


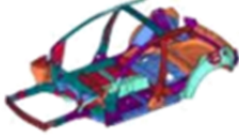

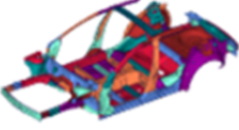

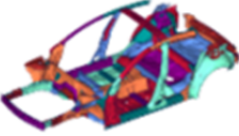
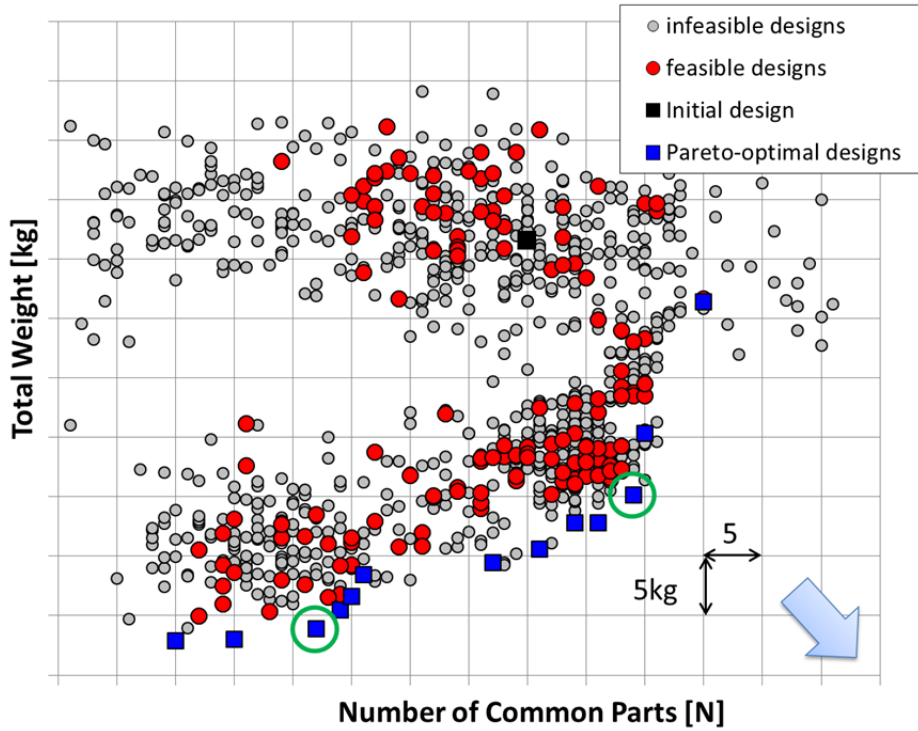
	車種	車体構造部品の板厚 (設計変数)
SUV-car		
Large-Car		
small-Car		

Fig. 4-23 Design parameters

第 27 世代(第 27 反復計算)まで多目的設計最適化計算を行った結果を Fig.4-24 に示す。縦軸が 3 車種の合計重量で 1 目盛が 5kg を表し、横軸が共通部品点数で 1 目盛が 5 個を表す。図中の黒色の四角はマツダで設計された初期設計、灰色の丸は最適化の過程で得られた解のうち制約条件を満足しない設計、赤色の丸はすべての制約条件を満足する実行可能解、青色の四角はすべての制約条件を満足するパレート最適解である。

この設計最適化問題は制約条件が多く厳しい条件であるため、最適化の過程で得られた設計のうち過半数が制約条件を満足しない解であったが、初期設計よりも優れた設計が多数発見され、車両構造重量最小化と共通部品点数最大化の間のトレードオフ関係が明らかになった。特に、重量で約 30kg、共通部品点数にして、45 個の空間にトレードオフ面があり、その面内の 2 点(図中緑○)で、共通部品点数を増やした場合、急激な重量増加が発生してしまう点や、反対に重量増加を伴わないトレードオフ面が明らかになった。これらの情報は、商品開発時のどの設計空間で軽量化と部品共通化のバランスを取るのかの判断に活用できる可能性がある。また、Fig.4-25、4-26 に示すように iSPM などを使って設計パラメータ値の分布などを可視化・分析することにより、各設計パラメータの各目的関数に対する寄与などを把握することができた。例えば、Fig.4-25 は、Fig.4-24 を車種ごとに可視化したものであり、縦軸横軸は、Fig.4-24 と同じである。各赤■が SUV-car、赤●が Large-car、赤◆が Small-car のトレードオフ面であり、SUV、Small-car は、非線形な特性を持っているのに対して、Large-car は線形な特性をもったトレードオフ面であることが分かる。続いて、Fig.4-26 のように、目的関数と各設計変数を詳細に可視化すると、トレードオフ面に対して、共通化できる部品(目的関数行において、ある板厚に収束している設計変数)として、DV001 や 004 があげられ、反対に、非共通化部品(目的関数行において、板厚が収束していない設計変数)として、DV002、003、005 などがわかり、設計者へ直感的にわかりやすい設計指針を与えてくれるものと期待される。

これらの得られた知見により、大幅な開発・製造コストの削減と、重量を削減したことによる燃費の向上(CO2 排出量の削減)が見込まれている。これらの結果は日刊工業新聞 2015 年 2 月 16 日号[11]にも掲載された。



マツダ(株)の利用合意を受けているので、他への転載、転用を一切禁ずる。

Fig.4-24 Design optimization result of simultaneous design optimization of multiple car models

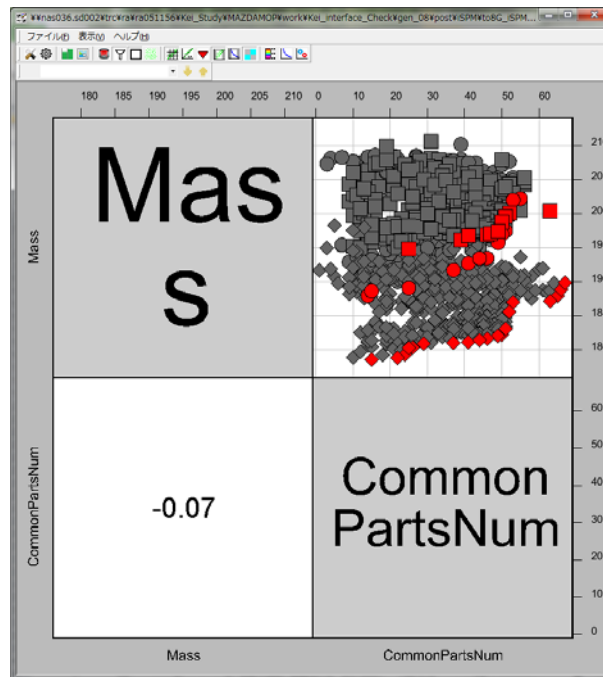


Fig.4-25 Visualization of objective functions using iSPM Red points are Pareto-optimal designs (■:SUV, ●:CDW, ◆:C5H) Other feasible designs are shown by gray points.

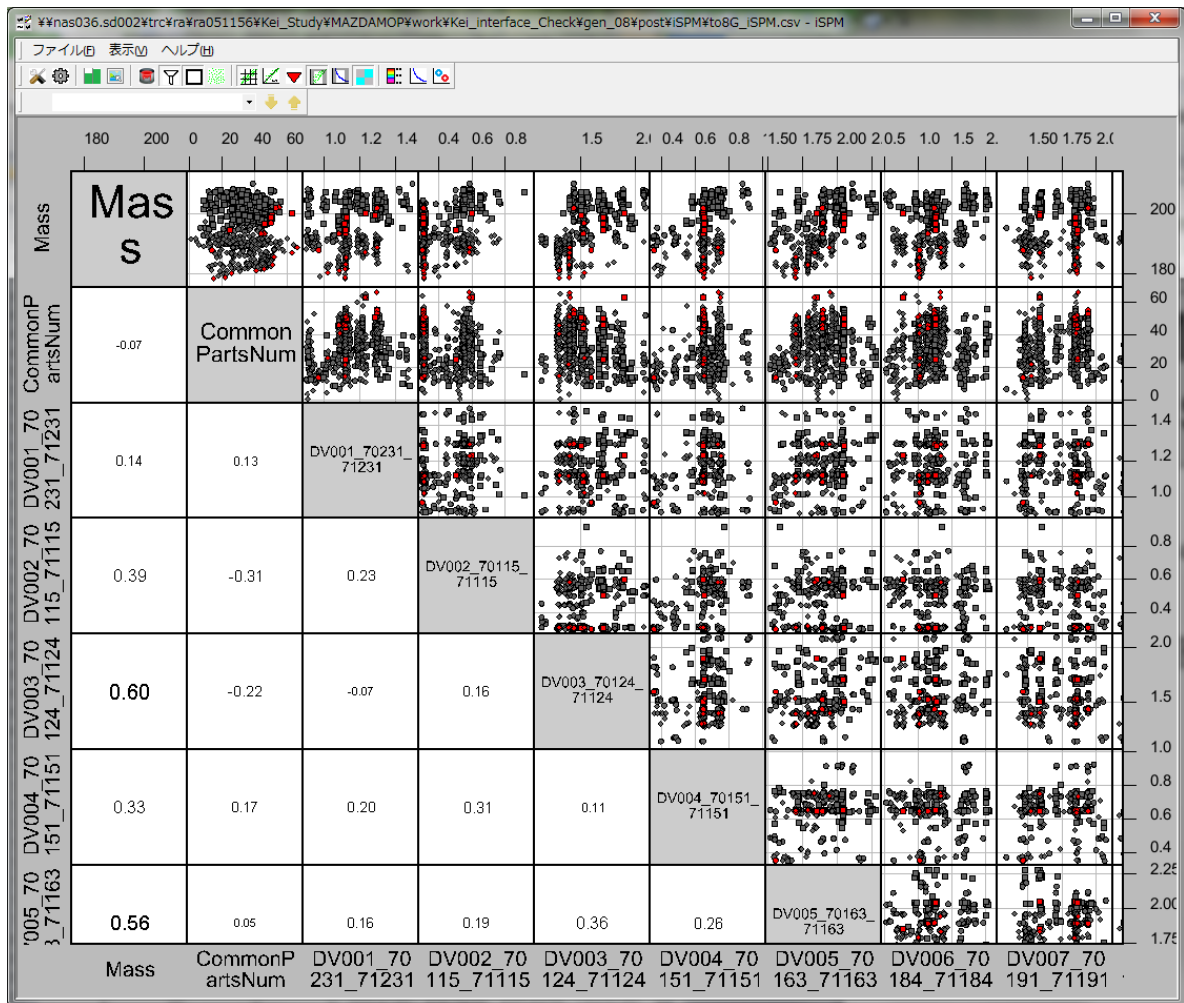


Fig.4-26 Visualization of objective functions and design parameters using iSPM Red points are Pareto-optimal designs (■:SUV,●:CDW, ◆:C5H) Other feasible designs are shown by gray points.

