

アトムサイエンス くまどり

vol. 18

2016 秋冬号

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/>

巻頭特集

臨界実験装置(KUCA)が 新規制基準に合格

ASKレポート1

研究ハイライト

ASKレポート7

第七回日台中性子X線
散乱研究会の開催報告

ASKインタビュー

京都大学原子炉実験所の人々

ASK WORLDレポート1

熊取滞在記

ASK WORLDレポート2

オハイオ州立大学に滞在して

INFORMATION

ASK掲示板

臨界実験装置(KUCA)が新規制基準に合格

原子力基礎工学研究部門核変換システム工学研究分野・三澤毅教授

京都大学原子炉実験所には臨界実験装置という装置があります。聞き慣れない名前で、どのような装置かわかり難いかと思いますが、目的に応じて原子炉の形や材料などを変更して運転を行うことができる、出力が非常に低い原子炉のことです。正式には京都大学臨界実験装置という名前で、英語の略称でKUCAと呼んでいます。京都大学原子炉実験所には出力5000kWの研究用原子炉(KUR)がありますが、このKUCAは最大出力が100Wと低くKURの5万分の1しかありません。KUCAは全国の大学や研究機関の研究者が利用することができる共同利用研究施設として1974年に運転が開始され、国内の大学が有する唯一の臨界実験装置として、これまでに原子炉の基礎研究、新しいタイプの原子炉の開発、放射線検出器の開発などの研究目的のために広く利用されてきました。またKUCAでは全国12大学の原子力を専攻している学生や大学院生に対して、原子炉や放射線に関する実験教育を行ってきており、これまでに3500名以上が受講し、国内外の原子力分野での人材育成に大きく貢献してきました。

ご存じかと思いますが、2011年の東電福島第一原子力発電所の事故の以降に原子力規制庁が発足し、2013年7月に原子力発電所に対する新しい規則が策定されました。これを新規制基準と呼んでおり、この規則に適合していることが確認されるまでは原子力発電所は運転できないことになっております。これまでに九州電力の原子力発電所など数基の発電所しかこの新規制基準に合格していません。一方、2013年12月に研究用原子炉に対しても原子力発電所とほぼ同様な新規制基準が策定され、その規則に適合していることが原子力規制庁により認められないと、研究用原子炉も運転ができなくなりました。この新しい規則では、事故の防止策の強化、地震・津波・竜巻・火災などの災害に対する対処方法の強化などが盛り込まれ、原子炉の全ての設備を安全性の観点で最初から見直すことが求められました。

KUCAは最大出力が100Wと電球1個程度の熱しか出ないため、原子炉を冷やすための設備は付いておらず、

仮に停電になったとしても原子炉は自動的に停止し、その後は電気が無くても全く問題が起きないような高い安全性を有しています。しかしながら原子炉であることには違いありませんので、2014年3月に運転を停止した後は新規制基準に適合しているかどうかの審査を受け、全ての審査に合格するまでは運転できなくなってしまいました。そのため、2014年9月にKURと同時に新規制基準に適合していることを示すための書類(設置承認申請書)を原子力規制庁に提出し、その後、原子力規制庁との70回以上の説明会合においてKUCAの安全性に対する説明、さらに安全性を向上させるための装置の追加設置の計画などの説明を行い、ようやく2016年5月に設置承認申請書が新規制基準を満足していることが認められました。研究用原子炉では初めての合格で、KUCAと同様に出力が低い近畿大学原子炉と同時に原子力規制庁より合格証が交付されました。現在は早期の運転再開を目指して、原子力規制庁に説明した幾つかの追加工事を行うための手続きなどを行っております。

KUCAの運転停止により、予定していた研究活動を行うことができなかった各大学の方々には大変ご迷惑をお掛けしてしまいました。さらに原子力を専攻したにも関わらず、数多くの学生が本物の原子炉実験を体験することなく卒業せざるをえなかったことは非常に残念に思っております。この場を借りて深くお詫び致します。

KUCAの運転再開後はより一層の安全性を確保するための運転や維持管理に努めるとともに、研究活動および学生実験教育を積極的に進めていきたいと考えておりますので、今後とも関係各位の皆様からの温かいご支援を賜りますようお願い致します。





