

# JST CREST プロジェクト「原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション」 の全体計画

吉村 忍

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp

## 1. 背景

現在想定されている東南海・南海地震等の巨大地震は、長周期成分を多く含む継続時間が長い地震波となることが最近次第に明らかになってきた。このような特徴を有する地震は、さまざまな共振周波数を持つ構造系に長時間振動を与えるため、従来の想定とは異なる破損が生じることが懸念される。特に、我が国において運用している原子力設備・機器の相当数は建設からかなりの年月を経ており、今後も安定的にエネルギーを供給していくためには、機器部材等の経年劣化を踏まえた上での巨大地震に対する耐震性能の確認および未来状態の予測が急務とされている。そのような中、2006年9月には耐震設計審査指針も改訂され、これまで以上に安全性の担保が要求される状況になってきた。原子力設備が健全であるためには、建屋が崩壊せず、配管系を含めた機器類が強振動時においても支持され、放射性物質に対する気密性が保持されていなければならない。このような挙動を考慮した詳細解析の必要性がますます高まっている。

## 2. 研究のねらい等

原子力発電プラントのように社会的にも大きなインパクトを有する人工物が巨大地震にさらされる際の性能限界の確認は、可能であれば実大試験で実証されるべきであろう。しかし規模やコスト面における制限によりその実施は事実上不可能である。しかも、実プラント機器を構成する部材の30年超の経年変化を考慮した震動実験も不可能である。これまで、原子力発電プラントの耐震性能評価については、縮小モデルや経験則、確率論的手法が取り入れられ、構造材料の経年変化については実験結果を外挿等することにより補完した上で論じられてきているにすぎない。そこで、近年発展が著しい計算科学を活用して、実験代替としてのシミュレーションシステム構築と、さまざまな動的現象を考慮できるシミュレーションモデルの開発が期待されている。

本研究においては、巨大地震力を受ける、地震発生直後の過渡状態における原子力プラントの機能限界を「耐力」と定義し、それをマルチスケール・マルチフィジクス統合シミュレーションにより定量的に見極めることを可能とするシミュレータを提案し、実装することを目的とする。まず機器への地震入力波を正確に評価するため、異なる振動特性を有する地殻 - 表層地盤 - 建屋 - 機器間を伝播する地震波動の挙動を明らかにする。同時に、原子炉内部の構造・材料 - 流体 - 熱 - 炉特性の相互作用についても、動的変形を伴う機器内の気液二相流挙動などの微視的な炉内変化、および炉特性の変化をマルチスケール・マルチフィジクスの解析評価する。

## 3. 研究の内容

本研究で対象とする現象を扱うにあたっては、地震の発生・地殻内伝播から表層地盤 - 建屋 - 機器そして炉内熱流動や中性子輸送までという、空間スケールで数百キロから数ミリまでの $10^5$ 超のマルチスケール性とマルチフィジクス性を考慮する必要がある。時間方向には（周波数領域）0.1Hz から 1000Hz 超、継続時間に関しては、十数秒から数時間のマルチスケール性とマルチフィジクス性を想定する。また、材料非線形性により弾性波速度が 1000[m/s]から数桁落ちた値になるというダイナミックなスケール変化もある。本研究では、各スケールの現象の相互作用を精密かつ効率的に扱うために、空間方向のマルチフィジクス解析において実績を積んできた、分離反復型強連成解析アルゴリズムを拡張し対処する。また、従来の土木・建築構造物の耐震評価では、構造力学・材料力学を中心とした力学評価が主であった。これに対して、本研究では、複雑大規模構造物であると同時に核反応装置でもある原子炉の耐震性能を扱う点に特徴がある。

科学技術振興機構

戦略的創造研究推進事業(CRESTタイプ)

マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション

平成19年度採択課題

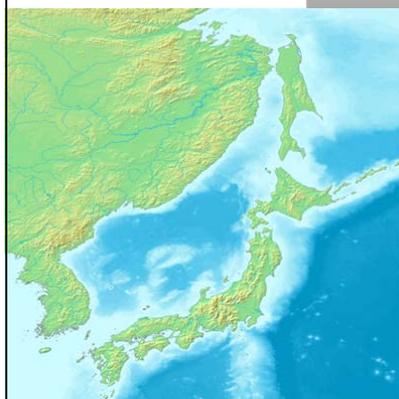
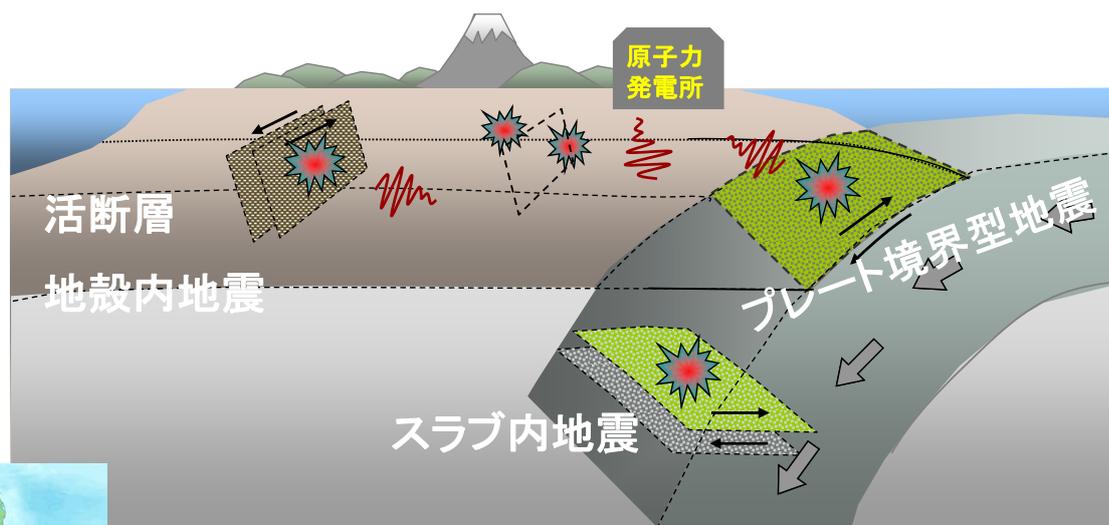
## 原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション ～ 全体計画 ～

