

2020年11月5日

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

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

【代表炉心の解析】

固体減速炉心と軽水減速炉心の代表炉心の解析について

固体減速炉心と軽水減速炉心について代表炉心の解析結果をまとめる。

1. 固体減速炉心

「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）、
「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）、および
「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」（2020 年 4 月 20 日）に
おいて固体減速炉心の炉心構成の制限、解析を行う代表炉心、代表炉心の解析結果につい
て説明した。それらの結果をまとめる。

1.1 炉心構成の制限

固体減速炉心については以下のような制限を加える。

- 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。（炉心名称の付け方については表 1-1 の脚注に記載）
- 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。
- 10) 制御棒は炉心配置（水平方向）に対して線対称となるように配置する。（図 1 参照）

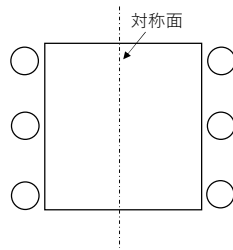


図1 固体減速炉心の制御棒配置方法の概略図（○：制御棒）

1.2 代表炉心の選定

以下のような代表炉心を選定する。

- 1) 1/8 インチ厚さ、または 1/16 インチ厚さのポリエチレン板と低濃縮ウラン板を組み合わせた燃料として表 1-1 の構成することができる炉心の中から以下のものを取り上げる。

LL1P、L1 P、L2 P、L3 P、L4 P、L5.5 P 炉心。

- 2) 各炉心の高さは、約 30cm、約 40cm、約 50cm とする。
- 3) 燃料体の配置は断面の x 方向（炉心配置図の左右方向）に対して対称とし、水平断面が正方形に近い形とする。
- 4) 上記の炉心のうち、最も臨界量が少ない炉心については、水平方向断面が正方形ではなく円形に近い形の炉心についても解析を行う。

1) と 2) より代表炉心としては、燃料セルの異なる 6 種類の炉心で各々について高さが 3 種類の合計 18 炉心を選定する。

構成することができる炉心の燃料セルの範囲と炉心高さ、それに対して選定した代表炉心を図 2 に示す。炉心高さの制限は約 30cm～約 50cm であり、それに対してその上限と下限付近の高さ、およびその中間高さの炉心を選定した。制御棒反応度は炉心高さが短いほど小さくなり核的制限値を満たさない可能性があること、反応度添加率は炉心高さが長いほど制御棒の反応度が大きくなり核的制限値を満たさない可能性があるため、高さの上限と下限の炉心を代表炉心に加えた。

図 3 に各燃料セルに対する体系の実効増倍率（一点炉近似でバックリングを約 2.1×10^{-2} ($1/\text{cm}^2$) に固定して計算)、および動特性パラメータの β_{eff}/l を示している。規定した H/U-235 が 34～372 の範囲で 1/8”と 1/16”のポリエチレン板を用いて組むことができる炉心は

代表炉心とその間の幾つかの炉心（図 2、3 の上部に矢印で示した燃料セル）である。燃料セルのポリエチレン板枚数の増加に対して k_{eff} の値は途中で極大値を持つような変化をし、 β_{eff}/l の値は単調減少をしていることから考えて、代表炉心の解析を行うことでそれ以外の炉心（矢印の燃料セル）の核特性を包含すること、すなわち内挿して各値を推定することができると考えられる。一方、炉心高さの変更に関して炉心の動特性パラメータ（ β_{eff} 、 l ）、温度係数はほとんど変化しないことが後述の解析結果からも判っているので、これらの炉心パラメータの観点からもここでの代表炉心の選定は問題が無いと考える。

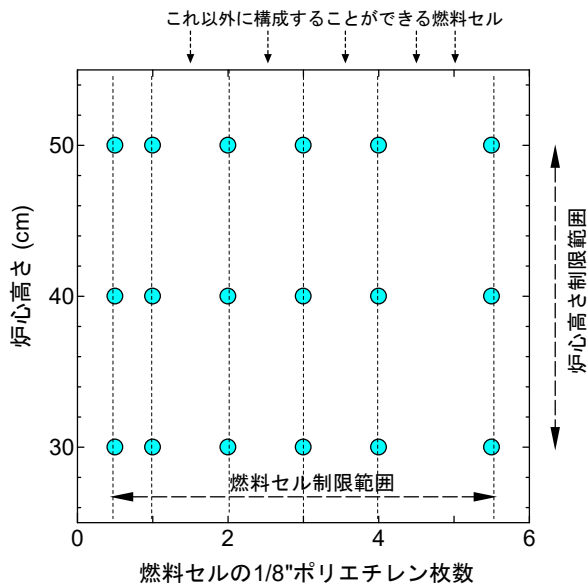


図 2 炉心構成範囲と代表炉心
(青丸が代表炉心)

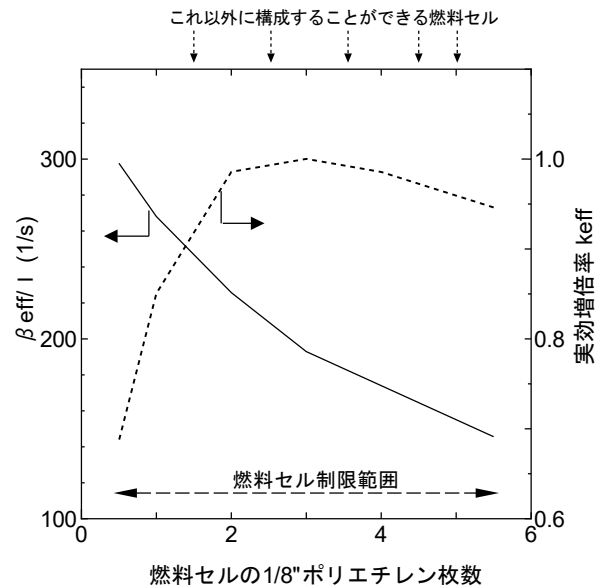


図 3 各燃料セルの β_{eff}/l (実線)と k_{eff} (点線)
横軸は燃料板 1 枚当たりの枚数

表 1-1 固体減速炉心の代表炉心

炉心名称	単位セル寸法 (cm)	ポリエチ対燃料 体積比	H/ ²³⁵ U (-)
L5.5	1.98	7.59	372
L4	1.50	5.52	270
L3	1.18	4.14	203
L2	0.87	2.76	135
L1	0.55	1.38	68
LL1	0.78	0.69	34

Lは低濃縮燃料板 Lが繰り返されると重ねることを表す (LLは低濃縮燃料板を2枚重ねる)

数値は減速材の厚さで、ポリエチレン減速材のときは1/8インチ単位の厚さ (例えば3のときは3/8インチ厚さ)

1.3 代表炉心の解析精度

代表炉心の解析は「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) の資料で示したとおり SRAC コードシステムを使用するが、一部の解析についてはモンテカルロ計算コード MCNP (使用核データライブラリは SRAC と同様に JENDL-4.0) も使用する。

また同資料で示した通り、固体減速炉心と軽水減速炉心の両炉心について各パラメータの解析精度は以下のような値であるとして各パラメータの解析結果を評価する。

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%

臨界質量に関しては、補足一D「実効増倍率の誤差が臨界質量に及ぼす影響について」での説明の通り解析精度は±6%として解析結果を評価する。

1.4 臨界量、動特性パラメータ、反応度温度係数等の解析結果

固体減速炉心の臨界となる体系の燃料体の配置（水平方向の配置）を図4、5に、各炉心の解析結果（臨界（ $k_{eff}=1.0$ ）となる炉心高さ、臨界量、動特性パラメータ、反応度温度係数）を表1-2に、最大過剰反応度（ $\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$ ）を持つ炉心の臨界量を表2に示す。図中の□は1つの燃料体を示しており、臨界となる炉心配置である。一方、図中の反応度調整用燃料体装荷位置の燃料体を追加した状態は最大過剰反応度を持つ炉心の配置である。

解析はSRACコードシステムの3次元拡散計算コードCITATIONを用いているので、炉心計算は燃料板、ポリエチレン板等の均質化定数を用いて行っている。そのためここでの臨界量は以下のような手順で算出した。

- ① CITATIONで $k_{eff}=1.0$ 、または $\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$ となるような燃料長（または部分燃料長）を求める。
- ② 炉心の燃料配置、制御棒配置は図1に示す通り中心線に対して線対称としているので、CITATIONの対称境界条件を用いて片側半分の体系を入力して計算を行う。
- ③ 燃料長から必要な燃料枚数を算出する（整数ではなく一般には実数となる）。
- ④ ③の燃料枚数に燃料板1枚当たりのウラン量を掛けて臨界量を求める。

KUCAでの核的制限値として、固体減速炉心の [] あることが規定されている。1.3節で述べたとおり [] 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1-2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 $+2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^\circ C$ 以下であることが記載されている。反応度温度係数の解析精度は $\pm 32\%$ 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1-2の全ての炉心においてこの基準値を満足している。


炉心の体系を変更した場合の解析については、臨界量が最も少ないL5.5P-30炉心について臨界量と動特性パラメータ（ β_{eff} 、 ℓ 、 β_{eff}/ℓ ）の値について調べた。ここでは $k_{eff}=1.0$ となる炉心である。

結果を図6、表3に示す。この結果より炉心配置の断面形状を正方形に近い形から円形に近い形に変更しても臨界量、および動特性パラメータはほとんど変化していないことが判る。

表 1-2 固体減速炉心の代表炉心（臨界炉心 $k_{eff}=1.0$ ）の臨界量、動特性パラメータ等

炉心名称 ^a	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	β_{eff} (-) ^b	ℓ (s) ^b	β_{eff}/ℓ (s ⁻¹)	温度係数 ^c ($\Delta k/k/^\circ C$)
L5.5P-50	372	50.9	7.46×10^{-3}	5.18×10^{-5}	144.2	-1.05×10^{-4}
L5.5P-40		41.8	7.46×10^{-3}	5.15×10^{-5}	144.9	-1.00×10^{-4}
L5.5P-30		30.8	7.46×10^{-3}	5.17×10^{-5}	144.3	-9.47×10^{-5}
L4P-50	270	49.7	7.55×10^{-3}	4.59×10^{-5}	164.5	-9.98×10^{-5}
L4P-40		39.5	7.59×10^{-3}	4.45×10^{-5}	170.6	-8.81×10^{-5}
L4P-30		30.7	7.59×10^{-3}	4.42×10^{-5}	171.5	-8.49×10^{-5}
L3P-50	203	51.3	7.64×10^{-3}	4.02×10^{-5}	190.3	-9.65×10^{-5}
L3P-40		39.8	7.65×10^{-3}	3.99×10^{-5}	191.5	-8.45×10^{-5}
L3P-30		30.5	7.66×10^{-3}	3.96×10^{-5}	193.2	-7.81×10^{-5}
L2P-50	135	48.1	7.69×10^{-3}	3.56×10^{-5}	215.6	-7.28×10^{-5}
L2P-40		39.0	7.72×10^{-3}	3.42×10^{-5}	225.4	-6.95×10^{-5}
L2P-30		30.7	7.70×10^{-3}	3.53×10^{-5}	218.3	-6.47×10^{-5}
L1P-50	68	47.7	7.68×10^{-3}	3.11×10^{-5}	246.7	-5.44×10^{-5}
L1P-40		38.2	7.73×10^{-3}	2.84×10^{-5}	272.4	-5.06×10^{-5}
L1P-30		29.2	7.72×10^{-3}	2.92×10^{-5}	264.3	-4.69×10^{-5}
LL1P-50	34	49.7	7.66×10^{-3}	2.70×10^{-5}	283.7	-3.18×10^{-5}
LL1P-40		38.4	7.69×10^{-3}	2.55×10^{-5}	301.6	-3.07×10^{-5}
LL1P-30		30.0	7.68×10^{-3}	2.59×10^{-5}	296.5	-2.45×10^{-5}

a 炉心名称の前方は燃料を構成する最小単位セル

- ・Lは低濃縮燃料板  Lが繰り返されると重ねることを表す（Lは低濃縮燃料板1枚、LLは低濃縮燃料板を2枚重ねる）
- ・末尾がPはポリエチレンを減速材として用いる
- ・数値は減速材の厚さで1/8インチ単位のポリエチレンの厚さ（例えば3のときは3/8インチ厚さ）
- ・ハイフンの後の数値はcm単位の概略の炉心高さ（50は高さ約50cmの炉心）

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

表 2 固体減速炉心の代表炉心（最大過剰反応度炉心 $\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$ ）の臨界量

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	ρ 調整用燃料長 (cm) ¹⁾	
L5. 5P-50	372	50.9	12.1	
L5. 5P-40		41.8	21.6	
L5. 5P-30		30.8	20.5	
L4P-50	270	49.7	11.2	
L4P-40		39.5	<u>5.5</u>	
L4P-30		30.7	24.0	
L3P-50	203	51.3	5.9	
L3P-40		39.8	13.2	
L3P-30		30.5	9.8	
L2P-50	135	48.1	12.0	
L2P-40		39.0	5.0	
L2P-30		30.7	<u>8.1</u>	
L1P-50	68	47.7	19.7	
L1P-40		38.2	6.3	
L1P-30		29.2	7.7	
LL1P-50	34	49.7	11.7	
LL1P-40		38.4	8.7	
LL1P-30		30.0	14.5	

- 1) 下線を付けた炉心については調整用燃料を 2 体使用した。それ以外の炉心は 1 体使用。

「グレーのマスキング範囲は不表示情報」

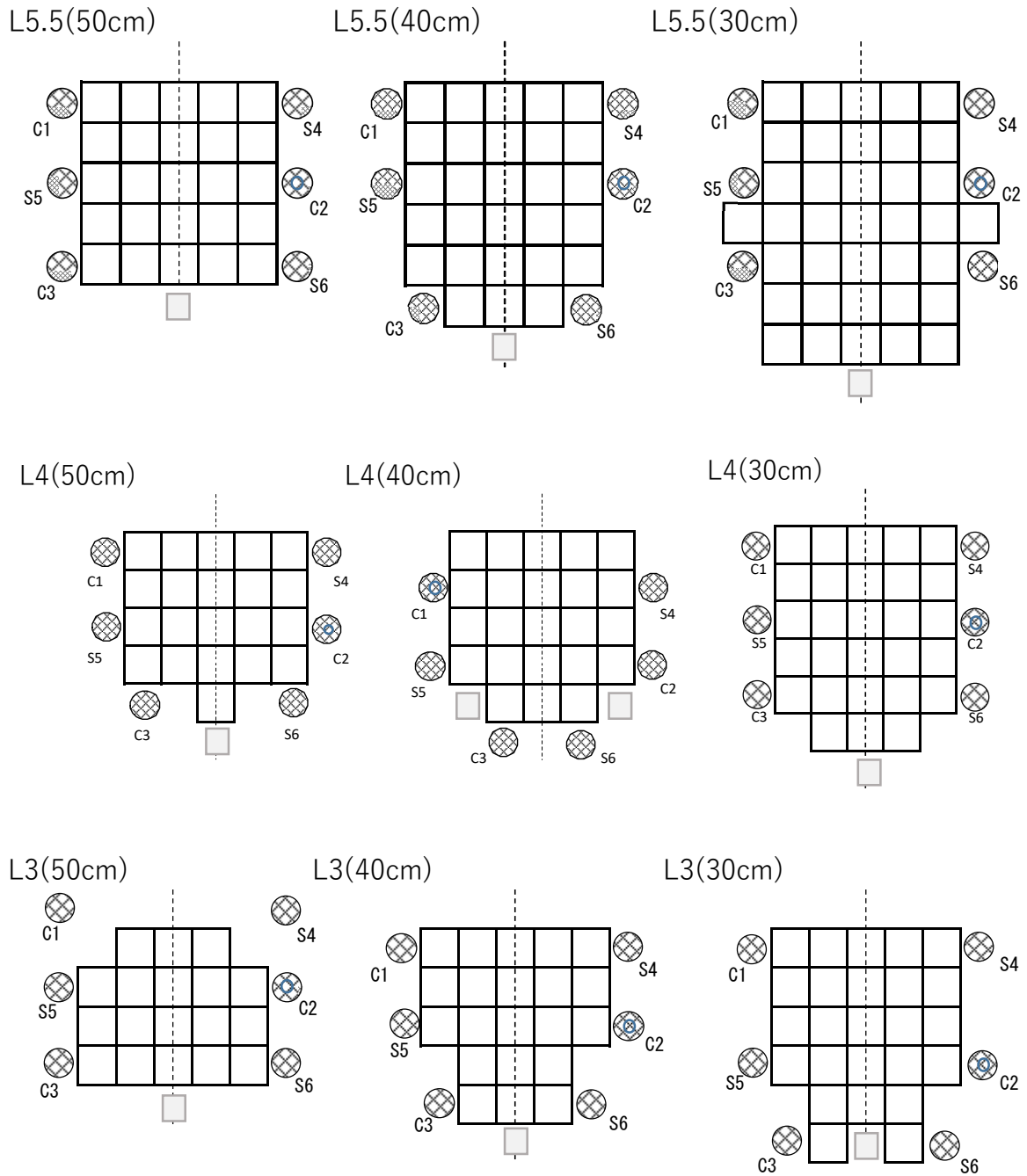


図4 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)

