

**次世代スパコンを活用した次世代ものづくり
巨大複雑人工物のリアル実証試験からバーチャル実証試験へ
原子力発電プラントの耐震安全性を例として**

吉村 忍

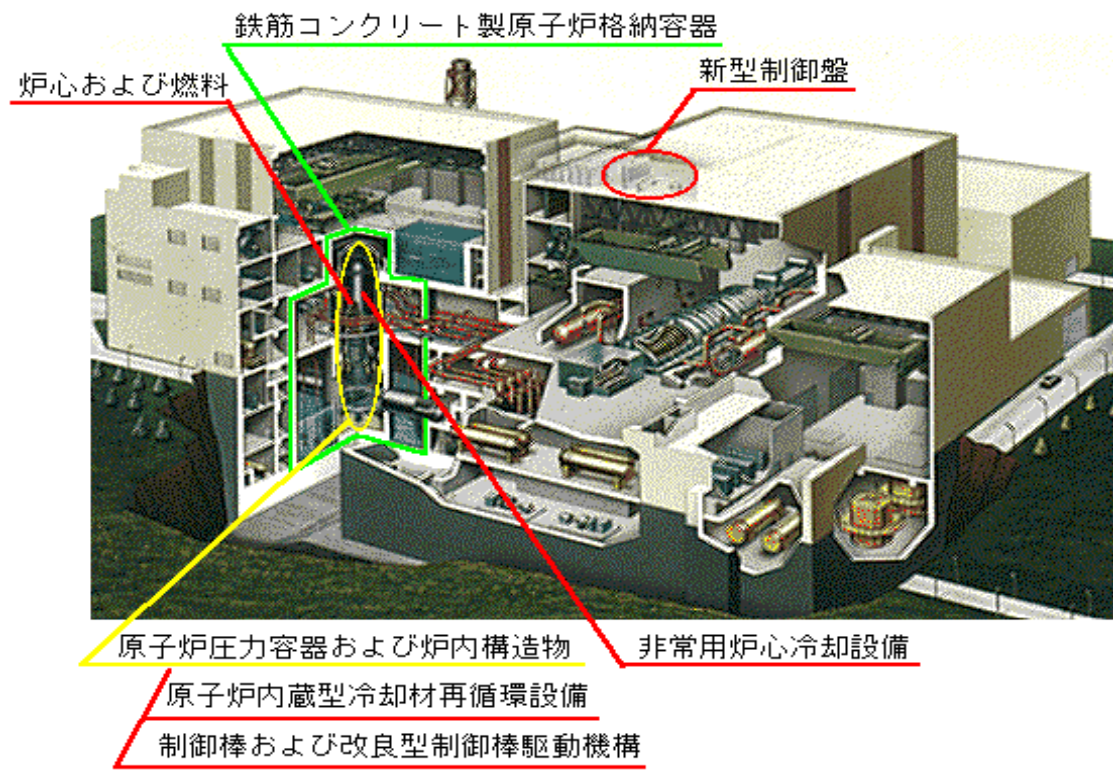
東京大学大学院工学系研究科

システム創成学専攻

yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp <http://save.sys.t.u-tokyo.ac.jp>

adv-info@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp>

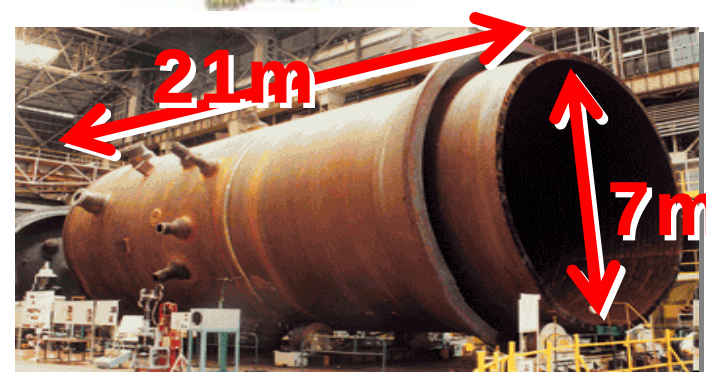
原子力発電プラントと耐震安全性(1)



