

# 計算科学で高める原子力の安全性

宮村倫司(日本大学工学部情報工学科)

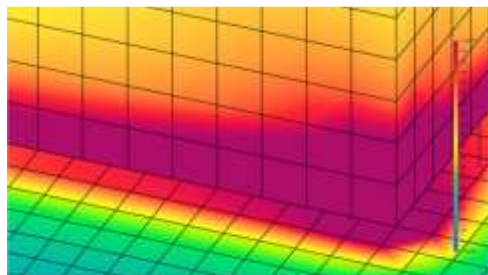
Tomoshi MIYAMURA (College of Engineering, Nihon University)

スパコンコロキウム

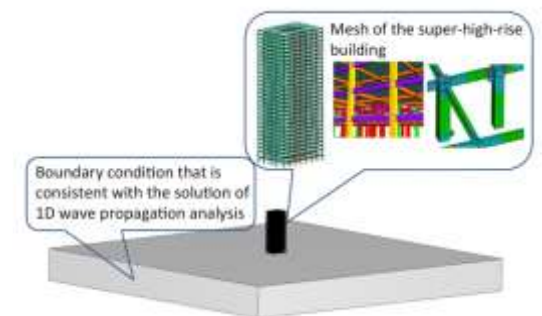
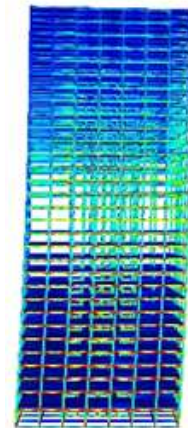
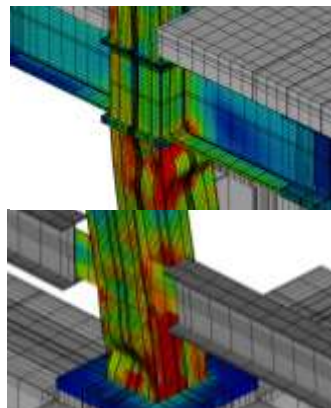
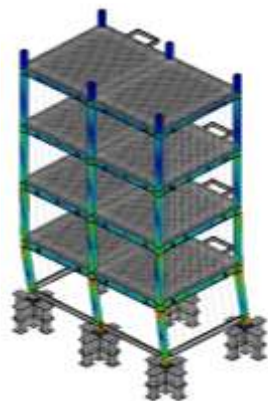
2026年3月11日(オンライン)

# 自己紹介(宮村倫司)

- 学生時代: 膜構造のしわの研究(非線形有限要素法に出会う)
- 1997年にADVENTUREプロジェクト(リーダー: 吉村先生)にポスドクとして参加, 並列構造解析コードADVENTURE\_SolidやADVENTURE\_IO等の開発
- 理研における地球シミュレータ(CHIKAKU), ものづくりVCADプロジェクト
- 防災科学技術研究所E-Defenseにおける数値震動台開発プロジェクト
  - ▣ 大規模高精細FEMによる様々なE-Defense実験の再現解析
- 現在の研究テーマ
  - ▣ 領域分割法, 並列計算, HPC
  - ▣ 構造物の高精細な耐震シミュレーション
  - ▣ CG, VR, AR



多点拘束条件+領域分割法



# 東日本大震災(東北地方太平洋沖地震)



東北地方太平洋沖地震 震源



日本大学工学部(福島県郡山市)

東京電力福島第一原子力発電所

- 15年前の今日
- その頃始まったスパコン「京」の原子力耐震課題(分野4)と地震津波課題(分野3)に参加していた
- 当時上野にあった原子力研究開発機構の計算センターに、原子力耐震の打ち合わせに行く途中で地震が発生した
- 日本大学工学部は福島県郡山市にあることもあり、福島原発の事故は衝撃的な出来事であった

# 研究の背景(1)

## 原子力発電所の地震応答解析

- **集中質量系モデル(バネ・マスモデル)**
  - 設計に用いられる
- **有限要素解析**
  - 各種コンポーネントのズーム解析(設計に用いられる)
  - 建屋の地震応答解析
    - ソリッド要素やシェル要素による詳細なモデルも使われるようになっている
    - 建屋+地盤
  - 原子炉圧力容器+内部機器(吉村等2012)(柏崎)
    - 制御棒, 燃料集合体
    - 気水分離機, 炉心シュラウド, ジェットポンプ
  - 炉水も含めた音響流体解析(Kataoka等2014)
  - **建屋+格納容器+圧力容器(吉村等2019)(弾性解析)→本研究はこの続き**

# 研究の背景(2)

原子力発電所の耐震シミュレーションに関するこれまでのプロジェクト

- 解析コードの開発：**ADVENTUREプロジェクト**
- 原子力耐震関係のプロジェクト
  - 地球シミュレータ+ADVENTURE
  - JST-CREST「原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション」プロジェクト
  - 「京」HPCI戦略プログラム分野4課題5 (hp140206, hp150207)
  - 「京」一般課題 (hp170194)
  - 「富岳」一般課題 (hp230061, hp240138, hp250298)

後ほど、吉村先生にこれまでの経緯をお話しいたします

# 研究の背景(3)

福島第一原発1号機の3次元フルスケール有限要素地震応答解析に関するこれまでの研究

- 微小変形弾性地震応答解析(スーパーコンピュータ「京」で計算)
  - 集中質点系モデルとの比較
- 弾塑性地震応答解析(スーパーコンピュータ「京」で計算)
  - 建屋は弾性
  - ほとんど塑性化しなかった
- 鉄筋コンクリート部分のクラックを考慮した試解析(スーパーコンピュータ「富岳」で計算)
  - クラックが発生しやすい条件で計算

(1)吉村忍, 宮村倫司, 山田知典, 秋葉博, 清浦英明, “3次元有限要素法による2011年東北地方太平洋沖地震本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機の応答解析(第1報および第2報)”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 18(3) (2019), pp. 135-159, 160-190.

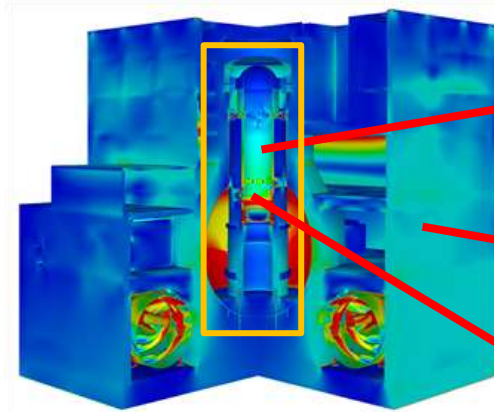
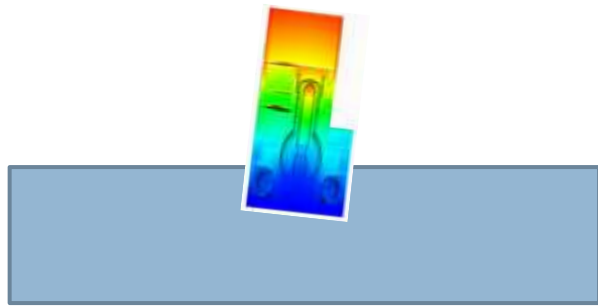
(2)Miyamura, T., Yoshimura, S., and Yamada, T., “Feasibility study of full-scale elastic-plastic seismic response analysis of a nuclear power plant”, Mechanical Engineering Journal, JSME, Vol. 6, Issue 6 (2019), Pages 19-00281 (10 pages).

(3)宮村倫司, 小池邦昭, 吉村忍, 山下拓三, “引張クラックを考慮した3次元高精細有限要素モデルによる原子力発電所の地震応答解析”, 計算工学講演会論文集, Vol. 29 (2024), D-12-04.

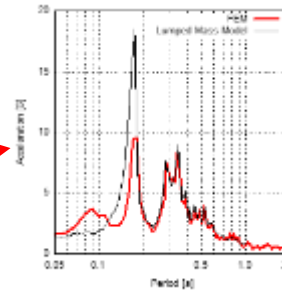
# 研究の目的

- 「富岳」に実装した並列有限要素解析コード  
ADVENTURE\_Solid3FS(フルスペック版)を用いて, 原子力発電所のフルスケール3次元FEMモデルによる非定常非線形シミュレーションを実施する
- 原子力発電所の耐震性能や構造健全性の評価システムを構築する

# フルスケール有限要素解析に基づく原子力発電所の耐震性能や構造健全性の評価システム



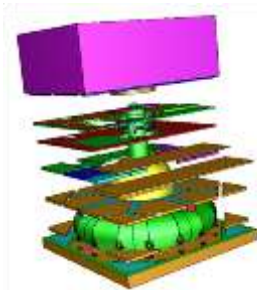
フルスケール有限要素解析



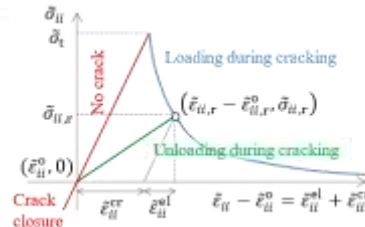
- 各点での床応答スペクトル
- 配管，機器の解析の入力となる
  - 地震波や非線形性等の影響を受ける

応力，変形，損傷等の構造物の力学的な(耐震)性能の評価

- 入力地震動の評価(ロッキング振動が重要)
- 固い地盤の上に建てられるが発電所の剛性はさらに高いので，船のように揺れる
- 地盤＋発電所モデル
  - プラント内の複数点で観測された加速度時刻歴から同定
  - 観測された加速度時刻歴＋集中質点系モデルで同定



形状モデル



材料モデル

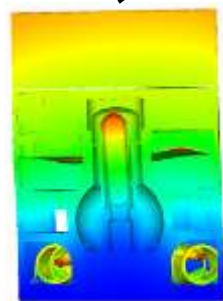
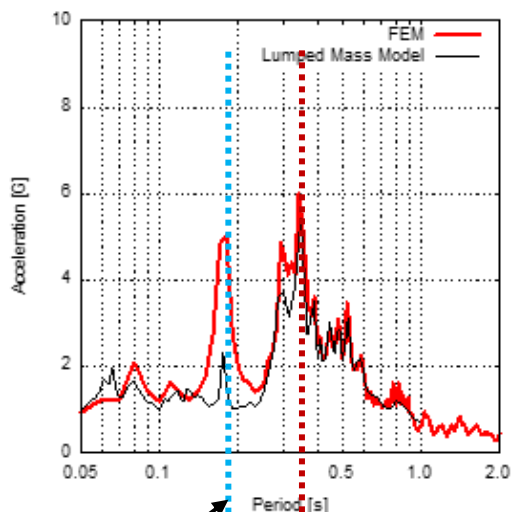
- 制御棒等の炉内の機器を考慮した解析
- フルスケール解析 or ズーミング解析
- 炉水を考慮した音響流体・構造連成解析



地震発生時に制御棒が挿入できるか等の機器の機能性の評価

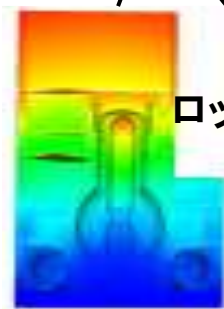
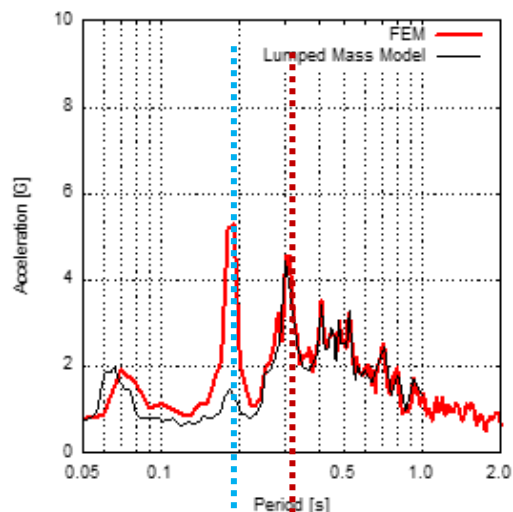
# 3D FEMモデルと集中質量系モデルによる床応答スペクトルの比較(建屋) (京による弾性計算)

Reactor building at O.P. 18.7 m (1F); Mass point 8; FE node 18269935



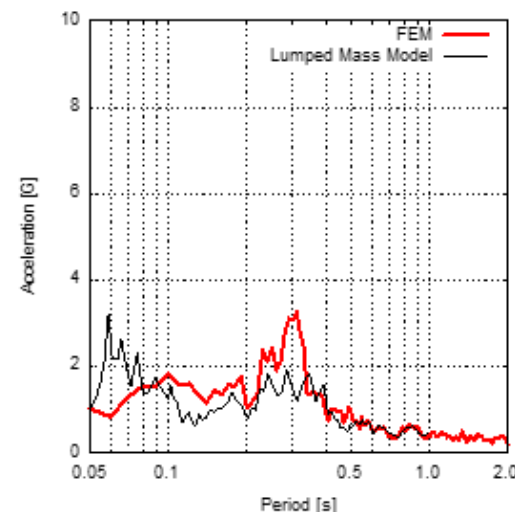
NS 1次モード: 0.180 s

NS  
 rockingモード

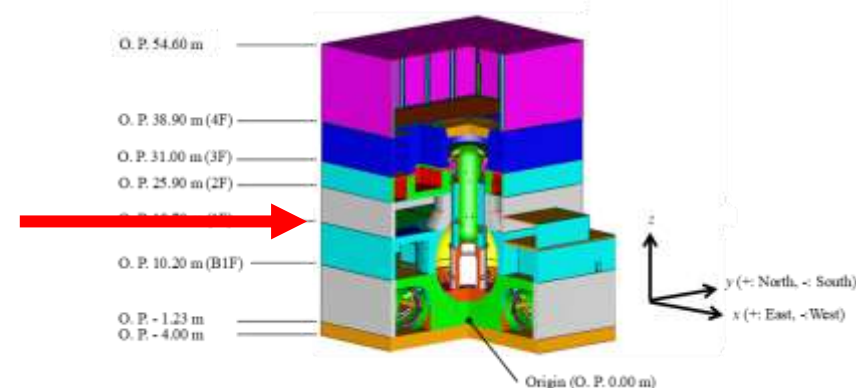


EW 1次モード: 0.186 s

EW  
 rockingモード

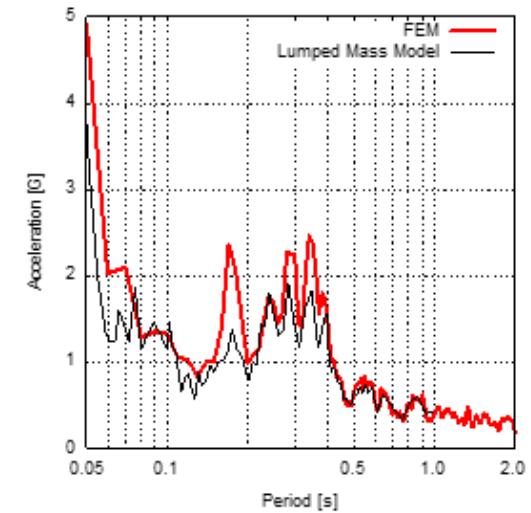
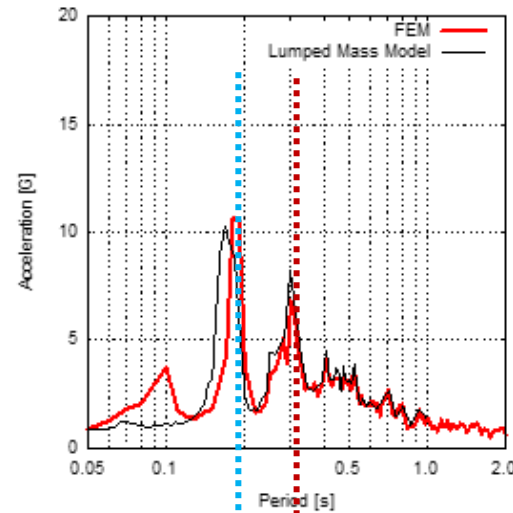
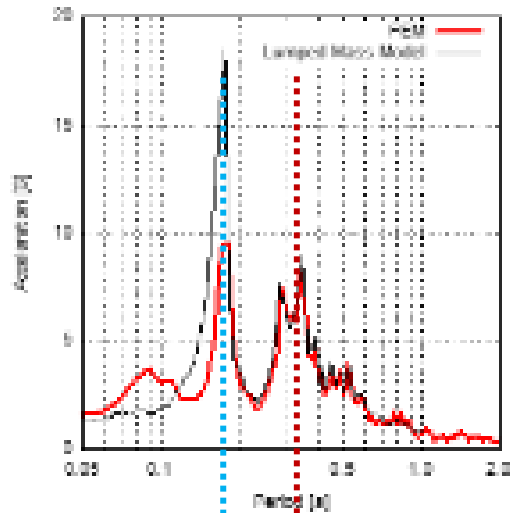


UD



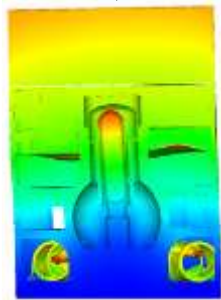
# 3D FEMモデルと集中質量系モデルによる床応答スペクトルの比較(原子炉圧力容器) (京による弾性計算)

