

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-11 改 01
提出年月日	2022年6月14日

制御棒の挿入性評価について

2022年6月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目次

1. はじめに	1
2. 上下地震動の影響について	2
2.1 既往知見の制御棒挿入性の整理	2
2.2 上下地震動の影響評価	3
2.2.1 制御棒に作用する荷重	3
2.2.2 燃料集合体の浮上り	12
3. まとめ	16

1. はじめに

制御棒の挿入性を阻害する支配的要因は、燃料集合体の水平地震動による相対変位であることから、制御棒挿入性については水平地震動を考慮した挿入性試験により確認している。

一方で、制御棒挿入性への上下地震動の影響については、社団法人日本電気協会原子力発電耐震設計専門部会「水平・上下地震動に対する機器の機能維持評価法の検討に関する調査報告書」（以下「耐専報告書」という。）並びに独立行政法人原子力安全基盤機構「原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力その2（BWR制御棒挿入性）に係る報告書」（以下「機器耐力その2報告書」という。）及び「原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力その3（総合評価）に係る報告書」（以下「機器耐力その3報告書」という。）にて整理されている。これらの既往知見は、島根原子力発電所第2号機と同じBWR炉心を対象としていることから、上下地震動による制御棒挿入性への影響について、これらの既往知見に基づき評価を実施した。

本補足説明資料は、添付資料「VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」の上下地震動に対する評価について補足するものである。

2. 上下地震動の影響について

2.1 既往知見の制御棒挿入性の整理

- (1) 耐専報告書では、制御棒挿入時に制御棒に作用する挿入力とその他作用力を算出し、その大小関係と方向から上下地震動に対する影響を評価し、 $1.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ に対して影響は小さく無視できるとしている。なお、ここでは、水平地震力による燃料中央部のたわみ変位は 34mm である。
- (2) 機器耐力その 2 報告書では、 $1.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ 以上の上下地震動の加速度が燃料集合体に作用する場合には、燃料集合体が浮上る可能性があることから、制御棒挿入性への影響として、制御棒の挿入現象・挿入時間及び燃料集合体の浮上りについて検討し、解析による制御棒挿入時間の評価及び $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ が作用し仮に燃料集合体に浮上りが生じた場合でも、燃料支持金具から離脱することはないことを報告している。
- (3) 機器耐力その 3 報告書では、上下地震動の最大加速度 $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ に対する検討を実施し、上下地震動による制御棒挿入性への影響はきわめて小さいことを報告している。
- (4) 既往知見の検討に関する燃料集合体等の機器仕様と島根原子力発電所第 2 号機の機器仕様についての比較結果を表 1 に示す。検討に関する機器仕様については、チャンネルボックス及び制御棒以外の機器仕様は同一条件である。また、一部制御棒（中性子吸収材）の仕様が異なるものの、ボロンカーバイド型制御棒における制御棒質量はハフニウム棒型制御棒と同等であることから、制御棒の型式の違いによる影響は軽微と考えられる。さらに、燃料集合体の鉛直方向の剛性も十分に高いことから、地震動の違いによる影響はないと考えられる。
以上より、既往知見の結果について、島根原子力発電所第 2 号機への適用性はあるものと判断できる。

表 1 機器仕様に係る既往知見との比較結果

機器	既往知見	島根原子力発電所第 2 号機	相違の有無
燃料集合体	9×9 燃料	9×9 燃料	無
チャンネルボックス	100mil	120mil	有
制御棒	ハフニウム型	ハフニウム棒型 ボロンカーバイド型	有
上部格子板	S 格子	S 格子	無
制御棒駆動機構	FSCRD	FSCRD	無

2.2 上下地震動の影響評価

制御棒挿入性に対する上下地震動による影響については、既往知見を踏まえ次の項目について評価する。

- ① 制御棒に作用する荷重
- ② 燃料集合体の浮上り

2.2.1 制御棒に作用する荷重

(1) 評価方針

耐専報告書における影響評価と同様に制御棒挿入時に制御棒に作用する荷重を静的荷重と扱い、また各荷重の作用方法は安全側の評価となるように設定する。ここで設定した条件において制御棒に作用する上下方向の荷重から、上下地震動が制御棒挿入性に与える影響を評価する。表2に、制御棒挿入性影響評価で考慮する荷重と設定方針を示す。

表2 制御棒挿入性影響評価で考慮する荷重と設定方針

No.	制御棒に作用する荷重の種類	設定方法
1	制御棒自重	下向きに働く力として設定
2	制御棒駆動機構の挿入力	定格炉圧時の炉圧スクラムでの挿入力として設定 ^{*1}
3	炉水による浮力	制御棒に生じる浮力を制御棒の体積に基づき設定
4	上下地震動による抗力	炉心支持板位置の鉛直方向下向きに作用する力として設定
5	水平地震力による抗力 (摩擦力)	耐専報告書で算定された水平地震力による抗力 (摩擦力)を用いる。 ^{*2}

