

2020年1月27日

第331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

(指摘事項番号：24)

添付8で取り扱う代表炉心の考え方を整理すること。

## 1. 低濃縮ウラン燃料を用いて実験を行う炉心について

### 固体減速炉心

- ・炉心は1種類の燃料体のみを使用した単一炉心とする。
- ・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。
- ・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。
- ・燃料集合体中の燃料領域の高さは30cm以上、50cm以下とする。
- ・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。
- ・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）。
- ・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。
- ・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）。
- ・天然ウラン、トリウムは使用しない。

### 軽水減速炉心

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

以上より添付 8 において取り上げる代表炉心は以下のように設定する。

#### 固体減速炉心

- 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。

- 各炉心の高さは、約 30cm、約 40cm、約 50cm とする。
- 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。
- 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。

#### 軽水減速炉心

- C30、C35、C45、C60 炉心で燃料体の配置は 4 列、5 列とする
- C45 と C60 炉心での 2 分割炉心の分割幅は、2cm、5cm、7cm、10cm、15cm とする。

## 2. 固体減速炉心の解析結果

### 2. 1 臨界量、動特性パラメータ等

固体減速炉心の臨界となる体系の燃料体の配置を図 1、2 に、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 に示す。

なお後述するように解析は SRAC コードシステムを用いており、燃料体を均質化して 3 次元炉心計算を行っているため、炉心高さは連続変数として解析を行うことができるので、ここでの臨界となる炉心高さに対応する燃料セルの数は必ずしも整数値とはなっていない。

これらの体系について、これまでの審査会合(11月25日(第315回)、12月23日(第326回)等)において既に解析結果を示している体系もあるが、その後の解析で制御棒反応度の規制値を確実に満足させるために炉心配置を変更したため一部の解析結果については若干値が変更しているが大きな変化はない。

H/U-235 に対する各炉心の  $\beta_{eff}$  (実効遅発中性子割合)、 $\ell$  (中性子平均寿命)、 $\beta_{eff}/\ell$ 、温度係数は図 7~10 に示す。



表1 代表炉心の臨界量（固体減速炉心）（低濃縮ウラン）

炉心名称 <sup>a</sup>	H/ <sup>235</sup> U (-)	炉心高 (cm)	$\beta_{\text{eff}}$ (-) <sup>b</sup>	$\ell$ (s) <sup>b</sup>	$\beta_{\text{eff}}/\ell$ (s <sup>-1</sup> )	温度係数 <sup>c</sup> ( $\Delta k/k/^\circ\text{C}$ )
L5.5P-50	372	50.9	$7.46 \times 10^{-3}$	$5.18 \times 10^{-5}$	144.2	$-1.05 \times 10^{-4}$
L5.5P-40		41.1	$7.47 \times 10^{-3}$	$5.14 \times 10^{-5}$	145.2	$-1.00 \times 10^{-4}$
L5.5P-30		30.5	$7.46 \times 10^{-3}$	$5.16 \times 10^{-5}$	144.5	$-9.47 \times 10^{-5}$
L4P-50	270	49.7	$7.55 \times 10^{-3}$	$4.59 \times 10^{-5}$	164.5	$-9.98 \times 10^{-5}$
L4P-40		38.5	$7.59 \times 10^{-3}$	$4.43 \times 10^{-5}$	171.4	$-8.81 \times 10^{-5}$
L4P-30		30.5	$7.59 \times 10^{-3}$	$4.42 \times 10^{-5}$	171.6	$-8.49 \times 10^{-5}$
L3P-50	203	51.9	$7.62 \times 10^{-3}$	$4.16 \times 10^{-5}$	183.3	$-9.65 \times 10^{-5}$
L3P-40		42.4	$7.66 \times 10^{-3}$	$3.97 \times 10^{-5}$	193.0	$-8.45 \times 10^{-5}$
L3P-30		30.3	$7.67 \times 10^{-3}$	$3.92 \times 10^{-5}$	195.8	$-7.81 \times 10^{-5}$
L2P-50	135	50.4	$7.70 \times 10^{-3}$	$3.52 \times 10^{-5}$	218.9	$-7.28 \times 10^{-5}$
L2P-40		39.0	$7.72 \times 10^{-3}$	$3.42 \times 10^{-5}$	225.4	$-6.95 \times 10^{-5}$
L2P-30		31.3	$7.73 \times 10^{-3}$	$3.35 \times 10^{-5}$	230.6	$-6.47 \times 10^{-5}$
L1P-50	68	52.7	$7.71 \times 10^{-3}$	$2.94 \times 10^{-5}$	262.1	$-5.44 \times 10^{-5}$
L1P-40		38.2	$7.73 \times 10^{-3}$	$2.84 \times 10^{-5}$	272.4	$-5.06 \times 10^{-5}$
L1P-30		29.2	$7.72 \times 10^{-3}$	$2.92 \times 10^{-5}$	264.3	$-4.69 \times 10^{-5}$
LL1P-50	34	49.7	$7.66 \times 10^{-3}$	$2.70 \times 10^{-5}$	283.7	$-3.18 \times 10^{-5}$
LL1P-40		38.4	$7.69 \times 10^{-3}$	$2.55 \times 10^{-5}$	301.6	$-3.07 \times 10^{-5}$
LL1P-30		30.0	$7.68 \times 10^{-3}$	$2.59 \times 10^{-5}$	296.5	$-2.45 \times 10^{-5}$

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（約2.3mm厚）、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）
- ・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、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）

b 定数について

$\beta_{\text{eff}}$  実効遅発中性子割合、 $\ell$  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