□: 反応度調整用燃料体装荷位置

(二重丸の制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

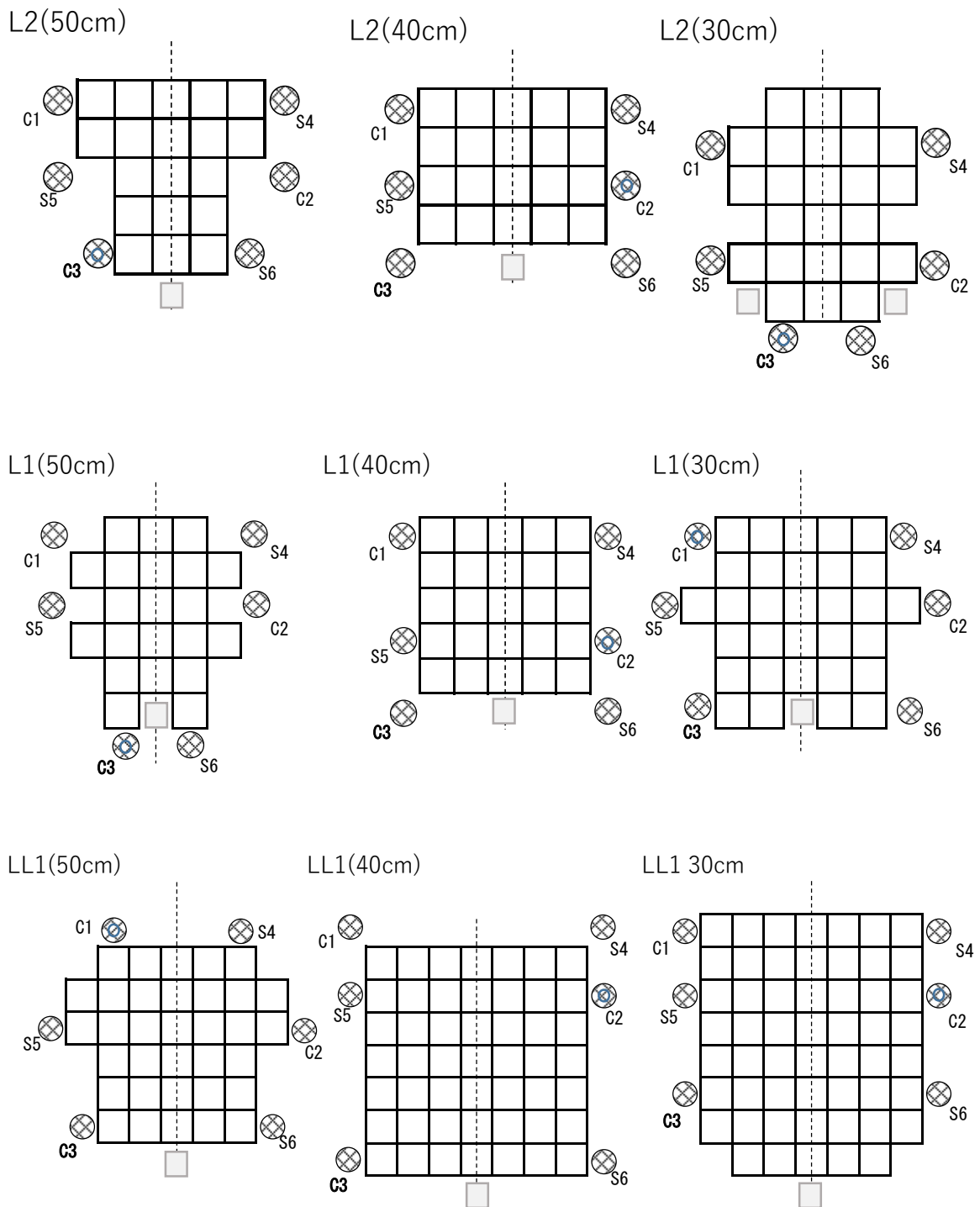


図5 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

■: 反応度調整用燃料体装荷位置

(二重丸の制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 3 L5.5P 炉心の臨界量と動特性パラメータ

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)		β_{eff} (-)	ℓ (s)	β_{eff}/ℓ (s ⁻¹)
L5.5P-30 (炉心 1)	372	30.5		7.46×10^{-3}	5.16×10^{-5}	144.5
L5.5P-30 (炉心 2)		30.5		7.47×10^{-3}	5.14×10^{-5}	145.4
L5.5P-30 (炉心 3)		30.6		7.47×10^{-3}	5.17×10^{-5}	144.4

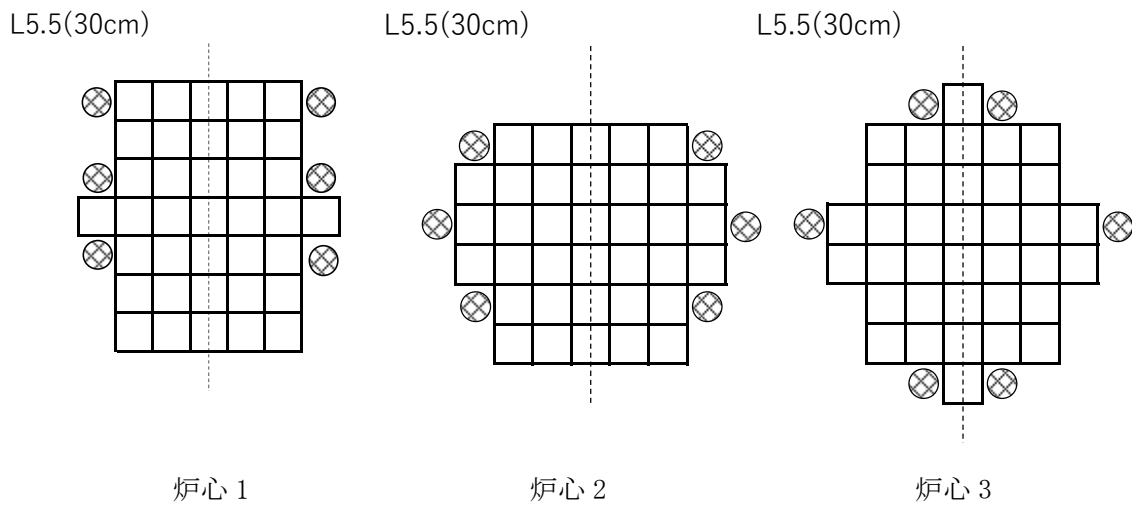


図 6 L5.5P 炉心(高さ約 30cm)の炉心配置図

1.5 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 4 に示す。

ここで各炉心は部分長燃料体（燃料領域長さが通常より短い燃料体、燃料領域の中心高さは他の燃料体と同じ）を炉心配置図（図 4、5）の縦方向下側に 1 体または 2 体を追加して過剰反応度を固体減速炉心の核的制限値である $0.35\% \Delta k/k$ とした炉心である（表 2 と同じ）。

過剰反応度の調整に用いた部分長燃料体の装荷位置は図 4、5 に、部分長燃料体の燃料領域高さを表 2 に示す。炉心計算は 1.4 節で述べた $k_{eff}=1$ の臨界体系の計算と同様に CITATION の対称境界条件を用いて片側半分の体系を入力して行っているため、最大反応度となる制御棒の反応度計算では制御棒を挿入したとして得られた反応度の値を $1/2$ としている。表 4 の最大反応度添加率の算出方法については、補足-Bの「制御棒の反応度印加率」に記載した手法により算出した。

KUCA での核的制限値として、

全制御棒価値が「 $1(\% \Delta k/k) + 過剰反応度(\% \Delta k/k)$ 」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。

全制御棒価値の判定基準は核的制限値により

$1(\% \Delta k/k) + 過剰反応度(0.35\% \Delta k/k) = 1.35\% (\% \Delta k/k)$ 以上であること

となる。

「核計算の妥当性の確認について」の項目で制御棒反応度の解析精度は $\pm 18\%$ としているため、代表炉心の解析においては

全制御棒価値： $1.35 \times (1+0.18) = 1.59 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

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 4 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、補足-Cの「最大反応度の制御棒の核的制限値」において検討を行っている。表 4 の「最大反応度($\% \Delta k/k$) (割合 %)」の欄の括弧内の数値（全反応度に対する割合）が 30% 以下であれば制御棒反応度の解析精度を含めても「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」という核的制限値を満たすことになるが、表 4 に示した数値は全て 30% 以下であるため、全ての炉心においてこの核的制限値を満足していることになる。

なお、反応度調整用燃料体を図 4、5 に示すように基本的には 1 本のみを利用しているが、これを 2 体利用とした場合の制御棒反応度については「第 343 回核燃料施設等の新規

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

制基準適合性に係る審査会合」(2020年3月16日)の資料(p33)において検討している。その結果、検討を行った H/U-235 の最も大きな L5.5 炉心と最も小さな LL1 炉心の全ての炉心について調整用燃料体を 2 体に増やした場合においても制御棒反応度の差は最大でも 0.02% $\Delta k/k$ 程度であり、制御棒反応度に対してほとんど影響を及ぼさないことを確認している。

なお、制御棒の干渉効果については「補足-A 制御棒の相互干渉効果」にて検討を行っている。

表 4 固体減速炉心の代表炉心 ($\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$) の制御棒反応度値

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	反射体 節約 (cm)	全反応度 (% $\Delta k/k$)	最大反応度 (% $\Delta k/k$) (割合 %) ¹⁾	最大反応度 添加率 ²⁾ (% $\Delta k/k/s$)
L5.5P-50	372	50.9	5.7	1.67	0.47 (28.2)	0.0126
L5.5P-40		41.8	5.8	2.00	0.43 (21.5)	0.0136
L5.5P-30		30.8	5.9	1.68	0.40 (23.9)	0.0157
L4P-50	270	49.7	6.0	2.47	0.58 (23.5)	0.0158
L4P-40		39.5	6.1	2.28	0.45 (19.8)	0.0145
L4P-30		30.7	6.2	1.94	0.40 (20.7)	0.0153
L3P-50	203	51.4	6.1	1.83	0.52 (28.5)	0.0136
L3P-40		39.8	6.2	2.52	0.48 (19.1)	0.0155
L3P-30		30.5	6.2	1.65	0.37 (22.5)	0.0143
L2P-50	135	48.1	6.2	2.36	0.59 (25.0)	0.0158
L2P-40		39.0	6.9	1.75	0.43 (24.6)	0.0136
L2P-30		30.7	6.9	2.03	0.38 (18.8)	0.0141
L1P-50	68	47.7	7.9	2.04	0.44 (21.6)	0.0115
L1P-40		38.2	8.5	1.96	0.49 (25.0)	0.0149
L1P-30		29.2	9.0	2.00	0.39 (19.5)	0.0139
LL1P-50	34	49.7	10.7	4.01	0.65 (16.3)	0.0154
LL1P-40		38.4	11.6	1.96	0.58 (29.6)	0.0157
LL1P-30		30.0	12.5	2.10	0.51 (24.3)	0.0154

1) 括弧内の数値は全反応度に対する割合 (%)

2) 炉心中心高さ位置での反応度添加率

表 4-2 固体減速炉心の代表炉心 ($\rho_{ex}=0.35\% \Delta k/k$) の制御棒反応度価値
(炉心計算で反射条件を用いずに全炉心モデルで計算) ¹⁾

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	反射体 節約 (cm)	全反応度 (% $\Delta k/k$)	最大反応度 (% $\Delta k/k$) (割合 %) ¹⁾	最大反応度 添加率 ²⁾ (% $\Delta k/k/s$)
L4P-50	270	49.7	6.0	2.45	0.56 (22.9)	0.0152
L2P-50	135	48.1	6.2	2.37	0.59 (24.9)	0.0158
LL1P-40	34	38.4	11.6	1.96	0.57 (29.0)	0.0157

1) 表 4 に示した結果のうち、最大反応度添加率が基準値に近い炉心について再計算を実施

1.6 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 体を含めることが設置申請書に定められているので、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 7 に示す。

解析結果の表 5 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 5 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 6 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 8、図 9 に示す。表 7 の結果からこれらの炉心の中心架台の反応度は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核的制限値を満足していることが判る。

表 5 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 6 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 7 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

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

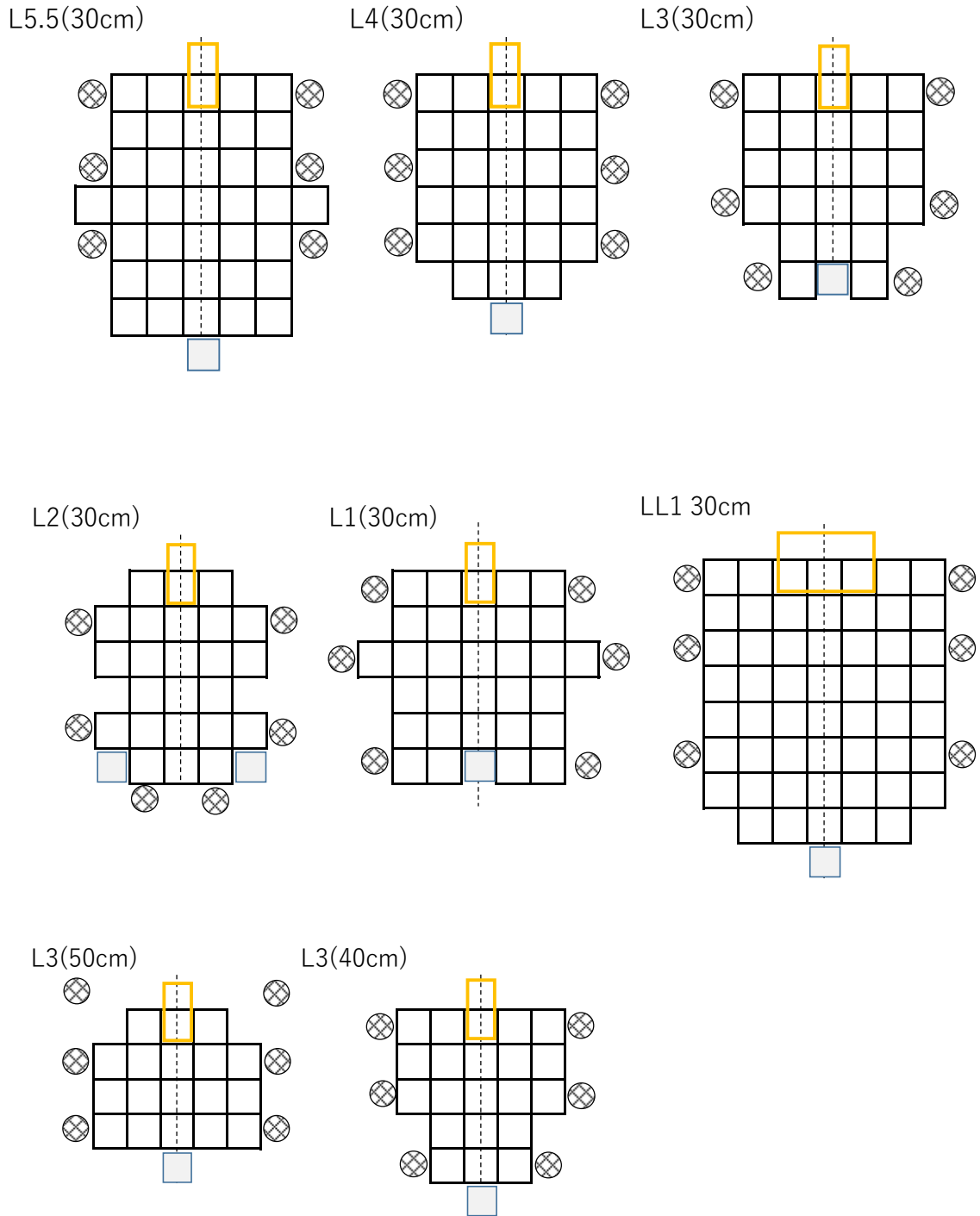


図7 中心架台の反応度評価を行う際の燃料体および反射体の取り出し箇所
(オレンジ色で囲んだ範囲を取り除く)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

