

2020年2月17日

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

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

0.はじめに

前回の「第 331 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 1 月 27 日)において、今回の KUCA 設置変更申請で規定する炉心とそれに対する添付 8 で取り上げる代表炉心の選定方法、さらにその解析の進め方について整理するようにとのご指摘を頂いた。

本審査会合においてはそのご指摘に対する回答を以下のような順番で説明する

- (1) 設置変更申請で規定する炉心構成の設定について
- (2) 解析を行う炉心の各種パラメータについて
- (3) 代表炉心の選定について
- (4) 解析を行う核計算手法の妥当性の確認方法について
- (5) 代表炉心の計算の妥当性について
- (6) 炉心の安全性評価について

なお、これらの回答に加えて、(4) 核計算の妥当性の確認方法について具体的に例を挙げて説明する。

1. 設置変更申請で規定する炉心構成の設定について

1.1 はじめに

今回の設置変更申請書において、低濃縮ウラン（以下、LEU）を使用する炉心に対する申請時の減速材対燃料比の制限値（H/U-235 が 400 以下）、燃料装荷量の制限値（固体減速炉心について [] [] [] []、軽水減速炉心は [] []）に加えて、構成することができる炉心について制限を加える。

1.2 固体減速炉心

1.2.1 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。
- 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。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

- 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。
- 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。

表 1 固体減速炉心で構成することができる炉心（燃料セルパターン）

炉心名称	H/ ²³⁵ U (-)
L5.5	372
L5	338
L4.5	304
L4	270
L3.5	236
L3	203
L2.5	169
L2	135
L1.5	101
L1	68
L0.5	34
LL1	34

L は低濃縮燃料板（約 2.3 mm 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）

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）

1.2.2 炉心構成の妥当性

上記の制限を加えた炉心についての妥当性を検討する。

- ・ 1) の制限を加えた炉心については、表 1 に示すとおり H/U-235 の制限値を満足している。また、これまでの解析によりこれらの炉心はすべて燃料装荷量の制限値を満足している。
- ・ 2) の 3) の 1 種類の燃料セルの単一炉心の制限により単純な炉心構成のみを取り扱うこととなる。
- ・ 4) の高さ方向の炉心長を制限することにより、制御棒反応度の極端に大きいまたは小さい炉心を避けることができる。なお、現在 KUCA で組んでいる高濃縮ウラン(以下、HEU)炉心は高さが約 40cm±5cm くらいの炉心が多いため、LEU 炉心での実験を行う上での大きな制約とはならない。
- ・ 5) の反応度調整用の短尺の燃料体を使用することは、過剰反応度の核的制限値を満足するような炉心を構成するためには不可欠である。反応度調整を 1 体のみで行うことが多いが、炉心に対称性を維持しながら反応度を調整するために 2 体を用いることもあるので 2 体以内と制限した。制御棒に隣接して配置しないようにするのは、制御棒校正曲線の形状に影響を及ぼすことを避けるためである。(これまでの HEU 炉心でもこのような炉心構成方法を行ってきた)
- ・ 6) 7) のポリエチレン反射体厚さ(燃料の周囲のポリエチレン 3 層で約 15cm)は無制限反射体厚さ以上の厚さを確保することでその反射体の外側の炉心配置に関する制限を加えないようにするためである。(これまでの HEU 炉心でもこのような炉心構成方法を行ってきた)
- ・ 8) および 9) の制限により、単純な炉心構成のみを取り扱うこととなる。

以上より、今回の炉心構成の制限の設定方法は妥当であると考えられる。

1.3 軽水減速炉心

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

1.3.2 炉心構成の妥当性

上記の制限を加えた炉心についての妥当性を検討する。

- ・ 1) の制限を加えた炉心については、H/U-235の制限値を満足している。また、これまでの解析によりこれらの炉心はすべて燃料装荷量の制限値を満足している。なおこれらの炉心を構成する燃料フレームについては全て既存のものである。
- ・ 2) および5) の制限により、単純な炉心構成のみを取り扱うこととなる。
- ・ 3) の制限により2分割炉心についても単純な炉心構成のみを取り扱うこととなる。
- ・ 過剰反応度の核的制限値を満足するような炉心を構成するためには各列の燃料板枚数を同じとすることはできないが、4) のような制限を加えることでできるだけ直方体に近い形状とすることができる。

