

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）に係る説明書

2020 年 10 月 6 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

目 次

1. 要求事項の整理
2. 要求事項への適合性
 - 2.1 制御設備及び非常用制御設備
 - 2.2 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

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. 要求事項への適合性

2.1 制御設備及び非常用制御設備

2.1.1 制御棒及び制御棒駆動系

2.1.1.1 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。

2.1.1.2 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。

2.1.1.3 主要設備

2.1.1.3.1 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2.1.1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

2.1.1.3.2 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 2.1.2 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

2.1.2 後備炉停止制御棒及び後備炉停止制御棒駆動系

2.1.2.1 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】。

2.1.2.2 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。

2.1.2.3 主要設備

2.1.2.3.1 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（第 2.1.1 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

2.1.2.3.2 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2.1.2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

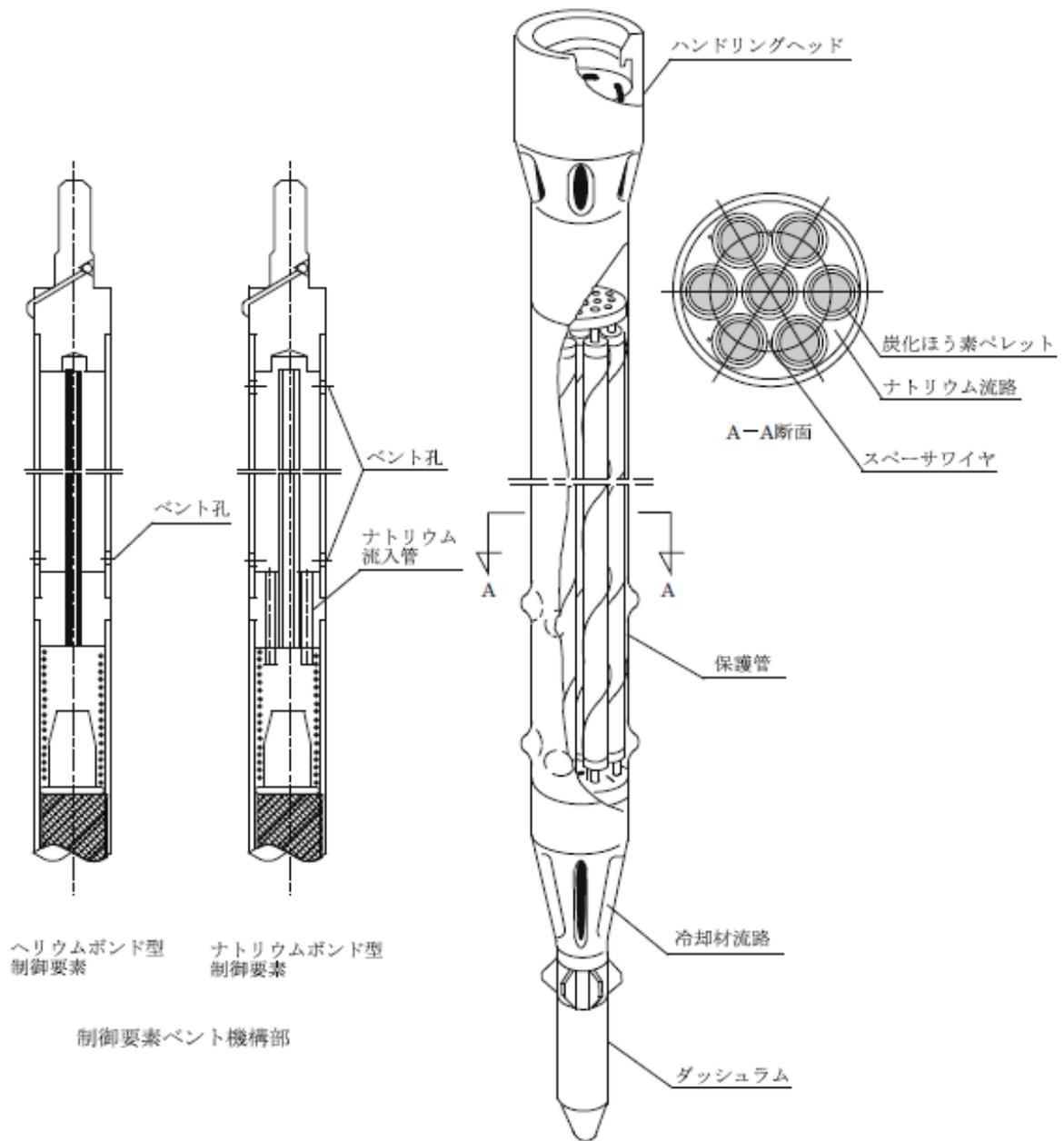
スクラム時挿入時間 0.8s 以下

(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)

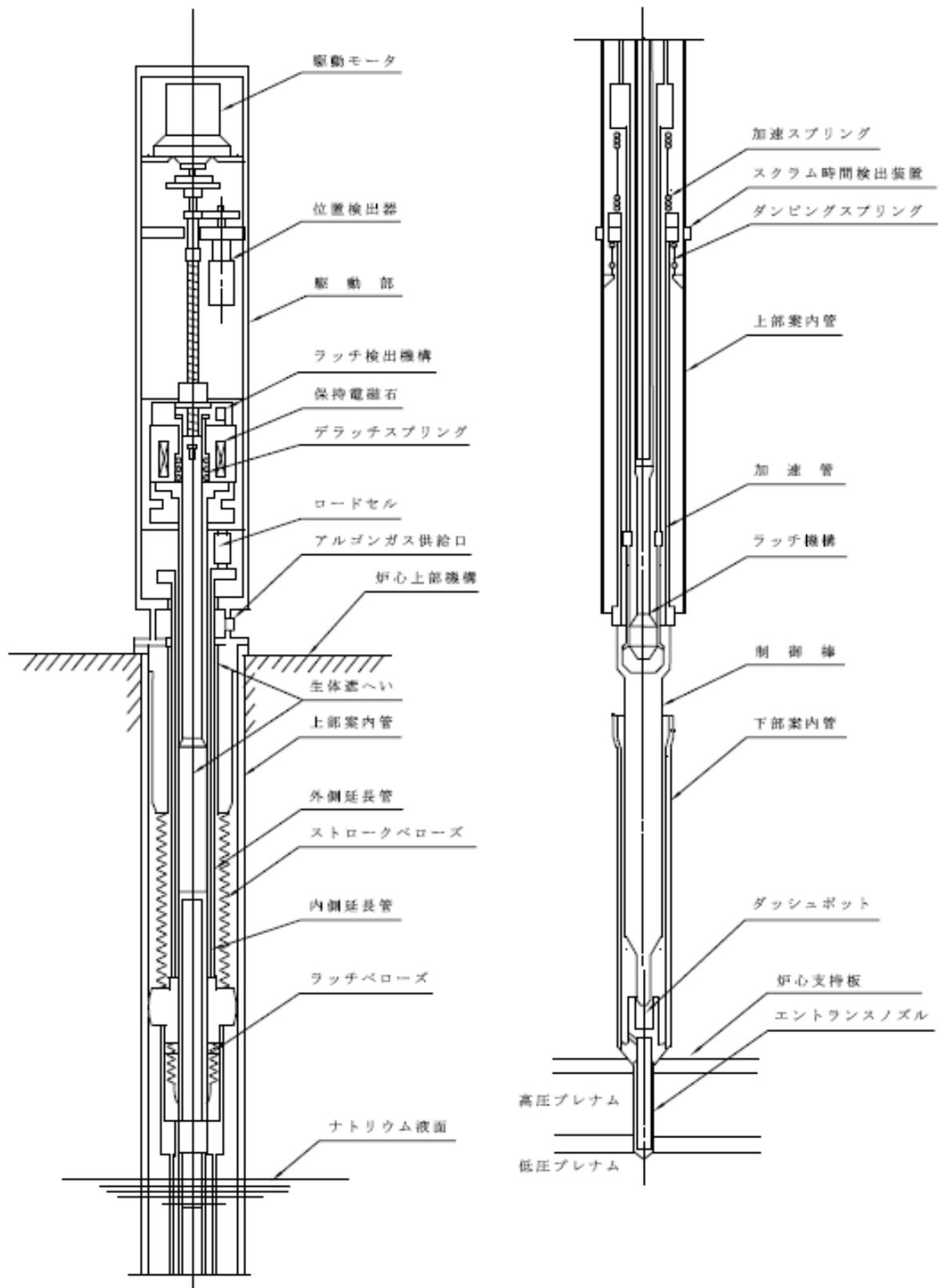
駆動速度 引抜き 13cm/min 以下

挿入 13cm/min 以下

駆動ストローク 約 65cm



第 2. 1. 1 図 制御棒及び後備炉停止制御棒



第 2. 1. 2 図 制御棒駆動機構及び後備炉停止制御棒駆動機構

2.2 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。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、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。【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）に係る説明書」（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」及び「添付書類 10 2. 運転時の異常な過渡変化 2.3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き」に示すように、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）に係る説明書」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

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。

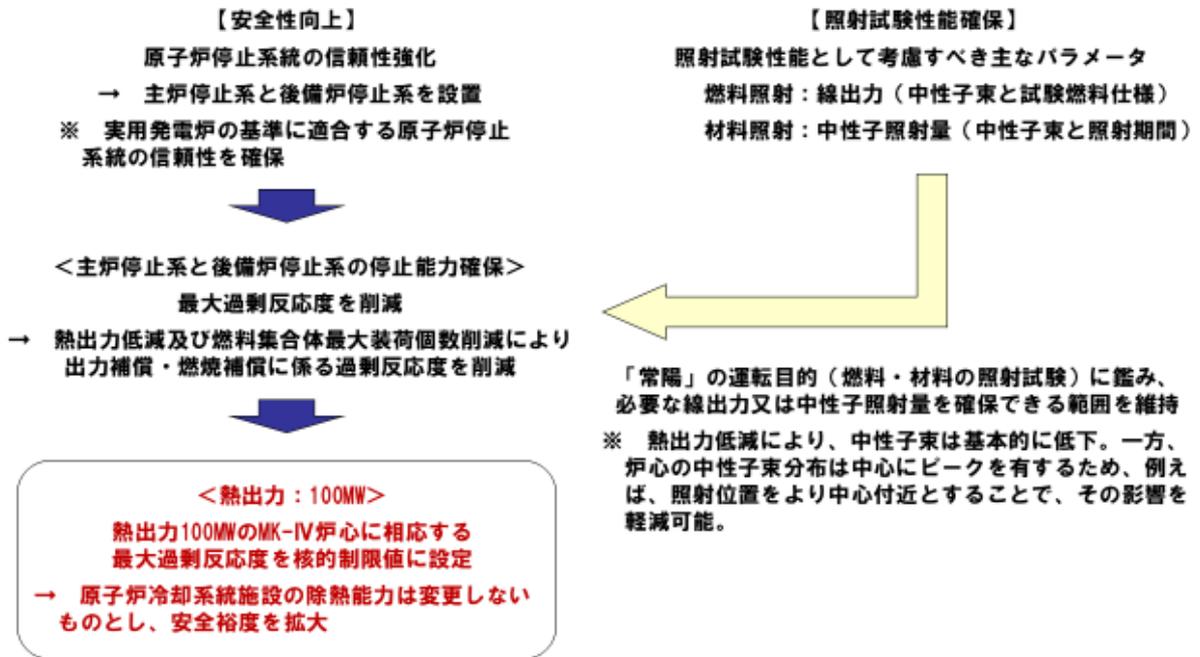
2. 「炉心の変更」に関する基本方針

「炉心の変更」は、改正された核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律の施行に伴い、「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あたり、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】

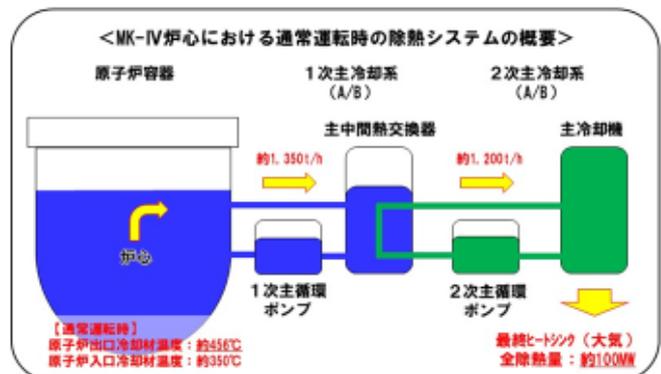
- ・ 炉心燃料集合体の機械設計（使用期間長期化対応を含む）
- ・ 動特性
- ・ 被ばく評価
- ・ 運転時の異常な過渡変化の評価
- ・ 設計基準事故の評価
- ・ 多量の放射性物質等を放出する事故の対策検討・評価

【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わせて**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労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