吉村 忍

東京大学大学院工学系研究科

システム創成学専攻

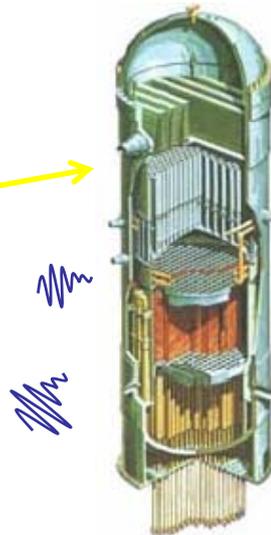
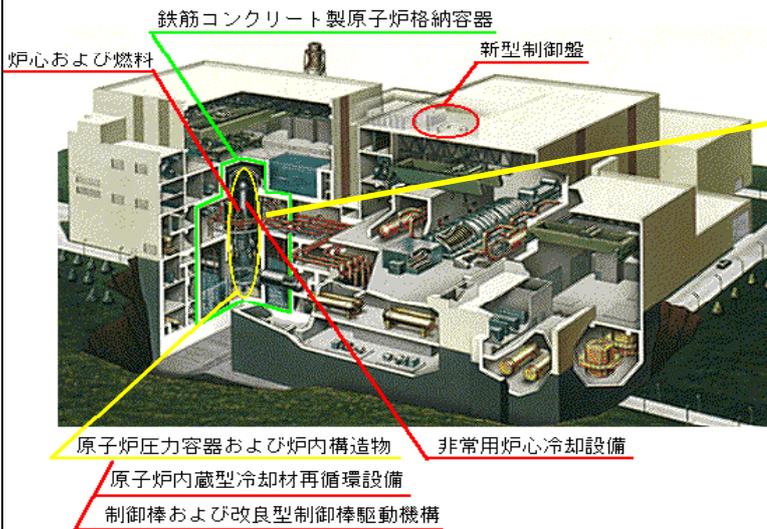
### 原子力発電プラントと耐震安全性(1)



53基の原子力発電所が稼働し、日本の必要な電力の約25%を供給している。

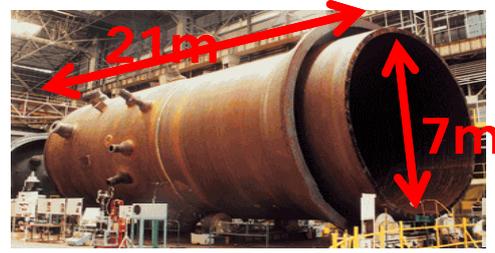
一方、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震(マグニチュード6.8)で震源から16km地点の東京電力柏崎刈羽原子力発電所(震度6強)が被災。6、7号機が最近稼働、1～5号機は停止中。

# 原子力発電プラントと耐震安全性(2)



## 原子炉容器と炉内構造物 (心臓部)

内部では核反応が連続的に起こり、かつ高温高圧の冷却材が高速に循環



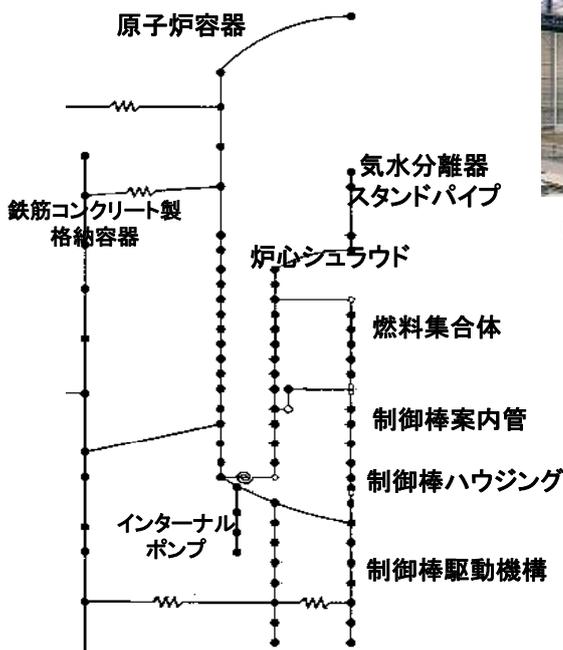
製造中の原子炉容器 板厚: 100-150mm

## 原子力発電プラント

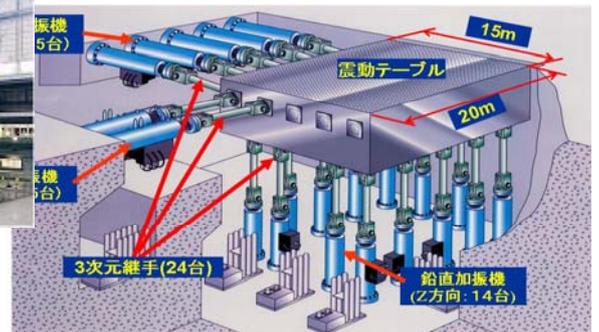
53基中、24基が稼働開始後30年を経過、うち5基は40年を経過

➡ 高経年化問題(疲労・腐食・中性子脆化等)

# 原子力発電プラントと耐震安全性(3)



6階建鉄筋コンクリートビルの震動破壊



現在の最高レベルの実験的評価手段:

