

2020年11月18日
京大 KUCA ヒアリング資料

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

【質問管理表-1】

燃料温度の算出方法の中で求めたピーキング係数 3.8 は保守的であるが、炉心毎に保守性が変わり、温度上昇の炉心の大小が変わると考えられる。添付八で評価した δ (ノミナル値) を用いた値について説明すること。

【質問管理表-2】

提示された方法では炉心寸法は影響しないが、保守性をとらずに評価する場合の各炉心の a, b の値について数値を示すこと。

【質問管理表-3】

燃料温度の算出方法における式 (E-2) の導出について、詳細に説明してください。

炉心の燃料領域を直方体 ($-a/2 \leq x \leq a/2$ 、 $-b/2 \leq y \leq b/2$ 、 $-c/2 \leq z \leq c/2$)、反射体節約を d としたとき炉心内の中性子束分布は以下のように書くことができるとする。

$$\phi(x, y, z) = \cos\left(\frac{\pi}{a+2d}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b+2d}y\right)\cos\left(\frac{\pi}{c+2d}z\right) \quad (1)$$

炉心内の中性子束の平均値は以下のようになる。

$$\bar{\phi} = \frac{\int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-c/2}^{c/2} dz \cos\left(\frac{\pi}{a+2d}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b+2d}y\right)\cos\left(\frac{\pi}{c+2d}z\right)}{\int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-c/2}^{c/2} dz} \quad (2)$$

分子の積分は変数分離して解くことができ、例えば x に関する積分は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi}{a+2d}x\right) dx &= \frac{a+2d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{a+2d}x\right) \right]_{-a/2}^{a/2} = 2 \times \frac{a+2d}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{a+2d} \frac{a}{2}\right) \\ &= 2 \times \frac{a+2d}{\pi} \sin\left\{ \frac{\pi(a+2d)}{2(a+2d)} - \frac{\pi d}{a+2d} \right\} = 2 \times \frac{a+2d}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi d}{a+2d}\right) \\ &= 2 \times \frac{a+2d}{\pi} \cos\left(\frac{\pi d}{a+2d}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

従って式 (3) は以下のようになる。

$$\begin{aligned}\bar{\phi} &= \frac{8}{\pi^3} \frac{(a+2d)(b+2d)(c+2d)}{abc} \cos\left(\frac{d\pi}{a+2d}\right) \cos\left(\frac{d\pi}{b+2d}\right) \cos\left(\frac{d\pi}{c+2d}\right) \\ &= \frac{8}{\pi^3} \phi_0\end{aligned}\tag{4}$$

$$\phi_0 \equiv \frac{(a+2d)(b+2d)(c+2d)}{abc} \cos\left(\frac{d\pi}{a+2d}\right) \cos\left(\frac{d\pi}{b+2d}\right) \cos\left(\frac{d\pi}{c+2d}\right)$$

(1)式の中性子束は $x=y=z=0$ のとき最大値 1 となるので、平均値に対して (4) 式の逆数を掛ければ最大値が求められることになる。

ϕ_0 の値は d の値の増加に対して必ずしも単調増加にはならないが、11月5日の審査会合資料で示したとおり、各炉心長 ($a/2$ 、 b 、 c の値) が 15cm 以上であれば d の値に対して単調増加になり、 d の値をゼロとしたときが最も安全側の評価(温度が高くなる方向)となる。

【質問管理表-5】

燃料板内の出力分布の考慮について、固体減速炉心は 1.09 倍、LL1 炉心は 1.23 倍としているが、L1 炉心は 1.09~1.23 の範囲にあると考えられる。減速毎に求めてスペクトルの影響について説明すること

各セルの燃料ミート部の中性子束分布の平均値と最大値の比を表 1 に示す。燃料板内での中性子束の歪みは燃料板の厚さに依存するため、L1 炉心での Flux 比は L5.5、L2 炉心とほとんど変わらない。燃料板を 2 枚重ねて使用した LL1 では 1.23 と例外的に大きな値となる。

燃料の最高温度を評価する際には安全側に評価するために表 1 の Flux 比に基づく値、すなわち固体減速炉心では安全側に 1.1 倍、軽水減速炉心では 1.01 倍の値とする。ただし LL1 炉心については 1.23 倍とする。

