

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-55 改 02
提出年月日	2022年12月23日

制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書に関する
補足説明資料

2022年12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. 制御棒貯蔵ハンガの配置	1
3. 今回工認における制御棒貯蔵ハンガの変更点	2
3.1 運用制限	2
3.2 制御棒落下防止治具の追設	2
4. 制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る評価対象部位	2
4.1 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の構造	2
4.2 波及的影響の検討に係る評価対象部位	4
4.3 評価対象外とした部位（ハンガ及び振れ止め）に対する落下評価	7
5. 制御棒落下防止ポールの効果	7
6. 制御棒貯蔵ハンガの耐震解析モデルにおける制御棒の拘束条件	9
6.1 概要	9
6.2 等価な単振り子の長さの導出	12
6.3 単振り子の振動モードの導出	12
7. まとめ	14
8. 参考文献	14

1. はじめに

制御棒貯蔵ハンガは、燃料プール内に設置され、近傍に設置された上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックに対して、波及的影響を及ぼさないことを目的として、基準地震動 S_s に対する耐震性を評価しており、その結果を「VI-2-11-2-7-5 制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書」に示している。

制御棒貯蔵ハンガは、耐震性の確保を目的として運用を制限する方針（貯蔵本数の変更）としていることから、本資料ではこれを踏まえた耐震評価手法について示す。

2. 制御棒貯蔵ハンガの配置

図1に示すとおり、制御棒貯蔵ハンガは燃料プール内に設置されており、近傍に上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックが設置されている。したがって、制御棒貯蔵ハンガが地震時に損傷、転倒することで、使用済燃料貯蔵ラックに波及的影響を及ぼす可能性があるため、基準地震動 S_s に対して上位クラス施設に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

波及的影響の検討内容については、「NS2-補-023-03 下位クラス施設の波及的影響の検討について」に詳細を示す。

なお、制御棒ハンガ（その2）については、地震等の影響で制御棒が脱落した場合でも制御棒貯蔵ハンガ（その1）と干渉し、上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックに波及的影響を及ぼすことはないことから、本資料では制御棒ハンガ（その1）について述べる。

