

(2) 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。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り、また、本年度は、昨今の新型コロナ拡大防止対応にて、この実施も危ぶまれたが、何とか実施することができたことは幸いである。

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17名、TAとして院生2名の計19名の学生、他指導教員2名の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。以下に概要を示す。

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臨界の定常状態とした。その後、臨界状態を保持するための自動制御装置を作動させ、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読取から理解を深め、原子炉起動の基本特性について理解した。

2)空間線量率測定(2次 γ 線パルス波高分布測定含む)

原子炉運転実習1W臨界到達後、炉心周辺の所定位置にて、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、交代で実際に学生が測定値を読取り、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・考察し、放射線管理実務を体感した。また、サーベイメータによる空間線量率測定だけでなく、ゲルマニウム半導体検出器測定による γ 線スペクトル分析から、線量率の強度のみだけでなく、原子炉周辺にどのような γ 線(エネルギー分布)が分布しているかを測定し、誘発的な高エネルギー γ 線の発生について考察し、理解を深めた。

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、それぞれ3条件にて行った。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。そして、これらの両班全ての測定データを総括的に評価し、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行った。

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による箔放射化法にて測定を行った。金箔を添付する軸孔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、金箔貼付方向を考慮し、炉心位置(0cm)を基準に上方炉頂部に向かって10cm間隔(0~+60cm)で、また、下方炉底部に向かって10cm間隔(0~-60cm)で、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した。

金箔の測定は、GM計数装置のカウント率から、炉心値を基準に相対値を求め、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し、裸・Cdフィルター両者の差分から、熱中性子束($n/cm^2 \cdot sec$)としての絶対量を評価し、軸方向の熱中性子束分布を導出した。測定は、両班それぞれに、2つのストリンガー部に装着した全28枚の金箔の測定を行い、それぞれに評価を行った。そして、箔の装着方向を考慮して、中央ストリンガーと黒鉛ストリンガーとの軸分布との比較から相違を考察した。

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分間の照射を行った。照射・取出し後、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分間の計測を行った。これらの30秒間隔の時間的なカウント数減衰分布(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

照射用サンプル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、中性子線は炉心上部照射実験設備(ラジオグラフィ用)にて、3秒間のX線照射、また、15分間の熱中性子照射を行い、各IPの読取られた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し、ラジオグラフィの基本的原理を理解した。

3. 実習結果

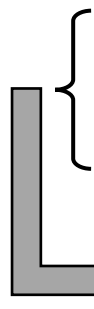
本報告では今回の実習プログラムとして行った内容について、学生の報告した結果を簡略に重要点のみを明記し、解説を加えた。実習プログラムは炉実習第1日目午後から翌2日目の正味1日半にて具体的な炉実習作業を行い、2日目の夕方から翌3日目の午前中を通じて、全実習内容とそれらの結果を総括するプレゼンテーション用資料の作成作業を、グループごとに行い、第3日目午後には報告会として発表し、相互の理解確認と問題点の抽出等を実施してきた。また、これには近大原研側の実習担当教員も同席いただき、報告事項についての質疑・コメント等をいただくこととなっている。学生にとってはかなりハードな作業対応ではあるが、短期集中的に、これまで講義(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、その対応状況からは十分な成果を得られていると感じ取れている。さらに、本報告会での質疑応答・コメント等を踏まえて、後日、大学授業時にディスカッション等による振り返り作業を実施し、プレゼンテーション用資料の再見直しを行い、修正版を作成・提出することで、理解度をより一層深めることを行った。

そして、これらの一連の流れを踏み、各自学生作成のレポート等を確認することから、本プログラム実施前のアンケート調査(意識・事前知識調査)等を比較しつつ、関心度・理解度等、学生の教育的効果を検討し、それらを用いた総合評価を踏まえ、学生の原子炉実習による教育的効果の向上を目指した改善等を行い、充実した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A・B班の発表内容の大筋を明記しておく。

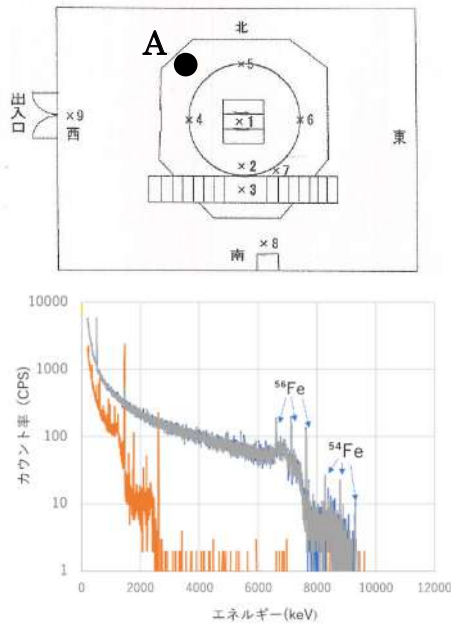
1) 原子炉運転実習

原子炉出力 [W]	ピコアンメータ [A]	制御棒位置			
		安全棒#1	安全棒#2	シム安全棒 [%]	調整棒 [%]
0.01	5.6×10^{-10}	上限	上限	85	25
0.1	5.3×10^{-9}	上限	上限	85	25
1	5.6×10^{-8}	上限	上限	85	25
0.1	5.6×10^{-9}	上限	上限	92	0