表 1 燃料板ミート部の Flux 比

| | 炉心名称 | Flux 比 |
|--------|---------|--------|
| 固体減速炉心 | L5.5 炉心 | 1.09 |
| | L2 炉心 | 1.09 |
| | L1 炉心 | 1.10 |
| | LL1 炉心 | 1.23 |
| 軽水減速炉心 | C30 炉心 | 1.01 |
| | C60 炉心 | 1.01 |

Flux 比 : (中性子束最大値) ÷ (中性子束平均値)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

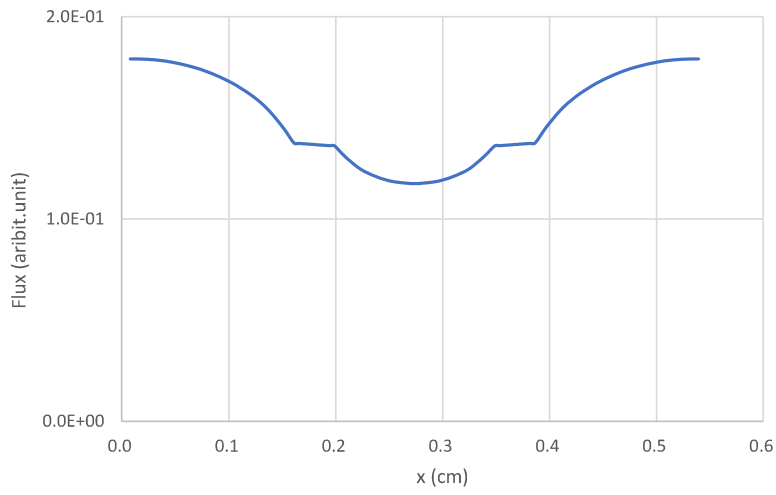


図 1 L1 セル (燃料 1 枚 + 1/8" × 1 枚ポリエチレン) 熱中性子束分布

【質問管理表－8】

パルス中性子発生装置については、実際の中性子強度について説明すること。

【質問管理表－13】

パルス中性子発生装置については、測定値などのエビデンスを示し、現在の強度範囲について説明すること。

現在設置している FFAg 加速器から KUCA に入射される陽子はエネルギー100MeV で最大電流値 1nA であることが RI 申請書に記載されている。中性子発生量は図 1 に示すようにターゲットの材質と入射陽子のエネルギーに依存し、ターゲットの材質として鉛またはタンタルを用いたときの中性子発生量は約 0.4 個/陽子となる。(中性子発生設備のターゲットの材質としてはタングステンを用いているが、タングステンとタンタルは原子番号と密度ともに近いいため陽子 1 個当たりの中性子発生量はあまり変化しないと考えられる)

この数値を用いると陽子電流が 1 nA のときの中性子発生量は以下ようになる。

$$\frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \times 10^{-9} \times 0.4 = 2.5 \times 10^9 \text{ (neutron/sec)}$$

実際の運転での中性子発生量は以下のように見積もっている。

- ① ターゲット前面に In 箔を貼り付け、閾値反応である $^{115}\text{In}(n,n')$ $^{115\text{m}}\text{In}$ 反応の反応率から中性子発生量を求める。
- ② In 照射時の炉室遮蔽壁上の中性子モニタ(図 2 に示す 2 台)の指示値を確認する。
- ③ ①と②から中性子モニタの指示値の平均値と中性子発生量の関係を求める。
- ④ 運転時の中性子モニタの指示値と③の換算係数から中性子発生量を求める。
- ⑤ 運転時の陽子ビーム電流をモニタして中性子発生量を変更する。

上記の③の換算係数は中性子発生設備を設置したときの使用前検査時(2009年3月)に求めている。昨年の実験時(2019年10月)にこの方法により求めた中性子発生量は最大で 2.1×10^9 (n/sec)であった。

コッククロフトウォルトン型加速器を用いたパルス状中性子発生装置については、設置当時の RI 申請書には最大加速電圧 300kV、最大波頭電流 10mA と記載されている。1982年に放射化法により測定した中性子発生量と電流値との関係は 7.5×10^{10} (n/sec/mA)であった。実際に導入した加速器のカタログ性能としては最大波頭電流 5mA、パルス発生時の