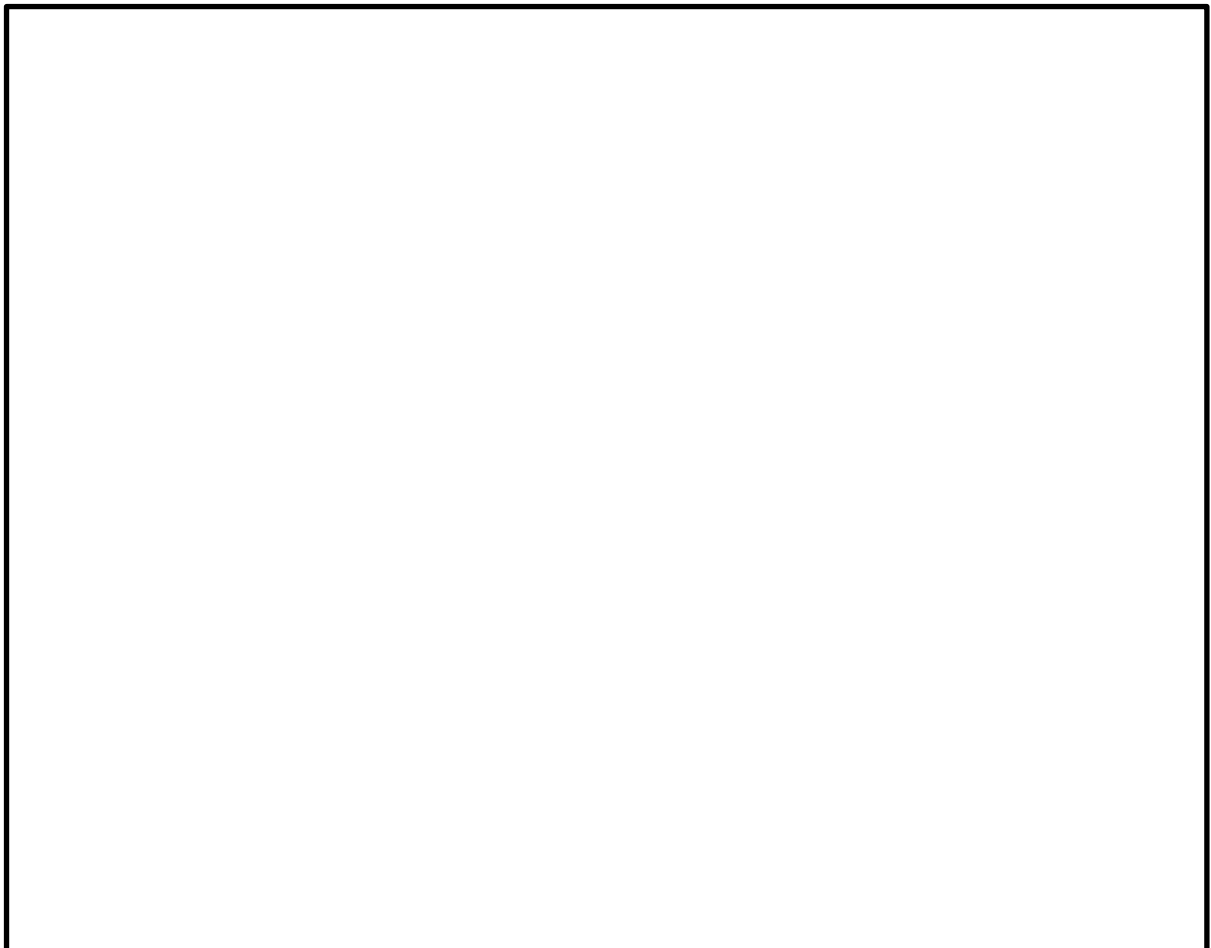


図1 制御棒貯蔵ハンガの配置図

3. 今回工認における制御棒貯蔵ハンガの変更点

3.1 運用制限

制御棒貯蔵ハンガ（その1）について、波及的影響に関する評価対象部位の基準地震動 S_s に対する構造健全性を満足するため、表1に示すとおり、制御棒貯蔵本数に対する運用を制限する方針（貯蔵本数の変更）としている。

表1 制御棒貯蔵本数の比較

	変更前（既工認）	変更後（今回工認）
制御棒貯蔵ハンガ（その1）	96本 (6本×16列)	64本 (4本×16列)

3.2 制御棒落下防止治具の追設

地震等の影響で、ハンガで保持している制御棒が脱落した場合でも、上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックに制御棒が落下しないよう、制御棒落下防止ポール及びポール支持金具からなる制御棒落下防止治具を設置する。

4. 制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る評価対象部位

制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討を実施するにあたり、今回工認において制御棒貯蔵ハンガの制御棒貯蔵本数を変更することによって制御棒貯蔵ハンガに対する荷重付加条件が変わること及び制御棒貯蔵ハンガの構造部材の役割等を踏まえて、改めて評価対象部位を選定する。

4.1 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の構造

制御棒貯蔵ハンガ（その1）は、ハンガ、サポート、制御棒落下防止治具、振れ止め、ボルト等で構成されている。また、今回工認では3.1に示した通り、貯蔵本数を1ハンガ（片側）あたりハンガ固定部寄りに2本までに制限し、また3.2に示した通り制御棒落下防止治具を追設することから、これらを踏まえた概略構造図を図2に示す。

