

2020年4月8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

1. 軽水減速炉心の代表炉心の解析について

「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)において、解析を行う代表炉心について選定について説明した。内容は以下の通りである。

- 1) C30、C35、C45、C60 炉心で燃料体の配置は 4 列、5 列とする。
- 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 種類の炉心で列数の異なる 2 種類の炉心、分割幅は 5 種類であるので合計 20 炉心を選定する。

解析手法については「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)に説明した通りである。

軽水減速炉心の臨界となる体系の臨界量の臨界 ($k_{eff}=1.0$) となる炉心高さ、臨界量の解析結果を表 1 に、動特性パラメータ、反応度温度係数、ボイド反応度係数の解析結果を表 2 に、炉心配置の例を図 1、2 に示す。

なお 2 分割炉心の C45G(6H₂O)、C45G(4H₂O) C45G(6H₂O) (分割幅が 4cm または 6cm) についてはここで取り上げる代表炉心には含まれていなかったが、これらは反応度温度係数が正となる炉心であったので、分割幅に対する温度係数の変化を調べるために追加で取り上げた。

KUCA での核的制限値として、軽水減速炉心の燃料装荷量は [] であることが規定されている。「核計算の妥当性の確認について」の項目で臨界質量の解析精度は ±4% としているので、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 1 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 $+2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^\circ C$ 以下であることを記載されている。「核計算の妥当性の確認について」の項目で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 2 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

各炉心の β_{eff} (実効遅発中性子割合)、 ℓ (中性子平均寿命)、 β_{eff}/ℓ を図 3~5 に示す。 β_{eff} は H/U-235 が増加したとき 100 近傍で最大となりその後減少するが、最大値と最小値の違いは 2% 以下と非常に小さい。 ℓ は H/U-235 は H/U-235 の増加に対して単調に増加している。

C45 の 2 分割炉心の温度係数を図 6 に示す。5 列炉心では分割幅が約 4~8cm のときに温度係数が正になり、4 列炉心では分割幅が約 6cm のときのみ温度係数が正になることが判る。

表1 代表炉心の臨界量 (LEU 軽水減速炉心)

炉心名称 ^a	H/ ²³⁵ U	列	炉心長さ (cm)	
C30G0	80	4	40.6	
		5	31.6	
C35G0	109	4	34.4	
		5	27.7	
C45G0	167	4	31.3	
		5	25.6	
C60G0	247	4	32.9	
		5	26.7	
C45G (2H ₂ O)	167	4	30.1	
C45G (5H ₂ O)			38.8	
<u>C45G (6H₂O)</u> ^c			43.0	
C45G (7H ₂ O)			47.0	
C45G (10H ₂ O)			55.3	
C45G (15H ₂ O)			60.5	
C45G (2H ₂ O)		5	24.1	
<u>C45G (4H₂O)</u> ^c			27.4	
C45G (5H ₂ O) ^c			30.4	
<u>C45G (6H₂O)</u>			33.7	
C45G (7H ₂ O)			36.9	
C45G (10H ₂ O)			44.2	
C45G (15H ₂ O)		49.2		
C60G (2H ₂ O)		247	4	33.7
C60G (5H ₂ O)				43.9
C60G (7H ₂ O)				52.0
C60G (10H ₂ O)	59.4			
C60G (15H ₂ O)	64.0			
C60G (2H ₂ O)	5		26.5	
C60G (5H ₂ O)			34.1	
C60G (7H ₂ O)			40.7	

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

C60G(10H ₂ O)			47.3	
C60G(15H ₂ O)			51.7	

a 炉心名称について

- 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

表 2 代表炉心の臨界量（軽水減速炉心）（低濃縮ウラン）

炉心名称 ^a	H/ ²³⁵ U	列	β_{eff} (-) ^b	ℓ (s) ^b	β_{eff}/ℓ (s ⁻¹)	温度係数 ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	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}	
<u>C45G(6H₂O)</u> ^c			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}	
<u>C45G(4H₂O)</u> ^c			7.48×10^{-3}	5.55×10^{-5}	134.8	-2.68×10^{-6}	-2.64×10^{-3}	
C45G(5H ₂ O) ^c			7.44×10^{-3}	5.66×10^{-5}	131.6	<u>4.06×10^{-5}</u>	-2.66×10^{-3}	
<u>C45G(6H₂O)</u>			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}	
C60G(2H ₂ O)	5		7.51×10^{-3}	5.67×10^{-5}	132.5	-5.39×10^{-5}	-2.72×10^{-3}	
C60G(5H ₂ O)			7.40×10^{-3}	6.14×10^{-5}	120.3	-8.53×10^{-6}	-2.51×10^{-3}	
C60G(7H ₂ O)			7.41×10^{-3}	6.03×10^{-5}	122.8	-7.49×10^{-6}	-2.71×10^{-3}	

