

(4) 近畿大学原子炉の炉特性実験・中性子利用実習による 教育的効果に関する研究

東海大学工学部

吉田茂生 亀山高範

大阪大学大学院工学研究科

村田勲

近畿大学原子力研究所

堀口哲男

1. はじめに

近畿大学原子炉は新規制基準適合確認の停止期間を経て、全ての検査を終え、2017年度(平成29年度)から運転再開となり、当校原子力工学科の3年次秋学期開講科目「原子炉実験・演習」の学外実習として「近大炉実習」実施をスタートすることができた。学生にとっては、実習場所が遠方の関西圏ではあるが、実習体験の教育的効果は著しいものと考えられ、毎年多くの学生が近大炉での2泊3日の実習プログラムを期待している状況である。ただ残念なことに、昨年2018年度は原子炉調整棒駆動機構の不調にて、原子炉停止となり、実習が実施不可能となってしまった。そのため本年度は、昨年実習参加予定であった現4年生と本年度履修の3年生を対象とした実習を開催することとなった。

このような状況にて今年度実施された実習プログラム(学部3年次生8名、学部4年次生6名、TAとして院生M1生3名の計17名の学生、他指導教員2名の参加、A班・B班の2班編成にて実施)について報告し、今後の展開について検討を行った。

2. 実習内容

実習内容は1)原子炉運転実習、2)空間線量率測定(2次 γ 線パルス波高分布測定含む)、3)制御棒校正実験、4)原子炉軸方向熱中性子束分布測定、5) ^{28}Al 短半減期測定、6)X線・中性子ラジオグラフィーの6テーマにて、1)～4)の原子炉基礎実験と、5)・6)の原子炉応用実験として実施した。

1)原子炉運転実習

原子炉の運転を始める前の計測制御系統等の設備・機器の点検である運転開始前点検から、核分裂反応の火種となる中性子源(Pu-Be中性子源)の挿入後、制御棒(安全棒#1・2、調整棒、シム安全棒)の引き抜き、中性子源の引き抜き後の調整にて0.01W臨界の達成となる操作を行った。さらに、シム安全棒・調整棒をさらに引き抜き0.01W出力から定格出力(最大)の1Wまで上昇させ、1W臨界の定常状態に到達させた。その後、臨界状態を保持させるための自動制御装置を稼働させ、所定の検査項目のチェック作業を行った。この一連の稼働操作を、指導教員(近大原研)の解説・指示に基づき、操作し、制御棒位置と中性子挙動との関係を、操作盤の計測メーター等の指示値の変動から、ひとつひとつステップごとに理解を深め、原子炉起動の基本技術について理解した。

2)空間線量率測定(2次 γ 線分布測定含む)

原子炉運転実習にて、1W臨界到達後、炉心周辺の所定測定位置にて、中性子・ γ 線の空間線量率測定を行った。測定器は、中性子線用の中性子レムカウンタと γ 線用の電離箱式サーベイメータを用いて、指定検査位置にて実際に学生に交代で測定値を読み取

らせ、所定の検査記録用紙に記入後、各放射線の線量分布状態を評価・考察させ、放射線管理実務としての実習を実施した。また、サーベイメータの線量率測定だけでなく、原子炉周辺のゲルマニウム半導体検出器測定による γ 線パルス波高分布の分析から、線量の数値のみだけでなく、どのような γ 線(エネルギー分布)が分布しているのか、特に二次的な高エネルギー γ 線の発生メカニズムについても、考察させ、理解を深めることを促した。

3) 制御棒校正実験

この実験では、制御棒を引き抜き、比較的小さな正の反応度を与え、原子炉出力の上昇を観測する正ペリオド法と、制御棒を急激に挿入(落下)させて、比較的大きな負の反応度を与え、原子炉出力の下降を観測する落下法の2種類を、A・B両班、表1のそれぞれの条件にて実施した。ここで正ペリオド法による反応度の測定では、倍加時間の測定からペリオドを求め、逆時間方程式から反応度 ρ を導出させた。また、落下法による反応度測定では、下降の間の中性子カウント数の無限時間積分値(測定時間:600秒)から反応度 ρ を導出させた。なお評価は、4つの測定データを総合的に評価させ、等価反応度や過剰反応度等を求め、制御棒の特性並びに原子炉の安全性について考察をさせた。

表1 各班の実験条件

	正ペリオド法 (調整棒及びシム安全棒)	落下法 (調整棒及びシム安全棒)
A班	調整棒(0%→100%) [シム安全棒:臨界位置78%]	シム安全棒 (臨界位置78%→0%)
B班	シム安全棒(臨界位置78%→100%) [調整棒:0%]	安全棒#2 (100%→0%)

