

2021年1月27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 1】

12月2日 ヒアリング資料 P1

微分反応度についてのデータを追加して説明すること。

【コメント 2】

12月2日 ヒアリング資料 P1

B 架台の炉心の反応度校正曲線から反応度値を計算する方法について必要なデータを追加して説明すること。微分反応度についてのデータを追加して説明すること。

固体減速炉心（A3/8”P36EU(3)炉心）の照射物の反応度は臨界状態での各制御棒位置と制御棒の反応度校正曲線（図 1）から求めています。算出方法は以下の通りです。

照射物未装荷時の余剰反応度：0.227 % $\Delta k/k$ （ペリオド法による測定）

照射物の反応度：0.227 - 0.1706 = 0.0564 % $\Delta k/k$

表 1 固体減速炉心での照射実験時のデータ

制御棒	制御棒値 (% $\Delta k/k$) ①	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入分の規格化 反応度 ³⁾ (図 1) ②	挿入反応度 (% $\Delta k/k$)
C1	0.3761	722.34	0.8117	0.0708 ¹⁾
C2	0.1055	723.05	0.8133	0.0197 ¹⁾
C3	0.4286	722.00	—	0.0801 ²⁾
合計				0.1706

1) ① × (1 - ②)

2) ペリオド法による測定

3) 図 1 の測定点のデータを直線内挿で算出

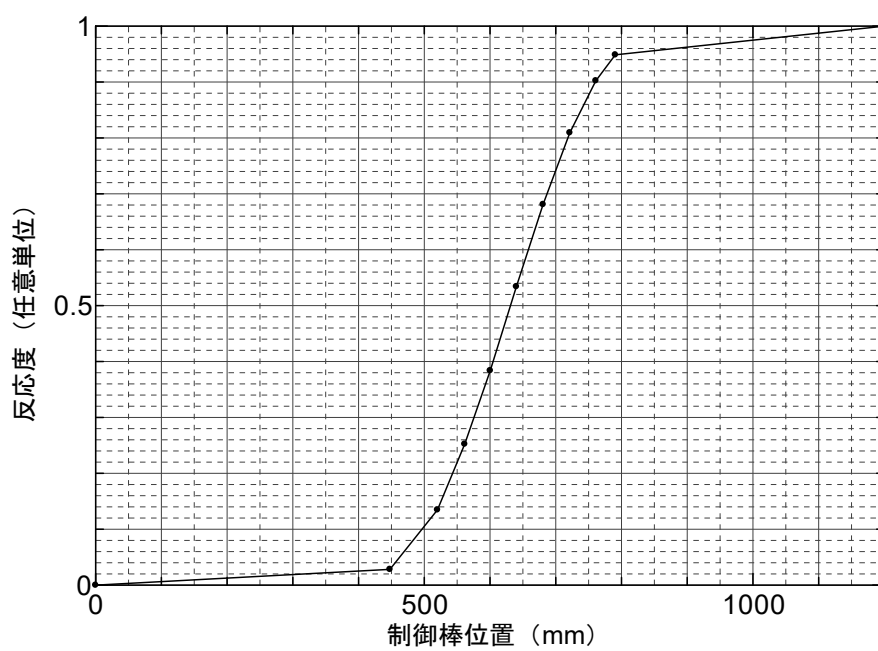


図1 A3/8”P36EU(3)炉心 制御棒積分反応度曲線
(全反応度を1に規格化、点は測定結果)

【コメント 3】

新規制以降に最初に炉心を構成した時の評価方法あるいは測定手順を説明すること。

現行の原子炉設置変更申請が承認された平成 28 年 5 月 11 日以降の落下の可能性のある実験物を使用した実験は全部で 31 件であり、それらは以下の 3 ケースに分類される（表 1 に各実験の実施日を示す）。

- (I) 定検炉心（固体減速架台）ケース
A3/8”p36EU(3)炉心あるいは B3/8”p36EU(3)炉心において裸金線 2 本と Cd 被覆付金線 2 本を出力校正を目的として照射
- (II) 定検炉心（軽水減速架台）ケース
C35G0(5 列)炉心において裸金線 4 本と Cd 被覆付金線 4 本を出力校正を目的として照射
- (III) 学生実験炉心および共同利用実験（軽水減速架台）ケース
C35G0(4 列)炉心において裸金線 3 本と Cd 被覆付金線 1 本を中性子束分布測定を目的として照射

結果については「ヒアリング資料(12月2日)」(以下、資料)に示している。

ケース(I)については資料の補足-1、ケース(II)については資料の補足-2、ケース(III)については資料の補足-3の通りで、すべて過剰反応度は正ペリオド法、各制御棒の反応度は落下法により測定している。