(4-4-2) 超電導リニアの空力音響多目的設計探査

超電導リニアは、車両に搭載した超電導磁石と地上に設置したコイルの間に働く磁力によって浮上・推進し、500km/h 以上での走行も可能な次世代高速鉄道である。超電導リニアは車輪がなく、流体騒音は車両速度のほぼ6乗に比例することから、流体騒音が車内騒音の発生源の1つとなる。よって、超電導リニアの車両設計においては車両形状の空力音響性能向上が空気抵抗の最小化とともに大事な設計指標となる。

しかしながら、空力音響性能評価に必要なシミュレーションは計算コストが高いため空力音響性能と空気抵抗の多目的設計探査はこれまで実施されてこなかった。そこで、京とCheetahを用いて、高速鉄道車両の空力音響多目的設計探査を実施した。

設計目的は

- (1)車体表面上のある領域 A 内の音圧レベル最小化
- (2)車体表面上のある領域 B 内の音圧レベル最小化
- (3)車体空力抵抗最小化

の3つである。空力音響性能および空気抵抗の性能評価には研究開発課題1で開発されたLANS3Dを用いた。領域分割を行い24ノードで並列計算を行った。1つのシミュレーションに要した

計算時間は約7時間である。多目的進化計算の1世代あたりの設計数および世代数はそれぞれ 120、50 世代とした。よって、2880 ノード並列で 350 時間の計算時間を要した。要した計算時間は約 100 万 ノード時間積である。

Fig.4-27 に多目的設計最適化により得られた設計の目的関数値を iSPM を用いて散布図行列の形で示す。○が劣解(パレート最適ではない解)、●が非劣解(パレート最適解)である。いずれの点も空気抵抗の値で色づけしており、赤から青に向かって抵抗が小さくなる。この図から、各目的関数の間のトレードオフを見ることができる。また、最終的には現行車両よりもすべての目的関数値において優れた解を複数得ることに成功している。Fig.4-28 は設計パラメータ値の分布を iSPM を使って可視化した例であり、このような可視化を行うことで各設計パラメータの目的関数に対する寄与などを把握することが可能になる。ここで得られた知見により、車内騒音を低減しつつ、0.1%程度の空気抵抗を削減できることが期待され、これにより大幅な運航経費の削減が見込まれる。以上のことから、高速鉄道車両の空力音響設計問題においても京コンピュータを用いた多目的設計探索の有用性が示された。これらの結果は国際フロンティア産業メッセ 2015[12]で展示・公開され大きな注目を集めた。

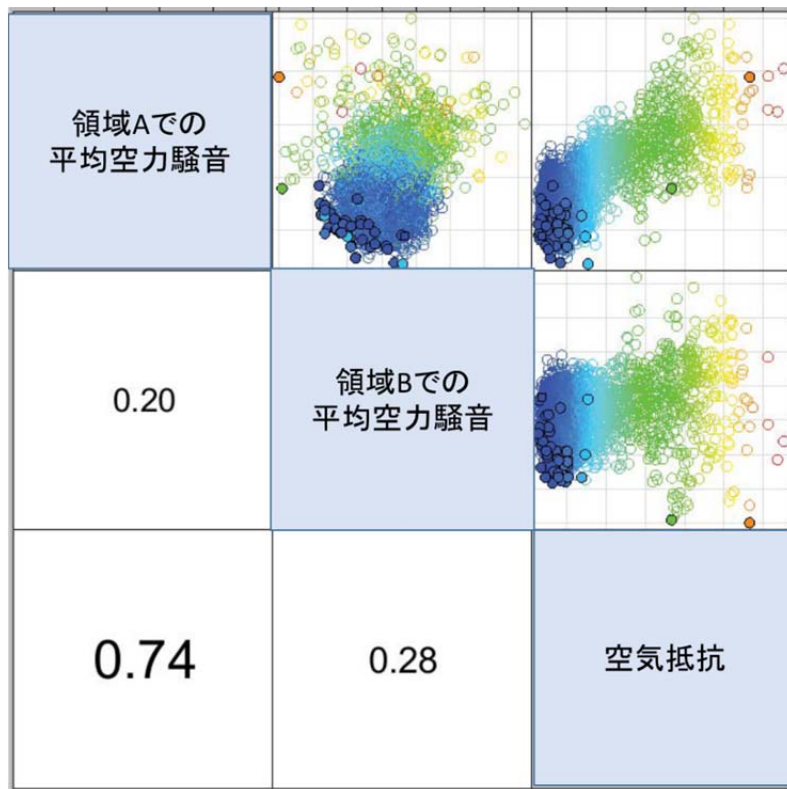


Fig.4-27 Result of multiobjective design optimization of high-speed rail vehicle (objective functions)

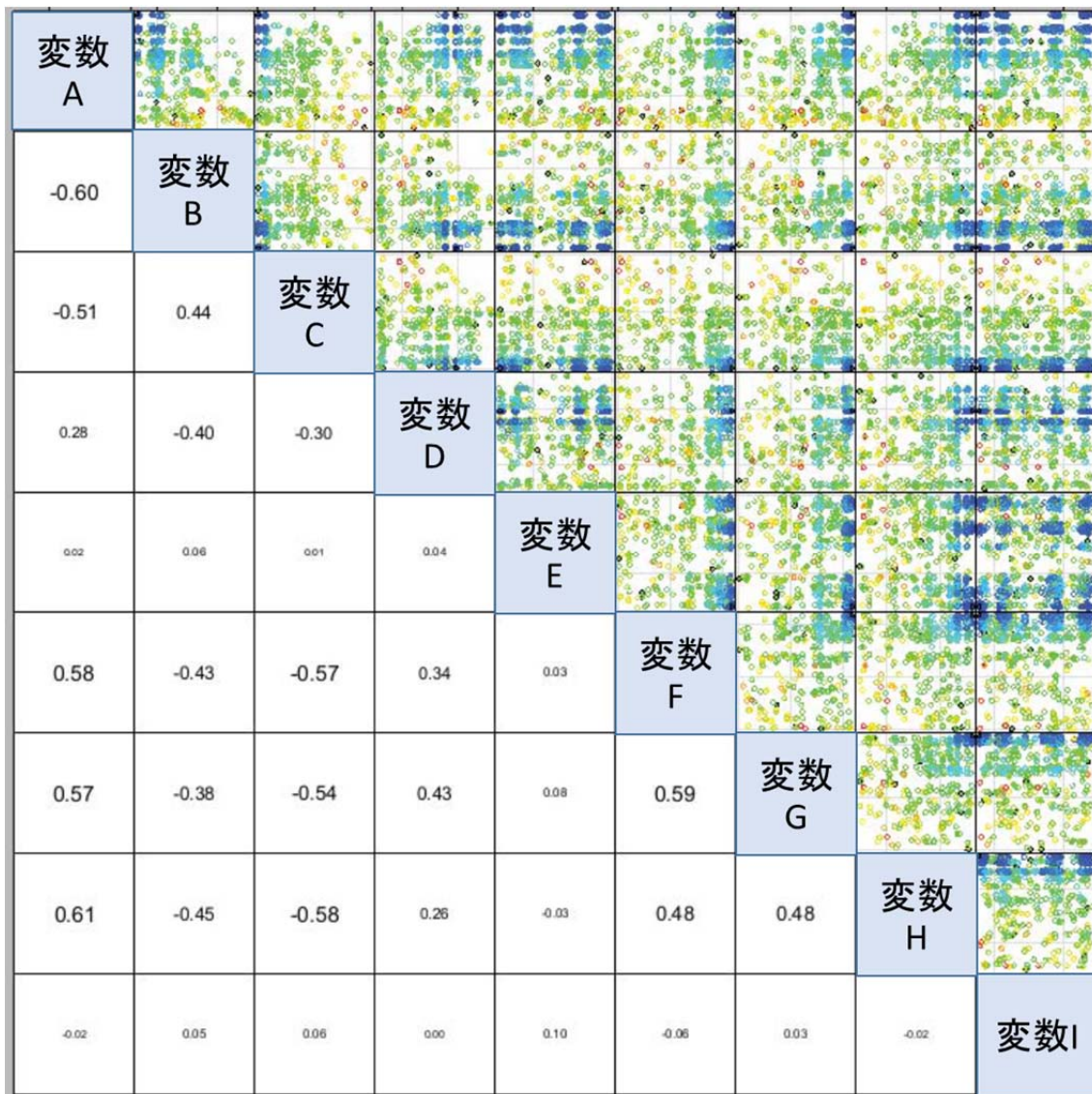


Fig.4-28 Result of multiobjective design optimization of high-speed rail vehicle (design variables)

