

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

第 59 条（原子炉停止系統）

2022 年 9 月 27 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究所高速実験炉部

第 59 条：原子炉停止系統

目 次

1. 要求事項の整理
2. 設置許可申請書における記載
3. 設置許可申請書の添付書類における記載
 - 3.1 安全設計方針
 - 3.2 気象等
 - 3.3 設備等
4. 要求事項への適合性
 - 4.1 制御設備及び非常用制御設備
 - 4.2 要求事項（試験炉設置許可基準規則第 59 条）への適合性説明

(別紙)

- 別紙 1 : 「炉心の変更」に関する基本方針
- 別紙 2 : 地震時の制御棒の挿入性について
- 別紙 3 : 反応度制御系統の故障時における原子炉停止系統の機能確保
- 別紙 4 : 相互に独立な複数の系統により原子炉を確実に停止する機能について（制御棒駆動系の共通原因故障の防止、原子炉停止機能の信頼性確保に関する考え方を含む。）
- 別紙 5 : 後備炉停止系による停止時のプラント挙動及び運転操作について

(添付)

- 添付 1 : 設置許可申請書における記載
- 添付 2 : 設置許可申請書の添付書類における記載（安全設計）
- 添付 3 : 設置許可申請書の添付書類における記載（適合性）
- 添付 4 : 設置許可申請書の添付書類における記載（設備等）

< 概 要 >

試験研究用等原子炉施設の設置許可基準規則の要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する高速実験炉原子炉施設の適合性を示す。

1. 要求事項の整理

「常陽」の炉心は、増殖炉心（以下「MK-I 炉心」という。）から照射用炉心（以下「MK-II 炉心」という。）へ変更された後、更に変更を加え、熱出力を 140MW とした照射用炉心（以下「MK-III 炉心」という。）に変更された。本申請では、更に変更を加え、熱出力を 100MW とした照射用炉心（以下「MK-IV 炉心」という。）を対象とする【「炉心の変更」に関する基本方針：別紙 1 参照】。試験炉設置許可基準規則第 59 条における要求事項等を第 1.1 表に示す。

第 1.1 表 (1/2) 試験炉設置許可基準規則第 59 条における要求事項及び本申請における変更の有無

要求事項	変更の有無
<p>1 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、原子炉停止系統を設けなければならない。</p> <p>一 制御棒による二以上の独立した系統を有するものとする。ただし、次に掲げるときは、この限りでない。</p> <p>イ 試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、未臨界を維持することができる制御棒の数に比し当該系統の能力に十分な余裕があるとき。</p> <p>ロ 原子炉固有の出力抑制特性が優れているとき。</p> <p>二 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、原子炉停止系統のうち少なくとも一つは、試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、少なくとも一つは、低温状態において未臨界を維持できるものとする。</p> <p>三 反応度価値の最も大きな制御棒一本が固着した場合においても前号の規定に適合するものとする。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第 1 項第 1 号に規定する「二以上の独立した系統」とは、相互に独立な複数の系統により試験研究用等原子炉を確実に停止することをいう。 ・ 第 1 項第 1 号イに規定する「未臨界に移行することができ、かつ、未臨界を維持することができる」とは、例えば、自重で制御棒が炉心に挿入されること等により試験研究用等原子炉に負の反応度が印加できることをいう。 ・ 第 1 項第 3 号に規定する「反応度価値の最も大きな制御棒一本が固着した場合」とは、駆動機構の構造上、制御棒が最大の引き抜き位置まで引き抜かれた場合をいう。 	<p>有</p>

第 1.1 表 (2/2) 試験炉設置許可基準規則第 59 条における要求事項
及び本申請における変更の有無

要求事項	変更の有無
<p>2 制御棒の最大反応度価値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉容器内部構造物の損壊を起こさないものでなければならない。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> 第 2 項に規定する「制御棒の最大反応度価値」の評価に当たっては、試験研究用等原子炉の運転状態との関係で、制御棒の挿入程度及び配置状態を制限するなどの反応度価値を制限する装置が設けられている場合は、その効果を考慮してもよい。 第 2 項に規定する「反応度投入事象」について、ナトリウム冷却型高速炉においては、ナトリウム冷却型高速炉としての施設の特徴を考慮して制御棒引き抜き事象及び制御棒急速引き抜き事故を想定すること。 	有
<p>3 原子炉停止系統は、反応度制御系統と共用する場合には、反応度制御系統を構成する設備の故障が発生した場合においても通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものでなければならない。</p>	有

2. 設置許可申請書における記載

添付 1 参照

3. 設置許可申請書の添付書類における記載

3.1 安全設計方針

(1) 設計方針

添付 2 参照

(2) 適合性

添付 3 参照

3.2 気象等

該当なし

3.3 設備等

添付 4 参照

※ 添付の朱書き：審査進捗を踏まえて記載を見直す箇所

4. 要求事項への適合性

4.1 制御設備及び非常用制御設備

4.1.1 制御棒及び制御棒駆動系

4.1.1.1 概要

原子炉施設には、反応度制御系統及び原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系（主炉停止系）を設ける。制御棒及び制御棒駆動系は、通常運転時に予想される温度変化、実験物の移動その他の要因による反応度変化を制御できるように、また、炉心からの飛び出しを防止するように設計する。制御棒の反応度添加率は、その停止能力（原子炉停止系統）と併せて、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容設計限界を超えないものとする。さらに、制御棒及び制御棒駆動系は、反応度価値の最も大きな制御棒1本が固着した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとし、制御棒の最大反応度価値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊を起こさないものとする。

4.1.1.2 設計方針

制御棒及び制御棒駆動系の設計方針を以下に示す。

- (1) 反応度価値が最も大きな制御棒1本が、完全に引き抜かれた状態で固着した場合であっても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする。
- (2) スクラム時挿入時間は、制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度価値 90%挿入までを 0.8 秒以下とする。
- (3) 制御棒は、基準地震動 S_s の設計用地震波に基づく最大想定変位時においても十分な余裕をもって挿入できるようにする【地震時の制御棒の挿入性について:別紙2参照】。
- (4) 個々の制御棒は全て別々に取付け、取外しが可能なようにする。

4.1.1.3 主要設備

4.1.1.3.1 制御棒

原子炉施設には制御材として、制御棒を設ける。炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する。また、原子炉スクラム時には、制御棒を、自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する。制御棒については、同一の構造及び機能を有する4本の独立したものを設ける。制御棒4本を炉心第3列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。

制御棒は、制御要素、ハンドリングヘッド及びダッシュラム等から構成する（第4.1.1図参照）。制御要素は、ほう素-10を濃縮した炭化ほう素のペレットを薄肉のシュラウド管により被覆し、ステンレス鋼の円筒管（被覆管）に充填したものであり、上部には発生したヘリウムガスを制御要素外に放出するためのダイビングベル型のベント機構を有している。ベント機構は中性子吸収材である炭化ほう素の $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応等により生成するヘリウ

ムガス等を制御要素外に放出し、内圧の上昇を防ぐことを目的としており、これによって制御棒の使用期間を長くすることができる。放出されたヘリウムガスは制御棒上部から原子炉容器上部のナトリウム中を経てカバーガス空間へ抜ける。

制御要素の型式には、冷却材であるナトリウムが制御要素内に浸入しないものとし、中性子吸収材充填部をヘリウム雰囲気とするヘリウムボンド型と、ベント機構から同部にナトリウムを導入する構造のナトリウムボンド型がある。なお、ナトリウムボンド型制御要素の被覆管内面は、ほう素及び炭素の浸入を防ぐため、クロムコーティング等を施すものとする。制御棒の使用期間は、必要な制御能力を確保する上での制限である核的寿命と炭化ほう素ペレットのスエリングによる被覆管との相互作用による機械的寿命のいずれか短い方で決定される。

制御棒は中性子吸収材を充填したステンレス鋼製制御要素 7 本をクラスタとしてステンレス鋼製の円筒管（保護管）に収納した構造とする。保護管の下側には、制御棒が、原子炉スクラム時に、自重等により炉心に挿入され、着地する際に生じる衝撃を緩衝するためのダッシュラムを設ける。また、保護管の上側には、制御棒を制御棒駆動系と連結するためのハンドリングヘッドを設ける。冷却材は、炉心支持板低圧プレナムを經由し、制御棒保護管脚部の冷却材流入口から流入する。主要仕様を以下に示す。

本数 4 本

制御要素数 7 本／制御棒

制御要素

中性子吸収材材料 炭化ほう素

被覆管材料 SUS 316 相当ステンレス鋼

中性子吸収材有効長さ 約 65cm

中性子吸収材ペレット外径 約 16.3mm

被覆管肉厚 ヘリウムボンド型 約 0.8mm

ナトリウムボンド型 約 0.5mm

内圧調整機構 ベント型（ダイビングベル型）

核的寿命 10%（軸方向平均ほう素-10 燃焼度）

保護管

保護管材料 ステンレス鋼

外径 約 64.7mm

突起部外径 約 72.7mm

4.1.1.3.2 制御棒駆動系

原子炉施設には、制御材駆動設備として、各制御棒に使用する 4 式の独立した制御棒駆動系を設ける。制御棒駆動系は、制御棒駆動機構、制御棒駆動機構上部案内管及び制御棒駆動機構下部案内管から構成する。

制御棒駆動機構は、制御棒駆動機構上部案内管と組み合わせて、炉心上部機構に設置される（第 4.1.2 図参照）。制御棒は、ハンドリングヘッドにおいて、制御棒駆動機構上部案内

管に収納されるエクステンションロッドを介して、制御棒駆動機構に吊り下げられる。エクステンションロッドは、制御棒をラッチ・デラッチするための内側エクステンションロッド、及び下部にグリップを有し、制御棒の位置を調整する際に制御棒をラッチする外側エクステンションロッドから構成する。制御棒は、内側エクステンションロッドの下端が、外側エクステンションロッドの内側に収納され、下部のグリップを押し広げることで、ラッチされる。なお、当該ラッチ操作では、エクステンションロッドを下降しつつ、内側エクステンションロッドの下端を、制御棒のハンドリングヘッド底部に押し当てることで、内側エクステンションロッドの下端を外側エクステンションロッドの内側に収納する。また、上記ラッチ操作では、内側エクステンションロッドが外側エクステンションロッドに対して、相対的に上方に移動するため、内側エクステンションロッドの上部に設けられたアーマチュアと外側エクステンションロッドに接続された制御棒駆動機構の電磁石のギャップがなくなり、電磁石の励磁コイルを励磁することで、内側エクステンションロッドの位置を固定できる状態となる。制御棒ラッチ時にあっては、内側エクステンションロッドは、上部に設けられたアーマチュアが、外側エクステンションロッドに接続された制御棒駆動機構の電磁石に吸着されることで、その位置が固定されるため、制御棒は、エクステンションロッドと一体となり、制御棒駆動機構のケーシングに収納された駆動電動機（三相誘導電動機）により、減速機を介して、外側エクステンションロッドに接続されたボールナットスクリュを回転させることで、上下駆動され、炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する（ボールナットスクリュ方式）。なお、駆動ストロークは約 65cm である。また、駆動電動機に設けられた電磁ブレーキにより、制御棒上下駆動の停止及び停止中の位置保持が行われる。制御棒の位置は、駆動電動機に設けられたシンクロ発信器により検出される。

内側エクステンションロッドが電磁石により固定され、制御棒をラッチした状態においては、制御棒駆動機構上部案内管に設けた加速スプリングが加速管を介して圧縮されるものとする。原子炉スクラム時には、制御棒駆動機構の制御棒保持電磁石励磁断により、内側エクステンションロッドは、自重及びスプリングにより下方に移動し、外側エクステンションロッドの外側に押し出されるため、制御棒がデラッチ（切り離し）される。制御棒は、自重及びスプリングにより加速されて、炉心に落下・挿入され、原子炉は停止する（バネ加速重力落下方式）。原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）は、炉心の反応度（原子炉の出力）を制御するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）の故障が発生した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする【反応度制御系統の故障時における原子炉停止系統の機能確保：別紙 3 参照】。炉心には、制御棒を所定の位置に導くため、ダッシュポットを有する制御棒駆動機構下部案内管が設置されており、制御棒は、当該下部案内管内に落下・挿入される。なお、燃料交換時にあっては、全ての制御棒をデラッチし、炉心に挿入した状態とする。制御棒駆動系の主な仕様を以下に示す。

台数 4 式

駆動方式 通常運転時 ボールナットスクリュ方式
スクラム時 バネ加速重力落下方式
スクラム時挿入時間 0.8s 以下
(制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度値 90%挿入までの時間)
駆動速度 引抜き 13cm/min 以下
挿入 13cm/min 以下
駆動ストローク 約 65cm

4.1.2 後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系

4.1.2.1 概要

原子炉施設には、非常用制御設備として、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系（後備炉停止系）を設ける。後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系は、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、原子炉を停止するように設計する【相互に独立な複数の系統により原子炉を確実に停止する機能について（制御棒駆動系の共通原因故障の防止、原子炉停止機能の信頼性確保に関する考え方を含む。）：別紙 4 参照】。

4.1.2.2 設計方針

後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系の設計方針を以下に示す。

- (1) 通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとする【後備炉停止系による停止時のプラント挙動及び運転操作について：別紙 5 参照】。
- (2) スクラム時挿入時間は、後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断から後備炉停止制御棒反応度値 90%挿入までを 0.8 秒以下とする。
- (3) 後備炉停止制御棒は、基準地震動 S_s の設計用地震波に基づく最大想定変位時においても十分な余裕をもって挿入できるようにする。
- (4) 個々の後備炉停止制御棒は全て別々に取付け、取外しが可能なようにする。

4.1.2.3 主要設備

4.1.2.3.1 後備炉停止制御棒

原子炉施設には、制御材として、後備炉停止制御棒を設ける。通常運転時にあつては、全引抜位置とし、原子炉スクラム時には、後備炉停止制御棒を、自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する。後備炉停止制御棒については、同一の構造及び機能を有する 2 本の独立したものを設ける。後備炉停止制御棒 2 本を炉心第 5 列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。

後備炉停止制御棒は、制御要素、ハンドリングヘッド及びダッシュラム等から構成する（第 4.1.1 図参照）。制御要素は、ほう素-10 を濃縮した炭化ほう素のペレットを薄肉のシユラウド管により被覆し、ステンレス鋼の円筒管（被覆管）に充填したものであり、上部には発生したヘリウムガスを制御要素外に放出するためのダイビングベル型のベント機構を有している。ベント機構は中性子吸収材である炭化ほう素の $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応等により生成するヘリウムガス等を制御要素外に放出し、内圧の上昇を防ぐことを目的としており、こ

れによって後備炉停止制御棒の使用期間を長くすることができる。放出されたヘリウムガスは後備炉停止制御棒上部から原子炉容器上部のナトリウム中を経てカバーガス空間へ抜ける。

制御要素の型式には、冷却材であるナトリウムが制御要素内に浸入しないものとし、中性子吸収材充填部をヘリウム雰囲気とするヘリウムボンド型と、ベント機構から同部にナトリウムを導入する構造のナトリウムボンド型がある。なお、ナトリウムボンド型制御要素の被覆管内面は、ほう素及び炭素の浸入を防ぐため、クロムコーティング等を施すものとする。後備炉停止制御棒の使用期間は、必要な制御能力を確保する上での制限である核的寿命と炭化ほう素ペレットのスエリングによる被覆管との相互作用による機械的寿命のいずれか短い方で決定される。

後備炉停止制御棒は中性子吸収材を充填したステンレス鋼製制御要素 7 本をクラスタとしてステンレス鋼製の円筒管（保護管）に収納した構造とする。保護管の下側には、後備炉停止制御棒が、原子炉スクラム時に、自重等により炉心に挿入され、着地する際に生じる衝撃を緩衝するためのダッシュラムを設ける。また、保護管の上側には、後備炉停止制御棒を後備炉停止制御棒駆動系と連結するためのハンドリングヘッドを設ける。冷却材は、炉心支持板低圧プレナムを経由し、後備炉停止制御棒保護管脚部の冷却材流入口から流入する。主要仕様を以下に示す。

本数 2 本

制御要素数 7 本／後備炉停止制御棒

制御要素

中性子吸収材材料 炭化ほう素

被覆管材料 SUS 316 相当ステンレス鋼

中性子吸収材有効長さ 約 65cm

中性子吸収材ペレット外径 約 16.3mm

被覆管肉厚 ヘリウムボンド型 約 0.8mm

ナトリウムボンド型 約 0.5mm

内圧調整機構 ベント型（ダイビングベル型）

核的寿命 10%（軸方向平均ほう素-10 燃焼度）

保護管

保護管材料 ステンレス鋼

外径 約 64.7mm

突起部外径 約 72.7mm

4.1.2.3.2 後備炉停止制御棒駆動系

原子炉施設には、制御材駆動設備として、各後備炉停止制御棒に使用する 2 式の独立した後備炉停止制御棒駆動系を設ける。後備炉停止制御棒駆動系は、後備炉停止制御棒駆動機構、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管及び後備炉停止制御棒駆動機構下部案内管から構成する。

後備炉停止制御棒駆動機構は、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管と組み合わせて、炉心上部機構に設置される（第4.1.2図参照）。後備炉停止制御棒は、ハンドリングヘッドにおいて、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管に収納されるエクステンションロッドを介して、後備炉停止制御棒駆動機構に吊り下げられる。エクステンションロッドは、後備炉停止制御棒をラッチ・デラッチするための内側エクステンションロッド、及び下部にグリップを有し、後備炉停止制御棒の位置を調整する際に後備炉停止制御棒をラッチする外側エクステンションロッドから構成する。後備炉停止制御棒は、内側エクステンションロッドの下端が、外側エクステンションロッドの内側に収納され、下部のグリップを押し広げることで、ラッチされる。なお、当該ラッチ操作では、エクステンションロッドを下降しつつ、内側エクステンションロッドの下端を、後備炉停止制御棒のハンドリングヘッド底部に押し当てることによって、内側エクステンションロッドの下端を外側エクステンションロッドの内側に収納する。また、上記ラッチ操作では、内側エクステンションロッドが外側エクステンションロッドに対して、相対的に上方に移動するため、内側エクステンションロッドの上部に設けられたアーマチュアと外側エクステンションロッドに接続された後備炉停止制御棒駆動機構の電磁石のギャップがなくなり、電磁石の励磁コイルを励磁することで、内側エクステンションロッドの位置を固定できる状態となる。後備炉停止制御棒ラッチ時にあっては、内側エクステンションロッドは、上部に設けられたアーマチュアが、外側エクステンションロッドに接続された後備炉停止制御棒駆動機構の電磁石に吸着されることで、その位置が固定されるため、後備炉停止制御棒は、エクステンションロッドと一体となり、後備炉停止制御棒駆動機構のケーシングに収納された駆動電動機（三相誘導電動機）により、減速機を介して、外側エクステンションロッドに接続されたボールナットスクリュを回転させることで、上下駆動される。駆動ストロークは約65cmであり、通常運転時の高温状態において、後備炉停止制御棒は、当該ストロークに保持されるものとする。駆動電動機に設けられた電磁ブレーキにより、後備炉停止制御棒上下駆動の停止及び停止中の位置保持が行われる。後備炉停止制御棒の位置は、駆動電動機に設けられたシンクロ発信器により検出される。

内側エクステンションロッドが電磁石により固定され、後備炉停止制御棒をラッチした状態においては、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管に設けた加速スプリングが加速管を介して圧縮されるものとする。原子炉スクラム時には、後備炉停止制御棒駆動機構の後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断により、内側エクステンションロッドは、自重及びスプリングにより下方に移動し、外側エクステンションロッドの外側に押し出されるため、後備炉停止制御棒がデラッチ（切り離し）される。後備炉停止制御棒は、自重及びスプリングにより加速されて、炉心に落下・挿入され、原子炉は停止する（バネ加速重力落下方式）。万一、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとする。炉心には、後備炉停止制御棒を所定の位置に導くため、ダッシュポットを有する後備炉停止制御棒駆動機構下部案内管が設置されており、後備炉停止制御棒は、当該下部案内管内に落下・挿入される。なお、燃料交換時にあっては、全ての後備炉停止制御棒をデラッチし、炉心に挿入した状態とする。後備炉停止制御棒駆動系の主な仕様を以下に示す。

台数 2 式

駆動方式 スクラム時 バネ加速重力落下方式

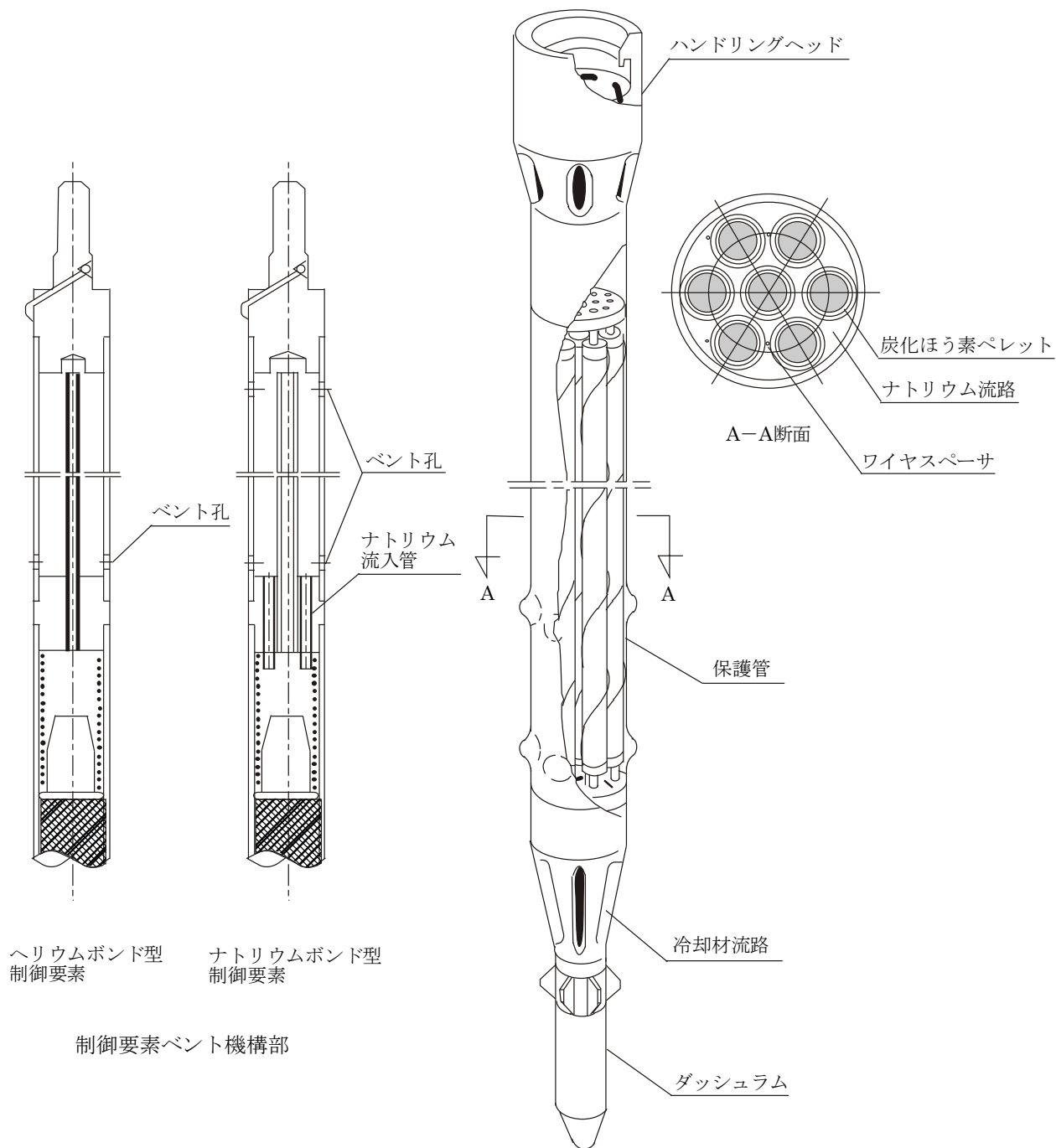
スクラム時挿入時間 0.8s 以下

(後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断から後備炉停止制御棒反応度値 90%挿入までの時間)

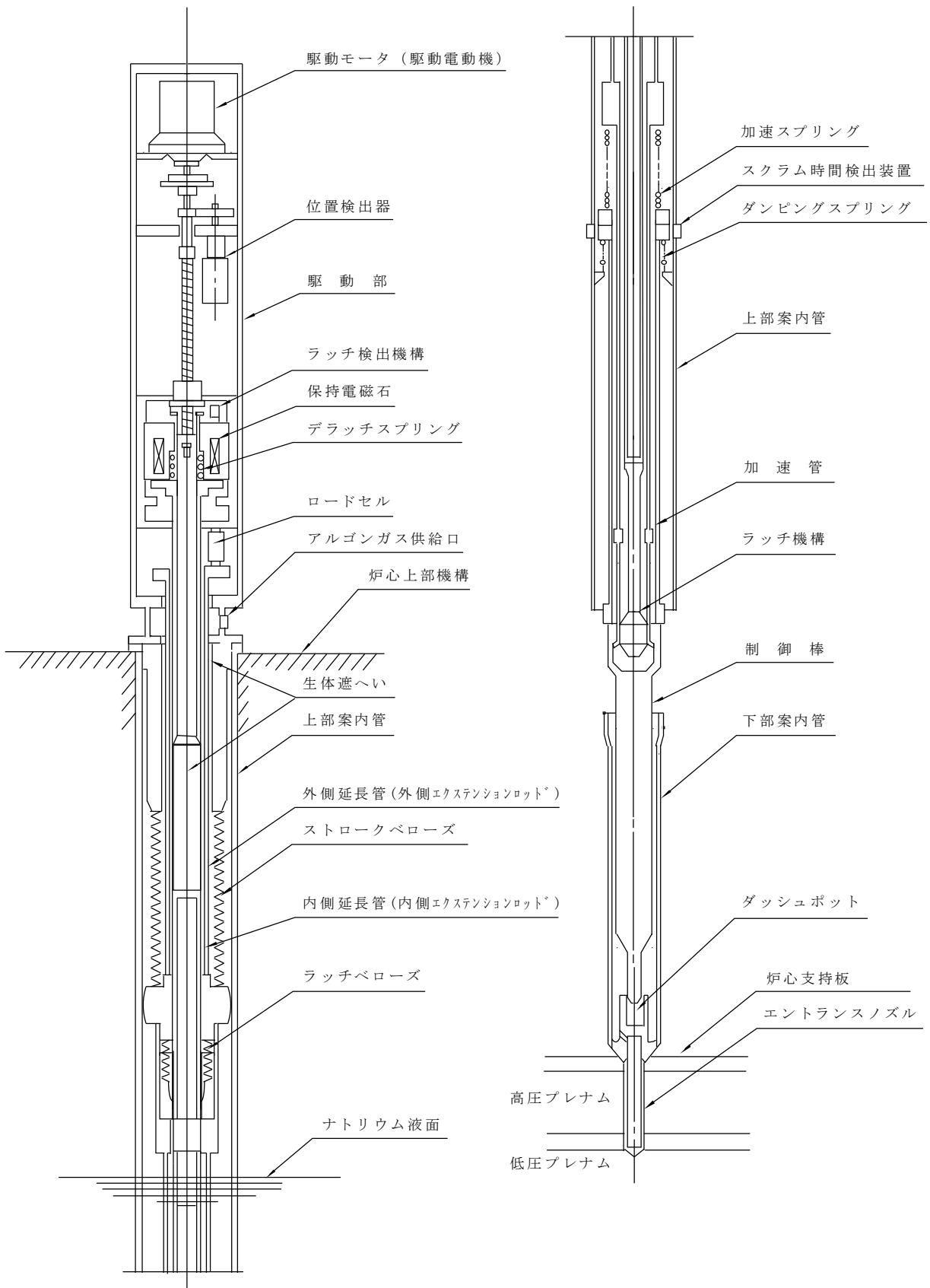
駆動速度 引抜き 13cm/min 以下

挿入 13cm/min 以下

駆動ストローク 約 65cm



第 4. 1. 1 図 制御棒



第 4.1.2 図 制御棒駆動機構

4.2 要求事項（試験炉設置許可基準規則第 59 条）への適合性説明

（原子炉停止系統）

第五十九条 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、原子炉停止系統を設けなければならない。

一 制御棒による二以上の独立した系統を有するものとする。ただし、次に掲げるときは、この限りでない。

イ 試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、未臨界を維持することができる制御棒の数に比し当該系統の能力に十分な余裕があるとき。

ロ 原子炉固有の出力抑制特性が優れているとき。

二 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、原子炉停止系統のうち少なくとも一つは、試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、少なくとも一つは、低温状態において未臨界を維持できるものとする。

三 反応度価値の最も大きな制御棒一本が固着した場合においても前号の規定に適合するものとする。

2 制御棒の最大反応度価値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉容器内部構造物の損壊を起こさないものでなければならない。

3 原子炉停止系統は、反応度制御系統と共用する場合には、反応度制御系統を構成する設備の故障が発生した場合においても通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものでなければならない。

適合のための設計方針

1 について

原子炉施設には、原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系並びに後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系を設ける。制御棒及び制御棒駆動系と後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系は相互に独立したものを設ける。原子炉スクラム時には、制御棒及び後備炉停止制御棒を、自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する。制御棒については、同一の構造及び機能を有する 4 本の独立したものを設ける。制御棒 4 本を炉心第 3 列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。また、各制御棒に使用する 4 式の独立した制御棒駆動系を設ける。制御棒（4 本）の反応度制御能力価値は $0.070 \Delta k/k$ 以上とし、反応度価値の最も大きな制御棒 1 本が固着した場合においても、 $0.015 \Delta k/k$ 以上の反応度停止余裕を確保できるように設計することから、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態（ここでは、 100°C の体系）において未臨界を維持できるものとする。後備炉停止制御棒については、同一の構造及び機能を有する 2 本の独立したものを設ける。後備炉停止制御棒 2 本を炉心第 5 列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移

行することができる設計とする（ここでは、350℃の体系）。後備炉停止制御棒の反応度制御能力は0.014 Δ k/k以上とし、350℃の体系において0.008 Δ k/k以上の反応度停止余裕を確保できるように設計することから、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行することができる。また、各後備炉停止制御棒に使用する2式の独立した後備炉停止制御棒駆動系を設ける。原子炉保護系と後備炉停止系用論理回路は、独立した盤に設置することで、独立性を確保した設計とする。

なお、原子炉保護系が作動した場合には、制御棒及び後備炉停止制御棒を切り離すものとするが、設計基準事故等の評価においては制御棒の挿入のみを考慮する。また、後備炉停止系用論理回路が作動した場合にも、制御棒及び後備炉停止制御棒を切り離すものとするが、炉心損傷防止措置の有効性評価においては後備炉停止制御棒の挿入のみを考慮する。

スクラム時挿入時間（制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度値90%挿入までの時間）は、0.8s以下とする【国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）「第32条（炉心等）」（その1：第32条第1～3項）参照】。

2 について

制御棒の最大反応度値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊を起こさないものとする。「添付書類10 2. 運転時の異常な過渡変化 2.2 未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き」、「添付書類10 2. 運転時の異常な過渡変化 2.3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き」及び「添付書類10 3. 設計基準事故 3.3 燃料スランピング事故」に示すように、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリの破損、及び炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊が生じることはない【国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）「第13条（運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止）」参照】。

3 について

制御棒及び制御棒駆動系は、反応度制御系統及び原子炉停止系統として共用する。制御棒は、制御棒駆動系により、上下駆動され、炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する（ボールナットスクリュ方式）。原子炉スクラム時には、制御棒がデラッチ（切り離し）される。制御棒は、自重及びスプリングにより加速されて、炉心に落下・挿入され、原子炉は停止する（バネ加速重力落下方式）。原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）は、炉心の反応度（原子炉の出力）を制御するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）の故障が発生した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする。

「炉心の変更」に関する基本方針

【第 32 条（炉心等）（その 1：第 32 条第 1～3 項）の別紙 1 に同じ】

1. 概要

「常陽」の炉心は、増殖炉心（以下「MK－Ⅰ炉心」という。）から照射用炉心（以下「MK－Ⅱ炉心」という。）へ変更された後、更に変更を加え、熱出力を 140MW とした照射用炉心（以下「MK－Ⅲ炉心」という。）に変更された。本申請では、更に変更を加え、熱出力を 100MW とした照射用炉心（以下「MK－Ⅳ炉心」という。）を対象とする。「炉心の変更」に関する基本方針を以下に示す。

2. 「炉心の変更」に関する基本方針

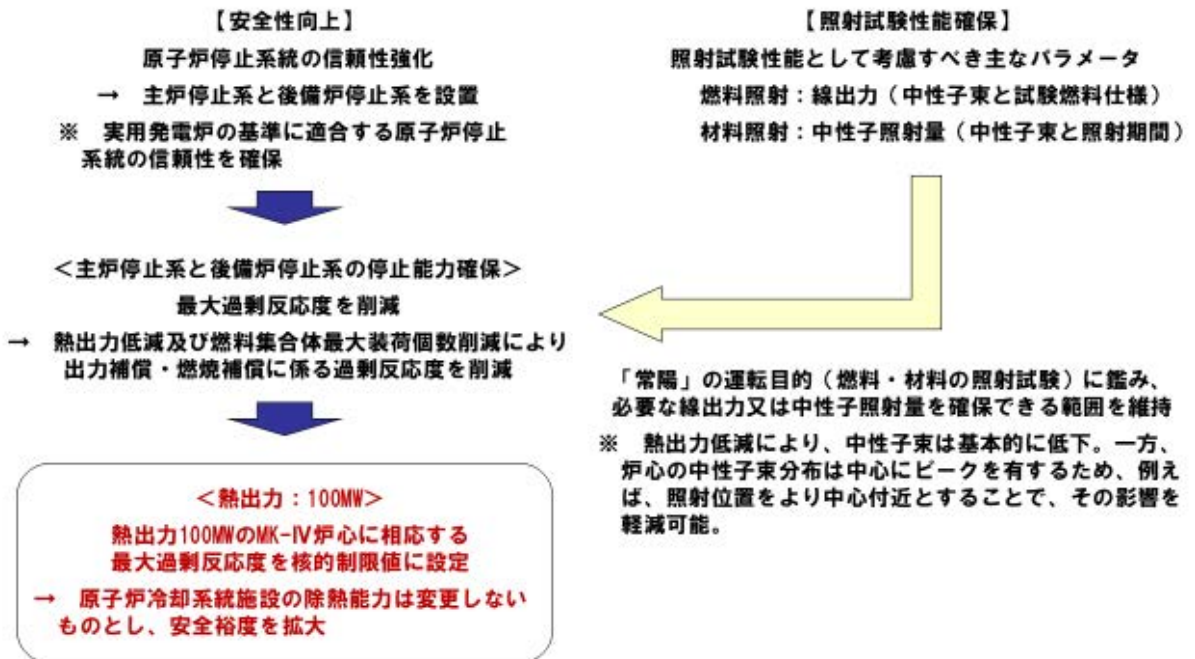
「炉心の変更」は、「常陽」を「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」等に適合させるための変更を行うに当たり、原子炉停止システムの信頼性を強化し、安全性を向上させること、一方で、高速炉燃料材料の開発等のための照射試験に必要な性能を維持することを目的とする（別図 1.1 参照）。

