



京都大学における加速器駆動未臨界炉研究計画

京都大学原子炉実験所

代谷 誠治

e-mail:shiroya@kuca.rri.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

最近、加速器駆動未臨界炉は核廃棄物中に含まれる放射能毒性の高い長寿命放射性物質の核変換処理を行う装置として世界的に注目されている。そればかりか、同炉は、高い安全性を有する核燃料の増殖やエネルギー生産が行える炉となり、また、研究用の強力中性子源となる可能性を秘めていることが指摘されている。¹⁾

京都大学原子炉実験所(以下、「京大炉」という。)では、昭和 39 年に初臨界を達成した熱出力 5 MW の京都大学研究用原子炉(KUR)の代替炉として、近年の加速器技術の発展と原子炉技術の成熟に依拠した加速器駆動未臨界炉を実現し、核エネルギーと中性子利用の分野における共同利用研究に供することを将来計画の最終目標としている。

本稿では、京大炉における加速器駆動未臨界炉の研究計画について、核エネルギー研究、特に核設計研究を中心に紹介する。

2. 京都大学原子炉実験所将来計画の概要

京大炉では、平成 8 年度に研究計画委員会の下に将来計画小委員会が設置され、将来計画の本格的な検討が開始された。中性子ファクトリー計画と名付けられた京大炉の将来計画では、近年の研究動向を分析した上で、「制御された中性子」²⁾の生成と利用を目的として、加速器中性子源と原子炉中性子源の協調システムを実現し、原子力安全の根幹を支える核エネルギーシステム、バックエンド、極限環境工学等の核エネルギー研究と粒子線機器開発を通じて花開く中性子科学、物質科学、生命科学等の中性子利用研究を車の両輪として推進し、従来から KUR を用いて行われてきた共同利用研究の持続的な発展に資することを目指している。

中性子ファクトリー計画の最終目標は加速器駆動未臨界炉を実現することであるが、これに向かつては段階的に研究成果を積み上げて行くことが必要と考えられる。第 1 期では、比較的低エネルギーの加速器を導入して、加速器中性子源の取扱いに習熟することを含めつつ、これを用いた新しい研究を開始するとともに、京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)と組み合わせ

て加速器駆動未臨界炉の成立性評価をも含めた基礎的な実験的研究を系統的に遂行し、その成果に基づいて第2期では、加速器の加速エネルギーを増強するとともに未臨界炉を設置して最終目標を実現することとされている。なお、この将来計画では、研究の継続性の観点から、現行の KUR については、燃料を低濃縮化し、加速器駆動未臨界炉が共同利用研究に供されるまでの間、運転を継続することとしている。

現時点では、第1期で設置後4半世紀を過ぎた KUCA の整備を行うとともに加速陽子エネルギー70 MeV 程度のリングサイクロトロンを導入し、研究基盤の整備を行って基礎的研究を遂行し、第2期で第1期の研究成果に基づいて加速エネルギーを500 MeV 程度に増強して未臨界炉を導入し、加速器駆動未臨界炉を実現する計画になっている。ちなみに、加速器駆動未臨界炉に用いる加速器の形式については、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と日本原子力研究所(JAERI)の統合計画では線型加速器を選択しているが、京大炉では、研究用中性子源としてのみならず、将来の核エネルギー発生装置としての加速器駆動未臨界炉に関する研究を行うために、より安価かつ省スペースで加速エネルギー効率の高い円型加速器の導入を計画している。

3. 加速器駆動未臨界炉に関する研究の準備状況

京大炉における加速器駆動未臨界炉に関する研究の準備状況としては、平成8年に将来計画小委員会が設置されて当該炉の核設計研究が本格的に開始され、平成12年度から同小委員会が次期計画推進室に衣替えした後も継続的に研究が行われており、それらの成果は国際会議等々でも報告されている。³⁵⁾ また、平成12年度からは KUCA 共同利用研究の一環としてプロジェクト的な実験的研究が開始されている。

一方、平成10年度に日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業の準備研究として「トリウム燃料サイクル及び加速器駆動未臨界炉基礎研究のための予備研究」が、当時、京都大学大学院工学研究科に在職中の木村逸郎教授を代表者として2年計画で開始された。なお、これについては平成11年度の代表者は筆者が務め、その成果に基づいて平成12年度からは KEK の森義治教授を代表者とする「高効率加速器 FFAG シンクロトロンの開発研究」が4年計画で実施されることになった。この FFAG シンクロトロンは円型加速器の一種であり、エネルギー生産用加速器駆動未臨界炉に有用なものと期待される。

