

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

| | |
|----------------|---------------------|
| 柏崎刈羽原子力発電所第6号機 | 設計及び工事計画審査資料 |
| 資料番号 | KK6 補足-028-10-12 改0 |
| 提出年月日 | 2024年1月22日 |

制御棒の挿入性評価について

2024年1月

東京電力ホールディングス株式会社

12. 制御棒の挿入性評価について

目 次

| | |
|-------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 制御棒挿入性評価について..... | 2 |
| 3. 鉛直地震動の影響について..... | 4 |
| 3.1 既往研究の制御棒挿入性の整理..... | 4 |
| 3.2 鉛直地震動の影響評価..... | 5 |
| 3.2.1 制御棒に作用する荷重..... | 5 |
| 3.2.2 燃料集合体の浮上り..... | 8 |
| 4. まとめ | 12 |

1. はじめに

制御棒挿入性への鉛直方向加速度の影響については、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。柏崎刈羽原子力発電所第6号機における鉛直方向加速度による制御棒挿入性の影響評価について、既往検討成果に基づき影響評価を実施した。

2. 制御棒挿入性評価について

今回工認における制御棒挿入性評価については、J E A G 4601-1991 追補版でのBWR用制御棒の評価手法を適用する。J E A G 4601-1991 追補版における制御棒挿入性の評価手順を図-1に示す。

制御棒の耐震性についての計算書では、建屋・機器連成系応答解析から得られた燃料集合体の地震時相対変位が、制御棒の挿入試験で得られた燃料集合体の相対変位（約40mm）以内であることを確認している。柏崎刈羽原子力発電所第6号機の制御棒の耐震性についての評価概要を表-1に示す。

表-1 制御棒の耐震性についての評価概要

| 燃料集合体相対変位 | 機能確認済相対変位 | 鉛直方向震度 (上部格子板位置) |
|----------------------|---------------------|---|
| 18.6mm ^{*1} | 約40mm ^{*2} | 1.1 ^{*1} (1.1 ^{*1}) |

注記*1：VI-2-3-1「炉心，原子炉压力容器及び压力容器内部構造物の地震応答計算書」の基準地震動S_sにおける地震応答解析結果

*2：機能確認済相対変位は，株式会社 東芝にて実施した挿入性試験で取得したもの。燃料集合体の相対変位が約40mmにおいても，60%及び100%ストロークスクラム時間がそれぞれ1.44秒及び2.80秒以内である。挿入性試験の内容は，VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」に示す。

