

# 京大炉 (KUR) 及びホットラボの利用高度化に関する研究

(受託者) 国立大学法人京都大学

(研究代表者) 川端祐司 大学院工学研究科

(再委託先) 公立大学法人大阪府立大学

(研究開発期間) 平成20年度～22年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

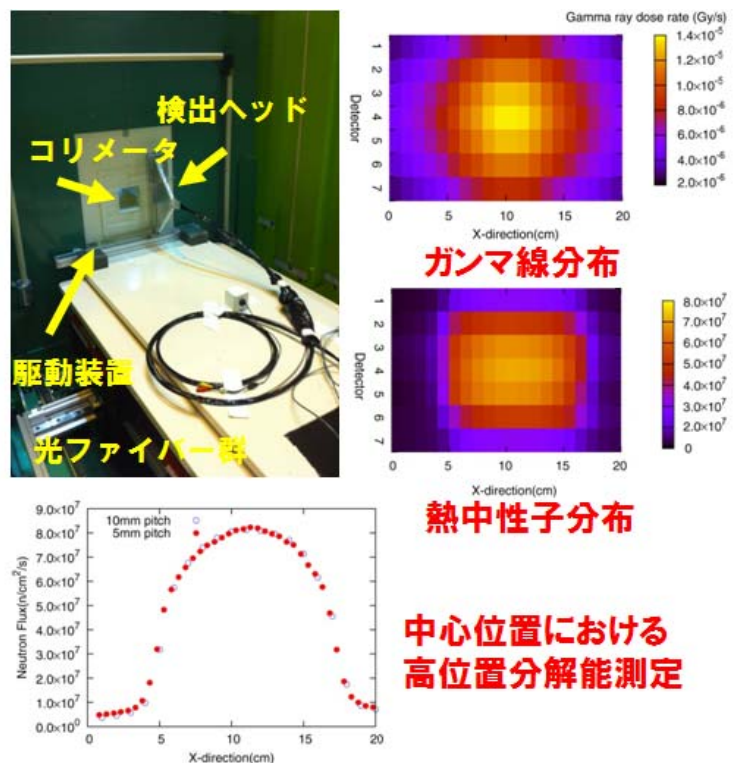
京大炉 (KUR) は日本唯一の大学付置中型熱中性子研究炉であり、これまでも全国共同利用に供してきた。しかし、近年維持管理費の削減が続き、基盤的研究装置類の老朽化・陳腐化の問題を抱えている。日本原子力研究開発機構に所属する研究炉等の中性子源は、国家戦略に基づき、世界最大規模を実現することでその役割を達成してきた。それに対し、京大炉は、大学付置として学術・教育における基礎基盤の役割を果たしてきている。また、全国共同利用研として、大学関係者を主とした研究者に研究の場を提供してきたばかりでなく、多くの学生が訪れる教育の場としての役割も大きい。この様な役割を十分に果たせるように、KUR 及びホットラボの利用高度化を行うことが本事業の目的である。ここでは、中小型研究炉である KUR 利用の活性化のため、その特長を最大限に生かす分野を重点的に強化することに限定している。内容は大きく5つの分野に分類できるため、以下にそれぞれについて述べる<sup>1)</sup>。

## 2. 研究開発成果

### 2. 1 医学生物照射のための線量評価高度化に関する研究

KUR 重水中性子照射設備では物理学、工学、生物学、薬学、医学と多岐に渡る研究が行われており、特に硼素中性子捕捉療法に関して基礎から臨床応用研究に活用されている。本設備での硼素中性子捕捉療法の臨床応用は、脳腫瘍および悪性黒色腫を対象に、1990年に本格的に始まった。これまでに275例の臨床試験が行われ、そのうち193例が2001年以降のものである。近年は、従来の脳腫瘍、悪性黒色腫に加えて、再発頭頸部腫瘍、肝腫瘍、中皮腫などへと症例部位の適応を拡大し、それぞれに対して有効性を示してきている。

今後、硼素中性子捕捉療法のさらなる有効性を示すためには、症例数を増やすことはもちろん、線量を精度良く評価することが非常に重要であり、30cmにも及ぶ大「面」積での二次元的な線量評価、さらに医療照射における患者への正確な投与線量の決定及び基礎実験における線量決定を



第1図 リアルタイム線量計と測定結果

行い、照射中に線量をリアルタイム（微分型）で測定することが必要である。この目的のために、本事業では大面積が測定可能なリアルタイム線量計の開発を行った。その外観及び測定結果を第1図に示す。光ファイバーを用いた微小シンチレータを用いることにより、中性子場を乱さない、照射による劣化が少ない、 $10^9$  (n/cm<sup>2</sup>/s) オーダーのフラックスに耐える計数率特性、さらに良好なガンマ線弁別性能を持ったリアルタイム線量計の開発に成功した<sup>2)</sup>。