注記^{*1}：制御棒駆動機構による上向きの挿入力として、水圧制御ユニットアキュムレータによるスクラムよりも低い炉圧スクラム（6.93MPa）による挿入力を保守的に用いる。

^{*2}：耐専報告書記載の文献（“BWR CONTROL ROD DRIVE SCRAMMABILITY DURING EARTHQUAKES”，ASME PVP Vol.182）における、水平方向加振中の制御棒挿入試験での計測結果から解析した制御棒に生じる水平力を基にしている。

(2) 評価結果

表 2 の設定方針により算出した制御棒に作用する各鉛直方向荷重を表 3, 表 4, 図 1 及び図 2 に示す。ボロンカーバイド型制御棒においては, 制御棒駆動機構の挿入力が主体の上向き力は \square N に対し, 自重や上下地震動による下向きの力は \square N であり, 方向性を考慮した加重の総和は上向き力が \square N 上回っている。一方, ハフニウム棒型制御棒においては, 制御棒駆動機構の挿入力が主体の上向き力は \square N に対し, 自重や上下地震動による下向きの力は \square N であり, 方向性を考慮した加重の総和は上向き力が \square N 上回っており, 制御棒に作用する荷重による制御棒の挿入性と健全性は確保される。なお, 今回の影響評価では, 下記に示すように保守性を有している。

- ① 交番荷重である上下地震動を常に下向きに作用することとしている。
- ② 制御棒駆動機構による上向きの挿入力として, 水圧制御ユニットアキュムレータによるスクラムよりも低い炉圧スクラム (6.93MPa) による挿入力をを用いている。

表3 制御棒挿入性影響評価で考慮する鉛直方向荷重と算出根拠
(ボロンカーバイド型制御棒)

No.	制御棒に作用する荷重の種類	鉛直方向荷重 (N) *1	算出根拠 〔島根原子力発電所第2号機〕
1	制御棒自重	<input type="text"/>	制御棒質量： <input type="text"/> kg
2	制御棒駆動機構の挿入力	+ 5064	定格圧力 (6.93MPa) 時の炉圧スクラムによる挿入力
3	炉水による浮力	<input type="text"/>	制御棒体積に炉水密度を考慮
4	上下地震動による抗力 (別紙参照)	- 1841	鉛直方向震度 $1.35 \times 9.8 \text{m/s}^2$ が制御棒及び制御棒駆動機構部に作用するとして算定 算出過程： <input type="text"/>
5	水平地震力による抗力 (摩擦力)	- 2264	耐専報告書を基に設定した、相対変位 34mm (島根原子力発電所第2号機の最大相対変位同等) における水平地震動による抵抗力 1509N に、制御棒の剛性 (断面二次モーメント) 比を乗じる。 算出過程： <input type="text"/>
作用力の合計		<input type="text"/>	—

注記*1：荷重の方向を、上向き+、下向き-とした。

*2：制御棒駆動機構駆動部質量

表 4 制御棒挿入性影響評価で考慮する鉛直方向荷重と算出根拠
(ハフニウム棒型制御棒)

No.	制御棒に作用する荷重の種類	鉛直方向荷重 (N) *1	算出根拠 〔島根原子力発電所第2号機〕
1	制御棒自重	<input type="text"/>	制御棒質量: <input type="text"/> kg
2	制御棒駆動機構の挿入力	+ 5064	定格圧力 (6.93MPa) 時の炉圧スクラムによる挿入力
3	炉水による浮力	<input type="text"/>	制御棒体積に炉水密度を考慮
4	上下地震動による抗力 (別紙参照)	- 1854	鉛直方向震度 $1.35 \times 9.8 \text{m/s}^2$ が制御棒及び制御棒駆動機構部に作用するとして算定 算出過程: <input type="text"/>
5	水平地震力による抗力 (摩擦力)	- 1509	耐専報告書を基に設定した, 相対変位 34mm (島根原子力発電所第2号機の最大相対変位同等) における水平地震動による抵抗力 1509N に, 制御棒の剛性 (断面二次モーメント) 比を乗じる。 算出過程: <input type="text"/>
作用力の合計		<input type="text"/>	—

