









KURNS


**京都大学複合原子力科学研究所**

〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目

**TEL:072-451-2300 FAX:072-451-2600**

**E-mail:soumu2@rri.kyoto-u.ac.jp**

**https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/**



編集:京都大学複合原子力科学研究所 学術情報本部出版チーム　発行日:2023年6月　制作/印刷:(有)フォトスペース・アールエス


KURNS Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science



KURNS

# 京都大学複合原子力科学研究所

Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

# 京都大学複合原子力科学研究所
# Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

CONTENTS


ごあいさつ …… 2
沿革 …… 3
土地・建物、現員、決算 …… 3
運営と研究のための組織 …… 4
●原子力基礎工学研究部門
研究炉安全管理工学研究分野 …… 7
核物質管理学研究分野 …… 7
放射線管理学研究分野 …… 8
放射性廃棄物制御工学研究分野 …… 8
核変換システム工学研究分野 …… 9
放射能環境動態工学研究分野 …… 9
アクチノイド物性化学研究分野 …… 10
量子ビームシステム研究分野(客員) …… 10
●粒子線基礎物性研究部門
中性子材料科学研究分野 …… 12
中性子応用光学研究分野 …… 12
核ビーム物性学研究分野 …… 13
核放射物理学研究分野 …… 13
粒子線物性学研究分野 …… 14
照射材料工学研究分野 …… 14
同位体利用化学研究分野 …… 15
●放射線生命科学研究部門
放射線生化学研究分野 …… 17
粒子線生物学研究分野 …… 17
生体分子構造研究分野 …… 18
●粒子線腫瘍学研究センター
粒子線腫瘍学研究分野 …… 20
粒子線医学物理学研究分野 …… 20
●安全原子力システム研究センター
原子力防災システム研究分野 …… 22
加速器応用工学研究分野 …… 22
熱エネルギーシステム研究分野 …… 23
●複合原子力科学研究所の研究ユニット
●量子ビーム生体分子統合研究センター
●新研究炉開発・利用センター・新試験研究炉産学共同研究部門
量子ビーム生体システム解析・応用ユニット …… 25
中性子イメージング研究ユニット …… 25
量子ビーム生体分子統合研究センター …… 26
新研究炉開発・利用センター・新試験研究炉産学共同研究部門 …… 26
共同利用研究と教育・国際交流 …… 27
安全管理組織 …… 28
地元自治体等との連携、原子力災害対策 …… 29
研究施設および設備等
●京都大学研究用原子炉(KUR) …… 31
●ホットラボラトリ …… 36
●京都大学臨界集合体実験装置(KUCA) …… 37
●熱特性実験装置 …… 38
●電子線型加速器 …… 39
●トレーサラボラトリ …… 39
●コバルト60ガンマ線照射装置 …… 39
●放射性廃棄物処理設備 …… 40
●放射線管理設備 …… 41
●高機能中性子鏡製造装置(イオンビームスパッタ装置および大面積蒸着装置) …… 41
●イノベーションリサーチラボラトリ …… 42




## ごあいさつ

京都大学複合原子力科学研究所(以下、複合研)は、前身の原子炉実験所(1963年設立、2018年複合研へ名称変更)時代を含めると、今年で60歳という節目の年を迎えます。複合研には、2基の原子炉施設(研究用原子炉KUR、臨界集合体実験装置KUCA)、多彩な加速器施設、大規模なホットラボラトリ等、が設置されています。大学の附置研究所として、これほど多彩な施設を有するところは他に無く、複合研は、世界でも類を見ない稀有な教育・研究機関として、国内外から認知・期待されています。このような独自性をいかして、これまで、複合研は、文部科学省から認定された共同利用・共同研究拠点として、我が国の教育・研究に貢献してきました。

一方で、福島第一原子力発電所の事故を受けての新規制基準への対応や施設の老朽化といった影響力の大きな波が、複合研にも押し寄せてきています。このような波の影響に加えて、米国への使用済燃料の返送期限の関係から総合的に判断した結果、2026年5月でKURの運転を停止することを正式に決定しました。とはいえ、もう一つの原子炉施設であるKUCAは、核燃料の低濃縮化をはかったうえで継続活用していきますし、いくつかの加速器施設は、KURの代替中性子源として活用していくことを考えています。また、ホットラボラトリは、放射性同位元素や核燃料物質を、実際にその場で取り扱うことのできる施設として、老朽化対策を施したうえで、継続活用していくこととしています。このような施設面の将来計画と並行して、研究面の将来計画も確立しつつあります。2021年度末には、その時点での複合研ロードマップが策定され、「新型原子炉研究・廃止措置研究」、「多様な放射性同位元素利用研究」、「多様な量子ビームの利用研究」が、今後注力していく三つの研究の柱として提示されています。

