

2020年11月5日

第381回 核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合

京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

京都大学複合原子力科学研究所

添付 10

「運転時の異常な過渡変化」および「設計基準事故」の解析項目について

今回の原子炉設置申請書の変更申請では、これまで使用してきた高濃縮ウラン燃料に加えて、新しく低濃縮ウラン燃料を追加することとなる。現行の申請書における添付 10 では、高濃縮ウラン燃料を対象とした「運転時の異常な過渡変化」「設計基準事故」の解析を実施しており、新規制基準の下、2016年5月に原子力規制委員会よりご承認を頂いている。

低濃縮ウラン燃料については、軽水減速架台では燃料板の燃料組成をウランアルミニウム合金からウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料に変更するが燃料の形状は全く、これまでの燃料フレームをそのまま使用する。また固体減速炉心では燃料板の燃料組成をウランアルミニウム合金からウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料に変更し、これまでの燃料板表面を塗装するのみであったものをアルミニウム被覆で覆う形状に変更するため少し厚くなるが、これまでの燃料さや管や減速材等はそのまま使用する。燃料板以外の制御設備、核計装系等に変更せず、炉心の核的制限値、熱的制限値、最大出力等の規制値も変更しないため「運転時の異常な過渡変化」「設計基準事故」解析は現行の申請書の内容を元に行った。

なお、申請書の添付 8 の審査において、本臨界実験装置の低濃縮ウラン燃料使用時の運転炉心の条件が高濃縮燃料ウラン使用時よりも制限することが規定されたため、2019年5月に申請した内容から一部「運転時の異常な過渡変化」を実施しない項目がある。

本資料においては、添付 10 に記載した「運転時の異常な過渡変化」「設計基準事故」として取り上げた項目の内容について説明する（解析項目の初期条件については表 1 にまとめている）。補足としてこれらの解析に関連した KUCA の設備、解析方法等について説明する。

補足-A：KUCA の制御設備、核計装設備、インターロックについて

補足-B：保安指示書（操作手引き）について

補足-C：パルス状中性子発生装置と中性子発生設備について

補足-D：パイルオッシレータについて

補足-E：燃料温度の算出方法について

補足-F：通常運転時の燃料の温度上昇について

1. 運転時の異常な過渡変化

「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」の第2条第2項に「運転時の異常な過渡変化とは、通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であつて、当該状態が継続した場合には試験研究用等原子炉の炉心又は原子炉冷却材バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの」と記載されている。

1-1 解析項目

解析は以下のような項目について取り扱う。

- (1) 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化
 - (i) 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き
 - (iii) 実験物の異常等による反応度の付加
- (2) 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化
 - (i) 商用電源喪失
- (3) その他原子炉施設の設計により必要と認められる事象
 - (i) 重水反射体への軽水流入
(ただし、これまでの審査会合での説明のなかで低濃縮ウラン燃料を用いた炉心では重水タンクを使用しないとしているので、この項目については追加の記載は行わない) (2019年5月に提出した設置変更承認申請書からの変更なので、補正申請で対応)
 - (ii) その他原子炉施設の設計により必要と認められる異常
 - a. 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 - b. 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

判定基準は以下の通りである。

- (i) 燃料の最高温度は400℃を超えないこと。
- (ii) 構造材のアルミニウムの最高温度は400℃を超えないこと。
- (iii) 固体減速架台の減速材である黒鉛及びポリエチレンの最高温度は100℃を超えないこと。(ただし、低濃縮ウラン燃料を用いた炉心では黒鉛を燃料セル部で使用しないとしているので、追加の記載は行わない)
- (iv) 軽水減速架台の減速材である軽水の最高温度は100℃未満であること。

1-2 解析条件

1-2-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

原子炉起動時に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起これ、原子炉出力が急上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。このような誤操作等を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- ・炉周期が 30 秒以下になればインターロックにより制御棒の引抜きは制限されると共に警報が発報し運転員に異常を知らせる。
- ・炉周期が 15 秒以下、または出力が線型出力計の各レンジの 110%以上になると一せいで挿入（制御棒 3 本のモータによる自動挿入）が作動すると共に警報が発報し運転員に異常を知らせる。
- ・炉周期が 10 秒以下、または出力が線型出力計の各レンジの 120%以上、若しくは安全出力計の指示値が 120%以上になればスクラムが作動し、自動的に 6 本全ての制御棒を保持している電磁石の励磁電流が遮断され自重により炉心に挿入され、同時に固体減速炉心では中心架台を保持している油圧ポンプが停止して中心架台が落下、軽水減速炉心ではダンプ弁を保持している電磁石の励磁電流が遮断され弁座が下降し炉心タンク内の水が排水される。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付書類 8 で選定したすべての代表炉心とする。

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値

固体減速炉心は $0.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $0.5 \% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

固体減速炉心は $1.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3 = 0.5 \% \Delta k/k$

制御棒反応度添加率は核的制限値の最大値

$0.02 \% \Delta k/k/s$

軽水ダンプまたは中心架台落下による反応度は核的制限値の最小値

$$1\% \Delta k/k$$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力系は指示値が 100%で 1W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数が負の炉心については温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。反応度温度係数が正の炉心（軽水減速炉心の一部の 2 分割炉心）については温度変化に伴う反応度フィードバックを考慮するが、反応度温度係数は核的制限値の最大値の $+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ\text{C}$ であるとし、燃料温度上昇により正の反応度が加わる。

2019 年 6 月 17 日の審査会合以降に「負の温度係数をゼロとしていることについて、この仮定によりスクラム（出力高）がより早くかかって、結果的に燃料や減速材の温度上昇を過小評価しているのではないか。実際の負の温度係数を前提とした評価結果について説明すること。」とのコメントがあり、2019 年 7 月 11 日のヒアリング資料において「負の温度係数を考慮することによりスクラム信号が発報するまでの時間は若干遅くなっているが、炉心の温度上昇の値については有効数字 3 桁では変化は見られなかった。従って負の温度係数を持つ炉心について温度係数をゼロとして過渡解析を行っても問題は無い。」と回答している。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期 15 秒以下の一せい挿入信号、および炉周期 10 秒以下のスクラム信号は発生しない。
- ・線型出力計の指示値が 110%を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が 1 秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・スクラム信号の発生でも中心架台は落下せず、ダンプ弁は開かない。

(6) スクラム信号発生

- ・制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率（ $0.02\% \Delta k/k/s$ ）で反応度が連続

的に投入される。

- ・線型出力計の指示値が 120%（出力が 1.2W）を超えたときにスクラム信号が発生する。

(7) 評価

- ・スクラム信号が発生するまでの時間、最大出力、未臨界になるまでの積算出力を求める。
- ・発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

1-2-2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

出力運転中に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起こり、原子炉出力の急上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

- (1)解析対象炉心、(2) 反応度等、(4)反応度温度係数、(5) 安全保護回路系等の動作、(7)評価

については「1-2-1」と同じ。

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 100W の臨界状態

(5) スクラム信号発生

- ・制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率（ $0.02\% \Delta k/k/s$ ）で反応度が連続的に投入される。
- ・線型出力計の指示値が 120%（出力が 120W）を超えたときにスクラム信号が発生する。安全出力計の指示値も 120%を越えて、同時にスクラム信号が発生する。

1-2-3 実験物の異常等による反応度の付加

原子炉の出力運転中に、炉心に直接挿入又は燃料集合体に取り付けて炉心内挿入する実

験物の位置が変化した場合、炉心に反応度が印加され原子炉出力が急上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

- (1)解析対象炉心、(2) 反応度等、(4)反応度温度係数、(5) 安全保護回路系等の動作、(7) 評価

については「1-2-1」と同じ。

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25℃

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 1W の臨界状態

(6) スクラム信号発生

- ・炉心に取り付けていた実験物が炉心から落下し、申請書に記載された実験物の最大反応度 (+0.5% $\Delta k/k$) がステップ状に加わる。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超えたときにスクラム信号が発生する。安全出力計の指示値も 120%を越えて、同時にスクラム信号が発生する。

1-2-4 商用電源喪失

原子炉の出力運転中に電力系統の故障又は所内電気設備の故障等により商用電源が喪失すれば、安全保護回路系の電源断により原子炉はスクラムして停止するため、その後の運転状況の監視を行う必要はないとしているが、それを確認するために評価を行う

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付 8 の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする

臨界量が少ない炉心のほうが発熱密度が最も高くなって、燃料温度の評価が厳しくなるためである。

(添付 8 の代表炉心については補正申請で修正)

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値

固体減速炉心は $0.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $0.5 \% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

固体減速炉心は $1.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3 = 0.5 \% \Delta k/k$

軽水ダンプまたは中心架台落下による反応度は核的制限値の最小値

$1 \% \Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

出力 100W の臨界状態で 1 時間運転（1 ヶ月の最大積算出力 100Wh までの運転）

(4) 反応度温度係数

温度変化に伴う反応度フィードバックは考慮しない。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・ 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により制御棒が落下。ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できないとする。
- ・ 商用電源喪失から 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ 固体減速炉心では商用電源喪失に伴い中心架台を保持している油圧ポンプが停止して中心架台が落下し、12 秒後（申請書の記載値）にステップ状の負の反応度が加わる。
- ・ 軽水減速炉心では商用電源喪失に伴いダンプ弁を保持している電磁石電源断により弁座が下降し水が排水され、30 秒後（申請書の記載値）にステップ状の負の反応度が加わる。

(6) 評価

- ・ 商用電源喪失後の 1 時間後までの積算熱量（主に核分裂生成物の崩壊熱）を求める。
- ・ 発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が \cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

1-2-5 重水反射体への軽水流入

軽水減速架台において重水タンクを使用して出力運転中に重水タンクが破損した場合、重水反射体へ軽水が流入すること、又は軽水に重水が流入することにより炉心に反応度が印加され原子炉出力が急上昇する可能性がある。

高濃縮ウラン燃料の炉心ではこの解析項目があるが、低濃縮ウラン燃料を用いた炉心では重水タンクを使用しないとしているので、追加の記載は行わない。

1-2-6 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用

固体減速架台の A 架台において、中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置は未臨界状態でのみ使用することが定められているが、臨界状態で使用した場合には出力が上昇し続けるため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の添付書類 8 で選定したすべての代表炉心とする。

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、0.35 % $\Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、1.35 % $\Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45$ % $\Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 1W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数はすべて負であるので、温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。

(5) 中性子発生設備の状態と安全保護回路系等の動作

- ・ 臨界状態でパルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量はパルス状中性子発生装置については $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ 、中性子発生設備については 10^{11}n/s であるので、この解析では値の大きい 10^{11}n/s で中性子を打ち込む

ものとする。

- ・線型出力計の指示値が 110%を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・線型出力計の指示値が 120%（出力が 1.2W）を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が 1 秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・スクラム信号の発生でも中心架台は落下しない。

(6) 評価

- ・スクラム信号が発生するまでの時間、最大出力、未臨界になるまでの積算出力を求める。
- ・発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

1-2-7 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

軽水減速架台の運転中に炉心タンクヒータを作動させるとき、反応度温度係数が正の炉心の場合には炉心温度の上昇に伴って正の反応度が印加され出力が上昇し続けるため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、軽水減速炉心の添付 8 の代表炉心の中で最も正の反応度温度係数が大きな炉心（C45G(6H₂O)炉心）とする。

（添付 8 の代表炉心については補正申請で修正）

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、0.5 %Δk/k

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、1.5 %Δk/k

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3 = 0.5$ %Δk/k

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 100W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数は核的制限値の最大値の $+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ\text{C}$ であるとし、燃料温度上昇により正の反応度が加わる。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・ [] [] 炉心タンク水の温度を上昇させる。
ヒータの熱は全て軽水の温度上昇に用いられるものとする。
- ・ 線型出力計の指示値が 110%を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・ 線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・ スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が 1 秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・ スクラム信号の発生でもダンプ弁は開放されない。

(6) 評価

スクラムが発生するまでの時間、積算発熱量を求め、発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

2. 設計基準事故

「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」の第2条第2項に「設計基準事故とは発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には試験研究用等原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの」と記載されている。

2-1 解析項目

解析は以下のような項目について取り扱う。

- (1) 反応度の異常な投入
 - (i) 燃料落下又は燃料誤装荷
- (2) 環境への放射性物質の異常な放出
 - (i) 燃料の機械的破損
 - (ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷

判定基準は運転時の異常な過渡変化の解析での判定基準 (i) ~ (iv) に以下の項目を加える。

- (v) 周辺公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり 5mSv を超えないこと。

2-2 解析条件

2-2-1 燃料落下又は燃料誤装荷

炉心配置変更の際に燃料集合体を計画外の位置に誤って装荷した場合、炉心に反応度が投入され原子炉出力が上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の添付8の代表炉心の中で各燃料セルの炉心のうち燃料体1本当当たりの反応度の大きな炉心長が約 50cm の炉心とする。すなわち、L5.5P-50、L4P-50、L3P-50、L2P-50、L1P-50、LL1P-50の6炉心とする。

(添付8の代表炉心については補正申請で修正)

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、 $0.35\% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、 $1.35\% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の $1/3$ 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$

中心架台の反応度は $5\% \Delta k/k$ 、または $10\% \Delta k/k$ の 2 ケース

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

6 本ある制御棒のうち 3 本は全引抜き、残りの 3 本は全挿入とし、中心架台を下限

線型出力系は指示値が 100% で 0.1W となるレンジ

中性子源を挿入して、出力 0.01W の未臨界定常状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数はすべて負であるので、温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・誤ってこの炉心用の燃料集合体をもう 1 体作成してしまい、炉心のポリエチレン反射体を取り出して、その位置に追加の燃料集合体を装荷したとする。燃料集合体の装荷位置は 1 体当たりの反応度が最も大きい位置とする。
- ・中心架台を上昇させる。上昇速度は申請書に記載した制限値の最大速度とする。
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期系からの信号では安全保護回路系が作動しない。
- ・線型出力計の指示値が 110% を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・線型出力計の指示値が 120%（出力が 0.12W ）を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・スクラム信号の発生に伴い中心架台を上昇させるための油圧ポンプが停止することにより、中心架台の上昇動作は直ちに停止する。
- ・スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が 1 秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・中心架台はスクラム信号発生後の 1 秒後に落下を開始し、スクラム信号発生後の 12 秒後までに時間とともに線型に負の反応度を加えるとする。

(6) 評価

スクラムが発生するまでの時間、積算発熱量を求め、発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が \cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

2-2-2 燃料の機械的破損

燃料集合体の製作、運搬、炉心装荷作業などの取扱中に誤って燃料集合体を落下させるなどした場合、燃料集合体が機械的に破損して燃料要素より核分裂生成物が放出され周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを与える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付 8 の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする（固体減速炉心：L4P-30、軽水減速炉心：C45G0(5 列)）。

(2) 初期条件

同じ炉心で月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを 9 回繰り返すとす。各運転間隔は 30 日間とし、その後、最後の運転の 24 時間後（次の月の初日）に 100W での運転を 1 時間行う。（申請書に記載された積算出力に関する規制値は、100Wh/月、1kW/年）

(3) 燃料破損条件

最後の運転を停止してから、1 日後に炉心配置変更作業を行い、その際に 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を破損させたとする。

軽水減速架台では 1 枚の燃料を破損させ、燃料芯材において [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] 固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10%の燃料板が折れ曲がり、 [REDACTED]
[REDACTED]

(4) 評価

研究所敷地境界位置での実効線量を評価する。

2-2-3 実験設備、実験物等の著しい損傷

パイルオシレータで核燃料の試料を用いているときに、核燃料が何らかの原因により損傷した場合、試料より核分裂生成物が放出される可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の添付 8 の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする [REDACTED]

(2) 初期条件

- ・最大出力 100W においてパイルオシレータにより天然ウラン、又は濃縮ウラン（4.5%濃縮）の試料の反応度測定を行う。
- ・各試料の量はパイルオシレータ実験での反応度絶対値の最大値 $0.1\% \Delta k/k$ であるとする。

(3) 実験物破損条件

最大積算出力となる運転を終了直後に試料が破損し、内部の核分裂生成物（希ガス（Xe、Kr）及びよう素）の 10%が放出されたとする。

(4) 評価

研究所敷地境界位置での実効線量を評価する。

表1 解析項目のまとめ

項目	初期状態、反応度印加方法			備考
	出力等	Lin-N レンジ	その他	
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	0.01W 臨界	100% 1W	制御棒連続引抜き	起動時には通常は1W以下のレンジ
出力運転中の制御棒の異常な引抜き	100W 臨界	100% 100W	制御棒連続引抜き	
実験物の異常等による反応度の付加	1W 臨界	100% 100W	ステップ状反応度印加	初期出力100Wより厳しい
商用電源喪失	100W 臨界	—	100W 1時間 運転直後	
中性子発生設備の臨界状態において利用	1W 臨界	100% 100W	中性子連続発生	中性子発生設備利用時は1W以下
炉心タンクヒータによる炉心温度上昇	100W 臨界	100% 100W	温度係数正の炉心	出力上昇に時間が掛かるので初期は100W
燃料誤装荷	中性子源未臨界	100% 0.1W	中心架台上昇で起動	中心架台上昇時には通常は0.1W以下のレンジ