表 1 2016 年 5 月 11 日以降の実験物照射実験の実施日

炉心の種類	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
定検炉心 (固体減速)	5/25	4/11	4/3	7/27
	5/31	4/19	4/11	8/5
定検炉心（軽水減速）	6/13	6/26	4/17	7/15
学生実験炉心 (軽水減速)	7/5	7/11	6/26	2/12*
	7/11	7/17	7/3	2/13*
	7/19	7/25	7/09	
	7/26	8/1	7/17	
	8/29	9/11	7/24	
	9/5	9/19		

【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 6】

軽水減速炉心において照射物の反応度を評価するためには、照射物を挿入した炉心（燃料枚数 432）を校正するために基準炉心（燃料枚数:430）に追加した 2 枚の燃料板の反応度が必要である。従って、追加した燃料板の位置とその反応度の測定結果について詳細に説明すること。

実験では以下のような手順で測定を行った。

① 422 枚装荷炉心

3501～3508 燃料フレーム：各 40 枚（合計 320 枚）

3509、3512 燃料フレーム：各 25 枚（合計 50 枚）

3510、3511 燃料フレーム：各 26 枚（合計 52 枚）

余剰反応度：0.021% $\Delta k/k$ （正ペリオド法により測定）

② 430 枚装荷炉心

3501～3508 燃料フレーム：各 40 枚（合計 320 枚）

3509、3512 燃料フレーム：各 27 枚（合計 54 枚）

3510、3511 燃料フレーム：各 28 枚（合計 56 枚）

余剰反応度：0.394% $\Delta k/k$ （正ペリオド法により測定）

上記の①と②より燃料板 1 枚当たりの反応度は

$$(0.394 - 0.021) \div 8 = 0.0466\% \Delta k/k/\text{枚}$$

となる。

③ 432 枚装荷炉心

3501～3508 燃料フレーム：各 40 枚（合計 320 枚）

3509～3512 燃料フレーム：各 28 枚（合計 112 枚）

432 枚装荷時の余剰反応度(照射物装着前)：

$$0.394 + 0.0466 \times 2 = 0.487\% \Delta k/k$$

照射物の反応度：

$$0.487 - 0.163 = 0.324 \% \Delta k/k$$

- ② から③の手順で追加した燃料板は外側の燃料フレームであるため、実際には1枚当たりの反応度は上記の手順により求められた $0.0466\% \Delta k/k/枚$ より小さくなるはずである。そのため余剰反応度(432 装荷時、照射物装着前)の値は $0.487\% \Delta k/k$ より小さくなるため照射物の反応度は上記の値 $0.324 \% \Delta k/k$ より小さくなる。

表2 C35G0(4列) (燃料板を432枚装荷)

制御棒	制御棒価値 (% $\Delta k/k$)	照射物装荷時の 臨界制御棒位置 (mm)	挿入反応度 (% $\Delta k/k$)
C1	0.289	504.34	0.029
C2	0.464	505.05	0.048
C3	0.849	504.49	0.086
合計			0.163

(制御棒 S4~S6 は上限 (炉心から引き抜かれた状態))