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

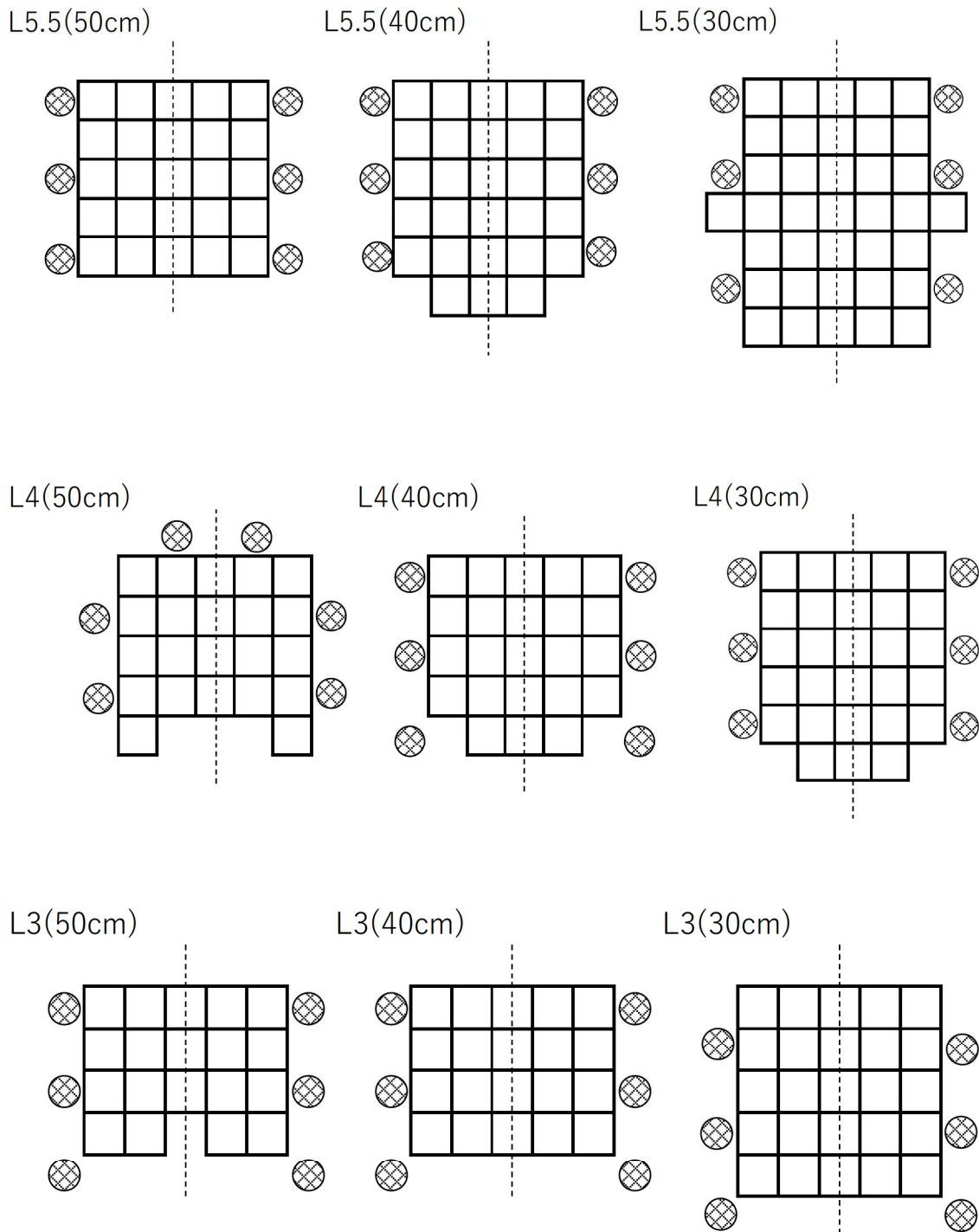


図1 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

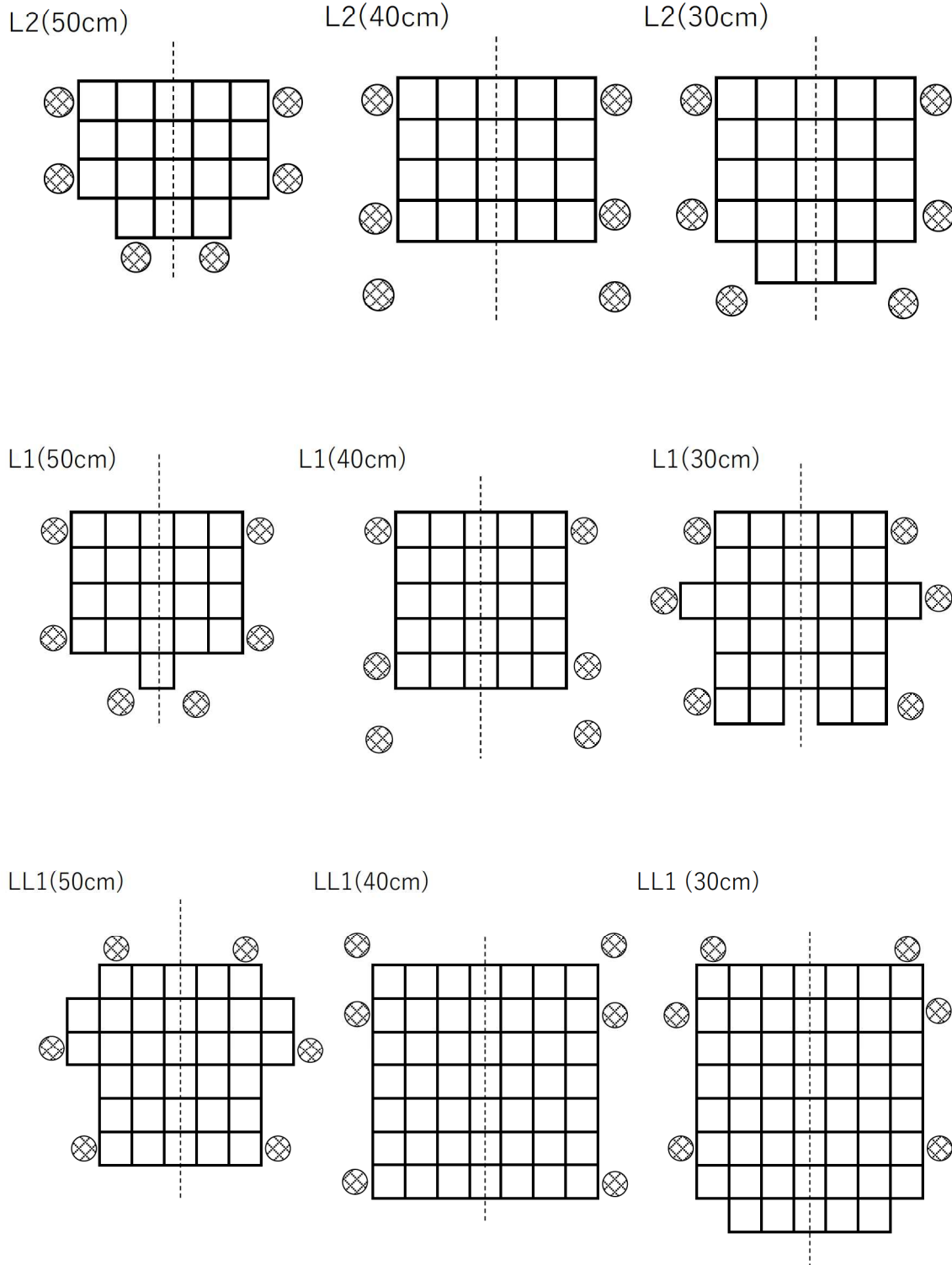


図2 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

## 2. 2 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2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）を炉心配置図の縦方向下側の中心に1体のみ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。部分長燃料体の装荷例を図3に示す（すべての炉心において、図3のように1体のみを追加した）。過剰反応度の調整に用いた部分長燃料体の燃料領域高さを表に示す。

全制御棒価値の判定基準は

$$1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度}(0.35\% \Delta k/k) = 1.35\% \Delta k/k$$

となる。

制御棒の過剰反応度印加率は以下のように求めた。

エネルギー1群の均質な体系であるとき、垂直方向の中性子束分布がコサイン分布であると仮定すると、制御棒の積分反応度校正曲線は以下ようになる。

$$\rho(z) = \rho_0 \left( \frac{z}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi z}{H} \right)$$

ここで  $\rho_0$  は全反応度、 $H$  は反射体節約を含めた炉心高さである。

微分反応度曲線は以下ようになる。

$$\frac{d\rho(z)}{dz} = \frac{\rho_0}{H} \left( 1 - \cos \frac{2\pi z}{H} \right)$$

制御棒を臨界状態で全ストロークを動かすことが可能であるとすると、微分反応度が最大

となるのは炉心中央で、そのときの最大値は  $\frac{d\rho(z)}{dz}_{MAX} = \frac{2\rho_0}{H}$  となる。

KUCAの制御棒の駆動速度は、設置申請書に0.5 m/min以下（5/6 cm/sec以下）と定められている（実測値は0.796 cm/sec）ので、最大過剰反応度添加率が満たすべき条件は制御棒が炉心中心まで挿入されたとき

$$\frac{d}{dt} \frac{d\rho(z)}{dz}_{MAX} = \frac{2\rho_0}{H} \times \frac{5}{6} \leq 0.02 (\% \Delta k / k / \text{sec})$$

となる。

実際には過剰反応度が小さな炉心であれば、臨界状態で制御棒を炉心中心の微分反応度が大きな場所まで挿入することができないので制御棒の反応度がこの値を超えていたとしても最大反応度添加率に関する制限値を満たす炉心を構築することはできるので、この値が制御棒の反応度に関する制限値とはならない。

表中の制御棒の最大添加反応率は炉心中心高さでの値であり、ここで用いる制御棒校正曲線（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

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

中性子束分布をコサイン分布でフィッティングして求めた。各炉心の反射体節約の値は表 2 に、また中性子束のフィッティングの例を図 4 に示す。

表 2 より全ての炉心において KUCA での核的制限値

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

制御棒反応度の最大の 1 本は全反応度の  $1/3$  以下であること

制御棒の最大反応度添加率は臨界近傍で  $0.02\% \Delta k/k/\text{sec}$  以下であることを満足している。

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）

炉心名称	H/ <sup>235</sup> U (-)	炉心高 (cm)	$\rho$ 調整 用燃料 長 (cm)	反射体 節約 (cm)	全反応度 (% $\Delta$ k/k)	最大反応度 (% $\Delta$ k/k) (割合%) <sup>1)</sup>	最大反応度 添加率 <sup>2)</sup> (% $\Delta$ k/k/s)
L5.5P-50	372	50.9	12.1	5.7	1.67	0.47 (28)	0.013
L5.5P-40		41.1	20.2	5.8	1.48	0.39 (27)	0.012
L5.5P-30		30.5	20.8	5.9	1.36	0.37 (28)	0.015
L4P-50	270	49.7	5.7	6.0	3.17	0.58 (18)	0.016
L4P-40		38.5	11.2	6.1	1.49	0.48 (32)	0.016
L4P-30		30.5	14.2	6.2	1.57	0.41 (26)	0.016
L3P-50	203	51.9	3.5	6.1	2.21	0.67 (30)	0.017
L3P-40		42.4	6.0	6.2	1.98	0.61 (31)	0.019
L3P-30		30.3	7.8	6.2	1.78	0.44 (25)	0.017
L2P-50	135	50.4	8.6	6.2	4.08	0.79 (19)	0.020
L2P-40		39.0	5.0	6.9	1.73	0.43 (25)	0.014
L2P-30		31.3	9.3	6.9	1.72	0.46 (27)	0.017
L1P-50	68	52.7	12.1	7.9	3.59	0.77 (21)	0.019
L1P-40		38.2	6.3	8.5	2.02	0.49 (24)	0.015
L1P-30		29.2	7.7	9.0	2.00	0.39 (20)	0.014
LL1P-50	34	49.7	11.7	10.7	4.01	0.65 (16)	0.015
LL1P-40		38.4	8.7	11.6	1.95	0.57 (29)	0.016
LL1P-30		30.0	14.5	12.5	2.10	0.51 (24)	0.015

