

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」の全体計画と現状概要

吉村 忍

東京大学大学院工学系研究科

# 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」 の全体計画と現状概要

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

地球温暖化やエネルギーセキュリティの観点から原子力エネルギーへの期待が高まる中、我が国の経年化プラントの巨大地震に対する安全性の確認は焦眉の課題となっている。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。また、想定地震動に対する安全性だけでなく、機器類が強加振されることによる機能限界についても、熱や流体の影響及び建屋との相互作用といった実環境状態と経年効果を考慮に入れた上でより詳細に考慮すべきとの認識が高まっている。

## 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。そこで、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。

## 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。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、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。

## 4. 進捗状況

これまでに、マルチスケール構造モデリングに関して地殻、表層地盤、建屋（鉄筋コンクリート）、経年化構造・機器（金属）に関する既存構形式・モデルの調査を行い、既存最先端技術の実態を把握し、本研究開発で取り組むべき技術を抽出した。また、耐力シミュレーションについても既存最先端技術の現状を把握し、本研究開発で取り組むべき技術を抽出した。この調査を基に、地殻－表層地盤－原子力建屋－構造機器および機器内の挙動を支配する構造・材料－流体－熱－炉特性等のマルチスケール・マルチフィジクス連成解析において、それぞれの解析で用いる個別ソフトウェアの機能強化を行っている。具体的には、地殻－表層地盤－原子力建屋のマルチスケール地震動伝播解析を行うMMAコードの開発がほぼ完了し、原子炉建屋モデルを用いた具体的な解析を開始した。建屋－プラント－機器の地震応答解析を行うADVENTUREコードについては、各種非弾性解析機能およびアセンブリ構造のためのMPC機能をADVENTURE\_Solid Ver.2に実装中であり、併せて、次世代スパコン向けのチューニング作業を実施中である。炉内の核熱連成振動解析コードTrac/Sketchには冷却材に加速度を考慮する機能を追加実装し、燃料集合体間の沸騰水流れ解析コードACE-3Dにも加速度及び流路の変形を考慮する機能を追加実装した。各ソフトウェアをつなげるためのマルチスケールカプラーの開発もほぼ完了し、各コードの接続テストを開始した。地盤、原子炉建屋、原子炉容器、炉水、燃料集合体の各有限要素メッシュも完成し、それぞれの確認解析を開始した。

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

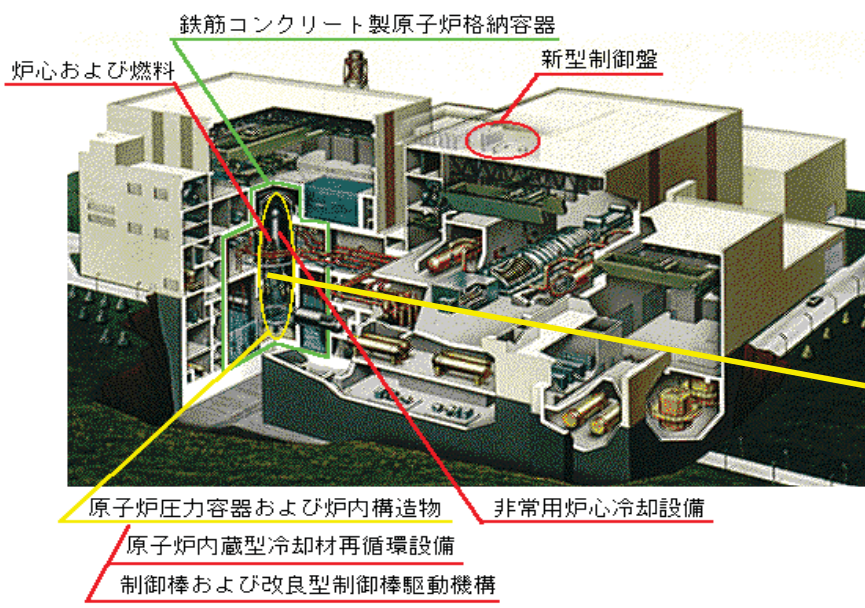
## 原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション ～ 全体計画と現状概要 ～