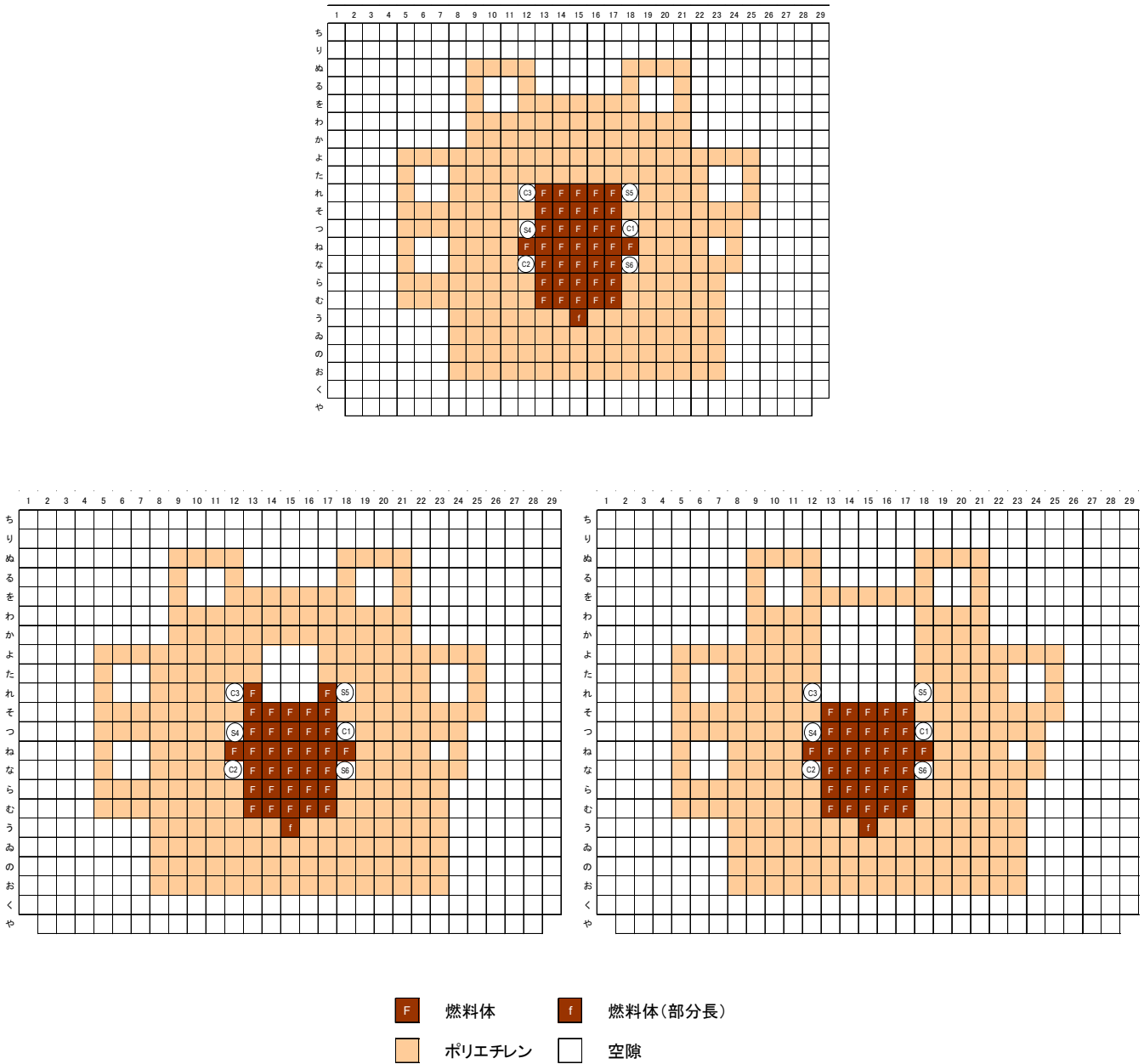


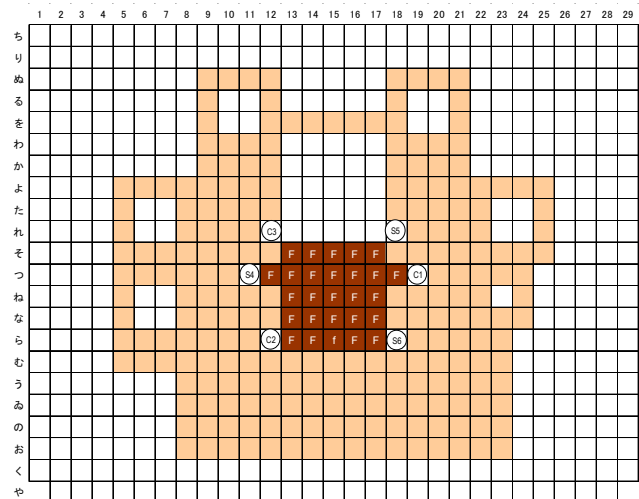
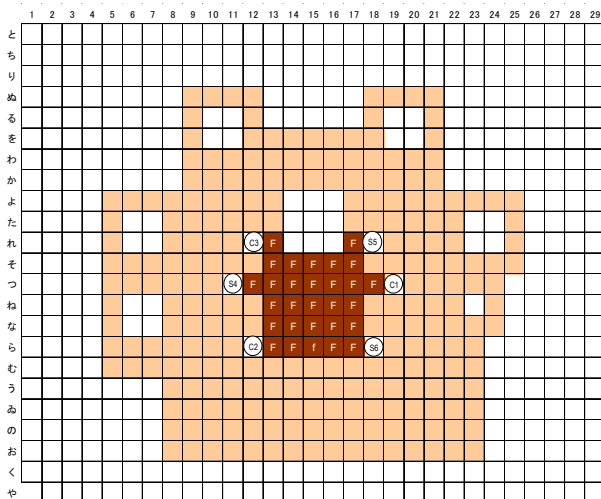
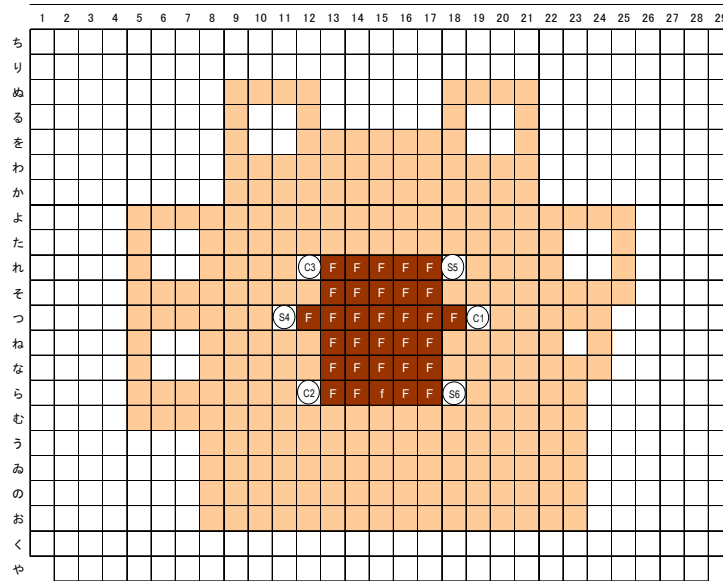
図8 L5.5 (30cm) 炉心 配置図

上： 中心架台落下前

下左：A 架台中心架台 (3×3) 落下後

下右：B 架台中心架台 (5×5) 落下後

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



F 燃料体	f 燃料体(部分長)
 ポリエチレン	 空隙

図9 L1 (30cm) 炉心 配置図

上： 中心架台落下前

下左：A 架台中心架台 (3×3) 落下後

下右：B 架台中心架台 (5×5) 落下後

2. 軽水減速炉心

「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）、
「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）、および
「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」（2020 年 4 月 20 日）に
おいて軽水減速炉心の炉心構成の制限、解析を行う代表炉心、代表炉心の解析結果につい
て説明した。それらの結果をまとめる。

2.1 炉心構成の制限

軽水減速炉心については以下のような制限を加える。

- 1) C30、C35、C45、C60 炉心とし、複数の燃料集合体を混在させない。（表 7-2 参照）
- 2) 燃料体の配置は 4 列または 5 列とする。ただし C60 の 2 分割炉心については 4 列のみとする。（図 10 参照）
- 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。（図 11 に例を示す）
- 5) 重水タンクは使用しない。
- 6) 制御棒は炉心配置（水平方向）に対して面对称となるように配置する。ただし 2 分割炉心については炉心分割面に対して面对称、または分割面の中央点に対して点对称となるように配置する（図 12 参照）。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

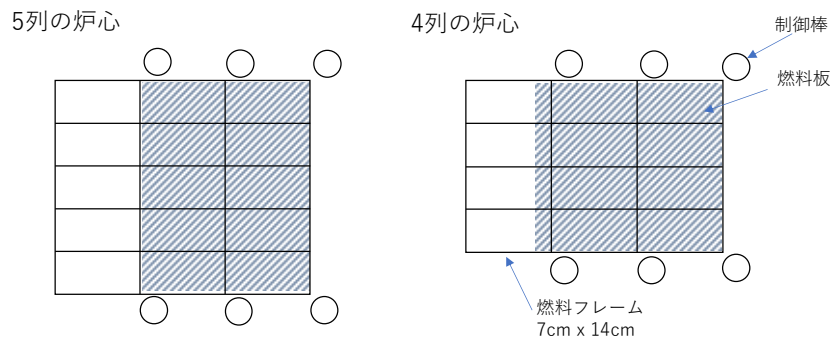


図 10 軽水減速炉心の配置図 (4列と5列の炉心)

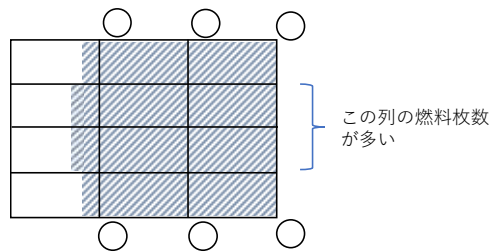


図 11 反応度調整のための燃料装荷例

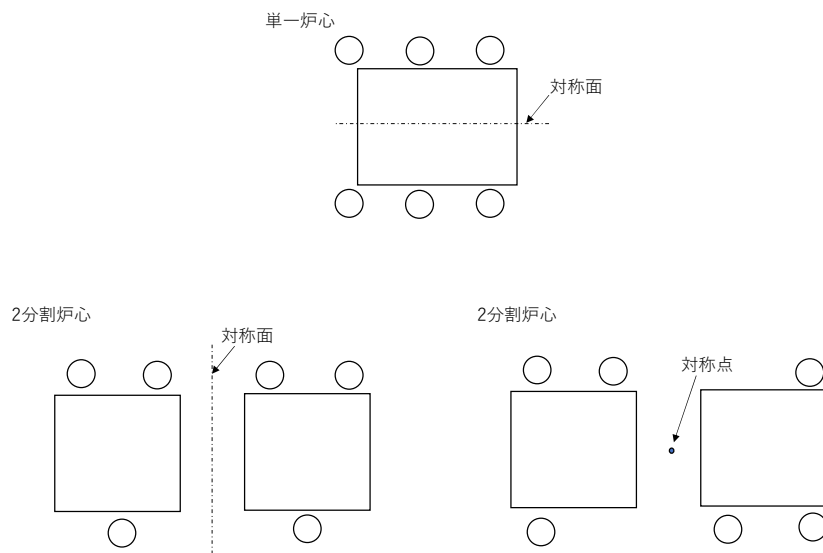


図 12 軽水減速炉心の制御棒配置方法の概略図 (○：制御棒)
(上：単一炉心、下の2つ：2分割炉心)

2.2 代表炉心の選定

以下のような代表炉心を選定する。

- 1) C30、C35、C45、C60 炉心で燃料体の配置は 4 列、5 列とする。(ただし C60 の 2 分割炉心については 4 列のみとする。)
- 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、C45 では列数の異なる 2 種類の炉心、C60 では 4 列の 1 種類の炉心、分割幅は 5 種類であるので合計 15 炉心を選定する。

単一炉心としては構成することができる炉心が 4 列と 5 列の異なる 4 種類の燃料セルの炉心であるので、すべてを代表炉心として取り上げていることになる。

2 分割炉心として分割幅は 0cm～15cm としているので、その範囲で 5 種類の分割幅の炉心を取り上げているのは妥当であると考えられるが、温度係数が分割幅により極大値や極小値を取る可能性がある場合、温度係数が正になる可能性がある場合には違う分割幅の炉心を代表炉心に加える。

2.3 代表炉心の解析精度

代表炉心の解析は固体減速炉心の場合と同様に SRAC コードシステムを使用するが、一部の解析についてはモンテカルロ計算コード MCNP (使用核データライブラリは SRAC と同様に JENDL-4.0) も使用する。

軽水減速炉心の各パラメータの解析精度は以下のような値であるとして各パラメータの解析結果を評価する。

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 %

臨界質量に関しては、補足—D「実効増倍率の誤差が臨界質量に及ぼす影響について」での説明の通り解析精度は±6%として解析結果を評価する。

ただし、2 分割炉心の分割幅が 7cm 以上の炉心については制御棒微分反応度の解析結果の値にさらに 2.8%の偏差を考慮して評価することにする。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 7-2 軽水減速炉心の代表炉心

炉心名称	単位セル寸法 (cm)	水対燃料体積比	H/ ²³⁵ U (-)
C30	0.30	0.97	80
C35	0.35	1.33	109
C45	0.45	2.03	167
C60	0.60	3.08	247

炉心名称について

C の後の数値はミリ単位の燃料板ピッチ (30 は約 3.0 mmピッチ)

2.4 臨界量、動特性パラメータ、反応度温度係数等の解析結果

軽水減速炉心の臨界となる体系の燃料体の配置例を図 13～16 に、臨界 ($k_{\text{eff}}=1.0$) となる炉心、および最大過剰反応度 ($\rho_{\text{ex}}=0.5\% \Delta k/k$) を持つ炉心の炉心長さ と臨界量を表 8 に、臨界となる炉心の動特性パラメータ、反応度温度係数、ボイド係数を表 9 に示す。

解析は固体減速炉心の解析と同様に SRAC コードシステムの 3 次元拡散計算コード CITATION を用いているので、炉心計算は燃料板、減速材等の均質化定数を用いて行っている。そのためここでの臨界量は以下のような手順で算出した。

- ① CITATION で $k_{\text{eff}}=1.0$ 、または $\rho_{\text{ex}}=0.5\% \Delta k/k$ となるような燃料長（または部分燃料長）を求める。
- ② 炉心の燃料配置、制御棒配置は図 12 に示す通り中心線に対して線対称、または点対象としているので、CITATION の対称境界条件を用いて片側半分の体系を入力して計算を行う。ただし、2 分割炉心の点対象となる炉心、および分割幅が 7cm 以上となる炉心については対称境界条件を用いずに全炉心を入力する。
- ③ 燃料長から必要な燃料枚数を算出する（整数ではなく一般には実数となる）。
- ④ ③の燃料枚数に燃料板 1 枚当たりのウラン量を掛けて臨界量を求める。

C45 の 2 分割炉心については反応度温度係数が正となる炉心があり、その分割幅依存性をより詳しく調べる必要があるため、4 列炉心、5 列炉心共に当初の代表炉心には加えていなかった分割幅が 6cm の炉心を追加して解析を行った。

KUCA での核的制限値として、
1.3 節で述べたとおり臨界質量の解析精度は±6%と
しているため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 8 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 $+2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^{\circ}C$ 以下であることが記載されている。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 9 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 8 軽水減速炉心の代表炉心の臨界量

炉心名称	H/ ²³⁵ U	列	臨界炉心		$\rho = 0.5\% \Delta k/k$ 炉心			
			炉心長さ (cm) ^b		炉心長さ (cm) ^b			
C30G0	80	4	41.6		41.7			
		5	31.6		32.3			
C35G0	109	4	34.4		35.2			
		5	27.7		28.4			
C45G0	167	4	31.3		32.0			
		5	25.6		26.1			
C60G0	247	4	32.9		33.7			
		5	26.7		27.2			
C45G (2H ₂ O)	167	4	30.1		30.9			
C45G (5H ₂ O)			38.8		40.0			
C45G (6H ₂ O)			43.0		44.3			
C45G (7H ₂ O)			47.0		48.4			
C45G (10H ₂ O)			55.3		56.8			
C45G (15H ₂ O)			60.5		62.0			
C45G (2H ₂ O)		5	24.1		24.7			
C45G (5H ₂ O)			30.4		31.8			
C45G (6H ₂ O)			33.7		34.6			
C45G (7H ₂ O)			36.9		37.4			
C45G (10H ₂ O)			44.2		45.2			
C45G (15H ₂ O)			49.2		50.2			
C60G (2H ₂ O)			247	4	33.7		34.3	
C60G (5H ₂ O)					43.9		45.3	
C60G (7H ₂ O)	52.0				53.5			
C60G (10H ₂ O)	59.4				61.1			
C60G (15H ₂ O)	64.0				65.6			

a : 炉心名称について

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

- 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 H_2O) を示す
 - G の後の数値が 0 のときは単一炉心
- b : 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)
- c : 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)

表9 軽水減速炉心の代表炉心（臨界炉心 keff=1.0）の臨界量、動特性パラメータ等

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(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	-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}	

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°C から 35°C 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」