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

C60G (10H ₂ O)			7.47×10^{-3}	5.70×10^{-5}	131.1	-2.85×10^{-5}	-3.03×10^{-3}
C60G (15H ₂ O)			7.54×10^{-3}	5.39×10^{-5}	139.9	-6.74×10^{-5}	-3.27×10^{-3}

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。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」

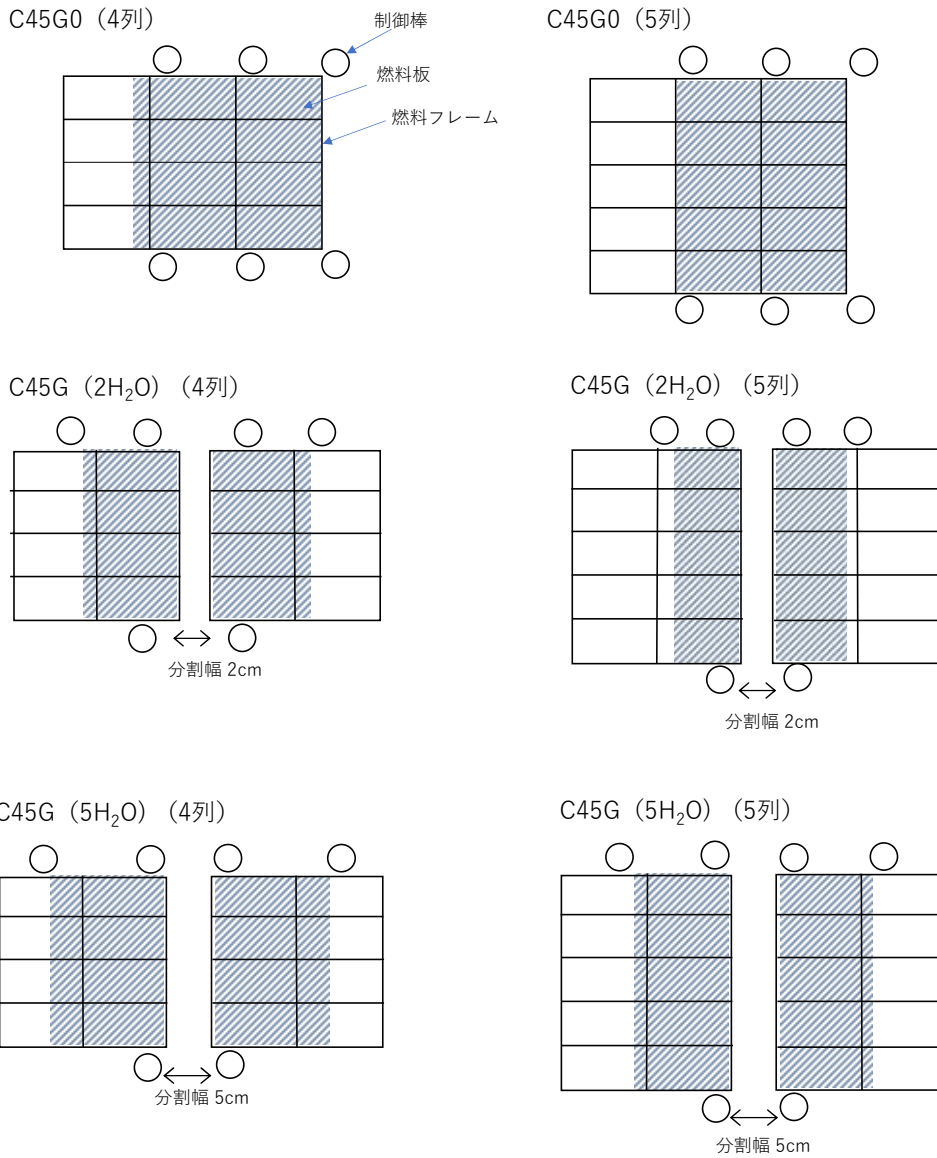