吉村 忍

東京大学大学院工学系研究科

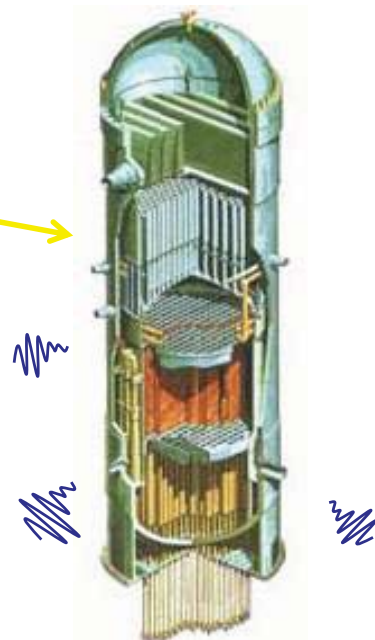
システム創成学専攻

### 原子力発電プラントと耐震安全性(1)



#### 原子炉容器と炉内構造物

内部では核反応が連続的に起こり、かつ高温高圧の冷却水が高速に循環

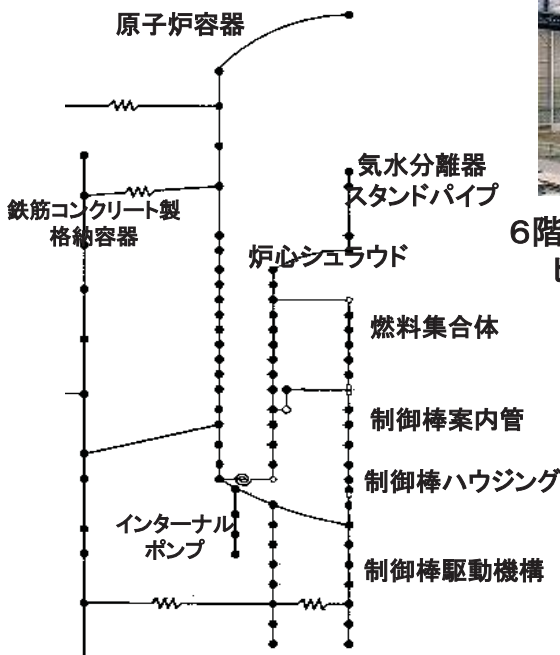


### 原子力発電プラント

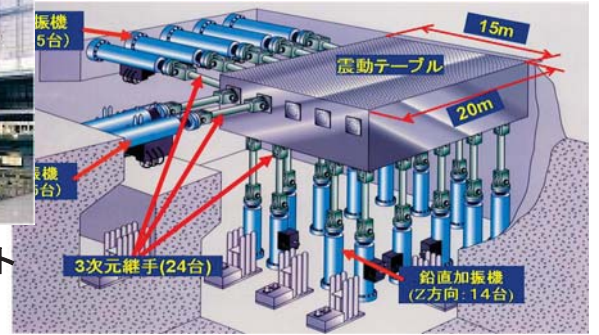
日本では54基があり、そのうち24基が稼働開始後30年を経過、5基は40年を経過 (世界では435基以上)

➡ 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(2)



6階建鉄筋コンクリートビルの震動破壊



現在の世界最高レベルの実験的評価手段

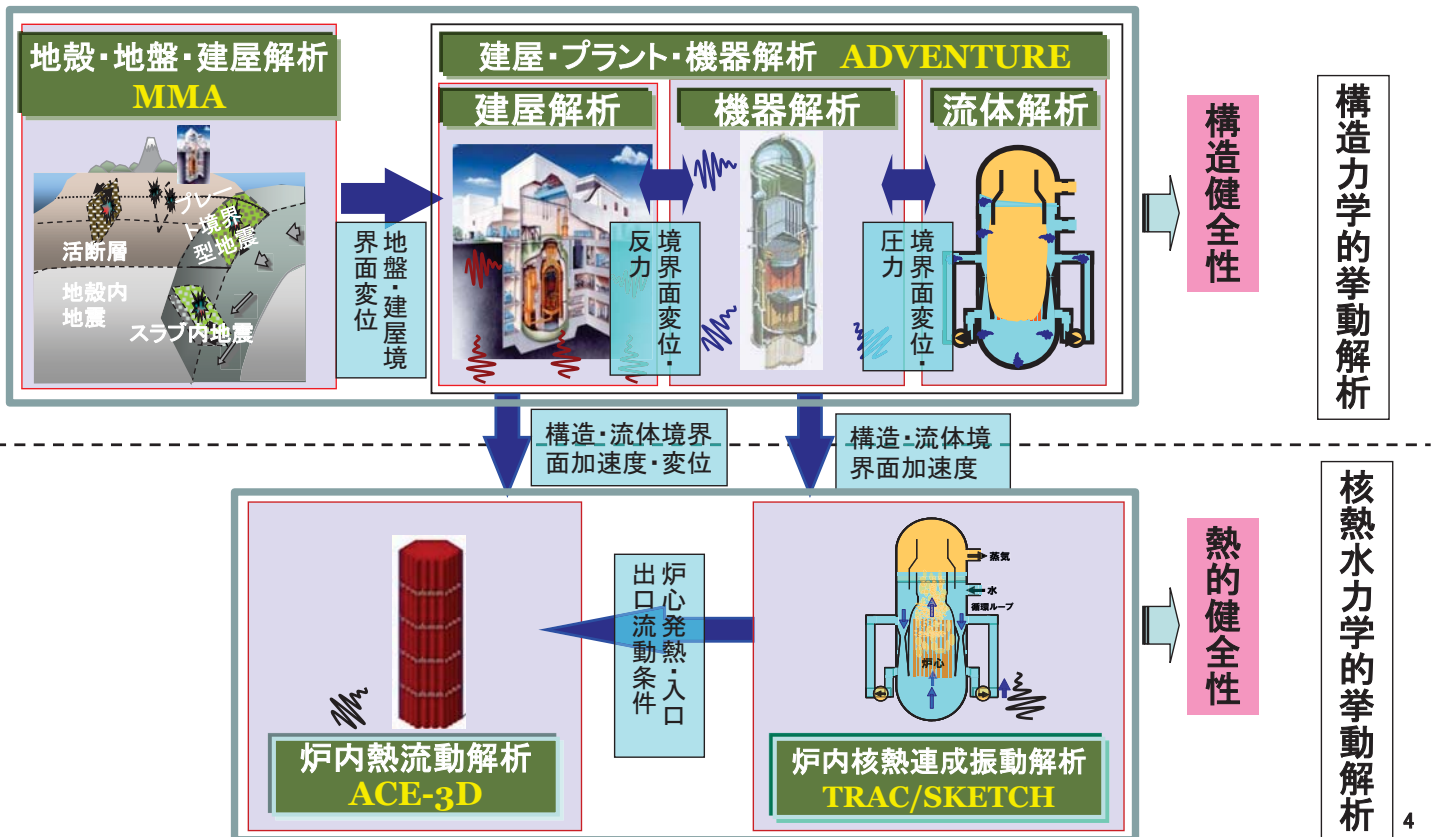
実大3次元震動破壊実験施設 (E-Defense)

