

<炉物理部会賞受賞記念寄稿>

近畿大学原子炉における炉物理実験研究の軌跡

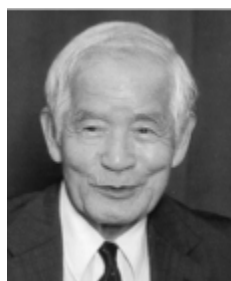
近畿大学原子力研究所 橋本憲吾

1. はじめに

この度、日本原子力学会炉物理部会から「2019 年度炉物理部会賞貢献賞」(題目: UTR-KINKI を用いた原子力研究および教育への多大な貢献、受賞者: 近畿大学原子力研究所) を頂き、所員一同、感激しております。近畿大学原子炉における教育活動については原子力学会等において頻繁に報告させて頂いておりますので、本寄稿では、炉物理研究を実施してきた原子炉工学研究室の変遷と近畿大学原子炉における炉物理実験研究に限定してお話しさせていただきます。

2. 原子炉工学研究室の発足と現在

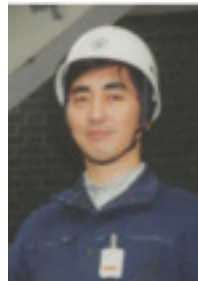
1987 年に柴田俊一先生が京都大学原子炉実験所から、1988 年に大澤孝明先生が九州大学から近畿大学原子力研究所に赴任され、翌年の 1989 年に橋本が同所助手として採用され、この 3 名を担当教員として本研究室がスタートした(写真 1)。研究室の名称は、柴田先生的一声で「原子炉工学研究室」となった。柴田先生は既に炉主任免状を持っておられ、橋本と大澤先生も速やかに同免状を取得したので、俗称「炉主任部屋」と呼ばれるようになった。研究室を主宰された柴田先生は仕事に大変厳しい方であり、日中は施設管理や許認可等の業務に忙殺され、研究は深夜か日曜に必死に取り組んでいた。当時、近畿大学には工学系の大学院は未設置だったので、進学希望の卒業研究生は国立大学の大学院へ送り出さねばならず、少なからず寂しい思いをした。現在の担当教員である佐野忠史准教授も当時の卒業生であり、阪大の竹田敏一先生のもとで修行することになった。ようやく大学院が設置されたのは 2000 年の春のことである。



柴田俊一教授



大澤孝明助教授



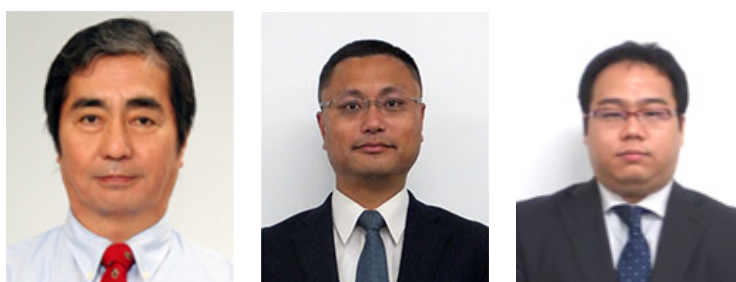
橋本憲吾助手

写真 1 平成元年当時の研究室担当教員

その後、2002 年に柴田先生が、2014 年に大澤先生が退職され、担当教員は橋本一人と

なった。また、理工学部原子炉工学科は廃止され、原子力専門科目の教育は殆どできない状況に追い込まれていた。以前は多くの学生と院生でゴった返していた研究室も、福島第 1 原子力発電所事故により更に不人気となり閑散とした状況となった。悪いことは重なるもので、新規制基準施行による原子炉停止後は、橋本も許認可業務に忙殺されることになった。しかしながら、僅かに残った院生と共に研究室存亡の危機を必死に乗り越え、何とか、第 2 期黄金時代(?)に繋げることができた。

