### 2020年秋の大会

## 新型炉部会セッション

## SFR 安全標準炉に求められる技術開発の状況

Status of technology development recommended for safety standard demonstration reactor of SFR

### (4) 3 次元免震技術

(4) Three-dimensional seismic isolation technology
 \*深沢剛司<sup>1</sup>
 <sup>1</sup>三菱 FBR システムズ

### 1. はじめに

日本は言わずと知れた地震国である。内閣府によれば、日本は世界の 0.25%の国土面積に比して、マグ ニチュード6以上の地震回数が約2割とされている<sup>[1]</sup>。この数字からもわかるように、日本での地震への 備えは不可欠であるといえよう。地震への備えとして、日本では1980年代初頭から免震技術の研究が本格 化している<sup>[2]</sup>。1995年の兵庫県南部地震によって、免震技術を適用した建築物の観測記録から、その有効 性が実証されている<sup>[3]</sup>。その後、社会インフラを中心に免震技術の普及が進み、今日では一つの構造様式 として定着している。

第四世代炉の候補の一つに挙げられるナトリウム冷却高速炉(以下、高速炉)は、熱効率を向上させる ため軽水炉と比べて、その運転時の温度は高温となる。そのため、高速炉の機器設計では熱応力の低減の 観点から、薄肉構造が指向されている。一方、機器に作用する地震荷重を考えた場合、厚肉構造が好まし い。よって、高速炉の機器設計では、熱荷重と地震荷重の相反する荷重条件に対して調和を図ることが課 題となる。これを解決する一つの方策として、免震技術(積層ゴム系免震装置)を導入することで、機器 に作用する水平方向の地震力を低減させる検討が 1980 年代半ばから行われている<sup>[415]</sup>。また、水平に加え て上下方向の地震力の低減を目的とした3次元免震システムの研究が 2000 年から行われている。この研究 では原子炉建屋を空気ばねで支持し、これによって励起されるロッキング動を油圧機構で抑制するシステ ムが提案され、その有効性が試験及び解析により確認されている<sup>[6]</sup>。

これらの知見を活用しながら、高橋らは、空気ばね、ロッキング抑制機能付オイルダンパ及び積層ゴムから構成される一般建築向けの3次元免震システムを世界で初めて実用化させている「<sup>7]</sup>。このシステムを 導入した地上3階RC建物の東北地方太平洋沖地震時(2011年)の観測記録によって、その免震効果が明 らかとなっている<sup>[8]</sup>。国外でも3次元免震システムの開発が進められている。Ying Zhou らは、複数枚の皿 ばねを用いた上下免震の概念を提示している<sup>[9]</sup>。また Wenguang Liu らは複数の積層ゴムを用いた3次元免 震システムを提案し、その有用性を試験及び解析を通じて明らかにしている<sup>[10]</sup>。このように、国外でも免 震システムの高性能化とその実現に向けた開発が進められている。その高性能化の背景には、構造物の安 全性の向上を目的として、設計で想定する地震動レベルの増大が挙げられる。

新潟県中越地震(2007年)や東北地方太平洋沖地震(2011年)では既設の原子力プラントにて大きな加速度レベルの地震動が観測されている。これを踏まえて、高速炉の設計検討で用いている基準地震動も増大している。これによって、水平のみならず上下方向の地震力の低減も過去に増して重要になっている。また、既設の原子力プラント以外でも大きな加速度レベルの地震動が観測されている。従来、上下地震動は水平地震動に比べて小さいとされてきたが、1995年以降に国内に整備された地震観測網によって、上下地震動がそれよりも大きくなるケースが観測されている。その代表例として、岩手・宮城内陸地震(2008年)では、上下方向に重力加速度(G)のおよそ4倍の加速度が観測されている<sup>[11]</sup>。今後の耐震設計では、過去に増して厳しい地震条件下で、如何に構造物の安全性を確保・向上させていくかが課題となる。

本稿では、地震に対する安全性の向上を目的として、2017年から検討を進めている高速炉向けの3次元 免震システムの開発の取り組みについて紹介する。

## 2.3 次元免震システムの概要

#### 2-1.3 次元免震システムの設計コンセプト

 3 次元免震システムの開発コンセプトは、①水平・上下方向の地震応答低減、②コンパクトな配置性、

 ③高い信頼性の実現である。

①地震応答低減については、ロッキング抑制装置等の付 帯設備を設けることなく、上下方向の地震応答低減効果を 実現させることをコンセプトとしている。また、水平方向 についても従来の水平免震システムと同程度の地震応答低 減効果の確保を目標としている。図1に上下方向の固有振 動数が水平方向の固有周期に及ぼす影響を理論解で求めた ものを示す。一般に、上下方向の剛性を低下(低振動数) させることで、上下方向の地震力を低減させることができ る。一方、この剛性の低下によって、ロッキング動が励起 され、水平方向の固有周期が増大してしまう。これを回避 し、水平・上下方向の地震応答低減効果を確保するために、 本システムでは上下方向の固有振動数を3Hzと設定してい る。