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



「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

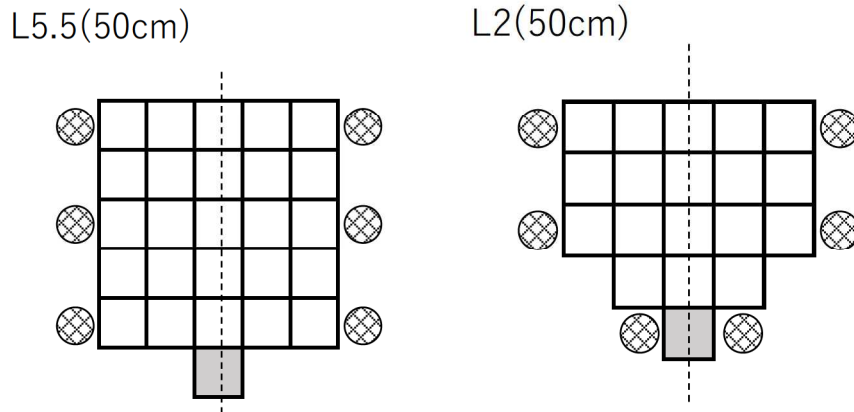


図3 部分長燃料体(灰色の燃料体)の装荷位置

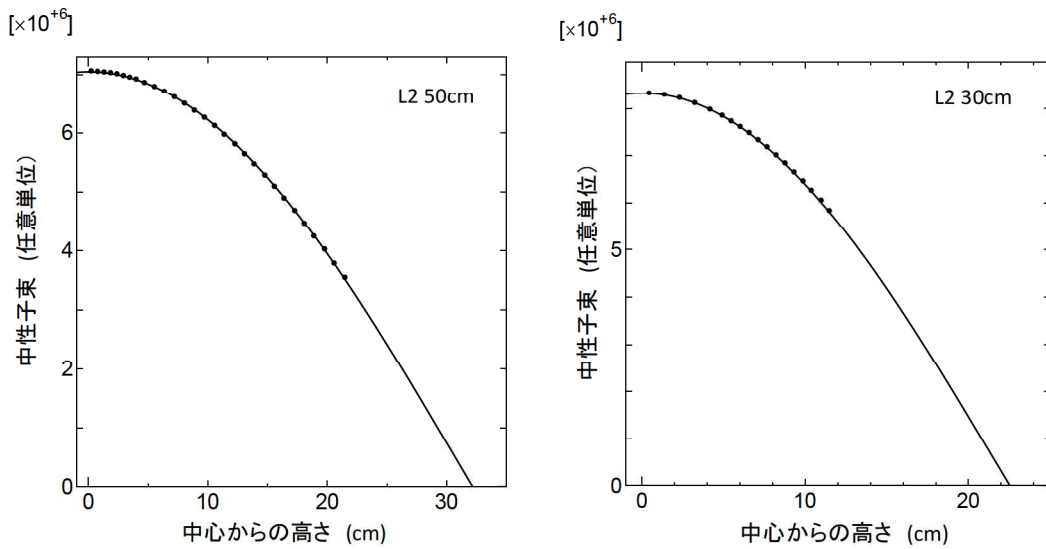


図4 中性子束 (高速エネルギー群)のコサインフィッティング例  
(左側 : L3-50cm 炉心、右側 : L2-30cm 炉心)



### 2.3 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小さくなるため、ここでは 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)。そのため実際の中心架台の反応度はここに示した値より大きくなる。取り除いた箇所を図 5 に示す。

表 3 に示すようにすべての炉心において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。

表 3 代表炉心の中心架台反応度 (固体減速炉心) (低濃縮ウラン)

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	1.34
L4P-30	2.26
L3P-50	4.55
L3P-40	2.94
L3P-30	2.26
L2P-30	3.18
L1P-30	1.84
LL1P-30	1.90

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

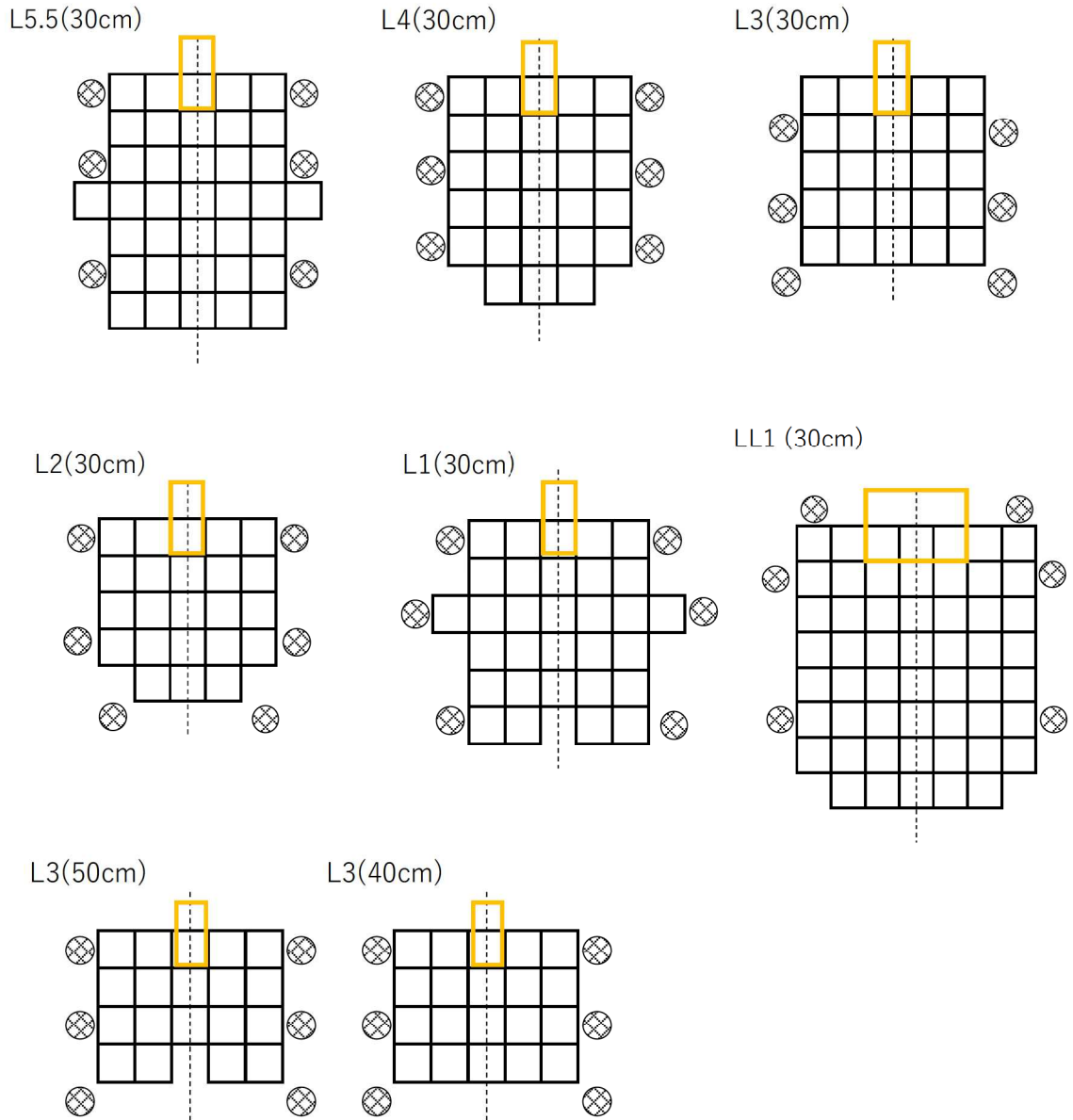


図5 中心架台の反応度評価を行う際の燃料体および反射体の取り出し箇所  
(オレンジ色で囲んだ範囲を取り除く)

2. 4 炉心形状の変更の効果

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炉心について検討し、その結果を図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はほとんど変化していないことが判る。

