

京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

【補足説明資料 (まとめ資料)】

【概要、装置説明、規則等】	1
【燃料について】	50
【添付書類八】	84
【添付書類十】	197
【トリウム保管庫について】	394
【指摘事項】	419
【設置許可基準規則との整合性】	
【トリウム設置許可基準規則との整合性】	451

この目次での各項目のページ番号は右下のゴシック体のページ番号に対応している
各項目の目次に記載したページ番号は真ん中下のページ番号に対応している

京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

【まとめ資料】

【概要、装置説明、規則等】	1
【燃料について】	50
【添付書類 8】	84
【添付書類 10】	197
【トリウム保管庫について】	395
【指摘事項】	420

この目次での各項目のページ番号は右下のゴシック体のページ番号に対応している
各項目の目次に記載したページ番号は真ん中下のページ番号に対応している

京都大学複合原子力科学研究所

1. 変更の経緯

京都大学複合原子力科学研究所（旧：京都大学原子炉実験所）の臨界実験装置（KUCA）は昭和47年8月6日に運転を開始した臨界実験装置で、平成28年5月11日に新規基準に適合させるための変更等について承認され、平成29年6月20日に運転を再開して現在に至っている。京都大学複合原子力科学研究所敷地内のKUCAの配置を図1に、KUCAの臨界集合体棟の平面図を図2に、KUCAに係る原子炉設置変更の経緯を表1にそれぞれ示す。

2. 変更の概要

申請書ではこれまでの高濃縮ウラン燃料の記載に加えて新たな低濃縮ウラン燃料の記載を追加しており、高濃縮ウラン燃料に関する記載内容は変更していない。申請書では両方の燃料の記載が書かれているが、高濃縮ウラン燃料と低濃縮ウラン燃料を同時に炉心で使用することは行わないことを記載している。炉心最大出力、核的制限値、安全保護回路等に関する内容の変更は行わない。

KUCAには図3、図5に示す軽水減速架台（1基）と図4、図6に示す固体減速架台（2基）の2種類の炉心があり、それぞれの架台で使用する燃料に低濃縮ウラン燃料を追加する。

2. 1 軽水減速架台用燃料

現在、軽水減速架台用燃料としては標準型燃料板と彎曲型燃料板があるが、彎曲型燃料板は前回の設置変更において燃料として炉心では用いないことにしている。

標準型燃料板は図7に示す [] 板状燃料で、厚さ [] アルミニウムで挟み込んだ構造になっており、1枚当たりの [] この燃料板を図9、図10に示す [] アルミニウム製の標準型燃料板支持フレームの溝にはめ込んで燃料集合体を構成して炉心で使用する（燃料板挿入時には上部のネジで留めているハンドルを取り外して作業を行う）。燃料板支持フレームは溝の間隔の異なるものを使用することにより炉心の中性子スペクトルを変更することができ、現在は燃料板ピッチが約3.0mm、約3.5mm、約4.5mmの3種類の燃料板支持フレームを所有している。

今回の申請書に記載した低濃縮ウラン燃料板は現在の標準型燃料板と全く同じ大きさのもので、 [] ウランアルミニウム合金から [] ウランシリサイド (U_3Si_2)・アルミニウム分散型燃料（以下、ウランシリサイド燃料 [] に変更したもので、1枚当たりの ^{235}U 含有量 [] である。ウランシリサイド燃料はKUR、JRR-3、JMTRなどの研究炉で広く使用されているものと同じである（芯材の厚さはKURと同じ）。高濃縮ウランと低濃縮ウラン燃料の燃料板には刻印を付けることで容易に区別できるようにする。

2. 2 固体減速架台用燃料

現在の固体減速架台用燃料は図 8 に示す [redacted] 角板で、濃 [redacted] ウランアルミニウム合金を耐放射線性プラスチック [redacted] 被覆したものである。1 枚当たりの [redacted] この角板を減速材（ポリエチレン、黒鉛等）の板と組み合わせて図 11 に示す [redacted] アルミニウム製のさや管の中へ挿入して燃料集合体を構成して炉心で使用する。

今回の申請書に記載した低濃縮ウラン燃料の角板は、ウランモリブデン（U-7Mo、U に Mo を 7wt%混ぜたもの）・アルミニウム分散型燃料材（以下、ウランモリブデン燃料）をアルミニウムで被覆したもので、 [redacted]、燃料芯材の大きさは [redacted]、1 枚当たりの [redacted] である。製造方法としてはアルミニウム製の底板付き額縁枠に燃料芯材を入れて、上から [redacted] アルミニウム板を被せた後に周囲をレーザー溶接するものである。

ウランモリブデン燃料はこれまで研究炉で広く使用されてきたウランシリサイド燃料に代わる燃料として世界各国の研究機関において開発された燃料である。KUCA は最大出力 100W であるため燃焼度はほとんど無視できるくらい低いが、これまでに 50%以上の燃焼度までの照射実験を含む多くの研究実績があり、高出力の研究炉での使用に耐えるだけの十分な核分裂生成物の保持能力があることが確認されている。

表1 京都大学臨界実験装置の原子炉設置変更承認の経緯

承認年月日	承認番号	備考
昭和47年 8月24日	47原第7905号	臨界実験装置 (KUCA) の増設
昭和50年 6月 3日	50原第5332号	KUCA の重水反射体の追加
昭和52年 4月12日	52安 (原規) 第120号	KUCA 彎曲型燃料体の製作
昭和55年 8月25日	55安 (原規) 第175号	KUCA 中濃縮ウラン彎曲型燃料体の製作
昭和59年 2月28日	59安 (原規) 第44号	KUCA の2分割混合炉心の構成
平成17年10月27日	16学文科科第960号	中性子発生設備の追加、安全保護回路の改造
平成28年 5月11日	原規規発第16051111号	新規制基準に適合させるための変更等
令和2年 8月31日	—	保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する書類届出

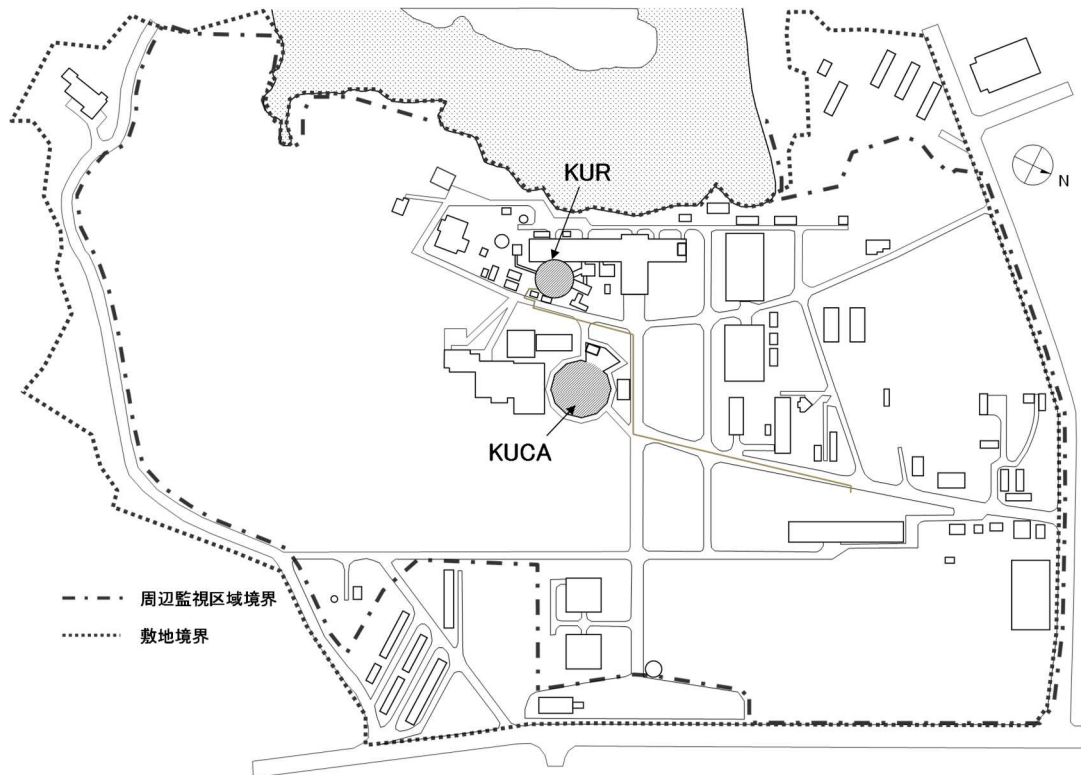


図1 京都大学複合原子力科学研究所 施設配置図

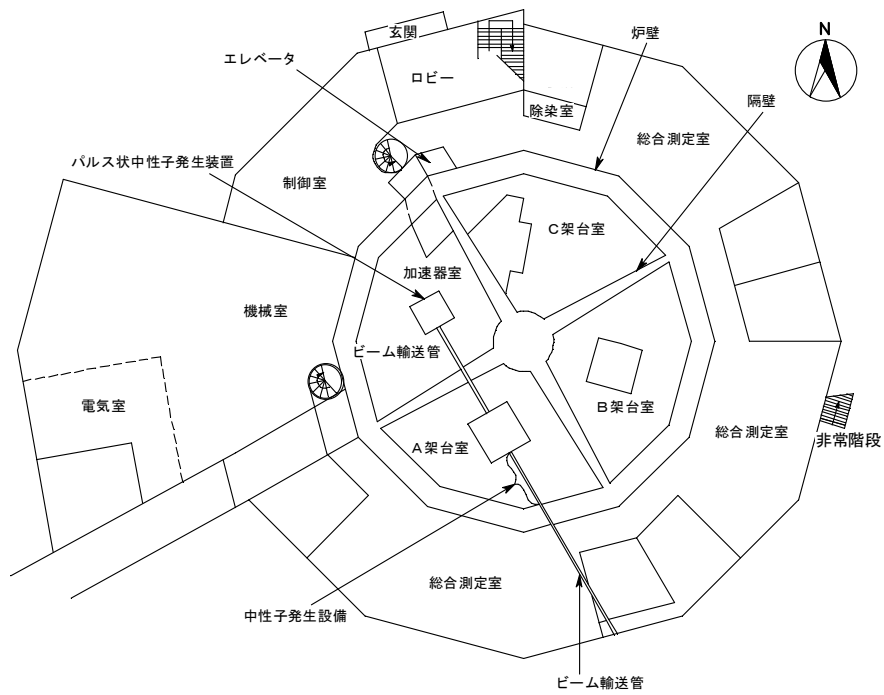
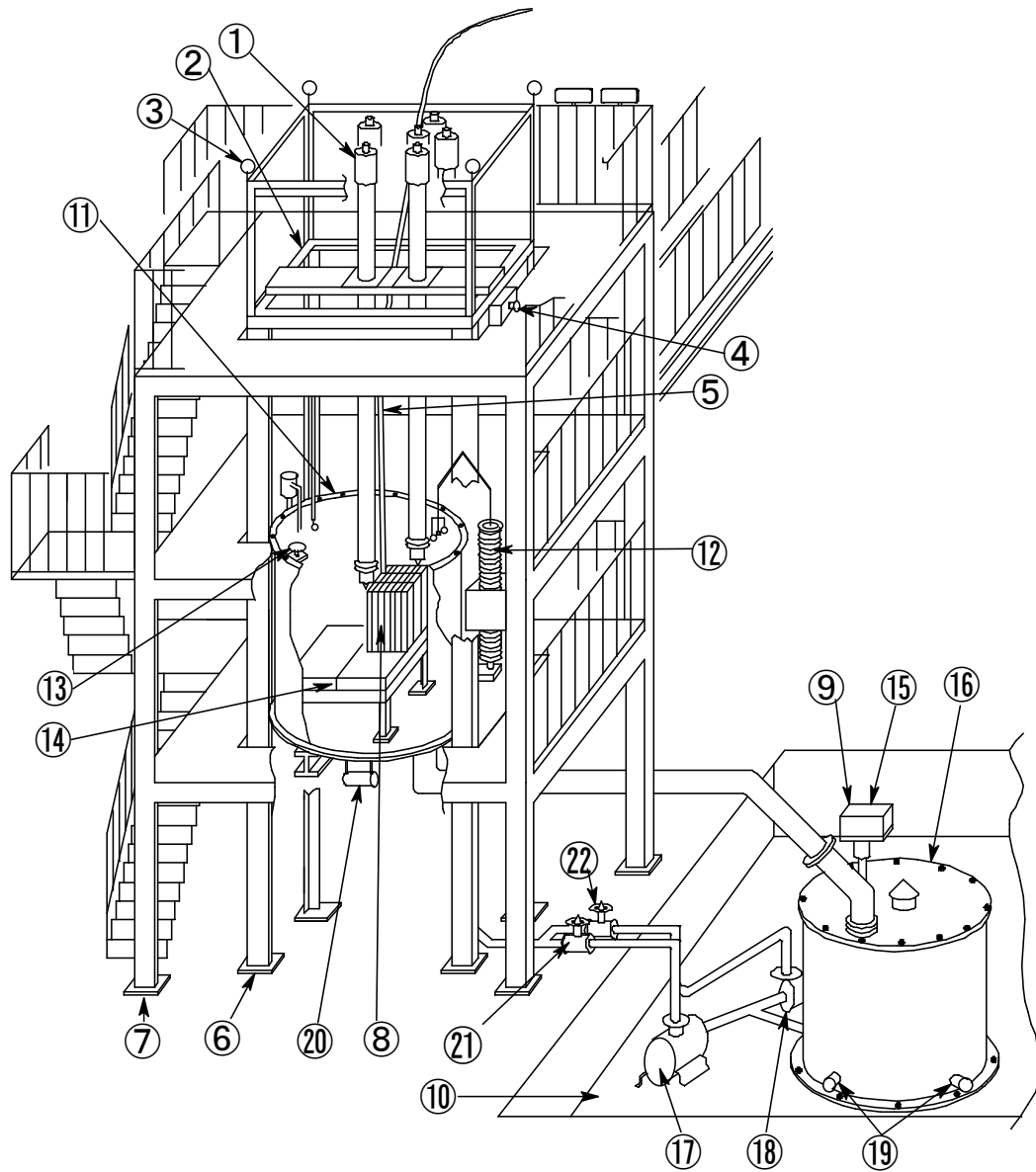
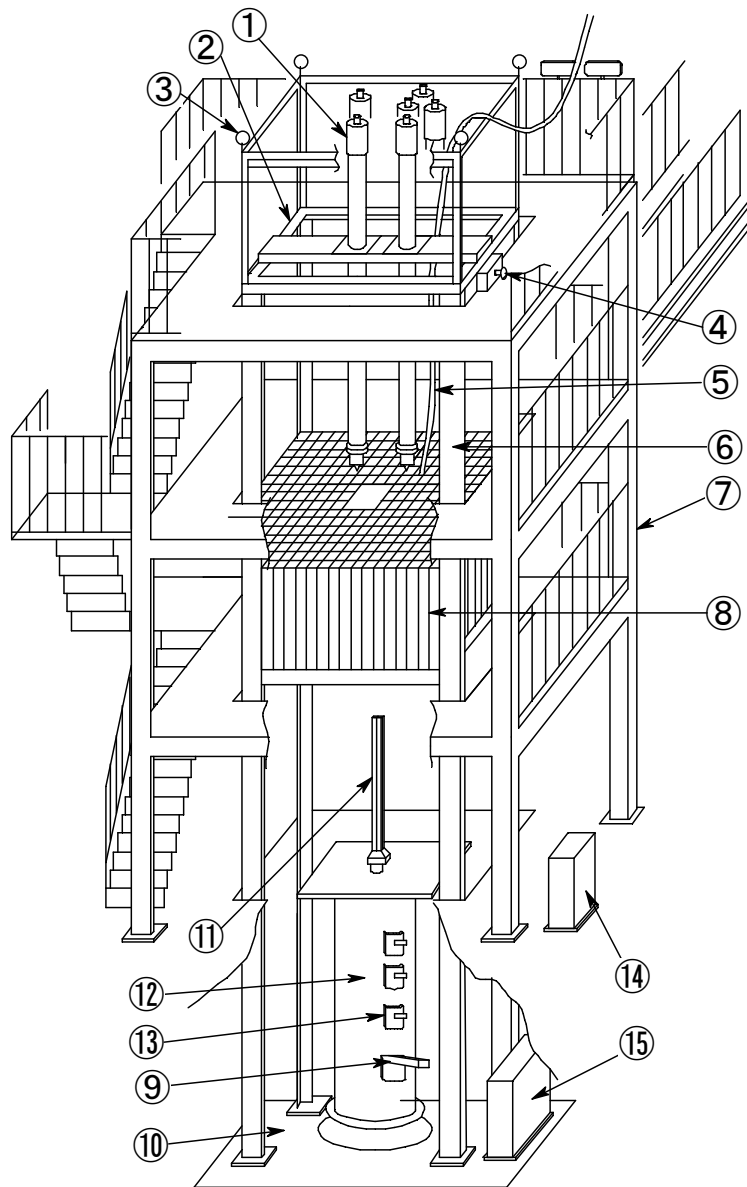


図2 臨界集合体棟 1階 平面図



- | | | |
|----------------|-------------|-------------|
| 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 格子板 | 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3 軽水減速架台



- | | | | |
|---|--------------|---|-----------|
| ① | 制御棒駆動装置 | ⑨ | 親子キー式ロック |
| ② | 制御棒駆動装置固定板 | ⑩ | ピット |
| ③ | クレーンつり上げ用フック | ⑪ | 中心架台 |
| ④ | ロックピン | ⑫ | 中心架台駆動装置 |
| ⑤ | 中性子源案内管 | ⑬ | ストッパ |
| ⑥ | 架台支持構造 | ⑭ | 中心架台現場操作盤 |
| ⑦ | 足場 | ⑮ | 油圧ユニット |
| ⑧ | 炉心 | | |

図4 固体減速架台

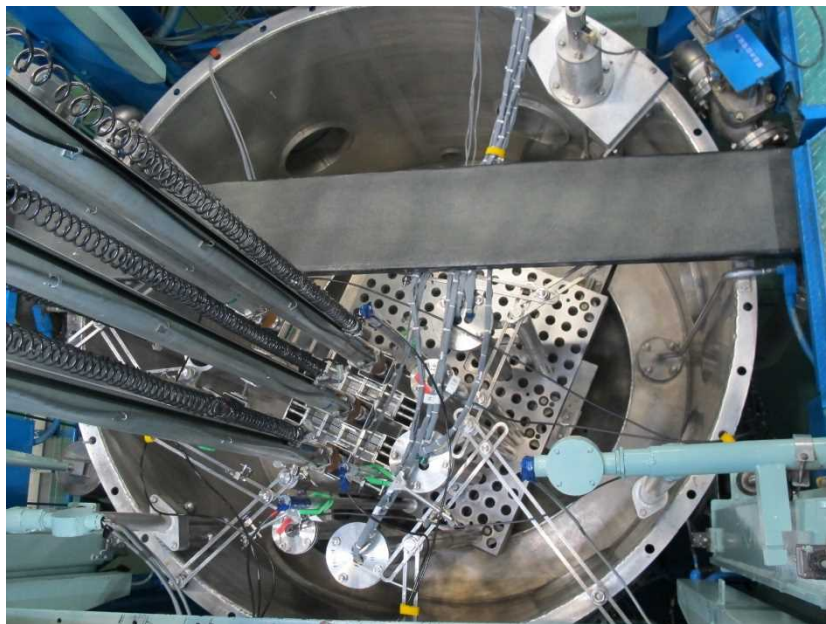


図5 軽水減速架台（写真）

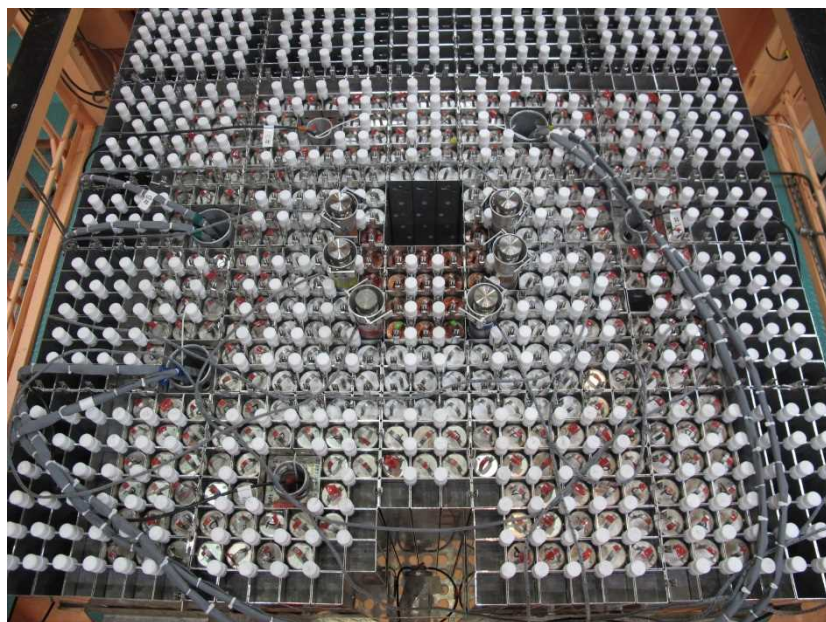
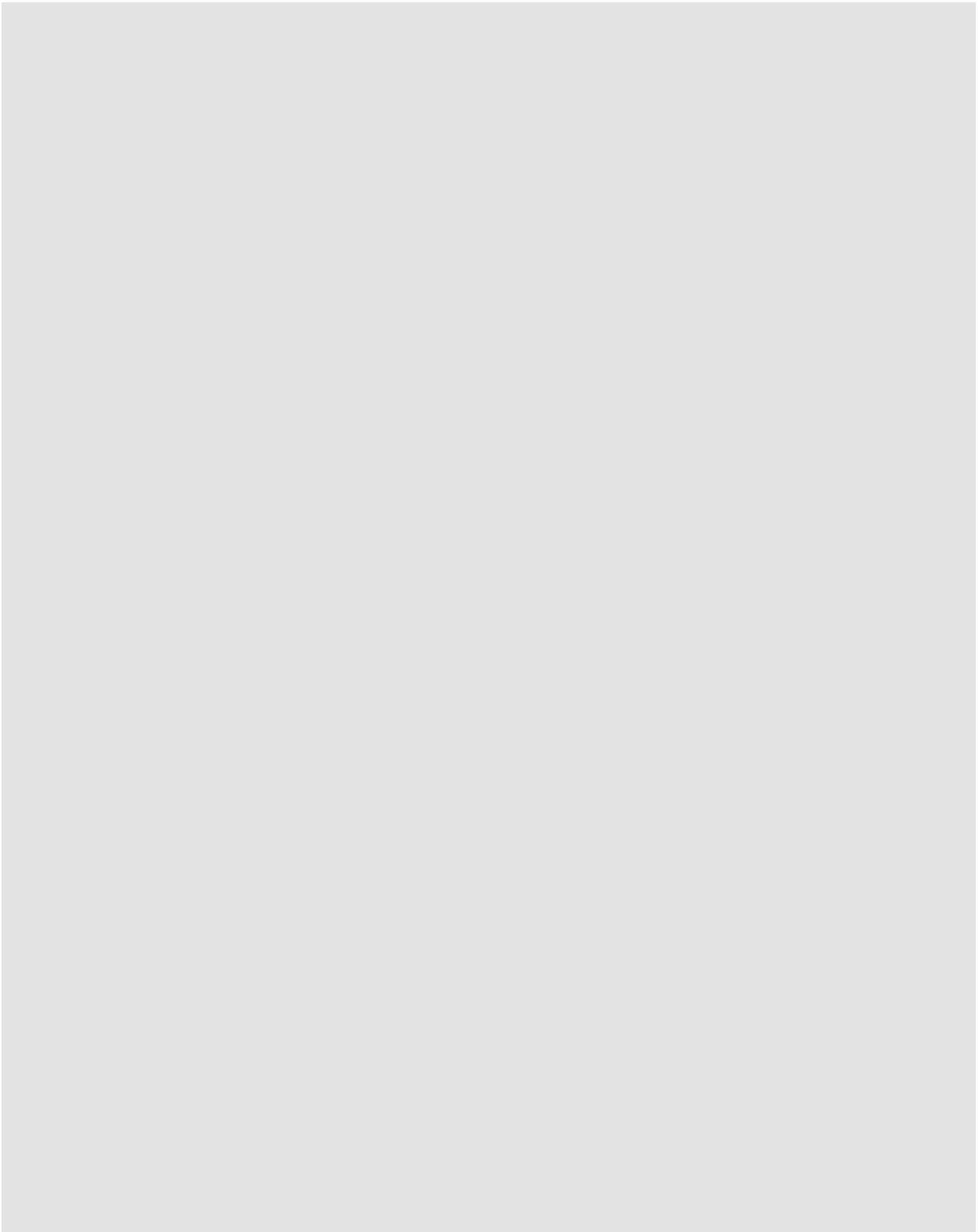


図6 固体減速架台（写真）（制御棒駆動機構無し）



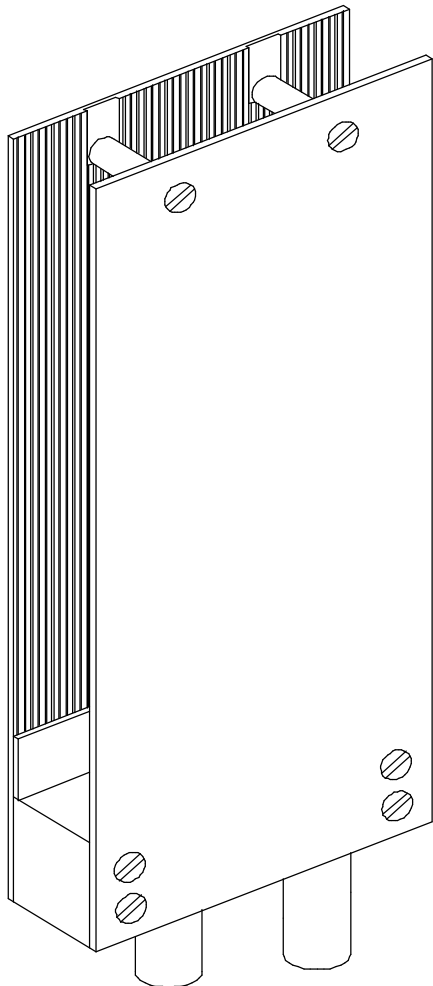


図 9 軽水減速架台用燃料板支持フレーム

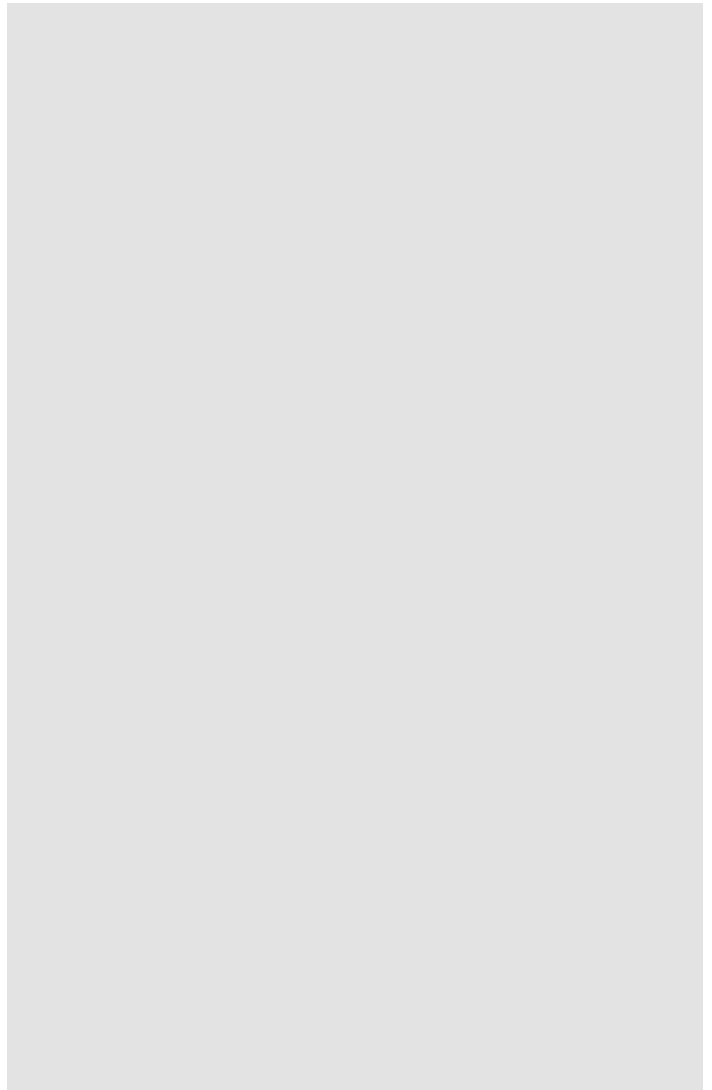


図 10 軽水減速架台用燃料板支持フレーム
(燃料板装荷時の側面図)

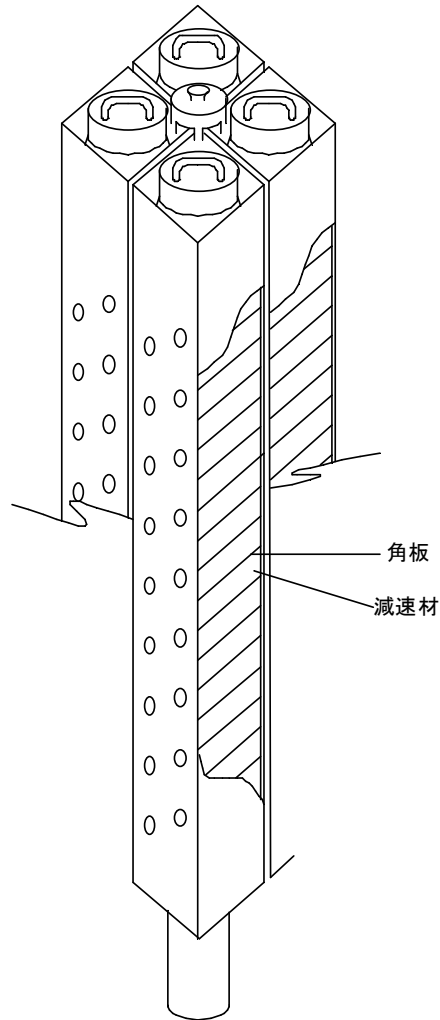


図 11 固体減速架台用燃料集合体
(さや管に角板、減速材を挿入)

【補足A KUCA の制御設備、核計装設備について】

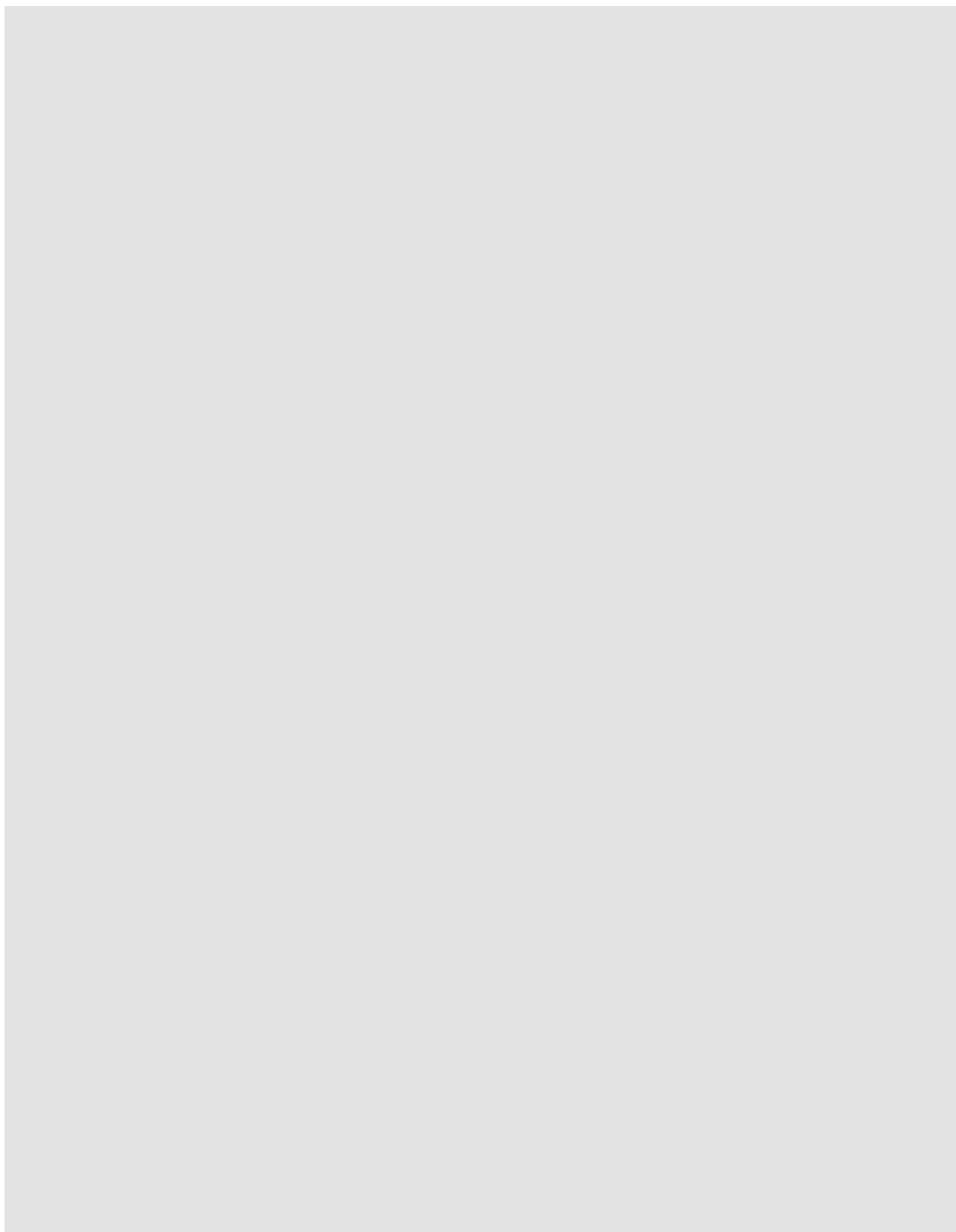
1) KUCA の制御設備は以下の通りである。

- 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、制御用モーター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

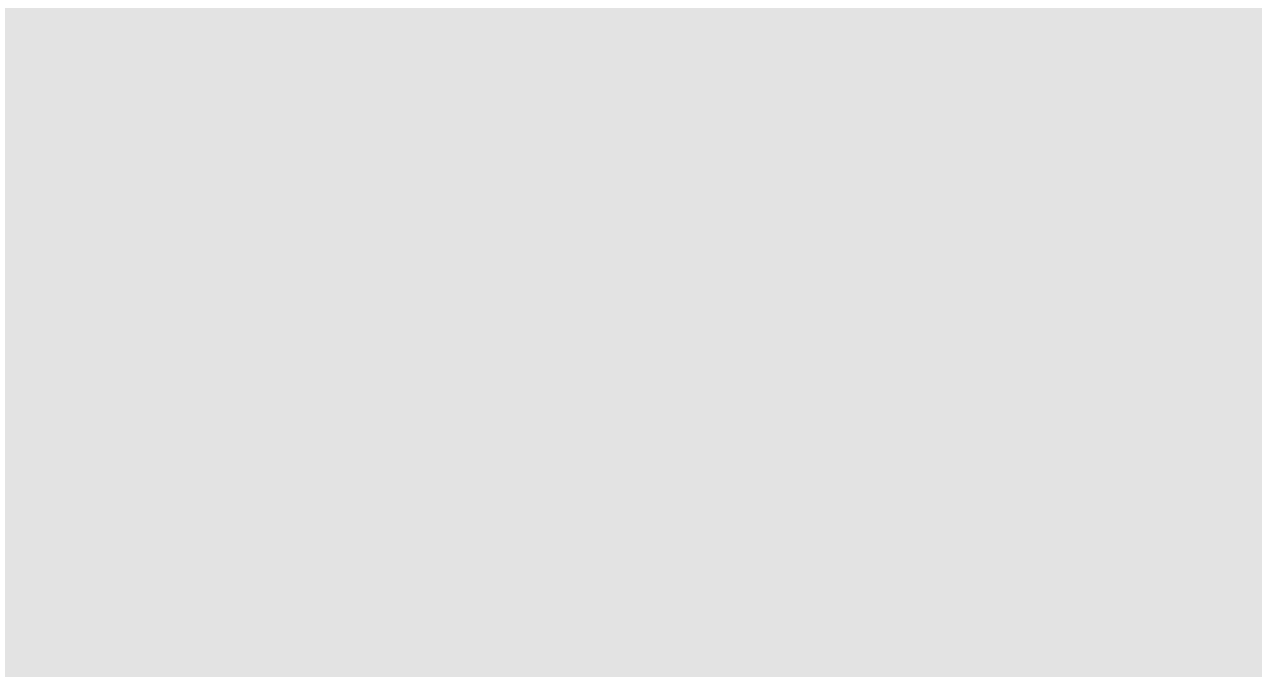
- ② 中心架台（固体減速炉心）（図 A-2）
 - ・A 架台では 3 行×3 列、B 架台では 5 行×5 列
 - ・下方から油圧ポンプにより油圧をかけることで上昇させる。上昇途中でストップが 3 箇所があり、各ストップを通過するごとに上昇速度が遅くなる（表 A-1）。
 - ・炉心の他の集合体と同じ高さになったところ（中心架台上限）で停止し、油圧ポンプを駆動させ続けて上限を維持する。
 - ・スクラム信号発生時に油圧ポンプの電源を切って下降させる。上限から 105cm 落下するまで 12 秒以下
 - ・中心架台が上限にないと C1～C3 の制御棒は上昇できない

- 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、上部のリンク機構を折曲げてカムをリンク機構に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

2) 運転手順は以下の通りである。

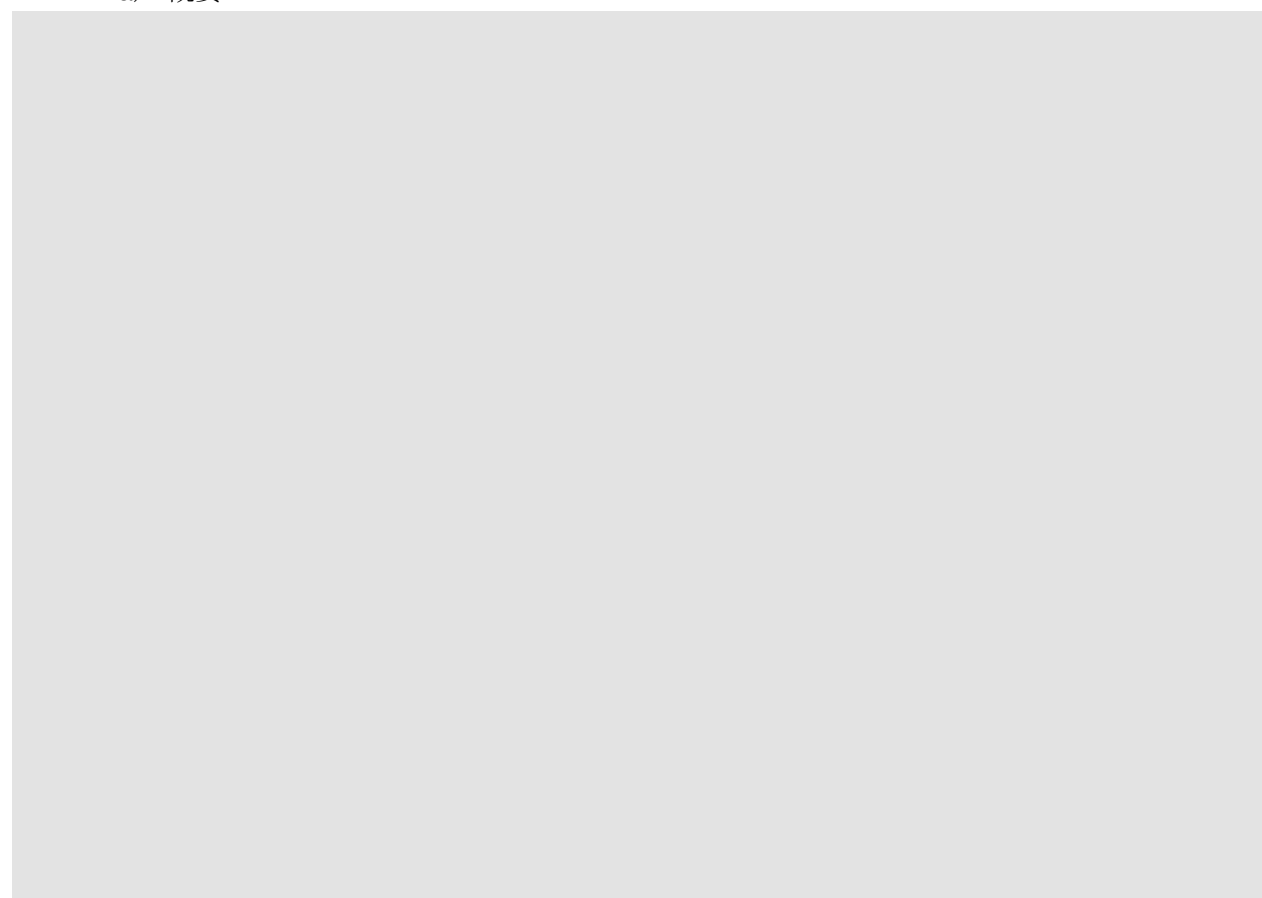


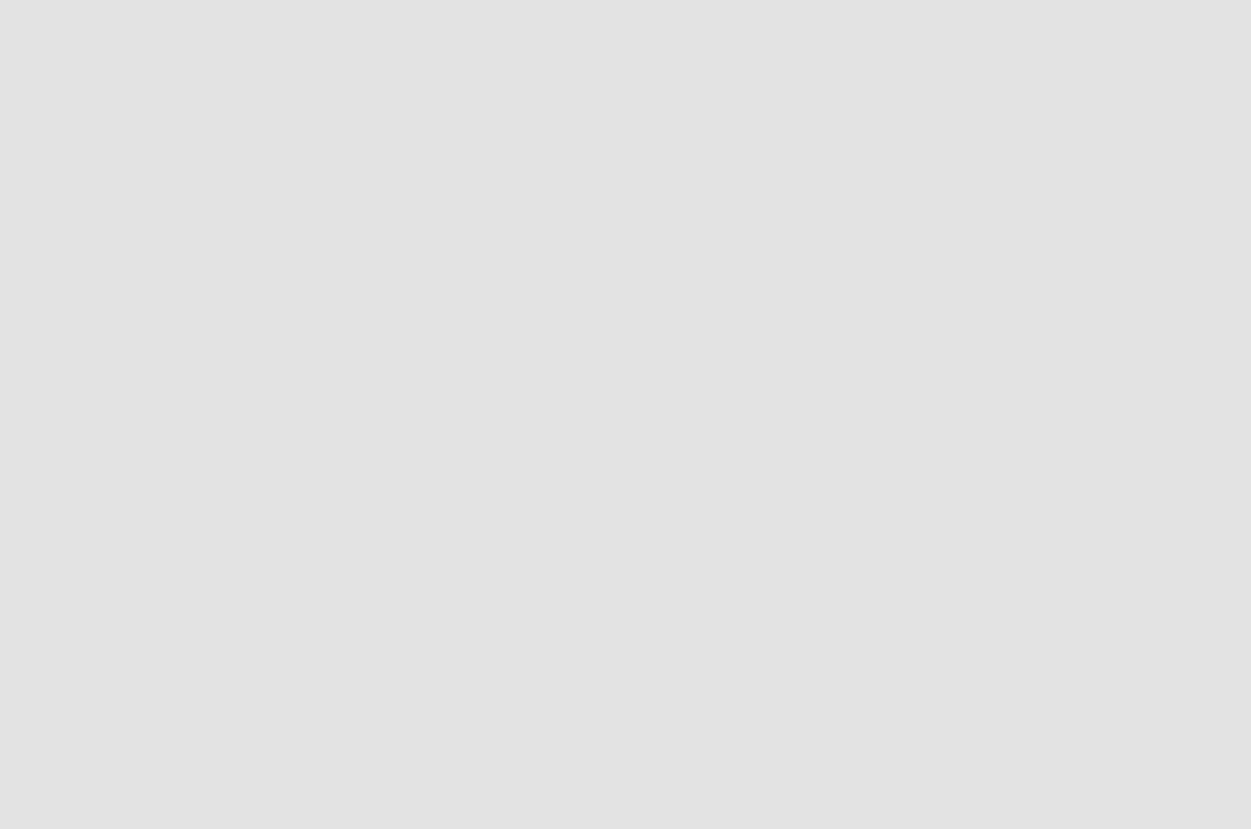
3) KUCA の核計装系は以下の通りである。



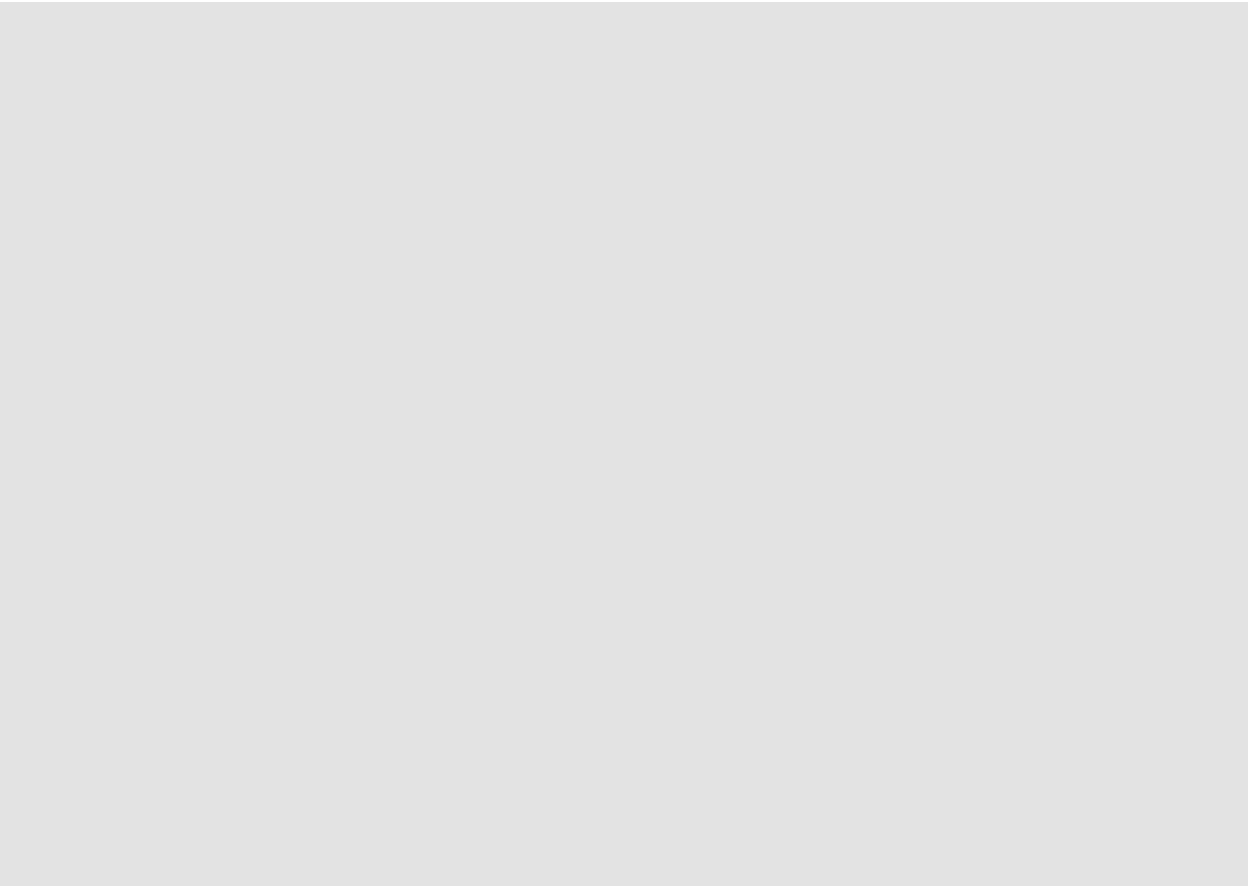
② 線型出力計系 (Lin-N)

a) 概要

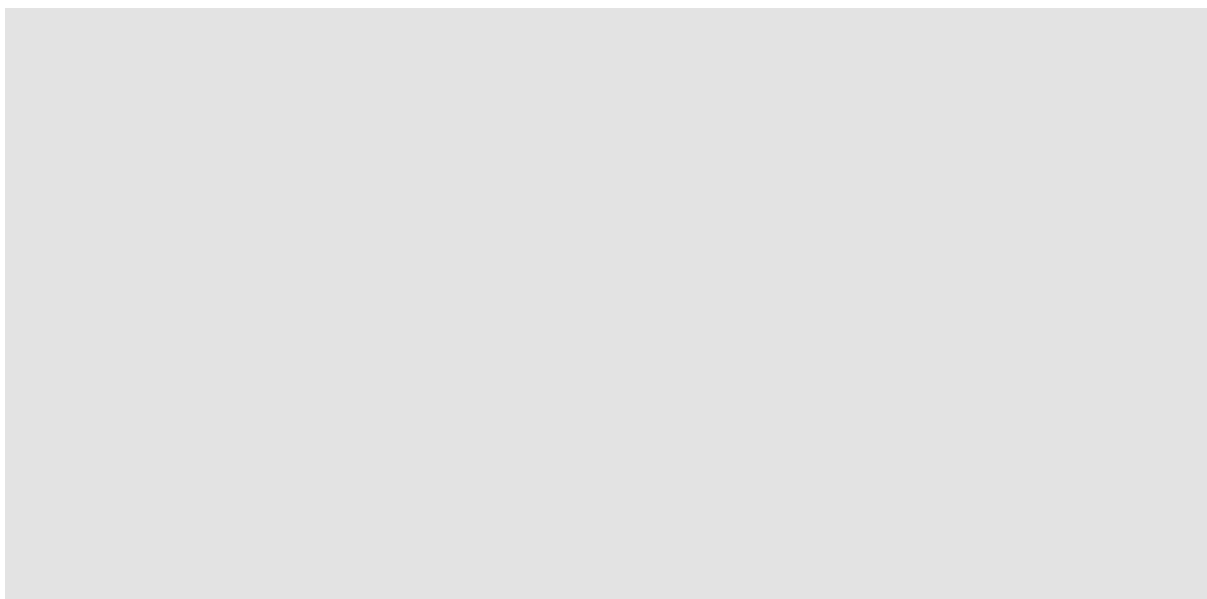




③ 对数出力炉周期系 (Log-N)



④ 安全出力系



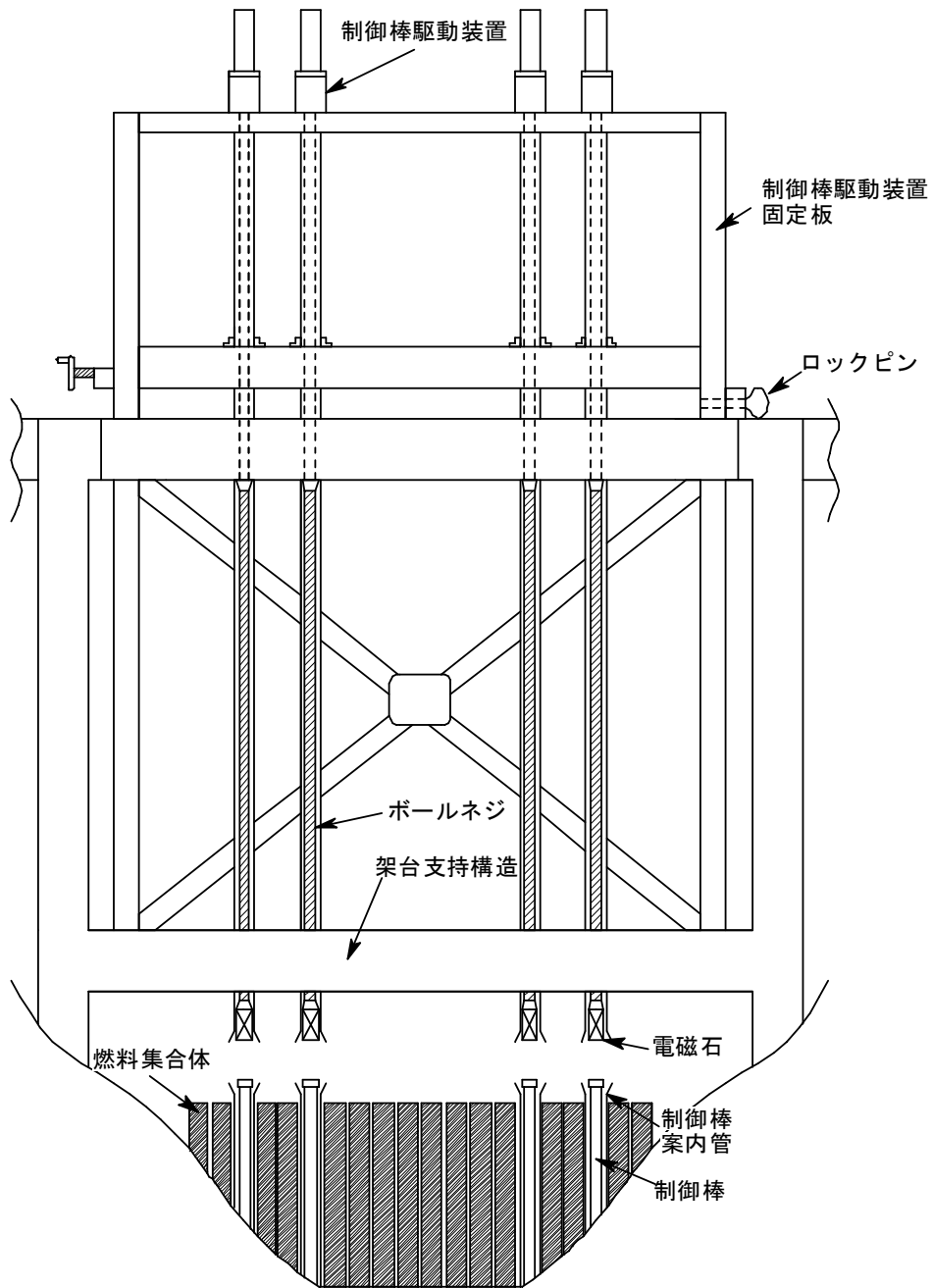
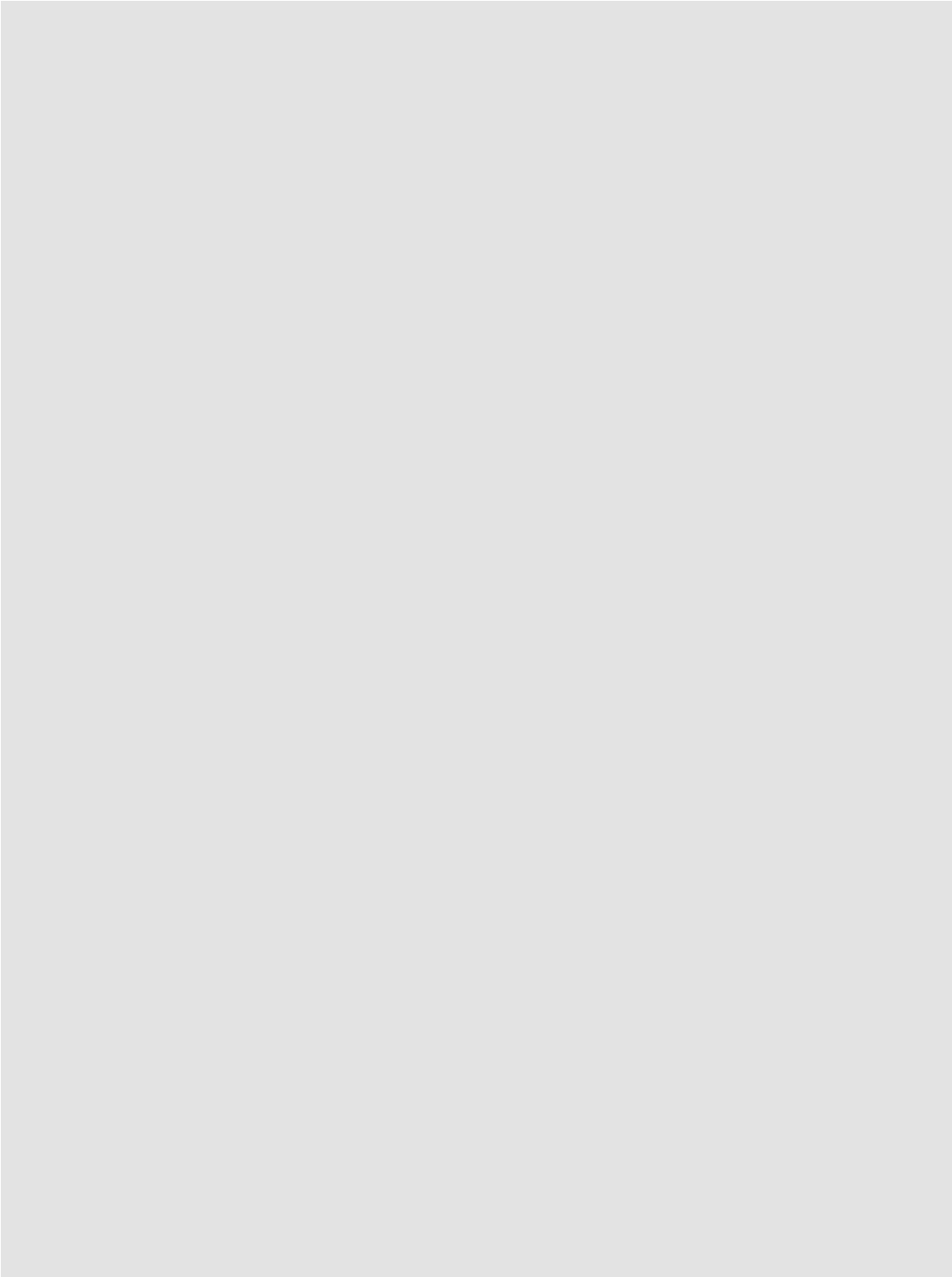
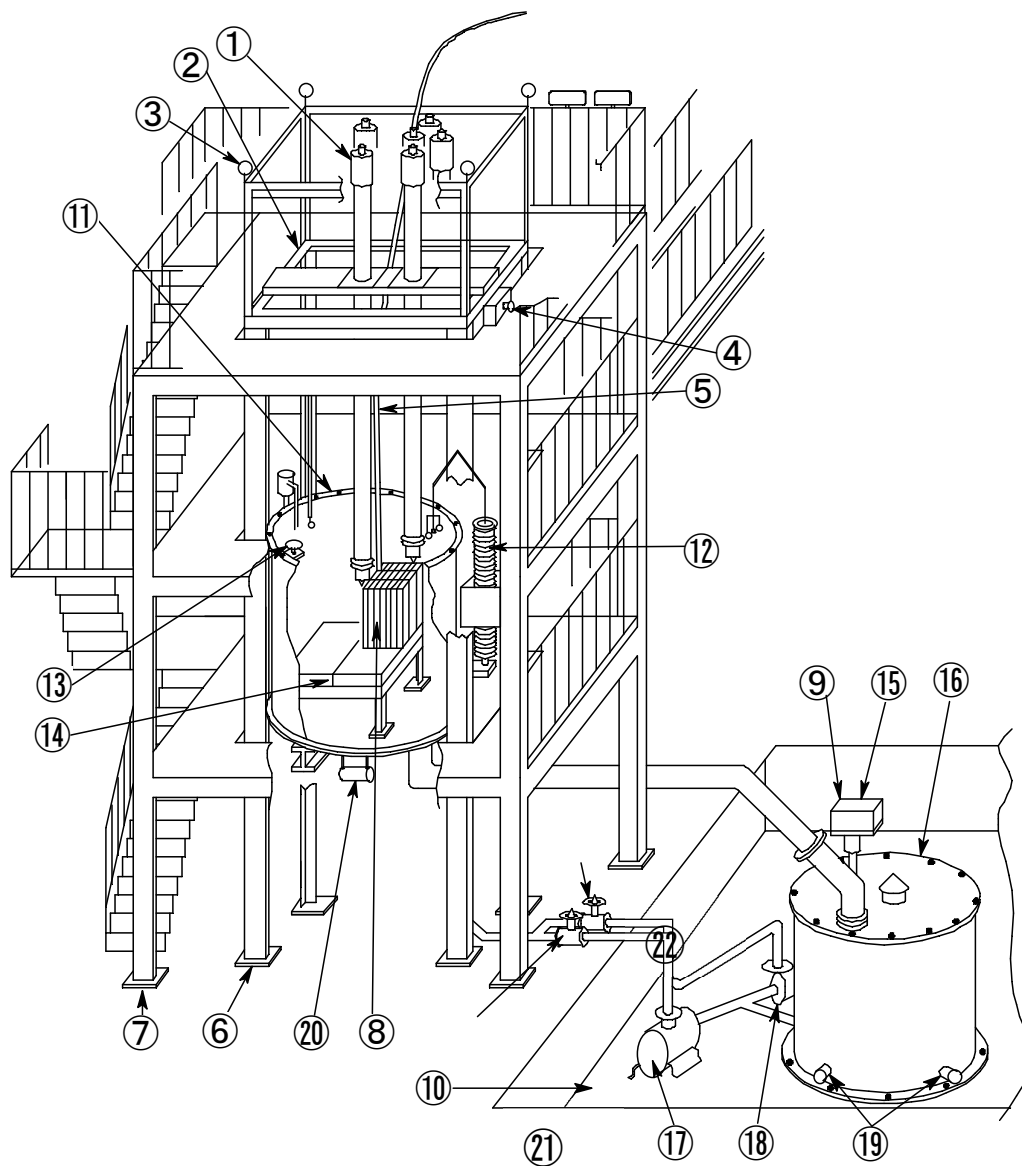


図 A-1 制御棒駆動装置





- | | | |
|--------------|-------------|-------------|
| 制御棒駆動装置 | ⑨ 親子キー式ロック | ⑰ 高速給水ポンプ |
| 制御棒駆動装置固定板 | ⑩ ピット | ⑱ 低速給水ポンプ |
| 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 |
| ロックピン | ⑫ 溢流器 蛇腹 | ⑳ 炉心タンクヒータ |
| 中性子源案内管 | ⑬ 炉心分割用ハンドル | ㉑ 高速給水弁 |
| 架台支持構造 | ⑭ 炉心分割機構 | ㉒ 低速給水弁 |
| 足場 | ⑮ ダンプ弁 | |
| 炉心 | ⑯ ダンプタンク | |

図 A-3 軽水減速炉心 概念図

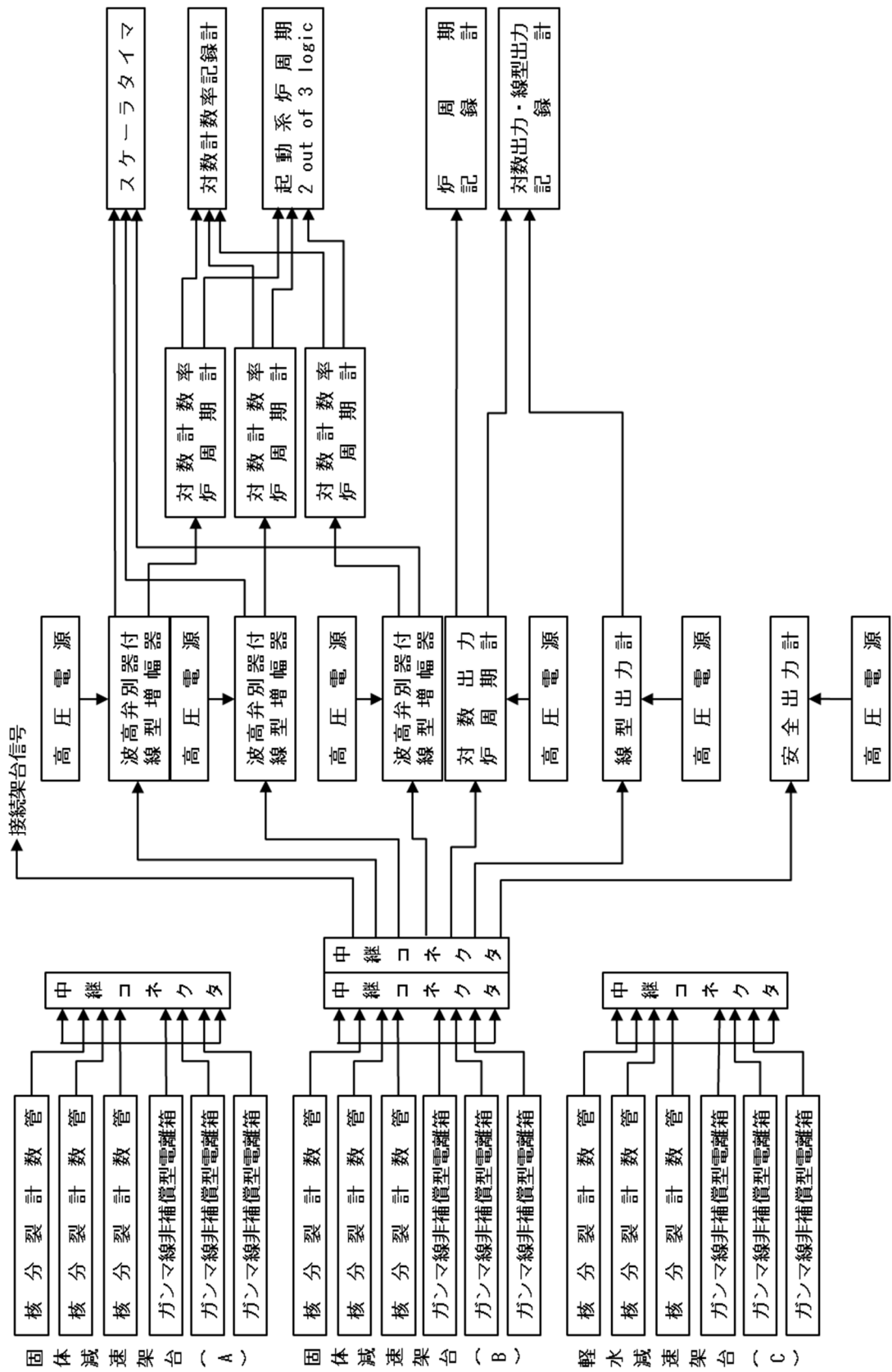
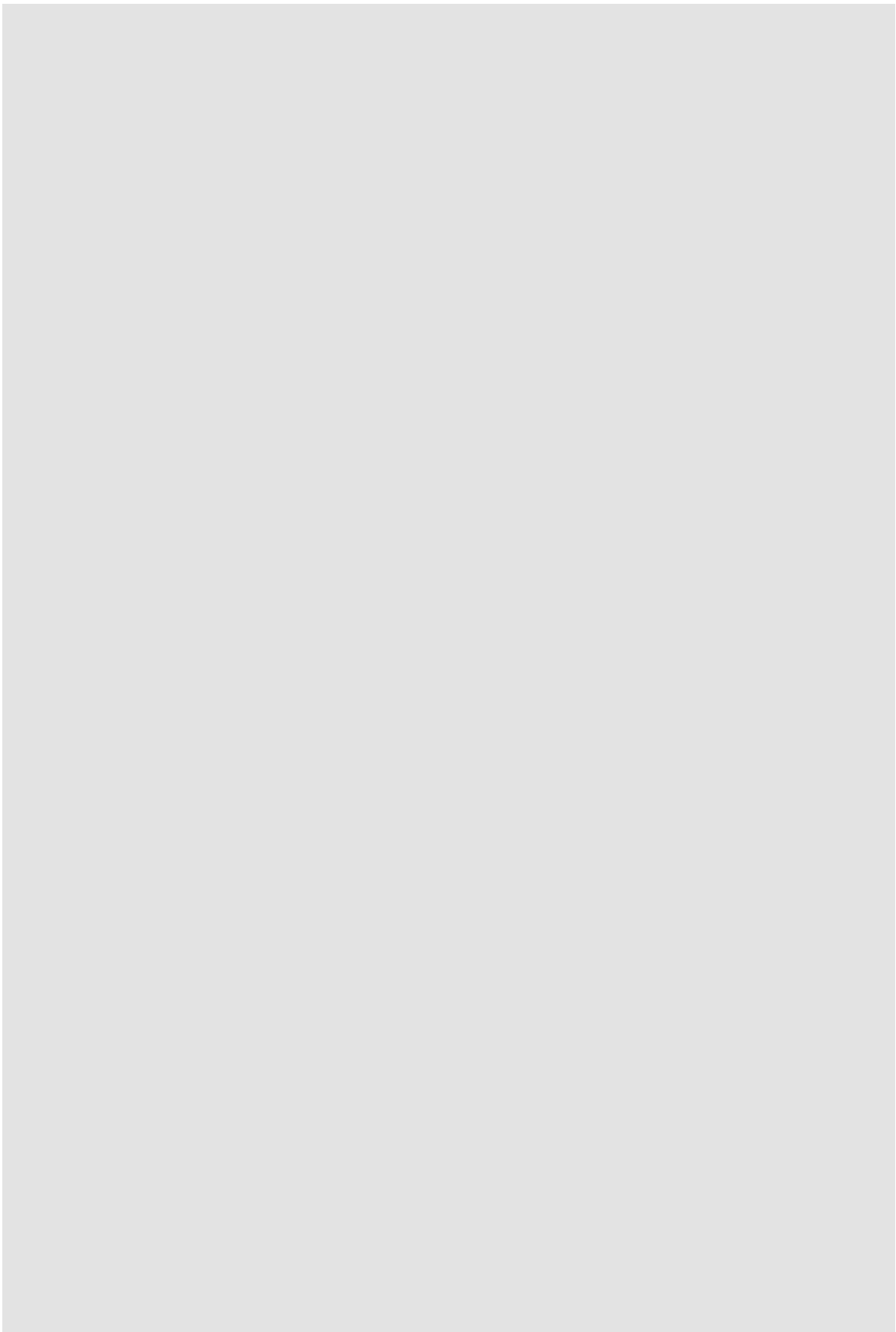


図 A 4 測定装置系図



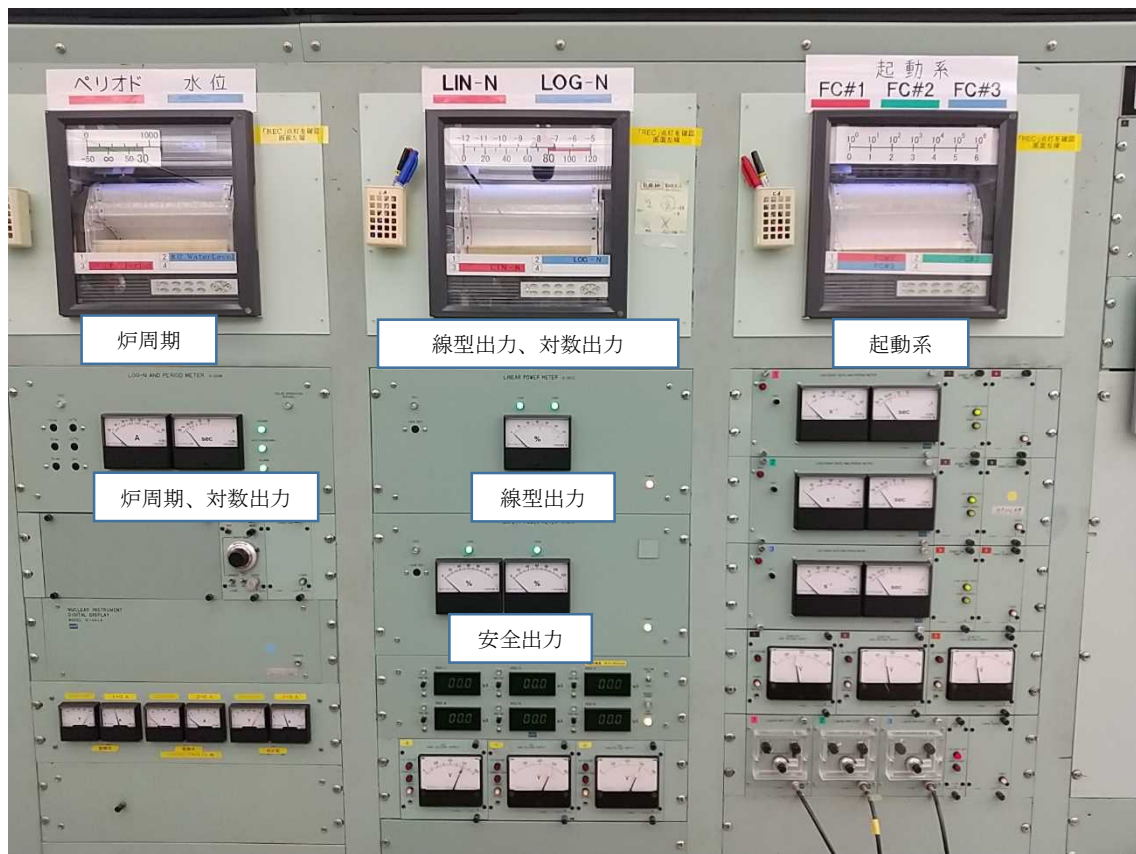
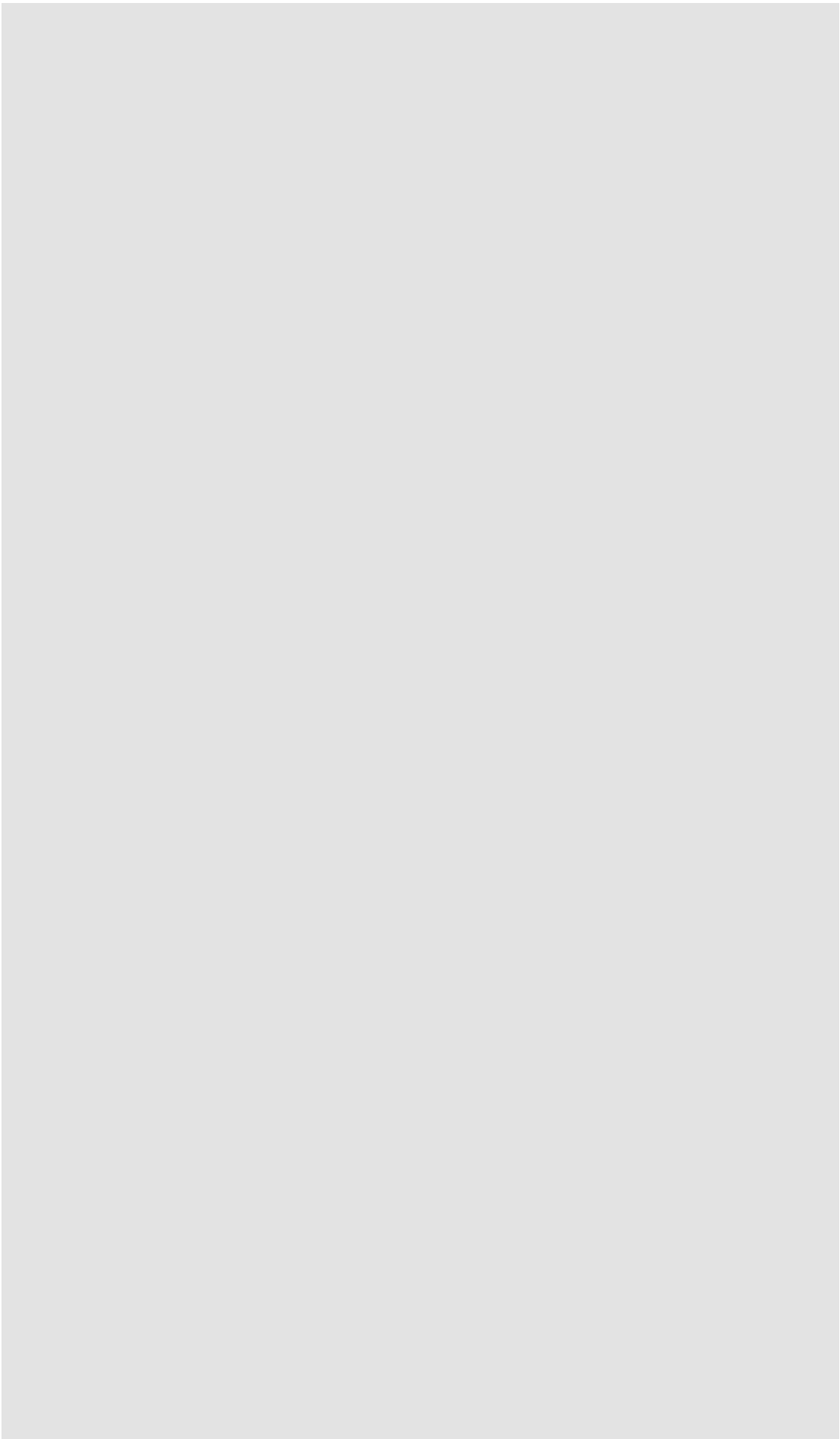


図 A-7 制御室核計装盤

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



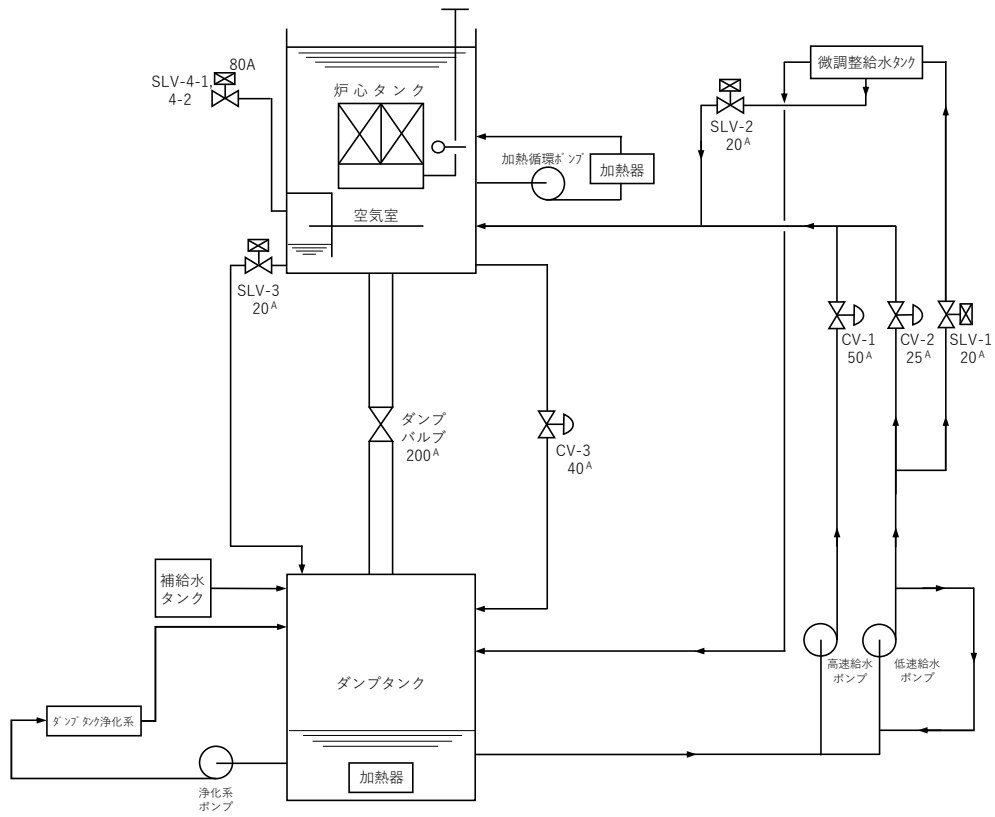


図 A-10 軽水減速炉心給排水系

2 分割炉心の構成についての補足説明

- 軽水減速架台の炉心格子板の可動側格子板（図 1 参照）を炉心分割用ハンドルを回すことにより水平方向に移動させて、所定の炉心分割幅になるように調整する。（必要に応じてスペーサを入れるなどして分割幅を決める）
- 分割幅を固定した後、燃料フレームを炉心格子板に挿入し、制御棒、検出器等の位置調整を行う。
- 炉心分割用ハンドルは取り外しができるようになっており、可動側格子板を移動させた後には取り外しておく。運転中にこのハンドルを挿入すると警報が発報する（自主警報）。また水位がある程度より高くなった状態ではフロートの動作により炉心分割機構が働かないようになっており、給水した状態で分割幅を変更することはできない。

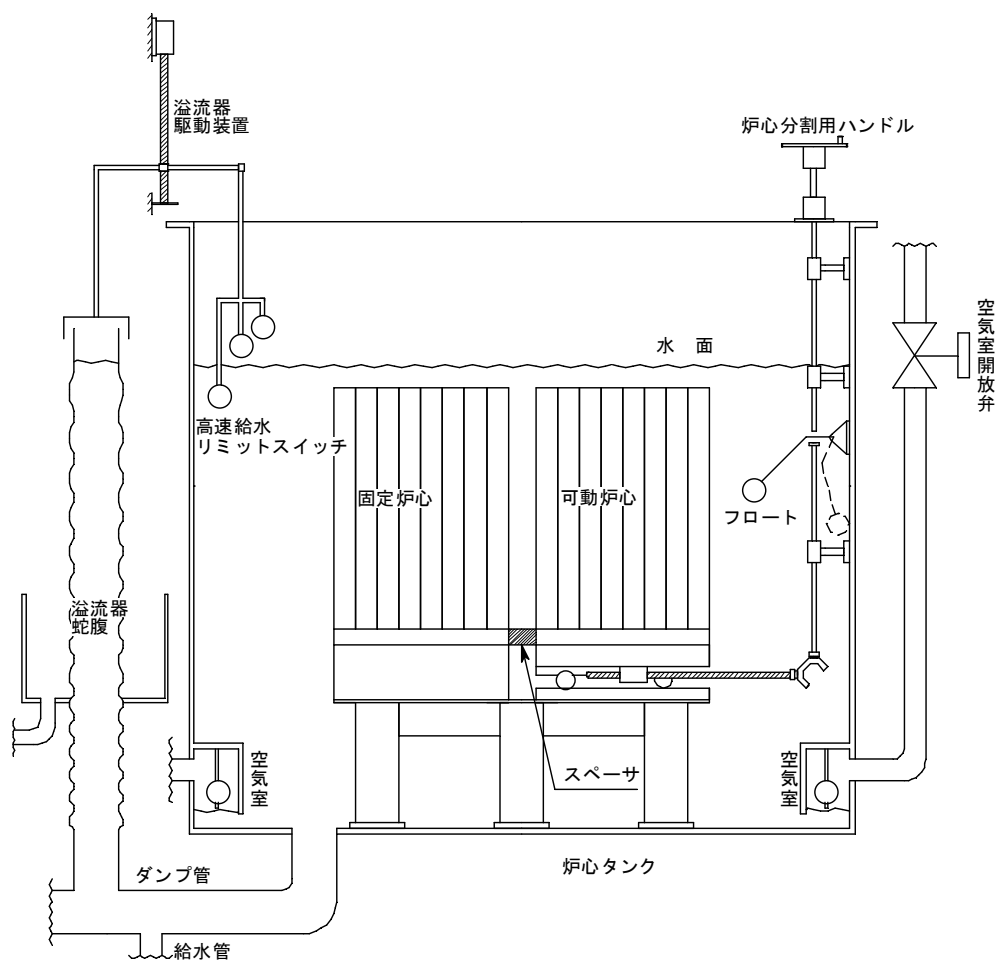


図 A-11 軽水減速架台 断面概念図

【補足B 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 B-2、図 B-3）と中性子発生設備（図 B-4、図 B-5）は KUCA 建屋内にあり（図 B-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 比は 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 10^7n/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 10^8n/s 程度の中性子発生量である。

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)

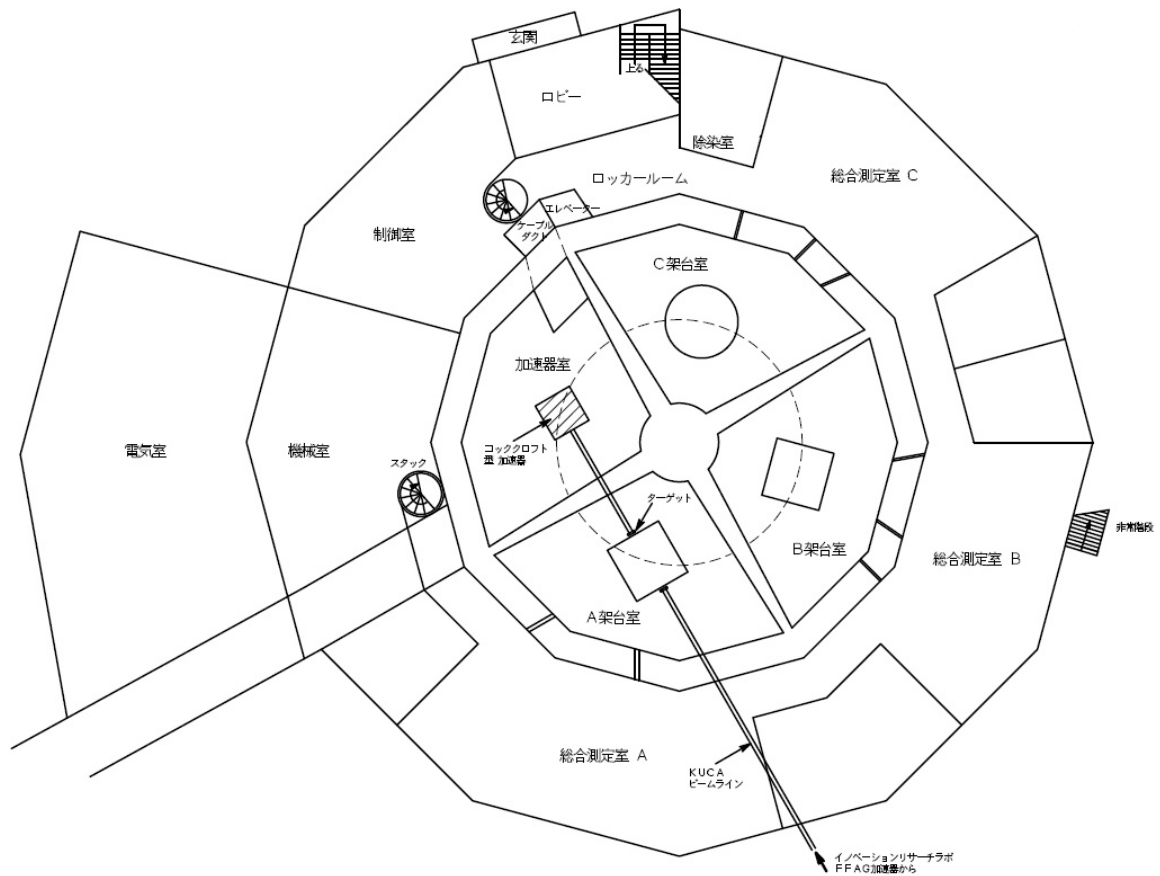


図 B-1 炉心建屋断面図

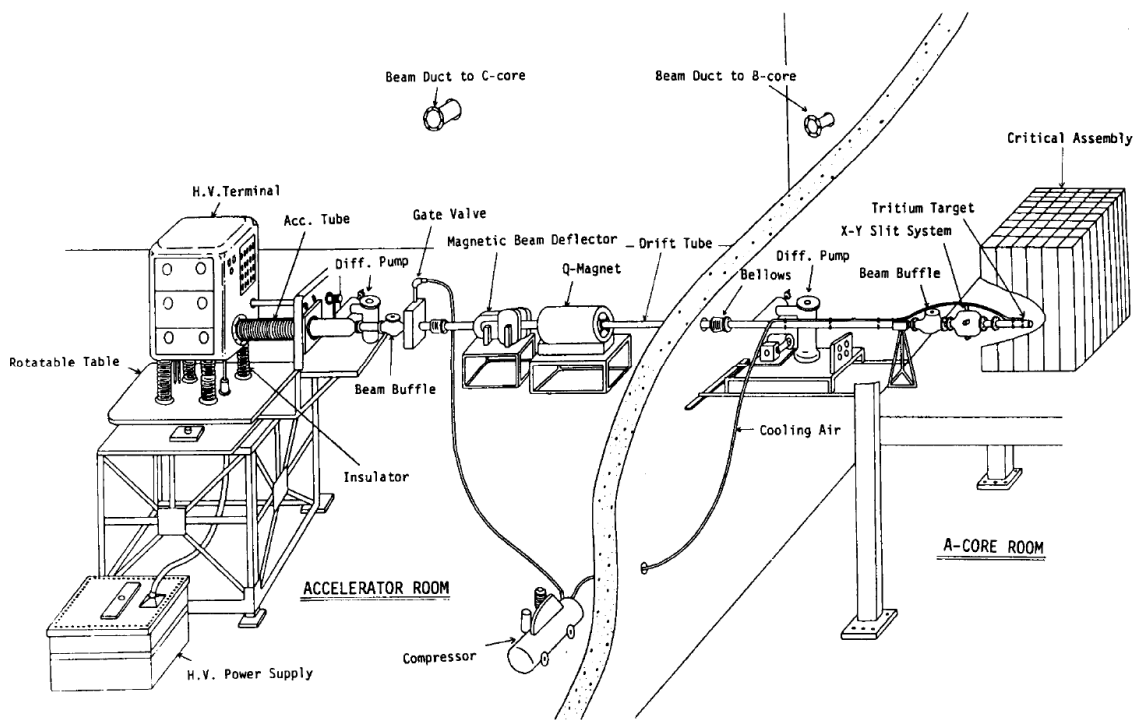
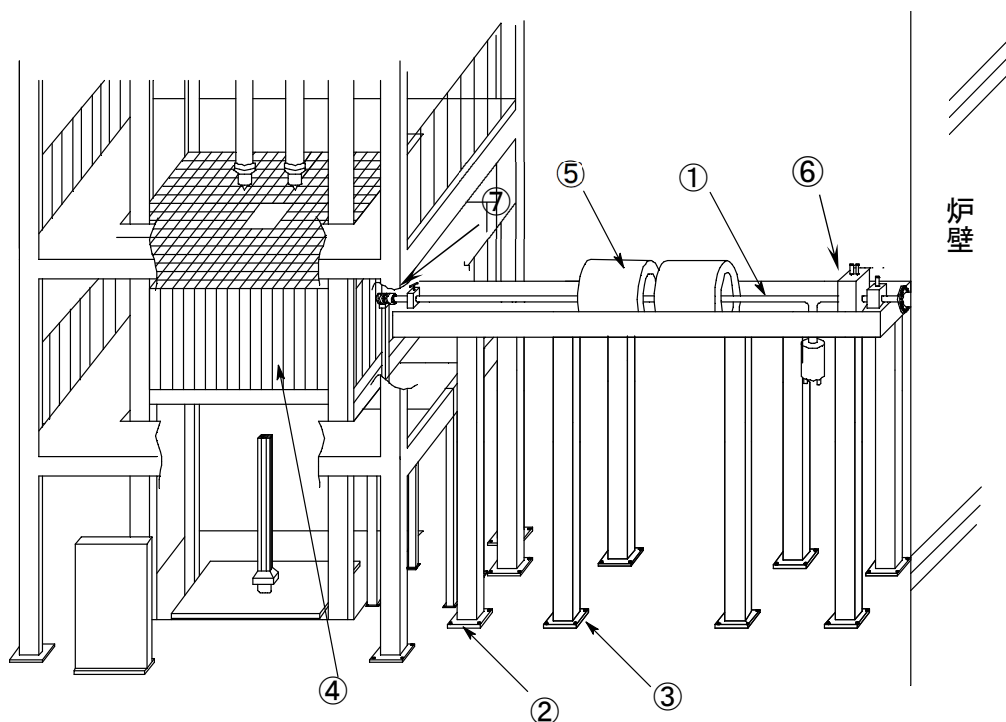


図 B-2 パルス状中性子発生装置 構成図
 (図中の Diff. Pump (油拡散ポンプ) はすべてターボ分子ポンプに変更)



図 B-3 パルス状中性子発生装置 (加速器本体)



- 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 B-4 中性子発生設備概略図



図 B-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）

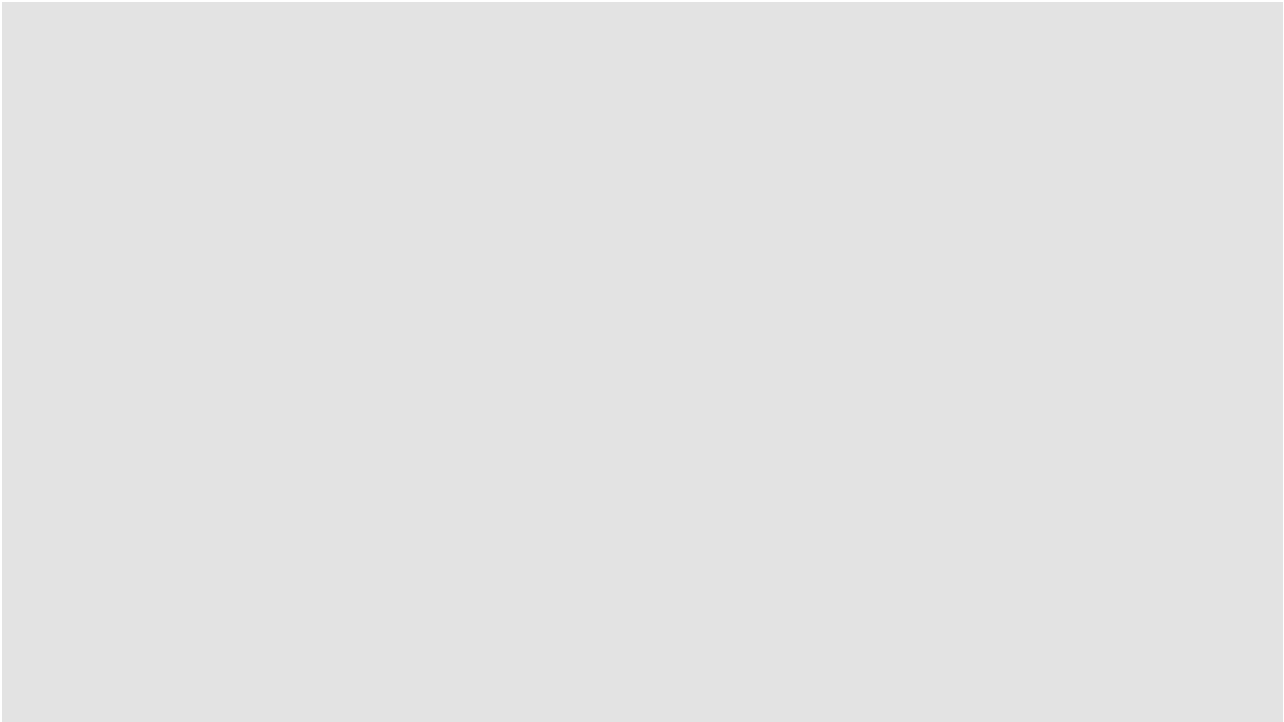


図 B-6 制御卓加速器操作盤（右側：操作盤一部、左側：加速器選択キー）

表 B-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C パイルオシレータについて】

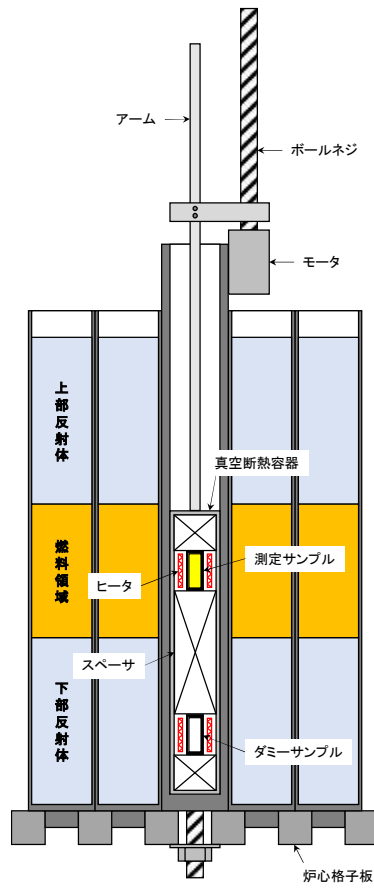
パイルオシレータについてはまだ詳細設計を行ってはおらず、今後、設置する場合には設
工認申請を行って製作する予定である。

パイルオシレータは JAEA の FCA において設置されており、試料を出し入れして反応度
を測定した経験があるため KUCA でもその装置を参考にするを考えている。

図 5 に KUCA の固体減速架台に設置したパイルオシレータの概念図を示す。装置は燃料
集合体を挿入する格子板の上に固定して設置し、内部の真空断熱容器に入れた試料（測定サ
ンプル）の周囲にヒータを設置して試料の温度を変化させることができ、モータ駆動により
炉心内を上下に動かすことができる。真空断熱容器内の試料を入れた容器の上下にはスペ
ーサ（反応度への影響の少ないアルミニウム製）を入れることで試料が下に落下しないよ
うな構造とすることが可能である。

実験では最初に試料を燃料領域の中央に置いて炉心を臨界状態とした後、モータ駆動に
より少しずつ試料を燃料領域外まで移動させ再度臨界状態とし、その前後での臨界制御棒
位置の違いから試料の反応度を求めることができる。この操作を繰り返すことにより試料
反応度の測定精度を上げることができる。

なお、パイルオシレータで「挿入する実験物」については装置込みのことを意味しており、
規制値の $0.1\% \Delta k/k$ はその装置込みの反応度と考えている。



図C-1 パイルオシレータの概念図（炉心を横から見た断面図）

【補足D 安全出力系について】

安全出力系は線型出力系と同じ非補償型電離箱を使用しており、線型出力系とは別の系統(高圧電源、定圧電源、増幅アンプ)を使用している。線型出力系との相違点は出力レンジの切り替えができないことで、検出器からの入力電流が $1\mu\text{A}$ のときに表示値が 100%となるように設定されており、値が 120%となるとスクラム信号が発生される(設置変更申請書に記載)。

安全出力系は 120W 以下でスクラム信号が発することができるように、やや炉心に近い側に配置されている。図 D-1~D-3 に各架台の 2018 年の施設定期検査時の炉心配置を示す。ここで矢印で示した UIC #6 と記載したものが安全出力系の非補償型電離箱である。

10W 運転時の各炉心の安全出力系の指示値を表 D-1 に示す。

各炉心共に指示値が 100%となったときの炉心出力は 100W 以下となるように検出器を設置している。検出器位置を少し炉心から離すことで約 100W で 100%指示値とするように対応することができる。

表 D-1 10W 出力運転時の安全出力系指示値

炉心	安全出力系指示値
A 架台炉心 (A3/8”P36EU(3)炉心)	34 %
B 架台炉心 (B3/8”P36EU(3)炉心)	40 %
C 架台炉心 (C35G0(5列))	58 %

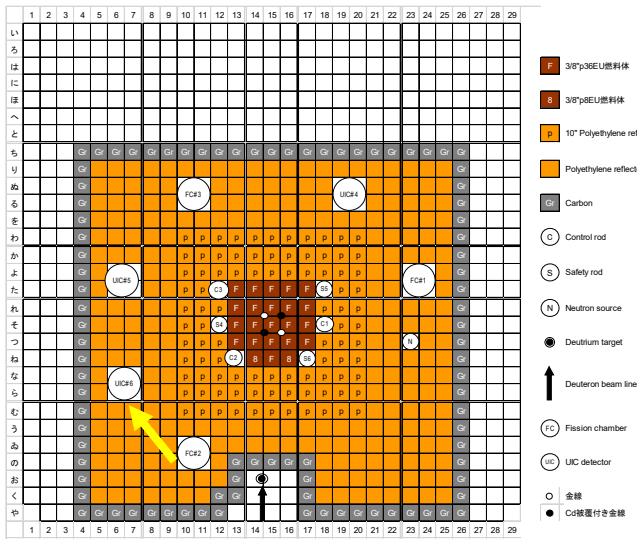


図 D-1 A 架台での施設定期検査炉心

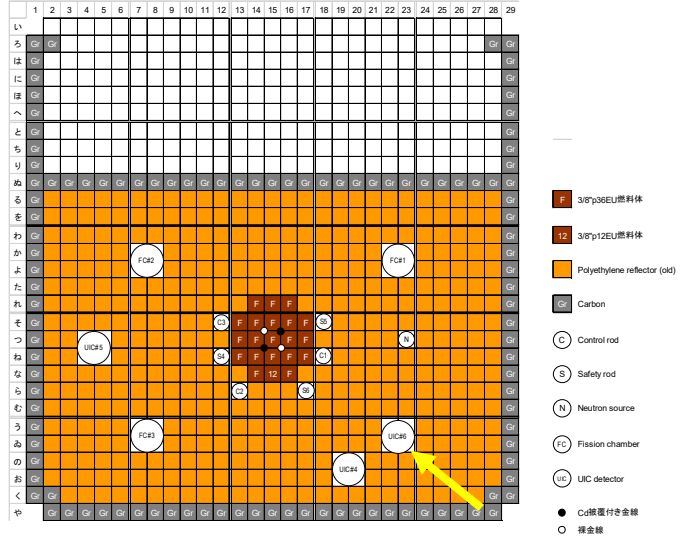


図 D-2 B 架台での施設定期検査炉心

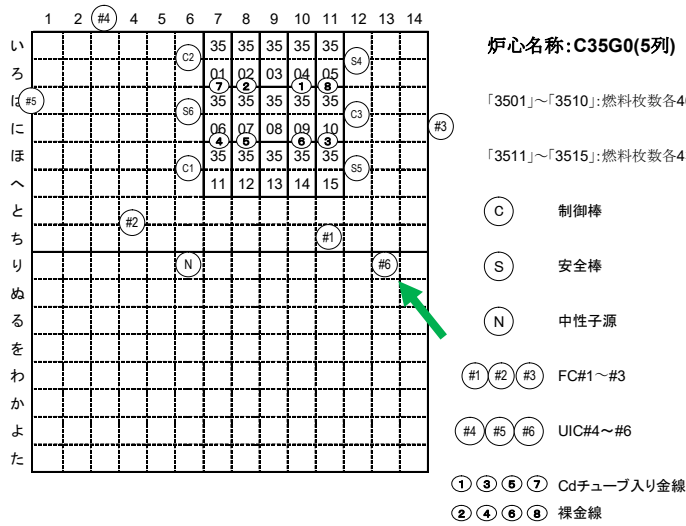


図 D-3 C 架台での施設定期検査炉心

【補足E 起動用中性子源について】

KUCA では起動用中性子源として Am-Be を使用している。

形状は図 E-1 の通りで、ステンレス製の 22.4 mm ϕ \times 31 mm のカプセル内部に Am-Be が封入されている。約 47 年前の購入時の強度は 2Ci (74GBq) であり、Am の半減期は 432 年であるため 7% ほど減衰している。

Am-Be 中性子源は図 E-4 に示すワイヤー付きカプセル内に入れられており、使用時には制御室から遠隔操作でワイヤーを駆動させて中性子源格納容器から炉心内に設置した中性子源挿入管 (図 E-5) 内まで移動させることができるが、出力や計数率の調整のため途中の位置で止めることもできる。軽水減速架台での中性子源が最も炉心に挿入されたときの位置を図 E-3 に示す (固体減速炉心の高さ方向の最も挿入された位置は炉心中心より少し上に設定されている)。図 E-5 の中性子源挿入管は炉心内のどの場所にでも設置することができ、実験目的に応じて設置場所を変更することができる。(燃料体に近接して設置することも可能。)

中性子発生量は約 4×10^6 n/s であり (約 2.2×10^6 n/s/Ci)、発生する中性子の平均エネルギーは約 4.4MeV である。^{1) 2)}

参考文献：

- 1) 辻村、他、「RI 中性子源における中性子放出角度分布の非等方性の評価」、JAEA-Research 2008-034.
- 2) Radiation sources industrial laboratory, The Radiochemical Centre, Amersham, 1977/8.

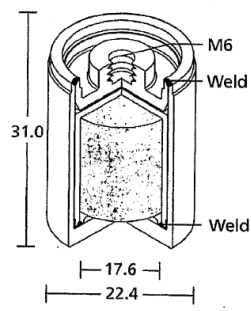


図 E-1 Am-Be 中性子源の構造

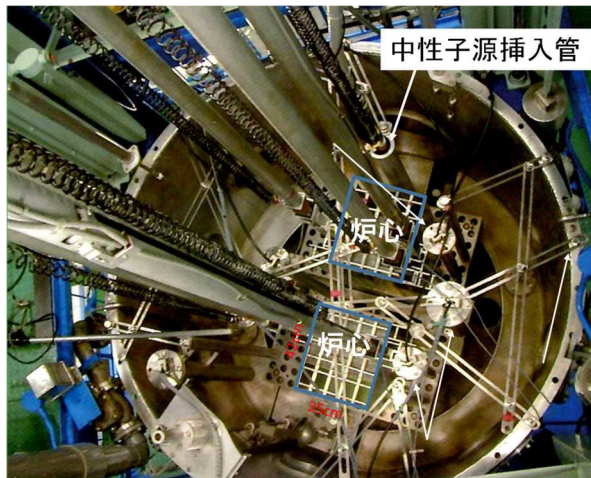


図 E-2 炉心内の中性子源挿入管

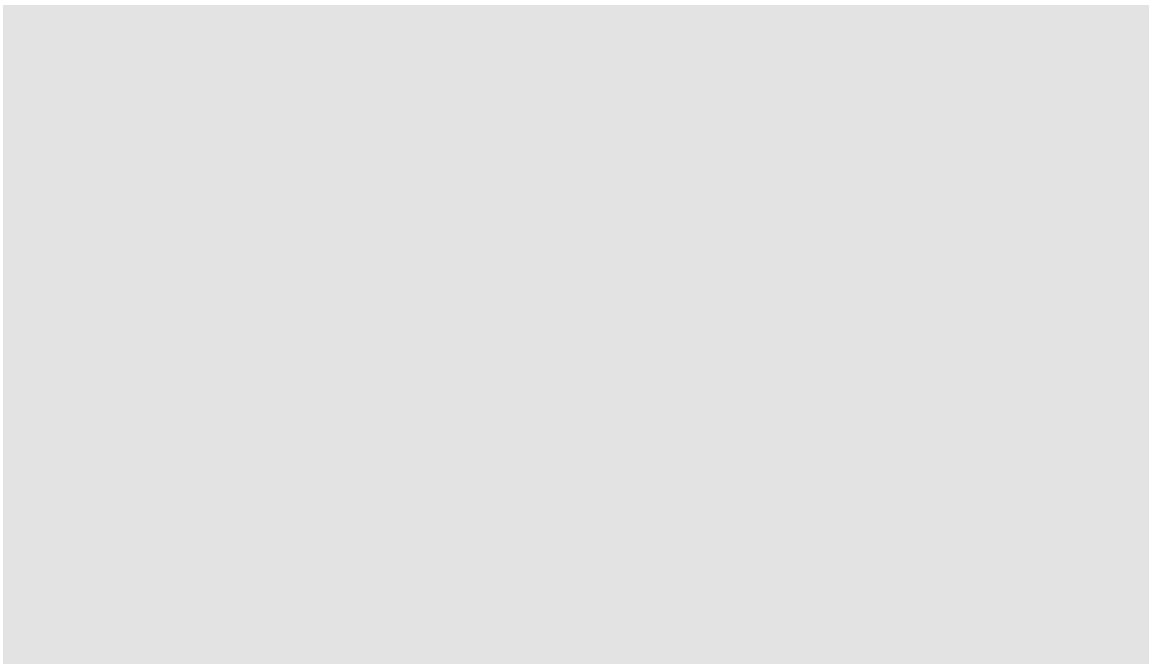


図 E-3 C 架台の中性子源位置 (垂直方向)

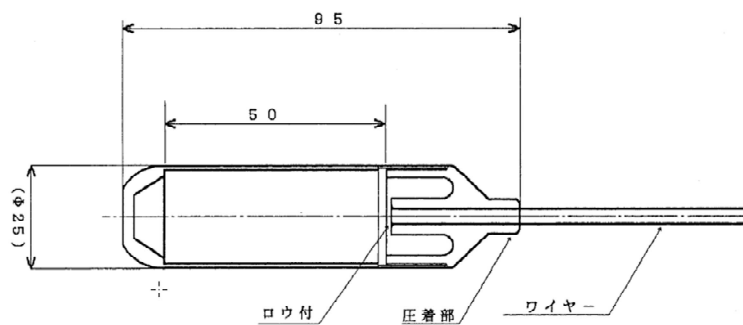


図 E-4 中性子源取り付けカプセル
 (カプセル内に Am-Be 中性子源を入れて、ワイヤーを通じて出し入れする)

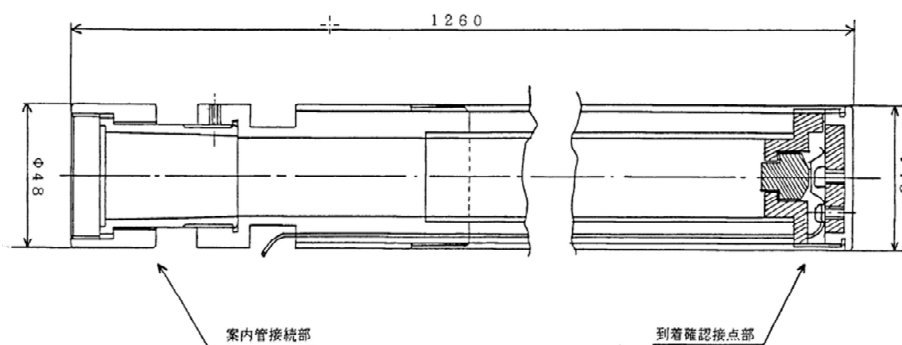
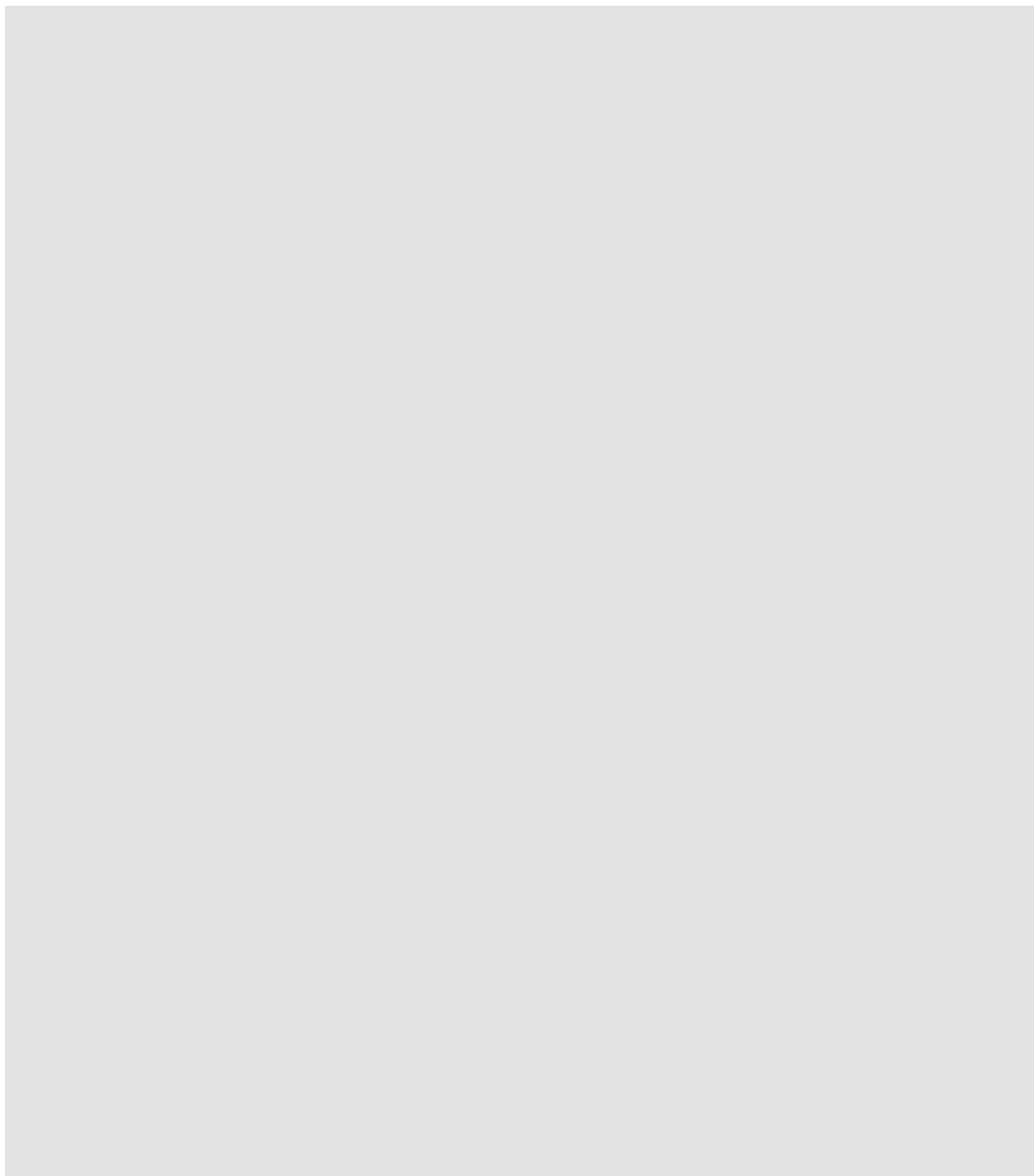
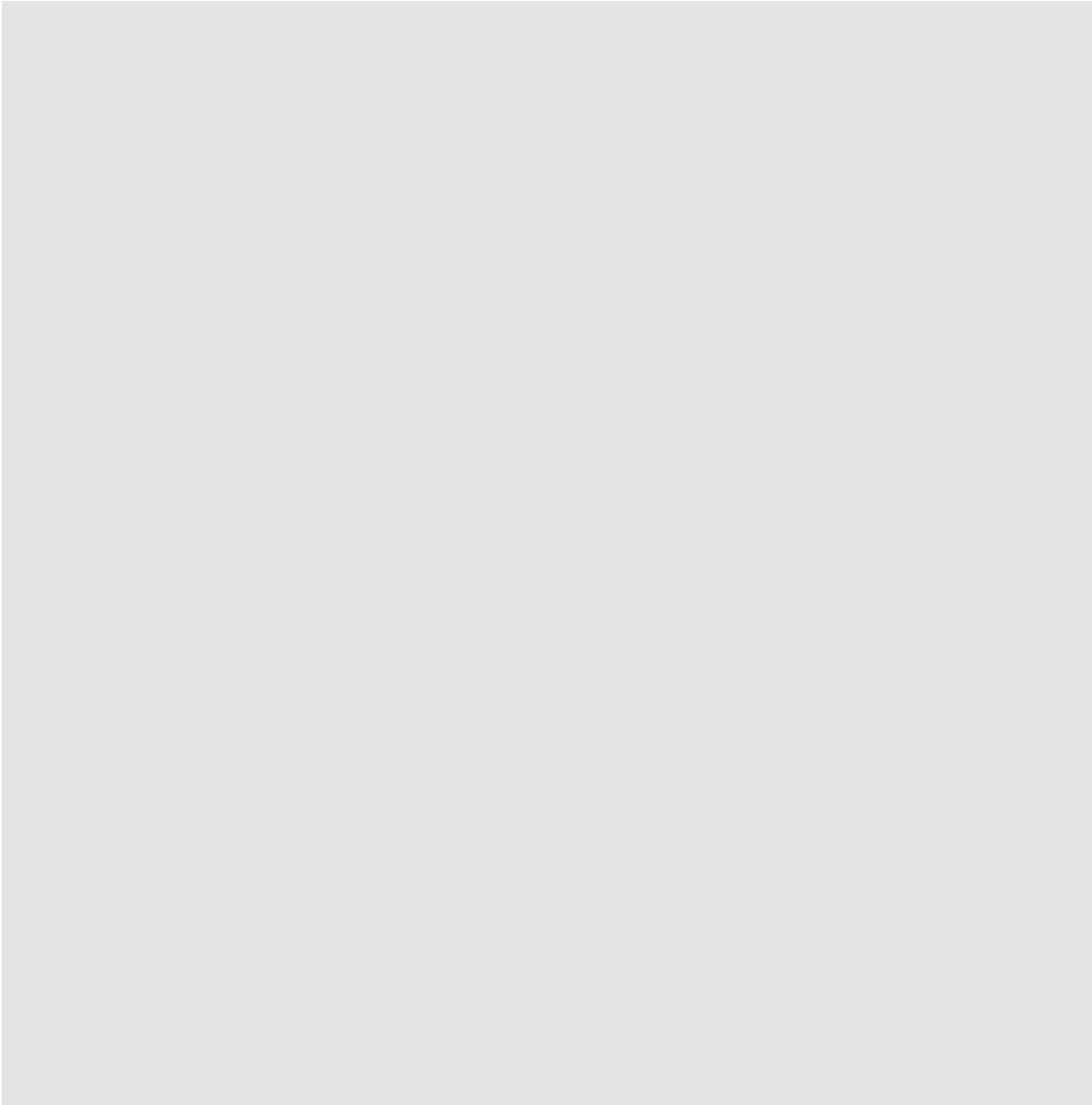


図 E-5 中性子源案内管
 (図の右側を下側として炉心に挿入し、上部より中性子源駆動パイプを通じて中性子源を挿入する)

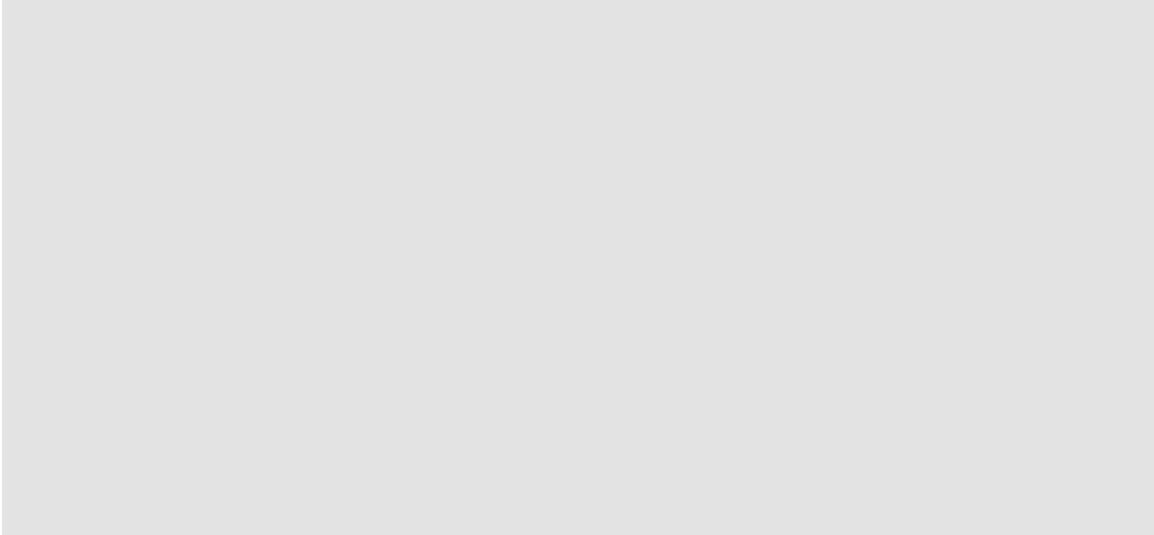
【補足F 保安指示書（操作手引き）について】

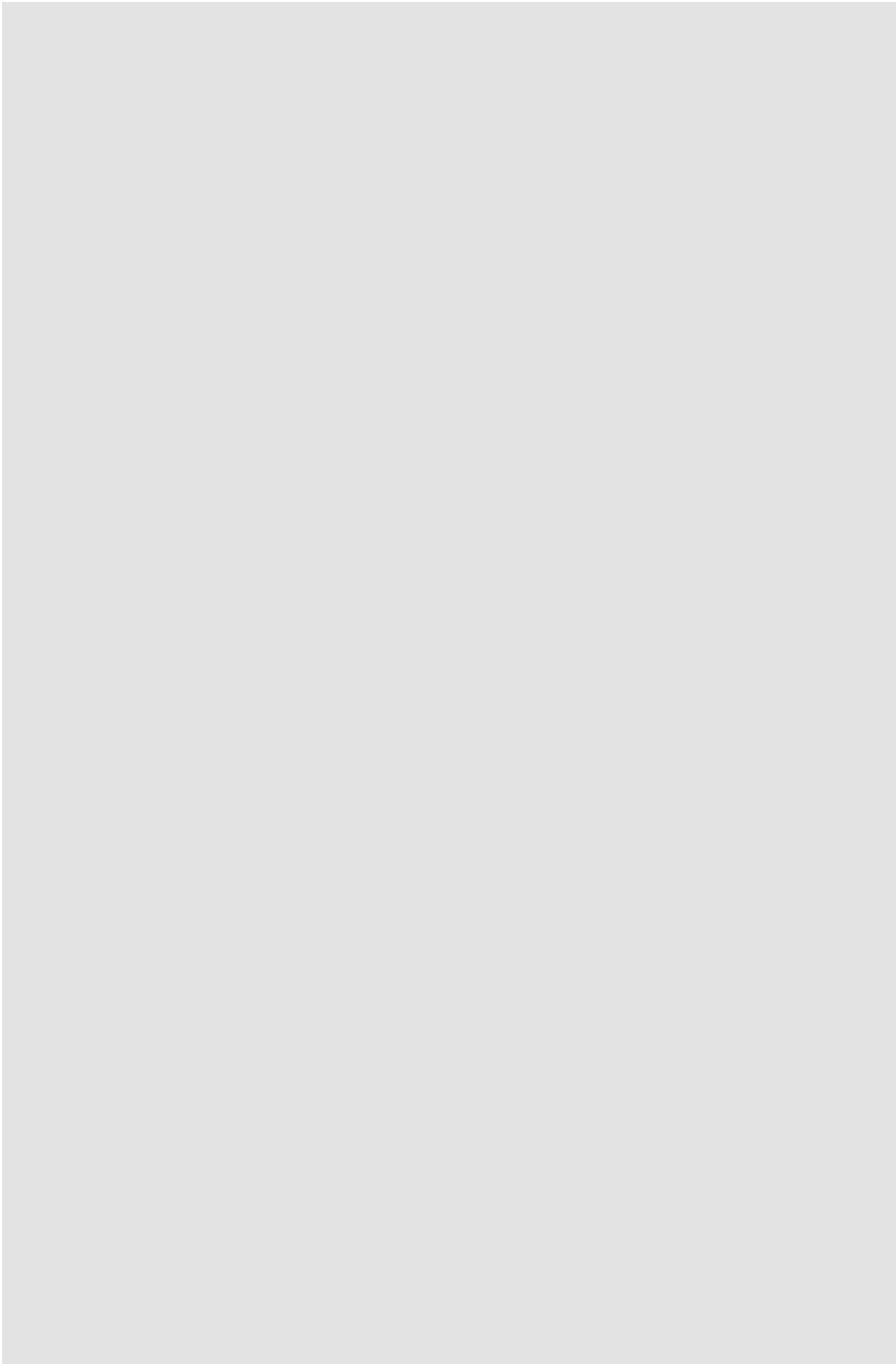
保安規定の下部規定である「原子炉施設保安指示書」から KUCA の起動、運転、停止方法に関する箇所を抜粋して記載する。

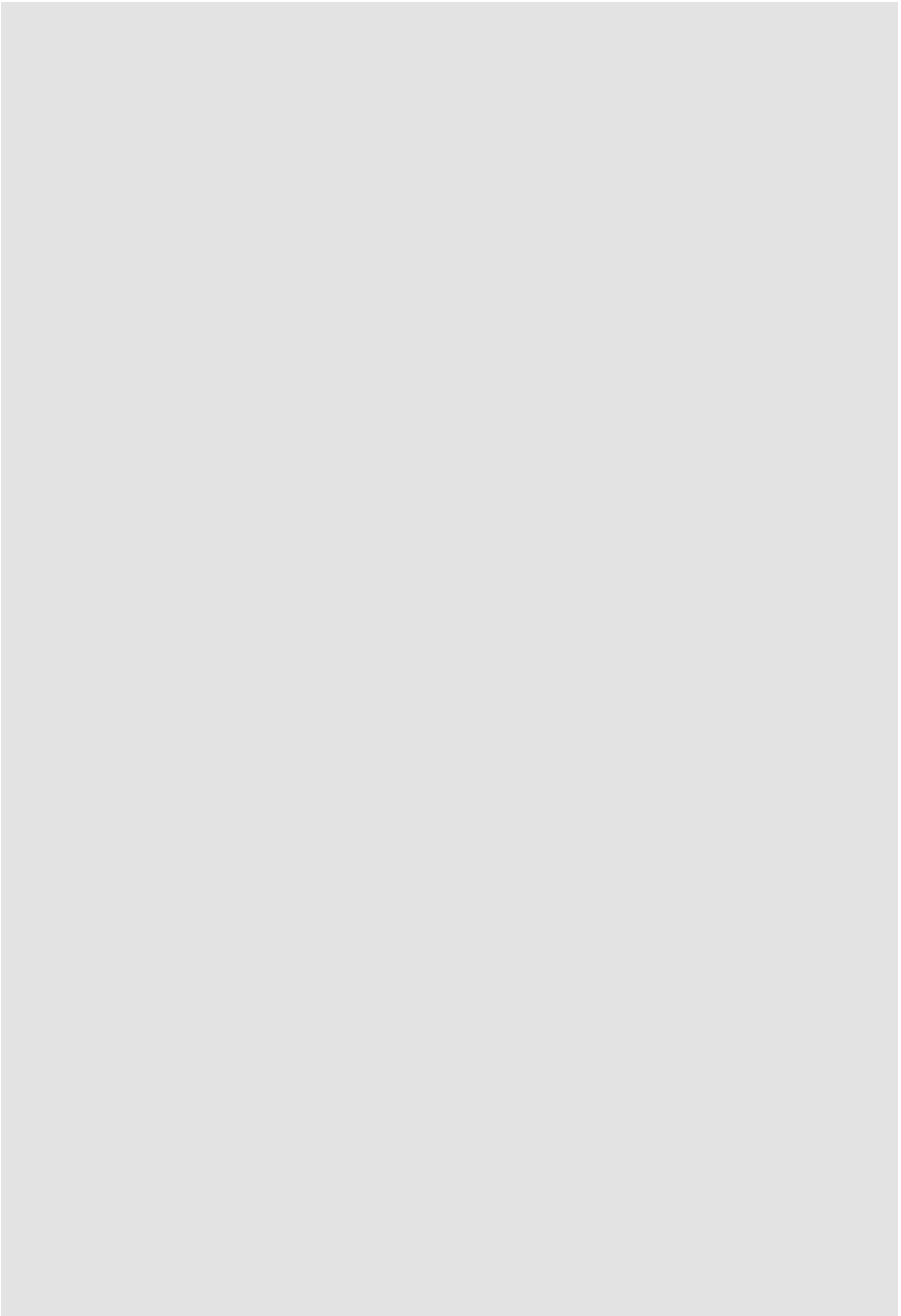




4.2.4.3.3 軽水減速架台（C 架台）起動の手順







【補足G 炉心構成が許可範囲であることを担保するために実施する手続き】

本事項に関連した原子炉施設保安規定（以下、保安規定）の記載内容は以下の通りである。

（運転の計画）

第59条 所長は、臨界装置の1年間の利用計画（以下「年間利用計画」という。）を年毎に又は年度毎にたて、これを周知させるものとする。

2 臨界装置部長は、前項に定める年間利用計画に基づき、臨界装置の運転計画をたて、臨界装置に関しての保安の監督をする主任技術者（以下「臨界装置主任技術者」という。）の承認を受けなければならない

3 （略）

4 （略）

5 臨界装置主任技術者は、第2項の承認を行うに当たり、別表第2に掲げる主要な核的制限値及び熱的制限値並びに別表第2の2に掲げる炉心配置その他の制限を満たしていることを確認する。

6 （略）

（使用の許可）

第89条 臨界装置本体を使用して実験を行おうとする者及び第87条の特性測定、機器の調整又は検査のために運転を必要とする者は、KUCA 実験記録等の使用申込書を提出して、臨界装置主任技術者の承認を受けたのち、所長の許可を受けなければならない。

2 所長は、前項の許可を与えるに当たっては、安全委員会の審議を経なければならない。ただし、当該使用に係る実験が既に安全に実施された実験と比較して、より安全であるか、又は極めて類似した条件の実験であると臨界装置主任技術者が認めた場合は、この限りでない。

3 第1項の許可を与えるに当たっては、安全のため必要な使用上の制限条件を付することができる。

（新配置の炉心の特性測定）

第87条 臨界装置部長は、新配置の炉心を組んだときは、そのつど、その炉心に係る次の各号に掲げる事項について、特性測定を行わなければならない。ただし、第5号に掲げる事項については、臨界装置主任技術者が安全上支障がないと認めたときは、この限りでない。

(1) 臨界量

(2) 過剰反応度

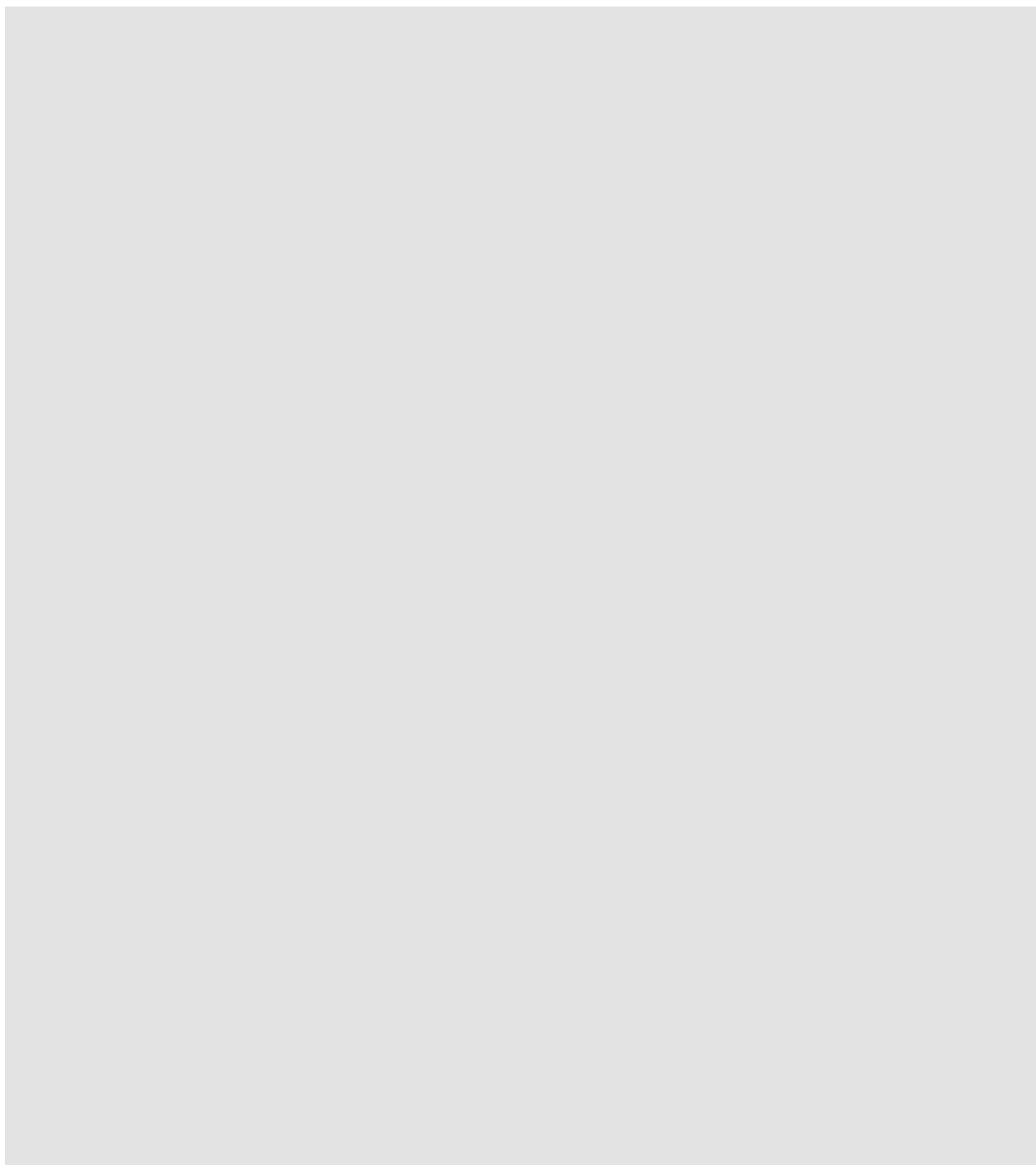
- (3) 制御棒及び非常用制御設備の反応度抑制効果
- (4) 反応度添加率
- (5) 遮蔽効果
- (6) その他臨界装置主任技術者の必要と認める事項

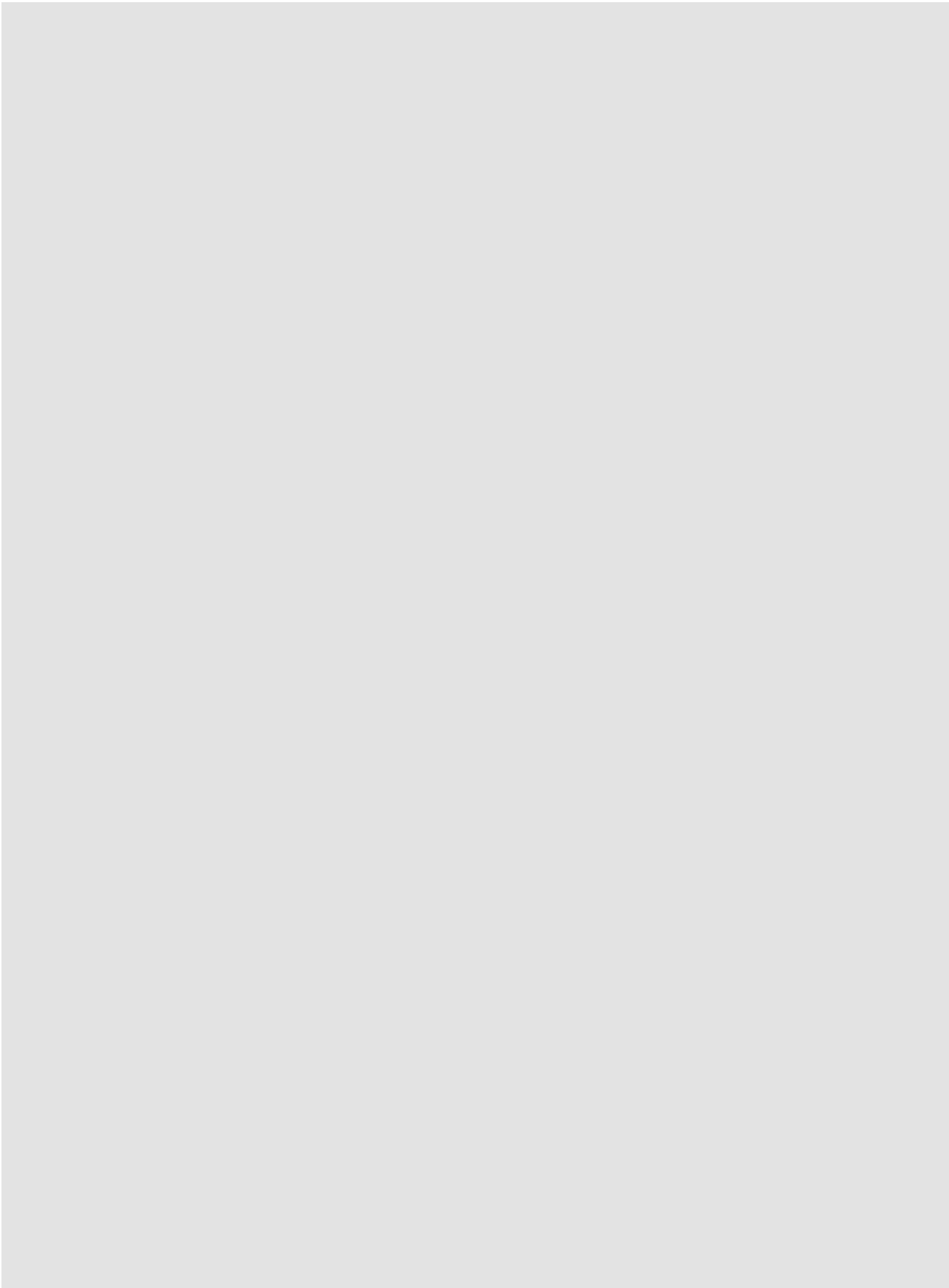
この保安規定に従い、新規の炉心にて実験を行う場合の手順は以下ようになる。
なお、既に特性実験を終えた炉心については 3)の項目のみを行う。

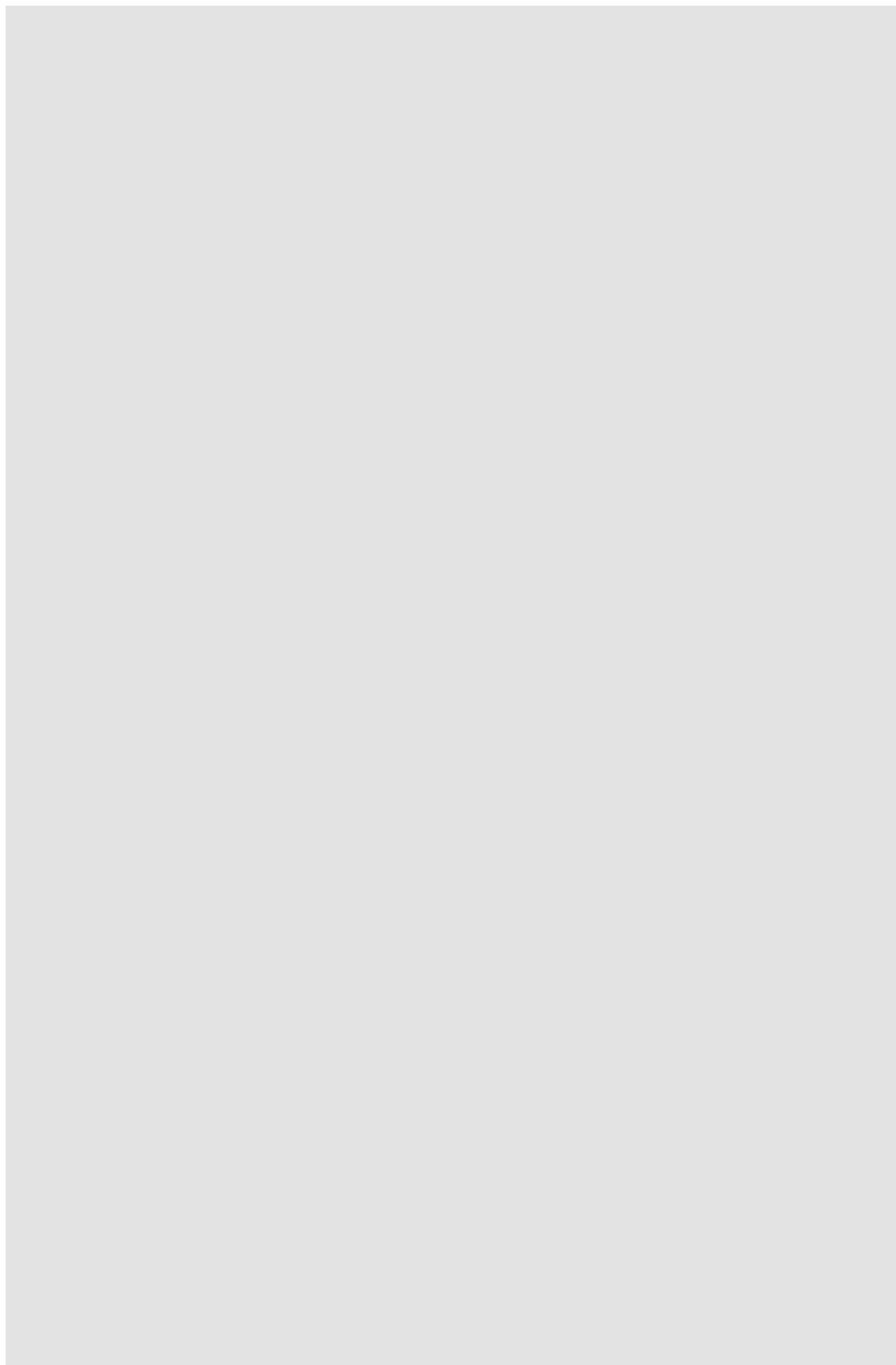
- 1) 実験を行うものは新規炉心の臨界予測枚数、制御棒反応度価値等の表 9、表 10 に示した核的制限値等を解析により確認し、それらの結果と実験手順（臨界近接の方法等）を記載した書類を KUCA 実験記録とともに臨界装置部長に提出する。
- 2) 臨界装置部長は月に 1 回開催される研究所の原子炉安全委員会（学内外の学識経験者、主任技術者等により構成）にて実験内容について説明し審議に諮り、核的制限値等を満足しており安全上問題ないと判断された場合には所長は臨界装置部長に実験の許可を与える。（保安規定第 89 条）
- 3) 臨界装置部長は運転計画を立てて臨界装置主任技術者の承認を受ける。その際、臨界装置主任技術者は炉心の核的制限値等の予測値を確認する。（保安規定第 59 条）
- 4) 臨界装置部長は新しい炉心において臨界量測定、反応度測定実験等の特性実験を行い、表 1 に示した核的制限値等を満たしていることを確認する。（保安規定第 87 条）
- 5) 臨界装置部長は特性実験の結果を原子炉安全委員会にて報告する。

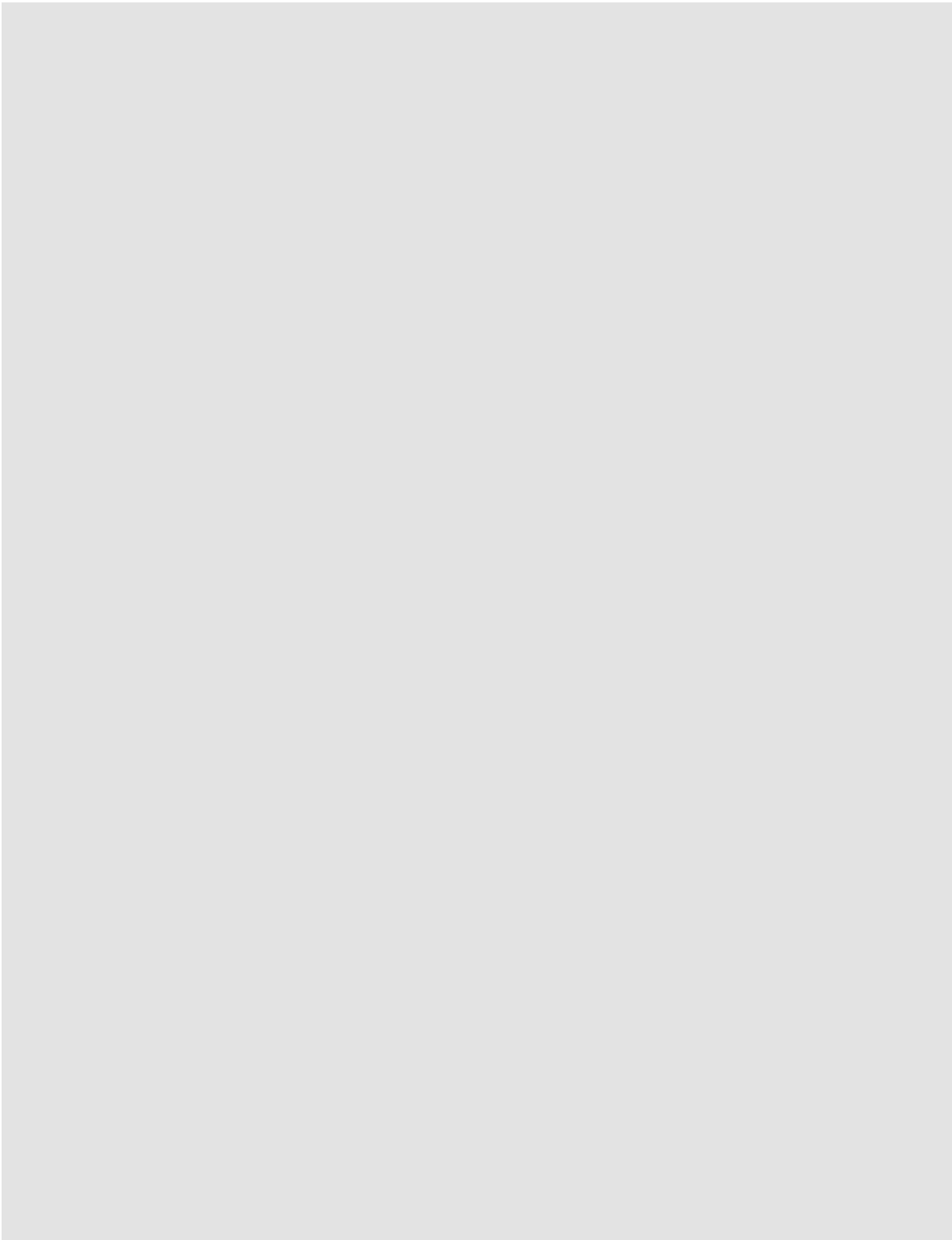
【補足H 通常運転時の運転手順について（線型出力系のレンジ切り替え）】

1. 運転手順について（線型出力計の指示値に関係すること）









京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

【燃料について】

ウラン・モリブデン燃料について.....	1
軽水減速炉心の燃料	31
ウランモリブテン燃料及びウランシリサイド燃料の仕様	34

京都大学複合原子力科学研究所

1. ウラン・モリブデン燃料について

1. 1. 概要

研究炉で LEU を使用するためにはウラン密度を上げることが必要であり、研究炉の性能向上のためにこれまで使用されてきたウランシリサイド分散型燃料 (U_3Si_2 -Al) よりさらにウラン密度が高い燃料の開発が求められるようになった。そのため、例えば U_3Si や U_6Fe などのウラン密度の高い燃料の研究が行われたが、照射特性が良くないということが判り利用するまでには至らなかった。そのような中で 1990 年代以降ウラン・モリブデン燃料 (以下、U-Mo 燃料) の研究が進み、米国、カナダ、フランス、韓国などで試験が行われた結果、照射特性が優れていることが判り、さらに研究が進められるようになった。

U-Mo 燃料は元々 1960 年代に高速炉の特にパルス炉で用いる燃料として開発が始まった燃料である。高速炉のための照射試験は高温で実施されるため、当時の照射試験に関するデータベースは研究炉で使用する U-Mo 燃料のためには一部しか利用できないが、開発研究を通じて U-Mo 燃料の相変化や物理的特性、熱的特性、機械的特性などに関する多くのデータが取得されていた。

U-Mo 燃料は U_3Si_2 と同様にアルミニウム中に分散させて使用する場合と、さらにウラン密度を高めるために U-Mo 単体 (U-Mo monolithic) で使用する場合は考えられているが、KUCA の固体減速炉心で使用を予定しているのは前者の U-Mo 分散型燃料 (Mo を 7wt% 用いた U-7Mo) である。現在使用予定の U-Mo 燃料は [redacted] の粒で、それをウランシリサイド分散型燃料の場合と同様にアルミニウムパウダー [redacted] と混合して整形したものである (アルミニウムとウランの原子数比は [redacted])

(なお、KUR のウランシリサイド分散型燃料の場合、 U_3Si_2 の粒径は [redacted])

U-Mo の諸物理特性¹⁾

融点： 1130 °C (U-7Mo)

熱容量： 30.5 J/mol/K (U-10Mo、25°C)

熱伝導率： 14.2 W/m/K (U-8Mo、10~100°C)

(ここで、U-7Mo 中の数字は Mo の wt%)

1. 2. 照射特性

U-Mo ハンドブック¹⁾に記載された U-Mo 燃料 (U-Mo monolithic) の燃料スウェリングのデータを図 1 に示す。

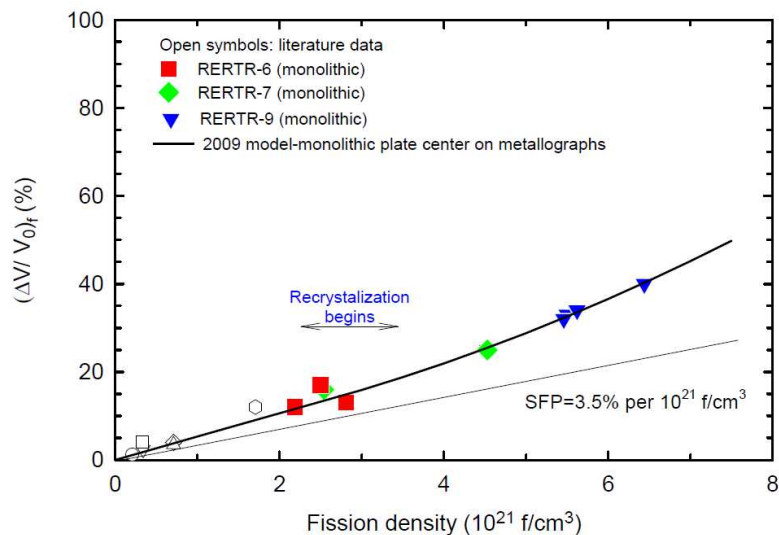


図1 燃料スウェリングの実験値

KUCA で使用する燃料のスウェリング量を求めるために、KUCA の設置変更申請書（以下、申請書）に記載した数値から燃料の燃焼度に対応する核分裂密度（fission density、以下 F_d ）を求める。

KUCA の年間積算出力：1 kWh （申請書 添付 2）

（申請書 添付 8）

U 密度：16.3 g/cm³ （U-7Mo（Mo を 7%）の U 密度）

1 核分裂当たりの回収エネルギー：200MeV

KUCA で使用する燃料は U-Mo 分散型燃料であるが、個々の U-Mo 粒子の F_d は U-Mo 単体の燃料の場合と同じであるので、燃料を同じ炉心で 50 年間使用したときの F_d は以下のようになる。

$$\text{積算出力} : 1 \times 10^3 \text{ (Wh)} \times 3600 \text{ (s/h)} \times 50 \text{ (year)} = 1.8 \times 10^8 \text{ (J/50-year)}$$

$$\text{核分裂数} : 1.8 \times 10^8 \text{ (J/50-year)} \div \{200 \times 10^6 \text{ (eV)} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ (J/eV)}\}$$

$$= 5.6 \times 10^{18} \text{ (fissions/50-year)}$$

$$F_d = 5.6 \times 10^{18} \div \text{ } \text{ fissions/cm}^3$$

これらの照射実験データより、U-Mo 燃料の swelling についてガス以外の FP によるもの (solid swelling) とガス状の FP によるもの (gas bubble swelling) について以下のような実験式が示されている¹⁾。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{total} (\%) &= \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{solid\ swelling} + \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{gas\ bubble\ swelling} \\ \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{solid\ swelling} (\%) &= 3.5 \times 10^{-21} F_d \\ \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{gas\ bubble\ swelling} (\%) &= 1.8 \times 10^{-21} F_d \quad (F_d \leq 3 \times 10^{21} \text{ fissions/cm}^3) \end{aligned}$$

KUCA の F_d を代入すると、total swelling (solid swelling と gas bubble swelling の和) は x-y-z 方向に均等に膨張すると仮定すると、各方向のサイズ変化は、図 2 に示す燃料板の製作公差に比べても十分に小さい値であることから照射に伴うスウェリング量は無視することができる。すなわち、核分裂で生成した核分裂生成物 (FP) は U-Mo 燃料の形状に影響を与えることなく U-Mo 燃料の内部に保持されるといえる。

U-Mo 分散型燃料の場合、FP の一部は U-Mo 粒子の表面から外部に放出されることになる。その放出率 F_r は以下のように表される²⁾。

$$F_r = \frac{3}{4} \left(\frac{\mu}{R}\right) - \frac{1}{16} \left(\frac{\mu}{R}\right)^3$$

ここで μ は U-Mo 中での FP の平均飛程、 R は U-Mo 粒子の平均半径である。U-7Mo について μ は $5 \mu\text{m}$ 、 R は $35 \mu\text{m}$ とすると、 F_r は約 12% となる。 μ は UAl_x の場合は $10 \mu\text{m}$ 、 U_3Si_2 の場合は $8 \mu\text{m}$ であるため、同じ粒径であれば密度が高い U-Mo のほうが F_r は小さくなる。

この放出された FP はウランシリサイド分散型燃料の場合と同様に U-Mo 周囲のアルミニウム中に保持されることになるが、その FP の保持能力については従来のウランシリサイド分散型燃料で十分に実績があり問題は無い。

1. 3. 燃料板の強度

燃料板はアルミニウム製の額縁の内部に U-Mo 分散型燃料のコンパクトを入れ、その上にアルミニウム製の板を置いて周囲を溶接しているという構造である (図 2、図 3)。また

燃料板は燃料さや管に収納されて炉心に設置されるため、燃料板自体の耐震強度は必要なく、ここでは、燃料板を積み重ねたときの圧縮荷重に対しての燃料板の強度を検討した。

荷重条件としては、燃料さや管の燃料領域（下部ポリエチレン反射体の上）に燃料板があり、その上部に KUCA で使用する物質の中で最も密度の大きなウラン金属が高さ 40cm、その上部に 50cm のポリエチレン反射体が挿入されている場合を考える。また圧縮荷重は [redacted] (図 3、P の矢印の箇所) に作用すると考える。

