

建屋・炉容器・機器解析  
モデリング & シミュレーションの現状と課題

吉村 忍  
東京大学大学院工学系研究科

# 建屋・炉容器・機器解析モデリング&シミュレーションの現状と課題

吉村 忍、河合浩志、杉本振一郎、室谷浩平、南さつき、片岡俊二

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,

小林 敬、渡辺 愛

東京電力株式会社

## 1. マルチスケール構造モデリング

本研究で扱う対象構造物の特徴として、①波動伝播特性の大きく異なる地殻、表層地盤、建屋、機器類の連成構造であること、②中心にある機器類（炉構造）が多種多様な接合を内包する巨大で複雑なアセンブリ構造であること、③各構造要素に特有の非線形・経年変化・損傷挙動および熱流体的連成挙動があること、が挙げられる。そこで、本研究においては、はじめ3年間かけて、既存構成式・モデルの調査および現在有している技術やその実装形態であるソフトウェアの融合開発を行い、上述の特徴を考慮したマルチスケール構造モデリングを完成させる。本構造モデリングの実装にあたっては、吉村（東京大学）らが開発し公開してきたオープンソースの大規模並列有限要素法解析システム ADVENTURE を基盤として用いる。特に地盤や鉄筋コンクリート製の建屋の非線形挙動を表すために必要不可欠な技術を高性能・大規模計算機環境へ組み込む。炉構造内部については、材料レベルの非線形性ととも、経年効果についてもデータベース等を基にその影響を考慮し、さらに、経年化構造・材料と熱-流体-炉特性との相互作用も考慮するための構造モデリングを行う。

## 2. マルチスケール連成モデリング

1. における構造モデリングと連携し、原子力発電所周辺規模のマクロスケールと原子炉内現象のメゾおよびミクロスケールの二つのマルチスケール連成解析技術の研究・開発を実施する。ひとつは、原子炉内現象のメゾおよびミクロスケールをつかさどる炉構造内部の経年化構造・材料-流体-熱-炉特性等の強い相互作用のモデリングである。もうひとつは、原子力発電所周辺規模のマクロスケールを担う波動伝播特性の大きく異なる地殻-表層地盤-建屋-機器の構造間の強い動的相互作用のモデリングであり、機器に伝わる地震力を精緻に評価する。これらの2種の相互作用モデルはさらに弱連成的に結合させる。

具体的には、このような2種のマルチスケール連成解析を実現するために、分離反復解法に基づくデータ受け渡しのためのカプラーを新規開発する。

## 3. 現在進行中の開発の概要

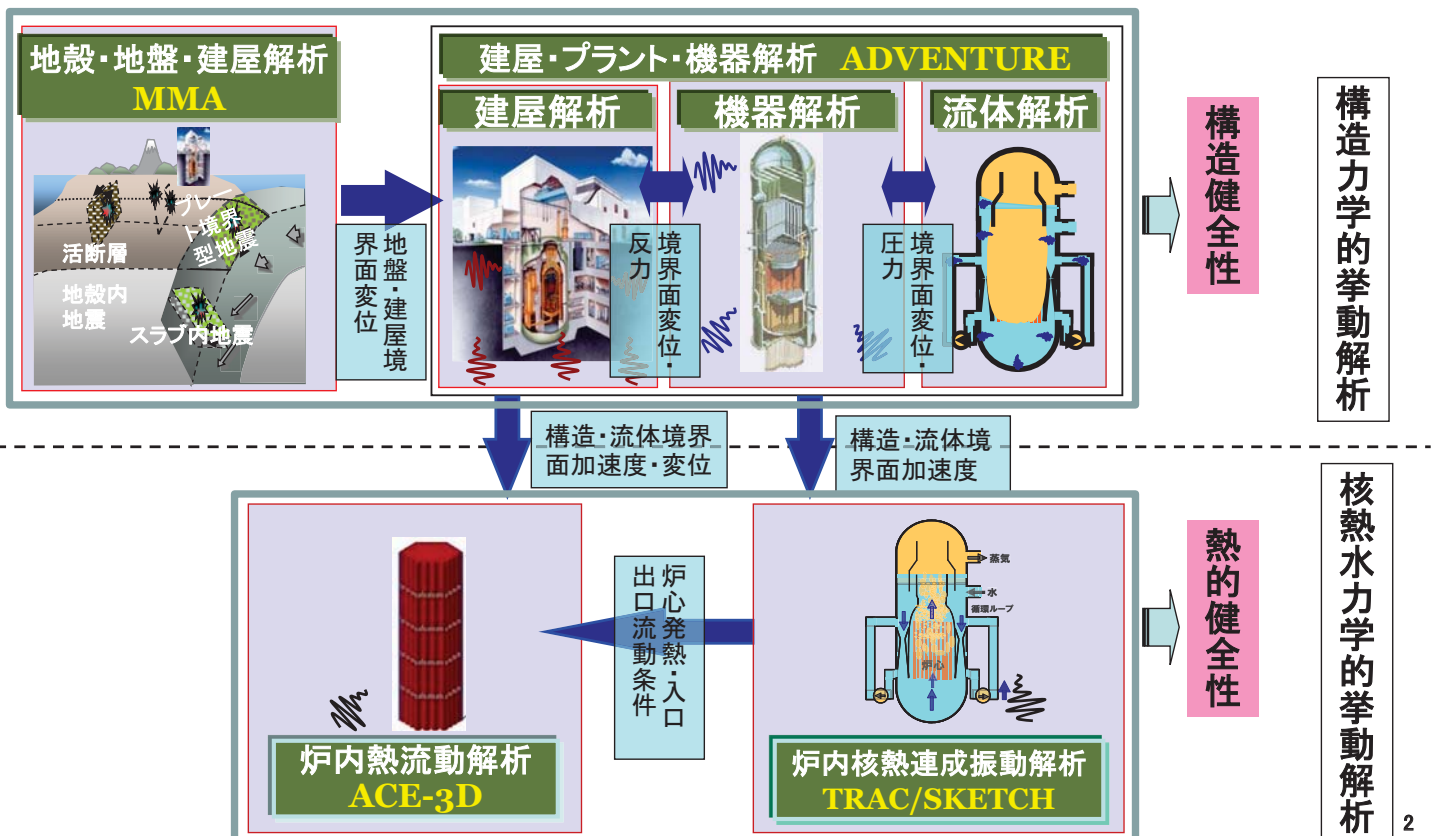
これまでに、マルチスケール構造モデリングに関して地殻、表層地盤、建屋（鉄筋コンクリート）、経年化構造・機器（金属）に関する既存構成式・モデルの調査を行い、既存最先端技術の実態を把握し、本研究開発で取り組むべき技術を抽出した。この調査を基に、地殻-表層地盤-原子力建屋-構造機器および機器内の挙動を支配する構造・材料-流体-熱-炉特性等のマルチスケール・マルチフィジクス連成解析において、それぞれの解析で用いる個別ソフトウェアの機能強化を行っている。建屋-プラント-機器の地震応答解析を行う ADVENTURE コードについては、各種非弾性解析機能およびアセンブリ構造のための MPC 機能を ADVENTURE\_Solid 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。次世代スパコン向けに数10万自由度規模のメッシュ及び階層型領域分割データを構築するための ADVENTURE\_Metis Ver.2 も開発中であり、これらに各種境界条件を付与するツール ADVENTURE\_BCtool Ver.2 も開発中である。さらに流体構造連成解析を実現するためのマルチフィジクスカプラー ADVENTURE\_Coupler も開発中である。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。