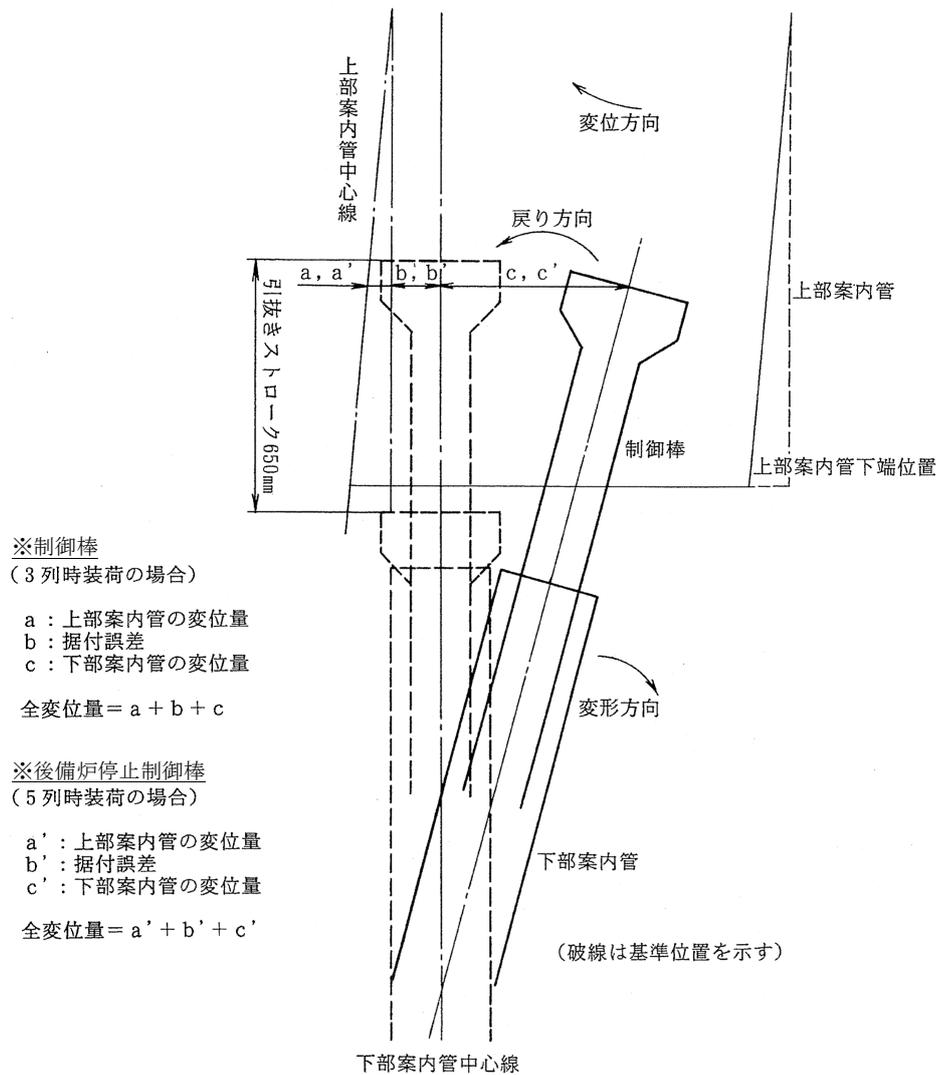
1. 地震時の制御棒挿入性評価の概要

「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。

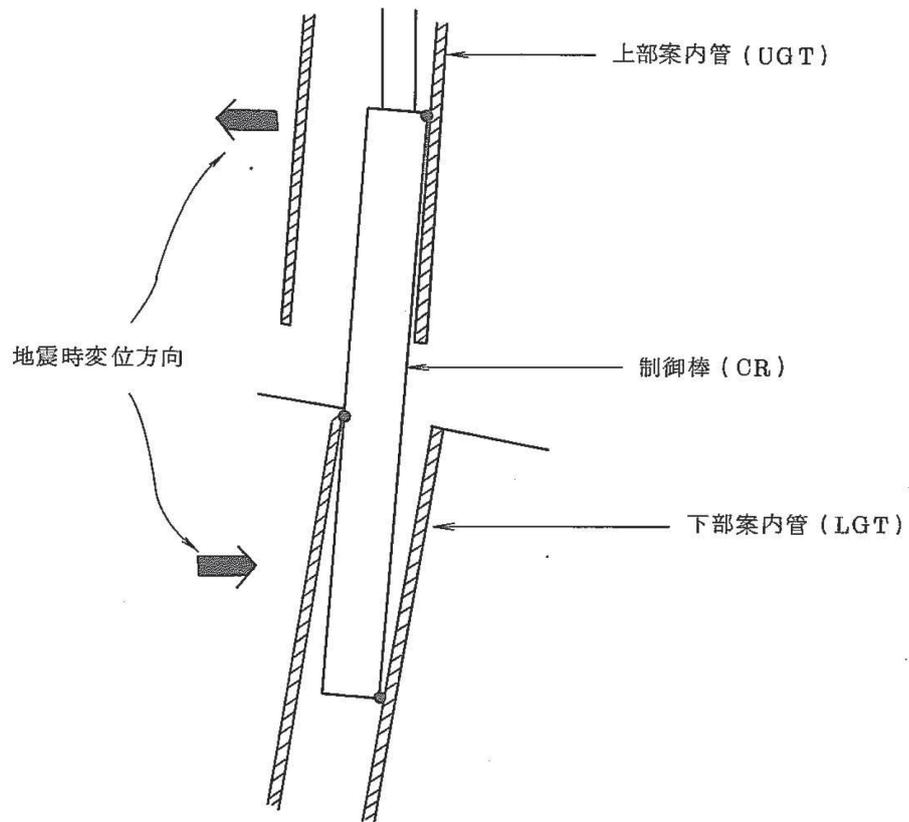
既許可・既設工認の地震時の制御棒挿入性については、上部案内管と下部案内管の相対変位を模擬した試験条件でのスクラム試験の結果により、相対変位 35mm までの範囲における制御棒挿入性を確認し、制御棒の挿入性は確保されると評価している^[1,2]。したがって、基準地震動 S_s に対して上部案内管と下部案内管の地震時最大変位量（第 1.1 図）を評価し、その相対変位が 35mm 以下であることを以て、地震時の制御棒の挿入性を評価する（静的条件での制御棒挿入性評価）。なお、第 1.2 図のように地震の変位により制御棒が上部案内管及び下部案内管と 3 点拘束が生じた場合、制御棒の挿入時間が長くなるが、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

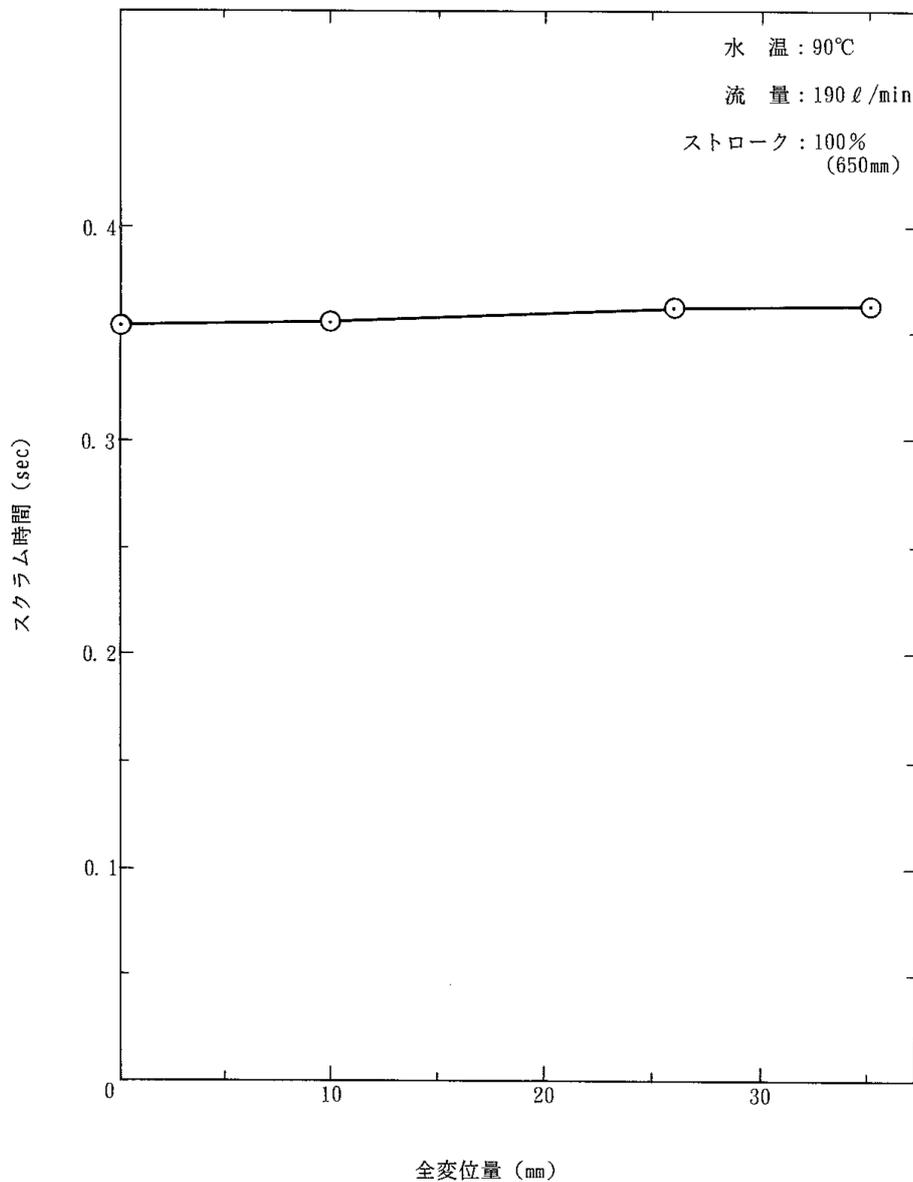
ここではスクラム時間は、デラッチリミットスイッチの作動した時間からスクラム位置（挿入ストローク 530mm の位置）に到達するまでの時間※で定義し、リミットスイッチと上部案内管に取り付けされた検出コイルにより測定した。

※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図 2.1 に示す。

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

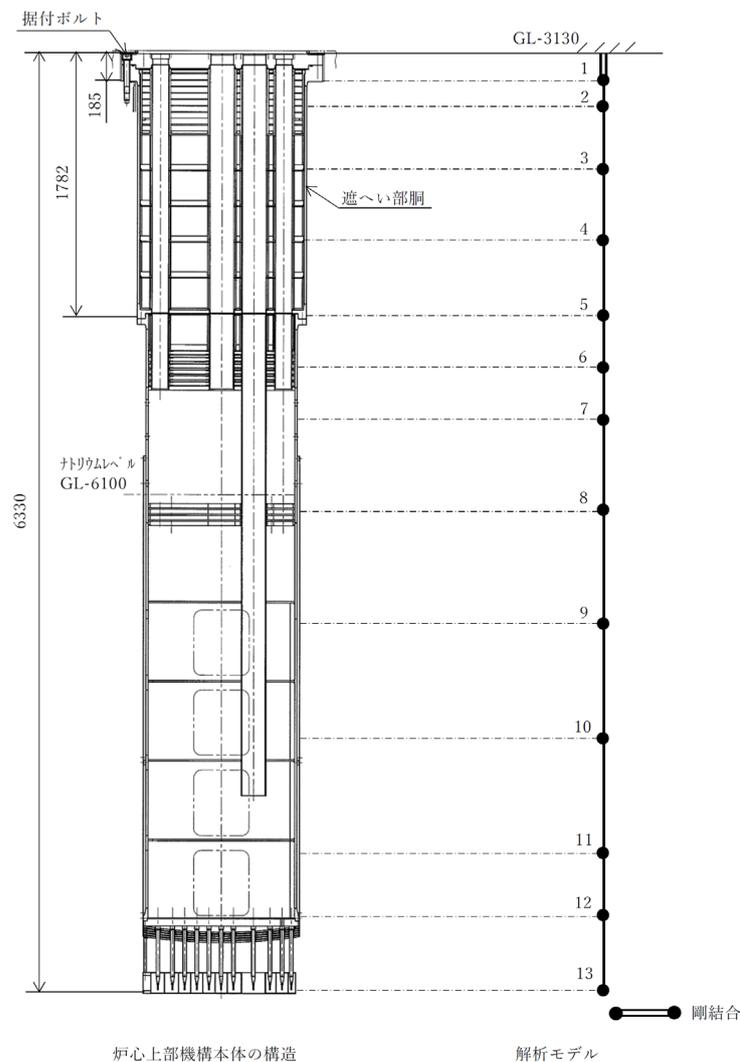
①解析コード

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。

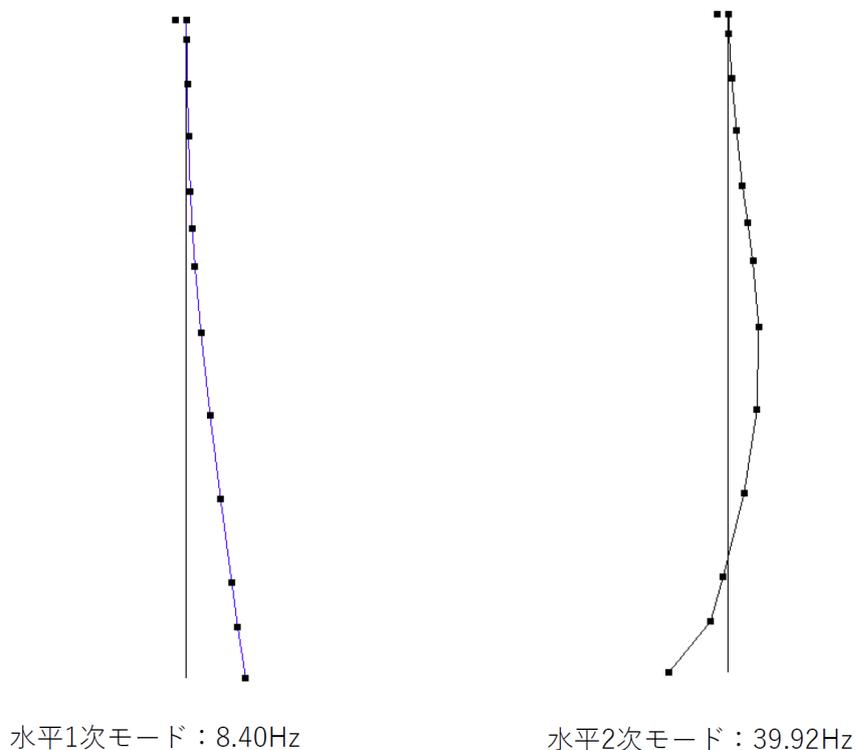
縦弾性係数：159,000MPa (at 500℃)

