

近畿大学原子炉における  
原子炉停止系制御棒の反応度添加率比について

令和6年1月10日

近畿大学原子力研究所

近畿大学原子炉には、三つの原子炉停止系統制御棒と二つの反応度制御系統制御棒（原子炉停止系統制御棒のうち一つは反応度制御系統制御棒の一つとして共用）を有している。本説明資料においては、原子炉停止系統制御棒の反応度添加率における平均値と最大値との比率等について述べる。

# 1 近畿大学原子炉の制御棒の概要

## 1.1 近畿大学原子炉

近畿大学原子炉は、米国 American Standard 社が製造・販売していた UTR 型原子炉の内の一つである。UTR 型原子炉の販売パンフレット<sup>[1]</sup>によれば、UTR 型原子炉には、UTR-B (B は”basic”より)、UTR-10, UTR-100 の 3 タイプ用意されており、その炉心構成については冷却系統や周辺附属設備の有無以外は、いずれも同様となっている。

近畿大学原子炉は、上記 3 タイプのうち UTR-B 型を購入し設置したものである。

## 1.2 制御棒の構成

UTR 型原子炉の炉心の核物理的な主要構成は、いずれも 2 個の開放型燃料タンク (1 個の燃料タンクにつき 6 体の燃料体を収容可能)、黒鉛反射体及び 4 本の制御棒という構成となっており、その寸法については共通規格となっている。

UTR 型原子炉の制御棒は、2 本の安全棒、1 本のシム安全棒、1 本の調整棒の計 4 本から構成されており、そのうち 2 本の安全棒と 1 本のシム安全棒は原子炉停止系統制御棒として機能する様に設計されている。また、シム安全棒と調整棒は反応度制御系統制御棒として機能する様に設計されている。

これらの制御棒は、設置変更許可申請書<sup>[2]</sup>に記載してある通り、電動機により電磁クラッチと駆動シャフトを介して回転する回転ドラムに固定したステンレス鋼板バネ先端の中性子吸収体により、炉心に対する反応度操作を行っている。

