

システム計算科学センターにおける  
耐震計算科学への取り組み

村松 健

日本原子力研究開発機構  
システム計算科学センター

# システム計算科学センターにおける耐震計算科学への取り組み

村松 健

日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター  
〒110-0015 東京都台東区東上野 6 丁目 9 番地 3 号 住友不動産ビル 8 号館  
muramatsu.ken@jaea.go.jp

## I. システム計算科学センターにおける計算科学研究

原子力の研究開発では、大規模な実験施設が必要となることが多く、実験研究を効率的に進める上でも計算科学の活用が重要と認識されており、日本原子力研究開発機構(以下機構とする)では各部門でスーパーコンピュータなども活用しつつ、計算科学の活用が進んでいる。システム計算科学センターは機構の計算科学活用を推進するため、①原子力における重要な課題に計算科学的手法を適用する研究を自ら行い、②その過程で最先端の計算科学基盤技術の開発整備を進め、③基盤技術を基に機構の各種プロジェクトの効率的推進に資する、との方針に基づき、①として3次元仮想振動台と材料シミュレーションの研究開発を進めている。

## II. 耐震計算科学研究の経緯と主な成果

耐震計算科学への取り組みは、平成16年に日本原子力学会の「原子力耐震計算科学」特別専門委員会より耐震設計に資する計算科学研究を推進すべきとの提言をいただいたことをきっかけとしている。その後原子力機構の第1期中期計画(17-21年度)では、「グリッド技術による並列分散計算技術を開発し、原子力施設の耐震性評価用仮想振動台を構築する」ことを掲げ、3次元仮想振動台として施設全体の解析を目指す研究が開始された。19年度には東京大学吉村忍教授を代表とするJST CREST研究「原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション」が開始され、この中で原子力機構は、地震・地盤解析から建屋・機器～炉内熱流動・核熱振動解析までの異種解析間の連携解析技術と、そのための基盤技術としてのグリッド解析技術の研究(マルチスケール・マルチフィジックス解析の主要要素技術)を分担している。22年度からの第2期中期計画では、「原子力施設の耐震性評価に資するためグリッド等先端計算機システムを活用して、弾塑性解析技術を開発し、原子力施設全体において新基準地震動を用いた挙動解析を可能とする」ことを掲げている。さらに22年度には次世代スーパーコンピュータ戦略プログラムフィージビリティスタディ、23年度には同準備研究として「原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発」において最新のスパコン(京)の性能を十分に活用できるソフトウェアの開発を産業界との協力のもと開始している。

これまでの主な成果としては、組立構造解析手法に基づく解析システムを開発し、高温ガス炉 HTTR の地震応答解析や FBR の熱応力に関する設計検討への適用により有用性を示したことが挙げられる。

## III. 現在の課題と取り組みの方向性

### (1) 構造応答モデルの高度化

基準地震動を超える領域での地震応答を正確に予測するため、地震時のように繰返しゆれが発生する場合の損傷評価技術や、建屋・機器間のように接合部で損傷が生じる可能性のある箇所での弾塑性連成モデルの開発などを進めている。

### (2) 超大規模構造解析を可能にする数値計算アルゴリズムの改良

原子力施設全体の挙動解析を効率的に実施するため、超大規模並列計算に適したアルゴリズムの開発など、最先端の計算技術の開発を進めている。

### (3) 解析結果の分析及び V&V に係わる技術

挙動解析の結果を用いて耐震性評価に資するため、結果の不確かさの低減や定量化に必要な、分析及び V&V に係わる技術として、既往解析コードや実験との比較をより合理的に行う手法の開発を進めている。

## IV. おわりに

最後に、地震 PSA への活用の可能性について述べる。わが国の原子力発電施設では、残余のリスクの評価を目的に地震 PSA が進行中であるが、3次元仮想振動台は、損傷モデルを含めて構造応答モデルの高度化を図ることにより現実的耐力の評価に寄与できる。また、建屋と主要な機器を考慮したプラント全体モデルを構築し、入力地震動や建屋・機器の特性の不確かさを考慮したばらつき解析が実施できれば、施設全体を通じた耐震余裕の理解に貢献できるだけでなく、損傷の相関性の扱いなどの技術的課題の解決にも役立つと考えられる。今後は、こうした応用の可能性についても模索していく。

