

## 模擬燃料体の部分装荷に係るコメント一覧

2020/1/31

No.	コメント内容	関連するコメントNo.
第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント		
1	部分装荷における影響の洗い出しについては、燃料取出し作業に限定せず、広範囲に行って、検討項目に抜けが無いようにすること。	
2	評価手法の妥当性は、実験と解析の比較に基づいている。『解析により実験を再現できたと』と判断した場合の根拠や考え方を説明すること。	No.16
3	炉心構成要素単体及び群振動としての振動モードは、衝突あるいは跳び上がりの有無、フル装荷から部分装荷とすることにより変化すると思われる。これらをどこまで正確に模擬しているのか説明すること。	
4	実験ではX方向単独加振のみであり、衝撃力の計測もX方向しか測定されていない。X、Y同時加振の場合は挙動が複雑になると思われるが、本評価手法は十分確認できるのか、説明すること。	No.24
5	上下変位応答の検証にあたり、実寸大試験体系と37体群体系で水中と気中の跳び上がり量の傾向が逆転していることの理由を説明すること。	
6	32体列体系、127体群体系、313体群体系でも跳び上がり挙動に係る実験を行っているのであれば、その実験の条件、結果、考察などを説明すること。	
7	各実験装置の試験体はJSFRにおける燃料要素を模擬しているため、この手法をもんじゅ体系に適用するにあたり、炉心構成要素の種類、振動特性や物性等に関する相違をどのように考慮したのか説明すること。また、評価手法に組み込まれている物性値は試験体に基づく実測値が含まれるが、もんじゅへの適用にあたり同じ項目の測定データを取得したのか、説明すること。	
8	群振動の入力条件となる炉心支持板の地震時時刻歴応答について、その評価手法やモデルと合わせて、その時刻歴データについても具体的に示すこと。 また、これに対する実験体系の入力条件に関する妥当性を説明すること。	No.23
9	もんじゅ部分装荷状態に関する評価に関し、313体群体系で部分装荷を模擬した実験を実施しているのか。実施しているのであればその内容を説明すること。	
10	跳び上がり量を判断基準と比較する際に、考慮すべき誤差や不確かさの項目、値を説明すること。	No.17、No18
11	炉心支持板から燃料体/模擬体への上下方向の地震動は全て同位相で入力しているが、これは実機とは異なる状態である。この影響について保守側となっているかどうかを説明すること。	
12	フル装荷/千鳥装荷で、炉心支持板の上に乗っている集合体の数が変わることで炉心支持板にかかる荷重重量が変わり、炉心支持板の地震時応答性が異なってくる。この観点でどちらが保守側か説明すること。	
13	千鳥では、炉心の流量配分が変わってくる。集合体/模擬体への上向き流体力が変わる。この影響について説明すること。	
14	部分装荷時の地震時構造健全性評価において、耐震バックチェック時に策定した地震動を用いた評価と軽水炉参考波を用いた評価について、飛び上がり量の評価結果に1桁の差がある。この理由と妥当性を説明すること。	
15	REVIAN-3DのV&Vのうち、Verificationに関するものについて、当該解析コードと検証モデルのコードとしての整合性等を整理して説明すること。	
面談時の追加コメント		
16	解析で試験を概ね再現ができたとしているが、その考え方を説明すること。	No.2
17	燃料体の跳び上がり評価ではどのような保守性を考慮しているのか説明すること。	No.10、No25
18	極値統計を分かり易く説明すること。	No.10
19	想定を超えた燃料体の跳び上がりが発生した場合の影響を説明すること。	
20	パッド外れが起きた場合について、試験結果を含め説明すること。	
21	炉心支持板の変位はどの程度となるのか説明すること。	
22	本解析手法の限界(適用できる範囲)について説明すること。また、本解析手法を汎用的に使用する際の課題は何か説明すること。	
23	刺激係数の値からは炉心重量が小さい様に推察される。炉心支持板の応答解析が適切か確認すること。	No.8
24	跳び上がり量について、加振方向(X方向、X-Y方向)との関係を説明すること。	No.4
25	燃料体跳び上がり評価における不確かさ(加振波含む)はどのように評価しているか説明すること。	No.17
26	燃料体の跳び上がり量評価について、解析結果が概ね妥当であることを試験結果から分かり易く説明するとどうなるか示すこと。	

