

(9) 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 三島 史人、砂川 武義、尾崎 禎彦
大阪大学大学院 工学研究科 北田 孝典
近畿大学原子力研究所 橋本 憲吾、堀口 哲男

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、4 年生の学生 28 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実験を実施した。また、出力 1 W 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、令和元年 9 月 11 日、9 月 12 日、9 月 13 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、1 W 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 13 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 13 日)

出力	SSR 位置	RR 位置	ビ°コアンメータ(A)
≒0.01W	76%	25%	5.6×10^{-10}
≒0.1W	76%	25%	5.3×10^{-9}
≒1W	76%	25%	5.2×10^{-8}

(注) ビ°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 13 日以外の 9 月 11 日、12 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った後、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を計算した。

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

l_0 ; 即発中性子平均寿命
 β_{effi}, λ_i ; i 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 ; ペリオド (炉周期) であり、倍加時間 T_d と $T=T_d/0.693$ の関係

ここで、即発中性子寿命 l_0 は近大炉の公称値 1.5×10^{-4} 秒を用い、 β_{effi}, 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_{effi}
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 11 日実施の実験結果を示す。実験は原子炉出力 0.01W (ピコアンペア = 5.7×10^{-10} A) で臨界を保った後、RR を位置 0% から 50% 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 81% であった。

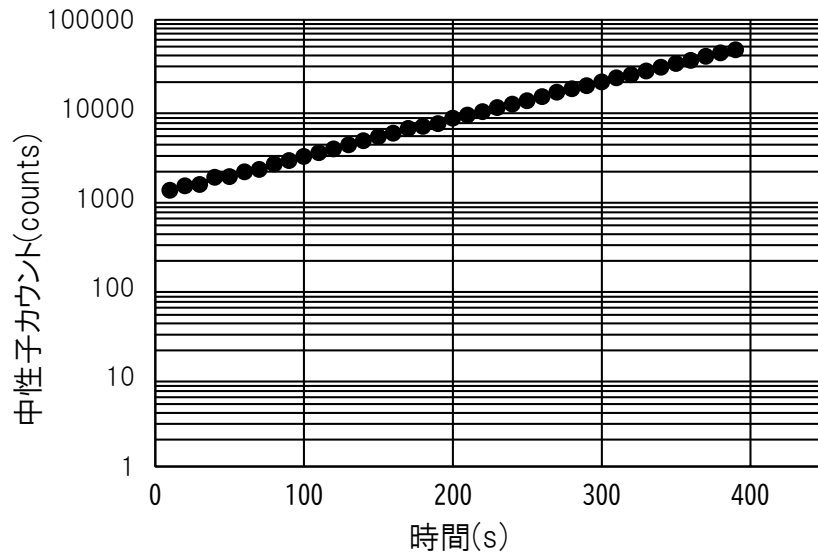


図 1 RR (0→50%) 引き抜き後の出力変化

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、73.1 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 105.5 秒となり、上式の逆時間方程式から計算される反応度は 0.000748 (0.0748% $\Delta k/k$) と得られた。これは、近大炉

の RR(0→50%) 公称値 $0.000718^{(*)}$ と比較して、ほぼ妥当な結果といえる。

次に 9 月 12 日に実施した RR 反応度校正試験は、出力 $0.01W$ (ビ°コンメータ= $5.7 \times 10^{-10}A$) 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 81% であった。