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。



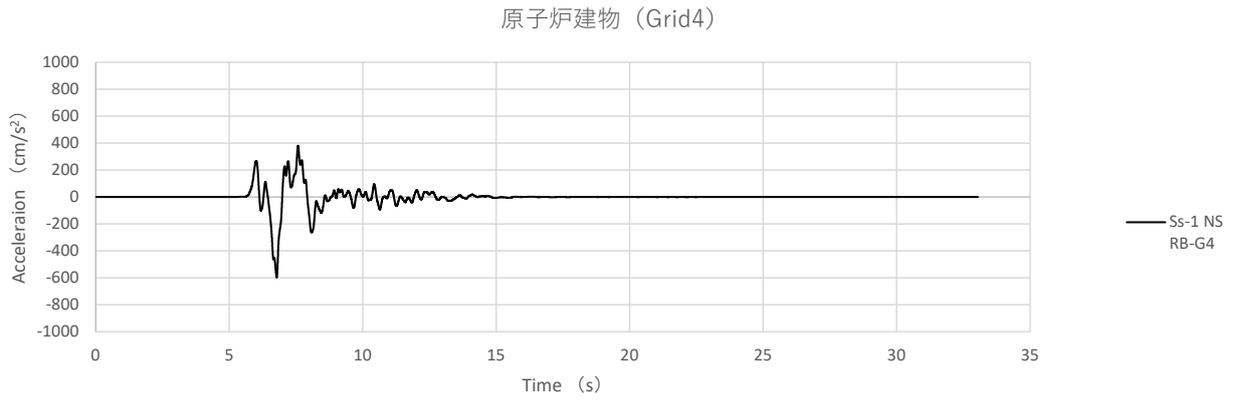
第 2.3 図 炉心上部機構の振動モード

⑤減衰定数

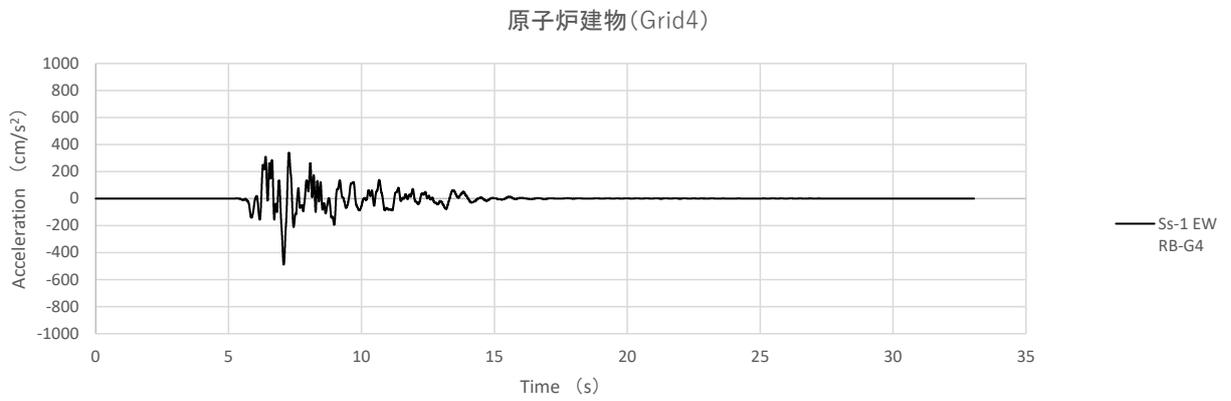
JEAC-4601-2008「4.4.5 設計用減衰定数」より 1.0%を用い、Rayleigh 型の比例減衰を用いる。

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。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)



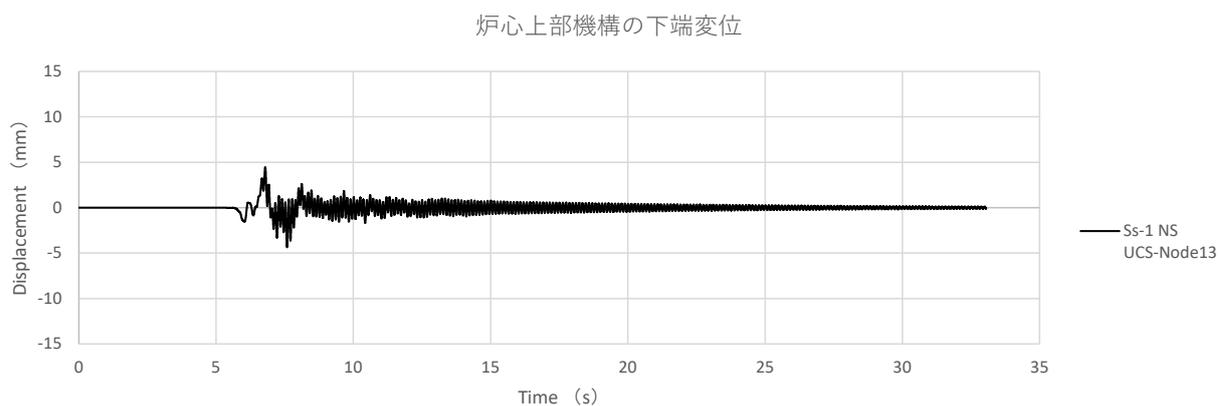
第 2.5 図 原子炉建物 BM1F 加速度時刻歴 (Ss-1、EW 方向)

(2) 地震応答解析結果

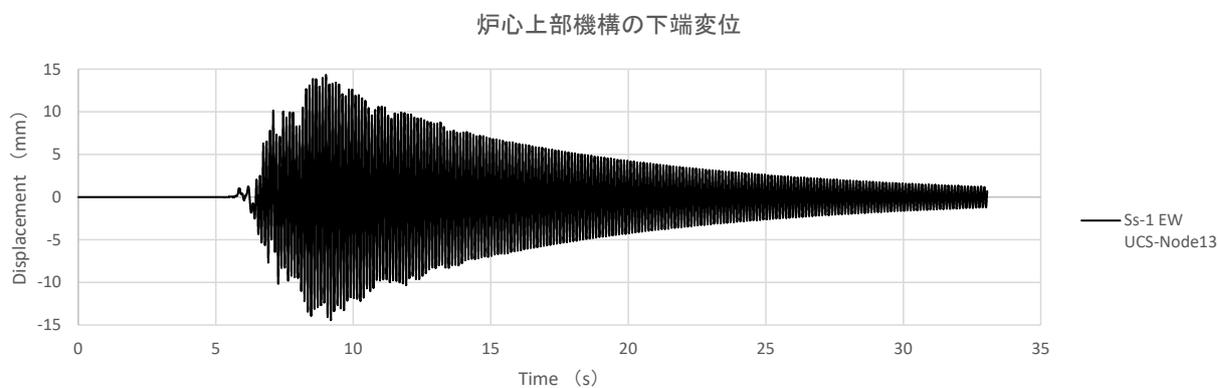
水平方向最大変位の解析結果を第 2.2 表に、変位の時刻歴例 (Ss-1) を第 2.6 図及び第 2.7 図に示す。水平方向変位は Ss-1 で最も大きくなる。炉心上部機構の 1 次固有振動数が 8.4Hz と、原子炉建物自体の EW 方向の 1 次固有振動数に近く、特に EW 方向の応答が増幅されている。

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 NS 方向 (mm)	水平方向最大変位 EW 方向 (mm)
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

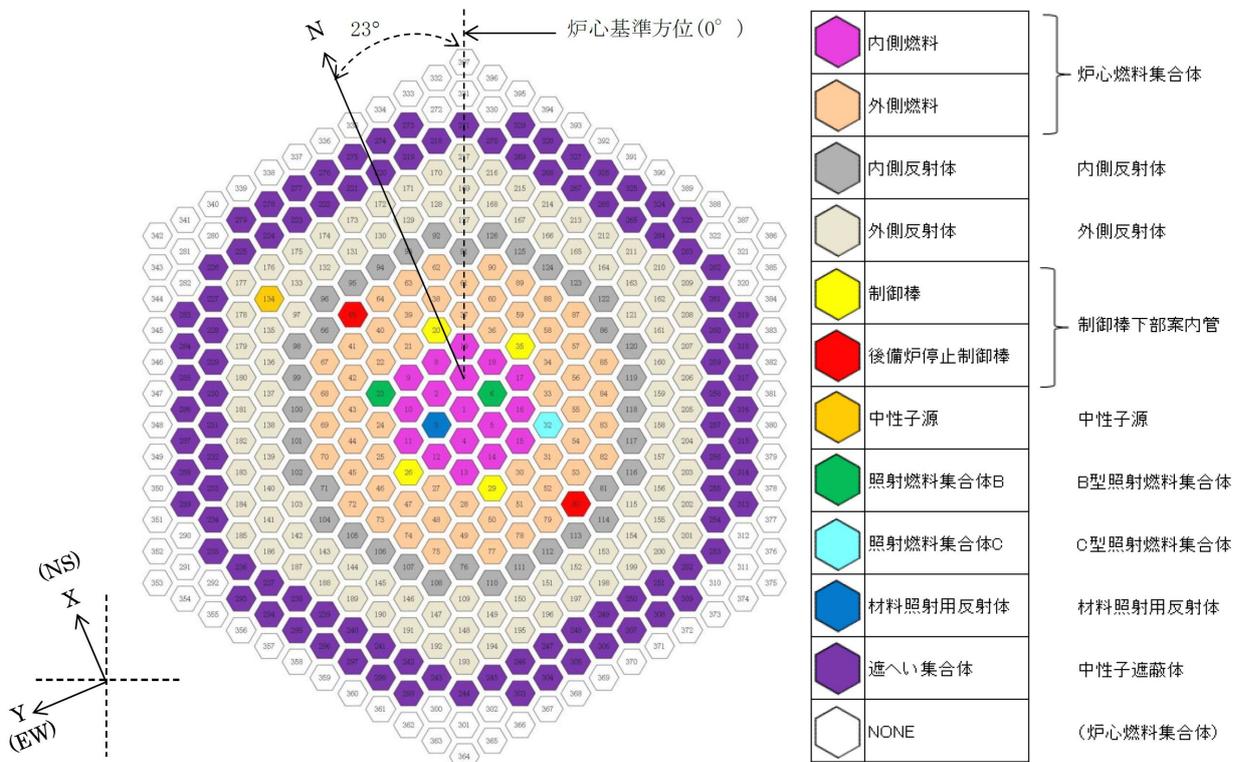
①解析コード

3次元炉心群振動解析コード Revian-3D (v8.2)