# システム計算科学センターにおける 耐震計算科学への取り組み

第22回 CCSEワークショップ  
「原子力耐震計算科学研究の現状と将来」  
平成23年2月4日

日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター  
村松 健

## 報 告 内 容

- 原子力機構における計算科学研究の位置づけ
- 耐震計算科学研究の経緯
- これまでの主な成果
- 継続している研究の成果と今後の方向性

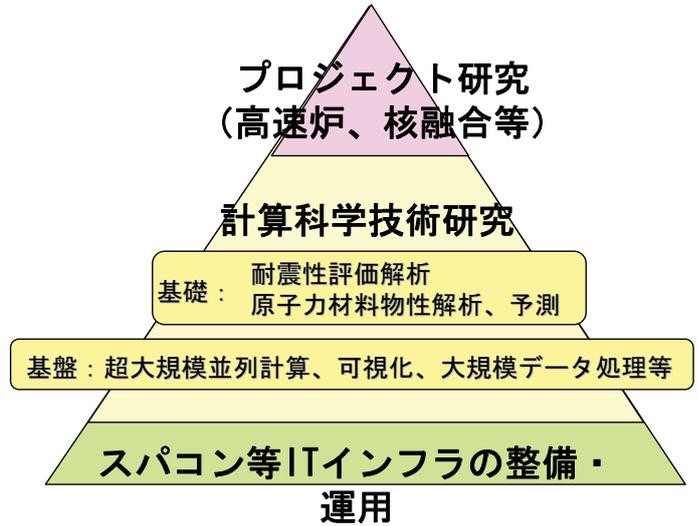
# 原子力機構における計算科学技術研究の位置づけ

## 位置づけ

- ◆ 「理論」「実験」と並ぶ第三の研究手法として、実験や観測が困難な現象の解明、予測に不可欠
  - 震動台では扱えない原子力施設全体の耐震解析、
  - 数十年にわたる原子炉材料の経年劣化、
  - 毒性・放射線の強い核燃料の物性予測、等
- ◆ 原子力政策大綱で「シミュレーション技術の高度化等による大規模な技術システム開発の効率化」が必要と指摘

## 計算科学技術に関する研究方針

- 1) 最先端計算技術を駆使しなければ解決できない原子力分野の重要課題を選定
  - ・ プラント全体に関する耐震評価、
  - ・ 第1原理計算を含むマルチスケールモデルによる材料物性シミュレーション、等
- 2) 上記研究に必要な超大規模並列計算技術等を基盤技術として開発、整備。
- 3) 研究成果を高速炉、核融合等のプロジェクト研究に連携・融合研究等を通じ横断展開

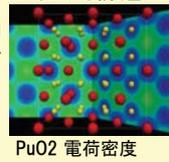


# 計算科学を活用した材料シミュレーション技術の研究開発

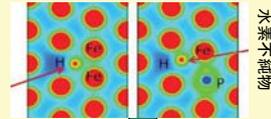
## 原子力分野における材料研究開発上の課題

- 実験・観察が困難な原子力材料の研究開発
  - ・ 極限環境下での材料評価の困難さ
  - ・ 長期間に渡る経年変化評価の困難さ
  - ・ 複雑・複合系における原因の特定の困難さ

- 既存シミュレーションにおける課題
  - ・ (例) 核燃料の高温での物性予測のためには重元素特有の高度な知見(相対論的効果等)が必須



- 原子力の工学的課題への貢献 マルチスケール手法の開発



計算科学を活用した仮想実験による安全且つ低コストな材料評価や物性予測が必要

最新の固体・理論物理学の知見を活かした第一原理計算が必要

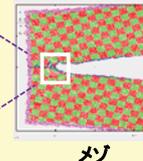
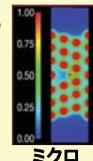
ミクロの正確な電子状態計算を基にメゾ、マクロに跨る高精度な材料・核燃料・機能材料の機械的評価と物性予測へ

## 原子力材料シミュレータの構築

原子力分野における広範な材料研究開発をシミュレーションによりカバーする

ミクロ: 正確な電子状態計算を可能にする第一原理計算手法の研究開発

メゾ・マクロ: ミクロの正確な計算結果を反映したメゾ・マクロ計算手法の研究開発



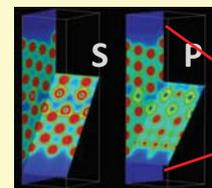
## 原子力材料シミュレータ構築の目標

### 第1期中期計画目標

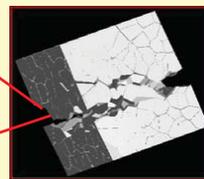
原子力材料におけるマルチスケール・シミュレーションの枠組みを構築する。

### 第2期中期計画目標

炉鋼材、核燃料、機能材料等の具体的課題へ適用可能な高精度シミュレーション技術の開発



第一原理計算による不純物の粒界脆化評価



ミクロの情報を反映した有限要素法き製造進展シミュレーション

## これまでの成果(例)

## 今後の成果活用

- ・ 複合不純物による粒界割れへの影響評価 (安全評価への基礎データ提供)
- ・ 高温での核燃料物性予測 (FBRへの物性データ提供)
- ・ 機能材料の機能発現機構の解明 (量子ビーム実験との協働)