写真1: KUCAの固体減速炉心



写真2: KUCAの軽水減速炉心

一般公開・桜公開の報告および学術公開のお知らせ

平成28年4月2日(土)に毎年恒例の一般公開を実施しました。昨年を超える893名の方々にお越しいただきました。研究用原子炉とホットラボトリ、FFAG加速器、廃棄物処理棟の施設見学を行いました。図書棟会議室では、福島第一原子力発電所の事故による広範囲の放射能汚染に対し放射線マッピングを効率的・継続的にできる当実験所で開発された、GPS連動型放射線自動計測システムKURAMAの紹介を行いました。事務棟会議室では、霧箱実験等の実験教室を開催し、多くの家族連れの方々にご参加いただきました。また、原子燃料工業株式会社における核燃料の製造工程や製造施設の安全性についての紹介が、同会社の熊取営業所の方々によって行われました。翌4月3日(日)には桜公開を開催し、659名の方々に来所いただきました。

今後ともこのような機会を通じて、地域住民の方々をはじめとした多くの方々に、原子力とそれを支える基礎的な科学への理解の場を提供して、当実験所における研究・教育活動についてご理解とご協力が得られるように努力いたします。

4月の一般公開を含めて、毎月1回学術公開を行っています。詳細については実験所HPをご覧ください。

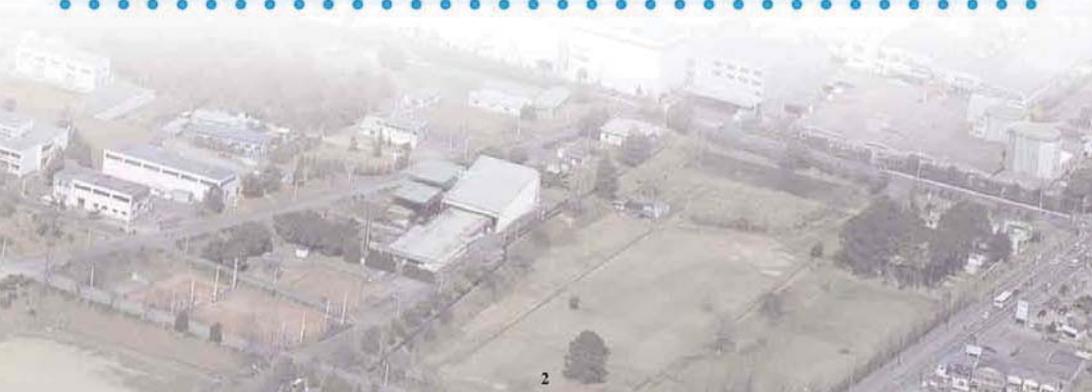
(http://www.rii.kyoto-u.ac.jp/pr/event_intro/e_sci_open)



一般公開受付の様子



実験教室の様子



ASKレポート1 研究ハイライト

“世界の実効増倍率”問題への挑戦

原子力基礎工学研究部門研究炉安全管理工学研究分野
山本俊弘准教授

当原子炉実験所のKURやKUCAといった原子炉では、核分裂の連鎖反応が中性子を介在して持続する“臨界”の状態を運転されています。一方で、核分裂が制御されていない原子炉以外の場所で、核燃料物質が予期せず一定量以上集まれば、平成11年に茨城県東海村で2名の方が亡くなった“臨界事故”と呼ばれる大きな災害を引き起こしてしまいます。いずれにせよ、核燃料物質の“臨界”の状態を正確に解析する必要があり、そのための計算手法の開発を行ってきました。

この計算では、中性子がどこで沢山反応を起こしているのかを反復計算によって求めます。KURのように核燃料が一箇所に集まっている小さな寸法の原子炉は、解析が比較的簡単な部類です。一方で、KUCAのような炉心の組み換えが容易な原子炉で、意図的に核燃料物質を分散させると、反復計算がうまくいかないことがあります。これは、分散した核燃料物質間の中性子の行き来があまりなく、互いに音信不通になってしまうからです。この問題は、“世界の実効増倍率”問題と呼ばれています。これは、もし仮に、世界中に分散している原子炉や核燃料物質を全てひっくるめて世界全体の“実効増倍率”