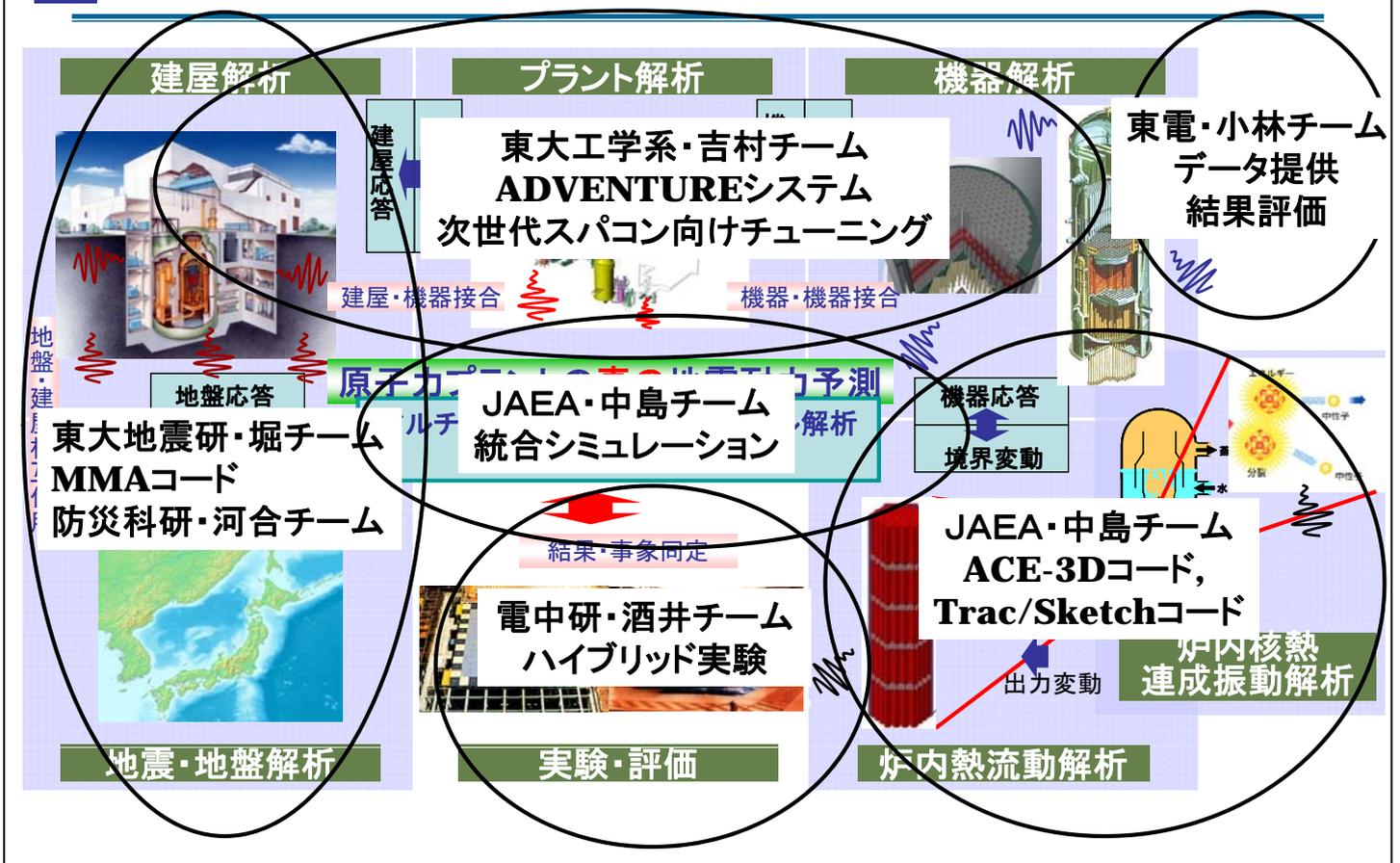
実大3次元震動破壊実験施設 (E-Defense)

課題: 上限1200トン、高コスト、繰り返し実験は困難

現在の耐震設計評価手段:  
近似モデル(多質点系モデル[串団子モデル]と部分FEMモデルの組み合わせ) + 大きな安全裕度

地震発生直後の過渡状態(稼働中)における原子力発電プラントの機能限界を定量的に見極める地震耐力予測シミュレーションが必要!!

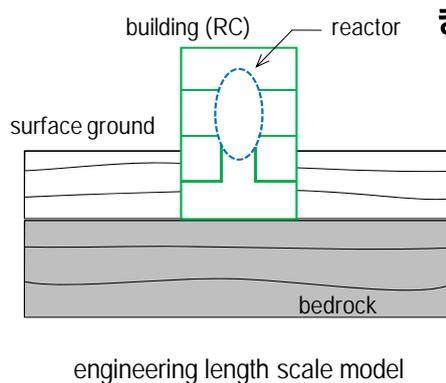
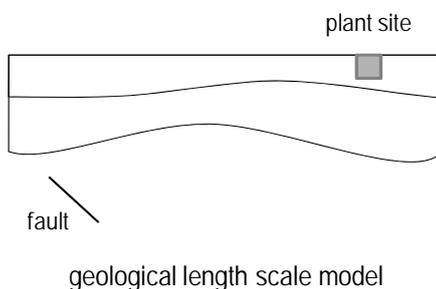
# 地震耐力予測シミュレーションの全体像と研究チーム



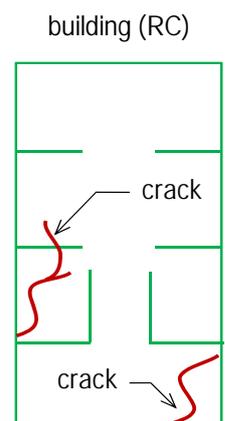
# 地殻・地盤・建屋モデリング & シミュレーション

- 地震動伝播解析: MMA (Macro-Micro Analysis)
  - 想定される断層から原子力発電プラントのサイトまで
  - マルチスケール解析 (地殻の波動伝播と表層地盤の増幅過程)
- 地盤—原子炉建屋連成解析
  - 地盤と建屋を同時に扱う連成解析
  - き裂進展解析 (鉄筋コンクリート建屋内のき裂発生・進展)

