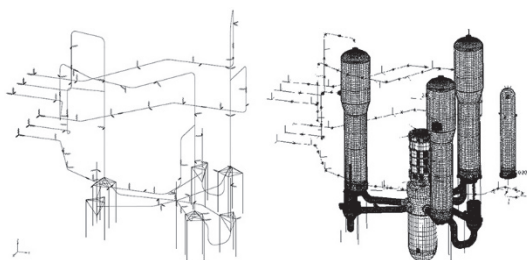


大規模構造解析技術を用いた原子炉冷却系主要機器の健全性評価プロセス高度化

The Process Improvement for Evaluating the Soundness of the Reactor Coolant System Main Components Using Large-Scale Structural Analysis Technology



渡邊 啓太^{*1}
Keita Watanabe

朝田 誠治^{*2}
Seiji Asada

中島 誠^{*3}
Makoto Nakajima

井上 耕也^{*1}
Koya Inoue

大野 直樹^{*4}
Naoki Ono

飴谷 康文^{*5}
Yasufumi Ametani

PWR(Pressurized water reactor)型原子力発電所の原子炉冷却系を構成する原子炉容器や蒸気発生器などの主要機器は、運転中の温度や圧力の過渡変化や地震力に対して詳細解析による構造健全性評価が求められる。従来、この詳細解析は細分化した解析モデルを使った構造解析プロセスにより行われている。また、近年の構造解析技術の発展を背景に、原子炉冷却系の主要機器の構造解析をシームレスに一度に計算する構造解析プロセス(以降、シームレス構造解析プロセスと呼ぶ)を構築し、効率的に解析する技術を開発している。

1. はじめに

原子炉冷却系は原子炉容器とその周辺に配置された蒸気発生器及び1次冷却材ポンプを1次冷却材管により接続した冷却ループで構成される。また、原子炉容器の内部には、炉心を構成する燃料集合体とそれらを支持する炉心支持構造物があり、原子炉容器の上部には、炉心の出力を制御する制御棒駆動装置がある。これらの機器(以下、主要機器と呼ぶ)は原子炉冷却材の温度や圧力の過渡変化や、地震が起きた際の揺れに対して原子炉冷却材圧力バウンダリとしての耐圧機能や炉心の支持機能を維持することが求められる。そのため、主要機器の耐圧部や炉心支持構造物については、各荷重条件に対し詳細な評価を行い、構造健全性を確認している。

2. 主要機器に対する構造健全性評価

主要機器の構造健全性評価は、所定の構造健全性クライテリアを満足することを確認するため、まず運転中の温度及び圧力条件並びに地震により機器に作用する荷重を荷重解析により求め、次に各部位を局所的に模擬した応力解析により各部位に生じる応力を計算する。その構造計算プロセスの概要を図1に示す。

各部位に作用する荷重を算出する荷重解析用モデルには、主要機器の主要部位に作用する荷重を求めるための全体モデルと、各主要機器の内部に作用する荷重を詳細に求めるための複数の機器詳細モデルとがあり、いずれも各部位の剛性及び質量を、はり要素、ばね要素、質量要素等に置き換え、機器の振動特性及び応答が適切にあるいは保守的に評価できるように構築される。荷重解析モデルの例を図2に示す。荷重解析モデルの諸元は、理論式を用いた手計算、構造物を局所的に模擬した有限要素(Finite Element, 以下、FE)解析などにより求められる。例えば1次冷却材管及び原子炉容器円筒部のように単純円筒として扱うことのできる部位は、単純なはり要素あるいはパイプ要素で模擬され、寸法及び材質に基づき計算した要素の諸元(断面

*1 原子力セグメント 機器設計部

*2 原子力セグメント 機器設計部 主幹 工博

*3 原子力セグメント 機器設計部 主席技師

*4 総合研究所 振動研究部 技術士(機械部門)

