

No.	高浜 1－熱時効－ 1 rev3	事象：2相ステンレス鋼の熱時効												
質 問	<p>(別冊-共通)                  高浜発電所 1 号炉劣化状況評価書におけるステンレス鋼の熱時効について、高浜発電所 1 号炉高経年化技術評価書（40 年目）[冷温停止状態が維持されることを前提とした評価]以降の最新知見等の反映により評価方法及び/又は評価結果に変更があった場合はその内容及び変更根拠を提示すること。</p>													
回 答	<p>高浜発電所 1 号炉劣化状況評価書では、高浜 1 号炉の新技術基準への適合に係る工事計画認可申請書の記載を反映して内容の修正を行っています。</p> <p>熱時効に係る評価のうち、高経年化対策上着目すべき劣化事象としている評価について、評価方法及び/又は評価結果に変更があった対象は以下に示すものとなっています。</p> <table border="1" data-bbox="406 987 1348 1368"> <thead> <tr> <th>設備</th> <th>部位</th> <th>変更内容</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ポンプ（1 次冷却材ポンプ）</td> <td>ケーシング</td> <td>基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 1 参照）</td> </tr> <tr> <td>配管（1 次冷却材管）*</td> <td>母管、管台</td> <td>基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 2 参照）</td> </tr> <tr> <td>炉内構造物</td> <td>下部炉心支持柱</td> <td>基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 3 参照）</td> </tr> </tbody> </table> <p>*：加圧器サージ配管含む</p>		設備	部位	変更内容	ポンプ（1 次冷却材ポンプ）	ケーシング	基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 1 参照）	配管（1 次冷却材管）*	母管、管台	基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 2 参照）	炉内構造物	下部炉心支持柱	基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 3 参照）
設備	部位	変更内容												
ポンプ（1 次冷却材ポンプ）	ケーシング	基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 1 参照）												
配管（1 次冷却材管）*	母管、管台	基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 2 参照）												
炉内構造物	下部炉心支持柱	基準地震動見直しによる評価見直し。（添付 3 参照）												

## 1次冷却材ポンプケーシングの熱時効評価変更内容について

高浜1号炉の1次冷却材ポンプのケーシングの熱時効評価については、工事計画認可申請（H27.7.3申請）を踏まえて、適用する基準地震動の変更を行っております。このため評価に用いた地震時応力が変更になっており、評価の見直しを行っております。

ただし変更後も1次冷却材管と発生応力及びフェライト量の比較を行い、1次冷却材ポンプの熱時効評価が1次冷却材管に包絡されることを確認しており、評価結果に変更はありません。

変更後の1次冷却材ポンプケーシングと1次冷却材管の発生応力とフェライト量の比較を表1に示します。

表1 1次冷却材ポンプケーシング熱時効評価結果

部位	Ss地震時応力 (MPa)	フェライト量 (%)	使用温度 (°C)
1次冷却材ポンプケーシング (吐出ノズル)	約107	約11	約289
1次冷却材管 (加圧器サージライン用管台)	約215	約13.7	約323

応力の詳細評価について表2に示します。

表2 1次冷却材ポンプケーシングの応力値の詳細

評価部位	内圧による応力	曲げ応力				軸力による応力				合算値 (MPa)
		自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	
1次冷却材ポンプケーシング										

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

### 1 次冷却材配管の熱時効評価変更内容について

高浜 1 号炉の 1 次冷却材管の母管および管台の熱時効評価については、工事計画認可申請 (H27.7.3申請) を踏まえて、適用する基準地震動の変更を行っております。このため評価に用いた地震時応力が変更になっており、評価の見直しを行っております。

変更後の地震応力条件 (Ss地震動) を適用した上で、発生応力及びフェライト量の比較を行い、応力最大部位とフェライト量最大部位についてき裂安定性評価を行った結果、評価部位が不安定破壊することはなく、健全性評価上問題とならないことを確認しています。

#### (1) 評価対象部位の選定

表 2 に 1 次冷却材管の評価部位とフェライト量と応力 (Ss地震動による地震応力を含む) の一覧を示します。応力最大部位として加圧器サージライン用管台、フェライト量最大部位として 6B安全注入系ライン用管台を選定しました。

表 2 評価対象部位一覧

評価部位	フェライト量 [%]	使用温度 [°C]	応力 [MPa]	選定
ホットレグ直管				
SG入口50°エルボ				
SG出口40°エルボ				
クロスオーバレグ直管 (垂直管)				
クロスオーバレグ SG側90°エルボ				
クロスオーバレグ直管 (水平管)				
クロスオーバレグ RCP側90°エルボ				
コールドレグ直管				
RV入口32°エルボ				
加圧器サージライン用管台	約13.7	322.8	約215	○
12B安全注入系ライン用管台				
充てん管台				
6B安全注入系ライン用管台	約15.5	288.6	約208	○

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

応力は供用状態A, Bの内圧、自重・熱膨張荷重、地震荷重(Ss)を考慮して算出し、熱時効評価対象部位の詳細な応力値を表 3 に示す。

表 3 熱時効対象部位の応力詳細

評価部位	内圧による応力 (MPa)	曲げ応力				軸力による応力				合算値 (MPa)
		自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	
加圧器サージライン用管台										215
6B安全注入系ライン用管台										208

(2) き裂進展力の決定

き裂安定性評価に用いる想定き裂は既評価と同じとし、表 4 に示すものとする。

表 4 き裂安定性評価用想定き裂

	き裂長さ (mm)	板厚 (mm)
加圧器サージライン用管台		
6B安全注入系ライン用管台		

評価用き裂と表 5 に示す評価条件を入力条件(Ss地震動による荷重を含む)として、FEM(有限要素法)解析により、き裂進展力 (Japp) を求める。なお、各き裂長さにおけるJappは、以下のとおり。

き裂長さ	加圧器サージライン用管台 (kJ/m <sup>2</sup> )	6B安全注入系ライン用管台 (kJ/m <sup>2</sup> )
1 t		
3 t		
5 t		

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5 評価条件

	加圧器サージライン用管台	6B 安全注入系ライン用管台																														
形状																																
内径[mm]																																
外径[mm]																																
き裂形状	周方向貫通き裂(き裂長さ: 1t、3t、5t の3種類)																															
荷重																																
内圧 <sup>(注)</sup> [MPa]																																
軸力[kN]	自重	熱	地震	合計	自重	熱	地震	合計																								
曲げモーメント *[kN・m]	自重	熱	地震	合計	自重	熱	地震	合計																								
	My	Mz	My	Mz	My	Mz	My	Mz																								
物性値																																
ヤング率[MPa]																																
ポアソン比	ν=0.3(弾性域)、ν=0.5(塑性域)																															
応力-ひずみ関係	<p>フェライト量が低い非時効材の応力-ひずみ線図を用いる。本評価データは電共研「1次冷却材管の時効劣化に関する研究(STEP1)」で得られた知見を参考にしている。本電共研では2つの試験片について引っ張り試験を実施し、結果がほぼ同等であったことから1つの試験片のデータを用いて応力-ひずみ線図を導出した。Japp 値は応力-ひずみ線図の下部の面積に比例するため、強度が低い非時効材を用いることはより安全側の評価となります。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="8">化学成分%</th> <th>Cre/Nie</th> <th>フェライト量</th> </tr> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>MO</th> <th>Cb(Nb)</th> <th>N</th> <th></th> <th>F%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		化学成分%								Cre/Nie	フェライト量	C	Si	Mn	Cr	Ni	MO	Cb(Nb)	N		F%										
化学成分%								Cre/Nie	フェライト量																							
C	Si	Mn	Cr	Ni	MO	Cb(Nb)	N		F%																							

(注) 評価用圧力は、負荷喪失時のピーク圧力とする。

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

(3) 材料のき裂進展抵抗 ( $J_{mat}$ )

き裂進展抵抗値 $J_{mat}$ は、既評価と同じである。

電共研「1次冷却材管等の時効劣化に関する研究 (STEPⅢ) (その2)」で改良された脆化予測モデル (H3Tモデル: Hyperbolic-Time, Temperature Toughness) を用いて、評価部位のフェライト量を基に決定する (算出方法はASME PVP2005-71528参照)。 $J_{Ic}$ 、 $J_6$ はデータの下限值 ( $-2\sigma$ ) を用いて算出した下記の値とした。

	加圧器サージライン用管台	6B安全注入系ライン用管台
$J_{Ic}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]		
$J_6$ [kJ/m <sup>2</sup> ]		

電共研「1次冷却材管等の時効劣化に関する研究 (STEPⅢ) (その2)」では最大で [ ] で時効させた材料データを用いて脆化予測モデルを作成しており、この条件で $J_{Ic}$ 、 $J_6$ とも飽和傾向であることを確認した。

なお、[ ] は [ ] で換算した場合、約80年運転相当の時間 (稼働率80%想定) である。

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

(4) き裂安定性評価結果

変更後の地震応力条件(Ss地震動)を適用した応力状態においても、図1-1、図1-2  
のとおり $J_{mat}$ と $J_{app}$ が $J_{Ic}$ 以下の低いJ値で交差しており、 $J_{app} < J_{Ic}$ であることが確  
認できるため、延性き裂は発生しないと判断でき、健全性が確認できたと判断する。

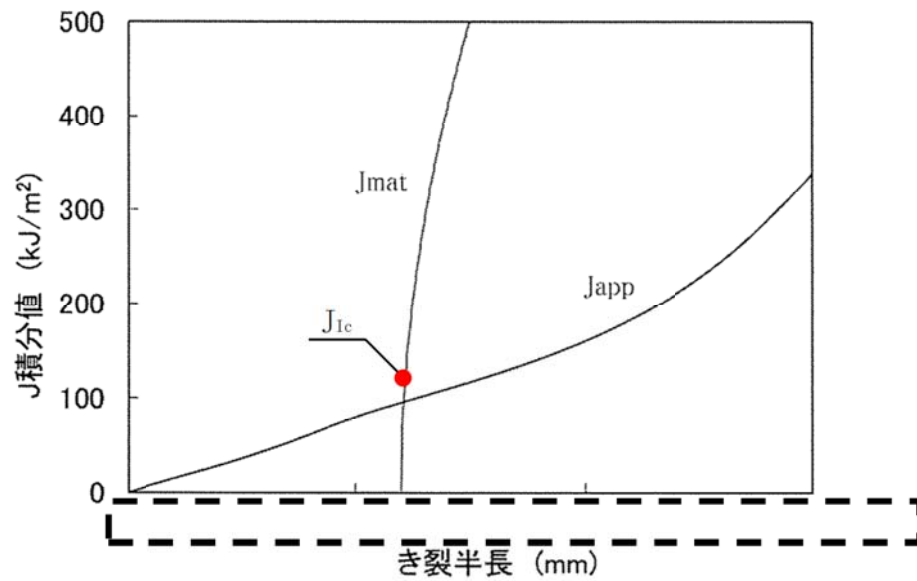


図1-1 加圧器サージライン用管台

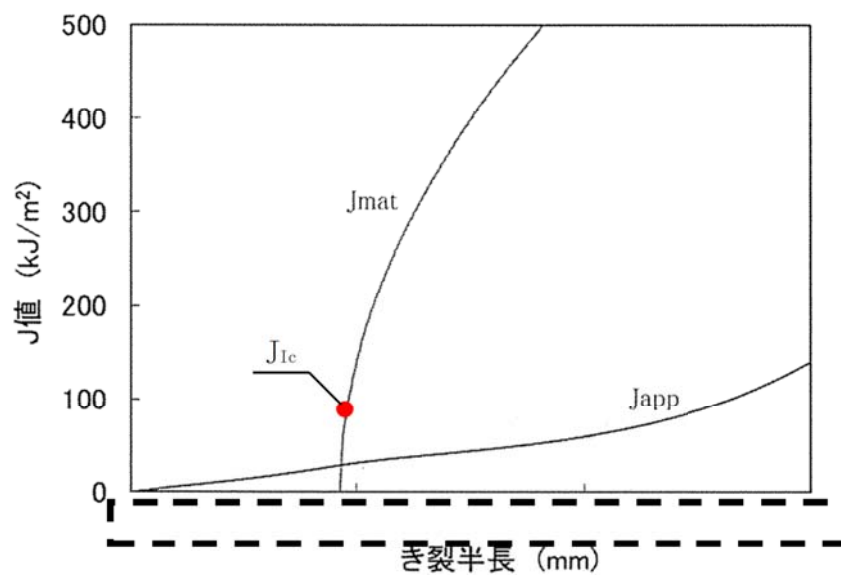


図1-2 6B安全注入系ライン用管台

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

炉内構造物の熱時効評価変更内容について

高浜 1 号炉の炉内構造物の下部炉心支持柱の熱時効評価については、工事計画認可申請 (H27.7.3申請) を踏まえて、適用する基準地震動の変更を行っております。このため評価に用いた地震時応力が変更になっており、評価の見直しを行っております。

ただし変更後も 1 次冷却材管と発生応力及びフェライト量の比較を行い、下部炉心支持柱の熱時効評価が 1 次冷却材管に包絡されることを確認しており、評価結果に変更はありません。

変更後の下部炉心支持柱と 1 次冷却材管の発生応力とフェライト量の比較を表 1 に示します。

表 1 炉内構造物 (下部炉心支持柱) 熱時効評価結果

部位	Ss地震時応力 (MPa)	フェライト量 (%)	使用温度 (°C)
下部炉心支持柱	約 1 4 0	約 1 1 . 2	約 2 8 9
1 次冷却材管 (加圧器サージライン用管台)	約 2 1 5	約 1 3 . 7	約 3 2 3

応力の詳細評価について表 2 に示します。

表 2 下部炉心支持柱の応力値の詳細

評価部位	内圧による応力	曲げ応力				軸力による応力				合算値 (MPa)
		自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	自重 (MPa)	熱 (MPa)	地震 (MPa)	合計 (MPa)	
下部炉心支持柱										

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



No.	高浜 1－熱時効－ 9 rev6	事象：2相ステンレス鋼の熱時効
質 問	<p>(別冊-5配管-4 1 次冷却材管-15頁)</p> <p>母管の熱時効に係る健全性評価について、重大事故等時(原子炉停止機能喪失)におけるプラント条件(ピーク温度360℃、ピーク圧力18.5MPa)を考慮しても、配管は不安定破壊することはないとした考え方及び具体的根拠を提示すること。</p>	
回 答	<p>重大事故等時のプラント条件を考慮した 1 次冷却材管に係る健全性評価の具体的評価内容を添付－ 1 に示します。</p> <p>重大事故等時における健全性評価への入力条件としては、プラント条件が最も厳しくなるピーク温度360℃、ピーク圧力18.5MPaとしており、地震荷重はS s 地震動による荷重としております。当該の重大事故等時のプラント条件は高浜 1 号機 工事計画認可申請書(平成28年2月29日補正申請)に記載されております。</p> <p>なお、通常運転時の条件から温度、圧力が異なっておりますが、重大事故等時の条件においても従来評価方法が問題なく適用できると判断しており、評価結果として配管は不安定破壊することはないことを確認しております。</p> <p>添付－ 1 の評価は過去の電共研で得られたデータに基づき、き裂進展抵抗(Jmat)とき裂進展力(Japp)を算出していますが、材料データ採取時の試験温度と、重大事故等時のプラント条件の温度とは差があります。温度差を考慮しても健全性評価結果に影響がないことを添付－ 2 に示します。</p> <p>1 次冷却材ポンプ(ケーシング)および、炉内構造物(下部炉心支持柱)については、重大事故等時における発生応力とフェライト量の比較でより厳しい条件となる 1 次冷却材管の評価に包絡されることを確認しており、重大事故等時における 1 次冷却材管の健全性を確認できたことで、1 次冷却材ポンプ(ケーシング)および、炉内構造物(下部炉心支持柱)も健全であると確認しております。</p> <p>1 次冷却材ポンプ(ケーシング)および、炉内構造物(下部炉心支持柱)の発生応力とフェライト量の 1 次冷却材管との比較を添付－ 3 に示します。</p>	

1. 代表点の抽出

重大事故等時の健全性を確認するにあたっては、評価対象部位の中で応力が最大であり、通常運転時の評価における評価点となっている加圧器サージライン用管台を代表点とする。

なお、重大事故等時の入力条件において応力最大部位に変更がないことを確認するため、通常運転時の応力が 2 番目に高い 6B 安全注入系ライン用管台についても重大事故等時の応力を算出し、評価部位における応力の大小関係に逆転が無いことを確認している。

評価部位	フェライト量 [%]	使用温度 [°C]	通常運転時 (参考) ※	重大事故等時※
			応力 [MPa]	応力 [MPa]
加圧器サージライン用管台	約 13.7	322.8	約 215	約 232
6B 安全注入系ライン用管台	約 15.5	288.6	約 208	約 230

※小数点第1位切り上げ

2. フェライト量の算出

フェライト量は、ミルシートの化学成分から、ASTM A800に基づき算出している。

化学成分 (溶鋼分析) %								Cre/Nie (注1)	フェライト量 (注2)
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb(Nb)	N		F%
									約 13.7

(注1) ASTM A800の7.1.2参照

(注2) ASTM A800のFig. X1.1参照

3. 評価用 J<sub>mat</sub> の決定

き裂進展抵抗値 (J<sub>mat</sub> 値) は、電共研で改良された脆化予測モデル (H3Tモデル: Hyperbolic-Time, Temperature Toughness) を用いて、評価部位のフェライト量を基に求める。

なお、重大事故等時の温度条件 (360°C) と [ ] の温度条件で採取されたデータの下限值 (H3Tモデルの下限線) には温度条件の違いがあるが、過去に実施した破壊靱性試験の結果 (添付 - 2 参照) から、[ ] の J<sub>mat</sub> 値と [ ] の J<sub>mat</sub> 値に大きな差が認められず、それぞれの J<sub>mat</sub> 値は H3Tモデルの下限線以上であることから、360°C の J<sub>mat</sub> 値を H3Tモデルの下限線として想定する現在の評価は重大事故時の条件においても適用でき、妥当であると判断している。

J<sub>mat</sub> の J<sub>1c</sub>、J<sub>6</sub> の値は以下のとおりである。

	J <sub>1c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>6</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
き裂進展抵抗 (J <sub>mat</sub> )	[ ]	[ ]

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. 評価部位の応力

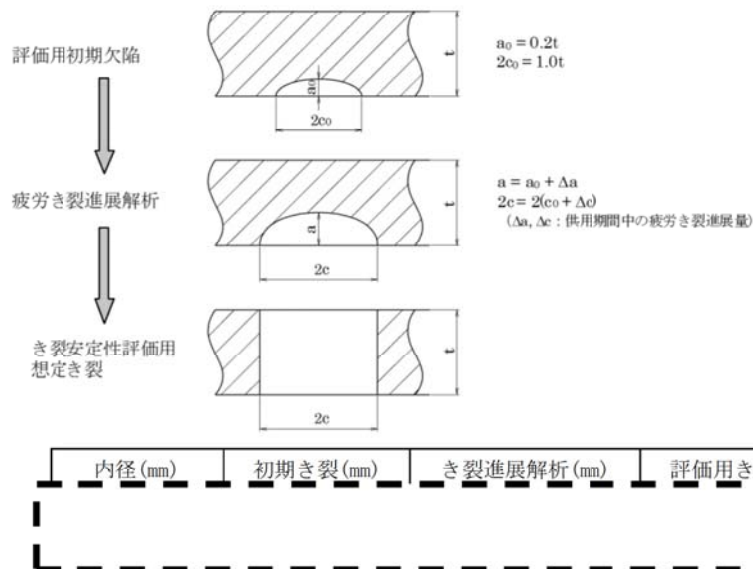
重大事故等時の内圧、自重、熱膨張及び地震荷重(Ss地震動)を考慮した応力値を示す。

評価条件	内圧による応力 (MPa)	曲げ応力				軸力による応力				合算値 (MPa) (小数点第1位切り上げ)
		自重 (%)	熱 (%)	地震 (Ss) (%)	合計 (MPa)	自重 (%)	熱 (%)	地震 (Ss) (%)	合計 (MPa)	
重大事故等時										約232
通常運転時 (参考)										約215

5. Jappの決定

(1) 評価用き裂

き裂安定性評価を保守的に行うために評価用き裂を貫通き裂とする。



(2) FEM解析

評価用き裂と表 1 に示す評価条件を入力条件として、FEM (有限要素法) 解析により、き裂進展力 (Japp値) を求める。

Japp の算出には、作用荷重 (Ss地震動による荷重を含む) と材料物性 (応力-ひずみ関係) を使用する。

また、材料物性 (応力-ひずみ関係) には、通常運転時の評価では、保守的な条件としてフェライト量が小さく、時効していない材料の応力-ひずみ関係を使用しているが、重大事故時等条件を考慮した評価においても同じものを使用している。重大事故時等条件 (360℃) を考慮した場合の応力-ひずみ関係はフェライト量、温度条件、時効劣化の有無の影響を総合すると、通常運転時の評価に使用する応力-ひずみ関係より大きくなるため、今回の評価で使用した応力-ひずみ関係は保守的な評価条件となる。

なお、各き裂長さにおけるJappは以下のとおり。

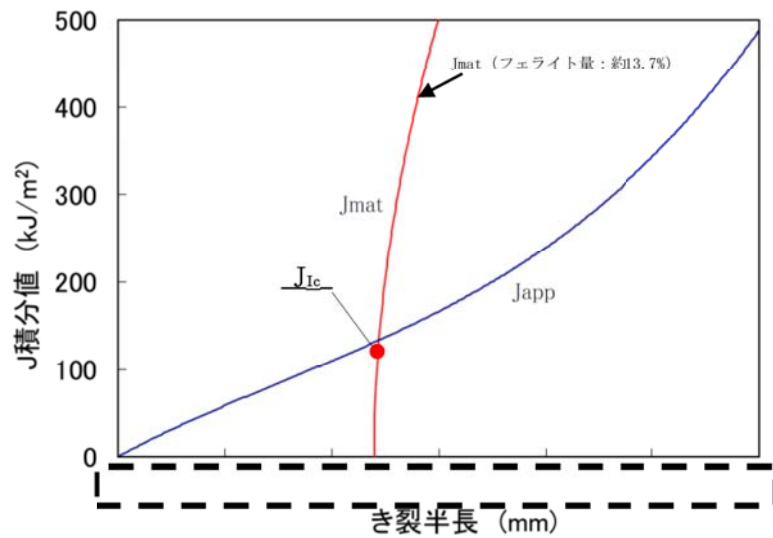
き裂長さ	1t	3t	5t
Japp (kJ/m <sup>2</sup> )			

6. き裂安定性評価

重大事故等時の加圧器サージライン用管台におけるき裂安定性評価結果を下図に示す。

重大事故等時においても、き裂進展抵抗がき裂進展力を上回ることで、およびき裂進展抵抗とき裂進展力の交点で、き裂進展抵抗の傾きがき裂進展力の傾きを上回っていることから、配管は不安定破壊することなく、重大事故等時のプラント条件を考慮しても健全であることが判断できる。

