

2021年2月3日
京大 KUCA ヒアリング資料

京都大学臨界実験装置 (KUCA)
設置変更承認申請について

京都大学複合原子力科学研究所

【コメント4】

12/2 のヒアリング資料について、誤記を修正した上、追加の図表を記載した修正資料を用いて説明すること。

【コメント5】

実験物の反応度測定に用いる制御棒反応度校正曲線は、制御棒位置から図のようにはならないのではないか。C1 と C2 について確認する必要がある。

12月2日のヒアリング資料を（別紙）の通り修正しました。（修正箇所は青字）

【コメント 7】

実験物の異常以外の異常な過渡変化及び設計基準事故において動特性評価条件に誤りがなかったを確認する必要がある。

【コメント 8】

想定している事象に対応する反応度添加量、スクラム時の抑制反応度について解析条件が妥当であることを確認する必要がある。

添付書類 10 の「運転時の異常な過渡変化の解析」では以下のような事象を評価している。

- (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（全ての基準炉心）
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（全ての基準炉心）
 - (iii) 実験物の異常等による反応度の付加（全ての基準炉心）
- (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（軽水減速の 1 炉心）
- (3) その他原子炉施設の設計により必要と認められる事象
 - (i) 重水反射体への軽水流入（軽水減速の炉心）
 - (ii) その他原子炉施設の設計により必要と認められる異常
 - a. 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（全ての基準炉心）
 - b. 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇（軽水減速の 1 炉心）

各事象についての反応度等を表 1 に示す。なお、「実験物の異常等による反応度の付加」の事象については今回判明した想定の誤りの結果を記載している。

各々の事象についての説明は以下の通りである。

- (1) 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心の場合、図 1-1）
 - ・ 過剰反応度は規制の最大値： $0.35\% \Delta k/k$
 - ・ 全制御棒反応度は規制の最小値： $1.0 + \text{過剰反応度} = 1.35\% \Delta k/k$
 - ・ 反応度が最大の 1 本： $(\text{全制御棒反応度}) \times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$
 - ・ 反応度の印加率は規制の最大値： $0.02\% \Delta k/k/s$

- ・初期状態では 0.01W の臨界状態で、線型出力計は 100% で 1W となるレンジ、過剰反応度の 0.35% $\Delta k/k$ 分の反応度だけ制御棒挿入
- ・挿入されていた制御棒を最大反応度印加率で引き抜くことで +0.35% $\Delta k/k$ の超過臨界状態（引抜きにかかる時間は「 $0.35 \div 0.02 = 17.5$ s」）
- ・線型出力が 120% を超えることで出力超過のスクラムにより 1 秒後に最大反応度の 1 本以外の 5 本の制御棒が落下し「 $1.35 - 0.45 = 0.9\%$ $\Delta k/k$ 」の反応度がステップ状に印加
- ・炉心は「 $+0.35 - 0.9 = -0.55\%$ $\Delta k/k$ 」の未臨界状態となる

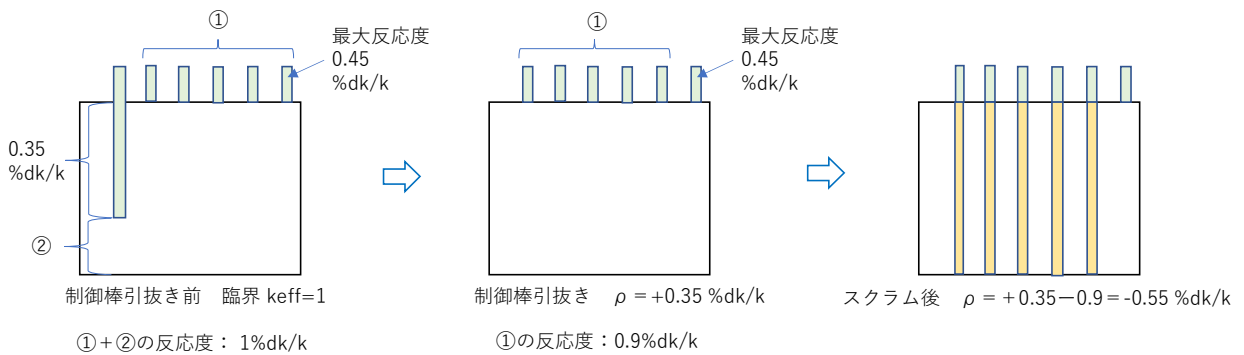


図 1-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）

軽水減速炉心では最大過剰反応度が 0.5% $\Delta k/k$ であるので、図 1-2 のようになる。（制御棒の引抜きにかかる時間は「 $0.5 \div 0.02 = 25$ s」）