*5 菱友システム技術(株) 神戸設計技術部 主席技師

二次モーメント等)が入力される。一方、原子炉容器の出入口管台のように形状が複雑な部位については、局所的な剛性を模擬したばね要素で模擬され、そこに入力するばね定数は実際の形状を局所的に模擬した FE 解析にて計算される。こうして構築した荷重解析モデルを用いて、原子力発電所耐震設計技術規程⁽¹⁾に定められた解析条件及び解析手法にて地震応答解析を行い、各部位に作用する荷重を算出する。なお、この荷重解析手法は、1980 年代から 1990 年代初頭にかけて実施された「原子力発電施設耐震信頼性実証試験」にて、実機の縮尺模型を使った加振試験の結果と解析による評価結果との比較によりその妥当性が確認されている。

次に、それぞれの荷重により生じる応力を応力解析にて計算する。応力解析には、評価部位毎に実際の形状を 3 次元ソリッドあるいは軸対称要素などでモデル化した応力解析モデルが用いられる。応力解析モデルの例を図 2 に示す。

これらの荷重解析と応力解析を連携させる構造計算プロセスにより得られた応力に対し、設計・建設規格⁽²⁾に定められた手順及びクライテリアに従って応力評価を行う。この評価は、合理的かつ保守的に主要機器の構造健全性を評価できるため、日本国内にある多数の原子力発電所の建設当時から現在に至るまで、国に提出される工事認可申請書の強度及び耐震計算書、経年変化や長期運転等に対する最新の構造健全性評価等に用いられ、主要機器の信頼性に寄与している。

