

ATOM SCIENCE KUMATORI

アトムサイエンスくまとり

vol. **30**
2022 秋冬号



巻頭特集 中性子イメージングユニット

ASKレポート1 中性子核データの測定 | 放射化断面積の測定及び高エネルギー粒子の挙動に関する研究 | 衝撃圧縮法を用いた惑星物質科学研究
FFAG加速器を用いた研究

ASKレポート2 京都大学研究用原子炉KURの今後の取扱いについて — 新たな複合原子力科学の展開を目指して —

ASKインタビュー 京都大学複合原子力科学研究所の人たち

特集 | 中性子イメージングユニット

「中性子イメージング」とは、単純に言うところ「中性子を用いたレントゲン撮影のようなもの」である。胸部レントゲンなどでは、線源としてX線を用いる。図1はX線と中性子の質量減衰係数と原子番号との関係を示す。図中の実線はX線に対する物質の質量減衰係数（この値が大きいくほど、X線が減衰する）は、原子番号が大きいく「重い」ものは透過しにくく、軽いものは透過しやすいという特性をもつ。よく放射線の遮蔽のために鉛が使用されるのはそのためである。一方、中性子に対する物質の減衰係数は物質（元素）ごとに異なり、水素や水素化合物、あるいは一部の金属（カドミウムやガドリニウムなど）で大きく、多くの金属では、減衰が少なく透過性が高いことがわかる。

図2は、植物の葉の葉脈を中性子で可視化したもので、水分の多い葉脈がはっきりと見えることがわかる。一方、図3は、金属容器内の水—空気二相流の中性子透過像であり、可視光で見えない金属管内の流れの様子がはっきりと計測できることがわかる。

中性子イメージングのためには、当然のことながら、中性子を発生する研究炉や加速器などが必要となる。それらの中性子源における中性子ビームの特性は施設によって異なるため、中性子源の特徴を活かした応用研究を実施する必要があるが、大型中性子源（研究炉やJ-PARC）小型中性子源では、施設独自に研究を進めており、施設の有効活用が行われてこなかった。さらに、中性子強度の違いのみならず、定常中性子源とパルス中性子源の活用についても使い方の最適化がされてこなかった。したがって、本ユニットでは、図4に示すように、中性子科学会中性子施設連携WGと連携し、J-PARC、JRR3、KUR、RUNS、HUNS、KURNS-LINAC、KUANSおよび他の小型中性子源の特徴と現在の利用方法をまとめ、施設連携ネットワークの構築に貢献している。