## 耐震研究の経緯

2004年 日本原子力学会「原子力耐震計算科学」特別専門委員会の設置にかかわる検討を開始し、2005年度より活動を開始。研究計画(案)を立案し、事前評価を実施。産業界、学会等の有識者のヒアリングを通して、電事連よりデザインバイアナリシスの重要性が指摘され、耐震設計に資する計算科学研究を原研(当時)にて推進すべきとの提言をいただき、中期計画を策定。

2005年 (独)日本原子力研究開発機構 発足。

同 年 第1次中期計画開始

「グリッド技術による並列分散計算技術を開発し、原子力施設の耐震性評価用仮想振動台を構築する」

2007年 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」(主査 東大吉村忍教授)開始

2010年 第2次中期計画開始

「原子力施設の耐震性評価に資するため、グリッド等先端計算機システムを活用して、弾塑性解析技術を開発し、原子力施設全体において新基準地震動を用いた挙動解析を可能とする」

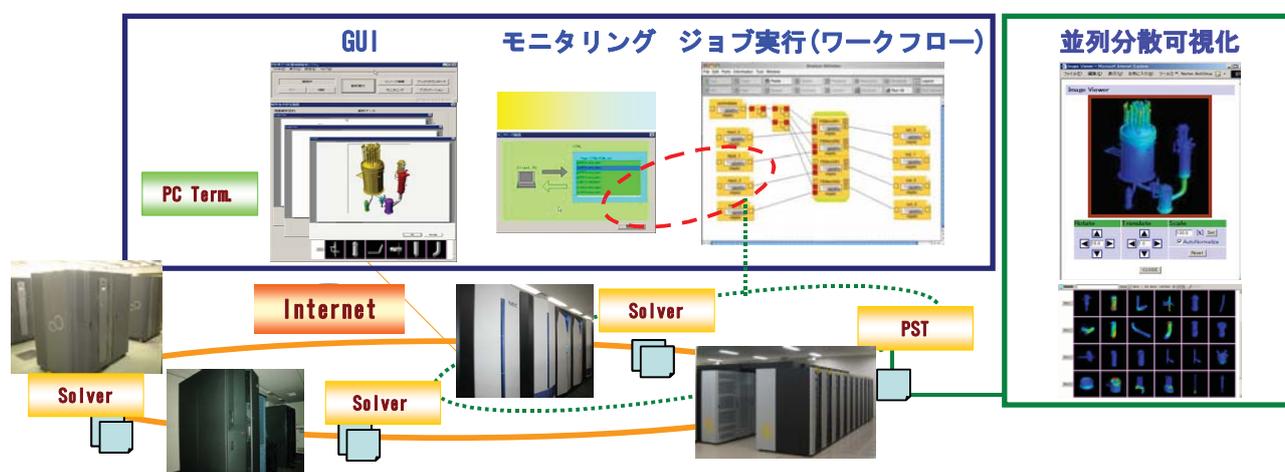
同 年 文部科学省次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム分野4次世代ものづくりの一部として「原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発」開始

4

## これまでの主な成果： 3次元仮想振動台の構築

### 手法

部品間相互作用を考慮しつつ部品の集合体として全体解析(組立構造解析)  
⇒ 複数台のスーパーコンピュータを統合利用可能な計算機環境を利用(グリッド)



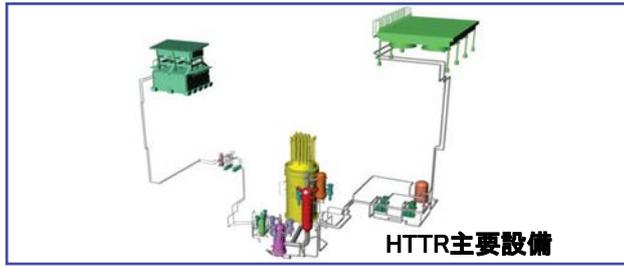
ITBLの機能を用いて構築した3次元仮想振動台プロトタイプ  
データセット、シミュレーション、可視化を統合的に実行可能

