

2020 年 3 月 16 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

京都大学臨界実験装置 (KUCA)
設置変更承認申請について

A. 核計算の妥当性の確認について

1. 計算手法

1.1 概要

臨界量、反応度温度係数、ボイド係数の解析方法の概要は以下の通りである。(計算フローの概略を図1に示す)

- (1) 計算には主として SRAC コードシステム (SRAC2006) を用いる。
- (2) 核定数は JENDL4.0 に基づくものを用いる。
- (3) エネルギー107 群の 1 次元衝突確率法により燃料セルの均質化定数を作成し、その後、2次元衝突確率法により燃料集合体の均質化定数を作成し 20 群に縮約する。
- (4) (3) で得られた均質化定数を用いて拡散計算コード CITATION による 3 次元炉心計算を行う。
- (5) 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実効増倍率を求めた。ここで使用する微係数の値は、既存の HEU 炉心(軽水減速炉心は C35G0(5 列)、固体減速炉心は 3/8”P36EU(3)炉心で、ともに施設定期検査で検査に用いるもっとも利用頻度の多い炉心)において、制御棒反応度の実験結果と合うように定めた。

前回の「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)において、「計算手法の妥当性については既存の高濃縮ウラン (HEU) を用いた固体減速炉心、および軽水減速炉心について実効増倍率と制御棒反応度の解析結果等を実験結果と比較して検討する」と説明した。

この HEU 炉心の解析結果から本解析手法の精度 (誤差) を推定する。低濃縮ウラン (LEU) 炉心の代表炉心の解析においては HEU 炉心と同じ解析方法を用いることで、この誤差を考慮した上での核的制限値の評価を行うものとする。

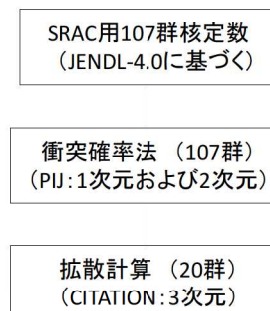


図1 計算フロー

1. 2 計算方法

1. 2. 1 固体減速炉心

以下のような手順で計算を行う。

- (1) 図 2 に示すような炉心を構成する燃料さや管 (図 3) の均質化断面積を求めるために、まず燃料角板、ポリエチレン板等からなる単位セルについて (図 3 の燃料さや管内の構成材)、107 群 (高速 62 群、熱 45 群) の 1 次元無限平板体系の衝突確率法により均質化定数を作成する。
- (2) 次に図 4 に示すさや管の水平断面について、(1) の均質化定数 (図 4 左図中の **Material Plate**) を用いて 107 群の 2 次元 x-y 体系の衝突確率法により均質化した 20 群の縮約定数を作成する。その際の中性子スペクトルは一点炉 B1 近似 ($k_{eff}=1$ となるバックリング使用) により求めたものを用いる。
- (3) (2) と同様にポリエチレン反射体についても 107 群の 2 次元 x-y 体系の衝突確率法により均質化した 20 群 (高速 12 群、熱 8 群) の縮約定数を作成する。
- (4) (2) (3) で得られた均質化定数を用いて 20 群の 3 次元 x-y-z 体系の拡散計算により炉心計算を行う。メッシュ幅は各方向ともに炉心内部と炉心近傍反射体で約 0.5cm 程度とする。
- (5) 原子個数密度、板厚を表 1~6 に、重量等の誤差を表 11 に示す。

1. 2. 2 軽水減速炉心

以下のような手順で計算を行う。

- (1) 図 5、6 に示す燃料板支持フレームの均質化断面積を求めるために、まず図 7 に示す燃料板 (燃料ミート部の U-Al 合金と Al 被覆材) と軽水 (減速材) からなる単位セルについて (図 8 の(a) **primary cell**)、107 群 (高速 62 群、熱 45 群) の 1 次元無限平板体系の衝突確率法により均質化定数を作成する。
- (2) 次に図 8 に示す燃料板支持フレームの水平断面について、(1) の均質化定数 (図 8 の **Fueled region**) を用いて 107 群の 2 次元 x-y 体系の衝突確率法により均質化した 20 群の縮約定数を作成する。その際の中性子スペクトルは一点炉 B1 近似 ($k_{eff}=1$ となるバックリング使用) により求めたものを用いる。
- (3) (2) で得られた均質化定数を用いて 20 群の 3 次元 x-y-z 体系 (図 10 に垂直方向の構成を示す) の拡散計算により炉心計算を行う。メッシュ幅は各方向ともに炉心内部と炉心近傍反射体で約 0.5cm 程度とする。
- (4) 原子個数密度を表 7~10 に、重量等の誤差を表 11 に示す。示す。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

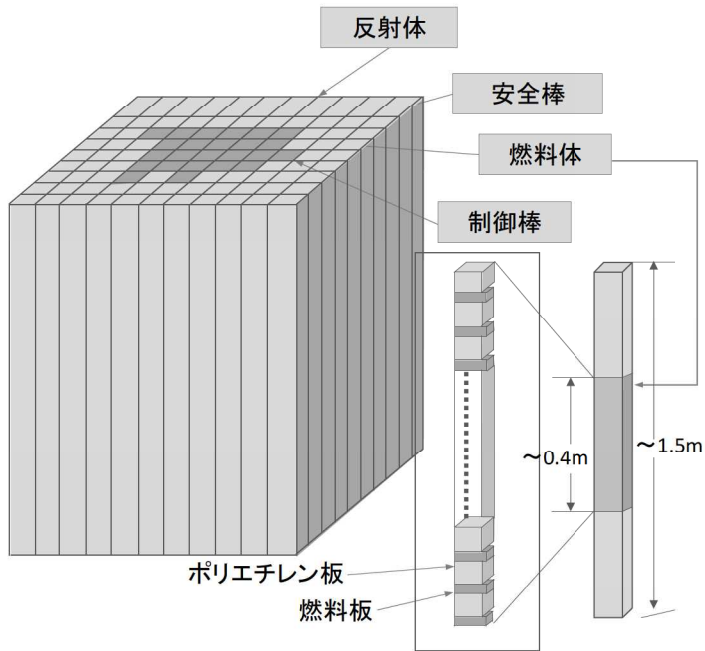


図2 固体減速架台炉心構成

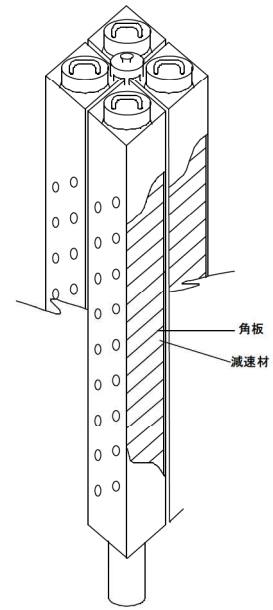
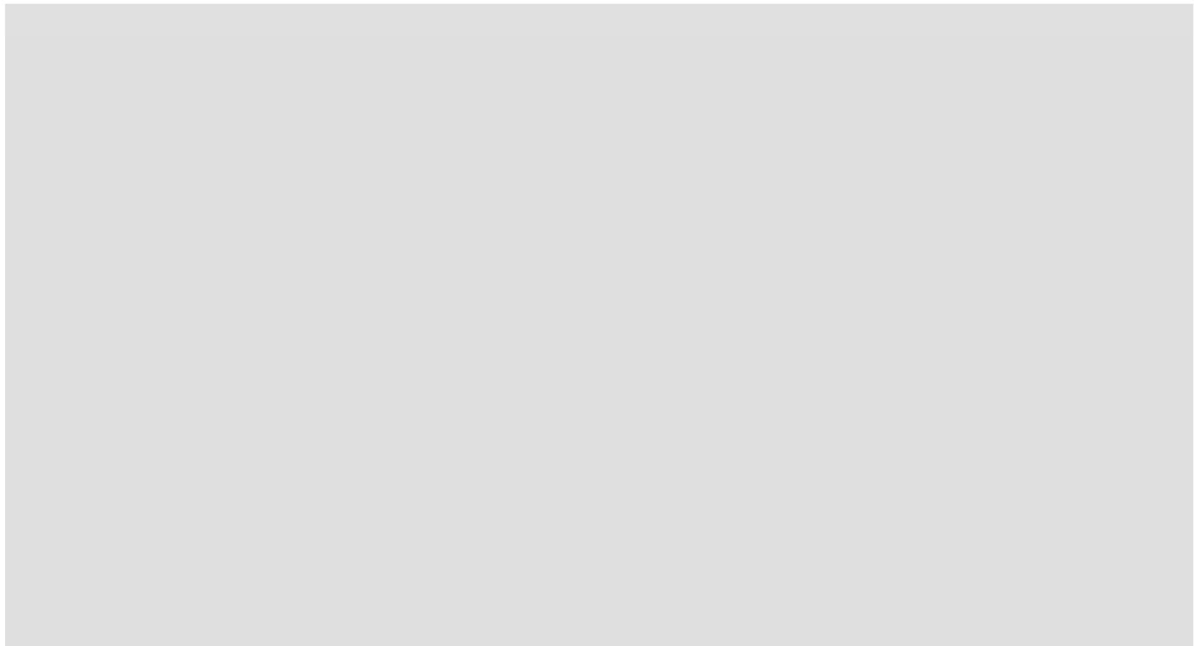


図3 燃料さや管
(さや管に角板、減速材を挿入)