以上より、今回の炉心構成の制限の設定方法は妥当であると考えられる。

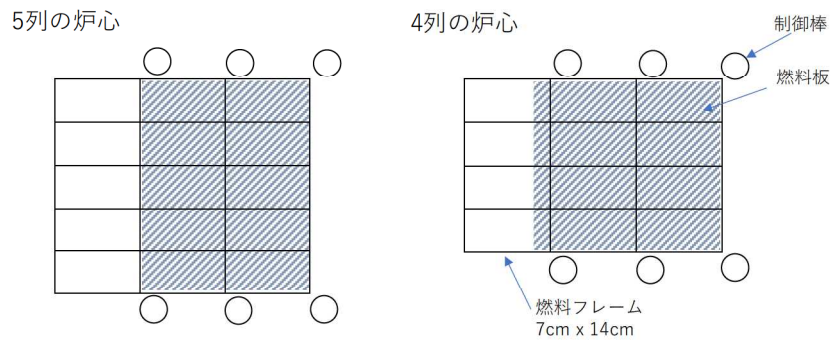


図1 軽水減速炉心の配置図 (4列と5列の炉心)

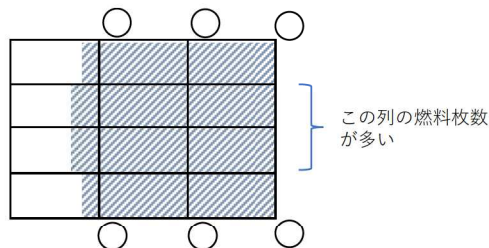


図2 反応度調整のための燃料装荷例

2. 解析を行う炉心の各種パラメータについて

添付 8 で解析を行う炉心については以下のようなパラメータについて解析を行う。

下記の検討のために、添付 10 の「運転時の異常な変化のうちの原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」の過渡解析結果について、幾つかのパラメータ (ℓ 、 β_{eff} 、 β_{eff}/ℓ 、臨界量) と積算出力、1.2W を越えるまでの時間、燃料最高温度の関係を図 3 及び図 4 に示す (図 3、4 は「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 年 12 月 23 日) の資料に記載の図から黒鉛、トリウムを用いた炉心 (体系の大きな炉心) の結果を除いたものである。)

1) 臨界量 (U-235 重量)

全ての代表炉心について臨界 ($k_{\text{eff}}=1$) となる炉心の解析を行い、U-235 重量が制限値以下であることを確認する。図 4 (d) に示すように臨界量が小さい炉心ほど過渡解析において燃料の温度上昇量が大きくなることが考えられるため、臨界量の小さな炉心の解析に注意する。

2) 温度係数

全ての代表炉心について温度係数の解析を行い、核的制限値 ($2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^{\circ}\text{C}$ 以下) であることを確認する。温度上昇について、固体減速炉心については燃料板のみの温度上昇、燃料板と減速材板の両方の温度上昇による反応度を比較して、温度係数が大きくなる可能性のある場合の解析を行う。軽水減速炉心については燃料板のみの温度上昇、燃料板と軽水減速材・反射材の両方の温度上昇による反応度を比較して、温度係数が大きくなる可能性のある場合の解析を行う。温度係数が正になる炉心についてはその解析に注意する。解析を行う炉心は 1) と同じとする。

3) ボイド反応度係数

軽水減速炉心の全ての代表炉心についてボイド反応度係数の解析を行う。ボイドは燃料板間にのみ発生するものとする。

4) 実効遅発中性子割合 (β_{eff})

過渡解析の結果に影響を及ぼす値であるため全ての代表炉心について解析を行う。図 3 (a) に示すように積算出力は β_{eff} の値に対して明らかに比例しているため β_{eff} が大きな炉心の解析に注意する。この理由は、 β_{eff} の値が大きくなると同じ反応度等価量に対してドル単位の反応度は小さくなり、出力がスクラム設定点まで達するまでの時間が図 3 (d) に示すように長くなり、そのために積算出力が大きくなっていると考えられる。解析を行う炉心は 1) と同じとする。

5) 中性子平均寿命 (ℓ)

過渡解析の結果に影響を及ぼす値であるため全ての代表炉心について解析を行う。
図 3 (b) に示すようにばらつきはあるものの積算出力は ℓ の値に対して反比例している
と思われるので、 ℓ の小さな値の炉心の解析に注意する。解析を行う炉心は 1) と同じ
とする。

6) 即発中性子減衰定数 ($\beta_{\text{eff}} / \ell$)

4) と 5) を通じて全ての代表炉心について解析を行う。

7) 全制御棒反応度

全ての代表炉心において全制御棒(6本)の反応度の解析を行い、核的制限値(1% $\Delta k/k$
+過剰反応度、以下)であることを確認する。解析を行う炉心は最大過剰反応度(固体
減速炉心は 0.35% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心は 0.5% $\Delta k/k$)とする。この炉心は臨界となる炉
心に短尺燃料体を 1 体追加して構成する。