原子炉出力が異なるが、シム安全棒と調整棒の位置は同じ

2) 空間線量率測定(2次 γ 線パルス波高分布測定含む)

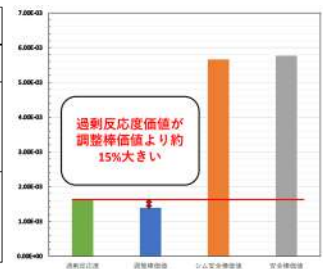


測定点	A班-空間線量率[$\mu\text{Sv/h}$]			B班-空間線量率[$\mu\text{Sv/h}$]		
	中性子	γ 線	合計	中性子	γ 線	合計
1	352	530	882	380	580	960
2	12	42	54	25	70	95
3	5.585	12.5	18.1	4.5	10	15
4	0.283	2.8	3.1	0.21	3.4	3.6
5	0.393	7.0	7.4	0.43	5.8	6.2
6	0.426	3.5	3.9	0.50	2.8	3.3
7	0.431	5.6	6.0	0.44	5.0	5.4
8	6.093	5.7	12	6.7	4.5	11
9	0.253	0.30	0.55	0.24	0.50	0.74

←測定点 A における Ge 半導体検出器による γ 線スペクトル: ^{54}Fe および ^{56}Fe からの即発 γ 線による全エネルギー吸収、シングルエスケープ、ダブルエスケープの各ピークが確認された。

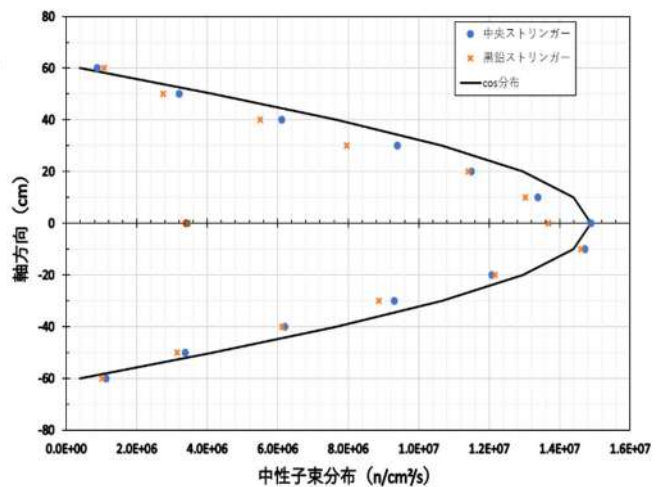
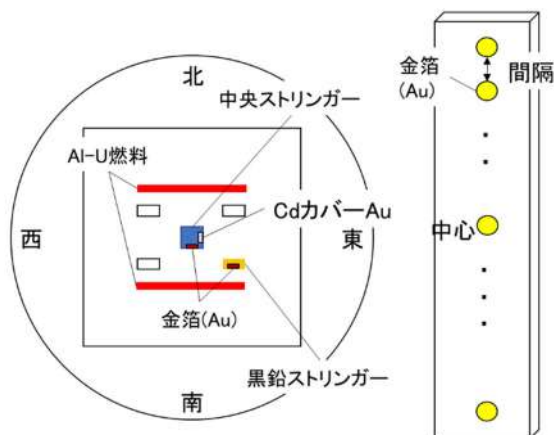
3) 制御棒校正実験

班	正ベリオド法			落下法		
	制御棒	条件	反応度 ρ	制御棒	条件	反応度 ρ
A	調整棒	0%→50%	6.31×10^{-4}	安全棒#1	100%→0%	5.77×10^{-3}
	調整棒	50%→100%	7.33×10^{-4}			
B	調整棒	0%→100%	1.42×10^{-3}	シム安全棒	92%→0%	5.44×10^{-3}
	シム安全棒	92%→100%	2.15×10^{-4}			