原子炉停止システムは、独立した主炉停止系と後備炉停止系を設けることで信頼性を向上する。それぞれの原子炉停止システムに要求される停止能力の確保には、最大過剰反応度の削減が必要であり、ここでは、熱出力の低減及び燃料集合体最大装荷個数の削減により、出力補償や燃焼補償に係る過剰反応度を削減して対応することとした。一方で、照射試験性能として考慮すべき主なパラメータである線出力と中性子照射量は、熱出力低減により基本的に低下する。必要な線出力又は中性子照射量を確保できる範囲に維持することも「常陽」の運転目的として肝要である。

熱出力を 100MW とした MK－Ⅳ炉心は、これらの要件を満足するものであり、当該炉心に相応する最大過剰反応度を核的制限値とする。

なお、原子炉冷却システム施設の除熱能力は変更しないものとし、安全裕度を拡大することとしている。

「炉心の変更」に伴って生じる主な変更点等を別図 1.2 に示す。本申請にあつては、MK－Ⅳ炉心（熱出力 100MW）での核設計や熱設計を実施するとともに、当該設計結果を炉心燃料集合体の機械設計や被ばく評価、安全評価等に反映する。



別図 1.1 「炉心の変更」に関する基本方針

MK-IV炉心（熱出力100MW）条件として、以下の変更・評価等を実施（最新知見の反映を含む）

【核設計における主な変更点】

- ・ 炉心構成（燃料集合体最大装荷個数削減に対応）
- ・ 核的制限値（最大過剰反応度削減に対応）
- ・ 反応度係数（炉心構成の変更に対応）
- ・ 動特性パラメータ（炉心構成の変更に対応）



【核熱設計結果の反映】

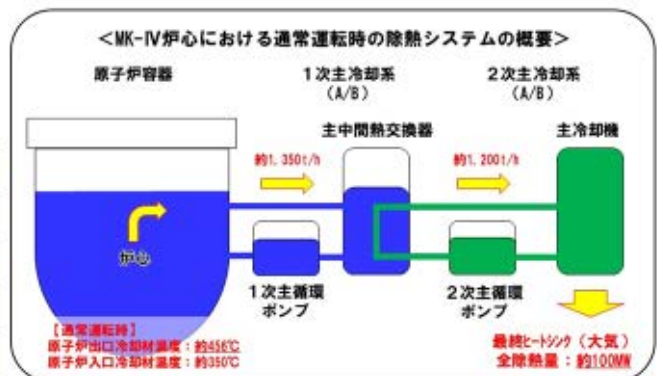
- ・ 炉心燃料集合体の機械設計（使用期間長期化対応を含む）
- ・ 動特性
- ・ 被ばく評価
- ・ 運転時の異常な過渡変化の評価
- ・ 設計基準事故の評価
- ・ 多量の放射性物質等を放出する事故の対策検討・評価

【熱設計における主な変更点】

- ・ 熱的制限値（熱出力低下に伴う使用期間長期化に対応）
- ・ 線出力密度や集合体冷却材流量（炉心構成の変更に対応）

熱的制限値： 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、原子炉停止系統及び安全保護系等の機能とあいまって**熱設計基準値（燃料の許容設計限界）**を超えないよう、かつ、その被覆管のクリープ寿命分数和と疲劣寿命分数和を加えた累積損傷和が設計上の制限値である1.0を超えないよう、定格出力時における制限値として設定

	MK-III炉心（140MW）		MK-IV炉心（100MW）	
	熱的制限値	熱設計基準値	熱的制限値	熱設計基準値
燃料最高温度	2,530℃	2,650℃	2,350℃	2,650℃
被覆管最高温度（肉厚中心）	675℃	830℃	620℃	840℃
冷却材最高温度		910℃		910℃



別図 1.2 「炉心の変更」に伴って生じる主な変更点等

地震時の制御棒の挿入性について

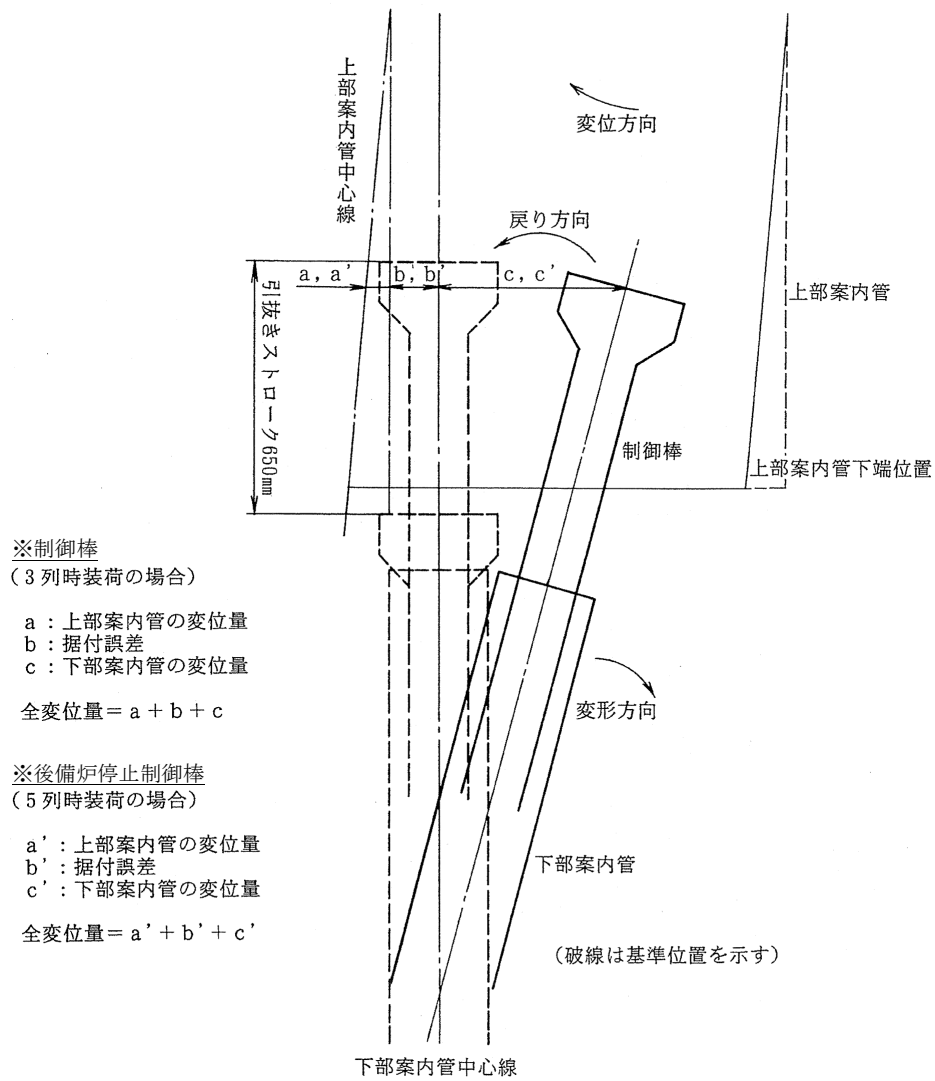
1. 地震時の制御棒挿入性評価の概要

「常陽」の制御設備及び非常用制御設備は、炉心第3列に設置される制御棒及び制御棒駆動系（主炉停止系）、第5列に設置される後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系（後備炉停止系）から構成される。主炉停止系と後備炉停止系のどちらも、地震時に生じる制御棒又は後備炉停止制御棒（制御棒又は後備炉停止制御棒を収納する下部案内管を含む。）及び制御棒又は後備炉停止制御棒をラッチする上部案内管（上部案内管に連結される駆動機構を含む。）の水平方向の相対変位を考慮しても、制御棒又は後備炉停止制御棒のスクラム時挿入時間（制御棒又は後備炉停止制御棒の保持電磁石励磁断からスクラム検出コイル位置※到達までの時間）が規定時間（0.8秒）以内となるように設計し、地震時の制御棒及び後備炉停止制御棒の挿入機能を維持する。制御棒、上部案内管及び下部案内管の構造並びにスクラム時挿入時間の要求は、主炉停止系と後備炉停止系で同じであり、以下、特に断りがない限り、「制御棒」には「後備炉停止制御棒」も含めるものとする。

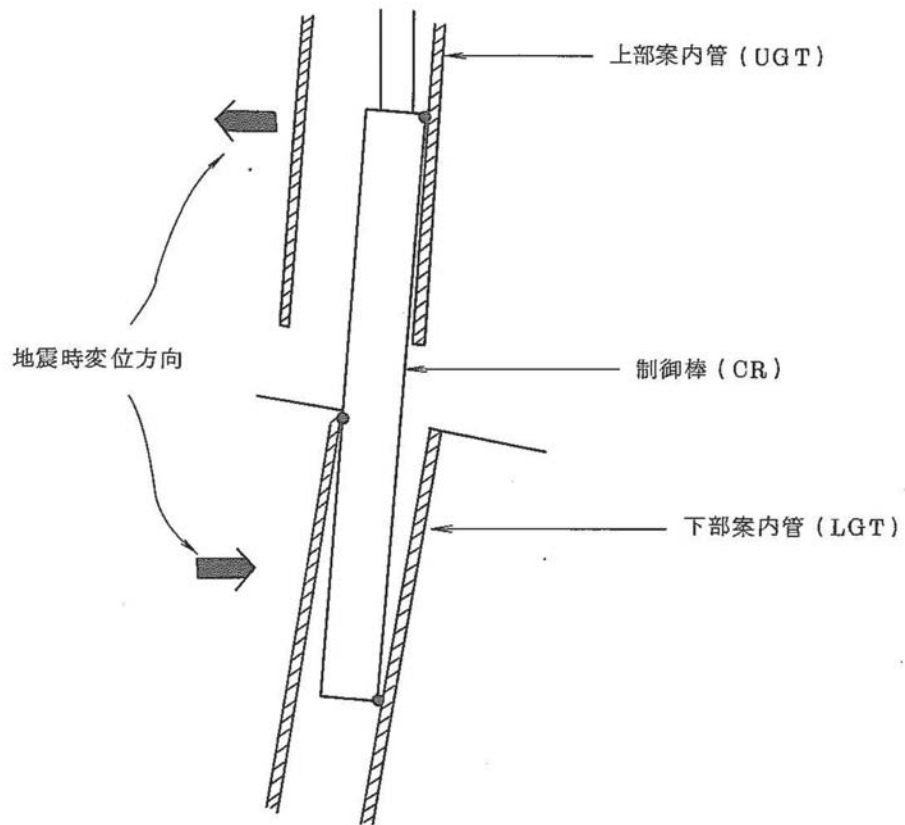
既許可・既設工認の地震時の制御棒挿入性については、上部案内管と下部案内管の相対変位を模擬した試験条件でのスクラム試験の結果により、相対変位 35mm までの範囲における制御棒挿入性を確認し、制御棒の挿入性は確保されると評価している^{[1],[2]}。したがって、基準地震動 S_s に対して上部案内管と下部案内管の地震時最大変位量（第 1.1 図）を評価し、その相対変位が 35mm 以下であることを以て、地震時の制御棒の挿入性を評価する（静的条件での制御棒挿入性評価）。なお、第 1.2 図のように地震の変位により制御棒が上部案内管及び下部案内管と 3 点拘束が生じた場合、制御棒の挿入時間が長くなるが、相対変位が 35mm 以下では 3 点拘束は生じない。

また、地震による加振中には、制御棒と下部案内管の衝突により接触摩擦抵抗によるスクラム時挿入時間の遅延が考えられるため、衝突による摩擦抵抗を考慮してもスクラム時挿入時間が規定時間（0.8 秒）以内となることも確認する（動的条件での制御棒挿入性評価）。

※スクラム検出コイル位置は、制御棒の挿入ストロークで約 530mm 位置であり、制御棒反応度価値 90%挿入位置の約 510mm より制御棒が挿入された位置となる。



第 1.1 図 地震時水平方向変位概略^[2]



第 1.2 図 制御棒の 3 点拘束

2. 静的条件での制御棒挿入性評価

2.1 制御棒スクラム試験

(1) 試験方法・試験条件

「常陽」制御棒のスクラム特性を確認するため、水中における実規模大モックアップ試験により、制御棒上部案内管と下部案内管の相対変位（偏心量）を 35mm まで変化させたときのスクラム時間を測定した。

水温は、390℃におけるナトリウムの動粘性係数を模擬する 90℃とした。

流量は、制御棒一本当たりの配分流量 2.7 kg/s を 390℃のナトリウムに換算した 190 L/min とした。

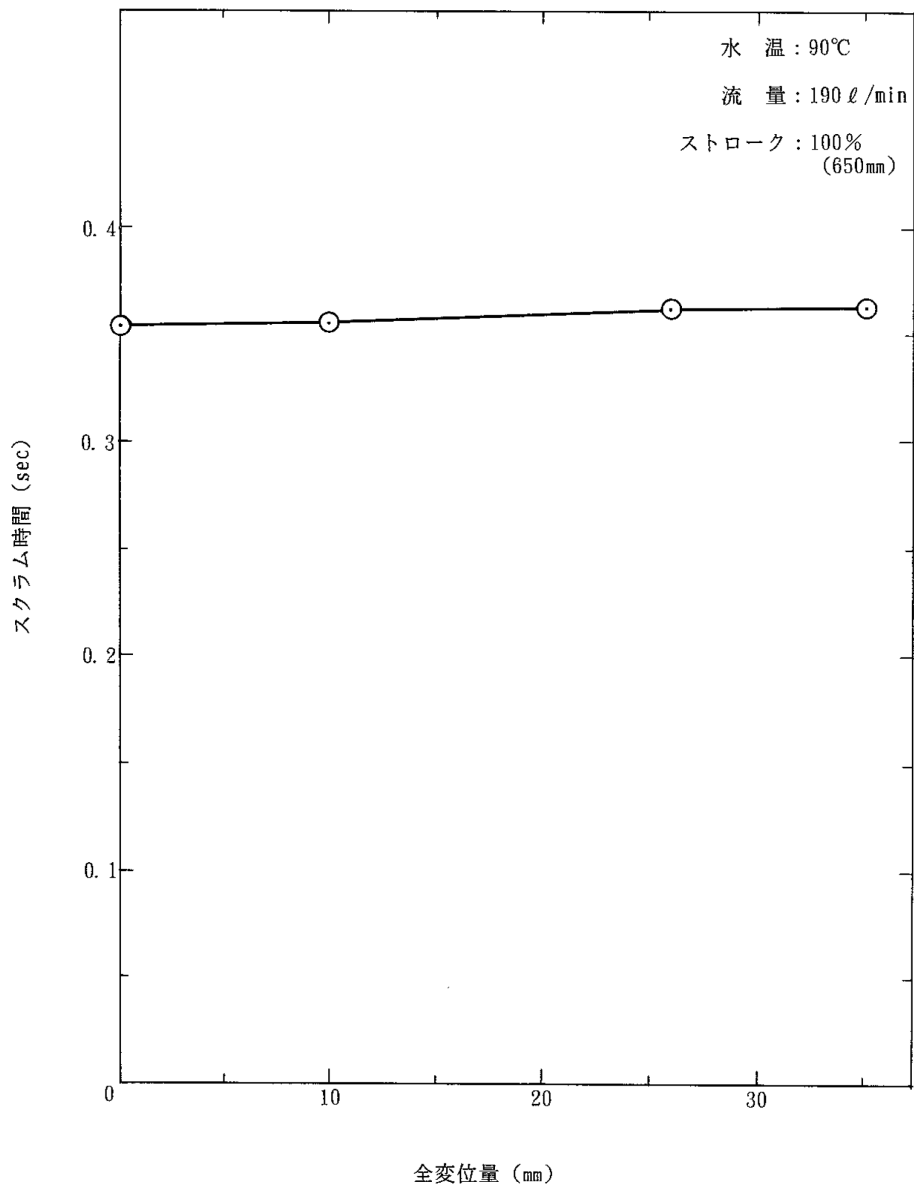
ここではスクラム時間は、デラッチリミットスイッチの作動した時間からスクラム位置（挿入ストローク 530mm の位置）に到達するまでの時間※で定義し、リミットスイッチと上部案内管に取り付けされた検出コイルにより測定した。

※設計ではスクラム時挿入時間を 0.8 秒以内としているが、これは保持電磁石励磁断からスクラム検出コイル位置到達までの時間である。保持電磁石励磁断からデラッチリミットスイッチ作動までの時間が 0.2 秒として、この場合のスクラム時間の目標は 0.6 秒以内となる。

(2) 試験結果

スクラム時間と偏心量の関係を示す。

スクラム時間は 35mm までの偏心量においてほぼ一定の値となっており、スクラム時挿入時間への影響がないことを確認した。



第 2.1 図 偏心量に関するスクラム特性 (水中) [2]

2.2 地震応答解析

制御棒を収納する下部案内管及び上部案内管の水平方向の変位を地震応答解析より算出する。下部案内管の上部と上部案内管の下部の水平方向の最大変位から、その最大相対変位を算出する。

2.2.1 上部案内管の水平方向変位の評価

(1) 解析方法・条件

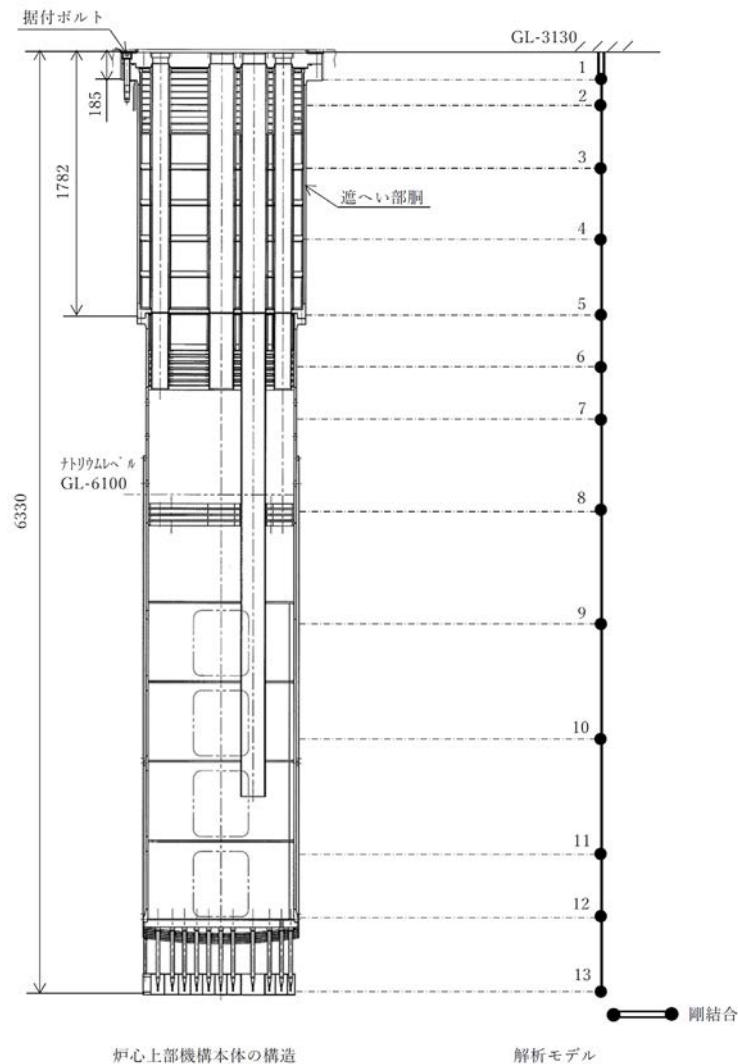
①解析コード

汎用非線形構造解析システム FINAS コード (ver. 21.3)

②解析モデル

解析モデルを第 2.2 図に示す。遮蔽部胴及び継胴の円筒部を梁要素でモデル化し、質量を分布質量としている。上端（上部フランジ接続部）を完全拘束としている。

炉心上部機構の下端（ノード No. 13）の変位が、制御棒上部案内管の下端変位となる。



第 2.2 図 炉心上部機構の解析モデル

③材料物性値

炉心上部機構の主要材料は SUS304 であり、運転温度は 370～500℃であるため、解析に使用する材料物性値は以下の値とした。

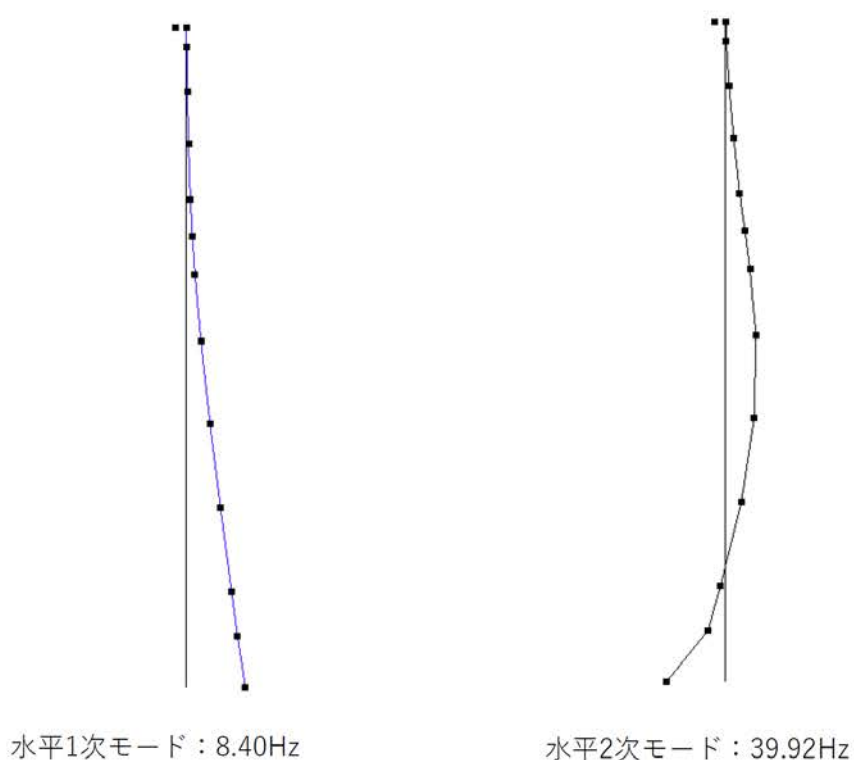
縦弾性係数：159,000MPa (at 500℃)

ポアソン比：0.302

なお、材料物性値は「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005 年版）＜第Ⅱ編 高速炉規格＞ JSME S NC2-2005（日本機械学会）」に基づいている。

④固有値解析

炉心上部機構の水平方向振動モードを第 2.3 図に示す。炉心上部機構の水平方向 1 次モードは 8.4Hz となっている。



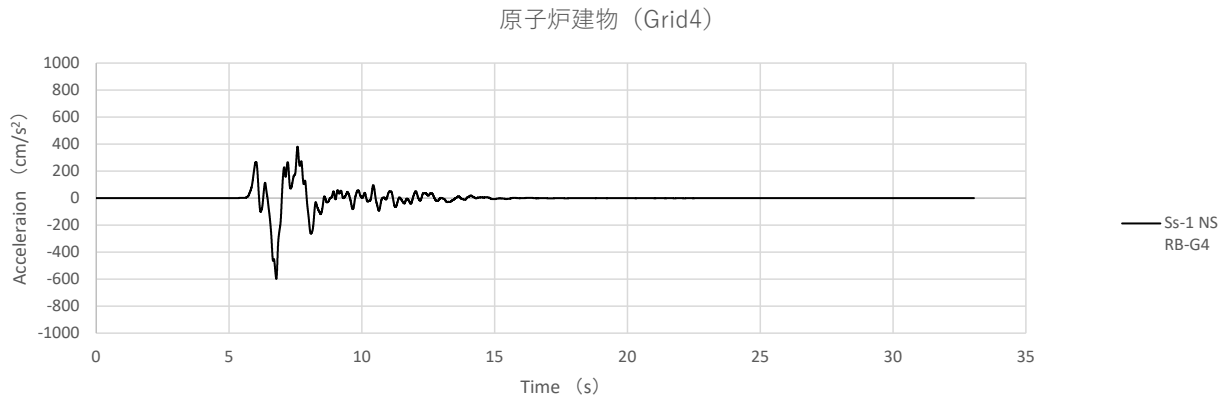
第 2.3 図 炉心上部機構の振動モード

⑤減衰定数

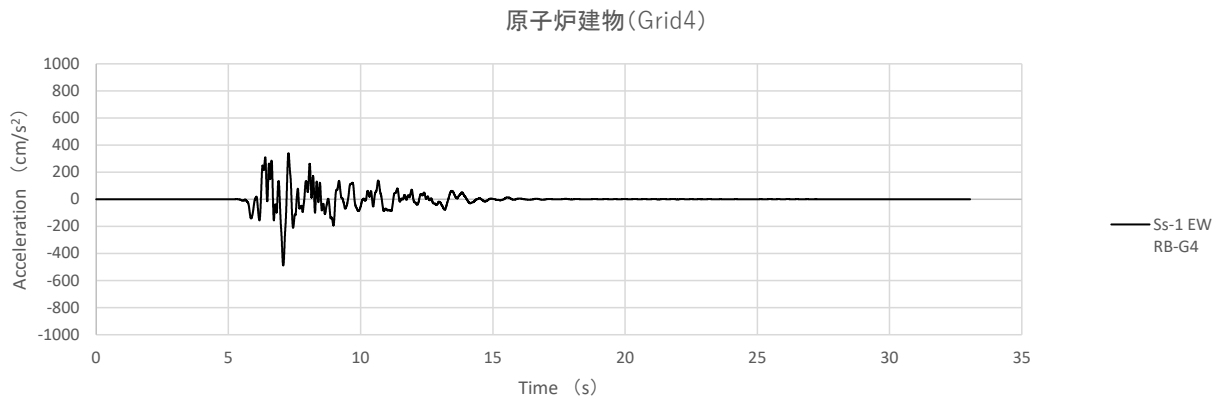
JEAC-4601-2008「4.4.5 設計用減衰定数」より 1.0%を用い、Rayleigh 型の比例減衰を用いる。

⑥加振波

「常陽」原子炉建物の地震応答解析により求めた建物地下中 1 階床応答（加速度応答）を入力とする。ここでは、2018 年 10 月 26 日補正申請の Ss-D, 1-5 波による地盤応答解析、建物応答解析の結果を使用する。解析入力の加振波例（Ss-1）を第 2.4 図及び第 2.5 図に示す。



第 2.4 図 原子炉建物 BM1F 加速度時刻歴 (Ss-1、NS 方向)



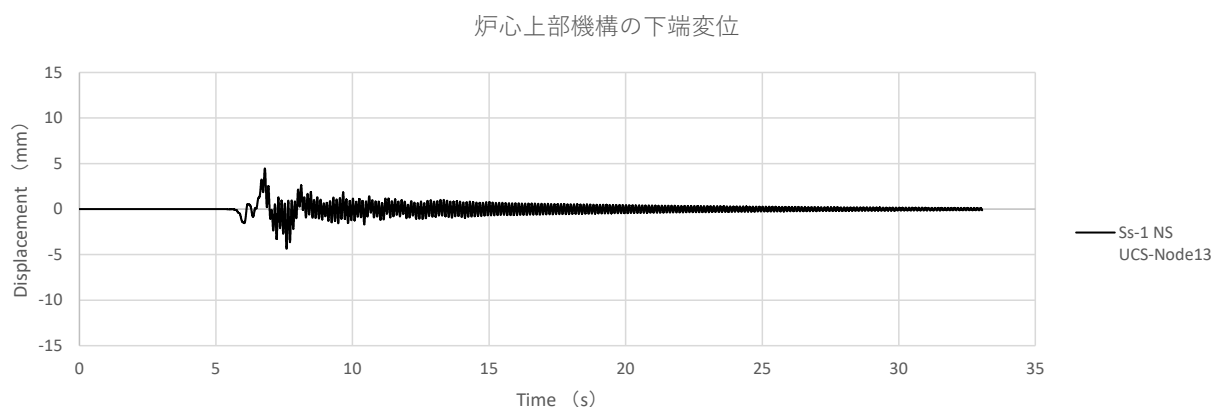
第 2.5 図 原子炉建物 BM1F 加速度時刻歴 (Ss-1、EW 方向)

(2) 地震応答解析結果

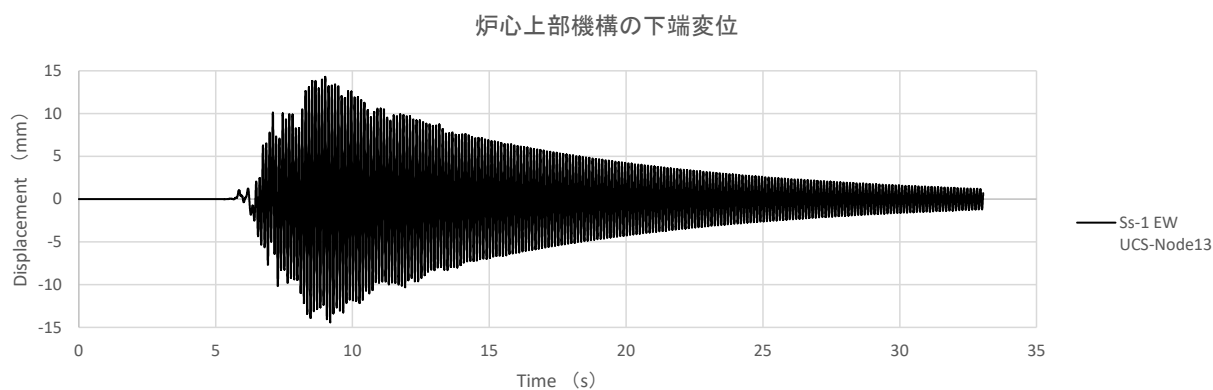
水平方向最大変位の解析結果を第 2.2 表に、変位の時刻歴例 (Ss-1) を第 2.6 図及び第 2.7 図に示す。水平方向変位は Ss-1 で最も大きくなる。炉心上部機構の 1 次固有振動数が 8.4Hz と、原子炉建物自体の EW 方向の 1 次固有振動数に近く、特に EW 方向の応答が増幅されている。

第 2.2 表 解析結果 (水平方向最大変位)

地震波	水平方向最大変位 (mm) (NS 方向)	水平方向最大変位 (mm) (EW 方向)
Ss-D	4.1	5.0
Ss-1	4.5	14.4
Ss-2	3.6	11.5
Ss-3	3.9	7.0
Ss-4	5.4	8.1
Ss-5	7.7	8.7



第 2.6 図 水平方向時刻歴 (Ss-1、NS 方向)



第 2.7 図 水平方向時刻歴 (Ss-1、EW 方向)

2.2.2 下部案内管の水平方向変位の評価

(1) 解析方法・条件

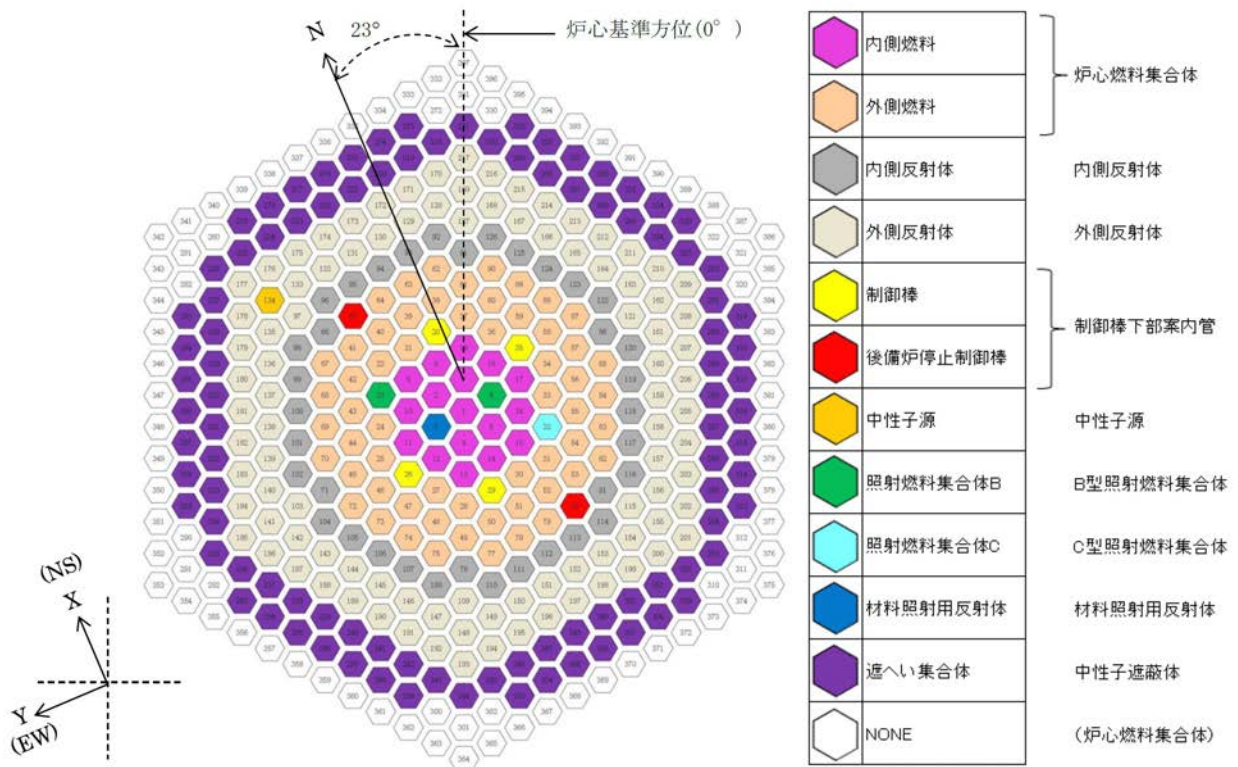
①解析コード

3次元炉心群振動解析コード Revian-3D (v8.2)