3. 解析方法

解析は遅発中性子 6 群の 1 点炉動特性方程式を解くことにより行う。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot N(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) + S$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{f_i \beta}{\ell} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (i=1 \sim 6)$$

ここで、

- $\rho(t)$: 時刻 t における反応度
- $N(t)$: 時刻 t における原子炉出力レベル
- ℓ : 中性子寿命
- β : 実効遅発中性子割合
- S : 中性子源強度
- f_i : グループ i に属する遅発中性子の割合
- λ_i : グループ i に属する連発遅発中性子先行核の崩壊定数
- $C_i(t)$: グループ i に属する遅発中性子先行核密度

この連立微分方程式を汎用数式処理システム Mathematica®を用いて解く（最新版である Mathematica バージョン 12.1.1 を使用）。Mathematica は 30 年以上にわたり世界各国で使用されている数式処理システムで、微分積分等の様々な数式を解析的または数値的に解くことができる。

このシステムの計算精度を確認するために、軽水減速架台の C35G0(5 列)炉心において臨界状態からステップ状に正の反応度が印加された場合の安定ペリオドを求め、通常の逆時間方程式に基づいて得られる安定ペリオドとの比較を行った。Mathematica の計算では (10-1-1)、(10-1-2)式の連立微分方程式を数値的に解いて出力を求め、出力変化の形状を指数関数にフィッティングして安定ペリオドを算出した。

結果を表 1 に示す。両者は非常によく一致していることが判る。

また、設計基準事故の「燃料の機械的破損」等の解析においては燃焼に伴う核分裂生成物の発生量、燃料板中の核分裂生成物の崩壊に伴う発熱等の評価が必要となる。燃料の燃焼計算は米国の Oak Ridge National Laboratory で開発された燃焼計算コード ORIGEN-2 の入手可能な最新版である ORIGEN-2.2 を使用し、断面積ライブラリとしては本原子炉施設の炉心の中性子エネルギースペクトルに比較的近い熱中性子炉の PWR 用に作成された定数 (PWRU.LIB) を用いた。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

第1表 安定ペリオドの計算結果の比較 (C35G0(5列)炉心)

印加反応度 (% $\Delta k/k$)	(A) 逆時間方程式 (s)	(B) Mathematica (s)	(A) / (B)
0.1	69.310	69.240	1.001
0.3	10.480	10.480	1.000
0.5	02.475	02.476	0.999

【補足-A】

KUCA の制御設備、核計装設備、インターロックについて

1) KUCA の制御設備は以下の通りである。

- ① 制御棒 6 本（制御棒駆動装置（図 A-1）は固体減速炉心、軽水減速炉心で共通）
 - ・制御棒本体（吸収体）はそのヘッドを制御棒駆動用電磁石に吸着させ、制御用モータで電磁石電源を上下させる
 - ・駆動速度は上下動作共に一定（0.5m /分 以下）
 - ・通常運転時は 3 本（S4～S6）を上限とし、残り 3 本（C1～C3）の挿入位置を調整する
 - ・スクラム信号発生時に電磁石電源を切って全ての制御棒を落下させる。スクラム信号発生から全挿入までの時間は 1 秒以下

- ② 中心架台（固体減速炉心）（図 A-2）
 - ・A 架台では 3 行×3 列、B 架台では 5 行×5 列
 - ・下方から油圧ポンプにより油圧をかけることで上昇させる。上昇途中でストップが 3 箇所があり、各ストップを通過するごとに上昇速度が遅くなる（表 A-1）。
 - ・炉心の他の集合体と同じ高さになったところ（中心架台上限）で停止し、油圧ポンプを駆動させ続けて上限を維持する。
 - ・スクラム信号発生時に油圧ポンプの電源を切って自重で下降させる。上限から 105cm 落下するまで 12 秒以下
 - ・中心架台が上限にないと C1～C3 の制御棒は上昇できない

- ③ ダンプ弁（軽水減速炉心）（図 A-3 の⑮、図 A-8, A-9）
 - ・炉心タンク下部の配管に取り付けてある
 - ・コンプレッサーからの空気圧をシリンダの下側に入れることで弁座を持ち上げ、上部のリンク機構にカムを引っかけて電磁石で固定することで弁座を閉止状態とする。シリンダ内の空気は電磁石で固定された時点で排出される。
 - ・スクラム信号発生時に電磁石電源を切ってリンク機構をカムから外し、弁座を下降させて炉心タンク水を排水する。燃料が完全に露出するまでの排水時間は 30 秒以下
 - ・ダンプ弁を閉止しないと C1～C3 の制御棒は上昇できない

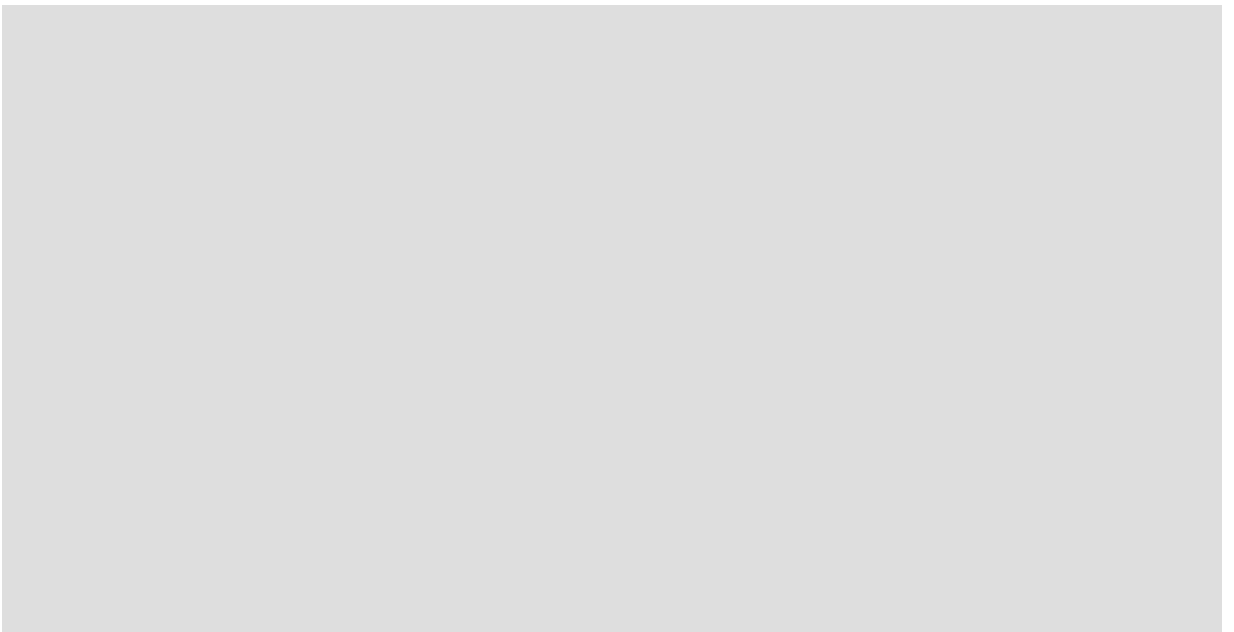
「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

2) 運転手順は以下の通りである。

① 固体減速炉心



② 軽水減速炉心 (図 A-3、図 A-10 参照)



3) KUCA の核計装系は以下の通りである。

① 起動系

- ・ 3本の核分裂計数管 FC #1~FC#3
- ・ FC #1~FC#3 の数値は制御室核計装盤 (図 A-7) の記録計とメータに表示される (範囲は $10^0 \sim 10^6$ cps)
- ・ 起動系の1系統以上の計数率が 2cps を越えないと制御棒、中心架台の上昇操作はできない

- ・ 起動系の計数率の炉周期を求め、3系統中2系統以上が炉周期短 (35秒以下) の信号を出したときには制御棒引抜き阻止 (6本全ての制御棒)、中心架台上昇油圧ポンプ停止、炉心タンク給水ポンプ停止
- ・ ある程度出力が上昇したときにもこの炉周期短のインターロックは働くが、高出力では検出器の不感時間の影響で機能しない
- ・ 通常運転時には運転員が起動系の信号を意識することは無い

② 線型出力計系 (Lin-N)



a) 概要

- ・ ガンマ線非補償型電離箱 UIC #5
- ・ UIC #5 の数値は制御室核計装盤 (図 A-7) の記録計とメータ、制御卓の記録計とデジタル表示器 (図 A-6) に表示される (範囲は 0~120%) (制御卓の記録計と表示器は自主設置)
- ・ 線型出力計の数値は電離箱からの信号の電流値で表示され、表示の電流値が 100%で 3pA から $1 \mu A$ となる 12レンジを制御卓で切り替える (図 A-5)。
- ・ 上のレンジに変更することはいつでも可能であるが、下のレンジへの変更は指示値が 25%以下のときにのみ可能 (オーバースケールによるスクラムを防ぐため)
- ・ UIC #5 は設置位置により $1 \mu A$ 指示値で出力 100W 以下となるように設置している

b) 安全保護

- ・線型出力計の各レンジにおいて指示値が 90%を越えるとアラームが鳴る（図 A-5 の ALARM、これは自主警報）
- ・線型出力計の各レンジにおいて指示値が 110%を越えると一せい挿入信号を発生し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、臨界調整用の 3 本の制御棒（C1～C3）の駆動モータが自動的に動作して電磁石電源が入った状態で制御棒を炉心に挿入する
- ・線型出力計の各レンジにおいて指示値が 120%を越えるとスクラム信号を発生し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、制御棒を吊っている電磁石電源が切断されて自重で炉心に挿入される（同時に中心架台落下、ダンプ弁開）

c) 運転時の操作

- ・起動前点検の核計装設備の機能点検を行うとレンジは自動的に 300pA になる。また起動前点検の最後の段階でレンジを 3pA に変更する項目がある。
- ・運転員は線型出力計の指示値を見ながら運転を行う。通常、起動時の中性子源を挿入したのみのときは 
- ・運転時には運転員は線型出力計の指示値が約 20～70%の範囲内になるようにレンジを切り替えて出力を表示させる。（運転マニュアルである保安指示書には「線型出力計の指示値が各レンジの 70%を超過しないことを目安にして出力レンジを切り替え、目的の出力まで近づける。」と記載）
- ・運転時の出力確認には制御卓に指示値が表示された炉室内ガンマ線エリアモニタも参考にしており 

③ 対数出力炉周期系（Log-N）

a) 概要

- ・ガンマ線非補償型電離箱 UIC #4
- ・UIC #4 の数値（対数指示値、炉周期）は制御室核計装盤（図 A-7）の記録計とメータ、制御卓のデジタル表示器（図 A-6）に表示される（対数指示値は電離箱からの電流値： $10^{-12}\text{A} \sim 10^{-5}\text{A}$ ）

b) 安全保護

- ・炉周期が 30 秒以下となるとアラームが鳴り、制御棒引抜き阻止（6 本全ての制御棒）、中心架台上昇油圧ポンプ停止、炉心タンク給水ポンプ停止
- ・炉周期が 15 秒以下となると一せい挿入信号を発生し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、臨界調整用の 3 本の制御棒（C1～C3）の駆動モータが自動的に動作して電磁石電源が入った状態で制御棒を炉心に挿入する（同時に中心架台落下、ダンプ弁開）

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

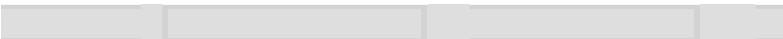
- ・炉周期が 10 秒以下となるとスクラム信号を発し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、制御棒を吊っている電磁石電源が切断されて自重で炉心に挿入される

c) 運転時の操作

- ・運転員は炉周期が 30 秒以下にならないように指示値を見ながら運転を行う（50 秒以上くらいを目安）
- ・運転員は対数出力計の表示を見ながら運転することはほとんど無く、参考として見る程度

④ 安全出力系

a) 概要

- ・ガンマ線非補償型電離箱 UIC #6
 - ・UIC #6 の数値はフルスケール 120% の制御室核計装盤（図 A-7）のメータにのみ表示され、レンジ切り替えは無し
 - ・UIC #6 は設置位置により 100% 指示値で出力 100W 以下となるように設置している
- 
- ・通常運転時には運転員が安全出力計の信号を意識することは無い

b) 安全保護

- ・指示値が 120% となるとスクラム信号を発し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、制御棒を吊っている電磁石電源が切断されて自重で炉心に挿入される（同時に中心架台落下、ダンプ弁開）

4) KUCA の制御棒引き抜き、中心架台上昇及び給水に対するインターロックは以下の通りである。（設置変更申請書に記載）

- (1) 制御棒引き抜き、中心架台上昇及び給水の共通条件
スクラム及び一せい挿入条件が解除されていること
起動系の中性子計数率が 2cps 以上であること
核計装系の原子炉周期が 30 秒より長いこと
起動系の原子炉周期が 35 秒より長いこと（設置承認申請書には 35 秒という設定値は記載されていない）
- (2) 制御棒引き抜きの条件
制御棒駆動装置が固定板に固定されていること
制御棒保持用電磁石が励磁されていること
中性子発生設備のビーム隔離弁が閉じられていること

