



JY-94-7

第59条（原子炉停止系統）に係る説明書（指摘回答）
第19条（反応度制御系統）に係る説明書

2021年11月2日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部

第59条（原子炉停止系）に係る指摘回答

地震時の制御棒挿入性（1/5：概要）

●地震時の制御棒及び後備炉停止制御棒の挿入機能に対する設計方針

制御棒又は後備炉停止制御棒（制御棒又は後備炉停止制御棒を収納する下部案内管を含む。）及び制御棒又は後備炉停止制御棒をラッチする上部案内管（上部案内管に連結される駆動機構を含む。）の地震時に生じる水平方向の相対変位を考慮しても、制御棒又は後備炉停止制御棒のスクラム時挿入時間（保持電磁石励磁断から反応度価値 90 % 挿入まで）が規定時間（0.8秒）以内になるよう設計する。

●基準地震動に対する制御棒挿入性評価

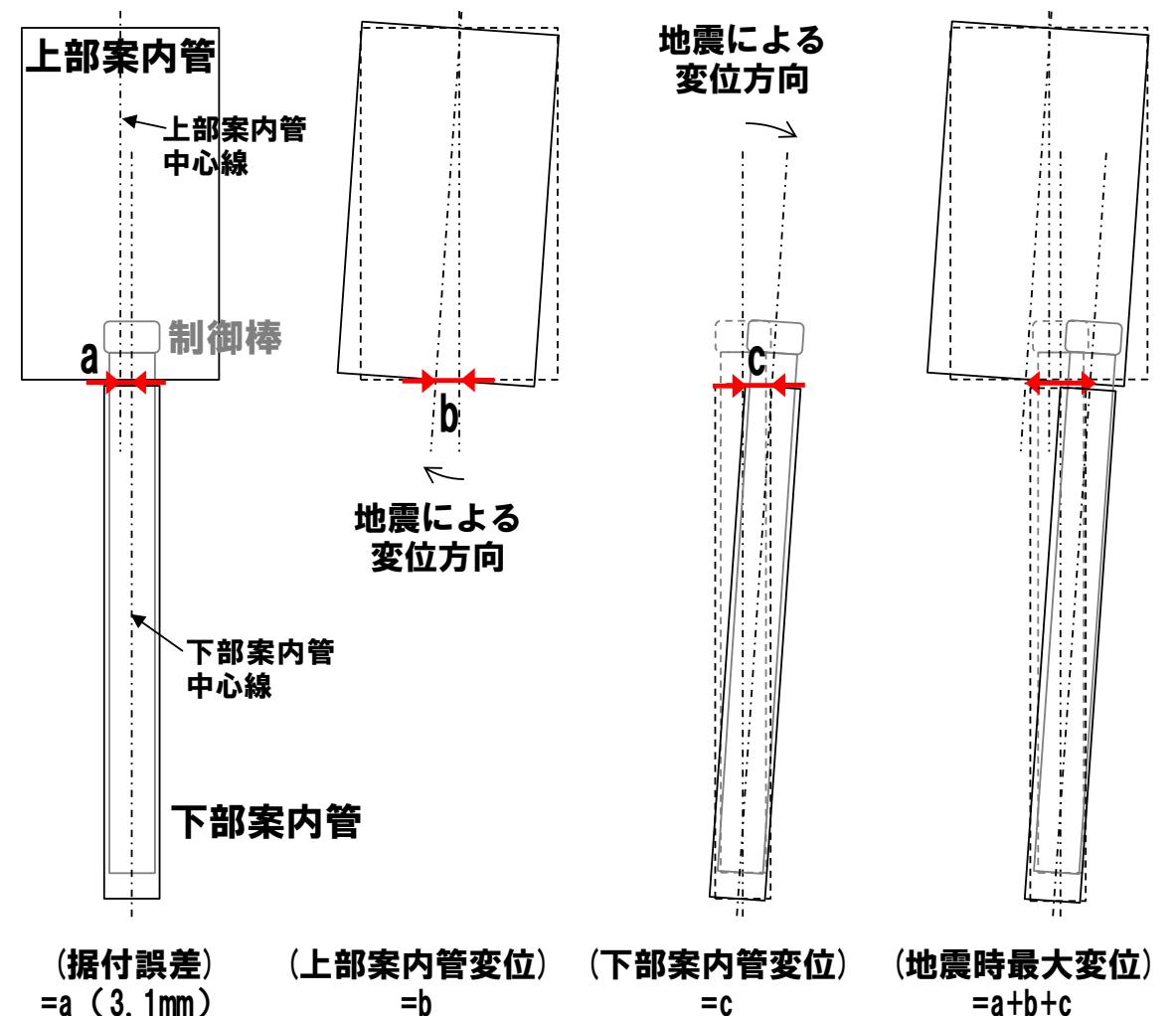
以下の2つの評価を実施する。

(1) 静的条件での制御棒挿入性評価

