

2020年4月20日

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

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. 軽水減速炉心の解析

1.1 代表炉心

「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)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。

また、同資料において代表炉心の解析において以下の精度を考慮した上で評価を行うことを説明した。

| | |
|-----------|-----------|
| 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 % |

なお、同資料において臨界質量については±4.0%とすることを記載していたが、検討の結果この値については変更する。(詳細は補足-3で説明)

1.2 臨界量、動特性パラメータ、反応度温度係数等

軽水減速炉心の臨界となる体系の臨界量の臨界 ($k_{eff}=1.0$ 、このとき制御棒は全て炉心から引き抜かれた状態) 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 2、3 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「1.1 代表炉心」で述べた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 [] 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%としていた。しかし、その後再度低濃縮ウラン炉心で解析を行い直したところ臨界質量の解析精度は±7%を見込む必要があることが判った。(補足-3で説明)

この解析精度を用いると、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。

なお、軽水減速架台の燃料を装荷する格子板には図1に示す通り燃料フレームを装荷することができる穴が16×14個が [] 配置されており、炉心長さは最大 [] できる。表1の炉心長さは全てこれ以下であるので格子板上に全ての炉心を構成することができる。

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。

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4~6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7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) ^c | |
|--|---------------------|------|---------------------------|---|
| 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> ^b | | | 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> ^b | | | 27.4 | |
| C45G (5H ₂ O) | | | 30.4 | |
| <u>C45G (6H₂O)</u> ^b | | | 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 |
| 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 | | |

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

| | | | | |
|---------------------------|--|--|------|--|
| C60G (5H ₂ O) | | | 34.1 | |
| C60G (7H ₂ O) | | | 40.7 | |
| 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

b : 代表炉心に新たに追加した炉心 (温度係数が正)

c : 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)

d : 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)

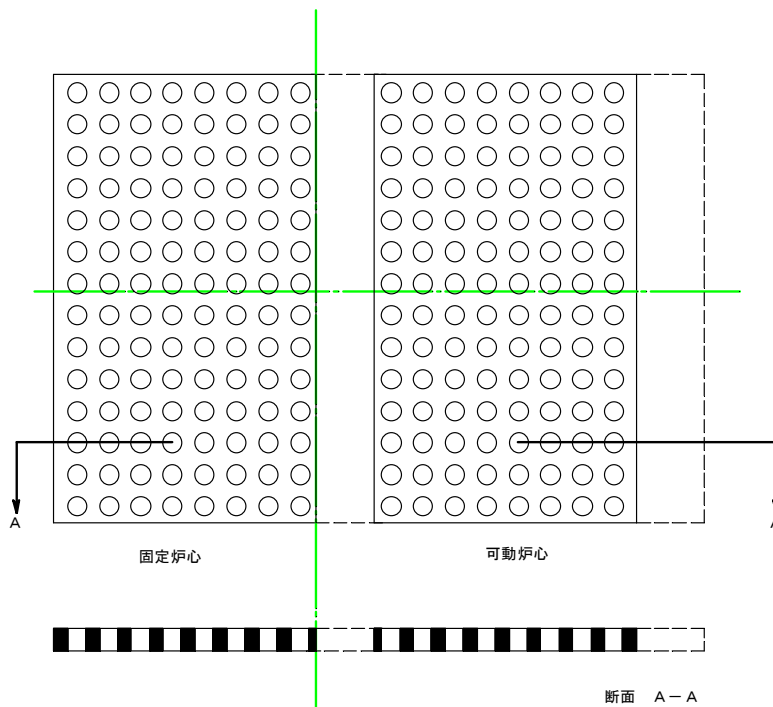


図1 軽水減速架台 格子板

表 2 代表炉心の各種炉心パラメータ (LEU 軽水減速炉心)

| 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(4H ₂ O) | | | 7.48×10^{-3} | 5.55×10^{-5} | 134.8 | -2.68×10^{-6} | -2.64×10^{-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 |
| 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} |

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

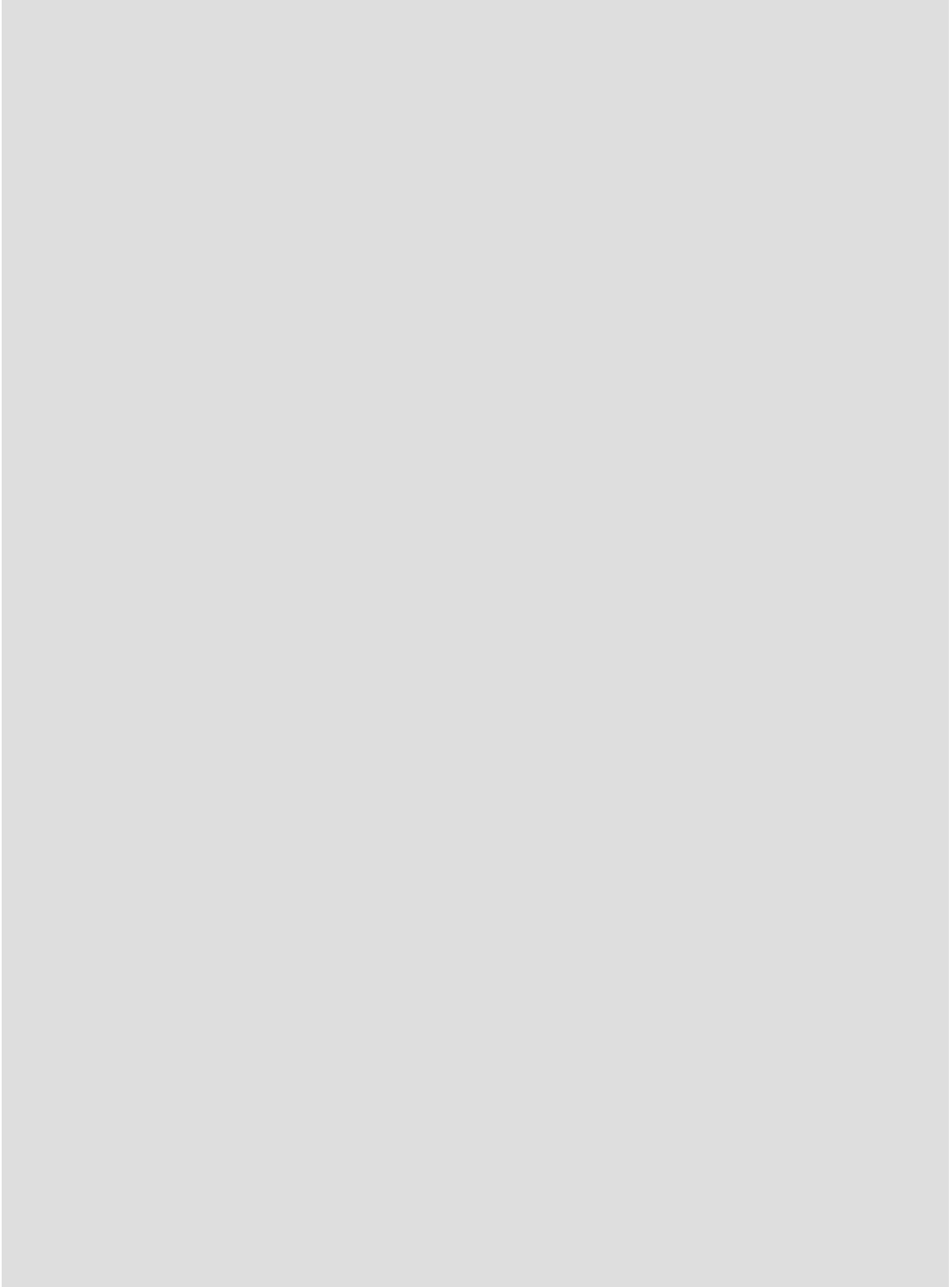
| | | | | | | | |
|---------------------------|--|--|-----------------------|-----------------------|-------|------------------------|------------------------|
| C60G (5H ₂ O) | | | 7.40×10^{-3} | 6.14×10^{-5} | 120.3 | -8.53×10^{-6} | -2.51×10^{-3} |
| C60G (7H ₂ O) | | | 7.41×10^{-3} | 6.03×10^{-5} | 122.8 | -7.49×10^{-6} | -2.71×10^{-3} |
| 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} |

