

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5年12月6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^[1]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 体の原子炉燃料体を収容可能)、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^[2]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板により、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について、図 1 に示す。

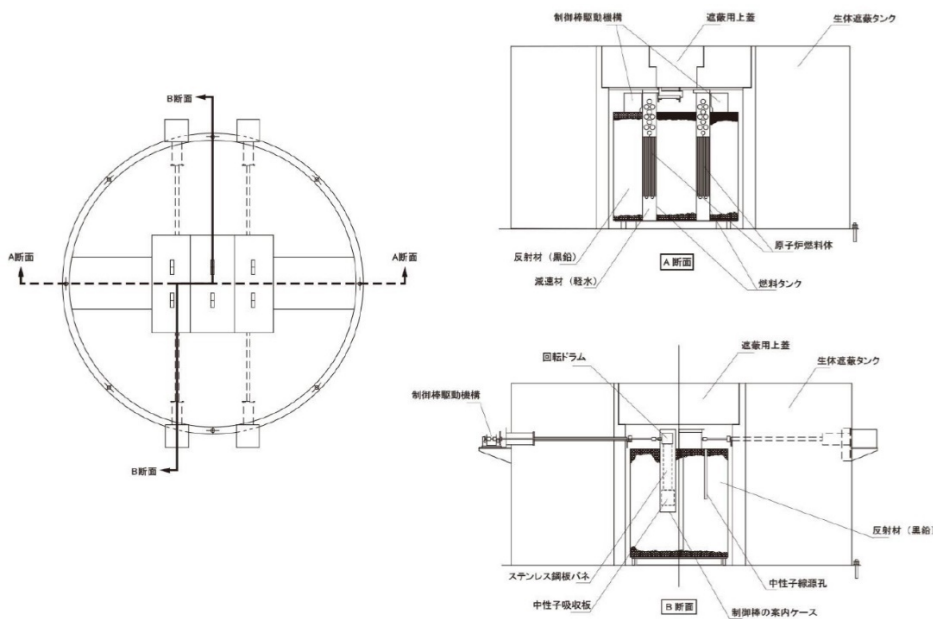


図 1 近畿大学原子炉の構造概要^[2]

2 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板により行われている。この中性子吸収板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。

UTR 型原子炉の内、幾つかのものについては文献^[3]に反応度添加率に関する情報が記載されているため、以下にその内容について示す。

2.1 文献^[3]におけるシム安全棒の反応度添加率

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値及び微分反応度曲線が必要となる。

文献^[3]には、1961 年 1 月 1 日時点で稼働中であった一部の UTR 型原子炉の特性が記載されている。対象の原子炉として、プロトタイプ UTR で American Standard 社内に設置・運転された UTR-1、アイオワ州立大学に設置・運転された UTR-10(ISU)、バージニア工科大学に設置・運転された UTR-10(VPI)、カイロ（エジプト）及びラホール（パキスタン）での展示会で設置・運転された UTR-E2 が挙げられている。

上記 UTR 型原子炉のうち、シム安全棒の全反応度値及び微分反応度曲線の両方が掲載されているものは、UTR-10(ISU)及び UTR-10(VPI)のみである。これらの炉のシム安全棒の全反応度値を表 1 に、UTR-10(ISU)の微分反応度曲線を図 2 に、UTR10(VPI)の微分反応度曲線を図 3 に示す。

表 1 UTR 型原子炉におけるシム安全棒の全反応度値^[3]