加圧器サージライン用管台のき裂安定性評価結果



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1 評価条件

加圧器サージライン用管台																										
内径 [mm]																										
外径 [mm]																										
き裂形状	周方向貫通き裂(き裂長さ: 1t, 3t, 5tの3種類)																									
荷重																										
内圧 [MPa]																										
軸力 [kN]	自重 熱 地震 合計																									
曲げモーメント [kN・m]	自重 熱 地震 合計 My Mz My Mz My																									
物性値																										
ヤング率 [MPa]																										
ポアソン比	$\nu=0.3$ (弾性域)、 $\nu=0.5$ (塑性域)																									
応力-ひずみ関係	<p>フェライト量が低い非時効材の応力-ひずみ線図を用いる。本評価データは電共研「1次冷却材管の時効劣化に関する研究 (STEP1)」で得られた知見を参考にしている。本電共研では2つの試験片について引張り試験を実施し、結果がほぼ同等であったことから1つの試験片のデータを用いて応力-ひずみ線図を導出した。Japp 値は応力-ひずみ線図の下部の面積に比例するため、強度が低い非時効材を用いることはより安全側の評価となります。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <th colspan="6">化学成分 (溶細分析) %</th> <th colspan="2">フェライト量</th> </tr> <tr> <td>C</td> <td>Si</td> <td>Mn</td> <td>Cr</td> <td>Ni</td> <td>Mo</td> <td>Cb (Nb)</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td colspan="7"></td> <td>Cre/Nie</td> <td>P%</td> </tr> </table>	化学成分 (溶細分析) %						フェライト量		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N								Cre/Nie	P%
化学成分 (溶細分析) %						フェライト量																				
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cb (Nb)	N																			
							Cre/Nie	P%																		



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

重大事故等時の条件を考慮した一次冷却材管の熱時効に対する健全性評価について

高浜1号炉の一次冷却材管（主冷却材管及び蓄圧注入系管台等）について、重大事故等時の温度、圧力条件を考慮した熱時効に対する健全性評価への影響の評価を以下に示す。

1. Jappの算出における重大事故等時条件（360℃）の考慮について

Jappの算出には、作用荷重（Ss地震動による荷重を含む）と材料物性（応力-ひずみ関係）を使用する。そのうち、作用荷重には重大事故等時条件（360℃）を考慮している。

また、材料物性（応力-ひずみ関係）には、通常運転時  の評価では、保守的な条件としてフェライト量が小さく、時効していない材料の  における応力-ひずみ関係を使用しているが、重大事故等時条件を考慮した評価においても同じものを使用している。




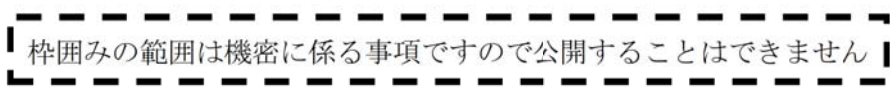
なお、重大事故等時条件（360℃）を考慮した場合の時効後の応力-ひずみ関係は図1に示す通り、通常運転時  の評価に使用する応力-ひずみ関係（非時効）より大きくなるため、今回の評価で使用した応力-ひずみ関係は保守的な評価条件となる。



図1. 通常運転時  の評価に使用する応力-ひずみ関係と時効した360℃における応力-ひずみ関係

また、応力-ひずみ関係は、通常運転時の評価を目的とするため、 におけるデータしか取得していないため、360℃における応力-ひずみ関係は次頁の方法にて予想している。

 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

(1) 熱時効により強度は上昇する。電共研において時効条件（時効温度・時間）と強度上昇の関係が整理されており、時効していない材料の耐力（ $\sigma_{y0}$ ）と $\sigma_{y0}$ にて時効した後の耐力の比を図2に示す。高浜1号炉の運転時間は約23万時間であり、約23万時間時効した材料の強度は時効前と比べて $\sigma_{y0}$ 上昇することがわかる。



図2 時効時間と強度上昇の関係

（出典：電共研「1次冷却材管等の時効劣化に関する研究（STEPⅢ）（その2）（平成10年度）」）

(2) 温度上昇により強度は低下する。JSME 設計・建設規格において各温度における設計降伏点応力（ $S_y$ ）がまとめられており、図3に $S_y$ における強度と各温度における強度の比を示す。360℃における降伏点応力は $S_y$ に比べて $S_y$ 低下することがわかる。

(3) (1) 及び(2)の関係から応力-ひずみ関係は、熱時効により $\sigma_{y0}$ 上昇し、温度上昇により $S_y$ 低下することから、 $\sigma_{y0}$ 上昇すると考えられる。なお、高浜1号炉加圧器サージライン用管台のフェライト量は約13.7%であり、応力-ひずみ関係には依然保守性が含まれる。

表1. 各応力-ひずみ関係の条件

条件	評価条件	実機の 重大事故等時条件	備考
熱時効の有無			
温度		360℃	
フェライト量		約13.7%	

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. 材料強度と温度の関係

(出典：JSME S NC1 - 2005/2007「設計・建設規格」(日本機械学会))

2. Jmatの算出(破壊靱性値)における重大事故等時条件(360℃)の考慮について

Jmatについては、          の温度条件で採取されたデータの下限值(H3Tモデルの下限線)を用いて設定しているが、重大事故等時の条件(360℃)を考慮した評価において、          で求めたJmatを用いることの妥当性を確認するため、以下のとおり破壊靱性試験を行った。

(1) 供試材



(2) 試験内容

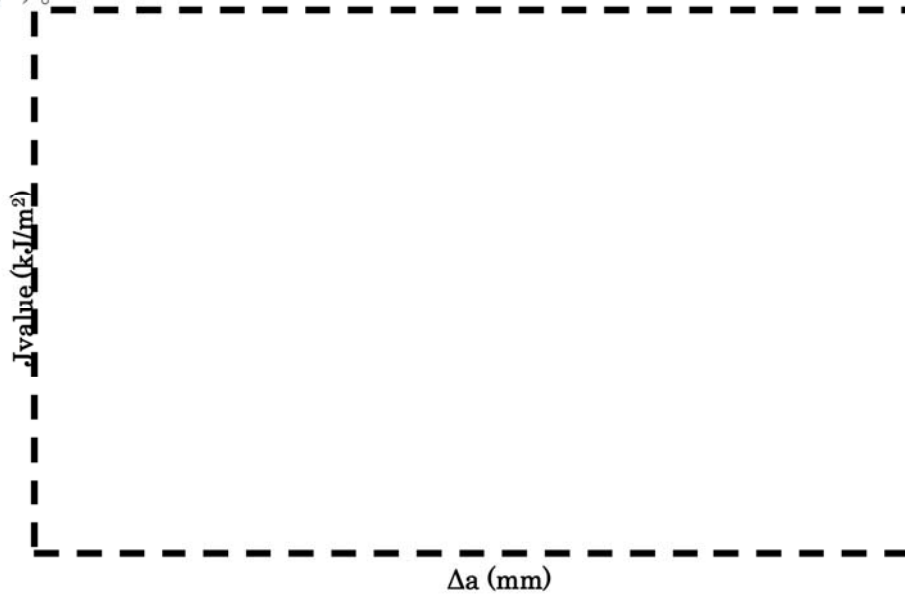


枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません



(3) 試験結果

今回の試験で採取された破壊靱性試験結果のプロットと $J_{Ic}$ 試験の結果、 $J_Q$ 値を以下に示す。



試験温度	試験片番号	$J_{Ic}$ 試験結果	$J_Q(J_{Ic})$

以上の結果より、          の $J_{mat}$ 値と          の $J_{mat}$ 値に大きな差は認められない。また、今回取得された          の $J_{mat}$ 値および          の $J_{mat}$ 値はH3Tモデルの下限線以上であることから、360℃の $J_{mat}$ 値をH3Tモデルの下限線として想定する現在の評価は妥当であると判断できる。



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

重大事故等時における 1 次冷却材ポンプおよび炉内構造物の熱時効評価

高浜 1 号炉の 1 次冷却材ポンプのケーシングおよび炉内構造物の下部炉心支持柱の発生応力（重大事故等時+Ss地震力）、フェライト量に対して、1 次冷却材管との比較を以下に示す。

重大事故等時の条件で応力、フェライトが 1 次冷却材管の条件で包絡されることを確認しており、重大事故等時でも 1 次冷却材管の評価を代表として健全性が示される。

1 次冷却材ポンプケーシング、下部炉心支持柱熱時効評価結果

部位	重大事故等時 応力 <sup>※1</sup> (MPa)	(参考) 通常運転時 応力 <sup>※1</sup> (MPa)	フェライト量 (%)	使用温度 <sup>※2</sup> (°C)
1 次冷却材 ポンプケーシング (吐出ノズル)	約 1 1 3	約 1 0 7	約 1 1	約 2 8 9
炉内構造物 (下部炉心支持柱)	通常運転時に 包絡 <sup>※3</sup>	約 1 4 0	約 1 1. 2	約 2 8 9
1 次冷却材管 (加圧器サージライ ン用管台)	約 2 3 2	約 2 1 5	約 1 3. 7	約 3 2 3

※1 Ss地震荷重含む

※2 通常使用時温度、SA条件は360°Cとする。

※3 炉内構造物は耐圧部材でないため、SA条件（18.5MPa、360°C）下においても、有意な圧力が作用していない。よって、設計条件に基づき評価した通常運転時の応力に包絡される。

No.	高浜1－耐震－7 Rev.2	事象：耐震												
質 問	<p>工事計画認可審査の内容を踏まえた高経年化技術評価の見直しがある場合、以下の事項について、見直し前後の相違点を整理し提示すること。</p> <p>イ) 評価対象の機器・構造物と経年劣化事象の関係 ロ) 評価条件・手法 ハ) 評価結果</p>													
回 答	<p>工事計画認可申請の審査の内容を踏まえて、高経年化技術評価における耐震安全性評価の見直しを行うものは、以下のとおり。</p> <p>1. 制御棒挿入性評価</p> <p>高浜1号機の新規制基準への適合に係る工事計画認可申請側で評価手法を見直した再評価を行っており、劣化事象を考慮した耐震安全性評価においても、これに合わせた評価手法として、評価の見直しを行う。</p> <p>イ) 評価対象の機器・構造物と経年劣化事象の関係</p> <p>① 制御棒クラス案内管（案内板）の摩耗を考慮した制御棒挿入性評価 ② 制御棒被覆管の摩耗を考慮した制御棒挿入性評価 ③ バッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れを考慮した制御棒挿入性評価</p> <p>※①、②については、案内板及び被覆管の摩耗を重畳させた評価を実施</p> <p>ロ) 評価条件・手法（相違点比較）</p> <table border="1" data-bbox="400 1305 1428 1980"> <thead> <tr> <th></th> <th>現評価（H27.11 補正申請）</th> <th>工認に合せた評価手法反映</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>評価条件</td> <td>燃料集合体照射後条件 （照射影響の考慮有り） Ss-1(700gal)～Ss-7</td> <td>燃料集合体照射後条件 （照射影響の考慮有り） Ss-1(700gal)～Ss-7</td> </tr> <tr> <td>解析モデル</td> <td>建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率：10%</td> <td>建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率：<u>1%</u></td> </tr> <tr> <td>評価手法</td> <td>《挿入経路機器の応答解析》 ・制御棒駆動装置：時刻歴手法 ・制御棒クラス案内管：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 ・制御棒クラス案内管：時刻歴手法 ・燃料集合体：時刻歴手法</td> <td>《挿入経路機器の応答解析》 ・制御棒駆動装置：<u>スペクトルモデル解析</u> ・制御棒クラス案内管：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：<u>最大抗力一定</u> ・制御棒クラス案内管：<u>最大抗力一定</u> ・燃料集合体：時刻歴手法</td> </tr> </tbody> </table>			現評価（H27.11 補正申請）	工認に合せた評価手法反映	評価条件	燃料集合体照射後条件 （照射影響の考慮有り） Ss-1(700gal)～Ss-7	燃料集合体照射後条件 （照射影響の考慮有り） Ss-1(700gal)～Ss-7	解析モデル	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率：10%	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率： <u>1%</u>	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 ・制御棒クラス案内管：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 ・制御棒クラス案内管：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： <u>スペクトルモデル解析</u> ・制御棒クラス案内管：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： <u>最大抗力一定</u> ・制御棒クラス案内管： <u>最大抗力一定</u> ・燃料集合体：時刻歴手法
	現評価（H27.11 補正申請）	工認に合せた評価手法反映												
評価条件	燃料集合体照射後条件 （照射影響の考慮有り） Ss-1(700gal)～Ss-7	燃料集合体照射後条件 （照射影響の考慮有り） Ss-1(700gal)～Ss-7												
解析モデル	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率：10%	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率： <u>1%</u>												
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 ・制御棒クラス案内管：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 ・制御棒クラス案内管：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： <u>スペクトルモデル解析</u> ・制御棒クラス案内管：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： <u>最大抗力一定</u> ・制御棒クラス案内管： <u>最大抗力一定</u> ・燃料集合体：時刻歴手法												

ハ) 評価結果

		挿入時間*1		規定時間
		現評価 (H27.11 補正申請)	工認手法反映	
評価条件	評価地震動	Ss-1~Ss-7 [-----]	Ss-1~Ss-7 [-----]	1.8 秒
	照射条件	照射後条件	照射後条件	
地震時挿入時間		1.43	[-----]	
制御棒クラスター案内管（案内板）及び被覆管の摩耗を考慮した地震時挿入時間		1.45	[-----]	
バップルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れを考慮した地震時挿入時間		1.45	[-----]	

\*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：挿入時間の下段のカッコ内は評価地震動を示す。

2. 炉内構造物等の耐震安全性評価

工事計画認可申請側の評価を踏まえ、燃料集合体の減衰定数を10%から1%へ変更することに伴い、原子炉容器－炉内構造物の連成モデルによる評価を行っている以下の評価について、応力評価及び疲労累積係数の評価の見直しを行う。

イ) 評価対象の機器・構造物と経年劣化事象の関係

No.	評価対象機器（部位）	経年劣化事象
①	原子炉容器（炉心支持金物）	低サイクル疲労
②	原子炉容器（胴部）	中性子照射脆化
③	炉内構造物（上部炉心支持板、上部炉心支持柱、下部炉心支持板、下部炉心支持柱）	低サイクル疲労
④	炉内構造物（下部炉心支持柱）	熱時効
⑤	炉内構造物（シンプルチューブ）	摩耗
⑥	炉内構造物（炉心そう）	中性子照射による靱性低下
⑦	制御棒クラスター（被覆管）	摩耗

ロ) 評価条件・手法（相違点比較）

	現評価（H27.11 補正申請）	工認に合せた評価手法反映
評価条件	Ss-1(700gal)~Ss-7	Ss-1(700gal)~Ss-7
解析モデル	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率：10%	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率： <u>1%</u>



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。

ハ) 評価結果：



① 原子炉容器（炉心支持金物）の低サイクル疲労を考慮した影響評価

	疲労累積係数（許容値 1 以下）		
	通常運転時	地震時	合計
FA 減衰率：10%での評価結果 	0.009	0.001	0.010
FA 減衰率：1%での評価結果 	0.009	0.001	0.010

②-1 原子炉容器（胴部）の中性子照射脆化を考慮した影響評価（関連温度上昇）

	応力拡大係数	
	き裂深さ 10mm	き裂深さ 5mm
FA 減衰率：10%での評価結果 	$K_{IC} > K_I$	$K_{IC} > K_I$
FA 減衰率：1%での評価結果 	$K_{IC} > K_I$	$K_{IC} > K_I$

②-2 原子炉容器（胴部）の中性子照射脆化を考慮した影響評価（上部棚評価）

	弾塑性破壊力学評価
FA 減衰率：10%での評価結果 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>J_{app} &lt; J_{mat}</math> (at <math>\Delta a = 2.5\text{mm}</math>) (き裂は進展しない)</li> <li>• <math>J_{app}</math> 曲線と <math>J_{mat}</math> 曲線の交点で <math>J_{app}</math> 曲線の勾配 <math>&lt;</math> <math>J_{mat}</math> 曲線の勾配 (想定欠陥は不安定成長しない)</li> </ul>
FA 減衰率：1%での評価結果 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>J_{app} &lt; J_{mat}</math> (at <math>\Delta a = 2.5\text{mm}</math>) (き裂は進展しない)</li> <li>• <math>J_{app}</math> 曲線と <math>J_{mat}</math> 曲線の交点で <math>J_{app}</math> 曲線の勾配 <math>&lt;</math> <math>J_{mat}</math> 曲線の勾配 (想定欠陥は不安定成長しない)</li> </ul>

③ 炉内構造物（上部炉心支持板、上部炉心支持柱、下部炉心支持板、下部炉心支持柱）の低サイクル疲労を考慮した影響評価

		疲労累積係数（許容値 1 以下）		
		通常運転時	地震時	合計
FA 減衰率 10%での評 価結果	上部炉心支持板	0.181	0.000	0.181
	上部炉心支持柱	0.030	0.001	0.031
	下部炉心支持板	0.017	0.027	0.044
	下部炉心支持柱	0.001	0.006	0.007
FA 減衰率 1%での評 価結果	上部炉心支持板	0.181	0.000	0.181
	上部炉心支持柱	0.030	0.001	0.031
	下部炉心支持板	0.017	0.027	0.044
	下部炉心支持柱	0.001	0.007	0.008

④ 炉内構造物（下部炉心支持柱）の熱時効を考慮した影響評価

	発生応力
FA 減衰率：10%での評価結果	MCPの包絡条件確認 MCP(215MPa) > 下部炉心支持柱(133MPa)
FA 減衰率：1%での評価結果	MCPの包絡条件確認 MCP(215MPa) > 下部炉心支持柱(140MPa)

⑤ 炉内構造物（シンプルチューブ）の摩耗を考慮した影響評価

	発生応力（1次膜+1次曲げ）		
	発生値 (MPa)	許容値 (MPa)	応力比
FA 減衰率：10%での評価結果			0.02
FA 減衰率：1%での評価結果			0.02

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。

⑥ 炉内構造物（炉心そう）の中性子照射による靱性低下を考慮した影響評価

	応力拡大係数		
	発生値 (MPa√m)	許容値 (MPa√m)	応力比
FA 減衰率：10%での評価結果	7.4	51	0.15
FA 減衰率：1%での評価結果	7.4	51	0.15

⑦ 制御棒クラスタ（被覆管）の摩耗を考慮した影響評価

	発生応力（1次膜+1次曲げ）		
	発生値 (MPa)	許容値 (MPa)	応力比
FA 減衰率：10%での評価結果			0.48
FA 減衰率：1%での評価結果			0.48

3. 工事計画を踏まえ、影響評価を行うもの

工事計画において、従来の設計手法における水平1方向及び鉛直方向地震力を組合せた耐震計算に対して、設備の構造特性等により水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の可能性のある部位を抽出し、影響評価を行った結果、耐震性に影響がなく従来の設計手法で対応可能であることが確認されているが、高経年化技術評価の耐震安全性評価においても、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を確認した。

イ) 評価対象の機器・構造物と経年劣化事象の関係

No.	評価対象機器（部位）	経年劣化事象
①	蒸気発生器（給水入口管台）	低サイクル疲労
②	1次冷却材ポンプ（支持脚）	低サイクル疲労
③	炉心支持構造物（下部炉心支持柱）	低サイクル疲労
④	燃料取替用水タンク（基礎ボルト）	腐食（大気接触部）

ロ) 評価条件・手法

高経年化評価対象設備のうち、工事計画において設備の構造特性等から水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の可能性があり、水平2方向+鉛直方向地震力の影響評価が行われた部位であって、耐震評価に影響する劣化事象が想定される部位について、影響評価を行った。

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。

ハ) 評価結果

① 蒸気発生器（給水入口管台）の低サイクル疲労を考慮した影響評価

	疲労累積係数（許容値 1 以下）		
	通常運転時	地震時	合計
水平 1 方向+鉛直方向地震動 を考慮した評価結果	0.235	0.008	0.243
水平 2 方向+鉛直方向地震動 を考慮した影響評価結果	0.235	0.024	0.259

② 1 次冷却材ポンプ（支持脚）の低サイクル疲労を考慮した影響評価

	疲労累積係数（許容値 1 以下）		
	通常運転時	地震時	合計
水平 1 方向+鉛直方向地震動 を考慮した評価結果	0.235	0.001	0.236
水平 2 方向+鉛直方向地震動 を考慮した影響評価結果	0.235	0.001	0.236

③ 炉心支持構造物（下部炉心支持柱）の低サイクル疲労を考慮した影響評価

	疲労累積係数（許容値 1 以下）		
	通常運転時	地震時	合計
水平 1 方向+鉛直方向地震動 を考慮した評価結果	0.001	0.007	0.008
水平 2 方向+鉛直方向地震動 を考慮した影響評価結果	0.001	0.031	0.032

※FA 減衰率：1%を考慮した再評価結果。



④-1 燃料取替用水タンク（基礎ボルト）の腐食を考慮した影響評価【引張荷重\*1】

	発生値 (MPa)	許容値 (MPa)	応力比
水平1方向+鉛直方向地震動 を考慮した評価結果			0.70
水平2方向+鉛直方向地震動 を考慮した影響評価結果			0.92

\*1：せん断荷重との組合せを考慮した評価

④-2 燃料取替用水タンク（基礎ボルト）の腐食を考慮した影響評価【せん断荷重】

	発生値 (MPa)	許容値 (MPa)	応力比
水平1方向+鉛直方向地震動 を考慮した評価結果			0.42
水平2方向+鉛直方向地震動 を考慮した影響評価結果			0.60

以上

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。

No.	高浜 1－耐震－ 8 Rev. 1	事象：耐震
質 問	<p>(別冊-16耐震)</p> <p>耐震Sクラス、耐震Bクラス及び耐震Cクラスの機器・配管に係る、比率で示された評価結果（疲れ累積係数を除く）について、各々の分子と分母の値を単位とともに提示すること。また、分子については、その算出に用いた地震力の種別（S s、S d、静的等）を提示すること。</p>	
回 答	<p>耐震評価結果を比率で示したもののうち、耐震Sクラス、耐震Bクラス及び耐震Cクラスの機器・配管に対し、添付－1の緑色セル内に、元となる「許容値」及び「発生値」を示す。</p> <p>なお、Sクラスの設備のうち、静的震度により算出した評価値を分子とした応力比はない。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>	

機種	章	機器名称	部位 非代表設備	経年劣化事象	耐震 重要度	評価部位	許容値 (MPa)	発生値 (MPa)	応力比	疲労累積係数※本字:標準疲労			
										通常 運転時	地震時	合計	
熱交換器	多管円筒形 熱交換器	1次系冷却水クーラ	伝熱管	内面腐食 (流れ加速型腐食)	S	銅板			0.58				
		湿分離加熱器	胴側耐圧構成品等	腐食(流れ加速型腐食)	C	銅板			0.25				
		第1低圧給水ヒータ	胴側耐圧構成品等	腐食(流れ加速型腐食)	C	銅板			0.21				
		第2低圧給水ヒータ	胴側耐圧構成品等	腐食(流れ加速型腐食)	C	銅板			0.34				
蒸気発生器	ステンレス銅配管	第3低圧給水ヒータ	胴側耐圧構成品等	腐食(流れ加速型腐食)	C	銅板			0.28				
		第4低圧給水ヒータ	胴側耐圧構成品等	腐食(流れ加速型腐食)	C	銅板			0.30				
		蒸気発生器	冷却材出入口管台 ヘッド	応力腐食割れ	S				0.93				
		余熱除去系統配管	母管	高サイクル熱疲労割れ (高低温水流部)	S				0.34				
配管	主蒸気系統配管	母管	母管	腐食(流れ加速型腐食)	S	一次			0.95				
						一次十二次			0.24				
						一次			0.42				
		母管	母管	腐食(流れ加速型腐食)	C	一次十二次				0.70			
						一次				0.68			
						一次				0.52			
	主給水系統配管	母管	母管	腐食(流れ加速型腐食)	S	一次十二次			0.56				
						一次				0.51			
						一次十二次				1.22	0.275		
		母管	母管	腐食(流れ加速型腐食)	C	一次				0.87			
						一次				0.25			
						一次				0.36			
炭素鋼配管	母管	母管	腐食(流れ加速型腐食)	C	一次				0.60				
					一次				0.48				
					一次				0.88				
	母管	母管	腐食(流れ加速型腐食)	C	一次				0.84				
					一次				0.94				
					一次				0.67				
配管サポート	アンカー	母管	腐食(流れ加速型腐食)	S	一次十二次				0.51				
					一次				0.43				
					一次				1.02	0.004			
	母管	母管	腐食(流れ加速型腐食)	S	一次十二次				0.76				
					一次				0.78				
					一次十二次				0.68				
炉内構造物	配管サポート	母管	腐食(流れ加速型腐食)	S	一次				0.82				
					一次十二次				0.15				
					一次				0.02				
	炉内構造物	炉内構造物	母管	照射誘起型応力腐食割れ	S	一次				0.39			
						一次				0.25			
						一次				0.19			
タービン	タービン	タービン	母管	腐食(流れ加速型腐食)	C	一次			0.04				
						一次				0.63			
						一次							
	タービン	タービン	タービン	母管	腐食(流れ加速型腐食)	C	一次						
							一次						
							一次						