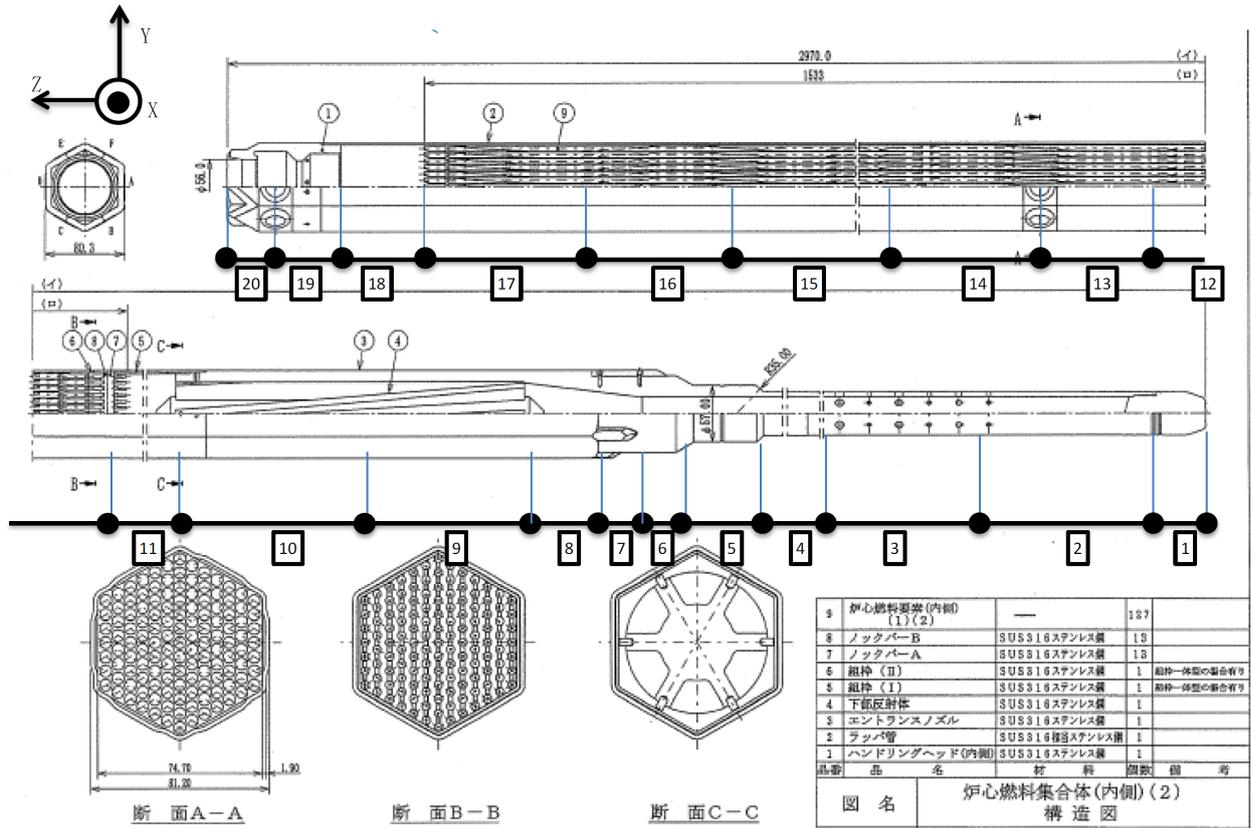
※もんじゅの模擬燃料体の部分装荷に関する審査において適用したコード^[3,4]。

②解析モデル

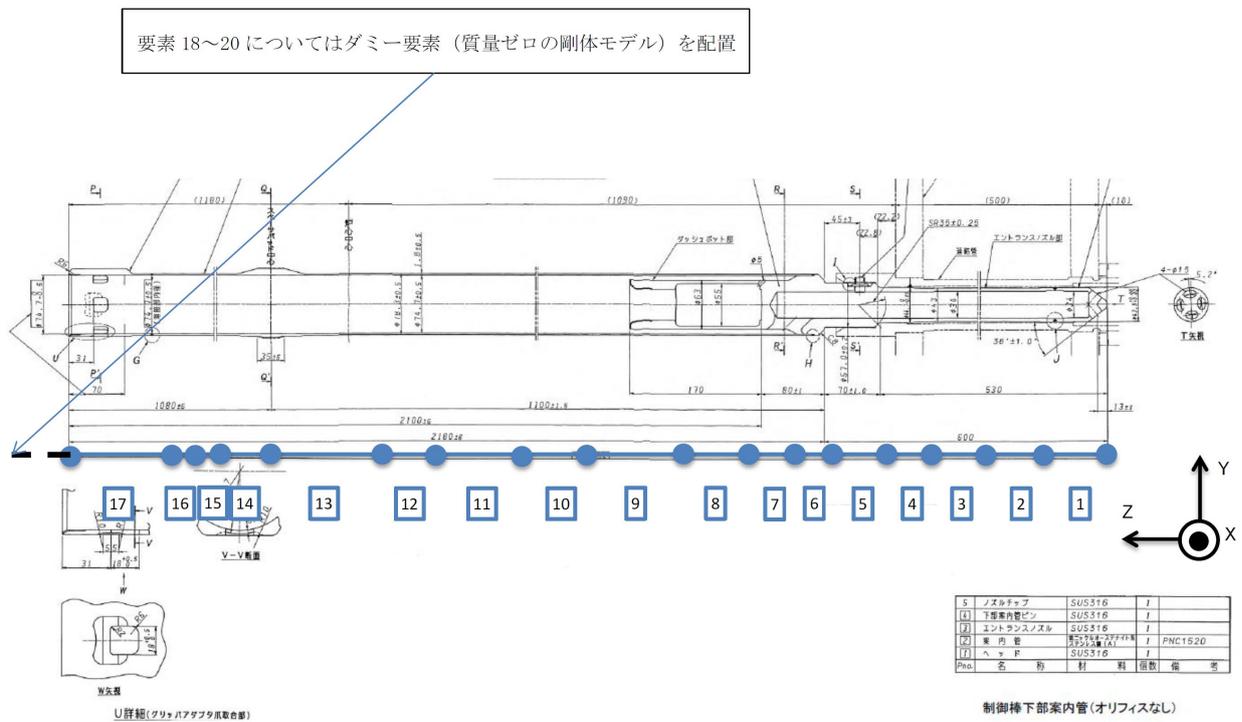
解析対象炉心の配置を第2.8図に示す。解析では、炉心燃料集合体、内側反射体、外側反射体、制御棒下部案内管（制御棒、後備炉停止制御棒）、中性子源、B型照射燃料集合体、C型照射燃料集合体、材用照射用反射体、遮へい集合体の9種類の炉心構成要素をモデル化した。制御棒下部案内管以外のビームモデルを第2.9図に、制御棒下部案内管（制御棒、後備炉停止制御棒）のビームモデルを第2.10図に示す。



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



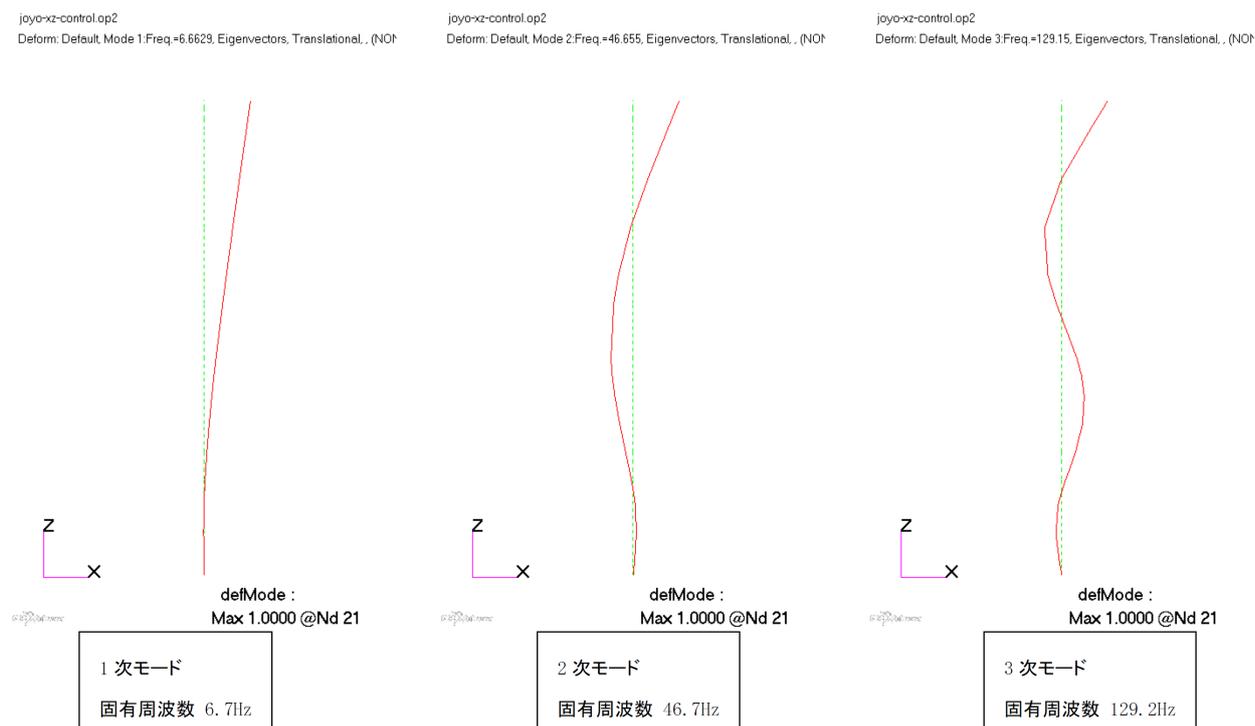
第 2.10 図 制御棒下部案内管のビームモデル

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

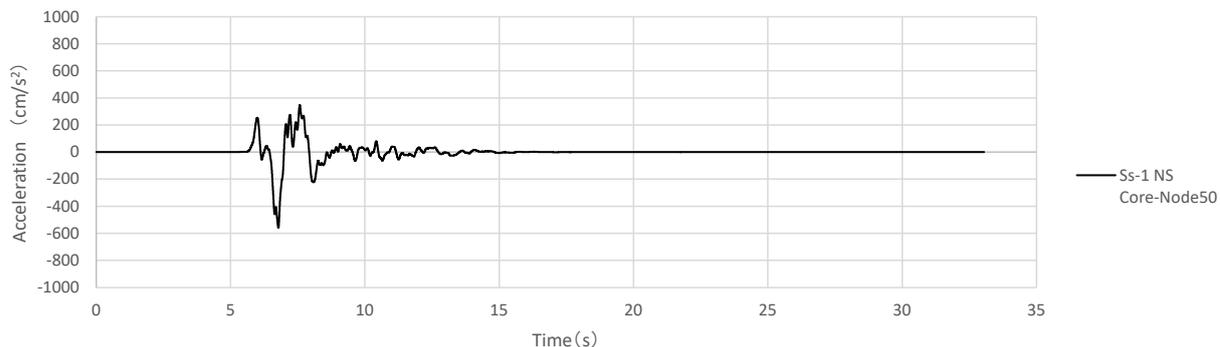
⑤減衰定数

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

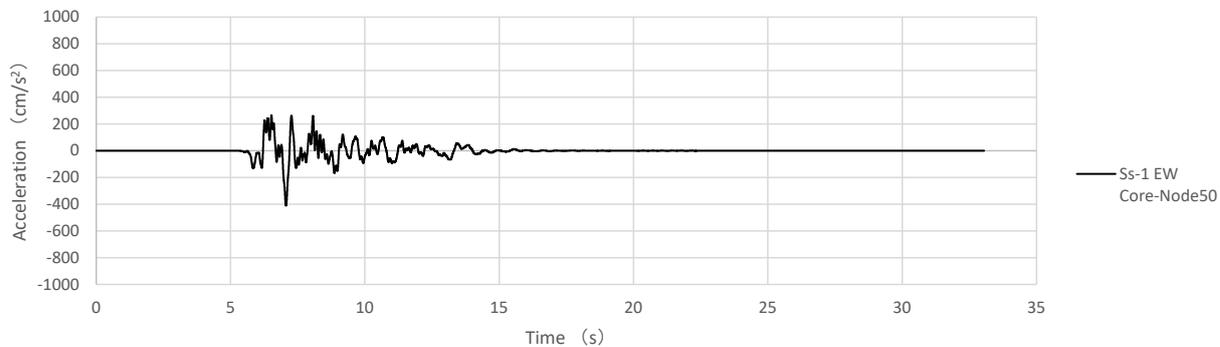
原子炉容器解析による炉心支持板応答を入力波とする。解析入力波例 (Ss-1) を第 2.12 図～第 2.14 図に示す。

原子炉容器炉心支持板 (R/V-Node50)



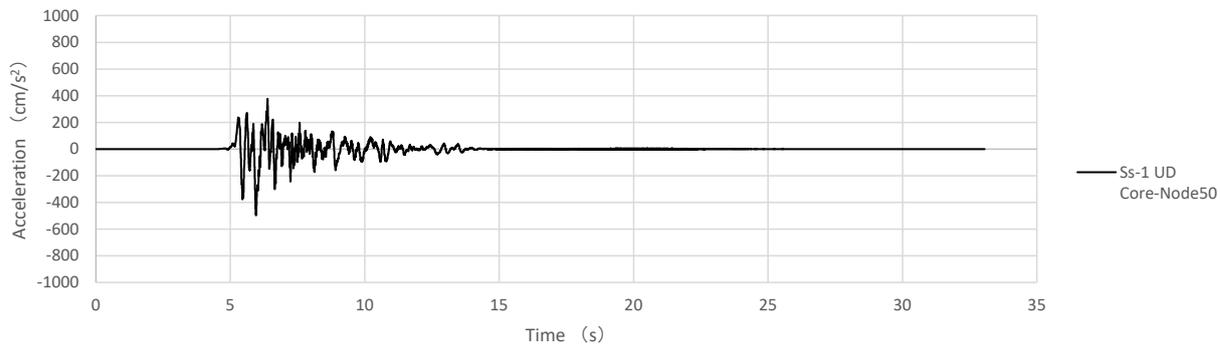
第 2.12 図 炉心支持板 (炉心下端位置) の加速度時刻歴 (Ss-1、水平 NS 方向)