a 定数について

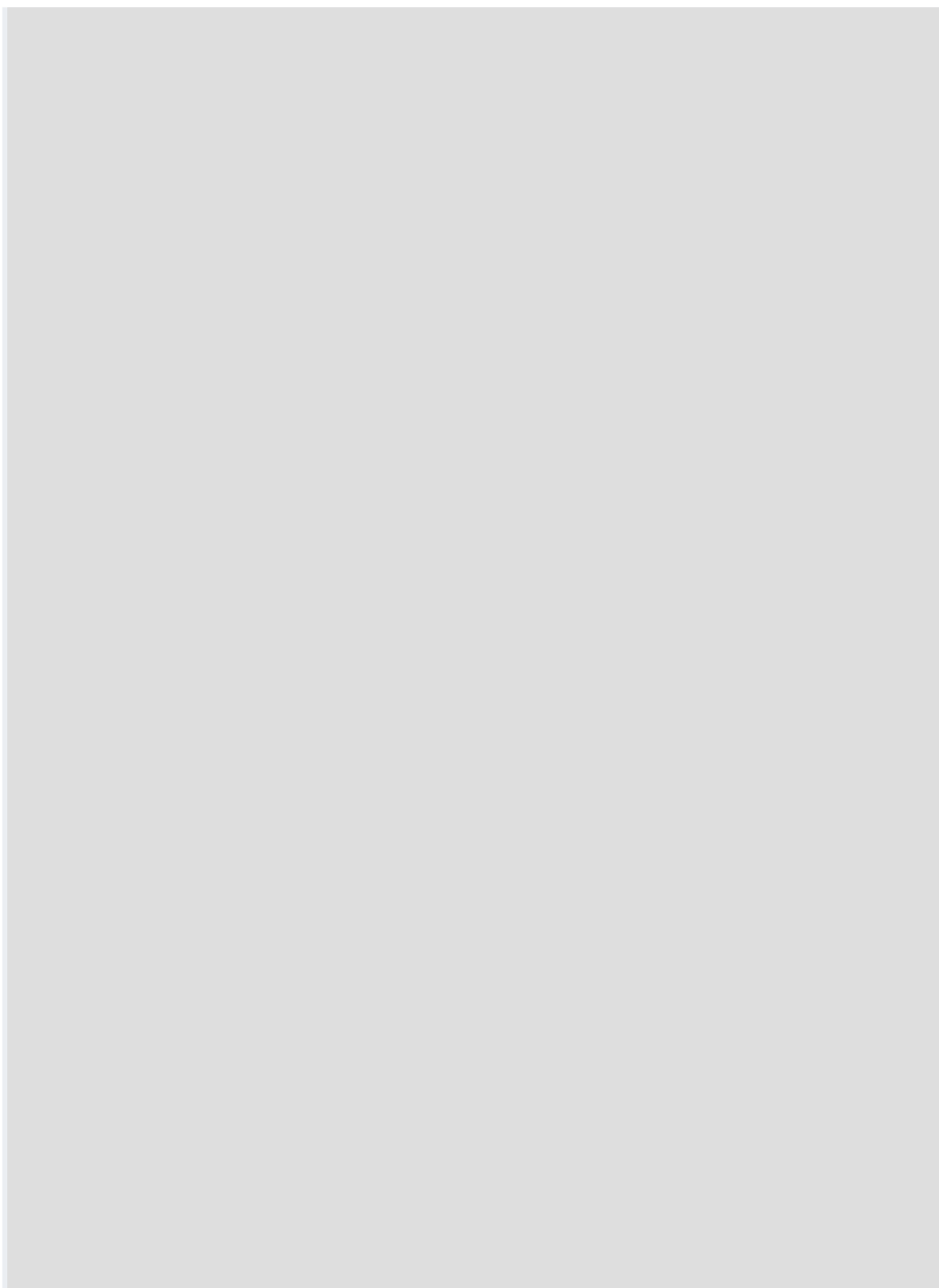
β_{eff} 実効遅発中性子割合、 ℓ 中性子平均寿命

b 反応度温度係数は温度を 25℃から 35℃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」



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

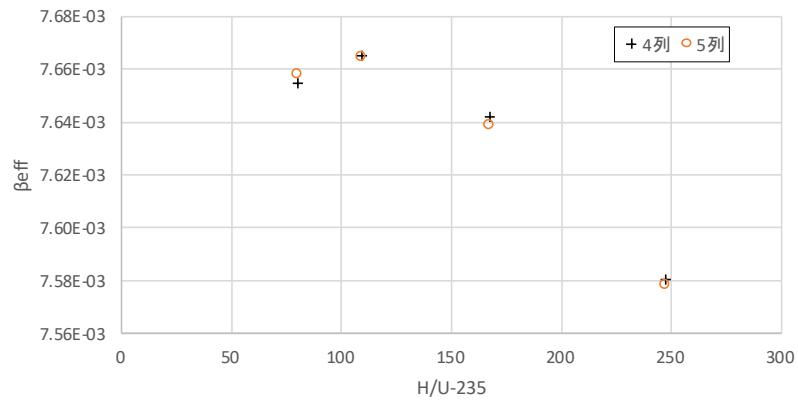


図4 単一炉心の実効遅発中性子割合 (β_{eff})