なお、既工認では、貯蔵本数を1ハンガ（片側）あたり3本までとしていた。

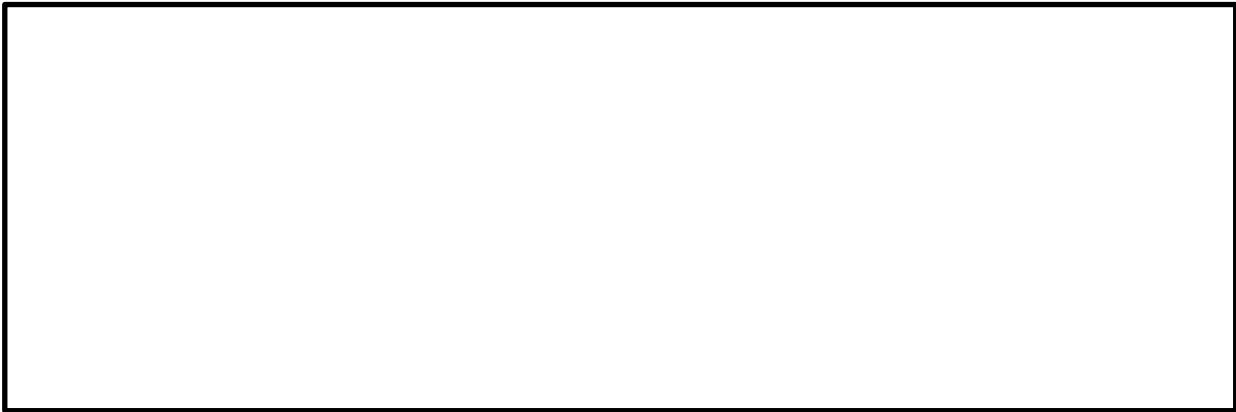
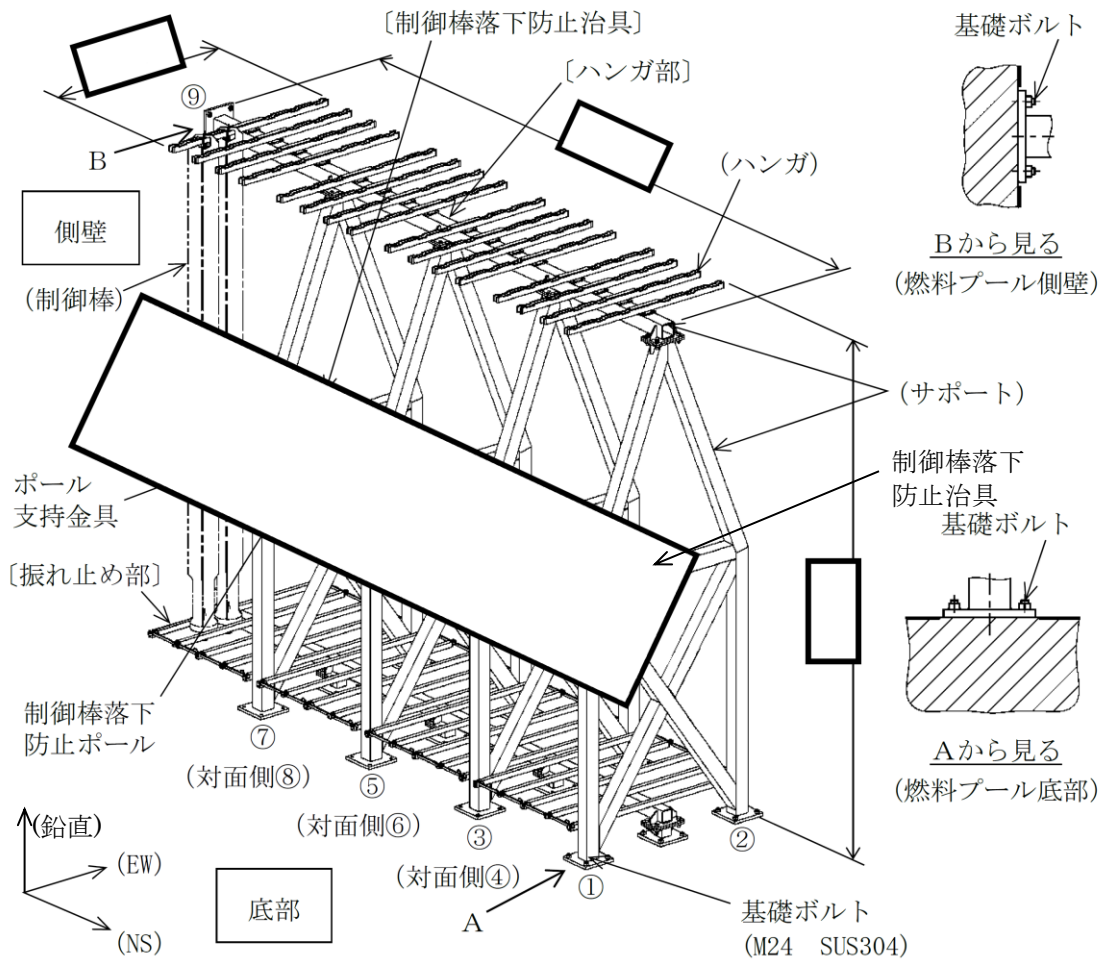


図2 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の概略構造図（今回工認）

4.2 波及的影響の検討に係る評価対象部位

今回工認において制御棒貯蔵ハンガの制御棒貯蔵本数を変更することを踏まえ、制御棒貯蔵ハンガの構造部材ごとに、役割、制御棒貯蔵による荷重負荷条件及び波及的影響に対する評価結果を**確認**し、改めて波及的影響に係る評価対象部位を検討した結果を表 2 に示す。

検討の結果、制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る評価対象部位としては、基礎ボルト、制御棒落下防止ポール及びポール支持金具を選定する。

表2 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の評価対象部位の検討結果（1/2）

構造部材名称	役割	評価対象部位		波及的影響に対する評価結果
		既工認 (貯蔵本数 96 本) Bクラス評価	今回工認 (貯蔵本数 64 本) 波及的影響	
ハンガ	制御棒をハンガに吊り下げる（1ハンガ（片側）あたり制御棒2本）	○	対象外	ハンガが損傷した場合にも、制御棒落下防止治具（制御棒落下防止ポール及びポール支持金具）が健全であれば上位クラス施設への波及的影響を防止できる。また、自重が軽量であるため、損傷した場合にも波及的影響を及ぼすおそれはない。 なお、当該部が破損し落下する場合について、重量物落下評価方法の評価条件と比較した結果、影響のないことを確認した。【4.3参照】
サポート	制御棒を吊り下げたハンガ及び制御棒落下防止治具からの荷重を受け、それらの荷重をプール床及び壁へ伝達する。	○	対象外	基礎ボルト及び制御棒落下防止治具が健全であれば、上位クラス施設への波及的影響を及ぼすおそれはない。
振れ止め	吊り下げた制御棒の下部を囲うことで振れを抑制する。	○	対象外	振れ止めが損傷した場合にも、制御棒落下防止治具（制御棒落下防止ポール及びポール支持金具）が健全であれば上位クラス施設への波及的影響を防止できる。また、自重が軽量であるため、損傷した場合にも波及的影響を及ぼすおそれはない。 なお、当該部が破損し落下する場合について、重量物落下評価方法の評価条件と比較した結果、影響のないことを確認した。【4.3参照】