今後数年間は複合研にとって非常に重要な時期になります。決めなければならないことが、たくさんあります。例えば、KUR運転停止後の研究所の目指すべき方向性や、方向性が定まったうえで、具体的にいつだれがどこでなにをおこなうか、といったことです。前途多難ですが、良いニュースもあります。福井県のもんじゅサイトには、KURのほぼ二倍の出力を有する新試験研究炉が設置される予定となっています。複合研は、現在、JAEA、福井大学と連携して、この新試験研究炉の詳細設計に携わっています。熊取サイトには、2023年4月、新研究棟が建設されました。人間でいえば還暦を迎えた複合研ですが、気持ちも新たに、明るく楽しく若々しく、人が集う魅力的な研究所を目指して、今後も全国共同利用研究所として、複合原子力科学に関する教育・研究を進めてまいります。これからも皆様のご理解・ご支援を賜りますようよろしくお願いいたします。

京都大学複合原子力科学研究所 所長
教授 黒﨑 健



# Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

## 沿革

■1956(昭和31)年 11月30日
第1回研究用原子炉設置準備委員会(初代委員長:湯川秀樹教授)開催
■1958(昭和33)年 9月
関西研究用原子炉建設委員会(委員長:藤本武助教授)発足
■1960年(昭和35)年 12月9日
建設地 大阪府泉南郡熊取町朝代地区に決定
■1960年(昭和35)年 12月21日
京都大学工学研究所(現エネルギー理工学研究所)に研究用原子炉建設本部(本部長:藤本武助教授)設置
■1961(昭和36)年 9月4日
原子炉設置承認申請書提出
■1961(昭和36)年 12月1日
起工式
■1962(昭和37)年 3月15日
原子炉設置承認
■1962(昭和37)年 4月1日
前記原子炉建設本部改組　京都大学に研究用原子炉(KUR)建設本部(本部長:木村毅一教授,副本部長:丹羽義次教授)設置
■1963(昭和38)年 4月1日
京都大学附置研究所として原子炉実験所を設置 全国大学等の共同利用研究所として発足(この期を前後して事務棟、原子炉棟、工作棟、トレーサ棟、研究棟、廃棄物処理棟、中性子発生装置室、研究員宿泊所などが完成し、原子炉研究部門、原子炉設備研究部門、ホットラボ設備研究部門、計測装置研究部門、廃棄物処理設備研究部門、放射線管理研究部門の6研究部門設置)
初代所長　木村毅一教授就任
■1964(昭和39)年 6月25日
KUR初臨界到達
■1964(昭和39)年 8月17日
KUR定格出力1000 kWに到達
■1965年(昭和40)年 1月1日
共同利用研究開始
■1968(昭和43)年 4月1日
第2代所長 岡村誠三教授就任
■1968(昭和43)年 7月16日
KUR定格出力5000 kWに上昇
■1969(昭和44)年 3月24日
ガンマ線照射棟竣工
■1969(昭和44)年 4月1日
原子炉熱特性管理研究部門増設
■1972(昭和47)年 4月1日
第3代所長 柴田俊一教授就任
■1972(昭和47)年 5月1日
臨界集合体実験装置(KUCA)の原子炉設置変更承認申請書提出
■1972(昭和47)年 8月24日
上記設置変更承認
■1974(昭和49)年 3月30日
臨界集合体棟竣工
■1974(昭和49)年 8月6日
KUCA初臨界到達
■1975(昭和50)年 4月1日
附属原子炉応用センター設置
■1976(昭和51)年 4月1日
放射線物性研究部門、原子炉核特性研究部門増設
■1976(昭和51)年5月10日
附属原子炉医療基礎研究施設設置
■1976(昭和51)年10月1日
高中性子束炉(2号炉)の原子炉設置変更承認申請書提出
■1977(昭和52)年 4月18日
技術室設置 核生物学研究部門、原子炉計測制御研究部門、原子炉物理学研究部門、低速中性子物理学研究部門、放射線化学研究部門、原子炉化学研究部門、原子炉化学工学研究部門の7部門増設
■1978(昭和53)年 10月2日
高中性子束炉の原子炉設置変更承認
■1979(昭和54)年 6月6日
京都大学熊取体育館竣工
■1980(昭和55)年 4月1日
第4代所長 林 竹男教授就任