原子力発電プラント

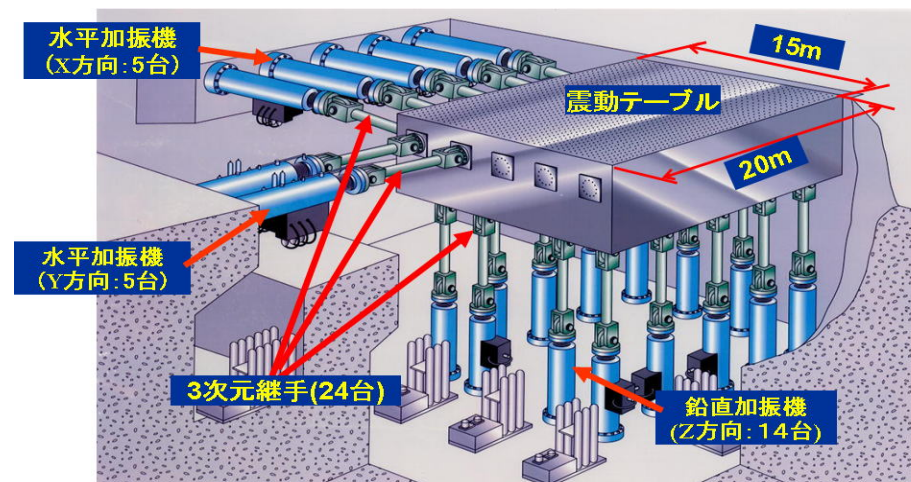
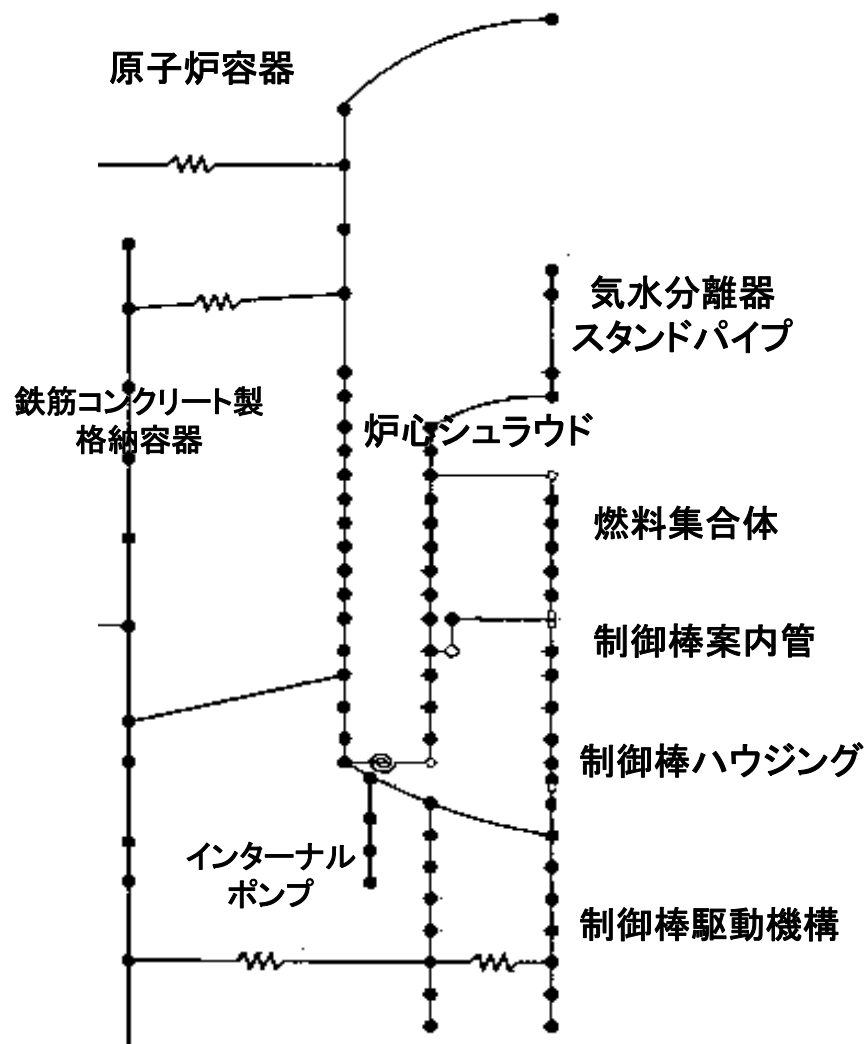