原子炉	シム安全棒の反応度値 [% $\Delta k/k$]
UTR-10(ISU)	0.62
UTR-10(VPI)	0.591

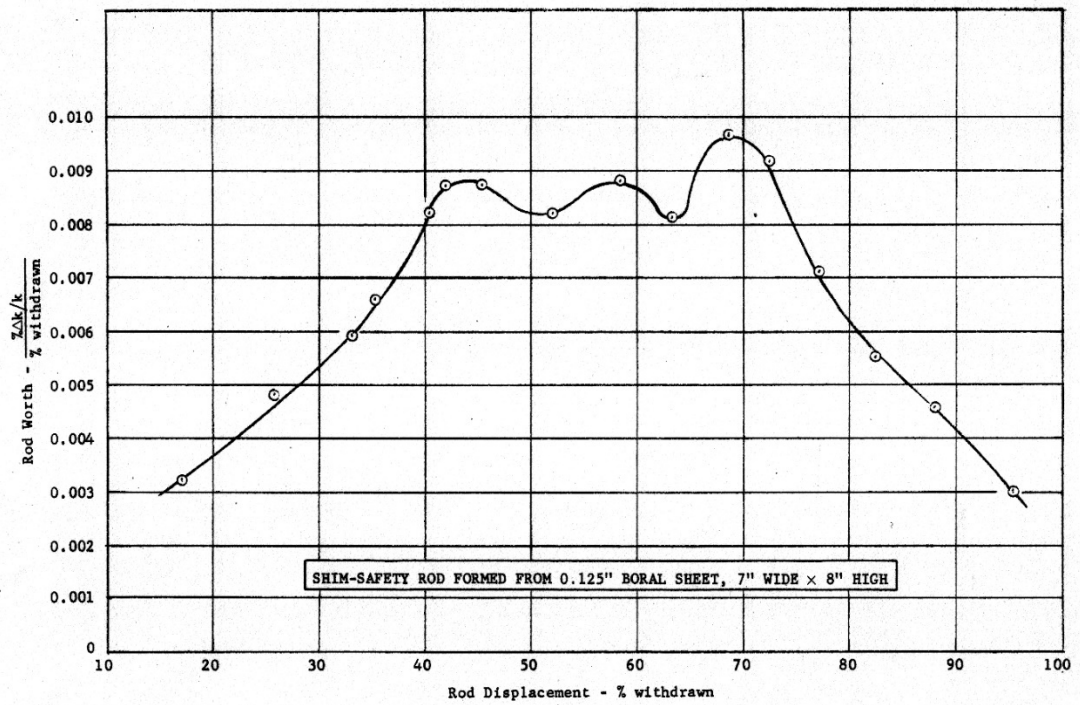


図2 UTR-10(ISU)シム安全棒の微分反応度曲線

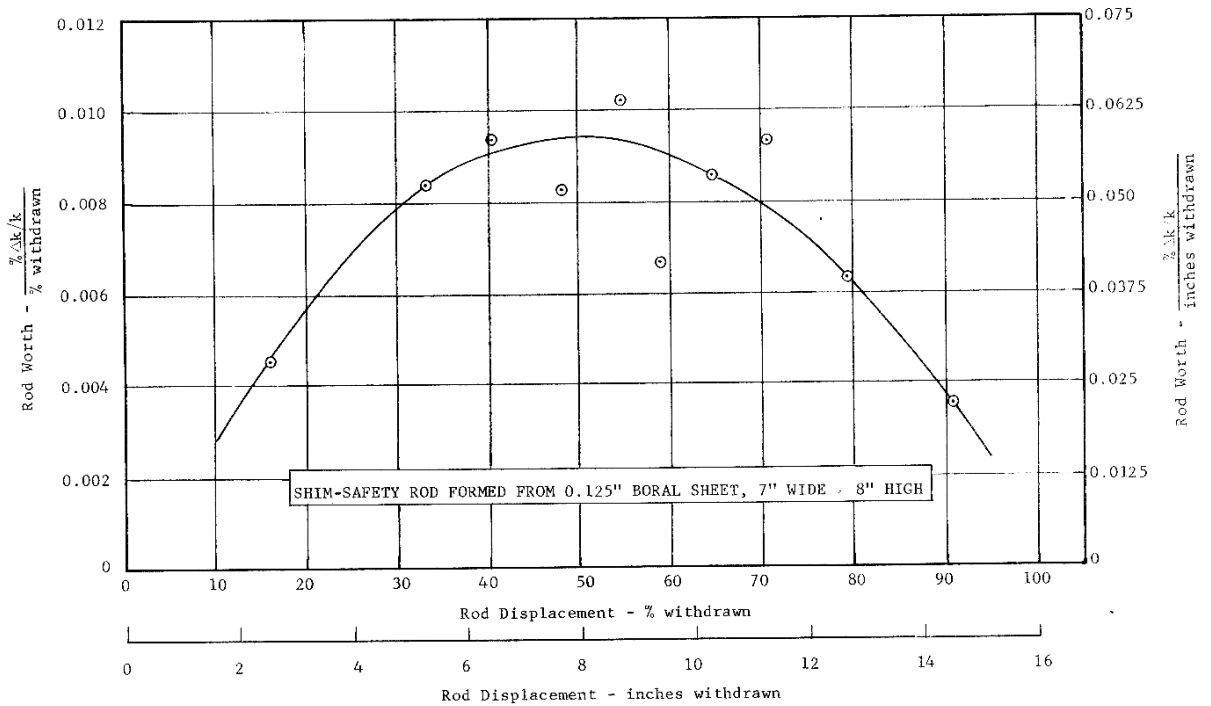


図3 UTR-10(VPI)シム安全棒の微分反応度曲線

2.2 UTR 型原子炉におけるシム安全棒の反応度添加率比

UTR-10(ISU)及び UTR-10(VPI)のいずれにおいても、微分反応曲線の最大値は概ね 0.01 [%Δk/k/引抜%]となっている。このため反応度添加率比の算出においては、最大反応度添加率としてこの値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。