RPV at O.P. 26.165 m (near RPV stabilizer); Mass point 42; FE node 261806

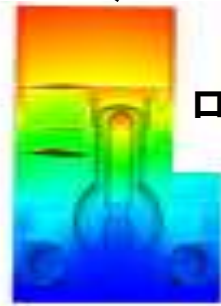


NS  
ロッキングモード

EW  
ロッキングモード

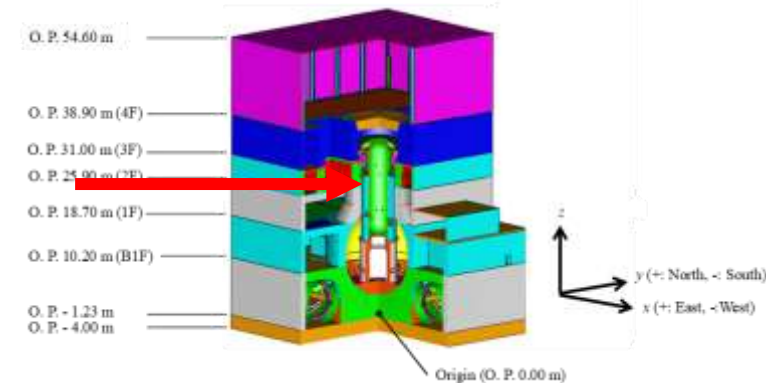


NS 1次モード: 0.180 s



EW 1次モード: 0.186 s

UD

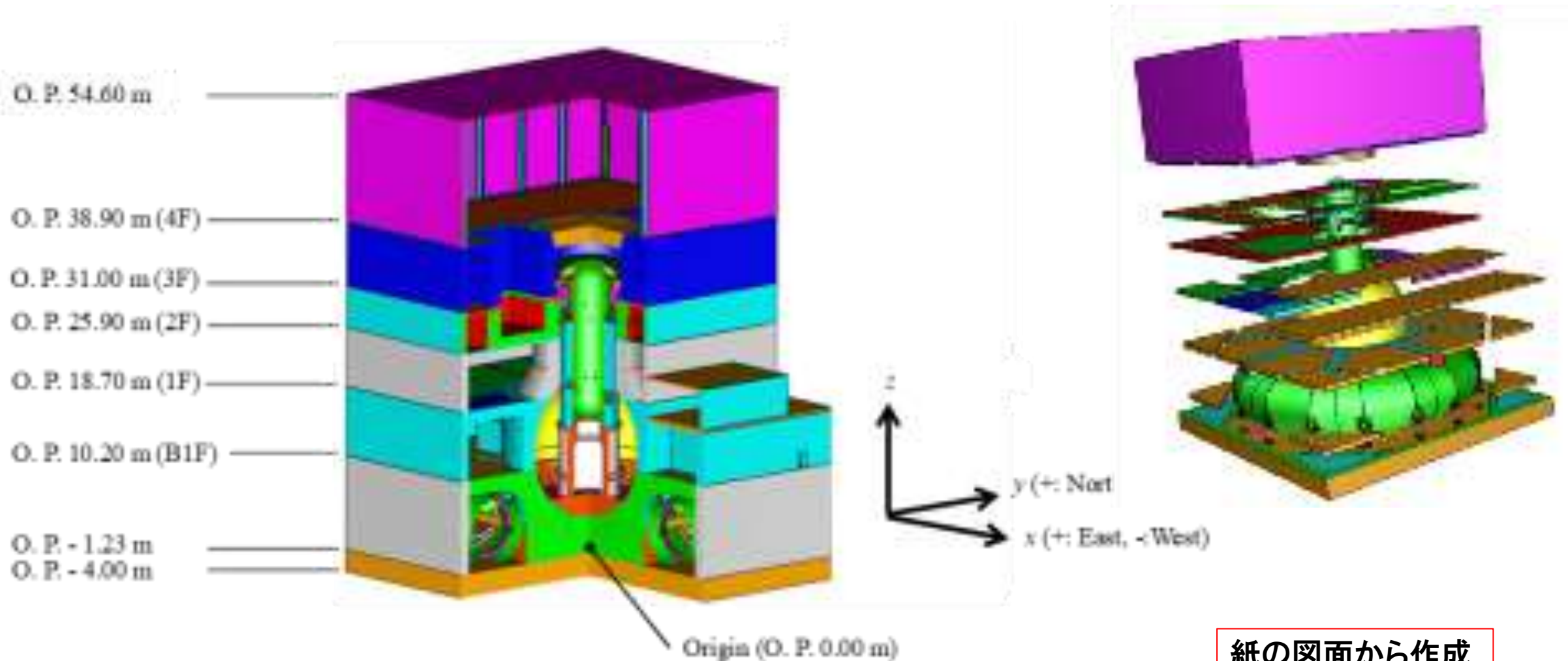


# 発表内容

- 原子力発電所(福島第一原子力発電所1号機)の高精細なフルスケール解析モデル(形状定義とメッシュ生成)
- 「富岳」向け並列有限要素解析コード(ADVENTURE\_Solid3FS)
- 解析結果
- 「富岳」による解析で苦労している点, 失敗事例
- 今後の展開: 小型原子炉モデル, 一部コンポーネントへのROMの導入,
- まとめ

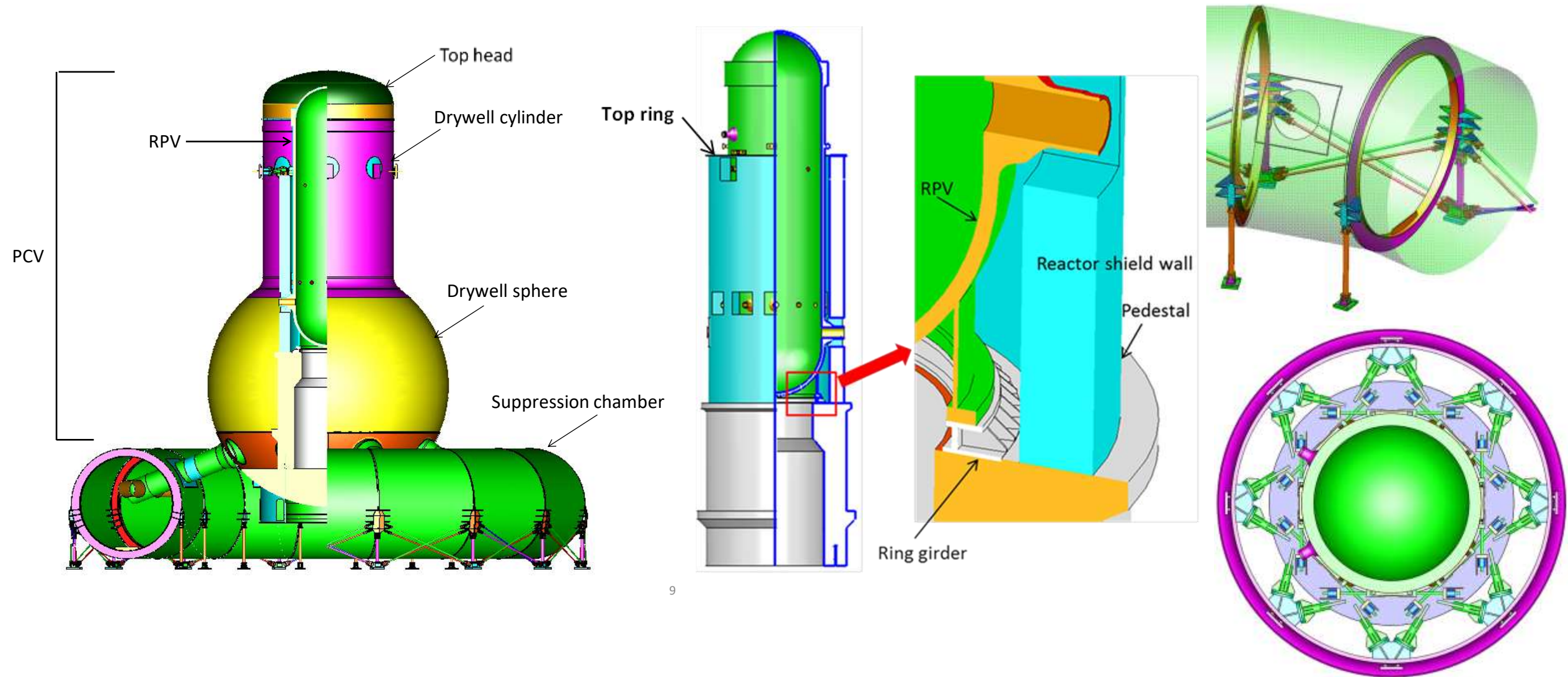
# 原子力発電所の高精細なフルスケール解析モデル (形状定義とメッシュ生成)

# 福島第一原子力発電所1号機のCADモデル



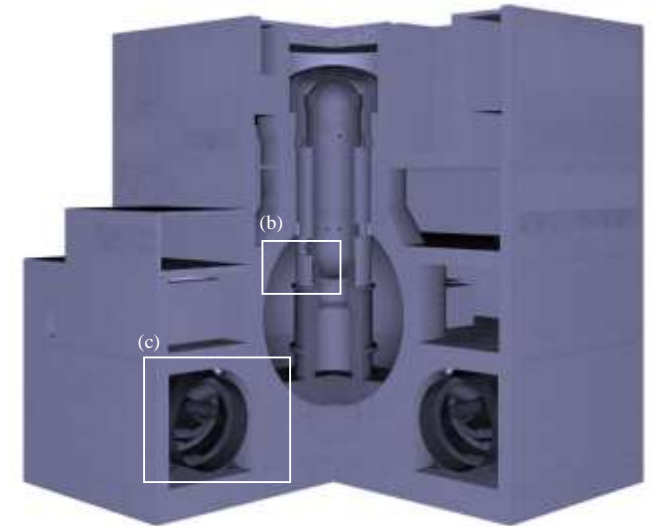
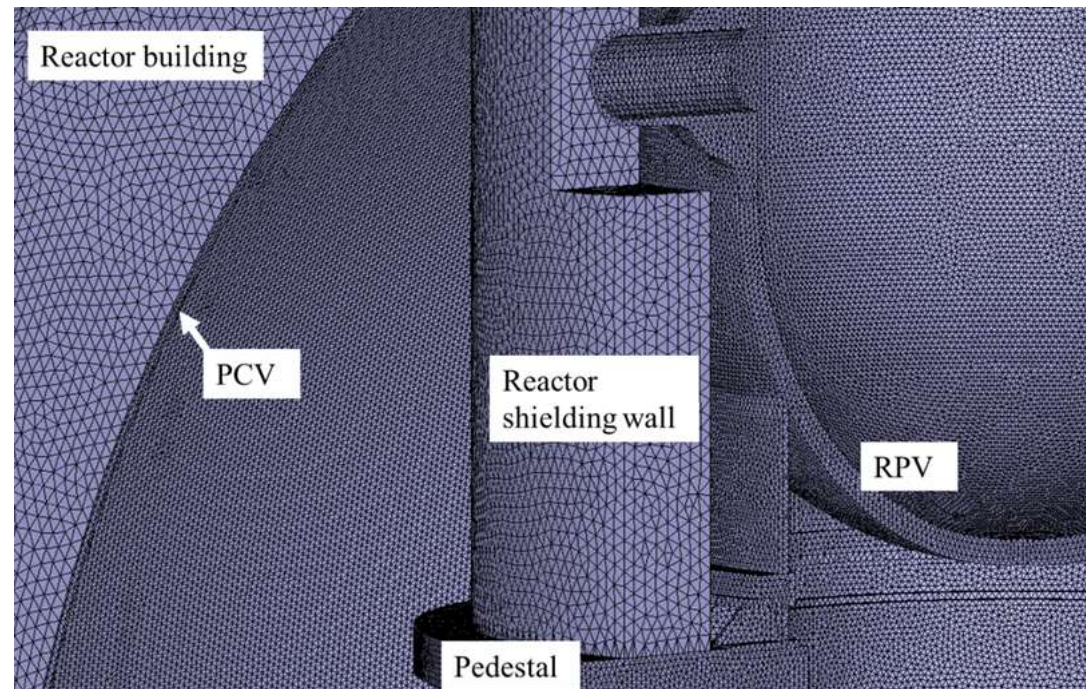
紙の図面から作成

# CADモデル



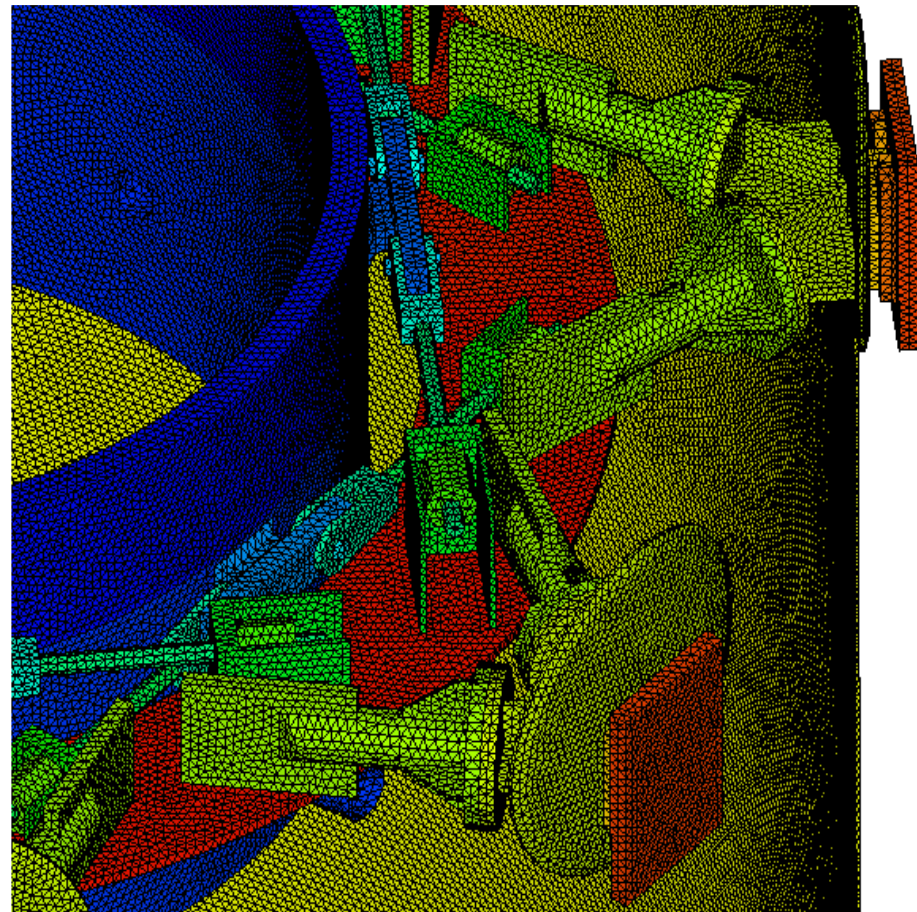
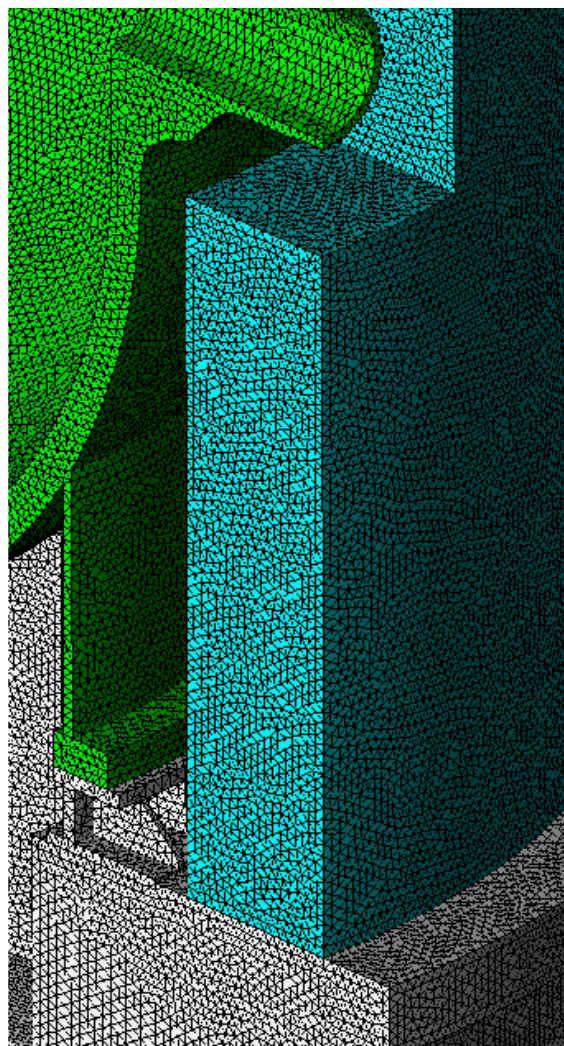
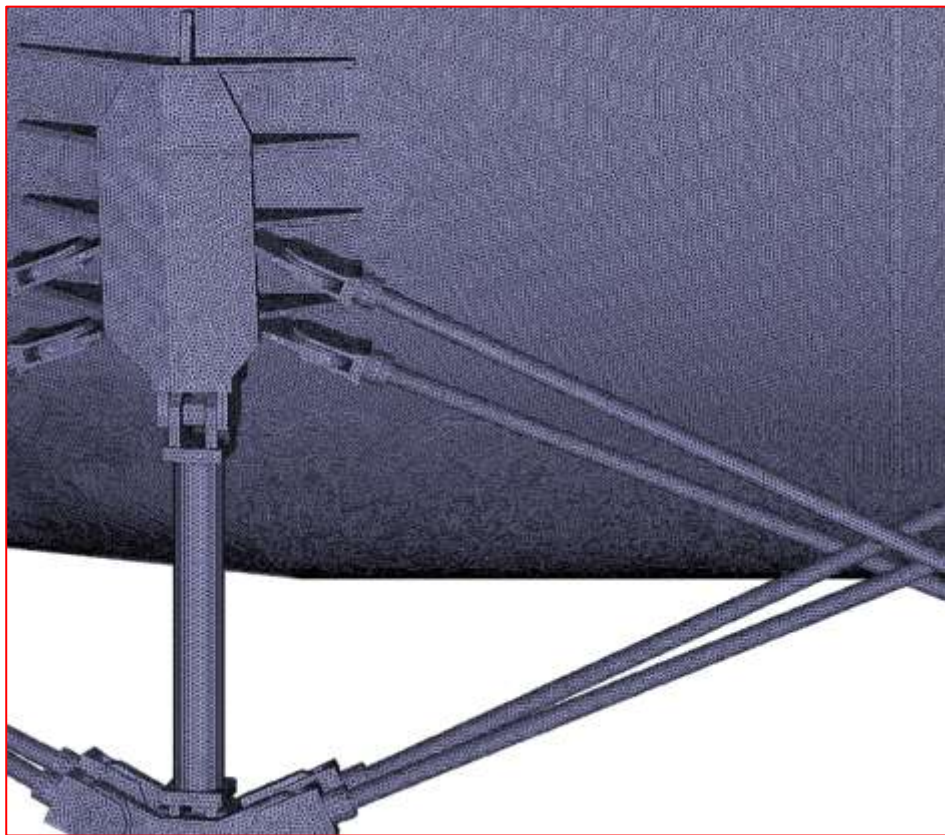
# 福島第1原子力発電所1号機のメッシュ(1)