# 建屋・炉容器・機器解析モデリング&シミュレーションの現状と課題

吉村 忍・河合浩志・杉本振一郎・室谷浩平・  
南さつき・片岡俊二  
東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

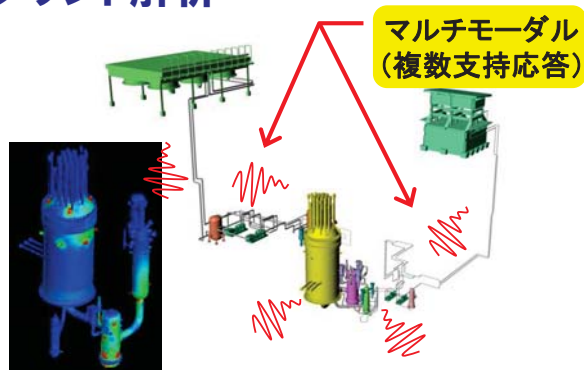
小林 敬・渡辺 愛  
東京電力(株)

## 地震耐力予測シミュレーションの全体像

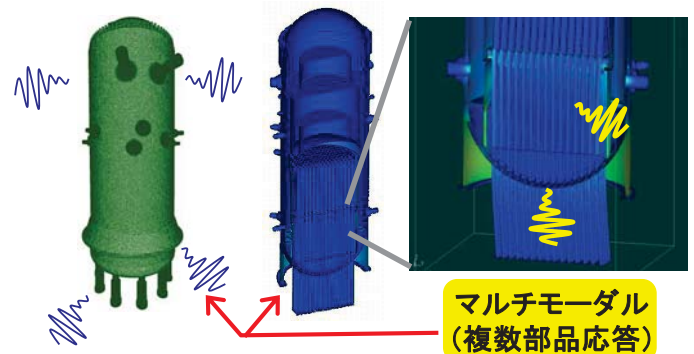


# 建屋・プラント・機器モデリングとシミュレーション

## プラント解析



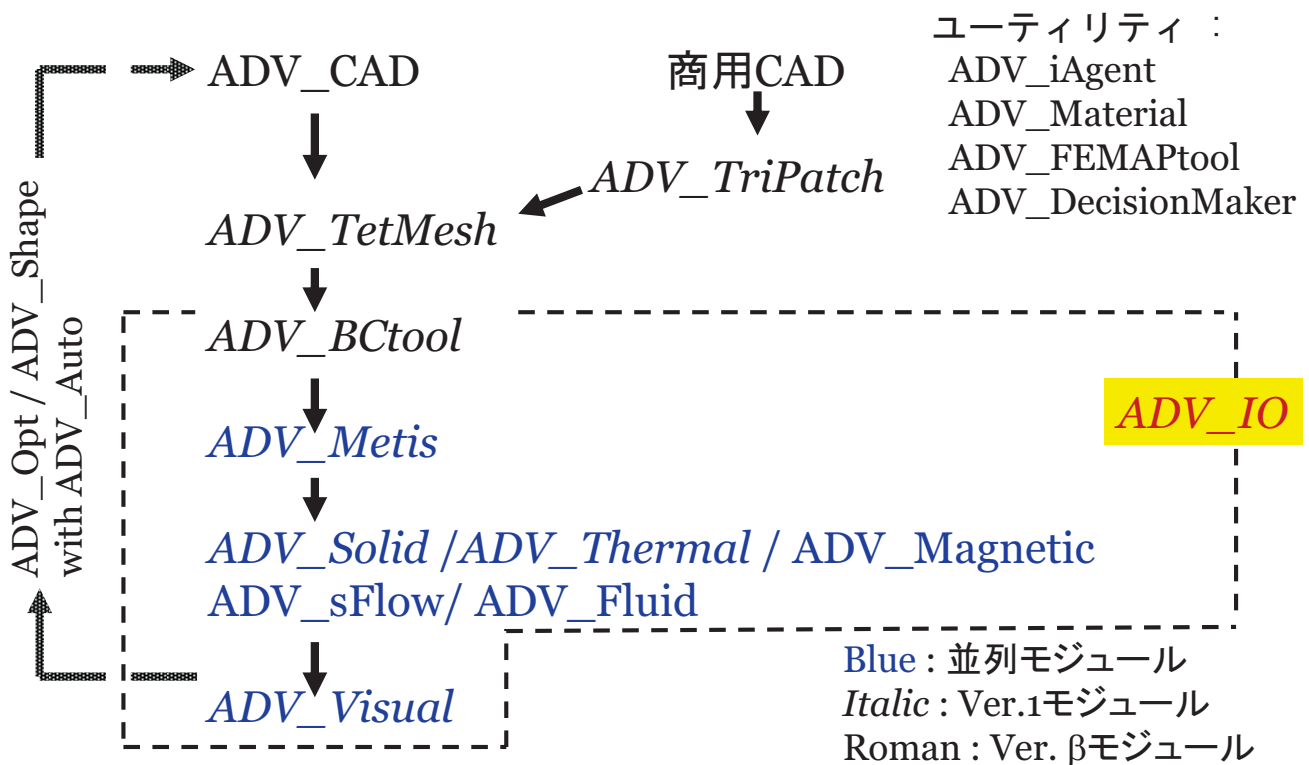
## 冷却材を考慮した機器振動解析



- (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)

