

KUCA 実験の現状と展望

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

京都大学原子炉実験所にある京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) は、1974年に初臨界を達成した臨界集合体であり、主に炉物理の研究・教育用として全国大学の共同利用研究に供されている¹⁾。本報告では、KUCAで最近行われている研究の幾例かを紹介しながら、KUCA実験の現状と展望について述べることとする。

2. KUCAの概要

KUCAは、最大熱出力100W、短時間(1時間以内)最大熱出力1kWの世界的にも稀少な非均質複数架台方式の臨界集合体であり、我が国で唯一の大学が持つ臨界集合体である。KUCAには、Fig. 1に示すようにA架台、B架台と呼ばれる2基の固体減速架台とC架台と呼ばれる1基の軽水減速架台があり、絶縁変圧器型の付設加速器が1基ある。

A、B架台用の燃料には93%高濃縮ウラン(HEU)アルミ合金の角板燃料(2"角で厚さ1/16")が用いられ、トリウム金属角板や天然ウラン金属角板も使用することができる。減速材や反射材としてはポリエチレン角板や黒鉛板が用いられ、ベリリウム金属板も使用することができる。C架台用の燃料には主にHEUアルミ合金をアルミ被覆した長板燃料が用いられ、HEUアルミ合金のアルミ被覆湾曲板燃料や45%中濃縮ウラン(MEU)アルミナイドのアルミ被覆湾曲板燃料も使用することができる。減速材や反射材としては軽水が用いられるが、反射材として重水を用いることもできるようになっている。なお、C架台には炉心分割機構があり、結合炉体系の実験も行えるようになっている。上記三つの架台で構成される炉心は基本的に熱中性子体系のものであるが、燃料板の間隔を変えることにより、即ち減速材対燃料体積比を変えることにより、系統的に炉心の中性子スペクトルを変化させることが可能な構造となっている。なお、付設加速器はパルス状D-T中性子の発生に使用され、臨界集合体と結合した実験ができるようになっている。

1974年に初臨界を達成したKUCAの運転は、原則として毎週火曜日から金曜日の朝起動し、夕方停止することになっている。KUCAは全国大学の共同利用研究に供され、毎年150名弱の大学関係者が利用しており、稼働日数は毎年100日強となっている。共同利用実験テーマの件数は毎年約10件で、最近では東北大、武工大、東海大、立教大、

名大、京大、阪大、近大、摂南大、九大の10大学が利用している。この他に全国大学院生実験が毎年2週あり、北大、東北大、東工大、武工大、東海大、名大、阪大、神船大、九大の9大学が参加している。なお、全国院生実験の受入定員は各週24名となっているが、受講希望者全員を受け入れるにはほど遠い状況にあり、参加大学から当面院生実験週を3週に増やして欲しいという強い要望を受け、その方策を検討中である。また、京大については学部学生実験と院生実験が毎年各1週ずつあるが、学部の再編成や独立研究科の誕生等により、実験週の増加を含めて検討する必要に迫られている。

3. KUCA実験の現状

ほとんどのKUCA実験は共同研究の形態で行われている。これまでの代表的な実験としては、1) 未臨界度測定、不均一燃料分布の反応度効果、未臨界度モニター開発を含む臨界安全性研究関連実験²⁻⁶⁾、2) 稠密格子型軽水炉開発研究関連実験⁷⁻¹⁰⁾、3) 試験・研究炉用ウラン燃料の濃縮度低減化研究関連実験¹¹⁻¹⁵⁾、4) 結合炉の核特性研究関連実験¹⁶⁻¹⁸⁾等がある。

1996年度の実験テーマと参加大学は大凡次の通りであった。

- 1) 原子炉出力振動に関する基礎実験3テーマ；阪大、武工大、近大、摂南大、京大炉
 - 2) 位置検出型検出器開発実験1テーマ；名大、京大炉
 - 3) 固有値間隔測定実験関係2テーマ；名大、京大炉
 - 4) トリウム燃料サイクル原子炉関係1テーマ；九大、京大炉
 - 5) 中性子スペクトル測定実験関係1テーマ；東海大、京大炉
 - 6) マイナーアクチニド核種の反応率測定実験関係2テーマ；東北大、阪大、京大炉
 - 7) トリウム燃料ハイブリッド炉実験関係1テーマ；立教大、京大、京大炉
- 以下に上記のテーマの内、1)、2)、6)について簡単に紹介し、現状報告に代える。

