

原子カシステム研究開発事業（ボトルネック課題解決型）
（R02年度～R04年度）

「地震荷重を受ける配管系の非弾性を考慮した高精度シミュレーションモデルの構築」

令和6年3月11日

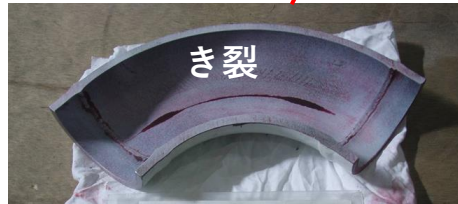
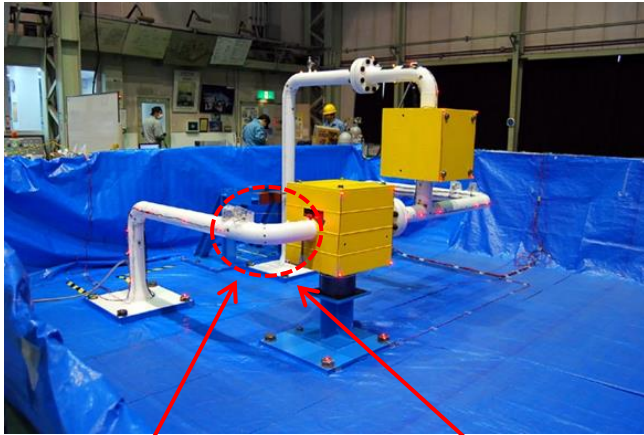
研究代表者：中村いずみ（防災科学技術研究所）

研究分担者：澁谷忠弘（横浜国立大学）

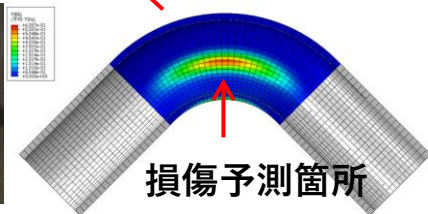
課題概要

- 次世代原子力システムの社会実装には、最新の計算科学を取り入れたデジタルツインをベースとする設計が不可欠である。耐震設計手法の構築にデジタルツインを活用する場合、**安全性評価に重要な終局挙動の評価が必要**であり、そのためには破壊現象や接触挙動も含めた局所非弾性挙動の解析モデルを実装する必要があるが、そのような解析モデルは存在しない。
- 本研究では、デジタルツインに基づく耐震信頼性評価手法の構築を念頭に、原子力施設の重要構造物の一つである**配管系を対象とし、終局強度の評価も含めた非弾性挙動を再現できる高精度シミュレーションモデルを構築**する。また、世界最大の震動台である**E-ディフェンスを用いた検証実験**を実施し、シミュレーションモデルの**V&Vに必要となるデータを取得**する。

地震荷重を受ける配管系の弾塑性応答を含めたシミュレーション評価の現状



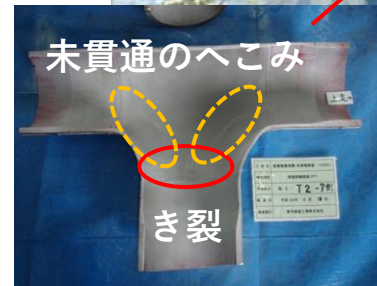
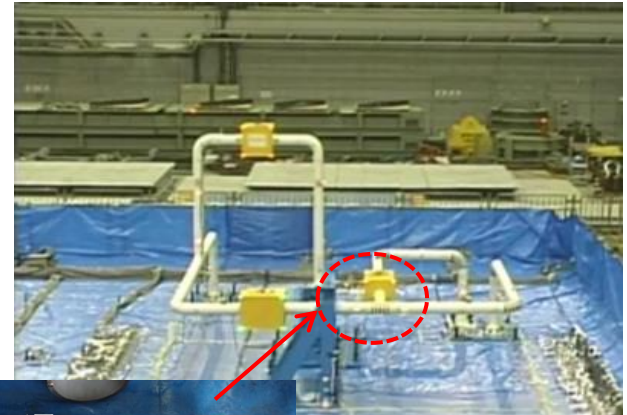
試験結果