課題: 上限1200トン、高コスト、繰り返し実験は困難

現在の国内耐震設計評価法  
近似モデル(多質点系モデル[串団子モデル]と部分FEMモデルの組合せ) + 大きな安全裕度

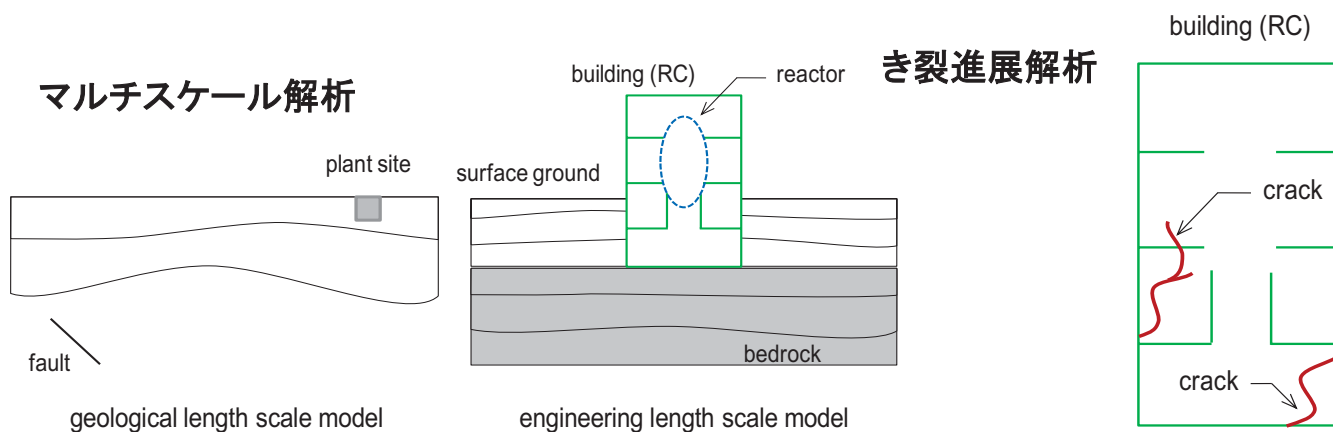
地震発生直後の過渡状態(稼働中)における原子力発電プラントの機能限界を定量的に見極める地震耐力評価シミュレーションが必要！！

# 地震耐力予測シミュレーションの全体像



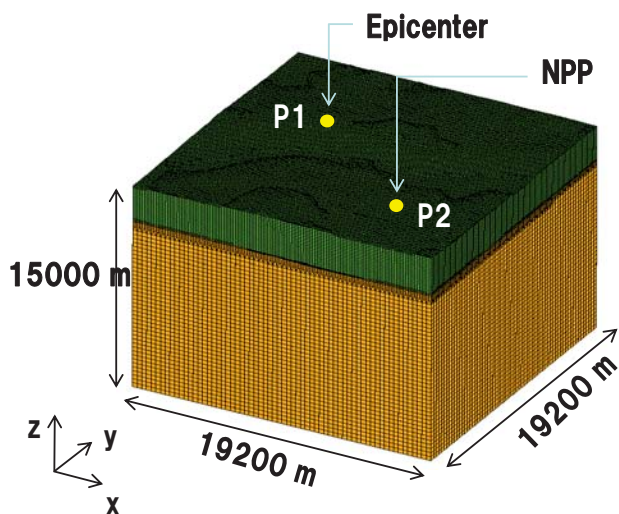
# 地殻・地盤・建屋モデリング & シミュレーション

- 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)