基準地震動 S_s に対して上部案内管と下部案内管の地震時最大変位量（右図）を評価し、その相対変位量が35mm以下であることを確認する。

(2) 動的条件での制御棒挿入性評価

機構解析により、衝突による摩擦抵抗を考慮してもスクラム時挿入時間が規定時間以内となることを確認する。

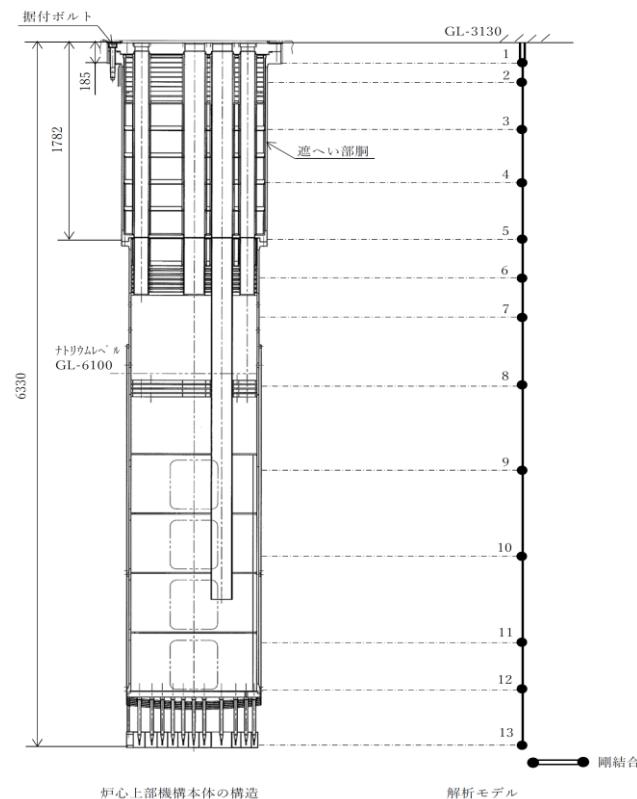


地震時の制御棒挿入性

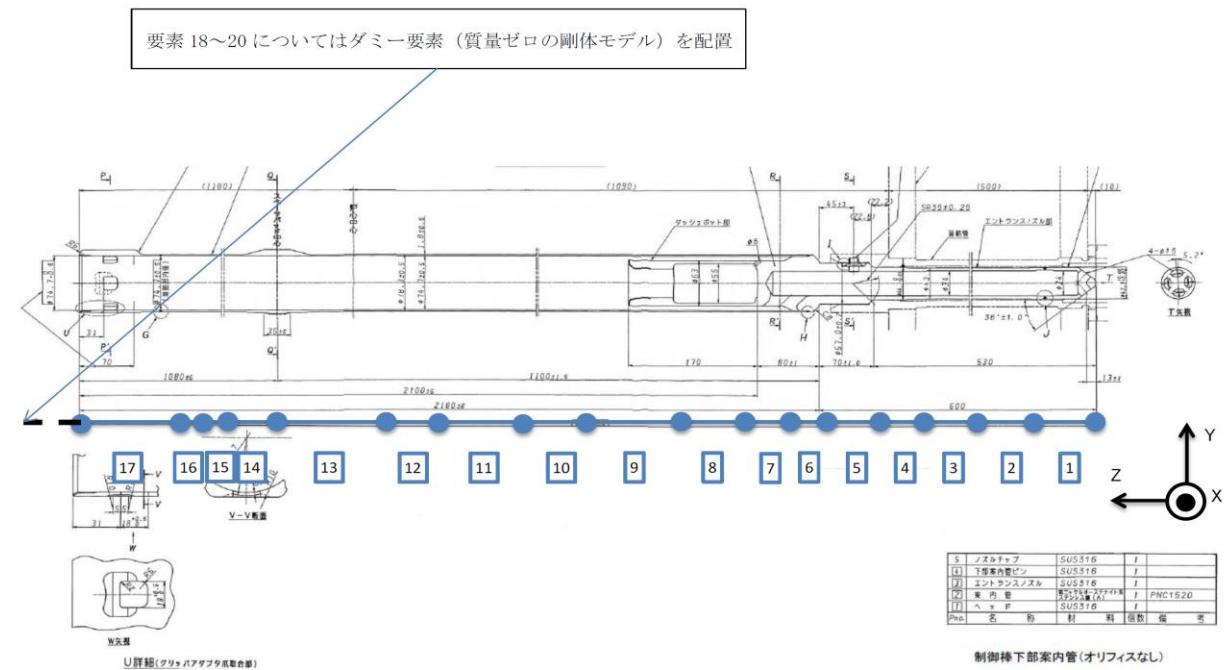
(2/5：静的条件での制御棒挿入性評価 (1) 解析条件)

●変位量評価の解析条件

	上部案内管	下部案内管
解析対象	炉心上部機構	全炉心（群振動解析）
解析コード	FINAS (ver. 21.3)	Revian-3D (v8.2)
固有値解析	1次8.4Hz、2次39.9Hz	1次6.7Hz、2次46.7Hz、3次129.2Hz
減衰定数	1.0% (Rayleigh型比例減衰)	3% (1次)、15% (2次、3次)
加振波	建物地下中1階床応答 (加速度) ※NS方向、EW方向それぞれ解析	炉心支持板応答 (加速度) ※NS+EW+UDの3次元解析