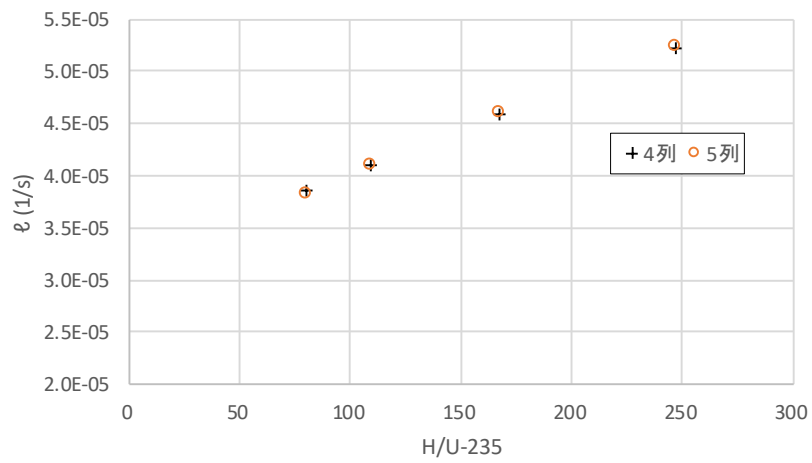


図5 単一炉心の中性子平均寿命 (l)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

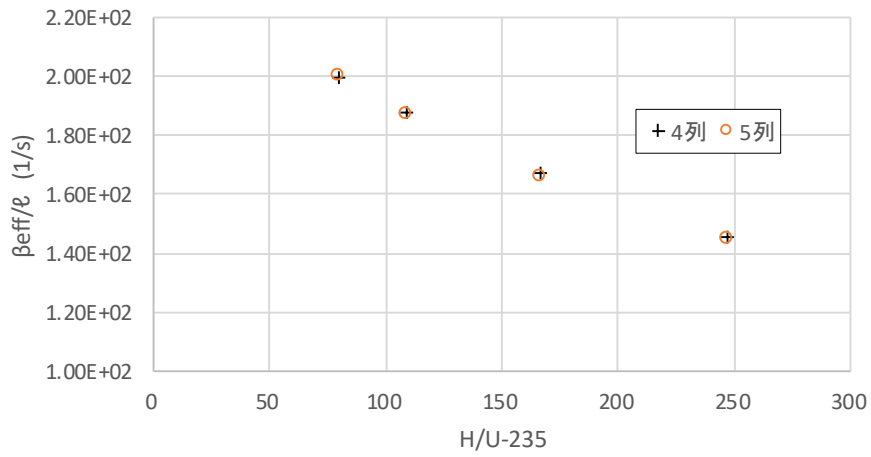


図6 単一炉心の β_{eff}/ℓ

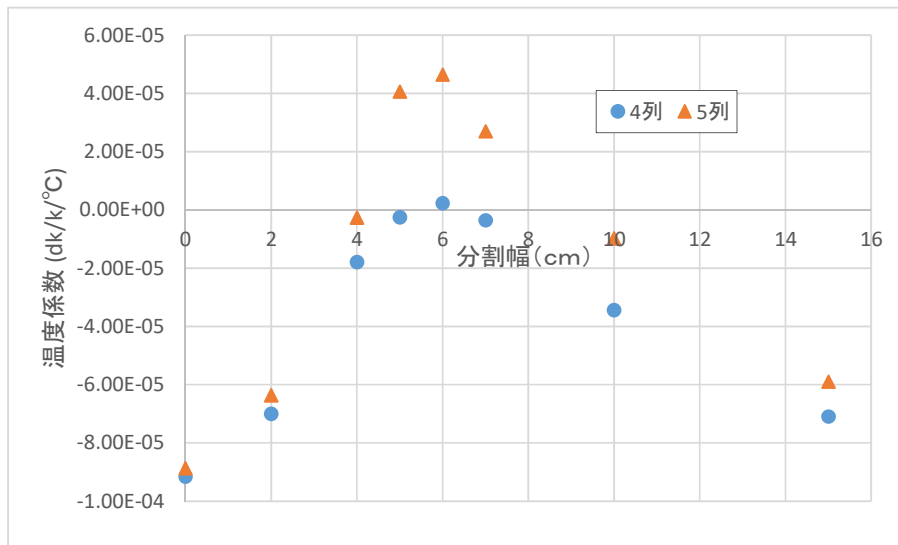


図7 C45の2分割炉心の温度係数

1. 3 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3に示す。

ここで各炉心は燃料板の枚数の調整により過剰反応度を軽水減速炉心の核的制限値である $0.5\% \Delta k/k$ とした炉心である。

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。

「1. 1 代表炉心」で述べたように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： $(1+0.5) \times (1+0.18) = 1.77 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

が求められるが、表3の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

制御棒の最大反応度添加率については「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)に説明した通り、中性子束分布をコサインでフィッティングして得られた反射体節約の値を用いて算出した(フィッティングについては補足-1で説明)。

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3の全ての炉心においてこの基準値を満足している。(反射体節約のフィッティング誤差は補足-1に示す通り 0.1cm 以下であるため最大反応度添加率に及ぼす影響は 1% 以下であり、この誤差を考慮しても結果に影響はない)

なお、2分割炉心についてもすべて単一炉心と同じ反射体節約の値を用いて最大反応度添加率求めているが、仮にこれらの2分割炉心について反射体節約の値をすべてゼロとしても制御棒の最大反応度添加率の値は基準である $0.0164 (\% \Delta k/k/s)$ 以下となる。(反応度添加率が最も大きな2分割炉心である C45G(2H₂O)炉心において反射体節約の値をゼロとしても $0.0161 (\% \Delta k/k/s)$)。従って、これらの2分割炉心の反射体節約の値の妥当性については検討する必要は無い。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

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表 3 に示した割合はすべて 30.1%未満であり、これらの全ての炉心について解析精度である±18%を考慮しても核的制限値の 1/3 以下となる。

(ここでの 30.1%未満を基準値とした根拠については補足-4 で説明)