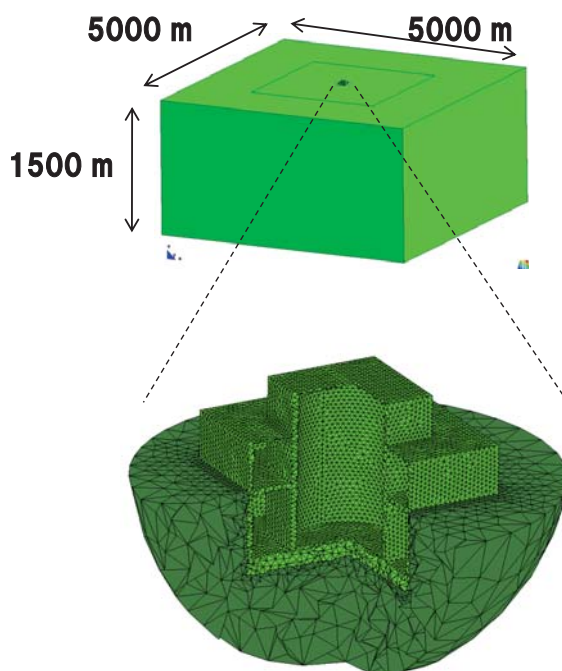
## MMA 解析におけるモデルの詳細

**マクロ解析:**  
地表面と地層境界の詳細なモデル化



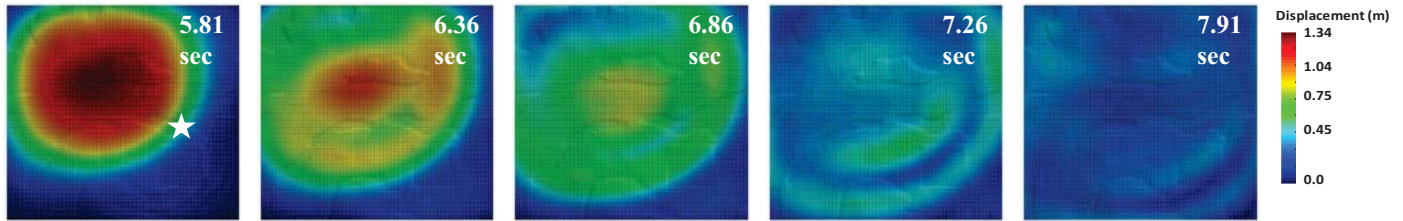
Layer	1	2
P wave (m/s)	2300	4500
S wave (m/s)	1500	3000
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1900	2500
Q	100	300

**ミクロ解析:**  
建屋と周辺地盤の詳細なモデル化

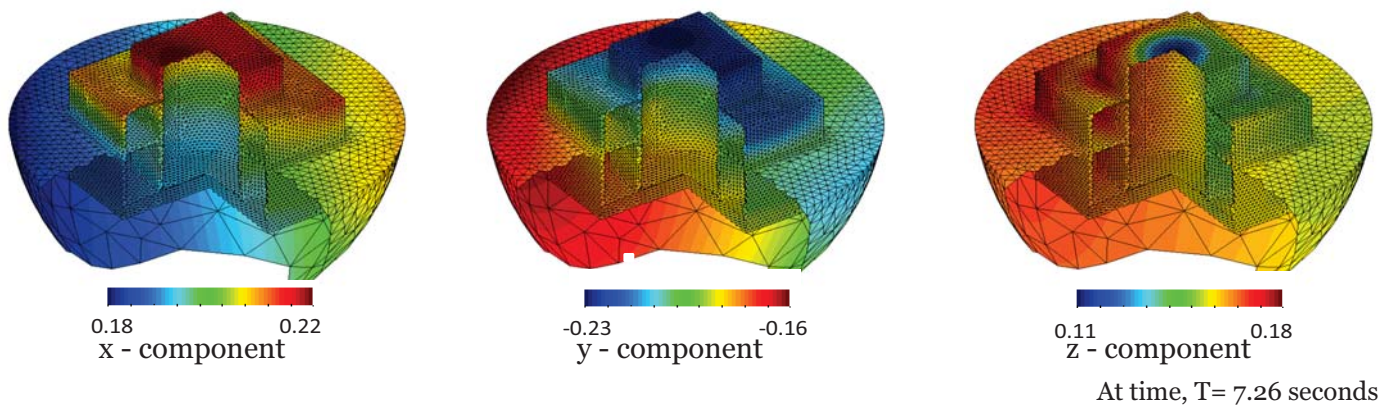


# MMA解析の計算例

マクロ解析: 地表面と地層境界の3次元トポグラフィック効果の計算(変位分布)

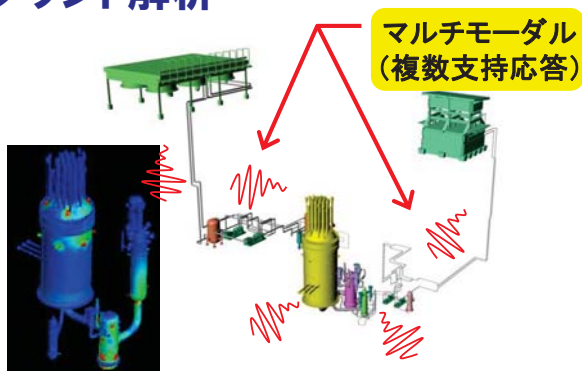


ミクロ解析: 建屋-地盤の一体解析(地盤-構造相互作用の評価が可能)