模擬燃料体の部分装荷に係るコメント回答

No.	コメント内容	回答概要
1	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント)                      部分装荷における影響の洗い出しについては、燃料取出し作業に限定せず、広範囲に行って、検討項目に抜けが無いようにすること。</p>	<p>部分装荷による影響要因を網羅的に抽出するため、①安全性への影響、②燃料取出し機能への影響、③冷却機能への影響、④ナトリウム取扱い機能への影響、⑤放射線防護機能への影響、⑥燃料体の処理・貯蔵、放射性廃棄物の処分への影響の視点から、影響要因を抽出した。それら要因について、まず、定性的に影響の有無と影響の程度を確認し、必要な場合は定量的な評価も加えた。その評価結果を一覧として全体を俯瞰できる形に整理した。また影響の有無に関しては、影響分類を単純化して、「安全性」、「燃料取出し機能に影響を与えるか」の観点で整理した。</p>
2	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント)                      評価手法の妥当性は、実験と解析の比較に基づいている。『解析により実験を再現できた』と判断した場合の根拠や考え方を説明すること。</p>	<p>炉心群振動解析コードREVIAN-3Dの開発は、高速炉炉心の地震時における炉心群振動挙動を解析的に評価するために、集合体単体の実験結果と解析結果の比較から着手し、段階的に集合体数を拡大した試験結果と解析結果を比較することにより、解析コードの再現性を確認してきた。                      なお、実験は4つの体系で、①単体試験、②37体群体系試験、③18体及び32体列体系試験、④127体及び313体多数体系試験で実施した。                      試験で得られた群振動挙動の特徴として、                      ①水平加振による跳び上がり量の低減効果                      ②流体による衝突荷重の低減効果、流動による跳び上がり量の増加効果                      ③最外周付近で水平方向の衝突荷重が増大する列配置の効果                      ④多数体系における共振振動数の低減効果、流路網の流体による振動低減効果                      が観察されたが、これらの特徴については、解析コードにより定性的によく模擬できている。                      解析の跳び上がり量や衝突荷重の計算値と実験・試験結果値との比較は、群振動挙動のバラツキが大きいことを踏まえ、大小関係だけで解析の妥当性の判断は難しいが、                      ・時刻歴挙動の定性比較(波形の特徴)                      ・最大値/RMS値などの統計値の定量比較、分布比較                      ・パラメータ変更時の影響の定性比較(気中と水中の違い、上下と水平の重畳の影響、上向き流体力の影響など)                      を総合的に判断して、実験を概ね再現できたと判断した。</p>
3	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント)                      炉心構成要素単体及び群振動としての振動モードは、衝突あるいは跳び上がりの有無、フル装荷から部分装荷とすることにより変化すると思われる。これらをどこまで正確に模擬しているのか説明すること。</p>	<p>炉心構成要素全数に対し、運動方程式を立て、流体による効果も加味して時刻歴応答解析により、全炉心構成要素の挙動を求めることから計算を効率的に行う(計算時間短縮、容量の増大化防止)ため、モーダル解析の手法を採用している。                      具体的には、                      ・各要素について水平XYの2方向、鉛直Zの1方向を考え、XY方向は3次モードまでの弾性変形を考えるとともに、重心廻りの回転を考慮。ただし、鉛直Z軸廻りの回転は考慮しない。                      ・外力として、重力、浮力に加え、パッド部の衝突荷重と摩擦力、エントランスノズル球面座の衝突荷重、エントランスノズルと連結管との摩擦力、流体の排除質量(鉛直方向については炉心構成要素の20%、水平方向については流路網理論に基づき計算)、内部流水による流体力、エントランスノズル下部空間のダッシュポット効果による流体力(もんじゅの構造では作用しない)を考慮。                      固有振動モードの算出に当たっての考え方は以下の通り。                      ・集合体はエントランスノズル部にて0.1ミリの隙間で嵌合されているので、集合体はノズルの上部及び下部で支持された”片持ちはり”として固有モードを算定する。数10mm程度の跳び上がりが生じて、振動モードへの影響はほとんどないので考慮しない。                      ・固有振動モードは、水中において内部の流体質量の影響を受けるので適切に考慮する。                      ・衝突が生じて、その継続時間は数ミリ秒のオーダーであり、地震荷重の交番性からその影響は考慮しない。                      ・全装荷、部分装荷とも固有振動モードは同じ。                      ・4次以降の高次モードについては、周波数100Hzを超え、十分剛な領域となる周波数となるため考慮しない。                      このような解析モデルに、炉心支持板から地震時の加速度時刻歴波を入力し、炉心構成要素の挙動を解析し、パッド部の衝突荷重、エントランスノズル部に発生する応力、跳び上がり量を算定した。                      なお、以下に示す外力は影響が小さいため、考慮しなくとも炉心の群振動挙動を模擬できるとした。                      ・Z軸廻りの回転により発生するモーメント、エントランスノズル部を支点とした遠心力、流体による炉心構成要素壁面のせん断力、炉心構成要素先端部が受ける流体抗力。                      上記の前提で作成した解析コードの妥当性を確認するため、一連の群振動試験を実施し、試験結果と解析結果とを比較して解析コードの妥当性を確認した。                      解析コードであり、モデル化に限界はあるが、群体系における炉心構成要素の挙動を解析にて概ね再現できることを確認した。</p>