圧縮荷重：

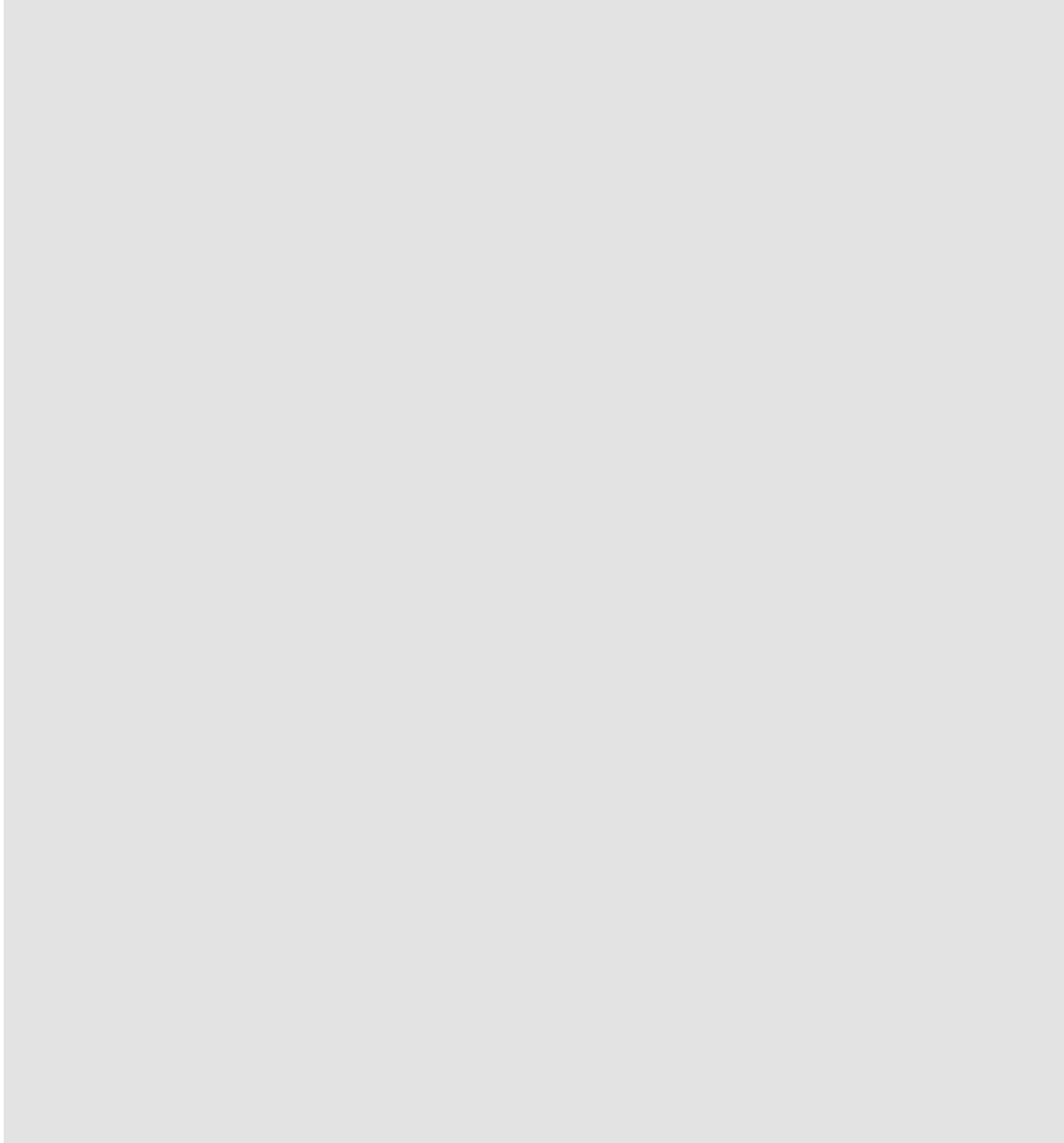


圧縮応力：



一方、アルミニウム合金 AG3NE 相当である A5052 は引張強さ 175 N/mm² 以上、耐力 (0.2%) 65 N/mm² 以上 (JIS H4000 A5052P-O 板) であり、圧縮強度も同じと考えれば燃料板上部からの圧縮荷重に対して燃料板は十分安全である。

なお、U-7Mo 単体での降伏点は 700 N/mm² であり¹⁾、混合するアルミニウムパウダーについては強度が弱い純アルミ系 (A1100) と同等の降伏点であるとしても耐力 (0.2%) は 25 N/mm² 以上 (JIS H4000 A1100P-O 板) であるため、仮に燃料板上部の挿入物の重量が U-Mo 燃料に直接加わったとしても圧縮応力 [redacted] より大きく問題はない。



1. 4. 燃料板の腐食

燃料板は KUCA の炉室内で使用するものであり、運転に伴う発熱は最大でも 100℃以下であるため燃料板が高温になることはない（申請書 添付 10 の解析結果より）。また使用する炉室内では昼間は空調設備が働いており（火曜日から金曜日は 9 時～20 時、それ以外の日は 9 時～12 時）、温度は夏場で最大 25℃程度、冬場で最低 15℃程度である。また除湿されているため高湿度になることはない。

このような使用環境であるので、燃料板（表面およびレーザー溶接部）が腐食する可能性

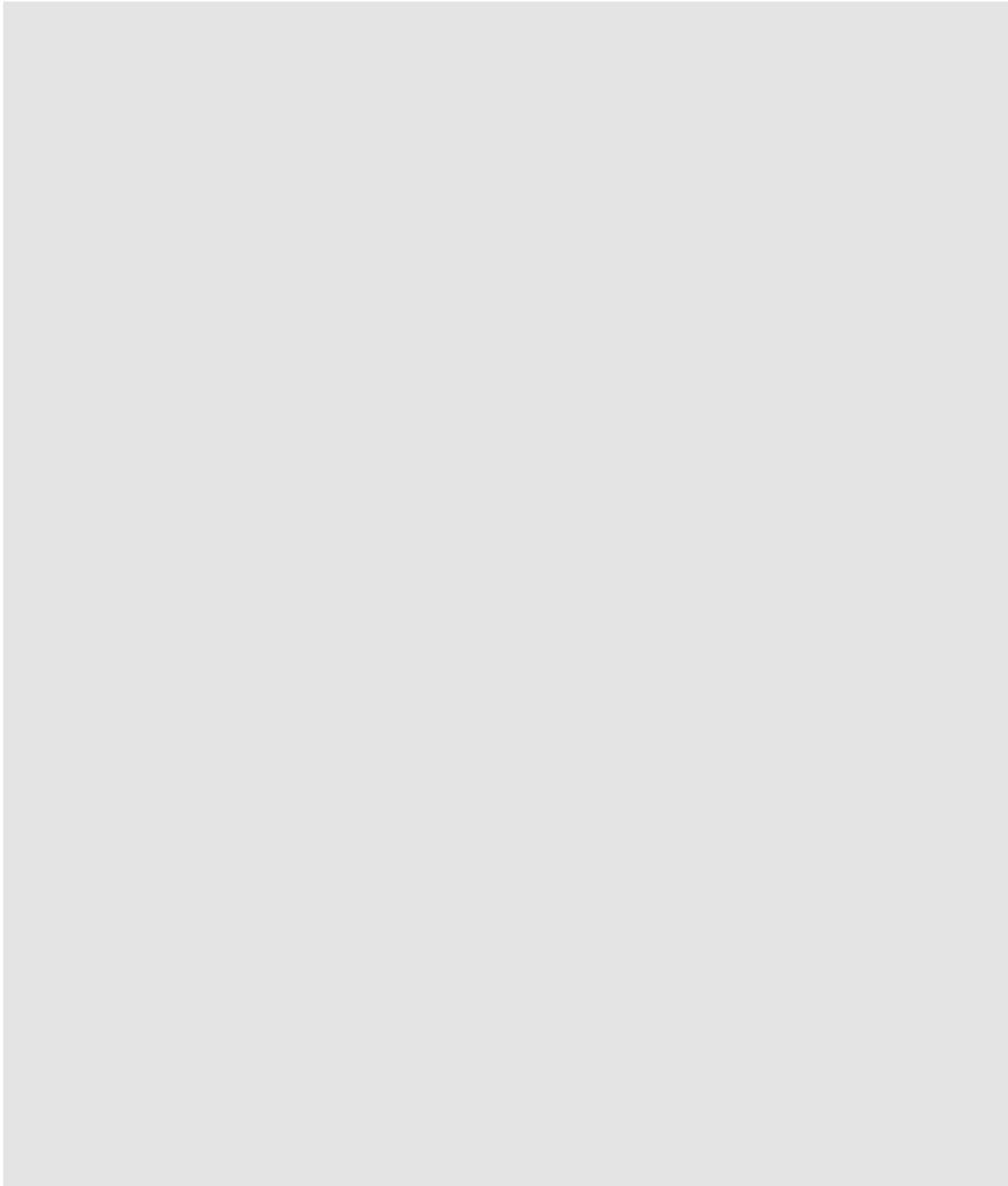
としては上記の使用環境を超えた温度変化および湿度変化が想定される最も厳しい状況であると考えられる。

そこで KUCA で使用するものと同じ方法で作成された複数枚の燃料板サンプルの耐食性試験を実施した。試験では温度 10℃で湿度 30%の低温乾燥の環境と、温度 40℃で湿度 85%の高温多湿の環境を繰り返す温湿度サイクル試験を実施し（図 4、図 5）、試験後に表面およびレーザー溶接部に腐食が認められるか確認した。

試験の結果、試験前後で外観上の変化は無く、レーザー溶接部および母材部に腐食は認められなかった（図 6）。

KUCA の炉室内には燃料板の材質とほぼ同等のアルミニウム合金（A5052）を用いた設備が多く存在する（例えば、軽水減速炉心の炉心タンク、配管など）。1974 年の設置以来、約 45 年が経過しているが、これまでにこれらの機器の表面や溶接部に腐食が認められたことは無いので、今回使用する燃料板についても腐食の恐れはほとんど無いと考えられる。

KUCA の燃料集合体は年に数回は組み立て、解体を行っており、各燃料板についてはこれらの作業時に表面の状況を目視で確認している。また使用していない燃料板についても少なくとも年 1 回は目視で確認しており、これらの確認作業で何らかの異常が発生した場合には使用しないようにする。



1. 5. 燃料板のブリスタ

今回使用する燃料板は U-Mo 粒子をアルミニウムパウダーと混ぜて製作した [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] 被覆材中に封入した構造をしており、これまで KUCA の軽水減速炉心で使用してきた燃料平板や KUR で使用している燃料平板 [REDACTED] [REDACTED] と極めて類似した構造をしている。KUR 等においてブリスタの発生防止するために燃料芯材の最高温度は 400°C を超えないことを求めており、今回の U-Mo を用いた燃料板についてもブリスタの発生を防止するために燃料芯材の最高温度は 400°C を超えないことを設計基準事故時の判断基準としている。これは、U-Mo 分散燃料はウランシリサイド分散型燃料と同様にアルミニウムパウダー中に融点の高い燃料粒子が分散した構造をしており、ブリスタの発生はこれまでの基準（燃料破損閾値としてブリスタ発生温度の約 500~600°C に安全余裕を見た温度である約 400°C）と同じとして良いと考えられるからである。

U-Mo 燃料のブリスタの発生要因についてはウランシリサイド分散型燃料の場合と同様に、燃料被覆材と U-Mo の燃料コンパクトの間の密着性の低い箇所の燃料芯材が高温にな

1. 7. 燃料板の落下試験

固体減速架台用の U-Mo 燃料のサンプルを使用しサンプルの落下試験を実施した。

KUCA での燃料取扱時には、燃料組み立ての際に誤って燃料をコンクリートの床に落とす可能性があり、その影響によって溶接部分等が破壊され、核物質の漏洩につながるものが危惧される。そこで、現在製作予定の燃料が実際の燃料取扱時の落下にも十分耐えうることを確認するため落下試験を行い、その強度と密封性能を確認した。

使用したサンプルは全て U-Mo 燃料を製作する予定のフランスの CERCA 工場において全く同じ手法で製作したもので、寸法およびアルミニウム被覆の材質は実際に製作予定のものと同じ、サンプルの内部には燃料コンパクトと密度が近いステンレス板 [REDACTED] [REDACTED] が梱包されている。図 7 にサンプルの概略図を示す。Front face は識別番号が刻印されている側とし、Back face は溶接が施されている側とした。各 Side face の位置は図 8 に示したとおりである。落下試験の前と数回の落下の後、さらに 100 回の落下試験後に、Front、Back、各 Side face の 6 面について写真撮影を行った。Side face 撮影時はサンプルを立て、Front face が必ず右側になるように設置して撮影を行った。

試験は KUCA 燃料室と同じコンクリート床である KUCA の総合測定室で実施した。サンプルを落下させる高さは、KUCA の燃料取扱時に使用している作業機が約 75 cm であるため、それより倍の高さである 150 cm とした。また、サンプルを落下させる際は、試験者は必ず刻印側が下となるようにサンプルを持ち落下させた。試験者は、サンプル落下後、破損等がないことを確認した後に、次の落下試験を行った。図 9 に落下試験の概略図を示す。

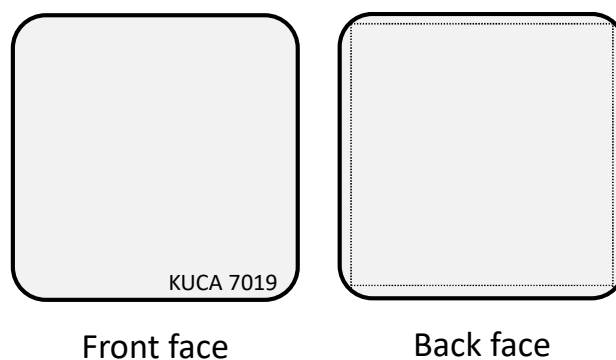


図 7 使用したサンプルの概略図

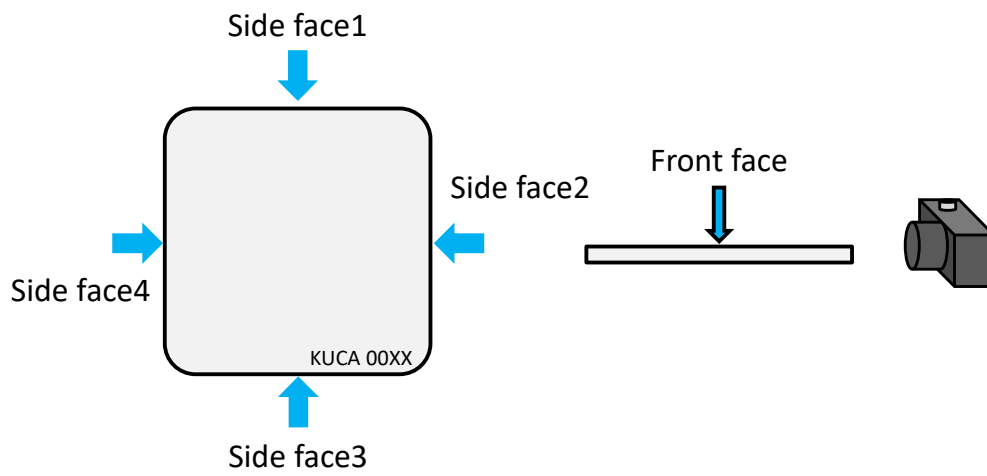


図 8 各 Side face の位置

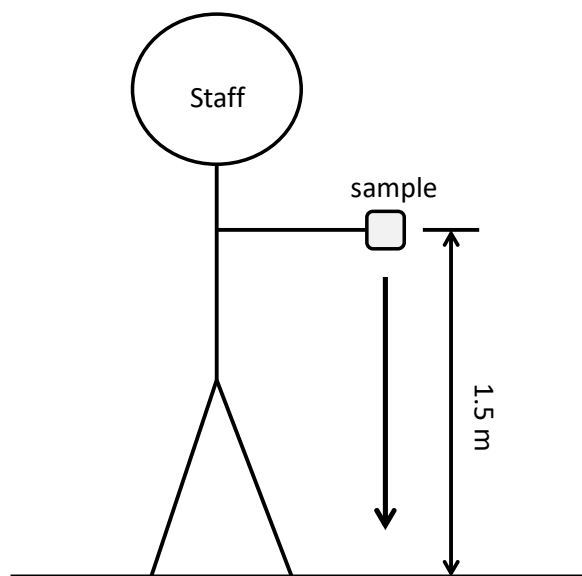
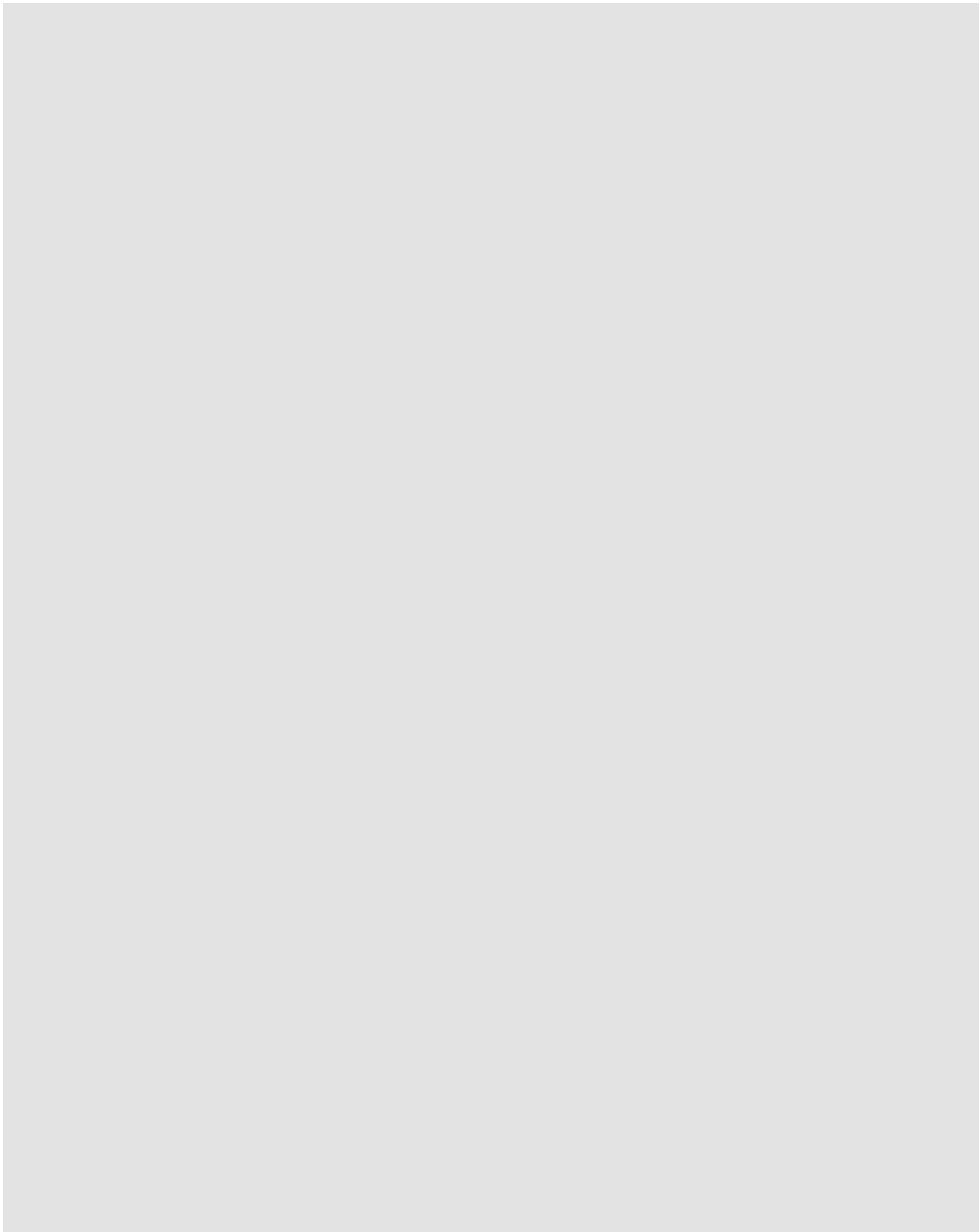
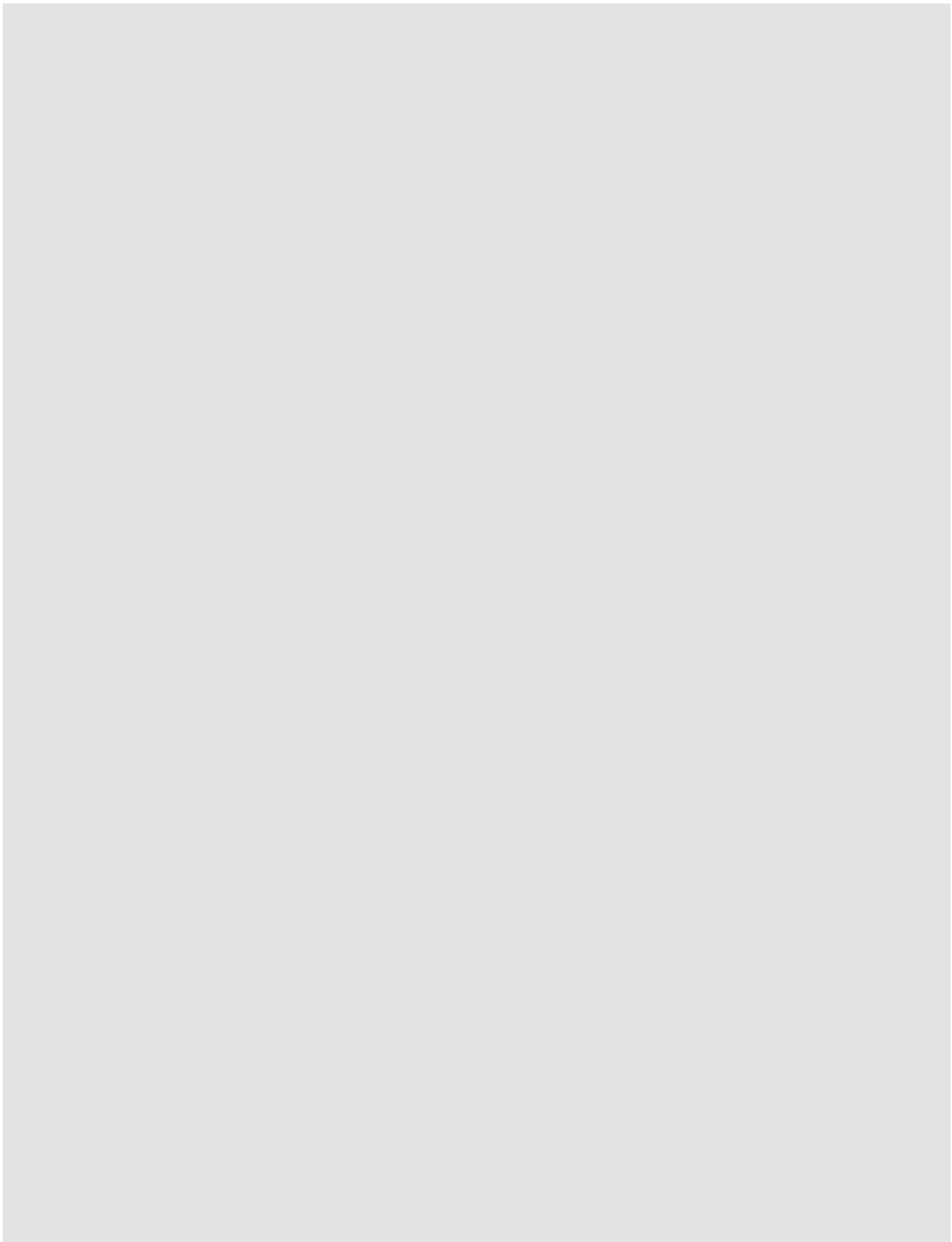


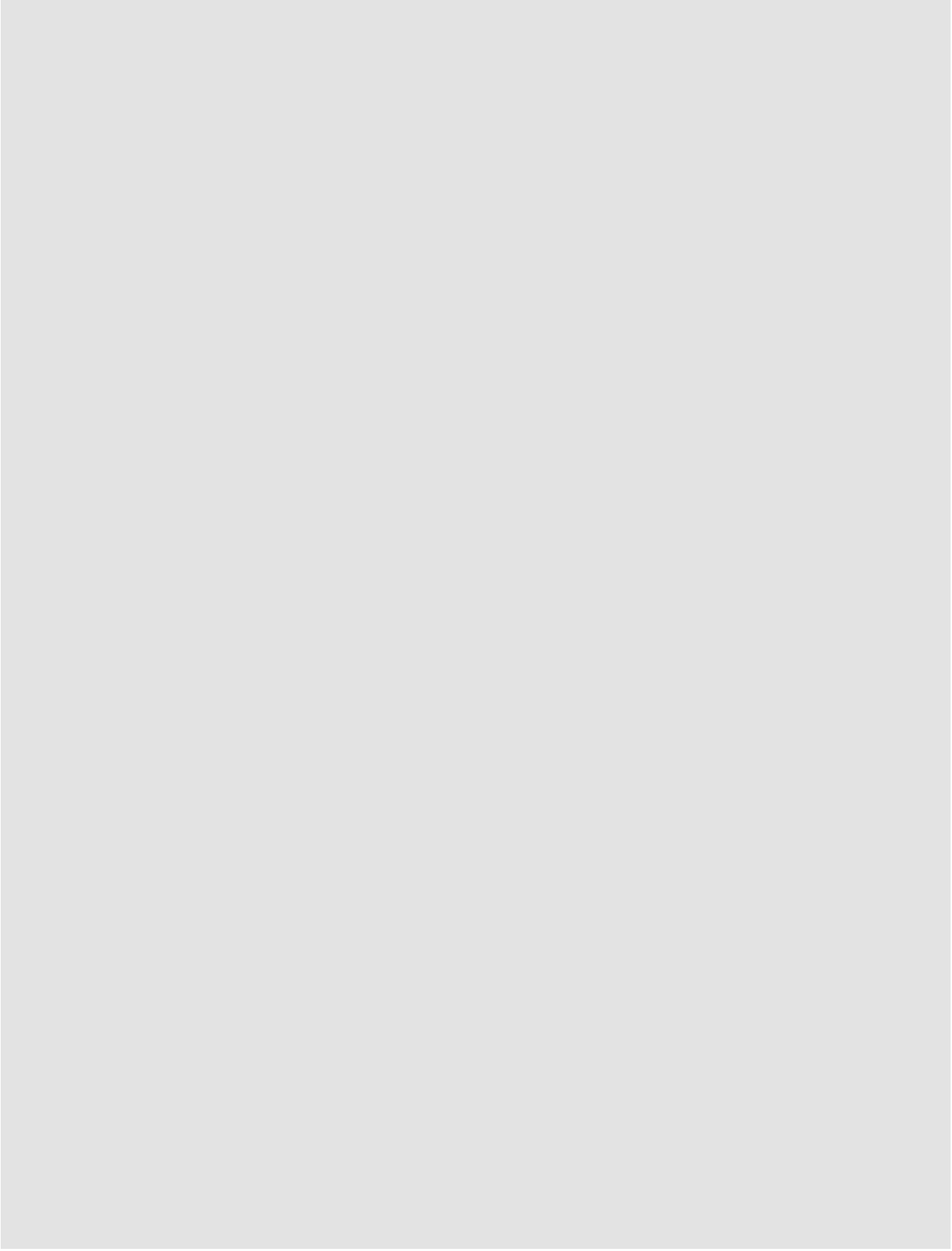
図 9 落下試験の概略図

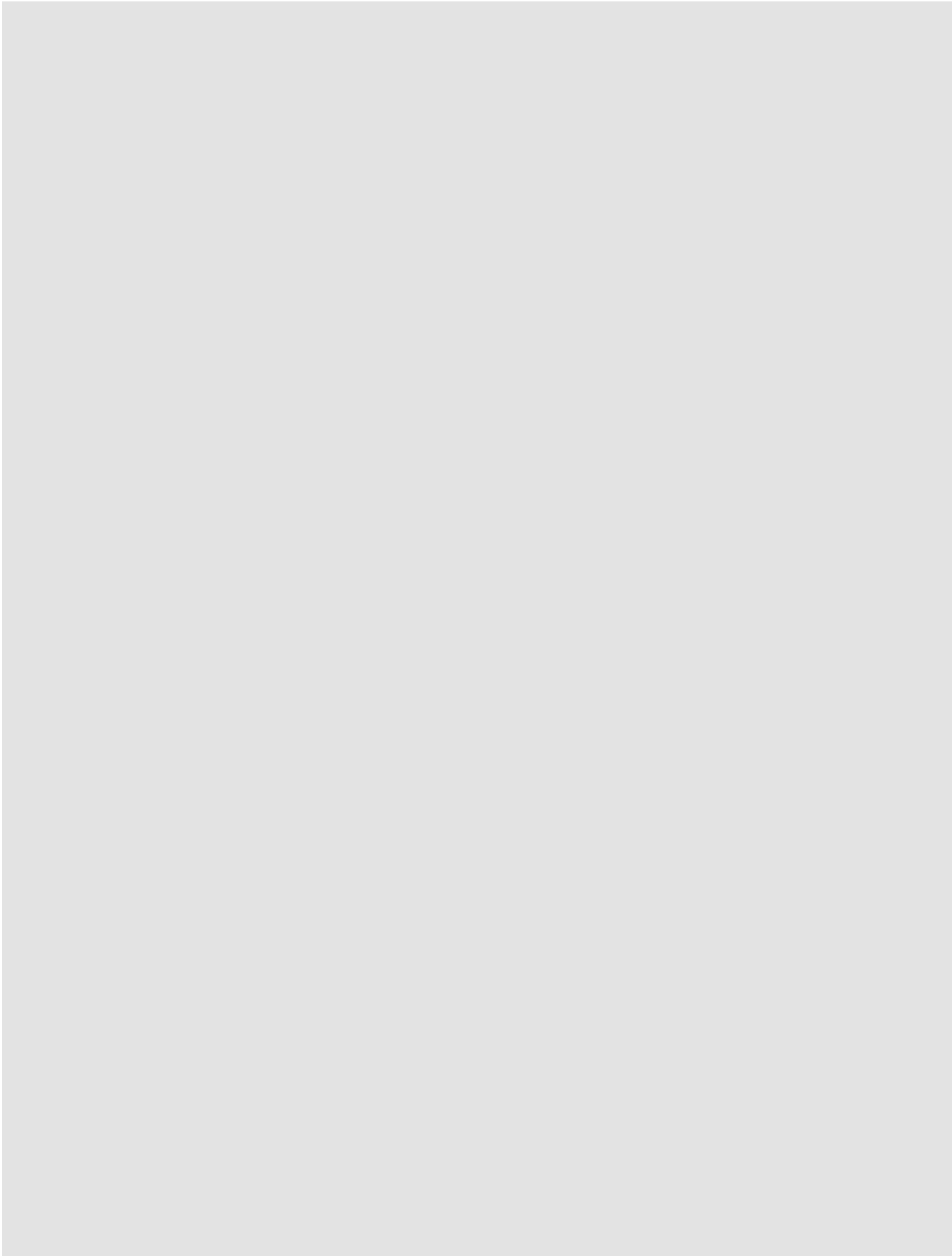
図 10-1～図 10-7 に試験前、1 回落下後、9 回落下後、20 回落下後、50 回落下後、75 回落下後、100 回落下後の各面の写真撮影結果を示す。1 回落下後は特に大きな変化は見られなかったが、9 回落下後にサンプル角に大きな曲がり確認できたが、燃料板の溶接箇所には異常は見られず密封性能に影響を与えるものではなかった。その後、落下を繰り返していくに連れて角の傷や角の曲がり等は多くなっていたが、100 回の落下試験後でも燃料の大きな破損はなく、溶接箇所には異常は見られず密封性能に影響を与えるものではなかった。

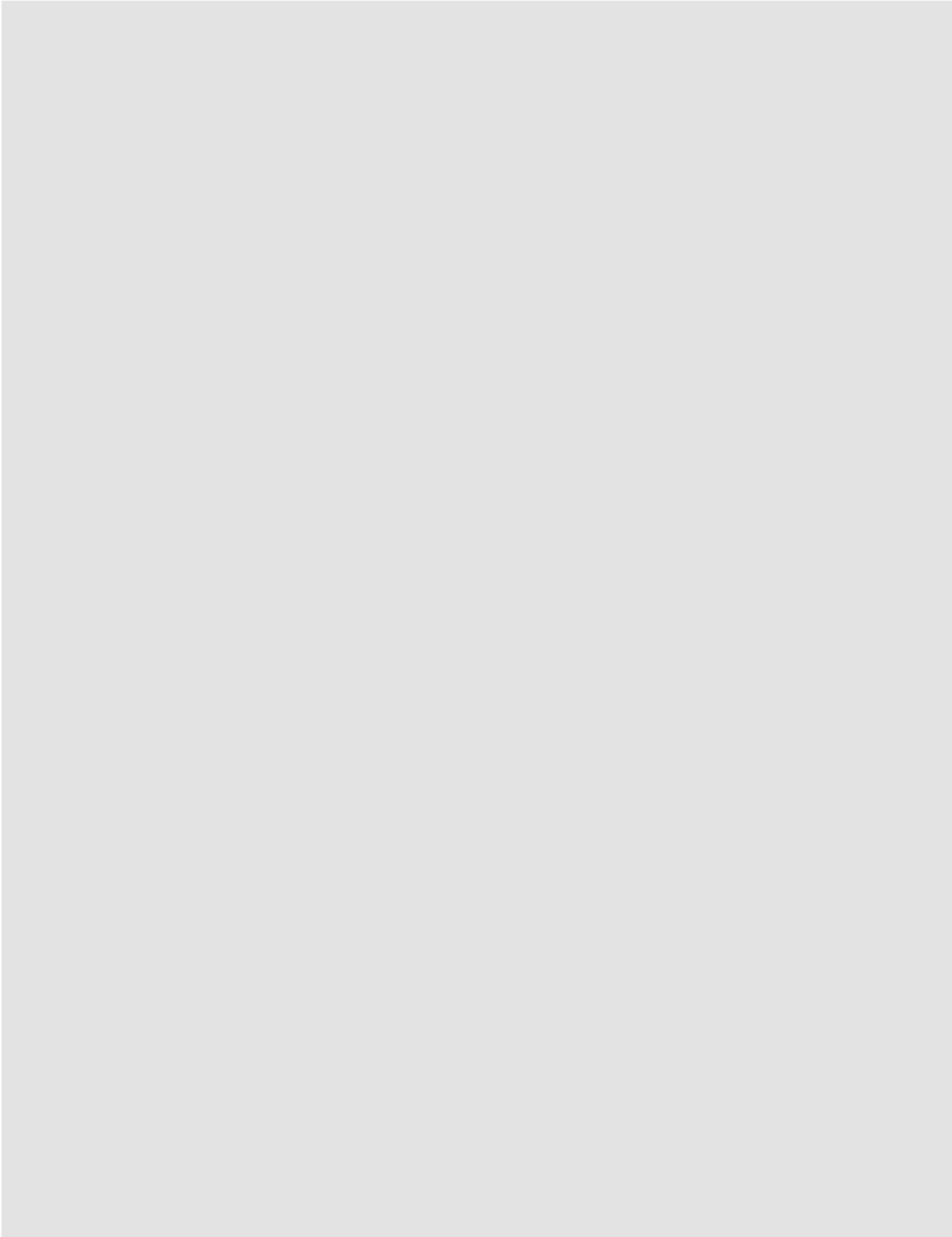
なお、これまでの高濃縮ウラン燃料板の使用時に燃料板に変形が見つかった場合にはそれ以降は炉心で使用しないような措置を取ってきたので、低濃縮ウラン燃料の場合でも同様の対応を行う予定である。

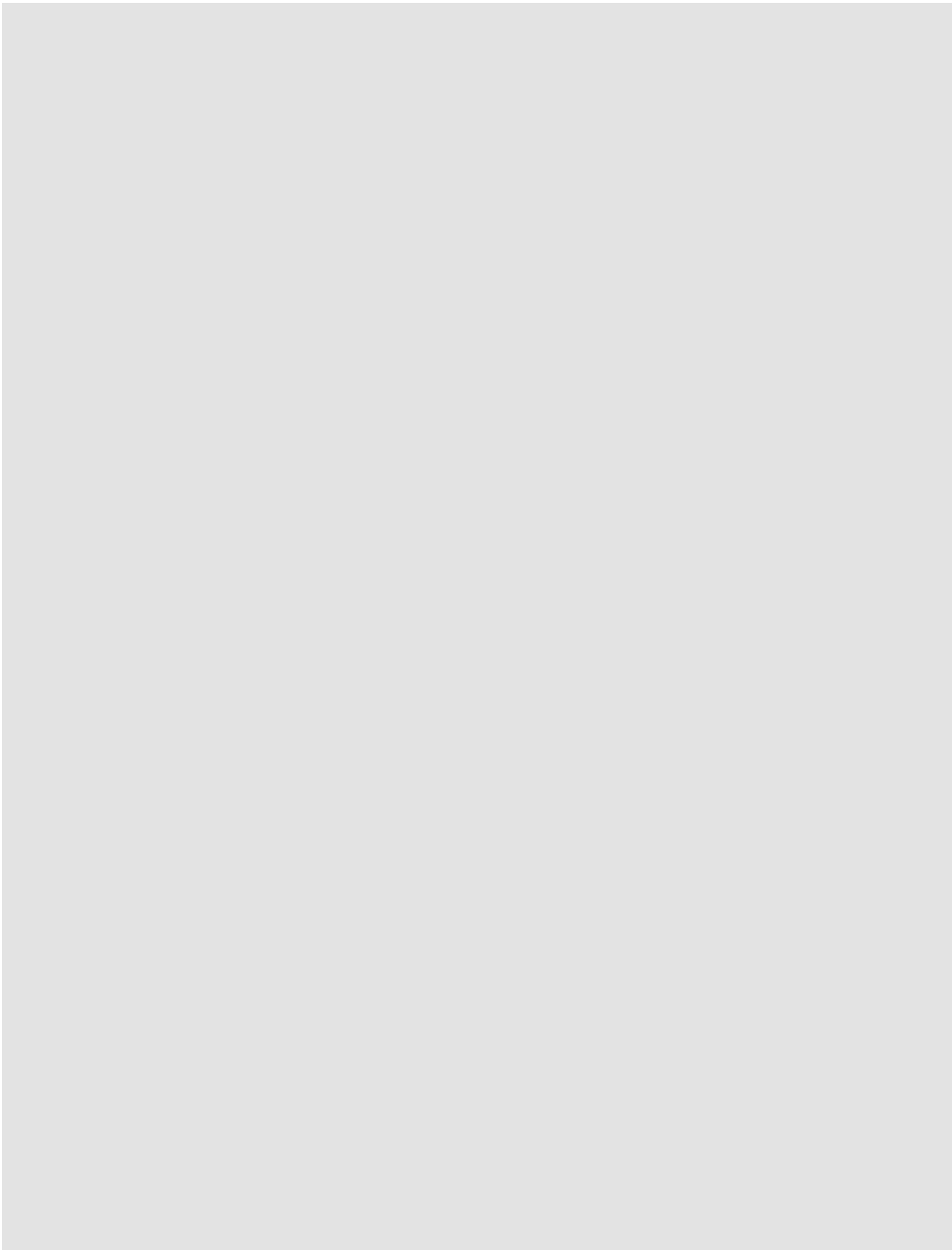


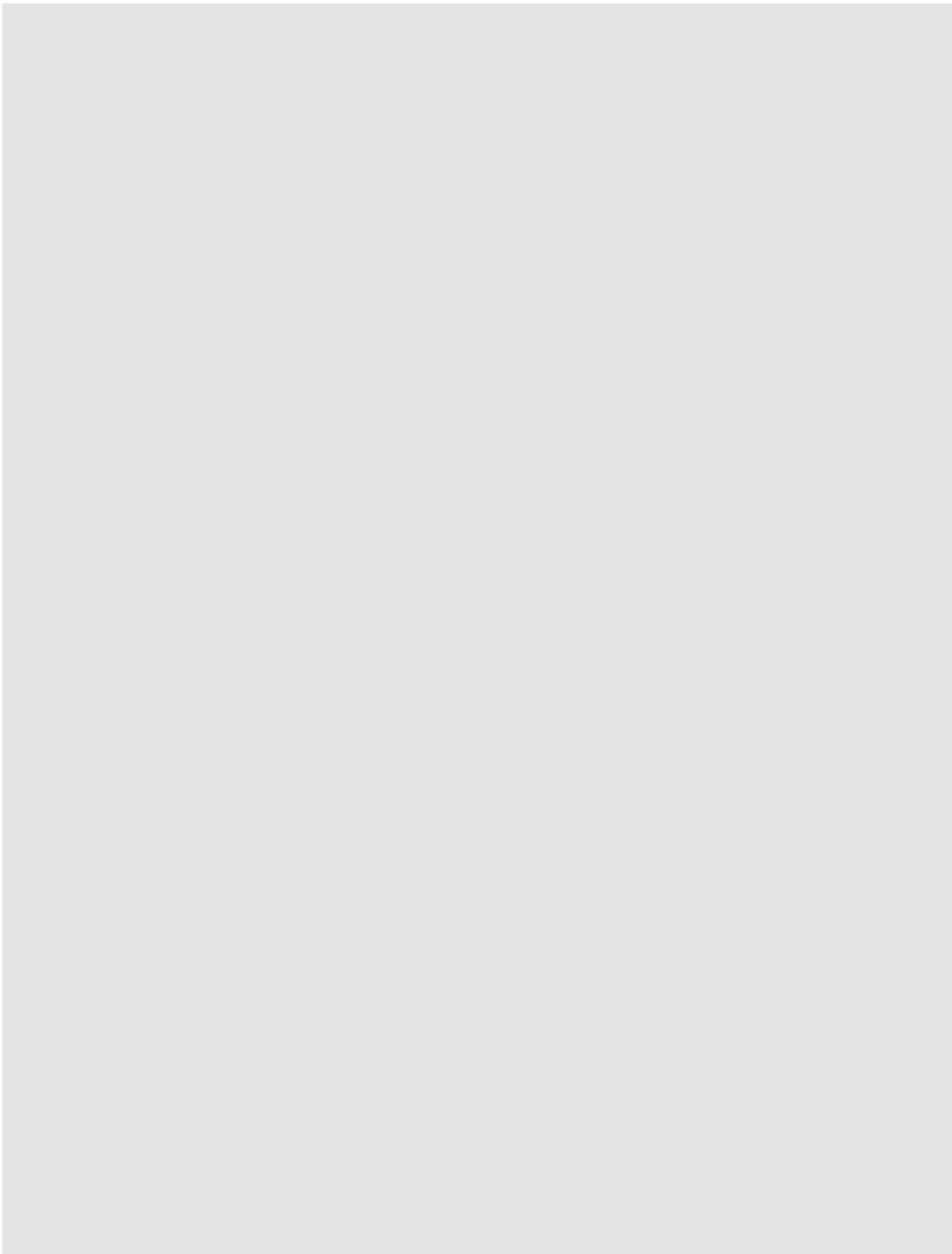


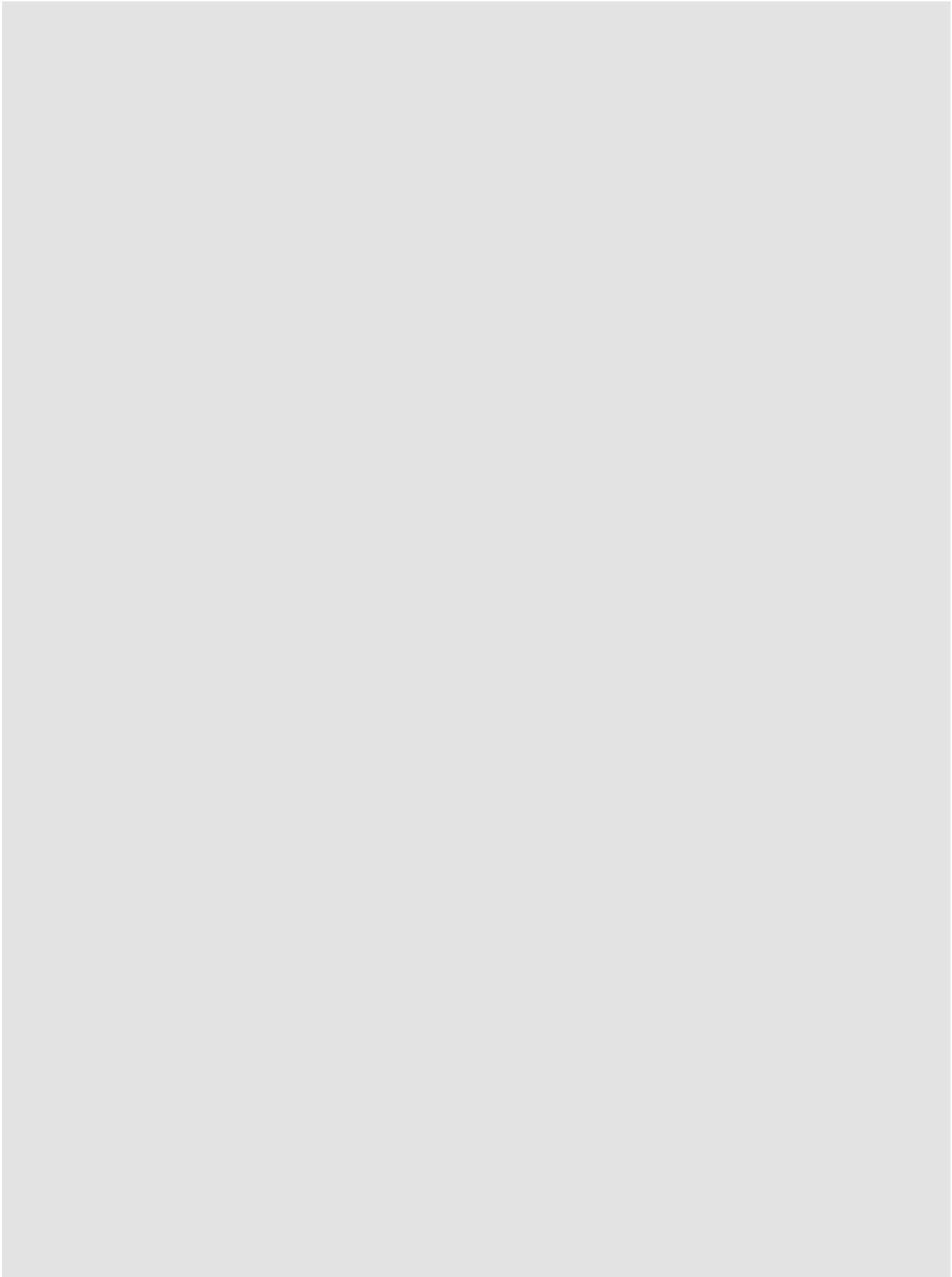


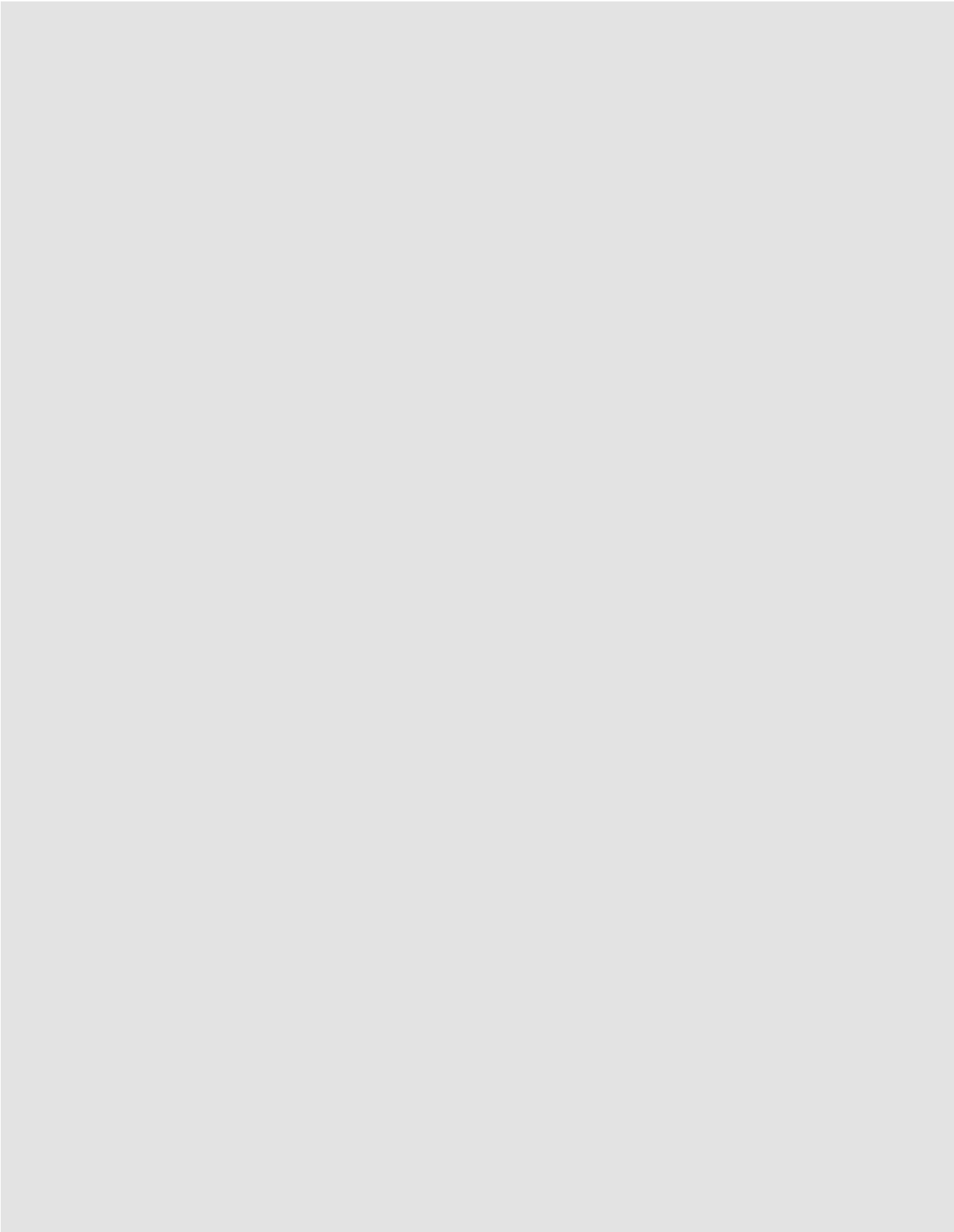


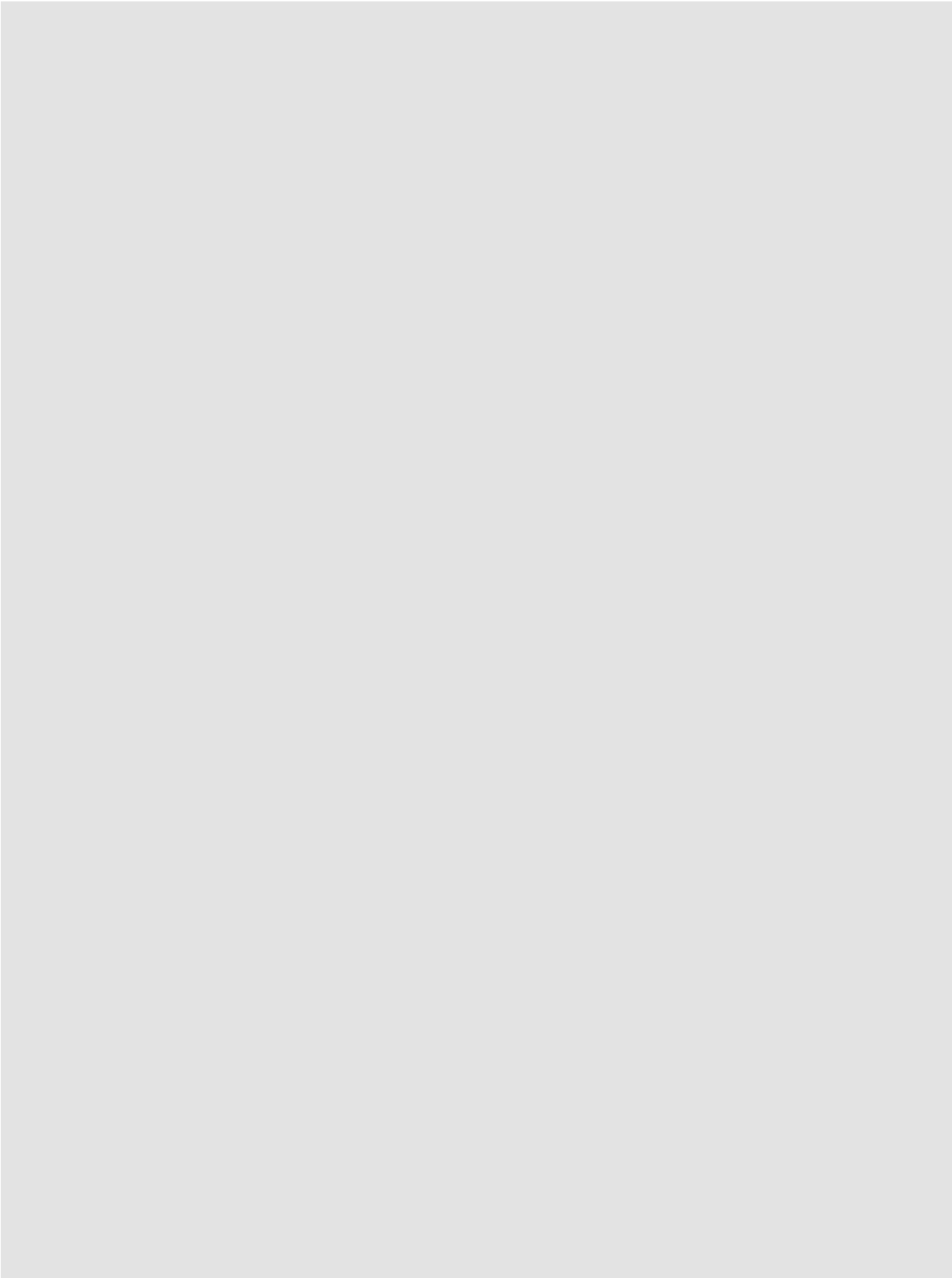


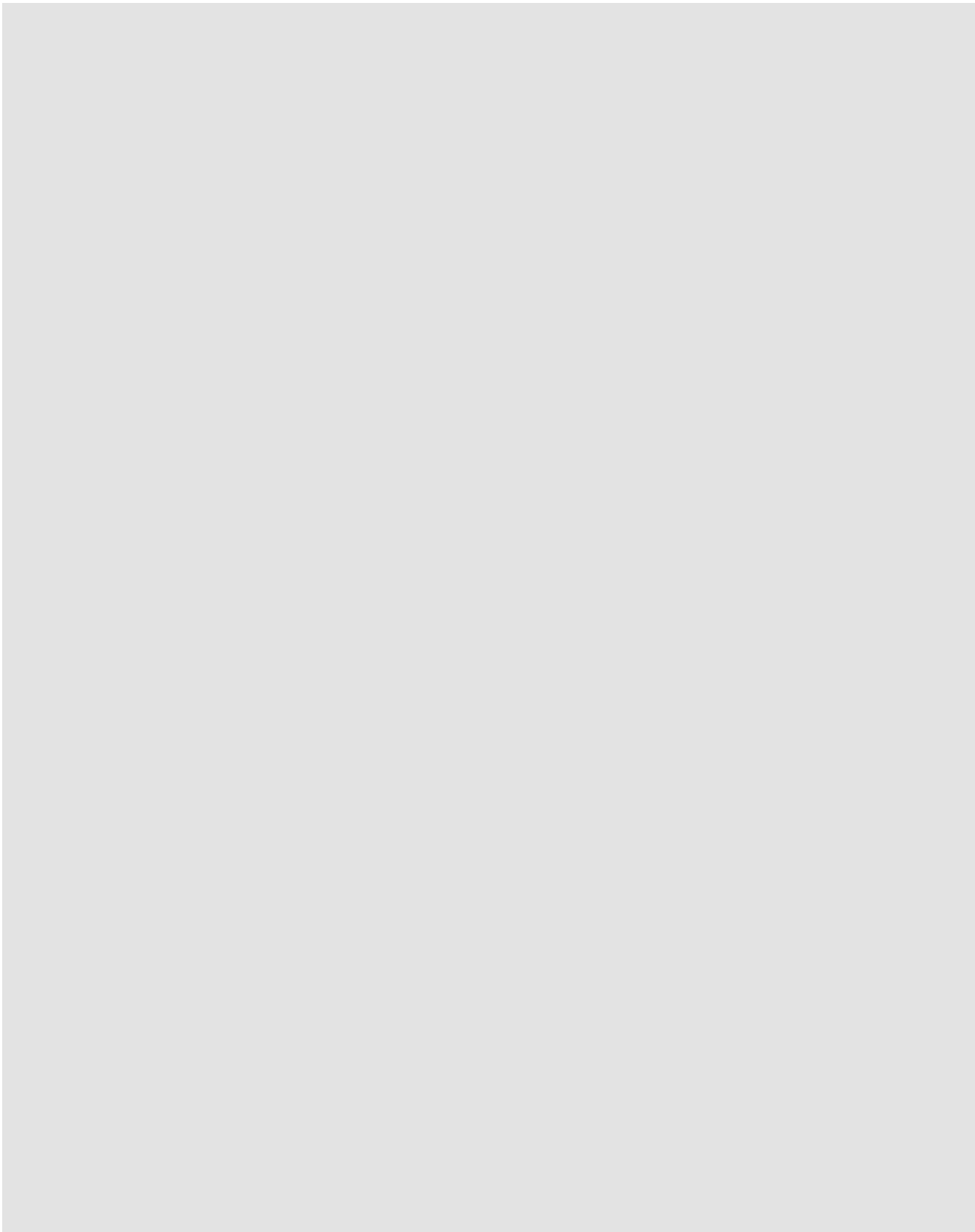


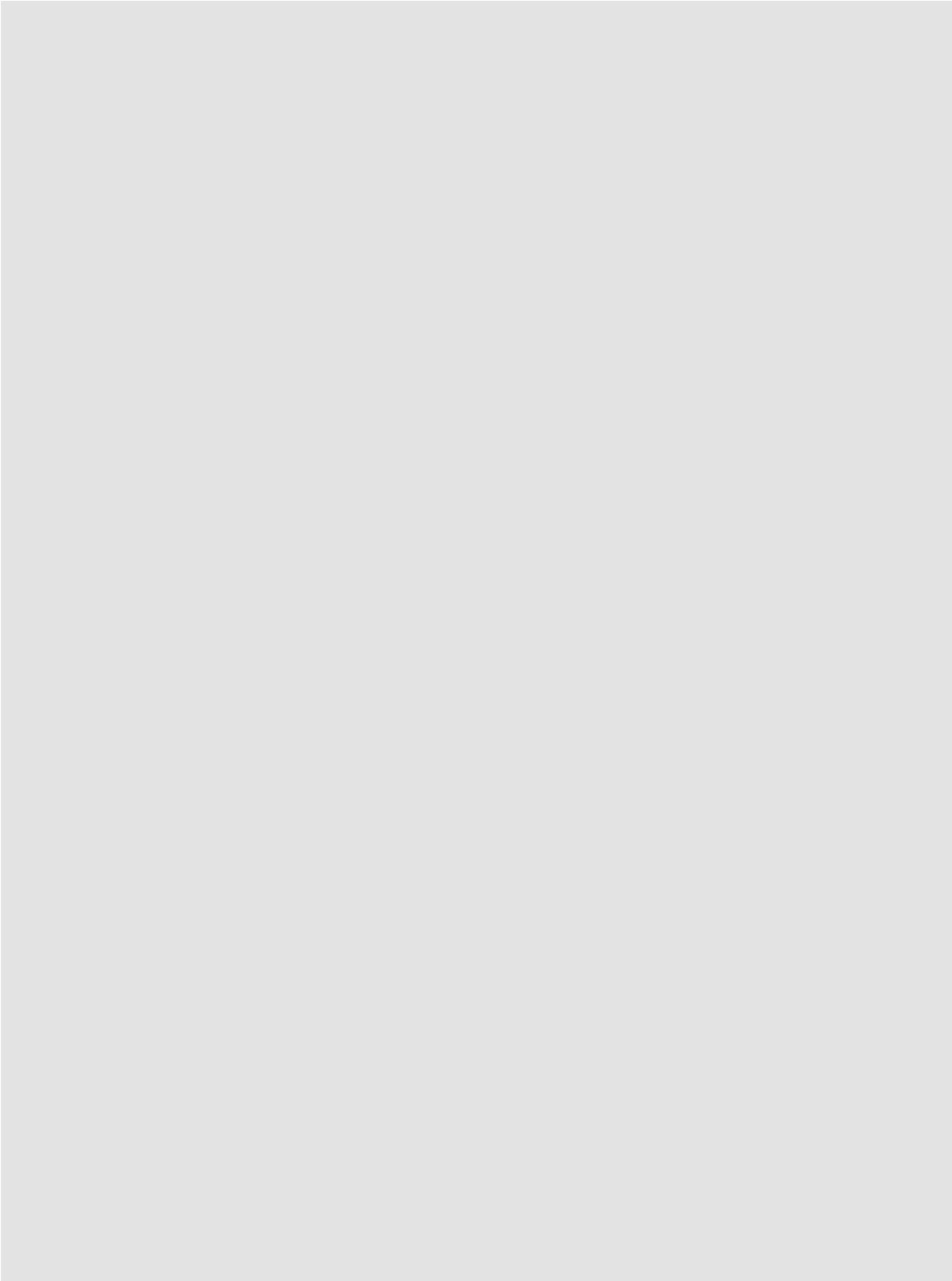


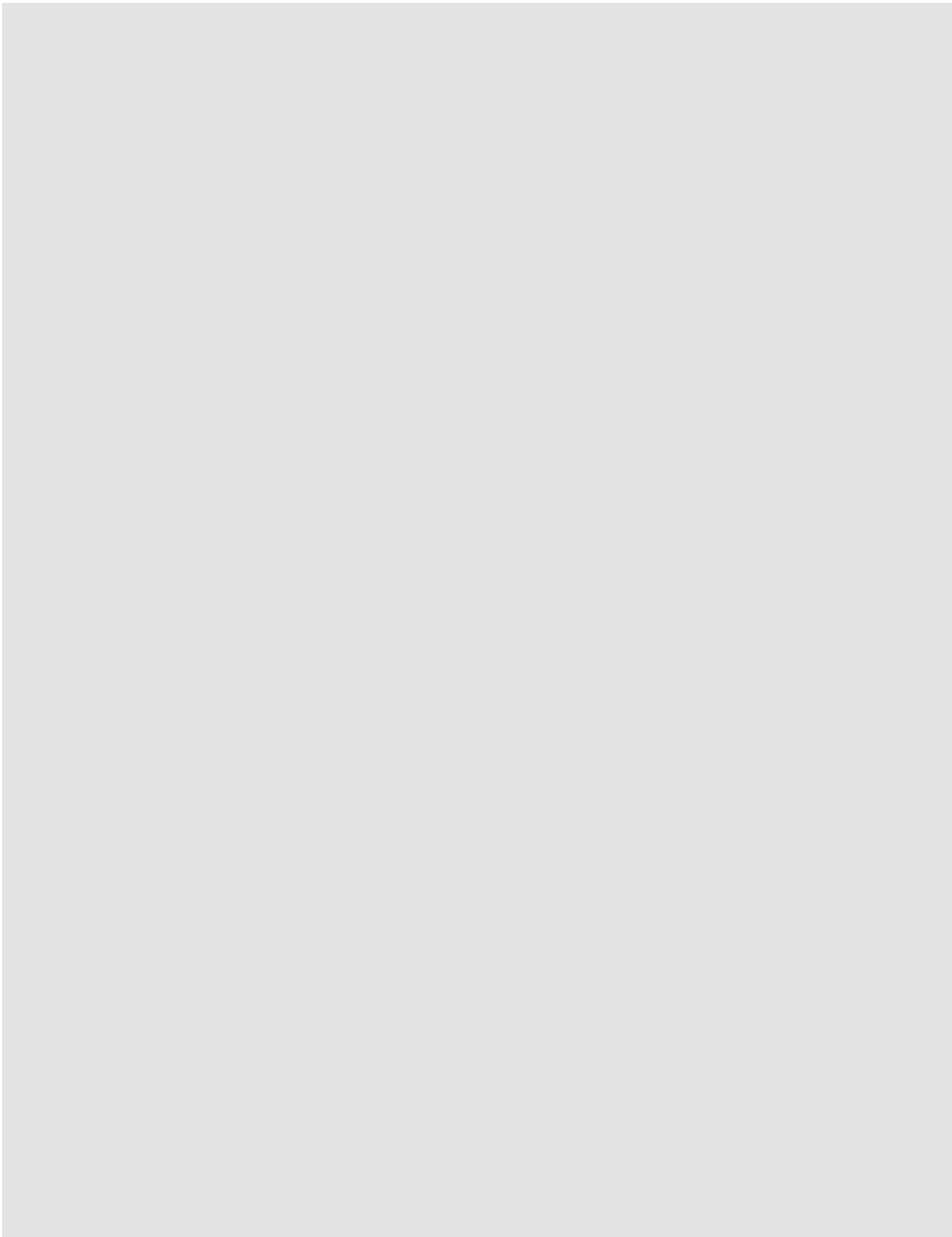


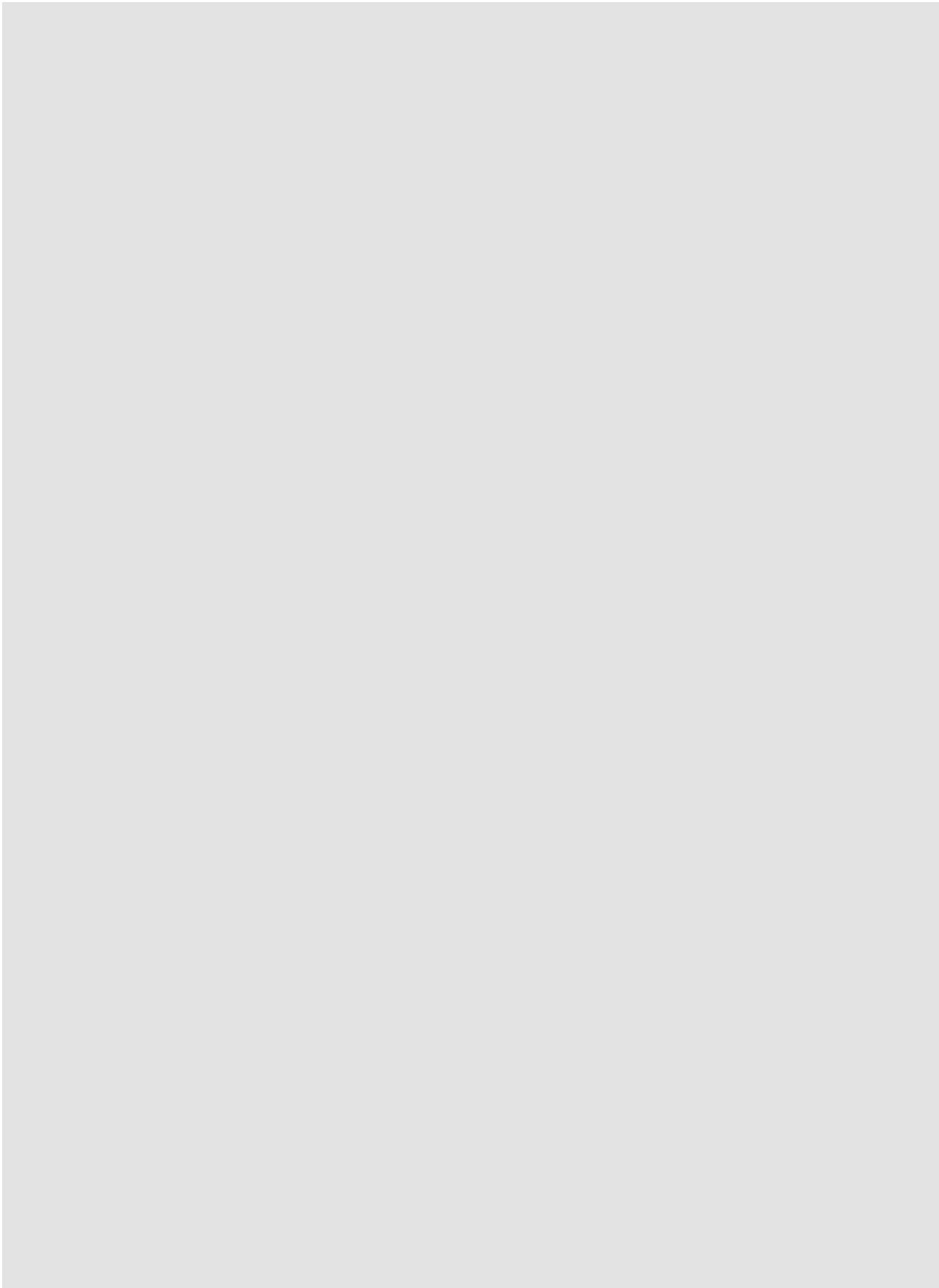




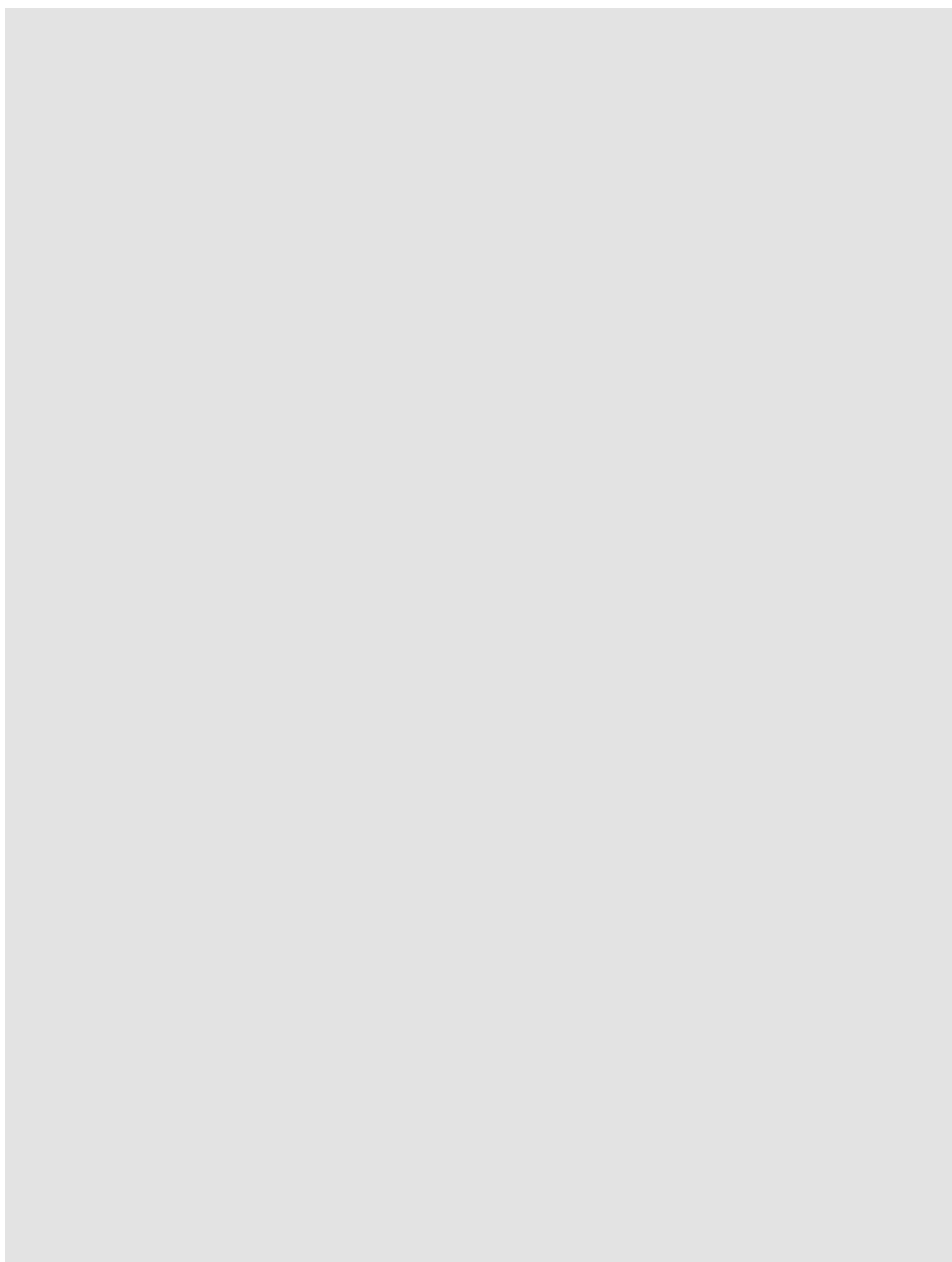


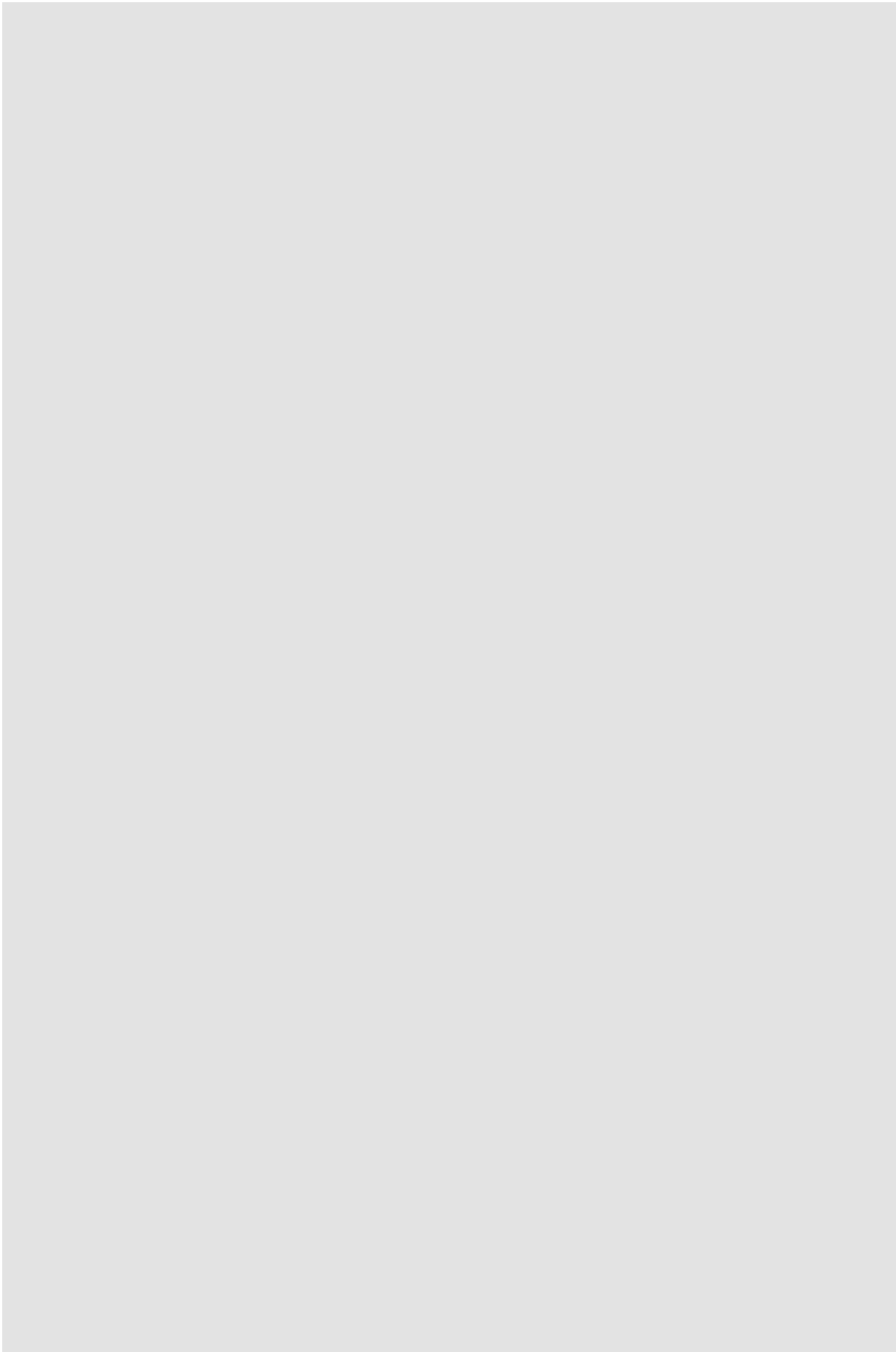


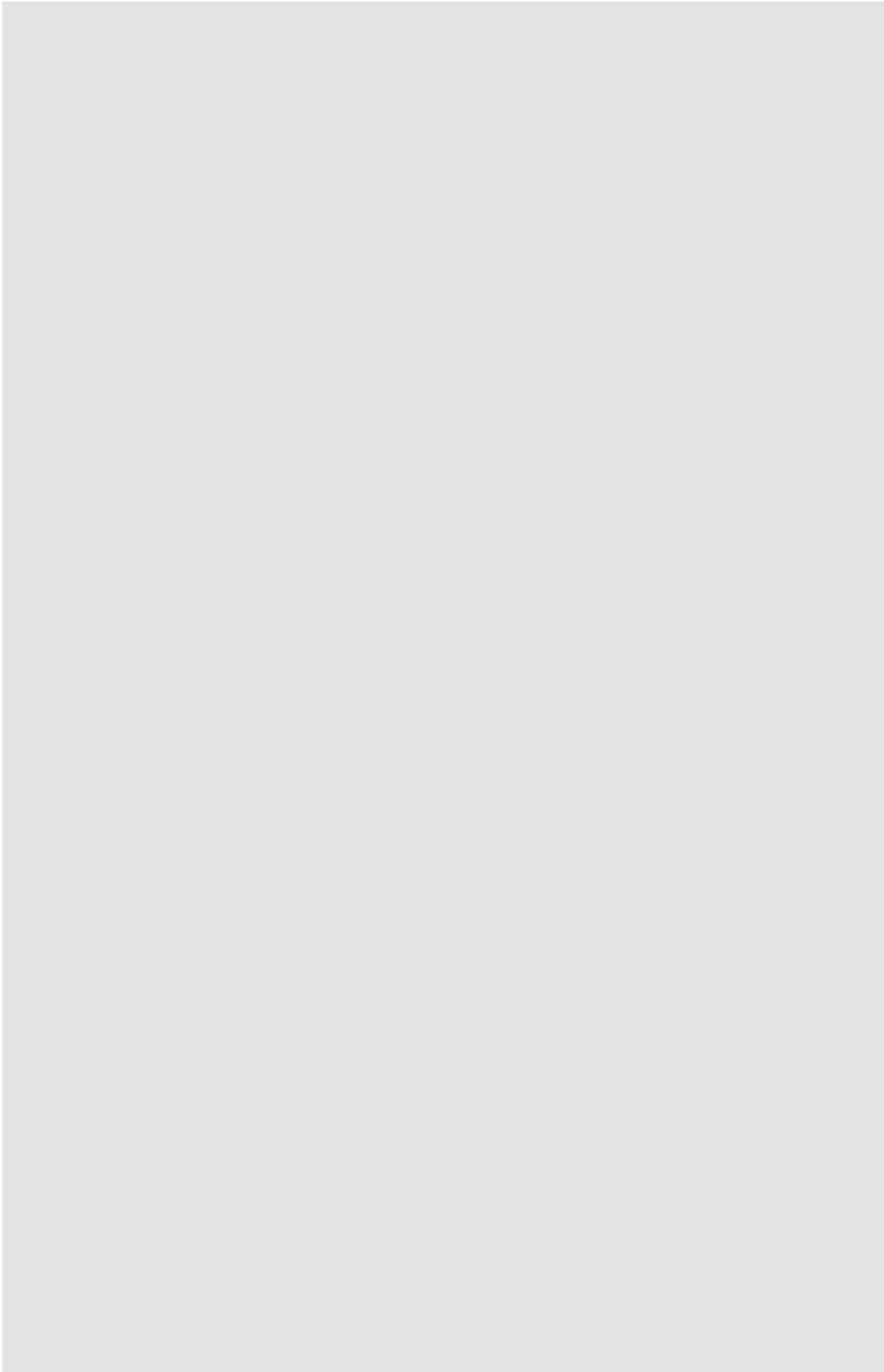




1. 8. 燃料体の組み立て方法について







2. 軽水減速炉心の燃料

2. 1. ウランシリサイド分散型燃料

軽水減速炉心では KUR、JRR-3 などの研究用原子炉で使用されているものと同じウランシリサイド分散型燃料 (U_3Si_2-Al) を使用する。形状は現在 KUCA の軽水減速炉心で使用している燃料平板と同じで、 U_3Si_2-Al の燃料ミート部を KUR と [redacted] アルミニウムで被覆した構造をしている(図 11)。燃料ミート部の U 密度は [redacted]

ウランシリサイド分散型燃料はこれまでに世界各国の多くの研究用原子炉において使用実績があり、高い燃焼度まで使用することができることが示されている [redacted]

2. 2. 照射特性

KUCA で使用する燃料のスウェリング量を求めるために、申請書に記載した数値から燃料の燃焼度に対応する F_d を求める。全核分裂数は 1.2. で示した結果と同じである。

[redacted] (申請書 添付 8)

[redacted] fissions/cm³

スウェリングによる体積増加率 $dV/V(\%)$ は、次式によって計算される³⁾。

$$dV/V (\%) = [redacted]$$

V_0 : 初期ボイド率 [%]

ボイド率 V_0 を 0 とし、体積増加率を求めると次のようになる。

$$[redacted]$$

スウェリング量は固体減速炉心の燃料より小さい値であり、照射に伴うスウェリング量は無視することができる。すなわち、核分裂で生成した FP は燃板の形状に影響を与えることなく内部に保持されるといえる。

2. 3. 燃料板の応力

燃料板は燃料フレームの溝に挿入して使用しており、他の箇所からの応力が係る可能性は無い。

燃料板の被覆材には、アルミニウム合金である AG3NE (JIS A5052 相当)を使用する。燃料板の中心温度が高く被覆材表面温度が低い場合には燃料板には熱応力が生じる可能性があるが、申請書の添付 10 に記載された運転時の異常な過渡変化の解析の結果によると燃料板の中心の温度上昇は最大でも 2℃以下と非常に低い値であるため、燃料板に異常をもたらすような応力は発生しない。

2. 4. 燃料板の腐食

燃料板の被覆材には、耐食性の高いアルミニウム合金である AG3NE (JIS A5052 相当)を使用する。KUCA では A5052 の被覆材用いた燃料板を 1974 年の設置以来、約 45 年間使用しているが、これまでに燃料板の表面に腐食が認められたことは無いので、今回使用する燃料板についても腐食の恐れはほとんど無いと考えられる。

2. 5. 燃料板のブリスタ

ウランシリサイド燃料のブリスタ発生温度に関しては米国 ORR 炉 (30MW) において照射したフルサイズ燃料要素を照射後に昇温してブリスタ発生温度を確かめた結果があり、そのデータでは、ブリスタ発生温度は 550℃以上であるとしている³⁾。また他にミニプレートによる他の実験結果をも参考にして、ブリスタ発生の下限温度を 515℃と評価している実験結果もある⁴⁾。そのためブリスタ発生を防止するため、運転時の異常な過渡変化が発生した場合においても燃料最高温度は 400℃を超えないこととしている。

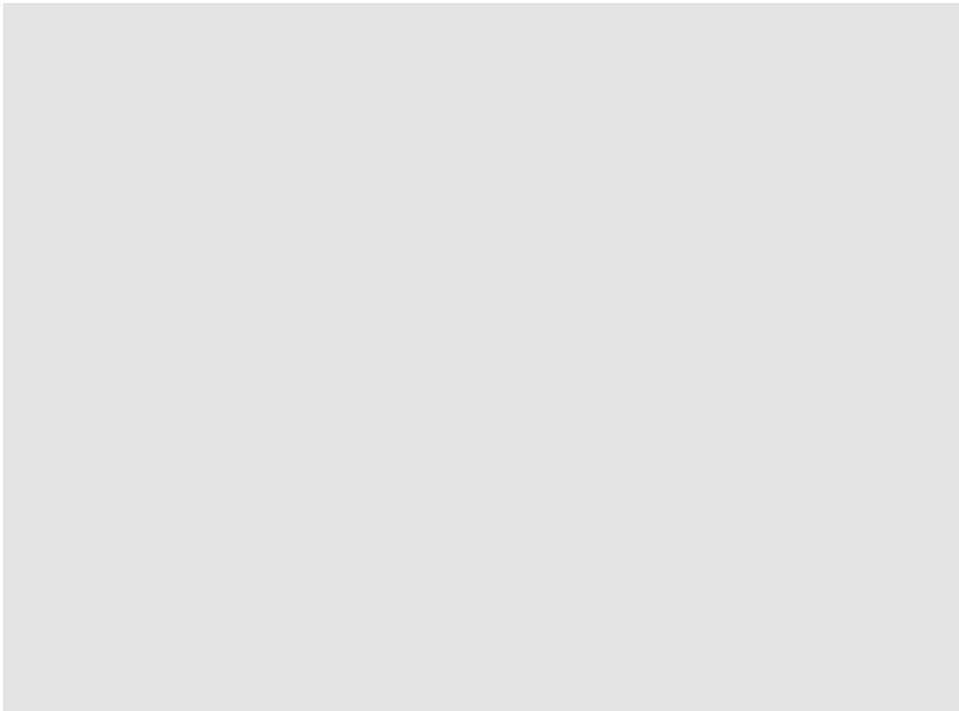
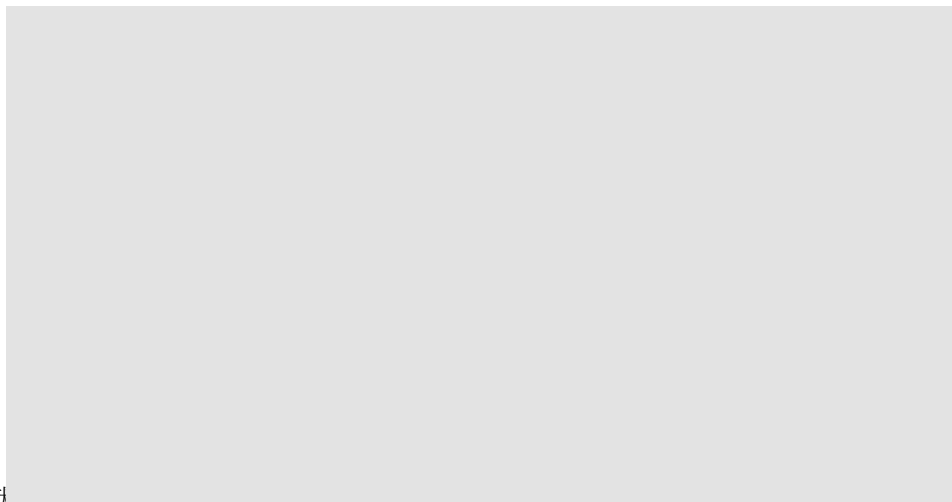
申請書の添付 10 に記載された解析の結果によると燃料板の中心の温度上昇は最大でも 0.3℃以下と非常に低い値であるため、ブリスタが発生する恐れはない。

参考文献

- 1) "U-Mo Fuels Handbook", ANL-09/31, Argonne National Laboratory (2006).
- 2) D.W. White, A.P. Beard, A.H. Willis, Irradiation behavior of Dispersion fuels, USAEC Report KAPL-P-1849, Knolls Atomic Power Laboratory, 1957.
- 3) U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Safety Evaluation Report related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors, NYREG-1313 (1988).
- 4) G. H. Hansen et al., "ATR-ETR Rates of Oxide Film Formation on Aluminum Fuel Plates," ANS Transaction, Vol.18, p.127 (1974).

補足A ウランモリブテン燃料及びウランシリサイド燃料の仕様
(モリブテンやシリサイドの密度に係る情報)

表A-1 U-Mo 燃料に関する仕様

A large rectangular area that has been completely redacted with a solid grey fill, obscuring the table's content.A second large rectangular area, also completely redacted with a solid grey fill, obscuring the table's content.

参考文献

- 1) “Evaluation of the Kyoto University Critical Assembly Erbium Oxide Experiments”,
LEU-MET-THERM-005, NEA/NSC/DOC/(95)03/IV Volume IV.
- 2) V. F. Dean ed., “ICSBEP Guide to the Expression of Uncertainties”
<https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/documents/UncGuide.pdf>

京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

【添付書類 8】

固体減速炉心	1
軽水減速炉心	21
核計算の妥当性の確認	38
制御棒の相互干渉効果	59
高濃縮ウランを用いた炉心の制御棒反応度等の解析	85
制御棒反応度の最大の 1 本の確認(誤差の考慮)	92
反応度調整用燃料体を 2 体利用した場合の制御棒反応度	96
実効増倍率の誤差が臨界質量に及ぼす影響	98
燃料製作時の公差等が実効増倍率に及ぼす影響	101
反応度印加率の算出方法	107
低濃縮炉心の燃料板の仕様	111

京都大学複合原子力科学研究所

1. 固体減速炉心

1.1 炉心構成の制限

固体減速炉心については以下のような制限を加える。

- 1) 低濃縮ウラン板とポリエチレン板からなる燃料について、H/U-235 の最も大きなものとして L5.5P (燃料板 1 枚と 1/8 インチポリエチレン板 5.5 枚、H/U-235=372)、H/U-235 の最も小さなものとして LL1 (燃料板 2 枚と 1/8 インチポリエチレン板 1 枚、H/U-235=34) とする。なお、ポリエチレン板としては 1/8 インチ厚さと 1/16 インチ厚さのもの以外は使用しない。(炉心名称の付け方については表 1 の脚注に記載)
- 2) 炉心は 1 種類の燃料体のみを使用した単一炉心とする。
- 3) 燃料集合体の軸方向に異なる燃料セルの分布を設けない。
- 4) 燃料集合体中の燃料領域の高さは 31cm 以上、47cm 以下とする。
- 5) ただし、反応度調整のために燃料領域の高さが 30cm 以下の燃料集合体を 2 体まで使用しても良いが、制御棒に隣接して配置しない。
- 6) 燃料の周囲を 3 層以上のポリエチレン反射体で囲む(ただし、検出器等の挿入のためにポリエチレン反射体を挿入できない場合を除く)。
- 7) 燃料集合体の燃料領域の上下方向には 25cm 以上のポリエチレン反射体を挿入する。
- 8) 減速材、反射材として黒鉛を使用しない(ただし、燃料集合体の最上部と最下部の黒鉛、および炉心最外周の黒鉛領域は除く)。
- 9) 天然ウラン、トリウムは使用しない。
- 10) 制御棒は炉心配置(水平方向)に対して線対称となるように配置する。(図 1 参照)

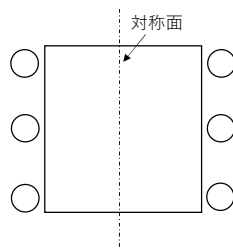


図 1 固体減速炉心の制御棒配置方法の概略図 (○：制御棒)

1.2 代表炉心の選定

以下のような代表炉心を選定する。

1) 1/8 インチ厚さ、または 1/16 インチ厚さのポリエチレン板と低濃縮ウラン板を組み合わせた燃料として表 1 の構成することができる炉心の中から以下のものを取り上げる。

LL1P、L1 P、L2 P、L3 P、L4 P、L5.5 P 炉心。

2) 各炉心の高さは、約 30cm、約 40cm、約 50cm とする。

3) 燃料体の配置は断面の x 方向（炉心配置図の左右方向）に対して対称とし、水平断面が正方形に近い形とする。

4) 上記の炉心のうち、最も臨界量が少ない炉心については、水平方向断面が正方形ではなく円形に近い形の炉心についても解析を行う。

1) と 2) より代表炉心としては、燃料セルの異なる 6 種類の炉心で各々について高さが 3 種類の合計 18 炉心を選定する。

構成することができる炉心の燃料セルの範囲と炉心高さ、それに対して選定した代表炉心を図 2 に示す。炉心高さの制限は約 30cm～約 50cm であり、それに対してその上限と下限付近の高さ、およびその中間高さの炉心を選定した。制御棒反応度は炉心高さが短いほど小さくなり核的制限値を満たさない可能性があること、反応度添加率は炉心高さが長いほど制御棒の反応度が大きくなり核的制限値を満たさない可能性があるため、高さの上限と下限の炉心を代表炉心に加えた。

図 3 に各燃料セルに対する体系の実効増倍率（一点炉近似でバックリングを約 2.1×10^{-2} ($1/\text{cm}^2$) に固定して計算)、および動特性パラメータの β_{eff}/ℓ を示している。規定した H/U-235 が 34～372 の範囲で 1/8”と 1/16”のポリエチレン板を用いて組むことができる炉心は代表炉心とその間の幾つかの炉心（図 2、3 の上部に矢印で示した燃料セル）である。燃料セルのポリエチレン板枚数の増加に対して k_{eff} の値は途中で極大値を持つような変化をし、 β_{eff}/ℓ の値は単調減少をしていることから考えて、代表炉心の解析を行うことでそれ以外の炉心（矢印の燃料セル）の核特性を包含すること、すなわち内挿して各値を推定することができると考えられる。一方、炉心高さの変更に関して炉心の動特性パラメータ (β_{eff} , ℓ)、温度係数はほとんど変化しないことが後述の解析結果からも判っているので、これらの炉心パラメータの観点からもここでの代表炉心の選定は問題が無いと考える。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

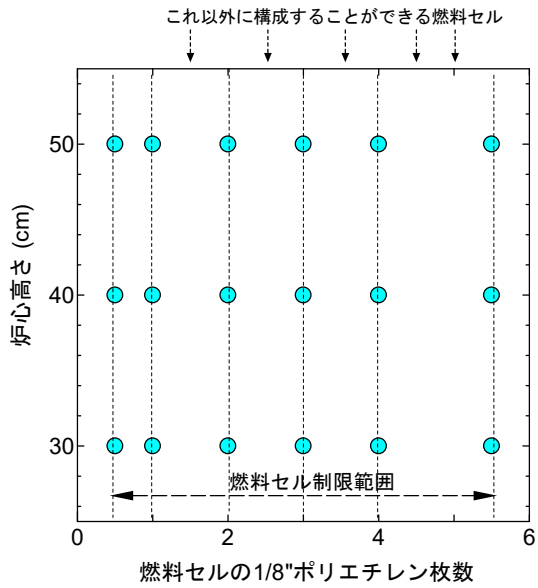


図2 炉心構成範囲と代表炉心
(青丸が代表炉心)

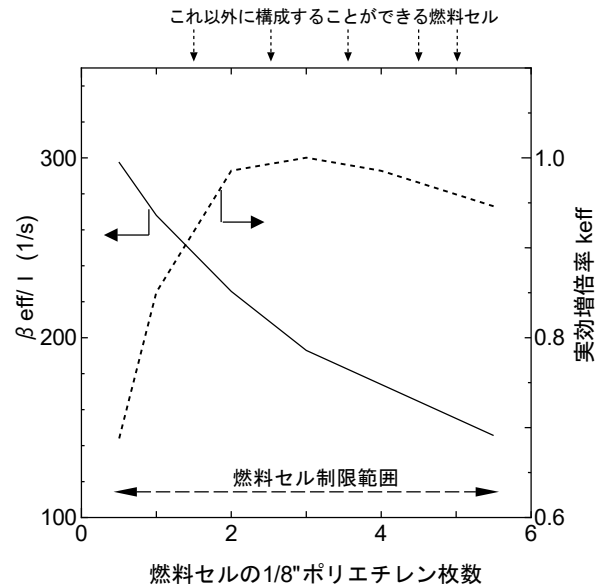


図3 各燃料セルの β_{eff}/l (実線)と k_{eff} (点線)
横軸は燃料板1枚当たりの枚数

表 1 固体減速炉心の代表炉心

炉心名称	単位セル寸法 (cm)	ポリエチ対燃料 体積比	H/ ²³⁵ U (-)
L5.5	1.98	7.59	372
L4	1.50	5.52	270
L3	1.18	4.14	203
L2	0.87	2.76	135
L1	0.55	1.38	68
LL1	0.78	0.69	34

Lは [] Lが繰り返されると重ねることを表す (LLは低濃縮燃料板を2枚重ねる)

数値は減速材の厚さで、ポリエチレン減速材のときは1/8インチ単位の厚さ (例えば3のときは3/8インチ厚さ)

1.3 代表炉心の解析精度

代表炉心の解析は「第 343 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 3 月 16 日) の資料で示したとおり SRAC コードシステムを使用する(この審査会合で説明した内容は補足 A 「核計算の妥当性の確認」に示す)。一部の解析についてはモンテカルロ計算コード MCNP (使用核データライブラリは SRAC と同様に JENDL-4.0) も使用する。

また同資料で示した通り、固体減速炉心と軽水減速炉心の両炉心について各パラメータの解析精度は以下のような値であるとして各パラメータの解析結果を評価する。

実効増倍率	: ± 0.6 %
制御棒反応度	: ± 18 %
反応度温度係数	: ± 32 %
即発中性子減衰定数	: ± 8%

臨界質量に関しては、補足 F 「実効増倍率の誤差が臨界質量に及ぼす影響について」での説明の通り解析精度は±6%として解析結果を評価する。

1.4 臨界量、動特性パラメータ、反応度温度係数等の解析結果

固体減速炉心の臨界となる体系の燃料体の配置（水平方向の配置）を図4、5に、各炉心の解析結果（臨界（ $k_{eff}=1.0$ ）となる炉心高さ、臨界量、動特性パラメータ、反応度温度係数）を表2に、最大過剰反応度（ $\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$ ）を持つ炉心の臨界量を表2に示す。図中の□は1つの燃料体を示しており、臨界となる炉心配置である。一方、図中の反応度調整用燃料体装荷位置の燃料体を追加した状態は最大過剰反応度を持つ炉心の配置である。

解析はSRACコードシステムの3次元拡散計算コードCITATIONを用いているので、炉心計算は燃料板、ポリエチレン板等の均質化定数を用いて行っている。そのためここでの臨界量は以下のような手順で算出した。

- ① CITATIONで $k_{eff}=1.0$ 、または $\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$ となるような燃料長（または部分燃料長）を求める。
- ② 炉心の燃料配置、制御棒配置は図1に示す通り中心線に対して線対称としているので、CITATIONの対称境界条件を用いて片側半分の体系を入力して計算を行う。
- ③ 燃料長から必要な燃料枚数を算出する（整数ではなく一般には実数となる）。
- ④ ③の燃料枚数に燃料板1枚当たりのウラン量を掛けて臨界量を求める。

UCAでの核的制限値として、固体減速炉心の
1.3節で述べたとおり 代
表炉心の解析においては

であることが求められるが、表2の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

反応度温度係数については核的制限値として $+2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^\circ C$ 以下であることが記載されている。反応度温度係数の解析精度は $\pm 32\%$ としているので、各炉心の反応度温度係数は

$$(2 - 2 \times 0.32) \times 10^{-4} = 1.36 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^\circ C \text{以下}$$

であることが求められるが、表2の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

炉心の体系を変更した場合の解析については、臨界量が最も少ないL5.5P-30炉心について臨界量と動特性パラメータ（ β_{eff} 、 ℓ 、 β_{eff}/ℓ ）の値について調べた。ここでは $k_{eff}=1.0$ となる炉心である。

結果を図6、表3に示す。この結果より炉心配置の断面形状を正方形に近い形から円形に近い形に変更しても臨界量、および動特性パラメータはほとんど変化していないことが判る。

表 2 固体減速炉心の代表炉心（臨界炉心 keff=1.0）の臨界量、動特性パラメータ等

炉心名称 ^a	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	β_{eff} (-) ^b	ℓ (s) ^b	β_{eff}/ℓ (s ⁻¹)	温度係数 ^c ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)
L5.5P-50	372	50.9	7.46×10^{-3}	5.18×10^{-5}	144.2	-1.05×10^{-4}
L5.5P-40		41.8	7.46×10^{-3}	5.15×10^{-5}	144.9	-1.00×10^{-4}
L5.5P-30		30.8	7.46×10^{-3}	5.17×10^{-5}	144.3	-9.47×10^{-5}
L4P-50	270	49.7	7.55×10^{-3}	4.59×10^{-5}	164.5	-9.98×10^{-5}
L4P-40		39.5	7.59×10^{-3}	4.45×10^{-5}	170.6	-8.81×10^{-5}
L4P-30		30.7	7.59×10^{-3}	4.42×10^{-5}	171.5	-8.49×10^{-5}
L3P-50	203	51.3	7.64×10^{-3}	4.02×10^{-5}	190.3	-9.65×10^{-5}
L3P-40		39.8	7.65×10^{-3}	3.99×10^{-5}	191.5	-8.45×10^{-5}
L3P-30		30.5	7.66×10^{-3}	3.96×10^{-5}	193.2	-7.81×10^{-5}
L2P-50	135	48.1	7.69×10^{-3}	3.56×10^{-5}	215.6	-7.28×10^{-5}
L2P-40		39.0	7.72×10^{-3}	3.42×10^{-5}	225.4	-6.95×10^{-5}
L2P-30		30.7	7.70×10^{-3}	3.53×10^{-5}	218.3	-6.47×10^{-5}
L1P-50	68	47.7	7.68×10^{-3}	3.11×10^{-5}	246.7	-5.44×10^{-5}
L1P-40		38.2	7.73×10^{-3}	2.84×10^{-5}	272.4	-5.06×10^{-5}
L1P-30		29.2	7.72×10^{-3}	2.92×10^{-5}	264.3	-4.69×10^{-5}
LL1P-50	34	49.7	7.66×10^{-3}	2.70×10^{-5}	283.7	-3.18×10^{-5}
LL1P-40		38.4	7.69×10^{-3}	2.55×10^{-5}	301.6	-3.07×10^{-5}
LL1P-30		30.0	7.68×10^{-3}	2.59×10^{-5}	296.5	-2.45×10^{-5}

a 炉心名称の前方は燃料を構成する最小単位セル

- ・Lは低濃縮燃料板（約2.3mm厚）、Lが繰り返されると重ねることを表す（Lは低濃縮燃料板1枚、LLは低濃縮燃料板を2枚重ねる）
- ・末尾がPはポリエチレンを減速材として用いる
- ・数値は減速材の厚さで1/8インチ単位のポリエチレンの厚さ（例えば3のときは3/8インチ厚さ）
- ・ハイフンの後の数値はcm単位の概略の炉心高さ（50は高さ約50cmの炉心）

b 定数について

β_{eff} 実効遅発中性子割合、 ℓ 中性子平均寿命

c 反応度温度係数は温度を25°Cから35°Cに変化させたときの実効増倍率の変化から求めた

表 2 固体減速炉心の代表炉心（最大過剰反応度炉心 $\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$ ）の臨界量

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	ρ 調整用燃料長 (cm) ¹⁾	
L5.5P-50	372	50.9	12.1	
L5.5P-40		41.8	21.6	
L5.5P-30		30.8	20.5	
L4P-50	270	49.7	11.2	
L4P-40		39.5	<u>5.5</u>	
L4P-30		30.7	24.0	
L3P-50	203	51.3	5.9	
L3P-40		39.8	13.2	
L3P-30		30.5	9.8	
L2P-50	135	48.1	12.0	
L2P-40		39.0	5.0	
L2P-30		30.7	<u>8.1</u>	
L1P-50	68	47.7	19.7	
L1P-40		38.2	6.3	
L1P-30		29.2	7.7	
LL1P-50	34	49.7	11.7	
LL1P-40		38.4	8.7	
LL1P-30		30.0	14.5	

- 1) 下線を付けた炉心については調整用燃料を 2 体使用した。それ以外の炉心は 1 体使用。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

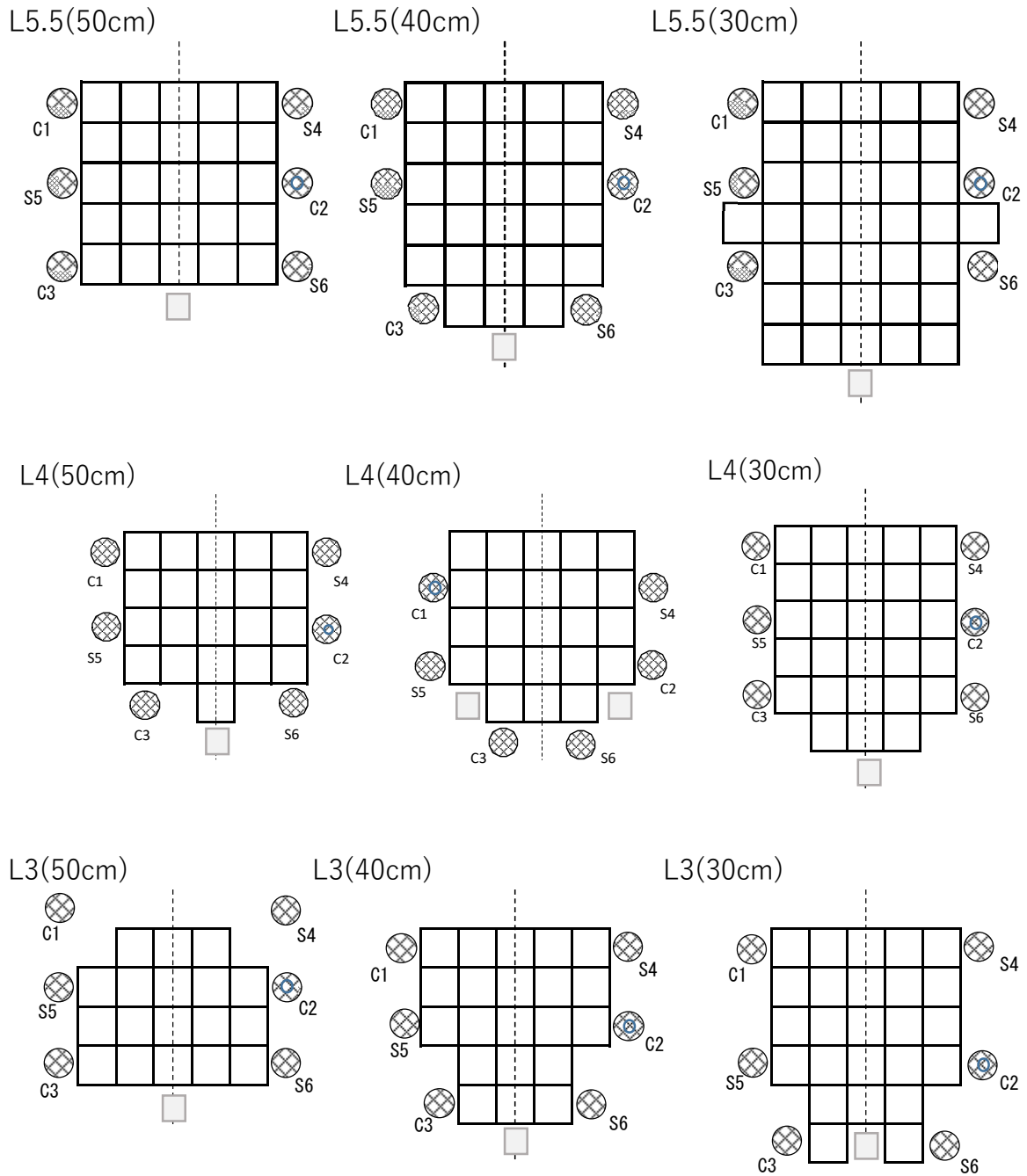


図4 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)

□: 反応度調整用燃料体装荷位置

(二重丸の制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

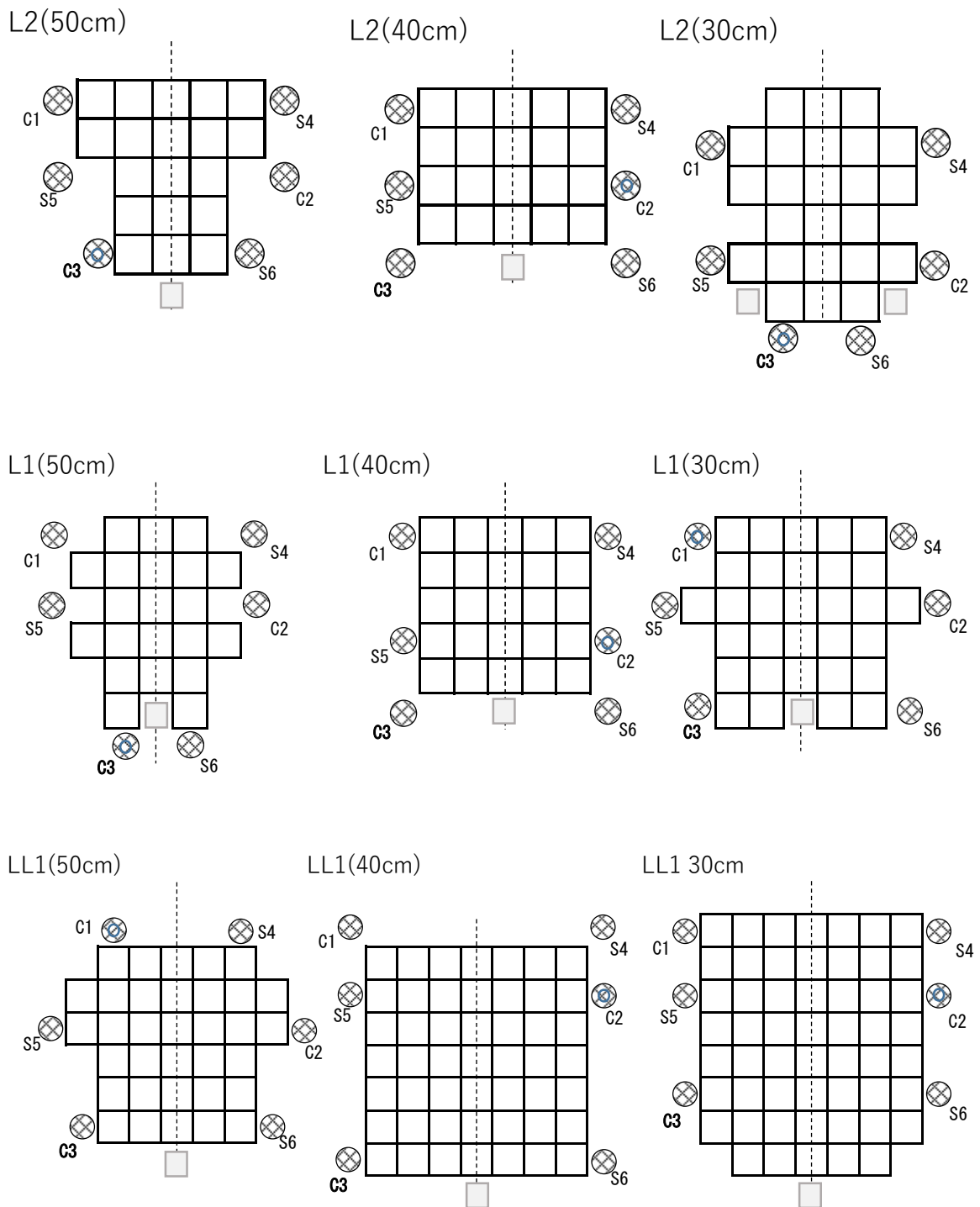


図5 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

■: 反応度調整用燃料体装荷位置

(二重丸の制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表3 L5.5P 炉心の臨界量と動特性パラメータ

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)		β_{eff} (-)	ℓ (s)	β_{eff}/ℓ (s ⁻¹)
L5.5P-30 (炉心1)	372	30.5		7.46×10^{-3}	5.16×10^{-5}	144.5
L5.5P-30 (炉心2)		30.5		7.47×10^{-3}	5.14×10^{-5}	145.4
L5.5P-30 (炉心3)		30.6		7.47×10^{-3}	5.17×10^{-5}	144.4

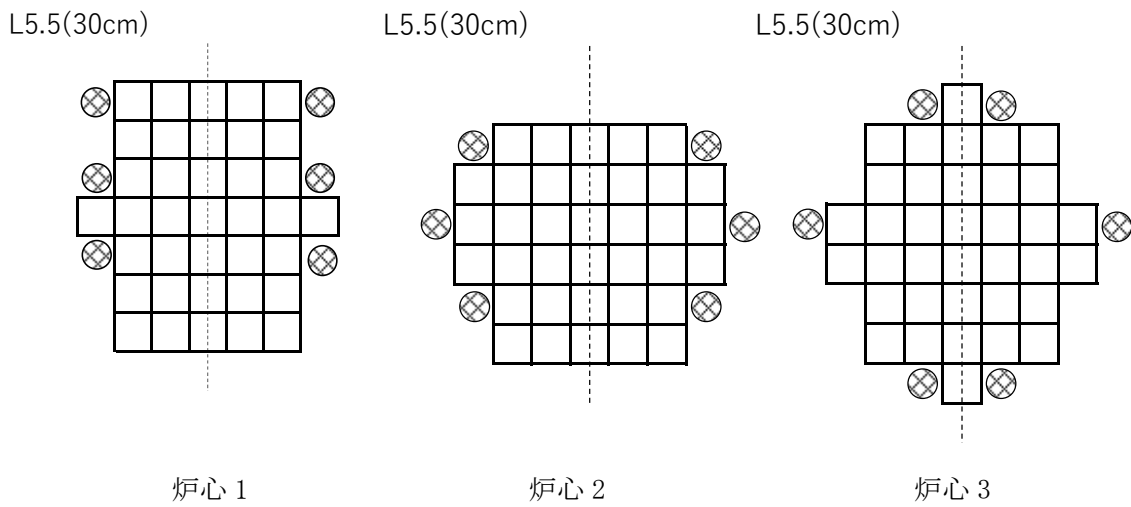


図6 L5.5P 炉心(高さ約 30cm)の炉心配置図

1.5 制御棒反応度価値

各炉心の制御棒反応度価値の解析結果を表 4 に示す。

ここで各炉心は部分長燃料体（燃料領域長さが通常より短い燃料体、燃料領域の中心高さは他の燃料体と同じ）を炉心配置図（図 4、5）の縦方向下側に 1 体または 2 体を追加して過剰反応度を固体減速炉心の核的制限値である $0.35\% \Delta k/k$ とした炉心である（表 2 と同じ）。

過剰反応度の調整に用いた部分長燃料体の装荷位置は図 4、5 に、部分長燃料体の燃料領域高さを表 2 に示す。炉心計算は 1.4 節で述べた $k_{eff}=1$ の臨界体系の計算と同様に CITATION の対称境界条件を用いて片側半分の体系を入力して行っているため、最大反応度となる制御棒の反応度計算では制御棒を挿入したとして得られた反応度の値を $1/2$ としている。表 4 の最大反応度添加率の算出方法については、補足-B の「制御棒の反応度印加率」に記載した手法により算出した。

KUCA での核的制限値として、

全制御棒価値が「 $1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度}(\% \Delta k/k)$ 」以上であること

制御棒の最大反応度添加率は臨界近傍で $0.02\% (\Delta k/k/s)$ 以下であること

制御棒反応度の最大の 1 本は全反応度の $1/3$ 以下であること

が規定されている。

全制御棒価値の判定基準は核的制限値により

$1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度}(0.35\% \Delta k/k) = 1.35\% (\% \Delta k/k)$ 以上であること

となる。

「核計算の妥当性の確認について」の項目で制御棒反応度の解析精度は $\pm 18\%$ としているため、代表炉心の解析においては

全制御棒価値： $1.35 \times (1+0.18) = 1.59 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

制御棒の最大反応度添加率： $0.02 \times (1-0.18) = 0.0164 (\% \Delta k/k/s)$ 以下であること

が求められるが、表 4 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

反応度が最大の制御棒の反応度の全反応度に対する割合については、補足-C の「最大反応度の制御棒の核的制限値」において検討を行っている。表 4 の「最大反応度($\% \Delta k/k$) (割合 %)」の欄の括弧内の数値（全反応度に対する割合）が 30% 以下であれば制御棒反応度の解析精度を含めても「制御棒反応度の最大の 1 本は全反応度の $1/3$ 以下であること」という核的制限値を満たすことになるが、表 4 に示した数値は全て 30% 以下であるため、全ての炉心においてこの核的制限値を満足していることになる。

なお、反応度調整用燃料体を図 4、5 に示すように基本的には 1 本のみを利用しているが、これを 2 体利用とした場合の制御棒反応度については「第 343 回核燃料施設等の新規

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

制基準適合性に係る審査会合」(2020年3月16日)の資料(p33)において検討している(補足E「反応度調整用燃料体を2体利用した場合の制御棒反応度」)。その結果、検討を行ったH/U-235の最も大きなL5.5炉心と最も小さなLL1炉心の全ての炉心について調整用燃料体を2体に増やした場合においても制御棒反応度の差は最大でも0.02% $\Delta k/k$ 程度であり、制御棒反応度に対してほとんど影響を及ぼさないことを確認している。

なお、制御棒の干渉効果については「補足-B 制御棒の相互干渉効果」にて検討を行っている。

表 4 固体減速炉心の代表炉心 ($\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$) の制御棒反応度値

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	反射体 節約 (cm)	全反応度 (% $\Delta k/k$)	最大反応度 (% $\Delta k/k$) (割合 %) ¹⁾	最大反応度 添加率 ²⁾ (% $\Delta k/k/s$)
L5.5P-50	372	50.9	5.7	1.67	0.47 (28.2)	0.0126
L5.5P-40		41.8	5.8	2.00	0.43 (21.5)	0.0136
L5.5P-30		30.8	5.9	1.68	0.40 (23.9)	0.0157
L4P-50	270	49.7	6.0	2.47	0.58 (23.5)	0.0158
L4P-40		39.5	6.1	2.28	0.45 (19.8)	0.0145
L4P-30		30.7	6.2	1.94	0.40 (20.7)	0.0153
L3P-50	203	51.4	6.1	1.83	0.52 (28.5)	0.0136
L3P-40		39.8	6.2	2.52	0.48 (19.1)	0.0155
L3P-30		30.5	6.2	1.65	0.37 (22.5)	0.0143
L2P-50	135	48.1	6.2	2.36	0.59 (25.0)	0.0158
L2P-40		39.0	6.9	1.75	0.43 (24.6)	0.0136
L2P-30		30.7	6.9	2.03	0.38 (18.8)	0.0141
L1P-50	68	47.7	7.9	2.04	0.44 (21.6)	0.0115
L1P-40		38.2	8.5	1.96	0.49 (25.0)	0.0149
L1P-30		29.2	9.0	2.00	0.39 (19.5)	0.0139
LL1P-50	34	49.7	10.7	4.01	0.65 (16.3)	0.0154
LL1P-40		38.4	11.6	1.96	0.58 (29.6)	0.0157
LL1P-30		30.0	12.5	2.10	0.51 (24.3)	0.0154

1) 括弧内の数値は全反応度に対する割合 (%)

2) 炉心中心高さ位置での反応度添加率

表 4-2 固体減速炉心の代表炉心 ($\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$) の制御棒反応度価値
(炉心計算で反射条件を用いずに全炉心モデルで計算) ¹⁾

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	反射体 節約 (cm)	全反応度 (% $\Delta k/k$)	最大反応度 (% $\Delta k/k$) (割合 %) ¹⁾	最大反応度 添加率 ²⁾ (% $\Delta k/k/s$)
L4P-50	270	49.7	6.0	2.45	0.56 (22.9)	0.0152
L2P-50	135	48.1	6.2	2.37	0.59 (24.9)	0.0158
LL1P-40	34	38.4	11.6	1.96	0.57 (29.0)	0.0157

1) 表 4 に示した結果のうち、最大反応度添加率が基準値に近い炉心について再計算を実施

1.6 中心架台の反応度

炉心の中心架台の反応度について評価を行った。

中心架台の反応度は炉心の燃料体数が多い方が、また炉心高さが短い方が小さくなるため、ここでは燃料体数の少ない L3P 炉心については 30、40、50cm 高さの 3 炉心、他炉心については 30cm 高さの炉心を取り上げた。

中心架台は A 架台では $3 \times 3 = 9$ 体、B 架台では $5 \times 5 = 25$ 体の燃料体および反射体からなる。中心架台には燃料体は最低 1 体を含めることが設置申請書に定められているので、ここでは燃料体 1 体と反射体 1 体のみを取り除いた場合の反応度を求めた (LL1P 炉心は除く)。燃料体と反射体を取り除いた箇所を図 7 に示す。

解析結果の表 5 に示す。すべての炉心において燃料体 1 体と反射体 1 体のみを取り除いた場合の反応度は中心架台に対する核的制限値の $1\% \Delta k/k$ 以上を満たしている。(反応度の計算精度を制御棒に対する計算精度の $\pm 18\%$ 以内と同じであると考えても十分に満たしている。)

表 5 に示した結果は SRAC コードシステムを用いて求めたものであるが、この計算の妥当性を確認するために一部の炉心についてはモンテカルロ計算コード MCNP により同様に燃料体 1 体と反射体 1 体のみを取り除いた場合の反応度を求めた。なお、MCNP での実効増倍率や反応度の計算では、SRAC の計算の誤差 (実効増倍率 $\pm 0.6\%$ 、制御棒反応度 $\pm 18\%$) を鑑みて両者を比較する上で十分小さな精度 (誤差) となるようにヒストリー数を設定する。(例えば、表 6 の上の欄の結果であれば SRAC は 1.33 ± 0.24 (誤差 $\pm 18\%$) に対して MCNP は 1.51 ± 0.04 であり、MCNP の誤差が SRAC の誤差より十分に小さくなるようなヒストリー数としている)。

表 6 に示すとおり SRAC と MCNP の結果は制御棒反応度の解析許容誤差と同程度であり、SRAC を用いた解析手法に問題が無いことを確認することができた。

表 6 に示した炉心について、中心架台 (A 架台で 3×3 の 9 体、B 架台で 5×5 の 25 体) を落下させたときの反応度をモンテカルロ計算コード MCNP を用いて計算した。各架台の中心架台を落下させた後の炉心配置を図 8、図 9 に示す。表 7 の結果からこれらの炉心の中心架台の反応度は計算精度を制御棒に対する計算精度の $\pm 18\%$ 以内と同じであると考えても十分に核的制限値を満足していることが判る。

表 5 一部の燃料体と反射体 1 体を取り除いたときの反応度

炉心名称	中心架台の反応度 (燃料および反射体の一部 を取り除く) (% $\Delta k/k$)
L5. 5P-30	1. 33
L4P-30	2. 27
L3P-50	4. 55
L3P-40	2. 94
L3P-30	2. 94
L2P-30	2. 33
L1P-30	1. 84
LL1P-30	1. 84

表 6 燃料体 1 体と反射体 1 体を取り除いたときの反応度 (SRAC、MCNP の比較)

炉心名称	SRAC (% $\Delta k/k$)	MCNP (% $\Delta k/k$)	MCNP/SRAC
L5. 5P-30	1. 33	1. 51 \pm 0. 04	1. 13
L1P-30	1. 84	2. 13 \pm 0. 04	1. 15

表 7 中心架台反応度 (MCNP による計算)

炉心名称	A 架台 (3 \times 3) (% $\Delta k/k$)	B 架台 (5 \times 5) (% $\Delta k/k$)
L5. 5P-30	3. 24 \pm 0. 04	3. 98 \pm 0. 04
L1P-30	5. 57 \pm 0. 04	7. 64 \pm 0. 04

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

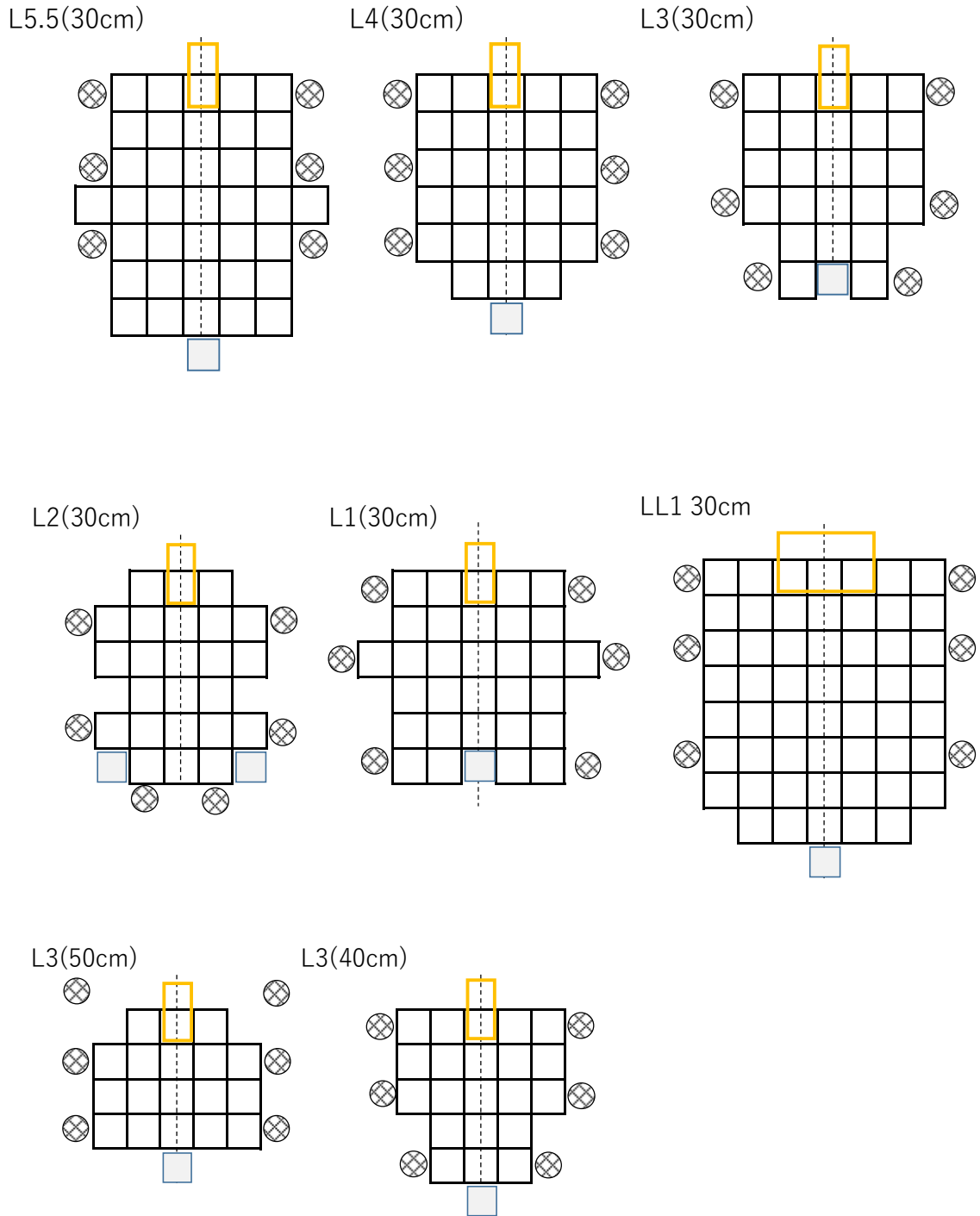


図7 中心架台の反応度評価を行う際の燃料体および反射体の取り出し箇所
(オレンジ色で囲んだ範囲を取り除く)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

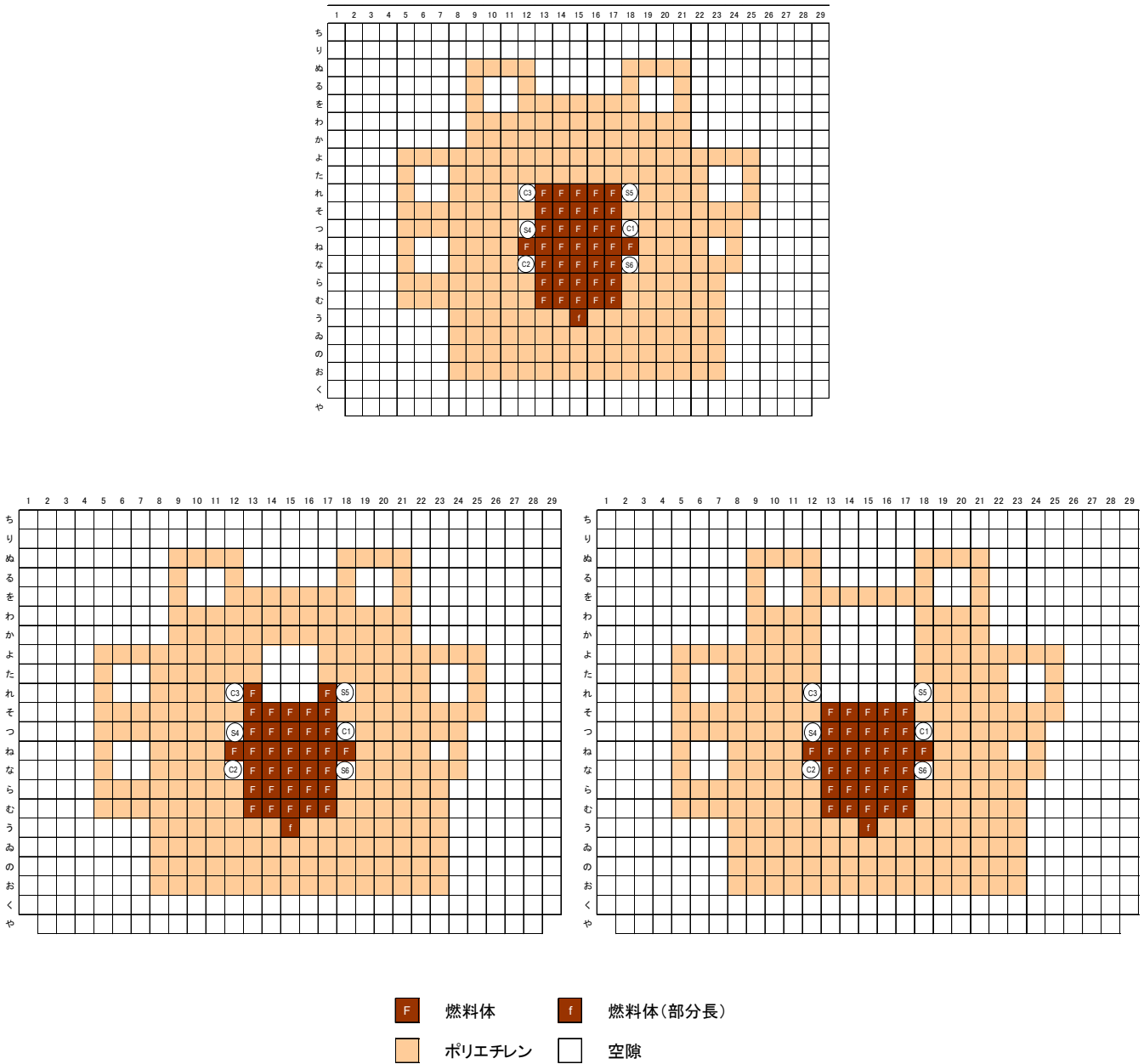
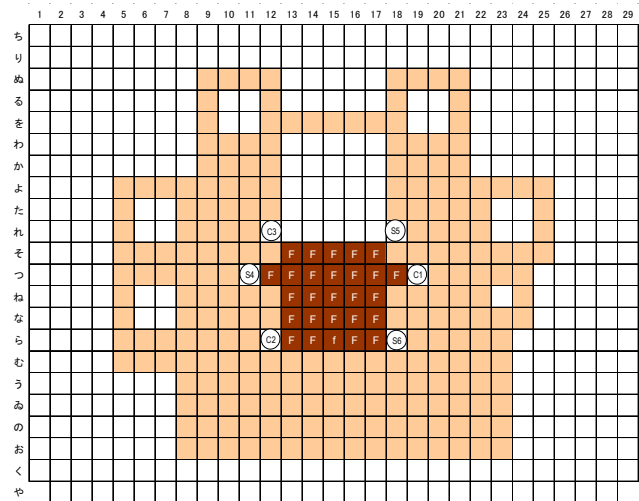
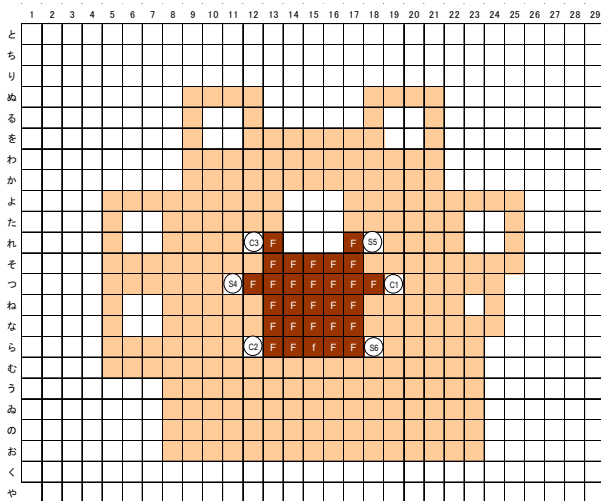
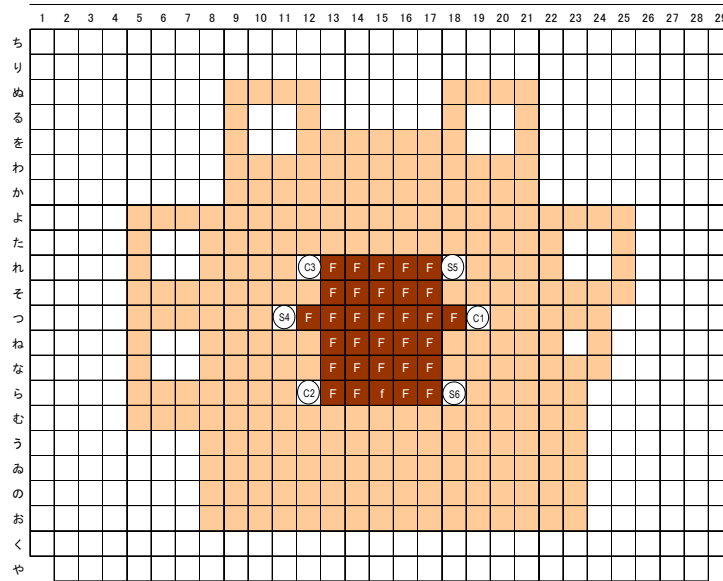


図 8 L5.5 (30cm) 炉心 配置図
 上： 中心架台落下前
 下左：A 架台中心架台 (3×3) 落下後
 下右：B 架台中心架台 (5×5) 落下後

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



燃料体 燃料体(部分長)
 ポリエチレン 空隙

図9 L1 (30cm) 炉心 配置図

上： 中心架台落下前

下左：A 架台中心架台 (3×3) 落下後

下右：B 架台中心架台 (5×5) 落下後

2. 軽水減速炉心

「第 337 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 2 月 17 日)、
「第 343 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 3 月 16 日)、および
「第 348 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 4 月 20 日)に
おいて軽水減速炉心の炉心構成の制限、解析を行う代表炉心、代表炉心の解析結果につい
て説明した。それらの結果をまとめる。

2.1 炉心構成の制限

軽水減速炉心については以下のような制限を加える。

- 1) C30、C35、C45、C60 炉心とし、複数の燃料集合体を混在させない。(表 7-2 参照)
- 2) 燃料体の配置は 4 列または 5 列とする。ただし C60 の 2 分割炉心については 4 列のみとする。(図 10 参照)
- 3) 2 分割炉心は C45 と C60 炉心でのみ構成し、燃料集合体の配置は分割面に対して対称とし、分割幅は 15cm 以下とする。
- 4) 各列の燃料板枚数の総数の差異は 2 枚以内となるようにする。(図 11 に例を示す)
- 5) 重水タンクは使用しない。
- 6) 制御棒は炉心配置(水平方向)に対して面対称となるように配置する。ただし 2 分割炉心については炉心分割面に対して面対称、または分割面の中央点に対して点对称となるように配置する(図 12 参照)。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

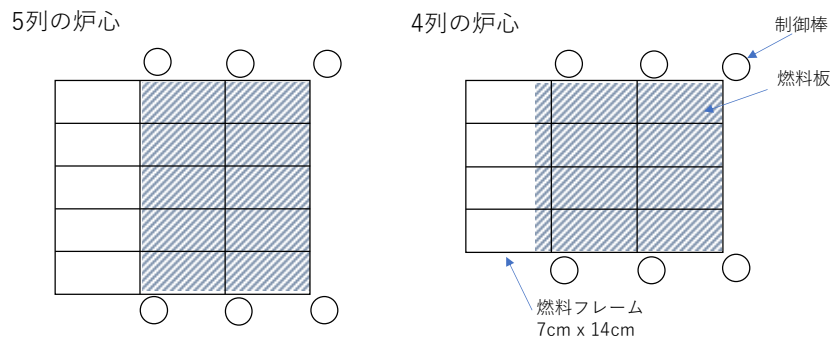


図 10 軽水減速炉心の配置図 (4列と5列の炉心)

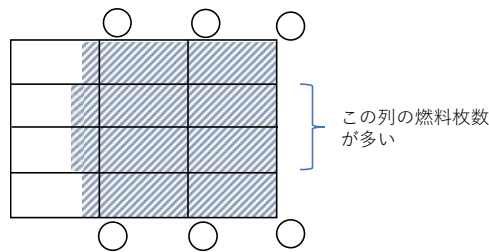


図 11 反応度調整のための燃料装荷例

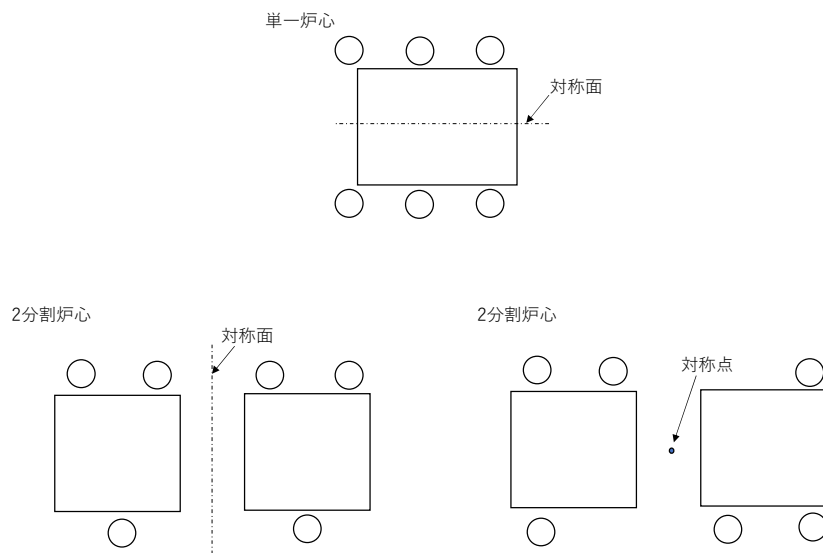


図 12 軽水減速炉心の制御棒配置方法の概略図 (○：制御棒)
(上：単一炉心、下の2つ：2分割炉心)

2.2 代表炉心の選定

以下のような代表炉心を選定する。

- 1) C30、C35、C45、C60 炉心で燃料体の配置は 4 列、5 列とする。(ただし C60 の 2 分割炉心については 4 列のみとする。)
- 2) C45 と C60 炉心での 2 分割炉心(分割面について対称)の分割幅は、2cm、5cm、7cm、10cm、15cm とする。

1) より単一炉心の代表炉心としては、燃料セルの異なる 4 種類の炉心で各々について列数の異なる 2 種類の合計 8 炉心を選定する。また、2) より 2 分割炉心としては、燃料セルの異なる 2 種類の炉心で、C45 では列数の異なる 2 種類の炉心、C60 では 4 列の 1 種類の炉心、分割幅は 5 種類であるので合計 15 炉心を選定する。

単一炉心としては構成することができる炉心が 4 列と 5 列の異なる 4 種類の燃料セルの炉心であるので、すべてを代表炉心として取り上げていることになる。

2 分割炉心として分割幅は 0cm～15cm としているので、その範囲で 5 種類の分割幅の炉心を取り上げているのは妥当であると考えられるが、温度係数が分割幅により極大値や極小値を取る可能性がある場合、温度係数が正になる可能性がある場合には違う分割幅の炉心を代表炉心に加える。

2.3 代表炉心の解析精度

代表炉心の解析は固体減速炉心の場合と同様に SRAC コードシステムを使用するが、一部の解析についてはモンテカルロ計算コード MCNP (使用核データライブラリは SRAC と同様に JENDL-4.0) も使用する。

軽水減速炉心の各パラメータの解析精度は以下のような値であるとして各パラメータの解析結果を評価する。

実効増倍率	: ± 0.6 %
制御棒反応度	: ± 18 %
反応度温度係数	: ± 32 %
即発中性子減衰定数	: ± 8 %

臨界質量に関しては、補足—D「実効増倍率の誤差が臨界質量に及ぼす影響について」での説明の通り解析精度は±6%として解析結果を評価する。

ただし、2 分割炉心の分割幅が 7cm 以上の炉心については制御棒微分反応度の解析結果の値にさらに 2.8%の偏差を考慮して評価することにする。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 7-2 軽水減速炉心の代表炉心

炉心名称	単位セル寸法 (cm)	水対燃料体積比	H/ ²³⁵ U (-)
C30	0.30	0.97	80
C35	0.35	1.33	109
C45	0.45	2.03	167
C60	0.60	3.08	247

炉心名称について

C の後の数値はミリ単位の燃料板ピッチ (30 は約 3.0 mmピッチ)

2.4 臨界量、動特性パラメータ、反応度温度係数等の解析結果

軽水減速炉心の臨界となる体系の燃料体の配置例を図 13～16 に、臨界 ($k_{eff}=1.0$) となる炉心、および最大過剰反応度 ($\rho_{ex}=0.5\% \Delta k/k$) を持つ炉心の炉心長さ と臨界量を表 8 に、臨界となる炉心の動特性パラメータ、反応度温度係数、ボイド係数を表 9 に示す。

解析は固体減速炉心の解析と同様に SRAC コードシステムの 3 次元拡散計算コード CITATION を用いているので、炉心計算は燃料板、減速材等の均質化定数を用いて行っている。そのためここでの臨界量は以下のような手順で算出した。

- ① CITATION で $k_{eff}=1.0$ 、または $\rho_{ex}=0.5\% \Delta k/k$ となるような燃料長（または部分燃料長）を求める。
- ② 炉心の燃料配置、制御棒配置は図 12 に示す通り中心線に対して線対称、または点対象としているので、CITATION の対称境界条件を用いて片側半分の体系を入力して計算を行う。ただし、2 分割炉心の点対象となる炉心、および分割幅が 7cm 以上となる炉心については対称境界条件を用いずに全炉心を入力する。
- ③ 燃料長から必要な燃料枚数を算出する（整数ではなく一般には実数となる）。
- ④ ③の燃料枚数に燃料板 1 枚当たりのウラン量を掛けて臨界量を求める。

C45 の 2 分割炉心については反応度温度係数が正となる炉心があり、その分割幅依存性をより詳しく調べる必要があるため、4 列炉心、5 列炉心共に当初の代表炉心には加えていなかった分割幅が 6cm の炉心を追加して解析を行った。

KUCA での核的制限値として、
1.3 節で述べたとおり臨界質量の解析精度は±6%と
しているため代表炉心の解析においては

であることが求められるが、表 8 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

反応度温度係数については核的制限値として $+2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^\circ C$ 以下であることが記載されている。反応度温度係数の解析精度は±32%としているので、各炉心の反応度温度係数は

$$(2 - 2 \times 0.32) \times 10^{-4} = 1.36 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^\circ C \text{ 以下}$$

であることが求められるが、表 9 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

表 8 軽水減速炉心の代表炉心の臨界量

炉心名称	H/ ²³⁵ U	列	臨界炉心		$\rho = 0.5\% \Delta k/k$ 炉心			
			炉心長さ (cm) ^b		炉心長さ (cm) ^b			
C30G0	80	4	41.6		41.7			
		5	31.6		32.3			
C35G0	109	4	34.4		35.2			
		5	27.7		28.4			
C45G0	167	4	31.3		32.0			
		5	25.6		26.1			
C60G0	247	4	32.9		33.7			
		5	26.7		27.2			
C45G (2H ₂ O)	167	4	30.1		30.9			
C45G (5H ₂ O)			38.8		40.0			
C45G (6H ₂ O)			43.0		44.3			
C45G (7H ₂ O)			47.0		48.4			
C45G (10H ₂ O)			55.3		56.8			
C45G (15H ₂ O)			60.5		62.0			
C45G (2H ₂ O)		5	24.1		24.7			
C45G (5H ₂ O)			30.4		31.8			
C45G (6H ₂ O)			33.7		34.6			
C45G (7H ₂ O)			36.9		37.4			
C45G (10H ₂ O)			44.2		45.2			
C45G (15H ₂ O)			49.2		50.2			
C60G (2H ₂ O)			247	4	33.7		34.3	
C60G (5H ₂ O)					43.9		45.3	
C60G (7H ₂ O)	52.0				53.5			
C60G (10H ₂ O)	59.4				61.1			
C60G (15H ₂ O)	64.0				65.6			

a : 炉心名称について

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

- C の後の数値は燃料板ピッチ (35 は 3.5 mmピッチ)
 - G の後に括弧があるときは 2 分割炉心で、括弧内の数値は炉心間距離を cm 単位で示し、その後に炉心間の物質名 (ここでは軽水 H₂O) を示す
 - G の後の数値が 0 のときは単一炉心
- b : 炉心長さは各燃料フレーム列に装荷する燃料板の長さ(2 分割炉心は 2 つの炉心長さの和)
- c : 臨界となる炉心サイズから算出した燃料板枚数 (小数点以下は四捨五入)

表9 軽水減速炉心の代表炉心（臨界炉心 keff=1.0）の臨界量、動特性パラメータ等

炉心名称	H/ ²³⁵ U	列	β_{eff} (-) ^a	ℓ (s) ^a	β_{eff}/ℓ (s ⁻¹)	温度係数 ^b ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	ボイド係数 ($\Delta k/k/\%\text{void}$)		
C30G0	80	4	7.65×10^{-3}	3.85×10^{-5}	199.0	-6.61×10^{-5}	-3.52×10^{-3}		
		5	7.65×10^{-3}	3.82×10^{-5}	200.2	-6.58×10^{-5}	-3.55×10^{-3}		
C35G0	109	4	7.67×10^{-3}	4.09×10^{-5}	187.3	-7.10×10^{-5}	-3.65×10^{-3}		
		5	7.66×10^{-3}	4.10×10^{-5}	187.1	-7.07×10^{-5}	-3.64×10^{-3}		
C45G0	167	4	7.64×10^{-3}	4.58×10^{-5}	166.8	-9.16×10^{-5}	-3.66×10^{-3}		
		5	7.64×10^{-3}	4.60×10^{-5}	166.1	-8.88×10^{-5}	-3.63×10^{-3}		
C60G0	247	4	7.58×10^{-3}	5.22×10^{-5}	145.3	-7.11×10^{-5}	-3.39×10^{-3}		
		5	7.58×10^{-3}	5.23×10^{-5}	144.9	-7.02×10^{-5}	-3.37×10^{-3}		
C45G(2H ₂ O)	167	4	7.59×10^{-3}	4.96×10^{-5}	153.1	-7.01×10^{-5}	-3.06×10^{-3}		
C45G(5H ₂ O)			7.48×10^{-3}	5.45×10^{-5}	137.3	-2.58×10^{-6}	-2.85×10^{-3}		
C45G(6H ₂ O)			7.48×10^{-3}	5.42×10^{-5}	137.9	<u>2.24×10^{-6}</u>	-2.94×10^{-3}		
C45G(7H ₂ O)			7.49×10^{-3}	5.33×10^{-5}	140.4	-3.66×10^{-6}	-3.05×10^{-3}		
C45G(10H ₂ O)			7.55×10^{-3}	5.01×10^{-5}	150.7	-3.45×10^{-5}	-3.35×10^{-3}		
C45G(15H ₂ O)			7.61×10^{-3}	4.72×10^{-5}	161.2	-7.10×10^{-5}	-3.57×10^{-3}		
C45G(2H ₂ O)		5	7.58×10^{-3}	5.04×10^{-5}	150.3	-6.36×10^{-5}	-2.93×10^{-3}		
C45G(5H ₂ O)			7.44×10^{-3}	5.66×10^{-5}	131.6	<u>4.06×10^{-5}</u>	-2.66×10^{-3}		
C45G(6H ₂ O)			7.43×10^{-3}	5.66×10^{-5}	131.4	<u>4.64×10^{-5}</u>	-2.74×10^{-3}		
C45G(7H ₂ O)			7.44×10^{-3}	5.58×10^{-5}	133.5	<u>2.69×10^{-5}</u>	-2.87×10^{-3}		
C45G(10H ₂ O)			7.51×10^{-3}	5.20×10^{-5}	144.6	-9.78×10^{-6}	-3.22×10^{-3}		
C45G(15H ₂ O)			7.59×10^{-3}	4.81×10^{-5}	158.0	-5.90×10^{-5}	-3.51×10^{-3}		
C60G(2H ₂ O)			247	4	7.52×10^{-3}	5.59×10^{-5}	134.5	-4.69×10^{-5}	-2.71×10^{-3}
C60G(5H ₂ O)					7.43×10^{-3}	5.95×10^{-5}	125.0	-5.94×10^{-6}	-2.51×10^{-3}
C60G(7H ₂ O)	7.45×10^{-3}	5.82×10^{-5}			128.1	-2.55×10^{-6}	-2.70×10^{-3}		
C60G(10H ₂ O)	7.51×10^{-3}	5.55×10^{-5}			135.3	-2.80×10^{-5}	-3.03×10^{-3}		
C60G(15H ₂ O)	7.56×10^{-3}	5.33×10^{-5}			141.8	-5.09×10^{-5}	-3.26×10^{-3}		

a 定数について β_{eff} 実効遅発中性子割合、 ℓ 中性子平均寿命

b 反応度温度係数は温度を 25°C から 35°C に変化させたときの実効増倍率の変化から算出。温度係数が正になる場合については下線を付した

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

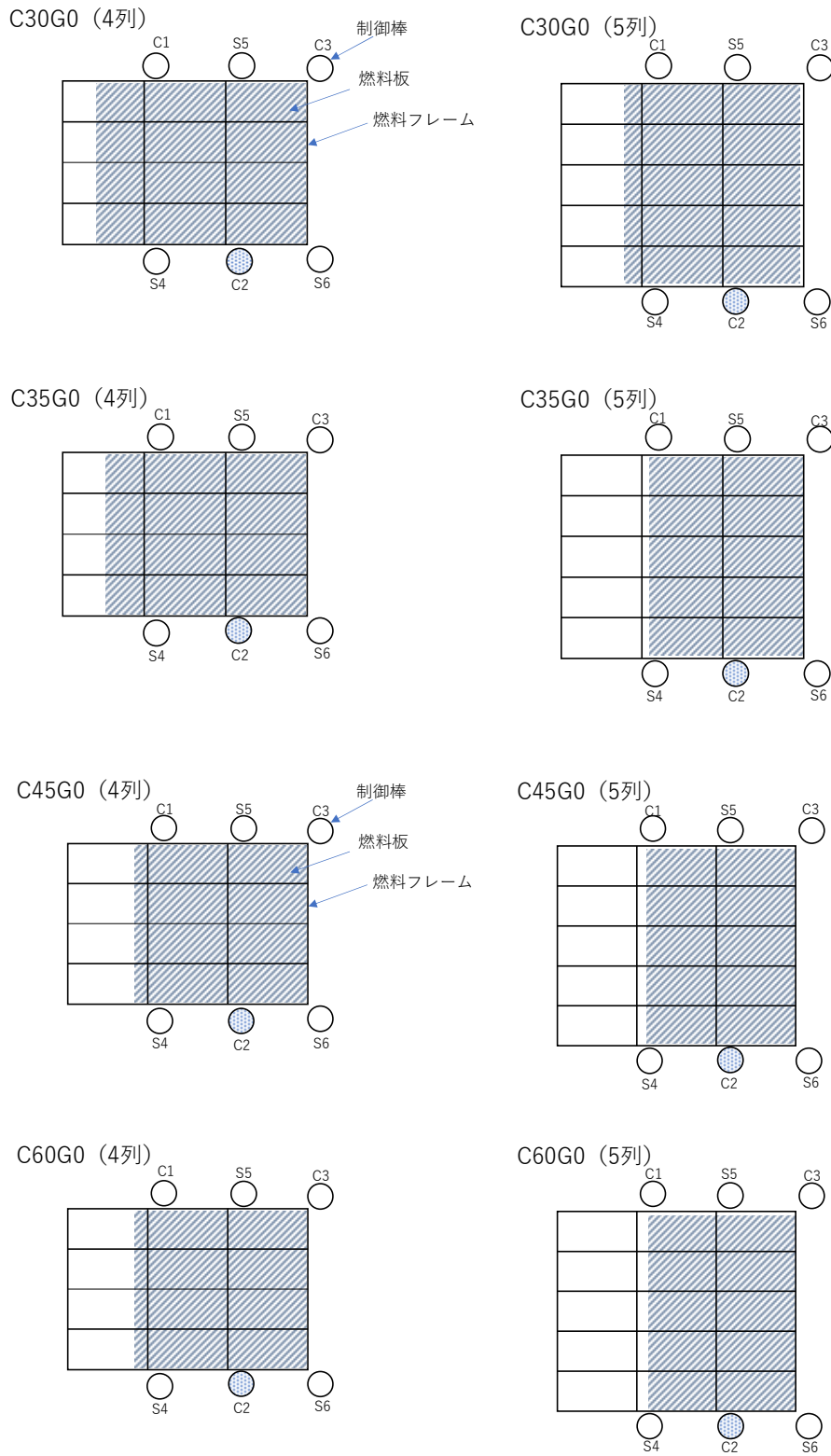
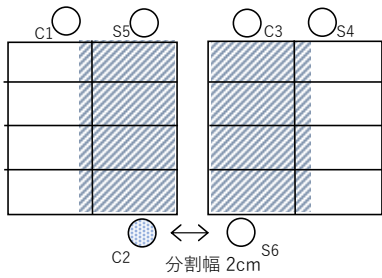


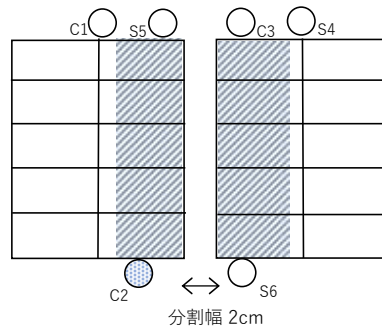
図 13 軽水減速炉心の炉心配置図 (1)
(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

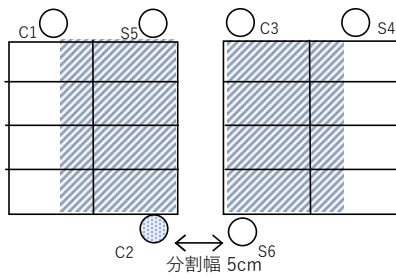
C45G (2H₂O) (4列)



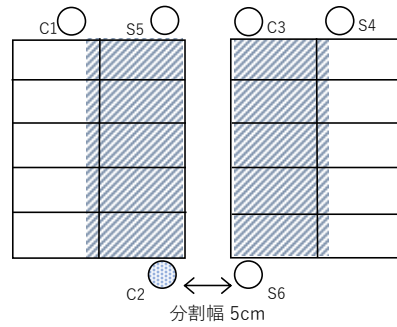
C45G (2H₂O) (5列)



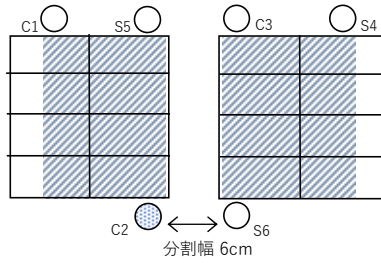
C45G (5H₂O) (4列)