8) 最大反応度を持つ制御棒反応度

全ての代表炉心において最大反応度を持つ 1 本の制御棒の反応度の解析を行い、核
的制限値(全制御棒反応度の 1/3 以下)であることを確認する。解析を行う炉心は 7)
と同じとする。

9) 反応度添加率

全ての代表炉心において最大反応度を持つ 1 本の制御棒の反応度添加率の解析を行
い、核的制限値(臨界近傍において 0.02% $\Delta k/k/s$ 以下)であることを確認する。解析
を行う炉心は 7) と同じとする。

1 0) 固体減速炉心の中心架台反応度

固体減速炉心の炉心高さが 30cm の代表炉心において中心架台反応度(中心架台が
取り除かれたときの反応度)の解析を行い、核的制限値(1% $\Delta k/k$ 以上)であることを
確認する。中心架台反応度は炉心の燃料体数が多くなるほど燃料 1 体が抜けたときの
反応度が小さくなるので燃料体数が多い炉心高さ 30cm の炉心を取り上げる。中心架
台の大きさは A 架台が 3×3 の 9 体、B 架台が 5×5 の 25 体であるので、厳しい条件
である A 架台の 3×3 を念頭に置いて計算を行う。計算として解析を行う炉心は 1) と
同じとする。

1 1) 軽水減速炉心のダンプ排水反応度

軽水減速炉心の最もスペクトルが柔らかい C60 炉心においてダンプ排水反応度(軽

水減速材が抜けたときの反応度)の解析を行い、核的制限値 ($1\% \Delta k/k$ 以上)であることを確認する。炉心の反射体が抜けたときのスペクトルが柔らかい炉心のほうがスペクトルの硬い炉心に比べて小さいので C60 炉心を取り上げる。解析を行う炉心は 1)と同じとする。

1 2) 中性子束分布

制御棒の微分反応度を求めるために反射体節約の値を用いており、そのために炉心内の中性子束分布の解析を行う。解析を行う炉心は 7)と同じとする。なお、中性子束分布は炉心内の出力ピーキングの位置を確認するためにも用いる。

上記の 1)、2)、7)～11)の解析結果により炉心の核的制限値を満足していることを確認することができる(解析で確認すべき核的制限値はこれで全て)。

添付 10 の過渡解析を行うためには、臨界量、実効遅発中性子割合 (β_{eff})、中性子平均寿命 (ℓ)、温度係数が必要であり、上記の 1)、2)、4)、5)の解析によりこれらのパラメータを求めることができる。

以上より上記の 1)～11)の解析を行うことは核的制限値の確認、および添付 10 の解析を行う上で十分であり、これらの解析パラメータの選定は妥当であると考えられる。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