原子炉容器と
炉内構造物



製造中の原子炉容器

原子力発電プラントと耐震安全性(2)



現在の実験的評価手段：
実大3次元震動破壊実験施設 (E-Defense)

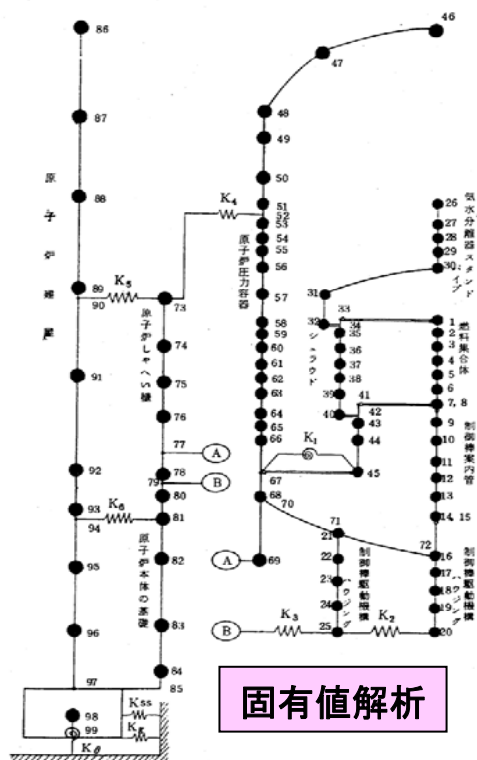


地震発生直後の過渡状態における原子力
発電プラントの機能限界を定量的に見極める
地震耐力予測シミュレーションが必要！！

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])と大きな安全裕度

現状：多質点系モデルと詳細FEM解析の一方方向連携

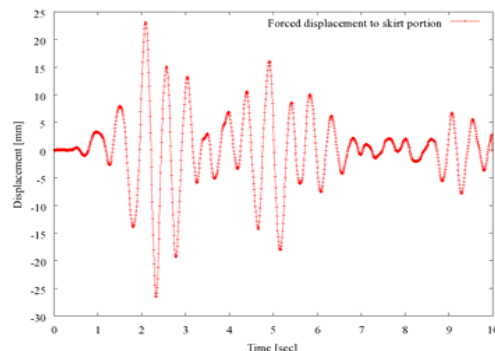
建屋に模擬地震波、
地震応答解析



固有値解析

多質点系モデル

地盤—建屋—炉容器—内部構造物—冷却材の相互作用を考慮し、地震応答を評価



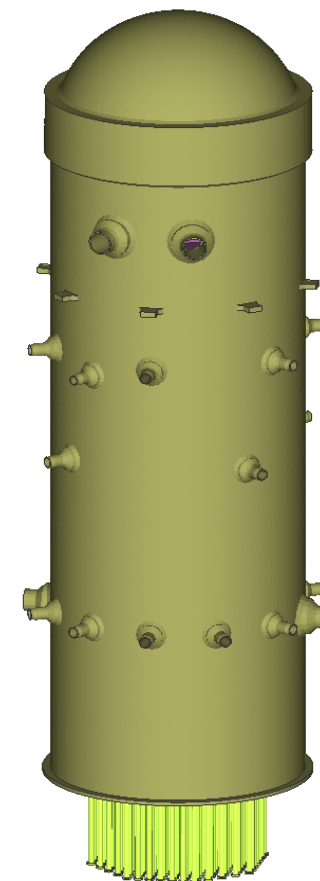
FEMモデル境界条件部の変位時刻歴

境界条件

固有値情報

物性値や境界条件設定に
産業界が持つ技術を活用

物性値
(減衰係数)