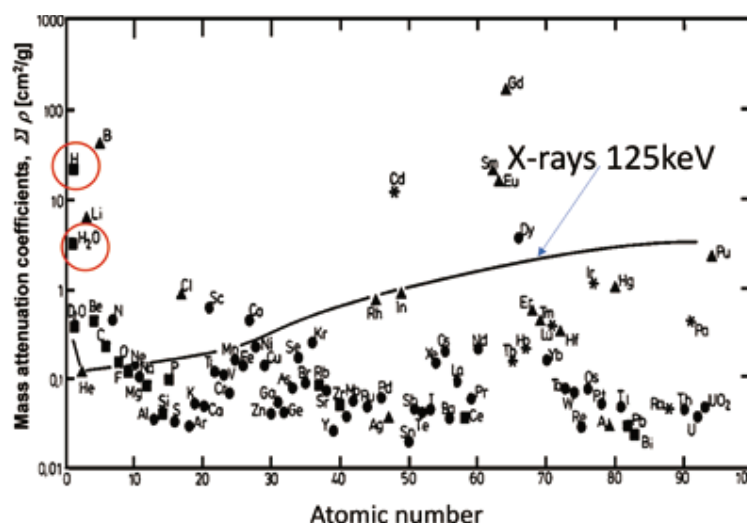


図1. 中性子とX線に対する物質の質量減衰係数



図2. 葉の中性子イメージング

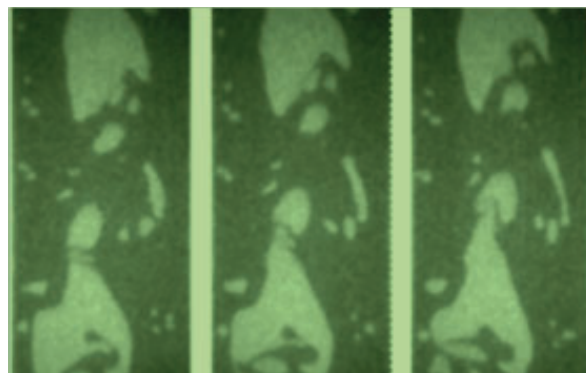


図3. 空気—水二相流の高速度撮像

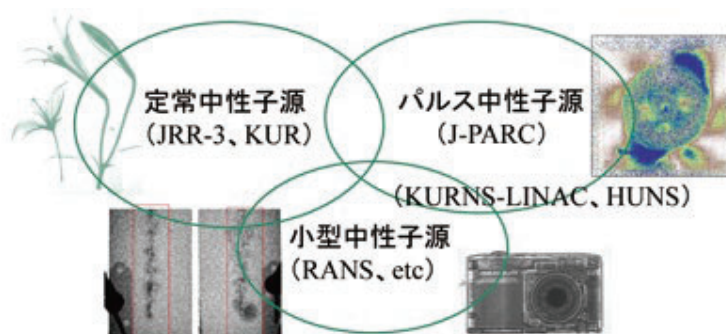


図4. 様々な中性子源施設との連携

その活動の一環として、本研究ユニットでは、様々な施設に撮像システムを導入し、テスト撮像を行い、その標準化手法を開発している。図5は、青森量子科学センター（青森QSC）、図6は、愛媛県の住重アテックスに最新の撮像システムを導入した様子であり、いずれも、比較的短い露光時間で約 $300\mu\text{m}$ 程度の空間分解能が得られることを示した。

図7は、約10年ぶりに共同利用運転を再開した日本原子力研究開発機構の研究炉JRR-3の熱中性子ラジオグラフィ設備（TNRF）に最新の撮像システムを導入した様子である。さらに、本研究ユニットでは、オープンソースを用いたCT再構築ソフトの共用化を開始するとともに、撮像システムの改良を行っており、例として、図8にTNRFで取得した携帯電話のCT再構成像（3次元画像）を示す。

現在、福井県のもんじゅサイトに新たに試験研究炉の建設が計画されており、その概念設計が日本原子力研究開発機構、京都大学、福井大学において進められている。この新試験研究炉においても、中性子イメージングの活用は重要となる。したがって、熱中性子イメージングと冷中性子イメージングの具体的な装置設計を行う必要がある。これまでにユニットメンバーの様々な意見を取り入れ、具体的な設計を検討している。また、本研究所の次期中性子源として期待されているBNCT加速器中性子源を用いたイメージング装置に関しても、本ユニット内で詳細な設計を進めている。



図5. 青森QSCでの撮像テストと得られた画像

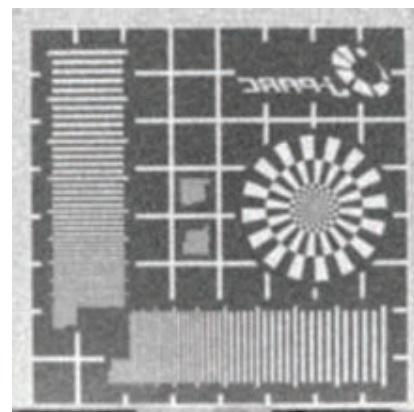


図6. 住重ATEXでの撮像テストと得られた画像



図7. JRR3に導入した撮像システム



図8. 得られたCT画像

表紙写真説明

表紙の写真は、国際原子力機関（IAEA）が指定した放射線解析用のツボ型の考古学サンプルであり、右側には一部の中性子透過像を示している。

京都大学では、このように比較的大きな考古学サンプルの詳細解析のため、中性子を用いた元素分析（即発ガンマ線解析）と中性子イメージングを用いた技術開発を行っている。

中性子核データの測定

原子力基礎工学研究部門・研究炉安全管理工学研究分野 寺田 和司 助教

長寿命核廃棄物の処理・処分は、原子力の抱える重要な問題です。現在、日本の原子力政策において、使用済み核燃料は再処理施設でガラス固化して高レベル放射性廃棄物(HLW:High Level Waste)となります。最終的に、HLWは30～50年中間貯蔵した後で地層処分されます。