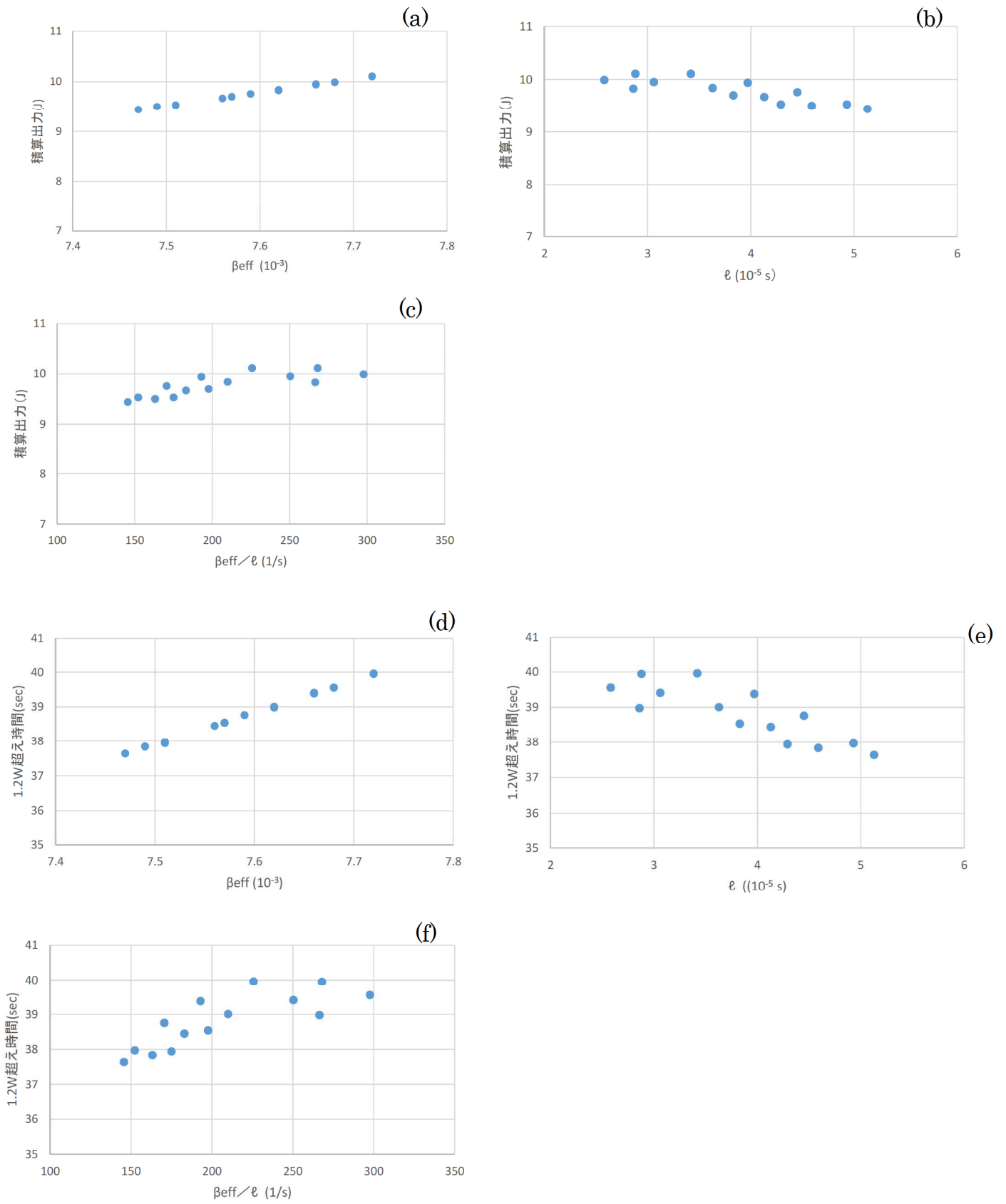


図3 l 、 β_{eff} 、 β_{eff}/l 、臨界量と積算出力、1.2Wを越えるまでの時間の関係

「グレーのマスクング範囲は不表示情報」

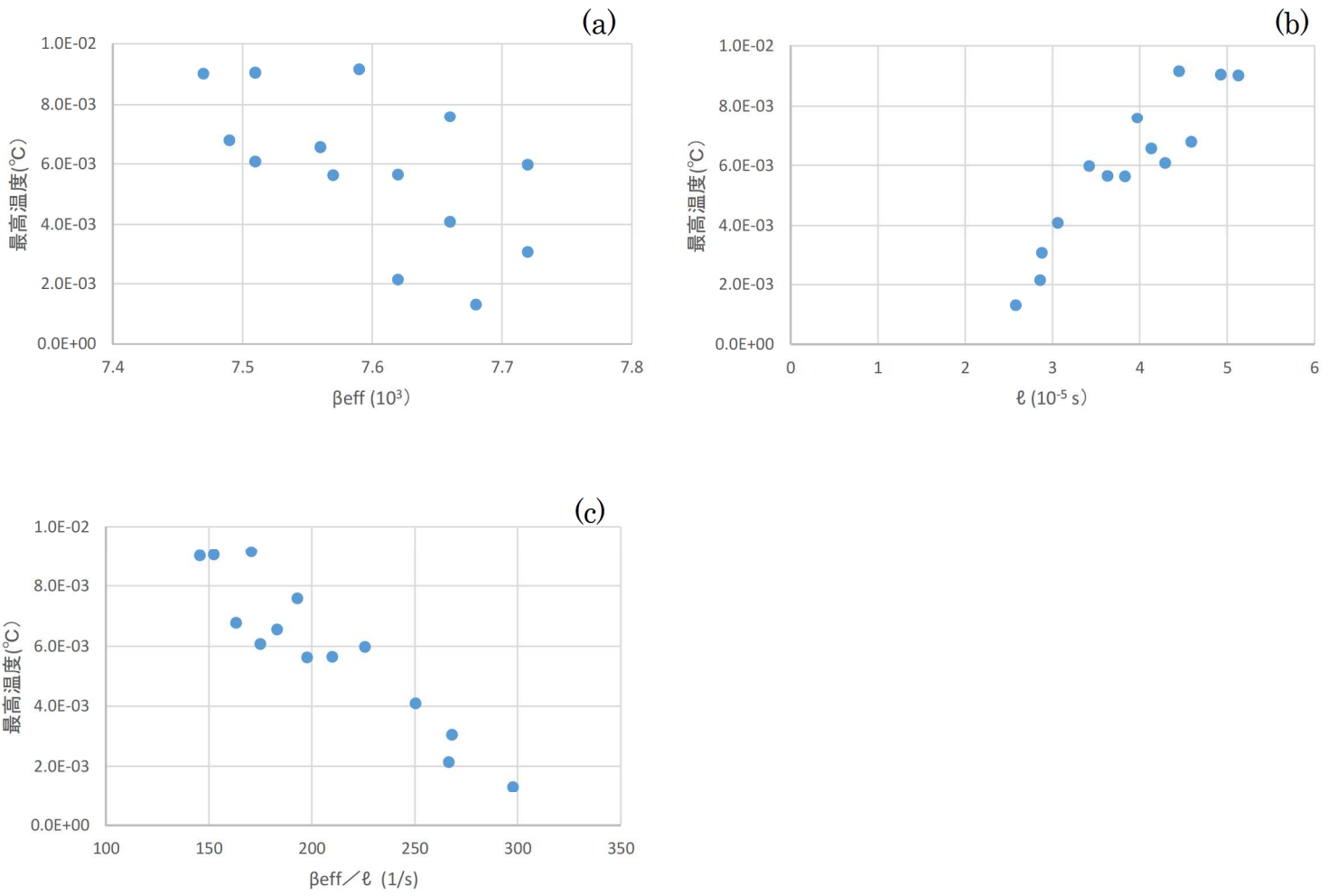


図4 l 、 β_{eff} 、 β_{eff}/l 、臨界量と最高温度の関係

3. 代表炉心の選定

3.1 固体減速炉心

3.1.1 代表炉心

1 で制限した固体減速炉心の炉心構成に対して、代表炉心を以下のように選定する。

- 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 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。

3.1.2 代表炉心の選定についての考察

・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 3.1.1 で選定した代表炉心を図 5 に示す。炉心高さの制限は 30cm～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。ま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ることは妥当であると考えられる。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これまでの解析により判っているが、もし代表炉心の解析においてこれらのパラメータが炉心高さにより大きく変化する場合には、違う高さの炉心を代表炉心に加える。

