

燃料体の跳び上がり量評価に関する試験による確認
(改正 2)

令和 2 年 2 月 3 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. はじめに

炉心群振動解析は、模擬燃料体の装荷体数を削減し部分装荷状態とすることによる炉心等への影響（安全性（「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」）への影響や燃料体の取出し機能への影響等）を確認するために実施した解析評価である。本資料は、炉心群振動解析において評価した跳び上がり量について、解析結果が概ね妥当であることを過去の試験結果等をもとに確認した結果を示す資料である。

2. 跳び上がり量評価の妥当性確認

(1) 妥当性確認の方法

炉心群振動解析にて評価した跳び上がり量について、類似試験結果との比較を行うことで、解析結果が概ね妥当であることを確認する。

具体的には、平成 21 年度の「高速増殖原型炉もんじゅ 新耐震指針に照らした耐震安全性評価」（耐震バックチェック）の際に実施した「もんじゅ」燃料集合体の模擬集合体を用いた振動試験結果と今回の解析結果を比較し、その差が物理的に整合する（流体力の差異によって変動の説明ができる）ことで、評価結果の妥当性を確認する。

(2) 比較対象

ア. 模擬燃料集合体を用いた振動試験

耐震バックチェック時の際に実施した振動試験を比較対象に用いる。この試験では、炉心構成要素の跳び上がり量を確認するため、「もんじゅ」実機の炉心燃料集合体と連結管を実寸で模擬した試験体を用い、地震動は S2 地震動を係数倍した地震波形を使用している。比較対象に用いる試験データを図-1 に示す。また、振動試験を比較対象とした理由を【参考 1】に示す。

イ. 耐震バックチェック時の解析

耐震バックチェックでは、鉛直、水平同時加振を考慮した解析を実施しており、その時の地震動は Ss-D 波を使用している。今回の群振動解析においても、地震動として Ss-D 波を使用していることから、参考として解析結果の比較を行う。耐震バックチェック時に評価した、燃料体の跳び上がり評価結果を図-2 に示す。

(3) 確認の結果

燃料体の跳び上がり量について、模擬燃料集合体を用いて実施した試験の

結果、耐震バックチェック時の解析結果、今回の解析結果を比較し表-1 に示す。

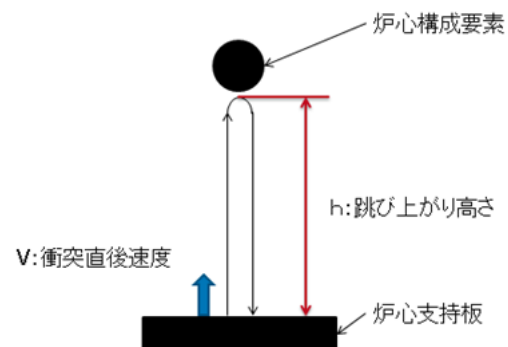
振動試験、耐震バックチェック、及び、本評価では加振波形がそれぞれ異なるが、全て炉心支持板中央部の加速度応答を使用しているため卓越周波数は同等であり、最大加速度についても同等レベルである。よって、地震波による跳び上がり量へ与える加振波の影響は小さいとみられる。

上向き流体力に差がない振動試験と耐震バックチェック時の解析結果は、跳び上がり量が 40mm 前後となっているのに対し、今回の解析結果は 20mm 以下と約半分程度となっている。

ここで、跳び上がりは、炉心支持板と炉心構成要素の衝突によって発生する。衝突後の炉心構成要素は、周囲からの干渉の影響等を除けば、概ね等加速度運動となるため、衝突直後の速度を用いると、跳び上がり高さは簡易的に以下の式で計算できる。

$$h = \frac{V^2}{2g'} \quad (1)$$

<p>h: 跳び上がり高さ V: 衝突直後の速度 g': 見かけの重力加速度</p>
--



一方、廃止措置段階では、1次主循環ポンプは主モータが停止し、ポニーモータ運転である。このため炉心を流れる流量は定格運転時の約 1/10 と大きく低下し、冷却材が燃料体内を流れることにより作用する上向き流体力も大きく低減する。この結果、燃料体に作用する見かけの重力加速度が、0.5G 程度から 0.9G 程度と大きくなっている。

前記(1)式より、跳び上がり量は見かけの重力加速度に概ね反比例する^{注1}。振動試験や耐震バックチェック時の見かけの重力加速度と今回の解析における見かけの重力加速度の比は、 $0.5/0.9 = 0.55$ 倍であり、この程度跳び上がり量が低下すると概算される。

注1：実際には、周囲からの摩擦力（干渉力）や、上向き流体力以外の流体力（排除

質量流体力) などにより、跳び上がり挙動は変化するほか、跳び上がり挙動は非線形性が強い挙動のため、評価結果にはバラつきが生じる。

0.55 倍は、跳び上がり量の比較対象との比率 (0.42 倍 (17/41) ~0.45 倍 (17/38)) と概ね整合しており、今回の解析結果は妥当な値を算定しているものと推察される。

