

原子炉出力過渡特性の測定と評価(原子炉実習実験)*

— 正ペリオド法による制御棒反応度校正試験他 —

尾崎 禎彦^{*1}, 砂川 武義^{*1}

Study on Reactor Power Transient Characteristics (Reactor Training Experiments)

— Control Rod Reactivity Calibration by Positive Period Method and other Experiment —

Yoshihiko Ozaki^{*1} and Takeyoshi Sunagawa^{*1}

^{*1} Department of Applied Nuclear Technology

In this paper, it is reported about some experiments that have been carried out in the reactor training that targets sophomore of the department of applied nuclear engineering, FUT. Reactor of Kinki University Atomic Energy Research Institute (UTR-KINKI) was used for reactor training. When each critical state was achieved at different reactor output respectively in reactor operating, it was confirmed that the control rod position at that time does not change. Further, control rod reactivity calibration experiments using positive Period method were carried out for shim safety rod and regulating rod, respectively. The results were obtained as reasonable values in comparison with the nominal value of the UTR-KINKI. The measurement of reactor power change after reactor scram was performed, and the presence of the delayed neutron precursor was confirmed by calculating the half-life. The spatial dose rate measurement experiment of neutrons and γ -rays in the reactor room in a reactor power 1W operating conditions were also performed.

Key Words : Reactor Training Experiment, Reactor Operation Training, Reactor Transient Characteristics, Control Rod Reactivity, Positive Period Method, Confirmation of Delayed Neutron

1. 緒 言

本学原子力技術応用工学科では、2年生を対象に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) を用いた原子炉実習を毎年実施している。学生にとっては、直に原子炉に触れる体験学習の場として座学では得られない知識獲得の貴重な機会となっている。原子炉を用いた実習テーマとしては、原子炉の起動・制御などの原子炉運転、および、原子炉の出力過渡特性の測定・評価実験、もしくは、材料の放射化実験を実施している。

今回、本稿にて報告する実験は、原子炉起動/出力調整運転とそれに伴う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を確認する原子炉運転実習、正ペリオド法による制御棒反応度校正実験、さらには原子炉スクラム停止後の原子炉出力変化の測定から遅発中性子先行核の存在を実感、確認するための実験である。また併せて放射線測定実験として、原子炉出力 1 W 運転状態で原子炉室内に立ち入り、原子炉室内の幾つかの代表的な測定場所で γ 線、中性子線の空間線量率測定実験についても実施した。

報告は、本学科 2 年次学生数が最も多く、従って、多種の制御棒を正ペリオド法による制御棒反応度校正試験対象とすることができた 2012 年度の実験結果について報告することとした。実験は学生 3 班構成で 1 日/1 班×3 回実施とし、各班は制御棒反応度校正実験の対象制御棒のみが異なるものの、その他の実験は全く同じ実験内

* 原稿受付 2014 年 2 月 19 日

^{*1} 原子力技術応用工学科

E-mail: yoshihiko-ozaki@fukui-ut.ac.jp

E-mail: sunagawa@fukui-ut.ac.jp

容とした。実験は、2012年9月11, 12, 13日に実施した。

2. UTR-KINKI 概要⁽¹⁾

UTR-KINKI は90%濃縮ウランを燃料とする軽水減速黒鉛反射比均質型熱中性子炉で、Fig.1に示すように2分割炉心を持つタンク型炉である。定格熱出力が1Wという低出力であるため、減速・冷却材である軽水を循環させることもなく、また浄化系も持たない原子炉である。