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。

機種	章	機器名称	部位 非代表設備	経年劣化事象	耐震 重要度	評価部位	許容値 (MPa)	実生値 (MPa)	疲労累積係数※太字:環境疲労		応力比	
									通常 運転時	地震時		
機械設備	重機器サポート	原子炉容器サポート	サポートブラケット	中性子およびγ線照射脆化	S	精強材			0.36			
		蒸気発生器サポート(支 持脚)	ヒンジ駆動部	摩耗	S	蒸気発生器支持脚			0.35			
		1次冷却材ポンプサポート(支 持脚)	ヒンジ駆動部	摩耗	S	1次冷却材ポンプ支持脚			0.20			
		格納容器外制御用空気を ため、格納容器外制御用 空気を乾燥器)	格納容器外制御用空気を ため、格納容器外制御用 空気を乾燥器)	腐食(全面腐食)	S	計器用空気圧縮機 空気ため 計器用空気乾燥器			0.58			
		非核燃料炉心精成品	被覆管	摩耗	S	被覆管			0.16			
		濃縮減容設備	伝熱管等(加熱器、濃縮液 ポンプ)	応力腐食割れ	B	伝熱管等(加熱器、濃縮液 ポンプ)			0.38			
			廃液蒸発装置	応力腐食割れ	B	廃液蒸発装置 加熱器伝熱管			0.25			
			ポンプ	腐食	S	海水ポンプ			0.11			
			熱交換器	腐食	C	脱気器タンク			0.07			
			容器	腐食	S	燃料取替用水タンク			0.70 [0.92]			
	基礎ボルト		復水タンク	腐食	腐食	S	基礎ボルト		0.42 [0.60]			
			主蒸気系統配管	配管用基礎ボルト	腐食(全面腐食)	S	基礎ボルト		0.56			
			伝熱管	母管	内面からの腐食(流れ加 速型腐食)	S	基礎ボルト		0.16			
			非常用アイゼンセル機関 付属設備(配管)	母管	内面からの腐食(流れ加 速型腐食)	S	空気冷却器		0.36			
電源設備											0.18	

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。

No.	高浜 1－耐震－10 Rev. 4	分類：容器
質 問	(3.4.41,42頁) 原子炉容器の中性子照射脆化（関連温度上昇）に対する耐震安全性評価の具体的内容（評価仕様、解析モデル、入力（荷重）条件、評価結果を含む）を提示すること。	
回 答	<p>原子炉容器の中性子照射脆化に対する耐震安全性評価は、工認の審査状況を踏まえて、燃料集合体の減衰定数を10%から1%へ変更して再評価を実施しています。燃料集合体の減衰定数を1%とした評価結果を以下に示します。</p> <p><b>【想定き裂深さ10mmでの評価】</b>          JEAC4206-2007「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」では、加圧熱衝撃評価を実施するにあたって深さ10 mmの想定き裂を設定するように定められています。原子炉容器内表面からの深さ10 mm位置での評価結果を以下に示します。</p> <p>① PTSでの応力評価部位と応力値          PTS事象の<math>K_I</math>上限包絡曲線については、技術評価書「容器－原子炉容器」に示すとおり、小破断1次冷却材喪失事故（小破断LOCA）、大破断1次冷却材喪失事故（大破断LOCA）、主蒸気管破断事故および2次冷却系からの除熱機能喪失に対する<math>K_I</math>曲線を上限包絡して示したものです。  <math>K_I</math>値は、原子炉容器胴部に想定欠陥（長さ <math>l</math>、深さ10 mmの半楕円表面欠陥）を仮定し評価しています。</p> <p>② Ss地震時の応力評価部位と応力値          Ss地震による原子炉容器胴部に生じる曲げモーメントとして、最大となる節点（原子炉容器管台ノズル部（図甲）の <math>\theta</math>）を使用しています。この曲げモーメントを断面係数 <math>W</math> で除して算出した曲げ応力値（<math>\sigma_b</math>）は <math>\frac{M}{W}</math> になります。</p> <div style="border: 2px dashed black; height: 300px; width: 100%; margin-top: 20px;"></div>	

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  $K_{Ic}$ の算出式とその根拠

$K_{Ic}$ はJEAC4206-2007の附属書C「供用状態C, Dにおける加圧水型原子炉圧力容器の炉心領域部に対する非延性破壊防止のための評価方法」に基づき、以下の式で計算しています。（技術評価書「容器－原子炉容器」参照）

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.9 \exp\{0.0161(T - T_p)\} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$$

④  $K_I$ 値の評価結果

PTS事象での $K_I$ 上限包絡曲線（上記①）に、 $S_s$ 地震で生じる $K_I$ 値を一律でかさ上げしています。 $S_s$ 地震の $K_I$ 値は、原子炉容器胴部に仮定した想定欠陥（長さ  $l$  mm、深さ10 mmの半楕円表面欠陥、母材厚さ  $t$  mm）に上記②の荷重が作用した場合に生じる値として、JEAC4206-2007 F-3300 ASME Sec. XI App. Aの解（作用分布応力を線形近似する場合）を用いて  $K_I$  MPa $\sqrt{m}$  を算出しました。

PTS事象の $K_I$ 値はJEAC4206-2007でPTS事象の $K_I$ 値算出に引用されているC. B. Buchalet & W. H. Bamfordの応力拡大係数式（附属図C-2000-1及びC-2000-2の係数を使用）を用いて算出されたものですが、 $S_s$ 地震で生じる $K_I$ 値の算出に対しては規定がないため、JEAC4206-2007の附属書F「応力拡大係数」にて記載のあるASME Sec. XI App. Aの解（作用分布応力を線形近似する場合）を使用しています。

応力拡大係数を計算する際のき裂寸法は、長さ  $l$  mm、深さ10 mmの半楕円表面欠陥です。

$S_s$ 地震で生じる $K_I$ 値： $K_I$ の算出過程は以下のとおりです。

JEAC4206-2007 F-3300 ASME Sec. XI App. Aの解（作用分布応力を線形近似する場合）により、 $K_I$ 値を算出します。想定欠陥のサイズは、

$$\begin{aligned} \text{欠陥深さ} & a = 10\text{mm} = 0.394 \text{ in} \\ \text{欠陥長さ} & l = \text{---} \\ \text{母材厚さ} & t = \text{---} \end{aligned}$$

附属書表F-3200-1 (1/2) 最深点Aでの係数（添付－1）において、 $a/t = \text{---}$ 、 $a/l = \text{---}$ より、

$$\begin{aligned} M_m &= G_0 = \text{---} \\ G_1 &= \text{---} \end{aligned}$$

よって、

$$q_y = \left[ \frac{(\sigma_m \cdot M_m + A_p \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b)}{\sigma_{ys}} \right]^2 / 6 = \text{---} / 6 = \text{---}$$

ここで  $A_p = 17.16 \text{ MPa}^* = 2.49 \text{ ksi}$

$$M_b = G_0 - 2(a/t) G_1 = \text{---}$$

$$\sigma_{ys} = 304.3 \text{ MPa} = 44.1 \text{ ksi}$$

( $T_c = 288.6 \text{ }^\circ\text{C}$ におけるJSME S NC1-2005/2007の値)

$$\sigma_m = 0$$

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} - q_y = \text{---}$$

※：欠陥面にかかる内圧は、PTS事象とし考慮している小破断LOCA、大破断LOCA、主蒸気管破断事故および2次冷却系からの除熱機能喪失時の最高圧力を上回る、最高使用圧力（17.16 MPa）を評価に用いています。

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

以上より、

$$K_I = \frac{[(\sigma_m + A_p) \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b] \sqrt{\pi a} / Q}{\dots}$$

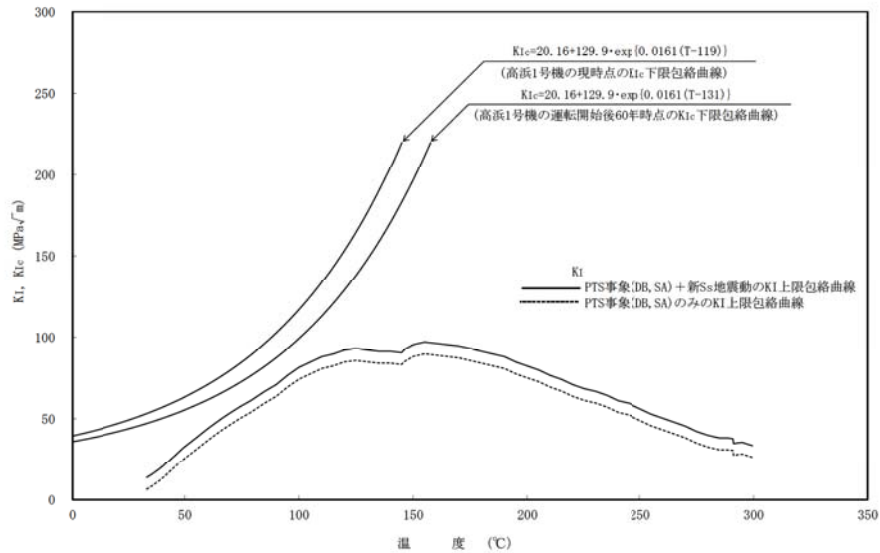


図1 高浜1号機 Ss地震を考慮したPTS評価結果(欠陥深さ10 mm)(燃料集合体の減衰定数を1%とした評価)

【想定き裂深さ5mmでの評価】

運転期間延長認可申請に際して実施した特別点検の結果を踏まえて、想定き裂深さを5mmとした評価も実施しております。原子炉容器内表面からの深さ5mm位置での評価結果を以下に示します。

① PTSでの応力評価部位と応力値

PTS事象のKI上限包絡曲線については、技術評価書「容器—原子炉容器」に示すとおり、小破断1次冷却材喪失事故(小破断LOCA)、大破断1次冷却材喪失事故(大破断LOCA)、主蒸気管破断事故および2次冷却系からの除熱機能喪失に対するKI曲線を上限包絡して示したものです。

KI値は、特別点検の結果を踏まえ、原子炉容器胴部に想定欠陥(長さ100mm、深さ5mmの半楕円表面欠陥)を仮定し評価しています。

② Ss地震時の応力評価部位と応力値

Ss地震による原子炉容器胴部に生じる曲げモーメントとして、最大となる節点(原子炉容器管台ノズル部(図中)の)N・mmを使用しています。この曲げモーメントを断面係数(mm<sup>3</sup>)で除して算出した曲げ応力値(σb)は、になります。

③ KICの算出式とその根拠

KICはJEAC4206-2007の附属書C「供用状態C, Dにおける加圧水型原子炉圧力容器の炉心領域部に対する非延性破壊防止のための評価方法」に基づき、以下の式で計算しています。(技術評価書「容器—原子炉容器」参照)

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.9 \exp\{0.0161(T - T_p)\} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$$

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  $K_I$  値の評価結果

PTS事象での $K_I$ 上限包絡曲線(上記①)に、Ss地震動で生じる $K_I$ 値を一律でかさ上げしています。Ss地震の $K_I$ 値は、原子炉容器胴部に仮定した想定欠陥(長さ $20\text{ mm}$ 、深さ $5\text{ mm}$ の半楕円表面欠陥、母材厚さ $20\text{ mm}$ )に上記②の荷重が作用した場合に生じる値として、JEAC4206-2007 F-3300 ASME Sec. XI App. Aの解(作用分布応力を線形近似する場合)を用いて $100\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を算出しました。

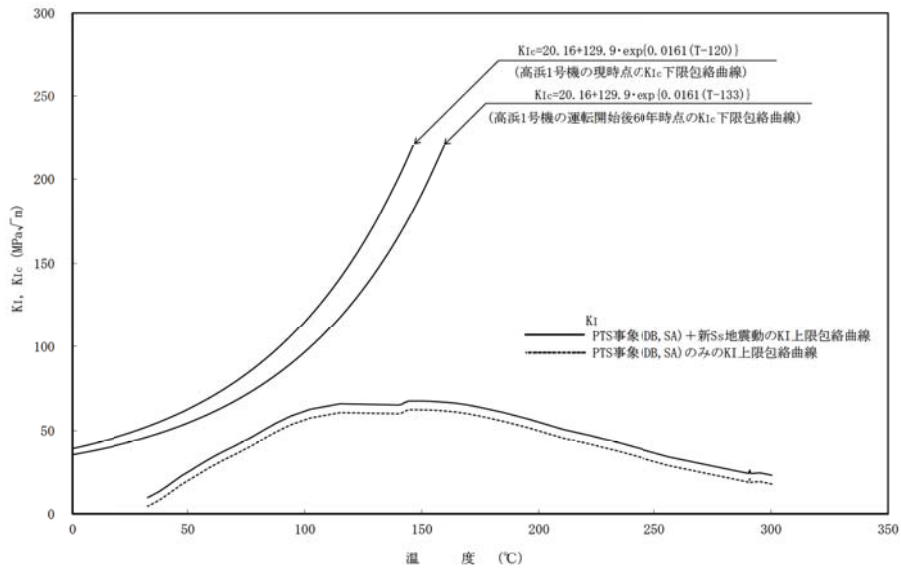


図2 高浜1号機 Ss地震を考慮したPTS評価結果(欠陥深さ $5\text{ mm}$ )  
(燃料集合体の減衰定数を $1\%$ とした評価)

以上を踏まえて、耐震安全性評価書には深さ $10\text{ mm}$ の想定き裂の評価結果、あわせて深さ $5\text{ mm}$ の想定き裂の評価結果を併記しております。

以上の結果より、運転開始後 $60$ 年時点での $K_{Ic}$ 下限包絡曲線とPTS事象にSs地震を考慮した $K_I$ を比較すると、両曲線は交差することはなく、 $K_{Ic} > K_I$ は満足され、原子炉容器の中性子照射による関連温度上昇は、耐震安全性評価上問題ないことを確認しております。



また参考として、燃料集合体の減衰定数を10%として評価した結果を以下に示します。

【想定き裂深さ10mmでの評価】

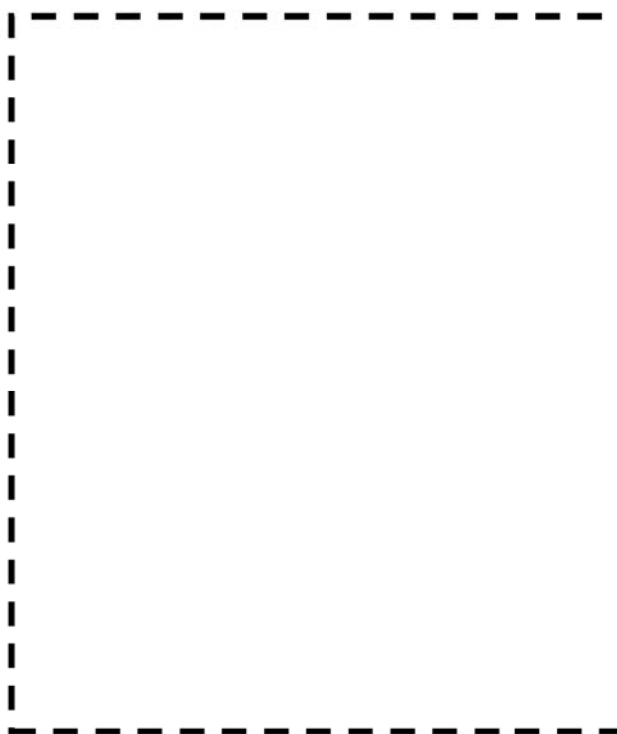
①PTSでの応力評価部位と応力値

PTS事象の $K_I$ 上限包絡曲線については、技術評価書「容器－原子炉容器」に示すとおり、小破断1次冷却材喪失事故（小破断LOCA）、大破断1次冷却材喪失事故（大破断LOCA）、主蒸気管破断事故および2次冷却系からの除熱機能喪失に対する $K_I$ 曲線を上限包絡して示したものです。

$K_I$ 値は、原子炉容器胴部に想定欠陥（長さ  $\square$  mm、深さ10mmの半楕円表面欠陥）を仮定し評価しています。

②Ss地震時の応力評価部位と応力値

Ss地震による原子炉容器胴部に生じる曲げモーメントとして、最大となる節点（原子炉容器管台ノズル部（図中  $\square$  の  $\square$ ）を使用しています。この曲げモーメントを断面係数  $\square$  で除して算出した曲げ応力値（ $\sigma_b$ ）は  $\square$  になります。



③ $K_{Ic}$ の算出式とその根拠

$K_{Ic}$ はJEAC4206-2007の附属書C「供用状態C, Dにおける加圧水型原子炉圧力容器の炉心領域部に対する非延性破壊防止のための評価方法」に基づき、以下の式で計算しています。（技術評価書「容器－原子炉容器」参照）

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.9 \exp\{0.0161(T - T_p)\} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m)}}$$

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 K<sub>I</sub> 値の評価結果

PTS事象でのK<sub>I</sub>上限包絡曲線(上記①)に、S<sub>s</sub>地震で生じるK<sub>I</sub>値を一律でかさ上げしています。S<sub>s</sub>地震のK<sub>I</sub>値は、原子炉容器胴部に仮定した想定欠陥(長さ [ ]、深さ10mmの半楕円表面欠陥、母材厚さ [ ])に上記②の荷重が作用した場合に生じる値として、ASME Sec. XI App. Aの式を用いて [ ] を算出しました。

PTS事象のK<sub>I</sub>値はJEAC4206-2007でPTS事象のK<sub>I</sub>値算出に引用されているC. B. Buchalet & W. H. Bamfordの応力拡大係数式(附属図C-2000-1及びC-2000-2の係数を使用)を用いて算出されたものですが、S<sub>s</sub>地震で生じるK<sub>I</sub>値の算出に対しては規定がないため、JEAC4206-2007の附属書F「応力拡大係数」にて記載のあるASME Sec. XI App. Aの式を使用しています。

応力拡大係数を計算する際のき裂寸法は、長さ [ ] 深さ10mmの半楕円表面欠陥です。

S<sub>s</sub>地震で生じるK<sub>I</sub>値 [ ] の算出過程は以下のとおりです。ASME Sec. XI App. A A-3320(b)により、K<sub>I</sub>値を算出します。想定欠陥のサイズは、

欠陥深さ a = 10 mm = 0.394 in  
 欠陥長さ l = [ ]  
 母材厚さ t = [ ]

TABLE A-3320-1において、a/t = [ ] a/l = [ ] より、  
 M<sub>m</sub> = G<sub>0</sub> = [ ]  
 G<sub>1</sub> = [ ]

よって、

$$q_y = \frac{[(\sigma_m \cdot M_m + A_p \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b) / \sigma_{ys}]^2 / 6}{[ ]^2 / [ ]}$$

ここで A<sub>p</sub> = 17.16 MPa※ = 2.49 ksi  
 M<sub>b</sub> = G<sub>0</sub> - 2(a/t) G<sub>1</sub> [ ]  
 σ<sub>ys</sub> = 304.3 MPa = 44.1 ksi  
 (T<sub>c</sub> = 288.6°Cにおける JSME S NC1-2005/2007の値)  
 σ<sub>m</sub> = 0  
 Q = 1 + 4.593(a/l)<sup>1.65</sup> - q<sub>y</sub> = [ ]

※：欠陥面にかかる内圧は、PTS事象とし考慮している小破断LOCA、大破断LOCA、主蒸気管破断事故および2次冷却系からの除熱機能喪失時の最高圧力を上回る、最高使用圧力(17.16MPa)を評価に用いています。

以上より、

$$K_I = \frac{[(\sigma_m + A_p) \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b] \sqrt{\pi a / Q}}{[ ]}$$

$$= [ ]$$

$$= [ ] = [ ]$$

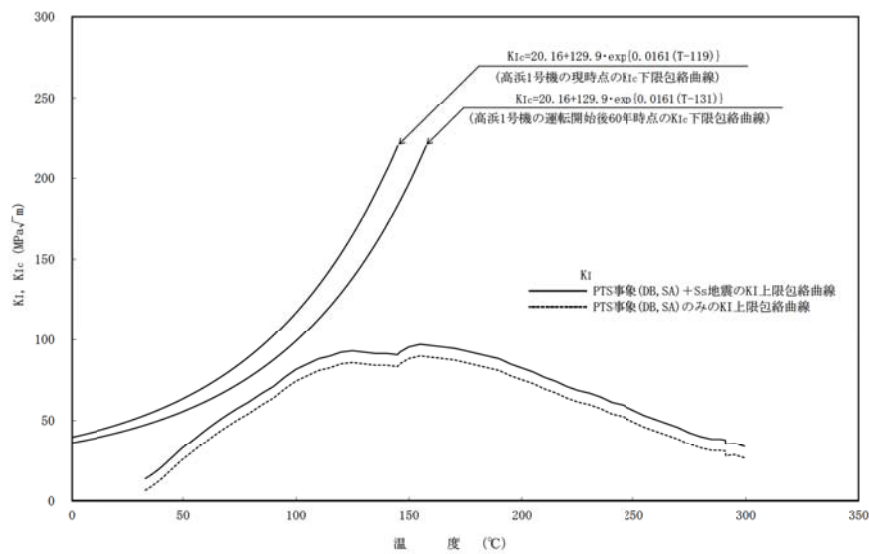


図3 高浜1号機 Ss地震を考慮したPTS評価結果（欠陥深さ10mm）  
（燃料集合体の減衰定数を10%とした評価）

【想定き裂深さ5mmでの評価】

①PTSでの応力評価部位と応力値

PTS事象の $K_I$ 上限包絡曲線については、技術評価書「容器—原子炉容器」に示すとおり、小破断1次冷却材喪失事故（小破断LOCA）、大破断1次冷却材喪失事故（大破断LOCA）、主蒸気管破断事故および2次冷却系からの除熱機能喪失に対する $K_I$ 曲線を上限包絡して示したものです。