一方、HLWから半減期が数百年～数百万年の長寿命核分裂生成物(LLFP: Long-Lived Fission Product)やマイナーアクチノイド(MA: Minor Actinide)を分離・抽出し、核反応を用いて短半減期化または安定化することにより、地層処分に伴う環境負荷の低減が期待されています。特に、原子核が中性子を吸収する中性子捕獲反応を用いた核変換処理が現実的に実現可能と有望視され、盛んに研究されています。中性子と原子核の相互作用の起こりやすさを断面積といい、核変換処理システムの性能評価にはLLFPおよびMAの高精度な中性子捕獲反応断面積データが必要不可欠です。しかし、これらの中性子捕獲断面積データは質的・量的に不十分であり、高精度化が重要です。

そこで、重要なLLFPおよびMAである ^{107}Pd 、 ^{237}Np 、 $^{241,243}\text{Am}$ について、茨城県東海村にあるJ-PARC等の大型実験装置を用いています。J-PARCでは3GeVの陽子線を水銀ターゲットに照射し、核破砕反応で発生した中性子を液体水素モデレーターで減速させ、熱領域からMeV領域にわたって大強度の中性子ビームが得られます。したがって、少量のFPおよびMAサンプルでの測定が実現できます。また、京都大学複合原子力科学研究所に来てからは熱中性子散乱則



データの測定と検証にも取り組んでいます。革新型原子炉の開発で要求される減速材に対する熱中性子散乱則データは質的・量的に不十分なのが現状です。そこで、革新型原子炉の減速材を模擬した体系に電子線形加速器から得られたパルス中性子ビームを照射し、体系外の中性子および γ 線スペクトルをTOF法で測定することによって、熱中性子散乱則データの検証に必要なデータの取得を試みています。

放射化断面積の測定及び高エネルギー粒子の挙動に関する研究

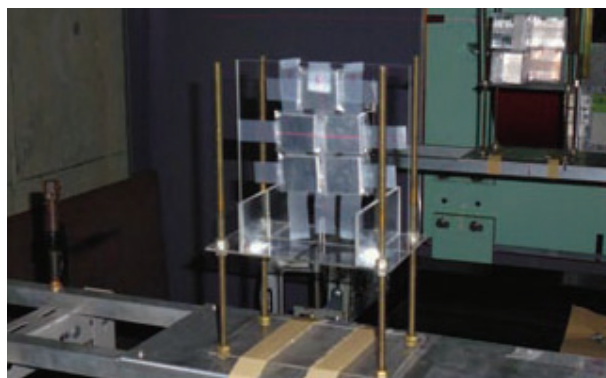
原子力基礎工学研究部門・放射線管理学研究分野 八島 浩 助教

放射線が原子核と核反応を起こして放射性核種が生成することを放射化といいます。原子炉施設や加速器施設では原子炉からの中性子や加速器で加速された1次荷電粒子及び1次荷電粒子の核反応で生成した2次粒子によってターゲットや構造物等に放射能(誘導放射能)が生じます。この誘導放射能評価は作業者の被ばく評価や廃棄物中の放射能評価上、重要となります。

誘導放射能評価には放射化断面積(放射線が原子核と核反応を起こして放射性核種が生成する確率)が必要で最近ではシミュレーションコードを用いた計算で評価しますが重イオンや高エネルギー中性子については実験データが乏しくシミュレーションコードで使われている理論モデルの検証が十分にはできていません。そこで本研究では計算精度の向上に資するための重イオンや高エネルギー中性子の入射による放射化断面積の測定を進めています。

また、加速器施設で生成する高エネルギー中性子線は透過力が強く中性子線に対する遮蔽設計が高エネルギー加速器施設の安全評価上重要となります。こちらら簡易計算式やシミュレーションコードによる計算で評価するのですが計算精度検証を行うための実験データが必要となります。本研究では加速器施設の遮蔽体内部やその周辺に放射化検出器を設置して生成した放射能を測定することで加速器施設において発生した2次中性子の遮蔽体内での減衰や空間分布の実験データを取得しています。