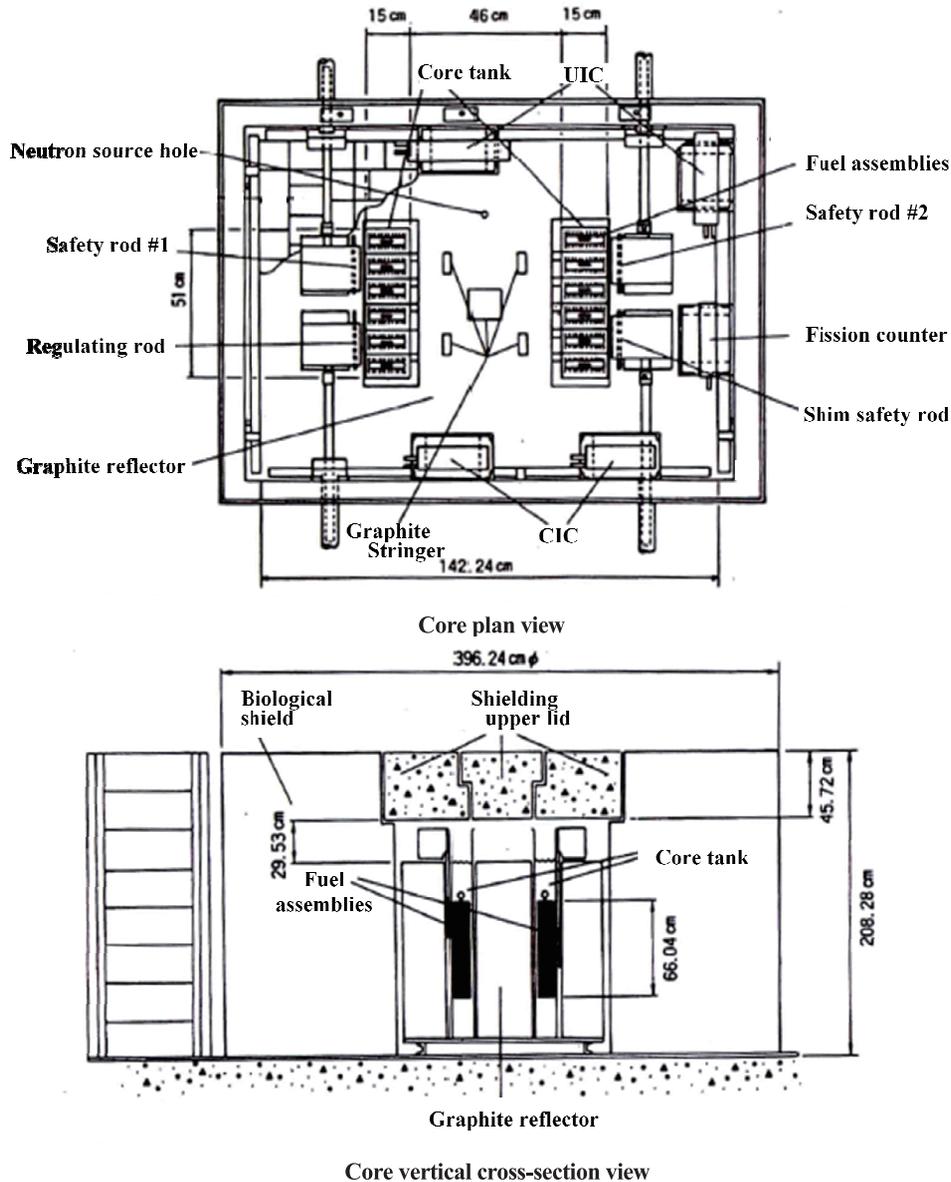


Fig.1 Structure diagram of UTR-KINKI

UTR-KINKI の反応度係数は、燃料温度係数（ドップラー係数）、減速材温度係数、ボイド係数ともに負の値であり、一般的な軽水炉と同様の自己制御性を有している。燃料は、ウラン-アルミ合金をアルミ被覆した平板構造で、熱伝達性に優れ、反応度係数によるフィードバックに対しても速やかに応答する。循環冷却系を有していないので、燃料タンク内の減速（冷却）水は静止しており、外乱の影響も少なく、安定性に優れた原子炉といえる。

近大炉で用いられている制御棒としては、安全棒（SR）#1、安全棒#2、シム安全棒（SSR）、調整棒（RR）という4系統のものが設置されている。2系統の安全棒#1、安全棒#2は原子炉緊急停止（スクラム）用であり、

