

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-45_改5
提出年月日	2021年11月2日

補足-600-40-45 炉心シュラウド支持ロッドの構造及び耐震評価に関する補足説明資料

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-2-3-3-2-4 炉心シュラウド支持ロッドの耐震性についての計算書」及び添付書類「VI-3-別添-6-3 炉心シュラウド支持ロッドの強度計算書」において耐震評価及び強度評価の対象としている、炉心シュラウド支持タイロッドの各部材の機能及び構造と、耐震解析モデルの考え方について説明するものである。

また、解析モデルにおけるばね定数等の考え方については以下の参照図書による。

参照図書

- (1) VI-2-3-2 炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書
- (2) 補足-600-8-2 建屋－機器連成解析における解析モデルの設定に係る補足説明資料
- (3) 補足-600-2 耐震評価対象の網羅性，既工認との手法の相違点の整理について

2. 炉心シュラウド支持ロッドの各部材の機能について

炉心シュラウド支持ロッドは、機能として以下の2つに大別される。

(1) 炉心シュラウド鉛直方向拘束

炉心シュラウド上部胴とシュラウドサポートを連結し、鉛直方向の荷重に対し炉心シュラウドを拘束（浮上りを防止）する。

本機能の構成部材は上部サポート，上部タイロッド，下部スタビライザ，下部タイロッド及びトグルである。

(2) 炉心シュラウド水平方向拘束

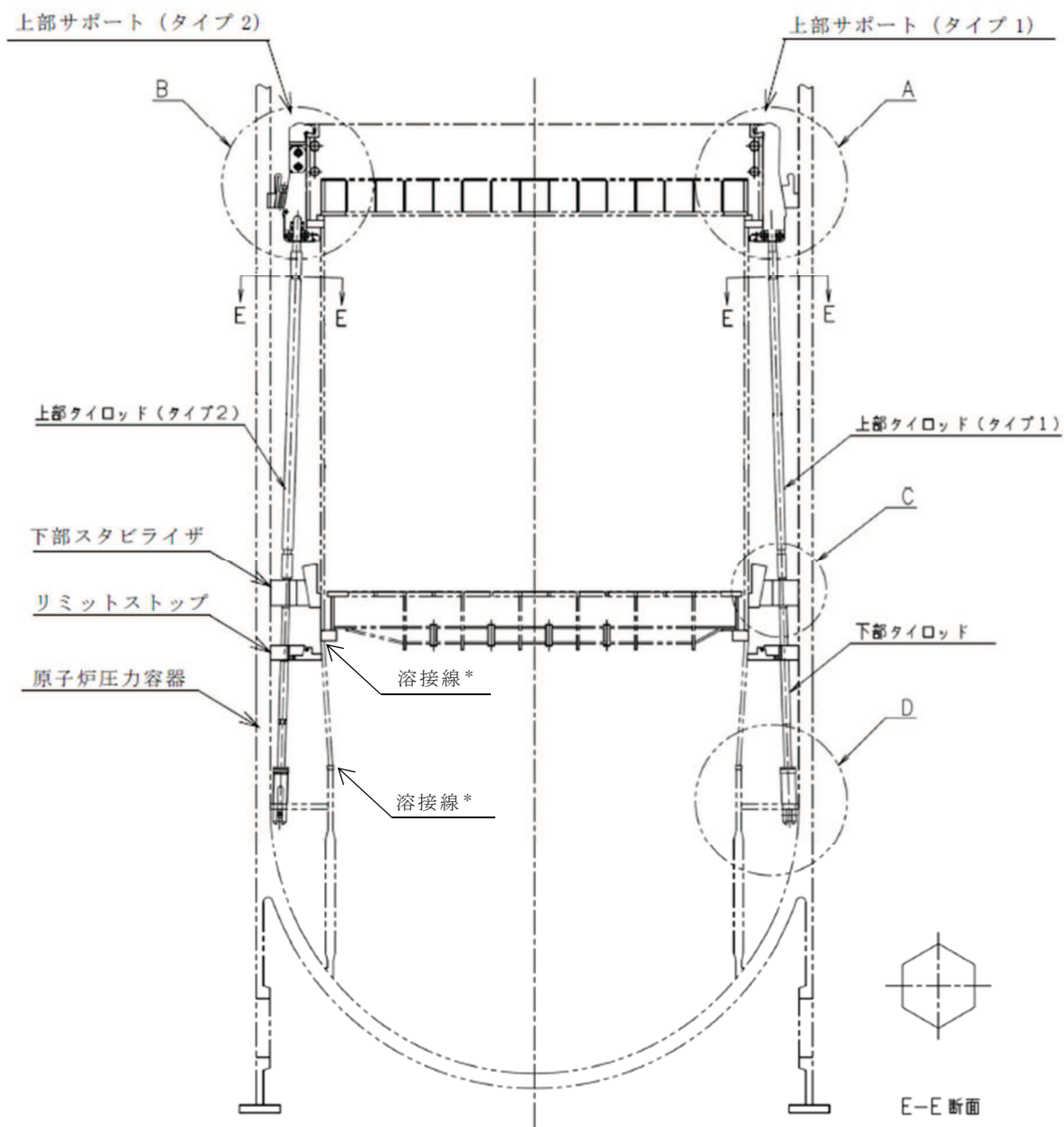
炉心シュラウドと原子炉圧力容器の間に設置し、水平方向の荷重に対し炉心シュラウドを拘束（横ずれを防止）する。

本機能の構成部材は上部サポート，上部ウェッジ，下部スタビライザ及び下部ウェッジである。

炉心シュラウド支持ロッドの各部材は本機能を満足するように設計されており，その機能を表1に示す。また，構造説明図を図1に示す。

表 1 炉心シュラウド支持ロッドの各 부품の機能

部品名称	機能
上部サポート	<p>炉心シュラウド上部リングに設けられた溝に設置され、炉心シュラウド溶接部の全周破断時の浮上り荷重及び地震発生時の炉心シュラウドの倒れ荷重を上部タイロッドに伝達する。</p> <p>また、上部ウェッジと組み合わせることで、炉心シュラウド上部胴に接触し、水平荷重を上部ウェッジを介して原子炉圧力容器に伝達する。</p> <p>なお、上部サポートの炉心シュラウド上部胴との取り合い部には凸部が設けられ、水平荷重を上部ウェッジの設置高さで炉心シュラウド上部胴に伝達できるようにしている。</p>
上部ウェッジ	<p>上部サポートと組み合わせることで、原子炉圧力容器に接触し、水平荷重を原子炉圧力容器に伝達する。</p> <p>また、炉心シュラウド全周破断時における炉心シュラウドの水平方向を支持する。</p>
上部タイロッド	<p>炉心シュラウドの浮上り荷重及び地震発生時の炉心シュラウドの倒れ荷重を下部スタビライザに伝達する。</p>
下部スタビライザ	<p>下部スタビライザと下部ウェッジを組み合わせることで、シュラウド中間胴と原子炉圧力容器に接触し、炉心支持板及び炉心シュラウド中間胴の水平荷重を原子炉圧力容器に伝達するとともに、炉心シュラウドの浮上り荷重及び地震発生時の炉心シュラウドの倒れ荷重を下部タイロッドに伝達する。</p>
下部ウェッジ	<p>また、下部スタビライザ及び下部ウェッジを設置することにより、上部タイロッドと下部タイロッドの振動を抑制するとともに、炉心シュラウド全周破断時における炉心シュラウドの水平方向を支持する。</p>
リミットストップ	<p>炉心シュラウド全周破断時におけるシュラウド下部胴の位置ずれを防止する。なお、炉心シュラウド上部胴の位置ずれは上部サポート及び上部ウェッジにより防止し、炉心シュラウド中間胴の位置ずれは上部を上部サポートの下端にあるブロックにより、下部を下部スタビライザ及び下部ウェッジにより防止する。</p>
下部タイロッド	<p>炉心シュラウドの浮上り荷重及び地震発生時の炉心シュラウドの倒れ荷重をトグルに伝達する。</p>
トグル	<p>トグルバーによりシュラウドサポートプレートに設置され、炉心シュラウドの浮上り荷重及び地震発生時の炉心シュラウドの倒れ荷重をシュラウドサポートプレートに伝達する。</p>



