

# 建屋・炉容器・機器解析モデリング&シミュレーション 成果と今後の展望

吉村 忍・杉本振一郎・室谷浩平・南さつき・片岡俊二・遊佐泰紀

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

河合浩志

諏訪東京理科大学システム工学部機械システム工学科

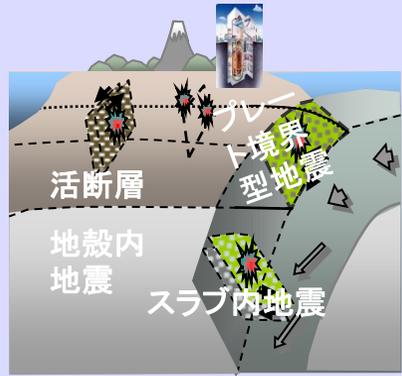
ADVENTUREプロジェクトメンバー

折田修一

東京電力(株)

# 地震耐力予測シミュレーションの全体像

## 地殻・地盤・建屋解析 MMA



地盤・建屋境界面変位

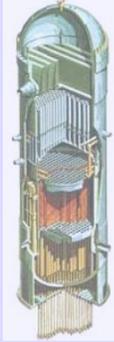
## 建屋・プラント・機器解析 ADVENTURE

### 建屋解析

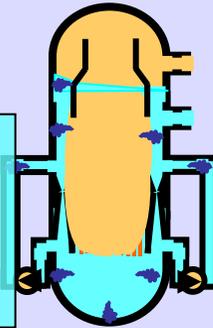


境界面変位・反力

### 機器解析



### 流体解析



境界面変位・圧力

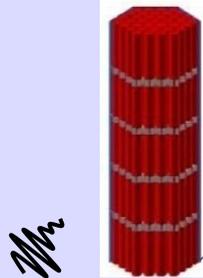
構造健全性

構造力学的挙動解析

構造・流体境界面加速度・変位

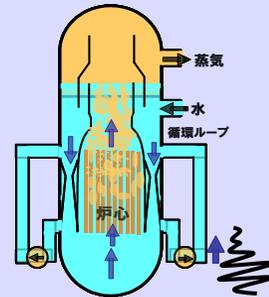
構造・流体境界面加速度

## 炉内熱流動解析 ACE-3D



炉心発熱・入口出口流動条件

## 炉内核熱連成振動解析 TRAC/SKETCH

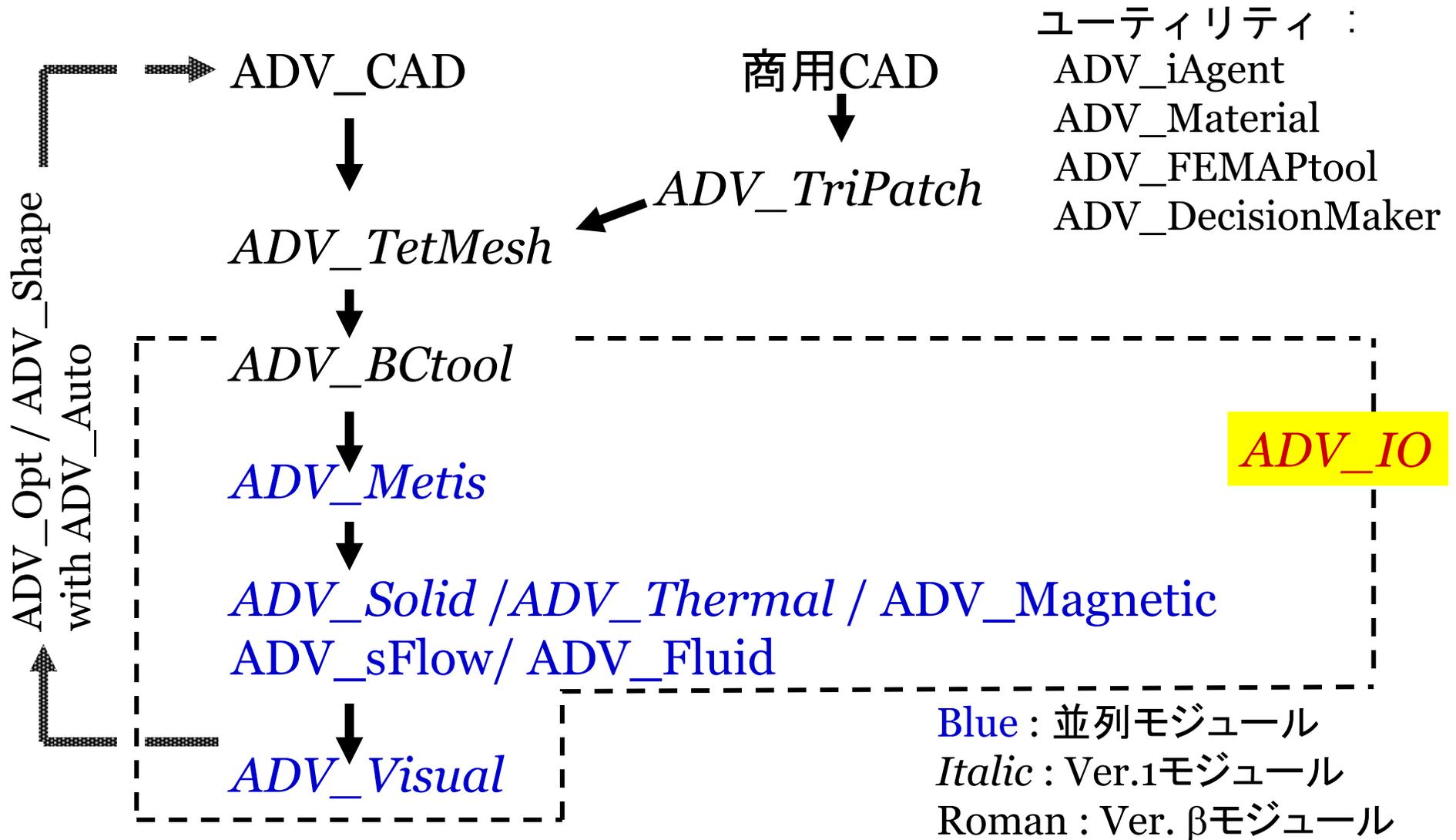


熱的健全性

核熱水力学的挙動解析

# ベースとしたADVENTURE1システムの特徴

- (1) 数百～数億自由度メッシュによる丸ごと解析
- (2) 1000プロセッサの超並列計算機環境でも90%を超える高い並列効率
- (3) 優れた移植性：単一プロセッサ, PCクラスター, MPP(ESなど)  
2005.3.10 Windows版公開(登録ユーザー数 3,285人)
- (4) ライセンスフリー / オープンソース：登録ユーザー数 **7,186**人  
ダウンロードされたモジュール数 **36,495**本  
商用バージョン **ADVENTUREcluster** (アライドエンジニアリング)  
⇒ IEEE/ACM SC2006 Gordon Bell Award finalist  
2008年日本機械学会賞(技術)  
2009年文部科学大臣表彰・科学技術賞
- (5) 拡張性と保守性：モジュール構造とIOの標準化、Commodity技術



# ■ 新開発のADVENTURE2の主要R&D項目

---

## (1) ADVENTURE\_Solid Ver.2開発

- ・材料非線形解析機能(金属材料、コンクリート・地盤)
- ・大規模アセンブリ構造対応(MPC・要素混在)
- ・マルチコア／京コンピュータ向け性能チューニング