「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

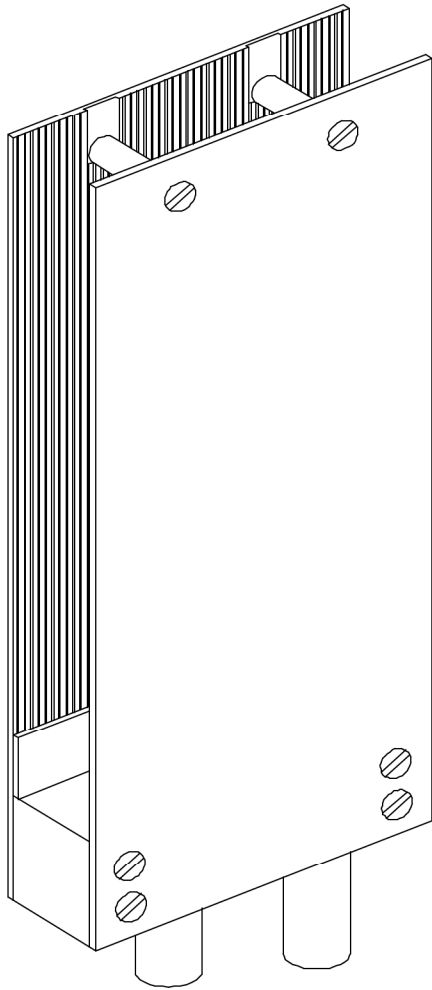
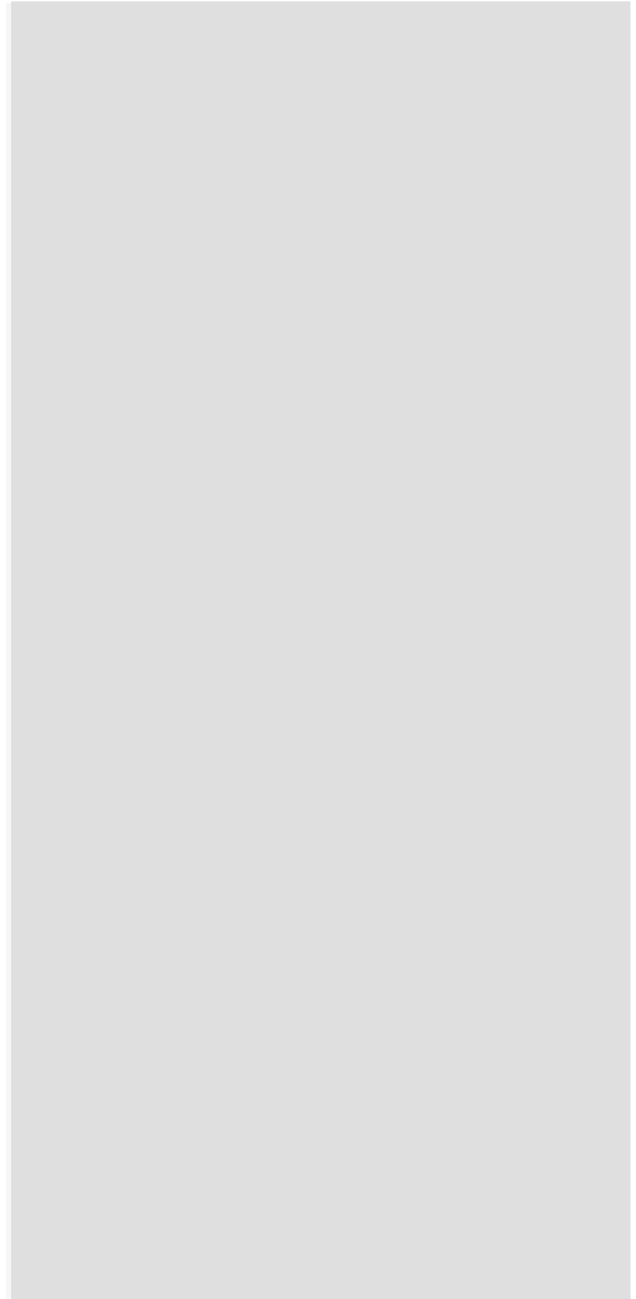
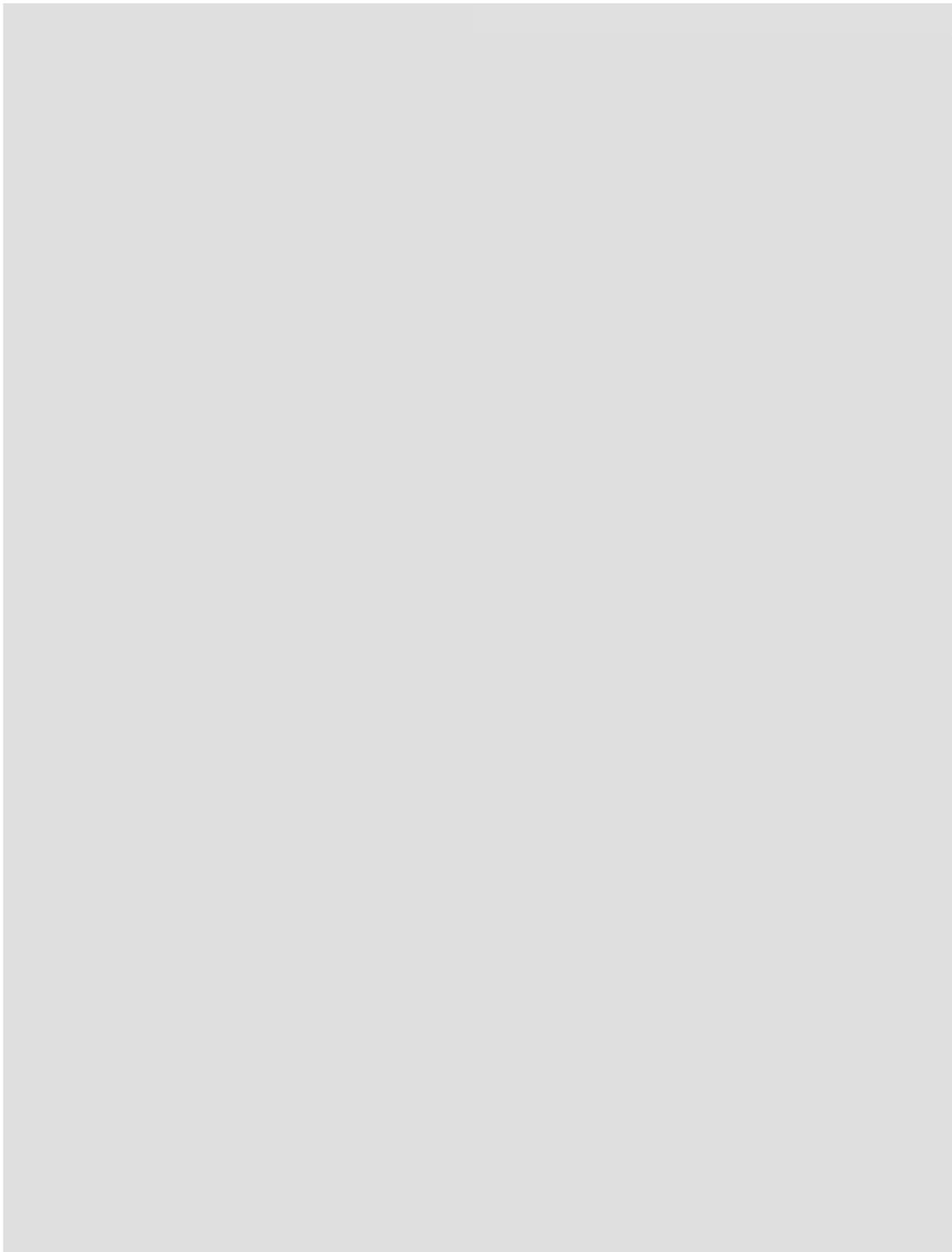


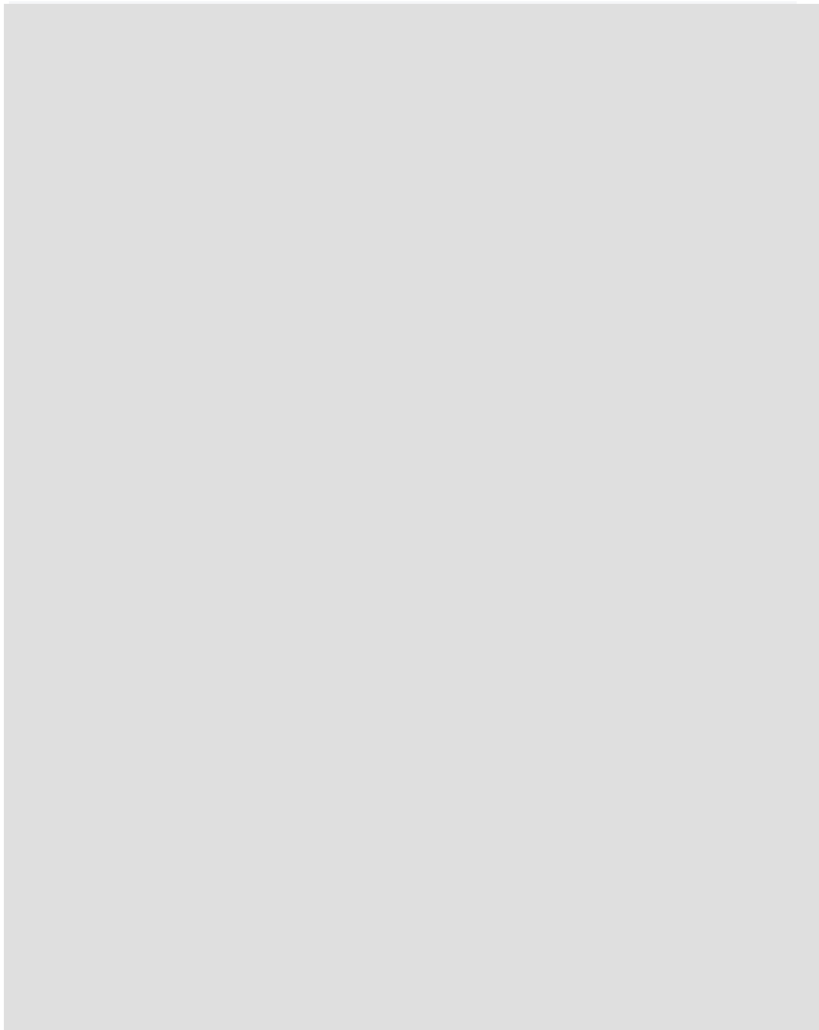
図 5 軽水減速架台用燃料板支持フレーム



「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」



表 3 固体減速炉心用ポリエチレン 原子個数密度.

