

(3) 近畿大学原子炉の出力過渡特性の測定と評価

福井工業大学工学部
近畿大学原子力研究所

三島 史人、砂川 武義、尾崎 禎彦
橋本 憲吾、佐野 忠史

1. 概要

近畿大学原子力研究所付設原子炉 UTR-KINKI(以下、近大炉と称す)を用いた福井工業大学(以下、本学と称す)原子力技術応用工学科 2、3 年生の学生 8 名が参加して、原子炉の起動・制御などの原子炉運転の実習、および、原子炉の出力過渡特性の測定・評価実験を実施した。実験は、原子炉の異なる出力で各々臨界を達成し、臨界となる制御棒位置が出力に依存しないことの確認と、次に正ペリオド法による制御棒反応度校正実験を実施した。さらに原子炉スクラム停止後の炉出力変化の測定から遅発中性子先行核の確認を実施した。また、出力1W 運転状態での原子炉室の幾つかの代表場所での γ 線、中性子の空間線量率測定も併せて実施した。実験は、令和 2 年 9 月 16 日、17 日の各々で実施した。

2. 原子炉臨界確認実験

所定の原子炉起動手順、運転手順に基づき安全棒(SR)位置を上限に、シム安全棒(SSR)と調整棒(RR)を調整しつつ出力を上昇させていった。その際、出力が約 0.01W、0.1W、1W 各出力での臨界状態達成時の SSR と RR 位置を記録し、表1の結果を得た。表1は、9 月 16 日に測定された結果である。ただし、いずれの場合も SR#1、SR#2 は上限位置としている。

表 1 各出力での臨界状態達成時の制御棒位置(9 月 16 日)

出力	SSR位置	RR位置	ピコアンメータ(A)
≒0.01W	70%	70%	5.8×10^{-10}
≒0.1W	70%	70%	5.3×10^{-9}
≒1W	70%	70%	5.2×10^{-8}

(注)ピコアンメータ校正結果からは、 $5.72 \times 10^{-8} \text{A} = 1.0 \text{W}$ と得られている。

9 月 17 日についても表 1 と同様の結果が得られており、各出力での臨界状態達成時の制御棒(SSR、RR)位置は原子炉出力に依存しないことが確認された。

3. 正ペリオド法による制御棒反応度校正実験

今回は RR を対象に正ペリオド法による反応度校正実験を実施した。原子炉出力をある値で臨界状態に保持後、RR を引き抜き、炉出力が 2 倍となる倍加時間を測定する。測定した倍加時間から、以下の逆時間方程式を用いて反応度値を計算した。

$$\rho = \frac{l_0}{T + l_0} + \frac{T}{T + l_0} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{eff_i}}{1 + \lambda_i T}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} l_0 \quad ; \text{即発中性子平均寿命} \\ \beta_{eff_i}, \lambda_i \quad ; i \text{ 群遅発中性子先行核収率(実効遅発中性子割合)と崩壊定数} \\ T \quad ; \text{ペリオド(炉周期)であり、倍加時間 } T_d \text{ と } T = T_d / 0.693 \text{ の関係} \end{array} \right.$$

ここで、即発中性子寿命 λ_0 は近大炉の公称値 1.5×10^{-4} 秒を用い、 β_{eff} 、 λ_i に対する実効遅発中性子データは同じく近大炉公称値である以下の表 2 の値を用いた。

表 2 近大炉の実効遅発中性子崩壊定数と収率

群(i)	崩壊定数 λ_i [1/s]	先行核収率 β_{eff}
1	1.24×10^{-2}	3.05×10^{-4}
2	3.05×10^{-2}	1.64×10^{-3}
3	1.11×10^{-1}	1.50×10^{-3}
4	3.01×10^{-1}	3.24×10^{-3}
5	1.14	1.02×10^{-3}
6	3.01	2.07×10^{-4}

図1に 9 月 16 日実施の実験結果を示す。実験は原子炉出力 0.01W ((ピコアンメータ= 5.8×10^{-10} A) で臨界を保った後、RR を位置 0% から 100% に引き抜き、10 秒毎の中性子カウントを測定したものである。なお、このとき SR#1,#2 位置は上限、SSR 位置は 91% であった。

次に 9 月 17 日に実施した RR 反応度校正試験は、出力 0.001W であり、RR 位置 0% から 100% への引き抜き、10 秒毎の中性子カウントを測定し、その結果を図 2 に示した。なお、SR#1,#2 位置は上限、SSR 位置は 90% であった。