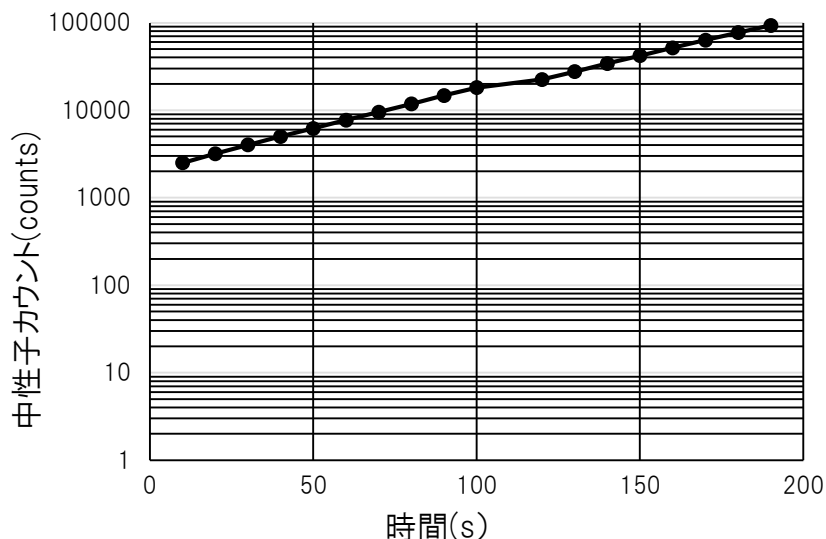


図 2 RR(0→100%) 引き抜き後の出力変化

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、33.3 秒と得られた。この値から求められるペリオド T は 47.0 秒となり、上式の逆時間方程式から計算される反応度は 0.00133 ($0.133\% \Delta k/k$) と得られた。これは、近大炉の RR(0→100%) 公称値 $0.00134^{(*)}$ と比較して、ほぼ一致した妥当な結果といえる。

次に 9 月 13 日に実施した RR に対する反応度校正試験結果を図 3 に示す。原子炉出力 $0.012W$ (ビ°コンメータ= $6.6 \times 10^{-10}A$) で RR を位置 81% から 100% へ引き抜いて実施した。なお、SR#1, #2 は上限位置、SSR 位置は 81% であった。

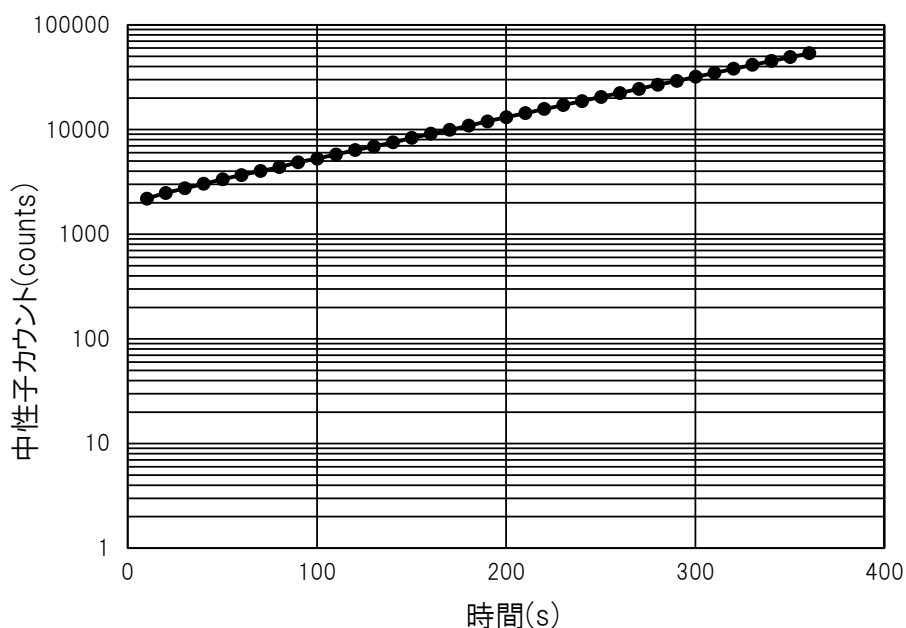


図 3 RR(81→100%) 引き抜き後の出力変化

図 3 の各レンジでの倍加時間の平均値として Td を求めると 77.3 秒と得られ、ペリオド T は 111.6 秒と得られる。ペリオドの値から逆時間方程式から反応度を計算すると、0.000716 (0.0716% Δk/k) と求められた。

今回の試験で得られた RR の反応度校正結果を表 3 にまとめた。

表 3 調整棒反応度校正測定結果

RR 引き抜き	Td(s)	T(s)	ρ (% Δk/k)
RR(0→50%)	73.1	112.3	0.0748
RR(0 →100%)	33.3	47.0	0.133
RR(81→100%)	77.3	111.6	0.0716

(*) 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

ここでは原子炉を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 11 日、12 日、13 日に各々測定し (9 月 12 日の測定結果を図 4 に示す。)、スクラムから充分時間経過した測定領域 (およそ 150 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。