FINAS解析の炉心上部機構モデル



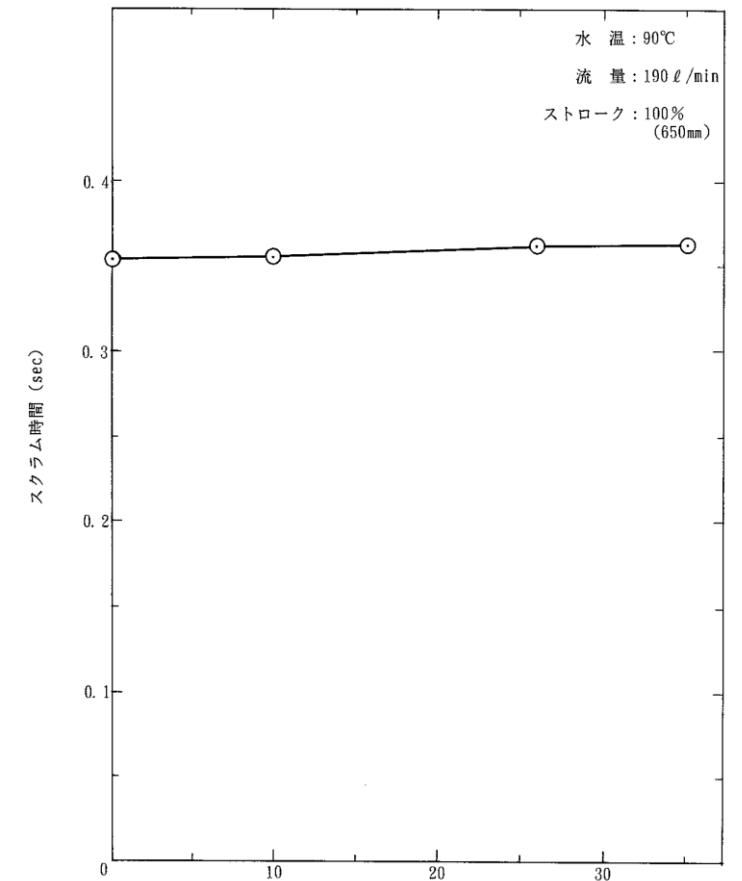
Revian-3D解析の下部案内管モデル

地震時の制御棒挿入性

(3/5：静的条件での制御棒挿入性評価 (2) 評価結果)

●最大相対変位量評価結果

	上部案内管 最大変位 (mm) (NS+EW)	下部案内管 最大変位 (mm) (NS+EW)	据付誤差 (mm)	最大相対 変位量 (mm)
Ss-D	6.4	14.4	3.1	23.9
Ss-1	14.5	12.9	3.1	30.5
Ss-2	11.5	14.2	3.1	28.8
Ss-3	7.0	13.3	3.1	23.4
Ss-4	8.4	11.2	3.1	22.7
Ss-5	9.2	10.4	3.1	22.7



水中スクラム試験結果

(実機ナトリウム環境を模擬する水温及び流量を設定)

●基準地震動Ssの地震に対する挿入性

- ・水中における実規模大モックアップ試験では、スクラム時間は35mmまでの相対変位量においてほぼ一定の値となっており、スクラム時挿入時間への影響がないことを確認している。
- ・位相を考慮せずにそれぞれの最大変位量を保守的に足し合わせた場合でも、基準地震動による最大相対変位量は最大でも30.5mm (Ss-1) で、スクラム試験の結果から0.8秒以内の挿入性が確認されている35mmを超えない。

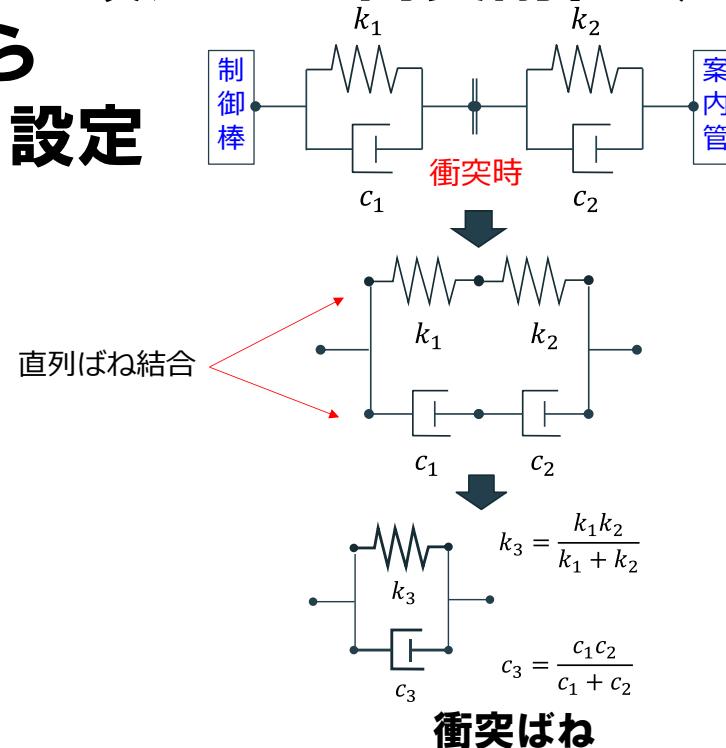
地震時の制御棒挿入性

(4/5：動的条件での制御棒挿入性評価(1)解析条件)