解析モデル	要素数	節点数	自由度数
一次モデル	344,689,808	67,188,830	201,566,490
二次モデル	344,689,808	499,107,555	1,497,322,665



四面体要素によるメッシュ

# 福島第1原子力発電所1号機のメッシュ(2)



# 解析コードと可視化コード

# 解析コード

- 並列有限要素構造解析コード: **ADVENTURE\_Solid3FS**(フルスペック版)
  - **ADVENTURE**プロジェクトで開発
  - **陰解法**
  - **階層型領域分割法**による並列実装
  - **バランシング領域分割法(BDD法)**による前処理
- (階層型)領域分割: **ADVENTURE\_Metis**(Metis, ParMetisを使用)
- 並列オフライン可視化コード **LexADV\_WOVis**
  - <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/index.html>
  - ポストペタCREST塩谷チーム開発ソフトウェア
  - カスタマイズして使用



# 非線形解法

- 時間積分: **Newmark's  $\beta$ 法(陰解法)**
- 陽解法に比べて時間ステップを大きくとれるので、**低振動数の現象に興味があり、かつ、継続時間が長くなる地震応答解析に向いている**
- 時間ステップ毎に非線形問題に対する**Newton-Raphson法**の反復を行う
- **Newton-Raphson法の反復毎に連立一次方程式を解く(反復型線形ソルバーで解く)**
- **Newton-Raphson法と反復型線形ソルバーの二重ループ**

# 時間積分: Newmark's $\beta$ 法

## 予測子

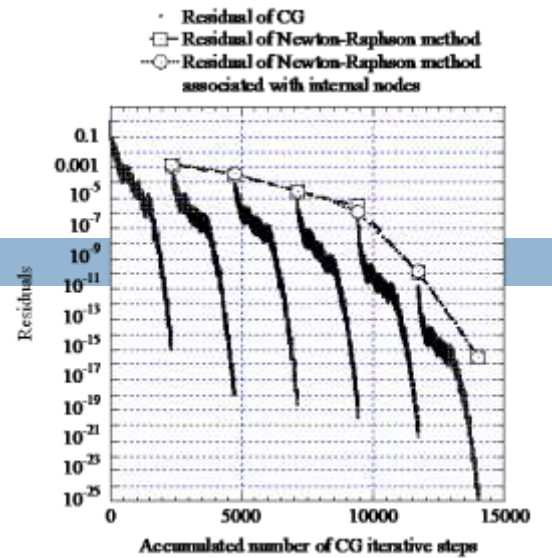
$$\left( \frac{1}{\Delta t^2 \beta} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\Delta t \beta} \mathbf{C} + {}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(1)} \right) \Delta \mathbf{U}^{(1)}$$

$$= {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^t \mathbf{Q} + \mathbf{M} \left[ \frac{1}{\Delta t \beta} {}^t \dot{\mathbf{U}} + \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) {}^t \ddot{\mathbf{U}} \right] + \mathbf{C} \left[ \left( \frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) {}^t \dot{\mathbf{U}} + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) {}^t \ddot{\mathbf{U}} \right]$$

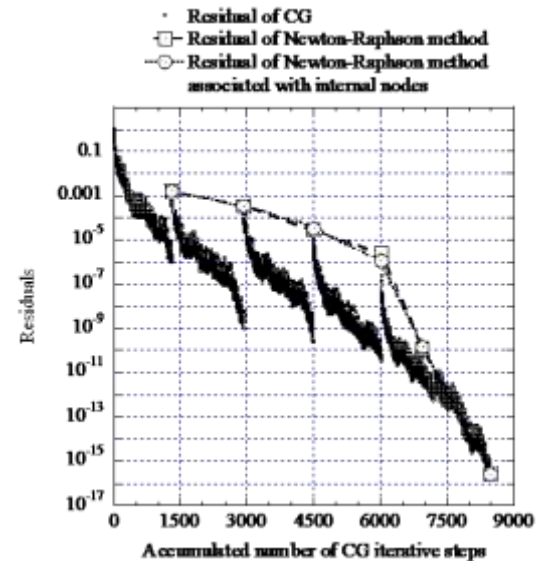
## 修正子

$$\left( \frac{1}{\Delta t^2 \beta} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\Delta t \beta} \mathbf{C} + {}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(k)} \right) \Delta \mathbf{U}^{(k)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{Q}^{(k-1)} - \mathbf{M} {}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{U}}^{(k-1)} - \mathbf{C} {}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{U}}^{(k-1)}$$

右辺が小さくなるまでNewton-Raphson法の反復を繰り返す

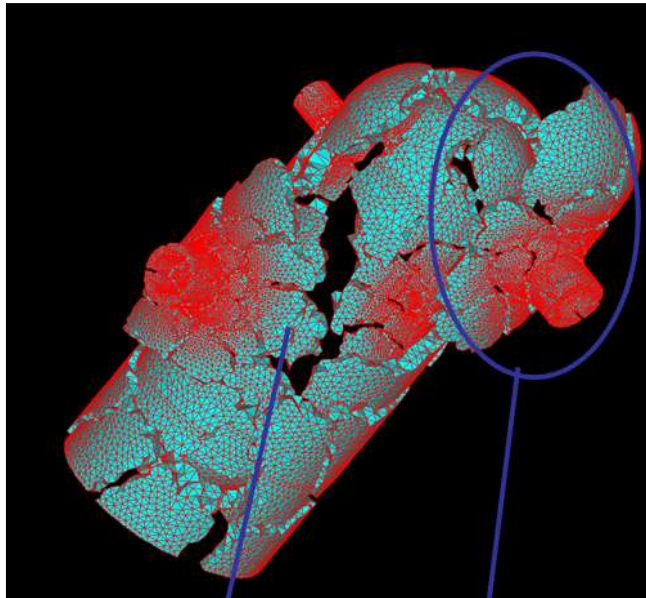


CG法の収束判定を緩めると全体の反復回数を減らせる



CG法とNR法の残差

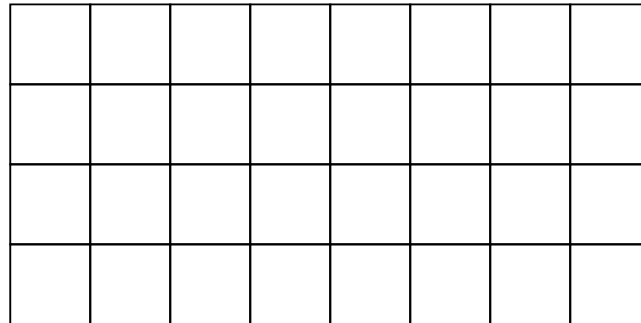
# 部分構造型領域分割法の階層型領域分割に基づく並列実装



Subdomain

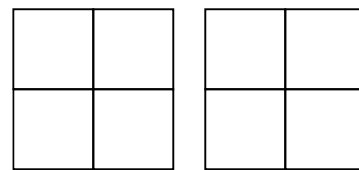
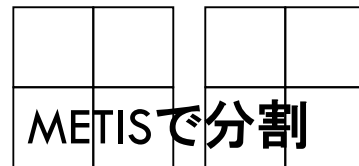
Part

- 1 MPIプロセスに割り当てる
- 1 MPIプロセスは1個のメニーコア計算ノードに割り当てる

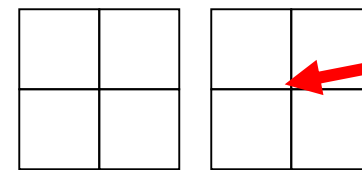
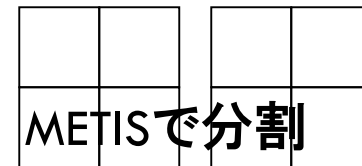


全体メッシュ

↓ ParMETISで分割



パート



部分領域

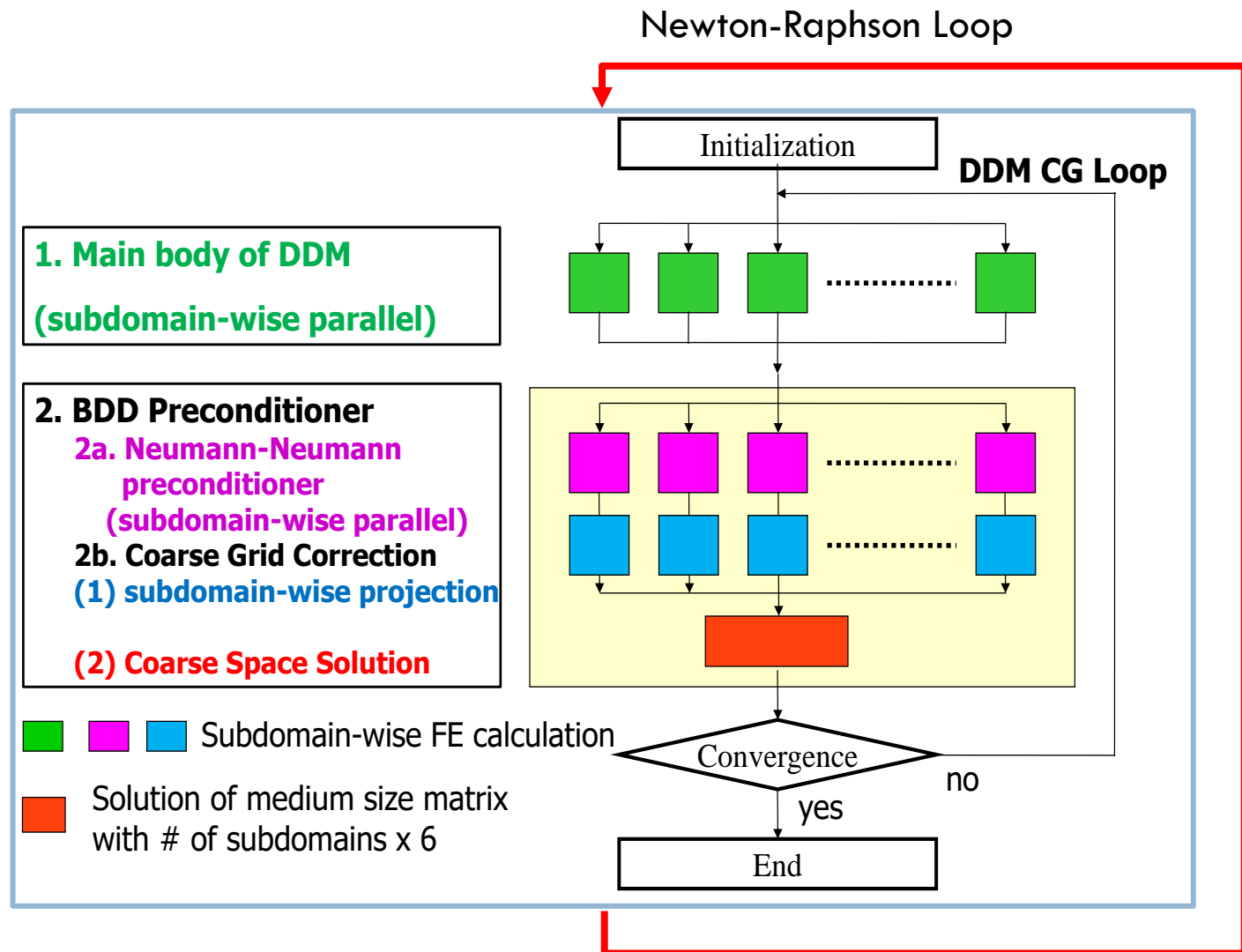
部分構造型領域分割法に基づく線形ソルバー

- 内部自由度を直接法で静的縮約(ローカル問題)
- 部分領域間境界自由度については、反復型解法である共役勾配法(CG法)で解く
- 1 MPIプロセス内の複数の部分領域のローカル問題をOpenMPスレッド並列で解く

# バランシング領域分割(BDD)法

## BDD法

- 線形問題を解くためのCG法の前処理
- 部分領域の剛体運動を利用して作る粗い問題(コース問題)によって得られる近似解により反復法の収束性を高める
  - 部分領域数×6自由度の問題
  - MPI-OpenMPハイブリッド並列化されたスパース直接法ソルバーMUMPSで並列に解く
- 部分領域に対するノイマン問題を解く(ローカルノイマン問題)ことによるノイマン-ノイマン前処理
- ローカルノイマン問題もOpenMPスレッド並列で解く



# 超大規模問題, 富岳の多数ノード利用における問題点 と新しい実装方法

## 従来の実装

- ローカル問題の規模 $\approx$ 全自由度数 / 総部分領域数  $\rightarrow$  シングルスレッド版のスカイライン法
- コースグリッド問題の規模 $\approx$  総部分領域数  $\times 6 \rightarrow$  スパースダイレクトソルバーMUMPS

## 問題点

- ローカル問題を一定規模にすると, どんどん部分領域数が増える
- コースグリッド問題の規模が大きくなりすぎる
- 一方で, ノード数  $>$  適切な部分領域数  $\rightarrow$  ノードを使いきれない



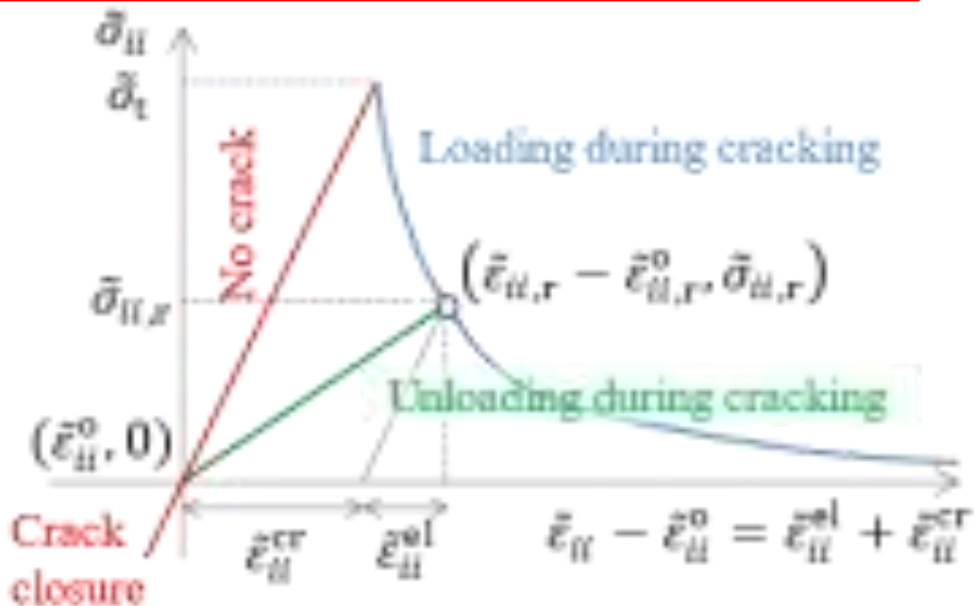
## 新しい実装

- ローカル問題も複数ノードを用いたMUMPSで解くことにより部分領域数を減らす  $\rightarrow$  コースグリッド問題の自由度を減らし, ノードを有効活用
  - 2次要素モデルの15億自由度では, ぎりぎり従来の実装の方が高速

# コンクリート構成則 – ひび割れ(クラック)モデル – (防災科学技術研究所, 数値震動台プロジェクトで開発)

24

- 弾塑性: Drucker-Prager則
- 圧壊: Drucker-Prager則の相当塑性ひずみに基づく損傷モデル
- **クラックモデル(下記)**
  - クラックはNewton-Raphson法収束後に陽的に更新