Isotope	1/8" Poly	1/4" Poly	Reflector Poly
Carbon	4.0084E-02	4.0441E-02	4.0084E-02
Hydrogen	8.0167E-02	8.0882E-02	8.0167E-02

Number Density の計算に必要な情報 :

Weight : 7.4354g (1/8" Poly)、15.3146g (1/4" Poly)

Reflector Poly is the same as 1/8" Poly

表 4 固体減速炉心用燃料さや管 アルミニウム 原子個数密度.

Isotope	Wt. Fraction (%)	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
Aluminum	98.5	5.8919E-02
Silicon	0.60	3.4479E-04
Magnesium	0.90	5.9763E-04

Number Density の計算に必要な情報 : Specific gravity : 2.68 g/cm³

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 5 固体減速炉心用制御棒内無水ホウ酸 (B_2O_3) 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24} \text{ 1/cm}^3$)
Boron (natural)	3.1832E-02
Oxygen	4.7748E-02

Number Density の計算に必要な情報 : Specific gravity : 1.84 g/cm³

表 6 固体減速炉心用板材厚さ.

Plate Type	Thickness(cm)
HEU-AL Fuel	0.156
NU Fuel	0.1031
1/8-inch Polyethylene	0.3086
1/4-inch Polyethylene	0.6300

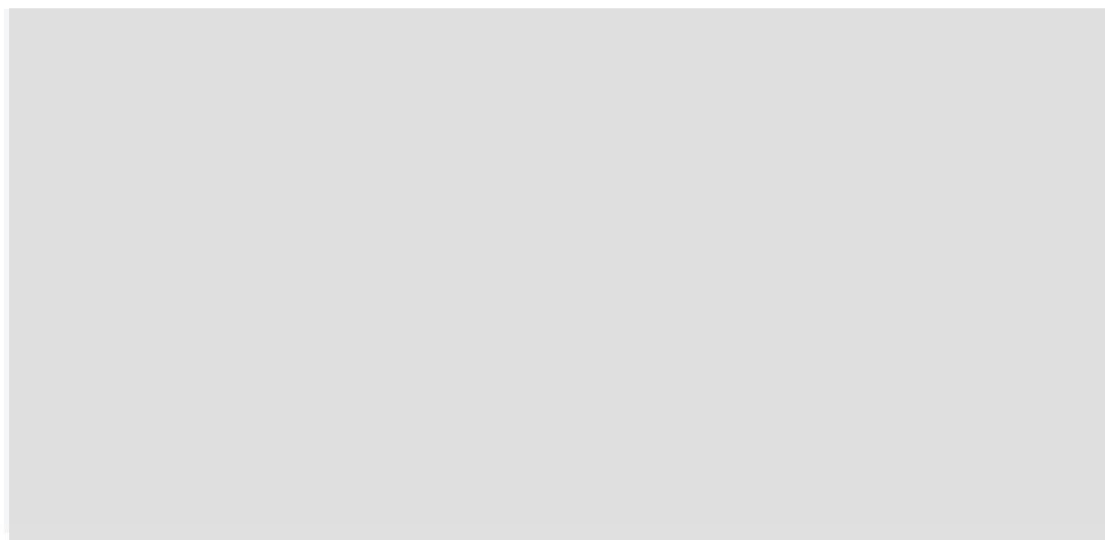


表 8 軽水減速炉心用標準型燃料板 アルミニウム被覆材 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24} \text{ 1/cm}^3$)
Al	6.0217E-02

Number Density の計算に必要な情報 : Specific gravity : 2.698 g/cm³

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

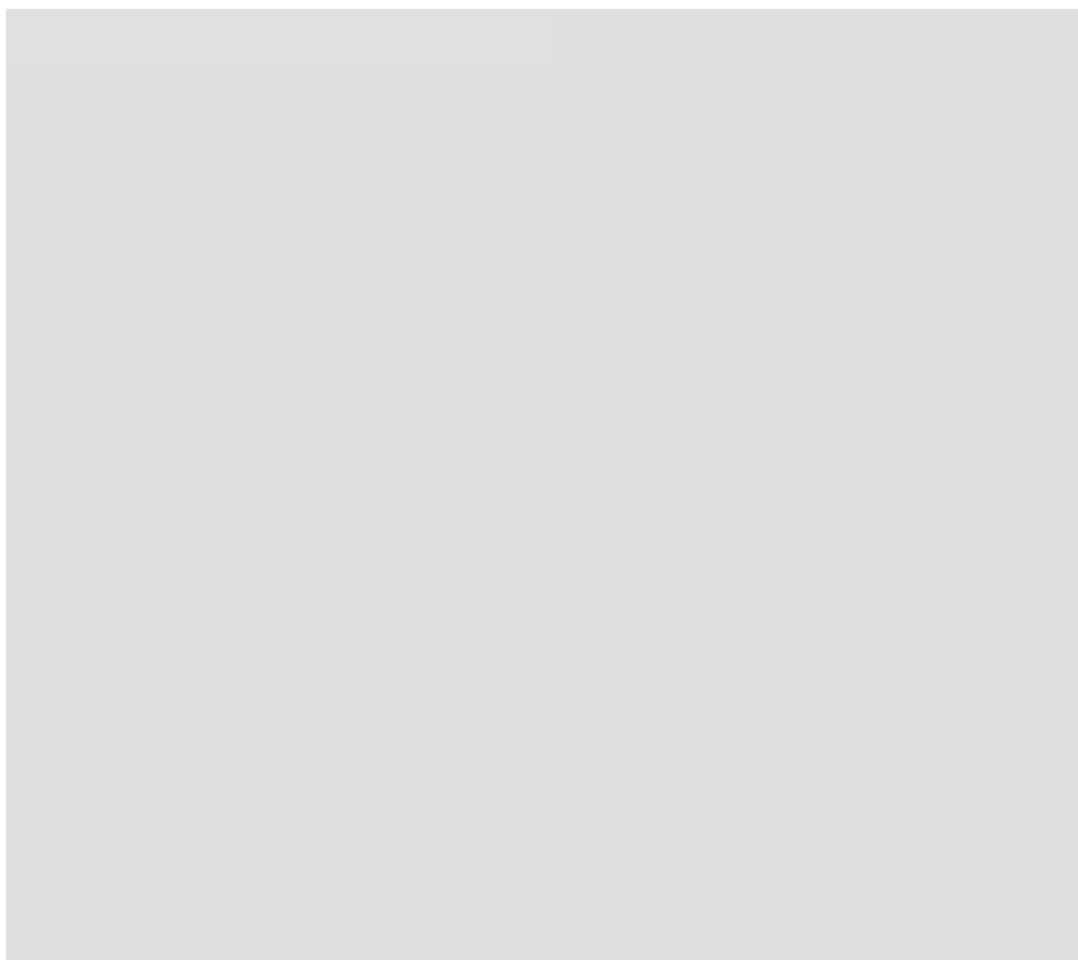
表 9 軽水減速炉心 軽水 (20°C) 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
H-1	6.6736E-02
O-16	3.3678E-03

表 10 軽水減速炉心用燃料板支持フレーム アルミニウム 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
Aluminum	5.9076E-02
Silicon	3.1959E-04
Magnesium	7.3860E-04

Number Density の計算に必要な情報 : Specific gravity : 2.692 g/cm³



2. 臨界量、制御棒反応度について

2. 1 固体減速炉心

固体減速炉心について、既存の高濃縮ウランを用いた幾つかの体系（図 11）について、実効増倍率、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の比較を行った。ここで取り上げた炉心は KUCA で実験を行ってきた炉心の H/U-235 をほぼカバーしている。炉心長はほとんど 40cm 前後であるが、約 50 cm の体系も取り上げた。

実効増倍率は制御棒が全て抜けた状態での値であり、過剰反応度を正ペリオド法により測定した結果から求めた値である。なお、反応度を求めるための逆時間方程式（遅発中性子 6 群）は以下の通りである。

$$\rho = \frac{\ell}{T + \ell} + \frac{T}{T + \ell} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{i,eff}}{1 + \lambda_i T}$$

ここで、 ℓ は中性子平均寿命、 T は安定ペリオド、 $\beta_{i,eff}$ は遅発中性子 6 群の各群の実効遅発中性子割合である（参考文献）。また制御棒反応度は落下法（積分法）により測定して求めた値である。

実効増倍率の実験値と計算値の結果を表 12 に示す。この表中の誤差はペリオド法の倍加時間測定時の誤差 により生じるものである。

表 12 より C/E は 0.998～1.006 の範囲であることから実効増倍率の解析精度は±0.6%以内であると考えられる。なお、B3/8” P36EU-NU 炉心については炉心を構成する燃料、さや管等の全ての材料の寸法や成分などの誤差をすべて考慮して評価した結果、実効増倍率の実験値の誤差は 0.062%であることが報告されているので、この C/E の 1 からのずれは実験値による誤差ではなく計算値の誤差に起因するものであるといえる。

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してみる。

最も燃料体数の少ない B1/8” P80EU 炉心では臨界近傍で体積が 1%変化したときの実効増倍率を求めたところその変化割合は約 1.7%であったので、実効増倍率が 0.6%変化したときの体積変化、すなわち臨界質量の変化割合は

$$0.6 / 1.7 = 0.35\%$$

となる。一方、最も燃料体数の多い B4/8” P24EU-Th-EU 炉心では臨界近傍で体積が 1%変化したときの実効増倍率の変化割合は約 0.15%であったので、実効増倍率が 0.6%変化したときの体積変化、すなわち臨界質量の変化割合は

$$0.6 / 0.15 = 4.0\%$$

となる。従って、実効増倍率が±0.6%変化したとき臨界質量の評価では±4%の誤差を見込む必要があることを示している。

制御棒の反応度価値（6本の全制御棒挿入時の反応度）の実験値と計算値の結果を表13に示す。ここでの反応度の誤差は落下法（積分法）における中性子計数の誤差に生じるものである。使用した制御棒表面での中性子束の微係数の値はA3/8” P36EU炉心の実験値との比較により算出した[マスクング]。C/Eは0.96～1.18の範囲であることから制御棒反応度の解析精度は±18%以内であると考えられる。なお、C/Eが大きくなると計算値が全制御棒の反応度（核的制限値は $(1\% \Delta k/k + \text{過剰反応度})$ 以下）を大きく見積もるため非安全側となり、C/Eが小さくなると反応度添加率（核的制限値は $0.02\% \Delta k/k/s$ 以下）を小さく見積もるため非安全側となる。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精度は炉心解析を行う上で十分な精度であると考えられる。