シム安全棒は反応度の粗調整用，調整棒は反応度の微調整用，および，ある一定出力での自動運転用として用いられている．制御棒は，中性子吸収体であるカドミウム板が採用されている．安全棒，シム安全棒のカドミウム板の寸法は約 $178 \times 178 \times 1 \text{ mm}$ ，調整棒のカドミウム板寸法は約 $51 \times 51 \times 1 \text{ mm}$ である．原子炉停止状態では，全ての制御棒の中性子吸収体は，燃料版の軸方向中央位置（下限位置）に保持され，安全棒 #1, 2 は原子炉運転中には上限位置に配置される．安全棒の駆動方向は引き抜きのみであり，緊急時の挿入は渦巻きバネの復元力を利用するもので PWR での重力落下と同様に人為的なものではなく自然作用による安全性の高い方式が採用されている．シム安全棒と調整棒の駆動方向は，引き抜きおよび挿入が可能で，任意の中間位置で停止することが可能である．

今回，正ペリオド法による制御棒反応度校正試験の対象は，このシム安全棒と調整棒である．

3. 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 #1, #2 位置を上限に設置した状態で，シム安全棒と調整棒を引き抜きつつ調整し，出力を上昇させていった．その際，出力が 0.01W ， 0.1W ， 1W の各出力でシム安全棒，調整棒を用いて，臨界状態を達成する．そして，各臨界状態を達成した時のシム安全棒と調整棒位置を記録し，Table 1 の結果を得た．いずれの場合も安全棒 #1, #2 は上限位置である．

ここで，中性子計測系からの原子炉出力に比例したピコアンメータの校正結果からは， $5.72 \times 10^{-8} \text{ A}$ が 1.0W に相当すると得られている．

Table 1 Control rod position of the critical state when achieved at each power output

Power output	Position of shim safety rod	Position of regulating rod	Pico ampere meter(A)	Neutron counts(CPS)
$\approx 0.01\text{W}$	80%	33%	6.2×10^{-10}	1600
$\approx 0.1\text{W}$	80%	33%	5.9×10^{-9}	14300
$\approx 1\text{W}$	80%	33%	5.8×10^{-8}	123000

9月12日以外の11, 13日についてもTable 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（シム安全棒，調整棒）位置は原子炉出力に依存しないことが確認された．今回の原子炉を用いた各種試験の学生実習の様子をFig.2に示した．正面に見えるのが近大炉中央操作盤であり，原子炉室は左手ガラスの向こう側になる．



Fig.2 Photograph of reactor operation training

4. 正ペリオド法による制御棒反応度校正実験

4.1 正ペリオド法による反応度測定

正ペリオド法による反応度測定について以下に概説する。原子炉内で、ある核分裂で発生した中性子数と次の核分裂で発生する中性子数、すなわち世代ごとに発生する中性子数の比を実効増倍係数といい、 k_{eff} で表す。この比が 1 より大きい場合が超臨界、1 と等しい場合が臨界、1 より小さい場合が未臨界となる。反応度とは、次式で示すように実効増倍係数 k_{eff} が 1、すなわち臨界状態からの偏差を示すものと定義され、超臨界の場合は正の反応度、臨界状態にある場合は 0、未臨界状態では負の反応度をもつことになる。制御棒は中性子吸収体から構成されているので、原子炉内に挿入されたときには負の反応度、引き抜かれる時には正の反応度を与えることになる。制御棒反応度校正とは、この制御棒の挿入量、あるいは、引き抜き量に対する反応度を校正することである。

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{crit}}$$

反応度の測定方法としては種々の方法があるが、正ペリオド法は正の反応度を測定する方法としては標準的な手法である。反応度 0、すなわち臨界状態にある原子炉に正の反応度が印加されると、原子炉出力は次式で示すように指数関数的に増加する。

$$P(t) = P_0 \exp(t/T)$$

ただし、 $P(t)$ は測定開始から時間 t が経過した時の原子炉出力、 P_0 は測定を開始した時点での原子炉出力、 T はペリオドと呼ばれる炉周期であり、原子炉出力が e 倍になる時間である。式に示されているように、原子炉出力が e 倍になる時間はどの時刻を測定開始時刻としても同じ値が得られる。ペリオド T と反応度 ρ との間には、原子炉内中性子空間分布が変化しないと仮定し、また、遅発中性子を考慮した一点炉動特性方程式から下記の逆時間方程式と呼ばれる関係がある。

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

ただし、

$$\left\{ \begin{array}{l} l_0 \quad ; \text{即発中性子平均寿命} \\ \beta_{eff_i}, \lambda_i \quad ; \text{i 群遅発中性子先行核収率（実効遅発中性子割合）と崩壊定数} \\ T \quad ; \text{ペリオド（炉周期）} \end{array} \right.$$

