

# CREST 研究チームによる原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション への挑戦：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。

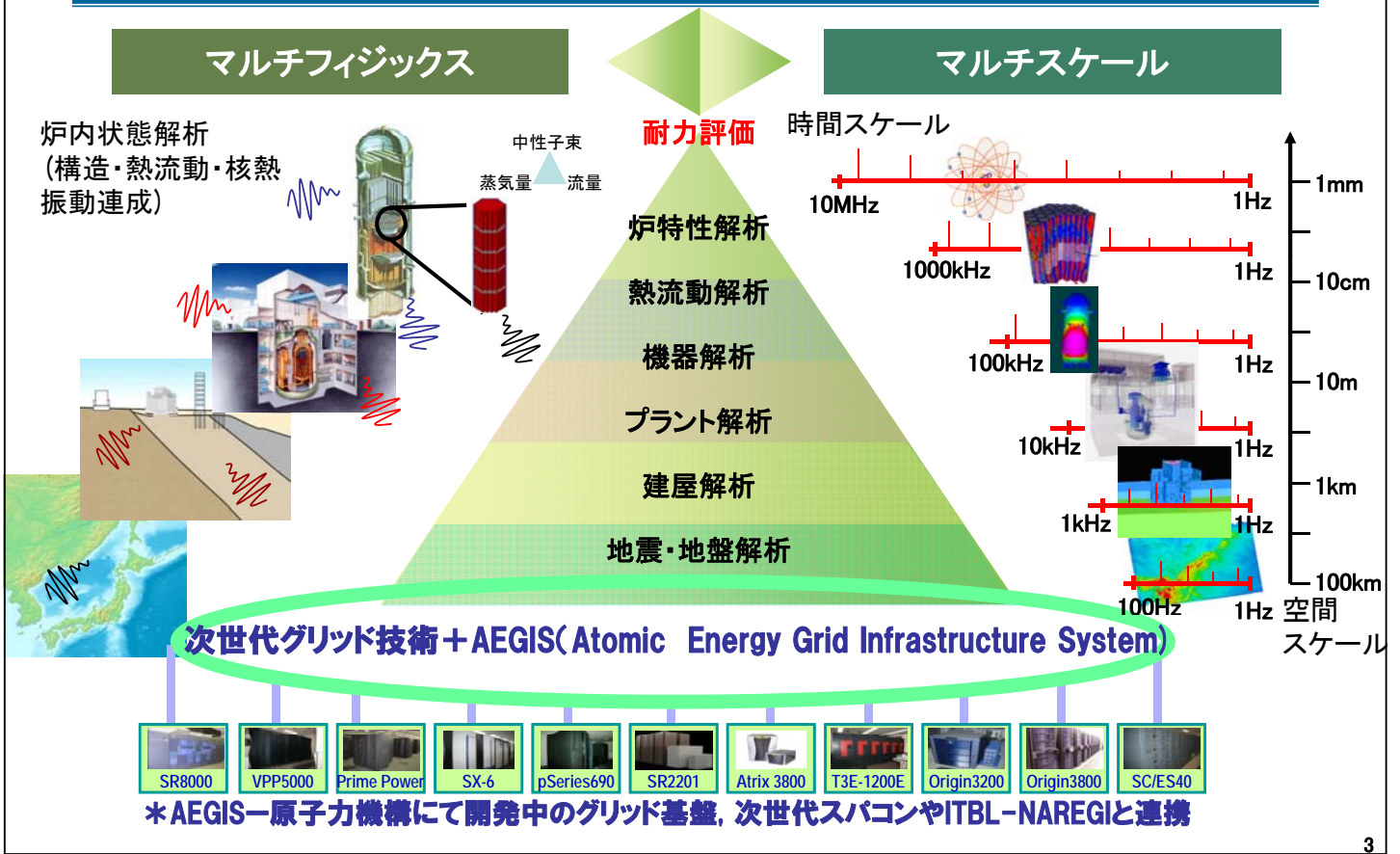
本研究においては、巨大地震力を受ける、地震発生直後の過渡状態における原子力プラントの機能限界を「耐力」と定義し、それをマルチスケール・マルチフィジクス統合シミュレーションにより定量的に見極めることを可能とするシミュレータを提案し、実装することを目的とする。まず機器への地震入力波を正確に評価するため、異なる振動特性を有する地殻 - 表層地盤 - 建屋 - 機器間を伝播する地震波動の挙動を明らかにする。同時に、原子炉内部の構造・材料 - 流体 - 熱 - 炉特性の相互作用についても、動的変形を伴う機器内の気液二相流挙動などの微視的な炉内変化、および炉特性の変化をマルチスケール・マルチフィジクスの解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