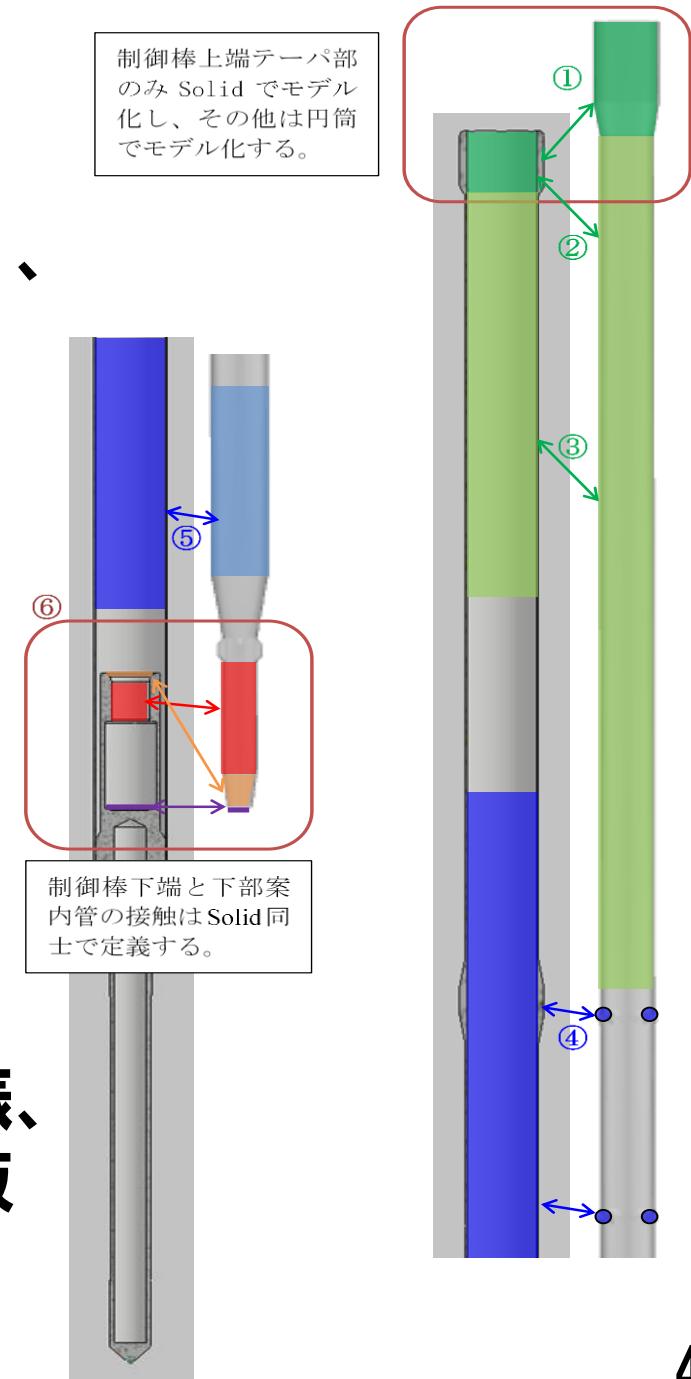
●機構解析※

- 解析コード：ADAMS (ver. 2019) ※衝突や摩擦等を模擬した解析
ADAMSの検証解析を別紙1に示す。
- モデル 制御棒、下部案内管：形状模擬した剛体
上部案内管：単純円筒、加速管：円筒構造
- 接触条件：接触箇所（右図）における衝突剛性、衝突減衰を、落下試験結果から設定した衝突剛性 ($k_{1,2}$)、衝突減衰 ($c_{1,2}$) から以下のように合成し設定

部位	衝突剛性 k_3 (N/mm)	衝突減衰 c_3 (Ns/mm)
①	1.6×10^4	9.0×10^{-1}
②	5.7×10^3	1.7×10^{-1}
③	3.8×10^3	1.0×10^{-1}
④	3.8×10^3	1.0×10^{-1}
⑤	7.1×10^3	2.0×10^{-1}
⑥	2.2×10^4	2.1×10^0



制御棒上端テーパ部のみ Solid でモデル化し、その他は円筒でモデル化する。

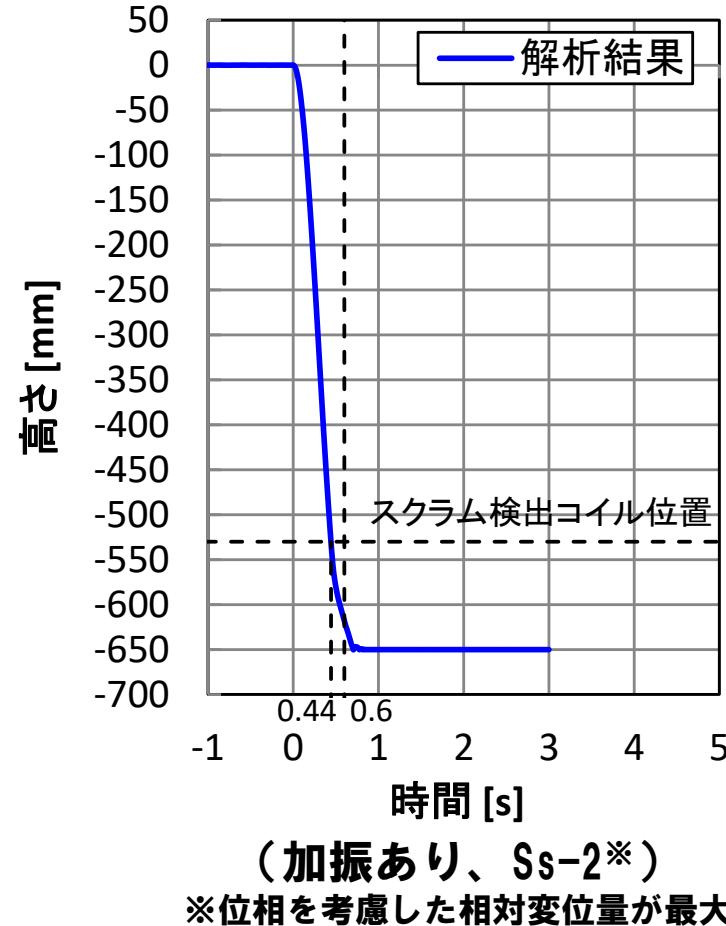
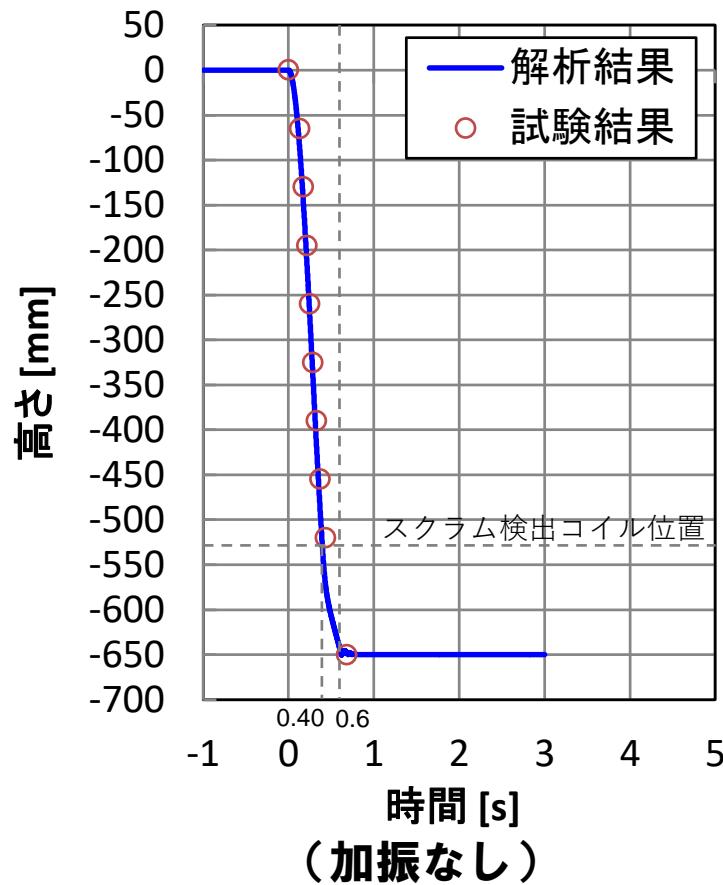