(臨界になりやすさの指標)を知ろうとしても、互いに孤立しているために、それが非常に困難(というよりも不可能)であるということから、収束性の困難な問題を比喩的に表現したものです。

そこで、古くから確立されていた反復方法を抜本的に改善し、収束性を確実にかつ簡便に向上させることのできる手法の開発に取り組みました。図1は、その計算例を示しています。“核燃料1”と“核燃料2”の間は、40cm離れており、さらに10cmのポリエチレンによって中性子の行き来が妨げられています。図の縦軸は“核燃料1”の中性子の割合を示しています。本来は80%くらいになるところ、これまでの方法で計算すると、反復を数百回繰り返してもまだ迷走しています。これを“新手法”で計算すると、わずか10回程度の反復で収束していることが分かります。

手前味噌ながら、この方法は好評を博し、臨界を計算するいくつかのコンピュータプログラムにオプションとして組み込まれ実用化されています。

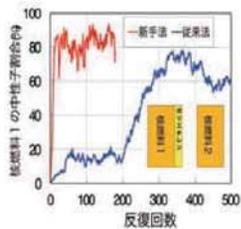


図1:新手法と従来法の反復回数の比較

BNCTの治療効果向上をめざした放射線影響研究

原子力基礎工学研究部門放射線安全管理工学研究分野
木梨友子准教授

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)で用いる中性子照射による細胞及び生体影響に関する研究を進めています。

BNCT患者の末梢血リンパ球の核形成観察からの生物学的線量評価の試みに関する研究では、放射線治療後に末梢血リンパ球に出現するリンパ球の核増数からBNCT治療時に受けた生物学的線量を物理学的線量と比較することで、生物学的線量に個人差が認められるかどうかを検討しています(図1)。BNCTでは照射線量は照射野に含まれる正常組織の耐用線量を上限として決定されていますが、正常組織の感受性には個人差があり様でないため、患者の放射線感受性の差によって耐用線量を変化させることで個々の症例ごとに線量を含わせるオーダーメイド治療の実施が可能になります。

BNCTで用いる中性子照射による突然変異誘発に対するラジカルスカベンジャーの防護効果の研究では、ラジカルスカベン

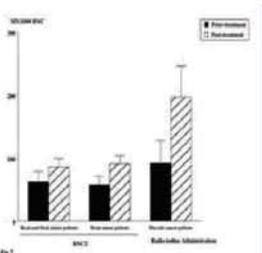


図1.BNCT患者(左2件)と甲状腺がん¹³¹I治療患者(右)の比較。BNCTを受けた患者の末梢血リンパ球の核増数(MN/Micro Nucleus)の出現は全症例で増加した。その増加数の平均値は3.7GBq(100mCi)投与時の¹³¹I-NaI治療後の甲状腺がん患者の核増数増加数の平均値の半分以下であった。

ジャーの中性子誘発突然変異に対する防護効果を明らかにしました。中性子照射によるDNA二重鎖切断(dsbs:double strand breaks)と突然変異の関連性の研究では、免疫染色法によってDNA-dsbsを直接観察して中性子が引き起こすDNA-dsbsを多面的視点から解析しました(図2)。中性子の生体影響研究では中性子の部分照射時に非照射部臓器である脾臓に起きるアプスコピル効果を世界で初めて発表しました。アプスコピル効果は近年放射線治療分野で注目されており、BNCTとがん免疫賦活効果の相乗効果が期待されるためBNCT治療効果向上につながります。

これらの研究業績が認められ第57回日本放射線影響学会において岩崎君子賞を受賞しています。これからもBNCTの治療効果向上をめざした放射線影響研究を続けて行きたいと思っています。

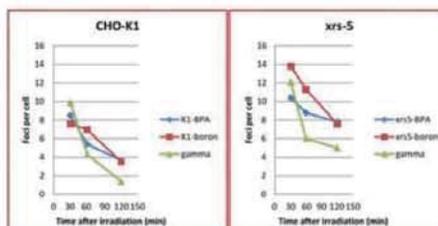


図2.ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)とガンマ線照射によるPhosphorylated H2AX focus 数の推移。BNCTにより放出されるα線およびリチウム線によるDNA損傷をCHO細胞(左)および、その突然変異株でKu80欠損細胞であるxrs5(右)を用いて評価しガンマ線照射時のDNA損傷と比較した。BNCTにおいてはDNA二重鎖切断修復関連タンパク質を構成するKu80欠損細胞のxrs5は中性子照射2時間後においてDNA二重鎖切断修復の遅延が認められ、DNA損傷が持続していた。