・図 6 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。1.2.1 で制限した 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 5、6 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

変化、 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。もし代表炉心の解析において動特性パラメータ等の値が燃料セルの違いにより大きく変化する場合には、違う燃料セルの炉心を代表炉心に加える。

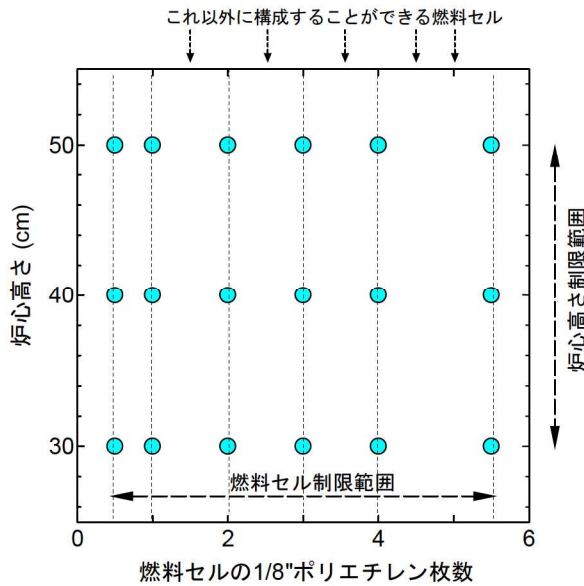


図5 炉心構成範囲と代表炉心
（青丸が代表炉心）
横軸は燃料板1枚当たりの枚数

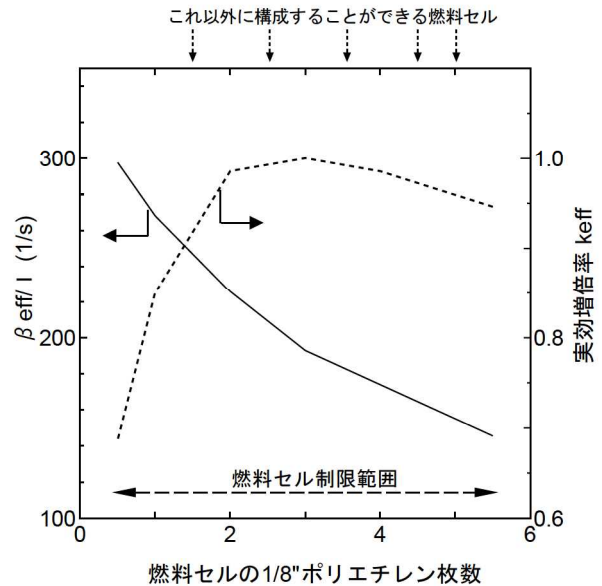


図6 各燃料セルの β_{eff}/l (実線)と k_{eff} (点線)
横軸は燃料板1枚当たりの枚数

3.2 軽水減速炉心

3.2.1 代表炉心

1で制限した軽水減速炉心の炉心構成に対して、代表炉心を以下のように選定する。

- 1) C30、C35、C45、C60 炉心で燃料体の配置は4列、5列とする。
- 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。

