

令和6年度 原子力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

令和7年3月3日

研究代表 東京大学 笠原直人

連携機関 日本原子力研究開発機構
防災科学技術研究所

研究目標

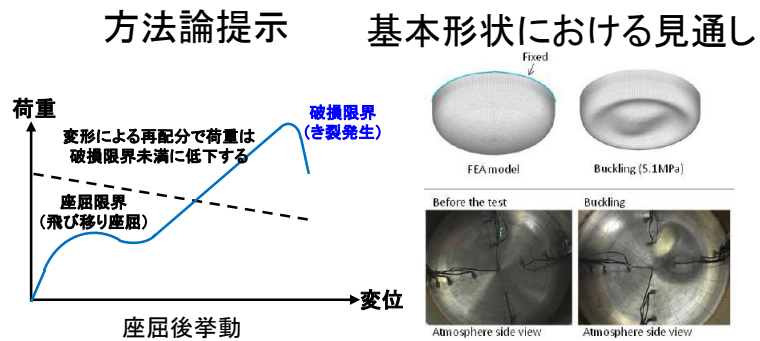
従来の原子炉構造設計は、設計想定事象に対する破損発生防止を目的としてきた。これに対して本研究では、申請者らが開発してきた機器単体の破壊制御技術をプラントシステムに拡張することにより、設計想定を超える事象（過酷事故時の超高温や過大地震）によって破損が生じた場合に、その拡大を抑制する技術を開発し、原子炉構造のレジリエンス向上に資する。

破損発生防止を目的とした従来の構造強度技術の対象は、単一機器の破損発生までであった。ここでは破損発生後の挙動を対象として、計算科学技術と模擬材料試験技術を駆使して、安全性への影響の小さい破損モードを先行させることによって周囲の機器の荷重やエネルギーを低減させ、安全性へ影響の大きい破損モードへの拡大を抑制する、革新的な構造強度技術を開発する。

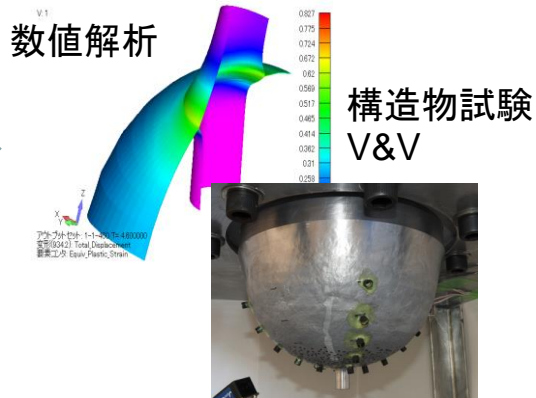
また、社会実装を促すため、開発技術を次世代原子炉構造へ試適用し、破損拡大抑制の有効性を示す。最終的に成果を知識統合することにより、原子炉の事故時の安全性能の低下を抑制し回復を容易にし、レジリエンスを向上させるためのガイドラインを作成する。