図1 軽水減速炉心の炉心配置例 (1)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

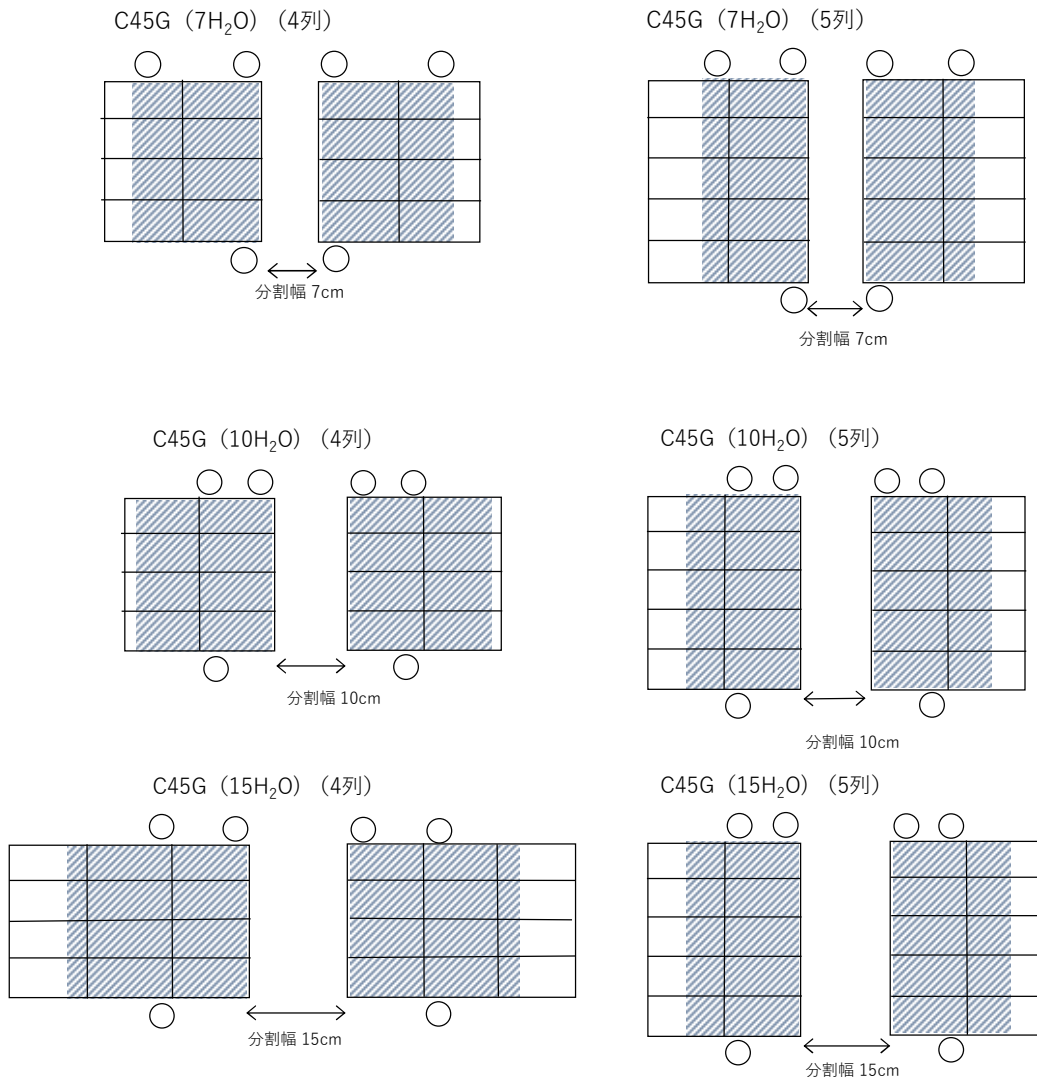


図2 軽水減速炉心の炉心配置例 (2)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

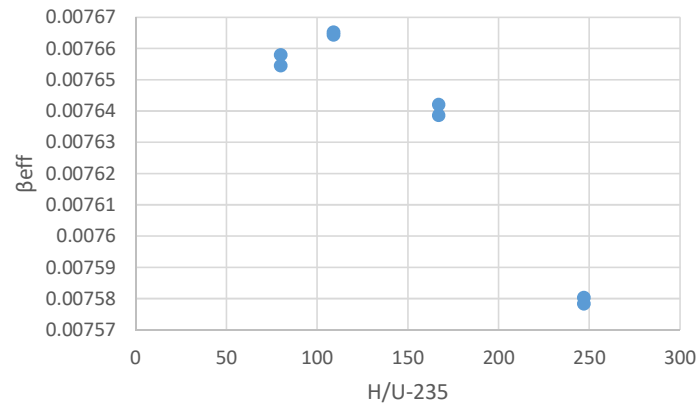


図3 単一炉心の β_{eff}

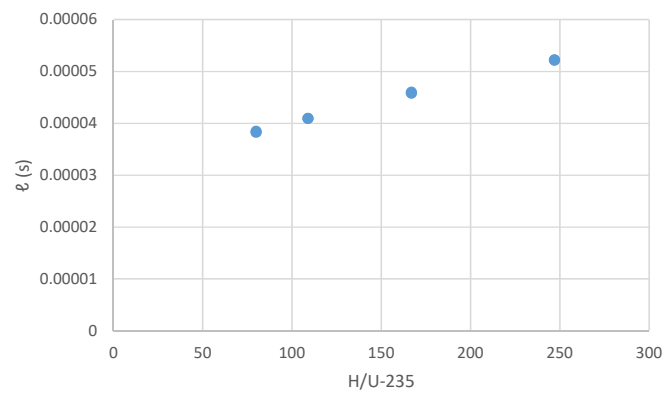


図4 単一炉心の l

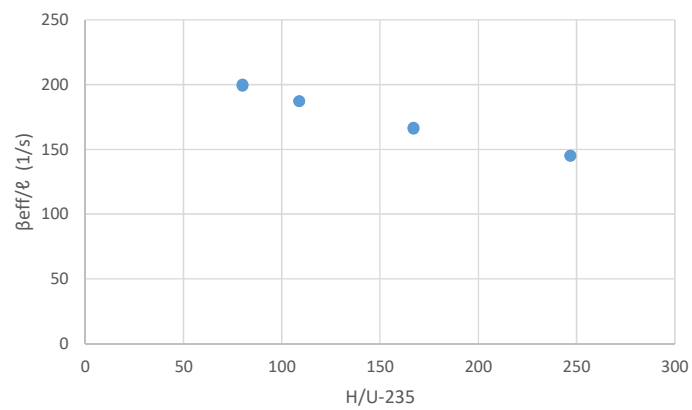


図5 単一炉心の β_{eff}/l