■1982(昭和57)年 2月25日
環境放射能核種別分析測定室竣工
■1983(昭和58)年 4月2日
第5代所長 岡本 朴教授就任
■1986(昭和61)年 1月20日
使用済燃料室竣工
■1989(平成元)年 4月2日
第6代所長 西原英晃教授就任
■1990(平成2)年 7月31日
学術審議会報告「大学における研究用原子炉の在り方について」
■1990(平成2)年 12月6日
高中性子束炉撤回の原子炉設置変更承認申請書提出
■1991(平成3)年 2月4日
上記設置変更承認
■1992(平成4)年 8月20日
京都大学「京都大学研究用原子炉(KUR)の整備等について」を文部省学術国際局へ報告
■1993(平成5)年 7月28日
学術審議会報告「大学における研究用原子炉の在り方について」
■1995(平成7)年 4月1日
研究組織の改組(16研究部門を原子炉安全管理研究部門、中性子科学研究部門、核エネルギー基礎研究部門、バックエンド工学研究部門、応用原子核科学研究部門、放射線生命科学研究部門の6研究(大)部門に改組、2附属施設の原子炉医療基礎研究施設、原子炉応用センターの整備)
■1995(平成7)年 4月2日
第7代所長 前田 豊教授就任
■1999(平成11)年 4月1日
第8代所長 井上 信教授就任
■2003(平成15)年 4月1日
第9代所長 代谷誠治教授就任
研究組織の改組(6研究(大)部門を原子力基礎工学研究部門、粒子線基礎物性研究部門、放射線生命科学研究部門の3研究(大)部門に改組、2附属施設を合わせて原子力基礎科学研究本部、粒子線物質科学研究本部、放射線生命医科学研究本部体制を構築)
■2004(平成16)年 3月22日
イノベーションリサーチラボ棟竣工
■2005(平成17)年 4月1日
附属施設の改称(附属原子炉医療基礎研究施設を附属粒子線腫瘍学研究センターに改称)
■2006(平成18)年 4月1日
附属施設の改組(附属原子炉応用センターを附属安全原子力システム研究センターに改組)
■2008(平成20)年 4月1日
寄附研究部門(中性子医療高度化研究部門)設置
(～平成29年3月31日)
■2009(平成21)年 3月4日
FFAG陽子加速器−KUCA結合実験開始
■2009(平成21)年 4月1日
第10代所長 森山裕丈教授就任
■2010(平成22)年 4月1日
文部科学省認定(認定期間:2010～2015年度)
共同利用・共同研究拠点「複合原子力科学拠点」認定
■2010(平成22)年 4月15日
KUR低濃縮ウラン炉心 初臨界到達
■2010(平成22)年 5月12日
KUR低濃縮ウラン炉心 定格出力5000kWに到達
■2015(平成27)年 4月1日
第11代所長 川端祐司教授就任
■2016(平成28)年 4月1日
文部科学省認定(認定期間:2016～2021年度)
共同利用・共同研究拠点「複合原子力科学拠点」認定更新
■2017(平成29)年 4月1日
寄附研究部門(基礎老化研究部門)設置 (～令和2年3月31日)
■2017(平成29)年 6月21日
新規制基準対応のため運転を休止していたKUCAが、約3年3ヶ月ぶりに運転を再開
■2017(平成29)年 8月29日
新規制基準対応のため運転を休止していたKURが、約3年3ヶ月ぶりに運転を再開
■2018(平成30)年 4月1日
組織名の改称(原子炉実験所を複合原子力科学研究所に改称)
3研究本部制(原子力基礎科学研究本部、粒子線物質科学研究本部、放射線生命医科学研究本部)の廃止
■2021(令和3)年 4月1日
第12代所長 中島健教授就任
■2021(令和3)年 4月12日
新研究炉開発・利用センター設置
■2022(令和4)年 4月1日
文部科学省認定(認定機関:2022～2027年)
共同利用・共同研究拠点 「複合原子力科学拠点」認定更新
■2022(令和4)年 6月1日
量子ビーム生体高分子統合研究センター設置
■2023(令和5年)年 4月1日
第13代所長 黒崎健教授就任
産学共同研究部門(新試験研究炉産学共同研究部門)設置
複合原子力科学フロンティア研究プロジェクト設置
複合原子力科学安全管理研究プロジェクト設置
■2023(令和5年)年 4月28日
第二研究棟竣工