全体研究計画

I. 超高温時に対する破損拡大抑制技術

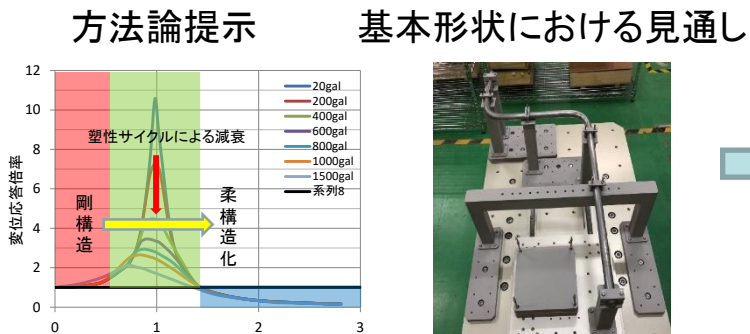


中間評価
(ステージゲート)
機器構造における見通し

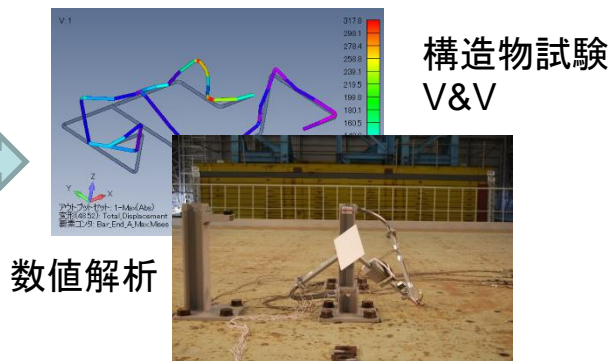


向上策候補提示

II. 過大地震に対する破損拡大抑制技術



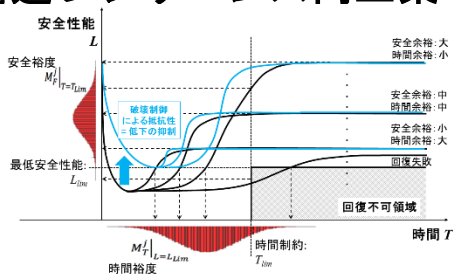
機器構造における見通し



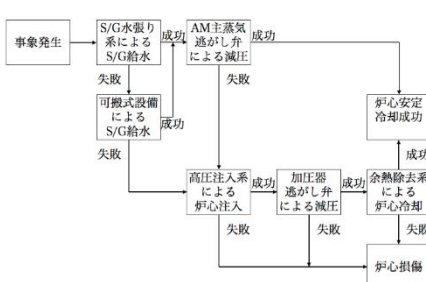
向上策候補提示

III. 原子炉構造レジリエンス向上策

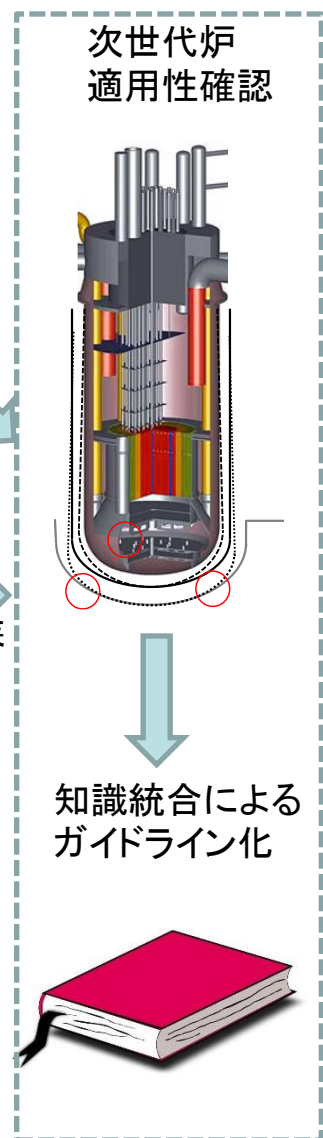
レジリエンス可視化法提示



PRAとの解析統合



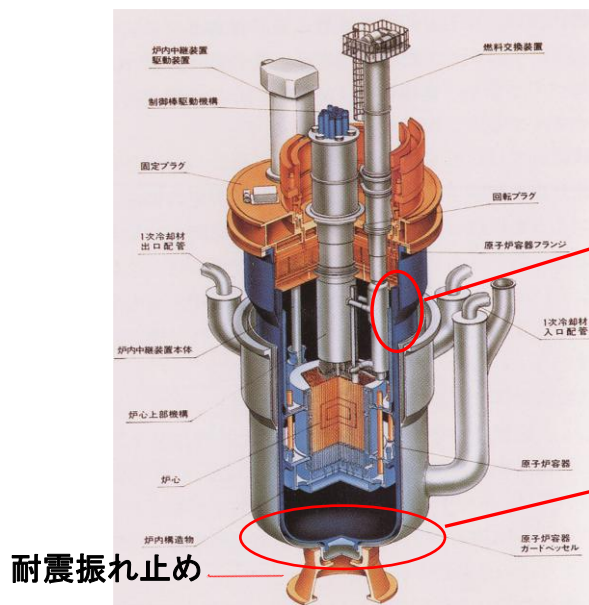
レジリエンス可視化



I. 超高温時に対する破損拡大抑制技術

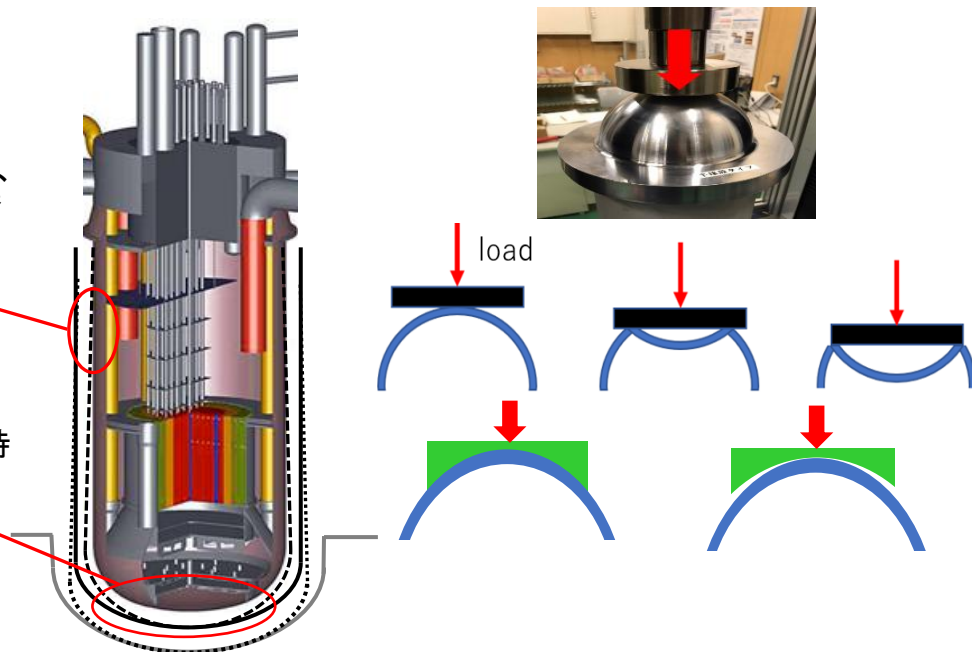
超高温時に対する受動安全構造の提案

- 上吊り支持の高速炉原子炉容器は超高温時には、荷重の厳しい上部胴の弾塑性クリープ変形により下方向に変形。ガードベッセルや床に接触として荷重が低減し、破断を回避。
- 接触により上部胴の荷重が下部鏡に移動して座屈するが、その後破断せずに荷重を支持できれば受動安全が成立。



上部胴の荷重が厳しいが、
下方向変形後の床接触で
低減し破断を回避

床接触により下部鏡が座屈するが、破断せずに支持できれば受動安全が成立



構造不連続部付き球殻座屈試験
形状: もんじゅ原子炉容器模擬



床接触球殻座屈試験
形状: JSFR原子炉容器模擬

原子炉容器下部鏡を模擬した球殻座屈試験の結果



浅い球殻(R300)



中間の球殻(R90)



半球殻(R66)



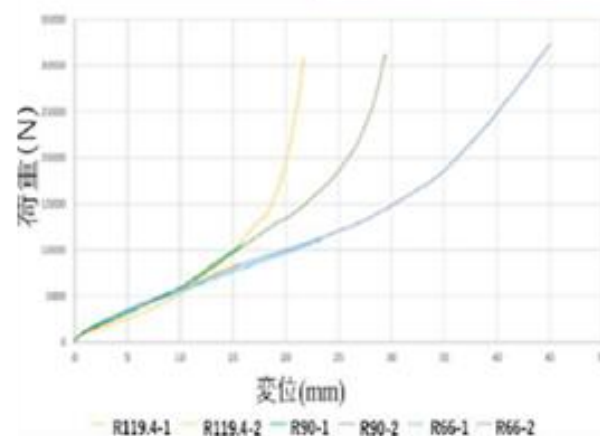
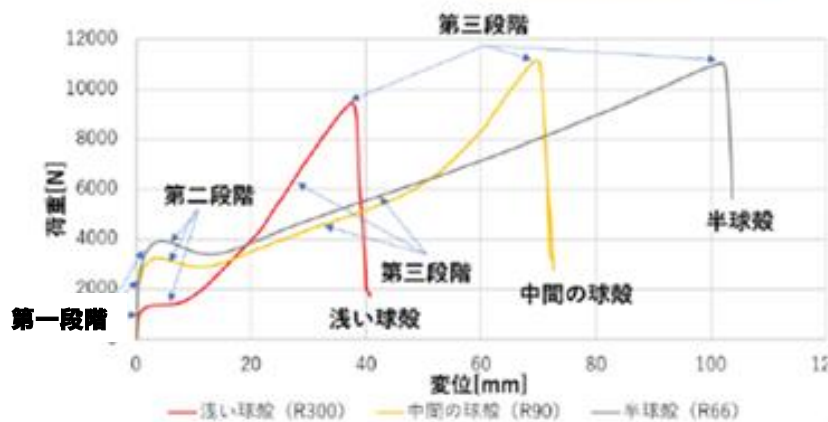
R119.4