本研究室の卒業生である左近敦士君(2014 年博士後期課程修了)を 2015 年秋に JAEA から助教として呼び戻し、2019 年春には本研究室卒業生の佐野忠史君(1997 年原子炉工学科卒業)が京大炉から准教授として赴任し、現在の研究室体制となる(写真 2)。現在、近畿大学を含む私立大学では、「1 研究室教員 1 人」が一般的となっており、教員の退職により研究室が消滅し、卒業生は故郷を失い路頭に迷うことになる。この現状を想うと、我が研究室は何とか 30 余年間存続することができ幸運であった。特に、炉物理実験をテーマに研究を展開する研究室は、複数の教員と後期課程を含む院生の存在が必須条件である。本学の電気電子工学科では、卒業研究生の配属は研究所全体で 10 名程度にすぎず、しかも大学院進学者は学部生の 1 割程度に限られる。コンスタントに院生を確保するためには、僅かな進学希望の学部生に我が研究室を希望してもらう必要がある。原子力専門教育を受けていない学生に「原子炉愛」を持ってもらうことは容易でないが、原子炉工学研究の継承と発展のため、今後も努力せねばならない。全国の大学の炉物理系研究室も末永く続くことを願うばかりである。長年培ってきた貴重な研究の DNA を次世代に引き継ぐためにも。



橋本憲吾教授

佐野忠史准教授

左近敦士助教

写真 2 現在の研究室担当教員

### 3. 近畿大学原子炉における炉物理実験研究の概要

橋本個人の過去の研究を回顧してみると、近畿大学炉以外の KUCA 等の施設利用による実験研究や理論研究の成果の方が多くことに気付き、炉物理実験屋としては恥ずかしい限りである。今後とも、共同研究者の皆さんの協力を得ながら、近畿大学炉の炉物理利用を活性化させ、この原子炉から多くの論文が世に出ることを期待する。共同研究者の論文出版の報を受け取ると、施設側の研究者として、自分が投稿した論文が出版されるより嬉

しく有り難いものである。以下に、本原子炉の利用による研究概要を分野毎に示す。

### 3.1. 空間依存動特性に関する研究

近畿大学炉は小回りが効くので 1 日のマシンタイムでかなりの実験ができる。さらに、この二分割炉は空間結合が弱いので、院生時代 (名大) の研究テーマである空間依存動特性から研究を開始することにした。従来、空間結合度の指標である結合係数や固有値間隔は炉雑音法やパイルオシレータ法により測定していたが、院生時代からもっと簡単に迅速に測定できる方法がないか考え続けていた。ある施設検査における制御棒落下実験の際に、落下後の中性子束分布の時間変化を妄想していると、複数の中性子計数管を空間的に分散配置すれば落下実験から容易に結合度が得られるはずと閃いた。翌日、実験をしてみると、予想した通りの結果が出た[1,3]。調子づいて、ANL の ZPPR で行った Flux Tilt 実験も行ってみると、制御棒落下実験から得られた結合度に近い値が得られた[2]。これらの実験手法を KUCA でも系統的に行い、多くの成果を得ることができた。続いて、1950 年代に米国で盛んに行われていた Source Jerk 法も初めて試みたところ、楽しい結果が出た[4]。この様に、日中の大半を原子炉室で過ごし、思いつくまま実験をしていると、嫌いであった実験研究がだんだん好きになっていった。

- [1] K. Hashimoto, R. Miki, T. Itoh, T. Shibata, Derivation of Coupling Coefficients from Rod Drop Measurements in Two-Point Reactors, Ann. Nucl. Energy, Vol.17, No.12, pp.667-672, (1990).
- [2] K. Hashimoto, T. Ohsawa, R. Miki, T. Shibata, A Practical Formula for Inferring Eigenvalue Separation from Flux Tilt Measurements in Nuclear Reactors, Ann. Nucl. Energy, No.18, No.3, pp.131-140, (1991).
- [3] K. Hashimoto, T. Ohsawa, R. Miki, T. Shibata, Derivation of Consistent Reactivity Worth and Eigenvalue Separation from Space-Dependent Rod Worths on the Basis of Modal Approach, Ann. Nucl. Energy, Vol.18, No.6, pp.317-325, (1991).
- [4] K. Hashimoto, R. Miki, Space-Dependent Effect Observed in Subcriticality Measurements for Loosely Coupled-Core System, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.32, No.10, pp.1054-1060 (1995).