(4-4-3) 車両空力性能向上のためのタイヤ設計

時速 60 キロメートルで走行する自動車にはたらく抵抗のおよそ半分は空気抵抗が占める。デザインや積載性を損なうことなく空気抵抗を低減するためには、車体ではなくタイヤの形状を工夫することが望まれる。横浜ゴムでは車両の空力性能向上を目指しタイヤ側面に配するフィン状突起に関する技術開発を進めている。放射状のフィン状突起 (Fig.4-29) を車両装着内側のタイヤ側面に配置することで車両全体の空気抵抗を低減できることが確認できた[13]ものの、揚力が増加する課題を抱えていた。そのため研究開発課題3 (乱流の直接計算に基づく次世代流体設計システムの研究開発) で開発された FrontFlow/red を利用し、突起形状と位置を設計変数とした移動境界を含む LES による多目的設計探査を実施した。

利用した車両形状を Fig.4-30 に示し、フィン形状とタイヤ側面の計算格子の一例を Fig.4-31 に示す。その結果、抵抗と共に揚力も低減できるフィン形状と位置に関する革新的な知見を得ることに成功した。多目的設計探査で得られた結果の一部を Fig.4-32 に示す。横軸はフィンの無いベースラインタイヤとの CD 値の差 (カウント数) を示し、縦軸はベースラインタイヤとの CL 値の差 (カウント数) を示す。これらの計算は移動境界 (スライディングメッシュ) を用いた LES を伴うため、1 ケースの計算あたり京

コンピュータの 64 ノードを利用して約 300 時間、全体では約 100 万ノード時間を要した。「京」を利用することで初めてこのような商品開発が実現できたと言える。また、得られたタイヤの試作品を製作し横浜ゴムのテストコースで実施した実車計測（JIS D 1012、自動車燃費消費率試験方法に基づき $n=5$ で計測）において本知見を裏付ける結果が得られた（図中の A→B の CD 低減効果について効果を確認した）。得られた成果については横浜ゴム株式会社からニュースリリース[14]として発信されると共にプロトタイプ（Fig.4-33）が 2015 年の東京モーターショーにおいて公開された。

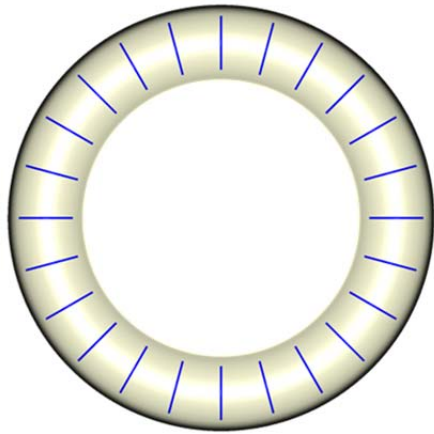


Fig. 4-29 Tire with radial fins

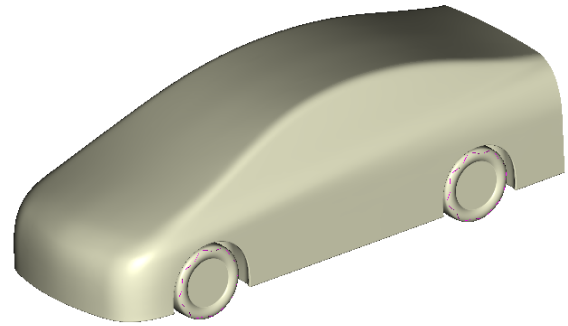


Fig.4-30 Car body model

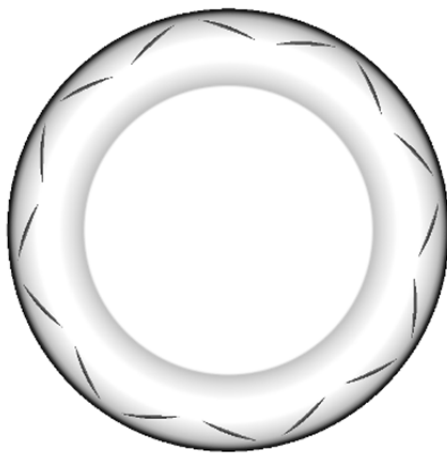
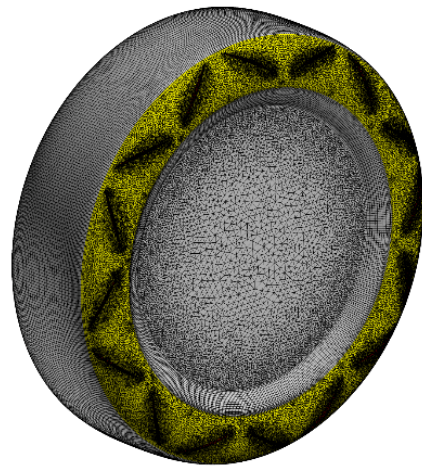


Fig.4-31 Tire with new fin shapes and its computational mesh



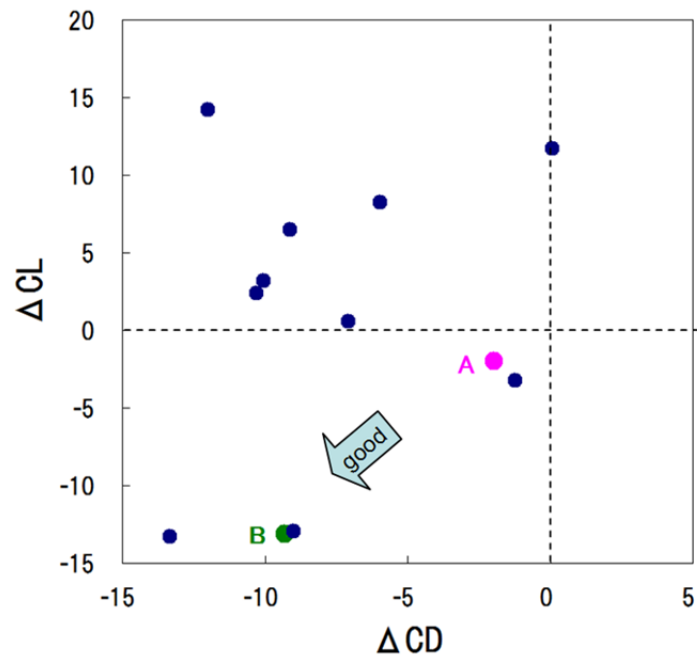


Fig.4-32 Distribution of the designs.



Fig.4-33 Prototype of aero tire presented at 2015 Tokyo motor show.

- [1] Antonio Lopez, Akira Oyama, and Kozo Fujii, "A Ranking Method Based on Two Preference Criteria: Chebyshev Function and e-Indicators," Proceedings of 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 2827-2834, 2015.
- [2] Hernan Aguirre, Akira Oyama, and Kiyoshi Tanaka, "Distribution Search on Evolutionary Many-Objective Optimization: Selection Mappings and Recombination Rate," Evolution, Complexity and Artificial Life, Editors S. Cagnoni, M. Mirolli, M. Villani, Springer, pp. 241-259, 2014.
- [3] Martin Schlueter, Chit Hong Yam, Takeshi Watanabe, and Akira Oyama, "Parallelization

Impact on Many-Objective Optimization for Space Trajectory Design,” Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence, 2015.

[4] 平野博之, 吉川大弘, 多数目的最適化における PSO を用いた 2 段階探索法の提案, 進化計算学会論文誌, Vol.3, No. 3, p.163-172, 2012.

[5] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II,” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197, 2002.

[6] <https://www.r-project.org/>

[7] <http://flab.eng.isas.jaxa.jp/monozukuri/mode/>

[8] 小杉幸寛, 大山聖, 藤井孝藏, 金崎雅博, ハイブリッドロケットエンジンの概念設計最適化, 宇宙輸送シンポジウム, STCP-2009-75, 2010.

[9] 立川智章, 長田裕樹, 山本誠, 野々村拓, 大山聖, 藤井孝藏, ロケットの射点設計に向けた空力音響最適化問題多目的探査, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013.

[10] 小平剛央, 中本尊元, 小池真人, 逐次実験計画法による車体構造の複合領域最適化手法, 自技会論文集, Vol.44, No2, pp.535-541, 2013.

[11] 最適解を「京」で分析, 日刊工業新聞, 2015 年 2 月 16 日

[12] <https://www.kobemesse.com/>

[13] 児玉勇司, 小石正隆, タイヤによる自動車の空気抵抗低減技術に関する研究, 第 26 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, D06-1, (2012).