表2 制御棒貯蔵ハンガ（その1）の評価対象部位の検討結果（2/2）

構造部材名称	役割	評価対象部位		波及的影響に対する評価結果
		既工認 (貯蔵本数 96 本) Bクラス評価	今回工認 (貯蔵本数 64 本) 波及的影響	
基礎ボルト	制御棒貯蔵ハンガ部をプール床、壁面に固定する。	○	○	基礎ボルトが損傷した場合には、制御棒貯蔵ハンガ全体が転倒する可能性があるため、波及的影響を及ぼすおそれがある。
制御棒落下防止ポール	保管中の制御棒が落下したとしても、制御棒貯蔵ハンガの設置範囲内に制御棒を留める。	－ (新設)	○	制御棒落下防止治具(制御棒落下防止ポール及びポール支持金具)が損傷した場合、ハンガから脱落した制御棒が使用済燃料貯蔵ラックに向かって転倒する可能性があるため、波及的影響を及ぼすおそれがある。
ポール支持金具	制御棒落下防止ポールを支持する。	－ (新設)	○	

4.3 評価対象外とした部位（ハンガ及び振れ止め）に対する落下評価

制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の評価対象外とした部位（ハンガ及び振れ止め）について、仮に当該部位が損傷し落下する場合の上位クラス施設への波及的影響の可能性を確認することを目的として添付書類「VI-1-3-3 燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能喪失の防止に関する説明書」に示されている、燃料プールライニングに対する模擬燃料集合体を用いた気中落下試験条件と制御棒貯蔵ハンガ及び振れ止めの落下条件の比較を表3に示す。

検討の結果、制御棒貯蔵ハンガのハンガ又は振れ止めが損傷し落下した場合においても、評価条件が模擬燃料集合体を用いた気中落下試験に包絡されることから、上位クラス施設である燃料プールや使用済燃料貯蔵ラックに対して波及的影響を及ぼすことはないと判断できる。