## ひずみの加算分解

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}^{el} + \tilde{\varepsilon}^{pl} + \tilde{\varepsilon}^{cr}$$

$\tilde{()}$ : クラック座標系での変数

$\tilde{\varepsilon}^{el}$ : 弾性ひずみ,  $\tilde{\varepsilon}^{pl}$ : 塑性ひずみ,  $\tilde{\varepsilon}^{cr}$ : クラックひずみ

## クラック発生時の負荷

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \sigma_{cr} \exp(-c \tilde{\varepsilon}^{cr}) \quad \text{where} \quad c = \frac{\sigma_{cr} l_r}{G_f}$$

$\sigma_{cr}$ : クラック発生応力,  $G_f$ : 破壊エネルギー,  $l_r$ : 要素の代表長さ

## クラック発生時の除荷

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \frac{\tilde{\sigma}_{ii,r}}{\tilde{\varepsilon}_{ii,r} - \tilde{\varepsilon}_{ii,r}^0} (\tilde{\varepsilon}_{ii} - \tilde{\varepsilon}_{ii}^0)$$

下添字  $r$  は除荷開始点での値

# 鉄筋

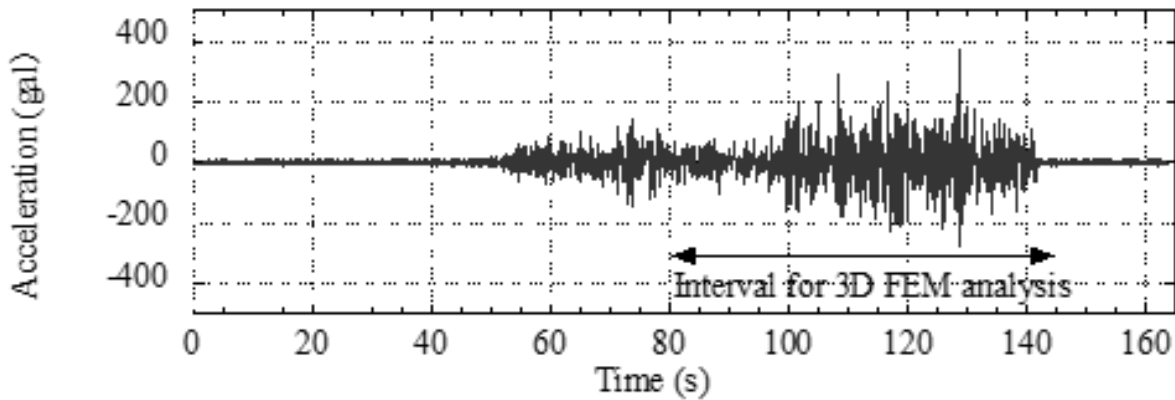
直交異方性弾性構成則による分散鉄筋モデル

(現在, Hoffman-Hillの直交異方性弾塑性則版も開発中)

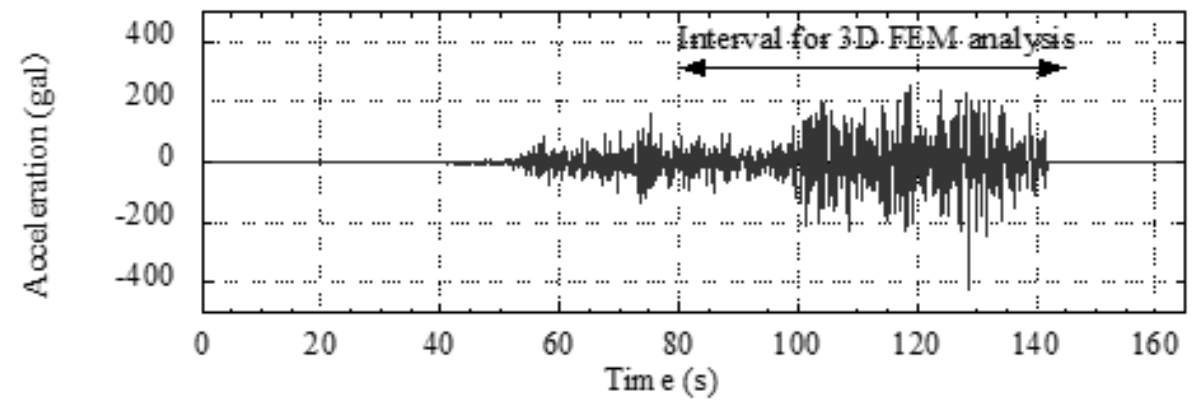
# 解析結果

# 入力地震動

東北地方太平洋沖地震において1F1の地階で観測された東西(EW), 南北(NS)の並進の加速度時刻歴



NS方向並進



EW方向並進

2階の地震計が故障したため、建屋地盤連成集中質点系モデルによる解析によりロッキング成分を同定

# 材料定数

## コンクリート(弾塑性, 圧壊)

E [GPa]	$\nu$	$\sigma_0^y$ [MPa]	Hardening coefficient [MPa]	$\phi$ [deg.]	$\epsilon$	$e_0$	$e_1$	$D_{max}$
25.1	0.2	32.4	27.0	66	0.0716	0.0001	0.004	0.9

## コンクリート(クラック)

$\nu$	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$l_r$ [mm]	$G_f$ [mm]	$\tilde{\sigma}_t$ [MPa]
0.2	2.6	75	0.1	2

## 鉄筋

Young's modula $E_{11} = E_{22} = E_{33}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	Poisson's ratio $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	Shear elastic modulus $G$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2.665	0.0	1.0

- 鉄筋は連続体直交異方性弾性体モデル(分散鉄筋モデル)
- 縦筋鉄筋比を1.3%として鋼材のヤング率にかける

# 並列計算の諸元, 計算時間, 計算条件

- 1次要素モデル
  - 258ノード, 1032MPIプロセス, 12コア(スレッド)/1MPIプロセス
  - 20時間ステップ: 入出力, 可視化も含めて約2時間40分
- 2次要素モデル(ローカル問題スカイライン版)
  - 1536ノード, 6144MPIプロセス, 12コア(スレッド)/1MPIプロセス
  - 10時間ステップ: 入出力, 可視化も含めて約1時間44分
- 6500時間ステップ(継続時間: 65秒(現在は約50秒まで計算))
- 時間刻み
  - $\Delta t = 0.01s$
- 1F1における東北地方太平洋沖地震の観測波を1.2倍
- Newton-Raphson法収束判定
  - 初期残差  $\times 10^{-4}$  (最大反復回数: 10回. 収束しない場合には残差を次ステップに持ち越す)
- CG法収束判定
  - 各反復における初期残差  $\times 10^{-2}$
- 自重を考慮(静解析)

# 1次要素モデル(C1)と2次要素モデル(C2)の比較

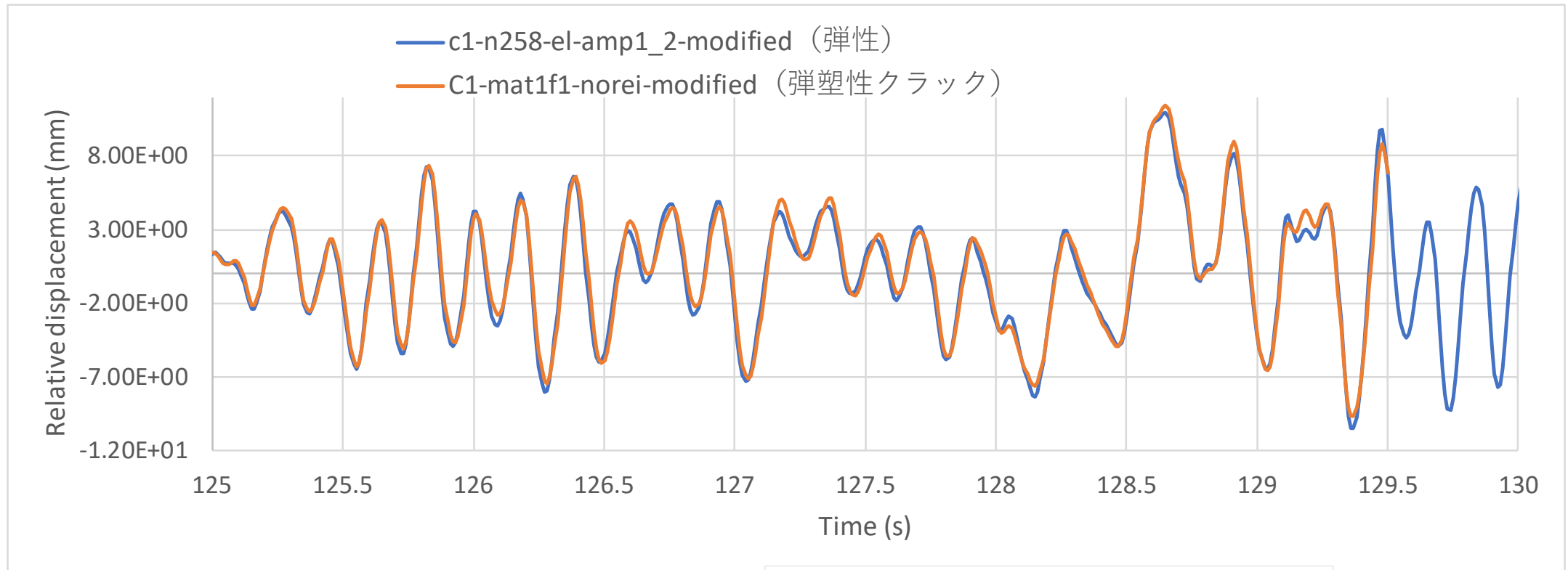
## 解析条件と計算した時間ステップ数および実時間

モデル	鉄筋	クラック	弾塑性, 圧壊	ステップ数	実時間(s)
C1	なし	あり	なし	6500	65.0
C1	あり	あり	なし	6500	65.0
C2	なし	あり	なし	4960	49.6
C2	あり	あり	なし	800	8.0
C1	なし	あり	あり	5250	52.5
C1	あり	あり	あり	3150	31.5
C2	なし	あり	あり	440	4.4

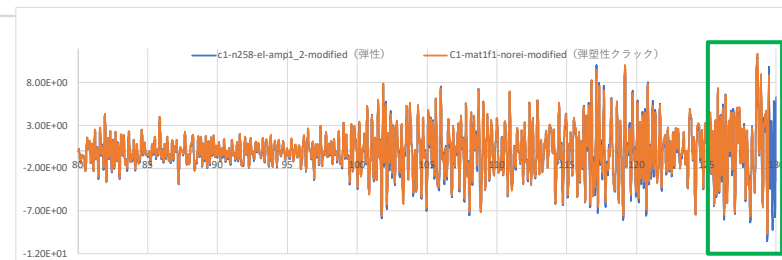
15億自由度のC2モデルで非線形解析を行うことができた(京では困難であった計算)

以下では主に分散鉄筋なしの結果を示す

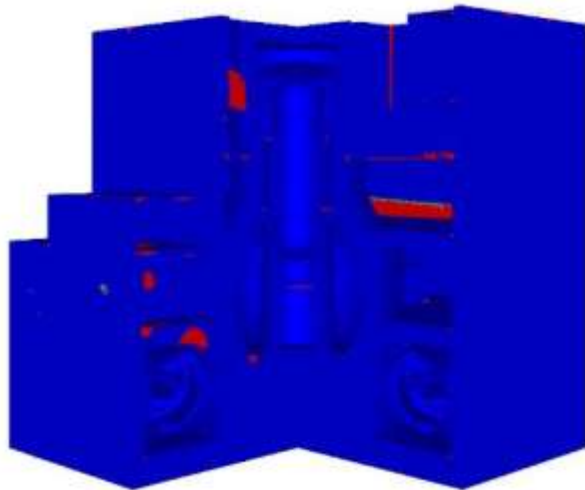
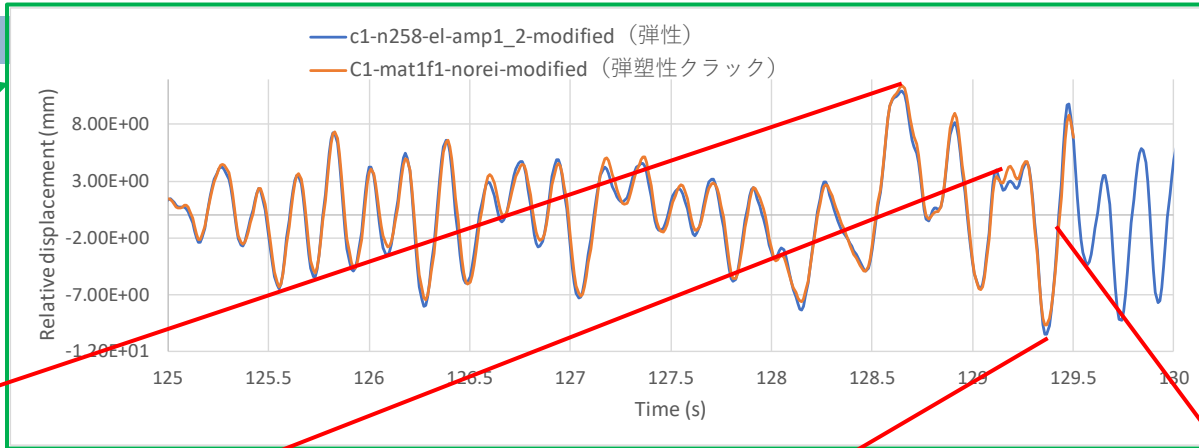
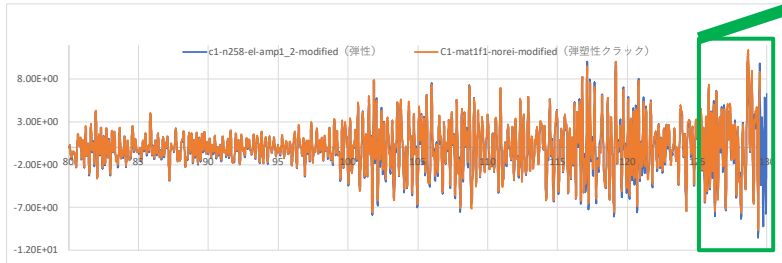
# 変位時刻歴(圧力容器上部)



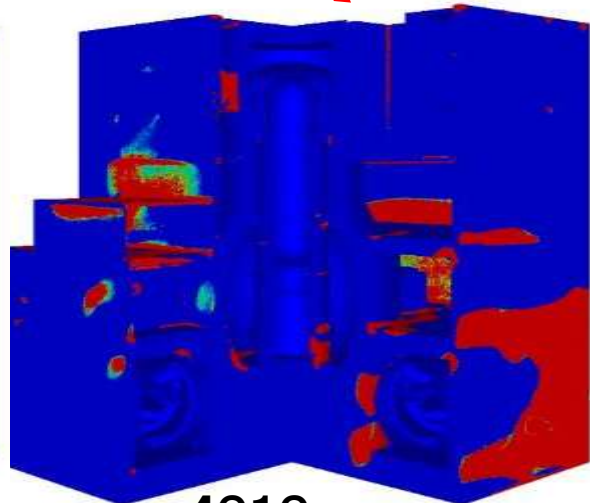
圧力容器上部における水平変位時刻歴  
→弾塑性, クラックの影響が少しみられる



