

美浜3号炉－耐震－2 1 Rev3

タイトル	制御棒被覆管の摩耗に対する評価の具体的内容（評価仕様、解析モデル、入力条件（変位、加速度、抗力）、評価結果を含む）について
説明	制御棒被覆管の摩耗に対する具体的評価内容（応力評価）について、添付1に示す。 また、制御棒被覆管の摩耗に対する具体的評価内容（挿入時間の評価）について、添付2に示す。

## 制御棒挿入性評価について

制御棒挿入性の評価については、新規制基準への適合に係る工認側で評価手法を見直した再評価を実施したため、これに合わせた評価手法により評価の見直しを行った。

	当初申請 (H27.11補正申請)	工認に合せた評価手法反映 (H28.5補正)
評価条件	燃料集合体未照射条件 (照射影響の考慮無し) 旧Ss* ※取替前の炉内構造物での評価	燃料集合体照射後条件 (照射影響の考慮有り) Ss-1(750gal)～Ss-24：Ss-3 ※取替後の炉内構造物での評価
解析モデル	RV-CI連成モデル FA減衰率：1%	建屋-RCS-RV-CI連成モデル FA減衰率：10% (Ss-1～3) 1% (Ss-4～24)
評価手法	《挿入経路機器の応答解析》 ・制御棒駆動装置：時刻歴手法 ・制御棒クランク案内管：時刻歴手法 ・燃料集合体：時刻歴手法 《地震時挿入抗力の考慮方法》 ・制御棒駆動装置：時刻歴手法 ・制御棒クランク案内管：時刻歴手法 ・燃料集合体：時刻歴手法	《挿入経路機器の応答解析》 ・制御棒駆動装置：時刻歴手法 ・制御棒クランク案内管：時刻歴手法 ・燃料集合体：時刻歴手法 《地震時挿入抗力の考慮方法》 ・制御棒駆動装置：時刻歴手法 ・制御棒クランク案内管：時刻歴手法 ・燃料集合体：時刻歴手法

\*耐震バックチェックで用いたSs (スペクトル波(750gal)+断層波7波)のうち、最も厳しい断層波による評価。

制御棒挿入時間が当初申請時(平成27年11月)と補正時(平成28年5月)とでは、以下のような差異がある。

- ・炉内構造物取替(CIR)による評価モデルの変更
- ・地震動の変更(旧Ssから、Ss-1～24)
- ・建屋-RCS-RV-CI連成モデルの適用
- ・FA減衰率10%の適用(Ss-1～3)
- ・燃料集合体の照射影響の考慮
- ・制御棒駆動装置(CRDM)への中間耐震サポートの追設(設計変更含む)

各項目毎の挿入時間に対する影響は以下のとおりである。中間耐震サポートの追設によるCRDM 応答の低減により、全体として制御棒挿入時間が低減されているものである。

○挿入時間が大きくなる傾向にある項目：

- ・地震動の変更
- ・燃料集合体の照射影響の考慮

○挿入時間が小さくなる傾向にある項目

- ・中間耐震サポートの追設

○影響が軽微、もしくは挿入時間が大きくなる、小さくなる両方の場合がある項目

- ・FA 減衰率10%の適用
- ・CIR によるそもそものモデルの変更
- ・建屋-RCS-RV-CI 連成モデルの適用

## 被覆管の摩耗に対する耐震安全性評価

### 1. 計算方法の概要

制御棒クラスタの被覆管に摩耗を想定した場合の耐震安全性評価については、摩耗なしの場合の計算を実施し、摩耗なしの状態が発生応力が最大となる条件に対して、膜成分は断面積の減少分を、曲げ成分は断面係数の減少を考慮し、評価を実施する。