表 3 代表炉心の制御棒反応度値 (LEU 軽水減速炉心)

| 炉心名称 ^a | 列 | 全反応度 (% $\Delta k/k$) ¹⁾ | 最大反応度 (% $\Delta k/k$) (割合%) ²⁾ | 最大反応度添 加率 ^{3) 4)} (% $\Delta k/k/s$) |
|--------------------------|-------------|---|---|--|
| C30G0 | 4 | <u>2.87</u> | 0.66 (23) | 0.015 |
| | 5 | 2.55 | 0.65 (26) | 0.014 |
| C35G0 | 4 | 3.22 | 0.75 (23) | 0.013 |
| | 5 | 2.19 | 0.56 (26) | 0.013 |
| C45G0 | 4 | <u>2.80</u> | 0.68 (24) | 0.0156 ⁵⁾ |
| | 5 | 1.83 | 0.52 (28) | 0.012 |
| C60G0 | 4 | 2.43 | 0.60 (25) | 0.014 |
| | 5 | <u>1.85</u> | 0.52 (28) | 0.012 |
| C45G(2H ₂ O) | 4 | 2.43 | 0.55 (23) | 0.013 |
| C45G(5H ₂ O) | | 2.09 | 0.48 (23) | 0.008 |
| C45G(6H ₂ O) | | <u>1.87</u> | 0.43 (23) | 0.010 |
| C45G(7H ₂ O) | | 2.01 | 0.38 (19) | 0.009 |
| C45G(10H ₂ O) | | 2.38 | 0.40 (17) | 0.009 |
| C45G(15H ₂ O) | | 2.31 | 0.40 (17) | 0.009 |
| C45G(2H ₂ O) | 5 | 1.80 | 0.41 (23) | 0.009 |
| C45G(4H ₂ O) | | <u>1.86</u> | 0.38 (21) | 0.009 |
| C45G(5H ₂ O) | | <u>1.84</u> | 0.34 (18) | 0.008 |
| C45G(6H ₂ O) | | <u>1.79</u> | 0.33 (18) | 0.008 |
| C45G(7H ₂ O) | | <u>1.84</u> | 0.34 (19) | 0.008 |
| C45G(10H ₂ O) | | <u>1.89</u> | 0.34 (18) | 0.008 |
| C45G(15H ₂ O) | <u>1.78</u> | 0.32 (18) | 0.007 | |
| C60G(2H ₂ O) | 4 | 2.00 | 0.46 (23) | 0.011 |
| C60G(5H ₂ O) | | 2.00 | 0.39 (20) | 0.009 |
| C60G(7H ₂ O) | | 2.19 | 0.37 (17) | 0.009 |
| C60G(10H ₂ O) | | 2.00 | 0.34 (17) | 0.008 |
| C60G(15H ₂ O) | | 1.89 | 0.32 (17) | 0.007 |
| C60G(2H ₂ O) | 5 | <u>1.80</u> | 0.38 (21) | 0.009 |
| C60G(5H ₂ O) | | <u>1.776</u> ⁵⁾ | 0.33 (19) | 0.008 |

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

| | | | | |
|--------------------------|--|-------------|-----------|-------|
| C60G(7H ₂ O) | | <u>1.92</u> | 0.44 (23) | 0.010 |
| C60G(10H ₂ O) | | <u>1.97</u> | 0.55 (28) | 0.013 |
| C60G(15H ₂ O) | | <u>1.90</u> | 0.56 (29) | 0.014 |

- 1) 下線を付けた炉心については「第 331 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 1 月 27 日）」の結果(表 7)から制御棒の配置を変更した炉心（解析誤差を考慮していなかったため）
- 2) 括弧内の数値は全反応度に対する割合(%)
- 3) 炉心中心高さ位置での反応度添加率
- 4) 反射体節約は以下の通りとした
 - (5 列) C30: 9.3cm、C35: 8.5cm、C45: 7.8cm、C60: 7.3cm
 - (4 列) C30: 9.3cm、C35: 8.6cm、C45: 7.8cm、C60: 7.3cm
- 5) 規制値に近い桁数を増やして記載

1. 4 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（3次元炉心計算でz方向の上端を真空境界条件する）、そのときの実効増倍率の値から反応度を求めた。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 4 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少し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。

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 5 に示すとおり、軽水が無くなった場合の実効増倍率は核的制限値に比べて十分に小さな値となっている。

表 4 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 5 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 |

2. 固体減速炉心の解析

2.1 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体を含めることが規定されているので、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8に示す。

解析結果の表6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6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。表7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に示した炉心のうち図9、図10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9、図10に示す。表8の結果からこれらの炉心の中心架台の反応度は核的制限値を十分に満足していることが判る。

表 6 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 7 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 8 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 |