### 3.2. 原子炉雑音解析に関する研究

炉雑音解析は「オタク」みたいで好きではなかったが、名古屋大学の山根義宏先生と摂南大学の山田澄先生の薫陶を受け、徐々に興味を持つようになった。ファインマン法における計数管不感時間効果の簡単な考慮法[5]、核分裂計数管を用いた時の 2 次中性子の考慮法[6]、即発ガンマ線検出による中性子相関解析[7]、ベネットの方法を一般化した階差フィルター法の実証[8]と、思いつくままに何でもかんでも試してみた。ファインマン解析に対する階差フィルター法は好評で、九州大学の的場優先生の研究[9]をはじめ、多くの炉施設で採用されることとなった。最近考案した移動バンチング法[10]も一般的に採用されるようになり、嬉しい限りである。通常の本バンチング法によるファインマン解析結果の Y 値が

ばらつく場合 (図 1) でも、この移動バンチング法を採用すると即発中性子減衰定数の推定が可能となる (図 2)。だんだんと、自らのみならず周囲の先生達も「オタク」になり、楽しかった。多くの研究者が集まって行う炉物理実験は、とても楽しい。これらの手法を KUCA に持ち込んで楽しんだのは言うまでも無い！

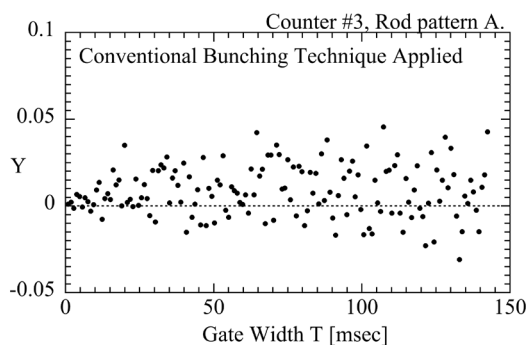


図 1 通常の本チング法による解析結果

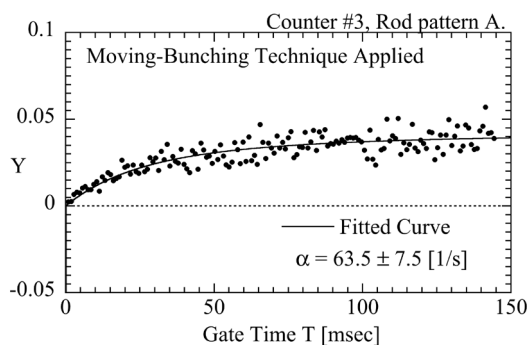


図 2 移動本チング法による解析結果

- [5] K. Hashimoto, K. Ohya, Y. Yamane, Experimental Investigations of Dead-Time Effect on Feynman- $\alpha$  Method, Ann. Nucl. Energy, Vol.23, No.14, pp.1099-1104 (1996).
- [6] K. Hashimoto, H. Shirai, T. Horiguchi, S. Shiroya, Experimental Investigation on Secondary-Count Effect in Feynman- $\alpha$  Measurement by Fission Counter, Ann. Nucl. Energy, Vol.24, No.11, pp.907-915 (1997).
- [7] K. Hashimoto, S. Yamada, Y. Hasegawa, T. Horiguchi, Feynman- $\alpha$  Correlation Analysis by Prompt-Photon Detection, Ann. Nucl. Energy, Vol.25, No.1-3, pp.13-22 (1998).
- [8] K. Hashimoto, H. Ohsaki, T. Horiguchi, Y. Yamane, S. Shiroya, Variance-to-Mean Method Generalized by Linear Difference Filter Technique, Ann. Nucl. Energy, Vol.25, No.9, pp.639-652 (1998).
- [9] G. Wakabayashi, Y. Yonemura, H. Heguri, M. Matoba, T. Sakae, K. Hashimoto, T. Horiguchi, Measurement of Subcritical Reactivity in Unsteady State with Digital Time-Series Data Acquisition System Using Difference Filter Technique, IEEE Trans.Nucl.Sci., Vol.49, No.5, pp.2508-2512 (2002).
- [10] R. Okuda, A. Sakon, S. Hohara, W. Sugiyama, H. Taninaka, K. Hashimoto, An Improved Feynman- $\alpha$  Analysis with a Moving-Bunching Technique, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.53, No.10, pp.1647-1652 (2016).