3-1. 位置検出型検出器開発実験

臨界集合体を用いた原子炉物理実験において中性子束分布の測定は極めて重要な位置を占める。KUCAではこれまで主として金線や金箔を用いて熱中性子束分布の測定を行ってきた。しかし、周知のようにこの方法では、金線等を炉心に装着し、照射運転を行った後にこれらを取り出し、誘導放射能を計測しなければならず、1週間単位の共同利用実験週の内にも多数の中性子束分布を測定することは不可能であった。

幸い位置検出型³He 比例計数管の開発研究を行っていた名大の森研究室から「位置検出型比例計数管の性能試験をKUCAで行いたい」との連絡を受けたのを契機として、この関係の実験が開始された¹⁹⁾。小型の臨界集合体における中性子束分布の測定に際して、検出器の導入による中性子ストリーミングなどの影響を極力緩和するために、位置検出型比例計数管の細径化の努力が行われた²⁰⁾が、検出器の導入による中性子束分布の変化を

皆無とすることはできなかった。しかし、前出の森研究室でシンチレータ塗布・光ファイバー検出器が開発され²¹⁾、俄然炉物理実験への応用範囲が拡大するに至った。

光ファイバー検出器は、細径のプラスチックあるいはクォーツ製光ファイバーの先端に、中性子コンバーターの役目を果たす物質をZnSシンチレータの粉末と混合した後、接着剤を用いて塗布し、水性塗料で遮光を施したものである。これを位置検出型検出器とするには、光ファイバーを一定の速度で駆動し、予め規定された駆動範囲を移動する時間と駆動速度から検出器の位置を算出し、中性子束分布を測定すればよい。但し、この方法では定常的な中性子束分布しか測定できないことになる。光ファイバー検出器の計測システムの概略をFig. 2に示す。

森研究室で開発された熱中性子束分布測定用光ファイバー検出器は1 mm φのプラスチックファイバーの先端に約95%濃縮の⁶LiからなるLiOHをコンバータとし、LiOH : ZnS : 接着剤の混合比を1 : 1 : 2としてエポキシ系接着剤のアラルダイトと混合した上で塗布したものであった。LiOHは強アルカリなので、水中における使用を考えてより化学的に安定なLiFに代え、ZnSとの混合比をLiF : ZnSを1 : 1として、接着剤を光の透過性がより高いと考えられる瞬間接着剤のアロンアルファに代えたところ、Fig. 3、Fig. 4に示すように中性子のパルス波高は数倍に、熱中性子検出効率も約5倍になった。既にこの検出器はKUCA炉物理実験に応用されている。

3-2. 原子炉出力振動に関する基礎実験

BWRにおける領域振動現象の核的な原因を解明するため、KUCAのC架台に2分割炉心を構成して、原子炉出力振動に関する基礎実験が行われている。2分割炉心において炉心間距離を変化させれば、小型の臨界集合体でも大型炉の空間的な核的結合を第1次近似的に模擬することが可能となる。具体的には、燃料板ピッチを約3.5 mmとした軽水減速・反射型炉心の分割距離を約20、14、10 cmと系統的に変えながら、原子炉安定性の指標として用いられる固有値間隔を3つの方法で測定し、相互に比較検討を行った。

3つの方法としては、1) Feynman- α 法、2) 制御棒落下法¹⁹⁾、3) フラックススティルト法を用いた。これらの実験ではFig. 5に示すような炉心を構成し、炉心分割面に対称に配置された制御棒C1、C2の挿入状態を変化させて、3)の方法では上述の光ファイバー検出器により中性子束分布の歪みを測定した。なお、その際、C1、C2以外の制御・安全棒はすべて炉心から引き抜かれた状態となっている。Fig. 6に炉心分割距離が14 cmのものについて、C1、C2制御棒位置を変化させて光ファイバー検出器により測定した中性子束分布を示す。この図から制御棒を挿入した側の炉心の中性子束分布のレベルは制御棒を引き抜いた側の炉心の中性子束分布のレベルより小さくなり、フラックススティルトが起こっていることがわかる。Table 1に3つの方法で測定した1次固有値間隔を示す。炉心間隔が狭くなるにつれて1次モードの励起が減弱して行き、1次固有値間