3.2.2 代表炉心の選定についての考察

- ・ 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、もし代表炉心の解析において動特性パラメータ (β_{eff} , l) や温度係数が分割幅により大きく変化する場合、または極大値や極小値を取る可能性がある場合、解析結果がより厳しくなる可能性がある場合、さらに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。

以上、3.1.2 および 3.2.2 の考察によりここで取り上げる代表炉心の選定方法は適切であると考えられる。

4. 核計算の妥当性について

4.1. 核計算の方法について

臨界量、各種反応度係数、動特性パラメータ、反応度の解析は SRAC コードシステムを使用する。

- (1) 核定数は JENDL4.0 に基づくものを用いるが、 β_{eff} と ℓ の比較検討のために代表的な炉心(特に中性子スペクトルの観点から)については ENDF/B-VII、JEF-3.0 等の核定数を使用する。
- (2) 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する(軽水減速炉心では図 7 の Primary Cell)。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(図 7 の Secondary Cell)、20 群に縮約する。
- (3) (2) 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。
- (4) 燃料集合体の本数、配置、高さを調整して臨界となる体系を決め、臨界量を求める。
- (5) 各種反応度は、炉心計算の実効増倍率の差から算出する。
- (6) 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。反応度の解析を行う。
- (7) SRAC コードシステムを用いた計算に加えて、幾つかの炉心(中性子スペクトルの異なる炉心)について臨界量、制御棒反応度、中心架台反応の計算をモンテカルロ計算コード MCNP を用いて行う。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

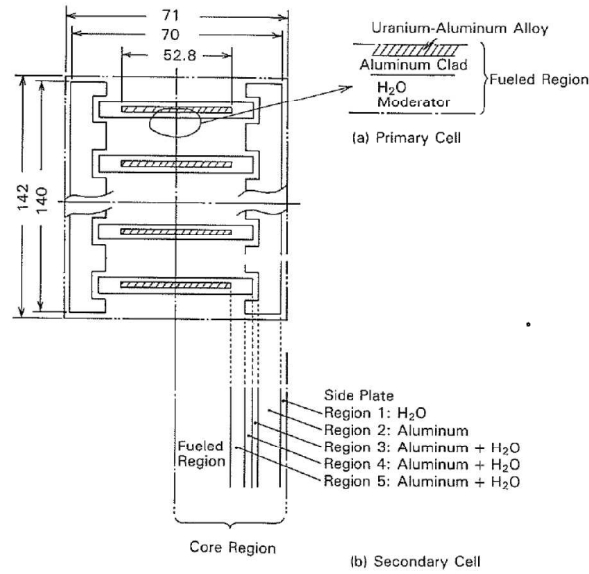


図7 軽水減速炉心の燃料体の断面図

この計算手法の妥当性については既存の HEU を用いた固体減速炉心、および軽水減速炉心について、LEU 炉心の解析に用いるものと同じ方法で行った実効増倍率と制御棒反応度の解析結果を実験結果と比較して検討する。また (7) のモンテカルロ計算コードとの比較を行うことで SRAC コードシステムを用いた計算のモデル化の妥当性について確認する。

その結果から本解析手法の精度（誤差）を推定し、その誤差を考慮した上で代表炉心の核的制限値の評価を行う。

5. 代表炉心の計算の妥当性について

代表炉心の計算の妥当性については実験値がないため評価を行うことは難しいが、SRACコードシステムの計算モデルの妥当性については、一部の炉心(中性子スペクトルが大きく異なる炉心)の実効増倍率、制御棒反応度、中心架台反応度の解析をモンテカルロ計算コードMCNPを用いて行うことで確認する。

6. 炉心の安全性評価について

4の解析を通じて、核的制限値については解析の誤差を推定し、代表炉心についてはその誤差を考慮した上で核的制限値をすべて満足していることを確認することを行う。

この確認により 1.2.1(固体減速炉心)と 1.3.1(軽水減速炉心)で限定した範囲の炉心について核的制限値を全て満足する炉心を構成することが可能であると結論づけることができる。