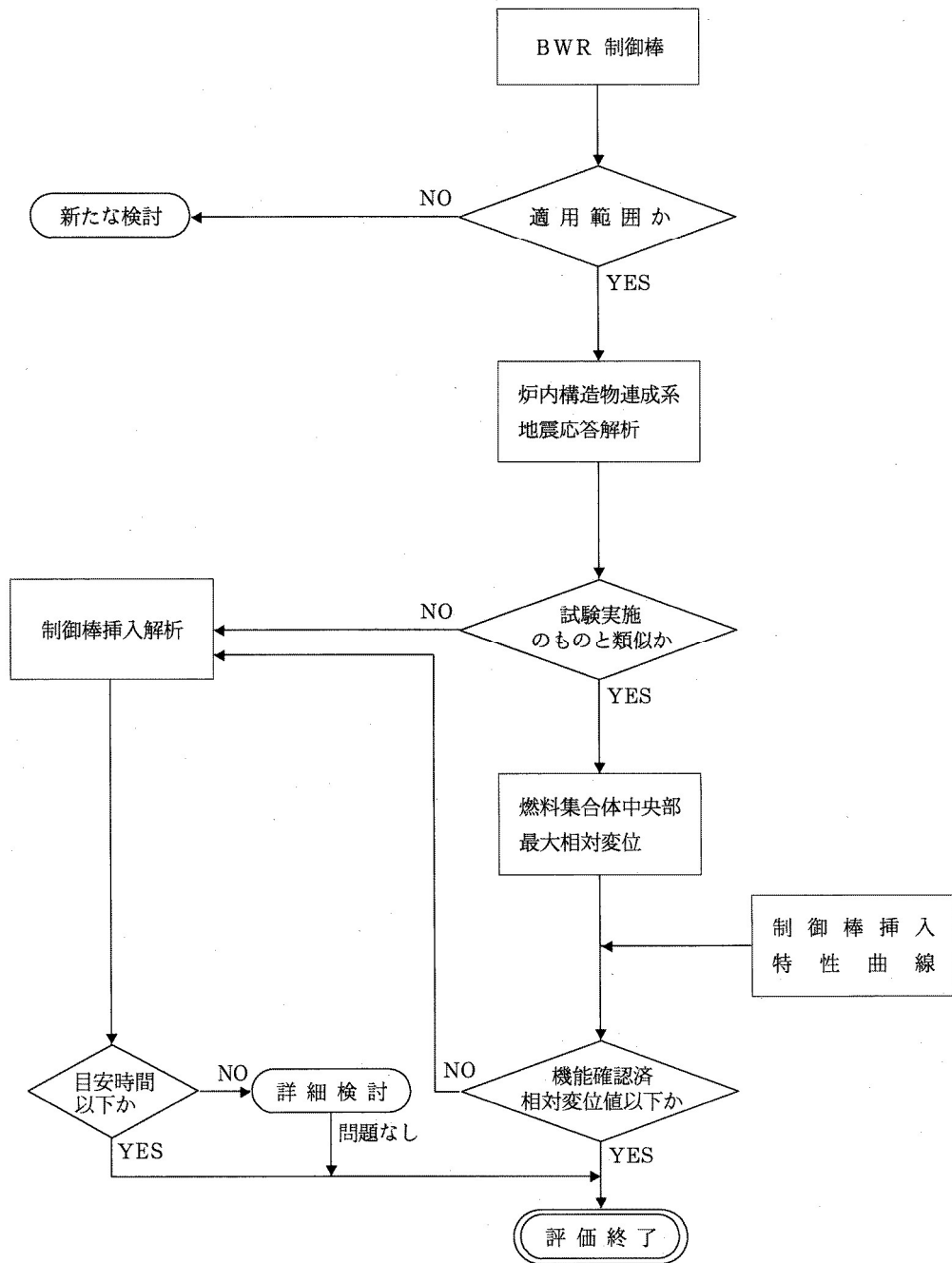


図-1 制御棒挿入性の評価手順 (BWR) (J E A G 4601-1991 追補版)

3. 鉛直地震動の影響について

3.1 既往研究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 34 mm である。
- (2) 機器耐力その 2 報告書では、 $1.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 以上の上下方向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としている。
- (3) 機器耐力その 3 報告書では、上下地震動として最大加速度 $2.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 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としている。

3.2 鉛直地震動の影響評価

制御棒挿入性に対する鉛直方向加速度による影響については、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

3.2.1 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、鉛直方向加速度が制御棒挿入性に与える影響を評価する。表-2 に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圧及び炉圧 | 定格炉圧に抗して、制御棒駆動機構水圧ユニット（以下「HCU」）アキュムレータの運転時最低チャージ圧をスクラムでの挿入力として設定 |
| 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 | 上下地震力による抗力 | 炉心支持板位置の鉛直方向加速度を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 | 機器耐力その2報告書を基に設定した水平抗力に、摩擦係数及び報告書で用いられた制御棒と柏崎刈羽原子力発電所第6号機用制御棒の剛性の差を考慮して設定 |

(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及び図-2に示す。制御棒挿入機構の挿入力为主体の上向きの力は Nである。一方、自重や鉛直地震動による下向きの力は Nである。よって、方向性を考慮した荷重の総和は上向きの力が N上回っている。

表-3 制御棒挿入性影響評価で考慮する荷重と算出根拠

| No. | 制御棒に作用する荷重の種類 | 荷重 (N) * | 算出根拠 |
|--------|----------------------|----------------------|--|
| 1 | 制御棒自重 | <input type="text"/> | [柏崎刈羽原子力発電所第6号機] 制御棒質量： <input type="text"/> kg |
| 2 | 制御棒駆動機構の挿入圧及び炉圧 | <input type="text"/> | [柏崎刈羽原子力発電所第6号機] 定格炉圧, HCU アクチュウムレータの運転最低チャージ圧でのスクラム挿入力 |
| 3 | 炉水による浮力 | <input type="text"/> | [柏崎刈羽原子力発電所第6号機] 制御棒体積に炉水密度を考慮 |
| 4 | 上下地震力による抗力 (別紙参照) | <input type="text"/> | [柏崎刈羽原子力発電所第6号機] 鉛直方向加速度 $1.1 \times 9.8 \text{m/s}^2$ が制御棒及び制御棒駆動機構部に作用するとして算定 |
| 5 | 水平地震力による抗力 (摩擦力) | - 3000 | [柏崎刈羽原子力発電所第6号機] 機器耐力その2報告書を基に設定した, 相対変位 <input type="text"/> mm (柏崎刈羽原子力発電所第6号機の最大相対変位を包絡) における水平抗力 <input type="text"/> Nに, 摩擦係数 <input type="text"/> , 制御棒の剛性 (断面二次モーメント) 比 <input type="text"/> 倍を乗じる |
| 作用力の合計 | | <input type="text"/> | — |