- 加振条件：上部案内管を水平2方向及び鉛直方向に並進加振、下部案内管上端を水平2方向に加振、炉心支持板（ピン支持）を水平2方向及び鉛直方向に加振
- 解析タイミング：最大相対変位が生じるタイミング

地震時の制御棒挿入性

(5/5：動的条件下での制御棒挿入性評価(2)評価結果)

●スクラム時間評価結果



	スクラム時間 (スクラム検出コイル位置に 到達するまでの時間)
加振なし	0.40
加振あり	0.44

スクラム検出コイル位置：-530mm
(制御棒反応度値で 90 %挿入とな
る位置は約-512mm)

※	上部案内管-下部 案内管の最大相 対変位量 (mm)	据付誤差 (mm)	最大相対変位 量 (mm)
Ss-D	12.8	3.1	15.9
Ss-1	17.2	3.1	20.3
Ss-2	17.3	3.1	20.4
Ss-3	11.8	3.1	14.9
Ss-4	13.6	3.1	16.7
Ss-5	14.3	3.1	17.4

●基準地震動Ssの地震に対する挿入性

- ・機構解析ではスクラム試験結果をよく再現している。
- ・加振時でもスクラム時間は0.5秒以内。
- ・保持電磁石励磁断からデラッチリミットスイッチ作動までの時間を0.2秒として(スクラム時間が0.6秒以内)、基準地震動時でも制御棒は規定時間内に挿入される。

第19条（反応度制御系統）に係る要求事項と対応概要

要求事項	対応の概要
<p>1 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、反応度制御系統を設けなければならない。</p> <p>一 通常運転時に予想される温度変化、キセノンの濃度変化、実験物（構造材料その他の実験のために使用されるものをいう。以下同じ。）の移動その他の要因による反応度変化を制御できるものとする。</p> <p>二 制御棒を用いる場合にあっては、次に掲げるものであること。</p> <p>イ 炉心からの飛び出し、又は落下を防止するものとする。</p> <p>ロ 当該制御棒の反応度添加率は、原子炉停止系統の停止能力と併せて、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容設計限界を超えないものとする。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉施設には、反応度制御系統及び原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系を設ける。制御棒及び制御棒駆動系は、通常運転時に予想される温度変化、実験物の移動その他の要因による反応度変化を制御できるように設計する。 ・ 炉心の反応度（原子炉の出力）は、エクステンションロッドと一体となった制御棒を、制御棒駆動機構のケーシングに収納された駆動電動機（三相誘導電動機）により、減速機を介して、外側エクステンションロッドに接続されたボールナットスクリュを回転させることで、上下駆動し、制御棒の位置を調整することで制御する（ボールナットスクリュ方式）。 ・ 照射燃料集合体、材料照射用反射体及び照射用実験装置においては、燃料又は照射物の過度の溶融又は分解を生じないように、及び冷却材の沸騰が生じないように設計するものとしている*1。 ・ 原子炉運転中に試料部を案内管内で可動できるものにあつては、試料部を可動させても、炉心の核特性に有意な影響を与えないものとしている。 ・ 高速炉の炉心の特徴として、キセノンの濃度変化による反応度変化は無視できる程度となる。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 炉心からの飛び出しを防止するために、制御棒は、ハンドリングヘッドにおいて、制御棒駆動機構上部案内管に収納されるエクステンションロッドを介して、制御棒駆動機構に吊り下げられる構造とする。なお、駆動電動機に設けられた電磁ブレーキにより、制御棒上下駆動の停止及び停止中の位置保持が行われる。 ・ 制御棒の反応度添加率は、その停止能力（原子炉停止系統）と併せて、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容設計限界を超えないものとする。制御棒による最大反応度添加率は約0.00016Δk/k/sである。 <ul style="list-style-type: none"> → 「添付書類10 2.運転時の異常な過渡変化 2.2 未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き」及び「添付書類10 2.運転時の異常な過渡変化 2.3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き」に示すように、制御棒の反応度添加率は、その停止能力と併せて、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容設計限界を超えないものとしている。

*1： 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）「第29条（実験設備等）に係る説明書」、
「第43条（試験用燃料体）に係る説明書」で別途提示。