注記*1: 荷重の方向を, 上向き+, 下向き-とした。

*2: 制御棒駆動機構駆動部質量

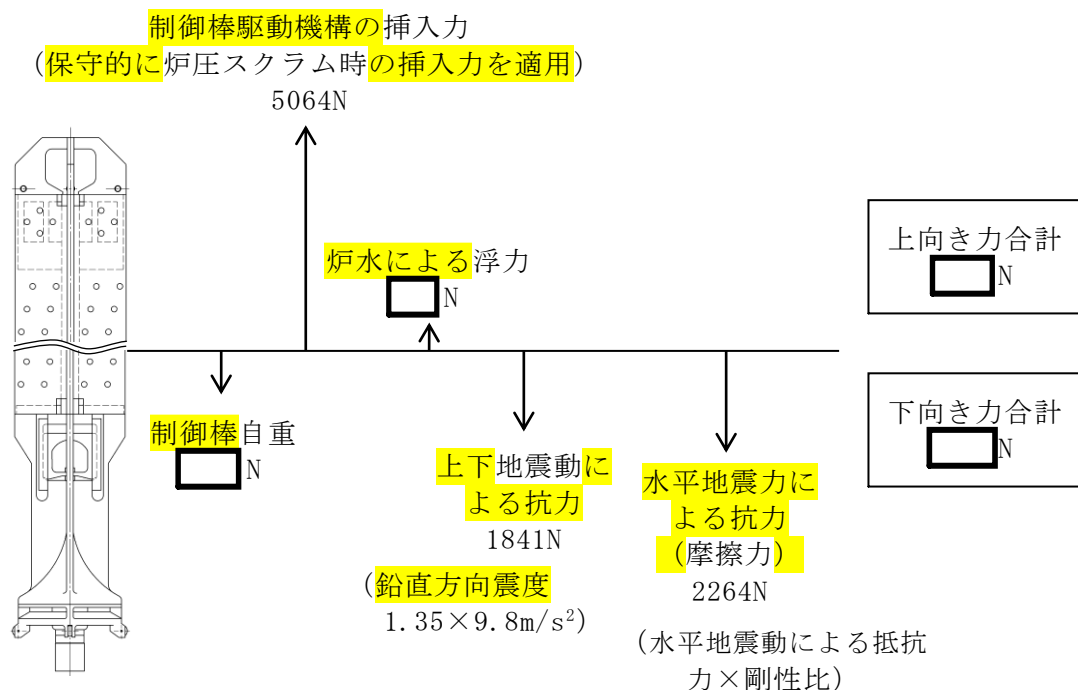


図 1 制御棒に作用する鉛直方向荷重
(ボロンカーバイド型制御棒)

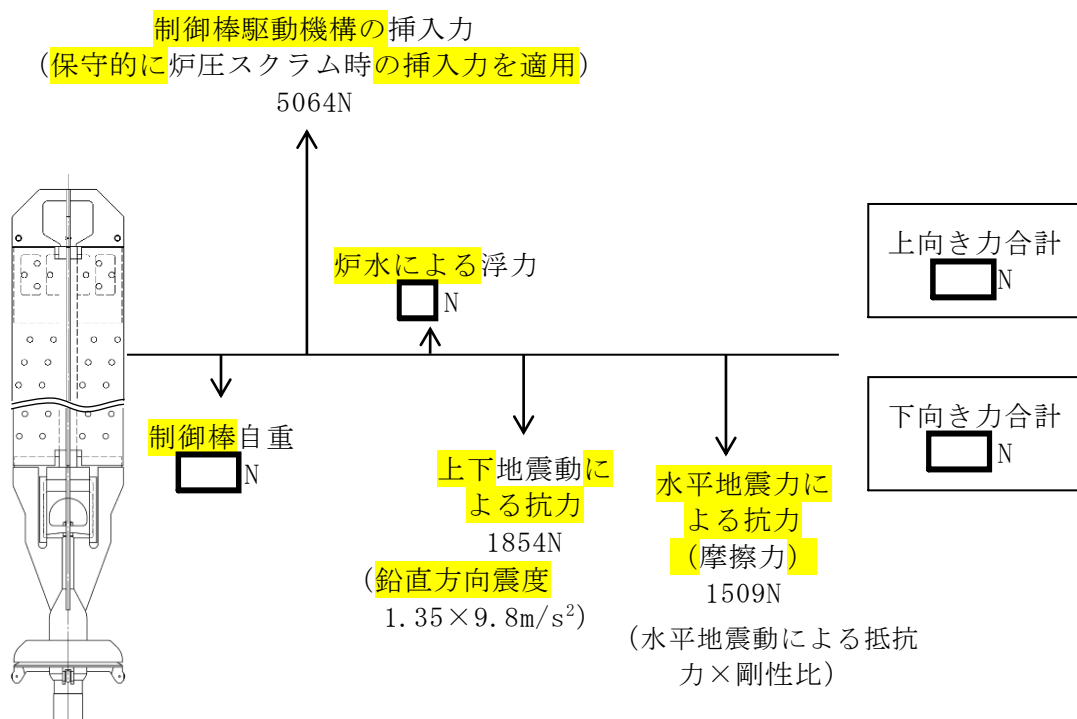


図 2 制御棒に作用する鉛直方向荷重
(ハフニウム棒制御棒)