放射線施設からの放射性物質漏えいの初期過程の研究

原子力基礎工学研究部門同位体製造管理工学研究分野
沖雄一准教授

最近、福島第一原発や東海村の大型加速器施設であるJ-PARCで起きた放射性物質の環境への漏えい事故は、規模こそ大きく異なりますが、いずれも種々の放射性物質(放射性核種)を含む金属(放射化した金属)が急激に加熱されて溶融し、放射性のエアロゾルやガスが発生したため起きました。溶融したのは、福島第一原発では炉心のウラン燃料、J-PARCでは照射実験で用いた金属試料でした。エアロゾルは煙のように気体中に分散した微小な粒子の集まりですが、これらの粒子は種々の物質を取り込んで、広い地域に輸送し拡散させる性質があります。中国から飛来するPM2.5粒子が有害化学物質を運んで来るのと同じように、放射性物質もエアロゾル粒子に取り込まれ放射性エアロゾルとなって運ばれます。福島第一原発の事故では、まさにこうした環境中へのエアロゾルによる放射性物質の拡散が起きたのでした。

溶融金属からどのように放射性核種が放出され放射性エアロゾルが生成するかという放出挙動の初期過程の研究は、放出のしやすさや環境中の挙動の解釈にとり有益といえます。高エネルギー陽子加速器で金属を照射することにより多種類の放射性核種を含む放射化金属試料を作ることができますが、ほこれら放射性試料を用いて、プラズマトーチや高温炉によって金属溶融の模擬実験を行い、生成した放射性エアロゾルを捕集し種々の分析を試みています。その結果、エアロゾル粒子の生成時には、粒子に ^{23}Na 等の低沸点の核種などが濃縮しますが、核種によっては、濃縮度が粒子の大きさ(粒径)により大きく異なり、元素の沸点や蒸気圧などの物理的性質だけ



では説明できない場合があることがわかりました。また、試料金属中に元々含まれていた不純物元素の挙動に影響を受けることも示唆されています。今後このような模擬実験により得られた情報を活かして、漏えい事故などの詳細解明に役立てていければと考えています。



写真1:放射化金属の加熱模擬実験の様子

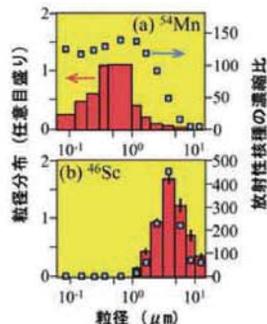


図2:放射性核種の粒径とエアロゾル粒子への濃縮(溶融した放射性鉄から生成した放射性エアロゾル粒子の例)

ASKレポート2

第七回日台中性子X線散乱研究会の開催報告

粒子線基礎物性研究部門粒子線物性学研究分野・井上倫太郎准教授

平成28年3月11日から12日にかけてThe 7th Japan-Taiwan joint meeting on neutron and X-ray scattering (第七回日台中性子X線散乱研究会)が京都大学原子炉実験所で開催されました。この研究会は主にX線及び中性子散乱を用いて合成高分子・ソフトマター・バイオマターの構造やダイナミクスの研究を行っている日本と台湾のトップレベルの研究者が集まり、これまでに得られた研究成果や今後の研究交流に関して議論を行っています。第一回目は2006年に茨城県東海村で開催され、その後ほぼ二年に一回のペースにて二国間で交互に開催されており、栄える第七回目はこの熊取町で開催されることになりました。研究会中には全体で日本からは43名、台湾から15名の研究者が参加しました。京都大学原子炉実験所で開催されたと言う事で特別講演として本実験所の小野公二教授が“Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) including every element of the achievements in radiation oncology since the discovery of X-ray”と言うタイトルでホウ素中性子捕捉療法によるがん治療に関する研究紹介を行いました。研究会では南国の若手・ベテランの研究者による世代を超えた熱い議論、及び情報交換が朝から晩まで交わされました。実際、この