[14] <http://www.yrc.co.jp/release/?id=2517&lang=jp&sp=20>

[15] <https://www.youtube.com/watch?v=Y2bo5CbXQ3w>

(5) 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

本研究では強固な産学官連携体制の下、大型プラントのものづくりで必要とされる、実験では不可能な詳細かつ一体的な耐震シミュレーション技術(丸ごとシミュレーション技術)を研究開発し、開発した技術の機能確認と動作検証及び具体事例への適用実験を行った。高温工学試験研究炉の適用実験では、観測記録と計算結果の照合を行った。原子力施設等の大型プラントにおいて設計用基準地震動に対する安全余裕を一層合理的に設定する方法の確立に貢献していくとともに、安心・安全社会の構築に資することを目標とし、プロジェクトの総合的推進施策とあわせ、ソフトウェアの研究開発、及びプロダクションランの実施とシミュレーション結果利活用技術の研究開発を実施した。その結果、京を用いた解析結果を、高温工学試験研究炉の安全審査の補助資料として高温工学試験研究炉部HTTR技術課へ提出し、事業進展に貢献できた。

本課題では、(5-1)プロジェクトの総合的推進施策、(5-2)大規模プラントの高精度評価システムにおける構造解析ソフトウェアの研究開発、(5-3)プロダクションランの実施と大規模プラントの高精度評価システムの研究開発を実施した。

(5-1)プロジェクトの総合的推進施策に関しては、大規模プラントの高精度評価システム(ソフトウェア)の研究開発とそのプロダクションランや要素技術開発および技術調査、ものづくり利用に向けたアウトリーチ活動を総括し、総合的に推進すると共に、継続的に研究開発計画を精査し詳細化し、活動した。また、成果物の産業利用の促進ため、産業界及び有識者からなるコンソーシアム(委員会等)を設置し、運営した。これらの活動を通して、プロジェクトを効率的に推進した。その結果、京を用いた解析結果を、高温工学試験研究炉の安全審査等の補助資料として提出するとともに、新たな研究課題も発掘できた。

(5-2)大規模プラントの高精度評価システムにおける構造解析ソフトウェアの研究開発に関しては、京における性能調査、構造解析ソフトウェアの高度化、構造解析解の確認と検証に係わる検討を総合的に行い、大規模プラントの高精度評価システムにおけるシミュレーション技術の研究開発を推進した。その結果、大型プラント等において特徴的な構造である薄肉構造物の超高速・高効率なシミュレーション技術の開発に成功した。また、京に合わせチューニングを行い、組立構造解析技術(FIESTA: Finite Element Analysis for Structure of Assembly)の実行性能は、B/F 値を考慮した場合の京の上限性能に達成できた。

(5-3)プロダクションランの実施と大規模プラントの高精度評価システムの研究開発に関しては、構造解析解の確認と検証を実施するため、入力モデルの作成とシミュレーション実施に必要な環境の整備や研究開発を行うと共に、大規模構造解析およびその結果の活用に関する調査・検討を行った。その結果、ものづくり企業等のニーズに沿ったプロダクションランを実施でき、京を利用した構造解析の有用性について確認できた。

(5-1) プロジェクトの総合的推進施策

大規模プラントの高精度評価システム(ソフトウェア)の研究開発とそのプロダクションランや要素技術開発および技術調査、ものづくり利用に向けたアウトリーチ活動を総括し、本研究開発を進めた。産業利用促進を図るために大型構造施設等を扱う産業分野および大型構造施設等を対象とする計算科学分野に広く呼び掛ける努力をし、その結果 22 機関とともに、コンソーシアムを運営するとともに、成果の利用協力を(株)荏原製作所と千代田化工建設(株)の 2 社と実施した。コンソーシアムに参加頂いた 22 機関のうち、15 機関は産業分野から、7 機関は学術分野からの参加である。これら 22 機関(機関名は、(2)研究開発体制について、(5) 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、を参照)が集まることにより、原子力利用、設計・製造、計算科学、基礎研究、防災等、本課題を推進するために必要な技術分野を網羅する場として運営した。成果物の産業利用の促進のため、その活動をした。その結果以下のような新たな研究課題を発掘するとともに、現況で利用可能部分も見出した。

高温工学試験研究炉の V&V の考え方・進め方においては、その利用可能性を見極めつつ、安全審査への補助資料に当該解析を活用し、その計算結果を提供したことは、産業利用促進への大きな一歩となった。

新たな研究課題は、以下のとおりである。

- 1) 高性能になっていくハードウェアを有効に使う方法、手早くモデル作成を行う方法を検討することは重要である。
- 2) 鉄筋コンクリートの軽度なひび割れに起因する非線形性への対処が必要である。積層シェル要素を用いているのは一案である。
- 3) 非線形解析への足掛かりは重要である。復元力特性を定量化する必要がある、設計時の特性はわかるが、現在の特性はどのように設定していくか課題となる。
- 4) 観測値だけでなく、もっと巨大な地震時の V&V を実施しなければ、耐震裕度の評価は難しい可能性がある。
- 5) 解析時の減衰項はどのような値を使うのか、高温なので熱変形を逃がすためのガタがあるはずだが、どのようにモデル化していくのか課題となる。
- 6) 建屋と機器の相互作用について議論していくことも課題である。
- 7) プラントの一部を取り出して実際に揺らして確認するというような実験等の連携も課題である。
- 8) 設備や機器の内部流体やオペレーションを反映した検討技術の構築。
- 9) 建屋と機械構造物だけでなく、核燃料等、炉内の黒鉛構造物等のシミュレーションの実現は、重要課題である。

(5-2) 大規模プラントの高精度評価システムにおける構造解析ソフトウェアの研究開発

ADVENTURE プロジェクトで開発された ADVENTURE システムをベースとした振動解析コードの高効率実装に係わる要素技術の研究開発を行ってきた。ADVENTURE システムでは後述するバランシング領域分割法を導入することにより、並列環境においても効率的に大規模シミュレーションが可能となっている。以下、バランシング領域分割法の概要を述べる。

有限要素法を用いた固体力学解析においては、各節点での変位を未知数とした大規模な連立一次方程式が得られる。

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (5-1)$$

この問題に対して、Fig.5-1 に示すようなオーバーラップ領域を持たない部分構造法を適用することを考える。式(1)に含まれる全ての自由度は、部分領域間境界に位置する自由度と、それ以外の自由度に大別できる。そこで、部分領域間境界に位置する自由度に対して B (Fig.5-1 においては赤色の節点における自由度)、それ以外の自由度に対して I というサフィックスを与えると、行列は次式で表される。

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} \mathbf{R}_I^{(i)T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_B^{(i)T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{II}^{(i)} & \mathbf{A}_{IB}^{(i)} \\ \mathbf{A}_{BI}^{(i)} & \mathbf{A}_{BB}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_I^{(i)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_B^{(i)} \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

さらに、式(5-2)から部分領域内部自由度を消去することで、 $\sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i^{(i)T} \mathbf{A}_{ii}^{(i)} \mathbf{R}_i^{(i)}$ に関する Schur 補元方程式が得られる。

$$\mathbf{Sx}_B = \mathbf{g} \quad (5-3)$$

本研究では線形弾性問題を対象とするため、行列は正定値対称であり、共役勾配(CG)法などで解くことができる。CG法で必要となる行列ベクトル積演算では、一般には Schur 補元行列は陽に求めず、Fig.5-2 に示す実装に従い各部分領域において反力計算を行うことによって Schur 補元行列との行列ベクトル積演算を代用している。この部分領域ごとの反力計算は部分領域ソルバによって行われる。

式(3)をCG法等で解く場合には、前処理によって収束性を向上することが可能である。領域分割法では対角スケーリング前処理が利用されることが多いが、バランシング領域分割法では次式で示すコースグリッドコレクションを含んだ前処理が導入されており、高い収束性が得られている。

$$\mathbf{M}^{-1} = (\mathbf{I} - \mathbf{R}_0^T \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{R}_0 \mathbf{S}) \mathbf{T}_{N-N} \quad (5-4)$$

ADVENTURE プロジェクトではバランシング領域分割法における Neumann-Neumann 処理を簡略化した BDD-DIAG 実装が行われており、その場合の前処理行列は以下ようになる。

$$\mathbf{M}^{-1} = (\mathbf{I} - \mathbf{R}_0^T \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{R}_0 \mathbf{S}) \mathbf{T}_{DIAG} \quad (5-5)$$

ここで式(5-4)、(5-5)で現れる \mathbf{S}_0^{-1} はコース行列の逆行列である。コース行列は各部分領域の剛体運動モード(3次元では6成分)により定義されるコース問題から得られる。このため、コース行列は大規模シミュレーションにおいても中規模程度のサイズであり、既存の実装ではコースソルバとして並列スカイライン法を採用し、コース行列の分解が行われてきた。

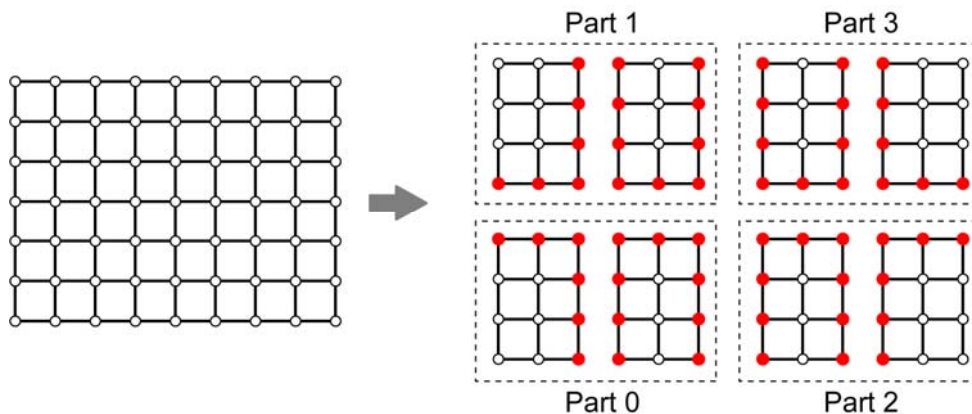


Fig.5-1 Non-overlapping domain decomposition

$$\begin{matrix} \text{disp} & & \text{hddmmat.gk} & & \text{reac} \\ \begin{Bmatrix} y_{1I(i)} \\ y_{1B(i)} \end{Bmatrix} & = & \begin{bmatrix} K_{II(i)} & K_{IB(i)} \\ K_{BI(i)} & K_{BB(i)} \end{bmatrix} & \begin{Bmatrix} 0 \\ -p \end{Bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{for (i = 0; i < matdim; i++) disp[i] = 0;} \\ \text{dary_clear(reac, matdim);} \\ \text{put_neg_bcdisp_to_vec(, , dmesh.bcdisp, reac);} \\ \text{advlas_matmult_vec_add(hddmmat.gk, reac, disp);} \end{matrix}$$