隔の測定が困難となり、測定値がばらついて測定誤差も大きくなる傾向が見られる。炉心間隔が狭くなると、1次モードの抽出が難しいFeynman- α 法では測定値の信頼性にも疑問が生じるような値となる。一方、炉心間距離が大きい場合には3つの方法で測定した値が誤差の範囲で一致しており、1次モードが明らかに励起していることを示している。

3-3. マイナーアクチニド核種の反応率測定実験

高レベル核廃棄物中に含まれる超長寿命の超ウラン元素であるマイナーアクチニド(MA)の消滅処理研究に関連するKUCA実験が1995年より開始された。これは軽水炉で発生するMAを消滅させるためには高速中性子炉が適していると考えられてはいるものの、高速炉の導入時期が遅れ気味であることから、軽水炉を消滅処理に用いることを真剣に検討する必要があるとの認識に基づいている。消滅処理システムの開発研究を行うためには、MAの核データが必要となるが、これらの核データの評価を行うのに必要な実験データは極めて不足しているのが現状である。現在のところ、KUCA実験では、軽水炉で最も多く発生するMA核種である ^{237}Np の核分裂断面積と中性子捕獲断面積の評価を炉心の中性子スペクトルを系統的に変化させながら行うことを目指している。ここでは背中合わせ型二重核分裂電離箱²²⁾(BTB)を用いた $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂率比の測定と解析について途中経過を紹介する。

Fig. 7に共鳴エネルギー領域の ^{237}Np 核分裂断面積の実験値と各種評価値を示す。JENDL-3.2は山中等の実験値²³⁾に基づいてJENDL-3.1を修正して作成されたものであるが、3種類の評価値間にはかなりの差が見られる。実験はKUCAのB架台に組み込まれた炉心の中央部にボイド領域を設け、BTB検出器中にSUSのバックリング板上に電着した ^{237}Np と ^{235}U を背中合わせに設置して行われた。実験値をSRAC計算コード²⁴⁾によるセル計算の結果と比較してFig. 8に示す。なお、参考までに、実験炉心のセル平均中性子スペクトルの計算値をFig. 9に示す。計算値では中性子の漏れの効果をバックリングを与えて模擬したが、実験値を過小評価しており、各種核データを用いた計算値間の差は実験値と計算値の間の差よりも小さかった。実験値と計算値を詳細に比較するためには、計算において中性子漏れの効果及びSUSバックリング板による熱中性子束の歪みの効果を補正する必要があるが、この結果はJENDL-3.2を使用すれば最も実験値に近い結果が得られることを暗示している。

4. KUCA実験の展望

今後とも、KUCA実験では減速材対燃料体積比を変えて炉心中性子スペクトルを系統的に変化させることができるという特質を活かしてMAの炉心核データ評価等を継続して行い、軽水炉における消滅処理等の研究に一定の寄与を行うこととしたい。また、最新の測定技術開発研究に携わる放射線計測分野の研究者等との連携を密にして、新たな炉物理

測定法の開発を行いたい。さらに、ウラン-プルトニウム燃料サイクルに続くものと期待されるトリウム燃料サイクルの開発研究に関連して、できることなら実際に燃料を取得して ^{233}U 燃料原子炉に関する基礎的研究を行いたい。その際、KUCAでは加速器と臨界集合体を結合した実験が行えるので、加速器中性子源と原子炉体系を結合したハイブリッド炉の特性実験を行いたいと考えている。なお、空間依存動特性等の原子炉動特性研究についても、単に動特性パラメータの測定実験等だけではなく、パイルオッシレータを用いた実験の経験等もあるので、具体的にその可能性について検討を行いたいと考えている。