## 3. 研究の内容

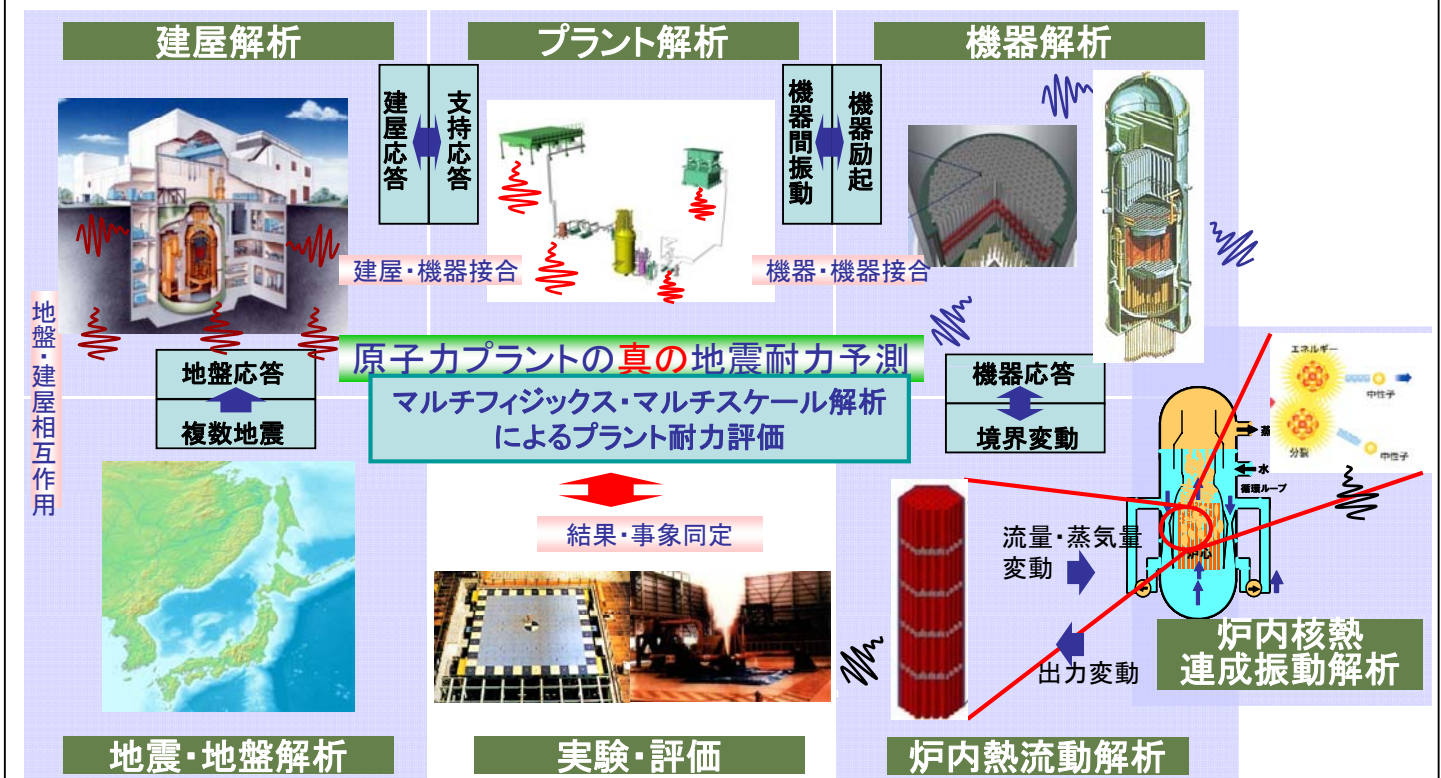
本研究で対象とする現象を扱うにあたっては、地震の発生・地殻内伝播から表層地盤 - 建屋 - 機器そして炉内熱流動や中性子輸送までという、空間スケールで数百キロから数ミリまでの $10^5$ 超のマルチスケール性とマルチフィジクス性を考慮する必要がある。時間方向には（周波数領域）0.1Hz から 1000Hz 超、継続時間に関しては、十数秒から数時間のマルチスケール性とマルチフィジクス性を想定する。また、材料非線形性により弾性波速度が 1000[m/s]から数桁落ちた値になるというダイナミックなスケール変化もある。本研究では、各スケールの現象の相互作用を精密かつ効率的に扱うために、空間方向のマル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。