dmesh.bcdisp

$$\begin{matrix} \text{disp_ii} & & \text{disp_ii} \\ \begin{Bmatrix} y_{2I(i)} \end{Bmatrix} & = & [K_{II(i)}]^{-1} \begin{Bmatrix} y_{1I(i)} \end{Bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{for (i...) disp_ii[index[i]] = disp[i];} \\ \text{advlas_ldl_solve(gksc_inv, disp_ii);} \\ \text{for (i...) disp[i] = disp_ii[index[i]];} \end{matrix}$$

hddmmat.gk_inv

$$\begin{matrix} \text{reac} & & \text{hddmmat.gk} & & \text{disp} \\ \begin{Bmatrix} y_{3I(i)} \\ y_{3B(i)} \end{Bmatrix} & = & \begin{bmatrix} K_{II(i)} & K_{IB(i)} \\ K_{BI(i)} & K_{BB(i)} \end{bmatrix} & \begin{Bmatrix} y_{2I(i)} \\ p \end{Bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{put_bcdisp_to_vec(, , dmesh.bcdisp, disp);} \\ \text{dary_clear(reac, matdim);} \\ \text{advlas_matmult_vec_add(hddmmat.gk, disp, reac);} \end{matrix}$$

dmesh.bcdisp

$$\{y_{3B(i)}\} = \left([K_{BB(i)}] - [K_{BI(i)}][K_{II(i)}]^{-1}[K_{IB(i)}] \right) \{p\}$$

Fig.5-2 Implementation of matrix-vector multiplication procedure in case of Schur complement matrix

これまでの研究開発において、要素技術の一つとして部分領域ソルバについては、キャッシュの有効利用を行うためのEBE (Element by Element) 反復法実装、及び、陽にSchur補元行列Sを求める実装等の実行効率調査を行い、特に後者では 4,096 ノード (32,768 コア) 利用時に対ピーク性能比 40%を超える高い実行効率を得た。更に、コース行列の逆行列 S_0^{-1} についても従来のLU分解ではなく、陽に、かつ、4倍精度を用いて逆行列を算出するコースソルバの実装を試み、従来実装に比較し10倍から20倍の高速化が達成可能であることを示してきた。これらの実装時術の高度化により16.5億自由度の静応力解析を実施し、32,768 ノード利用時において、ソルバ準備段階の一つの作業である行列分解プロセスで対ピーク性能比 58%、バランシング領域分割法の各反復計算ステップにおいて同10%を達成した。詳細な計測計算時間を Table.5-1 に示す。更に、これらの技術により構造解析では世界最大規模となる約1,040億自由度モデルの解析にも成功した。

最終年度である平成27年度はこれらの要素技術の総括を行うため、それぞれの要素技術に対して性能予測モデルを構築し、続いて、実行時間およびメモリ使用量などについて予測値と実測値の比較を実施した。例えばB/Fの要求レベルの違いから、部分領域ソルバにおいて陽にSchur補元行列Sを求める実装ではピーク性能比が15~21%程度となった一方で、従来手法の分解に基づく前進後退代入では5~10%程度となることが示された。また、大規模なシミュレーション結果を取り扱うため、サーバーサイド可視化技術の高度化も行った。これはプロダクトランを実施するにあたり、そのシミュレーション結果は数百TBにも上り、そのデータハンドリングに大きな問題を生じたためである。シミュレーションコード本体に可視化モジュールを埋め込むことにより、画像以外の出力を行わず、耐震シミュレーションを実施可能な環境を構築した。

Table.5-1 Computation time of Integrated Code

Total DOF	Subdomain DOF	Num. Subdomains	Num. Comp. Nodes	Time (sec.)			Time per BDD step
				<i>Prepare Coarse</i>	<i>Prepare LSC Mat.</i>	<i>Solve</i>	
0.09B	6600	16384	4096	120	4.7	0.60	0.011
0.37B	6600	65536	32768	967	2.5	1.4	0.026
1.21B	21000	65536	32768	967	27	1.8	0.028
1.65B	28000	65536	32768	967	48	2.3	0.033
0.41B	28000	16384	4096	115	105	2.0	0.029
0.93B	28000	36864	18432	474	47	1.9	0.026
1.65B	28000	65536	32768	967	48	2.3	0.033

(5-3) プロダクションランの実施と大規模プラントの高精度評価システムの研究開発

a) 高温工学試験研究炉の入力モデル作成と施設における部分的 V&V

高温工学試験研究炉 (HTTR: High Temperature engineering Test Reactor 以下、HTTR と略す) とは、850~950°C の高温ヘリウムガスを世界で初めて原子炉圧力容器外へ直接取り出す被覆粒子燃料—黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉で、平成 3 年 3 月の建設着工から約 7 年半をかけて機器の設計・製作・据付・試験を終え、平成 10 年 7 月から HTTR への燃料装荷を開始し、同年 11 月に初臨界を達成した。定格出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850°C を達成し、高温ガス炉の技術基盤を確立するとともに、水素社会に向けて温室効果ガスを排出しない革新的な熱化学水素製造法の熱源として原子力エネルギーを利用できることを世界で初めて実証した。また、設備の簡略化、高効率、モジュール化、メンテナンスの容易性、および設計上の工夫による高い経済性を実現し、自然に止まる、自然に冷えるなど優れた固有の安全性を持ち、発電だけでなく、熱・蒸気供給、水素製造などの利用目的、産業などの低炭素化に貢献など幅広い用途に対応できる特徴を持つ。

平成 23 年度に、HTTR の施設全体モデルに対して、加圧水冷却系及び補助冷却系のモデル整備を進め、平成 24 年度は、加圧水冷却系のモデルデータ組み上げを中心にモデル整備を推進した。平成 25 年度は、補助冷却器のモデル整備を行うと同時に HTTR 建屋の耐震シミュレーションによる V&V を実施するために必要なデータ改修を行った。また、これらのデータを用いて感度解析や「京」を使ったシミュレーションの計算精度確認なども実施し、必要に応じたデータの改修をした。平成 26 年度は、HTTR 建屋における観測記録とシミュレーション結果の確認と、HTTR 建屋における観測記録とシミュレーション結果の検証を実施した。また、機器解析を実施するために、炉心機器のモデル整備をした。平成 27 年度は、HTTR の機器における観測記録とシミュレーション結果の確認と、HTTR の機器における観測記録とシミュレーション結果の検証を実施し、HTTR の施設全体モデルに対する V&V を完了した。

HTTR における観測記録とシミュレーション結果の検証については、観測で得られた加速度データから荷重データを作成し、これを入力データとして大型プラントの振動挙動をシミュレーションするとともに、観測で得られた加速度データとシミュレーション結果として得られた加速度データを比較することで、耐震シミュレーションの検証と妥当性確認 (Verification and Validation: V&V) を実施した。

V&V については、国外では、ASME V&V10[1]、ASME V&V 20[2]に、国内では、日本原子力学

会のシミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン[3]などに詳しく記載されている。これらの文献において、V&V の一プロセスとして、実験(あるいは観測)結果およびシミュレーション結果に含まれる誤差を見積もるプロセスと、見積もった誤差を用いて実験(あるいは観測)結果とシミュレーション結果の比較を行うプロセスが必要と示されている。しかしながら、個別の実験(あるいは観測)において誤差を見積もる具体的な方法は示されていない。また、実験(あるいは観測)結果とシミュレーション結果を比較する方法について、[1]と[2]では異なる方法が示されており、こういった方法を用いるのがより良いかは未だ十分確立していない。そこで、不完全ながら、これらの調査研究をもとに HTTR の施設全体モデルの V&V 方法を定め、コンソーシアム等で議論を進め、もっと巨大な地震時の V&V を実施しなければ、耐震裕度の評価に耐えられないという課題等を残しつつ、非線形解析への足掛かりは重要であるという着地点に向けて V&V 完了させた。この手順の概略を Fig.5-3 に示す。

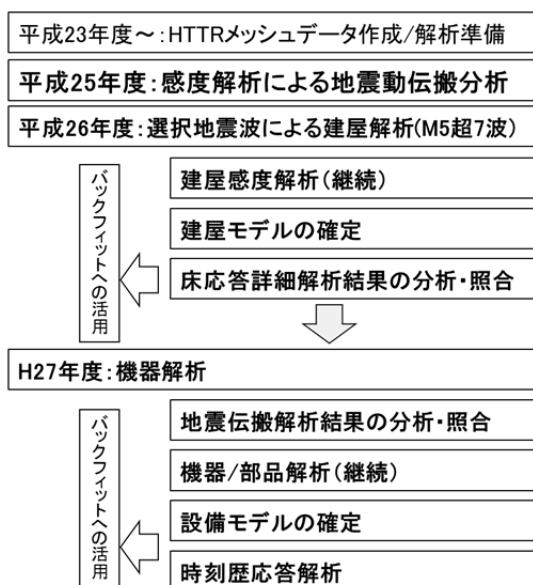


Fig.5-3 Procedure of V&V for HTTR

HTTR 建屋における観測記録とシミュレーション結果の確認を行うために、Fig.5-2 に示すような建屋モデルの確認と分析を行った。建屋の幾何モデルは、Fig.5-2 の(a)にその全体を、(b)には半分に切断した断面が見えるように、また6階建ての様子がわかるように(c)に可視化した。建屋モデルの確認と分析においては、Fig.5-2 の(d)に示した四面体要素で分割した有限要素分割モデル(Finite Element meshed model)、六面体要素で分割したものを(e)に、積層シェル要素で分割したものを(f)にそれぞれの一例を示した。建屋モデルの確認と分析では、有限要素分割の粗密や要素による計算結果を分析し、それらの検討結果から積層シェル要素で建屋解析を実施した。積層シェル要素モデルによる7つの地震波の応答解析結果の一例を Fig.5-3 に示す。使用した地震波を Table.5-1 に示す。これは平成 10 年 4 月以降に HTTR で観測された震央におけるマグニチュード 5 以上の地震波である。