核計算の妥当性の確認について

1. 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以下のような手法で行った。

- (1) 核定数は JENDL4.0 に基づくものを用いる。
- (2) 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。
- (3) (2) 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。
- (4) 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。

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 によるエネルギー20 群 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。

1. 1 固体減速炉心について

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 1)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。

実効増倍率はペリオド法により、また制御棒反応度は落下法(積分法)で測定したものである。

実効増倍率の実験値と計算値の結果を表 1 に示す。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。

制御棒の反応度値(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 2 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 A3/8” P36EU 炉心の実験値との比較により算出した。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%dk/k+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%dk/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。

1. 2 軽水減速炉心について

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2）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3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4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。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。

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4～6に示す。実験では水温を変更して過剰反応度、または未臨界度をペリオド法（一部、中性子源増倍法）で測定し、2つの温度における過剰反応度の差から温度係数を求めた。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。なお、添付10の解析においては出力の上昇が厳しくなる正の反応度を持つ炉心については核的制限値の最大値（ $2 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^{\circ}C$ ）を用いて解析を行うことにしているので、各炉心の温度係数が誤差を考慮して $1.36 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/^{\circ}C$ 以下であることを確認することになる。

1. 3 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、実効増倍率の解析精度は±0.6%以内、制御棒反応度の解析精度は±18%以内であると考えられる。

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

表1 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
B1/8” P80EU (E1 炉心)	106	1.00060 ±0.00001	1.00051	1.000
B2/8” P48EU (E2 炉心)	212	1.00207 ±0.00002	0.99860	0.997
B3/8” P36EU (E3 炉心)	319	1.00313 ±0.00003	1.00089	0.998
A2/8” P36EU-NU-EU (ENE2 炉心)	92	1.00168 ±0.00001	0.99932	0.998
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

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 2 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