# 対象現象のマルチフィジックス・マルチスケール性



# 地震耐力予測シミュレーションの全体像



# プロジェクト前半の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

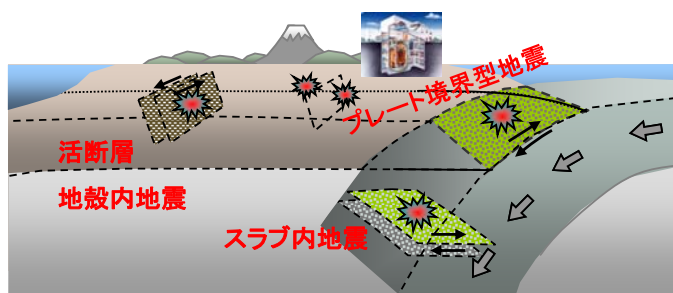
ケース3: スクラム不作動、再循環ポンプ不作動

5

## 地震・地盤・建屋解析の特徴

### 地震・地盤解析

わが国の地震発生形態は多様  
➡ それぞれについて耐力を論じるべき



### 巨大地震の地震動計算の特徴

長周期成分が卓越する海溝型地震  
短周期成分が卓越する断層直近の内陸地震

### 巨大発電プラントへの入力地震動

地表付近の地盤に応じた複雑な入力波の計算  
広い周波数域にわたって計算精度を確保

### 建屋解析(+地盤相互作用)

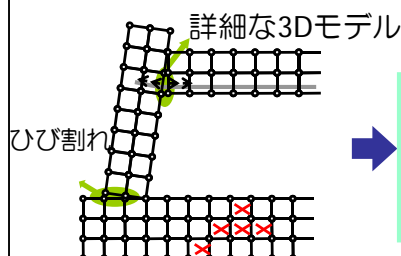
建屋の振動解析には正確な地震動と地盤-構造相互作用の評価が必要



- 地盤の非線形性
- 建屋基礎部の非線形モデリング

マルチモーダル  
(複数地震波)

地盤・建屋の3次元ソリッドによる詳細非線形・損傷モデリング

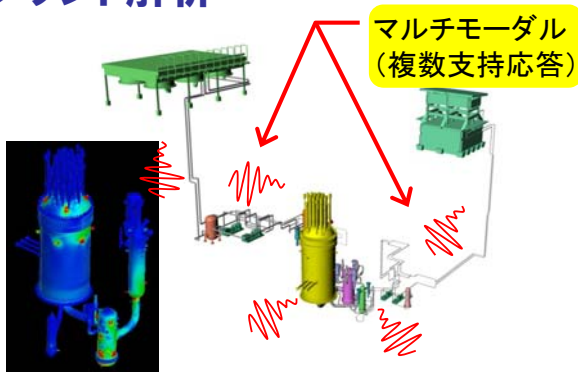


- コンクリート構成則
- 鉄筋とコンクリートの付着
- き裂の発生と進展

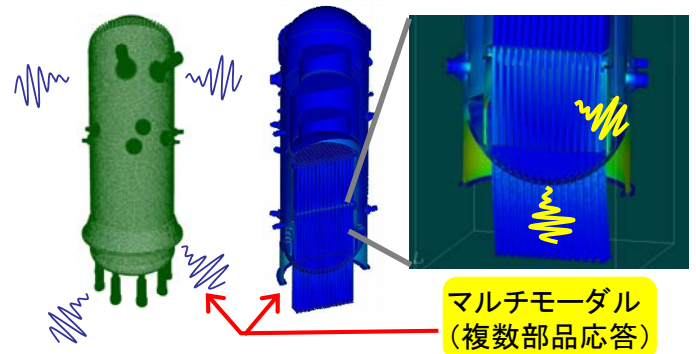
6

# ■ プラント・機器解析の特徴 (ADVENTURE)

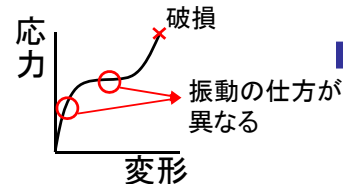
## プラント解析



## 冷却材を考慮した機器振動解析



- ・大規模複雑アセンブリ構造のMPCを活用した丸ごとモデリング
- ・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
- ・冷却材の付加質量効果と冷却材を介した機器同士の強連成効果の精緻な考慮
- ・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