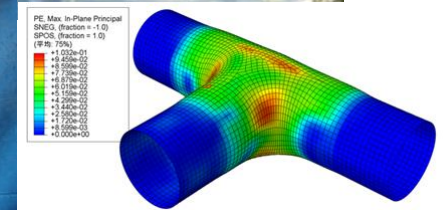
解析結果

- 損傷箇所が「エルボ」で、作用荷重が「主に面内曲げ」の場合
- ひずみ範囲1~2%で、疲労損傷が想定される場合

ある程度精度の良い評価が可能



試験結果



解析結果

- 損傷箇所がエルボ以外
- 負荷の形態が地震応答の中で変化する
- 局所の非弾性現象が振動応答挙動に大きく影響を与える・・・等

現状では解析による評価が難しい

V&Vに使用できるデータも不足している

解決すべきボトルネックと研究目標

解決すべきボトルネック

- ① 非弾性現象を取り込んだ高精度シミュレーションモデルの構築
- ② 高精度シミュレーションモデルのV&V

研究目標

原子力施設の重要構造物の一つである配管系を対象とし、

- ① 非弾性挙動を考慮した高精度シミュレーションモデルの構築
- ② 世界最大の振動台である実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を用いた検証実験により、V&Vに必要なデータを取得

これらの実施により、次世代原子力システムの実装に必要な基盤データの構築を進める。



* E-ディフェンス：
防災科学技術研究所が兵庫県三木市に
有する世界最大の振動実験施設

研究計画

I. 高精度シミュレーションモデルのV&Vに活用する実測データの取得（防災科研）

V&Vに提供するための、E-ディフェンスを使用した終局挙動までの加振試験実施とデータ取得、形状や材料のばらつき調査を実施する。

II. 非弾性挙動を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築（横浜国立大学）

多様な非弾性現象のうち、以下に絞って検討を行う。

1. 非比例負荷を受ける材料の破壊過程のモデル化
2. 支持部やバルブ等の配管系要素内部の接触荷重による非弾性挙動のモデル化

III. 高精度シミュレーションモデルの提案（防災科研、横浜国立大学）

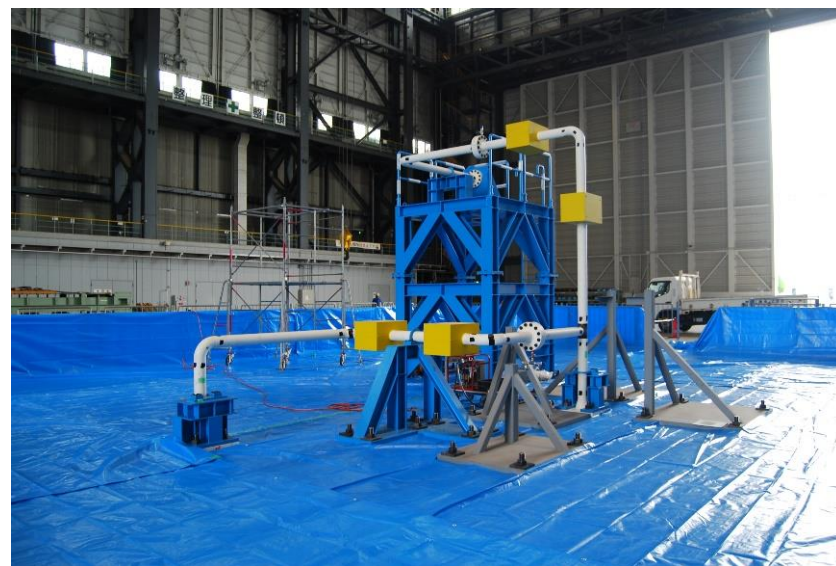
I、IIの成果をまとめ、高精度シミュレーションモデル作成手順を示す。また、その手法の信頼性を定量的に評価するV&Vを行う。

年次計画

	令和2年度 (2020年度)	令和3年度 (2021年度)	令和4年度 (2022年度)
I. 高精度シミュレーションモデルのV&Vに活用する実測データの取得 (防災科研)	既往試験データの調査 試験体基本設計	配管継手調査 試験体製作・特性調査	E-ディフェンス実験
II. 非弾性挙動を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築 (横浜国立大学)		非弾性モデルの基礎特性の検証 事前解析モデルの構築、パラメトリック解析	材料損傷分析
III. 高精度シミュレーションモデルの提案 (防災科研、横浜国立大学)			モデル作成手順のまとめ モデル作成手順のまとめとV&V実施