## (2) ADVENTURE\_Metis Ver.2開発

- ・数100億自由度のメッシュの階層型領域分割データ作成

## (3) ADVENTURE\_Coupler Ver.1開発

- ・分離反復法による双方向連成解析ツール (流体構造連成、磁場構造連成)

## (4) ADVENTURE\_BCtool Ver.2開発

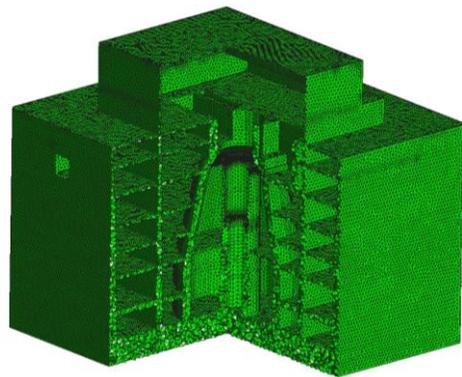
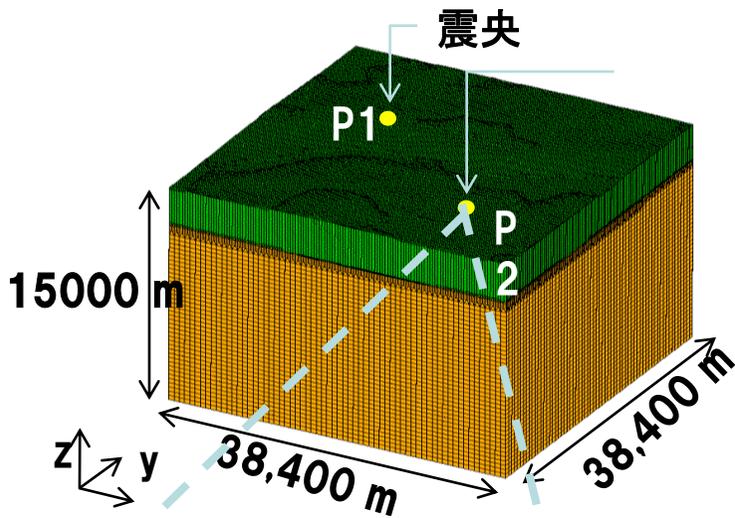
- ・解析モデル作成支援(MPC、連成解析等)

## (5) ADVENTURE\_POSTtool Ver.1開発

- ・大規模並列可視化(オンライン、オフライン、ウォークスルー)

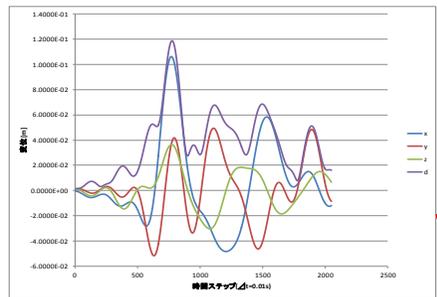
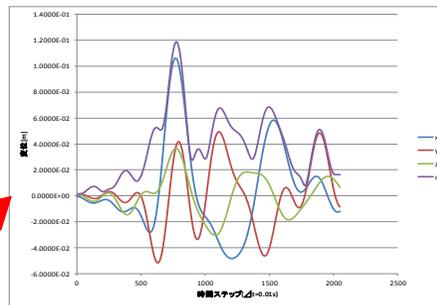
# MMA-ADVENTUREの一方方向結合解析の流れ

ステップ1: MMAによる断層⇒地盤⇒原子炉建屋の地震波動伝播解析

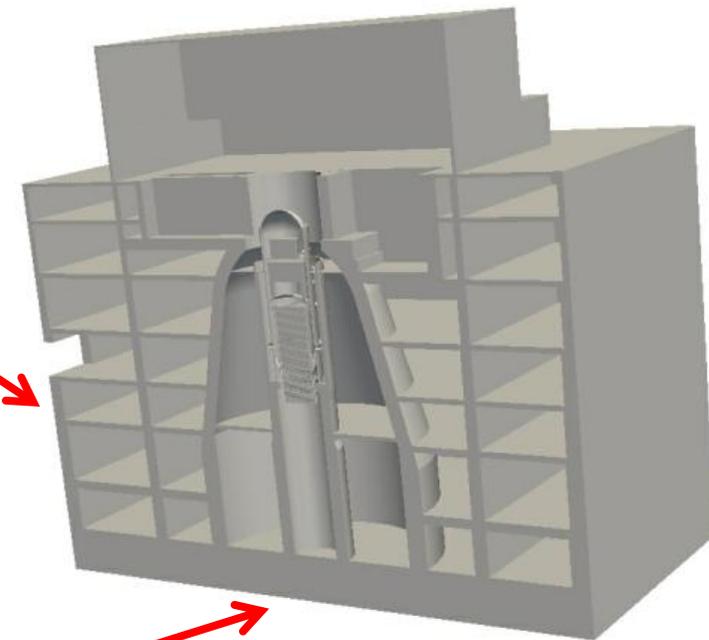


Wall thickness: 0.5 ~ 2.5 m  
Floor thickness: 0.5 ~ 1.0 m  
Base mat thickness: 6.5 m

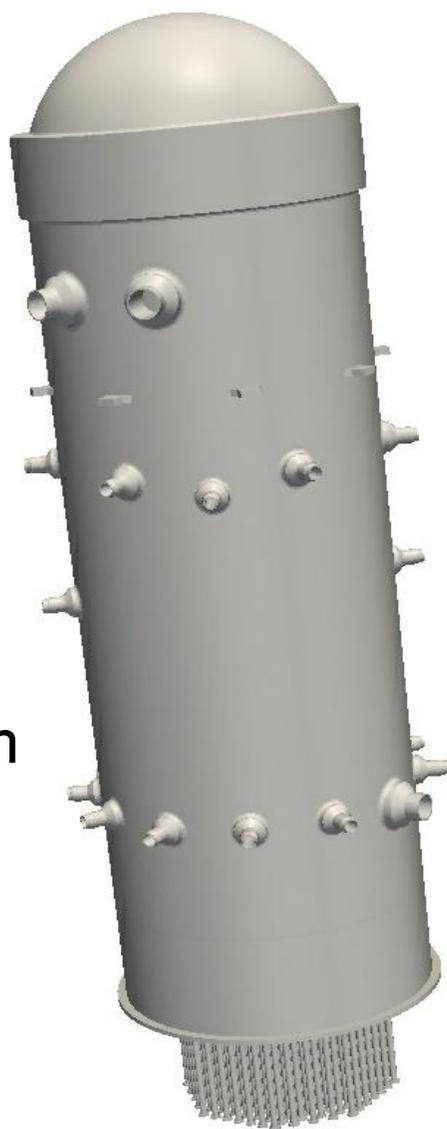
ステップ2:  
MMAの結果から  
建屋表面の変位  
の時刻歴を**節点  
毎**に抽出