注記*：荷重の方向を、上向き+, 下向き-とした。

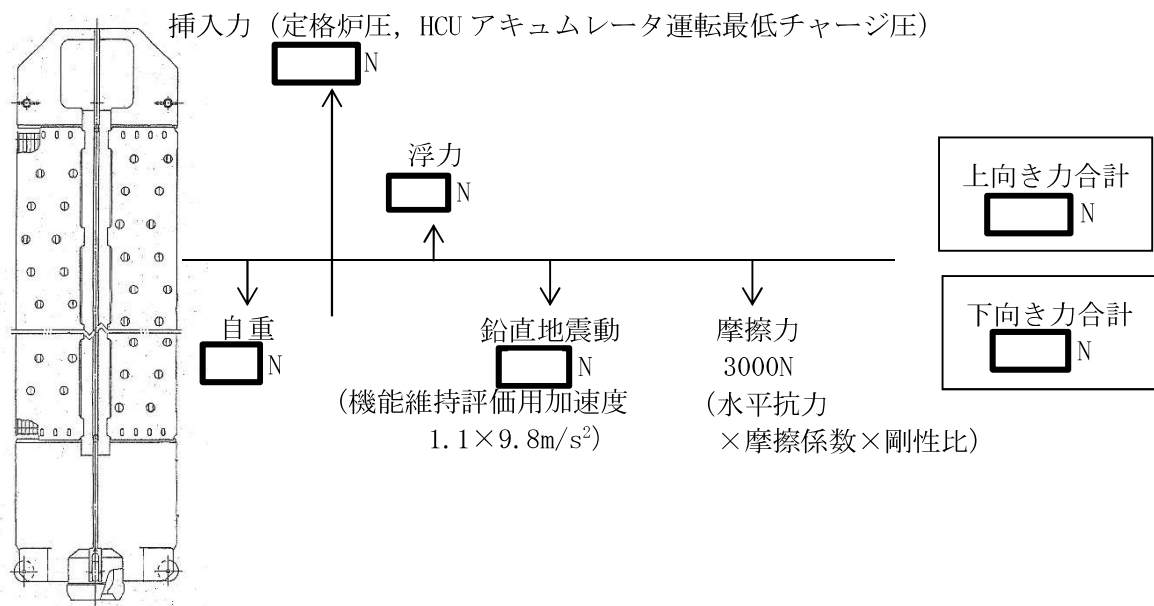


図-2 制御棒に作用する鉛直方向荷重

3.2.2 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。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機の鉛直方向震度は $1.1 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 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 mm 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。