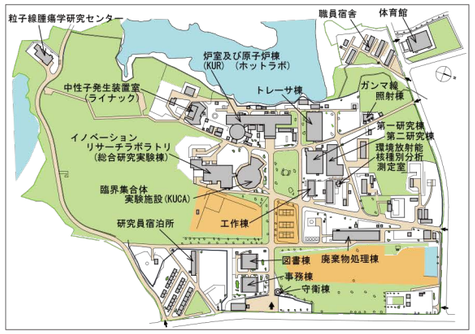
## 土地・建物 (2023年4月1日)

■土地

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 所有地 | 研究所 | 323,262 m² | 借用地 | 坊主池 | 55,679 m² |
| | 野外監視所(和田観測所) | 392 m² | | 野外監視所(体育館) | 2,956 m² |
| | 合計 | 323,654 m² | | 合計 | 58,635 m² |

■主な建物

| | | | |
|---|---|---|---|
| 原子炉棟・ホットラボラトリ | 4,146 m² | 第一研究棟 | 2254 m² |
| トレーサ棟 | 1,726 m² | 第二研究棟 | 4302 m² |
| 廃棄物処理棟 | 1,209 m² | 粒子線腫瘍学研究センター | 900 m² |
| 電子線加速器(ライナック)施設 | 419 m² | 熊取体育館 | 1,248 m² |
| ガンマ線照射棟施設 | 156 m² | 工作棟 | 411 m² |
| 臨界集合体実験棟 | 2,585 m² | 事務棟 | 714 m² |
| イノベーションリサーチラボラトリ(総合研究実験棟) | 3,377 m² | 図書棟 | 706 m² |
| | | その他 | 3271 m² |
| | | 合計 | 27,424 m² |




## 現員 (2023年4月1日)

| | 現員数* |
|---|---|
| 教授 | 14人(2人) |
| 准教授 | 19人(2人) |
| 講師 | 1人(0人) |
| 助教 | 25人(5人) |
| 事務職員・技術職員 | 47人(3人) |
| 合計 | 106人(12人) |

*( )は特定有期雇用・客員・再雇用職員で外数。

## 決算 (単位:千円)

| 年度 | 運営費交付金 | 科学研究費等 | その他外部資金 | 合計 |
|---|---|---|---|---|
| 2017年度 | 1,030,008 | 84,536 | 253,894 | 1,368,438 |
| 2018年度 | 919,932 | 180,043 | 182,636 | 1,282,611 |
| 2019年度 | 975,699 | 147,452 | 161,614 | 1,284,765 |
| 2020年度 | 897,060 | 107,122 | 167,443 | 1,171,625 |
| 2021年度 | 1,055,155 | 111,520 | 269,299 | 1,435,974 |
| 2022年度 | 915,607 | 131,105 | 742,147 | 1,788,860 |

※運営費交付金には人件費は含まず。
※2018年度ー2022年度の運営交付金にはウラン燃料低濃縮化等経費を含まず。



# Organization

## 運営と研究のための組織




■組織図(2023年4月1日現在)