R90



R66



原子炉容器下部鏡(構造不連続部付き球殻及び単純球殻)に大きな荷重が加わったときの挙動として、座屈直後に破壊が生じず、変形しながら十分な剛性を保つことを明らかにした。



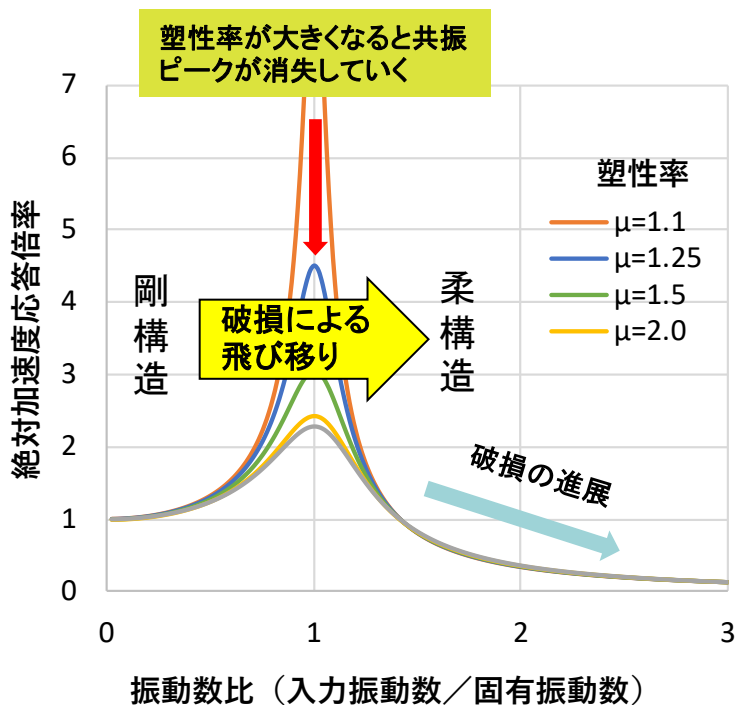
下部鏡の座屈は飛び移り座屈であり、**座屈後挙動は安定して一定の耐荷能力を維持することにより、下部鏡と床の接触により上部胴の荷重が低減して破壊しない受動安全が成立することを示した。**

Ⅱ.過大地震に対する破損拡大抑制技術

過大地震に対する受動安全構造の提案

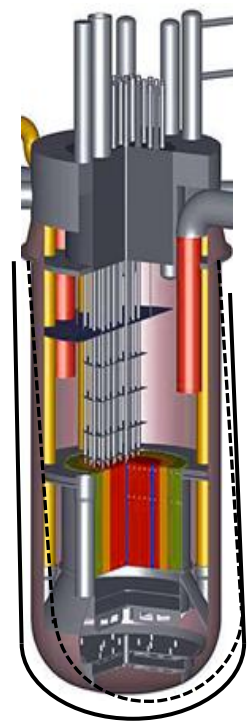
■ 受動安全の成立条件

破損により、振動数比が1を超えて柔構造化すると、荷重に対する応答が遅れて力が伝わりにくくなり受動安全が成立



■ 受動安全容器(構造固有の受動安全性)

座屈による柔構造化で力が伝わらず容器の破断を抑制

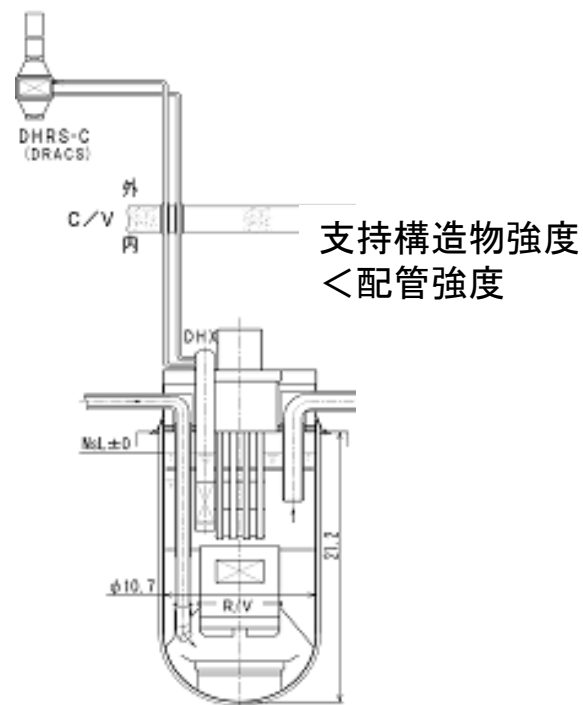


座屈強度 < 破断強度

座屈変形しても直ぐにはバウンダリ破損しない。座屈すると急に柔構造化する。

■ 受動安全配管系(設備集合の受動安全性)

配管に先行する支持構造物破損により系が柔構造化し、力が伝わらず配管の崩壊と破断を抑制

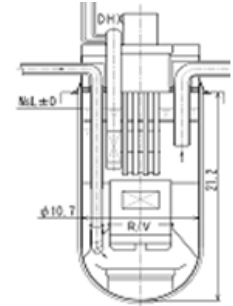


支持構造が破損しても配管自体はすぐには崩壊・破断に至らない。支持構造の破損は、柔構造化するまで進行する。

薄肉円筒の水平振動荷重による座屈と座屈後挙動に関する試験

実際の原子炉容器と近い形状と荷重

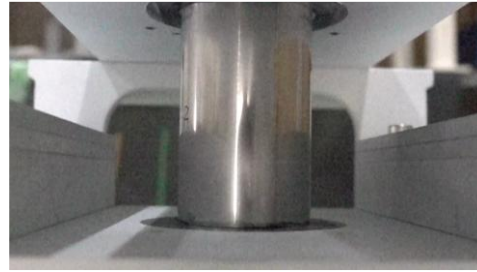
→ 実機と同様の「半径/板厚(R/t)、高さ/半径(L/R)」の寸法、上吊りの薄肉円筒試験体



