屈から崩壊や破断に拡大するメカニズムと制御パラメータを解明する。





梁のラチェット変形/崩壊試験



曲がり梁試験



JAEA



梁の軸圧縮座屈試験



円筒座屈試験



### 梁モデルにおけるラチェット変形と崩壊の発生条件



#### ラチェットと崩壊の破損モードマップ

起こりやすさ ラチェット>>崩壊

最大加速度が同じでも、振動数比(入力振動数/固有振動数)が 大きくなると、ラチェットや崩壊が起こりにくくなる。



### 円筒モデルにおける座屈発生と座屈後挙動







初期固有振動数34Hz

座屈後20Hz~15Hzに低下

15Hz程度まで低下し安定



座屈後は応答加速度と固有振動数が大きく低下した。固有振動数が入力振動数より下がることで動 的荷重のエネルギーが入力されにくく、それ以上の座屈進展や亀裂が抑制されることがわかった。

### Ⅱ-b. 過大地震に対する破損シーケンス抑制技術(防災科研)

複数の支持構造物を有する小規模な配管系を対象に、弾塑性応答によるエネルギー 吸収、支持構造物損傷による配管系の柔構造化などを取り入れた破損シーケンス制 御の具体的手法の検討を行い、BDBE下で配管系の機能喪失を回避する、レジリエ ンス性を含めた新たな耐震性評価概念を提案する。



小規模配管系試験による、支持構造物損傷による破損シーケンス制御技術の確認

✓ 検討用地震波(K-NET穂別NS、時間軸調整なし)により、支持構造物Aが配管系に先行して塑性化することを確認。
 ✓ 2022年1月17日~2月4日に防災科研大型耐震で加振試験中

### 過大地震に対する破損拡大抑制の方法論と見通しの提示

梁および円筒について、材料に延性があり、塑性変形や座屈変形後の荷 重再配分が安定なものであれば、変形により振動数比(入力振動数/固有 振動数)が上昇し、エネルギー伝達が低減することから、崩壊や破断に至 る前に挙動が安定し破損拡大抑制技術が適用できることを明らかにした。



次世代高速炉の原子炉容器と配管では、適切な品質管理の下、材料延性と交 番荷重に対する耐疲労性が確保される場合、ラチェット限界や座屈限界より破 損限界が相当に大きいことを活用し、変形が許容できる範囲で破損前に柔構 造化が進むように制御して、変形・座屈から崩壊・破断への拡大を抑制できる見 通しを得た。



## Ⅲ. 原子炉構造レジリエンス向上策(東大,JAEA)

#### 破損拡大抑制によるレジリエンス向上効果:



#### 向上効果を可視化するために解決すべき課題:

- 従来のPRA手法は、想定したイベントに対する成功か失敗の確率を扱う。
- 成功か失敗かに至る時間効果と導入新たなAM策の追加などイベントの動的変化を評価 する必要がある。



#### プラント状態シミュレーションと連続マルコフ連鎖モンテカルロ法による時間効果導入

- イベントツリーと時々刻々のプラント状態を、連続マルコフ過程モンテカルロ法で連成 させ、事象の進展を動的に捉える。
- 時間効果とイベントの動的変化を考慮したレジリエンス指標(安全機能)が得られる。





### 破損拡大抑制によるレジリエンス向上効果の可視化法提示

- イベントツリーと時々刻々のプラント状態評価を連続マルコフ過程モンテカルロ法で 連成させることで、時間効果と事象の動的変化を考慮に入れたPRA解析法を開発 した。
- この方法により、破損拡大抑制による性能維持と時間余裕によって追加されたAM 策による、炉心損傷確率の低減、レジリエンス指標(安全裕度、時間裕度)を可視 化することができる。



- 4. まとめ
- 記計想定を超える事象(過酷事故時の超高温や過大地震)によって破損が生じた場合にその拡大を抑制する革新技術として、破壊制御に基づく方法論を提示した。
- 基本的な構造物(球殻、梁、円筒)の破壊試験により、上記破損拡大抑制技術の適用見通しを示した。
- 次世代高速炉を具体例として、破損拡大抑制によるレジリエンス向上策を検討し、その効果の可視化方法を提案した。
- 今後は、破損拡大抑制技術の実機適用性を、配管系モデル・原子炉容器モデルの構造物試験と、詳細構成式を用いた数値シミュレーションの組み合わせにより確認する。
- 最終的に次世代高速炉のレジリエンス向上策を提案する。さらに成果を一般 化することにより、炉型に関わらず、事故時の破損拡大を抑制してレジリエ ンスを向上させるためのガイドラインを作成する。



#### 詳細構成式と模擬材料試験を組み合わせた革新的モデリング Q&A用











模擬材料 構造物試験 構造物試験

シミュレーション



実機構造 シミュレーション



マルチリニア移動硬化則構成式: 実機材料と模擬材料(注)の両者の温度依存弾塑性繰り返し 応力ーひずみ特性を、材料パラメータの変更だけで表現できる詳細構成式の整備

(注)鉛アンチモン合金。超高温における実機材の変形挙動を室温で模擬できる(前プロジェクトで実証)



 $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 

α

10

100T-S-2

防災科研

-100T式

0.02 0.04 0.06 0.08 0.1 0.12 0.14 0.16

JAEA

。 (mm/mm) Pb-Sb合金の成分比を変化させた場合の応力-ひずみ関係

東京大学

赤い太線:鉛アンチモン合金の実験から 得られた動的応力ひずみ曲線(応力振 幅とひずみ振幅の関係)

細い線:整備した詳細構成式による応力 ひずみヒステリシスの予測

22

開発した構成式を<mark>有限要素解析コードFINAS/STARに組み込み、</mark>破壊制御の有効性評価に 必要となる構造解析機能を確認

超高温時に対する破損拡大抑制技術のための構造不連続部付き球殻の座屈試験の予測



過大地震時に対する破損拡大抑制技術のための円筒座屈試験の予測(実施中)



円筒座屈試験体









バイリニア弾塑性、引張軸力、 最大加振加速度10m/s<sup>2</sup> 3.0E+02 2.0E+02  $\ge$ 1.0E+02 底部X方向反力 0.0E+00 -1.0E+02 -2.0E+02 -3.0E+02 -2.0E-03 -1.0E-03 0.0E+00 1.0E-03 2.0E-03 変位(m)

支持点での反カー変位解析