詳細FEMモデル

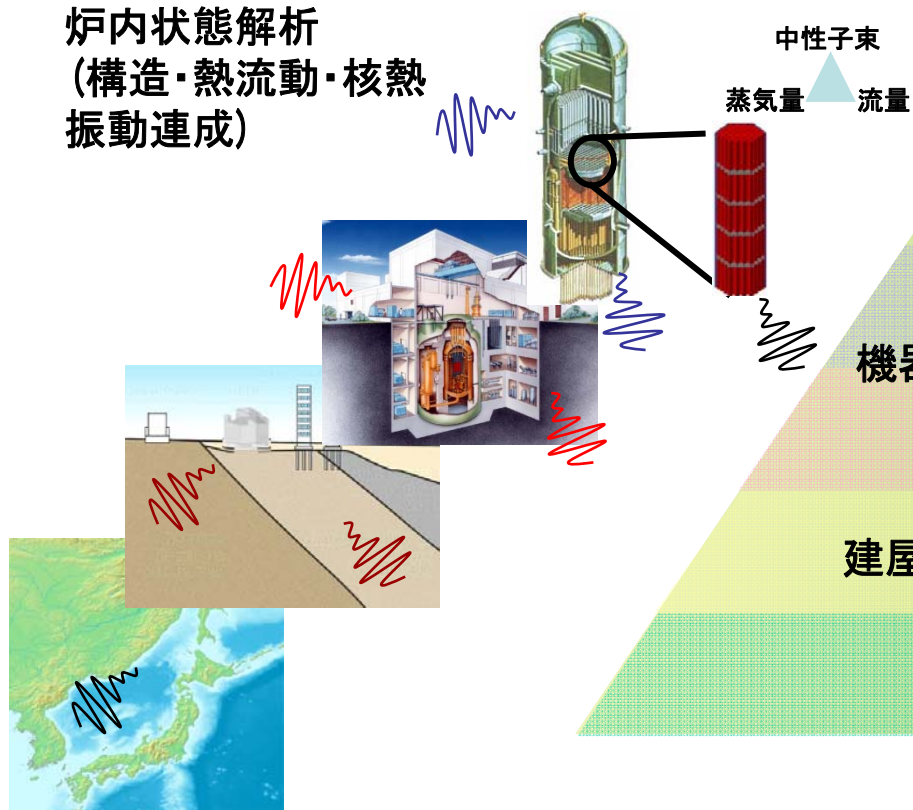
炉容器—内部構造物
の詳細な動的変形、
細部の応力集中を評価

対象現象のマルチフィジックス・マルチスケール性

マルチフィジックス

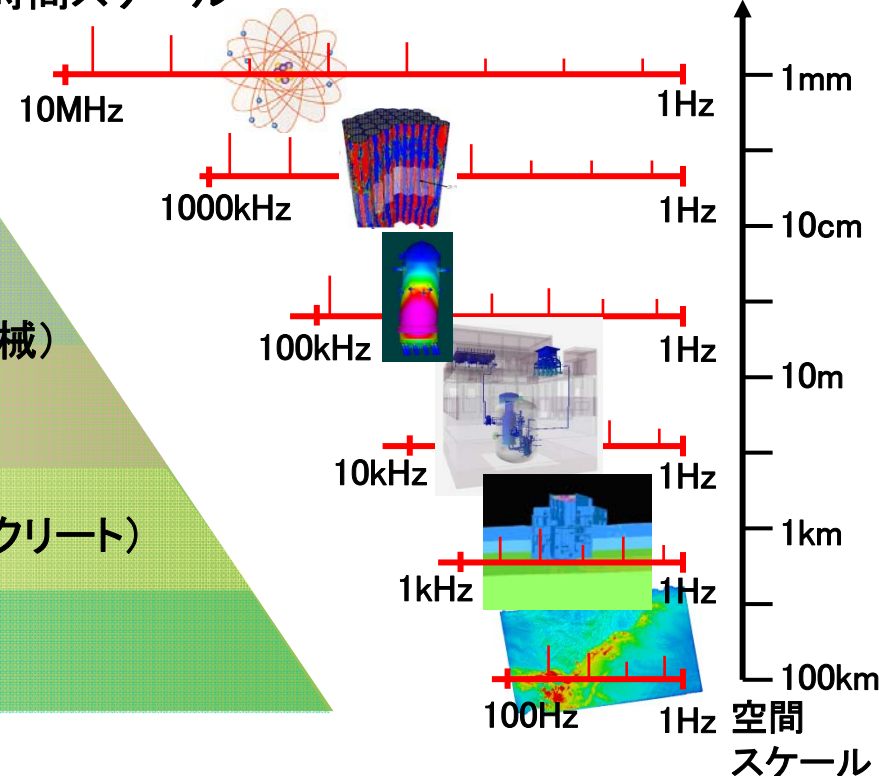
マルチスケール

炉内状態解析
(構造・熱流動・核熱
振動連成)