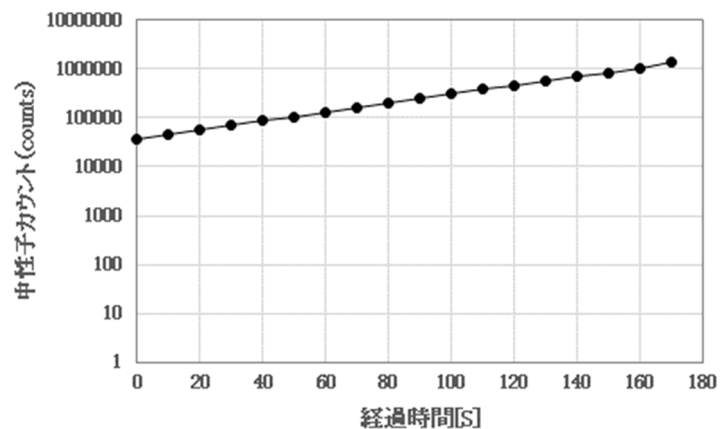


図 1 0.01W 臨界後、RR(0→100%)引き抜き後の出力変化

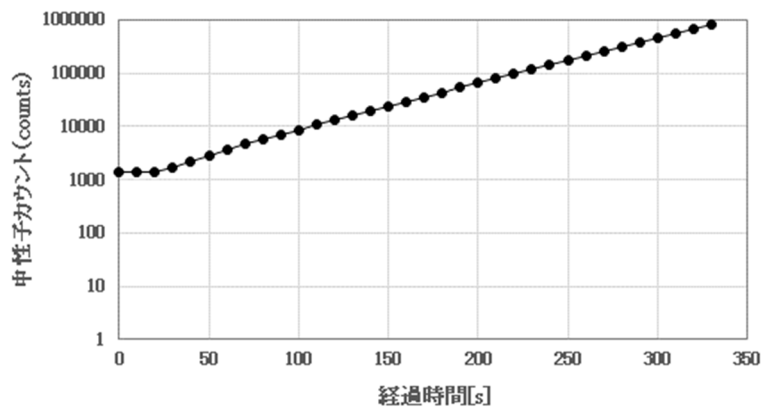


図 2 0.001W 臨界後、RR(0→100%)引き抜き後の出力変化

図 1 の各レンジでの倍加時間の平均値として T_d を求めると、32.3 秒と得られた。この倍加時間 T_d から求められるペリオド T は 46.7 秒となり、上式の逆時間方程式から計算される反応度値は $0.135\% \Delta k/k$ と得られた。これは、近大炉の $RR(0 \rightarrow 100\%)$ における公称値 $0.134\% \Delta k/k^{(*)}$ と比較して、ほぼ一致した妥当な結果といえる。

また、図 2 の各レンジでの倍加時間の平均値として T_d を求めると、33.8 秒と得られ、ペリオド T は 48.8 秒となり、反応度値は $0.131\% \Delta k/k$ と得られた。これも、近大炉の $RR(0 \rightarrow 100\%)$ 公称値 $0.134\% \Delta k/k^{(*)}$ と比較して、ほぼ一致した妥当な結果といえる。

表 3 に示すように、異なる原子炉出力値においても、反応度値は近大炉の $RR(0 \rightarrow 100\%)$ 公称値 $0.134\% \Delta k/k^{(*)}$ に、ほぼ一致していることが確認できた。

表 3 調整棒反応度校正測定結果

出力	RR引き抜き	$T_d(s)$	$T(s)$	$\rho (\% \Delta k/k)$
10mW	RR(0 → 100%)	32.3	46.7	0.135
1mW	RR(0 → 100%)	33.8	48.8	0.131

(*) 鶴田隆雄:原子炉入門 表 14-3, 通商産業研究社, p.148, 2009

4. 遅発中性子先行核確認実験

ここでは原子炉出力1W 臨界後、制御棒によりスクラム停止させた後の出力変化を測定し、特に半減期が 55.6 秒と遅発中性子先行核の中では最も半減期の長い ^{87}Br の存在を実感することを目的としている。9月16日、17日に各々測定し(9月17日の測定結果を図3に示す。)、スクラムから充分時間経過した測定領域(およそ 200 秒以降)の出力変化から半減期を求めたところ、概ね約 50 秒~60 秒という値が得られ、1 群先行核 ^{87}Br の半減期 55.6 秒とほぼ対応するものであった。