②配置性については、水平免震システム(積層ゴム系免 震装置)と同等の配置性を確保する。これを実現するため には、一般的な水平免震装置と同程度の支持荷重性能を確 保し、これを具現化するためのスペースは水平免震装置が 取り付けられる図2のペデスタル(■)と同等のサイズに しなくてはならない。すなわち、配置性の設計目標は支持 性能を確保したうえで、ペデスタル部に入替が可能な3次 元免震システムを実現させることである。

③信頼性については、付帯設備を設けることなくシンプ

s 考慮した固有周期 5.0 下間有振動数f:3H; 4.0 水平方向のロッキング動を 3.0 Th=3s ロッキング動 2.0 上下方向の地震力 1.0 方向の剛性 0.0 0.1 10 上下方向の固有振動数(Hz) 図 1 上下固有振動数が水平方向の固有周期 に及ぼす影響 --b オイルダンパ 2500 ヨピ 積層ゴム 図2 水平免震システムの側面図

ルな構造を指向し、機械要素技術や免震・制振技術で培われた知見・製造技術を活用することで、安定した力学特性(荷重-変位関係)を実現させることにある。また、そのばらつきを抑制することで、システムとしての品質を確保する。

## 2-2.3 次元免震システムの構成

著者らが提案する3次元免震システムは、積層ゴム、皿ばねユニット及び上下オイルダンパで構成され ている(図3)。皿ばねユニット(皿ばねを並列・直列で組合せたもの)とオイルダンパは平面上に各4基 配置している。水平方向の復元力と減衰力は各々積層ゴムと水平オイルダンパにより、上下方向は皿ばね ユニットと上下オイルダンパで与えられる。本システムは、積層ゴムで生じるせん断力を水平支持構造に 負担させることで、このせん断力が上下オイルダンパや皿ばねユニットに直接作用することを回避してい る。これによって、水平方向と上下方向の免震機能は独立したものとなる。これを実現させるため、水平 支持構造には、積層ゴムで生じたせん断力を受けながら、上下方向の応答変位に追従して稼動可能なしゅ う動材が設けられている。

上記設計コンセプトを具現化するために、本システムの水平方向と上下方向の固有周期は10,000 kNの支 持荷重に対して、各々3.4 秒と0.33 秒(上下固有振動数3 Hz)となるように積層ゴムと皿ばねユニットの 支持機能と復元機能が設計されている(この支持荷重は本システムに導入する積層ゴム(直径1600 mm) の圧縮面圧に換算すると5 MPaに相当)。そして、これを実現させるためのスペースは水平免震装置が取り 付けられるペデスタルのサイズと同規模となり、そのスペースは限定的なものとなる。このスペースで支 持機能と復元機能を実現させるためには、規格基準から逸脱した皿ばねや上下オイルダンパが必要となる。 次章では本システムの基幹要素となる皿ばねユニットと上下オイルダンパの開発状況について説明する。

### 2020年秋の大会



図3 3次元免震システムの構成及び各要素の主要な機能

## 3.3 次元免震システムの上下免震要素

### 3-1. 皿ばねユニット

設計コンセプトの実現にあたり、皿ばねユニットに係わる開発課題は、①コンパクトなスペースで支持 機能と復元機能の両立、②ばらつきの抑制、③高い精度で再現可能な解析モデルの構築となる。支持機能 と復元機能の両立については、10,000 kNの支持荷重に対して、上下方向の固有振動数が3 Hz となるばね 定数を確保しなくてはならない。また、これを実現させるための平面寸法はおよそ 2.5 m×2.5 m と非常に限 られている。そこで、著者らは現行の規格基準を大きく逸脱する大型の皿ばねを複数枚用いて、これらを 並列・直列に組み合わせた皿ばねユニットを開発した。本システムに用いる皿ばねの直径は 700 mm で、 その板厚は 34 mm である。この皿ばねを代表的な皿ばねの規格基準(ISO 19690-1、JIS B2706-2013、DIN 2093) の呼び径と板厚-直径関係で比較したものが図4となる。本皿ばね(★)は直径、板厚とも規格基準を大 きく逸脱しており、その形状を1/2 縮尺(★)としても代表的な規格基準の呼び径を上回る。上記の支持 機能と復元機能を両立させるため、この大型の皿ばねを3 並列に積み重ね、これをさらに6 直列に積層さ せることで、支持荷重に対して必要な上下方向の固有振動数と地震時の応答変位に追従可能なストローク が確保される。したがって、本皿ばねユニットの設計成立性を見通すためには、大型の皿ばねの製作性、 力学特性(荷重-変位関係)の検証が不可欠となる。さらに、原子力施設への導入にあたっては品質を管 理するうえで、力学特性のばらつきを把握し、それを抑制することが必須となる。そこで、大型皿ばねの 力学特性とそのばらつきを検証した試験について紹介する。