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

duty 比は 1% であるので、最大電流の時の中性子発生量は

$$7.5 \times 10^{10} \times 5\text{mA} \times 0.01 = 3.75 \times 10^9 \text{ (n/sec)}$$

となる。ここ 10 年くらいは加速器の性能低下のため最大波頭電流は 0.5mA 以下であったので、中性子発生量はこの値より 1 桁以上小さな値で実験を行っていた。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

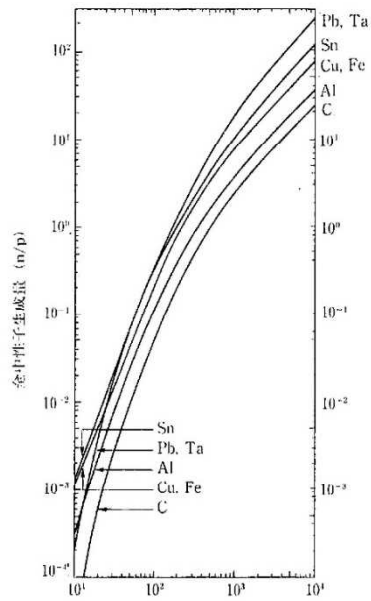


図1 陽子エネルギーと中性子発生量

(中村尚司、「放射線物理と加速器安全の工学[第2版]」、地人書館
(~~~~))

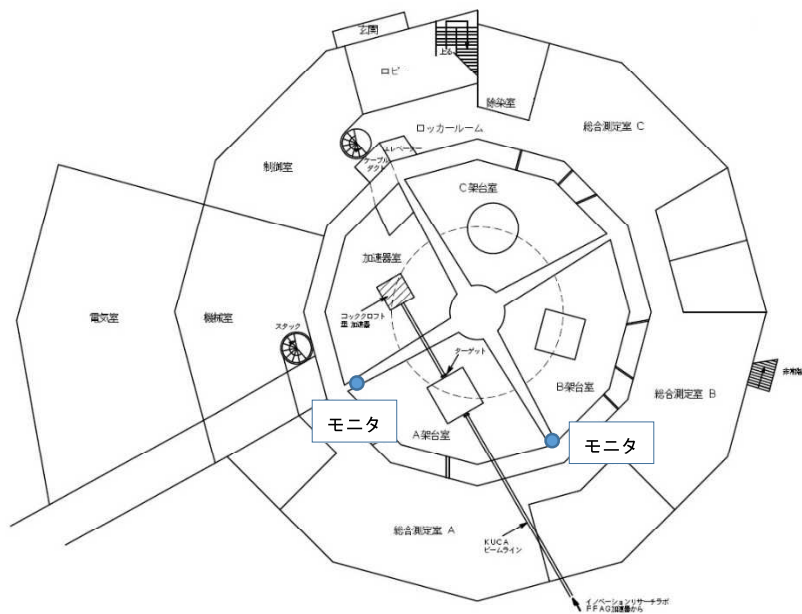


図2 中性子モニタ (青丸) の配置位置

「グレーのマスクング範囲は不公開情報」

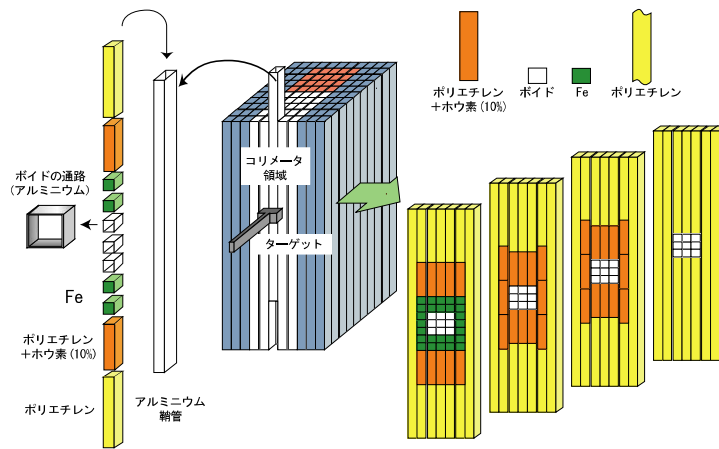


図 2 加速器からの中性子を導入するための反射体コリメータ

2) 中性子発生設備について

図3に炉心配置例を示す。ターゲットは「い-15」の外側に設置されており、この炉心の場合ターゲットから最も近い燃料体までは9体分(5.53cm×9=49.8cm)だけ離れている。パルス状中性子発生装置利用の場合と同様に中心架台近傍に炉心を配置しなければいけないため、これ以上炉心をターゲットに近づけて構成することはできない。