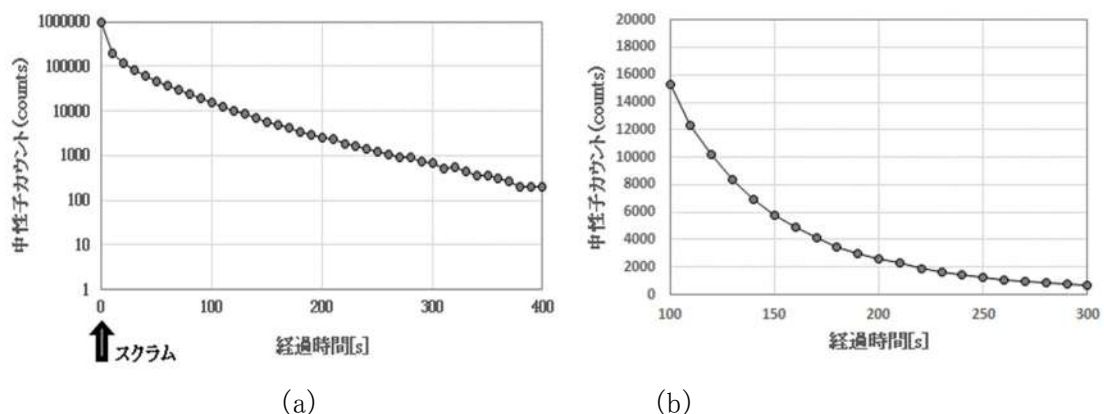
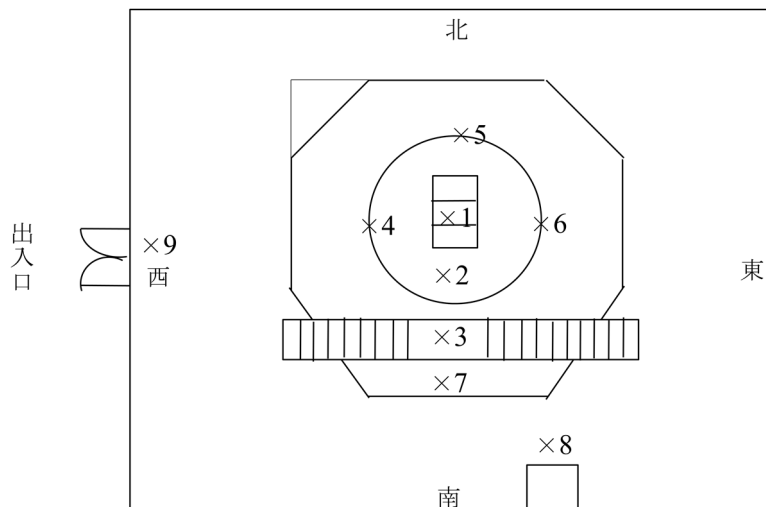


図 3 (a)スクラム停止後の出力変化,
(b)スクラム停止後の出力変化;線形表示 (100~300 秒後)

5. 原子炉室内空間線量率測定実験

原子炉出力運転時における原子炉室内での空間線量率を γ 線、中性子について9月16日、17日に各々測定した。



- 測定点 1, 2 ----- 床にサーベイメータを置く
 測定点 3 ----- 階段上部床上 0.8m
 測定点 4, 5, 6, 7, 9 ----- 床上 0.8m
 測定点 8 ----- 中性子源保管庫表面

図4 原子炉室内の線量率測定点(×1～×8)

γ 線測定には電離箱型サーベイメータを、中性子測定については中性子レムカウンターを使用し、測定は図4に示した原子炉室内の各測定点で実施した。測定結果は表4に示す。

表4 原子炉運転中(約1W)時における原子炉室内の空間線量率

測定点	γ 線量率(μ Sv/h)		中性子線量率(μ Sv/h)	
	9月16日	9月17日	9月16日	9月17日
1	500	—	390	—
2	9.5	—	4.4	—
3	12.5	10.0	3.7	4.4
4	3.0	3.3	0.38	0.36
5	6.0	6.0	0.44	0.40
6	3.0	3.4	0.33	0.35
7	5.5	5.5	0.55	0.47
8	4.5	5.0	7.6	7.0
9	0.5	0.3	0.25	0.20

*9月17日は、3密を考慮し、測定点1、2は測定せず。

表 4 からは炉心直上である測定点 1 は γ 線、中性子ともに、他の測定点に比べて非常に高い線量率を示し、炉心付近の測定点 2、3 での γ 線、中性子線量率も高い線量率を示している。また、中性子保管庫前の測定点 8 についても比較的高い中性子線量率が測定されているが、それ以外の場所では概ね γ 線、中性子ともに低い線量率であった。管理区域一時立入者の実効線量限度 $100 \mu\text{Sv}/1$ 回を考えると、特に測定点 1 のような炉心直上付近に長時間留まることがなければ、安全上問題となる線量率とはいえない。

謝辞

本実験実施にあたり、ご協力、ご指導いただきました近畿大学原子力研究所、並びに大阪大学大学院工学研究科の関係各位に深甚の謝意を表します。

令和 2 年(2020 年)の新型コロナウイルス感染症(COVID-19)拡大期の実施であったため、集団感染防止のために 3 密(密閉・密集・密接)対策を行い、以下の少人数(各日 4 名)での実験を実施し、結果、感染無く安全に実験を遂行しました。

実験参加学生(学部生) 氏名リスト

9 月 16 日(水)

2 年;エルデネ オチル ナムーン, 加藤 真衣, 小林 諭史, 古旗 壮一郎

9 月 17 日(木)

3 年;安田 一貴

2 年;小池 智熙, 高川 喜裕, 山田 真暉

(計 8 名)