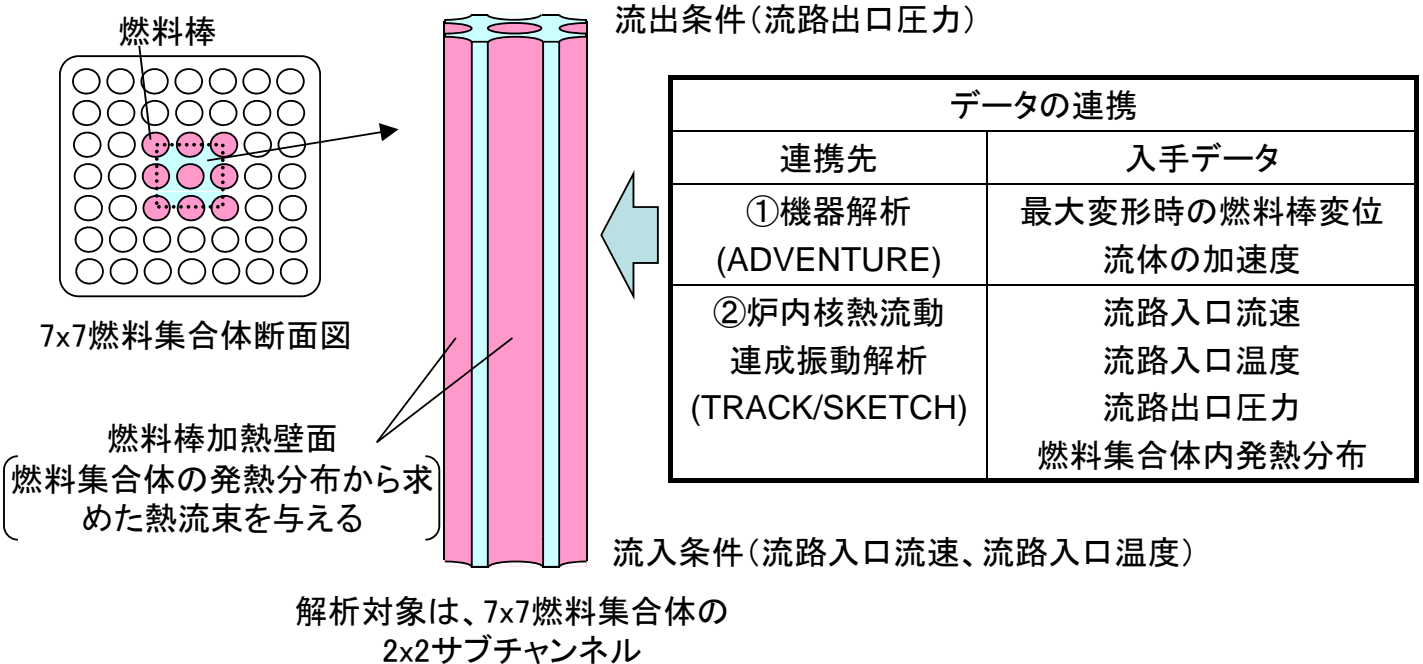


材料特性を捉える  
構成式モデリング