模擬燃料体の部分装荷に係るコメント回答

No.	コメント内容	回答概要
4	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント)                      実験ではX方向単独加振のみであり、衝撃力の計測もX方向しか測定されていない。X、Y同時加振の場合は挙動が複雑になると思われるが、本評価手法は十分確認できるのか、説明すること。</p>	<p>群振動挙動は、パッド部ギャップが累積し可動域(トータルギャップ)が増加することにより、衝突荷重、水平変位が増大する。このため、最長列方向(X方向)への加振を主体に試験を行い、解析値と比較し解析コードの妥当性確認を行っている。また、群体系のスweep加振試験で加振方向を90°変えた加振(Y方向加振)も行い、炉心全体の応答挙動(共振振動数と応答倍率)に差異がないことを確認している。また、実験では、X方向だけでなく、斜面間の衝突荷重も測定し、解析値との比較も実施し、解析にてY方向の加振結果を模擬できることを確認している。</p> <p>解析コードでは炉心構成要素モデルに、水平方向の弾性変形を考慮している。X方向加振試験、Y方向加振試験において、解析コードが実験結果を模擬できていれば、X方向、Y方向同時加振においても、解析コードは現象を理論的には模擬できることになる。</p> <p>なお、もんじゅの解析では、炉心支持板への水平方向の地震動入力にはX方向、Y方向に同時入力しており、炉心構成要素の6面に作用する衝突力、摩擦力、流体力等を考慮して評価を実施している。</p>
5	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント)                      上下変位応答の検証にあたり、実寸大試験体系と37体群体系で水中と気中の跳び上がり量の傾向が逆転していることの原因を説明すること。</p>	<p>実寸大試験においては、水平加振により大きな衝突荷重が発生し、跳び上がり量が抑制される効果を確認するため、鉛直方向の入力レベルを同一とした試験を実施した。その結果、水平加振により跳び上がり量を抑制できること、および流水の影響で跳び上がり量が増加することを確認し、解析でもこれらを概ね再現できること(衝突モデルの妥当性)を確認した。</p> <p>37体群体系試験においては、単体試験にて水平加振により跳び上がり量の抑制効果を確認したうえで、気中/水中/流水中において有意な試験データを取得するため、鉛直単独試験時と、鉛直+水平加振時の鉛直方向の加振レベルを変えて試験を行った。試験条件を十分説明していなかったため、コメントにある疑義の発生を招いたものと推察する。</p> <p><b>【単純なモデルによる跳び上がり量に係る定性的な説明】</b>                      気中と静止水中で試験体を同一速度で上方に投げ上げた場合、到達高さは水の浮力を考えると、気中よりも水中の方が高く上がる。一方、同一高さから落下した場合の支持板への衝突速度は、水中よりも気中の方が速くなる。水が下から上へ流れている流水中では、試験体は下から上向きに力を受ける。このため、静止水中と流水中では、初速の投げ上げ速度が同じであれば、試験体の到達高さは流水中の方が高くなる。気中と流水中を比較すると、状況は少し複雑になり、試験体が水中を運動する際に受ける抵抗よりも、流れから受ける流体力の方が大きい場合、流水中の方が気中よりも高く上がる。試験体の跳び上がり高さは、定性的には上記のような関係にある。</p> <p>群振動解析コードとしては、水中と流水中の関係(内部流水の効果)が再現できることが重要である。</p> <p><b>【37体群体系試験での跳び上がり量に関する確認事項】</b>                      鉛直単独加振時よりも水平+鉛直同時加振の方が鉛直方向の入力レベルが約1.4倍大きいことを考慮すると、                      ・実寸試験で確認された水平加振の影響で跳び上がり量が抑制される効果と矛盾しない                      また、                      ・気中と水中を比較すると気中の方が若干跳び上がり量が大きい                      ・水中と流水中を比較すると流水中の方が跳び上がり量は大きい                      ことがわかる。実験で得られたこれらの気中/水中/流水中における跳び上がり挙動の傾向を、鉛直方向の荷重バランスを考慮することで、解析コードはよく模擬できている。</p>
6	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント)                      32体列体系、127体群体系、313体群体系でも跳び上がり挙動に係る実験を行っているのであれば、その実験の条件、結果、考察などを説明すること。</p>	<p>32体列体系試験は、主に、列方向の燃料体数が増えること(もんじゅ規模を模擬)による、水平方向変位、燃料体同士の衝突荷重への影響を確認する試験。燃料体周辺の流体状況が実機と異なるが、燃料体の衝突荷重は容器端部で大きくなる傾向、パッド間ギャップが狭くなると衝突荷重が小さくなる傾向等を確認し、解析でもこの傾向を再現できることを確認。なお、32体列体系試験においても、燃料体の跳び上がりデータを取得しているが、試験装置の試験体支持板の形状及び剛性が、実機炉心支持板の形状及び剛性と大きく異なることから、跳び上がりに関しては試験値と解析値の整合性が良くない。</p> <p>127体多数体系試験、313体多数体系試験は、解析コードの実機適用性を確認するため、振動台の能力を考慮して実施した実機に近い体系の試験。これらの試験においても、37体群体系試験と同様に、水平加振が加わることで燃料体の跳び上がり量が抑制されることを確認。また、支持板の応答影響により、支持板中央部の燃料体の跳び上がり量が大きくなるが、解析でもこの傾向を再現できることを確認した。</p> <p>燃料体の体数が増えた体系では、解析は燃料体の跳び上がり量を大きめに評価することを確認。この原因は、試験では試験体の鉛直Z軸廻りの回転により隣接する試験体が接触し、その摩擦力が試験体の跳び上がりを抑制するが、解析モデルには燃料体のZ軸廻りの回転が考慮されていないため、跳び上がり量を大きめに評価すると推定している。</p>
7	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント)                      各実験装置の試験体はJSFRIにおける燃料要素を模擬しているため、この手法をもんじゅ体系に適用するにあたり、炉心構成要素の種類、振動特性や物性等に関する相違をどのように考慮したのか説明すること。また、評価手法に組み込まれている物性値は試験体に基づく実測値が含まれるが、もんじゅへの適用にあたり同じ項目の測定データを取得したのか、説明すること。</p>	<p>解析コードの開発では、試験体系に合わせ解析コードに組み込まれている数式の定数(物性値に係るパラメータ)を設定している。従って、もんじゅ体系の評価では、もんじゅの燃料体に合わせて定数を変えている。燃料体の寸法、重量等は試験体系ともんじゅ体系では異なる。当然寸法が異なれば、燃料体の剛性も異なってくる。また、もんじゅの燃料体で試験により確認されている値はその値を用いた。減衰定数は、既認可の燃料体の耐震計算の際に用いた数値を用いた。</p>