反応度制御系統における反応度変化の想定等

- 通常運転時に予想される温度変化 → 【第32条（炉心等）】において温度変化等に係る炉心動特性を評価
 - 反応度や主冷却器空気流量のステップ状の変化に起因する出力振動が発生した場合にあっても、固有の出力抑制効果及び原子炉冷却材温度制御系の適切な応答動作等により、原子炉の出力、原子炉入口冷却材温度、原子炉出口冷却材温度等の主要諸変数を、十分な減衰性をもたせて安定に制御することができるため、反応度制御系統の動作を必要としない。
- キセノンの濃度変化 → キセノンの中性子吸収断面積の特性により、高速炉の炉心の特徴として、キセノンの濃度変化による反応度変化は無視できる程度となる。
- 実験物（構造材料その他の実験のために使用されるものをいう。）の移動
 - 【第29条（実験設備等）】において、実験物の移動に伴う反応度変化を制限
 - 計測線付実験装置は、試験目的に応じ、原子炉運転中に試料部を案内管内で可動できる構造とする場合がある。
 - 計測線付実験装置は、炉心の核特性に影響を与えないものとしており、その装荷にあたり制御棒の反応度制御能力が変わるものではない。また、試料部を案内管内で可動させる場合にあっても、反応度添加率を制御棒より小さいものとしているため、可動に伴う反応度変化は制御棒により制御することができる。
 - ※ 過去の設計実績として、自己作動型停止機構（SASS）の炉内試験を目的とした「試料部可動型実験装置」があり、設工認の核熱設計書において、試料部の落下に伴う反応度が $(-1 \sim -4) \times 10^{-4} \Delta k/k$ と小さく、また、反応度添加率も制御棒より二桁小さく、原子炉の安全性に影響するものではないことを確認している。
 - 【第43条（試験用燃料体）】において、照射燃料集合体等に起因する反応度変化を制限
 - 照射燃料集合体、材料照射用反射体及び照射用実験装置においては、燃料又は照射物の過度の溶融又は分解を生じないように、及び冷却材の沸騰が生じないように設計するものとしている

機構解析による「常陽」制御棒の地震時挿入性解析の妥当性

「常陽」の地震時の制御棒挿入挙動の妥当性検証として、①「常陽」制御棒のスクラム挙動（制御棒落下挙動）を解析で再現できることを確認（「常陽」制御棒水中スクラム試験）、②地震時条件下のスクラム挙動を解析で再現できることを確認（電力共通研究 後備炉停止制御棒水中振動試験）する。

1. 「常陽」制御棒のスクラム解析への適用の妥当性

本文 3. の解析モデルで過去の「常陽」の水中スクラム試験を対象とした挿入時挙動の再現解析を実施し、「常陽」制御棒のスクラム挙動解析に適用できることを確認する。

1.1 水中スクラム試験の概要

下部案内管エントランスノズル部にオリフィスを取り付けて、下部案内管内に水を流した状態で制御棒駆動機構によるスクラム模擬動作を行い、軸方向各位置での落下時間を測定した。なお、測定した落下時間は、上部案内管の検出コイルによる加速管の通過時間相当、及び下部案内管下部の加速度計による制御棒の着座時間相当の時間である。

試験条件を以下に記す。

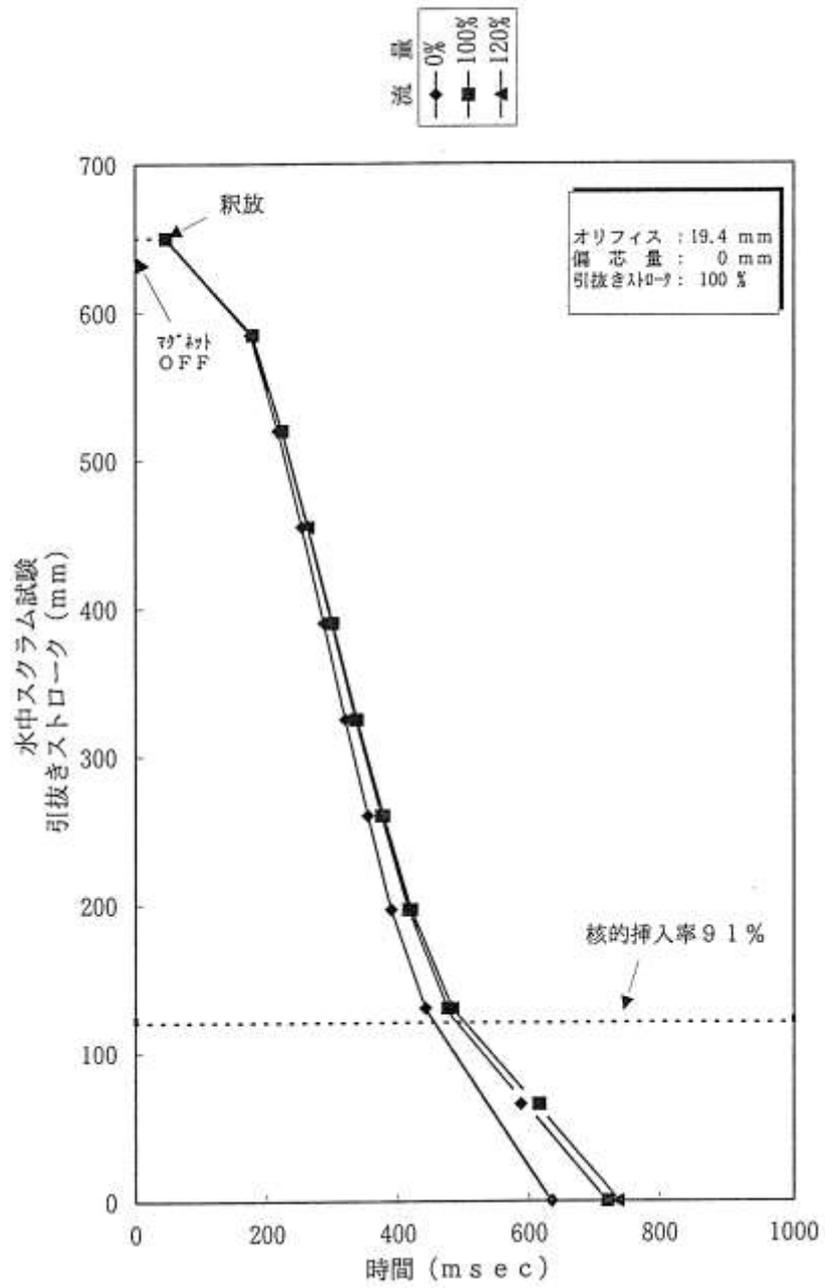
流体	: 水
水温	: 常温
流量	: 第 1 表
偏心量	: 0mm、35mm
スクラム回数	: 5 回