### 2. 制御棒クラスタの構造

制御棒クラスタは、1つの制御棒スパイダ及び20本の制御棒から構成される。

制御棒スパイダは、スパイダ本体より放射状に配置したベーン及び円筒形のフィンガから構成される。

制御棒は、ねじによりフィンガと接合され、ピンにより回り止めされている。

制御棒は、中性子吸収材である80%銀、15%インジウム、5%カドミウム合金をステンレス鋼製の被覆管に挿入し、被覆管両端に端栓を溶接した密封構造となっている。

制御棒には、更にコイルばねが入れられており、中性子吸収材の軸方向の動きを制限している。

構造説明図を図 2 - 1 及び図 2 - 2 に示す。

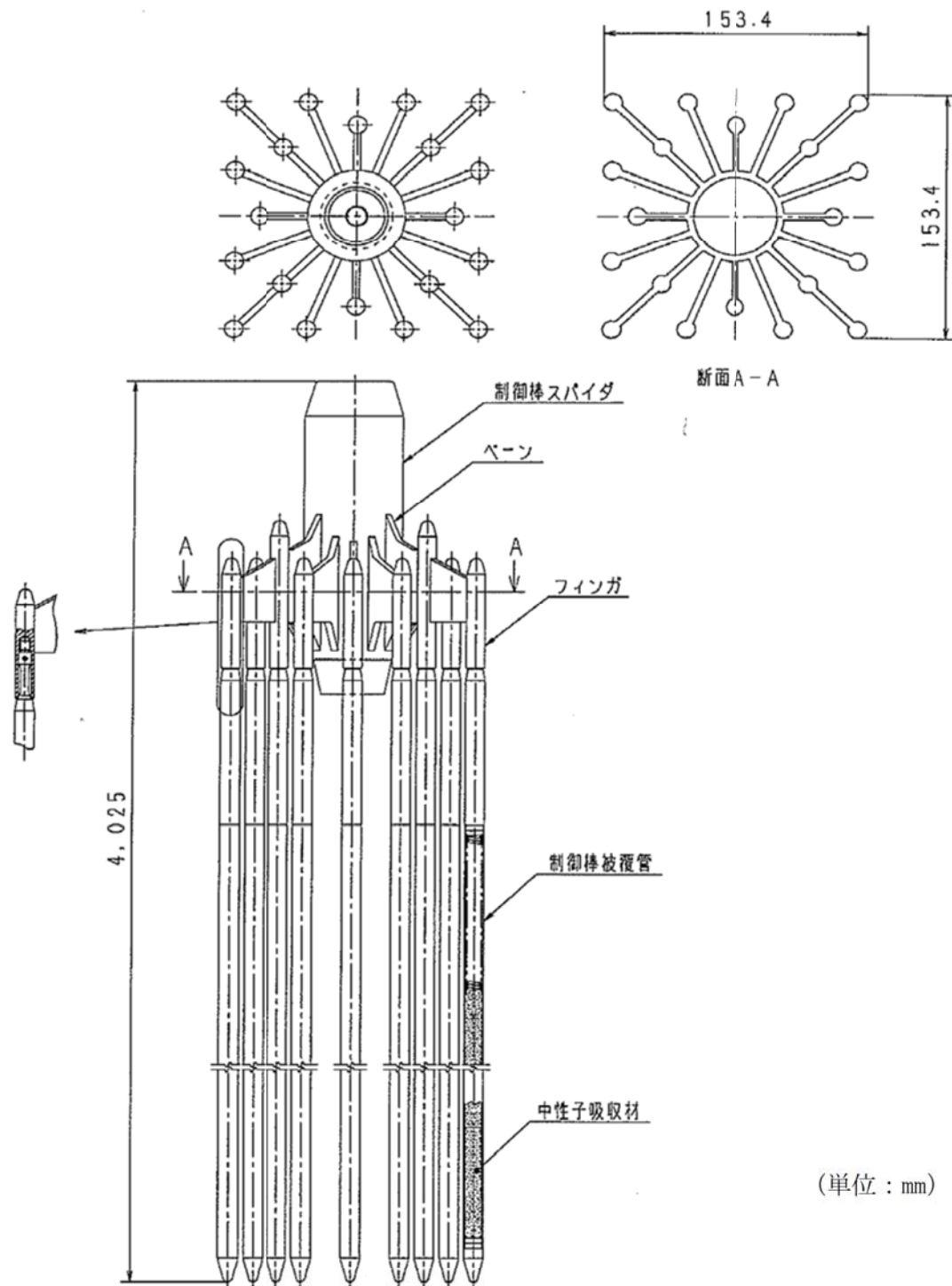


図2-1 15×15型制御棒クラスター構造図

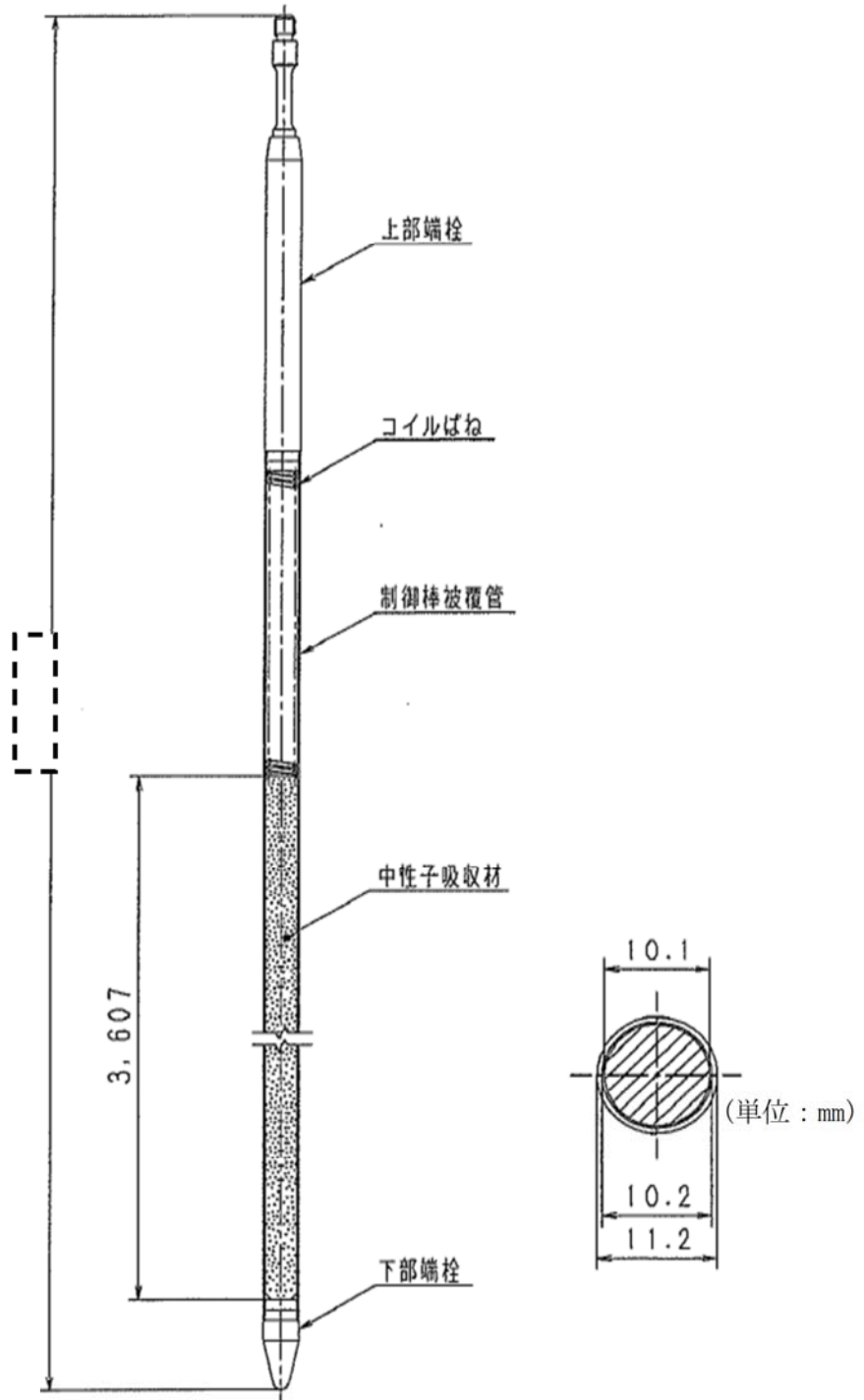


図 2 - 2 15×15型制御棒構造図

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



### 3. 地震時応力の算出（解析モデル及び入力条件について）

制御棒クラスタの耐震解析モデルを図3-1に、また、各挿入状態におけるこのはりモデルの支持点位置、荷重及び変位を入力する位置を図3-2に示す。入力条件として、等分布荷重（制御棒クラスタ案内管加速度）又は、強制変位（燃料集合体変位）を与えて計算により求める。

解析モデルの各はりに対する諸数値を表3-1に示す。表3-1に示す諸数値は摩耗なしの場合の数値となる。

水平方向については、制御棒クラスタの挿入位置によって地震荷重が変化するので、次の状態について、制御棒クラスタの応力計算を行う。