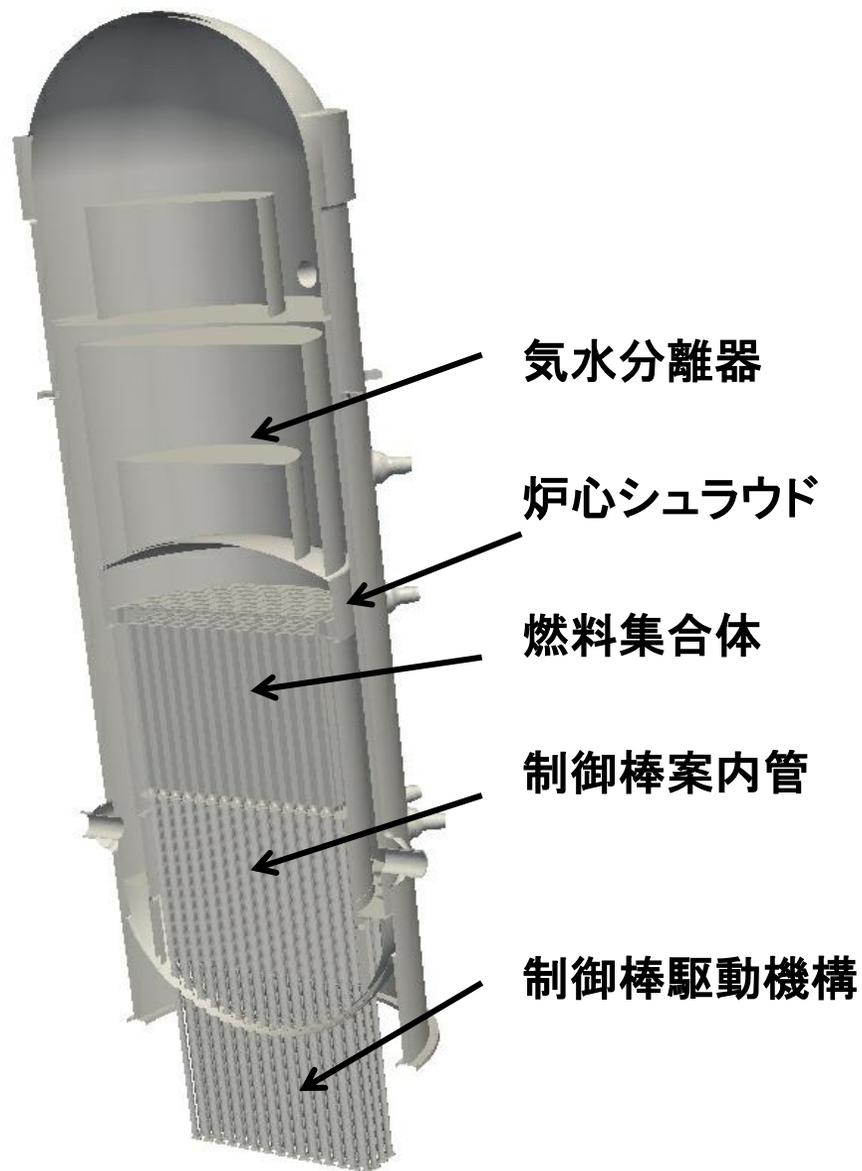
ステップ3:  
建屋表面の節点毎の変位  
の時刻歴を境界条件とし  
て、ADVENTUREによる  
建屋 - 炉容器 - 炉内機器  
の地震応答解析



# BWR炉容器及び炉内機器の形状モデル



高さ 20m  
直径 7m  
板厚150 mm



気水分離器

炉心シュラウド

燃料集合体

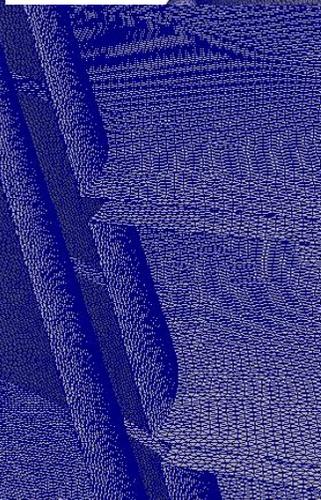
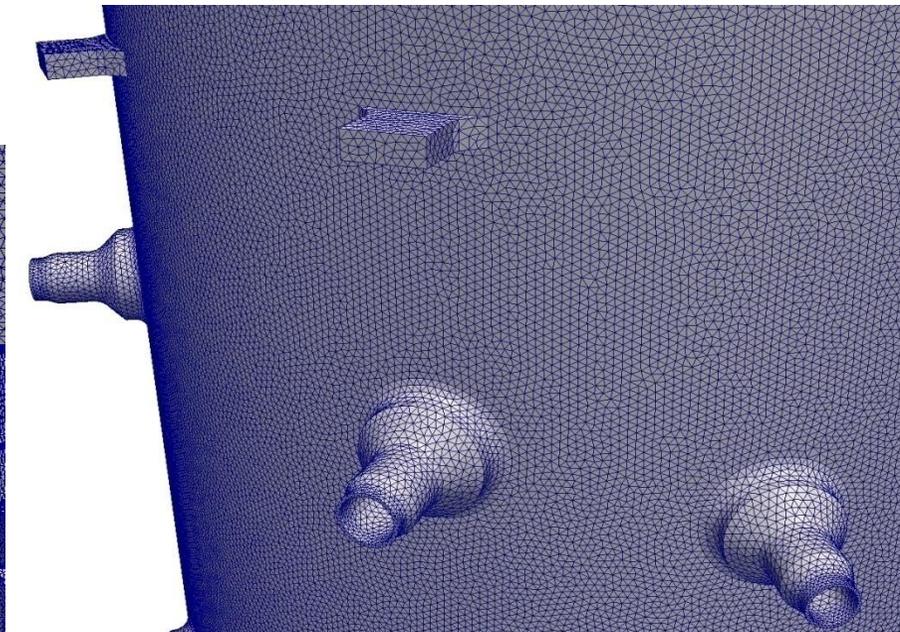
制御棒案内管