なお、振動試験との跳び上がり量の比較対象との比率(0.42 倍)が、見かけの重力加速度から推定される値 (0.55 倍) より若干小さくなっている。この要因として、比較した振動試験との水平方向の拘束条件の違いが考えられる。振動試験では頂部の水平変位を 5mm に制限しているのに対し、今回の実機解析は 20mm~40mm 程度の頂部水平変位が生じる条件で評価している。実機の頂部変位は、試験に比べてエントランスノズル部の干渉 (水平加振による跳び上がり抑制効果を生じさせる主要因【参考 2】) が強く働きやすく、跳び上がりを抑制する方向に作用する。よって、見かけの重力加速度から推定される比率より小さくなるのは物理的に整合性があり、解析結果は妥当と推察される。

表 1 跳び上がり量の比較

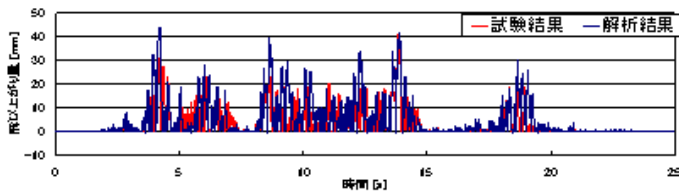
	今回解析		もんじゅ 振動試験	耐震 BC 解析結果
	部分装荷あり	部分装荷なし		
跳び上がり量	17mm	16mm	41mm	38mm
加振波形	Ss-D		S2 地震波	Ss-D
最大加振加速度	31 m/s ²		35 m/s ²	35 m/s ²
見かけの重力 加速度	8.7 m/s ² (0.89G)		4.7 m/s ² (0.48G)	<u>4.7 m/s²</u> <u>(0.48G)</u>

4(4). ⑥ 炉心構成要素飛び上り解析コードの検証

集合体の単体加振試験結果を用い解析コードを検証
解析は水の物性値を使用

検証結果

	最大値	二乗和平方根
試験結果	41.0 mm	5.9 mm
解析結果	43.9 mm	8.6 mm



試験装置全景

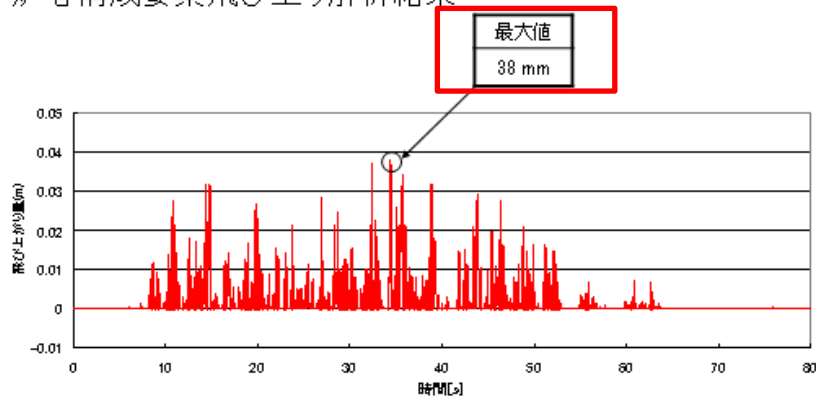
炉心構成要素飛び上り解析結果は、単体加振試験結果と精度良く一致しており、解析コードは妥当である

出典：耐震バックチェック説明資料（原安委 WG2 第 47-8 号）

図-1 もんじゅ振動試験の試験結果

4(4). ⑦ 炉心構成要素飛び上り評価結果

炉心構成要素飛び上り解析結果



鉛直・水平同時加振を考慮した解析結果

最大飛び上り量 38 mm ≤ 評価基準値 45 mm

炉心体系（幾何学的形状）は維持される

出典：耐震バックチェック説明資料（原安委 WG2 第 47-8 号）

図-2 耐震バックチェックの解析結果

4. まとめ

炉心群振動解析において評価した燃料体の最大跳び上がり 17 mmは、耐震バックチェック時に実施した、実機を模擬した燃料体の振動試験結果である 41 mmと比較すると小さな値となっている。しかし、廃止措置段階では炉心を流れる冷却材流量が 1/10 程度となっていることを考えると、燃料体に上向きの流体力がほとんど加わらない。このことと、試験条件と実機条件の差を合わせて考慮すれば燃料体の跳び上がり量は半分程度となることは物理的に整合性があり、跳び上がり量の評価値 17 mmは妥当な値であると推察される。

【参考 1】 もんじゅ単体試験を比較対象とした理由について

1. 概要

本解析の妥当性を確認するうえで、耐震バックチェック時の解析コードの検証に用いたもんじゅ単体試験結果を比較対象に選定した。参考図-1にもんじゅ単体試験の試験装置の概念図を示す。本資料では、このもんじゅ単体試験を比較対象とした理由について説明する。