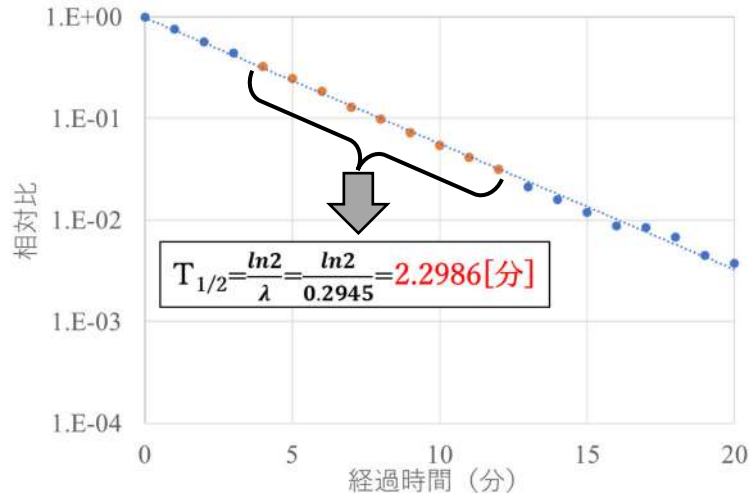
過剰反応度 $\rho_{ex} = 1.64 \times 10^{-3}$ の数値より、シム安全棒・安全棒いずれかを挿入すれば原子炉を安全に停止することが可能

4) 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	$1.9521\text{E}+07$	$4.6341\text{E}+06$	$1.4887\text{E}+07$
黒鉛ストリンガー	$1.8273\text{E}+07$	$4.5937\text{E}+06$	$1.3679\text{E}+07$

5) ^{28}Al 短半減期測定

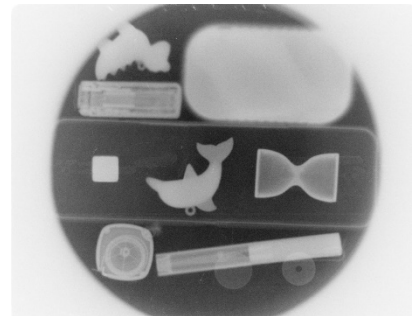
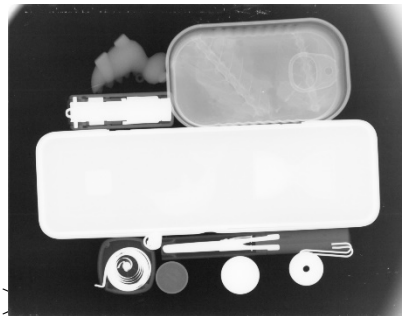


6) X線・中性子ラジオグラフィー

被写体

X線ラジオグラフィー

中性子ラジオグラフィー



《全体スケジュールおよび参加実習生》

●実習スケジュール

【全体説明】		
月/日 (曜日)	時刻	実習内容
12/2 (水)	12:45	【管理棟実験室Ⅲ】 近畿大学原子力研究所集合、事務手続き等
	12:55	【管理棟実験室Ⅲ】 保安教育
	13:15	【原子炉棟 炉室・制御室】 原子炉見学 (B班 13:15発、A班 13:25発)
【個別実習】		
月/日 (曜日)	時刻	実習内容
12/2 (水)	14:00	A班 【原子炉棟 炉室・制御室】 ①運転実習 ③制御棒校正(正ベリオリド法条件+落下法) ④空間線量率測定(2次γ線分布測定含む)
		B班 【管理棟 実験室Ⅲ】 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
12/3 (木)	9:30	【管理棟 実験室Ⅲ】 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
		【原子炉棟 炉室・制御室】 ①運転実習 ③制御棒校正(正ベリオリド法2条件+落下法) ④空間線量率測定(2次γ線分布測定含む) 【原子炉棟 炉室】放射化箔設置
	12:30	昼食 (この間に中央・黒船ストリンガーにて放射化: 12:30~13:30)
	14:00	【原子炉棟 炉室】放射化箔取出し 【22号館 会議演習室】 ④軸方向熱中性子束分布測定
	15:30	【原子炉棟 炉室 + 管理棟 実験室Ⅲ】 ⑥X線・中性子ラジオグラフィー 【22号館 会議演習室】 ④軸方向熱中性子束分布測定
	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
12/4 (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	氏名	学年
実習生	黒木 裕也	B3	松下 肇希	B3
	坂本 道仁	B3	濱上 風音	B3
	青山 優一	B3	汐崎 竣祐	B3
	須藤 章仁	B3	多田 康人	B3
	松永 裕貴	B3	後藤 直樹	B3
	猪瀬 健太	B3	阿部 健人	B3
	山崎 大地	B3	アルザハラニ ハコ	B3
	藤本 陸世	B3	塩野 幹人	B3
			フイホア ダイシ	B3
TA	太田 耕市	M1	眞壁 風	M1
教員	亀山 高範		吉田 茂生	

《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に深く感謝いたします。