注記*：リミットストップの機能において全周破断時を想定する溶接線である。

図 1(1) 炉心シュラウド支持ロッドの構造

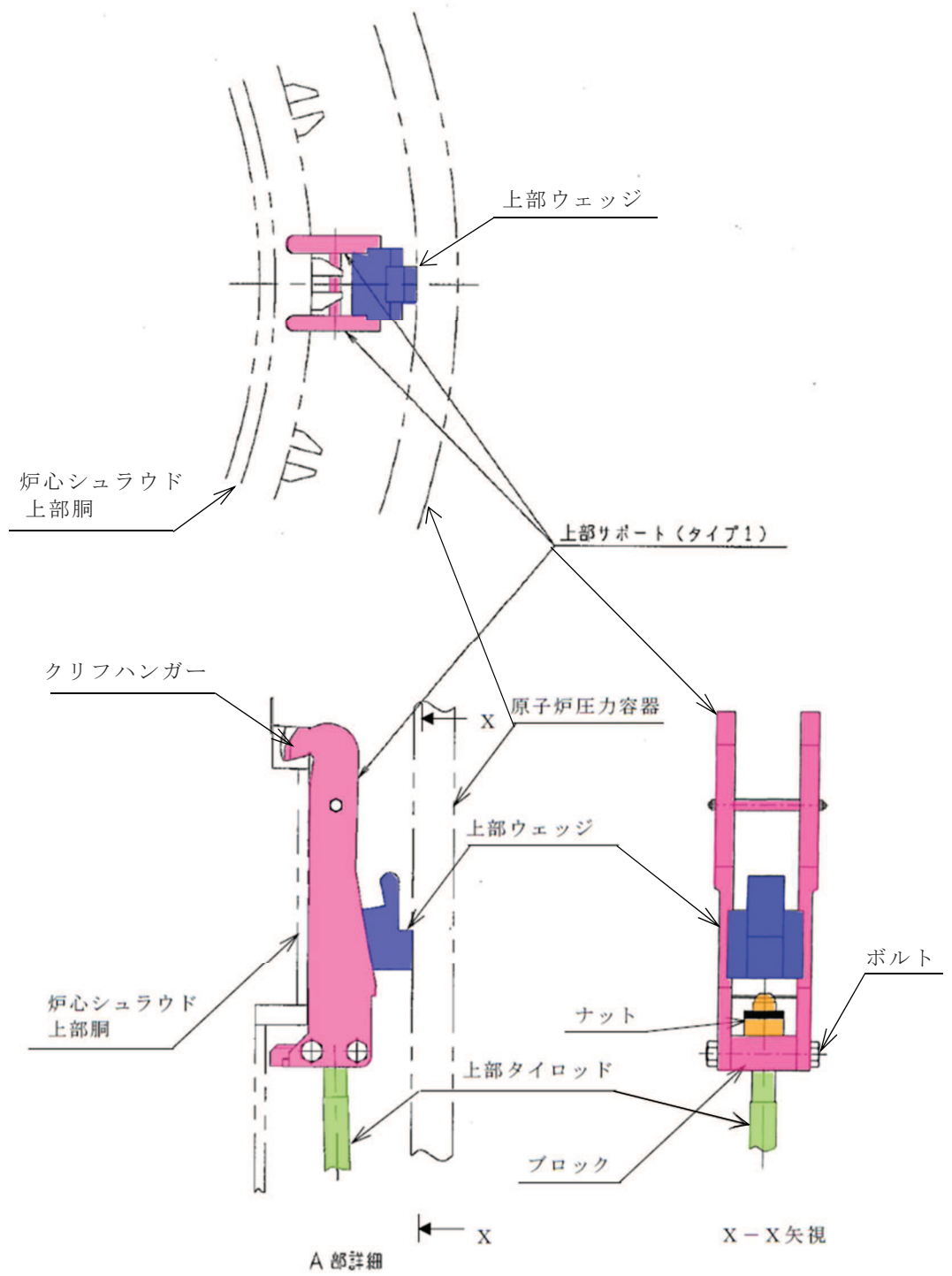


図 1(2) 炉心シュラウド支持ロッドの構造

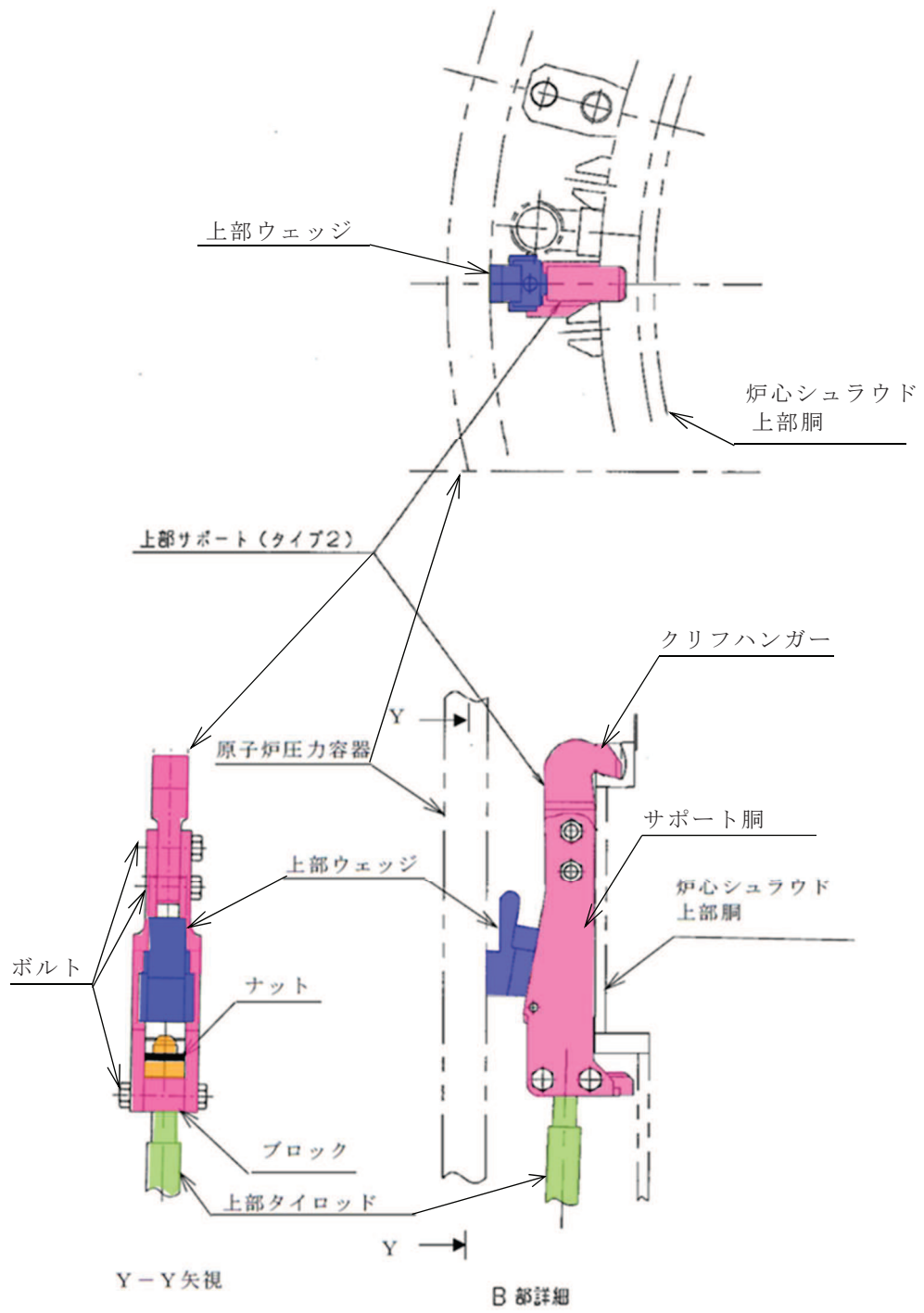
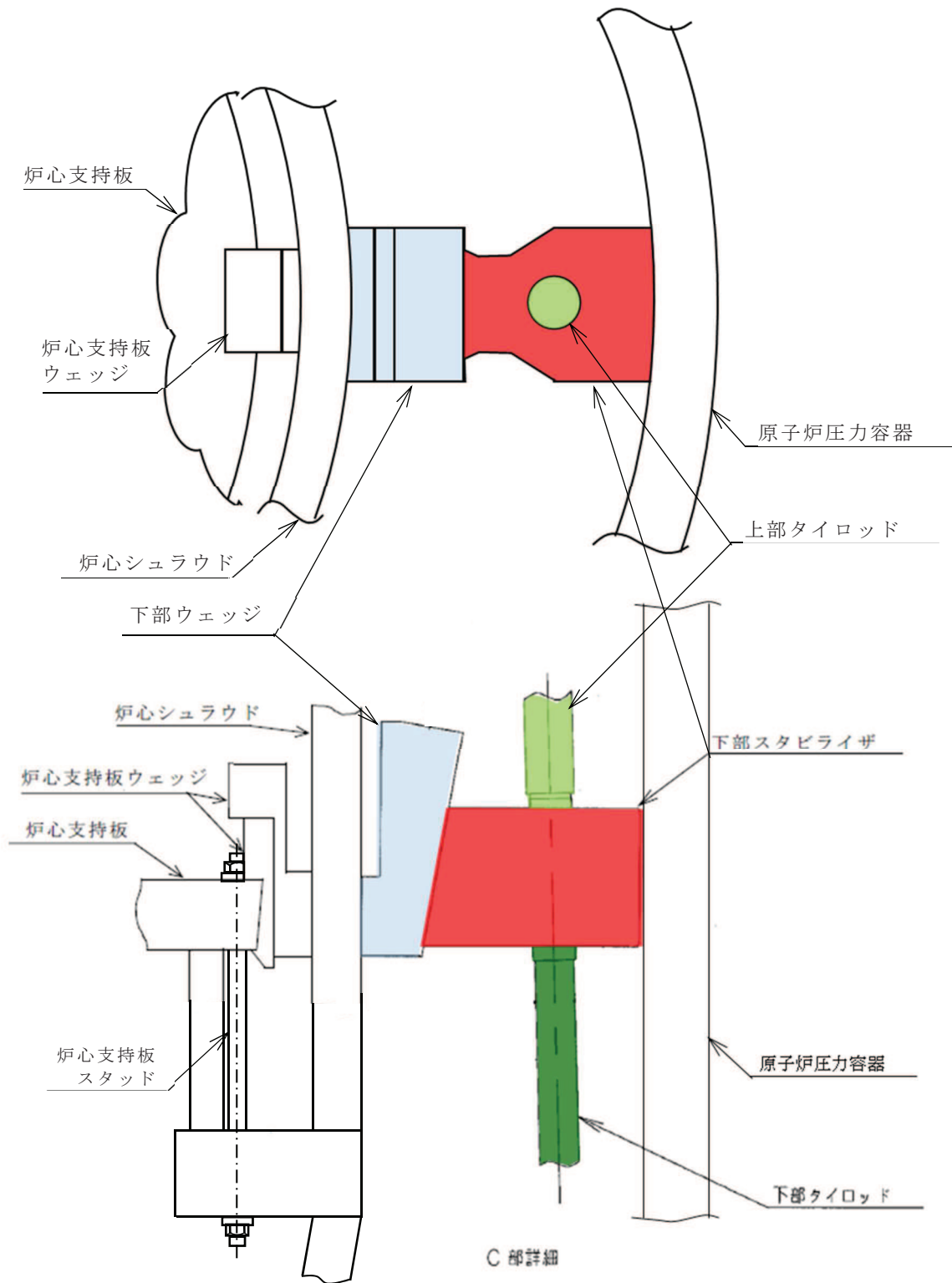
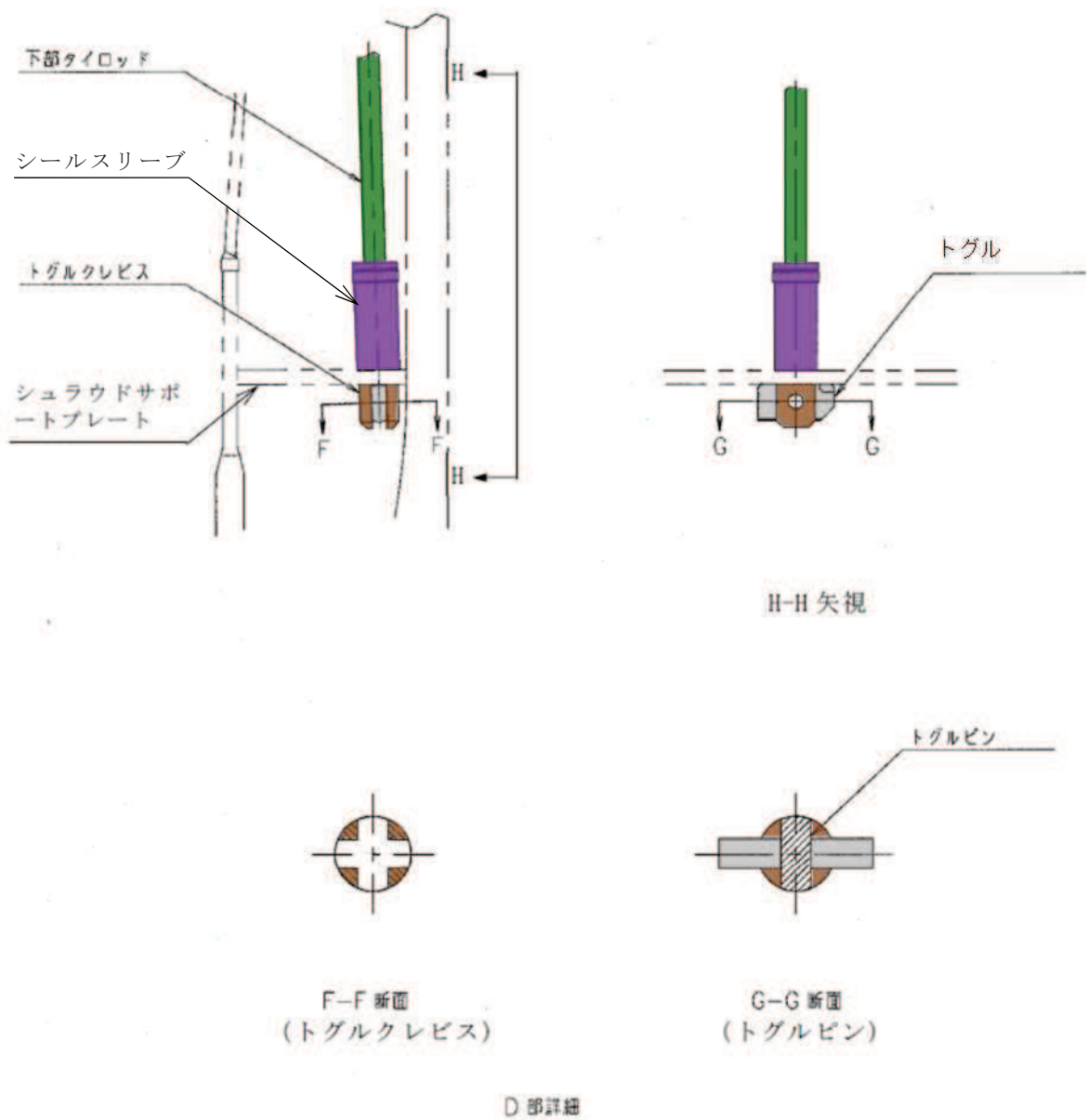