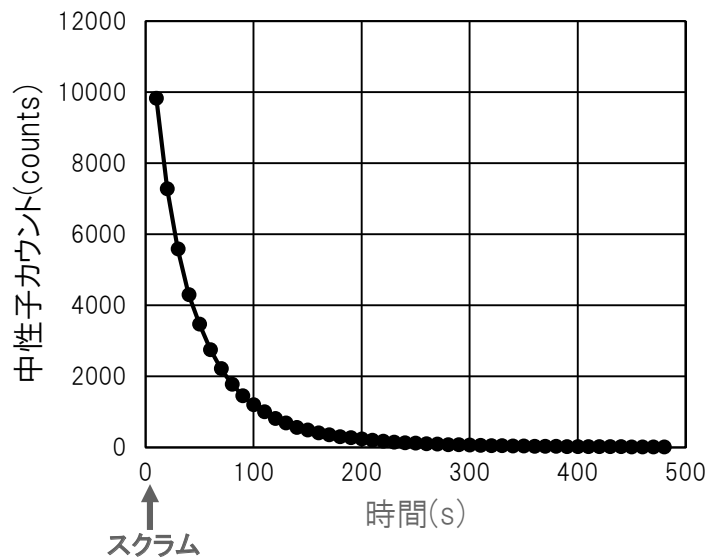
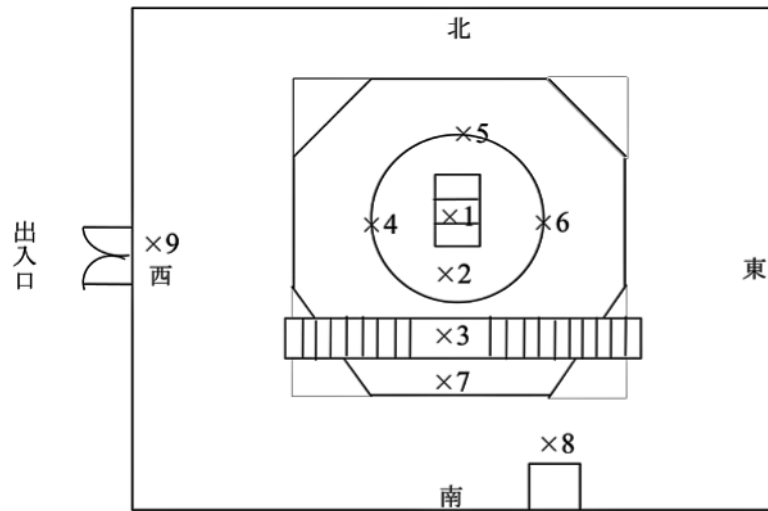


図 4 スクラム停止後の出力変化

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、中性子について測定した。



- 測定点 1, 2 ----- 床上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 5 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 5 に示した原子炉室内の各測定点で実施した。

測定結果を表 4 にまとめた。

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 ($\mu\text{Sv/h}$)			中性子線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		
	9月11日	9月12日	9月13日	9月11日	9月12日	9月13日
1	500	450	500	320	350	347
2	45	10	45	12	35	10
3	10.0	10.0	14.8	12.0	5.7	6.0
4	3.0	2.0	3.0	0.4	1.30	0.34
5	5.9	6.0	5.9	0.25	0.30	0.38
6	3.2	3.0	2.9	0.37	0.45	0.31
7	5.5	5.0	6.0	0.45	0.52	0.60
8	5.0	4.0	5.5	5.0	6.8	12.7
9	0.5	1.0	0.1	0.29	1.50	0.30

表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、炉心直上付近の測定点 2 での γ 線、中性子線量率も高い線量率を示している。一方、中性子保管庫前の測定点 8 については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、測定点 1, 2 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。

実験参加 学生(学部生)氏名リスト

9月11日(水)

4年; 森 謙太郎

3年; 藤澤 玲志、堀江 香音、前川 郁渡、矢野 尊逸、山本 倫也、
リョウ リュウエン

2年; 下山 拓記、長濱 葵、堀内 龍

9月12日(木)

3年; 岡本 武留

2年; 荒巻 みずき、佐々木 淳之介、佐々木 拓登、仲谷 まほろ、葉狩 大地、
原子 愛唯、牧田 司、安田 一貴

9月13日(金)

4年; 前田 裕紀

2年; 飯尾 玲於、岩井 新、岡本 健幹、左藤 維摩、武田 遼真、田中 俊輔、
土原 滉貴、山下 智大

(計 28名)