また、平成12年度には、JAERI の原子力基礎研究推進制度の下に、筆者が代表者を務める「加速器駆動未臨界炉に関する実験的研究」が採択され、3年計画で実施されることになった。さらに、平成5年以来続いている KUCA 共同利用研究に参加する日本の「大学連合」とフランス原子力庁(CEA)の研究協力協定に基づく日仏共同研究でも、平成11年の協定改定時とほぼ時を同じくして、CEA の高速臨界実験施設 MASURCA を用いた加速器駆動未臨界炉実験と KUCA を用いた同種の実験に関する情報交換を積極的に行うことで日仏双方が合意に達した。これは、MASURCA 実験が高速中性子炉体系で行われ、KUCA 実験が熱中性子炉体系で行われることから、相補的關係にある実験的研究の情報交換を行うことは極めて有意義であるとの認

識を日仏双方が持つに至ったためである。

4. 加速器駆動未臨界炉の概念的核設計

4-1. MCNPX の導入と検証計算

平成 11 年に加速器駆動未臨界炉設計用の核計算コードとして、米国ロスアラモス研究所で開発された MCNPX[®]を導入し、概念設計を行うに先立って検証計算を行った。なお、MCNPX では、核分裂性核種等を除いて、中性子エネルギーが 20 MeV から 150 MeV まで拡張された核データが使用可能となっている。

表 1 に各種エネルギーの陽子を鉛あるいは劣化ウランターゲットに入射したときに発生

表 1 発生中性子数に関する実験値と計算値の比較

ターゲット材料	陽子エネルギー [MeV]	計算値	実験値 ^{*)}	C/E 値
鉛	540	8.36	7.90	1.058
	720	12.81	12.05	1.063
	960	18.16	16.82	1.080
	1,470	27.74	26.82	1.034
劣化ウラン	540	13.12	18.64	0.704
	720	20.11	29.09	0.691
	960	29.08	40.46	0.719
	1,470	45.77	57.73	0.793

*) P. A. Landeyro *et al.*, "Simulation of Thick Target Experiments for the Validation of Spallation Codes," Proc. Int'l. Conf. on Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island, NY, USA, Oct. 5-8, 1998, Vol.2, p.1327.

する中性子数に関する実験値と計算値の比較を示す。この表から鉛ターゲットの場合には計算値が実験値をほぼ再現しているのに対して、劣化ウランターゲットの場合には計算値が 3 割程度過小評価する傾向にあることが判り、核分裂性物質等をターゲットとする加速器駆動未臨界炉を設計するためには、核データを含め、高エネルギー中性子の発生及び輸送に関して MCNPX の改良が必要であることを示している。

図 1-1、1-2 には、それぞれ鉛のターゲットに 500 MeV の陽子が入射したとき、及びアルミニウムのターゲットに 68 MeV の陽子が入射したときの角度依存中性子スペクトルに関する実験値と計算値の比較を示す。この図より、既に指摘