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

核計装系の原子炉周期測定系がバイパスされていないこと

(3) 中心架台上昇の条件

3本の制御棒が上限にあること

残り3本の制御棒が下限にあること

軽水減速架台のダンプ弁が開であること

他の固体減速架台の中心架台が下限にあること

中性子発生設備のビーム隔離弁が閉じられていること

原子炉周期測定系がバイパスされていないこと

(4) 給水の条件

3本の制御棒が上限にあること

2つの中心架台が下限にあること

炉心タンクのダンプ弁が閉であること

重水のレベルが設定値以上であること（重水タンクを使用する場合）

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

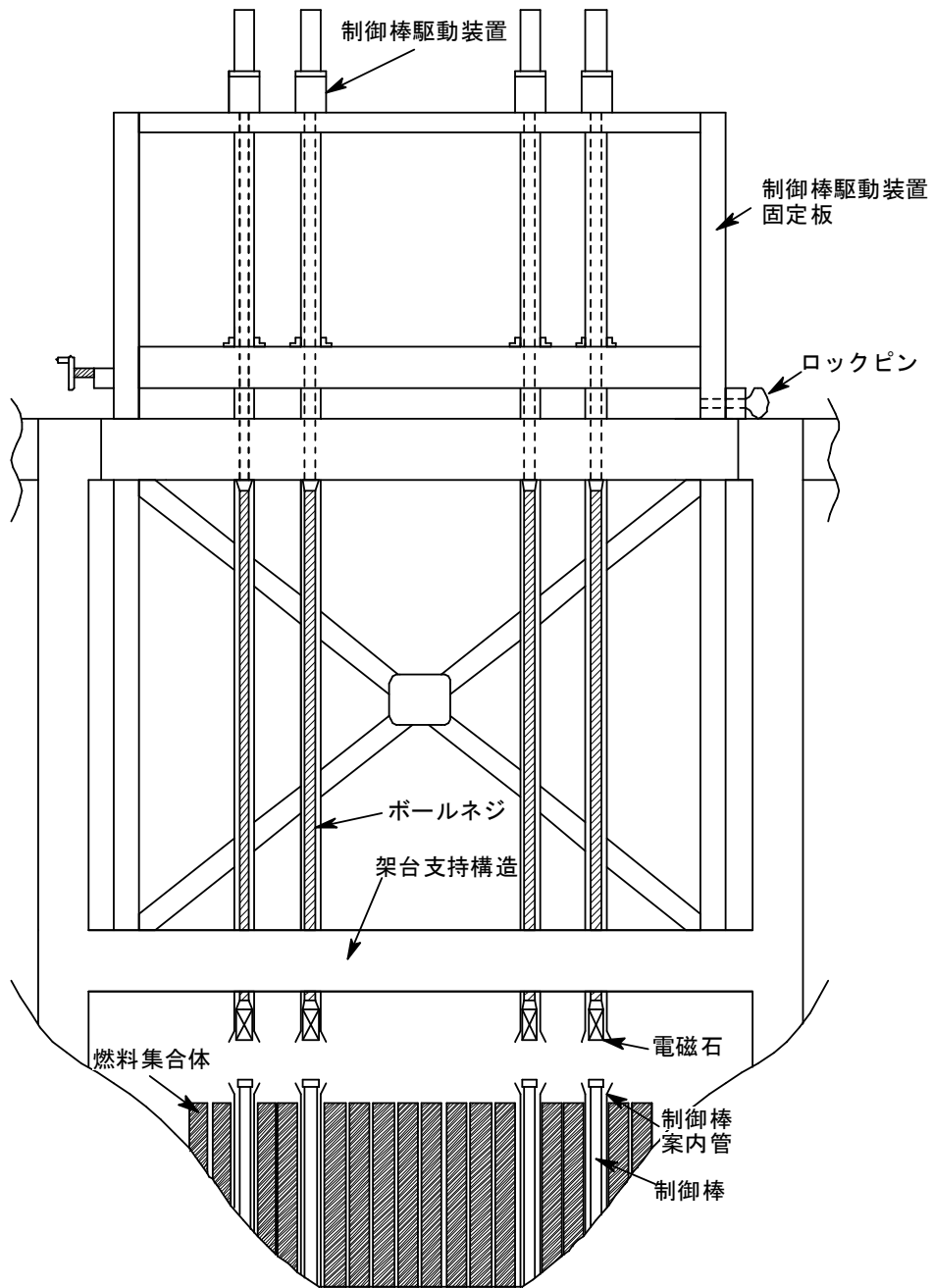


図 A-1 制御棒駆動装置

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

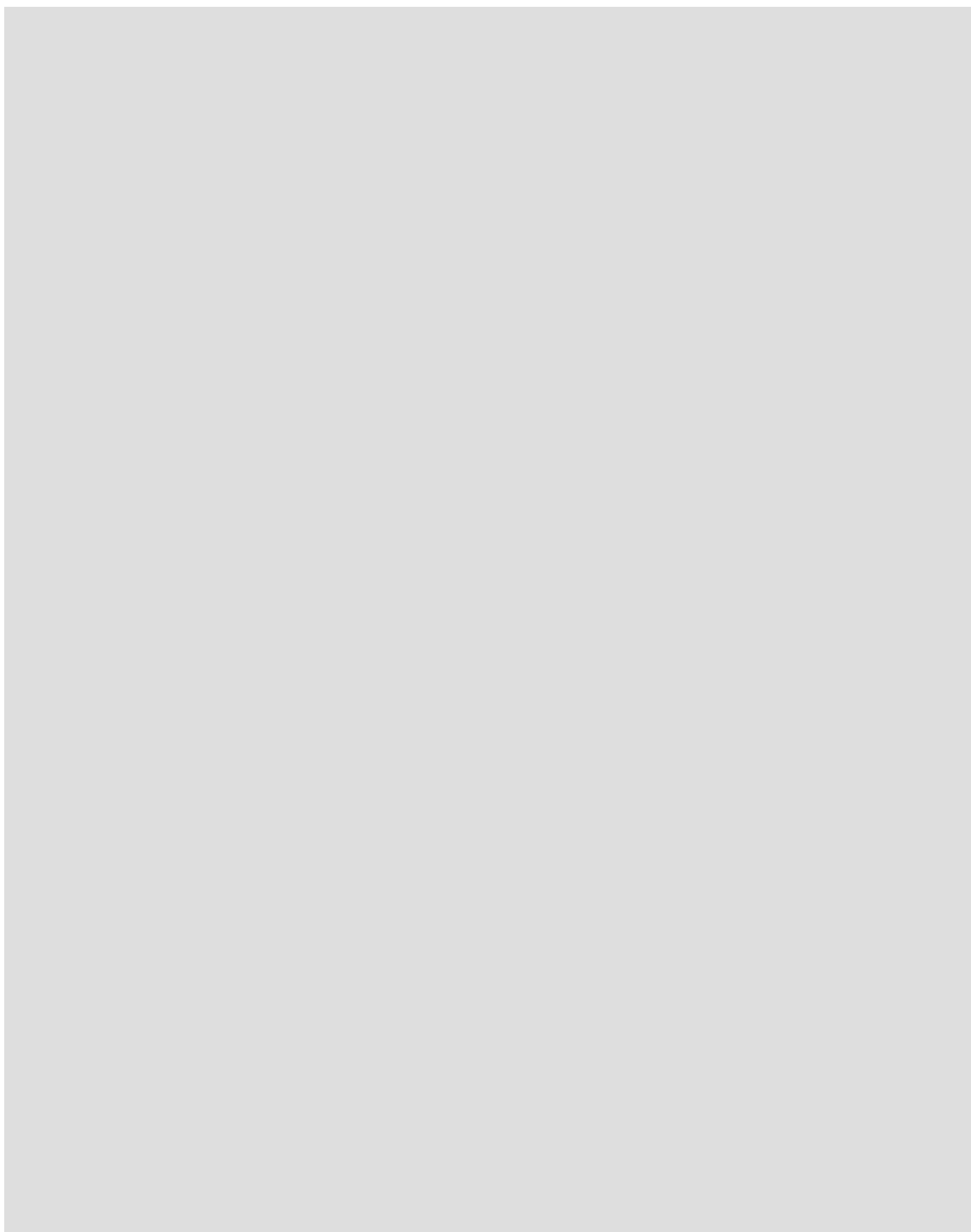
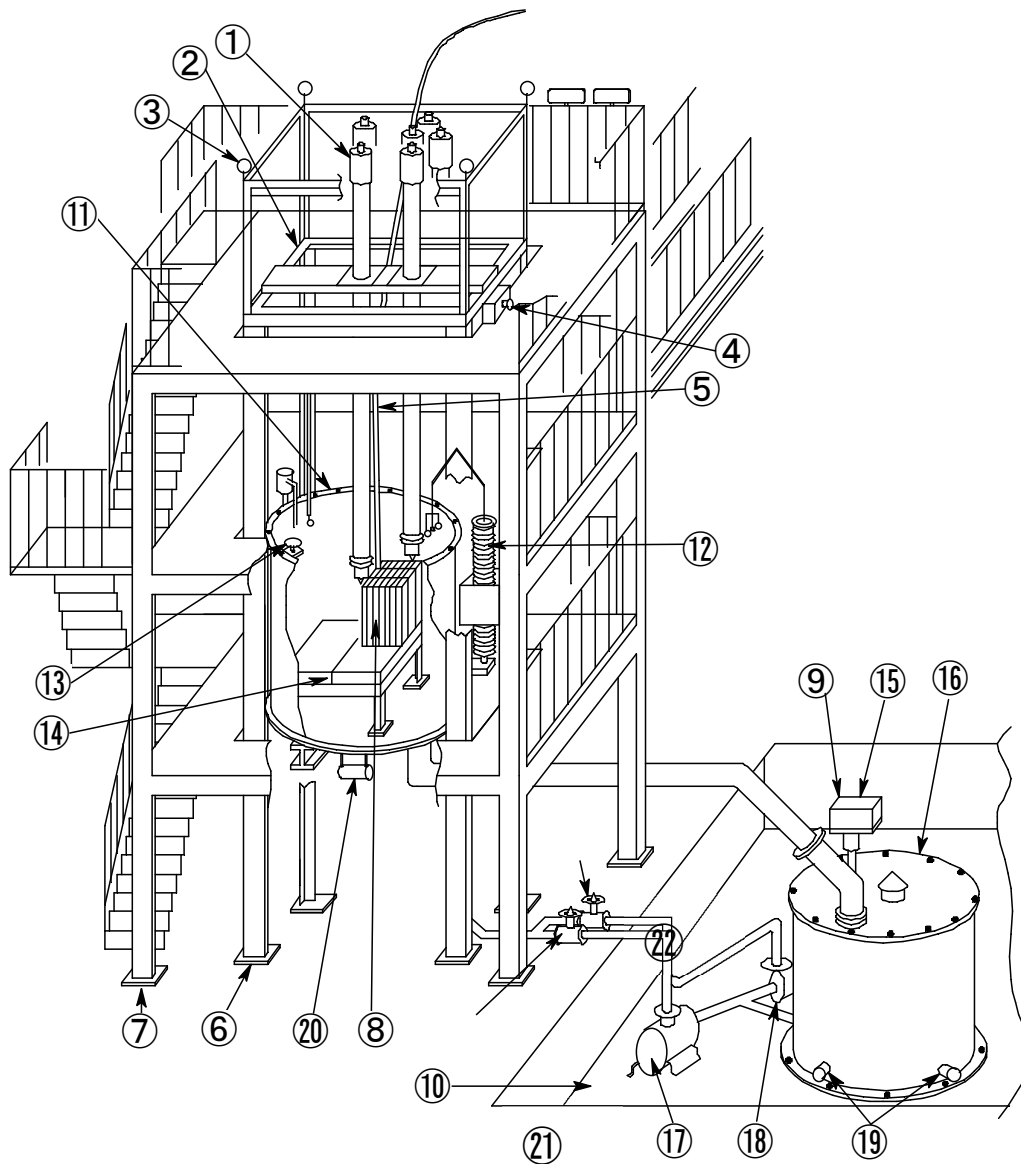


図 A-2 中心架台駆動装置

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



- | | | |
|----------------|-------------|-------------|
| ① 制御棒駆動装置 | ⑨ 親子キー式ロック | ⑰ 高速給水ポンプ |
| ② 制御棒駆動装置固定板 | ⑩ ピット | ⑱ 低速給水ポンプ |
| ③ クレーンつり上げ用フック | ⑪ 炉心タンク | ⑲ ダンプタンクヒータ |
| ④ ロックピン | ⑫ 溢流器 蛇腹 | ⑳ 炉心タンクヒータ |
| ⑤ 中性子源案内管 | ⑬ 炉心分割用ハンドル | ㉑ 高速給水弁 |
| ⑥ 架台支持構造 | ⑭ 炉心分割機構 | ㉒ 低速給水弁 |
| ⑦ 足場 | ⑮ ダンプ弁 | |
| ⑧ 炉心 | ⑯ ダンプタンク | |