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

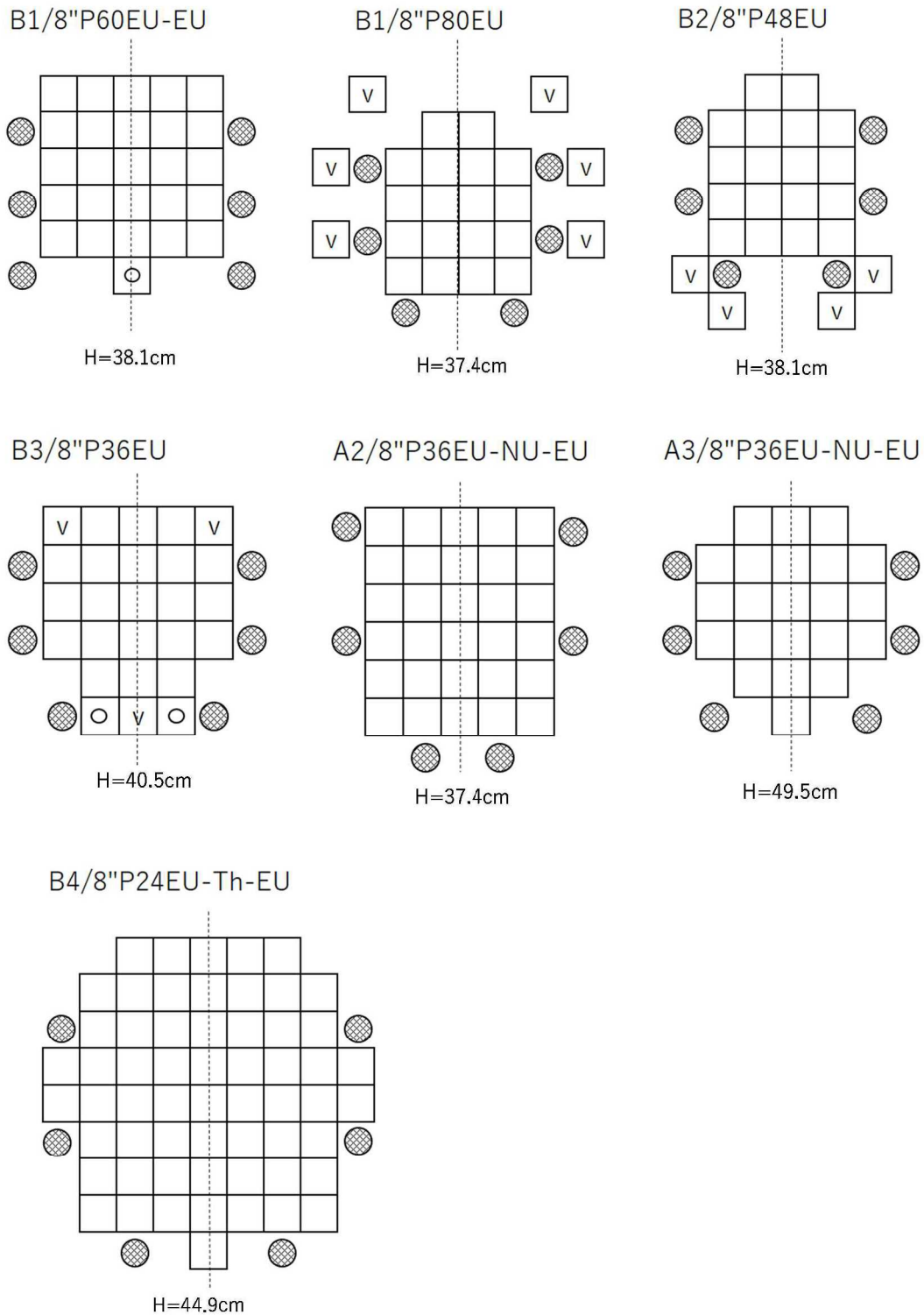


図1 炉心配置図 (固体減速炉心)
(V:空鞘管、○:穴あきポリエチレン)

表 3 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 4 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

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

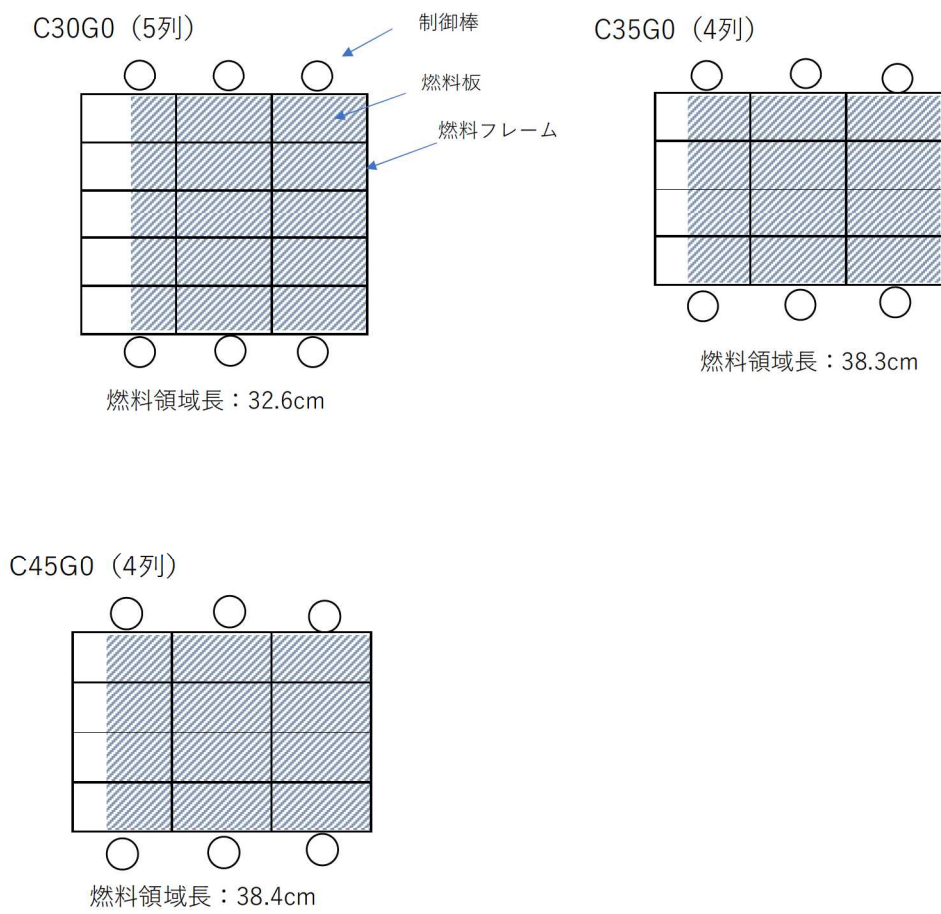


図2 炉心配置図（軽水減速炉心）
(燃料フレームの網掛けした箇所に燃料板を挿入している
サイズは 14.2cm×7.1cm)

表 4 温度係数 (C35G0 (3 列炉心) の解析

温度 (°C)	温度係数 ¹⁾ (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 ¹⁾ (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 5 温度係数 (C35G0 (5 列炉心) の解析

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

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 6 温度係数 (C45G0 (5 列炉心) の解析

温度 (°C)	温度係数 ¹⁾ (実験値) ($10^{-5} \Delta k/k/^\circ\text{C}$)	温度係数 ¹⁾ (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

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」