### 3.3. 中性子計数管不感時間効果に関する研究

学生実験のために GM 管を調整していると、2 線源法による不感時間測定の誤差評価が気になりだして、2 日間飲まず食わずで、同じ測定を 300 回程行い、集合平均による標準偏差をやっと出した。このような橋本を、不思議にも当時の先生達は褒めて下さった。これに機嫌良くして、中性子比例計数管や中性子シンチレーション計数管の不感時間の測定

を始めた[11-13]。ただし、簡単で即座に求まる方法で行ったことは言うまでも無い！

[11] 橋本憲吾, 大澤孝明, 原子炉出力変化法による中性子計数管不感時間の測定, 日本原子力学会誌, 36 巻, 3 号, pp.227- 231 (1994).

[12] K. Hashimoto, K. Ohya, Y. Yamane, Dead-Time Measurement for Radiation Counters by Variance-to-Mean Method, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.33, No.11, pp.863-8 68 (1996).

[13] K. Hashimoto, S. Yamada, Counting Losses due to Saturation Effects of Scintillation Counters at High Count Rates, Nucl. Instr. Meth.in Phys. Res. A, Vol.438, pp.502 -510 (1999).

### 3.4. 原子炉核特性一般に関する研究

神戸商船大学の北村先生は、近大炉実習で測定された膨大な中性子束分布データを整理され、モンテカルロ計算結果を付して論文にされた[14]。当時、学生実習を研究とは切り離して考えず、研究成果を求める姿勢に感服した。近畿大炉の学生実習や KUCA の院生実験においても蓄積されたデータを研究対象とすべきではないか。さらに一歩進んで、これら実習を研究と融合させることが必要では無いかな？

現在の本研究室の「十八番」は、雑音解析と最小二乗逆動特性解析である。炉物理実験で威力を発揮する後者の手法は、近畿大学原子力系の初めての課程博士である谷中裕君（現,JAEA）が開発・実証し[15,16]、KUCA 等で日常的に使用されるようになったものである。彼に敬意を表したい。

最近、本研究室では、燃料固有の中性子源に取り憑かれている。特に、近大炉や KUCA のアルミ合金高濃縮燃料は、炉物理実験に十分な固有中性子源強度があり、起動用中性子源無しで多くの実験を行っている。予想以上の中性子計数率が得られるので、当初は慎重に波高分布（図 3）や中性子相関解析（図 4）を行い、中性子計数管が検出しているものが核分裂連鎖を経た中性子であることを確認していた[17]。しかし、高濃縮燃料の返還が進む KUCA では、近いうちに固有中性子源の利用ができなくなる。低濃縮燃料の  $^{238}\text{U}$  の自発核分裂による中性子源強度は、高濃縮燃料の $(\alpha,n)$ 反応による強度に太刀打ちできない。