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

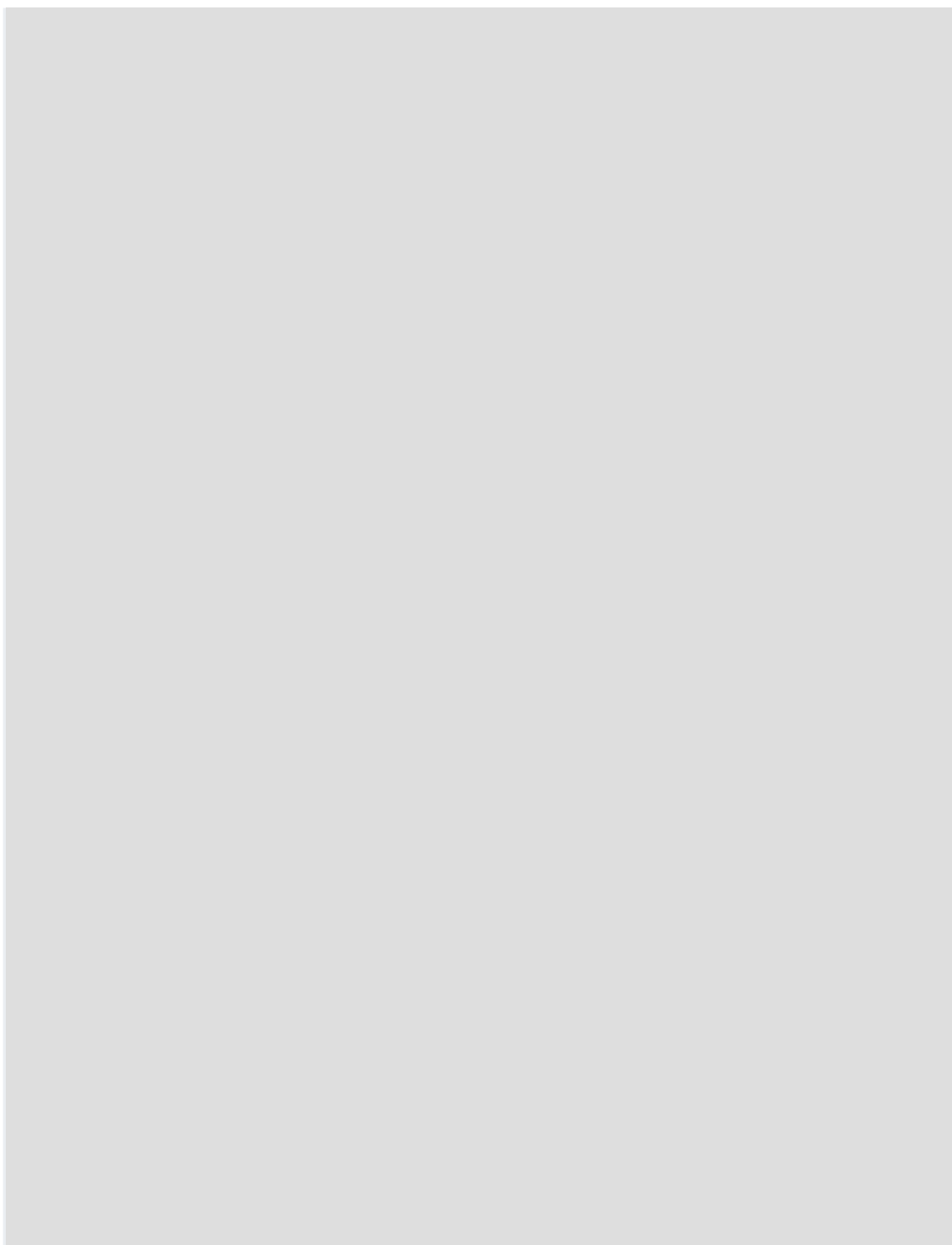
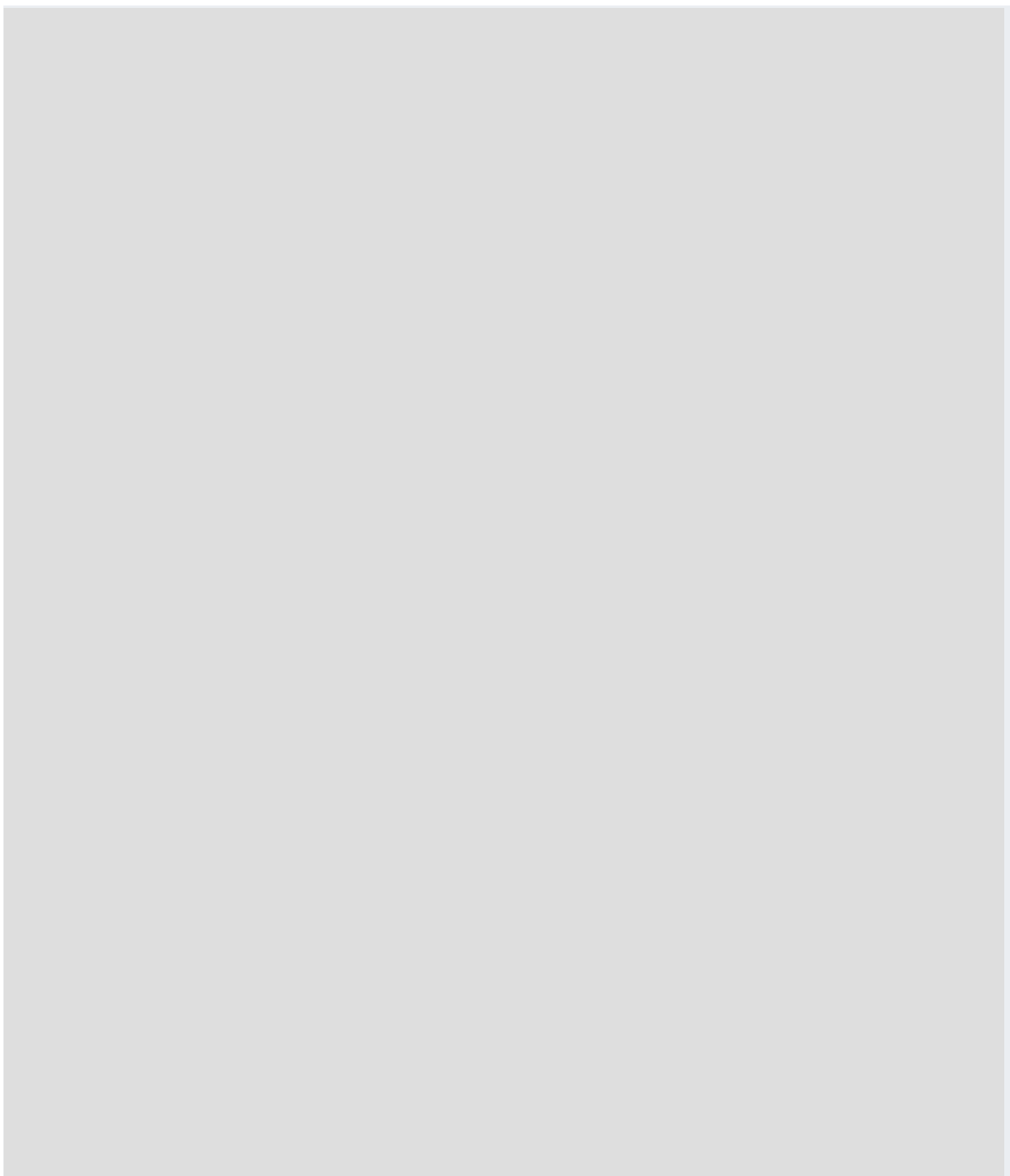
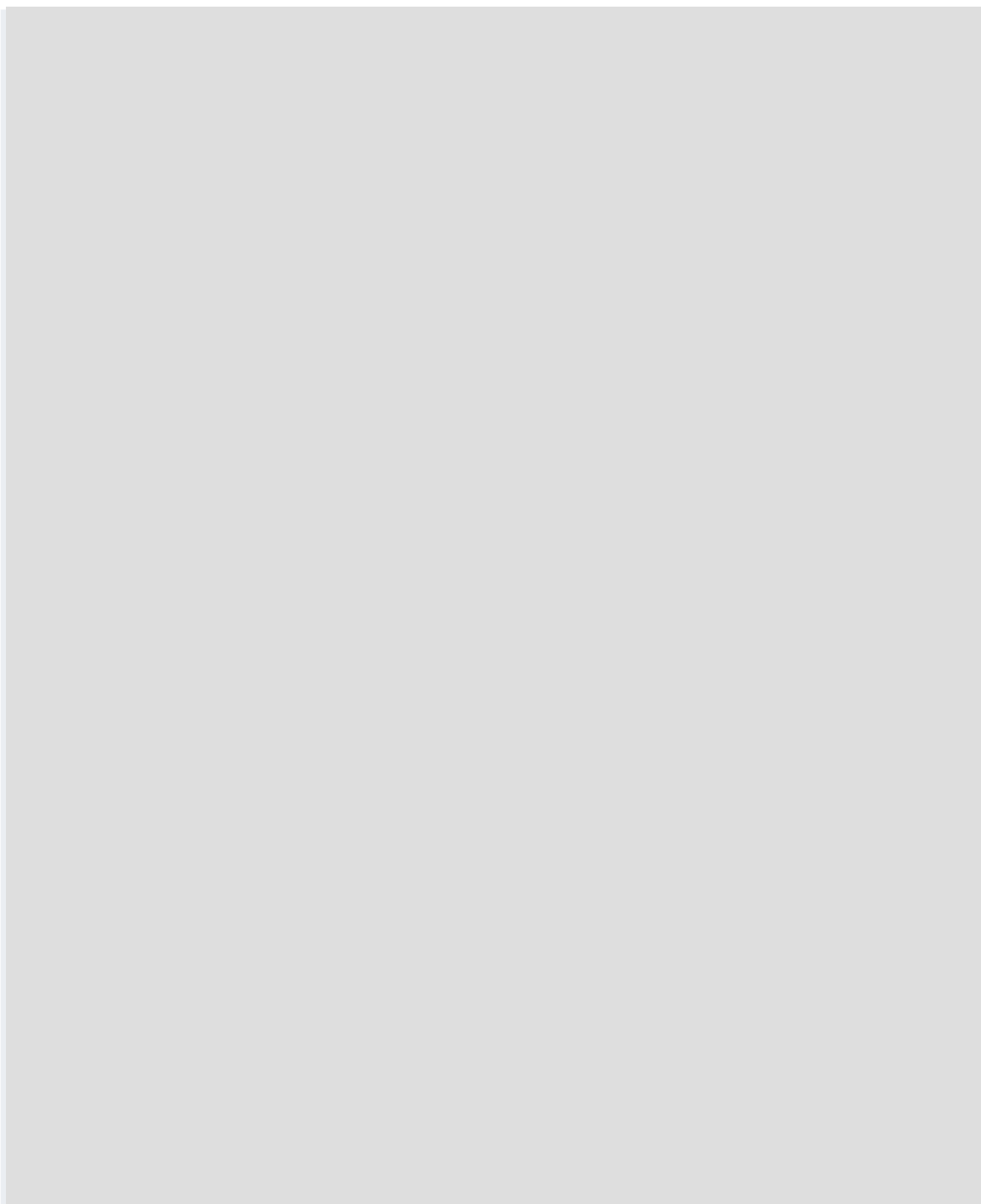