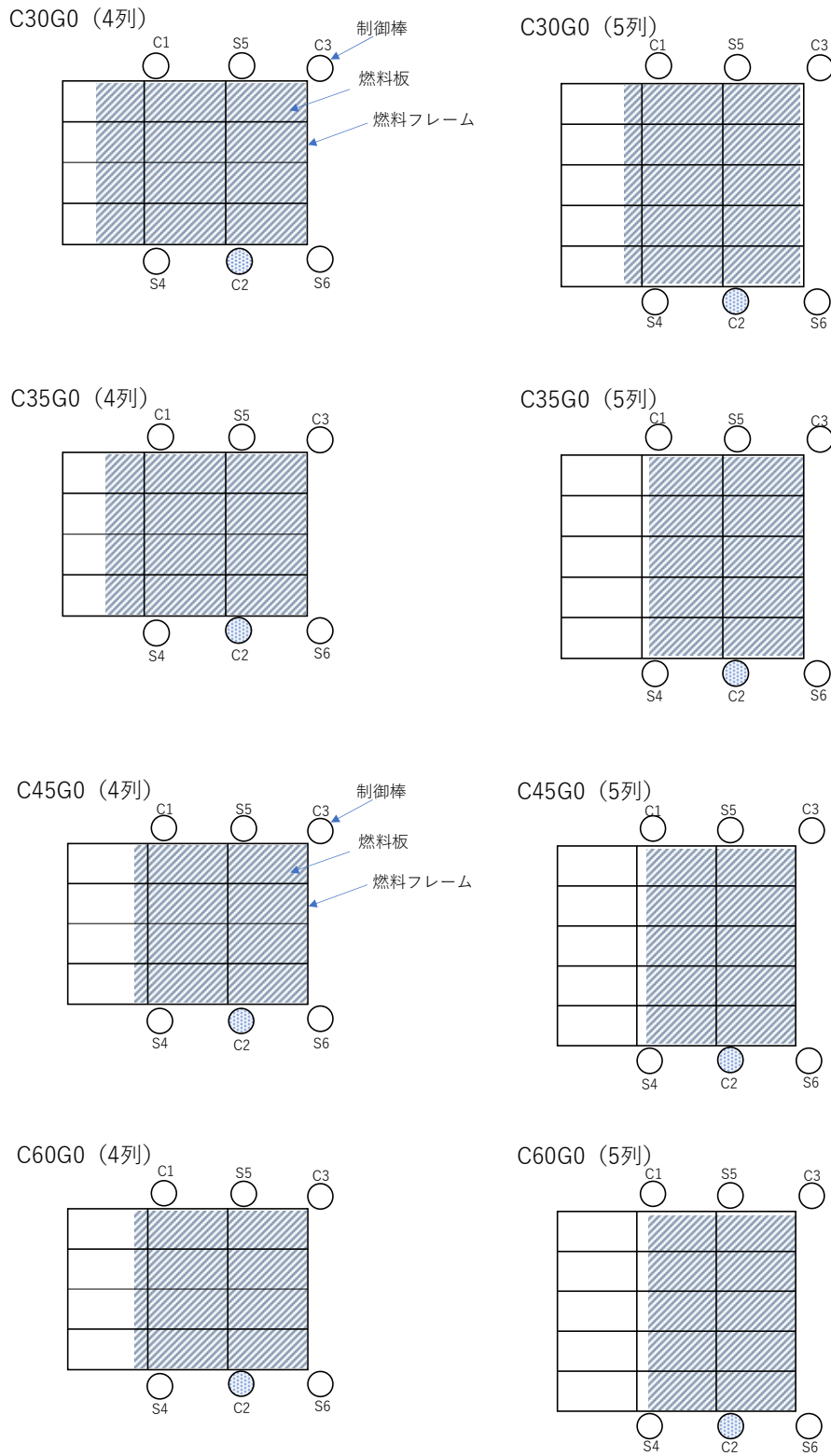
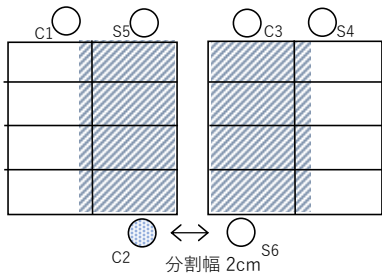


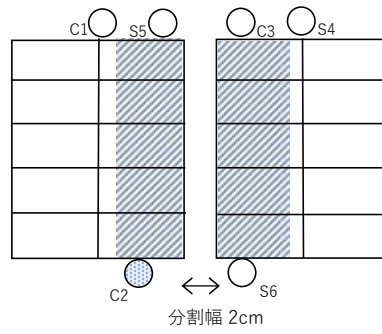
図 13 軽水減速炉心の炉心配置図 (1)
(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

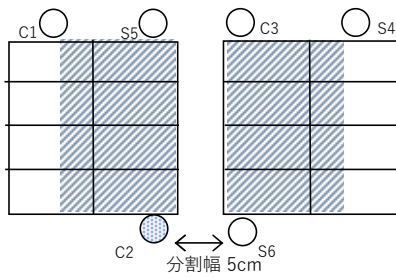
C45G (2H₂O) (4列)



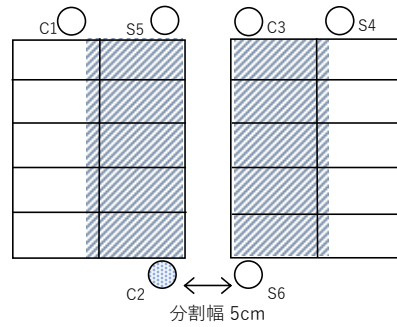
C45G (2H₂O) (5列)



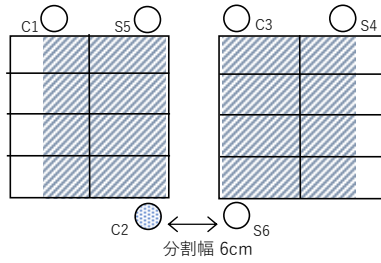
C45G (5H₂O) (4列)



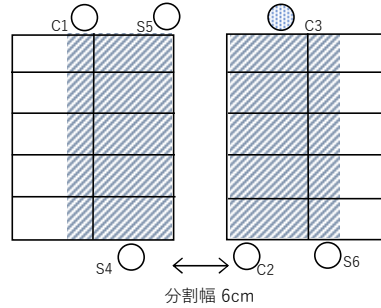
C45G (5H₂O) (5列)



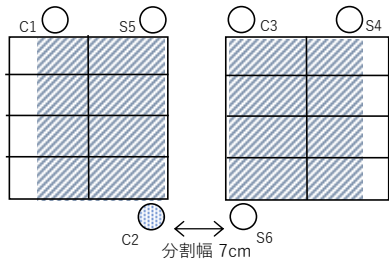
C45G (6H₂O) (4列)



C45G (6H₂O) (5列)



C45G (7H₂O) (4列)



C45G (7H₂O) (5列)

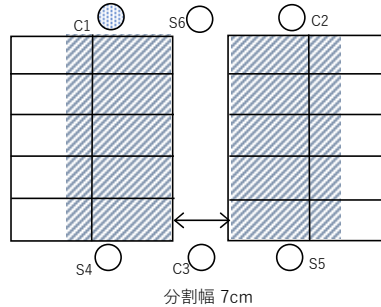


図 14 軽水減速炉心の炉心配置図 (2)

(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

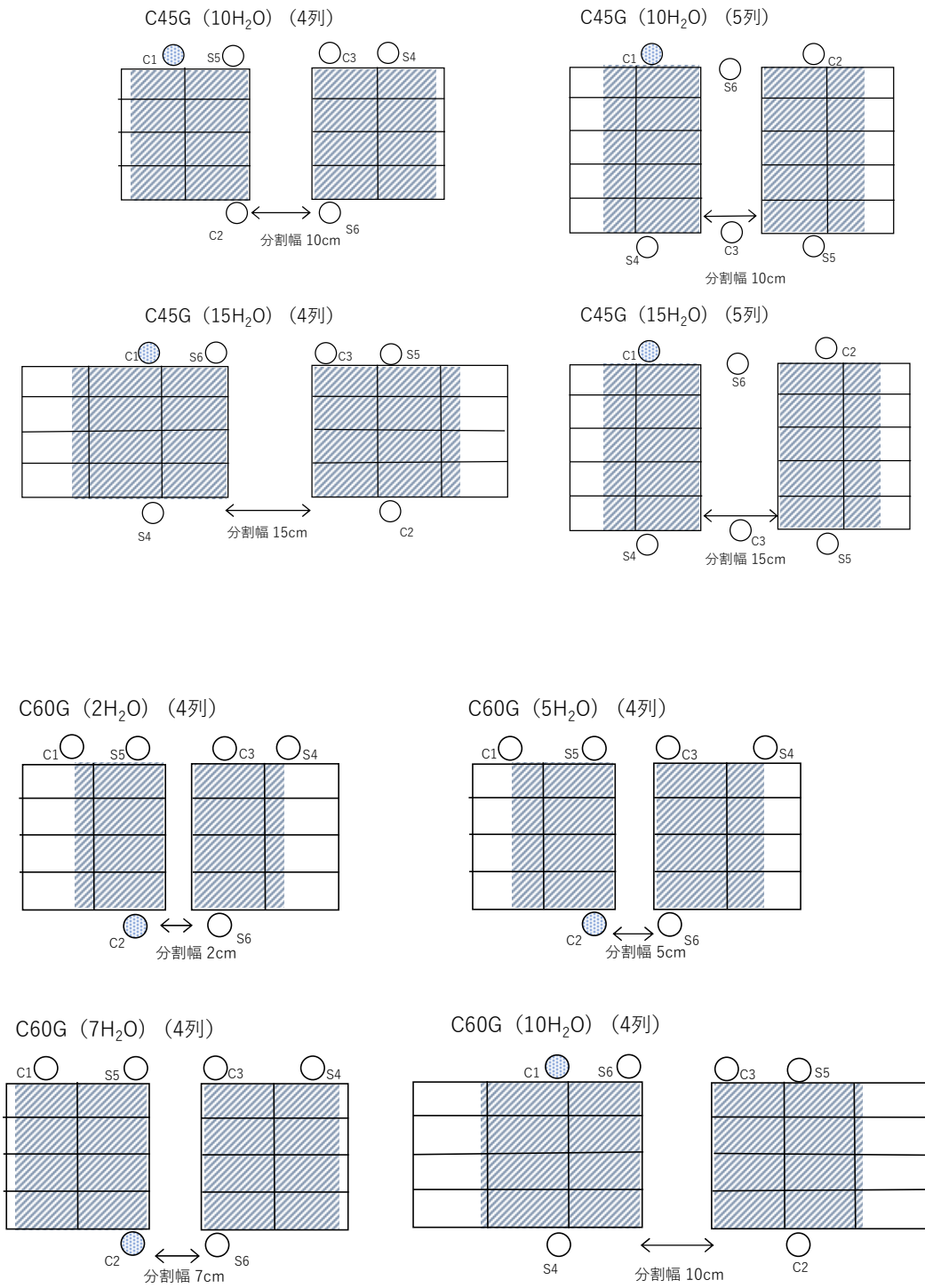


図 15 軽水減速炉心の炉心配置図 (3)
(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

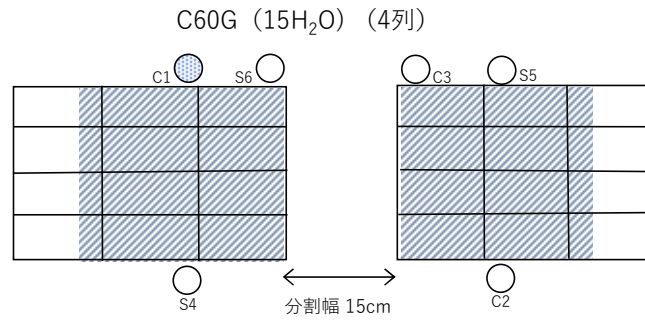


図 16 軽水減速炉心の炉心配置図 (4)
(網掛けをした制御棒は反応度が最大となる制御棒)

2.5 制御棒反応度価値

炉心計算は2.4節で述べた $k_{eff}=1$ の臨界体系の計算と同様に行っているため、対称条件を用いて半分の体系計算の場合には最大反応度となる制御棒の反応度計算では制御棒を挿入したとして得られた反応度の値を1/2としている。表10の下線を付けた分割幅が7cm以上の炉心、および2分割炉心の点対称配置の炉心については全炉心体系を入力しているため1本のみを挿入した場合の反応度を求めている。

各炉心の制御棒反応度価値の解析結果を表10に示す。

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。

全制御棒価値の判定基準は核的制限値により

$1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度} 0.5 (\% \Delta k/k) = 1.5 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

となる。

「核計算の妥当性の確認について」の項目で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： $1.5 \times (1+0.18) = 1.77 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

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10の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

2分割炉心の分割幅が7cm以上の炉心については、制御棒の最大反応度添加率については、この解析精度にさらに2.8%の偏差を考慮して評価することとしており、

制御棒の最大反応度添加率： $0.02 \times (1-0.18) \times (1-0.028) = 0.0159 (\% \Delta k/k/s)$ 以下であることが求められるが、表10の対象となる炉心については全てこの基準値を満足している。

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、補足-Cの「最大反応度の制御棒の核的制限値」において検討を行っている。表3の「最大反応度($\% \Delta k/k$) (割合%)」の欄の括弧内の数値(全反応度に対する割合)が30%以下であれば制御棒反応度の解析精度を含めても「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」という核的制限値を満たすことになるが、表10に示した数値は全て30%以下であるため、全ての炉心においてこの核的制限値を満足していることになる。

表 10 軽水減速炉心の代表炉心 ($\rho_{ex}=0.5\% \Delta k/k$) の制御棒反応度値

炉心名称	列	全反応度 (% $\Delta k/k$)	最大反応度 (% $\Delta k/k$) (割合%) ¹⁾	最大反応度添 加率 ^{2) 3)} (% $\Delta k/k/s$)
C30G0	4	2.87	0.66 (23.0)	0.015
	5	2.55	0.65 (25.5)	0.014
C35G0	4	2.06	0.58 (28.2)	0.013
	5	2.19	0.56 (25.6)	0.013
C45G0	4	2.80	0.68 (24.3)	0.0156 ^{4) 7)}
	5	1.83	0.52 (28.5)	0.012
C60G0	4	2.43	0.60 (24.7)	0.014
	5	1.85	0.52 (28.2)	0.012
C45G (2H ₂ O)	4	2.43	0.55 (22.7)	0.013
C45G (5H ₂ O)		2.09	0.48 (23.0)	0.008
C45G (6H ₂ O)		1.87	0.43 (23.0)	0.010
<u>C45G (7H₂O)</u> ⁵⁾		2.01	0.38 (19.0)	0.009
<u>C45G (10H₂O)</u> ⁵⁾		2.38	0.38 (16.0)	0.009
<u>C45G (15H₂O)</u> ⁵⁾		2.05	0.34 (16.6)	0.008
C45G (2H ₂ O)		5	1.80	0.41 (22.8)
C45G (4H ₂ O)	1.86		0.38 (20.5)	0.009
C45G (5H ₂ O)	1.84		0.34 (18.5)	0.008
<u>C45G (6H₂O)</u> ⁵⁾	1.771 ⁴⁾		0.34 (19.2)	0.008
<u>C45G (7H₂O)</u> ⁵⁾	1.78		0.31 (17.5)	0.007
<u>C45G (10H₂O)</u> ⁵⁾	1.90		0.32 (16.9)	0.007
<u>C45G (15H₂O)</u> ⁵⁾	2.01		0.34 (17.0)	0.008
C60G (2H ₂ O)	4	2.00	0.46 (23.0)	0.011
C60G (5H ₂ O)		2.00	0.39 (19.5)	0.009
<u>C60G (7H₂O)</u> ⁵⁾		1.88	0.37 (19.7)	0.009
<u>C60G (10H₂O)</u> ⁵⁾		1.79	0.31 (17.4)	0.007
<u>C60G (15H₂O)</u> ⁵⁾		1.80	0.32 (17.8)	0.008

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

- 1) 括弧内の数値は全反応度に対する割合 (%)
- 2) 炉心中心高さ位置での反応度添加率
- 3) 反射体節約は以下の通りとした
(5 列) C30: 9.14cm、C35: 8.35cm、C45: 7.65cm、C60: 7.16cm
(4 列) C30: 9.05cm、C35: 8.34cm、C45: 7.65cm、C60: 7.15cm
- 4) 規制値に近い桁数を増やして記載
- 5) 下線を付けた分割幅が 7cm 以上の炉心、および 2 分割炉心の点対称配置の炉心については全炉心体系を入力して最大反応度を持つ制御棒の解析を行った。他の炉心については対称条件を用いて半分の炉心の解析を行い、最大反応度を持つ制御棒は得られた値を 1/2 とした。
- 6) 記載の修正
(全制御棒引抜き : $k_{eff}=1.005014$ 、C2+S5 挿入 : $k_{eff}=0.993474$
 $\{(1/1.005014) - (1/0.993474)\} \div 2 = 0.00578 \% \Delta k/k$)
- 7) 最大反応度添加率の値が判定基準である $0.0164 (\% \Delta k/k/s)$ に近いので、念のため反射条件を用いずに全炉心計算で最大反応度を計算したところ、
全反応度 : $2.79 \% \Delta k/k$ 、最大反応度 : $0.67 \% \Delta k/k$ (24.0%)、
最大反応度添加率 : $0.0154 (\% \Delta k/k/s)$
であった。

2.6 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、SRAC の拡散計算コード CITATION の 3次元炉心計算での実効増倍率の値から反応度を求めた（3次元炉心計算で z 方向の上端を真空境界条件する）。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 11 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燃料板ミート部より 5cm 下の位置まで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。

この計算結果の妥当性を確認するために一部の炉心について同じ計算をモンテカルロ計算コード MCNP を用いて解析を行った。結果を表 12 に示す。両者の結果はよく一致しており、上記の SRAC を用いた結果は妥当であると考えられる。

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 13 に示すとおり、軽水がすべて無くなった場合の実効増倍率は核的制限値（反応度として $1\% \Delta k/k$ 以上なので、臨界時の誤差を考慮して k_{eff} が約 0.98 以下であれば満足する）に比べて十分に小さな値となっている。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 11 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 12 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 (% $\Delta k/k$)	
		SRAC	MCNP
C30G0	4	3.35	3.33 \pm 0.04
C45G0	4	2.65	2.64 \pm 0.04

表 13 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

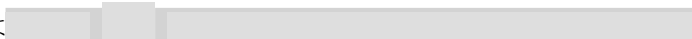
【補足－A 制御棒の相互干渉効果】

制御棒の相互干渉について

一般に制御棒干渉効果とは、近接した制御棒 2 本を同時に挿入したとき制御棒周辺の中性子束が近傍の制御棒挿入の影響により低下するため、その制御棒を単独で挿入した場合の反応度に比べて小さくなることである。そのため制御棒干渉効果がある場合には 2 本を同時に挿入したときの反応度の和は 1 本ずつ挿入したときの反応度の和に比べて小さくなる。