## マルチスケール解析



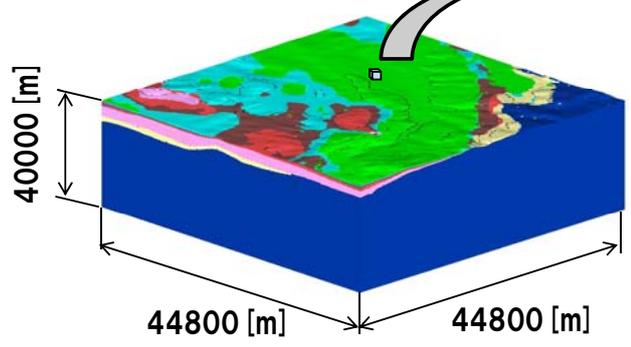
## き裂進展解析



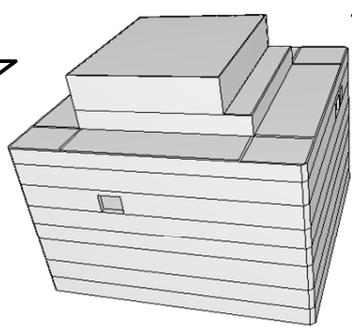
# MMA

## MMAによる中越地方における断層-原子炉建屋解析

中越地方の地殻-建屋モデル

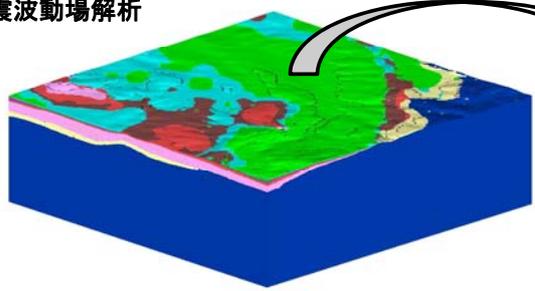


原子炉建屋



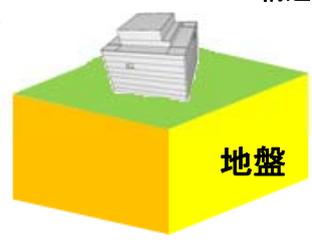
マクロ解析

地殻内地震波動場解析

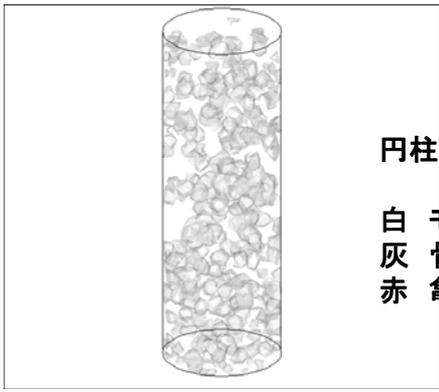
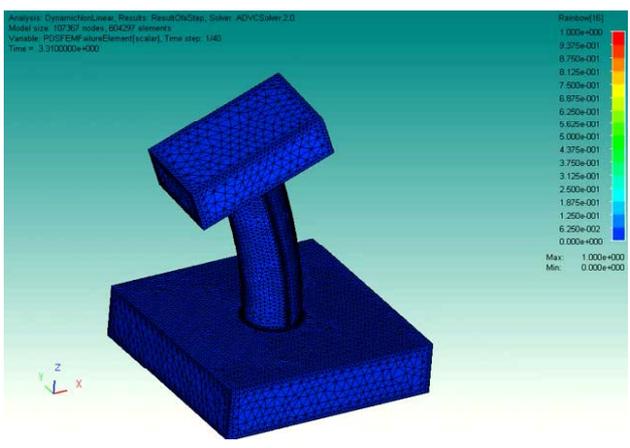
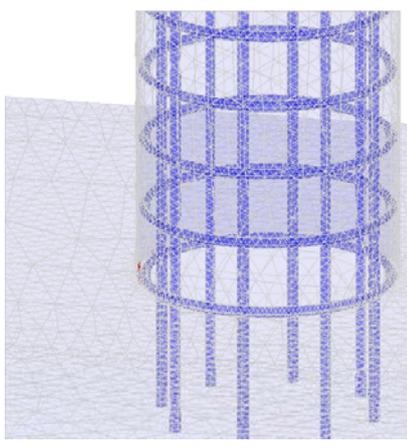


ミクロ解析

構造物と地盤の一体解析

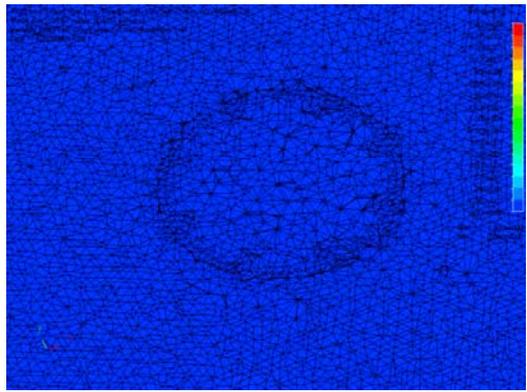


# 鉄筋コンクリートのき裂進展解析の解析

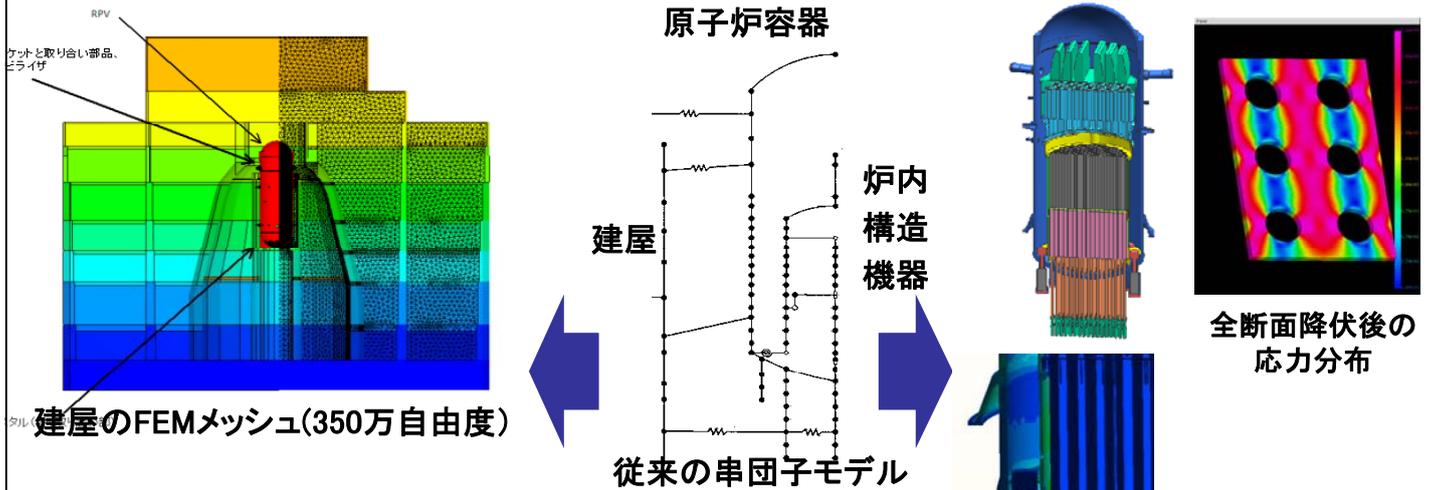


円柱供試体の一様引張破壊

- 白 モルタル
- 灰 骨材
- 赤 亀裂



# 建屋、炉内構造機器付き原子炉容器のフルスケールモデル



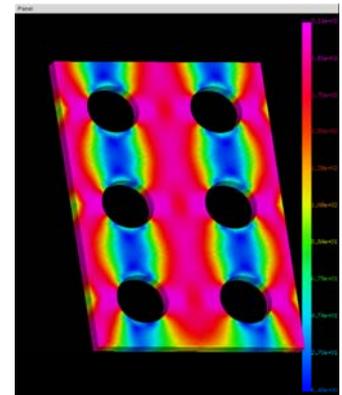
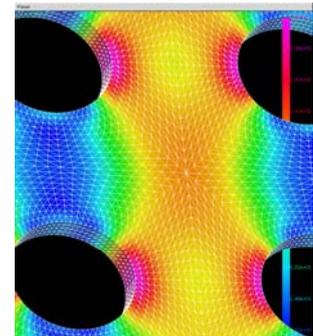
## ADVENTUREシステムの機能拡張