第 1 表 水中スクラム試験の流量条件

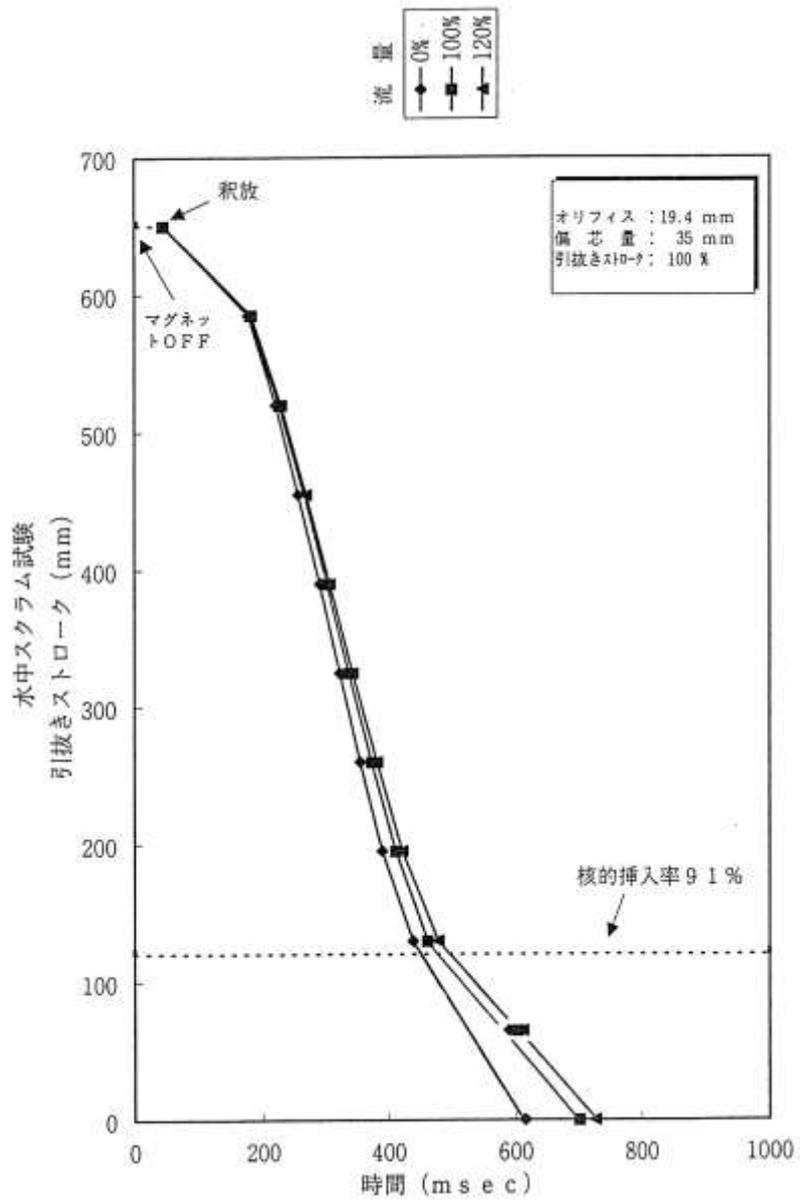
流量条件 (%)	水流量(L/min)	ナトリウム換算(kg/s)
0	0	0
100	158	2.26
120	190	2.71

水中スクラム試験の結果を第 1 図～第 2 図に示す。各プロットは同条件下での平均値である。制御棒落下は、制御棒駆動機構の保持電磁石の電源断から、約 45ms 後に開始している。

引抜きストローク 220mm 以上になると加速管がダンピングスプリングにより減速され始める。そのため、80%、90%の信号は独特の波形を示し（この間、制御棒は加速管から離れて単独で落下している）、90%は参考データ扱いである。100%の値は下部に設置された加速度計の信号から読み取ったものである。



第1図 水中スクラム試験結果 (偏心なし)



第2図 水中スクラム試験結果 (偏心 35mm)

1.2 ADAMS による機構解析

解析条件を第2表に示す。水中スクラム試験の条件（常温水中）に加え、試験の水中と実機のナトリウム中の比較のため、350℃Na 条件でも解析を実施した。

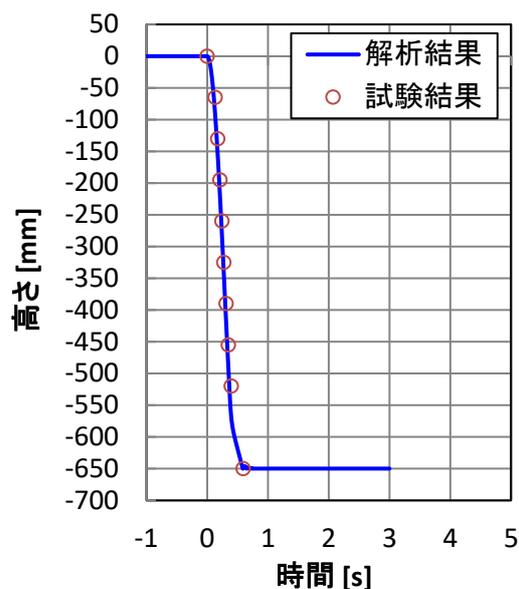
第2表 解析条件

	雰囲気	流量	偏心量	備考
(1)	常温水中	0 L/min	0 mm	
(2)	常温水中	158 L/min	0 mm	
(3)	常温水中	190 L/min	0 mm	
(4)	常温水中	158 L/min	35 mm	
(5)	350℃Na 中	2.71 kg/s	0 mm	水中と Na 中の比較用。 落下試験データはなし。