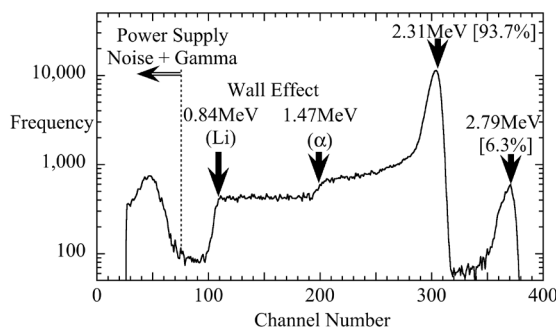


図 3  $\text{BF}_3$  計数管の波高分布

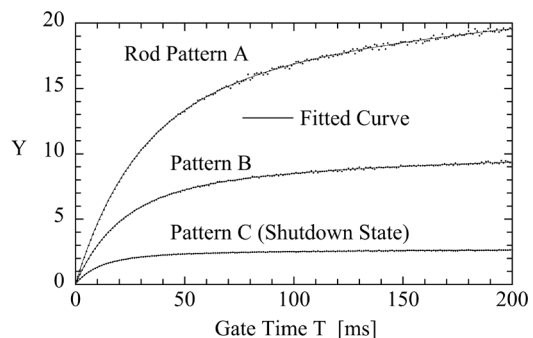


図 4 ファインマン解析結果

2019 年度から名古屋大学の遠藤先生の共同利用研究が始まり、マシンタイムが 2 日に

もかかわらず、初年度から興味深い論文が出され[18]、共同利用研究者の鏡であり感服している。今後の研究の進展に期待したい。

[14] A. Kitamura, J. Matsumoto, Y. Furuyama, A. Taniike, N. Kubota, T. Ohsawa, K. Hashimoto, T. Horiguchi, T. Tsuruta, Measurements and Analysis of Neutron Flux Distribution in UTR-KINKI, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.40, No.5, pp.349-355 (2003).

[15] H. Taninaka, K. Hashimoto, T. Ohsawa, An Extended Rod Drop Method Applicable to Subcritical Reactor System Driven by Neutron Source, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.47, No.4, pp.351-356 (2010).

[16] 谷中裕, 橋本憲吾, 大澤孝明, 最小自乗逆動特性解析における空間依存性の低減, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.9, No.3, pp.296-304 (2010).

[17] A. Sakon, K. Nakajima, S. Hohara, K. Hashimoto, Experimental Study of Neutron Counting in a Zero-Power Reactor Driven by a Neutron Source Inherent in Highly-Enriched Uranium Fuels, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.56, No.2, pp.254-259 (2019).

[18] T. Endo, A. Nonaka, S. Imai, A. Yamamoto, A. Sakon, K. Hashimoto, Subcriticality Measurement Using Time-Domain Decomposition-Based Integral Method for Simultaneous Reactivity and Source Changes, J. Nucl. Sci. Technol., Available from <https://doi.org/10.1080/00223131.2019.1706658>

### 3.5. 断面積評価に関する研究

京都大学原子炉実験所の小林捷平先生は、近畿大学炉の標準中性子場を利用して、様々な核種の共鳴積分[19,20] (表 1)、中性子エネルギースペクトルを測定された (図 5)。小林先生の退職後、断面積関係の共同研究は途絶えており、今後、強化せねばならぬ利用分野である。

表1 Resonance Integral for  $^{237}\text{Np}(n,\gamma)^{238}\text{Np}$  reaction

Present	652 ± 24 b
JENDL-3.2 ('93)	662
JENDL-3 ('90)	663
ENDF/B-VI ('91)	655
ENDF/B-V ('79)	662.6
JEF-2 ('93)	655
Mughabghab ('84)	640 ± 50
Gryntakis ('87)	821.5 ± 58.0
Hellstrand ('70)	640 ± 50
Schuman ('69)	807 ± 40
Scoville ('68)	900 ± 300

(近大炉で測定)

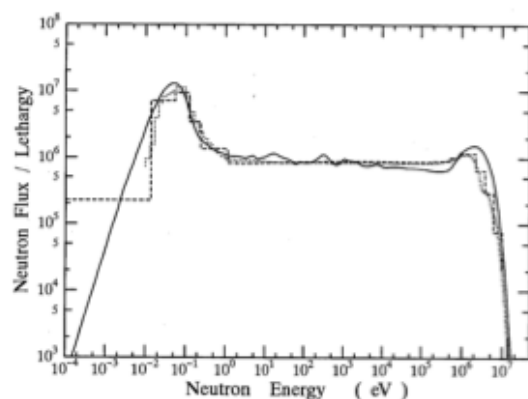


Fig. 3 Neutron spectrum for the central graphite cavity of the UTR-KINKI.  
 — Present result  
 ..... Analysis by the NEUPAC code<sup>20)</sup>  
 - - - Calculation by the SRAC code system<sup>20)</sup>

図 5 近大炉中央ストリンガー空孔内のエネルギースペクトル測定結果

[19] K. Kobayashi, A. Yamanaka, I. Kimura, Measurements of Thermal Neutron Cross Section and Resonance Integral for  $^{237}\text{Np}(n,\gamma)^{238}\text{Np}$  Reaction, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.31, No.12, pp.1239-1247 (1994).