図 A-3 軽水減速炉心 概念図

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

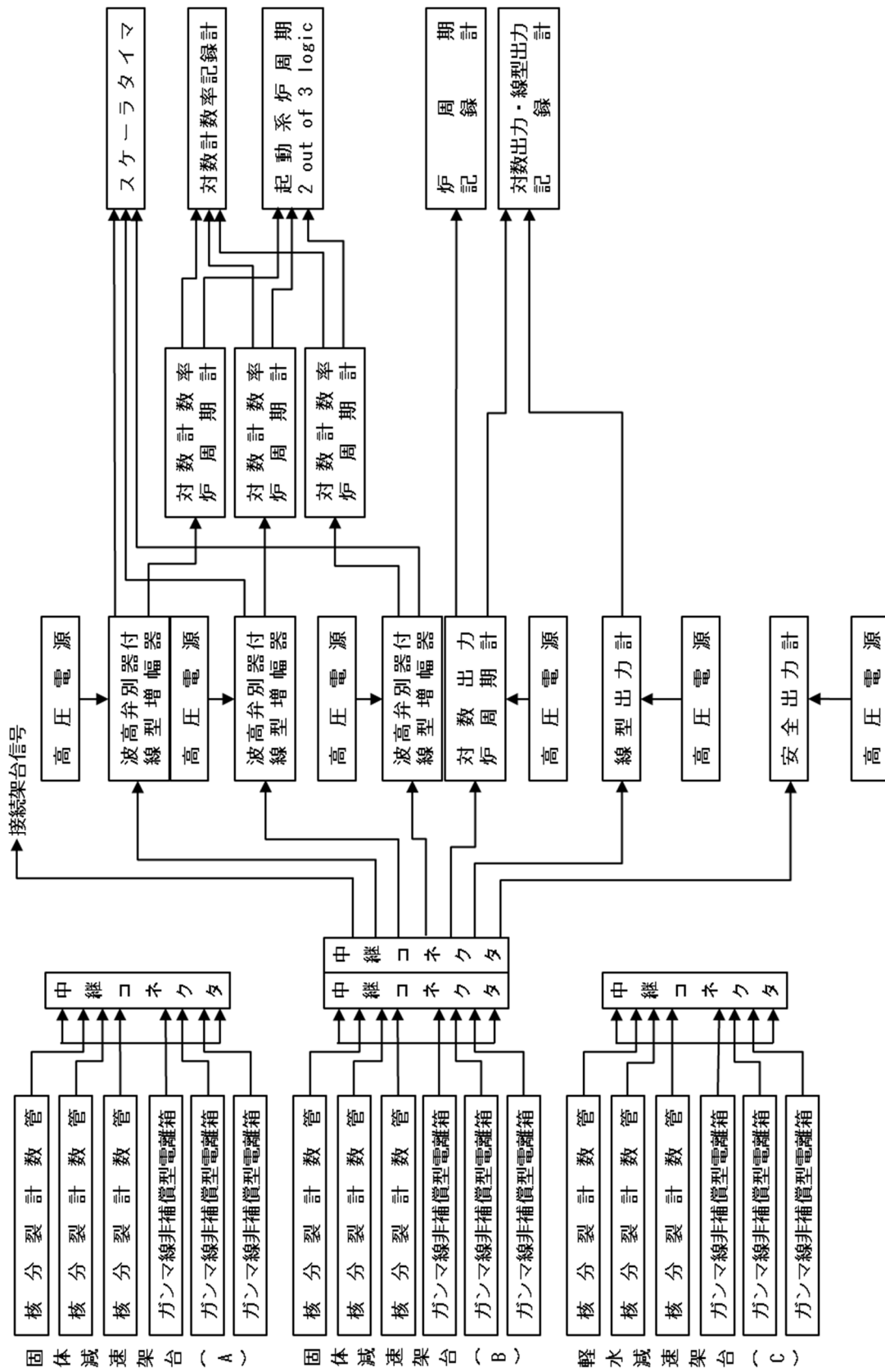


図 A-4 核計測系図

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

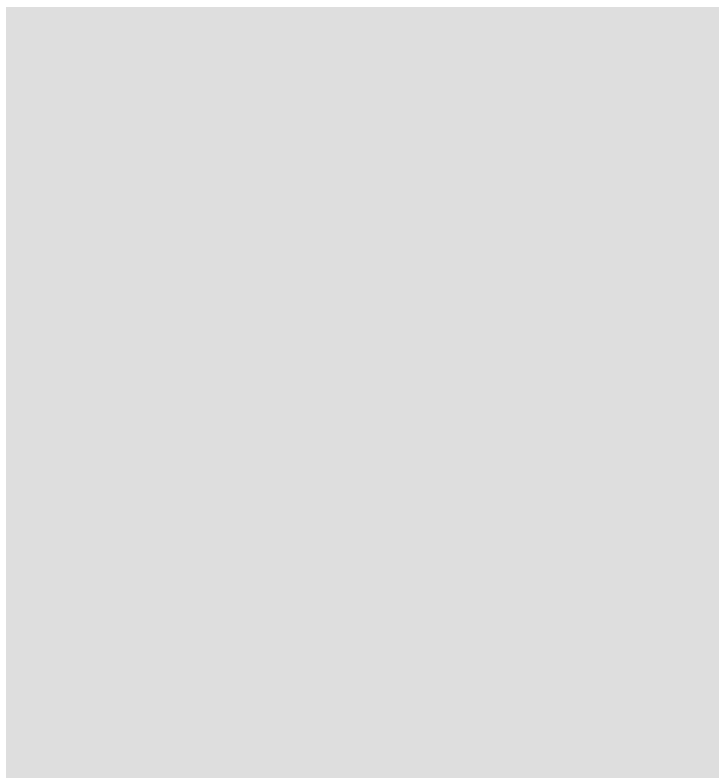


図 A-5 制御卓の線型出力計レンジ切り替えスイッチ

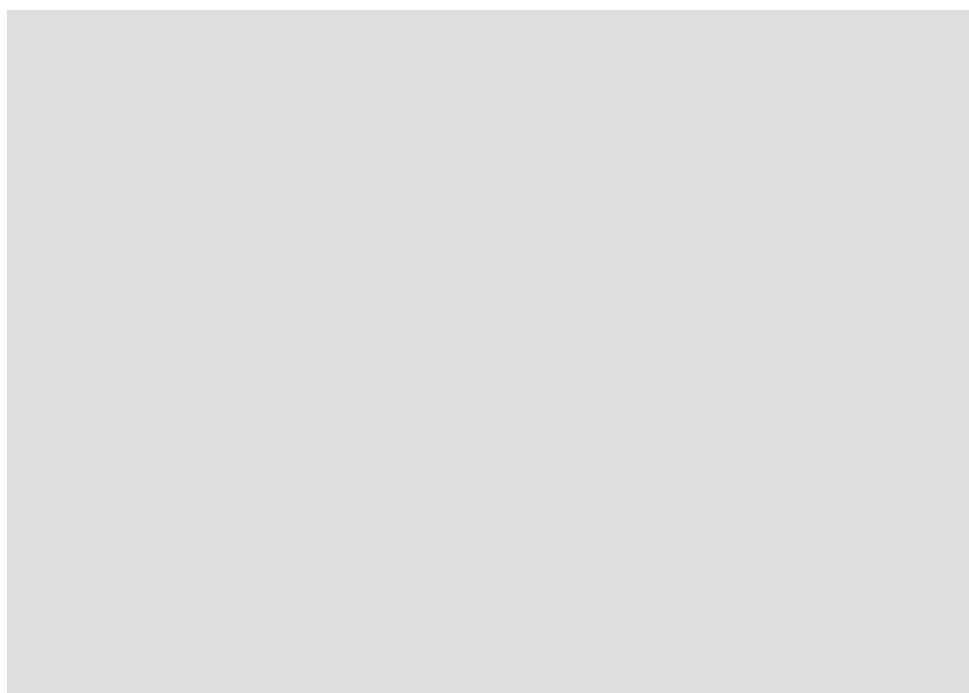


図 A-6 制御卓 線型出力計表示器

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

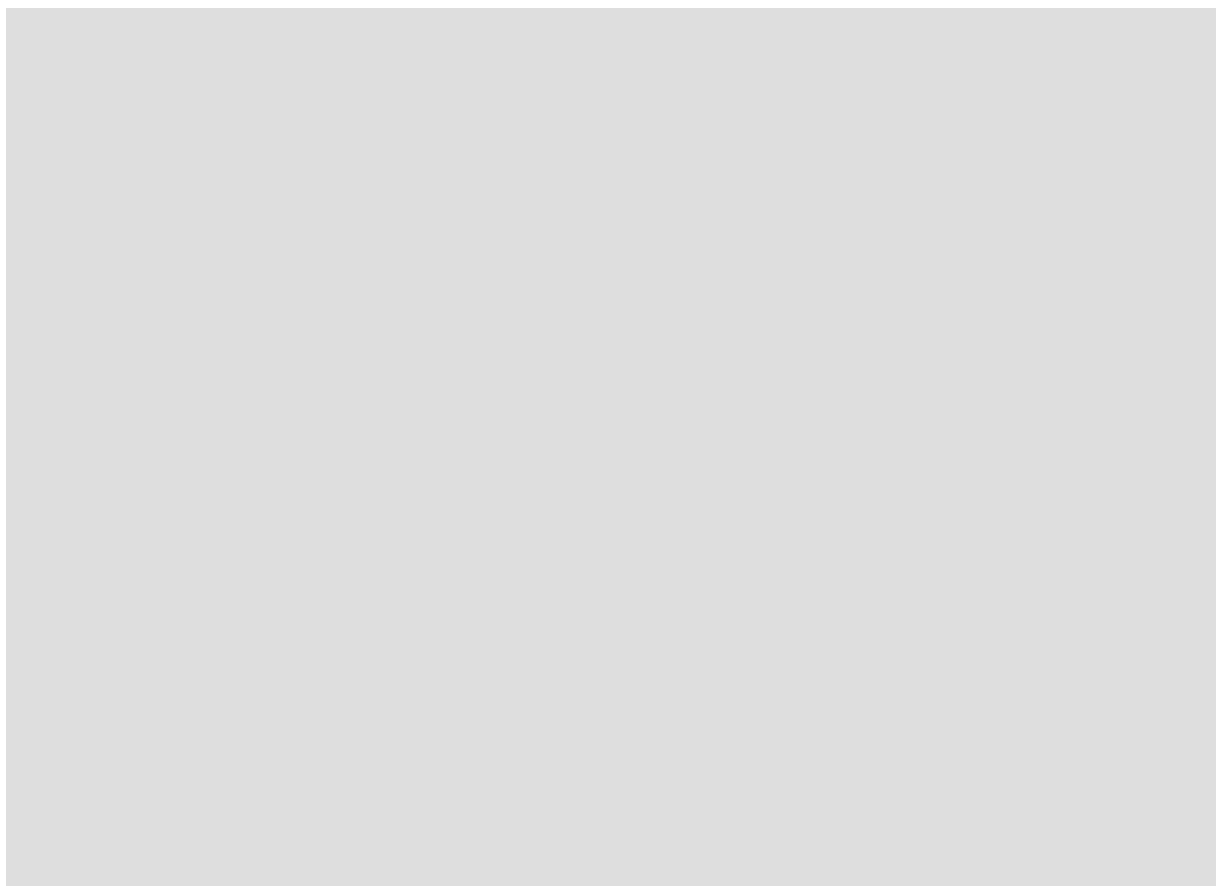


図 A-7 制御室核計装盤

表 A-1 中心架台の駆動速度

位置	ストローク (cm)	速度 (cm/s)
下限 ～ 第2段ストップ	下限 ～ 約70	3.3 以下
第2段ストップ ～ 第3段ストップ	約70 ～ 約140	1.1 以下
第3段ストップ ～ 第4段ストップ	約140 ～ 約170	0.6 以下
第4段ストップ ～ 上限	約170 ～ 約190	0.2 以下

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

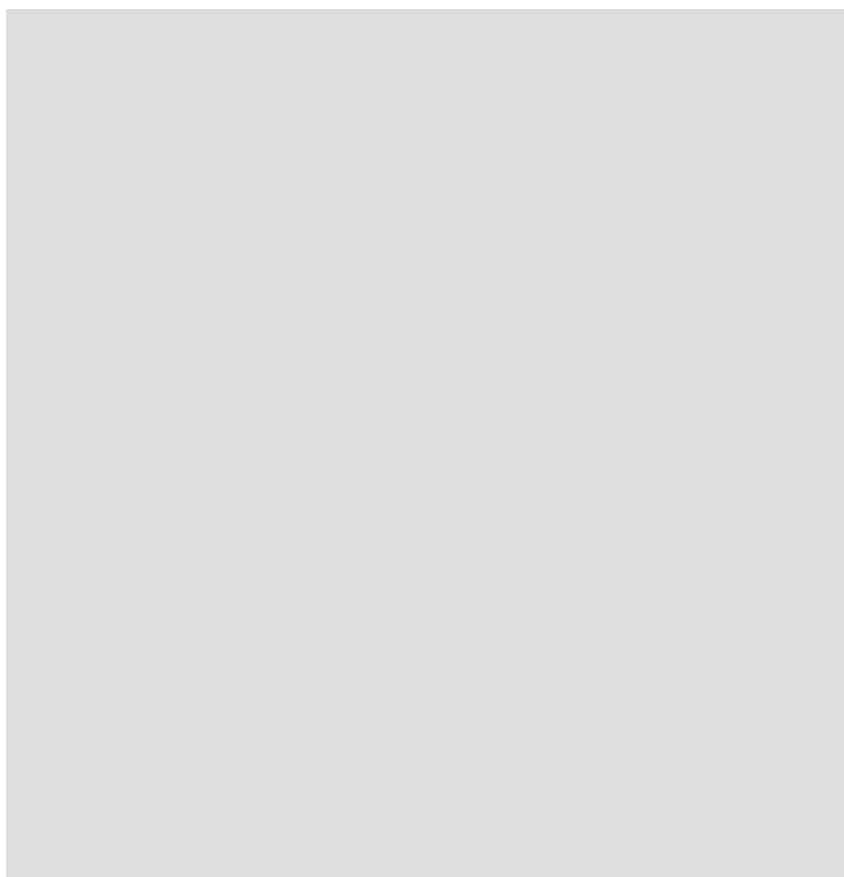


図 A-8 軽水減速炉心ダンプ弁 (1)

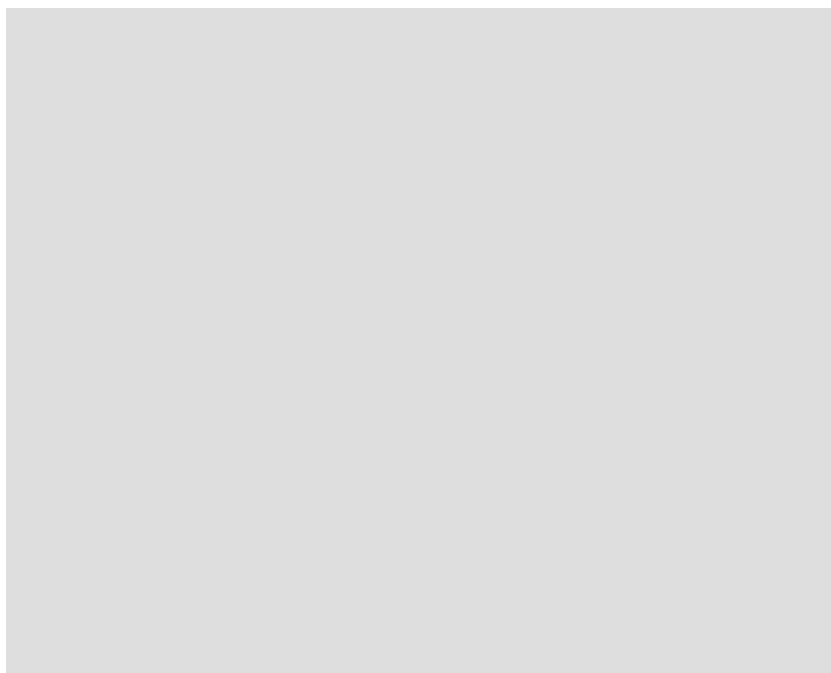


図 A-9 軽水減速炉心ダンプ弁 (2)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

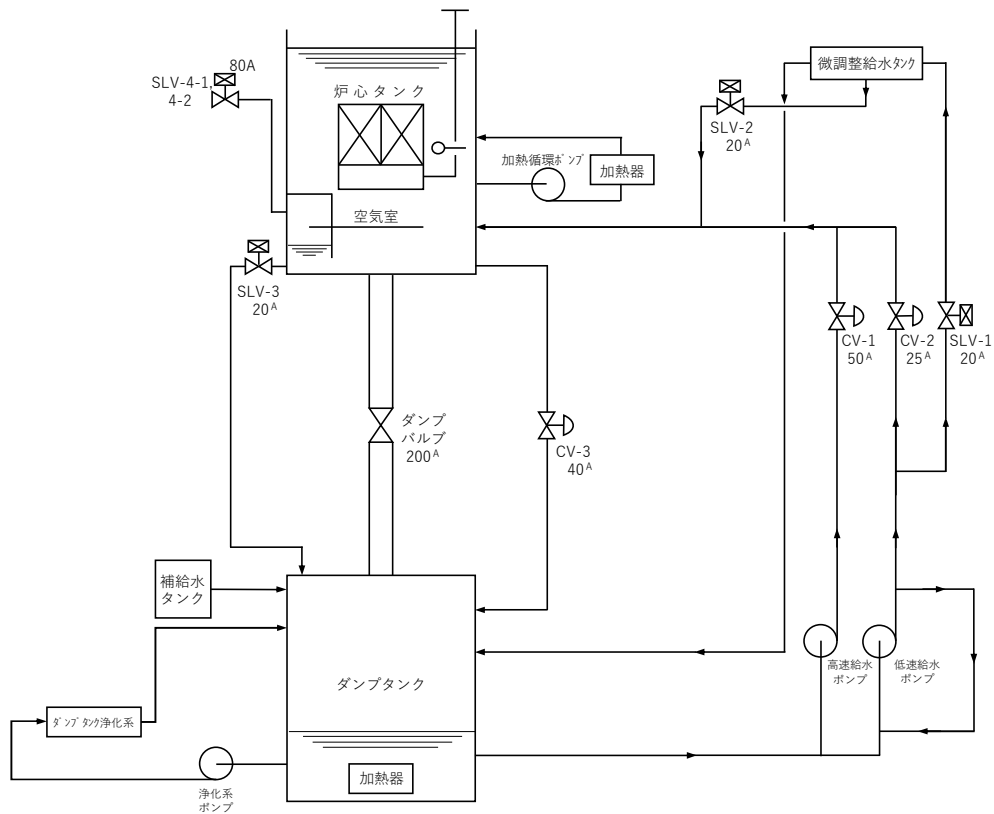


図 A-10 軽水減速炉心給排水系

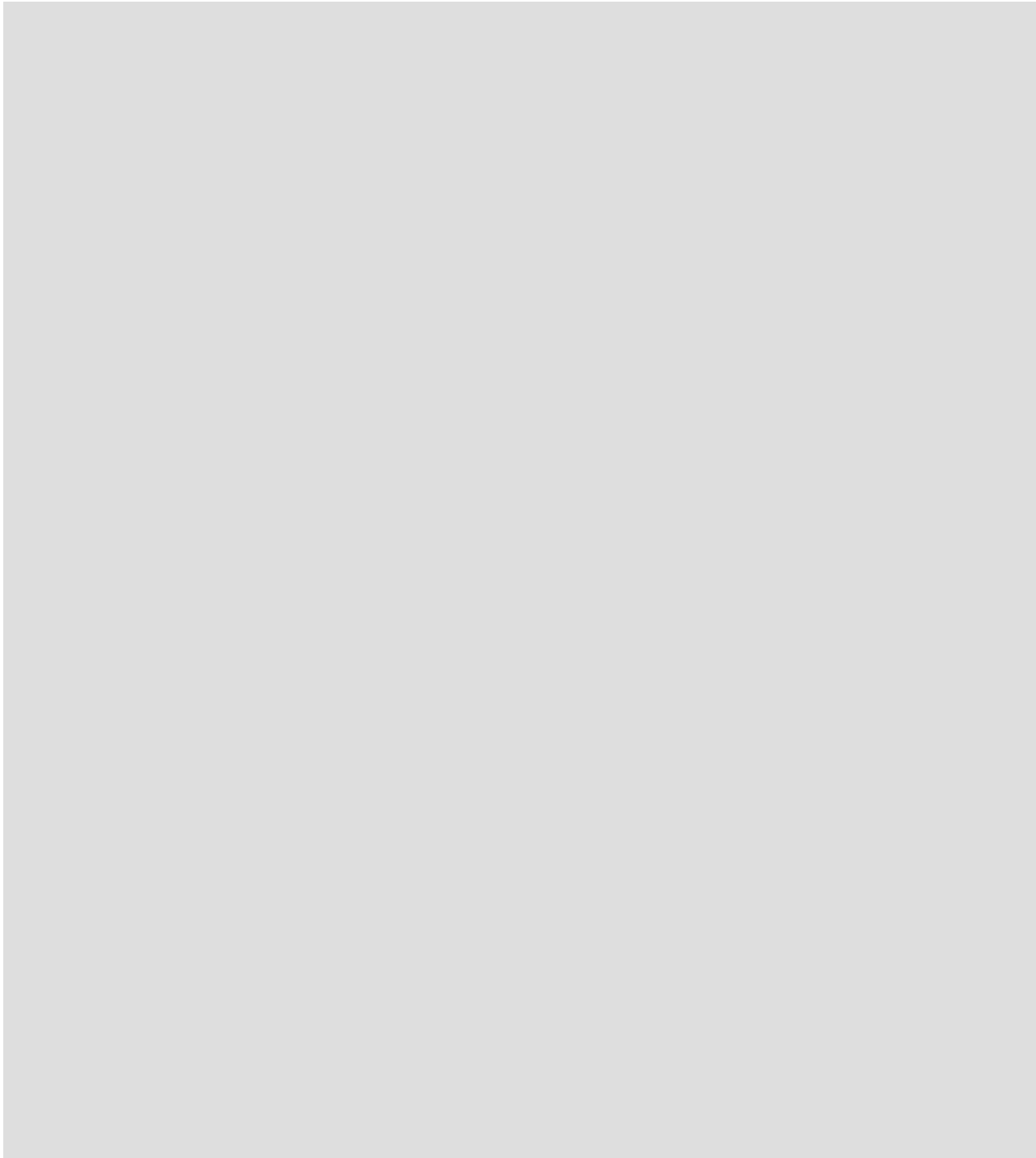
給排水系についての補足説明

- 炉心への給水は高速給水ポンプまたは低速給水ポンプにて行う。高速給水ポンプは水位が約 1350mm まで操作することができ、低速給水ポンプはいつでも操作することができる。制御卓にてどちらかのポンプを選択し給水操作を行うとバルブ（CV-1 または CV-2）が開きポンプが起動して給水を開始する。給水を継続するためには手で操作し続けなくてはならない。
- 低速給水ポンプが起動していると微調整給水タンクに給水され、微調整給水ボタンを操作すると SLV-2 バルブが開いて 1 回の操作で微調整給水タンクから炉心に約 300cc（水位で約 0.1mm）給水することができる。
- ダンプバルブを開くと満水状態（約 5m³）から約 30 秒で排水することができる。
- 制御卓で通常排水操作を行うと CV-3 のバルブが開いて排水される（全排水に 10 分以上掛かる）。排水操作バルブは手を離しても排水を継続することができる。
- 制御卓の微調整排水ボタンを操作すると SLV-3 バルブが開いて排水することができる（通常給水ラインの 1/4 の排水量）。微調整排水ボタンを押しているときのみバルブが開く。