ここでは KUCA の制御棒干渉効果について考える。以下の 1) 2) は固体減速炉心および軽水減速炉心の主に単一炉心についての検討、3) は軽水減速炉心の 2 分割炉心についての検討を行う。

1) 固体減速炉心

固体減速炉心の制御棒は  となっている(図 A-1)。制御棒自体は格子板上の隣り合った場所(炉心配置図の隣り合った 1 辺約 5.5cm マス目)に挿入することは可能であるが、制御棒を上下させる制御棒駆動機構はその構造上 1 つ以上マス目を空けて設置する必要があるため、制御棒の中心間の距離はマス目の大きさである 1 辺約 5.5cm の 2 倍の約 11cm 以上空けることになる。これまで示した全ての代表炉心の制御棒配置はそうになっている。

制御棒の干渉効果を確認するために、図 A-2 に示す中性子スペクトルが異なる各炉心について、モンテカルロ計算コード MCNP を用いて制御棒の干渉効果を確認した。これらの炉心は代表炉心の中では燃料体数が比較的少なく制御棒が近接しやすく制御棒干渉が現れやすいと考えられる。

結果を表 A-1 に示す。制御棒干渉効果があるとするならば表中の「③/(①+②)」の値は 1.0 より有意に小さな値になるはずであるが、全ての結果においてモンテカルロ計算の計算誤差範囲内で約 1.0 (結果のプラスマイナスの範囲内に 1.0 が入っている) となっている。後述する軽水炉心での制御棒干渉効果の解析(表 A-5, 表 A-6)においても計算誤差範囲内で「③/(①+②)」に相当する値が約 1.0 であれば干渉効果は無いことが示されている。これらの結果から固体減速炉心において制御棒を 1 つ以上マス目(1 さや管分以上)を空けて設置すれば制御棒の干渉効果は無視できると考えられ、今回解析を行った炉心(図 4、5)はすべてこの配置条件を満足している。

各制御棒の反応度と全反応度を SRAC を用いて解析を行った結果を表 A-2 に示す(各炉心の炉心配置図「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

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

16日)の資料(p25 p26、図1図2)の通り)。各制御棒の反応度を足し合わせた値と、同時に挿入したときの値はよく一致しており、これらの炉心についても制御棒の干渉効果は無視できると考えられる。

表 A-1 制御棒干渉効果の解析

炉心 ^{a)}	C1 反応度 (%Δk/k) ①	S5 反応度 (%Δk/k) ②	C1+S5 反応度 (%Δk/k) ③	③ / (①+②)
L5.5-40	0.18±0.02	0.46±0.02	0.62±0.02	0.98±0.03
L4-40	0.45±0.02	0.34±0.02	0.80±0.02	1.01±0.04
L3-40	0.40±0.04	0.59±0.04	1.00±0.05	1.00±0.08
L1-40	0.82±0.02	0.17±0.02	0.97±0.02	0.98±0.03
LL1-40	0.10±0.02	0.50±0.02	0.59±0.02	0.98±0.03

a) ハイフオンの後の数値は cm 単位の概略の炉心高さ (40 は高さ約 40cm の炉心)

表 A-2 各炉心の制御棒反応度

炉心	C 1 ¹⁾ (%Δk/k)	C 2 ¹⁾ (%Δk/k)	C 3 ¹⁾ (%Δk/k)	Sum ²⁾ (%Δk/k)	Total ³⁾ (%Δk/k)	Total/Sum
L5.5-50	0.189	0.468	0.196	1.71	1.67	0.98
L4-50	0.290	0.542	0.405	2.47	2.47	1.00
L3-50	0.013	0.519	0.398	1.86	1.83	0.98
L2-50	0.384	0.204	0.587	2.35	2.36	1.00
L1-50	0.204	0.406	0.435	2.09	2.04	0.98
LL1-50	0.654	0.649	0.637	3.88	4.01	1.03

1) 1/2 炉心モデルで対称な位置の 2 本の制御棒を同時に挿入したとして反応度を求め、その値を 1/2 とした値

2) Sum は C1+C2+C3 の値を 2 倍したもの

3) Total は同時に 6 本を挿入したときの値

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 A-2-2 各炉心の制御棒反応度（追加確認）

炉心	C 1 ¹⁾ (% Δ k/k)	C 2 ¹⁾ (% Δ k/k)	C 3 ¹⁾ (% Δ k/k)	Sum ²⁾ (% Δ k/k)	Total ³⁾ (% Δ k/k)	Total/Sum
L5.5-50	0.187	0.460	0.198	1.69	1.67	0.99
L3-50	0.016	0.510	0.391	1.83	1.82	0.99
LL1-50	0.658	0.644	0.635	3.90	4.02	1.03

1) 炉心配置の対称条件を用いた 1/2 炉心モデルではなく全炉心体系で計算

2) Sum は C1+C2+C3 の値を 2 倍したもの

3) Total は同時に 6 本を挿入したときの値

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

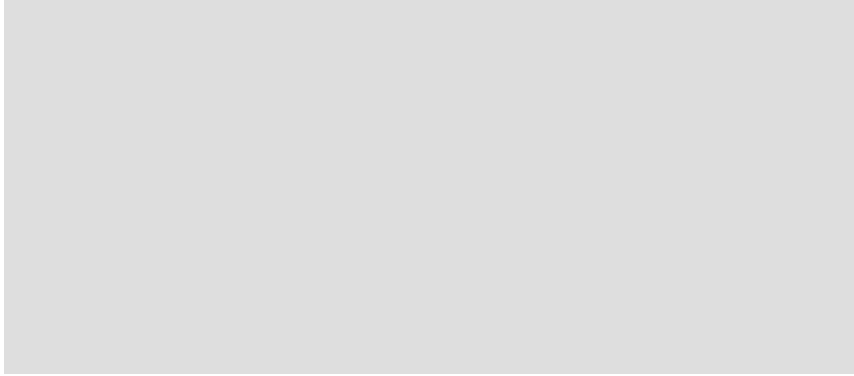


図 A-1 固体減速炉心の制御棒
(1440mm の円管内部に無水ホウ酸を詰め、図の右側をプラグで閉止する)

「グレーのマスキング範囲は不表示情報」

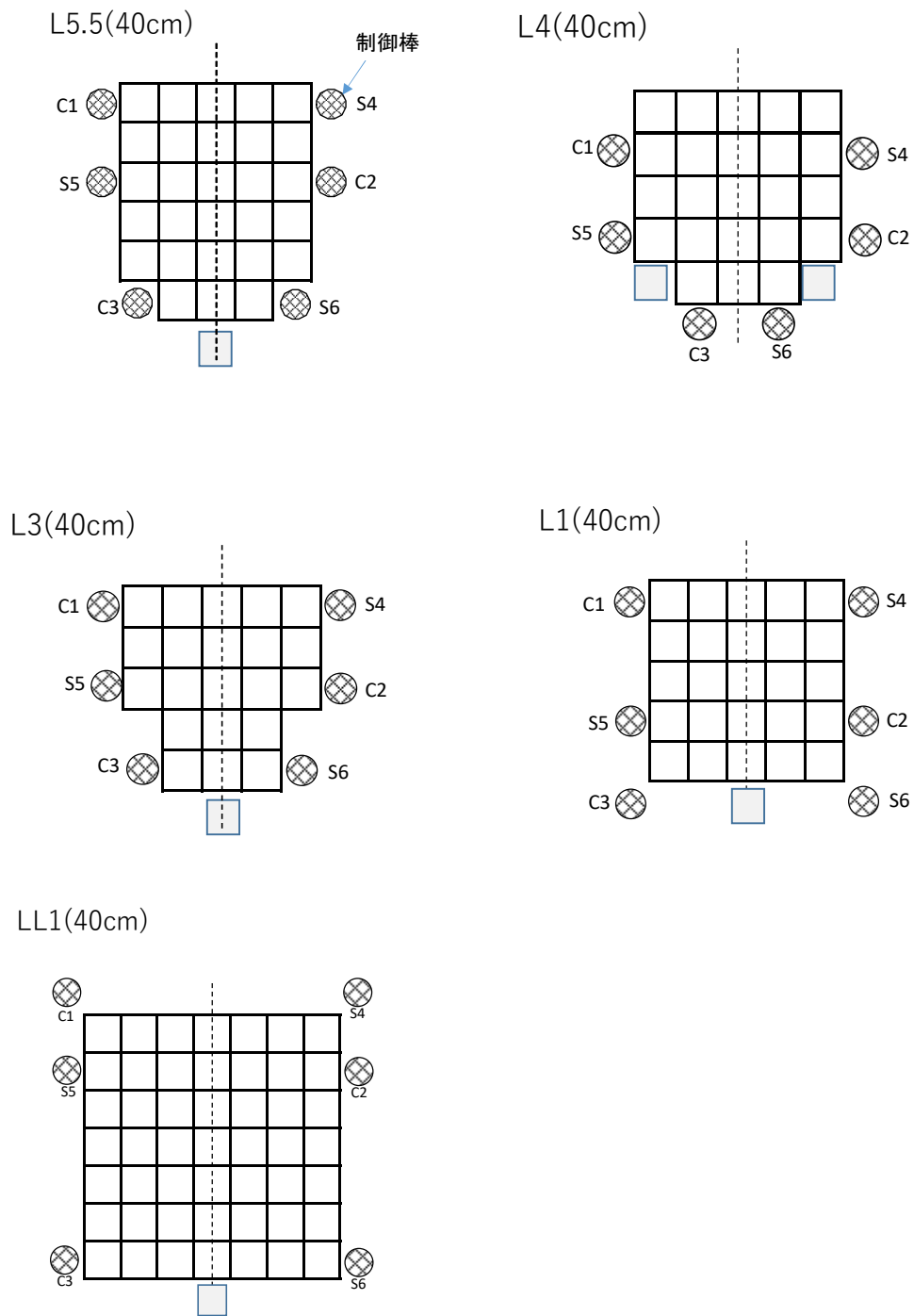


図 A-2 MCNP による解析炉心
(反応度が最大となる制御棒を C2、S5 とした)

図 A-2 に示した各炉心について、表 A-1 での検討結果では制御棒が集合体の 1 マス以上離して設置すれば制御棒干渉効果は考慮する必要が無いことを示しているが、確認のために、例えば L5.5(40cm)炉心の C2 と S5 制御棒のように制御棒反応度が最大となる鏡面对称位置にある 2 本の制御棒(対象となる制御棒は表 A-3 に記載)についての干渉効果をモンテカルロ計算コード MCNP を用いて検討する(計算は全炉心モデル)。

結果を表 A-3 に示す。制御棒干渉効果があるとすれば表中の「②/(①×2)」の値は 1.0 より有意に小さな値になるはずであるが、全ての結果においてモンテカルロ計算の計算誤差範囲内で約 1.0 (結果のプラスマイナスの範囲内に 1.0 が入っている)となっており、鏡面对称位置にある制御棒についての制御棒の干渉効果は無視できると考えられる。

表 A-3 鏡面对称位置にある制御棒の干渉効果の解析

炉心	対象となる 制御棒	C 反応度 (% Δk/k) ①	C+S 反応度 (% Δk/k) ②	② / (①×2)
L5.5-40	C2 と S5	0.49±0.02	1.00±0.02	1.02±0.05
L4-40	C1 と S4	0.34±0.02	0.70±0.02	1.03±0.05
L3-40	C2 と S5	0.59±0.04	1.23±0.02	1.04±0.06
L1-40	C2 と S5	0.82±0.02	1.68±0.02	1.02±0.03
LL1-40	C2 と S5	0.50±0.02	0.97±0.02	0.97±0.05

図 A-3 に示すような制御棒が隣接した幾つかの炉心について、制御棒干渉効果についての確認を行った。

図中の網掛けをつけた各炉心の 2 本の制御棒が対象であり、右側をC3、左側をS6制御棒とする。各制御棒の反応度について、どちらか 1 本のみを挿入した場合と 2 本同時に挿入した場合の反応度を SRAC コードシステムにより求めた。結果を表 A-4 に示す。制御棒干渉効果があるとなれば表中の「②／(①×2)」の値は 1.0 より有意に小さな値になるはずであるが、全ての結果において 1.0 に近い値となっており、前述の検討結果と同様にこれらの制御棒についての制御棒の干渉効果は無視できると考えられる。

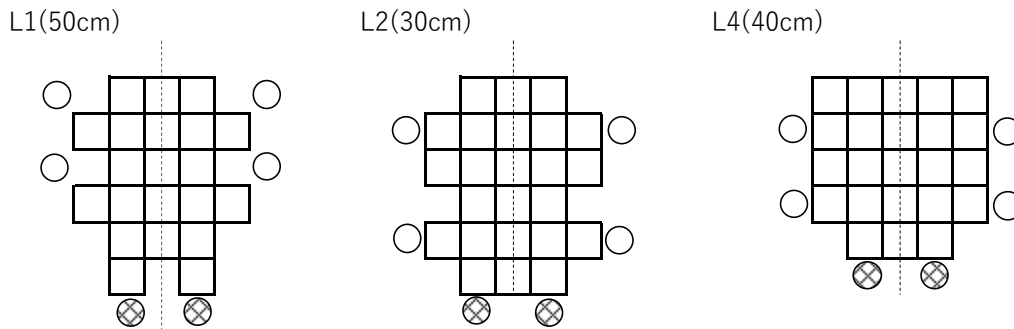


図 A-3 横方向に制御棒が隣接した炉心

表 A-4 横方向に制御棒が隣接した制御棒の干渉効果の解析

炉心	1 本反応度 (% Δ k/k) ①	2 本反応度 (% Δ k/k) ②	②／(①×2)
L1-50	0.435	0.879	1.01
L2-30	0.336	0.656	0.98
L4-40	0.317	0.614	0.97

2) 軽水減速炉心 (単一炉心)

軽水減速炉心の制御棒は [マスキング] 使用時に

はそれを 5cm 角の制御棒挿入管(図 A-4 中の Al box)に挿入した構造となっている。

制御棒の干渉効果を確認するために、図 A-5 に示す C45G0(4 列)と C45G0(5 列)の各炉心について、S4 と C2 の制御棒の間隔を変更し(C2 の位置は変更せずに S4 を C2 に近づける)、S4、C2 の単体を挿入したときの反応度、および S4 と C2 を同時に挿入し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。体系は反射条件を用いずに全炉心を入力して計算を行っている。

結果を表 A-5、A-6 に示す。表中の間隔は 2 本の制御棒の中心間の距離であり、表の「③／(①＋②)」の値は干渉効果がある場合には 1 より小さい値となる。間隔が 8cm のときにはやや干渉効果が認められるが、10cm 以上離れていた場合には干渉効果は無視できると考えられる。

実際には固体減速炉心の説明でも述べたように制御棒駆動機構の構造上、制御棒を約 11cm 以上近づけることは不可能であり、前回審査会合(「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」(2020 年 4 月 20 日))の資料で示した軽水減速炉心の制御棒反応度の解析(p13, P14 の表 3)ではすべて 11cm 以上離して制御棒を設置しているので、制御棒の近接による干渉効果は無視することができる。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

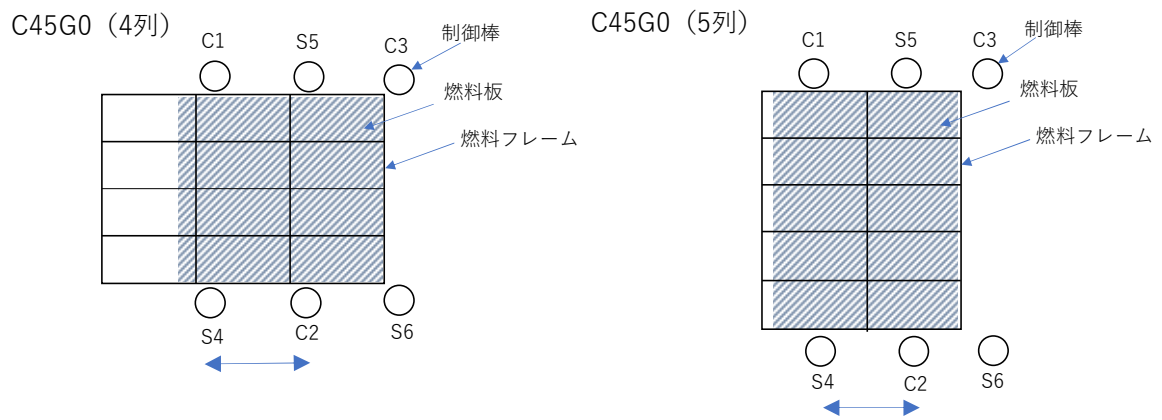
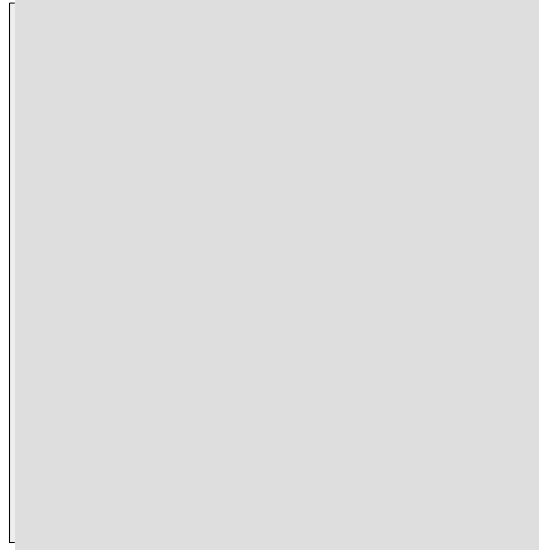