制御棒駆動機構

# 建屋-炉容器-炉内機器の2億自由度4面体メッシュ

プレプロセッサ : ADVENTURE\_TriPatch

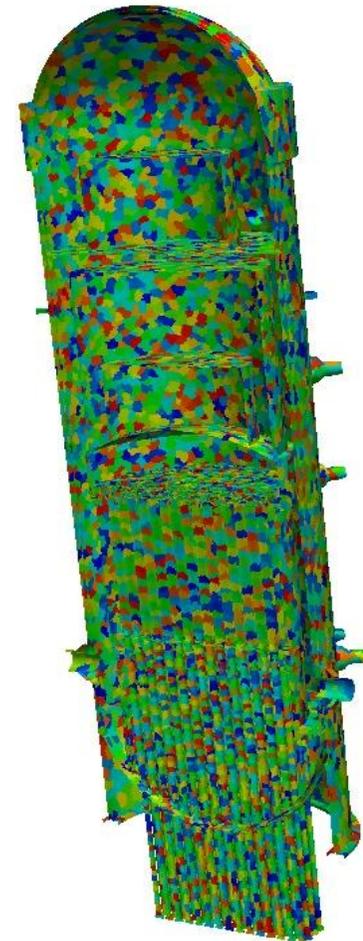
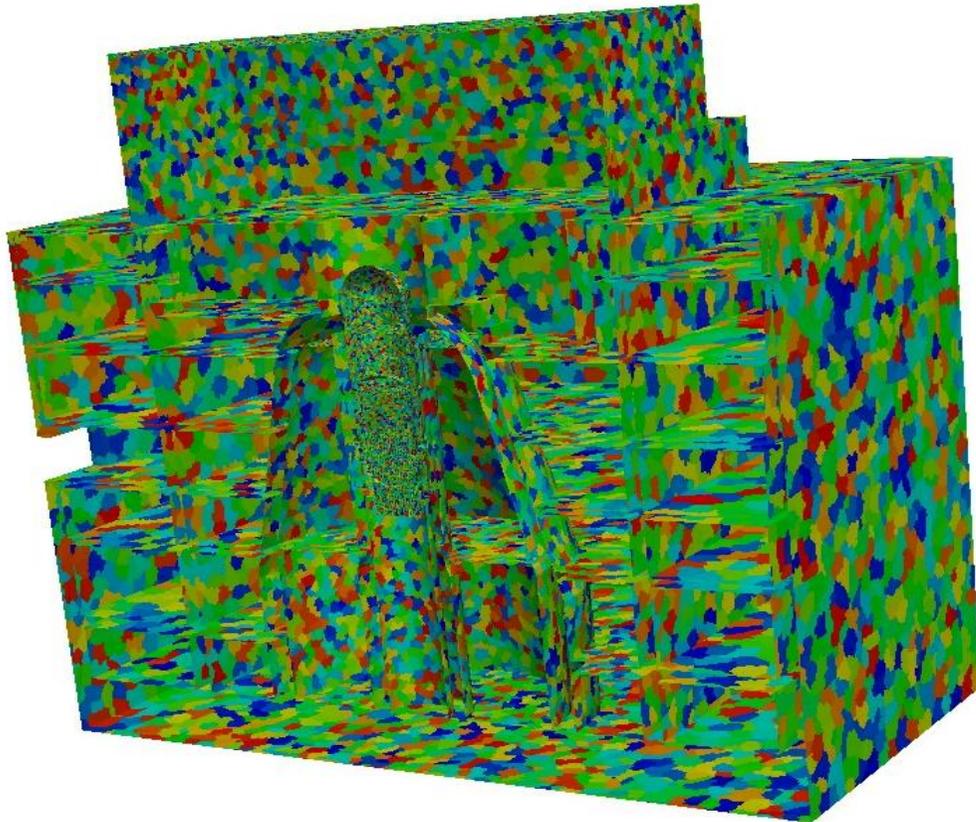
ADVENTURE\_TetMesh



# 2億自由度メッシュの領域分割例

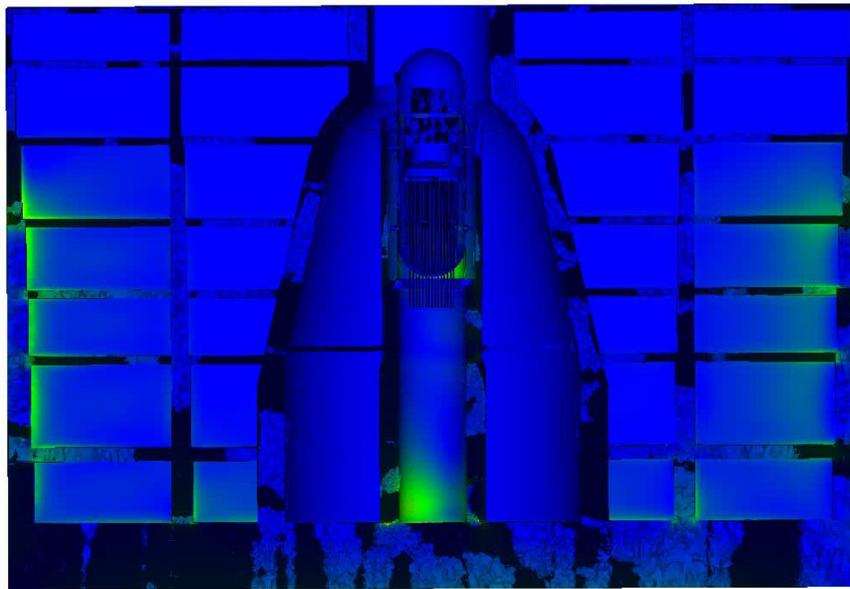
100 部分領域/パート × 1,024 パート = 102,400 部分領域  
(2000 DOFs/部分領域)

領域分割ツール: ADVENTURE\_Metis Ver.2.0

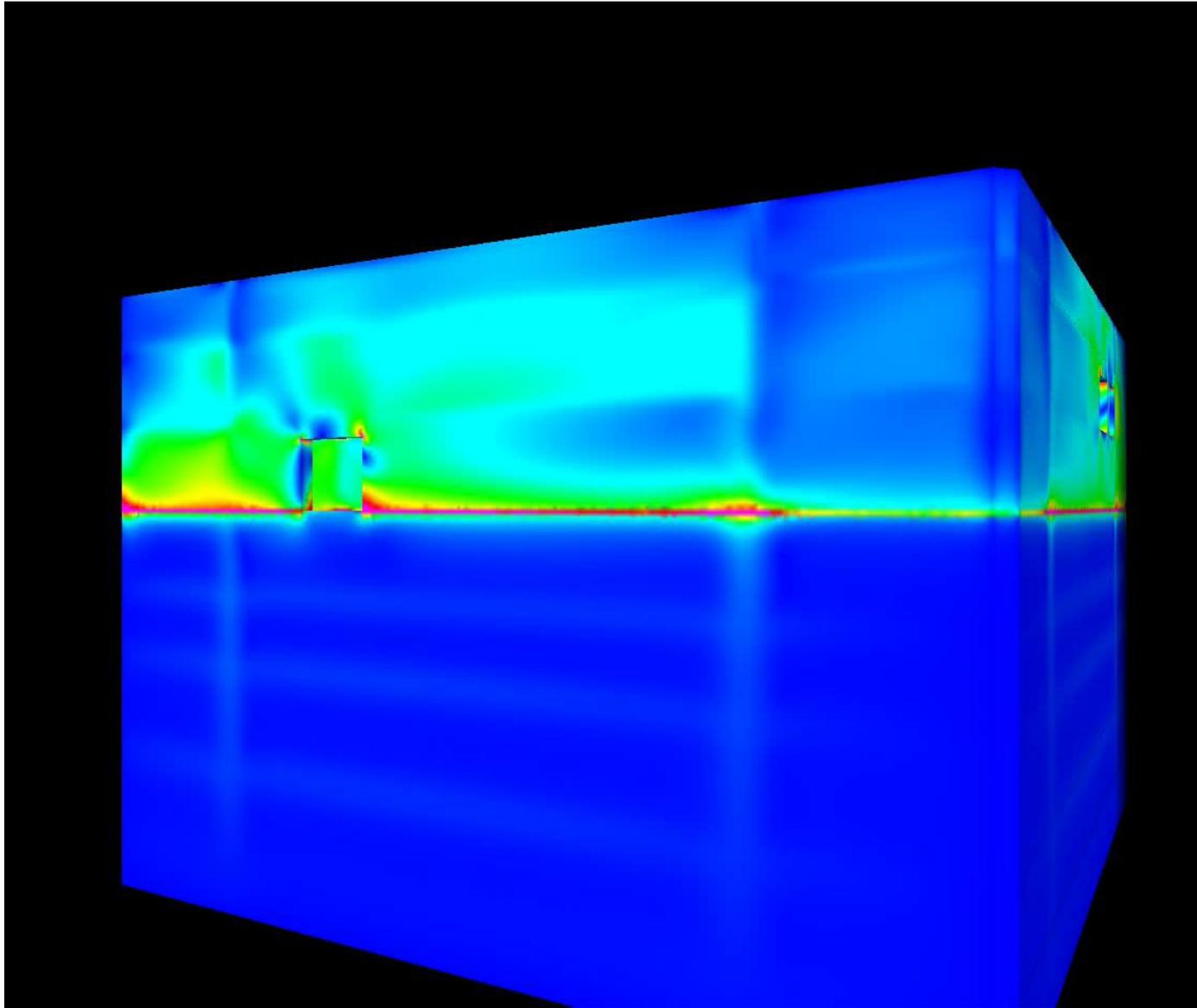


# 地震応答解析

直下型地震を受けるBWR原子炉建屋—炉容器—炉内機器結合  
2億自由度モデルの地震応答解析  
(色:相当応力表示、変形は10倍に拡大)