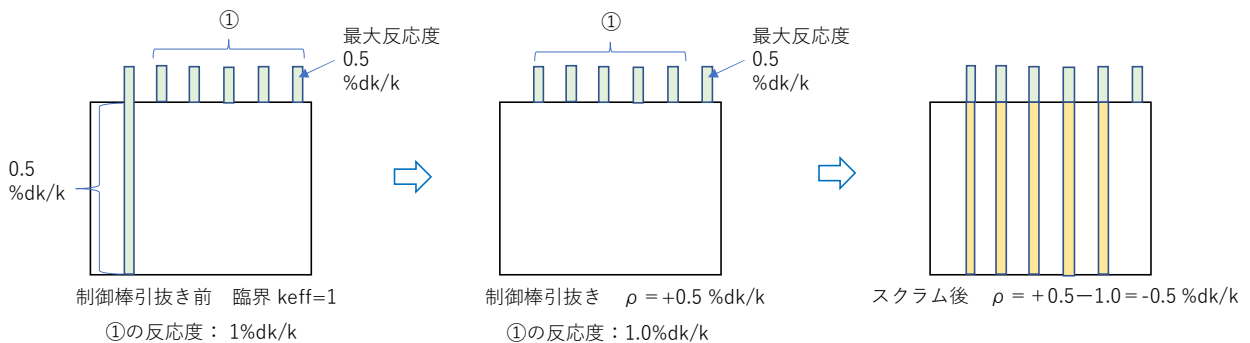


図 1-2 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）

(2) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心の場合、図 1-1 と同じ）

- ・ 過剰反応度は規制の最大値： $0.35\% \Delta k/k$
 - ・ 全制御棒反応度は規制の最小値： $1.0 + \text{過剰反応度} = 1.35\% \Delta k/k$
 - ・ 反応度が最大の 1 本： $(\text{全制御棒反応度}) \times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$
 - ・ 反応度の印加率は規制の最大値： $0.02\% \Delta k/k/s$
-
- ・ 初期状態では $0.01W$ の臨界状態で、線型出力計は 100% で $100W$ となるレンジ、過剰反応度の $0.35\% \Delta k/k$ 分の反応度だけ制御棒挿入
 - ・ 挿入されていた制御棒を最大反応度印加率で引き抜くことで $+0.35\% \Delta k/k$ の超過臨界状態（引抜きにかかる時間は「 $0.35 \div 0.02 = 17.5 \text{ s}$ 」）
 - ・ 線型出力が 120% を超えることで出力超過のスクラムにより 1 秒後に最大反応度の 1 本以外の 5 本の制御棒が落下し「 $1.35 - 0.45 = 0.9\% \Delta k/k$ 」の反応度がステップ状に印加
 - ・ 炉心は「 $+0.35 - 0.9 = -0.55\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる

軽水減速炉心の場合は図 1-2 のようになる。

(3) 商用電源喪失（軽水減速炉心、図 2）

- ・ 過剰反応度は規制の最大値： $0.5\% \Delta k/k$
 - ・ 全制御棒反応度は規制の最小値： $1.0 + \text{過剰反応度} = 1.5\% \Delta k/k$
 - ・ 反応度が最大の 1 本： $(\text{全制御棒反応度}) \times 1/3 = 0.5\% \Delta k/k$
-
- ・ 初期状態では $100W$ の臨界状態で過剰反応度の $0.5\% \Delta k/k$ 分の反応度だけ制御棒挿入（残りの全制御棒を挿入したときの反応度は「 $1.5 - 0.5 = 1.0\% \Delta k/k$ 」）
 - ・ 商用電源喪失によるスクラムで 1 秒後に最大反応度の 1 本（ $0.5\% \Delta k/k$ ）以外の 5 本の制御棒が落下し「 $1.0 - 0.5 = 0.5\% \Delta k/k$ 」の反応度がステップ状に印加
 - ・ 炉心は「 0.0 （臨界状態） $- 0.5 = -0.5\% \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる
 - ・ スクラムから 30 秒後にダンプ排水（炉心タンクからの排水）によりさらに $-1\% \Delta k/k$ の反応度が加わる