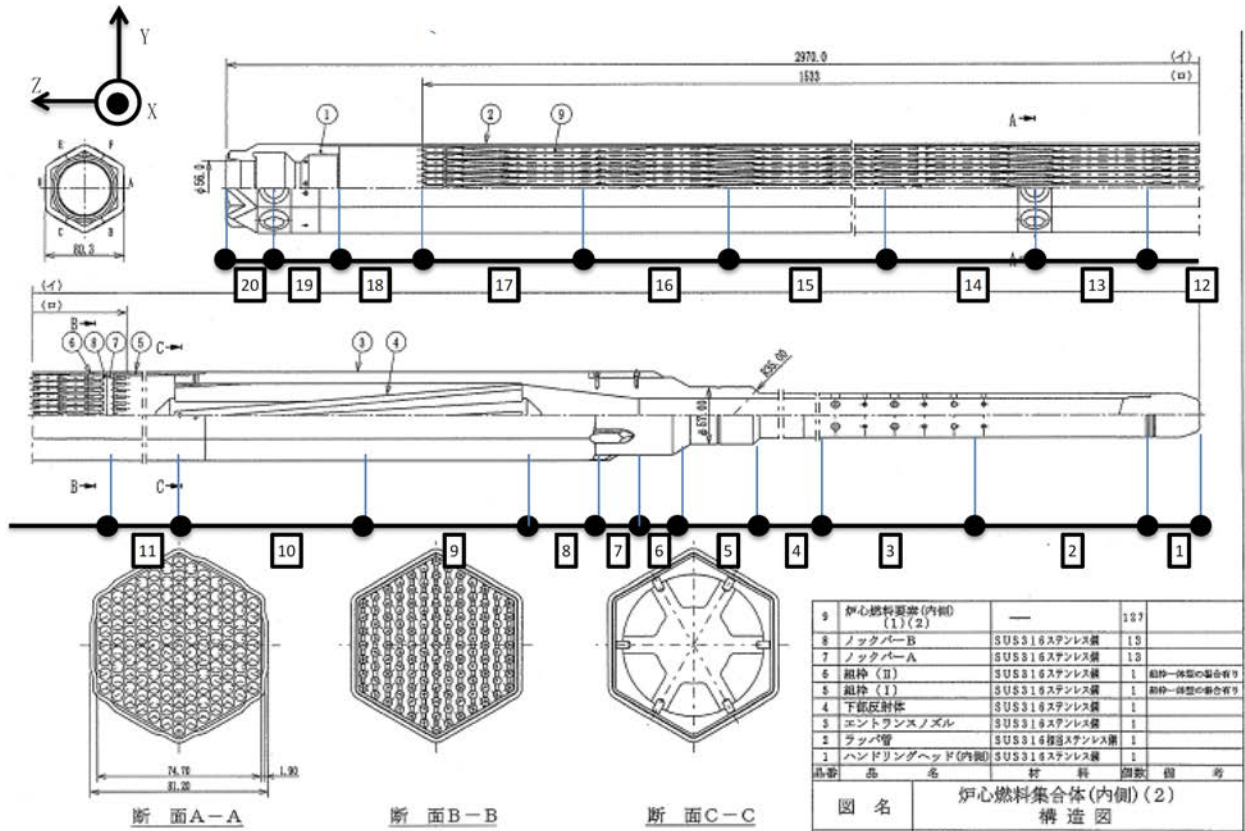
※もんじゅの模擬燃料体の部分装荷に関する審査において適用したコード^{[3], [4]}。

②解析モデル

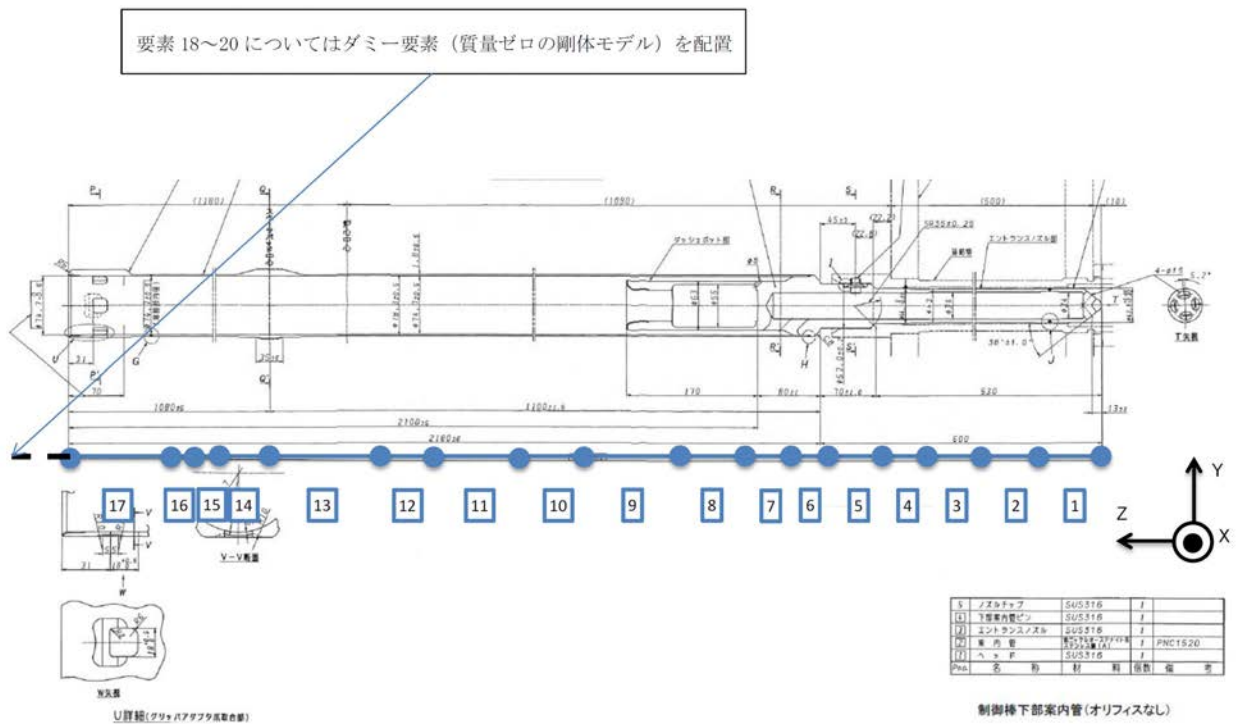
解析対象炉心の配置を第2.8図に示す。解析では、炉心燃料集合体、内側反射体、外側反射体、制御棒下部案内管（制御棒、後備炉停止制御棒）、中性子源、B型照射燃料集合体、C型照射燃料集合体、材用照射用反射体、遮へい集合体の9種類の炉心構成要素をモデル化した。制御棒下部案内管以外のビームモデルを第2.9図に、制御棒下部案内管（制御棒、後備炉停止制御棒）のビームモデルを第2.10図に示す。



第2.8図 解析体系の炉心配置



第 2.9 図 制御棒下部案内管以外のビームモデル



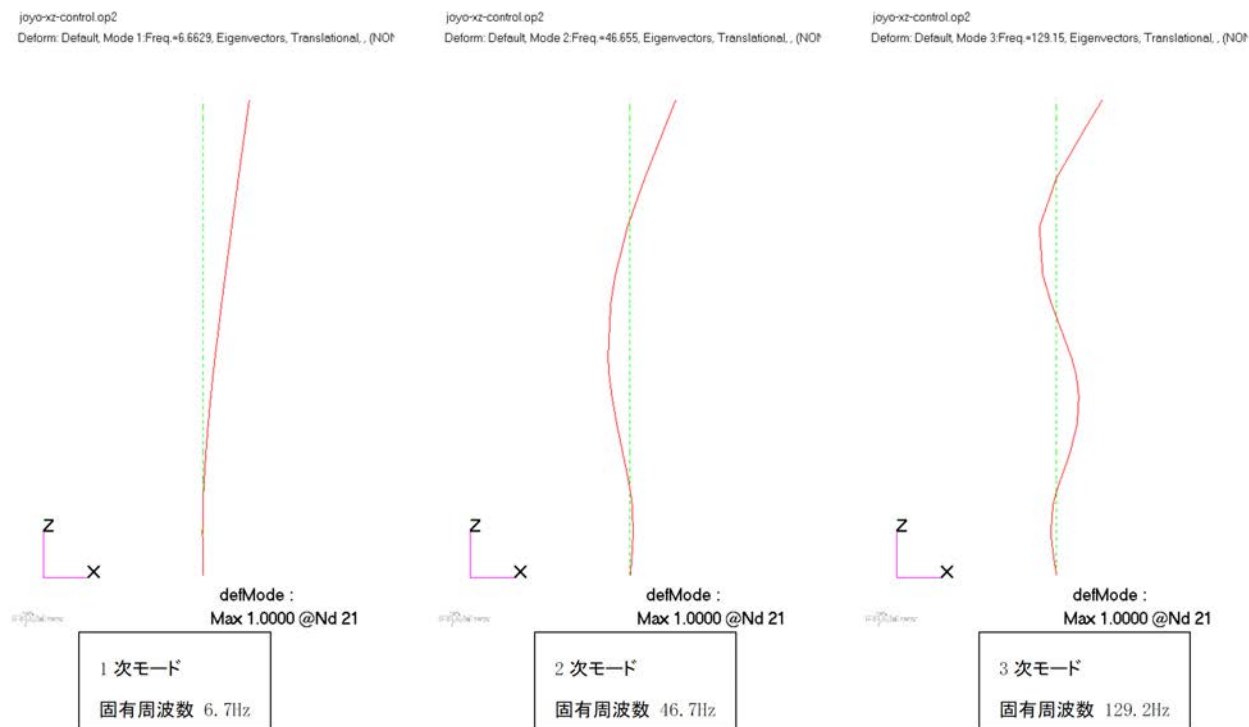
第 2.10 図 制御棒下部案内管のビームモデル

③材料物性値

炉心燃料集合体の内部流体（ナトリウム）の温度は、燃料ペレット下端より下部は 350℃、燃料ペレット上端より上部は 493℃とし、その間は線形となる温度分布とした。炉心燃料集合体を除く炉心構成要素の内部流体（ナトリウム）の温度は一律 350℃とした。剛性を算出する際の構造物の温度も内部流体（ナトリウム）の温度と同様とした。

④固有値解析

制御棒下部案内管の振動モードを第 2.11 図に示す。



第 2.11 図 制御棒下部案内管の振動モード

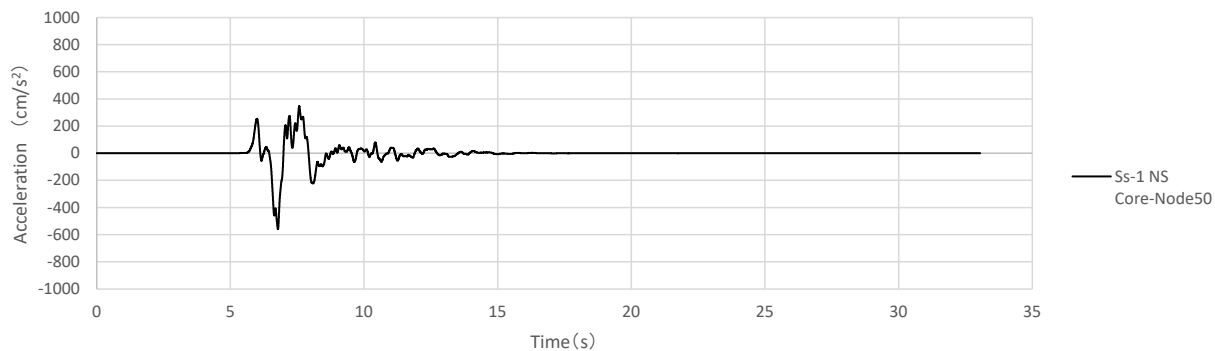
⑤減衰定数

炉心構成要素の振動モードを 1 次から 3 次まで考慮し、1 次モードで 3%、2 次/3 次モードで 15% とする。

⑥加振波

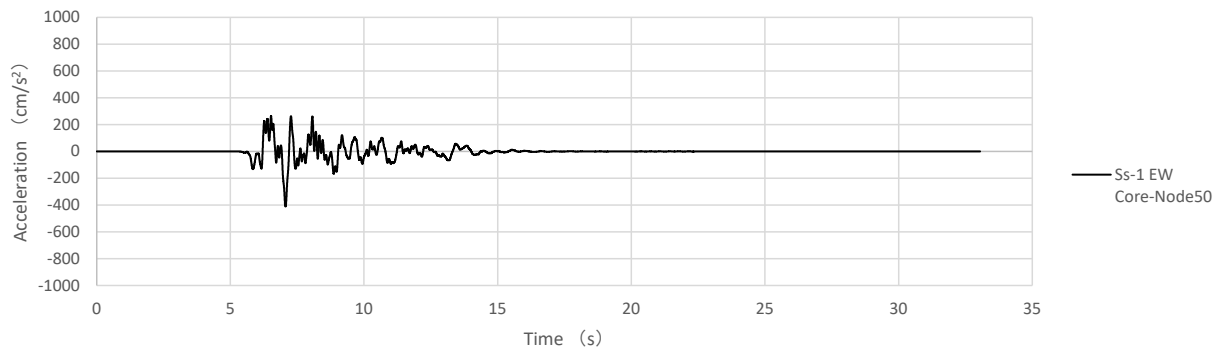
「2.2.1 上部案内管の水平方向変位の評価」の原子炉容器解析による炉心支持板応答を入力波とする。解析入力波例 (Ss-1) を第 2.12 図～第 2.14 図に示す。

原子炉容器炉心支持板 (R/V-Node50)



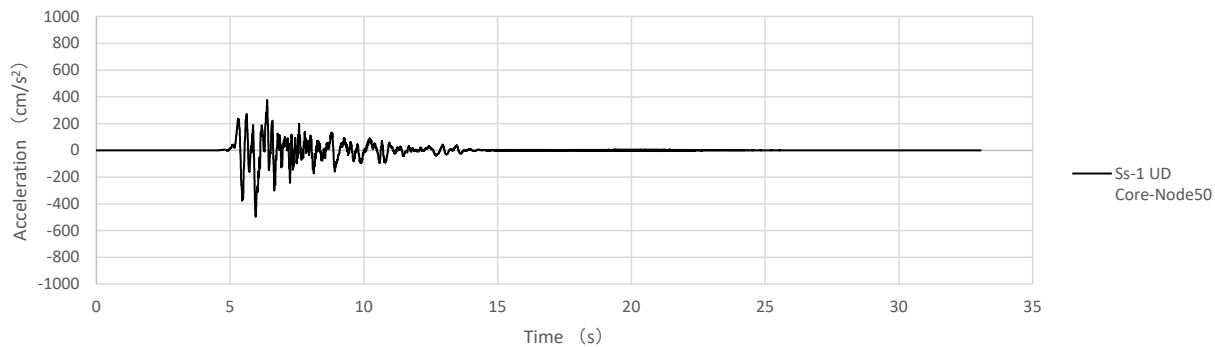
第 2.12 図 炉心支持板 (炉心下端位置) の加速度時刻歴 (Ss-1、水平 NS 方向)

原子炉容器炉心支持板 (R/V-Node50)



第 2.13 図 炉心支持板 (炉心下端位置) の加速度時刻歴 (Ss-1、水平 EW 方向)

原子炉容器炉心支持板 (R/V-Node50)



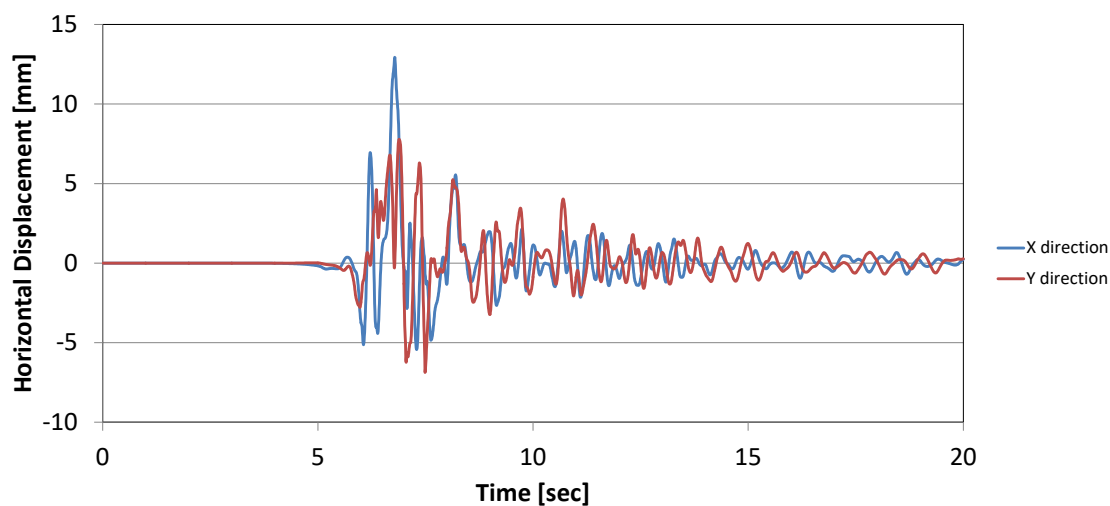
第 2.14 図 炉心支持板 (炉心下端位置) の加速度時刻歴 (Ss-1、鉛直 UD 方向)

(2) 解析結果

水平方向最大変位の解析結果を第 2.3 表に、変位の時刻歴例 (Ss-1) を第 2.15 図に示す。制御棒 (第 3 列 4 本)、後備炉停止制御棒 (第 5 列 2 本) の制御棒下部案内管頂部水平変位のうち最大値を記載している。

第 2.3 表 制御棒下部案内管の水平方向最大変位

地震波	制御棒 (mm) (NS+EW 方向合成)	後備炉停止制御棒 (mm) (NS+EW 方向合成)
Ss-D	14.4	13.7
Ss-1	11.8	12.9
Ss-2	14.2	13.4
Ss-3	12.6	13.3
Ss-4	11.2	10.7
Ss-5	10.0	10.4



第 2.15 図 頂部水平変位の時刻歴 (Ss-1)

2.3 地震時の相対変位評価

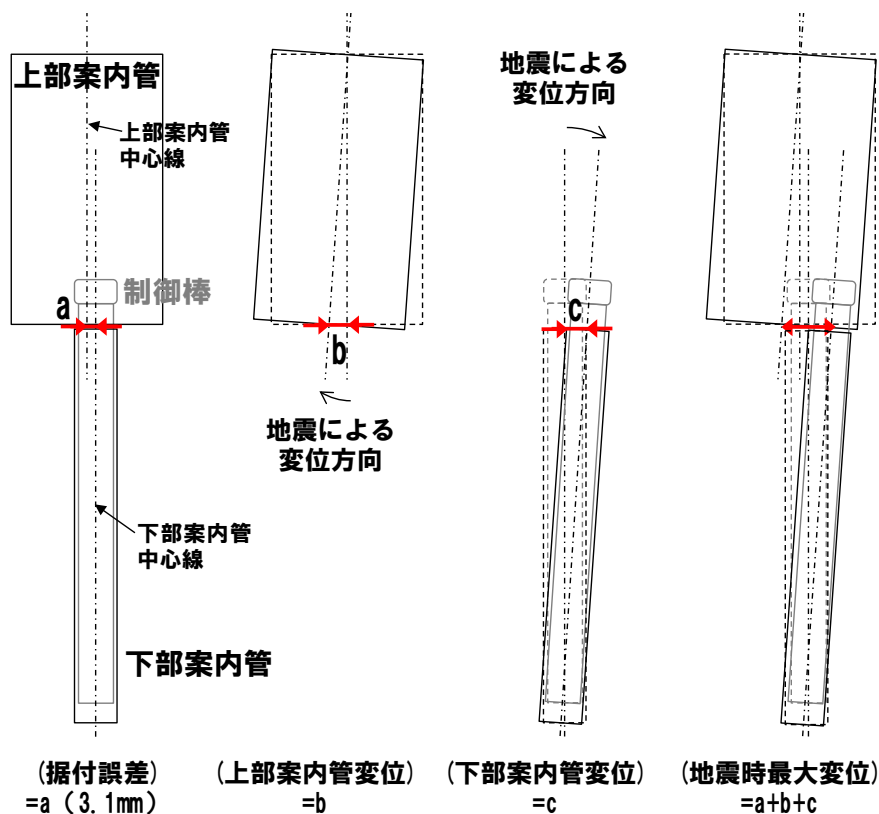
結果を整理すると第 2.4 表のとおりとなる。ここでは、上部案内管と下部案内管の最大変位が生じる時刻のズレは考慮せず、それぞれの変位量の最大値としている。この上部案内管・下部案内管それぞれの最大変位量に上部案内管の据付誤差 3.1mm を考慮して、水平方向の最大相対変位量を算出する（第 2.16 図）。

第 2.4 表 地震時の相対変位

地震波	据付誤差 a (mm)	上部案内管下端最大 変位量 b^{*1} (mm) (NS+EW 方向合成)	下部案内管頂部最大 変位量 c^{*2} (mm) (NS+EW 方向合成)	水平方向最大相対 変位量 $a+b+c$ (mm)
Ss-D	3.1	6.4	14.4	23.9
Ss-1	3.1	14.5	12.9	30.5
Ss-2	3.1	11.5	14.2	28.8
Ss-3	3.1	7.0	13.3	23.4
Ss-4	3.1	8.4	11.2	22.7
Ss-5	3.1	9.2	10.4	22.7

*1 同時刻における合成変位（NS 方向+EW 方向）の最大

*2 制御棒及び後備炉停止制御棒の最大



第 2.16 図 上部案内管と下部案内管の水平方向最大相対変位の算出

第 2.4 表より最大相対変位は最大でも 30.5mm (Ss-1) であり、スクラム試験の結果から 0.8 秒以内の挿入性が確認されている 35mm を超えない。

よって、基準地震動 Ss の地震時においても「核的挿入 90%が 0.8 秒以内」の制御棒挿入性は確保される。

3. 動的条件での制御棒挿入性評価

加振によって制御棒が上部案内管・下部案内管と衝突し、その接触摩擦抵抗によるスクラム時挿入時間の遅延への影響を調べるため、加振中の制御棒挿入の振舞いを解析により確認する。

(1) 解析方法・条件

①使用コード

汎用機構解析コード ADAMS ver. 2019

※制御棒挿入性評価へ適用することの妥当性検証を別添 1 に示す。

②解析モデル

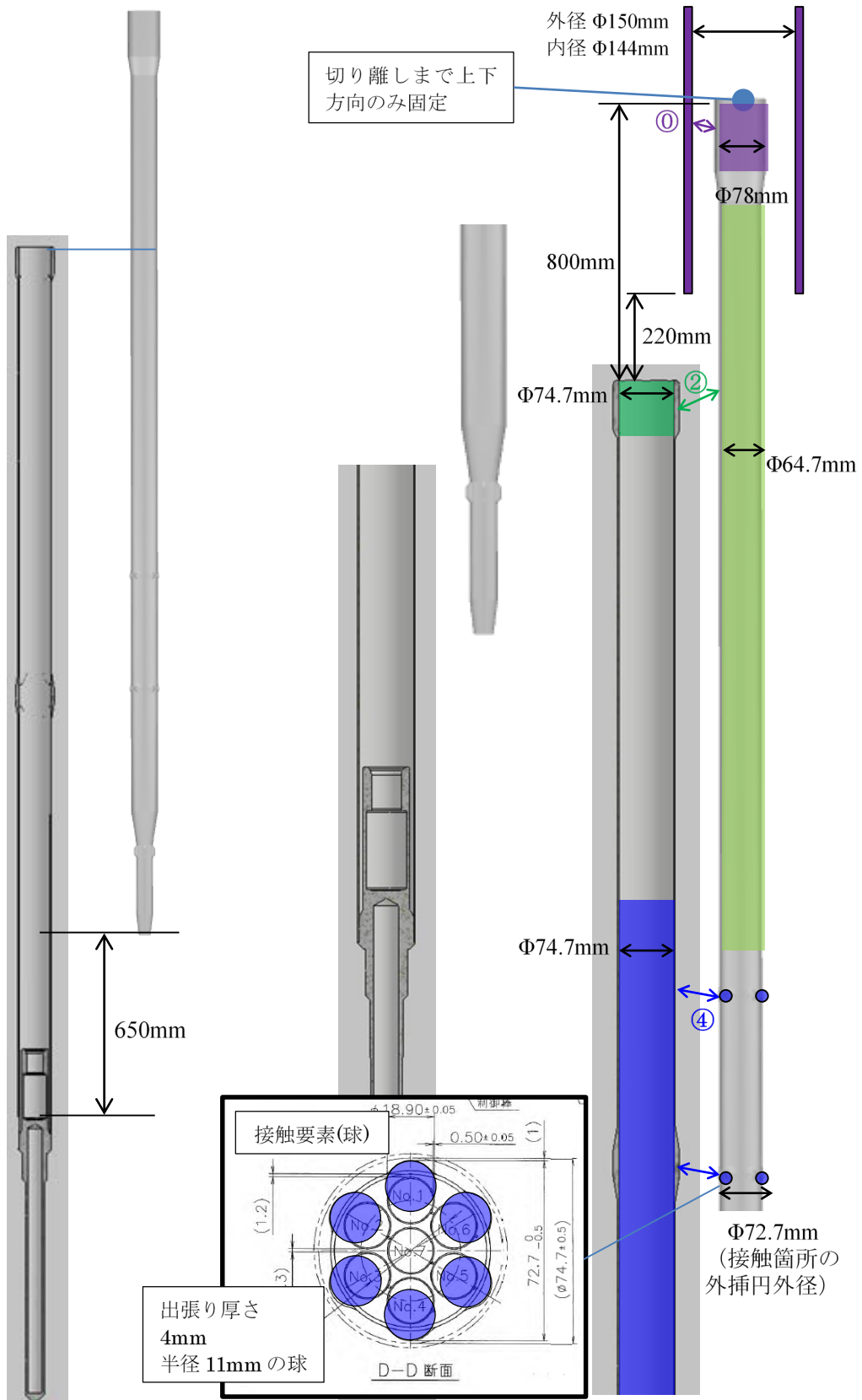
制御棒、下部案内管は形状を模擬した剛体とし、上部案内管は単純円筒で模擬する。制御棒の接触条件を第 3.1 図及び第 3.2 図に示す。

加速管は円筒構造（上部のみ外径が大きい）で模擬する。加速管は回転せず、並進運動するとし、加速管と上部案内管の接触は上部のみを考慮する。加速管と制御棒の間は、水平及び回転をフリーとし、加速管と制御棒は、加速管下端と制御棒上端の面で接触を考慮する（上下方向のみ）。加速管の接触条件を第 3.3 図に示す。

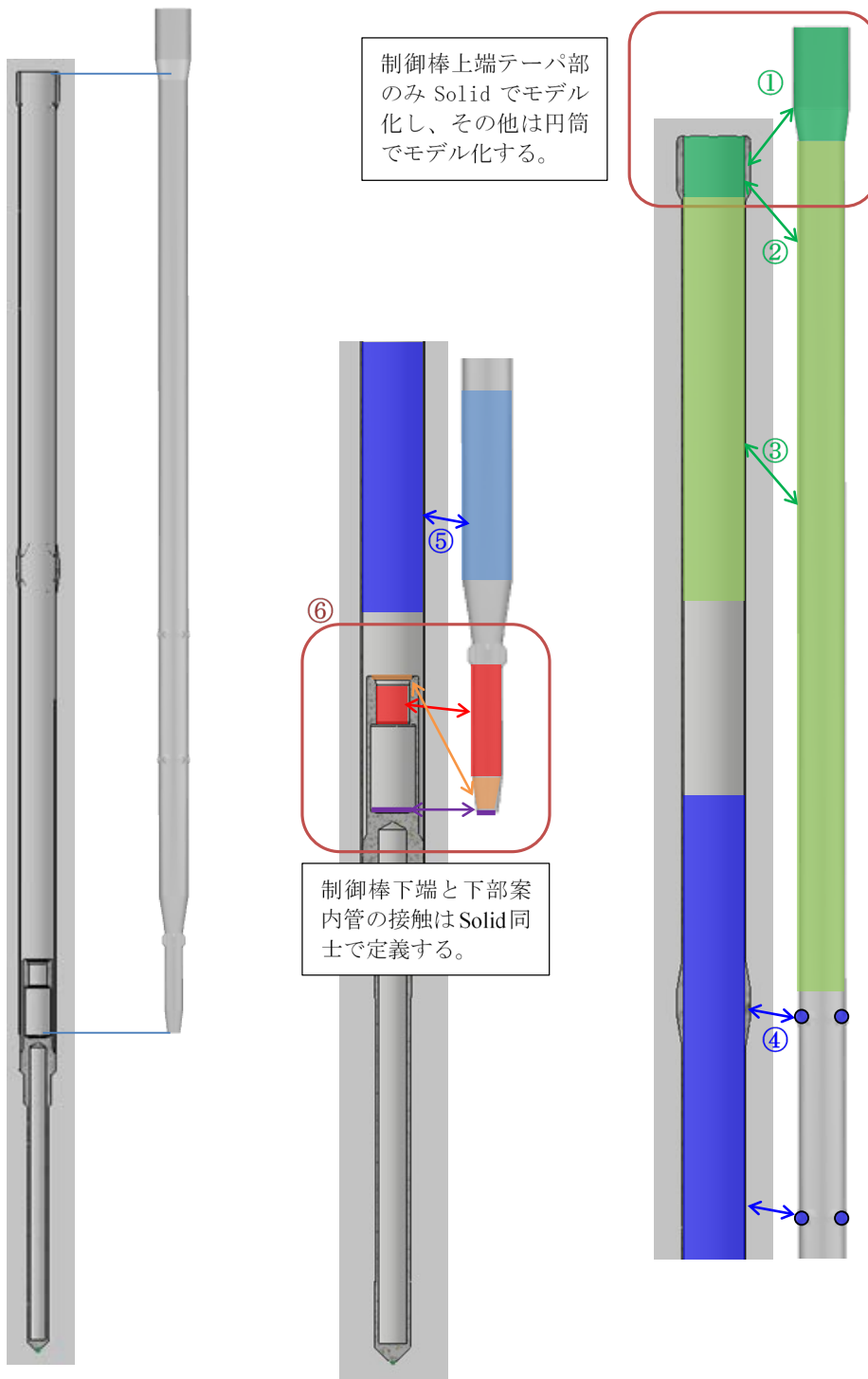
衝突パラメータは既存の FBR 実証施設試験体の落下試験や「常陽」の炉心構成要素ラッパ管の落下試験の結果より、寸法・板厚が近いものを用いた。接触箇所における衝突剛性・衝突減衰は各部位の衝突合成・衝突減衰の直列ばねとして計算した（第 3.1 表）。

第 3.1 表 接触パラメータ

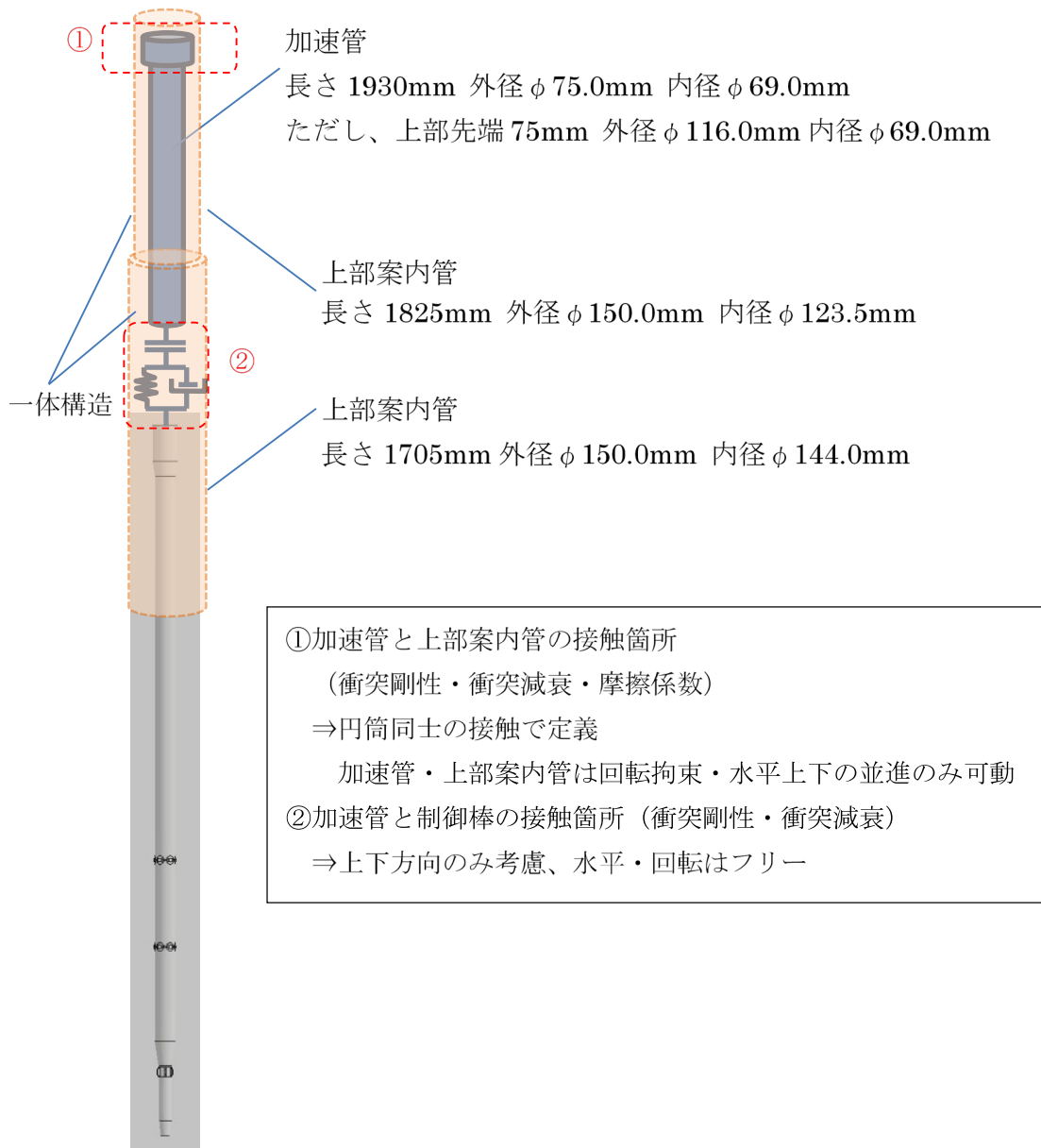
	剛性 (N/mm)	減衰 (Ns/mm)
第 3.1 図①	4.6×10^3	8.8×10^{-1}
第 3.2 図①	1.6×10^4	9.0×10^{-1}
第 3.1 図、第 3.2 図②	5.7×10^3	1.7×10^{-1}
第 3.2 図③	3.8×10^3	1.0×10^{-1}
第 3.1 図、第 3.2 図④	3.8×10^3	1.0×10^{-1}
第 3.2 図⑤	7.1×10^3	2.0×10^{-1}
第 3.2 図⑥	2.2×10^4	2.1×10^0
第 3.3 図①	3.0×10^4	2.5×10^1
第 3.3 図②	1.0×10^4	1.0×10^2