#### (1) 全引抜き状態

制御棒クラスタは制御棒クラスタ案内管内に位置し、ほぼ等間隔で水平方向に支持されている。したがって、制御棒クラスタ案内管の最大応答加速度を制御棒の入力加速度とする。

#### (2) 全挿入状態

全挿入状態では、制御棒クラスタは燃料集合体内に位置し、燃料集合体の振動変位に追従して変形する。したがって、全挿入状態での地震荷重は燃料集合体変位を強制変位として与える。強制変位は、第2支持格子（上部側から）の変位が最大となる際の変位とする。

#### (3) 半挿入状態

制御棒クラスタのうち、制御棒クラスタ案内管内に位置している部分については、全引抜き状態の考え方を適用し、制御棒クラスタ案内管の最大応答加速度を制御棒の入力加速度とし、また、燃料集合体内に挿入されている部分については全挿入状態の考え方を適用し、燃料集合体変位を強制変位として与える。



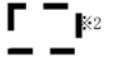
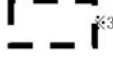
以上、評価の入力条件である制御棒クラスタ案内管加速度及び燃料集合体変位を表3-2に示す。

表3-1 計算モデルの各はりに対する諸元

はり 番号	部 材	縦弾性係数 E (MPa)	断面二次モーメント I (mm <sup>4</sup> )	はり長さ $\ell$ (mm)	単位長さ質量 $\rho \cdot A$ (kg/mm)	断面積 A (mm <sup>2</sup> )
1	制御棒スパイダ					
2	上部端栓細径部					
3	上部端栓					
4	制御棒プレナム部					
5	制御棒吸収材部					
6	下部端栓					