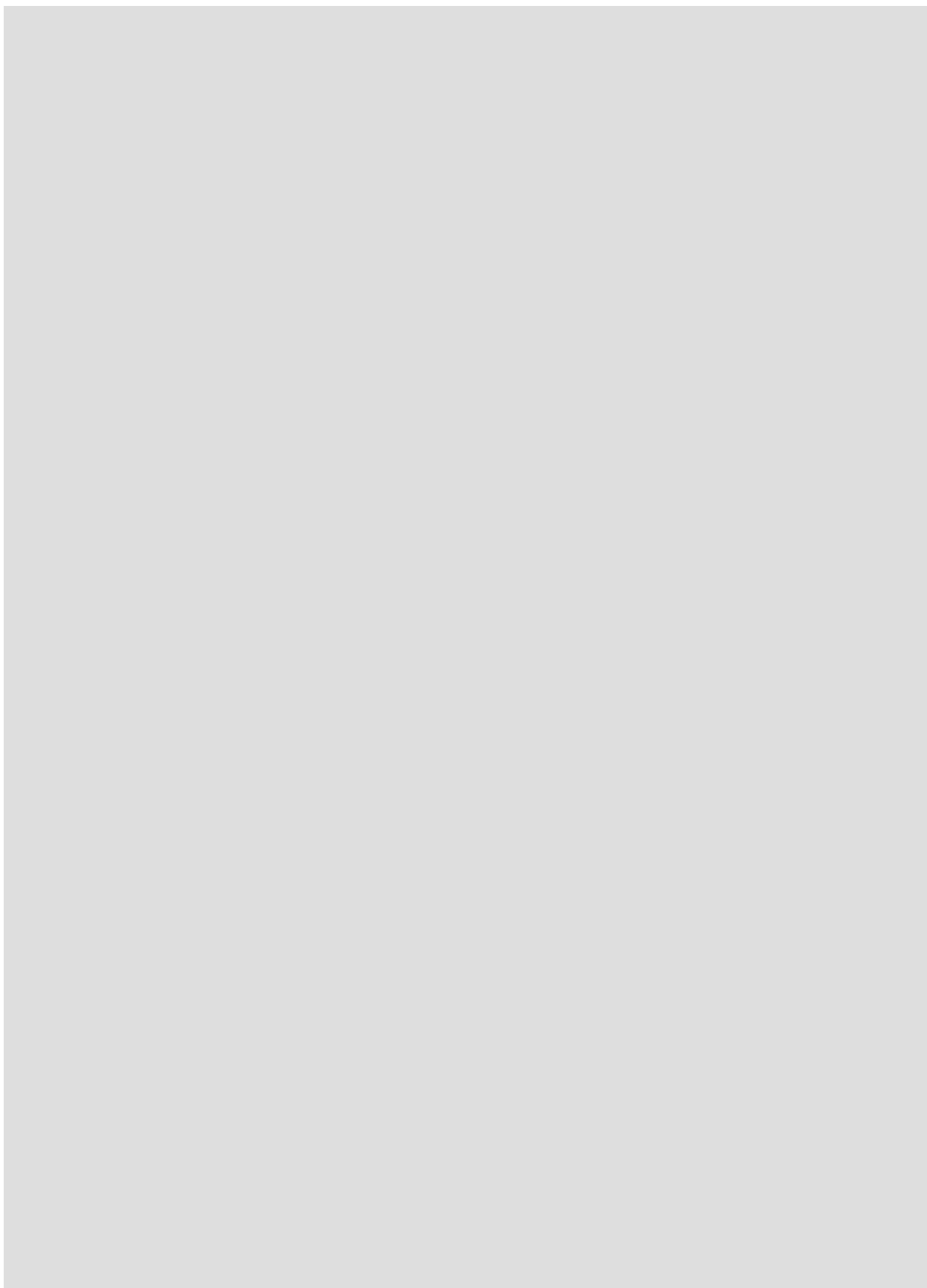
【補足-B】

保安指示書（操作手引き）について

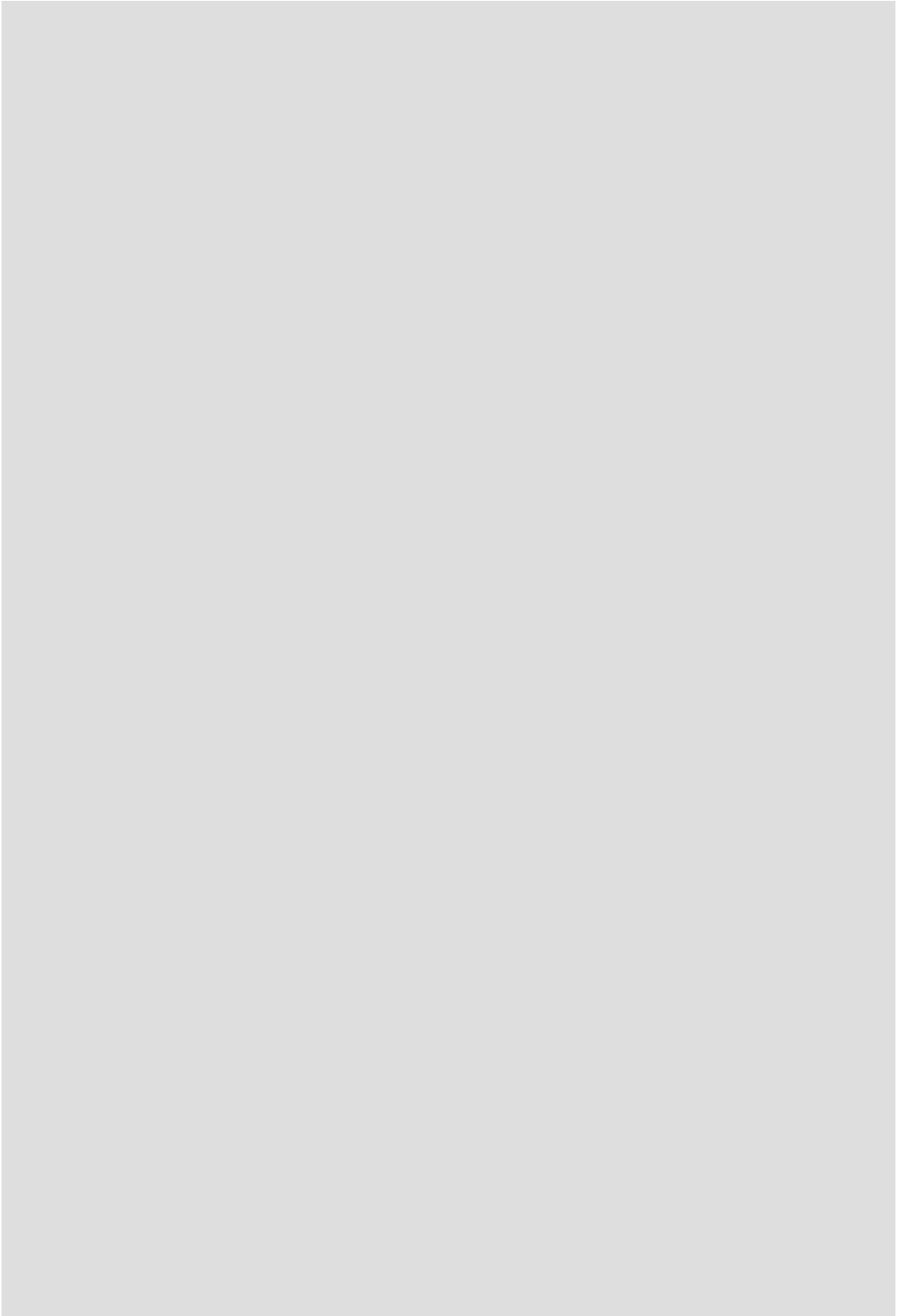
保安規定の下部規定である「原子炉施設保安指示書」から KUCA の起動、運転、停止方法に関する箇所を抜粋して記載する。



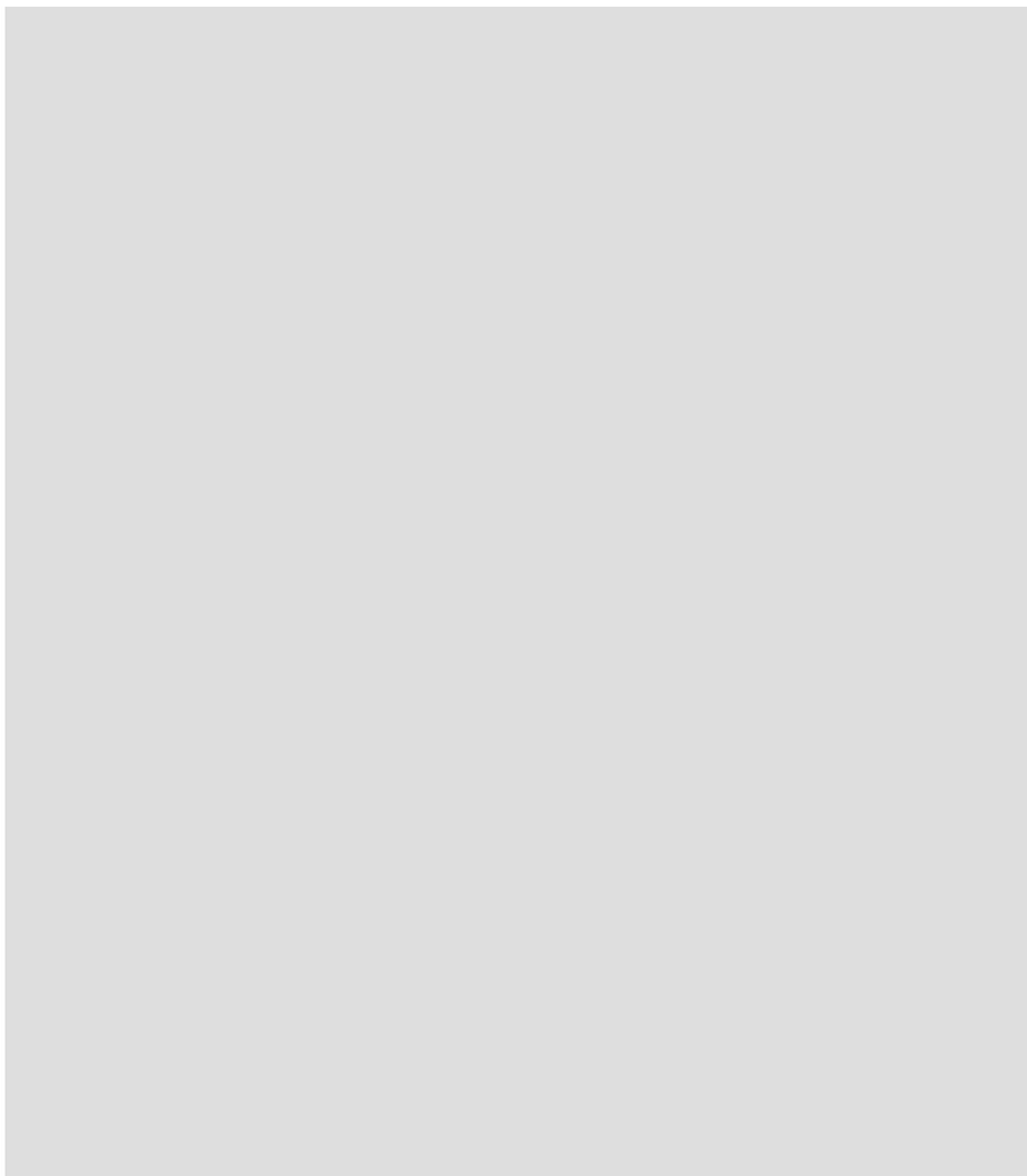
「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



【補足-C】

パルス状中性子発生装置と中性子発生設備について

パルス状中性子発生装置（図C-2、図C-3）と中性子発生設備（図C-4、図C-5）は KUCA 建屋内にあり（図C-1）、A 架台の炉心に中性子を入射させることができる。

1) 設置変更承認申請書の添付 8 での記載

(1) パルス状中性子発生装置

実効増倍率、動特性及び中性子エネルギースペクトル測定用として、パルス状中性子発生装置を設ける。同装置は A 架台専用とし、未臨界体系でのみ使用する。発生する中性子量は、パルス運転の場合で最大 10^{10}n/s 、連続運転の場合で最大 $5\times 10^{10}\text{n/s}$ である。また、加速電圧印加中に炉室扉を開けると同装置が停止する設計とする。

(2) 中性子発生設備

臨界集合体棟外部に設置された加速器からの粒子ビームを A 架台室に輸送し、実験を行うための中性子発生設備を設ける。同設備は未臨界体系でのみ使用する。設備は炉室内のビーム輸送系、中性子発生ターゲットとビーム隔離弁からなる。ビーム隔離弁はフェイルセーフの設計とし多重性を持たせ、同弁を閉じれば粒子ビームが中性子発生ターゲットに到達しなくなって中性子の発生が停止する構造とする。同弁の開閉操作は制御室で行うものとする。同弁は、スクラム又は一せい挿入の信号により自動的に閉じるものとし、また、可動遮蔽が開いたときは自動的に閉じるとともに、必要な場合 A 架台室において閉操作ができるものとする。中性子発生ターゲットは必要に応じて冷却できる構造とする。また、同ターゲットは炉心外部に設置する。この加速器はパルス運転のみが可能であり、中性子発生設備により発生する中性子量は最大 10^{11}n/s である。中性子発生設備はパルス状中性子発生装置との同時使用は行わない。

2) 装置の仕様

(1) パルス状中性子発生装置

- コッククロフトウォルトン型加速器で重水素ガスをイオン化して加速し（最大加速電圧 300kV）、炉心近傍に設置したトリチウムターゲットに衝突させて DT 反応により 14MeV の中性子を発生させることができる。
- 本コッククロフトウォルトン型加速器は連続運転も可能ではあるが、これまではパルス状の中性子を発生させるために使用している。
- パルス周期とパルス幅は Duty 比 1%以下の制限範囲で変更可能。
- 加速器の運転はすべて KUCA の制御室の加速器制御卓から行う。
- 炉室の入り口扉が開く、または KUCA がスクラムすると加速器の電源は遮断され中性子発生は停止する。
- 設置変更承認申請にはパルス運転の場合で最大 10^{10} n/s の中性子発生量と記載しているが、最近では最大でも約 10^7 n/s 程度の中性子発生量である。

(2) 中性子発生設備

- FFAG 陽子加速器で陽子イオンを加速し（最大陽子エネルギー100MeV、周期 30Hz）、炉心近傍に設置した重金属ターゲット（現在はタングステン）に衝突させてパルス状に中性子を発生させることができる。
- 加速器の運転は KUCA の建屋に隣接した加速器棟の制御室で行い、KUCA の中性子発生設備のビーム隔離弁を開いた後に加速器制御室にて KUCA 入射モードに変更することで KUCA への入射を開始する。
- A架台入り口の扉が開く、または KUCA がスクラムするとビーム隔離弁は自重で落下してビーム経路が閉鎖されてターゲットからの中性子発生は停止する。
- 設置変更承認申請にはパルス運転の場合で最大 10^{11} n/s の中性子発生量と記載しているが、現状では最大でも約 $10^8\sim 10^9$ n/s 程度の中性子発生量である。

3) 利用手順

(1) パルス状中性子発生装置

- ① 通常の手順により原子炉を起動して実験を行うための未臨界状態とする。
- ② 制御卓の加速器選択キー（図C-7）を操作して Cockcroft 側（パルス状中性子発生装置）にする。これにより加速器の電源を入れることができるので、加速器イオン源等の調整を行う。（①の前に調整を行うこともある）
- ③ 起動用の Am-Be 中性子源を取り出す。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

- ④ 核計装の炉周期系、および放射線モニタのペリオドを別々のキースイッチによりバイパスする。(核計装のペリオド短で一せい挿入やスクラムすることを防ぐ、また放射線モニタのペリオド警報が出るのを防ぐため) 核計装の炉周期系のペリオドバイパスキースイッチを ON にすると制御棒の引抜き操作や中心架台上昇操作ができなくなる。
- ⑤ ビーム隔離弁を開けてから加速器の加速用高圧電源を入れてビームをターゲットに入射させる。
- ⑥ 必要に応じて制御棒の挿入、中心架台の下降操作を行って未臨界度を変化させる(未臨界度が深くなる方向のみ変更可能)。