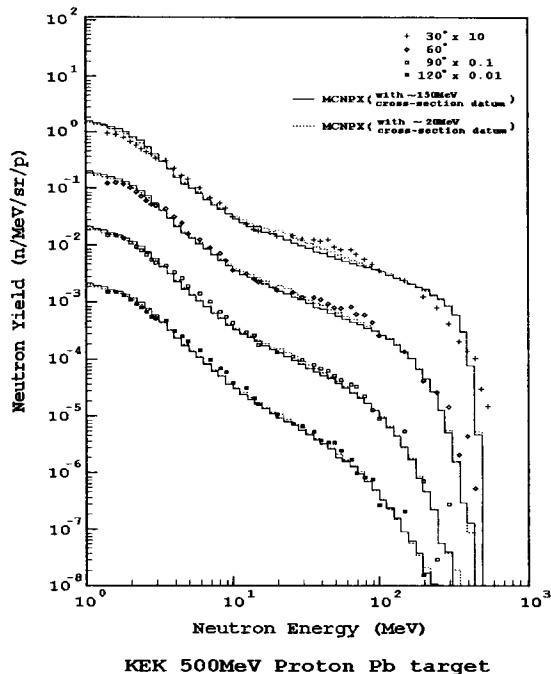
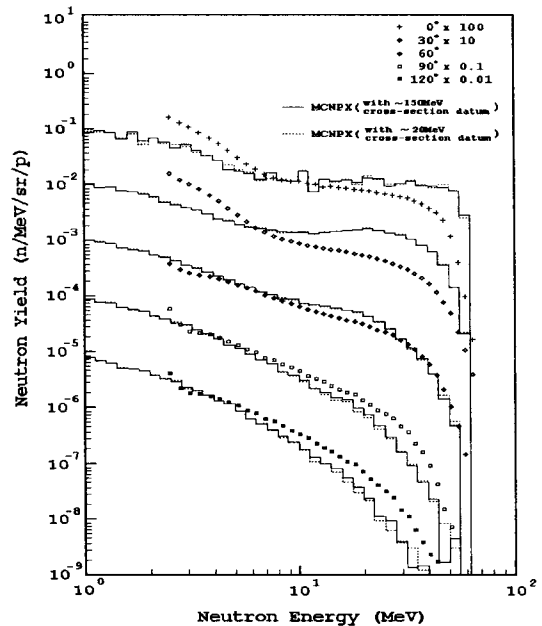


図 1-1 中性子の角度依存スペクトル(1)

されていることではあるが、ターゲットの原子核が軽くなればなるほど、また、入射陽子エネルギーが低くなればなるほど、実験値と計算値の差が大きくなる傾向にあり、さらに、角度が前方方向になればなるほど両者の差が拡大する傾向にあることが判る。なお、比較的良い一致を示している鉛ターゲットの場合においても中性子エネルギーが数十 MeV 付近で実験値と計算値の差が大きくなる傾向にあり、この部分の不一致だけで炉心出力に及ぼす影響は数%になるという評価例も示されている。⁸⁾

したがって、現時点においてMCNPXを概念設計に使用することは可能であっても、詳細設計に用いるには未だに程遠い状況にある。今後、MCNPXをはじめとして核設計コードを確立するために、核破砕反応による中性子発生機構と中性子輸送について、核データを含め、理論と実験の両面において種々の基礎的な研究を積み上げることが必要であろう。



TIARA 68MeV Proton Al target

図 1-2 中性子の角度依存スペクトル(2)

4-2. MCNPX を用いた KUR 型中性子源炉の概念的核設計

図 2 に示すように KUR の低濃縮ウラン装荷炉心の中央部に加速器ターゲットを設置し、未臨界状態にした上で高エネルギーの陽子を打ち込み、核破砕反応により中性子を発生させて加速器駆動未臨界炉中性子源を形成することを考え、MCNPX を用いて概念的核設計を行った。その際、加速器ビームの電流は 1 mA に固定し、ターゲット材料、加速粒子エネルギー、実効増倍率 k_{eff} などの核設計パラメータ

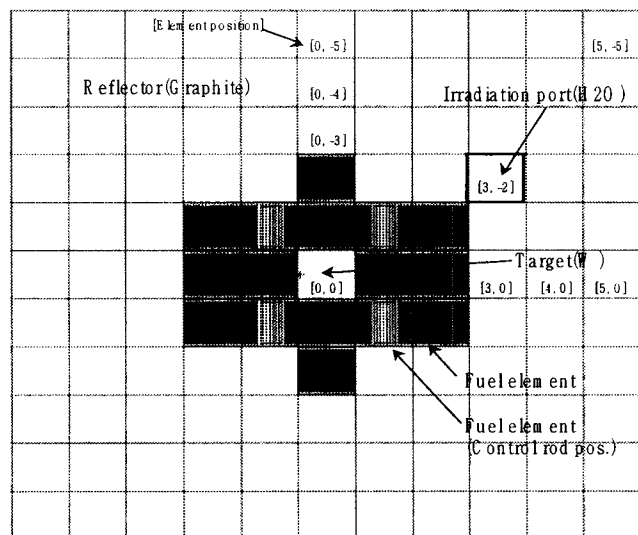


図 2 加速器駆動未臨界炉設計時の炉心配置図

を表2に示すように変化させて核計算を行い、中性子束、中性子スペクトル、出力、出力分布の変化について検討した。なお、その際、簡単のため、 k_{eff} の調整については炉心に装荷された燃料の密度を炉心の全領域に亘って均等に変更することとした。