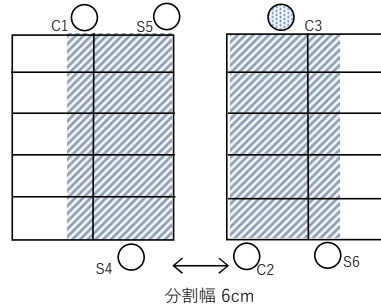
C45G (5H₂O) (5列)



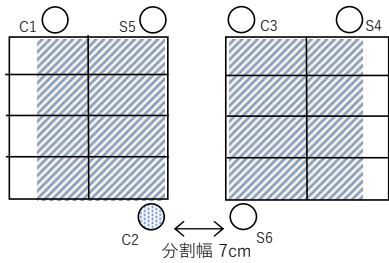
C45G (6H₂O) (4列)



C45G (6H₂O) (5列)



C45G (7H₂O) (4列)



C45G (7H₂O) (5列)

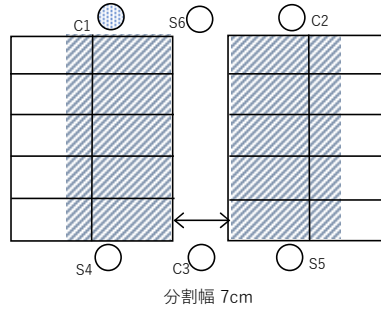


図 14 軽水減速炉心の炉心配置図 (2)

(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

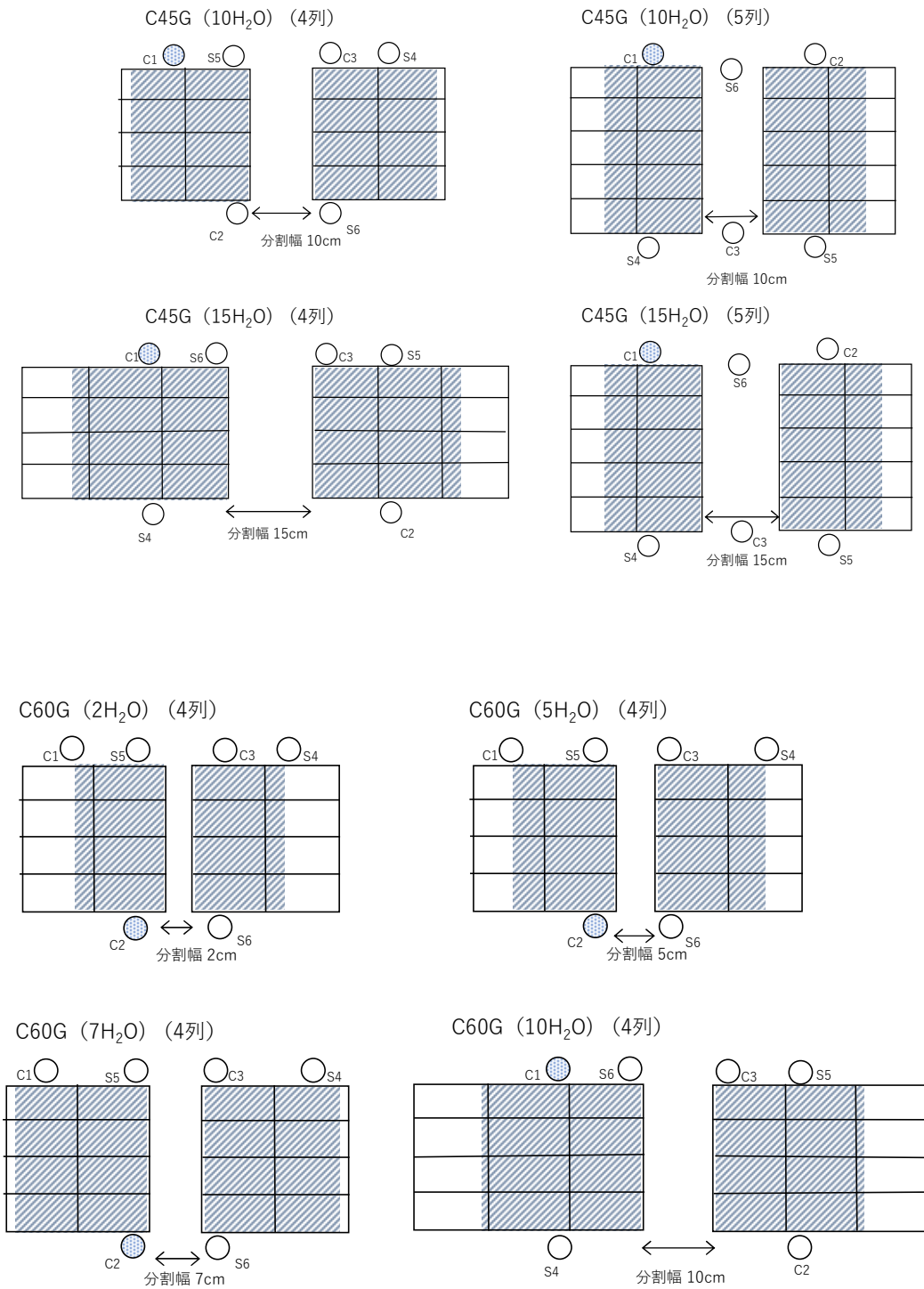


図 15 軽水減速炉心の炉心配置図 (3)
(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

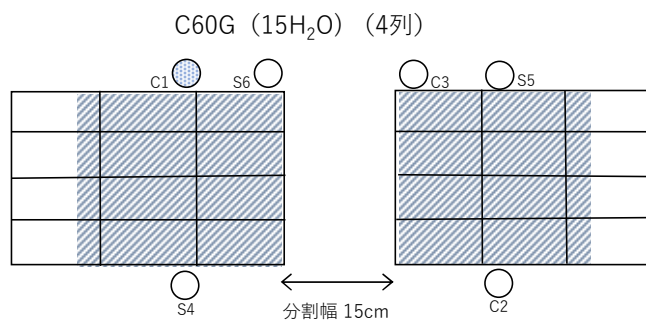


図 16 軽水減速炉心の炉心配置図 (4)
(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

2.5 制御棒反応度価値

炉心計算は2.4節で述べた $k_{eff}=1$ の臨界体系の計算と同様に行っているため、対称条件を用いて半分の体系計算の場合には最大反応度となる制御棒の反応度計算では制御棒を挿入したとして得られた反応度の値を $1/2$ としている。表 10 の下線を付けた分割幅が 7cm 以上の炉心、および 2 分割炉心の点対称配置の炉心については全炉心体系を入力しているため 1 本のみを挿入した場合の反応度を求めている。

各炉心の制御棒反応度価値の解析結果を表 10 に示す。

KUCA での核的制限値として、

全制御棒価値が「 $1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度}(\% \Delta k/k)$ 」以上であること

制御棒の最大反応度添加率は臨界近傍で $0.02(\% \Delta k/k/s)$ 以下であること

制御棒反応度の最大の 1 本は全反応度の $1/3$ 以下であること

が規定されている。

全制御棒価値の判定基準は核的制限値により

$1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度 } 0.5 (\% \Delta k/k) = 1.5 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

となる。

「核計算の妥当性の確認について」の項目で制御棒反応度の解析精度は $\pm 18\%$ としているので、代表炉心の解析においては

全制御棒価値： $1.5 \times (1+0.18) = 1.77 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

制御棒の最大反応度添加率： $0.02 \times (1-0.18) = 0.0164 (\% \Delta k/k/s)$ 以下であること

が求められるが、表 10 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

2 分割炉心の分割幅が 7cm 以上の炉心については、制御棒の最大反応度添加率については、この解析精度にさらに 2.8% の偏差を考慮して評価することとしており、

制御棒の最大反応度添加率： $0.02 \times (1-0.18) \times (1-0.028) = 0.0159 (\% \Delta k/k/s)$ 以下であることが求められるが、表 10 の対象となる炉心については全てこの基準値を満足している。

反応度が最大の制御棒の反応度の全反応度に対する割合については、補足 C の「最大反応度の制御棒の核的制限値」において検討を行っている。表 3 の「最大反応度($\% \Delta k/k$) (割合 %)」の欄の括弧内の数値 (全反応度に対する割合) が 30% 以下であれば制御棒反応度の解析精度を含めても「制御棒反応度の最大の 1 本は全反応度の $1/3$ 以下であること」という核的制限値を満たすことになるが、表 10 に示した数値は全て 30% 以下であるため、全ての炉心においてこの核的制限値を満足していることになる。

表 10 軽水減速炉心の代表炉心 ($\rho_{ex}=0.5\% \Delta k/k$) の制御棒反応度値

炉心名称	列	全反応度 (% $\Delta k/k$)	最大反応度 (% $\Delta k/k$) (割合%) ¹⁾	最大反応度添 加率 ^{2) 3)} (% $\Delta k/k/s$)
C30G0	4	2.87	0.66 (23.0)	0.015
	5	2.55	0.65 (25.5)	0.014
C35G0	4	2.06	0.58 (28.2)	0.013
	5	2.19	0.56 (25.6)	0.013
C45G0	4	2.80	0.68 (24.3)	0.0156 ^{4) 7)}
	5	1.83	0.52 (28.5)	0.012
C60G0	4	2.43	0.60 (24.7)	0.014
	5	1.85	0.52 (28.2)	0.012
C45G (2H ₂ O)	4	2.43	0.55 (22.7)	0.013
C45G (5H ₂ O)		2.09	0.48 (23.0)	0.008
C45G (6H ₂ O)		1.87	0.43 (23.0)	0.010
<u>C45G (7H₂O)</u> ⁵⁾		2.01	0.38 (19.0)	0.009
<u>C45G (10H₂O)</u> ⁵⁾		2.38	0.38 (16.0)	0.009
<u>C45G (15H₂O)</u> ⁵⁾		2.05	0.34 (16.6)	0.008
C45G (2H ₂ O)		5	1.80	0.41 (22.8)
C45G (4H ₂ O)	1.86		0.38 (20.5)	0.009
C45G (5H ₂ O)	1.84		0.34 (18.5)	0.008
<u>C45G (6H₂O)</u> ⁵⁾	1.771 ⁴⁾		0.34 (19.2)	0.008
<u>C45G (7H₂O)</u> ⁵⁾	1.78		0.31 (17.5)	0.007
<u>C45G (10H₂O)</u> ⁵⁾	1.90		0.32 (16.9)	0.007
<u>C45G (15H₂O)</u> ⁵⁾	2.01		0.34 (17.0)	0.008
C60G (2H ₂ O)	4		2.00	0.46 (23.0)
C60G (5H ₂ O)		2.00	0.39 (19.5)	0.009
<u>C60G (7H₂O)</u> ⁵⁾		1.88	0.37 (19.7)	0.009
<u>C60G (10H₂O)</u> ⁵⁾		1.79	0.31 (17.4)	0.007
<u>C60G (15H₂O)</u> ⁵⁾		1.80	0.32 (17.8)	0.008

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

- 1) 括弧内の数値は全反応度に対する割合 (%)
- 2) 炉心中心高さ位置での反応度添加率
- 3) 反射体節約は以下の通りとした
(5 列) C30: 9.14cm、C35: 8.35cm、C45: 7.65cm、C60: 7.16cm
(4 列) C30: 9.05cm、C35: 8.34cm、C45: 7.65cm、C60: 7.15cm
- 4) 規制値に近い桁数を増やして記載
- 5) 下線を付けた分割幅が 7cm 以上の炉心、および 2 分割炉心の点対称配置の炉心については全炉心体系を入力して最大反応度を持つ制御棒の解析を行った。他の炉心については対称条件を用いて半分の炉心の解析を行い、最大反応度を持つ制御棒は得られた値を 1/2 とした。
- 6) 記載の修正
(全制御棒引抜き : $k_{eff}=1.005014$ 、C2+S5 挿入 : $k_{eff}=0.993474$
 $\{(1/1.005014) - (1/0.993474)\} \div 2 = 0.00578 \text{ \% } \Delta k/k$)
- 7) 最大反応度添加率の値が判定基準である 0.0164(% $\Delta k/k/s$)に近いので、念のため反射条件を用いずに全炉心計算で最大反応度を計算したところ、
全反応度 : 2.79% $\Delta k/k$ 、最大反応度 : 0.67% $\Delta k/k$ (24.0%)、
最大反応度添加率 : 0.0154(% $\Delta k/k/s$)
であった。

2.6 ダンプ排水の反応度

炉心のダンプ排水（減速材である軽水をすべて排水）の反応度について評価を行った。

ここでは炉心から軽水が排出されつつある状態を想定して、燃料板のミート部（ウランの含まれる部分）より 5cm 下の位置から上部に軽水が無いと仮定して、SRAC の拡散計算コード CITATION の 3次元炉心計算での実効増倍率の値から反応度を求めた（3次元炉心計算で z 方向の上端を真空境界条件する）。なお、燃料体の水平方向は厚さ 20cm の軽水で囲まれているとする（実際には 30cm 以上の軽水がある）。

ここでは中性子エネルギースペクトルが最も柔らかく上部反射体除去の反応度変化の小さな C60 炉心を主に取り上げて解析を行った。

結果を表 11 に示す。このすべての炉心において反応度の変化量は $1\% \Delta k/k$ 以上であり、この反応度の計算精度を制御棒に対する計算精度の $\pm 18\%$ 以内と同じであると考えても、炉心タンク内の軽水が燃料板ミート部より 5cm 下の位置まで排水されれば核的制限値（ $1\% \Delta k/k$ 以上）を十分に満足することになる。

この計算結果の妥当性を確認するために一部の炉心について同じ計算をモンテカルロ計算コード MCNP を用いて解析を行った。結果を表 12 に示す。両者の結果はよく一致しており、上記の SRAC を用いた結果は妥当であると考えられる。

一部の炉心（C45(4列)、C30(4列)炉心）について、軽水がすべて炉心タンクから排水されて減速材および反射材が無くなった場合の実効増倍率をモンテカルロ計算コード MCNP により計算した。表 13 に示すとおり、軽水がすべて無くなった場合の実効増倍率は核的制限値（反応度として $1\% \Delta k/k$ 以上なので、臨界時の誤差を考慮して k_{eff} が約 0.98 以下であれば満足する）に比べて十分に小さな値となっている。

表 11 ダンプ排水反応度

炉心名称	列数	軽水を一部排水したときの反応度 (% $\Delta k/k$)
C30G0	4	3.35
	5	3.36
C35G0	4	2.99
	5	2.98
C45G0	4	2.65
	5	2.65
C60G0	4	2.46
	5	2.47
C60G(2 H ₂ O)	4	2.40
C60G(5 H ₂ O)	4	2.43
C60G(7 H ₂ O)	4	2.46
C60G(10 H ₂ O)	4	2.47
C60G(15 H ₂ O)	4	2.46

表 12 ダンプ排水反応度

炉心名称	列数	軽水を一部排水したときの反応度 (% $\Delta k/k$)	
		SRAC	MCNP
C30G0	4	3.35	3.33 \pm 0.04
C45G0	4	2.65	2.64 \pm 0.04

表 13 ダンプ排水後の実効増倍率

炉心名称	炉心から全ての軽水を除いたときの 実効増倍率
C30G0(4 列)	0.10450 \pm 0.00010
C45G0(4 列)	0.06889 \pm 0.00009

【補足A 核計算の妥当性の確認】

1. 計算手法

1.1 概要

臨界量、反応度温度係数、ボイド係数の解析方法の概要は以下の通りである。(計算フローの概略を図 A-1 に示す)

- (1) 計算には主として SRAC コードシステム (SRAC2006) を用いる。
- (2) 核定数は JENDL4.0 に基づくものを用いる。
- (3) エネルギー107 群 (高速群 62 群、熱群 45 群) の 1 次元衝突確率法により燃料セルの均質化定数を作成し、その後、2 次元衝突確率法により燃料集合体の均質化定数を作成し 20 群 (高速群 12 群、熱群 8 群) に縮約する。
- (4) (3) で得られた 20 群の均質化定数を用いて拡散計算コード CITATION による 3 次元炉心計算を行う。
- (5) 制御棒反応度計算では CITATION の内部黒体オプションを用いて制御棒は内部黒体として取り扱い、熱エネルギー領域において制御棒表面での中性子束の微係数を与えて実効増倍率を求めた。ここで使用する微係数の値は、既存の HEU 炉心 (軽水減速炉心は C35G0(5 列)、固体減速炉心は 3/8”P36EU(3)炉心で、ともに施設定期検査で検査に用いるもっとも利用頻度の多い炉心)において、制御棒反応度の実験結果と合うように定めた。

「第 337 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 2 月 17 日)において、「計算手法の妥当性については既存の高濃縮ウラン (HEU) を用いた固体減速炉心、および軽水減速炉心について実効増倍率と制御棒反応度の解析結果等を実験結果と比較して検討する」と説明した。

この HEU 炉心の解析結果から本解析手法の精度 (誤差) を推定する。低濃縮ウラン (LEU) 炉心の代表炉心の解析においては HEU 炉心と同じ解析方法を用いることで、この誤差を考慮した上での核的制限値の評価を行うものとする。

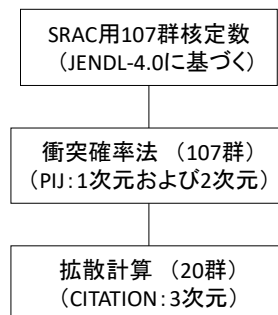


図 A-1 計算フロー

1. 2 計算方法

1. 2. 1 固体減速炉心

以下のような手順で計算を行う。

- (1) 図 A-2 に示すような炉心を構成する燃料さや管 (図 A-3) の均質化断面積を求め、るために、まず燃料角板、ポリエチレン板等からなる単位セルについて (図 A-3 の燃料さや管内の構成材)、107 群 (高速 62 群、熱 45 群) の 1 次元無限平板体系の衝突確率法により均質化定数を作成する。
- (2) 次に図 A-4 に示すさや管の水平断面について、(1) の均質化定数 (図 A-4 左図中の Material Plate) を用いて 107 群の 2 次元 x-y 体系の衝突確率法により均質化した 20 群の縮約定数を作成する。その際の中性子スペクトルは一点炉 B1 近似 ($k_{eff}=1$ となるバックリング使用) により求めたものを用いる。
- (3) (2) と同様にポリエチレン反射体についても 107 群の 2 次元 x-y 体系の衝突確率法により均質化した 20 群 (高速 12 群、熱 8 群) の縮約定数を作成する。
- (4) (2) (3) で得られた均質化定数を用いて 20 群の 3 次元 x-y-z 体系の拡散計算により炉心計算を行う。メッシュ幅は各方向ともに炉心内部と炉心近傍反射体で約 0.5cm 程度とする。
- (5) 原子個数密度、板厚を表 A-1~A-6 に、重量等の誤差を表 A-11 に示す。

1. 2. 2 軽水減速炉心

以下のような手順で計算を行う。

- (1) 図 A-5、A-6 に示す燃料板支持フレームの均質化断面積を求め、るために、まず図 A-7 に示す燃料板 (燃料ミート部の U-Al 合金と Al 被覆材) と軽水 (減速材) からなる単位セルについて (図 A-8 の(a) primary cell)、107 群 (高速 62 群、熱 45 群) の 1 次元無限平板体系の衝突確率法により均質化定数を作成する。
- (2) 次に図 A-8 に示す燃料板支持フレームの水平断面について、(1) の均質化定数 (図 A-8 の Fueled region) を用いて 107 群の 2 次元 x-y 体系の衝突確率法により均質化した 20 群の縮約定数を作成する。その際の中性子スペクトルは一点炉 B1 近似 ($k_{eff}=1$ となるバックリング使用) により求めたものを用いる。
- (3) (2) で得られた均質化定数を用いて 20 群の 3 次元 x-y-z 体系 (図 A-10 に垂直方向の構成を示す) の拡散計算により炉心計算を行う。メッシュ幅は各方向ともに炉心内部と炉心近傍反射体で約 0.5cm 程度とする。
- (4) 原子個数密度を表 A-7~10 に、重量等の誤差を表 A-11 に示す。示す。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

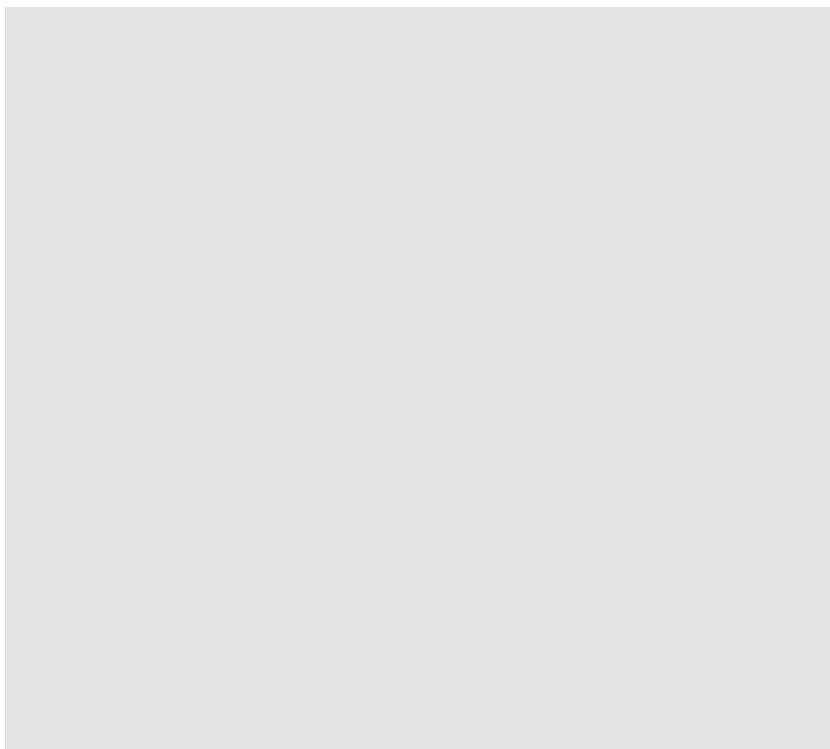


図 A-2 固体減速架台炉心構成

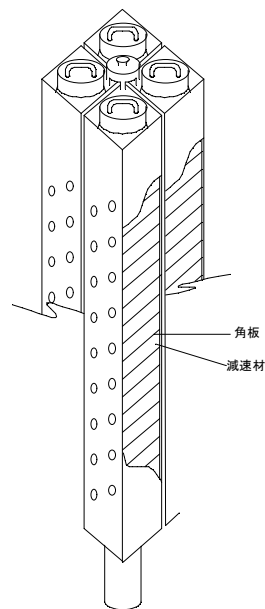


図 A-3 燃料さや管
(さや管に角板、減速材を挿入)

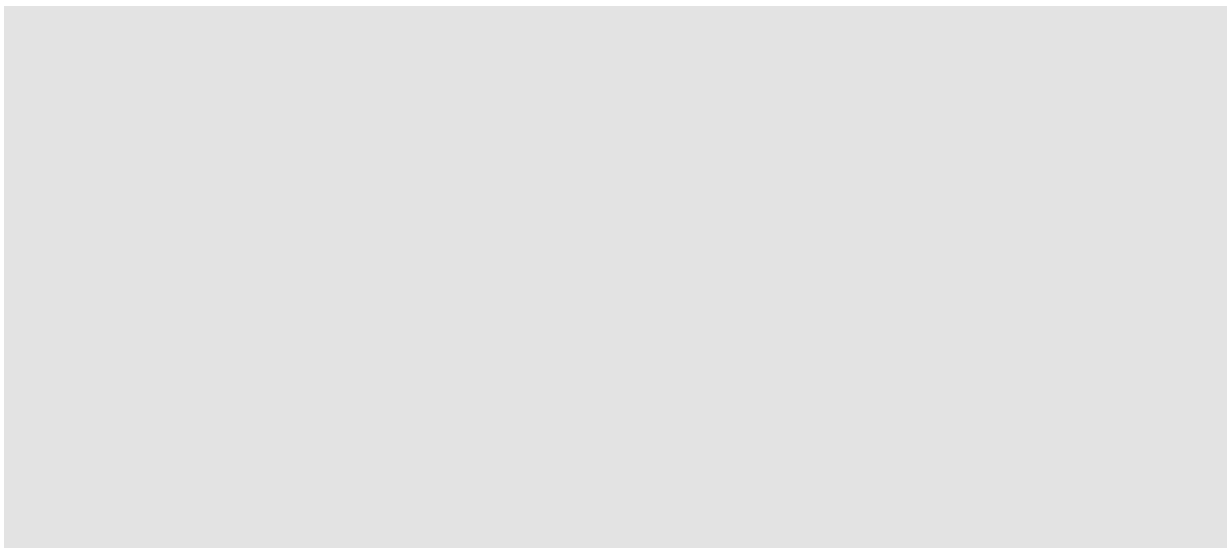


図 A-4 燃料さや管 (左)、制御棒 (右) 水平断面

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

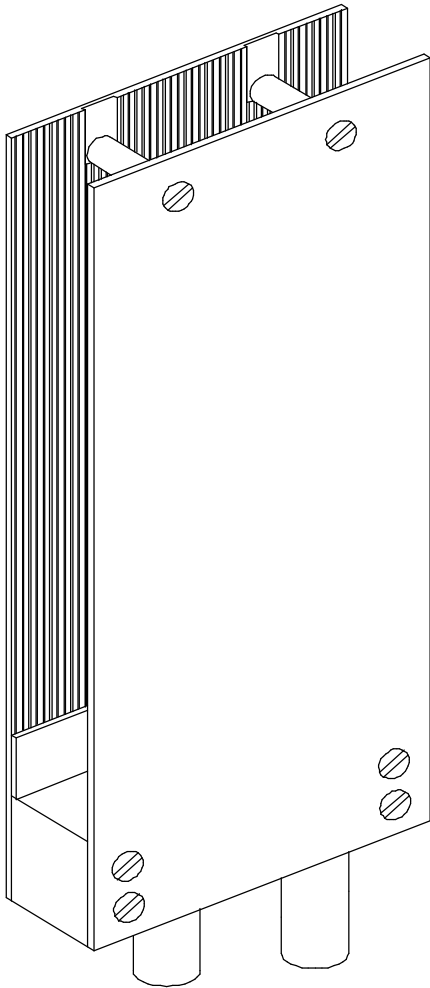


図 5 軽水減速架台用燃料板支持フレーム

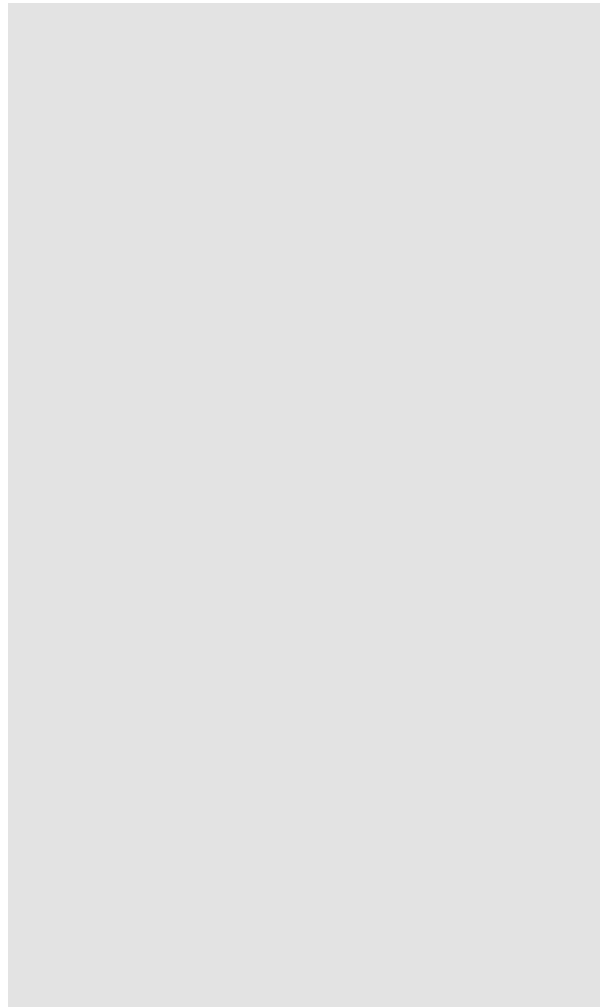


図 6 軽水減速架台用燃料板支持フレーム
(燃料板装荷時の側面図)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

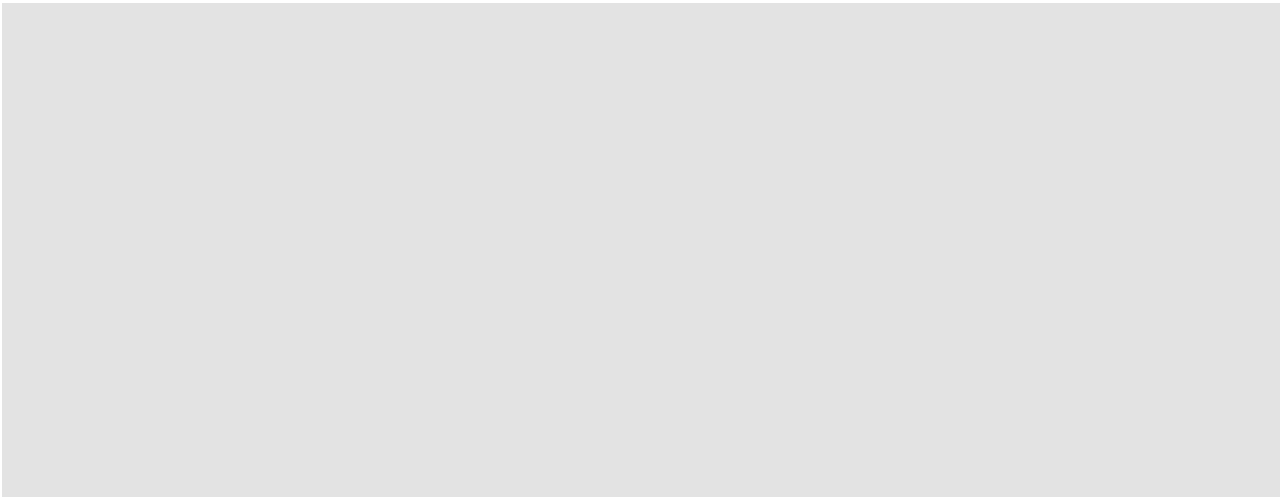


図 A-7 軽水減速炉心用標準型燃料板

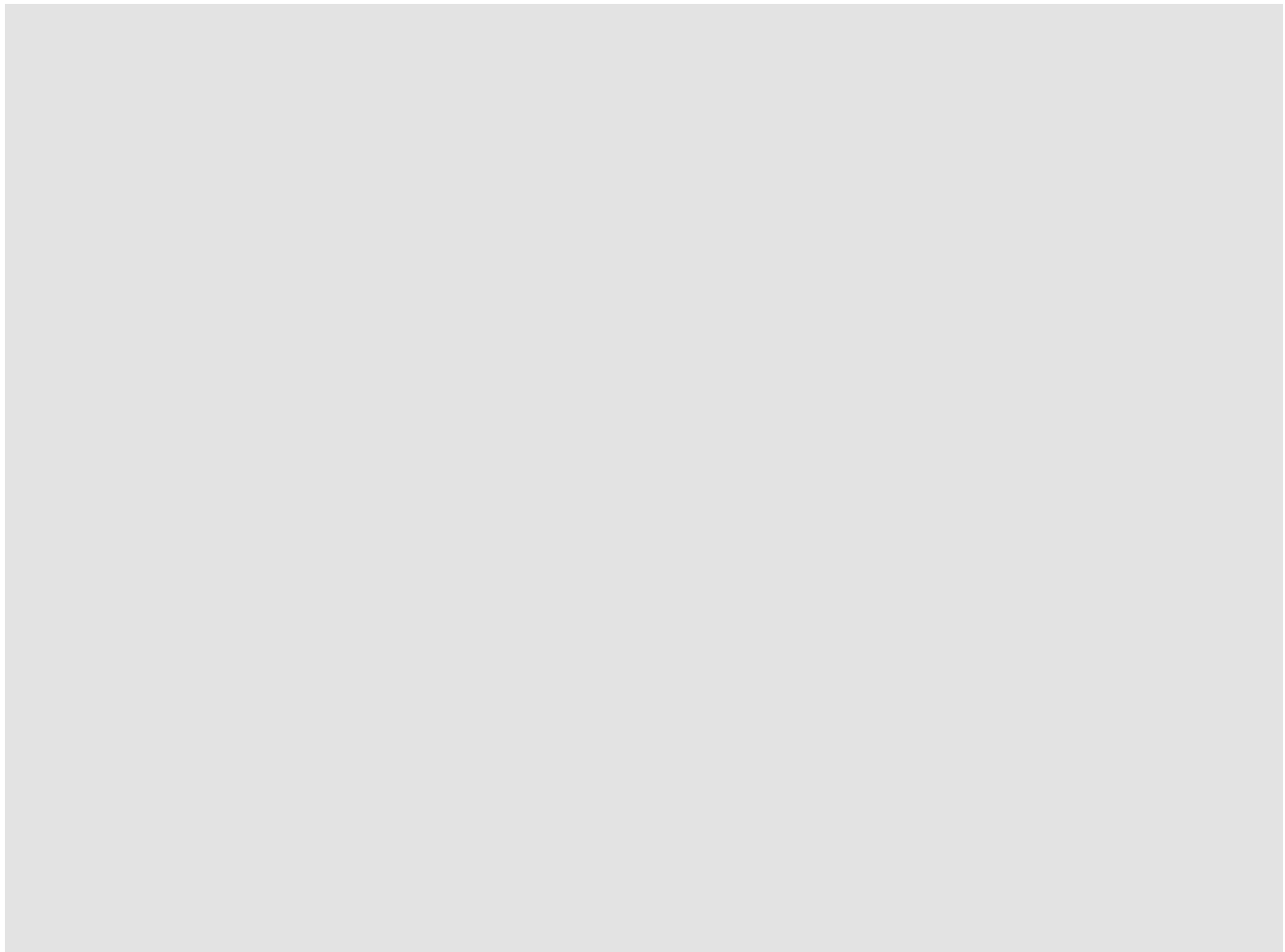


図 A-8 軽水減速炉心用燃料板支持フレーム水平断面（左図）
（右図は衝突確率法で均質化計算を行う際の領域の分け方）

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

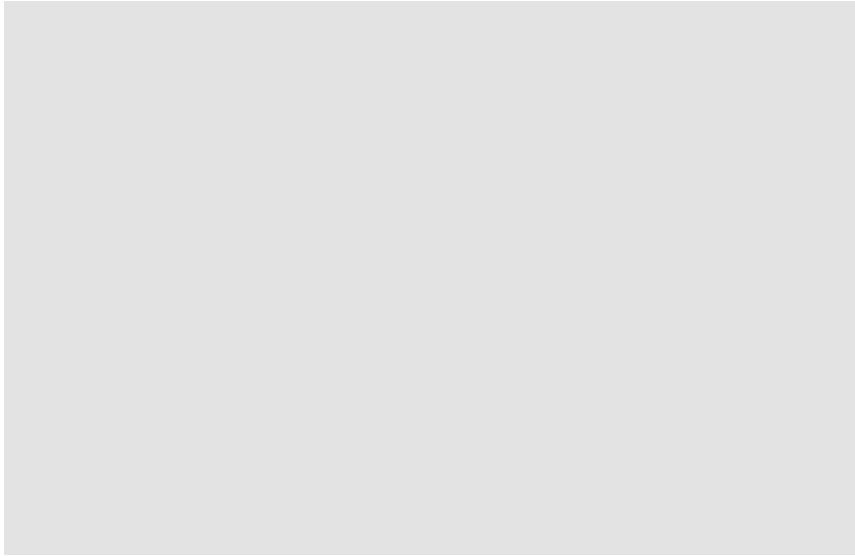


図 A-9 軽水減速炉心用燃料板支持フレーム 燃料板溝構造

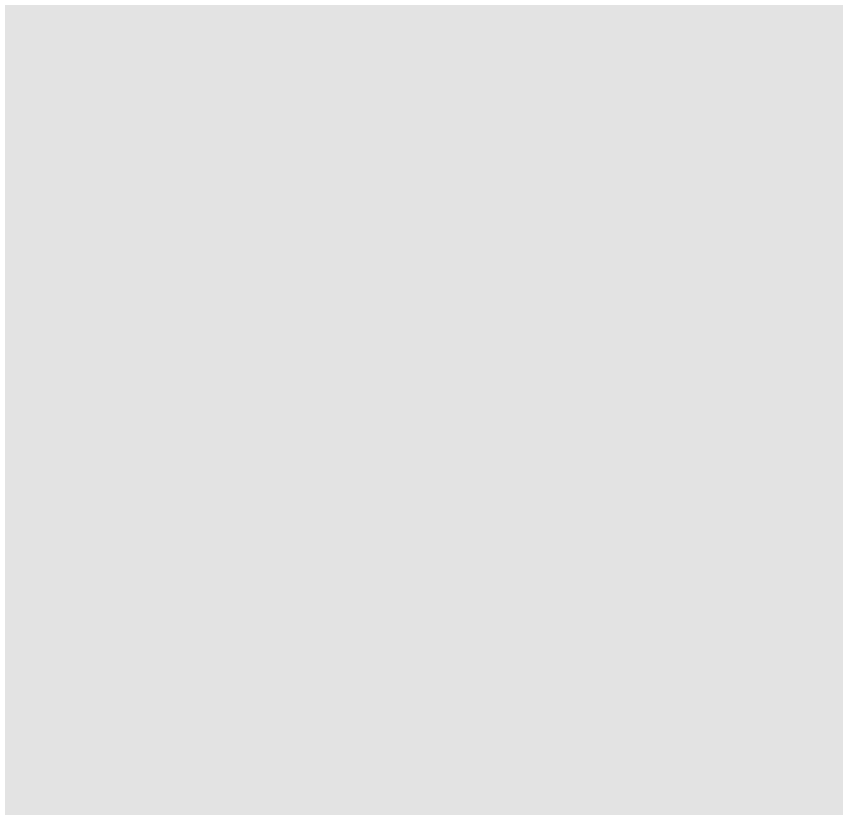
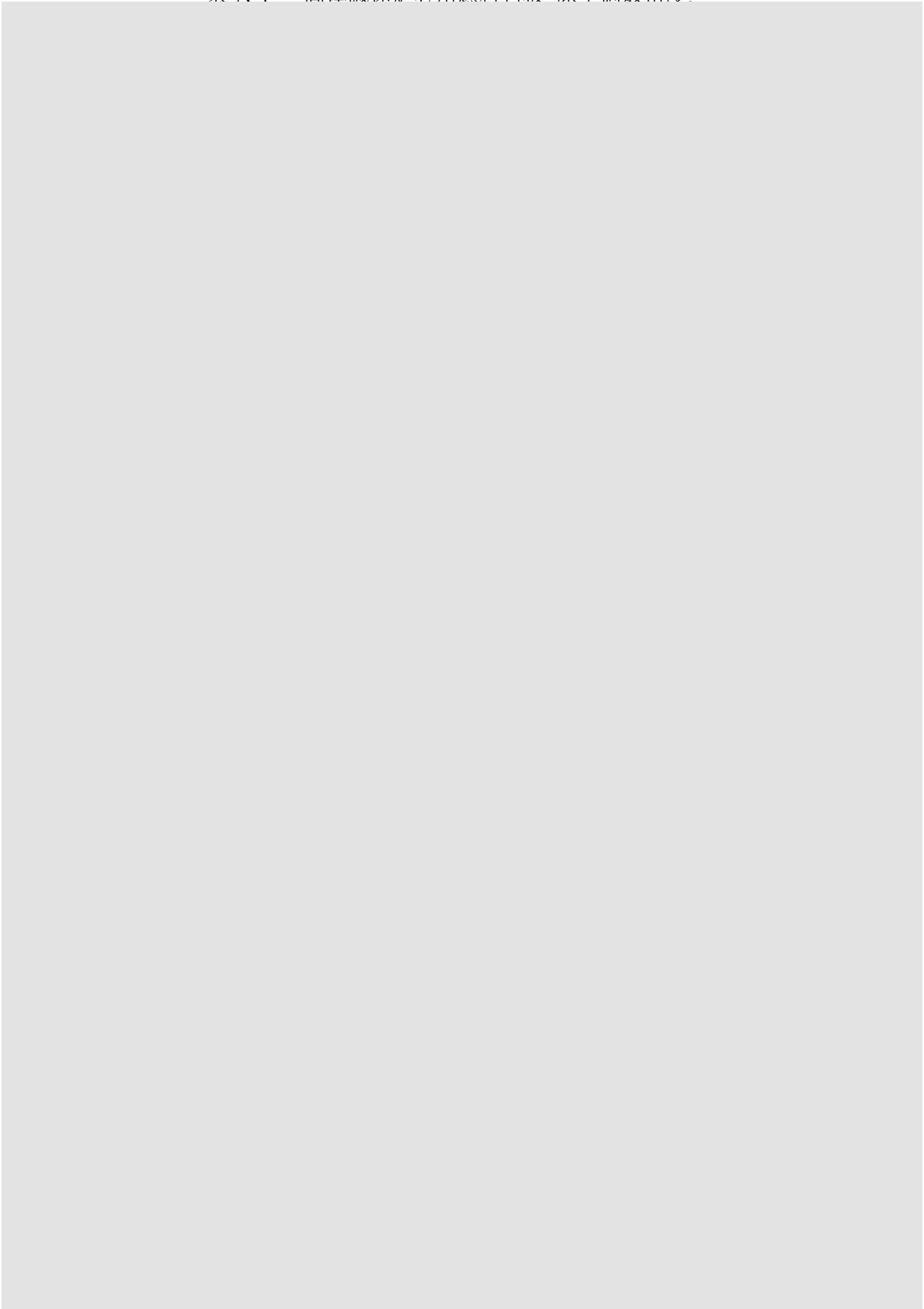


図 A-10 軽水減速炉心 垂直方向図

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

表 A-1 固体減速炉心用燃料角板 原子個数密度

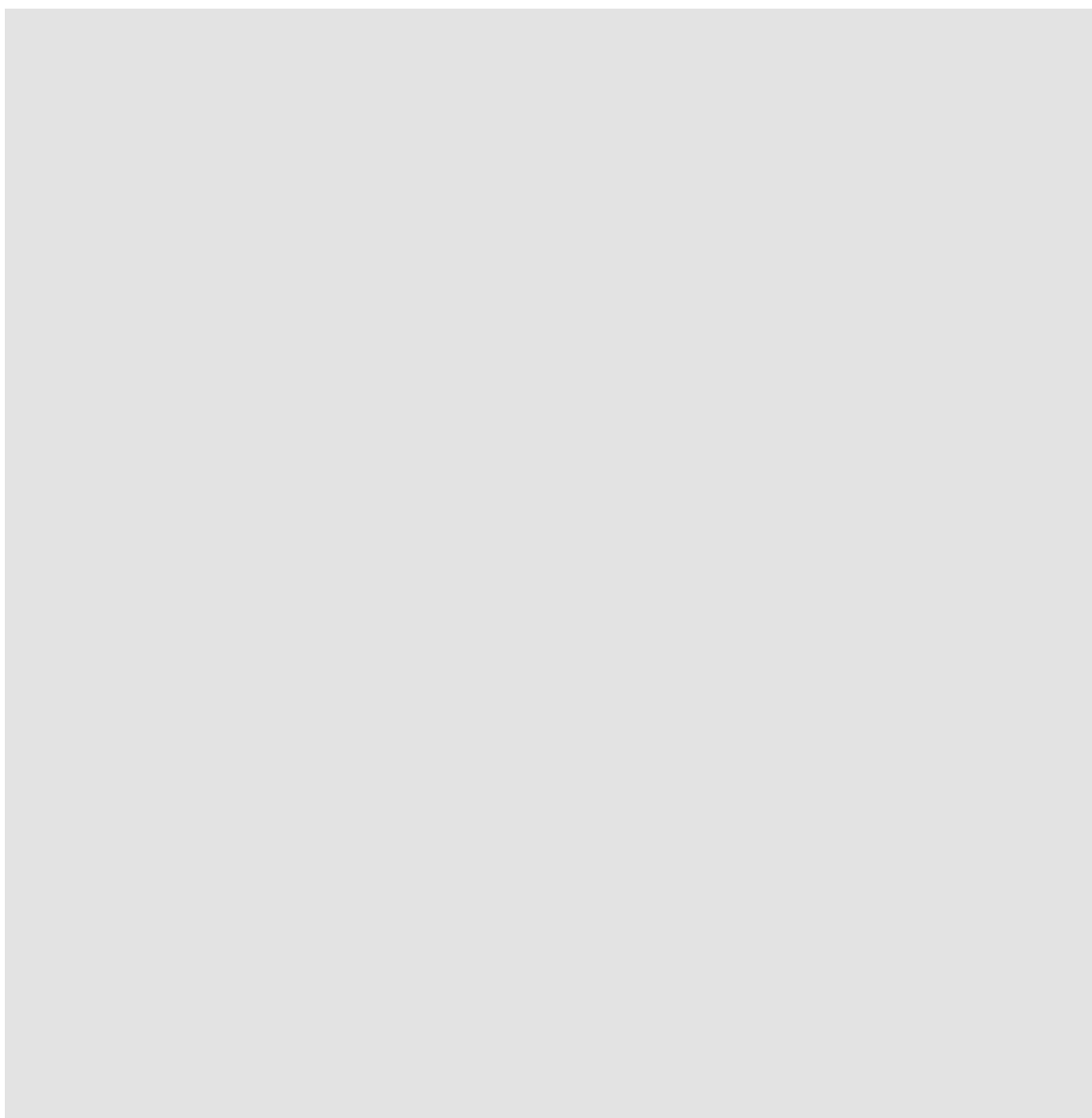


「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

表 A-5 固体減速炉心用制御棒内無水ホウ酸 (B_2O_3) 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24} \text{ 1/cm}^3$)
Boron (natural)	3.1832E-02
Oxygen	4.7748E-02

Number Density の計算に必要な情報 : Specific gravity : 1.84 g/cm^3



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

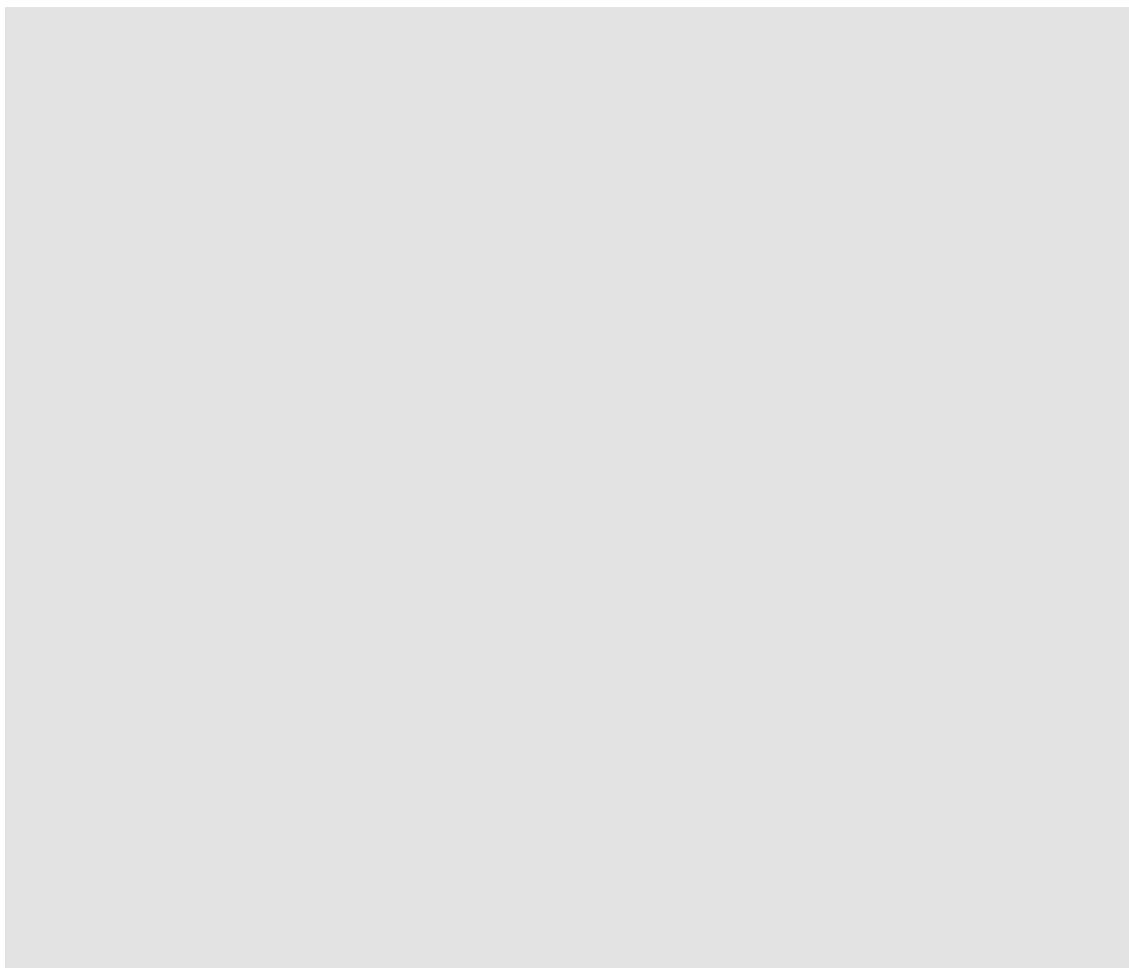
表 A-9 軽水減速炉心 軽水 (20°C) 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
H-1	6.6736E-02
O-16	3.3678E-03

表 A-10 軽水減速炉心用燃料板支持フレーム アルミニウム 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
Aluminum	5.9076E-02
Silicon	3.1959E-04
Magnesium	7.3860E-04

Number Density の計算に必要な情報 : Specific gravity : 2.692 g/cm³



2. 臨界量、制御棒反応度について

2. 1 固体減速炉心

固体減速炉心について、既存の高濃縮ウランを用いた幾つかの体系（図 A-11）について、実効増倍率、制御棒反応度の実験値と今回用いた SRAC コードシステムを用いた解析結果の比較を行った。ここで取り上げた炉心は KUCA で実験を行ってきた炉心の H/U-235 をほぼカバーしている。炉心長はほとんど 40cm 前後であるが、約 50 cm の体系も取り上げた。

実効増倍率は制御棒が全て抜けた状態での値であり、過剰反応度を正ペリオド法により測定した結果から求めた値である。なお、反応度を求めるための逆時間方程式（遅発中性子 6 群）は以下の通りである。

$$\rho = \frac{\ell}{T + \ell} + \frac{T}{T + \ell} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{i,eff}}{1 + \lambda_i T} .$$

ここで、 ℓ は中性子平均寿命、 T は安定ペリオド、 $\beta_{i,eff}$ は遅発中性子 6 群の各群の実効遅発中性子割合である（参考文献）。また制御棒反応度は落下法（積分法）により測定して求めた値である。

実効増倍率の実験値と計算値の結果を表 A-12 に示す。この表中の誤差はペリオド法の倍加時間測定時の誤差（±0.5 秒）により生じるものである。

表 A-12 より C/E は 0.998～1.006 の範囲であることから実効増倍率の解析精度は±0.6%以内であると考えられる。なお、B3/8” P36EU-NU 炉心については炉心を構成する燃料、さや管等の全ての材料の寸法や成分などの誤差をすべて考慮して評価した結果、実効増倍率の実験値の誤差は 0.062%であることが報告されているので、この C/E の 1 からのずれは実験値による誤差ではなく計算値の誤差に起因するものであるといえる。

実効増倍率が±0.6%変化したとき、臨界質量にどのくらいの影響を及ぼすかについて検討してみる。

最も燃料体数の少ない B1/8” P80EU 炉心では臨界近傍で体積が 1%変化したときの実効増倍率を求めたところその変化割合は約 1.7%であったので、実効増倍率が 0.6%変化したときの体積変化、すなわち臨界質量の変化割合は

$$0.6/1.7=0.35\%$$

となる。一方、最も燃料体数の多い B4/8” P24EU-Th-EU 炉心では臨界近傍で体積が 1%変化したときの実効増倍率の変化割合は約 0.15%であったので、実効増倍率が 0.6%変化したときの体積変化、すなわち臨界質量の変化割合は

$$0.6/0.15=4.0\%$$

となる。従って、実効増倍率が $\pm 0.6\%$ 変化したとき臨界質量の評価では $\pm 4\%$ の誤差を見込む必要があることを示している。

制御棒の反応度価値（6本の全制御棒挿入時の反応度）の実験値と計算値の結果を表 A-13 に示す。ここでの反応度の誤差は落下法（積分法）における中性子計数の誤差に生じるものである。使用した制御棒表面での中性子束の微係数の値は A3/8” P36EU 炉心の実験値との比較により算出した（高速 1～12 群：0.0、熱 13～20 群：0.0544）。C/E は 0.96～1.18 の範囲であることから制御棒反応度の解析精度は $\pm 18\%$ 以内であると考えられる。なお、C/E が大きくなると計算値が全制御棒の反応度（核的制限値は $(1\% \Delta k/k + \text{過剰反応度})$ 以下）を大きく見積もるため非安全側となり、C/E が小さくなると反応度添加率（核的制限値は $0.02\% \Delta k/k/s$ 以下）を小さく見積もるため非安全側となる。最近実施した新炉心での制御棒反応度のモンテカルロ計算コードによる解析値（研究所の原子炉安全委員会で新炉心の審議をした際に提出した事前解析値）と実験値との C/E は 1.17 であったので、ここで示した SRAC による制御棒反応度の精度は炉心解析を行う上で十分な精度であると考えられる。

2. 2 軽水減速炉心

軽水減速炉心について、既存の高濃縮ウランを用いた幾つかの体系（図 A-13）について、実効増倍率、制御棒反応度の実験値と今回用いた SRAC コードシステムを用いた解析結果の比較を行った。

実効増倍率の実験値と計算値の結果を表 A-14 に示す。C/E は 0.996～0.997 の範囲であることから実効増倍率の解析精度は $\pm 0.3\%$ 以内であると考えられる。

制御棒の反応度価値（6本の全制御棒挿入時の反応度）の実験値と計算値の結果を表 A-15 に示す。使用した制御棒表面での中性子束の微係数の値は C35G0 (5 列) 炉心の実験値との比較により算出した（高速 1～13 群：0.0、熱 14～20 群：0.0714）。C/E は 0.85～1.11 の範囲であることから制御棒反応度の解析精度は $\pm 15\%$ 以内であると考えられる。

表 A-12 高濃縮ウラン体系（固体減速炉心）の SRAC による実効増倍率の解析

炉心 ¹⁾	H/U-235	実効増倍率 (実験値)	実効増倍率 (計算値)	C/E
B1/8” P60EU-EU (EE1 炉心)	53	1.00095 ±0.00001	1.00433	1.003
A2/8” P36EU-NU-EU (ENE2 炉心)	92	1.00168 ±0.00001	0.99932	0.998
B1/8” P80EU (E1 炉心)	106	1.00060 ±0.00001	1.00051	1.000
A3/8” P36EU-NU-EU (ENE3 炉心)	138	1.00035 ±0.00001	1.00651	1.006
B4/8” P24EU-Th-EU (ETE2 炉心)	184	1.00086 ±0.00001	1.00380	1.003
B2/8” P48EU (E2 炉心)	212	1.00207 ±0.00002	0.99860	0.997
B3/8” P36EU-NU (EN3 炉心)	276	1.00124 ±0.00004	1.00117	1.000
B3/8” P36EU (E3 炉心)	319	1.00313 ±0.00003	1.00089	0.998

1) 炉心名称について

最初の A、B は架台

分数の数字（インチ単位）は燃料単位セルのポリエチレン板の厚さ

P のあとの燃料単位セルの繰り返し数

繰り返し数の次は燃料単位セルの構造

EU：高濃縮ウラン板、NU：天然ウラン板、Th：トリウム板

表 A-13 高濃縮ウラン体系（固体減速炉心）の SRAC による制御棒反応度の解析

炉心	反応度 ¹⁾ (実験値) (%Δk/k)	反応度 ¹⁾ (計算値) (%Δk/k)	C/E
B1/8” P60EU-EU (EE1 炉心)	3.54 ±0.01	4.07	1.15
B1/8” P80EU (E1 炉心)	3.87 ±0.02	4.40	1.14
B2/8” P48EU (E2 炉心)	3.37 ±0.02	3.82	1.13
B3/8” P36EU (E3 炉心)	1.95 ±0.02	1.87	0.96
A2/8” P36EU-NU-EU (ENE2 炉心)	3.37 ±0.03	3.99	1.18
A3/8” P36EU-NU-EU (ENE3 炉心)	2.86 ±0.02	2.80	0.98
B4/8” P24EU-Th-EU (ETE2 炉心)	1.70 ±0.02	1.86	1.09

1) 6 本制御棒を全て挿入したときの反応度の絶対値

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

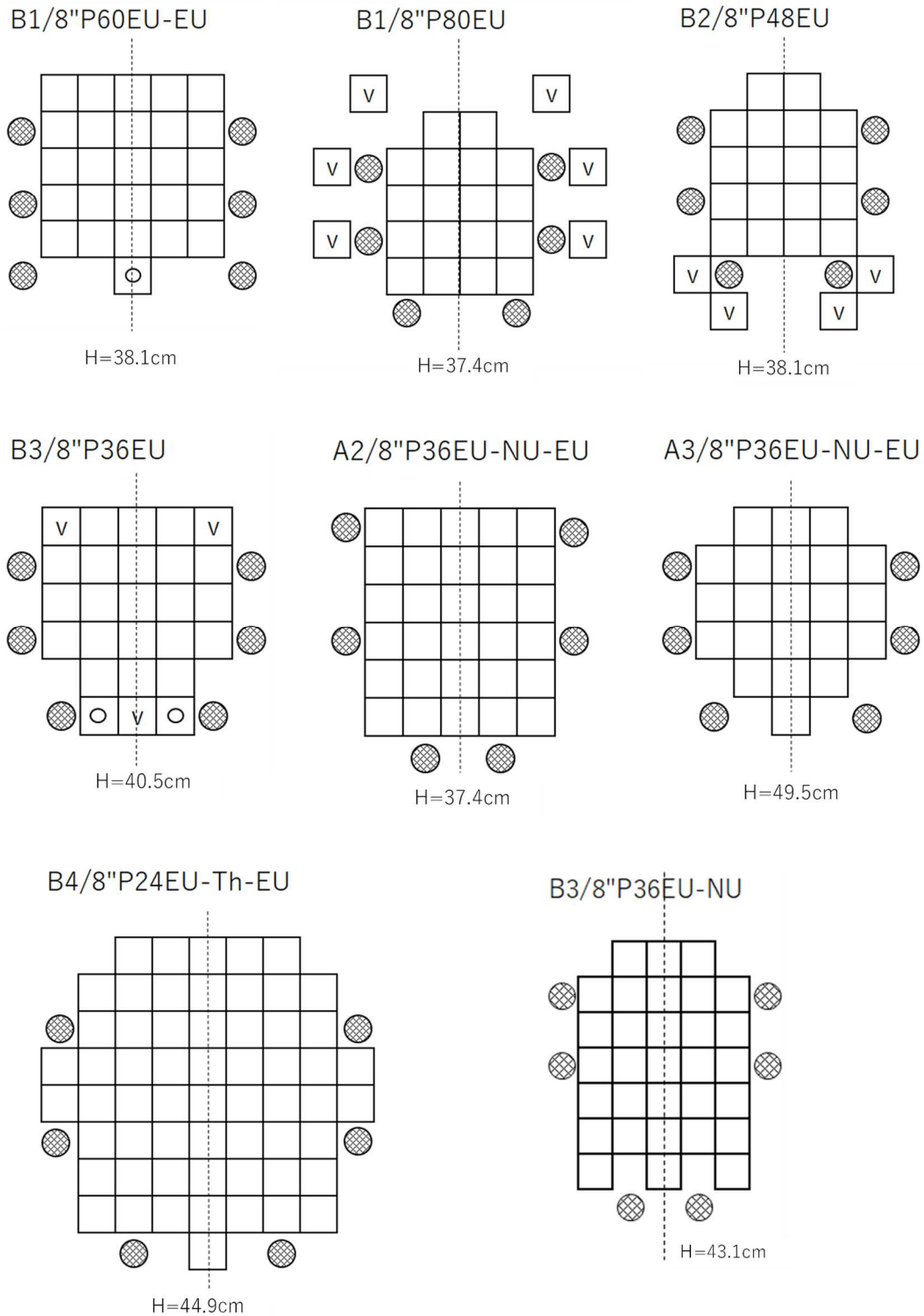


図 A-11 炉心配置図 (固体減速炉心)
(V:空鞘管、O:穴あきポリエチレン、Hは高さ)

表 A-14 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の SRAC による実効増倍率の解析

炉心 ¹⁾	H/U-235	実効増倍率 (実験値)	実効増倍率 (計算値)	C/E
C30G0(5列)	129	1.00501 ±0.00004	1.00199	0.997
C35G0(4列)	176	1.00499 ±0.00004	1.00183	0.997
C45G0(4列)	268	1.00484 ±0.00004	1.00096	0.996

表 A-15 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の SRAC による制御棒反応度の解析

炉心 ¹⁾	反応度 (実験値) (% Δ k/k)	反応度 (計算値) (% Δ k/k)	C/E
C30G0(5列)	2.76 ±0.01	2.40	0.87
C35G0(4列)	2.87 ±0.01	3.18	1.11
C45G0(4列)	2.87 ±0.01	2.44	0.85

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

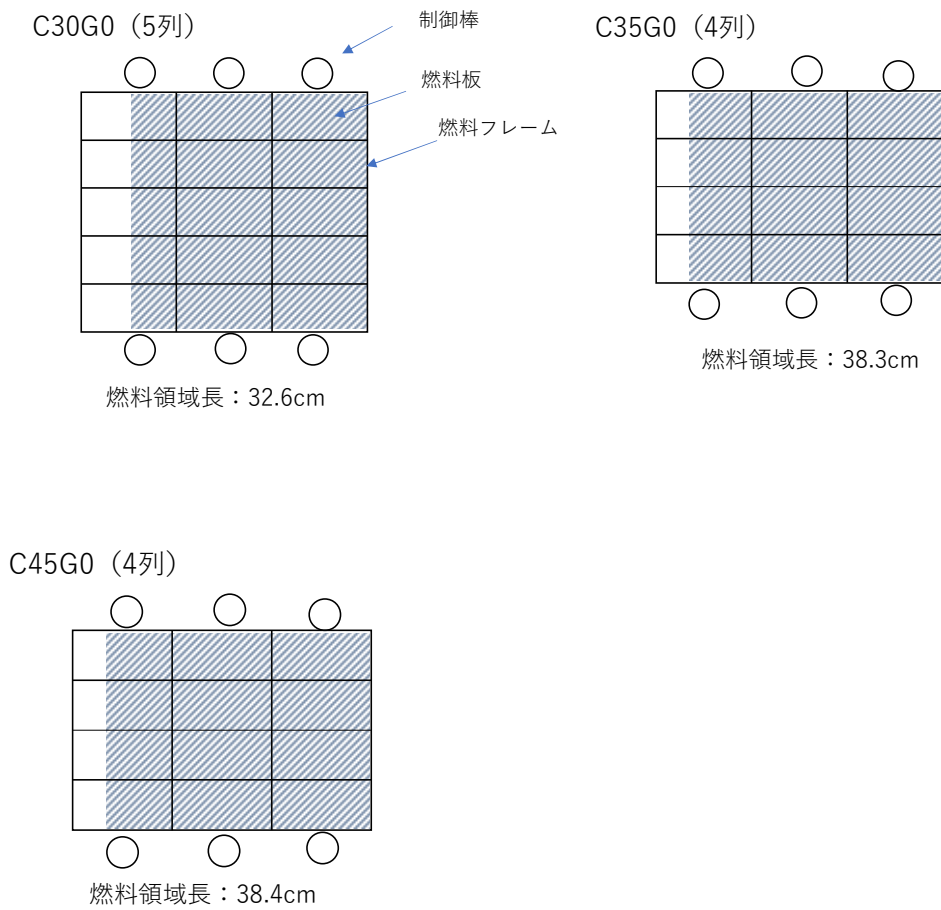


図 A-1 2 炉心配置図 (軽水減速炉心)

(燃料板支持フレームの網掛けした箇所に燃料板を挿入している
サイズは 14.2cm×7.1cm)

3. 温度係数について

軽水減速炉心では温度係数の測定実験が行われており、その実験値と計算値の結果を表 A-16～18 に示す。実験では以下のような手法で温度係数を求めた。

- ① 最初に 20°C 前後の水温で臨界状態とし（例えば表 A-16 の炉心では 22.1°C）、過剰反応度をペリオド法により測定する。
- ② 次に電気ヒーターにより水温を 10°C 程度上昇させ（例えば表 A-14 の炉心では 30.3°C）、臨界状態とし後に過剰反応度をペリオド法により測定する。
- ③ ①と②の過剰反応度の差と両者の水温の差から温度係数を求める。ただし、その温度係数は両者の温度の平均値に対する値とする。
- ④ この測定を繰り返す。ただし温度上昇により過剰反応度が負になった場合には、未臨界度を中性子源増倍法により測定する。

ここでの温度係数の誤差はペリオド法による過剰反応度測定時の倍加時間の誤差（±0.5s）、および温度の測定誤差（時間による変動）を考慮したものである。

C/E は 0.68～1.09 の範囲であることから、温度係数の解析精度は約±32%であると考えられる。

4. 即発中性子減衰定数について

中性子雑音解析法である Feynman- α 法により炉心の即発中性子減衰定数 α (β_{eff}/ℓ) の測定が行われてきた。実験では中性子検出器により中性子検出時刻の時系列を測定し、Feynman- α 法により Y 値を求め、理論式にフィッティングして α 値を求めた。

実験値と計算値の結果を表 A-19 に示す。ここでの α 値の誤差は最小自乗法によるフィッティングの誤差である。 β_{eff} と ℓ の値は SRAC の拡散計算コード CITATION の forward 計算と adjoint 計算により求めたものである。

C/E は 0.92～1.06 の範囲であることから、即発中性子減衰定数の解析精度は約±8%であると考えられる。

β_{eff} 単独の測定は非常に難したため、その誤差を正しく見積もることはできないが、過去においてに幾つかの実験的な研究が行われている。例えば JAEA の高速炉臨界実験装置 (FCA) においては国際ベンチマーク実験として幾つかの異なる手法で同じ体系での β_{eff} の測定が実施され比較検討された。また、熱炉である JAEA の臨界実験装置 (TCA) において β_{eff} が測定されたことがあり、FCA や TCA での実験結果を元に核データ JENDL の遅発中性子に関する定数の調整が行われ C/E が 3%以内程度で評価されている。KUCA の固体減速炉心においても FCA で用いられた手法の 1 つである Bennett 法により β_{eff} の測定が行われ、計算結果との差異は最大約 4%であったことが報告されている。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 A-16 温度係数 (C35G0 (3 列炉心) の実験と解析結果

温度 (°C)	温度係数 (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 (計算値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	C/E
26.2	0.66 ± 0.35	0.59	0.89
34.4	-2.48 ± 0.33	-1.68	0.68
42.5	-4.66 ± 0.41	-4.42	0.95
50.4	-7.78 ± 0.44	-7.07	0.91
59.2	-10.0 ± 0.29	-9.11	0.90
67.1	-13.5 ± 0.45	-10.5	0.78

表 A-17 温度係数 (C35G0 (5 列炉心) の実験と解析結果

温度 (°C)	温度係数 (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 (計算値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	C/E
29.7	-3.97 ± 0.32	-4.34	1.09
37.2	-7.34 ± 0.27	-6.67	0.91
44.1	-8.82 ± 0.28	-8.96	1.02
52.0	-12.5 ± 0.22	-11.5	0.91
63.6	-15.1 ± 0.28	-14.2	0.94

表 A-18 温度係数 (C45G0 (5 列炉心) の実験と解析結果

温度 (°C)	温度係数 (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 (計算値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	C/E
31.6	-8.82 ± 0.54	-6.73	0.76
39.8	-10.3 ± 0.56	-9.94	0.96
48.4	-13.2 ± 0.34	-12.5	0.95
57.0	-14.9 ± 0.30	-14.9	1.00

表 A-19 即発中性子減衰定数の実験と解析結果

炉心	α 値 (実験値) (1/s)	α 値 (計算値) (1/s)	C/E
B1/8" P60EU-EU (EE1 炉心) ¹⁾	270.5 \pm 1.9	249.1	0.92
C30G0 (5 列)	146.4 \pm 2.0	155.6	1.06
C35G0 (5 列)	138.5 \pm 0.3	138.5	1.05
C45G0 (5 列)	123.5 \pm 1.3	129.6	1.05

1) 図 A-11 の炉心配置

5 まとめ

固体減速炉心と軽水減速炉心について既存の高濃縮ウランを用いた体系について、実効増倍率、制御棒反応度、温度係数、即発中性子減衰定数の解析精度について評価を行った。

その結果、固体減速炉心と軽水減速炉心の両炉心について、各パラメータについての解析精度は以下のように評価する。

実効増倍率	: ± 0.6 %
臨界質量	: ± 4.0 %
制御棒反応度	: ± 18 %
反応度温度係数	: ± 32 %
即発中性子減衰定数	: ± 8 %

添付 8 の代表炉心の解析においては、これらの精度を考慮した上で評価を行うこととする。

参考文献

計算コード

K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko and K. Tsuchihashi, "SRAC2006; A Comprehensive neutronics calculation code system", JAERI-DATA/Code 2007-004 (2007).

反応度測定

T. Misawa, H. Unesaki and C. H. Pyeon, "Nuclear Reactor Physics Experiments", Kyoto Univ. Press (2010).

炉心説明

K. Kobayashi, J. Horie, K. Kanda and T. Shibata, "Reactivity Measurements in a Thorium Critical Assembly," Nucl. Sci. Eng., 71, 143 (1979)

S. Shiroya, K. Kanda and K. Tsuchihashi, "Analyses of Reactor Physics Experiments in the Kyoto University Critical Assembly," Nucl. Sci. Eng., 100, 525 (1988)

臨界量、誤差評価

"Evaluation of the Kyoto University Critical Assembly Erbium Oxide Experiments", LEU-MET-THERM-005, NEA/NSC/DOC/(95)03/IV Volume IV.

温度係数

M. Mori, S. Shiroya and K. Kanda, "Temperature Coefficient of Reactivity in Light-Water Moderated and Reflected Cores Loaded with Highly-Enriched-Uranium Fuel," J. Nucl. Sci. Technol., 24, 653 (1987)

即発中性子減衰定数

T. Misawa, S. Shiroya and K. Kanda, "Measurement of Prompt Neutron Decay Constant and Large Subcriticality by the Feynman- α Method," Nucl. Sci. Eng., 104, 53 (1990)

T. Misawa, S. Shiroya and Y. Yamane, "Measurement of Subcriticality by the Feynman- α Method at the KUCA," Ann. Rep. Res. Reactor Inst, Kyoto Univ., 27, 65 (1994)

β_{eff}

T. Yoshida et al., "Evaluation of Delayed Neutron Data for JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 2, 136-139 (20025).


山根義宏、他、「共分散測定法による実効遅発中性子割合の測定」、日本原子力学会誌、37, 513 (1995).

【補足-B 制御棒の相互干渉効果】

一般に制御棒干渉効果とは、近接した制御棒 2 本を同時に挿入したとき制御棒周辺の中性子束が近傍の制御棒挿入の影響により低下するため、その制御棒を単独で挿入した場合の反応度に比べて小さくなることである。そのため制御棒干渉効果がある場合には 2 本を同時に挿入したときの反応度の和は 1 本ずつ挿入したときの反応度の和に比べて小さくなる。

ここでは KUCA の制御棒干渉効果について考える。以下の 1) 2) は固体減速炉心および軽水減速炉心の主に単一炉心についての検討、3) は軽水減速炉心の 2 分割炉心についての検討を行う。

1) 固体減速炉心

固体減速炉心の制御棒は  となっている(図 B-1)。制御棒自体は格子板上の隣り合った場所(炉心配置図の隣り合った 1 辺約 5.5cm マス目)に挿入することは可能であるが、制御棒を上下させる制御棒駆動機構はその構造上 1 つ以上マス目を空けて設置する必要があるため、制御棒の中心間の距離はマス目の大きさである 1 辺約 5.5cm の 2 倍の約 11cm 以上空けることになる。これまで示した全ての代表炉心の制御棒配置はそのようになっている。

制御棒の干渉効果を確認するために、図 B-2 に示す中性子スペクトルが異なる各炉心について、モンテカルロ計算コード MCNP を用いて制御棒の干渉効果を確認した。これらの炉心は代表炉心の中では燃料体数が比較的少なく制御棒が近接しやすく制御棒干渉が現れやすいと考えられる。

結果を表 B-1 に示す。制御棒干渉効果があるとするならば表中の「③/(①+②)」の値は 1.0 より有意に小さな値になるはずであるが、全ての結果においてモンテカルロ計算の計算誤差範囲内で約 1.0 (結果のプラスマイナスの範囲内に 1.0 が入っている) となっている。後述する軽水炉心での制御棒干渉効果の解析(表 B-5, 表 B-6)においても計算誤差範囲内で「③/(①+②)」に相当する値が約 1.0 であれば干渉効果は無いことが示されている。これらの結果から固体減速炉心において制御棒を 1 つ以上マス目(1 さや管分以上)を空けて設置すれば制御棒の干渉効果は無視できると考えられ、今回解析を行った炉心はすべてこの配置条件を満足している。

各制御棒の反応度と全反応度を SRAC を用いて解析を行った結果を表 B-2 に示す(各炉心の炉心配置図「第 343 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 3 月 16 日)の資料(p 25 p 26、図 1 図 2)の通り)。各制御棒の反応度を足し合わせた値と、同

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

時に挿入したときの値はよく一致しており、これらの炉心についても制御棒の干渉効果は無視できると考えられる。

表 B-1 制御棒干渉効果の解析

炉心 ^{a)}	C1 反応度 (%Δk/k) ①	S5 反応度 (%Δk/k) ②	C1+S5 反応度 (%Δk/k) ③	③ / (①+②)
L5.5-40	0.18±0.02	0.46±0.02	0.62±0.02	0.98±0.03
L4-40	0.45±0.02	0.34±0.02	0.80±0.02	1.01±0.04
L3-40	0.40±0.04	0.59±0.04	1.00±0.05	1.00±0.08
L1-40	0.82±0.02	0.17±0.02	0.97±0.02	0.98±0.03
LL1-40	0.10±0.02	0.50±0.02	0.59±0.02	0.98±0.03

a) ハイフオンの後の数値は cm 単位の概略の炉心高さ (40 は高さ約 40cm の炉心)

表 B-2 各炉心の制御棒反応度

炉心	C 1 ¹⁾ (%Δk/k)	C 2 ¹⁾ (%Δk/k)	C 3 ¹⁾ (%Δk/k)	Sum ²⁾ (%Δk/k)	Total ³⁾ (%Δk/k)	Total/Sum
L5.5-50	0.189	0.468	0.196	1.71	1.67	0.98
L4-50	0.290	0.542	0.405	2.47	2.47	1.00
L3-50	0.013	0.519	0.398	1.86	1.83	0.98
L2-50	0.384	0.204	0.587	2.35	2.36	1.00
L1-50	0.204	0.406	0.435	2.09	2.04	0.98
LL1-50	0.654	0.649	0.637	3.88	4.01	1.03

- 1) 1/2 炉心モデルで対称な位置の 2 本の制御棒を同時に挿入したとして反応度を求め、その値を 1/2 とした値
- 2) Sum は C1+C2+C3 の値を 2 倍したもの
- 3) Total は同時に 6 本を挿入したときの値

表 B-2-2 各炉心の制御棒反応度（追加確認）

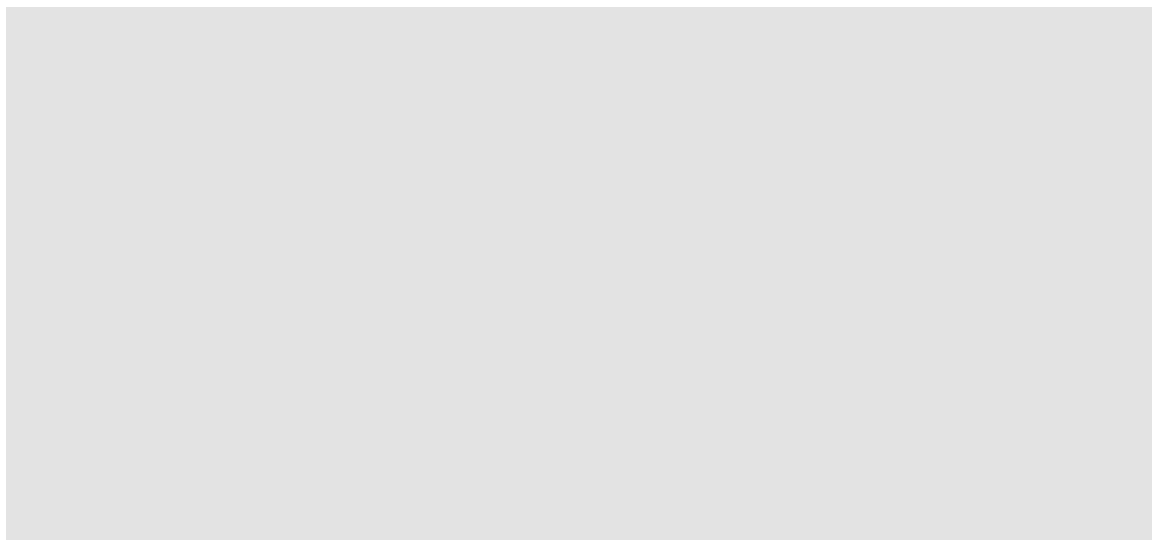
炉心	C 1 ¹⁾ (%Δk/k)	C 2 ¹⁾ (%Δk/k)	C 3 ¹⁾ (%Δk/k)	Sum ²⁾ (%Δk/k)	Total ³⁾ (%Δk/k)	Total/Sum
L5.5-50	0.187	0.460	0.198	1.69	1.67	0.99
L3-50	0.016	0.510	0.391	1.83	1.82	0.99
LL1-50	0.658	0.644	0.635	3.90	4.02	1.03

1) 炉心配置の対称条件を用いた 1/2 炉心モデルではなく全炉心体系で計算

2) Sum は C1+C2+C3 の値を 2 倍したもの

3) Total は同時に 6 本を挿入したときの値

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



「グレーのマスキング範囲は不表示情報」

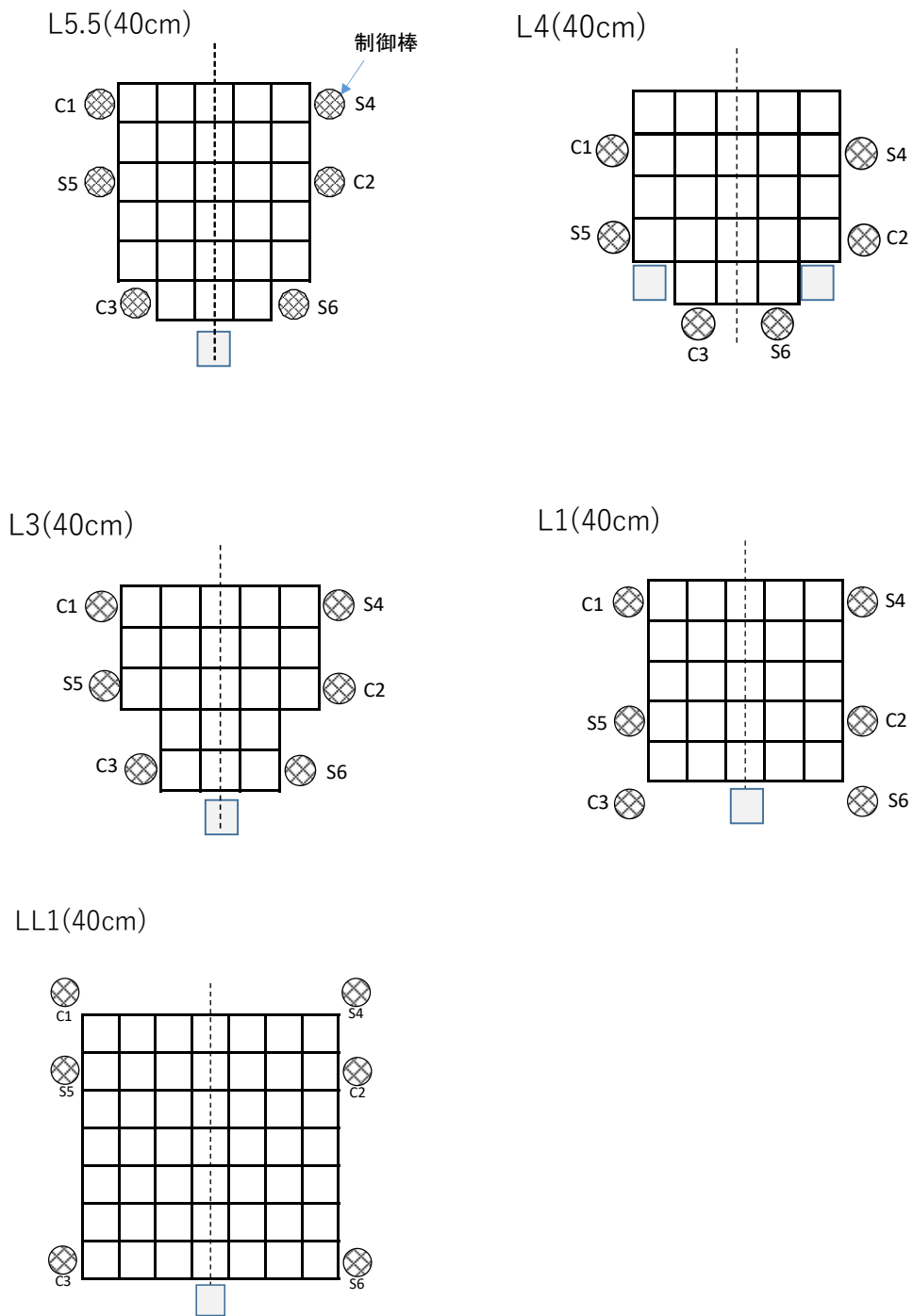


図 B-2 MCNP による解析炉心
(反応度が最大となる制御棒を C2、S5 とした)

図 B-2 に示した各炉心について、表 B-1 での検討結果では制御棒が集合体の 1 マス以上離して設置すれば制御棒干渉効果は考慮する必要が無いことを示しているが、確認のために、例えば L5.5(40cm)炉心の C2 と S5 制御棒のように制御棒反応度が最大となる鏡面对称位置にある 2 本の制御棒(対象となる制御棒は表 B-3 に記載)についての干渉効果をモンテカルロ計算コード MCNP を用いて検討する(計算は全炉心モデル)。

結果を表 B-3 に示す。制御棒干渉効果があるとすれば表中の「②/(①×2)」の値は 1.0 より有意に小さな値になるはずであるが、全ての結果においてモンテカルロ計算の計算誤差範囲内で約 1.0 (結果のプラスマイナスの範囲内に 1.0 が入っている)となっており、鏡面对称位置にある制御棒についての制御棒の干渉効果は無視できると考えられる。

表 B-3 鏡面对称位置にある制御棒の干渉効果の解析

炉心	対象となる 制御棒	C 反応度 (% Δk/k) ①	C+S 反応度 (% Δk/k) ②	② / (①×2)
L5.5-40	C2 と S5	0.49±0.02	1.00±0.02	1.02±0.05
L4-40	C1 と S4	0.34±0.02	0.70±0.02	1.03±0.05
L3-40	C2 と S5	0.59±0.04	1.23±0.02	1.04±0.06
L1-40	C2 と S5	0.82±0.02	1.68±0.02	1.02±0.03
LL1-40	C2 と S5	0.50±0.02	0.97±0.02	0.97±0.05

図 B-3 に示すような制御棒が隣接した幾つかの炉心について、制御棒干渉効果についての確認を行った。

図中の網掛けをつけた各炉心の 2 本の制御棒が対象であり、右側をC3、左側をS6制御棒とする。各制御棒の反応度について、どちらか 1 本のみを挿入した場合と 2 本同時に挿入した場合の反応度を SRAC コードシステムにより求めた。結果を表 B-4 に示す。制御棒干渉効果があるとなれば表中の「②／(①×2)」の値は 1.0 より有意に小さな値になるはずであるが、全ての結果において 1.0 に近い値となっており、前述の検討結果と同様にこれらの制御棒についての制御棒の干渉効果は無視できると考えられる。

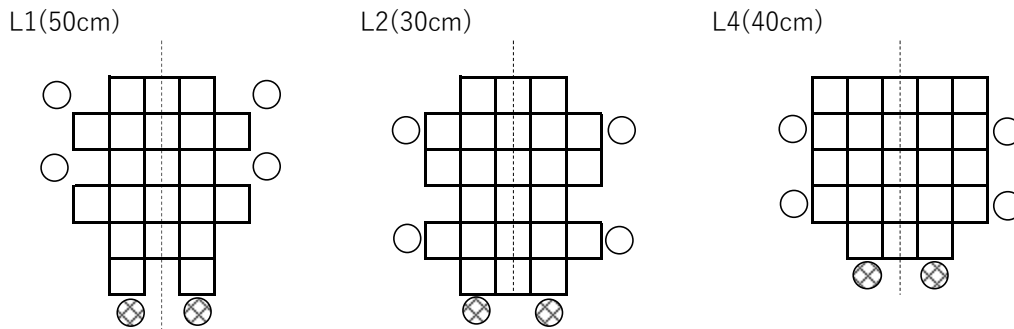




図 B-3 横方向に制御棒が隣接した炉心

表 B-4 横方向に制御棒が隣接した制御棒の干渉効果の解析

炉心	1 本反応度 (% Δ k/k) ①	2 本反応度 (% Δ k/k) ②	②／(①×2)
L1-50	0.435	0.879	1.01
L2-30	0.336	0.656	0.98
L4-40	0.317	0.614	0.97

2) 軽水減速炉心 (単一炉心)

軽水減速炉心の制御棒は 
 使用時にはそれを 5cm 角の制御棒挿入管(図 B-4 中の Al box)に挿入した構造となっている。

制御棒の干渉効果を確認するために、図 B-5 に示す C45G0(4 列)と C45G0(5 列)の各炉心について、S4 と C2 の制御棒の間隔を変更し(C2 の位置は変更せずに S4 を C2 に近づける)、S4、C2 の単体を挿入したときの反応度、および S4 と C2 を同時に挿入したときの反応度をモンテカルロ計算コード MCNP を用いて計算した。体系は反射条件を用いずに全炉心を入力して計算を行っている。

結果を表 B-5、B-6 に示す。表中の間隔は 2 本の制御棒の中心間の距離であり、表の「③／(①＋②)」の値は干渉効果がある場合には 1 より小さい値となる。間隔が 8cm のときにはやや干渉効果が認められるが、10cm 以上離れていた場合には干渉効果は無視できると考えられる。

実際には固体減速炉心の説明でも述べたように制御棒駆動機構の構造上、制御棒を約 11cm 以上近づけることは不可能であり、前回審査会合(「第 348 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 4 月 20 日))の資料で示した軽水減速炉心の制御棒反応度の解析(p13, P14 の表 3)ではすべて 11cm 以上離して制御棒を設置しているので、制御棒の近接による干渉効果は無視することができる。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

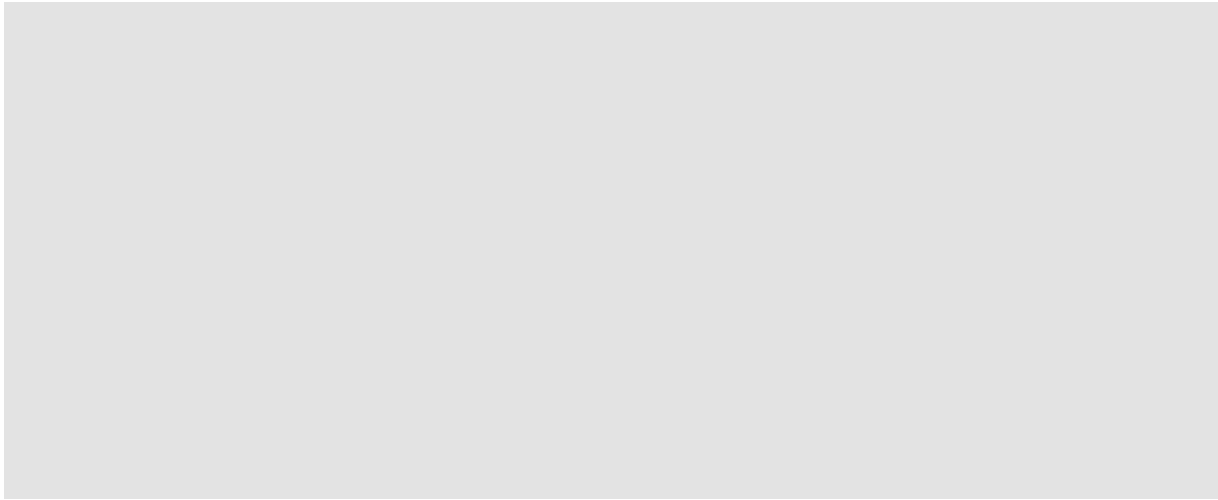


図 B-4 軽水減速炉心 制御棒断面図

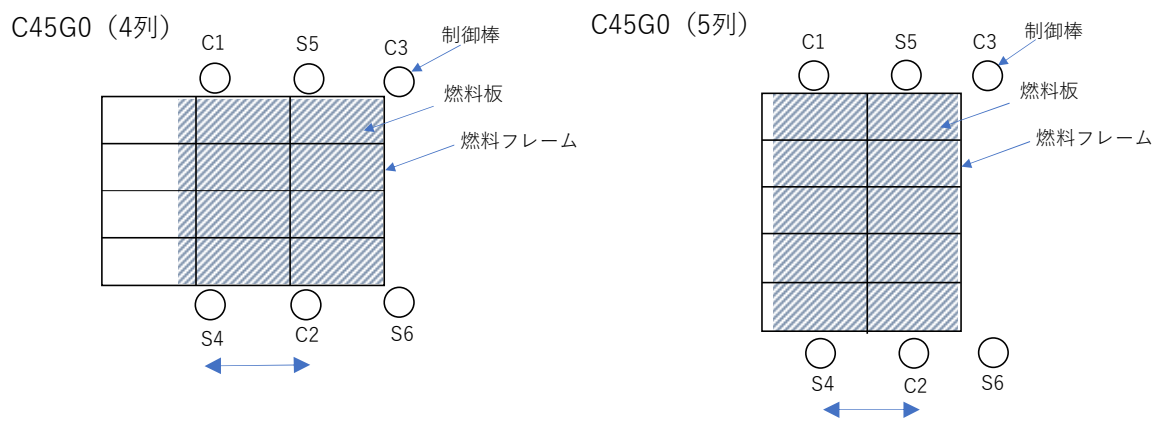


図 B-5 C45G0(4列)炉心(左)、C45G0(5列)炉心(右)

表 B-5 C45G0(4列)炉心 制御棒干渉効果の解析 (全炉心体系入力)

間隔	S4 反応度 (% Δk/k) ①	C2 反応度 (% Δk/k) ②	S4+C2 反応度 (% Δk/k) ③	③ / (①+②) (% Δk/k)
17 cm	0.38±0.02	0.53±0.01	0.94±0.01	1.04±0.03
14 cm	0.49±0.01	0.53±0.01	0.98±0.02	1.02±0.02
10 cm	0.63±0.01	0.53±0.01	1.15±0.01	1.00±0.02
8 cm	0.64±0.02	0.53±0.01	1.13±0.01	0.97±0.02

間隔は制御棒の中心間の距離

表 B-6 C45G0(5列)炉心 制御棒干渉効果の解析 (全炉心体系入力)

間隔 ^{a)}	S4 反応度 (% Δk/k) ①	C2 反応度 (% Δk/k) ②	S4+C2 反応度 (% Δk/k) ③	③ / (①+②) (% Δk/k)
17 cm	0.30±0.01	0.30±0.01	0.61±0.01	1.03±0.03
14 cm	0.39±0.01	0.30±0.01	0.70±0.01	1.00±0.03
10 cm	0.47±0.01	0.30±0.01	0.74±0.01	0.97±0.03
8 cm	0.48±0.02	0.30±0.01	0.73±0.01	0.94±0.03

a) 間隔は制御棒の中心間の距離

3) 軽水減速炉心 (2 分割炉心)

2 分割炉心での制御棒の相互干渉効果は 1) と 2) の単一炉心の場合の制御棒近接による干渉効果とは異なる傾向を示す。

図 B-6 に示すような 2 分割炉心を考える。燃料配置は分割面に対して対称であり、また 2 本の制御棒も分割面に対して対称に配置する。1) 2) で示した一般的な制御棒干渉効果では制御棒挿入により制御棒周辺の中性子束が局所的に歪むため、その歪み、すなわち中性子束の低下の影響を受ける制御棒の反応度が小さくなるのが問題となった。一方、2 つの炉心間の中性子結合が弱い 2 分割炉心の場合、制御棒を挿入した側の炉心での中性子束が全体として大きく低下する現象が起こる。その中性子束の概形を図 B-7 に示す(臨界計算での中性子束を示しているので、炉心全体で積分値は変わらないとする)。図 B-8 に KUCA での C45 の 2 分割炉心(燃料配置は分割面に対して対称)において図面の右側炉心の制御棒を挿入して摂動を加えたときに反応率分布を示す。ここで加えた摂動は約 $0.1\% \Delta k/k$ という小さなものであるが、反応率分布は右側炉心が左側炉心に比べて炉心全体にわたって低下していることが判る。このような中性子束の大局的な歪みは **Flux Tilt** と呼ばれている。

これは結合が弱いほど摂動に対して 1 次モード中性子束が励起しやすいために生じるものとして考えることができる。図 B-9、B-10 に C60G15(4 列)の 2 分割炉心の高速群の基本モード、1 次モード中性子束、4 次モード中性子束を、表 B-7 に各モードの固有値および固有値間隔を示す。高次モード解析は NEUMAC-3 コード(中性子拡散法と deflation 法に基づく 3 次元高次モード解析コード)を用いた¹⁾。基本モードは 2 つの炉心の分割面に対して対称となるが、1 次モードは反対称となる。(4 次モード中性子束については後述)

これまでの研究により結合が弱い 2 分割炉心において次式で定義される Flux Tilt 量(τ)は片側炉心に加えられた反応度 ρ に比例し、一次モード固有値間隔($E.S.$)₁ に反比例することが判っている²⁾³⁾。

$$\tau = \frac{\left| \int_{V_1} \phi' dV - \int_{V_2} \phi' dV \right|}{\int_V \phi dV} \propto \frac{\rho}{(E.S.)_1}$$

$$(E.S.)_1 = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_0}$$

ここで、 ϕ の上添え字無しは摂動前の基本モード中性子束、上添え字ダッシュ付きは摂動後の基本モード中性子束、分母は炉心全体 V の積分、分子は左右の 2 つの炉心ごと V_1 と V_2 (図 B-6 の炉心 1 と 2) の積分、 ρ は反応度、 λ_0 と λ_1 は基本モードと一次モードの固有値である。 $(E.S.)_1$ は 2 分割炉心の 2 つの炉心間の中性子結合の度合いを示すパラメータとして用いることができ、この値が小さいほど結合が弱いことを表している。2 分割炉では 2 炉心間の距離が広くなるほど結合が弱くなって $(E.S.)_1$ が小さくなり、摂動が加えられた場合に Flux Tilt 量は大きくなる。なお、Flux Tilt は単一炉心であっても $(E.S.)_1$ が小さい PWR のような大型炉心でも起こる現象であるが、KUCA

の小型の単一炉心では後で述べるとおり $(E.S.)_1$ の値が大きいため Flux Tilt の影響は無視することができる。

図 B-6 の炉心 1 と 2 の制御棒を同時に挿入すると一次モード中性子束は励起されずに中性子束は左右対称となるが、結合の弱い 2 分割炉心の片側炉心(図 B-6 の炉心 1)にのみ制御棒が挿入されると炉心 1 側の中性子束が全体として大きく歪み、そのため制御棒 1 の反応度は 1 と 2 を同時に挿入した場合の制御棒 1 の反応度の値に比べて小さくなる。これが 2 分割炉心での制御棒干渉効果であり、1)2)の局所的な中性子束の歪みをもたらす干渉効果とは異なり、制御棒が近接しているかどうかとは関係ない。

このような 2 分割炉心の制御棒干渉効果についていくつかの低濃縮ウランを用いた代表炉心についてモンテカルロ計算コード MCNP による解析を行った。対象としたのは C45(4 列)、C45(5 列)、C60(4 列)の単一炉心及び燃料と制御棒を分割面に対して対称に配置した 2 分割炉心で、図 B-6 のように配置した制御棒 C1 と C2 について単独で挿入した場合と 2 本を同時に挿入した場合の反応度を求めた。なお、各炉心共に制御棒は炉心分割面(単一炉心の場合は炉心中央)から同じ距離 7cm だけ離れた位置に配置した。体系は反射条件を用いずに全炉心を入力して計算を行っている。

結果を表 B-8~B-10 に示す。各炉心の結合の強さを確認するために、 $(E.S.)_1$ の解析結果も同表中に示す。各炉心ともに分割幅が広くなるにつれて $(E.S.)_1$ が小さくなっており炉心間の結合が弱くなっていることが判る。また 4 列炉心と 5 列炉心を比べると 4 列炉心のほうが $(E.S.)_1$ は小さく炉心間の結合が弱くなっているが、これは 4 列炉心のほうが軽水ギャップに面して対向する炉心(燃料領域)の表面積が 5 列炉心より狭いためと考えられる。

表中の flux 比は C1 制御棒のみを挿入したときの炉心 1 と炉心 2 での熱群中性子束の積分値(各炉心の体積で積分)の比である。 $(E.S.)_1$ が大きいときには 1 に近い値となっており、大局的には中性子束は歪んではいけないことが判る(局所的に中性子束は歪むため flux 比は 1 より少し小さい値となる)。一方、分割幅が 10 cm 以上となり $(E.S.)_1$ が小さく結合が弱いときには flux 比は明らかに 1 より小さな値になっており、その傾向は分割幅が広くなるにつれて顕著になってくる。

各炉心の制御棒反応度の結果について確認してみる。各表中の「②/(①×2)」は 2 本同時に挿入したときの反応度(②)と 1 本ずつ挿入したときの反応度の和(①+①)の比をとったもので、もし干渉効果がなければ 1 となるはず数値であるが、上記の flux 比の考察の場合と同様に分割幅が 10cm 以上となると明らかに 1 より大きくなっている(表中の下線を引いた数値)。これは 1 本の反応度の 2 倍より 2 本同時に挿入した場合の反応度のほうが大きくなっていることを示している。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

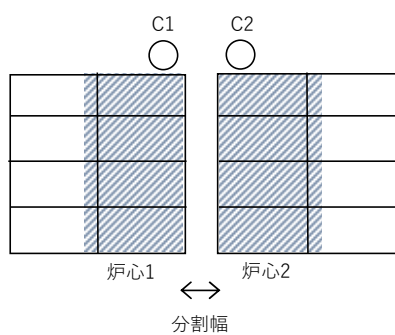


図 B-6 2 分割炉心(4 列)の配置図

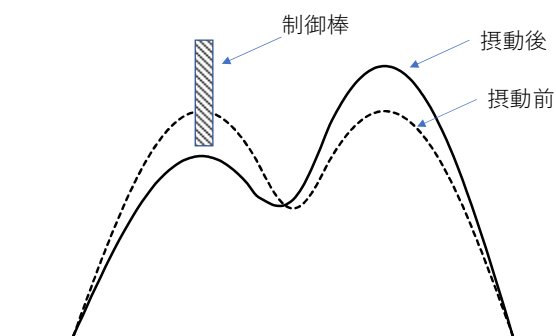
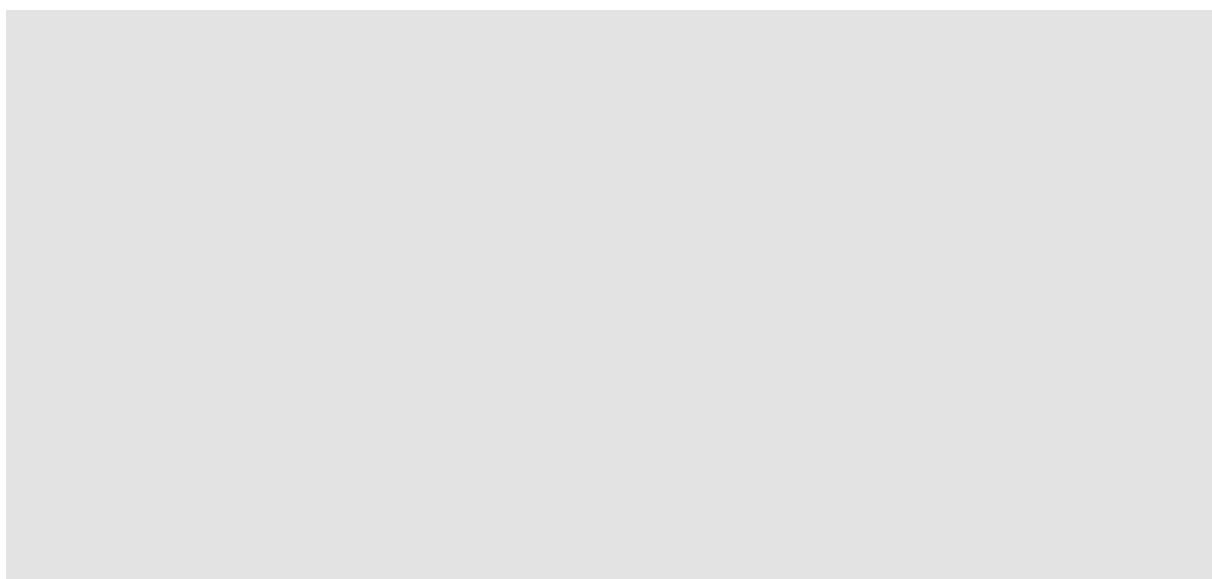


図 B-7 2 分割炉心の制御棒挿入前後の中性子束



「グレーのマスクング範囲は不表示情報」

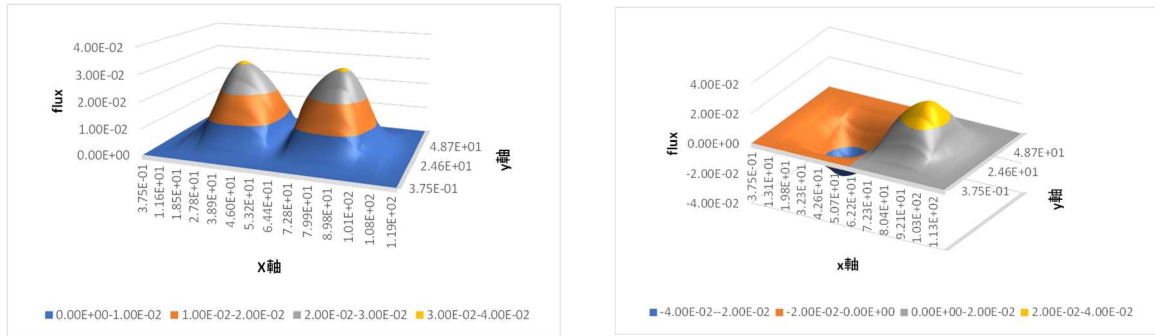


図 B-9 C60G15(4列)炉心の高速群の基本モード中性子束(左)、1次モード中性子束(右)

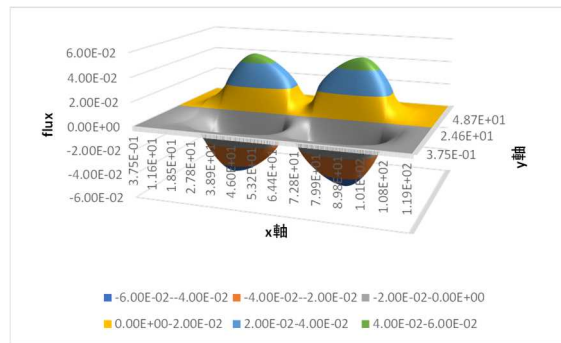


図 B-10 C60G15(4列)炉心の高速群の4次モード中性子束

表 B-7 C60 G15 (4列)炉心の固有値および固有値間隔

[Redacted Table Content]

表 B-8 C45(4列)の2分割炉心の制御棒反応度 (全炉心体系入力)

炉心	C1 反応度 (%Δk/k) ①	C1+C2 反応度 (%Δk/k) ②	②/(①×2) ¹⁾	Flux 比 ²⁾	
C45G0	0.48±0.01	0.95±0.01	0.99±0.03	0.97	
C45G(2H ₂ O)	0.44±0.01	0.86±0.01	0.98±0.03	0.97	
C45G(5H ₂ O)	0.39±0.01	0.77±0.01	0.98±0.03	0.96	
C45G(7H ₂ O)	0.34±0.01	0.68±0.01	0.99±0.04	0.95	
C45G(10H ₂ O)	0.25±0.01	0.55±0.01	<u>1.12±0.06</u>	0.91	
C45G(15H ₂ O)	0.21±0.01	0.46±0.01	<u>1.09±0.06</u>	0.74	

1) 下線は誤差を含めて 1.0 から外れたケース

2) Flux 比は C1 挿入時の

「熱群中性子束の体積積分 (炉心 1) ÷ 熱群中性子束の体積積分 (炉心 2)」

表 B-9 C45(5列)の2分割炉心の制御棒反応度 (全炉心体系入力)

炉心	C1 反応度 (%Δk/k) ①	C1+C2 反応度 (%Δk/k) ②	②/(①×2) ¹⁾	Flux 比 ²⁾	
C45G0	0.33±0.01	0.67±0.01	1.03±0.04	0.98	
C45G(2H ₂ O)	0.29±0.01	0.57±0.01	0.98±0.04	0.98	
C45G(5H ₂ O)	0.26±0.01	0.54±0.01	1.03±0.05	0.98	
C45G(7H ₂ O)	0.24±0.01	0.48±0.01	1.01±0.05	0.96	
C45G(10H ₂ O)	0.20±0.01	0.45±0.01	<u>1.13±0.07</u>	0.94	
C45G(10H ₂ O)	0.17±0.01	0.41±0.01	<u>1.17±0.08</u>	0.84	

1) 下線は誤差を含めて 1.0 から外れたケース

2) Flux 比は表 B-8 と同じ

表 B-10 C60 (4 列) の 2 分割炉心の制御棒反応度 (全炉心体系入力)





炉心	C1 反応度 (% Δk/k) ①	C1+C2 反応度 (% Δk/k) ②	② / (① × 2) ¹⁾	Flux 比 ²⁾	
C60G0	0.40 ± 0.01	0.79 ± 0.01	0.98 ± 0.02	0.98	
C60G (2H ₂ O)	0.37 ± 0.01	0.75 ± 0.01	1.03 ± 0.03	0.97	
C60G (5H ₂ O)	0.30 ± 0.01	0.61 ± 0.01	1.00 ± 0.03	0.96	
C60G (7H ₂ O)	0.26 ± 0.01	0.53 ± 0.01	1.02 ± 0.04	0.94	
C60G (10H ₂ O)	0.20 ± 0.01	0.43 ± 0.01	<u>1.05 ± 0.05</u>	0.89	
C60G (15H ₂ O)	0.16 ± 0.01	0.36 ± 0.01	<u>1.14 ± 0.07</u>	0.73	

- 1) 下線は誤差を含めて 1.0 から外れたケース
 2) Flux 比は表 B-8 と同じ

中性子結合の弱い 2 分割炉心では上記のような制御棒干渉効果が現れることを元に KUCA の 2 分割炉心の代表炉心(特に結合の弱い炉心)の解析結果について検討する。

- ① これまでの軽水減速炉心の解析では制御棒 6 本を同時に挿入した場合の反応度を計算して、その結果を核的制限値 (1%Δk/k + 最大過剰反応度) と比較してきたが、制御棒は「炉心配置 (水平方向) に対して線対称、または点対称となるように配置する」としており (「第 356 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 6 月 22 日) の資料 1 ページ目)、その場合は各炉心に均等に反応度が印加されるため 2 分割炉心で Flux Tilt は発生しないため、全制御棒反応度の核的制限値の評価についてはここで述べた 2 分割炉心の制御棒の干渉効果を考える必要は無い。
- ② これまでの最大反応度を持つ制御棒の解析では、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに最大の反応度となる 2 本を対称に配置した制御棒を挿入したときの反応度を求め、その値の 1/2 を最大の反応度として核的制限値 (全反応度の 1/3 以下) と比較してきた。これは一部の炉心計算で計算時間を少なくするために炉中心に対する対称条件を入れて炉心半分の幾何

入力で計算を行っていたためである。そのため 2 分割炉で最大 1 本の反応度を計算する過程で Flux Tilt は発生せず、表 B-8~B-10 での「C1+C2 反応度」を計算してその値を 1/2 としていたことになるが、上で説明したとおり結合の弱い炉心の場合、その値は 1 本を単独で挿入したときの反応度の値より大きくなるので、1 本の最大反応度の値が全反応度の 1/3 以下という核的制限値の評価は厳しい側（安全側）となるのでこれまでの解析方法で問題は無い。しかし、この効果を取り入れるため、結合が弱く高次モードの影響を受けやすい分割幅が 7cm 以上の炉心については、最大 1 本の反応度を求めるために反射条件を用いて炉心半分の幾何入力で計算を行うのではなく、全炉心の体系を入力して反応度を求めるようにする。

- ③ ②と同じ理由により最大の反応度をもつ制御棒を 1 本のみ挿入したときの反応度が小さくなるために反応度印加率も小さくなるので、核的制限値（0.02% $\Delta k/k/s$ 以下）を満足しやすくなる。
- ④ 2 分割炉心での 1 次モード中性子束に起因する制御棒干渉効果があるとすればさらに高次のモードによる影響も現れる可能性はある。例えば図 B-8 に示した C60G15(4 列)炉心の 4 次モード中性子束は 4 列の燃料体を挟む反対側の制御棒(図 B-5 の C1 と S4 のような配置)について制御棒干渉効果を生じさせる可能性があるが、表 B-7 に示す 4 次モードの固有値間隔は 72%と非常に大きい。



- ⑤ 固体減速炉心は全て単一炉心であるが、体系が大きく $(E.S.)_1$ が小さい場合には 1 次モードに起因する Flux Tilt が発生する可能性がある。これまでの固体減速炉心の代表炉心の中で図 B-11 に示す燃料体数が多い 2 つの炉心(LL1 (高さ約 30cm)、L5.5 (高さ約 30cm))について固有値間隔の解析を行った結果を表 B-11 に示す。これらの炉心の $(E.S.)_1$ は 30%以上あることから、これらの炉心についてもこれまで通り高次モードに起因する制御棒干渉効果を考慮する必要は無い。
- ⑥ 2 分割炉心での制御棒の挿入または引抜きに伴う 1 次モード中性子束の励起により制御棒微分反応度曲線の形状が変化する可能性がある。その影響を確認するために、図 B-13~図 B-15 に示す炉心のうち C45(4 列)、C45(5 列)、C60(4 列)の 3 つの単一炉心、および結合の弱い C45(4 列)、C45(5 列)、C60(4 列)で分割幅が 15cm の 2 分割炉心において、C1 制御棒を下限(全挿入)から上限(全引抜き)までの間の実効増倍率の変

化を代表炉心の制御棒反応度値計算に用いているものと同じ SRAC コードシステムにより解析を行った。なお、他の 5 本の制御棒は全引抜きとした。

C1 制御棒の引抜きに伴う実効増倍率の変化（増加）から制御棒微分反応度を求めた結果を図 B-11 に示す。図 B-12 の横軸は C1 制御棒の下限からの高さであり、炉心高さ方向中央は横軸の 31.5cm である。この図の各微分反応度曲線は制御棒位置を 2cm ずつ変化させたときの反応度の変化を CITATION により求め、その結果を 5 次式で最小二乗フィッティングし、その式を微分して求めたものである。

1 次モードの影響を無視することができる単一炉心（C45G0(4 列)）では微分反応度は図の高さ約 31cm のところ(燃料中央高さ)で最大値をとりほぼ左右対称、すなわち炉心ではほぼ上下対称になっていることが判る。一方、2 分割炉心での微分反応度曲線の最大値は単一炉心の場合と比べてやや高い位置で現れている。これは制御棒が下方にあるときにはその炉心側の中性子束が大きく低下しているため微分反応度が小さいが、引き抜くにつれて Flux Tilt 量が小さくなりそれに伴い微分反応度が大きくなるため、結果として微分反応度曲線のピーク位置が燃料中央高さより少し高くなったと考えられる。

C45 の 4 列と 5 列の単一炉心と炉心間結合が最も弱い分割幅が 15cm の炉心、および C60 の 4 列の単一炉心と分割幅が 15cm の炉心について、微分反応度曲線がピークとなる位置、およびそのときの微分反応度の値（積分反応度が 1 となるように規格化）を表 B-12 に示す。単一炉心に比べて C45G(15H₂O) (4 列)炉心で約 1.2cm、C60G0(4 列)炉心で約 2.4cm 高い位置で現れており、最大となる微分反応度の値は 2 分割炉心での最大値は単一炉心での最小値と比べて約 2.8%だけ大きくなっている。

そのため、代表炉心の解析において 1 次モード中性子束の影響を受けやすい分割幅が 7cm 以上の炉心の微分反応度については「補足-B 制御棒の反応度印加率」において Flux Tilt が生じないとして求めた値に対して 2.8%の偏差を考慮して評価することにする。（核的制限値に対して計算誤差に加えてさらにこの偏差を考慮して評価する）

なお、実際の 2 分割炉心において微分反応度曲線を測定する際には 1 つの炉心の制御棒を少しずつ上げて正ペリオド法により反応度を測定し、反対側の炉心の制御棒を徐々に挿入して臨界調整を行うので、両炉心にある程度制御棒が挿入することになり Flux Tilt 量は図 B-11 に示した 1 本のみ制御棒引抜きの場合より小さくなるので微分反応度曲線の形状は単一炉心のものに近くなるため、上述した最大微分反応度の 2.8%という偏差は安全側の評価値であると考えられる。

参考文献

- 1) T. Misawa *et al.*, “Application of Nodal Method to Lambda Mode Higher Harmonics Code”, J. Nucl. Sci. Technol., 33, 668 (1996).
- 2) M. Andoh *et al.*, “Measurement of Flux Tilt and Eigenvalue Separation in Axially Decoupled Core,” J. Nucl. Sci. Technol., 34, 445 (1997).
- 3) K. Hashimoto *et al.*, “A Practical Formula for Inferring Eigenvalue Separation from Flux Tilt Measurements in Nuclear Reactors,” Ann. Nucl. Energy, 18, 131 (1991).

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

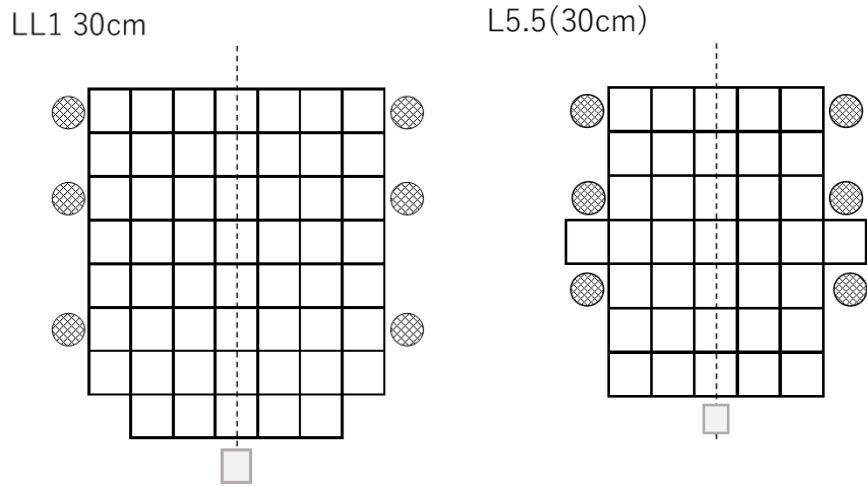


図 B-11 固体減速炉心の配置図 (左 : LL1 (高さ約 30cm)、右 : L5.5 (高さ約 30cm))

表 B-11 固体減速炉心の固有値間隔(%)

--

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

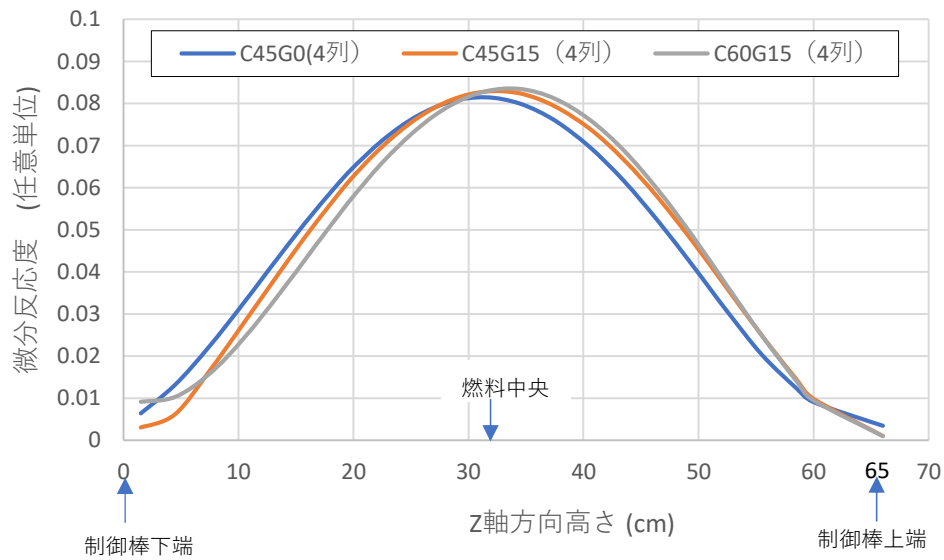


図 B-12 2分割炉心の制御棒微分反応度曲線 (曲線の積分値が1となるように規格化)
(C45G0 (4列) 炉心、C45G15 (4列) 炉心、C60G15 (4列) 炉心)

表 B-12 単一炉心と2分割炉心での微分反応度の最大値

炉心	最大となる高さ (cm)	微分反応度の最大値 (—) ¹⁾
C45G0 (4列)	31.2	0.0814 ²⁾
C45G15 (4列)	32.4	0.0831
C45G0 (5列)	31.2	0.0816
C45G15 (5列)	33.2	0.0826
C60G0 (4列)	31.2	0.0820
C60G15 (4列)	33.6	0.0837 ³⁾

- 1) 各炉心での積分反応度が1となるように規格化
- 2) 単一炉心での最小値
- 3) 2分割炉心での最大値

制御棒の微分反応度曲線の形状が、他の制御棒の挿入状態により変化するかについて調べた。対象とする炉心は図 B-13 に示す C45G0(4 列)炉心と C45G(15H₂O) (4 列)炉心である。

C45G0(4 列)炉心で反応度の最も大きい C2 制御棒について他の 5 本の制御棒が全引抜き (ARO) の場合(図 B-12 に示したケース)と、燃料領域を挟んで反対側の C1 制御棒が半分だけ挿入した場合での C2 制御棒の反応度を表 B-13 に、微分反応度曲線を図 B-14 に示す。両者はよく一致しており C2 制御棒の微分反応度曲線は反対側の制御棒の挿入状態に影響を及ぼさないことを確認した。(なお、C1 制御棒を全挿入の時には実際には未臨界に近い状態となるため、C1 制御棒全挿入時には C2 の微分反応度曲線を測定することはできない)

同様に C45G(15H₂O) (4 列)炉心について、反応度の最も大きい C1 制御棒について他の 5 本の制御棒が全引抜き (ARO) の場合(図 B-12 に示したケース)と、炉心の分割軽水領域を挟んで反対側の S5 制御棒を全挿入した場合での C1 制御棒の反応度を表 B-13 に、微分反応度曲線を図 B-15 に示す。表 B-13 の結果は両者ともよく一致している。S5 制御棒を全挿入した場合のほうが微分反応度が最大値になる位置は高さ方向の低い側にやや移り、最大値の大きさは 5 本 ARO の場合より少し低くなることが判った。

上述の通り、1 次モード中性子束の影響を受けやすい分割幅が 7cm 以上の炉心の微分反応度については制御棒の反応度印加率において Flux Tilt が生じないとして求めた値に対して 2.8%の偏差を考慮して評価するとしたが、他の制御棒が挿入されたほうが最大値は小さくなるためこの偏差を考慮して評価することは安全側であるといえる。

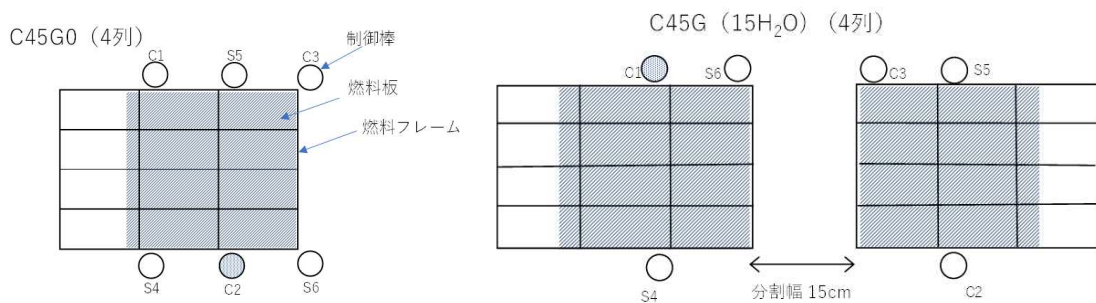


図 B-13 C45G0(4 列)炉心 C45G(15H₂O) (4 列)炉心の配置図

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

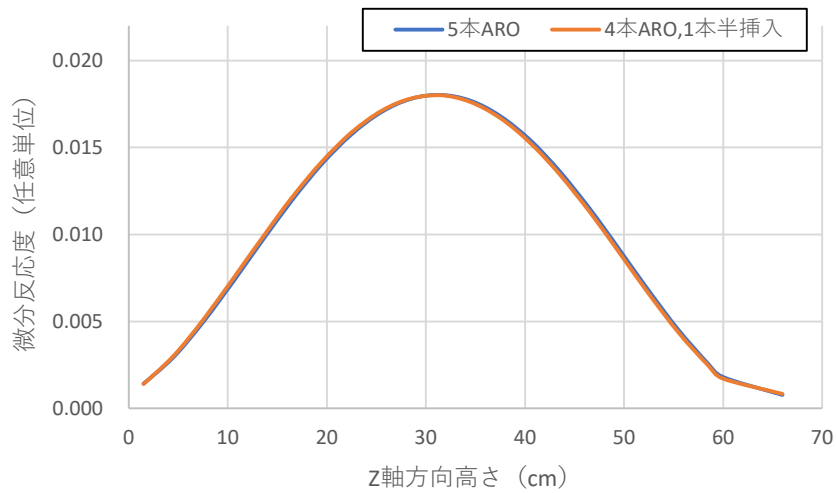


図 B-14 C45G0(4列)炉心のC2制御棒微分反応度曲線
(曲線の積分値が1となるように規格化)
(青線：C2以外の5本の制御棒は全引抜き、
オレンジ線：C2と反対側のC1制御棒を半分まで挿入)

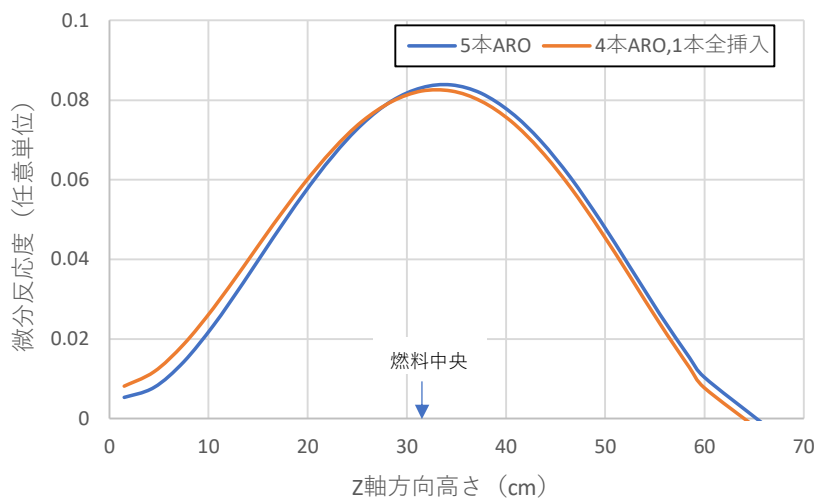


図 B-15 C45G(15H₂O)(4列)炉心のC2制御棒微分反応度曲線
(曲線の積分値が1となるように規格化)
(青線：C2以外の5本の制御棒は全引抜き、
オレンジ線：C2と反対側のS5制御棒を半分まで挿入)

表 B-13 制御棒反応度(反対側の制御棒挿入時の比較)

炉心	対象となる 制御棒	対象となる制御棒 以外 5 本 ARO	対象となる制御棒と 反対側の制御棒挿 入、4 本 ARO
C45G0(4 列))	C2	0.68	0.68
C45G(15H ₂ O)(4 列)	C1	0.34	0.35

代表炉心の最大反応度添加率は中性子束分布を cos 分布であると仮定して求めたが、確認のために表 B-12 の結果を求めるために用いた CITATION による微分反応度の値から得られた最大反応度添加率の最大値（炉心高さ方向の中央での値）との比較を行った。

最大反応度添加率の結果を表 B-14 に、また C45G0(4 列)炉心の制御棒微分反応度曲線を図 B-16 に示す。なお、図 B-12 の簡易計算では、炉心長を「第 369 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 8 月 31 日）の「【補足-B】制御棒の反応度印加率」の表 B-2 に示した C45G0(4 列)炉心の反射体節約の値（7.65cm）と燃料部長さ（57cm）から求めた 72.3cm、微分反応度が最大となる座標位置を表 B-12 の 31.2cm としている。（この図面では、座標の $31.2-72.3\div 2=-4.95\text{cm}$ と $31.2+72.3\div 2=67.35\text{cm}$ で中性子束がゼロとなる）

表 B-14 より CITATION による炉心計算から求めた値の方が若干小さい値（安全側の値）になっているが、両者はよく一致している。また図 B-15 より両者の制御棒微分反応度曲線の形状についても両者はよく一致している。

表 B-14 単一炉心の最大反応度添加率

炉心	中性子束分布を cos 分布と仮定して算出 ¹⁾ (% Δk/k/s)	炉心計算の最大微分反応度から算出 ²⁾ (% Δk/k/s)
C45G0 (4 列)	0.0156	0.0151
C45G0 (5 列)	0.0120	0.0118
C60G0 (4 列)	0.0140	0.0135

- 1) 「表 10 軽水減速炉心の代表炉心の制御棒反応度価値」に記載の値
(表 10 に比べて表示桁数を増やして記載)
- 2) 表 A-12 の結果を求めるために用いた SRAC-CITATION により得られた微分反応度の最大値より得られた値

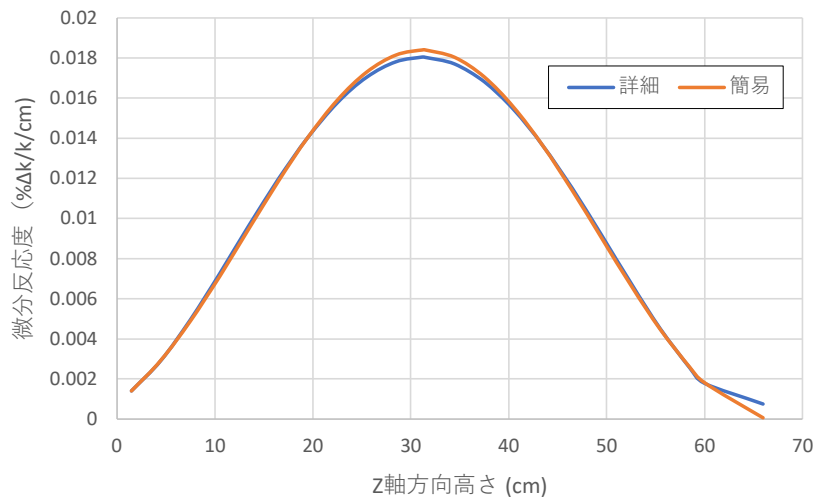


図 B-16 C45G0(4 列) 炉心の高さ方向の制御棒微分反応度曲線
(簡易:「補足-B」の方法、詳細: CITATION で計算)

【補足C 高濃縮ウランを用いた炉心の制御棒反応度等の解析について】

高濃縮ウランを用いた炉心の解析結果についての確認を行う。

図 C-1 に示す軽水減速炉心の既存の高濃縮ウランを用いた幾つかの単一炉心及び 2 分割炉心の体系について、制御棒反応度の実験値と今回用いた SRAC コードシステムを用いた解析結果、およびモンテカルロ計算コード MCNP を用いた解析を行った。

結果を表 C-1 に示す。これまでの代表炉心の解析において SRAC コードシステムを用いた制御棒反応度の解析精度は $\pm 18\%$ であるとしてきたが、表 C-1 の C/E はすべてこの解析精度の範囲内に入っていることを確認した。また表 C-2 に各炉心について実験で測定した各種パラメータの値を示す。

図 C-2 に示す固体減速炉心について、実験前に行った解析結果と測定結果（連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP を使用）を表 C-3 に示す。

なお、最大印加反応率については余剰反応度の値が少しでも変化すると臨界制御棒位置が変化し最大印加反応率の値が大きく変わってしまうため、実験値と計算値を直接比較することは非常に難しく、新しい炉心を組んだときに実験で核的制限値である最大印加反応率が規定値を満足していることを確認しているものの、これまで計算値と直接比較して考察したことはない。

表 C-1 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の制御棒反応度の解析

炉心	反応度 (実験値) (% $\Delta k/k$)	SRAC		MCNP	
		計算値 (% $\Delta k/k$)	C/E	計算値 (% $\Delta k/k$)	C/E
C30G0(5列)	2.76 ± 0.01	2.40	0.87	2.36 ± 0.09	0.86 ± 0.03
C35G0(4列)	2.87 ± 0.01	3.18	1.11	3.05 ± 0.10	1.06 ± 0.04
C45G0(4列)	2.86 ± 0.01	2.44	0.85	3.01 ± 0.10	1.05 ± 0.04
C35G(12 H ₂ O) (4列)	1.89 ± 0.01	1.97	1.04	1.70 ± 0.08	0.90 ± 0.04
C35G(14 H ₂ O) (4列)	1.80 ± 0.01	1.67	0.93	1.95 ± 0.08	1.08 ± 0.04

表 C-2 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の測定データ

炉心		C30G0 (5 列)	C35G0 (4 列)	C45G0 (4 列)	C35G (12H ₂ O) (4 列)	C35G (14H ₂ O) (4 列)
U-235 量(kg)		4.7	3.8	2.9	7.0	7.1
炉心長 (cm)		32.0	38.3	37.5	70.0	70.8
余剰反応度 (% Δk/k)		0.16	0.49	0.35	0.08	0.202
制御棒反 応度	C1 (% Δk/k)	0.31	0.29	0.65	0.36	0.44
	C2 (% Δk/k)	0.40	0.45	0.32	0.36	0.44
	C3 (% Δk/k)	0.67	0.69	0.46	0.23	0.03
	全反応度 (% Δk/k)	2.76	2.87	2.86	1.89	1.80
	最大の 1 本の 割合 (%)	24.3	24.1	22.7	19.0	24.4
	最大印加反応 率 (% Δk/k/s)	0.18	0.18	0.17	0.01	0.01
臨界制御 棒位置 (S4-S6: 650mm)						

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

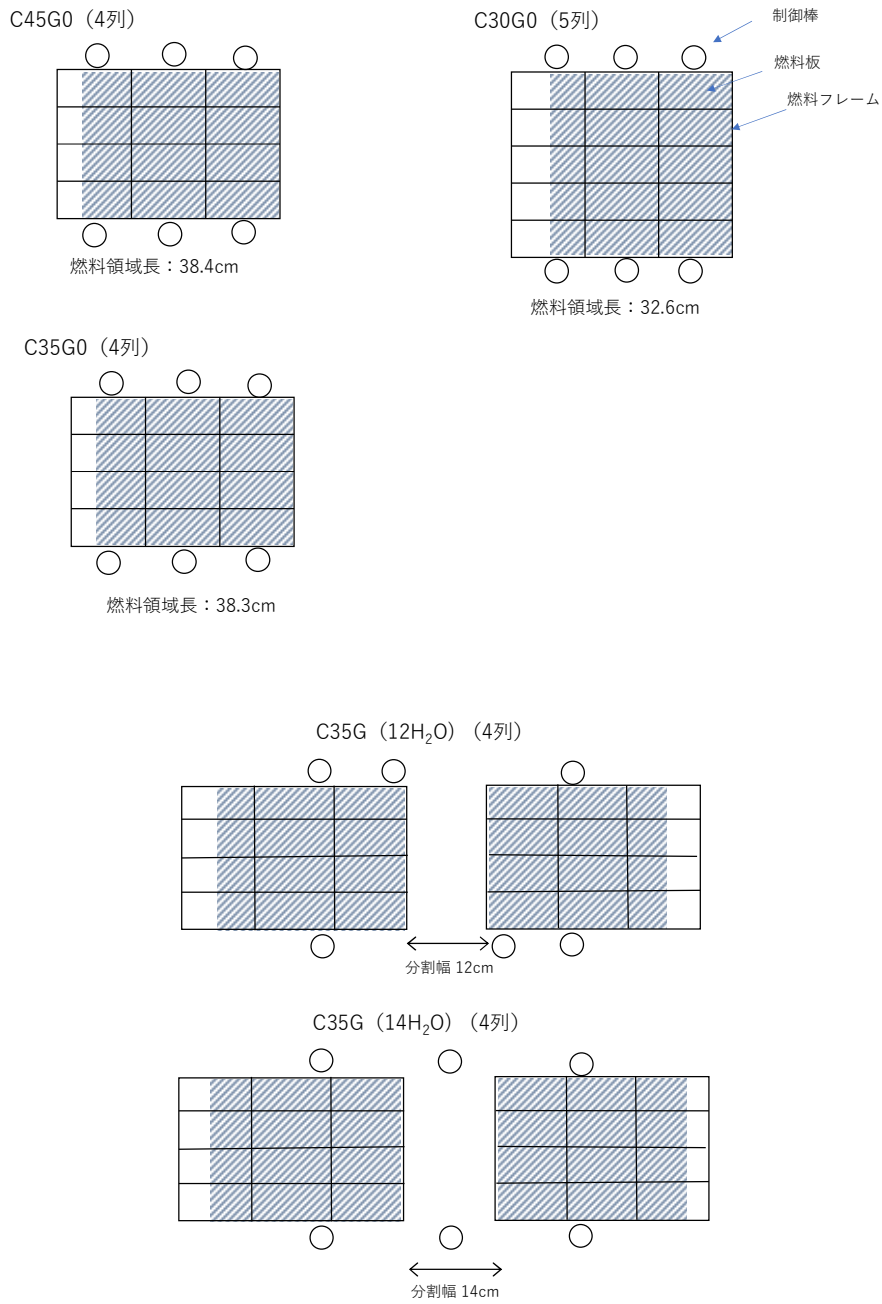


図 C-1 炉心配置図（軽水減速炉心）

(燃料板支持フレームの網掛けした箇所に燃料板を挿入している
サイズは 14.2cm×7.1cm)

表 C-3 固体減速炉心(B(1/8“P41EUThEU-2/8“P50EU))の測定データと解析結果

炉心		実験値	計算値 (MVP)
U-235 量(kg)		11.2	11.2
炉心長 (cm)		39.7	39.7
余剰反応度 (% Δk/k)		0.082	0.105±0.01
制御棒 反応度	C1 (% Δk/k)	0.32	0.37±0.02
	C2 (% Δk/k)	0.40	0.47±0.02
	C3 (% Δk/k)	0.39	0.35±0.02
	全反応度 (% Δk/k)	2.21	2.59±0.05
	最大の1本の割合 (%)	17.9	18.1
	最大印加反応率 (% Δk/k/s) ¹⁾	0.005	0.011±0.002 ³⁾
中心架台反応度 (% Δk/k)		2.33±0.02	4.07±0.02
温度反応度係数 (Δk/k/°C) ²⁾		-	-3.1×10 ⁻⁵
臨界制御棒 位置 (S4~S6: 1200mm)			

- 1) 最大印加反応率については余剰反応度の値が少しでも変化すると臨界制御棒位置が変化し最大印加反応率の値が大きくなってしまいうため、実験値と計算値を直接比較することは難しい。
- 2) 温度係数は測定していない。
- 3) 【補足説明】に記載

【 補足説明 】

表 C-3 の最大反応度印加率について

最大反応度印加率の解析値は以下のように求めている。

- ・解析で得られた余剰反応度(0.105% $\Delta k/k$)と C1 制御棒の反応度 (0.37% $\Delta k/k$)と C1 制御棒の反応度校正曲線から臨界となる C1 制御棒の位置を求める(約 710mm)。
- ・C1 制御棒の反応度校正曲線から臨界近傍での微分反応度を求めて、その値から反応度印加率を求める。
- ・この場合の解析のみの最大反応度印加率の誤差は、余剰反応度と制御棒反応度の誤差に起因することになる。

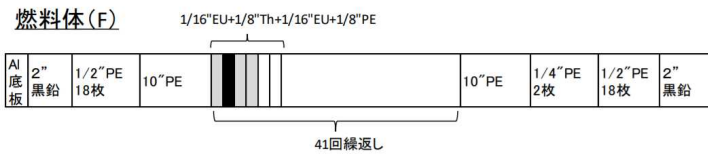
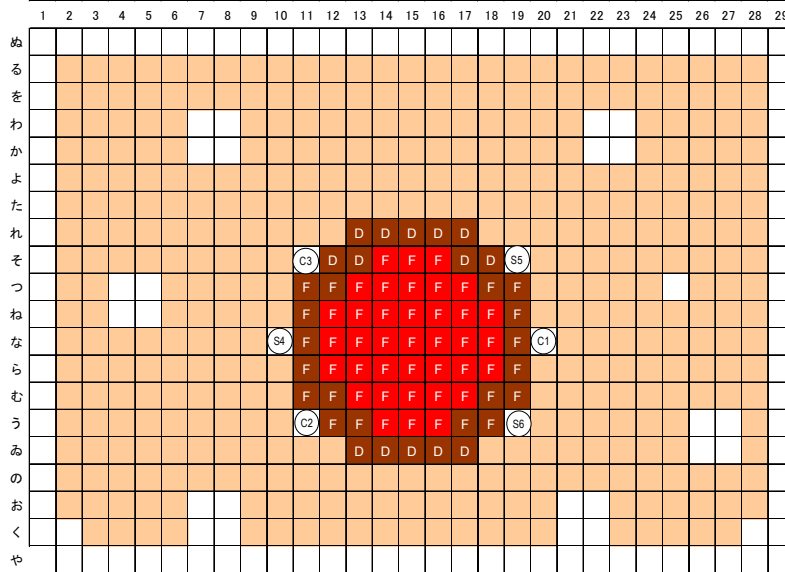
表 C-3 の解析結果のように余剰反応度の実験値と解析値は比較的良好に一致している場合、すなわち臨界制御棒位置が比較的良好に一致している場合には最大反応度印加率の実験値と解析値が大きく異なることはない。

一方、以下のような場合について考えてみる。解析で余剰反応度が 0.35% $\Delta k/k$ (解析での C1 制御棒の反応度に近い値であるので、C1 制御棒がほぼ全挿入で臨界となる)であったとすると、最大反応度印加率の値は C1 制御棒が炉心高さ方向中央位置付近での値となる(表 C-3 の場合は約 0.0012 % $\Delta k/k/s$)。この実験を行ったところ、余剰反応度がゼロ、すなわちすべての制御棒が引き抜かれた状態で臨界となったとする(本申請の実効増倍率の解析誤差 $\pm 0.6\%$ の範囲内)。そのときの最大反応度印加率の実験値は制御棒がすべて引き抜かれるためゼロであり、最大反応度印加率の C/E は無限大となる。

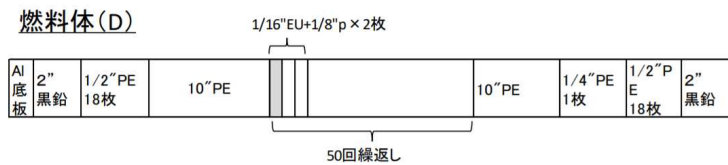
このように最大反応度印加率の解析値は余剰反応度の解析値に大きく影響されるため、実験値と解析値を通常の C/E のような指標で比較することは意味が無いと考える。

実験を行う前の事前解析としては「第 369 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 8 月 31 日)の「【補足一B】制御棒の反応度印加率」の説明で述べたように 1 本の制御棒の校正曲線の形状と制御棒反応度からその最大の反応度印加率(炉心高さ方向中央)を求め、その値が核的制限値を満たしているかを確認することがまず重要であると考える。

「グレーのマス킹範囲は不開示情報」



(a) 1/8"p41ETE 燃料体



(b) 2/8"p50E 燃料体

図 C-2 固体減速炉心配置図 (B(1/8"p41EUThEU-2/8"p50EU)炉心)

【補足D 制御棒反応度の最大の1本の確認について(誤差の考慮)】

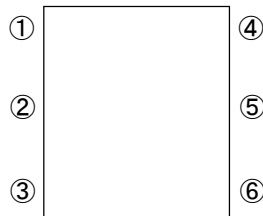
KUCAの核的制限値として、「制御棒反応度の最大の1本は全反応度の1/3以下であること」と記載されている。

この制御棒反応度の誤差を考慮したとき、この核的制限値を満足することを確認する。

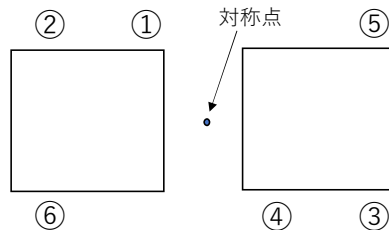
炉心配置の制限の項目で説明したとおり、制御棒配置は図面の水平方向に対して対称であるとするので、ここでは図D-1のように炉心の周囲に6本の制御棒(①～⑥)が配置されているとする。対称性より制御棒の反応度は

$$\rho_1 = \rho_4, \rho_2 = \rho_5, \rho_3 = \rho_6 \quad (D-1)$$

となる(下付添え字は図D-1の制御棒の番号)。なお、一部の2分割炉心では図C-2のように点対称で制御棒が配置されている場合もあるが、これについても(D-1)式のような関係が成立している。



図D-1 炉心配置(①～⑥は制御棒)



図D-2 2分割炉心の炉心配置(①～⑥は制御棒)

各制御棒反応度の誤差は $|\delta\rho_i| = r \rho_i$ ($i=1\sim 6$) であるとする。ここで r は反応度の誤差割合であり、今回の評価では $r = 0.18$ とする。

最大反応度を持つ制御棒は②であるとして、

$$\rho_{total} = 2 \times \sum_{i=1}^3 \rho_i, \quad \rho_2 = \max(\rho_1, \rho_2, \rho_3)$$

とおき、

$$f = \frac{\rho_2}{\rho_{total}}$$

を考える。(核的制限値として f は $1/3$ 以下であることが規定されている)

各制御棒の誤差は独立であるとする f の誤差は以下のように書き表すことができる。

$$(df)^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_i} \right)^2 (\delta\rho_i)^2 = r^2 \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_i} \right)^2 \rho_i^2$$

各微分項は

$$\frac{\partial f}{\partial \rho_1} = \frac{\partial f}{\partial \rho_3} = \frac{-\rho_1}{2(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)^2} = -\frac{2 \times f}{\rho_{total}}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \rho_2} = \frac{\rho_1 + \rho_3}{2(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)^2} = \frac{2}{\rho_{total}} (\rho_1 + \rho_3)$$

となるので、

$$(df)^2 = 2 r^2 f^2 \frac{\rho_1^2 + \rho_3^2 + \rho_1 \rho_3}{(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)^2}$$

と書くことができる。

従って、比率 f の誤差は以下ようになる。

$$|df| = \sqrt{2} r f \frac{\sqrt{\rho_1^2 + \rho_3^2 + \rho_1 \rho_3}}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}$$

ここで、

$$a = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad b = \frac{\rho_3}{\rho_2}$$

と置くと、比率 f の誤差 df は以下のように書き表される。

$$\begin{aligned}
 |df| &= \sqrt{2} r \frac{\rho_2}{2(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)} \frac{\sqrt{\rho_1^2 + \rho_3^2 + \rho_1\rho_3}}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3} \\
 &= \frac{r}{\sqrt{2}} \frac{1}{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} + \frac{\rho_3}{\rho_2} + 1\right)^2} \sqrt{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^2 + \left(\frac{\rho_3}{\rho_2}\right)^2 + \frac{\rho_1\rho_3}{\rho_2^2}} \\
 &= \frac{r}{\sqrt{2}} \frac{1}{(a+b+1)^2} \sqrt{a^2 + b^2 + ab}
 \end{aligned}$$

ここで、核的制限値より比率 f は $1/3$ 以下であるので以下の不等式が成り立つ。

$$f = \frac{\rho_2}{2(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)} = \frac{1}{2(a+1+b)} \leq \frac{1}{3}$$

この式を変形すると a 、 b については以下のような関係式が成り立つことになり、これが核的制限値を満たすために a 、 b の値が取り得る範囲となる。

(2 番目と 3 番目の不等式は ρ_2 の反応度が ρ_1 、 ρ_3 より大きいという条件)

$$a + b \geq \frac{1}{2}, \quad 0 \leq a \leq 1, \quad 0 \leq b \leq 1$$

ここで、 a 、 b を変化させて比率 f の誤差 df の絶対値をプロットすると図 D-3 のようになる。 a 、 b の値、すなわち最大反応度を持つ制御棒の反応度価値に対する各制御棒反応度の比率についての制限は無くすべての想定される状態を含んでいる。

等高線図の左下の青線で囲んだ三角形の領域は上記の a 、 b に関する条件から外れる領域で、 df が最大となるのは $a=1$ 、 $b=0$ (または $a=0$ 、 $b=1$) のときで、 df の最大値 (誤差が最も大きいとき) は 3.18% となる。

全制御棒反応度に対する制御棒反応度の最大の 1 本が占める割合 f の核的制限値は $1/3$ であるので、 $100/3 - 3.18 \doteq 30.1\%$ より、 f の値が 30% より小さい場合には誤差を含めてもこの核的制限値を満たすことになる。

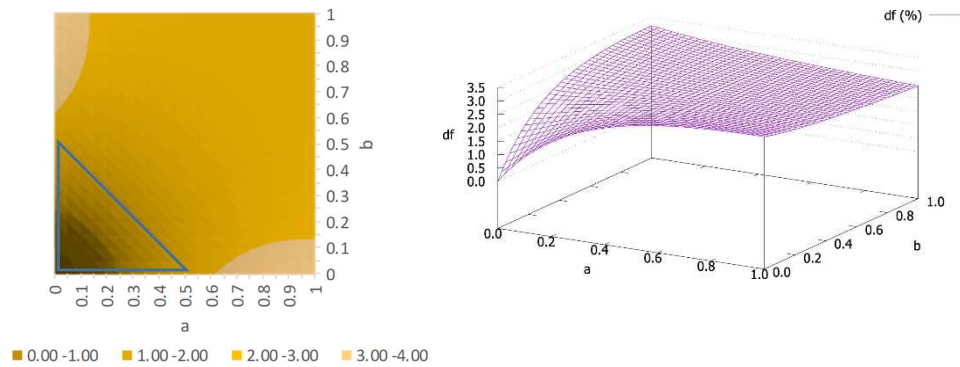


図 D-3 a、b に対する f の誤差 df (%) (左：等高線図、右：3D)

代表炉心の解析で f の値が大きい場合（制御棒反応度の最大の 1 本が全反応度の 25% を越えるもの）について df の値を評価した。

結果を表 D-1 に示す。この結果に示した全ての炉心について、全制御棒反応度に対する制御棒反応度の最大の 1 本が占める割合 f は誤差を含めても核的制限値の 1/3 (約 33.3%) 以下となっている。

表 D-1 各炉心の制御棒反応度の最大の 1 本が全反応度に占める割合 f

炉心	C 1 (%Δk/k)	C 2 (%Δk/k)	C 3 (%Δk/k)	Total (%Δk/k)	比率 f (%)
L5.5 (50cm)	0.189	0.468	0.196	1.705	27.5±2.7
L3 (50cm)	0.013	0.519	0.398	1.860	27.9±3.1
L2 (40cm)	0.430	0.424	0.019	1.745	24.6±3.2
L2 (50cm)	0.384	0.204	0.587	2.349	25.0±4.6
L1 (40cm)	0.482	0.494	0.003	1.958	25.2±3.2
LL1 (40cm)	0.066	0.575	0.337	1.957	29.4±2.9

【補足E 反応度調整用燃料体を2体利用した場合の制御棒反応度】

反応度調整用の燃料体は1体または2体使用している。

図 E-1 のほとんどの炉心についてはこの反応度調整用制御棒は1体のみ使用していたが、2体使用した場合の反応度について確認した。

ここで取り上げた炉心はH/U-235の最も大きなL5.5炉心と最も小さなLL1炉心であり、2体の調整用燃料体の装荷位置を図 E-1 に示す。

結果を表 E-1 に示す。全ての炉心について調整用燃料体を2体に増やした場合においても制御棒反応度の差は最大でも0.02%Δk/k程度であり、制御棒反応度に対してほとんど影響を及ぼさないといえる。

表 E-1 制御棒反応度価値(反応度調整用燃料体数の変更)

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	1体使用			2体使用		
		ρ 調整 用燃料 長 (cm)	全反応度 (%Δk/k)	最大反応 度 (%Δk/k)	ρ 調整 用燃料長 (cm)	全反応度 (%Δk/k)	最大反応度 (%Δk/k)
L5.5P-50	372	12.1	1.71	0.47	7.1	1.70	0.47
L5.5P-40		21.6	1.98	0.43	12.0	2.00	0.43
L5.5P-30		20.5	1.68	0.40	10.9	1.68	0.40
LL1P-50	34	11.7	4.01	0.65	5.9	4.02	0.65
LL1P-40		8.7	1.96	0.58	3.8	1.96	0.58
LL1P-30		14.5	2.10	0.51	8.7	2.10	0.51

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

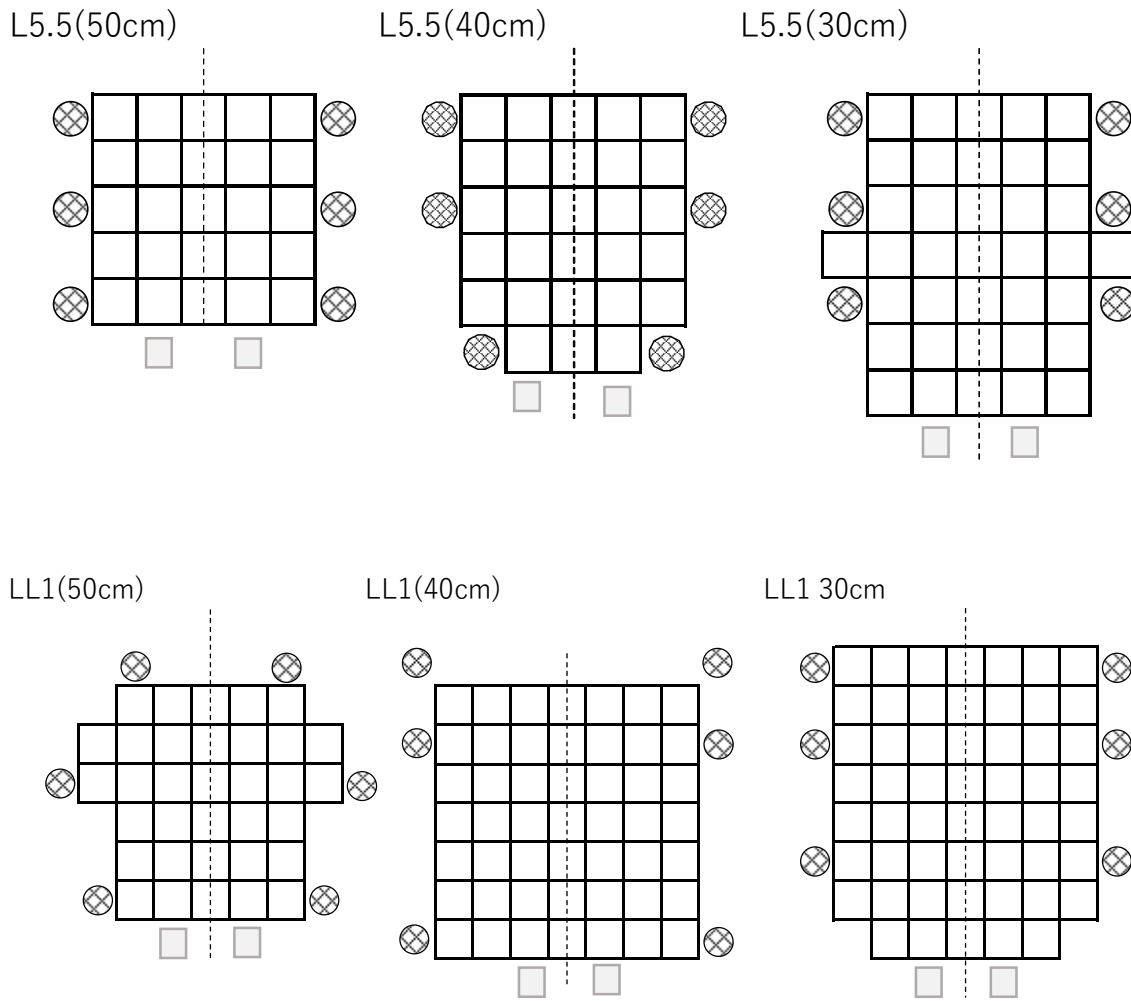


図 E-1 炉心配置図

□: 反応度調整用燃料体装荷位置

【補足 F 実効増倍率の誤差が臨界質量に及ぼす影響について】

現在の解析においては実効増倍率の解析精度を±0.6%以内であるとしている。
実効増倍率が±0.6%変化したとき、臨界質量にどのくらいの影響を及ぼすかについて検討する。

審査会合（「第 348 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 4 月 20 日）の資料（P28～）において、低濃縮ウランを用いた軽水減速炉心、及び固体減速炉心について臨界近傍で体積を 1%変化（体積変化は仮想的に X、Y、Z 方向で同じ割合で変化）させたときの実効増倍率の変化を求めたが、ここでは実際の炉心での反応度調製方法に従い、軽水減速炉心では燃料板を増加させる方向に変化（4 列または 5 列のすべての燃料集合体の燃料領域を同じ長さだけ変化）、固体減速炉心では燃料さや管中の燃料高さを変化（すべての燃料集合体の燃料領域を同じ高さだけ変化）させた。

変化量はすべての炉心において臨界炉心（ $k_{eff}=1.0$ ）の炉心について+2%とし、その変化させたときの実効増倍率の変化量は表 F-1、表 F-2 に示す。

固体減速炉心の結果を表 F-1 に示す。LL1 炉心と L3 炉心の高さを変更した結果より高さが 50cm の炉心 $\%dV/\% \Delta k$ が大きくなるのが判ったので他のセルパターンの炉心も高さ 50cm について確認した。この結果より実効増倍率に 0.6%の誤差があるとすれば解析で求めた炉心体積、すなわち臨界質量には最大 5.6%程度の誤差が生じることになる。

軽水減速炉心の結果を表 F-2 に示す。C30～C60 炉心の単一炉心の結果から 4 列炉心のほうが 5 列炉心に比べて $\%dV/\% \Delta k$ が大きくなるので、2 分割炉心については 4 列炉心について確認した。これらの結果より実効増倍率に 0.6%の誤差があるとすれば解析で求めた炉心体積、すなわち臨界質量には最大 3.3%程度の誤差が生じることになる。

以上より、実効増倍率に 0.6%の誤差があるとすれば臨界質量の評価では最大約 5.6%の誤差を見込む必要があることがわかり、ここでは余裕をみて 6%の誤差で評価を行うものとする。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

表 F-1 実効増倍率の変化に対する体積変化（固体減速炉心）

炉心名称	% Δk (2%vol 変化時)	%dV / % Δk	0.6% Δk に対応する%dV
LL1-30	0.635	3.15	1.89
LL1-40	0.340	5.88	3.53
LL1-50	0.267	7.48	4.49
L3-30	0.413	4.84	2.91
L3-40	0.272	7.35	4.41
L3-50	0.231	8.64	5.19
L1-50	0.225	8.87	5.32
L2-50	0.239	8.37	5.02
L4-50	0.226	8.86	5.31
L5.5-50	0.217	9.23	5.54

表 F-2 実効増倍率の変化に対する体積変化（軽水減速炉心）

炉心名称	% Δk (2%vol 変化時)	%dV / % Δk	0.6% Δk に対応する%dV
C30G0 (4 列)	0.370	5.41	3.24
C35G0 (4 列)	0.425	4.70	2.82
C45G0 (4 列)	0.456	4.39	2.63
C60G0 (4 列)	0.432	4.63	2.78
C30G0 (5 列)	0.477	4.19	2.52
C35G0 (5 列)	0.522	3.83	2.30
C45G0 (5 列)	0.550	3.64	2.18
C60G0 (5 列)	0.534	3.75	2.25
C45G (2 H ₂ O) (4 列)	0.372	5.37	3.22
C45G (5 H ₂ O) (4 列)	0.374	5.35	3.21
C45G (7 H ₂ O) (4 列)	0.384	5.21	3.13
C45G (10 H ₂ O) (4 列)	0.414	4.83	2.90
C45G (15 H ₂ O) (4 列)	0.443	4.51	2.71
C60G (2 H ₂ O) (4 列)	0.389	5.15	3.09
C60G (5 H ₂ O) (4 列)	0.389	5.15	3.09
C60G (7 H ₂ O) (4 列)	0.372	5.38	3.23
C60G (10 H ₂ O) (4 列)	0.399	5.01	3.01
C60G (15 H ₂ O) (4 列)	0.423	4.73	2.84

【補足G 燃料製作時の公差等が実効増倍率に及ぼす影響について】

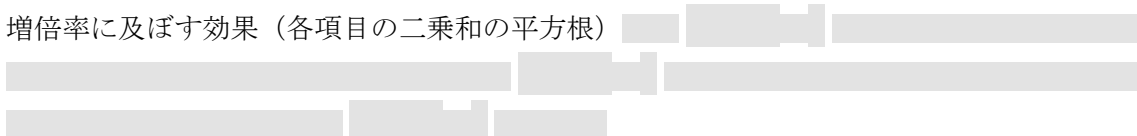
今回新たに製作する低濃縮ウランの公差、不確実性等が実効増倍率に及ぼす影響について評価する。比較のために高濃縮ウランを用いた固体減速炉心の公差等の不確実性の評価結果も示す。

1) 高濃縮ウラン (HEU) 炉心

B 架台の HEU を用いた固体減速炉心について ICSBEP のベンチマーク計算として誤差等の評価を行っている(参考文献 1)。対象となった炉心は「HEU (1/16-inch) + NU (1-mm) + Poly(2/8-inch)」の単位セルからなる燃料体を用いた単一炉心で、炉心の燃料スペクトルは KUCA で組むことができる炉心の中では中間くらいの硬さのものである。

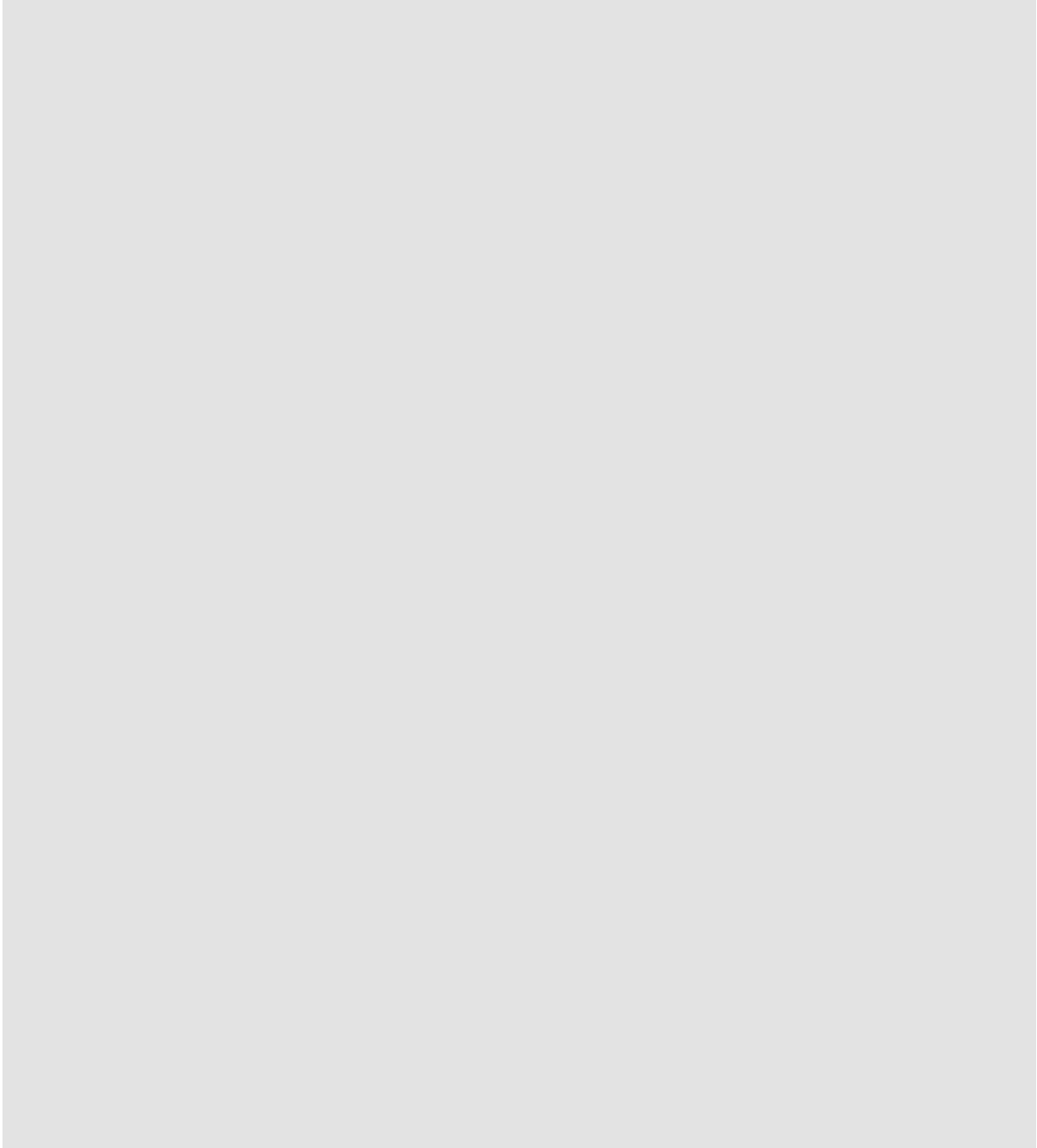
燃料製作に関する各種項目の誤差や不確実性が実効増倍率に及ぼす影響の評価結果を表 G-1 に示す。(ここでの Deviation の記載方法は参考文献 1 に示されたものと同じ)

燃料製作に関する各項目についての相関は無いとして全ての誤差を考慮したときの実効増倍率に及ぼす効果 (各項目の二乗和の平方根)

The table content is redacted with grey boxes. It appears to be a table with multiple rows and columns, likely containing numerical data related to the evaluation of multiplication factor effects.