## ADVENTUREシステムの特徴

- (1) 数百～数億自由度メッシュによる丸ごと解析
- (2) 1000プロセッサの超並列計算機環境でも90%を超える高い並列効率
- (3) 優れた移植性：単一プロセッサ, PCクラスター, 超並列計算機(ESなど)  
2005.3.10 Windows版公開(登録ユーザー数2,857人)
- (4) ライセンスフリー / オープンソース：登録ユーザー数6,384人  
ダウンロードされたモジュール数33,474本  
商用バージョン ADVENTUREcluster(アライドエンジニアリング)  
⇒ IEEE/ACM SC2006 Gordon Bell Award finalist  
2008年日本機械学会賞(技術)  
2009年文部科学大臣表彰・科学技術賞
- (5) 拡張性と保守性：モジュール構造とIOの標準化、Commodity技術



## ADVENTURE関連の主な研究開発項目

### (1) ADVENTURE\_Solid Ver.2開発

- ・マルチコア／京速コンピュータ向け性能チューニング
- ・材料非線形解析機能(金属材料、コンクリート・地盤)
- ・大規模アセンブリ構造対応(MPC・要素混在)

### (2) ADVENTURE\_Metis Ver.2開発

- ・数100億自由度のメッシュ／階層型領域分割データ作成

### (3) ADVENTURE\_Coupler Ver.1開発

- ・双方向連成解析機能(分離反復解法)

### (4) ADVENTURE\_BCtool Ver.2開発

- ・解析モデル作成支援(MPC、連成等)