図 8 中心架台の反応度評価を行う際の燃料体および反射体の取り出し箇所
(オレンジ色で囲んだ範囲を取り除く)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



3. 変更申請で規定する炉心構成の設定

「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) の説明資料の中で、設置変更申請で規定する炉心構成について説明した。

その後の検討を踏まえて再度以下のように設定する。(下線部は変更箇所)

3. 1 固体減速炉心

- 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。
- 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。

3. 2 軽水減速炉心

- 1) 炉心は C30、C35、C45、C60 炉心のみとし、複数の燃料集合体を混在させない。
(H/U-235=80、109、167、247)
- 2) 燃料集合体の配置は 4 列または 5 列とする。
- 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。
- 5) 重水タンクは使用しない

補足ー1

中性子束分布のフィッティング

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。中性子束のフィッティングの例を図 11、12 に示す。

フィッティング範囲を変更したときの反射体節約の値の違い（軽水減速炉心）を表 9 に示す。各炉心ともに反射体節約の値の変化は約 0.1cm 程度で、炉心高さ（固体減速炉心で 30～50cm、軽水減速炉心で 57cm）に比べて十分に小さいため反応度印加率の計算結果に及ぼす影響は十分に小さい。

固体減速炉心において、フィッティング範囲を変更したときの反射体節約の値とそのフィッティング誤差の値を表 10 に示す。

「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）の説明資料の固体減速炉心の「表 2 代表炉心の制御棒反応度価値（固体減速炉心）（低濃縮ウラン）」において、この反射体節約の値を用いて最大反応度印加率を求めている。表 10 に示した反射体節約の誤差は最大でも 0.07cm であるが、その誤差を含めたとしても表中に示した最大反応度印加率の値は変化しない（有効数字以下の変化）。

表 9 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 | | |
|-------|----|----------|----------|----------|
| | | 45cm | 35cm | 25cm |
| C30G0 | 4 | 9.3±0.02 | 9.2±0.02 | 9.1±0.05 |
| | 5 | 9.3±0.01 | 9.2±0.02 | 9.2±0.06 |
| C35G0 | 4 | 8.6±0.01 | 8.5±0.02 | 8.4±0.06 |
| | 5 | 8.5±0.01 | 8.4±0.02 | 8.4±0.05 |
| C45G0 | 4 | 7.8±0.01 | 7.7±0.02 | 7.7±0.05 |
| | 5 | 7.8±0.01 | 7.7±0.02 | 7.7±0.05 |
| C60G0 | 4 | 7.3±0.01 | 7.3±0.02 | 7.2±0.05 |
| | 5 | 7.3±0.01 | 7.3±0.02 | 7.2±0.04 |