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 G-1 HEU を用いた炉心（「HEU+NU+Poly(2/8-inch)」の燃料セル）の HEU 燃料
クーポンに関する各項目の誤差(不確実性)が実効増倍率に及ぼす影響



2) 低濃縮ウラン (LEU) 炉心

LEU を用いた固体減速炉心と軽水減速炉心について、新たに製作する予定の燃料 (固体減速炉心での U-Mo を用いた燃料角板 (燃料クーポン) と U_3Si_2 を用いた軽水減速炉心の燃料長板) の製作時の公差や不確実性が実効増倍率に及ぼす影響の評価を行った。解析にはこれまでと同様に SRAC コードシステムを用い、評価方法については参考文献 1 および 2 を参考にした。

評価を行った炉心は中性子エネルギースペクトルが大きく異なる体系で、固体減速炉心では LL1、L3、L5.5 炉心 (共に炉心高さは約 40cm)、軽水減速炉心では C30G0(4 列)、C60G0(4 列) 炉心である。燃料クーポンおよび燃料長板の燃料製作時の公差等の値は現在検討している値であり設工認申請までに確定する予定であるが、今のところこの値から大きく外れることはないと考えている。

結果を表 G-2、表 G-3 に示す。各項目についての相関は無いとして全ての誤差を考慮したときの実効増倍率に及ぼす効果 (各項目の二乗和の平方根) は最大でも固体減速炉心においては [] で述べた高濃縮ウランを用いた固体減速炉心の燃料に関する誤差である約 $0.039\% \Delta k$ と大きくは変わっていない。ポリエチレン板等の燃料以外の項目の公差等に伴う誤差を加えた場合でも最大で固体減速炉心においては [] 実効増倍率の計算誤差である [] 1 桁以上に小さい値である。

この計算誤差が臨界質量に及ぼす影響について評価する。【補足-D 臨界量の誤差】の結果において実効増倍率に 0.6% の誤差があるとすれば臨界質量の評価では最大約 5.6% の誤差を含むことになることが判っており、ここでの固体減速炉心においては [] の誤差により臨界質量は []

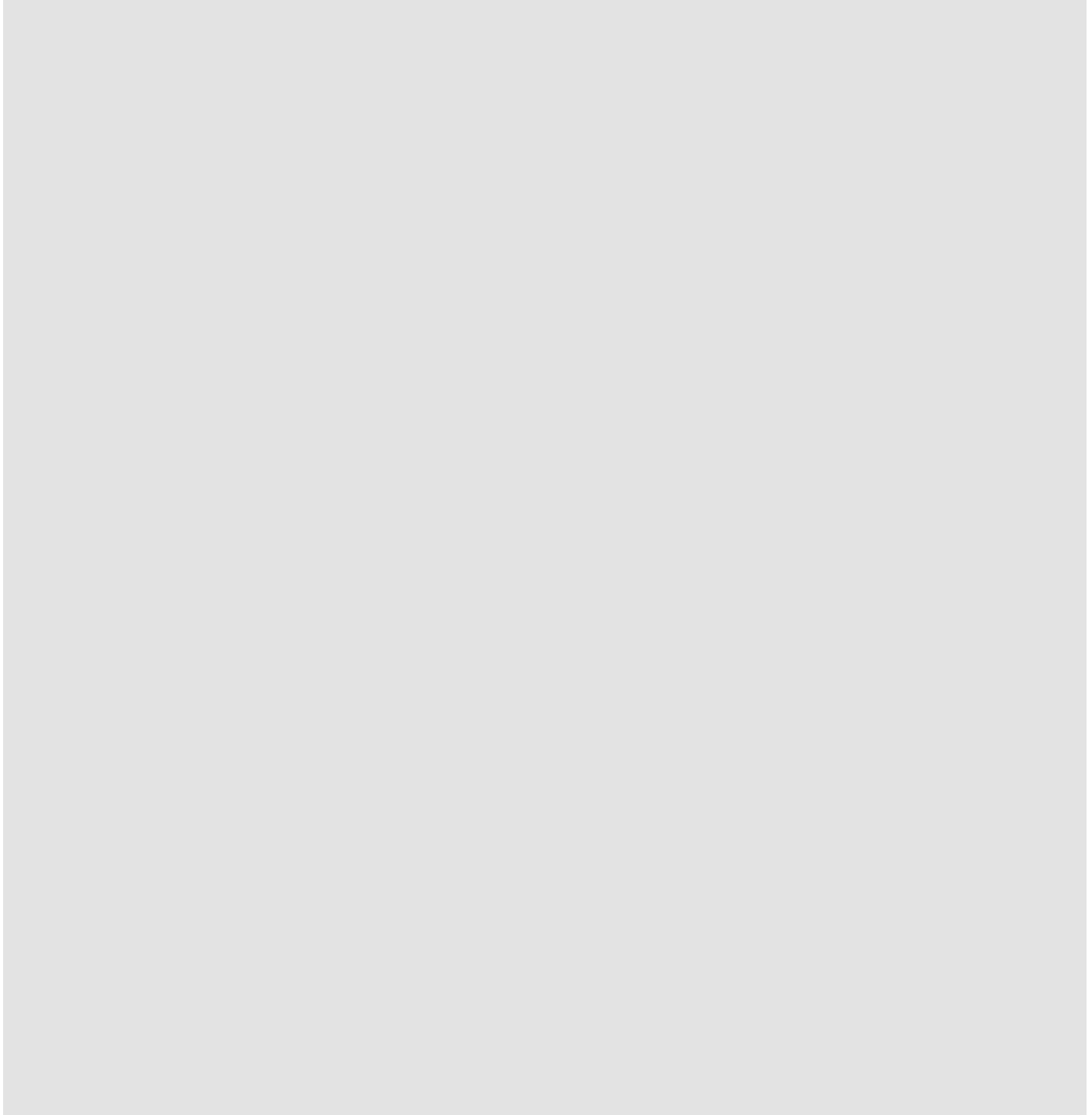
の誤差となる。代表炉心の解析において最も臨界質量が大きな炉心は「LL1P-40」炉心であり、 []

となり核的制限値を満足している。

軽水減速炉心については代表炉心の臨界量が核的制限値から十分に余裕があるため、ここでの [] を考慮したとしても臨界量についての核的制限値を越えるようなことはない。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

表 G-2 LEU を用いた固体減速炉心 (L5.5(40cm)、L3(40cm)、LL1(40cm))
の燃料等に関する各項目の誤差(不確実性)が実効増倍率に及ぼす影響



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

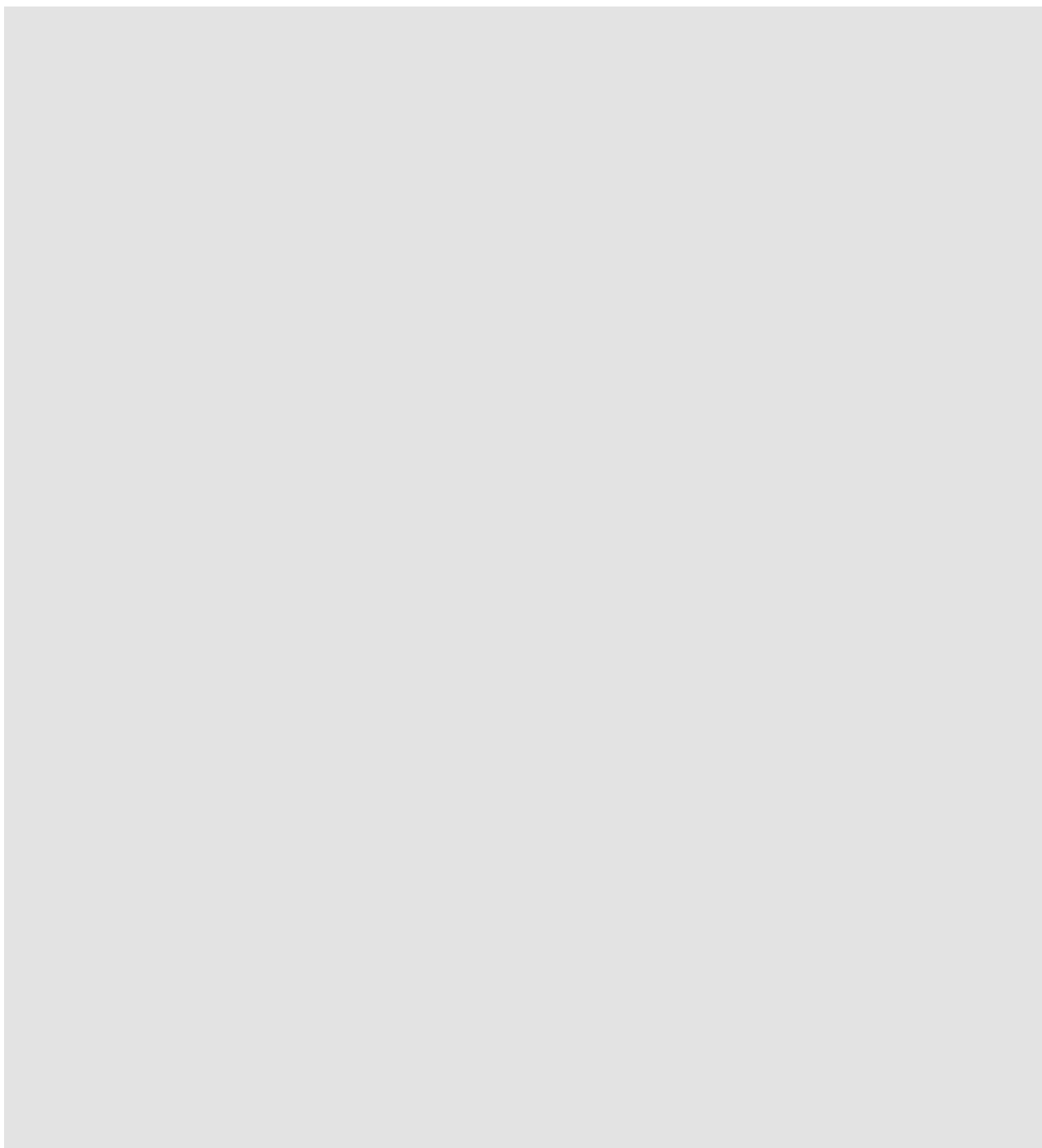


表 G-4 A5NE 化学的組成 単位 : ppm (max.)

B : 10	Cd : 10	Si : 3000	Fe : 4000	Fe+Si : 5000	Li : 10
Co : 10	Mn : 300	Cu : 80	Cr : 300	Zn : 300	
他元素 (個々) : 300		他元素 (合計) : 6000			

表 G-5 AG3NE 化学組成 単位:%

Mg=2.50~3.00	B \leq 0.001	Cd \leq 0.001	Cu \leq 0.008	Fe=0.20~0.40
Si \leq 0.30	Fe+Si=0.20~0.50		Li \leq 0.001	Zn \leq 0.03
Cr \leq 0.1	Mn \leq 0.1	他元素 (個々) \leq 0.03		

表 G-6 JIS A6063 化学組成 単位:%

Mg=0.45~0.9	Cu \leq 0.1	Fe \leq 0.35	Si=0.2~0.6
Cr \leq 0.1	Mn \leq 0.1	Zn \leq 0.1	Ti \leq 0.1
他元素 (個々) \leq 0.05		他元素 (合計) \leq 0.15	

表 G-7 JIS A6061 化学組成 単位:%

Mg=0.8~1.2	Cu=0.15~0.40	Fe \leq 0.7	Si=0.4~0.8
Cr=0.04~0.35	Mn \leq 0.15	Zn \leq 0.25	Ti \leq 0.15
他元素 (個々) \leq 0.15		他元素 (合計) \leq 0.15	

参考文献

- 1) “Evaluation of the Kyoto University Critical Assembly Erbium Oxide Experiments”, LEU-MET-THERM-005, NEA/NSC/DOC/(95)03/IV Volume IV.
- 2) V. F. Dean ed., “ICSBEP Guide to the Expression of Uncertainties”
<https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/documents/UncGuide.pdf>

【補足H 反応度印加率の算出方法、および反射体節約を求めるための中性子束分布のフィッティング範囲について】

1) 反応度印加率の算出方法

制御棒の反応度印加率は以下のように求めた。

エネルギー1群の均質な体系であるとき、垂直方向の中性子束分布がコサイン分布であると仮定すると、制御棒の積分反応度校正曲線は以下ようになる。

$$\rho(z) = \rho_0 \left(\frac{z}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi z}{H} \right) \quad (H-1)$$

ここで ρ_0 は全反応度、 H は反射体節約を含めた炉心高さである。すなわち、 H は炉心の燃料部高さに反射体節約の2倍を加えた値となる。

(B-1) 式より、微分反応度曲線は以下ようになる。

$$\frac{d\rho(z)}{dz} = \frac{\rho_0}{H} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{H} \right) \quad (H-2)$$

制御棒を臨界状態で全ストロークを動かすことが可能であるとすると、微分反応度が最大となるのは炉心の高さ方向中央で、そのときの最大値は $\frac{d\rho(z)}{dz}_{MAX} = \frac{2\rho_0}{H}$ となる。

KUCA の制御棒の駆動速度は、設置申請書に 0.5 m/min 以下 (50/60 cm/s = 約 0.833 cm/s 以下、実測値は約 0.796 cm/s) と定められているので、最大反応度添加率が満たすべき条件は制御棒が炉心中心まで挿入されたとき

$$\frac{d}{dt} \frac{d\rho(z)}{dz}_{MAX} = \frac{2\rho_0}{H} \times \frac{5}{6} \leq 0.02 (\% \Delta k / k / s) \quad (H-3)$$

となる。

実際には過剰反応度が小さな炉心で臨界状態で制御棒を炉心中心の微分反応度が大きな場所まで挿入することができ場合には、炉中心における反応度添加率の値が式 (H-3) に示す値を超えていたとしても最大反応度添加率に関する制限値を満たす炉心を構築することはできるが、ここでは安全側に考えて (H-3) 式をもと最大反応度添加率の評価を行うこととする。

2) 反射体節約の値の算出方法

制御棒校正曲線 (S 字曲線) の高さ方向の長さを決めるための反射体節約の値は各炉心ごとに高速群の中性子束分布を最小自乗法によりコサイン関数にフィッティングして求めた図 H-1 にフィッティングの例を示す。

審査会合（「第 348 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 4 月 20 日）資料 p23）ではこの反射体節約の値の決め方についての説明が不足していたので、それを含めて修正したものを表 B-1、表 B-2 に示す。制御棒校正曲線の評価のために使用した値は、異なるフィッティング範囲から得られた値のうち誤差を考慮して反射体節約が最も小さくなるもの（制御棒微分反応度が大きくなる値）とした。

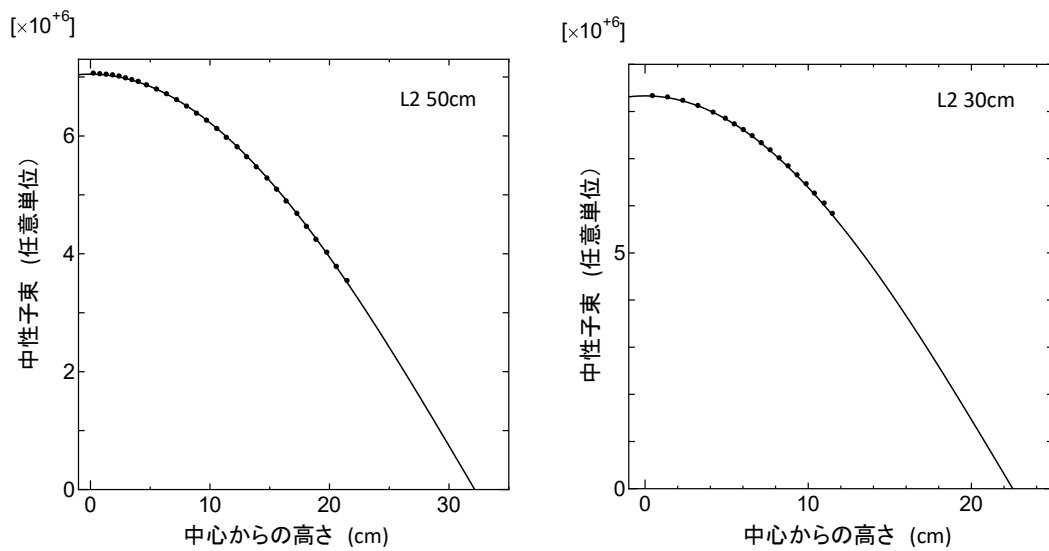


図 H-1 中性子束（高速エネルギー群）のコサインフィッティング例
（左側：L2-50cm 炉心、右側：L2-30cm 炉心）

表 H-1 フィッティング範囲と反射体節約（固体減速炉心）

炉心	高さ (cm)	フィッティング範囲 ¹⁾				採用値 ²⁾
		約 40cm (中心から± 約 20cm 範囲)	約 30cm (中心から± 約 15cm 範囲)	約 20cm (中心から± 約 10cm 範囲)	約 16cm (中心から± 約 8cm 範囲)	
L-5.5P	50.9	5.7±0.01	5.7±0.02			5.68
	41.8		5.8±0.01	5.7±0.04		5.66
	30.8			5.9±0.02	5.9±0.04	5.86
L-4P	49.7	6.0±0.01	5.9±0.02			5.88
	39.5		6.1±0.01	6.1±0.04		6.06
	30.7			6.2±0.02	6.2±0.04	6.16
L-3P	51.4	6.1±0.01	6.2±0.02			6.09
	39.8		6.2±0.02	6.1±0.05		6.05
	30.5			6.2±0.02	6.2±0.03	6.17
L-2P	48.1	6.2±0.01	6.1±0.02			6.08
	39.0		6.9±0.01	6.7±0.04		6.66
	30.7			6.9±0.02	7.0±0.04	6.88
L-1P	47.7	7.9±0.01	7.6±0.03			7.57
	38.2		8.5±0.02	8.2±0.05		8.15
	29.2			9.0±0.03	8.9±0.05	8.85
LL-1P	49.7	10.7±0.02	10.4±0.04			10.36
	38.4		11.6±0.02	11.1±0.05		11.05
	30.0			12.5±0.04	12.3±0.07	12.23

- 1) フィッティング範囲の中心は炉心高さ中央、反射体節約の値の単位は cm
 (対象とする位置に近いメッシュ点での値を用いているので「約」を付けている)
- 2) 誤差を考慮した最小値

表 H-2 フィッティング範囲と反射体節約（軽水減速炉心）

炉心	列数	フィッティング幅 ¹⁾			採用値 ²⁾
		約 44cm	約 35cm	約 25cm	
C30G0	4	9.3±0.02	9.2±0.02	9.1±0.05	9.05
	5	9.3±0.01	9.2±0.02	9.2±0.06	9.14
C35G0	4	8.6±0.01	8.5±0.02	8.4±0.06	8.34
	5	8.5±0.01	8.4±0.02	8.4±0.05	8.35
C45G0	4	7.8±0.01	7.7±0.02	7.7±0.05	7.65
	5	7.8±0.01	7.7±0.02	7.7±0.05	7.65
C60G0	4	7.3±0.01	7.3±0.02	7.2±0.05	7.15
	5	7.3±0.01	7.3±0.02	7.2±0.04	7.16

1) 反射体節約の値の単位は cm

フィッティング範囲は以下の通り（燃料ミート部長さは 57cm）

約 44cm：燃料ミート下端から約 6.5cm 上～燃料ミート部上端から約 6.5cm 下

約 35cm：燃料ミート下端から約 11cm 上～燃料ミート部上端から約 11cm 下

約 25cm：燃料ミート下端から約 16cm 上～燃料ミート部上端から約 16cm 下

（対象とする位置に近いメッシュ点での値を用いているので「約」を付けている）

2) 誤差を考慮した最小値

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

【補足 I 低濃縮炉心の燃料板の仕様】

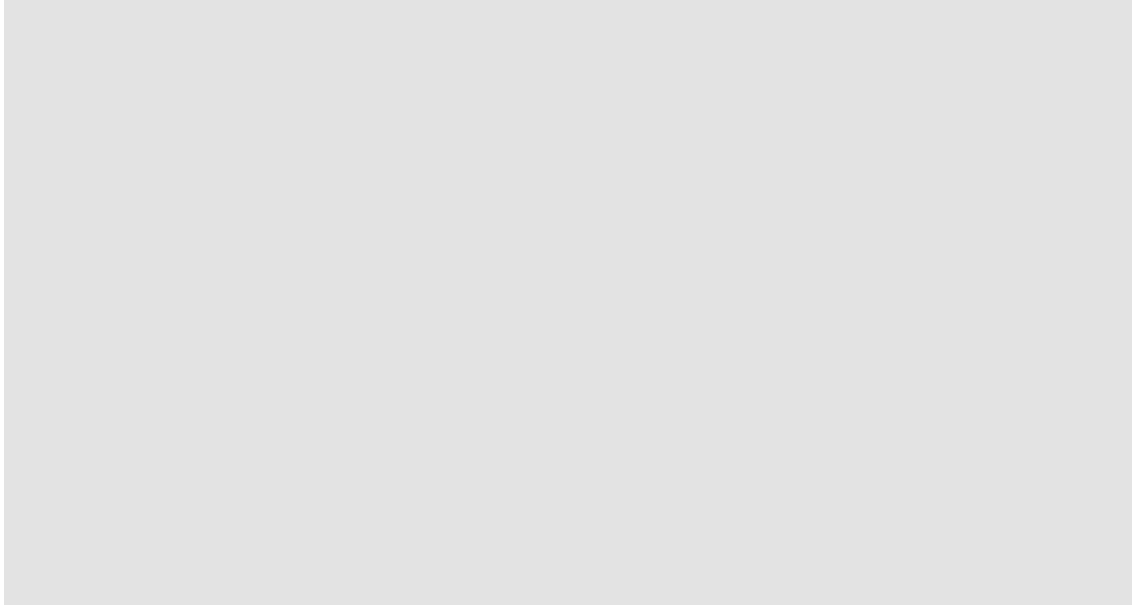
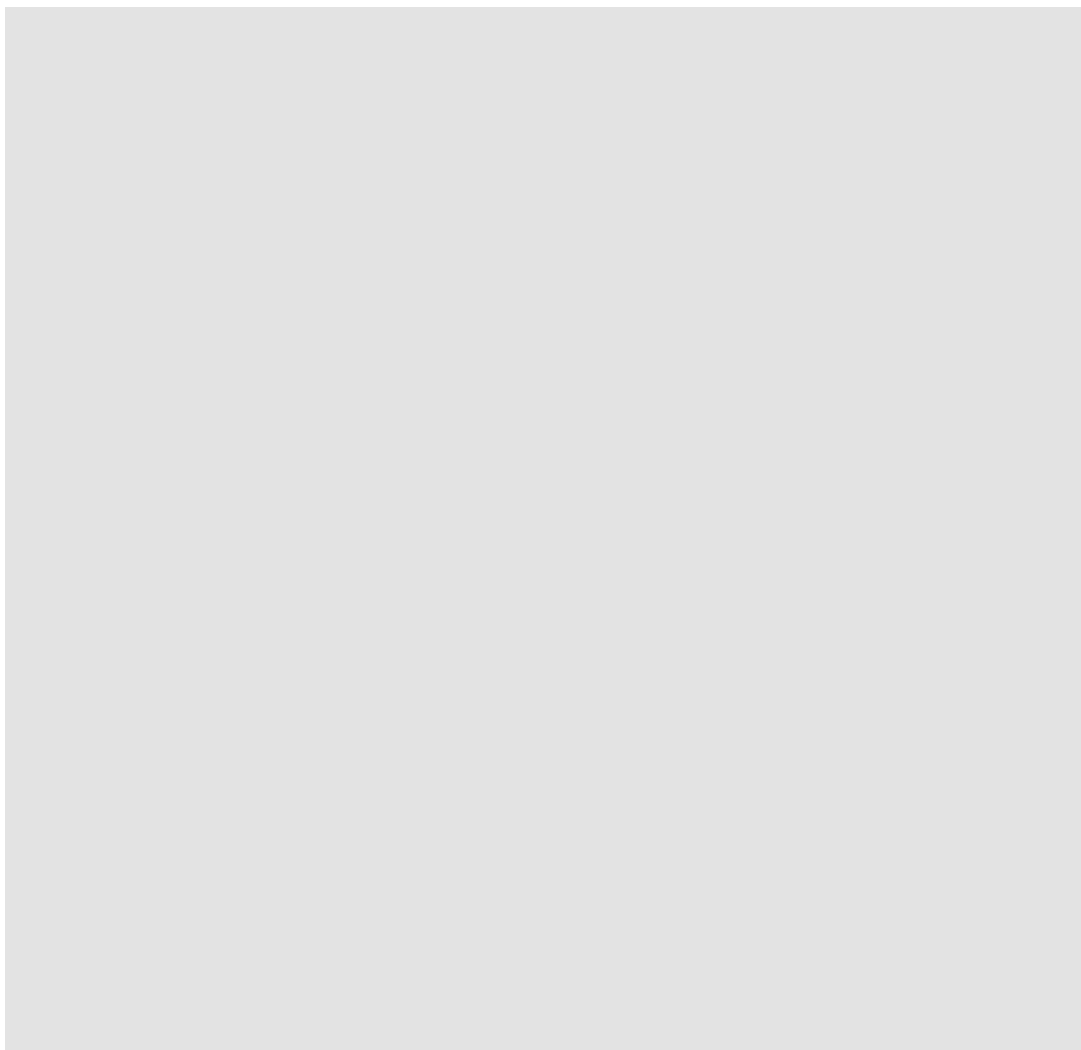


表 I-1 固体減速炉心用燃料角板 燃料コンパクト 原子個数密度.

A large rectangular area of the page is completely redacted with a solid gray fill, obscuring the entire table content that would follow the caption.

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



京都大学臨界実験装置 (KUCA)

設置変更承認申請について

【運転時の異常な過渡変化】	1
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	5
出力運転中の制御棒の異常な引抜き	22
実験物の異常等による反応度の付加	33
商用電源喪失	45
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で利用	52
炉心タンクヒータによる炉心温度上昇	74
【設計基準事故】	80
燃料落下又は燃料誤装荷	81
燃料の機械的破損	103
実験設備、実験物等の著しい損傷	118
【補足資料】	
各炉心の熱容量	123
燃料温度の算出方法	127
高出力運転後の炉心交換作業	144
異常な過渡変化の解析での反応度変化	146
実験物の異常が生じたときの反応度と制御棒の変化	154
実験物を装荷した炉心の炉心配置決定のためのプロセス	158
保安規定等での炉心配置手順等に関する規定	168
燃料誤装荷時の反応度	172
中心架台が上限と下限の場合の制御棒反応度について	183

京都大学複合原子力科学研究所

1. 運転時の異常な過渡変化、および設計基準事故の解析方法について

「運転時の異常な過渡変化」、および「設計基準事故」の動特性の解析は 6 群の遅発中性子先行核を考慮した通常の一点炉近似の動特性方程式に基づいて行い、連立微分方程式を汎用数式処理システム Mathematica®¹⁾ (最新バージョンの 12.2.0.0) を用いて解いた。

燃焼に伴って生じる核分裂生成物の崩壊に伴う発熱等の評価は米国の Oak Ridge National Laboratory で開発された燃焼計算コード ORIGEN-2²⁾の解析時点で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。

解析に必要な反応度の計算については SRAC コードシステム (SRAC2006)³⁾、またはモンテカルロ計算コード MCNP 6 (バージョン 1.0)⁴⁾を用いた。SRAC コードシステムの解析方法は以下の通りである。

使用核データ： JENDL-4.0
エネルギー構造： 107 群 (高速群 62 群、熱群 45 群)
20 群 (高速群 12 群、熱群 8 群)
計算方法： セル計算 PIJ (107 群)、20 群に縮約
炉心計算 CITATION
(3次元拡散計算、20群)
(x 方向、z 方向は反射境界条件、y 方向は真空境界条件)

MCNP についても使用した核定数は JENDL-4.0⁵⁾に基づいたものである。

解析のために必要となる各炉心のパラメータ (臨界量、実効遅発中性子割合、中性子平均寿命) は「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 11 月 5 日)の説明資料 2-1 に記載した数値を用いる (「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8 (下中央のページ番号) の表 2、p 28 (下中央のページ番号) の表 9)。これらの数値については設置変更申請書の添付書類八、および添付書類八に関するまとめ資料にも記載している。

温度解析に用いる各炉心の熱容量は補足資料-A に示す。

各解析項目の事象が発生してから高濃縮ウラン炉心については炉心出力がスクラム前の 1/10 に低下するまでの時間範囲、低濃縮ウラン炉心については炉心出力が 0.1W に低下するまでの時間範囲の積算出力を求めて、各炉心の熱容量を元に上昇温度を算出する。

高濃縮ウラン炉心については燃料要素から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料要素 (固体減速炉心については角板のウラン・アルミニウム合金、軽水減速炉心については標準型燃料板のアルミ被覆でサンドイッチされたウラン・アルミニウム

合金のミート部分) の温度上昇に費やされるものとする。炉心での発熱分布が \cos 分布であるとして燃料要素の温度の最大値を評価する。

低濃縮ウラン炉心については燃料から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料要素（固体減速炉心については角板のアルミニウム被覆でサンドイッチされたウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料材とアルミニウム被覆材の部分、軽水減速炉心については標準型燃料板のアルミニウム被覆でサンドイッチされたウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料材とアルミニウム被覆材の部分）の温度上昇に費やされるものとする。各炉心の発熱分布と燃料要素内での発熱分布を考慮して燃料要素の温度の最大値を評価する。

Mathematica を用いた動特性方程式の数値解析(以下、過渡解析)においては温度変化を考慮した解析が必要となる。温度上昇量は積算出力と熱容量から求められるので、過渡解析においては幾つかの時間に区切って、その間の温度は時間と共に線形に上昇するとして、その温度変化量に各炉心の温度反応度係数の値を掛けた値を動特性方程式の反応度の項に加えて解析を行った。

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き反応度印加量の大きなケース (図 2-1-1) や実験物の異常等による反応度がステップ状に印加されるケース (図 2-3-1) のような温度上昇量が小さい場合には以下のように解析を行った。

- ① 適当な温度上昇量を仮定して、最初のステップ(図 2-1-1 ではスクラムするまでの約 70 秒) の過渡解析を行い、その間の積算出力を求める。
- ② ①の最終的な炉出力、遅発中性子先行核密度を求め、それらの値を動特性方程式の初期値として次のステップの過渡解析を行い、その間の積算出力を求める。これを最後まで繰り返す。
- ③ ②までの解析で得られた積算出力を用いて各ステップでの温度上昇量を変更して再度各ステップの過渡解析を順番に行う。
- ④ ③の手順を温度上昇量が収束するまで行う。

温度上昇量が小さい場合には温度上昇の反応度に及ぼす影響が小さいため、この繰り返し計算は 2 回程度で収束する。

原子炉起動時において制御棒を少しだけ引き抜くケース(図 2-1-3)、中性子発生設備を臨界状態において使用するケース (図 2-5-2) のように温度上昇量が多い場合には上記のようなマニュアルでの計算手法では温度を収束させることが難しいため、以下のように解析を行った。

- ① 適当な温度上昇量を仮定して、最初のステップ(図 2-1-3 では温度が約 0.1°C 上昇する 1000 秒まで)の過渡解析を行い、その間の積算出力と温度上昇量を求めて、再度過渡

解析計算を行う。この解析を温度上昇量が収束するまで行う（温度変化割合が 1%以下となるまで）。

- ② ①の最終的な炉出力、遅発中性子先行核密度を求め、それらの値を動特性方程式の初期値として次のステップの過渡解析を行う。この過渡解析を温度上昇量が収束するまで行う。
- ③ ②の解析を最後のステップまで行う。

各ステップでの繰り返し計算の回数は温度変化量等によって異なるが、多いときでも 10 回以内程度であった。

上記の 2 つの手法は自動か手動で計算するかの違いのみで結果に影響を及ぼすことはない。

参考文献

- 1) Wolfram Mathematica, <https://www.wolfram.com/mathematica/> .
- 2) A. G. Croff, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175 (1980).
- 3) K. Okumura, et al., "SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System," JAEA-Data/Code 2007-004, Japan Atomic Energy Agency (2007).
- 4) D. B. Pelowitz, et al., "MCNP6 user's manual," LA-CP-13-00634, Los Alamos National Laboratory (2013).
- 5) K. Shibata, et al., "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).

2. 運転時の異常な過渡変化の解析

「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項において運転時の異常な過渡変化については以下のように規定されている。

「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って、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」

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 ①
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き ②
 - (iii) 実験物の異常等による反応度の付加 ③
- (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 ④
- (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) 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 ⑤
 - (ii) 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇 ⑥

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ポリエチレンの最高温度は 100℃を超えないこと。
- (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。

以上の①～⑥の項目について解析結果を示す。以下の節の「2-**」の**が①～⑥の番号に対応する。

なお、結果を示す表において、例えば「120W 超」のように「ある出力を超えた」時間を示す項目があるが、それは事象が始まってからその出力を超えてスクラム信号を発するまでの時間ということである。制御棒の場合であればスクラム信号発生後の1秒後に落下してステップ状の反応度が加わるとしている。

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り、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。

2-1-1 解析シナリオ

(a) ケース A

(1) 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

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

(2) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

(3) 解析条件

- ・制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率 ($0.02\% \Delta k/k/s$) で反応度を連続的に加える。臨界状態から全制御棒引き抜きまでに固体減速炉心では $0.35 / 0.02 = 17.5\text{ s}$ 、軽水減速炉心では $0.5 / 0.02 = 25\text{ s}$ かかる。
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110% 以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。
- ・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し、1 秒後に制御棒が落下する。(1 秒後にステップ状の反応度が加わる)

- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、固体減速炉心では $1.35 - 0.45 = 0.9 \% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $1.5 - 0.5 = 1.0 \% \Delta k/k$ の負の反応度が加わり出力は低下する。(固体減速炉心は $0.35 - 0.9 = -0.55 \% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $0.5 - 1.0 = -0.5 \% \Delta k/k$ の未臨界状態となる)
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

(4) 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「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」(2020 年 11 月 5 日)の説明資料 2-1 で選定したすべての代表炉心を対象とし(「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8 (下中央のページ番号)の表 2、p 26 (下中央のページ番号)の表 8)、燃料の最高温度が最大となる炉心について誤差を考慮するなどの詳しい解析を行う。

また解析に使用する遅発中性子割合、中性子平均寿命、温度係数についても上記の審査会合資料に記載した値を用いる。

(5) 最高温度の評価方法

固体減速炉心、軽水減速炉心ともに解析で求めた燃料の平均温度に「第 404 回 核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2021 年 5 月 17 日)の説明資料 1-1 で示した各炉心の出力の最大値と平均値の比(添付 10 のまとめ資料の表 B-1)を掛け、さらに、「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」(2020 年 11 月 5 日)の資料 2-2 で示した燃料板内でのピークを求めるための比率(添付 10 のまとめ資料の表 B-2 に記載。例えば、ほとんどの固体減速炉心では 1.09 倍)を掛けて燃料板内での最高温度を求める。(この算出方法については本資料の補足資料-B に記載)

以下、添付 10 の全ての解析において最高温度はこの方法により評価する。

(b) ケース B

(1) 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 $1.35 \times 1/3 = 0.45 \text{ \%}\Delta k/k$

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

(2) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

(3) 解析条件

- ・制御棒の引き抜きにより $0.05\% \Delta k/k$ のステップ状の反応度を加える
- ・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し、1 秒後に制御棒が落下する。(1 秒後にステップ状の反応度が加わる)
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110% 以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) に至らない場合には出力上昇後 1 時間 (3600 秒) を経過した段階で運転員が手動スクラムボタンを押し、1 秒後に制御棒が落下する。(1 秒後にステップ状の反応度が加わる)
- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとする。固体減速炉心では制御棒はスクラム前に $0.35 - 0.05 = 0.3\% \Delta k/k$ だけ挿入されているため、残りは $1.35 - 0.3 - 0.45 = 0.6\% \Delta k/k$ の負の反応度が加わり出力は低下する。($0.05 - 0.6 = -0.55 \text{ \%}\Delta k/k$ の未臨界状態となる)。軽水減速炉心では制御棒はスクラム前に $0.5 - 0.05 = 0.45\% \Delta k/k$ だけ挿入されているため、残りは $1.5 - 0.45 - 0.5 = 0.55\% \Delta k/k$ の負の反応度が加わり出力は低下する。($0.05 - 0.55 = -0.5 \text{ \%}\Delta k/k$ の未臨界状態となる) (ただし、温度変化による反応度を考慮しない場合)
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

(4) 解析対象炉心

ケース A の場合と同様である。

2-1-2 解析結果

ケース A

ケース A について固体減速炉心の結果を表 2-1-1 に示す。最も燃料温度が高くなったのが L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心で燃料温度上昇は約 0.44°C であり判定基準値を満たしてい

る（出力変化を図 2-1-1 に示す）。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.0011\% \Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「 $+0.35-0.0011-(1.35-0.45)=-0.5511\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心について燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、反応度温度係数の誤差（32%）を考慮したときの結果を表 2-1-2 に示す。（これらの誤差の値については、他の解析項目でも同じ値とする。）

燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。即発中性子減衰定数の β_{eff} と ℓ の誤差を個別に見積もることは難しいので、 β_{eff} と ℓ が各々 8% の誤差を持った場合（もう一方は誤差無し）の結果を示す。 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 18% 上昇する。反応度温度係数の誤差は結果にほとんど影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.25 倍（ 1.06×1.18 ）となるだけなので判定基準値を満たしている。（ $0.44^\circ\text{C} \times 1.25 = 0.55^\circ\text{C}$ ）

ケース A について軽水減速炉心の結果を表 2-1-3 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で、燃料温度上昇は約 0.069°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-1-2 に示す）。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.00009\% \Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「 $+0.5-0.00009-(1.5-0.5)=-0.50009\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、反応度温度係数の誤差を検討したときの結果を表 2-1-4 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 19% 上昇する。 ℓ と反応度温度係数の誤差は結果にほとんど影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.26 倍（ 1.06×1.19 ）となるだけなので判定基準値を満たしている。（ $0.069^\circ\text{C} \times 1.26 = 0.087^\circ\text{C}$ ）

ケース B

ケース B について固体減速炉心の結果を表 2-1-5 に示す。出力の変化には 2 つのパターンがある。1 つは図 2-1-3 に示した L4P-30 炉心のように出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇するが、元々の反応度添加量が $+0.05\% \Delta k/k$ と小さいため負の温度係数の影響により未臨界となり、出力は 120W のスクラム条件に至ることがなく最大となった後に徐々に出力が減少し、最終的には 3600 秒を経過したところで運転員が停止させるというものである。これは燃料板の全熱容量が小さな炉心（温度上昇の大きな炉心）で起こる可能性が高い。もう 1 つは温度上昇に伴って反応度は徐々に低下するものの、出力は上昇して 120W を超えることにより手動スクラムする場合である。表 2-1-5 の下線で示した結果が 120W スクラムに至らない場合では運転時間が長くなるため積算出力が増え、温度上昇も大きくなる。

今回の解析では L4P-30 炉心の温度上昇が最も高く、約 27.1°Cであり判定基準値を満たしている。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により-0.106 % $\Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「+0.05-0.106-(1.35-0.3-0.45)=-0.656 % $\Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差を検討した結果を表 2-1-6 に示す。燃料重量の誤差を考慮しても燃料温度はほとんど変わらない。 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさなく、 β_{eff} に誤差があった場合にも温度は低下する。温度係数の誤差については温度係数が小さくなると出力上昇が早くなり 120W でスクラムするため温度上昇は低くなる。一方、温度係数が大きくなると出力上昇が緩慢となり、積算出力は小さくなるため、やはり温度上昇は低くなる。

これらの誤差を考慮しても燃料温度は基準とした値より低くなる。

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 2-1-7 に示す。全ての炉心において出力は 120W まで上昇しスクラムに至っている。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は 1.85°Cであり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-1-4 に示す）。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により-0.005 % $\Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「+0.05-0.005-(1.5-0.45-0.5)=-0.505 % $\Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差を検討したときの結果を表 2-1-8 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 8%高くなる。 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 10% 上昇する。温度係数の誤差があった場合には燃料温度は約 2% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.21 倍 (1.08×1.10×1.02) となるだけなので判定基準値を満たしている。(1.85°C×1.21=2.24°C)

表 2-1-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）（ケース A）

炉心名称	炉心高 (cm)		120W 超 (s) ^{d)}	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
L5.5P-50	50.9		69.5	138.7	309.1	1.55E+03	1.72E-01	3.94E-01
L5.5P-40	41.8		69.6	138.7	309.2	1.55E+03	1.88E-01	4.32E-01
L5.5P-30	30.8		69.5	138.7	309.2	1.55E+03	1.93E-01	4.41E-01 ^{c)}
L4P-50	49.7		71.2	138.2	313.6	1.59E+03	1.56E-01	3.49E-01
L4P-40	39.5		72.1	137.9	315.8	1.61E+03	1.90E-01	4.15E-01
L4P-30	30.7		72.1	137.9	315.8	1.61E+03	2.01E-01	4.38E-01
L3P-50	51.3		73.0	137.6	318.2	1.63E+03	1.49E-01	3.17E-01
L3P-40	39.8		73.1	137.6	318.7	1.64E+03	1.65E-01	3.55E-01
L3P-30	30.5		73.4	137.5	319.2	1.64E+03	1.82E-01	3.79E-01
L2P-50	48.1		73.7	137.4	320.4	1.65E+03	1.12E-01	2.86E-01
L2P-40	39.0		74.3	137.2	322.0	1.66E+03	1.32E-01	2.92E-01
L2P-30	30.7		73.9	137.3	321.0	1.65E+03	1.39E-01	3.22E-01
L1P-50	47.7		73.2	137.6	319.6	1.64E+03	6.41E-02	2.07E-01
L1P-40	38.2		74.2	137.3	322.2	1.66E+03	6.82E-02	1.72E-01
L1P-30	29.2		74.0	137.3	321.7	1.66E+03	7.16E-02	2.19E-01
LL1P-50	49.7		72.7	137.7	318.5	1.63E+03	2.69E-02	1.02E-01
LL1P-40	38.4		73.3	137.5	319.9	1.64E+03	2.43E-02	8.85E-02
LL1P-30	30.0		73.0	137.6	319.4	1.64E+03	2.81E-02	1.11E-01

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

d) 出力が 120W を超えてスクラム信号が発生するまでの時間。制御棒はこの 1 秒後に落下してステップ状の反応度を加える。（以下の結果を示す表において、この時間の記載の内容は全て同じ）

表 2-1-2 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30 炉心)

(ケース A) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	69.5	138.7	309.2	1.55E+03	1.93E-01	4.41E-01	—
U 重量 6%減少	69.6	138.7	309.2	1.55E+03	2.05E-01	4.70E-01	1.06
β eff 8%減少	57.8	143.8	277.9	1.29E+03	1.60E-01	3.66E-01	0.82
β eff 8%増加	82.2	135.3	340.5	1.83E+03	2.28E-01	5.22E-01	1.18
ℓ 8%減少	69.5	138.7	309.1	1.55E+03	1.93E-01	4.41E-01	1.00
ℓ 8%増加	69.6	138.7	309.2	1.55E+03	1.93E-01	4.42E-01	1.00
温度係数 32% 減少	69.3	138.8	308.9	1.55E+03	1.92E-01	4.40E-01	1.00
温度係数 32% 増加	69.8	138.6	309.5	1.55E+03	1.93E-01	4.43E-01	1.00

a),b)は表 2-1-1 と同じ算出

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-1 の結果と同じ

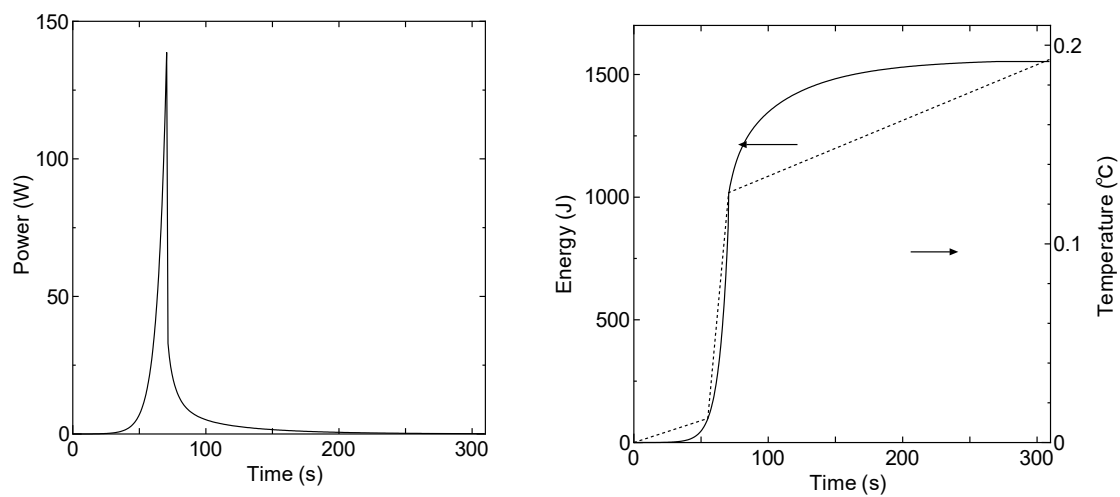


図 2-1-1 L5.5P-30 炉心

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースA)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

表 2-1-3 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）（ケース A）

炉心名称	列	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W ま で (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	37.8	180.0	257.1	8.81E+02	1.29E-02	3.26E-02
	5	37.8	180.0	257.1	8.81E+02	1.32E-02	3.15E-02
C35G0	4	38.0	179.2	258.0	8.86E+02	1.80E-02	4.09E-02
	5	37.9	179.6	257.5	8.84E+02	1.78E-02	4.10E-02
C45G0	4	37.8	180.1	256.8	8.80E+02	2.55E-02	5.08E-02
	5	37.8	180.1	256.8	8.80E+02	2.50E-02	5.27E-02
C60G0	4	37.3	182.2	254.5	8.65E+02	2.39E-02	4.34E-02
	5	37.3	182.2	254.5	8.65E+02	2.35E-02	4.44E-02
C45G(2H ₂ O)	4	37.4	181.9	254.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02^{c)}
C45G(5H ₂ O)		36.4	186.3	250.5	8.40E+02	1.97E-02	6.51E-02
C45G(6H ₂ O)		36.4	186.3	250.5	8.40E+02	1.77E-02	5.84E-02
C45G(7H ₂ O)		36.4	185.9	250.9	8.43E+02	1.63E-02	5.16E-02
C45G(10H ₂ O)		37.0	183.5	253.2	8.57E+02	1.41E-02	3.74E-02
C45G(15H ₂ O)		37.5	181.3	255.6	8.72E+02	1.31E-02	2.79E-02
C45G(2H ₂ O)	5	37.3	182.3	254.5	8.65E+02	2.60E-02	6.71E-02
C45G(5H ₂ O)		36.0	188.0	248.9	8.31E+02	1.99E-02	6.63E-02
C45G(6H ₂ O)		35.9	188.4	248.5	8.28E+02	1.79E-02	6.03E-02
C45G(7H ₂ O)		36.0	188.0	248.9	8.31E+02	1.63E-02	5.42E-02
C45G(10H ₂ O)		36.6	185.1	251.7	8.47E+02	1.39E-02	4.04E-02
C45G(15H ₂ O)		37.3	182.0	254.8	8.67E+02	1.28E-02	3.05E-02
C60G(2H ₂ O)	4	36.7	184.5	252.1	8.51E+02	2.29E-02	5.98E-02
C60G(5H ₂ O)		35.9	188.3	248.6	8.29E+02	1.71E-02	5.27E-02
C60G(7H ₂ O)		36.1	187.5	249.4	8.34E+02	1.46E-02	4.12E-02
C60G(10H ₂ O)		36.6	185.0	251.7	8.48E+02	1.30E-02	3.01E-02
C60G(15H ₂ O)		37.1	183.0	253.7	8.60E+02	1.22E-02	2.28E-02

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-1-4 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース A) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	37.4	181.9	254.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	—
U 重量 6%減少	37.4	181.9	254.8	8.67E+02	2.79E-04	7.31E-04	1.06
β eff 8%減少	32.1	215.3	231.3	7.30E+02	2.20E-02	5.79E-02	0.84
β eff 8%増加	43.3	164.6	280.1	1.03E+03	3.12E-02	8.20E-02	1.19
ρ 8%減少	37.3	182.0	254.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
ρ 8%増加	37.4	181.8	254.9	8.68E+02	2.62E-02	6.88E-02	1.00
温度係数 32% 減少	37.3	181.9	254.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
温度係数 32% 増加	37.4	181.9	254.9	8.68E+02	2.62E-02	6.88E-02	1.00

a),b)は表 2-1-2 と同じ算出

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-2 の結果と同じ

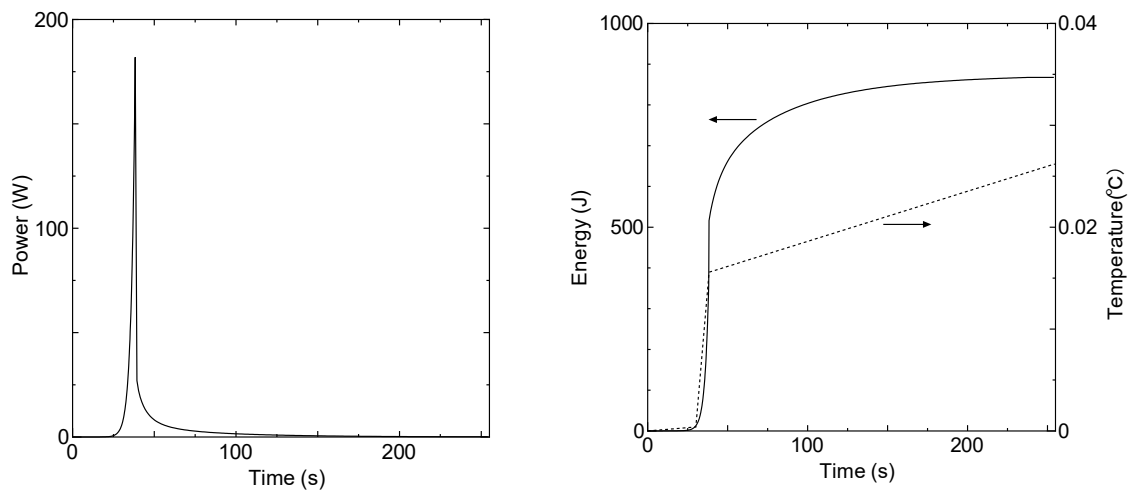


図 2-1-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケース A)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

表 2-1-5 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）（ケース B）

炉心名称	120W 超 または最大出力となる時刻 (s) ① d)	最大出力 (W) ②	0.1W までの時刻 (s) ③	手動スクラム時の出力 (W) ④	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	<u>1815.7</u> c)	<u>103.0</u>	<u>3601.0</u>	<u>0.154</u>	<u>9.08E+04</u>	<u>1.01E+01</u>	<u>2.31E+01</u>
L5.5P-40	<u>1810.1</u>	<u>99.1</u>	<u>3601.0</u>	<u>0.147</u>	<u>8.74E+04</u>	<u>1.06E+01</u>	<u>2.43E+01</u>
L5.5P-30	<u>1814.3</u>	<u>102.0</u>	<u>3601.0</u>	<u>0.152</u>	<u>9.00E+04</u>	<u>1.12E+01</u>	<u>2.56E+01</u>
L4P-50	1769.5	120.1	2136.7		4.01E+04	3.93E+00	8.79E+00
L4P-40	<u>1857.0</u>	<u>113.5</u>	<u>3605.0</u>	<u>0.240</u>	<u>1.02E+05</u>	<u>1.20E+01</u>	<u>2.62E+01</u>
L4P-30	<u>1853.9</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.7</u>	<u>0.234</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u> e)
L3P-50	1731.4	120.2	2098.9		3.49E+04	3.19E+00	6.78E+00
L3P-40	1720.7	120.2	2088.0		3.38E+04	3.41E+00	7.33E+00
L3P-30	1729.5	120.2	2097.2		3.44E+04	3.81E+00	7.94E+00
L2P-50	1627.0	120.5	1992.2		2.63E+04	1.78E+00	4.55E+00
L2P-40	1647.7	120.5	2006.8		2.66E+04	2.12E+00	4.68E+00
L2P-30	1634.7	120.5	1997.2		2.62E+04	2.20E+00	5.11E+00
L1P-50	1571.6	120.6	1934.2		2.29E+04	8.95E-01	2.90E+00
L1P-40	1582.4	120.6	1946.0		2.30E+04	9.43E-01	2.38E+00
L1P-30	1579.3	120.6	1942.7		2.29E+04	9.90E-01	3.03E+00
LL1P-50	1542.9	120.7	1904.3		2.16E+04	3.57E-01	1.35E+00
LL1P-40	1549.2	120.7	1911.3		2.17E+04	3.20E-01	1.17E+00
LL1P-30	1546.4	120.7	1908.2		2.16E+04	3.70E-01	1.47E+00

- a) 燃料板のみの温度上昇を考慮
b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける
c) 太字下線を付けた結果は出力が上昇してもスクラムの 120W まで至らず、その後未臨界のため出力が減少し、最終的に 3600 秒後に手動スクラム（1 秒後に反応度印加）で停止したケース
d) 表の説明
① 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合のスクラムに至るまでの時間、出力が 120W まで上昇しない場合は出力が最大となるまでの時間
② 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合、出力が 120W まで上昇しない場合ともに最大出力
③ 自動または手動スクラムをして出力が 0.1W まで低下する時間
④ 手動スクラム時の反応度が印加される直前での出力（③が 3601 秒となっている上段 3 つのケースは、制御棒落下ですぐに出力が 0.1W 以下となる）
e) 温度上昇が最大となる結果

表 2-1-6 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (L4P-30 炉心)
(ケース B) 誤差の影響

	120W 超 または最大 出力となる 時刻 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	<u>1853.9</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.7</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u>	—
U 重量 6%減 少	<u>1812.9</u>	<u>104.2</u>	<u>3603.3</u>	<u>9.33E+04</u>	<u>1.23E+01</u>	<u>2.69E+01</u>	<u>0.99</u>
β eff 8%減少	<u>1726.9</u>	<u>116.5</u>	<u>3601.0</u>	<u>9.58E+04</u>	<u>1.20E+01</u>	<u>2.61E+01</u>	0.96
β eff 8%増加	<u>2033.4</u>	<u>102.2</u>	<u>3446.4</u>	<u>9.87E+04</u>	<u>1.23E+01</u>	<u>2.69E+01</u>	0.99
ρ 8%減少	<u>1853.8</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.6</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u>	1.00
ρ 8%増加	<u>1853.9</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.6</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u>	1.00
温度係数 32%減少	1645.9	120.4	2009.3	2.84E+04	3.55E+01	7.73E+01	0.29
温度係数 32%増加	<u>1900.0</u>	<u>83.7</u>	<u>3604.5</u>	<u>7.46E+04</u>	<u>9.31E+00</u>	<u>2.03E+01</u>	0.75

a),b)は表 2-1-5 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-5 の結果と同じ

e) 太字下線を付けた結果は出力が上昇してもスクラムの 120W まで至らず、その後未臨界のため出力が減少し、最終的に 3600 秒後に手動スクラムで停止したケース表 2-1-5 の結果と同じ

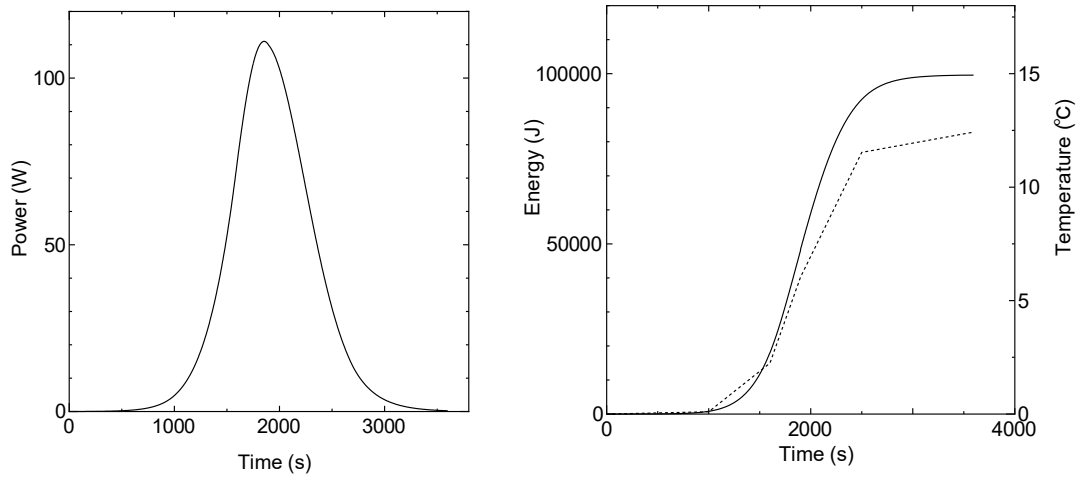


図 2-1-3 L4P-30 炉心

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースB)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

表 2-1-7 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）（ケースB）

炉心名称	列	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	1546.3	120.7	1922.3	2.17E+04	3.17E-01	8.04E-01
	5	1546.5	120.7	1922.5	2.18E+04	3.26E-01	7.78E-01
C35G0	4	1557.2	120.7	1933.8	2.21E+04	4.49E-01	1.02E+00
	5	1554.6	120.7	1931.0	2.21E+04	4.45E-01	1.03E+00
C45G0	4	1566.7	120.6	1942.9	2.29E+04	6.66E-01	1.32E+00
	5	1564.7	120.6	1940.9	2.28E+04	6.47E-01	1.37E+00
C60G0	4	1543.0	120.7	1917.6	2.22E+04	6.13E-01	1.11E+00
	5	1542.2	120.7	1916.9	2.22E+04	6.03E-01	1.14E+00
C45G(2H ₂ O)	4	1547.4	120.6	1922.3	2.24E+04	6.75E-01	1.77E+00 ^{c)}
C45G(5H ₂ O)		1501.3	120.7	1873.1	2.09E+04	4.90E-01	1.62E+00
C45G(6H ₂ O)		1493.2	120.8	1864.8	2.06E+04	4.34E-01	1.43E+00
C45G(7H ₂ O)		1497.0	120.7	1868.9	2.07E+04	3.99E-01	1.27E+00
C45G(10H ₂ O)		1517.5	120.7	1884.5	2.12E+04	3.48E-01	9.23E-01
C45G(15H ₂ O)		1538.1	120.7	1913.2	2.26E+04	3.40E-01	7.27E-01
C45G(2H ₂ O)	5	1542.0	120.7	1916.6	2.22E+04	6.67E-01	1.72E+00
C45G(5H ₂ O)		1473.6	120.8	1844.0	1.99E+04	4.77E-01	1.59E+00
C45G(6H ₂ O)		1470.8	120.8	1841.0	1.99E+04	4.29E-01	1.45E+00
C45G(7H ₂ O)		1478.3	120.8	1848.9	2.02E+04	3.97E-01	1.31E+00
C45G(10H ₂ O)		1502.7	120.7	1875.1	2.08E+04	3.42E-01	9.90E-01
C45G(15H ₂ O)		1530.9	120.7	1905.4	2.15E+04	3.17E-01	7.57E-01
C60G(2H ₂ O)	4	1518.0	120.7	1891.0	2.15E+04	5.79E-01	1.51E+00
C60G(5H ₂ O)		1483.2	120.7	1853.7	2.05E+04	4.24E-01	1.30E+00
C60G(7H ₂ O)		1487.1	120.8	1858.0	2.05E+04	3.58E-01	1.01E+00
C60G(10H ₂ O)		1505.8	120.7	1878.3	2.09E+04	3.20E-01	7.43E-01
C60G(15H ₂ O)		1521.2	120.7	1895.0	2.13E+04	3.02E-01	5.64E-01

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-1-8 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)
(ケース B) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	1547.4	120.6	1922.3	2.24E+04	6.75E-01	1.77E+00	
U 重量 6%減少	1559.3	120.61	1934.5	2.30E+04	7.36E-01	1.93E+00	1.09
β eff 8%減少	1397.8	120.7	1757.8	2.01E+04	6.08E-01	1.60E+00	0.90
β eff 8%増加	1698.2	120.6	2087.3	2.46E+04	7.42E-01	1.95E+00	1.10
ℓ 8%減少	1547.3	120.6	1922.2	2.24E+04	6.75E-01	1.77E+00	1.00
ℓ 8%増加	1547.5	120.6	1922.4	2.24E+04	6.75E-01	1.77E+00	1.00
温度係数 32% 減少	1538.2	120.7	1912.9	2.19E+04	6.60E-01	1.73E+00	0.98
温度係数 32% 増加	1556.7	120.6	1931.9	2.29E+04	6.90E-01	1.81E+00	1.02

a),b)は表 2-1-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-7 の結果と同じ

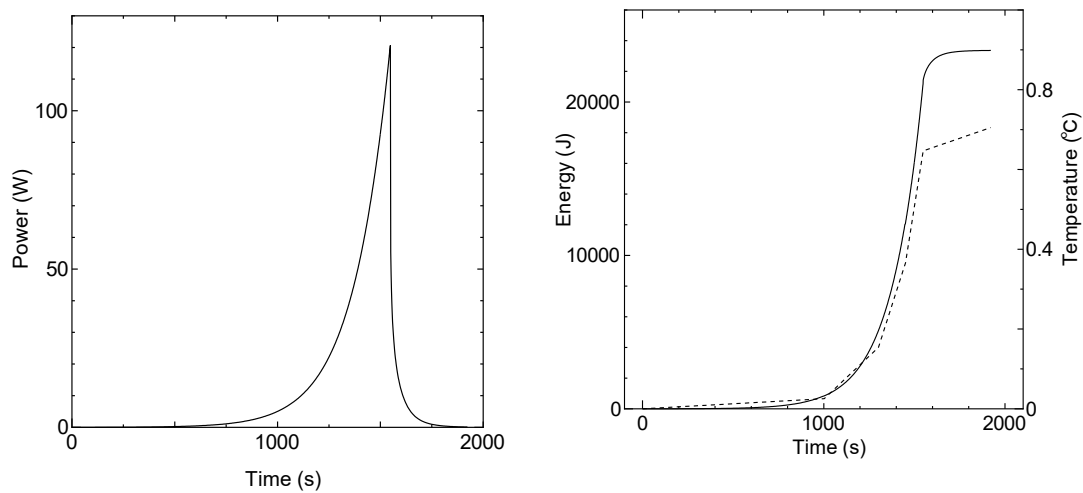


図 2-1-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケース B)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

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。

2-2-1 解析シナリオ

(a) ケース A

(1) 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

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

(2) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力計は指示値が 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

(3) 解析条件

- ・制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率 ($0.02\% \Delta k/k/s$) で反応度を連続的に加える。
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110% 以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。
- ・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し、1 秒後に制御棒が落下する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、固体減速炉心は $0.35 - (1.35 - 0.45) = -0.55\% \Delta k/k$ 、軽水減速

炉心では $0.5 - (1.5 - 0.5) = -0.5 \text{ \%}\Delta k/k$ の未臨界状態となる。(ただし、温度変化による反応度を考慮しない場合)

- ・出力が 0.1W になるまで解析する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンブ弁は作動しないとする。

(4) 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「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」(2020 年 11 月 5 日)の説明資料 2-1 で選定したすべての代表炉心を対象とし(「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8 (下中央のページ番号)の表 2、p 28 (下中央のページ番号)の表 9)、燃料の最高温度が最大となる炉心についてより詳しい解析を行う。

(b) ケース B

制御棒の引き抜きにより $0.05\text{\%}\Delta k/k$ のステップ状の反応度を加える場合をケース B としていた。この場合、出力はペリオド約 160 秒(倍加時間は約 120 秒)で増加し最も積算出力が大きくなる場合は初期出力が低い場合であるが、既に「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」の解析において初期出力が 0.01W の結果を示しているため、「出力運転中の制御棒の異常な引抜き」ではケース B の解析は行わない。

2-2-2 解析結果

ケース A について固体減速炉心の結果を表 2-2-1 に示す。最も燃料温度が高くなったのが L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は約 0.68°C であり判定基準値を満たしている(出力変化を図 2-2-1 に示す)。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.0007 \text{ \%}\Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「 $+0.35 - 0.0007 - (1.35 - 0.45) = -0.5507 \text{ \%}\Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表 2-2-3 に示す。初期出力を 100W から 90%まで下げても温度はほとんど変化せず。80Wまで変化させると 1%ほど低くなっている。これは初期出力が高い方がスクラム後の出力の低下がゆっくりとなり、結果として積算出力が高くなるためである。さらに初期出力を下げると積算出力が小さくなる。

この炉心の燃料重量の誤差(6%)、即発中性子減衰定数の誤差(8%)、温度係数の誤差(32%)を考慮したときの結果を表 2-2-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6%高くなる。 β_{eff} と ρ が各々 8%の誤差を持った場合(もう一方は誤差無し)の結果より、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 7%上昇する。温度係数の誤差も影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.13 倍 (1.06×1.07) となるだけなので判

定基準値を満たしている。 $(0.68^{\circ}\text{C} \times 1.13 = 0.77^{\circ}\text{C})$

ケースAについて軽水減速炉心の結果を表 2-2-4 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は約 0.21°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-2-2 に示す）。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.0007\% \Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「 $+0.5 - 0.0001 - (1.5 - 0.5) = -0.5001\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表 2-2-6 に示す。初期出力を 100W から 90% まで下げても温度はほとんど変化せず。80W まで変化させると 2% ほど低くなっている。さらに初期出力を下げると積算出力が小さくなる。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を検討したときの結果を表 2-2-5 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。 β_{eff} と ρ が各々 8% の誤差を持った場合（もう一方は誤差無し）の結果より、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 7% 上昇する。温度係数の誤差も影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.13 倍 (1.06×1.07) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.21^{\circ}\text{C} \times 1.13 = 0.24^{\circ}\text{C})$

表 2-2-1 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）（ケースA）

炉心名称 a、	炉心高 (cm)	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	50.9	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.67E-01	6.10E-01
L5.5P-40	41.8	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.90E-01	6.68E-01
L5.5P-30	30.8	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01 c)
L4P-50	49.7	4.28	127.5	376.2	2.43E+03	2.38E-01	5.32E-01
L4P-40	39.5	4.29	127.5	377.0	2.44E+03	2.87E-01	6.29E-01
L4P-30	30.7	4.29	127.5	377.0	2.44E+03	3.04E-01	6.64E-01
L3P-50	51.3	4.32	127.4	378.0	2.45E+03	2.25E-01	4.77E-01
L3P-40	39.8	4.32	127.4	378.2	2.46E+03	2.48E-01	5.33E-01
L3P-30	30.5	4.33	127.4	378.4	2.46E+03	2.73E-01	5.68E-01
L2P-50	48.1	4.34	127.4	379.0	2.47E+03	1.67E-01	4.28E-01
L2P-40	39.0	4.35	127.4	379.6	2.48E+03	1.97E-01	4.35E-01
L2P-30	30.7	4.34	127.4	379.2	2.47E+03	2.07E-01	4.81E-01
L1P-50	47.7	4.33	127.4	378.8	2.47E+03	9.63E-02	3.12E-01
L1P-40	38.2	4.35	127.3	379.8	2.48E+03	1.02E-01	2.56E-01
L1P-30	29.2	4.35	127.4	379.6	2.48E+03	1.07E-01	3.28E-01
LL1P-50	49.7	4.32	127.4	378.4	2.46E+03	4.06E-02	1.53E-01
LL1P-40	38.4	4.34	127.4	379.0	2.47E+03	3.65E-02	1.33E-01
LL1P-30	30.0	4.33	127.4	378.8	2.47E+03	4.23E-02	1.68E-01

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

c) 最大となる結果

表 2-2-2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))

(ケースA) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	—
U 重量を 6%減少	4.24	127.6	373.5	2.40E+03	3.17E-01	7.26E-01	1.06
β_{eff} を 8% 減少	4.11	128.1	361.6	2.23E+03	2.77E-01	6.34E-01	0.93
β_{eff} を 8% 増加	4.65	127.1	385.6	2.58E+03	3.21E-01	7.34E-01	1.07
ℓ を 8%減 少	4.38	127.6	373.8	2.41E+03	2.99E-01	6.84E-01	1.00
ℓ を 8%増 加	4.38	127.6	373.8	2.41E+03	2.99E-01	6.84E-01	1.00
温度係数 32%減少	4.20	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	1.00
温度係数 32%増加	4.28	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	1.00

a),b)は表 2-2-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-2-1 の結果と同じ

表 2-2-3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30 炉心)
(ケース A) 初期出力の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
初期出力 100W ^{d)}	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	—
初期出力 94W	5.39	128.5	370.3	2.41E+03	3.00E-01	6.86E-01	1.00
初期出力 90W	6.04	129.1	367.9	2.41E+03	3.00E-01	6.86E-01	1.00
初期出力 80W	7.60	130.7	361.2	2.39E+03	2.97E-01	6.79E-01	0.99
初期出力 50W	12.10	137.1	322.5	2.15E+03	2.67E-01	6.11E-01	0.89
初期出力 10W	21.98	139.5	256.0	1.55E+03	1.92E-01	4.04E-01	0.64
初期出力 1W	37.63	138.9	239.7	1.54E+03	1.91E-01	4.02E-01	0.64
初期出力 0.1W	53.4	138.8	291.9	1.55E+03	1.92E-01	4.02E-01	0.64

a),b)は表 2-2-1 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 2-2-1 の結果と同じ

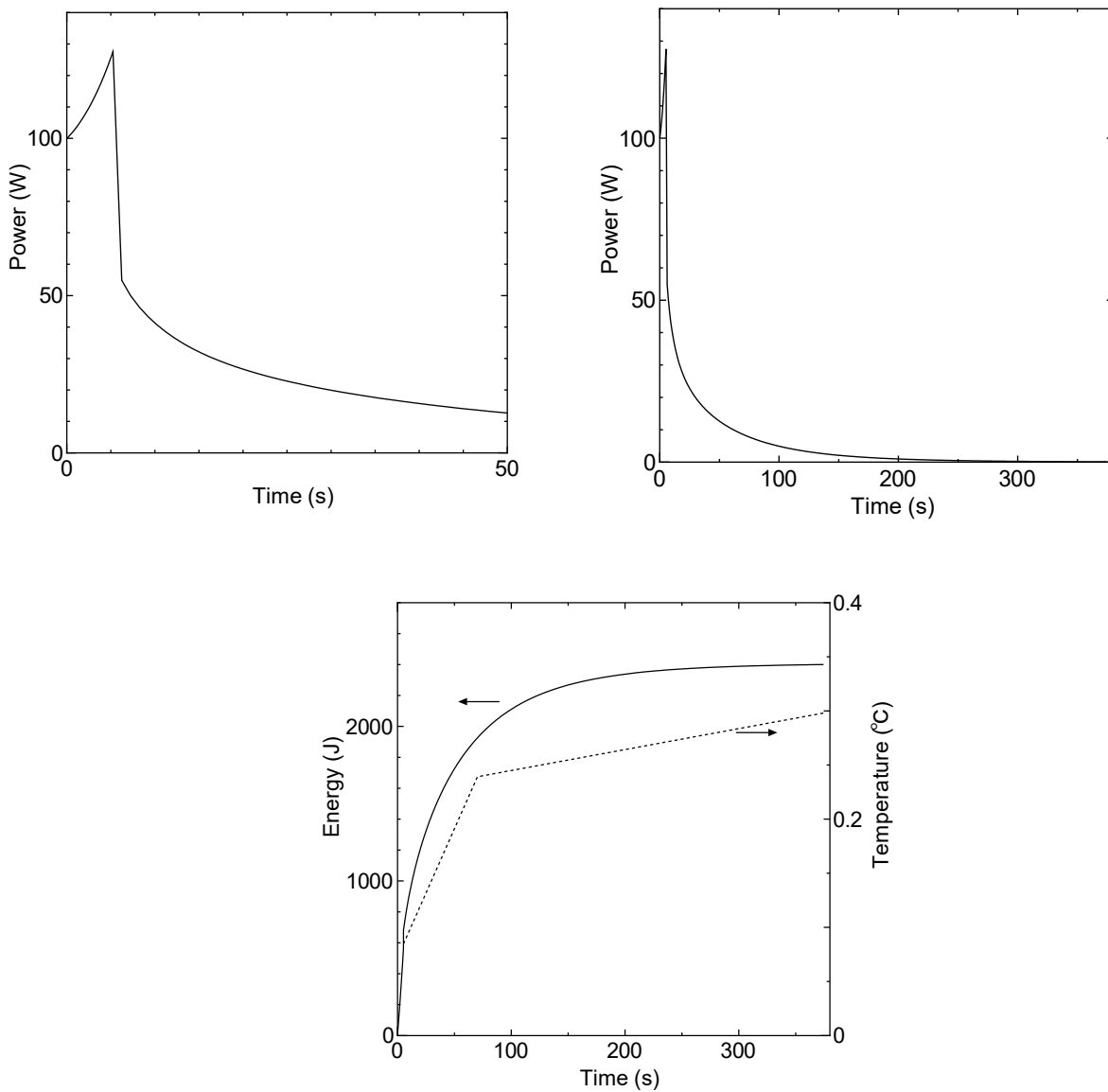


図 2-2-1 L5.5P-30 炉心
 出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケースA)
 出力変化 (上、スケールの違う 2 つの図)、
 積算出力と温度変化 (下、右実線 : 出力、右点線 : 温度)
 (右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

表 2-2-4 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）（ケース A）

炉心名称	列	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	4.32	127.41	392.73	2.64E+03	3.86E-02	9.79E-02
	5	4.32	127.41	392.73	2.64E+03	3.97E-02	9.46E-02
C35G0	4	4.33	127.39	393.15	2.65E+03	5.38E-02	1.22E-01
	5	4.33	127.40	392.94	2.65E+03	5.34E-02	1.23E-01
C45G0	4	4.32	127.41	392.52	2.64E+03	7.67E-02	1.53E-01
	5	4.32	127.41	392.52	2.64E+03	7.49E-02	1.58E-01
C60G0	4	4.29	127.46	391.26	2.62E+03	7.24E-02	1.32E-01
	5	4.29	127.46	391.26	2.62E+03	7.13E-02	1.35E-01
C45G(2H ₂ O)	4	4.30	127.45	391.47	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01 ^{c)}
C45G(5H ₂ O)		4.25	127.54	389.15	2.59E+03	6.06E-02	2.01E-01
C45G(6H ₂ O)		4.25	127.54	389.15	2.59E+03	5.47E-02	1.80E-01
C45G(7H ₂ O)		4.25	127.53	389.36	2.59E+03	5.01E-02	1.59E-01
C45G(10H ₂ O)		4.28	127.48	390.63	2.61E+03	4.29E-02	1.14E-01
C45G(15H ₂ O)		4.30	127.44	391.89	2.63E+03	3.95E-02	8.43E-02
C45G(2H ₂ O)	5	4.29	127.46	391.26	2.62E+03	7.90E-02	2.03E-01
C45G(5H ₂ O)		4.23	127.57	388.30	2.58E+03	6.17E-02	2.06E-01
C45G(6H ₂ O)		4.23	127.58	388.09	2.58E+03	5.56E-02	1.88E-01
C45G(7H ₂ O)		4.23	127.57	388.30	2.58E+03	5.07E-02	1.68E-01
C45G(10H ₂ O)		4.26	127.51	389.78	2.60E+03	4.28E-02	1.24E-01
C45G(15H ₂ O)		4.30	127.45	391.47	2.63E+03	3.88E-02	9.25E-02
C60G(2H ₂ O)	4	4.27	127.51	390.00	2.60E+03	7.02E-02	1.83E-01
C60G(5H ₂ O)		4.23	127.58	388.09	2.58E+03	5.33E-02	1.64E-01
C60G(7H ₂ O)		4.23	127.56	388.52	2.58E+03	4.51E-02	1.28E-01
C60G(10H ₂ O)		4.26	127.51	389.79	2.60E+03	3.98E-02	9.23E-02
C60G(15H ₂ O)		4.28	127.47	390.84	2.62E+03	3.72E-02	6.94E-02

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-2-5 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)
(ケース A) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	4.30	127.5	391.47	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	—
U 重量を 6%減少	4.31	127.5	391.47	2.63E+03	8.40E-03	2.21E-03	1.06
β_{eff} を 8% 減少	4.05	128.0	378.3	2.43E+03	7.34E-02	1.93E-01	0.93
β_{eff} を 8% 増加	4.60	127.0	404.0	2.82E+03	8.51E-02	2.24E-01	1.07
ℓ を 8%減 少	4.32	127.5	391.3	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00
ℓ を 8%増 加	4.32	127.5	391.3	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00
温度係数 32%減少	4.27	127.5	391.5	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00
温度係数 32%増加	4.37	127.5	391.5	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00

a),b)は表 2-2-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-2-4 の結果と同じ

表 2-2-6 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース A) 初期出力の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
初期出力 100W ^{d)}	4.30	127.5	391.5	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	—
初期出力 94W	5.32	128.4	388.0	2.62E+03	7.92E-02	2.08E-01	1.00
初期出力 90W	5.98	129.0	385.5	2.62E+03	7.90E-02	2.07E-01	1.00
初期出力 80W	7.56	130.6	378.8	2.58E+03	7.79E-02	2.04E-01	0.98
初期出力 50W	12.20	136.9	352.9	2.30E+03	6.95E-02	1.82E-01	0.88
初期出力 10W	20.47	163.4	286.4	1.41E+03	4.27E-02	1.12E-01	0.54
初期出力 1W	26.30	182.5	248.8	9.12E+02	2.75E-02	7.23E-02	0.35
初期出力 0.1W	31.82	182.0	248.7	8.71E+02	2.63E-02	6.91E-02	0.33

a),b)は表 2-2-2 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 2-2-4 の結果と同じ

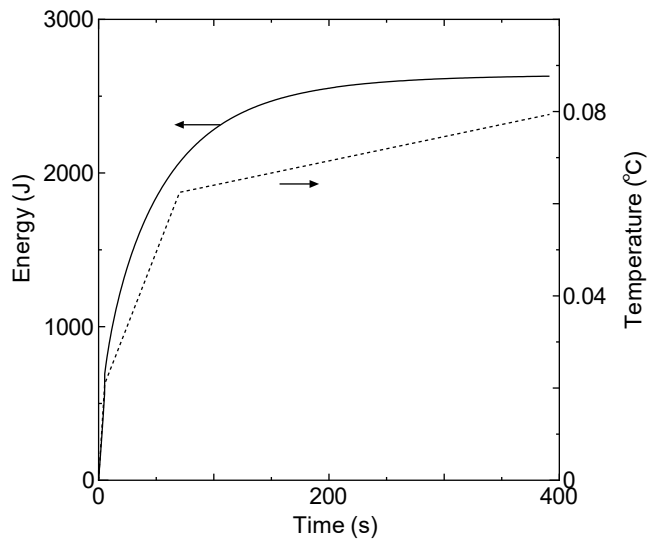
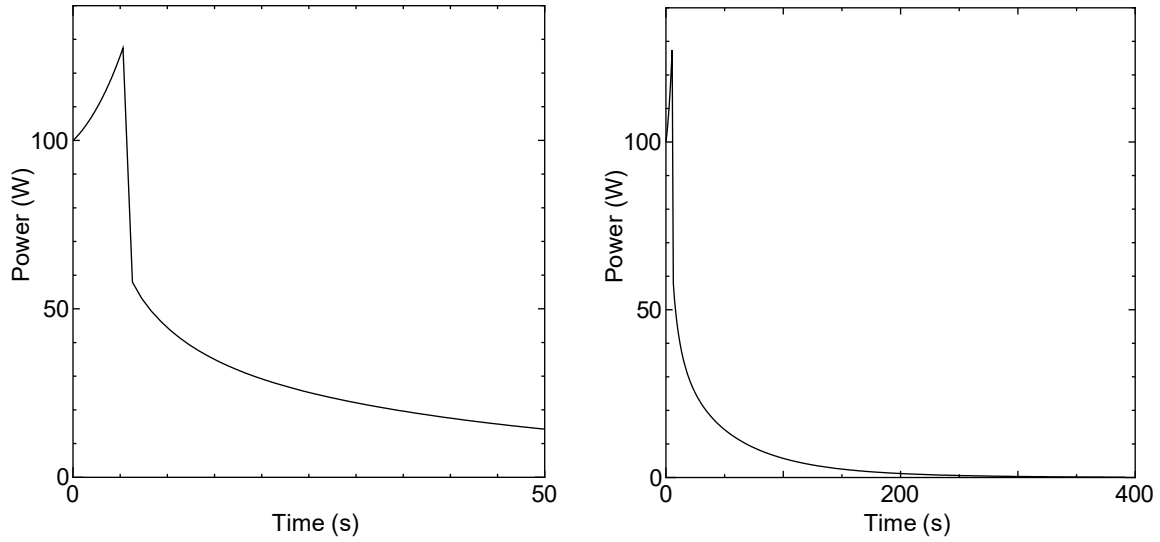


図 2-2-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心
 出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケースA)
 出力変化 (上、スケールの違う 2 つの図)、
 積算出力と温度変化 (下、右実線 : 出力、右点線 : 温度)
 (右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

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照射物の位置が変化した場合、または挿入管が破損して内部に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。

照射物については金箔やカドミウムのように炉心に装荷することにより負の反応度が印加される照射物（以下、負の反応度の照射物）と、濃縮ウラン箔のように炉心に装荷することにより正の反応度が印加される照射物（以下、正の反応度の照射物）がある。負の反応度の照射物については原子炉の出力運転中に炉心に装荷した状態から炉外に落下した場合に正の反応度印加が発生する。一方、正の反応度の照射物については、原子炉の出力運転中に炉心上部に装荷した状態から炉心中心に落下した場合に正の反応度印加が発生する。

負の反応度の照射物であっても正の反応度の照射物であっても照射物に異常が発生した場合の反応度については同じ値に制限しており、さらに照射物と挿入管に異常が生じたときに印加される反応度は、同時に異常が生じた場合での値として制限しているため、以下の解析においては挿入管が破損して正の反応度が加わることを含めて、負の反応度の照射物に異常が生じた場合、すなわち炉心に取り付けていた照射物が炉心から落下したことを考えて「照射物の落下」と記載して説明する。

2-3-1 解析シナリオ

(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「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定したすべての代表炉心を対象とする。（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8（下中央のページ番号）の表 2、p 26（下中央のページ番号）の表 8）

固体減速炉心、軽水減速炉心ともに照射物を取り付けた状態で制御棒は全引抜き状態とする。

(2) 反応度等

実験物の反応度（異常が発生した際に加わる反応度）は制限値の最大値

固体減速炉心は絶対値で $0.35\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は絶対値で $0.5\% \Delta k/k$

（照射物が落下した後の炉心の過剰反応度は固体減速炉心については $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心については $0.5\% \Delta k/k$ となる。）

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 $1.35 \text{ \%}\Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \text{ \%}\Delta k/k$

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 $1.35 \times 1/3 = 0.45 \text{ \%}\Delta k/k$

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

実験物が取り付けられた状態での各炉心の過剰反応度

固体減速炉心は $0.35 \text{ \%}\Delta k/k$

軽水減速炉心は $0.5 \text{ \%}\Delta k/k$

(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

線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒はすべて引き抜いて出力 0.01W の臨界状態

(4) スクラム信号発生

【ケース A】

- ・炉心に取り付けていた照射物が炉心から落下し、固体減速炉心では $+0.35 \text{ \%}\Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $+0.5 \text{ \%}\Delta k/k$ の反応度がステップ状に加わる。
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110% 以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。
- ・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し、1 秒後に制御棒が落下する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「実験物落下による反応度 - (全制御棒反応度 - 最大 1 本の反応度)」の未臨界度となる。すなわち、固体減速炉心では「 $+0.35 - 0.9 = -0.55 \text{ \%}\Delta k/k$ 」の未臨界度、軽水減速炉心では「 $+0.5 - 1.0 = -0.5 \text{ \%}\Delta k/k$ 」の未臨界度となる。
(ただし、温度変化による反応度を考慮しない場合)
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

【ケース B】

- ・炉心に取り付けていた照射物が炉心からゆっくり落下するような場合、または軽水減速炉心で炉心近傍の挿入管にゆっくり水が入り込むような場合を想定する。固体減速炉心では最大 $+0.35 \text{ \%}\Delta k/k$ 、軽水減速炉心では最大 $+0.5 \text{ \%}\Delta k/k$ の反応度が 1 時間（3600 秒）かけて加わるとする。

- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。
- ・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し、1 秒後に制御棒が落下する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、「照射物落下による反応度（落下途中での反応度）－（全制御棒反応度－最大 1 本の反応度）」の未臨界界となる。（ただし、温度変化による反応度を考慮しない場合）
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

2-3-2 解析結果

ケース A

ケース A について固体減速炉心の結果を表 2-3-1 に示す。最も燃料温度が高くなったのが L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は約 0.44℃であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-3-1 に示す）。線型出力系の指示値が 120%を超えてスクラム信号が発生する場合であり、この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.0011\% \Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「 $+0.35-0.0011-(1.35-0.45)=-0.5511\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、温度係数の誤差（32%）を考慮したときの結果を表 2-3-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6%高くなる。 β_{eff} と ℓ が各々 8%の誤差を持った場合の結果より、 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 18%上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.25 倍（ 1.06×1.18 ）となるだけなので判定基準値を満たしている。（ $0.44^\circ\text{C} \times 1.25 = 0.55^\circ\text{C}$ ）

ケース A について軽水減速炉心の結果を表 2-3-3 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は約 0.14℃であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-3-2 に示す）。このケースも線型出力系の指示値が 120%を超えてスクラム信号が発生する場合であり、この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.00009\% \Delta k/k$ の反応度が加わるため、その時点では「 $+0.5-0.00009-(1.5-0.5)=-0.50009\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果

を表 2-3-4 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。β_{eff} と ρ が各々 8% の誤差を持った場合の結果より、ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 19% 上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.26 倍 (1.06×1.19) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.07^{\circ}\text{C} \times 1.26 = 0.09^{\circ}\text{C})$

ケース B

ケース B について固体減速炉心の結果を表 2-3-5 に示す。最も燃料温度が高くなったのが L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は約 2.5°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-3-3 に示す）。線型出力系の指示値が 120% を超えてスクラム信号が発生する場合であり、この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.009\% \Delta k/k$ の反応度が加わり、照射物落下による反応度は $0.11\% \Delta k/k$ であったので、「 $+0.11 - 0.009 - (1.35 - 0.45) = -0.799\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果を表 2-3-6 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 7% 高くなる。β_{eff} と ρ が各々 8% の誤差を持った場合の結果より、ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 5% 上昇する。温度係数の誤差により燃料温度が約 2% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.15 倍 ($1.07 \times 1.05 \times 1.02$) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(2.6^{\circ}\text{C} \times 1.15 = 2.9^{\circ}\text{C})$

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 2-3-7 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は約 0.41°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-3-4 に示す）。線型出力系の指示値が 120% を超えてスクラム信号が発生する場合であり、この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.0013\% \Delta k/k$ の反応度が加わり、照射物落下による反応度は $0.13\% \Delta k/k$ であったので、「 $+0.13 - 0.0013 - (1.5 - 0.5) = -0.8713\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果を表 2-3-8 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。β_{eff} と ρ が各々 8% の誤差を持った場合の結果より、ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 6% 上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.12 倍 (1.06×1.06) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.54^{\circ}\text{C} \times 1.12 = 0.60^{\circ}\text{C})$

表 2-3-1 実験物の異常等による反応度の付加 (固体減速炉心)

【ケース A (ステップ状反応度印加)】

炉心名称 a、	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.72×10^{-1}	3.93×10^{-1}
L5.5P-40	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.87×10^{-1}	4.30×10^{-1}
L5.5P-30	58.0	138.8	297.3	1.55×10^3	1.92×10^{-1}	4.40×10^{-1} c)
L4P-50	59.7	138.3	301.9	1.59×10^3	1.56×10^{-1}	3.47×10^{-1}
L4P-40	60.6	138.0	304.0	1.60×10^3	1.89×10^{-1}	4.14×10^{-1}
L4P-30	60.6	138.0	304.0	1.60×10^3	2.00×10^{-1}	4.36×10^{-1}
L3P-50	61.5	137.7	306.5	1.63×10^3	1.49×10^{-1}	3.16×10^{-1}
L3P-40	61.7	137.7	307.0	1.63×10^3	1.65×10^{-1}	3.54×10^{-1}
L3P-30	62.0	137.6	307.6	1.63×10^3	1.81×10^{-1}	3.78×10^{-1}
L2P-50	62.4	137.5	309.0	1.65×10^3	1.11×10^{-1}	2.85×10^{-1}
L2P-40	63.0	137.3	310.6	1.66×10^3	1.32×10^{-1}	2.92×10^{-1}
L2P-30	62.6	137.4	309.5	1.65×10^3	1.38×10^{-1}	3.21×10^{-1}
L1P-50	62.0	137.6	308.4	1.64×10^3	6.40×10^{-2}	2.07×10^{-1}
L1P-40	63.0	137.3	311.0	1.66×10^3	6.82×10^{-2}	1.72×10^{-1}
L1P-30	62.8	137.3	310.4	1.66×10^3	7.16×10^{-2}	2.19×10^{-1}
LL1P-50	61.5	137.7	307.2	1.63×10^3	2.69×10^{-2}	1.01×10^{-1}
LL1P-40	62.1	137.5	308.8	1.64×10^3	2.43×10^{-2}	8.84×10^{-2}
LL1P-30	61.9	137.6	308.3	1.64×10^3	2.81×10^{-2}	1.11×10^{-1}

- a) 燃料板のみの温度上昇を考慮
- b) 各炉心の「最大値/平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数 (1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍) を掛ける
- c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-2 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心 L5.5P-30 炉心）
（ケース A） 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	58.0	138.8	297.3	1.55E+03	1.92E-01	4.40E-01	—
U 重量 6%減少	58.0	138.8	297.3	1.55E+03	2.03E-01	4.28E-01	1.06
β_{eff} 8%減少	46.0	144.0	265.9	1.28E+03	1.59E-01	3.65E-01	0.83
β_{eff} 8%増加	70.6	135.4	328.6	1.82E+03	2.27E-01	5.19E-01	1.18
ℓ 8%減少	57.9	138.9	297.2	1.54E+03	1.92E-01	4.39E-01	1.00
ℓ 8%増加	57.9	138.9	297.3	1.55E+03	1.92E-01	4.39E-01	1.00
温度係数 32%減少	57.8	138.9	297.2	1.54E+03	1.92E-01	4.39E-01	1.00
温度係数 32%増加	58.0	138.8	297.3	1.55E+03	1.92E-01	4.40E-01	1.00

- a),b)は表 2-3-1 と同じ
c) 基準の結果に対する比
d) 表 2-3-1 の結果と同じ

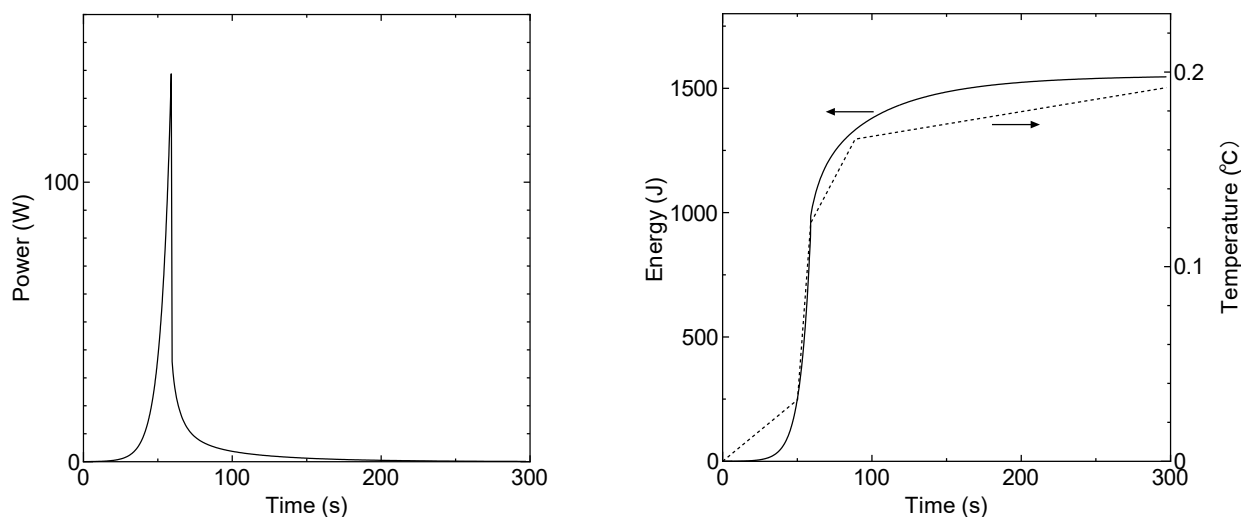


図 2-3-1 L5.5P-30 炉心

実験物の異常等による反応度の付加（ケース A ステップ状反応度添加）
出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-3 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心）

【ケース A（ステップ状反応度印加）】

炉心名称	列	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	19.9	180.0	239.1	8.80×10^2	1.28×10^{-2}	3.26×10^{-2}
	5	19.9	180.0	239.1	8.80×10^2	1.32×10^{-2}	3.15×10^{-2}
C35G0	4	20.1	179.3	240.0	8.86×10^2	1.80×10^{-2}	4.08×10^{-2}
	5	20.0	179.6	239.6	8.83×10^2	1.78×10^{-2}	4.10×10^{-2}
C45G0	4	19.8	180.2	238.8	8.79×10^2	2.55×10^{-2}	5.08×10^{-2}
	5	19.8	180.2	238.8	8.79×10^2	2.49×10^{-2}	5.26×10^{-2}
C60G0	4	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.39×10^{-2}	4.34×10^{-2}
	5	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.35×10^{-2}	4.44×10^{-2}
C45G (2H ₂ O)	4	19.4	182.0	236.8	8.67×10^2	2.62×10^{-2}	6.87×10^{-2} ^{c)}
C45G (5H ₂ O)		18.3	186.3	232.4	8.40×10^2	1.96×10^{-2}	6.51×10^{-2}
C45G (6H ₂ O)		18.3	186.3	232.4	8.40×10^2	1.77×10^{-2}	5.84×10^{-2}
C45G (7H ₂ O)		18.4	185.9	232.8	8.42×10^2	1.63×10^{-2}	5.16×10^{-2}
C45G (10H ₂ O)		18.9	183.5	235.2	8.57×10^2	1.41×10^{-2}	3.74×10^{-2}
C45G (15H ₂ O)		19.5	181.3	237.6	8.71×10^2	1.31×10^{-2}	2.79×10^{-2}
C45G (2H ₂ O)	5	19.3	182.3	236.4	8.64×10^2	2.60×10^{-2}	6.70×10^{-2}
C45G (5H ₂ O)		17.9	188.0	230.8	8.31×10^2	1.99×10^{-2}	6.63×10^{-2}
C45G (6H ₂ O)		17.8	188.4	230.4	8.28×10^2	1.79×10^{-2}	6.03×10^{-2}
C45G (7H ₂ O)		17.9	188.0	230.8	8.30×10^2	1.63×10^{-2}	5.41×10^{-2}
C45G (10H ₂ O)		18.6	185.1	233.6	8.47×10^2	1.39×10^{-2}	4.04×10^{-2}
C45G (15H ₂ O)		19.3	182.0	236.8	8.66×10^2	1.28×10^{-2}	3.05×10^{-2}
C60G (2H ₂ O)	4	18.7	184.6	234.0	8.50×10^2	2.29×10^{-2}	5.97×10^{-2}
C60G (5H ₂ O)		17.8	188.3	230.4	8.29×10^2	1.71×10^{-2}	5.26×10^{-2}
C60G (7H ₂ O)		18.0	187.5	231.2	8.33×10^2	1.46×10^{-2}	4.12×10^{-2}
C60G (10H ₂ O)		18.6	185.0	233.6	8.47×10^2	1.30×10^{-2}	3.01×10^{-2}
C60G (15H ₂ O)		19.1	183.0	235.6	8.60×10^2	1.22×10^{-2}	2.28×10^{-2}

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-4 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心 C45G(2H₂O) 4 列炉心）
 (ケース A) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	19.4	182.0	236.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	—
U 重量 6%減少	19.4	182.0	236.8	8.67E+02	2.78E-02	7.28E-02	1.06
β _{eff} 8%減少	13.5	215.4	212.6	7.29E+02	2.20E-02	5.78E-02	0.84
β _{eff} 8%増加	25.8	164.7	262.5	1.03E+03	3.12E-02	8.19E-02	1.19
ℓ 8%減少	19.3	182.1	236.7	8.66E+02	2.61E-02	6.86E-02	1.00
ℓ 8%増加	19.4	181.9	236.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
温度係数 32% 減少	19.3	182.0	236.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
温度係数 32% 増加	19.4	182.0	236.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00

- a),b)は表 2-3-3 と同じ
- c) 基準の結果に対する比
- d) 表 2-3-3 の結果と同じ

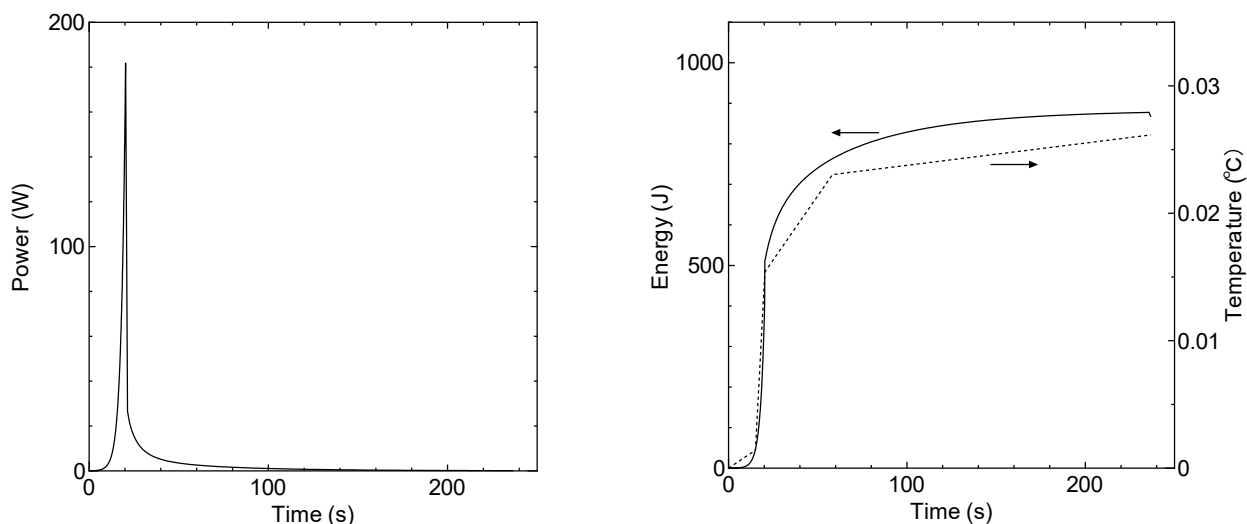


図 2-3-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心

実験物の異常等による反応度の付加（ケース A ステップ状反応度添加）
 出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-5 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心）

【ケース B（ランプ状反応度印加）】

炉心名称 a、	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	1173.7	121.9	1458.5	8.81×10^3	9.77×10^{-1}	2.24×10^0
L5.5P-40	1175.0	121.9	1459.7	8.82×10^3	1.07×10^0	2.45×10^0
L5.5P-30	1174.6	121.9	1459.3	8.80×10^3	1.09×10^0	<u>2.50×10^0</u> c)
L4P-50	1180.7	122.0	1466.9	8.78×10^3	8.61×10^{-1}	1.92×10^0
L4P-40	1184.7	121.9	1471.8	8.84×10^3	1.04×10^0	2.28×10^0
L4P-30	1184.9	121.9	1472.0	8.85×10^3	1.10×10^0	2.41×10^0
L3P-50	1187.2	122.0	1475.1	8.80×10^3	8.05×10^{-1}	1.71×10^0
L3P-40	1187.8	122.0	1475.8	8.79×10^3	8.88×10^{-1}	1.91×10^0
L3P-30	1188.7	122.0	1477.0	8.80×10^3	9.77×10^{-1}	2.03×10^0
L2P-50	1187.4	122.1	1475.7	8.66×10^3	5.86×10^{-1}	1.50×10^0
L2P-40	1190.6	122.0	1479.6	8.71×10^3	6.91×10^{-1}	1.53×10^0
L2P-30	1188.8	122.0	1477.4	8.69×10^3	7.28×10^{-1}	1.69×10^0
L1P-50	1183.6	122.1	1471.3	8.53×10^3	3.33×10^{-1}	1.08×10^0
L1P-40	1187.9	122.1	1476.6	8.56×10^3	3.51×10^{-1}	8.84×10^{-1}
L1P-30	1187.0	122.1	1475.5	8.55×10^3	3.69×10^{-1}	1.13×10^0
LL1P-50	1180.2	122.2	1467.3	8.45×10^3	1.39×10^{-1}	5.27×10^{-1}
LL1P-40	1182.7	122.1	1470.4	8.47×10^3	1.25×10^{-1}	4.56×10^{-1}
LL1P-30	1181.8	122.1	1469.3	8.46×10^3	1.45×10^{-1}	5.76×10^{-1}

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-6 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心 L5.5P-30 炉心）

（ケース B） 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	1174.6	121.9	1459.3	8.80E+03	1.09E+00	2.50E+00	—
U 重量 6%減少	1175.5	121.9	1460.4	8.84E+03	1.16E+00	2.66E+00	1.07
β_{eff} 8%減少	1120.1	122.0	1392.5	8.33E+03	1.03E+00	2.37E+00	0.95
β_{eff} 8%増加	1227.2	121.9	1523.8	9.26E+03	1.15E+00	2.63E+00	1.05
ℓ 8%減少	1174.6	121.9	1459.3	8.80E+03	1.09E+00	2.50E+00	1.00
ℓ 8%増加	1174.7	121.9	1459.4	8.80E+03	1.09E+00	2.50E+00	1.00
温度係数 32%減少	1170.6	122.0	1454.7	8.62E+03	1.07E+00	2.45E+00	0.98
温度係数 32%増加	1178.7	121.9	1464.0	8.98E+03	1.12E+00	2.55E+00	1.02

a),b)は表 2-3-5 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-5 の結果と同じ

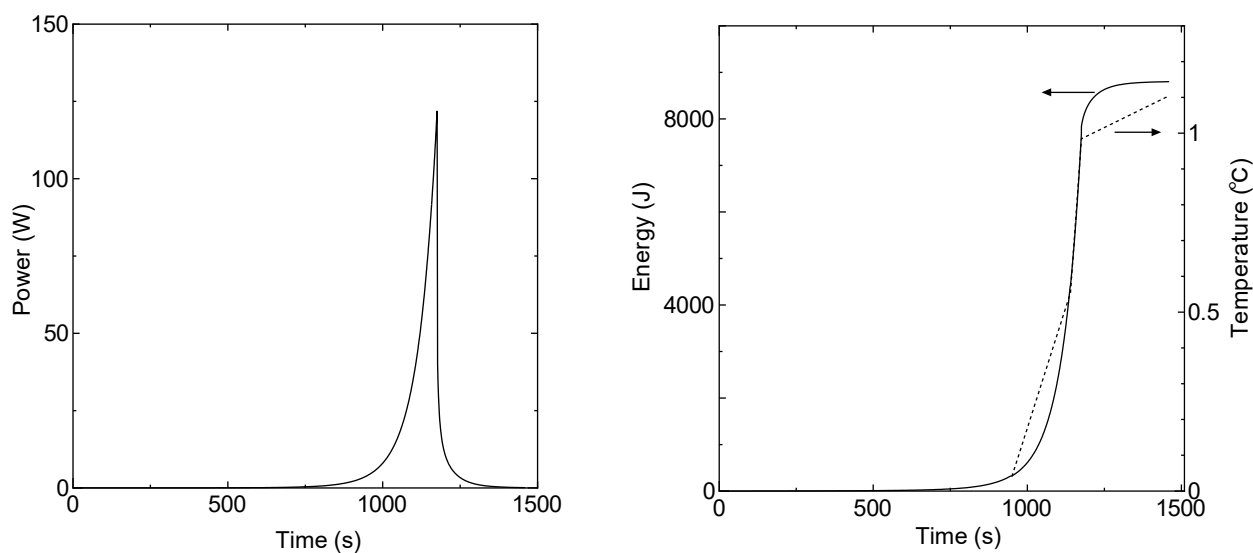


図 2-3-3 L5.5P-30 炉心 出力変化

実験物の異常等による反応度の付加（ケース B ランプ状反応度添加）

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-7 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心）

【ケース B（ランプ状反応度印加）】

炉心名称	列	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	960.1	122.7	1228.2	6.84×10^3	9.98×10^{-2}	2.53×10^{-1}
	5	960.1	122.7	1228.2	6.84×10^3	1.03×10^{-1}	2.45×10^{-1}
C35G0	4	961.8	122.7	1230.4	6.86×10^3	1.39×10^{-1}	3.16×10^{-1}
	5	961.1	122.7	1229.5	6.86×10^3	1.38×10^{-1}	3.18×10^{-1}
C45G0	4	960.3	122.7	1228.5	6.88×10^3	2.00×10^{-1}	3.97×10^{-1}
	5	960.3	122.7	1228.4	6.87×10^3	1.95×10^{-1}	4.12×10^{-1}
C60G0	4	955.6	122.7	1222.6	6.82×10^3	1.88×10^{-1}	3.42×10^{-1}
	5	955.6	122.7	1222.5	6.82×10^3	1.85×10^{-1}	3.50×10^{-1}
C45G (2H ₂ O)	4	956.4	122.7	1223.6	6.83×10^3	2.06×10^{-1}	5.41×10^{-1} ^{c)}
C45G (5H ₂ O)		947.5	122.7	1212.3	6.73×10^3	1.57×10^{-1}	5.21×10^{-1}
C45G (6H ₂ O)		947.1	122.8	1211.9	6.71×10^3	1.42×10^{-1}	4.66×10^{-1}
C45G (7H ₂ O)		947.9	122.7	1212.9	6.72×10^3	1.30×10^{-1}	4.12×10^{-1}
C45G (10H ₂ O)		952.6	122.7	1218.8	6.77×10^3	1.11×10^{-1}	2.95×10^{-1}
C45G (15H ₂ O)		957.3	122.7	1224.7	6.82×10^3	1.02×10^{-1}	2.18×10^{-1}
C45G (2H ₂ O)	5	955.6	122.7	1222.5	6.82×10^3	2.05×10^{-1}	5.29×10^{-1}
C45G (5H ₂ O)		943.7	122.8	1207.5	6.66×10^3	1.60×10^{-1}	5.32×10^{-1}
C45G (6H ₂ O)		942.9	122.8	1206.5	6.66×10^3	1.44×10^{-1}	4.85×10^{-1}
C45G (7H ₂ O)		943.9	122.8	1207.8	6.67×10^3	1.31×10^{-1}	4.35×10^{-1}
C45G (10H ₂ O)		949.4	122.7	1214.8	6.73×10^3	1.11×10^{-1}	3.21×10^{-1}
C45G (15H ₂ O)		955.7	122.7	1222.7	6.80×10^3	1.01×10^{-1}	2.40×10^{-1}
C60G (2H ₂ O)	4	950.8	122.7	1216.5	6.77×10^3	1.83×10^{-1}	4.76×10^{-1}
C60G (5H ₂ O)		943.6	122.8	1207.3	6.68×10^3	1.38×10^{-1}	4.24×10^{-1}
C60G (7H ₂ O)		945.0	122.8	1209.2	6.69×10^3	1.17×10^{-1}	3.31×10^{-1}
C60G (10H ₂ O)		949.6	122.7	1215.0	6.74×10^3	1.03×10^{-1}	2.39×10^{-1}
C60G (15H ₂ O)		953.4	122.7	1219.8	6.78×10^3	9.62×10^{-2}	1.80×10^{-1}

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-3-8 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心 C45G(2H₂O) 4 列炉心）

(ケース B) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	956.4	122.7	1223.6	6.83E+03	2.06E-01	5.41E-01 ^{c)}	—
U 重量 6%減少	956.5	122.7	1223.7	6.83E+03	2.19E-01	5.74E-01	1.06
β _{eff} 8%減少	911.0	122.8	1166.0	6.44E+03	1.94E-01	5.11E-01	0.94
β _{eff} 8%増加	1000.2	122.6	1279.1	7.21E+03	2.18E-01	5.71E-01	1.06
ℓ 8%減少	956.4	122.7	1223.5	6.83E+03	2.06E-01	5.41E-01	1.00
ℓ 8%増加	956.5	122.7	1223.6	6.83E+03	2.06E-01	5.41E-01	1.00
温度係数 32% 減少	956.0	122.7	1223.1	6.81E+03	2.06E-01	5.40E-01	1.00
温度係数 32% 増加	956.8	122.7	1224.0	6.85E+03	2.07E-01	5.43E-01	1.00

a),b)は表 2-3-7 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-7 の結果と同じ

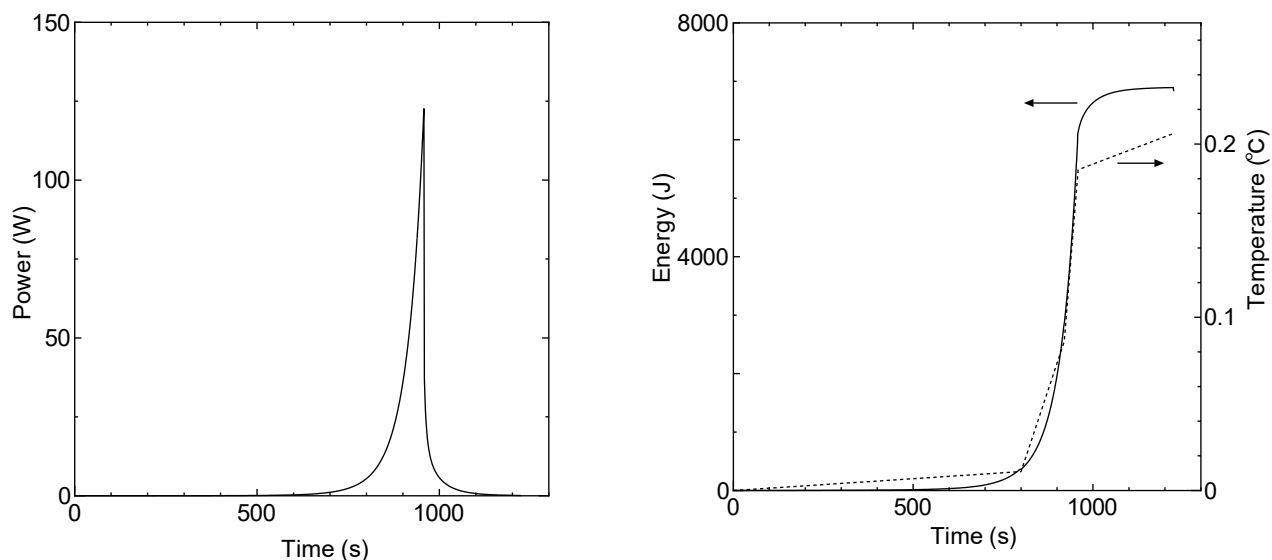


図 2-3-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化

実験物の異常等による反応度の付加（ケース B ランプ状反応度添加）

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

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

2-4-1 解析シナリオ

(1) 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

$1\% \Delta k/k$

(2) 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）

(3) 解析条件

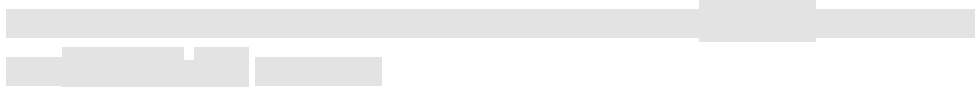
- ・ 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により制御棒が落下。ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できないとする。
- ・ 商用電源喪失から 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。「過剰反応度 - (全制御棒反応度 - 最大 1 本の反応度)」の未臨界度となる。すなわち、固体減速炉心では「 $+0.35 - (1.35 - 0.45) = -0.55\% \Delta k/k$ 」の未臨界度、軽水減速炉心では「 $+0.5 - (1.5 - 0.5) = -0.5\% \Delta k/k$ 」の未臨界度となる。
- ・ 固体減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

反応度が加わり、1% $\Delta k/k$ だけ深い未臨界度となる。

- ・ 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り、1% $\Delta k/k$ だけ深い未臨界度となる。
- ・ 商用電源喪失後の 1 時間後までの積算熱量（炉心の出力と核分裂生成物の崩壊熱の合計）を求める。

(4) 解析条件

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「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」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定したすべての代表炉心（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8（下中央のページ番号）の表 2、p 26（下中央のページ番号）の表 8）



2-4-2 解析結果

結果を表 2-4-1 に、出力変化、積算出力、温度変化を図 2-4-1～図 2-4-5 に示す。L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は約 0.74°C、C45G(6H₂O)炉心で燃料温度上昇は約 0.24°Cであり判定基準値を満たしている。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、反応度温度係数の誤差（32%）を検討したときの結果を表 2-4-2 と表 2-4-3 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6%高くなる。 β_{eff} と λ が各々 8%の誤差を持った場合（もう一方は誤差無し）の結果より、 λ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が L5.5P-30 炉心で 2%、C45G(6H₂O)炉心で 3%上昇する。反応度温度係数の誤差も燃料温度には影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は L5.5P-30 炉心で約 1.08 倍（1.06×1.02）の 0.80°C（0.74×1.08）、C45G(6H₂O)炉心で約 1.09 倍（1.06×1.03）の 0.26°C（0.24×1.09）となるだけなので判定基準値を満たしている。

表 2-4-1 商用電源喪失

炉心名称	0.1W までの時間 (s)	炉心 積算出力 (J)	FP 崩壊 積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
L5.5P-30	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01
C45G(2H ₂ O) 4 列	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数を掛ける

表 2-4-2 商用電源喪失 (L5.5P-30 炉心)

誤差の影響

	0.1W までの時間 (s)	炉心 積算出力 (J)	FP 崩壊 積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	—
U 重量を 6%減少	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.50E-01	8.02E-01	1.06
β_{eff} を 8%減少	245.7	9.38E+02	1.61E+03	3.16E-01	9.75E-01	0.98
β_{eff} を 8%増加	260.7	1.07E+03	1.61E+03	3.32E-01	7.61E-01	1.02
l を 8%減少	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
l を 8%増加	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
温度係数を 32% 減少	253.5	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
温度係数を 32% 増加	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00

a) 表 2-4-1 と同じ

b) 表 2-4-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-4-1 の結果と同じ

表 2-4-3 商用電源喪失 (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

誤差の影響

	0.1W までの時間 (s)	炉心 積算出力 (J)	FP 崩壊 積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	—
U 重量を 6%減少	262.2	1.36E+03	1.61E+03	9.69E-02	2.55E-01	1.06
β _{eff} を 8%減少	254.2	1.27E+03	1.61E+03	8.71E-02	2.29E-01	0.97
β _{eff} を 8%増加	269.9	1.45E+03	1.61E+03	9.23E-02	2.42E-01	1.03
ℓ を 8%減少	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
ℓ を 8%増加	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
温度係数を 32% 減少	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
温度係数を 32% 増加	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00

a) 表 2-4-1 と同じ

b) 表 2-4-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-4-1 の結果と同じ

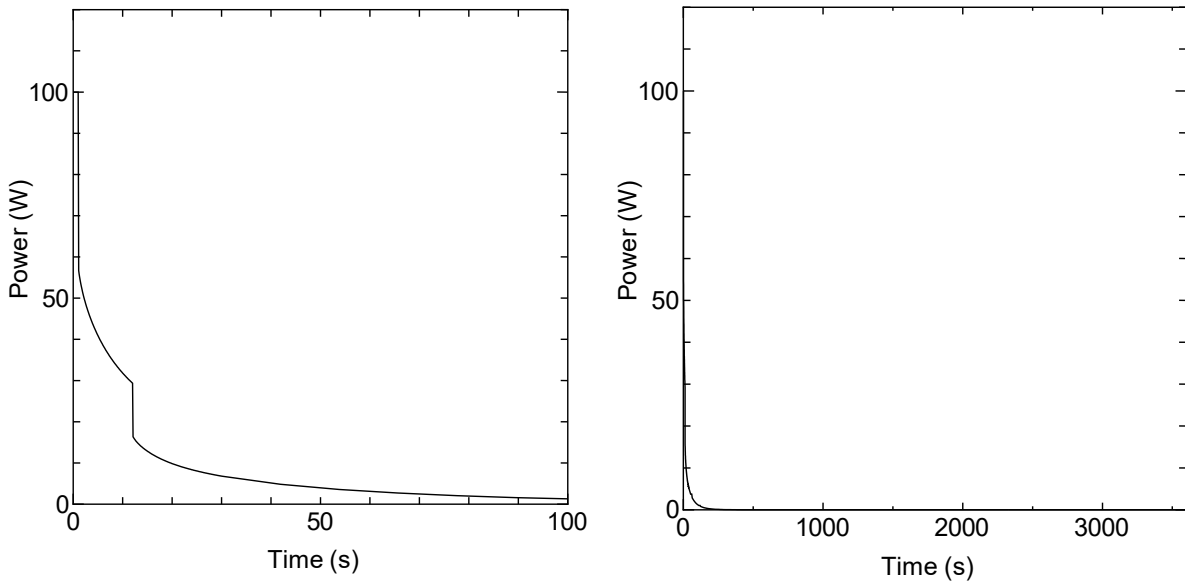


図 2-4-1 L5.5P-30 炉心 商用電源喪失時の出力変化
(左 : 100 秒まで、右 : 3600 秒まで)

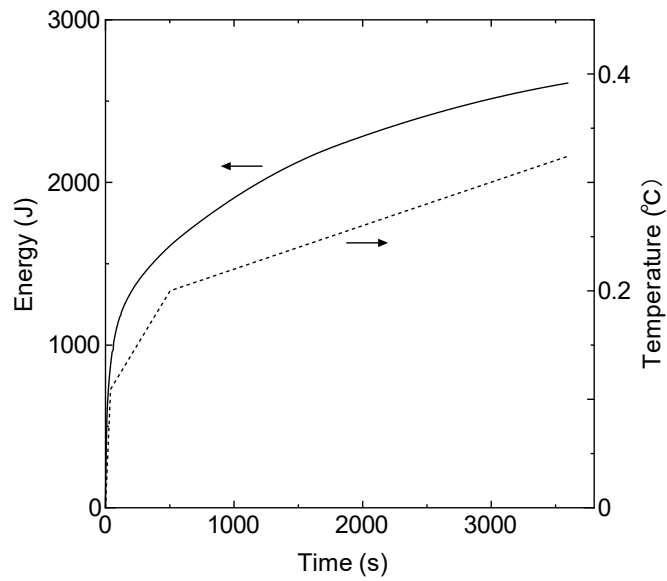


図 2-4-2 L5.5P-30 炉心
商用電源喪失時の積算出力(炉心+FP)

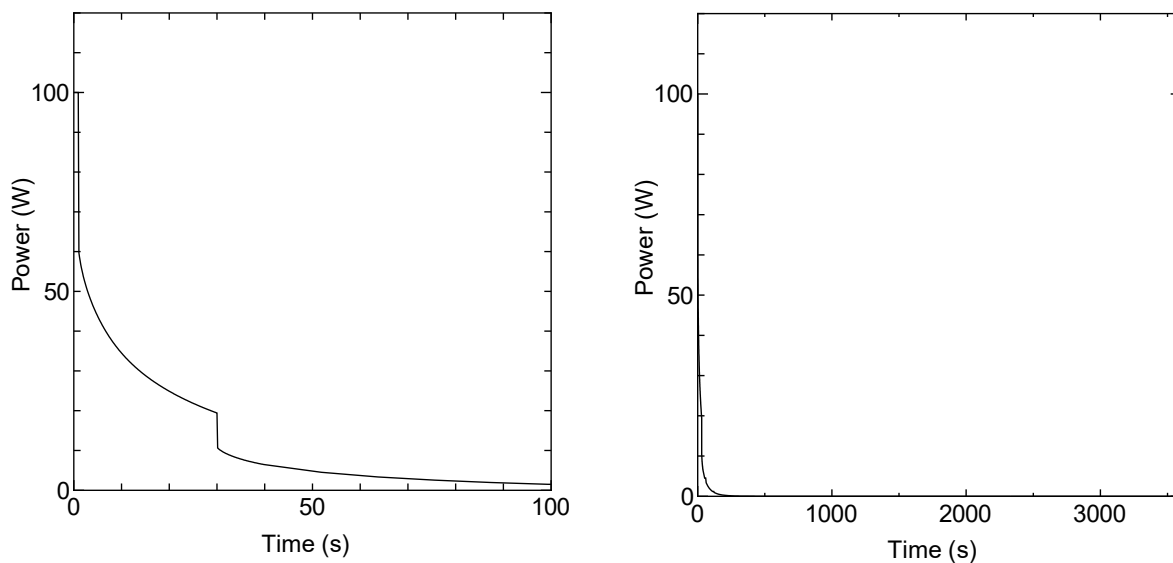


図 2-4-3 C45G(2H₂O) 4 列炉心 商用電源喪失時の出力変化
(左 : 100 秒まで、右 : 3600 秒まで)

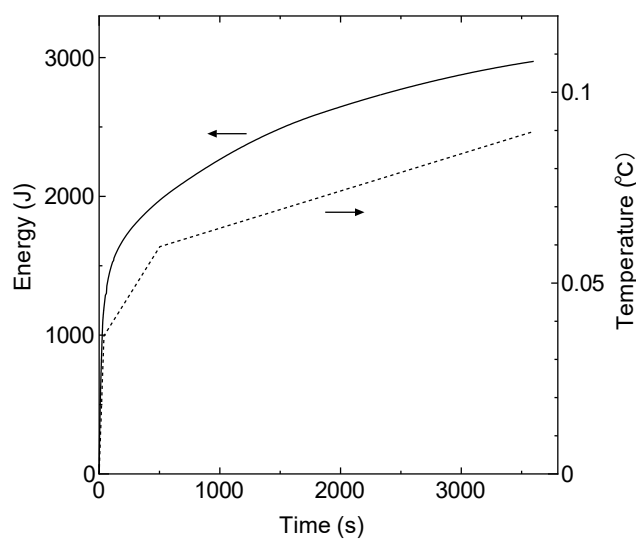


図 2-4-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心
商用電源喪失時の積算出力(炉心+FP)

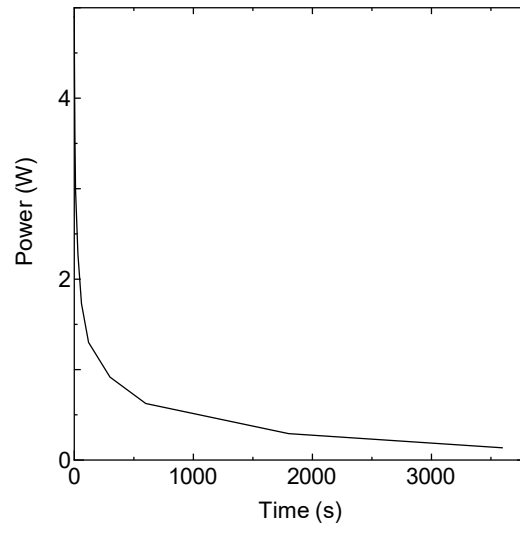


図 2-4-5 FP からの発熱 出力変化

2-5 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。

2-5-1 解析シナリオ

(1) 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

$$1.35 \times 1/3 = 0.45 \text{ \%} \Delta k/k$$

(2) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力計は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

(3) 中性子発生量

【ケース A】

- ・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で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。設置申請書に記載された最大中性子発生量はパルス状中性子発生装置が 5×10^{10} n/s、中性子発生設備が 10^{11} n/s であり、中性子発生は等方であるとする。炉心外側に設置された中性子発生ターゲットから炉心方向に 1/2 の中性子が到達する可能性がある。ここでは中性子発生量の多い中性子発生設備の場合の $10^{11} \times 1/2 = 5 \times 10^{10}$ n/s が出力上昇に寄与する中性子数（以下、中性子発生量）と考える。

【ケース B】

- ・炉心ごとに中性子発生量をケース A の最大値から減少させ、燃料温度が最大となるような中性子発生量を求めて解析を行う。

(4) 解析条件

- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。

- ・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。
- ・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。
- ・線型出力計の指示値が 120%（出力が 120W）に至らない場合には出力上昇後 1 時間（3600 秒）を経過した段階で運転員が手動スクラムボタンを押し、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。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、固体減速炉心では $1.35 - 0.45 = 0.9 \% \Delta k/k$ の負の反応度が加わり出力は低下する。 $(0.35 - 0.9 = -0.55 \% \Delta k/k$ の未臨界状態となる) (ただし、温度変化による反応度を考慮しない場合)
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。中心架台は作動しないとする。

(5) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心について「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」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定したすべての代表炉心を対象とし（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p8（下中央のページ番号）の表 2）、燃料の最高温度が最大となる炉心について誤差を考慮するなどの詳しい解析を行う。

2-5-2 解析結果

ケース A

結果を表 2-5-1 に示す。燃料温度が最も高くなったのが L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は約 0.15°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-5-1 に示す）。線型出力系の指示値が 120% を超えてスクラム信号が発生する場合であり、この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.0003 \% \Delta k/k$ の反応度が加わるので、「初期状態の反応度 + 温度上昇による反応度 - (全制御棒反応度 - 既に挿入されていた反応度 - 最大 1 本の反応度)」、すなわち、「 $0.0 - 0.0003 - (1.35 - 0.35 - 0.45) = -0.5503 \% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差（32%）を検討したときの結果を表 2-5-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。

β_{eff} と ρ が各々 8% の誤差を持った場合(もう一方は誤差無し)の結果より、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 21% 上昇する。反応度温度係数の誤差はほとんど影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.28 倍 (1.06×1.21) の 0.19°C ($0.15^{\circ}\text{C} \times 1.28$) となるだけなので判定基準値を満たしている。

ケース B

ケース B の解析を行う前に、中性子発生量を変化させたときの出力変化の違いについて、熱容量が小さい L5.5P-30 炉心と、それより熱容量が大きい LL1P-30 炉心について調べた結果を表 2-5-3 に示す。(L5.5P-30 炉心については中性子発生量を変化させた時の出力、積算出力、温度の時間変化を図 2-5-2～図 2-5-5 に示す)

L5.5P-30 炉心では、中性子発生量が小さい場合にはゆっくりと出力が上昇し、温度上昇に伴って未臨界となるため出力は最大となった後に減少して 1 時間後に手動スクラムして停止することになる。中性子発生量が大きくなると最大出力は大きくなり燃料の温度上昇も大きくなる。しかし中性子発生量が 0.072 倍になると最大出力が 120W を超えて、その時点でスクラムして停止するため積算出力としては小さくなってしまふ。さらに中性子発生量が増加すると 120W に至るまでの時間が短くなるため積算出力はさらに小さくなって温度上昇量も小さくなる。

LL1P-30 炉心でも同じような傾向を示し、中性子発生量が増えると温度上昇が大きくなるが、中性子発生量が 0.0128 倍になると最大出力が 120W を超えて、その時点でスクラムして停止するため積算出力としては小さくなってしまふ。さらに中性子発生量が増加すると 120W に至るまでの時間が短くなるため積算出力はさらに小さくなって温度上昇量も小さくなる。L5.5P-30 炉心と比べると LL1P-30 炉心のほうが熱容量が大きいいため負の温度係数の影響を受けにくく、LL1P-30 炉心では中性子発生量が少なくても最大出力が 120W を超えるまで出力が上昇することになる。

以上の結果より、中性子発生量を調整して出力の最大値が 120W より少しだけ低くなる場合 (120W のスクラムに至らない場合) と、それより中性子発生量が少しだけ大きくなった場合 (120W のスクラムに至る場合) について調べると、出力の最大値が 120W より少しだけ低くなる場合に温度上昇量が最も大きくなり、中性子発生量がそれより大きくても小さくても温度上昇は小さくなることが判った。

全ての炉心について最大値が 120W より少しだけ低くなる場合 (120W のスクラムに至らない場合) と、中性子発生量が少しだけ大きくなって 120W のスクラムに至る場合について調べた結果を表 2-5-4 に示す。燃料温度が最も高くなったのが L5.5P-30 炉心で中性子発生

量がケースAの 0.071 倍になった場合で、そのときの燃料温度上昇は 49.3℃であり判定基準値を満たしている。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により $-0.2\% \Delta k/k$ の反応度が加わるので、「初期状態の反応度+温度上昇による反応度-(全制御棒反応度-既に挿入されていた反応度-最大1本の反応度)」、すなわち、「 $0.0-0.2-(1.35-0.35-0.45)=-0.75\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

なお、最も温度上昇が高くなった中性子発生量 0.071 倍のケースから中性子発生量が少なくなると温度上昇量は単調に減少を確認することができた。(表 2-5-4(B))

L5.5-30 炉心について初期出力を 0.01W とし過渡解析を行っていたが、設定した初期出力が温度上昇に及ぼす影響について調べた。なお、初期出力を大きくすると同じ中性子発生量では 120W のスクラムに至る場合があるため中性子発生量は初期出力ごとに若干調整して 120W スクラムとならないようにしている。

表 2-5-6 に過渡解析の結果を示す。この結果より初期出力を変化させても温度上昇量はほとんど変化しないことが判る。初期出力が 0.01W と 1W の場合の出力変化を図 2-5-8 に、積算出力と温度変化を図 2-5-9 に示す(図 2-5-9 では 0.01W と 1W の結果はほとんど重なっている)。両者は過渡解析の初期段階では若干の違いがあるものの、大局的に見るとほとんど相違は見られないため温度上昇量(出力の積分値)もほとんど変化しないものと考えられる。

L5.5P-30 炉心で中性子発生量がケースAの 0.071 倍になった場合について、炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差を検討したときの結果を表 2-5-5 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は低くなる。 β_{eff} と ρ が各々 8% の誤差を持った場合の結果より、 β_{eff} と ρ の誤差があると燃料温度はほとんど変化しないか、または低くなる(β_{eff} が小さくなると出力は 120W まで出力が上昇してスクラムしている。)。反応度温度係数の誤差を考慮して温度係数を大きくしても小さくしても燃料温度上昇量は低くなる。これは温度係数が小さくなると負の反応度が小さくなるため出力の低下が起こりにくく、出力は 120W を超えてスクラムするため運転時間が短くなり積算出力は小さくなり、一方、温度係数が大きくなると出力低下が起こりやすくなって最大出力は 120W よりさらに低くなって積算出力も小さくなるためである。燃料温度係数の誤差を考慮した場合の出力、積算出力、温度の時間変化を図 2-5-6、図 2-5-7 に示す

従って、これらの誤差があったとしても燃料温度温度上昇量は低くなる。

表 2-5-1 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
(ケース A)

炉心名称	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	1.3	137.6	179.3	5.31E+02	5.89E-02	1.35E-01
L5.5P-40	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.42E-02	1.48E-01
L5.5P-30	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01 c)
L4P-50	1.4	137.2	182.1	5.47E+02	5.37E-02	1.20E-01
L4P-40	1.4	137.0	183.3	5.54E+02	6.52E-02	1.43E-01
L4P-30	1.4	137.0	183.3	5.54E+02	6.91E-02	1.51E-01
L3P-50	1.4	136.8	184.8	5.63E+02	5.15E-02	1.09E-01
L3P-40	1.4	136.7	185.5	5.67E+02	5.73E-02	1.23E-01
L3P-30	1.4	136.8	184.8	5.63E+02	6.25E-02	1.30E-01
L2P-50	1.5	136.6	186.4	5.72E+02	3.87E-02	9.92E-02
L2P-40	1.5	136.4	187.3	5.78E+02	4.59E-02	1.01E-01
L2P-30	1.5	136.5	186.7	5.74E+02	4.81E-02	1.12E-01
L1P-50	1.5	136.6	186.1	5.70E+02	2.23E-02	7.21E-02
L1P-40	1.5	136.4	187.6	5.79E+02	2.38E-02	5.98E-02
L1P-30	1.5	136.5	187.3	5.77E+02	2.49E-02	7.63E-02
LL1P-50	1.4	136.7	185.4	5.66E+02	9.34E-03	3.53E-02
LL1P-40	1.5	136.6	186.3	5.71E+02	8.45E-03	3.08E-02
LL1P-30	1.5	136.6	186.0	5.70E+02	9.76E-03	3.88E-02

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-5-2 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

(L5.5P-30) (ケースA) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	—
U 重量を 6%減少	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	7.02E-02	1.61E-01	1.06
β_{eff} を 8%減少	0.8	141.0	160.3	4.30E+02	5.34E-02	1.22E-01	0.81
β_{eff} を 8%増加	1.8	135.1	197.9	6.43E+02	7.99E-02	1.83E-01	1.21
ℓ を 8%減少	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00
ℓ を 8%増加	1.3	137.6	179.3	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00
温度係数を 32%減少	1.3	137.6	179.3	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00
温度係数を 32%増加	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00

a),b)は表 2-5-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-5-1 の結果と同じ

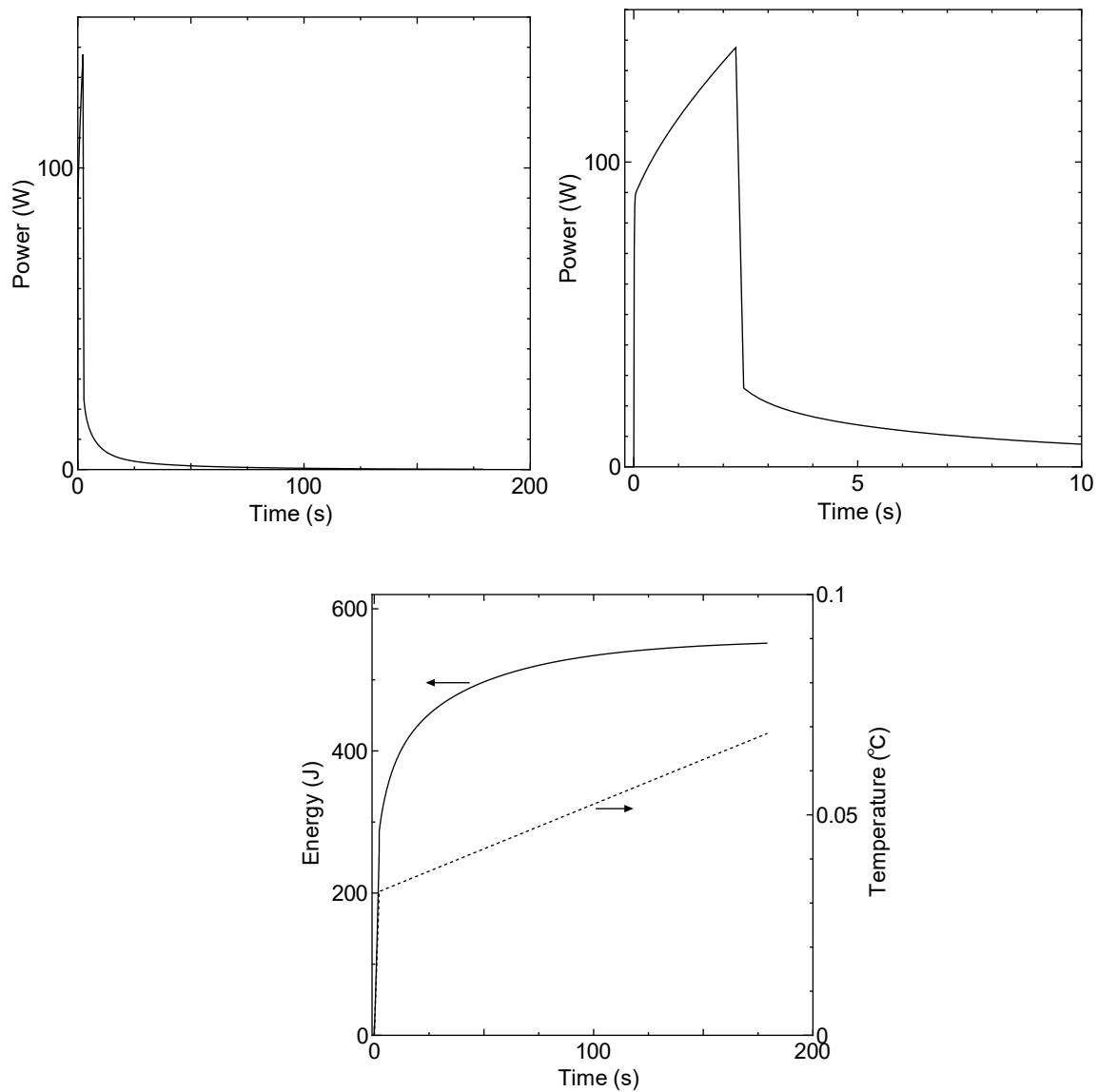


図 2-5-1 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用

L5.5P-30 炉心 (ケース A)

出力変化 (上、左右で横軸のスケールのみが異なる)、
 積算出力と温度変化 (右実線 : 出力、右点線 : 温度)

表 2-5-3 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
中性子発生量を変化させたとき

炉心名称	中性子発生量 (ケース A に対する比率) ^{a)}	120W 超 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	最大となる時間 (s) ^③	最大出力 (W) ^④	手動スクラム時の出力 (W) ^⑤	0.1W まで (s) ^⑥	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) ^{b)}
L5.5P-30	0.040	—	—	435.2	82.2	17.6	3806.4	1.30E+05	1.61E+01	3.69E+01
	0.071 ₂	—	—	351.7	119.9	23.3	3818.7	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01
	0.072	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69E+04	3.34E+00	7.66E+00
	0.080	238.1	120.2	—	—	—	599.2	1.99E+04	2.48E+00	5.67E+00
LL1P-30	0.008	—	—	2469.5	88.1	74.0	3947.4	2.34E+05	4.02E+00	1.60E+01
	0.012 ₄	—	—	2115.1	117.1	84.1	3957.5	3.16E+05	5.41E+00	2.15E+01
	0.012₈	2197.4	120.0	—	—	—	2582.7	1.76E+05	3.02E+00	1.20E+01
	0.016	1260.3	120.1	—	—	—	1643.7	8.61E+04	1.48E+00	5.86E+00
	0.024	758.5	120.1	—	—	—	1139.0	5.11E+04	8.75E-01	3.48E+00
	0.040	425.7	120.2	—	—	—	800.7	2.98E+04	5.11E-01	2.03E+00
	0.080	192.3	120.5	—	—	—	553.2	1.51E+04	2.58E-01	1.03E+00

a) ケース A の中性子発生量 ($5 \times 10^{10} \text{n/s}$) に対する比率 (例: 0.040 とは、 $5 \times 10^{10} \times 0.04 \text{n/s}$)

b) 説明

- ① 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合のスクラムに至るまでの時間
- ② 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合の最高出力
- ③ 出力が 120W まで上昇しない場合の出力が最大となるまでの時間
- ④ 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力
- ⑤ 手動スクラムして制御棒落下する直前の出力 (時間は 3601 秒)
- ⑥ 自動または手動スクラムをして出力が 0.1W まで低下する時間

c) 中性子発生量に欄で太字下線をつけたものは出力が 120W まで上昇してスクラムする場合、それ以外は 120W まで上昇せずに 1 時間後に手動スクラムで停止する場合

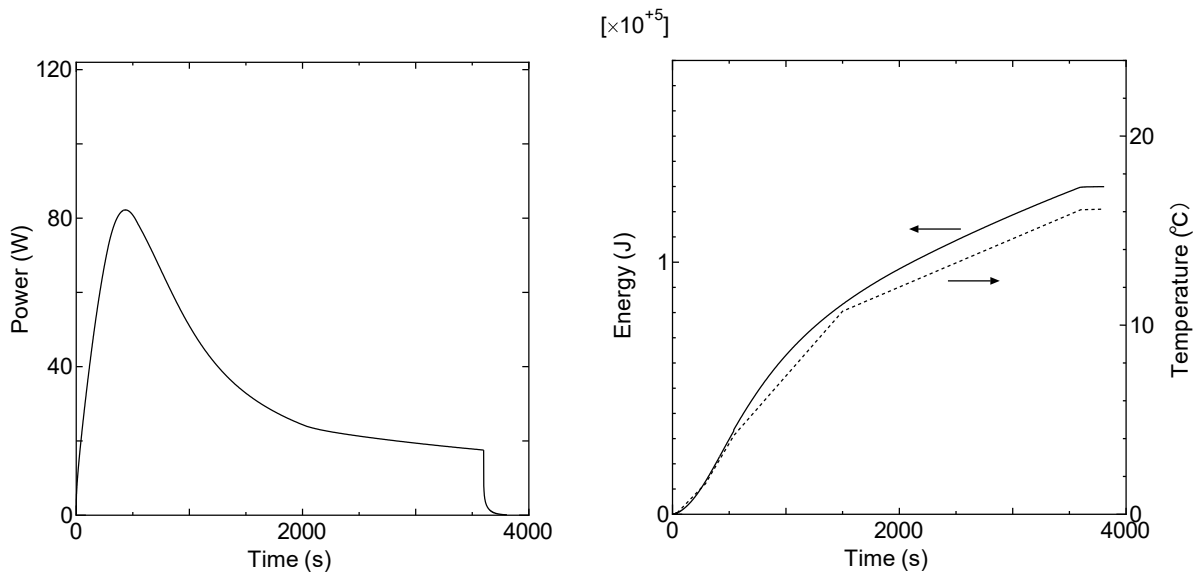


図 2-5-2 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の $\times 0.04$ 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線 : 出力、右点線 : 温度)

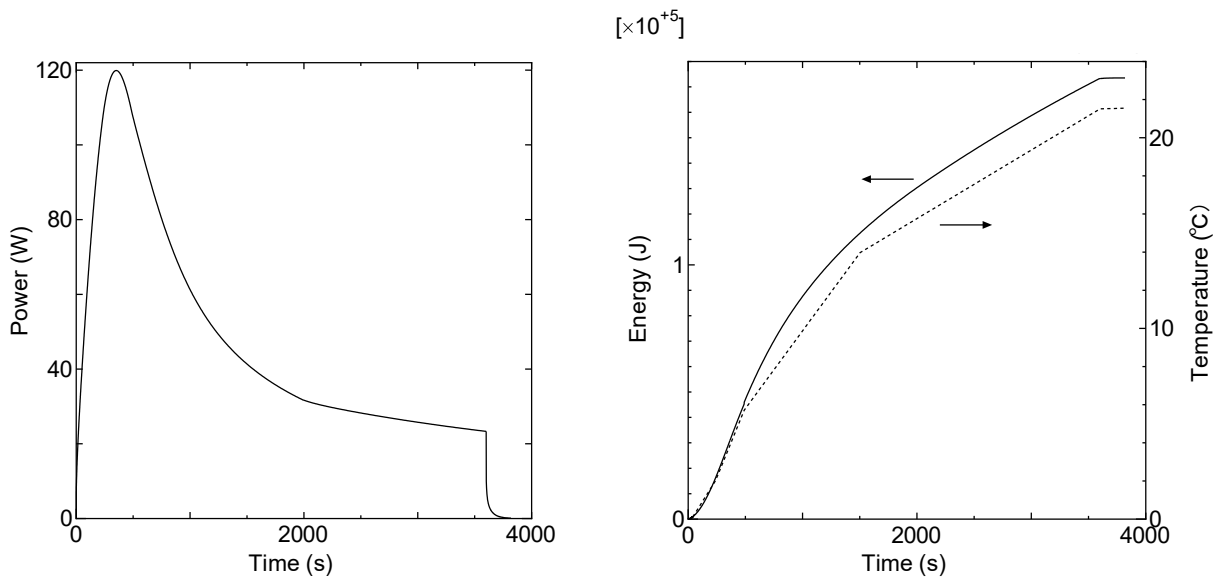


図 2-5-3 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の $\times 0.071$ 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線 : 出力、右点線 : 温度)

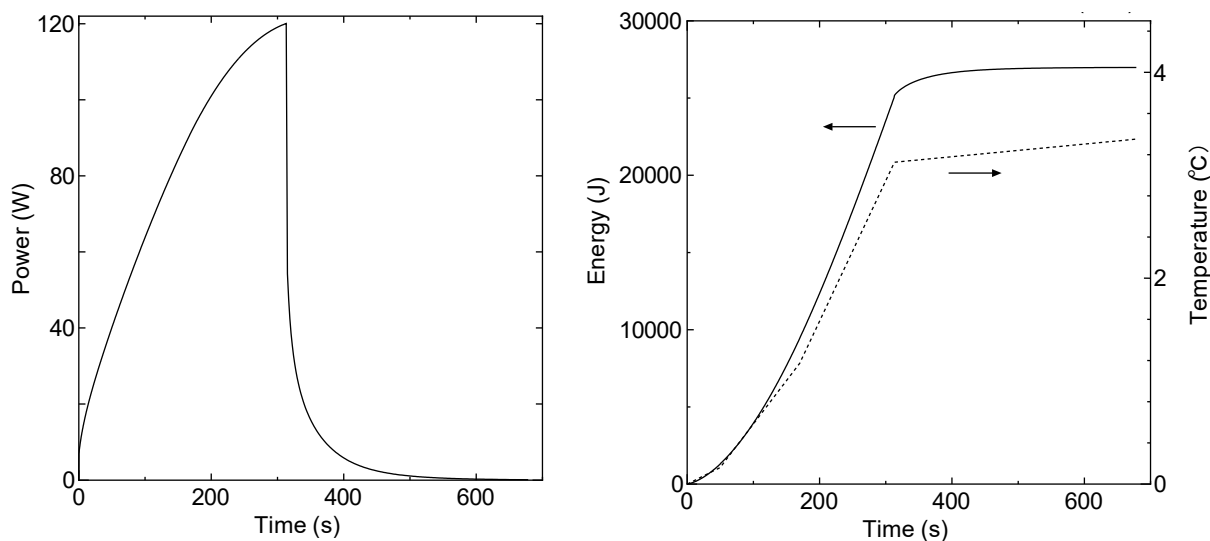


図 2-5-4 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の $\times 0.072$ 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線 : 出力、右点線 : 温度)