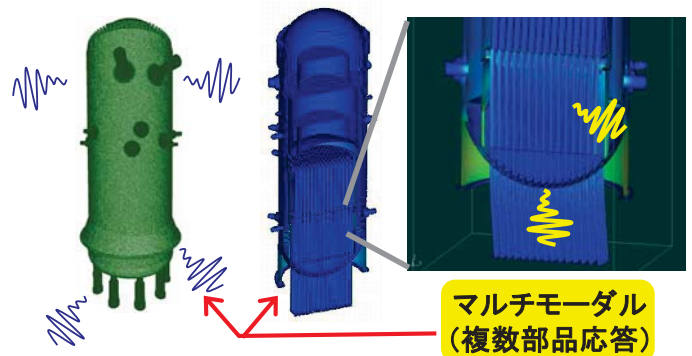


# 建屋・プラント・機器モデリングとシミュレーション

## プラント解析

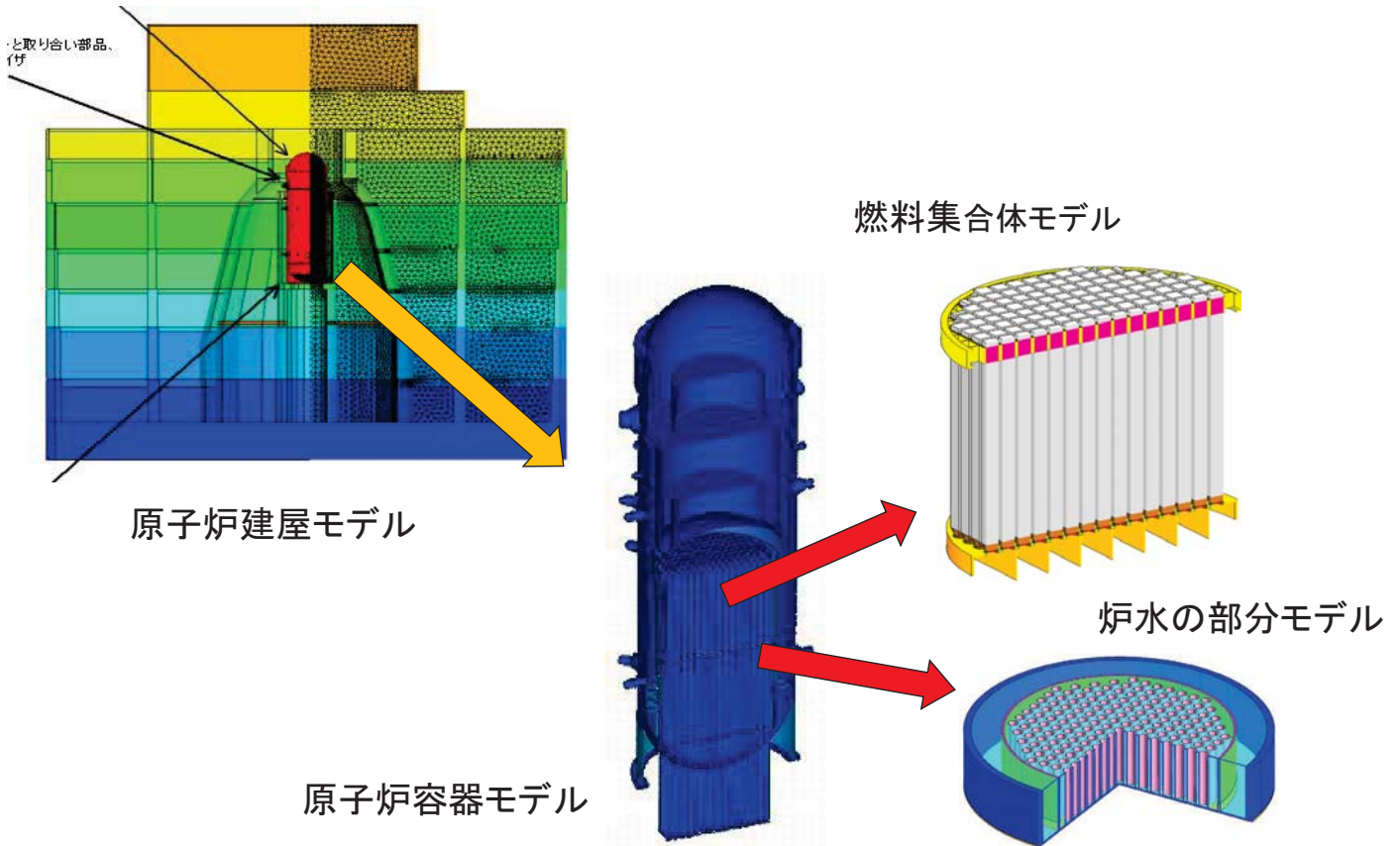


## 冷却材を考慮した機器振動解析



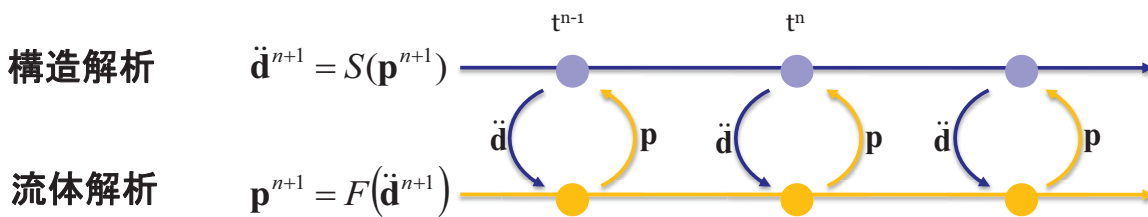
- (1) 構造機器(金属)の材料非線形(繰返し弾塑性等)モデリング、経年化材料特性モデリング
- (2) 建屋(鉄筋コンクリート)の材料非線形モデリング
- (3) 大規模複雑アセンブリ構造の多点拘束(MPC)を活用した丸ごとモデリング
- (4) 振動時の(a)冷却材の減衰効果(付加質量効果)と(b)冷却材を介した機器同士の強連成効果の精緻な考慮
- (5) 次世代スパコン(京コンピュータ)向けチューニング  
 数億自由度モデル → 数100億自由度モデルの超大規模解析 → 次世代スパコン対応へ  
 (実効性能1P目標)