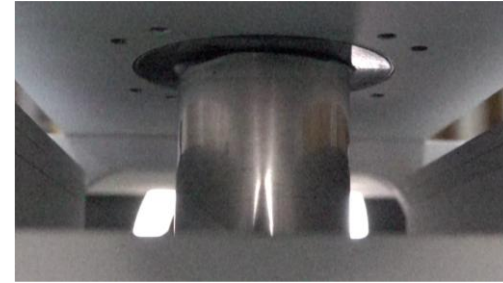
ループ型炉



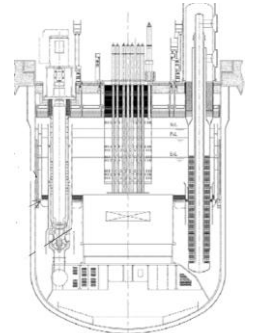
長軸円筒



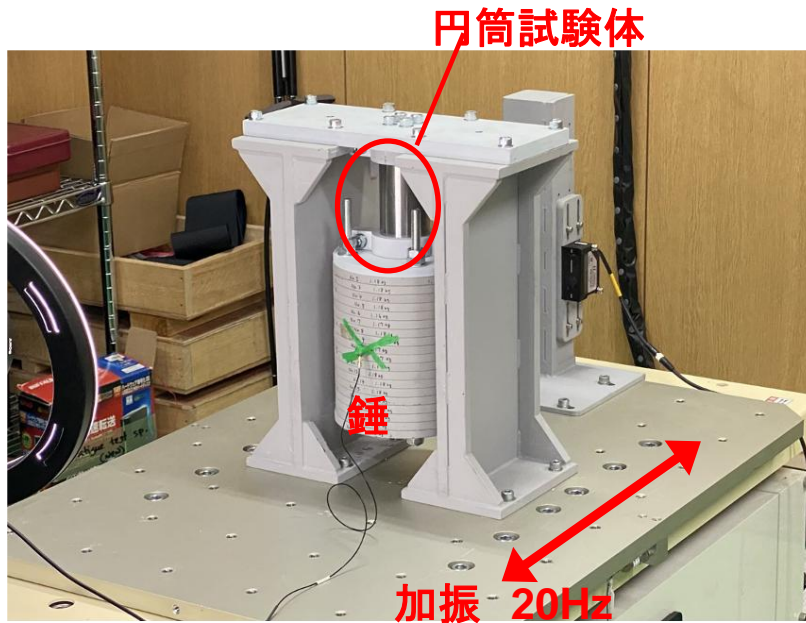
中長軸円筒



短軸円筒



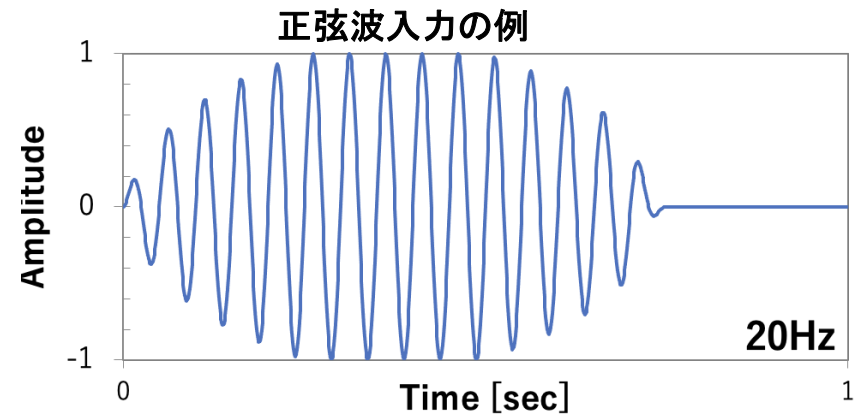
タンク型炉



材料：炭素鋼/SUS304

波形：正弦波、地震波

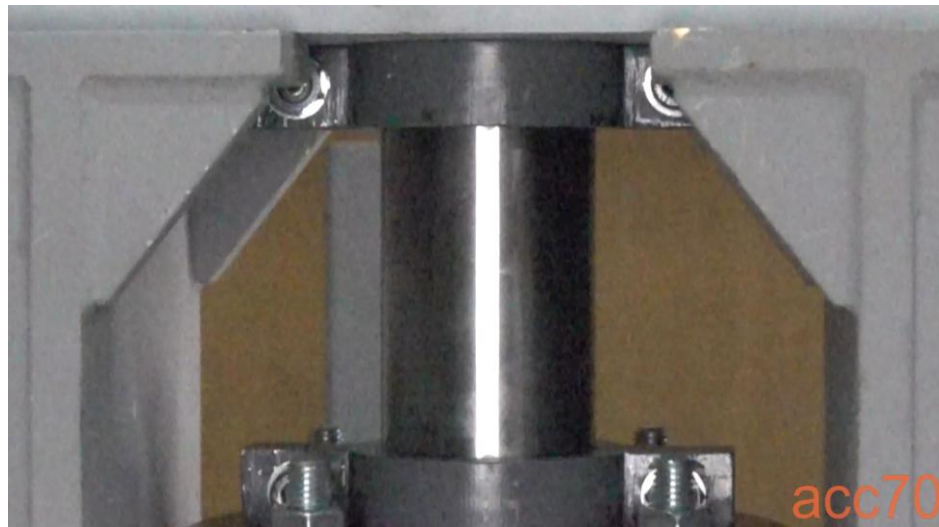
複数の条件の試験体で試験を行なった。



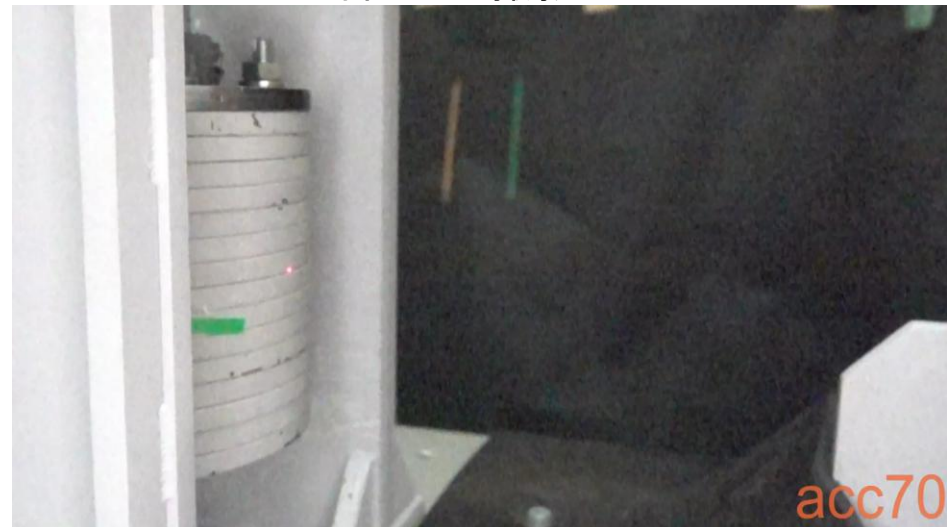
Yiji YE, Sho Hasegawa, Masakazu Ichimiya, Naoto Kasahara, Study on dynamic post-buckling stability of thin-walled cylinders subjected to horizontal vibration, ASME Journal of Pressure Vessel Technology .Vol.146(3):031303(2024)