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)



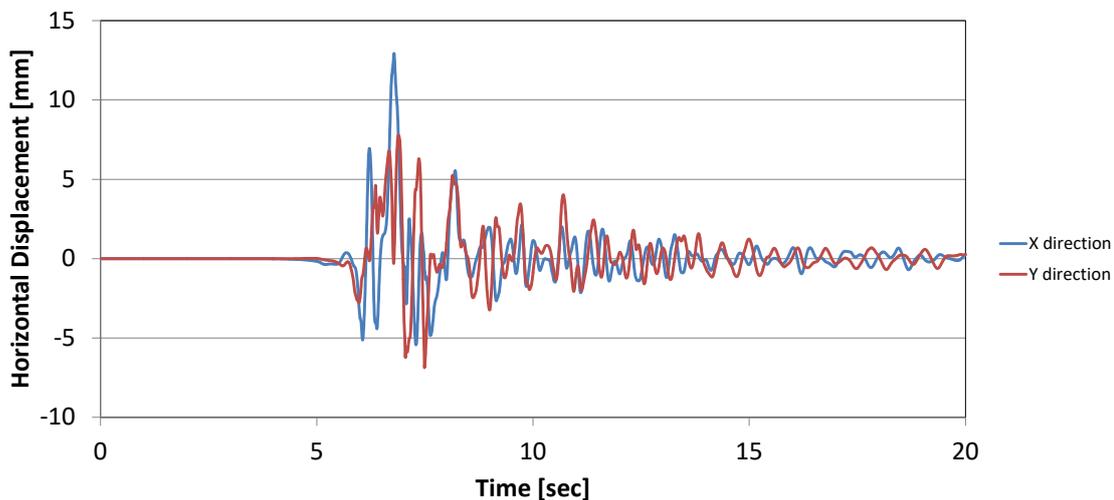
第 2.14 図 炉心支持板 (炉心下端位置) の加速度時刻歴 (Ss-1、鉛直 UD 方向)

(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)	後備炉停止制御棒 (mm)
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 (制御棒及び後備炉停止制御棒最大、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を考慮して最大相対変位量を算出する。

第2.4表 地震時の相対変位

地震波	据付誤差(mm)	上部案内管下端 最大変位量(mm)	下部案内管頂部 最大変位量*(mm)	最大相対変位量 (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

* 制御棒及び後備炉停止制御棒の最大

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（後日提示）に示す。

②解析モデル

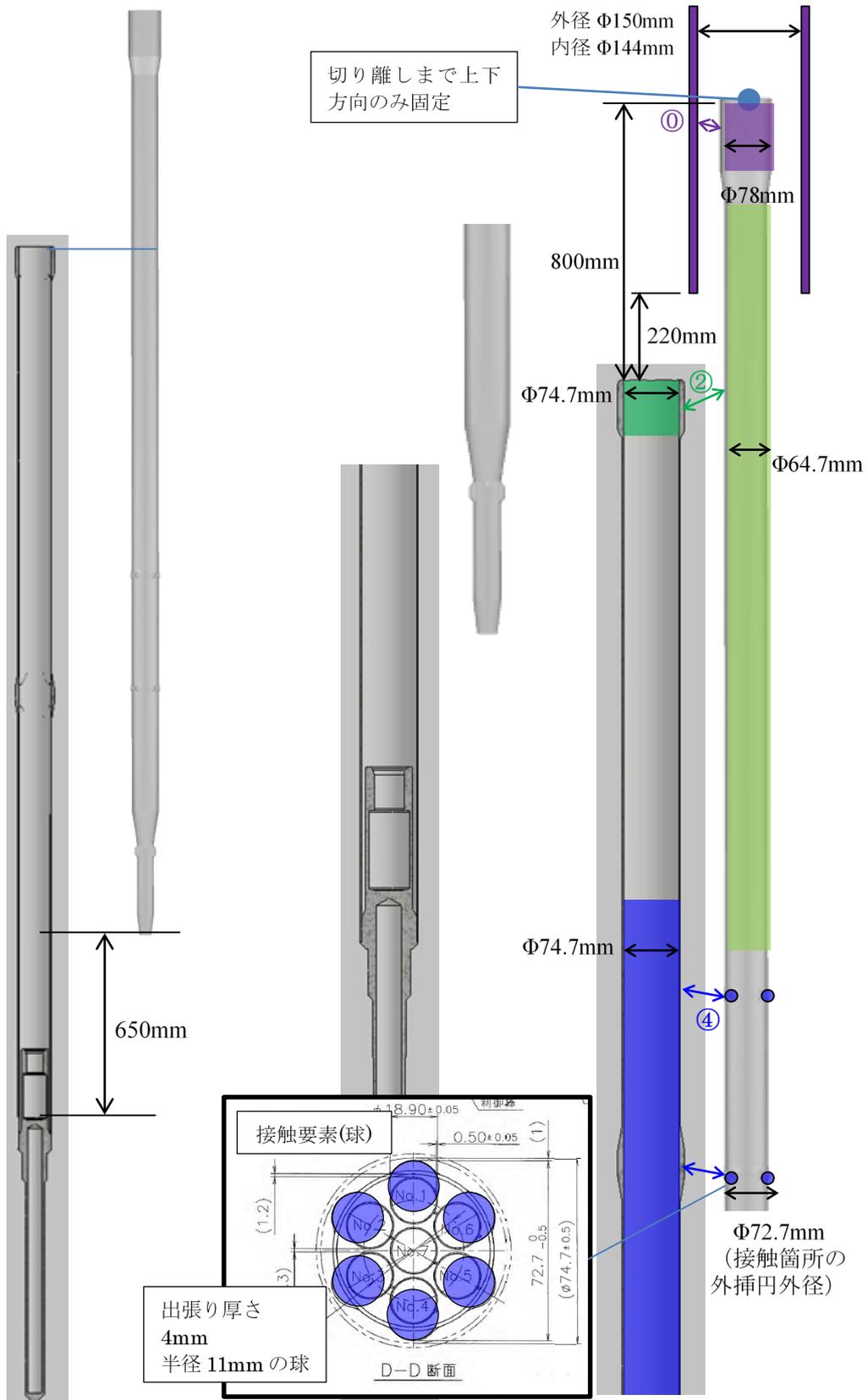
制御棒、下部案内管は形状を模擬した剛体とし、上部案内管は単純円筒で模擬する。制御棒の接触条件を第 3.1 図及び第 3.2 図に示す。

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。

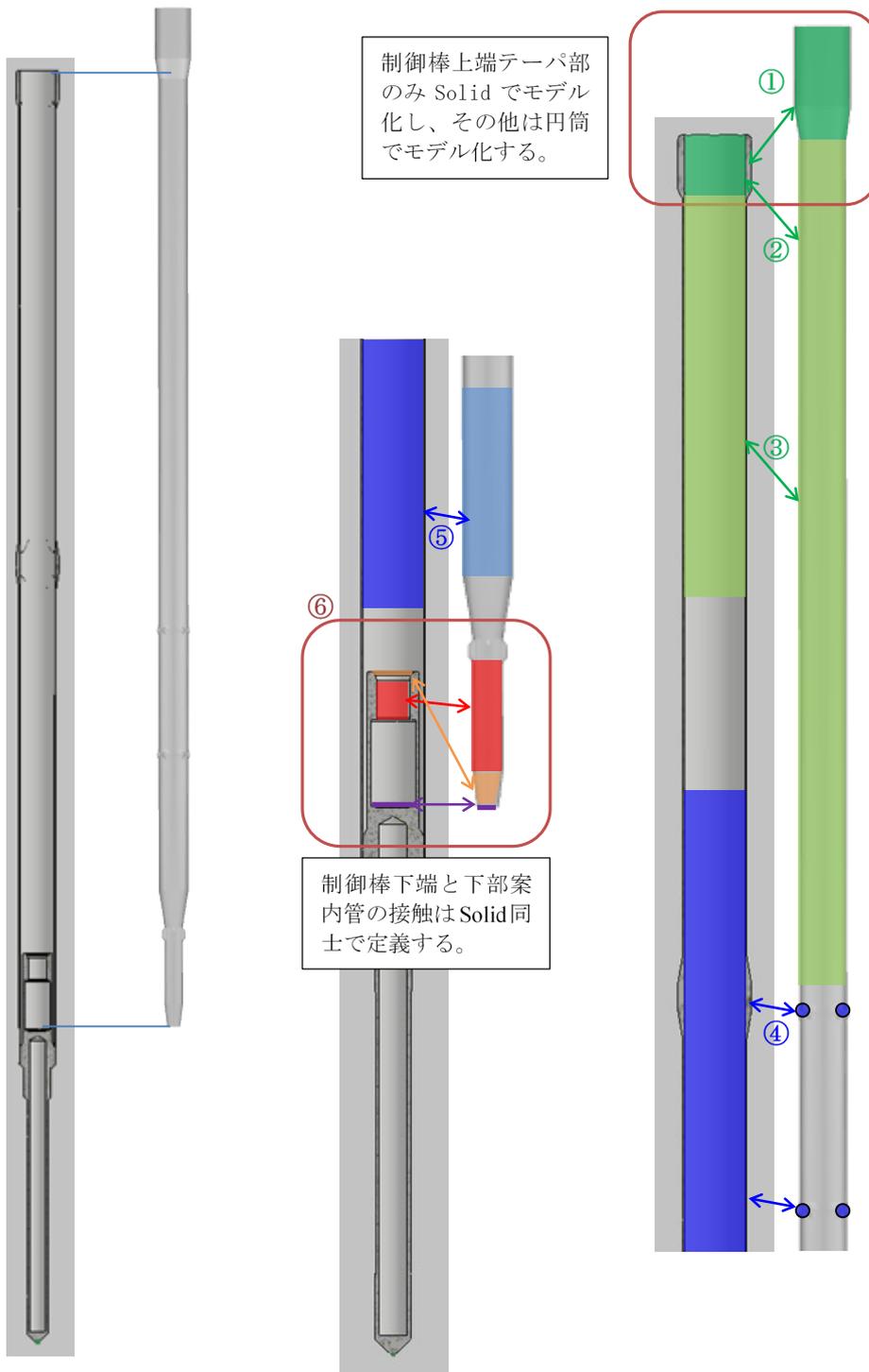
衝突パラメータは既存の FBR 実証施設試験体の落下試験や「常陽」の炉心構成要素ラッパ管の落下試験の結果より、寸法・板厚が近いものの用いた。接触箇所における衝突剛性・衝突減衰は各部位の衝突合成・衝突減衰の直列ばねとして計算した（第 3.1 表）。