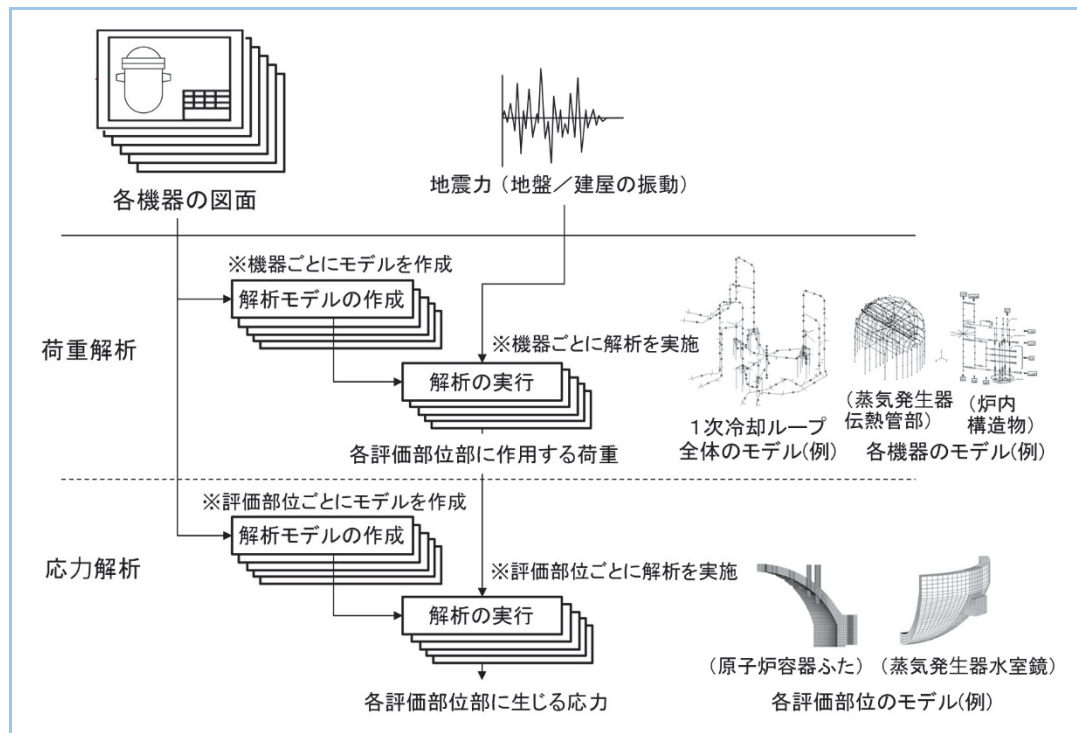


図1 現行の評価プロセスの概略フロー

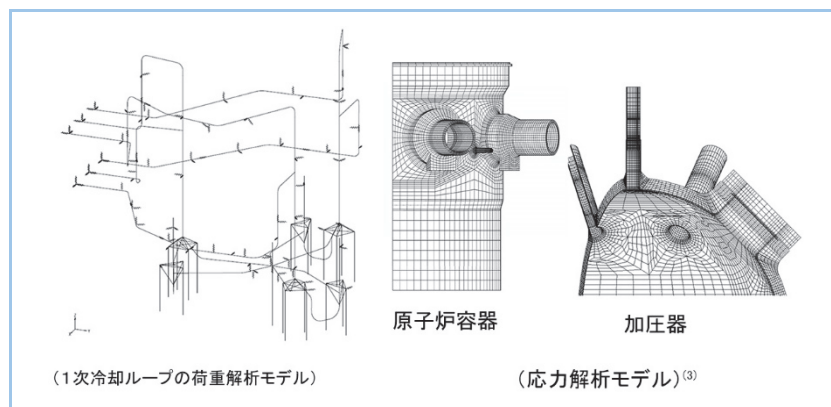


図2 解析モデルの例

3. シームレスな構造解析プロセスの開発

近年、計算機技術の向上や3次元 CAD の普及により、3次元の FE 解析モデルを用いた大規模な構造解析が身近なものとなりつつある。こうした動向を踏まえ、原子炉容器や蒸気発生器などの主要機器を一つの解析モデルで模擬し荷重解析から応力解析までを一つの構造解析モデルでシームレスに計算する構造解析プロセス(以下、シームレス構造解析プロセスと呼ぶ)の開発を行っている⁽⁴⁾。この方法を実用化すれば、荷重解析の結果を応力解析に受け渡したり、着目した部位ごとに応力解析を実施したりすることなく、当該部位に生じる応力を求めることができるようになる。これにより、機器形状や荷重条件を決めてから応力計算結果が出るまでの時間を短縮することができ、設計条件及び機器仕様の変更に迅速に対応できるようになると期待される。