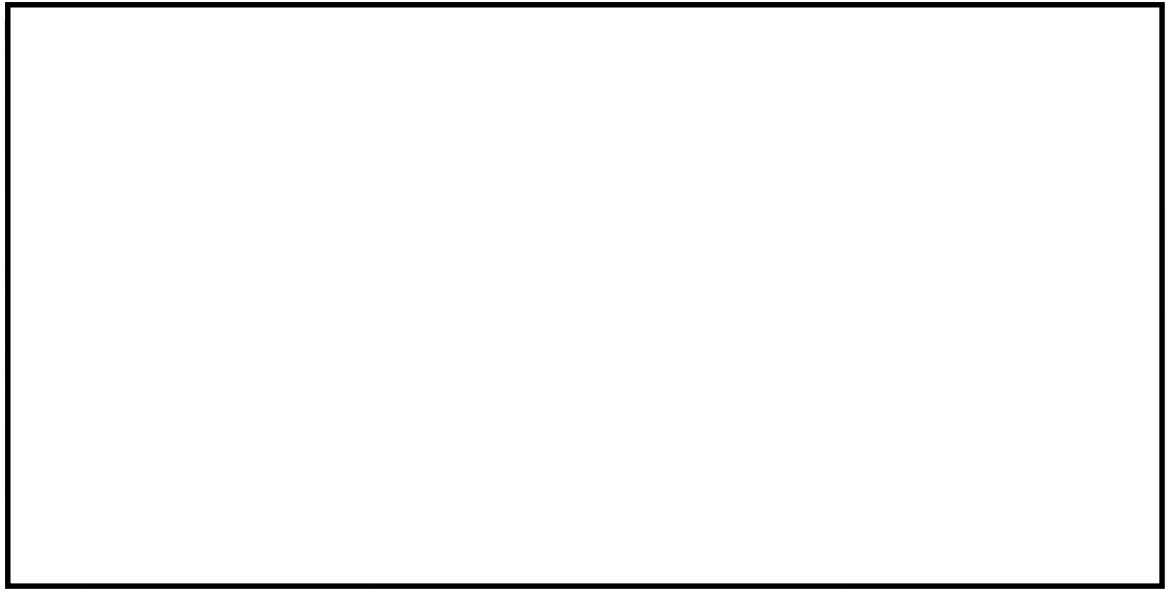


図-3 燃料集合体の浮上り量解析モデルの概略図（機器耐力その2 報告書）

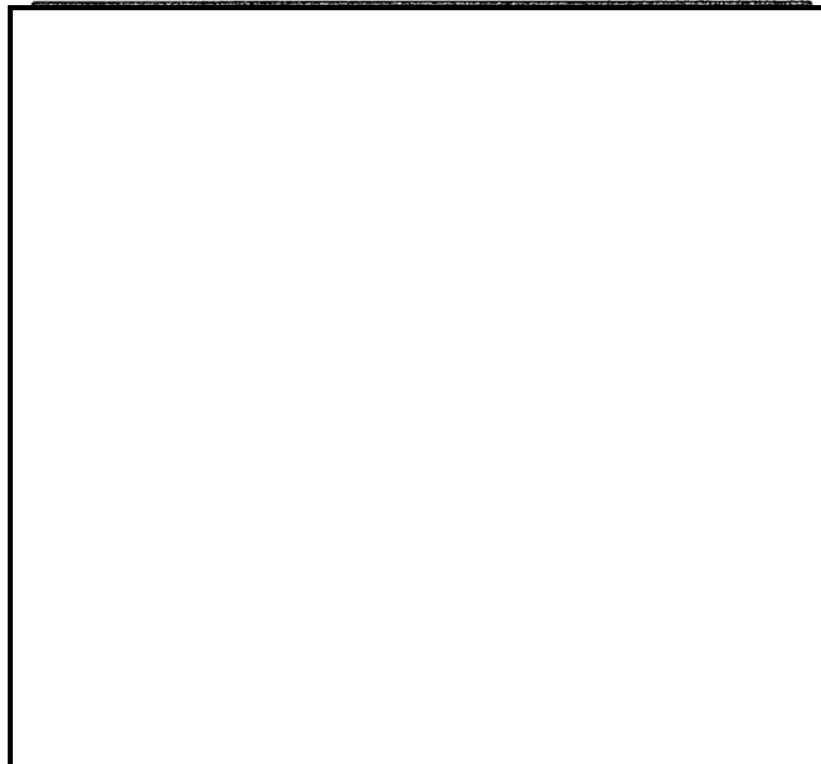


図-4 浮上り量解析結果（正弦波）（機器耐力その2 報告書）

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。実プラントの基準地震動条件での検討では、移動量評価条件は表-4に示すとおりで、機器耐力その2報告書において水平動に対する評価結果では、上下動が $1.5 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ のときの水平動による上方向の移動量は 1.1 mm 、 $2.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ のときの移動量は 1.3 mm 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、上下動が $1.5 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ のときは $\square \text{ mm} + 1.1 \text{ mm} = \square \text{ mm}$ 、上下動が $2.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ のときは $\square \text{ mm} + 1.3 \text{ mm} = \square \text{ mm}$ 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 $\square \text{ mm}$ に対し十分小さい値となることが確認されている。