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

表 10 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 | | | |
|--------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 40cm | 30cm | 20cm | 15cm |
| L-5.5P | 50.9 | 5.7±0.01 | 5.7±0.02 | | |
| | 41.8 | | 5.8±0.01 | 5.7±0.04 | |
| | 30.8 | | | 5.9±0.02 | 5.9±0.04 |
| L-4P | 49.7 | 6.0±0.01 | 5.9±0.02 | | |
| | 39.5 | | 6.1±0.01 | 6.1±0.04 | |
| | 30.7 | | | 6.2±0.02 | 6.2±0.04 |
| L-3P | 51.4 | 6.1±0.01 | 6.2±0.02 | | |
| | 39.8 | | 6.2±0.02 | 6.1±0.05 | |
| | 30.5 | | | 6.2±0.02 | 6.2±0.03 |
| L-2P | 48.1 | 6.2±0.01 | 6.1±0.02 | | |
| | 39.0 | | 6.9±0.01 | 6.7±0.04 | |
| | 30.7 | | | 6.9±0.02 | 7.0±0.04 |
| L-1P | 47.7 | 7.9±0.01 | 7.6±0.03 | | |
| | 38.2 | | 8.5±0.02 | 8.2±0.05 | |
| | 29.2 | | | 9.0±0.03 | 8.9±0.05 |
| LL-1P | 49.7 | 10.7±0.02 | 10.4±0.04 | | |
| | 38.4 | | 11.6±0.02 | 11.1±0.05 | |
| | 30.0 | | | 12.5±0.04 | 12.3±0.07 |

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

「グレーのマスキング範囲は不表示情報」

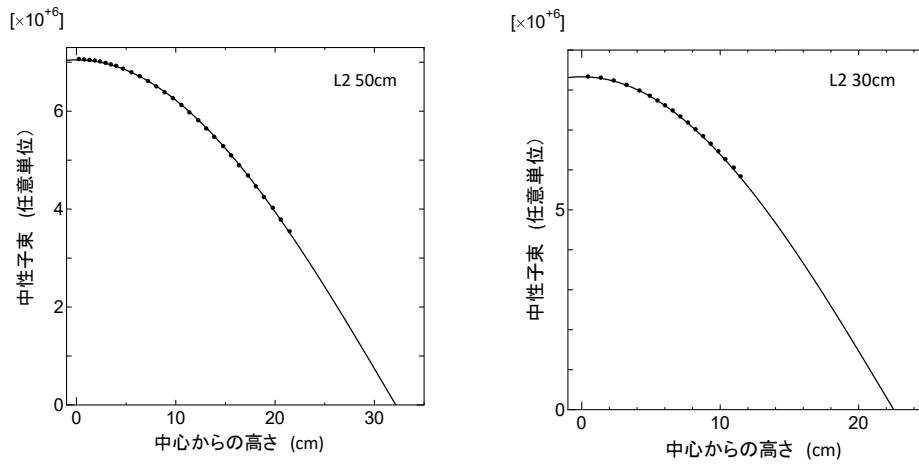


図9 中性子束のコサインフィッティング例
(左側：L3-50cm 炉心、右側：L2-30cm 炉心)

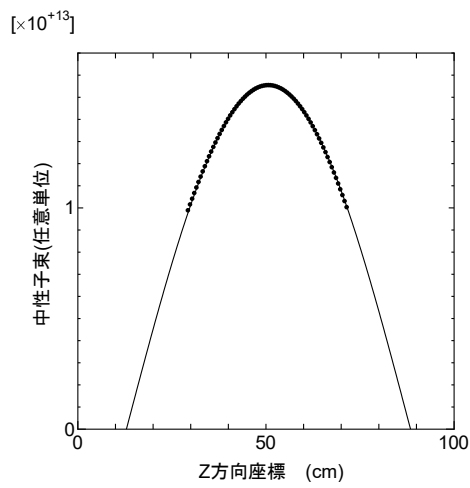


図10 中性子束 のコサインフィッティング例
(C30 (5 列) 炉心)

補足-2

各種の不確定性、公差等が実効増倍率に及ぼす影響

B 架台の炉心について 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。

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。

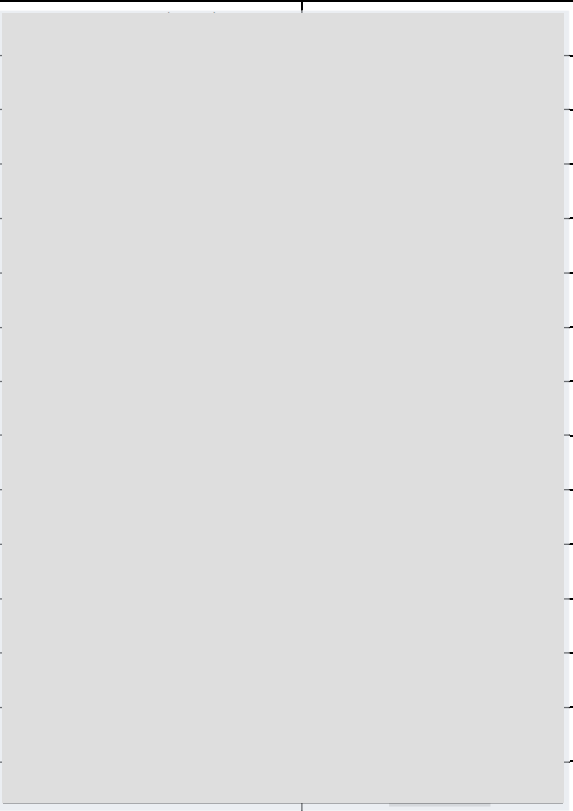
各項目の誤差や不確実性が実効増倍率に及ぼす影響を表 11 に示す。

全ての誤差を考慮しても実効増倍率に及ぼす効果は最大でも 0.06%程度であり、現在の実効増倍率の計算誤差に比べて十分に小さい。

表 11 各項目の誤差(不確実性)が実効増倍率に及ぼす影響

| Item | |
|--|--|
| HEU-Al Mass | |
| HEU-Al Weight Percent U | |
| HEU-Al Side Length | |
| HEU-Al Fuel Plate Thickness | |
| HEU-Al ²³⁴ U | |
| HEU-Al ²³⁵ U | |
| HEU-Al ²³⁶ U | |
| HEU-Al Impurity | |
| NU Fuel Plate Mass | |
| NU Fuel Plate Side Length | |
| NU Fuel Plate Thickness | |
| NU Fuel Plate Impurity | |
| 1/4" Polyethylene Plate Mass | |
| 1/8" Polyethylene Plate Mass Uncertainty | |
| 1/4" Polyethylene Plate Thickness | |
| 1/8" Polyethylene Plate Thickness | |

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

| | |
|-------------------------------------|---|
| 1/4" Polyethylene Plate Side Length |  |
| 1/8" Polyethylene Plate Side Length | |
| Reflector Blocks Mass | |
| Moderator Cell Side Length. | |
| Aluminum Sheath Thickness | |
| Aluminum Composition | |
| Control Rod Absorber Density | |
| Paint Top and Bottom Thickness | |
| HEU-Al Plate Paint Side Thickness | |
| NU Plate Paint Side Thickness | |
| Paint Density | |
| Paint Hydrogen wt% | |
| Paint Carbon wt% | |
| Element Pitch | |
| TOTAL | |