これらのデータは原子力施設や加速器施設の遮蔽設計や安全管理において重要ですのでこれからも研究を進めていきたいと思っています。



大阪大学核物理研究センターでの中性子放射化断面積測定の様子



米国フェルミ国立加速器研究所反陽子ターゲットステーションにおける遮蔽実験の様子

衝撃圧縮法を用いた惑星物質科学研究

粒子線基礎物性研究部門・中性子材料科学研究分野 梅田 悠平 助教

宇宙空間では小惑星や彗星などの衝突現象が普遍的に発生しています。それは地球でも同様であり、無数の小惑星が衝突・集積した結果、今から約46億年前に地球が形成されたと考えられています。その後の地球の歴史においても天体衝突現象は、環境変動や生物活動などに大きな影響を与えてきました。例えば、6500万年前に恐竜絶滅を引き起こした巨大小惑星衝突（通称チクシュルーブクレーターインパクト）です。この衝突はメキシコ・ユカタン半島において直径10 km程度の小惑星が秒速10 km超の速度で衝突し、直径200 kmもの巨大クレーターを形成したと推察されています。この衝突が当時の地球環境を激変させたことにより、恐竜を含む生物の約7割以上が絶滅したという説は、現在広く受け入れられていますが、その主な要因は何であったのかは、衝突生成温室効果ガス、酸性雨、巨大津波、衝突破砕物による太陽光の遮断など様々な説がありますが、未だに決着は付いていません。

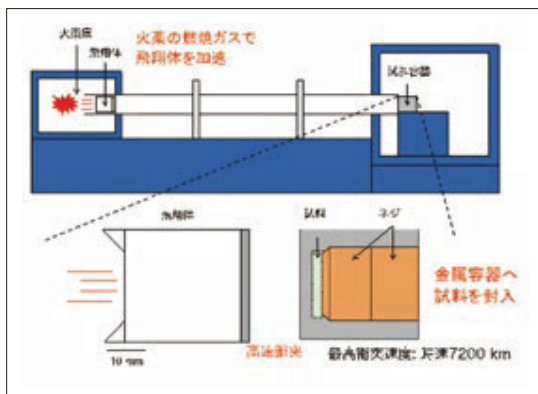


図1. 火薬銃による衝突回収実験原理

私は、天体衝突現象が惑星進化史や惑星環境変動に与えた影響を考察するために、天体衝突現象に対応する超高温高压環境（数百万気圧、数万度）を実際に実験室において発生させ、衝突を受けた物質（鉱物）の物理量（圧力・温度・密度など）や構造変化の様子を調べる研究を行っています。超高温高压環境の発生には、衝撃圧縮法という衝撃波によって物質を強く圧縮する手法を用いています。衝撃波の発生には火薬銃や高強度レーザーを使用しています（図1, 2）。火薬銃を用いた実験は大容量の試料の回収が可能であり、一方、レーザーを用いた実験は、高時間分解計測が可能であり、衝撃圧縮されている物質のまさにその場の物理量や構造変化の様子が計測できる、といった利点があります。私は、両手法の強みを活かしながら、衝撃圧縮中の惑星物質の振る舞い（状態方程式）や衝撃変成度を実験的に調べ、衝突スケールの定量化や衝突誘起反応を検討することによって、衝突現象が惑星進化史に与えた影響を明らかにしていきたいと考えています。

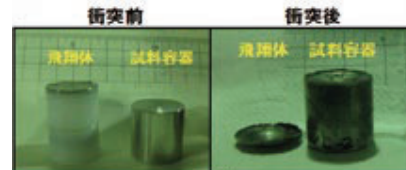


図2. 一段式火薬銃と衝突前後の飛翔体・試料容器

FFAG加速器を用いた研究

安全原子力システム研究センター・加速器応用工学研究分野 上杉 智教 助教

複合研イノベーションリサーチラボラトリでは、光速の40%の速度をもつ陽子ビームを生成するFFAG加速器を用いて、加速器駆動システム(ADS)の基礎研究を行なっています。ADSは加速器で作られた粒子ビームを使って未臨界炉を駆動する複合原子力システムで、加速器からのビーム供給が途絶えれば自動的に原子炉での核反応も終息するので、より安全な原子力システムと言えます。また、原子炉運転後に生じる長寿命放射性物質を核変換によって短寿命化することが可能で、原子炉からの核廃棄物の処理に利用できると期待されています。2009年よりFFAG加速器と京都大学臨界集合体(KUCA)と組み合わせた基礎実験が開始され、ADS実用化に必要な基礎データの収集を行なっています。他にも、陽子ビームを用いた様々な材料照射実験も行われています。