本皿ばねの製作性及び設計式の適用性を検証するため、実大サイズのばねを用いた載荷試験を実施して いる。本システムに導入している皿ばねは安定した地震応答低減効果が得られるように、その荷重一変位 関係は一般的な皿ばねと比較して線形特性を指向した設計となっている。図5に実大皿ばねの荷重一変位 関係を試験値と設計値で比較したものを示す。本皿ばねは規格基準を大きく逸脱した形状となるが、その 荷重一変位関係は設計で指向したとおりの線形特性となり、この特性は設計式とよく対応することが確認 されている。さらに、荷重一変位関係のばらつきを確認するため、72枚の1/2縮尺の皿ばねを用いた載荷 試験を実施している。図6に試験値と設計値で正規化したものを示す。製作された皿ばねと設計値との誤 差率は95%信頼区間でおよそ±5%となることが確認された。このように、規格基準を逸脱する皿ばね形状 であっても、設計通りの荷重一変位関係が実現可能な皿ばねを製作できる見通しが得られている。



# 3I\_PL04

#### 2020年秋の大会

しかし、ここでも課題に直面する。それは本システムに導入する皿ばねに限ったことではないが、製作 される皿ばねは程度の差こそあれ、荷重-変位関係にばらつきが生じる。そして、これが皿ばねユニット 間のばらつきに影響を及ぼすこととなる。加えて、本システム1基あたりの皿ばねの利用枚数は72枚(1 ユニット当たり18枚)と多い。ばらつきを抑制するために感度解析を試みた場合、この解析で考慮すべき 組み合わせ数は膨大となることから、これによって適切な組み合わせを求めることはできない。そこで、 著者らは、AIの一種であるメタヒューリスティックアルゴリズムを活用した最適組み合わせ手法を構築し た。この手法は、単体で生じる荷重のばらつきを組み合わせによって吸収することで、各ユニット間のば らつきの抑制が可能となる。その結果、図7のように計4ユニットの荷重-変位関係を高い精度で整合さ せることができる。また、皿ばねユニットの荷重-変位関係は鋼材の弾塑性挙動で確認される履歴ループ と異なったものとなるが、新たに開発した微分方程式による履歴ループモデルを用いることで、地震応答 解析で必要となる皿ばねユニットの荷重-変位関係(図7)を高精度に再現できる。



#### 3-2 上下オイルダンパ

設計コンセプトを実現させるうえでの上下オイルダンパの開発課題は、①コンパクト化、②高振動数・ 低振幅下での高い減衰力の実現、③高い精度で再現可能な解析モデルの構築である。コンパクト化につい ては、設計コンセプトの配置性を実現させるためには、既製品のオイルダンパと比較して、取り付け長を 300 mm 以上短縮させる必要がある。加えて、一般に油圧系は振動数の増加に伴い、減衰係数が二次曲線的 な低下を示す。上下方向の地震応答は、水平方向のそれと比べて低振幅かつ高振動数となる。そのため、 高振動数・低振幅下での高い減衰力の実現は、油圧系にとって不利な条件となる。これらの問題を解決す るため、コンパクトで、かつ高振動数領域でも減衰係数の低下が回避可能なオイルダンパを開発した(図 8)。 その一基あたりの最大減衰力は 2000 kN で、減衰特性(荷重-速度関係)はリニア型とバイリニア型とな っている。

開発した上下オイルダンパの減衰力特性を検証するため、実大サイズの試験体を製作し、加振試験を実施している。試験では、より実現象に近い荷重条件で減衰力を検証するため、地震応答解析で得られた応答変位を試験機への入力信号とする擬似地震波加振を行っている。その結果が図9である。上下オイルダンパは低振幅かつ高振動数下の非定常な入力に対して、高い減衰力を確保できることが確認されている。 また、その減衰力は新たに開発した Double Dashpot Model によって、入力波形や入力振動数によらず、高い精度で減衰力を再現することが可能となっている。