3次元仮想振動台に必要な  
基盤としてAEGISを整備

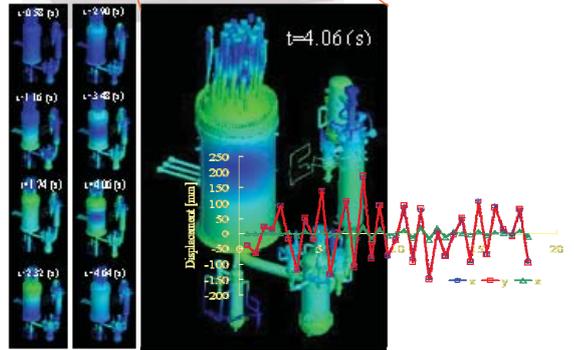
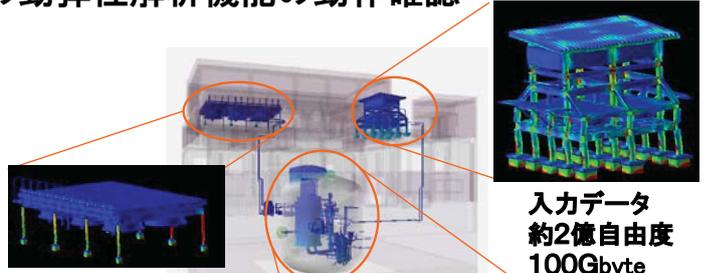
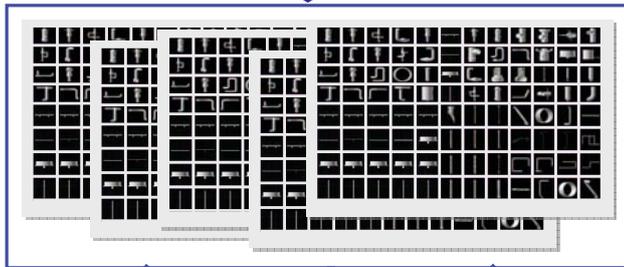
5

# 高温工学試験研究炉(HTR)動解析例

目的:プラント全体規模におけるFIESTAの動弾性解析機能の動作確認



部品展開



HTTR主要設備の動弾性解析を実現  
→ 地震時応答の全容解明への貢献が期待

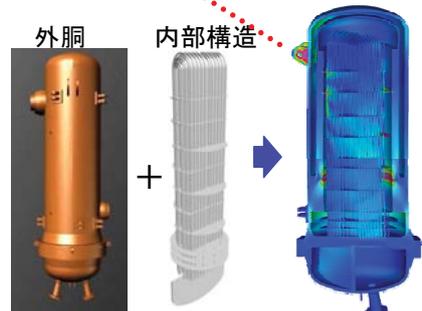
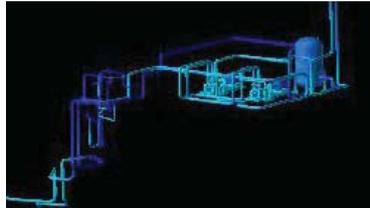
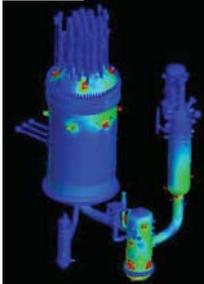
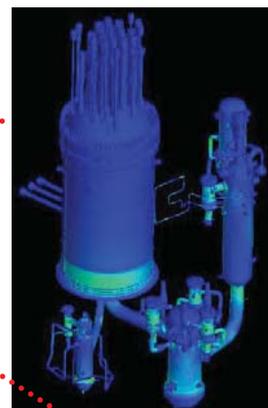
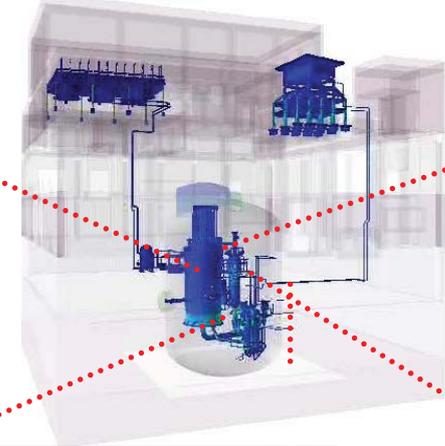
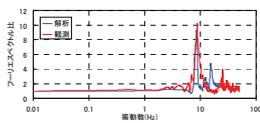
原子力学会論文誌採択、原子力学会部会業績賞受賞