図 1(3) 炉心シュラウド支持ロッドの構造



注記*：炉心支持板ウェッジは炉心シュラウド支持ロッド据付時に併せて設置している。炉心支持板は従来炉心支持板スタッドの締付力による摩擦力で水平方向荷重を下部リングに伝達するが、炉心シュラウド溶接部全周破断を想定して、炉心支持板、炉心支持板ウェッジ、炉心シュラウド、下部スタビライザ及び原子炉压力容器の順の荷重伝達パスを形成している。

図 1(4) 炉心シュラウド支持ロッドの構造



注：斜線部はトグルクレビス及びトグルピンの評価対象部を示す。

図 1(5) 炉心シュラウド支持ロッドの構造

3. 解析モデルの考え方について

炉心シュラウド支持ロッドの耐震評価において、水平方向地震荷重（せん断力及びモーメント）は炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルにより求める。炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルの考え方を表 2 に示す。また、構造及び解析モデルの比較を図 2 に示す。

建屋-大型機器連成解析モデル*のうち、水平方向地震応答解析モデルでは、炉心シュラウドと原子炉圧力容器の相互作用の影響を考慮するため、炉心シュラウド支持ロッド全体を回転ばねとしてモデル化し、上部サポート及び下部スタビライザは炉心シュラウドと原子炉圧力容器間の水平荷重を伝達する水平ばねとしてモデル化している。また、鉛直方向地震応答解析モデルでは、炉心シュラウド支持ロッド全体を軸方向のばね要素としてモデル化している。

炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルにおいては、上部タイロッド、下部タイロッドの振動により発生する応答荷重を求めるため、剛性の高い上部サポート及び上部ウェッジについては炉心シュラウドと一体とみなしている。

炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルは上部タイロッド及び下部タイロッドの軸直交方向への入力により生じるせん断力とモーメントを算出するためのものであり、炉心シュラウド支持ロッド実機長の 1 次元多質点系モデルとし、軸直交方向の固有周期を実機に合わせている。炉心シュラウド支持ロッドは鉛直方向に対して の傾きをもって取り付けられているが、図 3 に示すように、水平方向の地震動及び鉛直方向の地震動の上部タイロッド及び下部タイロッドの軸直交方向成分は水平方向の地震動による成分が支配的となり、鉛直方向の地震動による成分は小さいことから、鉛直方向に対する傾きを考慮しない解析モデルとし、水平方向の地震動をそのまま入力している。

*注記：添付書類「VI-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」における炉内構造物系地震応答解析モデルを示す。

4. 荷重の組合せ及び応力評価

初期締付力及び炉心シュラウドと原子炉圧力容器との相対変位による応力は、自己拘束により生じる応力であり、このような応力は二次応力に分類されることから、添付書類「VI-2-3-3-2-1 炉心支持構造物の応力解析の方針」4.4 節に示すように荷重として考慮していない。

5. 応力評価点の選定の考え方

評価すべき応力評価点は、厳しい荷重作用点、断面性状の比較から応力が高くなる部位、さらに応力と許容値との関係から厳しくなる部位の中から選定している。例えば上

部サポートのボルト部には高い純せん断応力が発生するものの、同じ材質であり許容値が同じになるトグルピンは、上部サポートのボルト部よりも断面性状が小さく応力が高くなることから、トグルピンを応力評価の代表点としている。

表 3 に各部の応力評価点の選定の考え方を示す。

表2 炉心シュラウド支持ロッドのモデル化の考え方

部品名称	モデル化方法	モデル化の考え方
上部サポート	モデル範囲外	上部サポート及び上部ウェッジは、上部タイロッドに比べて剛性が高いため、炉心シュラウドと一体とみなしている。
上部ウェッジ		
上部タイロッド	はり要素としてモデル化 (質点：□)	上部タイロッドは、棒状構造物であるため、はりとしてモデル化する。 上端は、上部サポート下端のブロックにナットで締結されていることから、ナット下端をピン支持としている。
下部スタビライザ	ばね要素としてモデル化	下部スタビライザ及び下部ウェッジは、上部タイロッド及び下部タイロッドの振動を抑制する構造物であるため、水平ばねとしてモデル化する。 水平ばねは、補足-600-8-2「建屋-機器連成解析における解析モデルの設定に係る補足説明資料」に則って設定している。 また、上部タイロッド、下部タイロッドと機械的に締結されているが、断面性状は上部タイロッド、下部タイロッドで代表してモデル化している。
下部ウェッジ		
リミットストップ	質量のみを質点□へ考慮	リミットストップは、原子炉圧力容器及び炉心シュラウドに接触しておらず、下部タイロッドに取り付けられているため、質量のみを質点□に考慮してモデル化している。
下部タイロッド	はり要素としてモデル化 (質点：□)	下部タイロッドは、棒状構造物であるため、はりとしてモデル化する。 下端は、シュラウドサポートプレートの下面に接触するようにトグルを設置していることから、トグルバー上面をピン支持としている。
トグル	質量のみを質点□へ考慮	トグルは、下部タイロッドに機械的に締結されているが、断面性状は下部タイロッドで代表しているため、質量のみを質点□に考慮してモデル化している。