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

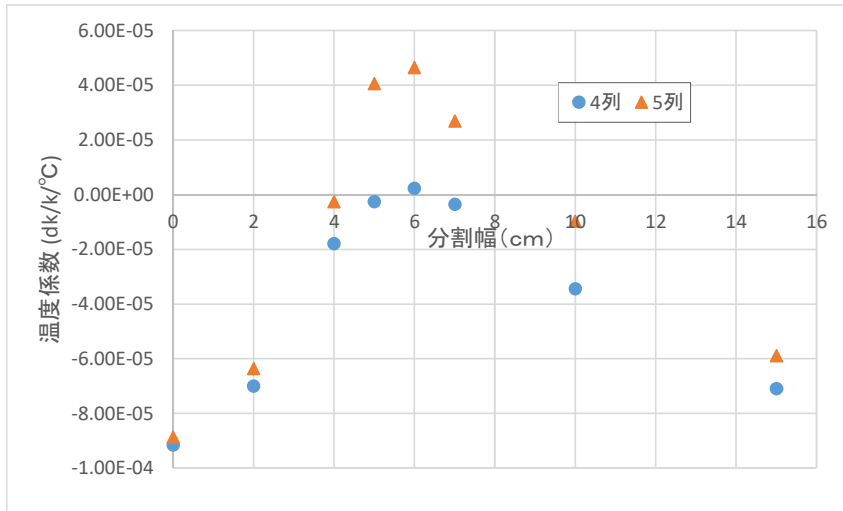


図6 C45の2分割炉心の温度係数

2. 中性子束について

添付 10 では炉心内での燃料クーポン（または燃料板）の最高温度を評価する必要があり、そのために中性子束について考慮する必要がある。

SRAC の CITATION コードは拡散計算コードであるため中性子束は均質化した燃料セルに対する値が求められるが、実際には炉心内での発熱率分布、すなわち核分裂率分布は燃料クーポン内でのみ離散的な値となる。図 7 にモンテカルロ計算コード MCNP による L1 炉心の 1 体の燃料クーポンの核分裂率分布を示す。