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表 3 - 2 入力条件

荷 重 条 件		S <sub>s</sub> 地震波	
水平	全引抜き 状 態	動的加速度 (G)	
	全 挿 入 状 態	燃料集合体最大変位 (mm)	
	半 挿 入 状 態	動的加速度 (G)	
		燃料集合体最大変位 (mm)	
鉛 直	動的加速度 (G)		

※1：最大応力を示すS<sub>s</sub>包絡波による制御棒クラスタ案内管の加速度

※2：S<sub>s</sub>-3波による燃料集合体の最大変位

※3：最大応力を示すS<sub>s</sub>包絡波による制御棒駆動装置の加速度

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



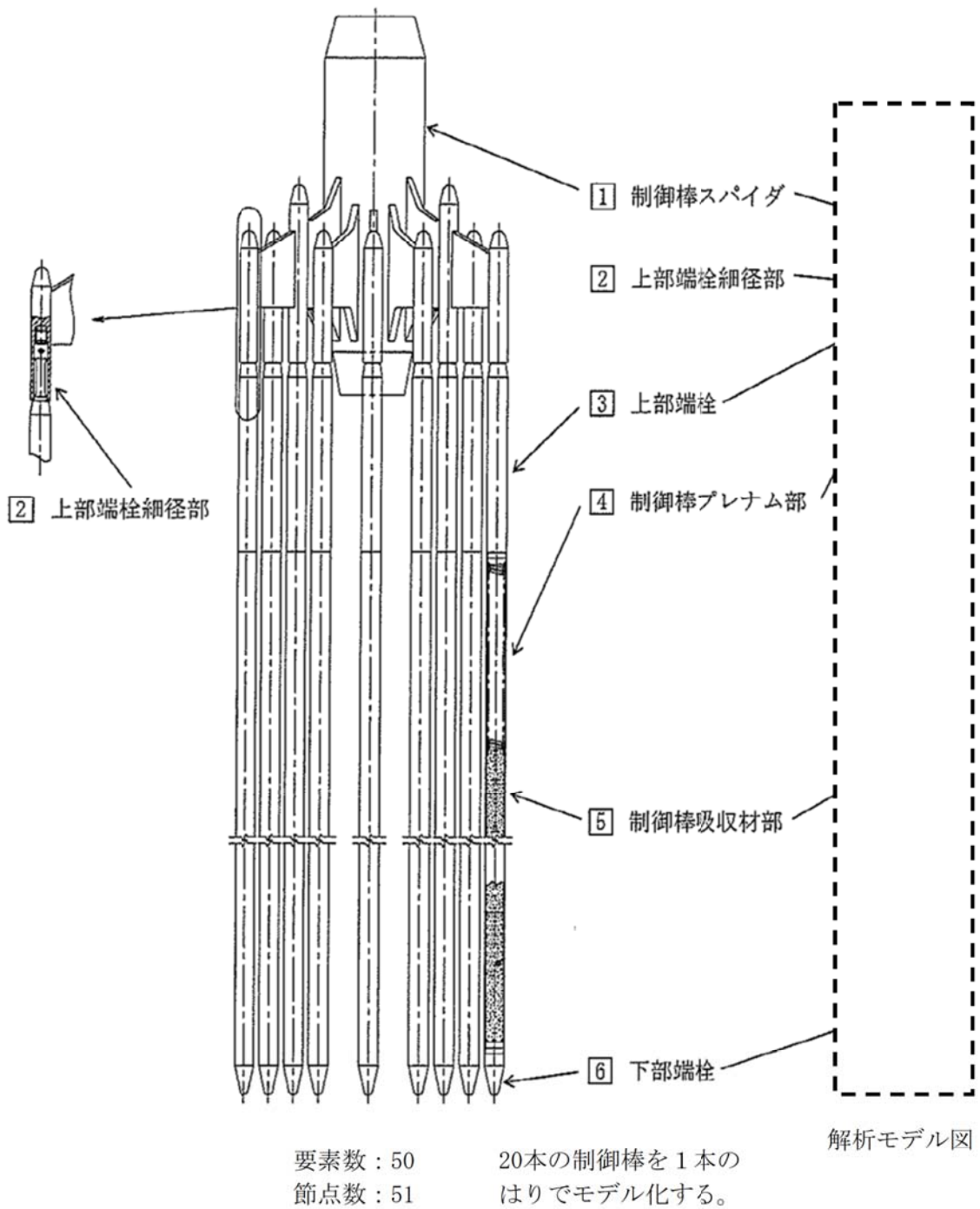


図3-1 計算モデル (はりモデル要素分割)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

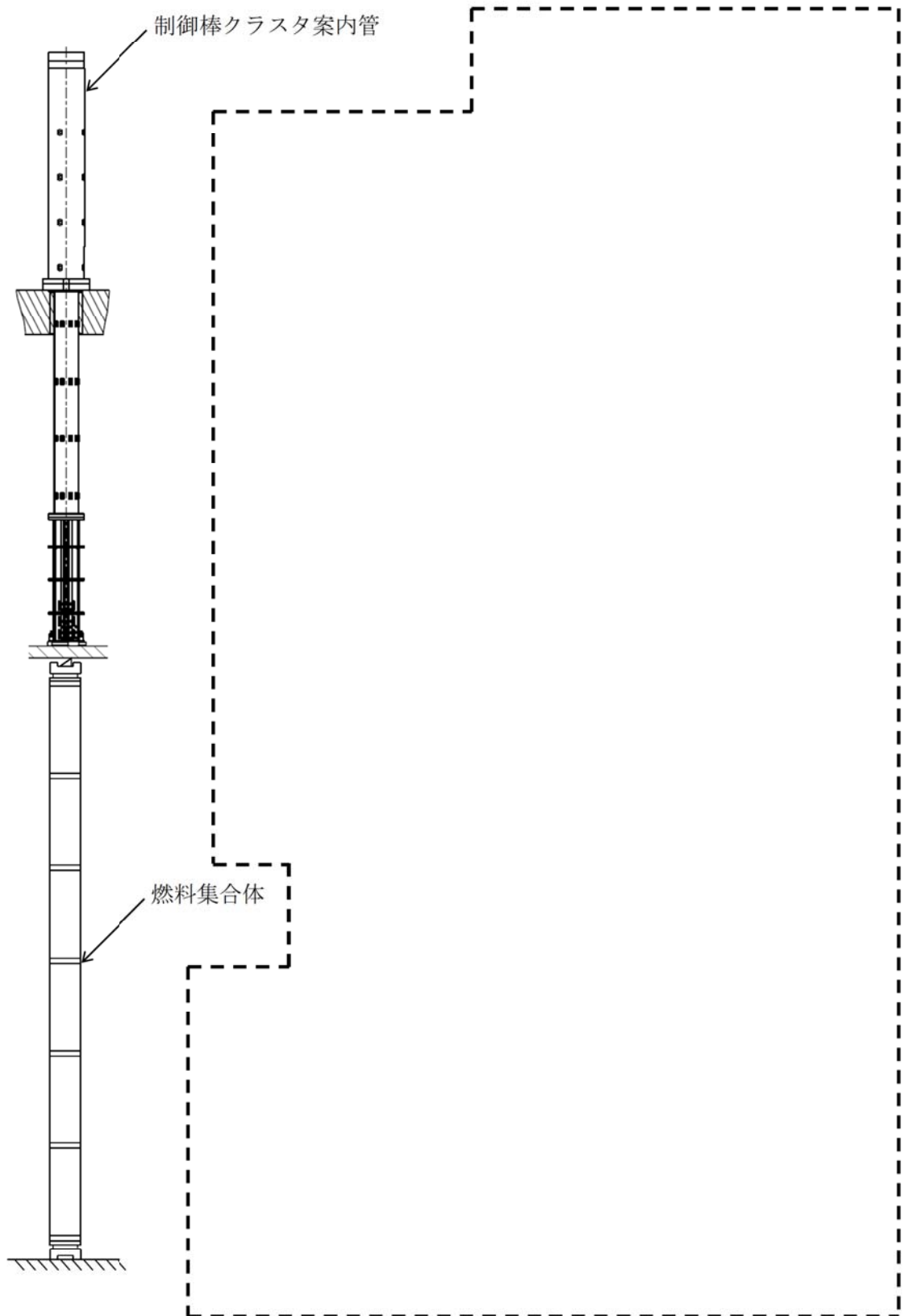


図3-2 制御棒クラスタ応力計算における外力及び支持条件（解析モデル図）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## 4. 運転時応力（自重及び機械的荷重による応力）の算出について

運転時に制御棒クラスタの被覆管には、自重及び制御棒クラスタ挿入によるスクラム荷重が加わる。軸荷重及び自重による応力は下式により計算する。また、入力となる設計条件を表4-1に示す。

$$\sigma_x = \frac{N}{A}$$

ここで、

$\sigma_x$  : 軸方向応力  
 N : 軸 荷 重  
 A : 断 面 積

表4-1 設計の条件

項 目		数 値
死 荷 重	自 重 (N) (制御棒1本当たり)	
機 械 的 荷 重	スクラム荷重 (N) <sup>(注)</sup> (制御棒1本当たり)	

(注) 駆動軸質量と制御棒クラスタ質量の和に、制御棒クラスタの挿入時加速度を考慮している。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## 5. 計算結果

被覆管の摩耗なしの状態での各挿入状態における運転時応力及び地震荷重による応力を表5-1に示す。

表5-1 計算結果まとめ

(単位: MPa)