である。一般的にはペリオド T を直接求めるのは面倒なので、原子炉出力が倍になる倍加時間 T_d を求め、次式によってペリオドを計算する方法が採られる。

$$T = T_d / 0.693$$

ここで、即発中性子寿命である l_0 は近大炉の公称値である 1.5×10^{-4} 秒を用い、 β_{eff_i} 、 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 Table 2 の値を用いた。

Table 2 Yield and decay constant of effective delayed neutron in UTR-KINKI

Group	Decay constant λ_i [1/s]	Yield of precursor β_{eff_i}
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}

4.2 試験結果

今回は調整棒、および、シム安全棒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。原子炉出力を低出力のある値で臨界状態に保った後、調整棒もしくはシム安全棒を所定の位置まで一気に引き抜き、原子炉出力が2倍となる倍加時間を測定する。測定した倍加時間から、上述のペリオドを計算し、逆時間方程式を用いて各々の制御棒の反応度を計算によって求めた。

Fig.3 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で臨界を保った後、調整棒を位置0%から100%に引き抜き、5秒毎の中性子数を測定、グラフ化したものである。なお、このとき安全棒#1、#2位置は上限、シム安全棒位置は88%であった。

Fig.3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、32.1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46.3秒となり、上式の逆時間方程式から計算される反応度は0.00136 (0.136% $\Delta k/k$)と得られた。ここで、 k は中性子実効増倍係数である。これは、近大炉のRR (0→100%) 公称値0.00134 (0.134% $\Delta k/k$)⁽²⁾と比較しても、ほぼ妥当な結果といえる。

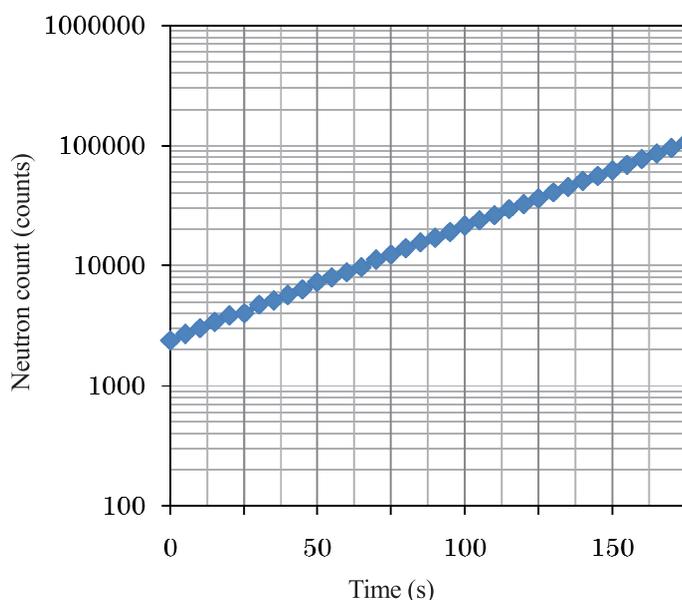


Fig.3 Output change after pull-out of regulating rod (0→100%)

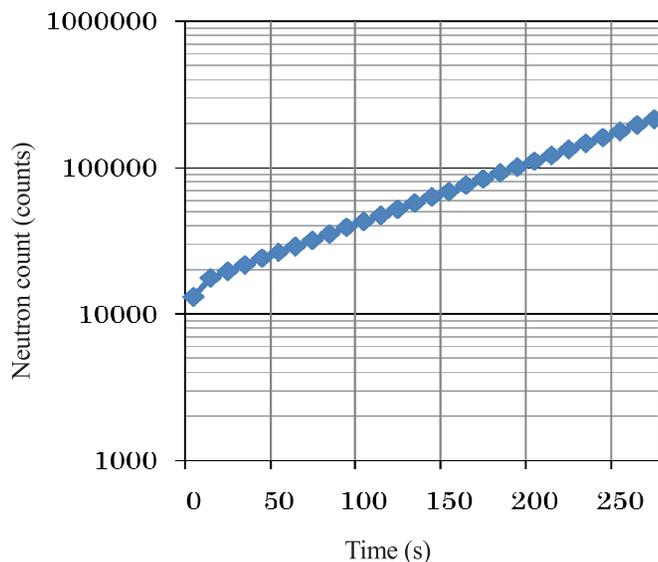


Fig.4 Output change after pull-out of regulating rod (0→50%)