$K_I$ 値は、特別点検の結果を踏まえ、原子炉容器胴部に想定欠陥（長さ□□□□、深さ5mmの半楕円表面欠陥）を仮定し評価しています。

②Ss地震時の応力評価部位と応力値

Ss地震による原子炉容器胴部に生じる曲げモーメントとして、最大となる節点（原子炉容器管台ノズル部（図中□□□□の□□□□））を使用しています。この曲げモーメントを断面係数□□□□で除して算出した曲げ応力値（ $\sigma_b$ ）は□□□□になります。

③ $K_{Ic}$ の算出式とその根拠

$K_{Ic}$ はJEAC4206-2007の附属書C「供用状態C、Dにおける加圧水型原子炉圧力容器の炉心領域部に対する非延性破壊防止のための評価方法」に基づき、以下の式で計算しています。（技術評価書「容器—原子炉容器」参照）

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.9 \exp\{0.0161(T - T_p)\} \quad (MPa\sqrt{m})$$

④ $K_I$ 値の評価結果

PTS事象での $K_I$ 上限包絡曲線（上記①）に、Ss地震で生じる $K_I$ 値を一律でかさ上げしています。Ss地震の $K_I$ 値は、原子炉容器胴部に仮定した想定欠陥（長さ□□□□、深さ5mmの半楕円表面欠陥、母材厚さ□□□□）に上記②の荷重が作用した場合に生じる値として、ASME Sec. XI App. Aの式を用いて□□□□を算出しました。

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

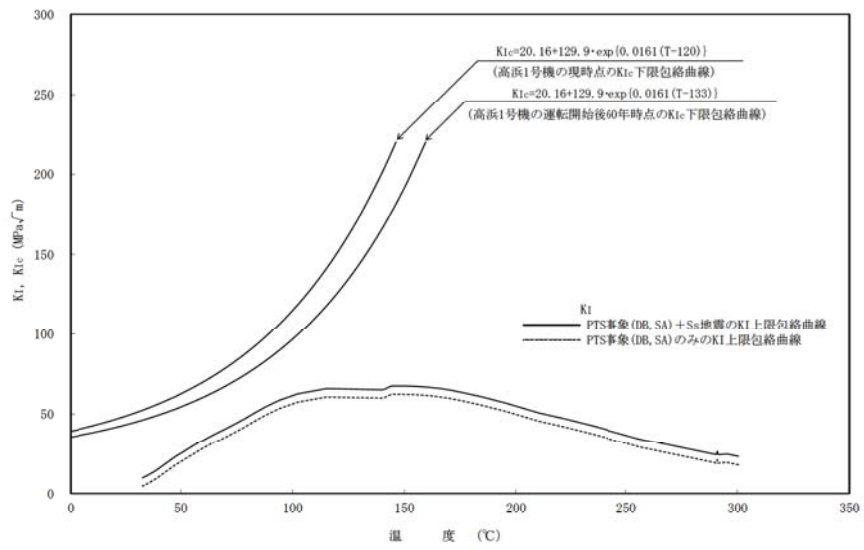


図4 高濱1号機 Ss地震を考慮したPTS評価結果(欠陥深さ5mm)  
(燃料集合体の減衰定数を10%とした評価)

以上

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

附属書表 F-3200-1 (1/2) 最深点 A での係数

Uniform  $G_0$

$a / t$	$a / \ell$					
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.00	1.1208	1.0969	1.0856	1.0727	1.0564	1.0366
0.05	1.1461	1.1000	1.0879	1.0740	1.0575	1.0373
0.10	1.1945	1.1152	1.0947	1.0779	1.0609	1.0396
0.15	1.2670	1.1402	1.1058	1.0842	1.0664	1.0432
0.20	1.3654	1.1744	1.1210	1.0928	1.0739	1.0482
0.25	1.4929	1.2170	1.1399	1.1035	1.0832	1.0543
0.30	1.6539	1.2670	1.1621	1.1160	1.0960	1.0614
0.40	2.1068	1.3840	1.2135	1.1448	1.1190	1.0772
0.50	2.8254	1.5128	1.2693	1.1757	1.1457	1.0931
0.60	4.0420	1.6372	1.3216	1.2039	1.1699	1.1058
0.70	6.3743	1.7373	1.3610	1.2237	1.1868	1.1112
0.80	11.991	1.7899	1.3761	1.2285	1.1902	1.1045

Linear  $G_1$

$a / t$	$a / \ell$					
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.00	0.7622	0.6635	0.6826	0.7019	0.7214	0.7411
0.05	0.7624	0.6651	0.6833	0.7022	0.7216	0.7413
0.10	0.7732	0.6700	0.6855	0.7031	0.7221	0.7418
0.15	0.7945	0.6780	0.6890	0.7046	0.7230	0.7426
0.20	0.8267	0.6891	0.6939	0.7067	0.7243	0.7420
0.25	0.8706	0.7029	0.7000	0.7094	0.7260	0.7451
0.30	0.9276	0.7193	0.7073	0.7126	0.7282	0.7468
0.40	1.0907	0.7584	0.7249	0.7209	0.7338	0.7511
0.50	1.3501	0.8029	0.7454	0.7314	0.7417	0.7566
0.60	1.7863	0.8488	0.7671	0.7441	0.7520	0.7631
0.70	2.6125	0.8908	0.7882	0.7588	0.7653	0.7707
0.80	4.5727	0.9288	0.8063	0.7753	0.7822	0.7792

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

No.	高浜 1－耐震－ 1 1 Rev. 3	分類：容器
質 問	<p>(3. 4. 43頁)          原子炉容器の中性子照射脆化（上部棚吸収エネルギーの低下）に対する耐震安全性評価の具体的内容（評価仕様、解析モデル、入力（荷重）条件、評価結果を含む）を提示すること。</p>	
回 答	<p>原子炉容器の中性子照射脆化に対する耐震安全性評価は、工認の審査状況を踏まえて燃料集合体の減衰定数を 10%から 1%へ変更して再評価を実施しています。燃料集合体の減衰定数を 1%とした評価結果を以下に示します。</p> <p>1. 弾塑性破壊力学評価</p> <p>(1) <math>J_{mat}</math> の算出          欠陥深さ <math>a</math> に対する上部棚破壊靱性 <math>J_{mat}</math> は次式で評価しています。  <math>J_{mat} = M_j \cdot C_1 \cdot \Delta a^{C_2}</math>  <math>M_j = 0.863</math> [供用状態 A,B]  <math>C_1 = \exp\{0.147 + 2.64 \cdot \log(\text{USE 調整値}) - 0.00087 \cdot T\}</math>  <math>C_2 = -0.549 + 0.383 \cdot \log(C_1)</math>          USE 調整値：60 年運転時点における 1/4t 深さでの値 (≡ <math>\frac{a}{4t}</math>)          T：評価位置での温度 (≡ <math>T</math>) (C)          (出典：JEAC4206-2007 附属書 G G-3200)</p> <p>本評価に用いた想定き裂は、周方向欠陥を想定しています。なお、想定き裂はアスペクト比一定とし、き裂深さ：き裂長さ = <math>\frac{a}{2l}</math> としています。</p> <p>(2) <math>J_{app}</math> の算出          欠陥深さ <math>a</math> に対するき裂進展力 <math>J_{app}</math> は次式、及び表 1 の評価条件を基に評価しています。  <math>J_{app} = 1000 \cdot (K_I')^2 / E'</math>  <math>K_I' = \sqrt{\frac{a_e}{a}} \cdot K_I</math>  <math>a_e = a + \left( \frac{1000}{6\pi} \right) \cdot \left[ \frac{K_I}{\sigma_y} \right]^2</math>  <math>\sigma_y</math>：降伏応力 (MPa)  <math>K_I = 0.961(K_{IP}^e + K_{I-S2}^e) + 0.961C \cdot K_{II}^e</math>  <math>C = 1.0 - \{-0.159(a/t) + 0.155\} (\sigma / \sigma_{total})</math>          ただし、C の下限は次式とする。 <math>C = 1.0 - 0.12 \cdot (\sigma / \sigma_{total})</math>  <math>\sigma_t</math>：欠陥深さ位置の熱応力 (MPa)  <math>\sigma_{total}</math>：欠陥深さ位置の応力 (Ss 地震力含む) (MPa)          t：胴部母材厚さ (≡ <math>t</math>) (mm)  <math>K_{IP}^e</math>：内圧応力に対する応力拡大係数  <math>K_{II}^e</math>：熱応力に対する応力拡大係数  <math>K_{I-S2}^e</math>：Ss 地震力に対する応力拡大係数          (出典：JEAC4206-2007 附属書 G G-6200)</p>	

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

※  $K_{IP}^e$  及び  $K_{IT}^e$  は、ASME Code Section XI, Appendix A の解（作用分布応力を多項式近似する場合）により算出する。

$K_{I-S2}^e$  は、ASME Code Section XI, Appendix A の解（作用分応力を線形近似する場合）により算出する。

表1 評価に使用した各条件(燃料集合体の減衰定数を1%とした評価)

仮想欠陥 <sup>※1※2</sup>	内圧 <sup>※4</sup>	温度過渡 <sup>※3</sup>	地震 <sup>※4</sup>
深さ $\square$ mm (1/4t) 長さ $\square$ mm (1.5t)	$\square$ (MPa) 一定 (最高使用圧力の 1.1 倍)	$\square$ C/h (停止までの下降率)	$\square$ (MPa) (Ss-1 地震時の曲げ応力)

※1: tは原子炉容器胴部の板厚

※2: 欠陥の想定位置は、回答 10 におけるPTS評価部位(炉心領域モデル④番部位)と同じ位置

※3: 温度過渡から求める  $\alpha$ 、 $K_{IT}$  は一定値ではなく過渡に伴う変数となります。 $\Delta a = 0\text{mm}, 1\text{mm}, 2\text{mm}, 2.5\text{mm}, 3\text{mm}$  において、それぞれの、 $\alpha$  及び  $K_{IT}$  の履歴をもとに算出した  $J_{app}$  値の履歴のうち最大値となる  $J_{app}$  を評価値としています。

※4:  $\Delta a = 0\text{mm}, 1\text{mm}, 2\text{mm}, 2.5\text{mm}, 3\text{mm}$  における、それぞれの、 $K_{IP}$  および  $K_{I-Ss}$  を表 2 に示します。

表 2 各想定欠陥深さにおける内圧による応力拡大係数  $K_{IP}$  及び

Ss 地震による応力拡大係数  $K_{I-Ss}$

$\Delta a$ [mm]	内圧による応力拡大係数 $K_{IP}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	Ss 地震による応力拡大係数 $K_{I-Ss}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]
0		
1		
2		
2.5		
3		

(算出に必要な条件)

【RV 寸法】

内半径:  $\square$  mm (クラッド<sup>°</sup> 内面)、 $\square$  mm (母材内面)

母材板厚:  $\square$  mm

【熱伝導率、熱拡散率】

ASME Sec II Part D の Table TCD を使用 (母材: Group C、クラッド<sup>°</sup>: Group J)

【縦弾性係数】

母材:  $1.84 \times 10^{11}$  Pa

【熱膨張係数】

母材:  $\square$   $\mu\text{m}/\text{mm}^\circ\text{C}$

【ポアソン比】

0.3

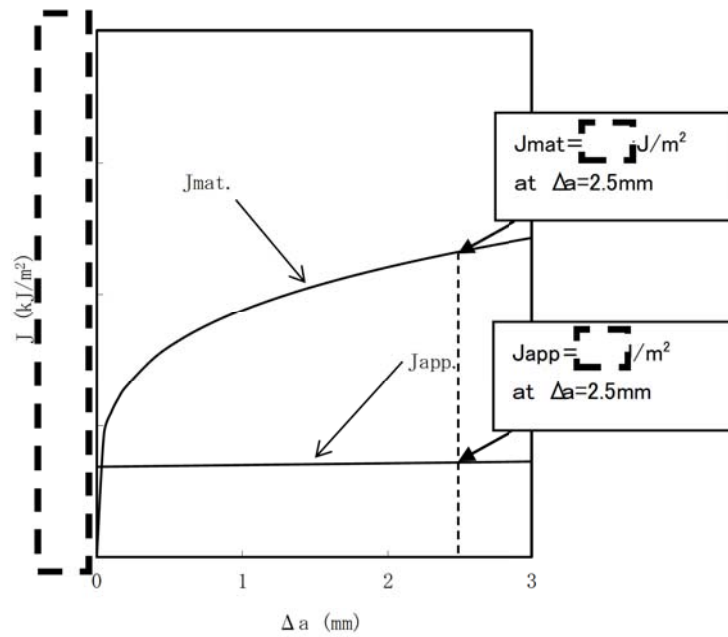
【降伏応力  $\sigma_y$ 】

$\square$  MPa (母材の低温側配管の冷却材温度  $\square$   $^\circ\text{C}$ ) での値)

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) 評価結果

評価結果を下図に示します。



高浜1号 Ss地震を考慮した供用状態A, Bに対するき裂安定性評価結果  
(燃料集合体の減衰定数を1%とした評価)



また参考として、燃料集合体の減衰定数を 10%として評価した結果を以下に示します。

1. 弾塑性破壊力学評価

(1)  $J_{mat}$  の算出

欠陥深さ  $a$  に対する上部棚破壊靱性  $J_{mat}$  は次式で評価しています。

$$J_{mat} = M_j \cdot C_1 \cdot \Delta a^{C_2}$$

$$M_j = 0.863[\text{供用状態 A,B}]$$

$$C_1 = \exp\{0.147 + 2.64 \cdot \log(\text{USE 調整値}) - 0.00087 \cdot T\}$$

$$C_2 = -0.549 + 0.383 \cdot \log(C_1)$$

USE 調整値：60 年運転時点における 1/4t 深さでの値 (= [ ] J)

T：評価位置での温度 (= [ ] °C)

(出典：JEAC4206-2007 附属書 G G-3200)

(2)  $J_{app}$  の算出

欠陥深さ  $a$  に対するき裂進展力  $J_{app}$  は次式、及び表 3 の評価条件を基に評価しています。

$$J_{app} = 1000 \cdot (K_I')^2 / E'$$

$$K_I' = \sqrt{\frac{a_e}{a}} \cdot K_I$$

$$a_e = a + \left( \frac{1000}{6\pi} \right) \cdot \left[ \frac{K_I}{\sigma_y} \right]^2$$

$\sigma_y$ ：降伏応力 (MPa)

$$K_I = 0.961(K_{IP}^e + K_{I-S2}^e) + 0.961C \cdot K_{II}^e$$

$$C = 1.0 - \{-0.159(a/t) + 0.155\}(\sigma_t / \sigma_{total})$$

ただし、C の下限は次式とする。  $C = 1.0 - 0.12 \cdot (\sigma_t / \sigma_{total})$

$\sigma_t$ ：欠陥深さ位置の熱応力(MPa)、

$\sigma_{total}$ ：欠陥深さ位置の応力 (S s 地震力含む) (MPa)

t：胴部母材厚さ (= [ ] mm)

$K_{IP}^e$ ：内圧応力に対する応力拡大係数

$K_{II}^e$ ：熱応力に対する応力拡大係数

$K_{I-S2}^e$ ：S s 地震力に対する応力拡大係数

(出典：JEAC4206-2007 附属書 G G-6200)

※  $K_{IP}^e$  及び  $K_{II}^e$  は、ASME Code Section XI, Appendix A の解 (作用分布応力を多項式近似する場合) により算出する。

$K_{I-S2}^e$  は、ASME Code Section XI, Appendix A の解 (作用分応力を線形近似する場合) により算出する。

表3 評価に使用した各条件(燃料集合体の減衰定数を 10%とした評価)

仮想欠陥 <sup>※1※2</sup>	内圧 <sup>※4</sup>	温度過渡 <sup>※3</sup>	地震 <sup>※4</sup>
深さ [ ] mm (1/4t) 長さ [ ] mm (1.5t)	[ ] MPa) 一定 (最高使用圧力の 1.1 倍)	[ ] °C/h (停止までの下降率)	[ ] MPa) (Ss-1 地震時の曲げ応力)

※1:tは原子炉容器胴部の板厚

※2:欠陥の想定位置は、回答 10 におけるPTS評価部位(炉心領域モデル④番部位)と同じ位置

※3:温度過渡から求める $\alpha$ 、 $K_{II}$ は一定値ではなく過渡に伴う変数となります。 $\Delta a = 0\text{mm}, 1\text{mm}, 2\text{mm}, 2.5\text{mm}, 3\text{mm}$ において、それぞれの、 $\alpha$ 及び $K_{II}$ の履歴をもとに算出した $J_{app}$ 値の履歴のうち最大値となる $J_{app}$ を評価値としています。

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:  $\Delta a=0\text{mm}$ , 1mm, 2mm, 2.5mm, 3mm におけるそれぞれの、 $K_{IP}$  および  $K_{I-Ss}$  を表4に示します。

表4 各想定欠陥深さにおける内圧による応力拡大係数  $K_{IP}$  及び  $Ss$  地震による応力拡大係数  $K_{I-Ss}$

$\Delta a$ [mm]	内圧による応力拡大係数 $K_{IP}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	$Ss$ 地震による応力拡大係数 $K_{I-Ss}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]
0		
1		
2		
2.5		
3		

(算出に必要な条件)

【RV 寸法】

内半径:  $\square$  mm (クラッド内面)、 $\square$  mm (母材内面)

母材板厚:  $\square$  mm

【熱伝導率、熱拡散率】

ASME Sec II Part D の Table TCD を使用 (母材: Group C、クラッド: Group J)

【縦弾性係数】

母材:  $1.84 \times 10^{11}$  Pa

【熱膨張係数】

母材:  $\square$  mm/mm $^{\circ}\text{C}$

【ポアソン比】

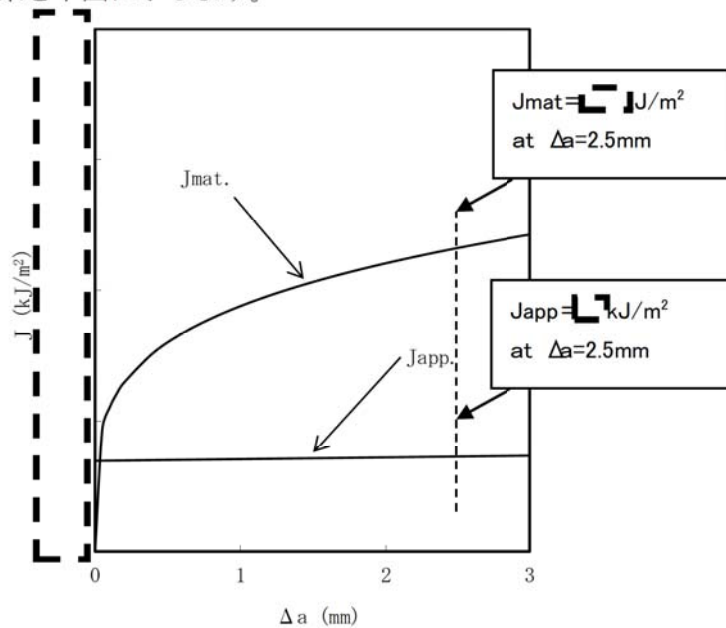
0.3

【降伏応力  $\sigma_y$ 】

$\square$  MPa (母材の低温側配管の冷却材温度  $\square$   $^{\circ}\text{C}$ ) での値)

(3) 評価結果

評価結果を下図に示します。



高浜1号  $Ss$  地震を考慮した供用状態A, B に対するき裂安定性評価結果  
(燃料集合体の減衰定数を10%とした評価)

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

No.	高浜 1－耐震－ 1 3 Rev. 2	分類：配管																																																																														
質 問	余熱除去系統配管のアンカーサポート取付部の疲労割れに対する評価の具体的内容（評価仕様、解析モデル、入力（荷重）条件、評価結果を含む）を提示すること。																																																																															
回 答	<p>余熱除去系統配管のアンカーサポートにかかる荷重をもとに、各応力を算出した過程は以下のとおりです。また、サポートの位置を添付－ 1 の系統図、アイソメ図に示します。</p> <p>1. 評価用荷重の算出</p> <p>配管を 3次元梁モデル化してSs、Sd地震時の支持点荷重をスペクトルモーダル解析にて算出しています。評価部位はサポートラグ（固定点）であり、隣接する解析ブロックとの境界部になります。この為、両ブロックの解析結果から得られた荷重を合成し、評価用荷重としています。さらに、当該アンカーサポートをモデル化し、算出された評価用荷重を用いて評価対象部位の部材力を算出した結果を表 1、表 2 に示します。</p> <p style="text-align: center;">表 1 評価用荷重 (Ss : 部材力)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">方向</th> <th colspan="2">配管とラグ</th> <th colspan="2">ラグとプレート</th> </tr> <tr> <th>1次</th> <th>1次+2次</th> <th>1次</th> <th>1次+2次</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fx</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Fy</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Fz</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Mx</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>My</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Mz</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 2 評価用荷重 (Sd : 部材力)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">方向</th> <th colspan="2">配管とラグ</th> <th colspan="2">ラグとプレート</th> </tr> <tr> <th>1次</th> <th>1次+2次</th> <th>1次</th> <th>1次+2次</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fx</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Fy</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Fz</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Mx</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>My</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Mz</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>		方向	配管とラグ		ラグとプレート		1次	1次+2次	1次	1次+2次	Fx					Fy					Fz					Mx					My					Mz					方向	配管とラグ		ラグとプレート		1次	1次+2次	1次	1次+2次	Fx					Fy					Fz					Mx					My					Mz				
方向	配管とラグ			ラグとプレート																																																																												
	1次	1次+2次	1次	1次+2次																																																																												
Fx																																																																																
Fy																																																																																
Fz																																																																																
Mx																																																																																
My																																																																																
Mz																																																																																
方向	配管とラグ		ラグとプレート																																																																													
	1次	1次+2次	1次	1次+2次																																																																												
Fx																																																																																
Fy																																																																																
Fz																																																																																
Mx																																																																																
My																																																																																
Mz																																																																																

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。

## 2. 応力の算出

溶接部に発生する応力は、下式で算出しています。本評価式は、材料力学に基づく公式をもとにして設定したものであり、設計・建設規格や耐震設計審査指針等に規定されたものではないことから、応力集中係数に係る規定はありません。また、支持構造物は、降伏点を許容値としており許容値を厳しくする設計体系となっていることから、発生応力の算出において応力係数を考慮する必要はないと判断しています。なお、本評価式により適切な応力が評価できることは、FEM解析により確認し採用しているものです。

$$\sigma_1 = \frac{|Mx| + |Fy| \cdot L}{Z_{wx}} + \frac{|My| + |Fx| \cdot L}{Z_{wy}} + \frac{|Fz|}{A_w}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\left(\frac{Fx}{A_w}\right)^2 + \left(\frac{Fy}{A_w}\right)^2} + \frac{|Mz|}{Z_{wp}}$$

$A_w$  : 溶接部の断面積

$Z_{wx}$  ,  $Z_{wy}$  ,  $Z_{wp}$  : 各方向の溶接部の断面係数

$L$  : 荷重作用点から評価部位までの距離

応力評価は、以下の組合せ応力を用います。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\sigma_2^2}$$