表3 気中落下試験条件と制御棒貯蔵ハンガのハンガ及び振れ止めの落下条件の比較

	模擬燃料集合体 気中落下試験	ハンガ	振れ止め
質量	310kg		
高さ	5.1m		

5. 制御棒落下防止ポールの効果

ハンガ破損時の制御棒の動態のイメージを図3に示す。



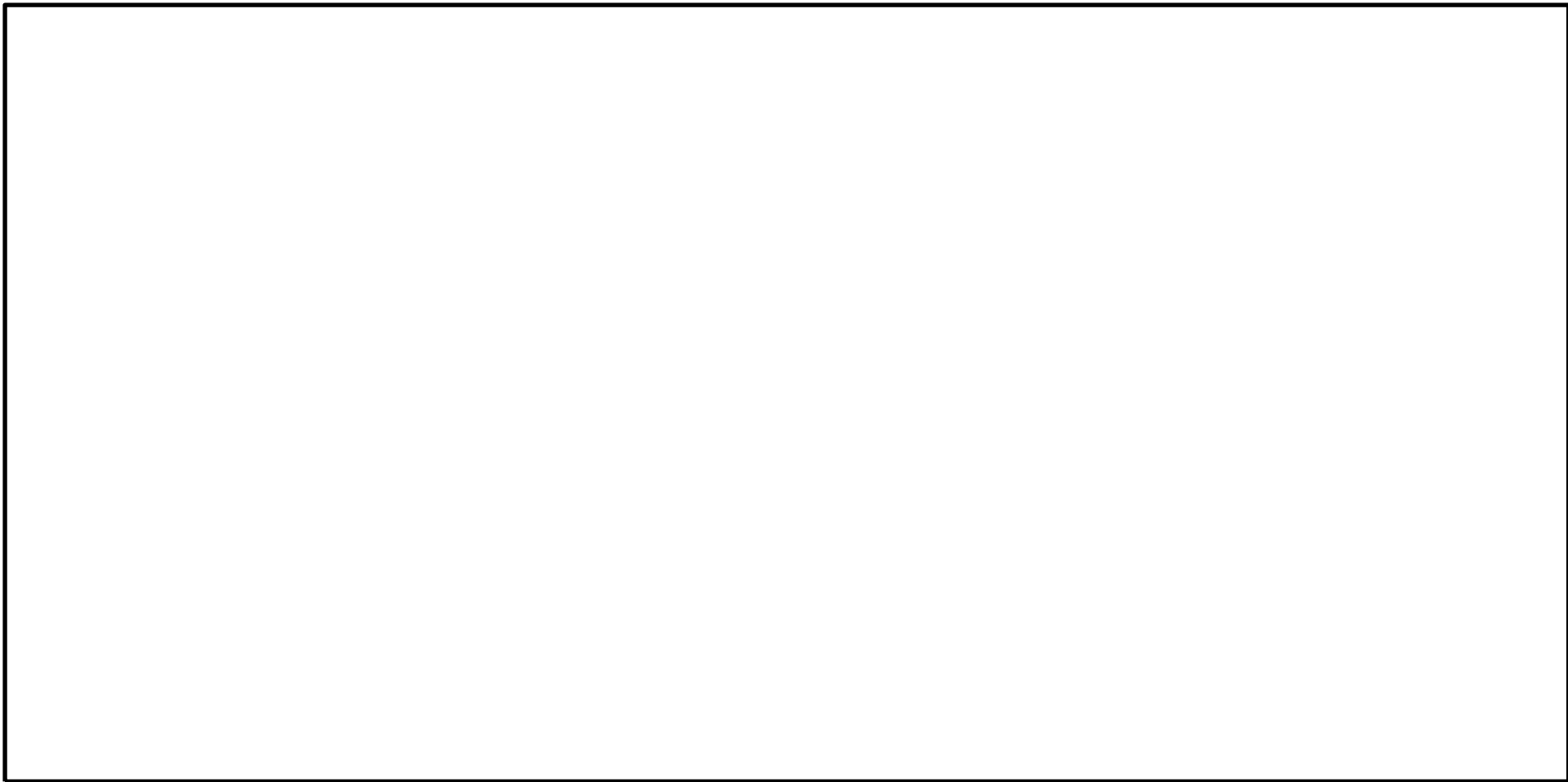


図3 ハンガ破損時の制御棒の動態のイメージ

6. 制御棒貯蔵ハンガの耐震解析モデルにおける制御棒の拘束条件

6.1 概要

制御棒貯蔵ハンガの解析モデルには制御棒が含まれている。解析モデルにおける制御棒の拘束条件として制御棒の上端のみを支持した場合は制御棒の位置（角度）が一意に定まらず解析結果が求められないため、以下の1)、2)を根拠として図4に示すように制御棒上端に加えて上端から $(2/3)L$ の点をピン支持(水平並進運動を拘束)している。ここで、 L は制御棒の長さを指す。

- 1) 制御棒の振動が、ハンガの制御棒支持部の振動に対して逆位相の振り子運動となる。
- 2) 1)の振り子運動における「節」（制御棒貯蔵ハンガに対して不動の点）が、上端から $(2/3)L$ の点となるため、並進運動を拘束しても振動に影響しないと考えられる。

以下、制御棒の振動モード及び節の位置を導出する。

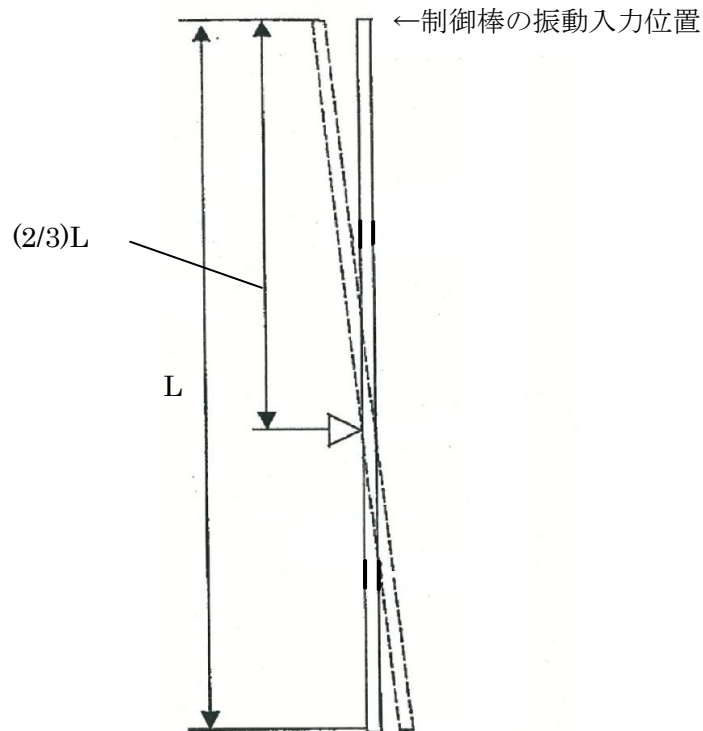


図4 支持点を追加した制御棒モデルの概略

まず、長さ L 、質量 M の制御棒は図5に示すように上端で支持された物理振り子（水平な回転軸を持つ剛体）とみなせる。慣性モーメントの関係から、図6に示すような質量 M を先端に持ち長さが $(2/3)L$ の単振り子（先端に集中質量を持つ通常の振り子）は、図5の物理振り子と等価であり、同じ入力を与えれば同じ挙動を示す（=同じ角度で運動する）。