状態	運転時応力 $\sigma_x$	地震時応力 $\sigma_x$	
		膜応力	曲げ応力
全引き抜き	2.2	$\pm 3.0$	$\pm 10.6$
半挿入	2.2	$\pm 3.0$	$\pm 161.5$
全挿入	-23.0	$\pm 3.0$	$\pm 255.3$

## 6. 摩耗を考慮した計算

被覆管の摩耗なしの状態に対し、発生応力が最大となる全挿入状態において、膜成分は断面積の減少を、曲げ成分は断面係数の減少を考慮した評価を行う。

被覆管摩耗は、図6-1に示すとおり貫通時の被覆管断面積の欠損割合が最も大きな摩耗形状を考慮する。

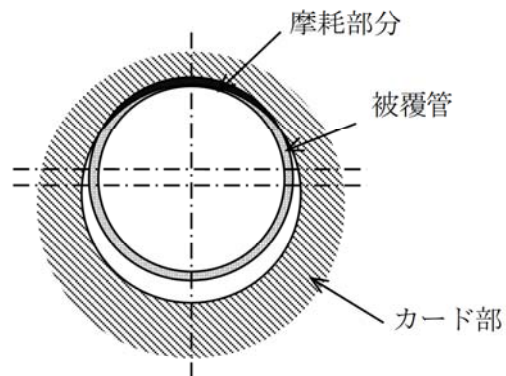


図6-1 評価で想定する被覆管の摩耗形状

被覆管摩耗なしでの地震荷重による応力計算結果（表5-1）より、地震時の膜応力及び曲げ応力は以下となる。

$$\sigma \text{ (曲げ成分)} = \pm 255.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma \text{ (膜成分)} = \pm 3.0 \text{ MPa}$$

次に、被覆管貫通摩耗を想定した場合の地震時曲げ応力は、被覆管貫通摩耗を想定したモデルを用いた応力解析より算出する。

図6-1に示す被覆管貫通摩耗を想定した場合の解析モデルを用い、強制変位（燃料集合体変位）与えて解析を実施し以下のとおり曲げ応力を算出した。

$$\sigma' \text{ (曲げ応力)} = \pm 255.3 \text{ MPa}$$

一方、膜応力は、被覆管断面積の比から、以下のとおり求める。

$$\sigma' \text{ (膜成分)} = \sigma \text{ (膜成分)} \times (A/A')$$

ここで A : 摩耗のない被覆管の断面積 :  $10000 \text{ mm}^2$

A' : 貫通摩耗ありの断面積 :  $9900 \text{ mm}^2$

従って、被覆管が貫通した場合の地震時膜応力は以下のとおりとなる。

$$\sigma' \text{ (膜応力)} = \pm 3.0 \text{ MPa}$$

以上より、被覆管貫通摩耗時の地震荷重による発生応力 ( $\sigma_x'$ ) は、以下のとおり求める。

$$\sigma_x' \text{ (一次膜+一次曲げ応力)} = \sigma' \text{ (曲げ応力)} + \sigma' \text{ (膜応力)}$$

従って、被覆管が貫通した場合の地震時の膜+曲げ応力は以下のとおりとなる。

$$\sigma_x' \text{ (一次膜+一次曲げ応力)} = \pm 258.3 \text{ MPa}$$

運転時応力は膜応力であるので、被覆管断面積の比から以下のように求められる。

$$\sigma_x' \text{ (運転時応力)} = \sigma_x \text{ (運転時応力)} \times (A/A')$$

運転時応力は-23.0 MPaなので、

$$\sigma_x' \text{ (運転時応力)} = \pm 23.0 \text{ MPa} \text{ となる。}$$

以上の評価結果から、被覆管摩耗に対する応力強さを表6-1に示す。また、評価結果のまとめを表6-2に示す。表6-2より、発生応力は許容値を満足することが確認できる。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表6-1 地震時の被覆管摩耗に対する評価結果

(MPa)

運転時応力 <sup>(注1)</sup>	地震時応力 <sup>(注1)</sup>	合計応力 <sup>(注2)</sup>

(注1) 負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。

(注2) 上段が地震荷重による応力の符号を正にとり、下段が地震荷重による応力の符号を負にとったものである。

表6-2 評価結果まとめ

発生応力 (MPa)	許容値 (MPa)	応力比
		0.55

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



## 被覆管に摩耗が存在する時の制御棒挿入性評価

制御棒被覆管の摩耗に対する評価として実施する、制御棒挿入時間評価の内容は以下のとおり。

### 1. 評価仕様

制御棒挿入時間評価は、制御棒クラスタが自重で落下する時に受ける各種の抗力を考慮し、下記の運動方程式を解くことで、最終的に制御棒クラスタの挿入距離と挿入時間を求めるものである。地震時の挿入時間の算出においては、制御棒挿入経路機器である制御棒クラスタ駆動装置、制御棒クラスタ案内管、燃料集合体（制御棒案内シンプル）の地震応答に対応する制御棒挿入抗力を考慮し、挿入時間を算出する。