表4 L5.5P炉心の臨界量

炉心名称	H/ <sup>235</sup> U (-)	炉心高 (cm)		$\beta_{\text{eff}}$ (-)	$\ell$ (s)	$\beta_{\text{eff}}/\ell$ (s <sup>-1</sup> )
L5.5P-30 (炉心1)	372	30.5		$7.46 \times 10^{-3}$	$5.16 \times 10^{-5}$	144.5
L5.5P-30 (炉心2)		30.5		$7.47 \times 10^{-3}$	$5.14 \times 10^{-5}$	145.4
L5.5P-30 (炉心3)		30.6		$7.47 \times 10^{-3}$	$5.17 \times 10^{-5}$	144.4

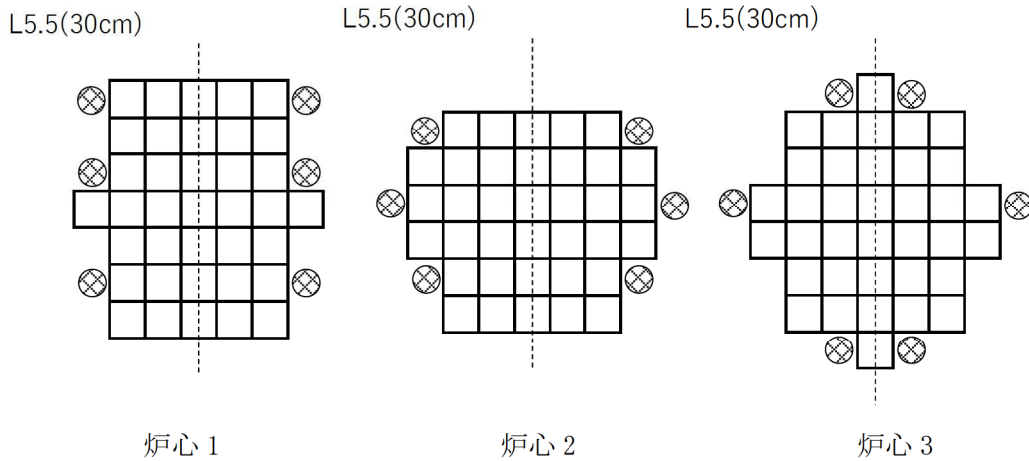


図6 L5.5P炉心(高さ約30cm)の炉心配置図

## 2. 5 固体減速架台の各パラメータについて

各炉心の  $\beta_{\text{eff}}$  (実効遅発中性子割合)、 $\ell$  (中性子平均寿命)、 $\beta_{\text{eff}}/\ell$ 、温度係数を図 7 ~10 に示す。

$\beta_{\text{eff}}$  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 4%以下と非常に小さい。

$\ell$  は H/U-235 の増加に対して単調に増加し、最大値と最小値では約 2 倍異なる。

温度係数は H/U-235 の増加に対して単調に変化している。

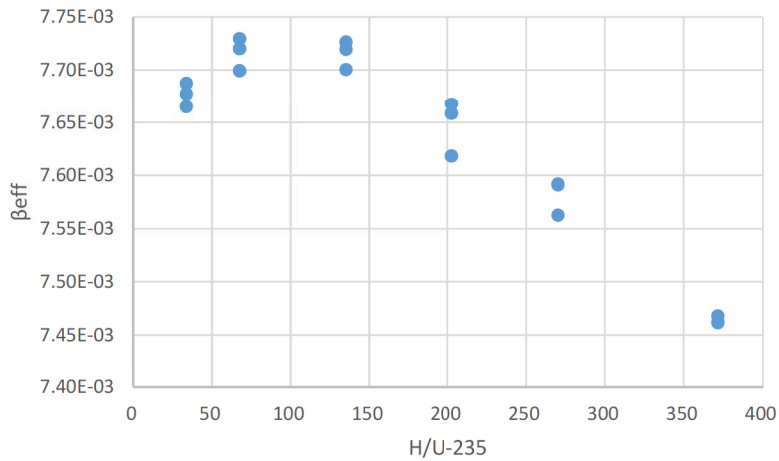


図 7 各炉心の  $\beta_{\text{eff}}$

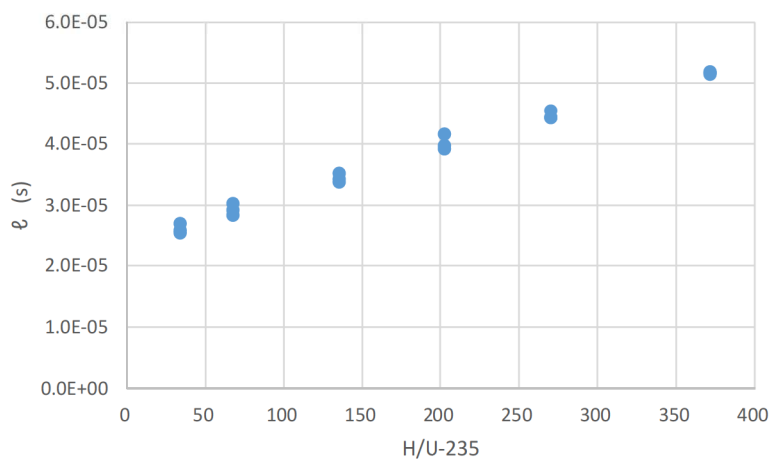


図 8 各炉心の  $\ell$

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

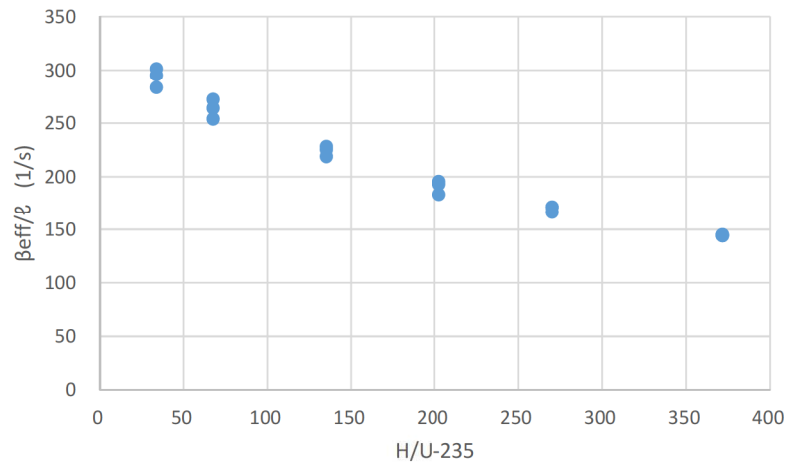


図9 各炉心の  $\beta_{eff}/\ell$

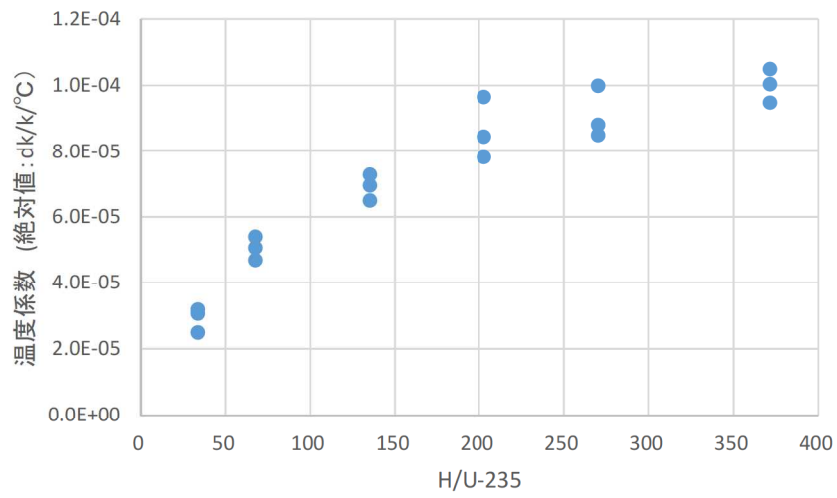


図10 各炉心の温度係数(絶対値)

### 3. 軽水減速炉心の解析結果

#### 3.1 臨界量、動特性パラメータ等

軽水減速炉心の臨界となる体系の臨界量等の解析結果を表5、6に、炉心配置の例を図10、11に示す。

固体減速架台の解析と同様に解析では燃料体を均質化して3次元炉心計算を行っているため、臨界となる炉心の水平方向の長さ（図10のx方向の長さ、幅と高さは固定）は連続変数とすることができるので、臨界となる長さに対応する燃料セルの数は必ずしも整数値とはなっていない。

固体減速炉心の解析結果と同様にこれらの体系について、これまでの審査会合（9月30日（第304回））において既に解析結果を示している体系もあるが、それらについても改めて結果を示す（4列の2分割炉心、C60の2分割炉心は初めての記載）。

なお2分割炉心のC45G(6H<sub>2</sub>O)、C45G(4H<sub>2</sub>O) C45G(6H<sub>2</sub>O)（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。