3. 評価仕様

評価に用いたデータを以下に示します。

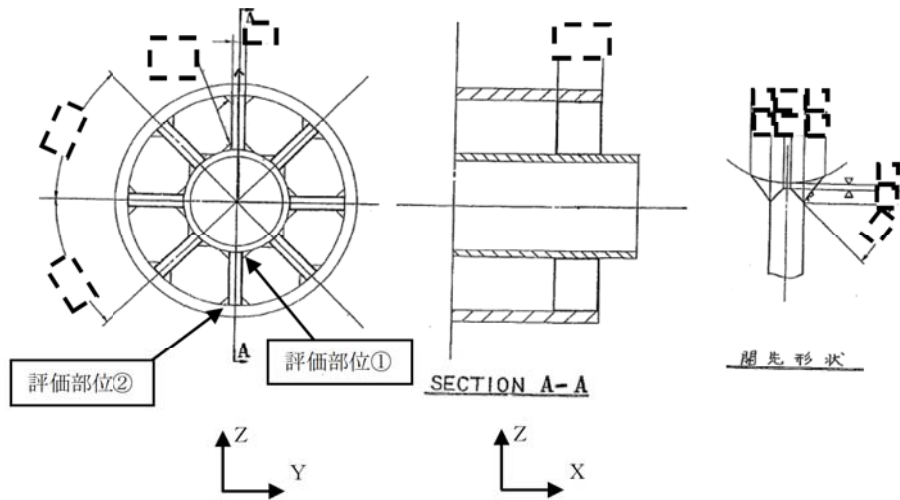


図-1 配管サポートの外形図

表4 諸元表 (単位: mm)

母管 外径	リブの長さ	リブの厚さ	スリーブ外径	スリーブの厚さ
$b_1$	$a$	$t_1$	$b_2$	$t_2$

評価部位	$L^{(注1)}$ (mm)	$A_w$ ( $mm^2$ )	$Z_{wx}$ ( $mm^3$ )	$Z_{wy}$ ( $mm^3$ )	$Z_{wp}$ ( $mm^3$ )
①配管とラグの 溶接部					
②ラグとプレート の溶接部					

(注1) アンカーラグサポートは形状が特殊なため、サポートをモデル化し、評価点(溶接部)での荷重を直接算出して評価を実施しているため、L寸法は評価に使用されていないことから「L=0」としている。

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。

4. 評価結果

各部位の許容応力を表5に、評価結果を表6に示します。発生応力は許容応力を超えることなく、耐震安全上問題ない。

表5 許容応力 (MPa)

部 位		リブ (ラグ)	スリーブ (プレート)
物 性 値	材 質		
	使用温度(°C)		
	F 値		
1 次応力の許容値			
1 次 + 2 次応力の許容値			

表6 (1/2) 配管とラグの溶接部 (評価部位①)

1 次応力 評価	S <sub>s</sub> <sup>(注1)</sup>	発生応力	
		許容応力	
1 次 + 2 次 応力評価	S <sub>s</sub> <sup>(注1)</sup>	発生応力	
		許容応力	

表6 (2/2) ラグとプレートの溶接部 (評価部位②)

1 次応力 評価	S <sub>s</sub> <sup>(注1)</sup>	発生応力	
		許容応力	
1 次 + 2 次 応力評価	S <sub>s</sub> <sup>(注1)</sup>	発生応力	
		許容応力	

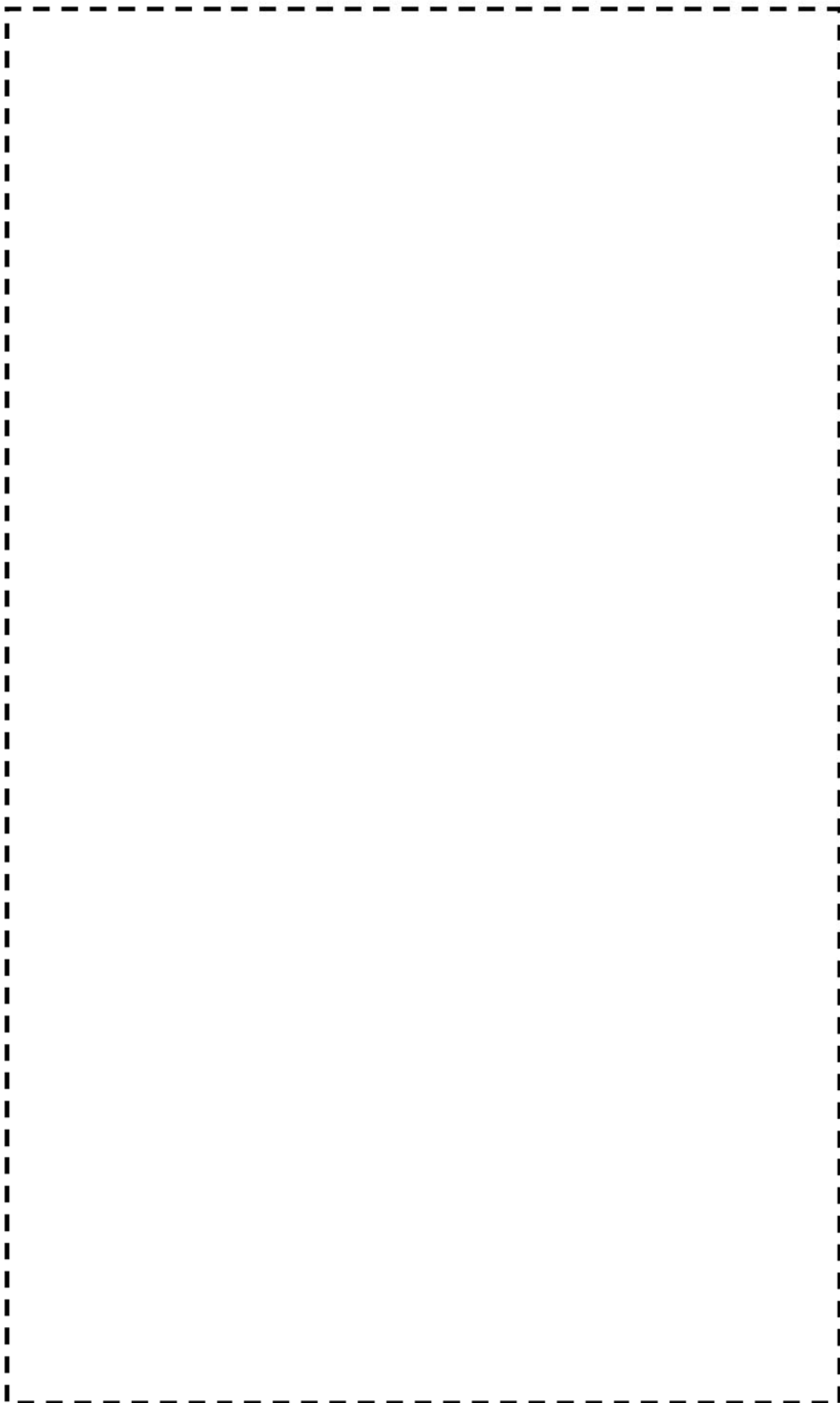
(注1) S<sub>s</sub>地震力がS<sub>d</sub>地震力および静的地震力より大きく、S<sub>s</sub>地震力による評価応力が共用状態C<sub>s</sub>の許容応力を下回るため、S<sub>d</sub>地震力および静的地震力による評価を省略した。

以上

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。

高浜1号機 余熱除去系統図 (評価対象アンカーサポートの設置位置)

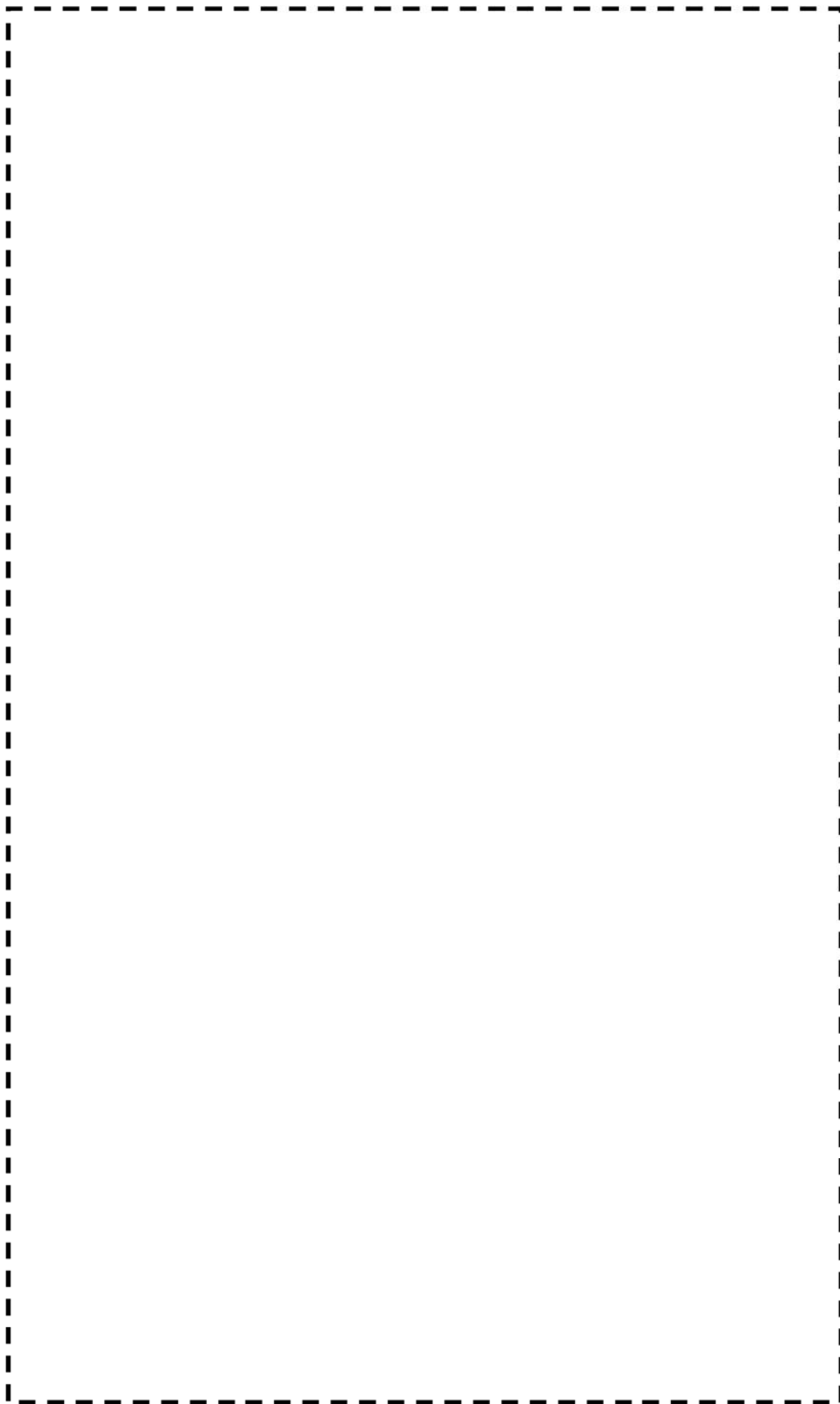
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



高浜 1 号機 余熱除去系統配管 (A - 余熱除去クーラー出口配管 (PEN側))

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。





高浜1号機 余熱除去系統配管(B-余熱除去クローラ出口配管(PEN側))

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。

高浜1号機 余熱除去系統配管サポートの疲労評価について

1. 評価対象サポート

高浜1号機については、余熱除去系統配管サポートのうち、3方向の変位及びモーメントを拘束する8個のアンカーサポートについて評価を実施しています。その結果、応力比の大きい [ ] 及び [ ] の評価結果を技術評価側に記載し、耐震評価については、特に応力比の大きい [ ] に対する評価を行っています。

なお、 [ ] と [ ] は、それぞれ図1に示す評価部位に対して、評価を行っています。

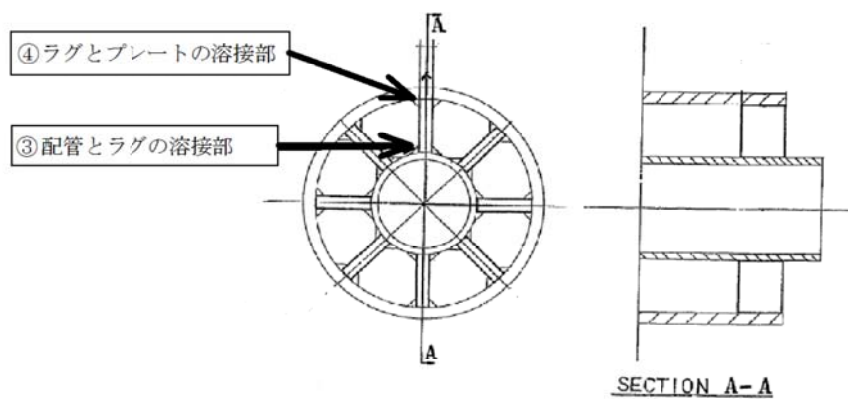
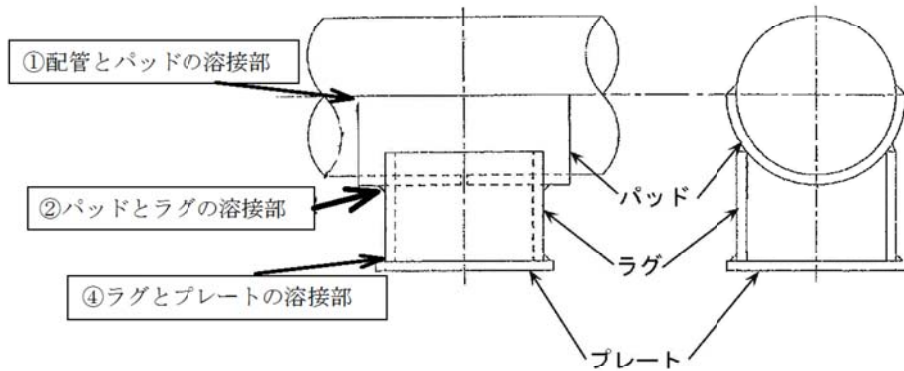
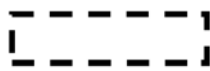


図1 [ ] 及び [ ] の評価部位

[ ] 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。

2. 技術評価結果及び耐震評価結果について

技術評価書及び耐震評価書に記載している「一次＋二次応力」における応力比の対象サ  
ポートと、それぞれの発生値、許容値は以下のとおりです。

高浜 1 号 技術評価

評価項目			
①配管とパッドの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
②パッドとラグの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
③配管とラグの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
④ラグとプレートの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
			0.97

耐震評価は技術評価において応力比の厳しい [ ] を評価対象とした



高浜 1 号 耐震評価

評価項目			
①配管とパッドの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
②パッドとラグの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
③配管とラグの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
④ラグとプレートの溶接部	一次＋二次応力	[ ]	[ ]
	許容応力		
	応力比		
			0.82

以 上

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。

許容応力の算出

(単位:MPa)

アンカーサポート番号		リブ (ラグ)	スリーブ (プレート)
部 位			
物 性 値	材 質		
	評価温度(°C)		
	① Sy (付録図表 Part 5 表 8) (at 使用温度)		
	Su (付録図表 Part 5 表 9) (at 使用温度)		
	② Sy (at 常温)		
	③ 1.35Sy		
	④ 0.7Su		
	F=min (②, ③, ④) (注1)		
	引張許容応力 ft=F/1.5		
	曲げ許容応力 fb=F/1.5		
せん断許容応力 fs=F/1.5√3			
一 次 応 力 の 許 容 値	引張許容応力 1.5ft [1.5ft*] (注2)		
	曲げ許容応力 1.5fb [1.5fb*] (注2)		
	せん断許容応力 1.5fs [1.5fs*] (注2)		
一 次 + 二 次 応 力 の 許 容 値	引張許容応力 3ft		
	曲げ許容応力 3fb		
	せん断許容応力 3fs (溶け込み) [1.5fs(すみ肉)]		

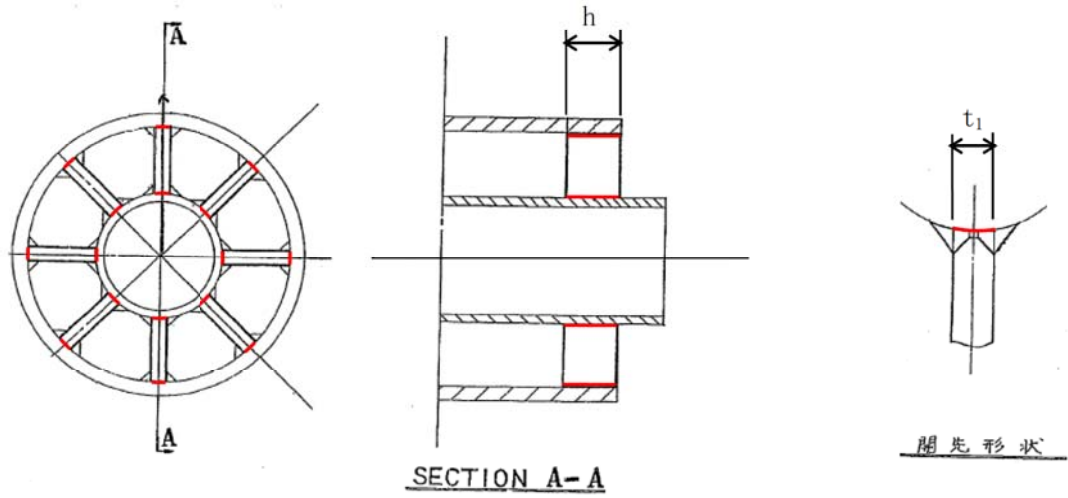
(注1) 使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の場合のみ。それ以外については、 $F = \min (①, ④)$

(注2) Ss 地震の一次応力評価では JEAG4601 の支持構造物規程に従い①, ②の値を「別表第 9 (付録図表 Part 5 表 8) に定める値の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値を使用する。

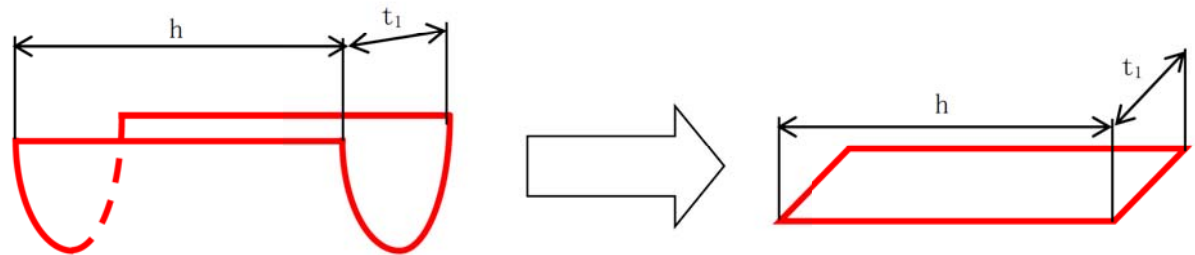
(注3) 本サポートはスリーブ内設置である。

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。

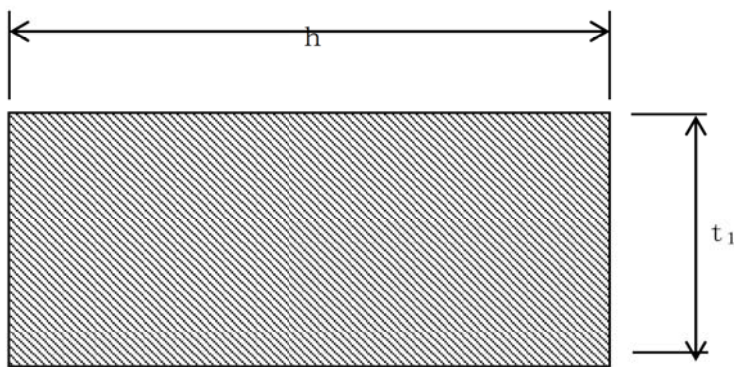
<溶接部の断面積計算例>



1. 溶接部の保守的なモデル化



2. 断面積 (Aw) の計算



断面積

$$A_w = h \times t_1 = \boxed{\quad} \times \boxed{\quad} = \boxed{\quad} [\text{mm}^2]$$

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。

No.	高浜1-耐震-18 Rev.1	事象：耐震
質問	<p>(別冊-16耐震-3.7炉内構造物-3.7.15, 16頁)                  バッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れ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)等)について、評価結果を含む)を提示すること。</p>	
回答	<p>以下のとおり評価の具体的内容を示します。                  なお、本評価については、別紙のとおり、工認に合せた評価手法を反映し再評価を行いました。</p> <p>1. ボルト損傷本数と想定箇所                  技術評価において、原子力安全基盤機構「照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術」事業で得られた最新知見を用いて評価した結果、運転開始後60年時点でのボルトの損傷本数は管理損傷ボルト数(全体の20%)以下との結果が得られていますが、本耐震安全性評価では、図1に示すとおり2~7段全てのバッフルフォーマボルト(全バッフルフォーマボルト□□本のうち、□□本の損傷を想定)が損傷したと仮定しました。</p> <div data-bbox="587 1124 1225 1774" data-label="Diagram"> </div> <p>図1 バッフルフォーマボルト損傷想定箇所</p> <p>【評価対象部位】                  他のバッフル板で端が支持されていない③、⑤のバッフル板(地震荷重を全てボルトで受けるため厳しい)のうち、幅が大きくボルト1本あたりの地震荷重が最も大きくなる「バッフル板③」のボルトを評価対象としました。</p>	

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。

## 2. 解析モデル及び諸元

### (1) 地震応力

バップルフォーマボルトが受ける地震荷重は、図1に記載のバップル板③をはり要素でモデル化し、これを組込んだ炉内構造物耐震評価モデル(図2)を用いて、スペクトルモーダル法によるSs地震時の応答解析を実施し算出しました。

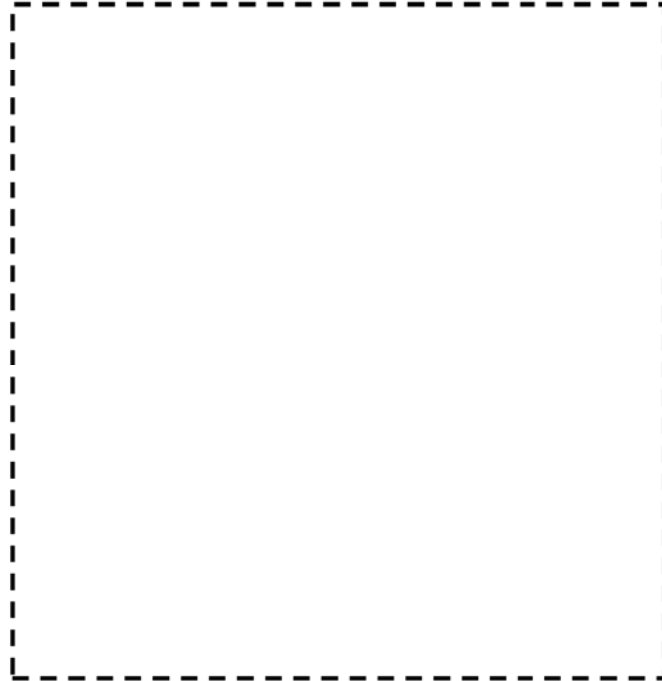


図2 炉内構造物耐震評価モデル

### (2) 機械的荷重による応力

機械的荷重として、運転時の差圧によるバップル板荷重を考慮しました。評価には最大差圧  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  を用い、最上段及び最下段のそれぞれ4本のボルトが受ける荷重は、図3に示す斜線部面積に作用する荷重としました。