第 3.1 図 制御棒の接触条件 (切り離し時)



第 3.2 図 制御棒の接触条件（着座時）

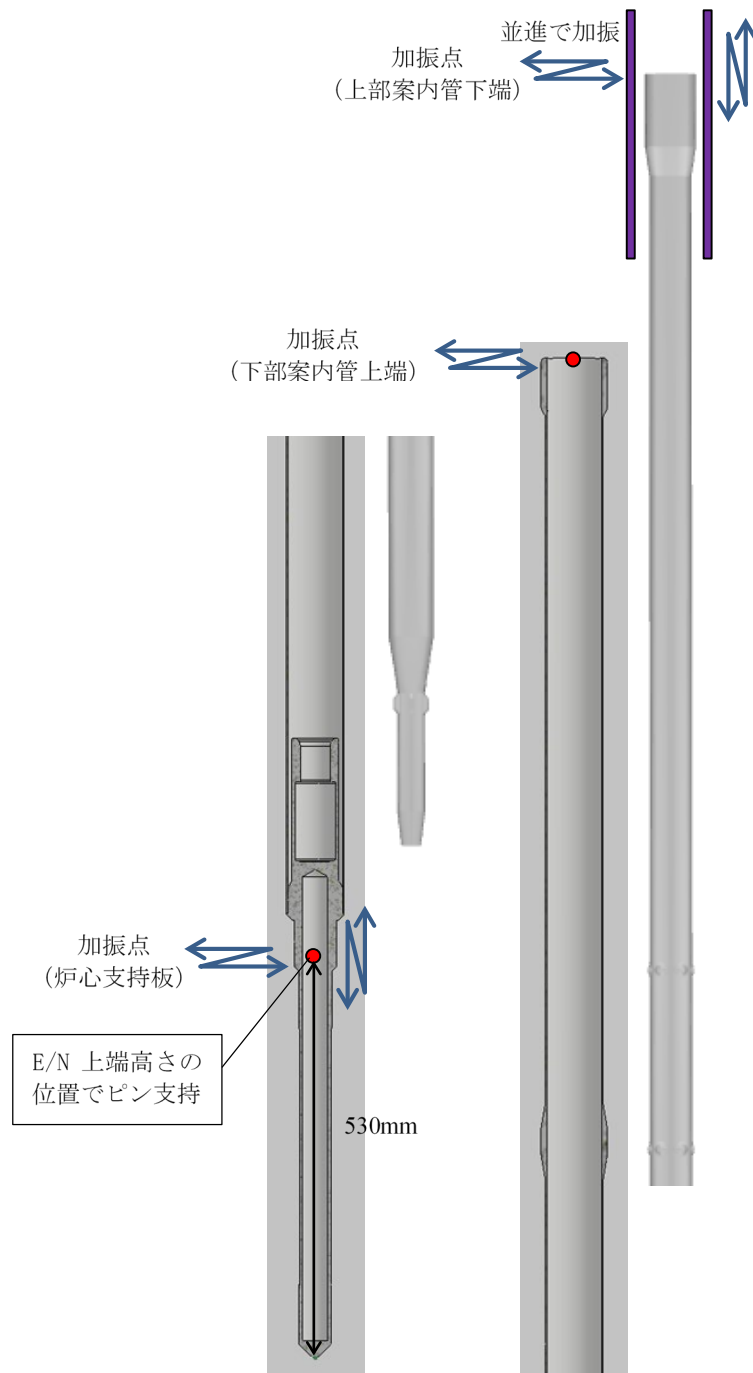


第 3.3 図 加速管の接触条件

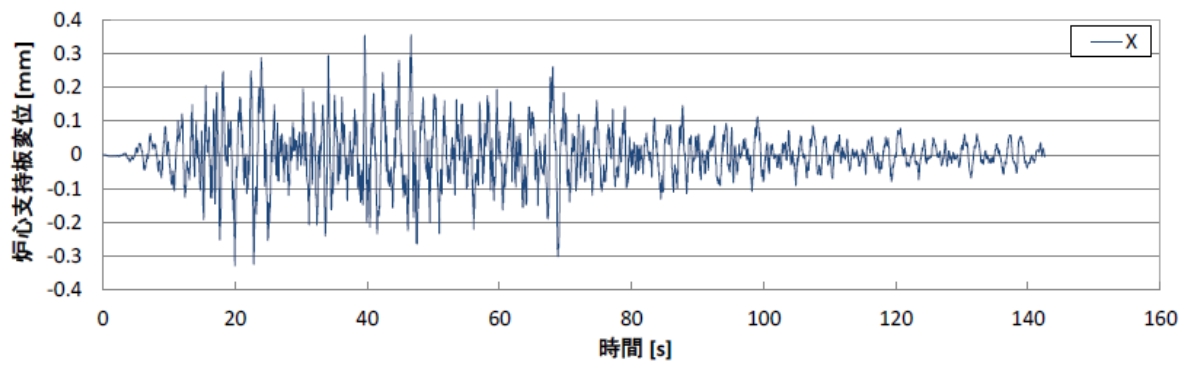
③加振波

加振点を第 3.4 図に示す。下部案内管の下部（炉心支持板球面座）を水平 2 方向加振及び鉛直方向に加振する。また下部案内管の上部を水平 2 方向に加振する（鉛直方向はフリー）。下部案内管は下部をピン支持・回転フリーとし、上下 2 箇所の水平加振によって、下部案内管は回転しながら振動する。上部案内管は水平 2 方向及び鉛直方向に並進して加振する（回転しない）。

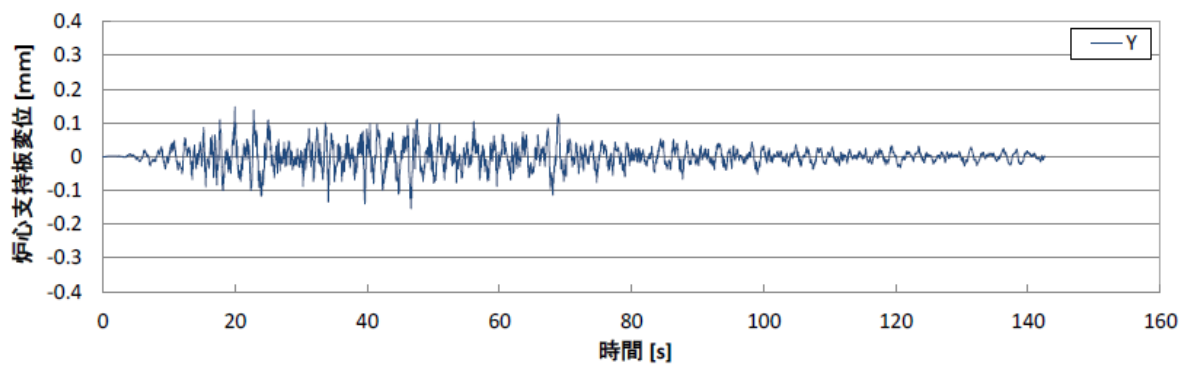
加振波を第 3.5 図～第 3.22 図に示す。「2.2 地震応答解析」の炉心支持板、上部案内管、下部案内管の応答を使用する。解析開始タイミングについては、実際には最大変位が生じるより前に挿入が完了すると考えられるが、ここでは、下部案内管と上部案内管の相対変位が最も大きくなるタイミング中での解析とする。



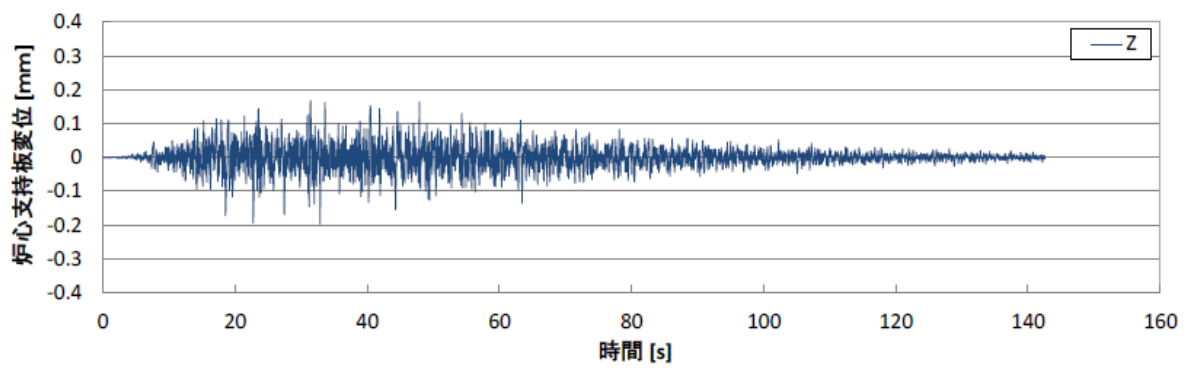
第 3.4 図 解析モデルにおける加振箇所



(a) X 方向

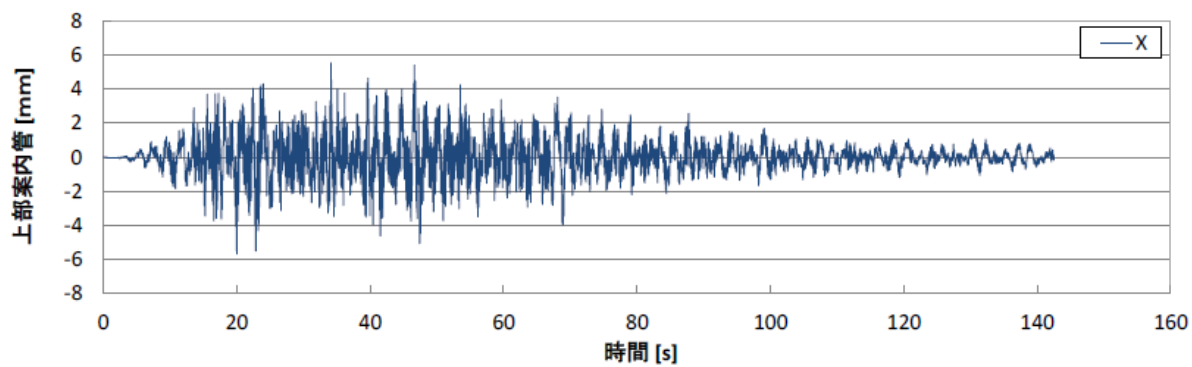


(b) Y 方向

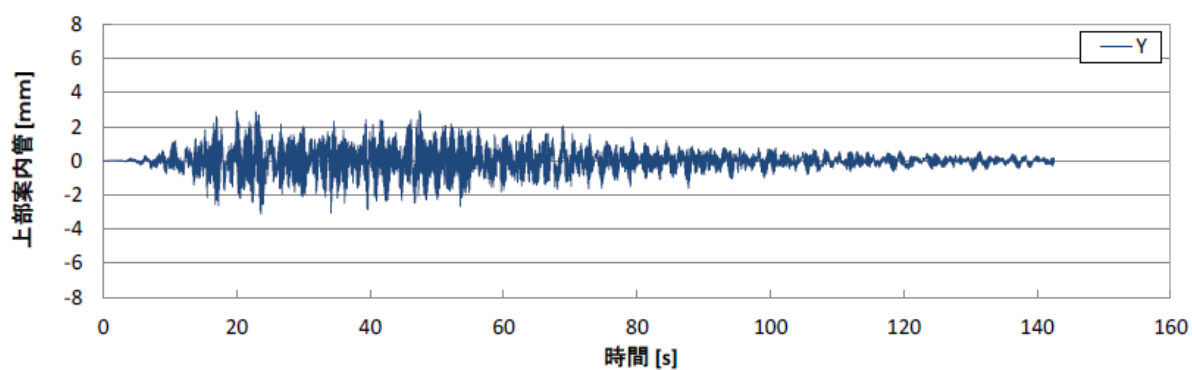


(c) Z 方向

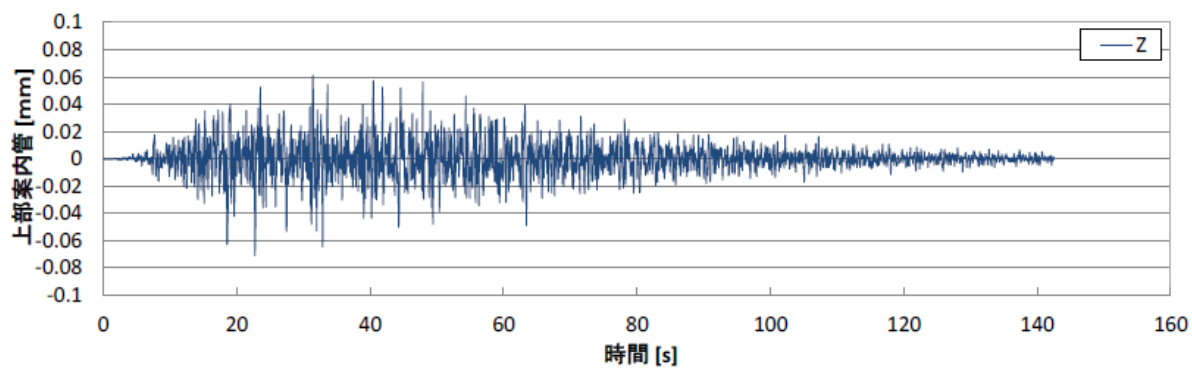
第 3.5 図 加振波 (Ss-D 波、炉心支持板変位)



(a) X 方向

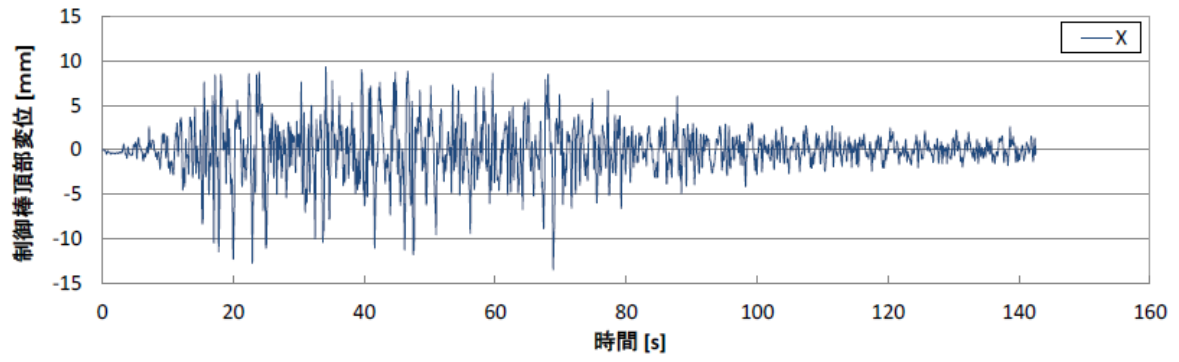


(b) Y 方向

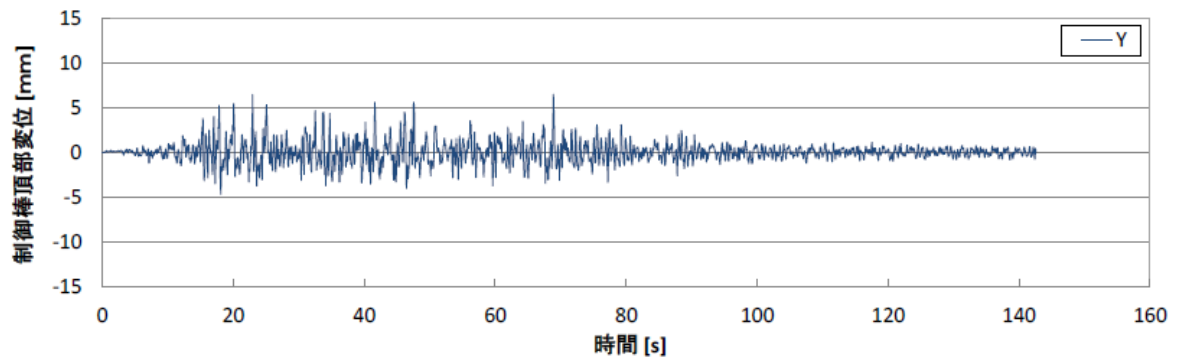


(c) Z 方向

第 3.6 図 加振波 (Ss-D 波、上部案内管下端変位)

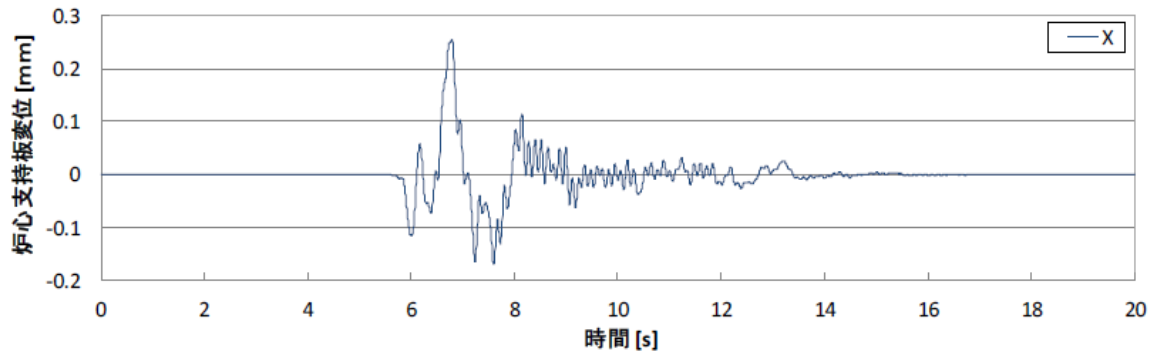


(a) X 方向

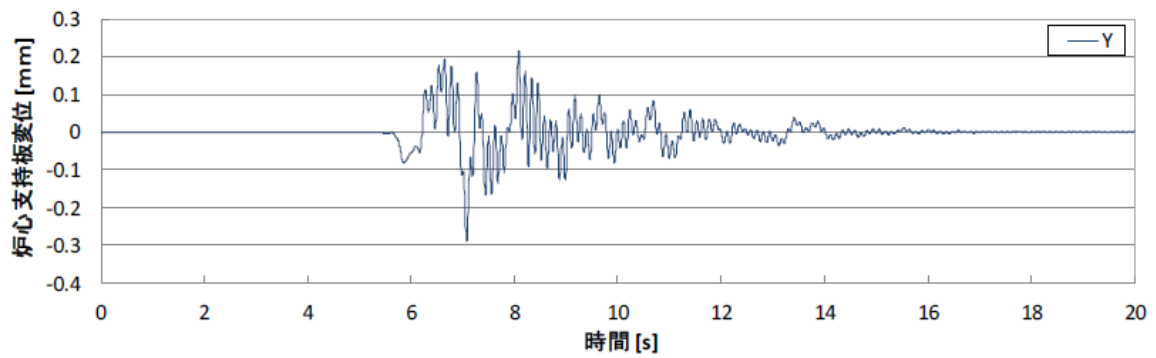


(b) Y 方向

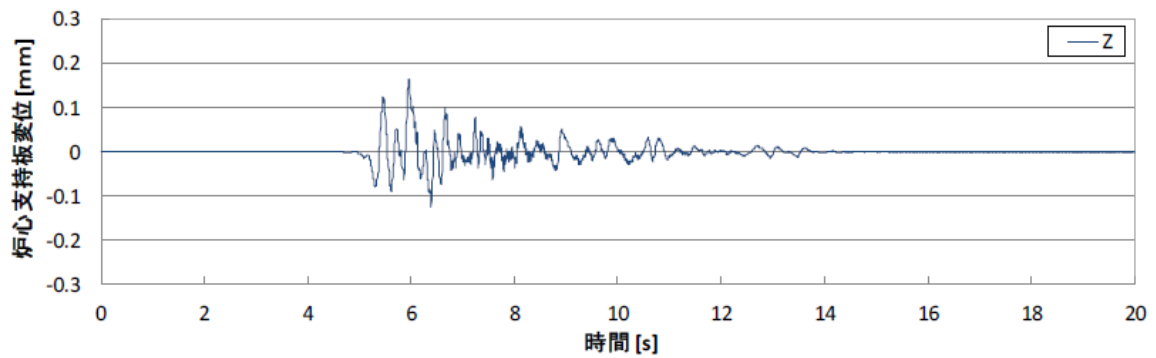
第 3.7 図 加振波 (Ss-D 波、下部案内管頂部変位)



(a) X 方向

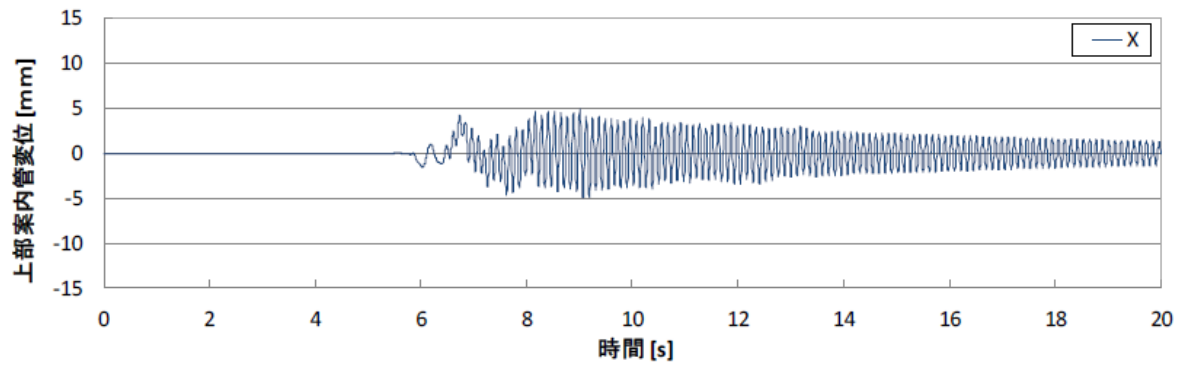


(b) Y 方向

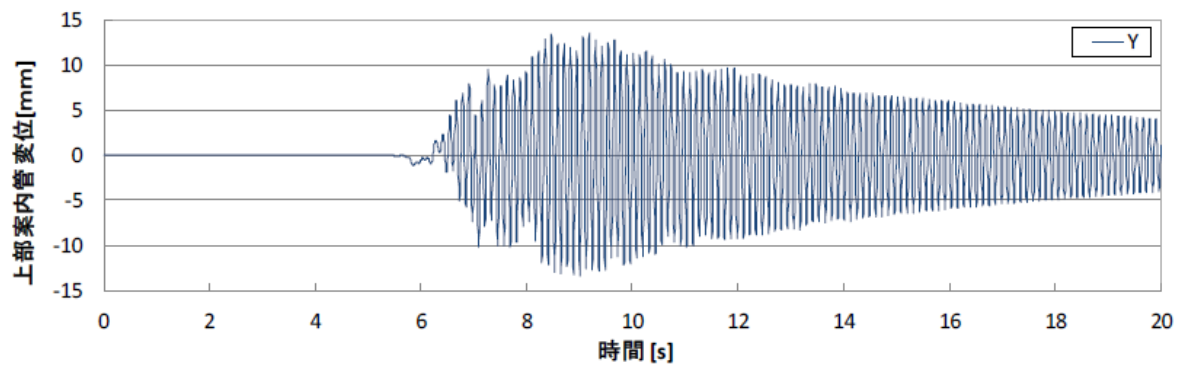


(c) Z 方向

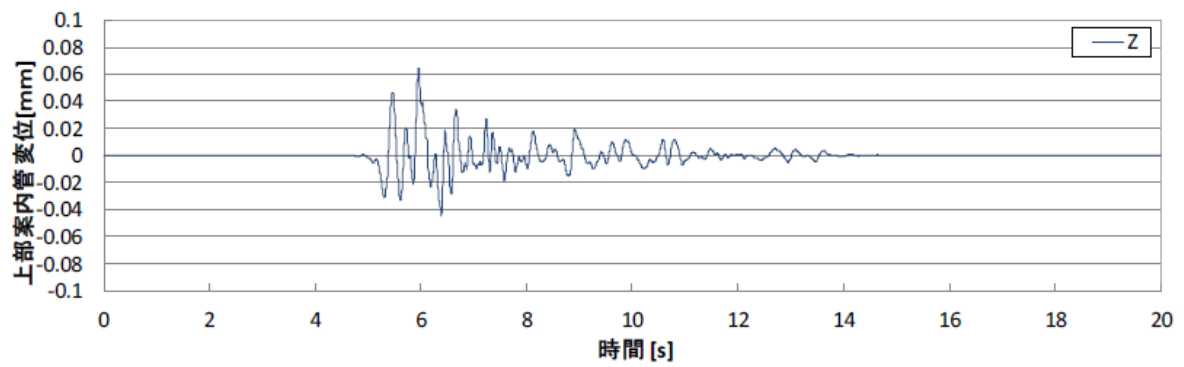
第 3.8 図 加振波 (Ss-1 波、炉心支持板変位)



(a) X 方向

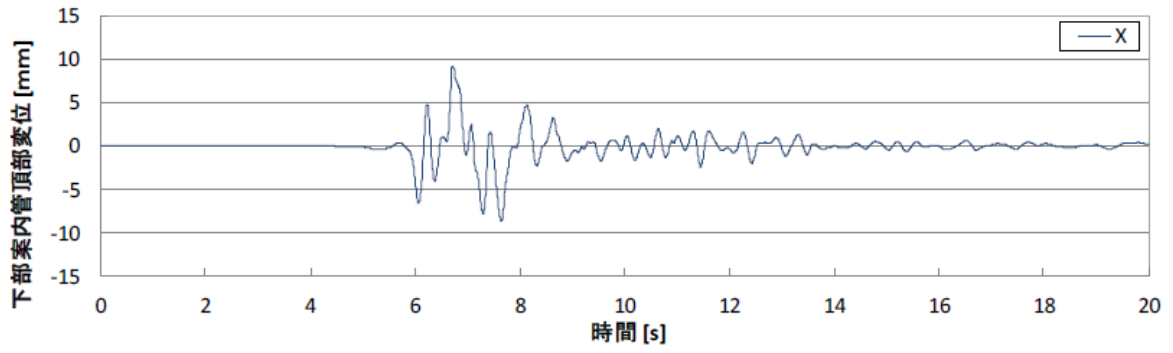


(b) Y 方向

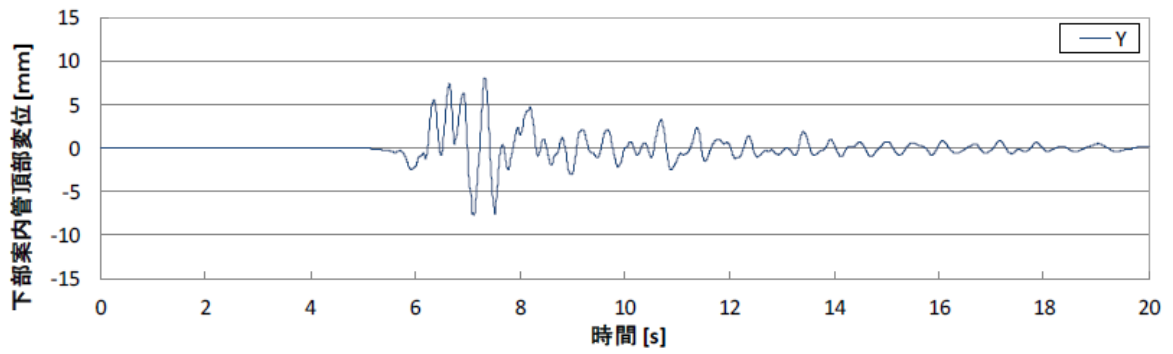


(c) Z 方向

第 3.9 図 加振波 (Ss-1 波、上部案内管下端変位)

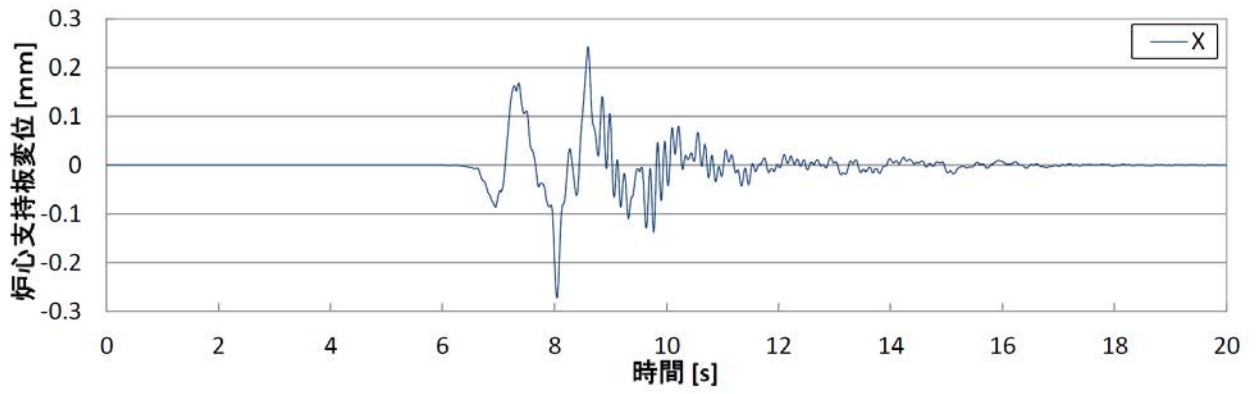


(a)X 方向

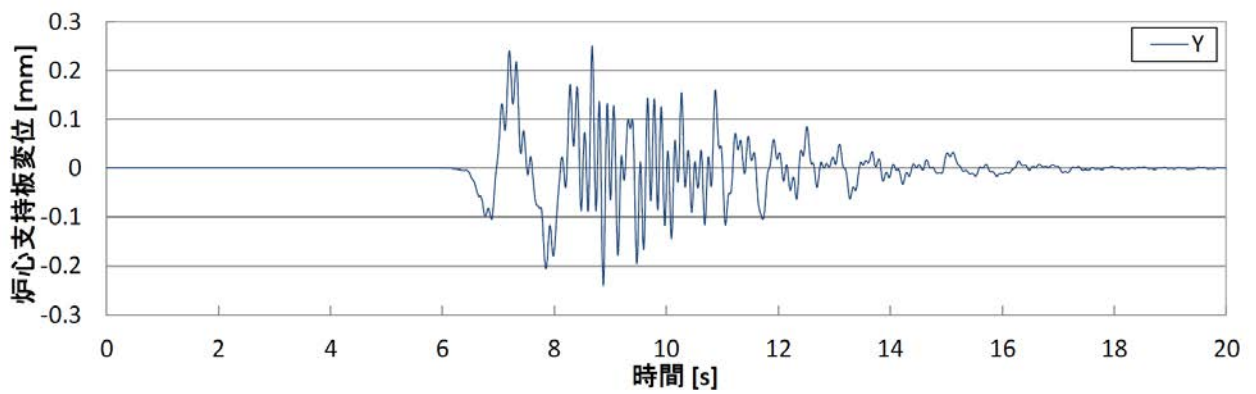


(b)Y 方向

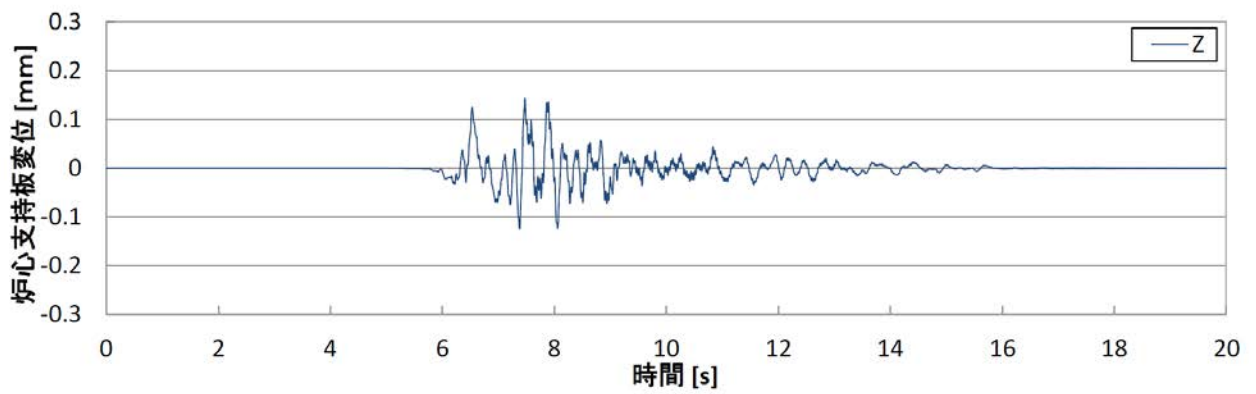
第 3.10 図 加振波 (Ss-1 波、下部案内管頂部変位)