次に9月12日に実施した調整棒反応度校正試験は、同じく出力0.01Wからの引き抜き試験であるが、調整棒位置0%から50%への引き抜き、10秒毎の中性子数を測定した。その結果をFig.4に示した。ただし、Fig.3、Fig.4ともに時間起点は引き抜き直後というわけではない。図の出力増加変化から倍加時間を求めるということからは、先に述べたように時間起点が同一である必要はない。Fig.4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、73.4秒と得られた。この値から求められるペリオド T は105.9秒となり、上式の逆時間方程式から計算される反応度は0.000746 (0.0746% $\Delta k/k$)と得られた。これは、近大炉のRR (0→50%) 公称値0.000718 (0.0718% $\Delta k/k$)⁽²⁾と比較して、ほぼ妥当な結果といえる。

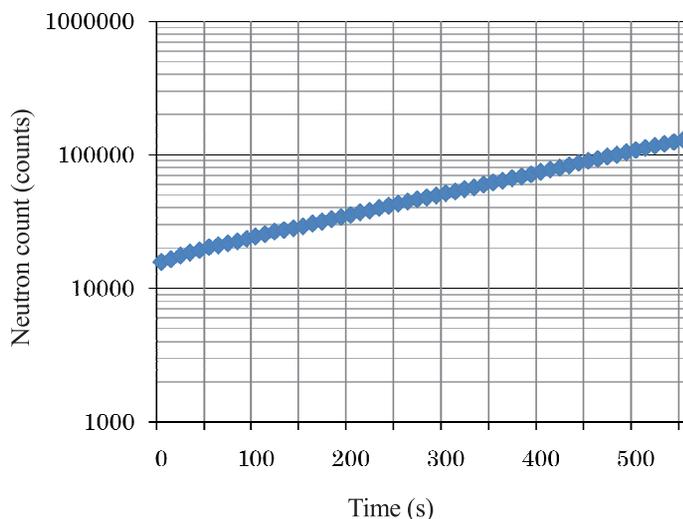


Fig.5 Output change after pull-out of shim safety rod (0→100%)

次に9月13日に実施したシム安全棒に対する反応度校正試験結果をFig.5に示す。試験は原子炉出力0.01Wで臨界状態とし、シム安全棒を位置89%から99%へ引き抜いて実施した。この時、安全棒#1、#2は上限位置、調整棒位置は0%、すなわち上限位置であった。

Fig.5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187.6秒と得られ、ペリオド T は270.7秒と得られる。ペリオドの値から逆時間方程式を用いて反応度を計算すると、0.000339 (0.0339% $\Delta k/k$)と求められた。

今回の試験で得られた調整棒、シム安全棒の反応度校正結果をTable 3にまとめた。

Table 3 Results of reactivity calibration test for regulating rod (RR) and shim safety rod (SSR)

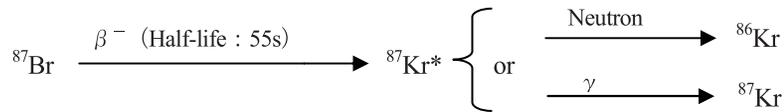
	T_d (s)	T (s)	ρ (% $\Delta k/k$)
RR(0→50%)	73.4	105.9	0.0746
RR(0 →100%)	32.1	46.3	0.136
SSR(89→99%)	187.6	270.7	0.0339

Table 3に示した今回得られた制御棒反応度校正結果は、近大炉公称値とも対応し、実験が所定の精度で実施されたことを示すものであった。

5. 遅発中性子先行核確認実験

^{235}U の核分裂からは平均2.4個の中性子が放出される。この中性子の99%以上は核分裂直後 (10^{-14} 秒後)に放出される即発中性子であるが、これとは別に極わずかな割合0.65%が遅発中性子と呼ばれる数秒程度遅れて放出される。即発中性子は核分裂片から直接放出されるが、遅発中性子はそれとは異なる過程で放出される。例えば、核分裂による数多くの核分裂生成物の一つに ^{87}Br があるが、この核種は約55秒の半減期で β^- 崩壊して励起