- (1) 構造機器(金属)の材料非線形(繰返し弾塑性等)モデリング、経年化材料特性モデリング
- (2) 建屋(鉄筋コンクリート)の材料非線形モデリング
- (3) 大規模複雑アセンブリ構造の多点拘束(MPC)を活用した丸ごとモデリング
- (4) 震動時の(a)冷却材の減衰効果と(b)冷却材を介した機器同士の強連成効果の精緻な考慮
- (5) 次世代スパコン向けチューニング

数億自由度モデル → 数100億自由度モデルの超大規模解析 → 次世代スパコン対応へ

# ADVENTURE\_Solidへの弾塑性解析機能の実装

- 構成則(von Mises材料)
  - 等方硬化、移動硬化、複合硬化
- 応力積分
  - 前進Euler積分+サブインクリメント
  - 後退Euler積分(von Mises材料のみ)
- 非線形スキーム
  - 増分のみ(静的陽解法)
  - 増分+Newton-Raphson
  - N-R
  - N-R、コンシステント接線剛性 (von Mises材料のみ)
- 増分ステップ制御
  - 弾性・塑性間の遷移
  - 最大塑性ひずみによる制御
  - 除荷発生時の制御

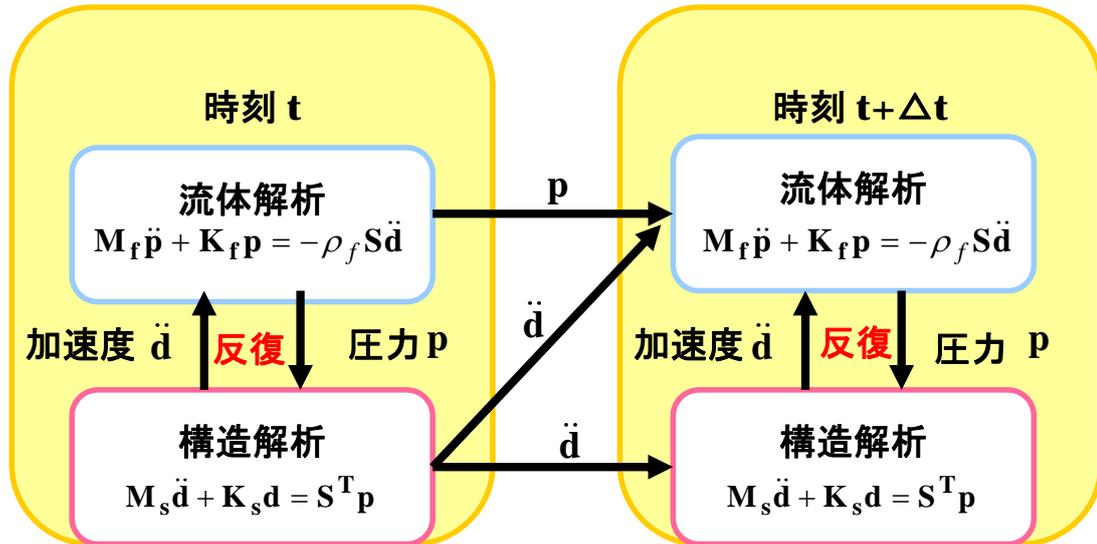


全断面降伏後の応力分布

## マルチフィジックスカップリングにおける分離反復型解法

各時刻ステップで流体と構造の支配方程式を独立に反復的に解き、連成界面の平衡条件、幾何学的適合条件を満足させる解法(一種の強連成解法)

アルゴリズムの一例



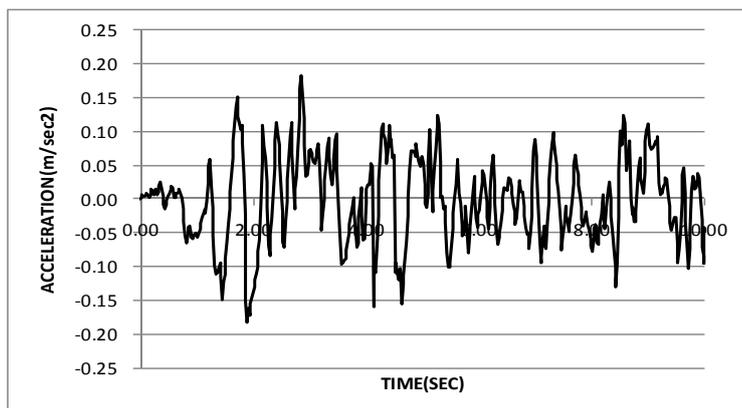
※本研究では、様々な非線形解法を検討しているが、一例として、最も基本的なBlock Gauss-Seidel法を適用

## 液中の角柱群・地震応答解析

ADVENTURE\_Solid, ADVENTURE\_Thermal, ADVENTURE\_Coupler (分離反復解法を実装) による流体構造連成解析例

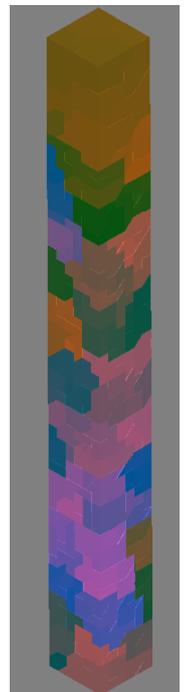
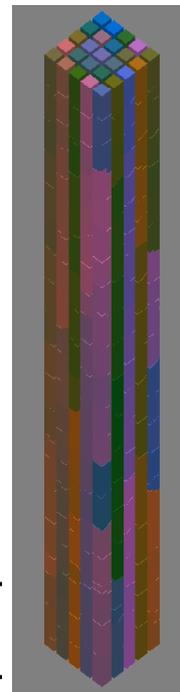
荷重条件: 底部地震加速度