# HTTRによる数値実験例

設計用地震波(S2波)を用いた  
HTTR格納容器内部全体の振動解析

観測地震波を用いたHTTR全体の振動解析

観測地震波(エルセントロ波)を用いた  
HTTR格納容器内部全体の振動解析



国際会議SC05のHPC Analytics ChallengeにおいてHonorable Mention賞受賞  
原子力学会部会業績賞受賞  
HTTRの耐震評価、HTGRの設計に資するため、モデルデータ(H19)、解析結果  
データを提供(H20)。

設計用地震波(S2波)を用いた圧力容器の時刻歴応答解析

# FBR研究開発に係わる蒸気発生器管板熱応力解析例

背景: 従来、100万自由度程度が解析の上限で、実形状による検討が不可能

目的: 大規模熱応力解析技術による蒸気発生器内球形管板の構造成立性の確認

実施内容:

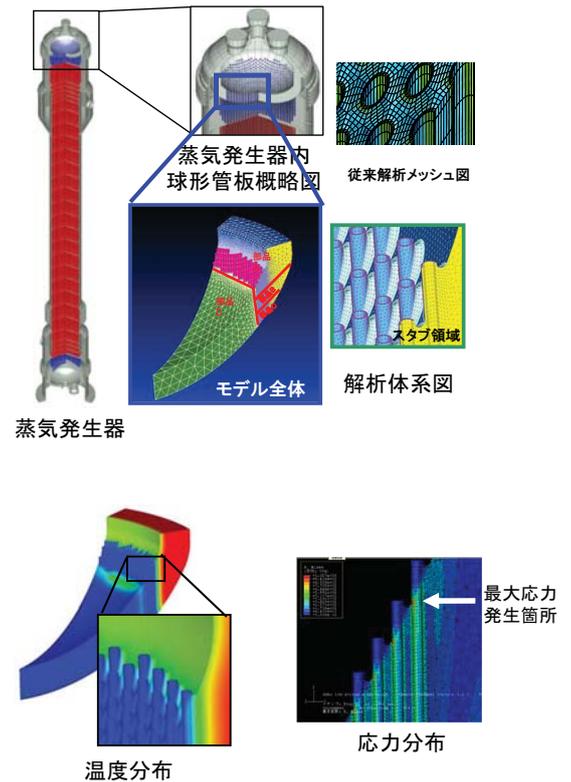
先端計算科学手法とグリッド計算機環境の活用により、2000万自由度の大規模解析を実現し、球形管板の破損可能性箇所を同定

成果: 破損可能性箇所を推定し、設計方針の決定に貢献

→分散型大規模解析フレームワークの構築を通じた設計に於ける大規模・パラメトリック解析への貢献が期待

今後の計画:

計算科学による構造熱設計手法の確立を通じた蒸気発生器設計への貢献



8

## 取り組みつつある課題と対応の方向性

### 1. 構造応答モデルの高度化

基準地震動を超える領域での地震応答を正確に予測するには、弾塑性領域での応答や、接合部における損傷・変形を考慮できるモデルが必要である。流体系との連成効果の影響の確認が望まれる。

- 弾塑性解析で必要となる、繰返し応力に対する損傷評価モデル
- 接合部の考慮の一環として、支持構造を介した建屋・機器間連成モデルの開発
- 流体系との連成解析機能の開発

### 2. 超大規模構造解析を可能にする数値計算アルゴリズムの改良

原子力施設全体の挙動解析を効率的に実施するには、超大規模並列計算に適したアルゴリズムの開発が必要。

- 新たなアルゴリズムの開発

### 3. 解析結果の分析及びV&Vに係わる技術

大量の解析結果を効率的に分析できる可視化手法、V&V手法が必要

- 可視化手法の高度化
- 実験データや既存の解析結果との比較を効率的に行う手法

9

# 構造応答モデルの高度化(1) 弾塑性応答評価技術

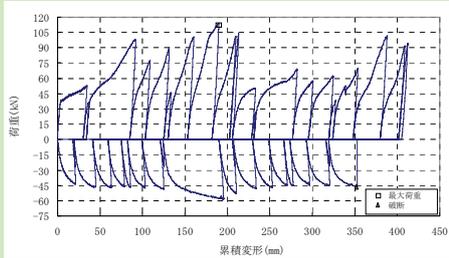
地震時の挙動特性分析のための応答評価技術

## 【課題】

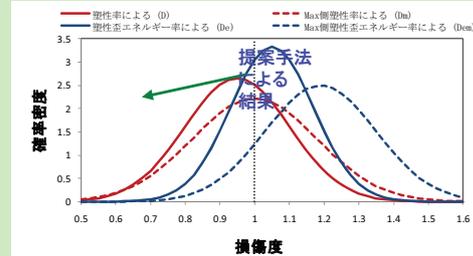
地震荷重下での構造物の弾塑性応答に対応した損傷評価手法の確立(損傷判定)