近畿大学原子炉の構造概要を図 1 に、燃料体と制御棒吸収体の位置関係 (上限位置及び下限位置) を図 2 に示す。

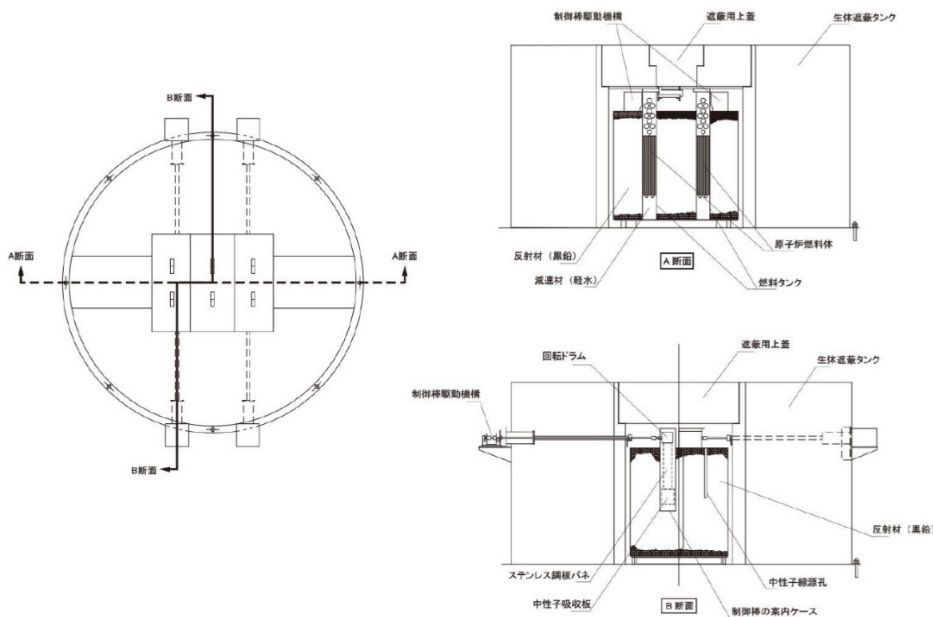


図 1 近畿大学原子炉の構造概要<sup>[2]</sup>

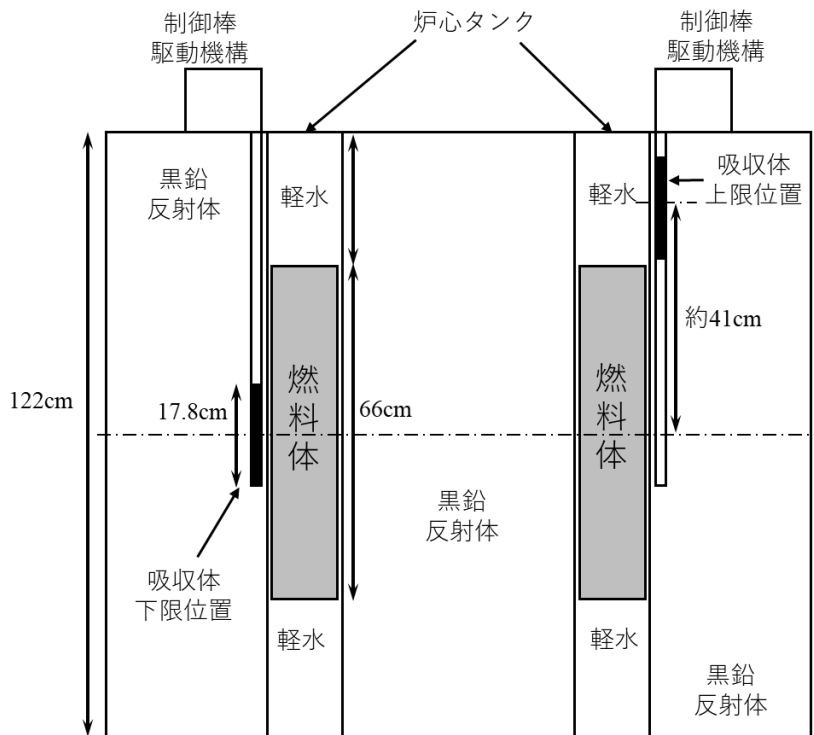


図2 近畿大学原子炉の燃料体と制御棒吸収体の位置関係

### 1.3 UTR 型原子炉における原子炉停止系統制御棒の反応度添加率

UTR 型原子炉における反応度操作は、前述の通り黒鉛反射体内を移動する中性子吸収体により行われている。この中性子吸収体の操作位置変化による原子炉の反応度変化は、その動作範囲内においては一様ではない。このため、制御棒の反応度添加率が制限値を満足するかどうかを確認する際には、原理的にはその都度、操作位置と反応度の関係を調査する必要がある。

一方で、制御棒の反応度値の平均値と微分値の関係が明らかである場合には、その関係性と平均反応度添加率を用いることにより、制御棒がその動作範囲内において反応度添加率の制限値を満足するかどうかを容易に評価・確認することが可能となる。

なお、UTR 型原子炉においては、2本の安全棒とシム安全棒は同規格の中性子吸収体及び駆動機構を用いることとなっているため、シム安全棒に対する評価をもって原子炉停止系統制御棒の反応度添加率評価とすることが出来る。

## 2 近畿大学原子炉における原子炉停止系統制御棒の反応度添加率比

制御棒の反応度添加率が制限値を満足するかどうかを確認する上においては、反応度添加率の最大値が評価対象点として適切である。反応度添加率の平均値と最大値との比率（以下「最大反応度添加率比」という）を算出するためには、対象とする制御棒の全反応度価値及び微分反応度曲線が必要となる。

近畿大学原子炉ではこれまでの実験等において、制御棒の全反応度価値測定や積分反応度曲線の作成がなされている。

近畿大学原子炉の原子炉停止系統制御棒の正味の最大反応度添加率比については、シム安全棒に対する前述データにより算定することが可能であり、当算定について以下に示す。

### 2.1 測定に基づくシム安全棒の反応度添加率

シム安全棒の全反応度価値は、2つの手法により求められる反応度価値の和として算定される。具体的には、制御棒落下法<sup>[3]</sup>により臨界引き抜き位置からの下限位置までの反応度価値を、正ペリオド法<sup>[3]</sup>により臨界引き抜き位置から上限位置までの反応度価値を求めて、合算することでシム安全棒の全反応度価値を算定する。

シム安全棒の積分反応度曲線については、引き抜き 0%から臨界位置までの間を中性子源増倍法<sup>[3]</sup>により、臨界位置から引き抜き 100%までの間を正ペリオド法により、相対的な積分反応度曲線を算定する。

2017年8月1日に測定したシム安全棒の全反応度価値を表1に、引き抜き%に対する相対的な積分反応度を表2に示す。なお、本測定において調整棒は引き抜き 0%（下限）である。

表1 シム安全棒の全反応度価値（2017年8月1日測定）

シム安全棒の全反応度価値 [% $\Delta k/k$ ]	0.553
-----------------------------------	-------

表2 シム安全棒の引き抜き位置に対する積分反応度 (2017年8月1日測定)

シム安全棒引き抜き位置 [%]	積分反応度値 [%Δk/k]	相対的な積分反応度値 [全反応度値を1として規格化]
0	0.000	0.000
10	0.006	0.011
20	0.041	0.075
30	0.087	0.158
40	0.160	0.290
50	0.241	0.435
60	0.326	0.590
70	0.410	0.741
77	0.457	0.827
80	0.474	0.858
85	0.500	0.905
90	0.523	0.945
95	0.540	0.976
100	0.553	1.000