ハイスピードカメラによるスローモーション動画

正面から撮影

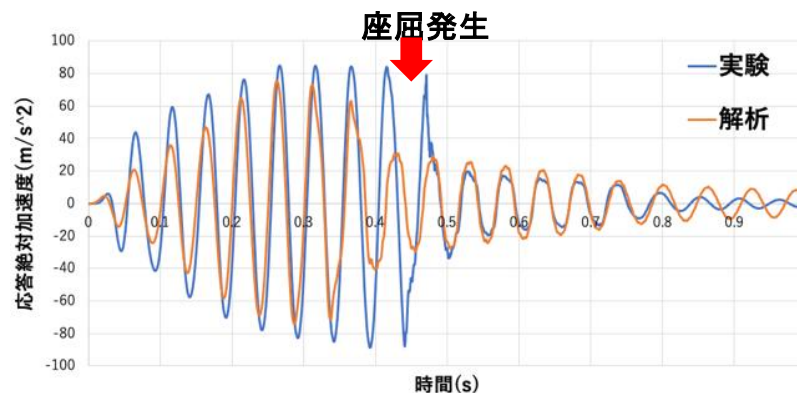


斜めから撮影



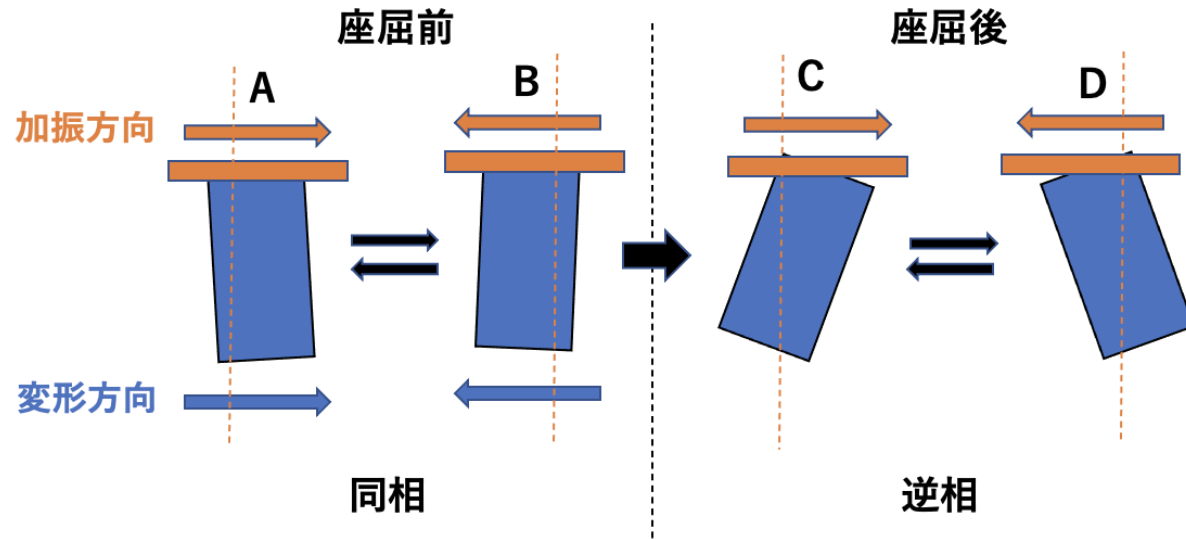
長軸円筒(曲げ座屈モード)

振動台と錘の間に位相遅れが生じた。



座屈後に応答絶対加速度が低下

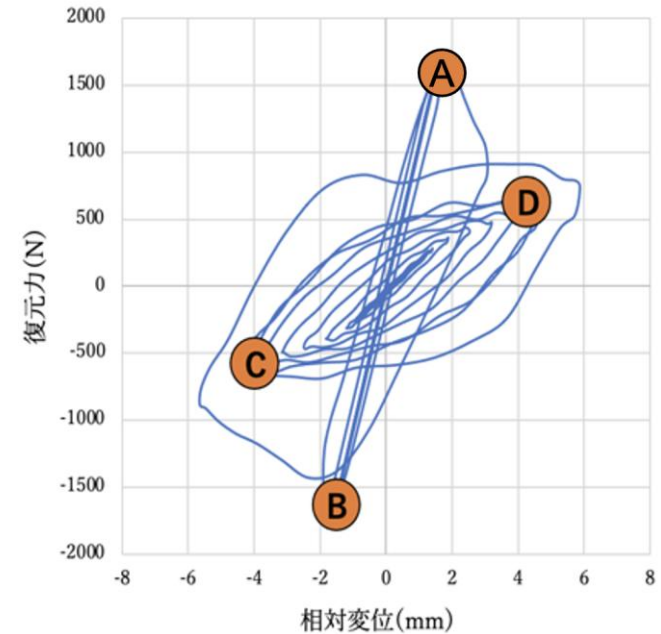
容器座屈後挙動が安定するメカニズム



座屈後は、

1. 固有振動数が低下し、入力振動数を下回る。
2. 位相遅れが生じる。
3. 入力に対する応答の位相が、同相から逆相へ遷移する。
4. 試験体にエネルギーが伝達されにくくなり、座屈後の挙動が安定する。