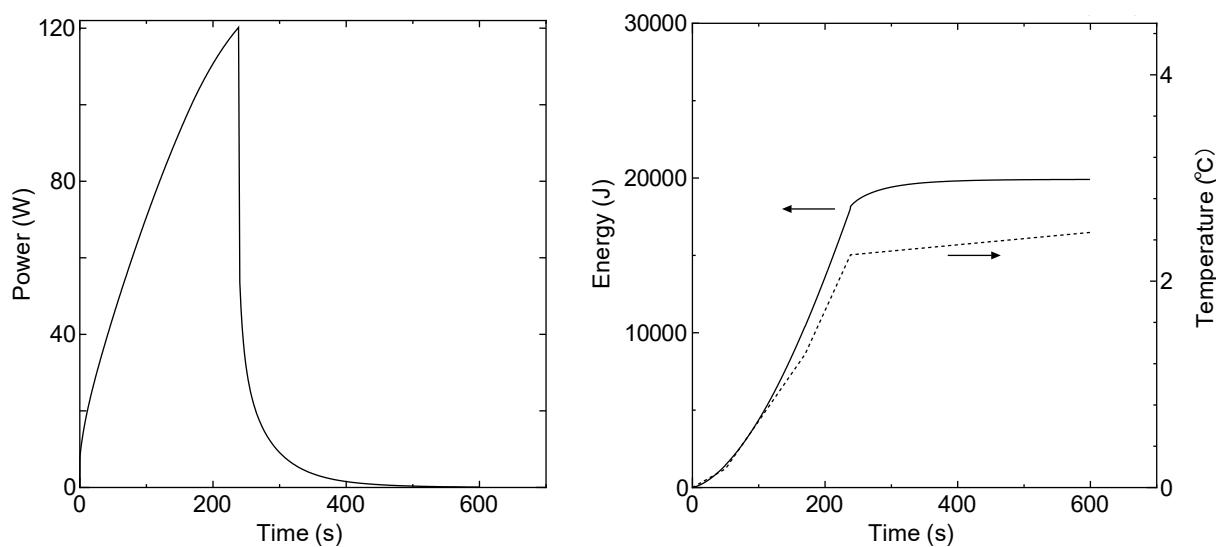


図 2-5-5 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の $\times 0.08$ 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線 : 出力、右点線 : 温度)

表 2-5-4 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

【ケース B 中性子発生量を変更した場合】

炉心名称	中性子発生量 (倍率) ^{a)}	120W 超 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	最大となる時間 (s) ^③	最大出力 (W) ^④	手動スクラム時の出力 (W) ^⑤	0.1W まで (s) ^⑥	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C)
L5.5P-50	0.070	—	—	355.0	119.0	23.2	3818.8	1.73E+05	1.92E+01	4.39E+01
	<u>0.071</u>	295.5	120.1	—	—	—	660.9	2.52E+04	2.80E+00	6.41E+00
L5.5P-40	0.072	—	—	347.1	119.7	23.1	3817.6	1.72E+05	2.08E+01	4.78E+01
	<u>0.073</u>	312.4	120.1	—	—	—	678.8	2.72E+04	3.28E+00	7.55E+00
L5.5P-30	0.071	—	—	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	<u>4.93E+01</u> ^{d)}
	<u>0.072</u>	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69E+04	3.34E+00	7.66E+00
L4P-50	0.065	—	—	392.3	119.9	24.2	3825.9	1.84E+05	1.80E+01	4.03E+01
	<u>0.066</u>	344.6	120.1	—	—	—	714.3	2.92E+04	2.86E+00	6.40E+00
L4P-40	0.067	—	—	380.8	119.7	23.9	3824.3	1.81E+05	2.13E+01	4.67E+01
	<u>0.068</u>	339.0	120.1	—	—	—	709.2	2.89E+04	3.40E+00	7.46E+00
L4P-30	0.067	—	—	377.8	118.9	23.6	3823.3	1.79E+05	2.24E+01	4.88E+01
	<u>0.068</u>	357.2	120.0	—	—	—	728.2	3.10E+04	3.87E+00	8.44E+00
L3P-50	0.061	—	—	420.2	118.8	24.7	3831.0	1.87E+05	1.71E+01	3.64E+01
	<u>0.062</u>	393.7	120.0	—	—	—	767.1	3.37E+04	3.08E+00	6.54E+00
L3P-40	0.060	—	—	428.5	118.9	25.0	3832.4	1.89E+05	1.91E+01	4.09E+01
	<u>0.061</u>	397.7	120.0	—	—	—	771.4	3.38E+04	3.42E+00	7.34E+00
L3P-30	0.061	—	—	423.9	119.5	25.0	3832.2	1.89E+05	2.10E+01	4.36E+01
	<u>0.062</u>	379.6	120.1	—	—	—	752.8	3.20E+04	3.55E+00	7.39E+00
L2P-50	0.045	—	—	579.5	119.3	29.0	3853.6	2.12E+05	1.44E+01	3.68E+01
	<u>0.046</u>	520.3	120.0	—	—	—	898.2	4.24E+04	2.87E+00	7.35E+00
L2P-40	0.048	—	—	544.3	119.5	28.3	3850.4	2.07E+05	1.65E+01	3.64E+01
	<u>0.049</u>	488.7	120.0	—	—	—	866.5	4.00E+04	3.18E+00	7.04E+00
L2P-30	0.047	—	—	550.9	118.6	28.2	3850.3	2.07E+05	1.73E+01	4.03E+01
	<u>0.048</u>	511.5	120.0	—	—	—	889.4	4.23E+04	3.55E+00	8.23E+00
L1P-50	0.029	—	—	914.6	118.9	37.3	3882.5	2.52E+05	9.85E+00	3.19E+01
	<u>0.030</u>	793.8	120.0	—	—	—	1175.0	6.12E+04	2.39E+00	7.74E+00
L1P-40	0.029	—	—	926.3	119.7	37.8	3884.6	2.55E+05	1.05E+01	2.63E+01
	<u>0.030</u>	784.0	120.0	—	—	—	1166.0	5.99E+04	2.46E+00	6.19E+00
L1P-	0.028	—	—	949.5	117.8	37.7	3885.5	2.53E+05	1.09E+01	3.35E+01

30	<u>0.029</u>	869.2	120.0	—	—	—	1252.7	6.83E+04	2.95E+00	9.03E+00
LL1P-	0.014	—	—	1884.3	118.4	73.1	3945.0	3.15E+05	5.20E+00	1.96E+01
50	<u>0.015</u>	1511.7	120.0	—	—	—	1895.5	1.09E+05	1.80E+00	6.80E+00
LL1P-	0.013	—	—	2039.1	118.3	80.4	3953.8	3.17E+05	4.69E+00	1.71E+01
40	<u>0.014</u>	1622.7	120.0	—	—	—	2007.4	1.17E+05	1.73E+00	6.29E+00
LL1P-	0.012	—	—	2139.5	114.6	83.4	3956.8	3.09E+05	5.30E+00	2.10E+01
30	<u>0.013</u>	1873.5	120.0	—	—	—	2258.4	1.40E+05	2.39E+00	9.50E+00

- a) ケース A の中性子発生量に対する倍率
- b) 各項目の説明は表 2-5-3 と同じ
- c) 中性子発生倍率に名称で下線をつけたものは出力が 120W まで上昇してスクラムする場合、それ以外は 120W まで上昇せずに手動スクラムで停止する場合
- d) 温度上昇が最大となる結果

表 2-5-4(B) 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
中性子発生量を変化させたとき

炉心名称	中性子発生量 (ケース A に対する比率) ^{a)}	最大となる時間 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	手動スクラム時の出力 (W) ^③	0.1W まで (s) ^④	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) ^{c)}
L5.5P -30	0.040	435.2	82.2	17.6	3806.4	1.30E+05	1.61E+01	3.69E+01
	0.055	385.2	101.2	20.5	3813.1	1.53E+05	1.90E+01	4.34E+01
	0.060	373.4	107.2	21.4	3815.0	1.59E+05	1.98E+01	4.53E+01
	0.065	363.1	113.0	22.3	3816.7	1.66E+05	2.06E+01	4.72E+01
	0.068	357.4	116.3	22.8	3817.7	1.70E+05	2.11E+01	4.82E+01
	0.069	355.6	117.5	23.0	3818.0	1.71E+05	2.12E+01	4.86E+01
	0.070	353.8	118.6	23.1	3818.3	1.72E+05	2.14E+01	4.89E+01
	0.071	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01

d) ケース A の中性子発生量 ($5 \times 10^{10} \text{n/s}$) に対する比率 (例: 0.040 とは、 $5 \times 10^{10} \times 0.04 \text{ n/s}$)

e) 説明

- ① 出力が 120W まで上昇しない場合の出力が最大となるまでの時間
- ② 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力
- ③ 手動スクラムして制御棒落下する直前の出力 (時間は 3601 秒)
- ④ 自動または手動スクラムをして出力が 0.1W まで低下する時間

f) 出力分布、燃料セル内での分布を考慮した温度

表 2-5-5 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
(L5.5P-30 炉心) (ケース A ×0.071 倍) 誤差の影響

	最大となる 時間 (s)	最大出力 (W)	手動スク ラム時の 出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01	
U 重量 6%減少	344.3	117.4	22.6	3815.6	1.68E+05	2.09E+01	4.78E+01	0.97
β_{eff} を 8%減少	<u>270.9</u> ^{e)}	<u>120.1</u>	—	<u>623.4</u>	<u>2.30E+04</u>	<u>2.86E+00</u>	<u>6.55E+00</u>	<u>0.13</u>
β_{eff} を 8%増加	371.2	117.1	23.3	3826.9	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01	1.00
ℓ を 8%減少	351.7	119.9	23.3	3818.7	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01	1.00
ℓ を 8%増加	351.7	119.9	23.3	3818.7	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01	1.00
温度係数を 32%減少	<u>255.0</u> ^{e)}	<u>120.2</u>	—	<u>617.7</u>	<u>2.06E+04</u>	<u>2.55E+00</u>	<u>5.84E+00</u>	<u>0.12</u>
温度係数を 32%増加	320.3	108.8	20.3	3805.2	1.51E+05	1.87E+01	4.29E+01	0.87

a),b)は表 2-5-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-5-4 の結果と同じ

e) 太字下線を付けた結果は出力が上昇して出力が 120W を超えてスクラムに至った場合。それ以外の結果はすべて出力は 120W まで至らずに出力が減少し、最終的に 3600 秒後に手動スクラムで停止した場合

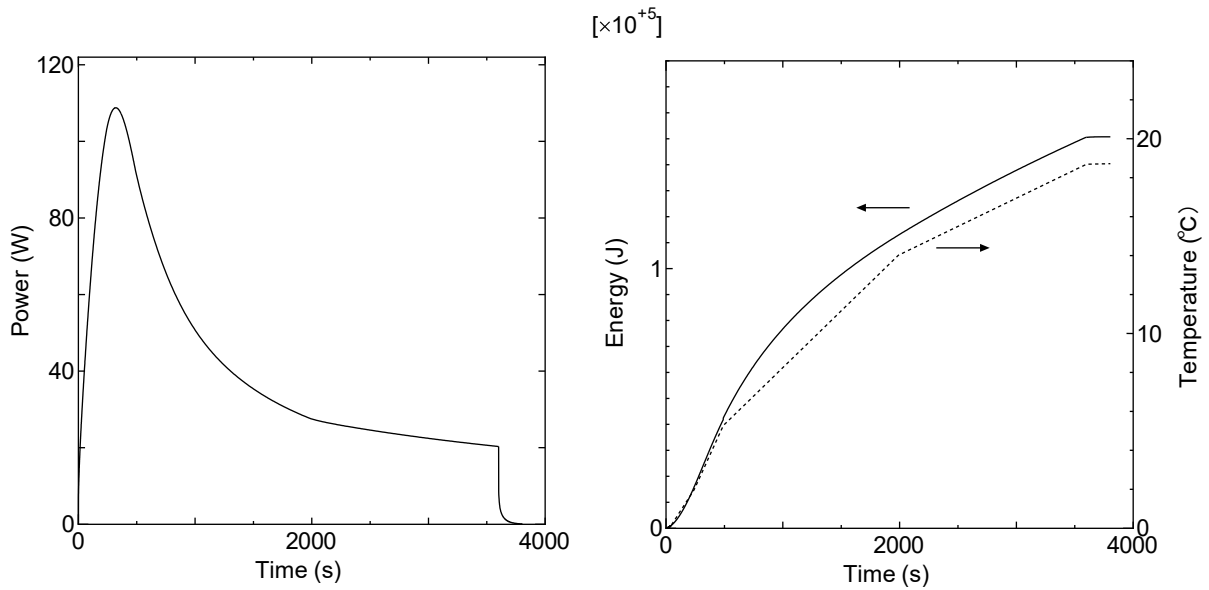


図 2-5-6 L5.5P-30 炉心 (ケース A $\times 0.071$ 倍)
 誤差考慮 (温度係数を 32% 増加)
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線: 出力、右点線: 温度)

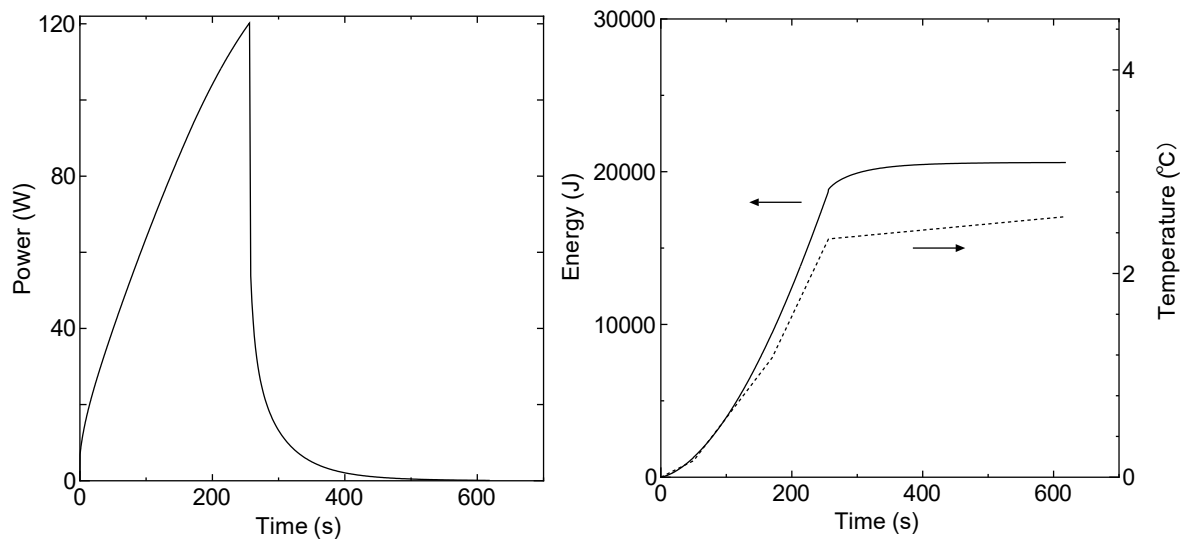


図 2-5-7 L5.5P-30 炉心 (ケース A $\times 0.071$ 倍)
 誤差考慮 (温度係数を 32% 減少)
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線: 出力、右点線: 温度)

表 2-5-6 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
初期出力を変化させたとき

炉心名称	初期出力 (W)	中性子発生量 (ケース A に対する比率) ^{a)}	最大となる時間 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	手動スクラム時の出力 (W) ^③	0.1W まで (s) ^④	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) ^{c)}
L5.5P -30	0.01	0.071	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	0.1	0.071	351.9	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	1	0.071	350.1	119.8	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	2	0.071	348.1	119.9	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	5	0.0707	342.5	119.8	23.2	3818.4	1.73E+05	2.15E+01	4.92E+01
	10	0.0701	333.2	119.9	23.1	3818.2	1.73E+05	2.14E+01	4.91E+01
	20	0.069	315.6	119.9	22.9	3817.7	1.71E+05	2.13E+01	4.87E+01

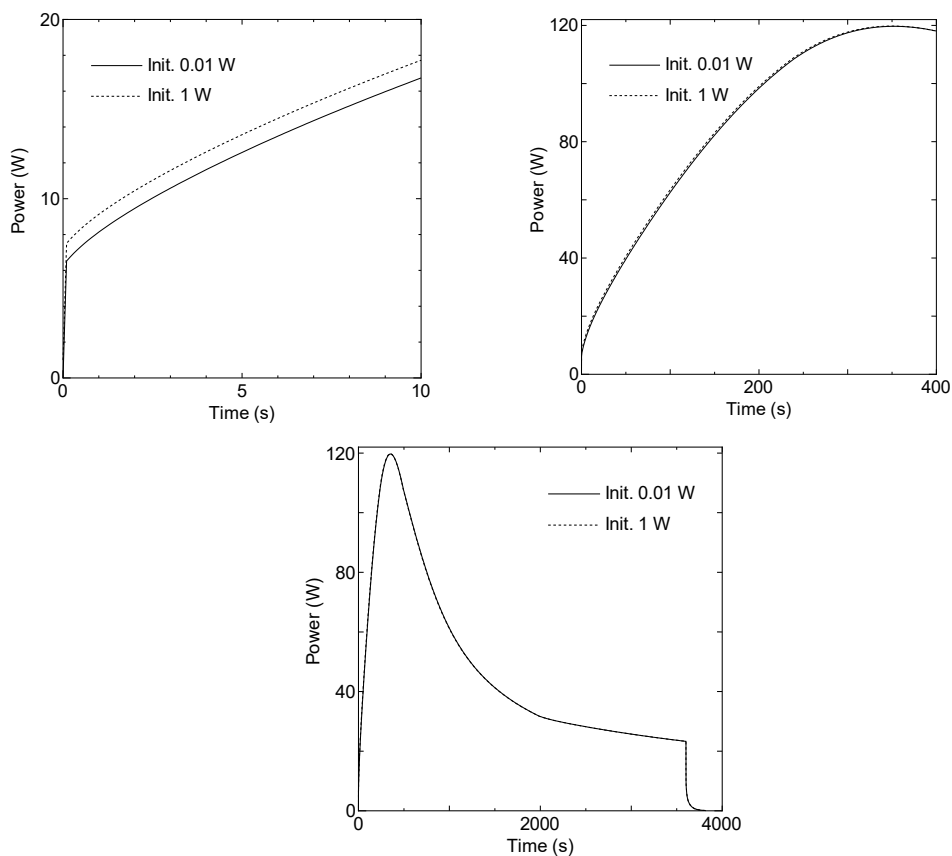


図 2-5-8 L5.5P-30 炉心 初期出力を変化させた時の出力変化
 (実線 : 0.01W、点線 1W) (3つの図は横軸のスケールのみの違い)

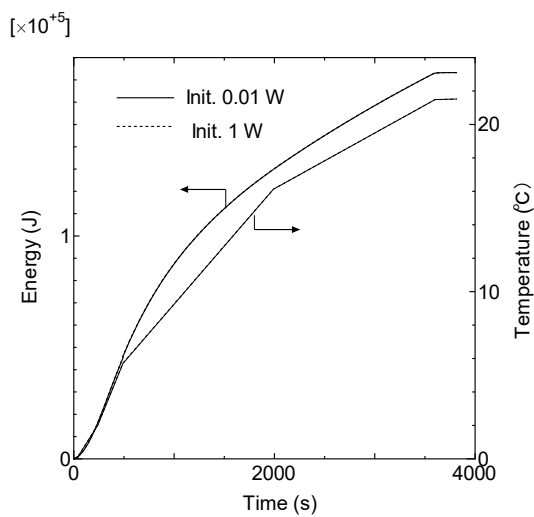


図 2-5-9 L5.5P-30 炉心 初期出力を変化させた時の積算出力と温度変化

2-5-3 補足

中性子発生量を少し変化させて現在示した結果が最大となることを確認する。

過渡解析で最も燃料温度が高くなった L5.5-30 炉心について、中性子発生量を変化させたときの解析結果を表 2-5-7 に示す。最も温度上昇が高くなった中性子発生量 0.071 倍のケースから中性子発生量が少なくなると温度上昇量は単調に減少することが確認することができた。

表 2-5-7 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
中性子発生量を変化させたとき

炉心名称	中性子発生量 (ケース A に対する比率) ^{a)}	最大となる時間 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	手動スクラム時の出力 (W) ^③	0.1W まで (s) ^④	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) ^{c)}
L5.5P -30	0.040	435.2	82.2	17.6	3806.4	1.30E+05	1.61E+01	3.69E+01
	0.055	385.2	101.2	20.5	3813.1	1.53E+05	1.90E+01	4.34E+01
	0.060	373.4	107.2	21.4	3815.0	1.59E+05	1.98E+01	4.53E+01
	0.065	363.1	113.0	22.3	3816.7	1.66E+05	2.06E+01	4.72E+01
	0.068	357.4	116.3	22.8	3817.7	1.70E+05	2.11E+01	4.82E+01
	0.069	355.6	117.5	23.0	3818.0	1.71E+05	2.12E+01	4.86E+01
	0.070	353.8	118.6	23.1	3818.3	1.72E+05	2.14E+01	4.89E+01
	0.071	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01

g) ケース A の中性子発生量 ($5 \times 10^{10} \text{n/s}$) に対する比率 (例: 0.040 とは、 $5 \times 10^{10} \times 0.04 \text{ n/s}$)

h) 説明

- ① 出力が 120W まで上昇しない場合の出力が最大となるまでの時間
- ② 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力
- ③ 手動スクラムして制御棒落下する直前の出力 (時間は 3601 秒)
- ④ 自動または手動スクラムをして出力が 0.1W まで低下する時間

i) 出力分布、燃料セル内での分布を考慮した温度

過渡解析において、初期出力を変更したときの影響について確認する。

L5.5-30 炉心について、初期出力を 0.01W として過渡解析を行っていたが、設定した初期出力が温度上昇に及ぼす影響について調べた。なお、初期出力を大きくすると同じ中性子発生量では 120W のスクラムに至る場合があるため中性子発生量は初期出力ごとに若干調整して 120W スクラムとならないようにしている。

表 2-5-8 に過渡解析の結果を示す。この結果より初期出力を変化させても温度上昇量はほとんど変化しないことが判る。初期出力が 0.01W と 1W の場合の出力変化を図 2-5-10 に、積算出力と温度変化を図 2-5-11 に示す(図 2-5-11 では 0.01W と 1W の結果はほとんど重なっている)。両者は過渡解析の初期段階では若干の違いがあるものの、大局的に見るとほとんど相違は見られないため温度上昇量(出力の積分値)もほとんど変化しないものと考えられる。

表 2-5-8 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
初期出力を変化させたとき

炉心名称	初期出力 (W)	中性子発生量 (ケース A に対する比率) a)	最大となる時間 (s) ① b)	最大出力 (W) ②	手動スクラム時の出力 (W) ③	0.1W まで (s) ④	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) c)
L5.5P-30	0.01	0.071	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	0.1	0.071	351.9	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	1	0.071	350.1	119.8	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	2	0.071	348.1	119.9	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	5	0.0707	342.5	119.8	23.2	3818.4	1.73E+05	2.15E+01	4.92E+01
	10	0.0701	333.2	119.9	23.1	3818.2	1.73E+05	2.14E+01	4.91E+01
	20	0.069	315.6	119.9	22.9	3817.7	1.71E+05	2.13E+01	4.87E+01

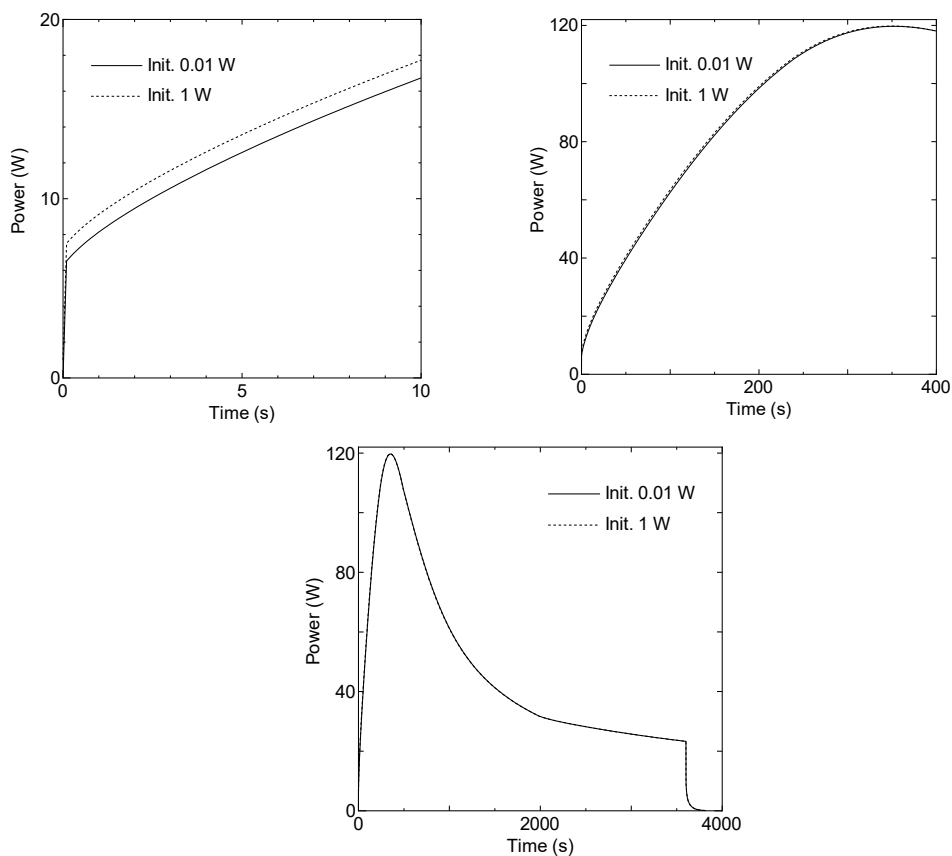


図 2-5-10 L5.5P-30 炉心 初期出力を変化させた時の出力変化
 (実線 : 0.01W、点線 1W) (3つの図は横軸のスケールのみの違い)

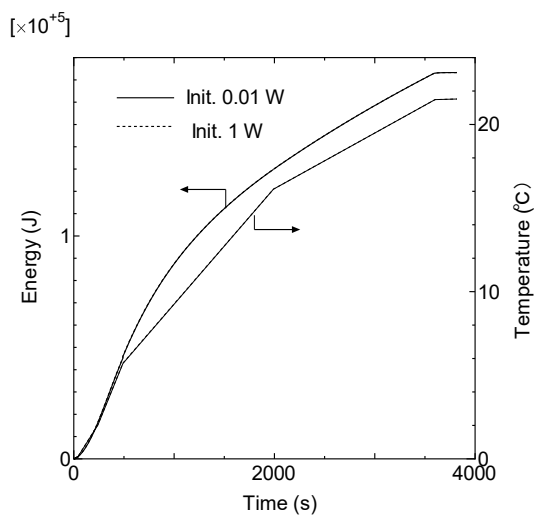


図 2-5-11 L5.5P-30 炉心 初期出力を変化させた時の積算出力と温度変化

パルス中性子源の現在の強度における評価結果に対して説明する。

中性子発生設備については設置変更申請書には最大中性子発生量 1×10^{11} n/s と記載されているが、これまでの実験での中性子発生量の最大値は約 1.2×10^9 n/s であった（2019年2月）。このときの加速器の運転条件等は以下の通り。

陽子エネルギー100MeV、電流値 1nA

ターゲットはタングステン

炉室内の中性子エリアモニタ指示値と中性子発生量との関係の校正定数から算出
なお、もう1つの加速器であるDT反応で中性子を発生させるパルス状中性子発生装置（コッククロフト型加速器）については、設置申請書に記載された最大中性子発生量 1×10^{10} n/s であるが、現状では 10^7 n/s 以下の中性子しか発生させることはできない。

中性子発生設備を使用するための加速器に関する現状のRI申請ではこの陽子エネルギーと電流値が最大であり、現在のところこの加速器の性能を向上させる予定は無い。

この中性子発生量の値は設置申請書に記載された最大値の約0.012倍であるので、この倍率を用いて添付書類10と同様の解析を行った（添付書類10では $\times 1.0$ と $\times 0.5$ の解析結果を示した）。

これまでの解析において温度上昇が最も大きくなったL5.5P-30炉心とL2-30炉心についての解析結果を表2-5-9に、L5.5P-30炉心の出力変化、積算出力、温度変化を図2-5-12に示す。

温度上昇については両炉心共にケースBの結果と比べて約1/10以下であった。

表 2-5-9 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
(中性子発生量減少 $\times 0.012$)

炉心名称	最大となる時間 (s) ③	最大出力 (W) ④	スクラム 時の出力 (W)	0.1W ま で (s) ⑤	積算出力 (J)	温度上昇 ($^{\circ}\text{C}$) ^{a)}	温度上昇 ($^{\circ}\text{C}$) ^{b)}
L5.5P-30	795.8	7.1	3.58	3725.4	1.82E+04	2.26E+00	5.17E+00
L2P-30	829.8	9.1	6.53	3767.1	2.45E+04	2.05E+00	4.77E+00

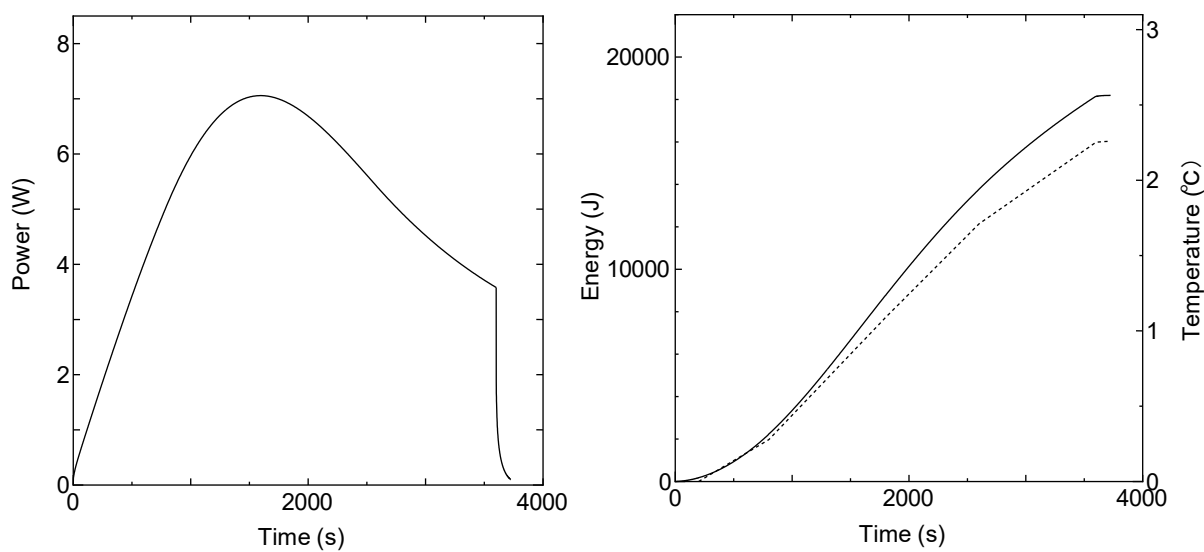


図 2-5-12 L5.5P-30 炉心

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)
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

2-6 炉心タンクヒータによる温度上昇

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。

炉心タンクヒータは図 2-6-1 の⑳で、設置変更申請書の本文には

ハ. 原子炉本体の構造及び設備

(1) 炉心

(i) 構造

炉心タンクには、水の加熱と保温のための電気ヒータを含むループを設ける。

と記載されているものである。出力 10kW の電気ヒータが設置されており、炉心タンクに給水した後に炉心タンク内の水をこの電気ヒータ系統にポンプで循環させて温度を上昇（保温）させることができる。

この電気ヒータを用いて炉心タンクの水温を上昇させるとする。

炉心タンクの容積：1m（半径）×1m×π×1.6m（水位）

水密度*）：0.99704 g/cm³（25℃）

定圧比熱容量*）：4.18 J/K/g（25℃） *）出典：理科年表（2015）

$$\text{温度上昇} : 10 \times 10^3 / (1.6 \pi \times 10^6 \times 0.99704 \times 4.18) = 4.78 \times 10^{-4} \text{ K/s}$$

2-6-1 解析シナリオ

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定した軽水減速炉心の中の反応度温度係数が正となる炉心とする（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 28（下中央のページ番号）の表 9）。反応度温度係数が正となる炉心は C45G(6H₂O)炉心など 4 つの炉心があり、その全ての炉心の解析を行う。

(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 1.5×1/3=0.5 %Δk/k

解析のために必要となる各炉心のパラメータ（臨界量、実効遅発中性子割合、中性子平均寿命、温度係数）は「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 に記載した数値を用いる。（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 28（下中央のページ番号）の表 9）

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

炉心タンク満水

線型出力計は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒を挿入して出力 1W の臨界状態

(4) スクラム信号発生

- ・炉心タンクヒータ（出力 10kW）を用いて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。
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。
- ・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し 1 秒後に制御棒が落下する。
- ・ただし、1 時間以内にスクラム信号が出ない場合には 1 時間後に運転員により手動スクラムボタンを押して 1 秒後に制御棒が落下する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本（0.5 % $\Delta k/k$ ）以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、「過剰反応度-（全制御棒反応度-最大 1 本の反応度）」の未臨界度となる。すなわち、「 $+0.5-(1.5-0.5)=-0.5\% \Delta k/k$ 」の未臨界度となる。（ただし、温度変化による反応度を考慮しない場合）
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。ダンプ弁は作動しないとする。

2-6-2 解析結果

結果を表 2-6-1 に示す。全ての炉心で最大出力は 120W 以下であるため、1 時間後に運転員が手動スクラムボタンを押して停止させた。（この間の水温の上昇は約 1.7°C）

燃料温度が高くなったのが C45G(6H₂O)炉心で燃料温度上昇は約 0.54°Cであり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-6-2 に示す）。この炉心ではスクラム時までの温度上昇により+0.00073 % $\Delta k/k$ の反応度が加わるので、「 $0.0+0.00073-(1.5-0.5-0.5)=-0.49927\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、反応度温度係数の

誤差 (32%) を検討したときの結果を表 2-6-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 7% 高くなる。β_{eff} と l が各々 8% の誤差を持った場合(もう一方は誤差無し)の結果より、 l の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 9% 上昇する。反応度温度係数の誤差を考慮したときには燃料温度は 40% 高くなる。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.63 倍 ($1.07 \times 1.09 \times 1.40$) と 0.88°C ($0.54^\circ\text{C} \times 1.63$) なるだけなので判定基準値を満たしている。

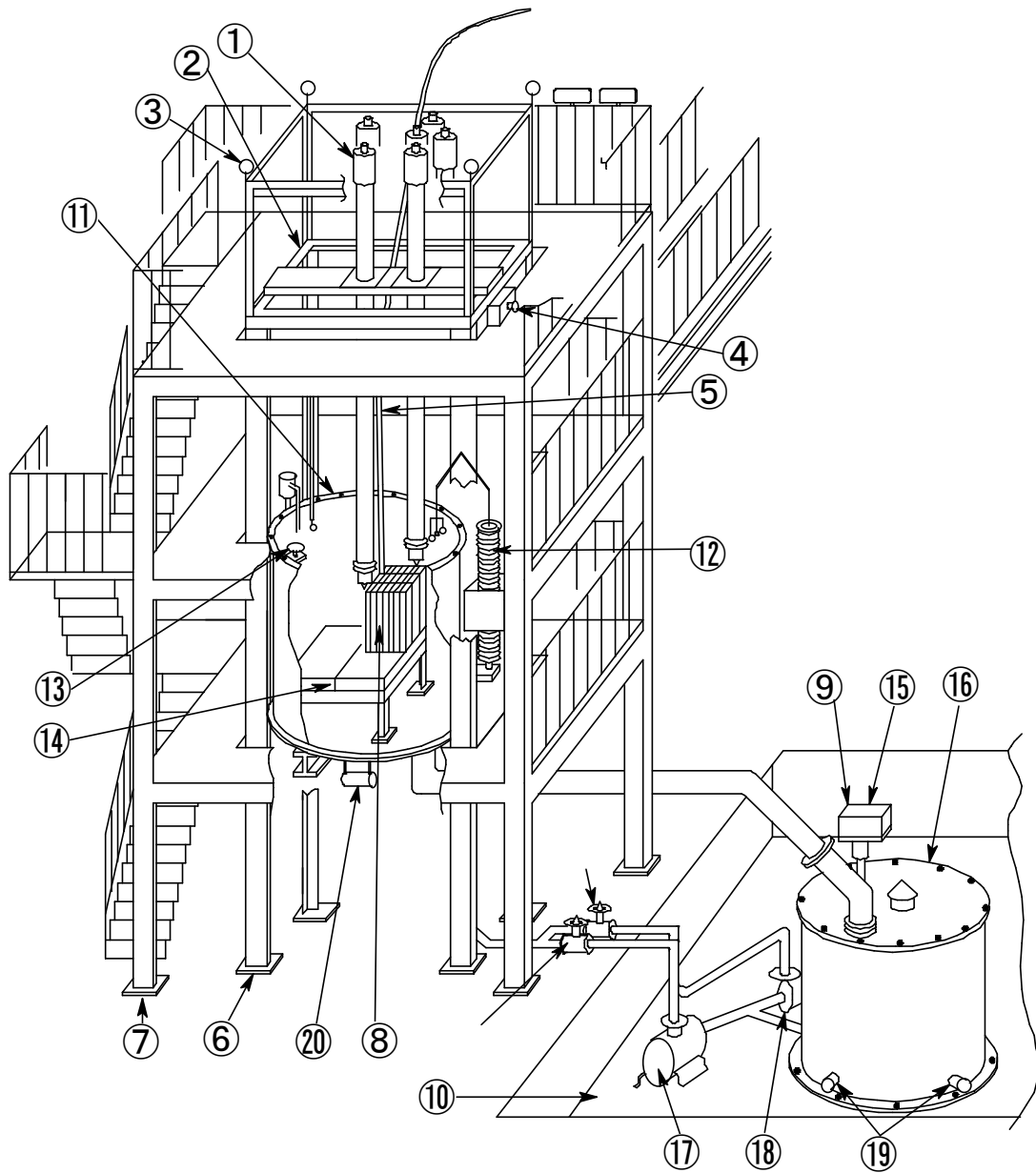


図 2-6-1 軽水減速架台 (C 架台) 概念図

(設置変更申請書の参考図 7)

⑳ : 炉心タンクヒータ

表 2-6-1 炉心タンクヒータによる温度上昇

炉心名称	列	温度係数 ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	1 時間後 最大出力 (W)	0.1W ま で (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ($^\circ\text{C}$) ^{a)}	温度上昇 ($^\circ\text{C}$) ^{b)}	(参考) 炉心タンク 水の温度上 昇 ($^\circ\text{C}$)
C45G(5H ₂ O)	4	2.24×10^{-6}	1.08	3666	3.71E+03	7.83E-02	2.58E-01	1.75E-00
C45G(5H ₂ O)	5	4.06×10^{-5}	4.35	3747	6.61E+03	1.58E-01	5.27E-01	1.79E-00
C45G(6H ₂ O)		4.64×10^{-5}	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-01	5.36E-01^{c)}	1.80E-00
C45G(7H ₂ O)		2.69×10^{-5}	2.56	3715	5.18E+03	1.02E-01	3.38E-01	1.78E-00

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数 (1.01 倍) を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-6-2 炉心タンクヒータによる温度上昇 (C45G(6H₂O)炉心)

誤差の影響

	1 時間後の 最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ($^\circ\text{C}$) ^{a)}	温度上昇 ($^\circ\text{C}$) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-02	5.36E-01	—
U 重量を 6%減少	5.47	3761	7.40E+03	1.70E-02	5.73E-01	1.07
β_{eff} を 8%減少	6.37	3762	7.99E+03	1.73E-01	5.82E-01	1.09
β_{eff} を 8%増加	4.72	3760	6.88E+03	1.49E-01	5.01E-01	0.94
ℓ を 8%減少	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-02	5.36E-01	1.00
ℓ を 8%増加	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-02	5.36E-01	1.00
温度係数を 32% 減少	3.06	3725	5.61E+03	1.21E-02	4.08E-01	0.76
温度係数を 32% 増加	10.17	3803	1.03E+04	2.23E-01	1.40E-00	1.40

a) 表 2-6-1 と同じ

b) 表 2-6-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-6-1 の結果と同じ

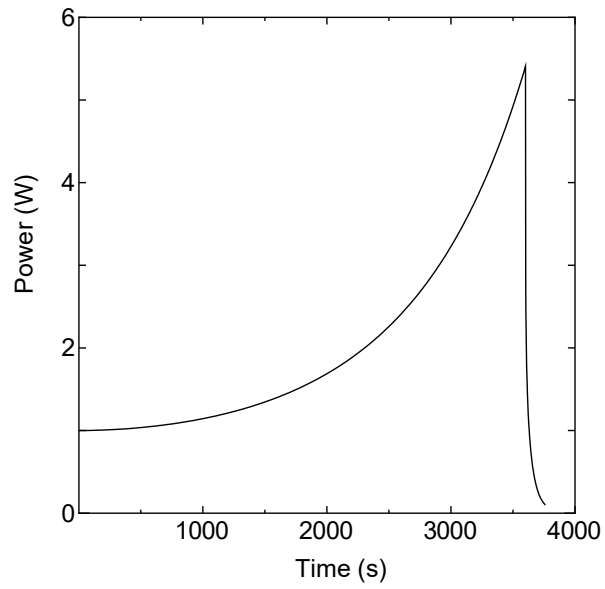


図 2-6-2 C45G(6H₂O)炉心 出力変化
炉心タンクヒータによる温度上昇

3. 設計基準事故の解析

「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項に設計基準事故については以下のように規定されている。

「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。

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 ①
- (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 ②
 - (ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷 ③

判定基準は「2 運転時の異常な過渡変化の解析」での判定基準に以下の項目を加える。

- ・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。

以上の①～③の項目について解析結果を示す。以下の節の「3-***」の**が①～③の番号に対応する。

なお、結果を示す表において、例えば「120W 超」のように「ある出力を超えた」時間を示す項目があるが、それは事象が始まってからその出力を超えてスクラム信号を発するまでの時間ということである。制御棒の場合であればスクラム信号発生後1秒後に落下してステップ状の反応度が加わるとしている。

3-1 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。

3-1-1 解析のシナリオ

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

固体減速炉心の「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」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定した代表炉心について（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8（下中央のページ番号）の表 2）、6 種類の減速度に対して、燃料体 1 本を炉心に近接させて誤装荷したとき最も大きな反応度が加わる場合を調べ、燃料の最高温度が最大となる炉心について申請書に記載する。（スクラム発生が早いケース、ケース A）

さらに 6 種類の減速度に対して、燃料体 1 本を炉心に近接させて誤装荷したとき最も小さな反応度が加わる場合を調べ、6 種類の炉心のうち燃料の最高温度が最大となる炉心について申請書に記載する。（スクラム発生が遅いケース、ケース B）

(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 $1.35 \times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$

制御棒反応度添加率は核的制限値の最大値

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

(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、中心架台を下限とする。全引抜きの 3 本と全挿入の 3 本は同じ反応度であるとする。（3 本の反応度： $1.35/2 = 0.675\% \Delta k/k$ ）

線型出力系は指示値が 100% で 100W 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

反応度温度係数を考慮する。

(5) 中心架台の動作についての説明

中心架台の概念図を図 3-1-1 に、制御室の中心架台操作盤を図 3-1-2 に示す。中心架台には A 架台炉心では 3×3、B 架台炉心では 5×5 体の燃料集合体、ポリエチレン反射体が装荷される。(最低でも 1 体の燃料集合体を装荷しなければいけないことが申請書の本文に記載)

中心架台を上昇させるためには、図 3-1-1 のシリンダ上昇用油圧ポンプを作動させた後、シリンダ上昇用操作レバーを操作して中心架台が載っているシリンダに下方から圧力をかける。シリンダには 4 段のストッパが取り付けられており、そのストッパをシリンダが通過するためにはストッパを 1 つずつ外す必要がある。運転員はストッパ操作釦 (図 3-1-2 の 4 つの釦) を 1 つずつ押してストッパを動作させてシリンダを上昇させるが、ストッパを通過するごとにシリンダの上昇速度は遅くなるように設計されている。中心架台の上昇速度とストロークについては申請書に表 3-1-1 のように記載されている。図 3-1-3 に主要なストッパ間の距離を記載している。

表 3-1-1 中心架台のストロークと上昇速度

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

スクラム時にはこの油圧ポンプが停止し、さらに油圧開放弁が開くことによりシリンダは落下する。その際、ストッパはラチェット構造となっているためストッパを外す操作を行わなくてもシリンダは下限まで下降することができる。

(6) 本事象の安全保護回路系等の動作を含むシナリオ

- ・3×3 の中心架台の位置は図 3-1-4、図 3-1-5 の各炉心の炉心配置図に示す。各炉心共に 1 体以上の燃料集合体が中心架台に装荷されている。
- ・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同じ燃料セルの炉心のうち 1 体当たりの反応度が最も大きい位置の場合、および最も反応度が小さい位置の場合とする。
- ・燃料集合体を誤装荷したときの反応度を添付書類 8 の代表炉心の解析に行ったものと同じ手法で求める。

計算コード：SRAC コードシステム（核データ：JENDL-4.0）

炉心計算：拡散計算コード CITATION（3 次元、20 群計算）

（Z 方向のみ反射境界条件、X と Y 方向は真空境界条件）

計算結果を表 3-1-1 に示す。L5.5 の燃料セルを持つ炉心の場合、L5.5 (50cm) 炉心の⑧の位置が最大となり、L5.5 (30cm) 炉心の⑨の位置が最小となる）

- ・中心架台を上昇させる。

下限から第 2 段ストップまでの中心架台の移動では反応度には影響を及ぼさないの 2 段から中心架台を連続的に上昇させたとする（そこからストロークは約 120cm）。上昇速度は申請書に記載した制限値（表 3-1-1）の最大速度とする。

第 2 段～第 3 段まで： 長さ実測値 70.0cm、速度 1.1 cm/s

第 3 段～第 4 段まで： 長さ実測値 30.0cm、速度 0.6 cm/s

第 4 段～上限まで： 長さ実測値 18.8cm、速度 0.2 cm/s

第 2 段から上限までは約 210 秒かかることになる。

中心架台の反応度の解析はモンテカルロ計算コード MCNP を用い、中心架台の位置を変更したときの反応度変化を求める。L5.5 (50cm) の結果を図 3-1-6 に L5.5(30cm)の結果を図 3-1-7 に示す。この計算結果を 6 次の多項式にフィッティングして動特性解析に用いる（表 3-1-5 に多項式の例を示す）。

（添付十で行った MCNP 計算のヒストリ数は約 2×10^7 とする）

誤装荷する燃料の反応度によりスクラムに至るまで 2 つの場合が想定される。

【ケース A】 中心架台の上昇途中で 120W を越えてスクラムする場合

- ・中心架台を上昇させるに従って出力が上昇するが、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。起動系（3 本の核分裂計数管）の対数計数率炉周期系統も作動しないこととする。
- ・線型出力系の指示値が 110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待し

ないものとする。

- ・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。
- ・スクラム信号の発生により中心架台を上昇させる油圧ポンプが停止し、1 秒後に中心架台が落下を開始し 12 秒後までに時間とともに線形に負の反応度を加えるものとする。(申請書に「最上位から燃料集合体の有効長さの 70%に相当する 105cm 落下するまで 12 秒以下」と規定されている)。その際に、制御棒 3 本は上限状態となっているが作動しないものとする。
- ・これらの動作の間、中性子源は挿入したままとする。
- ・ケース A は燃料 1 体を追加したときの反応度が大きい場合に発生するため、各々の燃料セルの炉心の中で最も反応度が大きくなる位置に燃料体 1 体を誤って挿入した場合、すなわち出力が最も急激に上昇すると考えられる炉心について解析を行う。

【ケース B】 中心架台が上限まで上昇し、その後の制御棒引き抜き操作に伴って出力が上昇し 120W を越えてスクラムする場合

- ・中心架台を上昇させたのち、出力が安定するまでしばらく待つ。
- ・中心架台を上昇させてから 10 分後(中心架台上限となつてから約 400 秒後)に制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率 (0.02% $\Delta k/k/s$) で反応度を連続的に加える。
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入には、期待しないものとする。また線型出力系の指示値が 110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとする。
- ・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。
- ・スクラム信号の発生により 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とする。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とする。その際に、中心架台は作動しないものとする。
- ・出力が 0.1W まで低下するまで解析を行う。
- ・これらの動作の間、中性子源は挿入したままとする。
- ・ケース B は燃料 1 体を追加したときの反応度が小さい場合に発生するため、各々の燃料セルの炉心の中で最も反応度が小さくなる位置に燃料体 1 体を誤って挿入した場合、すなわち出力が最も緩やかに上昇して積算出力が大きくなると考えられる炉心について解析を行う。

(7) 評価

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、燃料温度の最大値を求める。

3-1-2 解析結果

結果を表 3-1-2 に示す。温度上昇が最も大きいのは【ケース B】の L2P-30 炉心であり、このケースでは中心架台を上限にしても未臨界である。燃料温度上昇は約 1.1℃であり判定基準値を満たしている。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差を検討したときの結果を表 3-1-3 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 9% 上昇する。 ℓ と反応度温度係数の誤差は結果にほとんど影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.15 倍 (1.06×1.06) の約 1.3℃となるだけなので判定基準値を満たしている。

なお、燃料の温度上昇が最も大きくなった L2P-30 炉心の出力変化を図 3-1-9、図 3-1-10 に、反応度の変化(制御棒引抜き前まで)を図 3-1-11 に、また中心架台の反応度を表す式と係数の値を表 3-1-4 に示す。

【ケース B】の他の結果として、反応度が小さい燃料を挿入した場合で L2P-30 炉心の結果の次に温度が最も大きくなった L5.5P-30 炉心の出力変化を図 3-1-14、図 3-1-15 に示す。これは中心架台を上限にしても未臨界であった場合である。燃料要素の温度上昇は約 0.4℃であり設計基準事故時の判断基準を満足している。

【ケース A】の反応度が大きな燃料を挿入した場合で温度が最も大きくなった L5.5P-30 炉心の出力変化を図 3-1-12、図 3-1-13 に示す。これは中心架台を上昇中に出力が 120W を超えた場合である。燃料要素の温度上昇は約 0.2℃であり設計基準事故時の判断基準を満足している。

参考として、燃料を誤装荷しない場合に中心架台を上昇させたときの出力変化の例を図 3-1-8 に示す。

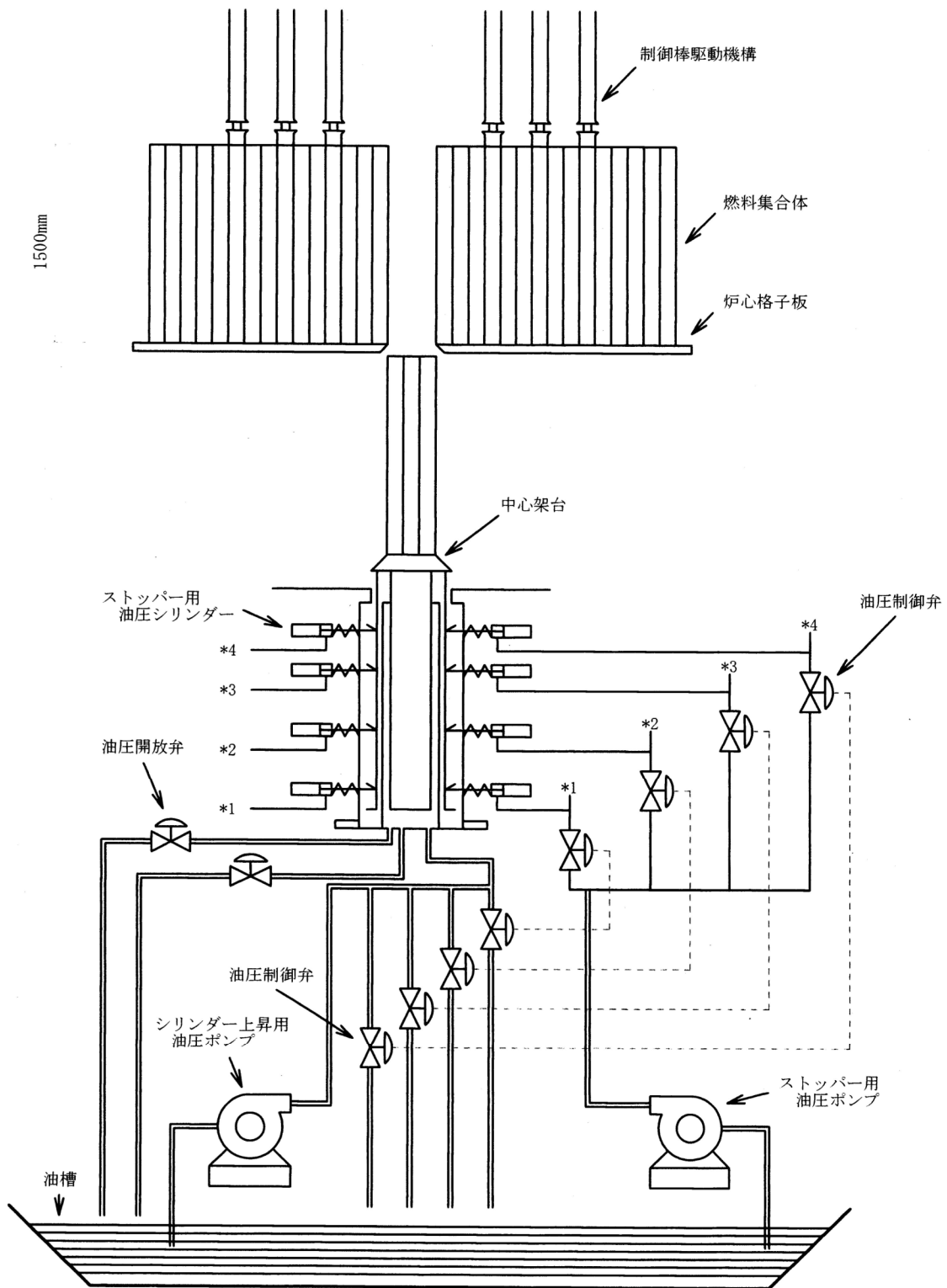


図 3-1-1 中心架台の概念図

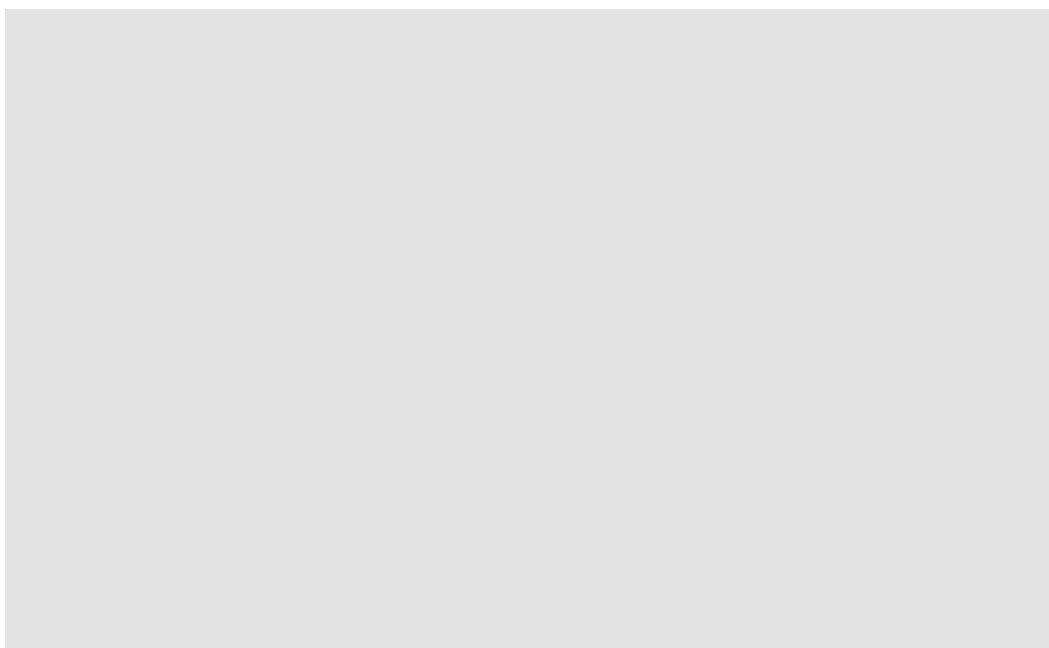


図 3-1-2 制御室制御卓の中心架台操作盤

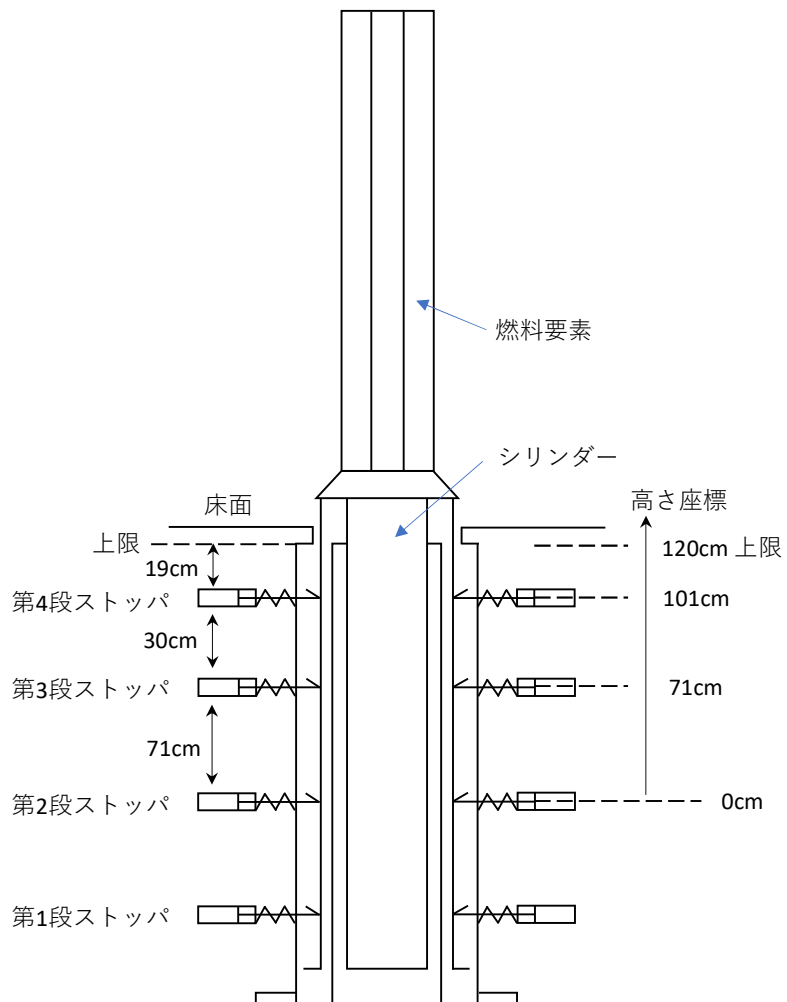
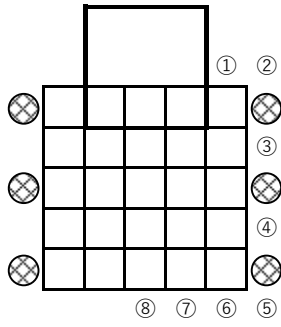
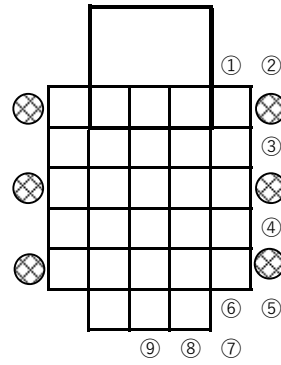


図 3-1-3 中心架台駆動装置のストップ位置
 (反応度が添加され始める位置を高さ座標の 0cm としている)

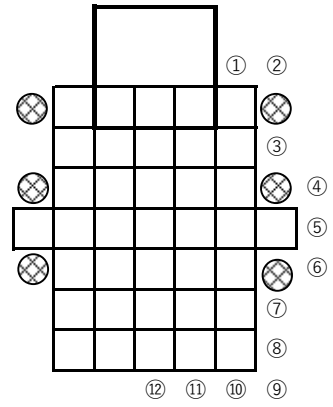
L5.5(50cm)



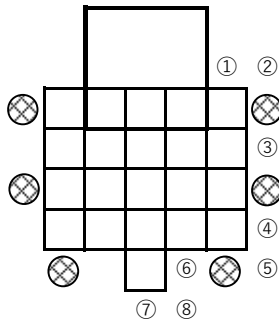
L5.5(40cm)



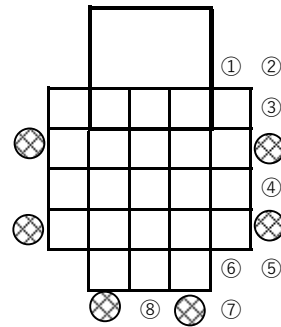
L5.5(30cm)



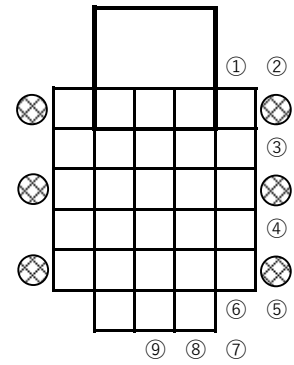
L4(50cm)



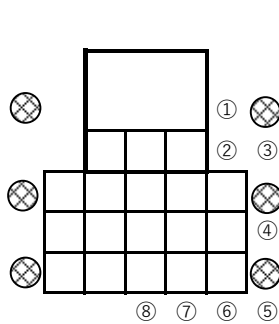
L4(40cm)



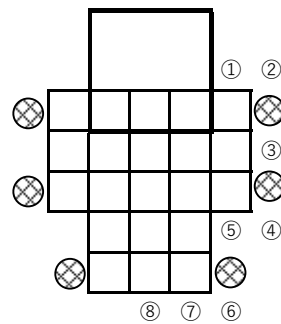
L4(30cm)



L3(50cm)



L3(40cm)



L3(30cm)

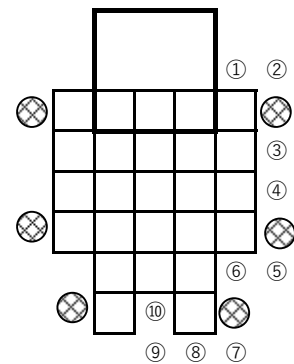
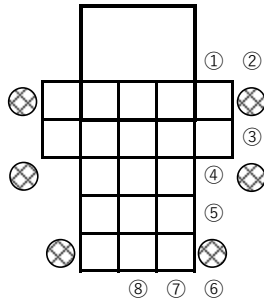
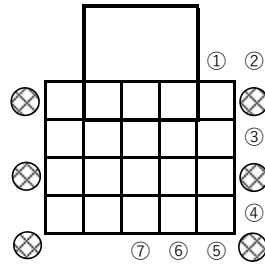


図 3-1-4 各炉心の燃料装荷位置 (L5.5、L4、L3 炉心)
炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

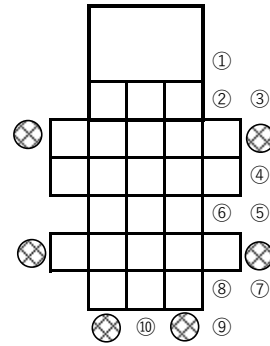
L2(50cm)



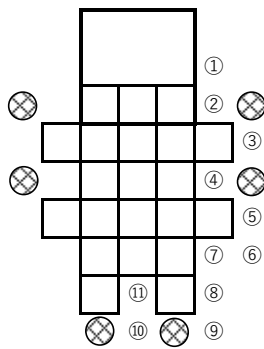
L2(40cm)



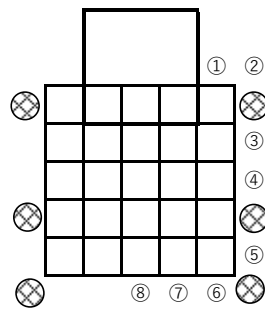
L2(30cm)



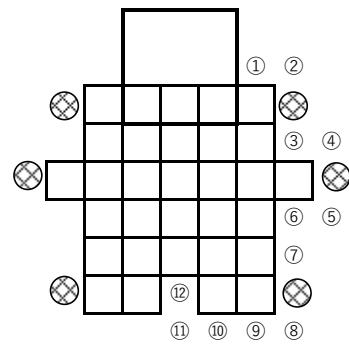
L1(50cm)



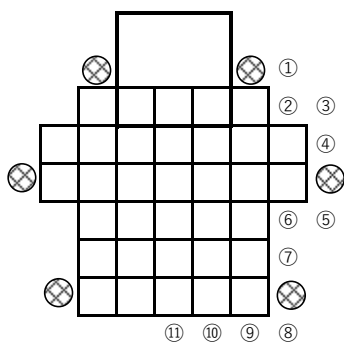
L1(40cm)



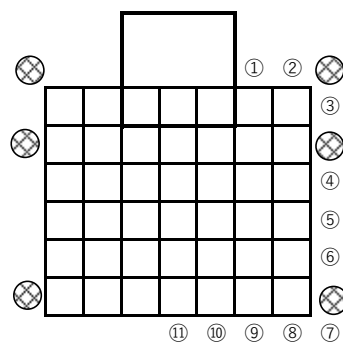
L1(30cm)



LL1(50cm)



LL1(40cm)



LL1(30cm)

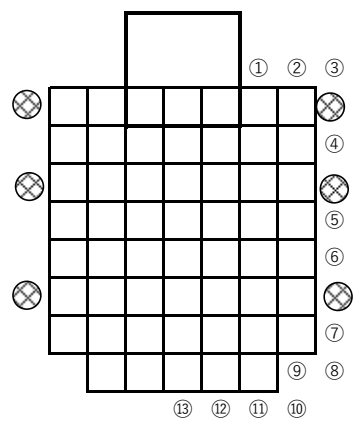


図 3-1-5 各炉心の燃料装荷位置 (L2、L1、LL1 炉心)

炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

表 3-1-1 燃料 1 体を追加したときの反応度 (% $\Delta k/k$)

位置	炉心																	
	L5.5-50	L5.5-40	L5.5-30	L4-50	L4-40	L4-30	L3-50	L3-40	L3-30	L2-50	L2-40	L2-30	L1-50	L1-40	L1-30	LL1-50	LL1-40	LL1-30
①	0.422	0.326	0.181	0.632	0.522	0.320	0.715	0.634	0.448	0.774	0.791	0.482	0.785	0.644	0.452	0.566	0.526	0.298
②	0.197	0.150	0.086	0.297	0.237	0.152	1.200	0.305	0.215	0.383	0.418	0.717	0.714	0.395	0.300	0.400	0.347	0.197
③	0.663	0.548	0.376	0.805	0.496	0.522	0.655	0.749	0.681	0.884	0.890	0.456	0.997	0.909	0.442	0.610	0.287	0.143
④	0.663	0.708	0.218	0.649	0.777	0.627	0.884	0.775	0.798	1.854	0.650	0.787	0.901	1.029	0.442	0.450	0.543	0.254
⑤	0.197	0.505	0.231	0.388	0.426	0.289	0.399	1.288	0.498	1.683	0.749	0.998	1.096	0.559	0.559	0.974	0.661	0.459
⑥	0.422	0.262	0.214	1.137	0.796	0.571	0.826	0.403	0.801	0.481	1.322	1.257	1.053	0.620	0.685	0.739	0.446	0.456
⑦	0.760	0.243	0.433	0.526	0.401	0.266	1.446	0.612	0.179	0.717	1.599	0.376	1.014	0.974	0.711	0.954	0.216	0.262
⑧	0.927	0.401	0.226		0.641	0.420	1.745	0.747	0.266	0.868		0.557	0.924	1.063	0.219	0.380	0.339	0.306
⑨		0.488	0.076			0.513			0.415			0.370	0.438		0.326	0.531	0.531	0.180
⑩			0.194						0.757				0.518	0.847	0.555	0.718	0.737	0.296
⑪													0.562		0.994	0.834	0.813	0.283
⑫															0.664			0.377
⑬																		0.422

太字は同じ燃料セルの炉心での最大値

下線付き太字は同じ燃料セルの炉心での最小値

各炉心の燃料装荷位置は図 3-1-4、図 3-1-5 に示す

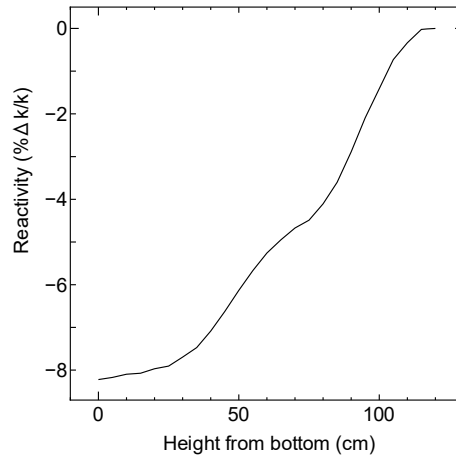


図 3-1-6 L5.5P-50 炉心の中心架台反応度

(横軸は上限から 120cm 下の位置を起点とした中心架台の高さ、120cm で上限となる)

(縦軸は中心架台を上限としたときを基準としたときの各高さでの反応度)

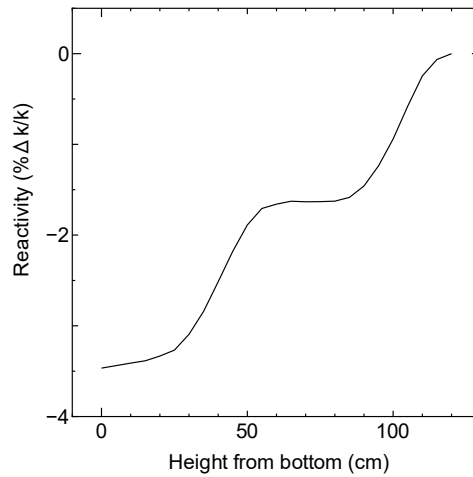


図 3-1-7 L5.5P-30 炉心の中心架台反応度

(横軸、縦軸は図 3-1-6 と同じ)

表 3-1-2 燃料誤装荷時の解析結果

炉心名称	燃料装荷 反応度 (%Δk/k)	中心架台 反応度 (%Δk/k)	120W 超 (s) ①	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C)
L5.5P-50 (最大)	0.927	8.22	<u>183.9</u> a)	8.26E+02	9.17E-02	2.10E-01
L5.5P-30 (最小)	0.076	3.47	45.6	1.26E+03	1.56E-01	3.57E-01
L4P-50 (最大)	1.137	11.5	<u>157.9</u>	5.34E+02	5.24E-02	1.17E-01
L4P-30 (最小)	0.152	5.93	36.0	1.23E+03	1.54E-01	3.36E-01
L3P-50 (最大)	1.745	12.7	<u>134.6</u>	5.20E+02	4.75E-02	1.01E-01
L3P-30 (最小)	0.179	8.64	33.5	1.41E+03	1.56E-01	3.25E-01
L2P-50 (最大)	1.854	17.5	<u>134.9</u>	4.84E+02	3.28E-02	8.40E-02
L2P-30 (最小)	0.370	9.00	16.8	5.80E+03	4.86E-01	<u>1.13E+00</u> b)
L1P-50 (最大)	1.096	10.7	<u>147.8</u>	5.80E+02	2.27E-02	7.34E-02
L1P-30 (最小)	0.219	8.70	31.3	1.60E+03	6.90E-02	2.11E-01
LL1P-50 (最大)	0.974	5.83	<u>140.8</u>	8.10E+02	1.34E-02	5.05E-02
LL1P-30 (最小)	0.180	3.23	35.4	1.11E+03	1.91E-02	7.58E-02

a) 太字下線の結果は中心架台上昇時に出力が 120W を超過してスクラムした場合【ケース A】、それ以外は中心架台上限とした後、制御棒を引き抜いて出力が上昇してスクラムした場合【ケース B】

b) 温度上昇の最大値は L2P-30 (下線付き数値)

① 中心架台上昇時にスクラムした場合は中心架台上昇開始 (図 3-1-3 の第 2 ストップ位置) からスクラム発生するまでの時間、中心架台上限となった場合は制御棒を上昇し始めてからスクラム発生するまでの時間

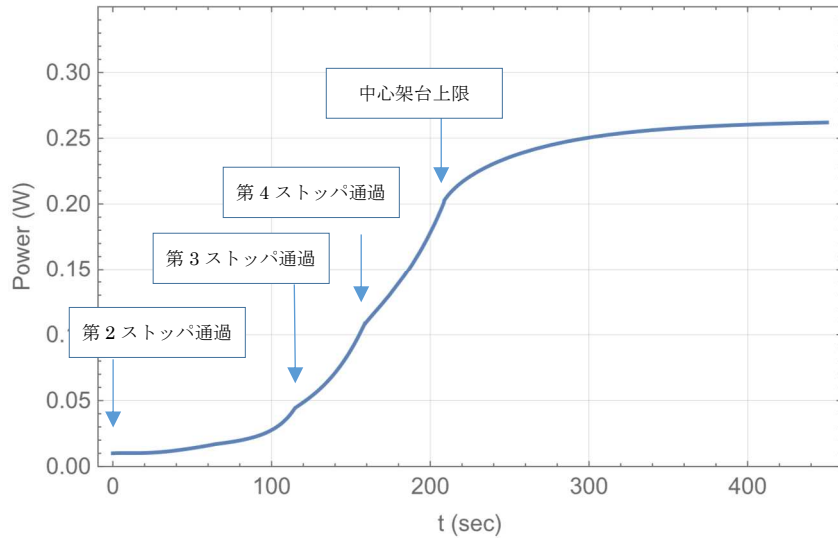


図 3-1-8 (A) L5.5P-30 炉心での通常運転時(燃料誤装荷無し)の中心架台上昇時の出力変化
(横軸、縦軸は図 3-1-6 と同じ)

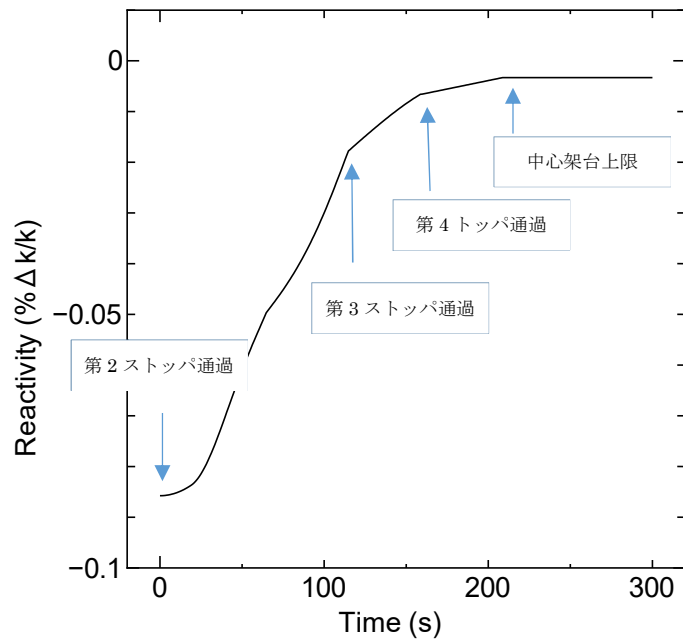


図 3-1-8 (B) L5.5P-30 炉心での通常運転時(燃料誤装荷無し)の中心架台上昇時の反応度の変化

表 3-1-3 L2P-30 炉心 (反応度最小) の解析結果 (誤差の影響)

	120W 超 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	16.8	5.80E+03	4.86E-01	1.13E+00	—
U 重量を 6%減少	16.8	5.80E+03	5.17E-01	1.20E+00	1.06
βeff を 8%減少	14.7	6.33E+03	5.31E-01	1.23E+00	1.09
βeff を 8%増加	18.8	5.46E+03	4.58E-01	1.07E+00	0.94
ℓ を 8%減少	16.8	5.81E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
ℓ を 8%増加	16.8	5.81E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
温度係数を 32%減少	16.8	5.80E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
温度係数を 32%増加	16.8	5.80E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
中心架台反応度誤差 + a)	16.5	6.09E+03	5.10E-01	1.18E+00	1.05
中心架台反応度誤差 -	17.1	5.51E+03	4.62E-01	1.07E+00	0.95

a) 反応度の誤差評価方法

$$\rho = 1 - \frac{1}{k} \text{ なので、 } \Delta\rho = \frac{1}{k^2} \Delta k = \frac{1}{\left(\frac{1}{1-\rho}\right)^2} \Delta k = (1-\rho)^2 \Delta k$$

Δk=±0.6%として±Δρを評価する。

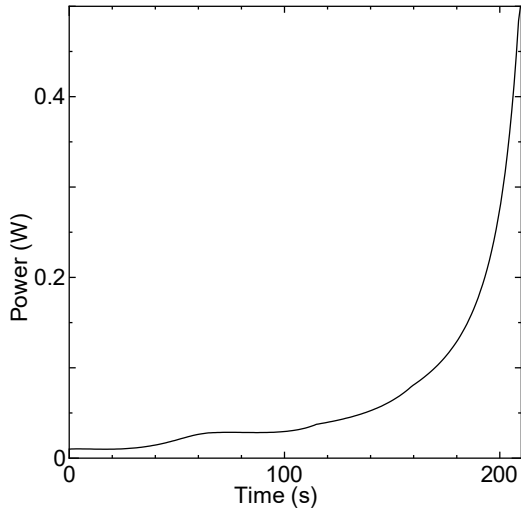


図 3-1-9 L2P-30(最小)出力変化
(中心架台上昇まで)

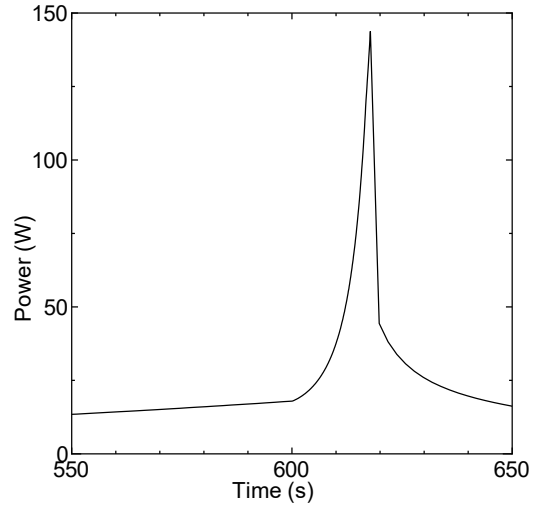


図 3-1-10 L2P-30(最小)出力変化
(600 秒から制御棒引抜き)

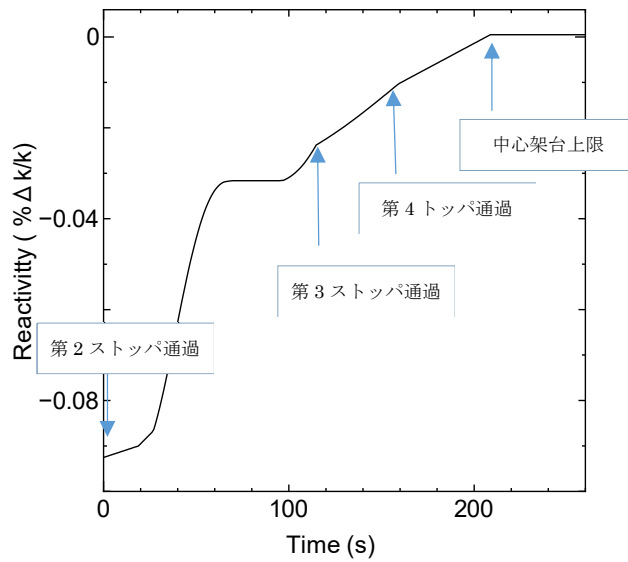


図 3-1-11 L2P-30(最小) 反応度変化
(中心架台上昇は 208 秒まで)

表 3-1-4 L2P-30 炉心の中心架台反応度

$$\rho(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3 + a_4z^4 + a_5z^5 + a_6z^6$$

係数	値
a ₀	-3.110E-10
a ₁	+1.136E-07
a ₂	-1.512E-05
a ₃	+8.693E-04
a ₄	-1.891E-02
a ₅	+1.298E-01
a ₆	-9.298E-00

中心架台が上限から 120cm 下がった位置を z=0 とする

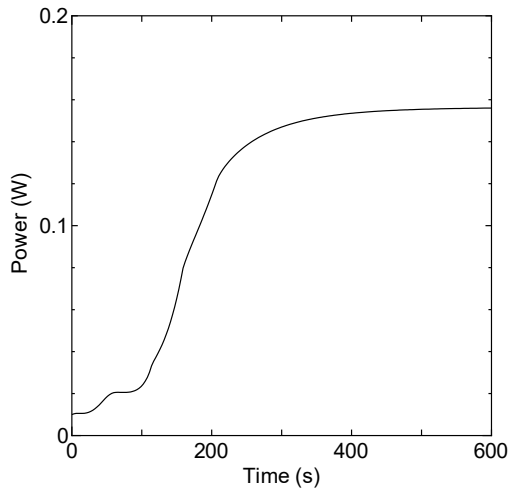


図 3-1-12 L5.5P-30(最小)出力変化
(中心架台上昇は 208 s まで)

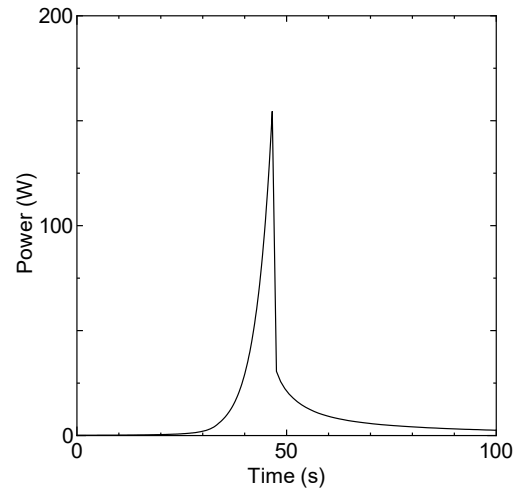


図 3-1-13 L5.5P-30(最小)出力変化
(制御棒上昇後、上昇開始を 0s)

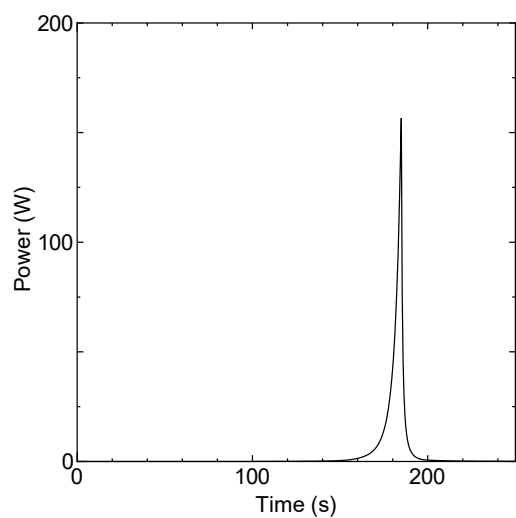


図 3-1-14 L5.5P-30(最大)出力変化

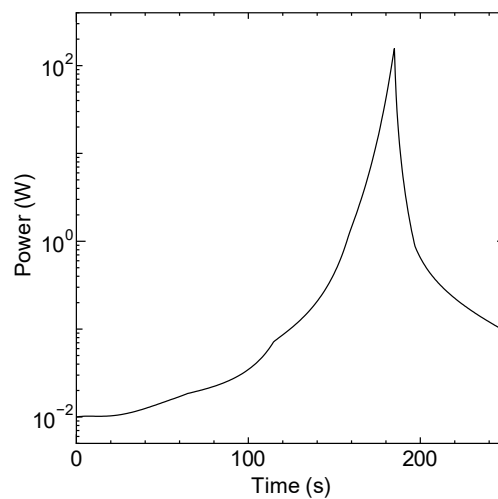


図 3-1-15 L5.5P-30(最大)出力変化
(図 3-1-14 の縦軸 Log)

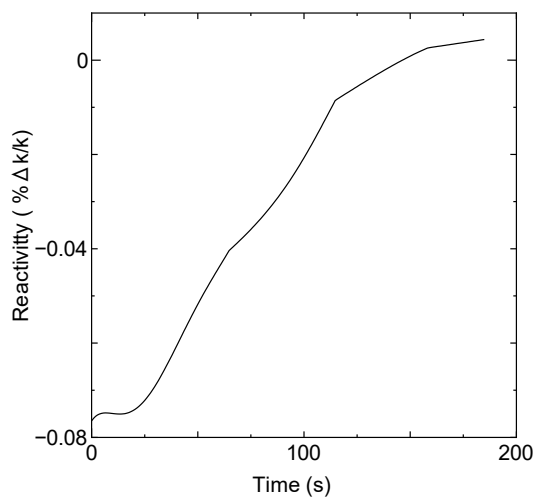


図 3-1-16 L5.5P-30(最大) 反応度変化

3-1-3 燃料誤装荷についての検討

ここで改めて燃料集合体の誤装荷が発生する可能性について検討する。

臨界実験装置は炉心の形状を容易に変更することができ、様々な体系の炉心を構築できることが特徴である。燃料集合体の誤装荷を防ぐためのハード的な設備を設けることは難しいため、燃料集合体を規定通り炉心に挿入するような手順書等によるソフト面での対応により燃料集合体を誤作成、誤操作が起こらないようにしている。

燃料集合体の取り扱いに関しては原子炉施設保安規定とその下部規定である原子炉施設保安指示書に記載している（【補足 G】に炉心配置手順等に関する規定を記載）。

炉心構成作業（燃料集合体の作成、炉心配置変更）は KUCA 炉心配置変更計画書（KUCA 運転指令書の一部）に従って行うことが規定されており、この計画書の作成者は臨界装置部長、確認者は臨界装置主任技術者で、作業は当直運転主任が当直運転員を指揮して実施している。

- (1) 燃料集合体の作成は、運転指令書に基づいて複数の作業員が実施しており、余分の燃料集合体を製作するためには、運転指令書に記載された以上の枚数の燃料要素をバードケージより取り出す必要があるため、誤って燃料集合体を製作する可能性は低い。バードケージから運転指令書に記載された枚数の燃料要素を取り出すようにしている。またバードケージを燃料棚に格納する前にはバードケージ内に保管されている燃料要素枚数を必ず確認しており、定められた枚数以上の燃料要素を取り出すことはないため、誤って追加の燃料集合体を作成する可能性は極めて低い。
- (2) (1)に記載の通り、誤って追加の燃料集合体を作成する可能性は極めて低いが、もし仮に固体減速炉心において燃料体 1 体を追加で作成してしまい、炉心の燃料体周囲のポリエチレン反射体を 1 体取出して燃料集合体追加で装荷した場合について考える。固体減速炉心については炉心配置変更の際に制御棒は 3 本が全挿入、3 本が全引抜きとし、作業前に中心架台が下限の状態であることを確認した後に作業を行っている。この状態で燃料集合体 1 体を追加で誤装荷してしまったとする。

低濃縮燃料を用いた代表炉心（図 3-1-4～図 3-1-5）のうち、表 3-1-1 に示す通り、同じ燃料セルの炉心のうち 1 体の燃料集合体の反応度が大きな高さ 50cm の各炉心について、燃料集合体を 1 体誤って追加で作成してしまい、燃料体周囲のポリエチレン反射体を 1 体取出して燃料集合体を追加で装荷したとする。中心架台は図 3-1-4～図 3-1-5 の高さ 50cm の炉心の図面の一番上側の中央 3 体の燃料体と 6 体のポリエチレン反射体を含む 3×3 体で構成されていると考える（例として図 3-1-17 に L5.5P-50 炉心の燃料体の配置、燃料誤装荷位置、中心架台の位置を示す）。各炉心について、燃料誤装荷時の最も大きな反応度とその炉心の中心架台の反応度を表 3-1-5 に示す。全

ての炉心において中心架台の反応度は燃料の反応度に比べて十分に大きな値となっており、炉心配置変更時に燃料集合体を 1 体誤装荷してしまっても中心架台が下限であれば炉心は十分に深い未臨界の状態を保つことができることが判る。(【補足 H 燃料誤装荷時の反応度】に各炉心で中心架台が下限の状態に燃料体を 1 体誤って炉心の装荷してしまった場合についての詳しい解析結果を記載する。)

また軽水減速炉心については炉心配置変更の際に減速材である軽水が炉心に無いことを確認した後に作業を行っており、臨界となることはあり得ない。

- (3) 炉心への燃料集合体の装荷時においては以下のような対応を行うことにより、燃料の誤装荷が起こらないようにしており、そのため燃料集合体を誤装荷した状態で起動してしまう可能性は極めて低い。
- a) 作業は KUCA 炉心配置変更計画書を確認しながら複数の現場作業員が行う。
 - b) 燃料装荷時に現場作業員と制御室の運転員が連絡を取り合い、声を出して装荷位置を確認しながら作業する。なお燃料集合体の側面にはその燃料集合体の名称を記載しており(図 3-1-18)、炉心に装荷する際にはその名称を確認している。
 - c) 炉心横に大きな炉心配置ボード(図 3-1-19、約 130cm×約 90cm)を設置し、燃料装荷作業を行う作業員以外の者が炉心配置ボードを見ながら燃料集合体の装荷作業を確認する。
 - d) 炉心配置変更作業終了後に燃料集合体の配置が正しいことを複数の現場作業員により確認する。なお、燃料集合体の上部キャップはポリエチレン反射体等と区別できるように色分けをしているため炉心を上から見ることで燃料集合体の配置を確認することができる(図 3-1-18)。

以上より設計基準事故の解析においては「燃料落下又は燃料誤装荷による反応度の異常な投入」の解析は実施しないものとする。

炉心配置変更時に燃料集合体を 1 体誤装荷してしまっても、固体減速炉心については中心架台の反応度が核的制限値の $1\% \Delta k/k$ 以上あり、さらに中心架台に燃料集合体が 1 体以上装荷されていれば臨界となることはないこと、燃料集合体を誤装荷してしまった場合であっても原子炉の起動前に気付くことができるため、設計基準事故である反応度の異常な投入となる可能性は極めて低いことから、「燃料落下又は燃料誤装荷」の事象は炉心には著しい損傷が発生するおそれがないものであり、当該設計基準事故以外の事故に至るおそれがある異常は生じないものである。

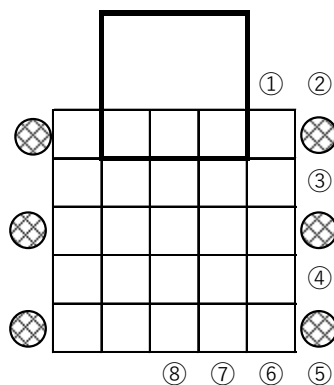


図 3-1-17 L5.5P-50 炉心 (低濃縮ウラン炉心)

(○の数字は燃料集合体の誤装荷を想定した位置、
太線は燃料集合体 3 体とポリエチレン反射体 6 体を装荷した中心架台)

表 3-1-5 燃料集合体の誤装荷による反応度、および中心架台の反応度
(低濃縮ウラン炉心)

炉心名称	燃料集合体 装荷反応度 (% Δk/k) ^{a)}	中心架台 反応度 (% Δk/k) ^{b)}
L5.5P-50	0.927	8.22
L4P-50	1.137	11.5
L3P-50	1.745	12.7
L2P-50	1.854	17.5
L1P-50	1.096	10.7
LL1P-50	0.974	5.83

a 燃料集合体 1 体を誤装荷した際に炉心に加わる最も大きな反応度

(表 3-1-1 に示した SRAC-CITATION の解析結果)

b 中心架台を下限から上限まで上昇した際に炉心に加わる反応度

(MCNP の解析結果)

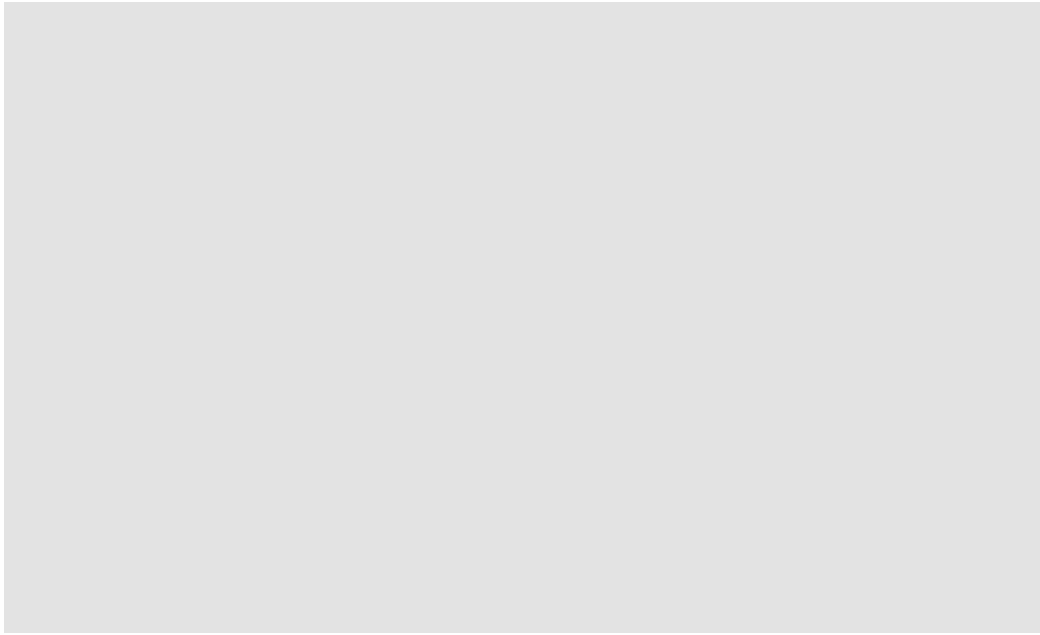


図 3-1-18 燃料集合体とポリエチレンの上部キャップ
(燃料集合体は赤色、ポリエチレン体は白色)
(燃料体の側面に燃料の名称を記載)

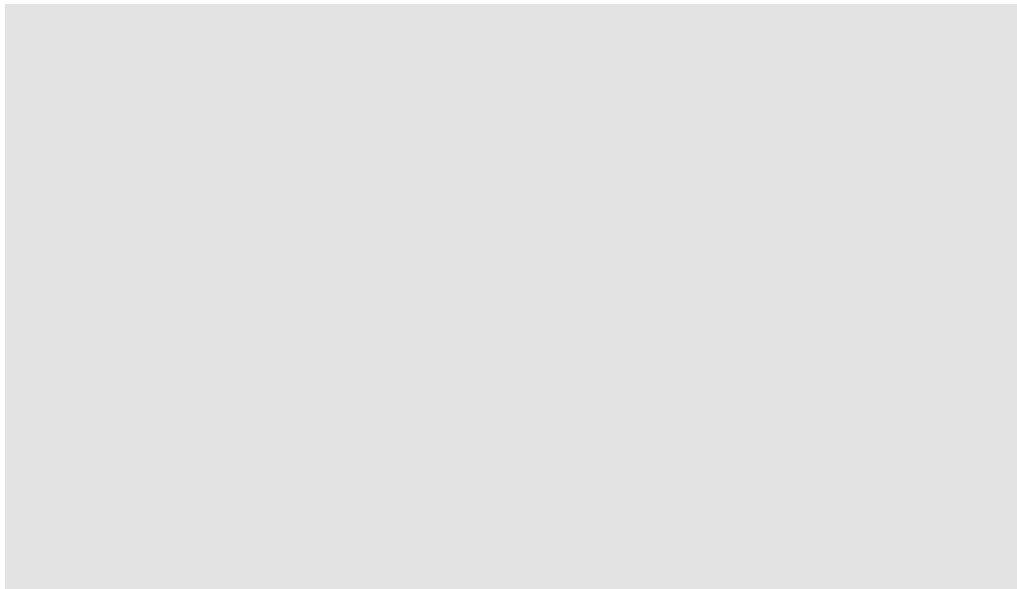


図 3-1-19 炉心配置ボード (左：固体減速炉心、右：軽水減速炉心)

3-2 燃料の機械的破損

燃料集合体の作成、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（固体減速炉心の燃料角板、軽水減速炉心の燃料長板）より核分裂生成物（FP）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。

3-2-1 解析シナリオ

以下のようなシナリオに従った解析を行う。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定した代表炉心の中で、下記の (3) の燃料破損条件の時に最も FP 放出量が多くなる炉心を対象とする。

（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8（下中央のページ番号）の表 2、p 26（下中央のページ番号）の表 8）

(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 回繰り返すとする。各運転間隔は 30 日間とし、その後、最後の運転（9 回目）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）

・この運転履歴を元に FP の生成量を燃焼計算コード ORIGEN-2.2 を用いて求める。

(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、燃料芯材において切断面からある深さ内に蓄積した FP のうち希ガス（Xe、Kr）及びヨウ素が全量放出されたとする。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10%の燃料要素（角板）が破損し、同じく燃料芯材の切断面からある深さ内に蓄積した FP のうち希ガス（Xe、Kr）及びヨウ素が全量放出されたとする。

(4) 評価

研究所敷地境界位置での実効線量を評価する。

3-2-2 燃料要素内での FP の飛程

燃料要素内での希ガス (Kr、Xe) とヨウ素 (I) の飛程を SRIM コード¹⁾を用いて求めた。SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter)は高速イオンが材料中を通過する場合のイオンの飛程やダメージ等を算出するためのシミュレーションコードである (現在の最新バージョンは SRIM2013)。

ウラン 235 の 1 核分裂あたりの発生エネルギーは約 200MeV で、このうち 170MeV が核分裂片 (FP) のエネルギーとなるとする。このエネルギーが 2 つの核分裂片 (FP) に全て分配されたとすると、質量数が小さい方が受け取るエネルギーは大きくなるので、Kr、Xe、I のうち線量の解析で考慮する各核種のなかでは Kr-81、Xe-129、I-131 のエネルギーが最も大きくなり、

Kr-81 : 112MeV、Xe-129 : 77MeV、I-131 : 76MeV

となる。

固体減速炉心で用いる U-Mo 燃料、および軽水減速炉心で用いる U-Si 燃料のそれぞれについての最大飛程の結果を表 3-2-1 に示す。高濃縮ウラン (HEU) の添付書類 10 での設計基準事故の解析では FP の最大飛程を 15 μm としていたが、低濃縮ウランを用いた両燃料要素共に燃料の密度が HEU の場合 (U-Al 合金) より大きいため FP の飛程は短くなる。

燃料要素である U-Si 燃料は研究用原子炉の燃料として広く用いられてきた実績があり、また U-Mo 燃料についても様々な照射実験によりその内部に FP を保持する能力が高いことが判っている。これらの燃料板は外部から力が加わった場合であっても変形するだけで割れたりする可能性は少なく FP は燃料要素内に留まるはずである。しかし、ここでは何らかの原因で切断面から FP の安全側の最大飛程 (15 μm とする) までの領域の FP がすべて切断面に溜まっていたと仮定して、破損した燃料板の切断面から 15 μm の深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素が全量放出されたとする。なお、KUR の設計基準事故解析でも FP の最大飛程を 15 μm としている。

燃料要素は対角方向にまっすぐに切断されたとする。角板の場合は 5.08cm 角の正方形の板なので、全体の切断面の長さは $5.08 \times \sqrt{2}$ であり、そのうち燃料ミート部の大きさは 4.48cm 角なので、燃料ミート部の切断面の長さは $4.48 \times \sqrt{2}$ となる。軽水減速架台の燃料長板のミート部は 58 \times 5.6cm であるので、切断面の長さは $\sqrt{(58^2 + 5.6^2)}$ となる。

燃料板 1 枚当たり FP を放出する体積の割合は以下のようになる。

固体減速炉心用 燃料角板

軽水減速炉心用 燃料角板

1) "SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter", <http://www.srim.org/>.

表 3-2-1 燃料要素中の FP の飛程 (単位: μm)

イオンエネルギー (MeV)	U-Mo 燃料			U-Si 燃料		
	Kr	I	Xe	Kr	I	Xe
70	—	7.2	8.0	—	9.3	8.4
80	—	7.8	8.6	—	10.0	9.0
110	10.9	—	—	12.7	—	—
120	11.5	—	—	13.4	—	—

3-2-3 解析炉心の選定

固体減速炉心については取り出した燃料体1体の一部を破損させることにしているので、まず全ての代表炉心について燃料体1体当たりの積分出力（核分裂率に比例）を求め、その中で最も値が大きくなる燃料体を求める。次にその燃料集合体を取扱中に破損させてしまうことを考えて、その燃料体の積分出力に対する出力のピーク値との比率を求める。（燃料体の高さ方向に出力のピークがあったとしたら、その箇所の燃料板のみを破損させるようなことを想定）。この両者を掛け合わせた値が最も大きな炉心が最もFPを放出する可能性があるため、その炉心を選定する。

なお各炉心について、燃料体ごとの出力積分値の最大となる燃料体の位置を図3-2-2、図3-2-3に示す。

表3-2-3に結果を示す。燃料体1体当たりの出力が最大となる炉心はL3P-50炉心であり、燃料体中の出力ピークを考慮してもこの炉心が最もFP放出量が大きくなるので、L3P-50炉心を選定する。なおこの炉心について燃料体ごとの出力を表3-2-6に示す(表3-2-6中の燃料体番号は図3-2-4に示す)。

軽水減速炉心については [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]
 なお、燃料板1枚当たりの平均FP生成量は燃料枚数に反比例し、その値に出力分布のピークと平均値の比率を掛けたものが最もFP生成量が多い燃料板（炉心）となるので、それを調べた結果、下記の表3-2-1(B)の通りC45G2(4列)が最も大きくなることを確認した(C45G5(5列)もほとんど同じ値)。

表 3-2-1(B) 各炉心の出力の最大値と平均値の比

炉心	[REDACTED]	最大値／平均値 (CITATION 結果) ①	1 / 燃料枚数×①
C30G0 (4 列)	[REDACTED]	2.51	0.0046
C30G0 (5 列)	[REDACTED]	2.36	0.0044
C35G0 (4 列)	[REDACTED]	2.25	0.0057
C35G0 (5 列)	[REDACTED]	2.28	0.0057
C45G0 (4 列)	[REDACTED]	1.97	0.0071
C45G0 (5 列)	[REDACTED]	2.09	0.0074
C60G0 (4 列)	[REDACTED]	1.80	0.0062
C60G0 (5 列)	[REDACTED]	1.87	0.0064

C45G2 (4 列)		2.60	<u>0.0098</u>
C45G5 (4 列)		3.28	0.0096
C45G6 (4 列)		3.26	0.0086
C45G7 (4 列)		3.14	0.0076
C45G10 (4 列)		2.63	0.0054
C45G15 (4 列)		2.11	0.0040
C45G2 (5 列)		2.55	0.0096
C45G5 (5 列)		3.30	0.0098
C45G6 (5 列)		3.34	0.0090
C45G7 (5 列)		3.28	0.0081
C45G10 (5 列)		2.87	0.0059
C45G15 (5 列)		2.36	0.0044
C60G2 (4 列)		2.58	0.0087
C60G5 (4 列)		3.04	0.0079
C60G7 (4 列)		2.80	0.0061
C60G10 (4 列)		2.30	0.0044
C60G15 (4 列)		1.85	0.0033

3-2-4 解析方法

放出はすべて地上放出とし、実効放出継続時間はFPが瞬時に大気に放出されるものと考え、気象観測時間の最小単位の1時間とする。希ガスからは直接 γ 線による外部被ばくを受け、よう素からは吸引による甲状腺への取込みによる内部被ばくを受けるものとする。被ばく線量を評価するための着目核種として、希ガスについては、「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」(平成元年3月27日原子力安全委員会了承、平成13年3月29日原子力安全委員会一部改訂)に記載されているXe及びKr核種を対象とする。

相対濃度 $(\chi/Q)_{97\%}$ 及び相対線量 $(D/Q)_{97\%}$ は実効放出継続時間に基づき計算する。

放射性雲による線量として、放射性雲中の希ガスからのガンマ線による実効線量は次式で計算する。

$$D_{\gamma} = Q_{\gamma} \cdot (D/Q)_{97\%} \quad (1)$$

ここで、

- D_{γ} : ガンマ線による実効線量 (Sv)、
- Q_{γ} : 希ガス核種の0.5MeV(ガンマ線)換算放出量(Bq)、
- $(D/Q)_{97\%}$: 希ガスに対する相対線量(実効放出時間1時間)(Sv/Bq)、

である。

よう素の呼吸摂取による実効線量は、評価地点におけるよう素の地表空気中の相対濃度及びよう素の ^{131}I 等価放出量に基づいて次式により計算する。

$$D = K_{He} \cdot M \cdot Q_e \cdot (\chi/Q)_{97\%} \quad (2)$$

ここで、

- D : よう素の呼吸摂取による実効線量 (Sv)、
- K_{He} : ^{131}I の吸入摂取による小児の実効線量係数 (Sv/Bq)、
- M : 小児の呼吸率(m^3/h)、
- Q_e : よう素の放出量(^{131}I 等価量)(Bq)、
- $(\chi/Q)_{97\%}$: よう素に対する相対濃度(実効放出時間1時間)(h/m^3)、

である。

(2)式中で用いるよう素の ^{131}I 等価放出量 Q_e は次式により計算する。

$$Q_e = \sum_i \frac{K_{Hi}}{K_{He}} \cdot Q_i \quad (3)$$

ここで、

- K_{Hi} : よう素核種*i*の吸入摂取による小児の実効線量係数 (Sv/Bq)、
- Q_i : よう素核種*i*の放出量 (Bq)、

である。

地上放出であるため、放出位置に近いほど評価が大きくなる。周辺監視区域の境界外で放出位置を中心としてとった 16 方位の範囲内で放出位置から最短距離である地点を着目地点として評価し、このうち最大の評価を与える地点を評価地点とする。よう素による実効線量の評価に使用するパラメータは表 3-2-2 に示す小児の値とし、実効放出継続時間が 1 時間であることを考慮して活動時における値を用いる。希ガスの環境への放出量は 0.5MeV(γ線)

なお、西南西方向は敷地境界までの距離が KUR に比べて KUCA のほうが遠いため、この評価は安全側の結果となる。

放出量は以下のように求める。

固体減速炉心 (L3P-50 炉心)

- (1) ORIGEN-2.2 で燃料破損時の FP の蓄積量を求める。
- (2) (1)の値に取り出した燃料体中の FP 蓄積量の比率である 7.13×10^{-2} (表 3-2-3 の(A)) を掛ける。
- (3) (2)の値にピークを考慮した比率 2.74 (表 3-2-3 の(B))を掛ける
- (4) (3)の値に L3P-50 炉心の燃料角板中でのピーキング係数 1.09^{a)}を掛ける。
- (5) (4)の値に燃料角板中の FP 放出箇所の体積の比率である 9.47×10^{-4} を掛ける。
- (6) (5)の値に燃料破損割合の 10%を掛ける

軽水減速炉心 (C45G(2H₂O) 4 列 炉心)

- (1) ORIGEN-2.2 で燃料破損時の FP の蓄積量を求める(固体減速炉心と同じ値)。
- (2) (1)の値に C45G(2H₂O) 4 列炉心の出力のピークを考慮した比率 2.60^{b)}を掛ける
- (3) (2)の値に C45G(2H₂O) 4 列炉心の燃料角板中でのピーキング係数 1.01^{a)}を掛ける。
- (4) (3)の値に燃料角板中の FP 放出箇所の体積の比率である 5.38×10^{-4} を掛ける。
- (5) (4)の値に破損燃料の比率である (1÷燃料板枚数(265 枚)) を掛ける。

a) 「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」(2020 年 11 月 5 日)の説明資料 2-2 で示した燃料板内のピーキング係数 (本資料の補足資料-Bに記載)

b) 「第 404 回 核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2021 年 5 月 17 日)の説明資料 1-1 で示した炉心内のピーキング係数 (本資料の補足資料-Bに記載)

3-2-5 解析結果

結果を表 3-2-4、表 3-2-5 に示す。被ばく線量は最大でも小児の場合の約 $0.004\mu\text{Sv}$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり 5mSv を超えないという判断基準を満足している。

表 3-2-2 よう素による実効線量の評価に使用するパラメータ等

パラメータ等		数値
核種 <i>i</i> の吸入摂取による 小児の実効線量係数 (Sv/Bq)	¹³¹ I	1.6×10^{-7}
	¹³² I	2.3×10^{-9}
	¹³³ I	4.1×10^{-8}
	¹³⁴ I	6.9×10^{-10}
	¹³⁵ I	8.5×10^{-9}
小児の呼吸率(m ³ /h) (活動時)		0.31

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」(平成 2 年 8 月 30 日
原子力安全委員会決定、平成 13 年 3 月 29 日原子力安全委員会一部改訂)

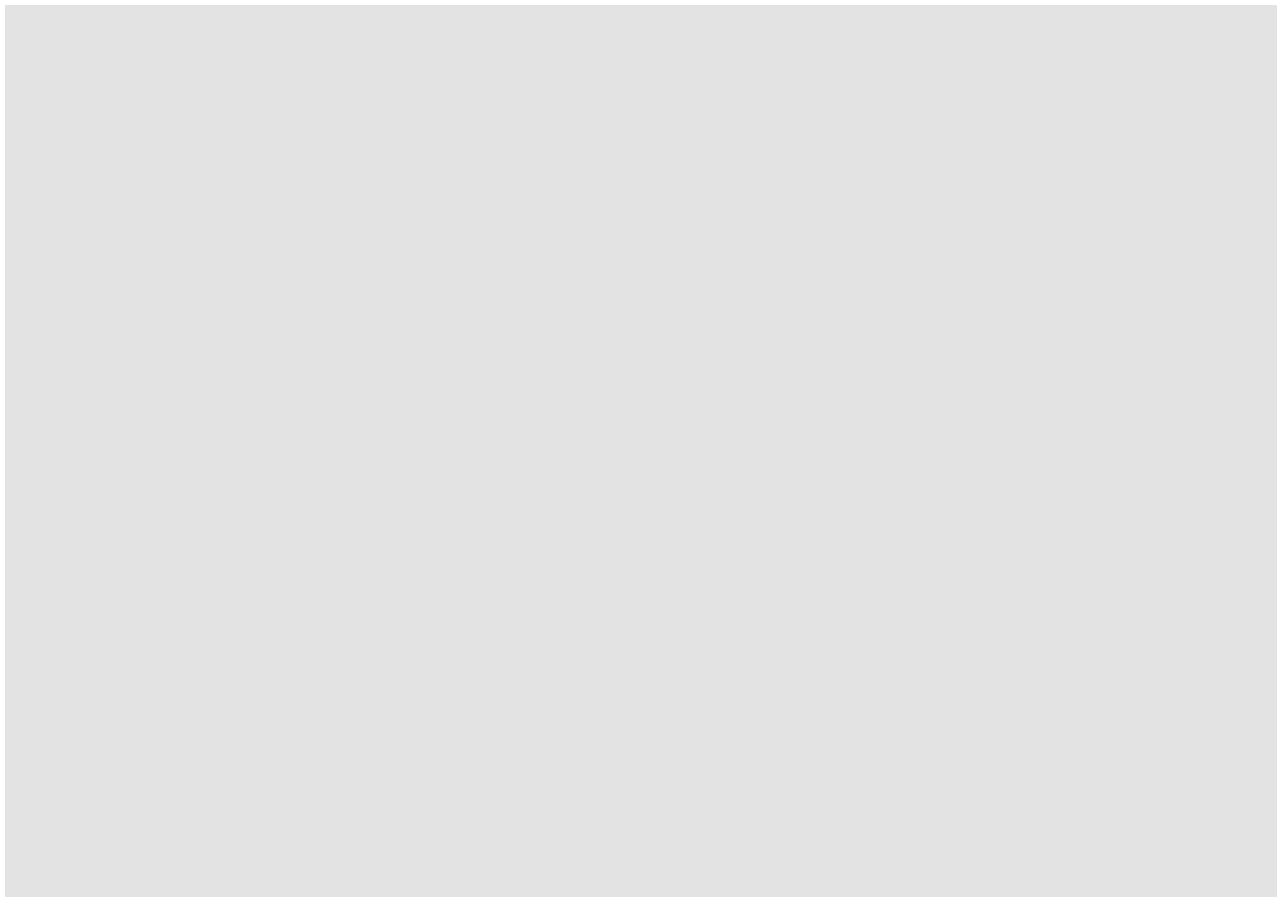


図 3-1-1 複合原子力科学研究所 施設配置図

表 3-2-3 各炉心の燃料 1 体当たりの積算出力の最大値、その燃料体中での出力ピーク比

炉心名称	燃料体 1 体当たり積算出力の最大値 (W) *) (A)	左記の燃料体中の出力平均値に対する出力最大値の比率**) (B)	(A)×(B)
L5.5P-50	5.90E-02	2.56	0.15
L5.5P-40	5.34E-02	2.83	0.15
L5.5P-30	4.29E-02	2.91	0.12
L4P-50	6.56E-02	2.68	0.18
L4P-40	6.19E-02	2.82	0.17
L4P-30	5.25E-02	2.72	0.14
L3P-50	7.13E-02	2.74	0.20***)
L3P-40	6.58E-02	2.85	0.19
L3P-30	5.69E-02	3.13	0.18
L2P-50	6.61E-02	2.71	0.18
L2P-40	6.27E-02	2.96	0.19
L2P-30	5.47E-02	3.26	0.18
L1P-50	5.51E-02	3.45	0.19
L1P-40	4.90E-02	3.46	0.17
L1P-30	4.07E-02	4.09	0.17
LL1P-50	3.42E-02	5.26	0.18
LL1P-40	2.88E-02	4.90	0.14
LL1P-30	2.41E-02	5.43	0.13

*) 炉心の積算出力を 1W としたときの燃料体 1 体当たりの出力の最大値

**) 1 体当たりの積算出力が最大となる燃料体中での (出力ピーク値) ÷ (出力平均値)

**) (A) × (B) が最大となる炉心

表 3-2-4 (A) 燃料損傷に伴う被ばく線量 (固体減速炉心 L3-50 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) ①	実効エネルギー [*] (MeV/dis) ②	0.5MeV 換算 放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 (μ Sv)
^{83m} Kr	1.64E+07	3.31E+02	0.0025	1.65E+00	6.74E+04	5.79E-07 ⁾
⁸⁵ Kr	6.45E+05	1.30E+01	0.0022	5.72E-02		
^{85m} Kr	1.51E+08	3.04E+03	0.159	9.68E+02		
⁸⁷ Kr	7.13E+04	1.44E+00	0.793	2.28E+00		
⁸⁸ Kr	6.99E+07	1.41E+03	1.950	5.49E+03		
^{131m} Xe	1.44E+06	2.90E+01	0.020	1.16E+00		
¹³³ Xe	1.41E+09	2.85E+04	0.045	2.57E+03		
^{133m} Xe	8.42E+07	1.70E+03	0.042	1.43E+02		
¹³⁵ Xe	5.31E+09	1.07E+05	0.250	5.35E+04		
^{135m} Xe	2.70E+08	5.44E+03	0.432	4.70E+03		

*) $6.74e4 \times 8.60e-18$ (Sv/Bq)

**) 「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」原子力安全委員会了承 (平成元年 3 月 27 日、平成 13 年 3 月 29 日一部改訂)

② : ① \times ② \div 0.5、 ④ : ③の放出量の合計

表 3-2-4 (B) 燃料損傷に伴う被ばく線量 (固体減速炉心 L3-50 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) ①	表 3-2-2 と同じ 核種iの吸入摂取に よる小児の実効線 量係数 (Sv/Bq) ②	¹³¹ I 等価放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 (μ Sv)
¹³¹ I	5.64E+08	1.14E+04	1.6E-7	1.14E+04	3.75E+04	4.10E-03 ⁾
¹³² I	1.85E+09	3.73E+04	2.3E-9	5.37E+02		
¹³³ I	4.61E+09	9.30E+04	4.1E-8	2.38E+04		
¹³⁴ I	3.25E+03	6.56E-02	6.9E-10	2.83E-04		
¹³⁵ I	1.68E+09	3.39E+04	8.5E-9	1.80E+03		

*) $3.75e4 \times 1.60e-7$ (Sv/Bq) \times $2.20e-6$ (h/m³) \times 0.31 (m³/h)

**) 「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」(平成 2 年 8 月 30 日原子力安全委員会決定、平成 13 年 3 月 29 日原子力安全委員会一部改訂)

③ : ① \times ② \div 1.6E-7 (¹³¹I の値)、 ④ : ③の放出量の合計

表 3-2-5 燃料損傷に伴う被ばく線量（軽水減速炉心 C45G(2H₂O) 4 列 炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算または 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m} Kr	8.74E+01	4.37E-01	1.78E+04	1.53E-07 ^{*)}
⁸⁵ Kr	3.44E+00	1.51E-02		
^{85m} Kr	8.05E+02	2.56E+02		
⁸⁷ Kr	3.80E-01	6.03E-01		
⁸⁸ Kr	3.73E+02	1.45E+03		
^{131m} Xe	7.66E+00	3.06E-01		
¹³³ Xe	7.54E+03	6.79E+02		
^{133m} Xe	4.49E+02	3.77E+01		
¹³⁵ Xe	2.83E+04	1.41E+04		
^{135m} Xe	1.44E+03	1.24E+03		
¹³¹ I	3.01E+03	3.01E+03	9.93E+03	1.08E-03 ^{**)}
¹³² I	9.87E+03	1.42E+02		
¹³³ I	2.46E+04	6.31E+03		
¹³⁴ I	1.73E-02	7.48E-05		
¹³⁵ I	8.97E+03	4.77E+02		

*) $1.78e4 \times 8.60e-18$ (Sv/Bq)

***) $9.93e3 \times 1.60e-7$ (Sv/Bq) $\times 2.20e-6$ (h/m³) $\times 0.31$ (m³/h)

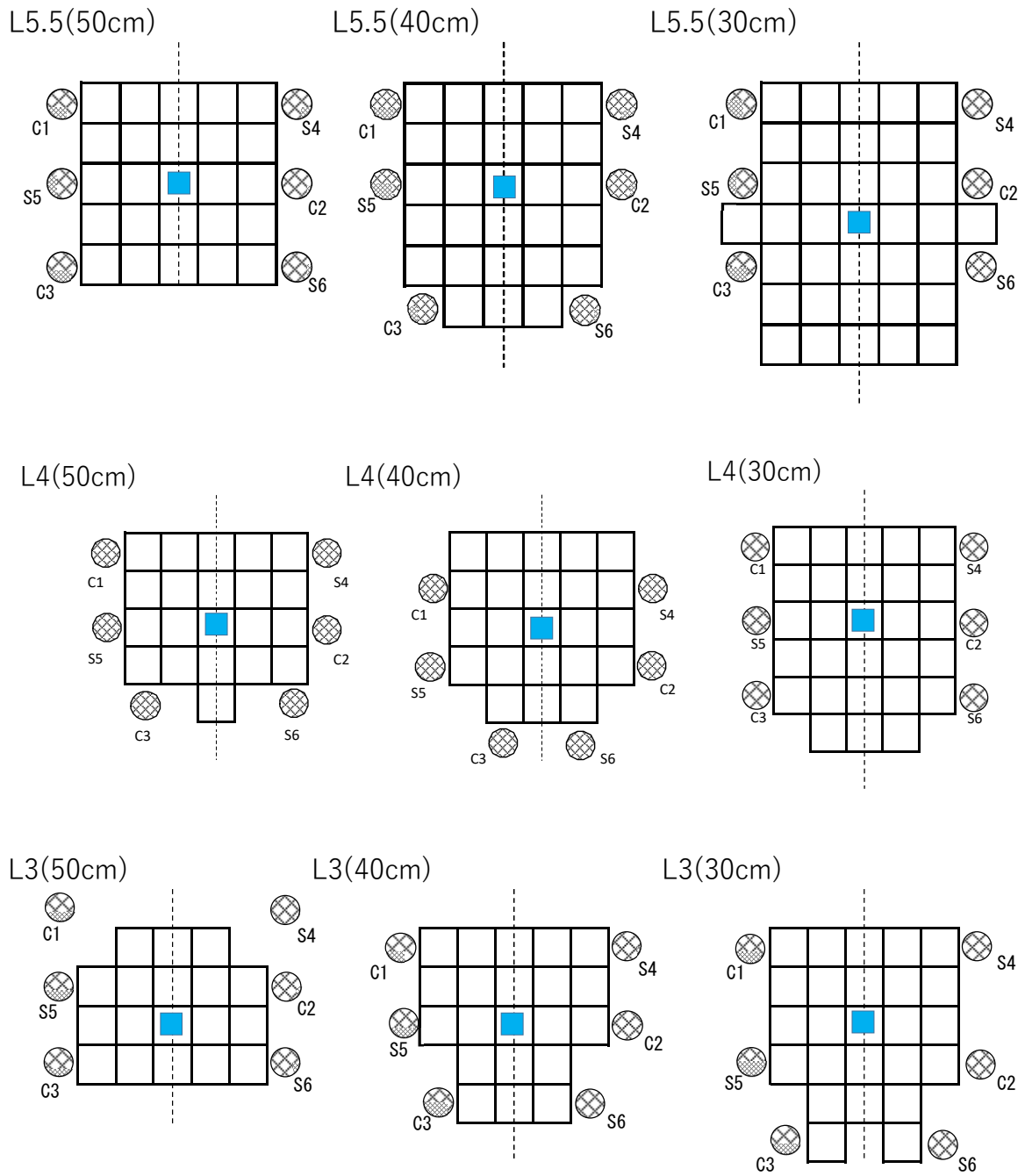


図 3-2-2 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)
 (■の記号をつけた燃料体が核分裂の積分値が最大となる燃料体)

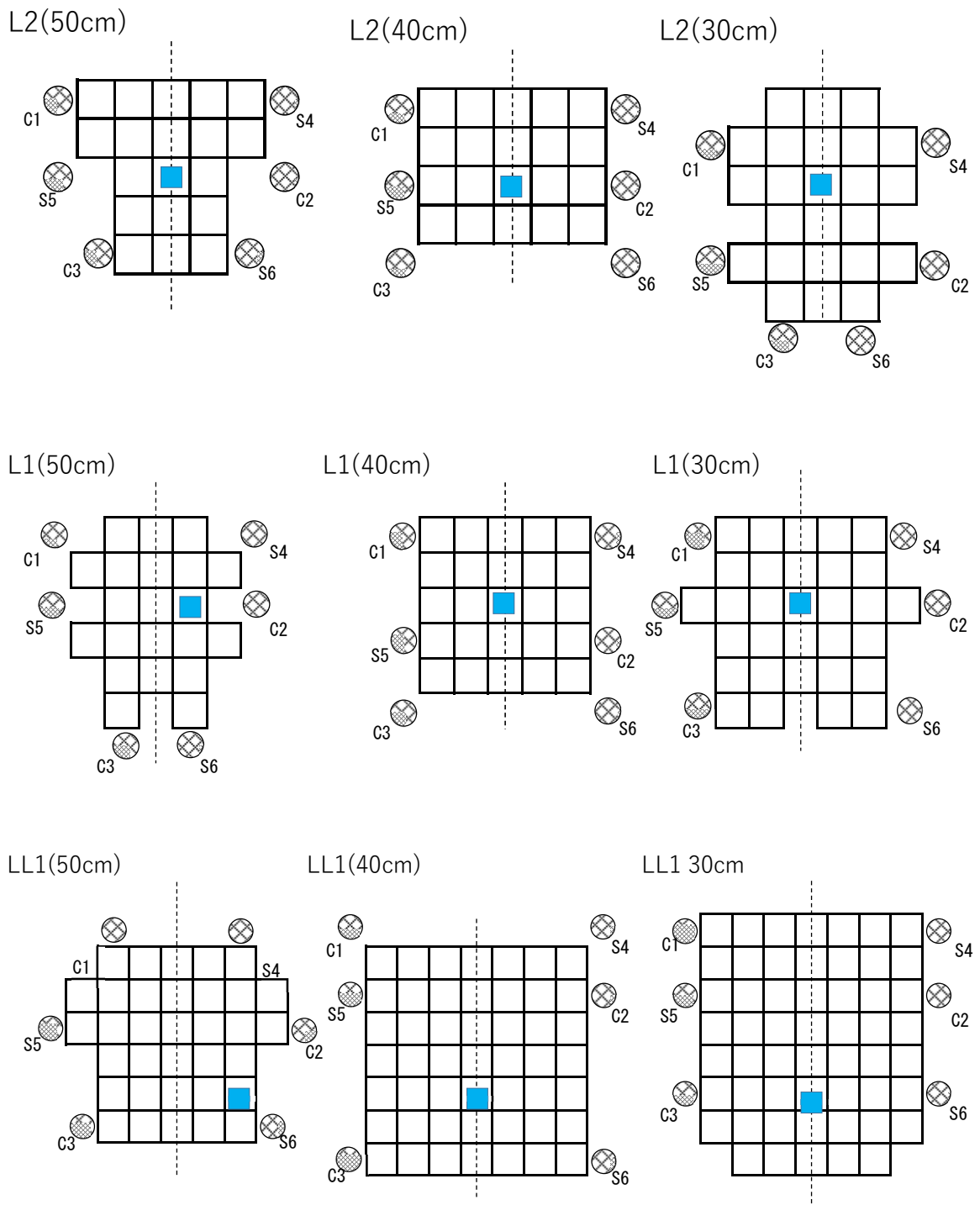


図 3-2-3 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)
 (■の記号をつけた燃料体が核分裂の積分値が最大となる燃料体)

L3(50cm)

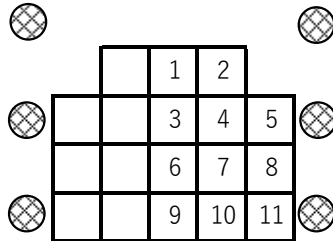


図 3-2-4 L3P-50 炉心配置図

表 3-2-6 L3P-50 炉心の燃料体ごとの出力
(炉心出力を 100W とする)

図 3-2-4 燃料体番号	出力 (W)
1	5.72E+00
2	5.46E+00
3	6.94E+00
4	6.23E+00
5	4.68E+00
6	7.14E+00^{a)}
7	6.37E+00
8	4.61E+00
9	6.26E+00
10	5.61E+00
11	4.02E+00

a) 出力の最大値

3-3 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、試料から核分裂生成物が放出される可能性がある。

3-3-1 解析シナリオ

(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「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 2-1 で選定した代表炉心（「まとめ資料」では、添付 8 のまとめ資料の p 8（下中央のページ番号）の表 2）の中で最も核燃料の試料（天然ウラン（NU）、または濃縮ウラン（EU））の核分裂率が大きくなる炉心とする。

(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 NU、または EU（濃縮度 4.5%）の酸化物（ UO_2 ）試料の反応度測定を行うとする。
- ・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。
- ・試料は各炉心で熱群の中性子束が最大値となる場所に固定していたとする。

(3) 実験物破損条件

1 時間の運転を行い、1 回の運転での最大積算出力の制限値（100Wh）となって運転を終了した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。

この解析の対象としているパイルオシレータについてはまだ KUCA には設置されておらず詳細な設計は行われていないため、試料を移動させるための挿入管の設置位置やサイズなどは全く決まっていない。また後述する試料の反応度と体積の関係は 1 次摂動計算を元に決定しているため、試料内での中性子束の歪み等の詳細な実験情報を取り込むことは難しいなど解析を行う上での不確定な要素が非常に多い。

現時点ではこれらの不確定要素については解析の条件に取り入れるしかないため、実験物破損条件を前節の「燃料の機械的破損」での燃料板の破損割合に比べて大きな値（10%）としている。

3-3-2 炉心の選定

パイロオシレータの実験で使用する試料の重量の最大値は、試料を反応度が最大となる位置においたときの反応度が制限値 ($0.1\% \Delta k/k$) となるという条件により決まるため、試料の重量は以下のように求める。

① SRAC コードシステムの拡散計算コード CITATION (3次元体系、20群) を用い、NU、EU 試料を反応度が最も高くなる炉心中心付近の熱中性子束が最大となるメッシュに置いたとして(メッシュ幅は各炉心共に約 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$)、そのときの反応度を1次摂動計算により求める。

② 試料の反応度の絶対値の最大値は $0.1\% \Delta k/k$ と規定されているので、NU と EU の試料の体積を以下の式により求める。

$$0.1\% \Delta k/k / [\text{②の反応度 } \% \Delta k/k \text{ の絶対値}] \times [\text{②のメッシュ体積}]$$

③ ③の体積に UO_2 の密度(10.97g/cm^3)を掛ける

実験では試料の位置を変化させるが、ここでは各炉心において NU、EU 試料の核分裂率の最大値となる位置に固定していると仮定する。

各炉心における NU、EU 試料の核分裂率の燃料内、反射体内を含めた最大値、および反応度の絶対値が $0.1\% \Delta k/k$ となる試料の重量を表 3-3-1 に示す。

試料中に生成する FP の量は核分裂率と試料の重量に比例するので、両者を掛け合わせた値が最も大きい場合が FP の量が最大となる。表 3-3-1 より NU 試料については L5.5P-30 炉心、EU 試料については L2P-50 炉心での照射が各試料中の FP 量が最大となる。

3-3-3 解析結果

線量の解析方法は「3-2 燃料の機械的破損」と同じである。

結果を表 3-3-2、表 3-3-3 に示す。被ばく量は最大でも小児に対する値、約 $0.19 \mu\text{Sv}$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値に関する設計基準事故時の判断基準を満足しており、周辺公衆に対して著しい放射線被ばくをおよぼさない。

表 3-3-1 各炉心の核分裂率の最大値、および反応度の重量

炉心名称	核分裂率 (1/cm ³ /s)		反応度の絶対値が 0.1%Δk/k となる試料の重量 (g)		(A)× (C)	(B)× (D)
	NU (A)	EU (B)	NU (C)	EU (D)		
L5.5P-50	7.13E+08	4.16E+09	145.8	16.5	1.04E+09	6.85E+08
L5.5P-40	7.84E+08	4.57E+09	130.3	14.8	1.02E+09	6.76E+08
L5.5P-30	8.01E+08	4.67E+09	131.0	14.6	1.05E+09^{*)}	6.80E+08
L4P-50	7.34E+08	4.48E+09	85.5	25.6	6.28E+08	1.15E+09
L4P-40	7.57E+08	4.62E+09	80.2	23.5	6.07E+08	1.09E+09
L4P-30	7.82E+08	4.47E+09	76.4	22.2	5.98E+08	9.91E+08
L3P-50	7.89E+08	4.81E+09	74.3	49.7	5.86E+08	2.39E+09
L3P-40	8.31E+08	5.07E+09	67.7	45.1	5.63E+08	2.28E+09
L3P-30	7.76E+08	4.73E+09	65.7	42.0	5.10E+08	1.99E+09
L2P-50	8.48E+08	5.15E+09	70.6	240.7	5.99E+08	1.24E+10^{**)}
L2P-40	8.49E+08	5.19E+09	62.3	218.5	5.29E+08	1.13E+10
L2P-30	9.73E+08	5.89E+09	61.0	194.7	5.94E+08	1.15E+10
L1P-50	6.60E+08	3.96E+09	84.1	163.9	5.55E+08	6.50E+09
L1P-40	6.73E+08	4.10E+09	78.5	153.1	5.28E+08	6.29E+09
L1P-30	7.80E+08	4.72E+09	73.4	142.6	5.72E+08	6.74E+09
LL1P-50	5.00E+08	3.05E+09	117.8	157.0	5.89E+08	4.79E+09
LL1P-40	4.91E+08	3.00E+09	111.6	148.7	5.48E+08	4.47E+09
LL1P-30	5.00E+08	3.05E+09	113.2	151.3	5.66E+08	4.62E+09

*) (A)× (C) が最大となる炉心

***) (B)× (D) が最大となる炉心

表 3-3-2 NU 試料破損時の被ばく線量 (L5.5P-30 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) *)	換算または 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	4.15E+04	4.15E+03	2.07E+01	1.04E+06	8.94E-06
^{85}Kr	3.69E-01	3.69E-02	1.62E-04		
^{85m}Kr	3.79E+05	3.79E+04	1.20E+04		
^{87}Kr	2.22E+06	2.22E+05	3.52E+05		
^{88}Kr	1.62E+06	1.62E+05	6.31E+05		
^{131m}Xe	4.68E-02	4.68E-03	1.87E-04		
^{133}Xe	6.02E+02	6.02E+01	5.41E+00		
^{133m}Xe	1.56E+02	1.56E+01	1.31E+00		
^{135}Xe	8.08E+04	8.08E+03	4.04E+03		
^{135m}Xe	4.67E+05	4.67E+04	4.04E+04		
^{131}I	5.21E+03	5.21E+02	5.21E+02	1.68E+04	1.83E-02
^{132}I	3.24E+04	3.24E+03	4.66E+01		
^{133}I	2.73E+05	2.73E+04	6.98E+03		
^{134}I	4.33E+06	4.33E+05	1.87E+03		
^{135}I	1.38E+06	1.38E+05	7.35E+03		

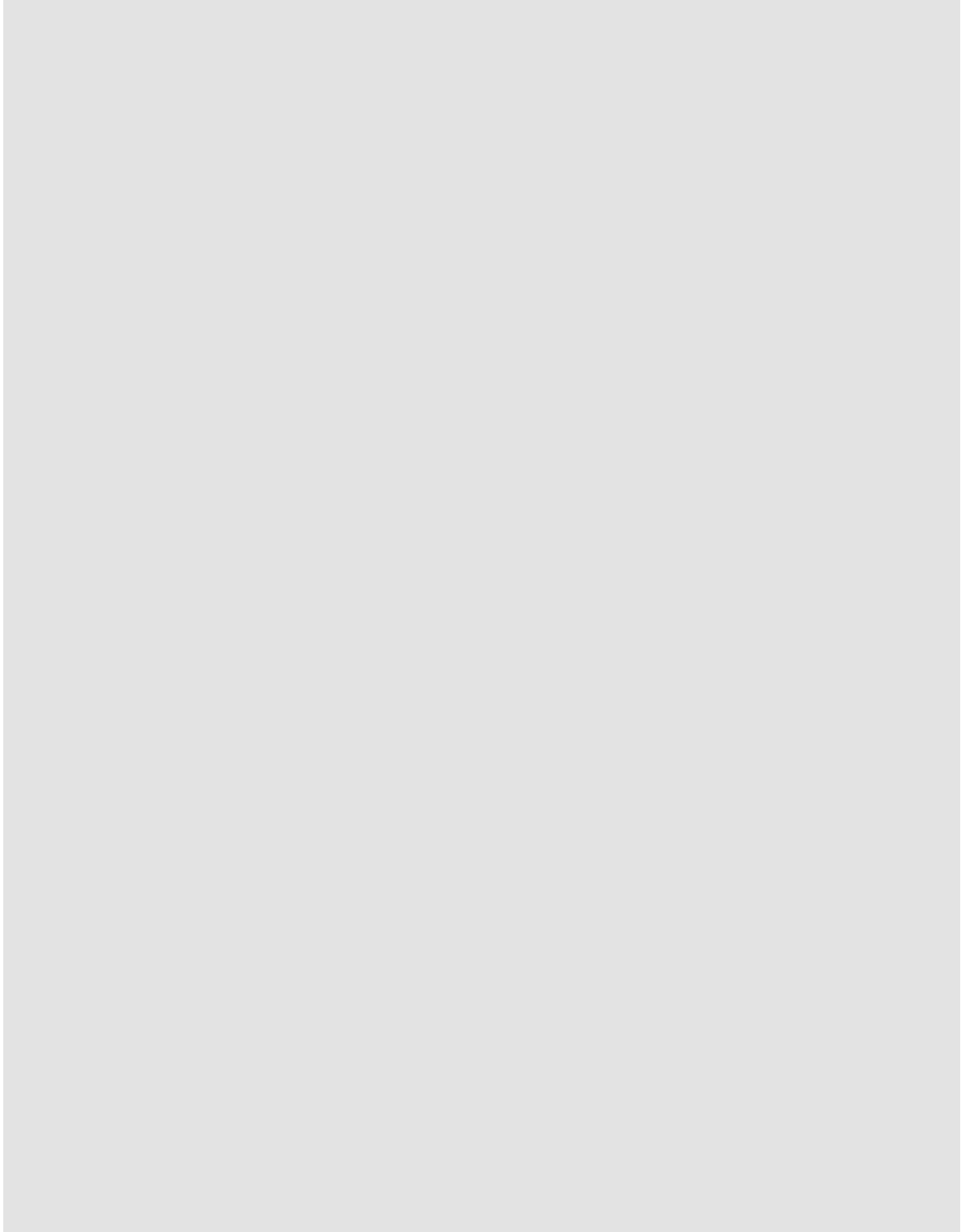
*) 放出量=生成量×0.1

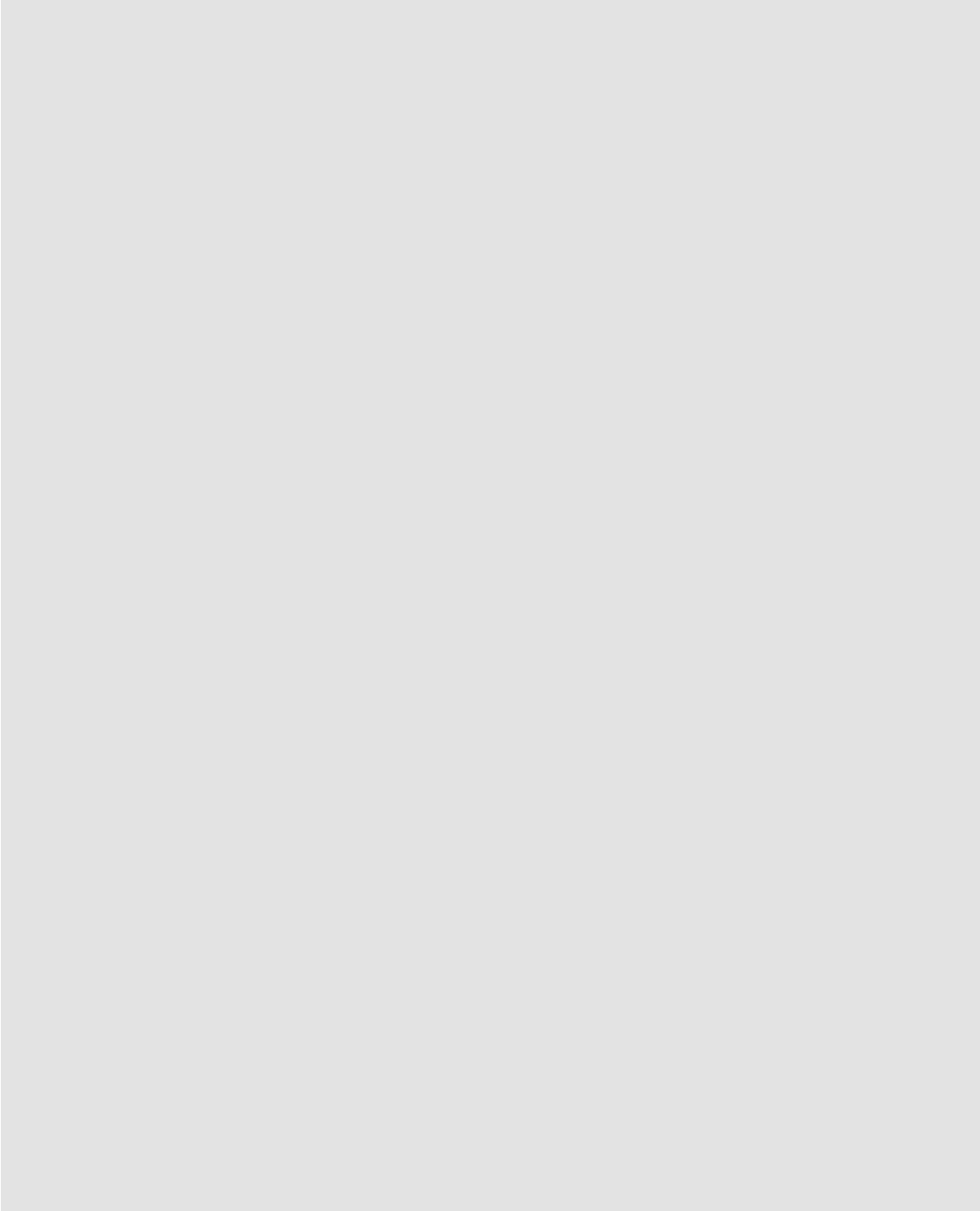
表 3-3-3 EU 試料破損時の被ばく線量 (L2P-50 炉心)

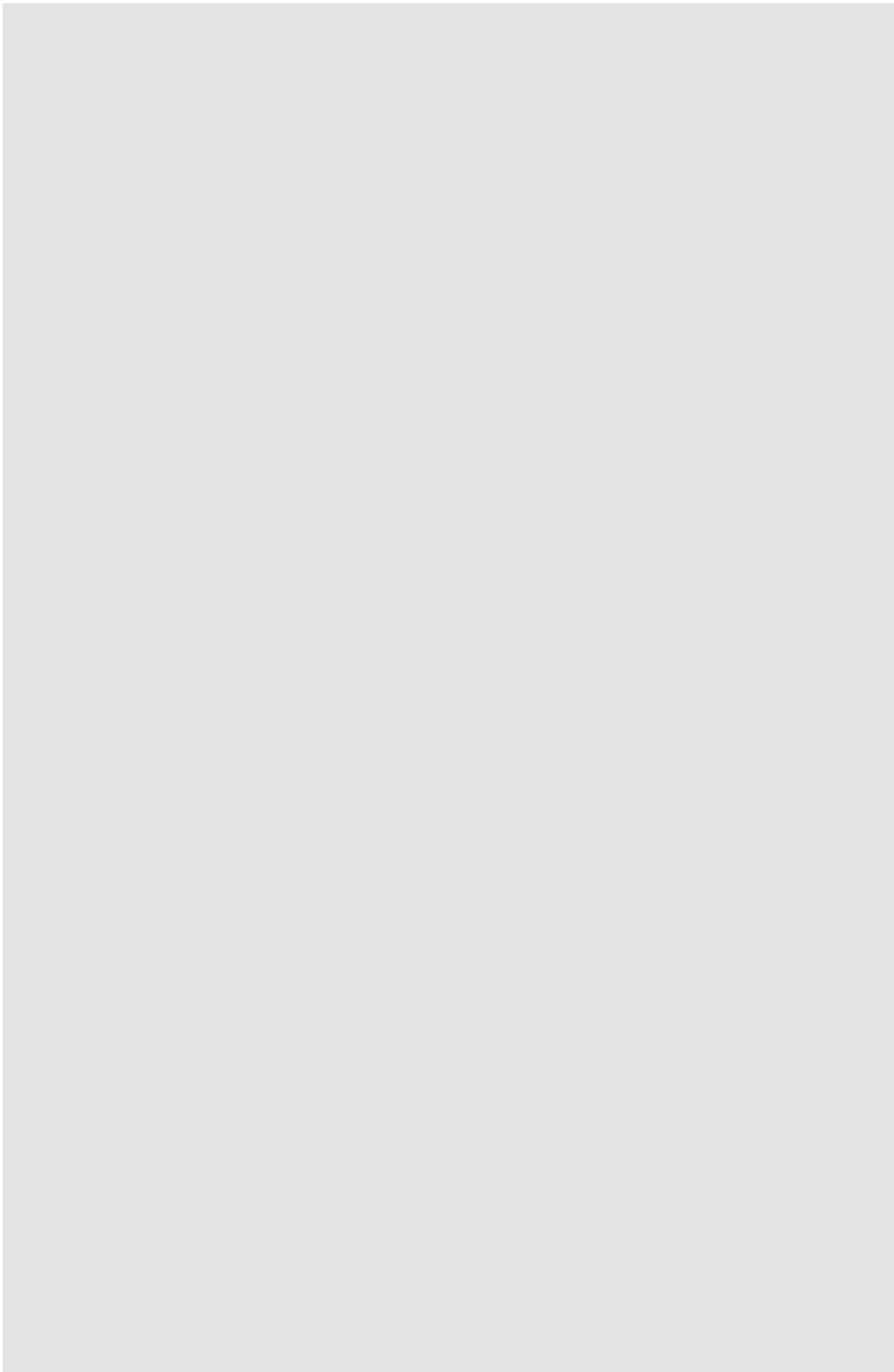
核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) *)	換算または 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)		
^{83m}Kr	4.30E+05	4.30E+04	2.15E+02	1.15E+07	9.90E-05		
^{85}Kr	3.72E-00	3.72E-01	1.64E-03				
^{85m}Kr	4.11E+06	4.11E+05	1.31E+05				
^{87}Kr	2.46E+07	2.46E+06	3.90E+06				
^{88}Kr	1.79E+07	1.79E+06	7.00E+06				
^{131m}Xe	4.74E-01	4.74E-02	1.89E-03				
^{133}Xe	6.04E+03	6.04E+02	5.44E+01				
^{133m}Xe	1.30E+03	1.30E+02	1.09E+01				
^{135}Xe	8.58E+05	8.58E+04	4.29E+04				
^{135m}Xe	5.09E+06	5.09E+05	4.40E+05				
^{131}I	5.13E+04	5.13E+03	5.13E+03			1.73E+05	1.88E-01
^{132}I	2.61E+05	2.61E+04	3.75E+02				
^{133}I	2.77E+06	2.77E+05	7.09E+04				
^{134}I	4.57E+07	4.57E+06	1.97E+04				
^{135}I	1.44E+07	1.44E+06	7.66E+04				

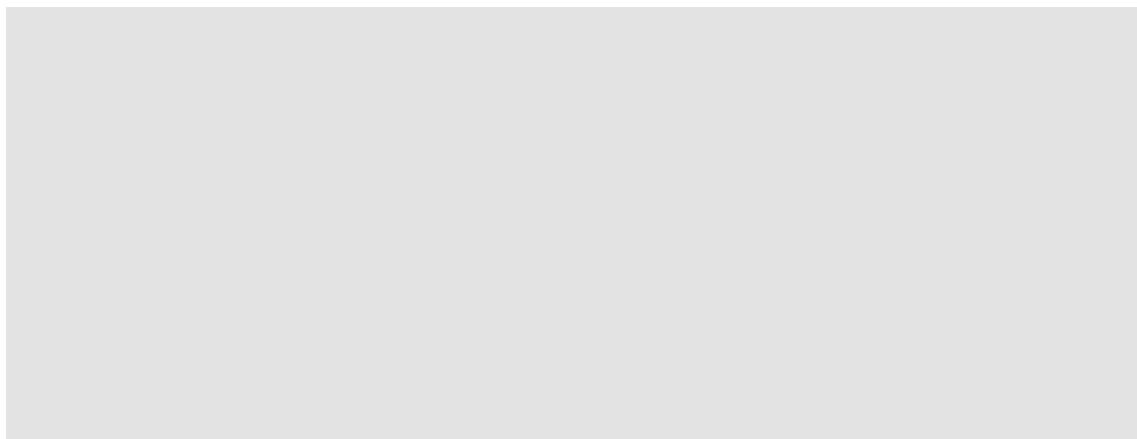
*) 放出量 = 生成量 \times 0.1

【補足A 各炉心の熱容量について】









c) 出典:「NSRR を用いたシリサイド板状燃料実験の技術開発」JAERI-M-91-114

【補足B 燃料温度の算出方法】

1. 炉心内出力の最大値の算出

添付書類 8 で取り上げたすべての代表炉心について臨界解析に用いた SRAC の CITATION により炉心内での発熱分布を求めた。燃料領域での平均値と最大値の比を算出した結果を表B-1に示す。発熱量（核分裂率）の解析方法は以下の通りである。

使用計算コード： SRAC コードシステム (SRAC2006)

使用核データ： JENDL-4.0

エネルギー構造： 107 群 (高速群 62 群、熱群 45 群)

20 群 (高速群 12 群、熱群 8 群)

計算方法： セル計算 PIJ (107 群)、20 群に縮約

炉心計算 CITATION

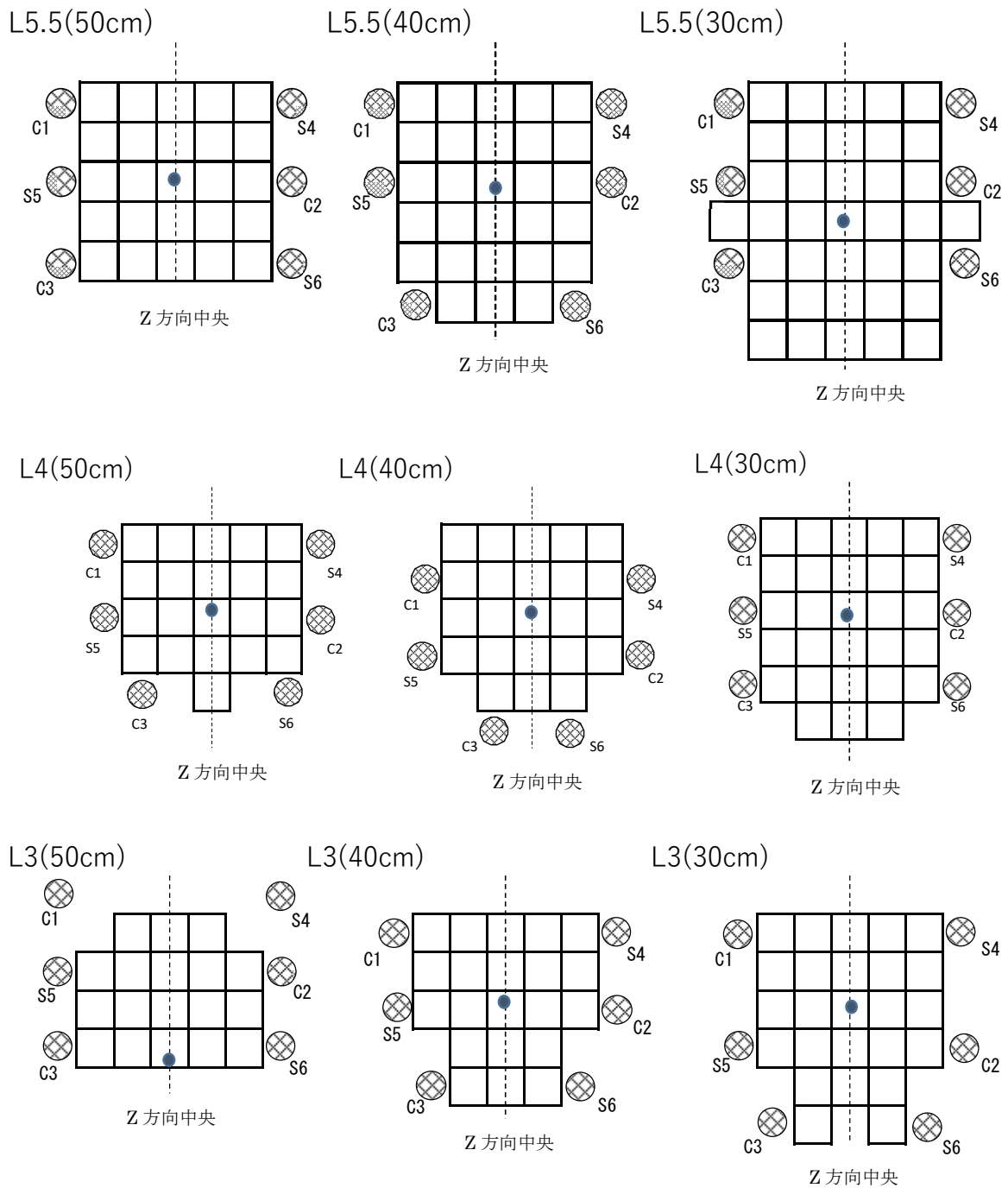
(3次元拡散計算、20群)

(x方向、z方向は反射境界条件、y方向は真空境界条件)

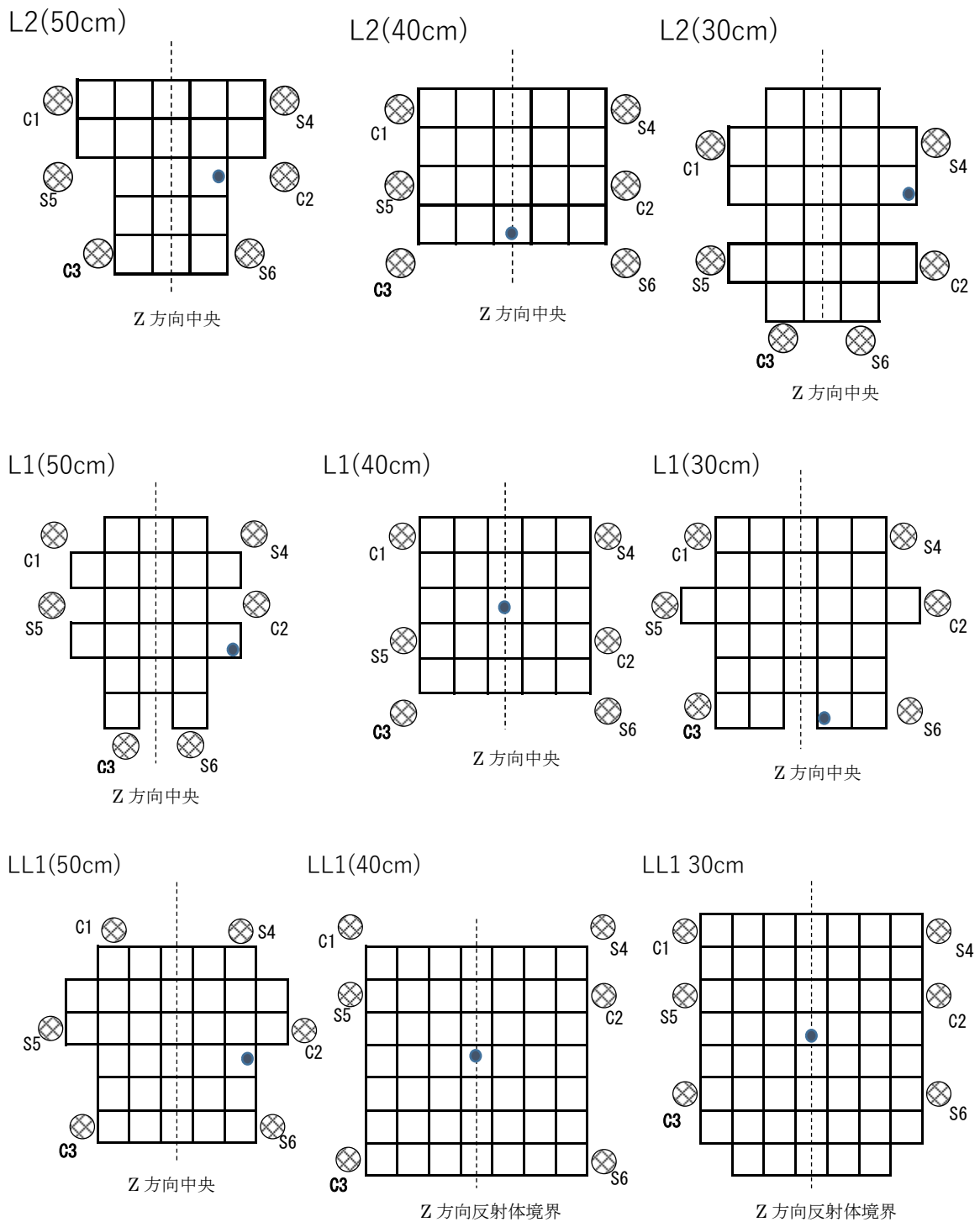
表B-1 各炉心の出力の最大値と平均値の比

	炉心	最大値／平均値 (CITATION 結果)
固体減速炉心	LL1 (30cm)	3.23
	LL1 (40cm)	2.96
	LL1 (50cm)	3.07
	L1 (30cm)	2.81
	L1 (40cm)	2.31
	L1 (50cm)	2.97
	L2 (30cm)	2.13
	L2 (40cm)	2.03
	L2 (50cm)	2.35
	L3 (30cm)	1.91
	L3 (40cm)	1.97
	L3 (50cm)	1.95
	L4 (30cm)	2.00
	L4 (40cm)	2.01
	L4 (50cm)	2.05
	L5.5 (30cm)	2.10
	L5.5 (40cm)	2.11
	L5.5 (50cm)	2.10
軽水減速炉心	C30G0 (4 列)	2.51
	C30G0 (5 列)	2.36
	C35G0 (4 列)	2.25
	C35G0 (5 列)	2.28
	C45G0 (4 列)	1.97
	C45G0 (5 列)	2.09
	C60G0 (4 列)	1.80
	C60G0 (5 列)	1.87
	C45G2 (4 列)	2.60
	C45G5 (4 列)	3.28
	C45G6 (4 列)	3.26
	C45G7 (4 列)	3.14