表2 核設計パラメータ

ビーム電流	1 [mA]
ターゲット材料	タングステン、鉛、劣化ウラン
粒子エネルギー	100、300、500、1,000 [MeV]
実効増倍率 k_{eff}	0.90、0.95、0.92

図3-1と3-2にそれぞれ固定中性子源法と固有値計算法で求めた各炉心要素毎の中性子スペクトルの例を示す。両者とも炉心中央部にはタングステンターゲットが配置され、 k_{eff} を0.98に調整したもので、固定中性子源計算では500 MeVで1 mAの陽子がターゲットに入射するとした。なお、図3中の[0,0]などの標記は炉心中の場所を表しており、図2の標記に対応している。タングステンターゲット部では共鳴吸収の効果により1~10 eV

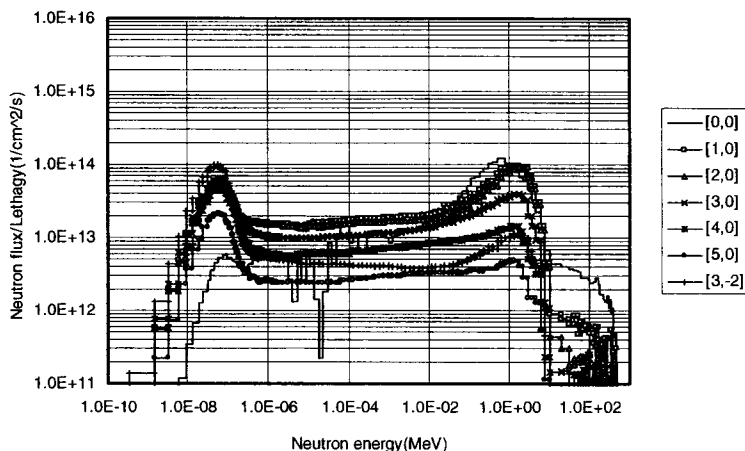


図3-1 固定中性子源計算で求めた中性子スペクトル

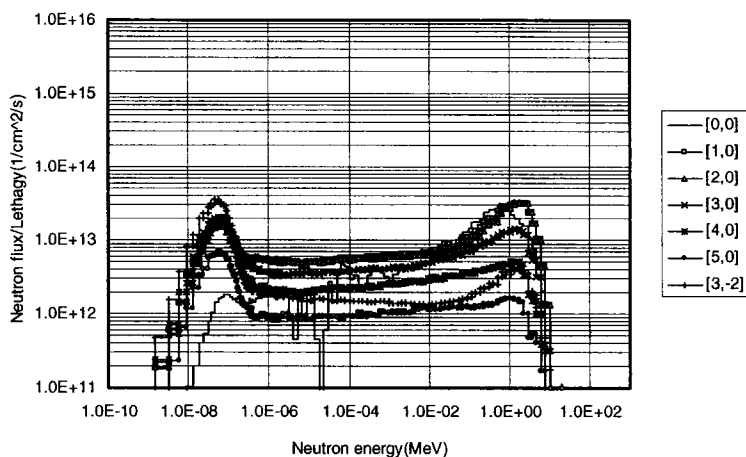


図3-2 固有値計算で求めた中性子スペクトル

の領域で中性子スペクトルに顕著な構造が現れている。これらの図から、約20 MeV以上の高エネルギーの領域を除けば両計算法により求めた中性子スペクトルの形状はほぼ同一であることがわかる。このことは、加速器駆動未臨界炉における中性子スペクトルの主要部は核分裂の連鎖反応によって支配されていることを如実に示しており、未臨界炉中で中性子が核分裂連鎖反

応によって何倍にも増倍されることを考えると極めて当然のこととして理解することができる。

図4にターゲット材質、陽子エネルギーをパラメータとした k_{eff} 依存の炉出力を示す。これより、現行の KUR と同等の 5 MW の出力を得るためには、ターゲットの材質がタングステンで陽子エネルギーが 500 MeV であれば k_{eff} を約 0.92 とすれば良いことが判る。また、タングステンターゲットの場合、陽子エネルギーを 300 MeV とすれば、5 MW の出力を得るためには k_{eff} を約 0.98 に維持しなければならないことがわかる。但し、本計算結果は炉心に装荷されたウランの密度を炉心全領域に亘って均一と仮定して調整したものであり、現実の体系とは異なることに注意を要する。現実の体系で出力 5 MW を実現するためにはより詳細な核計算を行う必要がある。