## 2. 2 微量元素総合計測システム構築に関する研究

KUR には、中性子放射化分析法による元素分析のための施設として、圧気輸送管照射設備および水圧輸送管照射設備が整備されており、これらの施設を用いて分析試料中の極微量元素の定性および定量分析が実施されている。ここでは、測定核種を広げるため、短寿命核種測定ステーション及び半減期の制限のない即発 $\gamma$ 線分析装置(PGAA)を整備した。

短寿命核種測定システムの開発では、短寿命核種定量分析の精度を向上させることを目的とし、コンプトン散乱によるガンマ線スペクトロメトリの妨害を低減させることの可能な Ge 半導体検出器および井戸型 NaI 検出器を組み合わせた反同時計測システムの開発を行い、<sup>40</sup>K や混合線源を用いてコンプトン光子の除去効率の最適化を行い、短寿命核種測定における中性子照射からガンマ線測定までのシステム全体としての精度を高めることができた<sup>3)</sup>。

即発 $\gamma$ 線分析装置の開発においては、 $\gamma$ 線バックグラウンドを低減化した測定システムを開発し、化学試薬試料や標準岩石試料中等の B, Cl, H, Ni, Na, S, Si 等の定量分析を行うことにより、基本特性測定及び応用実験を実施した<sup>4)</sup>。本装置は、従来の同種装置の設計とは全く異なる方針を打ち出し、中性子ビームライン上に、広い試料設置空間が確保できることや同時に中性子ラジオグラフィを実施できるようにしたことが最大の特長である。それにより、同一試料に対し、PGAA と同時に中性子ラジオグラフィを実施し、分析箇所的位置情報を与えることにより、比較的大きな試料における、位置情報を伴った局所元素分析などの利用も期待される。さらに、試料設置空間の広さを活かして試料環境整備装置を導入することにより、化学反応などの条件制御を行いつつ in situ で微量元素測定を行うことが可能である。この様な特徴を持った PGAA 施設の前例は無く、世界唯一のユニークな施設となっている。

## 2. 3 大電流利用二層流研究対応中性子イメージング装置の開発

X 線と比較すると、中性子は金属を透過しやすく水素等の軽元素に対して敏感であるという特徴がある。その結果、中性子イメージングでは X 線を用いた場合と相補的な情報が得られる。例えば、金属容器中での水の沸騰状況を研究する二相流研究は、原子炉安全研究にとって非常に重要であり、かつ中性子を用いなければならない研究分野である。中性子ラジオグラフィの二相流研究への応用は日本が得意とする分野であり、これまでも世界をリードしてきた。しかし、実験中の異常時における研究炉の安全系への影響の可能性を排除しきれないため、これまでは原子炉棟において大電力を使用した実験を行うことは困難であった。

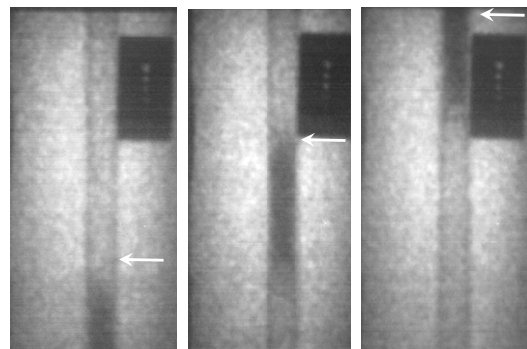


第2図 オープンスペース型  
即発 $\gamma$ 線分析装置

そこで、KUR では原子炉とは完全に隔離された電力ラインを整備し、さらに原子炉と離れたスーパーミラー中性子導管室において実験を実施することで、研究炉の安全性に影響することなく大電力を利用した研究を可能とした。

開発した中性子イメージング装置を用いて、ボイド率計測を初めとする二相流研究を行った結果、熱出力 5MW 運転時において高速度カメラを用いて流れを撮影し、500fps 程度の撮影速度以上で定性的な評価を見込める動画が得られることを確認することができた。第 3 図に 200fps

での測定例を示す。同じ熱流束条件において軸方向にボイド率分布を測定することで、従来の相関式と異なる流動特性があること等を示し、沸騰流中の液相透過厚さを計測して、液膜あるいは液滴の計測に中性子イメージングが応用可能であることを示すことができた。この様な大電力を利用した気液二相流研究を実施できる中性子イメージング施設はこれまで無く、世界的に見てもまったくユニークな施設を本課題によって実現することができた<sup>5)</sup>。



第 3 図 KUR B4 実験孔における気液二相流の可視化例 (KUR 5MW 運転時、毎秒 200 フレームにて動画撮影)