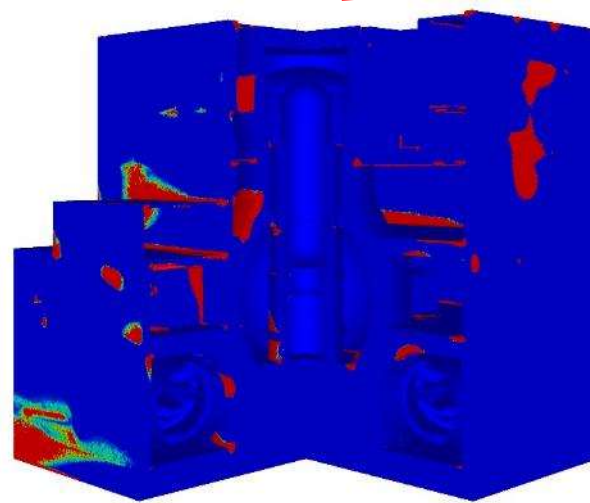
# クラックの発生



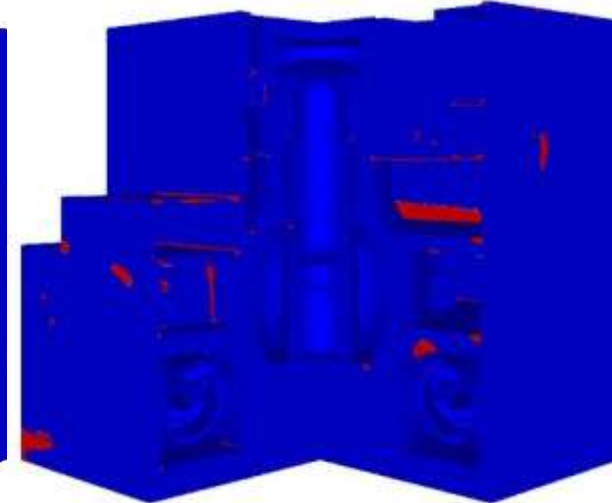
4867



4919



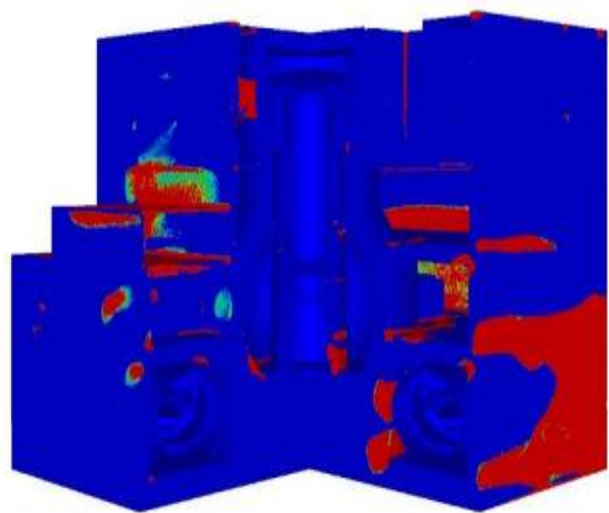
4937



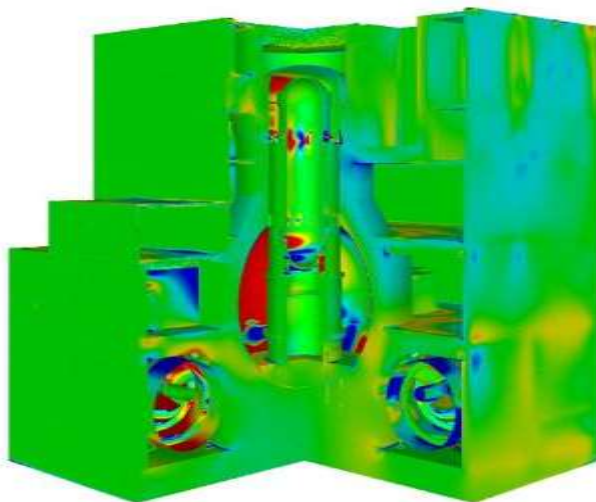
4944

注:このクラックモデルでは,クラック発生後に圧縮状態になると,クラック発生履歴は残らない

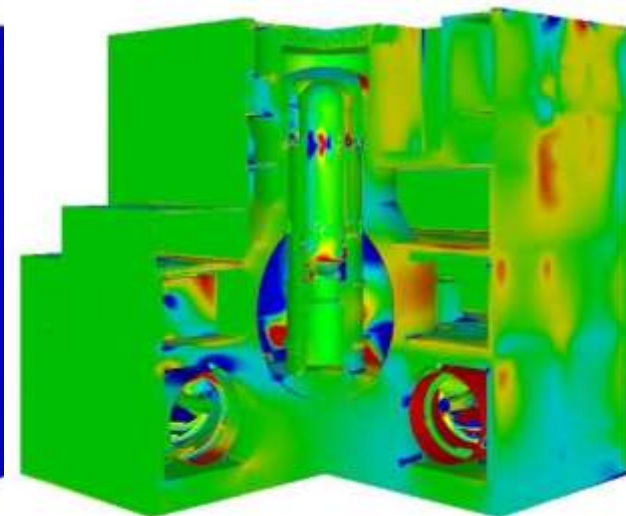
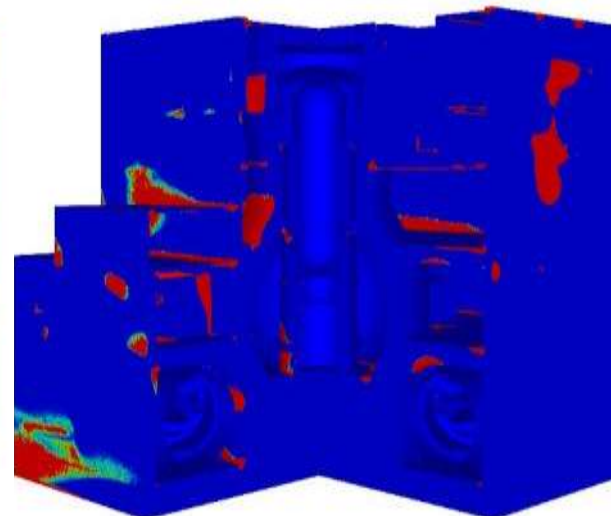
# クラックと応力 ( $\sigma_{xx}$ (東西) 成分)



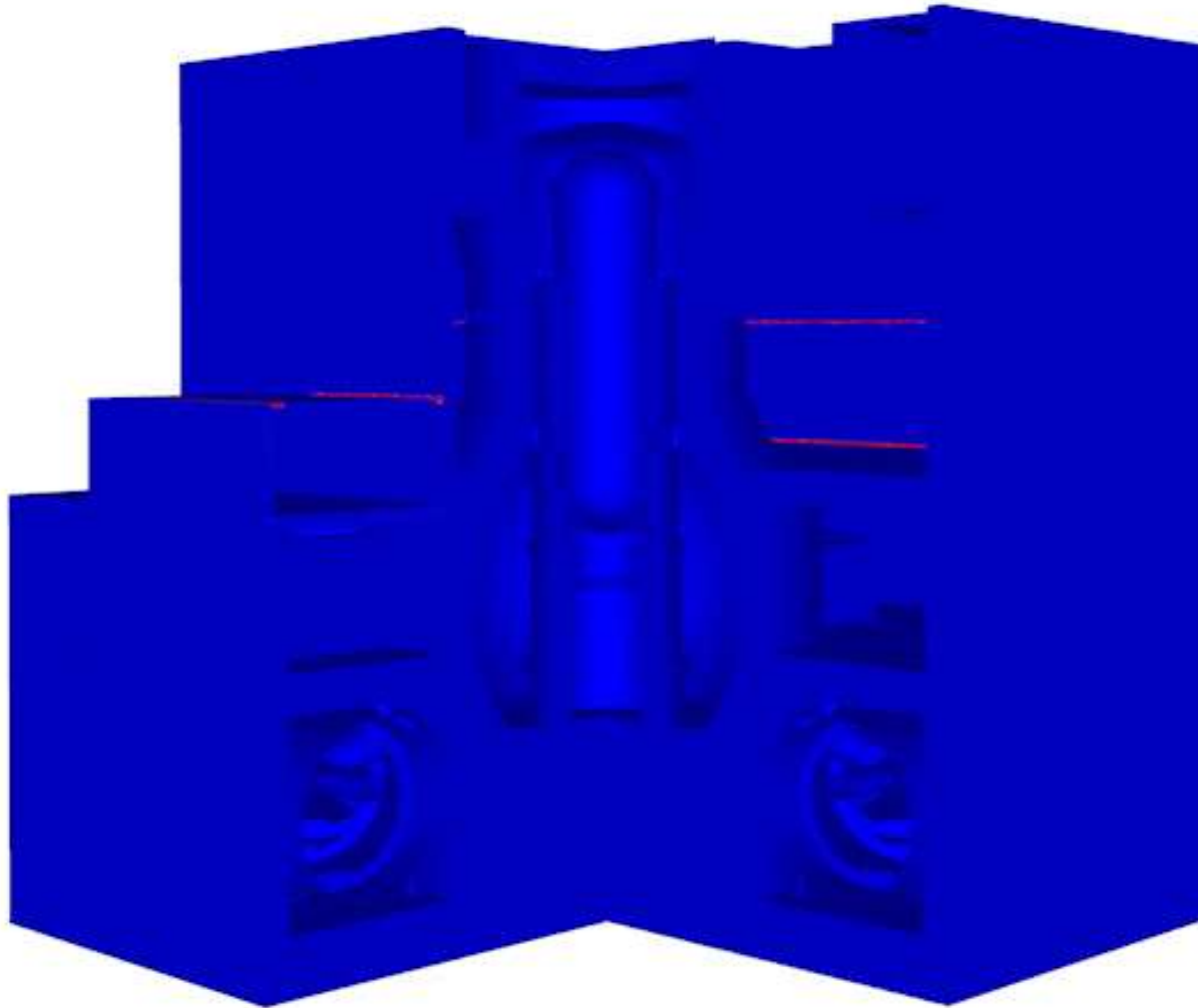
4919



4937

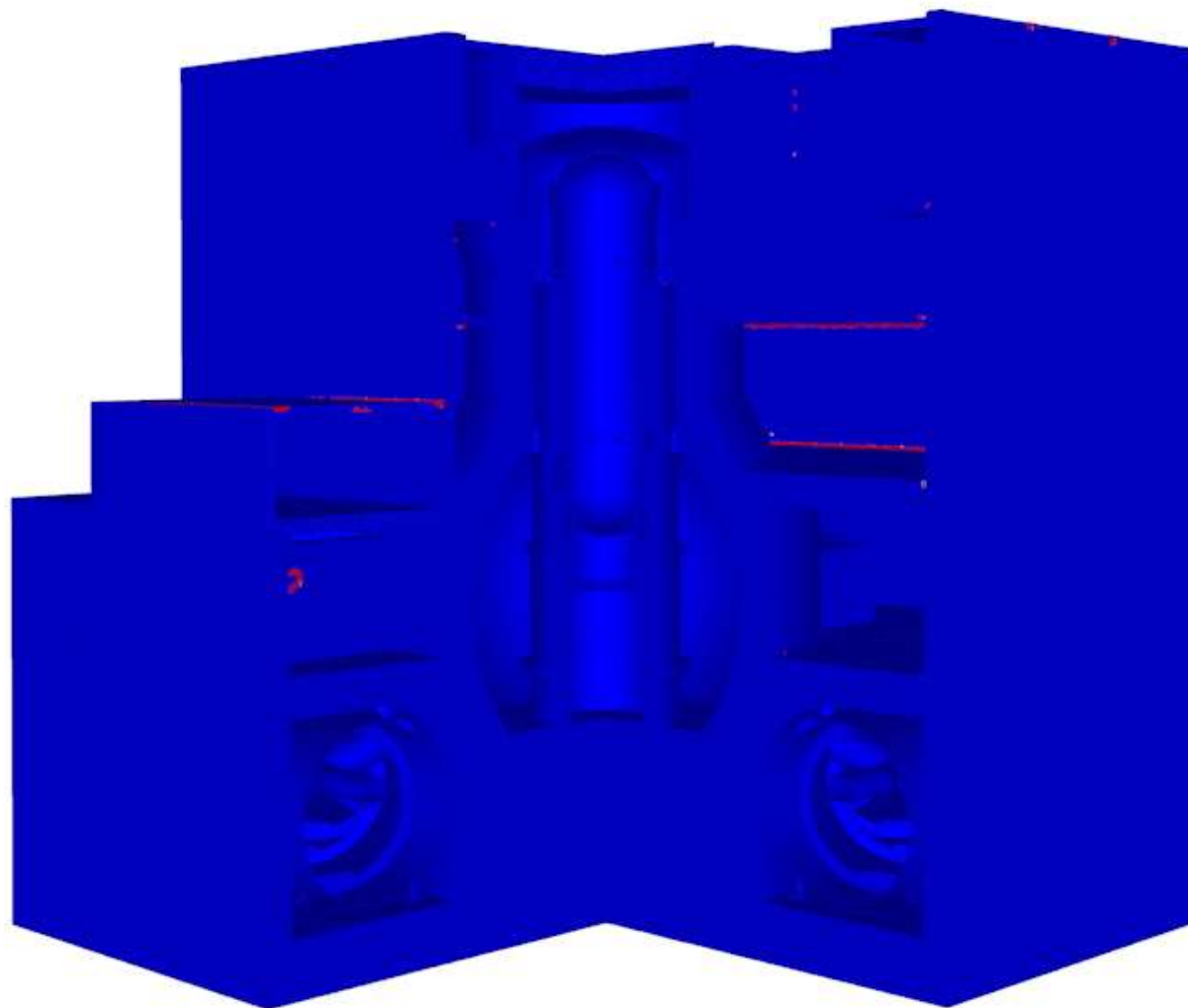


# 動画



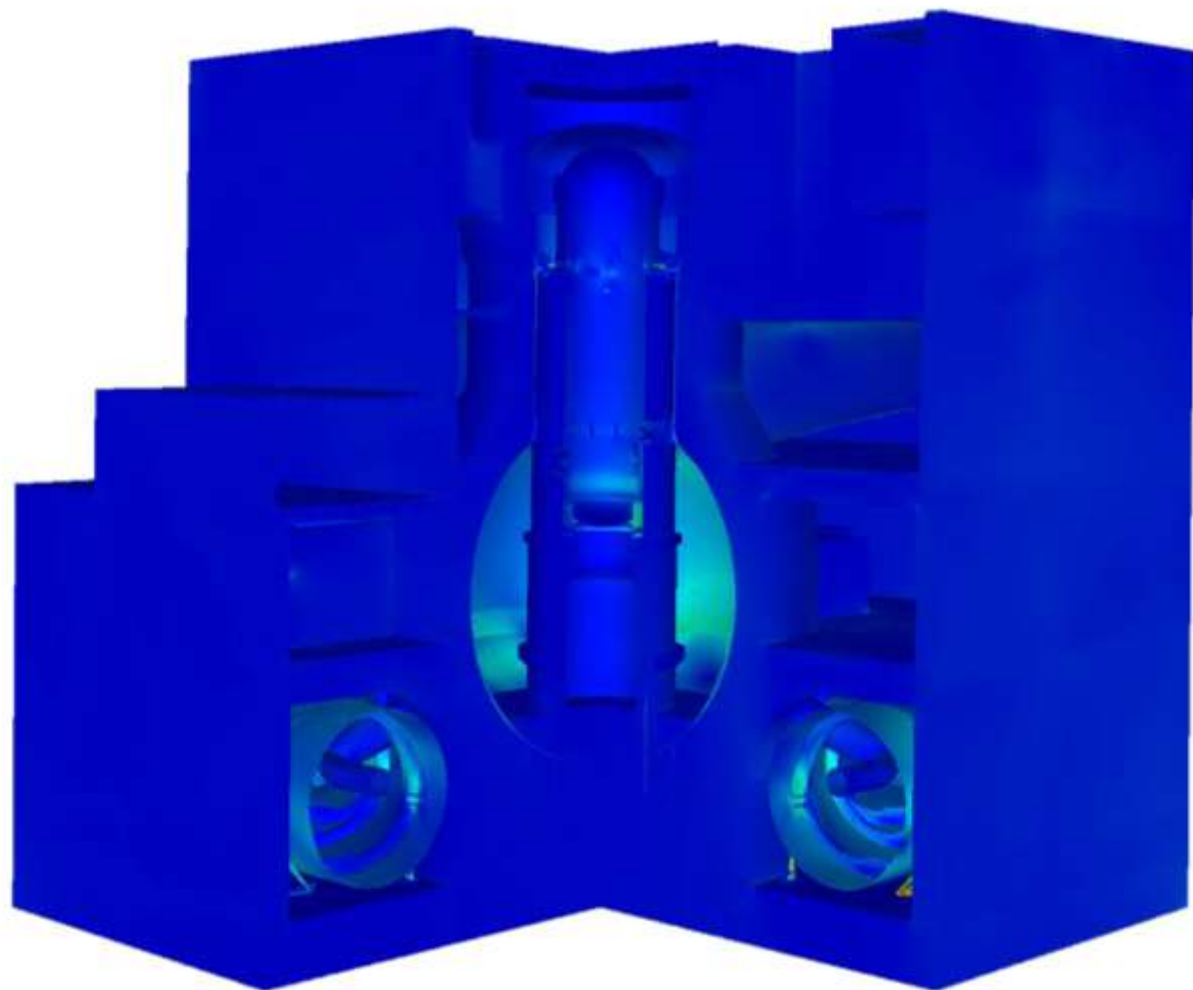
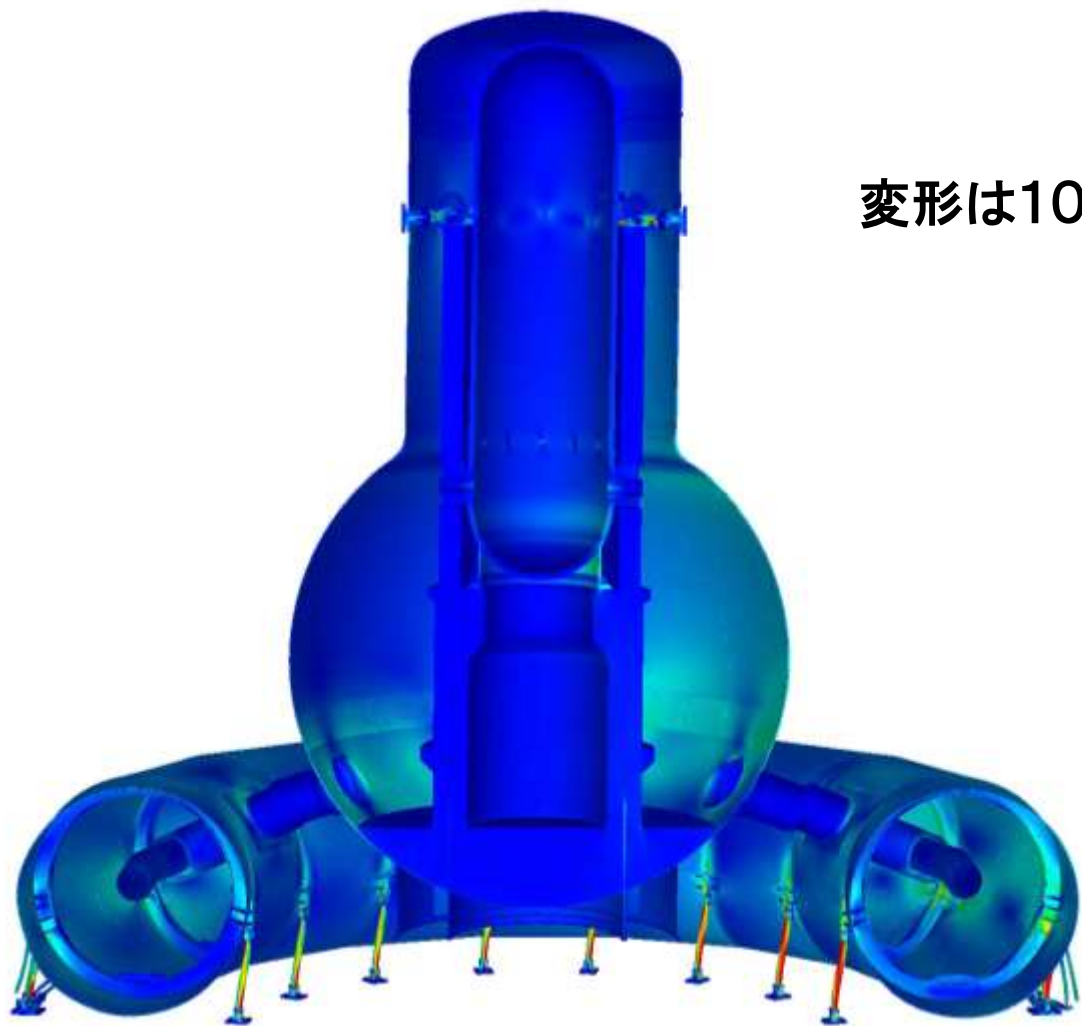
鉄筋コンクリート構造の許容応力度設計では、コンクリートの引張強度は0として設計するので、クラックが発生するから危険なわけではない