研究項目Ⅰ (1/4) 成果概要

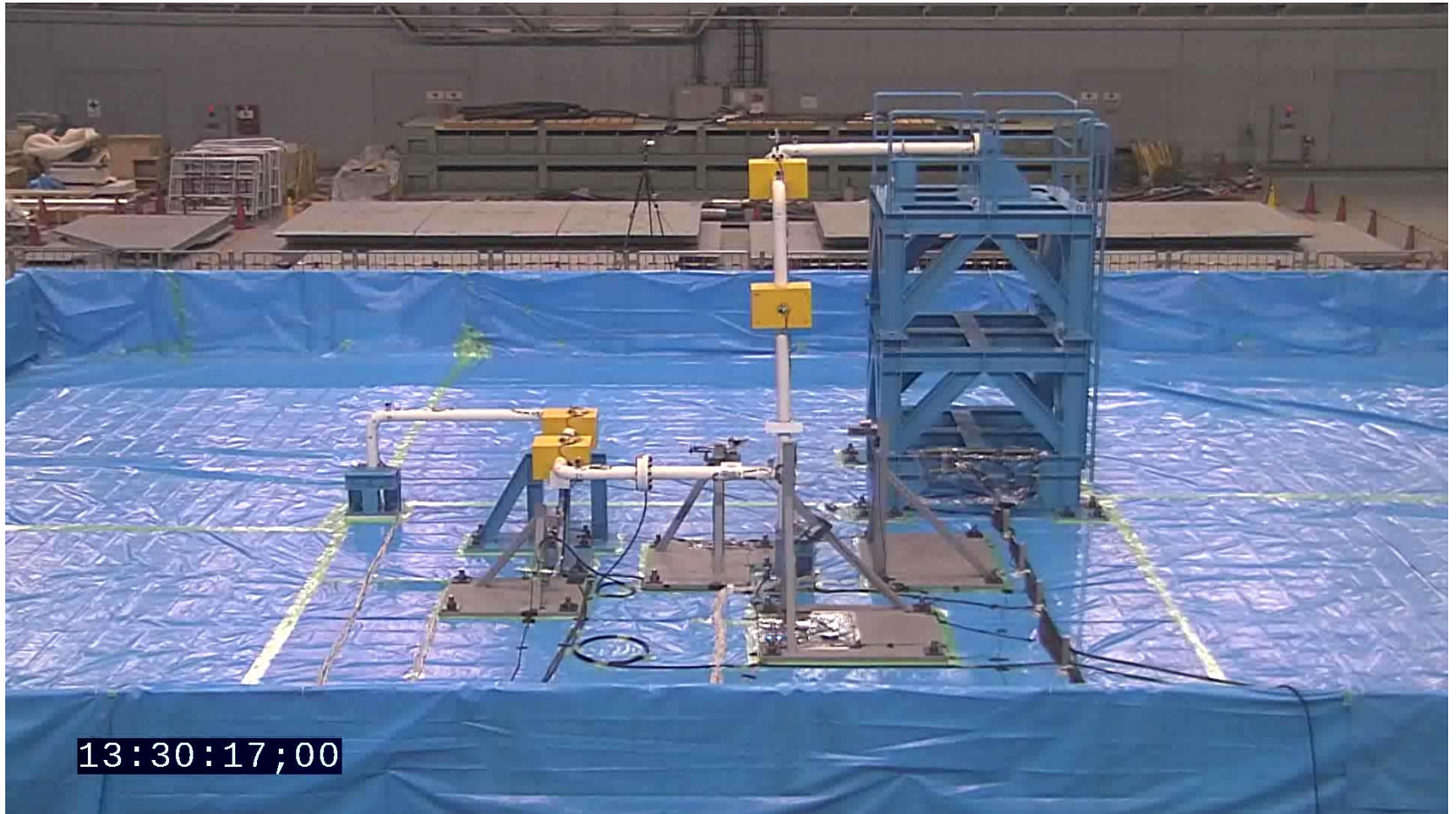
- E-ディフェンスを使用し、ティ配管継手を含む配管系試験体の加振試験を行い、弾性域～終局挙動までの実測データ、および破損モードを取得した。
 - ⇒V&Vへの活用が可能な終局挙動までのデータ取得
- 世界的に実験例の極めて少ない配管系内に設置されたティ配管継手部の破損モードを得た。
 - ⇒ティ部の疲労き裂の進展は既往研究の継手単体を対象とした静的載荷試験とはやや異なる挙動を示し、立体的な配管系形状の影響が確認された。