表5 代表炉心の臨界量（軽水減速炉心）（低濃縮ウラン）

炉心名称 <sup>a</sup>	H/ <sup>235</sup> 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 <sub>2</sub> O)	167	4	30.1	
C45G(5H <sub>2</sub> O)			38.8	
<u>C45G(6H<sub>2</sub>O)</u> <sup>c</sup>			43.0	
C45G(7H <sub>2</sub> O)			47.0	

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

C45G (10H <sub>2</sub> O)	247	5	55.3	[Redacted]
C45G (15H <sub>2</sub> O)			60.5	
C45G (2H <sub>2</sub> O)			24.1	
C45G (4H <sub>2</sub> O) <sup>c</sup>			27.4	
C45G (5H <sub>2</sub> O) <sup>c</sup>			30.4	
C45G (6H <sub>2</sub> O)		33.7		
C45G (7H <sub>2</sub> O)		36.9		
C45G (10H <sub>2</sub> O)		44.2		
C45G (15H <sub>2</sub> O)		49.2		
C60G (2H <sub>2</sub> O)		247	4	
C60G (5H <sub>2</sub> O)	43.9			
C60G (7H <sub>2</sub> O)	52.0			
C60G (10H <sub>2</sub> O)	59.4			
C60G (15H <sub>2</sub> O)	64.0			
C60G (2H <sub>2</sub> O)	5		26.5	
C60G (5H <sub>2</sub> O)			34.1	
C60G (7H <sub>2</sub> O)			40.7	
C60G (10H <sub>2</sub> O)			47.3	
C60G (15H <sub>2</sub> 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3.5mm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<sub>2</sub>O)を示す
- Gの後の数値が0のときは単一炉心

表6 代表炉心の臨界量 (軽水減速炉心) (低濃縮ウラン)

炉心名称 <sup>a</sup>	H/ <sup>235</sup> U	列	$\beta_{\text{eff}}$ (-) <sup>b</sup>	$\ell$ (s) <sup>b</sup>	$\beta_{\text{eff}}/\ell$ (s <sup>-1</sup> )	温度係数 ( $\Delta k/k/^\circ\text{C}$ )	ボイド係数 ( $\Delta k/k/\%\text{void}$ )
C30G0	80	4	$7.65 \times 10^{-3}$	$3.85 \times 10^{-5}$	199.0	$-6.61 \times 10^{-5}$	$-3.52 \times 10^{-3}$
		5	$7.65 \times 10^{-3}$	$3.82 \times 10^{-5}$	200.2	$-6.58 \times 10^{-5}$	$-3.55 \times 10^{-3}$
C35G0	109	4	$7.67 \times 10^{-3}$	$4.09 \times 10^{-5}$	187.3	$-7.10 \times 10^{-5}$	$-3.65 \times 10^{-3}$
		5	$7.66 \times 10^{-3}$	$4.10 \times 10^{-5}$	187.1	$-7.07 \times 10^{-5}$	$-3.64 \times 10^{-3}$



「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

C45G0	167	4	$7.64 \times 10^{-3}$	$4.58 \times 10^{-5}$	166.8	$-9.16 \times 10^{-5}$	$-3.66 \times 10^{-3}$
		5	$7.64 \times 10^{-3}$	$4.60 \times 10^{-5}$	166.1	$-8.88 \times 10^{-5}$	$-3.63 \times 10^{-3}$
C60G0	247	4	$7.58 \times 10^{-3}$	$5.22 \times 10^{-5}$	145.3	$-7.11 \times 10^{-5}$	$-3.39 \times 10^{-3}$
		5	$7.58 \times 10^{-3}$	$5.23 \times 10^{-5}$	144.9	$-7.02 \times 10^{-5}$	$-3.37 \times 10^{-3}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	167	4	$7.59 \times 10^{-3}$	$4.96 \times 10^{-5}$	153.1	$-7.01 \times 10^{-5}$	$-3.06 \times 10^{-3}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)			$7.48 \times 10^{-3}$	$5.45 \times 10^{-5}$	137.3	$-2.58 \times 10^{-6}$	$-2.85 \times 10^{-3}$
<u>C45G (6H<sub>2</sub>O)</u> <sup>c</sup>			$7.48 \times 10^{-3}$	$5.42 \times 10^{-5}$	137.9	<u><math>2.24 \times 10^{-6}</math></u>	$-2.94 \times 10^{-3}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)			$7.49 \times 10^{-3}$	$5.33 \times 10^{-5}$	140.4	$-3.66 \times 10^{-6}$	$-3.05 \times 10^{-3}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)			$7.55 \times 10^{-3}$	$5.01 \times 10^{-5}$	150.7	$-3.45 \times 10^{-5}$	$-3.35 \times 10^{-3}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)			$7.61 \times 10^{-3}$	$4.72 \times 10^{-5}$	161.2	$-7.10 \times 10^{-5}$	$-3.57 \times 10^{-3}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)		5	$7.58 \times 10^{-3}$	$5.04 \times 10^{-5}$	150.3	$-6.36 \times 10^{-5}$	$-2.93 \times 10^{-3}$
<u>C45G (4H<sub>2</sub>O)</u> <sup>c</sup>			$7.48 \times 10^{-3}$	$5.55 \times 10^{-5}$	134.8	$-2.68 \times 10^{-6}$	$-2.64 \times 10^{-3}$
C45G (5H <sub>2</sub> O) <sup>c</sup>			$7.44 \times 10^{-3}$	$5.66 \times 10^{-5}$	131.6	<u><math>4.06 \times 10^{-5}</math></u>	$-2.66 \times 10^{-3}$
<u>C45G (6H<sub>2</sub>O)</u>			$7.43 \times 10^{-3}$	$5.66 \times 10^{-5}$	131.4	<u><math>4.64 \times 10^{-5}</math></u>	$-2.74 \times 10^{-3}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)			$7.44 \times 10^{-3}$	$5.58 \times 10^{-5}$	133.5	<u><math>2.69 \times 10^{-5}</math></u>	$-2.87 \times 10^{-3}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)			$7.51 \times 10^{-3}$	$5.20 \times 10^{-5}$	144.6	$-9.78 \times 10^{-6}$	$-3.22 \times 10^{-3}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)			$7.59 \times 10^{-3}$	$4.81 \times 10^{-5}$	158.0	$-5.90 \times 10^{-5}$	$-3.51 \times 10^{-3}$
C60G (2H <sub>2</sub> O)			247	4	$7.52 \times 10^{-3}$	$5.59 \times 10^{-5}$	134.5
C60G (5H <sub>2</sub> O)	$7.43 \times 10^{-3}$	$5.95 \times 10^{-5}$			125.0	$-5.94 \times 10^{-6}$	$-2.51 \times 10^{-3}$
C60G (7H <sub>2</sub> O)	$7.45 \times 10^{-3}$	$5.82 \times 10^{-5}$			128.1	$-2.55 \times 10^{-6}$	$-2.70 \times 10^{-3}$
C60G (10H <sub>2</sub> O)	$7.51 \times 10^{-3}$	$5.55 \times 10^{-5}$			135.3	$-2.80 \times 10^{-5}$	$-3.03 \times 10^{-3}$
C60G (15H <sub>2</sub> O)	$7.56 \times 10^{-3}$	$5.33 \times 10^{-5}$			141.8	$-5.09 \times 10^{-5}$	$-3.26 \times 10^{-3}$
C60G (2H <sub>2</sub> O)	5	$7.51 \times 10^{-3}$		$5.67 \times 10^{-5}$	132.5	$-5.39 \times 10^{-5}$	$-2.72 \times 10^{-3}$
C60G (5H <sub>2</sub> O)		$7.40 \times 10^{-3}$		$6.14 \times 10^{-5}$	120.3	$-8.53 \times 10^{-6}$	$-2.51 \times 10^{-3}$
C60G (7H <sub>2</sub> O)		$7.41 \times 10^{-3}$		$6.03 \times 10^{-5}$	122.8	$-7.49 \times 10^{-6}$	$-2.71 \times 10^{-3}$
C60G (10H <sub>2</sub> O)		$7.47 \times 10^{-3}$		$5.70 \times 10^{-5}$	131.1	$-2.85 \times 10^{-5}$	$-3.03 \times 10^{-3}$
C60G (15H <sub>2</sub> O)		$7.54 \times 10^{-3}$		$5.39 \times 10^{-5}$	139.9	$-6.74 \times 10^{-5}$	$-3.27 \times 10^{-3}$

b 定数について

$\beta_{\text{eff}}$  実効遅発中性子割合、  $\ell$  中性子平均寿命

c 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

### 3. 2 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7に示す。

ここで各炉心は燃料板を追加して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。

全制御棒価値の判定基準は

$$1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度}(0.5\% \Delta k/k) = 1.5\% \Delta k/k$$