(2) 中性子発生設備

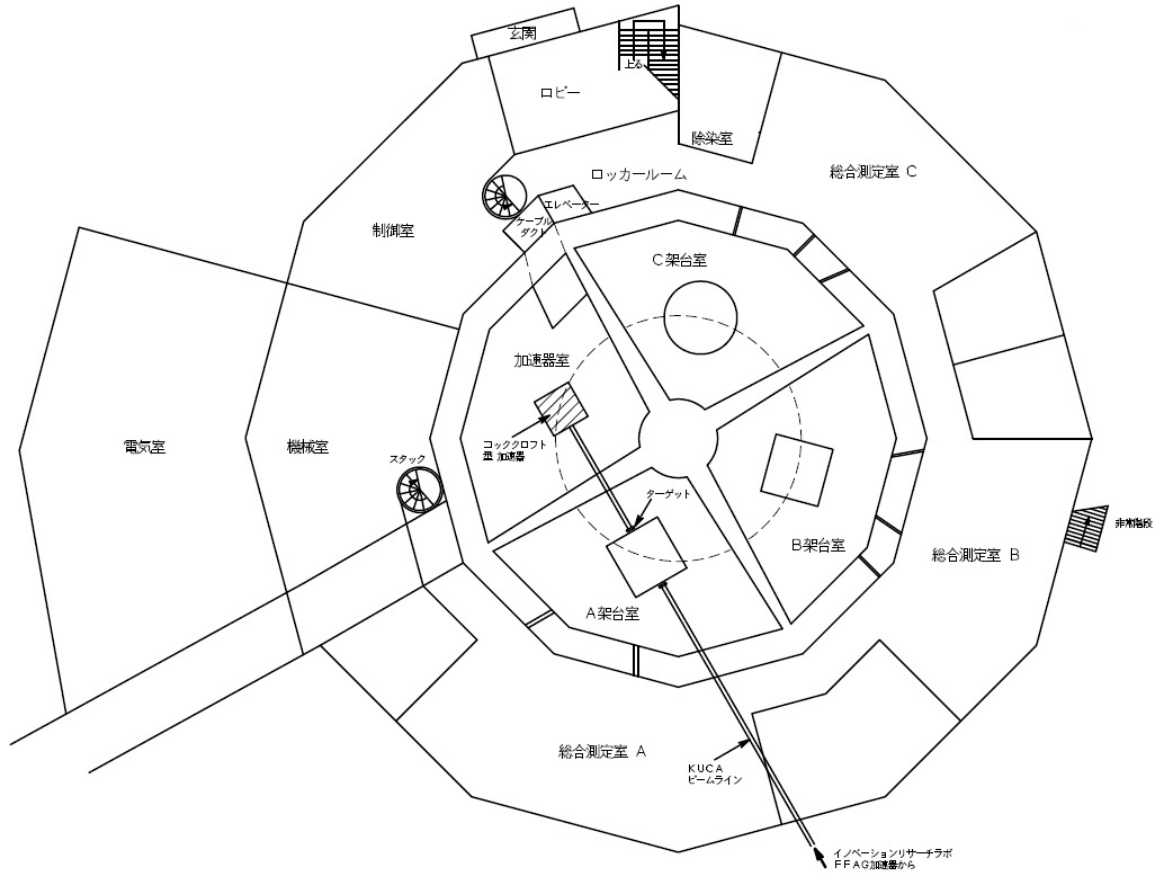
- ① 通常の手順により原子炉を起動して未臨界状態とする。
- ② 加速器の調整運転を行う。(①の前に調整を行うこともある)
- ③ 起動用の Am-Be 中性子源を取り出す。
- ④ 核計装の炉周期系、および放射線モニタのペリオド系を別々のキースイッチによりバイパスする。
- ⑤ 制御卓のキースイッチを中性子発生設備側に入れるとビーム隔離弁が開く。④の操作でも制御棒の引抜き操作や中心架台の上昇操作はできなくなるが、この⑤の操作でも同様に反応度印加する操作ができなくなる。
- ⑥ 加速器を KUCA 入射モードに変更してパルス中性子を入射する。
- ⑦ 必要に応じて制御棒の挿入、中心架台の下降操作を行って未臨界度を変化させる。

4) 今後の利用予定

現在のパルス状中性子発生装置については既に利用を停止しており、今後新規の中性子発生装置に変更することを検討している。(2019年6月14日、規制庁行政相談にて説明)

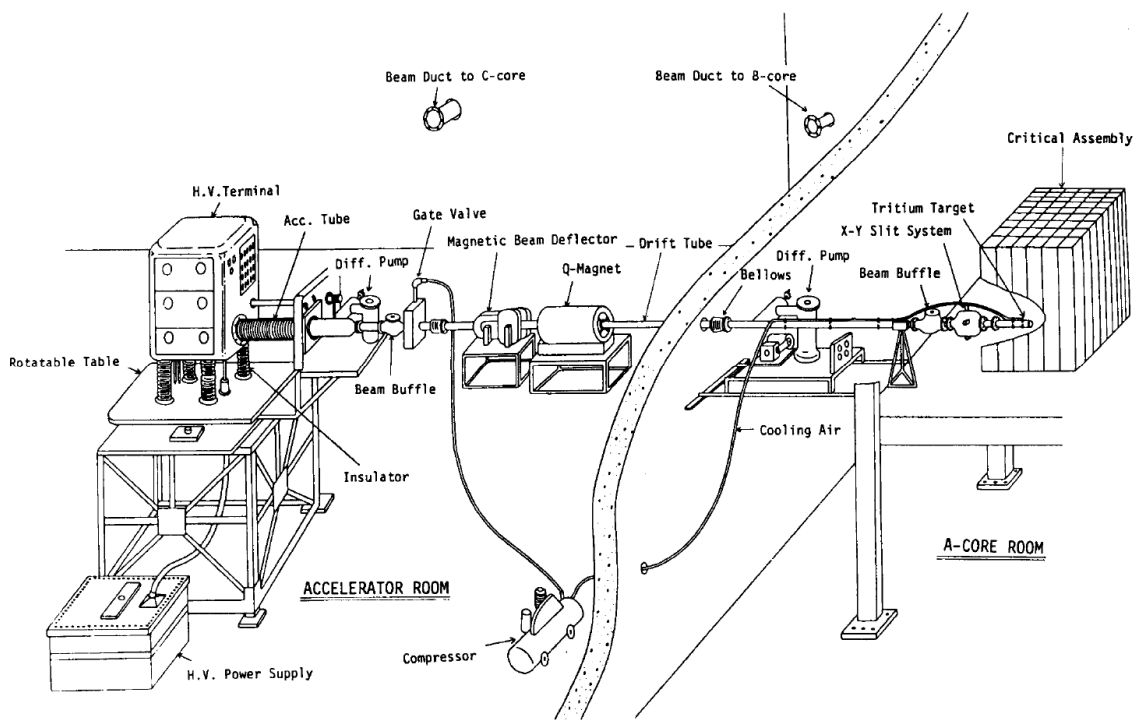
中性子発生設備については今後の取り扱いを検討中。(今年度は利用予定無し)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



図C-1 炉心建屋断面図

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

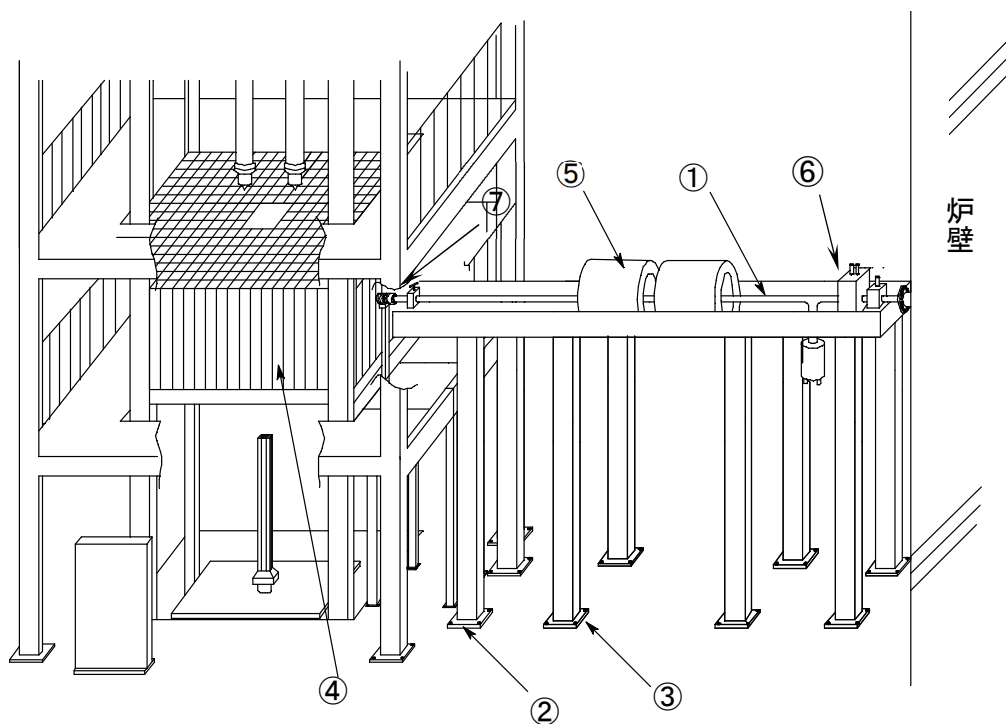


図C-2 パルス状中性子発生装置 構成図
(図中の Diff. Pump (油拡散ポンプ) はすべてターボ分子ポンプに変更)



図C-3 パルス状中性子発生装置 (加速器本体)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



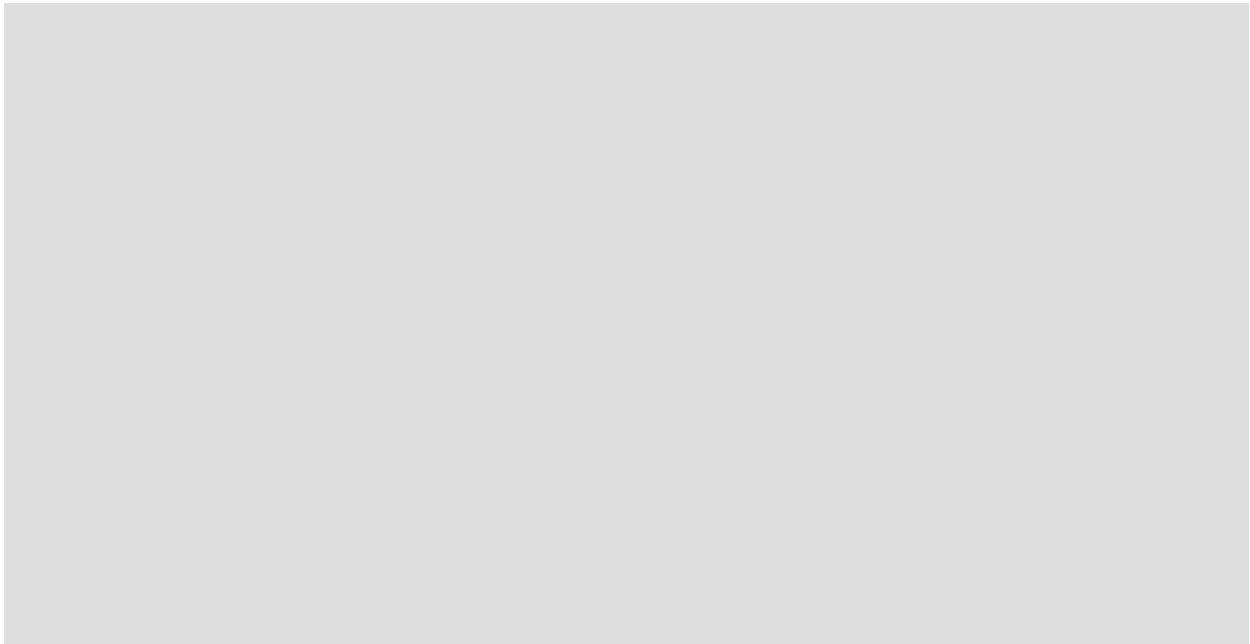
- ① ビームダクト、②ビームダクト支持架台、③電磁石支持架台
④ 炉心（燃料集合体）、⑤電磁石、⑥ビーム隔離弁、⑦ターゲット

図C-4 中性子発生設備概略図



図C-5 中性子発生設備（電磁石からターゲット方向を見たところ）

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



図C-6 制御卓加速器操作盤（右側：操作盤一部、左側：加速器選択キー）

表C-1 中性子発生装置の使用状況

年度	パルス状中性子発生装置		中性子発生設備	
	利用日数	調整日数	利用日数	調整日数
2012	15	11	0	8
2013	19	5	0	0
2017	16	12	9	0
2018	15	6	16	2
2019	4	6	0	0

(調整日数は炉心と組み合わせて調整したときで、単独運転の調整は含めない)

【補足-D】

パイルオシレータについて

設置変更申請の添付 8 にはパイルオシレータについて以下のように記載している。

=====

8-9 その他試験研究用原子炉の附属施設

8-9-4 実験設備等

8-9-4-1 主要な実験設備の構造

(2) パイルオシレータ

反応度測定、ドップラ係数の測定等のために実験物を炉心内に出し入れするものである。実験物の温度は-270°C～1000°Cの間で可変であり、周辺の炉心部へ伝わり難いよう断熱構造になっている。なお、挿入する実験物の反応度は絶対値として 0.1% $\Delta k/k$ 以下に制限する。

=====

現在 KUCA にパイルオシレータは設置されていないが、将来的に設置することを検討しており、その際には設工認申請の後に製作、工事を行なう予定である。

パイルオシレータの使用については次の2つの方法が考えられる。

① 実験物を挿入して反応度を測定する

(ア) 臨界での測定

- ・ 臨界状態となっている炉心に実験物を挿入する。
- ・ 反応度が加わった場合には超過臨界または未臨界となるが、その分の反応度を制御棒の挿入位置を調整することで臨界状態に戻し、制御棒位置の変化から実験物の反応度を求める。
- ・ 正の印加反応度が小さい場合にはそのまま出力させて正ペリオド法により反応度を測定することも考えられる。
- ・ 実験物を取り出し、再度制御棒位置を調整して臨界状態とする。
- ・ 必要に応じてこれらの操作を繰り返す。

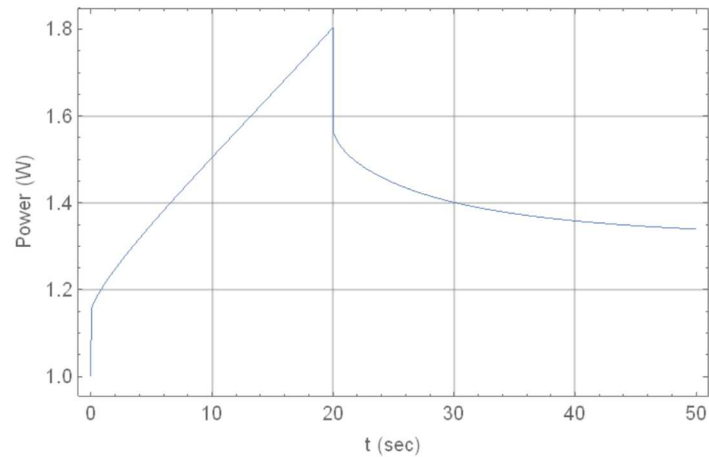
(イ) 未臨界での測定

- ・未臨界定常状態から実験物を挿入し、挿入後も未臨界であった場合には中性子源増倍法や炉雑音解析法等の手法により実験物の挿入前後の未臨界度を測定することで実験物の反応度を求める。
- ・未臨界定常状態から実験物を挿入し、挿入後に超過臨界となった場合には、制御棒の挿入位置を調整することで臨界状態とし、制御棒位置の変化および実験物挿入前の未臨界度から実験物の反応度を求める。

② 実験物の出し入れを連続的に行う

- ・臨界または未臨界の定常状態から実験物の出し入れを連続的に行い、出力変化等から反応度や炉心特性を測定する。

最初の①の実験方法の場合、実験物の反応度が正の場合には出力が上昇するが、実験物の反応度は $0.1\% \Delta k/k$ 以下に制限されているため出力上昇時の炉周期は約 60 秒（固体減速炉心の L5.5 炉心の場合）以上と比較的長く、通常の制御棒引抜きによる正の反応度印加の場合の出力変化と同程度のため運転に支障を及ぼすことはない。図D-1 に出力変化例を示す。



図D-1 実験物を挿入した場合の出力変化例

(固体減速炉心の L5.5-50 炉心において、反応度 $0.1\% \Delta k/k$ の実験物を時刻 $t=0$ にステップ状に挿入し、20 秒後に制御棒をステップ状に挿入して臨界状態に戻したときに出力変化)

次に、②の実験方法で実験物を周期的に出し入れすることで反応度を \sin 関数的に印加する場合について考える。

0.1% $\Delta k/k$ の正の反応度をもつ実験物を出し入れすることで反応度を $\rho=0.05 \times \sin(2\pi f \times t)$ (% $\Delta k/k$) (f は周波数) のように印加したとする。

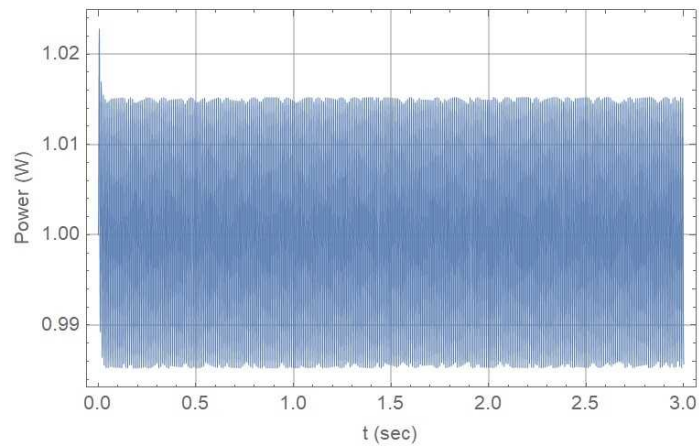
実験物を一部だけ挿入して 0.05% $\Delta k/k$ の反応度を加えた状態で臨界となっている場合を初期状態 ($t=0$) とする (炉心に全挿入したとき+0.05% $\Delta k/k$ の超過臨界、炉心から取り出したときには-0.05% $\Delta k/k$ の未臨界となる)。

周波数 1、10、100Hz について、出力変化を図D-2～D-4 に示す。(炉心は固体減速炉心の L5.5-50 とする)