E-ディフェンス実験試験体

研究項目Ⅰ (2/4) 加振試験の状況 (全景)

【試験状況 (正弦波Y軸980Gal 2回目、全景)】 * 破損時の加振

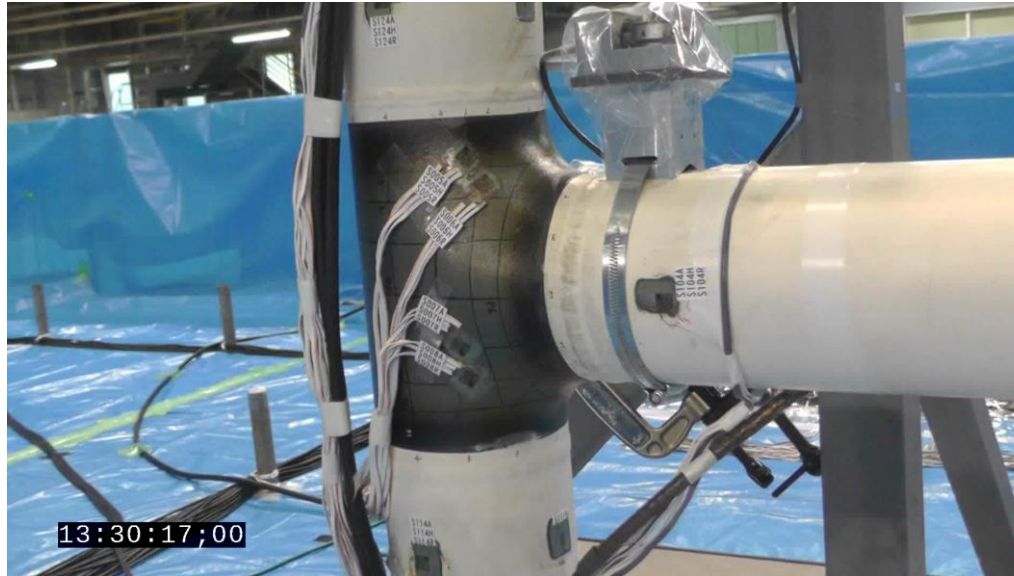


研究項目Ⅰ (3/4) 加振試験の状況 (ティ部)

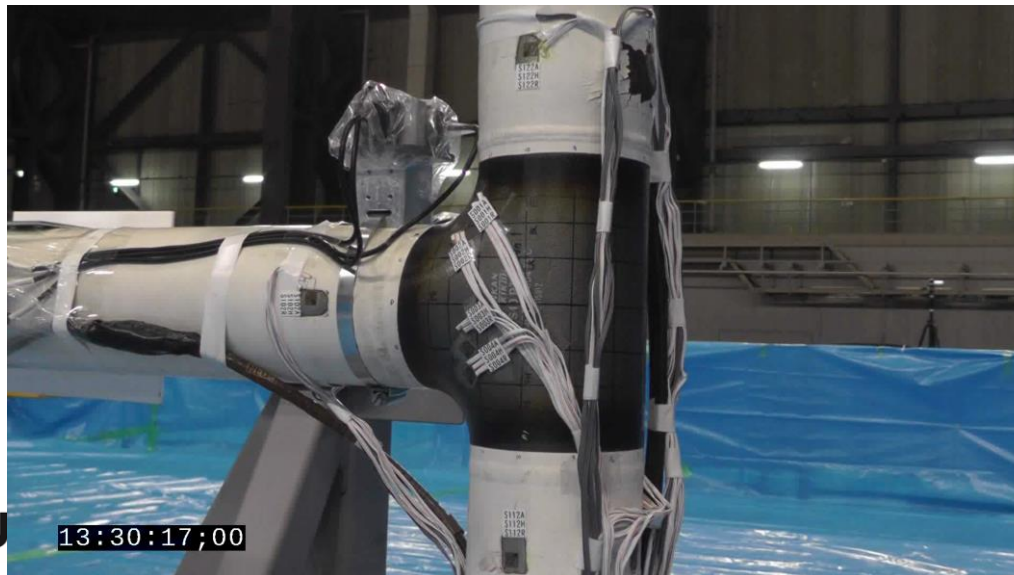
【試験状況 (正弦波Y軸980Gal 2回目、ティ南面・北面)】

* 破損時の加振

南面



北面



研究項目Ⅰ (4/4) ティ部の損傷 (詳細)