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

UTR-10(ISU)及び UTR-10(VPI)におけるシム安全棒の反応度添加率比を表 2 に示す。

これより、相対的に大きい値である 1.692 (UTR-10(VPI)の値) を包含する 1.7 を原子炉停止系統制御棒の反応度添加率比として用いることが妥当であると考えられる。

表 2 UTR 型原子炉における反応度添加率比

原子炉	平均反応度添加率 [%Δk/k/引抜%]	最大反応度添加率 [%Δk/k/引抜%]	反応度添加率比
UTR-10(ISU)	0.0062	0.01	1.613
UTR-10(VPI)	0.00591	0.01	1.692

3 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

近畿大学原子炉では学生実験等において、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も可能であり、当算定について以下に示す。

3.1 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、落下法^[4]により臨界引き抜き位置からの下限までの反応度価値を、ペリオド法^[4]により臨界引き抜き位置上限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^[4]により、臨界位置から引き抜き 100%までの間を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3に、引き抜き%に対する相対的な積分反応度を表4に示す。

表3 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4 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 [%]	相対的な積分反応度価値 [1で規格化]	積分反応度価値 [% $\Delta k/k$]
0	0.000	0.000
10	0.011	0.006
20	0.075	0.041
30	0.158	0.087
40	0.290	0.160
50	0.435	0.241
60	0.590	0.326
70	0.741	0.410
77	0.827	0.457
80	0.858	0.474
85	0.905	0.500

シム安全棒引き抜き位置 [%]	相対的な積分反応度価値 [1 で規格化]	積分反応度価値 [% Δk/k]
90	0.945	0.523
95	0.976	0.540
100	1.000	0.553

表 4 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。

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

$$\begin{aligned} \sigma(x): & \quad \text{積分反応度価値} [\% \Delta k/k] \\ x: & \quad \text{シム安全棒の引き抜き位置} [\%] \end{aligned}$$

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 4 に示す。

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

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dx}(x): & \quad \text{微分反応度価値} [\% \Delta k/k / \% \text{ withdrawn}] \\ x: & \quad \text{シム安全棒の引き抜き位置} [\%] \end{aligned}$$

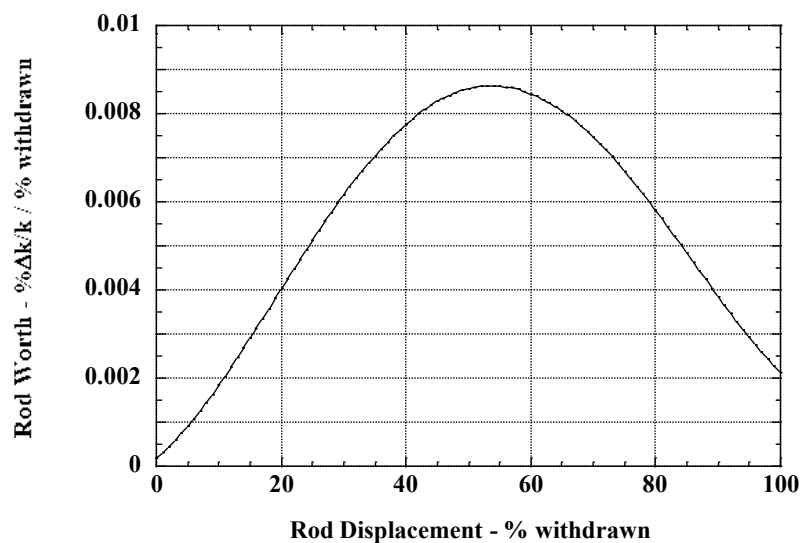


図4 近畿大学原子炉におけるシム安全棒の微分反応度曲線

3.2 近畿大学原子炉におけるシム安全棒の反応度添加率比

微分反応曲線の最大値は概ね 0.009 [%Δk/k/引抜%]以下となっているが、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反応度添加率比を表4に示す。

これより 1.627 を包含する 1.7 を原子炉停止系統制御棒の反応度添加率比として用いることが妥当であると考えられる。

表3 近畿大学原子炉における反応度添加率比

平均反応度添加率 [% Δk/k/引抜%]	最大反応度添加率 [% Δk/k/引抜%]	反応度添加率比
0.00553	0.009	1.627

4 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

文献^[3]および測定からの算出から、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 1.7 を用いる。

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] Summary Report “Measured Nuclear Characteristics of operating UTR Reactors”, 1 January 1961, Advanced Technology Laboratories, Division of American-Standard
- [4] “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