

## AUTODYNのモデル概要及び妥当性確認について

この資料では、AUTODYNコードの概要、原子炉容器の構造応答解析における重要現象のモデル化、及びAUTODYNコードの原子炉容器の構造応答解析への適用に関わる妥当性確認の結果について述べる。

## 1. AUTODYNコードの概要

AUTODYNコードは爆発・衝撃問題のような非線形の強い問題の時刻歴応答解析のための専用コードとして開発された<sup>[1]</sup>。本コードでは、流体（気体及び液体）の流動解析に適したオイラー型計算要素を用いた計算格子、及び構造物の変形解析に適したラグランジェ型及びシェル型計算要素を用いた計算格子を同時に扱うとともに、これら計算格子間の相互作用を扱うことが可能である。これにより、流体の流動と構造物の変形との間の相互作用を考慮した解析（流体-構造連成解析）が可能となっている。特に、流体中の圧力源が周囲の流体を加速して構造壁に圧力負荷を与えるような問題への適用においては、解析対象の幾何形状及び構造物の材料特性、並びに作用する圧力源の特性に基づいて、流体-構造連成挙動を解析し、構造物のひずみ及び変位を計算することができる。

AUTODYNコードは国内外の産業界や研究機関において幅広く利用実績があり、それらの適用解析を通じて同コードの基本的な妥当性は十分に確認され、その信頼性は高いと考えられる。国内の原子力分野においては、水素爆発によるPWR格納容器の健全性評価<sup>[2]</sup>、原子炉容器外における水蒸気爆発によるPWR原子炉キャビティのコンクリート構造の健全性評価<sup>[3]</sup>、及び高速実証炉の設計時における炉心損傷事故時の原子炉容器の健全性評価<sup>[4]</sup>に使用されている。

## 2. 重要現象のモデル化

格納容器破損防止措置の有効性評価において、AUTODYNコードは事象グループ「炉心流量喪失時原子炉停止機能喪失（ULOF）」の機械的応答過程において、発生する機械的エネルギーに対する原子炉容器の健全性の評価に使用される。原子炉容器のひずみ及び変位は、有効性評価の評価項目（「その3 2.4.6 有効性を評価するための評価項目の設定」を参照）のうち、(3)①「原子炉冷却材バウンダリの健全性が維持できること」に関わる重要なパラメータである。AUTODYNコードでは、これらのパラメータの計算に必要な重要現象を以下のようにモデル化している。

- (1) 先行して実施したSIMMER-IVにより計算された熱エネルギーから機械的エネルギーへの変換の過程で発生する圧力源の膨張特性を「圧力-体積曲線」としてモデル化する。
- (2) 圧力源の膨張による原子炉容器内の冷却材の多次元流動、特に上部プレナムのナトリウムスラグの加速と運動エネルギーの発達、カバーガス空間の圧縮、原子炉容器内の圧力分布とその動的変動をモデル化する。

(3) ナトリウムスラグの遮へいプラグ下面への衝突又はカバーガスの急激な圧縮による圧力発生に伴う流体と原子炉容器構造の連成解析を通じて、原子炉容器の弾塑性変形挙動及びひずみを解析する。

なお、(1)に述べた通り、S I M M E R - I V で計算した圧力-体積曲線 (P-V 曲線) を A U T O D Y N に引き渡すことにより、機械的エネルギーの発生と原子炉構造応答の間の整合性の取れた一貫した解析を可能としている。

### 3. A U T O D Y N コードの妥当性の確認

格納容器破損防止措置の有効性評価への A U T O D Y N コードの適用性及び妥当性を確認するため、1970 年代に米国 S R I インターナショナルにて実施された、高速炉原子炉容器の 1/30 スケール試験容器を用いた FV102 試験<sup>[5,6]</sup>の解析を行い、試験容器の最大変形部位の周方向ひずみがほぼ再現できることを確認した。以下には、FV102 試験の概要、試験解析の結果について記す。