# 建屋・炉容器・炉水・燃料集合体モデル



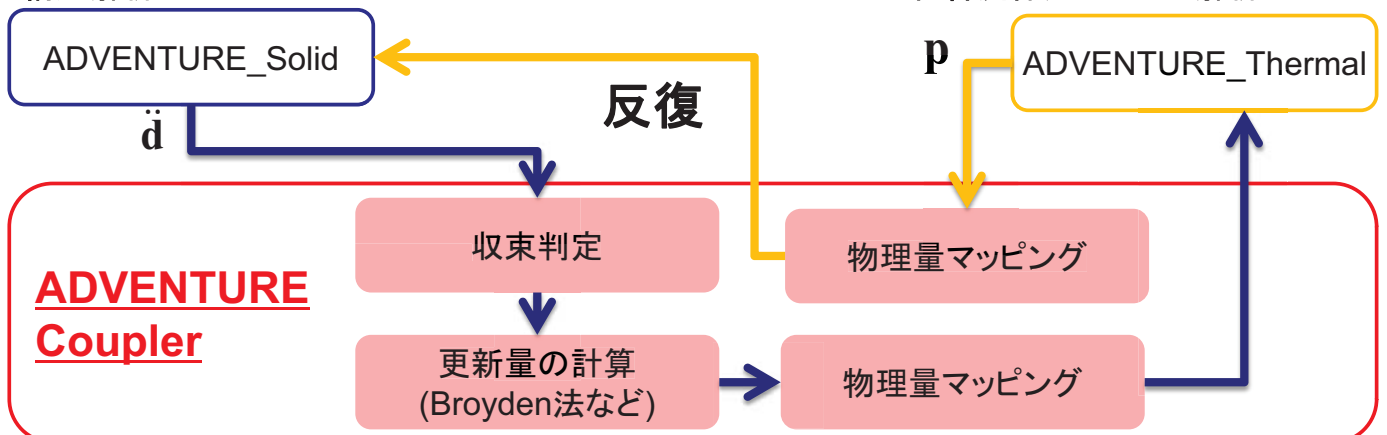
# ADVENTURE\_Couplerによるマルチフィジクス・カップリング

- 分離反復型解法による汎用的な高精度連成解析手法の構築



構造解析ソルバー

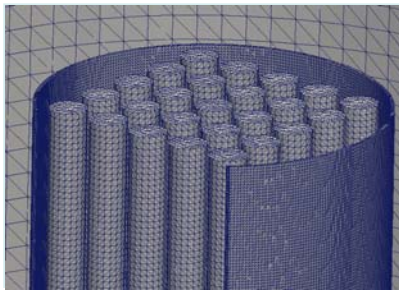
音響流体用ポアソン解析ソルバー



# 並列連成解析例：流体中の矩形断面棒群の振動

## ■ 簡易圧力容器モデルの流体構造連成解析

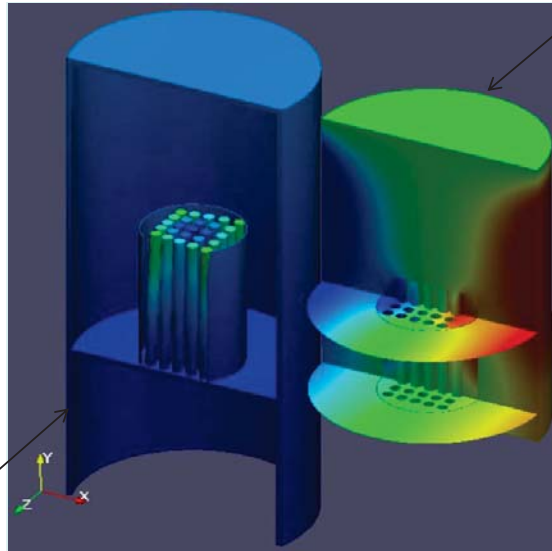
- 8 node 32 coreのPCクラスタによる解析
- 大規模複雑形状でも収束解を得ることができた。