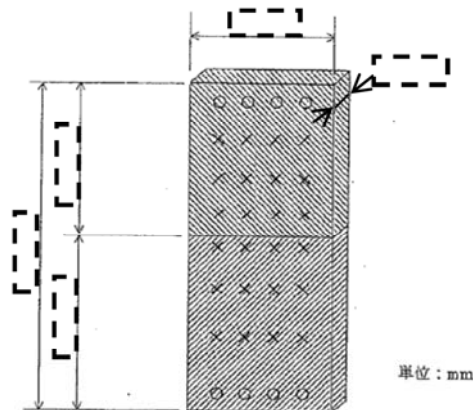


図3 バップルフォーマボルト応力評価モデル

(3)許容応力

許容応力については、炉内構造物の許容応力の $D_s (IV_{AS})$ の規定を適用しました。

表1 炉内構造物の許容応力

	一次応力強さ(一般膜応力)
$D_s (IV_{AS})$	$\text{Min}(2.4S_m, 2/3S_u)$
材料	
温度	

3. 評価内容

(1)地震応力

算出された、最上段及び最下段のボルト1本あたりに作用する地震荷重をもとに、地震応力を算出しました。

ボルト1本に作用する地震荷重(軸力):

〔 〕 (最上段)

〔 〕 (最下段)

ボルトシャンク径:

〔 〕

ボルトの地震応力(軸方向応力):

〔 〕 (最上段)

〔 〕 (最下段)

(2)機械的荷重による応力

ボルト1本に作用する差圧荷重(軸力):

〔 〕 (最上段)

〔 〕 (最下段)

ボルトの機械的荷重による応力(軸方向応力):

〔 〕

(3)地震時の応力(合計)

地震時のバップルフォーマボルトの応力は以下の通りです。

〔 〕 (最上段)

〔 〕 (最下段)

〔 〕 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. 評価結果

ハッフルフォーマボルトの地震時における応力評価結果を表2に示します。発生応力は許容応力を超えることはなく、耐震安全上問題がないことを確認しました。なお、発生応力は大きい方の最下段の評価結果を採用しました。

表2 高浜1号炉

ハッフルフォーマボルトの照射誘起応力腐食割れに対する耐震安全性評価結果

評価部位	地震時の発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	応力比
ハッフルフォーマボルト (最下段)			0.15

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. 制御棒挿入性評価

バッフルフォーマボルトの照射誘起応力腐食割れ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です。

### (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す。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、挿入時間を算出します。

バッフルフォーマボルトの照射誘起応力腐食割れに対する評価として実施する制御棒挿入時間評価では、燃料集合体の応答解析において、バッフルフォーマボルトの損傷を仮定した燃料集合体群振動解析モデルにより算出される応答を用いて挿入時間を算出することで、バッフルフォーマボルト損傷の影響を評価しています。

なお、地震応答に対応する制御棒挿入抗力は各機器に対する静的抗力測定試験や正弦波加振下での制御棒落下試験結果を基に、機器の応答変位や応答加速度に対応する抗力データを取得しています。

制御棒挿入時間解析においては、機器の時刻歴応答解析結果とこれらの抗力データから、解析の各タイムステップにおいて地震外力による抗力を求め、運動方程式に反映し、挿入時間を求めています。

添付-1に制御棒挿入時間評価の全体の流れ、制御棒挿入時間評価において考慮する各種抗力、及び制御棒挿入時間解析における抗力の取り扱いを示します。

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

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>m</sub>	:	メカニカル抗力
F <sub>u</sub>	:	浮 力

(2) 入力条件

①ボルト損傷本数と想定箇所

技術評価において、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術」事業で得られた最新知見を用いて評価した結果、運転開始後60年時点でのボルトの損傷本数は管理損傷ボルト数(全体の20%)以下との結果が得られていますが、本耐震安全性評価では、図1に示すとおり2~7段全てのバップルフォーマボルト(全バップルフォーマボルトのうち、        本の損傷を想定)が損傷したと仮定しました。(「1. ボルト損傷本数と想定箇所」と同じ)

②挿入経路機器の地震応答

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3に示します。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、挿入時間を算出します。

表3 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 案内管	燃料集合体 (制御棒案内シンプル)

(3) 評価結果

制御棒挿入時間の評価結果を表4に示します。バップルフォーマボルトの損傷を考慮した場合も、挿入時間は規定時間を満足しており、耐震安全上問題がないことを確認しました。

表4 制御棒クラス挿入時間計算結果

(単位: 秒)

	制御棒クラス挿入時間*1	規定時間*2
通常運転時	1.31	1.8
地震時 (バップルフォーマボルトの損傷を考慮)		

\*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: 設置許可申請書 添付10の値

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) 補足 (バッフルフォーマボルト損傷を考慮しない場合)

①地震時 制御棒挿入経路機器応答

表5 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

②評価結果

表6 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		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: 設置許可申請書 添付10の値

以 上

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。

## 6. 制御棒挿入性評価（見直し前の評価）

参考として、見直し前の制御棒挿入性の評価結果を以下に示します。なお、バップルフォーマボルトの地震時における応力評価結果はFA減衰定数の変更に伴う影響はありません。

### (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す。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、挿入時間を算出します。

バップルフォーマボルトの照射誘起応力腐食割れに対する評価として実施する制御棒挿入時間評価では、燃料集合体の応答解析において、バップルフォーマボルトの損傷を仮定した燃料集合体群振動解析モデルにより算出される応答を用いて挿入時間を算出することで、バップルフォーマボルト損傷の影響を評価しています。

なお、地震応答に対応する制御棒挿入抗力は各機器に対する静的抗力測定試験や正弦波加振下での制御棒落下試験結果を基に、機器の応答変位や応答加速度に対応する抗力データを取得しています。

制御棒挿入時間解析においては、機器の時刻歴応答解析結果とこれらの抗力データから、解析の各タイムステップにおいて地震外力による抗力を求め、運動方程式に反映し、挿入時間を求めています。

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

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>m</sub>	:	メカニカル抗力
F <sub>u</sub>	:	浮 力

(2) 入力条件

①ボルト損傷本数と想定箇所

技術評価において、原子力安全基盤機構「照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価技術」事業で得られた最新知見を用いて評価した結果、運転開始後60年時点でのボルトの損傷本数は管理損傷ボルト数(全体の20%)以下との結果が得られていますが、本耐震安全性評価では、図1に示すとおり2~7段全てのバップルフォーマボルト(全バップルフォーマボルト $\square$ 本のうち、 $\square$ 本の損傷を想定)が損傷したと仮定しました。(「1. ボルト損傷本数と想定箇所」と同じ)

②挿入経路機器の地震応答

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7に示します。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、挿入時間を算出します。

表7 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 案内管	燃料集合体 (制御棒案内シンプル)

(3) 評価結果

制御棒挿入時間の評価結果を表8に示します。バップルフォーマボルトの損傷を考慮した場合も、挿入時間は規定時間を満足しており、耐震安全上問題がないことを確認しました。

表8 制御棒クラス挿入時間計算結果

(単位：秒)

	制御棒クラス挿入時間*1	規定時間*2
通常運転時	1.31	1.8
地震時 (バップルフォーマボルトの損傷を考慮)	1.45	

\*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：設置許可申請書 添付10の値

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) 補足 (バッフルフォーマボルト損傷を考慮しない場合)

①地震時 制御棒挿入経路機器応答

表9 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

②評価結果

表10 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	1.43	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: 設置許可申請書 添付10の値

以上

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。

## 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。

	現評価 (H27. 11補正申請)	工認に合せた評価手法反映
評価条件	燃料集合体照射後条件 (照射影響の考慮有り) Ss-1(700gal)～Ss-7	燃料集合体照射後条件 (照射影響の考慮有り) Ss-1(700gal)～Ss-7
解析モデル	建屋-RCS-RV-CI-FA連成モデル FA減衰率：10%	建屋-RCS-RV-CI-FA連成モデル FA減衰率： <u>1%</u>
評価手法	《挿入経路機器の応答解析》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：時刻歴手法</li> <li>・制御棒クランク案内管：時刻歴手法</li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul> 《地震時挿入抗力の考慮方法》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：時刻歴手法</li> <li>・制御棒クランク案内管：時刻歴手法</li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul>	《挿入経路機器の応答解析》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：<u>スペクトルモデル解析</u></li> <li>・制御棒クランク案内管：時刻歴手法</li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul> 《地震時挿入抗力の考慮方法》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：<u>最大抗力一定</u></li> <li>・制御棒クランク案内管：<u>最大抗力一定</u></li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul>



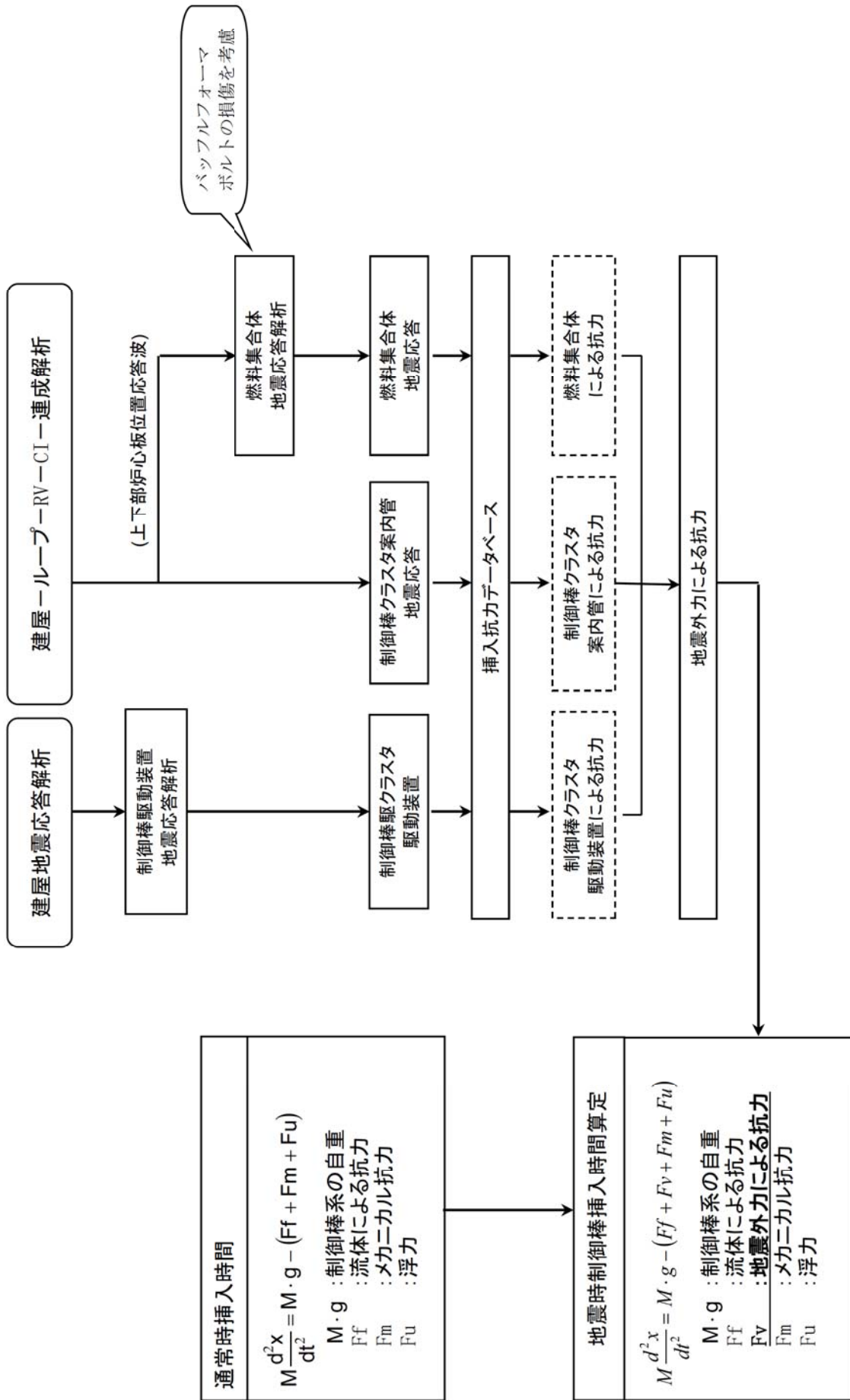


図1 制御棒挿入時間評価の流れ

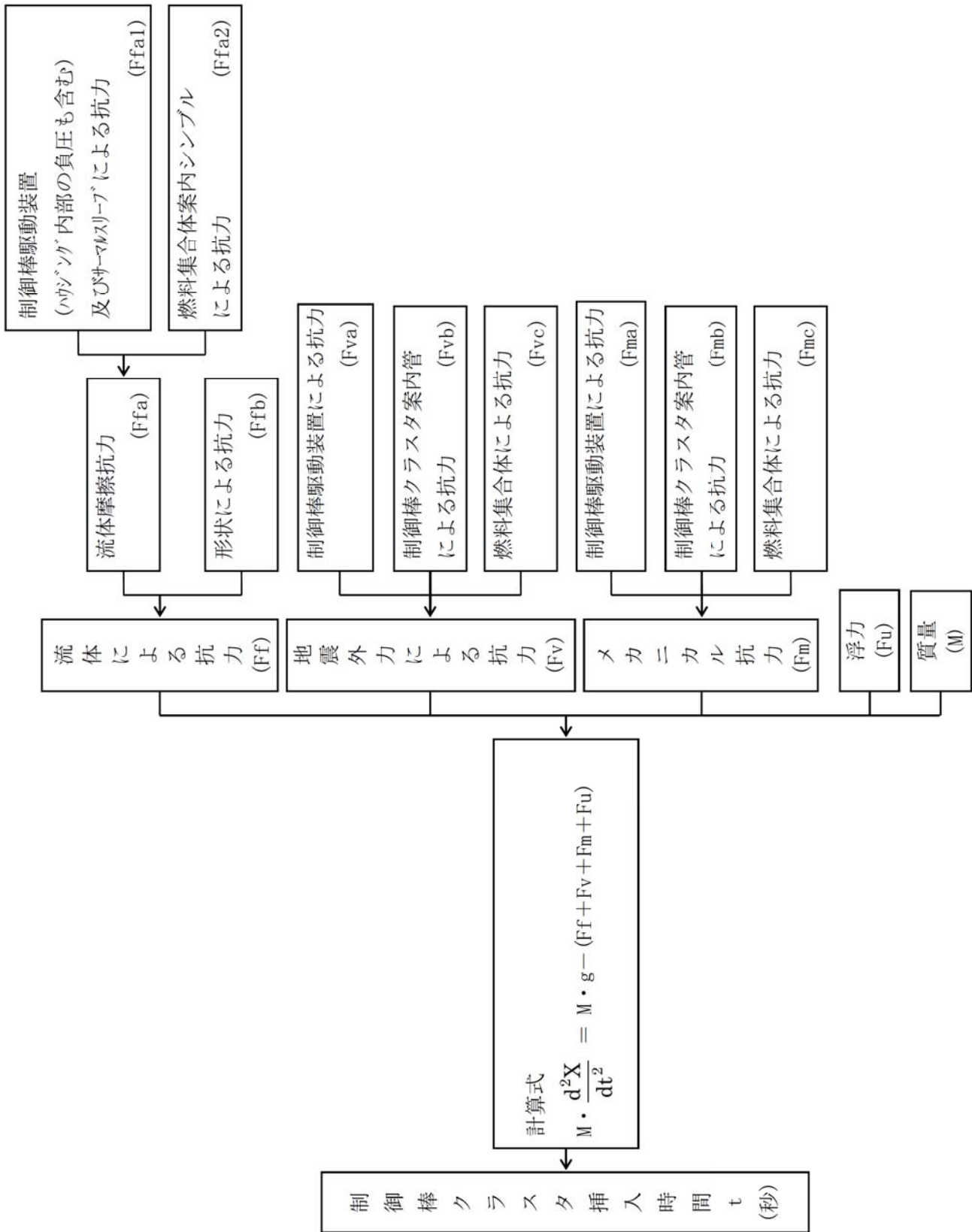
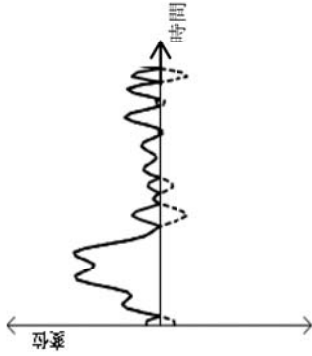


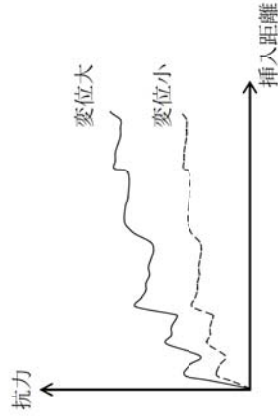
図 2 制御棒挿入時間評価において考慮する各種抗力

<時刻歴手法における地震応答及び抗力の取り扱い>

- ・地震応答の取り扱い  
機器の応答解析結果から時々刻々変化する変位、加速度を用いる



- ・抗力データ  
機器に対し、変位量に対応する挿入距離に対する抗力テーパー係数及び加速度抗力係数を設定 (下図はFA変位抗力の例)



機器の時刻歴応答 (変位、加速度) 及び抗力テーパー係数、加速度抗力係数より、解析の各タイムステップにおいて、その時刻の応答変位、応答加速度と挿入距離に対応する抗力を算出し、運動方程式に反映する。  
※静的手法では、最大応答に対応する抗力を一定に考慮する。

<入力条件>

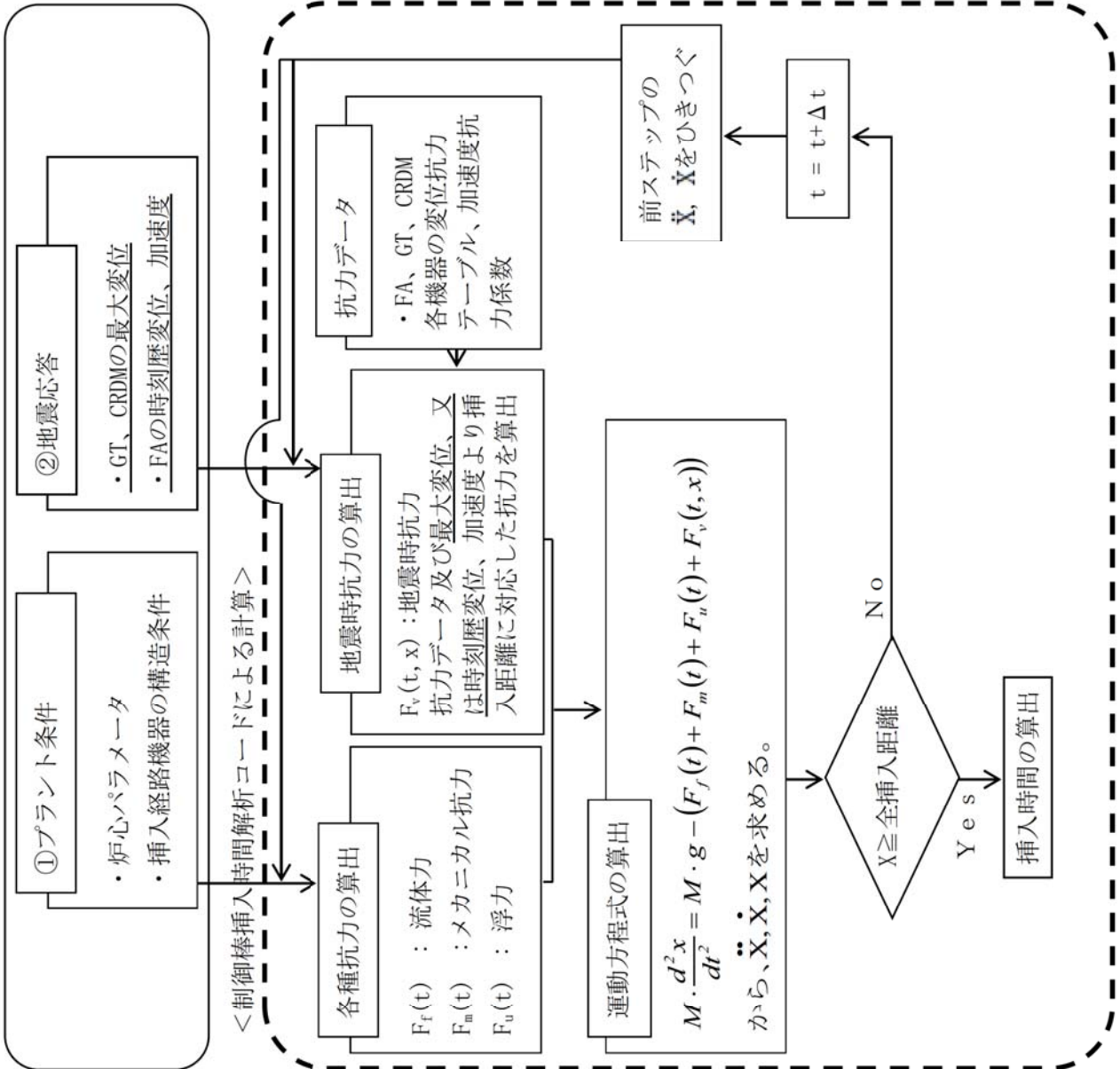


図 3 制御棒挿入時間解析における抗力の取り扱い

No.	高浜 1 - 耐震 - 1 9 Rev. 1	事象：耐震
質問	<p>(3. 14. 49, 50 頁)</p> <p>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）を提示すること。</p>	
回答	<p>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 に示します。</p> <p>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 に示します。</p> <p>なお、本評価については、別紙のとおり、工認に合せた評価手法を反映し再評価を行いました。</p> <p>参考として、再評価前の制御棒被覆管の摩耗に対する応力評価および制御棒挿入性の評価結果を添付- 3、4 に示します。</p>	

## 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。

	現評価 (H27.11 補正申請)	工認に合せた評価手法反映
評価条件	燃料集合体照射後条件 (照射影響の考慮有り) Ss-1(700gal)~Ss-7	燃料集合体照射後条件 (照射影響の考慮有り) Ss-1(700gal)~Ss-7
解析モデル	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率：10%	建屋-RCS-RV-CI-FA 連成モデル FA 減衰率： <u>1%</u>
評価手法	《挿入経路機器の応答解析》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：時刻歴手法</li> <li>・制御棒クランク案内管：時刻歴手法</li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul> 《地震時挿入抗力の考慮方法》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：時刻歴手法</li> <li>・制御棒クランク案内管：時刻歴手法</li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul>	《挿入経路機器の応答解析》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：<u>スペクトルモーダル解析</u></li> <li>・制御棒クランク案内管：時刻歴手法</li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul> 《地震時挿入抗力の考慮方法》 <ul style="list-style-type: none"> <li>・制御棒駆動装置：<u>最大抗力一定</u></li> <li>・制御棒クランク案内管：<u>最大抗力一定</u></li> <li>・燃料集合体：時刻歴手法</li> </ul>

## 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バ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 $^{109}\text{Ag}$ 銀、 $^{199}\text{Au}$ インジウム、 $^{242}\text{Cm}$ カドミウムの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。