5. おわりに

KUCAも初臨界後、既に約四半世紀を過ぎ、経年変化の影響も出始めている。このところ、文部省の方針によって、KUCAの維持費は漸次削減される方向にあり、現状では既に当初の4割程度となっている。その一方で、大学における炉物理研究・教育上、KUCAの果たすべき役割は以前にも増して大きくなりつつある。極低出力の臨界集合体では、核燃料が半永久的に使用でき、炉心構造物の放射線照射効果も無視できるので、機械的あるいは電氣的な部分について必要な経年変化対策を施せば、建屋の耐用年数が来るまでは稼働し続けることができ、必要に応じて実験装置を補強するなどの対策を講ずれば、時代の要請に対応した成果を生みだし続けることが可能と考えられる。

参考文献

- 1) 代谷誠治, 神田啓治, 他, 原子力誌, 31[5], 512 (1989).
- 2) T.Misawa, S.Shiroya and K.Kanda, Nucl. Sci. Eng., 104[1], 53 (1990).
- 3) Y.Yamane, A.Inoue and S.Shiroya, Kerntechnik, 57[6], 368 (1992).
- 4) Y.Yamane, Y.Hirano et al., J. Nucl. Sci. Technol., 31[7], 640 (1994).
- 5) Y.Yamane, Y.Hirano et al., ibid., 32[4], 285 (1995).
- 6) T.Misawa, S.Shiroya et al., Proc. Int. Conf. on Physics of Reactors PHYSOR96, Sept.16-20, 1996, Mito, Jpn. Vol.2, pp.E-228 - E236.
- 7) T.Takeda, H.Fujimoto et al., J. Nucl. Sci. Technol., 28[9], 863 (1991).
- 8) S.Shiroya, A.Yamamoto et al., Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto. Univ., 24, 19 (1991).
- 9) H.Unesaki and S.Shiroya, ibid., 25, 36 (1992).
- 10) N.Hirakawa, H.Nara et al., J. Nucl. Sci. Technol., 30[7], 628 (1993).
- 11) S.Shiroya, M.Hayashi et al., ibid., 22[7], 507 (1985).
- 12) H.Fukui, K.Mishima et al., Nucl. Technol., 70[3], 301 (1985).
- 13) Y.Senda, S.Shiroya et al., ibid., 70[3], 318 (1985).
- 14) S.Shiroya, M.Mori et al., J. Nucl. Sci. Technol., 32[11], 1081 (1995).

- 15) S.Shiroya, M.Mori and K.Kanda, *ibid.*, 33[3], 211 (1996).
- 16) Y.Yamane, K.Tanaka et al., *Nucl. Sci. Eng.*, 76, 232 (1980).
- 17) T.Misawa, S.Shiroya and K.Kanda, *Nucl. Technol.*, 83[2], 162 (1988).
- 18) K.Hashimoto, T.Ohsawa et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 30[10] 981 (1993).
- 19) A.Uritani, C.Mori et al., *ibid.*, 28[9], 824 (1991).
- 20) A.Uritani, Y.Kuniya et al., *ibid.*, 32[8], 719 (1995).
- 21) C.Mori, T.Osada et al., *ibid.*, 31[3], 248 (1994).
- 22) 大部誠, JAERI-M 9757 (1993).
- 23) A.Yamanaka, I.Kimura et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 30[9], 863 (1993).
- 24) 奥村啓介, 金子邦男, 土橋敬一郎, JAERI-Data/Code 96-015 (1996).

Table 1 Comparison among the measured first-order eigenvalue separations by three different methods

Core Separation Distance	10 cm	14 cm	20 cm
Feynman- α Method	4.447 ± 1.551 \$	2.992 ± 0.326 \$	0.825 ± 0.061 \$
Rod Drop Method	8.754 ± 1.128 \$	3.291 ± 0.149 \$	0.868 ± 0.029 \$
Flux Tilt Method	8.686 ± 0.239 \$	3.153 ± 0.120 \$	0.842 ± 0.027 \$