#### 3.1 FV102 試験の概要

FV102 試験は、流体-構造連成解析を行う解析コードの検証データ取得を目的として、1970 年代に米国 S R I インターナショナルによって実施された。この試験の目的は、クリンチ・リバー増殖炉 (Clinch River Breeder Reactor, CRBR) 原子炉容器の 1/30 スケールの単純な容器モデルに機械的負荷を与えた場合の応力、ひずみ及び変形を計測することである。FV102 試験は、炉心崩壊事故時の機械的エネルギーの発生に対する構造応答解析を行う解析コードの検証のための米国エネルギー省主催の国際ベンチマークプロジェクトである APRICOT プログラム (Analysis of P R I m a r y C O n t a i n m e n t T r a n s i e n t s) において選定された試験の 1 つである。

FV102 試験の試験装置の概要を図 1 に示す。試験体は円筒容器、上蓋、台、炉心槽及び圧力源 (爆薬) で構成されている。円筒容器は厚さ 5 mm の焼き鈍したニッケル 200 製である。炉心槽は厚さ 24.13 mm の鉛を用いた円筒であり、その外側は厚さ 1.27 mm のアルミ薄膜で覆われている。円筒容器は水で満たされており、その上部 12.7 mm の領域は空気が充填されたカバーガス領域である。炉心槽内に設置された爆薬の膨張エネルギーを利用して CDA 時の機械的負荷を模擬した。炉心槽には圧力隔壁 (MYLAR diaphragm) が設置され、水と爆薬との接触を防止している。3 つの圧力計が円筒容器壁に取り付けられ、13 のひずみゲージが円筒容器外面に設置された。

#### 3.2 FV102 試験の解析

A U T O D Y N コードによる FV102 試験の試験解析に当たって、図 1 に示すように試験装置を 2 次元 R-Z 体系でモデル化した。解析に当たっては、P I S C E S International 社 (当時) が開発した P I S C E S - 2 D E L K コードによる FV102 試験の試験解析<sup>[7]</sup>の情報を参考に、メッシュサイズを 12.7mm とした。圧力源の膨張挙動は、図 2 に示す P-V 曲線によってガス気泡の状態方程式を与える GASBAG モデル<sup>[8]</sup>によって模擬した。この P-V 曲線は、爆薬の膨張に伴う発生エネルギーを計測するための予備試験であるエネルギー較正試験により得られたものである。エネルギー較正試験では、爆薬と膨張材との混合比を調整して複数の試験を行い、圧力源の圧力と体積膨張を直接測定して P-V 曲線を得ている。

流体-構造連成解析における最も重要な評価指標は円筒容器の圧力荷重、力積及び変形である。図 3

には P7 圧力計の位置で計測された圧力及び力積を、AUTODYNによる解析結果と比較して示す。図 4 には円筒容器の残留変位とAUTODYNによる解析結果を比較して示す。これらの図から、円筒容器に作用する力積と残留ひずみがよく模擬できていることが確認でき、機械的負荷が作用する場合の原子炉容器の構造応答解析にAUTODYNコードが適用できることが確認できる。

## 5. 参考文献

- [1] <http://www.engineering-eye.com/AUTODYN/case/index.html>
- [2] O. Kawabata, M. Kajimoto, N. Tanaka, “Hydrogen Detonation and Dynamic Structural Response Analysis for Large Dry Containment Vessels of Steel and Pre-Stressed Concrete Types,” Proc. 8th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 8), Apr. 2-6, Baltimore, MD USA (2000).
- [3] O. Kawabata, “Analyses of Ex-Vessel Steam Explosion and its Structural Dynamic Response for a Typical PWR Plant,” Proc. 12th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 12), Apr. 25-29, Arlington, Virginia USA (2004).
- [4] T. Nakamura, H. Kaguchi, I. Ikarimoto, Y. Kamishima, K. Koyama, S. Kubo, S. Kotake, “Evaluation Method for Structural Integrity Assessment in Core Disruptive Accident of Fast Reactor,” Nuclear Engineering and Design, Vol.227, pp97-123 (2004).
- [5] C.Y. Wang, “Comparison of ICECO code predictions with flexible vessel experiments,” Nuclear Engineering and Design, Vol.49, pp.145-154 (1978).
- [6] “Results of phase 2 of the APRICOT program Final Report,” DOE/SF/01112-T2 (DE82007965), work performed under contract No. AC03-76SF01112, Science Applications, Incorporated, May 1981.
- [7] J.P. Buis, C.J.L. Florie, M.J. v.d. Hoek, W. Pohl, “The PICES Software for NUCLEAR SAFETY A Survey of PISCES Code Application to Nuclear Safety Problems,” PISCES International B.V., 1984.
- [8] “ANSYS AUTODYN バージョン 15 膨張挙動モデル使用方法説明書”、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社、2015 年.