[上下地震動による抗力で生じるスクラム時間遅れ]

(1) 評価方針

上下地震動による抗力でスクラム時間に遅れが生じることから、燃料のたわみ変位によって生じる下向き抗力とスクラム遅れ時間との相関を仮定し、整理する。

(2) 評価結果

ボロンカーバイド型制御棒においては、添付書類VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」の「図4-3 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響（ボロンカーバイド型制御棒）」（別図1参照）の通り、非加振時のスクラム時間は約[]秒であるのに対し、相対変位 35.0 mm におけるスクラム時間は約[]秒であり、スクラム時間は[]秒増加している。一方、燃料中央部のたわみ変位 35.0mm での抗力（摩擦力）は 2264N と推定されることから、制御棒挿入に対する抗力（摩擦力）2264N が常時下向きに作用する場合、スクラム時間は[]秒増加すると推定できる。

次に、「表3 制御棒挿入性影響評価で考慮する荷重と算出根拠（ボロンカーバイド型制御棒）」より鉛直方向震度 $1.35 \times 9.8\text{m/s}^2$ 作用時には抗力 1841N が生じることから、この時のスクラム時間の遅れは、摩擦力と時間遅れが比例するとして $[] \times (1841/2264) = []$ (秒) となる。

燃料集合体の相対変位 35.0mm に対するスクラム時間（75%ストローク）は、別図1より約[]秒であることから、上下地震動による影響を考慮したスクラム時間は $[] + [] = []$ (秒) となる。これは、75%ストロークスクラムの目安時間 1.62 秒以内である。

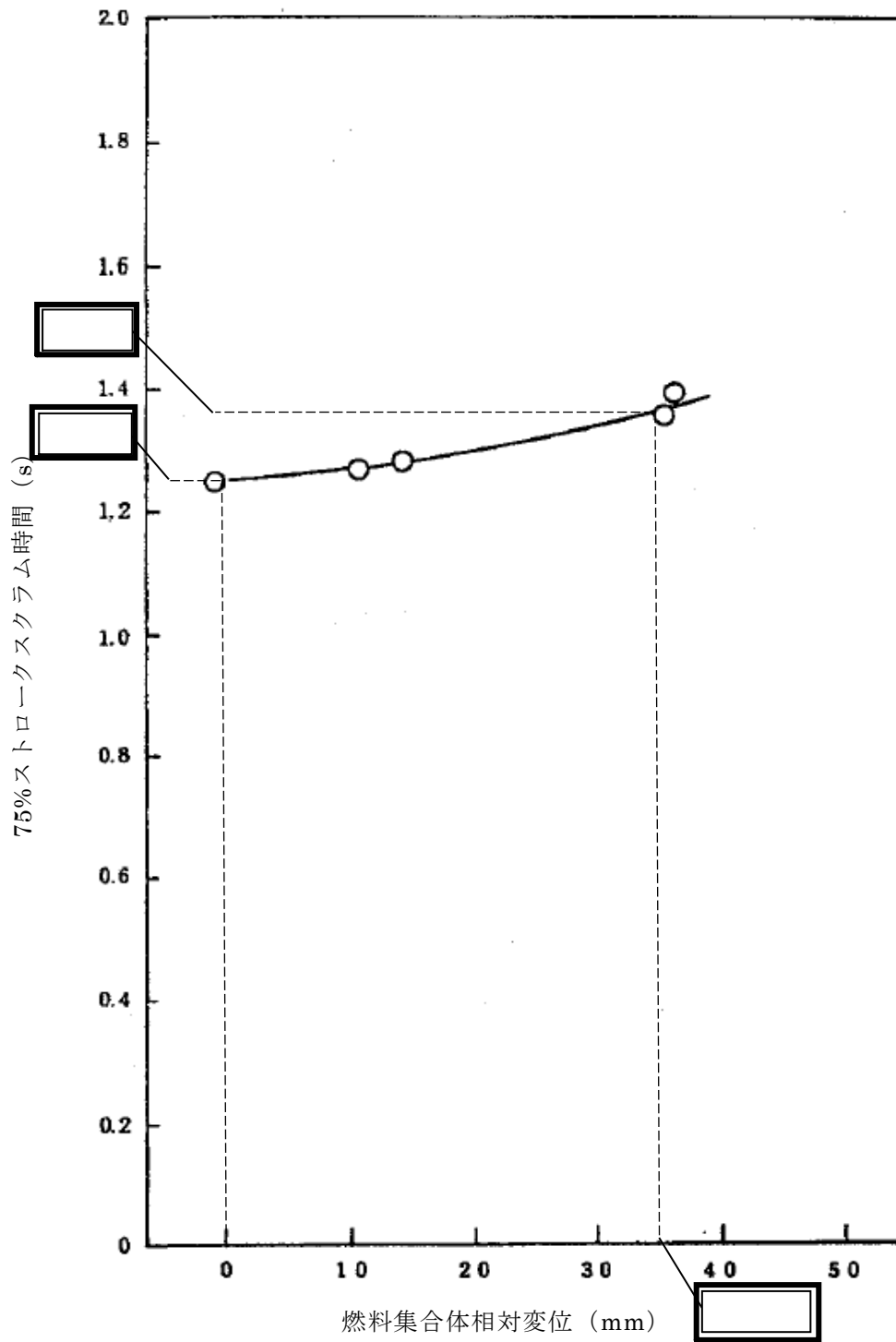
ハフニウム棒型制御棒においては、添付書類VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」の「図4-4 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響（ハフニウム棒型制御棒）」（別図2参照）の通り、非加振時のスクラム時間は約[]秒であるのに対し、相対変位 35.0 mm におけるスクラム時間は約[]秒であり、スクラム時間は[]秒増加している。一方、燃料中央部のたわみ変位 35.0mm での抗力（摩擦力）は 1509N と推定されることから、制御棒挿入に対する抗力（摩擦力）1509N が常時下向きに作用する場合、スクラム時間は[]秒増加すると推定できる。