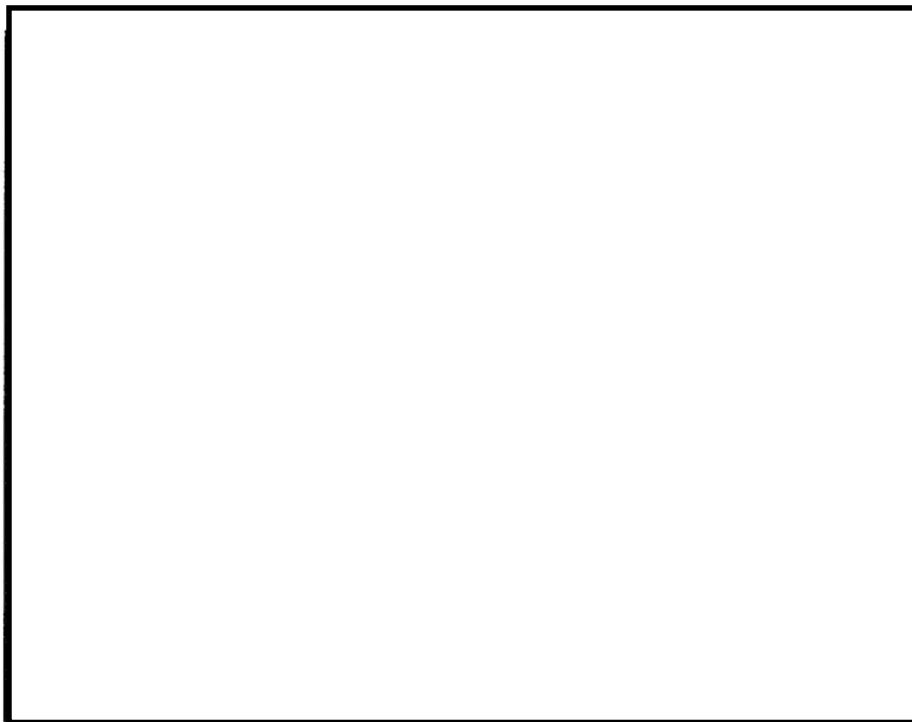


図-5 水平・上下方向の地震動による浮上り検討概要図（機器耐力その2報告書）

表一4 2.0×9.8m/s²及び1.5×9.8m/s²のときの移動量評価条件（機器耐力その2報告書）

| |
|--|
| |
|--|

次に柏崎刈羽原子力発電所第6号機の基準地震動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、表一5に示す。機器耐力その2報告書の検討条件に対し、柏崎刈羽原子力発電所第6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□ mm（1.5×9.8 m/s²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の間の流量が増加し、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える。

表一5 柏崎刈羽原子力発電所第6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 | | | |
| 柏崎刈羽原子力 発電所第6号機 | 1.1×9.8 | 1.21×9.8 | 2.05×10 ⁶ |

4. まとめ

鉛直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、制御棒に作用する上下方向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の評価し、影響を検討した。その結果、交番荷重である鉛直地震動の加速度 $1.1 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ が、仮に常時下向きに作用するとした場合でも、制御棒の上向き挿入力は下向きの力に対して、十分大きくなっている。なお、今回の影響評価では、下記①に示すように保守性を有している。

- ① 水平地震力による抗力として、機器耐力その2報告書を基に設定した、相対変位 40 mm における水平力を使用している。一方、柏崎刈羽原子力発電所第6号機の燃料集合体相対変位は 18.6 mm であり、この時の水平地震力による抗力は 40 mm での抗力より小さい。

また、鉛直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、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、実際には鉛直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、柏崎刈羽原子力発電所第6号機の基準地震動 S_s の評価条件を比較し、柏崎刈羽原子力発電所第6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鉛直方向地震による影響は小さく問題ないと考えられる。