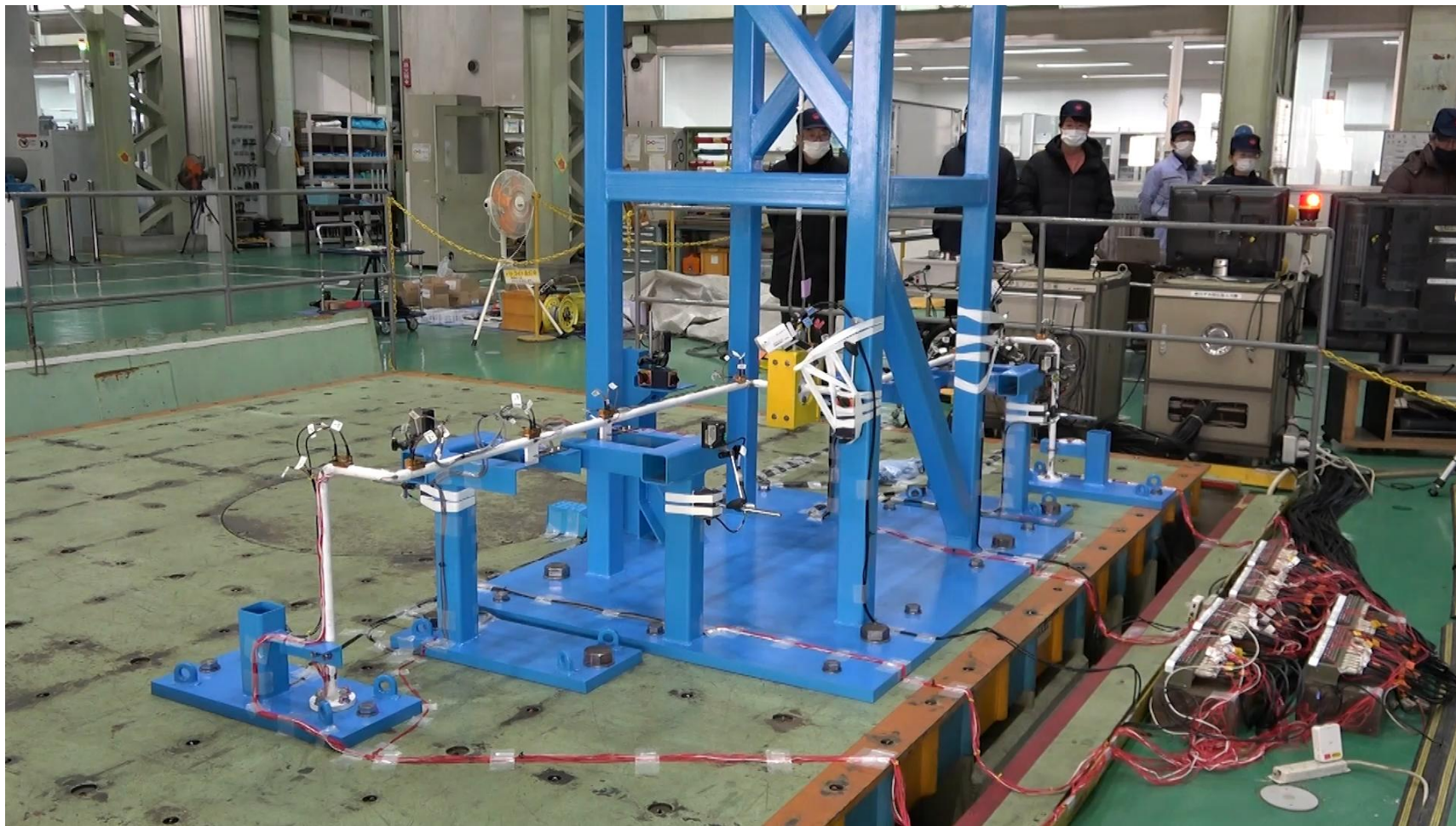
復元力-相対変位曲線



※ 鉛直動に対しても同様の結果とメカニズムを確認

複数支持構造物を持つ配管系試験体の地震動加振試験

- 立ち上がり部や複数の曲げ、複数の支持構造物を含むやや複雑な形状の配管系試験体に対する、地震波による加振試験を実施



過大地震に対する破損拡大抑制技術まとめ

- 上吊り容器と配管系には、過大地震時に破局的壊れ方をしない以下の受動安全性が備わっていることを明らかにした。
- 上吊り容器には座屈変形による柔構造化が先行すると、加振力が伝わらず座屈後の破損拡大が抑制される受動安全性が存在する。
受動安全性が成立するのは、柔構造化により固有振動数が地震の卓越周波数を下回る場合である。
- 配管系には、支持構造破損による系の柔構造化が先行すると、加振力が伝わらず配管自体の破損が抑制される受動安全性が存在する。
受動安全性が成立する条件は、配管自体の強度が支持構造より高く、支持構造破損による固有振動数の低下が地震の卓越周波数を下回る場合である。
- 過大地震時に対する破損拡大抑制技術として、上吊り容器と配管系が持つ受動安全性が成立する条件を評価する方法を提案した。

「破局的壊れ方をしない受動安全構造」の提案

■ 定義

本研究において受動安全構造とは、事故が発生した際に外部からの動力や操作に依存せずに自然現象に基づき安全機能を維持する構造と定義する。

■ 原理

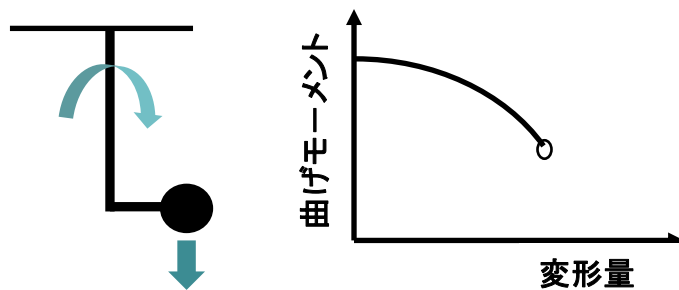
安全機能への影響の小さな破損が先行して荷重や力が自然に低減し、機能喪失に至る破局的な破壊を起こさない。