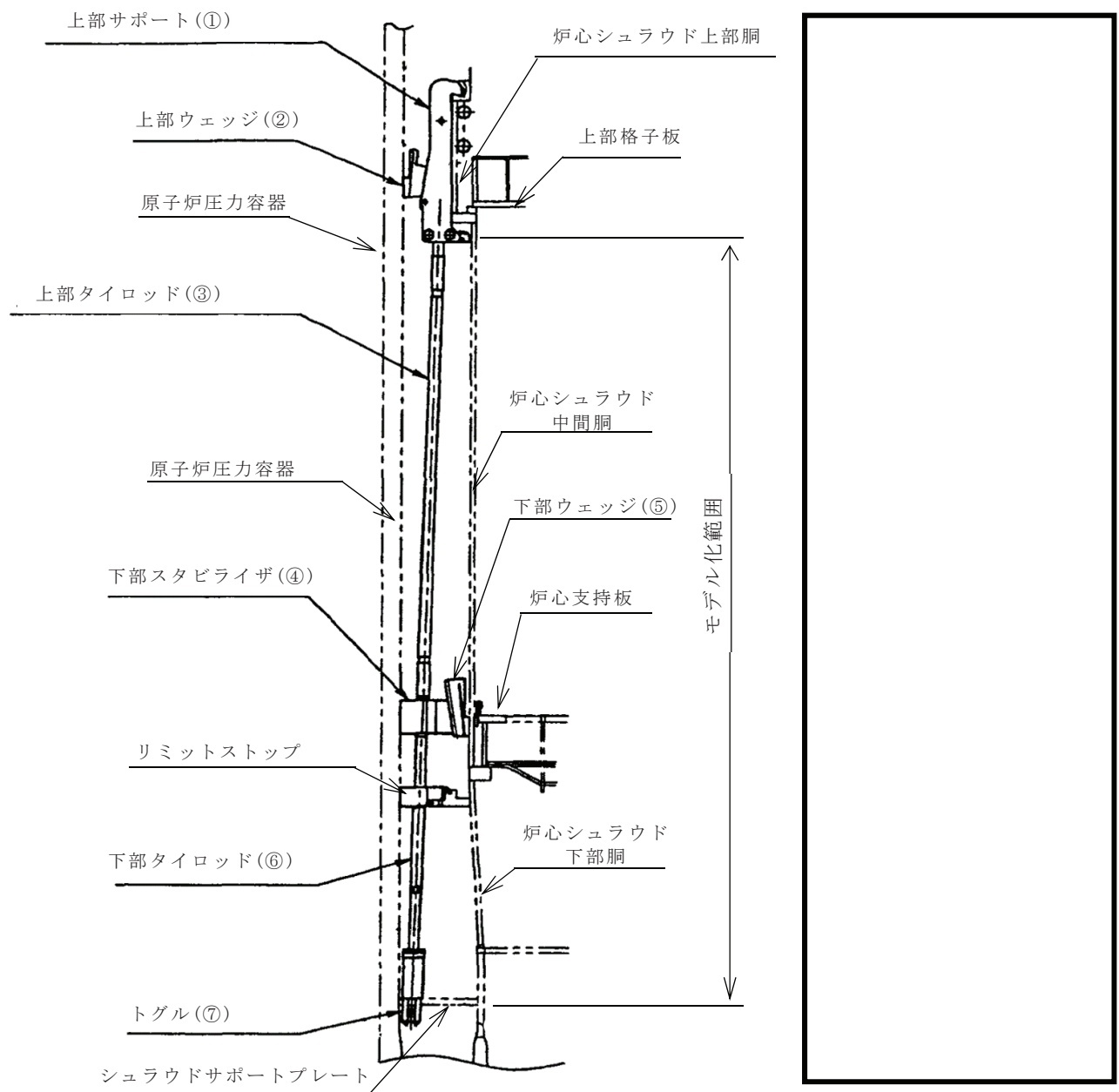


図2 炉心シュラウド支持ロッドの構造及び解析モデルの比較

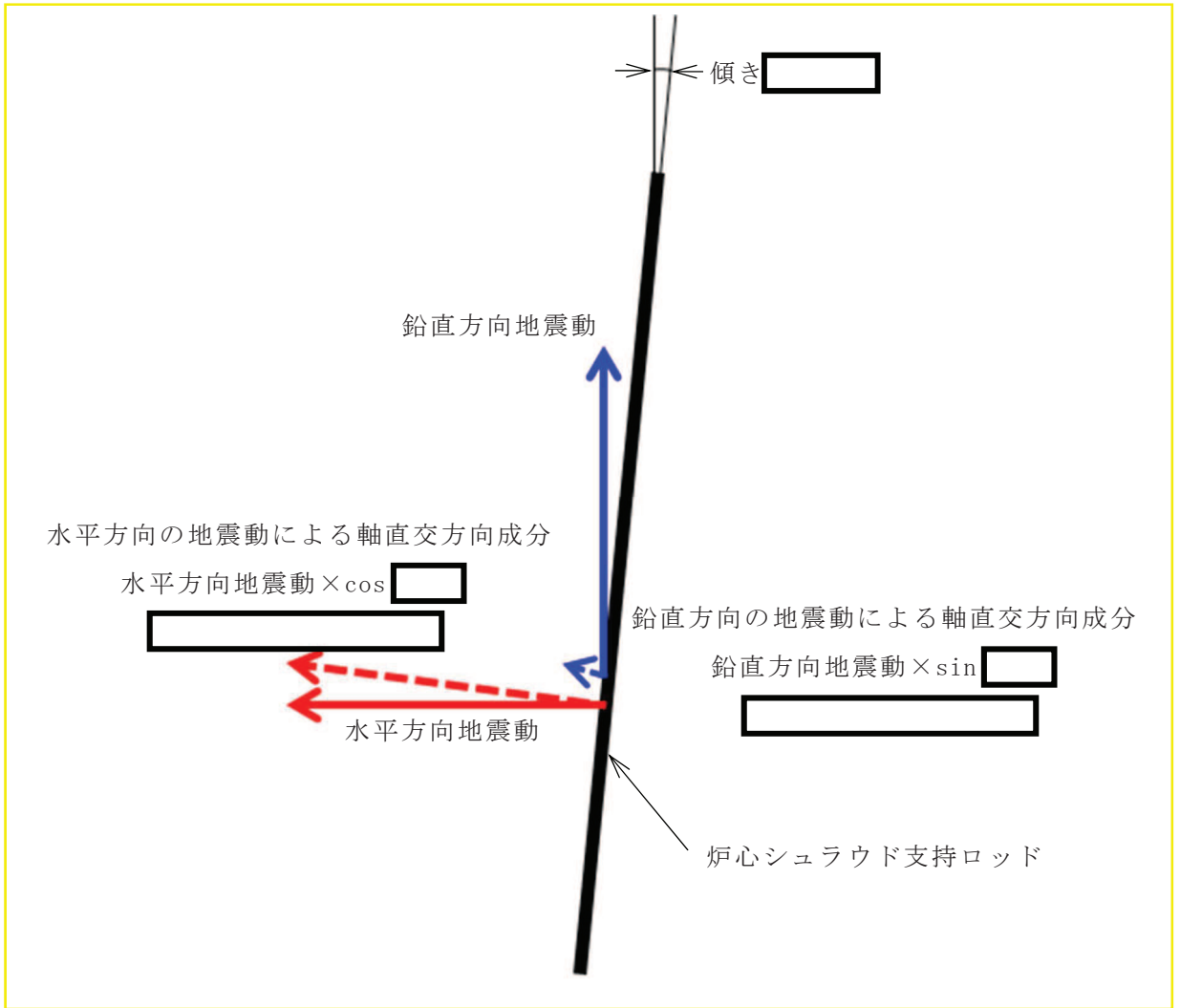


図3 炉心シュラウド支持ロッドの軸直交方向成分の概要

表 3 応力評価点の選定の考え方(1/2)

部品名称	構成部材	選定の考え方
上部サポート (タイプ 1)	クリフハンガー	<p>炉心シュラウド上部リングへの設置部に高い応力が発生するため応力評価点に選定している。</p> <p>接触する炉心シュラウド上部胴の許容応力 (Ⅲ_AS:157MPa, IV_AS:210MPa)の方が上部サポートの許容応力 (Ⅲ_AS:870MPa, IV_AS:1160MPa) よりも低くなることから、炉心シュラウド上部胴側を支圧応力評価の代表点としている。</p>
	ブロック	<p>ブロックのせん断断面積 ([] mm²)は同じ荷重が作用するトグルピンのせん断断面積 ([] mm²)よりも大きく、応力が小さくなることからトグルピン側を純せん断応力評価の代表点としている。</p>
	ボルト	<p>ボルトのせん断断面積 ([] mm²)は同じ荷重が作用するトグルピンのせん断断面積 ([] mm²)よりも大きく、応力が小さくなることからトグルピン側を純せん断応力評価の代表点としている。</p>
上部サポート (タイプ 2)	クリフハンガー	<p>炉心シュラウド上部リングへの設置部に高い応力が発生するため応力評価点に選定している。</p> <p>接触する炉心シュラウド上部胴の許容応力 (Ⅲ_AS:157MPa, IV_AS:210MPa)の方が上部サポートの許容応力 (Ⅲ_AS:870MPa, IV_AS:1160MPa) よりも低くなることから、炉心シュラウド上部胴側を支圧応力評価の代表点としている。</p>
	サポート胴	<p>サポート胴のせん断断面積 ([] mm²)は同じ荷重が作用するトグルピンのせん断断面積 ([] mm²)よりも大きく、応力が小さくなることからトグルピン側を純せん断応力評価の代表点としている。</p>
	ブロック	<p>ブロックのせん断断面積 ([] mm²)は同じ荷重が作用するトグルピンのせん断断面積 ([] mm²)よりも大きく、応力が小さくなることからトグルピン側を純せん断応力評価の代表点としている。</p>
	ボルト	<p>ボルトのせん断断面積 ([] mm²)は同じ荷重が作用するトグルピンのせん断断面積 ([] mm²)よりも大きく、応力が小さくなることからトグルピン側を純せん断応力評価の代表点としている。</p>

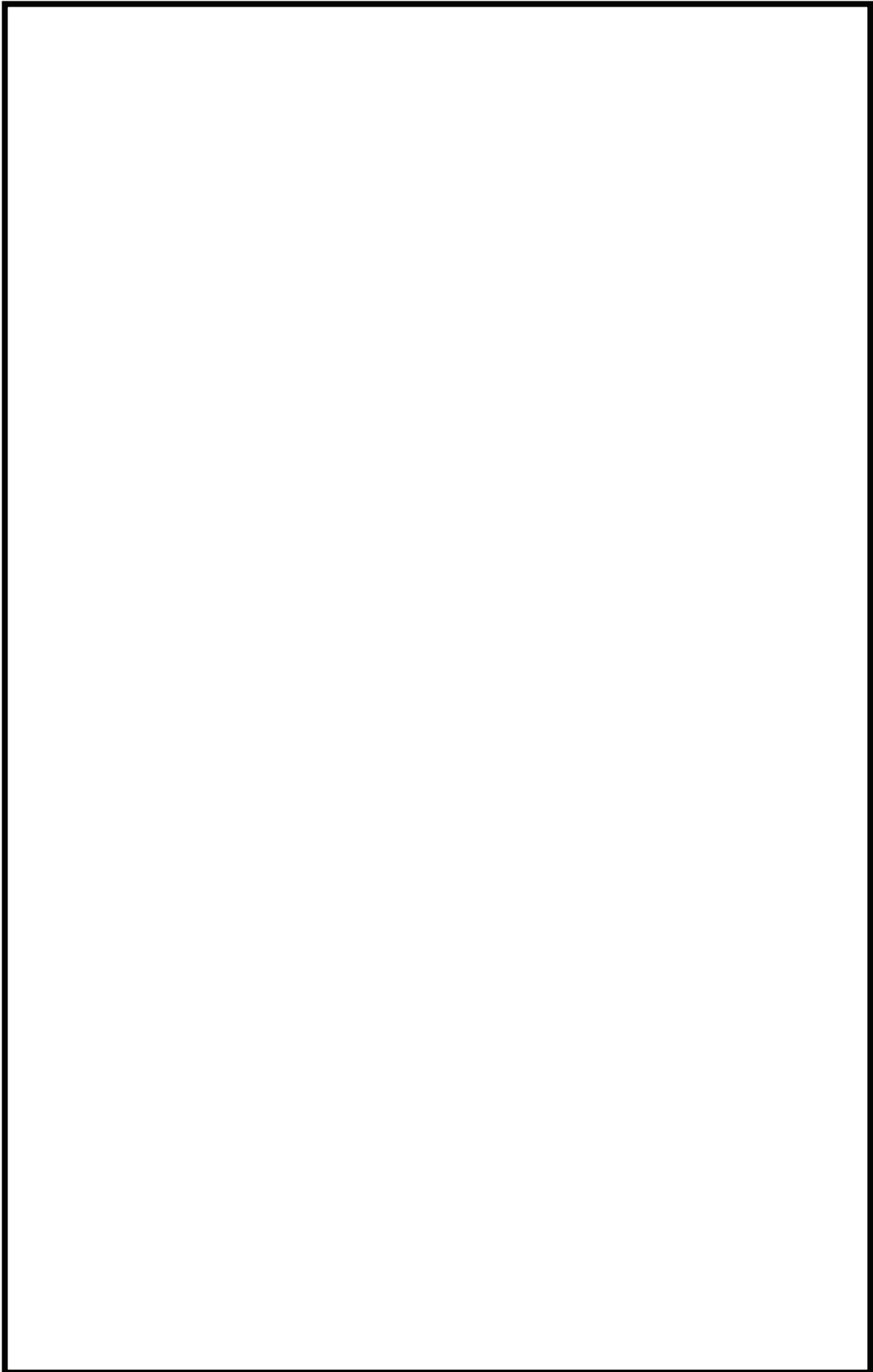
表 3 応力評価点の選定の考え方(2/2)