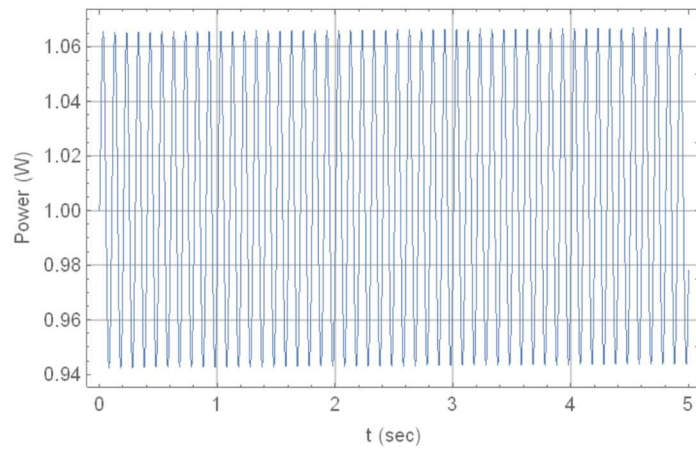
出力変動幅は周波数に依存し、周波数が高いほど小さくなり炉の運転に及ぼす影響は小さくなる。周波数が低いと出力変動幅が大きくなるが、その出力上昇はステップ状に反応度を加えた①の場合よりゆっくりとなるため運転に支障を及ぼすことはない。

同様に 0.1% $\Delta k/k$ の反応度の実験物を取り出した状態から $t=0$ で臨界状態となっている炉心に挿入することで、 $\rho=0.05 \times \{\sin(2\pi f \times t) + 1\}$ (% $\Delta k/k$) のように反応度を印加したとする。周波数 10Hz についての出力変化を図 D-5 に示す。正の反応度を加え続けることになるため出力は変動しながら最大値は少しずつ上昇していくが、その出力上昇はステップ状に反応度を加えた①の場合よりゆっくりとなるため運転に支障を及ぼすことはない。

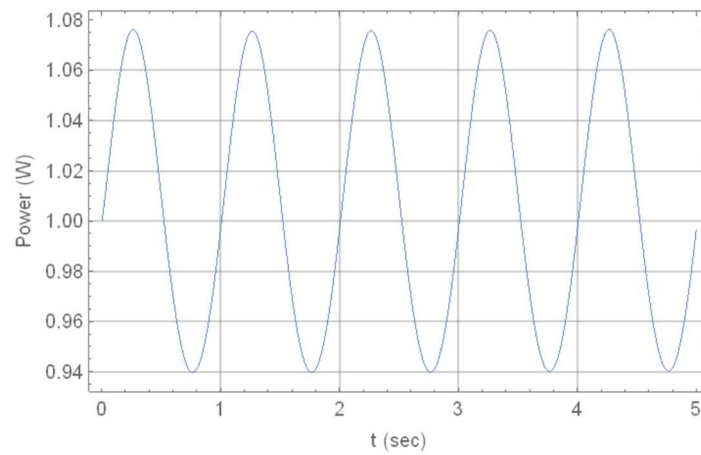
「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



図D-2 出力変化 (1) (周波数 100Hz)

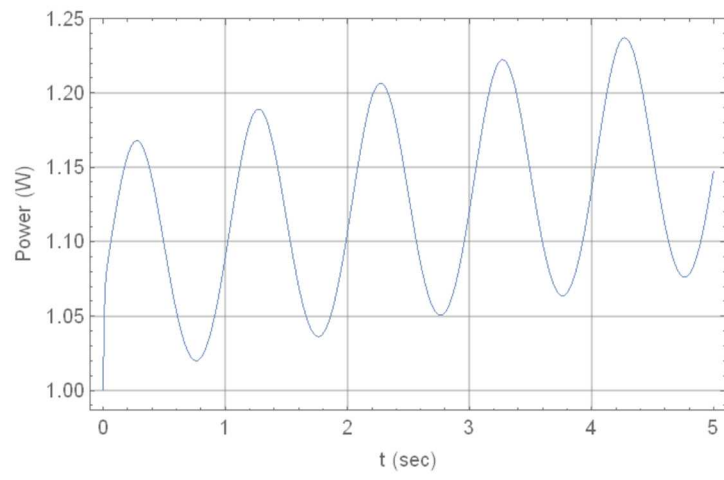


図D-3 出力変化 (2) (周波数 10Hz)



図D-4 出力変化 (3) (周波数 1Hz)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



図D-5 出力変化（周波数 1Hz）
（実験物を取り出したときに臨界）

【補足-E】

燃料温度の算出方法

1) 申請書での温度上昇量の算出方法

運転時の異常な過渡変化等の解析においては1点炉近似により運転時の出力、積算出力を求めているので、燃料の最大温度を算出するためには中性子束分布の形状を考慮する必要がある。現在の申請書では中性子束分布がcos分布であるとして以下のように求めている。

炉心の燃料領域を直方体 ($-a/2 \leq x \leq a/2$ 、 $-b/2 \leq y \leq b/2$ 、 $-c/2 \leq z \leq c/2$)、反射体節約を d としたとき炉心内の中性子束分布は以下のように書くことができるとする。

$$\phi(x, y, z) = \cos\left(\frac{\pi}{a+2d}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b+2d}y\right)\cos\left(\frac{\pi}{c+2d}z\right) \quad (\text{E-1})$$

炉心内の中性子束の平均値は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \bar{\phi} &= \frac{\int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-c/2}^{c/2} dz \cos\left(\frac{\pi}{a+2d}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b+2d}y\right)\cos\left(\frac{\pi}{c+2d}z\right)}{\int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-c/2}^{c/2} dz} \\ &= \frac{8}{\pi^3} \frac{(a+2d)(b+2d)(c+2d)}{abc} \cos\left(\frac{d\pi}{a+2d}\right)\cos\left(\frac{d\pi}{b+2d}\right)\cos\left(\frac{d\pi}{c+2d}\right) \quad (\text{E-2}) \\ &= \frac{8}{\pi^3} \phi_0 \\ \phi_0 &\equiv \frac{(a+2d)(b+2d)(c+2d)}{abc} \cos\left(\frac{d\pi}{a+2d}\right)\cos\left(\frac{d\pi}{b+2d}\right)\cos\left(\frac{d\pi}{c+2d}\right) \end{aligned}$$

中性子束は $x=y=z=0$ のとき最大値1となるので、平均値に対して (E-2) 式の逆数を掛ければ最大値が求められることになる。

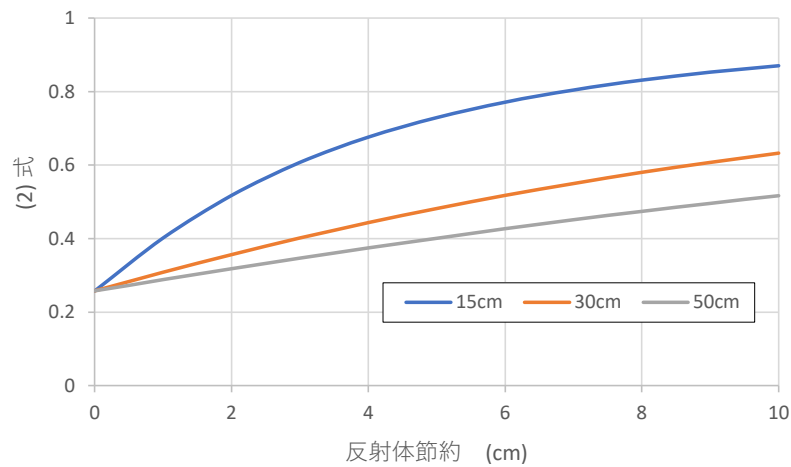
d は 10cm 以下の値であり、 a 、 b 、 c はそれより大きい値である。(E-2)式について炉心長を 15cm~50cm で変化させたときの反射体節約の依存性を図E-1に示す(ここで a 、 b 、 c はすべて同じ値であるとする)。この図より(E-2)式の値は $d=0$ のとき最小値となる。

すなわち平均値に対して (E-2) 式の逆数を掛けたとき最も大きな値となるのは反射体節約の値 $d=0$ のときで、そのときの値は

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

$$\frac{1}{\phi} = \frac{\pi^3}{8} \approx 3.88 \quad (\text{E-3})$$

となる。燃料板の発熱量は中性子束に比例するので、本解析においては発熱量を安全側に（高くなる側）に見積もるため、反射体節約 d の値は 0 とする。従って、発熱量の平均値に対して(E-3)式を掛けたときに発熱量の最大値となる。



図E-1 (E-2) 式の値 (各炉心長について反射体節約の長さ依存性)

燃料板の温度上昇量は以下のような手順で算出する。

- ① 過渡解析等により積算出力 (J) を求める
- ② 炉心に装荷された燃料板枚数と燃料ミート部の比熱から全熱容量を求める
- ③ 積算出力を全熱容量で割り算して平均的な温度上昇量を求める
- ④ ③の値に(E-3)式の値を掛け算する

2) 燃料板内の出力分布の考慮

今後、以下の内容を追加して燃料板の最高温度を評価する予定である。

燃料のセル計算による熱中性子束分布を固体減速炉心について図E-2～図E-4に、軽水減速炉心について図E-5～図E-6に示す。中性子スペクトルが硬い炉心と柔らかい炉心を対象とした。全てのセルで燃料ミート部（図のUと記載した箇所）の中心で中性子束が低下し、燃料板被覆のアルミニウムとの境界で中性子束が最大となっていることが判る。

発熱量の分布については核分裂率に比例するので、各炉心のセルについて全エネルギーで積分した核分裂率分布を求めた。図E-7に中性子束分布の燃料ミート部で最も大きかったLL1セルについての核分裂率分布を示す。

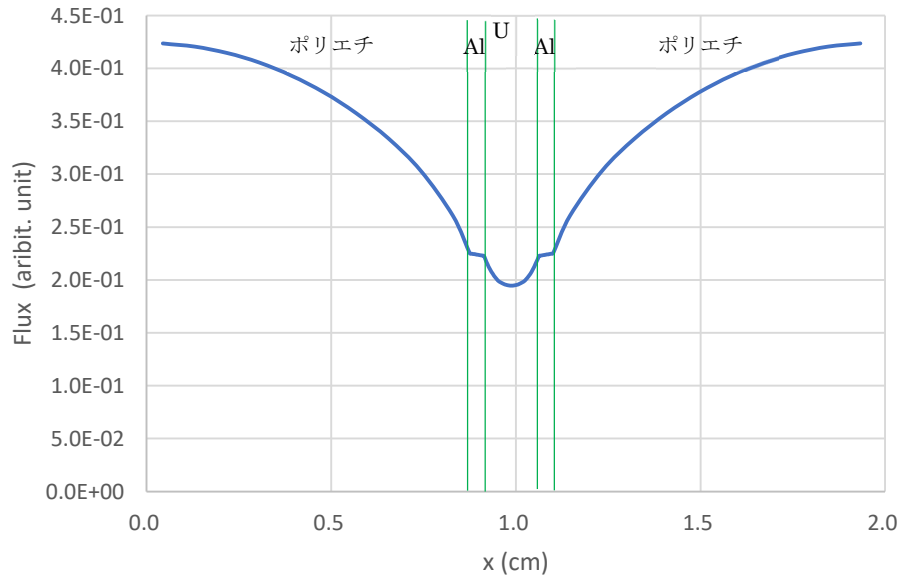
各セルの燃料ミート部の中性子束分布の平均値と最大値の比を表E-1に示す。固体減速炉心の燃料板を1枚使用したセルでFlux比は1.09、軽水減速炉心で1.01となっている

（燃料板を2枚使用したLL1では1.23と例外的に大きな値）。固体減速炉心のU-Mo燃料が軽水減速炉心に比べて厚く、しかも密度が高いためFlux比が大きくなると考えられる。

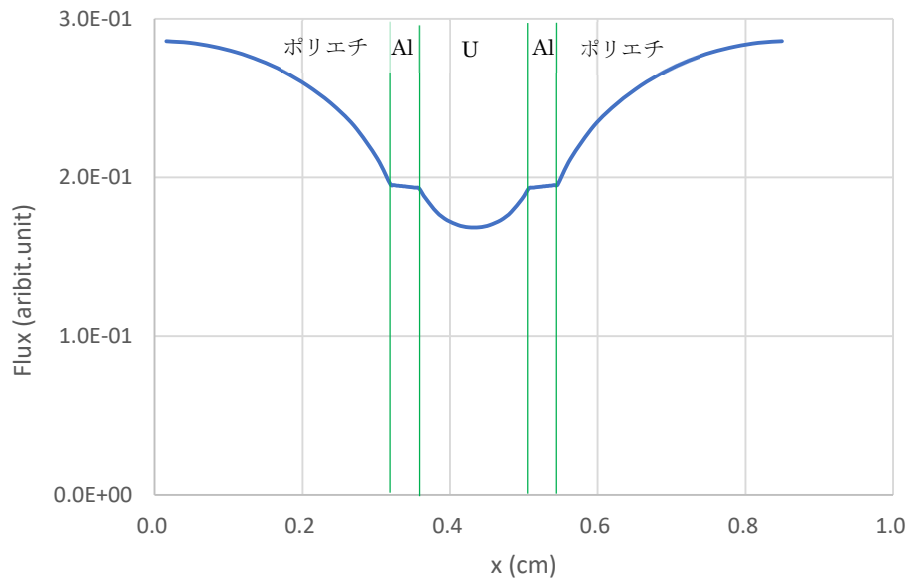
同様に各セルの燃料ミート部の核分裂率分布の平均値と最大値の比を表E-2に示す。軽水減速炉心については表E-1のFlux比の結果と変わらないが、固体減速炉心についてはやや小さな値となっている。これは固体減速炉心の燃料セルのほうが燃料ミート部が厚く、燃料ミート部での高速中性子束分布、すなわち高速核分裂分布の燃料ミート部で大きくなる程度が軽水減速炉心に比べて大きくなっているためであると考えられる。

燃料の最高温度を評価する際には1)で述べた温度の評価結果に対して、安全側に評価するために表E-1のFlux比に基づく値、すなわち固体減速炉心では1.09倍、軽水減速炉心では1.01倍の値とする。ただしLL1炉心については1.23倍とする。