2. 2 軽水減速炉心

軽水減速炉心について、既存の高濃縮ウランを用いた幾つかの体系（図13）について、実効増倍率、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の比較を行った。

実効増倍率の実験値と計算値の結果を表14に示す。C/Eは0.996～0.997の範囲であることから実効増倍率の解析精度は±0.3%以内であると考えられる。

制御棒の反応度価値（6本の全制御棒挿入時の反応度）の実験値と計算値の結果を表15に示す。使用した制御棒表面での中性子束の微係数の値はC35G0(5列)炉心の実験値との比較により算出した[マスクング]。C/Eは0.85～1.11の範囲であることから制御棒反応度の解析精度は±15%以内であると考えられる。

表 12 高濃縮ウラン体系（固体減速炉心）の SRAC による実効増倍率の解析

炉心 ¹⁾	H/U-235	実効増倍率 (実験値)	実効増倍率 (計算値)	C/E
B1/8” P60EU-EU (EE1 炉心)	53	1.00095 ±0.00001	1.00433	1.003
A2/8” P36EU-NU-EU (ENE2 炉心)	92	1.00168 ±0.00001	0.99932	0.998
B1/8” P80EU (E1 炉心)	106	1.00060 ±0.00001	1.00051	1.000
A3/8” P36EU-NU-EU (ENE3 炉心)	138	1.00035 ±0.00001	1.00651	1.006
B4/8” P24EU-Th-EU (ETE2 炉心)	184	1.00086 ±0.00001	1.00380	1.003
B2/8” P48EU (E2 炉心)	212	1.00207 ±0.00002	0.99860	0.997
B3/8” P36EU-NU (EN3 炉心)	276	1.00124 ±0.00004	1.00117	1.000
B3/8” P36EU (E3 炉心)	319	1.00313 ±0.00003	1.00089	0.998

1) 炉心名称について

最初の A、B は架台

分数の数字（インチ単位）は燃料単位セルのポリエチレン板の厚さ

P のあとの燃料単位セルの繰り返し数

繰り返し数の次は燃料単位セルの構造

EU：高濃縮ウラン板、NU：天然ウラン板、Th：トリウム板

表 13 高濃縮ウラン体系（固体減速炉心）の SRAC による制御棒反応度の解析

炉心	反応度 ¹⁾ (実験値) (% $\Delta k/k$)	反応度 ¹⁾ (計算値) (% $\Delta k/k$)	C/E
B1/8" P60EU-EU (EE1 炉心)	3.54 ± 0.01	4.07	1.15
B1/8" P80EU (E1 炉心)	3.87 ± 0.02	4.40	1.14
B2/8" P48EU (E2 炉心)	3.37 ± 0.02	3.82	1.13
B3/8" P36EU (E3 炉心)	1.95 ± 0.02	1.87	0.96
A2/8" P36EU-NU-EU (ENE2 炉心)	3.37 ± 0.03	3.99	1.18
A3/8" P36EU-NU-EU (ENE3 炉心)	2.86 ± 0.02	2.80	0.98
B4/8" P24EU-Th-EU (ETE2 炉心)	1.70 ± 0.02	1.86	1.09

1) 6 本制御棒を全て挿入したときの反応度の絶対値

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

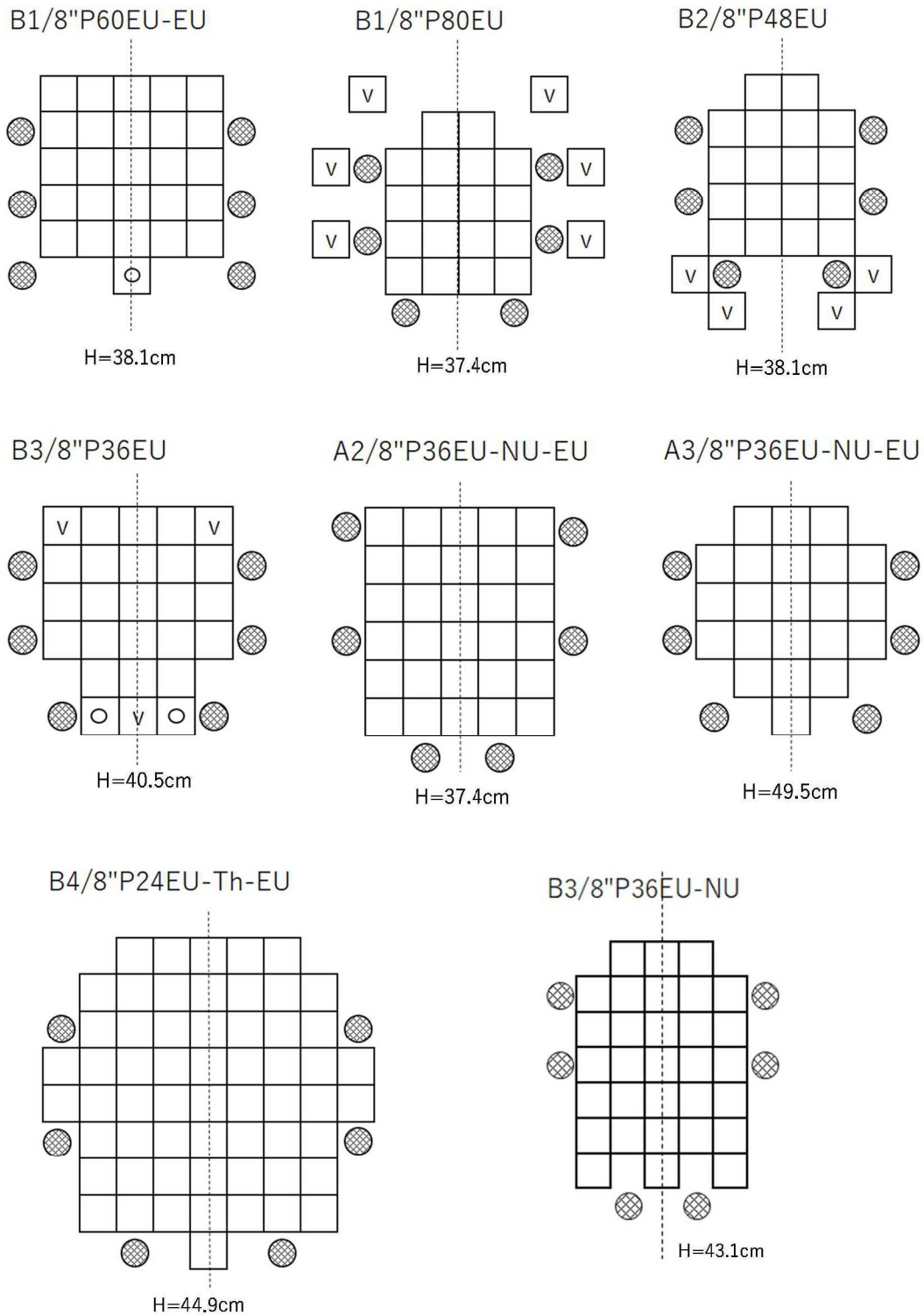


図 11 炉心配置図 (固体減速炉心)
(V:空鞘管、○:穴あきポリエチレン、Hは高さ)

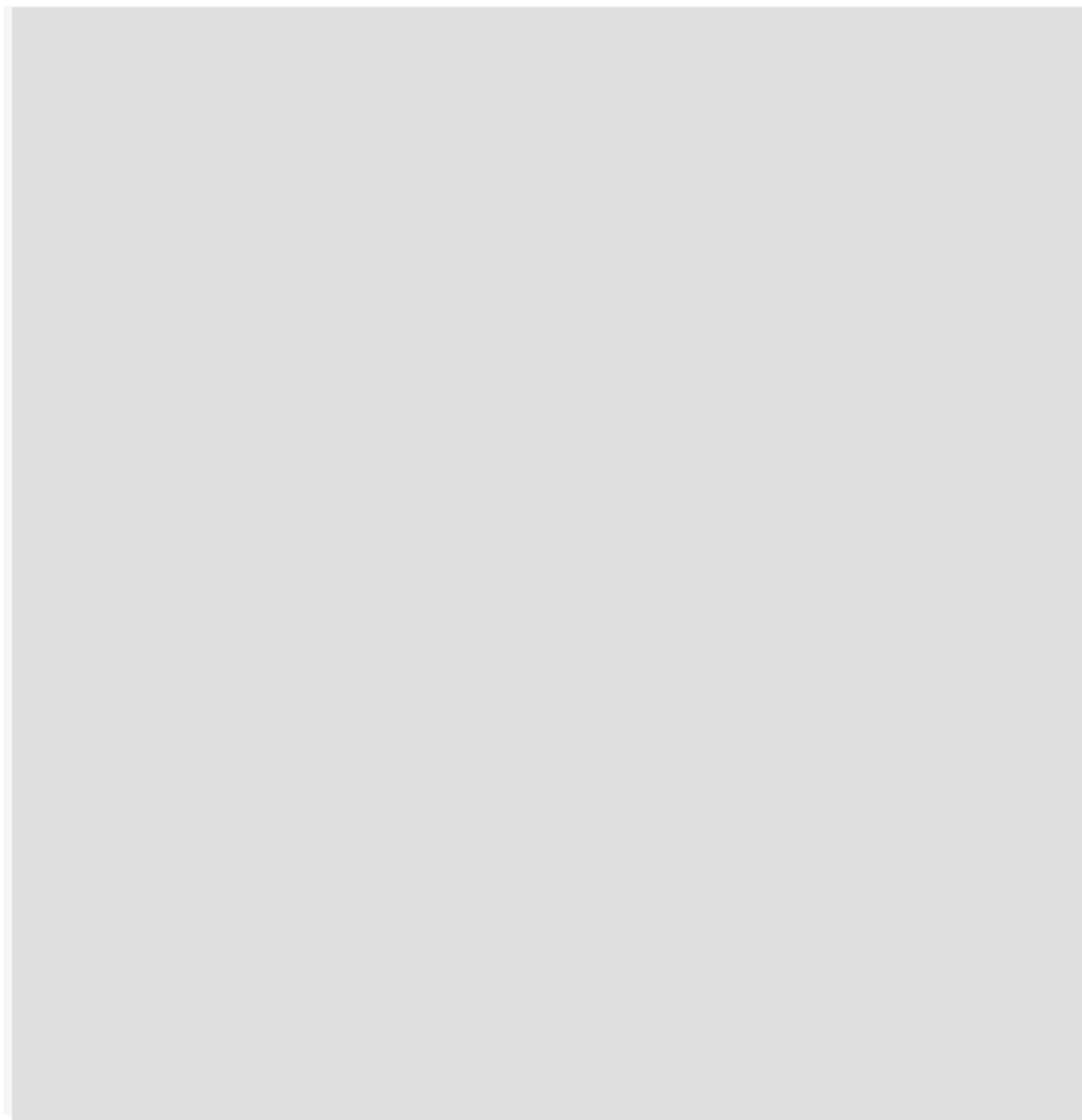
表 14 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の SRAC による実効増倍率の解析