表2で示した積分反応度を5次で近似した曲線が以下の通りとなる。

$$\sigma(x) = (1.3706 \cdot 10^{-10})x^5 - (3.5867 \cdot 10^{-8})x^4 + (2.1894 \cdot 10^{-6})x^3 + (5.5972 \cdot 10^{-5})x^2 + (2.0164 \cdot 10^{-4})x - 6.8605 \cdot 10^{-4}$$

$\sigma(x)$ : 積分反応度値[%Δk/k]  
 $x$ : シム安全棒の引き抜き位置[%]

これより、微分反応度曲線は上式のxに対する微分で求められる。この微分反応度曲線を図3に示す。

$$\frac{d\sigma(x)}{dx} = (6.8530 \cdot 10^{-10})x^4 - (1.4347 \cdot 10^{-7})x^3 + (6.5682 \cdot 10^{-6})x^2 + (1.1194 \cdot 10^{-4})x + 2.0164 \cdot 10^{-4}$$

$\frac{d\sigma(x)}{dx}$ : 微分反応度値[%Δk/k/% withdrawn]  
 $x$ : シム安全棒の引き抜き位置[%]

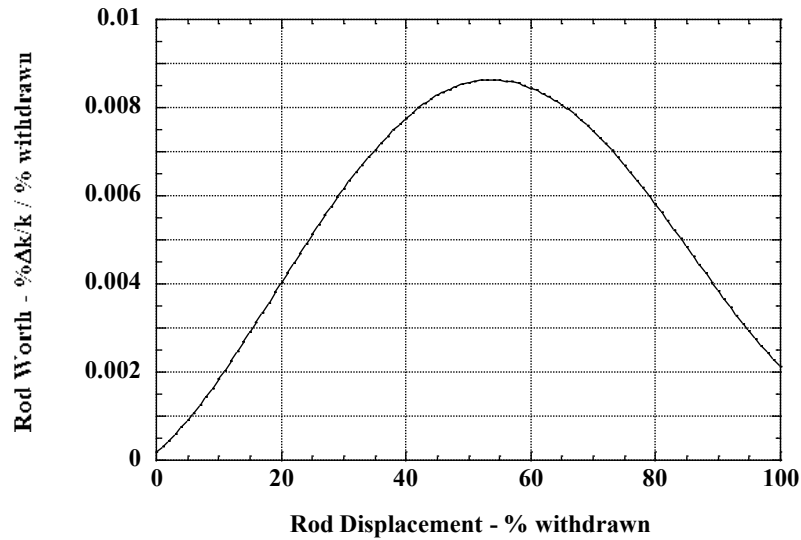


図3 近畿大学原子炉におけるシム安全棒の微分反応度曲線

## 2.2 近畿大学原子炉におけるシム安全棒の反応度添加率

微分反応曲線の最大値は0.009 [%Δk/k/引抜%]を下回っているが、保守的に評価を行う事を目的として、最大反応度添加率として0.009を採用することとする。

また、平均反応度添加率については、以下の式を用いて算出する。

$$\text{平均反応度添加率} [\% \Delta k / k / \text{引抜}\%] = \frac{\text{全反応度価値} [\% \Delta k / k]}{100 [\%]}$$

近畿大学原子炉におけるシム安全棒の平均反応度添加率と最大反応度添加率を表3に示す。

表3 近畿大学原子炉における平均反応度添加率と最大反応度添加率

平均反応度添加率 [% Δk/k/引抜%]	最大反応度添加率 [% Δk/k/引抜%]
0.00553	0.009

反応度添加率比は以下の式で求められ、表3の値より1.627を得ることができる。

$$\text{反応度添加率比} = \frac{\text{最大反応度添加率} [\% \Delta k / k / \text{引抜}\%]}{\text{平均反応度添加率} [\% \Delta k / k / \text{引抜}\%]}$$

### 3 近畿大学原子炉の原子炉停止系統制御棒の反応度添加率比

実測値からの算出により、近畿大学原子炉におけるシム安全棒の反応度添加率比として 1.627 が得られたが、保守的にこれを包含する 1.7 を近畿大学原子炉におけるシム安全棒の反応度添加率比として用いる。

#### 参考文献

- [1] “UTR University Teaching and Research Reactor System”, Advanced Technology Laboratories, Division of American-Standard
- [2] “近畿大学原子力研究所 原子炉設置変更許可申請書の本文及び添付書類の一部補正について”、近大原研発第 2056 号、平成 28 年 3 月 30 日（原規規発第 16051112 号、平成 28 年 5 月 11 日により許可）
- [3] “原子炉物理実験”、日本原子力学会臨界実験専門委員会編集、昭和 39 年 1 月 30 日発行