ところで、FFAGとは「固定磁場強収束」の頭文字を取った言葉で、粒子加速器のタイプの一つです。詳細は省略しますが、FFAG加速器は比較的コンパクトなリングで大量の粒子をより早く、より高いエネルギーまで加速できる特長を持つ非常にユニークな加速器です。特に面白いのはエネルギー（速度）の大きく異なるビームを同時に保持できることで、これを利用して、ビーム周回軌道の内部に標的を設置して何度も照射を繰り返す「エネルギー回復内部標的(ERIT)」という方式を使った粒子発生源への応用も期待されています。

イノベーションリサーチラボラトリでは、ERIT方式の原理実証機が開発され、その有効性が実証されました。複合研のFFAG加速器施設では、加速器そのものの技術開発を目的とした基礎研究も行われており、英国チームとの共同研究も活発に行われています。



図. FFAG加速器全景。直径約10メートルの主リング中を陽子ビームが周回しながら加速される。

京都大学研究用原子炉KURの今後の取扱いについて ― 新たな複合原子力科学の展開を目指して ―

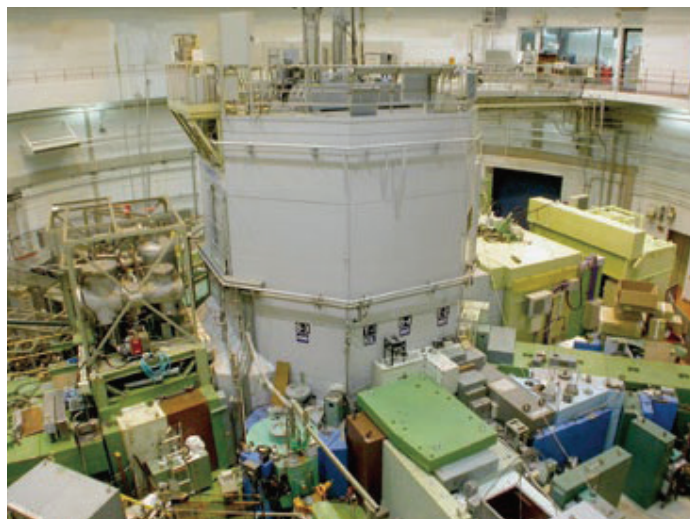
京都大学複合原子力科学研究所 所長 中島 健

京都大学複合原子力科学研究所は全国共同利用研究所として、多くの研究者・学生に原子力研究施設を用いた実験研究の場を提供するとともに、人材の育成に貢献してきました。このうち研究用原子炉KURは、1964年の運転開始以来、がん治療法であるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)の世界初の社会実装を実現するなど、多くの優れた成果を生み出してきましたが、施設の高経年化に加え福島第一原子力発電所の事故以降の安全規制の強化、使用済燃料の処分の問題などにより、大学において維持管理することが難しい状況となりつつあります。その一方、これまでBNCTの治験に用いられてきたサイクロトロン加速器が当研究所に移管され、将来の中性子源としての整備が進められています。また、福井県の「もんじゅ」サイトに設置する新たな試験研究炉の概念設計が昨年度より開始となり、当研究所は日本原子力研究開発機構及び福井大学とともに中核機関として設計に参加しています。さらに、もう1基の研究用原子炉である京都大学臨界実験装置KUCAでは、安定運転と高度利用を目指して、核燃料の低濃縮化作業が進められる等、新たな複合原子力科学の展開に向けた活動が行われています。

このような状況を踏まえ、京都大学では、4年後のKUR使用済燃料の米国への引き渡しにかかる期限である2026年5月までにKURの運転を終了することとしました。

今後は各種の加速器、KUCA及びホットラボラトリ等の実験施設の

整備を進めるとともに、外部研究機関との連携を深め、熊取キャンパスにおいて核燃料・放射性同位元素及び量子ビームを利用した新たな複合原子力科学研究及び関連する人材育成を進めていきます。



設備掛 小西 哉汰(こにし かなた)

出身地:兵庫県神戸市 略歴:近畿大学理工学部機械工学科

Q1. 複合研に來られたいきさつを教えてください。

在学中に就職活動を行っていたところ大学の先生より紹介があり施設系技術職員という職業を知りました。大学職員に興味を持ち、独自採用試験で採用されました。

Q2. 現在の職務内容について簡単に教えてください。

複合原子力科学研究所の施設の維持管理(給水、排水、空調、ガス)、機械設備工事の担当です。現在ですと第2研究棟機械工事の工事管理も担当させて頂いております。

Q3. 出身地のご当地自慢をお聞かせください。

出身は神戸市の北区の方なので割と山奥で過ごしました。有名なのは有馬温泉です。近くを通る有馬川には夏前になると蛍が飛んでいてとてもきれいです。ぜひ見に来てください。