図 A-5 C45G0(4列)炉心(左)、C45G0(5列)炉心(右)

表 A-5 C45G0(4列)炉心 制御棒干渉効果の解析 (全炉心体系入力)

間隔	S4 反応度 (% Δk/k) ①	C2 反応度 (% Δk/k) ②	S4+C2 反応度 (% Δk/k) ③	③ / (①+②) (% Δk/k)
17 cm	0.38±0.02	0.53±0.01	0.94±0.01	1.04±0.03
14 cm	0.49±0.01	0.53±0.01	0.98±0.02	1.02±0.02
10 cm	0.63±0.01	0.53±0.01	1.15±0.01	1.00±0.02
8 cm	0.64±0.02	0.53±0.01	1.13±0.01	0.97±0.02

間隔は制御棒の中心間の距離

表 A-6 C45G0(5列)炉心 制御棒干渉効果の解析 (全炉心体系入力)

間隔 ^{a)}	S4 反応度 (% Δk/k) ①	C2 反応度 (% Δk/k) ②	S4+C2 反応度 (% Δk/k) ③	③ / (①+②) (% Δk/k)
17 cm	0.30±0.01	0.30±0.01	0.61±0.01	1.03±0.03
14 cm	0.39±0.01	0.30±0.01	0.70±0.01	1.00±0.03
10 cm	0.47±0.01	0.30±0.01	0.74±0.01	0.97±0.03
8 cm	0.48±0.02	0.30±0.01	0.73±0.01	0.94±0.03

a) 間隔は制御棒の中心間の距離

3) 軽水減速炉心 (2 分割炉心)

2 分割炉心での制御棒の相互干渉効果は 1) と 2) の単一炉心の場合の制御棒近接による干渉効果とは異なる傾向を示す。

図 A-6 に示すような 2 分割炉心を考える。燃料配置は分割面に対して対称であり、また 2 本の制御棒も分割面に対して対称に配置する。1) 2) で示した一般的な制御棒干渉効果では制御棒挿入により制御棒周辺の中性子束が局所的に歪むため、その歪み、すなわち中性子束の低下の影響を受ける制御棒の反応度が小さくなるのが問題となった。一方、2 つの炉心間の中性子結合が弱い 2 分割炉心の場合、制御棒を挿入した側の炉心での中性子束が全体として大きく低下する現象が起こる。その中性子束の概形を図 A-7 に示す(臨界計算での中性子束を示しているので、炉心全体で積分値は変わらないとする)。図 A-8 に KUCA での C45 の 2 分割炉心(燃料配置は分割面に対して対称)において図面の右側炉心の制御棒を挿入して摂動を加えたときに反応率分布を示す。ここで加えた摂動は約 $0.1\% \Delta k/k$ という小さなものであるが、反応率分布は右側炉心が左側炉心に比べて炉心全体にわたって低下していることが判る。このような中性子束の大局的な歪みは **Flux Tilt** と呼ばれている。

これは結合が弱いほど摂動に対して 1 次モード中性子束が励起しやすいために生じるものとして考えることができる。図 A-9、A-10 に C60G15(4 列)の 2 分割炉心の高速群の基本モード、1 次モード中性子束、4 次モード中性子束を、表 A-7 に各モードの固有値および固有値間隔を示す。高次モード解析は NEUMAC-3 コード(中性子拡散法と deflation 法に基づく 3 次元高次モード解析コード)を用いた¹⁾。基本モードは 2 つの炉心の分割面に対して対称となるが、1 次モードは反対称となる。(4 次モード中性子束については後述)

これまでの研究により結合が弱い 2 分割炉心において次式で定義される Flux Tilt 量(τ)は片側炉心に加えられた反応度 ρ に比例し、一次モード固有値間隔($E.S.$)₁ に反比例することが判っている²⁾³⁾。

$$\tau = \frac{\left| \int_{V_1} \phi' dV - \int_{V_2} \phi' dV \right|}{\int_V \phi dV} \propto \frac{\rho}{(E.S.)_1}$$

$$(E.S.)_1 = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_0}$$

ここで、 ϕ の上添え字無しは摂動前の基本モード中性子束、上添え字ダッシュ付きは摂動後の基本モード中性子束、分母は炉心全体 V の積分、分子は左右の 2 つの炉心ごと V_1 と V_2 (図 A-6 の炉心 1 と 2) の積分、 ρ は反応度、 λ_0 と λ_1 は基本モードと一次モードの固有値である。(E.S.)₁ は 2 分割炉心の 2 つの炉心間の中性子結合の度合いを示すパラメータとして用いることができ、この値が小さいほど結合が弱いことを表している。2 分割炉では 2 炉心間の距離が広くなるほど結合が弱くなって(E.S.)₁ が小さくなり、摂動が加えられた場合に Flux Tilt 量は大きくなる。なお、Flux Tilt は単一炉心であっても (E.S.)₁ が小さい PWR のような大型炉心でも起こる現象であるが、KUCA

の小型の単一炉心では後で述べるとおり $(E.S.)_1$ の値が大きいため Flux Tilt の影響は無視することができる。

図 A-6 の炉心 1 と 2 の制御棒を同時に挿入すると一次モード中性子束は励起されずに中性子束は左右対称となるが、結合の弱い 2 分割炉心の片側炉心(図 A-6 の炉心 1)にのみ制御棒が挿入されると炉心 1 側の中性子束が全体として大きく歪み、そのため制御棒 1 の反応度は 1 と 2 を同時に挿入した場合の制御棒 1 の反応度の値に比べて小さくなる。これが 2 分割炉心での制御棒干渉効果であり、1)2)の局所的な中性子束の歪みをもたらす干渉効果とは異なり、制御棒が近接しているかどうかとは関係ない。

このような 2 分割炉心の制御棒干渉効果についていくつかの低濃縮ウランを用いた代表炉心についてモンテカルロ計算コード MCNP による解析を行った。対象としたのは C45(4 列)、C45(5 列)、C60(4 列)の単一炉心及び燃料と制御棒を分割面に対して対称に配置した 2 分割炉心で、図 A-6 のように配置した制御棒 C1 と C2 について単独で挿入した場合と 2 本を同時に挿入した場合の反応度を求めた。なお、各炉心共に制御棒は炉心分割面(単一炉心の場合は炉心中央)から同じ距離 7cm だけ離れた位置に配置した。体系は反射条件を用いずに全炉心を入力して計算を行っている。

結果を表 A-8~A-10 に示す。各炉心の結合の強さを確認するために、 $(E.S.)_1$ の解析結果も同表中に示す。各炉心ともに分割幅が広がるにつれて $(E.S.)_1$ が小さくなっており炉心間の結合が弱くなっていることが判る。また 4 列炉心と 5 列炉心を比べると 4 列炉心のほうが $(E.S.)_1$ は小さく炉心間の結合が弱くなっているが、これは 4 列炉心のほうが軽水ギャップに面して対向する炉心(燃料領域)の表面積が 5 列炉心より狭いためと考えられる。

表中の flux 比は C1 制御棒のみを挿入したときの炉心 1 と炉心 2 での熱群中性子束の積分値(各炉心の体積で積分)の比である。 $(E.S.)_1$ が大きいときには 1 に近い値となっており、大局的には中性子束は歪んではないことが判る(局所的に中性子束は歪むため flux 比は 1 より少し小さい値となる)。一方、分割幅が 10 cm 以上となり $(E.S.)_1$ が小さく結合が弱いときには flux 比は明らかに 1 より小さな値になっており、その傾向は分割幅が広がるにつれて顕著になってくる。

各炉心の制御棒反応度の結果について確認してみる。各表中の「②/(①×2)」は 2 本同時に挿入したときの反応度(②)と 1 本ずつ挿入したときの反応度の和(①+①)の比をとったもので、もし干渉効果がなければ 1 となるはず数値であるが、上記の flux 比の考察の場合と同様に分割幅が 10cm 以上となると明らかに 1 より大きくなっている(表中の下線を引いた数値)。これは 1 本の反応度の 2 倍より 2 本同時に挿入した場合の反応度のほうが大きくなっていることを示している。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

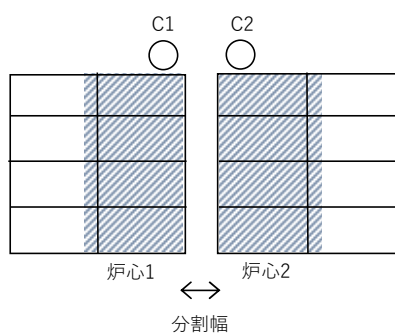


図 A-6 2 分割炉心(4 列)の配置図

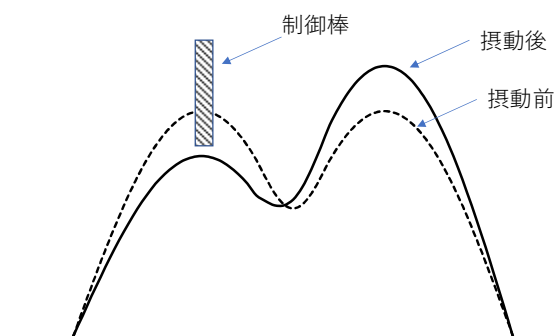
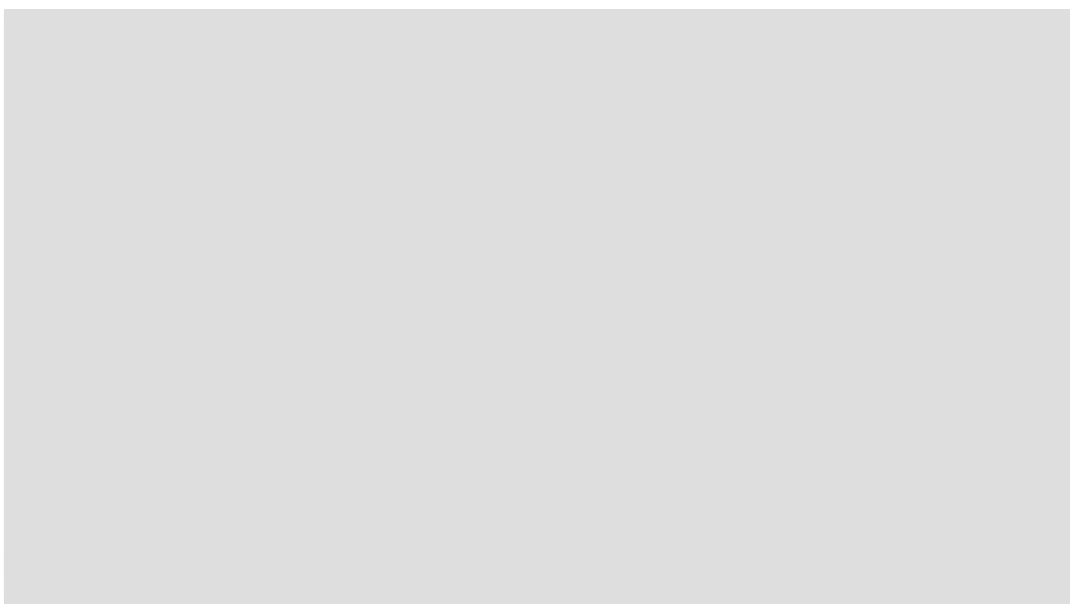


図 A-7 2 分割炉心の制御棒挿入前後の中性子束



「グレーのマスクング範囲は不表示情報」

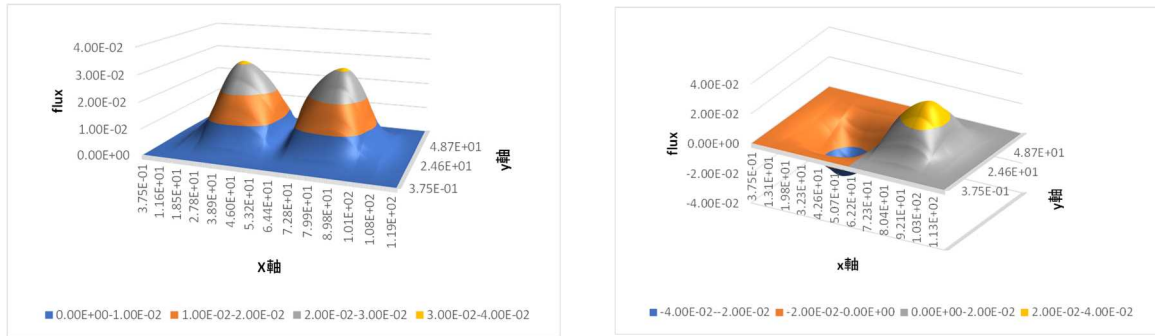


図 A-9 C60G15(4列)炉心の高速群の基本モード中性子束(左)、1次モード中性子束(右)

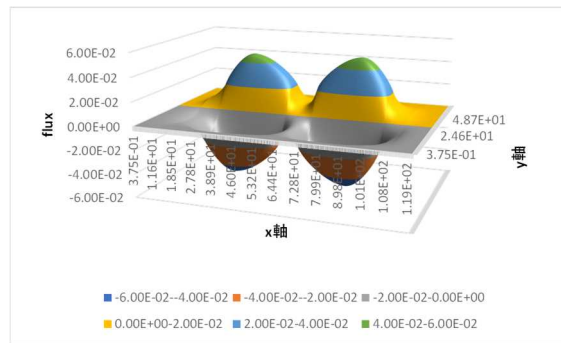


図 A-10 C60G15(4列)炉心の高速群の4次モード中性子束

表 A-7 C60 G15 (4列)炉心の固有値および固有値間隔

モード	固有値	固有値間隔 (%) i 次モード $(E.S.)_i = \frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_0}$
基本モード		
1次		
2次		
3次		
4次		

表 A-8 C45 (4 列) の 2 分割炉心の制御棒反応度 (全炉心体系入力)

炉心	C1 反応度 (% Δk/k) ①	C1+C2 反応度 (% Δk/k) ②	② / (① × 2) ¹⁾	Flux 比 ²⁾	
C45G0	0.48 ± 0.01	0.95 ± 0.01	0.99 ± 0.03	0.97	
C45G(2H ₂ O)	0.44 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.98 ± 0.03	0.97	
C45G(5H ₂ O)	0.39 ± 0.01	0.77 ± 0.01	0.98 ± 0.03	0.96	
C45G(7H ₂ O)	0.34 ± 0.01	0.68 ± 0.01	0.99 ± 0.04	0.95	
C45G(10H ₂ O)	0.25 ± 0.01	0.55 ± 0.01	<u>1.12 ± 0.06</u>	0.91	
C45G(15H ₂ O)	0.21 ± 0.01	0.46 ± 0.01	<u>1.09 ± 0.06</u>	0.74	

1) 下線は誤差を含めて 1.0 から外れたケース

2) Flux 比は C1 挿入時の

「熱群中性子束の体積積分 (炉心 1) ÷ 熱群中性子束の体積積分 (炉心 2)」

表 A-9 C45 (5 列) の 2 分割炉心の制御棒反応度 (全炉心体系入力)

炉心	C1 反応度 (% Δk/k) ①	C1+C2 反応度 (% Δk/k) ②	② / (① × 2) ¹⁾	Flux 比 ²⁾	
C45G0	0.33 ± 0.01	0.67 ± 0.01	1.03 ± 0.04	0.98	
C45G(2H ₂ O)	0.29 ± 0.01	0.57 ± 0.01	0.98 ± 0.04	0.98	
C45G(5H ₂ O)	0.26 ± 0.01	0.54 ± 0.01	1.03 ± 0.05	0.98	
C45G(7H ₂ O)	0.24 ± 0.01	0.48 ± 0.01	1.01 ± 0.05	0.96	
C45G(10H ₂ O)	0.20 ± 0.01	0.45 ± 0.01	<u>1.13 ± 0.07</u>	0.94	
C45G(10H ₂ O)	0.17 ± 0.01	0.41 ± 0.01	<u>1.17 ± 0.08</u>	0.84	

1) 下線は誤差を含めて 1.0 から外れたケース

2) Flux 比は表 A-8 と同じ

表 A-10 C60 (4 列) の 2 分割炉心の制御棒反応度 (全炉心体系入力)

炉心	C1 反応度 (% Δk/k) ①	C1+C2 反応度 (% Δk/k) ②	② / (① × 2) ¹⁾	Flux 比 ²⁾	
C60G0	0.40 ± 0.01	0.79 ± 0.01	0.98 ± 0.02	0.98	
C60G (2H ₂ O)	0.37 ± 0.01	0.75 ± 0.01	1.03 ± 0.03	0.97	
C60G (5H ₂ O)	0.30 ± 0.01	0.61 ± 0.01	1.00 ± 0.03	0.96	
C60G (7H ₂ O)	0.26 ± 0.01	0.53 ± 0.01	1.02 ± 0.04	0.94	
C60G (10H ₂ O)	0.20 ± 0.01	0.43 ± 0.01	<u>1.05 ± 0.05</u>	0.89	
C60G (15H ₂ O)	0.16 ± 0.01	0.36 ± 0.01	<u>1.14 ± 0.07</u>	0.73	