# 動画(4倍遅く)

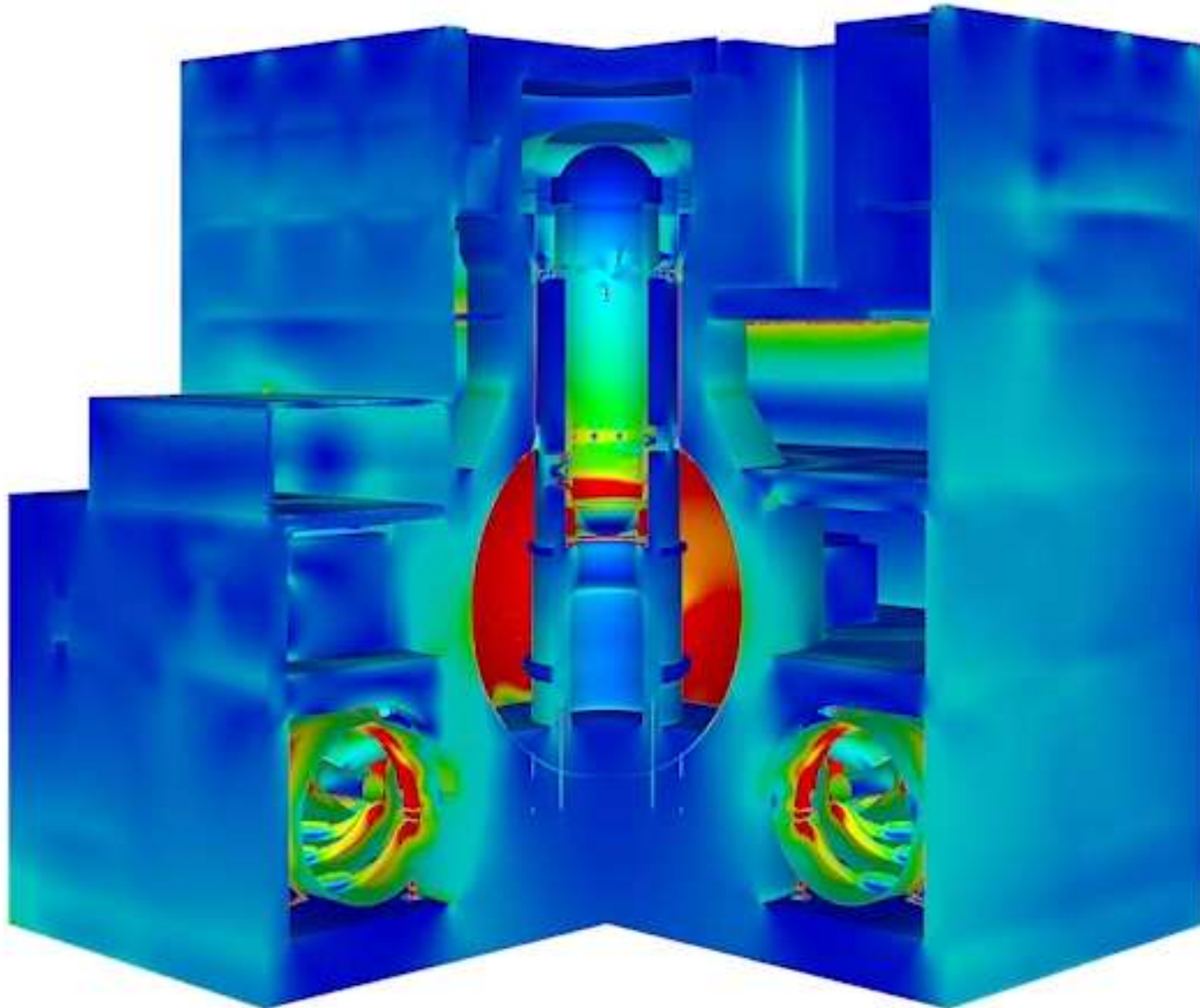


# 相当応力と変形(動画)(実時間)(1)

変形は100倍



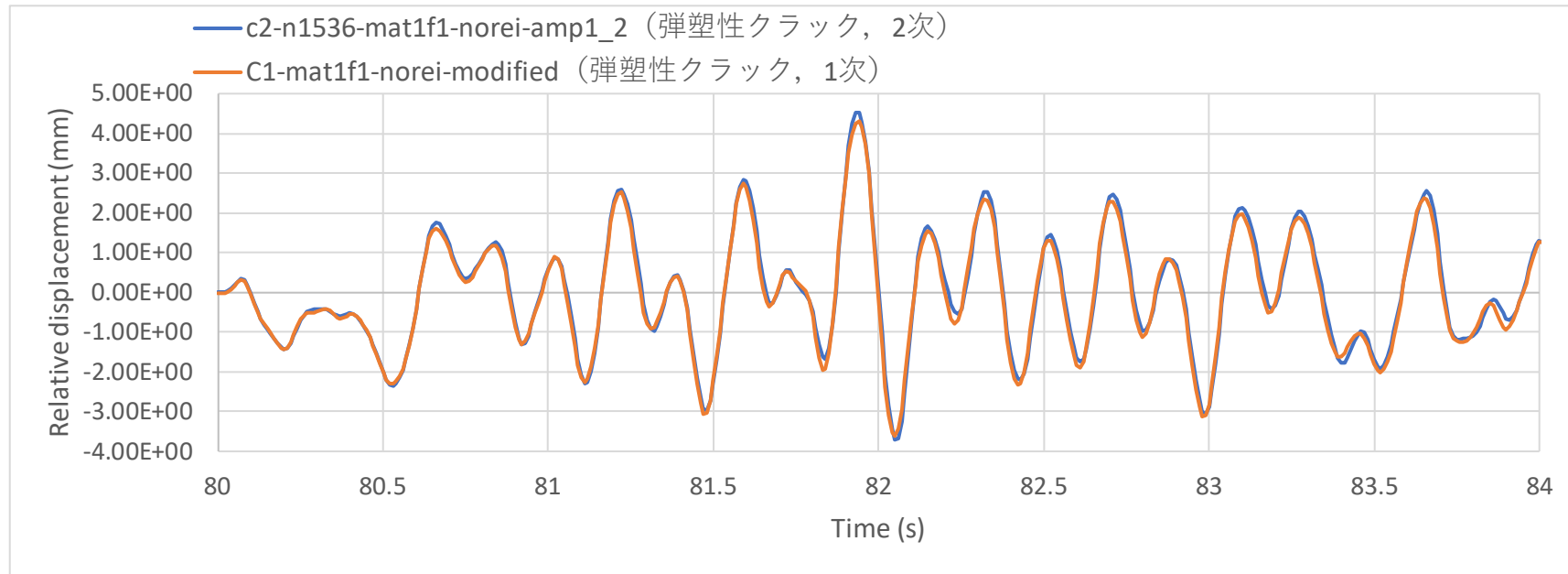
# 相当応力と変形(動画)(実時間)(2)



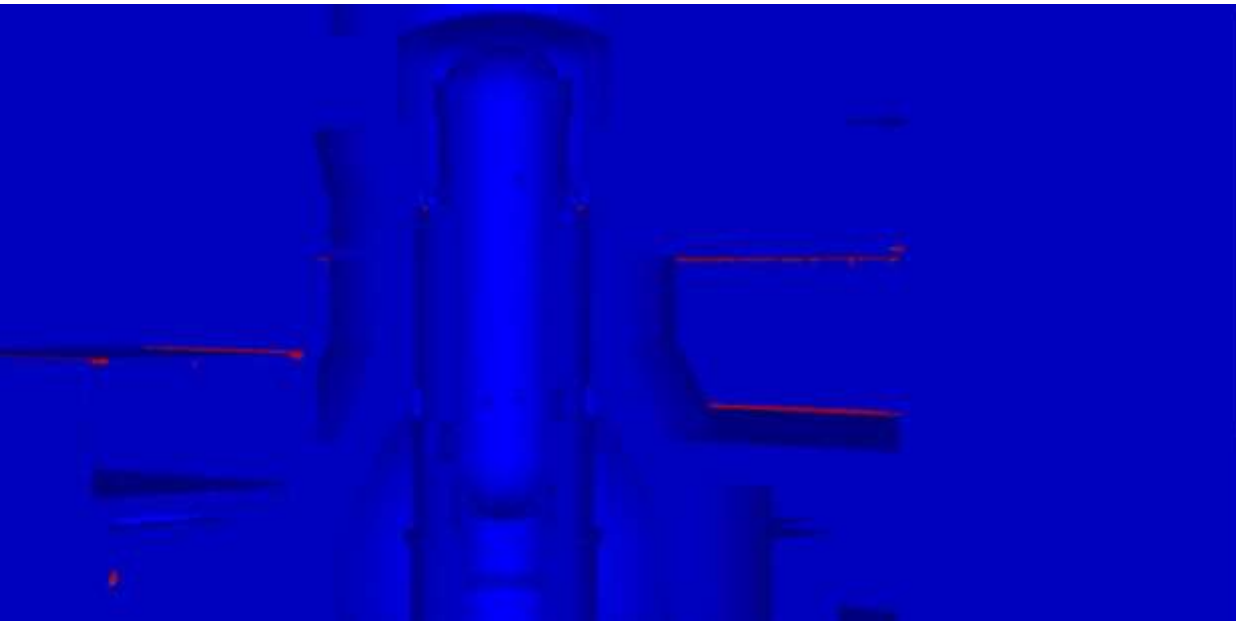
変形は1倍(解像度を上げ, 応力コンタのレンジを調整して見易くしたものの, 変形倍率をかけるのを忘れていた)

# 2次要素モデル(c2)(15億自由度モデル)

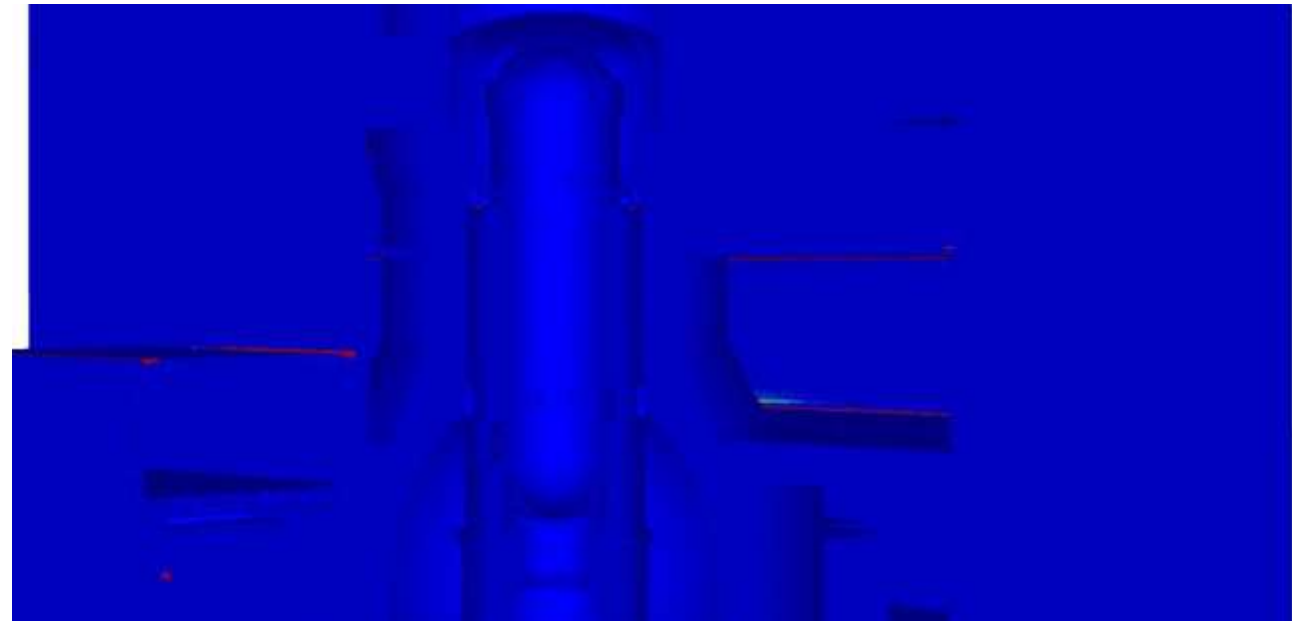
- 弾塑性なし, クラックありの2次要素モデルで4960ステップ分計算
  - 京のときには, ほとんど非線形性のない設定で12ステップしか計算できなかった
- 弾塑性あり, クラックありの15億自由度モデルで440ステップ分計算
  - 変位時刻歴は1次要素モデルと少し異なっている



# クラックひずみコンタの比較



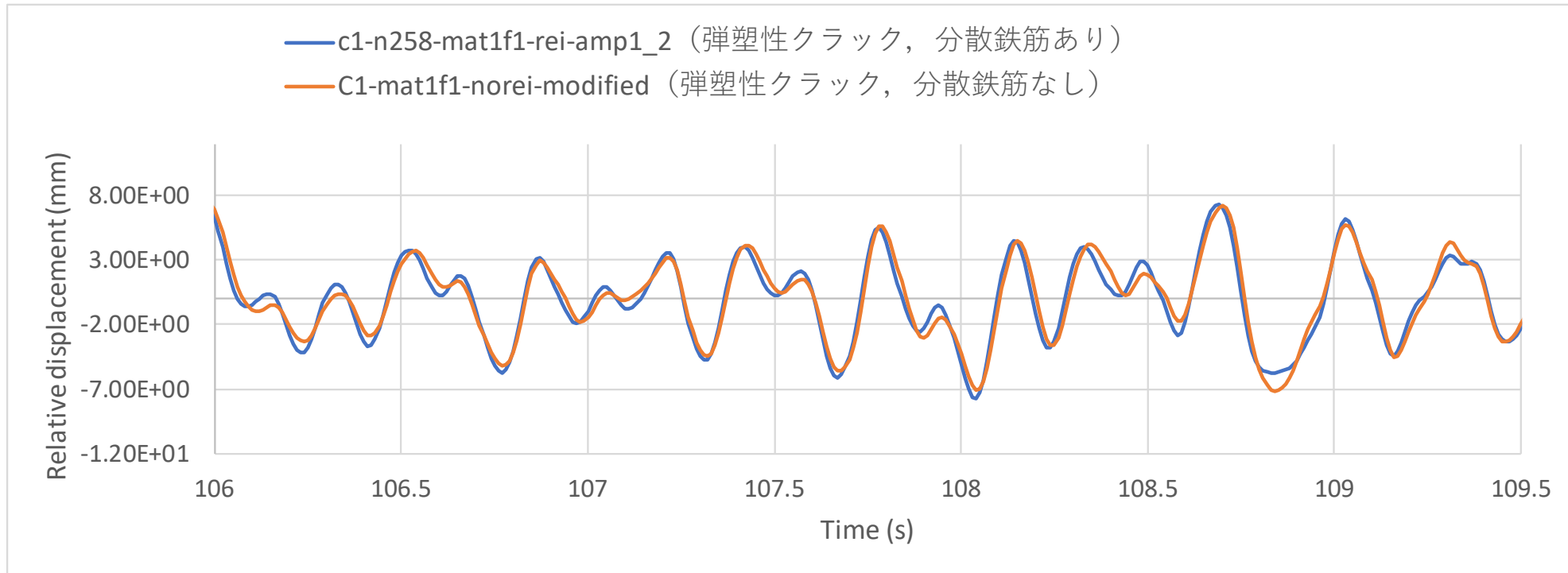
1次



2次

327ステップ(3.27秒)