耐力評価

時間スケール



原子力発電プラント(巨大複雑人工物)

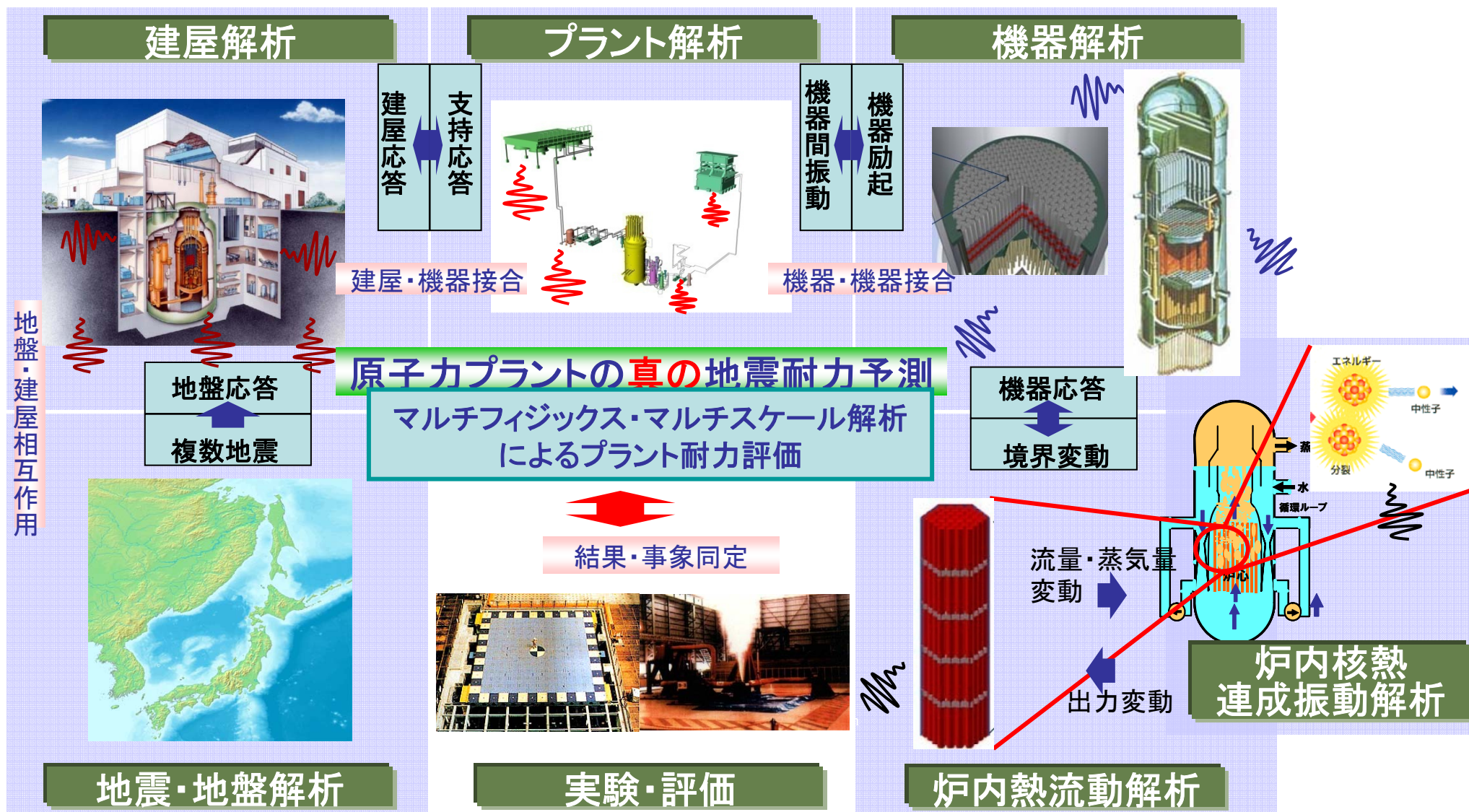


地震力(大規模自然現象)