となる。

最大反応度添加率の値の求め方は固体減速炉心の場合と同じである(炉心燃料高さは57cm)。反射体節約の値は最も中性子エネルギースペクトルが柔らかいC60炉心の高さ方向の高速群の中性子束分布をコサイン分布にフィッティングして求め、その値を各炉心共通で用いた(反射体節7.24cm)。

表6より全ての炉心においてKUCAでの核的制限値

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

制御棒反応度の最大の1本は全反応度の1/3以下であること

制御棒の最大反応度添加率は臨界近傍で $0.02\% \Delta k/k/\text{sec}$ 以下であること

を満足している。

表7 代表炉心の制御棒反応度値（軽水減速炉心）（低濃縮ウラン）

炉心名称 <sup>a</sup>	列	全反応度 (% Δk/k)	最大反応度 (% Δk/k) (割合%) <sup>1)</sup>	最大反応度 添加率 <sup>2)</sup> (% Δk/k/s)
C30G0	4	2.89	0.67 (23)	0.016
	5	2.55	0.65 (26)	0.015
C35G0	4	3.22	0.75 (23)	0.018
	5	2.19	0.56 (26)	0.013
C45G0	4	2.82	0.73 (26)	0.017
	5	1.83	0.52 (28)	0.012
C60G0	4	2.43	0.60 (25)	0.014
	5	1.59	0.43 (27)	0.010
C45G (2H <sub>2</sub> O)	4	2.43	0.55 (23)	0.013
C45G (5H <sub>2</sub> O)		2.09	0.48 (23)	0.008
C45G (7H <sub>2</sub> O)		2.01	0.38 (19)	0.009
C45G (10H <sub>2</sub> O)		2.38	0.40 (17)	0.009
C45G (15H <sub>2</sub> O)		2.31	0.40 (17)	0.009
C45G (2H <sub>2</sub> O)	5	1.80	0.41 (23)	0.009
C45G (5H <sub>2</sub> O)		1.56	0.36 (23)	0.011
C45G (7H <sub>2</sub> O)		1.63	0.30 (19)	0.007
C45G (10H <sub>2</sub> O)		1.71	0.30 (18)	0.007
C45G (15H <sub>2</sub> O)		1.59	0.28 (17)	0.006
C60G (2H <sub>2</sub> O)	4	2.00	0.46 (23)	0.011
C60G (5H <sub>2</sub> O)		2.00	0.39 (20)	0.009
C60G (7H <sub>2</sub> O)		2.19	0.37 (17)	0.009
C60G (10H <sub>2</sub> O)		2.00	0.34 (17)	0.008
C60G (15H <sub>2</sub> O)		1.89	0.32 (17)	0.007
C60G (2H <sub>2</sub> O)	5	1.51	0.34 (23)	0.008
C60G (5H <sub>2</sub> O)		1.56	0.30 (19)	0.007
C60G (7H <sub>2</sub> O)		1.51	0.26 (17)	0.006
C60G (10H <sub>2</sub> O)		1.50	0.27 (18)	0.006
C60G (15H <sub>2</sub> O)		1.51	0.26 (17)	0.006

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

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

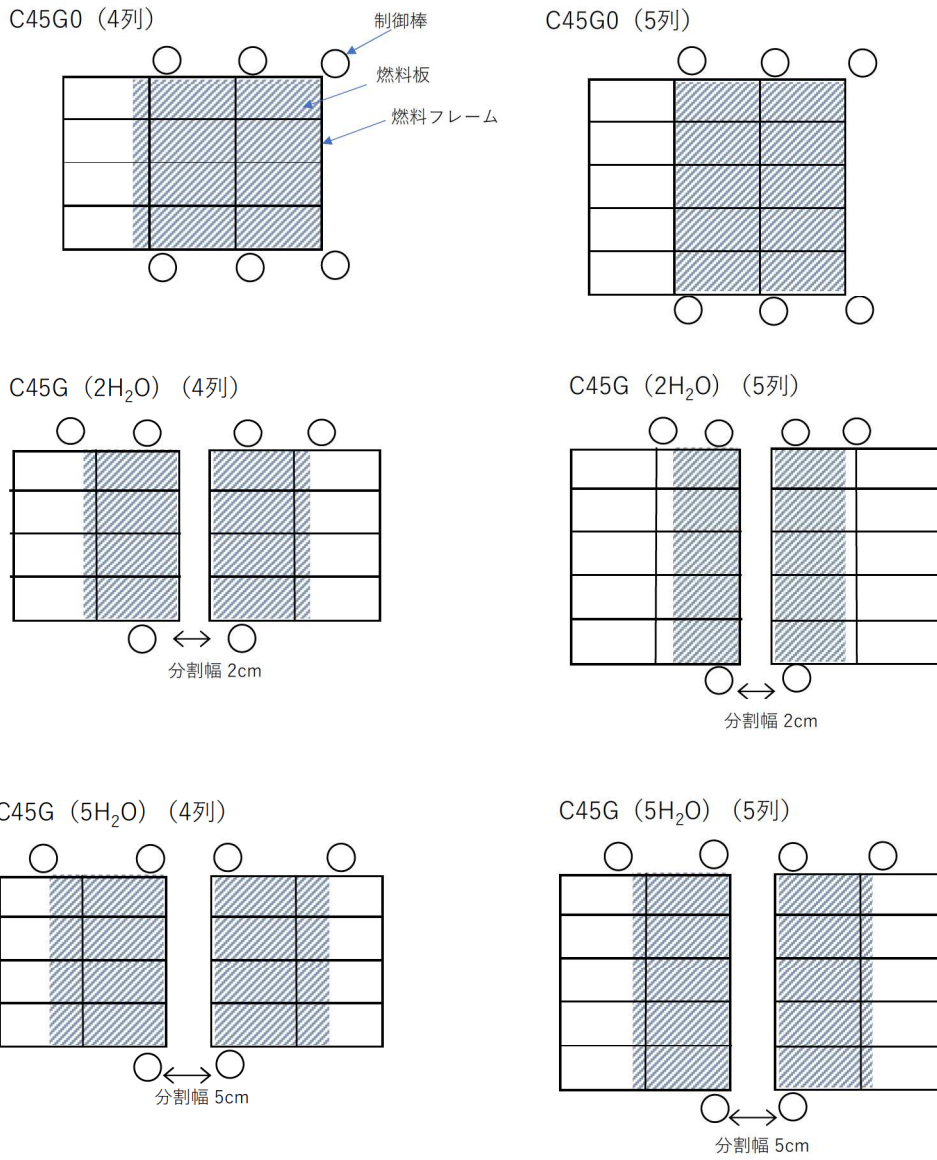


図 10 軽水減速炉心の炉心配置例 (1)