炉心 ¹⁾	H/U-235	実効増倍率 (実験値)	実効増倍率 (計算値)	C/E
C30G0(5列)	129	1.00501 ±0.00004	1.00199	0.997
C35G0(4列)	176	1.00499 ±0.00004	1.00183	0.997
C45G0(4列)	268	1.00484 ±0.00004	1.00096	0.996

表 15 高濃縮ウラン体系（軽水減速炉心）の SRAC による制御棒反応度の解析

炉心 ¹⁾	反応度 (実験値) (% Δ k/k)	反応度 (計算値) (% Δ k/k)	C/E
C30G0(5列)	2.76 ±0.01	2.40	0.87
C35G0(4列)	2.87 ±0.01	3.18	1.11
C45G0(4列)	2.87 ±0.01	2.44	0.85

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」



3. 温度係数について

軽水減速炉心では温度係数の測定実験が行われており、その実験値と計算値の結果を表 16～18 に示す。実験では以下のような手法で温度係数を求めた。

- ① 最初に 20°C前後の水温で臨界状態とし（例えば表 16 の炉心では 22.1°C）、過剰反応度をペリオド法により測定する。
- ② 次に電気ヒーターにより水温を 10°C程度上昇させ（例えば表 14 の炉心では 30.3°C）、臨界状態とし後に過剰反応度をペリオド法により測定する。
- ③ ①と②の過剰反応度の差と両者の水温の差から温度係数を求める。ただし、その温度係数は両者の温度の平均値に対する値とする。
- ④ この測定を繰り返す。ただし温度上昇により過剰反応度が負になった場合には、未臨界度を中性子源増倍法により測定する。

ここでの温度係数の誤差はペリオド法による過剰反応度測定時の倍加時間の誤差（±0.5s）、および温度の測定誤差（時間による変動）を考慮したものである。

C/E は 0.68～1.09 の範囲であることから、温度係数の解析精度は約±32%であると考えられる。

4. 即発中性子減衰定数について

中性子雑音解析法である Feynman- α 法により炉心の即発中性子減衰定数 α (β_{eff}/ℓ) の測定が行われてきた。実験では中性子検出器により中性子検出時刻の時系列を測定し、Feynman- α 法により Y 値を求め、理論式にフィッティングして α 値を求めた。

実験値と計算値の結果を表 19 に示す。ここでの α 値の誤差は最小自乗法によるフィッティングの誤差である。 β_{eff} と ℓ の値は SRAC の拡散計算コード CITATION の forward 計算と adjoint 計算により求めたものである。

C/E は 0.92～1.06 の範囲であることから、即発中性子減衰定数の解析精度は約±8%であると考えられる。

β_{eff} 単独の測定は非常に難したため、その誤差を正しく見積もることはできないが、過去においていくつかの実験的な研究が行われている。例えば JAEA の高速炉臨界実験装置 (FCA) においては国際ベンチマーク実験としていくつかの異なる手法で同じ体系での β_{eff} の測定が実施され比較検討された。また、熱炉である JAEA の臨界実験装置 (TCA) において β_{eff} が測定されたことがあり、FCA や TCA での実験結果を元に核データ JENDL の遅発中性子に関する定数の調整が行われ C/E が 3%以内程度で評価されている。KUCA の固体減速炉心においても FCA で用いられた手法の 1 つである Bennett 法により β_{eff} の測定が行われ、計算結果との差異は最大約 4%であったことが報告されている。

表 16 温度係数 (C35G0(3 列炉心)の実験と解析結果

温度 (°C)	温度係数 (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 (計算値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	C/E
26.2	0.66 ± 0.35	0.59	0.89
34.4	-2.48 ± 0.33	-1.68	0.68
42.5	-4.66 ± 0.41	-4.42	0.95
50.4	-7.78 ± 0.44	-7.07	0.91
59.2	-10.0 ± 0.29	-9.11	0.90
67.1	-13.5 ± 0.45	-10.5	0.78

表 17 温度係数 (C35G0(5 列炉心)の実験と解析結果

温度 (°C)	温度係数 (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 (計算値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	C/E
29.7	-3.97 ± 0.32	-4.34	1.09
37.2	-7.34 ± 0.27	-6.67	0.91
44.1	-8.82 ± 0.28	-8.96	1.02
52.0	-12.5 ± 0.22	-11.5	0.91
63.6	-15.1 ± 0.28	-14.2	0.94

表 18 温度係数 (C45G0(5 列炉心) の実験と解析結果

温度 (°C)	温度係数 (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 (計算値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	C/E
31.6	-8.82 ± 0.54	-6.73	0.76
39.8	-10.3 ± 0.56	-9.94	0.96
48.4	-13.2 ± 0.34	-12.5	0.95
57.0	-14.9 ± 0.30	-14.9	1.00

表 19 即発中性子減衰定数の実験と解析結果

炉心	α 値 (実験値) (1/s)	α 値 (計算値) (1/s)	C/E
B1/8" P60EU-EU (EE1 炉心) ¹⁾	270.5 \pm 1.9	249.1	0.92
C30G0(5 列)	146.4 \pm 2.0	155.6	1.06
C35G0(5 列)	138.5 \pm 0.3	138.5	1.05
C45G0(5 列)	123.5 \pm 1.3	129.6	1.05

1) 図 11 の炉心配置

5 まとめ

固体減速炉心と軽水減速炉心について既存の高濃縮ウランを用いた体系について、実効増倍率、制御棒反応度、温度係数、即発中性子減衰定数の解析精度について評価を行った。

その結果、固体減速炉心と軽水減速炉心の両炉心について、各パラメータについての解析精度は以下のように評価する。

実効増倍率	: ± 0.6 %
臨界質量	: ± 4.0 %
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 %

添付 8 の代表炉心の解析においては、これらの精度を考慮した上で評価を行うこととする。

参考文献

計算コード

K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko and K. Tsuchihashi, "SRAC2006; A Comprehensive neutronics calculation code system", JAERI-DATA/Code 2007-004 (2007).

反応度測定

T. Misawa, H. Unesaki and C. H. Pyeon, "Nuclear Reactor Physics Experiments", Kyoto Univ. Press (2010).

炉心説明

K. Kobayashi, J. Horie, K. Kanda and T. Shibata, "Reactivity Measurements in a Thorium Critical Assembly," Nucl. Sci. Eng., 71, 143 (1979)

S. Shiroya, K. Kanda and K. Tsuchihashi, "Analyses of Reactor Physics Experiments in the Kyoto University Critical Assembly," Nucl. Sci. Eng., 100, 525 (1988)

臨界量、誤差評価

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

温度係数

M. Mori, S. Shiroya and K. Kanda, "Temperature Coefficient of Reactivity in Light-Water Moderated and Reflected Cores Loaded with Highly-Enriched-Uranium Fuel," J. Nucl. Sci. Technol., 24, 653 (1987)

即発中性子減衰定数

T. Misawa, S. Shiroya and K. Kanda, "Measurement of Prompt Neutron Decay Constant and Large Subcriticality by the Feynman- α Method," Nucl. Sci. Eng., 104, 53 (1990)

T. Misawa, S. Shiroya and Y. Yamane, "Measurement of Subcriticality by the Feynman- α Method at the KUCA," Ann. Rep. Res. Reactor Inst, Kyoto Univ., 27, 65 (1994)

β_{eff}

T. Yoshida et al., "Evaluation of Delayed Neutron Data for JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 2, 136-139 (20025).

山根義宏、他、「共分散測定法による実効遅発中性子割合の測定」、日本原子力学会誌、37, 513 (1995).