40～60年の長期使用 → 材料特性の経年変化・様々な損傷の進行
低炭素社会実現に向けた重要なエネルギー源・インフラストラクチャーの一つ
潜在的风险が大きい、極めて高いレベルの安全性・信頼性が要求される

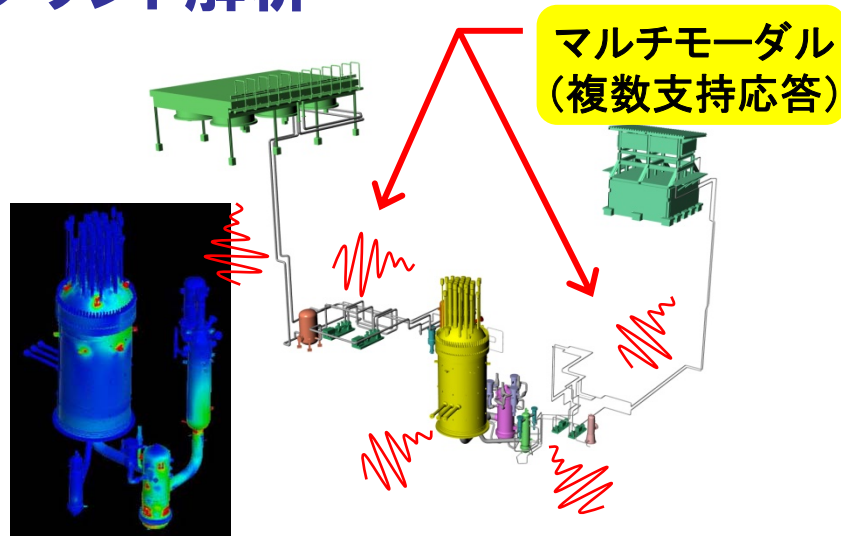
発生場所・時間・規模に関する不確実性
巨大なエネルギーの放出
人為的制御不能

地震耐力予測シミュレーションの全体像

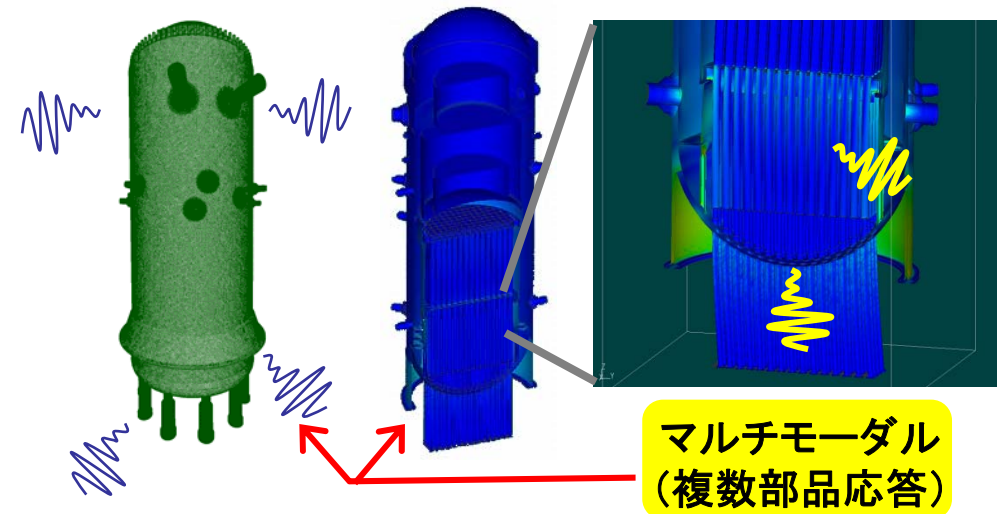


プラント建屋・構造・機器モデリングとシミュレーション

プラント解析



冷却材を考慮した機器振動解析

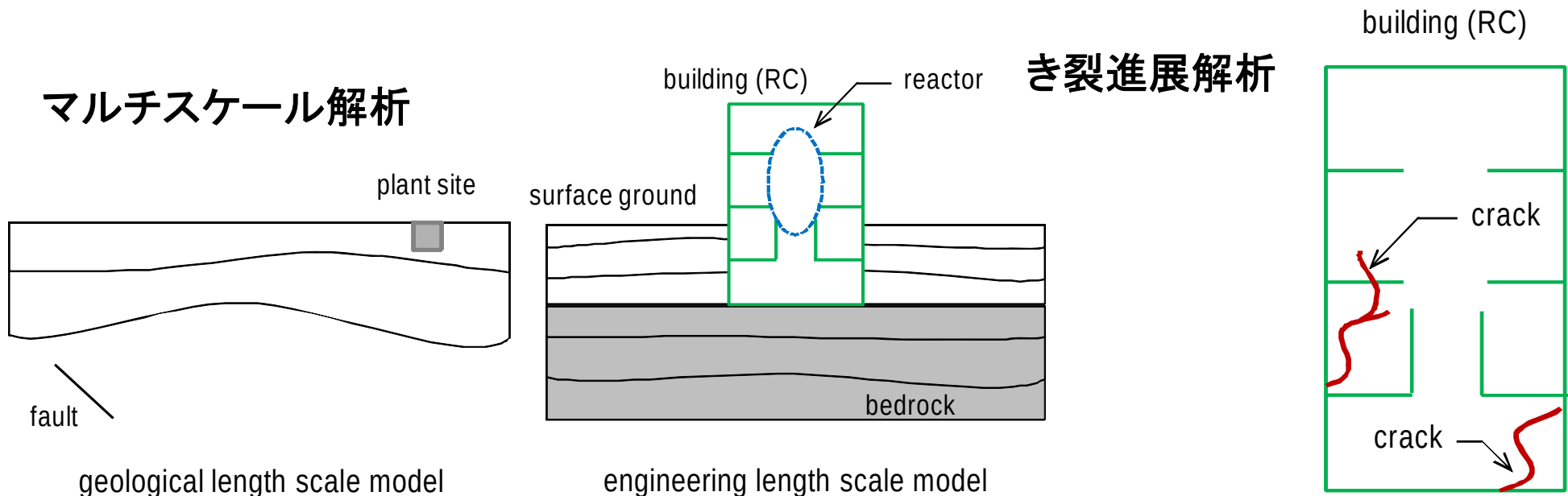


- (1) 構造機器(金属)の材料非線形(繰返し弾塑性等)モデリング、経年化材料特性モデリング
- (2) 建屋(鉄筋コンクリート)の材料非線形モデリング
- (3) 大規模複雑アセンブリ構造の多点拘束(MPC)を活用した丸ごとモデリング
- (4) 振動時の(a)冷却材の減衰効果と(b)冷却材を介した機器同士の強連成効果の精緻な考慮
- (5) 次世代スパコン向けチューニング

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

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)