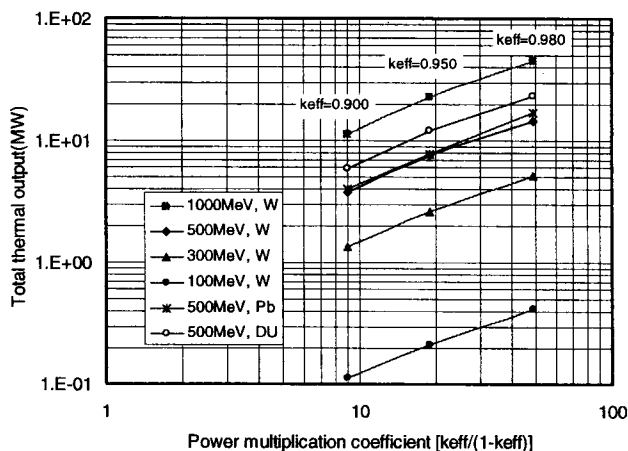


図4 ターゲット材質、陽子エネルギー、 k_{eff} 依存の炉出力

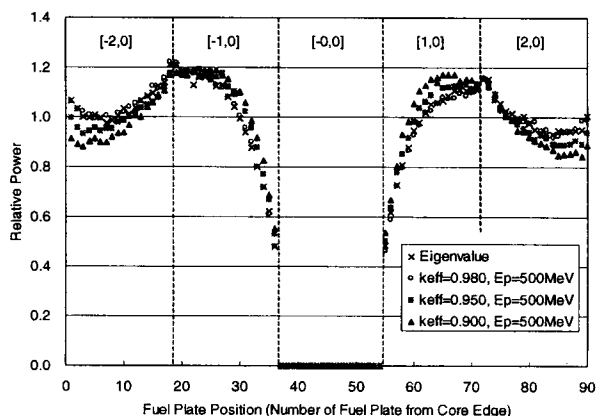


図5 W ターゲット周辺燃料板毎の出力の k_{eff} 依存性

図5にタングステンターゲットに 500 MeV の陽子を入射したとき、ターゲット周辺の燃料板毎の出力について k_{eff} 依存性を示す。この図から、 k_{eff} が 0.98 のときは固有値計算と固定中性子源計算の結果はほぼ同一となり、 k_{eff} が小さくなると両者の差は拡大するものの、出力ピークの値についてはほぼ同様な数値を与えることが判明した。

なお、ターゲットの材質は中性子束と熱出力分布に大きな影響を与えるが、 k_{eff} と陽子エネルギーはそれほど大きな影響を与えないことが判った。但し、上記の概念的核設計計算では、極めて中性子漏れが大きく、かつ炉心が小さい KUR 型の研究用原子炉に加速器から発生する中性子を打ち込むことを考えたものであり、核廃棄物の核変換処理や核エネルギー発生用の加速器駆動未臨界炉等とは炉心の核特性が異なることを付言しておく。

5. KUCA における加速器駆動未臨界炉基礎実験

5-1. MVP を用いた 14 MeV 中性子入射実験解析

MeV 中性子入射実験解析

KUCA における加速器駆動未臨界炉基礎実験で使用した炉心の配置図の一例を図 6 に示す。ちなみに、図中に示した燃料棒や反射体等の 1 体あたりの大きさは約 5.4 cm 角である。この実験では約 5.1 cm 角で約 93 %濃縮のウラン・アルミニウム合金燃料を装荷したポリエチレン減速・反射型炉心に KUCA 付設加