研究会をきっかけとなり幾つかの共同研究が始まっており、本研究会は今後の研究交流を続ける上でも必要不可欠とのことで継続が決まりました。今回は二年後に台湾で開催されます。特に学生を含む若手の研究者の方々にはこの二年間で研究成果を出して、次回の研究会に積極的に参加されることを期待しています。



原子炉実験所長による開会挨拶の様子

技術室・金山雅哉さんに聞く

Q1:原子炉実験所に來られたいきさつを教えてください。

進路指導の先生から「学年の中で最も器用に工作機械を扱っている。」と評価を頂き、原子炉実験所からの公募の話を中心に伺いました。ちなみに、京都大学職員として「一人目の平成生まれ」とお聞きしました。

Q2:現在の職務内容について簡単に教えてください。

工作棟(工場)で動いています。実験所では多分野の研究が行われていますが、実験に必要な実験装置や部品の製作および修理、改造など教職員からの要望に応じた製品を工作機械を使って製作しています。さらに放射線管理区域内での現場作業やその他の施設での現場作業も行っています。

Q3:ストレス解消法は?

普段できないことをするのがストレス解消法なので、例えばカラオケに行ったり、絶叫マシンに乗りに行きます。USJには年2回は必ず行き、新しい絶叫マシンが建設されると長時間並んでも乗りに行きます。最高5時間程待った記憶もあります。今後、機会があればバンジージャンプやスカイダイビングにも挑戦したいです。

Q4:休日の過ごし方は?

休日は子供との時間を大切にしています。天気の良い日は子供が遊具で遊ぶように近所の公園や鶴見緑地公園へ連れて行ったりしています。しかし、マイペースで一人が好きな性格なのか、遊具では

遊ばず公園内をウロチョロ探索しています(笑)。去年の秋頃に行った時には、落ち葉が気持ち良さそう(お布団?)と思ったのかその場所へ寝転んだりしていました(笑)。子供の行動は見るだけで本当に面白いと実感しました。



金山雅哉(かなやま すぎ) 出身地:大阪府大阪市

ASK インタビュー

京都大学原子炉実験所の人たち

京都大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻 複合原子カシステム研究分野(石研究室)・ 堀田有哉さんに聞く

Q1:原子炉実験所でのご生活はいかがですか。

自分の研究テーマに加えて、様々なことを経験できる良い環境です。例えば、去年はカナダからの留学生を研究室が受け入れました。彼は3ヶ月間程、日本に来ていたのですがプライベートで関西を案内したり、共に研究活動をするなど、まるで自分が海外にいるかのような貴重な機会を得ることができました。他にも、コンピュータに関わる機会が非常に多いです。様々なソフトを作ったり、最近ではハードに触れる機会も多くなりました。元々、コンピュータの事は好きであったため、この環境はとても良いです。

Q2:現在の研究テーマを易しく教えてください。

私の研究はFFAG加速器を対象とした研究です。FFAG加速器とはサイクロトロン、シンクロトロンのような加速器の種類の一つです。現在、加速器は様々な分野で利用されており、身近な所ではガンの放射線治療などの医療の分野において目覚ましい活躍をしています。そのような加速器にとって、重要な要素の一つとして、加速の安定性というものがあります。安定性を失った場合、加速している粒子が壁などにぶつかってロスしてしまいます。私の研究では、京都大学の150MeV FFAG加速器の加速の安定性をさらに向上させようとしています。

Q3:将来目指していることを教えてください。

将来は海外で働きたいと思っています。そのために、自分の専門性やスキルを今のうちに身につけなければなりません。

Q4:出身地のご当地自慢をお聞かせください。

私は、大分県日田市出身なのですが、日田天領水といえば、ほとんどの人が聞いた事あるくらい日田市は水がきれいな町です。大分県と言えば、温泉がとても有名です。

Q5:趣味は何ですか。

コンピュータ、海外サッカー、トレーニング、スノーボード(冬だけ)です。



堀田有哉(ほりた ゆうや) 出身地:大分県日田市 出身大学:九州大学

ASK WORLDレポート1

熊取滞在記

放射線生命科学研究部門

放射線機能生化学研究分野(藤井研究室)・

研究員 金仁求さん

はじめまして、韓国(Republic of Korea)から2010年の夏に来た金仁求(キム インクウ)です。韓国で学部及び修士課程まで勉強し、博士課程から京都大学大学院理学研究科に入学するために京大原子炉実験所の藤井紀子研究室(放射線生命科学研究部門)に所属し、研究生として熊取での生活を始めました。研究テーマは「放射線照射による水晶体中のクリスタリンのアミノ酸残基の変化」です。博士の学位を取った後は、現在まで原子炉実験所で研究員として研究を行っています。