構造モデル  
800万DOF

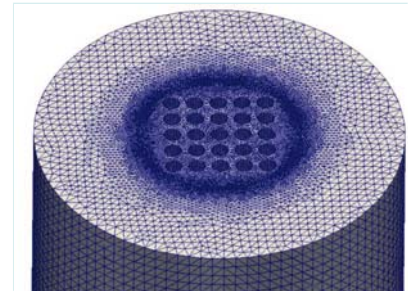


構造領域・変位応答



流体領域・圧力分布

流体モデル  
650万DOF



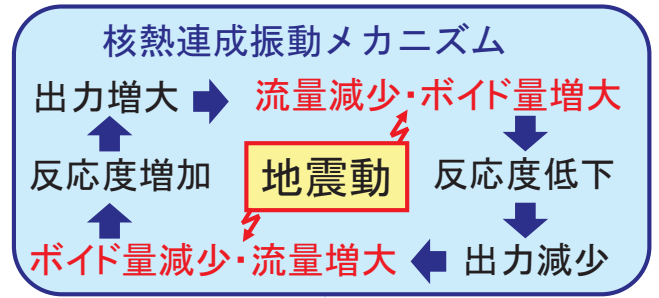
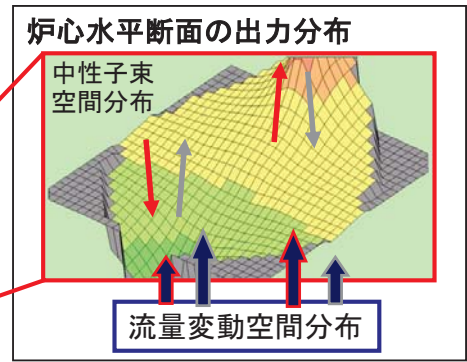
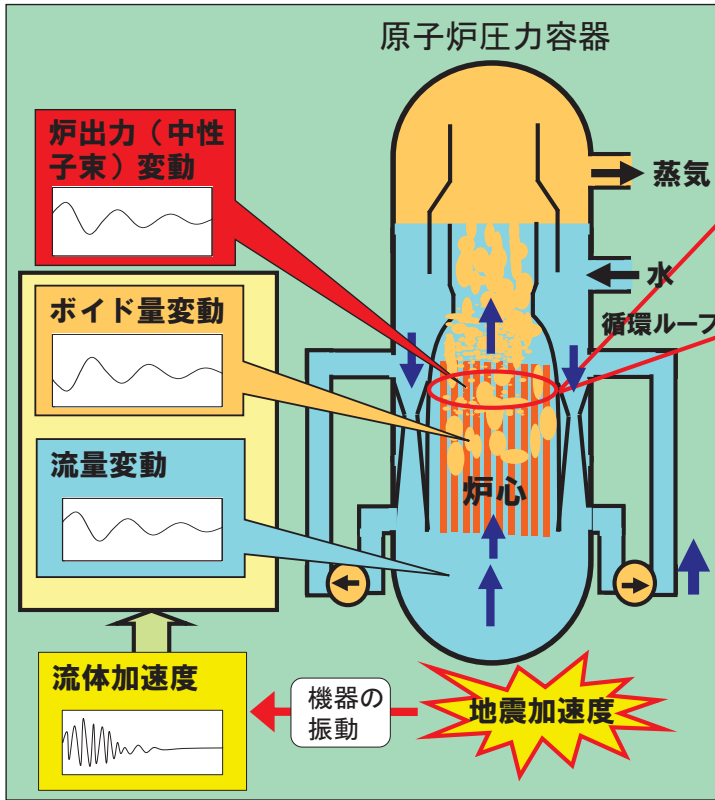
# 次世代スパコン向けチューニングロードマップと実績

ADVENTURE\_Solid(BDD前処理付き反復型領域分割法)の場合

	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
1億自由度	PC一台 1時間以内 →	PCクラスタ 数十分 →	数分
		大規模クラスタ 数分 →	数十秒
10億自由度		PCクラスタ 数時間 →	1時間
		大規模クラスタ 一時間以内 →	数十分
100億自由度			大規模PCクラスタ 一時間以内
			ペタコン 数分