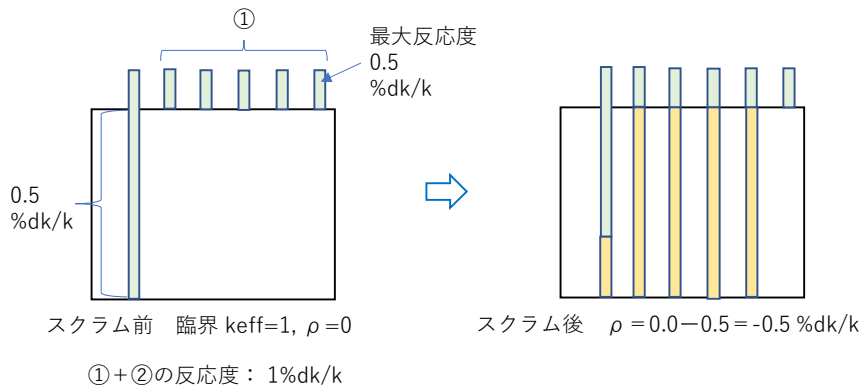


図2 商用電源喪失（軽水減速炉心）

(4) 重水反射体への軽水流入（軽水減速炉心）

臨界状態で運転していた際に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場合、及び重水タンク中の重水の一部が炉心タンクの軽水に混入した場合のどちらの場合についても炉心は未臨界状態となり制御系を使用しなくても直ちに原子炉は停止する。過渡解析の結果は添付10には記載していない。

(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（固体減速炉心、図3）

- ・ 過剰反応度は規制の最大値：0.35% $\Delta k/k$
- ・ 全制御棒反応度は規制の最小値：1.0 + 過剰反応度 = 1.35% $\Delta k/k$
- ・ 反応度が最大の1本：(全制御棒反応度) $\times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$

- ・ 初期状態では1Wの臨界状態で過剰反応度の0.35% $\Delta k/k$ 分の反応度だけ制御棒挿入（残りの全制御棒を挿入したときの反応度は「1.35 - 0.35 = 1.0% $\Delta k/k$ 」）
- ・ 外部からの中性子入射により出力増加し線型出力が120%を超えることで出力超過スクラムで1秒後に最大反応度の1本（0.45% $\Delta k/k$ ）以外の5本の制御棒が落下し「1.0 - 0.45 = 0.55% $\Delta k/k$ 」の反応度がステップ状に印加
- ・ 炉心は「0.0（臨界状態） - 0.55 = -0.55% $\Delta k/k$ 」の未臨界状態となる

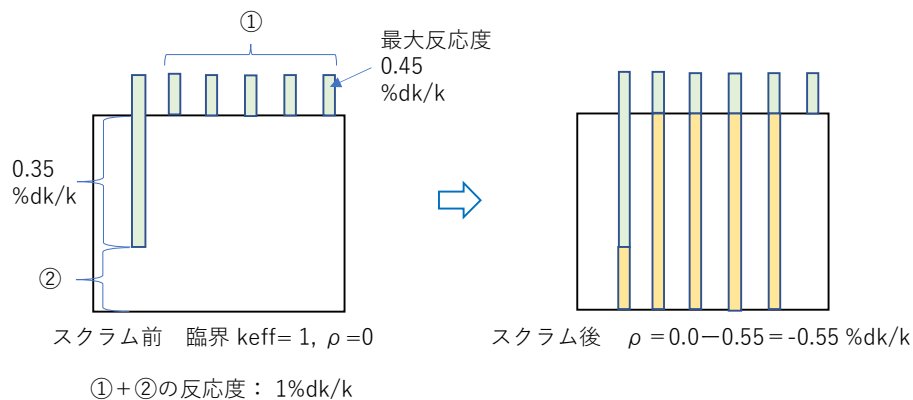


図3 中性子発生設備利用（固体減速炉心）

(6) 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇（軽水減速炉心）

- ・ 過剰反応度は規制の最大値：0.5% $\Delta k/k$
- ・ 全制御棒反応度は規制の最小値：1.0 + 過剰反応度 = 1.5% $\Delta k/k$
- ・ 反応度が最大の 1 本：(全制御棒反応度) $\times 1/3 = 0.5\% \Delta k/k$
- ・ 炉心の温度係数は規制の最大値：0.02% $\Delta k/k/^\circ C$
- ・ 初期状態では 100W の臨界状態で過剰反応度の 0.5% $\Delta k/k$ 分の反応度だけ制御棒挿入（残りの全制御棒を挿入したときの反応度は「1.5 - 0.5 = 1.0% $\Delta k/k$ 」）
- ・ 温度が 1.5 $^\circ C$ 上昇したときに線型出力が 120% を超えることで出力超過スクラムする。その際に印加した反応度は「0.02 $\times 1.5 = 0.03\% \Delta k/k$ 」で、1 秒後に最大反応度の 1 本（0.5% $\Delta k/k$ ）以外の 5 本の制御棒が落下し「1.0 - 0.5 = 0.5% $\Delta k/k$ 」の反応度がステップ状に印加
- ・ 炉心は「+0.03 - 0.5 = -0.47% $\Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。
- ・ 商用電源喪失の場合とほとんど同じ未臨界状態となるため、温度上昇量もほとんど変わらない（商用電源喪失の場合は FP の崩壊熱を含めて 1 $^\circ C$ 以下）と考えて解析結果は記載していない。