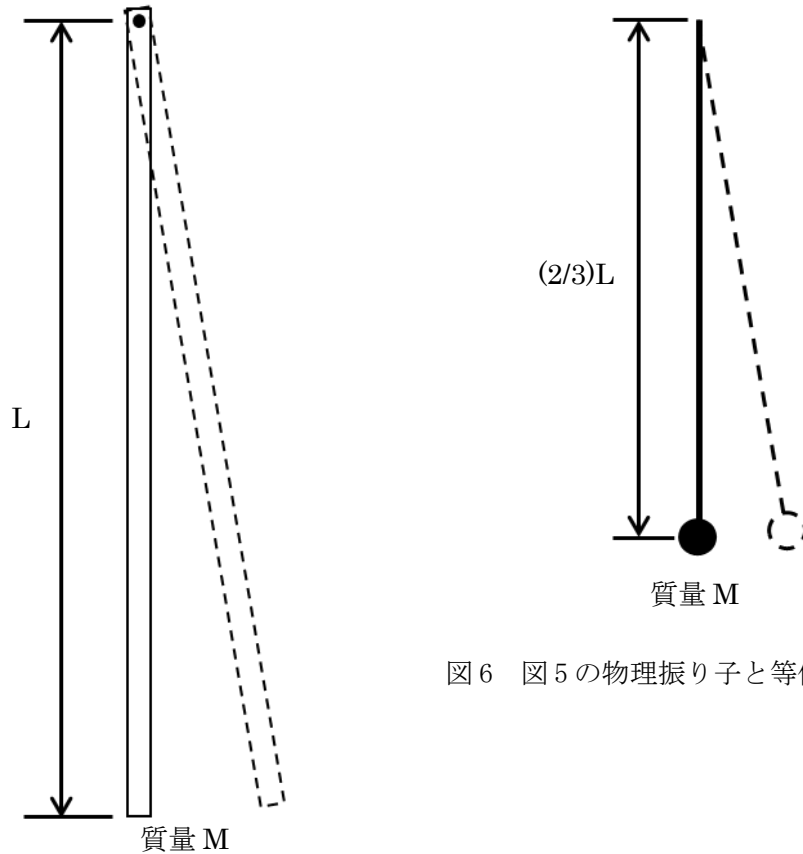


図6 図5の物理振り子と等価な単振り子

図5 制御棒を模擬した物理振り子

前段落で示した関係を利用し、制御棒を単振り子に置き換えることで、1質点系として振動モードを求める。まず図6の単振り子に対して制御棒貯蔵ハンガの固有振動数と等しい振動数 ω の強制外力を与えると、この単振り子の固有振動数 ω_n との関係は $\omega > \omega_n$ となることから、図7に示すような逆位相の振動モードとなり、先端の集中質量は不動点となる。

したがって、元の制御棒も図8に示す逆位相の振動モードとなる。また単振り子と制御棒の長さの関係より、制御棒の上端から $(2/3)L$ の点が不動点となる。よって図4に示すピン支持条件で解析を行っている。

