

2021年5月12日
京大 KUCA ヒアリング資料-1

京都大学臨界実験装置 (KUCA)
設置変更承認申請について

- 【燃料温度の算出方法】
- 【照射物の反応度】
- 【過渡解析で取り上げる代表炉心】
- 【過渡解析の制御棒引抜きの反応度印加条件】
- 【初期条件及びパラメータ誤差の影響】

京都大学複合原子力科学研究所

【燃料温度の算出方法について】

「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）の資料 2-2（48 ページ）において燃料温度の算出方法として、中性子束分布（出力分布）が x,y,z 方向において \cos 分布であるとし、厳しい条件となるように反射体節約をゼロであるとして評価すると出力の平均値に対して、

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

を掛けると出力（発熱量）の最大値を求めることができるとして、その結果を用いて添付 10 の過渡解析解析を行っていた。

出力分布が \cos 分布でない場合、反射体との境界付近、または 2 分割炉心での中央水ギャップ近傍で出力が最大となる場合があるのでその影響について調べるため、添付 8 での臨界解析に用いた SRAC の CITATION により炉心内での発熱分布を求めた。出力の最大値が炉心中心でない例として、図 1 に固体減速炉心の中で最も中性子エネルギースペクトルが硬い LL1 炉心の燃料領域高さが約 30cm の場合の垂直方向の出力分布（反射体との境界で出力が最大）、また図 2 に軽水減速炉心の C45 炉心（5 列）でギャップ幅 5cm が 2 分割炉心の水平方向の出力分布（炉心間の水ギャップとの境界で出力が最大）を示す。

燃料領域での平均値と最大値の比を算出した結果を表 1 に示す。2 分割炉心ではない単一炉心において反射体との境界付近で出力が大きく増加するのは燃料領域での中性子エネルギースペクトルが硬い場合、炉心のサイズが小さい場合（垂直方向の長さが短い場合や燃料体数が少ない場合）であるので、それらの場合について確認した。その結果、表 1 に示した全ての炉心において炉心出力の平均値と最大値の比は式（1）に示した値（約 3.88）より小さくなっており、出力分布の平均値に（1）の値を掛けて出力の最大値を求める結果は安全側（高温側）となるといえる。

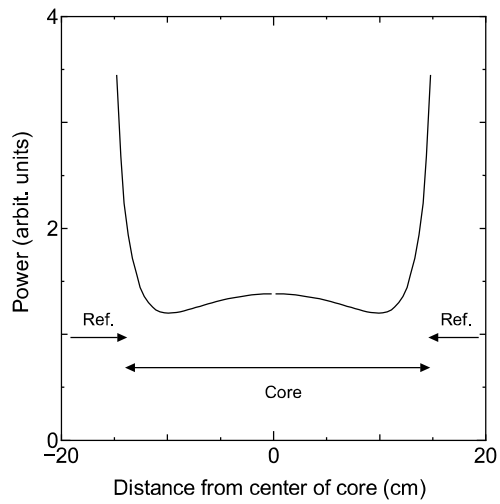


図1 LL1(30cm)炉心のz方向出力分布

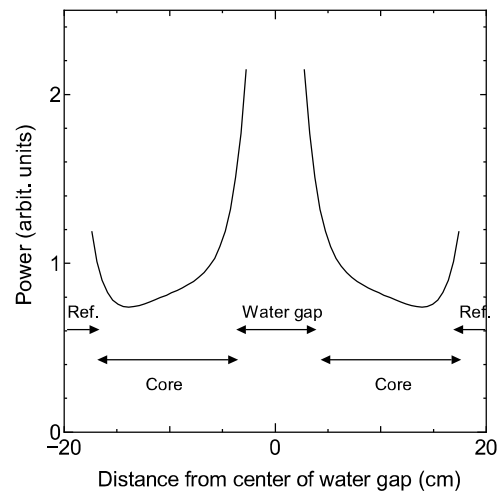


図2 C45G5(5列)炉心のx方向出力分布

表 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
固体減速炉心	LL1 (30cm) ^{*1)}	3.23
	LL1 (40cm) ^{*1)}	2.96
	LL1 (50cm) ^{*1)}	3.07
	L1 (30cm)	2.81
	L1 (40cm)	2.31
	L1 (50cm)	2.97
	L2 (30cm)	2.13
	L2 (30cm)	2.03
	L2 (30cm)	2.35
	L3 (30cm) ^{*2)}	1.91
軽水減速炉心	C30G0 (4 列) ^{*3)}	2.51
	C30G0 (5 列)	2.36
	C45G2 (4 列) ^{*4)}	2.60
	C45G5 (4 列)	3.28
	C45G6 (4 列)	3.26
	C45G7 (4 列)	3.14
	C45G2 (5 列)	2.55
	C45G5 (5 列)	3.30
	C45G6 (5 列) ^{*5)}	3.34
	C45G7 (5 列)	3.28