第 3.1 表 接触パラメータ

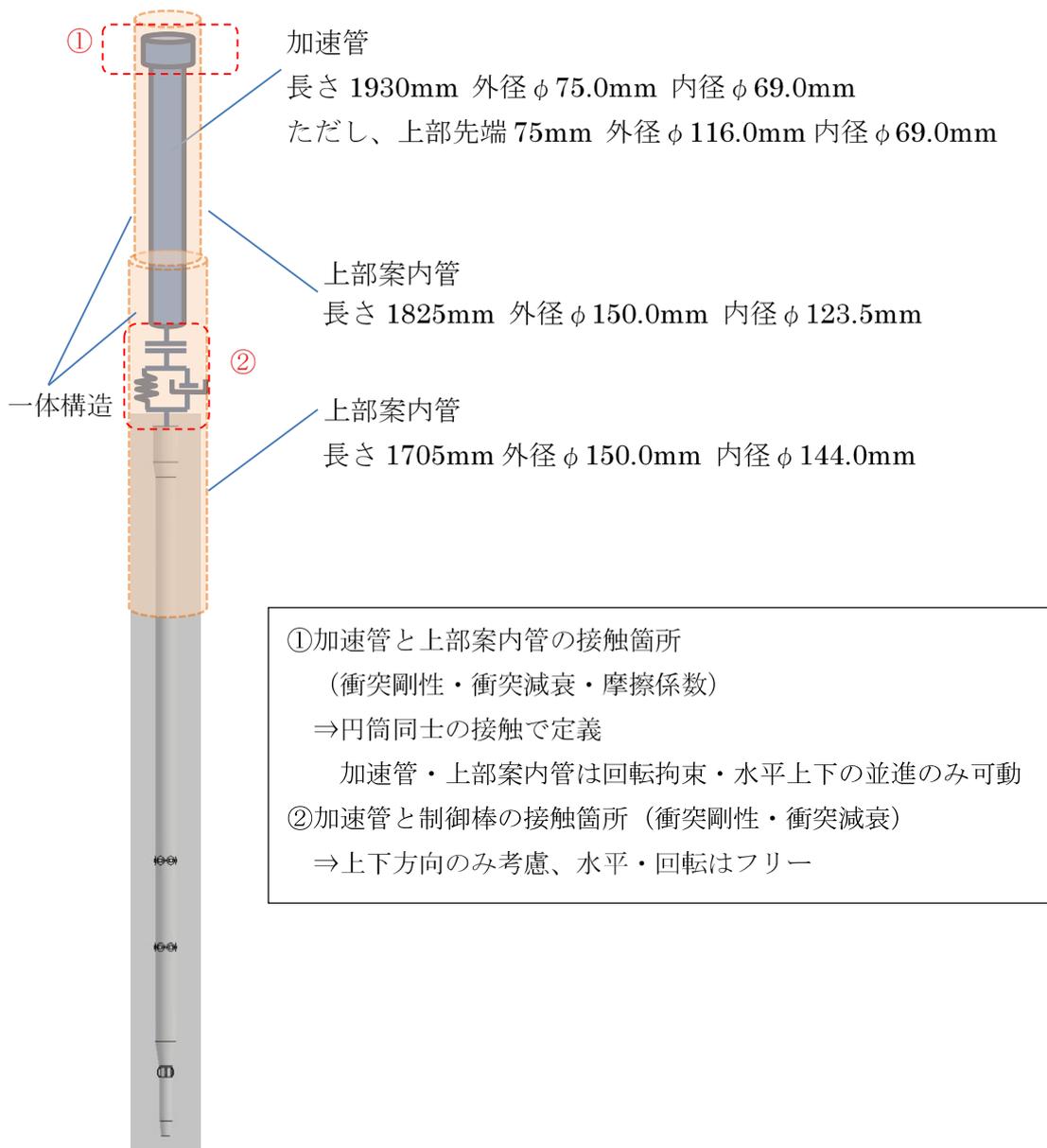
	剛性 (N/mm)	減衰 (Ns/mm)
第 3.1 図①	4.6×10^3	8.8×10^{-1}
第 3.2 図①	1.6×10^4	9.0×10^{-1}
第 3.1 図、第 3.2 図②	5.7×10^3	1.7×10^{-1}
第 3.2 図	3.8×10^3	1.0×10^{-1}
第 3.1 図、第 3.2 図④	3.8×10^3	1.0×10^{-1}
第 3.2 図⑤	7.1×10^3	2.0×10^{-1}
第 3.2 図⑥	2.2×10^4	2.1×10^0
第 3.3 図①	3.0×10^4	2.5×10^1
第 3.3 図②	1.0×10^4	1.0×10^2



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）

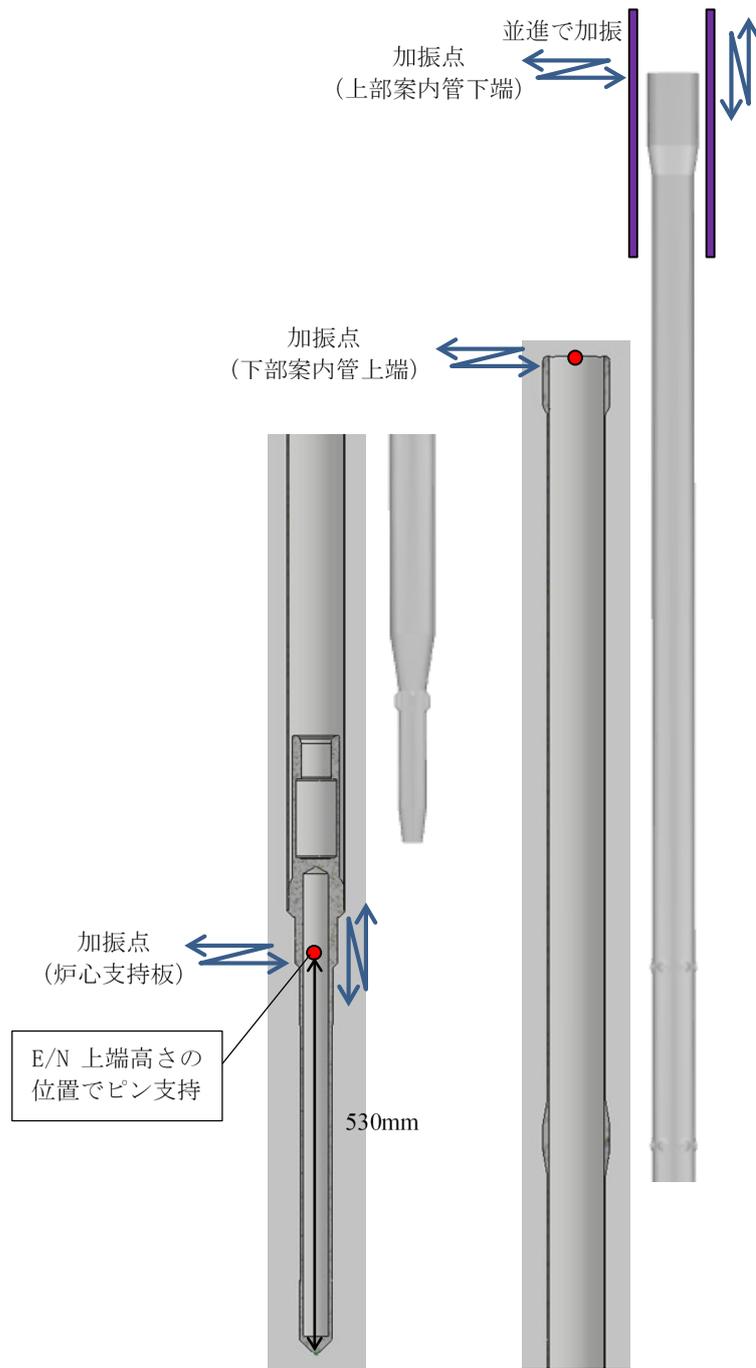


第 3.3 図 加速管の接触条件

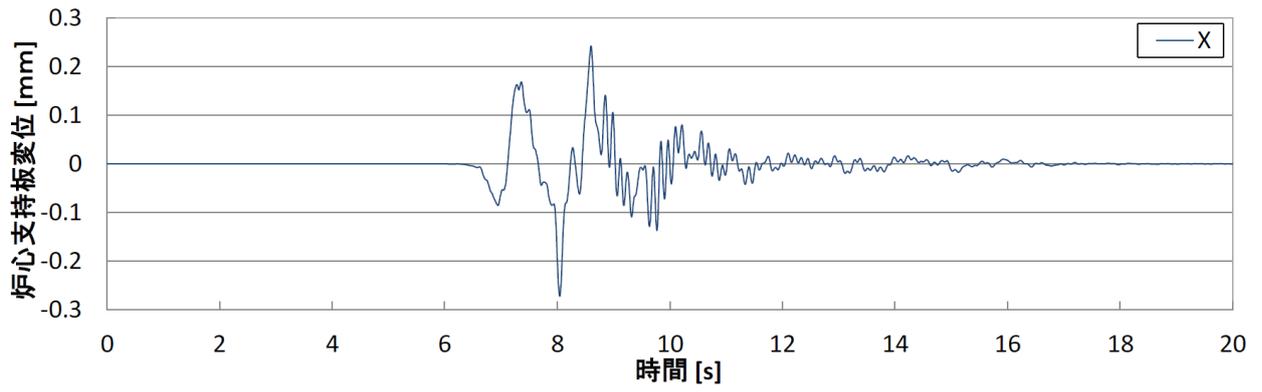
③ 加振波

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）。

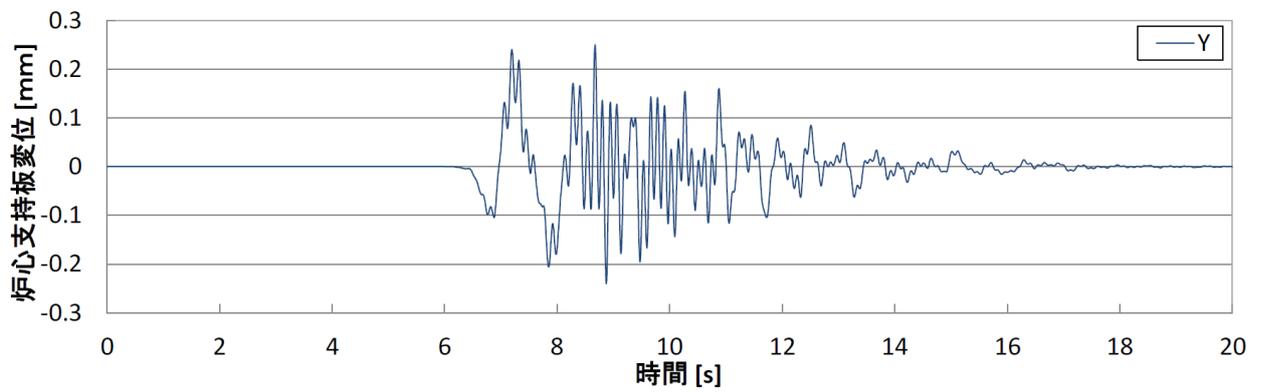
加振波を第 3.5 図～第 3.7 図に示す。制御棒下部案内管と上部案内管の相対変位が最も大きくなる Ss-2 に対して解析を実施した。解析開始タイミングについては、実際には最大変位が生じるより前に挿入が完了すると考えられるが、ここでは、下部案内管と上部案内管の相対変位が最も大きくなるタイミング中での解析とする。