4) 原子炉軸方向熱中性子束分布測定

原子炉軸方向の熱中性子束分布を金箔の箔放射化法にて測定を行った。金箔を添付する軸孔として2ヶ所を設定し、1ヶ所は中央ストリンガー部、またもう1ヶ所は4つの黒鉛ストリンガー部のいずれか1つを選択し、金箔貼付面を考慮し、炉心位置(0cm)を基準に上方炉頂部に向かって10cm間隔で+60cmまで、また、下方炉底部に向かって10cm間隔で-60cmまでの計13ヶ所に金箔を配置した。さらに、中央ストリンガー炉心部の金箔付着面の反対面にCdフィルター付金箔を設け、Cd比が垂直方向一様として、熱中性子束の分布を評価させた。

金箔の測定はGM計数装置にて、各値の相対値を求めさせ、さらに、炉心位置の金箔(Cdフィルターも含む)をゲルマニウム半導体検出器にて測定後、両者の差分から熱中性子束($n/cm^2 \cdot sec$)としての絶対量を評価させることで、軸方向での熱中性子束分布を導き出させた。測定は、両班それぞれに、2つのストリンガー部に装着させた全28枚の箔全ての測定を行い、それぞれにて評価を行わせた。そして、中央ストリンガー軸分布と黒鉛ストリンガー軸分布とを比較し、それぞれの箔の装着方向を考慮して、その相違の原因を考察させた。

5) ^{28}Al 短半減期測定

^{27}Al の小片(数g)を1W 炉心位置にて約 15 分間照射を行い、取り出し後、直ぐに GM 計数装置にて、中性子放射化による ^{28}Al 核種からの放射線 (β 線) のカウント数を 30 秒間隔 (30 秒測定→30 秒クーリング→30 秒測定・・・) にて20分間計測を行い、時間的な 30 秒間のカウント数の減衰分布 (片対数グラフによる直線、指数関数) の直線の傾きから ^{28}Al の半減期を求め、理論値 2.2414 分 (アイソトープ手帳 11 版) との比較を行った。

6) X 線・中性子ラジオグラフィー

照射用サンプル物品から各班にて抽出した物品を各イメージングプレート (IP) 上に並べ、X 線は X 線発生装置 (HITACHI MBR-1505R) にて、中性子は炉心上部照射実験設備 (ラジオグラフィー用) にて、それぞれに 3 秒間 X 線、15 分間熱中性子の照射を行い、各 IP の画像の相違を比較し、その原因について、放射線と物質との相互作用の違いから考察させ、ラジオグラフィーの基本的原理を理解させた。

3. 実習結果

本報告では今回プログラムとして実施した内容についてのみ留め、以下に今回の実習にて報告された結果について、簡単に重要点のみを明記し、解説を加えた。本プログラムにおいては、炉実習第1日目午後から翌2日目の1日半の間、具体的な炉実習を行い、2日目の夕方から翌3日目の午前中を通じて実習内容・結果を総括したプレゼンテーション用の資料作成をグループごとにまとめさせ、報告会として発表させることを第3日目の午後実施している。これには近大炉側の実習担当教員も出席いただき、報告事項についての質疑・コメント等をいただくこととなっている。学生にとってはかなりハードな対応ではあるが、短期集中的に、これまで講義(座学)やシミュレーション(演習)にて学んできた内容を、実際の演習にて引き出し、まとめ上げていく点においては、充実し、その対応感覚からは十分な成果を得られたものと感じ取れる。

今後はこの発表会での質疑応答やコメントによる指摘点等を踏まえた各自学生作成のレポート等を参照に、関心度・理解度等、学生の教育的効果を評価するための指標を検討し、それらを用いた相互評価から学生の原子炉実習による教育的効果の向上を目指し、改善等を行い、充実した次年度実施プログラム構成を検討していく。

以下に今回の実習報告会でのポイント点のみを明記した。A・B 班2班の発表がなされたが、当然のことながら、概ね同様の内容であり、いずれのまたは両班共通する点を明記した。《原子炉運転実習》

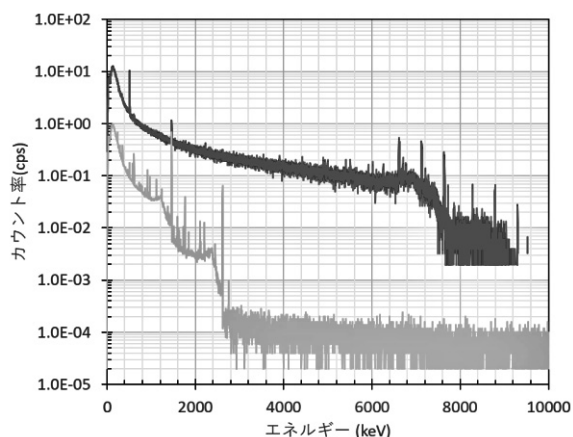
◎原子炉臨界条件

出力[W]	炉の出力[A]		制御棒位置[%]	
	線形出力計	対数出力計	シム安全棒	調整棒
0.01	5.8×10^{-10}	4.2×10^{-10}	70	37
0.1	5.7×10^{-9}	4.0×10^{-9}	70	37