模擬燃料体の部分装荷に係るコメント回答

No.	コメント内容	回答概要
8	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) 群振動の入力条件となる炉心支持板の地震時時刻歴応答について、その評価手法やモデルと合わせて、その時刻歴データについても具体的に示すこと。</p>	<p>地震の際は、地盤の揺れが建物に伝わり、建物の揺れが原子炉容器に伝わり、原子炉容器炉心支持板の揺れが燃料体へ伝わる。このため、建物(原子炉建物・原子炉補助建物)の地震応答解析を行い、建物の基礎版の床応答を求める。この基礎版の床応答を基にして、原子炉容器の地震応答解析を行う。この解析から得られる炉心支持板の地震時の時刻歴加速度波を用いて炉心の群振動解析を実施した。</p> <p>評価に用いた地震動は、耐震バックチェック時に策定した基準地震動Ss-D(水平:760ガル、鉛直:507ガル)と、近隣の軽水炉を参考にして策定した地震動(水平:995ガル、鉛直:464ガル)の2組の地震動。建物の地震応答解析では、①水平方向:剛基礎を共有する並列質点系の曲げせん断型モデル、②鉛直方向:軸ばねにより各質点を連結した多質点系モデル。それぞれの解析モデルに水平方向、鉛直方向の地震波を入力し応答解析を実施。</p> <p>得られた建物基礎版の応答時刻歴波を基に、原子炉容器の地震応答解析を実施。原子炉容器の地震応答解析は、耐震バックチェック時に使用した、①水平方向:内部コンクリートと原子炉容器とを連成させた多質点はりモデル、②鉛直方向:炉容器内のナトリウムとの流体連成を考慮した次元軸対象モデル、を用いた。それぞれのモデルに、原子炉建物基礎版(水平方向モデル)、または内部コンクリートベDESTAL(鉛直方向)から建物の地震応答解析で求めた応答時刻歴波を入力し原子炉容器の応答解析を実施した。</p> <p>この結果で得られた、炉心支持板の水平方向、鉛直方向の地震動を用い、炉心の群振動解析を実施した。</p>
	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント、つづき) また、これに対する実験体系の入力条件に関する妥当性を説明すること。</p>	<p>振動試験は、高速炉炉心に共通に使用できる群振動挙動を解析するコード:REVIAN-3Dの開発が目的であり、単体試験、37体群体系試験、18体列体系試験、32体列体系試験、127体群体系試験、313体群体系試験を実施している。実験で用いた試験体の縮尺は、単体試験:1/1、37体群体系試験:1/1.5、18体列体系試験:1/1.5、32体列体系試験:1/1.5、127体群体系試験:1/2.5、313体群体系試験:1/2.5である。</p> <p>試験では、炉心支持板の応答周波数の分析を行い、卓越周波数を求め、試験の目的と振動台の加振能力を考慮して、水平、鉛直方向の加振波のレベルを設定した。一連の群振動試験では、正弦波による加振を先に行い、その上で、模擬時刻歴波を用いた加振を実施。具体的には、正弦波掃引加振(卓越振動数を挟む振動数域)、正弦波加振(卓越振動数)、模擬時刻歴波加振(実証炉の設計研究で設定した時刻歴波)である。</p> <p>群振動試験で用いた模擬時刻歴波は、REVIAN-3D開発当時に開発を進めていた実証炉を対象としてももんじゅの場合と同様の手法で得た炉心支持板の応答時刻歴波を係数倍した地震波である。もんじゅの地震波との間に直接の関係はないが、地震動から原子炉構造応答までの高速炉の設計成立性や健全性評価に用いる応答時刻歴波であり、解析手法の妥当性を評価する時刻歴波としては妥当と考える。</p>
9	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) もんじゅ部分装荷状態に関する評価に関し、313体群体系で部分装荷を模擬した実験を実施しているのか。実施しているのであればその内容を説明すること。</p>	<p>313体多数体系試験では、燃料体の一部を取出した部分装荷状態を対象として、水中において水平加振の試験を実施している。</p> <p>部分装荷では、燃料体未装荷箇所が空間となり、隣接する燃料体が6体から3体に減り、燃料体の可動域が大きくなる。このため、地震時には燃料体の水平方向変位が全装荷時に比べ大きくなることが予想され、試験により全装荷状態と部分装荷状態の差異を確認した。</p> <p>また、解析コードは燃料体頂部の水平方向の変位挙動を模擬できており、最大変位も概ね一致することを確認した。燃料体の未装荷箇所ができることによる衝突荷重の増加は小さく、この状況は実験、解析とも同様の傾向であった。</p>
10	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) 跳び上がり量を判断基準と比較する際に、考慮すべき誤差や不確かさの項目、値を説明すること。</p>	<p>燃料体の跳び上がり現象は、衝突現象という非線形現象をモデル化し評価していることから、跳び上がり量はバラツキを有する現象となる。従って、解析モデルに含まれる影響程度の小さい個々の誤差要因は、衝突現象のバラツキの中に包含されてしまう。このため、跳び上がり量の最大値を評価することに着目し、極値統計の考え方を適用して、最大値評価の妥当性を確認している。</p> <p>具体的には、試験と解析の跳び上がり量の度数分布を整理し、その分布形状が似た形をしていること、解析値と実験値で同等の値が得られることを確認している。これは、解析によって実機の燃料体の跳び上がり量の最大値を、統計論的に一定の信頼度をもって推定できることを意味する。</p> <p>また、多数体の体系では、解析による跳び上がり量評価は、試験に比べより保守側の評価を与えることを確認している(解析モデルが燃料体の鉛直Z軸廻りの回転を考慮していないことが原因と推定)。このため、もんじゅ実機体系の跳び上がり量評価は、解析値の最大値としておくことで一定程度の信頼度をもった評価となっている。</p>
11	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) 炉心支持板から燃料体/模擬体への上下方向の地震動は全て同位相で入力しているが、これは実機とは異なる状態である。この影響について保守側となっているかどうかを説明すること。</p>	<p>炉心支持板は2枚の板が700本以上の連結管で接続され、剛性が高い構造となっている。しかしながら、荷重は炉心支持板周囲で支持されていることから、鉛直方向に振動する場合、中央部の振動が大きい。燃料体の跳び上がり評価する場合、中央部の振動を入力した方が、燃料体の跳び上がり量は大きくなる。このため、評価結果が保守的な値を与えるよう、解析では炉心支持板の上下方向の振動は、炉心支持板中央部の解析値を一様に入力しており、燃料体装荷位置の差は考慮していない。</p>