*1：固体減速炉心の中で最もスペクトルが硬い炉心

*2：燃料体数が最も少ない炉心

*3：軽水減速炉心の中で最もスペクトルが硬い炉心

*4：燃料板枚数が最も少ない炉心

*5：2 分割炉心で比が最大となる炉心

【照射物の反応度について】

1) 申請書の記載方法について

照射物の装荷に関する制限を以下のように設定する。

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）

「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固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限する」

照射物を取り付けた状態で運転を行うためには過剰反応度が $0.35\% \Delta k/k$ または $0.5\% \Delta k/k$ 以下を満足しなければいけないことは自明の条件となる。

照射物が炉心から落下した場合に正の反応度が加わるが、上記の通り照射物を取り付ける前の状態（照射物を取り除いた状態）で過剰反応度は $0.35\% \Delta k/k$ または $0.5\% \Delta k/k$ 以下であることから、その場合でも炉心の核的制限値は満足されている。

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）

「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固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限する」

照射物を取り付けた状態で過剰反応度が $0.35\% \Delta k/k$ または $0.5\% \Delta k/k$ 以下を満足しなければいけないという炉心の核的制限値は満足している。

照射物が炉心から落下した場合に負の反応度が加わるが、その場合でも炉心の核的制限値は満足されている

照射物に関する本文の記載案は以下の通り。

=====

ヌ. その他原子炉の附属施設の構造及び設備

(3) その他

炉心装荷物

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試料又は挿入管若しくは

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

その両方を炉心に装荷する。

(i) 照射試料

種類	金、カドミウム等で燃料体に貼り付ける照射物
形状	板状、線状等
反応度の制限	(a)照射試料を取り付けることにより負の反応度が加えられる場合には、照射試料を取り付ける前の状態での炉心の過剰反応度を固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限する。照射試料を取り付けて臨界状態で運転を行うためには、照射試料の反応度の絶対値は固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限される。 (b)照射試料を取り付けることにより正の反応度が加えられる場合には、照射試料の反応度が最も大きくなる位置に取り付けられた場合であっても炉心の過剰反応度を固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限する。照射物を取り付ける前に臨界状態で運転を行うためには、照射物の反応度の絶対値は固体減速炉心では $0.35\% \Delta k/k$ 以下、軽水減速炉心では $0.5\% \Delta k/k$ 以下に制限される。
取り付け方法	運転中は反応度の有意な変動がない様にテープ等で固定する

(ii) 挿入管

種類	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（固体減速炉心用、軽水減速炉心用）
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
設置場所	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過剰反応度が $0.5\% \Delta k/k$ 以下となる場所 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

=====

2) 「実験物の異常等による反応度の付加」の解析方法

添付 10 の「運転時の異常な過渡変化」の項目のうちの「実験物の異常等による反応度の付加」の解析は以下のように行う。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付書類 8 で選定した代表炉心のうち、燃料の最高温度が最大となる炉心で、炉心に負の反応度を有する実験物を装荷しているとする。

(2) 反応度等

実験物が取り付けられていない状態での各炉心の過剰反応度

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 $1.5 \times 1/3 = 0.5 \% \Delta k/k$

実験物の反応度

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 $0.5 \% \Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒はすべて引き抜いて出力 1W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

(5) 安全保護回路系等の動作

(4)、(5) は「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」と同じ

(6) スクラム信号発生

- ・ 炉心に取り付けていた実験物が炉心から落下し、固体減速炉心では $+0.35 \% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $+0.5 \% \Delta k/k$ の反応度がステップ状に加わる。
- ・ 線型出力計の指示値が 120%（出力が 120W）を超えたときにスクラム信号が発生する。安全出力計の指示値も 120% を越えて、同時にスクラム信号が発生する。

【添付 10 の「運転時の異常な過渡変化」および「設計基準事故」で取り上げる代表炉心について】

以下のような代表炉心を取り上げて申請書に記載する。

なお解析で使用するパラメータ等については添付 8 で示した値を用いる。

1) 「運転時の異常な過渡変化」

(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

これらの項目については、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付書類 8 で選定した代表炉心のうち、燃料の最高温度が最大となる炉心とする。なお、解析については固体減速炉心の全ての炉心について行い、その中で最も燃料温度が高くなる炉心について申請書に記載する。

(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

固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付書類 8 で選定した代表炉心のうち、最も臨界量の少ない炉心とする。商用電源喪失時の出力変化は炉心の動特性パラメータにはほとんど依存せず半減期の長い遅発中性子の減衰でほとんど決まっているため、臨界量が少なく発熱密度の高い炉心が燃料温度の評価が厳しくなると考えられるためである。