## 委員会等

### ■協議員会
研究所の重要事項について審議する。

### ■運営委員会
所外の学識経験者および研究所の委員で構成され、研究所の運営に関する重要事項について所長の諮問に応じる。

### ■研究計画委員会
運営委員会の下に所外の学識経験者および研究所の委員で構成され、研究所における将来計画の調査立案、研究計画の検討を行う。

### ■人事選考委員会
運営委員会の下に置かれ、研究所の教員（助教を除く）の人事選考について調査を行う。

### ■共同利用運営委員会
所外の学識経験者および研究所の委員で構成され、研究所の共同利用の運営に関する重要事項について所長の諮問に応じる。

### ■共同利用研究委員会
共同利用運営委員会の下に所外の学識経験者および研究所の委員で構成され、研究所における共同利用研究の方針などの立案および実施に関する調整を行う。

### ■評価委員会
研究所の研究教育活動等の状況についての点検・評価の実施などを行う。

### ■地域広報委員会
熊取町、泉佐野市および貝塚市の教育委員会で、学校教育および社会教育等の職務を担当する有識者および研究所の委員で構成され、地域広報などについて情報交換を行う。

### ■原子炉安全委員会
所外の学識経験者および研究所の委員で構成され、原子炉施設および核燃料物質使用施設の保安に関する事項を審議する。

### ■放射線障害防止委員会
所外の学識経験者および研究所の委員で構成され、放射性同位元素などによる放射線障害の防止に関する事項を審議する。

### ■内部監査委員会
研究所の委員のみで構成され、原子炉施設の品質保証活動に関する監査を行う。

### ■教育活動推進委員会
共同利用研究を活性化するため、所内外の学部学生および大学院生等に対する教育・実習活動を行う。

### ■所長室
所長の業務を補佐するとともに、研究業務の調整および推進並びに人事計画の立案、実行を行う。

### ■所員会議
所長の諮問に応じて、研究所の所内運営に関する事項について検討する。

## 研究部門
原子力基礎工学研究部門（7研究分野、1客員分野）、安全原子力システム研究センター（3研究分野）、粒子線基礎物性研究部門（7研究分野）、放射線生命科学研究部門（3研究分野）および粒子線腫瘍学研究センター（2研究分野）が設置されている。これらの研究部門および研究センターでは、原子核物理から原子力・放射線、量子ビーム、ナノテクノロジー、物質材料、生命科学、医療（がん治療）など、広範な分野において先導的な学際的研究を展開し、共同利用研究の核として機能している。また、各研究分野は京都大学大学院理学研究科、医学研究科、工学研究科、農学研究科、エネルギー科学研究所の協力講座となっており、次代を担う学部・大学院生のみならず、高校生から社会人までを対象とした体験的教育も視野に入れて教育活動を推進している。

## 事務部
事務部は、総務全般を扱う総務掛、共同利用事務を扱う共同利用掛、図書関係業務を扱う図書掛、予算関係を扱う財務掛、予算執行を扱う契約管理掛、施設関連の業務（建築、電気、機械関係）を扱う施設掛、設備掛、旅費・謝金関係を扱う旅費・謝金センターの計7掛、1センターで構成している。

## 図書室
複合原子力科学研究所図書室は、原子力工学を中心に、数学、物理学、化学、生物学、医学、環境学など、当研究所で行われている研究分野に合わせて、幅広い分野の文献を収集・保管している。サービス面では、図書室で所蔵していない文献の取り寄せや、レファレンスサービスなどによって、利用者の研究・教育活動の支援を行っている。

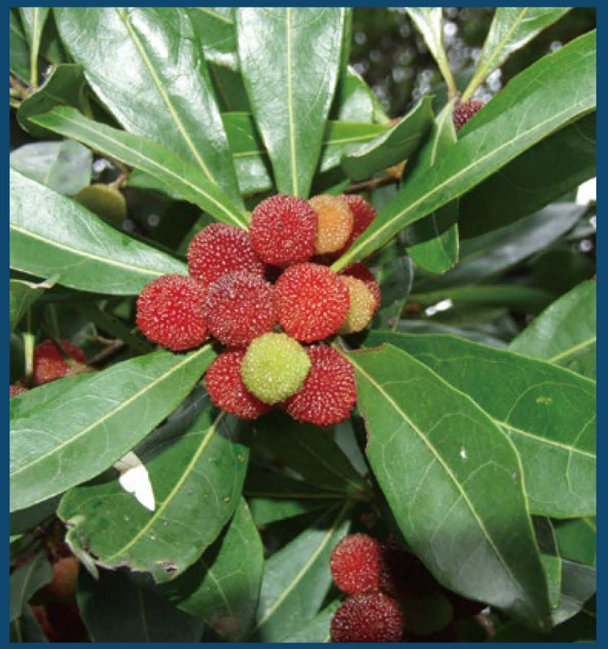
また、図書室は、京都大学の図書館ネットワークである図書館機構と連携し、専門図書館としての機能を果たすことによって、大学全体の図書館機能の実現を目指している。

## 技術室
4班8掛からなる技術室は、研究炉(KUR)、臨界集合体実験装置(KUCA)などの原子炉施設及びホットラボ施設、トレーサー棟、ライナックなどの関連実験施設・設備の運転・保守・管理並びに放射線管理、放射性廃棄物処理業務の実務の主要部分を部・室に所属して担うとともに、共同利用研究者を含めた研究者に対する技術支援および機械工場における研究者からの依頼に応じた実験機器の製作、材料の提供、機械工作指導などを担当している。またFFAG陽子加速器やBNCTサイクロトロン加速器などの研究開発にも携わり、新たな技術を習得しながら貢献している。