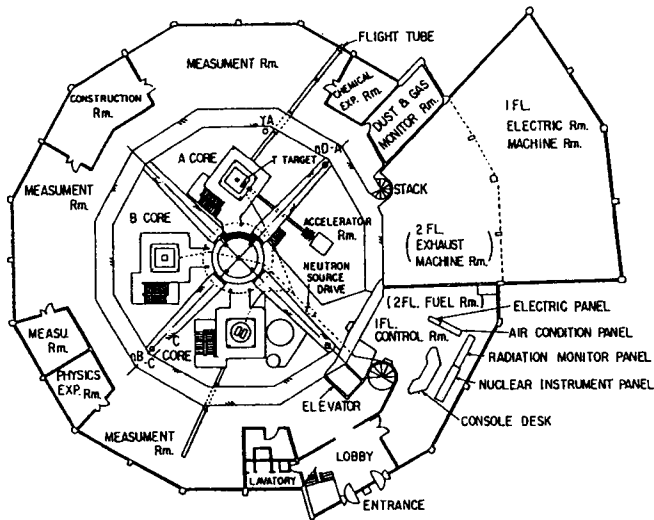


Fig. 1 Plan view of the KUCA building

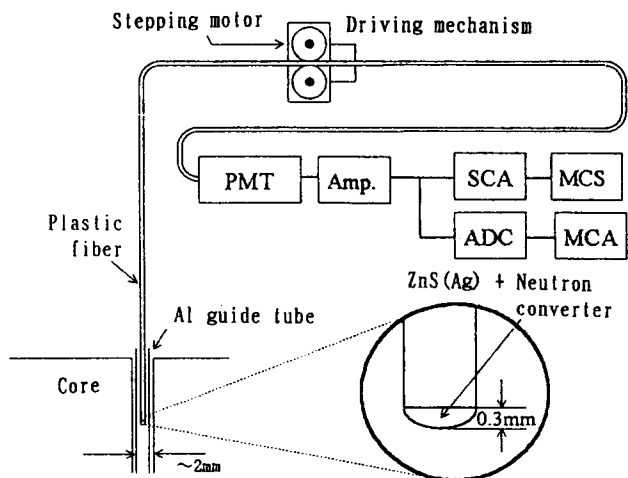


Fig. 2 Pulse counting system of an optical fiber with scintillator

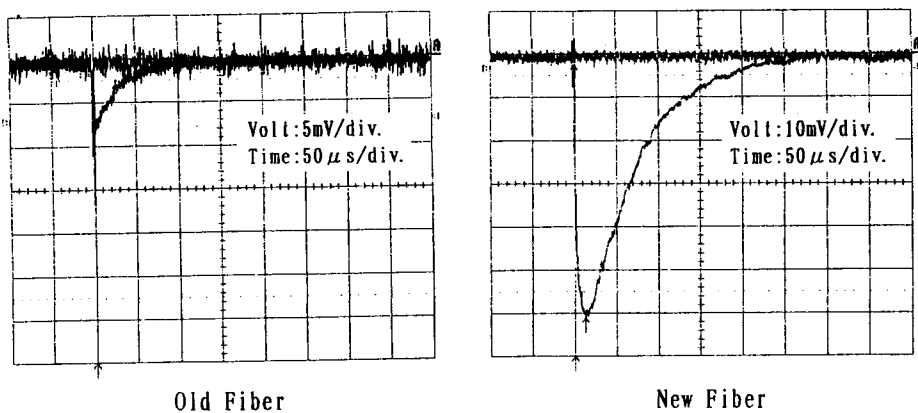


Fig. 3 Typical neutron pulses observed by the old- and new-type optical fiber detectors

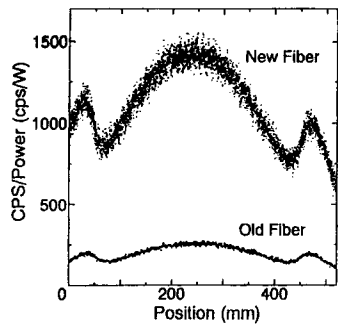


Fig. 4 Neutron flux distributions measured by the old- and new-type optical fiber detectors