次に、「表4 制御棒挿入性影響評価で考慮する荷重と算出根拠（ハフニウム棒型制御棒）」より鉛直方向震度 $1.35 \times 9.8\text{m/s}^2$ 作用時には抗力 1854N が生じることから、この時のスクラム時間の遅れは、摩擦力と時間遅れが比例するとして $[] \times (1854/1509) = []$ (秒) となる。

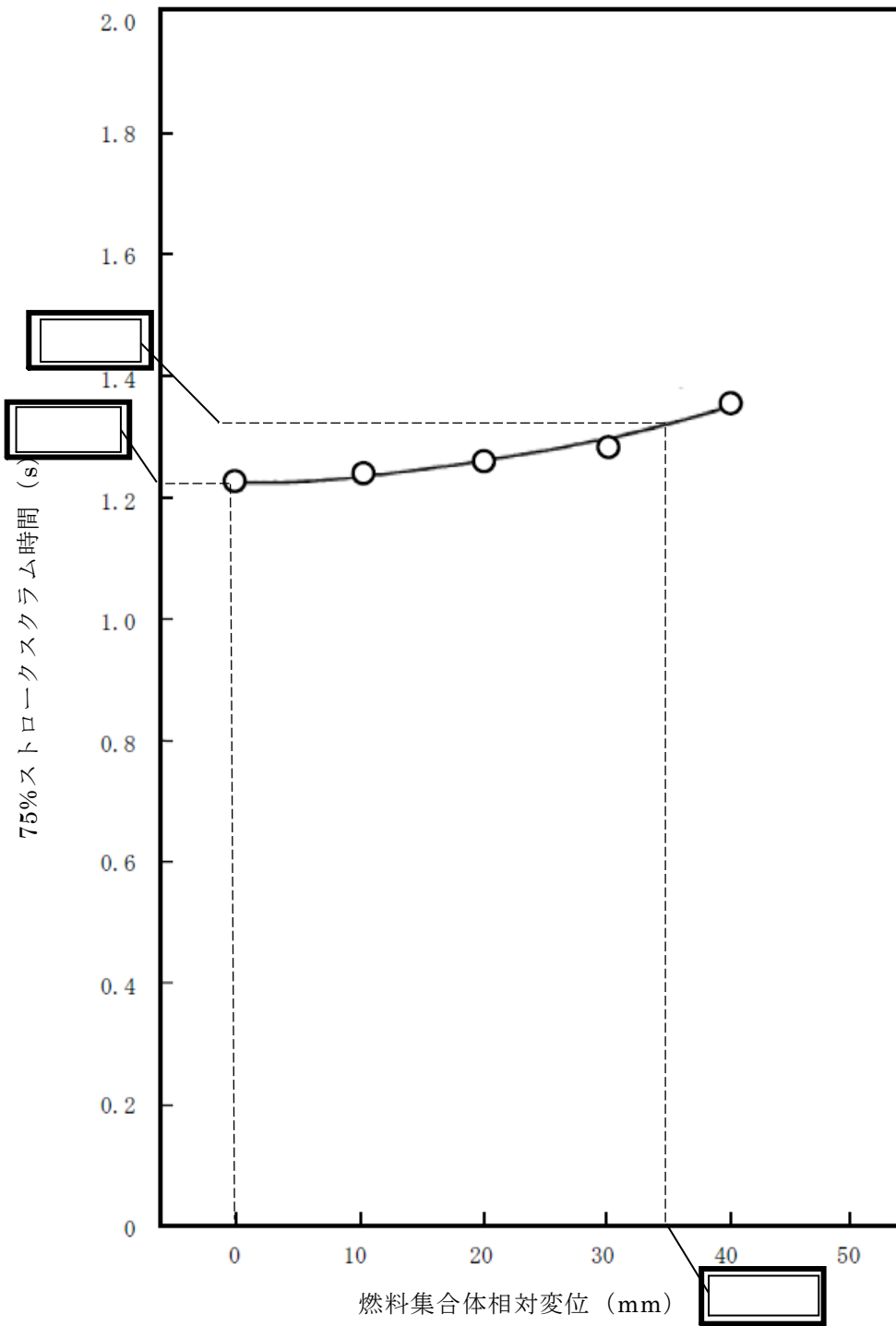
燃料集合体の相対変位 35.0mm に対するスクラム時間（75%ストローク）は、別図2より約[]秒であることから、上下地震動による影響を考慮したスクラム時