出力が変化してもシム安全棒と調整棒の位置は同じとなった。

《空間線量率測定(2次γ線パルス波高分布測定含む)》

測定位置	測定点	γ線線量率 (μSv/h)	中性子線量率 (μSv/h)	合計 (μSv/h)
炉頂	1	600	360	960
炉頂入口	2	65	20	85
階段上	3	11.9	4.43	16.3
炉心外周-西	4	3.0	0.35	3.4
炉心外周-北	5	7.6	0.38	8.0
炉心外周-東	6	3.4	0.35	3.8
炉心外周-南	7	6.5	0.35	6.9
中性子源保管庫	8	5.7	6.42	12
炉室入口	9	0.5	0.211	0.7



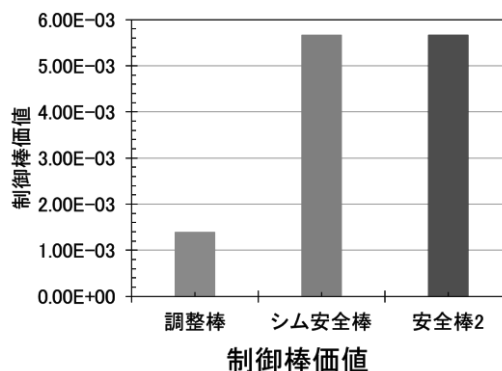
《制御棒校正実験》

		反応度 ρ
ペリオド法	調整棒	1.394×10^{-3}
	シム安全棒	9.018×10^{-4}
落下法	シム安全棒	4.763×10^{-3}
	安全棒2	5.662×10^{-3}

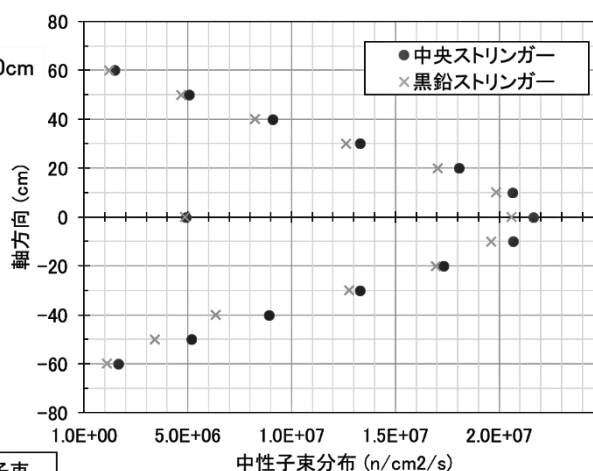
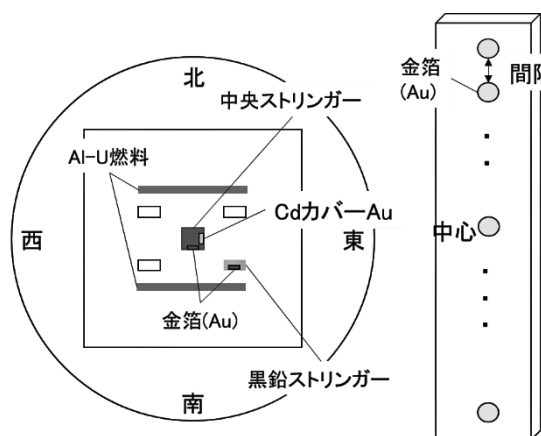
	制御棒価値
調整棒	1.394×10^{-3}
シム安全棒	5.664×10^{-3}
安全棒2	5.662×10^{-3}