【ティ部の損傷進展過程】



研究項目Ⅱ (1/5) 成果概要

- 微小空洞の発生・成長をモデル化したGTNモデルをベースとして、配管系への適用を検討した。また、E-ディフェンスで使用した試験体について、支持部の非線形挙動の影響について検討した。
- 配管から切り出した小型試験片による材料試験を実施し、非弾性挙動の影響を精緻化した。
- 実測データをもとに事前解析モデルを構築し、局所非弾性挙動が配管系の振動応答挙動に及ぼす影響について評価を実施した。主要な因子をパラメトリック解析により変化させ、パラメトリックに用いる主要な因子を特定した。
- E-ディフェンス実験の検証を行うため、損傷部の分析を行い、V&Vのための定量データを取得した。また、不確かさの要因となる局所的な損傷挙動について、感度解析を実施してその影響因子を検討した。

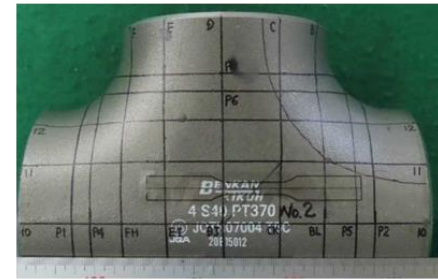
研究項目 II (2/5) GTNモデルの導入

【局所非弾性現象の振動応答挙動に及ぼす影響の検証とモデル化】

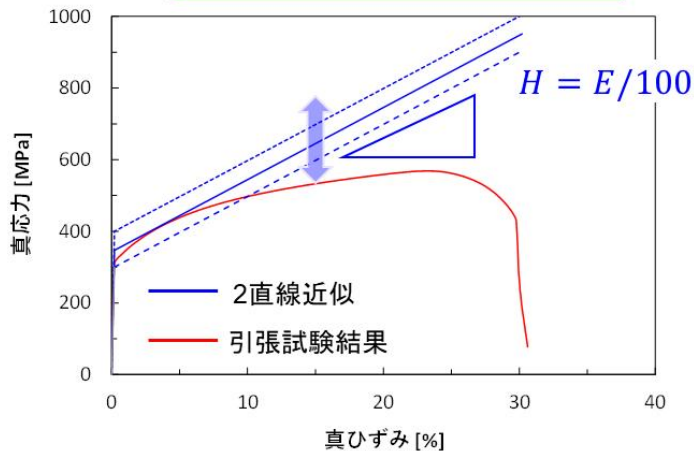
機械学会発電用原子力設備設計・建設規格 NC-CC-008では、構成則は計算負荷から2直線近似しており、今回の破壊試験でも2直線近似を採用。

ただし、破断までの大きなひずみでの評価を行うため、**大きなひずみまで一致するように**パラメータを決定する。

実際のT継手から切出した試験片の**引張試験結果**から、構成則・損傷則の**パラメータ同定**を行なった。

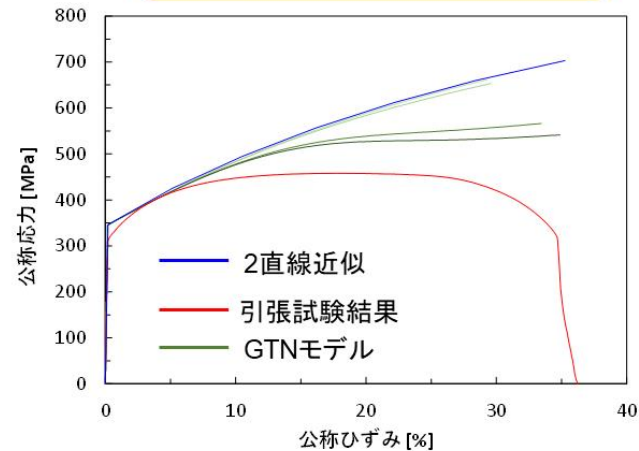


構成則のパラメータ同定



設計標準では $\sigma_y = 1.2 SMYS$ だが、より大きなひずみまで合うように
また、損傷を入れた際に合うように決定

損傷則のパラメータ同定



破断の評価に用いるため、最大荷重点を超えた大きなひずみ域まで一致するようにGTNパラメータを決定

研究項目 II (3/5) E-ディフュージョン実験の解析

- E-ディフュージョン実験を対象に、加振履歴を考慮した解析を行い、不確かさの要因を検討した。

履歴を考慮した解析 (残留ひずみ)