部品名称	構成部材	選定の考え方
上部ウェッジ	—	水平荷重の伝達経路であるが、接触する原子炉圧力容器の胴板側の許容応力（Ⅲ _A S:303MPa, IV _A S:481MPa）の方が上部ウェッジの許容応力（Ⅲ _A S:390MPa, IV _A S:521MPa）よりも低いことから、胴板側を支圧応力の応力評価の代表点としている。
上部タイロッド	—	主要な荷重伝達経路であり、最も断面性状が小さい六角断面部と主要な円柱部を応力評価の代表点としている。
下部スタビライザ	—	接触する原子炉圧力容器の胴板側の許容応力（Ⅲ _A S:303MPa, IV _A S:481MPa）の方が下部スタビライザの許容応力（Ⅲ _A S:390MPa, IV _A S:521MPa）よりも低いことから、胴板側を支圧応力の応力評価の代表点としている。
下部ウェッジ	—	接触する炉心シュラウド中間胴の許容応力（Ⅲ _A S:157MPa, IV _A S:210MPa）の方が下部ウェッジの許容応力（Ⅲ _A S:390MPa, IV _A S:521MPa）よりも低くなることから、下部ウェッジ側は支圧応力の応力評価点から除外する。なお、耐震評価において、炉心シュラウド中間胴側の支圧応力（S _d *:46MPa, S _s :84MPa）は、上部サポートの炉心シュラウド支持面の支圧応力（S _d *:95MPa, S _s :160MPa）よりも小さいことから炉心シュラウドの上部サポート支持面側を代表点にしている。
リミットストップ	—	荷重の伝達経路にはなっていないことから、応力評価の選定から除外している。
下部タイロッド	—	主要な荷重伝達経路であり、断面性状の小さい細径部を応力評価の代表点とする。
トグル	トグルクレビス	主要な荷重伝達経路であり、断面性状が最も小さくなるトグル取付け部を応力評価点とする。
	トグル	トグルのせん断断面積（ mm ² ）は同じ荷重が作用するトグルピンのせん断断面積（ mm ² ）よりも大きく、応力がトグルピンよりも小さくなることから、トグルピンを応力評価の代表点としている。
	トグルピン	最も厳しい純せん断応力の発生部位であり応力評価点としている。
	シールスリーブ	荷重の伝達経路になっていないことから、応力評価の選定から除外している。

炉心シュラウド支持ロッド据付の概要

1. 炉心シュラウド支持ロッドの機能及び配置

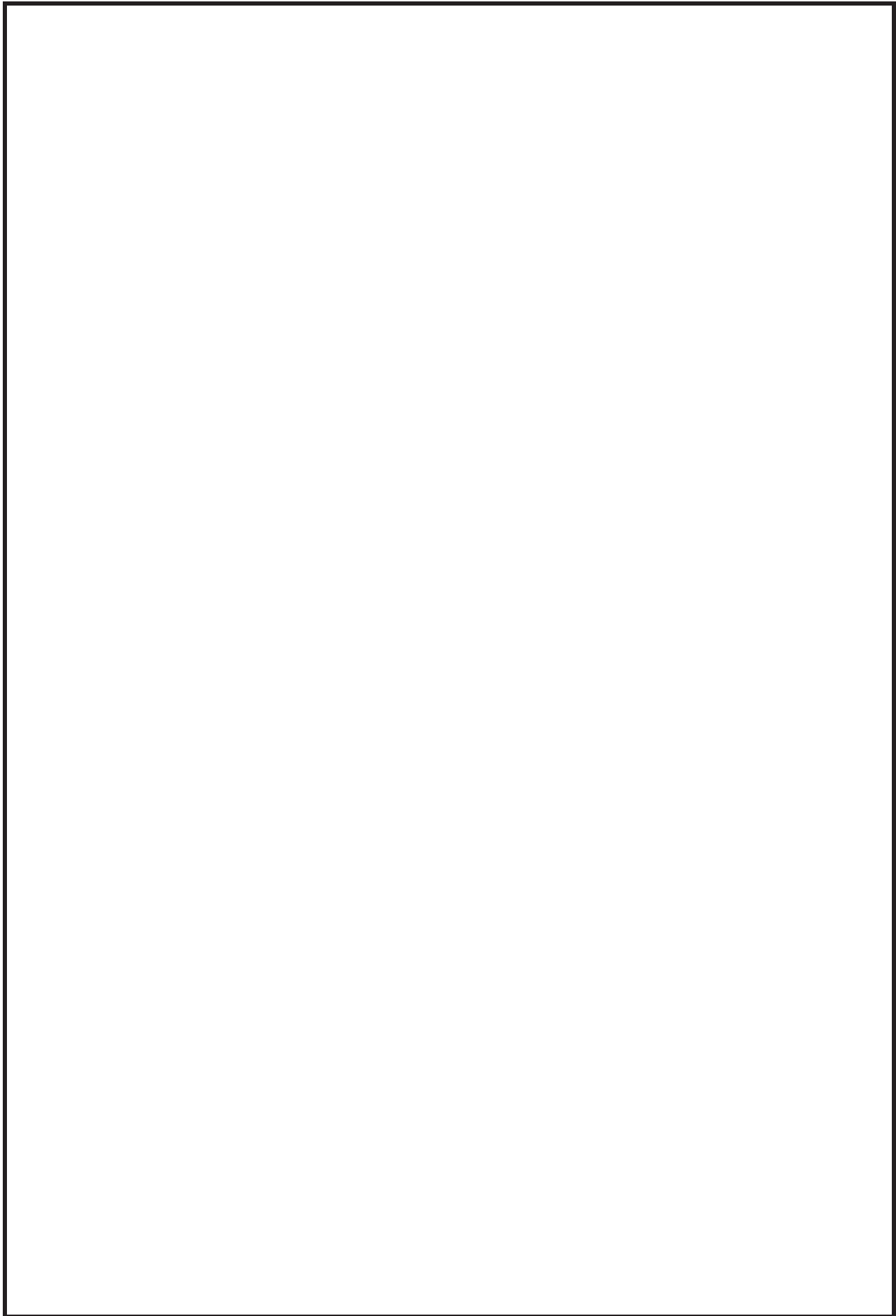
炉心シュラウド支持ロッドは、炉心シュラウド上部胴とシュラウドサポートを連結し、鉛直方向の荷重に対し炉心シュラウドを拘束（浮上りを防止）する機能及び炉心シュラウドと原子炉圧力容器の間に設置し、水平方向の荷重に対し炉心シュラウドを拘束（横ずれを防止）する機能を有する。原子炉圧力容器内部の構造物との取り合いを考慮し、据付方位は であり、上部サポートの構造が異なる2種類（タイプ1及びタイプ2）の炉心シュラウド支持ロッドが据え付けられている。炉心シュラウド支持ロッドの詳細図を参考図-1-1に、配置図を参考図-1-2に示す。



参考図-1-1 炉心シュラウド支持ロッド詳細

参考-1-2

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



参考図-1-2 炉心シュラウド支持ロッド配置図

参考-1-3

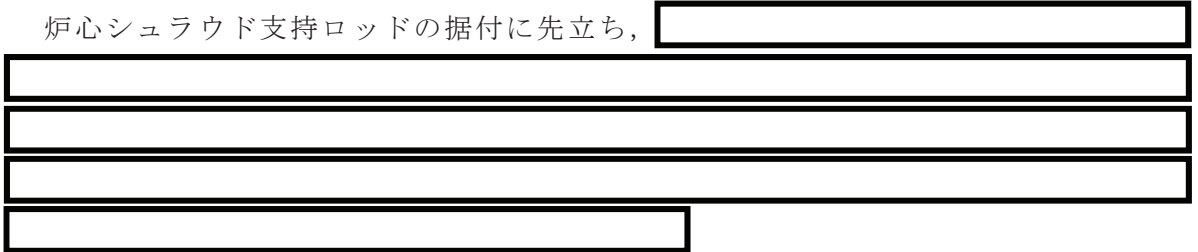
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2. 炉心シュラウド支持ロッド据付手順