過剰反応度 $\rho = 2.296 \times 10^{-3}$ となり、安全棒1本で原子炉は停止する。

調整棒の値が低く、シム安全棒と安全棒の値が等しいことから、制御棒価値はサイズに依存している。



《原子炉軸方向熱中性子束分布測定》

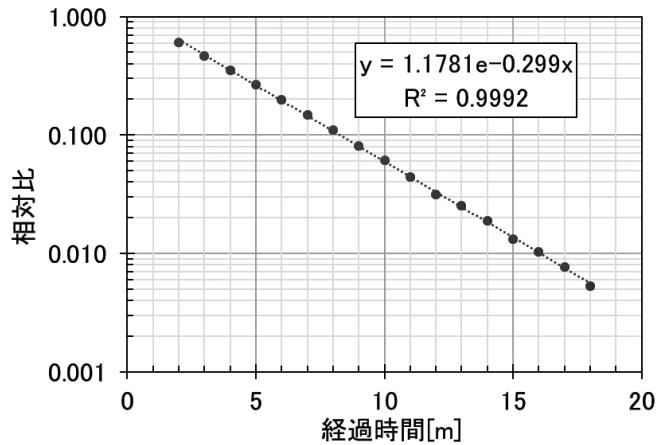


	中性子束	熱外中性子束	熱中性子束
中央ストリンガー	2.164.E+07	4.897.E+06	1.675.E+07
黒鉛ストリンガー	2.058.E+07	4.87.E+06	1.571.E+07

金箔の軸方向の中性子束分布

《²⁸Al 短半減期測定》

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{0.299} = 2.318[\text{min}]$$

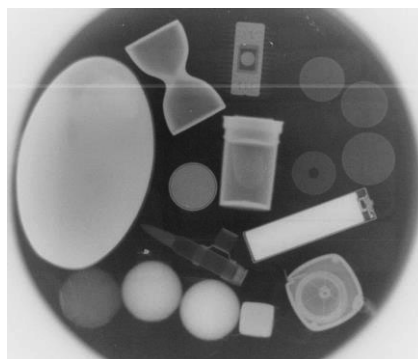


《X線・中性子ラジオグラフィー》

被写体

中性子ラジオグラフィー

γ線ラジオグラフィー



[全体スケジュール・研修学生]

●実習スケジュール
【全体説明】

月/日 (曜日)	時刻	実習内容
12/4 (水)	12:45	【管理棟研修室】 近畿大学原子力研究所集合、事務手続き等
	13:00	【管理棟研修室】 保安教育＋施設見学

【班別実習】

月/日 (曜日)	時刻	実習内容	
		A班	B班
12/4 (水)	14:00	【原子炉炉室・制御室】 ①運転実習 ②制御棒校正 (正ペリオド法 2条件＋落下法) ③空間線量率測定 (2次γ線分布測定含む)	【原子炉建屋実験室＋管理棟実験室】 ④中性子束測定用放射化箔(Au)準備 (Ge半導体検出器による放射能定量法の説明) ⑤ ²⁸ Al短半減期測定
	17:00	実習結果確認	
	17:30	解散	
12/5 (木)	9:30	【原子炉建屋実験室＋管理棟実験室】 ④中性子束測定用放射化箔(Au)準備 (Ge半導体検出器による放射能定量法の説明) ⑤ ²⁸ Al短半減期測定	【原子炉炉室・制御室】 ①運転実習 ②制御棒校正 (正ペリオド法 2条件＋落下法) ③空間線量率測定 (2次γ線分布測定含む)
	12:30	昼食 (この間に中央・黒船ストリンガーにて箔放射化: 12:30~13:30)	
	14:00	【原子炉炉室＋管理棟実験室】 ⑥X線・中性子ラジオグラフィー	【管理棟実験室】 ⑦軸方向中性子束分布測定
	15:30	【管理棟実験室】 ⑦軸方向中性子束分布測定	【原子炉炉室＋管理棟実験室】 ⑥X線・中性子ラジオグラフィー
	17:00	実習結果確認	
17:30	解散		

【全体発表】

月/日 (曜日)	時刻	実習内容
12/6 (金)	9:30	【管理棟研修室】 実習まとめ作業→実習成果発表会準備(リハーサル)
	12:30	昼食
	14:00	実習成果発表会
	15:30	解散(退所)

	A班			B班		
	氏名	学年	性別	氏名	学年	性別
実習生	高橋 直樹	B3	男	井上 恵輔	B4	男
	藤原 圭佑	B3	男	眞壁 風	B4	男
	川上 大地	B3	男	太田 耕市	B4	男
	井上 滉生	B3	男	金原 太一	B4	男
	磯崎 一馬	B3	男	村越 聖哉	B4	男
	海達 祐輝	B3	男	内田 真緒	B4	女
	塙 稜	B3	男			
	平沢 雅之	B3	男			
TA	加藤 祐嗣	M1	男	五十嵐 魁	M1	男
	鈴木 実	M1	男			
教員	亀山 高範	教授	男	吉田 茂生	教授	男

謝辞 最後にあたり、今年度炉実習にご指導・ご協力をいただきました近畿大学原子力研究所の堀口哲男先生をはじめ、近大原研のスタッフの皆様へ深く感謝いたします。