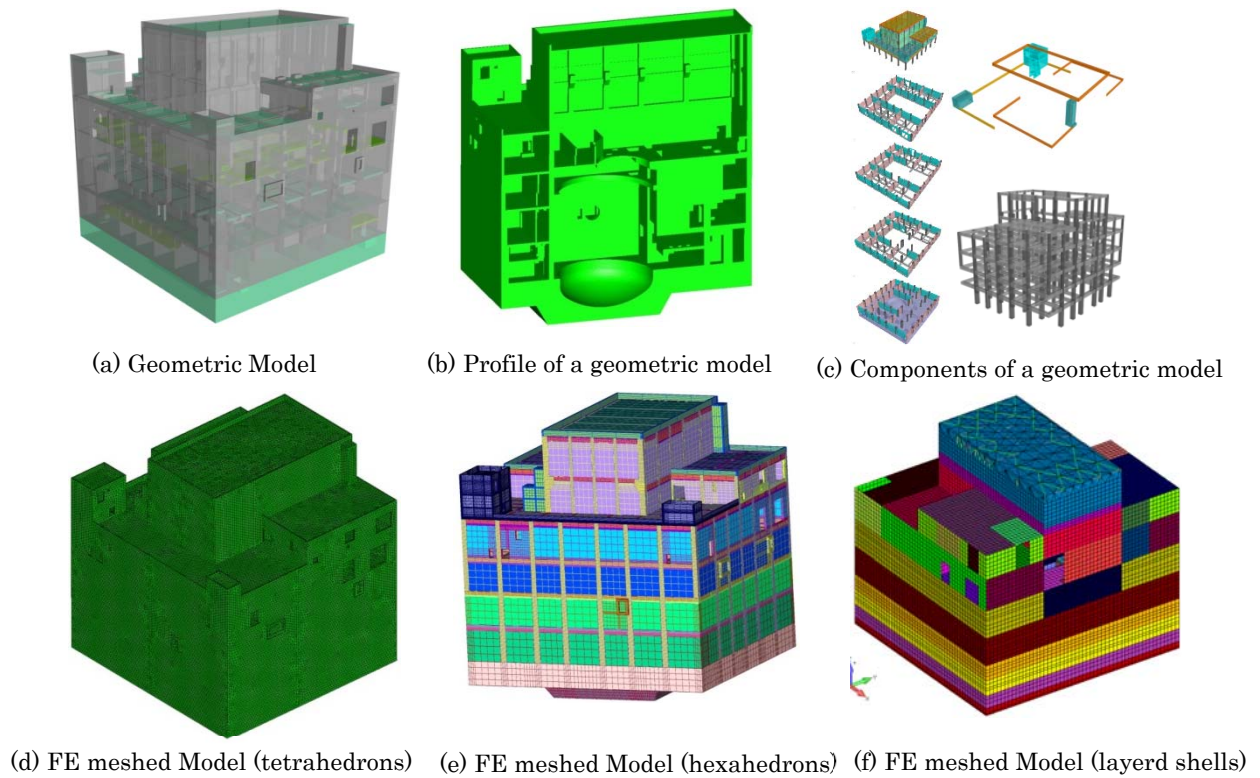


Fig.5-4 Visualization of HTTR's building and FE meshed models

Table. 5-2 A table for seismic waves

	地震	発生日時	最大加速度(Gal)	マグニチュード	深さ(Km)	震央
1	—	平成10年04月09日 17:45	92.3	M5.4	95	福島県沖
2	茨城県北部	平成11年03月26日 08:31	110.7	M5.0	59	茨城県北部
3	—	平成11年04月25日 21:27	77.8	M5.2	59	茨城県沖
4	茨城県沖	平成17年10月19日 20:44	78.4	M6.3	48	茨城県沖
5	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震	平成23年03月11日 14:46	558.3	M9.0	24	三陸沖
6	— (311余震1)	平成23年03月11日 15:15	382.9	M7.6	43	茨城県沖
7	— (311余震2)	平成23年04月11日 17:16	179.6	M7.0	6	福島県浜通り

Fig.5-5 は、Table. 5-2 で示した番号 5 の平成 23 年 3 月 11 日(2011 年)に三陸沖で発生した東北地方太平洋沖地震と呼ばれる地震波を用いて、建屋の時刻歴応答解析を行い、観測データとの照合を行った一例である。この地震では最大加速度は水平方向 519.26Gal、鉛直方向 287.42Gal を記録している。

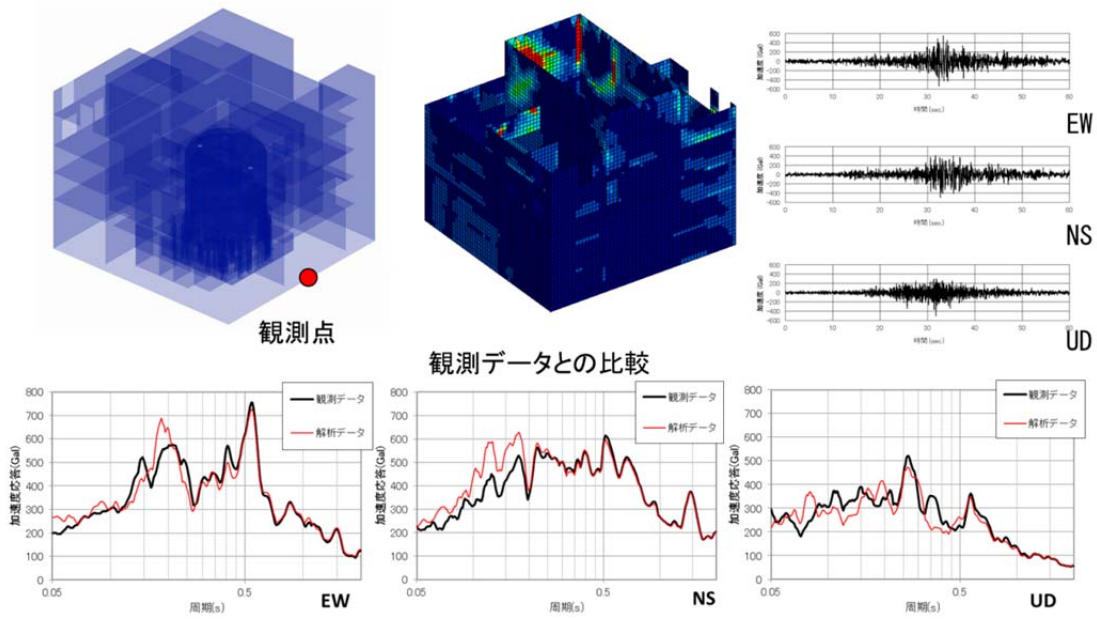


Fig.5-5 Case 5 on 2011.3.11 (14:46)

これら Table. 5-2 で示した地震波を用いて、建屋の観測値とV&Vを実施、建屋の挙動を確定した。これら建屋に伝播した振動データを入力として、Fig.5-6 に示した観測データの存在する HTTR 機器に対する V&V を実施した。建屋から機器に伝播したと考えられる箇所は約 200 である。これらの機器と建屋の位置関係を Fig.5-7 に示す。

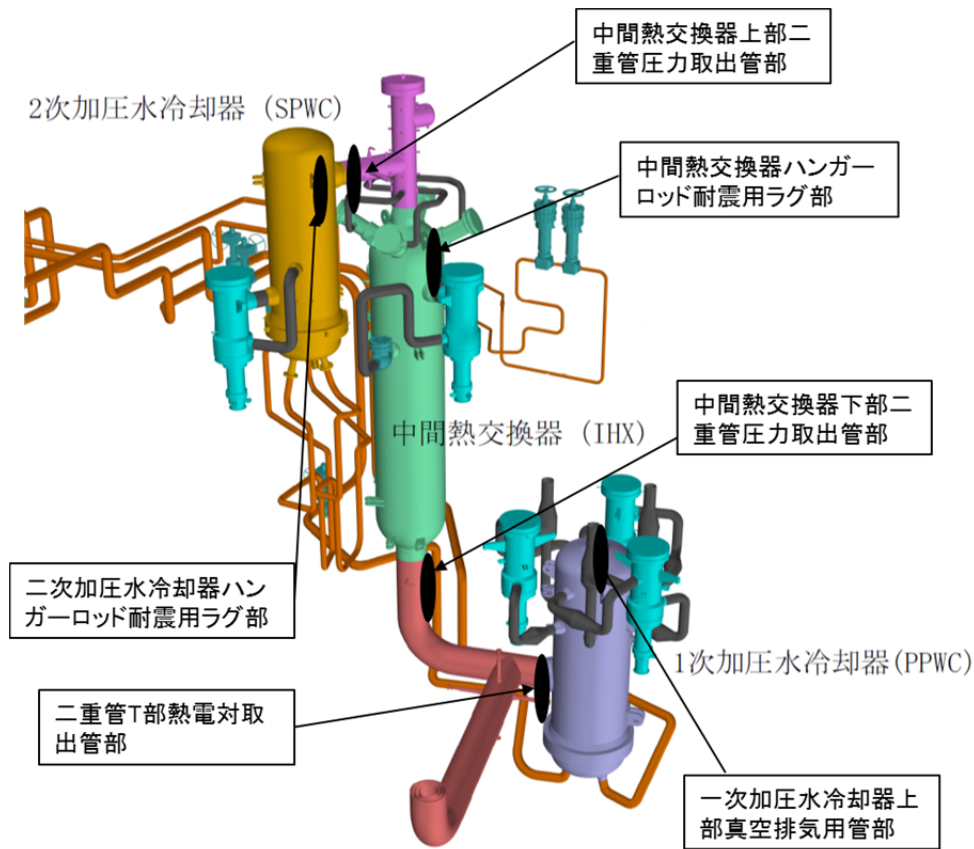


Fig.5-6 Positions where accelerators were placed.