模擬燃料体の部分装荷に係るコメント回答

No.	コメント内容	回答概要
12	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) フル装荷／千鳥装荷で、炉心支持板の上に乗っている集合体の数が変わることで炉心支持板にかかる荷重重量が変わり、炉心支持板の地震時応答性が異なってくる。この観点でどちらが保守側か説明すること。</p>	<p>部分装荷では、燃料体が最大124体減る。重量では約23トン減るが、炉内構造全体の重量約430トン(炉容器全体では約1200トン)と比較すると約5%とそれほど大きいわけではない。振動解析では重量が減り、固有周期が短くなる方向に作用するが、実際に応答解析を行うとその影響は小さく、炉心支持板の水平方向の固有周期はほとんど変わらない。 炉心支持板上に加わる燃料体等の荷重は全装荷時において約150トンである。このため、燃料体取出し完了時に荷重は約15%減る。炉心支持板の鉛直方向の剛性は変わらないので、炉心支持板上に積載される重量が減れば、固有周期は短くなる。一方、炉心支持板の鉛直方向の固有周期は0.075秒以下であるが、地震動Ss-Dの鉛直方向の加速度応答スペクトルを見ると、この領域では固有周期が短くなると、応答は小さくなる。また、炉心支持板に載る荷重が減れば、定性的には炉心支持板のたわみも小さくなり、地震時の鉛直方向振動の振幅も小さくなる。 以上より、炉心支持板の地震時の応答解析は、全装荷状態で行うことが保守側の評価結果を与える。</p>
13	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) 千鳥では、炉心の流量配分が変わってくる。集合体/模擬体への上向き流体力が変わる。この影響について説明すること。</p>	<p>燃料取出時は1次系循環ポンプはポニーモータ運転であり、循環流量は定格運転と比較して1/10程度と小さい。また、流体力は概略流速の2乗に比例することから、その影響は定格運転時に比べ1/100程度。このため、部分装荷における群振動解析では、浮力は考慮しているものの上向き流体力はゼロとして解析している。 部分装荷で、燃料体が装荷されない空間が生じると、その部分の流動抵抗が小さくなり、未装荷部分に冷却材が多く流れ、燃料体部に流れる流量は低下する。このため燃料体に働く上向き流体力は更に小さくなる。 燃料体が抜けた空間を流れる冷却材流量は増加するが、通常の燃料交換においても、燃料引抜部の冷却材は増える。このような状況で、燃料交換が行える実績があることから、燃料体未装荷部分の流量増加は、燃料取出し機能に影響を与えない。 なお、炉心部の圧力損失が小さくなることで、循環流量が増えるが、一方では1次主冷却系循環による主冷却系統側の圧力損失が大きくなることから、冷却材の循環流量は、一定流量以上増えることはない。</p>
14	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) 部分装荷時の地震時構造健全性評価において、耐震バックチェック時に策定した地震動を用いた評価と軽水炉参考波を用いた評価について、飛び上がり量の評価結果に1桁の差がある。この理由と妥当性を説明すること。</p>	<p>Ss-D波と軽水炉参考波を比較すると、水平方向の加速度では軽水炉参考波は995ガルとSs-D波の760ガルに比べ大きい、鉛直方向の加速度では軽水炉参考波は464ガルとSs-D波の507ガルに比べ小さい。また、鉛直方向の応答スペクトルで比較(炉心支持板の固有周期0.075秒と比較)しても、軽水炉参考波はSs-D波に比べ小さく、燃料体の跳び上がりは小さくなる。 実際の炉心支持板の加速度時刻歴波で比較すると、軽水炉参考波は1822ガルでありSs-D波の3090ガルと6割程度となっており、軽水炉参考波による跳び上がり量が小さくなることは妥当である(跳び上がり量は気中では初速の2乗に比例する)。 また、これまでも説明したように、燃料体は衝突を繰り返し、燃料体が落下した際、炉心支持板の上向き速度が大きい時に大きく跳び上がる。軽水炉参考波は、地震動の継続時間が短く、燃料体が繰り返し炉心支持板に衝突する機会が減ることも最大跳び上がり量が小さくなる要因となる。</p>
15	<p>(第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント) REVIAN-3DのV&amp;Vのうち、Verificationに関するものについて、当該解析コードと検証モデルのコードとしての整合性等を整理して説明すること。</p>	<p>炉心群振動挙動を3次元でシミュレーションする解析コードREVIAN-3Dは、群振動挙動を解析的に評価するために、単体の試験から着手し、段階的に試験体系を拡大し、解析コードの整備を進めてきた。解析コードの開発は、平成20年(2008年)から着手した。その当時、ASMEにおいてV&amp;V 10-2006が公表され、日本においても解析コードのV&amp;Vの考え方が認識されるようになっていた。このため解析コードは、ASMEのV&amp;Vの考え方を念頭に置き開発を進めてきた。 実験と解析とを比較しながら、解析コード開発を進めてきたが、具体的には個別の計算(数値)モデルを検証し(Verification)、実験による妥当性確認を行い(Validation)、解析と試験の差が大きければ計算モデルの修正を行い、解析コードの信頼性を確保してきた。 解析コード全体を俯瞰して見た場合、Verificationとして区分される代表的な事例を挙げると、①自由落下挙動の計算モデルを理論解と比較(解析刻み時間が適正であることの確認)、②自由落下時の跳び上がり挙動を理論解と比較(衝突時の跳び上がり高さ、滞空時間の確認)、③自由落下時の隣接燃料体との摩擦効果効果を理論解と比較、④流路網流体力の固有値解析を理論解と比較、⑤解析モデルに組み込まれる数式の物理定数は実験による確認値を使用、等である。</p>