ターゲットと燃料領域の距離を30cm、コリメータの大きさを15×15cmであるとし、中性子がすべて前方に発生するとするとターゲットから燃料領域に供給される中性子量は以下ようになる。(パルス中性子の最大発生量を申請書記載の10¹¹(n/sec)とする)

$$\frac{10^{11}}{2\pi \times 30^2} \times 15^2 = 4.0 \times 10^9 \quad (\text{個/sec})$$

添付10の解析では1)のケースより大きいこの値を用い行う。

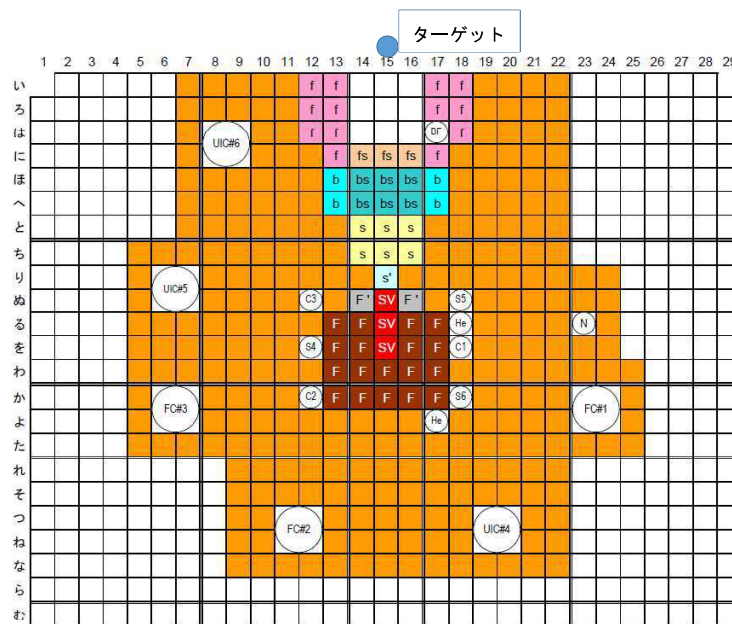


図3 中性子発生設備を用いた実験の炉心配置図

【質問管理表-10】

ポリエチレン板、アルミさや管まで含めた場合の温度上昇について詳細に説明すること。

固体減速炉心において出力 100W で 1 時間連続運転した際の温度上昇を求める。

固体減速炉心の燃料集合体は、燃料板とポリエチレン板を重ねてアルミニウム製のさや管に挿入している。燃料集合体の概略を図 1 に、その水平断面を図 2 に示す。図面上では燃料板等とさや管との間には平均 0.25mm ((51.3-50.8) ÷ 2) の隙間があるが、実際にはほとんど接した状態になっている。固体減速炉心の L5.5 炉心の燃料板 1 枚当たりの体積、熱容量等を表 1 に示す。

(燃料 $U_3Si_2 + Al$ 被覆)、(燃料 $U_3Si_2 + Al$ 被覆 + 燃料板間軽水)、(燃料 $U_3Si_2 + Al$ 被覆 + 燃料板間軽水 + アルミフレーム) の各ケースについてすべて同じ温度となった場合の温度上昇量を表 2 に示す。

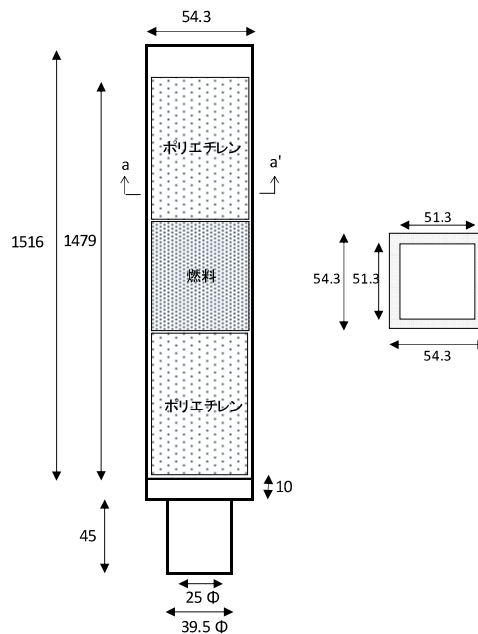


図 1 固体減速炉心の燃料集合体の概略図 (数値の単位は mm)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