[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

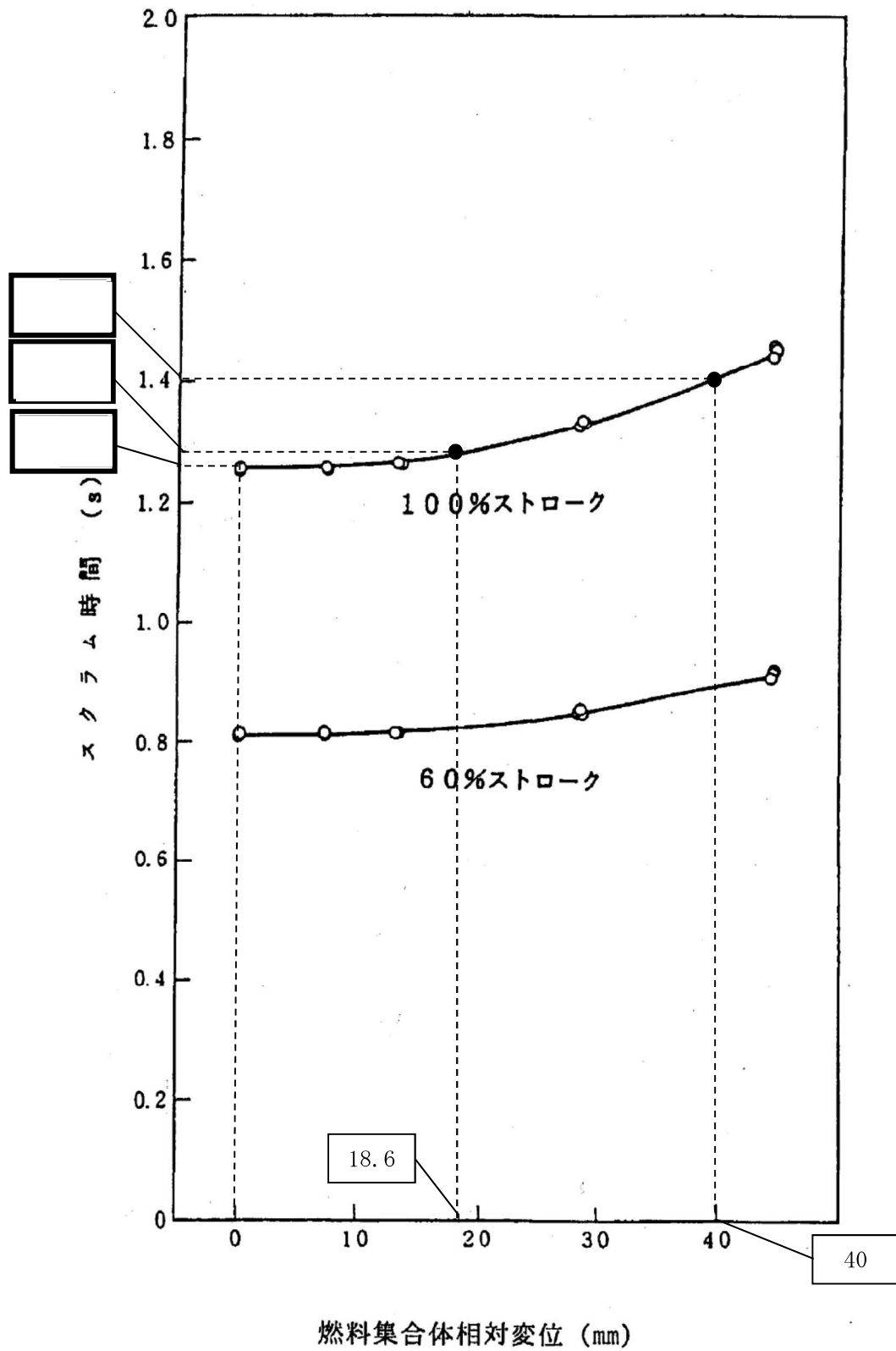
鉛直地震力による抗力でスクラム時間に遅れが生じることから、燃料のたわみ変位によって生じる下向き抗力とスクラム遅れ時間との相関を仮定し、整理する。

(2) 評価結果

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」(別図1参照)によると、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40 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、「表-3 制御棒挿入性影響評価で考慮する荷重と算出根拠」より、相対変位40 mmでの抗力(摩擦力)を保守的に3000 Nとすると、制御棒挿入に対する抗力(摩擦力)3000N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」より鉛直方向加速度 $1.1 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 作用時には抗力[]N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 $[] \times ([] / 3000) = []$ (秒)となる。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機の相対変位18.6 mmに対するスクラム時間(100%ストローク)は、別図1より約[]秒であることから、鉛直地震力による影響を考慮したスクラム時間は[](秒)となる。これは、100%ストロークスクラムの目安時間2.8秒以内である。



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
(VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」に加筆)