# 弾塑性解析機能

## ■ 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)

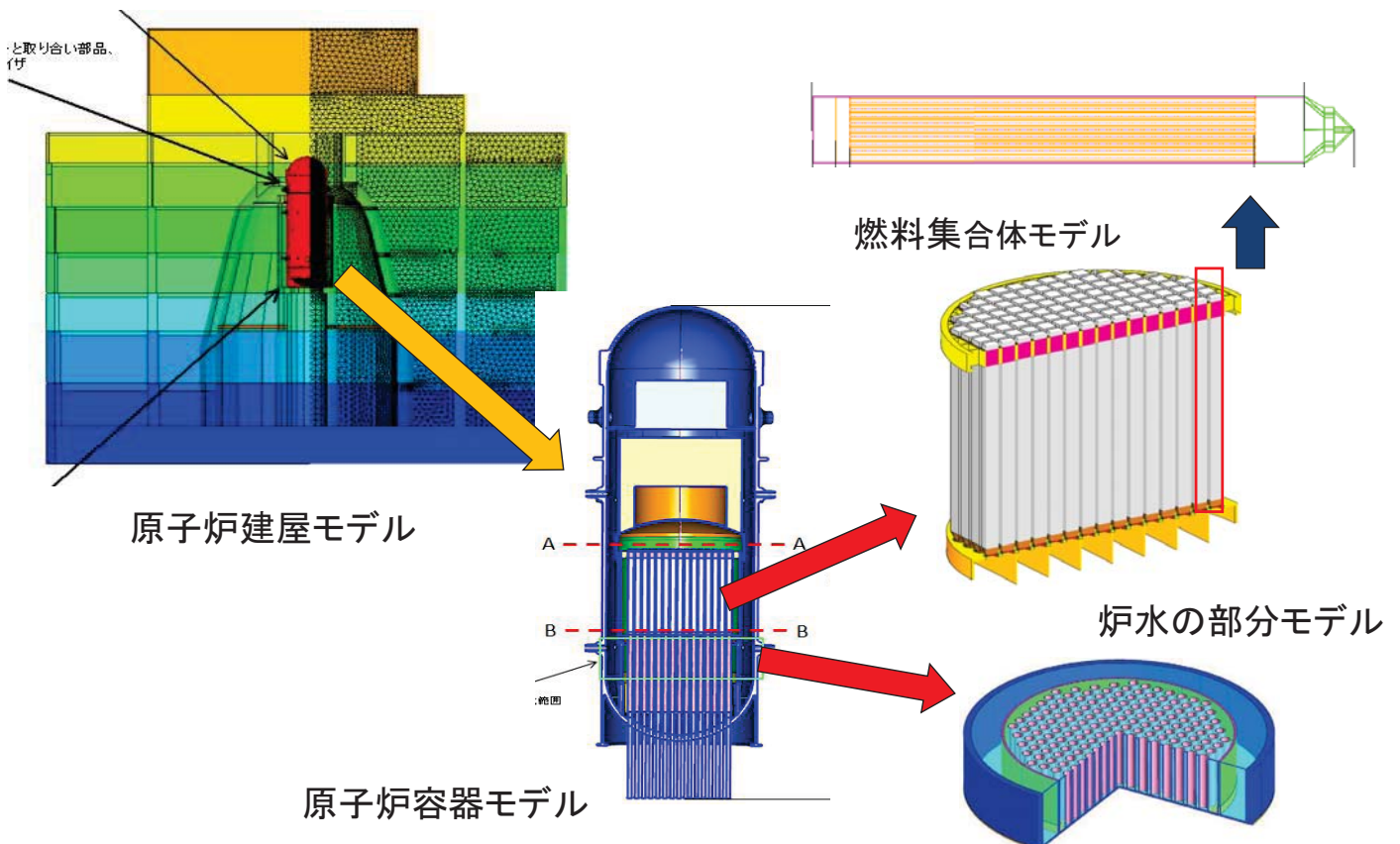
## ■ 増分ステップ制御

弾性・塑性間の遷移

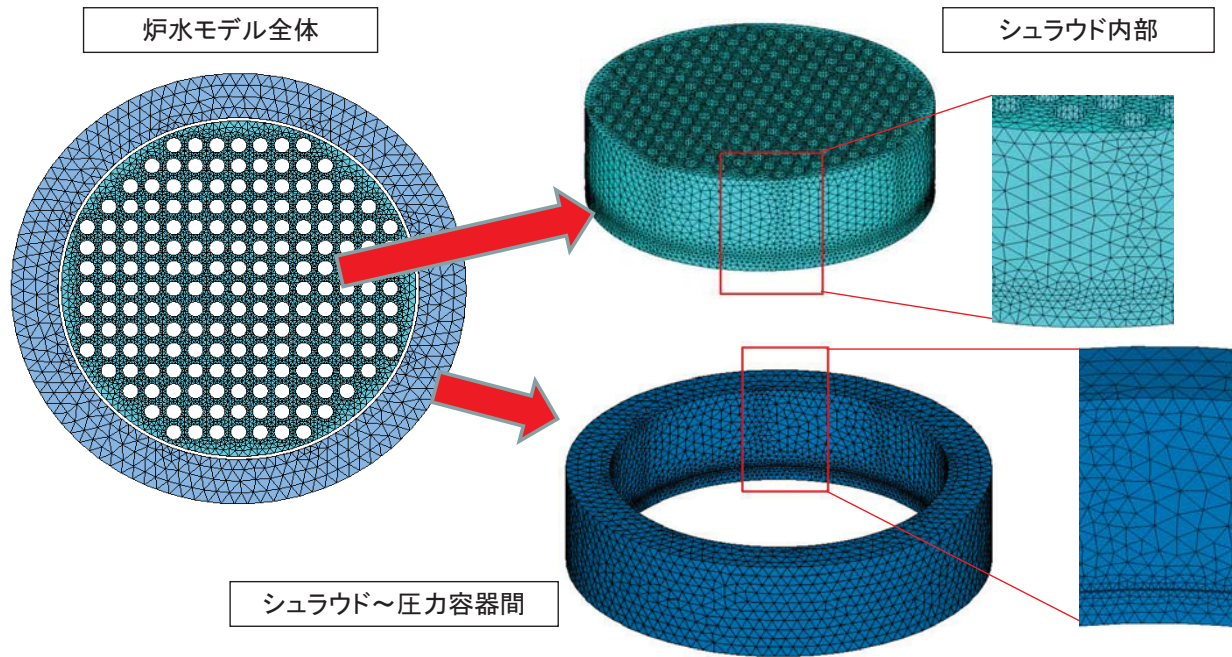
最大塑性ひずみによる制御

除荷発生時の制御

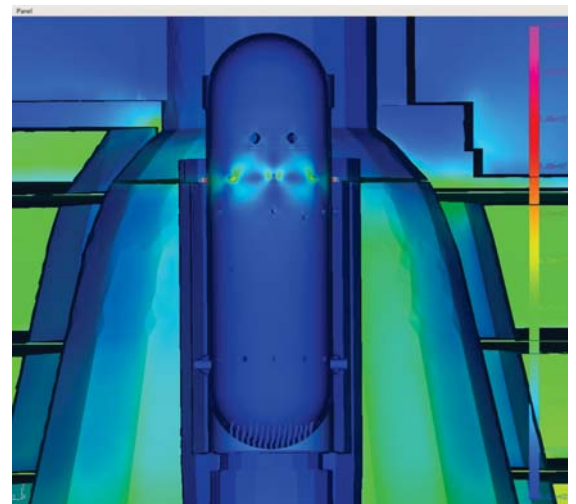
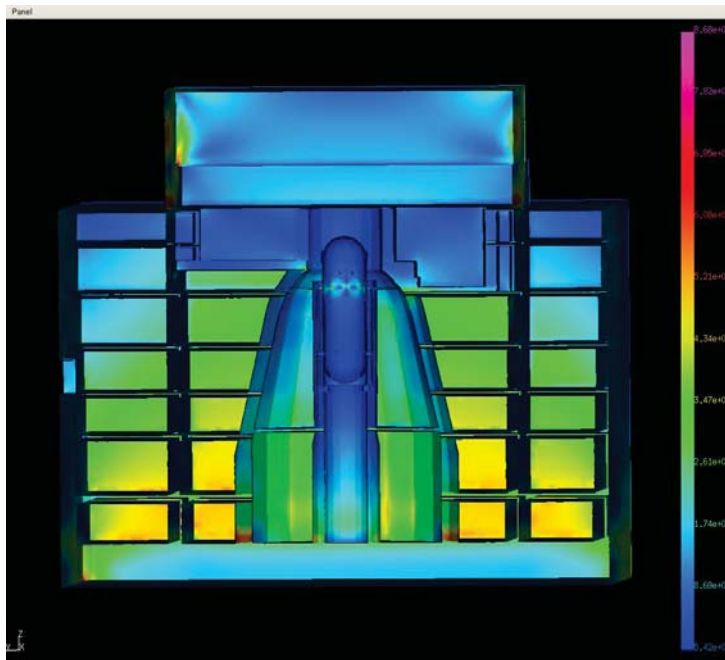
# 建屋・炉容器・炉水・燃料集合体モデル



# 炉水モデル



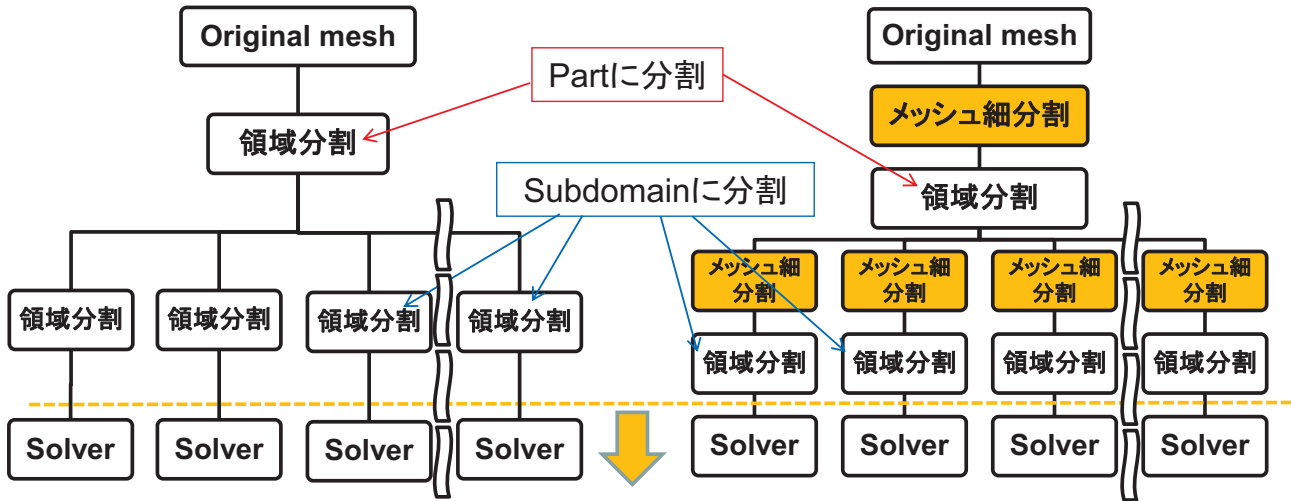
# 建屋・炉容器結合モデルの予備解析例(体積力付加)