- 1) 下線は誤差を含めて 1.0 から外れたケース
 2) Flux 比は表 A-8 と同じ

中性子結合の弱い 2 分割炉心では上記のような制御棒干渉効果が現れることを元に KUCA の 2 分割炉心の代表炉心(特に結合の弱い炉心)の解析結果について検討する。

- ① これまでの軽水減速炉心の解析では制御棒 6 本を同時に挿入した場合の反応度を計算して、その結果を核的制限値 (1%Δk/k + 最大過剰反応度) と比較してきたが、制御棒は「炉心配置 (水平方向) に対して線対称、または点对称となるように配置する」としており (「第 356 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 6 月 22 日) の資料 1 ページ目)、その場合は各炉心に均等に反応度が印加されるため 2 分割炉心で Flux Tilt は発生しないため、全制御棒反応度の核的制限値の評価についてはここで述べた 2 分割炉心の制御棒の干渉効果を考える必要は無い。
- ② これまでの最大反応度を持つ制御棒の解析では、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに最大の反応度となる 2 本を対称に配置した制御棒を挿入したときの反応度を求め、その値の 1/2 を最大の反応度として核的制限値 (全反応度の 1/3 以下) と比較してきた。これは一部の炉心計算で計算時間を少なくするために炉中心に対する対称条件を入れて炉心半分の幾何

入力で計算を行っていたためである。そのため 2 分割炉で最大 1 本の反応度を計算する過程で Flux Tilt は発生せず、表 A-8～A-10 での「C1+C2 反応度」を計算してその値を 1/2 としていたことになるが、上で説明したとおり結合の弱い炉心の場合、その値は 1 本を単独で挿入したときの反応度の値より大きくなるので、1 本の最大反応度の値が全反応度の 1/3 以下という核的制限値の評価は厳しい側（安全側）となるのでこれまでの解析方法で問題は無い。しかし、この効果を取り入れるため、結合が弱く高次モードの影響を受けやすい分割幅が 7cm 以上の炉心については、最大 1 本の反応度を求めるために反射条件を用いて炉心半分の幾何入力で計算を行うのではなく、全炉心の体系を入力して反応度を求めるようにする。

- ③ ②と同じ理由により最大の反応度をもつ制御棒を 1 本のみ挿入したときの反応度が小さくなるために反応度印加率も小さくなるので、核的制限値（0.02% $\Delta k/k/s$ 以下）を満足しやすくなる。

- ④ 2 分割炉心での 1 次モード中性子束に起因する制御棒干渉効果があるとすればさらに高次のモードによる影響も現れる可能性はある。例えば図 A-8 に示した C60G15(4 列)炉心の 4 次モード中性子束は 4 列の燃料体を挟む反対側の制御棒(図 A-5 の C1 と S4 のような配置)について制御棒干渉効果を生じさせる可能性があるが、表 A-7 に示す 4 次モードの固有値間隔は 72%と非常に大きい。

図 A-5 の C1 と S4 のような配置の制御棒についてはこれまで通り高次モードに起因する制御棒干渉効果を考慮する必要は無い。

- ⑤ 固体減速炉心は全て単一炉心であるが、体系が大きく $(E.S.)_1$ が小さい場合には 1 次モードに起因する Flux Tilt が発生する可能性がある。これまでの固体減速炉心の代表炉心の中で図 A-11 に示す燃料体数が多い 2 つの炉心(LL1 (高さ約 30cm)、L5.5 (高さ約 30cm))について固有値間隔の解析を行った結果を表 A-11 に示す。これらの炉心の $(E.S.)_1$ は 30%以上あることから、これらの炉心についてもこれまで通り高次モードに起因する制御棒干渉効果を考慮する必要は無い。

- ⑥ 2 分割炉心での制御棒の挿入または引抜きに伴う 1 次モード中性子束の励起により制御棒微分反応度曲線の形状が変化する可能性がある。その影響を確認するために、図 13～図 15 に示す炉心のうち C45(4 列)、C45(5 列)、C60(4 列)の 3 つの単一炉心、および結合の弱い C45(4 列)、C45(5 列)、C60(4 列)で分割幅が 15cm の 2 分割炉心において、C1 制御棒を下限(全挿入)から上限(全引抜き)までの間の実効増倍率の変化を

代表炉心の制御棒反応度価値計算に用いているものと同じ SRAC コードシステムにより解析を行った。なお、他の 5 本の制御棒は全引抜きとした。

C1 制御棒の引抜きに伴う実効増倍率の変化（増加）から制御棒微分反応度を求めた結果を図 A-11 に示す。図 A-12 の横軸は C1 制御棒の下限からの高さであり、炉心高さ方向中央は横軸の 31.5cm である。この図の各微分反応度曲線は制御棒位置を 2cm ずつ変化させたときの反応度の変化を CITATION により求め、その結果を 5 次式で最小二乗フィッティングし、その式を微分して求めたものである。

1 次モードの影響を無視することができる単一炉心（C45G0(4 列)）では微分反応度は図の高さ約 31cm のところ(燃料中央高さ)で最大値をとりほぼ左右対称、すなわち炉心ではほぼ上下対称になっていることが判る。一方、2 分割炉心での微分反応度曲線の最大値は単一炉心の場合と比べてやや高い位置で現れている。これは制御棒が下方にあるときにはその炉心側の中性子束が大きく低下しているため微分反応度が小さいが、引き抜くにつれて Flux Tilt 量が小さくなりそれに伴い微分反応度が大きくなるため、結果として微分反応度曲線のピーク位置が燃料中央高さより少し高くなったと考えられる。

C45 の 4 列と 5 列の単一炉心と炉心間結合が最も弱い分割幅が 15cm の炉心、および C60 の 4 列の単一炉心と分割幅が 15cm の炉心について、微分反応度曲線がピークとなる位置、およびそのときの微分反応度の値（積分反応度が 1 となるように規格化）を表 A-12 に示す。単一炉心に比べて C45G(15H₂O) (4 列)炉心で約 1.2cm、C60G0(4 列)炉心で約 2.4cm 高い位置で現れており、最大となる微分反応度の値は 2 分割炉心での最大値は単一炉心での最小値と比べて約 2.8%だけ大きくなっている。

そのため、代表炉心の解析において 1 次モード中性子束の影響を受けやすい分割幅が 7cm 以上の炉心の微分反応度については「補足-B 制御棒の反応度印加率」において Flux Tilt が生じないとして求めた値に対して 2.8%の偏差を考慮して評価することにする。（核的制限値に対して計算誤差に加えてさらにこの偏差を考慮して評価する）

なお、実際の 2 分割炉心において微分反応度曲線を測定する際には 1 つの炉心の制御棒を少しずつ上げて正ペリオド法により反応度を測定し、反対側の炉心の制御棒を徐々に挿入して臨界調整を行うので、両炉心にある程度制御棒が挿入することになり Flux Tilt 量は図 A-11 に示した 1 本のみ制御棒引抜きの場合より小さくなるので微分反応度曲線の形状は単一炉心のものに近くなるため、上述した最大微分反応度の 2.8%という偏差は安全側の評価値であると考えられる。

参考文献

- 1) T. Misawa *et al.*, “Application of Nodal Method to Lambda Mode Higher Harmonics Code”, J. Nucl. Sci. Technol., 33, 668 (1996).
- 2) M. Andoh *et al.*, “Measurement of Flux Tilt and Eigenvalue Separation in Axially Decoupled Core,” J. Nucl. Sci. Technol., 34, 445 (1997).
- 3) K. Hashimoto *et al.*, “A Practical Formula for Inferring Eigenvalue Separation from Flux Tilt Measurements in Nuclear Reactors,” Ann. Nucl. Energy, 18, 131 (1991).

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

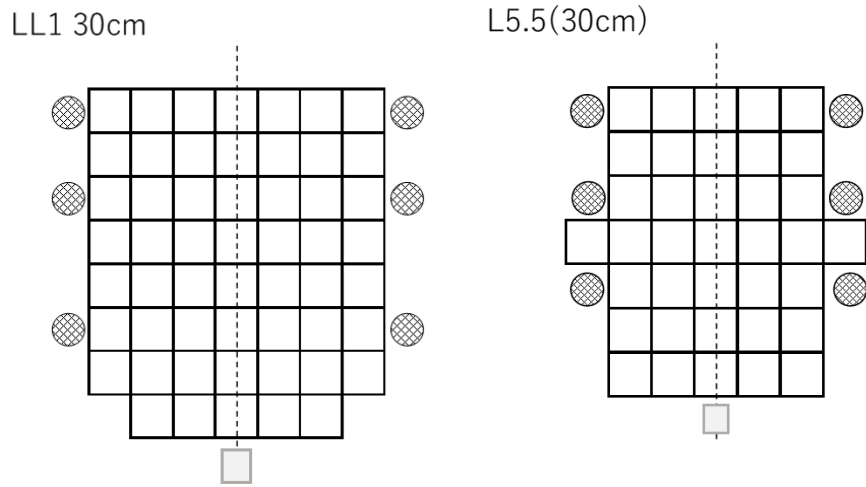


図 A-11 固体減速炉心の配置図 (左 : LL1 (高さ約 30cm)、右 : L5.5 (高さ約 30cm))

表 A-11 固体減速炉心の固有値間隔(%)

モード	炉心	
	1次	
2次		

$$i \text{ 次モード } (E.S.)_i = \frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_0}$$

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

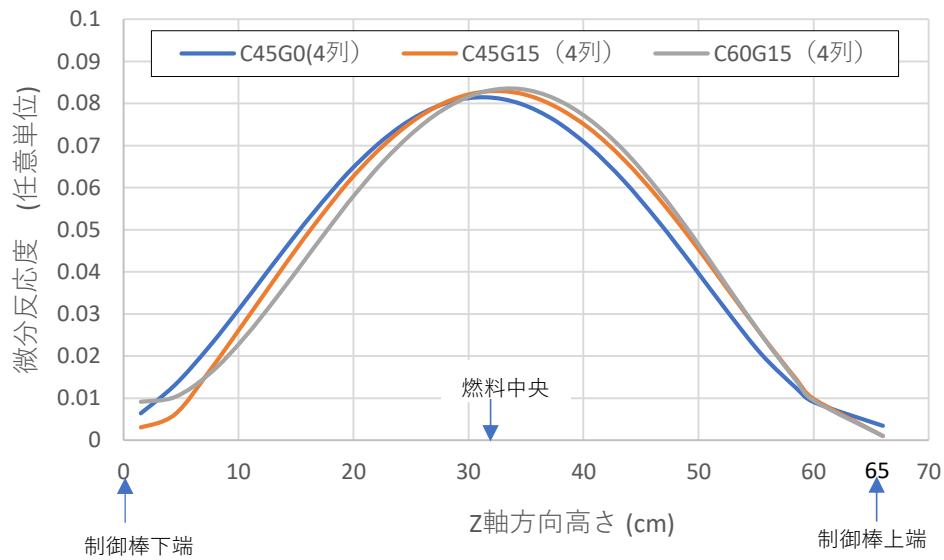


図 A-12 2分割炉心の制御棒微分反応度曲線（曲線の積分値が1となるように規格化）
（C45G0（4列）炉心、C45G15（4列）炉心、C60G15（4列）炉心）

表 A-12 単一炉心と2分割炉心での微分反応度の最大値

炉心	最大となる高さ (cm)	微分反応度の最大値 (-) ¹⁾
C45G0 (4列)	31.2	0.0814 ²⁾
C45G15 (4列)	32.4	0.0831
C45G0 (5列)	31.2	0.0816
C45G15 (5列)	33.2	0.0826
C60G0 (4列)	31.2	0.0820
C60G15 (4列)	33.6	0.0837 ³⁾

- 1) 各炉心での積分反応度が1となるように規格化
- 2) 単一炉心での最小値
- 3) 2分割炉心での最大値

制御棒の微分反応度曲線の形状が、他の制御棒の挿入状態により変化するかについて調べた。対象とする炉心は図 A-13 に示す C45G0(4 列)炉心と C45G(15H₂O) (4 列)炉心である。

C45G0(4 列)炉心で反応度の最も大きい C2 制御棒について他の 5 本の制御棒が全引抜き (ARO) の場合(図 A-12 に示したケース)と、燃料領域を挟んで反対側の C1 制御棒が半分だけ挿入した場合での C2 制御棒の反応度を表 A-13 に、微分反応度曲線を図 A-14 に示す。両者はよく一致しており C2 制御棒の微分反応度曲線は反対側の制御棒の挿入状態に影響を及ぼさないことを確認した。(なお、C1 制御棒を全挿入の時には実際には未臨界に近い状態となるため、C1 制御棒全挿入時には C2 の微分反応度曲線を測定することはできない)

同様に C45G(15H₂O) (4 列)炉心について、反応度の最も大きい C1 制御棒について他の 5 本の制御棒が全引抜き (ARO) の場合(図 A-12 に示したケース)と、炉心の分割軽水領域を挟んで反対側の S5 制御棒を全挿入した場合での C1 制御棒の反応度を表 A-13 に、微分反応度曲線を図 A-15 に示す。表 A-13 の結果は両者ともよく一致している。S5 制御棒を全挿入した場合のほうが微分反応度が最大値になる位置は高さ方向の低い側にやや移り、最大値の大きさは 5 本 ARO の場合より少し低くなることが判った。

上述の通り、1 次モード中性子束の影響を受けやすい分割幅が 7cm 以上の炉心の微分反応度については制御棒の反応度印加率において Flux Tilt が生じないとして求めた値に対して 2.8%の偏差を考慮して評価するとしたが、他の制御棒が挿入されたほうが最大値は小さくなるためこの偏差を考慮して評価することは安全側であるといえる。

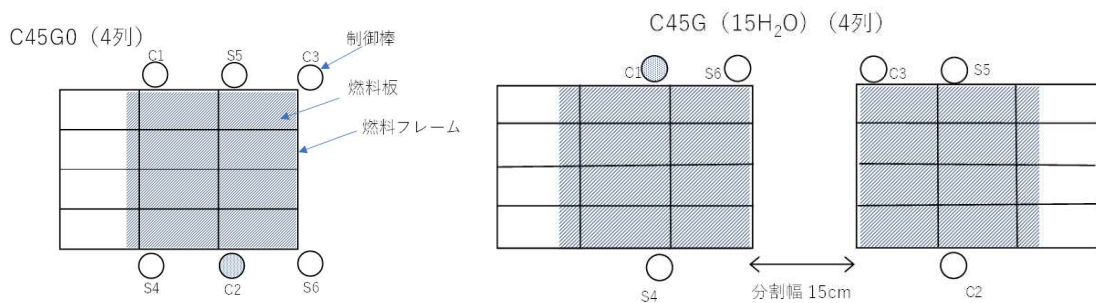


図 A-13 C45G0(4 列)炉心 C45G(15H₂O) (4 列)炉心の配置図

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

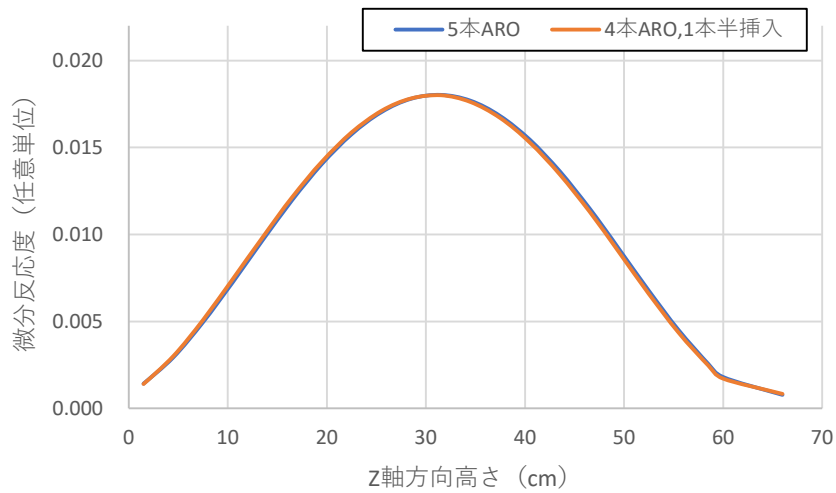


図 A-14 C45G0(4列)炉心のC2制御棒微分反応度曲線
(曲線の積分値が1となるように規格化)
(青線：C2以外の5本の制御棒は全引抜き、
オレンジ線：C2と反対側のC1制御棒を半分まで挿入)

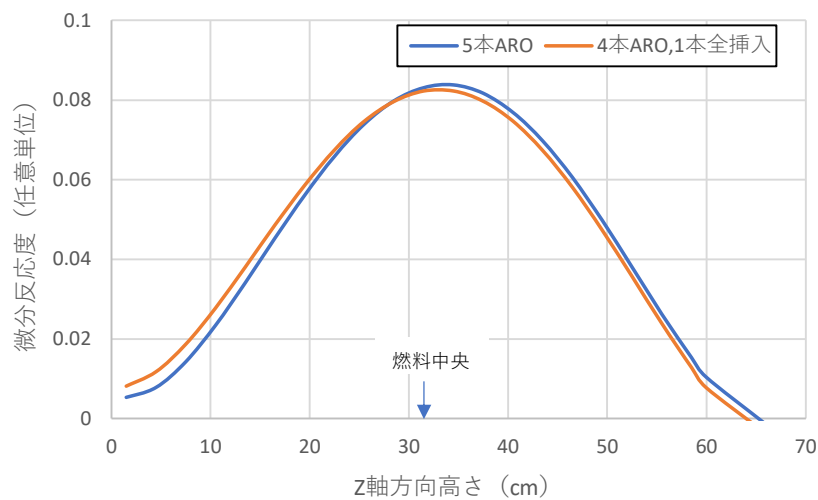


図 A-15 C45G(15H₂O)(4列)炉心のC2制御棒微分反応度曲線
(曲線の積分値が1となるように規格化)
(青線：C2以外の5本の制御棒は全引抜き、
オレンジ線：C2と反対側のS5制御棒を半分まで挿入)