3.1 シームレス構造解析プロセスにおける解析手順

シームレス構造解析プロセスの概略のフローを図3に示す。この解析プロセスを用いた実施手順を以下に述べる。

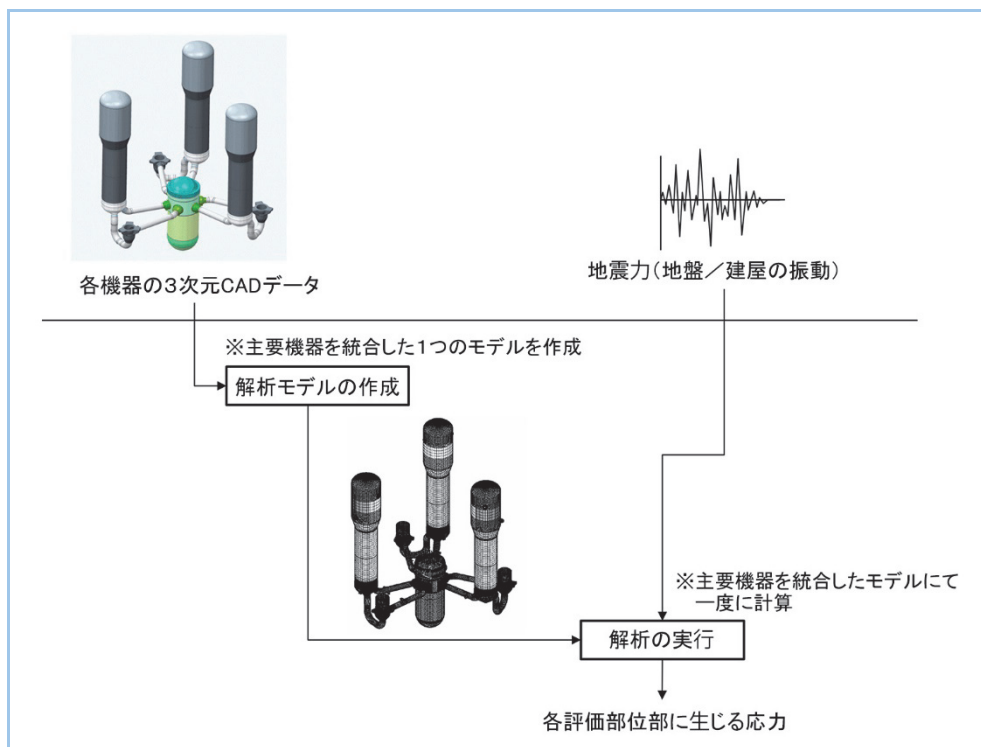


図3 シームレス評価プロセスの概略フロー

3.1.1 解析モデルの作成

はじめに、3次元 CAD データから取り込んだ主要機器の3次元的な形状情報をインプット情報として、3次元ソリッド要素(六面体または四面体)にてメッシュ分割を行い、3次元 FE 解析モデルを作成する。また、メッシュのサイズは、基本的に材料内部の応力分布や表面のピーク応力を詳細に把握できるよう十分小さくする。ただし明らかに有意な応力が生じない部位については、モデルの剛性や振動特性に影響を与えない範囲でメッシュサイズを大きくし、モデル全体の要素数・節点数が増えすぎないように配慮する。また、使用する要素については円筒部などの形状が単純な部位では六面体要素を用い、管台や形状不連続部などの複雑な部位では四面体要素を用いる。

3.1.2 解析

次に、地震力や温度など対象となる荷重条件と、適切な境界条件を設定し解析を行う。

(1) 静解析

静的な荷重条件(内圧や自重など)については、静的な構造解析にて応力を算出する。

(2) 動解析

地震動により生じる各部の応力は、時刻歴地震波を入力して各時刻の応答を計算する時刻歴応答解析により算出する。その時刻歴応答解析には、非線形な問題でも解くことができる直接積分法と、線形モデルを対象とし計算が高速なモーダル法とがある。主要機器の解析モデルは線形要素のみで構成されるため、後者を適用する。同じモデルで計算速度のベンチマークを行った結果、モーダル法の方が40倍程度計算が速いことが確認された。

(3) 熱応力解析

過渡時の温度変動に対しては非定常伝熱解析にて温度分布を算出し、その結果をインプットとした静的な構造解析にて過渡中の各時刻点における応力を算出する。

3.1.3 応力評価

得られた解析結果の後処理を行い、設計・建設規格(2)の規程に基づき応力評価基準に従った応力評価を行う。

3.2 シームレス構造解析プロセスの解析結果の例

シームレス構造解析プロセスでの主要機器のFE解析モデルの作成例を図4に示す。解析コードは原子力発電所の許認可で使用実績のある汎用構造解析プログラム ANSYS を使用し、また計算機は、複数の計算機を並列化したクラスターシステムを含め様々な計算環境でベンチマーク計算を行った結果を踏まえ、比較的計算性能が高く運用の容易な汎用解析用ワークステーション1台 (Intel Xeon Gold 6244 [3.6Hz・8コア] ×2CPU) を使用し、材料内部の応力分布や表面のピーク応力を現行の応力解析モデルと同等の精度で計算できるようなメッシュサイズで作成している。