地震加速度



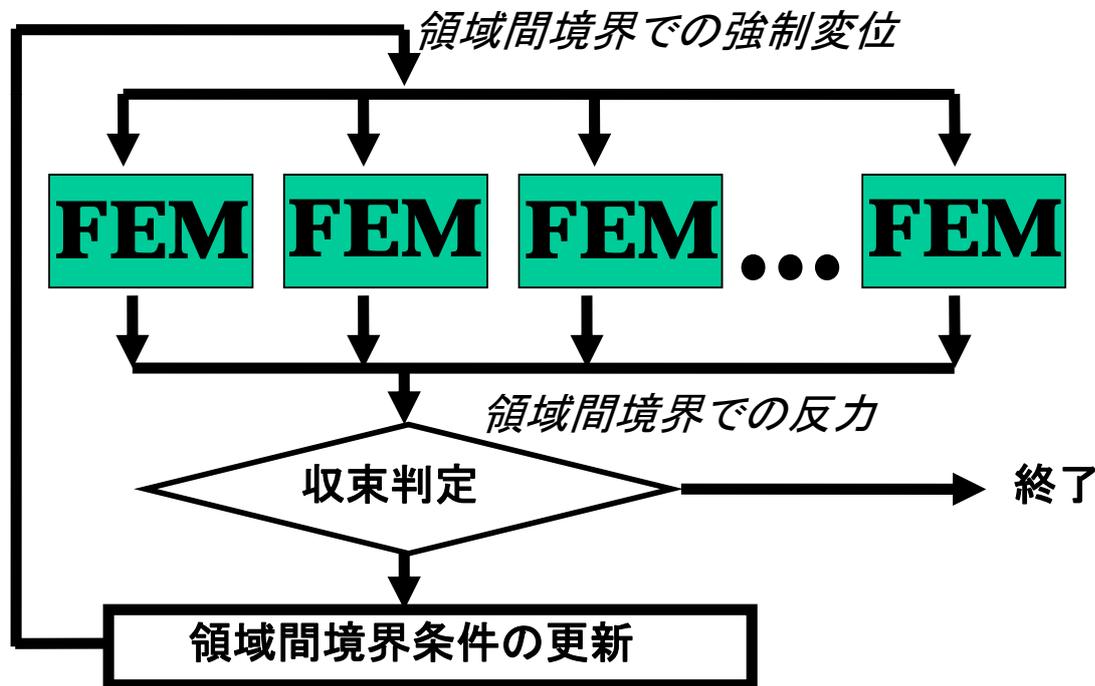
構造モデル

流体領域



# ADVENTURE\_Solidの次世代スパコン向けチューニング (BDD前処理付き階層型領域分割法)

## 反復型領域分割法の解析の流れ



## 部分領域FEM計算の分類

### ■ 直接法ベース

- 保存型: **DS** (*Direct solver-based matrix Storage*)  
係数行列とLDL分解結果をメモリ上に保存  
毎DDM反復ごとに前進後退計算だけで解を求める
- 省メモリ型: **DSF** (*Direct solver-based matrix Storage-Free*)  
DDM反復毎にLDL分解も行う

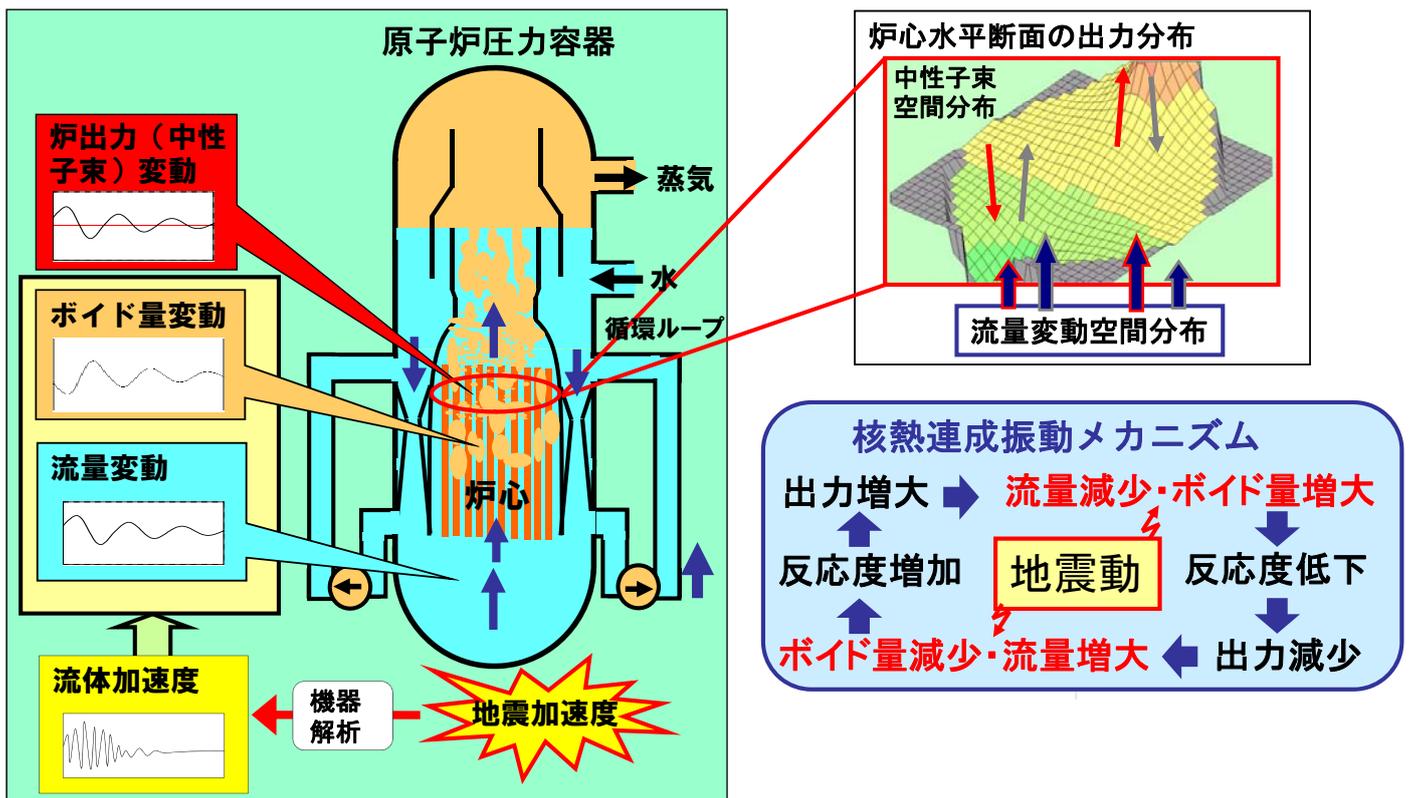
### ■ 反復法ベース

- 保存型: **IS** (*Iterative solver-based matrix Storage*)  
係数行列(または/かつ)前処理行列をメモリ上に保存  
DDM反復毎にCG法で反復解を求める
- 省メモリ型: **ISF** (*Iterative solver-based matrix Storage-Free*)  
DDM反復毎に係数行列+前処理行列の作成を行う