また、制御棒被覆管の摩耗に対する評価では、制御棒の摩耗及び制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗を考慮した挿入抗力を地震時の制御棒挿入抗力に付加し、挿入時間を算出する。評価の全体フローを図2に示す。

$$M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = M \cdot g - (F_f + F_v + F_w + F_m + F_u)$$

ここで、

M	:	質 量
x	:	制御棒クラスタ挿入距離
t	:	制御棒クラスタ挿入時間
g	:	重力加速度
F <sub>f</sub>	:	流体による抗力
F <sub>v</sub>	:	地震外力による抗力
F <sub>w</sub>	:	摩耗による抗力
F <sub>m</sub>	:	メカニカル抗力
F <sub>u</sub>	:	浮 力

## 2. 入力条件

### (1) 地震外力による抗力

制御棒挿入時間評価の入力となる地震時の制御棒挿入経路機器の最大応答変位を表1に示す。これらの機器応答に対応する地震時の制御棒挿入抗力を求め、挿入時間を算出する。

表1 地震時 制御棒挿入経路機器応答

最大変位 (mm)		
制御棒駆動装置	制御棒クラスタ案内管	燃料集合体 制御棒案内シムプル
5.5	0.8	60.0

### (2) 摩耗による抗力

制御棒クラスタ案内管（案内板）及び被覆管の摩耗による抗力については、過去に実施したモックアップによる抗力測定試験で取得した摩耗抗力から抗力値を設定している。

摩耗量について制御棒に対しては、保守的に制御棒の被覆管の一部が100%摩耗することを仮定している。また、制御棒クラスタ案内管の案内板は図1に示すような摩耗（摩耗長さ86%）を仮定している。

以上より、案内管（案内板）及び被覆管の摩耗条件を組み合わせた場合に最大となる制御棒挿入抗力を、摩耗による抗力として設定している。

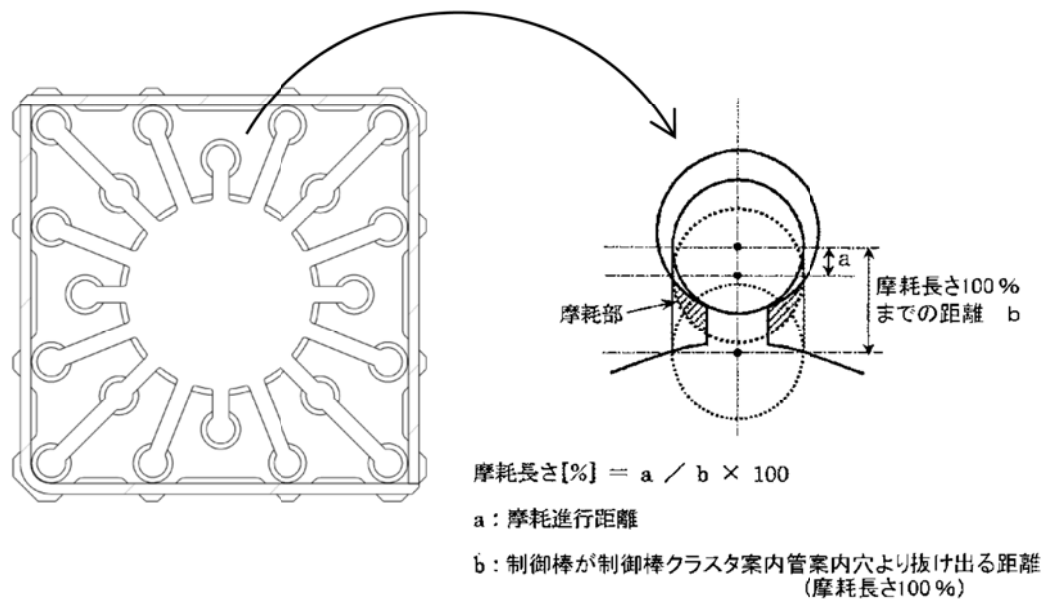


図1 制御棒クラスタ案内管 案内板摩耗の仮定

## 3. 評価結果

制御棒挿入時間の評価結果を表2に示します。

表2 制御棒クラスタ挿入時間計算結果

(単位：秒)

	制御棒クラスタ挿入時間*1	規定時間*2
通常運転時	1.31	1.8
地震時 (制御棒クラスタ案内管 案内板、制御棒被覆管 摩耗考慮) (S <sub>s</sub> -3)	1.44	