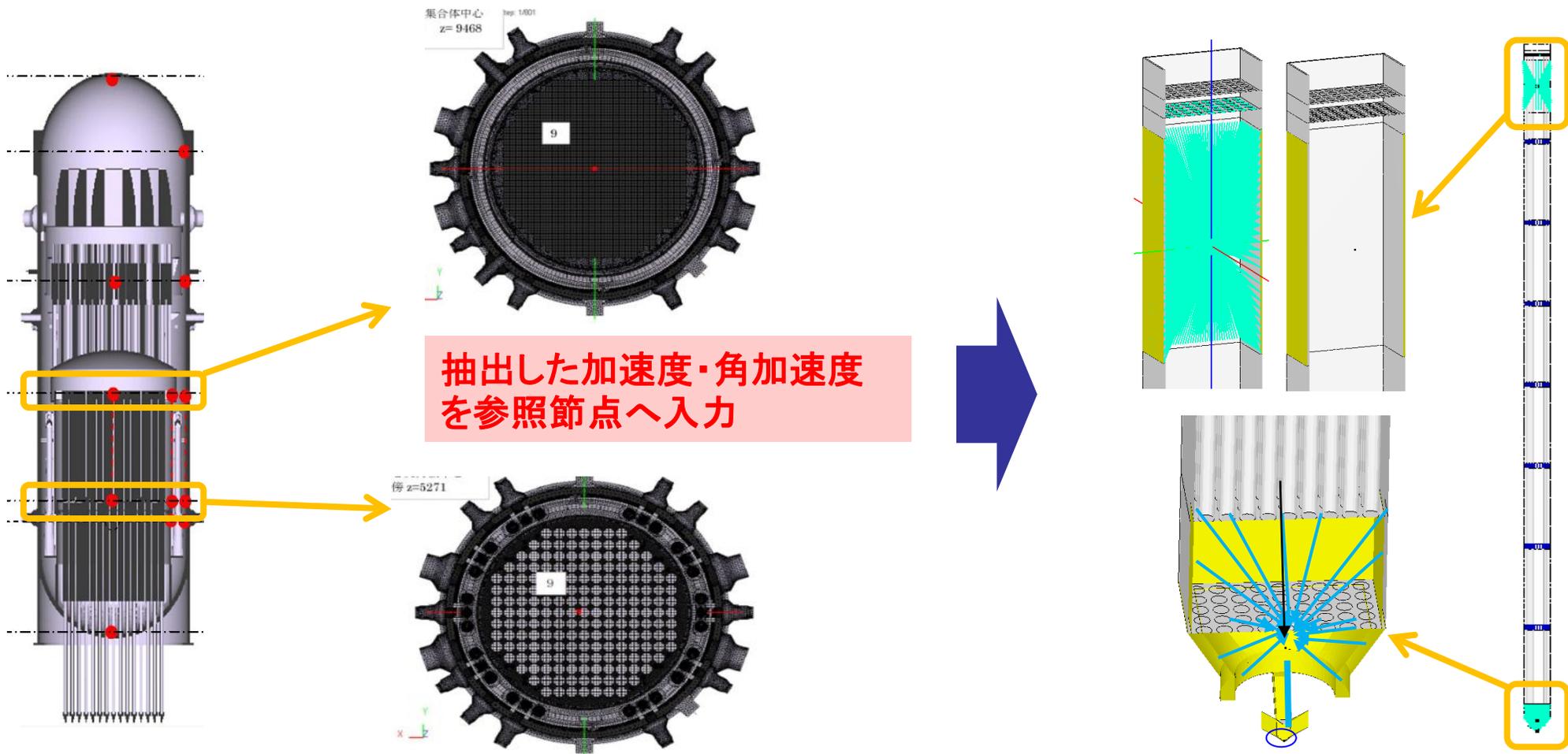


# ウォークスルー可視化



Walk-through of stress contour data at a certain time step

# 1つの燃料集合体の時刻歴応答解析

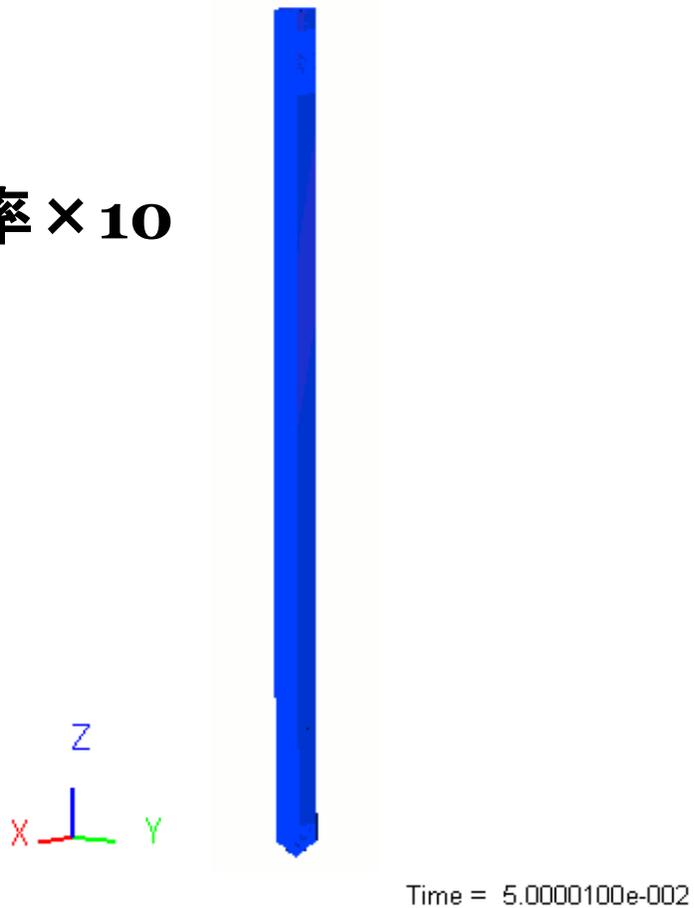


BWR炉容器モデル

燃料集合体モデル

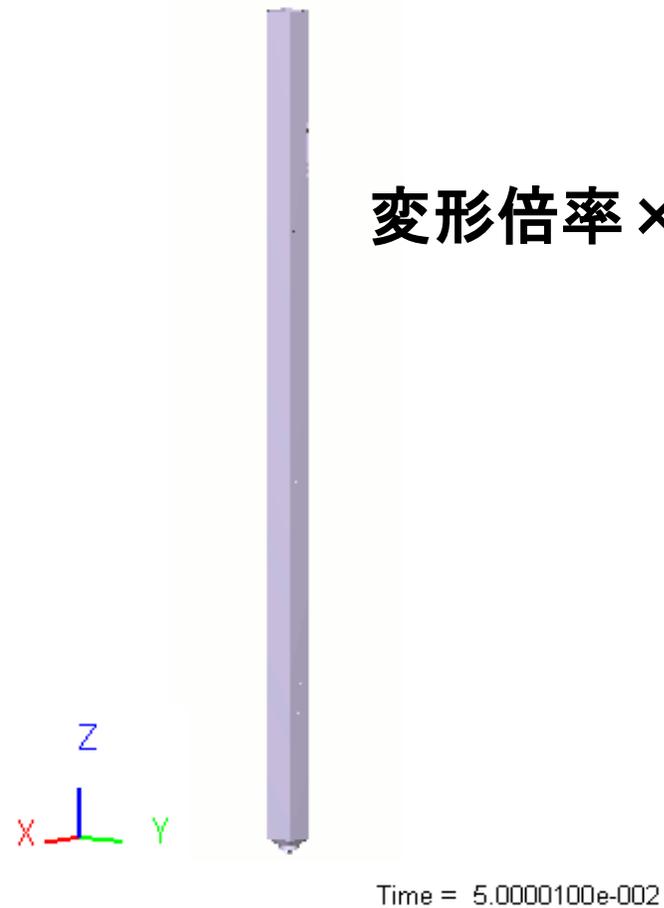
# 燃料集合体の変位の時刻歴応答

変形倍率 × 10



相対変位