■ 成立条件

先行する破損が破局的破壊を抑制する場合と、促進する場合があります、前者となる場合に受動安全が成立する。

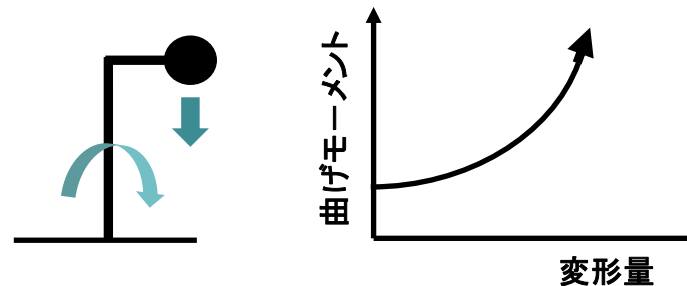
受動安全が成立する例

先行する変形(安全への影響小)により曲げモーメントが減少して崩壊に至らない。



受動安全が成立しない例

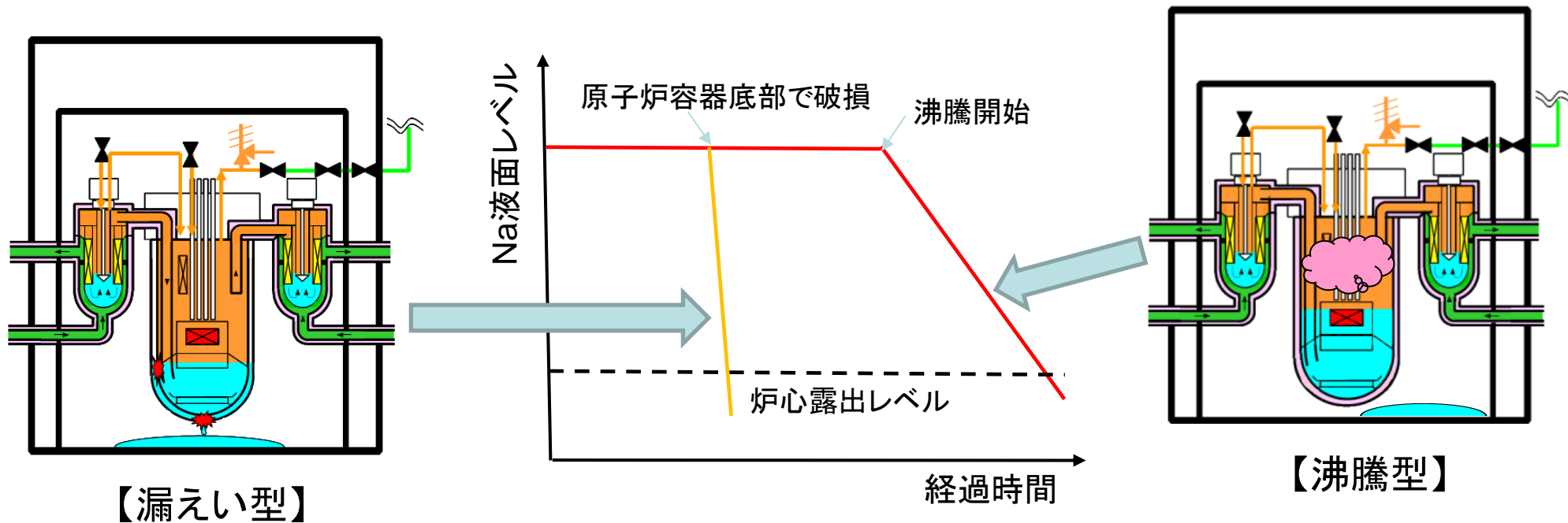
先行する変形が進むと曲げモーメントが増大していき、やがて崩壊に至る。



Ⅲ. 原子炉構造レジリエンス向上策

超高温事故進展シナリオ

- 除熱機能喪失 (LOHRS) 後、事象進展が緩慢に推移しながら超高温に至る。原子炉容器底部が破損した場合、早期に炉心が露出し、露出後は短時間で炉心が損傷することから除熱機能の復旧や代替冷却設備等のAM策導入までの時間余裕の観点から原子炉容器底部の破損を回避することが重要。
- さらに、基軸の事象推移を沸騰型として、炉心露出まで原子炉容器のナトリウムバウンダリを維持してAM策導入を確実とする。



原子炉容器Na液位の低下イメージ

原子炉構造レジリエンス向上策

① ラプチャディスク

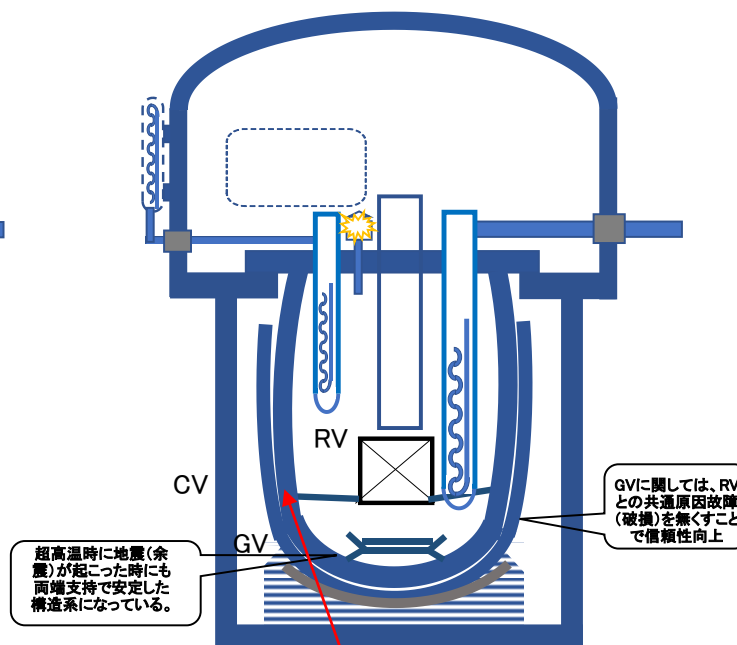
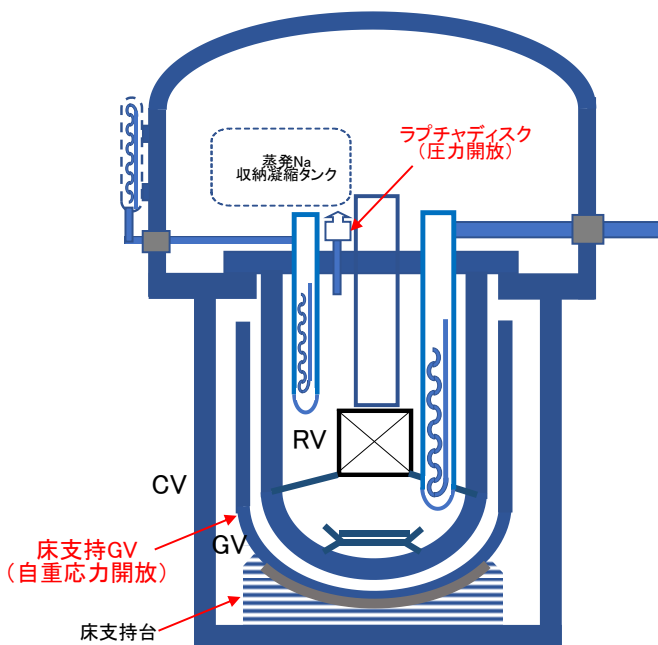
- 圧力に対する受動安全
- 既存技術