# 超大規模解析実現のためのロードマップ

|         | 2008         | 2010         | 2012                          |
|---------|--------------|--------------|-------------------------------|
| 1千万自由度  | PC一台 数十分 →   | PCクラスタ 数分 →  | 数十秒<br>数秒                     |
| 1億自由度   | PC一台 1時間以内 → | PCクラスタ 数十分 → | 数分<br>数十秒<br>数秒               |
| 10億自由度  |              | PCクラスタ 数時間 → | 1時間<br>数十分                    |
| 100億自由度 |              |              | 大規模PCクラスタ 一時間以内<br>次世代スパコン 数分 |

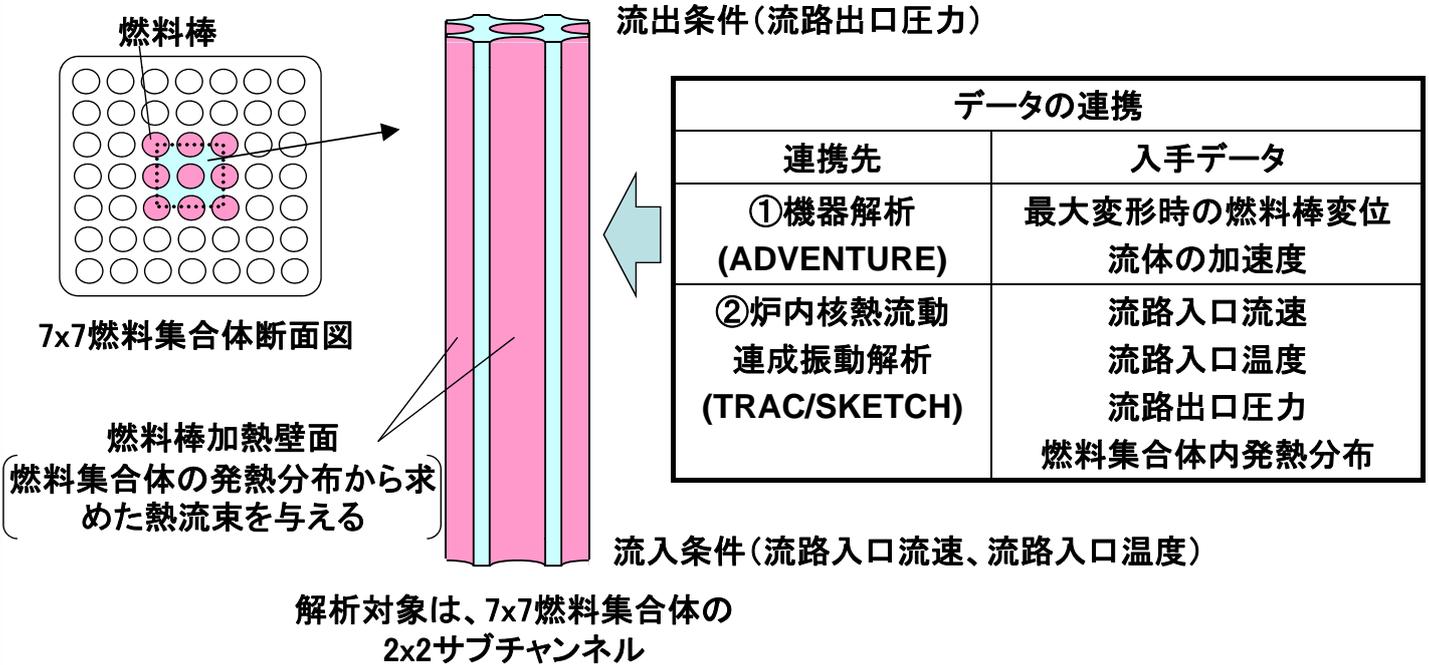
## TRAC/SKETCHの改良: 炉心安定性への加速度の影響



## 炉内熱流動解析 (ACE-3D)

地震加速度負荷時の燃料集合体内沸騰流解析を可能とする。  
また、地震時に発生する燃料棒変形を考慮する。

解析対象およびデータの連携



## ターゲット解析の想定シナリオ

BWR(沸騰水型原子炉)が、

巨大地震発生直後に

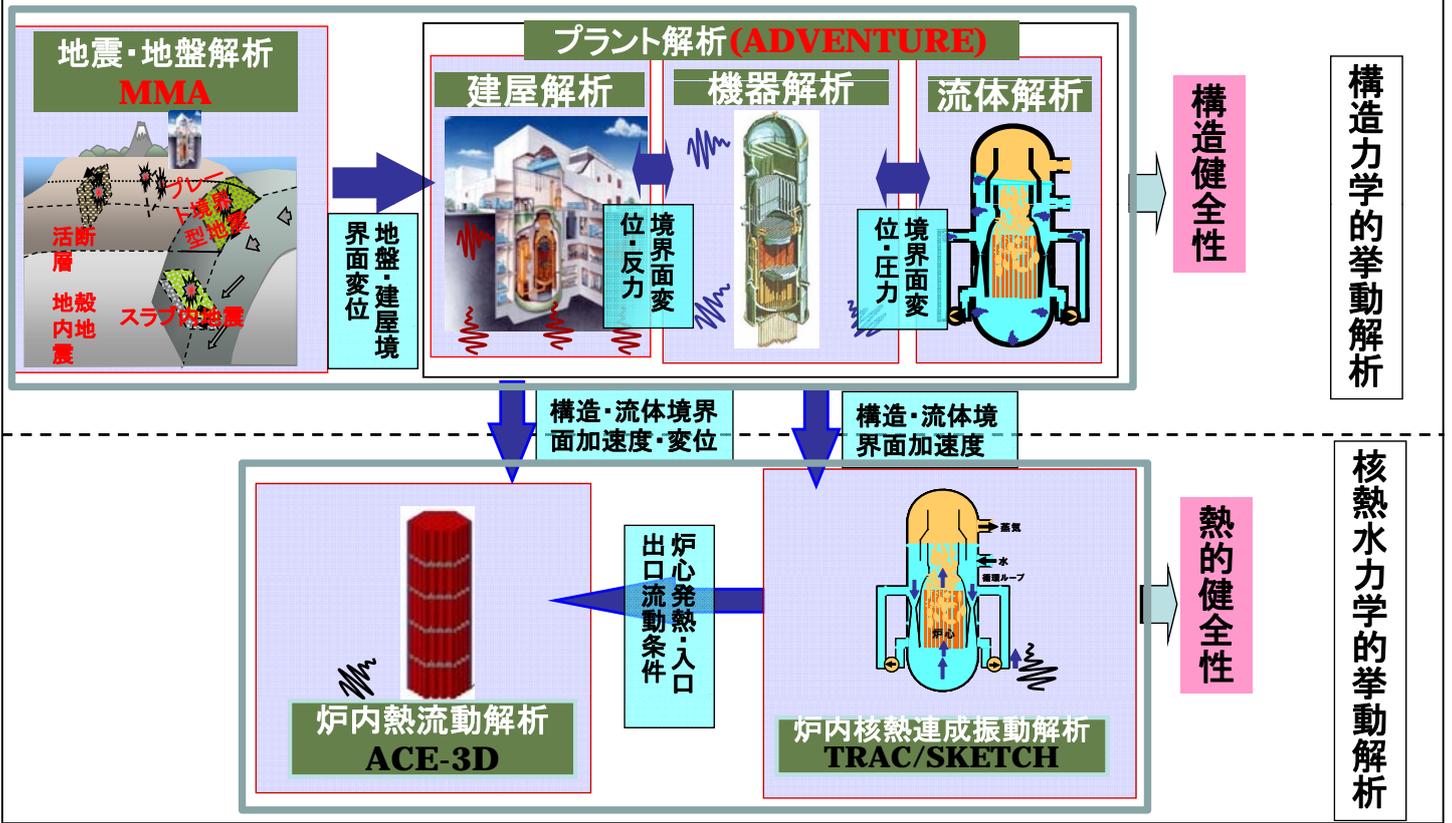
ケース1:スクラム作動、再循環ポンプ作動