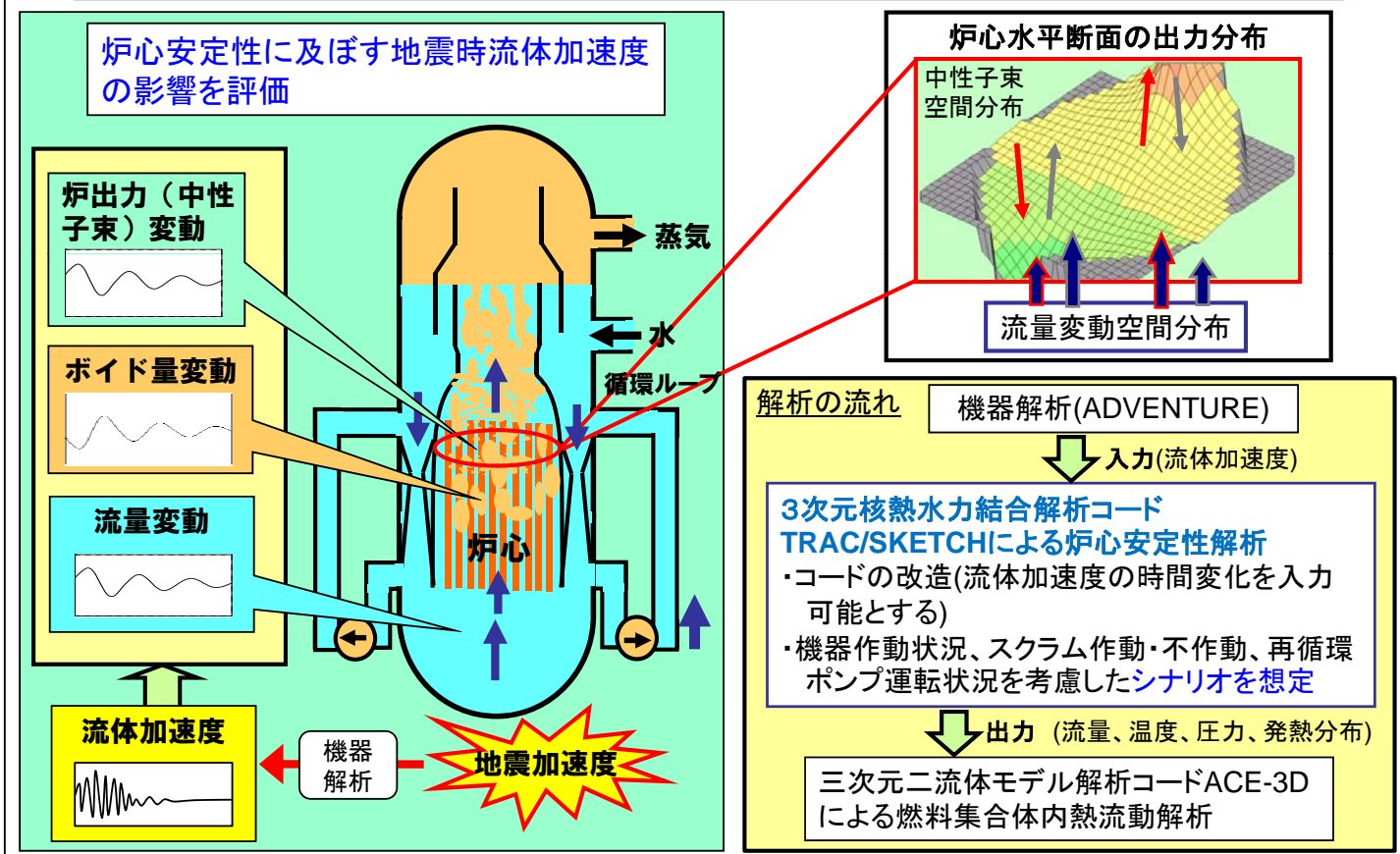
# ■ 炉内熱流動解析の特徴 (ACE-3D)