(a) X 方向

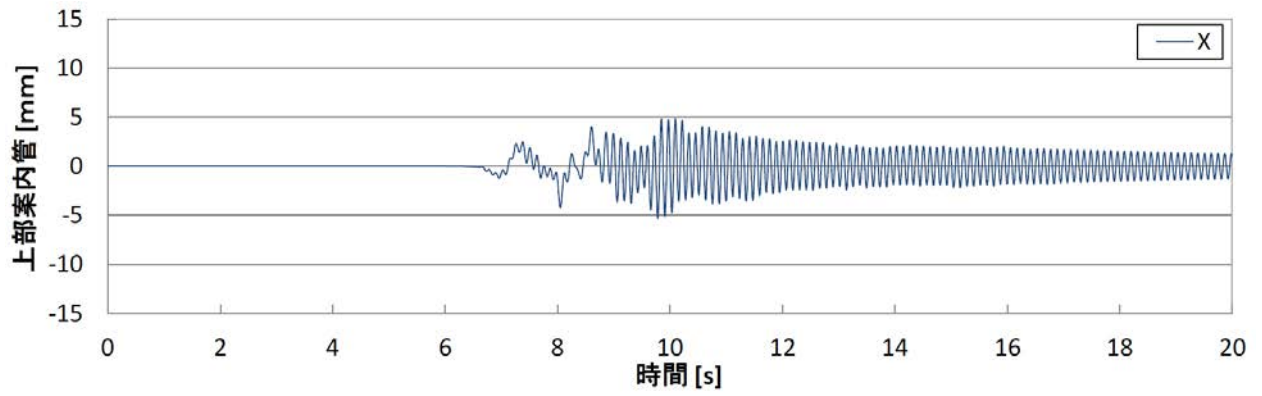


(b) Y 方向

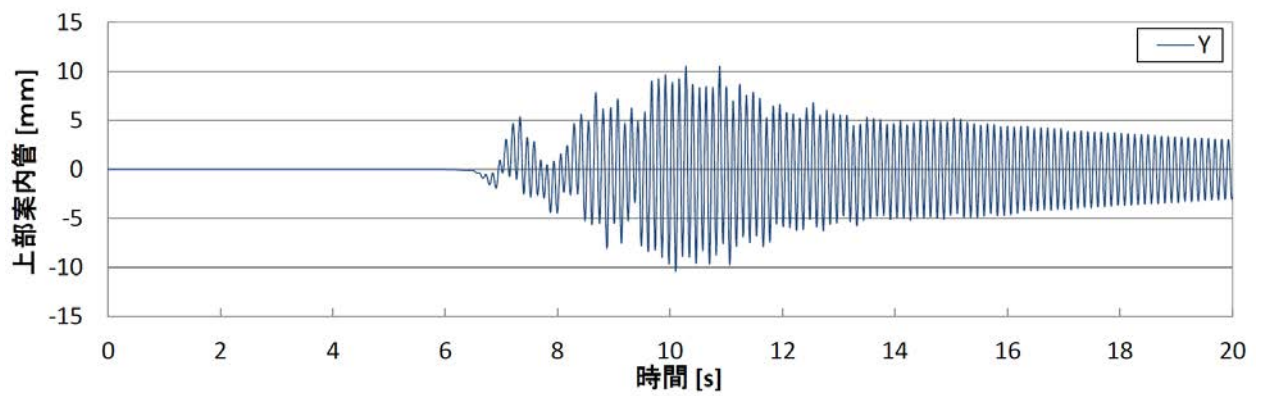


(c) Z 方向

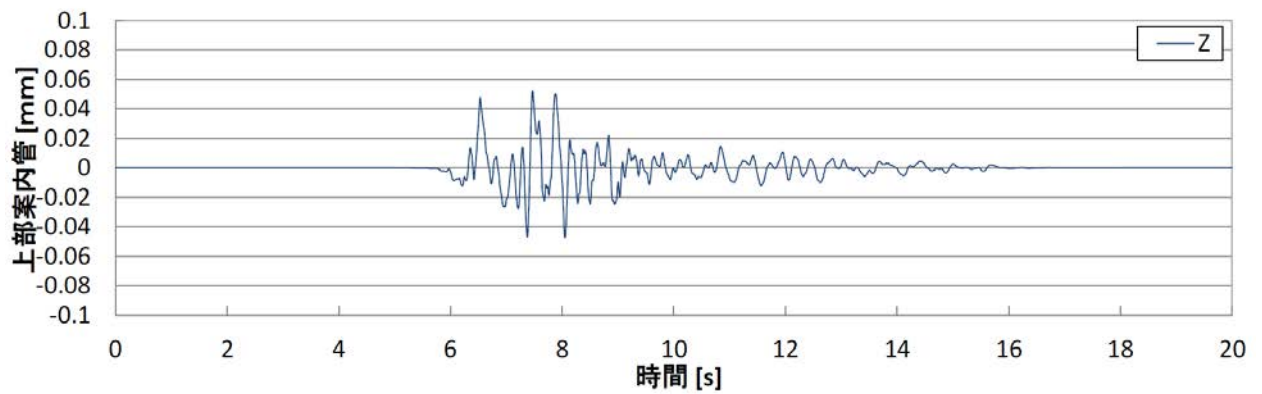
第 3.11 図 加振波 (Ss-2 波、炉心支持板変位)



(a) X 方向

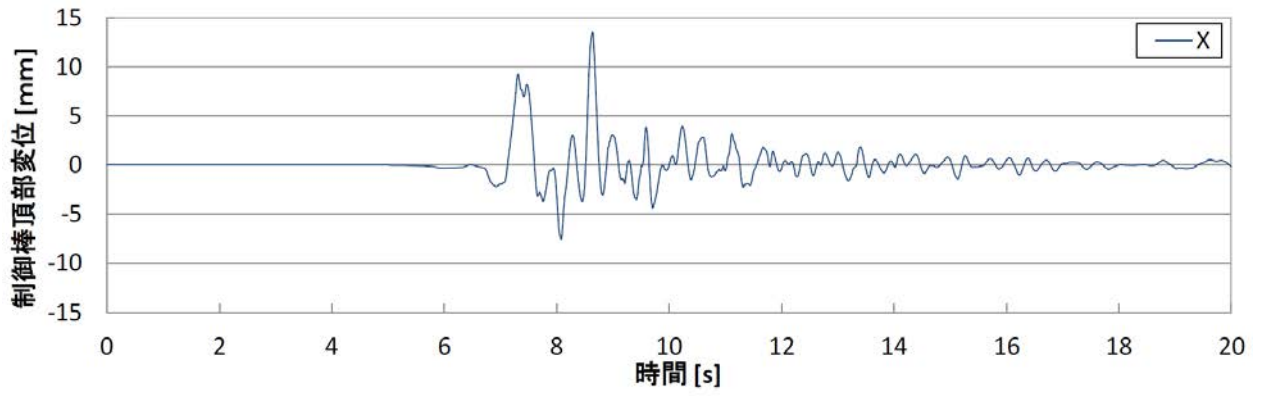


(b) Y 方向

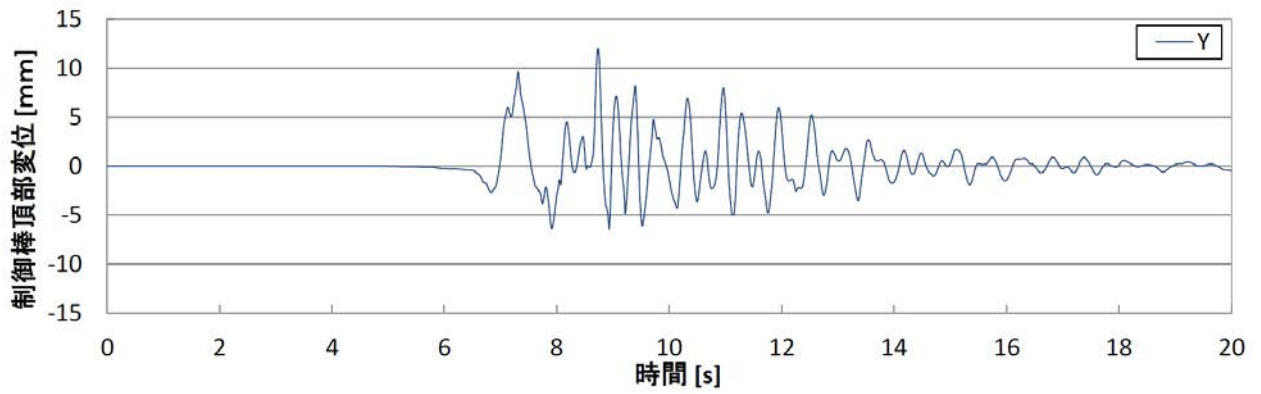


(c) Z 方向

第 3.12 図 加振波 (Ss-2 波、上部案内管下端変位)

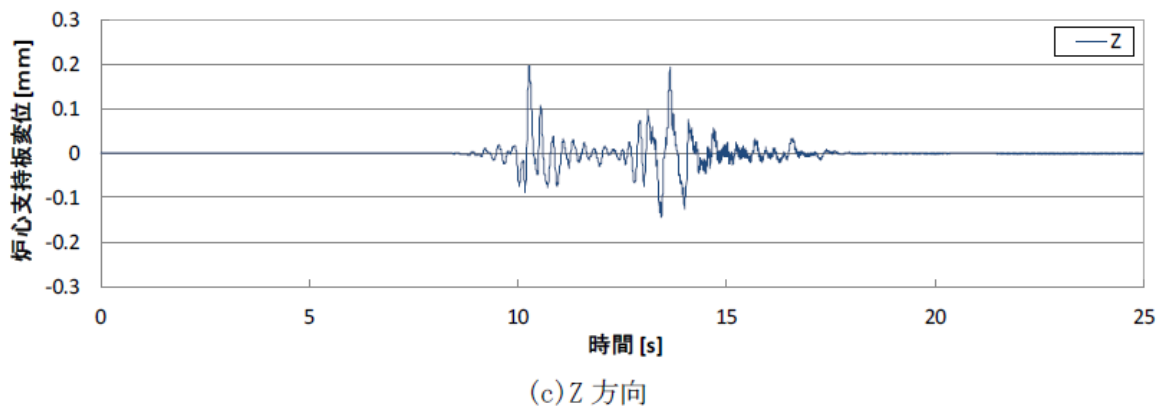
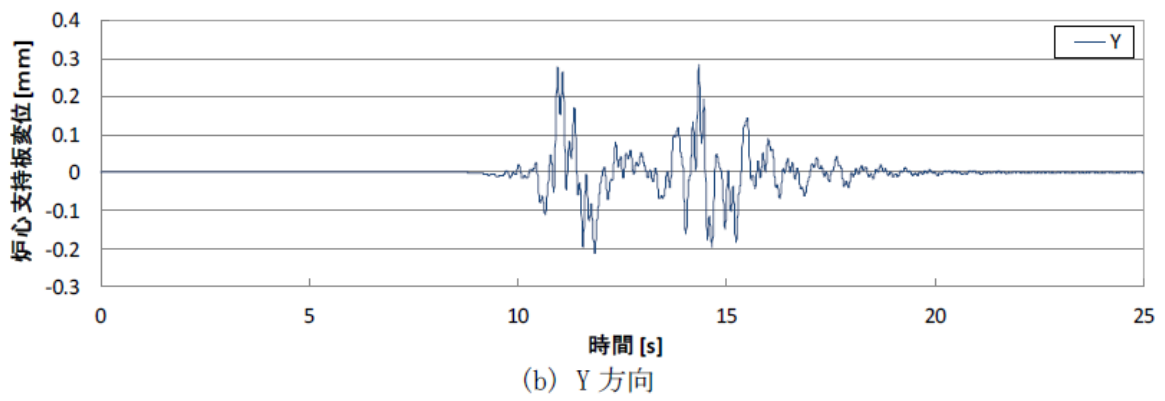
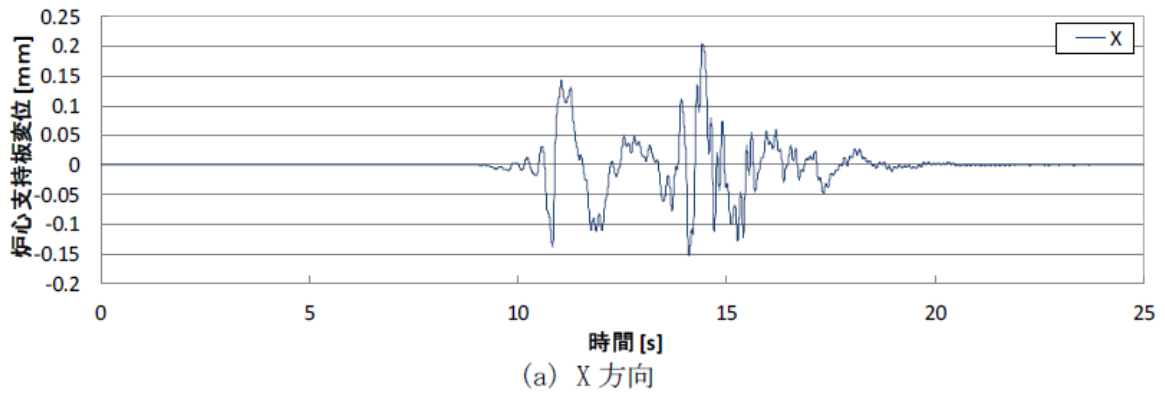


(a) X 方向

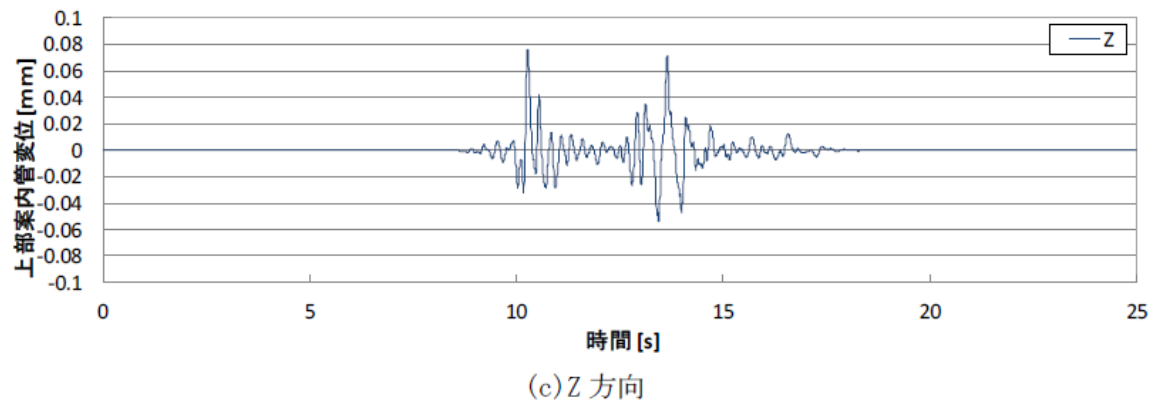
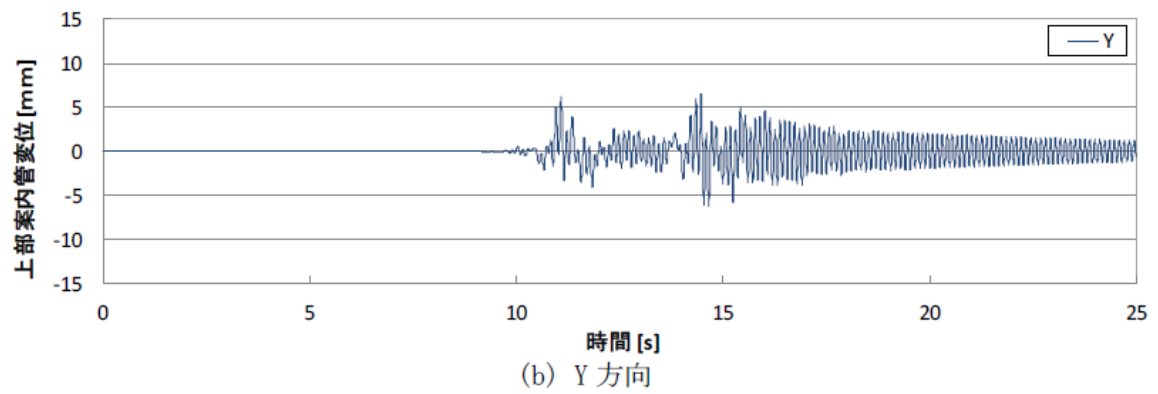
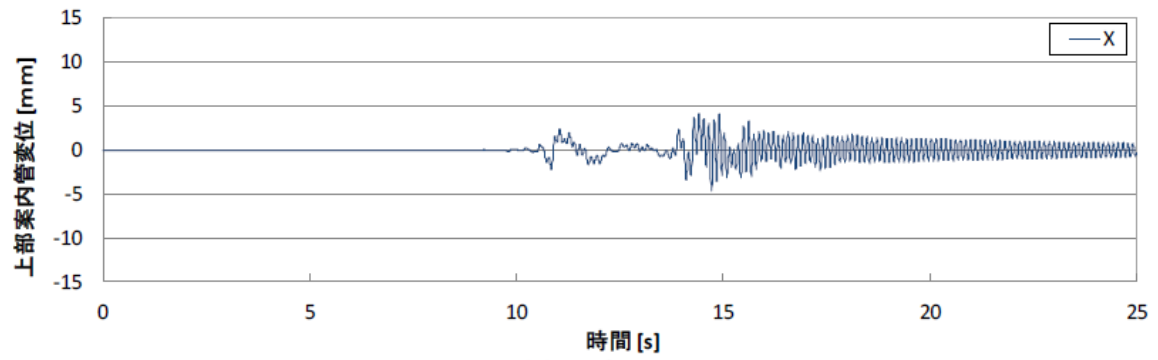


(b) Y 方向

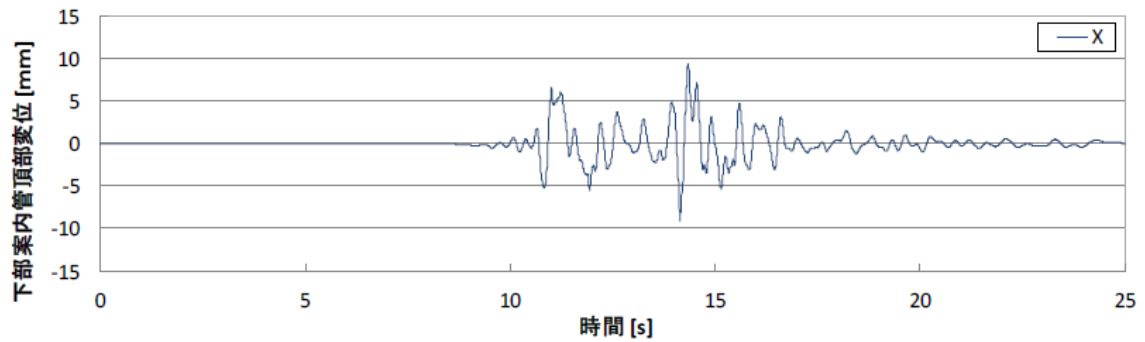
第 3.13 図 加振波 (Ss-2 波、下部案内管頂部変位)



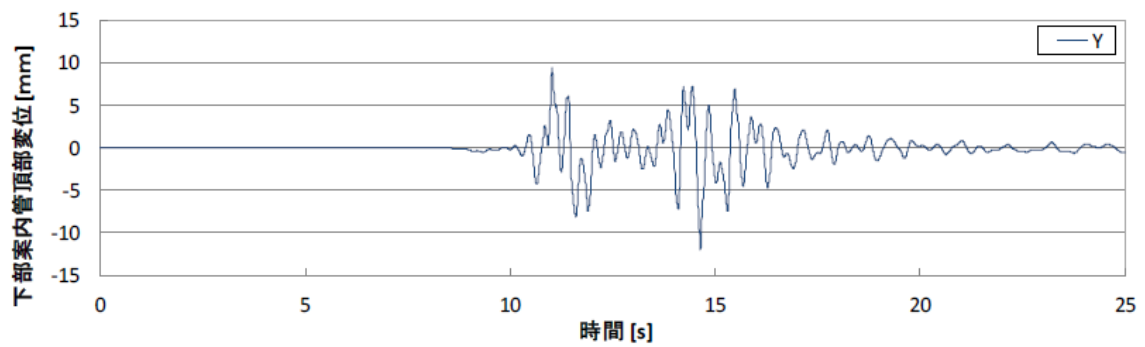
第 3.14 図 加振波 (Ss-3 波、炉心支持板変位)



第 3.15 図 加振波 (Ss-3 波、上部案内管下端変位)

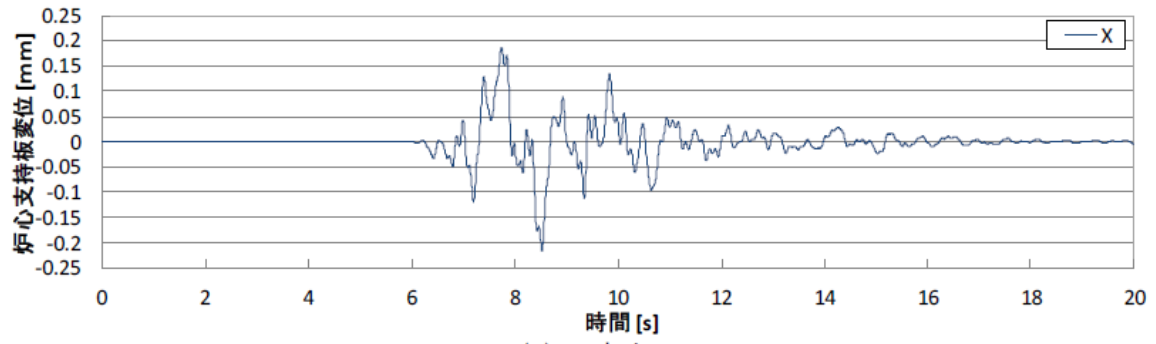


(a) X方向

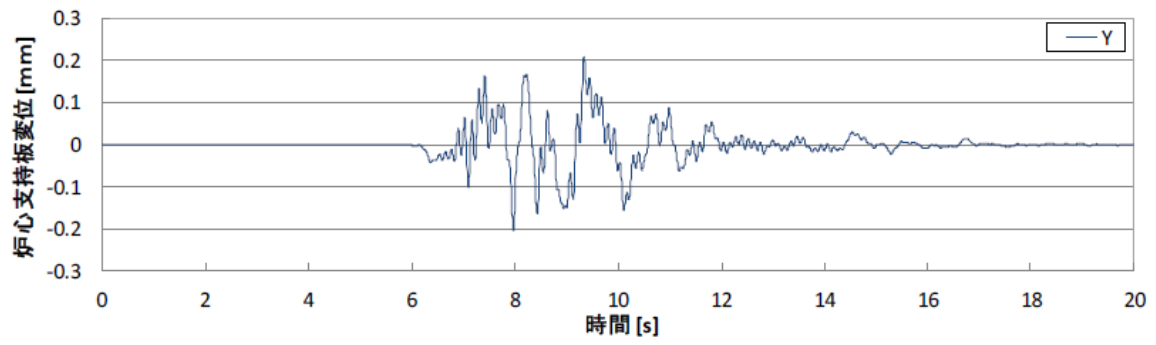


(b) Y方向

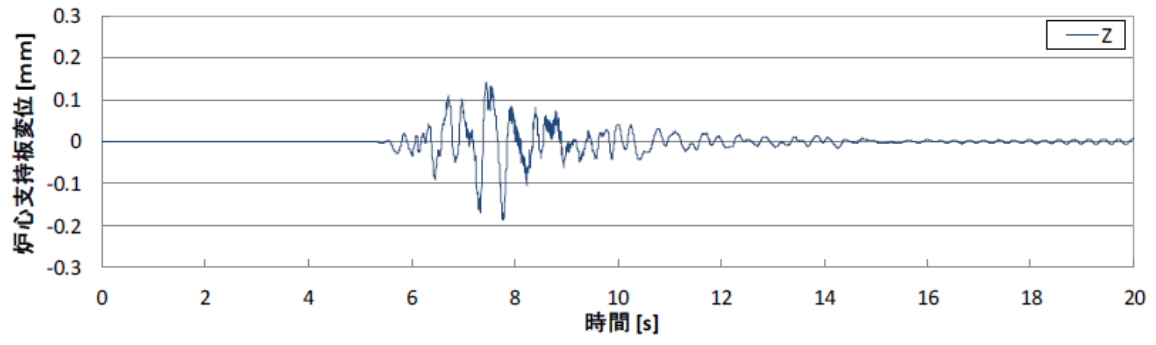
第 3.16 図 加振波 (Ss-3 波、下部案内管頂部変位)



(a) X 方向

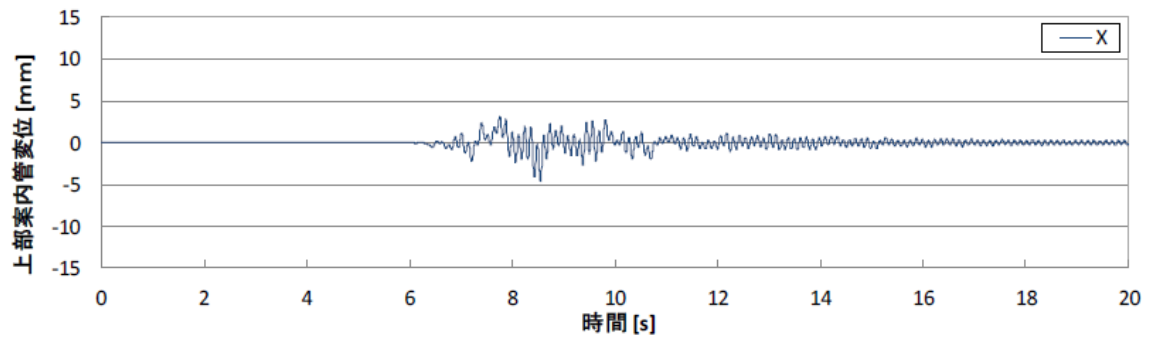


(b) Y 方向

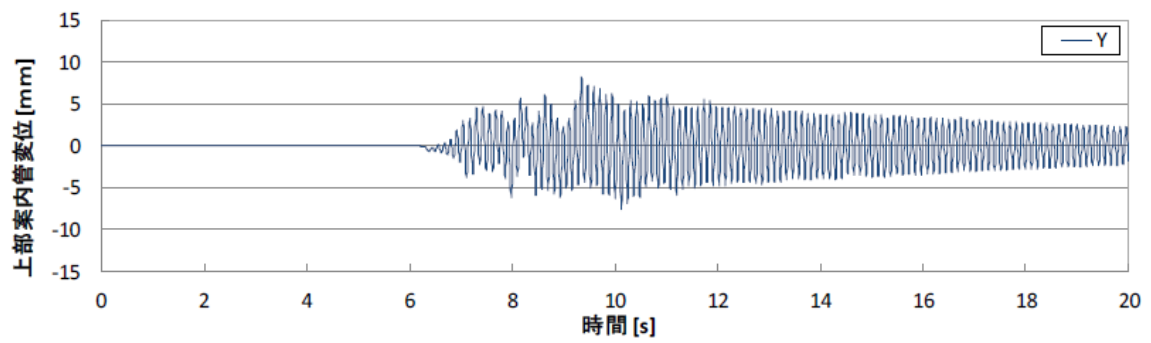


(c) Z 方向

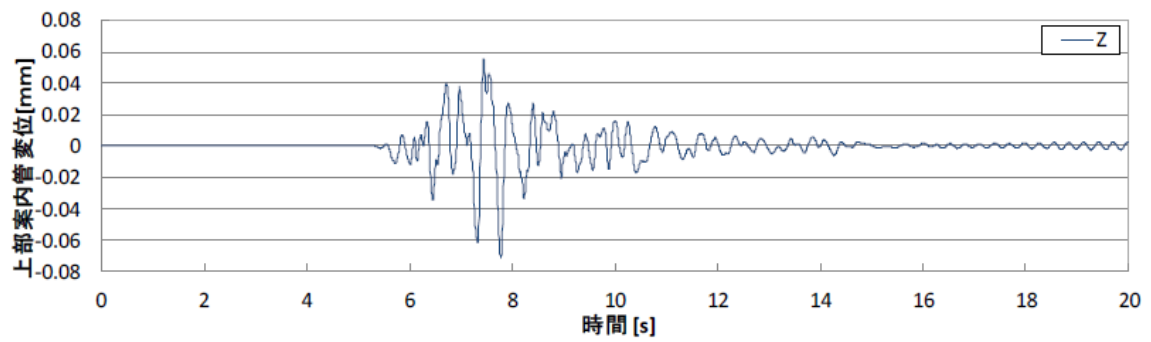
第 3.17 図 加振波 (Ss-4 波、炉心支持板変位)



(a) X 方向

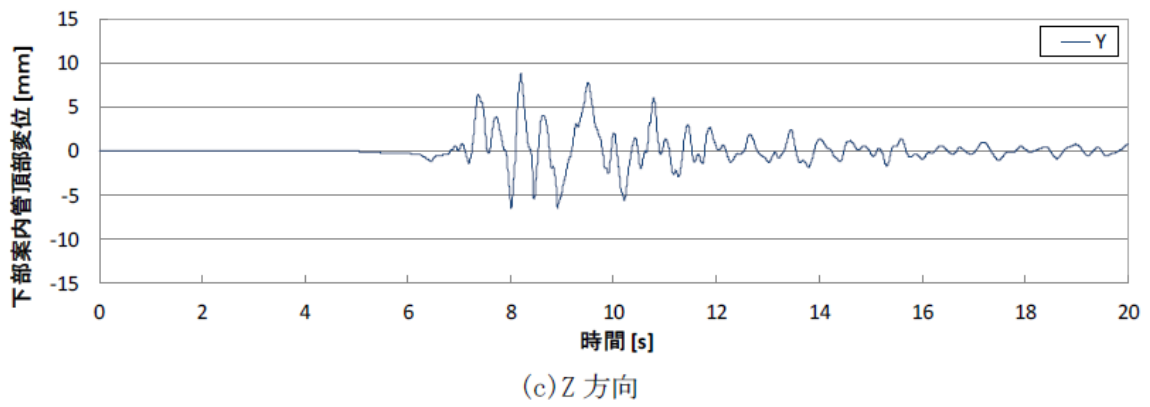
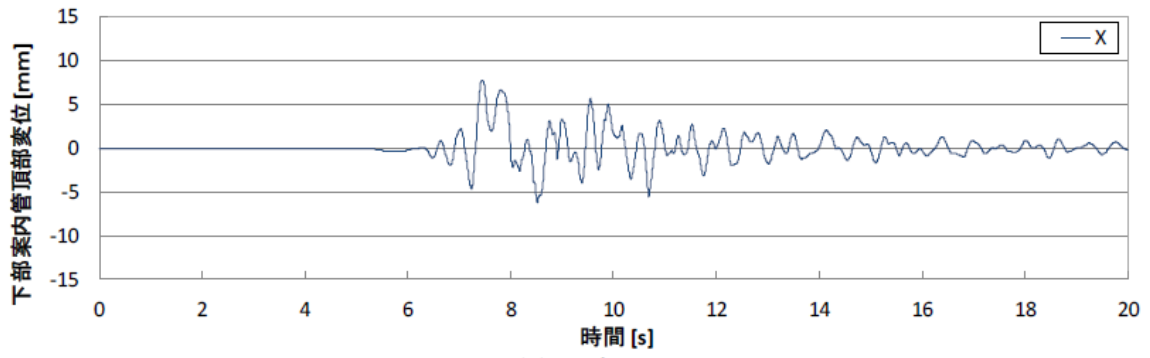


(b) Y 方向

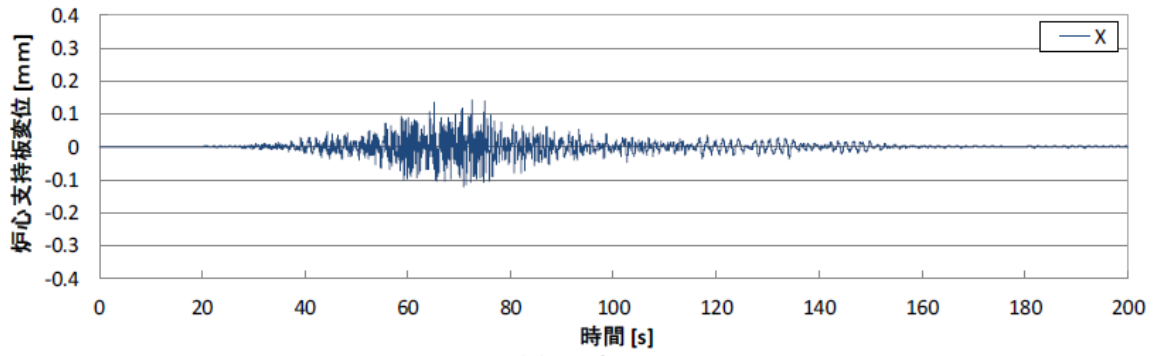


(c) Z 方向

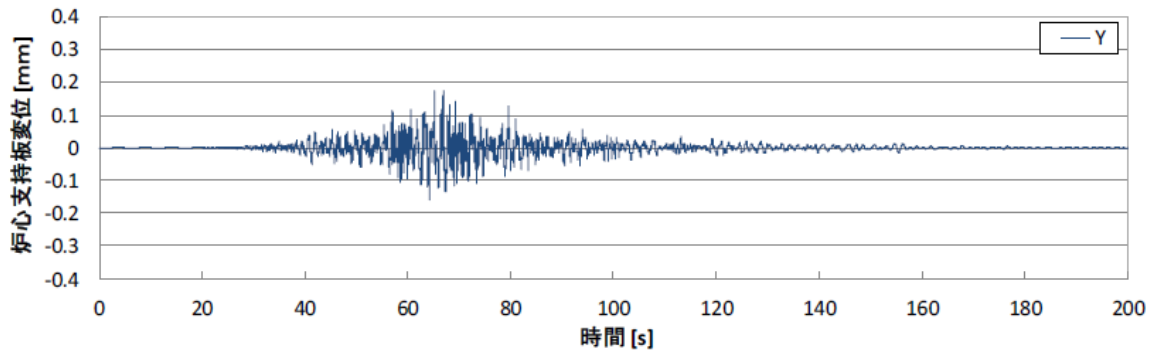
第 3.18 図 加振波 (Ss-4 波、上部案内管下端変位)