2. もんじゅ単体試験を比較対象とした理由

振動試験結果から評価値の妥当性を確認するにあたっては、より解析条件に近い条件にて実施された振動試験を用いることが望ましい。過去、実施されてきた振動試験のうち、跳び上がりを主眼においた試験としては、耐震バックチェック時の検証に用いられたもんじゅの単体試験と、REVIAN-3Dの検証のために実施された一連の振動試験（JSFR体系に基づいた単体試験、37体群体系試験、32体列体系試験、及び、313体群体系試験）がある。

これらの試験の中から、もんじゅ単体試験を比較対象とした理由は以下の通りである。

- ・もんじゅ単体試験結果は、もんじゅの燃料集合体を実寸大で模擬した模擬燃料集合体を使用して試験を実施しており、炉心構成要素の振動特性、衝突特性が実機に最も近い。
- ・参考図 2、参考図 3 に示す通り、加振波形は、鉛直・水平の両方とも、実機解析と概ね同等の加速度レベルにて加振している。
- ・跳び上がり量に関するパラメータのうち、影響が大きい上向き流体力を通常運転時の条件に概ね一致させている。
- ・同じく跳び上がり量に影響が大きい反発係数は、この試験データを基に解析にて設定されたものであり、今回の解析と同条件となる。
- ・水平加振によって生じるエントランスノズルの干渉^{注2}による跳び上がりの抑制を模擬した試験となっており、水平加振の影響も考慮されている。

以上のことから、もんじゅ単体試験は実機の通常運転時と概ね同等の跳び上がり量となる試験条件となっている。よって、JSFRの体系を基に、REVIAN-3Dの検証を主眼として試験条件が設定されているその他の検証試験に比べて、実機解析に最も近い条件となっていることから、もんじゅ単体試験を比較対象に選定した。

一方で、この試験は単体試験であることから、実機体系とは群振動挙動に関わる条件が異なるものとなっている。すなわち、群振動挙動が生じた場合の、水平加振による跳び上がり抑制効果の違いがある。

振動試験では頂部水平変位を 5mm に制限している。一方、実機体系においては、群振動挙動による頂部水平変位の可動域は、最外周までのパッド間ギャップの合計値（トータルギャップ）によって決まる。これにより、今回解析における頂部水平変位は、通常装荷時に 20mm 程度部分装荷時に 40mm 程度となっている。振動試験は実機体系よりも頂部水平変位が小さくなるため、水平加振による跳び上がりの抑制効果の主要因であるエントランスノズル部の干渉力が小さくなり、定性的に実機体系より跳び上がりが大きくなる傾向にある。

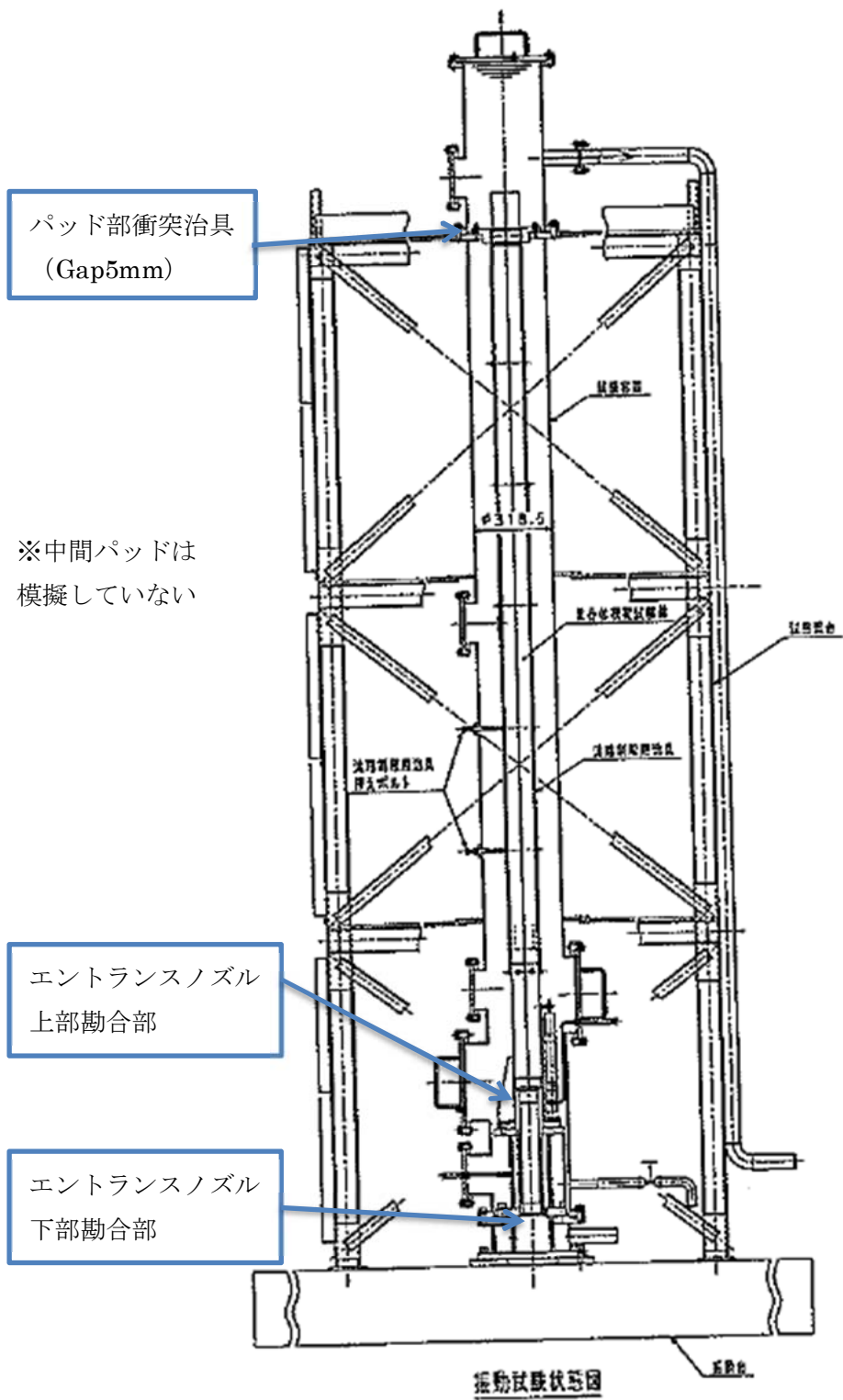
しかし、5mm という頂部水平変位はエントランスノズルによる自由倒れ分（約 2mm）より大きく、エントランスノズル部の干渉を生じさせるには十分大きい。また、炉心構成要素は振動により変形をするため、頂部水平変位がそのままエントランスノズル部の干渉力に比例するわけではない。（参考図-4、参考図 5-1、5-2）