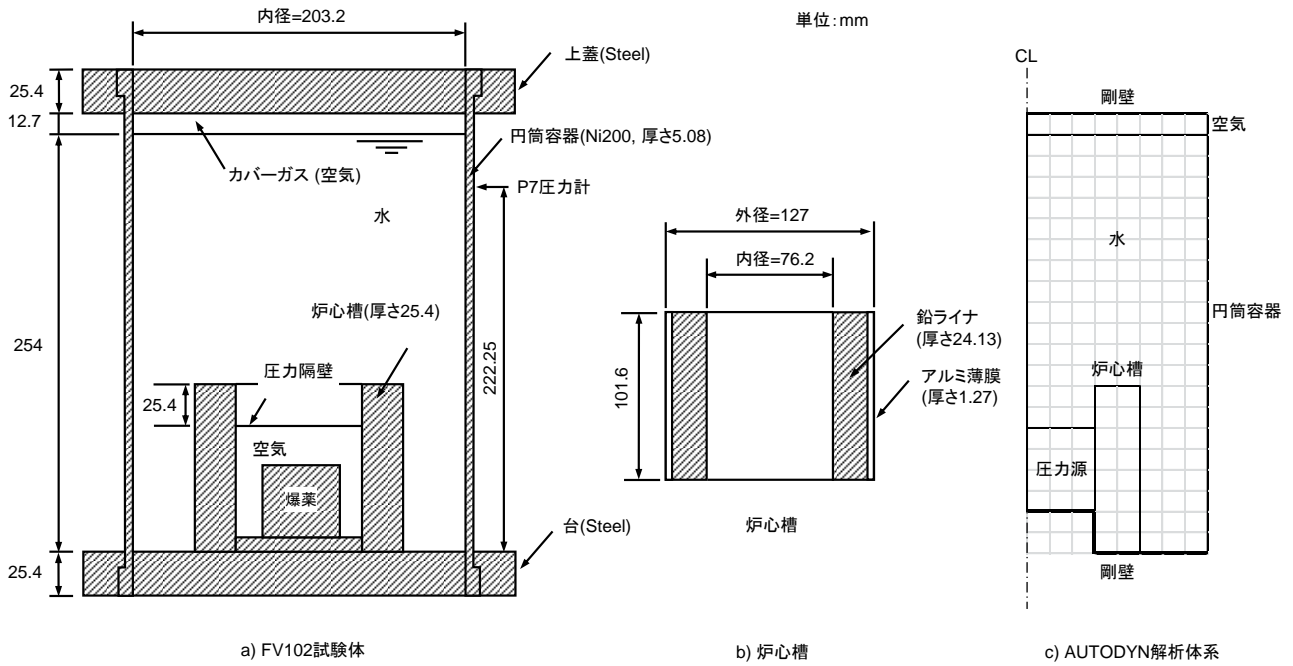


図1 FV102 試験の試験体概要と AUTODYN コードの解析体系

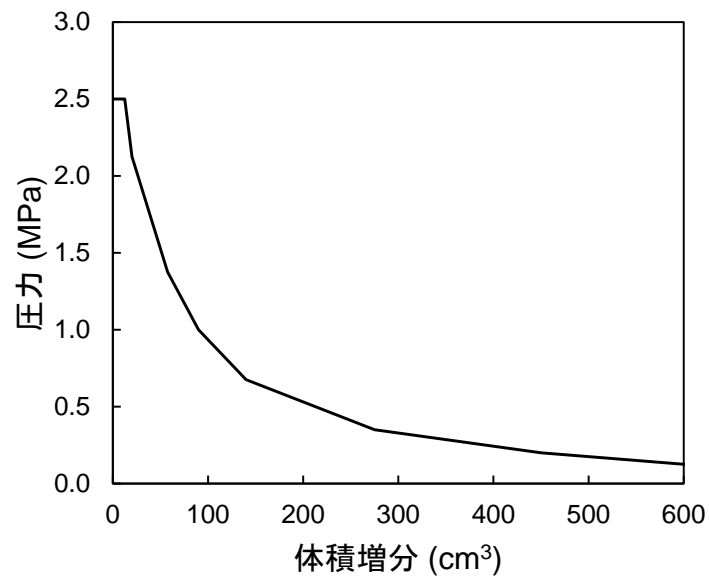


図2 圧力源の P-V 曲線