状態の $^{87}\text{Kr}^*$ へと壊変する。壊変によって作られた励起状態にある核は、通常 γ 崩壊して基底状態の核となるが、一部の $^{87}\text{Kr}^*$ は γ 崩壊せずに中性子を放出する。この過程を下記に示した。



^{87}Br のようなその後に中性子放出を伴う崩壊をする核を遅発中性子先行核という。現在までに約 200 種以上の遅発先行核が知られているが、一般的には Table 4 に示すように 6 群にまとめて取り扱われる。

Table 4 Precursor of delayed neutron

	Precursor	Half-life(s)
1	^{87}Br	55.6
2	^{137}I ^{88}Br $^{134}\text{Sb}, ^{136}\text{Te}, ^{141}\text{Cs}$	24.5 16.5
3	^{138}I ^{89}Br $^{84}\text{As}, ^{87}\text{Se}, ^{92}\text{Rb}, ^{93}\text{Rb}, ^{147}\text{La}$	6.49 4.40
4	^{139}I ^{90}Br Ga, As, Se, Br, Kr, Rb, Y, In, Sb, Te, I, Xe, Cs	2.29 1.92
5	Ga, As, Se, Br, Kr, Sr, Y, In, Sn, Sb, I, Xe, Cs, Ba	(~ 0.5)
6	Ga, Se, Br, Kr, Rb, In, Cs	(~ 0.2)

ここでの実験は、原子炉を制御棒によりスクラムさせた後の中性子数変化を測定し、スクラム後約 300 秒程度での中性子数変化から半減期を求め、遅発中性子先行核の中では半減期が 55.6 秒と最も長い ^{87}Br の存在を実感することを目的とした。9 月 11 日, 12 日, 13 日も測定結果を各々, Fig.6, Fig.7, Fig.8 に示した。