\*1：各時間は落下開始から制御棒が全ストロークの85%に至るまでの時間

\*2：工事計画認可申請書 添付13 耐震性に関する説明書 に記載の値

## 4. 補足 (制御棒クラスタ案内管案内板、制御棒被覆管の摩耗を考慮しない場合)

## ①地震時 制御棒挿入経路機器応答

表3 地震時 制御棒挿入経路機器応答

最大変位 (mm)		
制御棒クラスタ 駆動装置	制御棒クラスタ 案内管	燃料集合体 制御棒案内シンプル
5.5	0.8	60.0

## ②評価結果

表4 制御棒クラスタ挿入時間計算結果

(単位：秒)

	制御棒クラスタ挿入時間*1	規定時間*2
地震時挿入時間 (S <sub>s</sub> -3)	1.42	1.8

\*1：各時間は落下開始から制御棒が全ストロークの85%に至るまでの時間

\*2：工事計画認可申請書 添付13 耐震性に関する説明書 に記載の値

以上

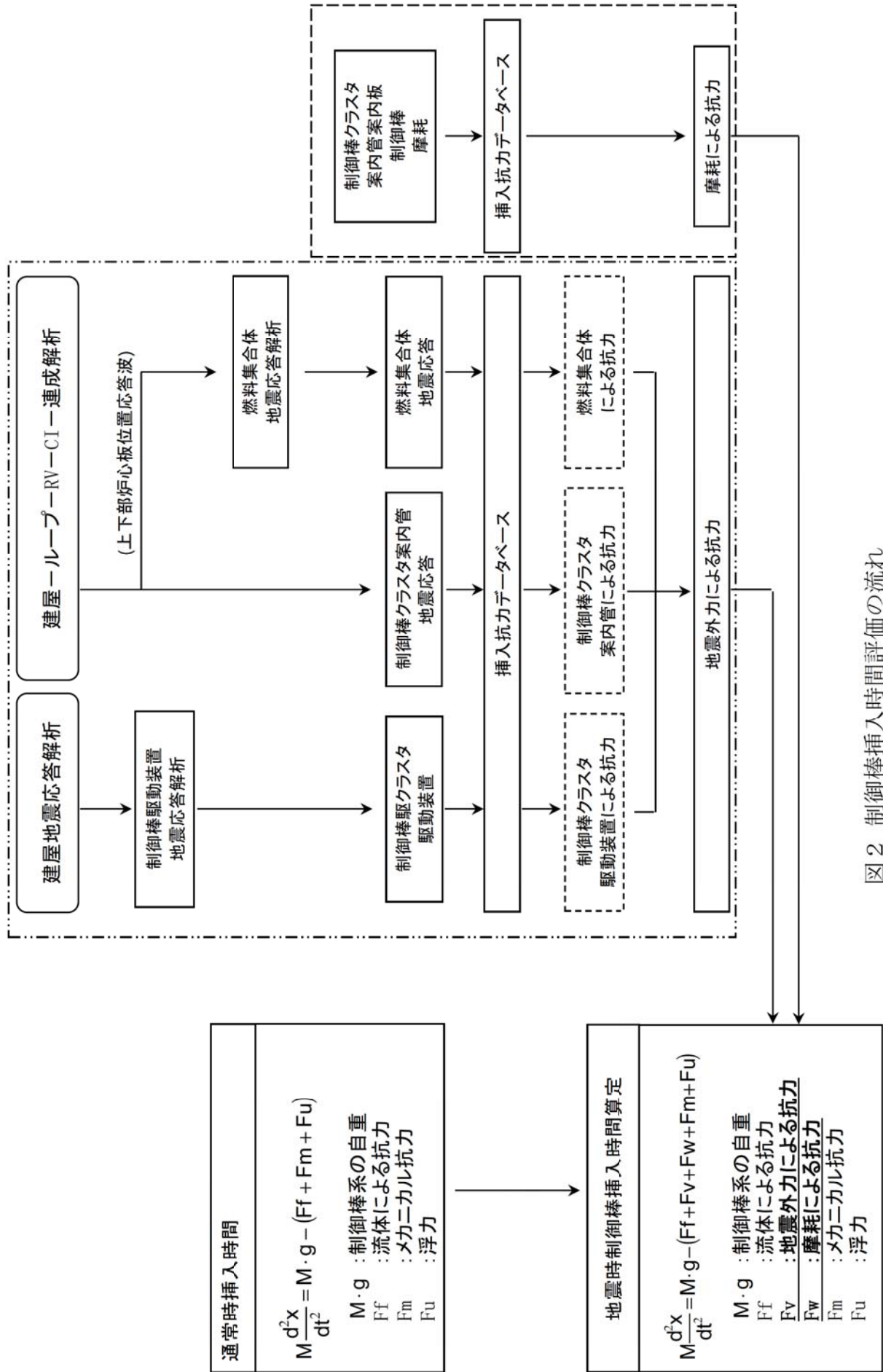


図2 制御棒挿入時間評価の流れ