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

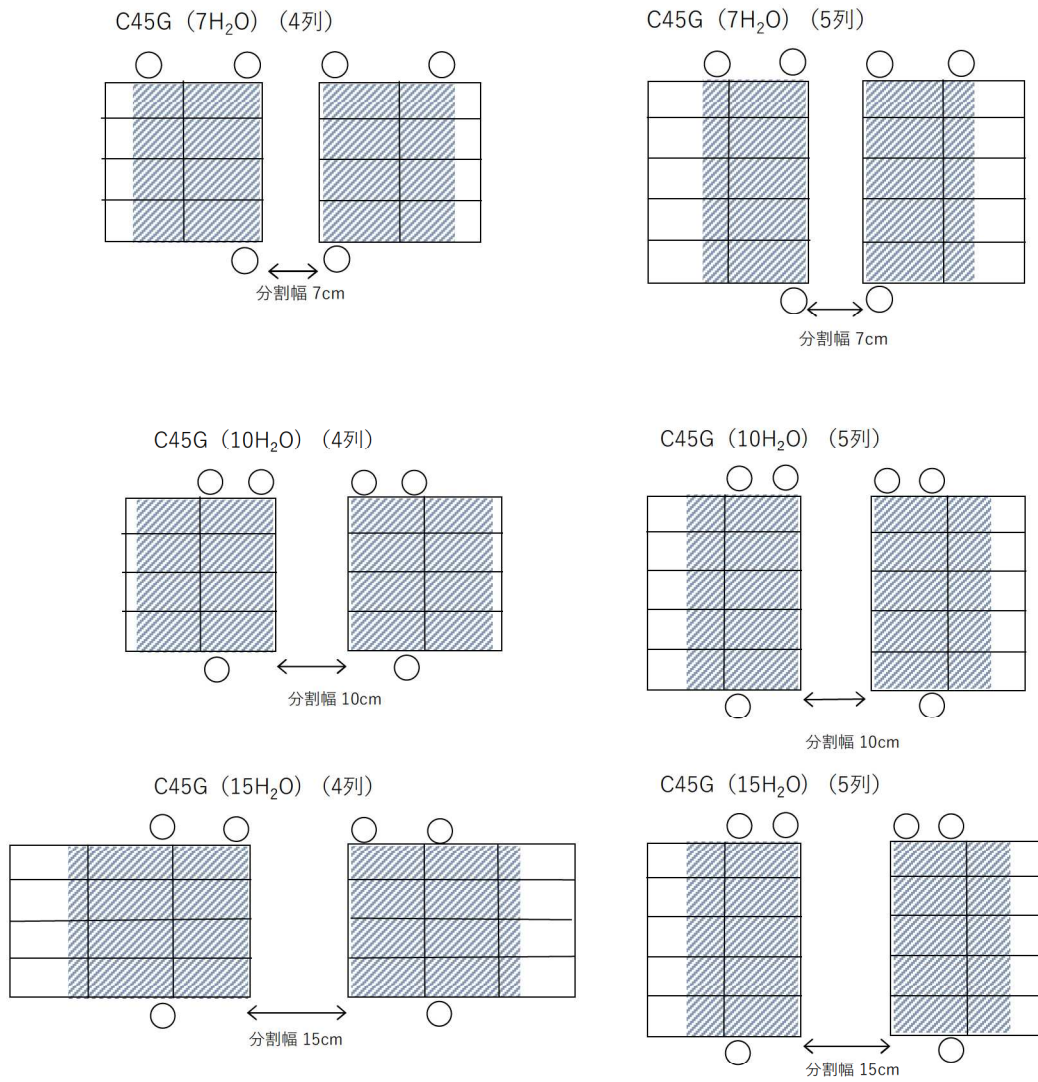


図 11 軽水減速炉心の炉心配置例 (2)

### 3. 3 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。

ここでは炉心上部の軽水のみを除去した場合を想定して、燃料板のミート部（ウランの含まれる部分）より上部がすべて無いものと仮定して（3次元炉心計算でz方向ミート部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。

ここではスペクトルの最も硬い C30 炉心と最も柔らかい C60 炉心の単一炉心、および上部反射体除去の反応度変化の小さな C60 炉心（スペクトルが柔らかいため反射体効果が小さい）の2分割炉心を取り上げた。

表 8 に示すようにすべての炉心においてダンプ排水に対する核的制限値の  $1\% \Delta k/k$  以上を満たしている。実際には減速材である軽水はすべて炉心から無くなるので反応度はこの表の値より大幅に大きくなる。

表 8 ダンプ排水反応度（軽水減速炉心）（低濃縮ウラン）

炉心名称	上部反射体(軽水)を除いたときの反応度 ( $\% \Delta k/k$ )
C30G0 (5 列)	1.66
C60G0 (5 列)	1.06
C60G (7H <sub>2</sub> O) (5 列)	1.06
C60G (15H <sub>2</sub> O) (5 列)	1.04

### 3. 5 軽水減速架台の各パラメータについて

各炉心の  $\beta_{\text{eff}}$  (実効遅発中性子割合)、 $\ell$  (中性子平均寿命)、 $\beta_{\text{eff}}/\ell$  を図 12~14 に示す。 $\beta_{\text{eff}}$  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。 $\ell$  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 15 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。

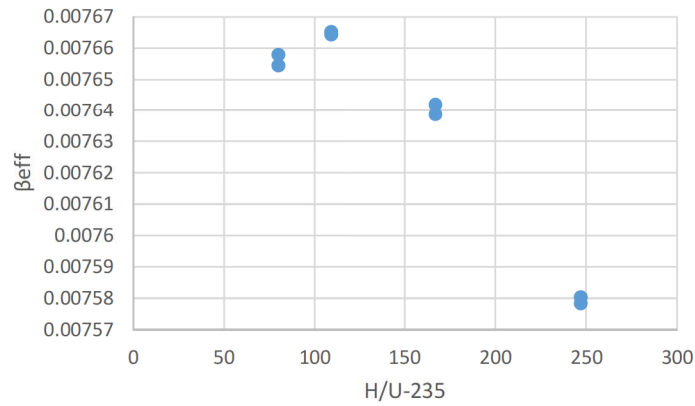


図 12 単一炉心の  $\beta_{\text{eff}}$

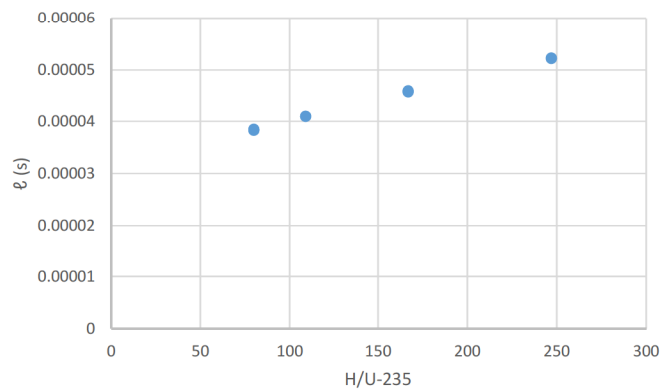


図 13 単一炉心の  $\ell$



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

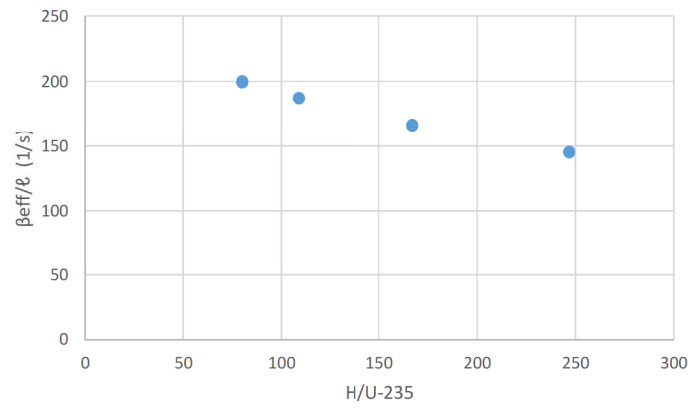


図 14 単一炉心の  $\beta_{eff}/\ell$

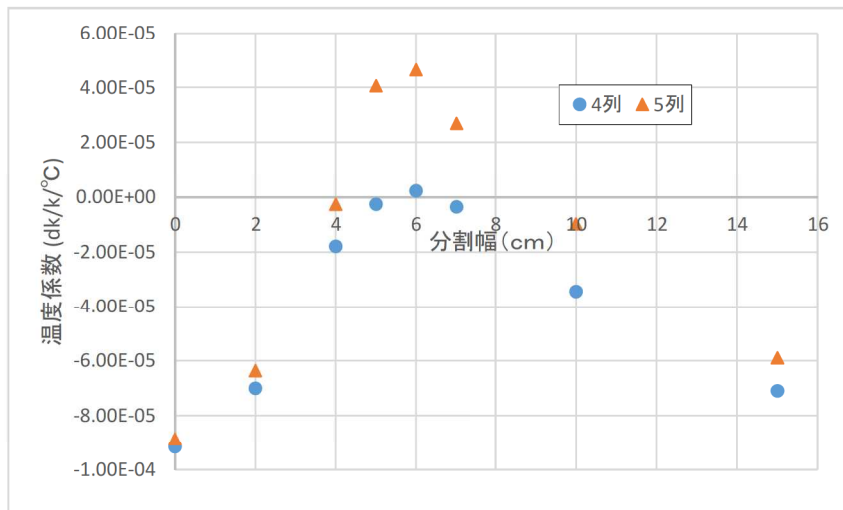


図 15 C45 の 2 分割炉心の温度係数

#### 4. 臨界量、制御棒反応度等の計算について

臨界量、反応度温度係数、ボイド係数の解析は添付 8 の臨界計算に用いたものと同じ SRAC コードシステムを使用した(使用した核定数は JENDL4.0 に基づく)。

衝突確率法により燃料集合体の均質化定数を作成し、その定数を用いて拡散計算コード CITATION による 3 次元炉心計算を行った。

制御棒反応度計算では CITATION の内部黒体オプションを用いて制御棒は内部黒体として取り扱い、熱エネルギー領域において制御棒表面での中性子束の微係数を与えて反応度の解析を行った。なお、使用した微係数はこれまでの E1 炉心での高濃縮ウラン体系の実験値との比較により算出した。