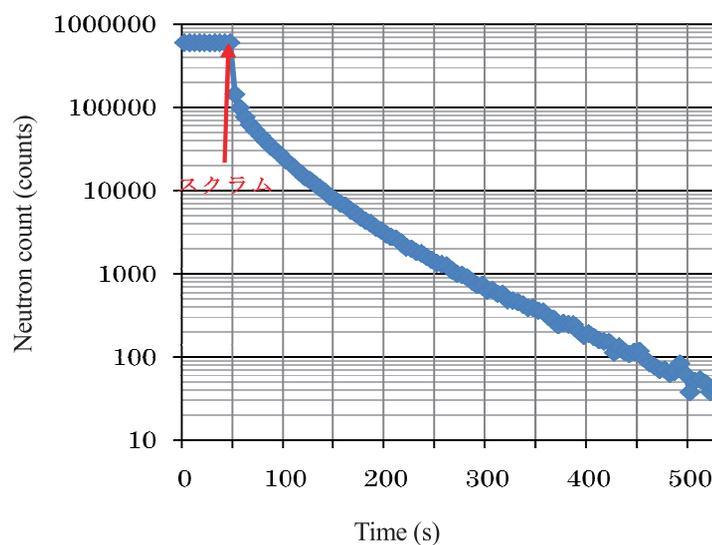


Fig.6 Output change after reactor scram

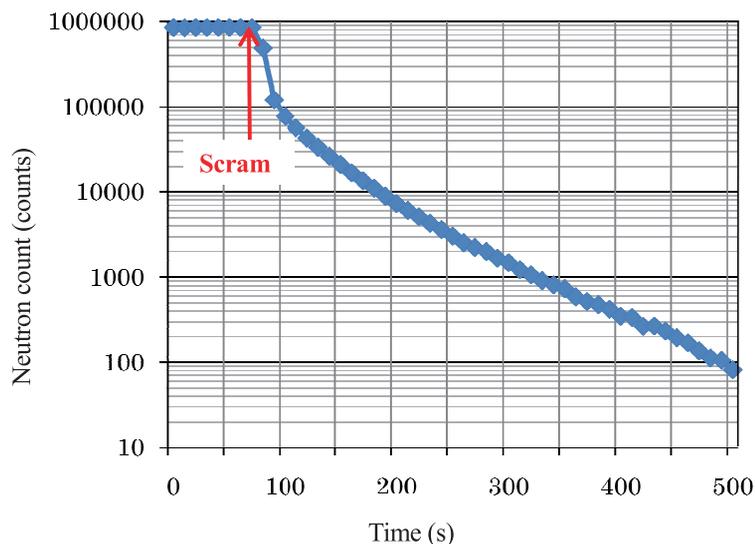


Fig.7 Output change after reactor scram

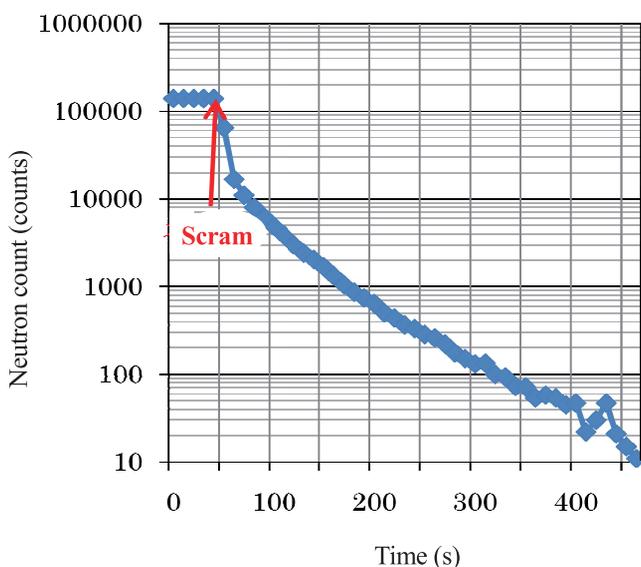


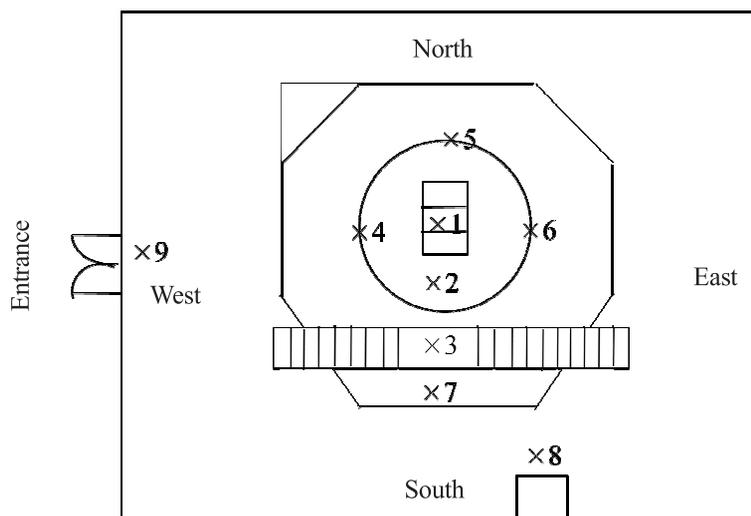
Fig.8 Output change after reactor scram

スクラム後の出力変化から半減期を求め、先行核の特に半減期 55.6 秒の ^{87}Br の存在を図から実感することを期待している。Fig.8 はスクラムから十分時間が経過した時点での中性子数が小さく、半減期 $T_{1/2}$ の算出に対する誤差が大きいと考え、今回の考察対象からは除外した。Fig.6, Fig.7 のスクラム後約 300 秒以降のデータから求めた各々複数の半減期の両者の平均値から求めた $T_{1/2}$ は約 55 秒と得られた。この値は 1 群先行核 ^{87}Br の半減期 55.6 秒と良い一致を示しており、スクラムからある程度十分な時間が経過した出力変化から、この ^{87}Br の存在を実感することができた。

6. 原子炉室内空間線量率測定実験

原子炉の概要で記載したように、原子炉出力が 1W と非常に低出力で、いわゆるゼロ出力炉と呼ばれる原子炉である。そのため、原子炉運転中も最大出力の 1W の時でさえ、原子炉内に立ち入ることが可能である。そこで今回、原子炉出力 1W 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することとした。 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、Fig.9 に示した原子炉室内の各測定点で測定した。