B. 代表炉心の解析について

1. 代表炉心

前回の「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。

1.1 固体減速炉心

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 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、L1P、L2P、L3P、L4P、L5.5P 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。

なお、使用する燃料角板の寸法、原子個数密度を補足 3 に示す。

1.2 軽水減速炉心

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。

なお、使用する燃料長板の原子個数密度を補足 3 に示す。寸法は高濃縮ウランの燃料長板と同じである。

今回の審査会合においては、これらの代表炉心の解析のうち固体減速架台の一部の解析項目について説明する。

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、反応度温度係数等

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。計算方法は「核計算の妥当性の確認について」の項目で説明した高濃縮ウラン体系の解析に用いたものと同じ SRAC コードシステムによるものである。

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)、12月23日(第326回)、1月27日(第331回)等)において既に解析結果を示している体系もあるが、一部の結果については制御棒反応度の規制値に対して解析誤差を含めて満足させるなどの理由のため炉心配置を変更して解析をやり直している。

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 $\pm 4\%$ としているので、代表炉心の解析においては

[] であることが求められるが、表 1 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

反応度温度係数については核的制限値として $+2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^\circ C$ 以下であることを記載されている。「核計算の妥当性の確認について」の項目で反応度温度係数の解析精度は $\pm 32\%$ 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 の全ての炉心においてこの基準値を満足している。

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 ^{a、} 1)	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	β_{eff} (-) ^b	ℓ (s) ^b	β_{eff}/ℓ (s ⁻¹)	温度係数 ^c ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)
<u>L5.5P-50</u>	372	50.9	7.46×10^{-3}	5.18×10^{-5}	144.2	-1.05×10^{-4}
<u>L5.5P-40</u>		41.8	7.46×10^{-3}	5.15×10^{-5}	144.9	-1.00×10^{-4}
<u>L5.5P-30</u>		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}
<u>L4P-40</u>		38.5	7.59×10^{-3}	4.45×10^{-5}	170.6	-8.81×10^{-5}
<u>L4P-30</u>		30.7	7.59×10^{-3}	4.42×10^{-5}	171.5	-8.49×10^{-5}
<u>L3P-50</u>	203	51.3	7.64×10^{-3}	4.02×10^{-5}	190.3	-9.65×10^{-5}
<u>L3P-40</u>		39.8	7.65×10^{-3}	3.99×10^{-5}	191.5	-8.45×10^{-5}
<u>L3P-30</u>		30.5	7.66×10^{-3}	3.96×10^{-5}	193.2	-7.81×10^{-5}
<u>L2P-50</u>	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}
<u>L2P-30</u>		30.7	7.70×10^{-3}	3.53×10^{-5}	218.3	-6.47×10^{-5}
<u>L1P-50</u>	68	47.7	7.68×10^{-3}	3.11×10^{-5}	246.7	-5.44×10^{-5}
<u>L1P-40</u>		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}

1) 下線は第331回審査会合（2020.1.27）の資料から変更した炉心

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

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

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

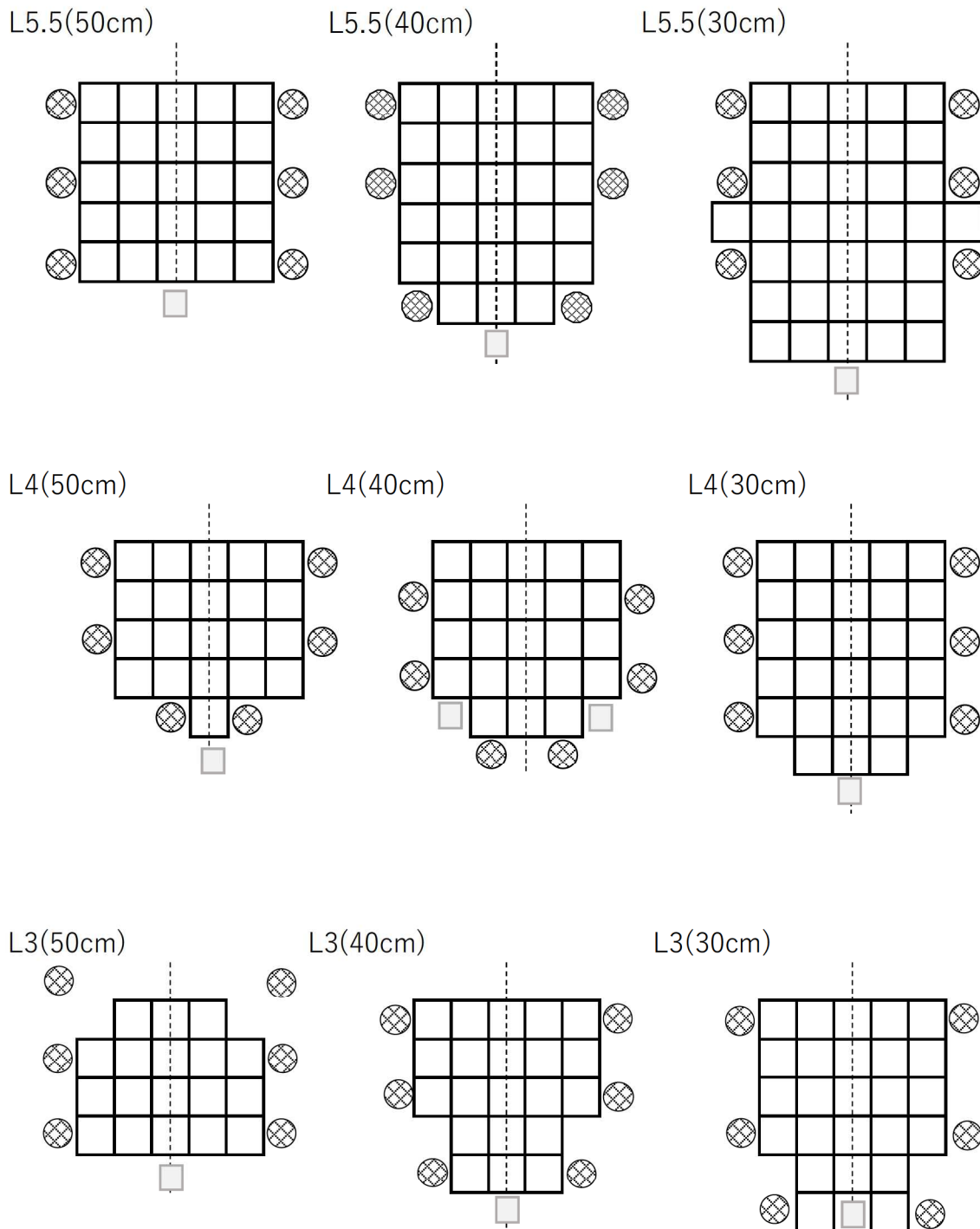


図1 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)

■: 反応度調整用燃料体装荷位置

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

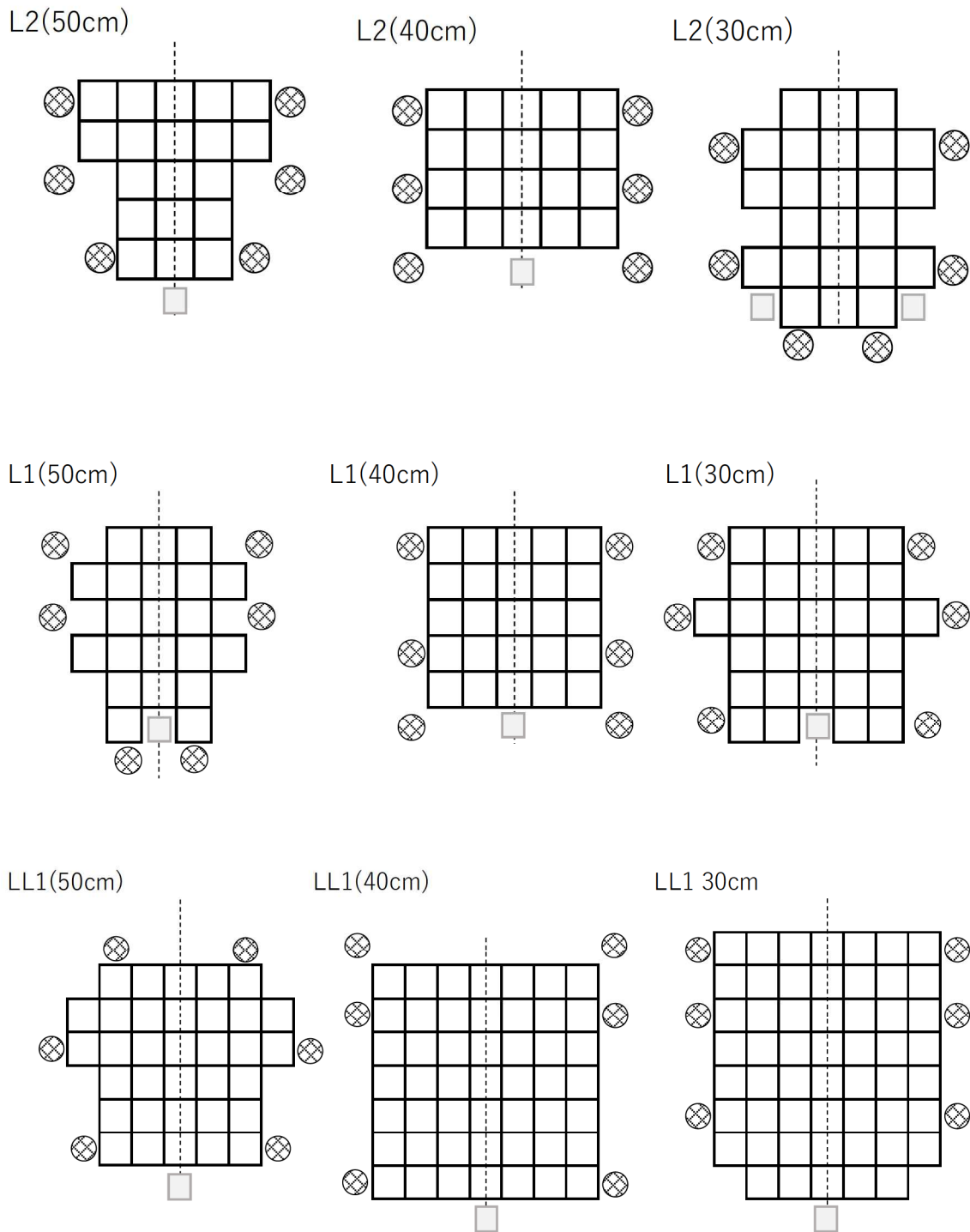


図2 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

■: 反応度調整用燃料体装荷位置

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。

部分長燃料体の装荷位置は図 3 に示す。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核的制限値により