参考文献

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

補足-3

実効増倍率の誤差が臨界質量に及ぼす影響

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。

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%変化させたときの実効増倍率の変化を求めた。体積変化は仮想的にX、Y、Z方向で同じ割合で変化するものとする。

軽水減速炉心の結果を表12に示す。C30～C60炉心の結果から $\%dV/\% \Delta k$ が大きくなるのはC60炉心であったので、C60炉心については2分割炉心も対象とした。 $\%dV/\% \Delta k$ の値は各炉心でほとんど変化していないことが判る。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3.3%の誤差が生じることになる。

固体減速炉心の結果を表13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 $\%dV/\% \Delta k$ が大きくなること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6.15%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6.2%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7%の誤差で評価を行うものとする。

(訂正)

「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)の説明資料の固体減速炉心の解析において、以下のように記載していた。

「KUCAでの核的制限値として、固体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 []

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

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。」

しかし、上記の解析の結果、臨界質量の解析精度は±7%としているので、以下のように訂正する。最終的な評価結果に変更は無い。

「KUCA での核的制限値として、固体減速炉心の [] 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±7%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。」

表 1 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 (1%vol 変化時) | %dV / % Δk | 0.6% Δk に対応する%dV |
|----------------------------|---------------------|------------|------------------|
| C30G0 (4 列) | 0.194 | 5.14 | 3.08 |
| C35G0 (4 列) | 0.196 | 5.09 | 3.06 |
| C45G0 (4 列) | 0.197 | 5.09 | 3.05 |
| C60G0 (4 列) | 0.192 | 5.22 | 3.13 |
| C60G (2 H ₂ O) | 0.186 | 5.37 | 3.22 |
| C60G (5 H ₂ O) | 0.182 | 5.50 | 3.30 |
| C60G (7 H ₂ O) | 0.185 | 5.41 | 3.25 |
| C60G (10 H ₂ O) | 0.189 | 5.30 | 3.18 |
| C60G (15 H ₂ O) | 0.193 | 5.20 | 3.11 |

表 1 3 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 (1%vol 変化時) | %dV / % Δk | 0.6% Δk に対応する%dV |
|---------|---------------------|------------|------------------|
| LL1-30 | 0.212 | 4.82 | 2.89 |
| LL1-40 | 0.172 | 5.80 | 3.48 |
| LL1-50 | 0.134 | 7.64 | 4.58 |
| L3-30 | 0.203 | 5.02 | 3.01 |
| L3-40 | 0.137 | 7.44 | 4.47 |
| L3-50 | 0.100 | 10.2 | 6.15 |
| L1-50 | 0.107 | 9.57 | 5.74 |
| L2-50 | 0.114 | 8.91 | 5.35 |
| L4-50 | 0.112 | 9.14 | 5.48 |
| L5.5-50 | 0.108 | 9.42 | 5.65 |

補足-4

制御棒反応度の最大の1本の確認について

「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)にこの件について説明したが、その資料に示した結果の一箇所の修正と追加の説明を行う。

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。

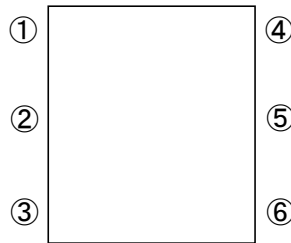


図 補-1 炉心配置 (①～⑥は制御棒)

図補-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。ただし炉心および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。

対称性より制御棒の反応度は

$$\rho_1 = \rho_4, \quad \rho_2 = \rho_5, \quad \rho_3 = \rho_6$$

となる(下付添え字は制御棒の番号)。

各制御棒反応度の誤差は $|\delta\rho_i| = r \rho_i$ ($i=1\sim6$) 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

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

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

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。

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

$$= \frac{r}{\sqrt{2}} \frac{1}{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} + \frac{\rho_3}{\rho_2} + 1 \right)^2} \sqrt{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2 + \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} \right)^2 + \frac{\rho_1 \rho_3}{\rho_2^2}}$$

$$= \frac{r}{\sqrt{2}} \frac{1}{(a+b+1)^2} \sqrt{a^2 + b^2 + ab}$$

ここで、比率 f は $1/3$ 以下であるので以下の不等式が成り立つ。

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

従って a, b については以下のような条件となる。(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 11 のようになる。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、 $100/3 - 3.18 \approx 30.1\%$ より、 f の値が 30.1% 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。

「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）の資料で説明した固体減速炉心の制御棒反応度価値の値（当日の説明資料 p29 の表 2）、及び今回の資料で説明した軽水減速炉心の制御棒反応度価値の値（表 3）に示した f の値はすべて 30.1% 未満であるので、すべ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 の核的制限値（ $1/3$ 以下）を満たしている。

（訂正）

「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 p 32 において、固体減速炉心の「表補-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 」の L2 (50cm) 炉心の結果において比率 f を $25.0 \pm 4.6(\%)$ と記載しておりましたが、 $25.0 \pm 2.8(\%)$ の間違いでした。他の数字に変更はありません。

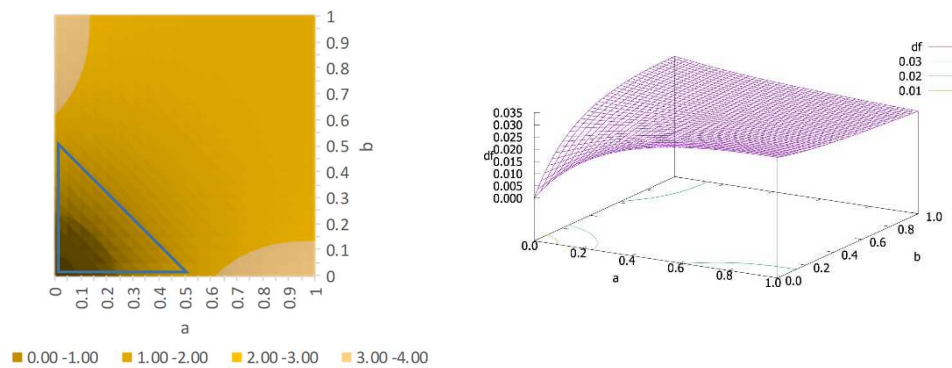


図 11 a 、 b に対する f の誤差 df (%) (左：等高線図、右：3D)

補足-5

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) | — | ○ | 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) ○ : これまでの審査会合で説明、◎ : 本審査会合で説明、— : 不要