## 安全管理本部
原子炉施設、核燃料物質使用施設および放射性同位元素など使用施設の安全管理業務を所掌する部を統括、指揮するとともに、その他一般の保安管理業務についても統括するために安全管理本部が設置されている。所長が事故などにより職務を遂行できないときは、安全管理本部長が安全管理業務を代行する。

## 学術情報本部
学術情報本部は、教職員の学術業績データベースの整備・管理、ネットワークやホームページ（HP）運用の支援、学術広報などを担当している。HP 運用の支援には、研究所における諸業務の IT化などがある。学術広報には、HP を通じた研究所の研究・教育活動などの紹介、一般公開（講演・実験教室・施設公開）・学術公開の開催、見学用パンフレット、要覧、広報誌アトムサイエンスくまとり（ＡＳＫ）、Progress Report、報文集などの出版、学術講演会・アトムサイエンスフェア（ASF）講演会・ASF 実験教室の開催、講師派遣などがある。





# Division of Nuclear Engineering Science

## 原子力基礎工学研究部門

●研究炉安全管理工学研究分野●
●核物質管理学研究分野●
●放射線管理学研究分野●
●放射性廃棄物制御工学研究分野●
●核変換システム工学研究分野●
●放射能環境動態工学研究分野●
●アクチノイド物性化学研究分野●
●量子ビームシステム研究分野（客員）●

# Division of Nuclear Engineering Science
## 原子力基礎工学研究部門

### 研究炉安全管理工学研究分野
### Research Reactor Safety

京大研究炉(KUR)は、一般研究用として設置された全国大学共同利用の研究炉です。多量の中性子を提供し、極めて広い研究分野で利用されています。また、電子線型加速器(LINAC)は研究炉に相補的なパルス状の中性子源で、中性子飛行時間法による核データの測定等を行っています。
私たちはこれらの装置を用いて、原子炉物理及び臨界安全に対する実験的・理論的研究を行うとともに、原子力施設の安全性に関する研究に取り組んでいます。

1)原子炉物理、臨界安全に関する研究
KURや臨界集合体装置を使用した原子炉物理や臨界安全に関する実験的研究や、次世代原子炉に対する核特性や安全性の研究、また、原子炉物理に関する計算手法の高度化に関する研究を行っています。
2)中性子核反応断面積の測定
次世代原子炉や核変換等において重要なマイナーアクチニドやLLFPに関する核データ(核反応断面積)の測定をLINACやKURを用いて行っています。
3)次世代核燃料に対する非破壊分析技術の開発
パルス中性子源であるLINACを用いて、次世代核燃料中の様々な原子核の定量や燃料中の温度分布等の測定を非破壊で行う技術を開発しています。

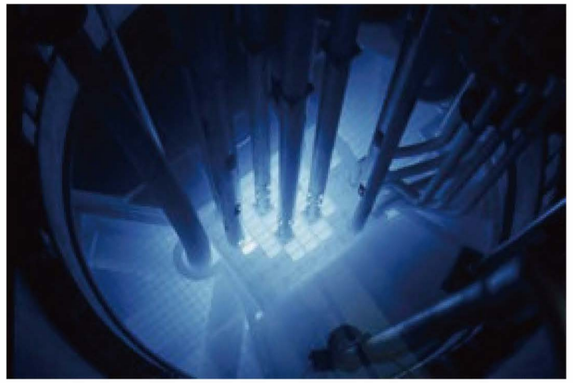
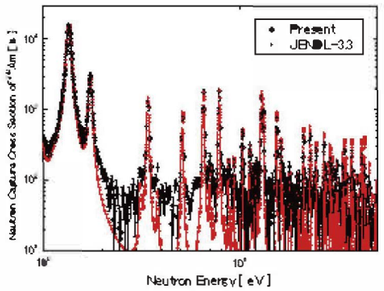


図1 研究炉KURの炉心(チェレンコフ光)




**$^{243}$Amの中性子捕獲断面積**

図2 Am243の中性子捕獲反応断面積

### 核物質管理学研究分野
### Nuclear Material Control

ウランやプルトニウム等の核燃料物質(核物質)の管理や最適利用を通じて、将来のエネルギー問題を解決する革新的な核エネルギー利用システムについて考察し、関係する諸課題についてハード面及びソフト面から研究を進めている。
また、本研究分野は、協力講座として京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻　エネルギー政策学分野を担当しており、エネルギー政策分析、エネルギーセキュリティ評価研究に自然科学、社会科学の両面から取り組んでいる。