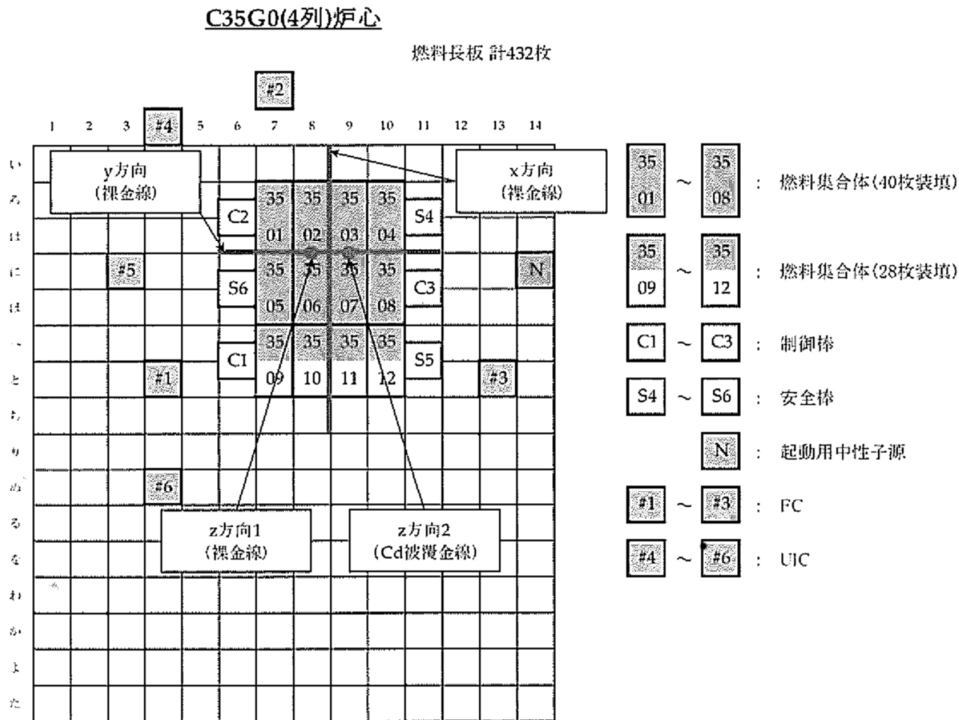


図2 C35G0(4列)炉心 炉心配置図(432枚装荷)

【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での説明が不足しておりました。

反応度の解析に用いたヒアリング資料の図2-1の校正曲線はC架台の積分反応度校正曲線ですが、同じ軽水減速炉心ではありますが制御棒設置位置が少し異なる炉心での測定結果です。その炉心ではC1の積分反応度が約0.33% $\Delta k/k$ でした。図中のC2の結果は積分反応度をC1と同じであるとしたとき(約0.33% $\Delta k/k$ に規格化したとき)の結果です。コメント1の対応と同じように(コメント1では最大値を1.0に規格化)、この形状は同じであるとして各制御棒の反応度を考慮して挿入反応度の計算を行いました。

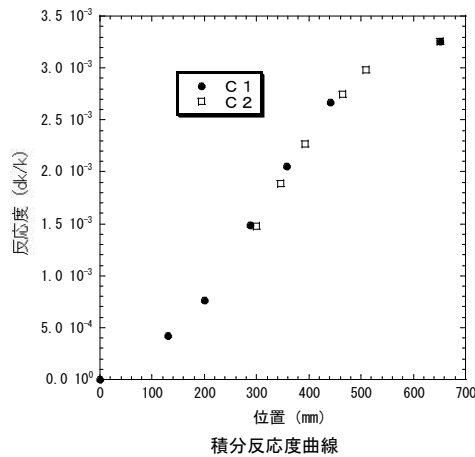


図2-1 C架台の制御棒反応度校正曲線

【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
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き
 - (iii) 実験物の異常等による反応度の付加
- (2) 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化
 - (i) 商用電源喪失
- (3) その他原子炉施設の設計により必要と認められる事象
 - (i) 重水反射体への軽水流入
 - (ii) その他原子炉施設の設計により必要と認められる異常
 - a. 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 - b. 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

各事象についての反応度等を表 3 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との誤りの結果を記載している。

商用電源の喪失、重水反射体への軽水流入、中性子発生設備の利用、炉心タンクヒータの利用については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）は「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」の場合と同じ値で問題はなかった。

「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3 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 (% $\Delta k/k$)	全制御棒反応度 (% $\Delta k/k$)	最大1本反応度 (% $\Delta k/k$)	スクラム発生時の炉心反応度 (% $\Delta k/k$)	スクラム後の反応度 (絶対値は未臨界度) (% $\Delta k/k$)	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	30秒後にダンプ排水1%dk/k ¹⁾
重水反射体への軽水流入	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⁾
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	0.0	0-(1.0 -0.5) =-0.5	②と同じ未臨界度 ¹⁾

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9】

再発防止のための今後の対応に関して、4項目で新たに設置する小委員会が設置申請書を作成するとしている。一方、本小委員会は原子炉安全委員会の下に設置するとなっているが、小委員会は申請等を所感する部室に代わって一次資料を作成することになるのか、その場合のチェック機能についての考え方を確認する。

原子炉安全委員会の下部組織として申請業務小委員会(仮称)を業務ごとに設置し、申請書の作成から審査対応を一貫して行います。既に同様な小委員会(検査小委員会)は存在し、定期事業者検査を独立性を確保して実施しています。申請業務のための手順書は現在策定中ですが、業務ごとに小委員会を組織し、委員長は原子炉安全委員会内規に従って所長が任命し、委員としては当該申請の主たる部室の長に加え、申請内容を勘案した上で、必要な専門性や経験などとともに独立性にも配慮し、所長が任命することになります。申請業務のプロセスについては手順書に記載しますが、まずは担当部室によって計画書を策定し、小委員会でのレビュー等のプロセスを小委員会で確定します。その後、申請内容や委員の専門、経験を加味した上で委員の役割分担を決め、作業を開始します。具体的な作業は委員である当該申請の主たる部室の長や部室が行うこととなります。