次節以降に、単振り子の長さや振動モードの詳細な導出過程を示す。

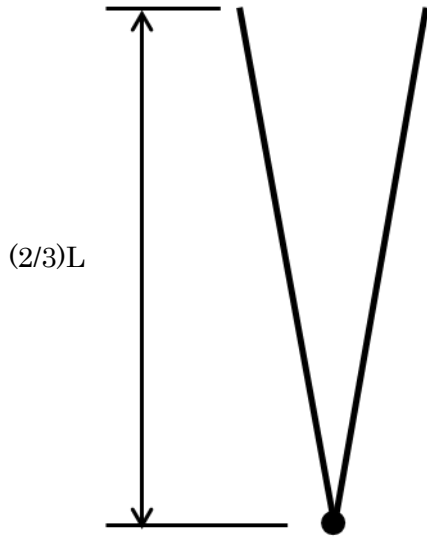


図 7 等価な単振り子の振動モード

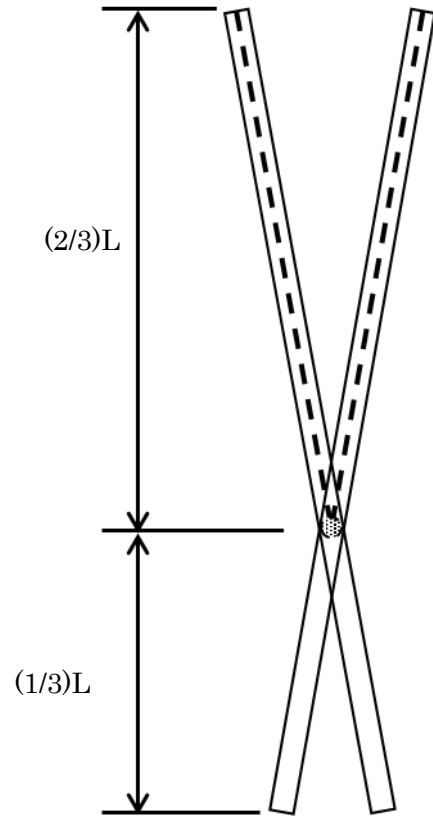


図 8 制御棒の振動モード

6.2 等価な単振り子の長さの導出

6.1 節では、制御棒を物理振り子（水平な回転軸を持つ剛体）とみなしたうえで、検討を容易にするため、それと同様な振動特性を持つ単振り子（先端に集中質量を持つ通常の振り子）に置き換えており、制御棒の長さが L のとき単振り子の長さは $(2/3)L$ になると述べた。本節ではこの導出過程について述べる。

機械工学便覧（参考文献(1)）によれば、物理振り子の運動方程式は式(1)で表される。ここで I は回転軸まわりの慣性モーメント、 M は質量、 h は回転軸 O から重心 G までの距離、 ϕ は OG と鉛直軸とのなす角度、 g は重力加速度である。

$$I \frac{d^2\phi}{dt^2} = -M g h \sin \phi \quad (1)$$

一方、単振り子（先端に集中質量を持つ通常の振り子）の運動方程式は式(2)で表される。ここで ℓ は単振り子の長さである。

$$M \ell^2 \frac{d^2\phi}{dt^2} = -M g \ell \sin \phi \quad (2)$$

式(1)と式(2)を比較すると、物理振り子と単振り子が等価となるような単振り子の長さ ℓ は式(3)で表され、 $\ell = (2/3)L$ である。ここで回転軸から重心までの距離 $h = (1/2)L$ を用いた。

$$\ell = \frac{I}{M h} = \frac{M \frac{L^2}{3}}{M \frac{L}{2}} = \frac{2}{3} L \quad (3)$$

なお、物理振り子の端点周りの慣性モーメントは、制御棒を直線とみなすことで参考資料(1)に従い式(4)で算出される。

$$I = M \frac{L^2}{3} \quad (4)$$

6.3 単振り子の振動モードの導出

6.1 節では、制御棒貯蔵ハンガの固有振動数 ω と、等価単振り子の固有振動数 ω_n との関係は $\omega > \omega_n$ になると述べた。この導出を示す。

強制振動による振り子の挙動は、参考文献(2)によれば、振動モードは入力振動数と固有振動数の関係によって図9のように3種類に分類される。ここで、 ω は振り子への入力角振動数、 ω_n は振り子の固有角振動数である。