全反応度の実験値と計算値を表 9 に示す。実験値と計算値は 15%以内の精度で一致していることが判る。

また、低濃縮ウランの L3 炉心(高さ約 40cm)、L1 炉心(高さ約 40cm)について制御棒反応度の SRAC コードシステムとモンテカルロ計算コード MCNP による解析結果を比較したものを表 10、表 11 に示す。ここで SRAC の解析では MCNP で入力した燃料セル数に合わせて炉心高さを調整しているので表 1 に示した結果とは少し異なる。実効増倍率、制御防犯濃度共に両者の結果はよく一致している。

最近実施した新炉心での制御棒反応度のモンテカルロ計算コードによる解析値(研究所の原子炉安全委員会での新炉心の審議をした際に提出した事前解析値)と実験値との C/E は 1.17 であったので、ここで示した SRAC による制御棒反応度の結果は実験を遂行する上で十分な精度であると考えられる。

表9 高濃縮ウラン体系でのSRACによる制御棒の反応度の解析

炉心	全反応度値 (実験値) (% $\Delta k/k$ )	全反応度値 (計算値) (% $\Delta k/k$ )	C/E
B1/8" P60EU-EU(5) (EE1 炉心)	3.54	4.07	1.15
B2/8" P48EU(2) (E2 炉心)	3.37	3.82	1.13
B3/8" P36EU(3) (E3 炉心)	1.95	1.87	0.96

表10 L3P-40 炉心でのMCNPとSRACによる解析

解析コード	制御棒全引抜き k-eff	全制御棒反応度 (% $\Delta k/k$ )
MCNP	0.99704 $\pm$ 0.00031	2.01 $\pm$ 0.05
SRAC	1.00088	1.98
SRAC/MCNP	1.00	0.99

表11 L1P-40 炉心でのMCNPとSRACによる解析

解析コード	制御棒全引抜き k-eff	全制御棒反応度 (% $\Delta k/k$ )
MCNP	0.99952 $\pm$ 0.00033	1.93 $\pm$ 0.04
SRAC	1.00165	2.02
SRAC/MCNP	1.00	1.05

(以上)

## 補足資料

京都大学臨界実験装置(KUCA)の低濃縮化に係る安全設計の解析項目について

「第326回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合  
(2019/12/23)」(資料3-2)  
を元に作成

NO	炉心条件と解析項目	固体減速架台 (ポリエチレン減速)	固体減速架台 (黒鉛減速)	軽水減速架台	京大からの回答
1	炉心構成条件 (減速度、最大炉心挿入量)		C/U235 ≤ 2500	C/U235 ≤ 400	H/U235 ≤ 400 固体減速架台 組むことができる炉心はLEU燃料板1枚に対して1/8インチポリエチレン板が5.5枚～0.5枚の燃料セルに限定、 $34 \leq H/U235 \leq 372$ 軽水減速架台 組むことができる炉心はC30、C35、C45、C60燃料フレームを用いたものに限定 ( $80 \leq H/U235 \leq 247$ )
2	炉心構成条件 (反射体条件)	十分な反射体 (3層)			反射体はポリエチレンに限定 厚さは最低3層を使用する(約16cm、無限反射体厚さ以上の厚さ)
3	制御棒の核的制限値	①制御棒の全反応度 $\geq 1\%+0.35\%$ (最大過剰反応度) ②制御棒の最大反応度値 $< 全反応度 / 3$	①制御棒の全反応度 $\geq 1\%+0.35\%$ (最大過剰反応度) ②制御棒の最大反応度値 $< 全反応度 / 3$	①制御棒の全反応度 $\geq 1\%+0.5\%$ (最大過剰反応度) ②1本の制御棒の最大反応度値 $< 全反応度 / 3$	固体減速架台 取り上げた代表炉心(燃料セルパターン)はL5.5P、L4P、L3P、L2P、L1P、LL1Pの6種類、炉心高さは約30cm、約40cm、約50cmの3種類、合計18炉心)について、すべて制御棒に関する核的制限値を満足していることを確認した。 軽水減速架台: 取り上げた代表炉心(C30、C35、C45、C60燃料フレーム)の単一炉心(4列、5列)、2分割炉心についてすべて制御棒に関する核的制限値を満足していることを確認した。

NO	炉心条件と解析項目	固体減速架台 (ポリエチレン減速)	固体減速架台 (黒鉛減速)	軽水減速架台	京大からの回答
4	【解析項目】 ①炉心構成範囲	主要パラメータ (減速度、臨界高さ) 臨界高さ制限 (≧30cm)	主要パラメータ (減速度、臨界高さ) 臨界高さ制限 (100cm)	主要パラメータ (減速度、面間距離) 燃料板の間隔(H/U235)	固体減速炉心 組むことができる炉心はLEU燃料板1枚に対して1/8インチポリエチレン板が5.5枚～0.5枚の燃料セルに限定 炉心高さは30～50cm 軽水減速炉心： 組むことができる炉心はC30、C35、C45、C60の燃料フレームに限定 燃料体の配置は4列または5列に限定 2分割炉心はC45またはC60燃料フレームの炉心で、面間距離は15cm以下
5	②最大炉心(体積)	<炉心条件と計算結果>			固体減速架台の水平断面形状の違いについて、L5.5P-30cm炉心で検討
6	③最小炉心(体積)				固体減速架台 ウラン重量が大凡最小となるのはL5.5P-40cm、L5.5P-30cm、L4P-50cm、L4P-40cm炉心 軽水減速架台 ウラン重量が大凡最小となるのはC45の分割幅が約2cmの炉心
7	④最大本数に対応する炉心条件				固体減速架台 LL1の高さ30cmの炉心 軽水減速架台： 分割幅が15cmの炉心
8	⑤ウラン装荷量最大炉心 低濃縮ウラン (濃縮度20%) 天然ウラン トリウム燃料				固体減速架台 ウラン重量が最大となるのはLL1P-30cm 炉心 軽水減速架台 ウラン重量が最大となるのはC60(5列)の分割幅15cmの炉心  天然ウラン、トリウムは使用しない



NO	炉心条件と解析項目	固体減速架台 (ポリエチレン減速)	固体減速架台 (黒鉛減速)	軽水減速架台	京大からの回答
9	⑥減速度範囲 減速度が最小になる条件 減速度が最大になる条件				固体減速架台 組むことができる炉心はLEU燃料板1枚に対して1/8インチポリエチレン板が5.5枚～0.5枚の燃料セルに限定、 $34 \leq H/U235 \leq 372$ 軽水減速架台 組むことができる炉心はC30、C35、C45、C60の燃料フレームに限定
10	⑦ゾーン型炉心の構成条件 (水平方向)				ゾーン型炉心は構成しない
11	⑧ゾーン型炉心の構成条件 (垂直方向)				ゾーン型炉心は構成しない
12	⑨反応度温度係数 $\alpha_T$				固体減速架台 反応度温度係数を解析 ( $-1.05 \times 10^{-4} \sim -2.45 \times 10^{-5} dk/k/^\circ C$ ) 軽水減速架台 反応度温度係数を解析 ( $-9.16 \times 10^{-5} \sim +4.64 \times 10^{-5} dk/k/^\circ C$ )
13	⑩反応度ポイド係数 $\alpha_v$				軽水減速架台 反応度ポイド係数を解析 ( $-3.66 \times 10^{-3} \sim +2.51 \times 10^{-5} dk/k/\%void$ )
14	⑪遅発中性子割合 $\beta_{eff}$				各炉心の実効遅発中性子割合を解析 ( $7.40 \times 10^{-3} \sim 7.73 \times 10^{-3}$ )
15	⑫即発中性子寿命 ( $\ell$ )				各炉心の中性子寿命を解析 ( $2.55 \times 10^{-5} \sim 6.14 \times 10^{-5} s$ )
16	⑫動特性パラメータ指標 ( $\beta_{eff}/\ell$ )				各炉心の即発中性子減衰定数を解析 ( $120 \sim 301 1/s$ )

NO	炉心条件と解析項目	固体減速架台 (ポリエチレン減速)	固体減速架台 (黒鉛減速)	軽水減速架台	京大からの回答
17	【制御棒の核的制限値】 ①全系反応度				各炉心の制御棒反応度を解析 全制御棒値が「 $1(\% \Delta k/k) + \text{過剰反応度}(\% \Delta k/k)$ 」以上であることを確認
18	②最大反応度 制御棒の値				各炉心の制御棒反応度を解析 制御棒反応度の最大の1本は全反応度の1/3以下であることを確認
19	③反応度添加速度 (S曲線の解析)				各炉心の制御棒反応度を解析 制御棒の最大反応度添加率は臨界近傍で $0.02\% \Delta k/k/\text{sec}$ 以下であることを確認
20	【評価方法】 ①計算手法と検証結果				解析手法についてMCNPと比較 制御棒反応度値の解析値を実験値と比較 本解析の妥当性を確認