模擬燃料体の部分装荷に係るコメント回答

No.	コメント内容	回答概要
16	<p>(面談時の追加コメント) 解析で試験を概ね再現ができたとしているが、その考え方を説明すること</p>	<p>炉心群振動解析コードREVIAN-3Dの開発は、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・群振動挙動への主要な影響因子を特定</li> <li>・その影響を確認できる体系の試験を実施し、試験データを取得</li> <li>・解析コードで、影響因子の効果を確認</li> </ul> <p>というステップを踏みながら進めてきた。</p> <p>具体的には、試験は4つの体系:①単体、②37体群体系、③18体及び32体列体系、④127体及び313体多数体系で試験を実施した。</p> <p>試験で得られた群振動挙動の特徴のうち、代表的事例として</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①試験: 垂直加振に水平加振が加わると跳び上がり量が低減する効果</li> <li>②試験: 流路網の流体力により衝突荷重が低減する効果</li> <li>③試験: 内部流水により跳び上がり量が増加する効果</li> <li>④試験: 最外周付近で水平方向の衝突荷重が増大する列配置の効果</li> </ul> <p>等を確認し、主たる影響因子の影響程度を確認した。</p> <p>解析の跳び上がり量や衝突荷重の計算値と試験結果値の比較は、群振動挙動がバラツキの大きい現象であることを踏まえると、単純に数値の大小関係だけを比較して解析の妥当性を判断することには限界がある。そこで、試験で確認された群振動挙動の特徴を、時刻歴挙動の定性的比較(波形の特徴比較)、解析値の統計量(最大値/RMS値等)の比較を実施し、それらの比較検討結果を総合的に判断して、解析は試験を概ね再現できていると判断した。</p> <p>なお、解析の精度の観点から、試験結果全体を俯瞰すると、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・最大跳び上がり量に関しては、±20~30%程度の精度で評価。</li> <li>・最大衝突荷重に関しては、+60%程度(保守側<sup>※</sup>)の精度で評価。</li> </ul> <p>※: 解析モデルでは、燃料体のZ軸廻りの回転を考えていない。この結果、解析モデル上では燃料体同士の衝突がパッド部の面同士の衝突となり、解析により算出された衝突荷重は実際の衝突現象に比べ大きな値となる。</p>
17	<p>(面談時の追加コメント) 燃料体の跳び上がり評価ではどのような保守性を考慮しているのか説明すること</p>	<p>燃料体の保有する崩壊熱も放射能レベルも十分減衰しており、冷却機能を喪失しても燃料被ふく管が破損することはない。また、燃料取扱事故が発生しても、周辺公衆に対し著しい被ばくリスクを与えることなく安全性は確保されている。このため、燃料体の跳び上がり評価では、現実的に想定される条件設定の下で基本的にノミナル値ベースの解析評価を実施している。</p> <p>例えば、構造物の地震応答解析では、設計値を使うことが基本となっている。これは構造物の剛性が固有周期に影響を与えることによる。今回の炉心群振動解析においても、解析に用いる定数は、設計値あるいは200°Cにおける材料の物性値、実験による実測値を使用している。従って、振動パラメータや物性値等に保守性を見込んでおらず、平均的挙動を示す結果となる。燃料体の跳び上がり評価で考慮している保守性は、機器の耐震評価と同様に、評価に用いる地震動、機器の減衰定数、炉心支持板の応答に保守性が含まれる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①基準地震動策定に当たっては、考慮対象とする活断層の規模、断層面及びアスペリティの設定位置、応力降下量等の不確かさを考慮して、保守的に策定する。また、もんじゅにおいては大きな地震は、距離が近い活断層によってもたらされるが、逆に地震動の継続時間は短い。しかし、応答スペクトル手法に基づく地震動設定では、震源が遠い活断層の規模と距離を考慮しており、地震動の継続時間は十分長い。この結果、応答スペクトル手法に基づく地震動設定は、地震動継続時間の観点から保守的な設定となっている。</li> <li>②機器の減衰定数は、設備機器設計側の評価では、規格値を採用しているが、実際の機器・構造が有する減衰定数はこの数値よりも高いことから、地震時の応答は保守側の評価となる。</li> <li>③炉心支持板は、周辺部に比べ振動が最も大きくなる中央部の応答を用いて評価を実施している。炉心支持板中央部の地震応答を用いることで、最大跳び上がり量が保守的な値が得られるようにしている。</li> </ul>
18	<p>(面談時の追加コメント) 極値統計を分かり易く説明すること</p>	<p>燃料体の跳び上がりは、炉心支持板との衝突現象を伴うため、確定論的に燃料体の挙動を追うことには限界がある。しかし、炉心支持板の振動が一定の振幅の中で振動すること、燃料体の炉心支持板への衝突速度も一定の幅の中で変動することを考えれば、確率論的に取り扱うことは可能である。</p> <p>評価の対象としているのは、燃料体の最大跳び上がり量である。燃料体個々の跳び上がり量も分布を持つ。解析や実験によって評価対象としている値は、それぞれの燃料体跳び上がりの最大値である。これは、個々に分布を有したデータの中から、最大値を抽出し、その最大値の分布がどうなるかを調べることに等しい。</p> <p>このような、最大値の分布を調べる方法として、極値統計論がある。この理論を37体群体系実験に適用し、跳び上がり量がどのように整理されるか調べた。</p> <p>燃料体の最大跳び上がり量の分布は概ね二重指数分布(Gumbel分布)に従うことを確認し、燃料体跳び上がり量の最大値は、一定の信頼度を有して推定可能なことを確認した。また、37体群体系の跳び上がり実験では、解析が実験結果を保守側に評価することも確認した。</p> <p>また、もんじゅ燃料体の跳び上がり量評価結果は、ほぼ二重指数分布に従うことが確認されており、解析による燃料体の跳び上がり量評価は一定の信頼度をもって最大跳び上がり量を推定している。</p>