「グレーのマスクング範囲は不表示情報」

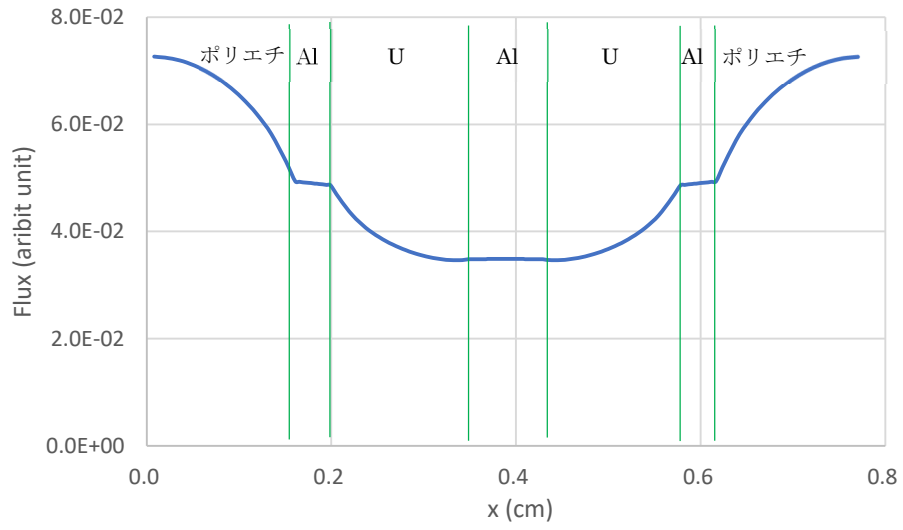


図E-2 L5.5 セル (燃料 1 枚 + 1/8" × 5.5 枚ポリエチレン) 熱中性子束分布

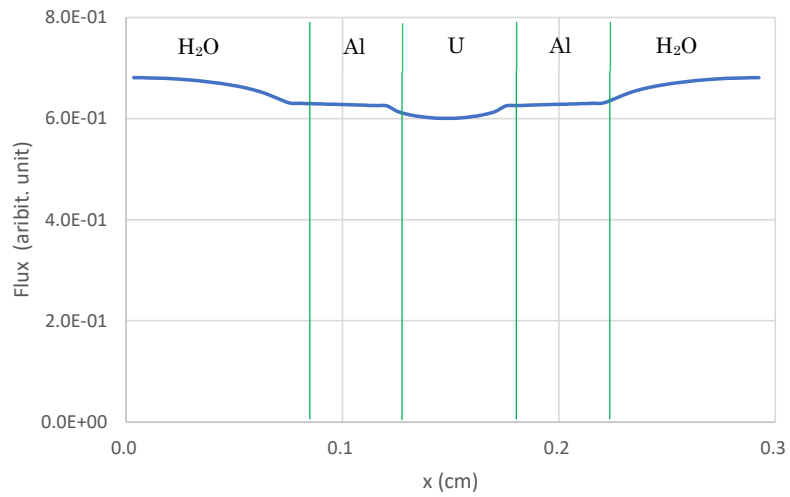


図E-3 L2 セル (燃料 1 枚 + 1/8" × 2 枚ポリエチレン) 熱中性子束分布

「グレーのマスクング範囲は不表示情報」

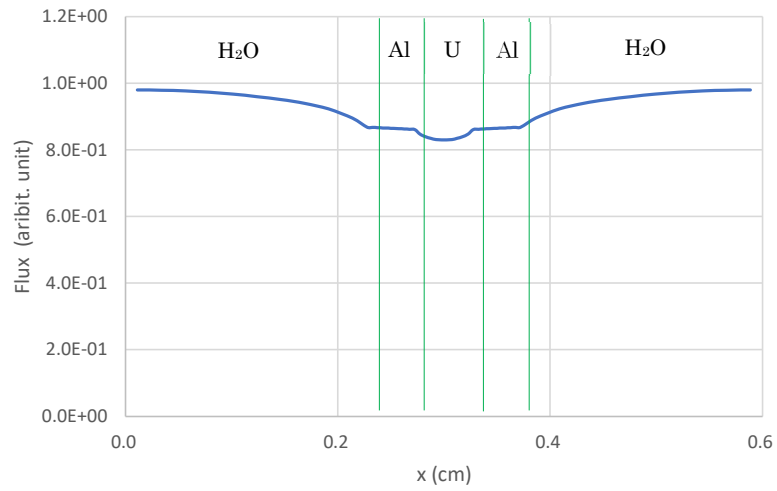


図E-4 LL1 セル (燃料 2 枚 + 1/8" × 1 枚ポリエチレン) 熱中性子束分布

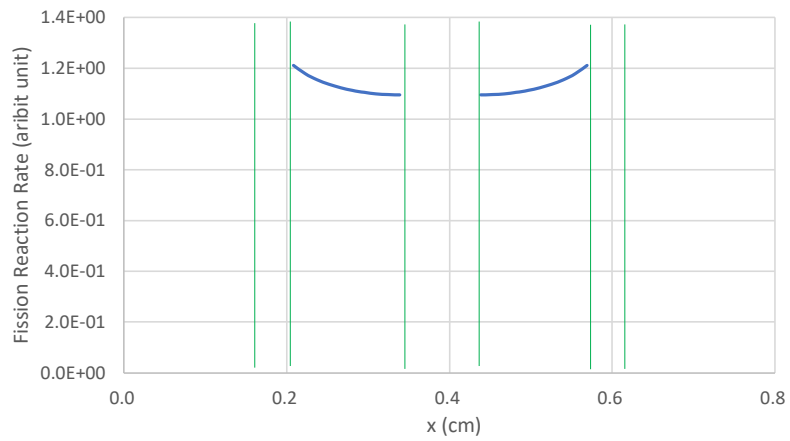


図E-5 軽水減速炉心 C30 セル 熱中性子束分布

「グレーのマスクング範囲は不表示情報」



図E-6 軽水減速炉心 C60 セル 熱中性子束分布



図E-7 LL1 セル (燃料 2 枚 + 1/8" × 1 枚ポリエチレン) 核分裂反応率分布

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表E-1 燃料板ミート部の Flux 比

	炉心名称	Flux 比
固体減速炉心	L5.5 炉心	1.09
	L2 炉心	1.09
	LL1 炉心	1.23
軽水減速炉心	C30 炉心	1.01
	C60 炉心	1.01

Flux 比 : (中性子束最大値) ÷ (中性子束平均値)

表E-2 燃料板ミート部の核分裂率比

	炉心名称	核分裂率比
固体減速炉心	L5.5 炉心	1.06
	L2 炉心	1.05
	LL1 炉心	1.08
軽水減速炉心	C30 炉心	1.01
	C60 炉心	1.01

核分裂率比 : (核分裂率最大値) ÷ (核分裂率平均値)

【補足-F】

燃料の温度上昇について

1) 通常運転時の温度上昇について

設置変更承認申請に KUCA の積算出力について、1 ヶ月につき 100Wh 以下とすることが定められているので、出力 100W で 1 時間連続運転した際の温度上昇を求める。ここで炉心は燃料 1 枚当たりの温度上昇が大きくなる余剰反応度がゼロの臨界状態 ($k_{eff}=1$) であるとするとする。

軽水減速炉心の C30 炉心の燃料板 1 枚当たりの体積、熱容量等を表 E-1 に示す。なお、高さ方向は [マスキング] アルミフレームの下部のブロック、燃料板上部と下部の軽水は無視している。(図 F-1)

C30G0(4 列)炉心の $k_{eff}=1$ のときの [マスキング] 例えば発熱がすべて燃料ミート部 (U_3Si_2) のみの温度上昇に寄与したとすると、
[マスキング]
となる。

同様に (燃料 U_3Si_2+Al 被覆)、(燃料 U_3Si_2+Al 被覆+燃料板間軽水)、(燃料 U_3Si_2+Al 被覆+燃料板間軽水+アルミフレーム) の各ケースについて温度上昇を求めた。

固体減速炉心については (燃料 U-Mo)、(燃料 U-Mo+Al 被覆)、(燃料 U-Mo+Al 被覆+ポリエチレン)、(燃料 U-Mo+Al 被覆+ポリエチレン+アルミさや管) の各ケースについて温度上昇を求めた。固体減速炉心の L5.5 炉心の燃料板 1 枚当たりの体積、熱容量等を表 F-3 に示す。

結果を表 F-2、F-4 に示す。軽水減速炉心ではアルミフレームまで含めた場合の温度上昇は 2°C 以下、固体減速炉心ではアルミさや管まで含めた場合の温度上昇は 3°C 以下である。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

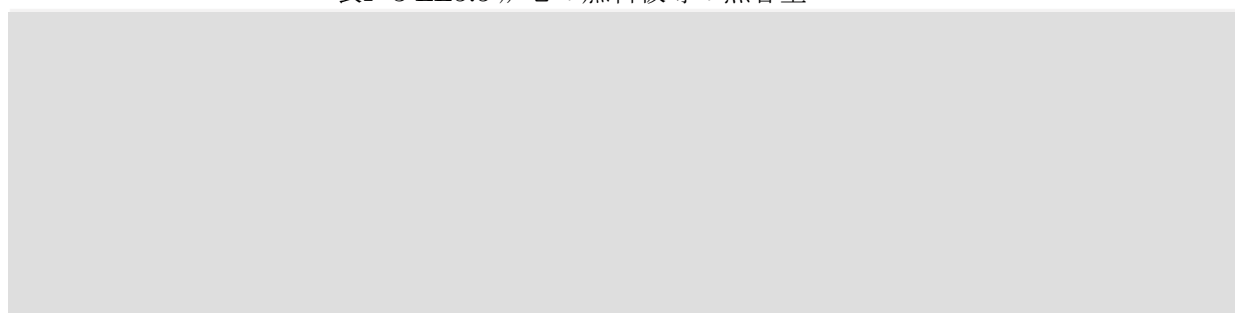
表F-1 C30 炉心の燃料板等の熱容量



表F-2 軽水減速炉心の 100W×1 時間運転時の温度上昇 (°C)

炉心名称		温度上昇選択箇所			
		燃料ミート	燃料ミート +Al 被覆	燃料ミート +Al 被覆+ 軽水	燃料ミート+ Al 被覆+軽水 +フレーム
C30(4 列)		18.4	5.0	1.9	1.7
C45(4 列)		36.5	10.0	2.2	2.0
C60(4 列)		34.8	9.5	2.2	1.9

表F-3 LL5.5 炉心の燃料板等の熱容量



「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表F-4 固体減速炉心の 100W×1 時間運転時の温度上昇 (°C)

炉心名称	温度上昇選択箇所			
	燃料ミート	燃料ミート+ Al 被覆	燃料ミート+ Al 被覆+ポリ エチ	燃料ミート+ Al 被覆+ポリ エチ+さや管
LL1-30	9.2	5.8	2.6	0.5
L3-30	59.7	37.7	8.1	2.8
L5.5-30	66.8	42.2	5.5	2.5

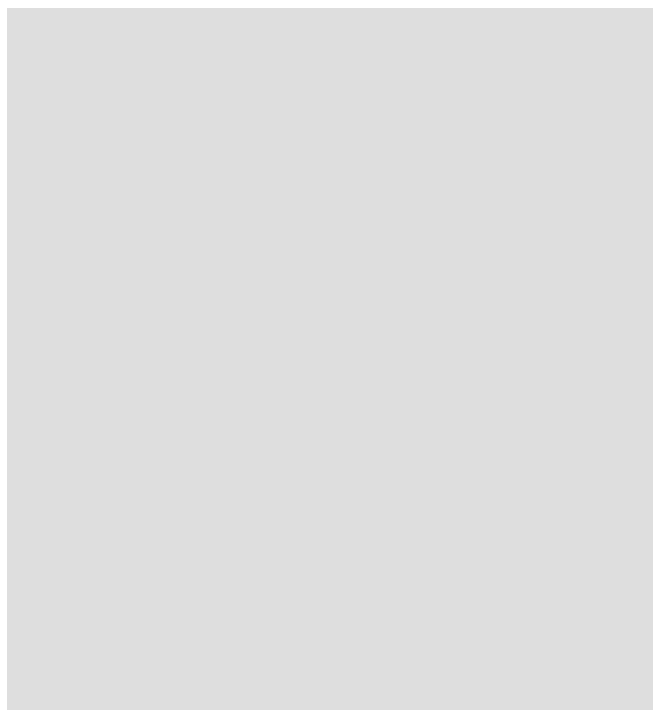


図 F-1 軽水減速炉心の燃料フレーム断面図

定常時の燃料板内での温度分布について考察する。

軽水減速炉心のうち、

C45G0(4列)炉心を考える。

燃料板と軽水を含む燃料セルの一次元無限平板で考える。(図 F-2)

この燃料セルについて燃料ミート部において一様に発熱するとして、一次元の熱伝導方程式

$$c(x)\rho(x)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + Q(x,t) \quad (F-1)$$

を考える。

ここで、

$T(x, t)$: 位置 x 、時刻 t の温度 (°C)、 $Q(x, t)$: 位置 x 、時刻 t の発熱率 (W/m³)

$c(x)$: 比熱 (J/kg/°C)、 $\rho(x)$: 密度 (kg/m³)、 $\lambda(x)$: 熱伝導率 (W/m/°C)

とし、比熱、密度、熱伝導率は各物質中でそれぞれ時刻によらず一定値であるとする。

熱伝導率 λ について、燃料板ミート部は 被覆材のアルミニウムは という値に対して、軽水は 0.6 (W/m/°C) と 2 桁以上小さな値であるためアルミニウム被覆材表面から軽水には熱は伝わり難いので、ここでは仮に燃料ミート部と被覆材のみの温度が上昇すると考え、炉心の出力を 100W として $t=0$ にステップ状に燃料板ミート部において均一に発熱が開始したとする。

発熱開始後 1 秒後の燃料板内の温度分布を図 F-4 に示す。発熱部である燃料板中央 ($x=0$) において温度は最大値になっているものの、被覆材との温度差は小さく燃料板内で温度分布はほぼ一様になってことから、熱は直ちに燃料板ミート部から燃料板全体に拡散しているといえる。図 F-5 に 10 秒後までの燃料板内の温度変化を示すが、ほぼ一様に温度が上昇していることがわかる。

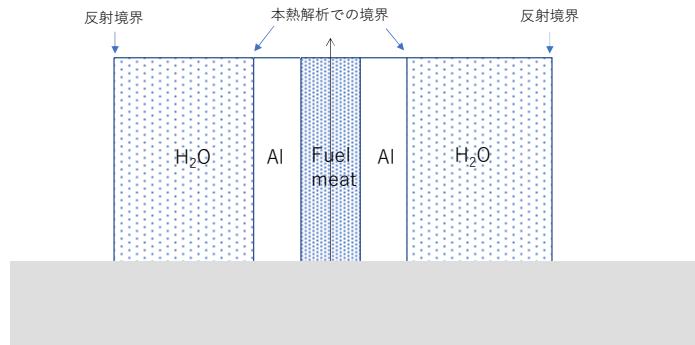
固体減速炉心の燃料板についても同様の解析を行った。燃料板はミート部 (U-Mo-Al) 被覆のアルミニウム 燃料板間のポリエチレン厚さ約 17.5mm である (図 F-3)。

燃料板枚数の少ない LL5.5-30 炉心において軽水減速炉心の場合と同じく炉心の出力を 100W として $t=0$ にステップ状に燃料板ミート部において均一に発熱が開始したとして燃料ミート部と被覆材のみの温度が上昇すると考え、発熱開始後 1 秒後の燃料板内の温度分布を図 F-6 に示す。図 F-5 の軽水減速炉心の場合と同様にほぼ一様に温度が上昇していることがわかる。

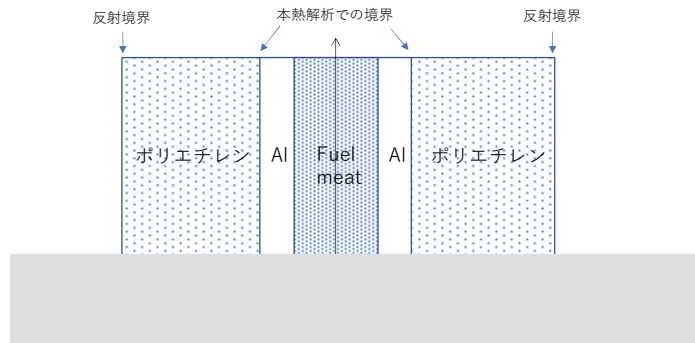
「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

これらの結果より、表F-2 および表 F-4 に示した各炉心において出力 100W で 1 時間運転を行ったときの温度上昇量は、少なくとも温度上昇選択箇所を「燃料ミート+Al 被覆」とした結果より小さくなると考えられる。実際には軽水、ポリエチレン、燃料フレーム、燃料さや管等の燃料板周囲へも温度は伝達されるので、燃料板の温度上昇量はこの値より小さくなる。

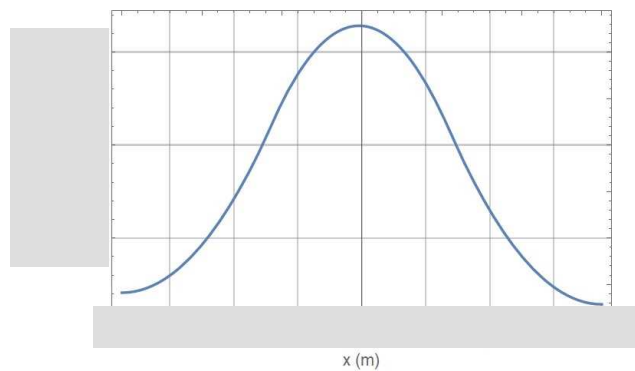
「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



図F-2 C45 燃料セルの一次元無限平板

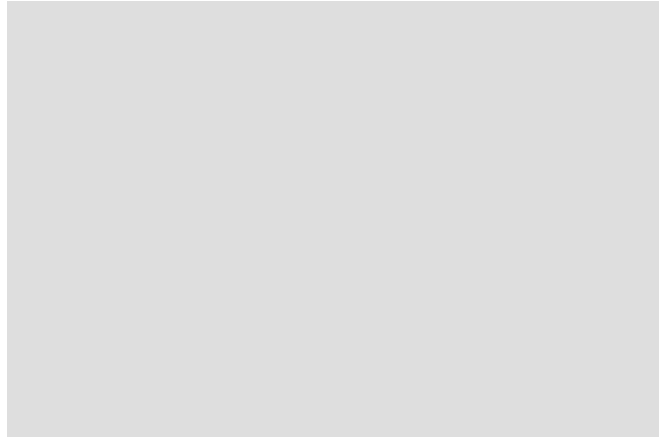


図F-3 L5.5 燃料セルの一次元無限平板

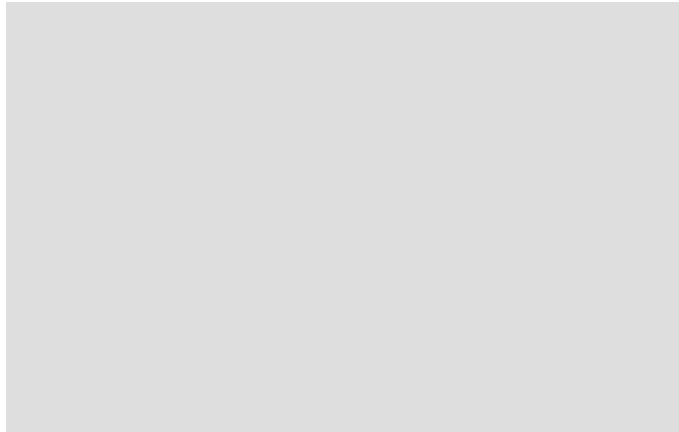


図F-4 C30 燃料セル内の温度分布 (1 秒後)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



図F-5 C45 炉心の燃料板内の温度分布（10 秒後まで）



図F-6 L5.5 炉心の燃料板内の温度分布（10 秒後まで）