変形倍率 × 1



絶対変位

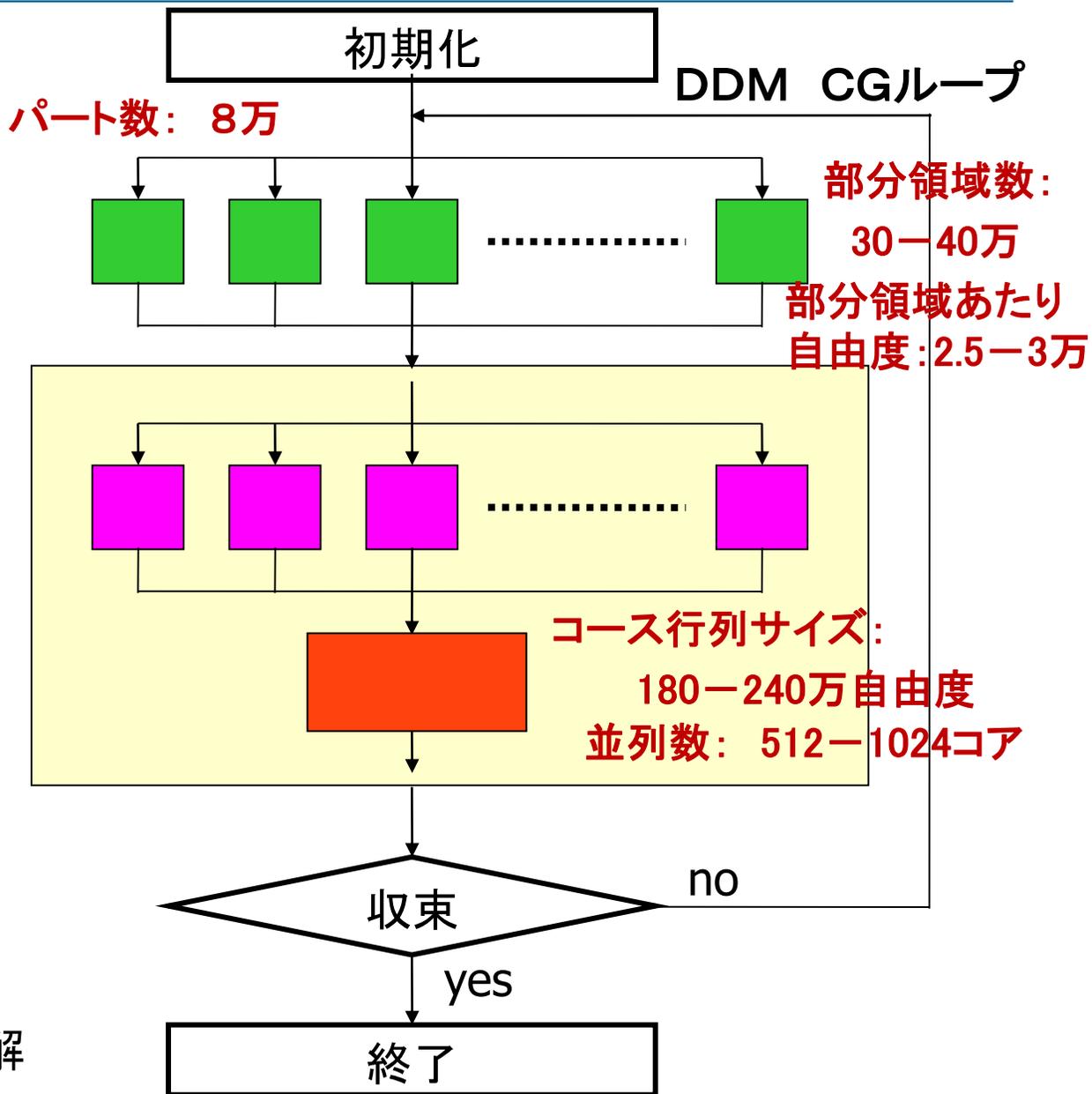
# BDD前処理付き反復型領域分割法の処理の流れ

京コンピュータ (8万ノード)、  
100億自由度の場合

**DDM本体**  
(部分領域単位で並列化)

**BDD前処理**  
部分領域毎に計算  
(部分領域単位で並列化)  
**コースグリッド修正**

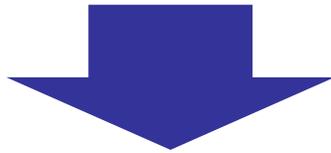
-   部分領域毎のFEM計算
-  部分領域数 × 6倍サイズの中規模連立一次方程式の求解