## 【アプローチ】

実験データの分析にもとづく応答の方向性(正・負)を考慮した損傷評価手法の提案



荷重変形関係が正側と負側で非対称となる場合、既存評価手法では確度が不十分



正側と負側の最大荷重時で評価することで安全側の評価となることを確認

## 【成果】

・実験結果とよく適合し、かつ、安全側の評価となる損傷評価手法を提案。

## 【今後の方向性】

・実プラントシミュレーション結果への適用

# 構造応答モデルの高度化(2) 接合部連成モデル

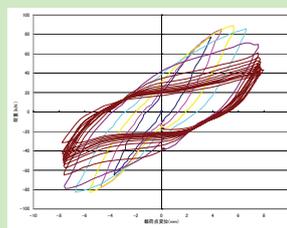
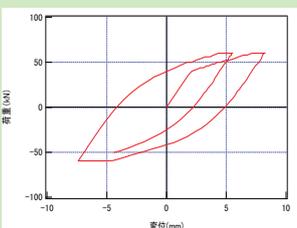
接合部相互作用を加味した弾塑性モデリング

## 【課題】

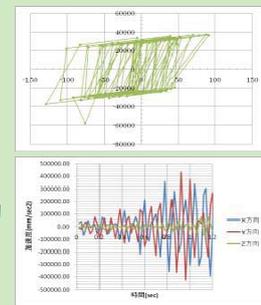
構造系全体応答と局所破損を同時に評価するためのモデリング & シミュレーション技術の開発

## 【アプローチ】

建屋—設備間の接合部に接合部連成効果を加味した物理モデルを導入



ハイブリッド実験データによる接合部連成モデルの検証



実プラントデータに接合部連成モデルを導入し、効果を確認

## 【成果】

・実プラントへの適用実験において接合部連成モデルの効果を確認(H18原子カシステム研究開発事業採択)

## 【今後の方向性】

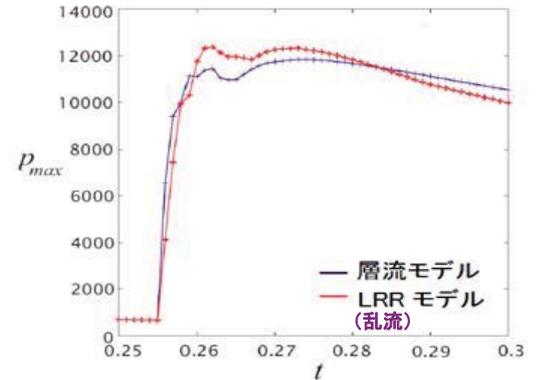
・接合部連成モデルの適用検証のためのデータ蓄積

# 構造応答モデルの高度化(3):

## 流体との連成効果の考慮

### 課題

- ・ スロッシングや気泡挙動など、地震時のプラント挙動に影響を及ぼす気液二相乱流の特性シミュレーション技術の開発。
- ・ 3次元仮想振動台に適した**安定で効率的な流体構造連成解析手法**の確立。



層流と乱流による壁面圧力の差

K.Uzawa, et al., SNA+MC2010 (2010), 19<sup>th</sup> Teraflop WS (2010).  
木野他, 電気学会誌130, 7(2010), C.Kino, et al., SNA+MC2010(2010).

### 22年度までの成果と現状

- ・ オープンソースコード**OpenFOAM**の導入整備を進め、解析精度や並列化効率を検討するとともに、エネルギー散逸や構造への**衝撃圧**に及ぼす**乱流効果**を明らかにした。
- ・ 流体解析と構造解析の**情報交換技術**を検討するとともに、流体コードが移動境界として構造データを受け取る連成手法を採用すべく、コード改造に着手した。