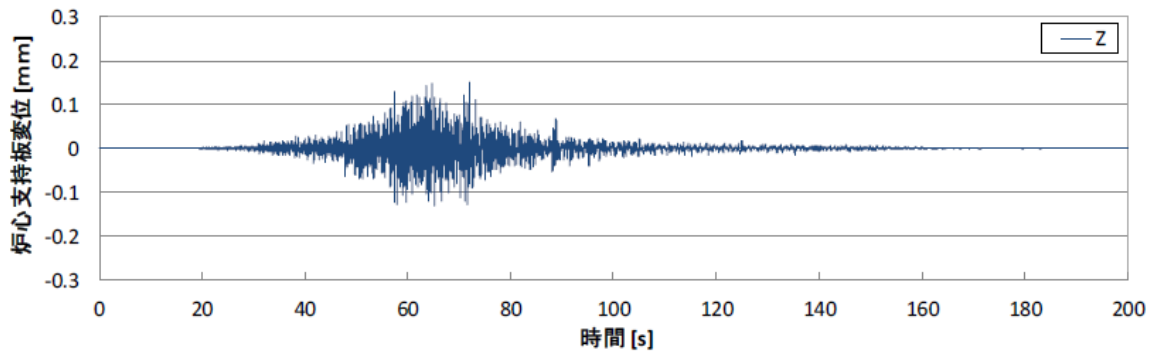
第 3.19 図 加振波 (Ss-4 波、下部案内管頂部変位)



(a) X 方向

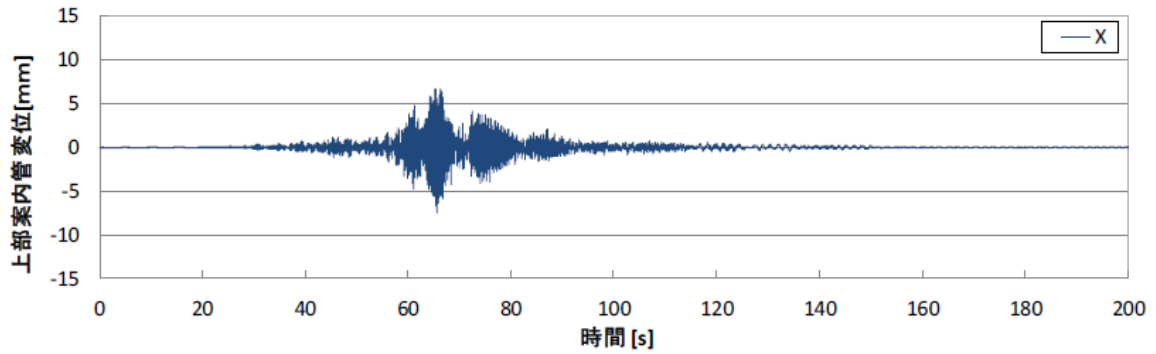


(b) Y 方向

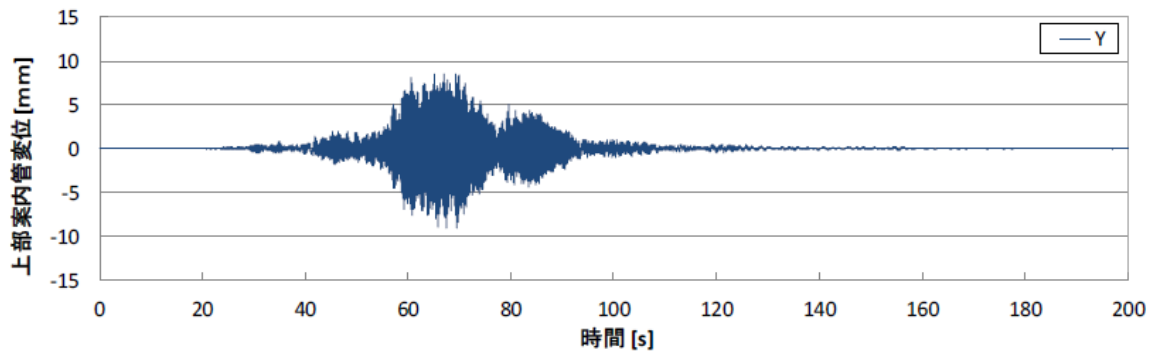


(c) Z 方向

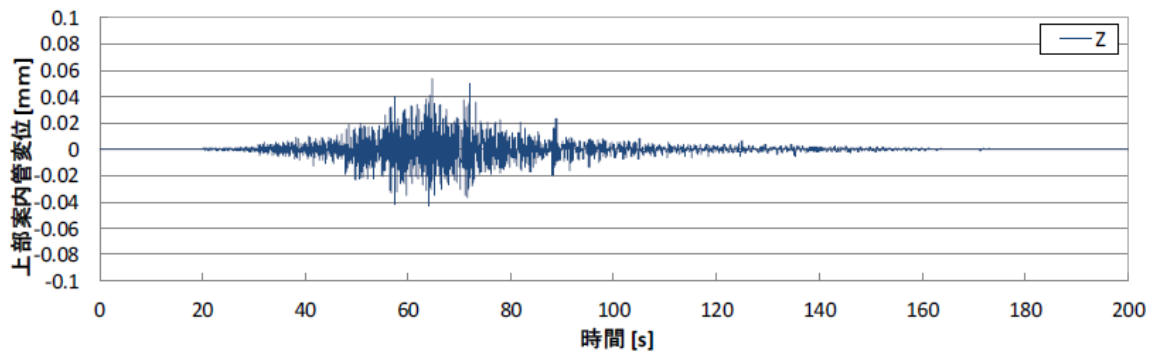
第 3.20 図 加振波 (S_s-5 波、炉心支持板変位)



(a) X 方向

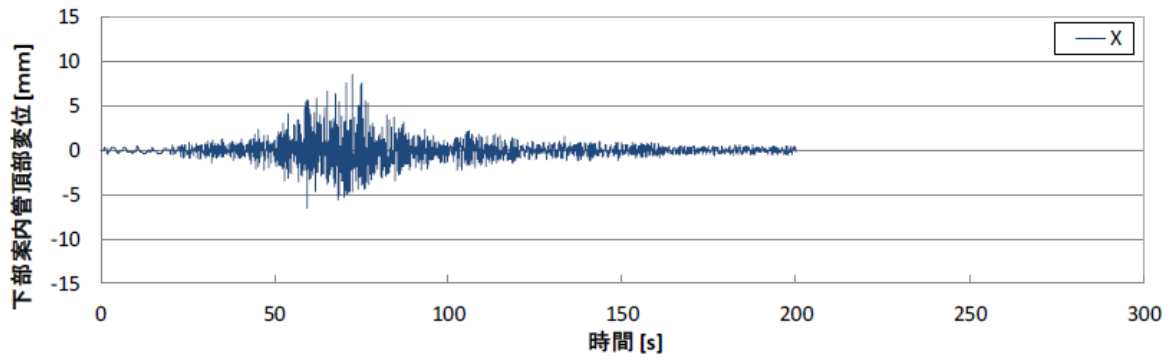


(b) Y 方向

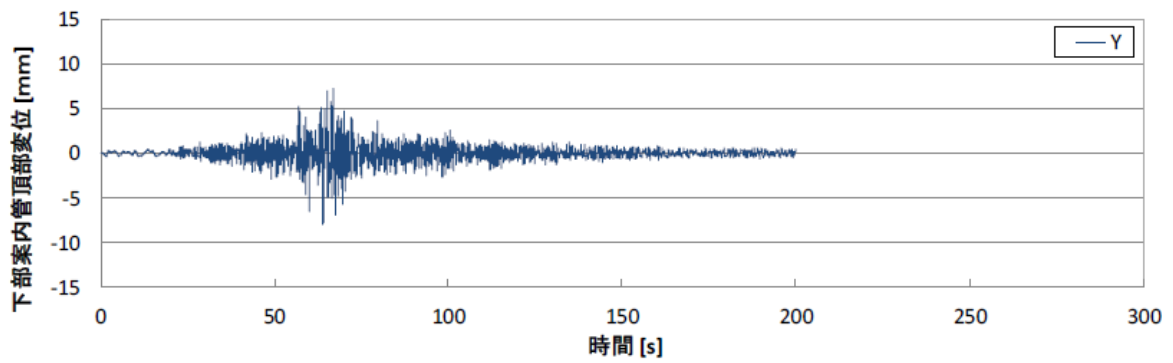


(c) Z 方向

第 3.21 図 加振波 (Ss-5 波、上部案内管下端変位)



(a) X 方向



(b) Y 方向

第 3.22 図 加振波 (Ss-5 波、下部案内管頂部変位)

(2) 解析結果

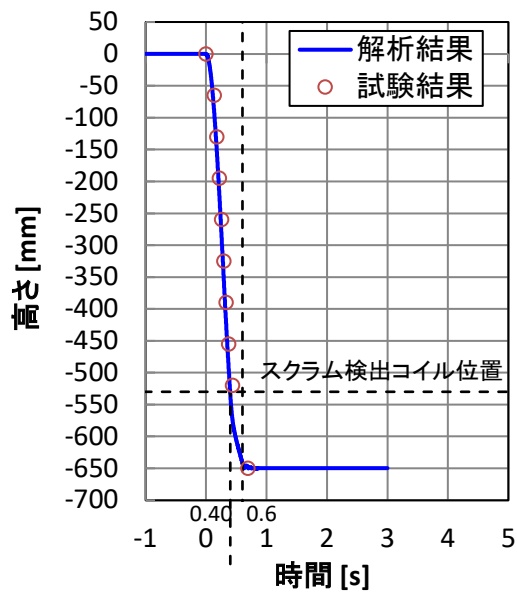
実機条件（ナトリウム雰囲気）におけるスクラム時間（デラッチから挿入量 530mm 位置に到達するまでの時間）の解析結果を第 3.2 表に示す。加振波（第 3.5 図～第 3.22 図）では時刻によって変位や加速度が変わってくるため、加振波の中で保守的なスクラム挙動解析となるよう、制御棒の落下中に上部案内管と下部案内管頂部の相対変位が最大となる解析としており、加振波中の落下開始時間も表中に示す。

加振時のスクラム曲線を加振なしの解析結果と併せて第 3.23 図に示す。参考として、「(1)加振なし」の図中には水中スクラム試験の結果もプロットしている。

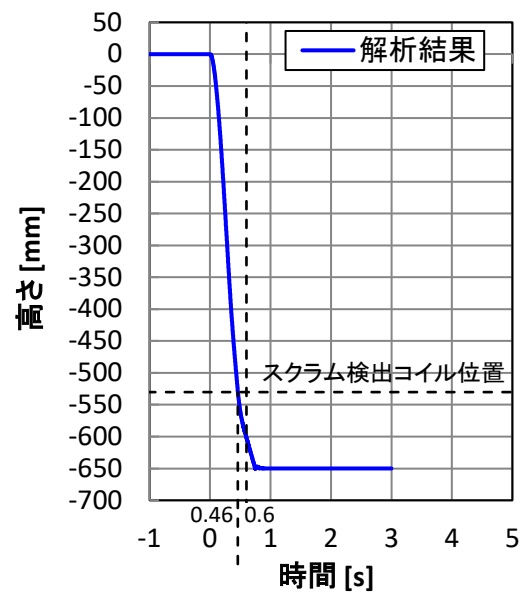
すべての波において、加振時でもスクラム時間は制限となる 0.6 秒以内となっている。よって基準地震動 S_s の地震時においても「核的挿入 90%が 0.8 秒以内」の制御棒挿入性は確保される。

第 3.2 表 スクラム時間

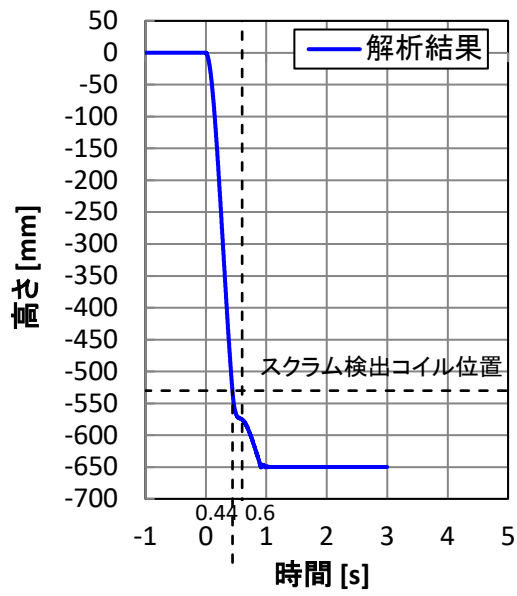
	地震波	スクラム時間(s)	備考
(1)	— (加振なし)	0.40	
(2)	Ss-D	0.46	落下：22.82s～
(3)	Ss-1	0.44	落下：7.23s～
(4)	Ss-2	0.44	落下：8.64s～
(5)	Ss-3	0.45	落下：14.51s～
(6)	Ss-4	0.43	落下：9.43s～
(7)	Ss-5	0.46	落下：67.45s～



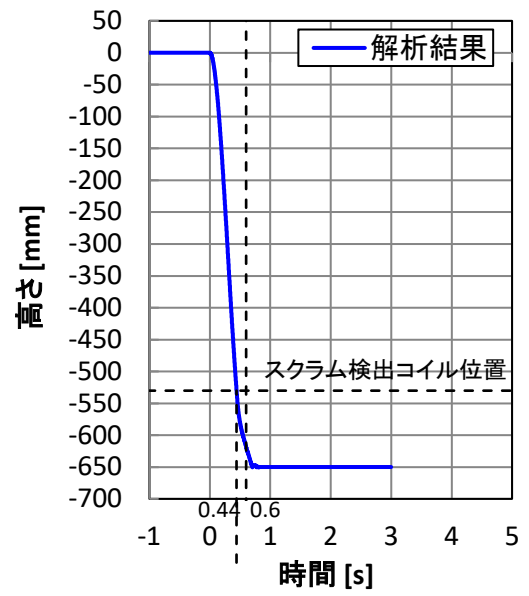
(1) 加振なし



(2) Ss-D 加振

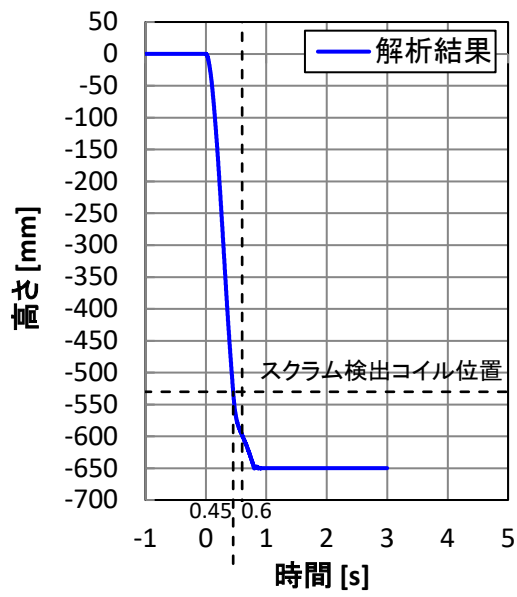


(3) Ss-1 加振

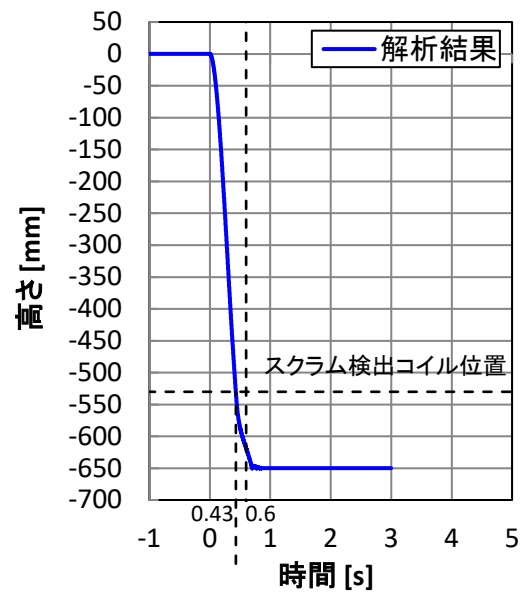


(4) Ss-2 加振

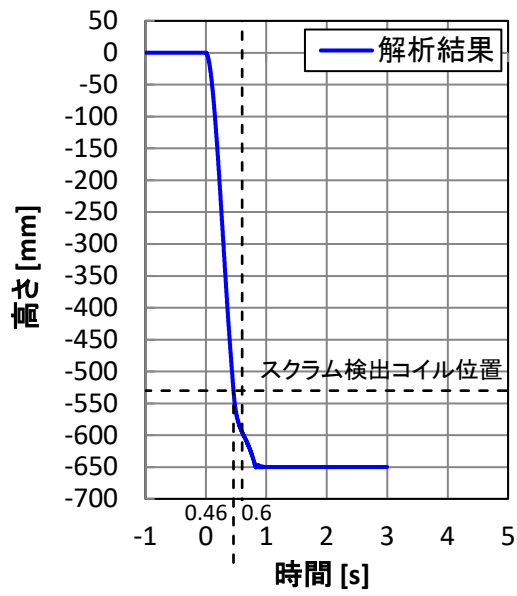
第 3.23 図 解析結果(1/2)



(5) Ss-3 加振



(6) Ss-4 加振



(7) Ss-5 加振

第 3.23 図 解析結果 (2/2)

参考文献

- [1] 高速実験炉照射用炉心制御棒の研究開発、原子炉設置変更許可申請書（高速実験炉原子炉施設の変更その6）添付書類8 追補1、昭和52年9月2日申請（昭和53年9月20日許可）。
- [2] 制御棒の地震時の挿入性に関する説明書、設計及び工事の方法の変更認可申請書「第5次取替制御棒の製作及び制御棒下部案内管の更新、第6次取替制御棒の製作、並びに制御棒駆動機構上部案内管部の更新の一部変更」添付資料－Ⅱ、平成3年10月1日申請（平成3年10月18日認可）。
- [3] 3次元炉心群振動解析評価手法について、第25回もんじゅ廃止措置安全監視チーム、資料2-2-1、令和元年10月17日。
- [4] 「もんじゅ」廃止措置計画の変更内容（模擬燃料体の部分装荷）、第27回もんじゅ廃止措置安全監視チーム、資料2、令和2年2月17日。

機構解析による「常陽」制御棒の地震時挿入性解析の妥当性

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

1. 「常陽」制御棒のスクラム解析への適用の妥当性

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

1.1 水中スクラム試験の概要

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

試験条件を以下に記す。

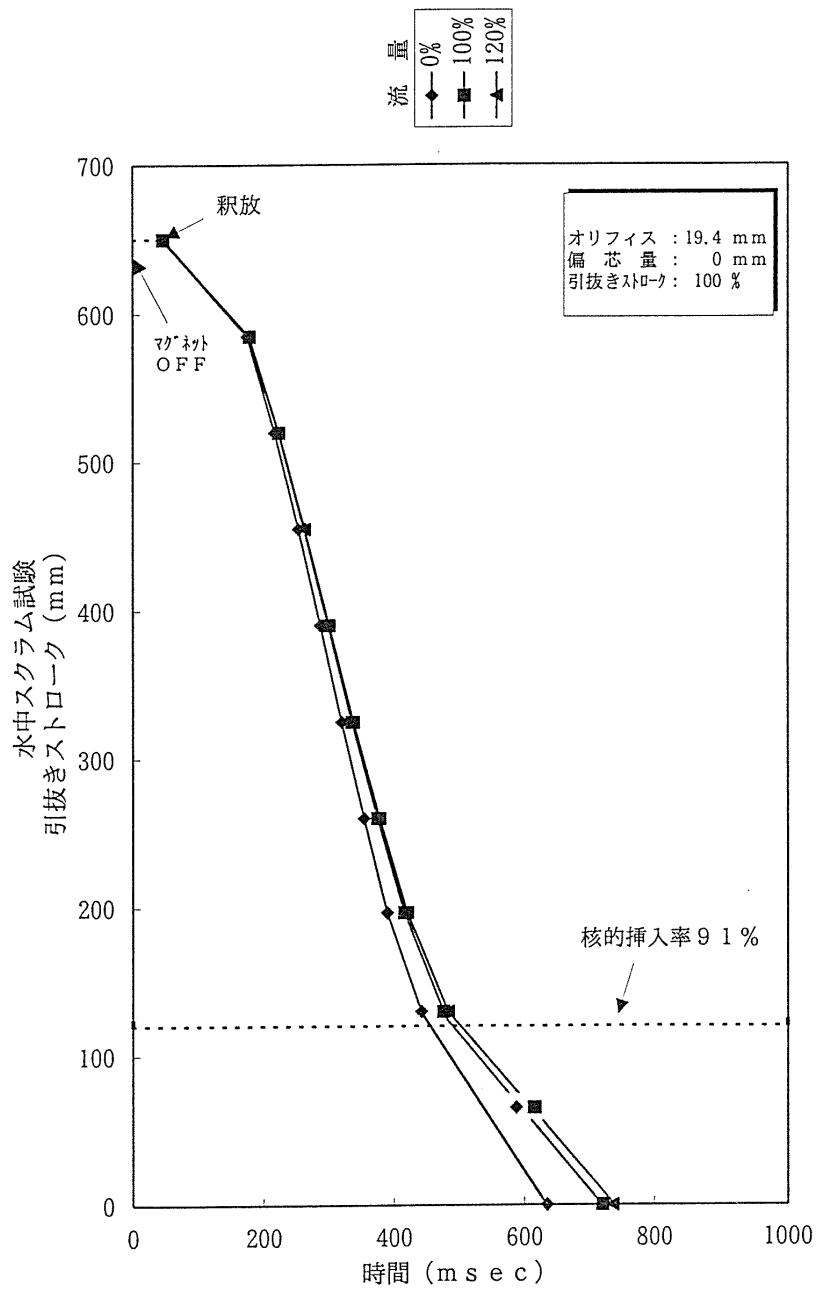
流体	: 水
水温	: 常温
流量	: 第 1 表
偏心量	: 0mm、35mm
スクラム回数	: 5 回

第 1 表 水中スクラム試験の流量条件

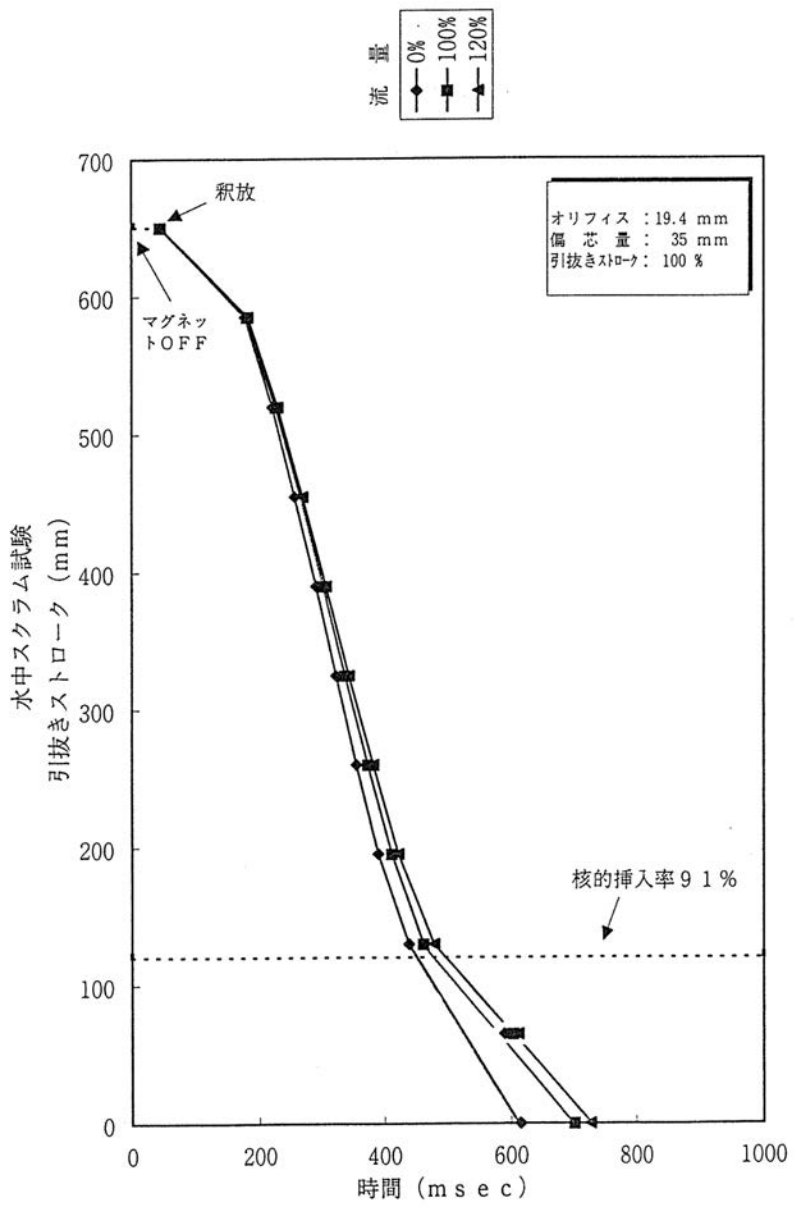
流量条件 (%)	水流量(L/min)	ナトリウム換算(kg/s)
0	0	0
100	158	2.26
120	190	2.71

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

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



第1図 水中スクラム試験結果 (偏心なし)



第2図 水中スクラム試験結果 (偏心 35mm)

1.2 ADAMS による機構解析

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

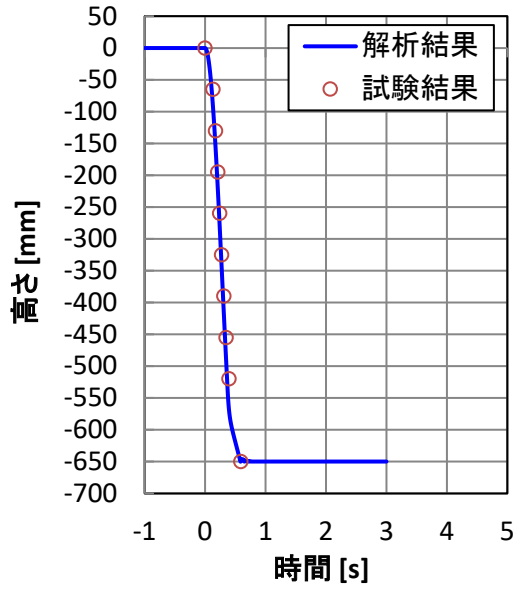
第2表 解析条件

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

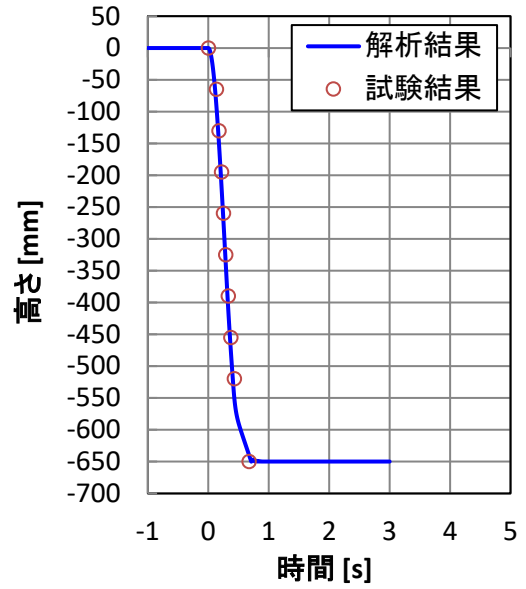
解析結果を第3図～第7図に示す。試験結果については、アーマチュア落下（釈放）を制御棒落下開始タイミングとして解析結果とともに図中に示している。

ADAMS の解析結果は水中スクラム試験の結果（試験では 10～80%は加速管の落下位置、100%は制御棒位置）を精度よく再現できており、「常陽」制御棒のスクラム挙動解析に適用できることが確認できた。常温水中と 350℃Na 中の解析結果の比較では、350℃Na 中の方がスクラム時間は短い。これは、350℃Na の方が常温水より密度が小さいため、制御棒スクラム時の流体抗力が小さくなるためである。流体抗力の影響を受けやすい水中でも解析ではよく再現できていることから、流体抗力の影響を受けにくい Na 中でも解析により挙動をよく再現できると考える。

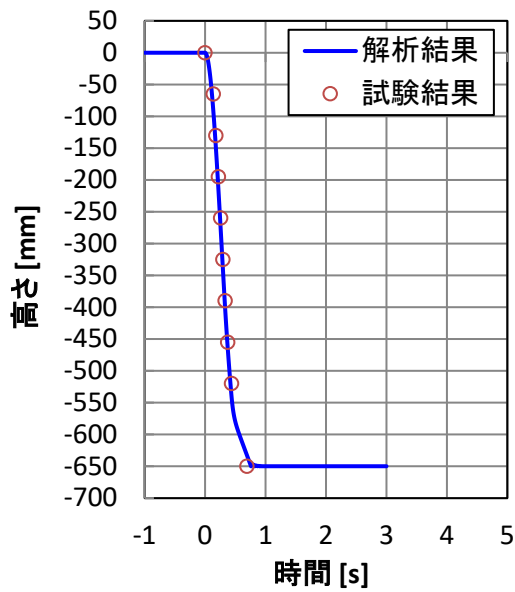
なお実機では、運転中は熱膨張により各要素のパッド部が接触し、炉心要素群全体の剛性を高めている。Revian-3D による炉心群振動解析では、常温でのノミナル寸法での解析であるため、実際の地震時の変位は解析結果よりも小さいものと考えられ、制御棒の挿入時間も解析より短くなると考えられる。



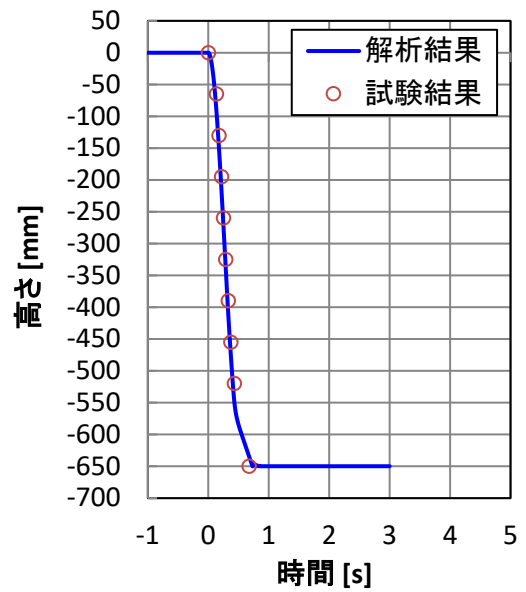
第3図 解析結果(1)
(常温水中、0 L/min、偏心 0 mm)



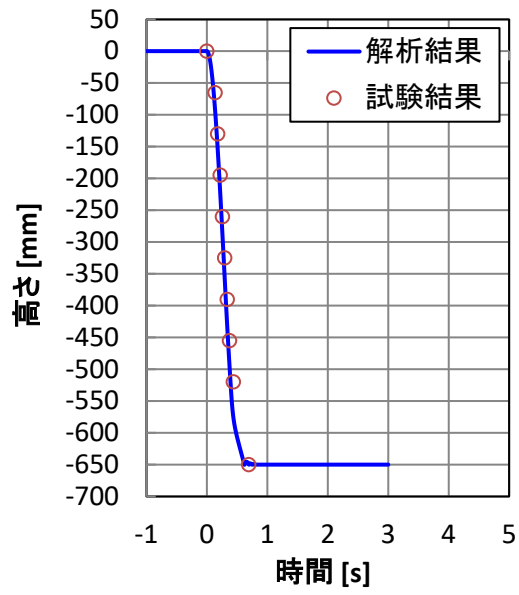
第4図 解析結果(2)
(常温水中、158 L/min、偏心 0 mm)



第5図 解析結果(3)
(常温水中、190 L/min、偏心 0 mm)



第6図 解析結果(4)
(常温水中、158 L/min、偏心 35 mm)



第7図 解析結果(5)

(350°CNa 中、2.71 kg/s、偏心 0 mm)

※落下試験結果は常温水中 190 L/min の条件

2. 地震時の加振による制御棒挿入性評価への適用の妥当性

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

2.1 対象試験の概要

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

2.2 ADAMS による機構解析

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

解析結果を第 8 図～第 15 図に示す。

加振なしの落下試験では、解析と試験の結果がよく一致したが、加振中の落下試験の結果では、解析の落下時間が増加し、試験結果より若干大きくなった。これは、制御棒と制御棒案内管の間における流体による水平方向の応答低減効果を無視しているため、加振によって制御棒と制御棒案内管が接触することで生じる上下方向の摩擦力が解析で大きくなったことが原因と考えられるが、試験結果との差は僅かであり、保守側の評価となる。