# 京コンピュータ向けADVENTURE\_Solidの高速化

部分領域解析用のローカル有限要素解析ソルバーの性能

- ローカルSchur補元(DS-LSC)型 **ピークの40%**
- 閾値付き不完全分解(IS-ICT-EBE)型 **ピークの25%**

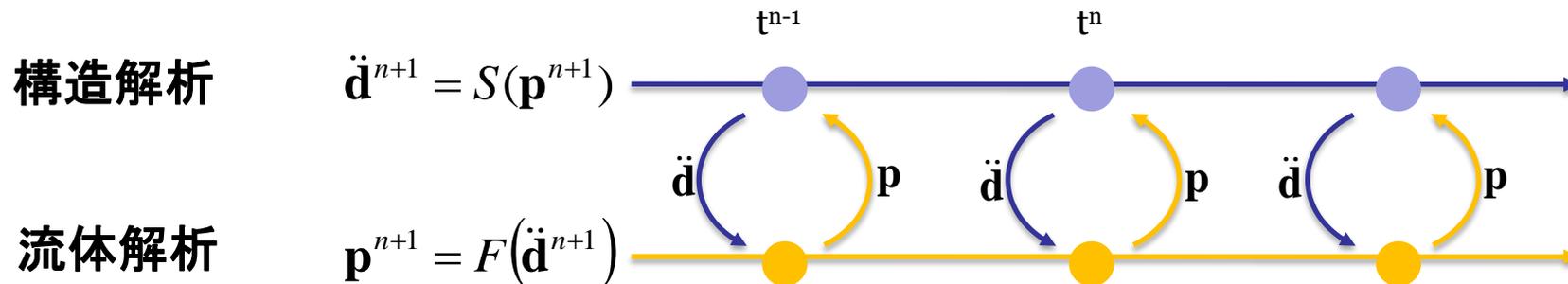


**4,096ノードまでのスケーリングテストをパス**

**2億自由度モデルの1回の求解を30秒、**

**9億自由度モデルの1回の求解を2分**

# ADVENTURE\_Couplerによる分離反復型連成解析



構造解析ソルバー

ADVENTURE\_Solid

$\ddot{\mathbf{d}}$

音響流体用ポアソン解析ソルバー

ADVENTURE\_Thermal

$\mathbf{p}$

反復

**ADVENTURE  
Coupler**

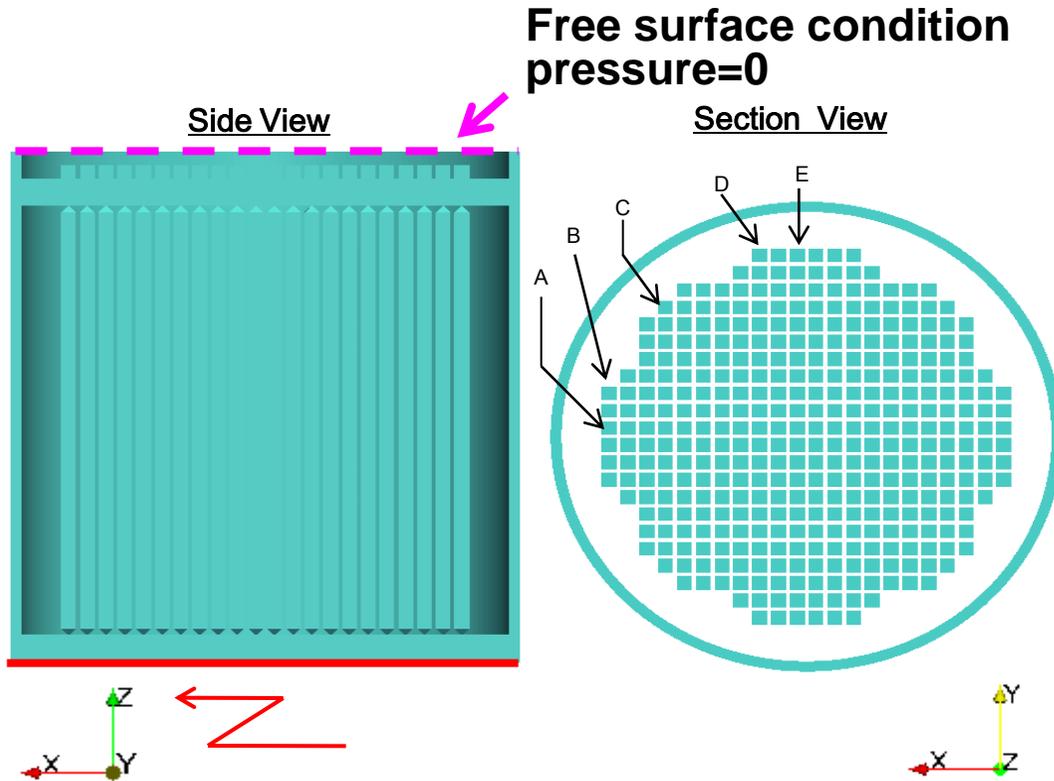
収束判定

更新量の計算  
(Broyden法など)