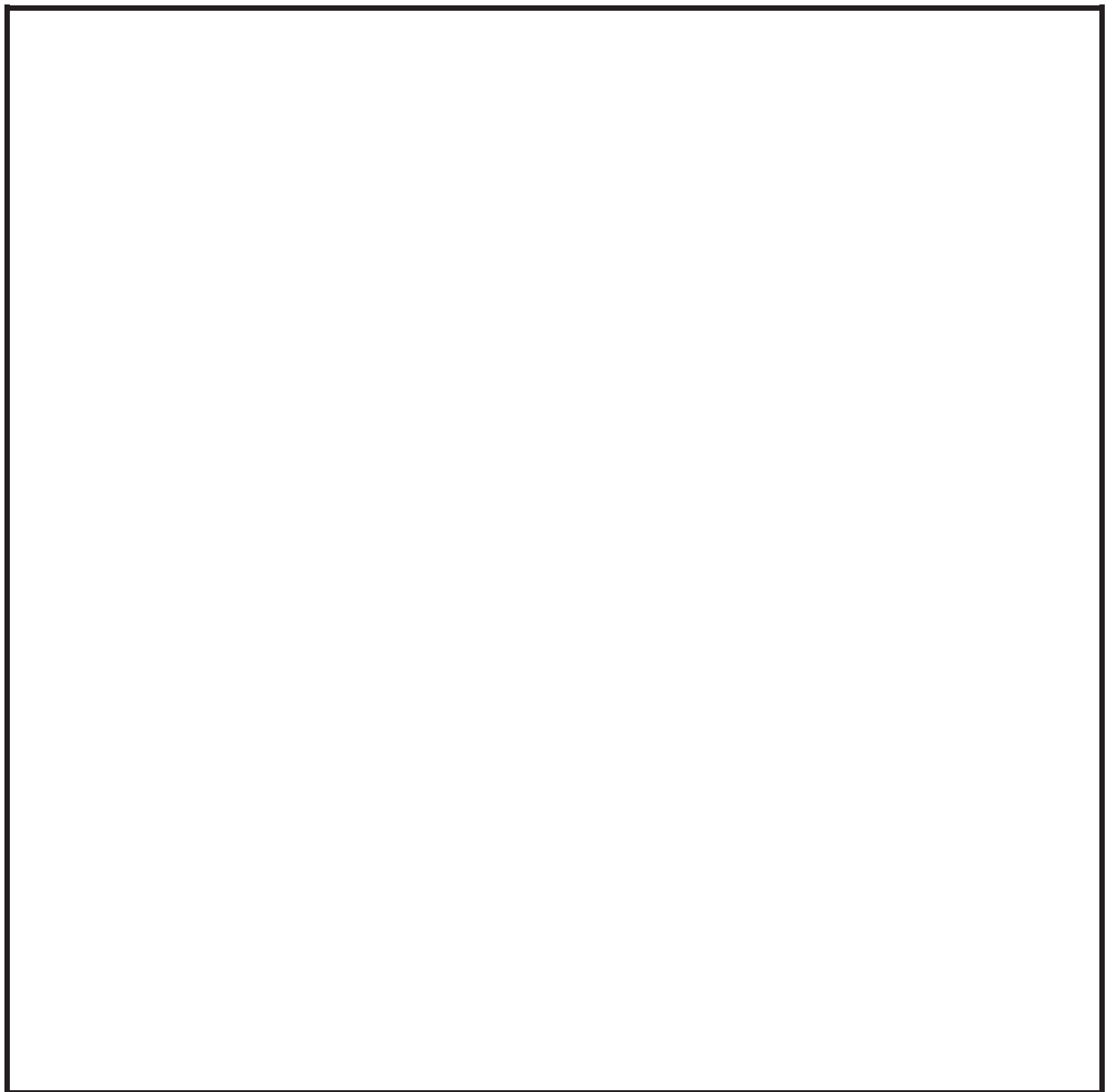
炉心シュラウド支持ロッドの据付手順は以下の通りである。

(1) 炉心シュラウド支持ロッド据付前の加工

炉心シュラウド支持ロッドの据付に先立ち、



なお、これらの荷重は、炉心シュラウド及びシュラウドサポートの応力計算において支圧荷重として考慮される。加工部位について参考図-1-3 に示す。



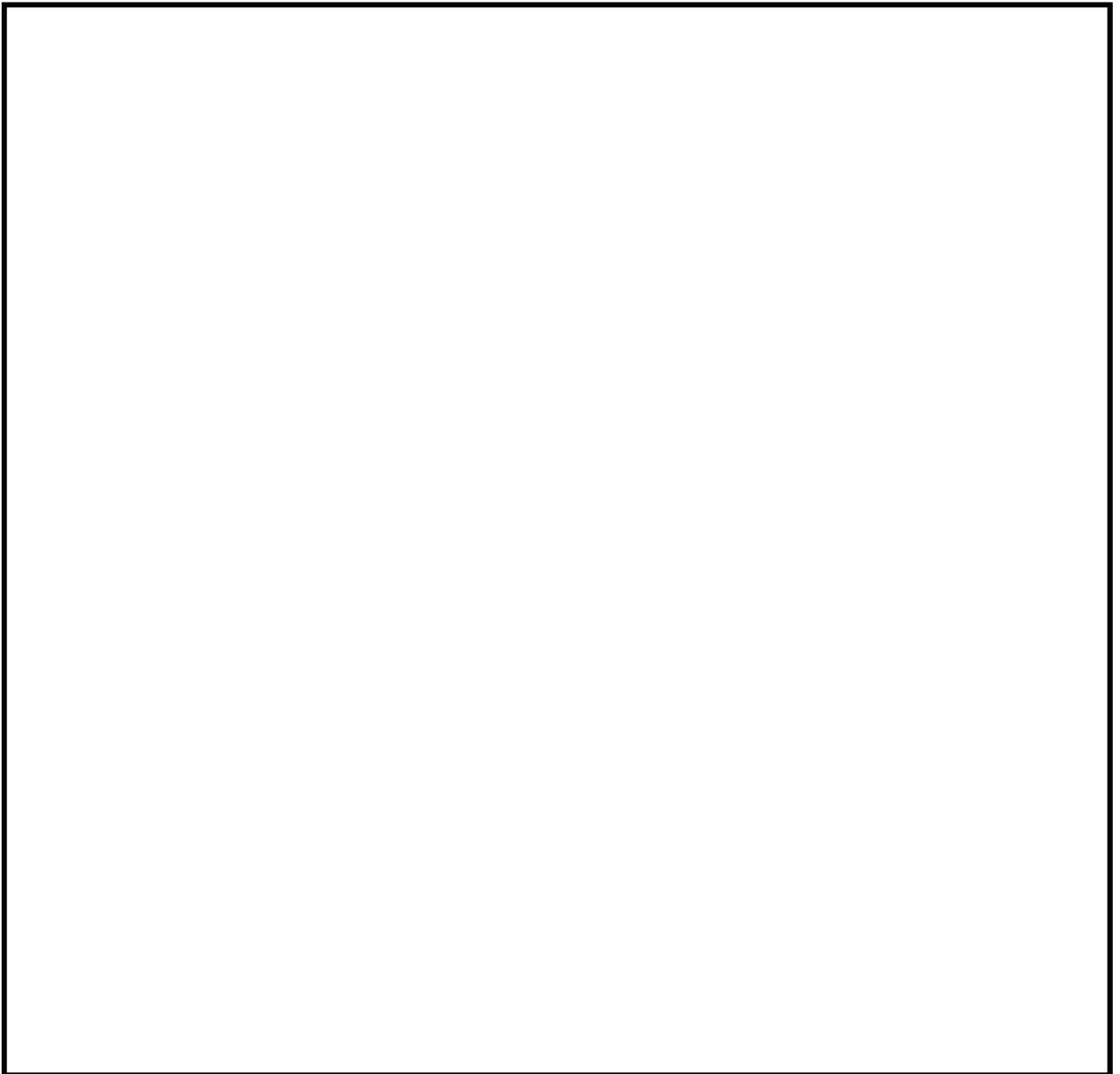
参考図-1-3 炉心シュラウド及びシュラウドサポートの加工部位

(2) 炉心支持板への炉心支持板ウェッジの設置

炉心シュラウド内の炉心支持板に炉心支持板ウェッジを設置する。炉心シュラウド支持ロッドの据付方位 に対応する位置に炉心支持板ウェッジを設置し、下部スタビライザ部における水平方向の荷重伝達経路の一部※となる。

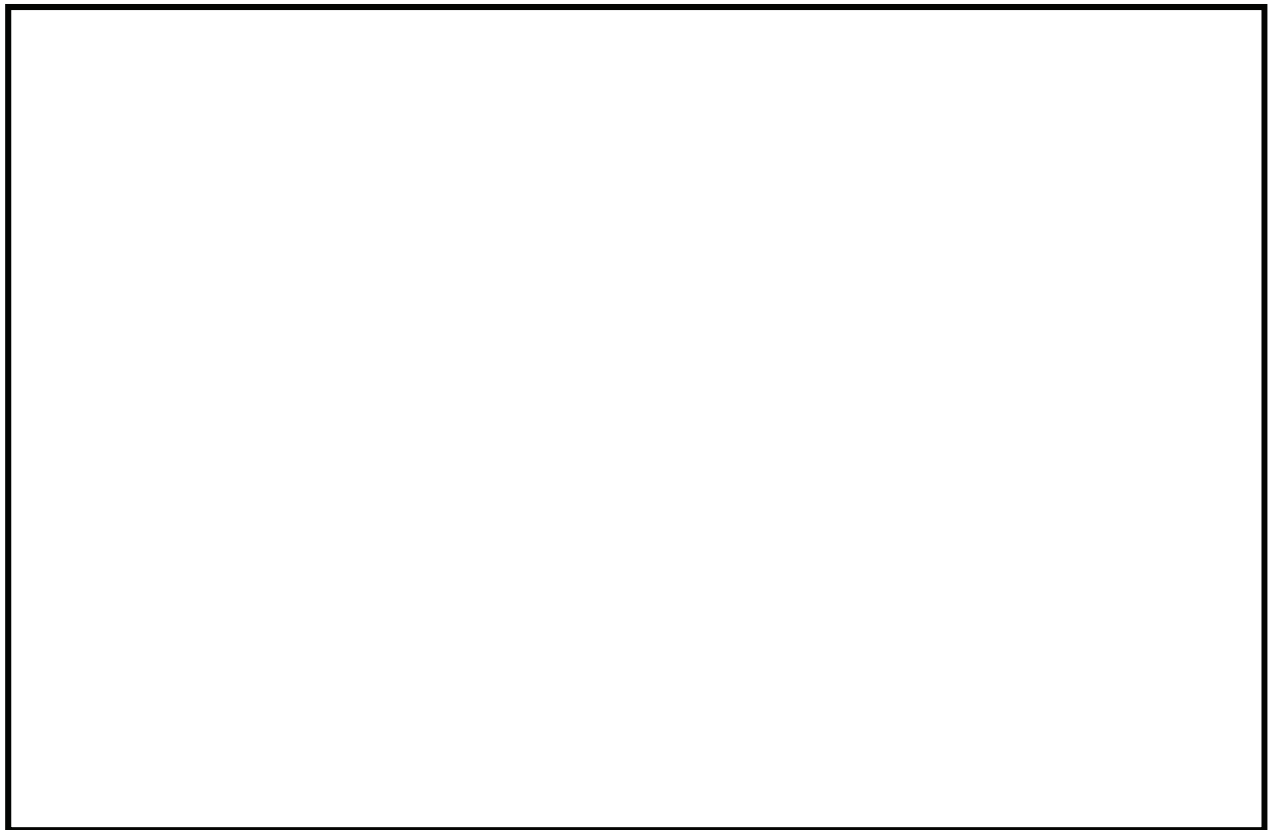
なお、下部スタビライザ部は、炉心シュラウド支持ロッドの解析モデル及び水平方向の炉内構造物系地震応答解析モデルにおいて水平ばね として考慮される。下部スタビライザ部の構造概要を参考図-1-4 に示す。

※：下部スタビライザ部は、原子炉圧力容器に接触し荷重伝達を担う下部スタビライザ、炉心シュラウドに接する下部スタビライザウェッジ、さらに炉心シュラウドと炉心支持板との間に設置される炉心支持板ウェッジにより構成する。