ケース2:スクラム不作動、再循環ポンプ作動

ケース3:スクラム不作動、再循環ポンプ不作動

# 地震耐力予測シミュレーションにおける解析間データ連携機能の開発

## 地震耐力予測シミュレーションの全体像



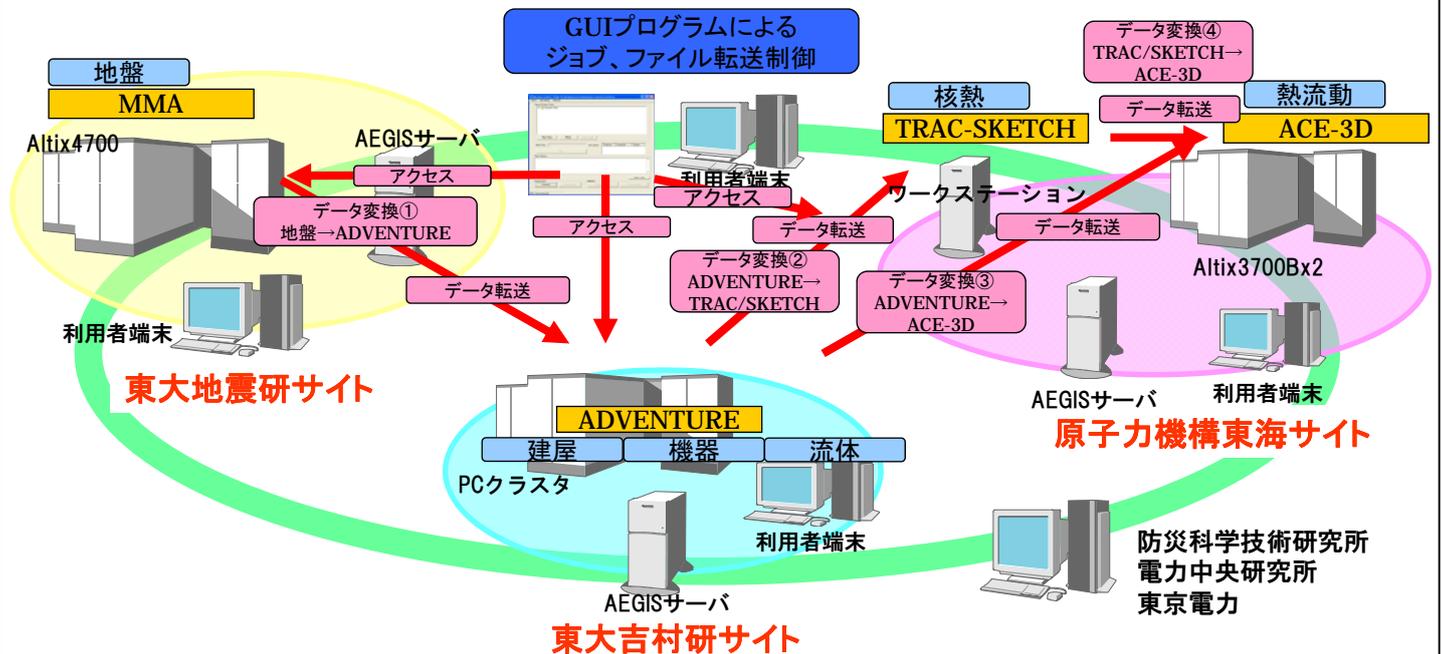
# 地震耐力予測シミュレーション統合化実装例

## 実行計算機のグリッド化

- ・東京大学地震研: Altix 4700
- ・東京大学吉村研: PCクラスタ
- ・原子力機構: 安全研究センターワークステーション及びAltix 3700Bx2

## クライアント接続

- ・防災科学技術研究所
- ・電力中央研究所
- ・東京電力



# まとめと今後の計画

## 2009年度

- (1) 各要素現象用シミュレーションコードの開発・改良
- (2) プロトタイプモデル・メッシュの構築
- (3) システム統合化の準備
- (4) 次世代スパコン向けチューニングをADV\_Solidに対して実施

## 2010年度

- (1) 個別コードの機能検証及びコードの機能向上、シミュレーションモデルの改良
- (2) それらすべてを接続し、トータルの総合シミュレーションシステムのテストを開始
- (3) 3種類の想定シナリオのシミュレーション評価を実施
- (4) 次世代スパコン向けチューニングをADV\_Thermal, ADV\_Couplerに対して実施

## プロジェクト期間中の最終ゴール

地震発生・地震動伝搬から原子炉内の状態までを含めて解析することができる地震耐力予測シミュレータを完成させる。ただし、原子力発電所の実データを用いたテストはプロジェクト終了後、別途検討する。