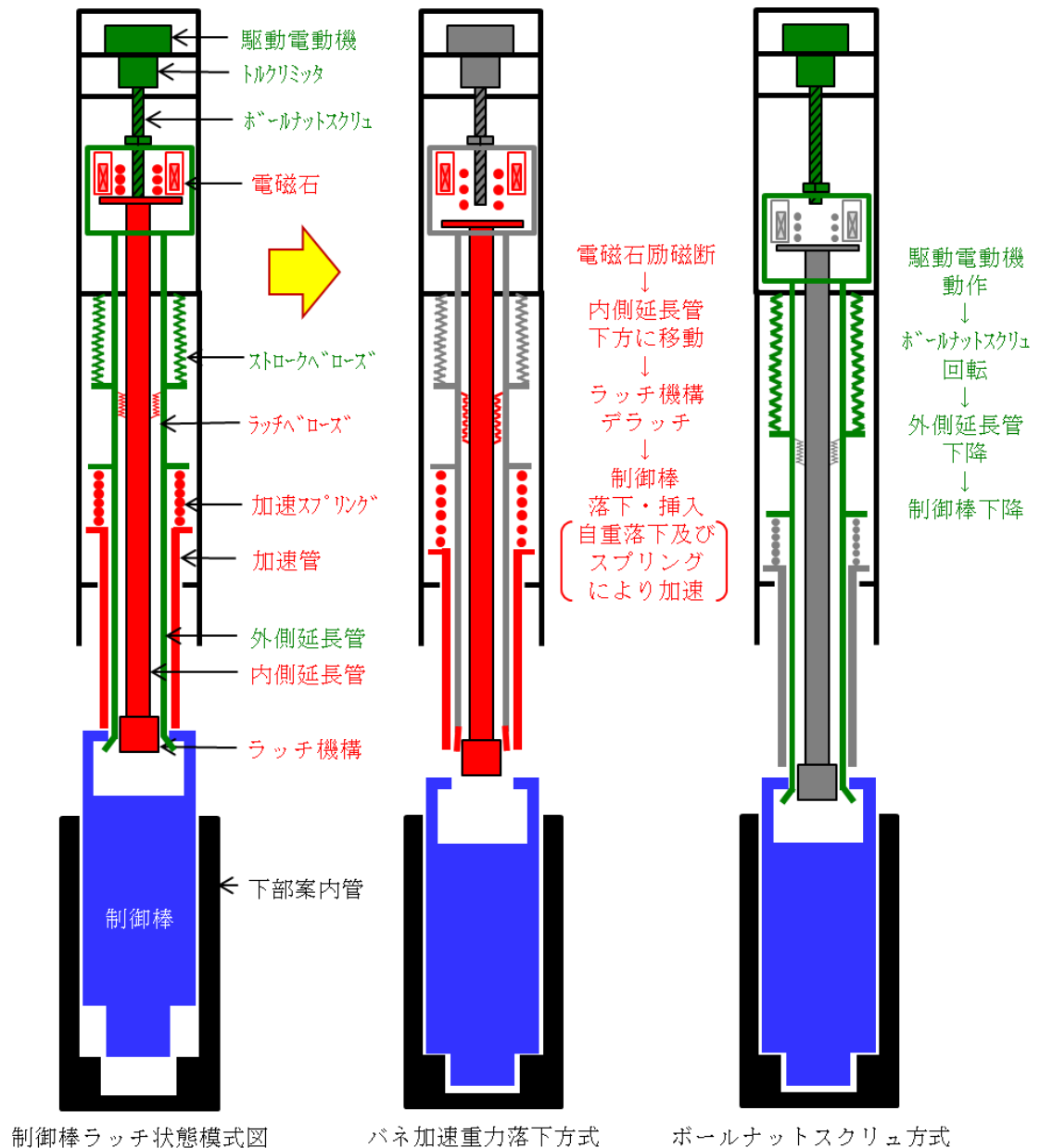
本評価で、加振時の試験結果を解析によって精度良く再現できることが確認できた。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

他社技術情報が含まれている
ため公開できません。

反応度制御系統の故障時における原子炉停止系統の機能確保

制御棒及び制御棒駆動系は、反応度制御系統及び原子炉停止系統として共用する。炉心の反応度（原子炉の出力）を制御するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）に係る器具及び原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）に係る器具を下図に示す。これらの器具について、共用するものではなく、原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）は、炉心の反応度（原子炉の出力）を制御するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）の故障が発生した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できる。



赤：バネ加速重力落下方式の作動に係る器具
 緑：ボールナットスクリュ方式の作動に係る器具

相互に独立な複数の系統により原子炉を
確実に停止する機能について
(制御棒駆動系の共通原因故障の防止、原子炉停止機能の
信頼性確保に関する考え方を含む。)

1. 概要

原子炉施設には、反応度制御系統及び原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系（主炉停止系）を設ける。また、非常用制御設備として、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系（後備炉停止系）を設け、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系は、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、原子炉を停止するように設計する。

2. 主炉停止系と後備炉停止系との共通原因故障の防止について

後備炉停止系は、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合に、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとする。このため、後備炉停止系は、主炉停止系と共通原因により同時に原子炉の停止機能を喪失するおそれがないよう設計する。また、制御棒駆動系と後備炉停止制御棒駆動系とは物理的・電氣的に分離し、制御棒駆動系の故障等が後備炉停止制御棒駆動系に影響を与えない構造としている。さらに、制御棒駆動系及び後備停止制御棒駆動系には専用の無停電電源を設置することにより、交流動力電源の喪失による共通原因故障も防止している。

共通原因故障の事例について、「常陽」及び「もんじゅ」の運転経験、米国及び OECD/NEA の研究を調査した結果、「常陽」及び「もんじゅ」では事例がなく、海外においても加圧水型軽水炉における最大 2 体の制御棒の共通原因故障事例があるのみであった（第 1 図参照）。

なお、「もんじゅ」において、冷却材不純物により微調整棒駆動機構の駆動荷重が増加する事象が発生しているが（平成 14 年 6 月 26 日、第 9 回もんじゅ安全性調査検討専門委員会、資料 No. 2）、「常陽」では、ナトリウム液面近傍に狹隘部を設けない設計とすること、狹隘部はナトリウム液中及びカバーガス中の高温部に設けること及びナトリウムの純度管理により、同様の事象の発生を防止している（第 2 図参照）。

共通原因故障を引き起こす可能性のある事象として考えられるものは、機器の偶発的故障に加え、安全施設全体に影響を及ぼすおそれがあるものとして、自然現象、火災及び溢水がある（第 3 図参照）。主炉停止系と後備炉停止系が格納容器内に設置されていることを踏まえて、これらのうちの地震及び火災を考慮する。これらの事象に対する防護対策について以下に示す。

2.1 偶発的故障による共通原因故障の防止について

制御棒駆動系と後備炉停止制御棒駆動系の構造は、原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）と、原子炉を停止するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）を物理的に分離させており、機器の偶発的な故障による共通原因故障により、原子炉の停止機能を喪失することがない設計としている（別紙 3 及び第 4 図参照）。

2.2 地震による共通原因故障の防止について

制御盤、格納容器貫通部、制御棒、制御棒駆動系、後備炉停止制御棒、後備炉停止制御棒駆動系、炉心支持構造物は基準地震動による地震力に対して十分な耐震性を有する設計とすることから、地震により制御棒及び後備炉停止制御棒の炉心への挿入性が損なわれない設計としている（別紙 2 参照）。

2.3 火災による共通原因故障の防止について

主炉停止系及び後備炉停止系を構成する機器は、火災防護対象機器とし、火災により安全機能が損なわれないように、「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」及び「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」を参考に、火災の発生防止、火災の感知及び消火並びに火災の影響軽減の三方策を適切に組み合わせた火災防護対策を講じることから、火災による共通原因故障により、原子炉の停止機能を喪失することがない設計としている【国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）「第8条（火災による損傷の防止）に係る説明書」参照】。

3. 安全保護回路を含めた共通原因による原子炉停止機能の喪失の防止について

原子炉保護系は、論理回路、補助継電器回路、制御棒保持電磁石電源装置及び後備炉停止制御棒保持電磁石電源装置から構成している。関連する核計装又はプロセス計装において作動設定値を超える信号を検出し、論理回路においてスクラム信号が発生した場合には、制御棒保持電磁石電源装置及び後備炉停止制御棒保持電磁石電源装置からの保持電磁石電流を遮断し、制御棒及び後備炉停止制御棒を切り離すことで、原子炉は停止される。原子炉保護系は、論理回路を独立した2系統から構成することで多重化を図っている。また、作動信号も多重化を図っている。以上のおり、原子炉の停止機能に係る施設は多重性及び独立性を有する設計により、単一故障を想定しても機能を喪失することなく、設計基準事象に対して適切な信頼性を確保する設計としている。

一方、第53条の多量の放射性物質等を放出する事故（以下「BDDBA」という。）の拡大の防止においては、設計基準事象の想定を超えた多重故障を考慮し、設計基準事故対処設備の機能喪失を想定し、炉心損傷防止措置を講じている。原子炉の停止機能に係る設計基準事故対処設備及びBDDBAの拡大の防止措置を第5図、第6図に示す。これらの施設により、設計基準事象に対して適切な信頼性を確保するとともに、BDDBAが発生しても炉心の損傷を防止できるように設計している。

4. 評価

以上のおり、主炉停止系と後備炉停止系は相互に独立して設置しているとともに、主炉停止系、後備炉停止系、安全保護回路それぞれにおいて、共通原因故障を防止する設計としており、原子炉停止機能は設計基準事象に対して適切な信頼性を確保している。

以上

「常陽」及び「もんじゅ」の運転経験において共通原因故障による制御棒急速挿入失敗事例なし。

類似機器の共通原因故障事例調査

炉心へ重力によって制御棒を挿入するタイプの制御棒を対象に制御棒急速挿入の共通原因故障事例について調査した。

1. 米国軽水炉の研究

米国Westinghouse社製加圧水型軽水炉の原子炉停止系の信頼性を研究したレポート[1]には、1984年～1995年における制御棒急速挿入の共通原因故障事例の調査・分析が示されている。

- 明確な共通原因故障と判定された事例は無い。
- 不確実だが共通原因故障の可能性が疑われる事例が2件存在し、いずれも48体中2体のみ故障し、残りの46体は健全という事例である。このうち、運転中に生じたとされる1件が制御棒1体当たりの故障確率評価において考慮されている。なお、この事例は情報不足により故障の影響がFail-safeか否か不明とされている。

2. 国際機関OECD/NEAによる研究

OECD/NEAが制御棒駆動集合体の共通原因故障の調査分析について取りまとめた国際共通原因故障データ交換(ICDE)プロジェクトレポート[2]には、制御棒を重力によって挿入するタイプの制御棒駆動集合体についての制御棒急速挿入の共通原因故障事例の調査・分析が示されている。

- 重力によって挿入するタイプの制御棒の共通原因故障事例は84件あり、このうち80件は完全な機能喪失ではなく機能低下又は兆候程度の事例であり、3件は制御棒1体だけ完全な機能喪失に至った事例であり、残りの1件は制御棒2体だけ完全な機能喪失に至った事例である。共通原因故障により3体以上の制御棒の完全な機能喪失に至った事例は無い。

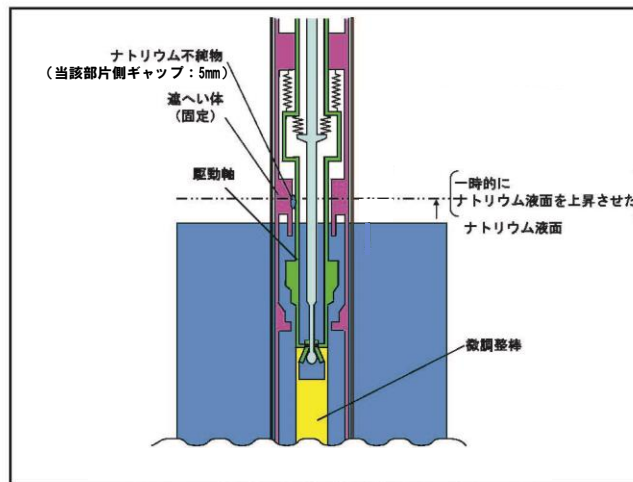
3. まとめ

炉心へ重力によって挿入する制御棒について、共通原因故障による急速挿入失敗を想定したとしても、それによって3体以上の失敗に至る可能性は低いと考えられる。制御棒急速挿入について、3重以上の多重性を備えることは、共通原因故障に対しても一定の信頼性を有することが期待される。

[1] S. A. Eide, et. al, "Reliability Study: Westinghouse Reactor Protection System, 1984-1995," NUREG/CR-5500 Vol.2, April 1999.

[2] OECD/NEA, "ICDE Project Report: Collection and Analysis of Common-cause Failures of Control Rod Drive Assemblies," NEA/CSNI/R(2013)4, June 2013.

第1図 共通原因故障の事例調査



「もんじゅ」における微調整棒駆動機構の荷重増加事象

- ・「常陽」では以下の対策により、同様の事象の発生を防止
 - ナトリウム液面近傍に狭隙部を設けない設計
 - 狭隙部はナトリウム液中及びカバース中の高温部に設け、固着を防止する設計
 - ナトリウムの純度を適切に管理し、ナトリウム不純物の付着による影響を防止

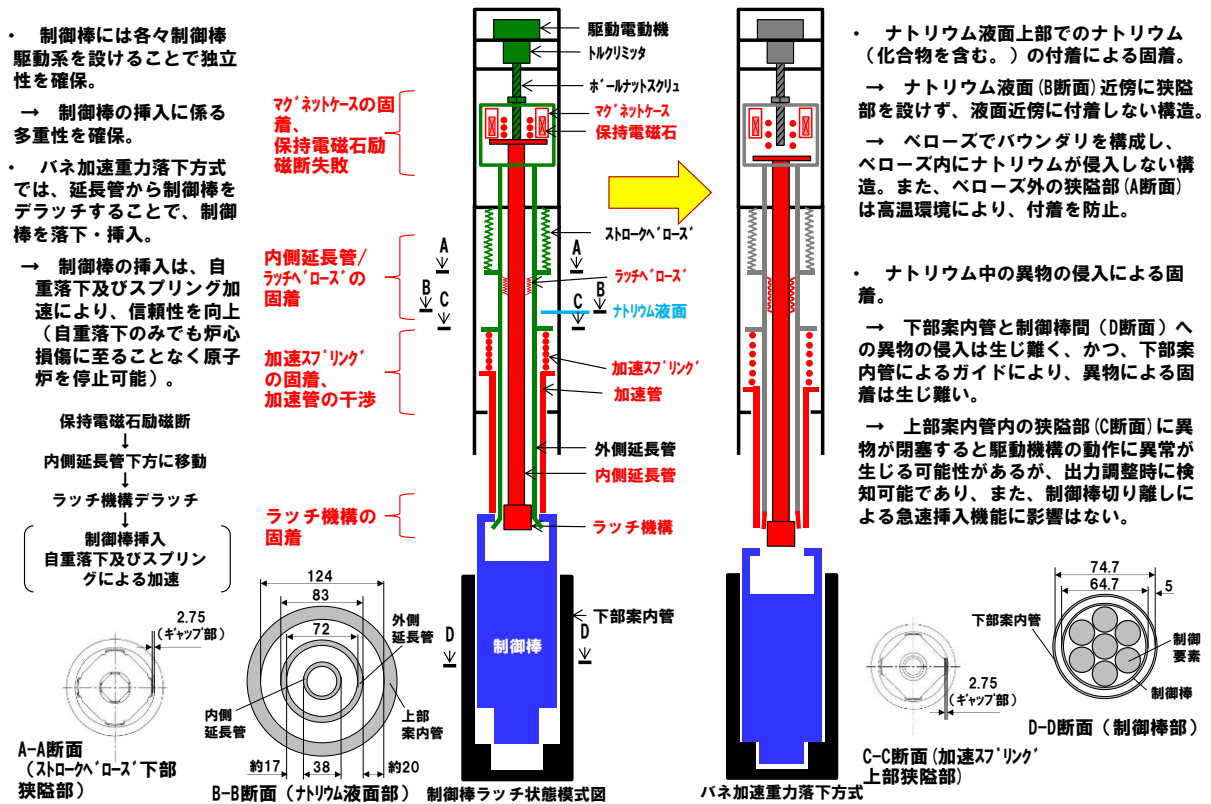
注) 「常陽」では原子炉運転中において、1次冷却材を原子炉容器の上部に設けた配管を経由して、オーバフロータンクに還流させることで、原子炉冷却材液位(ナトリウム液面)を一定に保っている。また、原子炉運転中において、1次主冷却系は一定流量で制御しており、流量変化による液面変化も生じることはない。

第2図 「もんじゅ」における微調整棒駆動機構の荷重増加事象及び「常陽」における対策

分類	具体的な故障例	防止対策	
内的事象	機械的要因	<ul style="list-style-type: none"> ・マグネットケース固着 ・内側延長管／ラッチペロース固着 ・ラッチ機構固着 ・加速スプリング固着／加速管干渉（自重による落下） 	<ul style="list-style-type: none"> ・実績に基づく構造信頼性の確保 ・使用前の検査等による性能確認
	熱的・化学的要因	<ul style="list-style-type: none"> ・変形による可動部固着 ・ナトリウム凝固による可動部固着 ・腐食／侵食による可動部固着 ・スエリングによる可動部固着 	<ul style="list-style-type: none"> ・製作時の材料管理／寸法管理 ・間隙部へのナトリウム凝固防止設計 ・高温配置によるナトリウム凝固防止設計 ・ナトリウム純度管理 ・照射量管理
	電氣的・磁氣的要因	<ul style="list-style-type: none"> ・保持電磁石励磁断失敗 ・電磁石の保持力低減失敗 	<ul style="list-style-type: none"> ・保持電磁石励磁断の多重化 ・保持電磁石の適切な設計 ・使用前の検査等による性能確認 ・フェイルセーフ設計
	設計・製作時のエラー	<ul style="list-style-type: none"> ・材料不適合、機械／電気品不良 ・寸法公差逸脱、溶接欠陥、組立不良 	<ul style="list-style-type: none"> ・実績に基づく設計・製作の信頼性の確保 ・使用前の検査等による性能確認
	保守・補修時のエラー	<ul style="list-style-type: none"> ・整備不良、交換品不良、組立不良 	<ul style="list-style-type: none"> ・実績に基づく保守・補修の信頼性の確保 ・使用前の検査等による性能確認
外的事象	地震	<ul style="list-style-type: none"> ・地震による制御棒挿入阻害 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震時の挿入性を確保
	その他	<ul style="list-style-type: none"> ・自然現象（地震以外）による制御棒挿入阻害 ・自然現象による外部電源喪失 ・自然現象による外部火災他 	<ul style="list-style-type: none"> ・外殻施設（建物）による防護 ・フェイルセーフ設計

内的事象起因の機械的な共通原因故障に対しては上記の防止対策を講じる設計とし、外的事象のうち機械的な影響が大きいと考えられる地震による共通原因故障に対しては、基準地震動を一定程度超えた範囲まで制御棒の挿入性が確保されるよう設計する。本設計により、想定すべき故障は偶発故障となり、後備炉停止系による制御棒の多重化により必要な信頼性が確保できる。

第3図 共通原因故障の分類及び防止対策



注) 下部案内管と制御棒間（D断面）は、円環状5mmの間隙を、低圧プレナムから流入するナトリウムが上向きに流れる流路となっており、異物の侵入は生じ難い。また、下部案内管内面及び制御棒外面は平滑であり、異物が堆積し閉塞することはない。

第4図 共通原因故障の防止対策の概要

① 原子炉トリップ信号

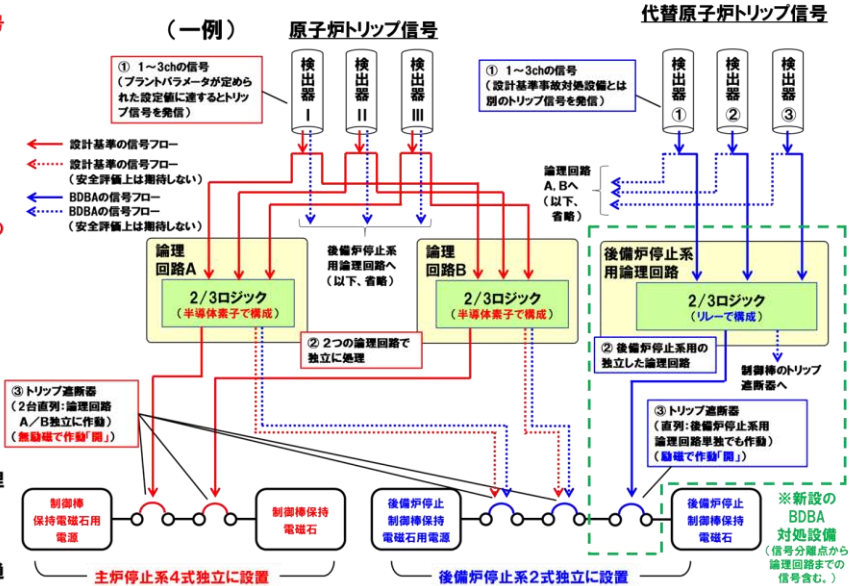
【設計基準】1種類の原子炉トリップ信号に対して、それぞれ独立した検出器を複数設けることで、原子炉トリップ信号発信に係る独立性及び多重性を確保
 【BDBA】設計基準事故対処設備とは別の検出器により、原子炉トリップ信号発信に係る多様性及び独立性を確保

② 安全保護回路

【設計基準】原子炉保護系（スクラム）の論理回路は、それぞれ独立した2台を設けることで、ロジック回路の動作に係る独立性及び多重性を確保
 【BDBA】設計基準事故対処設備とは別の後備炉停止系用論理回路を設け、後備炉停止系用論理回路からのトリップ遮断器を設けることで、論理回路の動作に係る多様性及び独立性を確保

③ 制御棒の急速挿入

制御棒等の保持電磁石用電源は、論理回路に対応してトリップ遮断器を設けることで、制御棒等の切離しに係る独立性及び多重性を確保
 また、制御棒等の急速挿入に係る共通原因故障の防止対策を講じ、必要な信頼性を確保



- 原子炉停止に係る施設は独立性及び多重性を確保しており、単一故障を想定しても、停止機能を喪失することなく、必要な信頼性を確保
 - 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故では、主炉停止系の反応度値の最も大きな制御棒一本が全引き抜き位置に固着した場合を想定し、主炉停止系のみで原子炉を安全に停止できることを確認
 - BDBAでは、後備炉停止系の急速挿入のみで炉心損傷を防止できることを確認
- ※「BDBA」：多量の放射性物質等を放出するおそれのある事故

第5図 原子炉の停止機能に係る設計基準事故対処設備及びBDBAの拡大の防止措置

- 設計基準事故対処設備として考慮した原子炉トリップ信号^{※2}の発信失敗を想定したとしても、残された既設の原子炉トリップ信号を活用することにより、選定した異常事象の全てに対して独立で多様な代替原子炉トリップ信号^{※4}を確保

既設の原子炉保護系の作動項目	過渡・事故事象 ^{※1}	設計基準事故対処設備 (原子炉トリップ信号 ^{※2})	BDBAの事象Gr ^{※3}	BDBA対処設備 (代替原子炉トリップ 信号 ^{※4})	第3信号
中性子東高（出力領域）	未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き 出力運転中の制御棒の異常な引抜き 主冷却器空気流量の増大	中性子東高（出力領域）	過出力時 原子炉停止機能喪失	原子炉出口冷却材温度高	手動スクラム
中性子東高（中間領域／起動領域）	—	—	—	—	—
炉周期短（中間領域／起動領域）	—	—	—	—	—
原子炉出口冷却材温度高	—	—	—	—	—
原子炉入口冷却材温度高	主冷却器空気流量の減少 2次冷却材漏えい事故 主送風機風量瞬時低下事故	原子炉入口冷却材温度高	除熱源喪失時 原子炉停止機能喪失	原子炉出口冷却材温度高	2次主循環ポンプトリップ、手動スクラム
1次冷却材流量低	1次冷却材流量減少 1次主循環ポンプ軸固着事故	1次冷却材流量低	炉心流量喪失時 原子炉停止機能喪失	1次主循環ポンプトリップ	原子炉出口冷却材温度高、手動スクラム
2次冷却材流量低	2次冷却材流量減少 2次主循環ポンプ軸固着事故	2次冷却材流量低	除熱源喪失時 原子炉停止機能喪失	原子炉出口冷却材温度高	2次主循環ポンプトリップ、手動スクラム
炉内ナトリウム液面低	1次冷却材漏えい事故	炉内ナトリウム液面低	炉心流量喪失時 原子炉停止機能喪失	1次主循環ポンプトリップ	原子炉出口冷却材温度高、手動スクラム
炉内ナトリウム液面高	—	—	—	—	—
1次主循環ポンプトリップ	—	—	—	—	—
2次主循環ポンプトリップ	—	—	—	—	—
電源喪失	外部電源喪失	電源喪失	炉心流量喪失時 原子炉停止機能喪失	1次主循環ポンプトリップ	2次主循環ポンプトリップ、手動スクラム
手動スクラム	—	—	—	—	—

※1：原子炉保護系の作動設定値に至らないものを除く
 ※2：既設の原子炉トリップ信号のうち、設計基準事故対処設備として考慮（「過渡変化の解析」及び「事故経過の解析」において考慮）する信号
 ※3：原子炉停止機能の喪失を想定する事象Grに対して整理
 ※4：既設の原子炉トリップ信号のうち炉心損傷防止措置として考慮する信号

第6図 原子炉トリップ信号の多様化の確保

後備炉停止系による停止時のプラント挙動及び運転操作について

1. 概要

原子炉施設には、反応度制御系統及び原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系（主炉停止系）を設ける。また、非常用制御設備として、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系（後備炉停止系）を設け、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系は、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、原子炉を停止するように設計する。

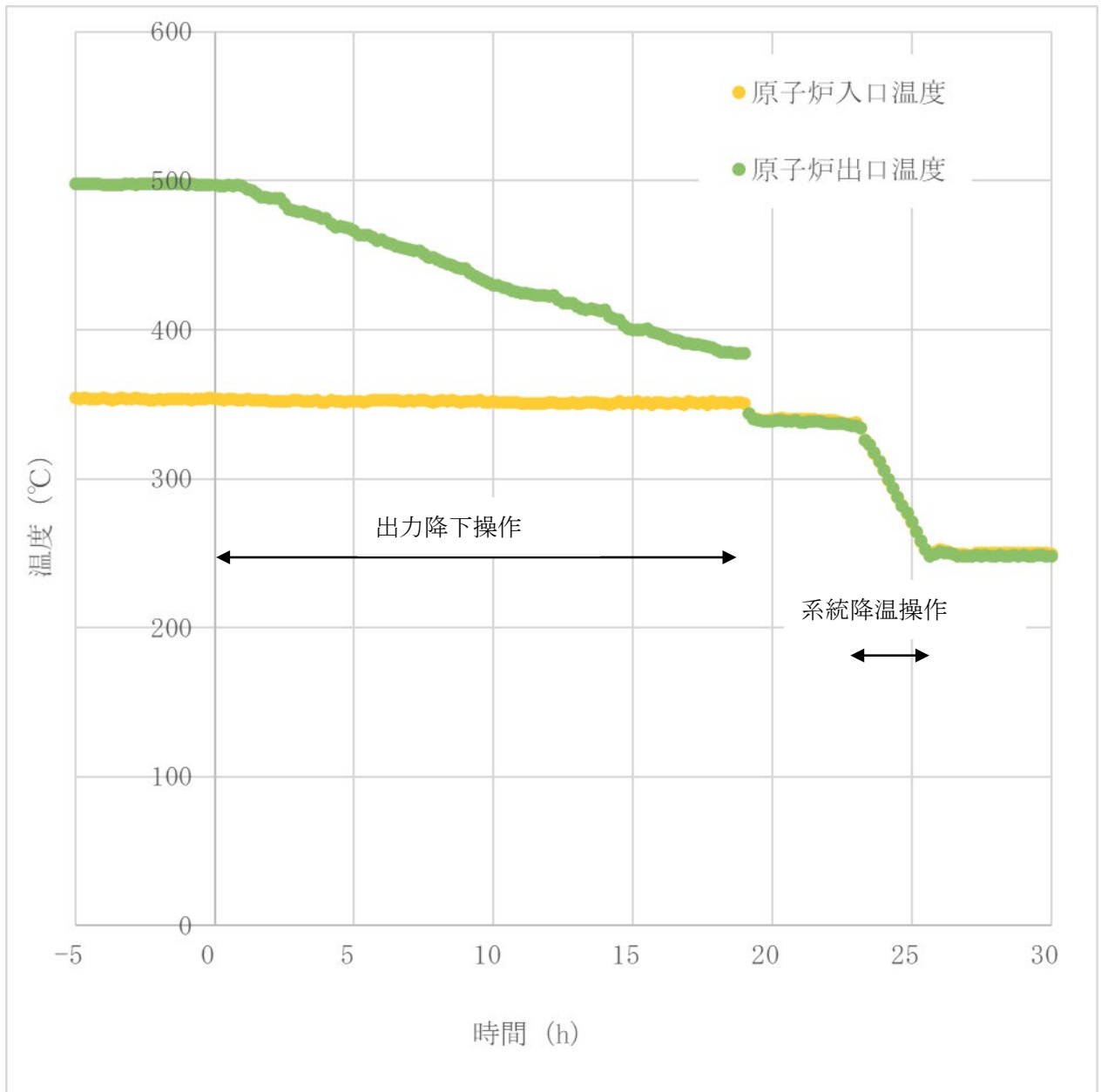
2. 後備炉停止系による原子炉停止時のプラント挙動について

後備炉停止系は、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合に、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとする。後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系の設計は、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとしており、未臨界への移行は外側エクステンションロッドに接続されたボールナットスクリュを回転させることで、後備炉停止制御棒を炉心に挿入することで達成する（ボールナットスクリュ方式）。

原子炉停止時のプラント挙動は、熱過渡緩和の観点で、原子炉出口温度の温度変化率を 50°C/h 以下を維持しながら出力を低下させるため、主炉停止系による通常の原子炉停止時のプラント挙動と同じとなる（第 1 図に MK-III 炉心における通常の原子炉停止時のプラント挙動を示す。）。また、高温状態での後備炉停止制御棒による未臨界維持中に、主炉停止系による原子炉停止不能の原因を究明し、主炉停止系の制御棒を炉心に挿入する。

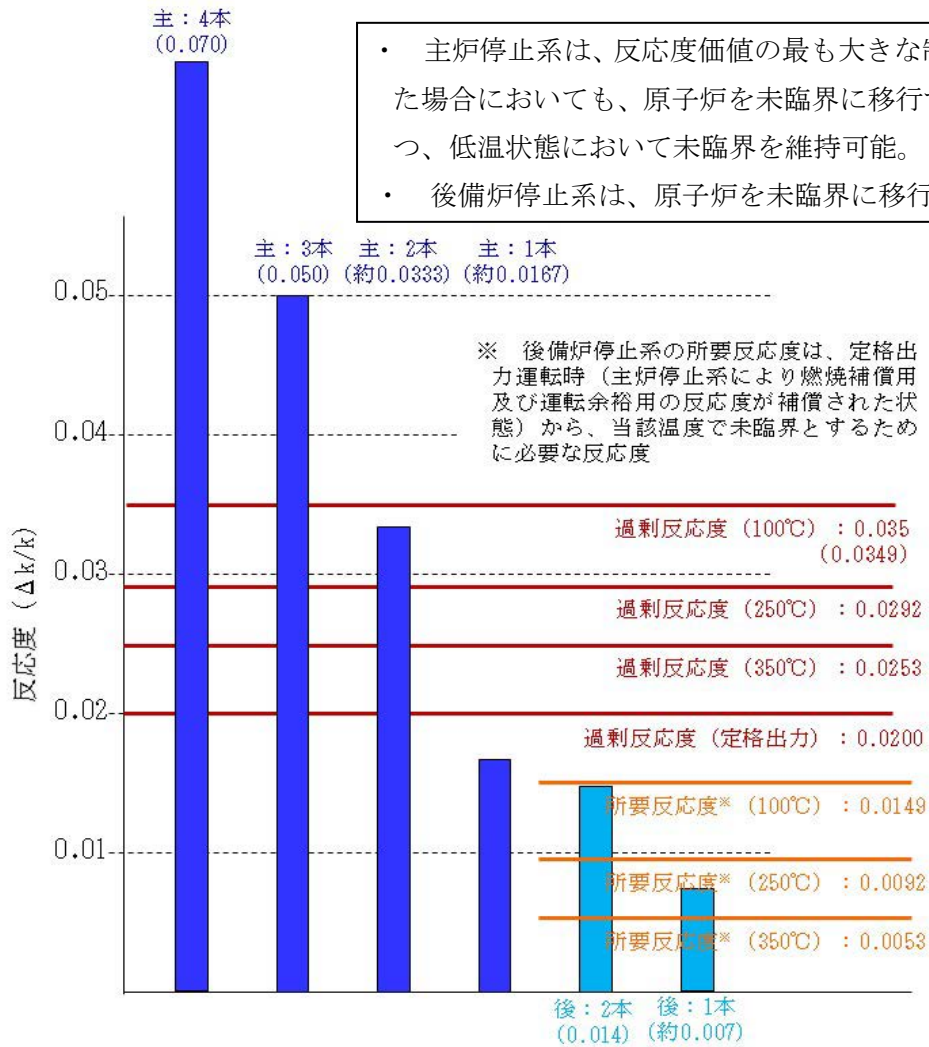
なお、第 53 条の多量の放射性物質を放出する事故の拡大の防止の評価においては、後備炉停止制御棒の急速挿入を措置としており、後備炉停止制御棒が急速挿入された場合のプラント挙動は第 53 条の炉心損傷防止措置の有効性評価で示すとおり、出力の低下速度がわずかに遅いことを除いて、主炉停止系によるスクラム時とほぼ同様のプラント挙動となる【国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）「第 53 条（多量の放射性物質を放出する事故の拡大の防止）に係る説明書」（その 2：炉心損傷防止措置）参照】。

以上



第1図 MK-III炉心における原子炉停止時のプラント挙動（平成16年10月測定）

主炉停止系及び後備炉停止系の反応度制御能力と過剰反応度の相関



反応度バランス		主炉停止系	後備炉停止系
定格出力時の最大の過剰反応度		0.020	-
内訳	燃焼補償用	0.014	-
	運転余裕用	0.006	-
温度補償用及び出力補償用		0.0149	0.0053
内訳	100°C～250°C	0.0057	-
	250°C～350°C	0.0039	-
	350°C～定格	0.0053	0.0053
所要反応度の合計		0.035 (0.0349)	0.006 (0.0053)
反応度制御能力		0.050 (リゾット・スタック時)	0.014
反応度停止余裕		0.015	0.008

添付 1 設置許可申請書における記載

5. 試験研究用等原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備

へ. 計測制御系統施設の構造及び設備

原子炉施設には、炉心、原子炉冷却材バウンダリ、原子炉カバーガス等のバウンダリ及び原子炉格納容器バウンダリ（以下「格納容器バウンダリ」という。）並びにこれらに関連する系統の健全性を確保するために監視することが必要なパラメータを、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても想定される範囲内に制御し、かつ、監視するための計測制御系統施設を設ける。計測制御系統施設は、設計基準事故が発生した場合の状況を把握し、及び対策を講ずるために必要なパラメータを設計基準事故時に想定される環境下において、十分な測定範囲及び期間にわたり監視及び記録できるものとする。