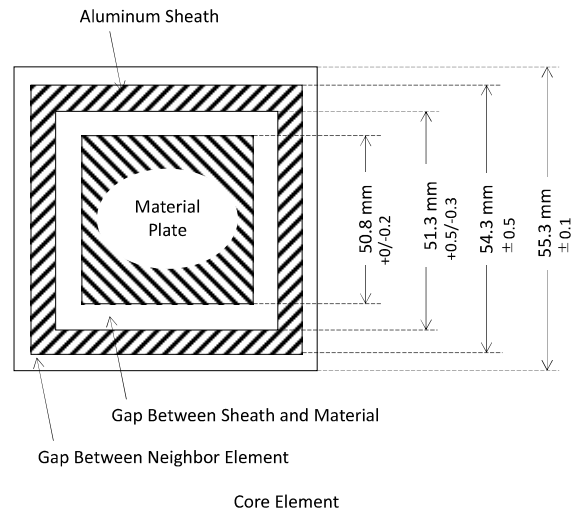


図 2 固体減速炉心の燃料要素の水平断面図

表 1 LL5.5 炉心の燃料板等の熱容量

| | 燃料板 U-7Mo | 燃料板 Al 被覆 | ポリエチレン板 | アルミ さや管 |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 体積 (cm ³) | 3.74 | 2.19 | 45.06 | 6.26 |
| 比熱 (J/cm ³ /K) | 2.50 | 2.49 | 2.20 | 2.49 |
| 熱容量 (J/K) | 9.35×10^0 | 5.47×10^0 | 9.90×10^1 | 1.56×10^1 |

表 2 固体減速炉心の 100W×1 時間運転時の温度上昇 (°C)

| 炉心名称 | 燃料板 枚数 | U-235 (kg) | 温度上昇選択箇所 | | | |
|---------|-----------|---------------|----------|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| | | | 燃料ミート | 燃料ミート+ Al 被覆 | 燃料ミート+ Al 被覆+ポリ エチ | 燃料ミート+ Al 被覆+ポリ エチ+さや管 |
| LL1-30 | 4165 | 15.8 | 9.2 | 5.8 | 2.6 | 0.5 |
| L3-30 | 645 | 2.44 | 59.7 | 37.7 | 8.1 | 2.8 |
| L5.5-30 | 576 | 2.18 | 66.8 | 42.2 | 5.5 | 2.5 |

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

【質問管理表-11】

一点炉動特性方程式の外部ソース項の評価方法について説明すること。

2020年11月11日のヒアリング資料のp12～p13で説明しました。

【質問管理表-11】

1点炉動特性で用いている各パラメータの値について示すこと（代表炉心の事例）。

表 1 に動特性方程式に用いる遅発中性子先行核の崩壊定数と相対収率を示す。
実効遅発中性子割合と中性子平均寿命は各炉心の計算値を用いる。

表 1 動特性方程式に用いる定数⁽¹⁾⁽²⁾

| 群 | パラメータ | |
|---|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | 崩壊定数 λ_i (sec ⁻¹) | 相対収率 ($a_i = \beta_i/\beta$) |
| 1 | 0.0124 | 0.033 |
| 2 | 0.0305 | 0.219 |
| 3 | 0.111 | 0.196 |
| 4 | 0.301 | 0.395 |
| 5 | 1.14 | 0.115 |
| 6 | 3.01 | 0.042 |

$$\beta = \sum \beta_i = 0.640 \times 10^{-2}$$

- (1) G.R.Keepin, "Physics of Nuclear Kinetics," p.86-90, 103-107, 193, 214-215, Addison-Wesley (1965).
- (2) G.R.Keepin, T.F.Wimett and R.K.Zeigler, "Delayed Neutrons from Fissionable Isotopes of Uranium, Plutonium and Thorium," LA-2118, USAEC.