	C45G10 (4 列)	2.63
	C45G15 (4 列)	2.11
	C45G2 (5 列)	2.55
	C45G5 (5 列)	3.30
	C45G6 (5 列)	3.34
	C45G7 (5 列)	3.28
	C45G10 (5 列)	2.87
	C45G15 (5 列)	2.36
	C60G2 (4 列)	2.58
	C60G5 (4 列)	3.04
	C60G7 (4 列)	2.80
	C60G10 (4 列)	2.30
	C60G15 (4 列)	1.85



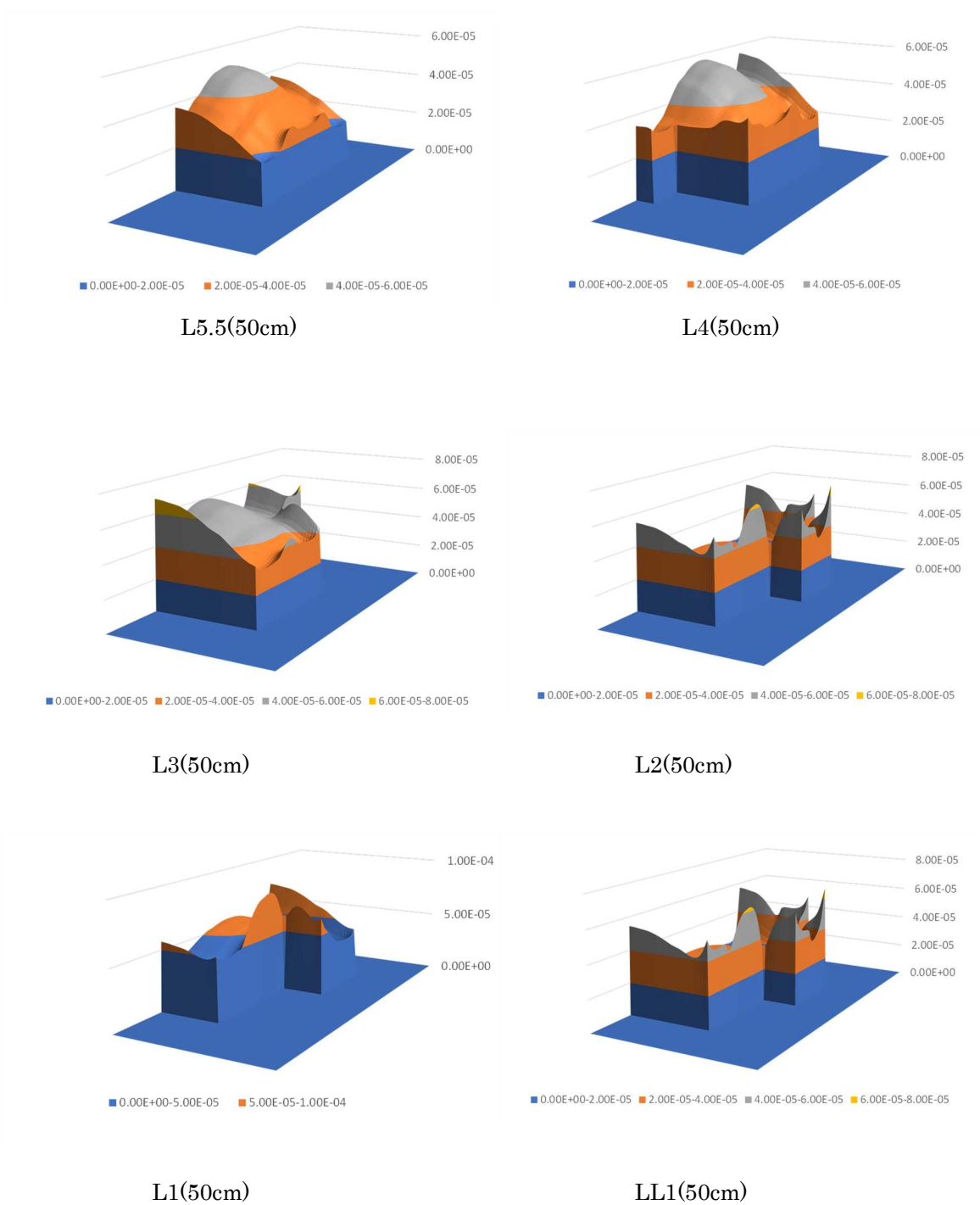
図B-1 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)
 (炉心内丸印が出力分布が最大となる点
 z方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)



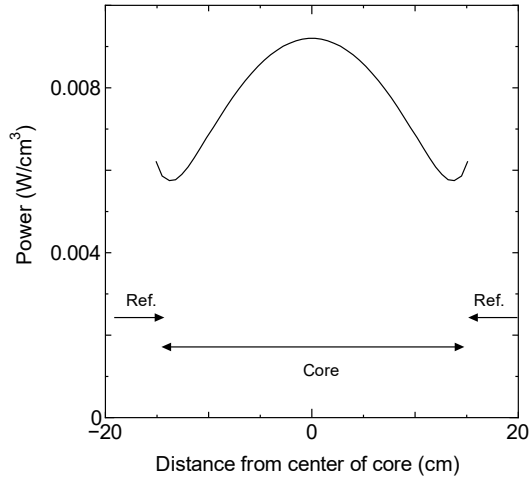
図B-2 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

(炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

z 方向(垂直方向)は LL1(40cm)、LL1(30cm) 以外の炉心はすべて中央で出力分布は最大となる。LL1(40cm)、LL1(30cm) 炉心は丸印の燃料体の z 方向(垂直方向)の反射体境界で出力分布は最大となる)

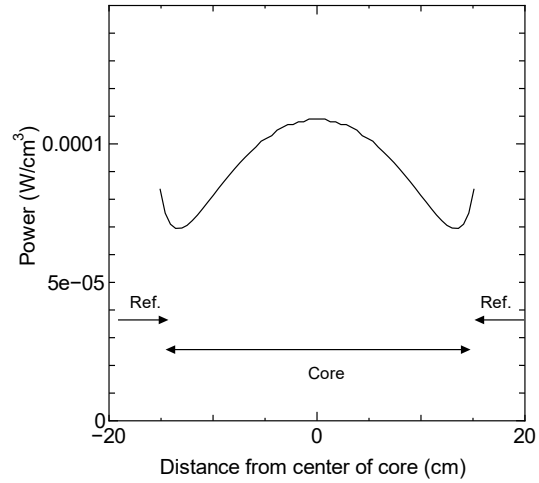


図B-3 出力分布（高さ約50cmの固体減速炉心）
 （炉心出力を1Wで規格化、縦軸の単位はすべてW/cm³）



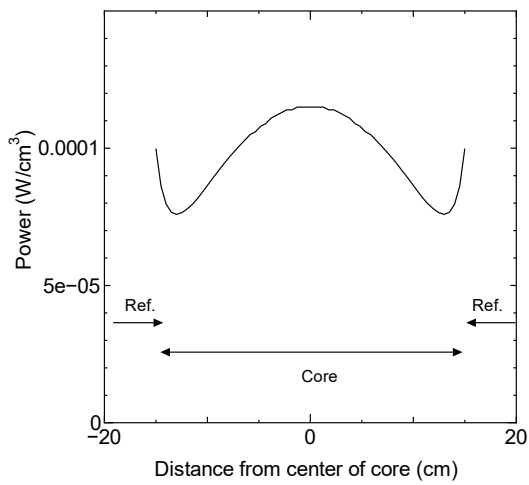
L5.5(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.21)



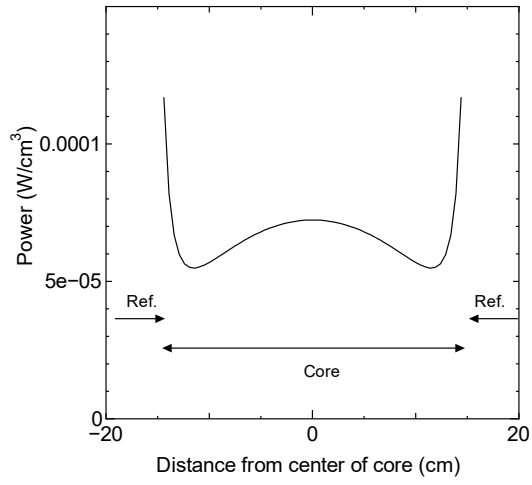
L4(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.20)



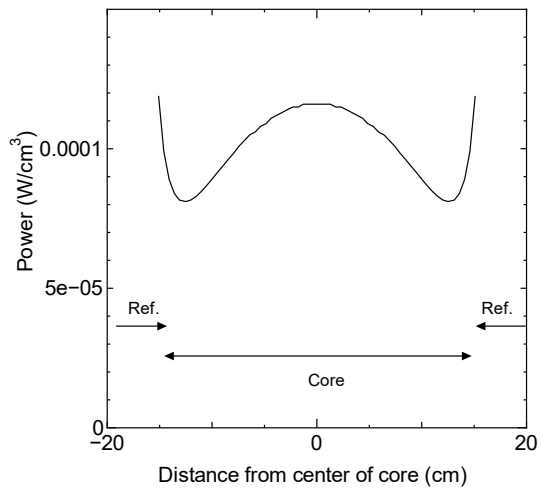
L3(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.18)



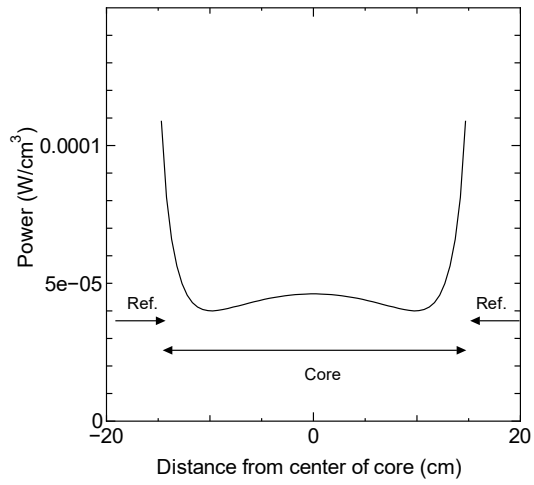
L2(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.15)



L1(30cm)炉心

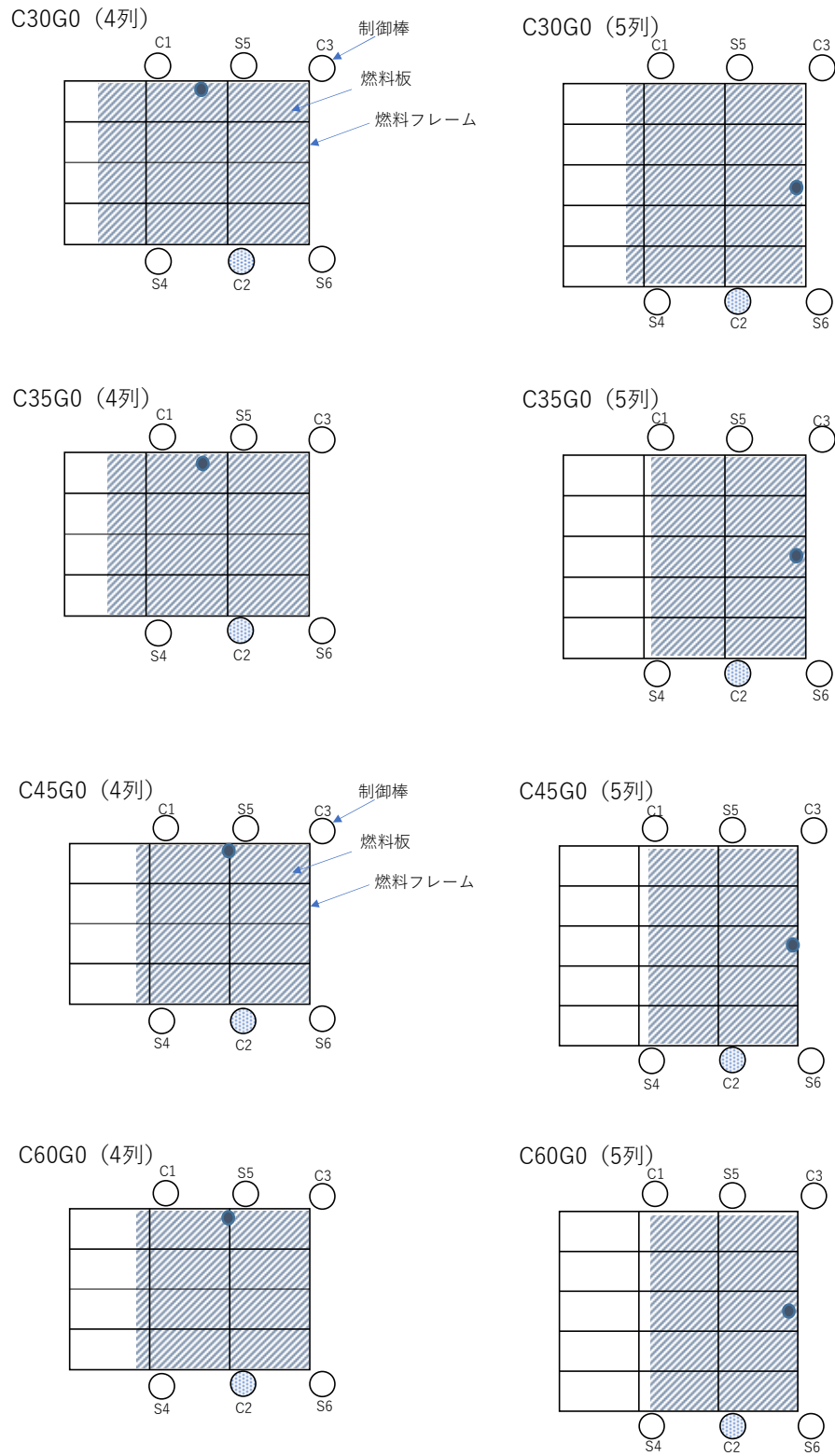
(z 方向平均値に対する中央比率 1.08)



LL1(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 0.96)

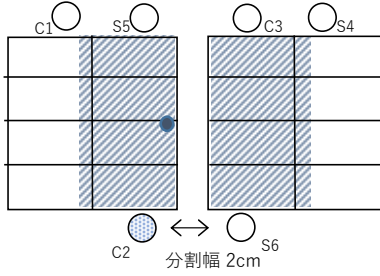
図 B-4 出力分布 (高さ約 30cm の固体減速炉心の炉心中心付近の z 方向)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)



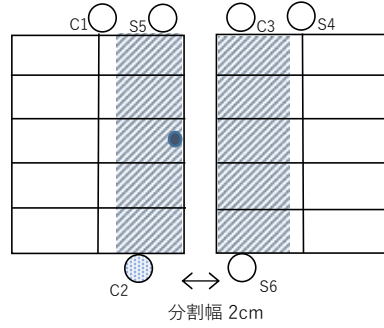
図B-5 軽水減速炉心の炉心配置図(1)
(炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)

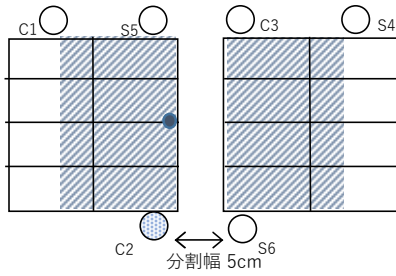
C45G (2H₂O) (4列)



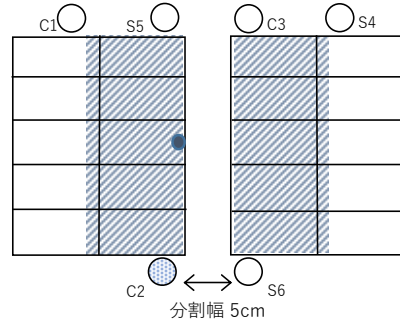
C45G (2H₂O) (5列)



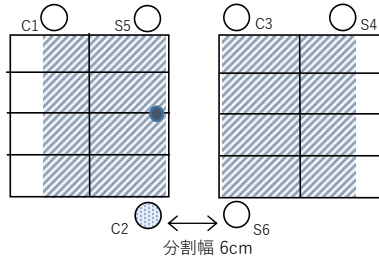
C45G (5H₂O) (4列)



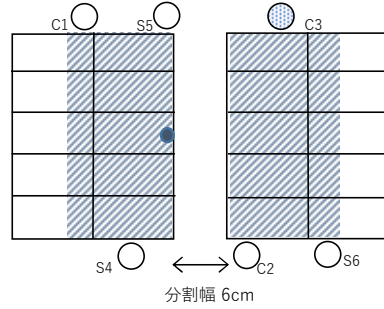
C45G (5H₂O) (5列)



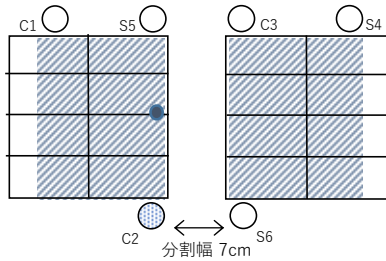
C45G (6H₂O) (4列)



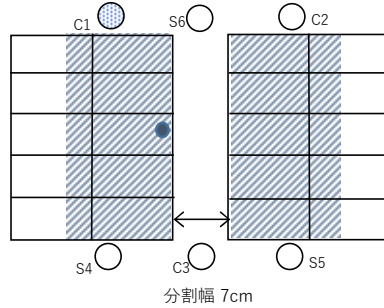
C45G (6H₂O) (5列)



C45G (7H₂O) (4列)

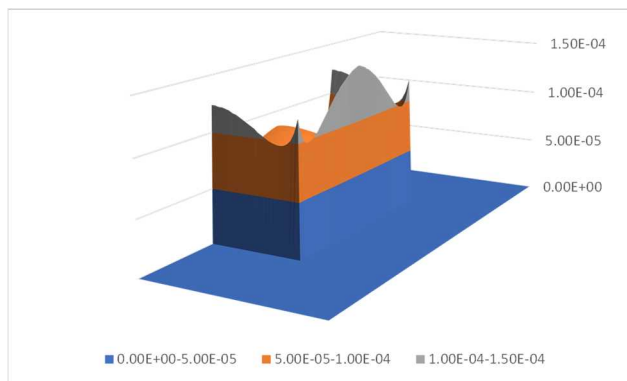


C45G (7H₂O) (5列)

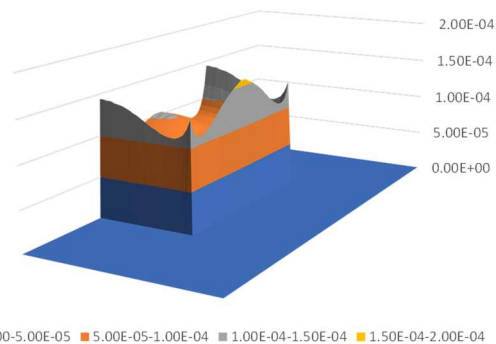


図B-6 軽水減速炉心の炉心配置図(2)
(炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

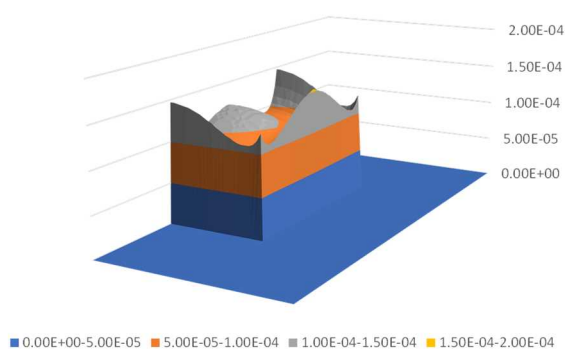
z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)



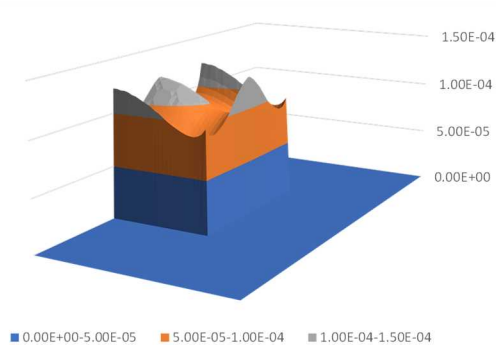
C30G0-4 列 炉心



C35G0-4 列 炉心

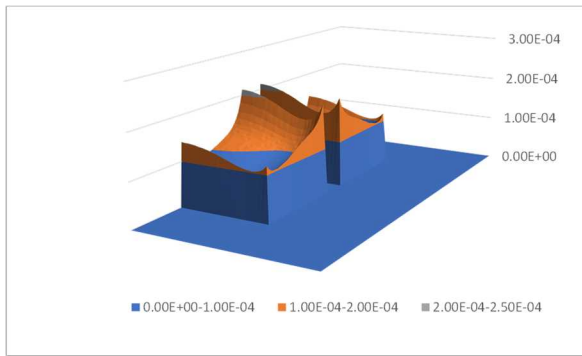


C45G0-4 列 炉心

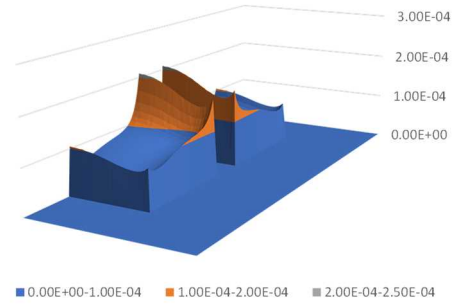


C60G0-4 列 炉心

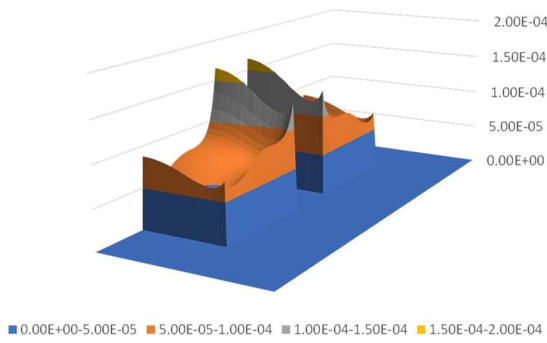
図B-7 出力分布 (4列の軽水減速炉心の高さ方向中央)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)



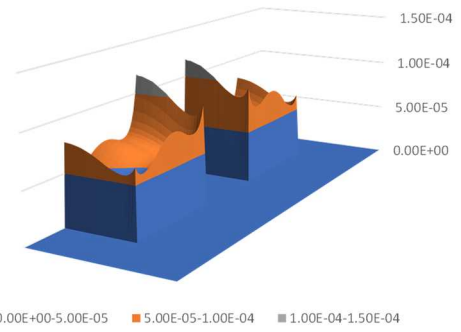
C45G2-4 列 炉心



C45G5-4 列 炉心

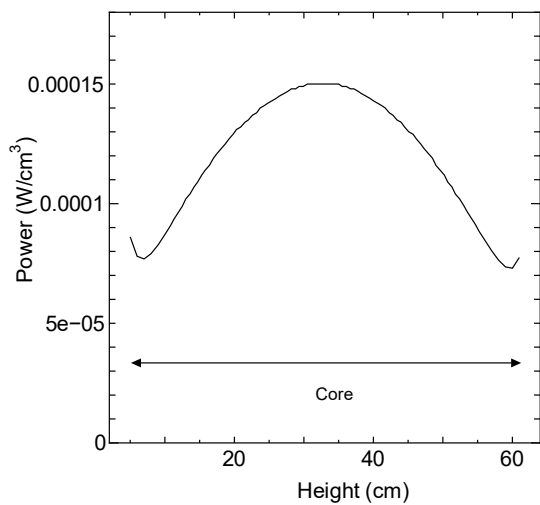


C45G7-4 列 炉心



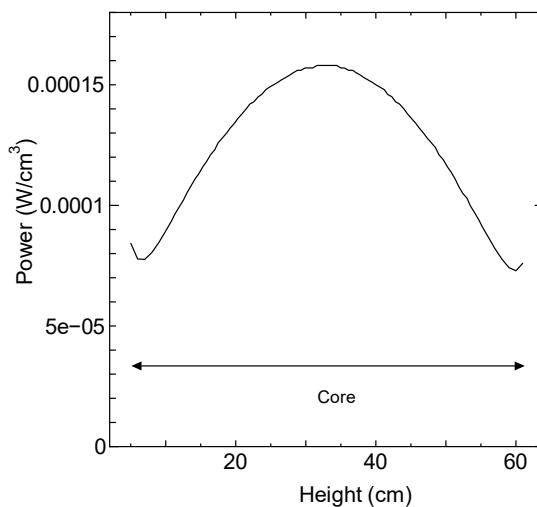
C45G10-4 列 炉心

図B-8 出力分布 (4列の軽水減速炉心の2分割炉心、高さ方向中央)
(炉心出力を1Wで規格化、縦軸の単位はすべてW/cm³)



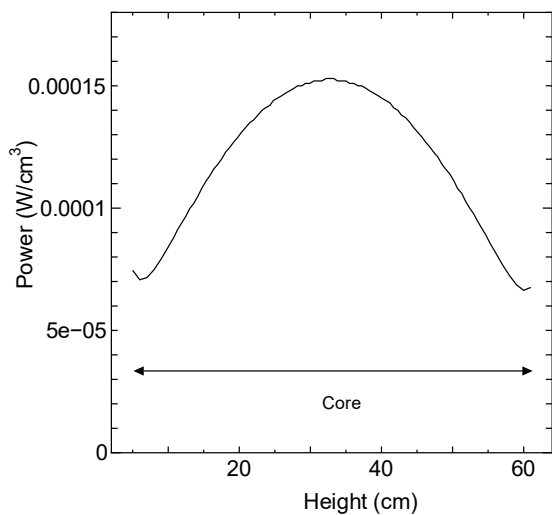
C30G0 (4 列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.23)



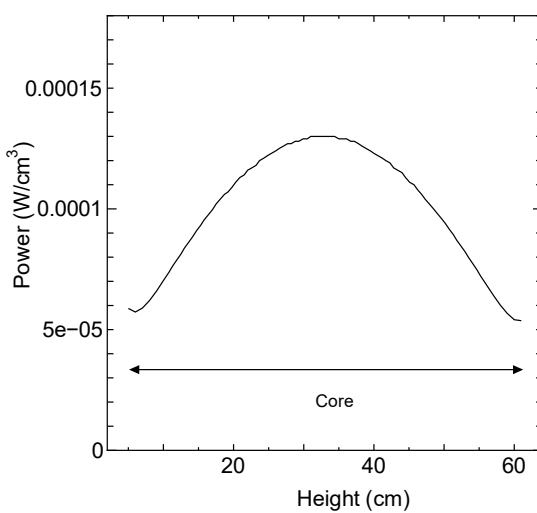
C35G0 (4 列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.24)



C45G0 (4 列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.25)



C60G0 (4 列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.26)

図B-9 出力分布 (4 列の軽水減速炉心の炉心中心付近の z 方向高さ方向中央)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)

2. 燃料板内の出力分布の考慮

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 B-10～図 B-13 に、軽水減速炉心について図 B-13～図 B-14 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。

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 B-2 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。

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値に対して、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。

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の値に炉心内の最高出力と平均出力の比（表 B-1）を掛ける
- ⑤ ④の値に表 B-1 の燃料板内の出力比を掛ける

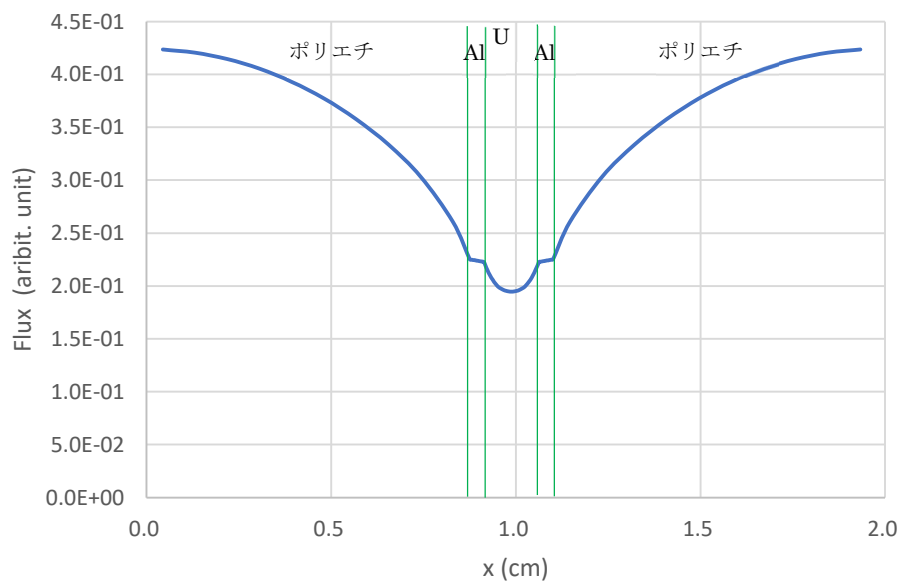


図 B-10 L5.5セル（燃料1枚+1/8”×5.5枚ポリエチレン）熱中性子束分布

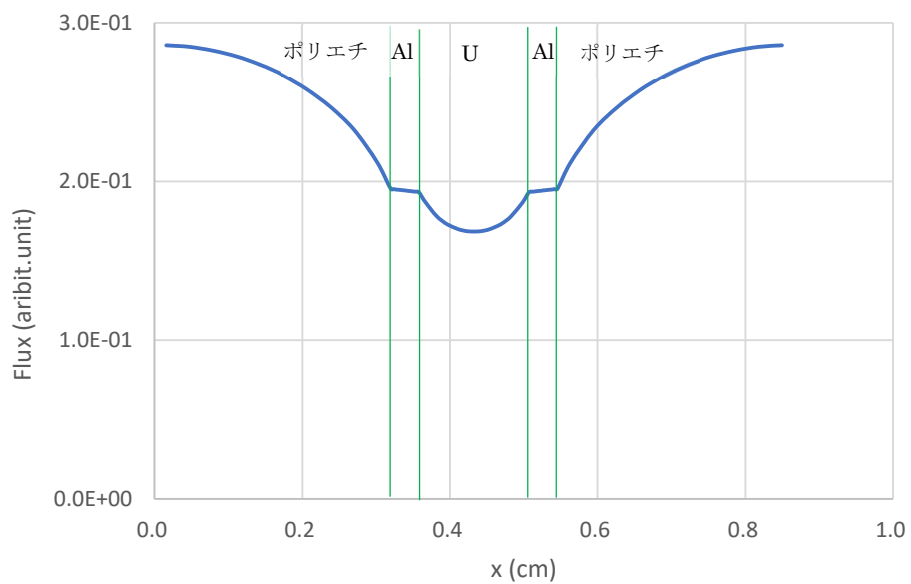


図 B-11 L2セル（燃料1枚+1/8”×2枚ポリエチレン）熱中性子束分布

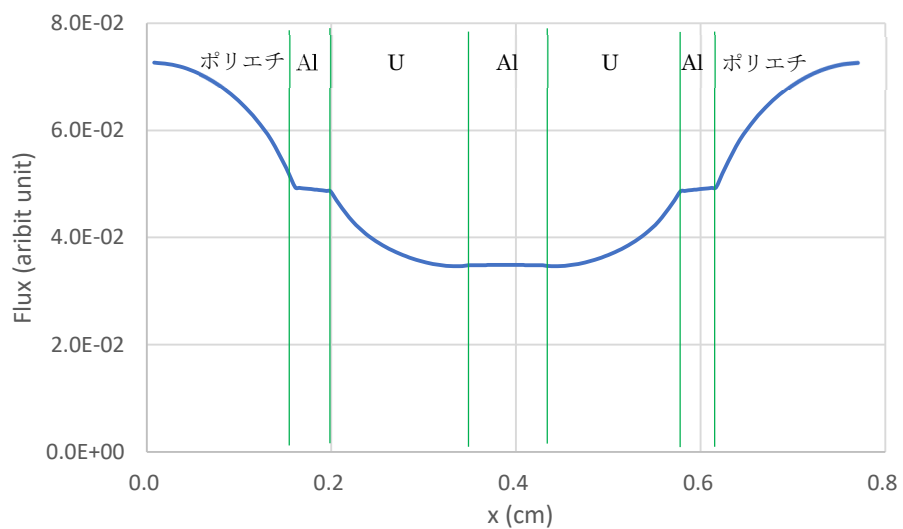


図 B-12 LL1 セル (燃料 2 枚 + 1/8" × 1 枚ポリエチレン) 熱中性子束分布

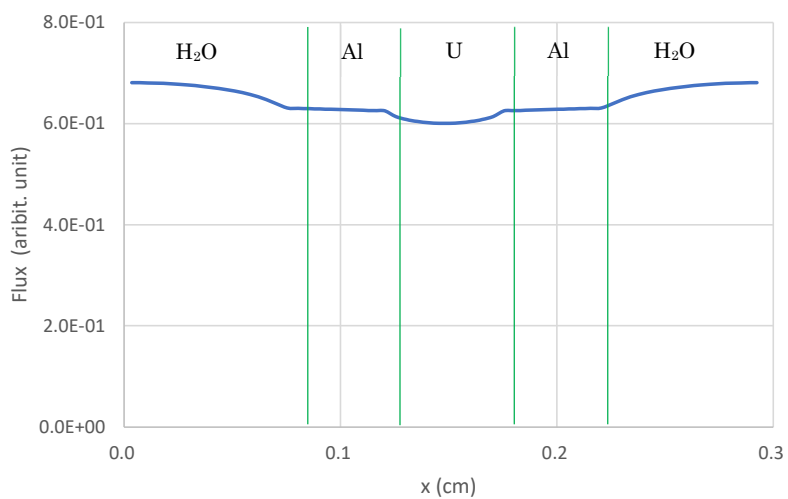


図 B-13 軽水減速炉心 C30 セル 熱中性子束分布

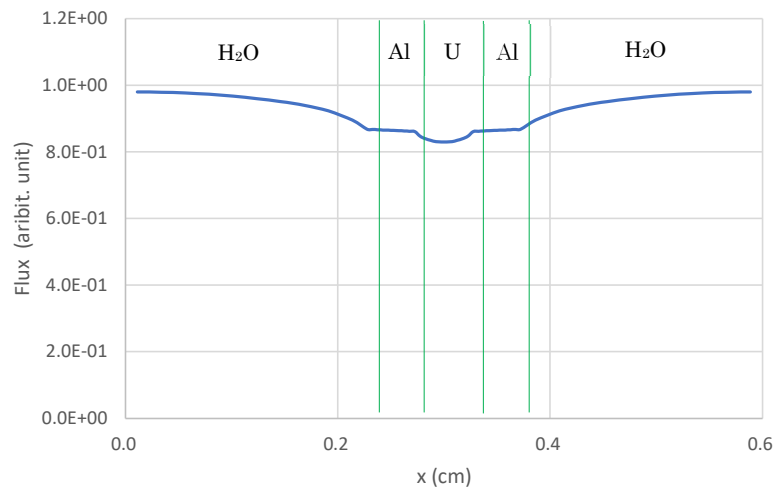


図 B-14 軽水減速炉心 C60 セル 熱中性子束分布

表 B-2 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)

【補足C 高出力運転後の炉心交換作業について】

原子炉施設保安規定には高出力運転後の作業開始の規定については記載が無く、被ばく管理の基本方針として、「放射線管理部長は、管理区域に立ち入る者の線量を、通常時において、放射線業務従事者については1 mSv/週以下にするように被ばく管理上の措置を講じなければならない。」と記載されており、それに従って作業を行うことが原則となる。

現状では1W以上の高出力運転を行った直後は点検も含めて炉心に近づく作業は禁止して翌日に炉心作業を行うことにしており、その際であっても燃料体を取り出して操作する作業は鉛エプロンを装着して短時間で行うなどなどの対応をすることで、できる限り被ばく量を少なくするように努めている。

設計基準事故では100Wで1時間運転を行った後に燃料操作を行ったときに燃料破損をしてしまうことを想定している。運転後の経過時間を変化させた時の燃料板中のFPの量をORIGENにより求めた。ここで解析の対象とした炉心は軽水減速炉心で、臨界燃料板枚数の少ないC45G2 [REDACTED] FPの総量を1/8倍したものが含まれると仮定した。ORIGENではそのFPから放出されるエネルギー18群(0.01~9.5MeV)のガンマ線の光子数が求められるので、そのFPが点線源であるとして燃料板や空気での減衰を無視したときの1m離れた位置での光子束を求め、ガンマ線のエネルギーから線量に換算する係数を掛けて線量率を算出した。

運転後の経過時間を変化させた時の燃料1体から発生する放射線による1m離れた位置での線量率の解析結果を表A-1に示す。この表での1時間というのは、臨界状態から停止までにかかる時間と炉室作業を始めるまでの準備にかかる時間を考慮して、運転後に燃料操作を開始する最短時間の目安と考える。

燃料作業を行う際の燃料との作業員との距離は1mよりもっと短いため、作業場所での線量率はこの表の値の数倍以上となると考えられる。1回の作業当たりの放射線被ばく量を1mSv以下に抑えることを考えると、運転停止後24時間以上経過してから燃料作業を行うという考え方にならざるを得ないと考える。(これまでの経験から考えると、被ばく線量を下げするためにさらに数日以上時間を開けることになる)と考える)

表C-1 100W 運転後の燃料 1 体当たりの線量率

経過時間	線量率 (mSv/h/m)
運転直後	98
1 時間後	17
24 時間後	0.47

軽水減速炉心を想定

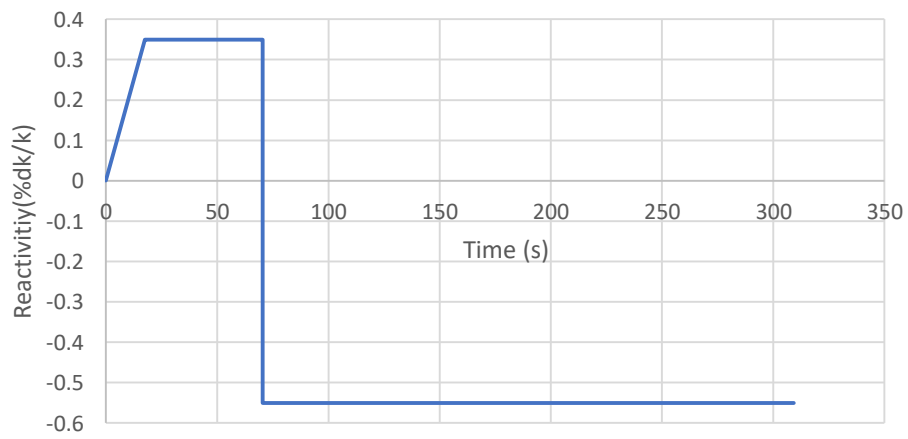
解析コード:ORIGEN 2. 2

【補足D 異常な過渡変化の解析での反応度変化】

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

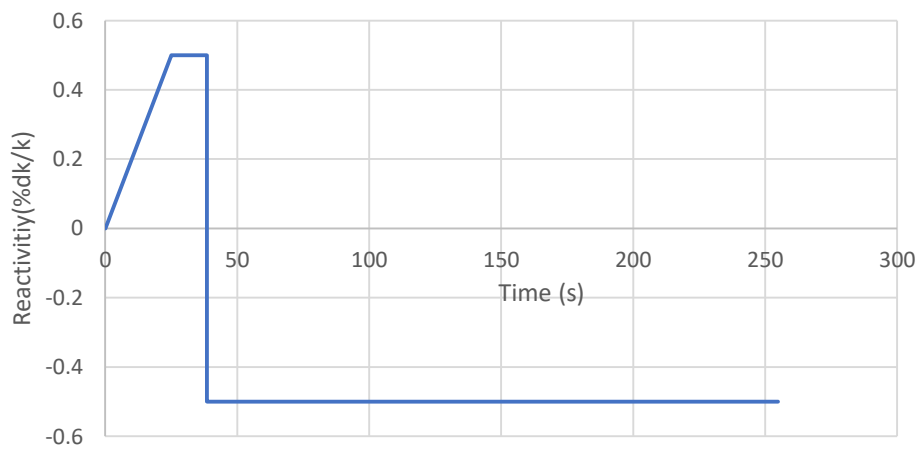
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

L5.5P-30炉心 Case-A



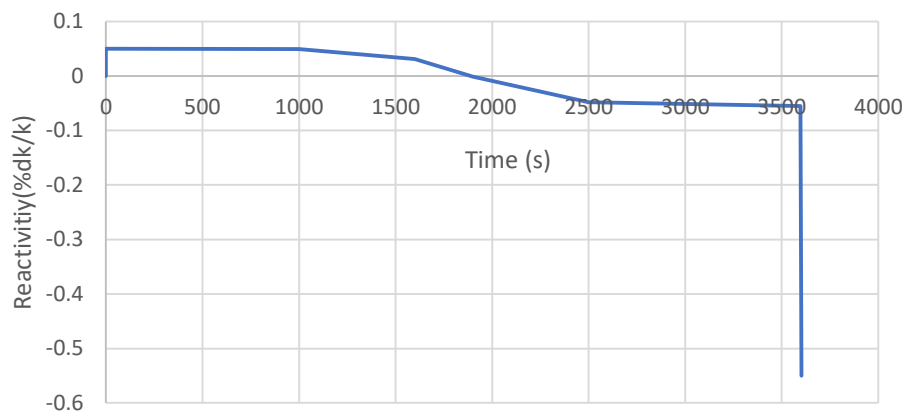
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

C45G2-4炉心 Case-A



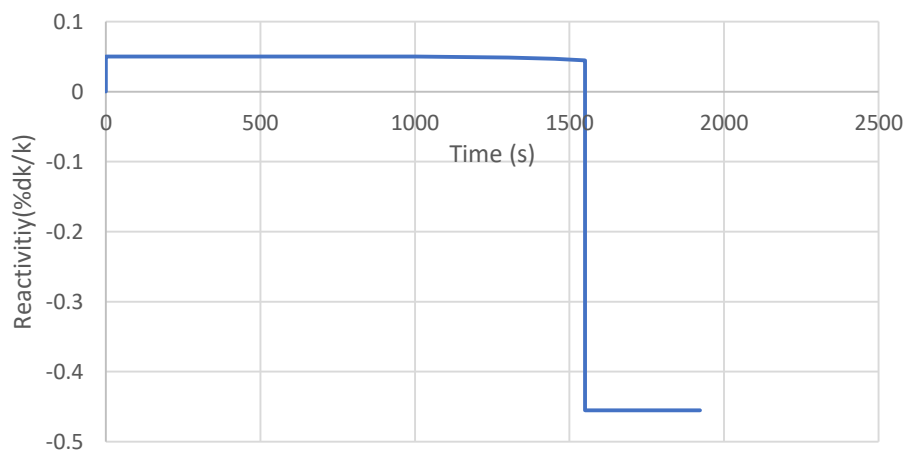
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

L4P-30炉心 Case-B



原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

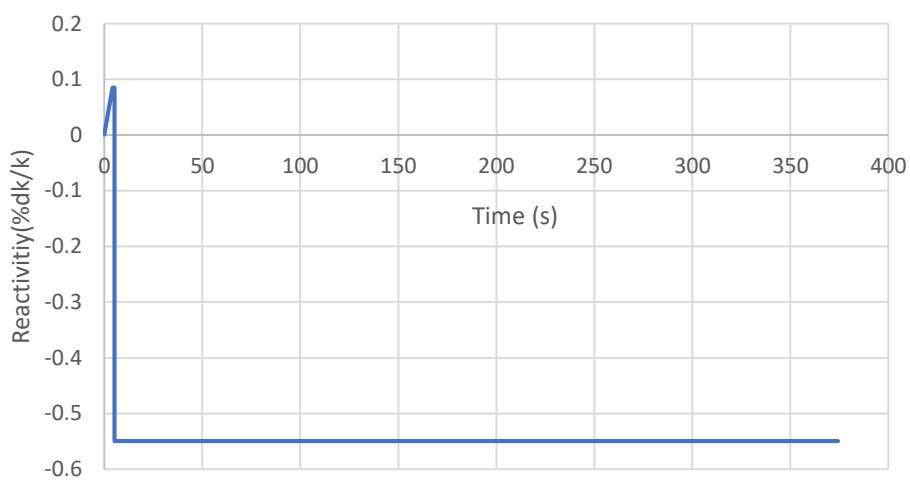
C45G2-4炉心 Case-B



出力運転中の制御棒の異常な引抜き

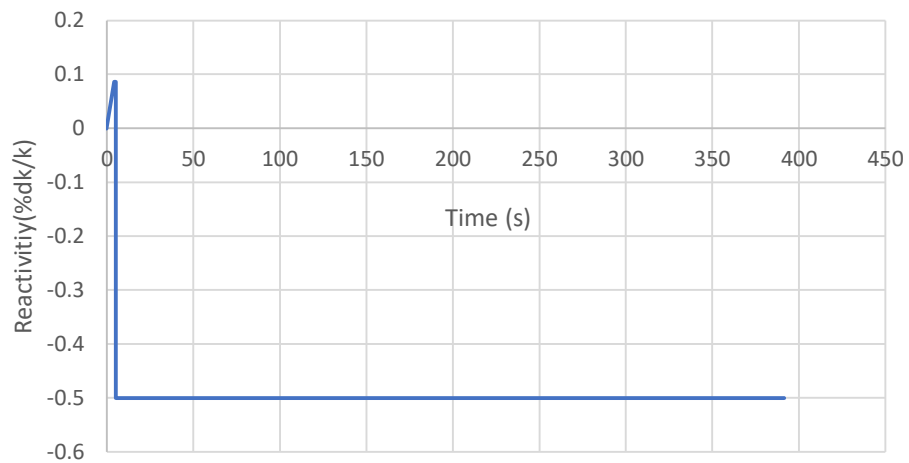
出力運転中の制御棒の異常な引抜き

L5.5P-30炉心



出力運転中の制御棒の異常な引抜き

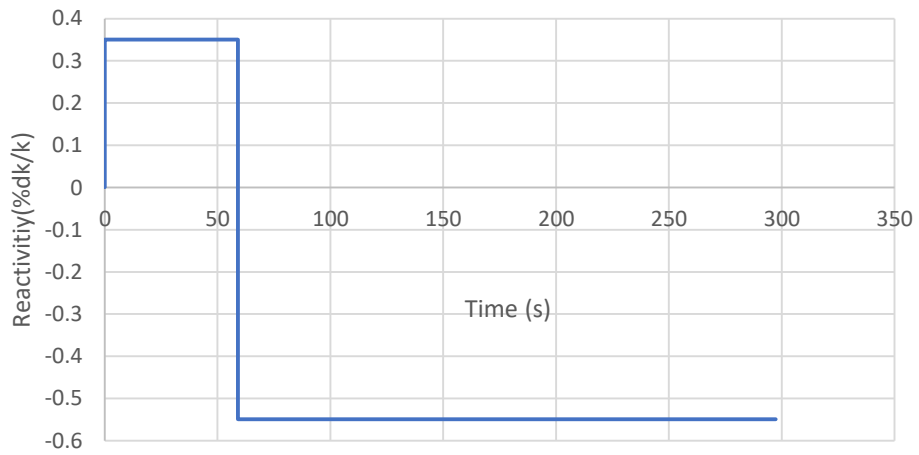
L5.5P-30炉心



実験物の異常等による反応度の付加

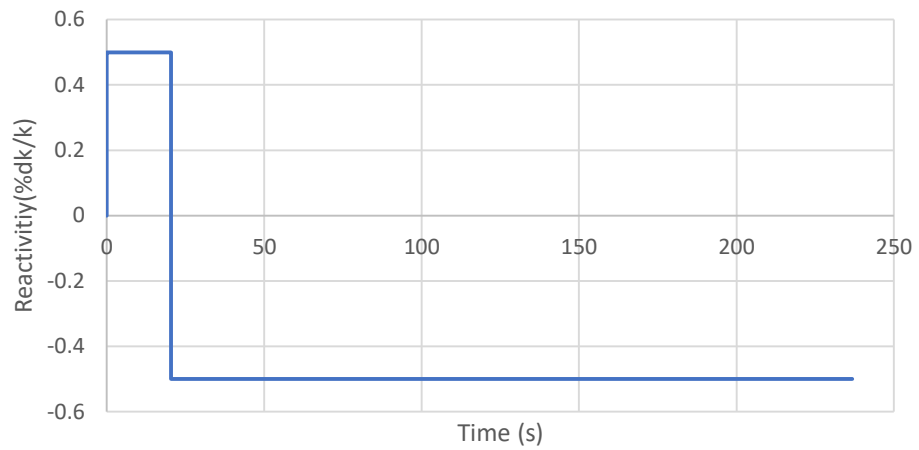
実験物の異常等による反応度の付加

L5.5P-30炉心 Case-A



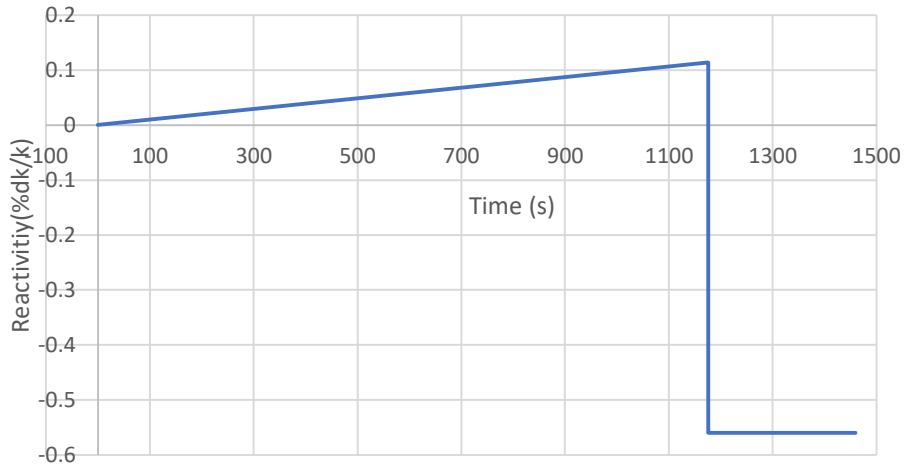
実験物の異常等による反応度の付加

C45G2-4炉心 Case-A



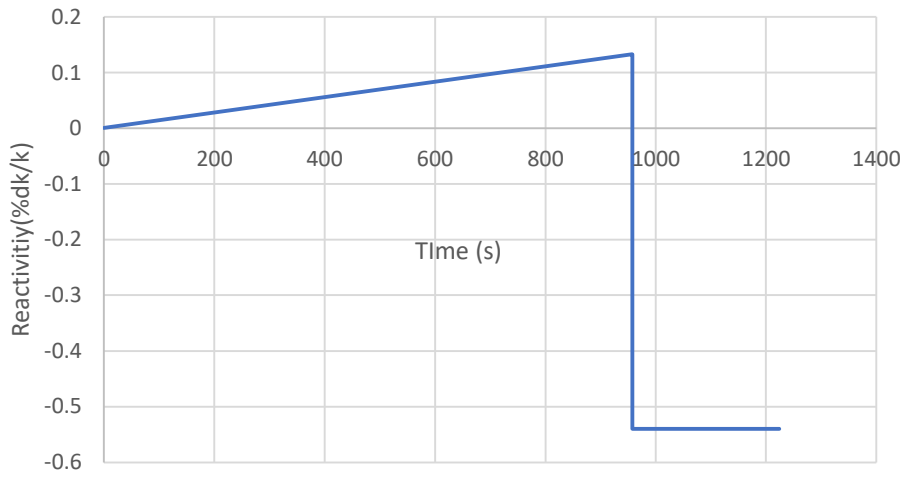
実験物の異常等による反応度の付加

L5.5P-30炉心 Case-B



実験物の異常等による反応度の付加

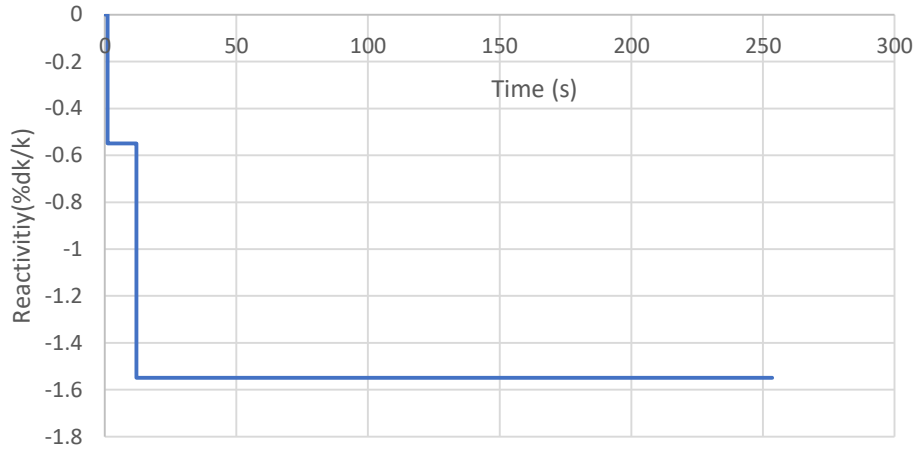
C45G2-4炉心 Case-B



商用電源喪失

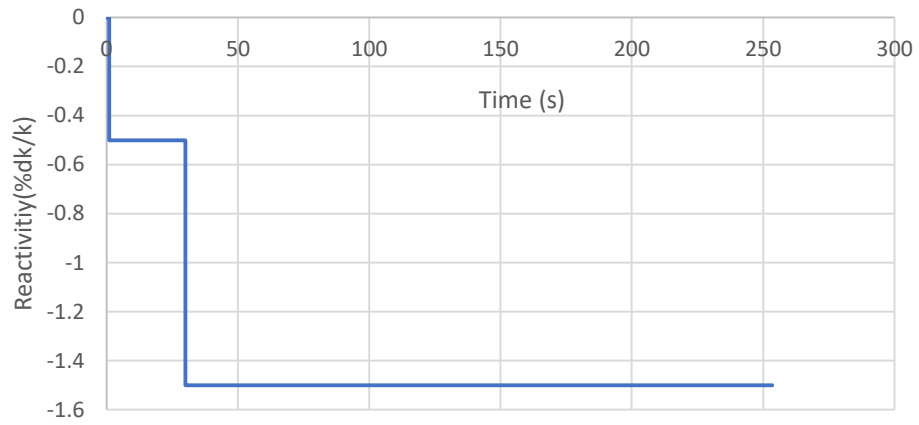
商用電源喪失

L5.5P-30炉心



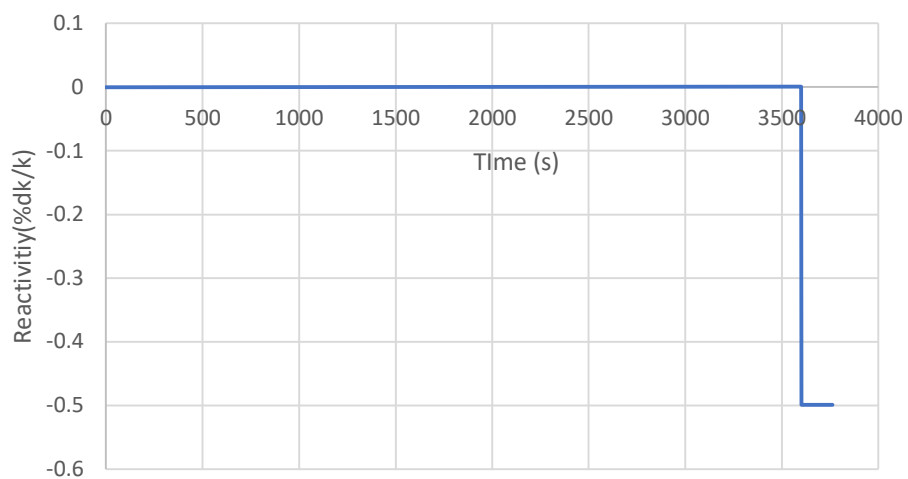
商用電源喪失

C45G2-4炉心



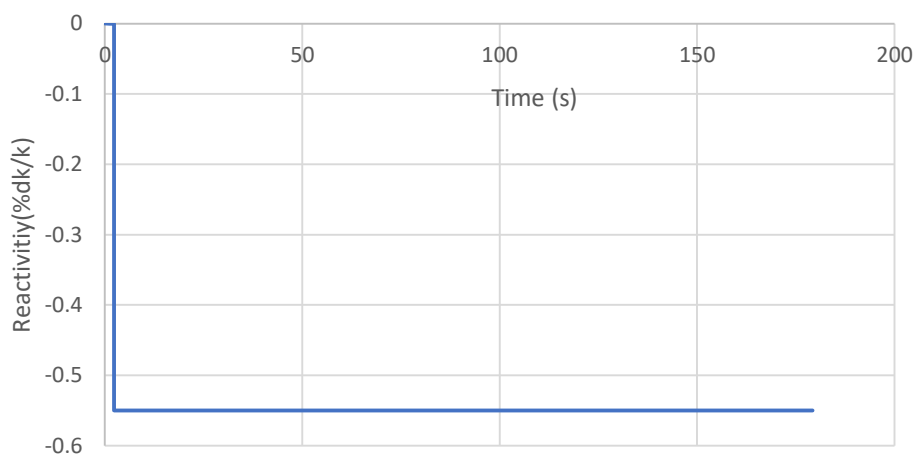
炉心タンクヒータ

炉心タンクヒータ
C45G6-4炉心

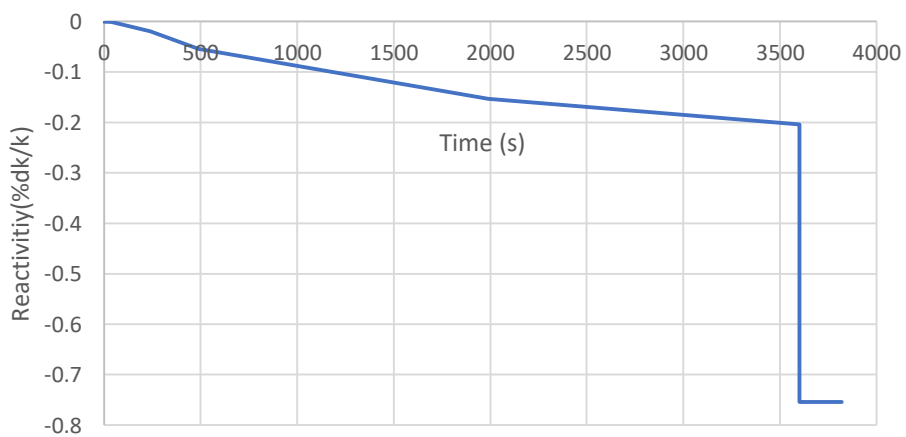


中性子発生設備利用

中性子発生設備利用
L5.5P-30炉心 Case-A



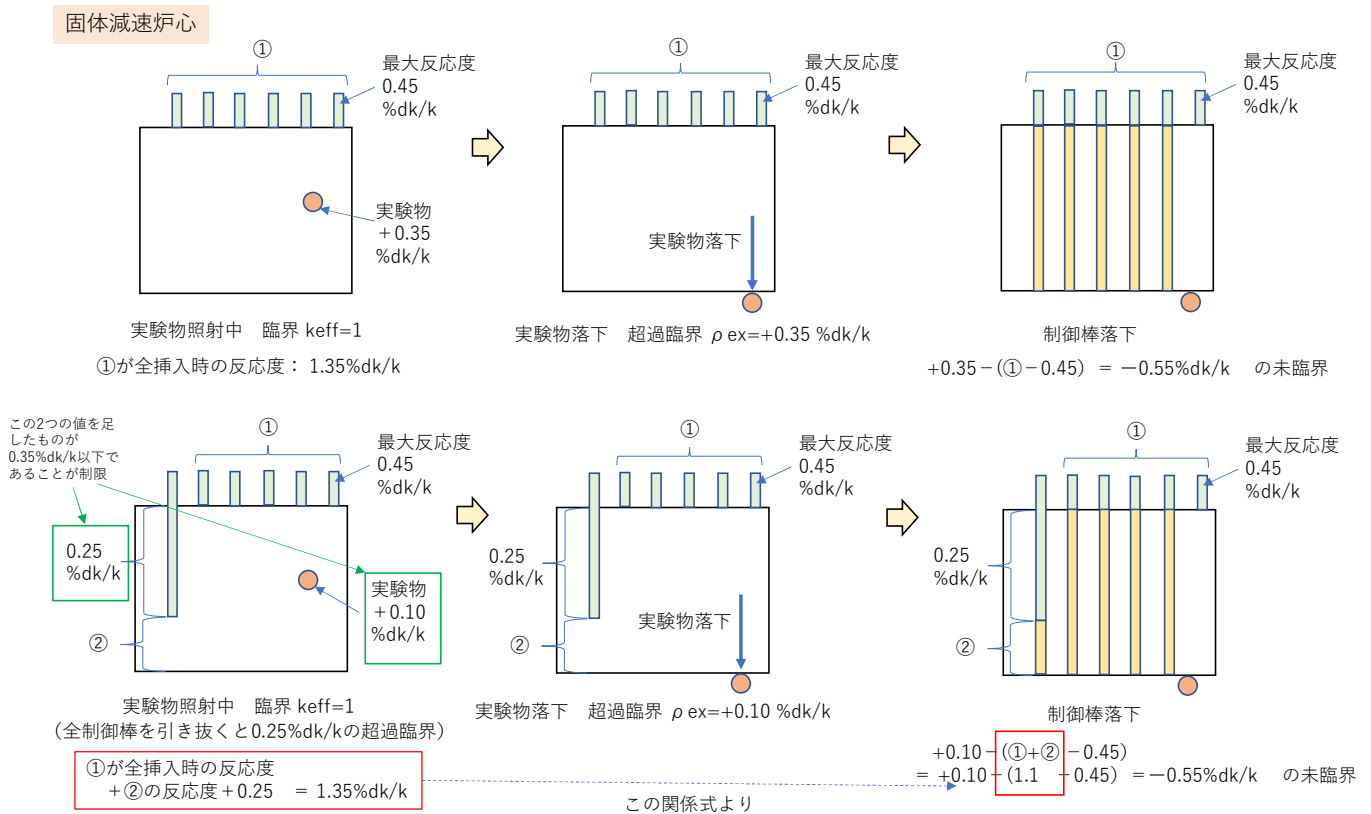
中性子発生設備利用
L5.5P-30炉心 Case-B



【補足E 実験物の異常が生じたときの反応度と制御棒の変化】

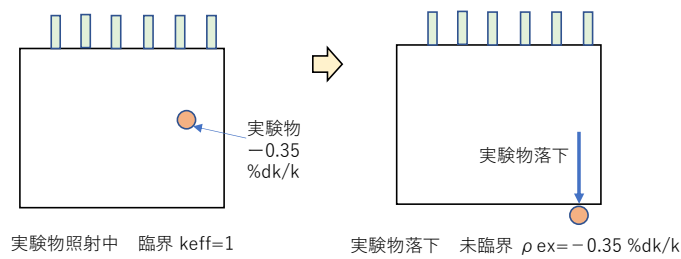
図E-1-1に固体減速炉心で炉心に取り付けたカドミウムが落下した場合、図E-1-2、図E-1-3に固体減速炉心で炉心に取り付けたウラン箔が落下した場合を示す。また、図E-2-1に軽水減速炉心で炉心に取り付けたカドミウムが落下した場合、図E-2-2に軽水減速炉心で炉心に取り付けたウラン箔が落下した場合を示す。

どの場合も制御棒の反応度は核的制限値の最小値（【1 + 過剰反応度 + 実験物の移動に伴う反応度】%dk/k）、最大反応度を持つ制御棒の反応度は最大値（全体の1/3）とする。



図E-1-1 固体減速炉心

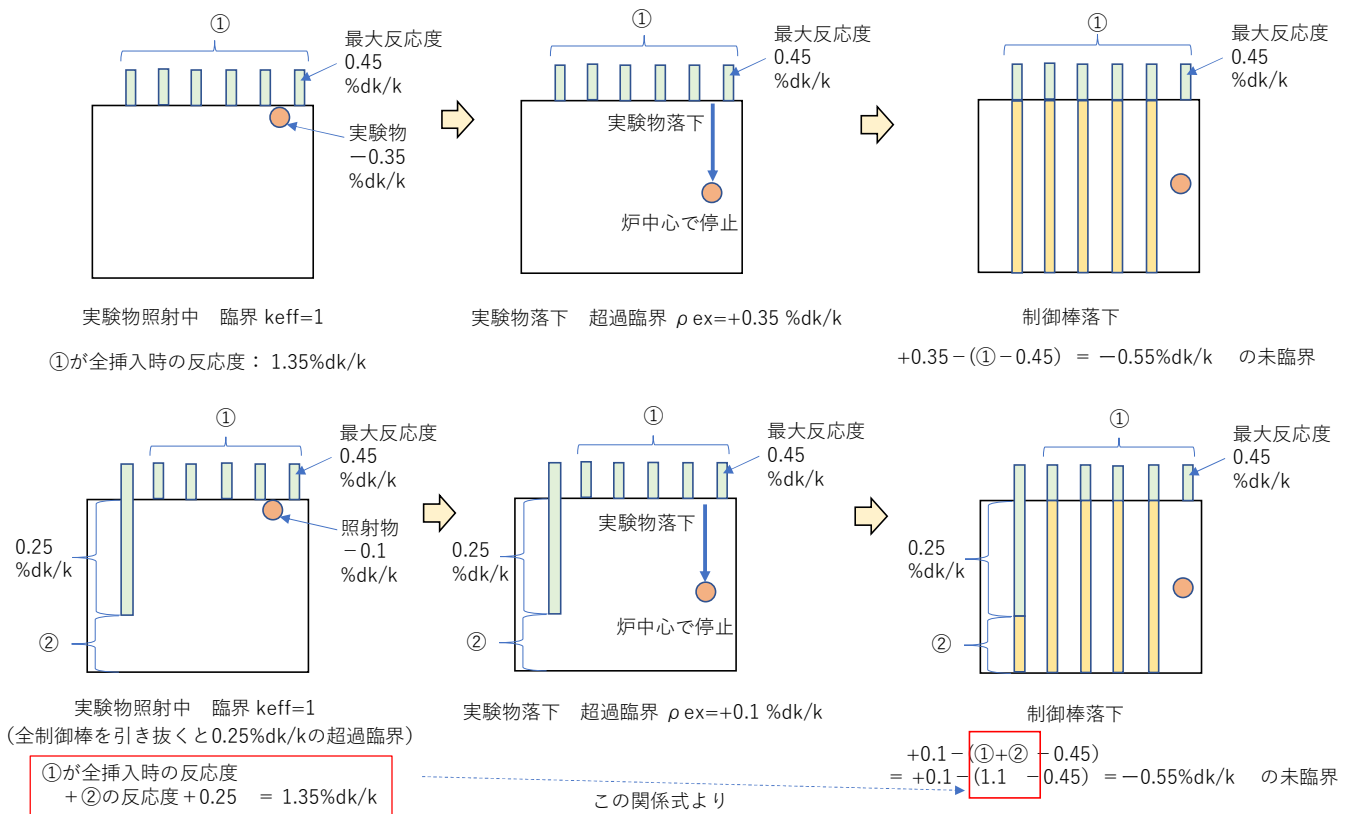
実験物の落下により正の反応度が印加される場合
例えば炉中心に取り付けたカドミウムが炉外に落下



図E-1-2 固体減速炉心

実験物の落下により負の反応度が印加される場合

例えば炉中心に取り付けたウラン箱が炉外に落下、すぐに未臨界となり炉停止する

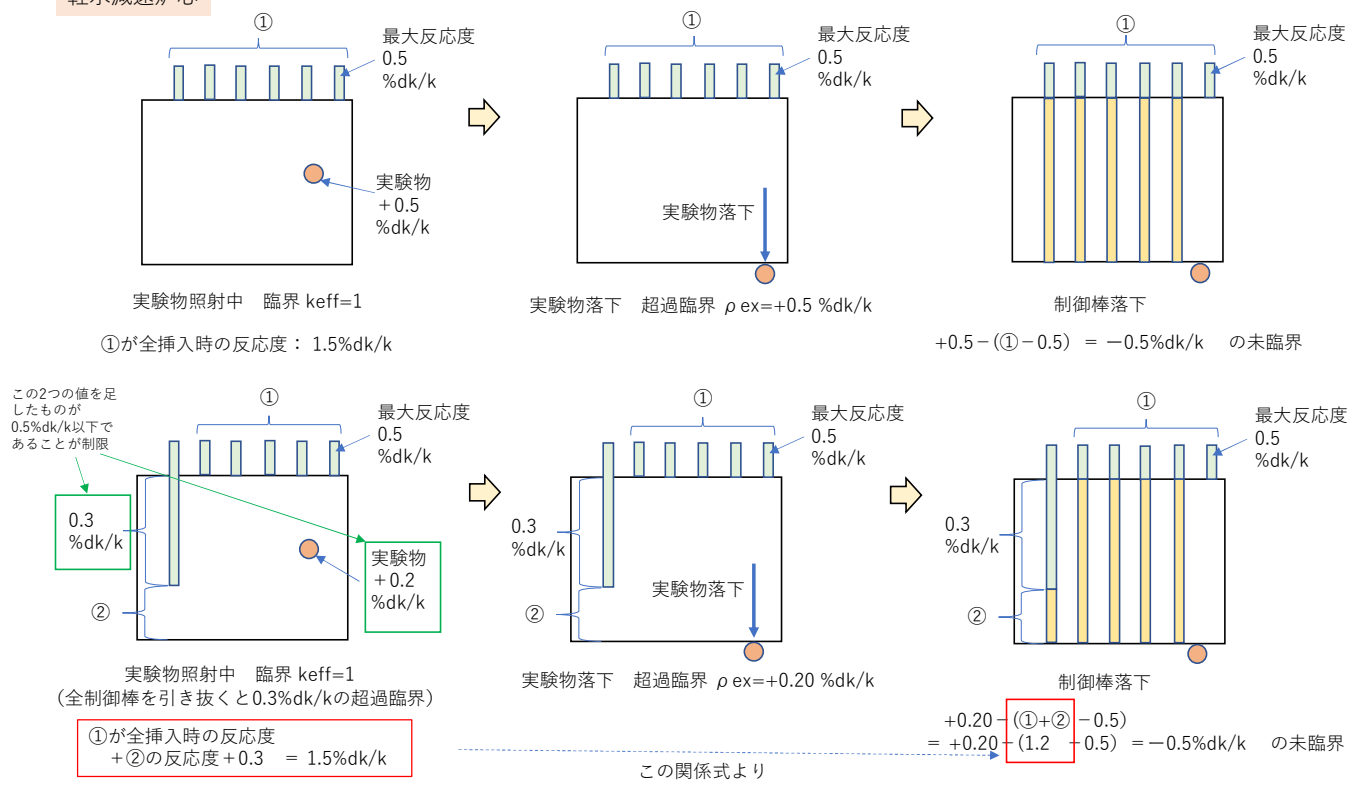


図E-1-3 固体減速炉心

実験物の落下により正の反応度が印加される場合

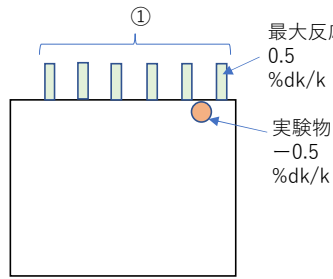
例えば炉外に取り付けたウラン箱が炉中心に落下して停止

軽水減速炉心



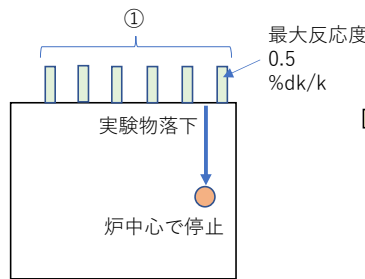
図E-2-1 軽水減速炉心

実験物の落下により正の反応度が印加される場合
 例えば炉中心に取り付けたカドミウムが炉外に落下

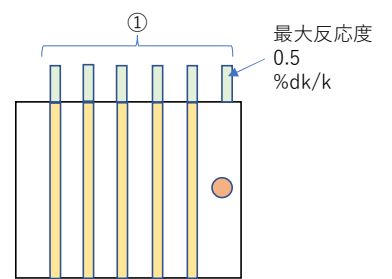


実験物照射中 臨界 $k_{eff}=1$

①が全挿入時の反応度：1.5%dk/k

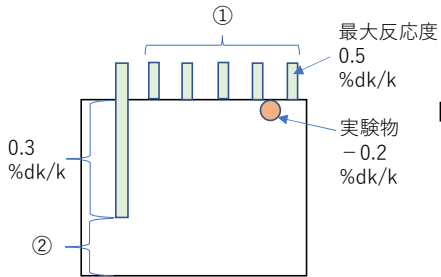


照射物落下 超過臨界 $\rho_{ex}=+0.5\%dk/k$



制御棒落下

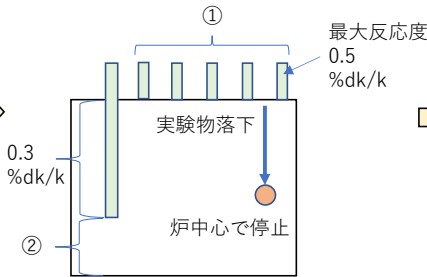
$+0.5 - (① - 0.5) = -0.5\%dk/k$ の未臨界



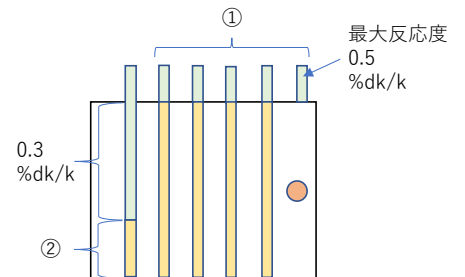
実験物照射中 臨界 $k_{eff}=1$

(全制御棒を引き抜くと0.3%dk/kの超過臨界)

①が全挿入時の反応度
+ ②の反応度 + 0.3 = 1.5%dk/k



実験物落下 超過臨界 $\rho_{ex}=+0.2\%dk/k$



制御棒落下

$+0.2 - (①+② - 0.5)$
 $= +0.2 - (1.2 - 0.5) = -0.5\%dk/k$ の未臨界

この関係式より

図E-2-2 軽水減速炉心

実験物の落下により正の反応度が印加される場合
 例えば炉外に取り付けたウラン箱が炉中心に落下して停止

【補足F 実験物を装荷した炉心の炉心配置決定のためのプロセス】

実験物（照射物、軽水減速炉心については挿入管）を装荷した炉心検討のフローを図F-1～図F-7に示す。

これらのケースの中で、軽水減速炉心については照射物の有無に加えて挿入管破損有無が重畳して検討プロセスが複雑になるため、以下にその流れを説明する。

【照射物を用いない場合（図F-4）】

- 1) 低濃縮炉心において選択できる範囲より標準型燃料板の装填ピッチを選択する。
- 2) 燃料集合体、制御棒、挿入管を配置し、臨界調整を行い、挿入管健全ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。
- 3) 挿入管破損ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。また、破損前後の過剰反応度の差として挿入管反応度を求め、制限値内であることを確認する。
- 4) 挿入管健全ケースの制御棒の反応度を計算し、全反応度が制限を満たすことを確認する。
- 5) 挿入管健全ケースの最大反応度を持つ制御棒の反応度が「全反応度の1/3以下」であることを確認する。
- 6) 挿入管健全ケースの反応度添加率が規定値以下であることを確認する。
- 7) 挿入管健全ケースのダンプ排水反応度と温度係数が規定値を満足することを確認する。
- 8) 研究所原子炉安全委員会に付議する。

【負の反応度を印加する照射物を用いる場合（図F-5）】

- 1) 低濃縮炉心において選択できる範囲より標準型燃料板の装填ピッチを選択する。
- 2) 燃料集合体、制御棒、挿入管を配置し、臨界調整を行い、照射物未装荷・挿入管健全ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。
- 3) 照射物未装荷・挿入管破損ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。また、破損前後の過剰反応度の差として挿入管反応度を求め、制限値内であることを確認する。
- 4) 照射物未装荷・挿入管健全ケースの制御棒の反応度を計算し、全反応度が制限を満たすことを確認する。
- 5) 照射物未装荷・挿入管健全ケースの最大反応度を持つ制御棒の反応度が「全反応度の1

／3以下」であることを確認する。

- 6) 照射物未装荷・挿入管健全ケースの反応度添加率が規定値以下であることを確認する。
- 7) 照射物未装荷・挿入管健全ケースのダンプ排水反応度と温度係数が規定値を満足することを確認する。
- 8) 照射物を実際の照射位置に設置した照射物装荷・挿入管健全ケースの過剰反応度を求め、これと照射物未装荷・挿入管健全ケースの過剰反応度との差として照射物反応度を計算し、規定値内（負値）であることを確認する。
- 9) 研究所原子炉安全委員会に付議する。

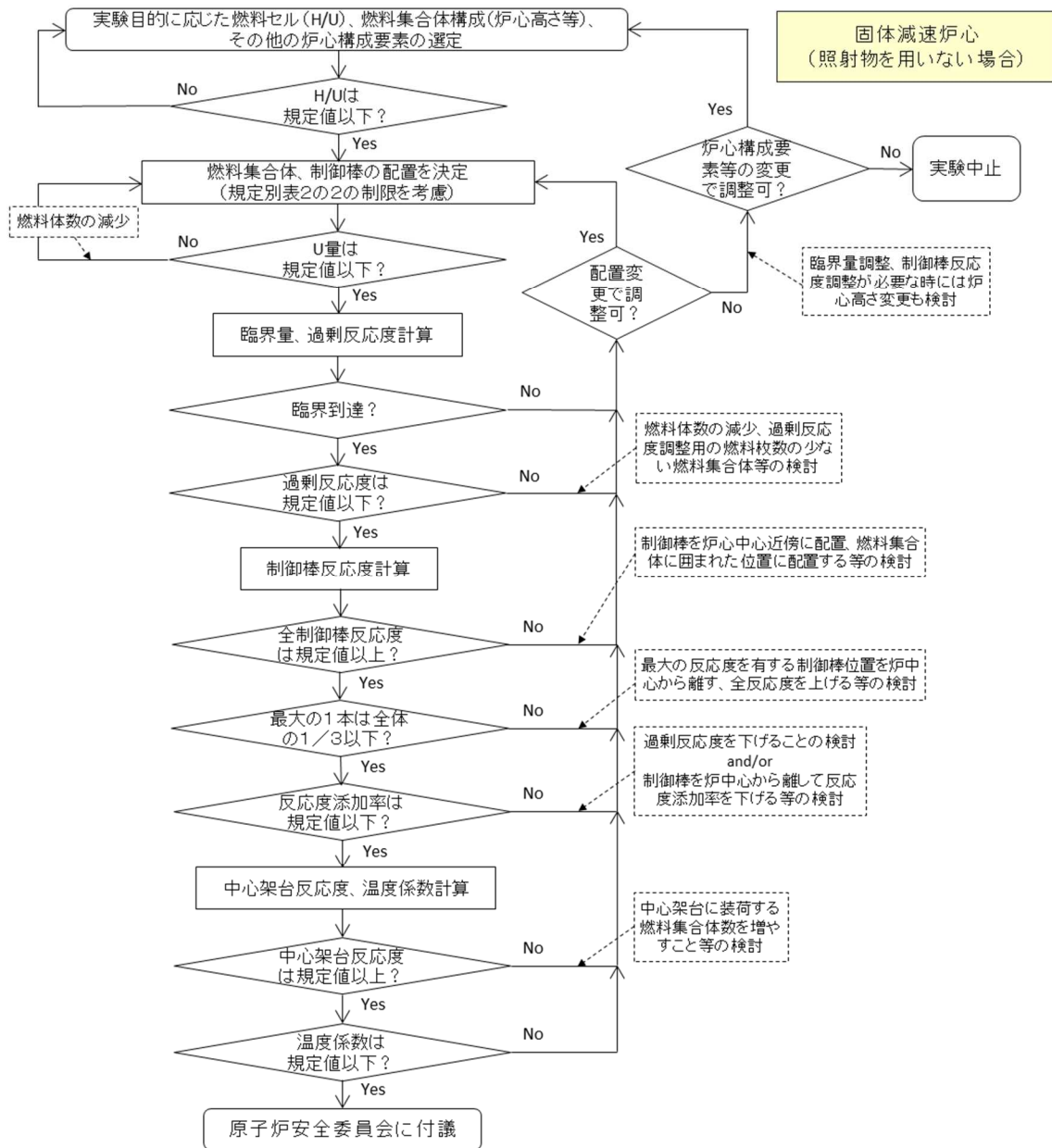
【正の反応度を印加する照射物を用い、挿入管反応度が負値の場合（図F-6）】

- 1) 低濃縮炉心において選択できる範囲より標準型燃料板の装填ピッチを選択する。
- 2) 燃料集合体、制御棒、挿入管を配置し、臨界調整を行い、照射物未装荷・挿入管健全ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。
- 3) 照射物未装荷・挿入管破損ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。また、破損前後の過剰反応度の差として挿入管反応度を求め、制限値内（負値）であることを確認する。
- 4) 照射物装荷・挿入管健全ケースについて、照射物装荷位置を変えながら最大反応度を与える照射位置をサーベイする。
- 5) 照射物装荷・挿入管健全ケースについて、最大反応度を与える照射位置に照射物を装荷した場合の過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。また、照射物未装荷・挿入管健全ケースの過剰反応度との差として照射物反応度を計算し、制限値内（正值）であることを確認する。
- 6) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、制御棒の反応度を計算し、全反応度が制限を満たすことを確認する。
- 7) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、最大反応度を持つ制御棒の反応度が「全反応度の1／3以下」であることを確認する。
- 8) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、反応度添加率が規定値以下であることを確認する。
- 9) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、ダンプ排水反応度と温度係数が規定値を満足することを確認する。
- 10) 研究所原子炉安全委員会に付議する。

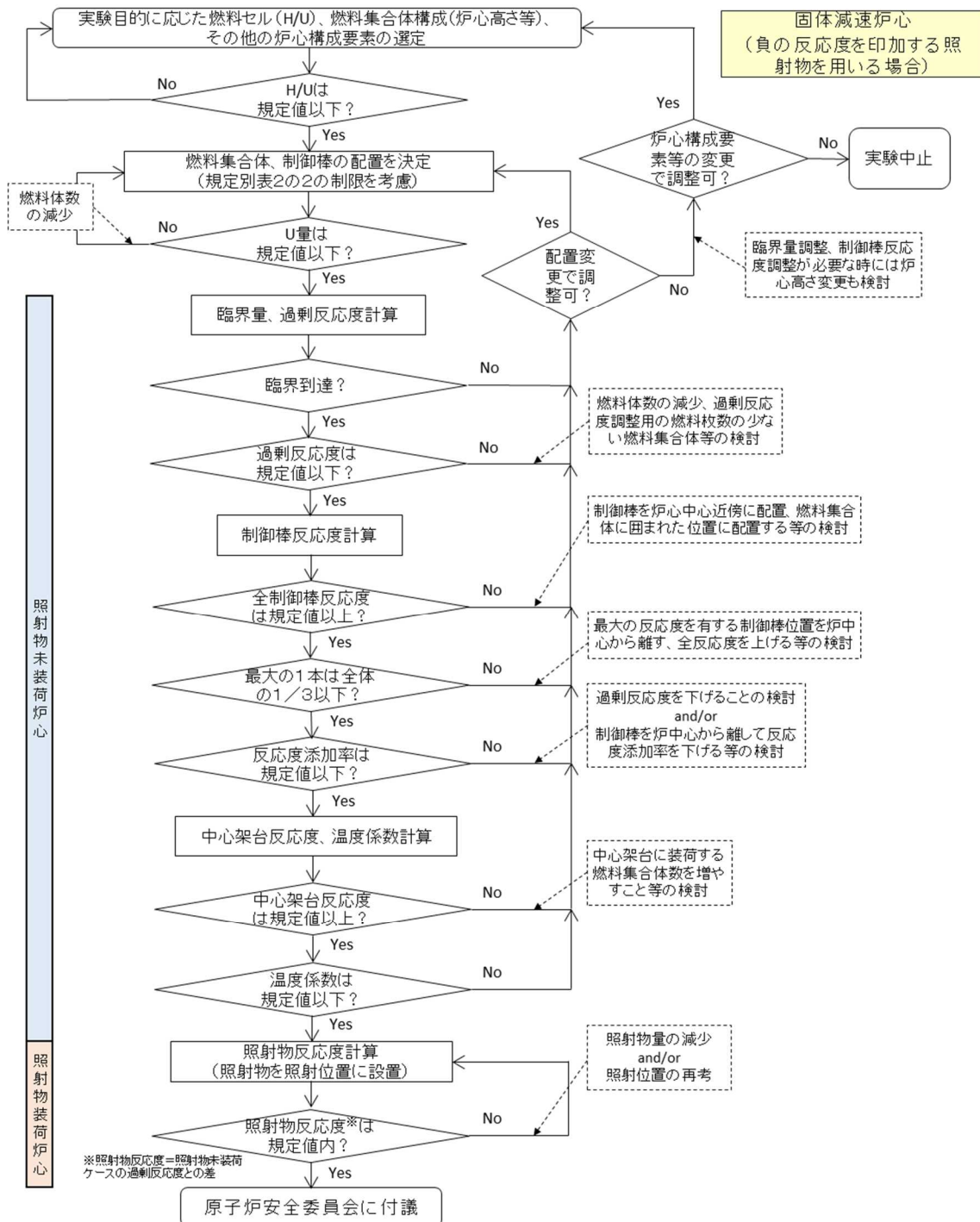
【正の反応度を印加する照射物を用い、挿入管反応度が正值の場合（図F-7）】

- 1) 低濃縮炉心において選択できる範囲より標準型燃料板の装填ピッチを選択する。

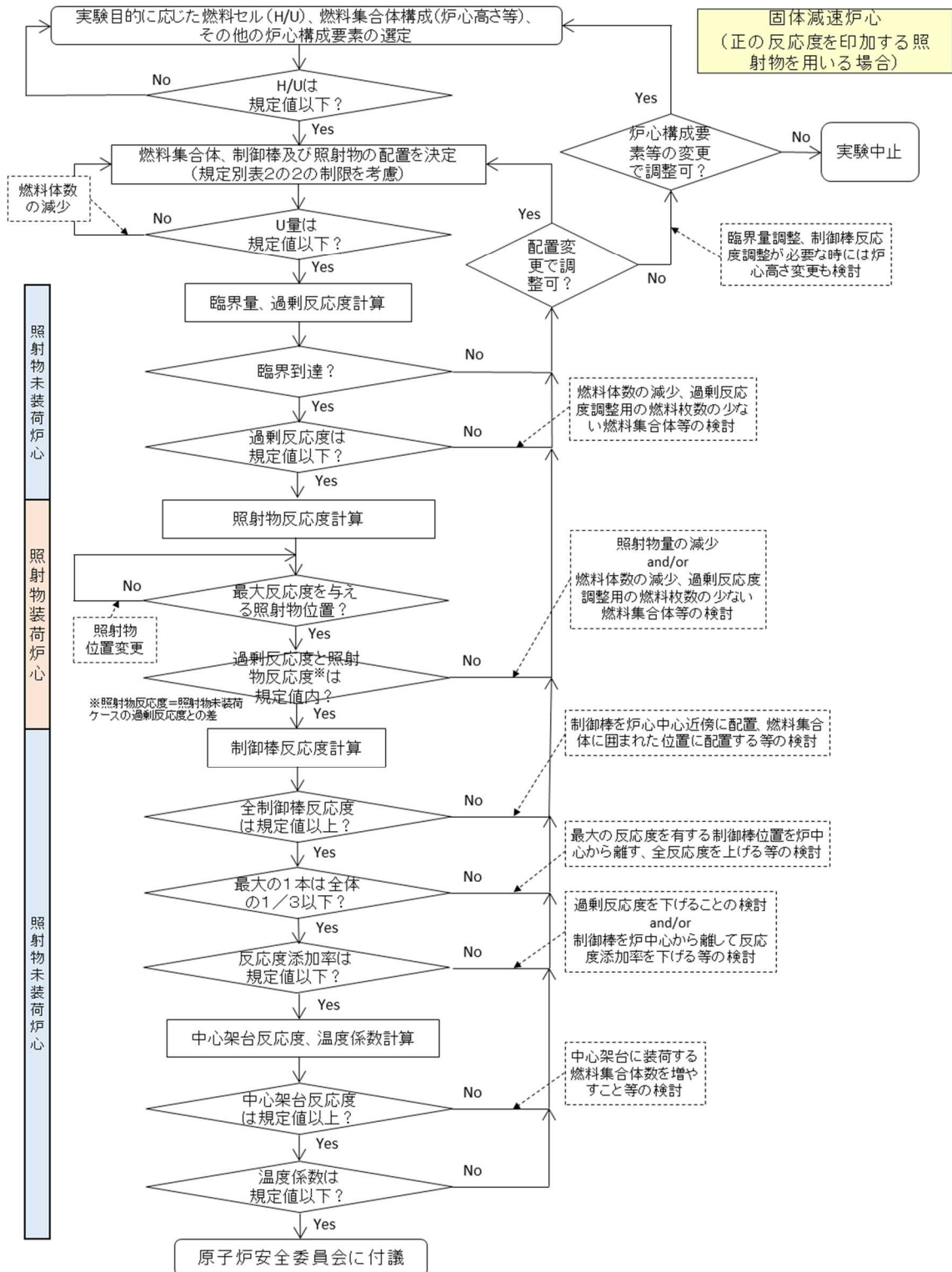
- 2) 燃料集合体、制御棒、挿入管を配置し、臨界調整を行い、照射物未装荷・挿入管健全ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。
- 3) 照射物未装荷・挿入管破損ケースの過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。また、破損前後の過剰反応度の差として挿入管反応度を求め、制限値内（正值）であることを確認する。
- 4) 照射物装荷・挿入管破損ケースについて、照射物装荷位置を変えながら最大反応度を与える照射位置をサーベイする。
- 5) 照射物装荷・挿入管破損ケースについて、最大反応度を与える照射位置に照射物を装荷した場合の過剰反応度を計算し、過剰反応度の制限を満たすことを確認する。また、照射物未装荷・挿入管破損ケースの過剰反応度との差として照射物反応度を計算し、制限値内（正值）であることを確認する。
- 6) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、制御棒の反応度を計算し、全反応度が制限を満たすことを確認する。
- 7) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、最大反応度を持つ制御棒の反応度が「全反応度の $1/3$ 以下」であることを確認する。
- 8) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、反応度添加率が規定値以下であることを確認する。
- 9) 照射物未装荷・挿入管健全ケースについて、ダンプ排水反応度と温度係数が規定値を満足することを確認する。
- 10) 研究所原子炉安全委員会に付議する。



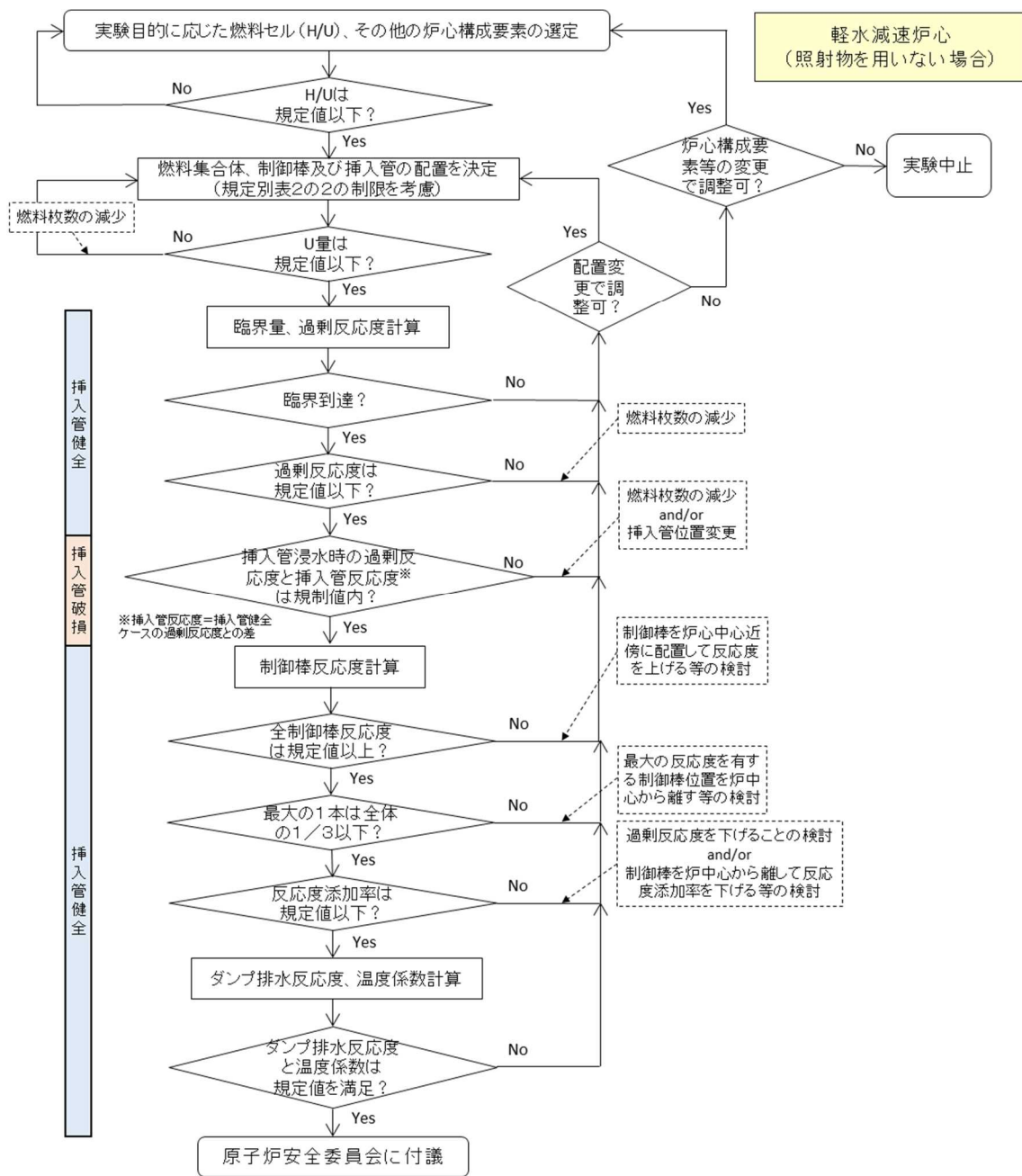
図F-1 炉心配置決定のためのプロセス
(固体減速炉心、照射物を用いない場合)



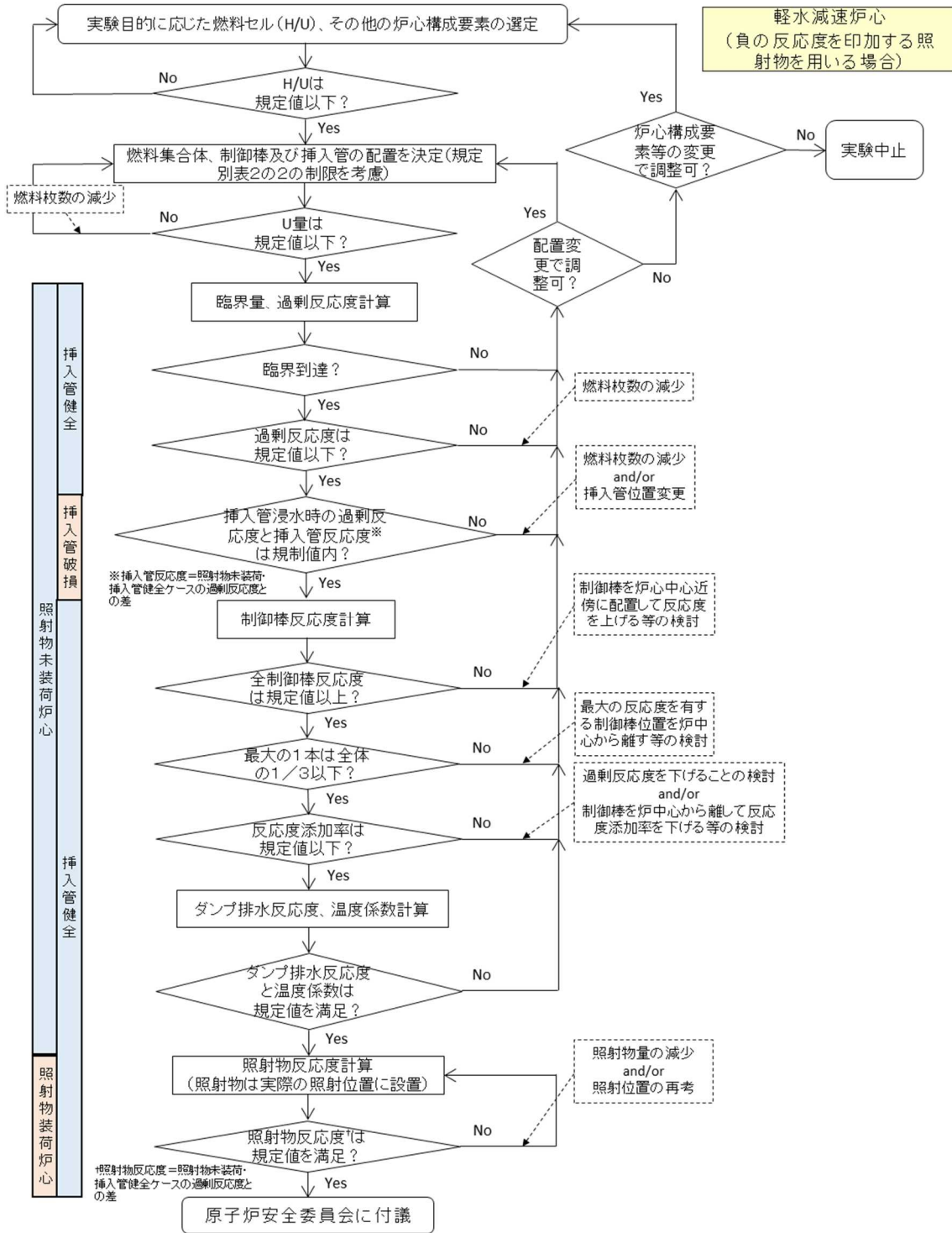
図F-2 炉心配置決定のためのプロセス
(固体減速炉心、負の反応度照射物 (例: カドミウム) の場合)



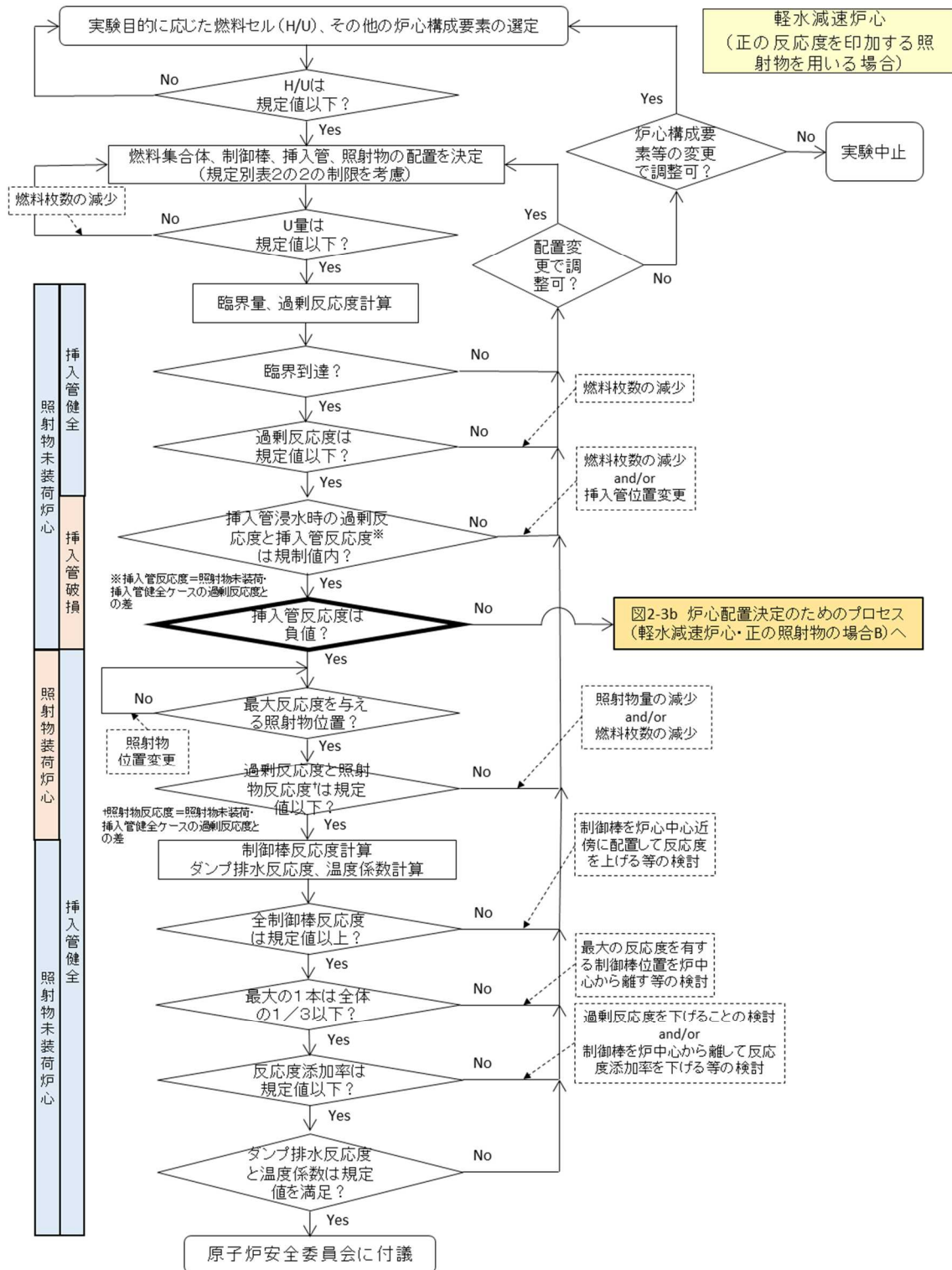
図F-3 炉心配置決定のためのプロセス
(固体減速炉心、正の反応度照射物(例:ウラン箔)の場合)



図F-4 炉心配置決定のためのプロセス
(軽水減速炉心、照射物を用いない場合)

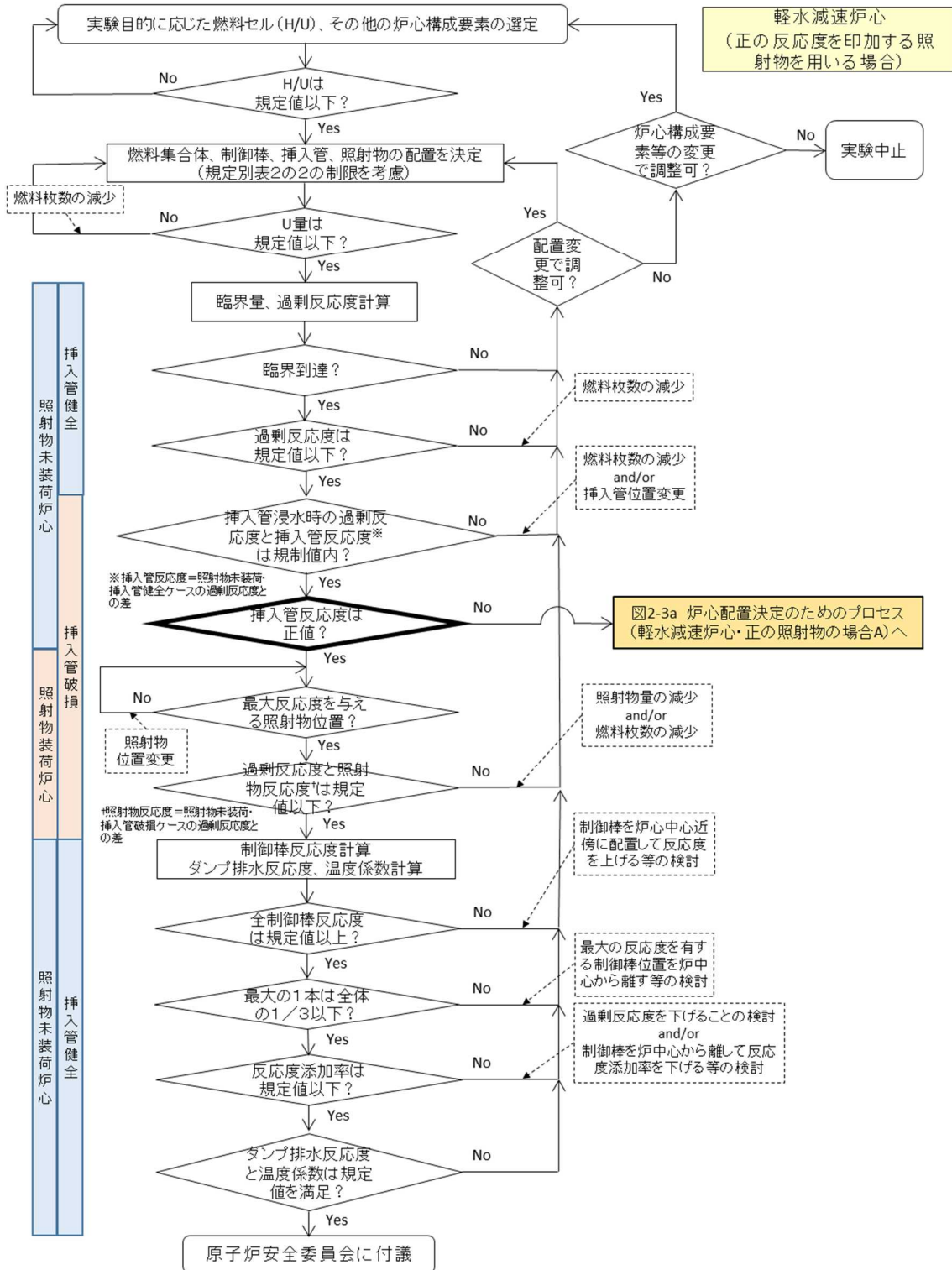


図F-5 炉心配置決定のためのプロセス
(軽水減速炉心、負の反応度照射物(例:カドミウム)の場合)



図F-6 炉心配置決定のためのプロセス

(軽水減速炉心、正の反応度照射物（例：ウラン箔）・負の挿入管反応度の場合)



図F-7 炉心配置決定のためのプロセス

(軽水減速炉心、正の反応度照射物 (例: ウラン箔)・正の挿入管反応度の場合)

【補足 G 保安規定等での炉心配置手順等に関する規定】

臨界実験装置は炉心の形状を容易に変更することができ、様々な体系の炉心を構築できることが特徴である。燃料の誤装荷を防ぐためのハード的な設備を設けることは難しいため、燃料を規定通り炉心に挿入するような手順書等によるソフト面での対応により燃料誤操作が起らないようにしている。

燃料の取り扱いに関する原子炉施設保安規定とその下部規定である原子炉施設保安指示書の関係箇所を以下に記載する。(下線部は特に関係する箇所)

炉心構成作業(燃料集合体の作成、炉心配置変更)はKUCA炉心配置変更計画書(運転指令書の一部)に従って行うことが規定されており、この計画書の作成者は臨界装置部長、確認者は臨界装置主任技術者で、作業は当直運転主任が当直運転員を指揮して実施している。(KUCA運転計画指令書、およびKUCA炉心配置変更計画書はまとめ資料の「トリウム保管庫について」の「その他の資料」(p11以降)にサンプルを添付している)

1. 原子炉施設保安規定

(燃料集合体等の炉心配置変更計画)

第66条 臨界装置部長は、燃料集合体を炉心に挿入若しくは取出し、又は炉心内でその位置を変更しようとするときは、あらかじめKUCA炉心配置変更計画書を作成し、炉心特性を算定したうえで、臨界装置主任技術者の承認を受けなければならない。

2 臨界装置主任技術者は、前項の承認を与えるに当たり、過剰反応度、燃料要素等の装荷手順及び臨界点確認の時期が適切であること、その他操作手順上の安全を確認する。

3 臨界装置の運転中に、炉心についてKUCA運転計画指令書に記載された実験の範囲内での変更を必要とする場合には、当直運転主任は、臨界装置主任技術者又はその指定した者の承認を得て、これを行うことができる。

(燃料集合体の組立て及び解体)

第67条 当直運転主任が、当直運転員を指揮して、燃料集合体の組立て及び解体を行う場合、燃料取扱設備に関する点検後、KUCA炉心配置変更計画書に従って、行わなければならない。

2 実験及び教育並びに訓練運転のため、当直運転主任又は臨界装置主任技術者が指名した者の立会指導のもとに、当直運転員以外の者が燃料集合体の組立て及び解体を行うことができる。

3 臨界装置部長は、前2項の作業中又は作業終了後、燃料集合体の構成並びに燃料要素等の数量、外観について点検を行い、異常のないことを確認しなければならない。

(燃料集合体の挿入及び取出し)

第68条 当直運転主任は、当直運転員を指揮して、燃料集合体の臨界装置燃料室からの移動及び臨界装置燃料室への移動を行う場合は、専用運搬台車により行わなければならない。

3 当直運転主任は、当直運転員を指揮して、燃料集合体の炉心への挿入及びその炉心からの取出しを行う場合は、KUCA炉心配置変更計画指令書に従って行わなければならない。

4 実験及び教育並びに訓練運転のため、当直運転主任又は臨界装置主任技術者が指名した者の立会指導の下に、当直運転員以外の者が燃料集合体の臨界装置燃料室からの移動及び臨界装置燃料室への移動を行うことができる。

5 軽水減速架台用燃料要素のうち彎曲型燃料板については燃料として炉心で用いてはならない。

2. 原子炉施設保安指示書(保安規定の下部規定)

4.2.2.5 KUCA炉心配置変更計画指令書(臨-様式-003)

臨界装置部長は炉心操作にあたり、「KUCA炉心配置変更計画指令書」に必要事項を記入し、臨界装置主任技術者の承認を得る。臨界装置主任技術者は、承認を与えるに当たり、過剰反応度等の主要な核的及び熱的制限値(保安規定の別表第2)を満たしていること、炉心配置その他の制限(保安規定の別表第2の2)を満たしていること、燃料要素等の装荷手順及び臨界点確認時期が適切であること、その他操作手順上の安全を確認した上で「KUCA運転計画指令書」(臨-様式-002)に確認済みであることを記入すること。

臨界装置主任技術者が行うこれらの確認にあたり、同様の実験が既に安全に実施されており、主要な核的及び熱的制限値(保安規定の別表第2)に記載された各項目(以下、制限項目)に変更が無い場合には既に実施された実験の実施年月日を記載する。制限項目が有意に変更となる可能性がある場合には、既に実施された類似した条件の実験の実施年月日を記載するとともに、変更となる制限項目の変更後の推定値を「KUCA運転計画指令書」の「7.その他臨界装置主任技術者が必要と認める事項」の欄に記載する。

なお、ここでいう炉心操作とは、燃料集合体、反射体、制御棒及び検出器等を炉心に挿入若しくは取出し、又は炉心内でその位置を変更することをいう。ただし、検査、確認のために燃料集合体等を一時的に取出し若しくは挿入した場合であって、原子炉の起動を行わず元の配置に戻す場合はこの限りでない。

4.2.3 燃料要素及び燃料集合体の取扱い

燃料要素の受払い及びその措置、検査、運搬、仮置き並びに貯蔵その他燃料要素の取扱いについては、核燃料管理室長の管理の下に、臨界装置部長が行うこと。

4.2.3.1 一般的原則及び注意

燃料の取扱いには、以下のことに注意して慎重に行わなければならない。

- (1) いかなる場合にも、臨界に達するおそれがない状態で行わなければならない。
- (2) 燃料要素及び燃料集合体の運搬、移動、組立て及び解体、炉心への挿入及び取出しに関しては「KUCA 運転計画指令書」(臨-様式-002)に従って行う。ただし、検査及び点検等の場合は除く。
- (3) 作業は放送設備、関連した場所の ITV 又はインターホン(所内電話でも可)並びに放射線モニタが動作しているときでなければ行ってはならない。
- (4) 作業者は必ず所定の布製の手袋を着用し、固体減速架台用燃料要素を取り扱う場合にはさらにゴム又はプラスチック製の手袋を着用する。また、必要に応じて作業服又は防塵マスクを着用する。
- (5) 作業中は、必要に応じてデジタル式のポケット線量計を着用するとともに、適時サーベイメータにより、作業場所の線量率の測定を行う。
- (6) 制御室では、制御卓操作員が作業現場を ITV で監視し、また、インターホン等で現場と制御室で相互に連絡を取りながら作業を行わなければならない。
- (7) 作業は原則として複数で行い、相互に安全についての監視を行う。
- (8) 作業者は作業の都度、必要事項を確認し合いながら行う。
- (9) 燃料要素及び燃料集合体の取扱いに関する作業の放射線管理については、京都大学複合原子力科学研究所放射線障害予防規程を準用する。
- (10) 軽水減速架台用燃料要素のうち彎曲型燃料板は燃料として炉心で用いてはならない。
- (11) 燃料要素の貯蔵に従事する者以外の者が貯蔵場所に立ち入る場合は、その貯蔵に従事する者の指示に従うこと。
- (12) 燃料要素及び燃料集合体の取扱いは原則として当直運転員が行うこと。ただし、実験及び教育並びに訓練運転のため、当直運転主任又は臨界装置主任技術者が指名した者

の立会指導のもとに、当直運転員以外の者が燃料集合体の組立て及び解体並びに燃料室からの移動、又は燃料室への移動を行うことができる。

4.2.3.4 燃料集合体の組立て、解体及び炉心作業

- (1) 臨界装置部長は作業に先立ち、あらかじめテープを床に貼るなどして、燃料室に組立解体エリアを設定する。
- (2) 作業は燃料取扱設備に関する点検後、KUCA 炉心配置変更計画指令書に従って行う。
- (4) 作業は組立解体エリア以外で行ってはならない。ただし、軽水減速架台に限り、ダンプ弁「開」の条件の下で、臨界装置主任技術者又はその指定した者の立会の下に燃料要素又は燃料集合体を移動することができる。
- (5) 作業中の空間線量率が、 $20\mu\text{Sv/h}$ を超えるおそれのある場合は、ポケット線量計を装着し放管当直の立会いを求める。
- (6) 燃料集合体の組立て及び解体は、別に定める手順に従って行う。
- (7) 燃料集合体、減速材、反射材及びその他さや管は、さや管の上下に厚さ 5cm 以上の黒鉛若しくは金属を装填すること。ただし、空さや管あるいは検出器等の挿入孔のある集合体等で設置できない場合を除く。
- (8) 角板燃料、長板燃料及び彎曲型燃料板を 1 つの組立解体エリアに混在させてはいけない。
- (9) 複数のバードケージから取出した彎曲型燃料板を 1 つの組立解体エリア内に入れて取り扱ってはならない。
- (10) 作業中又は作業終了後、燃料集合体の構成並びに燃料要素等の数量、外観について点検を行い、異常のないことを確認すること。
- (11) 作業中、燃料要素又は燃料集合体を変形あるいは破損等させたときは作業を直ちに中止し、当直運転主任は直ちに中央管理室長、核燃料管理室長及び臨界装置主任技術者に連絡し、必要な処置を行う。
- (12) その他の異常又は事故が発生したときは、当直運転主任は直ちに臨界装置主任技術者及び中央管理室長に通報し、必要な処置を行う。

【補足 H 燃料誤装荷時の反応度】

固体減速炉心において燃料集合体を誤って 1 体追加で作成してしまい、それを炉心に装荷した場合の解析について説明する。

固体減速炉心の代表炉心を図 3-1-4～図 3-1-5 に示す。

各炉心で燃料集合体 1 体を誤装荷した際の反応度を表 3-1-1 に示す（解析は SRAC コードシステムの CITATION にて実施）。

これまでの代表炉心について解析結果を整理する。

- ① 燃料集合体誤装荷前の反応度(0.35% $\Delta k/k$)
- ② 燃料集合体誤装荷時の燃料装荷反応度(表 3-1-5 等)
- ③ 添 8 で求めた制御棒の反応度(添付八のまとめ資料 P.98 表 4 等)に解析誤差を乗じた反応度
- ④ 添 8 で求めた中心架台の反応度(添付八のまとめ資料 P.101 表 5 等)に解析誤差を乗じた反応度

結果を表 H-1 に示す。これはすべての反応度を SRAC-CITATION で計算した場合の結果となる。添八で求めた中心架台の反応度は L3P の炉心以外は中心架台の反応度が小さくなる高さ 30cm の炉心での値を示しており、ここでの中心架台として LL1P-30 炉心以外は燃料集合体 1 体とそれに隣接する反射体 1 体のみを考えている（まとめ資料 p 102 図 7）

(LL1P-30 炉心については中心架台が燃料集合体 1 体と反射体 1 体だけでは反応度が 1% $\Delta k/k$ に満たないため燃料集合体を 3 体と反射体 3 体を装荷したとしている)。

中心架台としての燃料集合体 1 体と反射体 1 体のみからなるとしているため、中心架台の反応度は実際の反応度より小さな値となっているが、全ての炉心において最も反応度の高くなる位置に燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても表 H-1 の H 欄の数値はすべて負の値となっていることから、炉心配置変更時に燃料集合体 1 体を誤装荷した場合であっても未臨界である。

表 H-1 と同様の評価において、各炉心の中心架台の解析のみをモンテカルロ計算コード MCNP を用いて行ったときの結果を表 H-2 に示す（中心架台の位置は図 3-1-4、図 3-1-5）。他の反応度の計算は表 H-1 と同じ SRAC-CITATION により結果である。全ての炉心において最も反応度の高くなる位置に燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても表の H 欄の数

値はすべて負の値となっていることから、炉心配置変更時に燃料集合体 1 体を誤装荷した場合であっても未臨界である。

これらの結果に加えて、燃料誤装荷時の反応度印加量が大きい L2-50 炉心と L3-50 炉心、および L5.5-50 炉心について MCNP での反応度の解析結果を表 H-3 に示す（すべて MCNP で計算した場合）。各炉心とも炉心配置変更時に最大反応度の燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても十分に未臨界である。

なお、表 H-2 の炉心配置変更中に誤装荷が起きた場合の反応度（表 H-2 の H 欄）と表 H-3 の MCNP の結果（表 H-3 の[2]）を比較すると、L5.5P-50 炉心では約 8%、L3P-50 炉心では約 1%、L2P-50 炉心では約 16%の相違であり、両者の結果は比較的良く一致しているといえる。

表 H-3 の MCNP の計算結果では、[4]の欄の全制御棒引抜き時の実効増倍率の値が想定している値（過剰反応度が $0.35\% \Delta k/k$ 、 $k_{eff}=1.00351$ ）とは若干異なっている（L5.5P-50 炉心で 0.4%、L3P-50 炉心で 0.2%、L5.5P-50 炉心で 0.2%の相違）。これは SRAC-CITATION の解析を元に代表炉心の体系を設定したためであるが、両者の違いは実効増倍率の誤差として見積もっている 0.6%以内となっている。この実効増倍率の誤差を見込んだとしても、表 H-3 の MCNP の計算結果では各炉心とも炉心配置変更時に最大反応度の燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても十分に未臨界である。

この誤装荷の解析は燃料集合体を 1 体余分に作成してしまっただけで追加で装荷することを想定しているが、規定の燃料体数の範囲で燃料を別の場所に挿入してしまうこと、すなわちレイアウト間違いをしてしまうことについて検討する。

反応度の影響が小さい場所から大きい場所に誤装荷することについては、余分に作成してしまった 1 体を反応度が大きな場所に追加挿入してしまう場合に包含されると考えられる。

低濃縮ウランの固体減速炉心では、過剰反応度調整用に燃料セルの繰り返し数が少ない燃料集合体（反応度調整用燃料体）を用いる場合がある。これは、通常の臨界近接の手順に従い、炉心を臨界に至らしめた後、炉心最外周に設置することで実験目的に応じて過剰反応度を調整するために使用するものである。従って、炉心最外周に設置すべき反応度調整用燃料集合体のレイアウト間違いが発生した場合、インポートンスの高い場所に反応度調整用燃料集合体を置くこととなるため、炉心の過剰反応度は小さくなり安全側となる。

表 H-1 燃料誤装荷後の反応度 (中心架台反応度は「まとめ資料の p 101 表 5」による)

	A	B	C = B * (100% - 18%)	D	E = D * (100% - 18%)	F = A - (C/2) - E	G	H = F + G	
炉心	誤装荷前炉心の過剰反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	中心架台反応度* [%dk/k]	中心架台反応度* (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	炉心配置変更作業開始時の反応度 [%dk/k]	誤装荷による添加反応度の最大値 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きた場合の反応度 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きても未臨界状態が維持されるか?
L5.5P-50	0.35	1.67	1.37	1.33	1.09	-1.43	0.927	-0.50	Yes
L5.5P-40	0.35	2.00	1.64	1.33	1.09	-1.56	0.708	-0.85	Yes
L5.5P-30	0.35	1.68	1.38	1.33	1.09	-1.43	0.433	-1.00	Yes
L4P-50	0.35	2.47	2.03	2.27	1.86	-2.53	1.137	-1.39	Yes
L4P-40	0.35	2.28	1.87	2.27	1.86	-2.45	0.796	-1.65	Yes
L4P-30	0.35	1.94	1.59	2.27	1.86	-2.31	0.627	-1.68	Yes
L3P-50	0.35	1.83	1.50	4.55	3.73	-4.13	1.745	-2.38	Yes
L3P-40	0.35	2.52	2.07	2.94	2.41	-3.10	1.288	-1.81	Yes
L3P-30	0.35	1.65	1.35	2.94	2.41	-2.74	0.801	-1.94	Yes
L2P-50	0.35	2.36	1.94	2.33	1.91	-2.53	1.854	-0.68	Yes
L2P-40	0.35	1.75	1.44	2.33	1.91	-2.28	1.599	-0.68	Yes
L2P-30	0.35	2.03	1.66	2.33	1.91	-2.39	1.257	-1.13	Yes
L1P-50	0.35	2.04	1.67	1.84	1.51	-2.00	1.096	-0.90	Yes
L1P-40	0.35	1.96	1.61	1.84	1.51	-1.97	1.063	-0.91	Yes
L1P-30	0.35	2.00	1.64	1.84	1.51	-1.98	0.994	-0.99	Yes
LL1P-50	0.35	4.01	3.29	1.84	1.51	-2.81	0.974	-1.84	Yes
LL1P-40	0.35	1.96	1.61	1.84	1.51	-1.97	0.813	-1.16	Yes
LL1P-30	0.35	2.10	1.72	1.84	1.51	-2.02	0.459	-1.56	Yes
データの出典	まとめ資料 p98 表4	まとめ資料 p98 表4		まとめ資料 p101 表5			まとめ資料 p288 表3-1-1		

* 燃料集合体の一部+反射体の一部から成る中心架台 (実際の中心架台の形状とは一致しない) (青字の小さいフォントの数字は高さ 30cm の炉心の値を記載)

制御棒反応度、中心架台反応度の解析精度は 18%とする

データ出典のまとめ資料のページは右下のページ番号

表 H-2 燃料誤装荷後の反応度 (中心架台反応度は MCNP の解析結果による)

	A	B	C = B * (100% - 18%)	D	E = D * (100% - 18%)	F = A - (C/2) - E	G	H = F + G	
炉心	誤装荷前炉心の過剰反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	中心架台反応度* [%dk/k] MCNP計算	中心架台反応度* (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	炉心配置変更作業開始時の反応度 [%dk/k]	誤装荷による添加反応度の最大値 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きた場合の反応度 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きても未臨界状態が維持されるか?
L5.5P-50	0.35	1.67	1.37	8.22	6.74	-7.08	0.927	-6.15	Yes
L5.5P-40	0.35	2.00	1.64	6.47	5.31	-5.78	0.708	-5.07	Yes
L5.5P-30	0.35	1.68	1.38	3.47	2.85	-3.19	0.433	-2.76	Yes
L4P-50	0.35	2.47	2.03	11.5	9.43	-10.10	1.137	-8.96	Yes
L4P-40	0.35	2.28	1.87	9.72	7.97	-8.56	0.796	-7.76	Yes
L4P-30	0.35	1.94	1.59	5.93	4.86	-5.31	0.627	-4.68	Yes
L3P-50	0.35	1.83	1.50	12.7	10.41	-10.81	1.745	-9.06	Yes
L3P-40	0.35	2.52	2.07	11.9	9.76	-10.45	1.288	-9.16	Yes
L3P-30	0.35	1.65	1.35	8.64	7.08	-7.41	0.801	-6.61	Yes
L2P-50	0.35	2.36	1.94	17.5	14.35	-14.97	1.854	-13.12	Yes
L2P-40	0.35	1.75	1.44	7.96	6.53	-6.90	1.599	-5.30	Yes
L2P-30	0.35	2.03	1.66	9	7.38	-7.86	1.257	-6.60	Yes
L1P-50	0.35	2.04	1.67	10.7	8.77	-9.26	1.096	-8.16	Yes
L1P-40	0.35	1.96	1.61	8.87	7.27	-7.73	1.063	-6.67	Yes
L1P-30	0.35	2.00	1.64	8.7	7.13	-7.60	0.994	-6.61	Yes
LL1P-50	0.35	4.01	3.29	5.83	4.78	-6.08	0.974	-5.11	Yes
LL1P-40	0.35	1.96	1.61	3.93	3.22	-3.68	0.813	-2.87	Yes
LL1P-30	0.35	2.10	1.72	3.23	2.65	-3.16	0.459	-2.70	Yes
データの出典	まとめ資料 p98 表4	まとめ資料 p98 表4		まとめ資料(添付10) p93 表3-1-2と追加計算			まとめ資料 p288 表3-1-1		

*中心架台反応度の MCNP 計算結果の標準偏差は値の 1%以下

データ出典のまとめ資料のページは中心架台反応度以外は右下のページ番号

表 H-3 燃料集合体誤装荷に関する反応度 (MCNP の解析結果)

	状態 ¹⁾	L5.5-50 炉心	L3-50 炉心	L2-50 炉心
[1]	中心架台：下限 制御棒：3 本上限、3 本下限 誤装荷：なし 【起動前の状態】	keff : 0.91544±0.00016 ([3]との反応度差 8.22±0.03% Δk/k)	keff : 0.88401±0.00020 ([3]との反応度差 12.7±0.03% Δk/k)	keff : 0.84603±0.00020 ([3]との反応度差 17.5±0.03% Δk/k)
[2]	中心架台：下限 制御棒：3 本上限、3 本下限 誤装荷：1 本 【誤装荷した状態】	keff : 0.93055±0.00017 ([3]との反応度差 6.45±0.03% Δk/k) 図 3-1-4 の L5.5-50 炉心⑧に誤装荷	keff : 0.91366±0.00019 ([3]との反応度差 8.98±0.03% Δk/k) 図 3-1-4 の L3-50 炉心⑧に誤装荷	keff : 0.86241±0.00018 ([3]との反応度差 15.2±0.03% Δk/k) 図 3-1-5 の L2-50 炉心④に誤装荷
[3]	中心架台：上限 制御棒：3 本上限、3 本下限 誤装荷：なし 【通常の起動中の状態】	keff : 0.98993±0.00018	keff : 0.99533±0.00020	keff : 0.99261±0.00017
[4]	中心架台：上限 制御棒：6 本上限 誤装荷：なし 【起動中の全制御棒引抜き】	keff : 0.99983±0.00018 ¹⁾	keff : 1.00558±0.00017 ¹⁾	keff : 1.00534±0.00018 ¹⁾

1) SRAC-CITATION では[4]の実効増倍率は 1.00351 (ρ : 0.35% Δk/k)

以上の結果は中心架台の設置位置が炉心断面に対して左右対称な位置とした図 3-1-4～図 3-1-5 の代表炉心の場合であるが、それ以外に中心架台を端のほうに設置して、燃料体を 1 体のみを装荷した場合について検討した。検討対象とした炉心は、L2-50 炉心、L3-50 炉心、L5.5-50 炉心の 3 炉心である。

燃料集合体誤装荷時の反応度印加量が大きな L2-50 炉心と L3-50 炉心について、中心架台の位置が異なる場合の反応度について MCNP により解析した。結果を表 H-4 に示す。

中心架台には燃料集合体を最低でも 1 体以上装荷することを設置変更申請書の本文に記載しているので、図 H-1 に示した通り反応度が小さいと考えられる体系の隅にある燃料集合体 1 体を 3×3 の中心架台に載せたときを考える。隅の燃料集合体を中心架台に含めるためにはその近くの制御棒が邪魔になってしまうが、ここでは反応度への影響を調べるために仮にこのような配置が可能となったものとして考える。

中心架台の反応度を表 H-4 に示す。L2-50 炉心では図 H-1 の②の位置、L3-50 炉心では図 H-1 の③の位置に中心架台を設定したときの反応度が小さくなる。

中心架台の位置を変更して中心架台に燃料体を 1 体のみ装荷した場合であっても、中心架台の反応度は燃料集合体誤装荷による反応度印加量と比べて十分に大きな値であり、表 H-2 の解析に用いたとしても最右欄の計算結果は”yes”となり燃料集合体を誤装荷した場合であっても未臨界状態を保つことができる。

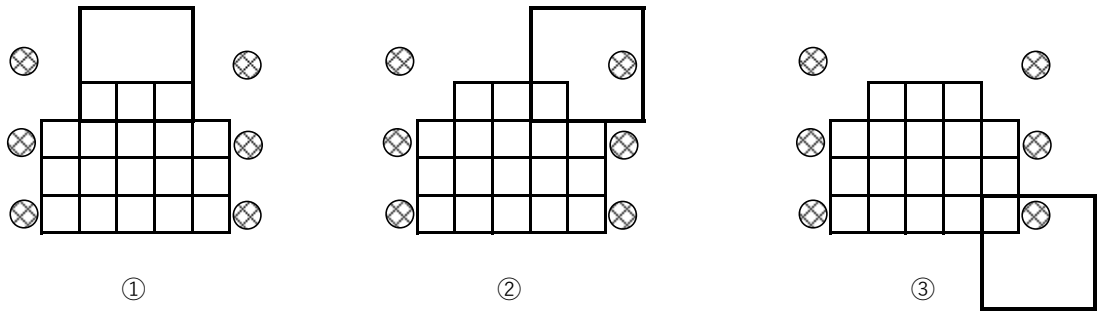
表 H-4 中心架台の反応度 ρ

炉心	中心架台上限 ¹⁾	中心架台位置		
		図 H-1 ① ²⁾ (ρ : % $\Delta k/k$)	図 H-1 ② ²⁾ (ρ : % $\Delta k/k$)	図 H-1 ③ ²⁾ (ρ : % $\Delta k/k$)
L3-50 炉心	keff : 0.99533 ± 0.00020	keff : 0.88401 ± 0.00020 ρ : 12.7 ± 0.03	keff : 0.94145 ± 0.00017 ρ : 5.75 ± 0.03	keff : 0.96257 ± 0.00017 ρ : 3.42 ± 0.03
L2-50 炉心	keff : 0.99261 ± 0.00017	keff : 0.84603 ± 0.00020 ρ : 17.5 ± 0.03	keff : 0.94850 ± 0.00018 ρ : 4.69 ± 0.03	keff : 0.94586 ± 0.00018 ρ : 4.98 ± 0.03

1) 中心架台上限、制御棒 3 本上限、制御棒 3 本下限

2) 中心架台下限、制御棒 3 本上限、制御棒 3 本下限

L3(50cm)



L2(50cm)

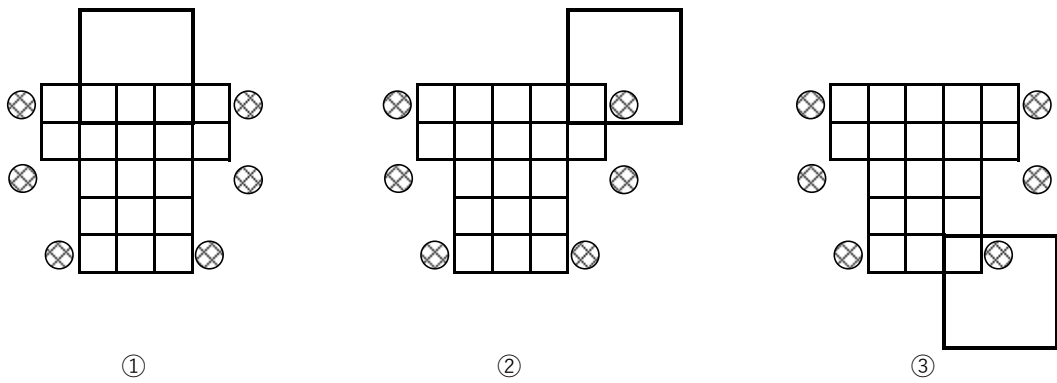


図 H-1 L3-50 炉心と L2-50 炉心の中心架台の位置
 (太い線が 3×3 の中心架台の位置。①は図 3-1-4～図 3-1-5 と同じ)

中心架台に燃料集合体を 1 体のみ設置したときの燃料誤装荷について検討する。

中心架台の位置は表 H-4 に示した通り反応度が小さくなる L2-50 炉心では図 H-1 の②に示す位置、L3-50 炉心では図 H-1 の③に示す位置とし、L5.5-50 炉心では図 H-2 に示す位置とする。(L5.5-50 炉心は断面が正方形のため、燃料集合体 1 体のみを中心架台に装荷して反応度が最も小さくなるのは明らかに図 H-2 に示す位置となる)。

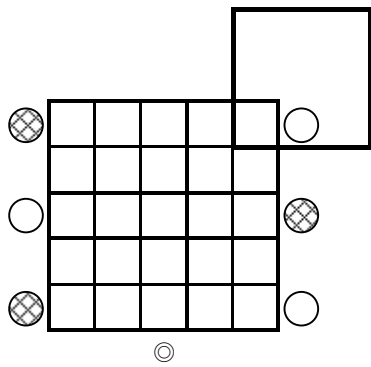
各炉心において、図 H-3 の位置に燃料集合体を誤装荷した際に印加される反応度を MCNP により解析した。結果を表 H-6 に示す。太字の下線を付した結果が反応度が最大となる場合である。

図 H-2 に示す位置に燃料集合体を誤装荷した際の反応度を MCNP により解析を行った結果を表 H-5 に示す。各炉心とも最大反応度の燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても中心架台が下限の状態では未臨界である。

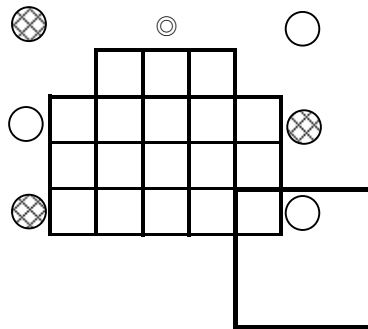
表 H-5 中心架台に1体の燃料集合体を装荷した炉心に
燃料集合体を1体誤装荷した場合の実効増倍率（低濃縮ウラン炉心）

炉心状態		実効増倍率 ^a		
		L5. 5P-50 炉心	L3P-50 炉心	L2P-50 炉心
[1]	中心架台：下限 制御棒：3本上限、3本下限 誤装荷：なし 【起動前の状態】	0.96844±0.00016	0.96257±0.00017	0.94850±0.00018
[2]	中心架台：下限 制御棒：3本上限、3本下限 誤装荷：1体 【誤装荷が発生した状態】	0.97819±0.00016 (炉心状態[1]から添加される反応度 =誤装荷による添加反応度 =1.03±0.03%Δk/k)	0.97831±0.00019 (炉心状態[1]から添加される反応度 =誤装荷による添加反応度 =1.67±0.03%Δk/k)	0.96493±0.00018 (炉心状態[1]から添加される反応度 =誤装荷による添加反応度 =1.80±0.03%Δk/k)
[3]	中心架台：上限 制御棒：3本上限、3本下限 誤装荷：なし 【通常の起動中の状態】	0.98993±0.00018 (炉心状態[1]から添加される反応度 =中心架台反応度 =2.24±0.03%Δk/k)	0.99533±0.00020 (炉心状態[1]から添加される反応度 =中心架台反応度 =3.42±0.03%Δk/k)	0.99261±0.00017 (炉心状態[1]から添加される反応度 =中心架台反応度 =4.69±0.03%Δk/k)
[4]	中心架台：上限 制御棒：6本上限 誤装荷：なし 【起動中の全制御棒引抜き】	0.99983±0.00018	1.00558±0.00017	1.00534±0.00018

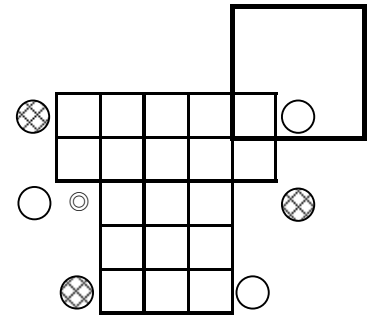
a MCNPコードにより計算



L5.5P-50 炉心



L3P-50 炉心



L2P-50 炉心

図 H-2 中心架台に 1 体の燃料集合体を装荷した
L5.5P-50 炉心、L3P-50 炉心、L2P-50 炉心の炉心配置図
(中心架台は引き抜かれた制御棒も含めた位置)
(低濃縮ウラン炉心、太線で囲んだ 3×3 領域が中心架台)

燃料体の周囲の白地○は引き抜かれた制御棒、網掛けの○は挿入された制御棒
◎は反応度が最大となる燃料誤装荷位置

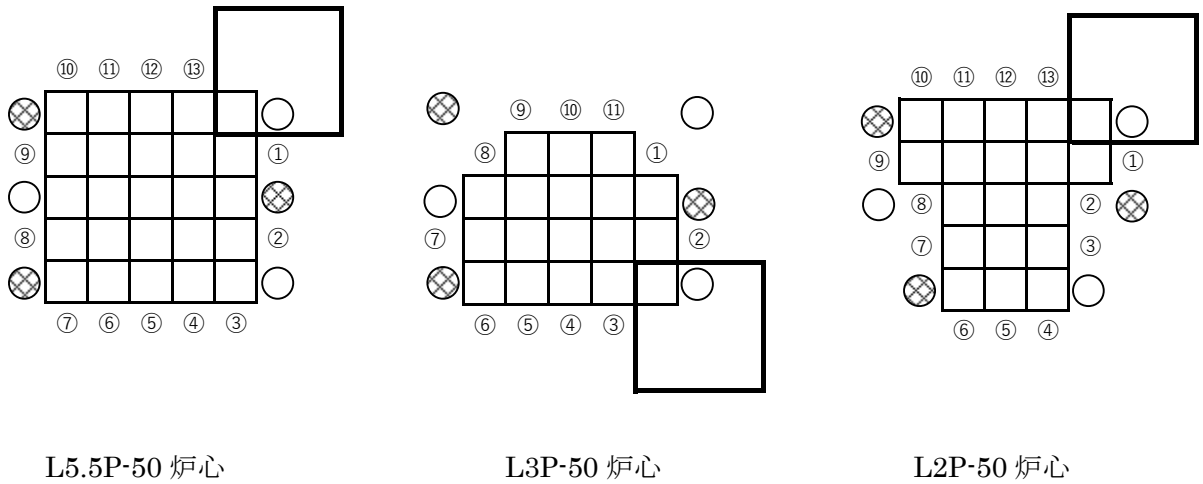


図 H-3 各炉心の燃料集合体の誤装荷位置

太枠は中心架台の位置で、中心架台は下限の状態

燃料集合体の周囲の白地○は引き抜かれた制御棒、網掛けの○は挿入された制御棒

表 H-6 図 H-3 の丸付き番号の位置に燃料集合体を 1 体誤装荷した場合の反応度 (MCNP による解析結果)

燃料装荷位置	炉心名称		
	L5.5P-50 炉心 (% Δ k/k)	L3P-50 炉心 (% Δ k/k)	L2P-50 炉心 (% Δ k/k)
①	0.22 ± 0.03	1.05 ± 0.03	0.49 ± 0.03
②	0.40 ± 0.03	0.47 ± 0.03	1.35 ± 0.03
③	0.46 ± 0.03	0.75 ± 0.03	1.53 ± 0.03
④	0.82 ± 0.03	1.59 ± 0.03	1.09 ± 0.03
⑤	1.03 ± 0.03 ¹⁾	1.58 ± 0.03	1.09 ± 0.03
⑥	0.79 ± 0.03	1.00 ± 0.03	0.91 ± 0.03
⑦	0.39 ± 0.03	0.81 ± 0.03	1.67 ± 0.03
⑧	0.53 ± 0.03	1.25 ± 0.03	1.80 ± 0.03 ¹⁾
⑨	0.56 ± 0.03	1.43 ± 0.03	0.95 ± 0.03
⑩	0.35 ± 0.03	1.67 ± 0.03 ¹⁾	0.80 ± 0.03
⑪	0.70 ± 0.03	1.35 ± 0.03	1.38 ± 0.03
⑫	0.72 ± 0.03	—	1.41 ± 0.03
⑬	0.36 ± 0.03	—	0.80 ± 0.03

1) 太字の下線を付けた結果が最大となる場合

【補足 I 中心架台が上限と下限の場合の制御棒反応度について】

燃料集合体の誤装荷時の反応度印加量が大きな L2-50 炉心と L3-50 炉心について、中心架台が上限の場合と下限の場合の制御棒反応度を MCNP により解析した。(炉心配置は図 3-1-4～図 3-1-5 に示す通り。両炉心共に中心架台には 3 本の燃料体と 6 本の反射体が装荷されている。)

6 本の制御棒の反応度合計の解析結果を表 I-1 に示す。どちらの炉心も中心架台下限の状態のほうが制御棒反応度は大きくなっており、中心架台下限の起動前の未臨界度は、通常運転状態の制御棒反応度を用いて評価した値より大きいことが判る。

なお、表 I-1 の参考値は添付八に示した SRAC-CITATION を用いた制御棒反応度の解析結果であり、MCNP の結果と比べると誤差として考えた 18% の範囲内に入っている。

表 I-1 制御棒反応度 (中心架台が下限と上限の状態)

炉心		中心架台上限 (運転中の状態)	中心架台下限 (起動前の状態)
L3-50 炉心	全制御棒 IN keff	0.98652±0.00017	0.87461±0.00020
	全制御棒 OUT keff	1.00558±0.00017	0.89560±0.00018
	制御棒反応度 (% Δ k/k) ²⁾	1.92±0.02	2.68±0.03
	参考値 (% Δ k/k) ¹⁾	1.83	—
L2-50 炉心	全制御棒 IN keff	0.98096±0.00019	0.82707±0.00020
	全制御棒 OUT keff	1.00534±0.00018	0.85310±0.00019
	制御棒反応度 (% Δ k/k) ²⁾	2.47±0.03	3.69±0.04
	参考値 (% Δ k/k) ¹⁾	2.36	—

1) 参考値は添付八に記載した SRAC-CITATION で求めた制御棒反応度 (まとめ資料 p98 表 4 の結果、6 本の制御棒の合計反応度)

2) 制御棒反応度: $1/\text{keff}(\text{制御棒 IN}) - 1/\text{keff}(\text{制御棒 OUT})$

表 異常な過渡変化および設計基準事故の解析条件の整理 (固体減速炉心)

事象	ケース	過剰反応度 ^(a) (%Δk/k)	反応度添加率(% Δk/k/s)	全制御棒 の反応度 (%Δk/k)	最大1本 の反応度	スクラム 発生時間 ^(b) (s)	スクラム 発生時の 出力 ^(c) (W)	スクラム発生時の 炉心反応度 ^(d) (%Δ k/k)	スクラム後の反応度 ^(e) (%Δk/k)	スクラム 発生前の 積算出力 (J)	スクラム発生後の 積算出力 (J)	全積算出力 (J)	中心架台 の作動の 有無	備考	備考2 (スクラム発生時の反 応度)	備考3 (スクラム後の反応度)
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	ケースA	0.35	0.02%Δk/k/s(ランプ状添加)	1.35	0.45	70.5	138.7	0.35	-0.55 (+0.35-0.9) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.35-0.45=0.9%Δk/kが挿入される)	9.56E2	5.96E2	1.55E3	無	L5.5P-30炉心	温度上昇による-0.0011%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0018%Δk/kの反応度加わる
	ケースB	0.35	0.05%Δk/k(ステップ状添加)	1.35	0.45	3601	0.15	0.05	-0.55 (+0.05-0.6) (制御棒はスクラム前に0.35-0.05=0.3%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.35-0.3-0.45=0.6%Δk/k)	9.95E4	3.98E-1	9.95E4	無	L4P-30炉心 3600秒後に手動スクラム	温度上昇による-0.106%Δk/kの反応度	0.1Wの時点では温度上昇による-0.106%Δk/kの反応度加わる
出力運転中の制御棒の異常な引抜き	ケースA	0.35	0.02%Δk/k/s(ランプ状添加、最大0.35Δk/kまで)	1.35	0.45	5.24	127.6	0.085 (+0.02×4.24) スクラム信号発報まで4.24s	-0.55 (+0.085-0.635) (制御棒はスクラム前に0.35-0.085=0.265%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.35-0.265-0.45=0.635%Δk/k)	5.84E2	1.82E3	2.40E3	無	L5.5P-30炉心	温度上昇による-0.0007%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0028%Δk/kの反応度加わる
実験物の異常等による反応度の付加	ケースA	0.35 ^(f)	0.35%Δk/k(ステップ状添加) ^(f)	1.35	0.45	59.0	138.8	0.35	-0.55 (+0.35-0.9) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.35-0.45=約0.9%Δk/kが挿入される)	9.52E2	5.94E2	1.55E3	無	L5.5P-30炉心	温度上昇による-0.0011%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0018%Δk/kの反応度加わる
	ケースB	0.35 ^(f)	9.72E-5%Δk/k(3600秒で0.35%Δk/kの反応度をランプ状添加) ^(f)	1.35	0.45	1175.6	121.9	0.11 (+9.72E-5×1174.6) スクラム信号発報まで1174.6s	-0.79 (+0.11-0.9) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.35-0.45=約0.9%Δk/kが挿入される)	7.80E3	1.00E3	8.80E3	無	L5.5P-30炉心	温度上昇による-0.009%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.010%Δk/kの反応度加わる
商用電源喪失		0.35	-	1.35	0.45	0	100	0	-0.55 (0.0-0.55) (制御棒はスクラム前に0.35%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.35-0.35-0.45=0.55%Δk/k)	-	2.61E3 (FP崩壊熱を含む)	2.61E3	有	L5.5P-30炉心 スクラム信号発報の12秒後に中心架台の反応度-1.0%Δk/k加わる	-	0.1Wの時点では温度上昇による-0.003%Δk/kの反応度加わる
中性子発生設備利用	ケースA	0.35	-	1.35	0.45	2.3	137.6	0	-0.55 (0.0-0.55) (制御棒はスクラム前に0.35%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.35-0.35-0.45=0.55%Δk/k)	2.64E2	2.68E2	5.31E2	無	L5.5P-30炉心 ケースAは最大中性子発生量の場合	温度上昇による-0.0003%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0006%Δk/kの反応度加わる
	ケースB	0.35	-	1.35	0.45	3601	23.3	0	-0.55 (0.0-0.55) (制御棒はスクラム前に0.35%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.35-0.35-0.45=0.55%Δk/k)	1.73E5	2.95E2	1.73E5	無	L5.5P-30炉心 ケースBは燃料温度が最大となる場合 3600秒後に手動スクラム	温度上昇による-0.20%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.20%Δk/kの反応度加わる

a.過剰反応度 : 炉心に加わる反応度(ステップ、ランプ)

b.スクラム発生時間 : スクラム信号が発報した時間+1秒後の時間

表 異常な過渡変化および設計基準事故の解析条件の整理 (軽水減速炉心)

事象	ケース	過剰反応度 ^(a) (%Δk/k)	反応度添加率(%Δk/k/s)	全制御棒の反応度(%Δk/k)	最大1本の反応度	スクラム発生時間 ^(b) (s)	スクラム発生時の出力 ^(c) (W)	スクラム発生時の炉心反応度 ^(d) (%Δk/k)	スクラム後の反応度 ^(e) (%Δk/k)	スクラム発生前の積算出力(J)	スクラム発生後の積算出力(J)	全積算出力(J)	ダンプ弁の作動の有無	備考1	備考2 (スクラム発生時の反応度)	備考3 (スクラム後の反応度)
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	ケースA	0.5	0.02%Δk/k/s(ランプ状添加)	1.5	0.5	38.4	181.9	0.5	-0.5 (+0.5-1.0) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.5-0.5=1.0%Δk/kが挿入される)	4.38E2	4.29E2	8.67E2	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.00009%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.00018%Δk/kの反応度加わる
	ケースB	0.5	0.05%Δk/k(ステップ状添加)	1.5	0.5	1548.4	120.7	0.05	-0.5 (+0.05-0.55) (制御棒はスクラム前に0.5-0.05=0.45%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.45-0.5=0.55%Δk/k)	2.13E4	1.99E3	2.33E4	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.005%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.005%Δk/kの反応度加わる
出力運転中の制御棒の異常な引抜き	ケースA	0.5	0.02%Δk/k/s(ランプ状添加)	1.5	0.5	5.3	127.5	0.086 (0.02×4.3) スクラム信号発報まで4.3s	-0.5 (+0.086-0.586) (制御棒はスクラム前に0.5-0.086=0.414%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.414-0.5=0.586%Δk/k)	5.90E2	2.04E3	2.63E3	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.0001%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0006%Δk/kの反応度加わる
実験物の異常等による反応度の付加	ケースA	0.5 ^(f)	0.5%Δk/k(ステップ状添加) ^(f)	1.5	0.5	20.4	138.8	0.5	-0.5 (+0.5-1.0) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.5-0.5=約1.0%Δk/kが挿入される)	4.37E2	4.30E2	8.67E2	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.00009%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0002%Δk/kの反応度加わる
	ケースB	0.5 ^(f)	1.39E-4%Δk/k(3600秒で0.5%Δk/kの反応度をランプ状添加) ^(f)	1.5	0.5	957.4	122.7	0.13 (+1.39E-4×956.4) スクラム信号発報まで957.4s	-0.87 (+0.13-1.0) (制御棒はスクラム前に全引抜きであり、1.5-0.5=約1.0%Δk/kが挿入される)	5.98E3	8.50E3	6.83E3	無	C45G(2H2O)炉心	温度上昇による-0.0013%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による-0.0014%Δk/kの反応度加わる
商用電源喪失		0.5	-	1.5	0.5	0	100	0	-0.5 (0.0-0.5) (制御棒はスクラム前に0.5%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.5-0.5=0.5%Δk/k)	-	2.97E3 (FP崩壊熱を含む)	2.97E3	有	C45G(2H2O)炉心 スクラム信号発報の30秒後にダンプ弁の反応度-1.0%Δk/kが加わる	0	0.1Wの時点では温度上昇による-0.002%Δk/kの反応度加わる
炉心タンクヒータ		0.5	-	1.5	0.5	3601	1	0.00073 (ヒータの温度上昇による反応度)	-0.49927 (+0.00073-0.5) (制御棒はスクラム前に0.5%Δk/kだけ挿入されているため、残りは1.5-0.5-0.5=0.5%Δk/k)	6.40E3	9.59E2	7.36E3	無	C45G(6H2O)炉心 3600秒後に手動スクラム	炉心発熱の温度上昇による+0.0006%Δk/kの反応度加わる	0.1Wの時点では温度上昇による+0.0007%Δk/kの反応度加わる

a.過剰反応度 : 炉心に加わる反応度(ステップ、ランプ)

b.スクラム発生時間 : スクラム信号が発報した時間+1秒後の時間

c.スクラム発生時の出力: 最大出力と同じ(W)

d.スクラム発生時の炉心反応度

e.スクラム後の反応度: 最大反応度の制御棒以外の制御棒が全挿入された状態での反応度

f.制御棒引抜きによる反応度と試料の移動による反応度を足したもの

c.スクラム発生時の出力:最大出力と同じ(W)

d.スクラム発生時の炉心反応度

e.スクラム後の反応度:最大反応度の制御棒以外の制御棒が全挿入された状態での反応度

f.制御棒引抜きによる反応度と試料の移動による反応度を足したもの

KUCA設置変更申請書 添付書類10の安全評価結果 高濃縮燃料（既承認）と低濃縮燃料(今回申請)の比較

	高濃縮燃料（既承認）	低濃縮燃料(今回申請)	備考
	<p>共通事項</p> <p>(1)燃料から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料板の燃料ミート部の温度上昇に費やされるものとする。</p> <p>(2)温度分布が x, y, z 方向共に cos 分布であるとして、温度上昇の平均値に対する出力ピークの係数を掛ける。</p> <p>(3) 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効果は無視する。軽水減速炉心の2分割炉心で正の反応度温度係数を持つ炉心についてはすべて温度係数が制限値の最大値 ($+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$) であるとし、燃料温度上昇により正の反応度が加わるとして解析を行う。</p> <p>(4) 制御棒挿入後に出力が 1/10 以下に低下するまでの積算出力を算出する。</p> <p>(5) スクラム発生時には最大の反応度を有する1本の制御棒が落下しない。</p> <p>(6) 判定基準は高濃縮燃料、低濃縮燃料で変更無し。</p>	<p>共通事項</p> <p>(1)燃料から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料板の燃料ミート部と燃料被覆材の温度上昇に費やされるものとする。</p> <p>(2) 各炉心の出力分布の最大値と平均値の比を掛け、さらに燃料板内でのピークを求めるための比率を掛ける。</p> <p>(3) 全ての炉心で各炉心の反応度温度係数（正負とも）を考慮して解析を行う。</p> <p>(4) 制御棒挿入後に出力が 0.1W まで低下するまでの積算出力を算出する。</p> <p>(5) スクラム発生時には最大の反応度を有する1本の制御棒が落下しない。</p> <p>(6) 判定基準は高濃縮燃料、低濃縮燃料で変更無し。</p>	<p>LEUでは各炉心の出力分布と燃料板内出力分布考慮して最大値を求める</p> <p>LEUは全炉心で温度係数考慮</p> <p>積算範囲が異なる</p>
	<p>原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き</p>	<p>原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き</p>	
シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付8で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 1W となるレンジ。</p>	<p><u>ケースA</u></p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(2) 添付8で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p>	<p>LEUは線型出力系 100W レンジ</p>