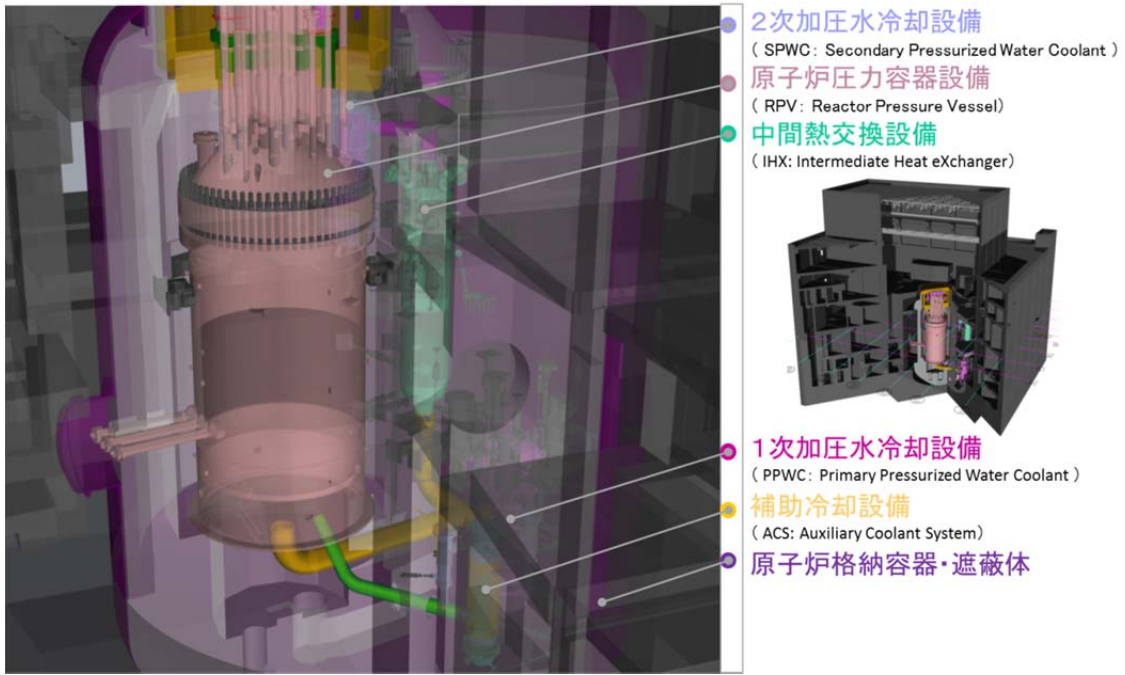


Fig.5-7 A location of facilities in the building of HTTR

Fig.5-8 は、Table.5-2 で示した番号 4 の平成 17 年 10 月 19 日 (2005 年) の茨城県沖地震と呼ばれる茨城県沖で発生した地震波を用いて、建屋の時刻歴応答解析を行い、観測データとの照合を行った伝搬波を用いて、機器の解析結果と V&V を実施したものである。この地震の最大加速度は、水平方向 59.02Gal、鉛直方向 35.04Gal である。各観測値のあるデータの照合結果の一つを Fig.5-8 に示す。これらの結果から、当該解析結果は完全一致ではないものの特性挙動をよく近似した結果を得たと考える。