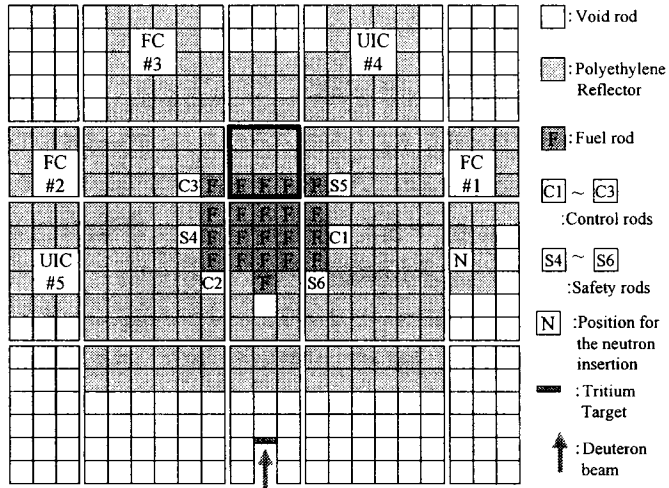


図 6 KUCA 実験で使用した炉心の配置図

速器で D-T 核融合反応により発生した 14 MeV のパルス状中性子を入射し、名古屋大学で開発され、KUCA で作成された濃縮 ${}^6\text{Li}$ からなる LiF と ZnS(Ag) を 1:1 で混合して直径約 1 mm の光ファイバーの先端に瞬間接着剤を用いて塗布した光ファイバー検出器⁹⁾を燃料棒の間隙に設置して中性子束分布、即発中性子減衰定数等を測定した。なお、未臨界度の測定には面積比法¹⁰⁾を用い、発生中性子数のモニターには LiF を ThO_2 に置き換えた光ファイバー検出器をターゲット側のポリエチレン反射体の側面に貼付して用いた。また、即発中性子減衰定数測定時のトリガパルスは加速器のアーケパルスを利用した。

この実験の解析には JAERI で開発された連続エネルギーモンテカルロコード MVP¹¹⁾を用いた。図 7 に MVP で計算した中性子減衰の様子から求めた即発減衰定数 α を実験値と比較して示す。なお、計算で使った核データは JENDL-3.2¹²⁾である。また、この図では、現在のところ MVP では遅発中性子が扱えないため、計算値は以下

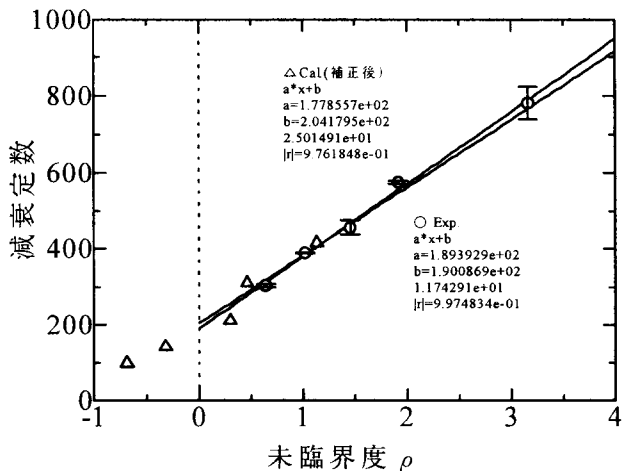


図 7 即発減衰定数の実験値と計算値の比較

の手順で遅発中性子の効果を補正したものを示した。すなわち、体系の反応度を ρ 、実効遅発中性子割合を β_{eff} 、中性子生成時間を Λ で表せば、

$$\alpha = (\beta_{\text{eff}} - \rho) / \Lambda。$$

(1)

という関係が成り立つので、これを用いて補正を行った。未臨界度が小さいときには、(1)式中の β_{eff} と Λ は定数と見なすことができるので、 α を ρ に対してプロットすると、(1)式は $(0, \beta_{\text{eff}}/\Lambda)$ を通る傾き $1/\Lambda$ の 1 次関数になるはずである。そこで、実験値を 1 次関数でフィットしたものは $(-\beta_{\text{eff}}, 0)$ を通ると考えられるので、計算値を 1 次関数でフィットしたものが $(-\beta_{\text{eff}}, 0)$ を通るように平行移動させて図 7 に示した。

中性子束分布の形状については実験値と計算値が良い一致を示したが、絶対値では大きく食い違う結果が得られた。絶対値で比較するためには、計算で求める固有値の精度を飛躍的に向上させる必要があることを改めて痛感した。勿論、未臨界度測定の精度を向上させる必要があることも論を待たない。これは、粗っぽく言えば、未臨界炉中での中性子の増倍は $k_{\text{eff}}/(1 - k_{\text{eff}})$ 、つまり $1/\rho$ の関数と見なせるので、当然のことながら、実際に計算値と実験値を絶対値で比較するとなると極めて難しいということである。