三次元二流体モデル解析コードACE-3Dを用いて、定格運転時において地震が発生した場合の燃料集合体の沸騰流挙動を、燃料棒の変形前と最大変形時について解析

## 解析対象およびデータの連携

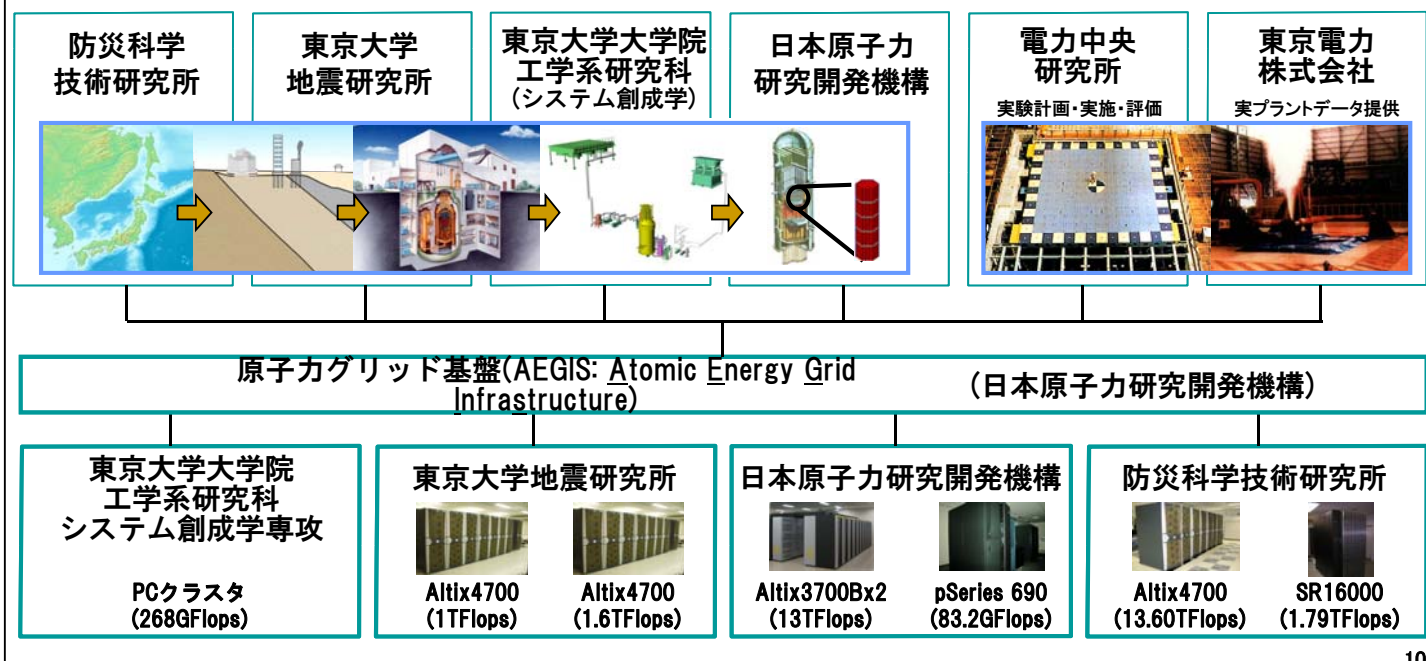


# 炉内核熱連成振動解析の特徴 (TRACK/SKETCH)



# 原子カグリッド基盤AEGIS上での展開

- ・ 原子力機構、防災科研、東大の計算機をAEGIS基盤により試験接続
- ・ 統合地震解析を連携させるグリッド化の実装のために、計算機上で地震解析コード間の連携を試行し、接続を確認



# 既存計算資源・実験資源の活用と将来展開

## 次世代スパコン

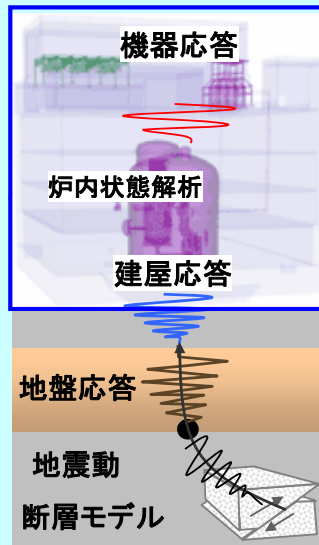
**分散化**  
数ミリから数センチ単位で地盤から機器までをシームレスに分散化

**解析時間**  
実時間内で解析を実施  
(グリッド3ヶ月を1ヶ月に)

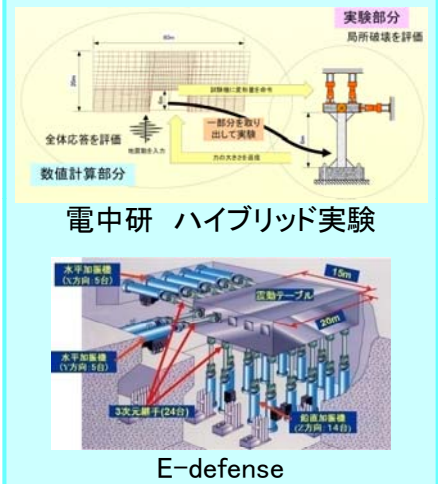
次世代スパコン利用インターフェース

相互乗入可能

## 地震応答評価系



## 実験・評価



他の重要構造物へ

## 次世代グリッド技術+AEGIS(Atomic Energy Grid Infrastructure System)