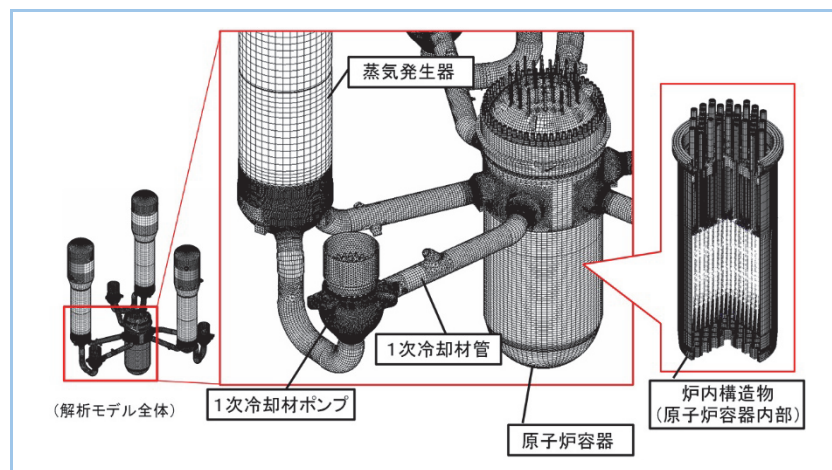


図4 解析モデルの作成例

このモデルが、耐震評価の観点でも適切な解析モデルとなっていることを確認するため、メッシュサイズを変えたパラメータスタディを行い代表的な振動モードの固有振動数の変化を確認するとともに、現行の荷重解析モデルとも固有振動数の比較を行った。結果のイメージを図5に示す。平均のメッシュサイズを2倍程度まで粗くしても代表的なモードの固有振動数に大きな変化はなく、かつ現行モデルとも同等であることから、メッシュサイズが適切であることを確認した。また、計算結果の例として地震時の応力コンター図を図6に示す。発生応力についても概ね現行手法と同等であることを確認した。