(3) 制御設備

原子炉施設には、反応度制御系統及び原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系を設ける（主炉停止系）。制御棒及び制御棒駆動系は、通常運転時に予想される温度変化、実験物の移動その他の要因による反応度変化を制御できるように、また、炉心からの飛び出しを防止するように設計する。制御棒の反応度添加率は、その停止能力（原子炉停止系）と併せて、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容設計限界を超えないものとする。さらに、制御棒及び制御棒駆動系は、反応度値の最も大きな制御棒 1 本が固着した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとし、制御棒の最大反応度値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊を起こさないものとする。

(i) 制御材の個数及び構造

原子炉施設には制御材として、制御棒を設ける。炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する。また、原子炉スクラム時には、制御棒を、自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する。

a. 個数

原子炉施設には、4本の独立した制御棒を設ける。制御棒4本を炉心第3列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。

b. 中性子吸収材の種類

炭化ほう素

c. 構造

制御棒は中性子吸収材を充填したステンレス鋼製制御要素7本をクラスタとしてステンレス鋼製の円筒管に収納した構造とする。制御要素の型式には、中性子吸収材充填部をヘリウム雰囲気とするヘリウムボンド型と、同部にナトリウムを

導入する構造のナトリウムボンド型がある。なお、中性子吸収材の有効長さは約 65 cm とする。

(ii) 制御材駆動設備の個数及び構造

原子炉施設には、制御材駆動設備として、制御棒駆動系を設ける。制御棒駆動系は、制御棒駆動機構、制御棒駆動機構上部案内管及び制御棒駆動機構下部案内管から構成する。制御棒は、制御棒駆動機構上部案内管を介して、制御棒駆動機構に吊り下げられ、炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する（ボールナットスクリュ方式）。なお、駆動ストローク（最大）は 65cm である。原子炉スクラム時には、制御棒駆動機構の制御棒保持電磁石励磁断により、制御棒を切り離し、制御棒を自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する（バネ加速重力落下方式）。原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）は、炉心の反応度（原子炉の出力）を制御するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）の故障が発生した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする。

a. 個数

原子炉施設には、各制御棒に使用する 4 式の独立した制御棒駆動系を設ける。

b. 駆動方式

通常運転時 ボールナットスクリュ方式

スクラム時 バネ加速重力落下方式

c. 挿入時間及び駆動速度

スクラム時挿入時間 0.8s 以下

(制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度値 90%挿入までの時間)

駆動速度 13cm/min 以下

(iii) 反応度制御能力

反応度制御能力 $0.070 \Delta k/k$ 以上

反応度停止余裕 $0.015 \Delta k/k$ 以上

(反応度値の最も大きな制御棒 1 本が固着した場合を想定)

最大反応度添加率 約 $0.00016 \Delta k/k/s$

(4) 非常用制御設備

原子炉施設には、非常用制御設備として、後備炉停止系を設ける。後備炉停止系は、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系から構成し、万一、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、原子炉を停止するように設計する。

(i) 制御材の個数及び構造

a. 個数

原子炉施設には、2 本の独立した後備炉停止制御棒を設ける。後備炉停止制御棒 2 本を炉心第 5 列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。

b. 中性子吸収材の種類

炭化ほう素

c. 構造

後備炉停止制御棒は中性子吸収材を充填したステンレス鋼製制御要素7本をクラスタとしてステンレス鋼製の円筒管に収納した構造とする。制御要素の型式には、中性子吸収材充填部をヘリウム雰囲気とするヘリウムボンド型と、同部にナトリウムを導入する構造のナトリウムボンド型がある。なお、中性子吸収材の有効長さは約65cmとする。

(ii) 制御材駆動設備の個数及び構造

後備炉停止制御棒駆動系は、後備炉停止制御棒駆動機構、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管及び後備炉停止制御棒駆動機構下部案内管から構成する。後備炉停止制御棒は、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管を介して、後備炉停止制御棒駆動機構に吊り下げられる。なお、駆動ストロークは約65cmであり、通常運転時の高温状態において、後備炉停止制御棒は、当該ストロークに保持されるものとする。原子炉スクラム時には、後備炉停止制御棒駆動機構の後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断により、後備炉停止制御棒を切り離し、後備炉停止制御棒を自重等により炉心に挿入することで、万一、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとする。

a. 個数

原子炉施設には、各後備炉停止制御棒に使用する2式の独立した後備炉停止制御棒駆動系を設ける。

b. 駆動方式

スクラム時 バネ加速重力落下方式

c. 挿入時間及び駆動速度

スクラム時挿入時間 0.8s以下

(後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断から後備炉停止制御棒反応度値90%挿入までの時間)

(iii) 反応度制御能力

反応度制御能力 $0.014 \Delta k/k$ 以上

反応度停止余裕 $0.008 \Delta k/k$ 以上 (350°C)

添付書類八

3. 原子炉本体

3.9 制御設備及び非常用制御設備

3.9.1 制御棒及び制御棒駆動系

3.9.1.1 概要

原子炉施設には、反応度制御系統及び原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系（主炉停止系）を設ける。制御棒及び制御棒駆動系は、通常運転時に予想される温度変化、実験物の移動その他の要因による反応度変化を制御できるように、また、炉心からの飛び出しを防止するように設計する。制御棒の反応度添加率は、その停止能力（原子炉停止系統）と併せて、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容設計限界を超えないものとする。さらに、制御棒及び制御棒駆動系は、反応度価値の最も大きな制御棒 1 本が固着した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとし、制御棒の最大反応度価値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊を起こさないものとする。

3.9.1.2 設計方針

制御棒及び制御棒駆動系の設計方針を以下に示す。

- (1) 反応度価値が最も大きな制御棒 1 本が、完全に引き抜かれた状態で固着した場合であっても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする。
- (2) スクラム時挿入時間は、制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度価値 90%挿入までを 0.8 秒以下とする。
- (3) 制御棒は、基準地震動 S_s の設計用地震波に基づく最大想定変位時においても十分な余裕をもって挿入できるようにする。
- (4) 個々の制御棒は全て別々に取付け、取外しが可能なようにする。

3.9.2 後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系

3.9.2.1 概要

原子炉施設には、非常用制御設備として、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系（後備炉停止系）を設ける。後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系は、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、原子炉を停止するように設計する。

3.9.2.2 設計方針

後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系の設計方針を以下に示す。

- (1) 通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものと

する。

- (2) スクラム時挿入時間は、後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断から後備炉停止制御棒反応度値 90%挿入までを 0.8 秒以下とする。
- (3) 後備炉停止制御棒は、基準地震動 S_s の設計用地震波に基づく最大想定変位時においても十分な余裕をもって挿入できるようにする。
- (4) 個々の後備炉停止制御棒は全て別々に取付け、取外しが可能なようにする。

添付 3 設置許可申請書の添付書類における記載（適合性）

添付書類八

1. 安全設計の考え方

1.8 「設置許可基準規則」への適合

原子炉施設は、「設置許可基準規則」に適合するように設計する。各条文に対する適合のための設計方針は次のとおりである。

(原子炉停止系統)

第五十九条 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、原子炉停止系統を設けなければならない。

一 制御棒による二以上の独立した系統を有するものとする。ただし、次に掲げるときは、この限りでない。

イ 試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、未臨界を維持することができる制御棒の数に比し当該系統の能力に十分な余裕があるとき。

ロ 原子炉固有の出力抑制特性が優れているとき。

二 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、原子炉停止系統のうち少なくとも一つは、試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、少なくとも一つは、低温状態において未臨界を維持できるものとする。

三 反応度価値の最も大きな制御棒一本が固着した場合においても前号の規定に適合するものとする。

2 制御棒の最大反応度価値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉容器内部構造物の損壊を起こさないものでなければならない。

3 原子炉停止系統は、反応度制御系統と共用する場合には、反応度制御系統を構成する設備の故障が発生した場合においても通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に試験研究用等原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものでなければならない。

適合のための設計方針

1 について

原子炉施設には、原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系並びに後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系を設ける。制御棒及び制御棒駆動系と後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系は相互に独立したものを設ける。原子炉スクラム時には、制御棒及び後備炉停止制御棒を、自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する。

制御棒については、同一の構造及び機能を有する4本の独立したものを設ける。制御棒4本を炉心第3列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。また、各制御棒に使用する4式の独立した制御棒駆動系を設ける。制御棒(4本)の反応度制御能力価値は $0.070 \Delta k/k$ 以上とし、反応度価値の最も大きな制御棒1本が固着した場合においても $0.015 \Delta k/k$ 以上の反応度停止余裕を確保できるように設計することから、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態(ここでは、 100°C の体系)において未臨界を維持できる。

後備炉停止制御棒については、同一の構造及び機能を有する2本の独立したものを設ける。後備炉停止制御棒2本を炉心第5列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行すること

ができる設計とする（ここでは、350℃の体系）。後備炉停止制御棒の反応度制御能力は 0.014 Δk/k 以上とし、350℃の体系において 0.008 Δk/k 以上の反応度停止余裕を確保できるように設計することから、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行することができる。また、各後備炉停止制御棒に使用する 2 式の独立した後備炉停止制御棒駆動系を設ける。原子炉保護系と後備炉停止系用論理回路は、独立した盤に設置することで、独立性を確保した設計とする。

なお、原子炉保護系が作動した場合には、制御棒及び後備炉停止制御棒を切り離すものとするが、設計基準事故等の評価においては制御棒の挿入のみを考慮する。また、後備炉停止系用論理回路が作動した場合にも、制御棒及び後備炉停止制御棒を切り離すものとするが、炉心損傷防止措置の有効性評価においては後備炉停止制御棒の挿入のみを考慮する。

スクラム時挿入時間（制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度値 90%挿入までの時間）は、0.8s 以下とする。

2 について

制御棒の最大反応度値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊を起こさないものとする。「添付書類 10 2. 運転時の異常な過渡変化 2.2 未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き」、「添付書類 10 2. 運転時の異常な過渡変化 2.3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き」及び「添付書類 10 3. 設計基準事故 3.3 燃料スランピング事故」に示すように、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリの破損、及び炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊が生じることはない。

3 について

制御棒及び制御棒駆動系は、反応度制御系統及び原子炉停止系統として共用する。制御棒は、制御棒駆動系により、上下駆動され、炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する（ボールナットスクリュ方式）。原子炉スクラム時には、制御棒がデラッチ（切り離し）される。制御棒は、自重及びスプリングにより加速されて、炉心に落下・挿入され、原子炉は停止する（バネ加速重力落下方式）。原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）は、炉心の反応度（原子炉の出力）を制御するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）の故障が発生した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする。

添付書類八の以下の項目参照

- 3. 原子炉本体
- 6. 計測制御系統施設

添付書類十の以下の項目参照

2. 運転時の異常な過渡変化
3. 設計基準事故

添付書類八

3. 原子炉本体

3.9 制御設備及び非常用制御設備

3.9.1 制御棒及び制御棒駆動系

3.9.1.1 概要

原子炉施設には、反応度制御系統及び原子炉停止系統として、制御棒及び制御棒駆動系（主炉停止系）を設ける。制御棒及び制御棒駆動系は、通常運転時に予想される温度変化、実験物の移動その他の要因による反応度変化を制御できるように、また、炉心からの飛び出しを防止するように設計する。制御棒の反応度添加率は、その停止能力（原子炉停止系統）と併せて、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容設計限界を超えないものとする。さらに、制御棒及び制御棒駆動系は、反応度価値の最も大きな制御棒 1 本が固着した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとし、制御棒の最大反応度価値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象に対して原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガス等のバウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物又は原子炉内部構造物の損壊を起こさないものとする。

3.9.1.2 設計方針

制御棒及び制御棒駆動系の設計方針を以下に示す。

- (1) 反応度価値が最も大きな制御棒 1 本が、完全に引き抜かれた状態で固着した場合であっても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする。
- (2) スクラム時挿入時間は、制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度価値 90%挿入までを 0.8 秒以下とする。
- (3) 制御棒は、基準地震動 S_s の設計用地震波に基づく最大想定変位時においても十分な余裕をもって挿入できるようにする。
- (4) 個々の制御棒は全て別々に取付け、取外しが可能なようにする。

3.9.1.3 主要設備

3.9.1.3.1 制御棒

原子炉施設には制御材として、制御棒を設ける。炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する。また、原子炉スクラム時には、制御棒を、自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する。制御棒については、同一の構造及び機能を有する 4 本の独立したものを設ける。制御棒 4 本を炉心第 3 列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。

制御棒は、制御要素、ハンドリングヘッド及びダッシュラム等から構成する（第 3.9.1 図参照）。制御要素は、ほう素-10 を濃縮した炭化ほう素のペレットを薄肉のシュラウド管に

より被覆し、ステンレス鋼の円筒管（被覆管）に充填したものであり、上部には発生したヘリウムガスを制御要素外に放出するためのダイビングベル型のベント機構を有している。ベント機構は中性子吸収材である炭化ほう素の $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応等により生成するヘリウムガス等を制御要素外に放出し、内圧の上昇を防ぐことを目的としており、これによって制御棒の使用期間を長くすることができる。放出されたヘリウムガスは制御棒上部から原子炉容器上部のナトリウム中を経てカバーガス空間へ抜ける。

制御要素の型式には、冷却材であるナトリウムが制御要素内に浸入しないものとし、中性子吸収材充填部をヘリウム雰囲気とするヘリウムボンド型と、ベント機構から同部にナトリウムを導入する構造のナトリウムボンド型がある。なお、ナトリウムボンド型制御要素の被覆管内面は、ほう素及び炭素の浸入を防ぐため、クロムコーティング等を施すものとする。制御棒の使用期間は、必要な制御能力を確保する上での制限である核的寿命と炭化ほう素ペレットのスエリングによる被覆管との相互作用による機械的寿命のいずれか短い方で決定される。

制御棒は中性子吸収材を充填したステンレス鋼製制御要素 7 本をクラスタとしてステンレス鋼製の円筒管（保護管）に収納した構造とする。保護管の下側には、制御棒が、原子炉スクラム時に、自重等により炉心に挿入され、着地する際に生じる衝撃を緩衝するためのダッシュラムを設ける。また、保護管の上側には、制御棒を制御棒駆動系と連結するためのハンドリングヘッドを設ける。冷却材は、炉心支持板低圧プレナムを經由し、制御棒保護管脚部の冷却材流入口から流入する。主要仕様を以下に示す。

本数 4 本

制御要素数 7 本／制御棒

制御要素

中性子吸収材材料 炭化ほう素

被覆管材料 SUS 316 相当ステンレス鋼

中性子吸収材有効長さ 約 65cm

中性子吸収材ペレット外径 約 16.3mm

被覆管肉厚 ヘリウムボンド型 約 0.8mm

ナトリウムボンド型 約 0.5mm

内圧調整機構 ベント型（ダイビングベル型）

核的寿命 10%（軸方向平均ほう素-10 燃焼度）

保護管

保護管材料 ステンレス鋼

外径 約 64.7mm

突起部外径 約 72.7mm

3.9.1.3.2 制御棒駆動系

原子炉施設には、制御材駆動設備として、各制御棒に使用する 4 式の独立した制御棒駆動系を設ける。制御棒駆動系は、制御棒駆動機構、制御棒駆動機構上部案内管及び制御棒駆動

機構下部案内管から構成する。

制御棒駆動機構は、制御棒駆動機構上部案内管と組み合わせて、炉心上部機構に設置される（第3.9.2図参照）。制御棒は、ハンドリングヘッドにおいて、制御棒駆動機構上部案内管に収納されるエクステンションロッドを介して、制御棒駆動機構に吊り下げられる。エクステンションロッドは、制御棒をラッチ・デラッチするための内側エクステンションロッド、及び下部にグリッパを有し、制御棒の位置を調整する際に制御棒をラッチする外側エクステンションロッドから構成する。制御棒は、内側エクステンションロッドの下端が、外側エクステンションロッドの内側に収納され、下部のグリッパを押し広げることで、ラッチされる。なお、当該ラッチ操作では、エクステンションロッドを下降しつつ、内側エクステンションロッドの下端を、制御棒のハンドリングヘッド底部に押し当てることで、内側エクステンションロッドの下端を外側エクステンションロッドの内側に収納する。また、上記ラッチ操作では、内側エクステンションロッドが外側エクステンションロッドに対して、相対的に上方に移動するため、内側エクステンションロッドの上部に設けられたアーマチュアと外側エクステンションロッドに接続された制御棒駆動機構の電磁石のギャップがなくなり、電磁石の励磁コイルを励磁することで、内側エクステンションロッドの位置を固定できる状態となる。制御棒ラッチ時にあっては、内側エクステンションロッドは、上部に設けられたアーマチュアが、外側エクステンションロッドに接続された制御棒駆動機構の電磁石に吸着されることで、その位置が固定されるため、制御棒は、エクステンションロッドと一体となり、制御棒駆動機構のケーシングに収納された駆動電動機（三相誘導電動機）により、減速機を介して、外側エクステンションロッドに接続されたボールナットスクリュを回転させることで、上下駆動され、炉心の反応度（原子炉の出力）は、制御棒の位置を調整することで制御する（ボールナットスクリュ方式）。なお、駆動ストロークは約65cmである。また、駆動電動機に設けられた電磁ブレーキにより、制御棒上下駆動の停止及び停止中の位置保持が行われる。制御棒の位置は、駆動電動機に設けられたシンクロ発信器により検出される。

内側エクステンションロッドが電磁石により固定され、制御棒をラッチした状態においては、制御棒駆動機構上部案内管に設けた加速スプリングが加速管を介して圧縮されるものとする。原子炉スクラム時には、制御棒駆動機構の制御棒保持電磁石励磁断により、内側エクステンションロッドは、自重及びスプリングにより下方に移動し、外側エクステンションロッドの外側に押し出されるため、制御棒がデラッチ（切り離し）される。制御棒は、自重及びスプリングにより加速されて、炉心に落下・挿入され、原子炉は停止する（バネ加速重力落下方式）。原子炉スクラムに必要な機能（バネ加速重力落下方式）は、炉心の反応度（原子炉の出力）を制御するために使用する機能（ボールナットスクリュ方式）の故障が発生した場合においても、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時に、原子炉を未臨界に移行することができ、かつ、低温状態において未臨界を維持できるものとする。炉心には、制御棒を所定の位置に導くため、ダッシュポットを有する制御棒駆動機構下部案内管が設置されており、制御棒は、当該下部案内管内に落下・挿入される。なお、燃料交換時にあっては、全ての制御棒をデラッチし、炉心に挿入した状態とする。制御棒駆動系の主な仕様を以下に示す。

台数 4式

駆動方式 通常運転時 ボールナットスクリュ方式

スクラム時 バネ加速重力落下方式

スクラム時挿入時間 0.8s 以下

(制御棒保持電磁石励磁断から制御棒反応度値 90%挿入までの時間)

駆動速度 引抜き 13cm/min 以下

挿入 13cm/min 以下

駆動ストローク 約 65cm

3.9.2 後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系

3.9.2.1 概要

原子炉施設には、非常用制御設備として、後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系（後備炉停止系）を設ける。後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系は、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、原子炉を停止するように設計する。

3.9.2.2 設計方針

後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系の設計方針を以下に示す。

- (1) 通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとする。
- (2) スクラム時挿入時間は、後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断から後備炉停止制御棒反応度値 90%挿入までを 0.8 秒以下とする。
- (3) 後備炉停止制御棒は、基準地震動 S_s の設計用地震波に基づく最大想定変位時においても十分な余裕をもって挿入できるようにする。
- (4) 個々の後備炉停止制御棒は全て別々に取付け、取外しが可能なようにする。

3.9.2.3 主要設備

3.9.2.3.1 後備炉停止制御棒

原子炉施設には、制御材として、後備炉停止制御棒を設ける。通常運転時にあっては、全引抜位置とし、原子炉スクラム時には、後備炉停止制御棒を、自重等により炉心に挿入することで原子炉を停止する。後備炉停止制御棒については、同一の構造及び機能を有する 2 本の独立したものを設ける。後備炉停止制御棒 2 本を炉心第 5 列に配置するものとし、その挿入により、原子炉を未臨界に移行することができる設計とする。

後備炉停止制御棒は、制御要素、ハンドリングヘッド及びダッシュラム等から構成する。制御要素は、ほう素-10 を濃縮した炭化ほう素のペレットを薄肉のシュラウド管により被覆し、ステンレス鋼の円筒管（被覆管）に充填したものであり、上部には発生したヘリウムガスを制御要素外に放出するためのダイビングベル型のベント機構を有している。ベント機構は中性子吸収材である炭化ほう素の $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応等により生成するヘリウムガスを制御要素外に放出し、内圧の上昇を防ぐことを目的としており、これによって後備炉停

止制御棒の使用期間を長くすることができる。放出されたヘリウムガスは後備炉停止制御棒上部から原子炉容器上部のナトリウム中を経てカバーガス空間へ抜ける。

制御要素の型式には、冷却材であるナトリウムが制御要素内に浸入しないものとし、中性子吸収材充填部をヘリウム雰囲気とするヘリウムボンド型と、ベント機構から同部にナトリウムを導入する構造のナトリウムボンド型がある。なお、ナトリウムボンド型制御要素の被覆管内面は、ほう素及び炭素の浸入を防ぐため、クロムコーティング等を施すものとする。後備炉停止制御棒の使用期間は、必要な制御能力を確保する上での制限である核的寿命と炭化ほう素ペレットのスエリングによる被覆管との相互作用による機械的寿命のいずれか短い方で決定される。

後備炉停止制御棒は中性子吸収材を充填したステンレス鋼製制御要素 7 本をクラスタとしてステンレス鋼製の円筒管（保護管）に収納した構造とする。保護管の下側には、後備炉停止制御棒が、原子炉スクラム時に、自重等により炉心に挿入され、着地する際に生じる衝撃を緩衝するためのダッシュラムを設ける。また、保護管の上側には、後備炉停止制御棒を後備炉停止制御棒駆動系と連結するためのハンドリングヘッドを設ける。冷却材は、炉心支持板低圧プレナムを経由し、後備炉停止制御棒保護管脚部の冷却材流入口から流入する。主要仕様を以下に示す。

本数 2 本

制御要素数 7 本／後備炉停止制御棒

制御要素

中性子吸収材材料 炭化ほう素

被覆管材料 SUS 316 相当ステンレス鋼

中性子吸収材有効長さ 約 65cm

中性子吸収材ペレット外径 約 16.3mm

被覆管肉厚 ヘリウムボンド型 約 0.8mm

ナトリウムボンド型 約 0.5mm

内圧調整機構 ベント型（ダイビングベル型）

核的寿命 10%（軸方向平均ほう素-10 燃焼度）

保護管

保護管材料 ステンレス鋼

外径 約 64.7mm

突起部外径 約 72.7mm

3.9.2.3.2 後備炉停止制御棒駆動系

原子炉施設には、制御材駆動設備として、各後備炉停止制御棒に使用する 2 式の独立した後備炉停止制御棒駆動系を設ける。後備炉停止制御棒駆動系は、後備炉停止制御棒駆動機構、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管及び後備炉停止制御棒駆動機構下部案内管から構成する。

後備炉停止制御棒駆動機構は、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管と組み合わせて、炉

心上部機構に設置される。後備炉停止制御棒は、ハンドリングヘッドにおいて、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管に収納されるエクステンションロッドを介して、後備炉停止制御棒駆動機構に吊り下げられる。エクステンションロッドは、後備炉停止制御棒をラッチ・デラッチするための内側エクステンションロッド、及び下部にグリッパを有し、後備炉停止制御棒の位置を調整する際に後備炉停止制御棒をラッチする外側エクステンションロッドから構成する。後備炉停止制御棒は、内側エクステンションロッドの下端が、外側エクステンションロッドの内側に収納され、下部のグリッパを押し広げることで、ラッチされる。なお、当該ラッチ操作では、エクステンションロッドを下降しつつ、内側エクステンションロッドの下端を、後備炉停止制御棒のハンドリングヘッド底部に押し当てることで、内側エクステンションロッドの下端を外側エクステンションロッドの内側に収納する。また、上記ラッチ操作では、内側エクステンションロッドが外側エクステンションロッドに対して、相対的に上方に移動するため、内側エクステンションロッドの上部に設けられたアーマチュアと外側エクステンションロッドに接続された後備炉停止制御棒駆動機構の電磁石のギャップがなくなり、電磁石の励磁コイルを励磁することで、内側エクステンションロッドの位置を固定できる状態となる。後備炉停止制御棒ラッチ時にあっては、内側エクステンションロッドは、上部に設けられたアーマチュアが、外側エクステンションロッドに接続された後備炉停止制御棒駆動機構の電磁石に吸着されることで、その位置が固定されるため、後備炉停止制御棒は、エクステンションロッドと一体となり、後備炉停止制御棒駆動機構のケーシングに収納された駆動電動機（三相誘導電動機）により、減速機を介して、外側エクステンションロッドに接続されたボールナットスクリュを回転させることで、上下駆動される。駆動ストロークは約 65cm であり、通常運転時の高温状態において、後備炉停止制御棒は、当該ストロークに保持されるものとする。駆動電動機に設けられた電磁ブレーキにより、後備炉停止制御棒上下駆動の停止及び停止中の位置保持が行われる。後備炉停止制御棒の位置は、駆動電動機に設けられたシンクロ発信器により検出される。

内側エクステンションロッドが電磁石により固定され、後備炉停止制御棒をラッチした状態においては、後備炉停止制御棒駆動機構上部案内管に設けた加速スプリングが加速管を介して圧縮されるものとする。原子炉スクラム時には、後備炉停止制御棒駆動機構の後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断により、内側エクステンションロッドは、自重及びスプリングにより下方に移動し、外側エクステンションロッドの外側に押し出されるため、後備炉停止制御棒がデラッチ（切り離し）される。後備炉停止制御棒は、自重及びスプリングにより加速されて、炉心に落下・挿入され、原子炉は停止する（バネ加速重力落下方式）。万一、主炉停止系による原子炉停止が不能の場合でも、通常運転時の高温状態において、原子炉を未臨界に移行し未臨界を維持できるものとする。炉心には、後備炉停止制御棒を所定の位置に導くため、ダッシュポットを有する後備炉停止制御棒駆動機構下部案内管が設置されており、後備炉停止制御棒は、当該下部案内管内に落下・挿入される。なお、燃料交換時にあっては、全ての後備炉停止制御棒をデラッチし、炉心に挿入した状態とする。後備炉停止制御棒駆動系の主な仕様を以下に示す。

台数 2 式

駆動方式 スクラム時 バネ加速重力落下方式

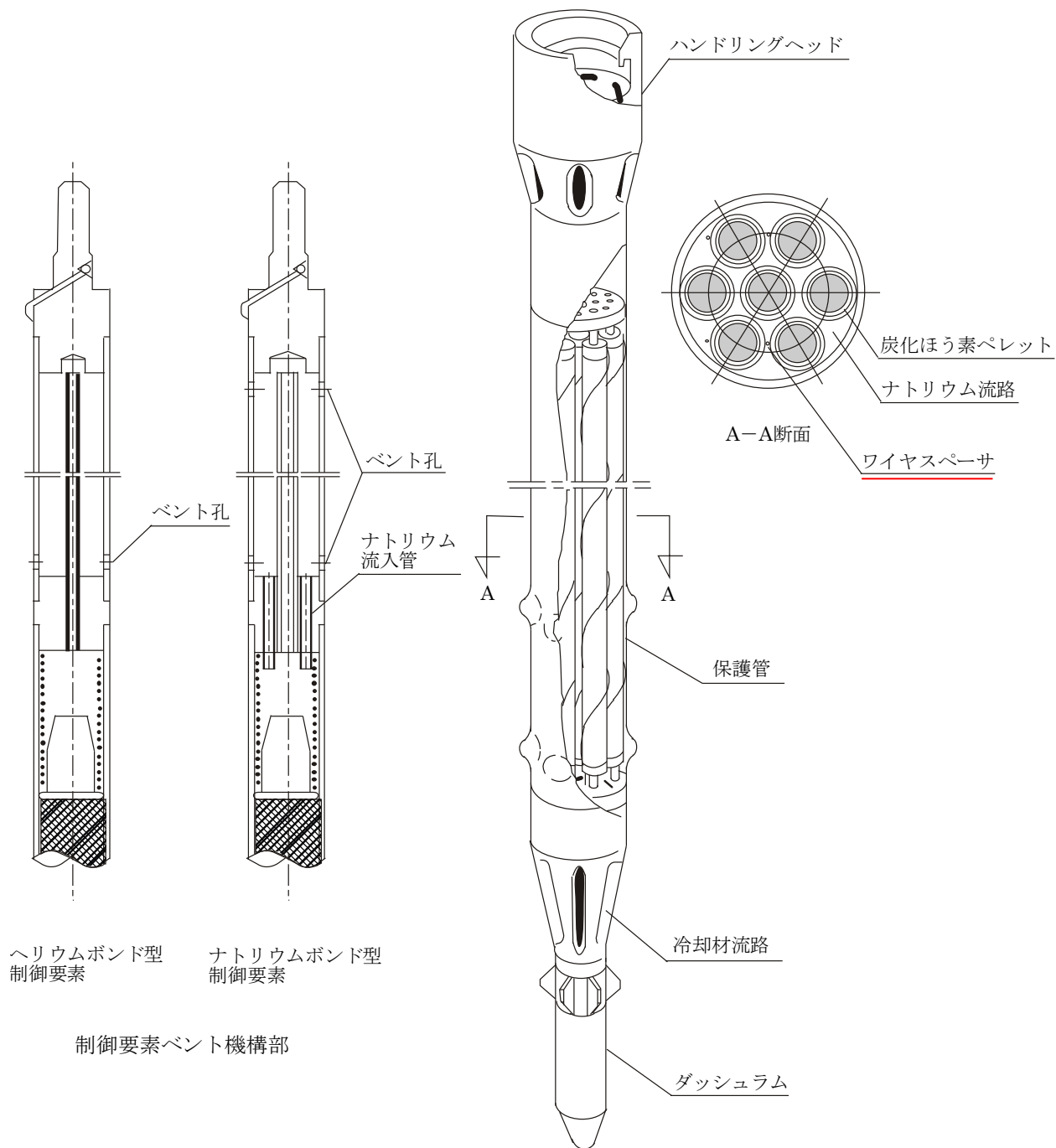
スクラム時挿入時間 0.8s 以下

(後備炉停止制御棒保持電磁石励磁断から後備炉停止制御棒反応度値 90%挿入までの時間)

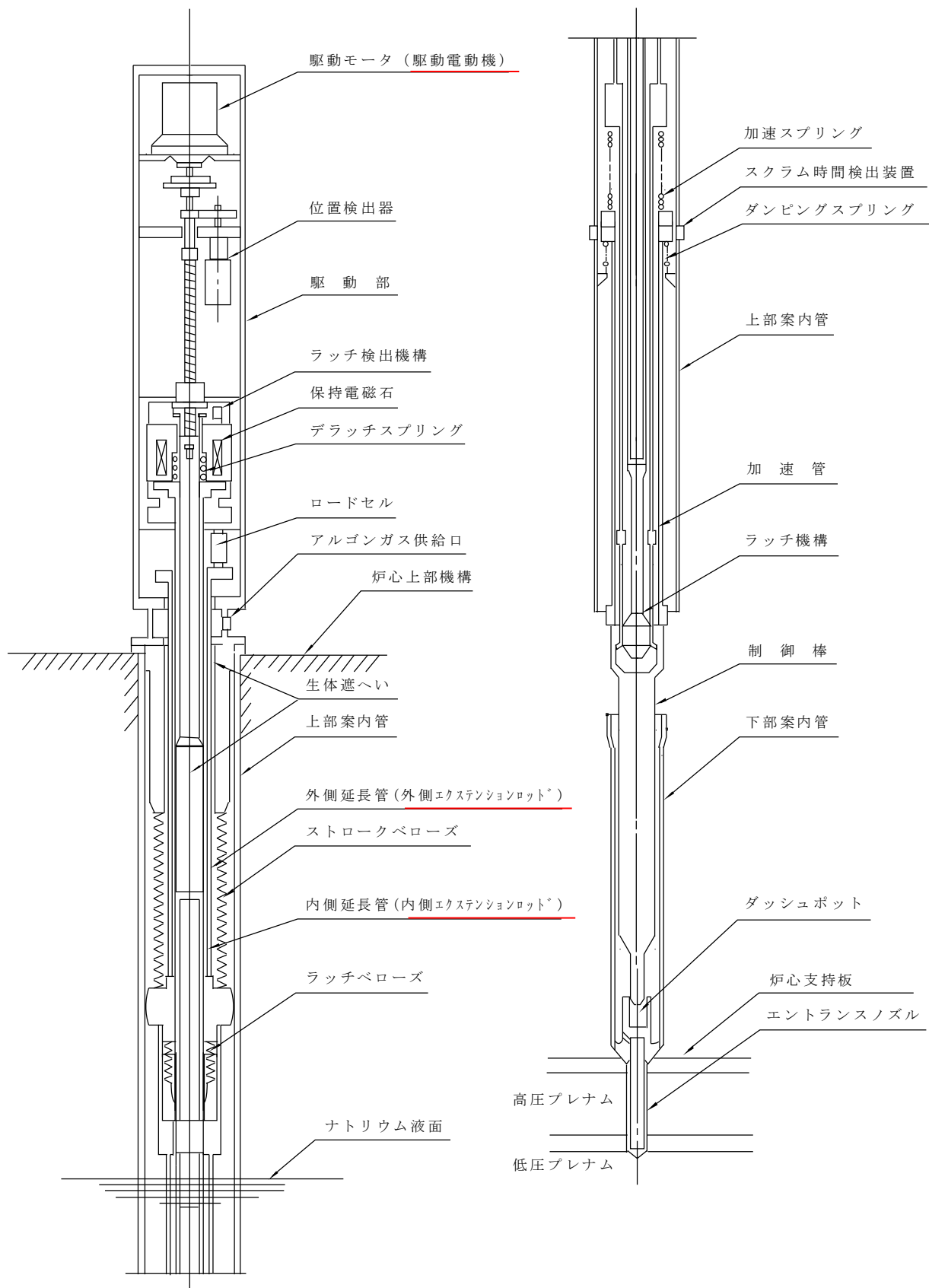
駆動速度 引抜き 13cm/min 以下

挿入 13cm/min 以下

駆動ストローク 約 65cm



第 3.9.1 図 制御棒



第 3.9.2 図 制御棒駆動機構