間は□+□=□(秒)となる。これは、75%ストロークスクラムの目安時間1.62秒以内である。

これにより、ボロンカーバイド型制御棒及びハフニウム棒型制御棒においては、上下地震動による抗力が常時下向きに作用し、スクラム時間の遅れが発生したとしても目安時間を超えることはなく、また実際の上下地震動は交番荷重として作用することから、スクラム時間の遅れに対し影響はないと考えられる。



別図1 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響
 (添付書類「VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」に加筆)
 (ボロンカーバイド型制御棒)



別図2 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響
(添付書類「VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」に加筆)
(ハフニウム棒型制御棒)

2.2.2 燃料集合体の浮上り

(1) 評価方針

制御棒上部は、スクラム開始前の初期状態においても燃料集合体間に挿入されており、仮に上下地震動による浮上りが生じた場合でも燃料集合体下部の水平方向の移動は制御棒により拘束されるため、制御棒挿入が不可能になることはないと考えられる。

本項では機器耐力その2報告書を基に、仮に上下地震動により燃料集合体に浮上りが生じた場合として、次の2ケースについて検討する。

- ① 上下地震動による燃料集合体の浮上り
- ② 水平及び上下地震動による燃料集合体の浮上り

(2) 評価結果

a. 上下地震動による燃料集合体の浮上り

機器耐力その2報告書では、上下地震動による燃料集合体の燃料支持金具からの浮上り量について、1自由度1質点の簡易解析モデルに正弦波を入力する解析により検討している。モデルを図3に、解析結果を図4に示す。浮上り量の最大は、入力加速度 m/s²、振動数 5Hz の場合で浮上り量は mm となっている。

島根原子力発電所第2号機の鉛直方向震度は $1.35 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ であり、機器耐力その2報告書の解析結果における $1.5 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ での浮上り量 37mm を超えることはなく、浮上り量は燃料支持金具設置深さ mm より小さい。