【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 3 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 125mm 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見なすことができると考えられる。

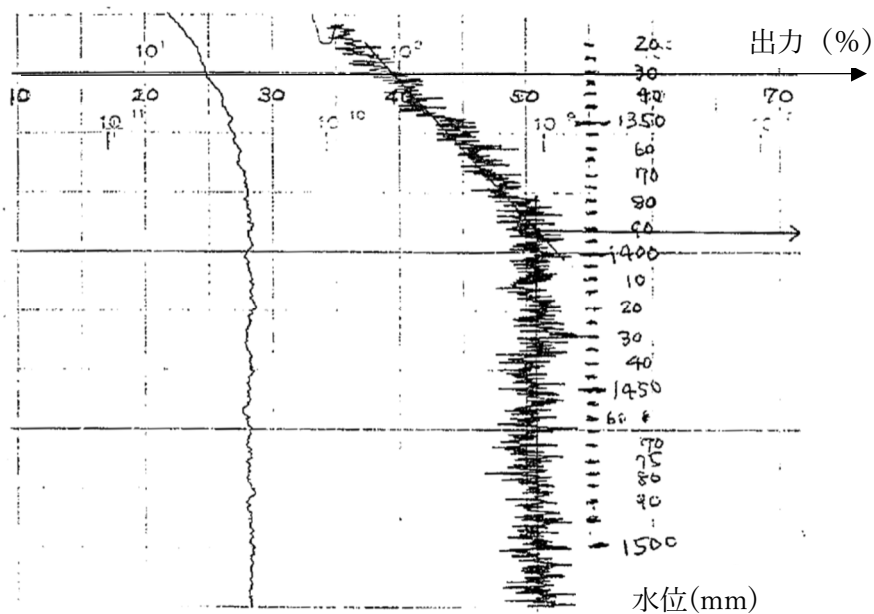


図 3 C35G0(4列)炉心の水位を変化させたときに出力変化

軽水減速炉心で最も中性子スペクトルの硬い C30 炉心において、炉心外側反射体厚さを
 変化させたときの反応度の変化をモンテカルロ計算コード MCNP により解析を行った。

図 4 に C30G0(4 列)炉心の水平方向炉心配置図を示す。この図で矢印で示した反射体厚
 さを変化させたときの実効増倍率の解析結果から反応度変化を求めた(外側境界は長方形を
 保つ)。反射体厚さが 25cm のときを基準として反射体厚さを変化させた際の反応度の解析
 結果を図 5 に示す。この図から反射体厚さが 15cm 以上あれば反応度はほぼゼロとなっ
 ていることが判る。従って中性子スペクトルの硬い C30 炉心であっても 20cm 厚さの反射体
 であれば十分に無限反射体と見なすことができる。

以上より燃料領域から 20cm 以上離して挿入管を設置すれば、挿入管に水が流入するよう
 な事象が発生しても炉心に反応度が加わることはないと考えられるので、保安規定の下部
 規定(マニュアル)である保安指示書にこのような制限を追加する。

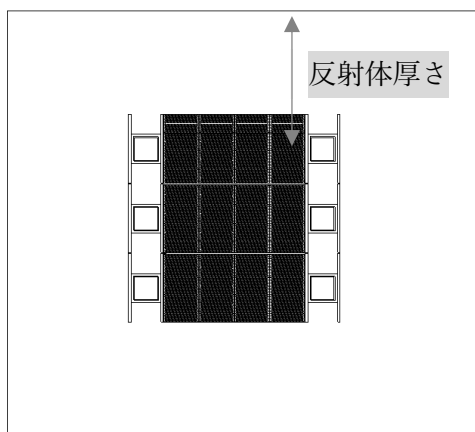


図 4 C30G0(4 列)炉心 配置図 (MCNP 入力)
 (外側の枠の外は真空)

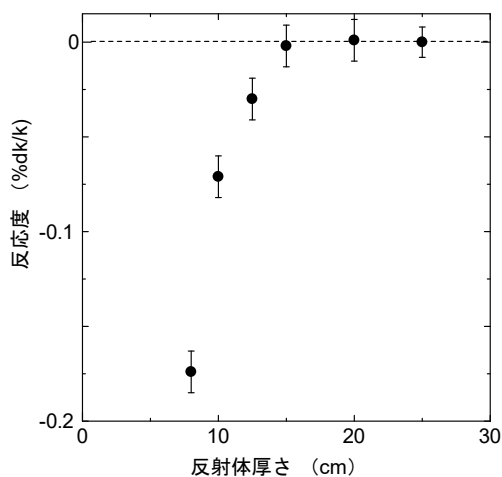


図 5 反射体厚さを変化させたときの反応度