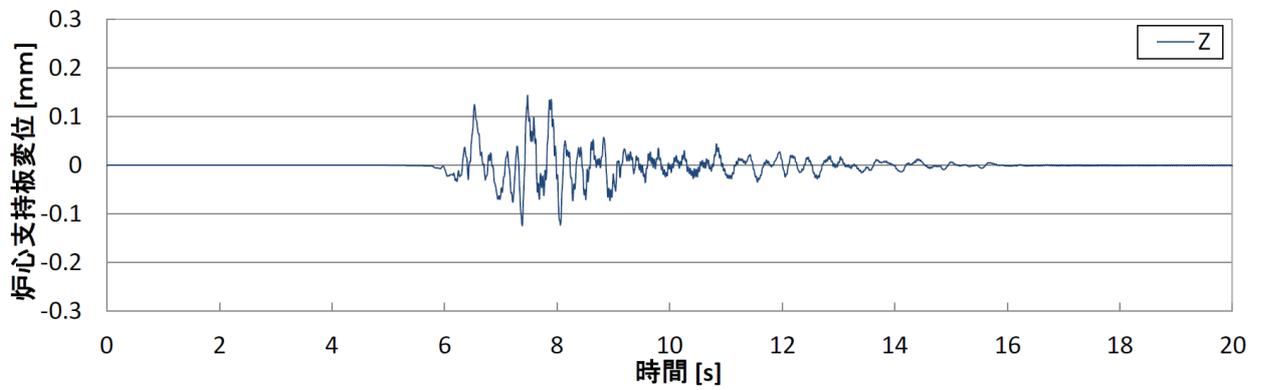
第 3.4 図 解析モデルにおける加振箇所



(a) X 方向

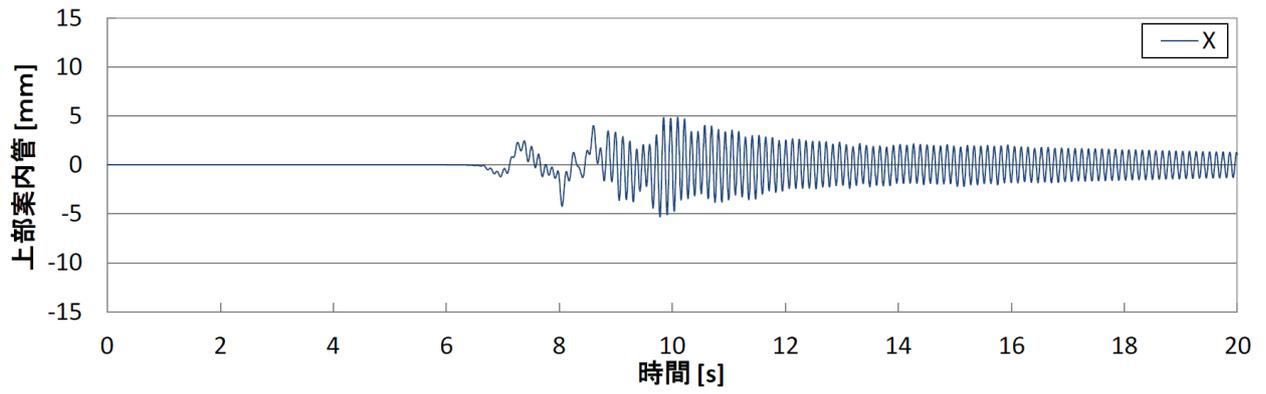


(b) Y 方向

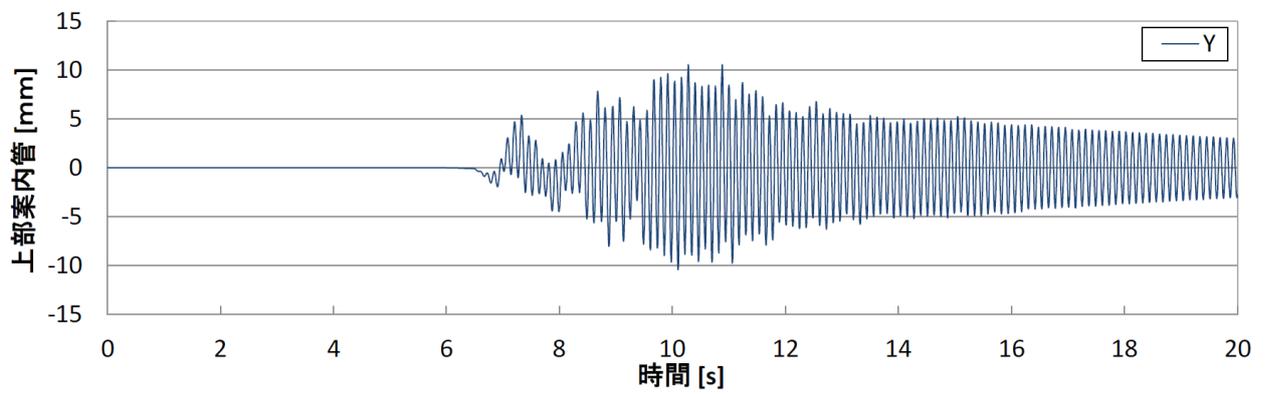


(c) Z 方向

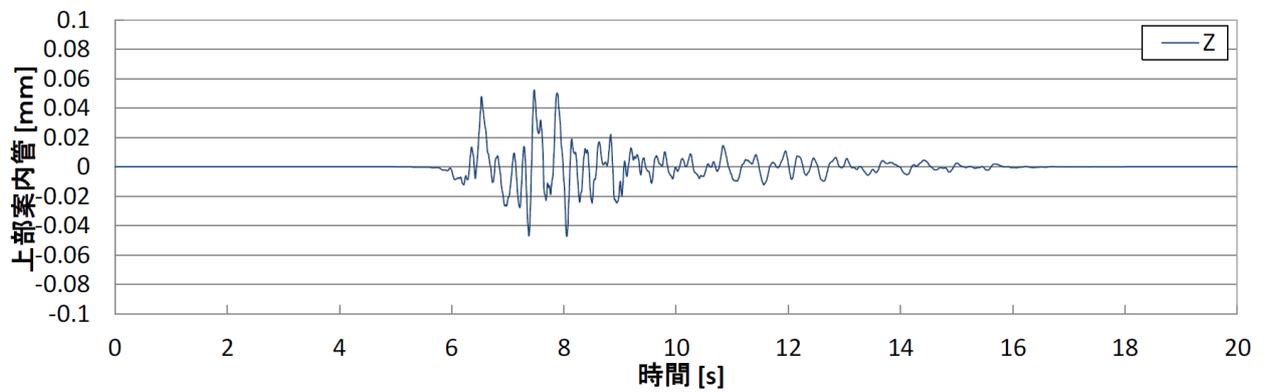
第 3.5 図 加振波 (Ss-2 波、炉心支持板変位)



(a) X 方向

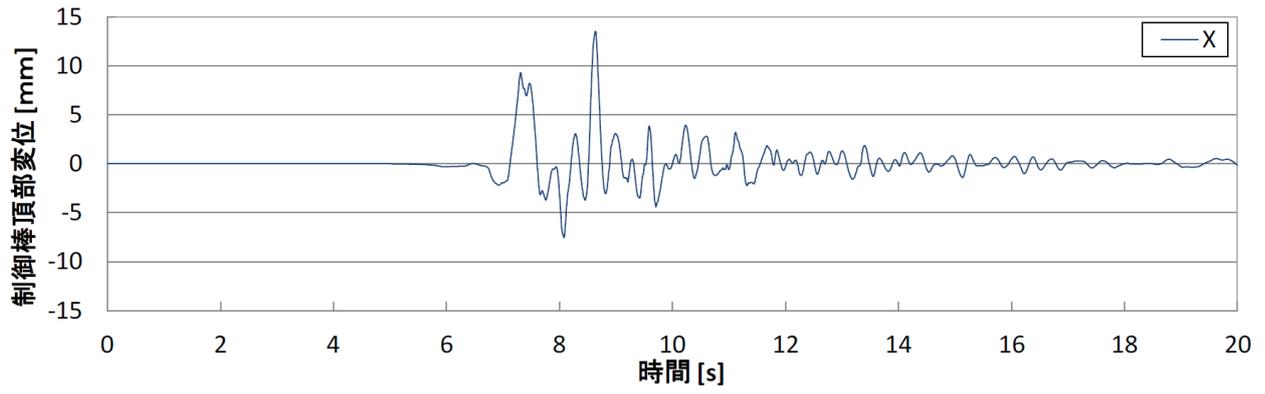


(b) Y 方向

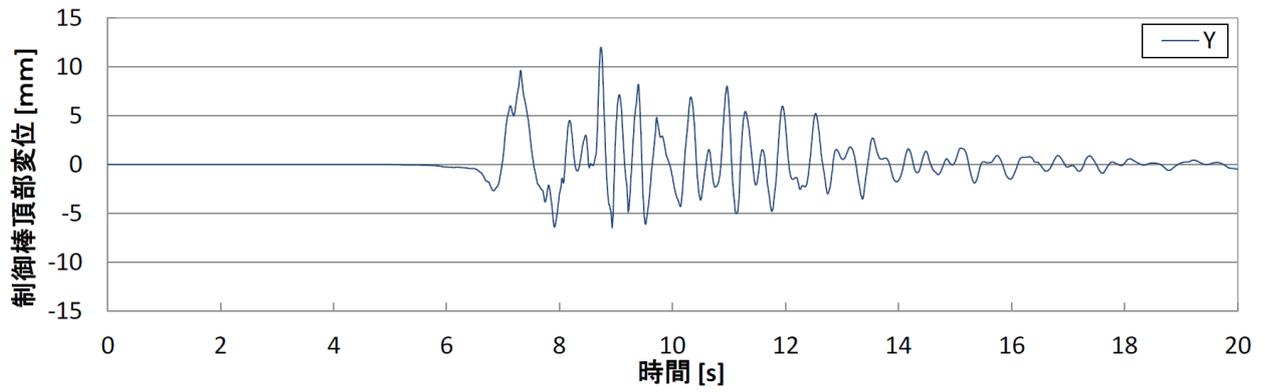


(c) Z 方向

第 3.6 図 加振波 (Ss-2 波、上部案内管変位)



(a) X 方向



(b) Y 方向

第 3.7 図 加振波 (Ss-2 波、下部案内管頂部変位)

(2) 解析結果

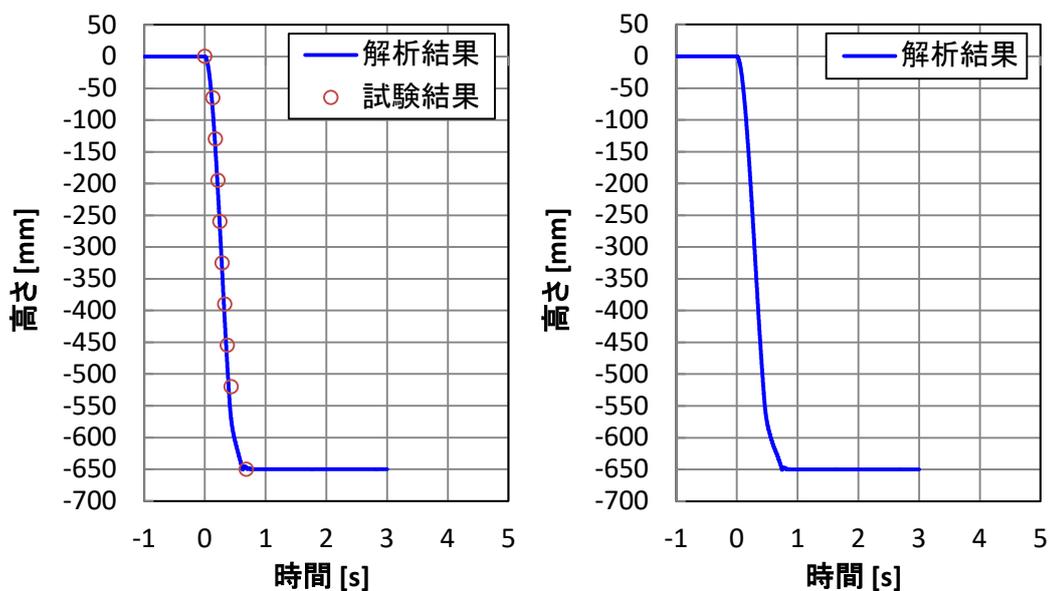
実機条件（ナトリウム雰囲気）におけるスクラム時間（デラッチから挿入量 530mm 位置に到達するまでの時間）の解析結果を第 3.2 表に示す。また、加振時のスクラム曲線を加振なしの解析結果と併せて第 3.8 図に示す。

加振の影響はほとんどなく、加振時でもスクラム時間は 0.5 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

	スクラム時間 (s)	備考
(1)	0.40	加振なし
(2)	0.44	S_s -2 加振



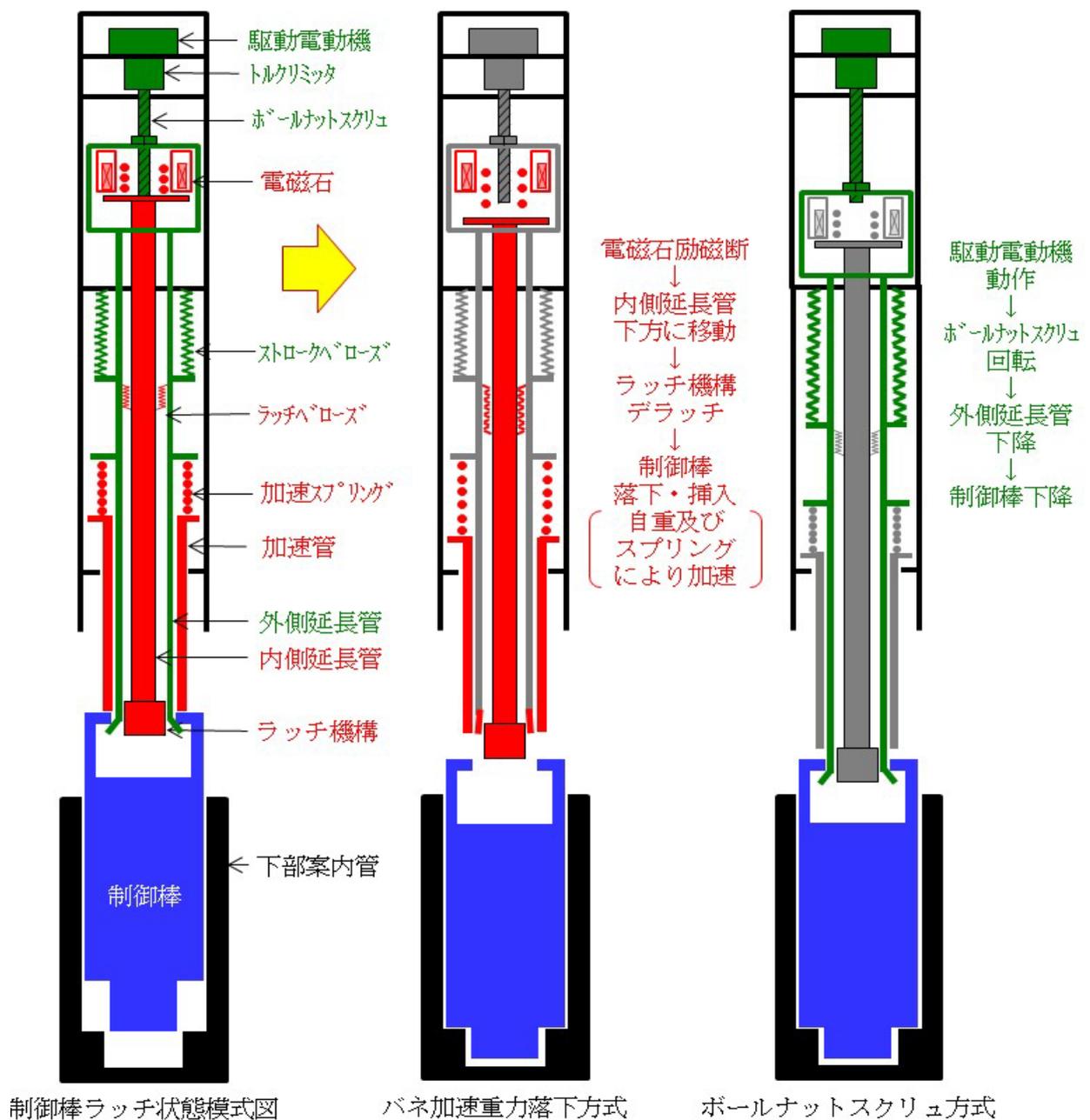
第 3.8 図 解析結果（左：加振なし、右： S_s -2 加振）

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。

反応度制御システムの故障時における原子炉停止システムの機能確保

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。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。以上のとおり、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「bdba」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、設計基準対象施設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対象施設及びbdbaの拡大の防止措置を第1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しているとともに、bdba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