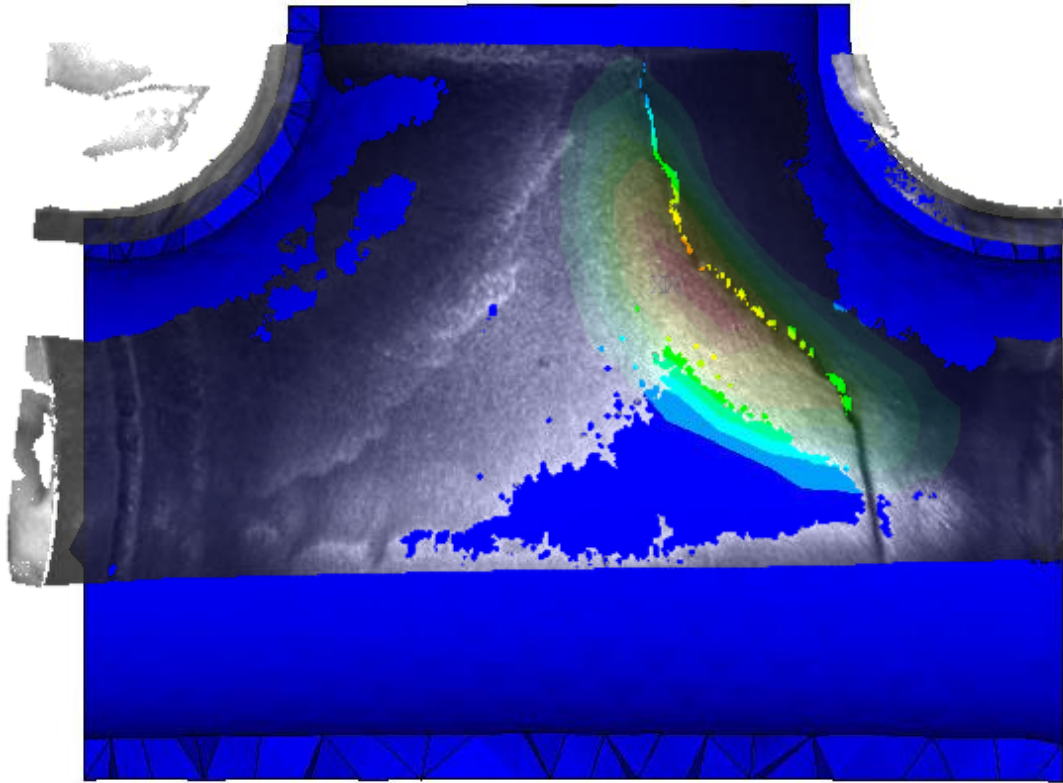
Waveform	倍率 (%)	Experiment*1 (R005, %)	FEM*2 (Max, %)
地震波加振 (3軸)	150	0.17	0.0051
地震波加振 (3軸)	200	0.18 (0.01)	0.027 (0.02)
地震波加振 (3軸)	250	0.24 (0.06)	0.072 (0.05)
地震波加振 (3軸)	300	0.33 (0.09)	0.15 (0.08)
地震波加振 (3軸)	350	0.39 (0.06)	0.27 (0.12)
地震波加振 (3軸)	400	0.46 (0.07)	0.40 (0.13)
地震波加振 (3軸)	450	0.49 (0.03)	0.54 (0.14)
地震波加振 (3軸)	500	0.58 (0.09)	0.67 (0.13)

括弧内の値は増分値 (当該加振により生じた残留ひずみ)