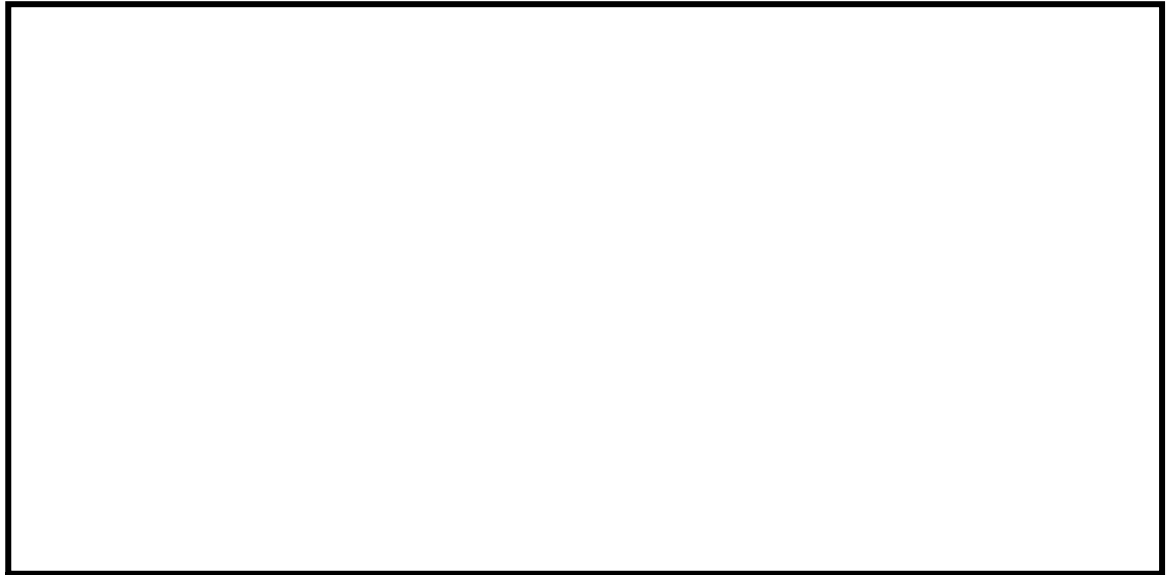


図 3 燃料集合体の浮上り量解析モデルの概略図（機器耐力その 2 報告書）

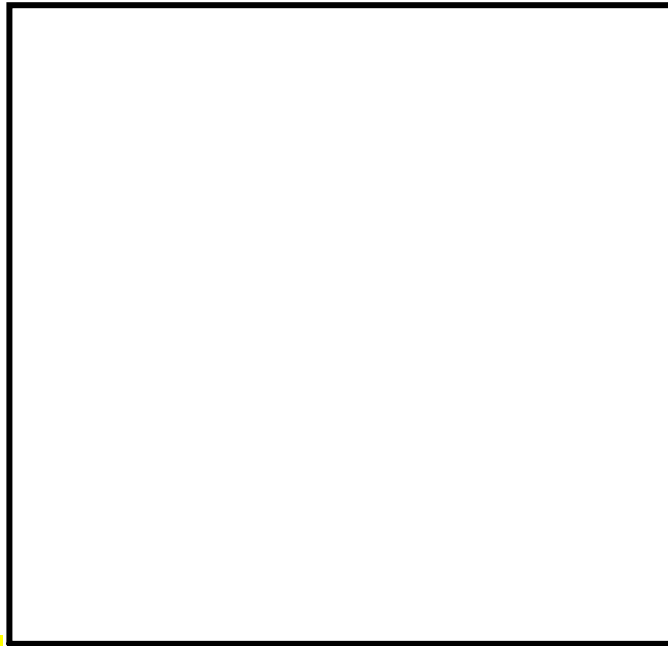


図 4 浮上り量解析結果（正弦波）（機器耐力その 2 報告書）

b. 水平及び上下地震動による燃料集合体の浮上り

機器耐力その2報告書では、上下方向に加えて水平方向の地震力を考慮し、燃料集合体が燃料支持金具から離脱する可能性について検討している。燃料集合体が上下地震動により浮上り、水平地震動の加速度により燃料支持金具の面に沿って上方向に移動する事象を考えている。概要図を図5に示す。

図5の条件において力学的検討を行い、上下地震動によって燃料集合体が浮上った状態で水平方向の地震動の影響を受けた場合の水平動による上方向の移動量を求めている。機器耐力その2報告書で検討した移動量評価条件を表5に示す。表5に示す条件における水平動に対する評価結果では、上下地震動の最大加速度が $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの水平動による上方向の移動量は1.1mm、 $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの移動量は1.3mmとなっている。結果として、水平及び上下地震動による上方向の移動量は、上下地震動の最大加速度が $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときは□mm+1.1mm=□mm、上下地震動の最大加速度が $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときは□mm+1.3mm=□mmとなり、上下地震動に加え水平地震動を考慮した場合でも、燃料支持金具設置深さ□mmに対し十分小さい値となることが確認されている。