Q4. 趣味はなんですか？

幼稚園の頃からサッカーをしており、中学高校ではレギュラーでの活躍をしました。

最近はFPSゲームにはまっていて、友人とボイスチャットを繋ぎながら戦っています。

Q5. モットーを教えてください。

モットーは何事も体験することです。仕事をするうえで書面だけでは分からないことや知ることができないことを実際に目で見て体験して、知識として増やしていくことが大切だと思っています。



学術情報本部 IT支援チーム 岡島 賢一郎(おかじま けんいちろう)

出身地:大阪府池田市

Q1. 複合研に來られたいきさつを教えてください。

2021年4月の人事異動で、情報部情報基盤課との兼務として配属されました。京都吉田地区からの異動で人生初の単身赴任生活ですが、今では生活にもだいぶ馴染んできて楽しんでいます。

Q2. 現在の職務内容について簡単に教えてください。

IT支援チームの一員として、ネットワークや情報セキュリティの保守、皆様からの問い合わせ対応など、ICTに関するサポートを行っています。

Q3. 出身地のご当地自慢をお聞かせください。

池田には日本で2番目に小さな動物園(無料)があり、そこでは日本では珍しいウォンバットが見られます。子供にも人気で池田のゆるキャラにもなっています。あと、呉春という日本酒があって、地元では人気のとても美味しいお酒です。また、カップヌードルミュージアムは池田駅前から近く、家族やカップルで行くと楽しめる場所だと思います。

Q4. 趣味はなんですか？

子供が産まれたのをきっかけに写真撮影に興味を持ちました。少々奮発してレンズを買い撮影を楽しんでいたのですが、宿舍でうっかり落としてしまいカメラを壊してしまいました。

Q5. モットーを教えてください。

業務では、IT系用語などできるだけ分かりやすい言葉でお伝えすることを心がけています。もし「ちょっと何言ってるか分かんない」と思うようなことがあれば遠慮なしに仰ってください。



アトムサイエンスフェア講演会2022開催案内

下記の要領で開催いたします。2名の講師がお話します。

- ◎日時：2022年10月22日(土)13:30～16:00
- ◎ハイブリッド開催(会場：京都大学複合原子力科学研究所 事務棟)
(オンライン：Zoom配信)
- ◎講演1：『顕微鏡による天文学 ―小惑星リュウグウのすがたを探る―』
講師：富岡 尚敬 (海洋研究開発機構 高知コア研究所 主任研究員)
- ◎講演2：『未来のがん治療技術：核医薬 ―人類に脅威にも福音にもなるアクチノイド―』
講師：山村 朝雄 (京都大学複合原子力科学研究所 教授)
- ◎定員：会場 30名(申込先着順)、オンライン 500名
- ◎対象：中学生～一般(会場参加条件：新型コロナワクチン接種歴が2回以上)
- ◎参加費：無料
- ◎申込方法：参加希望の方は事前に以下のホームページよりお申し込みください。
<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/public/asf/2022/lecture.php>
- 【会場参加】：申込期間2022年9月26日(月)10:00～10月7日(金)17:00
※先着順：定員に達した時点で受付を終了します。
- 【オンライン参加】：申込期間 2022年9月26日(月)～※開催当日まで
- ◎新型コロナウイルス感染症の状況により開催形式を変更する場合があります。

アトムサイエンスフェア実験教室2022プラス開催案内

- 内容の異なる2種類の実験を人数の制限を設けて対面で開催する予定です。
- ◎日時：2022年10月30日(日)13:30～15:30
 - ◎場所：京都大学複合原子力科学研究所 事務棟
 - ◎対象：中学生(参加条件：新型コロナワクチン接種歴が2回以上)
 - ◎定員：15名 ※先着順：定員に達した時点で受付を終了します。
 - ◎参加費：無料
 - ◎申込方法：以下のホームページより詳細をよくご確認の上、お申し込みください。
※参加者本人もしくは保護者の方、保護者の方が同伴される場合は1名
※ホームページ： <https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/public/asf/2022/class.php>
 - ◎申込期間：2022年10月17日(月)17:00～10月21日(金)12:00まで
※詳細は上記ホームページをご覧ください。
 - ◎新型コロナウイルス感染症の状況により開催日時・実験内容を変更し、オンライン開催に切り替える場合があります。(実験材料等は送付いたします)。