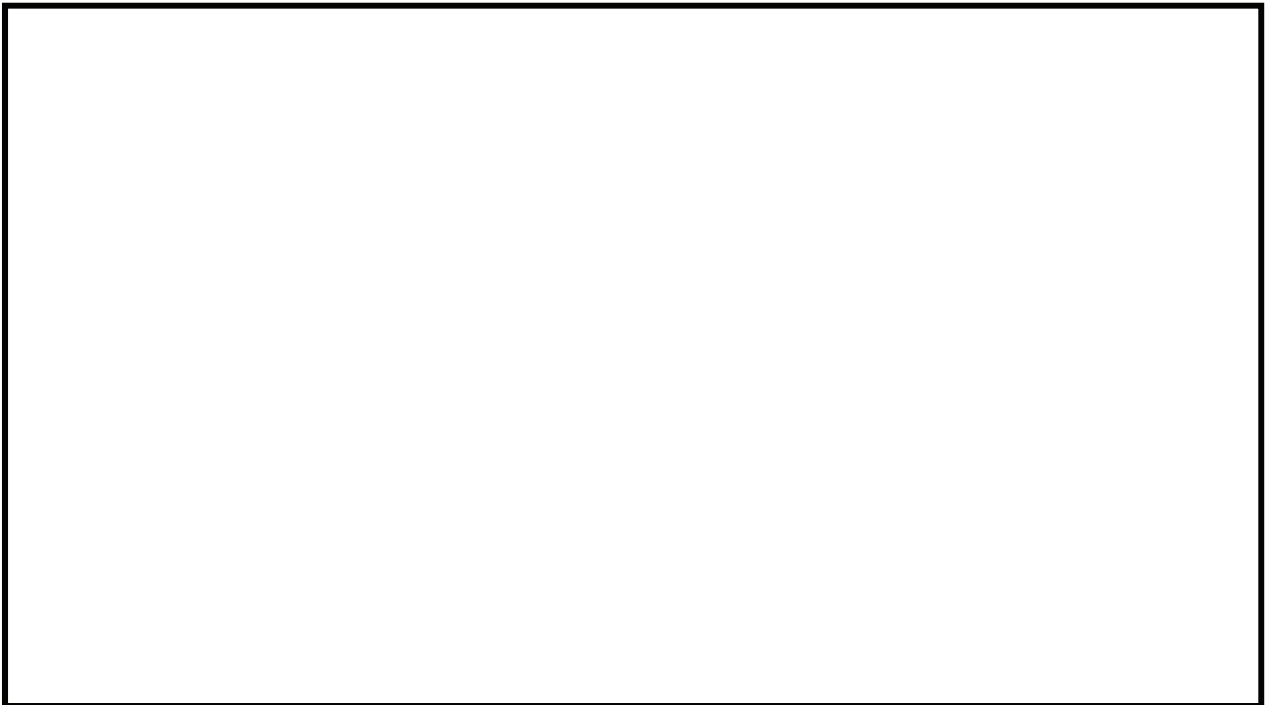


参考図-1-4 下部スタビライザ部の構造概要

(3) 炉心シュラウド支持ロッドの組み立て及び設置



以上の手順により設置される炉心シュラウド支持ロッドの据付手順概要を参考図-1-5に示す。



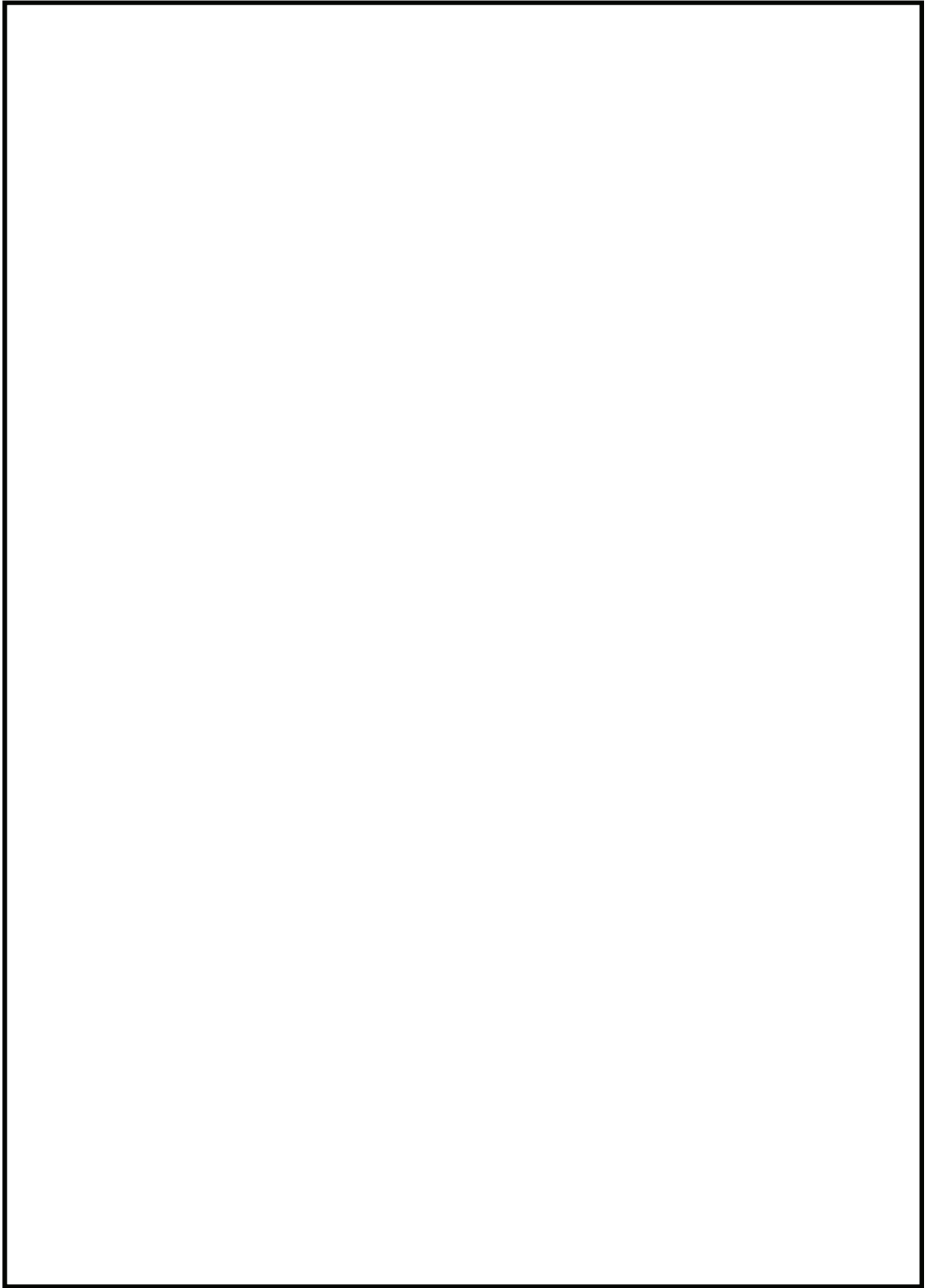
参考図-1-5 炉心シュラウド支持ロッド据付手順概要

炉心シュラウド支持ロッドの締結部の脱落防止対策等

炉心シュラウド支持ロッドは、設計上の考慮事項として据付時に適切な脱落防止対策等を実施している。炉心シュラウド支持ロッド各 부품の締結部に対する脱落防止対策等は参考表-2-1 に示す通りである。また、各対策に対応する部位を図示した図を参考図-2-1 に示す。

参考表-2-1 炉心シュラウド支持ロッド締結部の脱落防止対策及び緩み防止対策

対策	対象部品	位置	目的	対策概要

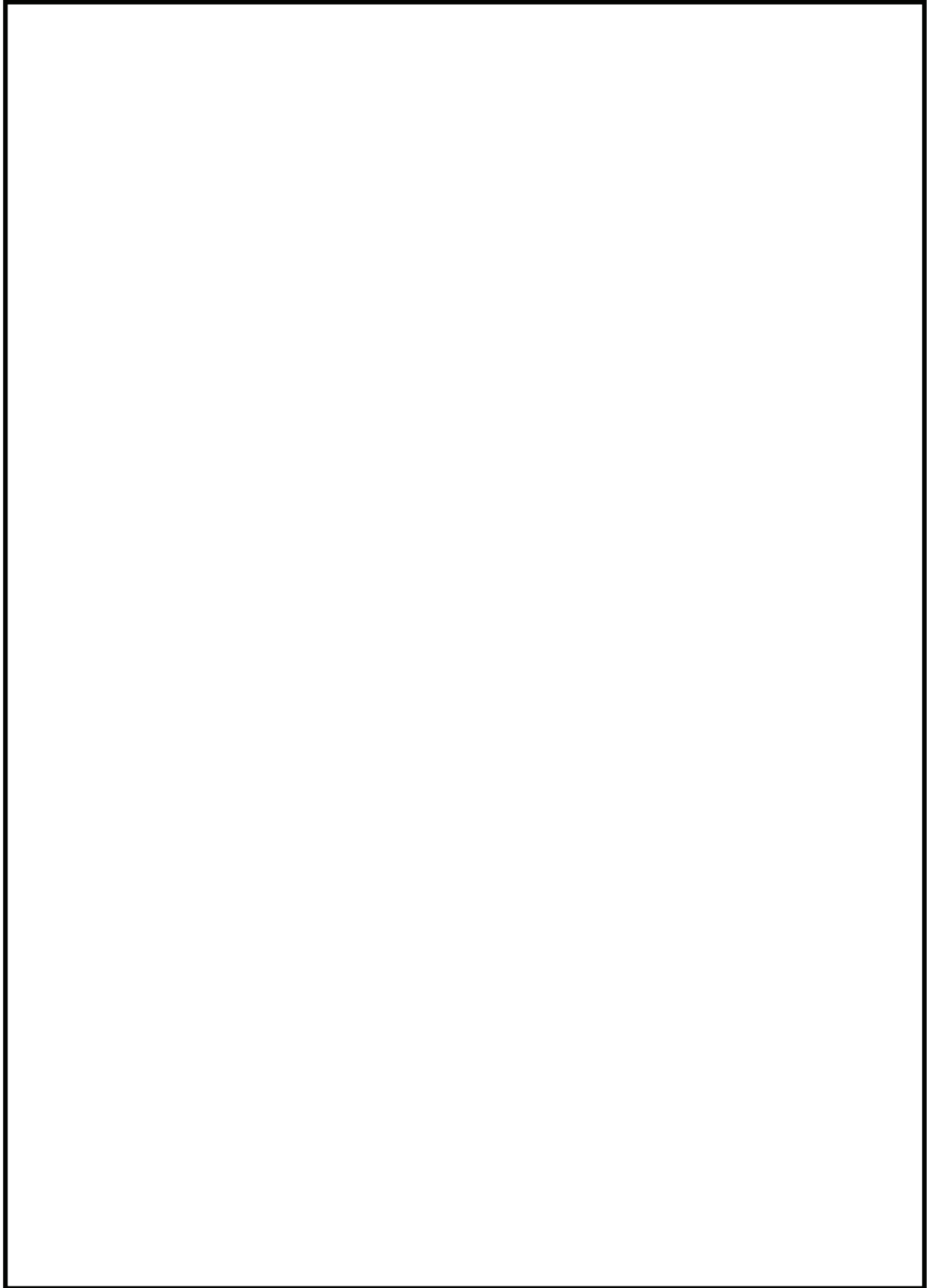


参考図-2-1(1/4)