# ADVENTURE\_Metis Ver.2 (数100億DOFモデル)

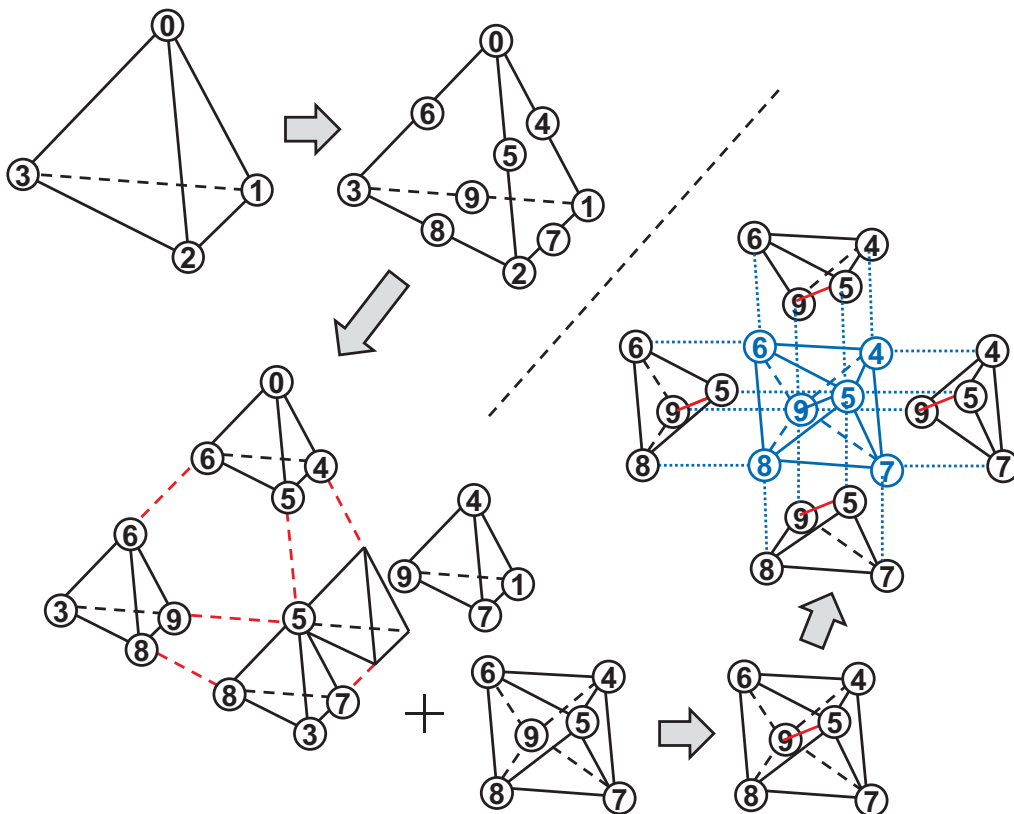
## ADVENTURE\_Metis Ver.1

## ADVENTURE\_Metis Ver.2

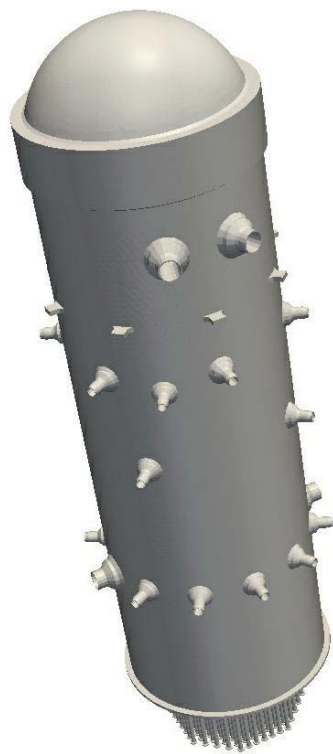


- ADVENTURE\_Solid
- ADVENTURE\_Magneticなど

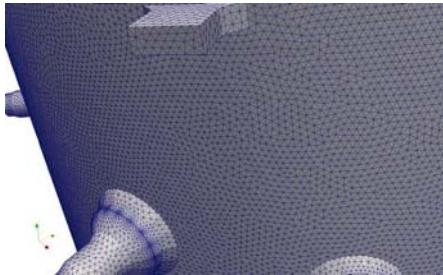


# 四面体メッシュの8分割(メッシュ細分割)



## 100億自由度の階層型領域分割メッシュ



Original mesh

Original mesh 1000万頂点 (2億DOF)	メッシュ細分割1回 6800万頂点 (14億DOF)
	
	メッシュ細分割2回 4億8000万頂点 (109億DOF)
	

## 100億自由度の階層型領域分割メッシュ

計算機環境:

- Heian: CPU 2.66GHz/24Core      Memory 128GB

Model	Machine	頂点数 (2次要素のDOF)	parts	subdomains	Total time	Total file size
BWR (メッシュ細分割 2回)	Heian 20omp	4.8億 (109億)	4096	82万 (4096x200)	9h	668GB

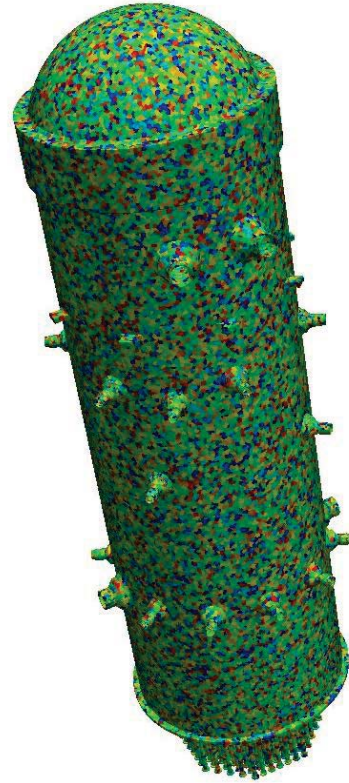
階層型領域分割された100億自由度のメッシュを  
**1台の計算機で9時間**  
 で作成可能。