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

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 ρ_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

となるのは炉心の高さ方向中央で、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 ($5/6 \text{ cm/s} = \text{約 } 0.833 \text{ cm/s}$ 以下、実測値は 0.796 cm/s) と定められているので、最大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

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

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、その場合は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 2 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

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

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。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。なお、フィッティングの誤差は図 4 の左図で約±0.03cm (約 0.06%)、右図で±0.02cm (約 0.07%)であり、反応度印加率に及ぼす影響は十分に小さい

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。

「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±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： $1.35 / (1 - 0.18) = 1.646 (\% \Delta k/k)$ 以上であること

制御棒の最大反応度添加率： $0.02 / 1.18 = 0.0169 (\Delta k/k/s)$ 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。

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 2 の割合が 25% を越えて核的制限値に近くなる厳しい炉心について補足 1 で考察しており、その結果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 $1/3$ 以下であることを確認した。

3. 設置変更申請で規定する炉心構成の設定についての一部変更について

前回の「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、設置変更申請で規定する固体減速炉心の炉心構成の設定について以下のよう

4) 燃料集合体中の燃料領域の高さは 30cm 以上、50cm 以下とする。

しかし今回の代表炉心の解析において、この高さの範囲の上限と下限から外れる炉心で解析を行ったケースがあったので、この代表炉心が設置変更申請で規定する炉心高さの範囲をカバーするために上記 4) の設定を以下のように変更したい。

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。

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 ¹⁾	H/ ²³⁵ U (-)	炉心高 (cm)	ρ 調整用 燃料長 (cm) ⁴⁾	反射体 節約 (cm)	全反応度 (% Δ k/k)	最大反応度 (% Δ k/k) (割合%) ²⁾	最大反応度 添加率 ³⁾ (% Δ k/k/s)
<u>L5.5P-50</u>	372	50.9	12.1	5.7	1.71	0.47 (<u>28</u>)	0.0126
<u>L5.5P-40</u>		41.8	21.6	5.8	1.98	0.43 (22)	0.0136
<u>L5.5P-30</u>		30.8	20.5	5.9	1.68	0.40 (24)	0.0157
L4P-50	270	49.7	11.2	6.0	3.17	0.58 (18)	0.0157
<u>L4P-40</u>		39.5	<u>5.5</u>	6.1	2.22	0.45 (20)	0.0145
<u>L4P-30</u>		30.7	24.0	6.2	1.94	0.40 (20)	0.0153
<u>L3P-50</u>	203	51.4	5.9	6.1	1.86	0.52 (<u>28</u>)	0.0136
<u>L3P-40</u>		39.8	13.2	6.2	2.52	0.48 (19)	0.0155
<u>L3P-30</u>		30.5	9.8	6.2	1.65	0.37 (22)	0.0143
<u>L2P-50</u>	135	48.1	12.0	6.2	2.35	0.59 (<u>25</u>)	0.0158
L2P-40		39.0	5.0	6.9	1.75	0.43 (<u>25</u>)	0.0136
<u>L2P-30</u>		30.7	<u>8.1</u>	6.9	2.10	0.38 (18)	0.0141
<u>L1P-50</u>	68	47.7	19.7	7.9	2.04	0.44 (22)	0.0115
<u>L1P-40</u>		38.2	6.3	8.5	1.96	0.49 (<u>25</u>)	0.0149
L1P-30		29.2	7.7	9.0	2.00	0.39 (20)	0.0139
LL1P-50	34	49.7	11.7	10.7	4.01	0.65 (16)	0.0154
LL1P-40		38.4	8.7	11.6	1.96	0.58 (<u>29</u>)	0.0157
LL1P-30		30.0	14.5	12.5	2.10	0.51 (24)	0.0154

- 1) 下線は第 331 回審査会合（2020.1.27）の資料から変更した炉心
- 2) 括弧内の数値は全反応度に対する割合(%) 下線を付けた数字は割合が 25%を越えるもので、これらの値については誤差を含めて核的制限値を満足することを検討する（補足 1）
- 3) 炉心中心高さ位置での反応度添加率
- 4) 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。（図 1、図 2 の炉心配置図に記載）

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

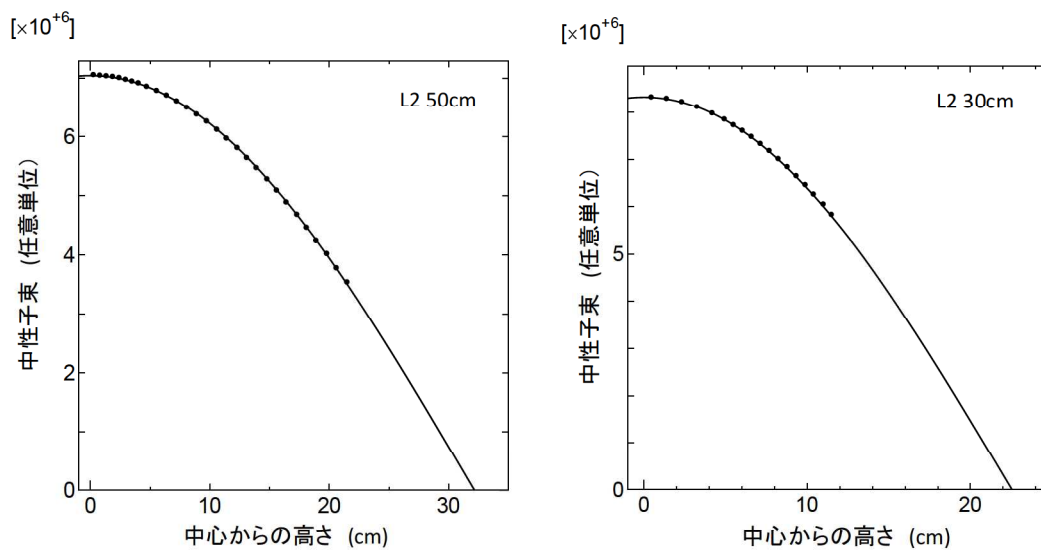


図4 中性子束 (高速エネルギー群)のコサインフィッティング例
(左側 : L2-50cm 炉心、右側 : L2-30cm 炉心)

補足 1

制御棒反応度の最大の 1 本の確認について

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。

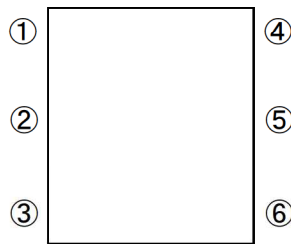


図 補-1 炉心配置 (①～⑥は制御棒)

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

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

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とき f の誤差は以下のように書き表すことができる。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

$$(df)^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_i} \right)^2 (\delta \rho_i)^2 = r^2 \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_i} \right)^2 \rho_i^2$$

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。

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

表 2 において f の値が大きい場合（制御棒反応度の最大の 1 本が全反応度の 25% を越えるもの）について df の値を評価した。

結果を表補-1 に示す。この結果に示した全ての炉心について、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 は誤差を含めても核的制限値の 1/3 (約 33.3%) 以下となっている。

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

炉心	C 1 (%Δk/k)	C 2 (%Δk/k)	C 3 (%Δk/k)	Total (%Δk/k)	比率 f (%)
L5.5 (50cm)	0.189	0.468	0.196	1.705	27.5±2.7
L3 (50cm)	0.013	0.519	0.398	1.860	27.9±3.1
L2 (40cm)	0.430	0.424	0.019	1.745	24.6±3.2
L2 (50cm)	0.384	0.204	0.587	2.349	25.0±4.6
L1 (40cm)	0.482	0.494	0.003	1.958	25.2±3.2
LL1 (40cm)	0.066	0.575	0.337	1.957	29.4±2.9