	<p>(4) 制御棒の引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たとする。対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120% である 1.2W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>(4) 制御棒の引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たとする。対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120% である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u> (ケース A と異なる箇所のみ記載)</p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は $0.05\% \Delta k/k$ とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより $0.05\% \Delta k/k$ のステップ状の反応度を加える。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) に至らない場合には出力上昇後 1 時間 (3600 秒) を経過した段階で運転員が手動スクラムボタンを押す。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。</p>	<p>LEU は線型出力系 120W でスクラム</p> <p>LEU はケース B の小反応度印加を追加</p> <p>LEU は 3600 秒後に手動スクラムもある</p>
結果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>E3. 7P 炉心 : 積算出力 9.74J、温度上昇 $5.48 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C60G0 (5 列) 炉心 : 積算出力 4.59J、温度上昇 $1.64 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A L5. 5P-30 炉心 : 積算出力 $1.55 \times 10^3 \text{ J}$、温度上昇 $4.41 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B L4P-30 炉心 : 積算出力 $9.95 \times 10^4 \text{ J}$、温度上昇 $2.71 \times 10^1 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A C45G (2H₂O) 4 列炉心 : 積算出力 $8.67 \times 10^2 \text{ J}$、温度上昇 $6.87 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B C45G (2H₂O) 4 列炉心 : 積算出力 $2.33 \times 10^4 \text{ J}$、温度上昇 $1.85 \times 10^0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p>	
	出力運転中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	
シ	(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値 (固体減速架台 0.35%	(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値 (固体減速架台	

<p>ナ リ オ</p> <p>$\Delta k/k$、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$) とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 $0.01W$ の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が $100W$ となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引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たとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120% である $120W$ を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>$0.35\% \Delta k/k$、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$) とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 $0.01W$ の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が $100W$ となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引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たとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120% である $120W$ を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	
<p>結 果</p> <p>固体減速炉心の温度上昇の最大値 E3.7P 炉心：積算出力 $9.84 \times 10^2 J$、温度上昇 $2.15 \times 10^0 \text{ }^\circ C$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値 C60G0 (5 列) 炉心：積算出力 $4.27 \times 10^2 J$、温度上昇 $5.90 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値 L5.5P-30 炉心：積算出力 $2.40 \times 10^3 J$、温度上昇 $6.83 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値 C45G (2H₂O) 4 列炉心：積算出力 $2.63 \times 10^3 J$、温度上昇 $2.08 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p>	
<p>実験物の異常等による反応度の付加</p>	<p>実験物の異常等による反応度の付加</p>	
<p>シ ナ リ オ</p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値 (固体減速架台 $0.35\% \Delta k/k$、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$) とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 実験物 (照射試料) を装着した状態で $1W$ の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が $100W$ となるレンジ。</p>	<p>ケース A</p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に異常発生前は制御棒は全引抜き状態とし、制御棒の全反応度は制限値の最小値 (固体減速炉心では $1.35\% \Delta k/k$、軽水減速炉心では $1.5\% \Delta k/k$)、ダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値 ($1\% \Delta k/k$)。異常発生後の過剰反応度は固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p>	<p>LEU の過剰反応度は制限値の最大値とする k</p>

	<p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料が炉心から落下し+0.5%Δk/k がステップ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 原子炉は出力が線型出力系の指示値の120%である120Wを超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した1秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>(3) 実験物（照射試料）を装着した状態で0.01Wの臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は100%で出力が100Wとなるレンジ。</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料が炉心から落下し反応度の最大値（固体減速架台+0.35%Δk/k、軽水減速炉心+0.5%Δk/k）がステップ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 原子炉は出力が線型出力系の指示値の120%である120Wを超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した1秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p> <p><u>ケースB</u>（ケースAと異なる箇所のみ記載）</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料がゆっくり落下し試料の反応度の最大値（固体減速架台+0.35%Δk/k、軽水減速炉心+0.5%Δk/k）が時間と共に線形に3600秒掛けてランプ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の110%での一せい挿入も作動しない。</p>	<p>LEUは初期出力0.01W</p> <p>固体減速炉心の反応度印加量変更</p> <p>LEUはケースBのランプ状反応度印加を追加</p>
結果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>E3.7P炉心：積算出力4.44×10^2J、温度上昇2.50×10^{-1}℃</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C60G0（5列）炉心：積算出力4.33×10^2J、温度上昇1.55×10^{-1}℃</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケースA L5.5P-30炉心：積算出力1.55×10^3J、温度上昇4.40×10^{-1}℃</p> <p>ケースB L5.5P-30炉心：積算出力8.80×10^3J、温度上昇2.50×10^0℃</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケースA C45G(2H20)4列炉心：積算出力8.67×10^2J、温度上昇6.87×10^{-2}℃</p> <p>ケースB C45G(2H20)4列炉心：積算出力6.83×10^3J、温度上昇5.41×10^{-1}℃</p>	
	商用電源喪失	商用電源喪失	
シ	(1) 軽水炉心のC35G0（5列）炉心において、1ヶ月の最大積算出力（100Wh）となる運転	(1) 固体減速炉心はL5.5P-30炉心、軽水減速炉心はC45G(2H ₂ O)4列炉心において、	LEUは固体減速

ナ リ オ	<p>を行った直後に商用電源が喪失。</p> <p>(2) 過剰反応度は制限値の最大値（軽水減速炉心 0.5% Δk/k）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ 1 本以外の 5 本が炉心に挿入され、ダンプ弁保持の電磁石電源断によりダンプ弁が開となる。ただし、制御棒落下により 1 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。またダンプ弁の開動作により 30 秒後に燃料領域の水が全て排出してステップ状の負の反応度が加わる。</p>	<p>1 ヶ月の最大積算出力（100Wh）となる運転を行った直後に商用電源が喪失。</p> <p>(2) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% Δk/k、軽水減速炉心 0.5% Δk/k）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ 1 本以外の 5 本が炉心に挿入され、ダンプ弁保持の電磁石電源断によりダンプ弁が開となる。ただし、制御棒落下により 1 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。固体減速炉心では 12 秒後に中心架台が落下してステップ状の負の反応度が加わる。軽水減速炉心ではダンプ弁の開動作により 30 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。</p>	と軽水減速の 2 炉心を選択
結 果	C35G0（5 列）炉心：積算出力 $3.28 \times 10^3 \text{J}$ 、温度上昇 $8.08 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>L5.5P-30 炉心：積算出力 $2.61 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $7.43 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C45G(2H₂O) 4 列炉心：積算出力 $2.97 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $2.36 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$</p>	
	重水反射体への軽水流入	重水反射体への軽水流入	
シ ナ リ オ	<p>(1) 軽水減速炉心で C30 の単一炉心、または 2 分割炉心の燃料体の外側に重水タンクを設置する。過剰反応度は制限値の最大値、制御棒とダンプ弁の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 出力が 100W の臨界状態とし、その際に線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ。</p> <p>(3) 重水タンクが大きく破損して全ての重水が軽水と混合した、又は、重水タンクが小さく破損して重水の一部が重水タンクから漏れ出して炉心タンクの軽水と混入。</p> <p>(4) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。ス</p>	低濃縮燃料では重水は使用しないため解析は行わない	

	スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下により 1 秒後にステップ状の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。		
結果	出力上昇せず未臨界	—	
	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	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	
シナリオ	<p>(1) 固体減速架台で過剰反応度は制限値の最大値 0.35% Δk/k、制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 1W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W とするレンジ。</p> <p>(4) 臨界状態で 10^{11}n/s で中性子を打ち込み、炉心には 4×10^9n/s の中性子が入射し出力上昇。</p> <p>(5) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(6) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。</p>	<p><u>ケース A</u></p> <p>(1) 固体減速架台で過剰反応度は制限値の最大値 0.35% Δk/k、制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 0.01W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W とするレンジ。</p> <p>(4) 臨界状態で 10^{11}n/s で中性子を打ち込み、炉心には半分の 5×10^{10}n/s の中性子が入射し出力上昇。</p> <p>(5) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入には作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(6) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下により 1 秒後にステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u> (ケース A と異なる箇所のみ記載)</p> <p>(4) 臨界状態で炉心にはケース A より少ない中性子が入射。中性子発生量は炉心により異なり、燃料温度が最も上昇する中性子発生量をサーベイして決定する。</p> <p>(6) 線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超える場合にはケース A と同様にスクラムするが、120% に至らずに出力が低下する場合には出力上昇後 1 時間 (3600 秒) を経過した段階で運転員が手動スクラムボタンを押し、1 秒後に制御棒落下に</p>	<p>LEU は初期出力 0.01W 中性子発生量の変更</p> <p>LEU はケース B の追加</p>

		よりステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。	
結果	温度上昇の最大値 E3. 7P 炉心：積算出力 1.28×10^4 J、温度上昇 7.22×10^0 °C	温度上昇の最大値 ケース A L5. 5P-30 炉心：積算出力 5.31×10^2 J、温度上昇 1.51×10^{-1} °C ケース B L5. 5P-30 炉心：積算出力 1.73×10^5 J、温度上昇 4.93×10^1 °C	
	炉心タンクヒータによる温度上昇	炉心タンクヒータによる温度上昇	
シナリオ	(1) 軽水減速架台で正の反応度温度係数が最も大きい C30G (7H ₂ O) (5 列) 炉心で、反応度温度係数が制限値の最大値 ($+2 \times 10^{-4}$ Δk/k/°C) であるする、 (2) 出力が 100W の臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W となるレンジ。 (3) 軽水の初期温度を 25°C とし、炉心タンクヒータを用いて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。 (4) 線型出力系の 110% での一せい挿入は作動しない。 (5) 原子炉は安全出力計の指示値の 120% を超えたときにスクラムする。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の負の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。	(1) 代表炉心の中で軽水減速架台の反応度温度係数が正となる C45G (6H ₂ O) 炉心など 4 つの炉心を対象とし、反応度温度係数は各炉心の値を用いる。 (2) 出力が 1W の臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W となるレンジ。 (3) 軽水の初期温度を 25°C とし、炉心タンクヒータを用いて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。 (4) 線型出力系の 110% での一せい挿入は作動しない。 (5) 原子炉は線型出力計の指示値の 120% を超えたときにスクラムする。ただし、1 時間以内にスクラム信号が出ない場合には 1 時間後に運転員により手動スクラムボタンを押して 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の負の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。	LEU は対象炉心 変更 LEU は初期出力 1W LEU は 3600 秒 後に手動スク ラム
結果	温度上昇 1.5×10^0 °C	温度上昇の最大値 C45G (6H ₂ O) 5 列炉心：積算出力 7.36×10^3 J、温度上昇 5.36×10^{-1} °C	
	燃料落下又は燃料誤装荷	燃料落下又は燃料誤装荷	
シナリオ	(1) 固体減速架台で、過剰反応度が制限値の最大値 ($0.35\% \Delta k/k$) となるだけの燃料集合体が装荷されている。制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。 (2) E3. 7, E3, E2, E1, EE1, EEE1 炉心を対象。	燃料誤装荷の解析は行わない	

<p>(3) 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、中心架台を下限とした状態で炉心配置変更作業を行う。なお、引き抜いた制御棒と挿入された制御棒は燃料領域に対して対称な位置に配置されている。中心架台の反応度は制限値の最低値、または $5\% \Delta k/k$ とする。</p> <p>(4) 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、炉心の燃料周囲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。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である。</p> <p>(5) 線型出力計の指示値が100%で0.1Wとなるレンジで中性子源を挿入し、出力0.01Wの定常状態となったとする。その後、中心架台を上昇させる。中心架台の上昇速度は制限値の最大速度。</p> <p>(6) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(7) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の120%である0.12Wを超えたときにスクラムする。スクラム信号が発生し、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。制御棒は3本が上限になっているが、その中に最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。スクラム信号が発生した1秒後に制御棒の挿入によりステップ状に負の反応度が加わるとする。</p> <p>(8) 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秒後までに時間ともに線型に負の反応度を加える。</p>		
<p>温度上昇の最大値</p> <p>E3. 7P 炉心：積算出力 $3.61 \times 10^0 \text{J}$、温度上昇は最大で $2.0 \times 10^{-3} \text{°C}$</p>	<p>温度上昇の最大値</p> <p>ケース A L5. 5P-50 炉心：積算出力 $8.26 \times 10^2 \text{J}$、温度上昇 $2.10 \times 10^{-1} \text{°C}$</p> <p>ケース B L2P-30 炉心：積算出力 $5.80 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $1.13 \times 10^0 \text{°C}$</p>	
<p>燃料の機械的破損</p>	<p>燃料の機械的破損</p>	

<p>シ ナ リ オ</p> <p>(1) 軽水減速架台、又は固体減速架台 (E3.7P 炉心、C60G0 炉心) において、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運転間隔は 30 日間として 9 回繰り返す。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。</p> <p>(2) 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 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を損傷させた。</p> <p>(3) 軽水減速架台では燃料を破損させ、燃料芯材において表面より 15 μm 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素が全量放出された。燃料板の破損は KUR の使用済燃料の破損の解析と同じように表面の被覆材がすべて外れたとする。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10%の燃料板が燃料の端面と平行な方向に折れ曲がり (長さ約 5cm) 燃料芯材が露出し、燃料板の切断面から 15 μm 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素が全量放出された。</p>	<p>(1) 固体減速炉心では全ての炉心のうち燃料体ごとの出力積分値が最大となる燃料体を有する炉心 (L3P-50 炉心)、軽水減速架台では臨界質量が小さい炉心 (C45G2 (4 列) 炉心) を対象。月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを運転間隔は 30 日間として 9 回繰り返す。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。</p> <p>(2) 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 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を損傷させた。</p> <p>(3) 軽水減速架台では 1 枚の燃料が燃料板の対角線方向に折れ曲がり燃料芯材が露出し、燃料芯材において表面より 15 μm 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素が全量放出された。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10%の燃料板が対角線方向 (長さ約 7cm) に折れ曲がり燃料芯材が露出し、燃料板の切断面から 15 μm 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素が全量放出された。</p>	<p>LEU では出力積分値が最大となる燃料体を選定</p> <p>燃料の破損方向を軽水と固体共に燃料板の対角線方向に統一</p>
<p>結 果</p> <p>被ばく量は最大でも小児に対して約 0.18 μSv</p>	<p>被ばく量は最大でも小児に対して約 0.004 μSv</p>	
<p>実験設備、実験物等の著しい破損</p>	<p>実験設備、実験物等の著しい破損</p>	
<p>シ ナ リ オ</p> <p>(1) 固体減速架台 (E3 炉心、EE3 炉心) で最大出力 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 (反応度絶対値の最大値 0.1%Δk/k) を使用。照射位置は炉心中心。</p> <p>(2) 100Wh の運転直後に試料が破損し、内部の核分裂生成物 (希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素) の 10%が放出。</p> <p>(3) 放出の経路については「燃料の機械的破損」と同じとする。</p>	<p>(1) 固体減速架台の全ての代表炉心を対象として、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 (反応度絶対値の最大値 0.1%Δk/k) を使用。照射位置は試料の核分裂率の最大値となる位置。</p> <p>(2) 100Wh の運転直後に試料が破損し、内部の核分裂生成物 (希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素) の 10%が放出。</p> <p>(3) 放出の経路については「燃料の機械的破損」と同じとする。</p>	<p>LEU では全ての炉心を検討。照射位置は核分裂率最大値となる位置</p>
<p>結 果</p> <p>被ばく量は最大でも小児に対して約 0.092 μSv</p>	<p>被ばく量は最大でも小児に対して約 0.19 μSv</p>	

京都大学臨界実験装置 (KUCA)


設置変更承認申請について

【トリウム保管庫について】

トリウム燃料の保管状況について.....	1
トリウム保管庫の臨界計算について.....	7
その他の資料	9

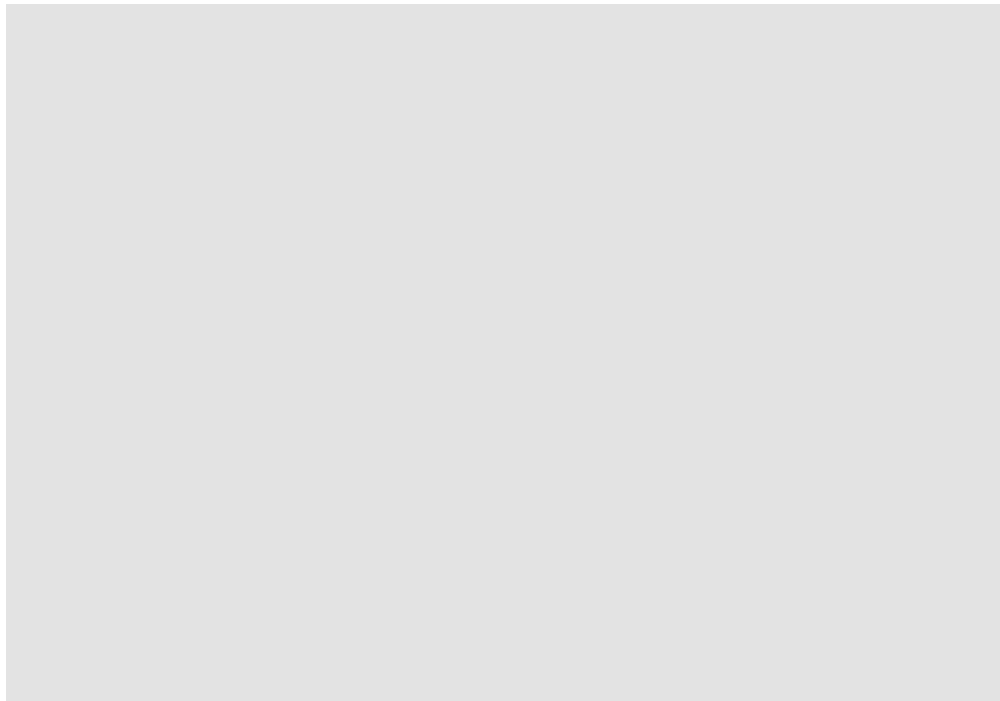
京都大学複合原子力科学研究所

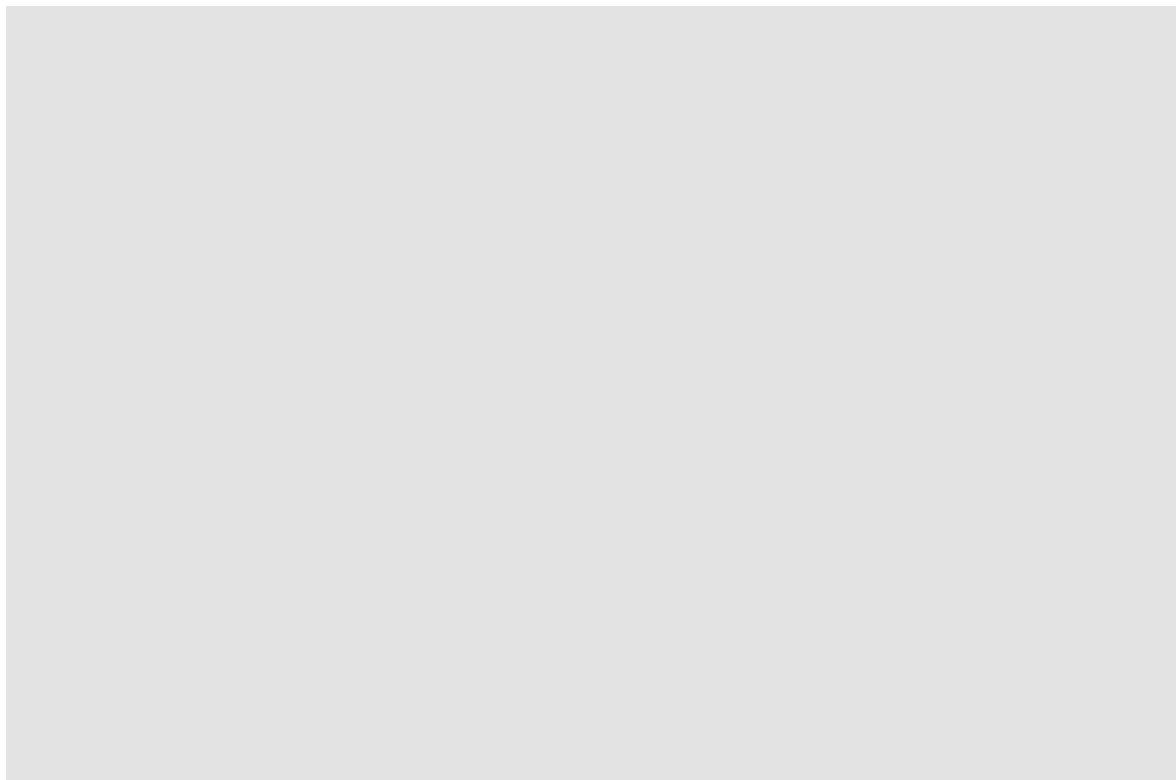
トリウム燃料の保管状況について

現在、KUCAには厚さの異なる2種類のトリウム板  を燃料室の2箇所保管している。

保管庫(写真1)は鉛遮蔽体でできており、その内部にトリウム板を入れるための角柱の容器が入っている。保有する全てTh Iを入れた状態で保管庫の表面線量は約5~6 μ Sv/hである。

もう1つの保管庫(写真2)は鉛遮蔽体の周囲にカバー用のアルミ製のボックスを被せた構造になっており、鉛遮蔽体の内部にトリウム板を入れるための角柱の容器が入っている。保有する全てTh IIを入れた状態で保管庫の表面線量は約5~14 μ Sv/hである。





燃料室には図 1 に示すように 2 台の電離箱のガンマ線エリアモニタ (γ F1 と γ F2) が壁面に設置されている。保管容器は γ F1 のすぐ下に設置されている。

γ F1 と γ F2 の指示値の記録紙を写真 3、写真 4 に示す。 $10^0 \sim 10^6 \mu$ Sv/h の対数スケールのため記録紙上での下限値は 1μ Sv/h である。この時点で保有している高濃縮ウラン燃料板とトリウム板はすべて燃料室に保管されており、記録紙に印字されたデジタル数値から換算するとトリウム保管庫に近い γ F1 は約 1.1μ Sv/h、 γ F2 は約 0.7μ Sv/h となっている。(常に γ F1 のほうが γ F2 に比べて高い値を示している)

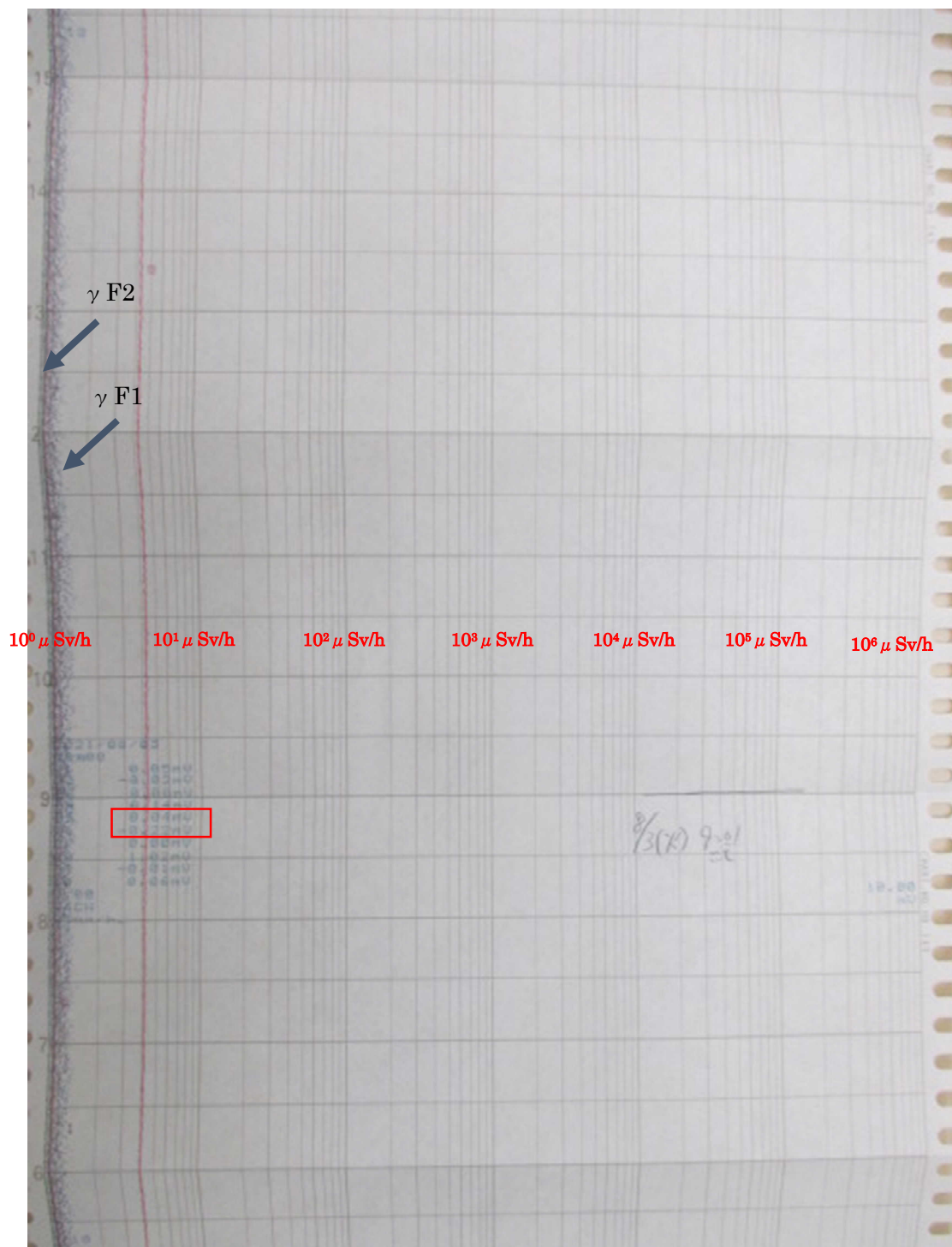


写真3 燃料室ガンマ線エリアモニタ記録紙 (1)

記録紙 (データは打点式) は6デカードで $10^0 \mu\text{Sv/h}$ から $10^6 \mu\text{Sv/h}$ の範囲を示す。
 γ F1 は Ch.5、 γ F2 は Ch.6 で、ここでの表示のデジタル値 (赤枠) は Ch.5 が 0.04mV
 V ($1.1 \mu\text{Sv/h}$)、Ch.6 が -0.22mV ($0.7 \mu\text{Sv/h}$) となる。
 (記録紙[mV]と線量率[$\mu\text{Sv/h}$]の換算は、 $[\mu\text{Sv/h}] = 10^{(6/10 \times [\text{mV}])}$)。

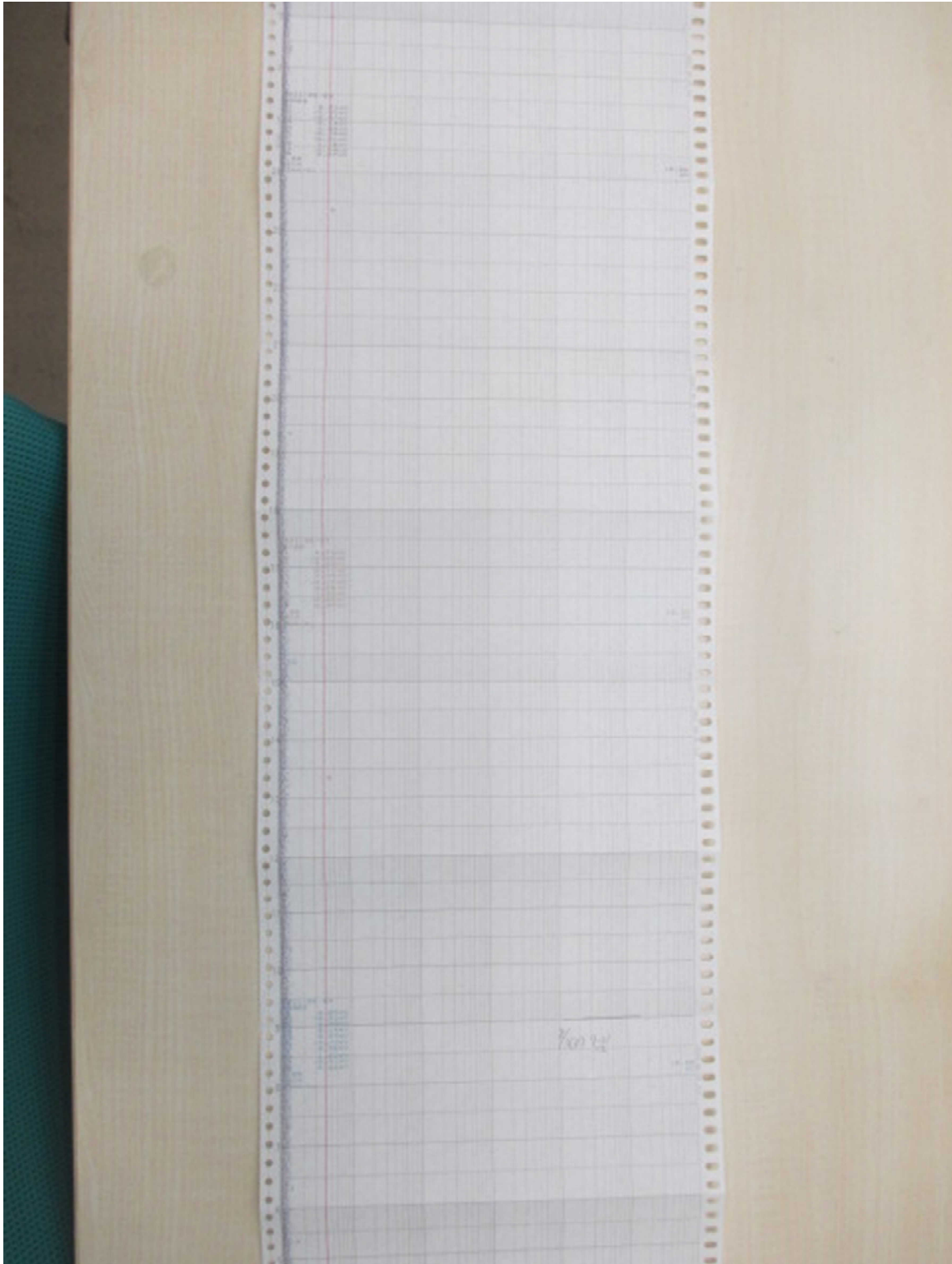


写真 4 燃料室ガンマ線エリアモニタ記録紙 (1 日分)

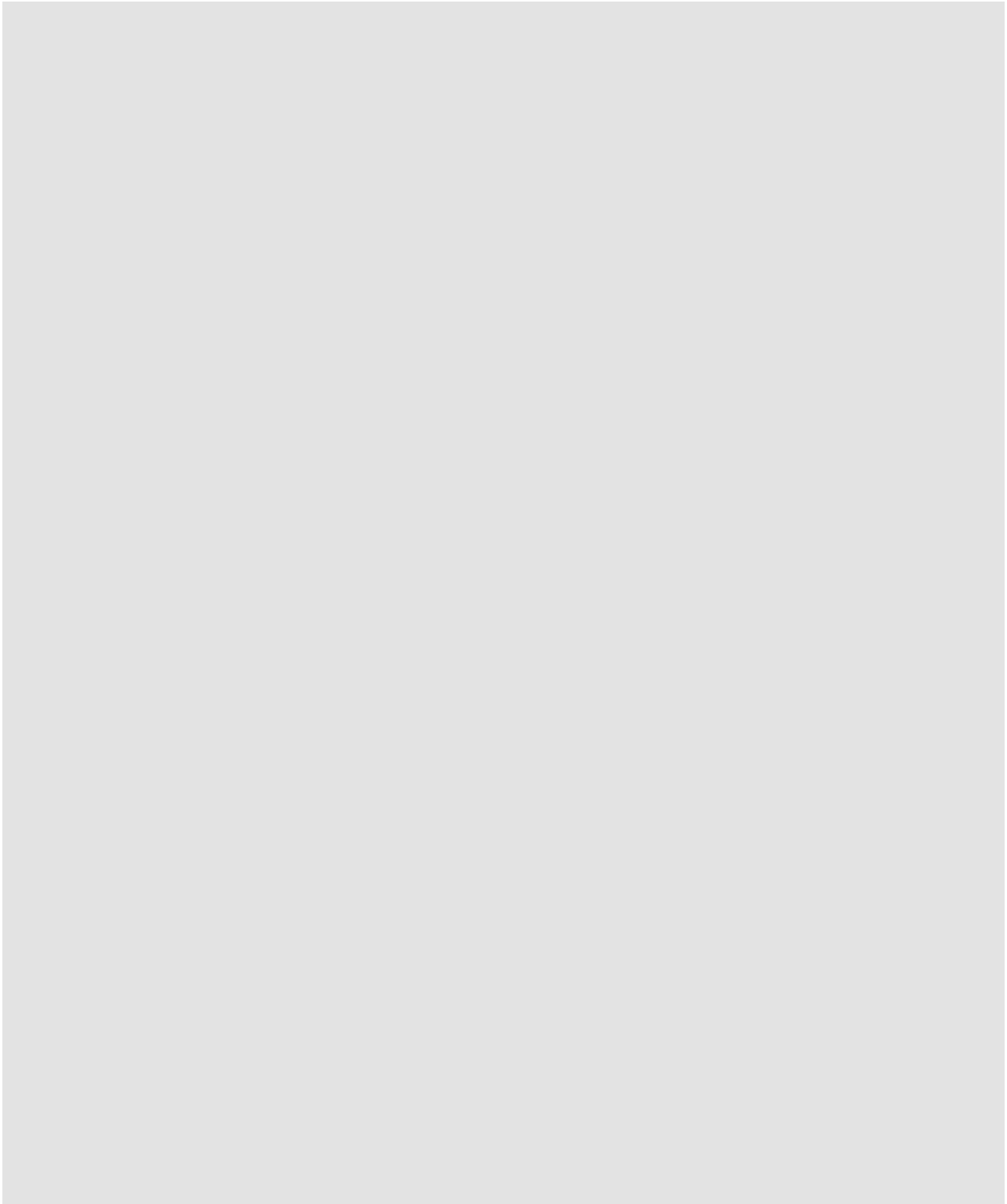


図 1 炉室内放射線モニタ配置図

トリウム保管庫の臨界計算

モンテカルロ計算コード MCNP により増倍率を計算した。(②を除く)

① トリウム (金属) 単体の無限増倍率

0.06304 ± 0.0003

トリウム単体の増倍率は 1 より十分に小さい

② トリウム (金属) + 減速材あり (熱領域での増倍)

Th-232 の熱エネルギー領域で断面積等は以下の通りである。(0.0253eV での値)

σ fission : 53.71 μ barn (核分裂断面積)

σ capture : 7.338 barn (捕獲断面積)

ν p : 1.851 ν d : 4.9e-2 (1 核分裂での中性子発生数)

出典 : JENDL-4.0

<https://www.ndc.jaea.go.jp/cgi-bin/Tab80WWW.cgi?lib=J40&iso=Th232>

増倍率 = $(\nu p + \nu d) \times \sigma$ fission / σ capture = 1.39×10^{-5}

熱領域の増倍率は 1 より十分に小さな値であるのでトリウム+減速材体系を無限体積としても増倍率は 1 より十分に小さい

③ トリウム保管庫 (現状の寸法、周囲に厚さ 10cm の鉛遮へい)

鉛周囲に水なし 0.04274 ± 0.0001

鉛周囲に水 0.04275 ± 0.0001

増倍率は 1 より十分に小さい。また保管庫の周囲に水があっても増倍率にはほとんど影響しない

④ 固体減速炉心のバードケージを保管容器に隣接

鉛周囲に水なし 0.04820 ± 0.0001

鉛周囲に水 0.44923 ± 0.0001

バードケージを近接させた場合でも増倍率は 1 より十分に小さい

⑤ Th を照射して U-232 が生成された場合

100W で 1 時間の運転を 10 回繰り返す、その炉心にトリウムを装荷していることを

想定して ORIGEN-2.2 により燃焼計算を行う。

ト [REDACTED] [REDACTED]、U-233 の生成量は 1.04×10^{-3} g であった。この U-233 を Th に含めて②と同じトリウム保管庫（周囲に厚さ 10cm の鉛遮へい）の解析を行う。

鉛周囲に水なし 0.04274 ± 0.0001

鉛周囲に水 0.04277 ± 0.0001

Th から生成される U-233 を含めても増倍率は 1 より十分に小さい

その他の資料

直近の利用実績

補足資料 4 に新規制基準対応以降のトリウムの利用実績の資料を示す。

2017 年 6 月に運転を再開して以降は 2018 年 12 月と 2020 年 1 月の 2 回、トリウムを含む炉心での実験を行っている。

トリウム燃料の設工認

補足資料 5 にトリウム燃料の設工認（KUCA 増設設工認「その 3」、昭和 48 年 4 月）を示す。

トリウム燃料の管理に関わる保安規定等の条項について

原子炉施設保安規定での関係する条項は以下の通り。

原子炉施設保安規定

（燃料要素の点検）

第 6 3 条 臨界装置部長は、次の各号に掲げる場合には、臨界装置用燃料要素の外観について点検を行い、異常のないことを確認しなければならない。

- (1) 燃料要素を収納しようとするとき。
- (2) 燃料室に保管中の燃料要素、1 年に 1 回以上
- (3) 燃料集合体を組み立てるとき。

トリウムの使用（燃料の収納、組み立てを含む）は保安規定 60 条に定められた運転指令（書式としては「KUCA 運転計画指令書」）に基づいて行われる。運転員は使用時に高濃縮ウラン板およびトリウム板の外観を確認し、その結果については「KUCA 運転報告書」の中の「燃料要素の外観等の異常」の有無として報告される。

2020 年 1 月 6 日のトリウムを利用した炉心の臨界近接実験を行った際の「KUCA 運転計画指令書」、および「KUCA 運転報告書」を添付する。

燃料室に保管中の点検については、IAEA の査察として年 1 回実施される実在庫検認（PIV : Physical Inventory Verification、棚卸し）時に他の高濃縮ウラン燃料板と一緒にト

トリウムについても取り出して外観を確認している。査察の記録については「KUCA 核燃料物質の記録」に記載している。2020 年から現在までのトリウムについての査察、棚卸しの記録を添付する。

原子炉施設保安規定の下部規定である保安指示書の関係する条項は以下の通り。

原子炉施設保安指示書

4.2.2.7 KUCA 用燃料記録（臨-様式-005）

「KUCA 用燃料記録」は、「KUCA 炉心配置変更計画指令書」（臨-様式-003）の添付書類として、一連の作業終了時の燃料室の各バードケージの燃料枚数、並びに炉心の燃料枚数を記載するものである。指令書番号は「KUCA 炉心配置変更計画指令書」と同じ番号とし、臨界装置主任技術者の署名のあるものによって有効とする。

トリウム板の枚数は「KUCA 用燃料記録（臨-様式-005）」に記載して管理している。

2020 年 1 月 6 日にトリウムを使用した運転の時の「KUCA 用燃料記録」を添付する。この書類には燃料室の各バードケージ内の燃料角板、燃料長板の枚数、
および各炉心内の燃料角板、燃料長板の枚数、トリウム燃料板の枚数を記載しており、炉心配置変更等の作業を行うことでこの記録に記載された枚数が変更されたときに更新する。

（炉心に装荷されている濃縮ウラン板、トリウム板の枚数については「KUCA 運転報告書」の「14.炉心装荷内訳」にも記載して確認している）

4.2.3.8 KUCA 用核燃料記録

- (1) 核燃料物質の記録は 1 ヶ月を単位とし、燃料室及び各架台の炉心の枚数を記録する。
- (2) 燃料操作を行った日毎の記録は、運転報告書及び運転計画指令書に添付されている「KUCA 用燃料記録」（臨-様式-005）用紙に記載される。
- (3) 燃焼は一切ないものとして記録する。

燃料操作を行ったときのトリウム板枚数の記録は「KUCA 用燃料記録」に記載されてい

る。(添付の通り)

1ヶ月単位のトリウム板枚数の記録は「KUCA 核燃料物質の記録」に記載している。例として2021年6月7日～7月11日の記録(2021.7表紙、2021.7T在庫明細)を添付する。この期間ではトリウム板は全てKMP-Aである燃料室に保管されていた。

KUCA 運転計画指令書

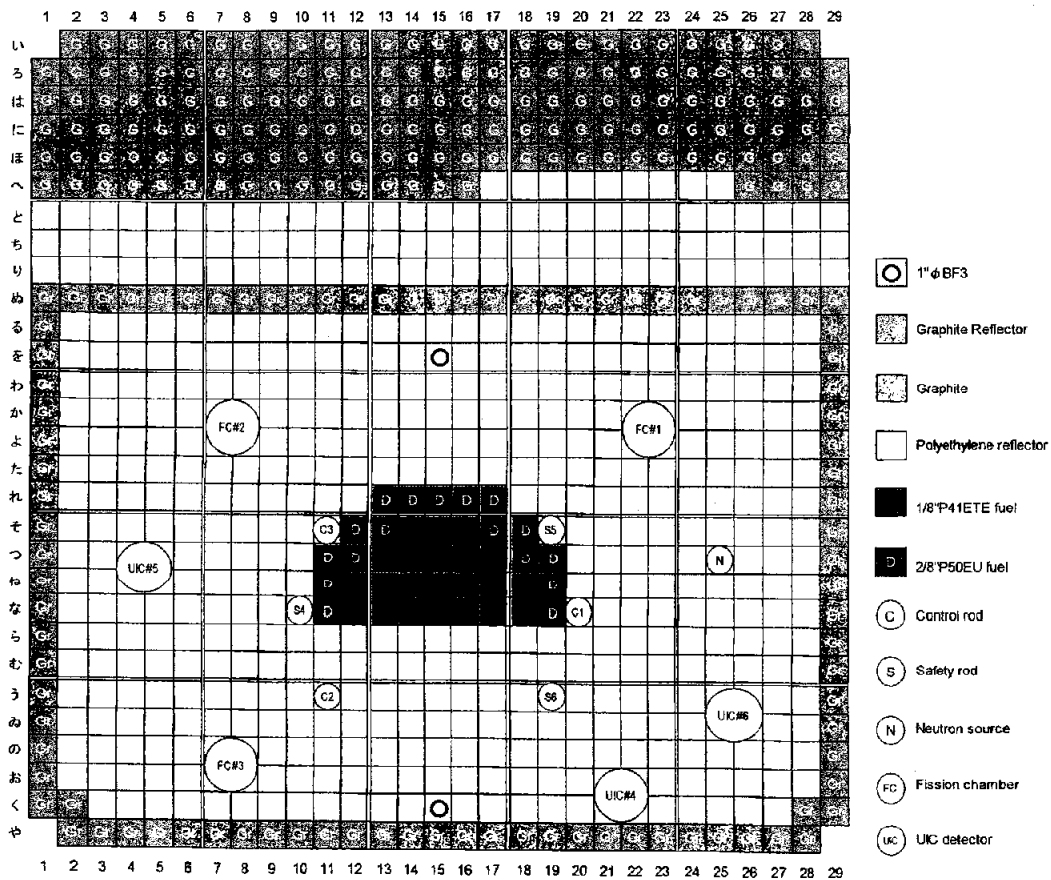
実施記録

運転計画指令 C-20001 号 (1/2)

<p style="text-align: center;">下記の通り臨界装置 (KUCA) の運転を計画する。</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 10px;">KUCA 運転計画</div> <p style="text-align: right;">臨界装置部長 [Redacted] 署名</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">運転架台</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; font-size: 2em; font-weight: bold;">B</div>
<p>1. 日 時 <u>2020年 1 月 6 日 (月) 13:30~17:00</u></p> <p>2. 燃料等の配置 <u>KUCA 炉心配置変更計画指令書 C-20002 号による</u></p> <p>3. 最終到達出力 <u>1W 未満</u></p> <p>4. 主な実験 <u>KUCA におけるトリウム装荷炉心の核特性測定 (II) : 臨界近接実験</u> <u>(実験番号 2001)</u></p> <p>5. バイパスの指示 <u>なし</u></p> <p style="margin-left: 20px;">制御棒上限位置 <u>1200 mm</u> 可動オーバーフロー設定位置 <u> mm</u></p> <p style="margin-left: 20px;">安全棒上限位置 <u>1200 mm</u> 毎回可動フロートスイッチ設定位置 <u> mm</u></p> <p style="margin-left: 20px;">最高炉心温度 <u>室温 °C</u></p> <p>6. 特に必要な監視事項</p>	<p>7. その他臨界装置主任技術者が必要と認める事項</p> <div style="background-color: gray; height: 150px; width: 100%; margin-bottom: 10px;"></div> <p style="text-align: right;">作成者 [Redacted]</p>
<p>上記の運転計画を承認する。 臨界装置主任技術者 [Redacted] 署名 ^{1/6}</p>	
<p style="text-align: center;">上記の運転計画に基づき次の通り KUCA の運転を指令する。</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 10px;">KUCA 運転指令書</div> <p style="text-align: right;">臨界装置部長 [Redacted] 署名</p>	
<p>1. 当直運転主任 : [Redacted]</p> <p>2. 当直運転員 : [Redacted]</p> <p style="margin-left: 20px;">放射線管理業務を行う者 : [Redacted]</p> <p>3. 交代時刻 : [Redacted]</p> <p>4. その他注意事項 : [Redacted]</p>	

KUCA 炉心配置変更計画指令書

炉心配置変更計画指令 C-20002 号 (2/2)



最終炉心配置図

作成者
審査者

[Redacted signature area]

臨界装置主任技術者

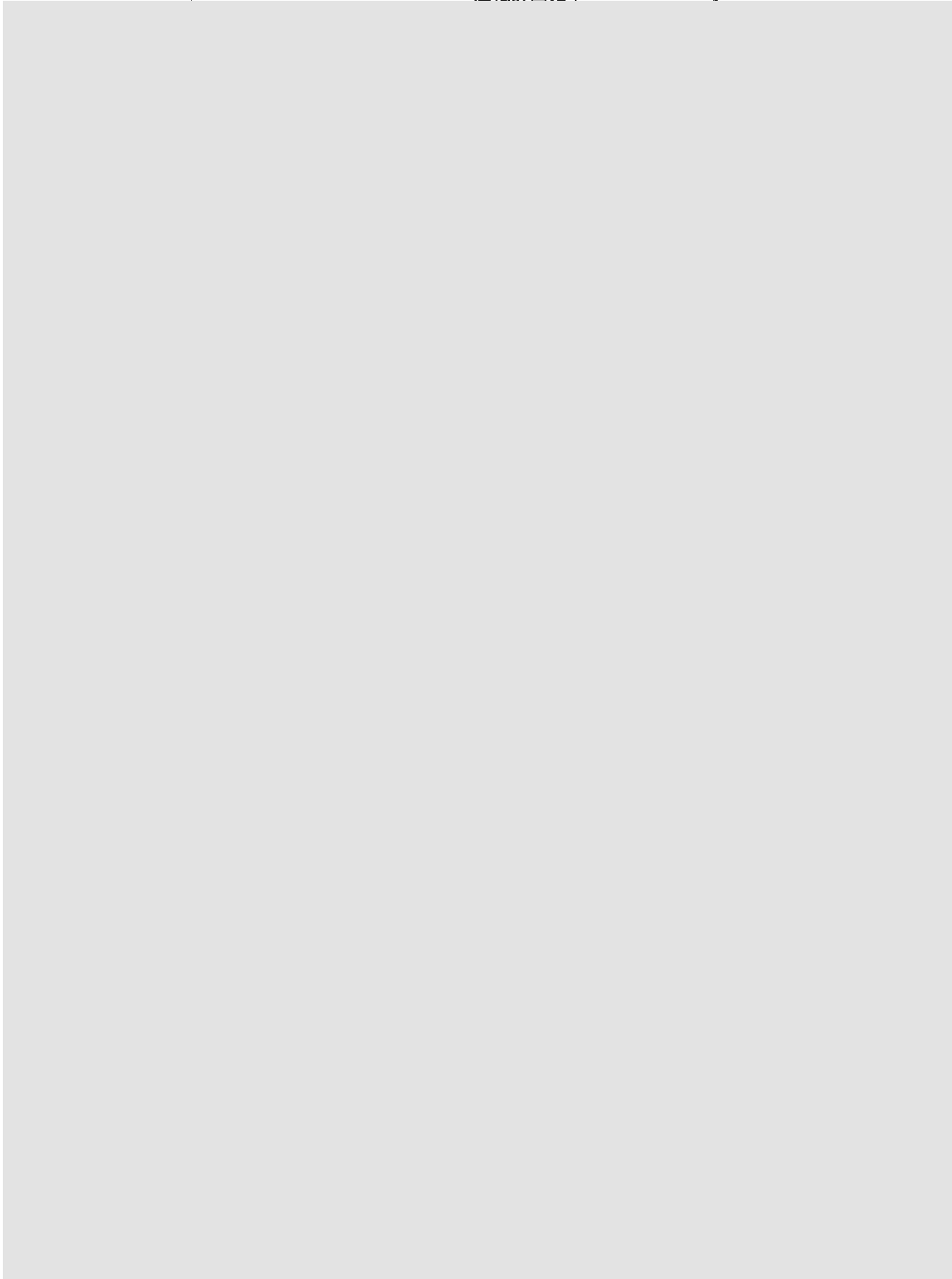
[Redacted signature area]

署名

KUCA用燃料記録

運転計画指令 C-20001号

(2/2)



・Th Iは厚さ1/8"のもの、Th IIは厚さ1/2"のもの。

・U01、U02、V01、02、03には [redacted] 保管

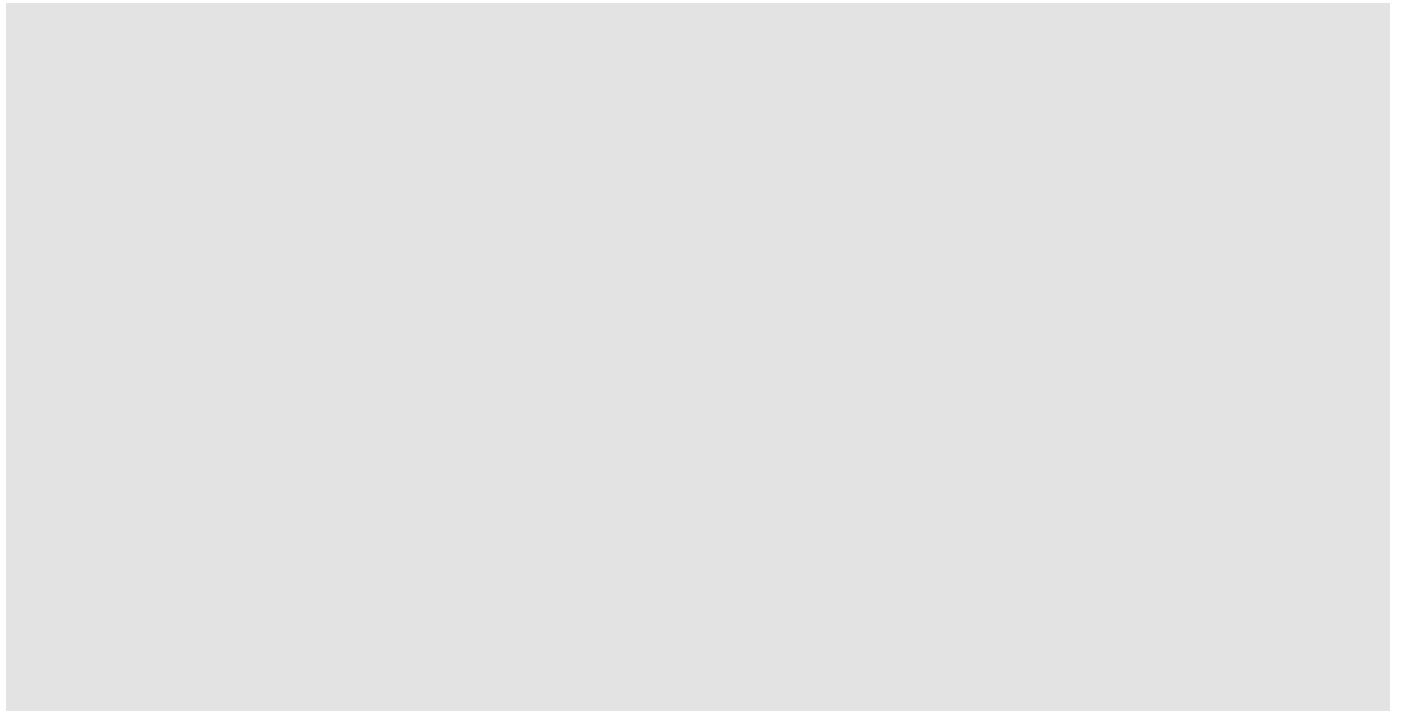
・一時保管に記載している燃料は [redacted] 保管

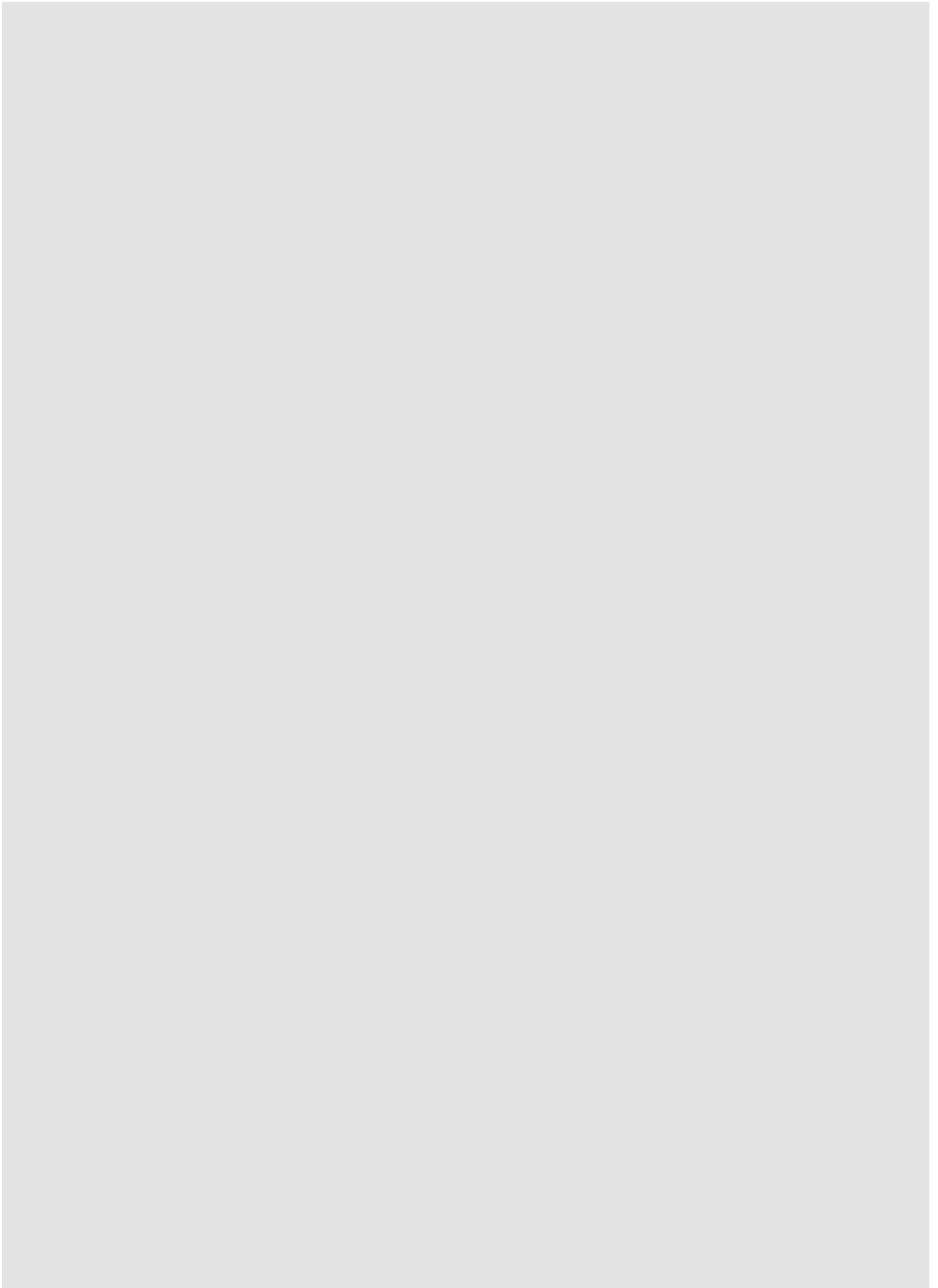
K U C A 運 転 報 告 書

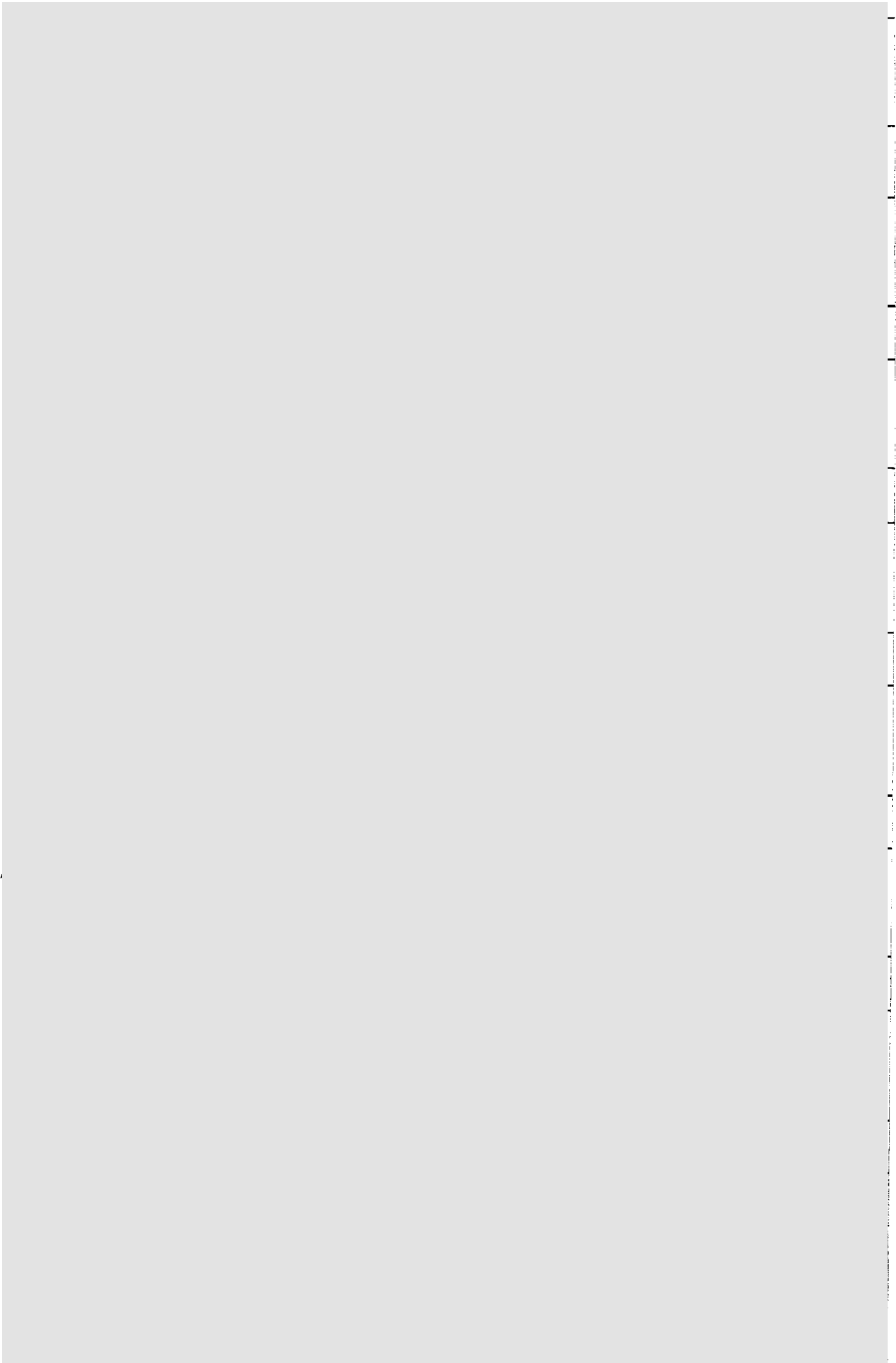
(/)

<p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">中央管理室長 殿 臨界装置部長 殿</p>	運転架台	<p>5. 運転計画指令 C- <u>20001</u> 号 (炉心変更) C- <u>20002</u> 号</p>	回覧																						
	B	<p>6. 2020年 1 月 6 日 (月) <u>13:30</u> 起動前点検開始 <u>17:50</u> 運転終了時点検終了</p>	<p>7. 炉心名称 <u>B(1/2"p41ETE+3/8"p50ECS)</u></p> <p>8. Run No. (燃料枚数)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">No.</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">(枚)</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">No.</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">(枚)</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">No.</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">(枚)</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">No.</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">(枚)</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">No.</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">(枚)</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">No.</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">(枚)</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">No.</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">(枚)</td></tr> </table> <p>報告時の炉心 <u> </u> (枚)</p>	No.	(枚)	No.	(枚)	No.	(枚)	No.	(枚)	No.	(枚)	No.	(枚)	No.	(枚)	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">中管室長</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">CA主任技術者</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">CA部長</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">CA副部長</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">CA副部長</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">核管室長</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;"> </td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;"> </td></tr> </table>	中管室長	CA主任技術者	CA部長	CA副部長	CA副部長	核管室長	
No.	(枚)																								
No.	(枚)																								
No.	(枚)																								
No.	(枚)																								
No.	(枚)																								
No.	(枚)																								
No.	(枚)																								
中管室長																									
CA主任技術者																									
CA部長																									
CA副部長																									
CA副部長																									
核管室長																									
<p>1. 運転主任氏名 運転員氏名 (所属)</p> <p>2. 放射線管理担当者</p> <p>3. 立会者氏名</p> <p>4. 主な実験</p> <p style="text-align: center;">(実験番号 <u>2001</u>)</p>																									
<p>9. 実験結果の概要</p> <p style="font-size: 1.2em; text-align: center;">主な実験 a とおし</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p>14. 炉心装荷内訳***</p> <p style="background-color: #cccccc; height: 100px; width: 100%;"></p>																								
<p>10. 特記事項**</p> <p style="font-size: 1.2em; text-align: center;">なし</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p>備考</p> <p style="background-color: #cccccc; height: 150px; width: 100%;"></p>																								
<p>11. 高出力運転 (100μSv/h 以上)</p>	<u>0</u> μSv/h × h	<u>0</u> μSv/h × h	積算熱出力***	<u>0</u> W																					
<p>12. 燃料要素の外観等の異常</p>	有 <input checked="" type="radio"/> 無 <input type="radio"/>	起動回数	<u>0</u> 回	台帳への記録																					
<p>13. 核物質及び設備等の異常</p>	有 <input checked="" type="radio"/> 無 <input type="radio"/>	報告者		印																					

※: (1)装置の故障、異常 (2)装置の取扱に関する事 (3)提言 (4)その他 の順に
 ※※: 起動時と燃料枚数が違っている場合に記入すること ※※※: 0.002 × (総高出力運転積算量) = (積算熱出力)







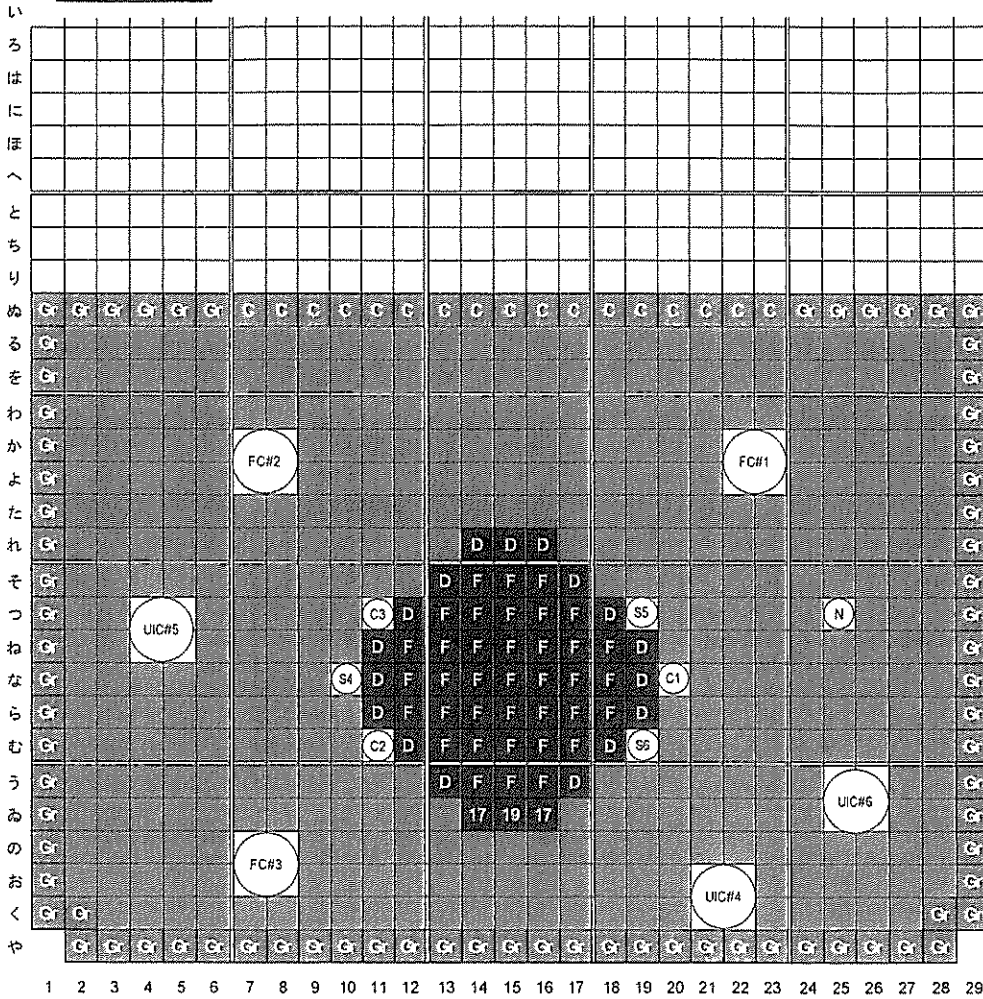
KUCA 運転計画指令書



運転計画指令 C-18272 号

<p style="text-align: center;">下記の通り臨界装置 (KUCA) の運転を計画する。</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;">KUCA 運転計画</div> <p style="text-align: right;">臨界装置部長 XXXXXXXXXX 署名</p> <p>1. 日 時 <u>2018 年 12 月 13 日 (木) 09:30 ~ 終了まで</u></p> <p>2. 燃料等の配置 <u>炉心配置変更計画指令 C-18273 号に従う</u></p> <p>3. 最終到達出力 <u>1W未満</u></p> <p>4. 主な実験 <u>反応度測定</u> (実験番号 1844)</p> <p>5. バイパスの指示 <u>バイパス無し</u></p> <p>制御棒上限位置 <u>1200 mm</u> 可動オーバーフロー設定位置 <u> mm</u> 安全棒上限位置 <u>1200 mm</u> 毎回可動フロートスイッチ設定位置 <u> mm</u> 最高炉心温度 <u>室温</u> °C</p> <p>6. 特に必要な監視事項</p> <div style="background-color: gray; width: 100%; height: 100px; margin-top: 5px;"></div>	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;">運転架台</div> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 5px; margin-top: 5px; text-align: center; font-size: 24px;">B</div>
<p>7. その他臨界装置主任技術者が必要と認める事項</p> <div style="background-color: gray; width: 100%; height: 150px; margin-top: 5px;"></div> <p style="text-align: right;">作成者 XXXXXXXXXX</p>	
<p>上記の運転計画を承認する。 臨界装置主任技術者 XXXXXXXXXX 署名^{1/2}</p>	
<p style="text-align: center;">上記の運転計画に基づき次の通り KUCA の運転を指令する。</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;">KUCA 運転指令書</div> <p style="text-align: right;">臨界装置部長 XXXXXXXXXX 署名</p> <p>1. 当直運転主任 : XXXXXXXXXX</p> <p>2. 当直運転員 : XXXXXXXXXX 放射線管理業務を行う者 : XXXXXXXXXX</p> <p>3. 交代時刻 : 交代無し</p> <p>4. その他注意事項 : _____</p>	

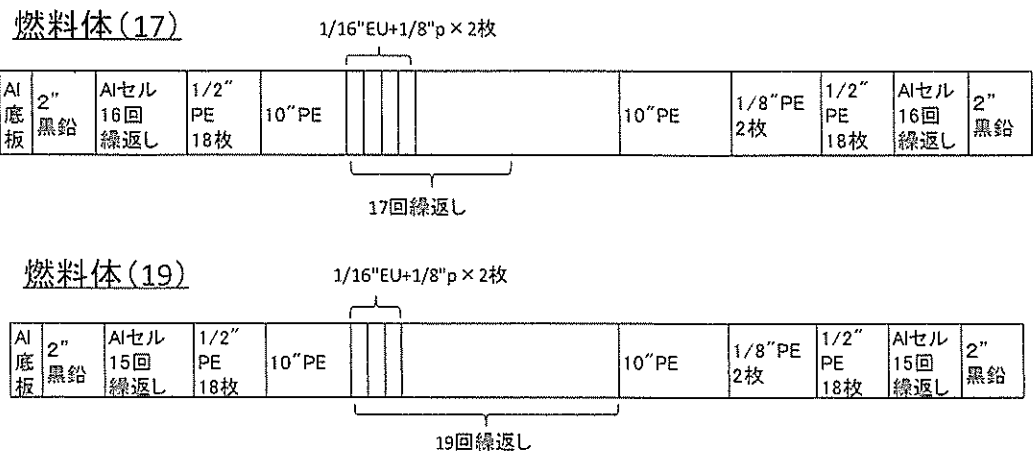
2018.12.13



運転架台
B

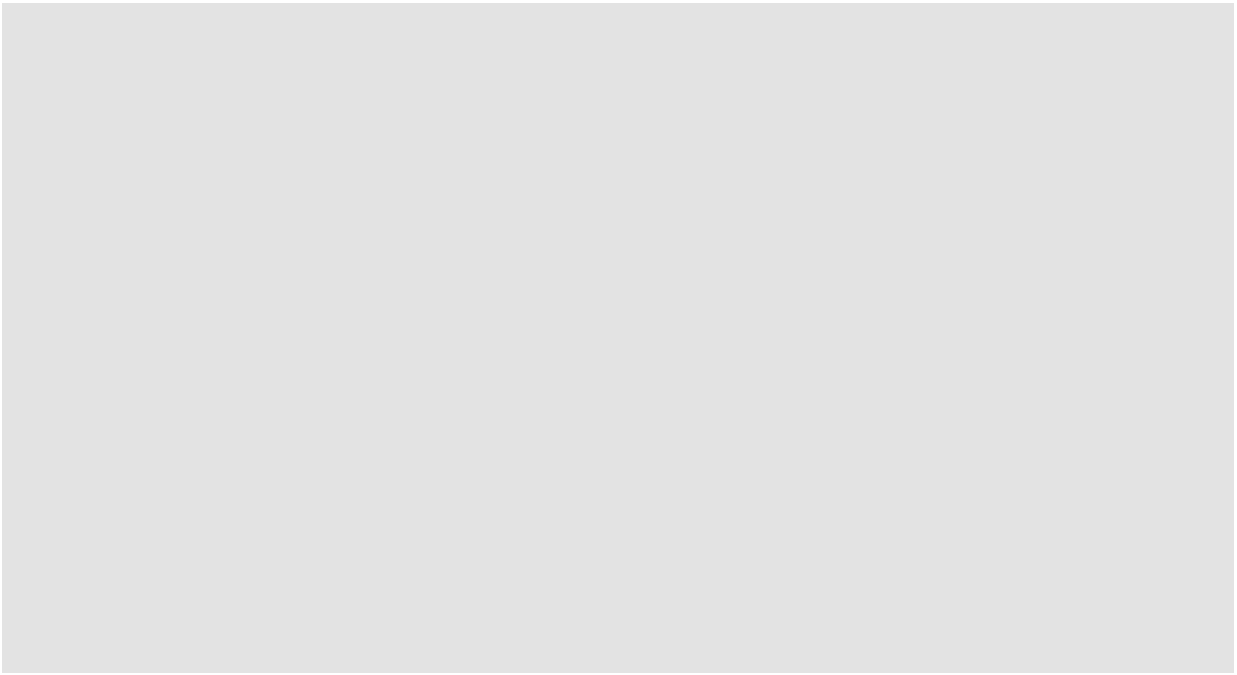
- F** 2/8"p27ETEE燃料体
- D** 2/8"p49EU燃料体
- 19** 2/8"p19EU燃料体
- 17** 2/8"p17EU燃料体
- Polyethylene reflector (old)
- C** Carbon
- C** Control rod
- S** Safety rod
- N** Neutron source
- FC** Fission chamber
- UIC** UIC detector

添付図 炉心配置図



作成者 _____
 審査者 _____

KUCA 主任技術者 _____ 署名



KUCA 運転計画指令書

実施記録

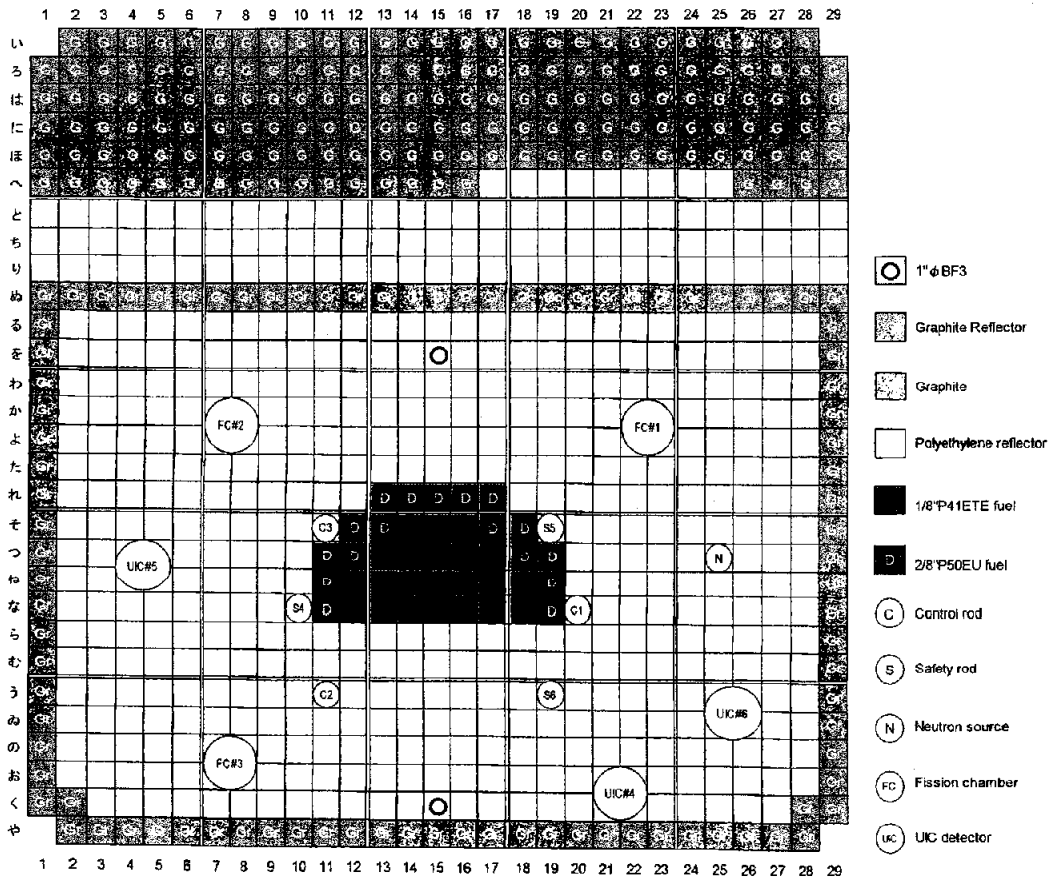
運転計画指令 C-20001 号 (1/2)

<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;">KUCA 運転計画</div> <p style="margin-top: 5px;">下記の通り臨界装置 (KUCA) の運転を計画する。</p> <p style="margin-top: 10px;">臨界装置部長 署名</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">運転架台</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; font-size: 2em; font-weight: bold; margin: 0 auto;">B</div>
<p>1. 日 時 <u>2020年 1 月 6 日 (月) 13:30~17:00</u></p> <p>2. 燃料等の配置 <u>KUCA 炉心配置変更計画指令書 C-20002 号による</u></p> <p>3. 最終到達出力 <u>1W 未満</u></p> <p>4. 主な実験 <u>KUCA におけるトリウム装荷炉心の核特性測定 (II) : 臨界近接実験</u> <u>(実験番号 2001)</u></p> <p>5. バイパスの指示 <u>なし</u></p> <p style="margin-left: 20px;">制御棒上限位置 <u>1200 mm</u> 可動オーバーフロー設定位置 <u> mm</u></p> <p style="margin-left: 20px;">安全棒上限位置 <u>1200 mm</u> 毎回可動フロートスイッチ設定位置 <u> mm</u></p> <p style="margin-left: 20px;">最高炉心温度 <u>室温 °C</u></p> <p>6. 特に必要な監視事項</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 20px; width: 300px; height: 150px;"> <p>7. その他臨界装置主任技術者が必要と認める事項</p> <div style="background-color: #cccccc; width: 100%; height: 100%;"></div> </div> <p style="margin-left: 20px;">作成者 </p>	
<p>上記の運転計画を承認する。 臨界装置主任技術者 署名 ^{1/6}</p>	
<p style="text-align: center;">上記の運転計画に基づき次の通り KUCA の運転を指令する。</p> <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px; margin-bottom: 5px;">KUCA 運転指令書</div> <p style="margin-top: 5px;">臨界装置部長 署名</p> <p>1. 当直運転主任 : </p> <p>2. 当直運転員 : </p> <p style="margin-left: 20px;">放射線管理業務を行う者 : </p> <p>3. 交代時刻 : </p> <p>4. その他注意事項 : </p>	

KUCA 炉心配置変更計画指令書

炉心配置変更計画指令 C-20002 号 (2/2)
2020年 1月 6日(月)

別紙



最終炉心配置図

作成者
審査者

臨界装置主任技術者

署名

II. 原子炉施設の設計及び工事の方法

II-1 原子炉本体

1. 燃料体

1-1 概要

燃料要素は、固体減速炉心用と軽水減速炉心用とに分けられる。固体減速炉心用燃料要素（以下燃料角板とよぶ。）には濃縮ウラン—アルミニウム合金のものを主体に、一部トリウム、天然ウラン及び劣化ウランの金属または酸化物が使用される。

これら燃料角板の寸法は国際規格になっており、耐放射線性プラスチック塗料で被覆されている。これらの燃料角板を黒鉛、プラスチック等各種の減速材角板と適当に組合せて、耐食アルミニウム製角筒型の燃料さやにおさめ、燃料集合体を形成する。燃料さやには下部に足がつけてあり、炉心底部の格子板孔に挿入され、配列装荷される。

また、軽水減速炉心用燃料要素（以下燃料長板とよぶ。）は、濃縮ウラン—アルミニウム合金にアルミニウムによる被覆を施した細長い板である。この板が最小単位であり、これらを燃料要素支持フレームの溝に並べて挿入したものを燃料集合体とする。この燃料要素支持フレームは、内側に一定間隔の溝をもつ2枚の平行板とこれらを固定するための支持部分からなっており、下部には2つの集合体固定足が設けてある。この足を炉心タンク内の格子板に設けられた穴に挿入して、集合体を支持し、位置決めを行なう。

また、燃料と減速材の体積比を変える事ができるように溝の間隔の異なる3種類のフレームがある。

1-2-3 トリウム燃料

(1) 材 質

金属トリウム

(2) 純 度

次表に掲げる含有不純物元素についてはそれぞれ示された量以下とする。

元 素	PPM	元・素	PPM
水 素	20	炭 素	1.000
硼 素	5	そ の 他	1.000
カドミウム	1		

(3) 密 度

約 11.5 g/cm^3

(4) 主な仕様

主な仕様は次のとおりである。

KUCA設置変更申請 指摘事項

質問管理表（燃料等、添付8、添付10）

（2019/6から2021/11の審査会合等）

番号		項目	添付	指摘事項	対応	コメント
1	第283回審査会合(19/6/3)	U-Mo燃料	8	固体減速架台用燃料のウランモリブデン燃料の安全性について、機械的強度、核分裂生成物の保有能力、レーザー溶接部の耐食性等に関する実験研究データを提示のうえ、説明すること。	第299回審査会合資料 2 (19/9/02)	ウランモリブデン燃料の安全性についての説明を記載しました。
2	"	"	10	添 10-1 頁の運転時の異常な過渡変化時の判断基準(i)の「燃料のプリスタが発生しないことを確認する。」について、今回追加になったウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料のプリスタの発生機構、発生の有無の確認方法について説明すること。	第299回審査会合資料 2 (19/9/02) 第412回審査会合資料 1-6 (21/8/31)	プリスタの発生についての説明を記載しました。
3	"	耐震性	8	耐震設計について、燃料の重量増加による耐震上の問題は生じないとの事であるが、これについて定量的な根拠を提示して説明すること。	第313回審査会合資料 4 (19/11/11) 第412回審査会合資料 1-2 (21/8/31)	耐震性についての説明を記載しました。
4	"	燃料貯蔵設備	8	燃料室の貯蔵能力について、貯蔵容量及び貯蔵設備(貯蔵棚、バードケージ)は、十分な余裕があり変更の必要はないとのことであるが、それらについて定量的な根拠を提示して説明すること。	第313回審査会合資料 4 (19/11/11) 第412回審査会合資料 1-2 (21/8/31)	燃料室の貯蔵能力についての説明を記載しました。
5	"	炉心配置手順等	8	燃料板と減速材用ポリエチレン板および黒鉛板の配置の方法、制限について説明すること。	第304回審査会合資料 1 (19/9/30)	燃料板の配置方法等について記載しました。
6	"	"	8	炉心構成が許可範囲であることを担保するために実施する手続きおよび手順について説明すること。また、これに係る保安規定の記載について説明すること。	第304回審査会合資料 1 (19/9/30) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	炉心構成を決める手順、保安規定の内容を記載しました。代表炉心については検討し直します。
7	"	"	8	2分割炉心においては炉心間の面間距離が炉心特性に影響を与えられられるが、面間距離の変化範囲をどのように制限するか、その方法を説明すること。	第304回審査会合資料 1 (19/9/30) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	2分割炉心の面間距離についての説明を記載しました。2分割炉心については構成できる範囲を限定しました。
8	"	解析	8	申請書に記載されている代表炉心の選定の考え方について説明すること。代表炉心の特性について、低濃縮ウラン炉心の特徴について説明すること。申請書に記載されている代表炉心については、即発中性子寿命、実効遅発中性子割合に加えて、温度係数及びポイド係数などの反応度係数について記載すること。	第304回審査会合資料 1 (19/9/30) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直します。

9	"	"	8	代表炉心に対する U235 の臨界量が示されているが、評価方法について説明すること。また、選定している代表炉心については、炉心形状が分かるように燃料棒配列等を記載すること。	第304回審査会合資料 1 (19/9/30) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直しました。
10	"	"	10	事故評価に使用するパラメータの計算手法について、評価済実験データなどによる検証結果および動特性解析における誤差の扱いを説明すること。	第304回審査会合資料 1 (19/9/30) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	添付10の解析は誤差も含めて評価し直しました。
11	"	温度係数	8	温度係数が正(最大)となる炉心(C30)について、高濃縮度(変更前)と低濃縮度(変更後)で温度係数が $+7.1 \times 10^{-5}$ で変わらない理由を説明すること。	第315回審査会合資料 1 (19/11/25) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心のパラメータについては評価し直しました。
12	"	"	10	添付書類十の解析で、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。	第304回審査会合資料 1 (19/9/30) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	添付10の解析は評価し直しました。
13	"	異常な過渡変化	10	事故評価の反応度投入量評価の前提となる制御棒の反応度値値について計算結果を示すこと。また、計算モデル、解析手法及び計算誤差の扱いについて説明すること。	第315回審査会合資料 1 (19/11/25) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	添付10の解析は評価し直しました。
14	"	"	10	添10-33頁について、固体減速架台にある中心架台の反応度校正曲線が炉心変更の許可範囲内であり変わらないとしているが、スペクトルの異なる炉心の比較等により具体的に説明すること。	第313回審査会合資料 4 (19/11/11) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	各炉心ごとに中心架台の反応度校正曲線を計算して解析に使用しました。
15	"	"	10	添10-27頁の文章では温度上昇量は 2°C 以下としているが、表10-2-14や表10-2-15ではそれぞれ最大で約 7°C 、約 12°C となっており、数値に矛盾がある。誤りであれば記載を適正化すること。	第313回審査会合資料 4 (19/11/11) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	添付10の解析は評価し直しました。
16	"	"	10	添 10-23 頁の商用電源喪失について、「別の炉心については核分裂による発熱量の相違は数%以下」として、高濃縮ウランのみの評価を行っているが、添10-8頁や添10-14頁の制御棒の異常な引き抜きの解析では、高濃縮ウランに対して低濃縮ウランの温度上昇が3倍になるものがある。高濃縮ウランと今回追加となった低濃縮ウランの発熱量の違いや、安全評価において低濃縮ウランの評価を行わないことの妥当性を説明すること。	第313回審査会合資料 4 (19/11/11) 第412回審査会合資料 1 (21/8/31)	添付10の解析は評価し直しました。
17	"	過渡解析	10	添 10-40頁について、被ばく評価に係るFPの燃料板内の飛程は低濃縮ウランの方が短いとしているが、各燃料板の仕様を考慮して具体的な数値を示すこと。	第313回審査会合資料 4 (19/11/11) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	低濃縮ウランでの解析結果を記載しました。

18	"	"	10	添 10-40 頁の燃料の機械的破損について、ウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料の燃料ミート体積の減少により、核分裂生成物の放出量が約3%多くなり実効線量も約3%増加するとしているが、それらの算出根拠及び低濃縮ウランの評価を行わないことの妥当性を説明すること。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	燃料の機械的損傷についてはLEUの解析を評価し直しました。
19	"	その他	8	新規の燃料について濃縮度20%未満と幅を持たせた記載になっているが、実際には濃縮度は一種類ではないか。	—	1種類のみですが、申請書ではこのように記載しております。
20	第299回審査会合(19/9/2)	U-Mo燃料	8	燃料板の落下試験の結果を明示すること。	第412回審査会合資料 1-6 (21/8/31)	落下試験の結果を記載しました。
21	"	"	8	芯材の固着度についてのデータを明示すること。圧縮・固着が安全設計上どこに関係するかを整理すること。	第412回審査会合資料 1-6 (21/8/31)	燃料の製造方法を記載し、芯材の評価について記載しました。
22	"	"	8	AlとU-Moで燃料を圧縮成形してほとんど100%の理論密度の燃料になっているというのを何らかの形で示して、強度はたとえばAlの強度で代用できることを何らかの方法で示すこと。	第412回審査会合資料 1-6 (21/8/31)	燃料の製造方法を記載し、強度の評価について記載しました。
23	"	"	8	ブリスタ発生の要因を調べること。	第299回審査会合資料 2 (19/9/02) 第412回審査会合資料 1-6 (21/8/31)	ブリスタの発生についての説明を記載しました。
24	第304回審査会合 (19/9/30)	解析手法	8	添付8で取り扱う代表炉心の考え方を整理すること。	第315回審査会合資料 1 (19/11/25) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直しました。
25	"	"	8	代表炉心において固体減速炉心で燃料領域高さを変更した炉心を検討すること。	第315回審査会合資料 1 (19/11/25) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心として高さが約30、40、50cmを取り上げ、その範囲を炉心構成の条件としました。
26	第313回審査会合 (19/11/11)	燃料貯蔵設備	8	項目4に関連 燃料室のバードケージの未臨界性について低濃縮ウランを用いた解析結果を示す。	第412回審査会合資料 1-2 (21/8/31)	モンテカルロ計算コードMCNPの解析結果を記載しました。
27	"	解析	10	項目14に関連 添10-33頁について、固体減速架台にある中心架台の反応度校正曲線について再検討する。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	各炉心ごとに中心架台の反応度校正曲線を計算して解析に使用しました。

28	"	"	10	項目15に関連 添10-27頁の文章の温度上昇量を修正する。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	温度上昇量については全面的 に見直しました。
29	"	"	10	項目16に関連 添10-23頁の商用電源喪失について、低濃縮ウラン炉心の結果例を追記する。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	LEUの解析結果を記載しまし た。
30	第315回審査 会合 (19/11/25)	解析	8	炉心の構成と代表的炉心の妥当性のあり方について説明していただいた上で、 それが妥当なのかというのを議論したい。 制御棒反応度値が示されていない。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直 し、制御棒反応度値も解析し 直しました。
31	"	解析	8	制限に従って、どこまでが構成できるか、臨界になるかについての説明が必要。 炉心の高さについての検討が必要。 天然ウラン、トリウムの最大装荷量の炉心が明示されていない。 ゾーン型炉心、2分割炉心の設定の評価不十分である。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直 し、高さを制限、天然ウランと トリウムの不使用、ゾーン型炉心 は除く、2分割炉心の炉心の制 限をしました。
32	第326回審査 会合 (19/12/23)	解析	8	制御棒反応度を過剰反応度の最大で炉心で評価。 制御棒の解析精度を示す。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直 し、制御棒反応度値も解析し 直しました。
33	"	解析	8	詳細コードとの比較を示す。	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31)	HEUでの実験結果とMVPの結果 の比較を示しました。
34	第331回審査 会合 (20/1/27)	解析	8	制御棒反応度、反応度添加率の解析精度を示す。	第343回審査会合資料 1-2 (20/3/16) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	パラメータについての誤差を評 価し、それを元に解析を行いま した。
35	"	解析	8 10	中心架台の反応度計算は詳細コードでの解析が必要。	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	中心架台の反応度はMCNPでも 評価しました。 添付10の解析でも中心架台の 反応度はMCNPで評価しまし た。
36	第337回審査 会合 (20/2/17)	解析	8	燃料の最大挿入量、H/U-235の数値が整合が取れていない。 反応度調整用短尺燃料体を装荷した炉心の制御棒値が記載されていない。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直 しました。
37	"	解析	8 10	温度係数の取扱が説明不足している、誤差が評価されていない。 必要なパラメータが整理されていない。 解析の不確かさ、誤差の説明をつける。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	パラメータについての誤差を評 価し、過渡解析では誤差を考慮 した解析を行いました。

38	"	解析	8	拡散計算での計算条件が記載されていない。 原子個数密度、均質化の条件、形状寸法の判る資料をつける。	第343回審査会合資料 1-2(20/3/16)	原子個数密度等の資料を追記しました。
39	"	解析	8	実験値との比較、ベンチマーク計算との比較の説明が不足している。 ICSBEFのようなベンチマーク計算との比較の説明が不足している。	第369回審査会合資料 1-2(20/8/31)	実験値と解析値の比較を評価しました。
40	"	解析	8	中性子束分布のフィッティングの誤差を示す。	第369回審査会合資料 1-2(20/8/31)	フィッティング誤差、フィッティング範囲の影響を評価しました。
41	"	解析	10	制御棒をゆっくり抜く解析の検討が必要。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	添付10の解析シナリオを見直しました。
42	"	解析	10	出力の一番厳しいところの評価が行われていない。 燃料セルでの出力ピーキングが評価されていない。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	出力ピーキングの評価方法を見直して、その結果を元に温度最大値を評価しました。
43	第343回審査会合 (20/3/16)	解析	8	低濃縮燃料の製作誤差が実効増倍率に対してどのくらい影響するかの感度解析が必要。	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31)	製作誤差に対して感度解析を行いました。
44	"	解析	8	微分反応度を求めるためのフィッティングの誤差の影響についての評価が必要	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31)	フィッティング誤差、フィッティング範囲の影響を評価しました。
45	"	解析	8	中心架台の反応度の計算を拡散計算で行っているが詳細な計算が必要	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	中心架台の反応度はMCNPでも評価しました。 添付10の解析でも中心架台の反応度はMCNPで評価しました。
46	第348回審査会合 (20/4/20)	解析	8	最大過剰反応度での臨界量の評価が必要	第381回審査会合資料 1-2 (20/11/5)	代表炉心を見直し、最大過剰反応度での臨界量の評価しました。
47	"	解析	8	微分反応度を求めるためのフィッティング範囲の影響についての評価が必要	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31)	フィッティング誤差、フィッティング範囲の影響を評価しました。
48	"	解析	8	最大反応度の制御棒の誤差の影響評価が必要	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31)	最大反応度の制御棒の誤差を評価しました。

49	"	解析	8	制御棒反応度の干渉効果の影響の評価が必要	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	制御棒の干渉効果を評価しました。
50	"	解析	8	HEU炉心について拡散計算ではなく詳細計算コードでの解析結果を示す	第369回審査会合 資料1-2 (20/8/31)	HEUでの実験結果とMVPの結果の比較を示しました。
51	"	解析	8	低濃縮燃料の製作誤差についての評価が必要	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31)	製作誤差を評価し感度解析を行いました。
52	第356回審査 会合 (20/6/22)	解析	8	制御棒反応度の干渉効果の影響の評価結果を示す	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	制御棒の干渉効果を評価しました。
53	"	解析	8	代表炉心の整理が必要	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	代表炉心については検討し直し、解析し直しました。
54	第369回審査 会合 (20/8/31)	解析	8	制御棒反応度の干渉効果の影響の評価が不十分	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	制御棒の干渉効果を評価しました。
55	"	解析	8	2分割炉心の微分反応度の評価が不十分 2分割炉心の制御棒が核的制限値を満たしていることの評価が不十分	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	2分割炉心の干渉効果の影響を考慮した評価を行いました。
56	第381回審査 会合 (20/11/5)	過渡解析	10	添付10の解析で緩慢な出力上昇の場合を検討する	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	急峻な出力上昇と緩慢な出力上昇の解析を行いました。
57	"	過渡解析	10	一定時間経過後の評価を検討する	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	過渡解析では経過時間は最大1時間として解析を行いました。
58	"	過渡解析	10	中性子発生設備の解析で、中性子発生量、初期出力の説明・検討が不十分である	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	過渡解析のシナリオを見直しました。
59	"	過渡解析	10	出力の一番厳しいところの評価が行われていない。 燃料セルでの出力ピーキングが評価されていない。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	出力ピーキングの評価方法を見直して、その結果を元に温度最大値を評価しました。

60	"	過渡解析	10	実験物の異常の解析での反応度の評価が問題	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	実験物に対する反応度の条件を見直し、それを元に解析を行いました。
61	第412回審査会合 (21/8/31)	条項対応	—	第15条第2項についての確認が必要	第414回審査会合資料 1-1 (21/9/14)	第15条第2項についての確認について追記しました。
62	"	条項対応	—	第24条の敷地周辺での線量評価の結果を補正申請で記載する必要がある(記載方法はKURの設置変更申請書を参考にする)	第414回審査会合資料 1-1 (21/9/14)	補正申請で記載します。
63	"	条項対応	—	トリウムの貯蔵に関する記載を補正申請に追記すること。また補正方針を次回 の審査会合で説明すること(記載方法はSTACYの説明資料を参考にする)。	第414回審査会合資料 1-1 (21/9/14)	補正申請で記載します。 補正方針を説明資料に記載しました。
64	"	条項対応	—	第12条第3項について設計基準事故時の最大の温度ではなく、運転時の過渡変化も含めた最大の温度の説明に修正すること。	第414回審査会合資料 1-1 (21/9/14)	説明を修正しました。
65	"	過渡解析	10	中性子発生設備を臨界状態で使用したときの解析において、中性子発生量が基準の0.071倍となるときに温度が最大となるとしているが、0.070や0.068くらいの 少しだけ小さな場合において、今示している温度より高くなることはないことを示 すこと。	第414回審査会合資料 1-2 (21/9/14)	解析結果を追記して、現状が最大となることを示しました。
66	"	過渡解析	10	中性子発生設備を臨界状態で使用したときの解析において、初期値を変化させた ときの結果を示すこと。	第414回審査会合資料 1-2 (21/9/14)	初期値が1Wのときの解析結果を追記しました。
67	"	過渡解析	10	実験設備、実験物等の著しい損傷の解析において、実験物を液体や粉体ではなく 固体に限定しないと放出割合を10%とすることが難しい。	第414回審査会合資料 1-2 (21/9/14)	補正申請にて使用する試料を 固体に限定します。
61	第47回原子力規制委員会 (21/11/24)	全般	—	過剰反応度の考え方を再検討すること	第424回審査会合資料 2-2 (21/12/21) 第431回審査会合資料 1-1 (22/2/8)	過剰反応度の考え方を再検討して、 本文および添付書類8の記載を変更しました。

質問管理表（添付8、添付10）

（2019/9から2020/11の審査会合、ヒアリング）

1	第304回審査会合 (19/9/30)	代表炉心	8	黒鉛のC/U-235の幅が広いが代表炉心には入っていない。高さの選定幅が狭い。 核的制限値との関係が不明確。2分割炉心の炉心構成をどのように考えているかを明確にする。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	組むことができる炉心の範囲を明確にした。(黒鉛炉心は組まないなど)
2	第313回審査会合 (19/11/11)	燃料貯蔵	8	低濃縮のウランも含めて、燃料貯蔵庫についての配置等も反映した解析結果を示す。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	MCNPIによる解析結果を示した。
3	"	代表炉心	8	代表炉心の高さ方向を考慮した解析が必要。停止余裕やワンロードスタックの解析が必要。燃料組成が違う領域やあるときの中性子束のピーキングについて考慮すべき。核的制限値を満たすために現実的にどのような炉心が考えられるかを示す。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	組むことができる炉心の範囲を明確にした。(2領域炉心は組まないなど)
4	"	過渡解析	10	代表炉心が事故評価で一番厳しいところになっているかの確認が必要。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	事故解析では代表炉心を全て解析を行い、一番厳しい結果について添付10で詳しく示した。
5	第315回審査会合 (19/11/25)	代表炉心	8	代表炉心について、可能性がある炉心を網羅的に取り上げるか、または現在想定されている炉心構成に限定するかを決めること。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	組むことができる炉心の範囲を明確にした。
6	"	代表炉心	8	制御棒反応値、反応度印加率等の結果を示すこと。炉心の高さの下限值あるいは上限値などの特性を明確にすること。天然ウラン、トリウムを装荷する炉心について説明すること。黒鉛炉心の高さについて説明すること。ゾーン型炉心、不均一炉心についての考え方を説明すること。2分割炉心の解析結果を説明すること。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	組むことができる炉心の範囲を明確にした。(天然ウラン、トリウムは使用しない、ゾーン型炉心は組まないなど)
7	ヒアリング (19/12/5)	代表炉心	8	炉心構成の範囲を規定し、その範囲で個々の核的制限値が満足することを説明する必要があるため、ゾーン型炉心と軸方向の不均一分布の変化範囲を明確にする必要がある。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	組むことができる炉心の範囲を明確にした。(天然ウラン、トリウムは使用しない、ゾーン型炉心は組まないなど)

8	ヒアリング (19/12/13)	代表炉心	8	軸方向に不均一な燃料セルが配列される炉心については、制御棒の反応度価値、反応度添加速度等の制御棒に関する核的制限値を炉心構成範囲内において満足することを解析により示す必要がある。 2種類の異なる燃料体から構成されるゾーン型炉心については、炉心構成範囲内で制御棒の核的制限値を満足することを示す必要がある。 炉心特性に関して計算結果と計算精度について説明する必要がある。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	組むことができる炉心の範囲を明確にした。 ゾーン型炉心は組まない。 計算精度を明確にして、それを考慮して解析を行った。
9	第326回審査会合 (19/12/23)	代表炉心	8	解析精度を示すこと。詳細コードとの比較を示すこと。 構成することができる炉心の範囲を絞ったので、その結果を示すこと。	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	解析精度を示した。MCNPとの比較を行った。 代表炉心のすべてについて必要な解析を行った。
10	”	過渡解析	10	急激な出力増加や出力がゆっくりしてスクラムにかかるまでの時間が非常にかかる場合について検討すること。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	過渡解析に追加した。
11	第331回審査会合 (20/1/27)	代表炉心	8	制御棒価値の誤差について検討すること。計算結果の誤差を考慮すること。実験値のと比較を示すこと。中心架台の反応度を評価すること。中心架台の反応度の詳細コードで評価すること。反応度調整用の燃料の説明をすること。反射体節約の値を評価すること。	第337回審査会合資料 1 (20/2/17) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	誤差評価の追加、反応度をMCNPで解析するなど、ご指摘を頂いた項目について回答した。
12	ヒアリング (20/1/31)	代表炉心	8	解析評価のステップ及び各ステップでの必要な解析項目を示すとともに、使用する計算コードの信頼性及び基準値との関係で計算誤差の扱い等に対する考え方を示すこと。 入力パラメータ、計算モデル、計算条件について詳しい説明をすること。 代表炉心の選定については、必要な解析項目の炉心構成範囲における特性を示し、代表炉心の選定方法が妥当であることを示すこと。	第337回審査会合資料 1 (20/2/17) 第343回審査会合資料 1 (20/3/16) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	核的制限値について解析誤差を明確にするなど、ご指摘を頂いた項目について回答した。
13	ヒアリング (20/2/7)	代表炉心	8	計算での燃料の均質化の方法、計算メッシュ、境界条件等の説明をすること。計算コードの妥当性を検証する実験についての炉心条件、測定方法等の説明すること。	第337回審査会合資料 1 (20/2/17)	ご指摘を頂いた項目について回答した。
14	第337回審査会合 (20/2/17)	代表炉心	8	ベンチマーク実験の結果を示すこと。体系の情報を詳しく示すこと。Number density、均質化の条件、形状寸法などを示すこと。反射体節約を求める際のフィッティング誤差を評価すること。反応度調整用の燃料の使用方法の説明をすること。	第343回審査会合資料 1 (20/3/16) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	計算条件や原子個数密度の明示、ベンチマーク計算結果の提示などご指摘を頂いた項目について回答した。
15	”	過渡解析	10	出力のピーキングについて考慮すること。温度係数の取扱を説明すること。 出力がゆっくり上昇するケースを考慮すること。	第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	全てのケースについて温度係数を考慮、各炉心の出力ピーキング値を解析に使うなど、ご指摘を頂いた項目を考慮して過渡解析を行った。

16	ヒアリング (20/2/27)	代表炉心	8	ベンチマーク実験の詳細を示すこと。SRAC を用いる場合の計算モデル、及び制御棒周辺の境界条件を具体的に示す。反射体節約 δ について、計算方法及び誤差を示し、反応度値への影響評価について説明する。燃料、構造材の組成、製作公差等の考慮については、ICSBP の報告書に基づく説明をする。中心架台の反応度についてMCNPIによる解析結果を示すこと。	第343回審査会合資料 1 (20/3/16) 第348回審査会合資料 1 (20/4/20) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	製作誤差等の影響を解析するなど、ご指摘を頂いた項目について回答した。
17	ヒアリング (20/3/5)	代表炉心	8	高濃縮ウラン体系の燃料板及び構造材について、密度・組成など、記載されている原子個数密度の算出条件を製作誤差等と併せて説明する。温度係数の測定実験も含めて、制御棒反応度、反応度係数及び動特性パラメータの検証用実験データについて、炉心条件、測定方法、実験誤差等を説明する。 代表炉心の制御棒配置について、最大反応度を有する制御棒の反応度割合の計算誤差を考慮するとともに、反応度調整用燃料との間の配置に係る制限を満足することをしめすこと。 ウランの臨界質量の計算誤差について説明すること。 炉心構成条件の一つである炉心高さについて、制限範囲と解析条件が一致しない部分があるため、両者の設定の考え方を説明する。	第343回審査会合資料 1 (20/3/16) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	計算条件や原子個数密度の明示、解析の誤差を評価してその範囲での解析を行う、ベンチマーク計算結果の提示などご指摘を頂いた項目について回答した。
18	第343回審査会合 (20/3/16)	代表炉心	8	低濃縮について製作誤差、設計の許容誤差の影響を評価すること。制御棒の干渉効果の評価を行うこと。制限値を解析の誤差を考慮して求めること。反射体節約のフィッティング範囲の影響を示すこと。	第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	低濃縮炉心の誤差評価、制御棒干渉効果をMCNPで解析するなど、ご指摘を頂いた項目について回答した。
19	ヒアリング (20/4/8)	代表炉心	8	制御棒の反応度値に解析誤差等を考慮して核的制限値を満足できることを説明すること。 反射体節約の評価について、現在のフィッティング範囲が計算条件として妥当であることを説明すること。 水平方向の炉心長さ、燃料体枚数を記載し、炉心の形状寸法及び最大挿入量を明確にすること。 臨界質量の誤差について説明すること。 低濃縮ウラン燃料の製作公差に対する感度解析を示すこと。	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	解析誤差の評価、反射体節約の評価など、ご指摘を頂いた項目について回答した。
20	ヒアリング (20/4/13)	代表炉心	8	制御棒の最大反応度値について代表炉心について全て記載すること。 中性子増倍率の解析について、低濃縮ウラン燃料の設計上の許容誤差、製作公差に対する感度について評価すること。	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31)	ご指摘を頂いた項目について回答した。
21	第348回審査会合 (20/4/20)	代表炉心	8	制御棒の干渉効果について示すこと。燃料製作時の公差等の実効増倍率変化の評価を行うこと。最大挿入量は最大過剰反応度の炉心で考慮すること。反射体節約のフィッティング範囲を明確にすること。最大1本の反応度の誤差の評価方法を再度説明すること。	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	低濃縮炉心の誤差評価、制御棒干渉効果をMCNPで解析、反射体節約の解析などなど、ご指摘を頂いた項目について回答した。

22	ヒアリング (20/5/15)	代表炉心	8	<ul style="list-style-type: none"> ・軽水減速炉心の臨界量、過剰反応度に対応する最大挿入量を記載すること。 ・反射体節約のフィッティング範囲を明確にすること。 ・臨界量の誤差について説明すること。 ・軽水減速架台について、HEU炉心の詳細計算コードの計算結果を示し、核的制限値が満足されていることを示す。 ・軽水減速炉心のダンブ反応度の計算方法の記載を追加すること。 ・制御棒の干渉効果について示すこと。 ・燃料製作時の公差等の実効増倍率変化の評価を行うこと。 ・現時点の代表炉心の炉心条件、制御棒配置、計算モデルの扱いについて示すこと。 	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	ご指摘を頂いた項目について回答した。
23	ヒアリング (20/8/7)	代表炉心	8	<ul style="list-style-type: none"> ・固体減速架台における制御棒の相互干渉効果について、検討した代表炉心に最も厳しい条件の炉心が含まれていることを示す。 ・最大反応度を有する制御棒の反応度評価について、制御棒1本の反応度が、鏡面反射を用いた1/2モデルではなく、全炉心モデルにおいても、核的制限値を満たすことを説明すること。 ・軽水減速架台の2分割炉心に対する最大反応度添加率の評価において、FLUX TILTによる影響を考慮しなければならない炉心間距離の範囲を明確にすること。 ・高濃縮ウラン軽水減速炉心に対して、後段規制で実施している制御棒反応度の解析について、解析条件と測定条件の相違について説明を加える ・審査の過程で代表炉心が変更されている炉心について、炉心条件、臨界量、最大挿入量、制御棒配置等を整理した資料を作成すること。 	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	ご指摘を頂いた項目について回答した。
24	ヒアリング (20/8/25)	代表炉心	8	<p>固体減速炉心及び軽水減速炉心の制御棒反応度値に関する評価結果において、基準値と比較する最大反応度を有する制御棒の反応度割合及び最大反応度添加率の解析結果について、説明資料間の整合及び適切な端数処理がなされていないため、再度、確認すること。</p> <p>炉心配置図に記載されている制御棒について、最大反応度を有する制御棒を含めて、全制御棒の符号が資料間で統一されていないため、再度、確認すること。</p> <p>固体減速炉心及び軽水減速炉心の制御棒反応度の解析では、いずれも制御棒配置の対称性を利用して、炉心形状の1/2モデルにより計算している。1/2モデルで計算することが、核的制限値となっている最大反応度を有する制御棒割合に対して及ぼす影響が無視できることが確認できない。検証の上、説明すること。</p> <p>高濃縮ウラン体系の後段規制の解析事例について、制御棒反応度の値は検証されているが、制御棒の微分反応度(印加反応率)の検証結果がない。検証の必要性についての考え方を整理すること。</p>	第369回審査会合資料 1-2 (20/8/31) 第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	ご指摘を頂いた項目について回答した。
25	第369回審査会合 (20/8/31)	代表炉心	8	<p>制御棒の解析を1/2炉心モデルではなく全炉心モデルで行うこと。微分反応度の解析の説明を詳しく行うこと。</p>	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	全炉心モデルでの結果を示すなど、ご指摘を頂いた項目について回答した。

26	ヒアリング (20/9/8)	代表炉心	8	<p>固体減速炉心及び軽水減速炉心の制御棒反応度の解析で1/2モデルを用いている炉心の中で、評価結果が基準値に対して余裕のない炉心に対して、モデル化の影響が無いことを確認すること。</p> <p>制御棒の相互干渉効果の指標(Total/Sum)が1を超えているケースにおいて、最大反応度を有する制御棒の反応度割合に対して、非安全側の評価になっていないことを確認すること。</p> <p>軽水減速2分割炉心における制御棒の微分反応度曲線について、詳細評価及び簡易評価の高さ方向の基準位置及び規格化に用いている積分範囲を明確にすること。</p> <p>最大反応度を有する制御棒の微分反応度に対して、他の制御棒の位置の影響が小さいことを確認すること。</p>	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	ご指摘を頂いた項目について回答した。
27	ヒアリング (20/9/25)	代表炉心	8	<p>・制御棒反応度の評価について、解析している制御棒の微分反応度評価に他の制御棒による干渉効果が影響を及ぼしていないことを確認のうえ説明すること。</p>	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	ご指摘を頂いた項目について回答した。
28	”	過渡解析	10	<p>・運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の各事象について、各事象の解析条件が最も厳しい条件となっていることを事象毎に具体的に説明すること。また、評価方針として、最も厳しい条件を解析条件とすることを明記するか否かについて説明すること。</p> <p>・安全評価の対象としている炉心が代表炉心の一部に限定している事象があるが、限定する場合はその理由を説明すること。</p>	第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)	過渡解析の解析方法についてはご指摘の件も含めて全て見直しました。
29	ヒアリング (20/10/7)	代表炉心	8	<p>軽水減速炉心の制御棒の微分反応度曲線に対する他の制御棒の影響解析について、解析結果の妥当性確認のため、制御棒の微分反応度は相対値だけでなく、絶対値も説明すること。また、影響を及ぼす制御棒には上限待機している制御棒(S)ではなく部分挿入状態の可能性のある制御棒(C)を選択して説明すること。</p>	第381回審査会合資料 2-1 (20/11/5)	ご指摘を頂いた項目について回答した。

30	"	過渡解析	10	<ul style="list-style-type: none"> ・運転時の異常な過渡変化の解析条件として、反応度添加条件(添加反応度、反応度添加速度)をいずれも核的制限値に設定しているが、この条件設定が安全評価上最も厳しい結果となることを説明すること。また、反応度温度係数、初期条件(初期出力及び初期温度)の条件設定が安全評価上最も厳しい結果となることを説明すること。 ・運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故のシナリオの妥当性を検討する上で必要な情報として、核計装設備の構成と計測領域、反応度制御系及び原子炉停止系の作動条件、並びに起動前点検事項、運転手順について説明すること。 ・異常な過渡変化の一つとしている実験物の異常等による反応度の付加について、添加される反応度を0.5%$\Delta k/k$としているが、運転手順上の考慮などを含めて、固体減速炉心及び軽水減速炉心の核的制限値(各々の最大過剰反応度0.35%$\Delta k/k$、0.5%$\Delta k/k$)を担保できることを説明すること。 ・燃料温度の最大値を求めるために炉内の中性子束分布であるCOS分布を用いているが、燃料セル内の局所ピーキングを考慮する必要があるため、燃料体部のピーキング係数の評価方法について説明すること。 ・運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の各事象について、解析条件が最も厳しい条件となっていることを説明すること。 	<p>第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)</p>	<p>過渡解析の解析方法についてはご指摘の件も含めて全て見直しました。</p>
31	ヒアリング (20/10/13)	過渡解析	10	<ul style="list-style-type: none"> ・異常な過渡変化の一つである実験物の異常などによる反応度の付加について、実験物の炉心からの落下により加わる最大反応度を最大+0.5%$\Delta k/k$としているが、固体減速架台の最大過剰反応度0.35%を超過している。この事象が発生した場合、どのように核的制限値を担保するのか、考え方を整理すること。 ・軽水減速架台において、排水時間の観点から、給排水系の配管の配置、排弁の構造・機能について、詳細に説明すること。 ・設計基準事故の一つである燃料落下又は燃料誤装荷において、初期条件設定の妥当性の観点から、起動時の中性子源挿入、中心架台の挿入及び制御棒の引き抜きの手順を説明するとともに、事故発生時の起こり得る過剰最大反応度及び反応度添加率の範囲について、説明すること。 ・燃料温度の評価に用いるピーキング係数について、コサイン分布とした炉心の中性子束の分布から求めるとしているが、非均質炉心の局所ピーキングを考慮した方法と比較して保守的な評価になっていることを説明するとともに、上記のピーキング係数及び熱物性(燃料・減速材の熱容量、体積、重量、比熱等)の値を説明すること。 軽水減速架台及び固体減速架台に設置されている線型出力計のレンジ操作において、保安規定に定めている操作、マニュアル等に記載している操作、慣習的に行われている操作を整理して、説明すること。 	<p>第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)</p>	<p>過渡解析の解析方法についてはご指摘の件も含めて全て見直しました。また炉心の構造、保安規定での運転マニュアル等について説明を致しました。</p>

32	ヒアリング (20/10/20)	過渡解析	10	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料温度上昇の算出において、燃料体の局所ピーキング係数を燃料及び減速材中の熱群の中性子束分布を用いて評価しているが、高速群の中性子束による出力の効果について説明すること。また、反射体節約の扱いによる影響についても説明すること。 ・実験設備であるパルス状中性子発生装置及び中性子発生設備の性能において、中性子発生強度の調整範囲を説明すること。また、一点炉動特性方程式における中性子源項の評価方法について、具体的な数値を説明すること。 ・通常運転時の燃料の温度上昇の評価について、固体減速架台の燃料板等の熱容量を説明すること。また、評価の対象としている炉心の各領域(燃料ミート、アルミ被覆、ポリエチレン等)の体積など、熱容量の計算に用いている値を説明すること。 ・事故シナリオの条件設定において、制御棒の引抜き操作・中心架台の駆動等、反応度を添加する操作に対するインターロック条件を説明すること。 ・安全評価における各シナリオの初期条件として、線型出力計のレンジ(1W~100W)と臨界状態の出力(0.01W~100W)がある。各シナリオにおける数値の設定根拠を、炉心の運転手順と線型出力計の運転時の操作と合わせて整理し、説明すること。 	<p>第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)</p>	過渡解析の解析方法についてはご指摘の件も含めて全て見直しました。
33	ヒアリング (20/10/28)	過渡解析	10	<ul style="list-style-type: none"> ・軽水減速炉心の燃料板内の温度分布について説明されているが、KUCAの炉心は軽水減速炉心と固体減速炉心があるため、固体減速炉心についても説明すること。 ・安全評価の評価条件について、出力が緩慢に上昇して一定の時間経過後にスクラム規定値到達するケースについても説明すること。 ・安全評価における代表炉心として、積算出力及び温度上昇が大きくなる炉心等を選定していることを説明すること。 	<p>第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)</p>	過渡解析の解析方法についてはご指摘の件も含めて全て見直しました。
34	ヒアリング (20/11/11)	過渡解析	10	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料の上昇温度に影響を与えるピーキング係数の算出式が示されているが、炉心内の中性子束の平均値の導出過程が不明であることから、説明すること。 ・実験設備であるパルス状中性子発生装置の最大中性子発生量(5×10^{10} n/s)については、妥当性が不明であるため、パルス状中性子発生装置の調整範囲を説明すること。また、測定値などのエビデンスについても説明すること。 ・パルス中性子発生装置による一点炉動特性方程式について、入射強度に影響する発生装置と炉心の位置関係を明確にし、また、中性子源強度の項を含めて各パラメータの値を説明すること。 ・異常な過渡変化の解析条件について、積算出力が最大となる添加反応度を設定する必要があるが、積算出力が月間積算出力となる添加反応度を用いる考え方について説明すること。 	<p>第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17) 第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)</p>	過渡解析の解析方法についてはご指摘の件も含めて全て見直しました。

35	ヒアリング (20/11/18)	過渡解析	10	<ul style="list-style-type: none"> ・固体減速炉心の100W×1時間運転時の温度上昇について、「燃料ミート+Al被服+ポリエチ」部の熱容量の導出過程が不明であることから、各炉心で使用している熱容量の算出方法を説明すること。 ・パルス状中性子発生装置及び中性子発生設備について、一点炉動特性方程式の外部ソース項に影響する中性子発生率の範囲、炉心との相対位置及びコリメータの設置条件等の詳細を説明すること。 ・固体減速炉心の局所ピーキング係数の妥当性について、燃料ミート部の中性子束のピーク対平均値を評価しているが、炉心の中性子束分布に対する補正として単位セルの燃料対減速材体積比の影響が無いことを説明すること。 	<p>第404回審査会合資料 1-1 (21/5/17)</p> <p>第412回審査会合資料 1-4 (21/8/31)</p>	<p>過渡解析の解析方法についてはご指摘の件も含めて全て見直しました。</p>
----	---------------------	------	----	--	---	---

質問管理表（添付10）

（2021/5から2022/2のヒアリング）

NO			質問	ページ	該当箇所	回答	備考
1	2021/5/17	説明	2つの事象（照射物の落下と挿入管への軽水流入）について、同時に2つの事象が生じた場合の考え方を説明すること。		照射物の反応度	照射物の落下と挿入管への軽水流入が同時に発生した場合であっても余剰反応度が核的制限値（0.5%Δk/k）を超えないことを申請書に記載する。	7/8ヒアリング資料 p54
2		説明	ピーキング係数の評価プロセス（図1及び図2について、XYZの3方向の評価結果と表1の数値）を具体的に説明すること。		燃料温度の算出方法	水平方向の出力分布の例、出力が最大値となる位置についての記載を追加した。	6/3ヒアリング資料 p40-p46
3		説明	事象「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」において、出力が緩慢に上昇する場合の実効的な中性子源強度について、炉心依存性等の検討プロセスを具体的に説明すること。		代表炉心	中性子源強度を変更したときの解析を行い、燃料温度が高くなる状態での解析を行った。	7/1ヒアリング資料 p50
4		説明	事象「燃料落下又は燃料誤装荷」において、添付書類八の全ての代表炉心における燃料体1本当たりの反応度を説明すること。		代表炉心	全ての代表炉心における燃料体1体当たりの反応度を記載した。	6/17ヒアリング資料 p68 表7-1
5		説明	事象「燃料の機械的破損」において、最も臨界量の少ない炉心が単位体積中に含まれる核分裂生成物の量が多いとしているが、非均質熱量の影響を説明すること。		代表炉心	各燃料体のFPの積分値をすべて解析し、その中で最大となるものを選定した	7/1ヒアリング資料 p82 表8-2
6		説明	事象「実験設備、実験物等の著しい損傷」において、最も臨界量が小さい炉心が、単位出力当たりの中性子束が最大となることについて説明すること。		代表炉心	全ての代表炉心の中で核燃料試料の核分裂率が最も大きくなる炉心を選定した。	7/1ヒアリング資料 p82 表8-2
7		説明	初期出力の影響を説明すること。		代表炉心	ほとんどの解析では初期出力は0.01Wとした。 出力運転時での制御棒引抜きは初期出力を変更して積算出力が最大となる出力を求めた。 炉心タンクヒータによる温度上昇の解析では出力上昇が非常に小さいため、初期出力は1Wで解析を行っている。	7/1ヒアリング資料 p3など
8		説明	温度係数の影響を説明すること。		代表炉心	最も燃料温度が厳しくなるケースに対して温度係数の誤差（±32%）を考慮した解析を行った。	7/1ヒアリング資料 p9 表1-3など
9		説明	動特性解析で用いる特性パラメータの誤差評価は、添付書類八の評価結果を用いて説明すること。		代表炉心	最も燃料温度が厳しくなるケースに対して動特性パラメータの誤差を考慮した解析を行った。	7/1ヒアリング資料 p9 表1-3など
10	2021/6/2	記載	動特性解析に用いた各炉心のパラメータの中で、温度係数の扱いについて記載がない。添8での計算結果を用いているのであれば、その旨を明記すること。	6/2ヒアリング資料 2	1.1解析項目	最も燃料温度が厳しくなるケースに対して温度係数の誤差（±32%）を考慮した解析を行った。	7/1ヒアリング資料 p9 表1-3など
11		記載	2. 解析結果のケースA、ケースBで使用している温度係数は共通なのか。異なる場合はその旨を記載すること。	27	2.解析結果	同じ温度係数を使用している。	7/1ヒアリング資料

12		追加計算	動特性コードの入力パラメータである質量M、実効遅発中性子割合 β_{eff} 、即発中性子寿命 ℓ について、計算誤差の影響が計算されているが、温度係数についても同様な解析を行い結果を記載すること。	9	表1.6	最も燃料温度が厳しくなるケースに対して温度係数の誤差(±32%)を考慮した解析を行った。	7/1ヒアリング資料 p9 表1-3など
13		図の追加	各事象で最も厳しい結果を与えている炉心について出力変化が図示されているが、積算エネルギー、温度、反応度についても示すこと。	10	図1から図5	積算エネルギー、温度についての図面を追加した。	7/8ヒアリング資料 p12 図1-2など
14		追加計算	出力運転時の制御棒誤引き抜きについて初期温度依存性が示されている。初期出力が約10Wで最大とする場合には、初期温度依存性が分かるように計算を追加し、図を示すこと(例、20、5、1Wを追加)	27	表4-3	初期出力は0.01Wとしました。	7/1ヒアリング資料 p3など
15		数値確認	表4-3で初期出力10Wでの比の値が12.4となっているが15.9の誤りでは	27	表4-3	ご指摘の通り間違っていました。	—
16		記載	出力分布を求めたCITATIONの計算方法について詳細に説明すること(核データ、縮約方法、エネルギー構造、境界条件など)	37		ヒアリング資料(6/28付け)で説明	6/28ヒアリング資料 p3
17		追加情報	炉心出力の最大値と平均値の比が示されているが、最大出力となる位置を示すこと(炉心中心を(0,0,0)としたセル中心の座標を記載)。また、炉心周辺部が最大になっている炉心について、炉心中心のピーキングを参考値として示すこと。	38	表A-1	図面に最大出力となる位置を示しております。また炉心中心の平均値に対する比率の例を記載しました。	7/8ヒアリング補足資料 p99-p111
18		追加情報	各代表炉心の燃料枚数、燃料体積、熱容量の一覧を示すこと。	38	表A-1	燃料枚数、燃料体積、熱容量の表を追加しました。	7/1ヒアリング資料 p91-p92
19		図の追加	出力分布については、代表的な炉心におけるX、Y、Z各方向のグラフに示すこと。	40	図A-1	出力分布の図面を追加しました。	7/8ヒアリング補足資料 p109-p110
20		説明	Z方向については炉心中央で最大となったと記載されているが、その理由について説明すること。	40	図A-1	中性子スペクトルの硬いLL1炉心では反射体境界で出力密度が最大となっていますが、それ以外の炉心では炉心中心が最大となりました。(z方向は均一)	—
21		追加計算	初期出力の影響が大きい結果となっているので(1.5倍?)、L5.5P-30以外の炉心についても、決定した厳しい初期出力での結果を記載すること。	27	全体	より厳しい条件での解析を行うために初期出力はすべて0.01Wでの解析結果を示しました。	7/1ヒアリング資料 p3など
22	2021/6/10	図表の追加	【商用電源喪失】 積算出力と反応度について、時間変化の図を追加すること	7	2.4	積算出力についての図面を追加しました。(反応度も対応します)	7/1ヒアリング資料 p42

23		解析条件	【中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用】 初期出力を1Wにしている理由について説明すること。中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備に係るインターロック、または、保安規定等による制約がない場合は、初期出力を1-100Wの範囲で、その影響を検討すること。	8	2.5	初期出力は0.01Wとしました。	7/1ヒアリング資料 p43
24		解析条件	【中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用】 中性子源強度ケースAに対して、0.5倍とした場合をケースB、0.1倍とした場合をケースCとしているが、現在の中性子源強度との関係を示すこと。	9	2.5	最も厳しくなる条件での解析結果を記載しました	7/26送付説明資料 p120
25		記載	【中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用】 L2P-30炉心に対するケースBとケースCの結果を比較して、「中性子発生量が少なくなると温度上昇が押さえられることが分かった」としているが、理由を詳しく説明すること。一般的に、初期出力が同一でスクラム時間に制限がない場合は、積算出力は外部中性子源強度の減少とともに増加すると考えられる。他の炉心についても当てはまるのかどうかについても説明すること。	10	2.5	中性子発生量の増加に伴い、ある中性子発生量で燃料温度の最大値となることの説明を追加しました。	7/1ヒアリング資料 p45
26		図表の追加	【中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用】及び【炉心タンクヒータによる炉心温度上昇】 出力、積算出力及び温度変化について、時間変化の図を追加すること。 (「中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用」は、ケースA～Cの各ケースそれぞれについて追加。なお出力は、「中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用」のケースBのみ追加。)	14	2.5	出力、積算出力及び温度変化について、時間変化の図を追加しました。	7/8ヒアリング補足資料 p52 図5-2など
27		図表の追加	【中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用】誤差の影響は、ケースBの温度係数が最も大きいため、出力、積算出力及び温度変化について、時間変化の図を追加すること。(1つの図に、基準値と温度係数±32%の3ケースを重ねて、比較できるようにしてください。)	15	2.5	出力変化の図は追加しました	7/1ヒアリング資料 p51 図5-2
28		図表の追加	【中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用】 ケースCの誤差の影響に係る表を追加すること。	16	2.5	ケースCは削除しました。	7/1ヒアリング資料

29		解析条件	【炉心タンクヒータによる炉心温度上昇】温度上昇に対する解析条件として反応度をステップ状に0.5%Δk/k加えるのは、現象を再現する解析条件になっていないと考えている。実際は、温度変化に伴い反応度が添加され、緩慢な出力上昇となるのではないかと。積算出力について、非安全側の評価となっていないことを説明すること。	20	2.6	0.5%Δk/kの反応度印加は行っていません	7/1ヒアリング資料
30		解析条件	【炉心タンクヒータによる炉心温度上昇】初期出力を1Wにしている理由について説明すること。減速材の温度を上昇させる実験において、保安規定等により、出力範囲は限定されているのか説明すること。	20	2.6	出力変化量はごくわずかであるので1Wで行っております。	7/1ヒアリング資料
31		解析条件	【中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備を臨界状態において利用】解析している代表炉心について、中心架台、炉心、中性子発生設備又はパルス状中性子発生設備との位置関係を示し、各炉心の外部中性子源強度の算出方法と結果について説明すること。(5/17審査会合において、例示として説明された「中性子発生量が最大値の約6%に減少した場合」との関係についても説明すること。)	25	補足説明	最も厳しくなる条件での解析結果を記載しました	7/28ヒアリング資料 p58表5-5
32	2021/6/17	解析条件	初期運転条件として、線型出力系は100%で0.1Wとなるレンジに設定されているとしているが、本事象が発生する段階で、線型出力系がこのレンジに設定されていることはどのような方法で担保されているか説明すること。(上のレンジに設定されていることを想定しなくてよい理由)	資料1、2	4-1	初期出力は0.01Wとしました。	7/1ヒアリング資料 p3など
33		解析条件	表7-1によると、燃料1体の反応度はL2-50炉心で最大となり1.854%となっている。また、L2P-50(燃料体21本)は、L5.5P-50(燃料体25本)と比べ、炉心体積が小さく、熱容量も小さいと考えられる。P2に記載の6種類×2=12種類の炉心について、それぞれの燃料体の温度を説明すること。	資料1 2、10	4-1	L2P-50(燃料体21本)は、L5.5P-50(燃料体25本)より燃料体数は少ないですが、1燃料体当たりの燃料板枚数はL5.5P-50のほうが少ないため、熱容量はL5.5P-50炉心のほうが小さくなります。各炉心の熱容量は補足資料Aに示しております。各炉心の燃料の最高温度は表7-2に記載しております。	7/1ヒアリング資料 p70表7-2
34		図表の追加	中心架台の反応度が負になっている図は理解しづらい。L5.5-50及びL5.5-30炉心における中心架台の反応度について、炉心部下端を基準として挿入距離と反応度の関係(反応度として正になる形)で整理すること。	資料1 11	4-1	中心架台上限での反応度をゼロとするのが分かり易いためこのようにしております	—
35		図面の追加	中心架台の最下端の位置と炉心下端の位置の関係について説明すること(炉心部と中心架台の垂直断面図を用いて説明)	資料1 11	4-1	位置関係の図面を追加しました	7/1ヒアリング資料 p65図7-3

36		図表の追加	L5.5-50及びL5.5-30炉心における中心架台の反応度について、炉心部下端を基準として挿入距離と反応度添加率の関係が分かる図を追加すること。(中心架台の最下端位置を基準とする場合は、炉心に挿入される位置を明示)	資料1 11、12	4-1	位置関係の図面を追加しました。また通常運転時の反応度変化の図を追加しました(図7-8(B))	7/8ヒアリング資料 p71図7-8
37		図表の追加	上記の2炉心について、反応度の時間変化の図を追加すること。	資料1 11、12	4-1	反応度の時間変化の図を追加しました。	7/1ヒアリング資料の 修正版 p73
38		記載	資料中に「形状において現有燃料要素と互換性を有しており」とあるが、設置変更承認申請書によると、固体減速炉心用の燃料要素において、厚さが異なる。形状における互換性とは、どのような状況において確保されるのかを説明すること。	資料2 2	16条	「固体減速炉心用燃料角板の厚みが0.7mm程度熱くなるのみで、現有燃料要素の取扱方法等に変更がない」という記載に変更しました。	7/8ヒアリング資料 p22
39		記載	高濃縮燃料と低濃縮燃料において、固体減速炉心用、軽水減速炉心用共に、燃料要素1枚あたりのU235量が異なっている。組立解体エリアにおける燃料要素の制限(保安指示書4.2.3.4)、組立解体エリアから炉心への移動時の燃料要素の制限(保安規定第68条)、設置許可基準規則第16条第1項第2号について、変更の必要性を説明すること。	資料2 2	16条	保安規定及び指示書の変更の必要性を明記しました。	7/8ヒアリング資料 p22
40		計算条件の追加	燃料貯蔵庫における高濃縮ウラン及び低濃縮ウランの貯蔵場所について説明すること。(図面の追加、バードケージの収納条件)	資料2 3	16条	建屋2階平面図を追加し、燃料貯蔵棚の位置を明示しました。	7/8ヒアリング資料 p23
41		計算条件の追加	燃料貯蔵庫における高濃縮ウラン及び低濃縮ウランの貯蔵場所に対する計算条件について記載すること。(計算モデル、各濃縮度の燃料の密度、原子個数密度、バードケージのモデルなど)	資料2 3	16条	計算を実施したLEU燃料について、個数密度及び計算モデルの情報を追加しました。	7/8ヒアリング資料 p24-p29
42		記載	軽水減速炉心及び固体減速炉心で使用する最大の燃料要素の枚数とバードケージの台数を説明すること。	資料2 3	16条	使用する最大の燃料量とバードケージ数を記載しました。	7/8ヒアリング資料 p23

43		記載	設置変更承認申請書では、高濃縮ウランの燃料要素も使用可能な申請となっているが、貯蔵施設の容量の評価では、低濃縮ウランの燃料要素のみの数量を評価している。貯蔵施設に貯蔵する容量の考え方について説明すること。	資料2 3	16条	高濃縮燃料と低濃縮燃料を合算し、それらすべてを貯蔵する能力を有していることを説明しました。	7/8ヒアリング資料 p24
44		保安規定	照射物と挿入管を同時に使用することがあるとして、設置変更承認申請書の記載の変更案が示されているが、いずれも管理・手順により担保する必要があるため、運用の方針を示すこと。	資料2 12	29条	照射物と挿入管を同時に使用することはありますが、両者の反応度を合わせて制限値を設けます。	7/8ヒアリング資料 p54
45		記載	8-9-5-1挿入管において、構造では「管の下部が密封されて水が入らない構造」とあって、事項の反応度の添加では「管の内部に水が流入する前後で」とあるが、破損を想定した記載が不足しているのではないか。	資料2 12	29条	「挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で」という記載に改めました。	7/8ヒアリング資料 p54
46		確認	「実行増倍率は1より十分に小さい」とあるが、既承認では「0.95」としているが、クライテリアを変更しているのか。	資料2 4	16条	クライテリアは0.95のままですので、「0.95より」に改めました。	7/8ヒアリング資料 p24
47	2021/6/21	事実確認	起動用中性子源について以下の点を説明すること。 ①構造 ②中性子強度（設置当時と現在のAm-Beの放射能強度） ③炉心構成における設置可能範囲 (設置範囲については、代表炉心の中から水平方向の断面積が最小と最大の炉心について、炉心と中性子源の相対位置、垂直方向の設置高さが分かる図面を添付)	資料1	4-1	中性子源についての説明資料を作成しました。	7/8ヒアリング補足資料 p96-p98
48		事実確認	燃料1体が誤装荷されたケースについて解析結果が示されているが、通常運転の状態を確認するため、誤装荷燃料がない通常状態での解析を示すこと。炉心の過剰反応度は0.5%Δk/kとする。(炉心L5.5-30)	資料1	4-1	通常の起動時の出力変化を追加しました。	7/8ヒアリング資料 p71
49		事実確認	事故解析の初期条件として、0.01Wになるよう中性子源強度を調整しているとしているが、実際の運転において線型出力系の出力がこのレンジ以下になっていることをレコーダの記録などを用いて説明すること。	資料1	4-1	起動時の線型出力計の指示値の例を示しました。	7/8ヒアリング補足資料 p112-113
50		事実確認	線型出力系レンジのフルスケールに対応する出力の範囲について、評価の方法を説明すること。また、高濃縮の具体的な炉心について例示すること。	資料1	4-1	線型出力計のフルスケール以外でのスクラムは行いません	7/1ヒアリング資料 p3など
51		事実確認（起動時の誤引き抜き）	起動時の制御棒の誤引き抜き(1-1)において、初期出力を0.01Wとしているが、中心架台を全挿入し、全挿入されている3本の制御棒を順次引き抜く段階での出力がこのオーダになっていることを説明すること。(燃料の誤装荷と起動時の制御棒誤引き抜きの事象の解析条件の整合性)	資料1	4-1	起動時の線型出力計の指示値の例を示しました。	7/8ヒアリング補足資料 p112-113

52		解析条件	中心架台の反応度解析の誤差が与える影響について示すこと。 (表7-4、表7-5)	資料	4-1	L2-30炉心について中心架台の誤差の影響を追記しました。	7/8ヒアリング資料 p72
53		事実確認	(3)実験物破損条件として「10%が放出」とあるが、10%とは、どのような考え方により設定された数値なのかを説明すること。	10	6/24 資料1 4-3	他炉心での燃料破損の破損率を参考として10%としています。	7/26送付説明資料 p114
54		解析条件	燃料の機械的破損 代表炉心の中から臨界質量が最小の炉心を選定して解析しているが、燃料1体が破損した場合に放出されるFPが最大となるのが最小(臨界)炉心であることを詳しく説明すること。(単位出力当たりの燃料体1体毎の出力割合が最大となっていることを示す必要がある。)	3	6/24 資料1 4-2	FP生成量の解析を行い評価を行いました	7/1ヒアリング資料 p83表8-2
55		解析条件	実験設備、実験物の著しい損傷において、熱中性子の核分裂断面積とサンプル資料の重量の積からFP量の多い代表炉心を選定しているが、スペクトルの硬い炉心等で熱外中性子あるいは高速中性子の影響があるのではないか。この効果について説明すること。	10	6/24 資料1 4-3	実験物の核分裂率を計算し、それを元に代表炉心を選定しました。	7/1ヒアリング資料 p83表8-2
56		事実確認	照射物と挿入管の組合せのうち、軽水減速炉心において、挿入管を使用せず、照射物を使用する時の反応度は、どのように考えられているのかを説明すること。	12~14	6/17 資料2	軽水減速炉心において挿入管は核計装の検出器を入れるために必ず使用しますので、挿入管に水は入ることと照射物が移動することの両方が発生しても核的制限値である0.5% Δk/kを満足するようにします。	6/17ヒアリング資料 2(条項対応)
57		解析条件	実験物の異常等による反応度の添加について、挿入管の反応度制限を0.5%Δk/kとする場合は、水の侵入などによるランプ反応度添加を想定して解析し、その影響について説明すること。	30	6/3 資料1	ランプ状反応度添加の解析を追加しました。	7/1ヒアリング資料 p28
58	2021/6/25		初期出力が、KUCAの運転条件、運転範囲をカバーする解析条件となっていることを説明すること。なお、説明が難しい場合は、初期出力を0.01~100Wの範囲(事象1及び6は0.01~1W)で変化させて影響を説明すること。			ほとんどの解析では初期出力は0.01Wとした。 出力運転時での制御棒引抜きは初期出力を変更して積算出力が最大となる出力を求めた。 炉心タンクヒータによる温度上昇の解析では出力上昇が非常に小さいため、初期出力は1Wで解析を行っている。	7/1ヒアリング資料
59			起動時の初期出力は、起動前の中心架台挿入時の出力範囲であることを説明すること。			起動時の線型出力計の指示値の例を示しました。	7/8ヒアリング補足資料 p112-113
60			照射物、挿入管による反応度添加として、ステップ及びランプ反応度添加を想定して解析し、その影響について説明すること。			ランプ状反応度添加の解析を追加しました。	7/1ヒアリング資料 p28
61			中性子発生装置の線源強度の影響については、結果が厳しくなる線源強度の条件を明らかにして解析結果を説明すること。			最も厳しくなる条件での解析結果を記載しました	7/28ヒアリング資料 p58表5-5

62			代表炉心を選定するにあたって、燃料体の本数が最小の炉心を選定して解析しているが、燃料1体が破損した場合に放出されるFPが最大となるのが上記の炉心となることを説明すること。			燃料体一体当たりのFP量を計算して炉心を選定しました。	7/1ヒアリング資料 p83表8-2
63			代表炉心を選定するにあたって、熱中性子の核分裂数を指標として用いているが、熱中性子以外（熱外中性子及び高速中性子）による核分裂の影響を説明すること。			実験物の核分裂率を計算し、それを元に代表炉心を選定しました。	7/1ヒアリング資料 p83表8-2
64	2021/6/29		許可基準則第17条、第1号および第3号に規定されている「必要なパラメータ」とは、許可基準規則の解釈に書かれている内容と考えている。炉心温度および架台室内エリアモニタ値以外の計測について、考え方を説明して下さい。			必要なパラメータは炉心温度、架台室内エリアモニタ及び中性子束密度であると記載しました。	7/8ヒアリング資料 p30
65			11/5審査会合資料を確認すると1μAレンジの100%指示値が100W以下としており、例示として1μAレンジの100%指示値を約25%とされている。許可基準規則第17条第2号にある「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で監視できるもの」について考え方を説明して下さい。			中性子束密度を監視する線形出力計は、その設置位置により測定範囲が変化するが、過去にKUCAにおいて1kW出力時に使用できた実績があることを記載しました。	7/8ヒアリング資料 p31
66	2021/7/1	解析条件	設計基準事故の一つである燃料の機械的破損について、軽水減速炉心では最小臨界量の炉心を代表炉心とするとしているが、固体減速炉心と同様、最小炉心が厳しいことを説明すること。	資料1 p39	4-2	説明の資料を追加しました。	7/8ヒアリング補足資料
67		事実確認 図表の追加	設計基準事故の一つである燃料の機械的破損について、代表炉心として選定したL3P-50炉心について、単位出力当たりの燃料体積分出力の水平分布を数値で示すこと。また、固体減速炉心の全代表炉心について、燃料体1体の積算出力が最大となる燃料体の位置が炉心中央部でない場合はその位置について記載すること。	資料1 p43	4-2	計算結果を追記しました	7/8ヒアリング資料 p86表8-5
68		事実確認 図表の追加	設計基準事故の一つである燃料の機械的破損について、軽水減速の代表炉心として選定しているC45G2（4列）炉心の燃料体毎の出力の水平分布が分かる図を示すこと。	資料1 p43	4-2	計算結果を追記しました	7/8ヒアリング資料
69		解析条件	実験設備、実験物の著しい損傷について、FPの放出率を燃料体からの放出率と同一の10%を用いているが、試料中のFPの飛程の観点から同一の放出量と考えられる理由について説明すること。（定量的な評価が困難である場合は、放出率は100%とするのが適当）	資料1 (p0)	4-3	説明書を作成しました	7/26送付説明資料 p114
70		解析条件	実験設備、実験物の著しい損傷について、0.1%Δk/kの反応度に相当する試料の重量を評価するにあたって炉心中心に試料を入れたことを想定しているが、重量の最大値になっていることを説明すること。	資料1 (p0)	4-3	摂動計算の方法についての説明を追記しました	7/8ヒアリング資料 p89-90
71		事実確認 図表の追加	実験設備、実験物の著しい損傷について、天然ウランおよび濃縮ウランの代表炉心として選定したL5、5P-30、L2P-50炉心の熱群中性子、及び熱外中性子と高速中性子の炉心中心を通る水平分布を示すこと（単位出力当たりの値）	資料1 (p2)	4-3	不要	—

72		事実確認 図表の追加	実験設備、実験物の著しい損傷について、0.1%の反応度に相当するウラン量を摂動理論により評価しているが、計算方法について、具体的に説明すること。	資料1 (p2)	4-3	摂動計算の方法についての説明を追記しました	7/8ヒアリング資料 p89-90
73	2021/7/12	事実確認	線型出力系の指示値は、核計装の検出器位置によってある程度の幅で変化する。炉心の出力上昇に対するスクラムを担保している安全出力系について、出力範囲をカバーできることを示すこと。また、高濃縮ウラン炉心における炉心配置の実績を示すこと。また、線型出力系と機器構成、機能で相違する点があれば比較すること。	3	2-1	説明書を作成しました	7/12送付説明資料 p1-2
74		事実確認	出力運転中の制御棒の異常なひき抜きについて、初期出力の変化範囲が100-80Wとしているが、1Wまでの範囲で評価すること。 (以前の資料でより低出力の範囲で結果が大きくなっていたが、今回の結果との関係を説明すること)	22	2-2	説明書を作成しました	7/12送付説明資料 p3-4
75		記載	事象に対する解析結果の図表は、各事象の節の中に記載すること。	34,36	2-2	次回ヒアリング資料で記載場所を修正します	7/26送付説明資料
76		記載	炉心タンクヒータによる温度上昇については、対象となる反応度係数が正になる4炉心の結果について解析結果が示されていない。	52	2-6	記載済み	—
77		事実確認	燃料の機械的破損について、FP放射能を運転終了後1日で評価しているが、FP放射能は運転終了後の冷却時間によって数桁にわたって変化する。高出力運転後の炉心交換作業について作業開始をどのように制限しているか、また、今回設定している冷却時間は運用管理において担保されることを説明すること。	76	3-8	説明書を作成しました	7/12送付説明資料 p5
78		記載	実験設備、実験物等の著しい損傷について、サンプル価値評価のためのインボータンス分布(炉心中央に設置した場合の0.1% Δk/kの重量を評価していますが、炉心挿入位置により相当重量は変化するはず。重量範囲として過少評価になっているのでは)	86	3-8	摂動計算の方法についての説明を追記しました	7/8ヒアリング資料 p89-90
79		記載 解析条件	実験設備、実験物の著しい損傷について、(2)初期条件において、試料は各炉心で熱群の中性子束が最大値となる場所に固定していたとするとの記載がある。熱群の中性子束が最大値となる場所は各炉心によって異なり、炉外となることもあり得る。ところが、試料の反応度計算においては、「炉心の中心に入れたことを想定して」との記載があり、初期条件と矛盾している。	86	3-8	試料の大きさは反応度最大の位置で決まり、照射量は反応率最大の位置できまり、その場所は異なりますので、その説明を追記しました	7/8ヒアリング資料 p89-90
80		解析条件	実験設備、実験物等の著しい損傷について、反応度が試料の重量に比例するとの記載があるが、試料の重量が増えると一次摂動が成立しなくなる恐れがあるため、表9-1の試料の重量にどの程度の誤差があるのかを確認する必要がある。また、試料の組成、幾何形状等についても示す必要がある。(確認計算ができないため)	86	3-8	2-9-1に説明を追記しました	7/26送付説明資料 (p98)

81		データ確認	燃料損傷に伴う被ばく線量について、評価で使用している換算係数が希ガス、ヨウ素について示されているが、各核種について示すこと。	84,85	3-8	説明書を作成しました	7/12送付説明資料 7/26送付説明資料 (p93)
82		データ確認	サンプル資料の破損による被ばく線量について、評価で使用している換算係数が希ガス、ヨウ素について示されているが、各核種について示すこと。	89,90	3-9	説明書を作成しました	7/12送付説明資料 7/26送付説明資料 (p93)
83	2021/7/15	記載の追加	燃料体全体の重量比説明して下さい。	ヒアリング 資料2 P.3	3)-3燃料支持 フレームの評 価結果	第四条に記載しました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p4)
84		変更対象に 追加	第2項 要求事項に変更が無い場合、対象外と考えても良いのでは。 第4項 燃料要素が安全施設に該当するので対象と考える。	ヒアリング 資料2 P.6	2)当該条文に おける変更内 容	拝承いたしました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p6,p9)
85		事実確認	「燃料は破損に伴う著しい機械的エネルギーを発生させないこと、炉心は著しい損傷に至ることはないこと」とあるが、前項の「燃料及び被覆材の温度が許容範囲内(400°C以下)となり、被覆材が機械的には損傷することなく」と書き分けている理由を説明して下さい。また、イとハは章立てを分けて(2.2と2.3と分ける)下さい。	ヒアリング 資料2 P.15	2.2第1項第二 号イ 及びハについ て	「燃料及び被覆材の温度が許容範囲内 (400°C以下) となり」の表現に統一しました。 イとハの章立てを分けました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p13)
86		変更対象に 追加	第1項第二号 変更が不要となる条項であっても、設工認または保安規定の変更申請の根拠となる条項については、設計方針を記載すること。	ヒアリング 資料2 P.22	2)当該条文に おける変更内 容	拝承いたしました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p20)
87		記載の追加	燃料貯蔵棚の材質、寸法などを詳しく説明すること。	ヒアリング 資料2 P.23	2.説明資料	燃料貯蔵棚の材質、寸法を記載しました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p22,p23)
88		記載の追加 解析条件	図2 バードケージ概念図について、材質、寸法を追加すること。また、バードケージなどの構造材の臨界計算上の扱いと原子個数密度を説明すること。	ヒアリング 資料2 P.25	図2 バード ケージ 概念図	バードケージの材質、寸法を記載しました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p23,p24)
89		記載の追加	KURや固体廃棄物貯蔵庫等、他の施設も含めて、50 μ Gy以下となる説明をして下さい。	ヒアリング 資料2 P.43	2.説明資料	修正いたしました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p48)
90		資料追加	「厚さ約1mの普通コンクリート壁」「炉室外周壁は厚さ0.7m以上の鉄筋コンクリート型」、それぞれの壁が、どの壁を指しているのか説明して下さい。また、それぞれの鉄筋コンクリート壁が、それぞれ遮蔽効果を有することについて、説明資料を添付して下さい。	ヒアリング 資料2 P.46	2)当該条文に おける変更内 容 3)適合のため の	KUCA炉室の水平・垂直断面図を追加し、説明を加えました。また、可動遮蔽及びコンクリート壁が遮蔽効果を有することを追記しました。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p51,p52,p53)

91	2021/7/16	データ	表1-3のパラメータの誤差影響について、U重量を6%減少した場合について、「-」としている理由を説明すること。最大出力、0.1Wまでの時間、積算出力を記載すること。	10~	表1-3~	U重量を6%減少した場合についての解析結果をすべて追加しました。	7/26送付説明資料 (p11~)
92		図の追加	原子炉起動時の誤引抜きについて、積算出力のグラフは、スクラム後出力が0.1Wに低下するまでの解析範囲をカバーするグラフを示すこと。また、評価量の特徴に応じて適当な時間スケールのグラフを追加すること。(他の事象も同様)	12, 27等	図1-1 図1-2 図5-1 等	0.1Wに低下するまでの範囲までに上げたグラフを追加しました。	同上 (p13,p54等)
93		解析	L5.5P-30炉心及びC45G(2H2O)4列炉心の温度変化について、積算出力と異なる傾向を示している。積算出力に対応した傾向を示さず直線的な変化を示している理由を詳しく説明すること。	12, 27, 38等	図1-1 図1-2 図2-1 図2-2 等	計算は幾つかの時間ステップに区切って、その間の温度変化は時間と共に線形に変化するとして行いました。計算方法についての説明を第1節に追加しました。	同上 (p1,p2)
94		図の追加	積算出力及び温度の時間変化についてグラフを追加すること。	34	図3-1 図3-2 図4-1 図4-2 等	積算出力及び温度の時間変化についてグラフを追加しました。	同上 (p36,p45等)
95		データの追加	表6-3に0.1Wまでの時間を追加すること。	42	表4-3	表4-3に0.1Wまでの時間を追加しました。	同上 (p44)
96		図の追加	積算出力・温度の時間変化を追加すること。	43	図4-1 図4-2	積算出力及び温度の時間変化についてグラフを追加しました。	同上 (p45)
97		構成	「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」の解析結果については、ケースA、ケースBに分け、説明、表、グラフを示すこと。	44~52	本文 図表	説明、表、グラフをケースA、ケースBに分けました。	同上 (p48~p57 他)
98		記載	「以上より、ケースBで温度上昇量が最大となったL2P~最も厳しい結果に近い値であると考えられる。」とあるが、ケースBではL2P-30炉心で最大となるが、表5-5のL5.5-30(中性子発生量0.89)における温度上昇は49.3℃であり、結果を反映した記載にはなっていないのではないか。この記載について説明すること。	46	本文 2-5	ご指摘の通りL5.5-30(中性子発生量0.89)が最大値であるのでそのような記載に変更しました。	同上 (p51)
99		解析条件	温度上昇b)の注釈において「出力分布を考慮した係数を掛ける」としているが、具体的な方法について詳しく説明すること。	47	表5-1	この計算方法については2-1のところに説明しておりますが、【質問番号102】回答にも記載しました。	同上 (p52,p109)
100		データ	出力が120Wまで到達せず、マニュアルでスクラムした場合の時間及びスクラム時の出力を示すこと。	49~	表5-3~5-5	マニュアルでスクラムした場合の時間及びスクラム時の出力を追記しました。	同上 (p55,p56,p58)
101		図の追加	表5-5において上昇温度が最大となっている炉心(L5.5P-30)について、中性子発生量を変化させた各ケース(X0.50、0.89、0.90、0.5)の図(出力、エネルギー、温度)の図を追加すること。	52	図5-1	図5-3~5-6に示しました。	同上 (p60,p61)

102		記載	パルス中性子源の影響評価結果に基づいて現在の強度における評価結果に対する説明を記載すること。	52	本文	【質問番号105】回答に記載しました。	同上 (p120)
103		記載	起動用中性子源の評価上の扱いについて説明すること。	58	本文 2-7	【質問番号103】回答に記載しました。	同上 (p105)
104		図の追加 解析条件	上昇温度が最大であるL2P-30炉心について示すこと。 また、中心架台反応度について、Fitting curve(6次式)を示すこと。	71	図7-8	図7-8に相当するL2P-30炉心についてのグラフを図7-11に追記しました。 中心架台の反応度の式を表7-5に記載しました。	同上 (p82p83)
105		データ	1体の燃料体のうち10%の燃料要素が破損するとしているが、参考とした他の試験炉の燃料と比較して、仕様、使用条件などを説明すること。	76	本文	【質問番号108】回答に記載しました。	同上 (p114)
106		データ	施設配置図に対して、別図で16方位を追加すること。	82	図8-1	図8-1に16方位を追記しました。	同上 (p91)
107		記載	表A-1について、燃料1体の線源強度の算出方法(想定している炉心、燃料体位置)を説明すること。	補足説明資料 (7/12)	質問番号75回 答	【質問番号110】回答に記載しました。	同上 (p115)
108		その他	安全出力系の校正方法について、実際の定期検査での測定の実績を説明すること(炉心、検出器配置、出力校正の方法など)	補足説明資料 (7/12)	図A-2 図A-3	【質問番号111】回答に記載しました。	同上 (p117)
109		事実確認	第13条第1項第2号について、添付書類10の解析により確認された被ばく線量は、実験設備・実験物等の著しい損傷の方が大きいのではないかと。	15	13条 2.2	修正いたしました。	7/13質問リストNo.3の追加 7/26ヒアリング資料2に反映 (p13)
110		事実確認	1KWの高出力運転時、炉心及び計装(線型出力系、安全出力系、温度計)の配置、並びに核計装及び架台室内エリアモニターの指示値を整理すること。	31	17条 2.1	1kW運転時の炉心配置図及び線形出力系の指示値を追加しました。ただし、温度計の位置、安全出力系及びエリアモニターの指示値に関する資料が発見できず、追記できませんでした。	7/26ヒアリング資料2に反映 (p32,p33)
111		事実確認	設計基準事故における架台室内エリアモニター値について、設置場所、出力の監視範囲について説明すること。	32	17条 2.2	追記いたしました。	7/26ヒアリング資料2に反映 (p31,p32)
112		記載	制御棒の誤引き抜きによる上昇温度の最大値は1.85°Cとしているが、これは軽水減速炉の値である。固体減速架台では27.1°Cとなっているので確認すること。	37	19条 2.1	修正いたしました。	7/26ヒアリング資料2に反映 (p38)
113		事実確認	仮想的な線源位置の設定の考え方を説明すること。 実測値があるガンマ線モニターについて具体的な設備名を示すこと。	43	24条 2.1	炉室中心から最も近い周辺監視区域境界までの距離は140mである。炉心が炉室の中心になく、少し偏心していることから直接線評価において距離を130mと考えた。ガンマ線モニターとは架台室に設置されているエリアモニターのことで。	7/26ヒアリング資料2に反映 (p44,p45)