# 大規模解析のための階層型領域分割

4096part分割

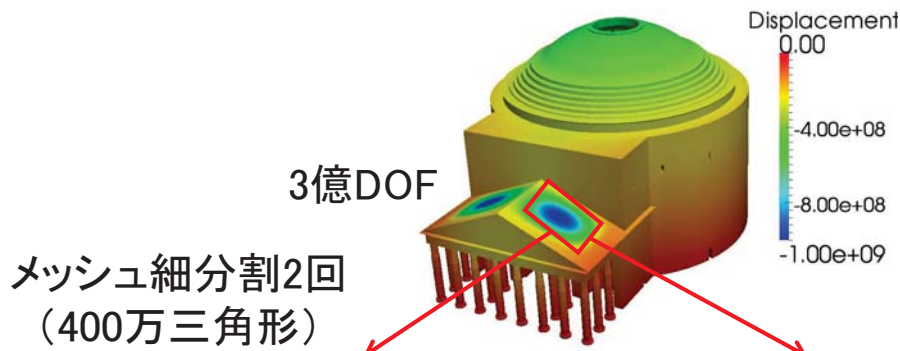


4096x200subdomain分割



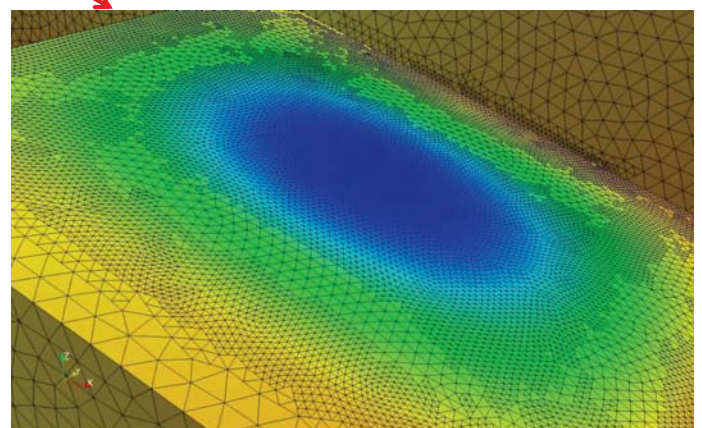
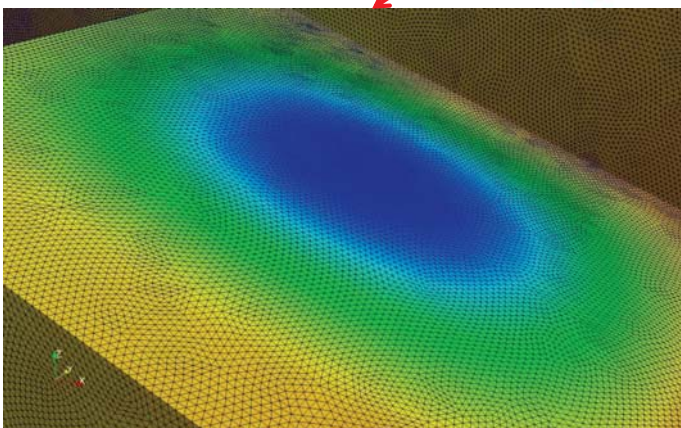
# 大規模解析結果のアダプティブ可視化

地面を完全拘束し、自重によるZ方向の変位を表示



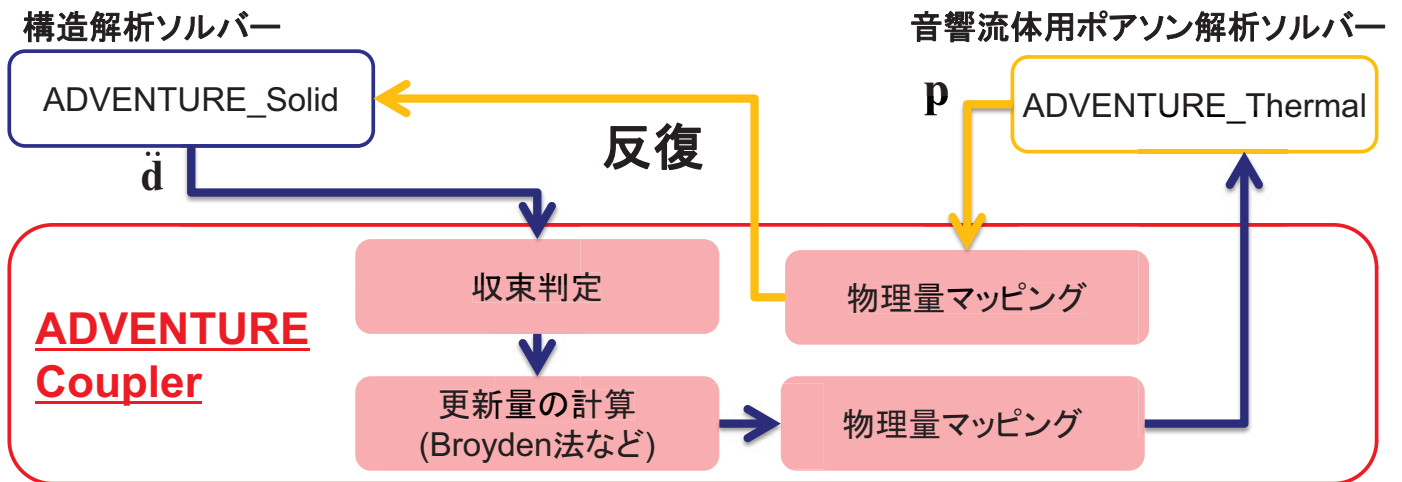
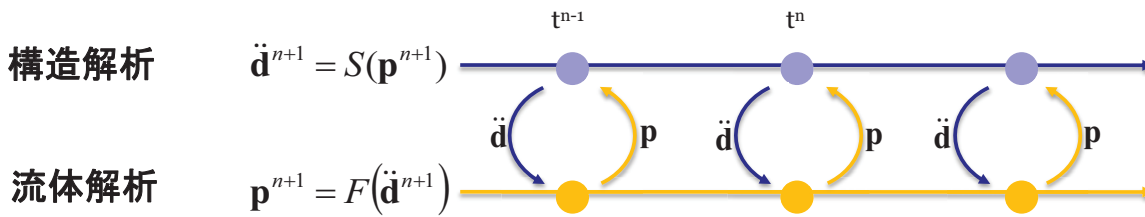
メッシュ細分割のデータ構造を用いれば、**同じ品質の表示を1/8のデータ量で実現**

**アダプティブ可視化 (50万三角形)**



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

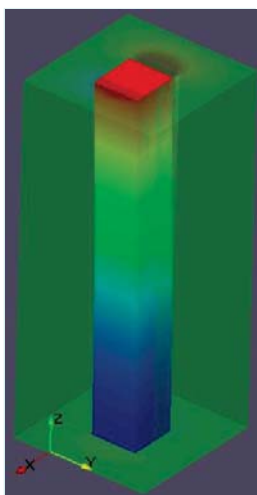
- 分離反復型解法による汎用的な高精度連成解析手法の構築



# ロバストで高速な分離反復アルゴリズムの探索

- 準ニュートン法(Broyden法)による境界自由度の更新
- 収束安定性を悪化させる高い流体密度(付加質量効果大)の場合にも、ロバストかつ高速に収束

液中角棒のステップ応答



付加質量小

↑

↓

付加質量大

収束までの平均反復回数

流体密度	アルゴリズム		
	GS	AT	BR
2,000	33.75	10.4	7.45
4,000	×	16	10.8
16,000	×	×	15
64,000	×	×	20.65