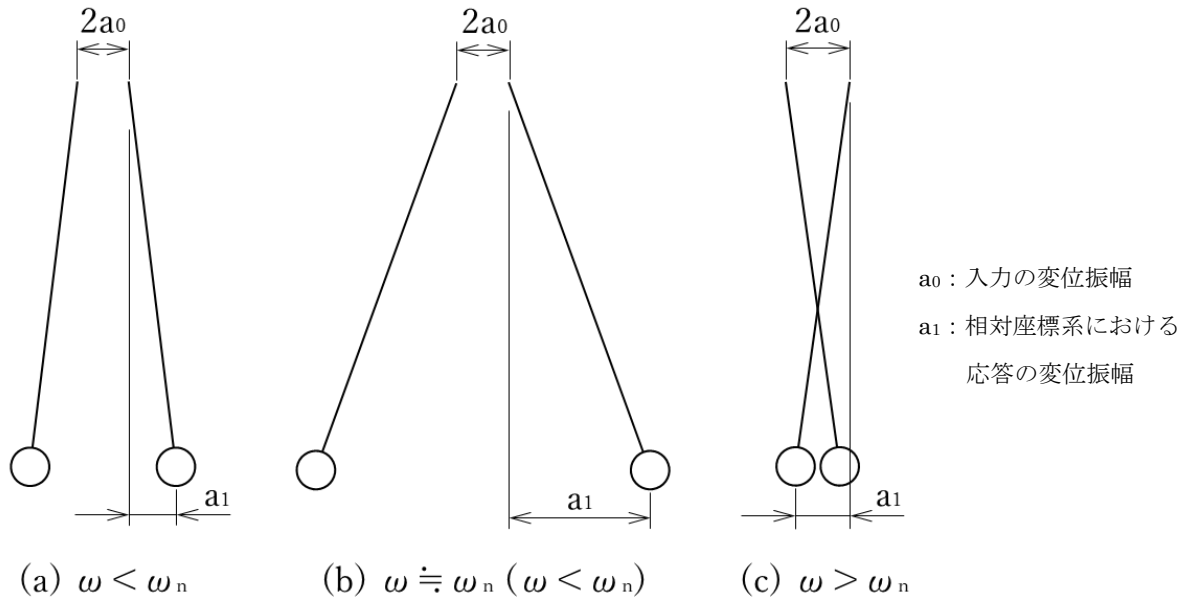


図9 振り子の振動モード

ω [rad/s]は制御棒貯蔵ハンガの固有角振動数のため、代わりに制御棒貯蔵ハンガの水平方向固有振動数 f [Hz]を用いることにすると、水平方向固有周期 T （水平X方向の卓越モードの固有周期）を用いて式(5)で算出される。

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ Hz} \quad (5)$$

次に ω_n の代わりに振り子の固有振動数 f_n を算出して f と比較する。制御棒と等価の単振り子の長さ ℓ は式(3)に基づき式(6)のようになり、その固有角振動数は参考文献(1)によれば式(7)で表されるため、固有振動数は式(8)で表される。ここで制御棒の長さ $L = \boxed{}$ m を用いた。

$$\ell = \frac{2}{3}L = \frac{2}{3} \times \boxed{} = \boxed{} \text{ m} \quad (6)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{\ell}} = \sqrt{\frac{9.80665}{\boxed{}}} = \boxed{} \text{ rad/s} \quad (7)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\boxed{}}{2\pi} = \boxed{} \text{ Hz} \quad (8)$$

以上の計算結果より、 $f = \boxed{} \text{ Hz} > f_n = \boxed{} \text{ Hz}$ すなわち $\omega > \omega_n$ となることから、図9に示した(c)のような逆位相の振動モードとなる。

なお、 $\omega/\omega_n = f/f_n = \boxed{}/\boxed{} = \boxed{}$ となり1より十分大きいため、参考文献(2)によれば振幅比は $a_1/a_0 \doteq 1$ となる。すなわち、単振り子の振動の寸法関係は、図9に基づき下記の図10のようになる（先端が静止する）。

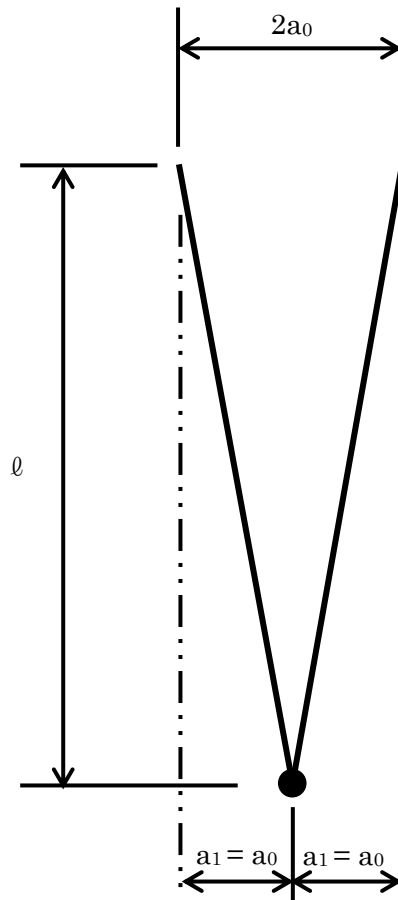


図 10 等価単振り子の振動の寸法関係

7. まとめ

制御棒貯蔵ハンガ（その 1）については、今回工認において制御棒貯蔵本数を変更（96 本から 64 本）し、また制御棒落下防止治具を追設することで、制御棒貯蔵ハンガの転倒及び制御棒脱落時にも上位クラス施設への波及的影響を防止する。

なお、制御棒貯蔵ハンガによる波及的影響の検討に係る耐震評価対象部位については、上位クラス施設への波及的影響を踏まえて基礎ボルト、制御棒落下防止ポール及びポール支持金具とする。

また、制御棒貯蔵ハンガの耐震評価における制御棒の拘束条件については、その振動特性を踏まえ、上端及び上端から $(2/3)L$ の点をピン支持している。

8. 参考文献

- (1) 機械工学便覧 基礎編 α2 機械力学
- (2) 山田伸志, 1987, 振動工学入門 第 2 版, パワー社