[20] H. Cho, K. Kobayashi, S. Yamamoto, K. Seo, H. Y. Hwang, S. K. Nha, S. K. Ko, Measurement of Thermal Neutron Cross-Sections and Resonance Integrals for  $^{164}\text{Dy}(n,g)^{165}\text{Dy}$  and  $^{180}\text{Hf}(n,g)^{181}\text{Hf}$  Reactions, Nucl. Instr. Meth.in Phys. Res. A, Vol.462, pp.442 -450 (2001).

### 3.6. 原子炉工学教育に関する研究

摂南大学の山本淳治先生は、原子炉実習の高度化を研究テーマに精力的に共同利用を進めてこられた[21-23]。学生実習については、安易に研究とは切り離して研究資源の消耗と考えがちであるが、教育活動も研究の場として捉える姿は工学教育研究の重要性を示唆している。

[21] 山本淳治, 井原陽平, 堀口哲男, 橋本憲吾, 山田澄, 飯田敏行, インターネットを用いて遠隔で行う原子炉実習の試み, 工学教育, 56 巻, 4 号, pp.33-38 (2008).

[22] 堀口哲男, 山本淳治, 橋本憲吾, 杉浦紳之, 伊藤哲夫, 実験実習とインターネット遠隔実習を組み合わせた原子炉教育の体系化, 工学教育, 59 巻, 1 号, pp.106-111 (2011).

[23] Y. Ihara, W. Kada, F. Sato, T. Iida, J. Yamamoto, S. Yamada, T. Horiguchi, K. Hashimoto, Development of Compact Pulse Height Analyzer Modules Based on FPGA for E-Learning Type Exercises on Nuclear Reactor, Progress Nucl. Sci. Technol., Vol.1, pp.244-247 (2011).

## 4. おわりに

近畿大学原子炉の共同利用については、炉物理実験研究の申請は少数であり、魅力ある提案を望んでいる。ただし、本研究所も京大炉も研究が本務であるので、コストに見合う研究成果が出なければ、永続的な運営は不可能となる。この観点からも、両研究所で実施している学生実習・院生実験は研究資源を消耗させ、これを放置すると研究力の低下のみならず研究所の存在すらも危うくなる。そろそろ、考え直す時期が来ているのではないか？ 近大炉実習や院生実験が始まった頃に立ち返り、共同実験研究の中で次世代の炉物理研究者や技術者を養成することを考えても良いのではないか。「デモ」的な実習・実験から抜け出し、研究者として真剣勝負の場で若者を鍛えてはどうか？

本研究所の原子炉工学研究室では、橋本も老い、第二世代に移ろうとしている。喜ばしい限りである。現在の研究活動は、近畿大学原子炉を拠点とし、京都大学施設 (KUCA, KUR, LINAC)、JAEA 施設 (J-PARK, HTTR) 等に及んでいる。将来は、国境を飛び越え、海外に実験の場を求めるかも知れない。しかし、本研究室だけで行う研究には限界があり、共に歩む「志」ある共同研究者を望む。理論や計算と異なり、炉物理実験は多くのマンパワーと経験が必要であるが、炉室や制御室で交わす議論は楽しく「Fruitful」である。真実は目の前の炉にあるのだが、なかなかデータとして教えてくれない。研究者の成長に

応じて、データを通して教えてくれる。修養をサボると偽のデータを出してくる。一緒に、「炉心を作り」、「運転し」、「データを取り」、「解析し」、「研究成果を社会財とする」楽しい作業をしようではないか！！

炉物理実験には、「理論」も「計算」も「マンパワー」も「時間」も「経験」も「根性」も「マシンタイム」も「設備機器」も「お金」も「厳しさ」も「信頼」も「友情」も「お酒」も、必要だ！ とてもしんどくても、皆で頑張る炉物理実験は楽しい！



近畿大学原子炉



1Wちゃん