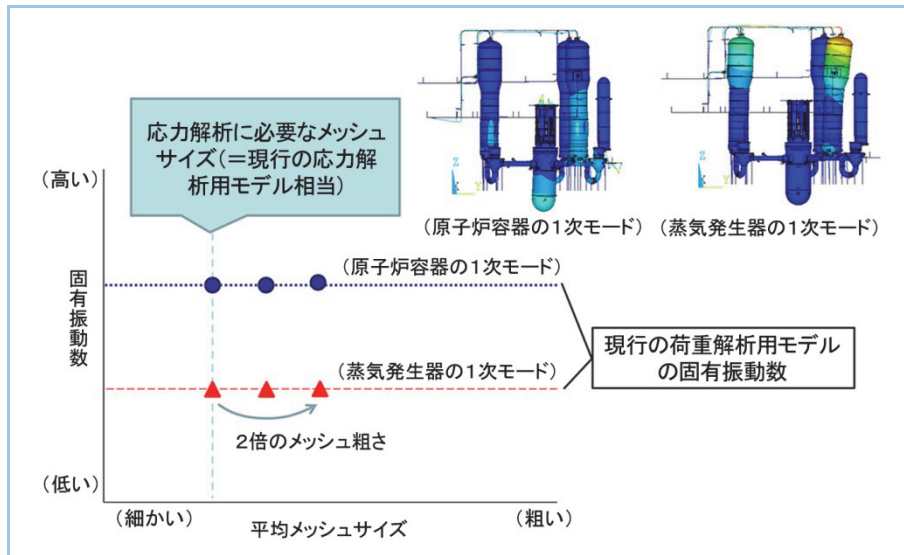


図5 固有振動数の比較によるメッシュサイズの妥当性確認結果

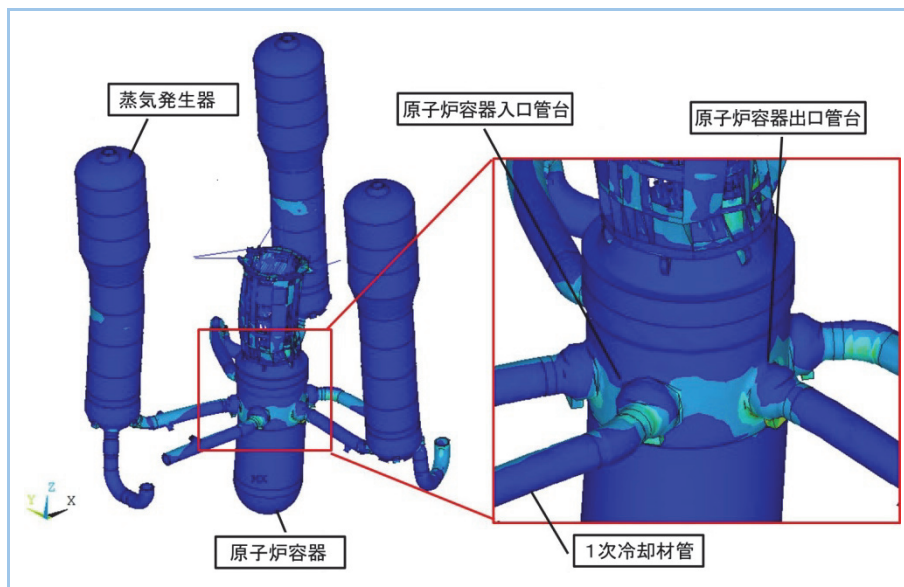


図6 解析結果の例

最も計算負荷が高く計算に時間を要する動解析では、前述の応力解析に必要なメッシュサイズのモデル(要素数約 330 万、節点数約 550 万)を使った1万ステップの地震波に対する計算が 3.5 時間で完了した。これにより原子炉冷却系の主要機器に関する構造解析を、大規模構造解析技術を用いることで実用的な時間で計算が可能な見通しを得た。

4. まとめ

原子炉冷却系の主要機器については、原子炉冷却材の温度や圧力の過渡変化や、地震が起きた際の揺れに対する健全性を確認するため、機器に作用する荷重を荷重解析により求め、その結果を入力として各部位ごとに応力解析を行う構造解析プロセスが用いられてきた。この構造解析プロセスは最新の規格にも合致し、日本国内にある多数の原子力発電所の建設当時から現在に至るまで主要機器の構造健全評価に広く用いられ、信頼性確保に貢献している。

また、解析技術の進歩を背景として原子炉冷却系の主要機器をシームレスな一つの有限要素 (FE) 解析モデルで模擬し、そのモデルを用いて構造解析を行うシームレスな構造解析プロセスを開発している。このシームレス構造解析プロセスは、2017 年度から研究を開始し、3次元ソリッド要素で原子炉冷却系全体を模擬する為のモデル化手法や大規模な構造解析を扱うことのできる計算手法及び計算機の仕様などを検討するとともに、実機の FE 解析モデルを作成して試解析を

行い、地震時の応力や熱応力などが計算できることを確認した。これにより、荷重解析から応力解析に荷重を受け渡す必要がなくなり構造解析プロセスが簡素化されるとともに、設計条件の変更や設計最適化に伴うイタレーションの時間を短くすることができ、開発期間の短縮につながる事が期待される。また、運転履歴(温度、圧力等)から機器の状態をリアルタイムモニターする等、新しい活用も期待される。今後は、過去に実施された加振試験の結果等を用いた妥当性確認評価を行い、新しいシームレス構造解析プロセスの信頼性の確立を進める。

参考文献

- (1) (一社)日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術規定, JEAC4601-2015
- (2) (一社)日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第I編 軽水炉規格>, JSME S NC1-2012
- (3) Seiji Asada, et al., ENVIRONMENTAL FATIGUE EVALUATION FOR CLASS 1 COMPONENTS OF AN ADVANCED PWR, ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2014-28300
- (4) 渡邊啓太ほか, 原子炉冷却系の主系統設備に対する荷重解析から応力解析までのシームレスな評価プロセスの検討, 2020 年度 日本機械学会年次大会, J01222 (2020)