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。

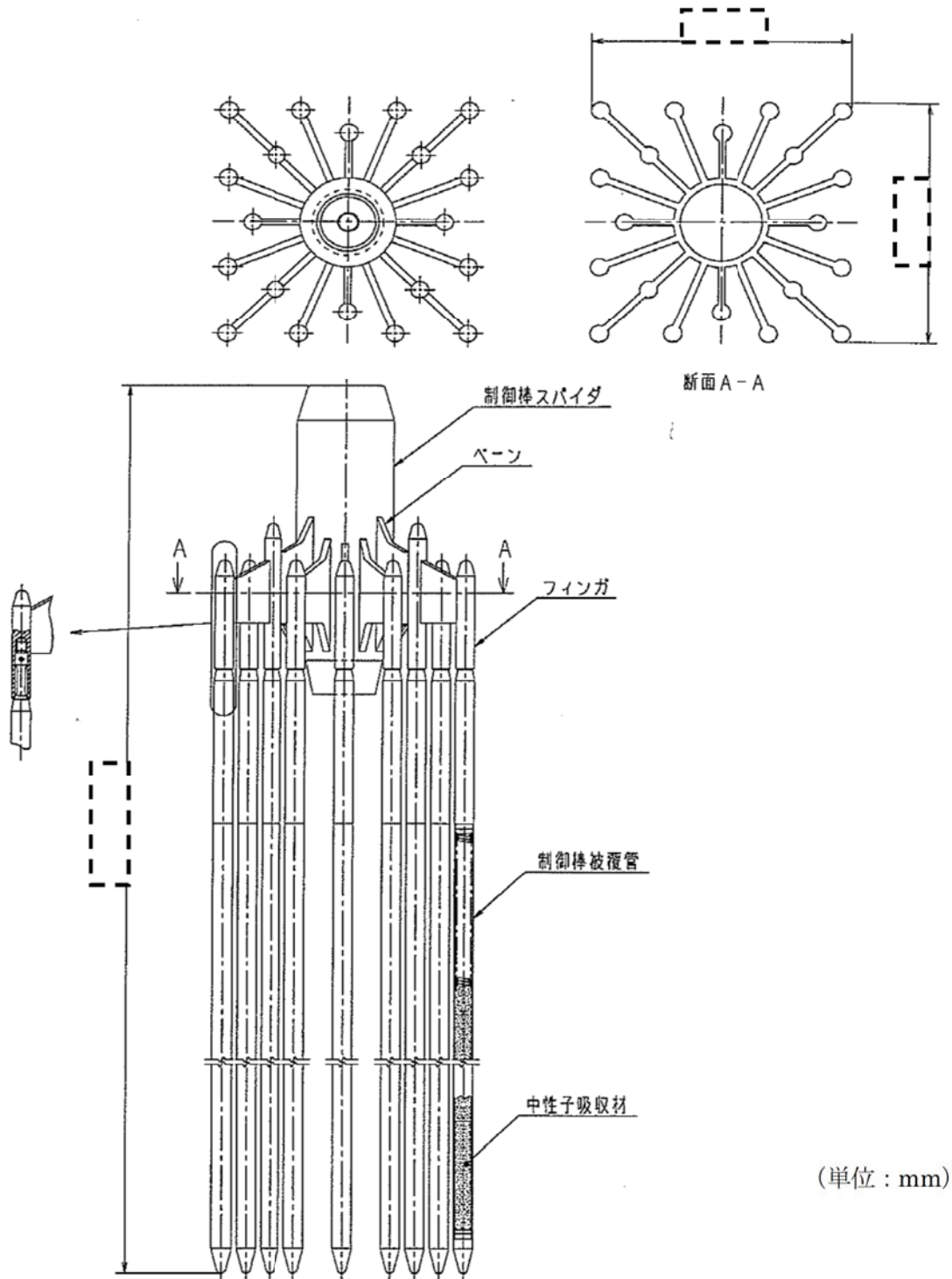


図 2-1 15×15 型制御棒クラスター構造図

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。

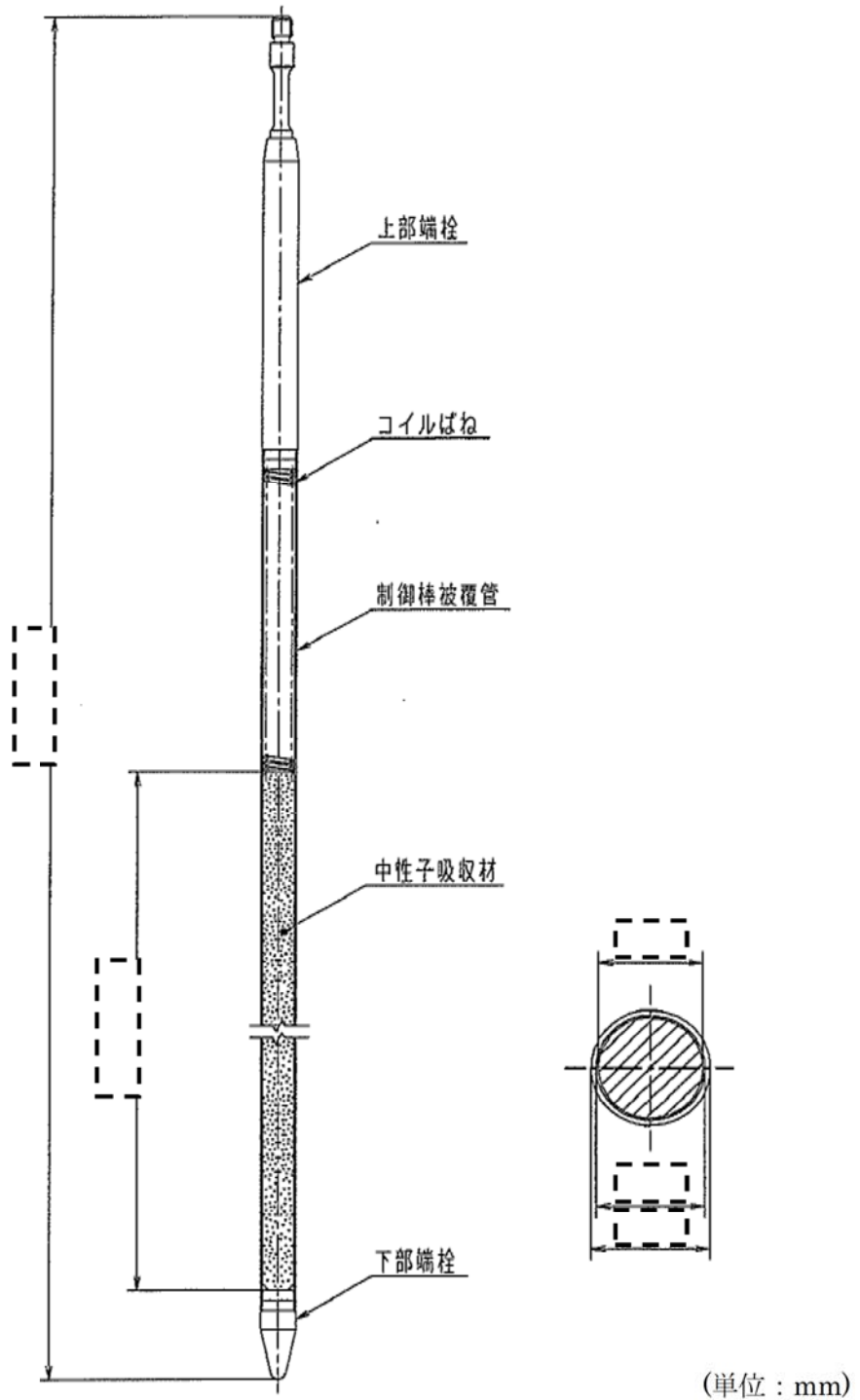


図 2-2 15×15 型制御棒構造図

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 ℓ (mm)	単位長さ質量 ρ・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

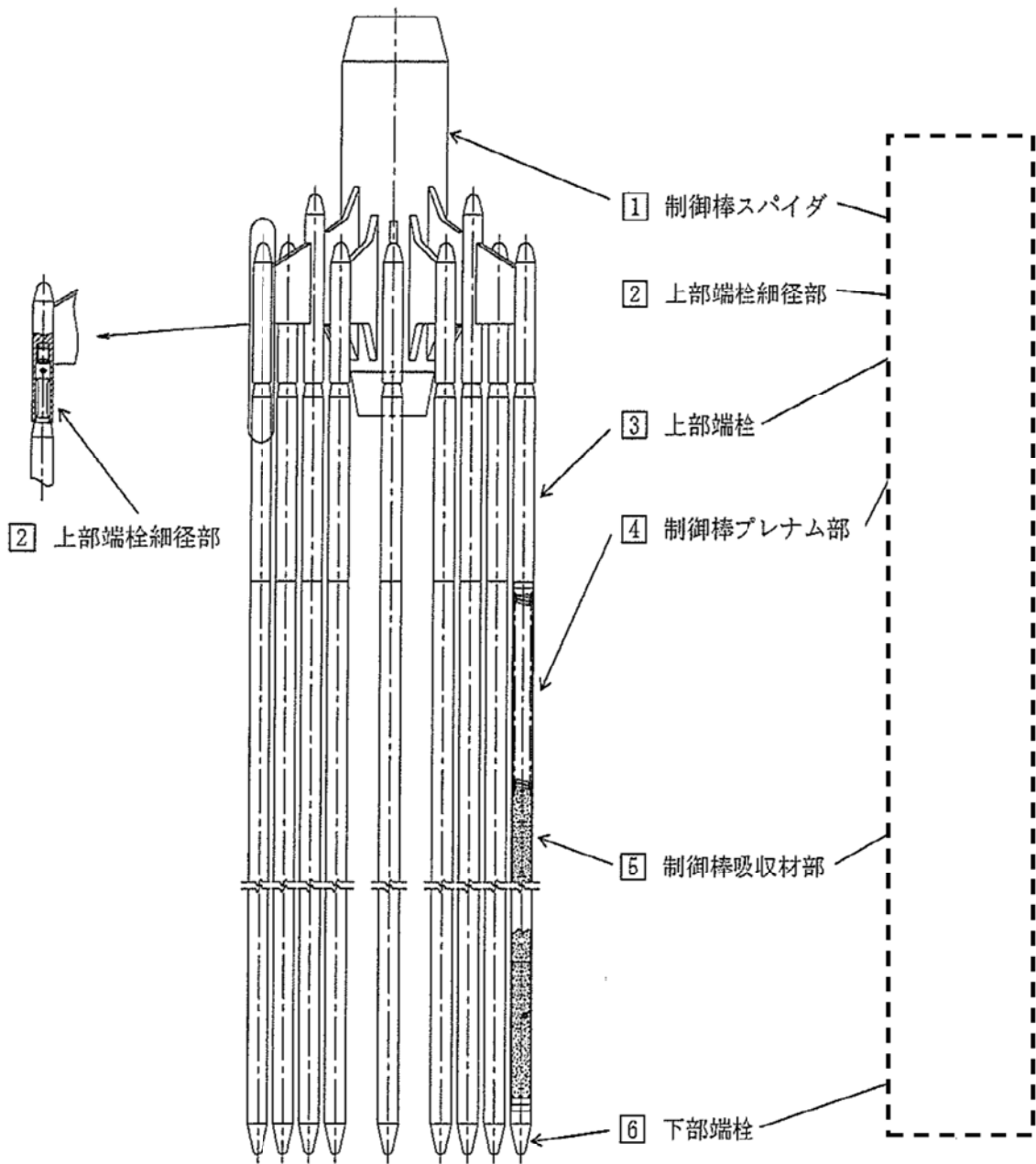
荷 重 条 件		S <sub>s</sub> 地震波
水平	全引抜き 状 態	動的加速度 (G)
	全 挿 入 状 態	燃料集合体最大変位 (mm)
	半 挿 入 状 態	動的加速度 (G)
		燃料集合体最大変位 (mm)
鉛 直	動的加速度 (G)	

※1 : S<sub>s</sub>-1 波による制御棒クラスタ案内管の加速度

※2 : S<sub>s</sub>-7 波による燃料集合体の最大変位

※3 : S<sub>s</sub>-1 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。



要素数 :  
節点数 :

20本の制御棒を1本の  
はりでモデル化する。

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。

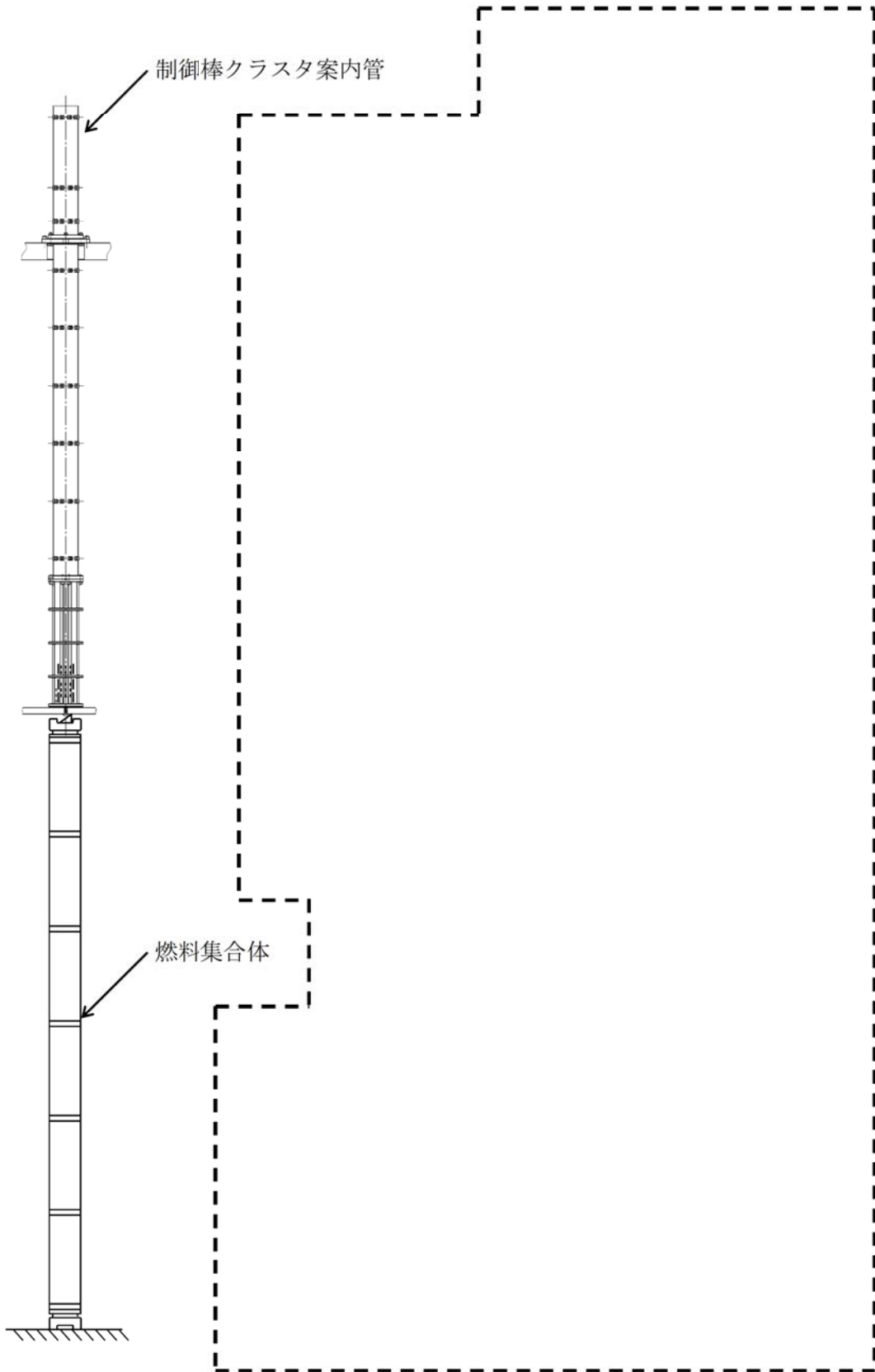


図 3-2 制御棒クラスタ応力計算における外力及び支持条件

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			
半挿入			
全挿入			

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に示す通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。

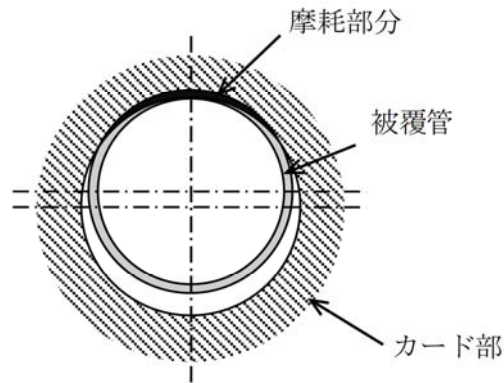


図6-1 評価で想定する被覆管の摩耗形状

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。

$$\begin{aligned} \sigma \text{ (曲げ成分)} &= \text{〓} \\ \sigma \text{ (膜成分)} &= \text{〓} \end{aligned}$$

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(燃料集合体支持格子変位)与えて解析を実施し以下のとおり曲げ応力を算出した。

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

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  $\text{〓} \text{mm}^2$

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

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。

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

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。

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

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  $\text{〓} \text{MPa}$  なので、

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

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
		0.48

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です。

## 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す。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、挿入時間を算出します。

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、挿入時間を算出します。評価の全体フローを図 2 に示します。

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

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 に示します。この最大変位に対応する地震時の制御棒挿入抗力を求め、挿入時間を算出します。

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案内管	燃料集合体制御棒案内シンプル

(2) 摩耗による抗力

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ます。また、制御棒クラスタ案内管の案内板は図 1 に示す様な摩耗を仮定しています。

これら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ます。

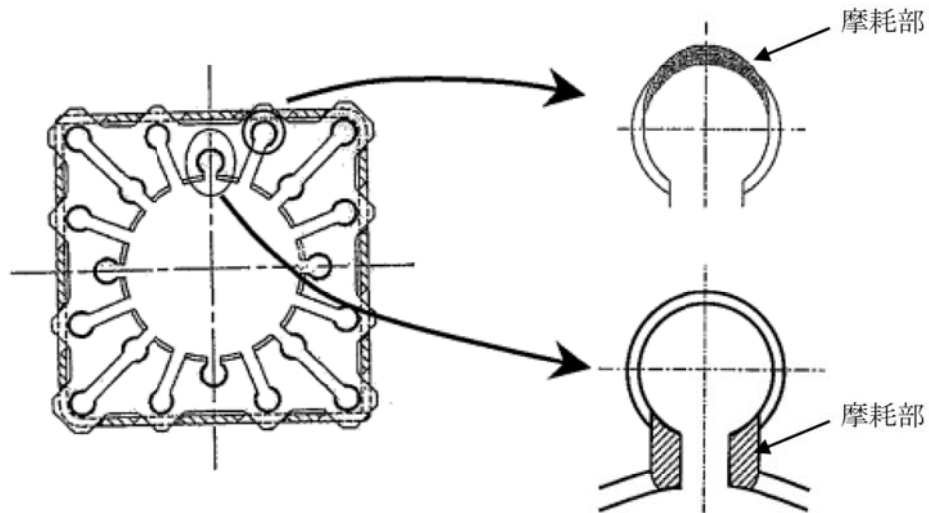


図 1 制御棒クラスタ案内管 案内板摩耗の仮定

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. 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)	□	

\*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：設置許可申請書 添付10の値

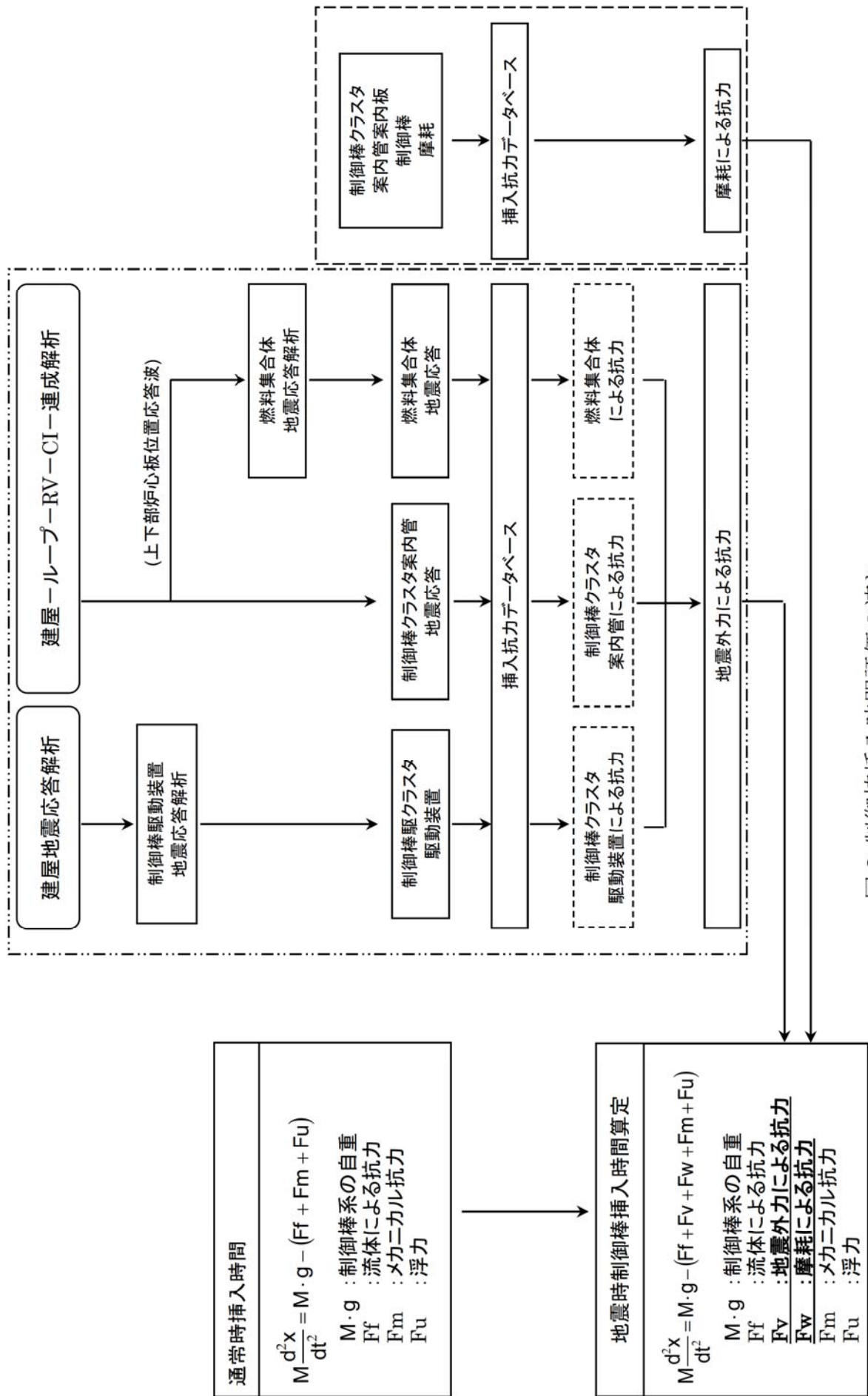


図2 制御棒挿入時間評価の流れ

## 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バ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 $^{109}\text{Ag}$ 銀、 $^{199}\text{Au}$ インジウム、 $^{208}\text{Po}$ ポロニウム、 $^{209}\text{Bi}$ ビスマuthの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。