補足 2

反応度調整用燃料体を 2 体利用した場合の制御棒反応度

反応度調整用の燃料体は 1 体または 2 体使用するとしている。

図 1、図 2 のほとんどの炉心についてはこの反応度調整用制御棒は 1 体のみ使用していたが、2 体使用した場合の反応度について確認した。

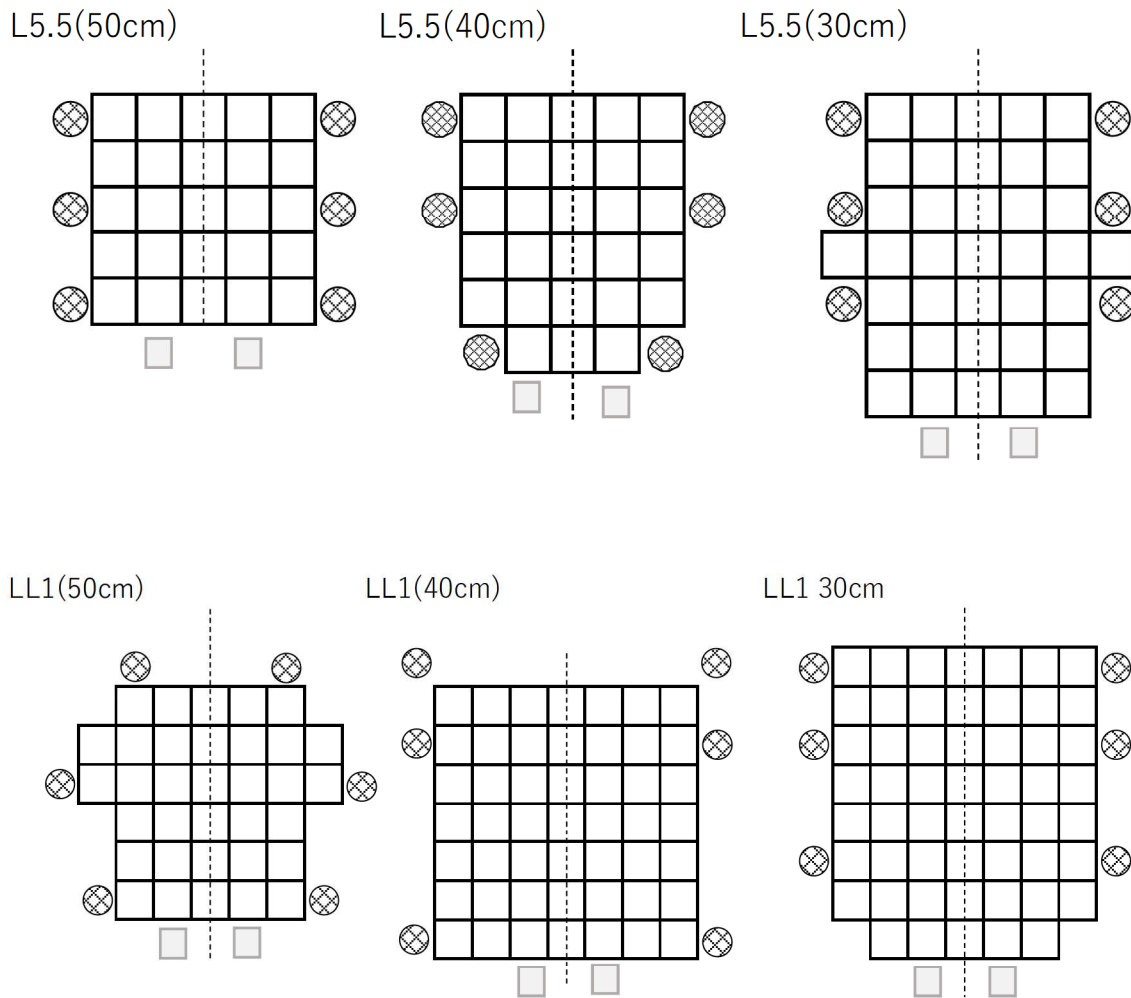
ここで取り上げた炉心は H/U-235 の最も大きな L5.5 炉心と最も小さな LL1 炉心であり、2 体の調整用燃料体の装荷位置を図補-2 に示す。

結果を表補-2 に示す。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% Δk/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といえる。

表補-2 制御棒反応度値(反応度調整用燃料体数の変更)

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)	1 体使用			2 体使用		
		ρ 調整 用燃料 長 (cm)	全反応度 (% Δk/k)	最大反応 度 (% Δk/k)	ρ 調整 用燃料長 (cm)	全反応度 (% Δk/k)	最大反応度 (% Δk/k)
L5.5P-50	372	12.1	1.71	0.47	7.1	1.70	0.47
L5.5P-40		21.6	1.98	0.43	12.0	2.00	0.43
L5.5P-30		20.5	1.68	0.40	10.9	1.68	0.40
LL1P-50	34	11.7	4.01	0.65	5.9	4.02	0.65
LL1P-40		8.7	1.96	0.58	3.8	1.96	0.58
LL1P-30		14.5	2.10	0.51	8.7	2.10	0.51

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」



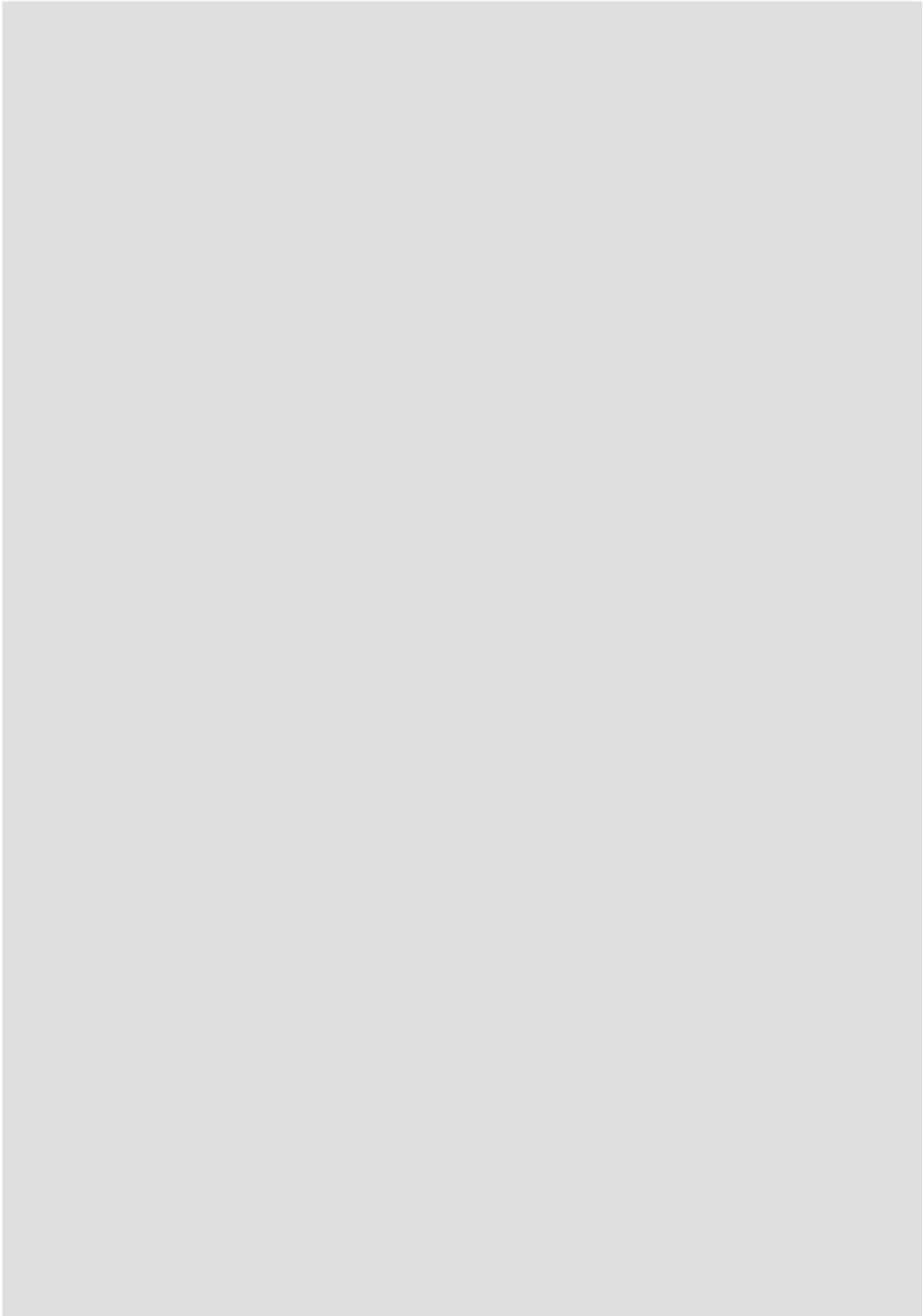
図補一2 炉心配置図

■: 反応度調整用燃料体装荷位置

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

補足3

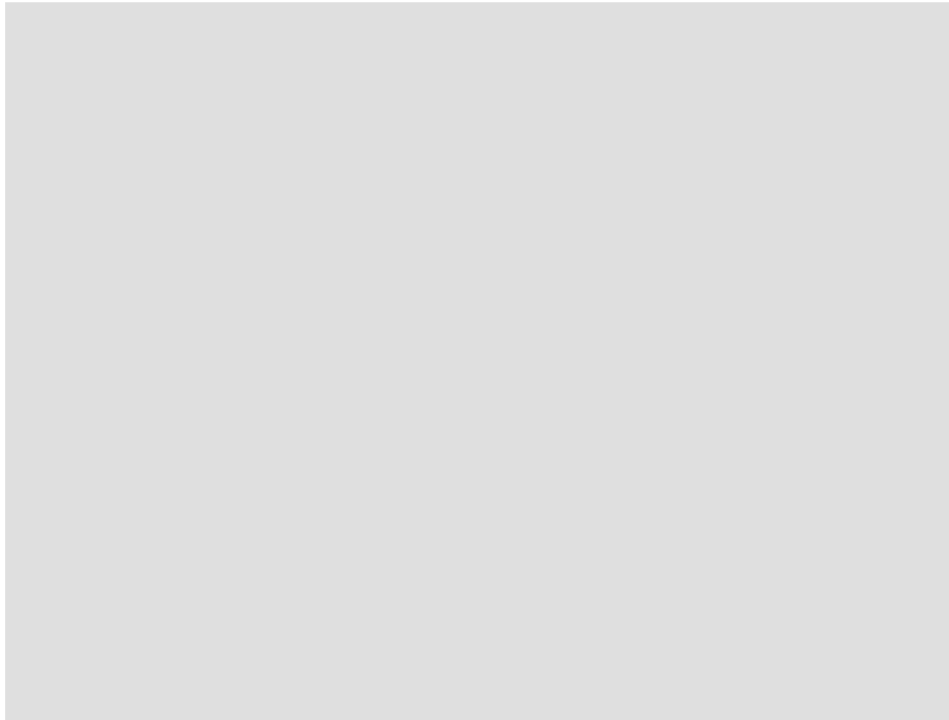
低濃縮炉心の燃料板の仕様



「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表補-4 固体減速炉心用燃料角板 被覆材 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
Al	6.00385E-02



補足 4

解析を行うパラメータについて

前回の「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）において、「解析を行う炉心の各種パラメータについて」を説明した。その各種パラメータの計算方法、確認・利用箇所等についてまとめたものを表補-6 に示す。

表補-6 解析パラメータについて

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

- 1) 解析方法 : SA は SRAC コードシステム、MO はモンテカルロ計算コード (MCNP 等)
- 2) 核的制限値 : ○は核的制限値に該当、一は該当しない (添付 8 にて確認する)
- 3) 結果 : ○は今回の審査会合資料で結果提示、△は次回以降の審査会合にて提示、×は該当しない
- 4) 添付 10 : 「利用予定無」は添付 10 ではこのパラメータは利用しない (今後変更の可能性あり)、×は明らかに利用予定無し