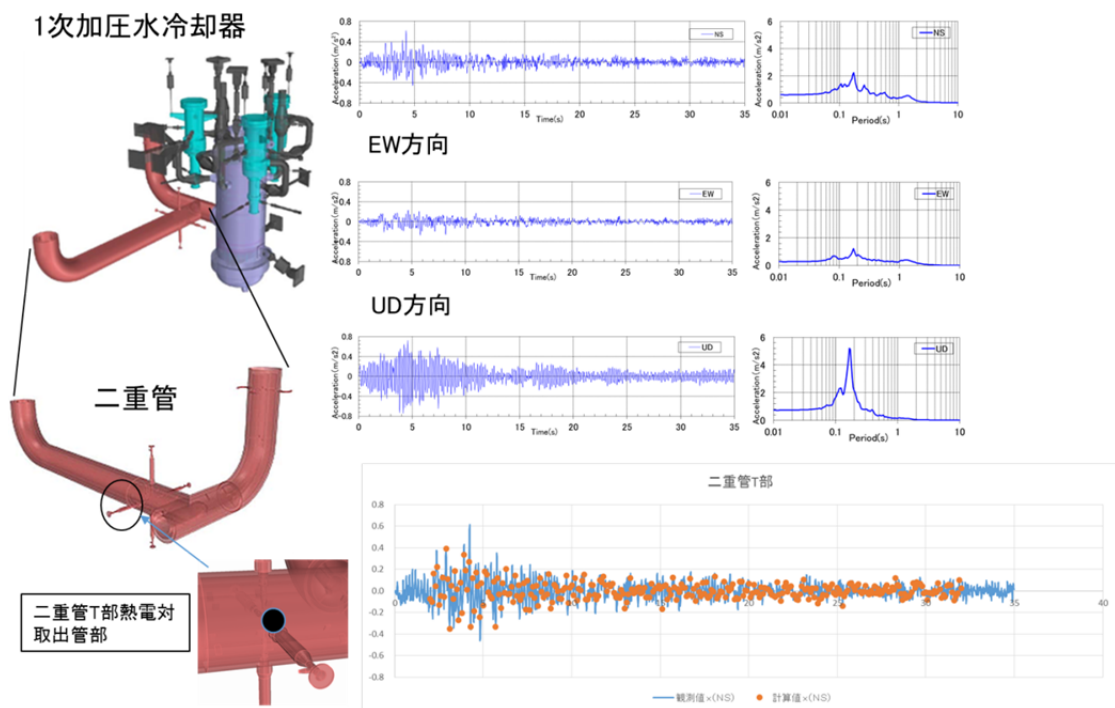


Fig.5-8 V&V with observed against simulated data

これらの照合のために平成 27 年度に実施した機器の個別解析結果例を Fig.5-9 に、全体解析結果例を Fig.5-10 に示す。

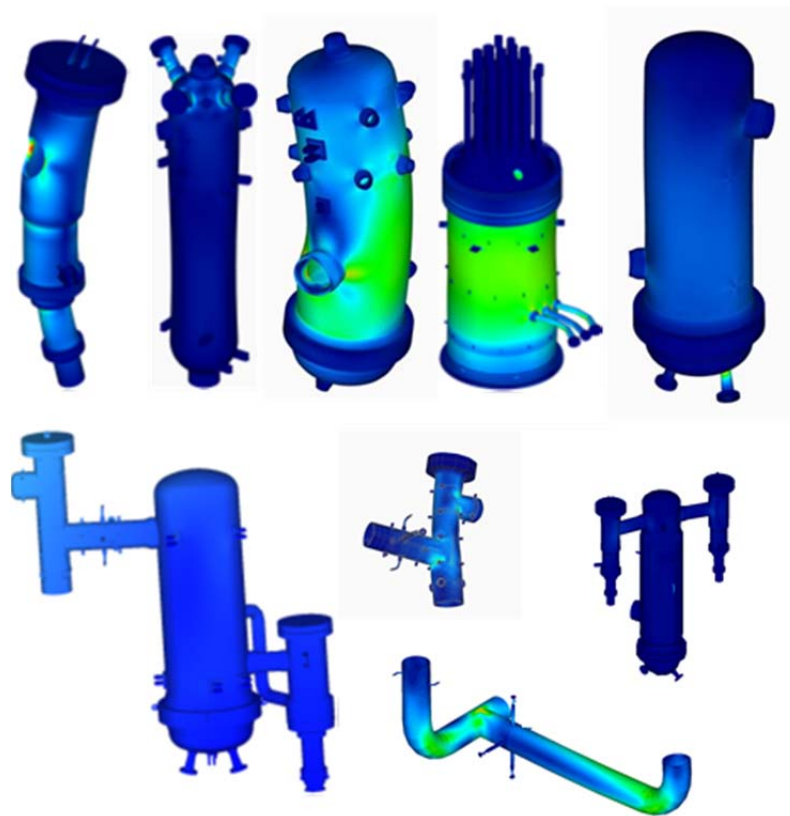


Fig.5-9 Simulation results for components in FY2015

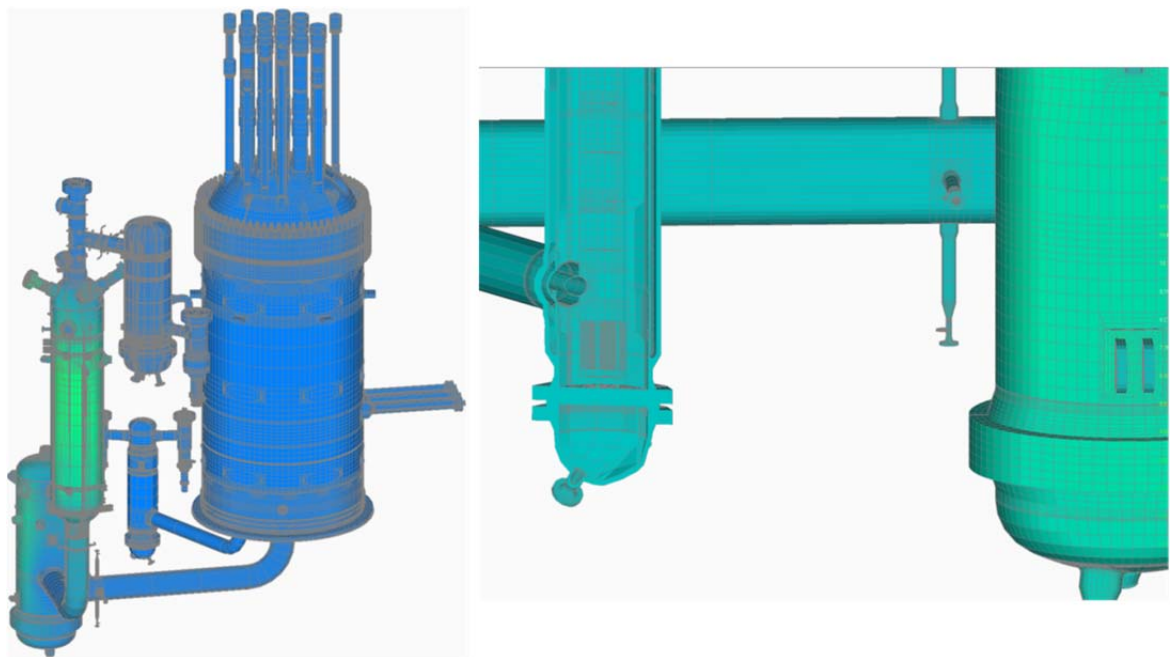


Fig.5-10 A result of components in the vessel

[1] ASME, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006, American Society of Mechanical Engineers, (2006)

[2] ASME, Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, ASME V&V 20-2009, American Society of Mechanical Engineers, (2009)

[3] 日本原子力学会標準委員会基盤・応用技術専門部会シミュレーションの信頼性分科会、日本原子力学会標準 シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン、(2015)

b) ADV_Kによる大規模薄肉構造物の実証計算：軽水炉モデル

実商業軽水炉を対象とした実機モデル(炉容器+格納容器+建屋等)構築作業を平成25年度より継続して実施してきた。平成25年度は1.5億自由度のモデルに対して大型プラントの構造的特徴を捉えた大規模複雑薄肉構造物の反復解法収束性の検証を行い、階層型領域分割法に基づくバランシング領域分割法実装が有効に作用し、「京」上において1,032ノードを用いた場合185秒で1時刻ステップ分の耐震シミュレーションが可能であることを示した。このとき、プロセス数とコースグリッド自由度との関係などを検討し実効時間の短縮化を図った。平成26年度には圧力容器スタビライザやサプレッションチェンバーブレード等の制震機器の詳細化を図った。

平成27年度はプロダクトランとして、4面体1次要素、約2億自由度のモデル、及び、4面体2次要素、約15億自由度のモデルを対象としたシミュレーションを実施した。Fig.5-11にメッシュ図を、Fig.5-12に解析結果の一例を示す。プロダクトランにより大型プラントに特徴的な薄肉構造物においても開発コードが高い性能を発揮でき、また、「京」を用いることにより超大規模耐震シミュレーションが実施可能であることを示した。同時に、バネマスモデル等と比較し、詳細な地震時の応答挙動が大規模3次元シミュレーションにより把握可能であることを確認した。

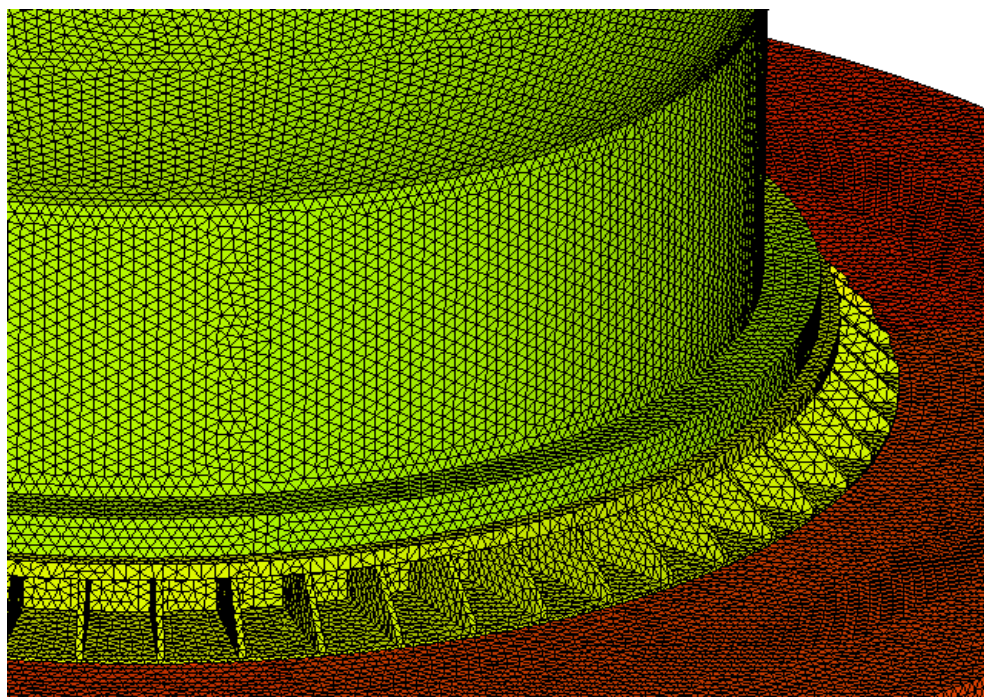


Fig.5-11 Finite element discretization of nuclear power plant model

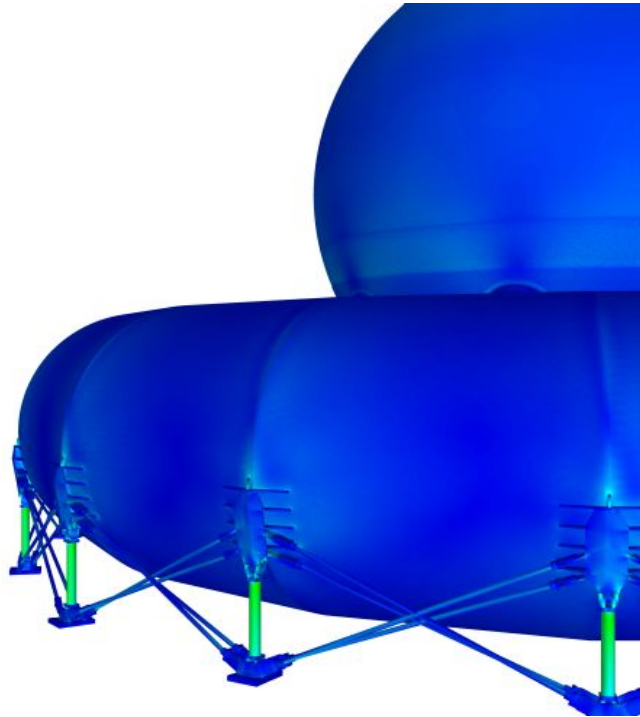


Fig.5-12 A snapshot of seismic simulation of nuclear power plant

c) ものづくり現場 2 社とのアウトリーチ活動

株式会社荏原製作所とは、社会インフラで活躍する一般プラントにかかわる立軸ポンプのモデル化、全体解析や詳細解析等に関する検討会議を平成 24 年度内で 3 回(4 月 17 日、6 月 6 日、3 月 25 日)、平成 25 年度内で 3 回(5 月 9 日、8 月 7 日、9 月 18 日)、平成 26 年度内で 5 回(4 月 9 日、6 月 25 日、8 月 8 日、8 月 26 日、10 月 9 日)、平成 27 年度内で 3 回(6 月 5 日、8 月 3 日、平成 28 年 1 月 15 日)開催した。

千代田化工建設株式会社とは、化学プラント等のモデル化、全体解析や詳細解析等に関する検討会議を、平成 24 年度内で 3 回(6 月 22 日、10 月 9 日、12 月 5 日)、平成 25 年度内で 3 回(4 月 23 日、8 月 7 日、10 月 8 日)、平成 26 年度内で 4 度(平成 26 年 5 月、平成 26 年 8 月、平成 26 年 11 月、平成 27 年 1 月)、平成 27 年度内で 7 度(平成 27 年 4 月、平成 27 年 6 月、平成 27 年 8 月、平成 27 年 9 月、平成 27 年 10 月、平成 27 年 12 月、平成 28 年 1 月)実施した。

(i) 株式会社 荏原製作所

荏原製作所殿は、ポンプやコンプレッサなどのターボ機械事業を中心とする世界的な産業機械メーカーであり、燃焼・ガス化、水処理技術を核とする環境エンジニアリング事業、更に半導体製造装置等を扱う精密・電子事業など幅広い分野での事業を牽引している。

ターボ機械の関わる設備には、ポンプ、駆動機、減速機等、大きな動力を扱う機器が設置されていることから、運転時には振動が発生する。設備自身の低振動化に加え、設備から建屋や地盤に伝播して発生する公害振動予防や、設備の健全性を確保するための耐震検討などは、設備設計にとって重要な検討課題である。そのような振動には、機械的要因と流体的要因があることから、ターボ機械、例えばポンプの振動解析や耐震解析では、非常に複雑な事象を本質的に解明しながら進める必要がある。本課題で開発する「次世代耐震シミュレーション」は、これらの事象の一部の分析