## 2. 4 材料照射測定用照射後試験装置の整備

原子炉心における材料照射は研究炉の重要な研究分野であるが、照射中の試料環境を厳密に制御した材料照射が出来る場合は、世界的に見ても多くない。KUR では中性子束はそれほど高くないが、試料環境を制御した照射が可能であり、厳密な条件設定ゆえに重要な科学的知見が得られるような装置を備える等して、低中性子束であるにもかかわらず特徴的な利用を可能としてきた。

材料の中性子照射効果の評価においては、材料の組織変化及び定量的力学特性の評価が重要である。ここでは特に定量評価を重視し、照射後の引張試験による低温から高温までの幅が広い温度領域での材料塑性変形の研究を行うことによって、照射による材料の力学特性への影響を理解することを目的とした。また、電子顕微鏡加熱引張りホルダを整備して、材料変形時の内部組織の動的な観察を行うことで、中性子照射によって形成された欠陥集合体が、材料変形の時に発生した転位をどう阻害するか、また、材料破断はどこから始まるかを調べることができ、組織の動的観察が可能となった。この様に整備された引張試験機を用いて、圧力容器鋼のモデル合金における中性子照射によって形成された銅析出物による引張特性への影響、及びヘリウムを注入した転位が含まれている Ni の引張り強度の変化等を調べることにより、照射材料力学特性研究を実施した<sup>6)</sup>。

## 2. 5 合理的管理のための放射線管理

研究用高レベル放射線施設 (研究炉・ホットラボ) は、商業用原子力施設などに比べきわめて多様な放射線作業環境を持つという特色を有している。このような特徴を活かし、従来の放射線安全管理手法に加え、作業内容、作業者の知識や技術能力、心理状態、健康 (生理) 状態などを考慮した高度な管理手法の開発研究を実施した。その結果、従来の放射線管理では、作業場の放射線量や放射能汚染のレベルのみで管理を行ってきたが、作業者の特性に応じた管理・教育を行うことにより、より被ばく線量の低減や安全性の向上が期待できることが示された。

### 3. 今後の展望

平成 22 年 3 月、日本学術会議より「提言 学術の大型施設計画・大規模研究計画 一企画・推進策の在り方とマスタープランの作成について」が公表され、京都大学原子炉実験所の提案「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」が、唯一「原子力」を表看板として掲げたものとして選定された。この計画では、研究炉（すなわち KUR）・加速器利用研究が中核となっている。本課題は「京大炉（KUR）・HL 利用高度化」を目的としており、まさしくこの計画の中心部分である。

また、KUR の全国共同利用研究には、「実験所において機動的に推進すべきプロジェクトについて、原則として所員が中心となって研究グループを組織して、長期的展望に立って共同利用研究を総合的かつ能率的に行う」ためのプロジェクト研究制度がある。平成 22 年度には、本研究課題に関係するプロジェクトは、4 テーマ（これらに含まれる総研究課題数は 34）にも上っており、共同利用の大きな部分を占めている。この様に、本研究課題から発展した研究は、既に KUR 共同利用の活性化に大きな役割を果たしている。

さらに、今後も京都大学原子炉実験所の全国共同利用研究制度を通じて、全国の研究者にその成果を展開してゆく予定である。我々は、学術会議が選定した日本にとって重要な計画の中核部分を担当していることを心し、今後もこの研究を積極的に推進することにより、学術の発展に貢献する重要な責務を果たさなければならないと考えている。

### 4. 参考文献

- 1) 川端祐司他、「京都大学研究用原子炉(KUR)利用設備整備計画の概要」、非破壊検査協会(2010) vol.59, No.2, pp62-67.
- 2) H. Tanaka et al, "Development of a Neutron Flux Monitor Using a Small Scintillator Coupled with Quartz Fiber for a Cyclotron-Based Boron Neutron Capture Therapy", IEEE nuclear Science Symposium Conference Record(2010), Tenessi, U.S.A, N34-307
- 3) K. Takamiya et al. "Neutron Distribution Measurements at Research Reactors Using A New Neutron Monitor" Second International Conference on Application of Radiotracers in Chemical, Environmental and Biological Sciences, Oral, November 12, 2010 (Kolkata, India)
- 4) S.Sekimoto et al., "Present status of NAA using Research Reactor in Japan -Kyoto University Reactor (KUR)-", FNCA(Forum for Nuclear Cooperation in Asia) Workshop on Research Reactor Utilization, Beijin, Sep. 2010.
- 5) Y. Saito et al., "Development of Neutron Radiography Facility for Boiling Two-Phase Flow Experiment in Kyoto University Research Reactor", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, in print.
- 6) Q.Xu et al., "Can helium actually improve the mechanical properties of a metal?", Phylosophical magazine Letters, (2011) Vol.91, No.11, 724-730.