6. 今後(当面)の研究計画

今後は、現在行っている KUCA における加速器と臨界集合体を組み合わせた加速器駆動未臨界炉に関する基礎的な実験を積み上げるとともに、加速器ターゲットでの核破砕反応による中性子発生や高エネルギー中性子の輸送に関する実験的研究等も行い、それらの解析を通じて MCNPX などの計算コード及び核データの検証、評価を行いつつ核設計研究を継続、発展させる予定である。なお、既に概算要求をしているところではあるが、少なくとも将来計画の第 1 期については、早期に実現して、より高度な KUCA 実験が行える体制が整うことを切に希望している。

7. おわりに

加速器駆動未臨界炉の実現に向けては、核データ及び核計算コードの整備が不可欠であり、特に高エネルギー核データ及び未臨界炉の特性に関する理論的、実験的研究を積み上げる必要があるものと考えており、多くの研究課題が残されている。

本研究の遂行に際し、平成 11 年度後期及び平成 12 年度前期に京大炉の客員助教授を務めた原子燃料工業(株)の山本章夫氏、JAERI の原子力基礎研究制度に基づく研究の分担者である京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻の秦和夫助教授のグループ、京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻の M2 で筆者の研究室に所属する池田沢慈君、仲野真一君には核設計計算、MCNPX 検証計算、MVP 解析計算で全面的にご協力をいただいた。また、筆者が所属する京大炉の核エネルギー基礎研究部門の宇根崎博信助手、三澤毅助教授、小林圭

二助手には本研究の共同研究者としてご協力をいただいた。さらに、筆者が所属する臨界装置部の中村博助手、市原千博助手、池川龍照技官、山本弘志技官、名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻の山根義宏教授のグループ、大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻の北田孝典助手、竹田敏一教授のグループには共同利用研究を含む KUCA 実験において全面的にご協力をいただいた。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。なお、本研究は JAERI の原子力基礎研究制度、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業、文部省の科学研究費補助金の支援を受けて行われたものである。

最後に、京大炉の将来計画に対して、各位の忌憚のないご意見と暖かいご支援、ご鞭撻を賜れば幸甚である。

参考文献

- 1) 原子力システム研究懇話会, 原子力産業会議:「第5章 加速駆動原子力システム」, 中性子科学, 平成11年6月.
- 2) 前田豊, 他:「研究用原子炉の現状と将来」, 日本原子力学会誌, Vol.38 (1996) 870.
- 3) Seiji Shiroya and Hironobu Unesaki: "Study on Conceptual Neutronics Design of 'Neutron Factory' as a Future Facility in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)," Proc. 9-th Int'l. Conf. On Emergent Nuclear Energy Systems, ICENES'98, June 28 – July 2, 1999, Tel Aviv, Israel, Vol.1, p.289.
- 4) S. Shiroya, H. Unesaki *et al.*: "Accelerator Driven Subcritical System as a Future Neutron Source in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI) – Basic Study on Neutron Multiplication in the Accelerator Driven Subcritical System -," Progress in Nuclear Energy, Vol.37 (2000) 357.
- 5) Akio Yamamoto and Seiji Shiroya: "A Conceptual Neutronics Design Study for Next Generation Neutron Source in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)," Proc. 10-th Int'l. Conf. on Emergent Nuclear Energy Systems, ICENES2000, Sept. 24 – 28, 2000, Petten, The Netherland, p.66.
- 6) Laurie S. Waters, ed.: MCNPXTM User's Manual, Version 2.1.5, TPO-E83-G-UG-X-00001, Revision 0, Nov. 14, 1999.
- 7) S. Meigo *et al.*: "Measurements of Spallation Neutrons from a Thick Target Bombarded with 0.5 and 1.5 GeV Protons," Proc. ICANS-XII, 1995, Oct. 11 – 14, PSI, Switzerland, p.442.
- 8) 代谷誠治:平成11年度 日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業 準備研究 トリウム燃料サイクル及び加速器駆動未臨界炉基礎研究のための予備研究 報告書, 平成11年4月.
- 9) C. Mori *et al.*: "Simple and Quick Measurement of Neutron Flux Distribution by Using an optical Fiber with Scintillator", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.31 (1994) 248.
- 10) N. G. Sjöstrand: Arkiv Fysik, Vol.11 (1956) 233.
- 11) 森貴正, 中川正幸: MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード, JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- 12) K. Shibata *et al.*: Curves and Tables of Neutron Cross Sections in JENDL-3.2, JAERI-Data/Code 97-003 (1997).