# 分散鉄筋の影響



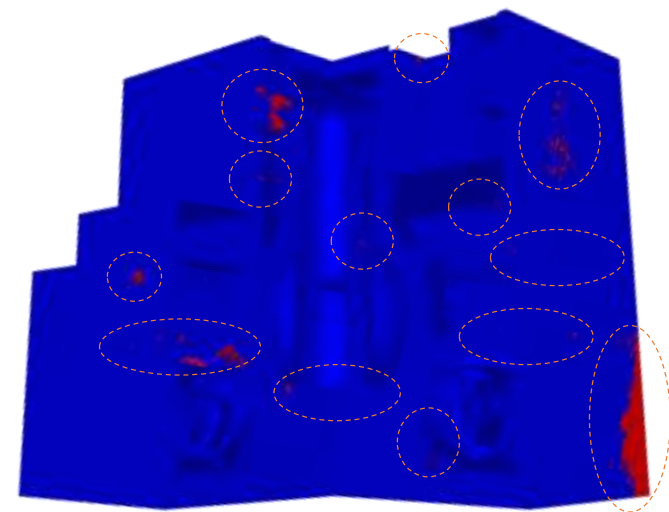
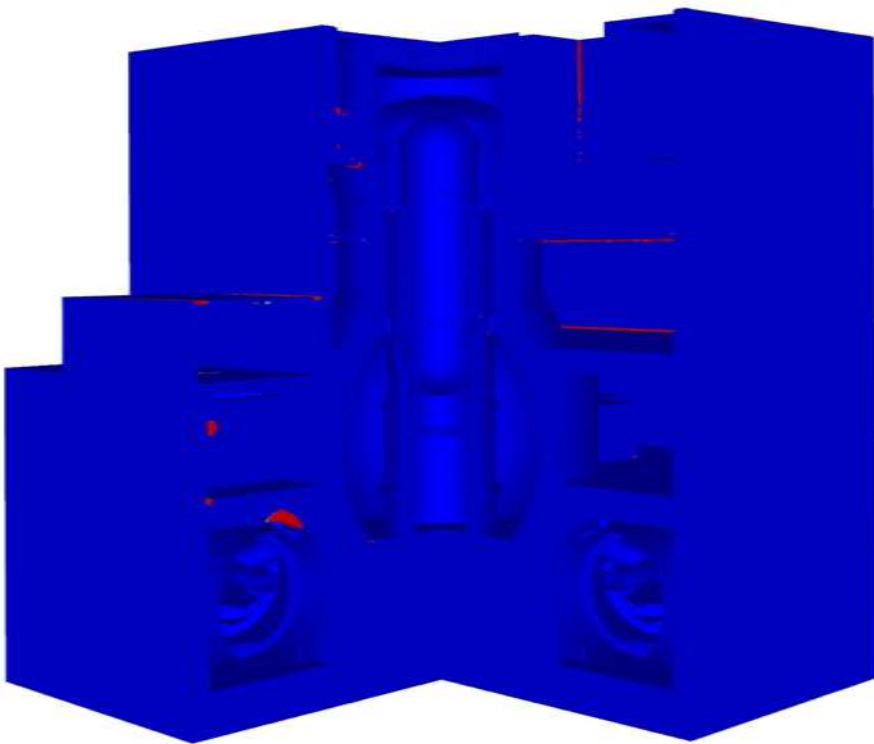
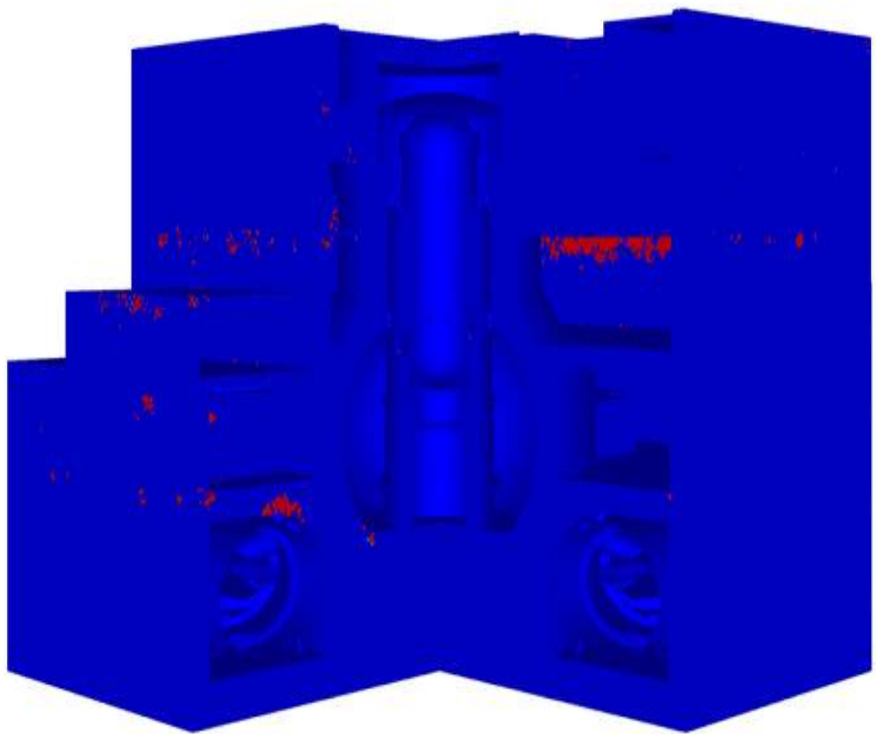
圧力容器上部の変位時刻歴

鉄筋を加えることで必ずしも応答が小さくなるわけではない

## 「富岳」による解析で苦労している点, 失敗事例

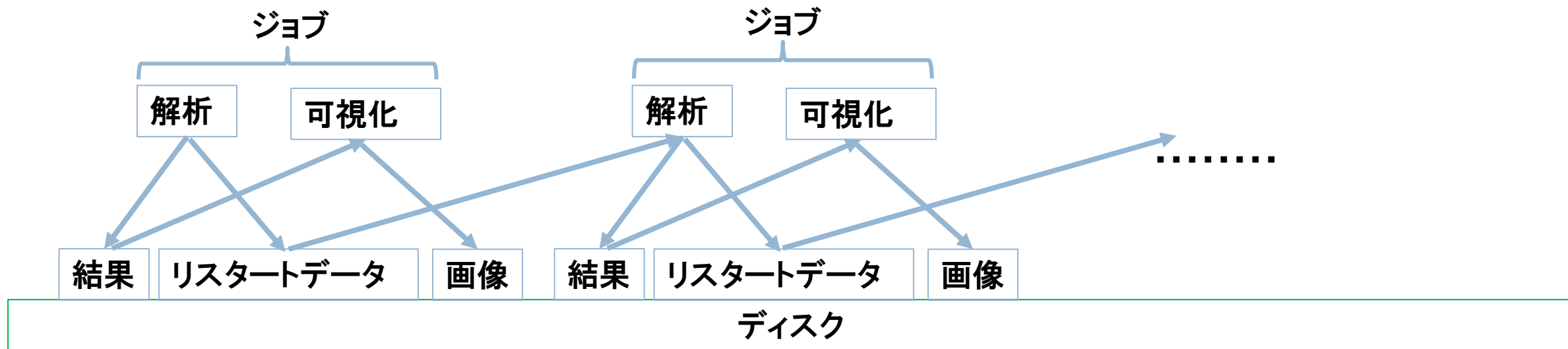
# 可視化の失敗

出力データの並び順を間違えた



c1-n258-mat1f1-norei-amp1\_2, 2563ステップ

# 解析，可視化作業とその苦勞



## 解析可視化作業の苦勞

- 富岳の1課題あたりのディスク容量は最大400TB
  - 1次要素モデルのデータ: **一部ファイルを消しても124TB**
  - 結果, リスタートを消さないとディスクがあふれる
  - 可視化コードの改良が間に合わず, 結果を消せない
- 様々なスクリプトによる処理
  - Spackで画像形式の変換
  - スクリプトをAIでどんどん作る
- ファイル数が多すぎて正規表現で処理できないことがある
- 計算資源は貯金できないので, できる計算から進める

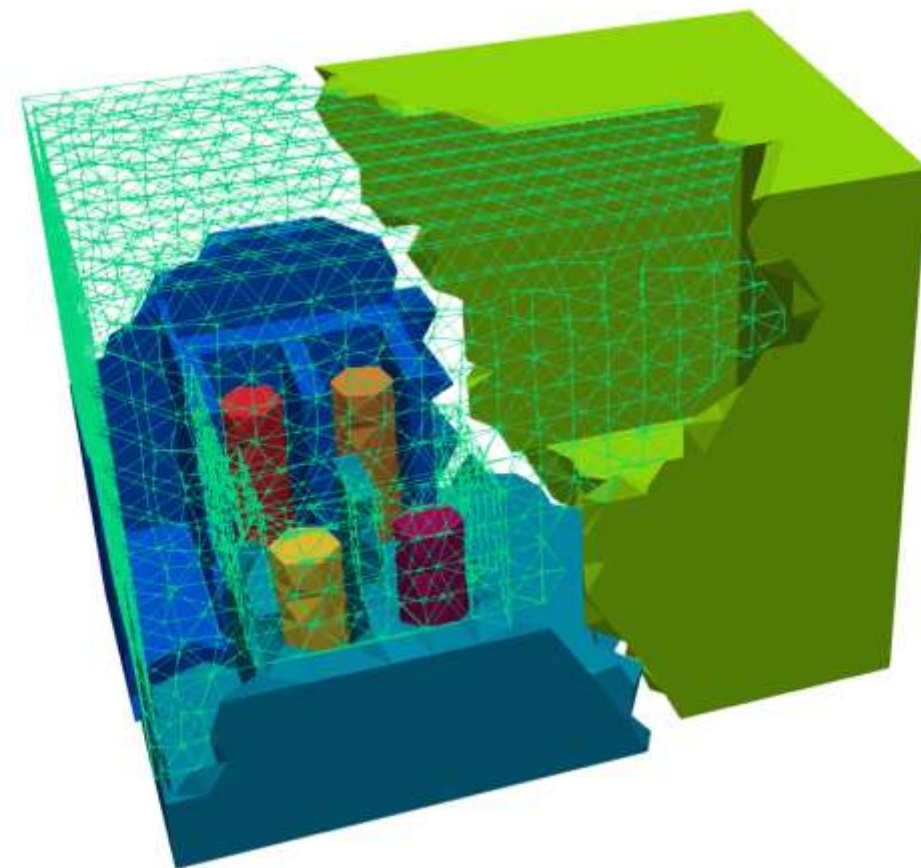
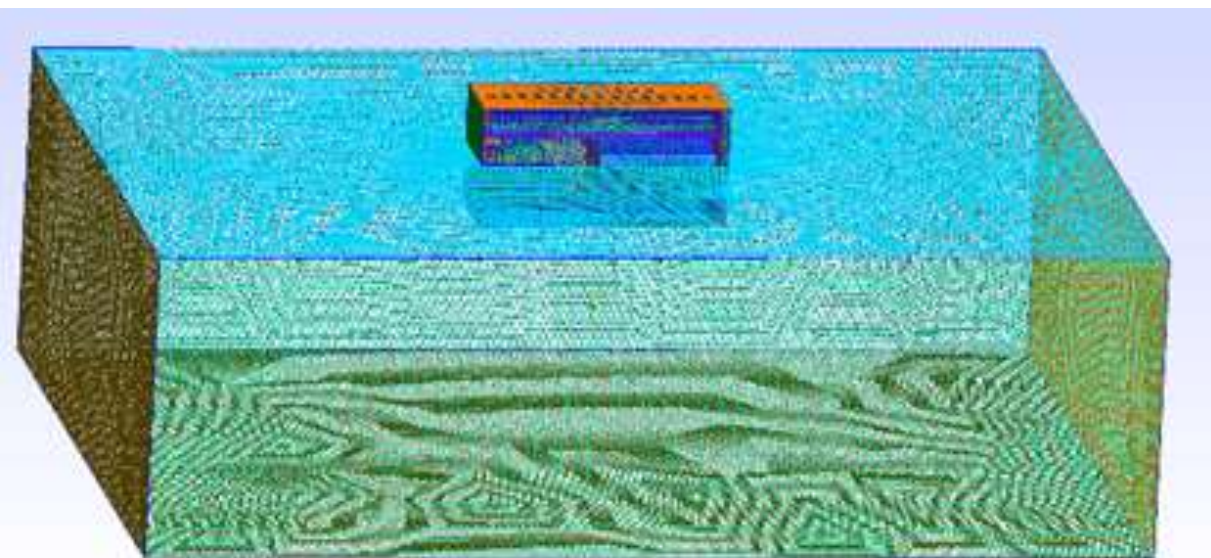
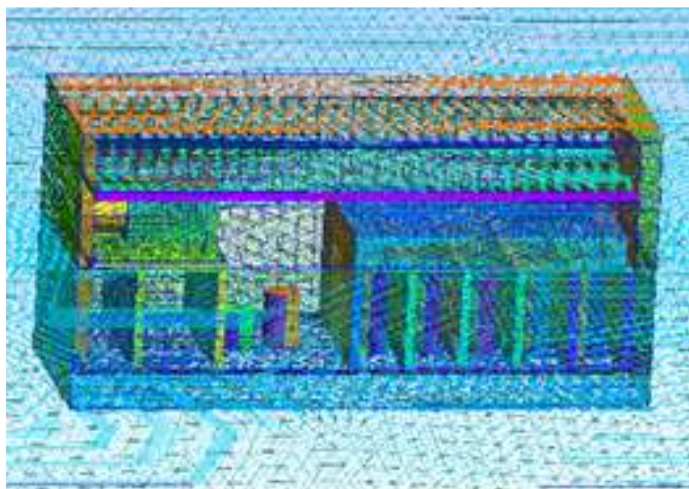
## 失敗事例

- 加速度の出力を忘れ, 床応答スペクトルの計算ができない
- クラックコンタ+変形ありの図を出力していない
- 可視化コードの設定ミスで, かなり先まで計算した後で絵が何も出力されていないことに気づく
- ...

とはいえ, まるで手元のPCで計算しているかのような使いやすさも感じられる

今後の展開：小型原子炉モデル，一部コンポーネン  
トへのROMの導入

# 複数の小型モジュール原子炉が設置された発電所+地盤の簡易メッシュの試作

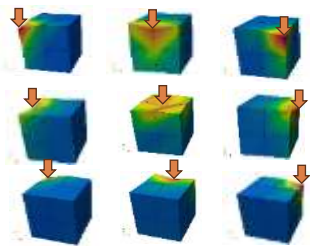
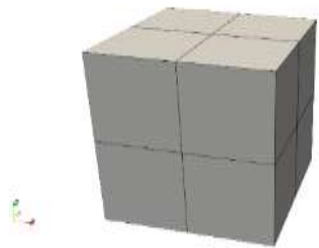


領域分割(4モジュール, 地盤なし)

# ROM (Reduced Order Model, 次数低減モデル)

## ROMの作り方

HDM



代表的な変形の解  
(スナップショット)を収集・学習



特異値  
分解



次数低減基底V

↑  
重要な情報を取り出す

解くべき連立一次方程式

未知数 = 節点数 × 自由度

$$27 \times 3 = 81$$

HDM

$$Ku = f$$

ROM

$$V^T K V y = V^T f$$

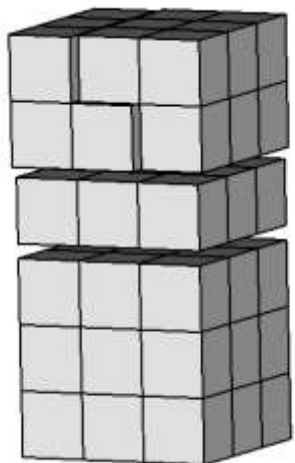
未知数 = 次数低減基底数

9

未知数の数が大きく減少！

最大でもスナップショットの数

# 部分領域型領域分割法によるHDMとROMの結合

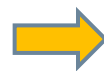


この部分領域をROMとする( $k$ で表す)

- Bにおいて指定する変位に対応する部分を $\mathbf{a}_B^{(k)}$ とする
- Bにおいて反力に対応する部分を $\mathbf{b}_B^{(k)}$ とする

部分領域における計算

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{II}^{(k)} & \mathbf{K}_{IB}^{(k)} \\ \mathbf{K}_{BI}^{(k)} & \mathbf{K}_{BB}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_I^{(k)} \\ \mathbf{a}_B^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_I^{(k)} \\ \mathbf{b}_B^{(k)} \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{K}_{II}^{(k)} \mathbf{u}_I^{(k)} = \mathbf{f}_I^{(k)} - \mathbf{K}_{IB}^{(k)} \mathbf{a}_B^{(k)}$$

$$\mathbf{b}_B^{(k)} = \mathbf{K}_{BI}^{(k)} \mathbf{u}_I^{(k)} + \mathbf{K}_{BB}^{(k)} \mathbf{a}_B^{(k)}$$

この式をROMに置き換える

$\mathbf{a}_B^{(k)}$  はディリクレ境界条件でありCG反復毎に変化する  
→これをパラメータ $\boldsymbol{\mu}$ とした部分領域のROMを作成

$$\mathbf{K}_{II}^{(k)} \mathbf{u}_I^{(k)} = \mathbf{f}_I^{(k)} - \mathbf{K}_{IB}^{(k)} \boldsymbol{\mu}$$