模擬燃料体の部分装荷に係るコメント回答

No.	コメント内容	回答概要
19	(面談時の追加コメント) 想定を超えた燃料体の跳び上がりが発生した場合の影響を説明すること	<p>燃料体の跳び上がりが40mmを超えると燃料体頂部が燃料交換装置等との干渉、45mmを超えると燃料体同士の上パッド外れが発生し、燃料取出し機能に影響を与える可能性がある。40～90mmの範囲で、これ以外に燃料取出しに影響を与えそうな因子は、燃料体頂部の炉心上部機構下端面との干渉、燃料体エントランスノズル部と連結管との吻合部外れがある。</p> <p>なお、パッド部は上下に7.5 mmのテーパを有しているため、パッド部高さ(45mm程度)を超えて跳び上がり、燃料体が隣接燃料体のパッド部上に乗ってしまったままとなる可能性は小さく、元の位置に戻る。</p> <p>想定を超えて燃料体の跳び上がりが発生し、装置や設備に異常が発生し、燃料体の取出しが不能となった場合は、原子炉容器の液面を下げる等して炉内の状況を確認し、設備の復旧・補修を行う。</p>
20	(面談時の追加コメント) パッド外れが起きた場合について、試験結果を含め説明すること	<p>実際にパッド外れが生じる炉心構成要素は一部であり、全体的な水平挙動は殆ど変化がないことが強加振条件による振動試験によっても確認されている。パッド外れが生じた場合は、パッドの接触条件が変わり、パッド部のギャップが大きくなる。これにより、炉心構成要素の水平方向の可動域が広がり、水平変位が大きくなるが、パッド部は角度の浅いテーパを持っており、跳び上がりによって乗り上げたとしても自重により落下する。</p> <p>なお、水平変位が大きくなった場合、運転時における制御棒挿入性を評価に影響が大きい。廃止措置段階においては、制御棒は既に挿入されている。また、炉心に残る燃料体の数も減っており、制御棒が無くても原子炉は臨界になりえない。仮にパッドが外れるような跳び上がりが生じた場合でも、原子炉施設の安全性は確保されている。</p>
21	(面談時の追加コメント) 炉心支持板の変位はどの程度となるのか説明すること	<p>燃料体の跳び上がり評価に用いた炉心支持板の鉛直方向の加速度時刻歴波を、2回積分すれば炉心支持板の鉛直方向の変位が求まる。ただし、建物も鉛直方向に揺れていることから、基準位置を設定する必要がある。原子炉容器の鉛直方向の振動は、ペDESTAL部から原子炉容器側に伝わることから、ペDESTAL部を基準に、炉心支持板の鉛直変位を算定する。</p> <p>ペDESTAL部の鉛直変位と炉心支持板の鉛直変位の差から炉心支持板の鉛直方向の変位量(ペDESTAL部に対する炉心支持板の相対変位)を評価すると、最大4.2mmとなる。炉心支持板はこの程度、鉛直方向に変位しているものと推定される。</p>
22	(面談時の追加コメント) 本解析手法の限界(適用できる範囲)について説明すること。また、本解析手法を汎用的に使用する際の課題は何か説明すること	<p>解析手法の限界(適用範囲)について 炉心群振動は、多数体の複数個所による衝突・ガタなどの非線形性を多く含む現象のため、個々の集合体の時刻歴挙動を完全に再現することは限界がある。一方で、評価の対象となる跳び上がり量、衝突荷重の発生頻度や最大値については、ある一定の精度*でもって評価が可能であることを確認している。 (* : 跳び上がり量最大値は±20%～30%程度の誤差、衝突荷重最大値は安全側に評価)</p> <p>本解析手法は、FBR炉心体系(六角配列)を前提としている。また、炉心構成要素のビームモデル、バネ要素を弾性要素で模擬している。そのため、炉心構成要素や衝突部が弾性的な挙動を示す範囲が解析の適用範囲となる。</p> <p>さらに、跳び上がりが大きくなると、パッド部など水平方向の支持条件(パッド部ギャップによる可動域)が変化し、水平方向の挙動に影響を与える。本解析手法は、このパッド外れが生じた状態も評価を可能としており、振動試験による検証も実施している。ただし、大多数の炉心構成要素がパッド外れを生じるような条件(支持板からエントランスノズルが抜けてしまうような条件)では、振動試験による検証も困難であり、その妥当性は検証できていないため、解析の適用範囲から外れる。</p> <p>解析の課題について(設計ツールとして汎用的に使用する上での課題) パッドを外れない程度、もしくは、一部の炉心構成要素がパッド外れを生じる程度の跳び上がり量(～数十mm)、及び、炉心構成要素が弾性的な挙動を示す範囲での水平変位、衝突荷重を算出するような条件において、炉心群振動解析手法に現時点で把握している技術的な課題はほぼ解決済みである。</p> <p>しかし、本手法を設計ツールとして汎用的に使用する上では、以下の課題が残る。</p> <p>炉心群振動解析による評価値には、跳び上がり量、パッド部衝突荷重、制御棒案内管頂部変位などがある。解析パラメータには、衝突パラメータ(衝突剛性、減衰)、嵌合部ギャップ、流体力、摩擦係数、物性値など多くのパラメータがあるが、評価値ごとにパラメータが保守的となる方向は異なる。</p> <p>よって、解析を行うに当たっては、評価の目的に合わせて適切な保守性を確保するためのパラメータの設定が必要となる。これには、各パラメータがもつ影響度合い(感度)を確認するための感度解析を実施し、保守側(安全側)の解析結果が得られるよう、安全余裕などを考慮した適切なパラメータの組み合わせを設定する必要がある。今後は、感度解析を実施し、評価目的に応じた保守性を確保するパラメータ設定を明らかにすることが課題と考えている。</p>