*1初日の残留ひずみ(0.13%)を足した値

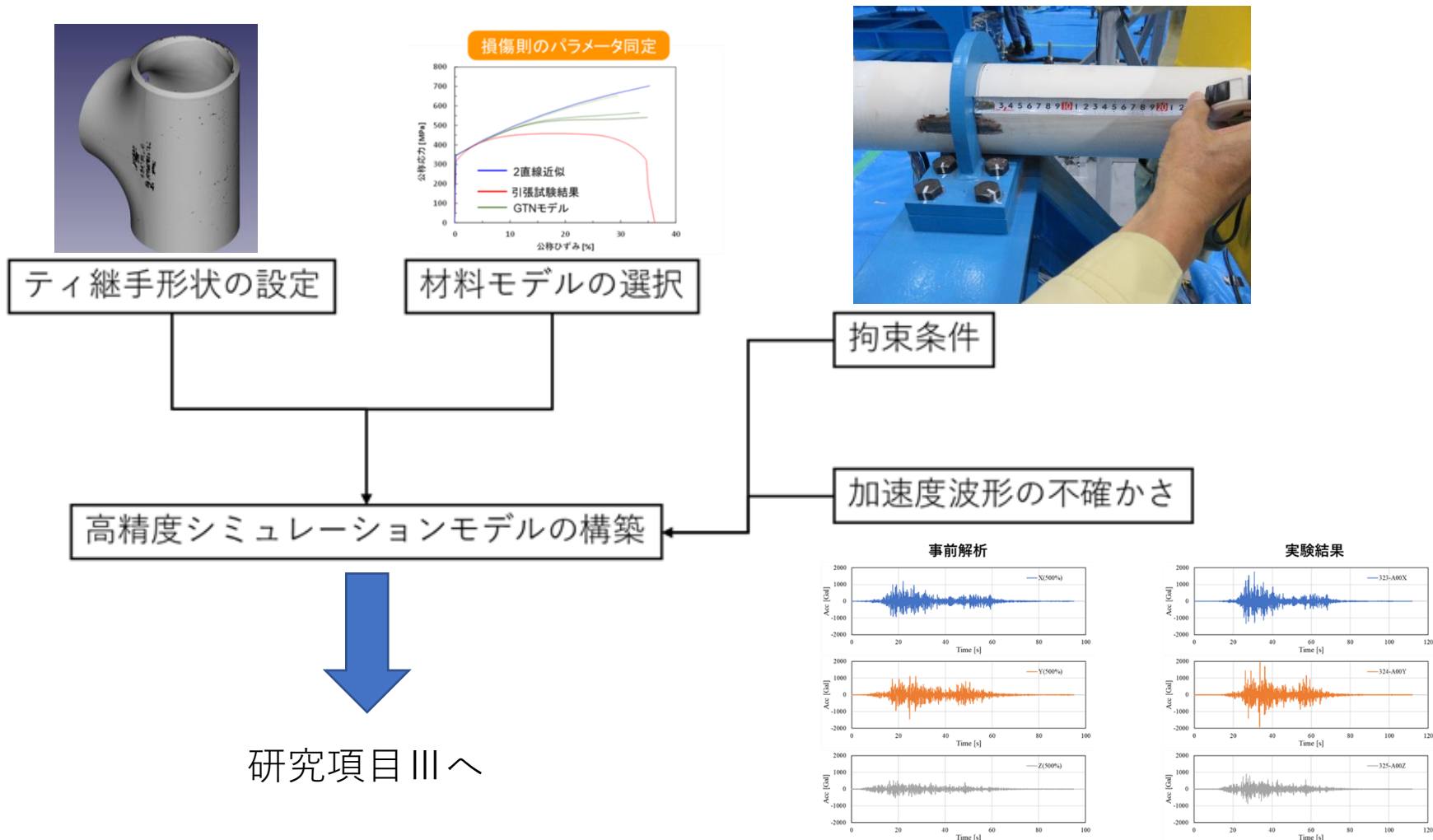
*2 実験の計測とは一致していない。FEMの測定箇所近傍の最大値を示す節点での値

研究項目II (4/5) E-ディフュゼンス実験 損傷部の解析結果との比較



- 三次元スキャンにより得られたディフュゼンスデータと事前解析結果を比較
- き裂の発生位置は累積相当塑性ひずみが最大値を示す箇所とおおむね一致。
- ひずみ分布形状は、き裂の進展経路とも一致しており、相当塑性ひずみによる損傷の蓄積により破損が生じたと考えられる。