スナップショットを計算し、  
次数低減基底を作る



$$\mathbf{V}^T \mathbf{K}_{II}^{(k)} \mathbf{V} \mathbf{y} = \mathbf{V}^T (\mathbf{f}_I^{(k)} - \mathbf{K}_{IB}^{(k)} \mathbf{a}_B^{(k)})$$

$$\mathbf{u}_I^{(k)} \approx \mathbf{V} \mathbf{y}$$

ROMで近似的に計算



$$\mathbf{b}_B^{(k)} = \mathbf{K}_{BI}^{(k)} \mathbf{u}_I^{(k)} + \mathbf{K}_{BB}^{(k)} \mathbf{a}_B^{(k)}$$

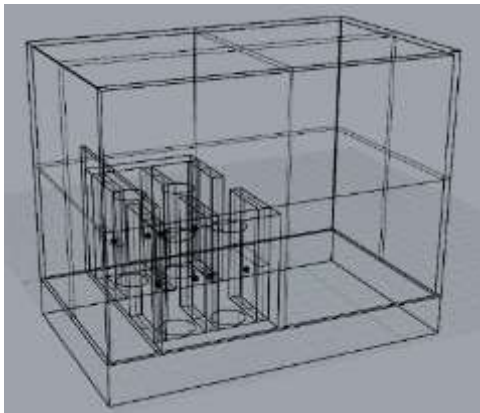
反力の計算はHDMによる

# 小型原子炉モデルへの適用

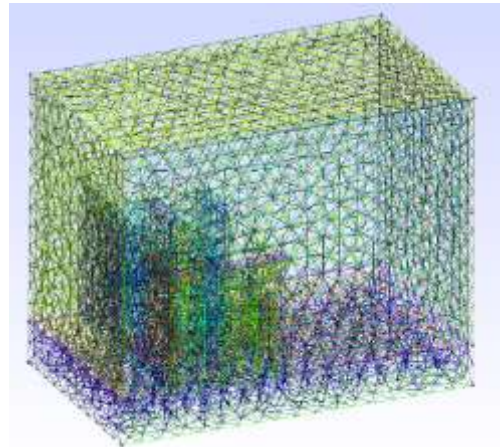
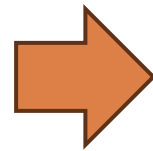


- 炉をROM領域
- 建屋をHDM領域

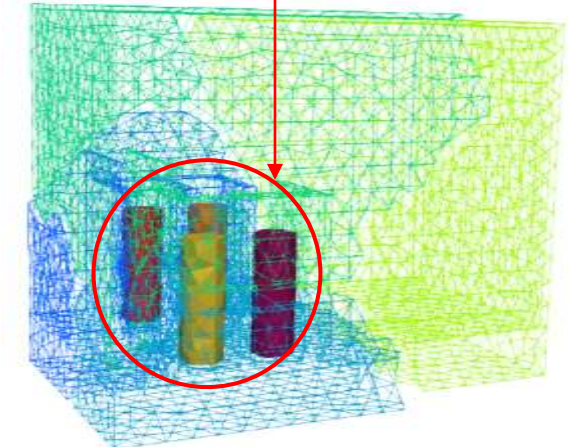
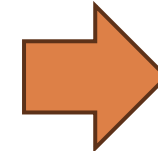
ROMに置き換える4領域は、それぞれ1つの部分領域になっている



モデル作成  
(Rhinoceros)

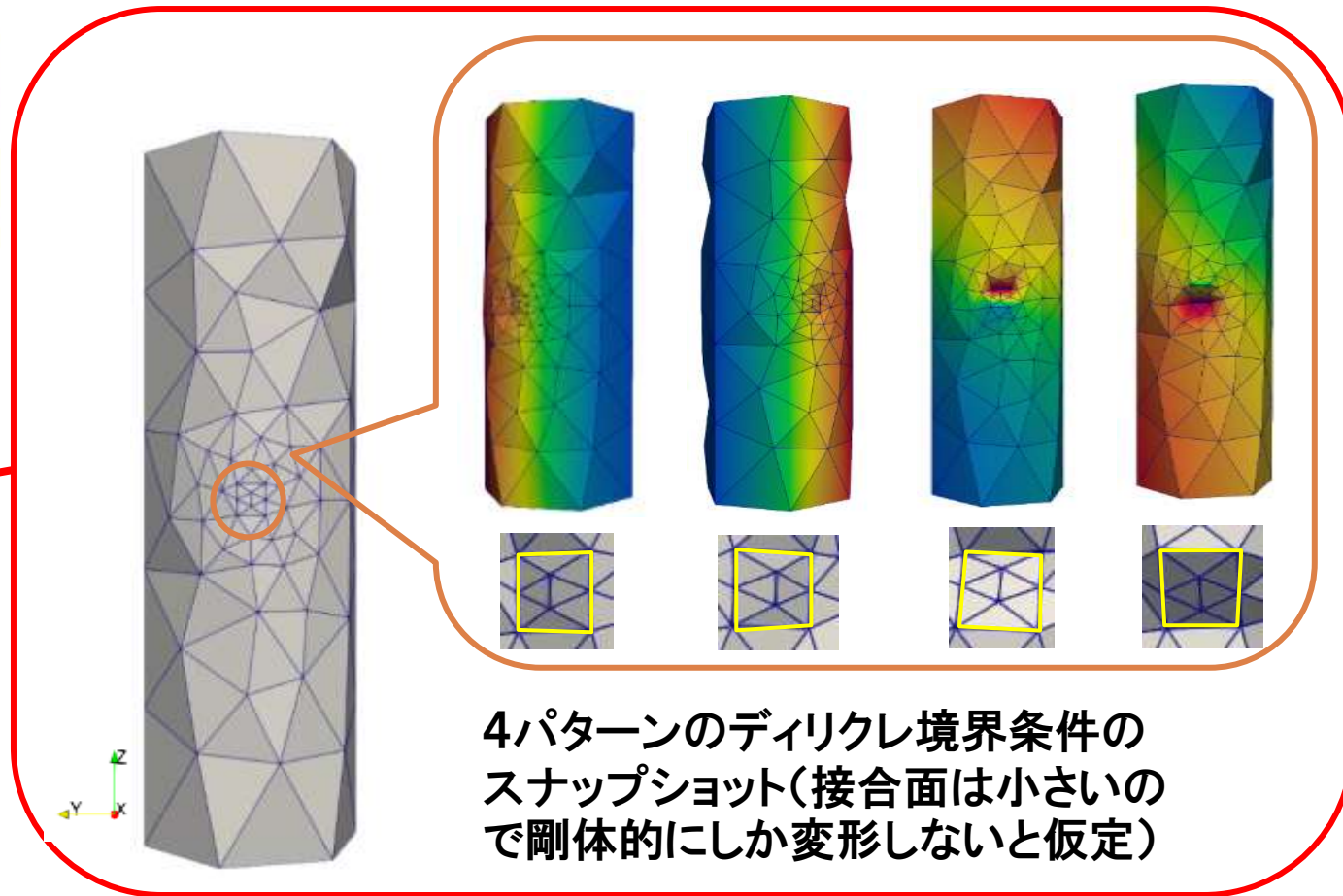
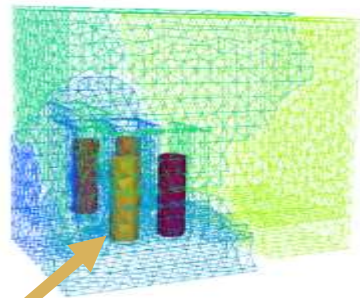
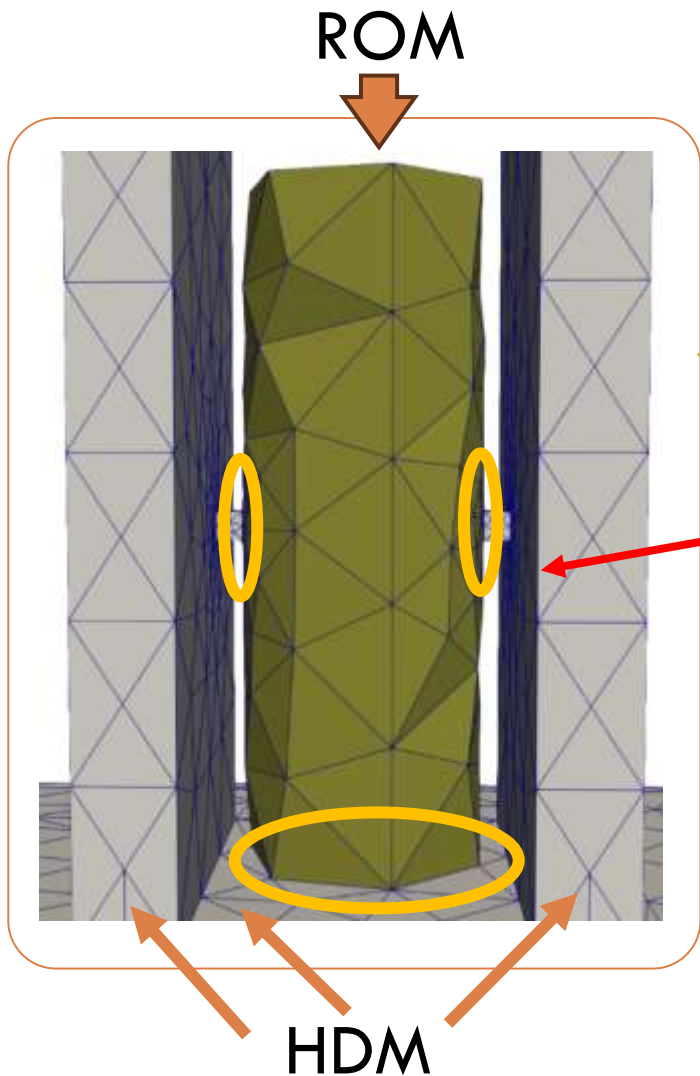


メッシュ作成  
(Gmsh)



領域分割

# スナップショット

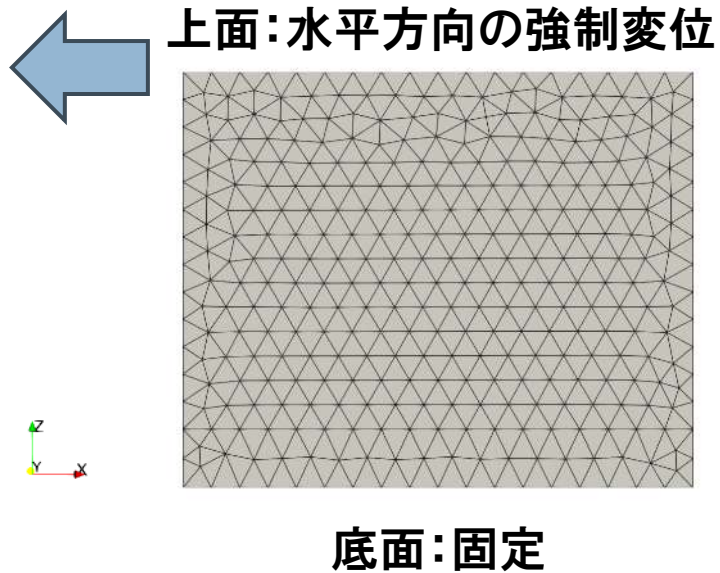


4パターンのディリクレ境界条件のスナップショット(接合面は小さいので剛体的にしか変形しないと仮定)

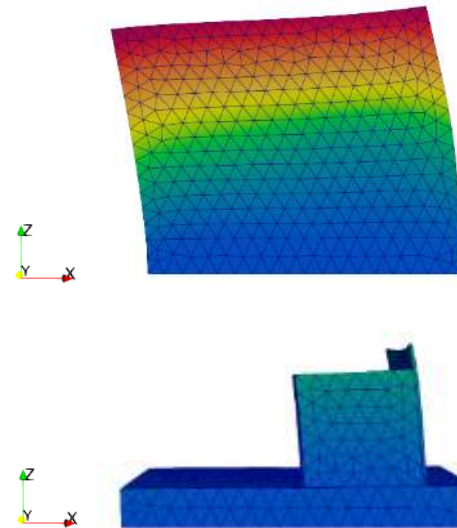
スナップショット数

$$4 \text{パターン} \times 3 \text{境界} \times 4 \text{領域} = 48 \text{個}$$

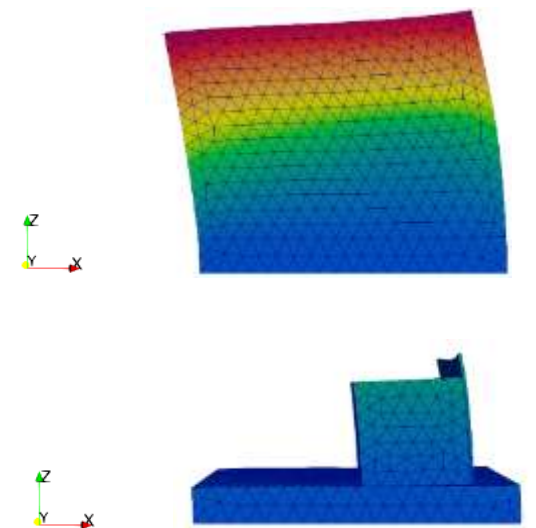
# 境界条件と結果



HDM



HDM+ROM



変形図(建屋全体と建屋内部)(コンタ: 変位ベクトルのノルム)

- HDMモデルの計算時間は**0.2秒**
- HDM+ROMモデルの計算時間は**1.5秒**
- モデルが小さいため、今のところはROMの導入によって高速化されていない

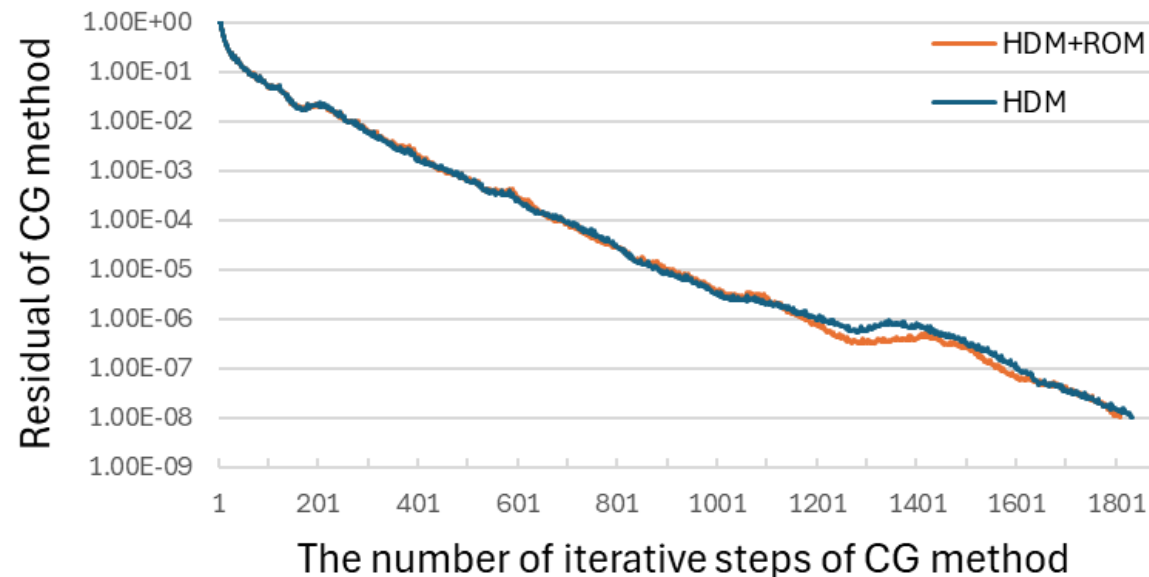
# 解の収束図とHDMとHDM+ROMの相対誤差

## HDMとHDM+ROMの各領域の変位の相対誤差の最大値ノルム

領域番号	最大値ノルム
0	1.19%
1	3.05%
2	0.62%
3	0.15%
4	7.27%
5	8.03%
6	8.08%
7	7.23%

ROM

### CG法の収束図



- HDM領域は、最大でも3.05%の相対誤差
- 一部をROMとして解析したとしても、HDMへの影響は少ない

# まとめ

- フルスケール有限要素解析に基づく原子力発電所の耐震性能や構造健全性の評価システムについて検討した
- 福島第一原子力発電所1号機の高精細フルスケール解析モデルを紹介した
- 「富岳」向け並列有限要素解析コード(ADVENTURE\_Solid3FS)とオフライン可視化コード(LexADV\_WOVisの改良版)を紹介した
- 解析結果
- 「富岳」による解析で苦労している点, 失敗事例
- 今後の研究に向けた小型原子炉簡易モデル, 一部コンポーネントへのROMの導入手法について紹介した

## 謝辞:

小池邦昭氏(ASTOM, 解析コード機能追加), 遊佐泰紀先生(電通大, ROM+HDM領域分割, オフライン可視化), 齊藤泰仁氏(日大院生, ROM+HDM法), 山下拓三氏(防災科研, コンクリート構成則の提供), 吉村忍先生(東大)に感謝の意を表す。

本研究の一部は, 本研究の一部は鹿島学術振興財団の一般研究助成(令和7年度), 科研費(24K14984)により行った。

本研究の一部は, スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け, 実施した(課題番号:hp230061, hp240138, hp250298)。