模擬燃料体の部分装荷に係るコメント回答

No.	コメント内容	回答概要
23	<p>(面談時の追加コメント) 刺激係数の値からは炉心重量が小さい様に推察される。炉心支持板の応答解析が適切か確認すること。</p>	<p>本評価で使用した原子炉構造の鉛直方向の応答評価モデルは、耐震バックチェック時に使用したモデルを用いて、廃止措置段階の条件に修正(温度、ヤング率など)したものである。今回使用したモデルは、耐震バックチェック時のモデルと固有値を比較することで解析モデルの妥当性を確認しており、炉心支持板の応答は適切である。</p> <p>また、ご質問の炉心の燃料体の質量に関しては、炉心質量163ton及び炉心支持構造の内部構造物(連結管など)22.5tonを、炉心支持板に付加重量として入力しており、適切に設定している。</p> <p>なお、原子炉構造応答解析モデル(鉛直方向)は、汎用FEMコードのFINASを使用しているが、このFINASにおける刺激係数が一般の定義とは異なる。原子炉構造の水平方向の応答解析はNASTRANを用いており、刺激係数が大きく異なるのは使用しているコードの違いによる。</p>
24	<p>(面談時の追加コメント) 跳び上がり量について、加振方向(X方向、X-Y方向)との関係を説明すること</p>	<p>(別途回答)</p>
25	<p>(面談時の追加コメント) 燃料体跳び上がり評価における不確かさ(加振波含む)はどのように評価しているか説明すること</p>	<p>①評価に用いた地震動 評価に用いた地震動は応答スペクトル手法に基づく地震動と、断層モデル手法に基づく地震動の2種類の地震動を用いている。炉心燃料の群振動挙動は、衝突現象を含み、最大値がバラツク現象のため、地震継続時間が短い断層モデル手法に基づく地震動の場合は、地震波が変わる毎に炉心群振動の最大値が変化する可能性を有す。一方、応答スペクトル手法に基づく地震動の場合は、地震動継続時間が長い場合、炉心群振動の最大値は一定の信頼度を持って炉心群振動挙動の最大値を推定している。</p> <p>②炉心支持板における地震動入力条件 炉心支持板の剛性は高いものの、地震時の上下動応答は周辺部よりも中央部で大きくなる。燃料体の跳び上がり評価では、跳び上がり評価が保守的となるよう、炉心支持板中央部の応答を入力している。この結果、炉心支持板中央から離れた位置に装荷される燃料体の跳び上がり量に対し、実際の挙動と比較して大きな値が得られる評価となっている。</p> <p>③二重指数分布による推定 燃料体の跳び上がりデータのサンプル数が多くなれば、統計論的にその分布は一定の形に漸近する。応答スペクトル手法に基づく地震動の燃料体の跳び上がり最大値評価に二重指数分布を適用した場合、データのプロットはほぼ直線上に並ぶ。燃料体の最大跳び上がり量の分布が二重指数分布に従うと仮定すれば、一定の信頼度を持って跳び上がり量の最大値を推定している。</p>
26	<p>(面談時の追加コメント) 燃料体の跳び上がり量評価について、解析結果が概ね妥当であることを試験結果試験結果から分かり易く説明するとどうなるか示すこと。</p>	<p>耐震バックチェック時に実規模の模擬燃料体を用いて、単体の振動試験を実施している。その際、S2地震動を係数倍した地震動によって、燃料体の跳び上がり試験を実施し、データを取得している。</p> <p>基準地震動<math>S_s-D</math>の炉心支持板の加速度<math>31m/s^2</math>と同等の加振試験(加速度<math>35m/s^2</math>)における模擬燃料体の最大跳び上がり量は41mmであった。この試験結果は流水中の試験結果である。廃止措置段階では、循環ポンプはポニーモータ運転であり、通常運転時の炉心流量と比較して1/10程度となっている。このため、燃料体頂部と下部の圧力差は小さく、流体の流れによる上向きの力はほとんど無視できる。その結果、流体の流れによる見かけの重力加速度は半減し、跳び上がり量も概ね半減する。</p> <p>この半減効果を考慮して跳び上がり量を評価すると約20mmとなる。解析評価で得られた燃料体の跳び上がり量は最大17mm。炉心支持板の加速度の差を考慮すれば、解析による最大跳び上がり量は小さくなる方向であり、試験と解析値は概ね整合する。</p>