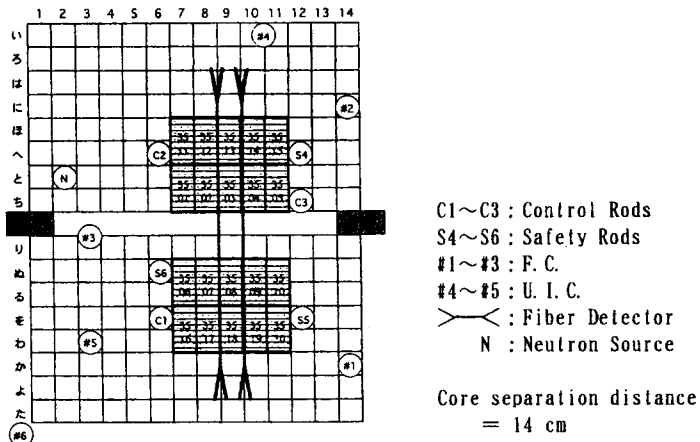


Fig. 5 Example of coupled-core configuration employed in the experiment

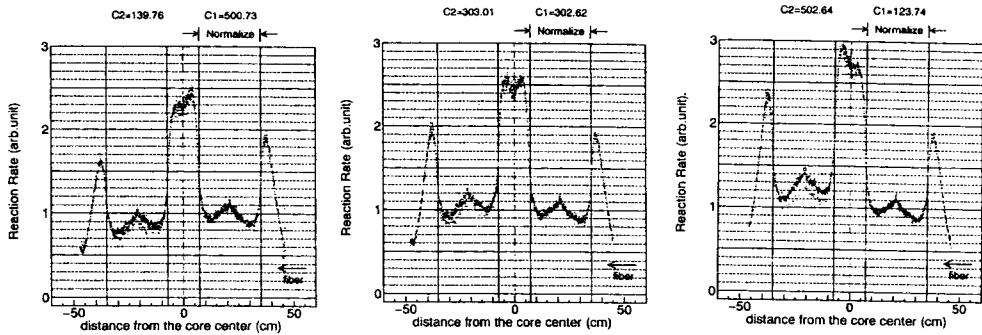


Fig. 6 Neutron flux distributions with and without flux tilt

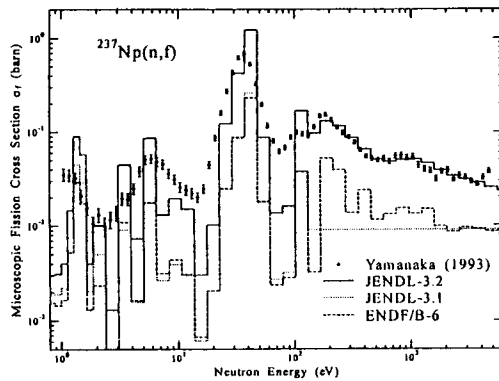


Fig. 7 Measured and evaluated fission cross sections for ^{237}Np in the resonance energy range

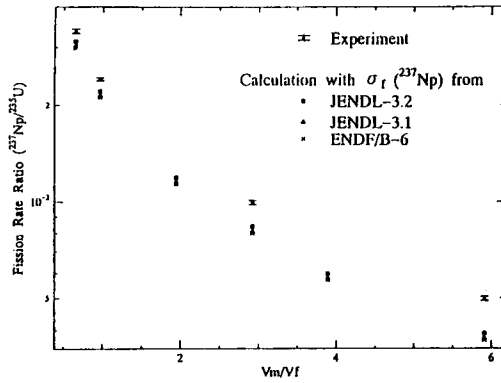


Fig. 8 Comparison among the measured and calculated $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ fission rate ratios (Note that the calculated values are obtained through the cell calculations)

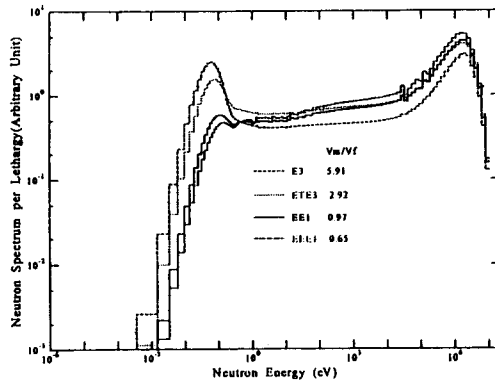


Fig. 9 Calculated cell-averaged neutron spectra in cores employed to measure the $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ fission rate ratios