商用電源の喪失、中性子発生設備の利用について事象発生時には臨界状態であったため「実験物の異常等による反応度の付加」の事象と同様に制御棒の一部は炉心に挿入されており、その状態から制御棒落下により炉心に加えられる反応度は少なくなってしまうが、本解析で用いた反応度（スクラム後の未臨界度）の値に問題はなかった。

「運転時の異常な過渡変化の解析」の解析は 6 群の遅発中性子先行核を考慮した一点炉近似動特性方程式を汎用数式処理システム Mathematica を用いて数値的に解くことで行っている。Mathematica の入力については KUCA での実験を詳しく理解しており、かつ計算プログラムを使用した経験がある炉物理専門家に、その入力プログラムリストを確認してもらった。

表1 運転時の異常な過渡変化の解析での各事象の反応度等

解析項目	炉心	過剰反応度 (% Δ k/k)	全制御棒反応度 (% Δ k/k)	最大1本反応度 (% Δ k/k)	スクラム発生時の炉心反応度 (% Δ k/k)	スクラム後の反応度 (絶対値は未臨界度) (% Δ k/k)	備考
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	固体減速	0.35	1.35	0.45	0.35	0.35-(1.35-0.45)=-0.55	①
	軽水減速	0.5	1.5	0.5	0.5	0.5-(1.5-0.5)=-0.5	②
出力運転中の制御棒の異常な引抜き	固体減速	0.35	1.35	0.45	0.35	0.35-(1.35-0.45)=-0.55	
	軽水減速	0.5	1.5	0.5	0.5	0.5-(1.5-0.5)=-0.5	
実験物の異常等による反応度の付加	固体減速	0.35	1.35	0.45	0.0	0.5-(1.0-0.45) =-0.05	実験物 0.5%dk/k (想定誤り)
	軽水減速	0.5	1.5	0.5	0.0	0.5-(1.0-0.5) =0.0	実験物 0.5%dk/k (想定誤り)
商用電源喪失	軽水減速	0.5	1.5	0.5	0.0	0-(1.0 -0.5) =-0.5	②と同じ未臨界度 ¹⁾ 30秒後にダンプ 排水1%dk/k
重水反射体への軽水流入	軽水減速	0.5	1.5	0.5	スクラムは発生しない	制御系を用いずに未臨界状態となる	解析結果は記載していない
中性子発生設備利用	固体減速	0.35	1.35	0.45	0.0	0-(1.0 -0.45) =-0.55	①と同じ未臨界度
炉心タンクヒータ	軽水減速	0.5	1.5	0.5	0.03	0.03-(1.0 -0.5) =-0.47	解析結果は記載していない

1) 全制御棒反応度 (1.5%dk/k) から余剰反応度分 (0.5%dk/k) を引いた値がスクラム前に印加可能な反応度。スクラム時には最大反応度の1本 (0.5%dk/k) が印加できないと仮定するので、-0.5%dk/kの未臨界状態となる。

【コメント 10】

挿入管の反応度が有意な値を持たない条件について、過去の測定実績等により、距離により制限することの妥当性を説明すること。

【コメント 11】

測定した炉心条件、挿入管の配置などを示し反応度の測定方法及び測定結果について説明すること。

C35G0(4列)炉心において炉心の水位を 1320mm~1500mm と変化させたときの出力変化の測定結果を図 4 に示す。この測定は浅い未臨界状態で中性子源を挿入して測定を行ったものである。

この結果より炉心水位が約 1400mm 以上あると出力が一定となっていることが判る。燃料領域上端の水位は 1285mm であるので、燃料の上部反射体の厚さが約 115mm 以上あるとそれ以上水位を変化させても反応度に影響を及ぼさない、すなわち無限反射厚さと思なすことができると考えられる。

(上記の青字の箇所が 1 月 27 日のヒアリング資料から変更)