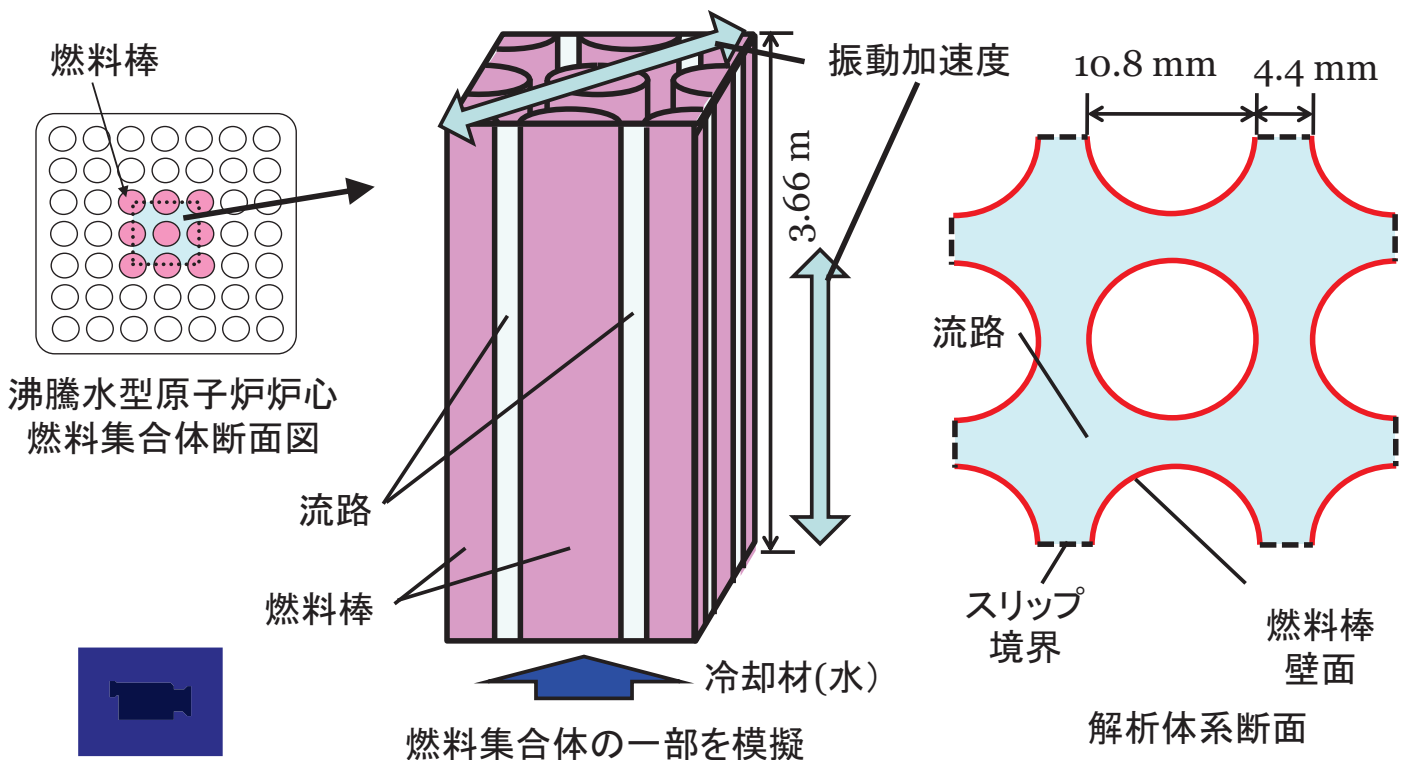
# TRAC-BF1 / SKETCH-INSによる核熱連成振動



地震動の、炉心安定性、システム応答への影響を検討

# 改良ACE-3Dによる燃料集合体内沸騰流解析

振動加速度付加時の影響評価



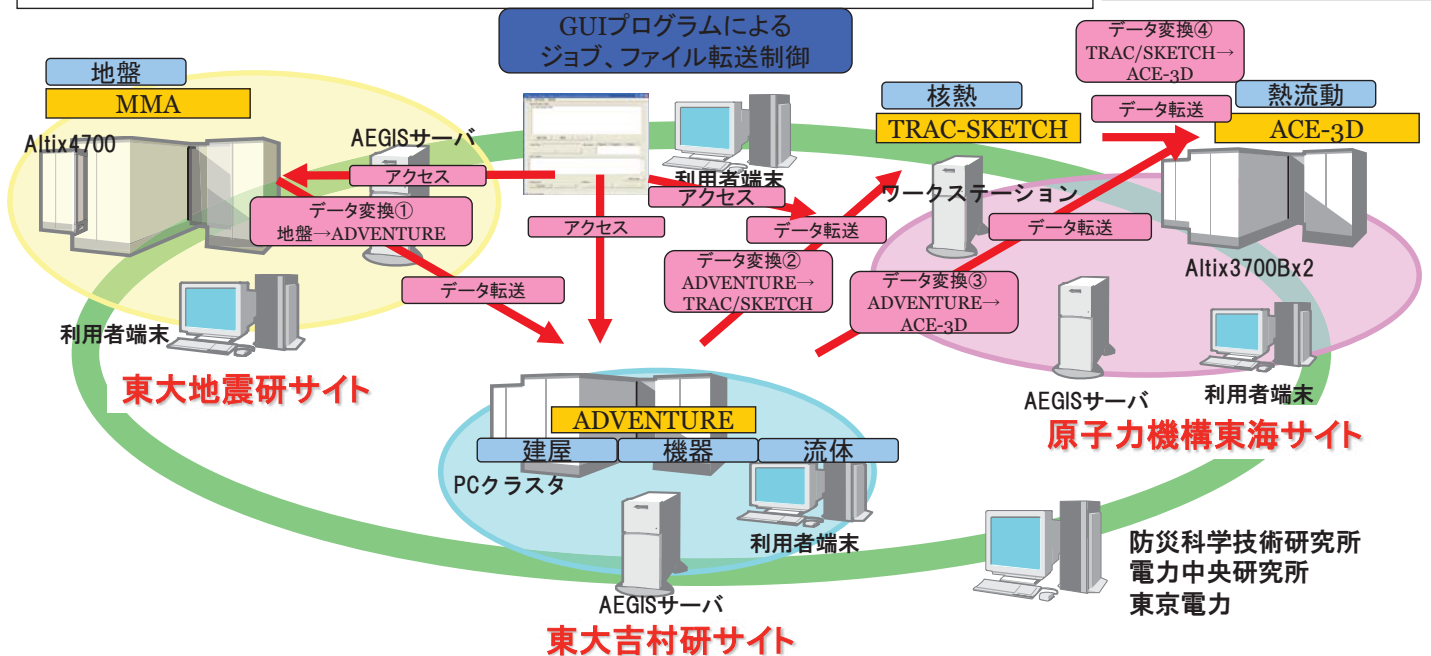
# 地震耐力予測シミュレーション統合化実装イメージ

## 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Primergy Bx900

## 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



## まとめと次年度の計画

### 2010年度

- (1) MMA, Trac/Sketch, ACE-3Dコードの改造作業ほぼ完了
- (2) ADVENTURE Ver.2 (Solid, BCtool, Metis, Coupler)の開発と基本機能の検証中
- (3) 次世代スパコン向けチューニングをADVENTURE\_Solidに対して実施
- (4) 地盤、建屋、炉容器、炉水、燃料集合体モデルの準備及びテスト
- (5) すべてのコードを接続し、トータルの総合シミュレーションのテストを開始

### 2011年度

- (1) MMA, ADVENTURE, Trac/Sketch, ACE-3Dコードの完成度の向上
- (2) ADVENTURE\_Solid向け次世代スパコン向けチューニング完了
- (3) ADVENTURE\_Thermal, Magnetic向け次世代スパコン向けチューニングを実施
- (4) MMA, ADVENTURE, Trac/Sketch, ACE-3Dコードを接続して、地盤—建屋—炉容器—炉水—燃料集合体モデルの統合解析の実施
- (5) 3種類の想定シナリオのシミュレーション評価を実施