### 今後の方向性

- ・ 二相乱流解析機能と連成機能の開発整備による現実的な振動問題での流体効果の検討。

## 超大規模構造解析を可能にする数値計算アルゴリズムの改良

文部科学省次世代スーパーコンピュータ戦略プログラムにおいて、京速コンピュータ「京」を利用しつつ新たな高速計算アルゴリズムの開発を目指す

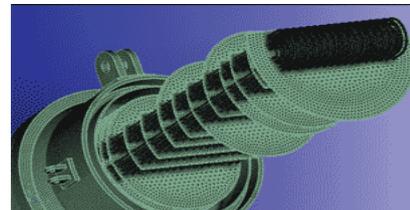
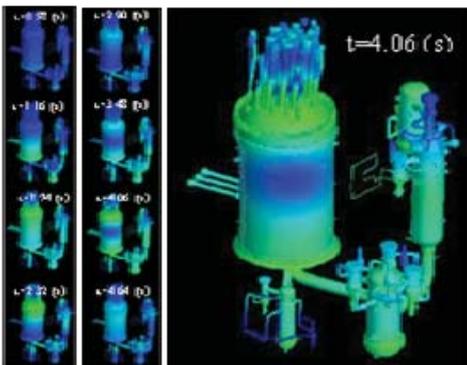
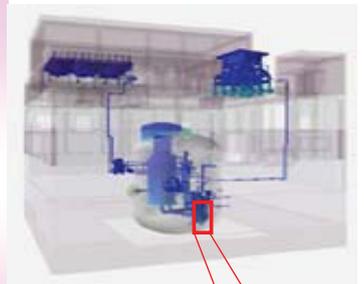
### 【現状】

Altix3700、ES、BX900  
 規模: 8000万自由度  
 実行ステップ: 200ステップ  
 (実時間の6秒に相当)  
 計算時間: 40時間



■次世代スパコンを用いた丸ごとシミュレーションの目標

- 規模: 100億自由度~
- 実行ステップ: 1000ステップ~
- 計算時間: ~24時間



個々の機器:アセンブリ構造物(約1,000部品)  
 (二次加圧水冷却器:約8,000万自由度)