② 床支持GV

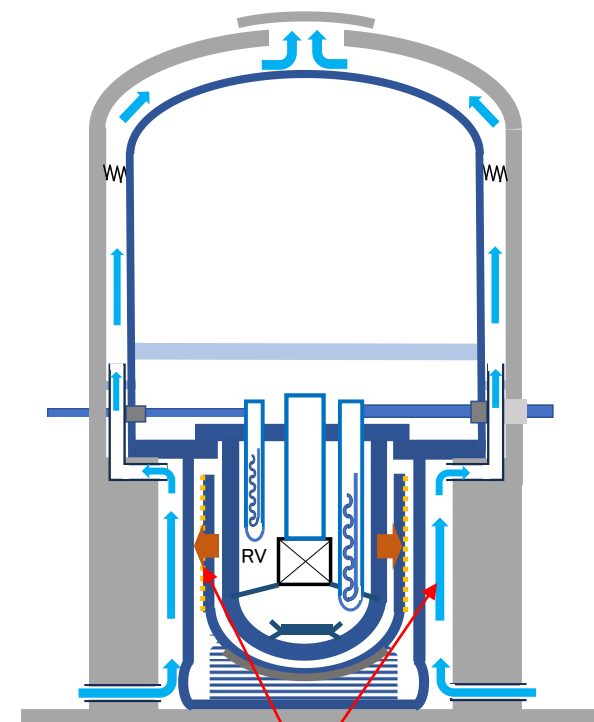
- 自重と熱膨張に対する受動安全構造
- 本研究成果反映

③ CVACS

- 受動安全構造を活かした自然冷却
- 概念提案（将来課題）

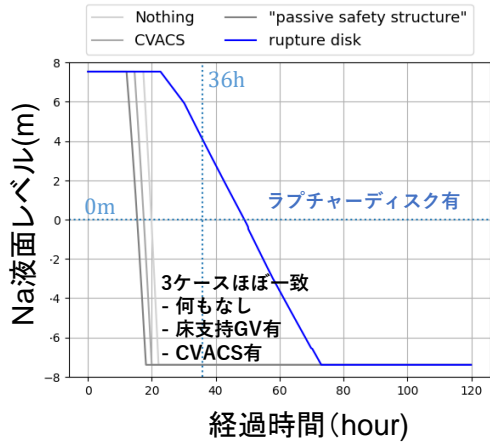


受動安全構造は900°C以上までバウンダリを維持

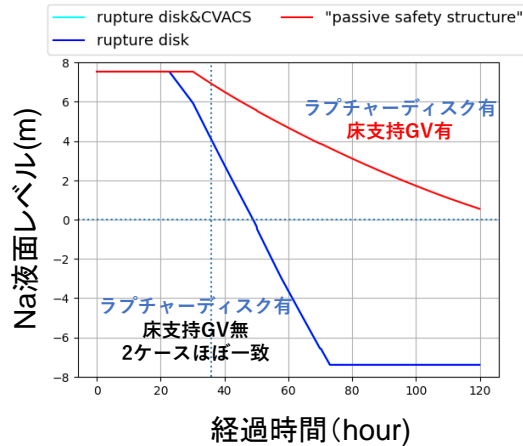


レジリエンス向上効果を安全余裕と時間余裕の2つの視点で可視化

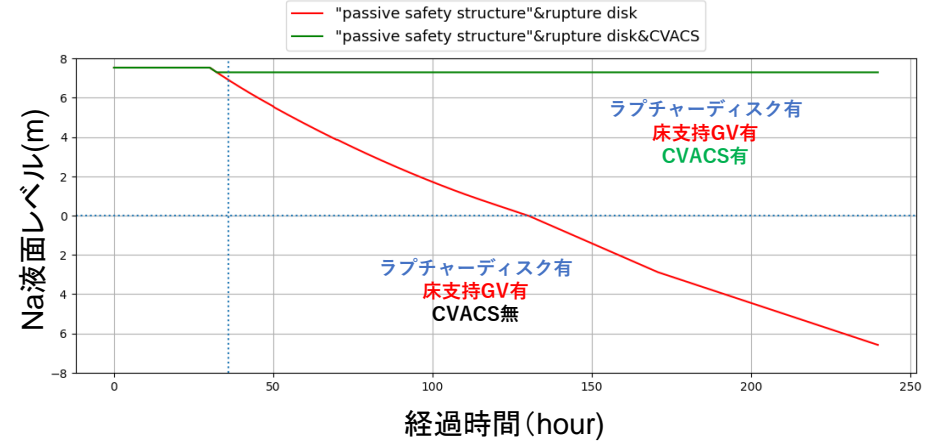
① ラプチャーディスク



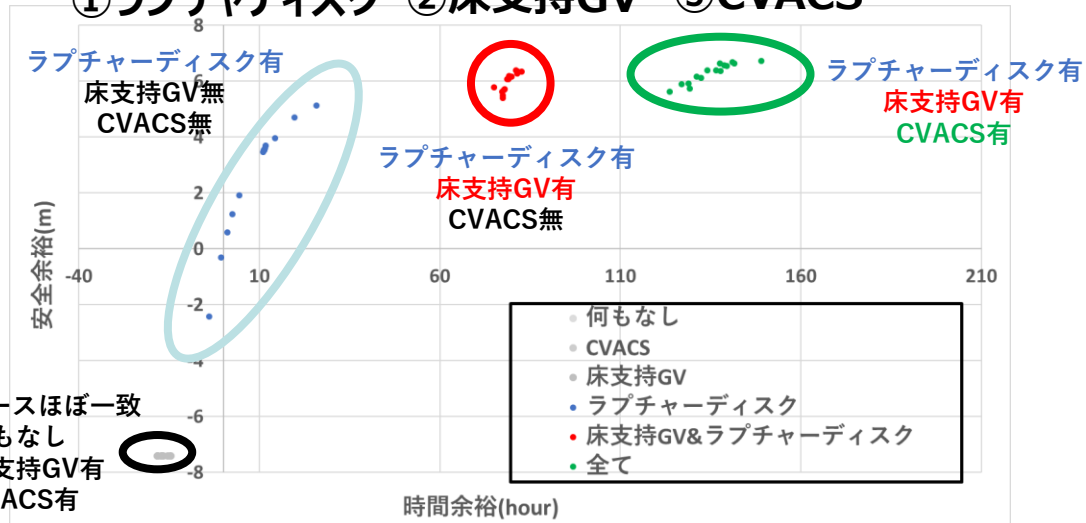
② 床支持GV



③ CVACS



① ラプチャーディスク ② 床支持GV ③ CVACS



最低安全機能 $h_{limit} = 0m$:
Na液位が燃料上面まで低下

時間制約 $t_{limit} = 36\text{hours}$:
仮に1.5daysと設定

※システム安全対策
(③CVACS)との組み
合わせで裕度は大きく
向上

全体まとめ

- 構造物は、変形などの小さな破損により力やエネルギーを解放し、崩壊や破断といった破局破損に至らない受動安全性が、広い条件で成立することを実験と解析で解明。
- 上記成果に基づき革新的な構造強度技術として、外部からの動力や操作に依存せずに自然現象に基づき安全機能を維持する「破局的壊れ方をしない受動安全構造」を提案。原子力構造工学分野で著名なASME PVPとSMiRTで受賞。
- 提案した受動安全構造を次世代原子炉構造に適用し、それによるレジリエンス向上効果を安全余裕と時間余裕の2つの視点で可視化。
- 設計想定事象に対する破損発生防止を目的としてきた従来の原子炉構造工学を、破損発生後の影響緩和まで拡張することを社会に提案。
- 構造対策だけでは影響緩和の効果は限定されることから、さらなる向上を目指したシステム安全対策との連携が今後の課題。

※原子力システム事業関係各位からのご支援に深く感謝申し上げます。