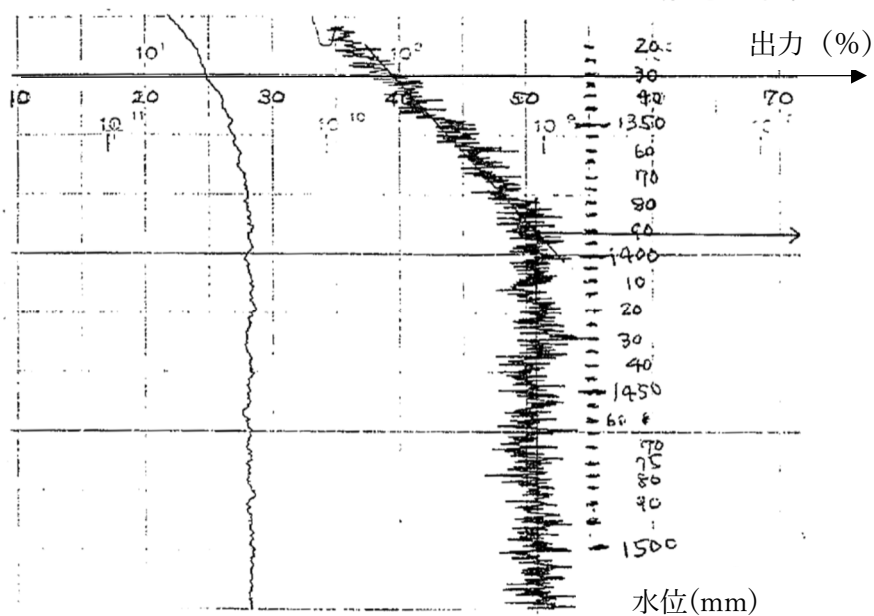


図 4 C35G0(4列)炉心の水位を変化させたときに出力変化

【コメント 10】

承認申請書、(2)主要な実験設備の構造 (ii) パイルオシレータについて、「使用中に実験物が装置から外れない構造とする。」としているが、パイルオシレータの構造、炉心への挿入方法、試料の取付方法などを、明確にし、使用中の脱落などにより反応度が添加されない見通しがあることを確認する必要がある。

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。

平成 28 年 5 月に承認を受けた申請書では「挿入する実験物の反応度は絶対値として $0.1\% \Delta k/k$ 以下に制限する」と記載していた。実験物のパイルオシレータへの装着方法については記載がなかったため使用中に実験物が落下するような事象も考えられるが、申請書で照射試料の反応度について「絶対値として $0.5\% \Delta k/k$ 以下」と制限していたためパイルオシレータで使用する試料の落下によるトラブルは照射試料の落下の事象に包含されると考えていたので、添付書類 10 での異常な過渡変化の事象としては取り上げなかった。

しかし、今回の設置変更申請において落下の可能性のある照射試料の使用を禁止したため、パイルオシレータで使用する試料については「使用中に実験物が装置から外れないような構造とする」という記載を追加することとした。

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ことを考えている。

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）を詰めて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。反応度の測定精度を上げるためのこの操作を繰り返す。

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。 $0.1\% \Delta k/k$ の反応度であれば仮にステップ状に印加されたとしても安定ペリオドは約 68 秒と通常運転での制御棒操作による出力上昇率以下であるため安全性に問題は無い。

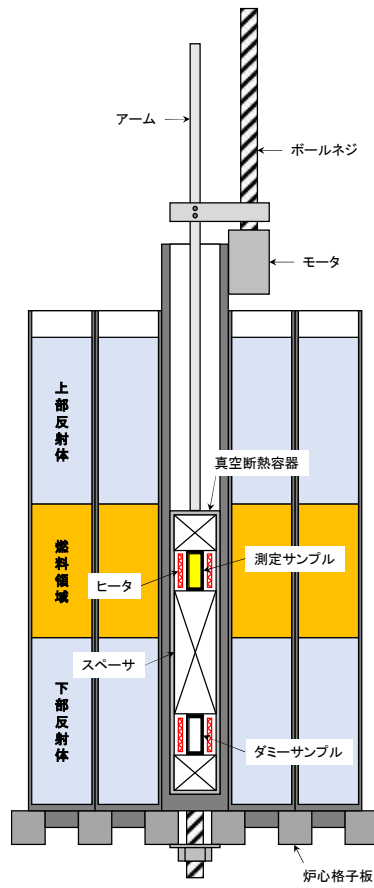


図5 パイルオシレータの概念図（炉心を横から見た断面図）