114		計算条件	図2に記載の「R=1.0e5」と、2.3に記載の「半径方向距離は1km」は同値か。また、線源から評価点までの水平距離は、2.2によると130mではないのか。なお、半径方向距離1kmとした理由を説明すること。	44	24条 2.3	図中の「R=1.0e5」を「R=1000」に修正しました。線源から評価点までの水平距離は140mであり、半径方向距離を1kmとしているのは十分であるからです。	7/26ヒアリング資料2 に反映 (p46)	
115		事実確認	鉄板製可動遮蔽の設置場所を図面で示すこと。	46	25条 1	追記いたしました。	7/13質問リストNo.8の 追加 7/26ヒアリング資料2 に反映 (p51)	
116	2021/8/5	解析条件 2-5-1 7/29	最大中性子発生量について、4E9n/s基準ケースとしているが、その考え方および算出方法を説明すること。	48		最大中性子発生量をターゲットから発生する最大中性子の1/2に変更して、それを基準としました。	8/10送付説明資料2	京大質問管理 表のNo (7/29ヒアリン グ) 3
117		解析条件 2-1,2-3,2-4 2-5,2-6,2-7 7/29	出力運転中の制御棒の誤引抜きは、初期出力をパラメータとして厳しい条件での解析結果を示しているが、その設計基準事故の機械的破損と実験物の損傷以外の事象は初期出力を各々設定している。これらの事象について初期出力の設定の考え方について説明すること。	6,30,41, 48,63,68		【質問番号120】回答に記載しました。 温度係数を変化させた時の図5-7、5-8を追記しました。	8/10送付説明資料1 p4	京大質問管理 表のNo (7/29ヒアリン グ) 14
118		解析結果 表2-3 7/29	出力運転中の制御棒の誤引抜きについて、初期出力の影響を示した表2-3では、初期出力を100~0.1Wの範囲で変化させた値を示すこと。	24		表2-3、表2-5に初期出力を変更した結果を追記しました。	7/12質問回答資料 8/10送付説明資料1 p4	京大質問管理 表のNo (7/29ヒアリン グ)
119		解析条件 2-5-2 7/29	熱容量の大きい炉心(LL10-30)を選定している理由を説明すること。	51		熱容量の大きな炉心と小さな炉心を選定して比較している理由を追記しました。	8/10送付説明資料2 p4	-
120		解析結果 2-5-1 7/29	温度係数の誤差による影響がケースA,B,Cで傾向が異なる理由について説明すること。また、温度が最大となるケースについて、温度係数を変化させた場合の図を参考として添付すること。	53,56,59		【質問番号120】回答に記載しました。 温度係数を変化させた時の図5-7、5-8を追記しました。	8/10送付説明資料2 p15 p13	-
121		解析結果 表5-3,5-5 7/29	LL1P-30炉心の120Wまでの到達時間について、中性子発生量が0.5の場合で異なっているが、どちらが正しいのか確認すること。	55,58		表5-3の数字が間違っておりました。 なおこのケースBは新しい説明資料では削除しました。	8/10送付説明資料2	-
122		記載 2-1,2-2,2-3 7/29	制御棒の誤引抜き、実験物の異常については、固体減速架台、軽水減速架台でまとめて、図表番号の整理を検討すること。	7,20,30		固体減速架台、軽水減速架台でまとめて図表番号となるように整理しました。	8/10送付説明資料1	京大質問管理 表のNo (7/29ヒアリン グ) 75
123		記載 2-5-2 7/29	ケースA、ケースBで最も温度が上がる炉心は、各々L5.5P-30炉心、L2P-30炉心ではないか。記載順序を検討すること。	51		ご指摘の通り記載順序が逆になっておりました。 なおこのケースAとBは新しい説明資料では削除しました。	8/10送付説明資料2	京大質問管理 表のNo (7/29ヒアリン グ) 98

124		記載 表5-4 7/29	マニュアルスクラムの場合のスクラム時の積算出力の記載について、質問99に対する回答としてP55,56,58が該当するとしているが、P56の表5-4を変更する必要があるか確認すること。	56		表5-4はケースBの評価のもので、このケースは新しい説明資料では削除しました。 新しい資料でこの表に相当する表5-5には手動スクラム時の出力を追記しました、	8/10送付説明資料2	京大質問管理 表のNo (7/29ヒアリン グ) 100
125	2021/12/3	添付10	照射物の移動による反応度の添加には、照射物の反応度が正の場合と負の場合で想定している状況が異なり、本文の実験物の制限として記載されている。照射物の移動による反応度の添加に二つのモードがあることを明記すること。			そのような記載に変更します。	12/6 ヒアリング資料	
126		添付10	照射物の反応度を最大とするために原子炉の過剰反応度を0%としたとしているが、照射物を装荷する実験では出力上昇が不可欠である。制御棒が部分挿入の場合もあるが、制御棒が全引抜き状態では正の値をとると考えられる。照射時は臨界であることをもって過剰反応度が0%であるとする理由について説明すること。			解析の初期条件として低出力の臨界状態を仮定しており、その状態まで中性子源の挿入で実現することは可能と考えております。具体的には中性子源を挿入して原子炉を起動して全制御棒を上限まで引抜き（その時点で臨界）、所定の出力まで上昇させた後に中性子源を引き抜けば過剰反応度がゼロであっても解析条件のような状態とすることができます。	12/6 ヒアリング資料	
127		添付10	今回の低濃縮ウラン炉心においては原子炉の過剰反応度を固体減速あるいは軽水減速のいずれの炉心でも0%としている。新規性基準時の審査においては、高濃縮ウラン炉心において固体/軽水で各々（最大）過剰反応度としてきた0.35%としていた。また、低濃縮炉心に関する当初申請においても上記と同じ考え方を採用していた。今回、低濃縮の審査の過程で変更した理由、その必要性について説明すること。			新規基準時の高濃縮ウラン炉心での審査時、および令和元年5月に低濃縮ウラン炉心の変更申請を最初に提出した時点では照射物の最大反応度を0.5% Δk/k、最大過剰反応度を核的制限値の最大値として設定しておりましたが、令和3年1月18日の審査会合で説明しました通りこの設定は誤っていることが判り、その後の設置変更申請においてはまずは照射物等を使用しないこととしました。 その誤りを修正したものが低濃縮ウラン炉心の補正申請であり、照射物を利用できるようにしたいと考えております。	12/6 ヒアリング資料	
128		添付10	制御棒の核的制限値として、制御棒の全反応度は過剰反応度+1%以上の制限がある。固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度を0%とし、制御棒の全反応度の制限値の最小値は固体減速架台で1.35% Δk/k、軽水減速炉心で1.5% Δk/kとしている理由を説明すること。			再々補正申請において、過剰反応度について異常が発生した場合の追加反応度を加えます。	12/21 審査会合	
129		添付10	制御棒の反応度抑制効果について「装荷物(挿入管、照射物)を使用した炉心について、挿入管の破損や照射物の移動により、正の反応度が添加される場合には、さらにその正の反応度も加えた量とする。」記載を追加しているが、ここで加わると想定している反応度は過剰反応度には含まれないと考えているのか。			再々補正申請において、過剰反応度について異常が発生した場合の追加反応度を加えます。	12/21 審査会合	

130		添付10	照射物の反応度を最大とするために原子炉の過剰反応度を0%としたの説明があったが、照射物を装荷する実験では出力上昇が不可欠である。臨界時に制御棒が部分挿入されている状態は運転範囲であると考えが必要があるが、制御棒が全引抜きの状態となった時の過剰反応度は正の値となると考えられる。照射時は臨界であることをもって過剰反応度を0%とする理由について説明すること。			過剰反応度がゼロであっても臨界とすることは可能です。実際の照射物を装荷した実験では過剰反応度をある程度確保して行いますが、ここでは照射物の異常時に炉心に加えらるる反応度を最大とするために過剰反応度をゼロとして解析を行っております。	12/6 ヒアリング資料	
131		添付10	制御棒の反応度抑制効果について、過剰反応度プラス1% $\Delta k/k$ に加えて、「炉心装荷を使用した炉心について、――さらにその正の反応も加えた」との記載が加えられている。照射物の移動により加わる反応度は過剰反応度に含まれないとする理由			再々補正申請において、過剰反応度について異常が発生した場合の追加反応度を加えます。	12/21 審査会合	
132		添付10	8-9-5-1 挿入管 照射物の有無にかかわらず、軽水減速炉心での挿入管への水流入の前後の反応度変化は絶対値で0.5% $\Delta k/k$ 以下とするとしているが、照射物のある場合は、照射物の落下等による反応度添加を考慮する必要があるのではないか			照射物と挿入管の両方の影響を含めて絶対値を規定するように変更します。	12/6 ヒアリング資料	
133		添付10	炉心決定のためプロセスをどのように取り扱うのか、その位置付について説明			原子炉施設保安規定の下部規定である原子炉施設保安指示書に入れる予定です。	12/6 ヒアリング資料	
134	2021/12/10	添付10	過剰反応度を「実験物の有無にかかわらず、運転状態における炉心の制御棒全引き抜き時における反応度」と定義しており、運転時の異常な過渡変化の解析における事象「実験物の異常等による反応度の付加」（以下、「実験物の異常」という。）において加わる反応度は過剰反応度に含まれないとしている。実験物の異常により加わる反応度を、炉心の過剰反応度を含めないとする考え方を説明すること。			核的制限値の過剰反応度の記載を修正しました。	12/21 審査会合 2/8 審査会合	
135		添付10	運転時の異常な過渡変化の解析「実験物の異常等による反応度の付加」において、照射物の反応度を最大とするために、炉心の過剰反応度を0% $\Delta k/k$ としている。運転範囲として過剰反応度が正となることもあるが、炉心の過剰反応度を0% $\Delta k/k$ とする京都大学の考え方を説明すること。			核的制限値の過剰反応度の記載を修正しました。「実験物の異常等による反応度の付加」の初期条件として過剰反応度を0% $\Delta k/k$ とするのではなく、制御棒引抜きと記載します。	12/21 審査会合 2/8 審査会合	

136		添付10	過剰反応度を「実験物の有無にかかわらず、運転状態における炉心の制御棒全引き抜き時における反応度」と定義し、実験物の異常により加わる反応度は過剰反応度に含まれないとする考え方は、申請書本文又.(3)(ii)照射物の記載では、実験物の異常により加わる反応度は過剰反応度に含まれているため、統一されていないと考える。			核的制限値の過剰反応度の記載を修正しました。	12/21 審査会合 2/8 審査会合	
137		添付10	運転時の異常な過渡変化の解析「実験物の異常等による反応度の付加」において、過剰反応度を0% $\Delta k/k$ とすると、全制御棒の反応度値は1% $\Delta k/k$ となり、通常運転時及び異常な過渡変化時に対して、全制御棒の挿入による炉心反応度が-1%の未臨界を維持できないと考える。炉心反応度が-1%の未臨界を維持できないことについて考え方を説明すること。			核的制限値の過剰反応度の記載を修正しました。	12/21 審査会合 2/8 審査会合	
138		添付10	運転時の異常な過渡変化の解析における炉心の過剰反応度は、「実験物の異常等による反応度の付加」以外の事象では各炉心の最大過剰反応度と等しい値を用いている。「実験物の異常等による反応度の付加」においてのみ、解析条件である炉心の過剰反応度を変更した考え方を説明すること。			「実験物の異常等による反応度の付加」の初期条件として過剰反応度を0% $\Delta k/k$ とするのではなく、制御棒引抜きと記載します。	12/21 審査会合 2/8 審査会合	
139	2021/12/14	添付11	添付11を追加すること			添付11を追加します。	1/11 ヒアリング資料	
140	2021/12/23	添付10	安全評価の解析において書いて頂いた反応度のグラフも含めること。			まとめ資料に記載します。	2/2 まとめ資料	
141	2022/1/12	本文、添付8	核的制限値の記載を検討すること。			核的制限値の過剰反応度の記載を修正しました。	2/8 審査会合	
142		添付10	燃料体積から燃料板熱容量の算出過程が不明			まとめ資料に計算例を記載します。	2/2 まとめ資料	
143	2022/1/13	添付5	体制表は添付書類五も修正。			添付書類五を修正します。	2/22 補正申請書に記載	
144		添付10	審査会合の引用資料はまとめ資料の引用箇所を記載する			まとめ資料を修正します。	3/7 まとめ資料	

145	2022/1/24	添付10	設計基準事故の燃料誤装荷の解析項目について検討すること			燃料誤装荷の解析についての記載を変更します。	2/8 審査会合	
146		添付10	燃料誤装荷が発生しないような手続き等についての記載を追加すること。			添付十に追記します。	2/8 審査会合	
147		添付10	保安規定と下部規定における炉心構成のチェック体制についての記載を追加すること			まとめ資料を修正します。	2/2 まとめ資料	
148	2022/2/9	添付10	中心架台の反応度についてまとめ資料では、全ての代表炉心における燃料集合体装荷反応度と中心架台の反応度を追加すること			まとめ資料を修正します。	2/2 まとめ資料	
149		添付10	中心架台に燃料体が1体のみ装荷されている場合の中心架台がどこにあるかわかるように炉心配置図を添付する。			まとめ資料を修正します。	2/2 まとめ資料	
150	2022/2/10	添付10	燃料誤装荷による反応度が最も大きいL2P-50を用いて、制御棒及び中心架台は添八で求めた反応度を採用して、モンテカルロ計算コードMCNPにて解析、未臨界となること及び説明1の未臨界度の読み方が妥当(?)であることを説明。			まとめ資料を修正します。	2/2 まとめ資料	
151		添付10	代表炉心の各値をExcelで集計し、燃料集合体1体を誤装荷したとしても、未臨界となることを説明を追加すること			まとめ資料にまとめの表を追加しました。	2/2 まとめ資料	
152		添付10	燃料を間違えた位置に装荷（追加1本の装荷ではなく、レイアウト間違い）した場合で未臨界となることの定性的に説明を追加すること。			まとめ資料を修正します。	2/2 まとめ資料	
153	2022/2/21	添付10	中心架台に燃料体が1体のみ装荷されている場合の結果を追加すること。			中心架台に燃料体が1体のみ装荷されている場合の結果を追加します。	2/22 補正申請書に記載	
154		添付10	MCNPの計算でヒストリー数をどのように設定しているのかを説明・追記してください。			まとめ資料の添付八の「1.6 中心架台の反応度」の項目内に記載、まとめ資料10にヒストリー数を記載	2/2 まとめ資料	

京都大学臨界実験装置（KUCA）

設置変更承認申請について

【設置許可基準規則との整合性】

第四条（地震による損傷の防止）	1
第十二条（安全施設）	6
第十三条（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）	11
第十五条（炉心等）	13
第十六条（燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設）	19
第十七条（計測制御系統施設）	30
第十八条（安全保護回路）	34
第十九条（反応度制御系統）	37
第二十条（原子炉停止系統）	39
第二十四条（工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護）	43
第二十五条（放射線からの放射線業務従事者の防護）	50
第二十九条（実験設備等）	55

【トリウム貯蔵に係る設置許可基準規則との整合性】

第四条（地震による損傷の防止）	62
第八条（火災による損傷の防止）	64
第十二条（安全施設）	65
第十六条（燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設）	68
第二十五条（放射線からの放射線業務従事者の防護）	75

京都大学複合原子力科学研究所

【設置許可基準規則との整合性】

第四条 地震による損傷の防止

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(地震による損傷の防止)

第四条 試験研究用等原子炉施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。

2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある試験研究用等原子炉施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。

3 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

4 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項及び第2項である。

第3項及び第4項については耐震重要施設が存在しないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項、第2項については、燃料要素の追加に伴い、固体減速炉心では燃料要素が挿入されるさや管、軽水減速炉心では燃料要素が挿入される標準型燃料板支持フレームの耐震性について検討した結果、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

(1) 対象

本申請の対象は低濃縮ウランの燃料要素（固体減速炉心用のウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料（角板）および軽水減速炉心用のウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料（標準型燃料板））と固体減速炉心では燃料要素が挿入されるさや管、軽水減速炉心では燃料要素が挿入される標準型燃料板支持フレームである。

なお、それぞれの燃料要素自体はさや管や支持フレームに挿入されるもので、耐震部材ではなく、燃料要素に作用する地震力はさや管や支持フレームが負担することになる。従って、燃料要素の重量を考慮した上でさや管や支持フレームの耐震強度を評価することによって燃料要素自体の耐震安全性も確保できる。

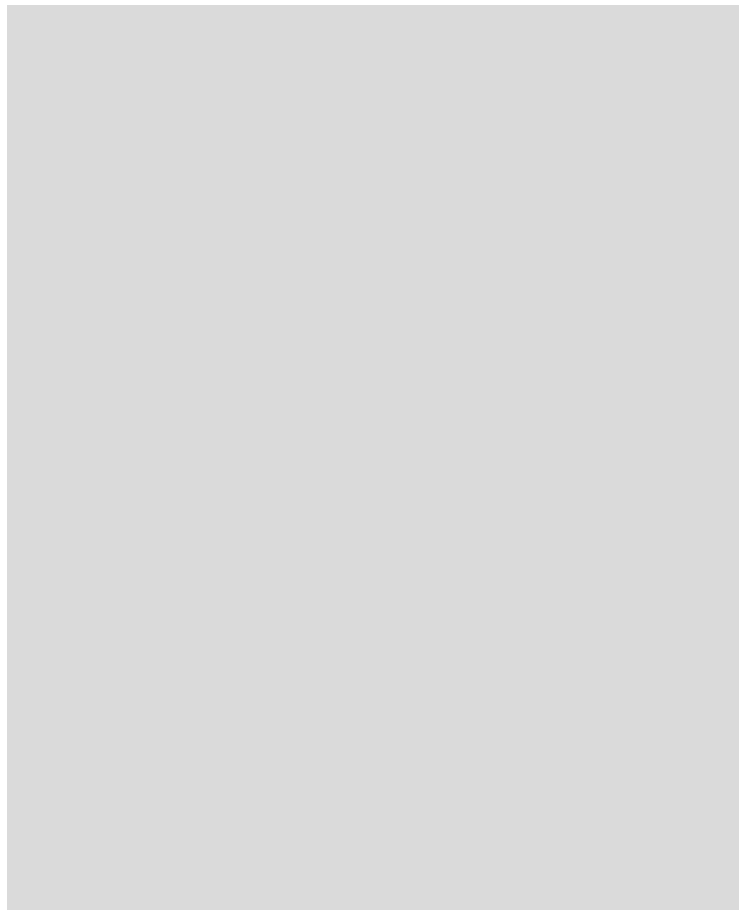


図1 固体減速架台の燃料さや管の概略図（単位：mm）
（左図：鉛直断面、右図：a-a'断面）

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

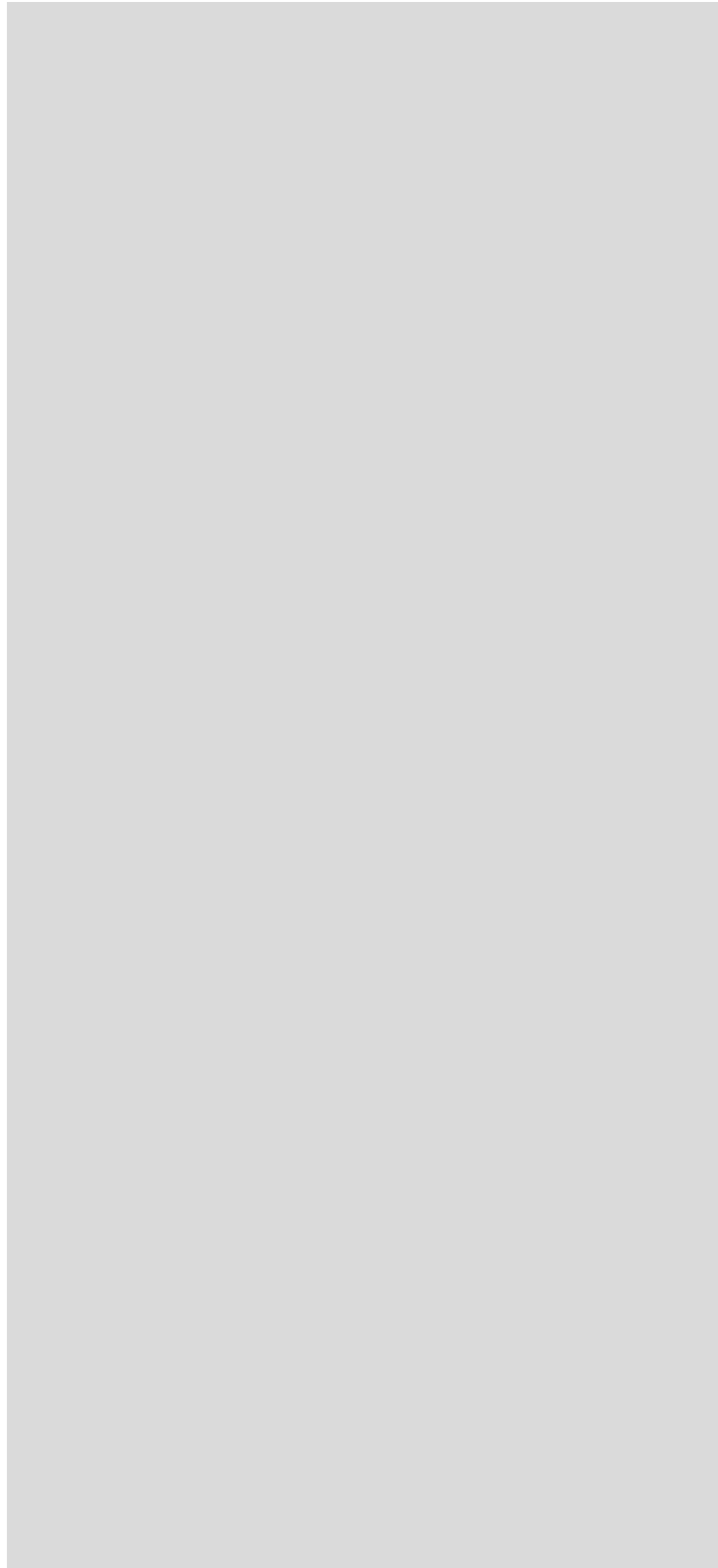


図2 軽水減速架台の燃料支持フレームの概略図
(上図：鉛直断面、下図：a-a'断面)

(2) さや管及び支持フレームの耐震性

1) 評価方針

固体減速架台で使用する燃料さや管（図 1）及び軽水減速炉心で使用する燃料支持フレーム（図 2）の耐震安全性は新規規制基準対応時の設工認申請書（（その 2）、平成 29 年 4 月 25 日付け承認（原規規発第 1704255 号））において確認されている。ここではその評価結果に基づき、燃料の低濃縮化によっても、燃料さや管及び燃料支持フレームの耐震安全性が確保されることを示す。

2) 燃料さや管及び燃料支持フレームに要求される地震力

燃料さや管及び燃料支持フレームは耐震重要度が C クラスに分類されており、地震力は設計震度(水平)を 0.24 として求められる。

3) 燃料さや管及び燃料支持フレームの耐震安全性の評価方法と結果

3)-1 耐震評価方法

燃料さや管及び燃料支持フレームの耐震安全性は、図 1 や図 2 に示したようにそれぞれ燃料板がさや管に収納された状態及び側板によって支持された状態において、図 3 に示すような燃料を含む全体の重量を 1 質点に集中させた単純なモデルによって、固定部の強度を確認している。従って、低濃縮化に伴う耐震安全性の検討においては設計震度とともに、燃料部の重量の影響を受けることになる。以下では燃料さや管及び燃料支持フレームについて、この観点から低濃縮化による耐震安全性を検討する。

3)-2 燃料さや管（固体減速架台用）の評価結果

今回の申請で追加する U-Mo 燃料板（厚さ []、重量 []、平均密度 []）は従来の U-Al 燃料板（厚さ []、重量 []、密度 []）に比べて 1 枚あたりの重量は増加している。一方、設工認申請では固体減速架台用の燃料さや管（角管部の材質 A-6063S）の耐震評価では U-Mo 燃料板より密度の大きな天然ウラン金属板（密度約 18.9g/cm³）を燃料領域（高さ約 40cm）にすべて挿入した場合の評価を行っている。燃料さや管に収納される燃料、ポリエチレンに燃料さや管の重量を積算したそれぞれの全重量は、U-Mo 燃料板の場合で []、U-Al 燃料板の場合で []、天然ウラン金属板の場合で [] となり、今回の低濃縮化による重量は設工認で想定した重量を下回っており、低濃縮化による燃料さや管の耐震安全性への影響はない。

3)-3 燃料支持フレーム（軽水減速架台用）の評価結果

従来の高濃縮 U-Al 燃料板の重量は 1 枚当たり約 [] であったのに対して今回の申請で追加する低濃縮ウランシリサイド燃料板の重量は 1 枚当たり約 [] と []

増加している。燃料板は [] で、燃料支持フレームの側板の重量は [] であり、高濃縮の場合の燃料体（燃料板と燃料支持フレーム）の重量は []、低濃縮の場合の重量は [] であり、燃料体としては [] 程度重量が増加する。

燃料支持フレーム（材質 A-6061P）については、平成 20 年に同じ形状で側板の一部に細径検出器用の溝を付けたものを製作している（「標準型燃料要素支持フレーム側板の製作」設工認申請書、平成 20 年 9 月 30 日付け承認（20 学文科科第 597 号））。その際の耐震計算では水平震度 0.72 とし、計算結果としての安全率（材料の許容値応力に対する発生応力の比）が 6 倍以上あることが示されている。従って、耐震重要度 C クラスに本来求められる水平震度 0.24 に対して保守的な地震力（3 倍）を想定して設計されており、またその安全率も考慮すると、今回低濃縮燃料を用いることにより燃料体の重量が [] 増加したとしても低濃縮化による燃料支持フレームの耐震安全性への影響はない。

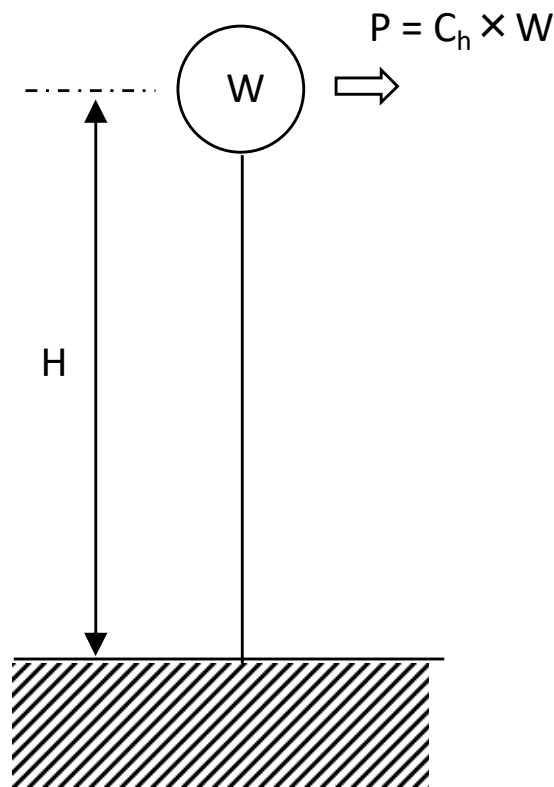


図3 耐震評価モデル（ C_h ：水平震度）

■

第十二条 安全施設

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(安全施設)

第十二条 安全施設は、その安全機能の重要度に応じて、安全機能が確保されたものでなければならない。

2 安全機能を有する系統のうち、安全機能の重要度が特に高い安全機能を有するものは、当該系統を構成する機械又は器具の単一故障（単一の原因によって一つの機械又は器具が所定の安全機能を失うこと（従属要因による多重故障を含む。）をいう。以下同じ。）が発生した場合であって、外部電源が利用できない場合においても機能できるよう、当該系統を構成する機械又は器具の機能、構造及び動作原理を考慮して、多重性又は多様性を確保し、及び独立性を確保するものでなければならない。

3 安全施設は、設計基準事故時及び設計基準事故に至るまでの間に想定される全ての環境条件において、その機能を発揮することができるものでなければならない。

4 安全施設は、その健全性及び能力を確認するため、その安全機能の重要度に応じ、試験研究用等原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができるものでなければならない。

5 安全施設は、蒸気タービン、ポンプその他の機器又は配管の損壊に伴う飛散物により、安全性を損なわないものでなければならない。

6 安全施設は、二以上の試験研究用等原子炉施設と共用し、又は相互に接続する場合には、試験研究用等原子炉施設の安全性を損なわないものでなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第3項及び第4項である。

第1項、第2項、第5項及び第6項は、本設置変更承認申請によって燃料要素が追加されることとは関係がないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

表1 本原子炉施設の構築物、系統及び機器の安全上の機能別重要度分類 (PS)

分類	定義	安全機能	構築物、系統及び機器 ^a
PS-1	その損傷又は故障により発生する事象によって、燃料の多量の破損を引き起こすおそれがあり敷地外への著しい放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器	—	(該当なし)
PS-2	その損傷又は故障により発生する事象によって、燃料の多量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器	—	(該当なし)
PS-3	1) 異常状態の起回事象となるものであって PS-1 及び PS-2 以外の構築物、系統及び機器	過剰な反応度の印加防止	制御棒駆動装置、(A)(B)中心架台駆動装置
		炉心の形成	架台支持構造、炉心格子板
			(C)炉心タンク
			燃料要素、(A)(B)さや管、(C)標準型燃料板支持フレーム
		放射性物質の貯蔵	バードケージ、燃料貯蔵棚
			廃液タンク、第1固形廃棄物倉庫、第2固形廃棄物倉庫
	プラント計測・制御	線型出力計、安全出力計、対数出力炉周期計、対数計数率炉周期計 炉室ガンマ線エリアモニタ	
その他	パイルオシレータ、(C)重水タンク		
	2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転に支障のない程度に低く抑える構築物、系統及び機器	—	(該当なし)

a 機器等の名称の頭に(A),(B),(C)とあるのはそれぞれの架台特有の機器等であることを示す。

表2 本原子炉施設の構築物、系統及び機器の安全上の機能別重要度分類 (MS)

分類	定義	安全機能	構築物、系統及び機器 ^a
MS-1	1) 異常状態発生時に、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器	—	(該当なし)
	2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器	—	(該当なし)
MS-2	1) PS-2の構築物、系統及び機器の損傷又は故障が及ぼす敷地周辺公衆への放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統及び機器	—	(該当なし)
	2) 異常状態への対応上特に重要な構築物、系統及び機器	原子炉の緊急停止及び未臨界維持	(A)(B)中心架台駆動装置 ⁺ 、(C)ダンプ弁 ⁺ 、制御棒案内管 ⁺
		工学的安全設備及び原子炉停止系への作動信号の発生	原子炉停止回路 ⁺
3) 安全上特に重要なその他の構築物、系統及び機器	—	(該当なし)	
MS-3	1) 運転時の異常な過渡変化があってもMS-1、MS-2とあいまって、事象を緩和する構築物、系統及び機器	原子炉の緊急停止及び未臨界維持	制御棒、制御棒駆動装置
		放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減	原子炉建屋、燃料要素
		工学的安全設備及び原子炉停止系への作動信号の発生	制御棒電磁石電源
			線型出力計、安全出力計、対数出力炉周期計、制御卓
		安全上重要な関連機能	非常用電源設備、炉心温度計
	その他	消火設備 (ハロン)	
	2) 異常状態への対応上必要な構築物、系統及び機器	事故時のプラント状態の把握、緊急時対策上重要なもの	ガスモニタ、ダストモニタ、炉室ガンマ線モニタ、燃料室ガンマ線モニタ
通信連絡設備			
制御室外安全停止		非常警報鈕 (中央管理室)	

a 機器等の名称の頭に(A),(B),(C)とあるのはそれぞれの架台特有の機器等であることを示す。

b +は信頼性に対する重要安全施設を示す。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第3項について、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素を用いた炉心の通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故において、その間に安全施設に影響を与えうると想定される燃料要素の温度上昇を検討した結果、安全施設の機能に影響を与えるものではなく、適合性が確認できるものである。

第4項について、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素は、PS及びMSに該当する（表1及び表2参照）。現有燃料要素と同様に作業員が手作業で取り扱うことから、停止中に目視による確認や検査を行うことで容易にその健全性を確認することができることから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第3項について

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素を用いた炉心の通常運転時、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、その間に安全施設に影響を与えると想定される環境条件としては、燃料要素の温度上昇がある。この影響については、本設置変更承認申請で追加する燃料要素の温度上昇が最大でどの程度であるかを調べることによって確認できる。2021年8月31日の「核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合(以下、審査会合という)」資料1-3の解析から、燃料要素の温度上昇は最大で49.3℃であり、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、安全施設はその間にもその機能を発揮することができる。また、バードケージ及び燃料貯蔵棚に対して影響を与えると想定される環境条件としては、収納中の燃料要素からの放射線がある。この影響については、バードケージ及び燃料貯蔵棚が鋼材を用いて製作されていることから、それらの機能は発揮できる。

参考資料

- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料1-3

■

第十三条 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

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(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)

第十三条 試験研究用等原子炉施設は、次に掲げるものでなければならない。

- 一 運転時の異常な過渡変化時において、設計基準事故に至ることなく、試験研究用等原子炉施設を通常運転時の状態に移行することができるものとする。
- 二 設計基準事故時において次に掲げるものであること。
 - イ 炉心の著しい損傷が発生するおそれがないものであり、かつ、炉心を十分に冷却できるものであること。
 - ロ 設計基準事故により当該設計基準事故以外の設計基準事故に至るおそれがある異常を生じないものであること。
 - ハ 試験研究用等原子炉施設が工場等周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであること。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第一号及び第1項第二号ハである。

第1項第二号イは、設計基準事故で炉心の著しい損傷が発生するおそれがある事象として反応度の異常な投入があり、その事象として KUCA では燃料の誤装荷が考えられる。燃料の装荷作業は、KUCA 炉心配置変更計画指令書及び燃料集合体等の炉心配置変更計画（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第66条、京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安指示書4.2.2.5）、燃料集合体の組立て及び解体（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第67条）、燃料集合体の挿入及び取出し（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第68条）及び、燃料要素及び燃料集合体の取扱い（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安指示書4.2.3）に従って実施することが規定され、その規定に基づいて作業を行っているため燃料集合体の誤装荷が発生する可能性は極めて低く、設計基準事故に含めないことが適当であると考えられるため、第1項第二号イは確認を要する対象ではない。第1項第二号ロは、複数想定される KUCA の設計基準事故が互いに独立な事象であって、1つが発生することにより、他が誘発されるという因果関係にないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第一号について、本設置変更承認申請書にて追加する燃料要素を用いた炉心について、運転時の異常な過渡変化時において設計基準事故に至ることなく通常運転時の状態に移行することから、適合性が確認できるものである。

第1項第二号ハについて、本設置変更承認申請書にて追加する燃料要素を用いた炉心について、設計基準事故時に周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないことから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第1項第一号について

添付書類10の解析により、運転時の異常な過渡変化時において最も炉心温度上昇が大きくなる場合でも49.3℃であった（2021年8月31日付、審査会合資料1-3）。よって、燃料及び被覆材の温度が許容範囲内（400℃以下）となり、燃料被覆材は機械的には損傷することなく、通常運転時の状態に移行することができる。

参照資料

- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料1-3

2.2 第1項第二号ハについて

添付書類10の解析により、燃料集合体の作成、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の周辺公衆に対する放射線被ばくについて評価したところ、被ばく量は最大でも0.19 μ Svであり基準値の5mSvを十分下回っていた（2021年8月31日付、審査会合資料1-3）。よって、周辺の公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えることはない。

参照資料

- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料1-3

■

第十五条 炉心等

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(炉心等)

第十五条 試験研究用等原子炉施設は、原子炉固有の出力抑制特性を有するものでなければならない。ただし、臨界実験装置に係る試験研究用等原子炉施設であって当該試験研究用等原子炉施設の安全を確保する上で支障がないものは、この限りでない。

2 試験研究用等原子炉施設は、試験研究用等原子炉の反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有するものでなければならない。

3 炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に試験研究用等原子炉の運転に支障が生ずる場合において、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燃料の許容設計限界を超えないものでなければならない。

4 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、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、試験研究用等原子炉を安全に停止できるものでなければならない。

5 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。

一 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における試験研究用等原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする事。

二 輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとする事。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項、第2項、第3項、第4項及び第5項である。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項について、本設置変更承認申請によって追加する燃料要素を用いた複数の代表炉心において温度係数が正となるものについても、安全を確保する上で支障がないことから、適合性が確認できるものである。

第2項について、本設置変更承認申請によって追加する燃料要素を用いた場合においても、当該原子炉施設は、反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる

能力を有することから、適合性が確認できるものである。

第3項について、本設置変更承認申請によって追加する燃料要素を用いた炉心において通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時の運転に支障が生ずる場合について、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燃料及び被覆材の温度が許容範囲内となることから、適合性が確認できるものである。

第4項について、本設置変更承認申請によって追加する燃料要素を用いた炉心において通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時について、燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物がそれらの機能を維持し、原子炉を安全に停止できることから、適合性が確認できるものである。

第5項について、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素を含む燃料体において自重、付加荷重及びその他通常運転中に加わる可能性のある負荷（固体減速炉心においては中心架台上昇時の加速度、軽水減速炉心においては水圧）に対して十分な耐力を有していることから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第1項について

添付書類 8 の解析より、軽水減速炉心のうち 2 分割炉心の一部（C45G(6H₂O)4 列、C45G(5H₂O)5 列、C45G(6H₂O)5 列、C45G(7H₂O)5 列）で温度係数が正となるものがあることが確認された（2020 年 11 月 5 日付、第 381 回 審査会合資料 2-1）。添付書類 10 の解析により、固体減速炉心及び温度係数が正となるものを含む軽水減速炉心に関して、運転時の異常な過渡変化の発生時において、炉心温度上昇が最も大きくなる場合でも 49.3℃であり、安全を確保する上で支障がない。

参照資料

- ・ 2020 年 11 月 5 日 第 381 回 審査会合資料 2-1
- ・ 2021 年 8 月 31 日 第 412 回 審査会合資料 1-3

2.2 第2項について

KUCA の固体減速炉心では、制御棒及び中心架台が独立した 2 系統の原子炉停止系統を構成する。炉心の過剰反応度及びそれぞれの原子炉停止系統の反応度抑制効果は、以下のように制限しているため、一方の原子炉停止系統が動作しない状況であっても動作するもう一方のみで、原子炉を 0.65%Δk/k より深い未臨界に移行し、その状態を維持できる。

- ・ 炉心の過剰反応度：0.35%Δk/k 以下
- ・ 制御棒の反応度抑制効果：過剰反応度+1%Δk/k 以上
- ・ 中心架台の反応度抑制効果：1%Δk/k 以上

一方、KUCA の軽水減速炉心では、制御棒及びダンプ弁が独立した 2 系統の原子炉停止系統を構成する。炉心の過剰反応度及びそれぞれの原子炉停止系統の反応度抑制効果は、以下のように制限しているため、一方の原子炉停止系統が動作しない状況であっても動作するもう一方のみで、原子炉を 0.50%Δk/k より深い未臨界に移行し、その状態を維持できる。

- ・ 炉心の過剰反応度：0.50%Δk/k 以下
- ・ 制御棒の反応度抑制効果：過剰反応度+1%Δk/k 以上
- ・ 中心架台の反応度抑制効果：1%Δk/k 以上

従って、本号の適合性のうち、通常運転時については、本設置変更承認申請で追加する燃料要素を用いる場合について、これらの制限を満たす炉心が成立するかどうかを調べることによって確認できる。これまでの解析において、通常運転時、固体減速炉心及び軽水減

速炉心の代表炉心がこれらの制限を満たすことを確認した（2020年11月5日付、審査会合資料 2-1）。さらに、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も原子炉の反応度を制御することができる能力を有することを確認した（2021年8月31日付、審査会合資料 1-3）。

参照資料

- ・ 2020年11月5日 第381回 審査会合資料 2-1
- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3

2.3 第3項について

添付書類 10 の解析により、固体減速炉心及び軽水減速炉心に関して、最も炉心温度上昇が大きくなる場合でも 49.3℃であった（2021年8月31日付、審査会合資料 1-3）。以上より、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時の運転に支障が生ずる場合において、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燃料及び被覆材の温度が許容範囲内（400℃以下）となる。

参照資料

- ・ 2020年11月5日 第381回 審査会合資料 2-1
- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3

2.4 第4項について

添付書類 10 の解析により、固体減速炉心及び軽水減速炉心に関して、最も炉心温度上昇が最大でも 49.3℃であり、また原子炉を安全に停止できることを確認している（2021年8月31日付、審査会合資料 1-3）。以上より、本設置変更承認申請によって追加する燃料要素を用いた炉心について、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、燃料体（最高温度 400℃）、減速材及び反射材（ポリエチレン又は軽水、最高温度 100℃）並びに炉心構造材（アルミニウム、最高温度 400℃）がそれらの機能を維持し、原子炉を安全に停止できる。

参照資料

- ・ 2020年11月5日 第381回 審査会合資料 2-1
- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3

2.5 第5項について

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素のうち、固体減速炉心用の角板は、アルミニウム製の額縁の内部に U-Mo 分散型燃料のコンパクトを入れ、その上にアルミニウム製の板を置いて周囲を溶接する構造である（図1、図2）。また角板は燃料さや管に収納されて炉心に設置されるため、燃料板自体の耐震強度は必要なく、角板を積み重ねたときの圧縮荷重に対する強度を確認する。

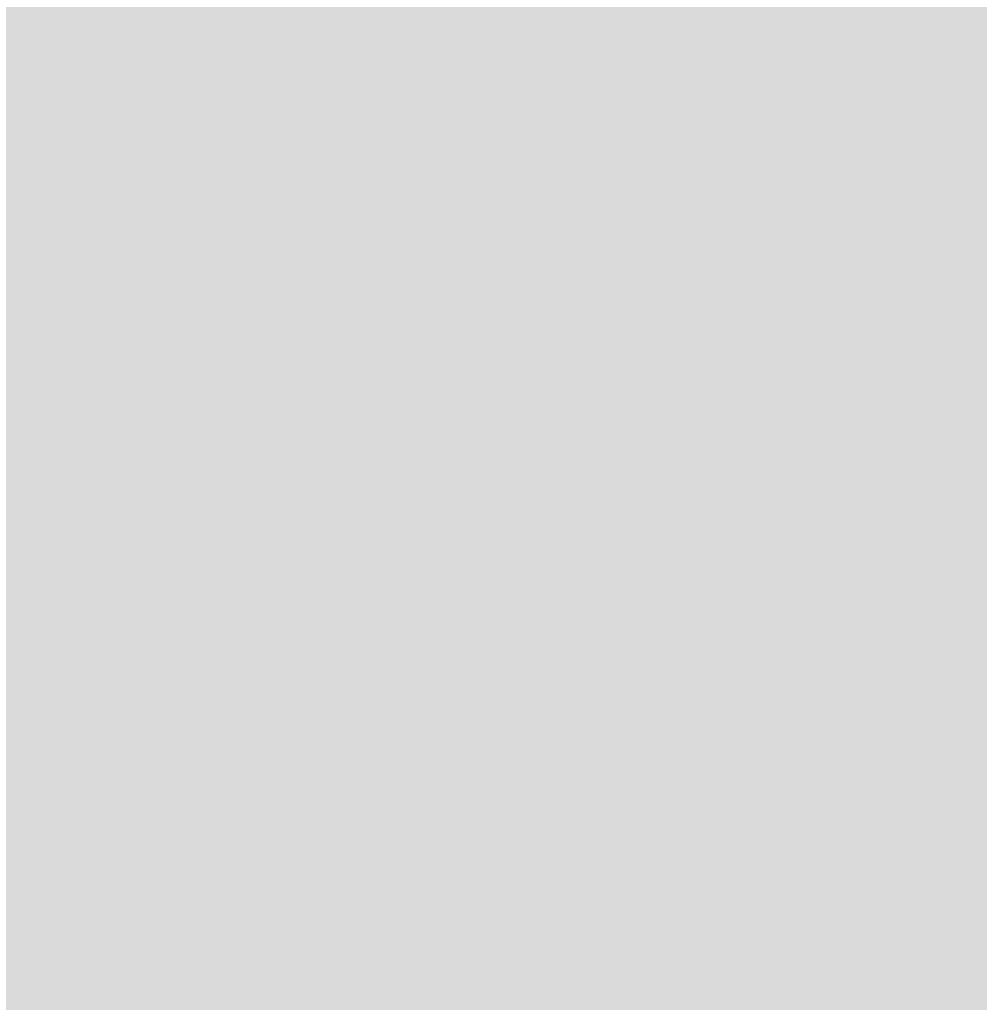


図2 燃料角板構造（断面図）（単位：mm）

荷重条件としては、燃料さや管の燃料領域（下部ポリエチレン反射体の上）に燃料板があり、その上部に KUCA 設置変更承認申請書に記載のある物質の中で最も密度の大きなウラン金属が高さ 40cm、その上部に 50cm のポリエチレン反射体が挿入されている場合を考える。また圧縮荷重は燃料板周囲の幅約 2mm のアルミ枠（図2、P の矢印の箇所）に作用すると考える。

圧縮荷重：

[Redacted]

[Redacted]

圧縮応力：

[Redacted]

[Redacted]

一方、アルミニウム合金AG3NE相当であるA5052は引張強さ175 N/mm²以上、耐力(0.2%) 65 N/mm²以上 (JIS H4000 A5052P-O 板) であり、圧縮強度も同じと考えれば燃料板上部からの圧縮荷重に対して燃料角板は十分安全である。

次に、50cm の上部ポリエチレン反射体、約 50cm の燃料領域、50cm の上部ポリエチレン反射体が装填された燃料集合体を考える。そのとき、燃料領域は [Redacted] 燃料要素が [Redacted] で構成されるとすると、上部及び下部反射体を含む合計荷重は、

$$+ 5.08^2 (\text{ポリエチレン面積}) \times 50 (\text{ポリエチレン高さ}) \times 0.96 (\text{ポリエチレン密度}) [Redacted]$$

となる。これが燃料集合体を構成する部材のうち最も脆いポリエチレン板に圧縮荷重として作用したとすると、圧縮応力は、

$$7.17 \text{ kg} / 50.8^2 = 0.00278 \text{ kgf/mm}^2 = 0.027 \text{ MPa} \quad (1 \text{ kgf/mm}^2 = 9.8 \times 10^6 \text{ Pa})$$

となる。機械工学便覧によると、ポリエチレンの圧縮強さは 19~25MPa であるので十分な耐荷重性を有する。

さらに、燃料角板が中心架台で使用された場合、中心架台の上昇の際の始動時と停止時には加速度を受ける可能性があるが、中心架台の上昇速度は最高でも 3.3cm/s であり、無視できる。以上より、燃料角板は十分な耐力を有しているとともに、輸送又は取扱は、作業員による手作業であるため、著しい変形を生じるおそれはない。

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素のうち、標準型燃料板については現有のものと同じく [Redacted] のアルミ板で被覆される。長板は、水中で使用されるため、通常運転中に加わる可能性のある負荷として、水圧を受けるが、炉心タンクの深さは高々2m しかないため、無視できる。以上より、標準型燃料板は十分な耐力を有しているとともに、輸送又は取扱は、作業員による手作業であるため、著しい変形を生じるおそれはない。

参照資料

- ・ 2019年9月2日 第299回 審査会合資料2
- ・ 機械工学便覧, 日本機械学会, 2008

■

第十六条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設)

第十六条 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」と総称する。）の取扱施設を設けなければならない。

- 一 燃料体等を取り扱う能力を有するものとする。
- 二 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。
- 三 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものとする。
- 四 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。
- 五 燃料体等の取扱中における燃料体等の落下を防止できるものとする。

2 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、燃料体等の貯蔵施設を設けなければならない。

- 一 燃料体等の貯蔵施設は、次に掲げるものであること。
 - イ 燃料体等を貯蔵することができる容量を有するものとする。
 - ロ 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。
- 二 使用済燃料その他高放射性の燃料体の貯蔵施設にあっては、前号に掲げるもののほか、次に掲げるものであること。ただし、使用済燃料中の原子核分裂生成物の量が微量な場合その他の放射線の遮蔽及び崩壊熱の除去のための設備を要しない場合については、この限りでない。
 - イ 使用済燃料その他高放射性の燃料体からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。
 - ロ 貯蔵された使用済燃料その他高放射性の燃料体が崩壊熱により溶融しないものとする。
 - ハ 使用済燃料その他高放射性の燃料体の被覆材が著しく腐食するおそれがある場合は、これを防止できるものとする。
 - ニ 放射線の遮蔽及び崩壊熱の除去に水を使用する場合にあっては、当該貯蔵施設内における冷却水の水位を測定でき、かつ、その異常を検知できるものとする。

3 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、燃料取扱場所の放射線量及び温度を測定できる設備を設けなければならない。

- 一 燃料取扱場所の放射線量の異常を検知し、及び警報を発することができるものとする。

二	崩壊熱を除去する機能の喪失を検知する必要がある場合には、燃料取扱場所の温度の異常を検知し、及び警報を発することができるものとする。
---	---

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第二号、第1項第三号、第1項第四号及び第2項第一号である。

第1項第一号及び第1項第五号は、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素の要素当たりの重量増加が現有の燃料要素と比べてごくわずかであり、形状も固体減速炉心用燃料角板の厚みが [] 程度であることから、従来どおり全て作業員の手作業で確実に把持して取り扱うこととするため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。第2項第二号及び第3項は、当該原子炉施設が低出力炉であり、放射線の遮蔽及び崩壊熱の除去のための設備を要しないため、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第二号について、現有燃料要素と追加される燃料要素とでは、1枚当たりのU235量が異なっているが、組立解体場所における燃料要素の制限（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安指示書4.2.3.4）、燃料机上において仮置きする燃料要素の制限（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第62条）及び組立解体場所から炉心への移動時の燃料要素の制限（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第68条）の変更により適合性が確保されることから、設計方針の変更は不要である。

第1項第三号、第1項第四号について、第1項第二号の適合性が確保されることにより、取扱施設が臨界に達するおそれがなく、放射線の遮蔽及び崩壊熱の除去のための設備を要しないため、適合性が確保されることから、設計方針の変更は不要である。

第2項第一号イについて、貯蔵施設に燃料要素を貯蔵することができる容量を検討した結果、適合性が確認できるものである。

第2項第一号ロについて、貯蔵施設における燃料要素の臨界計算を実施し、検討した結果、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第2項第一号イについて

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素は、現有燃料要素と同様、浸水のおそれのない臨界集合体棟の [] の燃料室を設け、 [] の棚をもつ貯蔵棚（最大で [] まで拡張することが可能）が設置されており、これにバードケージに収納して貯蔵する（図1、図2参照）。

燃料棚は、KUCA建設時に製作されたもので、昭和48年9月の設工認申請書に、以下のように記載されている。

形状：鉄骨製棚

材質：JIS G3101 SS41

数量：固体用棚 []、軽水用棚 []

詳細な寸法については、図3及び図4に示す（固体用棚は1個に1ユニットを使用、軽水用棚は1個に2ユニットを使用）。

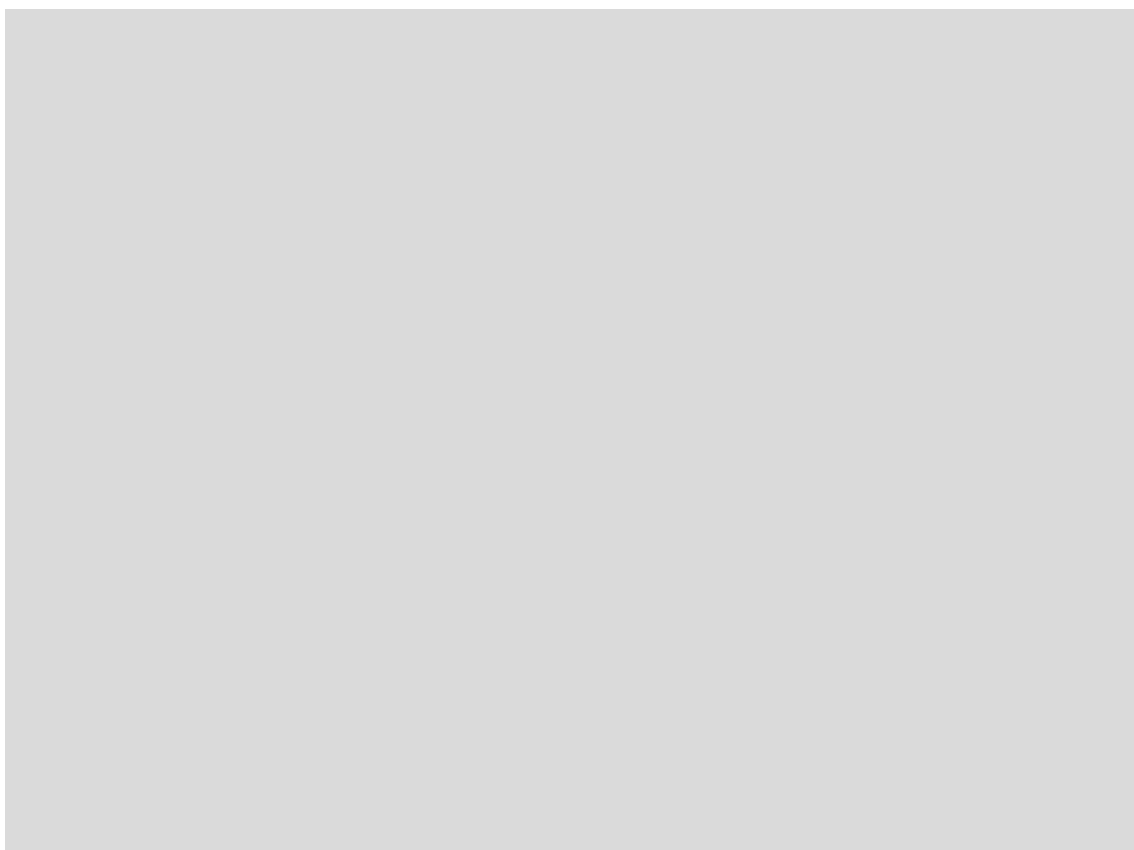


図1 臨界集合体棟 2階平面図

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

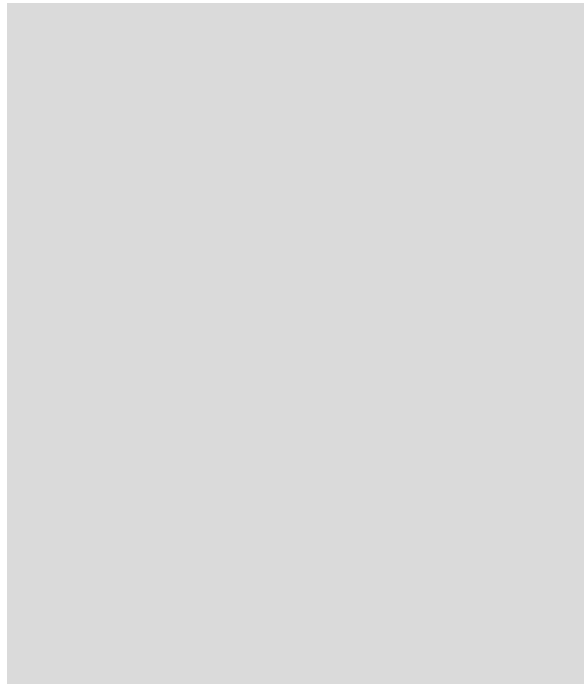
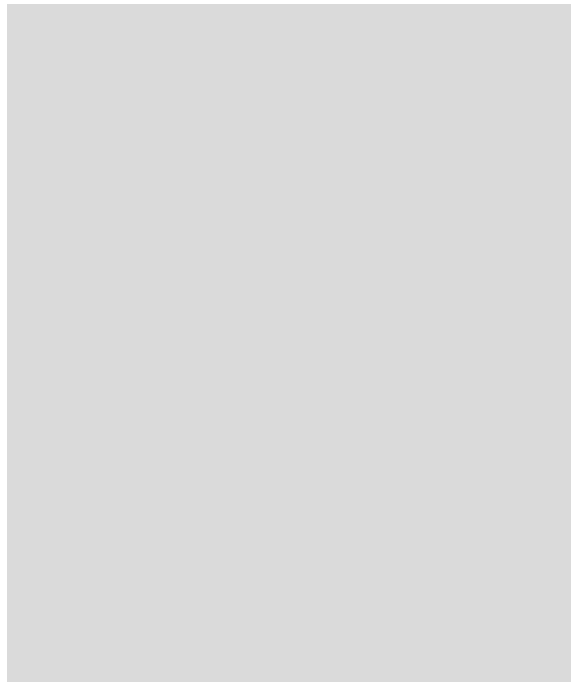


図2 燃料貯蔵棚の概略図



記号	寸法(mm)
A(全高)	■
B(奥行き)	■
C(1段有効幅)	■
D(1段有効高さ)	■

図3 固体減速炉心用燃料貯蔵棚



記号	寸法(mm)
A(全高)	■
B(奥行き)	■
C(1段有効幅)	■
D(1段有効高さ)	■

図4 軽水減速炉心用燃料貯蔵棚

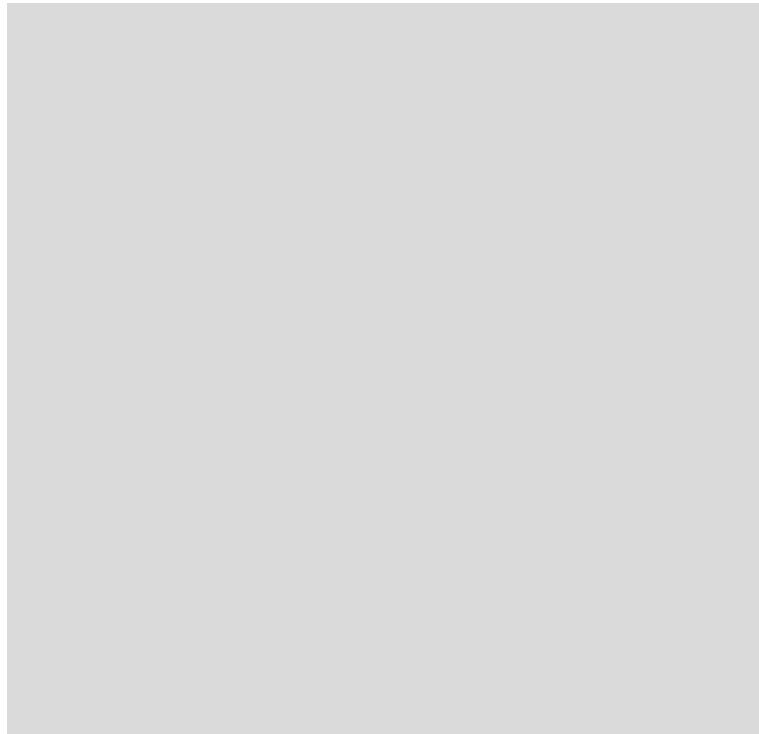
使用前検査では、外観検査（目視）、寸法検査（測定）、据付検査（目視＋水平加速度 0.3g に相当する横向き荷重をかけてたわみ量を測定）を行った。燃料貯蔵棚は、鉄製の枠組を組み合わせて作られており、燃料室床面の埋め込みボルトによって固定され、側壁にも埋め込みボルトによって固定されている。各ユニットの前面方向、横方向の枠にはバーが設置されており、バードケージが前面から落ちたり横ユニットに移動することを防ぐ構造となっている。

図5 にバードケージの概略図を、表1 にバードケージの仕様を示す。バードケージの材質は厚さ ■ ■ の SS41 の鋼板である（設工認申請書には記載無し）。

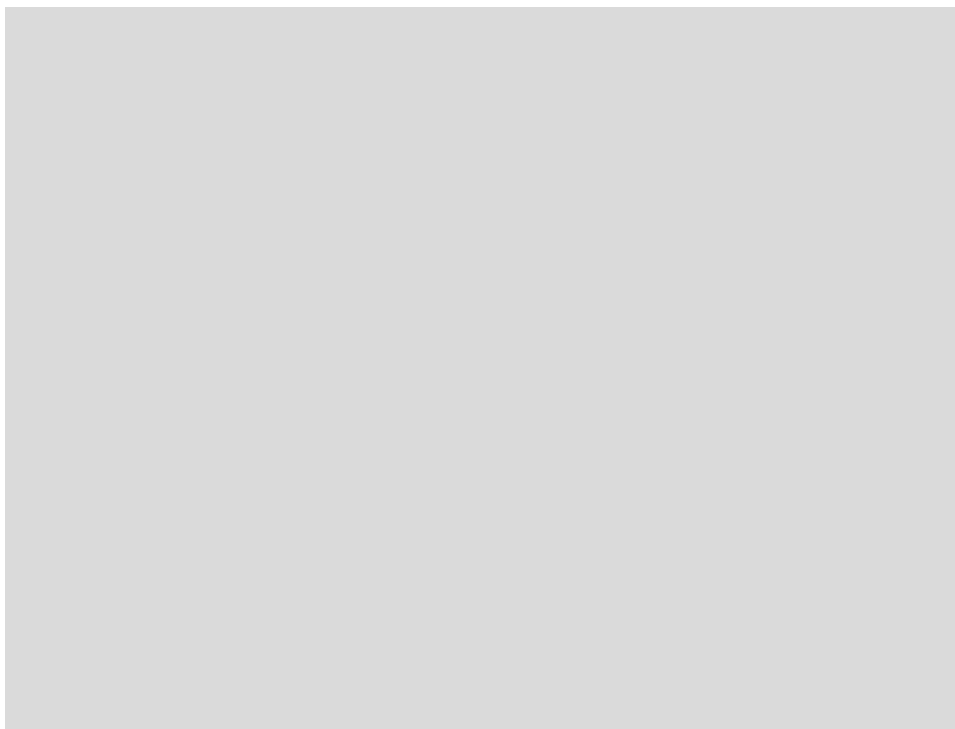
表1 バードケージの仕様

	固体減速架台用	軽水減速架台用
サイズ (幅×高さ×奥行)	■ ■ ■	■ ■ ■
材料	炭素鋼	
収納燃料板枚数 (制限値) HEU	■ ■	■ ■ ■ ■
収納燃料板枚数 (制限値) LEU	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



(a) 固体減速炉心用燃料板のバードケージ



(b) 軽水減速炉心用燃料板のバードケージ

図5 バードケージ概念図 (単位: mm)

(数字はバードケージの外寸、内部ボックスは燃料板の入るボックスの内寸)

固体減速炉心用の現有及び追加燃料要素は、U235量でそれぞれ [] 及び [] の計 [] である。ユニット当たりの最大量は [] であるので、 [] が必要となる。

一方、軽水減速炉心用の現有及び追加燃料要素は、U235量でそれぞれ [] 及び [] の計 [] である。従って、 [] のバードケースが必要となる。

以上より、すべての燃料要素を収納するためには、合計で [] が必要であるが、燃料室に既設の貯蔵棚は [] あるため、十分な貯蔵容量を有する。

なお、現在、固体減速炉心用のバードケース（図5(a)参照）は、 [] 所有している（1基は1ユニットに相当）。一方、軽水減速炉心用のバードケース（図5(b)参照）は、 [] 所有している（1基は2ユニットに相当）。不足する場合は、必要に応じて製作する。

2.2 第2項第一号ロについて

バードケースを収納する燃料棚は、バードケース毎に十分な隔離距離を設け、臨界に達するおそれのない配置となっている。また、バードケースは、現有燃料要素を物理的に収納可能な最大枚数まで燃料板を収納し、かつ、その状態のバードケースが完全に水没した状態で三次元的に無限に隣接した場合であっても、臨界に達するおそれはない設計となっている。

本設置変更承認申請で追加する燃料要素について、バードケースに最大数収納した状態で周囲を軽水で満たしてそれらを隣接させ、バードケース内部ボックスの周囲の鋼板のみを考慮し（原子個数密度： $\text{Fe } 8.49 \times 10^{22} \text{ (1/cm}^3\text{)}$ ）、反射境界条件を用いた場合の実効増倍率をMCNP6 (version 1.0) + JENDL-4.0により計算した。その結果は、以下のとおりである。

固体減速炉心用燃料要素： 0.46645 ± 0.00034

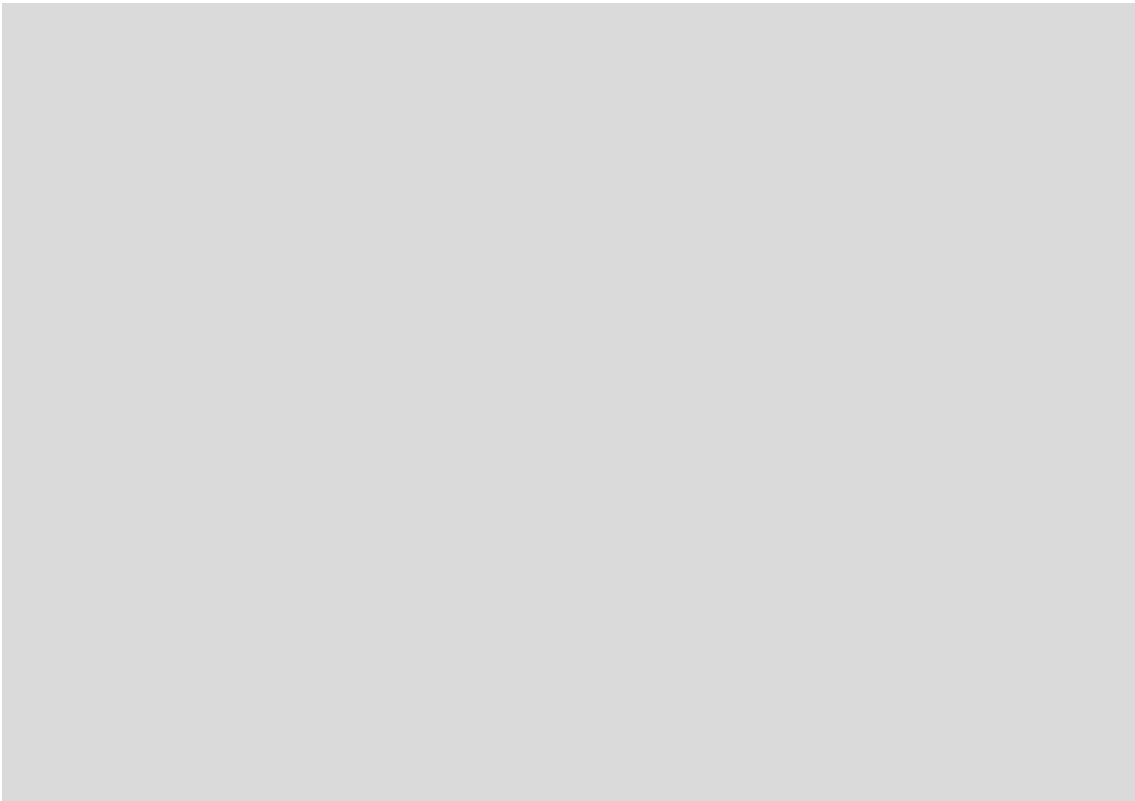
軽水減速炉心用燃料要素： 0.52072 ± 0.00036

実効増倍率は、0.95より十分に小さな値となっており、本バードケース及びそれを収納する燃料棚は、臨界に達するおそれのない設計となっている。なお、固体及び軽水減速炉心用燃料要素の概略図を図6に示す。また、計算体系の概略図を図7に示す。固体減速炉心用の計算体系は [] の水の中心に、燃料角板 [] を積み重ねたスタック [] を束ねて設置したものとなっている。一方、軽水減速炉心用の計算体系は [] の水の中心に標準型燃料板 [] を並べたものを [] 積み重ねたものとなっている。さらに、表2～表5に燃料ミート部及び被覆の原子個数密度を示す。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



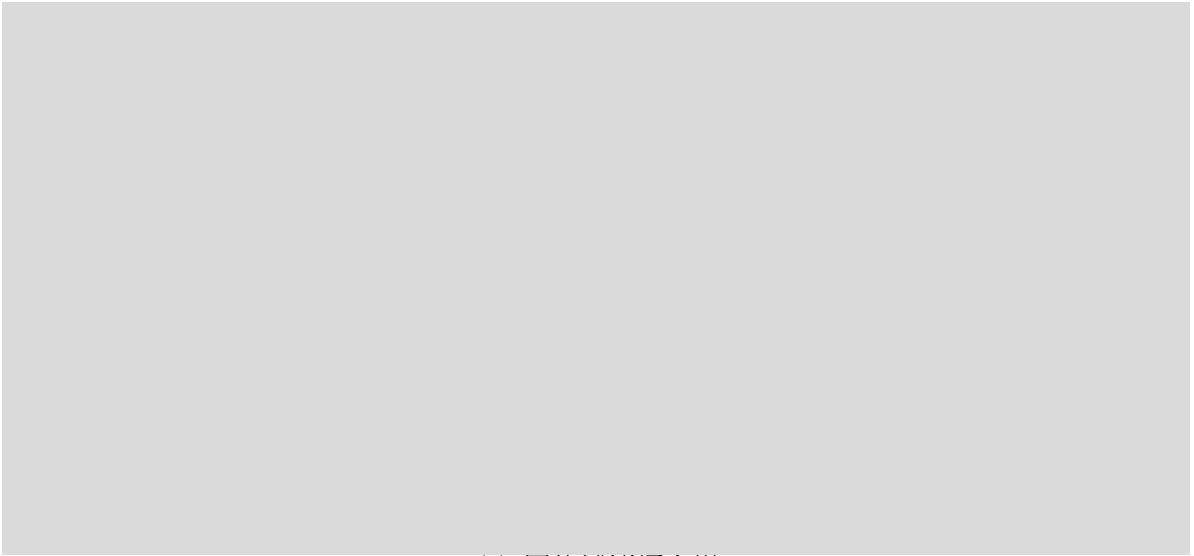
(a) 固体減速炉心用



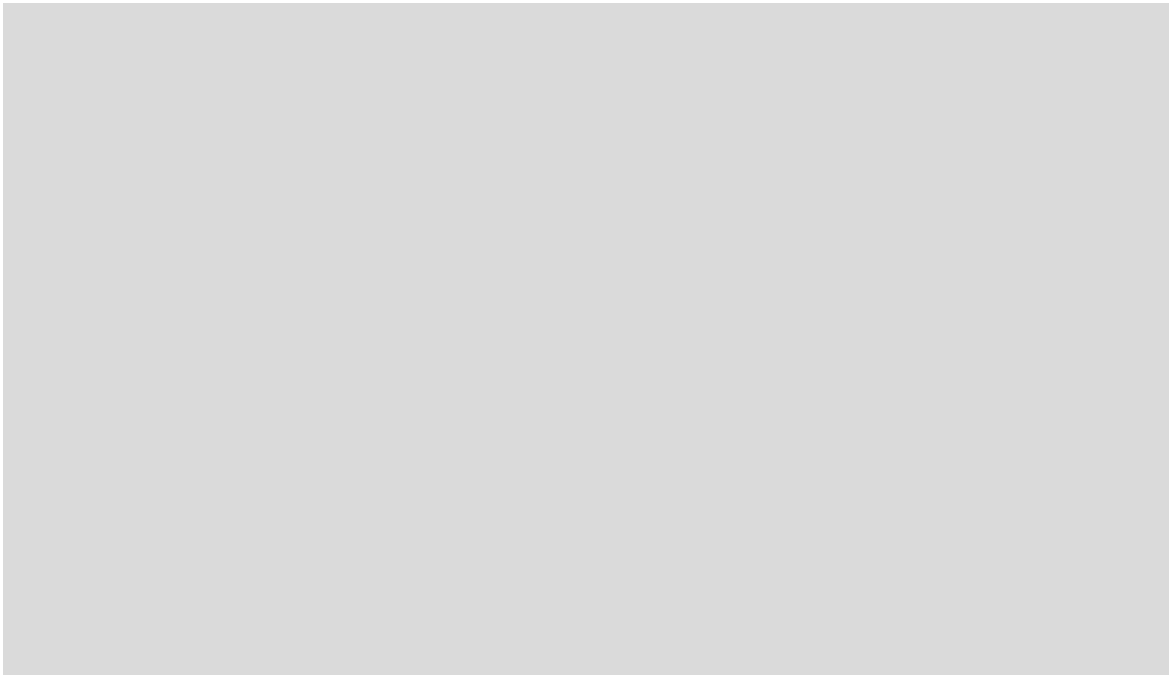
(b) 軽水減速炉心用

図6 追加する燃料要素の概念図

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



(a) 固体減速炉心用



(b) 軽水減速炉心用

図7 計算体系の概念図

表 4 軽水減速炉心用燃料板 燃料ミート部 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■

Specific gravity : ■、Enrichment: ■

U3Si2 Specific gravity : ■

表 5 軽水減速炉心用標準型燃料板 アルミニウム被覆材 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
■	■

Number Density の計算に必要な情報 : Specific gravity : ■



第十七条 計測制御系統施設

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(計測制御系統施設)

第十七条 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、計測制御系統施設を設けなければならない。

- 一 炉心及びこれ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は、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できるものとする。
- 二 前号のパラメータは、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で監視できるものとする。
- 三 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は、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。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第一号、第1項第二号、第1項第三号である。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第一号及び第二号について、炉心及びこれ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である炉心温度、架台室内エリアモニタ値及び中性子束密度を測定する線型出力計が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・監視できることから、適合性が確認できるものである。

第1項第三号について、設計基準事故が発生した場合の状況を把握するためのパラメータである炉心温度、架台室内エリアモニタ値及び炉心出力が、設計基準事故時に想定される環境下において、十分な測定範囲で監視及び記録でき、外部電源喪失時においても原子炉の停止が確認できることから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第1項第一号及び第二号について

KUCAにおいて、炉心温度の測定には、Tタイプの熱電対が使用される。同熱電対が監視できる温度範囲は $-270^{\circ}\text{C}\sim+400^{\circ}\text{C}$ である。添付書類10の解析により、固体減速炉心及び軽水減速炉心に関する運転時の異常な過渡変化時において、最も炉心温度上昇が大きくなる場合でも 49.3°C であることを確認し（2021年8月31日付、審査会合資料1-3）、監視できる温度の範囲に含まれている。

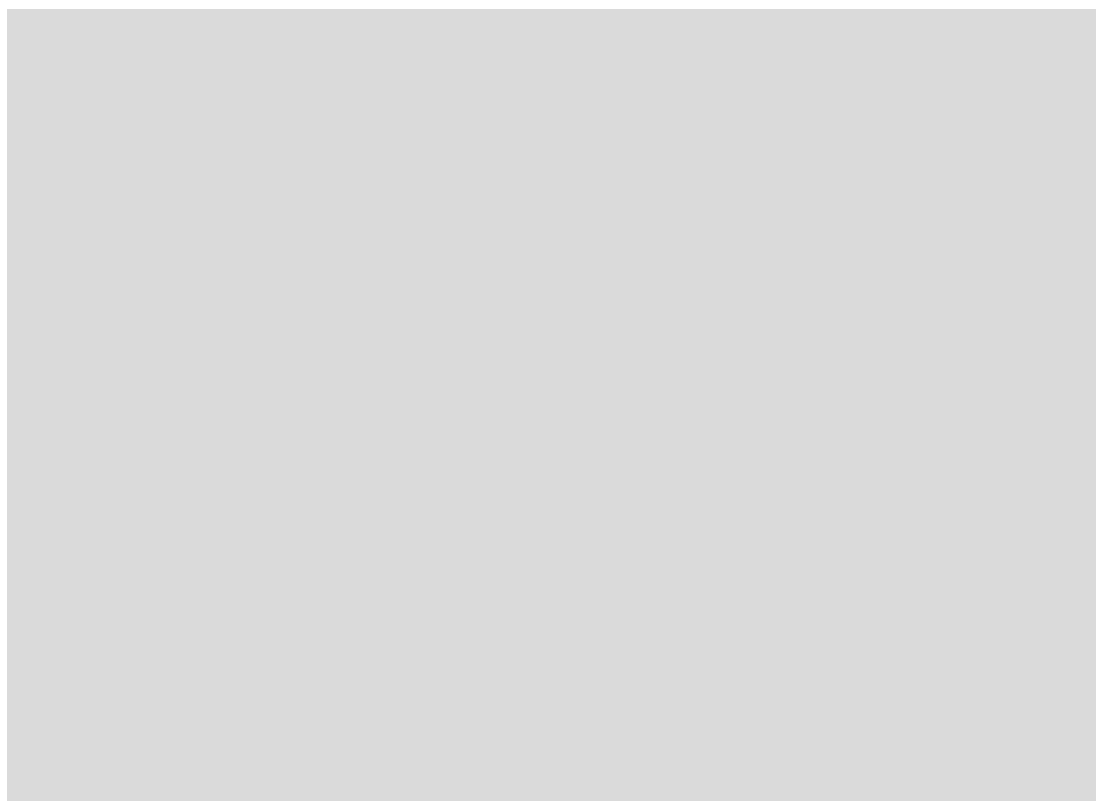


図1 臨界集合体棟 2階平面図（●：エリアモニタの設置場所）

KUCAの架台室に設置されているエリアモニタ（図1参照）の測定範囲の最大値は 1Sv/h である。2020年度の定期事業者検査における出力校正の結果によると、固体減速炉心（A炉心、B炉心）及び軽水減速炉心における校正定数は、

固体減速炉心（A炉心）： $0.00542\text{ W}/(\mu\text{Sv/h})$

固体減速炉心（B炉心）： $0.00207\text{ W}/(\mu\text{Sv/h})$

軽水減速炉心： $0.00205\text{ W}/(\mu\text{Sv/h})$

（A炉心及びB炉心では、炉心とモニタの位置関係が異なるので校正定数が異なる）

であったため、各エリアモニタが監視できる出力の範囲は、

固体減速炉心 (A 炉心) : 最大 5.42 kW

固体減速炉心 (B 炉心) : 最大 2.07 kW

軽水減速炉心 : 最大 2.05 kW

となる。従って、最も保守的な軽水減速炉心用のエリアモニタであっても測定範囲の上限値は、出力に換算して 2.05kW となる。本設置変更承認申請により追加する燃料要素を用いた炉心の運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時における最高到達出力については、添付書類 10 における解析により、190W 未満である (2021 年 8 月 31 日付、審査会合資料 1-3)。従って、監視できる線量の範囲に含まれている。

KUCA において使用している線型出力計 (非補償型電離箱) は、炉心格子板の範囲内で任意の場所に設置することができ、監視範囲は設置位置により決まる。昭和 49 年 12 月 9 日には、1 分間の 1kW の高出力試験を実施したことがあり、最大で 1kW の範囲で炉心の中性子束密度を監視した実績がある (当時の KUCA の最大熱出力は 1kW であった)。図 2 に、当日の炉心配置図を示す。図中の FC#1~#3 は起動系、UIC#4~#6 は、それぞれ対数出力炉周期系、線型出力系、安全出力系である。線型出力系の指示値は 300W×48%であった (当時はこのような表示であった)。なお、温度計の位置、安全出力系及びエリアモニタの指示値については記録が残っていなかった。本設置変更承認申請により追加する燃料要素を用いた炉心の運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時における最高到達出力については、添付書類 10 における解析により、190W 未満であるとの結果を得ている (2021 年 8 月 31 日付、審査会合資料 1-3)。従って、監視できる中性子束密度の範囲に含まれている。

参照資料

- ・ 2021 年 8 月 31 日 第 412 回 審査会合資料 1-3

2.2 第 1 項第三号について

設計基準事故が発生した場合の状況を把握するためのパラメータである炉心温度、架台室内エリアモニタ値及び炉心出力がそれぞれ 400°C と 2.05kW、1kW を超えないことは、添付書類 10 における解析により確認している (2021 年 8 月 31 日付、審査会合資料 1-3)。

KUCA において、原子炉停止後に炉心の冷却は必要ないため、設計基準事故が発生した場合に講ずるべき対策としては、原子炉停止の確認のみである。KUCA では外部電源喪失時においても、炉心温度及び架台室内エリアモニタ値並びに停止確認が実施できるように、3kVA 以上の蓄電池容量を持つ非常用電源設備により、核計装設備 (各計装記録計 3 台及び温度記録計 1 台を含む) 及び放射線モニタが停止確認に必要となる 5 分間以上にわたって

機能を維持できる。従って、本設置変更承認申請は、非常用電源設備の設計方針を変更するものではないことから、第1項第三号にのうち、十分な期間にわたり監視及び記録できる。

参照資料
・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3

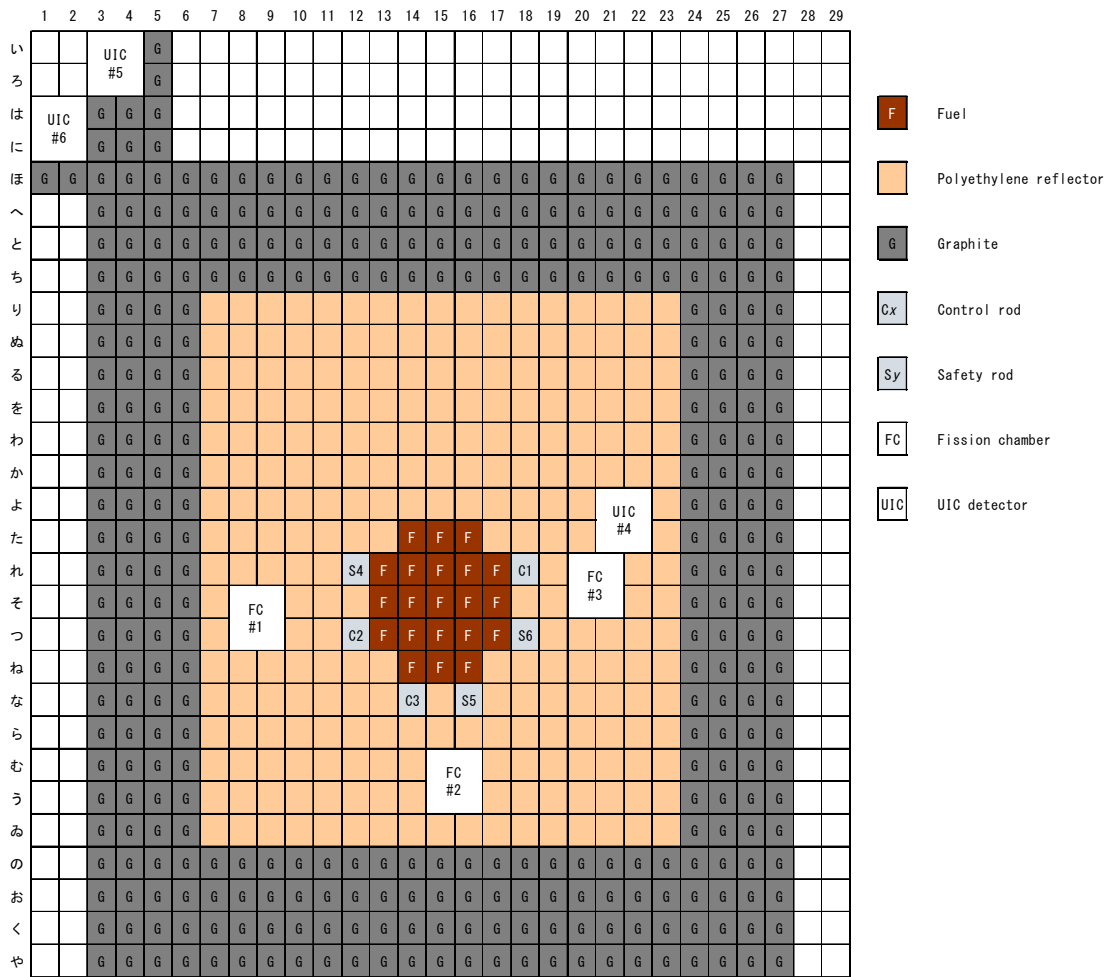


図2 昭和49年12月9日の炉心配置図 (UIC#5: 線型出力系、UIC#6: 安全出力系)

第十八条 安全保護回路

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(安全保護回路)

第十八条 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、安全保護回路を設けなければならない。

- 一 運転時の異常な過渡変化が発生する場合において、その異常な状態を検知し、及び原子炉停止系統その他系統と併せて機能することにより、燃料の許容設計限界を超えないようにできるものとする。
- 二 設計基準事故が発生する場合において、その異常な状態を検知し、原子炉停止系統及び必要な工学的安全施設を自動的に作動させるものとする。
- 三 安全保護回路を構成する機械若しくは器具又はチャンネルは、単一故障が起きた場合又は使用状態からの単一の取り外しを行った場合において、安全保護機能を失わないよう、多重性又は多様性を確保するものとする。
- 四 安全保護回路を構成するチャンネルは、それぞれ互いに分離し、それぞれのチャンネル間において安全保護機能を失わないように独立性を確保するものとする。
- 五 駆動源の喪失、系統の遮断その他の不利な状況が発生した場合においても、試験研究用等原子炉施設をより安全な状態に移行するか、又は当該状態を維持することにより、試験研究用等原子炉施設の安全上支障がない状態を維持できるものとする。
- 六 不正アクセス行為その他の電子計算機に使用目的に沿うべき動作をさせず、又は使用目的に反する動作をさせる行為による被害を防止することができるものとする。
- 七 計測制御系統施設の一部を安全保護回路と共用する場合には、その安全保護機能を失わないよう、計測制御系統施設から機能的に分離されたものとする。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第一号である。

第1項第二号～第七号については、本設置変更承認申請によって燃料要素が追加されることとは関係がないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第一号については、運転時の異常な過渡変化が発生する場合において、その異常な状態を検知でき、炉心温度上昇によって燃料が許容設計限界を超えないことから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第1項第一号について

KUCAにおいて使用している線形出力計（非補償型電離箱）は、炉心格子板の範囲内で任意の場所に設置することができ、監視範囲は設置位置により決まる。昭和49年12月9日には、1kWの高出力試験を実施したことがあり、最大で1kWの範囲で炉心の中性子束密度を監視した実績がある（第17条参照）。本設置変更承認申請により追加する燃料要素を用いた炉心の運転時の異常な過渡変化時における最高到達出力については、添付書類10における解析により、190W未満であるとの結果を得ている（2021年8月31日付、審査会合資料1-3）。従って、検知できる中性子束密度の範囲に含まれている。さらに、運転時の異常な過渡変化が発生する場合において、炉心温度上昇が最も大きくなる場合でも49.3℃であり（2021年8月31日付、審査会合資料1-3）、燃料の許容設計限界である400℃を超えない。

参照資料

- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料1-3



第十九条 反応度制御系統

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(反応度制御系統)

第十九条 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、反応度制御系統を設けなければならない。

- 一 通常運転時に予想される温度変化、キセノンの濃度変化、実験物（構造材料その他の実験のために使用されるものをいう。以下同じ。）の移動その他の要因による反応度変化を制御できるものとする。
- 二 制御棒を用いる場合にあっては、次に掲げるものであること。
 - イ 炉心からの飛び出し、又は落下を防止するものとする。
 - ロ 当該制御棒の反応度添加率は、原子炉停止系統の停止能力と併せて、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。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第一号及び第1項第二号ロである。

第1項第二号イについては、本設置変更承認申請によって燃料要素が追加されることとは関係がないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第一号について、通常運転時には温度変化に起因する反応度変化は制御でき、キセノンの濃度変化が生じてもそれに起因する反応度変化は制御できる。また、照射物の移動及び軽水減速炉心における挿入管が破損し水が流入することによる反応度変化については、第二十九条第1項第二号に関連して導入する制限により、挿入管の破損が単独で、あるいは照射物の移動と挿入管の破損が同時に発生しても反応度変化が制御できることから、適合性が確認できるものである。

第1項第二号ロについて、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ことから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第1項第二号ロについて

添付書類 10 の運転時の異常な過渡変化における原子炉起動時における制御棒の異常な引抜事象及び出力運転中における制御棒の異常な引抜事象の解析により、固体減速炉心及び軽水減速炉心に関して、最も炉心温度上昇が大きくなる場合でも 27.1℃である（2021年8月31日付、審査会合資料 1-3）。以上より、想定される制御棒の異常な引き抜きが発生しても、燃料の許容限界である 400℃を超えない。

参照資料

- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3



第二十条 原子炉停止系統

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(原子炉停止系統)

第二十条 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 制御棒その他の反応度を制御する設備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、当該系統が制御棒のみから構成される場合であって、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 制御棒を用いる場合にあつては、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 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。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第二号、第1項第三号及び第2項である。

第1項第一号は、本設置変更承認申請によって燃料要素が追加されることとは関係がないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第二号について、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素を用いた炉心における通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時について、最大

反応度効果を持つ制御棒 1 本が作動しない場合でも、残りの制御棒が作動することにより、炉心を未臨界に移行することができ、かつ、未臨界を維持できる。また、固体減速架台においては中心架台、軽水減速架台においてはダンプ弁が作動することにより、試験研究用等原子炉を低温状態において未臨界に維持できることから、適合性が確認できるものである。

第 1 項第三号について、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素を用いた炉心において反応度価値の最も大きな制御棒 1 本が固着して動作しない場合について、動作する残りの原子炉停止システムのみで原子炉を未臨界に移行できることから、適合性が確認できるものである。

第 2 項について、原子炉停止システムうち反応度制御システムと共用する制御棒のうち最大反応度効果を持つ 1 本が故障した場合において、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残りの制御棒により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、固体減速架台においては中心架台、軽水減速架台においてはダンプ弁が作動することにより、低温状態において未臨界を維持できることから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第1項第二号について

KUCA の固体減速炉心では、制御棒及び中心架台が独立した 2 系統の原子炉停止系統を構成する。炉心の過剰反応度及びそれぞれの原子炉停止系統の反応度抑制効果を以下のよう
に制限しておくことができれば、一方の原子炉停止系統が動作しない状況であっても、動作するもう一方のみで原子炉を $0.65\% \Delta k/k$ より深い未臨界に移行し、その状態を維持することができる。

- ・ 炉心の過剰反応度： $0.35\% \Delta k/k$ 以下
- ・ 制御棒の反応度抑制効果：過剰反応度 $+1\% \Delta k/k$ 以上
- ・ 中心架台の反応度抑制効果： $1\% \Delta k/k$ 以上

一方、KUCA の軽水減速炉心では、制御棒及びダンプ弁が独立した 2 系統の原子炉停止系統を構成する。炉心の過剰反応度及びそれぞれの原子炉停止系統の反応度抑制効果を以下のよう
に制限しておくことができれば、一方の原子炉停止系統が動作しない状況であっても動作するもう一方のみで、原子炉を $0.50\% \Delta k/k$ より深い未臨界に移行し、その状態を維持することができる。

- ・ 炉心の過剰反応度： $0.50\% \Delta k/k$ 以下
- ・ 制御棒の反応度抑制効果：過剰反応度 $+1\% \Delta k/k$ 以上
- ・ 中心架台の反応度抑制効果： $1\% \Delta k/k$ 以上

従って、本号の適合性は、本設置変更承認申請で追加する燃料要素を用いる炉心の場合
について、これらの制限を満たす炉心が成立するかどうかを調べることによって確認できる。これまでの解析において、通常運転時、固体減速炉心及び軽水減速炉心の代表炉心がこれらの制限を満たすことを確認した（2020 年 11 月 5 日付、第 381 回 審査会合資料 2-1）。

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は、添付書類 10 における評価により、独立した 2 系統の原子炉停止系統のうち一方の原子炉停止系統が動作しない状況であっても原子炉を未臨界に移行し、その状態を維持することができることを確認した（2021 年 8 月 31 日付、審査会合資料 1-3）。

参照資料

- ・ 2020 年 11 月 5 日 第 381 回 審査会合資料 2-1
- ・ 2021 年 8 月 31 日 第 412 回 審査会合資料 1-3

2.2 第1項第三号について

KUCA では、最大の反応度抑制効果を持つ制御棒の反応度が全制御棒反応度の 1/3 を超えないように制限される。これまでの解析において、通常運転時、固体減速炉心及び軽水減速炉心の代表炉心において、最大の反応度を持つ制御棒が固着して動作しない場合においても、動作する残りの原子炉停止系統のみで、原子炉を未臨界に移行し、その状態を維持することができる（2020年11月5日付、第381回 審査会合資料 2-1）。

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は、添付書類 10 における評価により、最大の反応度を持つ制御棒が固着して動作しない場合においても、動作する残りの原子炉停止系統のみで、原子炉を未臨界に移行し、その状態を維持することができる（2021年8月31日付、審査会合資料 1-3）。

参照資料

- ・ 2020年11月5日 第381回 審査会合資料 2-1
- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3

2.3 第2項について

原子炉停止系統のうち制御棒は、反応度制御系統と共用するが、固体減速炉心においては中心架台が、軽水減速炉心においてはダンプ弁がそれぞれ制御棒と独立して動作する。通常運転時において、制御棒に故障が生じて動作しない場合にでも、固体減速炉心にあっては中心架台が、軽水減速炉心にあってはダンプ弁が動作することにより、原子炉を未臨界に移行し、その状態を維持することができる（2020年11月5日付、第381回 審査会合資料 2-1）。

添付書類 10 における評価により、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、制御棒に故障が生じて動作しない場合にでも、固体減速炉心にあっては中心架台が、軽水減速炉心にあってはダンプ弁が動作することにより、原子炉を未臨界に移行し、その状態を維持することができる（2021年8月31日付、審査会合資料 1-3）。

参照資料

- ・ 2020年11月5日 第381回 審査会合資料 2-1
- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3



第二十四条 工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護)

第二十四条 試験研究用等原子炉施設は、通常運転時において試験研究用等原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による工場等周辺の空間線量率が十分に低減できるものでなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項である。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項について、試験研究用等原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による工場等周辺の空間線量率が十分に低減できることから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 評価方法の概要

以下の手順により、現有の燃料要素を用いた場合の KUCA の平常運転時における、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地境界付近における年間空気カーマの評価を行う。なお、線量の計算には QAD-CGGP2¹⁾及び G33-GP2¹⁾の機能を内蔵した γ 線遮蔽計算システム γ -Shielder²⁾を使用する。平常運転時の放射線場は、炉室中央に仮想的な線源をおくことによって模擬する。仮想線源として用いる核種は、比較的 γ 線エネルギーの高い Co-60 とする。Co-60 の γ 線の平均エネルギーは 1.25MeV であり、U-235 の即発 γ 線の平均エネルギーは 1MeV 以下³⁾であることから、仮想線源として Co-60 を用いることは保守的である。

なお、KUCA の平常運転時における壁面での中性子束は、100W 運転時で 5.2×10^3 (n/cm²/s) (2013 年度定期検査の出力校正運転時の値) であり、壁面の材質との反応断面積を考えると、即発ガンマ線による影響と比較して十分に低く無視し得るため、ここでは考慮しない。

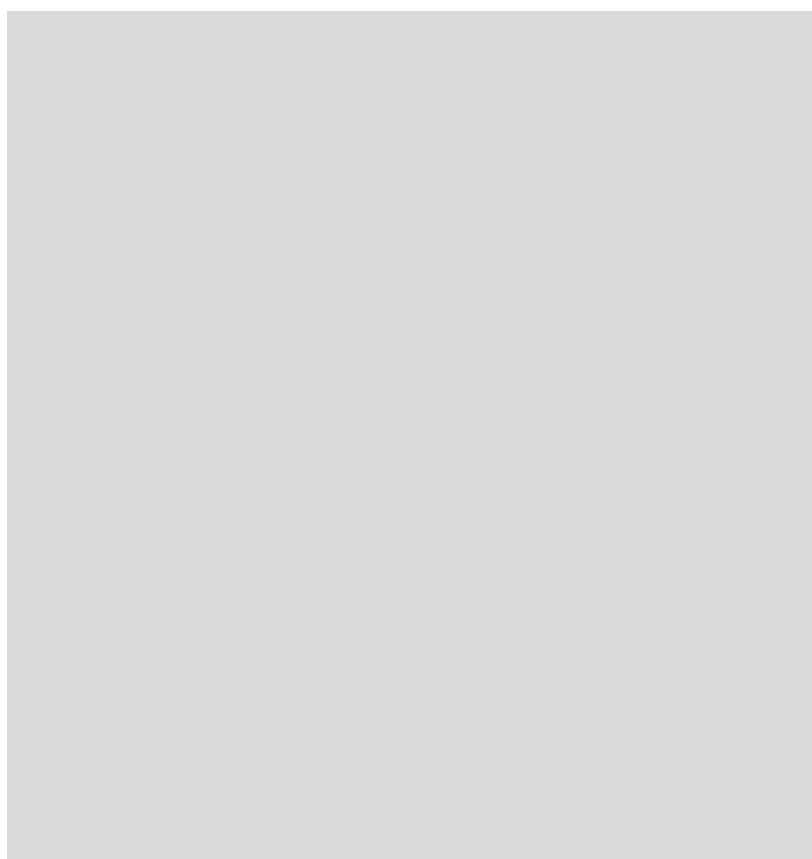


図 1 KUCA 炉室の垂直断面図 (概略図)

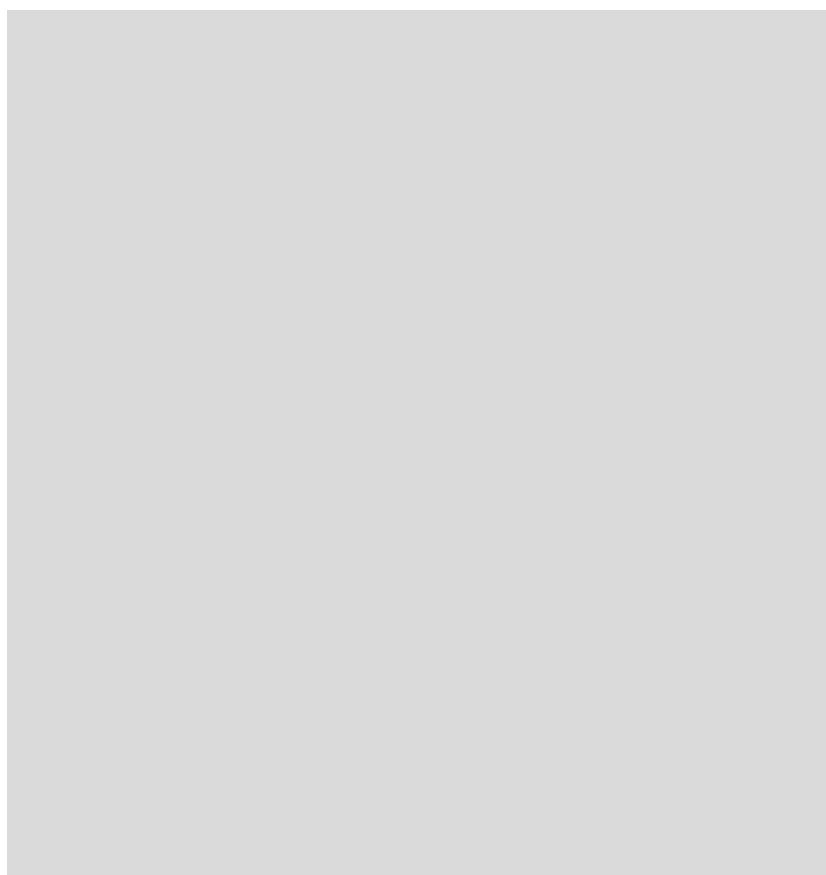


図2 QAD-CGGP2による直接ガンマ線の計算体系

2.2 計算体系の設定

- KUCA 炉室の断面図（概略図）を図1に示す。炉室の中心から最も近い周辺監視区域境界は、炉室中心から140m地点である。
- QAD-CGGP2の計算体系を図2に示す。遮蔽厚さは安全側に最も薄い壁厚（ ）で一定とする。評価点は、炉心の位置が炉室の中心と若干異なることを考慮し、保守的に炉室中心から130m地点とする。なお、壁による散乱線の影響は、ビルドアップ係数によって評価に加えられている。
- G33-GP2の計算体系を図3に示す。散乱領域は球形状とし、半径方向距離は1km、 θ は 20.27° 、 φ は 360° とする。
- 計算に用いた物質組成を表1に示す。なお、コンクリートの組成には「放射線施設の遮蔽計算実務（放射線）データ集2012」⁴⁾の値を用いる。なお、KUCAの壁面のコンクリートの実際の密度は であり、表1の物質組成による評価は保守的となる。

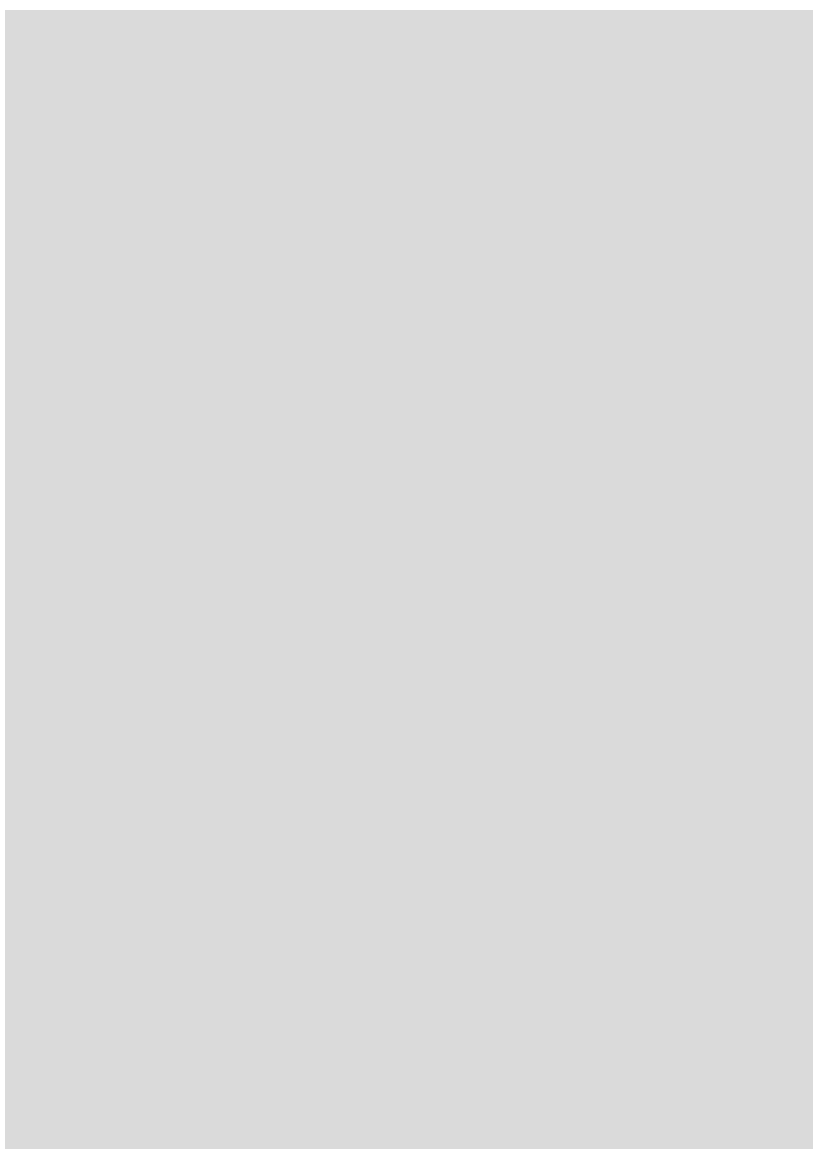


図2 G33-GP2によるスカイシャインガンマ線の計算体系

2.3 計算手順

直接線

- (1) QAD-CGGP2の機能を用いて、単位線源強度のCo-60を図2の線源位置に設置した際の、 γ 線モニタ（架台室エリアモニタ）位置における実効線量率を求める。
- (2) (1)で求めた線量が線量の実測値と一致するように、線源強度を逆算する。実測値は2013年度定期検査の出力校正運転における値である100W運転時で51mSv/hを用いる。
- (3) (2)で求めた線源強度を用い、QAD-CGGP2の機能を用いて、評価点における直接線による空気カーマ率を求める。

表 1 計算に用いた物質組成 (密度)

元素	原子量	コンクリート(g/cm ³)	空気(g/cm ³)
H	1.00794	0.0217	1.21E-08
C	12.011	0.0021	1.48E-07
N	14.00674		9.09E-04
O	15.9994	1.1462	2.95E-04
Mg	24.305	0.0046	
Al	26.98154	0.0732	
Si	28.0855	0.7282	
S	30.97376		
Ca	40.078	0.0939	
Fe	55.847	0.0301	
合計		2.1	1.20E-03

散乱線

- (4) QAD-CGGP2 の機能を用いて、(2)で求めた線源強度の場合の天井上面における直接線による実効線量率 (天井による遮蔽が考慮されている) を求める。
- (5) G33-GP2 の機能を用いて、(2)で求めた線源強度の場合の天井上面における直接線による実効線量率 (天井による遮蔽が考慮されていない) を求める。
- (6) (4)の結果を(5)で除して、G33-GP2 において天井による遮蔽を考慮するための補正係数を算出する。
- (7) G33-GP2 の機能を用いて、(2)で求めた線源強度の場合の散乱線による評価点の空気カーマ率 (天井による遮蔽が考慮されていない) を求める。
- (8) (7)に(6)で求めた係数を乗じ、天井による遮蔽を考慮した計算結果の補正を行う。

表 2 補正係数に係る計算値

QAD による天井上面の線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	G33 による天井上面における線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	補正係数 (QAD/G33)
2.94E+03	4.69E+03	6.27E-01

2.4 線量評価結果

線源強度の計算

線源強度を $1.0 \times 10^{10}(\text{Bq})$ として、QAD-CGGP2 による計算を行い、 γ 線モニタ位置における実効線量率を求めた。計算結果は、 $0.204(\text{mSv/h})$ となり、 51mSv/h となる線源強度 (100W 運転時に相当する Co-60 線源強度) は $2.5 \times 10^{12}(\text{Bq})$ となった。

直接線の計算

- (1)で求めた線源強度を使用し、評価点 (KUCA 中心から 130m 地点における高さ 1m 地

点)における直接線による空気カーマ率を計算した。その結果、100W 運転時における空気カーマ率は $6.5 \times 10^{-2} \mu\text{Gy/h}$ であった。

散乱線の計算

(1)で求めた線源強度を使用し、QAD-CGGP2 及び G33-GP2 を用いて、天井上面における直接線量を計算し、補正係数を求めた結果を表 2 に示す。次に、G33-GP2 を用いて評価点における散乱線による空気カーマ率を計算した。その結果、100W 運転時における空気カーマ率は $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{Gy/h}$ であった。

2.5 平常運転時における年間空気カーマの評価

直接線及び散乱線の結果を合計すると、100W 運転時における評価点の空気カーマ率は $1.2 \times 10^{-1} \mu\text{Gy/h}$ となった。KUCA の年間積算出力は最大 1kWh であることから、KUCA の平常運転時における、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地境界付近の年間空気カーマは最大で $1.2 \mu\text{Gy}$ となる。これに KUR から最も近い周辺監視区域境界における年間空気カーマ $15.0 \mu\text{Gy}$ 及び固形廃棄物倉庫(第 1 及び第 2) から最も近い周辺監視区域境界における年間空気カーマ $16.6 \mu\text{Gy}$ (いずれも現行設置変更承認申請より)を加えても年間 $50 \mu\text{Gy}$ を十分に下回る。

2.6 新規導入燃料要素を用いる炉心の場合の年間空気カーマの評価

U-238 の即発ガンマ線の平均エネルギーは 1MeV 以下であることから、仮想線源として Co-60 を用いることは依然保守的である³⁾。また、熱中性子による U-235 核分裂によって放出される全エネルギーは 202.77MeV であるのに対して、高速中性子による U-238 核分裂によって放出される全エネルギーは 206.04MeV であり、若干大きい。従って、新規導入燃料要素を用いた炉心の場合、現有燃料要素を用いた炉心よりも同じ出力を得るのに必要な核分裂数は少なくなる。また、核分裂当りに放出されるガンマ線数は、U-235 が 8.6 であるのに対して、U-238 では 7.6 となり、核分裂当りに放出されるガンマ線数も少なくなる⁵⁾。以上より、本設置変更承認申請により追加する燃料要素を用いる場合、敷地境界付近の年間空気カーマは $1.2 \mu\text{Gy}$ と同程度あるいは小さくなると思われる。

参照資料

- 1) Y. Sakamoto and S. Tanaka; QAD-CGGP2 and G33-GP2; Revised versions of QAD-CGGP and G33-GP codes with the conversion factors from exposure to ambient and maximum dose equivalents, JAERI-M 90-110 (1990).
- 2) (株) V.I.C. ; γ -Shielder ユーザーズマニュアル(2001).

- 3) I. Stetcu, et al., Evaluation of the prompt fission gamma properties for neutron induced fission of $^{235,238}\text{U}$ and ^{239}Pu , Nuclear Data Sheets 163, 261, 2020.
- 4) (公財) 原子力安全技術センター ; 放射線施設の遮蔽計算実務 (放射線) データ集 2012, 2012.
- 5) A.F. Badalov and V.I. Kopejkin, Uranium and plutonium energy release per fission event in a nuclear reactor,
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/051/20051054.pdf.



第二十五条 放射線からの放射線業務従事者の防護

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(放射線からの放射線業務従事者の防護)

第二十五条 試験研究用等原子炉施設は、外部放射線による放射線障害を防止する必要がある場合には、次に掲げるものでなければならない。

- 一 放射線業務従事者が業務に従事する場所における放射線量を低減できるものとする。
 - 二 放射線業務従事者が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、迅速な対応をするために必要な操作ができるものとする。
- 2** 工場等には、放射線から放射線業務従事者を防護するため、放射線管理施設を設けなければならない。
- 3** 前項の放射線管理施設には、放射線管理に必要な情報を原子炉制御室その他当該情報を伝達する必要がある場所に表示できる設備を設けなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文



本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第二号である。

第1項第一号、第2項及び第3項は、本設置変更承認申請によって燃料要素が追加されることとは関係がないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第二号について、放射線業務従事者が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、迅速な対応をするために必要な操作ができることから、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

KUCA では運転架台以外の場所において放射線量を低下させるために、
を設けている(図1及び図2参照)。

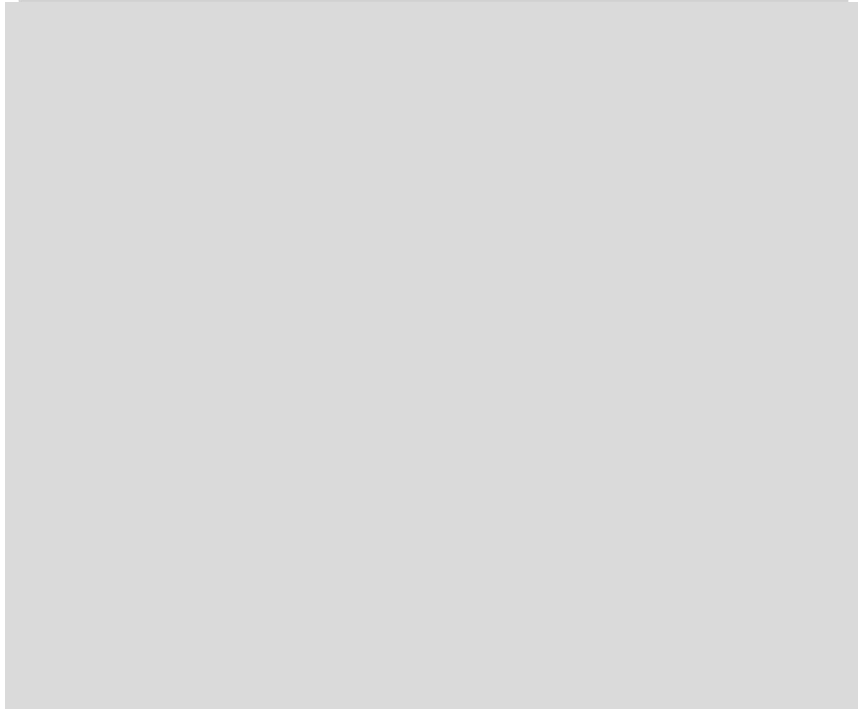


図1 炉室平面図

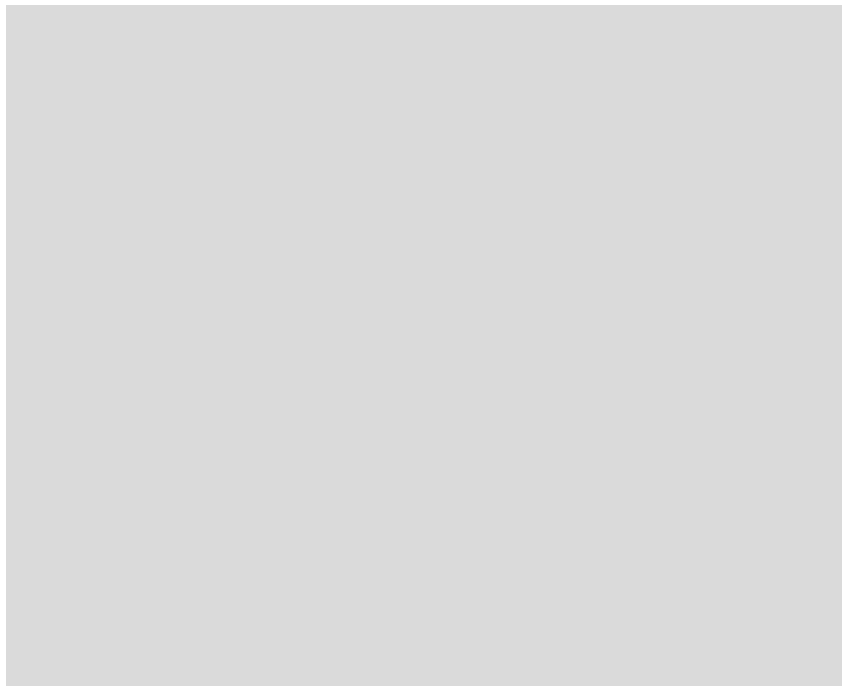


図2 炉室断面図

U-235 及び U-238 の即発ガンマ線の平均エネルギーはいずれも 1MeV 以下であることを踏まえ、平均エネルギーが 1.25MeV のガンマ線を放出する Co-60 を保守的に想定すると、 の鉄と の普通コンクリートによるガンマ線の透過率は、それぞれ 及び 程度であり、有意な遮蔽効果を持つ（図 3 参照）。従って、現有燃料要素を用いた炉心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放射線量を十分に低減でき、迅速な対応をするために必要な操作を作業員が制御室にて行うことができる設計となっている。

現有燃料要素を用いた炉心の場合、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、出力の最高到達値は 200W を超えるが、本設置変更承認申請により追加する燃料要素を用いた炉心の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、最高到達出力は 200W を超えなければ、以下に示す理由から作業員が制御室にて迅速な対応をすることができる。

- a) 熱中性子による U-235 核分裂によって放出される全エネルギーは 202.77MeV であるのに対して、高速中性子による U-238 核分裂によって放出される全エネルギーは 206.04MeV であり、若干大きく 1)、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素を用いた炉心の場合、現有燃料要素を用いた炉心よりも同じ出力を得るのに必要な核分裂数は少なくなる。
- b) 核分裂当りに放出されるガンマ線数は、U-235 が 8.6 であるのに対して、U-238 では 7.6 となり、核分裂当りに放出されるガンマ線数も少ないため 2)、本設置変更承認申請によって追加される燃料要素を用いた炉心の場合、同じ核分裂数であれば放射線量は少なくなる。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

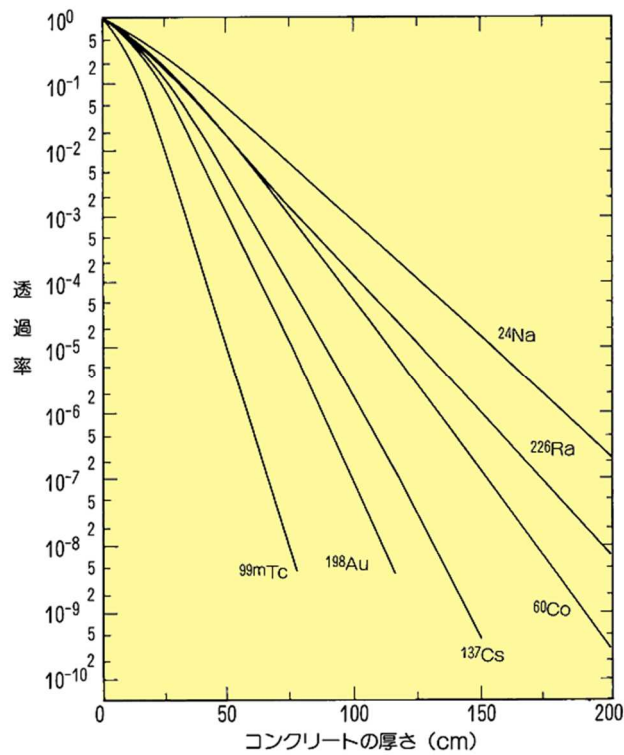
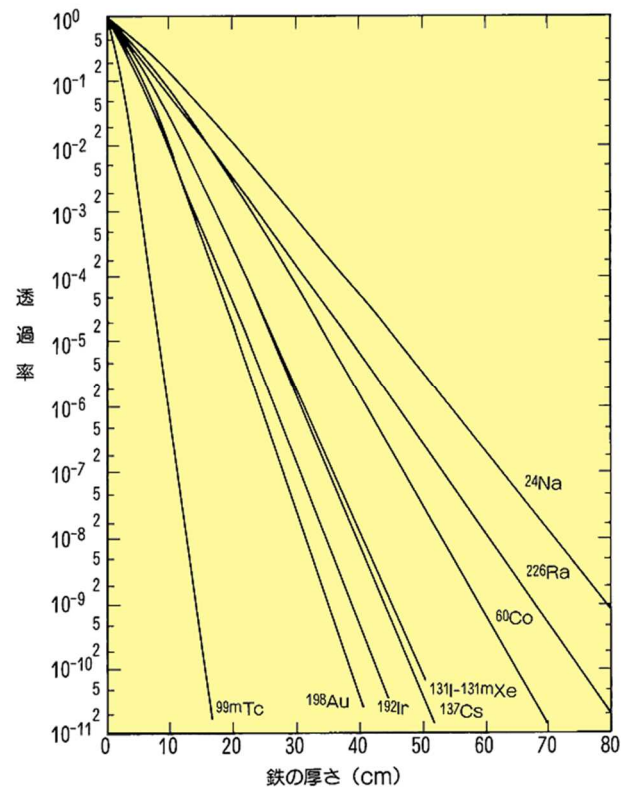


図3 鉄中（上図）及び普通コンクリート中（下図）におけるガンマ線の透過率
（アイソトープ手帳より）

本設置変更承認申請により追加する燃料要素を用いた炉心の運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時における最高到達出力については、添付書類 10 における解析により、190W 未満であるとの結果を得た（2021 年 8 月 31 日付、審査会合資料 1-3）。

参照資料

- 1) A.F. Badalov and V.I. Kopejkin, Uranium and plutonium energy release per fission event in a nuclear reactor,
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/051/20051054.pdf.
- 2) I. Stetcu, et al., Evaluation of the prompt fission gamma properties for neutron induced fission of $^{235,238}\text{U}$ and ^{239}Pu , Nuclear Data Sheets 163, 261, 2020.
 - ・ 2021 年 8 月 31 日 第 412 回 審査会合資料 1-3
 - ・ アイソトープ手帳 11 版



第二十九条 実験設備等

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(実験設備等)

第二十九条 試験研究用等原子炉施設に設置される実験設備（試験研究用等原子炉を利用して材料試験その他の実験を行う設備をいう。）及び利用設備（試験研究用等原子炉を利用して分析、放射性同位元素の製造、医療その他の行為を行うための設備をいう。）（以下「実験設備等」と総称する。）は、次に掲げるものでなければならない。

- 一 実験設備等の損傷その他の実験設備等の異常が発生した場合においても、試験研究用等原子炉の安全性を損なうおそれがないものとする。
- 二 実験物の移動又は状態の変化が生じた場合においても、運転中の試験研究用等原子炉に反応度が異常に投入されないものとする。
- 三 放射線又は放射性物質の著しい漏えいのおそれがないものとする。
- 四 試験研究用等原子炉施設の健全性を確保するために実験設備等の動作状況、異常の発生状況、周辺の環境の状況その他の試験研究用等原子炉の安全上必要なパラメータを原子炉制御室に表示できるものとする。
- 五 実験設備等が設置されている場所は、原子炉制御室と相互に連絡することができる場所とする。

2) 適合性の確認を要する条文

本設置変更承認申請によって追加される燃料要素により確認を要する条文は、第1項第二号及び第1項第三号である。

第1項第一号、第1項第四号及び第1項第五号は、本設置変更承認申請によって燃料要素が追加されることとは関係がないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針(考え方)

第1項第二号については、軽水減速炉心用挿入管の破損及び照射試料の脱落により反応度が投入される可能性が考えられる。これらの一方、あるいは両方が同時に生じる場合においても、運転中の試験研究用原子炉に反応度が異常に投入されないことが必要であり、設計方針に変更が必要である。

第1項第三号については、パイルオシレータにおいて実験物として用いた核燃料が損

傷した場合、放射線従事者に過度の放射線被ばくを与えないために、周囲に適切な遮蔽を設けるとともに、運転中は放射線量に応じて炉室への入室を制限するため、適合性が確認できるものである。

2. 説明資料

2.1 第1項第二号について

挿入管（検出器又は照射試料を挿入するためのアルミニウム等の円管または角管）のうち、軽水減速炉心用のものは、管の下部が密封されて水が内部に入らない構造となっている。しかし、万が一、管の内部に水が流入した場合には反応度が投入される可能性がある。従って、照射物を用いない運転時において、水流入の前後で軽水減速炉心の過剰反応度が $0.5\% \Delta k/k$ 以下となるように制限する。この制限を新たに加えることにより、水流入が発生した場合においても、炉心の核的制限値が満足される。

実験物である照射試料は、燃料体等に貼り付けて固定する。従って、それが脱落することにより、炉心に反応度が異常に投入される可能性が考えられる。さらに、軽水減速炉心においては、挿入管への水の流入による反応度の投入が重畳する可能性が考えられる。従って、以下のような制限を加える。

a) 照射物を装荷することで炉心に負の反応度が加わる場合（例えばカドミウム）

固体減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態（照射物を取り除いた状態）での炉心の過剰反応度を $0.35\% \Delta k/k$ 以下に制限する。一方、軽水減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態で、挿入管に水が流入する前後で過剰反応度を $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限する。

b) 照射物を装荷することで炉心に正の反応度が加わる場合（例えばウラン箔）

固体減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある場合での炉心の過剰反応度を $0.35\% \Delta k/k$ 以下に制限する。軽水減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある状態で、挿入管に水が流入する前後で過剰反応度を $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限する。

これらの制限を新たに加えることにより、仮に照射物が脱落した場合においても、さらに軽水減速炉心において挿入管への水流入が重畳した場合にも炉心の核的制限値が満足される。

参照資料

- ・ 2021年5月17日 第404回 審査会合資料 1-1

2.2 第1項第三号について

パイルオシレータにおいて実験物として核燃料を用いるとき、当該実験設備が損傷し、実験物より核分裂生成物が放出される可能性がある。本設置変更承認申請により追加される燃料要素について、添付書類 10 の当該設計基準事故の解析により評価したところ、被ばく線量は最大でも $0.19 \mu Sv$ となり、周辺公衆の実効線量は設計基準事故時の判断基準 ($5mSv$ 以下) を満足しており、著しい放射線被ばくが生じない。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

参照資料

- ・ 2021年8月31日 第412回 審査会合資料 1-3

3. 補正方針

原子炉設置変更承認申請書（2021年3月承認）	補正方針	備考
<p>8-9-5 炉心装荷物</p> <p>炉心の中性子束の測定等のために、実験計画に応じて挿入管を炉心に装荷する。<u>燃料体に貼り付ける又は軽水減速炉心の燃料板の間に挿入する照射物は使用しない。</u></p> <p>8-9-5-1 挿入管</p> <p>種類 検出器を挿入するためのアルミニウム等の円管または角管（固体減速炉心用、軽水減速炉心用）</p> <p>構造 軽水減速炉心用挿入管は管の下部が密封されて水が内部に入らない構造</p> <p>設置場所 <u>軽水減速炉心用については、管の内部に水が流入した場合であっても炉心に反応度が加わらない場所</u></p>	<p>8-9-5 炉心装荷物</p> <p>炉心の中性子束の測定等のために、実験計画に応じて照射物又は挿入管若しくはその両方を炉心に装荷する。</p> <p>8-9-5-1 挿入管</p> <p>種類 検出器を挿入するためのアルミニウム等の円管または角管（固体減速炉心用、軽水減速炉心用）</p> <p>構造 軽水減速炉心用挿入管は管の下部が密封されて水が内部に入らない構造</p> <p>反応度の添加 <u>照射物を装荷しないとき、軽水減速炉心では、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で炉心の過剰反応度を 0.5%Δk/k 以下に制限</u></p>	<p>第1項第二号に係る変更</p>

<p>固体減速炉心用、軽水減速炉心用ともに運転中に動くことないように固定する</p>	<p>固体減速炉心用、軽水減速炉心用ともに運転中に動くことないように固定する</p> <p><u>8-9-5-2 照射物</u></p> <p><u>種類</u> 金、カドミウム等で燃料体に貼り付ける照射物</p> <p><u>形状</u> 板状、線状等</p> <p><u>反応度の添加</u> a) 照射物を装荷することで炉心に負の反応度が加わる場合</p> <p>固体減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態（照射物を取り除いた状態）での炉心の過剰反応度を $0.35\% \Delta k/k$ 以下に制限</p> <p>軽水減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態で、かつ挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で過剰反応度を $0.5\% \Delta k/k$ 以</p>	<p>第1項第二号に係る変更</p>
--	--	--------------------

	<p><u>下に制限。</u></p> <p><u>b) 照射物を装荷することで炉心に正の反応度が加わる場合</u></p> <p><u>固体減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある場合での炉心の過剰反応度を 0.35%Δk/k 以下に制限</u></p> <p><u>軽水減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある状態で、かつ挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で過剰反応度を 0.5%Δk/k 以下に制限する。</u></p> <p><u>ただし、運転中は反応度の有意な変動がないようにテープ等で固定する。</u></p>	
--	---	--

■

【トリウム貯蔵に係る設置許可基準規則との整合性】

第四条 地震による損傷の防止

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(地震による損傷の防止)

第四条 試験研究用等原子炉施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。

2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある試験研究用等原子炉施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。

3 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

4 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文

トリウム貯蔵に関して確認を要する条文は、第1項及び第2項である。

第3項及び第4項については、耐震重要施設が存在しないため、設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項及び第2項について、トリウム貯蔵庫は、耐震重要度分類のうち、Cクラスに該当する施設として設計する（表1）。

表1 本原子炉施設の構築物、系統及び機器の耐震重要度分類

耐震重要度分類	機能上の分類	構築物、系統及び機器 ^a
Sクラス	自ら放射性物質を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能の喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの、並びにこれらの事故発生の際に外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響の大きいもの	(該当なし)
Bクラス	上記において、影響が比較的小さいもの	架台支持構造、(A)(B)中心架台駆動装置、(C)ダンプ弁、制御棒案内管、第2固形廃棄物倉庫
Cクラス	Sクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの	炉心格子板、(C)炉心タンク
		制御棒駆動装置
		燃料要素、(A)(B)さや管、(C)標準型燃料板支持フレーム
		(C)重水タンク、パイルオシレータ
		原子炉建屋、機械室
		炉室天井クレーン
		スタック、廃液タンク
		燃料貯蔵棚、 トリウム貯蔵庫
		第1固形廃棄物倉庫
		放射線モニタ盤(炉室ガンマ線エリアモニタ、燃料室ガンマ線エリアモニタ、ダストモニタ、ガスモニタ)
		計装盤(線型出力計、安全出力計、対数出力炉周期計、対数計数率炉周期計、制御棒電磁石電源、原子炉停止回路、プロセス計装)
		非常警報鈕(制御卓)
非常用電源設備		
非常警報鈕(中央管理室)		
消火設備(ハロン)		

^a 機器等の名称の頭に(A),(B),(C)とあるのはそれぞれの架台特有の機器等であることを示す。



第八条 火災による損傷の防止

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(火災による損傷の防止)

第八条 試験研究用等原子炉施設は、火災により当該試験研究用等原子炉施設の安全性が損なわれないよう、必要に応じて、火災の発生を防止することができ、かつ、早期に火災発生を感知する設備及び消火を行う設備（以下「消火設備」という。）並びに火災の影響を軽減する機能を有するものでなければならない。

2 消火設備は、破損、誤作動又は誤操作が起きた場合においても試験研究用等原子炉を安全に停止させるための機能を損なわないものでなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文

トリウム貯蔵に関して確認を要する条文は、第1項である。

第2項については、トリウム貯蔵に関して設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項について、火災により当該試験研究用等原子炉施設の安全性が損なわれないよう、トリウム貯蔵庫は鉛、鋼材等の不燃性の材料を用いる設計とする。火災の発生感知及び消火並びに火災の影響軽減に係る設計方針については、既承認から変更ない。



第十二条 安全施設

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(安全施設)

第十二条 安全施設は、その安全機能の重要度に応じて、安全機能が確保されたものでなければならない。

2 安全機能を有する系統のうち、安全機能の重要度が特に高い安全機能を有するものは、当該系統を構成する機械又は器具の単一故障（単一の原因によって一つの機械又は器具が所定の安全機能を失うこと（従属要因による多重故障を含む。）をいう。以下同じ。）が発生した場合であって、外部電源が利用できない場合においても機能できるよう、当該系統を構成する機械又は器具の機能、構造及び動作原理を考慮して、多重性又は多様性を確保し、及び独立性を確保するものでなければならない。

3 安全施設は、設計基準事故時及び設計基準事故に至るまでの間に想定される全ての環境条件において、その機能を発揮することができるものでなければならない。

4 安全施設は、その健全性及び能力を確認するため、その安全機能の重要度に応じ、試験研究用等原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができるものでなければならない。

5 安全施設は、蒸気タービン、ポンプその他の機器又は配管の損壊に伴う飛散物により、安全性を損なわないものでなければならない。

6 安全施設は、二以上の試験研究用等原子炉施設と共用し、又は相互に接続する場合には、試験研究用等原子炉施設の安全性を損なわないものでなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文

トリウム貯蔵に関して確認を要する条文は、第1項、第3項及び第4項である。

第2項、第5項及び第6項は、トリウム貯蔵に関して設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

表1 本原子炉施設の構築物、系統及び機器の安全上の機能別重要度分類 (PS)

分類	定義	安全機能	構築物、系統及び機器 ^a
PS-1	その損傷又は故障により発生する事象によって、燃料の多量の破損を引き起こすおそれがあり敷地外への著しい放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器	—	(該当なし)
PS-2	その損傷又は故障により発生する事象によって、燃料の多量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器	—	(該当なし)
PS-3	1) 異常状態の起回事象となるものであって PS-1 及び PS-2 以外の構築物、系統及び機器	過剰な反応度の印加防止	制御棒駆動装置、(A)(B)中心架台駆動装置
		炉心の形成	架台支持構造、炉心格子板
			(C)炉心タンク
			燃料要素、(A)(B)さや管、(C)標準型燃料板支持フレーム
		放射性物質の貯蔵	バードケージ、燃料貯蔵棚、 トリウム貯蔵庫
			廃液タンク、第1 固形廃棄物倉庫、第2 固形廃棄物倉庫
	プラント計測・制御	線型出力計、安全出力計、対数出力炉周期計、対数計数率炉周期計 炉室ガンマ線エリアモニタ	
その他	パイルオシレータ、(C)重水タンク		
2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転に支障のない程度に低く抑える構築物、系統及び機器	—	(該当なし)	

a 機器等の名称の頭に(A),(B),(C)とあるのはそれぞれの架台特有の機器等であることを示す。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項について、トリウム貯蔵庫は、PS-3に該当し（表1）、放射線業務従事者に過度の放射線被ばくを及ぼさないよう、鉛を用いて十分な遮蔽性能を持つ設計とするとともに、トリウム燃料要素の健全性を維持するために、それらの全量を収納する容量を持ち、物理的に収納可能な最大量まで燃料要素を収納した場合においても、臨界に達するおそれがない設計とする。

第3項について、トリウム貯蔵庫は、当該原子炉施設の通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故において、その間に想定される環境条件（使用中の燃料要素の温度上昇及び収納中の燃料要素からの放射線）に対して影響を受けないよう、鋼材等の材料を用い、機能を発揮することができる設計とする。

第4項について、トリウム貯蔵庫は、その健全性及び能力を確認するため、試験研究用原子炉の運転中又は停止中に外側からの外観検査及び蓋あるいは扉の開放による内側からの外観検査ができる設計とする。



第十六条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設)

第十六条 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」と総称する。）の取扱施設を設けなければならない。

- 一 燃料体等を取り扱う能力を有するものとする。
- 二 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。
- 三 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものとする。
- 四 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。
- 五 燃料体等の取扱中における燃料体等の落下を防止できるものとする。

2 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、燃料体等の貯蔵施設を設けなければならない。

- 一 燃料体等の貯蔵施設は、次に掲げるものであること。
 - イ 燃料体等を貯蔵することができる容量を有するものとする。
 - ロ 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。
- 二 使用済燃料その他高放射性の燃料体の貯蔵施設にあっては、前号に掲げるもののほか、次に掲げるものであること。ただし、使用済燃料中の原子核分裂生成物の量が微量な場合その他の放射線の遮蔽及び崩壊熱の除去のための設備を要しない場合については、この限りでない。
 - イ 使用済燃料その他高放射性の燃料体からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。
 - ロ 貯蔵された使用済燃料その他高放射性の燃料体が崩壊熱により溶融しないものとする。
 - ハ 使用済燃料その他高放射性の燃料体の被覆材が著しく腐食するおそれがある場合は、これを防止できるものとする。
 - ニ 放射線の遮蔽及び崩壊熱の除去に水を使用する場合にあっては、当該貯蔵施設内における冷却水の水位を測定でき、かつ、その異常を検知できるものとする。

3 試験研究用等原子炉施設には、次に掲げるところにより、燃料取扱場所の放射線量及び温度を測定できる設備を設けなければならない。

- 一 燃料取扱場所の放射線量の異常を検知し、及び警報を発することができるものとする。

二	崩壊熱を除去する機能の喪失を検知する必要がある場合には、燃料取扱場所の温度の異常を検知し、及び警報を発することができるものとする。
---	---

2) 適合性の確認を要する条文

トリウム貯蔵に関して確認を要する条文は、第1項第二号、第1項第三号、第1項第四号、第2項第一号、第2項第二号イである。

第1項第一号、第1項第五号、第2項第二号ロ、ハ、ニ及び第3項は、トリウム貯蔵に関して設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第二号について、トリウムと濃縮ウランの燃料要素を同時に使用する際は、組立解体場所における濃縮ウランの燃料要素の制限（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安指示書 4.2.3.4）、燃料机上において仮置きする燃料要素の制限（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第62条）及び組立解体場所から炉心への移動時の燃料要素の制限（京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第68条）を遵守し、臨界に達するおそれがないようにする。

第1項第三号について、第1項第二号の適合性が確保されることにより、濃縮ウランの燃料要素を同時に使用する際においても、臨界に達するおそれがなく、崩壊熱の除去のための設備を要しない。

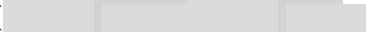

第1項第四号について、トリウムの燃料要素を取り扱う際は、作業状況に応じて、適宜、鉛エプロンを着用する、あるいは鉛ブロック等による仮遮蔽を設けることにより、放射線を適切に遮蔽する。さらに、トリウム貯蔵庫は、取扱い場所である燃料室に設置されるため、鉛を使用して十分な遮蔽能力を有するよう設計する。

第2項第一号について、トリウム貯蔵庫は、トリウム燃料要素を [] まで貯蔵できる容量を有する設計とする。さらに、トリウム貯蔵庫は、物理的に収納可能な最大量まで燃料要素を収納した場合においても、実効増倍率 0.95 未満であり臨界に達するおそれがない設計とする。

第2項第二号イについて、トリウム貯蔵庫は、鉛を使用して十分な遮蔽能力を有し、貯蔵庫の表面線量が研究所での管理区域内の高線量区域の基準となる 20 μ Sv/h 以下となるよう設計する。

2. 説明資料

2.1 第2項第一号イについて

現在、厚さの異なる2種類のトリウム板（）を燃料室内の2基のトリウム貯蔵庫で保管している。写真1及び写真2にその外観を示す。この2基のトリウム貯蔵庫で所有している全てのトリウム  を保管することができる。

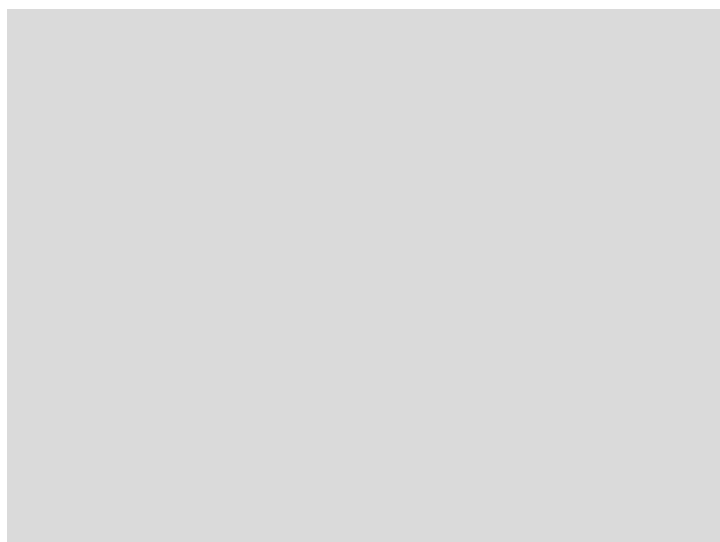




写真1 トリウム貯蔵庫Ⅰ（ ThⅠ用）
（幅：）

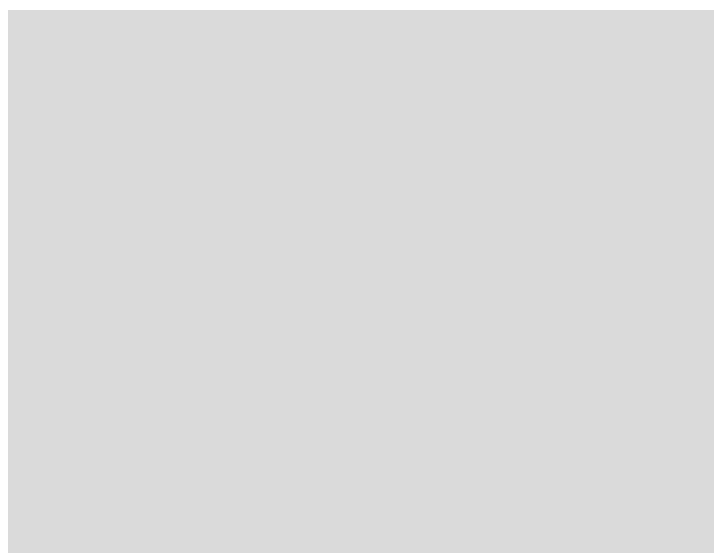




写真2 トリウム貯蔵庫Ⅱ（ ThⅡ用）
（幅：）

2.2 第2項第一号ロについて

トリウムの増倍率について確認した。

① 減速材無し

モンテカルロ計算コード MCNP により、トリウム（金属）単体の無限増倍率（無限大の体系での増倍率）を計算した。その結果、無限増倍率は 0.06304 ± 0.0005 となり、1 より十分に小さな値であるので、無限体積としても未臨界となることを確認した。

② 減速材あり（熱領域での増倍）

Th-232 の熱エネルギー領域で断面積等は以下の通りである。（0.0253eV での値）

$$\sigma_{\text{fission}} : 53.71 \mu\text{barn} \quad (\text{核分裂断面積})$$

$$\sigma_{\text{capture}} : 7.338 \text{ barn} \quad (\text{捕獲断面積})$$

$$vp : 1.851 \quad vd : 4.9 \times 10^{-2} \quad (1 \text{ 核分裂での中性子発生数})$$

出典：JENDL-4.0

<https://wwwndc.jaea.go.jp/cgi-bin/Tab80WWW.cgi?lib=J40&iso=Th232>

$$\text{増倍率} = (vp+vd) \times \sigma_{\text{fission}} / \sigma_{\text{capture}} = 1.39 \times 10^{-5}$$

熱領域の増倍率は 1 より十分に小さな値であるので無限体積としても未臨界となることを確認した。

③ トリウム貯蔵庫

MCNP により現在のトリウム貯蔵庫（トリウムの周囲に厚さ 10cm の鉛遮へい）の実効増倍率を計算した。

$$\text{鉛周囲に水なし} \quad 0.04274 \pm 0.0001$$

$$\text{鉛周囲に水} \quad 0.04275 \pm 0.0001$$

現在使用しているトリウム貯蔵庫の実効増倍率は 0.95 より十分に小さいことを確認した。

④ 濃縮ウラン（バードケージ）の影響

MCNP により固体減速炉心のバードケージをトリウム貯蔵庫に隣接した場合の実効増倍率を計算した。

$$\text{鉛周囲に水なし} \quad 0.04820 \pm 0.0001$$

$$\text{鉛周囲に水} \quad 0.44923 \pm 0.0001$$

現在使用しているトリウム貯蔵庫にバードケージを近接させた場合でも増倍率は 0.95 より十分に小さいことを確認した。

⑤ Th を照射して U-233 が生成された場合

100W で 1 時間の運転を 10 回繰り返し、その炉心にトリウムが装荷されていることを想定して ORIGEN-2.2 により燃焼計算を行ったところ、トリウムの全保有量を装荷したとき、U-233 の生成量は 1.04×10^{-3} g であった。この U-233 を Th に含めて③と同じトリウム貯蔵庫に貯蔵した場合の実効増倍率を MCNP により計算した。

鉛周囲に水なし 0.04274±0.0001

鉛周囲に水 0.04277±0.0001

Th から生成される U-233 を含めてもトリウム貯蔵庫の実効増倍率は 0.95 より十分に小さいことを確認した。

2.3 第 2 項第二号イについて

現在、トリウムは写真 1 と写真 2 に示すトリウム貯蔵庫に保管されている。トリウム貯蔵庫内でトリウムは鉛遮へい体で囲まれており、貯蔵庫表面でのガンマ線線量を低減させるようにしている。保有する全てトリウムをこの 2 基の貯蔵庫に入れた状態で、写真 1 の貯蔵庫の表面線量は約 $5 \sim 6 \mu\text{Sv/h}$ 、写真 2 の貯蔵庫の表面線量は約 $5 \sim 14 \mu\text{Sv/h}$ であり、研究所での管理区域内の高線量区域の基準となる $20 \mu\text{Sv/h}$ 以下となっている。

2.4 第 3 項について

第 3 項の「燃料取扱場所の放射線量及び温度を測定できる設備」については既設の設備であり、トリウム貯蔵に関して確認を要する条文には含まれていないと考えられるが、念のための説明を行う。

燃料室には図 1 に示すように 2 台の電離箱のガンマ線エリアモニタ (γF1 と γF2) が壁面に設置されている。[] のトリウム II の貯蔵庫 (写真 2) は γF1 のすぐ下に設置されている。

γF1 と γF2 の指示値の記録紙の例を写真 3 に示す。 $10^0 \sim 10^6 \mu\text{Sv/h}$ の対数スケールのため記録紙上での下限値は $1 \mu\text{Sv/h}$ である。保有している高濃縮ウラン燃料板とトリウム板はすべて燃料室に保管されており、記録紙に印字されたデジタル数値から換算すると、トリウム貯蔵庫に近い γF1 は約 $1.1 \mu\text{Sv/h}$ 、 γF2 は約 $0.7 \mu\text{Sv/h}$ となっている (常に γF1 のほうが γF2 に比べて高い値を示している)。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

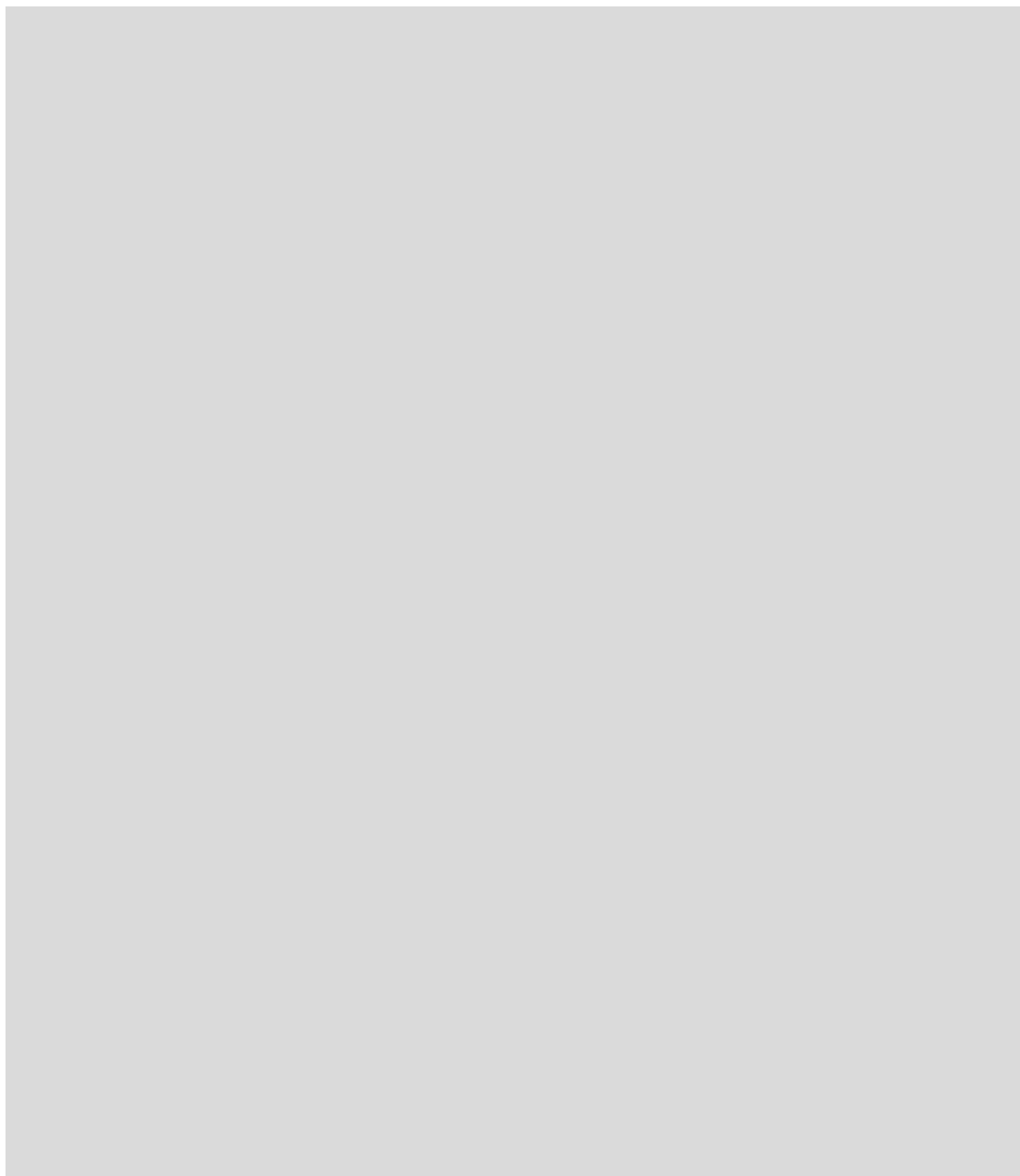


図1 炉室内放射線モニタ配置図

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

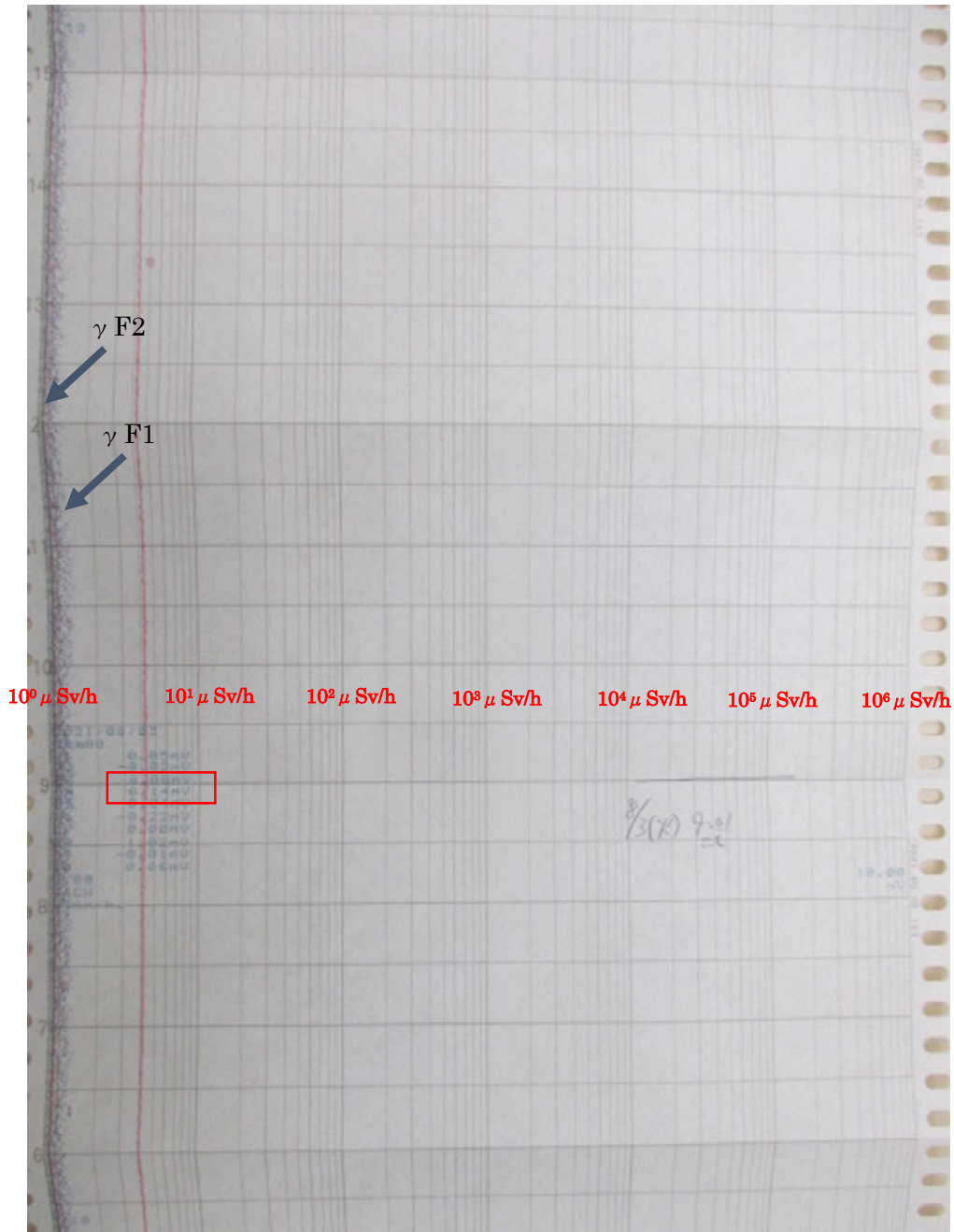


写真3 燃料室ガンマ線エリアモニタ記録紙

記録紙（データは打点式）は6デカードで $10^0\mu\text{Sv/h}$ から $10^6\mu\text{Sv/h}$ の範囲を示す。
 γF1 はCh.5、 γF2 はCh.6で、ここでの表示のデジタル値（赤枠）はCh.5が0.04mV
($1.1\mu\text{Sv/h}$)、Ch.6が-0.22mV ($0.7\mu\text{Sv/h}$)となる。
(記録紙[mV]と線量率[$\mu\text{Sv/h}$]の換算は、 $[\mu\text{Sv/h}] = 10^{(6/10 \times [\text{mV}])}$)



第二十五条 放射線からの放射線業務従事者の防護

1. 基本方針

(1) 要求事項に対する適合性

1) 要求事項

(放射線からの放射線業務従事者の防護)

第二十五条 試験研究用等原子炉施設は、外部放射線による放射線障害を防止する必要がある場合には、次に掲げるものでなければならない。

- 一 放射線業務従事者が業務に従事する場所における放射線量を低減できるものとする。
 - 二 放射線業務従事者が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、迅速な対応をするために必要な操作ができるものとする。
- 2** 工場等には、放射線から放射線業務従事者を防護するため、放射線管理施設を設けなければならない。
- 3** 前項の放射線管理施設には、放射線管理に必要な情報を原子炉制御室その他当該情報を伝達する必要がある場所に表示できる設備を設けなければならない。

2) 適合性の確認を要する条文

トリウム貯蔵に関して確認を要する条文は、第1項第一号である。

第1項第二号、第2項及び第3項は、トリウム貯蔵に関して設計方針の変更の必要はなく、確認を要する対象ではない。

3) 適合のための設計方針（考え方）

第1項第一号について、トリウム貯蔵庫は、放射線業務従事者が業務に従事する場所である燃料室に設置されるため、鉛を使用して十分な遮蔽能力を有するよう設計する。また、放射線業務従事者がトリウムを用いた作業を実施する際は、作業状況に応じて、鉛エプロンを着用する、あるいは鉛ブロック等による仮遮蔽を設けることで、京都大学複合原子力科学研究所原子炉施設保安規定第115条に規定にされる1mSv/週以下となるように被ばく管理を行う。