物理量マッピング

物理量マッピング

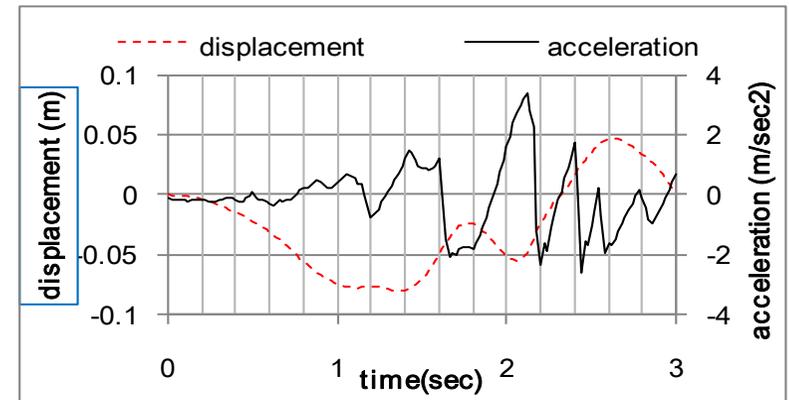
# BWR燃料集合体の流体構造連成振動解析



構造領域: 600万DOFs

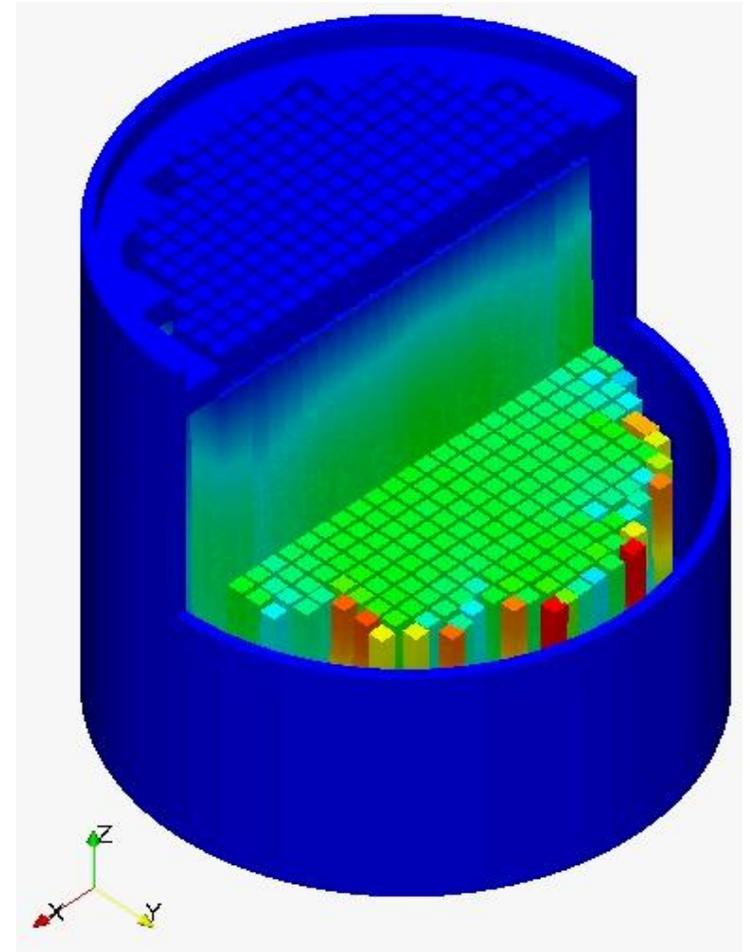
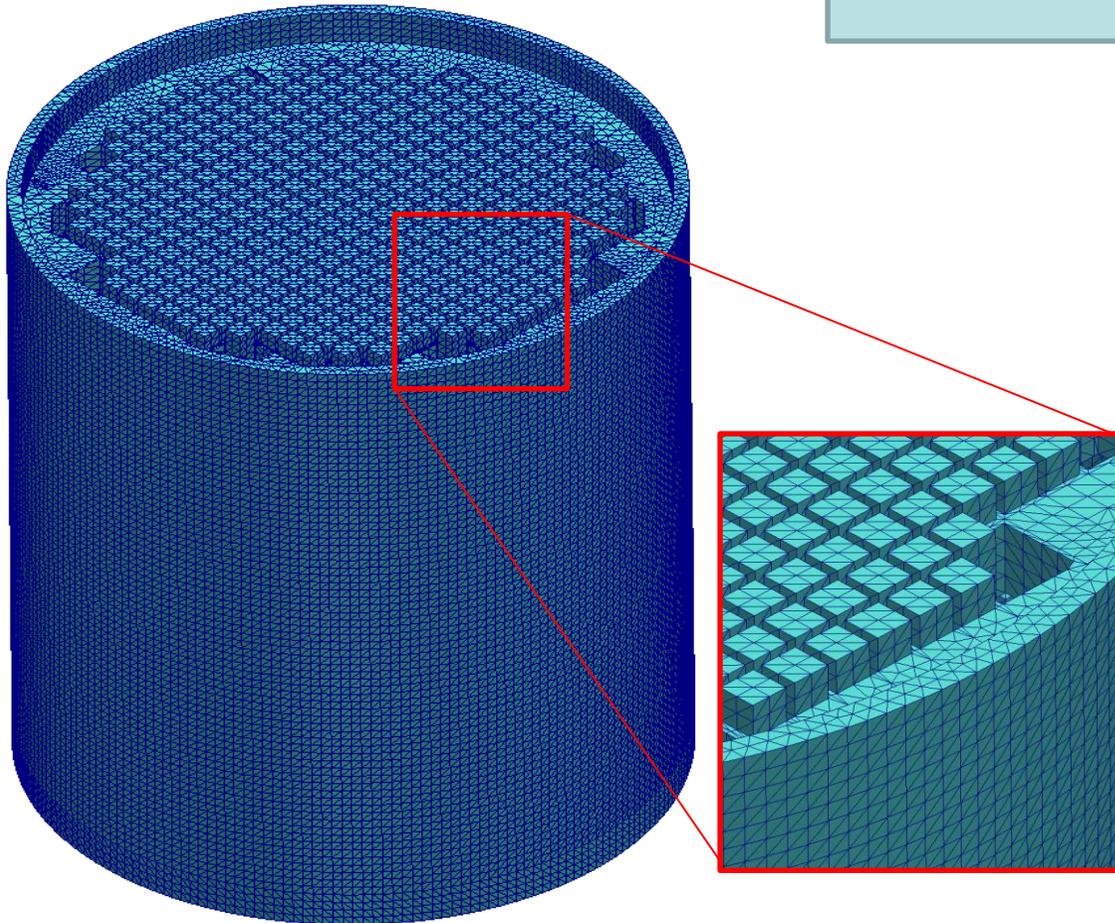
流体領域: 300万DOFs

X方向にEl Centro地震加速度を入力

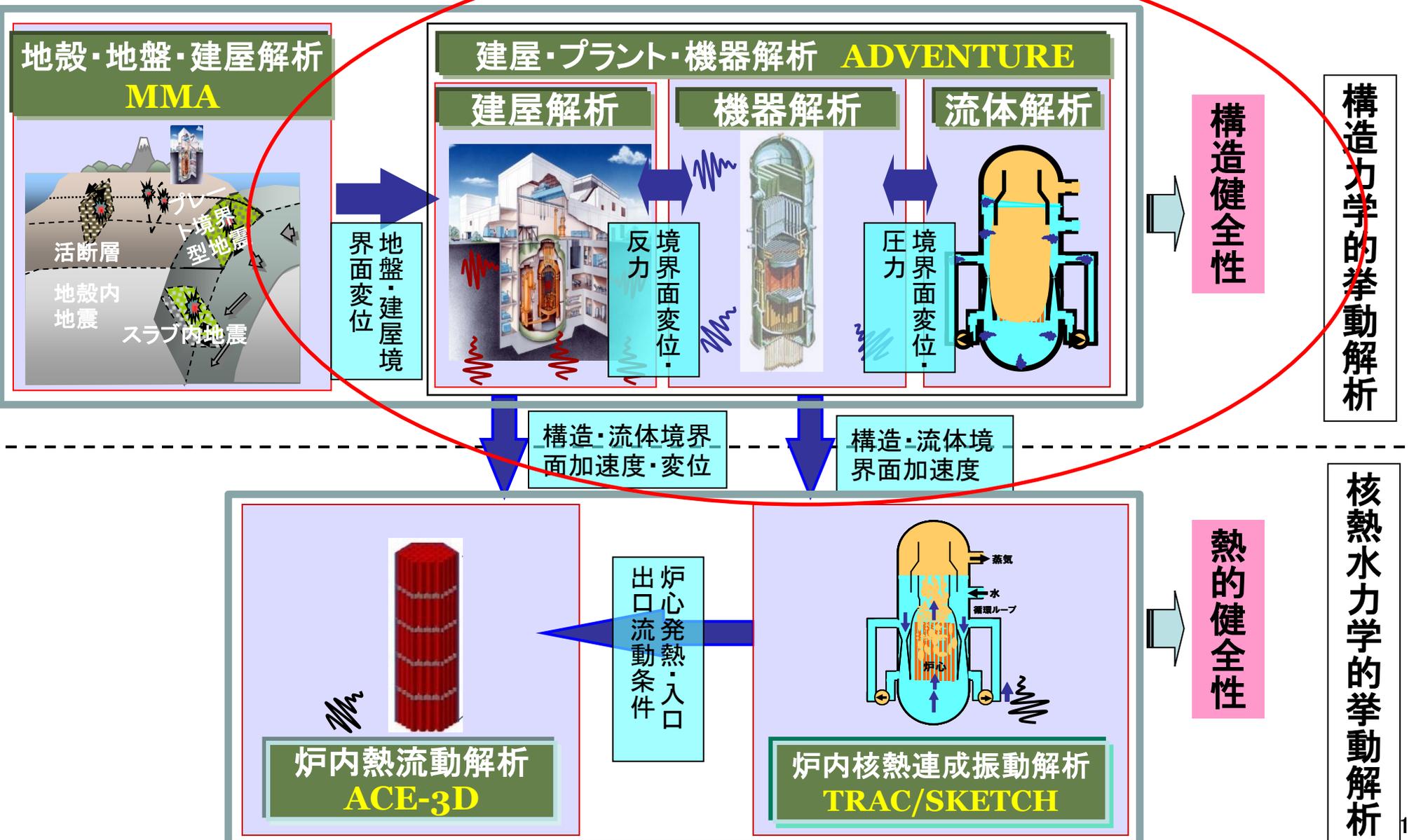


El Centro seismic wave-NS

# BWR燃料集合体の並列流体構造連成解析



# 成果のまとめ ⇒ ADVENTURE2の完成・公開・活用



# 今後の展望

---

## ①京コンピュータ上でADVENTURE2を用いて

現実の原子力発電プラントの

想定される地震発生シナリオのもとでの

地震応答解析(動的・非線形＋流体構造連成解析)の実現

## ②新解析機能の研究開発とADVENTURE2への実装

1) 直接破壊力学解析

2) 津波と構造物の双方向連成解析



現実の原子力発電プラントの耐震・耐津波性能評価精度の大幅向上