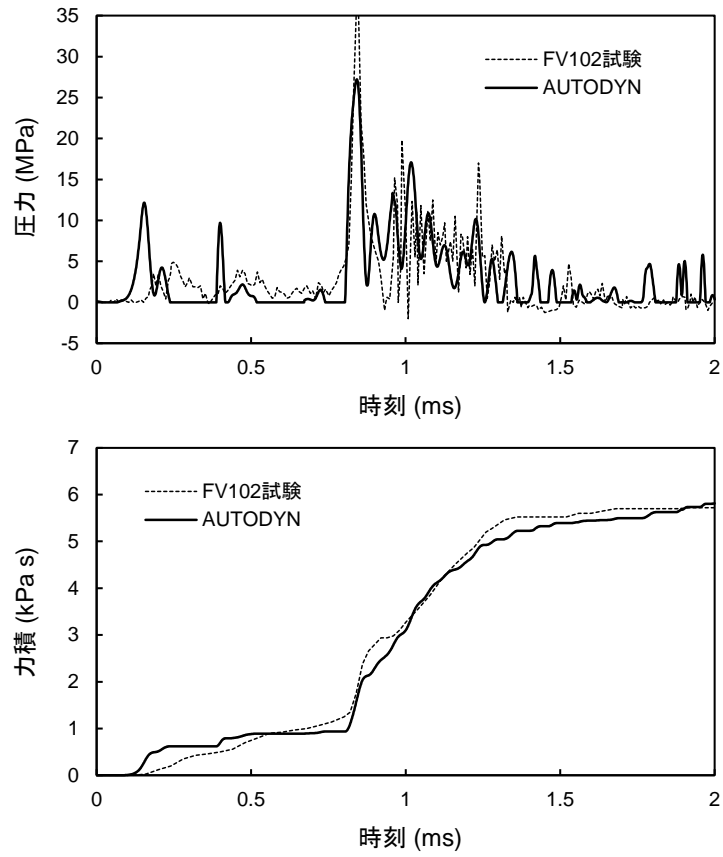


図3 P7 圧力計の位置（円筒容器下端から 222.25mm の高さ）で計測された圧力及び力積

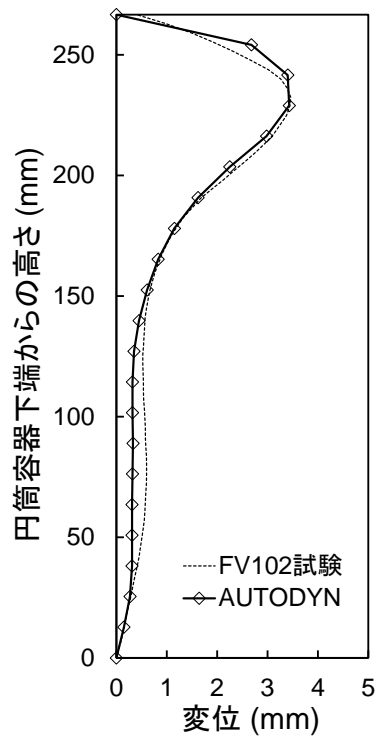


図4 円筒容器の残留変位