公式LINEアカウントについて

研究成果、イベントなどの情報をお知らせします。
ぜひ「友だち登録」をお願いします。



アトムサイエンスフェア2022の最新の情報はホームページをご確認ください。

- ※アトムサイエンスフェア2022における感染防止対策のための注意事項※
アトムサイエンスフェア講演会・実験教室において対面で参加される皆様には以下注意事項を遵守いただき、安全に安心して有意義な体験ができるようにご協力をお願いします。
- 当日、開催前1週間分の体調管理チェックシートを提出してください。
 - ご入構の際にはお一人お一人、運転免許証・学生証など顔写真入付の身分証明証の提示が必要です。
 - 新型コロナワクチン2回以上の接種歴が必要です。
 - 感染対策のため、ご入構の際にはマスク着用・検温・アルコール消毒を行ってください。
 - 体温が37.5℃以上の方は入構をお断りする場合があります。
 - 会場での飲食については持ち込みの飲み物(ペットボトル)のみ可能です。
 - 会場ではマスクの着用をお願いします。
 - お座席は間隔を空けて設置しています。
 - 会場での大声で会話する等の飛沫感染リスクを高める行為を禁止します。

第57回学術講演会開催案内

- 下記の要領で開催いたします。複合原子力科学研究所における共同利用・共同研究成果講演、定年退職職員記念講演などを行います。
- ◎日時：2023年2月14日(火) 10:30～17:30、15日(水) 10:40～15:10
(プログラム編成の都合により開催時間が変更される場合があります。)
 - ◎場所：京都大学複合原子力科学研究所 事務棟大会議室(依頼講演)
Zoomオンライン開催(一般講演)
 - ◎新型コロナウイルス感染症の状況により開催形式を変更する場合があります。
講演申込等、詳細については、複合研ホームページをご覧ください。
<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/events/16202>

令和5年度共同利用研究公募のお知らせ

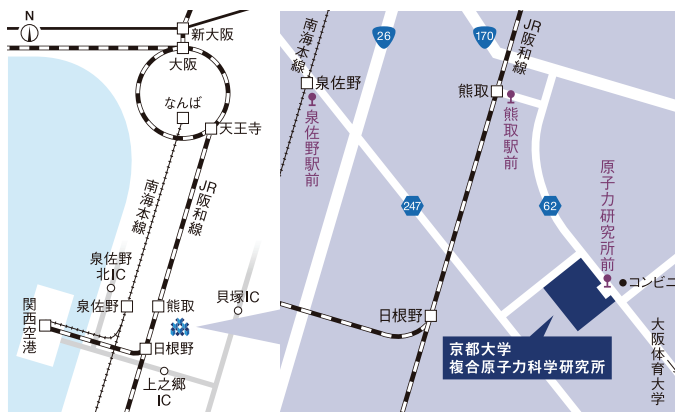
- 下記の要領で公募を行います。
- ◎公募要項：下記URLよりダウンロードしてください(2022年9月上旬頃から利用可)。
<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/inter-univ/kobo>
 - ◎申請方法：共同利用支援システムを利用した電子申請。詳細は公募要項をご覧ください。
 - ◎提出締切日
プロジェクト分担者：2022年10月19日(水)
通常及びプロジェクト代表者：2022年10月26日(水)
 - ◎照会先
京都大学複合原子力科学研究所 共同利用掛
電話：072-451-2312
電子メールアドレス：kyodo2312@rri.kyoto-u.ac.jp

次号以降の配布を希望される方は、総務掛までご連絡ください

広報誌「アトムサイエンスくまとり」に対するご意見、ご感想をお待ちしています。総務掛までお知らせください。

京都大学複合原子力科学研究所 総務掛
〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目
電話：072-451-2300
ファックス：072-451-2600
電子メールアドレス：soumu2@rri.kyoto-u.ac.jp
ホームページ：<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/>

●本誌の一部または全部を無断で複写、複製、転載することは法律で定められた場合を除き、著作権の侵害となります。



南海ウイングバス「原子力研究所前」下車すぐ

- ※JR熊取駅前発「大阪体育大学前」行き、または「つばさが丘北口」行き(所要時間約10分)
- ※南海本線 泉佐野駅前発「大阪体育大学前」行き(所要時間約30分)