添付 10 において燃料クーポンの最大発熱量は以下のように求めている。

- ① 過渡解析の動特性計算により炉心全体での積算発熱量 Q (J) を求める
- ② 装荷燃料枚数から 1 枚当たりの平均化した発熱量 q (J) を求める
- ③ 炉心内の中性子束分布(発熱率分布)が x 、 y 、 z 方向ともにコサイン分布(反射体節約を考えない)

$$\phi(x, y, z) = P \times \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{c}\right)$$

であるとする (a, b, c は x, y, z 方向の長さ)、積分値は以下ようになる

$$\int_V \phi(x, y, z) dV = P \times \frac{8abc}{\pi^3}$$

- ④ 発熱量最大値は発熱量平均値の $\frac{\pi^3}{8}$ 倍となるので、 $\frac{q\pi^3}{8}$ を最大発熱量とする。

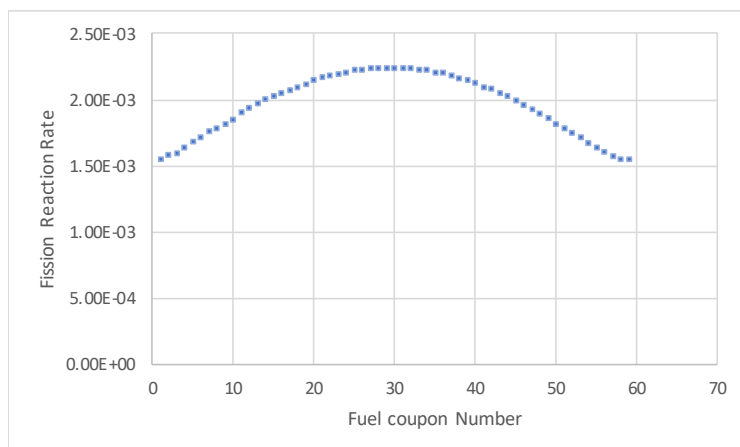


図 7 L1 炉心の 1 体の燃料クーポンの核分裂率分布

補足

補足表 解析パラメータについて

解析パラメータ	解析方法 ¹⁾	核的制限値 ²⁾	固体減速炉心		軽水減速炉心	
			結果 ³⁾	添付10 ⁴⁾	結果 ³⁾	添付10 ⁴⁾
臨界量	SA(一部MO)	○	○	過渡解析等 (温度評価等)	○	過渡解析等 (温度評価等)
温度係数	SA	○	○	過渡解析 (出力評価)	○	過渡解析 (出力評価)
ボイド反応度係数	SA	×	×	×	○	利用予定無
実効遅発中性子割合	SA	×	○	過渡解析 (出力評価)	○	過渡解析 (出力評価)
中性子平均寿命	SA	×	○	過渡解析 (出力評価)	○	過渡解析 (出力評価)
即発中性子減衰定数	SA	×	○	過渡解析 (出力評価)	○	過渡解析 (出力評価)
全制御棒反応度	SA(一部MO)	○	○	利用予定無	-	利用予定無
最大反応度の制御棒	SA	○	○	利用予定無	-	利用予定無
反応度添加率	SA	○	○	利用予定無	-	利用予定無
中心架台反応度	SA(一部MO)	○	-	過渡解析 (出力評価)	×	×
ダンプ排水反応度	SA(一部MO)	○	×	×	-	利用予定無
中性子束分布	SA(一部MO)	×	○(一部)	過渡解析 (温度評価)	△	過渡解析 (温度評価)

- 1) 解析方法 : SA は SRAC コードシステム、MO はモンテカルロ計算コード (MCNP 等)
- 2) 核的制限値 : ○は核的制限値に該当、×は該当しない
- 3) 結果 : ○は結果提示、-は次回以降に提示、×は該当しない
- 4) 添付 10 : 「利用予定無」は添付 10 ではこのパラメータは利用しない (今後変更の可能性あり)、×は明らかに利用予定無し