また、振動試験結果（41mm）と耐震バックチェック時の解析評価結果（38mm）が概ね同等となっていることから、このもんじゅの単体試験における水平荷重の抑制効果は、実機解析に概ね近いものになっていると考えられる。

さらに、本文でも示した通り、振動試験との跳び上がり量の比較対象との比率は、見かけの重力加速度から推定される値より小さくなっており、物理的な整合性も説明可能である。

以上の事から、もんじゅの単体試験は群体系ではないという実機解析との差異はあるものの、本試験が比較対象に最も適切であると判断した。

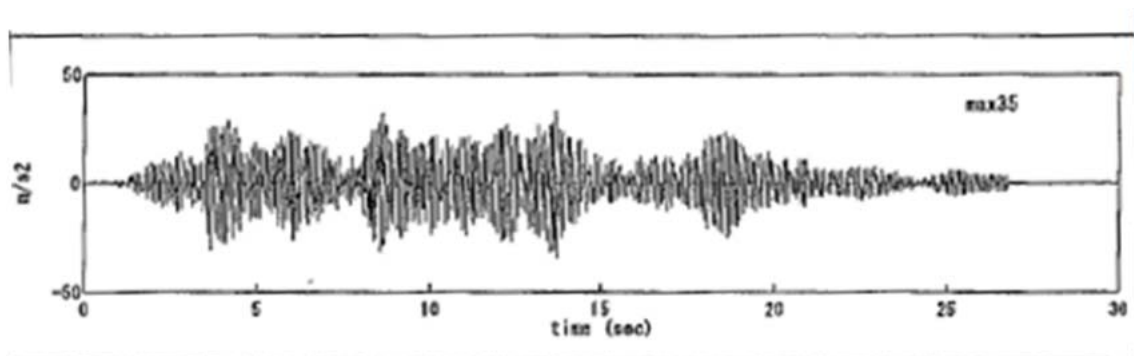
注 2：水平加振によって、干渉が生じる箇所は、パッド部とエントランスノズル部の 2カ所であるが、パッド部の干渉力は接触時間が短く、跳び上がりの抑制効果は小さい。これは、パッド部摩擦係数をパラメータとした感度解析によって確認されている。そのため、水平加振による跳び上がりの低減効果はエントランスノズル部の干渉力が支配的となっている。【参考 2】