## 2020年秋の大会

#### 4. 免震性能

本免震システムの地震応答低減効果を確認するため、各要素試験で同定した解析モデルを用いて地震応 答解析を実施している。入力には本システムのロバスト性を検証するため、高速炉の基準地震動の加速度 レベルを2倍にしたものを用いている。その水平と上下方向の最大加速度は各々16 m/s<sup>2</sup>、10.67m/s<sup>2</sup>である。 その結果を応答曲線として、水平免震システム(本システムから上下免震機能を取り除いたもの)の応答 と併記して図10に示している。本免震システムは幅広い固有周期領域で上下地震応答低減効果が得られて

いる。また、高速炉の機器の耐震成立性上クリ ティカルとなる原子炉容器の応答については、 それが有する固有周期近傍(0.10秒)の応答加 速度は水平免震(厚肉積層ゴム)と比較して、 およそ 1/2 となっている。この地震応答低減効 果によって、60万 kWe 級タンク型炉の原子炉 容器(直径:16 m)の耐震性が向上するだけでな く、100万 kWe を上回る大型の原子炉容器(19 m)の成立性も見通せるものとなっている<sup>[12]</sup>。



図10 3次元免震と水平免震の上下地震応答比較

#### 5. まとめ

本稿では2017年から検討を進めているロッキング抑制装置を導入することなく、水平・上下方向の地震 応答の低減が可能な3次元免震システムの設計コンセプトを概説した。このシステムは機械要素や一般建 築で多用されている皿ばねやオイルダンパ等の設計・製造方法を活用したものである。これによって地震 応答低減のみならず、それらの安定した力学特性の実現と製作が期待できる。本システムに限ったことで はないが、免震システムは建屋の支持機能と地震応答低減機能を担っている。そのため、免震システムの 設計裕度がプラントに及ぼす影響は大きい。今後は、本システム特有の破損モードを摘出しながら、設計 裕度の考え方を整備していく計画である。

冒頭でも述べたように、耐震設計で要求される地震動レベルは増大傾向にあり、過去に増して厳しい地 震条件に対して構造物の安全性を向上させていくことが課題となる。しかし、地震動レベルの増大ととも に免震技術も新たなシステムが開発されることによって進化してきた。そして、本システムが将来の地震 に対して安全性向上の一助となるように、その実現に向けて努めていきたい。

#### 謝辞

本稿の内容は、経済産業省からの受託研究である「平成 29 年度・平成 30 年度高速炉の国際協力等に関 する技術開発」の一環として実施された成果である。

なお、本稿は2020春予稿からの転載である。

#### 参考文献

[1] 内閣府, 日本の災害対策, 2015 年

[2] 藤田,他2名,積層ゴムによる重量機器の免震支持,日本機械学会論文集,50巻,454号,pp.933-942,1984

- [3] Design Recommendations for Seismically Isolated Buildings, Architectural Institute of Japan, 2016
- [4] 高橋,他4名,FBR プラントへの免震構造適用性に関する研究:その1 鉛ゴム支承の実験,日本建築学会学術講演梗概集 B,構造 I, pp. 983-984, 1986
- [5] T.Inagaki, et al., The present status of DFBR development in Japan, Progress in Nuclear Energy, Vol.32, Issues3–4, pp.281-288, 1998
- [6] M.Morishita, et al., Development of three-dimensional seismic isolation systems for fast reactor application, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3, 2004
- [7] O. Takahashi, et al., Construction of civil building using three dimensional seismic isolation system, World Conference on Earthquake Engineering, 2008
- [8] 富澤,他5名,3次元免震システムを適用した建築物の地震観測記録に関する考察,日本建築学会構造系論文集,第77巻,第679号, pp.1393-1402,2012
- [9] Ying Zhou, et al., Analytical and numerical investigation of quasi-zero stiffness vertical isolation system, ASCE, Vol. 145, Issue 6, 2019
- [10] Wenguang Liu, et al., Static test and seismic dynamic response of an innovative 3D seismic isolation system, ASCE, Vol. 144, Issue 12, 2018
- [11] 青井,他4名,2008 年岩手・宮城内陸地震の地震動の特徴,防災科学技術研究所,主要災害調査 第43 号,2010
- [12] M.Uchita, et al., Seismic evaluation for a large-sized reactor vessel targeting SFRs in Japan, ICAPP 2018, pp.380 386, 2018
- \* Tsuyoshi Fukasawa<sup>1</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Mitsubishi FBR Systems.