以上のとおり、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

(例1) 2次冷却材流量減少事象

(例1)2次冷却材流量減少事象

① 原子炉トリップ信号

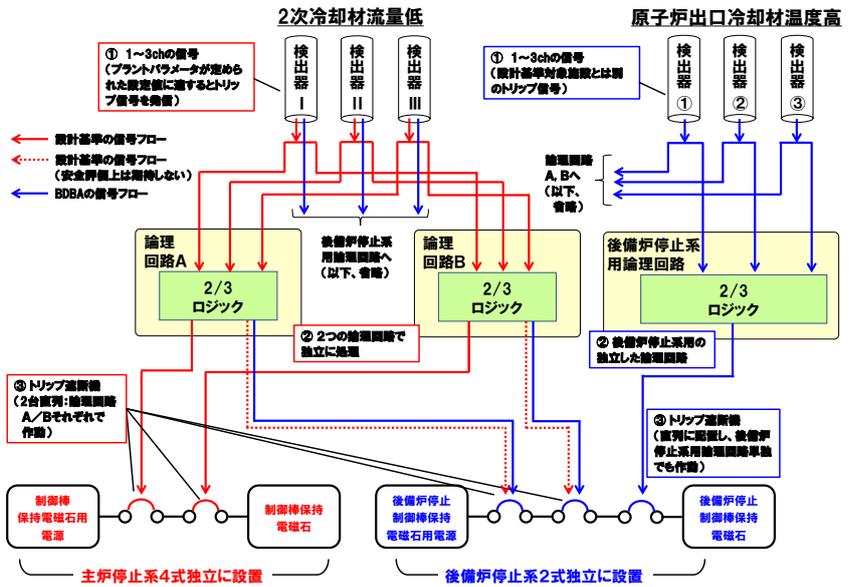
【設計基準】1種類の原子炉トリップ信号に対して、それぞれ独立した検出器を複数設けることで、原子炉トリップ信号発信に係る独立性及び多重性を確保。
 【BDBA】設計基準対象施設とは別の検出器を設けることで原子炉トリップ信号発信に係る多様性を確保

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】設計基準対象施設とは別の後備炉停止系用論理回路を設けることで安全保護回路の動作に係る多様性を確保

③ 制御棒等の挿入

【設計基準】制御棒等の保持電磁石用電源は、論理回路に対応して2台の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。
 【BDBA】設計基準対象施設とは別の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制御棒等の挿入に係る多様性を確保



・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はない、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（後備炉停止系は未考慮）。

(例2) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き事象

① 原子炉トリップ信号

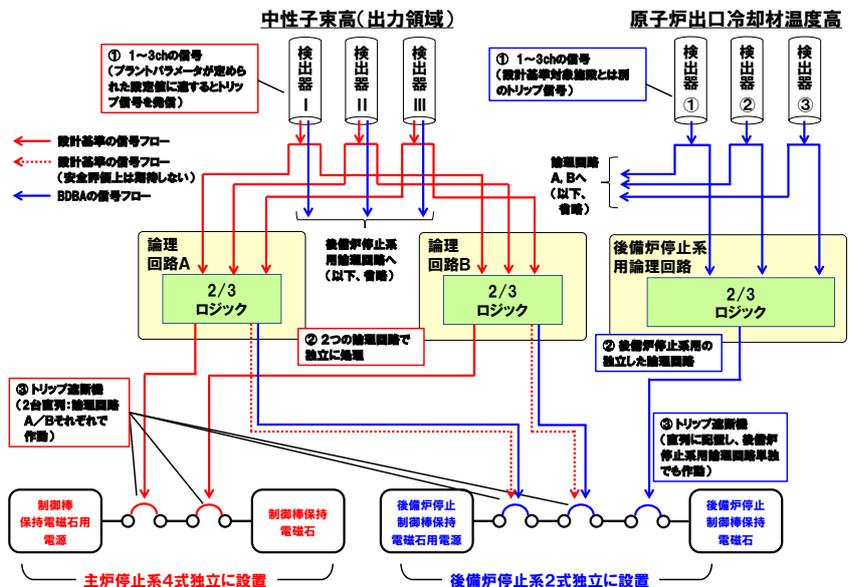
【設計基準】1種類の原子炉トリップ信号に対して、それぞれ独立した検出器を複数設けることで、原子炉トリップ信号発信に係る独立性及び多重性を確保。
 【BDBA】設計基準対象施設とは別の検出器を設けることで原子炉トリップ信号発信に係る多様性を確保

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】設計基準対象施設とは別の後備炉停止系用論理回路を設けることで安全保護回路の動作に係る多様性を確保

③ 制御棒等の挿入

【設計基準】制御棒等の保持電磁石用電源は、論理回路に対応して2台の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。
 【BDBA】設計基準対象施設とは別の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制御棒等の挿入に係る多様性を確保



・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はない、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（後備炉停止系は未考慮）。

第1図 原子炉の停止機能に係る設計基準対象施設及びBDBAの拡大の防止措置

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。

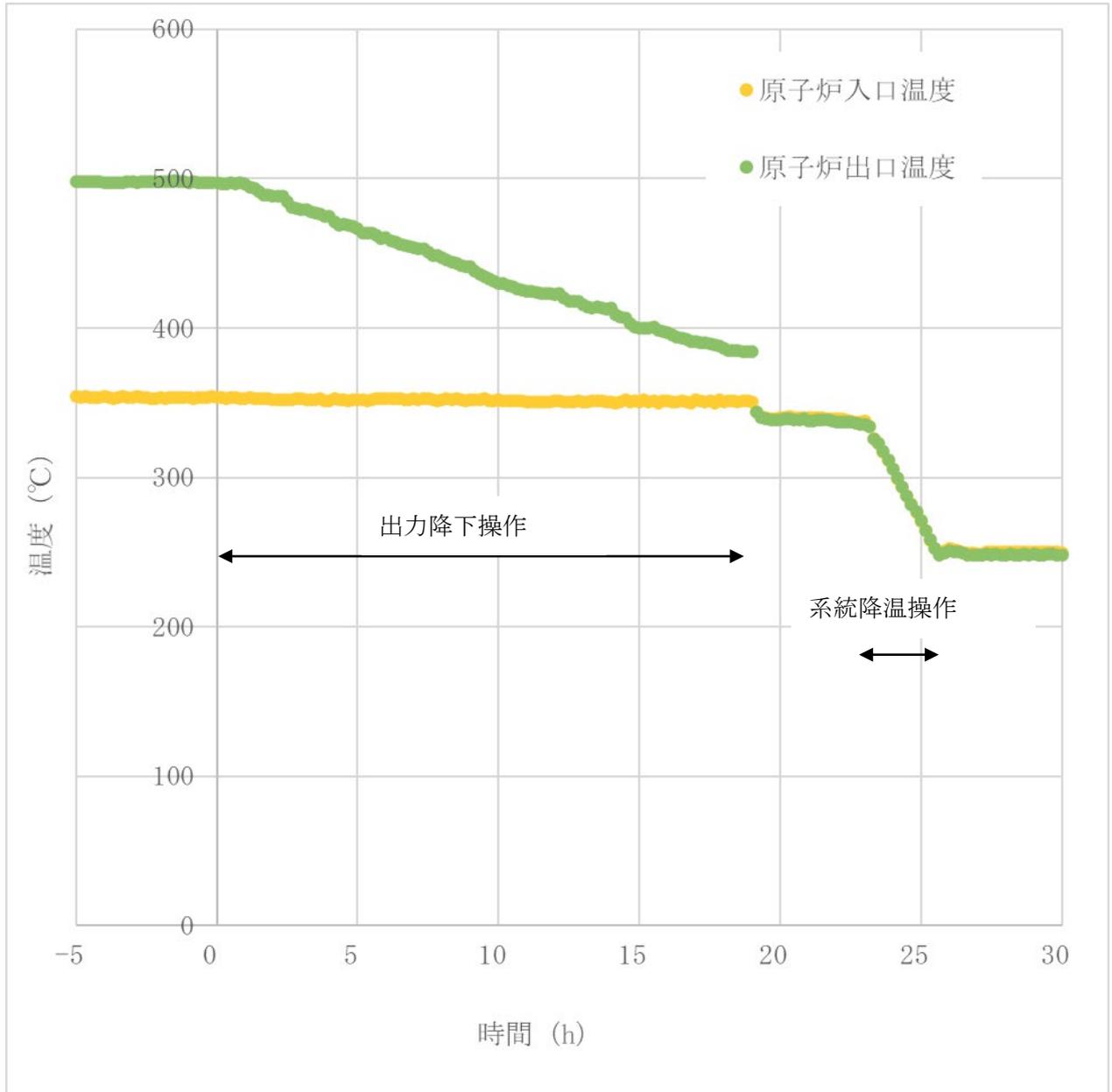
2. 後備炉停止系による原子炉停止時のプラント挙動について

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 $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 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。

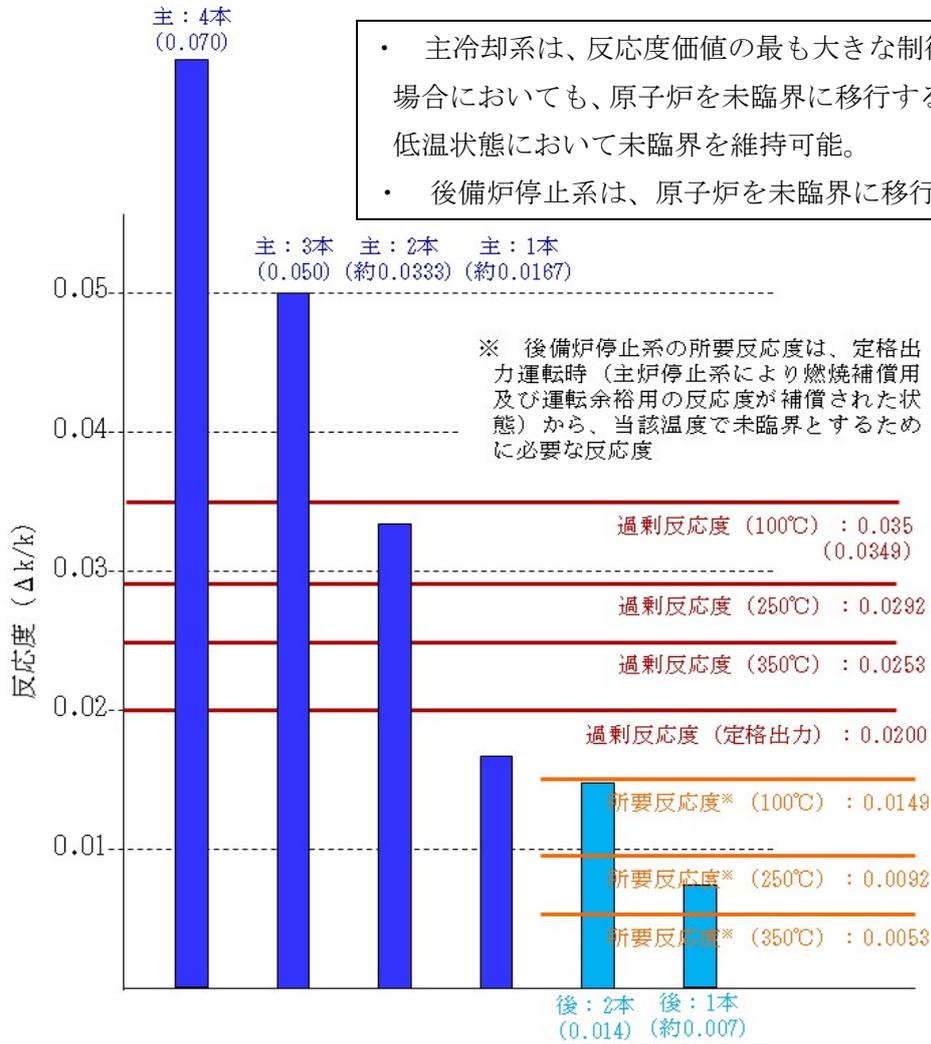
なお、第 53 条の多量の放射性物質を放出する事故の拡大の防止の評価においては、後備炉停止制御棒の急速挿入を措置としており、後備炉停止制御棒が急速挿入された場合のプラント挙動は第 53 条の炉心損傷防止措置の有効性評価で示したとおりであり、出力の低下速度がわずかに遅いことを除いて、主炉停止系によるスクラム時とほぼ同様のプラント挙動となる【国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）「第 53 条（多量の放射性物質を放出する事故の拡大の防止）に係る説明書」（その 2: 炉心損傷防止措置）参照】。

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 (リノット・スタック時)	0.014
反応度停止余裕		0.015	0.008