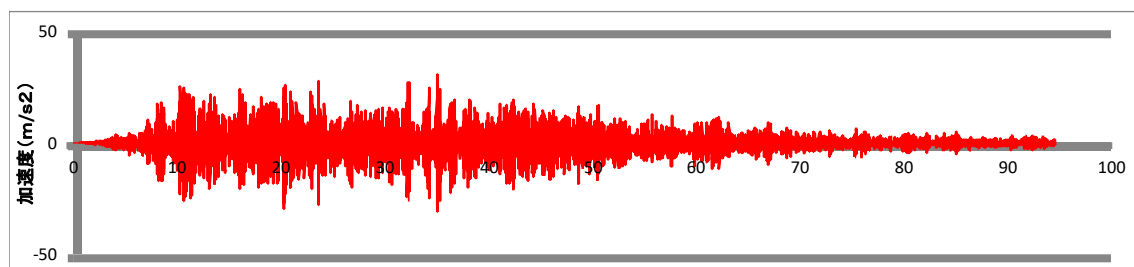
参考図-1 もんじゅ単体試験の試験装置の概念図

鉛直方向

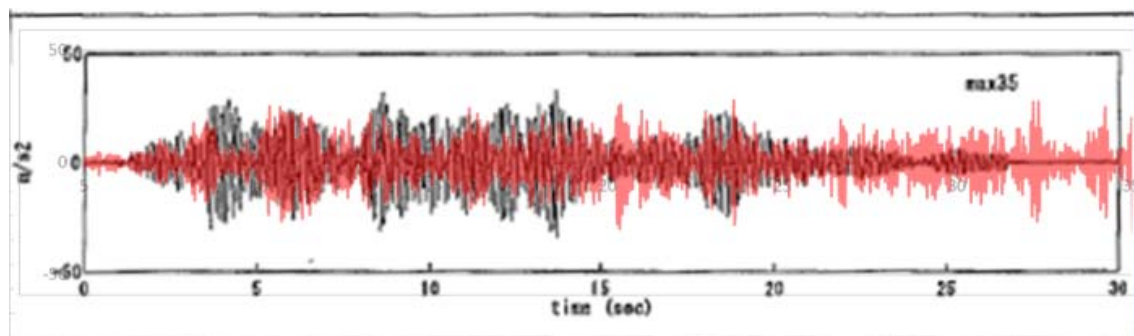
もんじゅ振動試験時の加振波形



部分装荷評価に用いた加振波形



重ね合わせて両者の波形を比較（時間軸を合わせた）

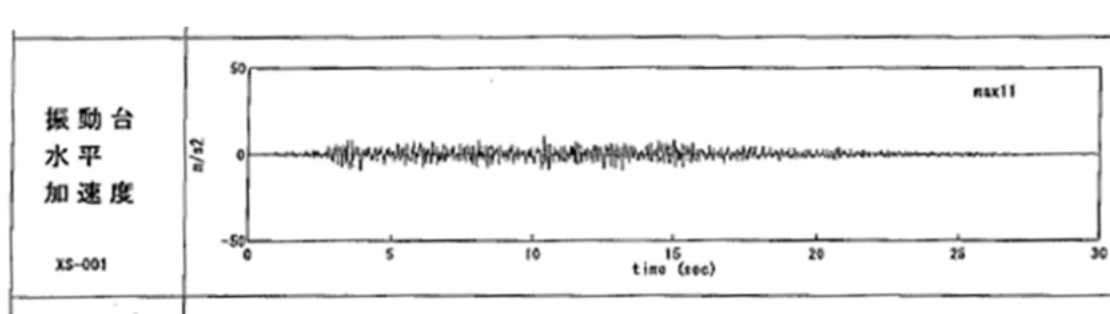


炉心支持板における加速度時刻歴波を比較すると、最大加速度は両者同等のレベルとなっている。

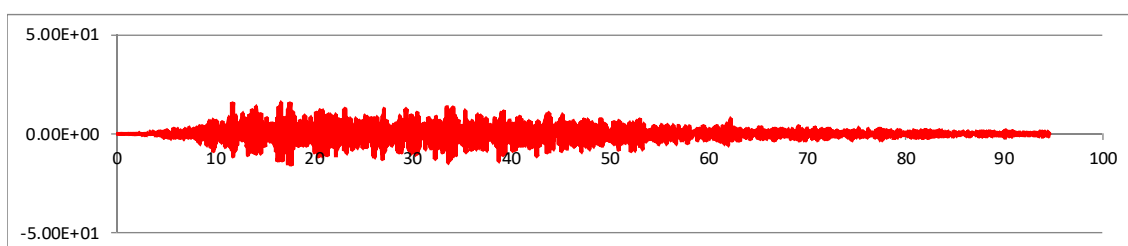
参考図-2 炉心支持板における加速度時刻歴波形の比較 【鉛直方向】