(3) その他原子炉施設の設計により必要と認められる事象

- (i) 重水反射体への軽水流入

(ただし、これまでの審査会合での説明のなかで低濃縮ウラン燃料を用いた炉心では重水タンクを使用しないとしているので、この項目については追加の記載は行わない) (2019 年 5 月に提出した設置変更承認申請書からの変更なので、補正申請で対応する)

(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

添付書類 8 で選定した固体減速炉心の代表炉心のうち、燃料の最高温度が最大となる炉心とする。その際の中性子発生量の条件としては、現実的な炉心配置において中性子発生設備を使用したとき中性子発生量を申請書の規制値の最大値 (10^{11}n/sec) としたときを想定する (2020 年 11 月 11 日のヒアリング資料に記載)。なお、解析については固体減速炉心の全ての炉心について行い、その中で最も燃料温度が高くなる炉心について申請書に記載する。

b. 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

軽水減速炉心の添付 8 の代表炉心の中の反応度温度係数が正となる炉心のうち燃料の最高温度が最大となる炉心とする。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い、その中で最も燃料温度が高くなる炉心について申請書に記載する。

2) 「設計基準事故」

(1) 反応度の異常な投入

(i) 燃料落下又は燃料誤装荷

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の添付 8 の代表炉心の中で各燃料セルの炉心のうち燃料体 1 本当たりの反応度の大きな炉心長が約 50cm の炉心 (L5.5P-50、L4P-50、L3P-50、L2P-50、L1P-50、LL1P-50) の中で、燃料の最高温度が最大となる炉心とする。

(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

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付 8 の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする。これは臨界量が少ない炉心のほうが燃料の単位体積中に含まれる核分裂生成物の量が多くなるため、環境への影響

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

が大きくなると考えられるためである。

(ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする。これは臨界量が少ない炉心のほうが同じ出力での中性子束密度が大きくなるため、実験物の単位体積中に含まれる核分裂生成物の量が多くなるため、環境への影響が大きくなると考えられるためである。

【運転時の異常な過渡変化の項目での

「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」の解析の反応度印加条件について】

「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」の解析における制御棒引抜きに伴う反応度の印加条件について、以下のような「ケース A」から「ケース C」の3つの解析方法について検討する。

ケース A (現在の申請書の解析条件の場合)

- ・余剰反応度が核的制限の最大値である固体減速炉心 $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心 $0.5\% \Delta k/k$ の炉心において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 $0.35/0.02=17.5\text{sec}$ 、軽水減速炉心では $0.5/0.02=25\text{sec}$ かかる。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 1.2W) を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・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。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

ケース B (非常にゆっくりと出力上昇の場合)

- ・余剰反応度が非常に小さい (ほとんどゼロ) 炉心において制御棒をごく僅か引き抜くことにより正の反応度をステップ状に加える。
- ・ここで加える反応度はスクラムまでの積算出力が 1 ヶ月の積算出力の最大値 ($100\text{Wh}=3.6 \times 10^5\text{J}$) となるような値であるとする。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 1.2W) を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・余剰反応度をゼロとすると制御棒の全反応度は $1.0\% \Delta k/k$ 、最大 1 本の反応度は $1.0/3=0.333\% \Delta k/k$ となるので、スクラム時に加わる反応度は $1-0.333=0.666\% \Delta k/k$ となり、炉心の反応度は $-0.666\% \Delta k/k$ となる。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

ケース C (運転を行う際の現実的な緩慢な出力上昇の条件)

- ・余剰反応度が $0.05\% \Delta k/k$ の炉心において制御棒のステップ状に引き抜くことにより $0.05\% \Delta k/k$ の反応度を加える。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

- ・線型出力計の指示値が 120%（出力が 1.2W）を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・制御棒の全反応度は 1.05%Δk/k、最大 1 本の反応度は $1.05 / 3 = 0.35\% \Delta k/k$ となるので、スクラム時に加わる反応度は $1.05 - 0.35 = 0.7\% \Delta k/k$ となり、炉心の反応度は $-0.65\% \Delta k/k$ となる。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

ケース A は新規制基準対応のための設置変更申請書（2016 年 5 月承認）の高濃縮ウランの炉心での解析でも取り上げた条件で、現在申請中の設置申請書でもこの条件での解析を行っており、制御棒は挿入される直前での出力が最も大きくなる場合と考えられる。

ケース B は積算出力が 1 ヶ月の積算出力の最大値（1 回の運転での最大値）となる条件で、放熱を考えない場合であれば最も燃料の温度上昇が大きくなる。しかし、その場合の解析例を表 2 に示すが、SCRAM に至るまでの約 402 日が必要となるため現実的なシナリオとは考えられない。