解析結果を第3図～第7図に示す。試験結果については、アーマチュア落下（釈放）を制御棒落下開始タイミングとして解析結果とともに図中に示している。

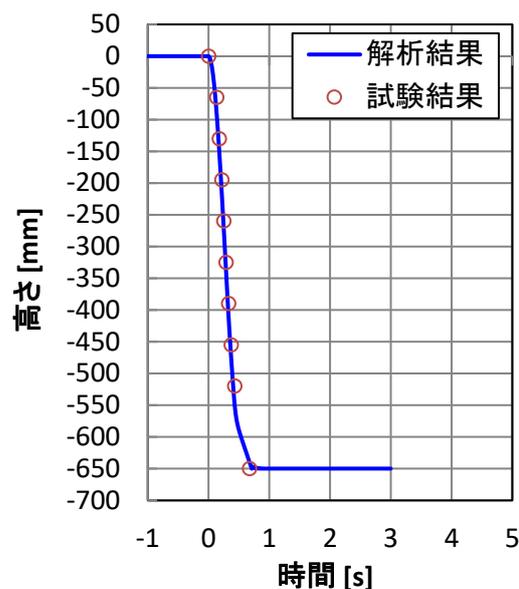
ADAMS の解析結果は水中スクラム試験の結果（試験では 10～80%は加速管の落下位置、100%は制御棒位置）を精度よく再現できており、「常陽」制御棒のスクラム挙動解析を行えることが確認できた。

また、常温水中と 350℃Na 中の解析結果の比較では、350℃Na 中の方がスクラム時間は短い。これは、350℃Na の方が常温水より密度が小さいため、制御棒スクラム時の流体抗力が小さくなるためである。



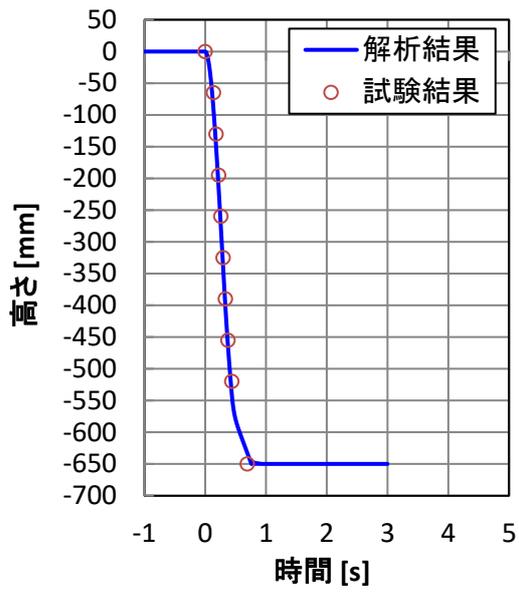
第3図 解析結果(1)

(常温水中、0 L/min、偏心 0 mm)



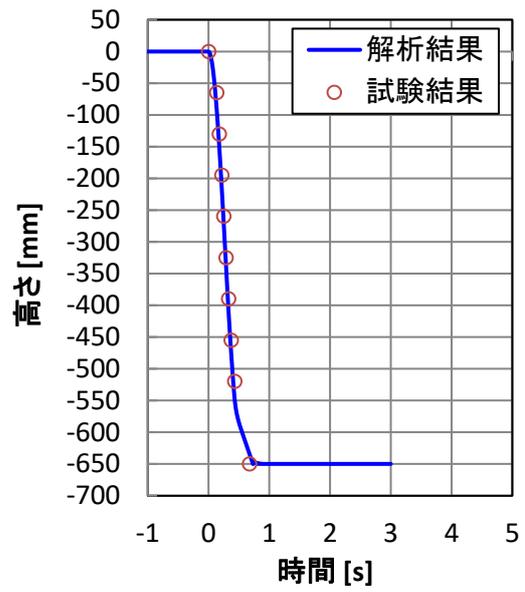
第4図 解析結果(2)

(常温水中、158 L/min、偏心 0 mm)



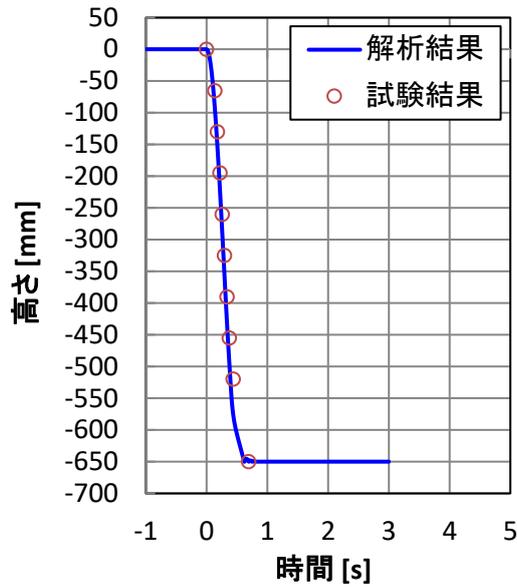
第5図 解析結果(3)

(常温水中、190 L/min、偏心 0 mm)



第6図 解析結果(4)

(常温水中、158 L/min、偏心 35 mm)



第7図 解析結果(5)

(350°CNa 中、2.71 kg/s、偏心 0 mm)

※落下試験結果は常温水中 190 L/min の条件

2. 地震時の加振による制御棒挿入性評価への適用の妥当性

振動試験を対象とした試験体モデルの挿入性解析を実施し、加振中のスクラム挙動解析に適用できることを確認する。ここでは、動的に加振した制御棒のスクラム試験として、高速炉の炉停止系における既往の地震時スクラム試験を対象とする。

2.1 対象試験の概要

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

2.2 ADAMS による機構解析

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。