水平方向

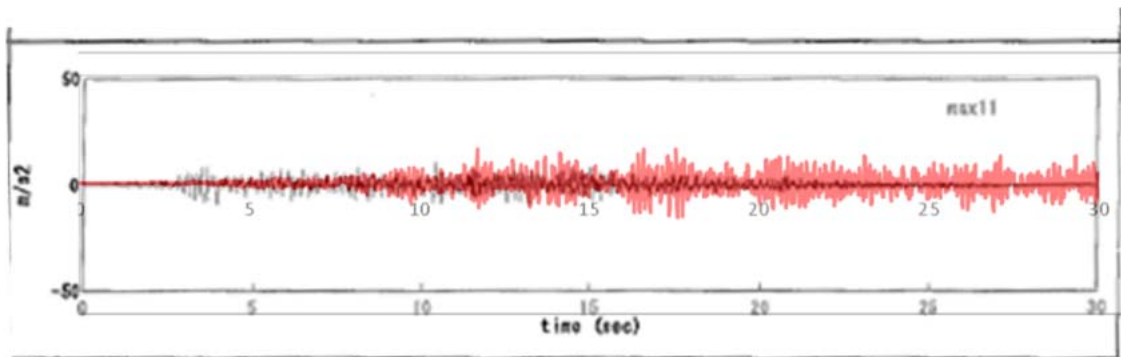
もんじゅ振動試験時の加振波形



部分装荷評価に用いた加振波形

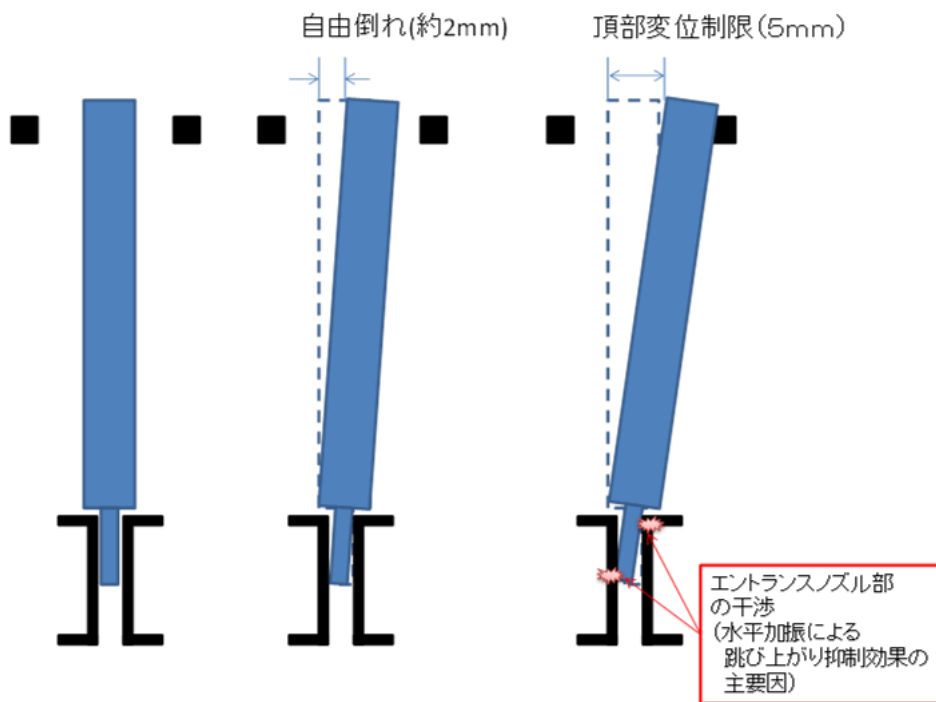


重ね合わせて両者の波形を比較（時間軸を合わせた）

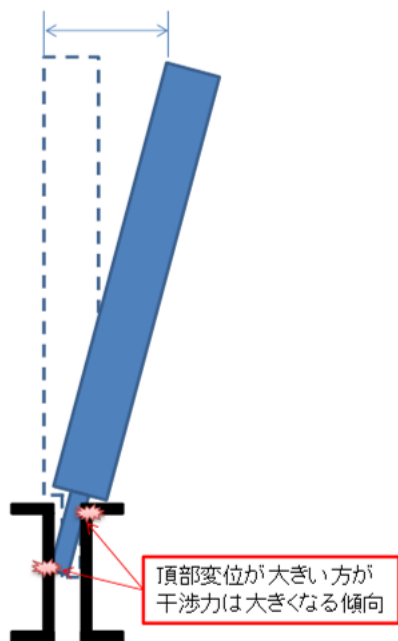


炉心支持板における加速度時刻歴波を比較すると、最大加速度は試験の方が最大値は若干小さい（試験が $\text{max}11\text{m/s}^2$ に対し、解析は $\text{max}15.9\text{m/s}^2$ ）。