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。

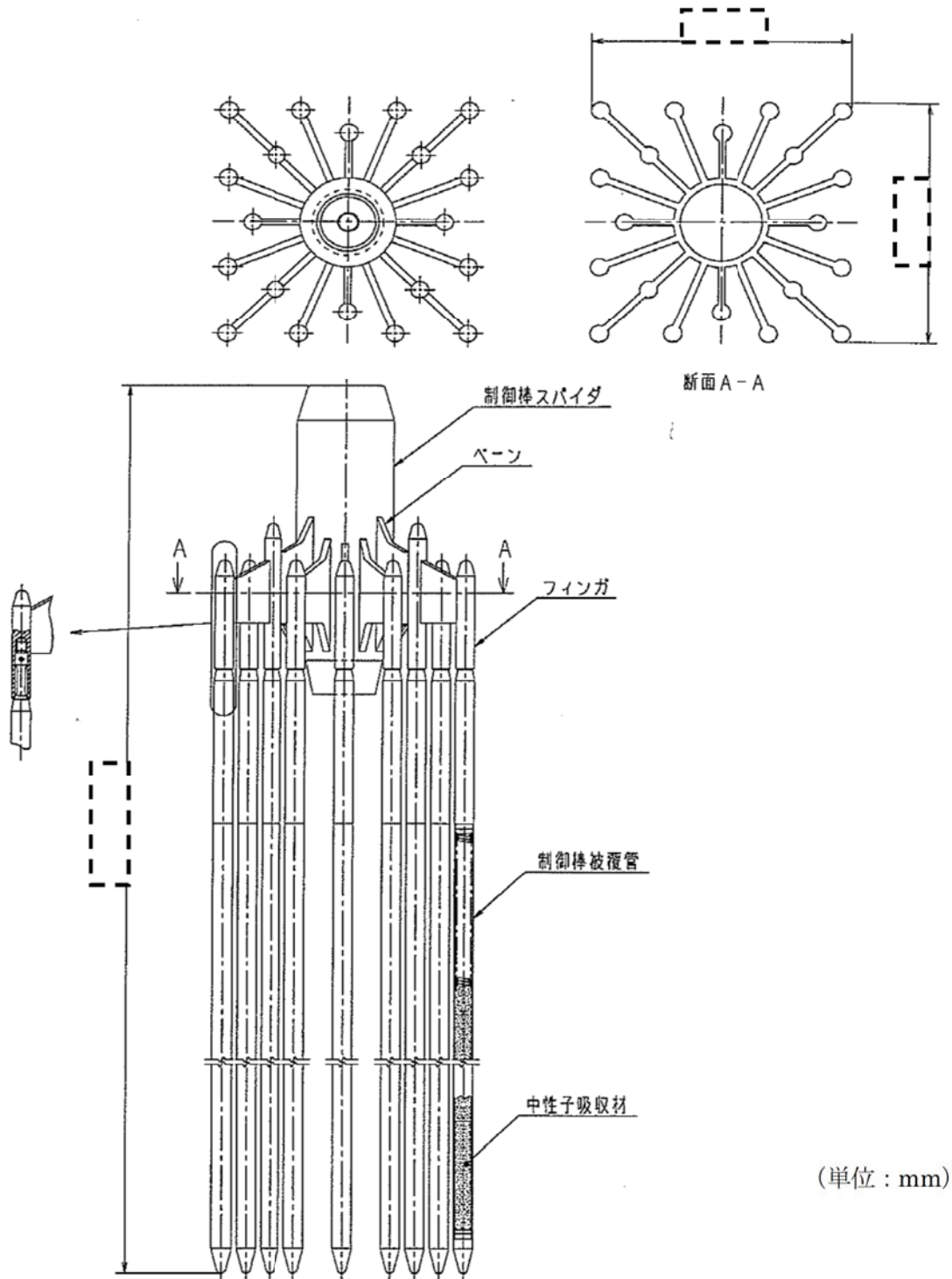


図 2-1 15×15 型制御棒クラスター構造図

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。

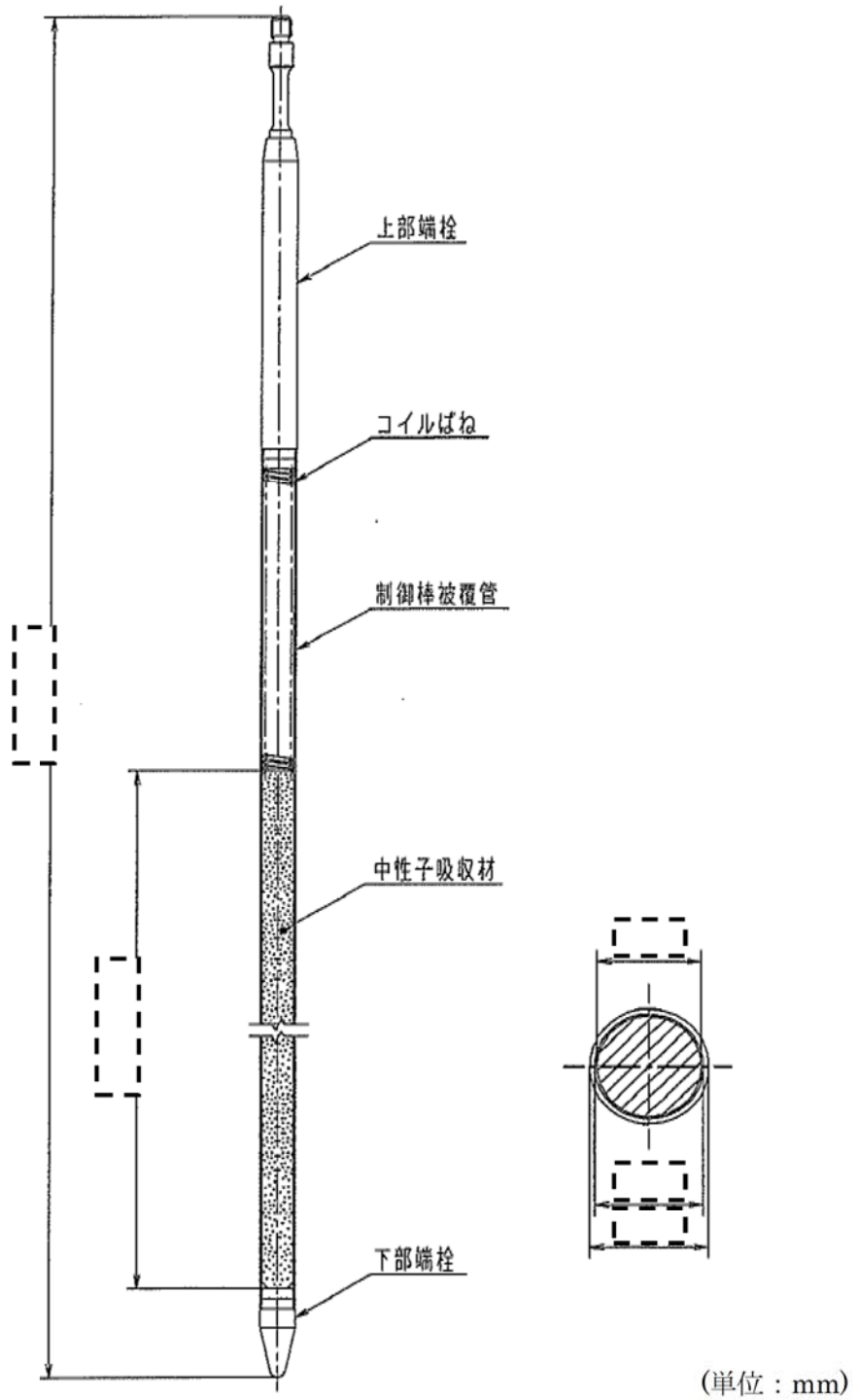


図 2-2 15×15 型制御棒構造図

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 $l$ (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

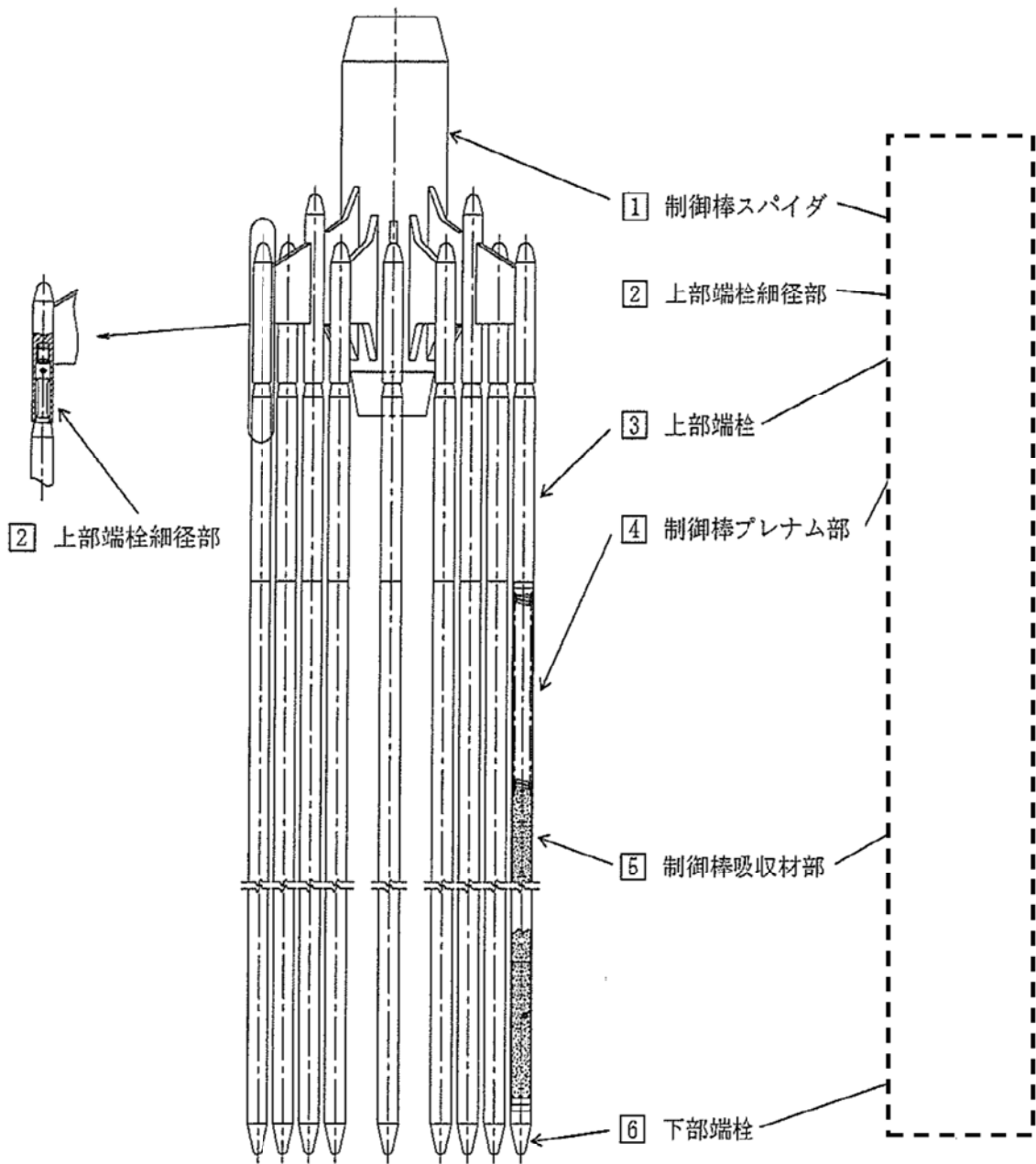
荷 重 条 件		S <sub>s</sub> 地震波
水平	全引抜き 状 態	動的加速度 (G)
	全 挿 入 状 態	燃料集合体最大変位 (mm)
	半 挿 入 状 態	動的加速度 (G)
		燃料集合体最大変位 (mm)
鉛 直	動的加速度 (G)	

※1 : S<sub>s</sub>-1 波による制御棒クラスタ案内管の加速度

※2 : S<sub>s</sub>-7 波による燃料集合体の最大変位

※3 : S<sub>s</sub>-1 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。



要素数 : [ ]  
節点数 : [ ]

20本の制御棒を1本の  
はりでモデル化する。

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。

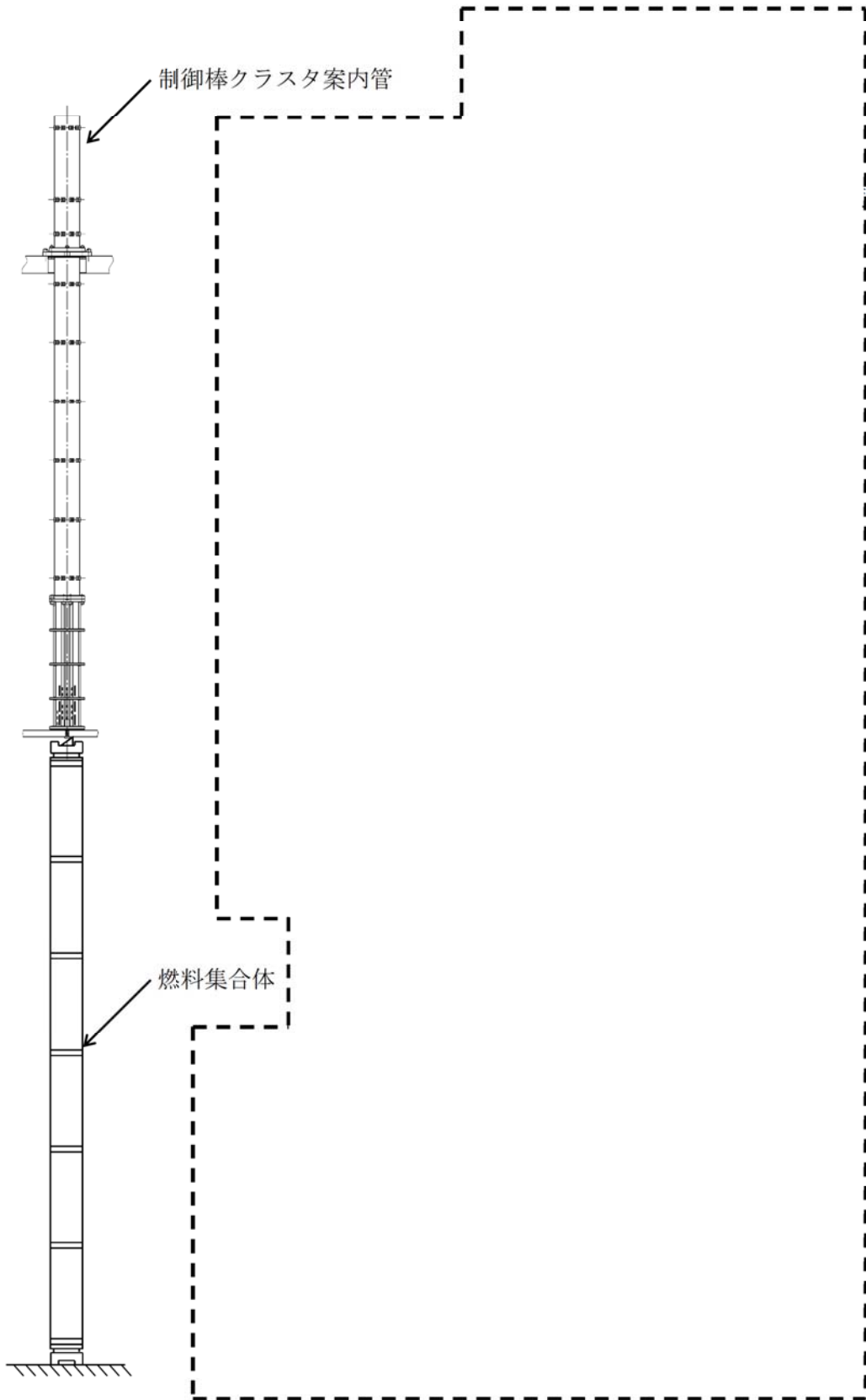


図 3-2 制御棒クラスタ応力計算における外力及び支持条件

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			
半挿入			
全挿入			

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に示す通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。

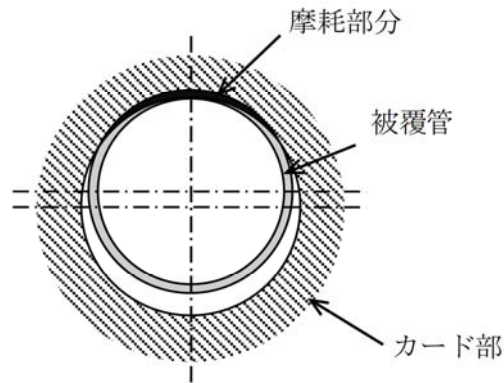


図6-1 評価で想定する被覆管の摩耗形状

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。

$$\begin{aligned} \sigma \text{ (曲げ成分)} &= \boxed{\phantom{000000}} \\ \sigma \text{ (膜成分)} &= \boxed{\phantom{000000}} \end{aligned}$$

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(燃料集合体支持格子変位)与えて解析を実施し以下のとおり曲げ応力を算出した。

$$\sigma' \text{ (曲げ応力)} = \boxed{\phantom{000000}} \text{MPa}$$

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:  $\boxed{\phantom{000000}} \text{mm}^2$

A': 貫通摩耗ありの断面積:  $\boxed{\phantom{000000}} \text{mm}^2$

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。

$$\sigma' \text{ (膜応力)} = \boxed{\phantom{000000}} \text{MPa}$$

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。

$$\sigma_x' \text{ (一次膜+一次曲げ応力)} = \boxed{\phantom{000000}} \text{MPa}$$

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  $\boxed{\phantom{000000}} \text{MPa}$  なので、

$$\sigma_x' \text{ (運転時応力)} = \boxed{\phantom{000000}} \text{MPa} \text{ となる。}$$

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。



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
		0.48

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です。

## 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す。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、挿入時間を算出します。

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、挿入時間を算出します。評価の全体フローを図 2 に示します。

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

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 に示します。この最大変位に対応する地震時の制御棒挿入抗力を求め、挿入時間を算出します。

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	制御棒クラスター案内管案内管	燃料集合体制御棒案内シムプル

(2) 摩耗による抗力

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ます。また、制御棒クラスター案内管の案内板は図 1 に示す様な摩耗を仮定しています。

これら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ます。

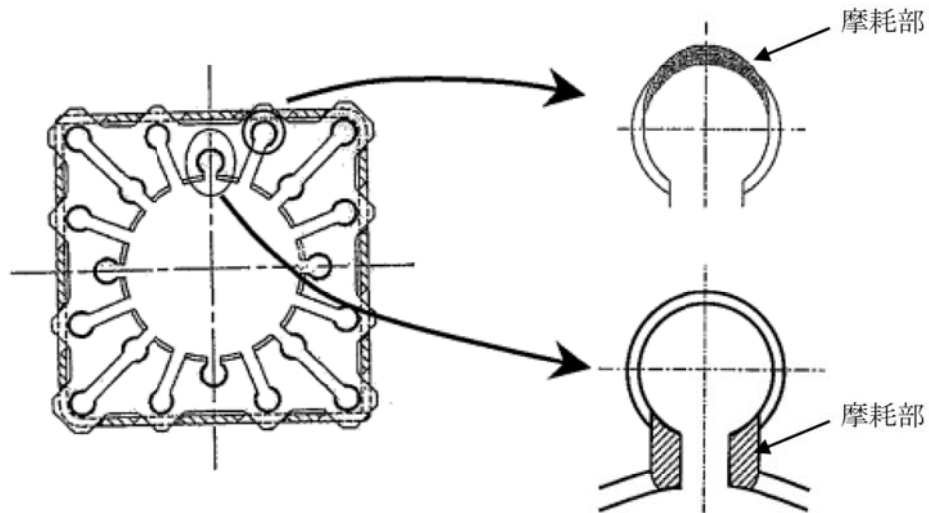


図 1 制御棒クラスター案内管 案内板摩耗の仮定

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. 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)	1.45	

\*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：設置許可申請書 添付10の値

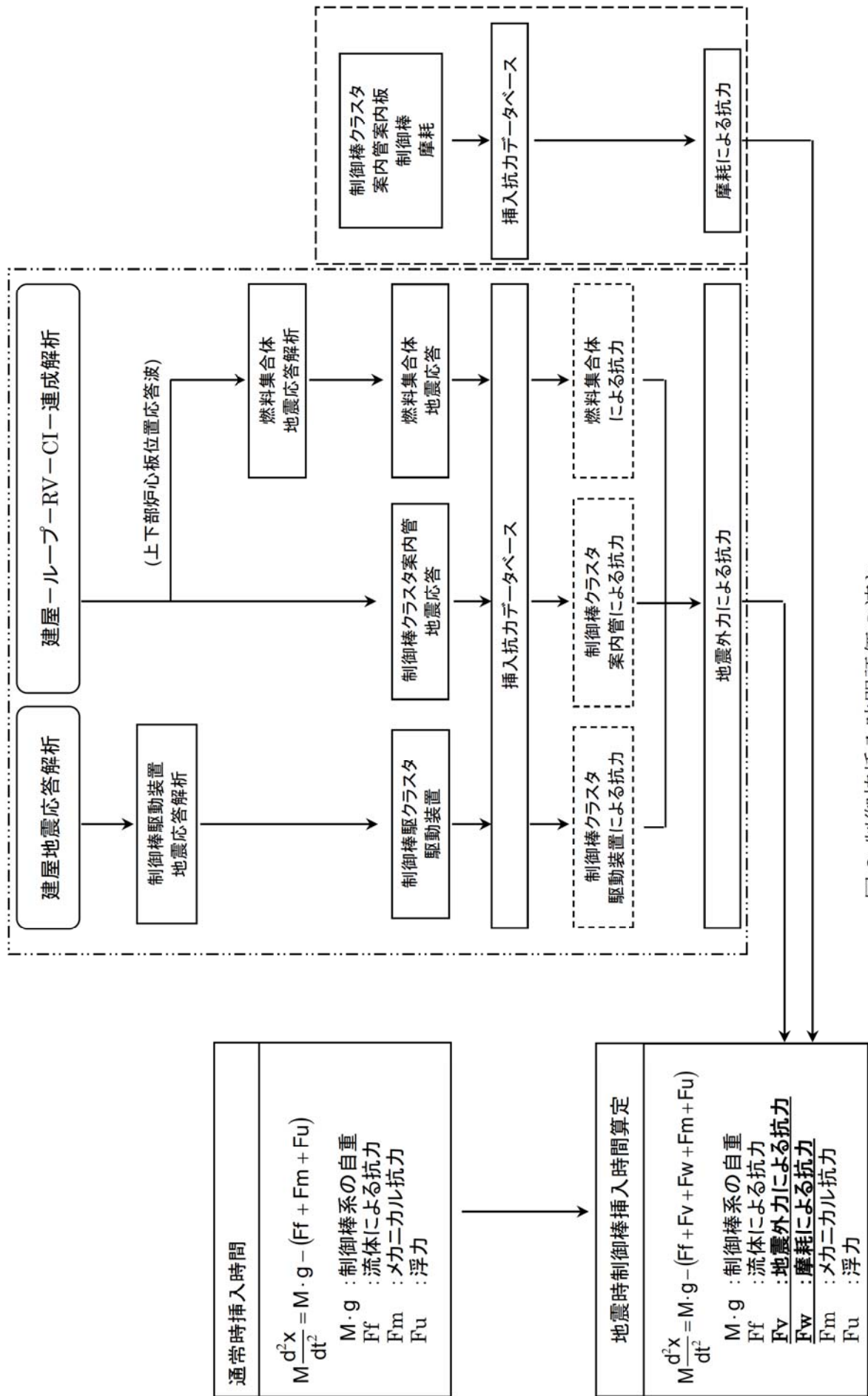


図2 制御棒挿入時間評価の流れ