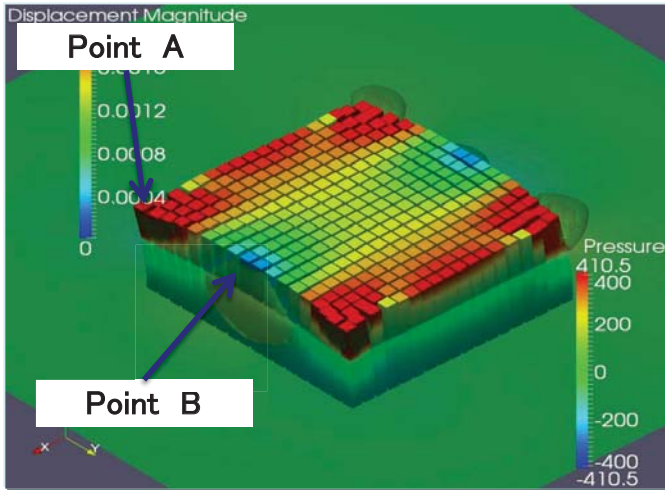
GS : Gauss Seidel法

AT : Aitken補外

BR : Broyden法

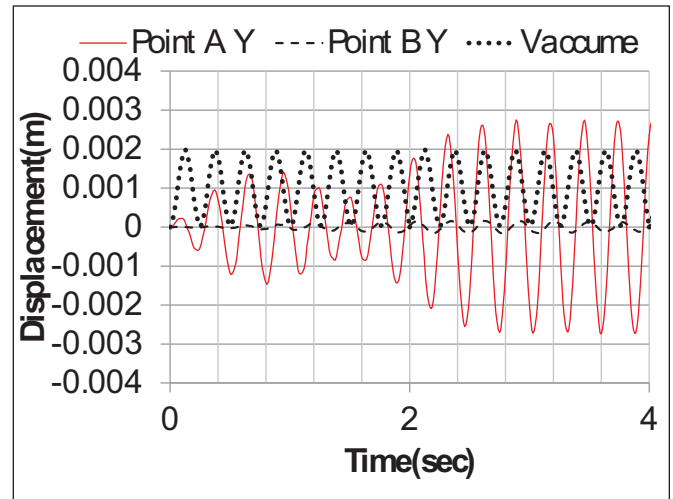
## ■ 並列連成解析例：流体中の矩形断面棒群の振動

- 矩形断面棒群のステップ応答解析
  - 構造300万自由度，流体160万自由度
  - 5node 20 coreのPCクラスタによる解析
- 棒間の相互作用による複雑な応答



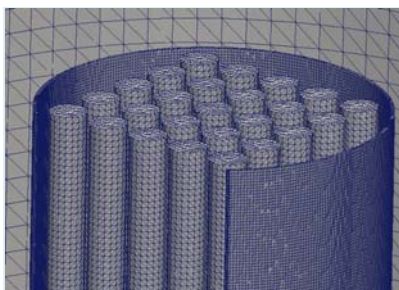
棒群の変形モードと圧力分布

点A, Bの変位時刻歴

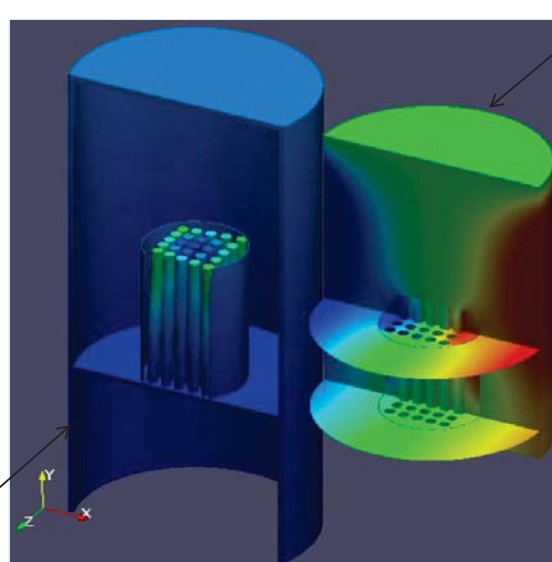


## ■ 並列マルチフィジクスシミュレーション

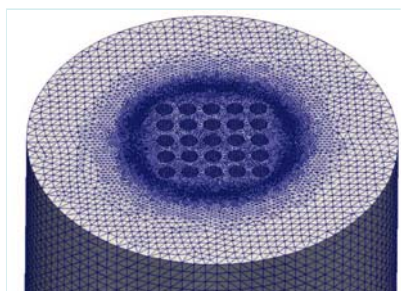
- 簡易圧力容器モデルの流体構造連成解析
  - 8 node 32 coreのPCクラスタによる解析
  - 大規模複雑形状でも収束解を得ることができた。