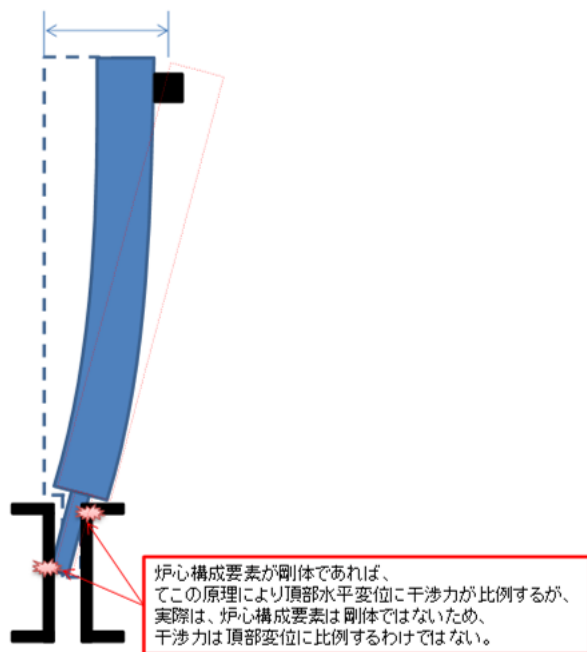
参考図-3 炉心支持板における加速度時刻歴波形の比較 【鉛直方向】



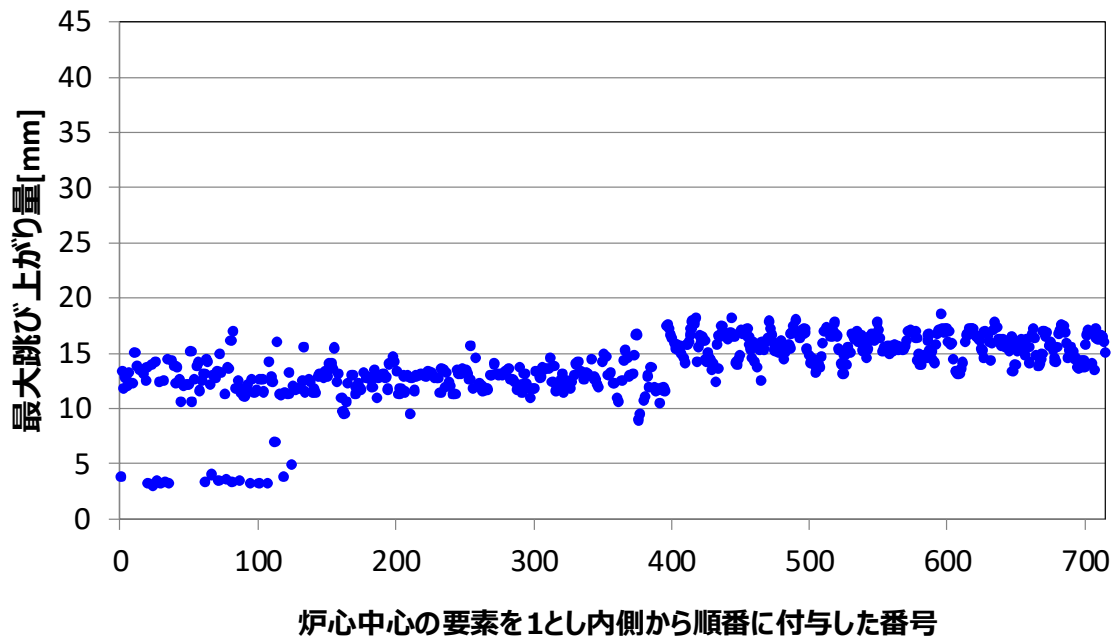
実機体系では、多数のバッド間ギャップが詰まる効果で20mm~40mm程度まで頂部変位は大きくなる