次世代スパコン、一般のスパコン、実験の役割

<複合損傷モデリング><一般のスパコンによるシミュレーション>
<モデリングのノウハウ>

各パーツ（金属・溶接部・ボルト締結・コンクリート等）の終局強度とそこに至るまでの構成式モデリング

小型～中型振動台による
各パーツの実験結果（既知）

構成式モデラー
改良型ADV_Material

バーチャル実証試験

各パーツのアセンブル構造
モデリング&シミュレーション

- ・ 流体－構造連成
- ・ 構造－地盤連成
- ・ 非線形モデリング
- ・ 接触／すべりモデリング
- ・ パラメトリックモデリング&アセンブリング

次世代スパコンによる
自由自在な感度解析

分割多次元可視化
ADV_DecisionMaker

耐震安全性向上
に向けた最適設計

<実機製作・使用>

■ 体制・応用範囲

体制

大学(シミュレーション技術の研究開発)
電力(プラントデータ・オペレーションノウハウ)
メーカー(設計・製造情報・ノウハウ)
国・学協会(規格・基準)
ソフトベンダー(ソフト開発・解析サービス)

直接的応用

改良型軽水炉の耐震設計・既設原子炉の耐震補強
次世代原子炉の耐震設計
他のエネルギー関連施設(風力発電・太陽光発電等)の耐震設計

波及効果

巨大複雑人工物のバーチャル実証試験へ
・次世代自動車(衝突性能・空力性能等)
・IT関連機器・システム