熊取ではすごく良い経験をさせてもらっています。春と秋に自然風景が美しい犬鳴山で登山をした後、犬鳴山温泉に行くのがすごく気持ち良かったです。また、和歌山の高野山と海も近く、ドライブを楽しむこともできました。初めてひまわりドームに運動をしに行った時にバレーボール(青葉台チーム)、バドミントン(原子炉チーム/職員の中尾さん)及びソフトボール(ホームズチーム/釜江教授)に誘っていただき、地域の方に教えていただきながら現在まで楽しく活動しております。また、熊取国際交流協会においてもいろいろな日本の文化や伝統に関して経験をすることができました。そこで知り合った方々



から新鮮な野菜なども頂き、今に至るまで長くお付き合いをさせていただいております。最後に、熊取で行われる楽車祭り(だんじりまつり)や盆踊りなどの様々な祭りを毎年楽しみにしております。

原子炉実験所の所属研究員の藤井紀子教授をはじめとした多くの先生方や所員の皆様にご心温かく接していただき、私は海外での生活でも寂しさを感じず幸せな熊取生活を送っております。熊取での恩恵を糧に研究に専念し良い研究を進めていきたいと思います。日本に来て良かった!熊取(京大原子炉実験所)に来て良かったと思います。



ASK WORLDレポート2

オハイオ州立大学に滞在して

粒子線腫瘍学研究センター粒子線腫瘍学研究分野・近藤夏子助教



2014年9月から1年間、オハイオ州立大学がんセンター(James Cancer Center)脳神経外科部門の中野伊知郎先生(現アラバマ大学脳神経外科)のラボに脳腫瘍の基礎研究のために留学する機会を頂きましたので、ご報告させていただきます。

ラボは大学病院のすぐ前のWiseman Hallという建物内にありました。ラボの主な研究テーマは「脳腫瘍幹細胞」に関するものでした。腫瘍の集団の中には「腫瘍幹細胞」が存在しており、この細胞は放射線療法・化学療法に対して抵抗性があり、再発の温床になると考えられています。私の主な仕事は、神経膠芽腫(グリオーマ)の組織を使って行う腫瘍間あるいは腫瘍内の不均一性を解明することでした。

私は、現在、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)という癌治療の臨床と基礎研究に従事していますが、オハイオ州立大学はもともとBNCTの研究が盛んなところでした。BNCTに関しても、病理学部門のRolf Barth教授と共同研究をさせていただく機会を得ることができました。

オハイオ州立大学は州都コロンバスにあります。周りは平和な田舎の大学町でした。ラボまで徒歩30分弱の距離を毎日歩いて通っていました。全米最大規模の広大なキャンパスには、芝生と種々の

木々があり、リスやウサギ、カルガモなどの動物たちと毎日遭遇することが楽しみでした。冬は-20℃くらいまで気温が下がって積雪が20cm程ありましたが、毎朝除雪されるので結局1年間ずっと徒歩で通うことができました。週末の買い出し等には「Car2go」というカーシェアリングシステムを利用していました。2人乗り小型車smartを用いた低価格で乗り捨て可能なシステムで大変重宝しました。

田舎で時に遊びに行くところが無いせい、ホームパーティーがしばしば開催されていました。中野先生始め日本人研究者のホームパーティーにはたびたび招待していただき、研究以外の交流も深めることができ、今では良い思い出となっています。遠出をしたのは、フィラデルフィアでアメリカの癌学会(AACR)に参加した時と、帰国直前にナイアガラの滝に旅行に行った時ぐらいでした。振り返ればあっという間の1年でした。今後この経験を研究に活かして精進してまいります。ありがとうございました。



広大なオハイオ州立大学内にあるミラー湖



便利なカーシェアリングシステム「Car2go」



中野先生の家でのクリスマスパーティー