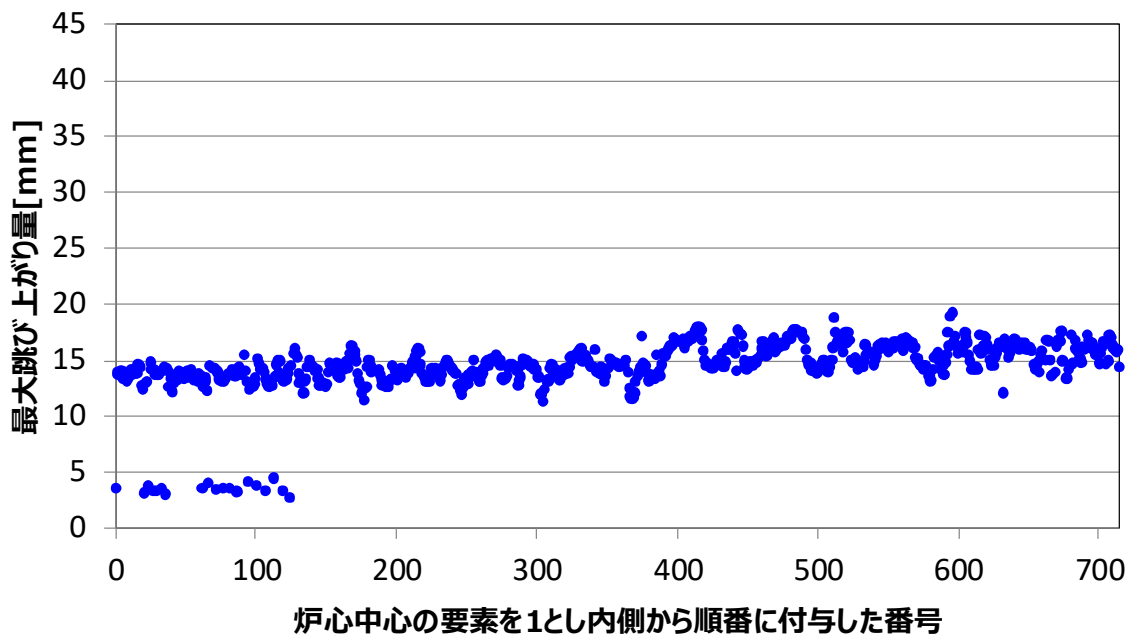
炉心構成要素には、振動によりビーム変形が生じる



参考図-4 エントランスノズル部の干渉力 概念図



参考図 5-1 部分装荷時の 3 次元群振動解析結果による跳び上がり量

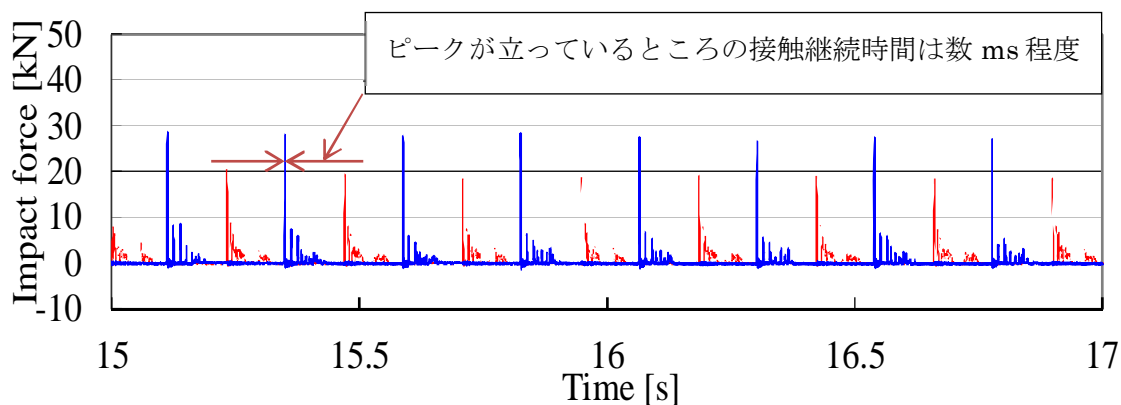


参考図 5-2 通常装荷時の 3 次元群振動解析結果による跳び上がり量

【参考 2】 水平加振による干渉効果について

水平加振によって、干渉が生じる箇所は、パッド部とエントランスノズル部の2カ所であるが、パッド部の干渉力は接触時間が短く、跳び上がりの抑制効果は小さい。一方、エントランスノズル部の干渉力は接触時間が長く、そのため、水平加振による跳び上がりの低減効果はエントランスノズル部の干渉力が支配的となっている。

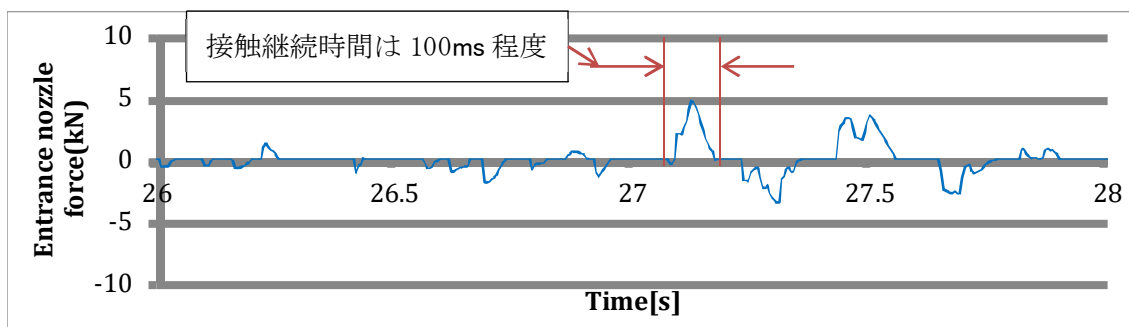
パッド部の接触時間



実寸単体試験 パッド部荷重時刻歴波形

※パッド部の接触時間はロードセルによる計測結果（試験結果）

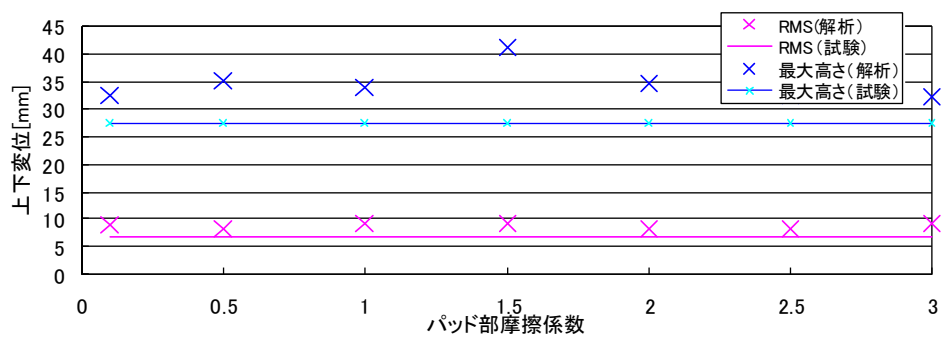
エントランスノズル部の接触時間



エントランスノズル 時刻歴波形（地震波解析結果）

※エントランスノズル部の荷重は測定していないため解析結果により例示

また、JSFR の実寸単体試験を対象に、パッド部摩擦係数を 0.1~3 まで変化させて感度解析を行っている。結果、パッド部摩擦係数は跳び上がりに殆ど影響を与えておらず、パッド部の干渉力が跳び上がりに影響がないことを示している。



摩擦係数と跳び上がり高さのサーベイ結果 (ギャップ 5.0mm)