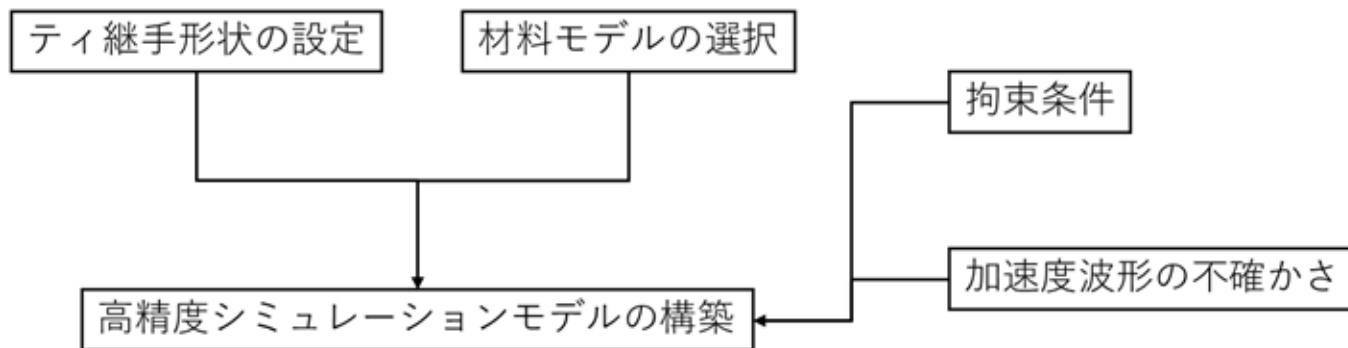
研究項目 II (5/5) 不確かさの要因の影響 検討



研究項目Ⅲ (1/2) 成果概要

- 既存の詳細解析モデル構築手法に対し、既存手法の適用対象範囲を超えるひずみ領域でも適用できる材料損傷を考慮した材料モデルの導入、ティ配管継手の実測形状の反映により終局挙動の評価が可能な高精度シミュレーションモデルを作成できることを示した。
- 設計時など実測形状の取得が難しい場合に使用できる簡易な解析モデル構築に向けて明らかにすべき情報を整理した。
- 配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルの作成手順について、実施したE-ディフェンス解析の結果より検討した。
- 解析における不確かな要因として、(1)ティ継手形状、(2)材料特性、(3)加速度波形、(4)拘束条件、を挙げ各項目についてV&Vを実施するとともにデジタルツインに求められる要件を整理した。

研究項目Ⅲ (2/2) 高精度シミュレーションモデルの提案



高精度シミュレーションモデル作成手順

不確かさ要因	内容	対応策
配管形状	ティ部の三次元形状ばらつき	実測形状の調査によるばらつきの把握
材料特性	高ひずみ領域における材料モデルの設定	GTNモデルの採用 GTNモデルのパラメータ最適化
加速度波形	事前に考慮した加速度波形と実測との差違	実測データの反映
拘束条件	支持構造の影響	大レベルの入力では影響は少ない?

成果のまとめ (1/2)

- 次世代原子力システムの耐震設計・評価手法の構築にあたっては、**弾性範囲を大きく超え、終局状態も含めた建造物の現実的な挙動を適切に評価**する必要がある。
- 本研究の実施までにはひずみ範囲1%程度以上の領域を対象とした配管系の高精度な非弾性解析モデル作成手順は示されておらず、高精度シミュレーションモデルのV&Vに活用できるような、配管継手の形状データや材料試験データも揃っていない加振試験データは皆無。



- 本研究の実施により、**終局挙動の評価が可能な高精度シミュレーションモデルの提案と、シミュレーションモデルのV&Vに活用できる試験データが整えられた。**
- 世界的に実験例の極めて少ない配管系内に設置されたティ配管継手部の破損モードを明らかにした点も、配管系の地震時挙動に関する新たな知見をもたらした。

成果のまとめ (2/2)

- 本研究で提案した手法に基づいた高精度シミュレーションモデルを活用することで、さまざまな地震波に対する配管系の非弾性応答挙動を、信頼性を持って幅広く調査することができる。また、それらの結果は実際の地震経験のない次世代原子力システムの耐震設計手法の整備に活用可能である。
- E-ディフェンス実験で取得したデータは令和6年9月までにE-ディフェンスのデータ公開システムで公開する予定。
⇒ **配管系の弾塑性地震応答解析のベンチマークデータとして活用でき、終局状態を含めた耐震評価に関連する研究分野の発展に寄与できる。**