表 A-13 制御棒反応度(反対側の制御棒挿入時の比較)

炉心	対象となる制御棒	対象となる制御棒以外 5 本 ARO	対象となる制御棒と反対側の制御棒挿入、4 本 ARO
C45G0(4 列))	C2	0.68	0.68
C45G(15H ₂ O)(4 列)	C1	0.34	0.35

代表炉心の最大反応度添加率は「補足—B 制御棒の反応度印加率」の項目で述べたように中性子束分布を cos 分布であると仮定して求めたが、確認のために表 A-12 の結果を求めるために用いた CITATION による微分反応度の値から得られた最大反応度添加率の最大値（炉心高さ方向の中央での値）との比較を行った。

最大反応度添加率の結果を表 A-14 に、また C45G0(4 列)炉心の制御棒微分反応度曲線を図 A-16 に示す。なお、図 A-12 の簡易計算では、炉心長を「第 369 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 8 月 31 日）の「【補足—B】制御棒の反応度印加率」の表 B-2 に示した C45G0(4 列)炉心の反射体節約の値（7.65cm）と燃料部長さ（57cm）から求めた 72.3cm 、微分反応度が最大となる座標位置を表 A-12 の 31.2cm としている。（この図面では、座標の $31.2-72.3\div 2=-4.95\text{cm}$ と $31.2+72.3\div 2=67.35\text{cm}$ で中性子束がゼロとなる）

表 A-14 より CITATION による炉心計算から求めた値の方が若干小さい値（安全側の値）になっているが、両者はよく一致している。また図 A-15 より両者の制御棒微分反応度曲線の形状についても両者はよく一致している。

表 A-14 単一炉心の最大反応度添加率

炉心	中性子束分布を cos 分布と仮定して算出 ¹⁾ (% Δk/k/s)	炉心計算の最大微分反応度から算出 ²⁾ (% Δk/k/s)
C45G0 (4 列)	0.0156	0.0151
C45G0 (5 列)	0.0120	0.0118
C60G0 (4 列)	0.0140	0.0135

- 1) 「表 10 軽水減速炉心の代表炉心の制御棒反応度価値」に記載の値
(表 10 に比べて表示桁数を増やして記載)
- 2) 表 A-12 の結果を求めるために用いた SRAC-CITATION により得られた微分反応度の最大値より得られた値

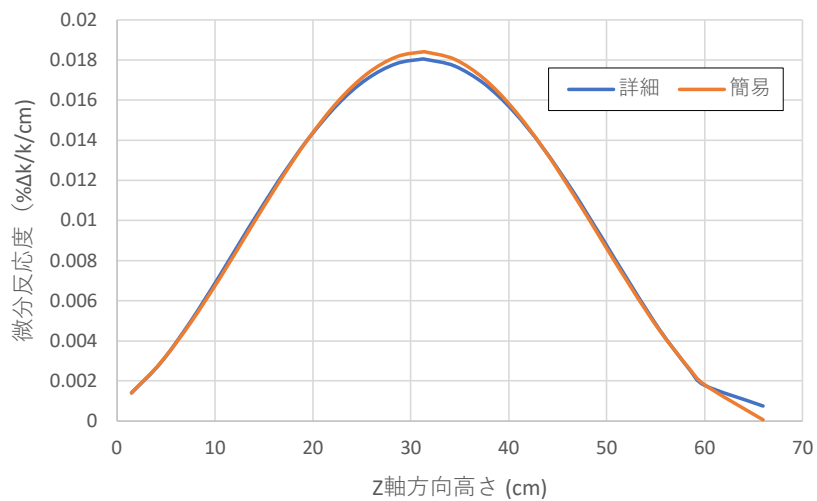


図 A-16 C45G0(4 列) 炉心の高さ方向の制御棒微分反応度曲線
(簡易:「補足—B」の方法、詳細:CITATION で計算)

【補足－E 高濃縮ウランを用いた炉心の制御棒反応度等の解析】

高濃縮ウランを用いた軽水減速炉心と固体減速炉心の測定データと制御棒反応度解析について

高濃縮ウランを用いた炉心の解析結果についての確認を行う。

図 E-1 に示す軽水減速炉心の既存の高濃縮ウランを用いた幾つかの単一炉心及び 2 分割炉心の体系について、制御棒反応度の実験値と今回用いた SRAC コードシステムを用いた解析結果、およびモンテカルロ計算コード MCNP を用いた解析を行った。

結果を表 E-1 に示す。これまでの代表炉心の解析において SRAC コードシステムを用いた制御棒反応度の解析精度は $\pm 18\%$ であるとしてきたが、表 E-1 の C/E はすべてこの解析精度の範囲内に入っていることを確認した。また表 E-2 に各炉心について実験で測定した各種パラメータの値を示す。

図 E-2 に示す固体減速炉心について、実験前に行った解析結果と測定結果（連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP を使用）を表 E-3 に示す。

なお、最大印加反応率については余剰反応度の値が少しでも変化すると臨界制御棒位置が変化し最大印加反応率の値が大きくなってしまうため、実験値と計算値を直接比較することは非常に難しく、新しい炉心を組んだときに実験で核的制限値である最大印加反応率が規定値を満足していることを確認しているものの、これまで計算値と直接比較して考察したことはない。

表 E-1 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の制御棒反応度の解析

炉心	反応度 (実験値) (% $\Delta k/k$)	SRAC		MCNP	
		計算値 (% $\Delta k/k$)	C/E	計算値 (% $\Delta k/k$)	C/E
C30G0(5列)	2.76 ± 0.01	2.40	0.87	2.36 ± 0.09	0.86 ± 0.03
C35G0(4列)	2.87 ± 0.01	3.18	1.11	3.05 ± 0.10	1.06 ± 0.04
C45G0(4列)	2.86 ± 0.01	2.44	0.85	3.01 ± 0.10	1.05 ± 0.04
C35G(12 H ₂ O) (4列)	1.89 ± 0.01	1.97	1.04	1.70 ± 0.08	0.90 ± 0.04
C35G(14 H ₂ O) (4列)	1.80 ± 0.01	1.67	0.93	1.95 ± 0.08	1.08 ± 0.04

表 E-2 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の測定データ

炉心		C30G0 (5 列)	C35G0 (4 列)	C45G0 (4 列)	C35G (12H ₂ O) (4 列)	C35G (14H ₂ O) (4 列)
U-235 量(kg)		4.7	3.8	2.9	7.0	7.1
炉心長 (cm)		32.0	38.3	37.5	70.0	70.8
余剰反応度 (% Δk/k)		0.16	0.49	0.35	0.08	0.202
制御棒反 応度	C1 (% Δk/k)	0.31	0.29	0.65	0.36	0.44
	C2 (% Δk/k)	0.40	0.45	0.32	0.36	0.44
	C3 (% Δk/k)	0.67	0.69	0.46	0.23	0.03
	全反応度 (% Δk/k)	2.76	2.87	2.86	1.89	1.80
	最大の 1 本の 割合 (%)	24.3	24.1	22.7	19.0	24.4
	最大印加反応 率 (% Δk/k/s)	0.18	0.18	0.17	0.01	0.01
臨界制御 棒位置 (S4-S6: 650mm)	C1 (mm)					
	C2 (mm)					
	C3 (mm)					

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

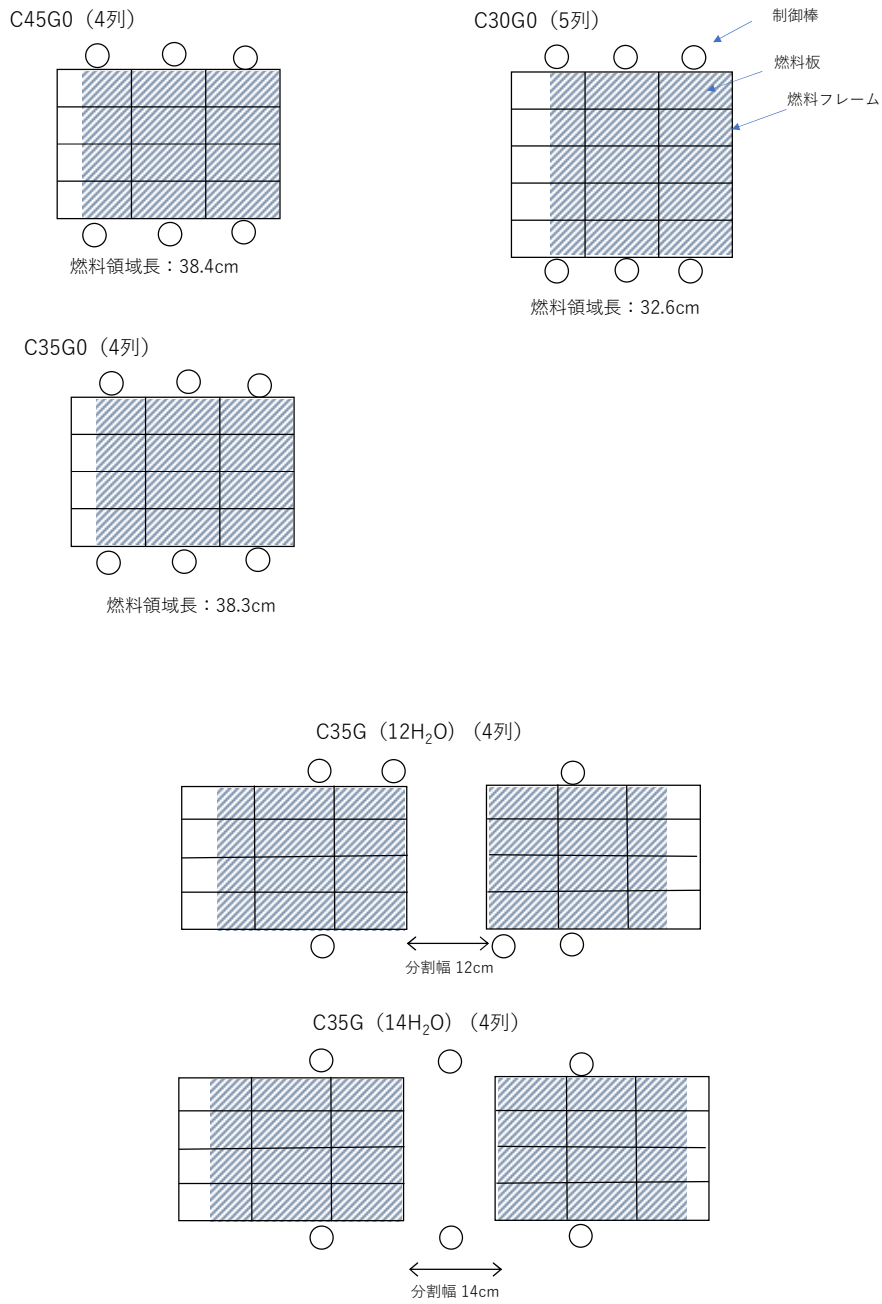


図 E-1 炉心配置図（軽水減速炉心）

(燃料板支持フレームの網掛けした箇所に燃料板を挿入している
サイズは 14.2cm×7.1cm)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 E-3 固体減速炉心(B(1/8“P41EUThEU-2/8“P50EU))の測定データと解析結果

炉心		実験値	計算値 (MVP)
U-235 量(kg)		11.2	11.2
炉心長 (cm)		39.7	39.7
余剰反応度 (% Δ k/k)		0.082	0.105±0.01
制御棒 反応度	C1 (% Δ k/k)	0.32	0.37±0.02
	C2 (% Δ k/k)	0.40	0.47±0.02
	C3 (% Δ k/k)	0.39	0.35±0.02
	全反応度 (% Δ k/k)	2.21	2.59±0.05
	最大の1本の割合 (%)	17.9	18.1
	最大印加反応率 (% Δ k/k/s) ¹⁾	0.005	0.011±0.002 ³⁾
中心架台反応度 (% Δ k/k)		2.33±0.02	4.07±0.02
温度反応度係数 (Δ k/k/°C) ²⁾		-	-3.1×10 ⁻⁵
臨界制御棒 位置 (S4~S6: 1200mm)	C1 (mm)		
	C2 (mm)		
	C3 (mm)		

- 1) 最大印加反応率については余剰反応度の値が少しでも変化すると臨界制御棒位置が変化し最大印加反応率の値が大きくなってしまいうため、実験値と計算値を直接比較することは難しい。
- 2) 温度係数は測定していない。
- 3) 【補足説明】に記載

【 補足説明 】

表 E-3 の最大反応度印加率について

最大反応度印加率の解析値は以下のように求めている。

- ・解析で得られた余剰反応度(0.105% $\Delta k/k$)と C1 制御棒の反応度 (0.37% $\Delta k/k$) と C1 制御棒の反応度校正曲線から臨界となる C1 制御棒の位置を求める(約 710mm)。
- ・C1 制御棒の反応度校正曲線から臨界近傍での微分反応度を求めて、その値から反応度印加率を求める。
- ・この場合の解析のみの最大反応度印加率の誤差は、余剰反応度と制御棒反応度の誤差に起因することになる。

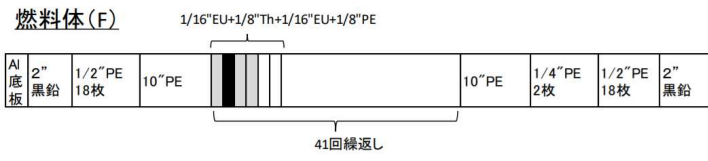
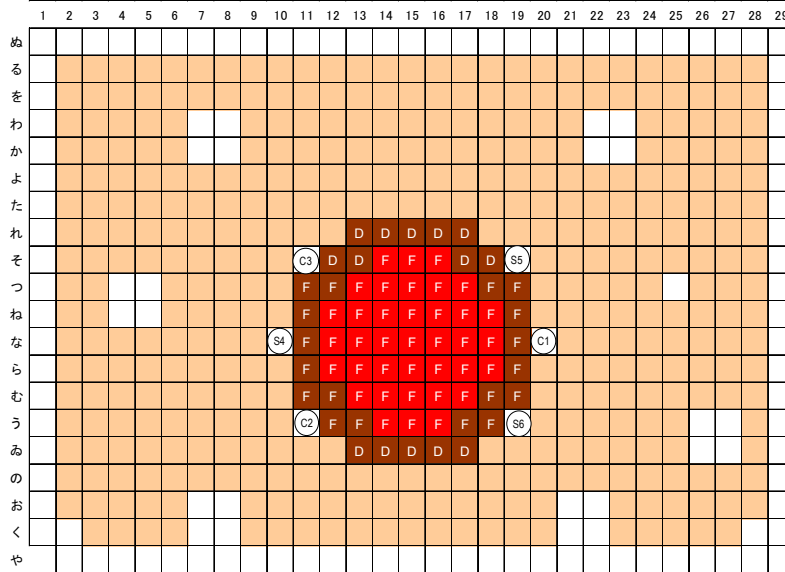
表 E-3 の解析結果のように余剰反応度の実験値と解析値は比較的良好に一致している場合、すなわち臨界制御棒位置が比較的良好に一致している場合には最大反応度印加率の実験値と解析値が大きく異なることはない。

一方、以下のような場合について考えてみる。解析で余剰反応度が 0.35% $\Delta k/k$ (解析での C1 制御棒の反応度に近い値であるので、C1 制御棒がほぼ全挿入で臨界となる)であったとすると、最大反応度印加率の値は C1 制御棒が炉心高さ方向中央位置付近での値となる(表 E-3 の場合は約 0.0012 % $\Delta k/k/s$)。この実験を行ったところ、余剰反応度がゼロ、すなわちすべての制御棒が引き抜かれた状態で臨界となったとする(本申請の実効増倍率の解析誤差 $\pm 0.6\%$ の範囲内)。そのときの最大反応度印加率の実験値は制御棒がすべて引き抜かれるためゼロであり、最大反応度印加率の C/E は無限大となる。

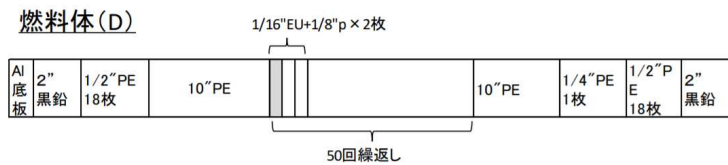
このように最大反応度印加率の解析値は余剰反応度の解析値に大きく影響されるため、実験値と解析値を通常の C/E のような指標で比較することは意味が無いと考える。

実験を行う前の事前解析としては「第 369 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 8 月 31 日)の「【補足一B】制御棒の反応度印加率」の説明で述べたように 1 本の制御棒の校正曲線の形状と制御棒反応度からその最大の反応度印加率(炉心高さ方向中央)を求め、その値が核的制限値を満たしているかを確認することがまず重要であると考える。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



(a) 1/8"p41ETh燃料体



(b) 2/8"p50E燃料体

図 E-2 固体減速炉心配置図 (B(1/8"p41EThEU-2/8"p50E)炉心)