800万DOF



流体モデル  
650万DOF



構造領域・変位応答

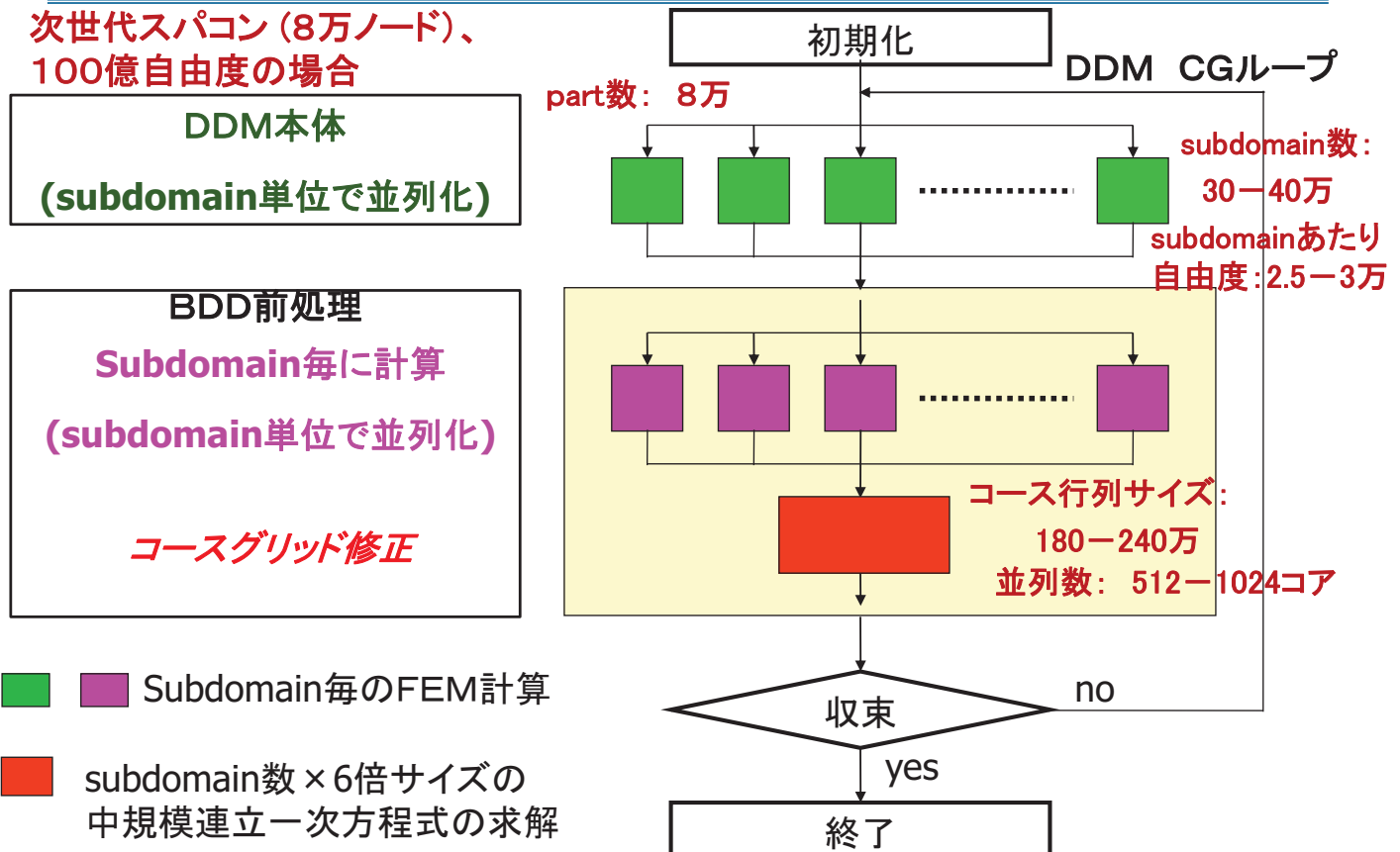
# 次世代スパコン向けチューニングロードマップと実績

ADVENTURE\_Solid(BDD前処理付き反復型領域分割法)の場合

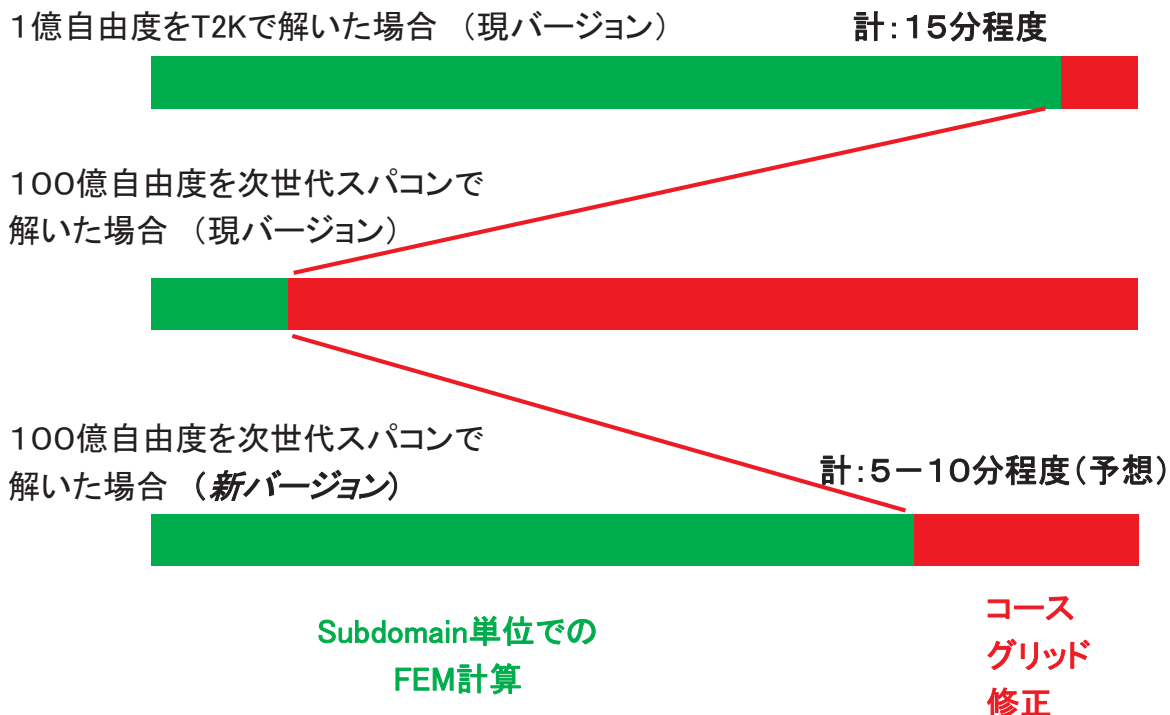
	2008	2010	2012
1千万自由度	PC一台 数十分 →	PCクラスタ 数分 →	数十秒
1億自由度	PC一台 1時間以内 →	PCクラスタ 数十分 →	数分
		大規模クラスタ 数分 →	数十秒
10億自由度		PCクラスタ 数時間 →	1時間
		大規模クラスタ 一時間以内 →	数十分
100億自由度		大規模PCクラスタ 一時間以内	ペタコン 数分

## BDD前処理付き反復型領域分割法の処理の流れ

次世代スパコン(8万ノード)、  
100億自由度の場合



## BDD前処理コースグリッド修正部分の高速化



## まとめと次年度の計画

### 2010年度

- (1) ADVENTURE Ver.2 (Solid, BCtool, Metis, Coupler)の開発と基本機能の検証中
- (2) 次世代スパコン向けチューニングをADVENTURE\_Solidに対して実施
- (3) 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

### 2011年度

- (1) ADVENTURE\_Solid向け次世代スパコン向けチューニング完了
- (2) ADVENTURE\_Thermal, Magnetic向け次世代スパコン向けチューニングを実施
- (3) 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
- (4) 3種類の想定シナリオのシミュレーション評価を実施