## 解析結果の分析及びV&Vに係わる技術(1) 可視化技術

### グリッド環境向け並列分散可視化ツール

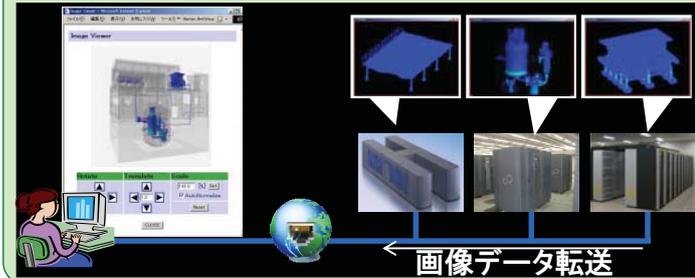
#### 【課題】

従来手法(端末1台で処理)では、グリッド環境のスパコンに分散した結果データの可視化が困難

- ①データサイズが大 → 1台では処理できない
- ②複数スパコンに分散 → 1台への転送に時間要

#### 【アプローチ】

- ①データ転送せず、各スパコンで個々に画像生成
- ②画像データのみ転送し、1枚の画像に重畳



#### 【成果】

・グリッド環境下で分散した仮想振動台の大規模データの可視化を可能とした

#### 【成果の活用】

・国家プロジェクト「ITBL計画」の完遂に貢献

### 時間-空間データを俯瞰的に観察するデータマップ

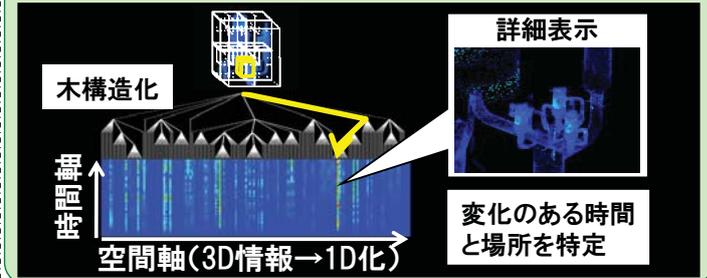
#### 【課題】

従来手法(一時刻・一部領域・一方向の画像)では想定外の物理量変化を見落とさず確認困難

- ①データ量が多い → 全情報の可視化が困難
- ②画像数が多い → ヒューマンエラーの誘発

#### 【アプローチ】

- ①3D空間情報を木構造化し、1D化
- ②時間方向に並べて、2D画像化



#### 【成果】

・仮想振動台の特徴解析において、背面にある応力の大きな領域、応力の大きな微小領域の抽出を可能とした

#### 【成果の活用】

・核融合研究や量子ビーム応用研究に活用

## 解析結果の分析及びV&Vに係わる技術(2) 計算結果の評価に関わる技術

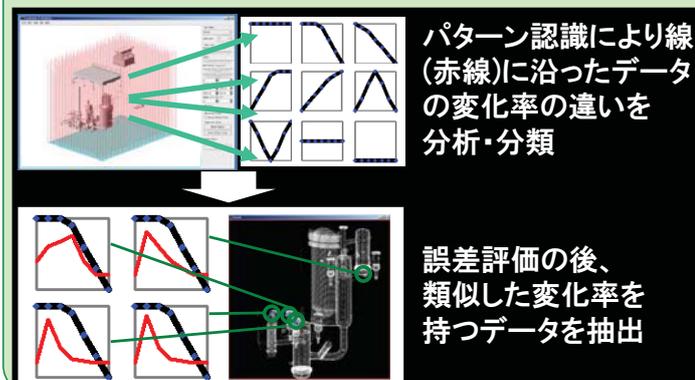
### 計算確度向上のためのシステム

#### 【課題】

シミュレーションに含まれる『不確かさ』の要因把握による計算確度(確かさの度合い)向上

#### 【アプローチ】

- ①物理量が急激に変化する分布を自動的に抽出
- ②分布に沿った誤差評価を実施



#### 【成果】

・メッシュ解像度に依存した誤差と物理量分布の関係を調査可能とした(SC07解析コンクール「Finalist」)

#### 【今後の方向性】

・種々の『不確かさ』の要因分析のためのシステム開発

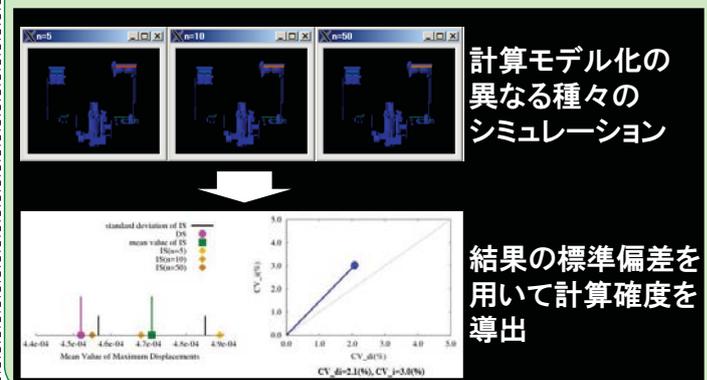
### 実現象推定のためのシステム

#### 【課題】

シミュレーションに含まれる『不確かさ』の定量化による実現象推定

#### 【アプローチ】

- ①推論法(演繹法・帰納法)を利用
- ②統計処理により計算確度導出



#### 【成果】

・比較実験不可能な規模のシミュレーションのV&V処理の可能性を見出した(SC08解析コンクール「Finalist」)

#### 【今後の方向性】

・種々の『不確かさ』の相関を分析可能なシステム開発

## おわりにー地震PSAへの活用可能性について

3次元仮想振動台は、大規模な構造物や施設の耐震性評価に広く活用できると期待できるが、特に原子力発電施設においては、残余のリスクの評価に用いられている地震PSAの手法の高度化やその結果を補完することに役立てうる。

- ・ 個別機器の現実的な耐力の評価が可能となる  
(耐力評価の精度向上やコスト縮減に貢献可能)
- ・ 多様な入力地震動に対する全ての評価対象機器について、一貫性のある応答解析が可能となり、機器ごとに異なる耐震余裕を俯瞰的に把握できる。
- ・ システム間の相互作用(複数機器で構成される設備の関係、建屋と機器の関係、B,Cクラスの機器の損傷、流体系と構造系の相互作用)などの影響を考慮した総合的な評価が可能となる
- ・ PSAの技術的な課題となっている損傷の相関などにも貢献できる

16

## まとめ

- ・ 3次元仮想振動台の開発を進めており、これまでに組立構造解析の手法により1億自由度規模の解析が可能なシステムを構築した。
- ・ 機器の限界耐力や施設全体の地震応答の解析を適切な精度、計算時間で実施できるよう構造応答モデル、流体連成モデル、計算アルゴリズム、解析結果分析機能、V&V支援機能等の開発を進めている。
- ・ 開発済みの機能については、機構内施設への適用等により検証・活用を進めている。
- ・ 今後、さらに実用性を高めるためのモデルや計算技術の高度化にあたっては、大学や国内研究機関、産業界等との連携を一層強化していく必要がある。

17