結果を Table 5 にまとめた。



- Measurement point 1, 2 ----- On the floor
- Measurement point 3 ----- 0.8m above the top floor stairs
- Measurement point 4,5,6,7,9 ----- 0.8m above the floor
- Measurement point 8 ----- Surface of the neutron vault

Fig.9 Dose rate measurement points of the reactor room

Table 5 Air dose rate in the reactor room during reactor operation of 1W

Measurement point	γ dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)			Neutron dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)		
	Sep. 11	Sep. 12	Sep. 13	Sep. 11	Sep. 12	Sep. 13
1	530	—	500	360	330	340
2	35	29	33	9.0	7.0	7.0
3	9.0	14	11	2.7	4.0	3.2
4	3.0	3.0	2.5	0.21	0.30	0.35
5	5.9	6.5	5.0	0.47	0.30	0.45
6	3.1	3.0	2.5	0.45	0.35	0.42
7	5.0	6.5	6.0	0.35	0.50	0.54
8	1.5	5.5	4.5	6.9	7.0	5.2
9	0.5	0.5	0.2	0.23	0.35	0.3

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，さらに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。また，中性子保管庫前の測定点 8 についても比較的高い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，長時間炉心直上付近に留まることがなければ，1W 運転中であっても安全上問題となる線量率は測定されなかった。

7. 結 言

本報告では，近畿大学原子力研究所所有の原子炉（UTR-KINKI）を用いて実施した本学原子力技術応用工学科学生二年生を対象とした原子炉実習実験について報告した。実験は，大きく以下の 4 種の実験について実施した。一つは，原子炉運転実習の実施と原子炉運転中での各々異なる原子炉出力で達成された臨界状態における

制御棒位置の確認実験である。この実験からは、各々異なる原子炉出力での臨界状態における制御棒位置は変化しないことが確認された。今一つは、原子炉出力 1W の運転状態における原子炉室内での中性子や γ 線の空間線量率測定実験の実施であり、原子炉室内の空間線量率が安全上問題とならないことを確認することができた。さらに一つは、正ペリオド法による制御棒反応度の校正実験である。校正実験は、シム安全棒と調整棒各々について実施した。実験結果は、両制御棒に対して UTR - KINKI の公称反応度値と比較して極めて妥当な反応度値を得ることができた。最後に、原子炉スクラム後の原子炉出力変化の測定を行い、遅延中性子先行核の存在、とりわけ半減期の長い先行核 ^{87}Br の存在をスクラム後長時間経過後の出力変化の半減期から確認する実験であり、所期の結果を得ることができた。

最後に、今回の原子炉実習実験に参加した本学科 2 年生学生諸君の氏名一覧を以下に記載する。総数 32 名であり、各班が各々 1 日交代で所定の実験に参加した。

2014 年 9 月 11 日

大津 咲, 荻野 隼太, 河田 彰太郎, 斎藤 隆之, 上光 伸吾, 中村 元紀, 西江 徹朗, 畠山 凌輔,
前田 和耶, 山本 晃大

2014 年 9 月 12 日

荒川 翔太, 大橋 秀平, 加藤 直暉, 越田 竜也, 高橋 康平, 竹下 剛寛, 田邊 卓也, 堂後 光史,
中村 真也, 藤井 和輝, 吉村 悠貴

2014 年 9 月 13 日

井田 将馬, 上野 真, 垣内 祥光, 草崎 一矢, 武市 大輝, 昇 雅貴, 野村 直生, 畠山 新平,
宮越 大輔, 山田 貴大, 吉田 一史

謝 辞

本実験は、大阪大学工学研究科取り纏めの「近畿大学原子炉等利用共同研究」の枠組みの中で実施されたものであり、実施にあたり受け入れ、ご協力いただきました近畿大学原子力研究所 橋本憲吾教授はじめ研究所職員各位、並びに大阪大学大学院工学研究科 堀池寛教授はじめ関係各位に深甚の謝意を表す。

文 献

- (1) 近畿大学原子力研究所編, 近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) を用いた実験実習テキスト, 第 3 版 (2010).
- (2) 鶴田隆雄, 原子炉入門, (2009), p.148, 通商産業研究社.

(平成 26 年 3 月 31 日受理)