ケース C は今回新たに提案するシナリオである。ここでの 0.05%Δk/k という反応度はペリオドが約 160 秒（倍加時間で約 120 秒）であり、実際の運転での制御棒校正実験などで印加することがある比較的小さな反応度であり、ゆっくりと出力が上昇する現実的なシナリオであると考えられる。

以上より、「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」の解析における制御棒引抜きの条件としてケース A とケース C を取り上げることを提案したい。

表 2 ケース B の解析結果 (C30G0(4 列)炉心)

反応度 (%dk/k)	ペリオド (sec)	SCRAM 時間 (sec)	ピーク出力 (W)	積算出力 (J)	燃料温度上 昇 (K)
0.17	31.0	133.7	1.24	40.1	0.0007
0.1	47.8	310.2	1.22	88.5	0.0016
0.005	1959	9381	1.20	2384	0.048
0.0000327	—	1.45e6(402day)	1.20	360000	6.5

【過渡解析での初期条件及びパラメータ誤差の影響について】

過渡解析において結果に影響を及ぼす可能性があるパラメータとしては以下のような項目がある。

- (1) 炉心出力
- (2) 燃料重量
- (3) 実効遅発中性子割合、中性子平均寿命

(1) の炉心出力の絶対値を求める手法としては金線（または金箔）の反応率から求める方法が用いられている。その例として毎年裸金線と Cd 付き金線を炉心の異なる 4 箇所に取り付けて照射を行い出力校正を行っている軽水減速炉心の C35G0(5 列)炉心（図 3）での出力校正実験の結果を表 3 に示す。この結果より炉心出力の値は 6%以内の差の範囲に入っていることが判る（金線の反応率を求める際の放射線測定時の統計誤差は 1%以下）。以上より、炉心出力の誤差については高々 10%以内であると考えられる。

(2) の燃料重量については添付 8 に関する審査会資料（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「1.3 代表炉心の解析精度（p 5）」に示した通り臨界質量の誤差として±6%を見込んでいるので、燃料重量を-6%とすると同じ積算出力であっても燃料温度は+6%増加することになる。

(3) の実効遅発中性子割合（ β_{eff} ）と中性子平均寿命（ ℓ ）の各々の誤差を評価することは非常に難しいが、審査会資料（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「1.3 代表炉心の解析精度（p 5）」において即発中性子減衰定数（ β_{eff}/ℓ ）の誤差を±8%とするとしたので、仮に実効遅発中性子割合と中性子平均寿命の両者に同程度の誤差（±約 5.7%）の誤差があるとすると過渡解析での積算出力の値は異なってくる。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

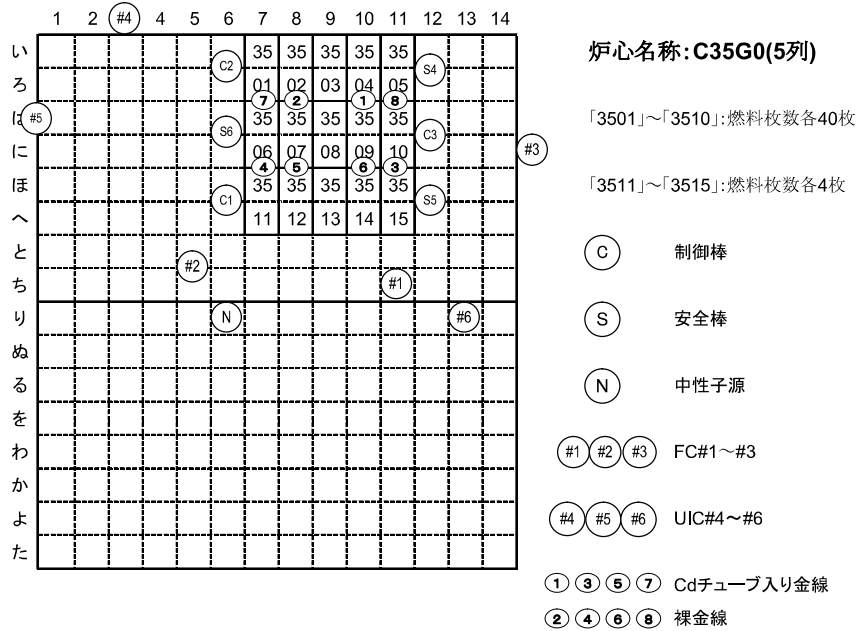


図3 C35G0(5列)炉心 出力校正のための炉心配置図

表3 出力校正時の各位置における反応率から求めた出力

図3中の測定位置	炉出力 (W)		
	2013年	2012年	2011年
①と②	1.186	1.244	1.162
③と④	1.118	1.173	1.121
⑤と⑥	1.130	1.218	1.158
⑦と⑧	1.154	1.230	1.153
最大値と最小値の比	1.06	1.06	1.04