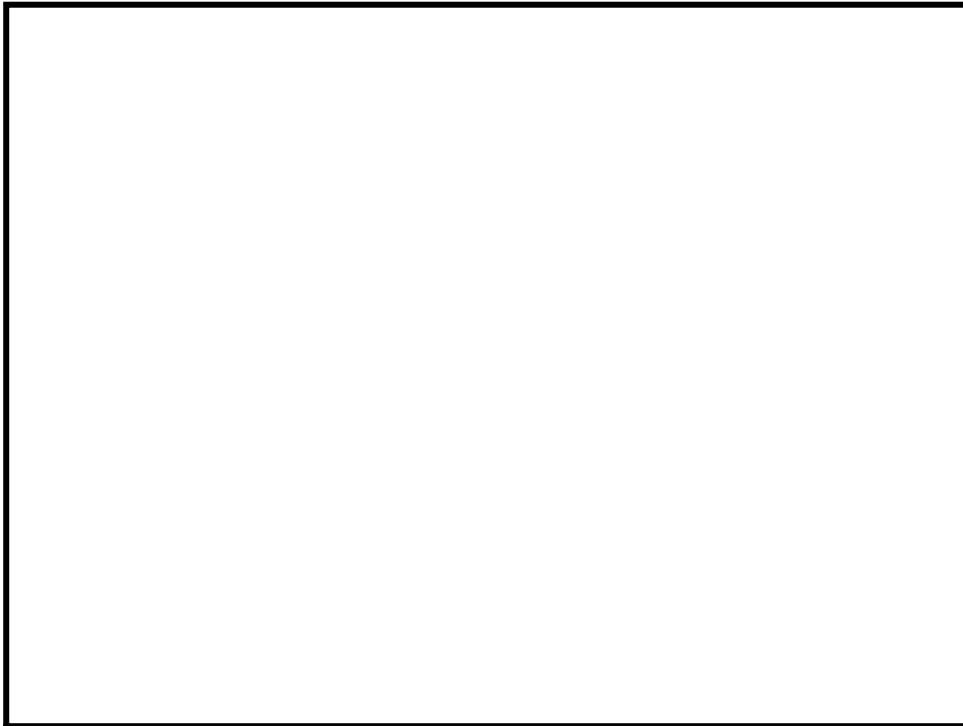


図5 水平・上下方向の地震動による浮上り検討概要図（機器耐力その2報告書）

表 5 $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ 及び $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの移動量評価条件（機器耐力その2報告書）

--

次に島根原子力発電所第2号機の基準地震動 S_s の条件での移動量評価条件を整理し、機器耐力その2報告書の移動量評価条件と対比して、表6に示す。機器耐力その2報告書の検討条件に対し、島根原子力発電所第2号機の基準地震動 S_s の条件の方が、燃料集合体下端の加速度最大値及びせん断力最大値ともに小さい。このため、水平及び上下地震動による上方向の移動量は、機器耐力その2報告書で算出された6.9mm ($1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ の場合) より小さくなり、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の影響はないと考える。

なお、燃料集合体の浮上に伴い、一時的に燃料集合体と燃料支持金具間の流量が増加し、燃料集合体内の流量低下が生じる可能性があるが、浮上り量も小さく、浮上り継続時間も短時間であることから、燃料集合体の冷却が著しく損なわれることはないと考える。

表 6 島根原子力発電所第2号機の移動量評価条件（機器耐力その2報告書と対比）

	上下地震動 最大加速度 (m/s^2)	燃料集合体下端 加速度最大値 (水平方向) (m/s^2)	燃料集合体下端 せん断力最大値 (水平方向) (N)
機器耐力その2 報告書			
島根原子力発電 所第2号機	1.35×9.8	1.30×9.8	2.21×10^6

3. まとめ

上下地震動が作用した場合を想定し、制御棒に作用する荷重、燃料集合体の浮上りについて影響を検討した。

まず、制御棒に作用する荷重について、制御棒に作用する鉛直地震力と地震スクラムにより生じるその他作用力との大小関係を評価し、影響を検討した。その結果、ボロンカーバイド型制御棒及びハフニウム棒型制御棒において、鉛直方向震度 $1.35 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ が、常時下向きに作用すると仮定した場合でも、制御棒の上向き挿入力は下向きの力に対して、大きくなっている。なお、今回の影響評価では、下記に示すように保守性を有している。

① 交番荷重である上下地震動を常に下向きに作用することとしている。

② 制御棒駆動機構による上向きの挿入力として、水圧制御ユニットアキュムレータによるスクラムよりも低い炉圧スクラム (6.93MPa) による挿入力を用いている。

また、上下地震動による抗力で生じるスクラム時間の遅れについて、燃料のたわみ変位によって生じる下向き抗力とスクラム遅れ時間との相関を仮定し検討した。その結果、ボロンカーバイド型制御棒及びハフニウム棒型制御棒において、常時下向きの地震力によるスクラム時間の遅れを加算してもスクラム目安時間を超えることはなく、実際には上下地震動は交番荷重として作用することから、挿入時間の遅れに対し影響はないと考える。

さらに、燃料集合体に浮上りが生じるとした場合の評価について、機器耐力その2報告書を参照して検討した。燃料支持金具から燃料集合体が離脱する可能性は極めて小さいとしている機器耐力その2報告書における耐震評価条件と、島根原子力発電所第2号機の基準地震動 S_s の評価条件を比較し、島根原子力発電所第2号機の耐震評価条件は機器耐力その2報告書の耐震評価条件より小さいことから、燃料集合体の浮上りによる影響はないと考える。

以上のことから、制御棒の挿入性に対する上下地震動による影響は小さく問題ないと考える。