炉心シュラウド支持ロッド締結部の脱落防止対策及び緩み防止対策部位

参考-2-2

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

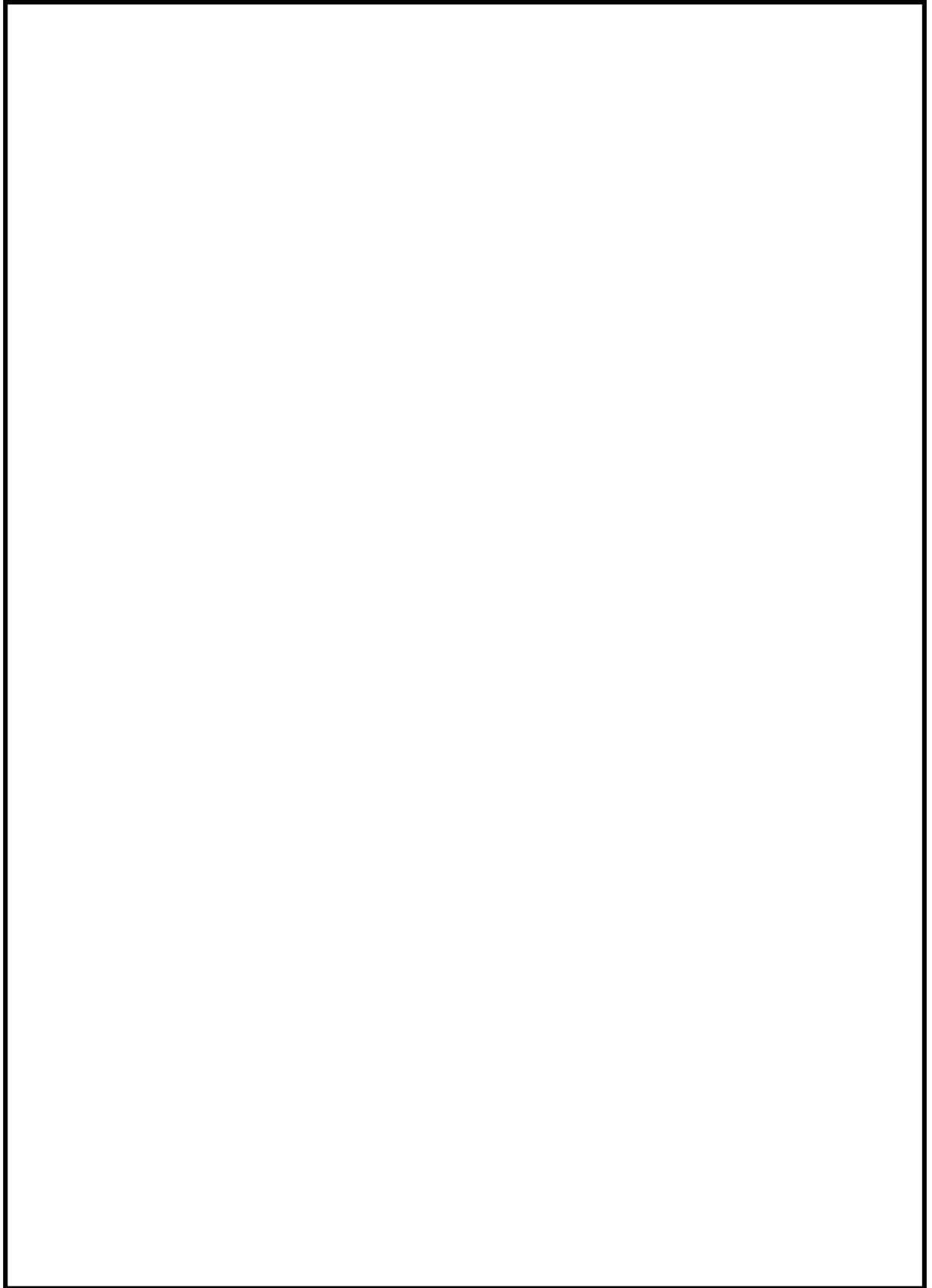


参考図-2-1 (2/4)

炉心シュラウド支持ロッド締結部の脱落防止対策及び緩み防止対策部位

参考-2-3

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

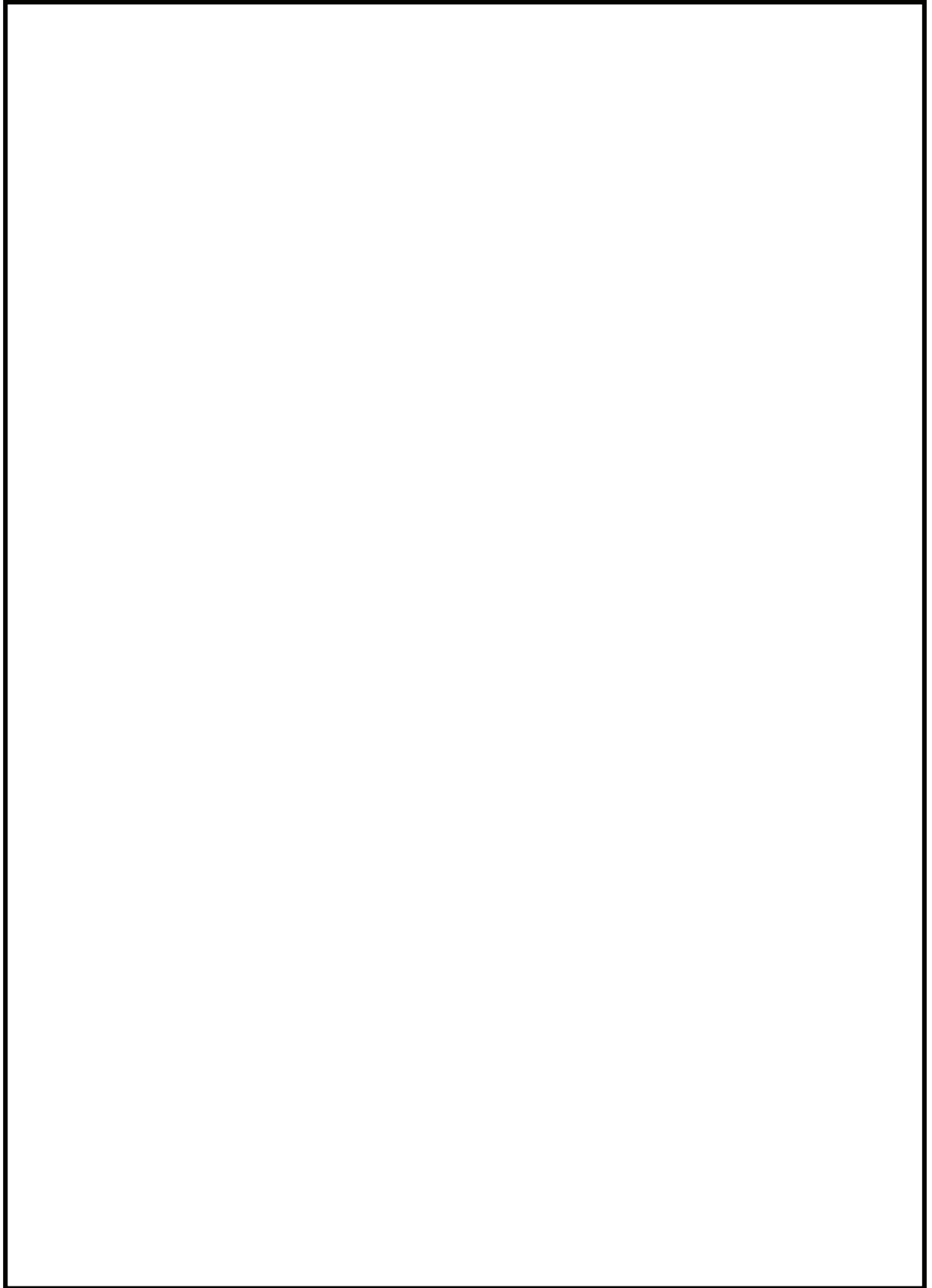


参考図-2-1 (3/4)

炉心シュラウド支持ロッド締結部の脱落防止対策及び緩み防止対策部位

参考-2-4

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



参考図-2-1(4/4)

炉心シュラウド支持ロッド締結部の脱落防止対策及び緩み防止対策部位

参考-2-5

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

炉心シュラウド支持ロッド解析モデルへの入力と比較

鉛直方向に対する傾きを考慮しない炉心シュラウド支持ロッド解析モデルに水平方向の地震動を入力する場合と、傾きを考慮した炉心シュラウド支持ロッドの軸直交方向に水平方向の地震動及び鉛直方向の地震動の軸直交方向成分を入力する場合の入力を比較した。炉心シュラウド支持ロッドは時刻歴解析を行っており加速度時刻歴を入力しているが、応答目安値の比較として、入力する O.P. [] における加速度時刻歴の FRS に対して炉心シュラウド支持ロッドの 1 次固有周期における値を比較した。

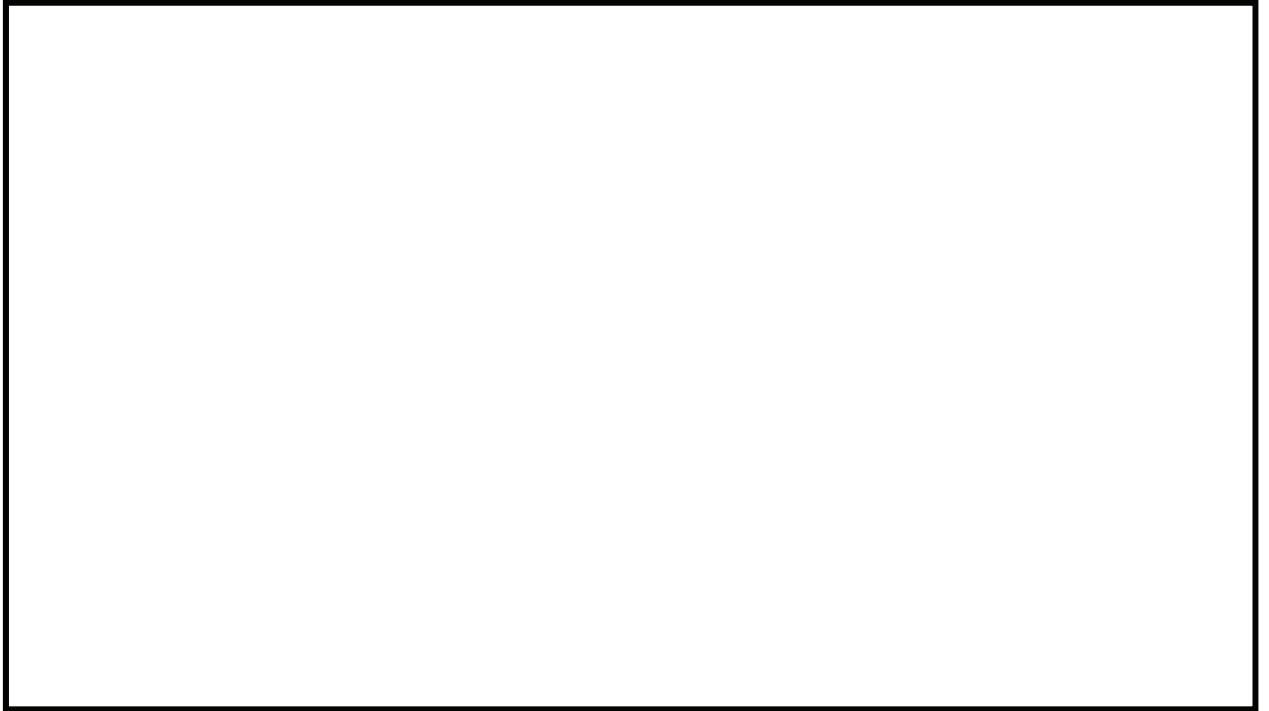
対象とするケースは、「補足-600-8-1 建屋-機器連成解析モデルの時刻歴応答解析における材料物性の不確かさ等を考慮した設計用地震力の設定について」の表 2-9 から、炉心シュラウド支持ロッドタイプ 2 の応答が大きくなるケース 1 の S_s-D 2 (NS 方向) における H1 分離ケースとし、UD 方向も同じくケース 1 の S_s-D 2 とした。

炉心シュラウド支持ロッドは鉛直方向に対して [] の傾きをもって取り付けられることから、炉心シュラウド支持ロッドの固定点の 1 つである炉心シュラウド上部胴上端における次の 2 つの加速度時刻歴の FRS を比較した。

①水平方向地震動

②水平方向地震動×cos [] + 鉛直方向地震動×sin []

FRS の比較結果を参考図-3-1 に示す。炉心シュラウド支持ロッドタイプ 2 の 1 次固有周期 [] での①と②の FRS の値の差は 0.1% 以下であり、ほぼ同じと言える。したがって、炉心シュラウド支持ロッドを鉛直方向に対する傾きを考慮しない、1 次元多質点系モデルとし、水平方向の地震動をそのまま入力することで、炉心シュラウド支持ロッドの応答を適切に評価できている。



参考図-3-1 FRS の比較 (ケース 1, Ss-D2 (水平方向 : NS 方向, H1 分離))