具体的な研究テーマとしては、
1) トリウム利用をはじめとした、優れた核拡散抵抗性及び核燃料資源節約特性を有する次世代原子炉システムの開発に関する研究、
2) 原子力エネルギーの役割に注目したエネルギー政策及びエネルギーセキュリティに関する研究、
3) 核燃料輸送・保障措置・核物質防護措置の高度化、効率化に関する工学的研究、
などが挙げられる。

これらの研究活動をもとに、実務面への応用にも取り組んでおり、核燃料管理室の運営を通じて、
1) 研究所における核物質の受払、使用、貯蔵等に関する規制面の指導、
2) 核物質の取扱いに係る教育、訓練、
3) 核物質防護対策、輸送対策を含む核燃料物質の管理、
4) 試験研究用原子炉の低濃縮化技術開発、
5) 国際査察への協力、
など核物質の安全管理に係る幅広い事項に関し、規制対応、所員への指導を行っている。

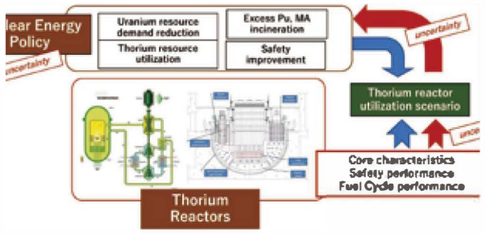



図1 次世代原子力エネルギーシステムとしてのトリウム利用に関する研究アプローチ

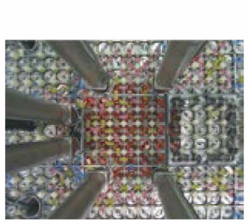


図2:KUCAトリウム装荷臨界実験炉心

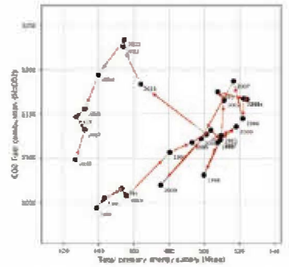


図3:我が国のエネルギー総供給とCO2排出の二次元軌跡(福島事故による原子力発電停止によるCO2排出挙動の変化と2013年以降の回復のエビデンス)

### 放射線管理学研究分野
### Radiation Control

原子力施設や放射線利用施設の従事者や周辺住民の方が、放射線や放射性物質による健康影響を受けることなく、安心して仕事や生活ができるために必要な「放射線・放射性物質」の「安全管理」に関する研究を行っている。具体的には、下記の4つの課題を中心に、工学、物理学、環境科学、医学などの多様なバックグラウンドをもつ専門家が協力して研究を進めている。東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けて、委員会や学会等を通して復旧復興に向けた取り組みに協力するとともに、緊急時、廃炉時、廃止措置にむけた放射線管理に関する研究も同時に進めている。

1)原子力施設やその周辺環境における放射線安全管理
原子力施設やその周辺環境の放射線管理に関して必要な研究を行っている。対象としてはKUR、KUCA、所内の加速器である。放射線の健康リスクの大きさに依存した、より高精度で信頼性が高い安全管理手法の開発を目指している。
2)福島第一原発事故や原子力施設に起因する放射性物質の環境中での動態
東京電力福島第一原子力発電所により周辺環境に放出された放射性物質、また、原子力施設から環境中に放出された放射性物質の動態について研究をおこなっている。特に、事故で放出された放射性物質の物理・化学性状の研究や土壌や植物を介した人への移行について、放射性セシウムなどを対象に研究を行っている。また、土壌から植物への移行をモデルで表す研究を進めている。
3)放射性物質を利用した環境研究
福島第一原発事故で環境汚染を引き起こした放射性セシウムは生態系の中で循環し、一部の生物種では生物濃縮が生ずる。そこで、これをトレーサーとして、森林生態系から大気へ放出されるバイオエアロゾル(真菌類胞子やバクテリアなど;図1)について、その種類、発生量、発生メカニズム、さらにはその影響についても研究を行っている。
4)放射線や環境有害物質の健康への影響と危険度(リスク)
放射線を過剰に受けると様々な健康への影響が生じる。これまでに、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)に用いる中性子線の生体影響の特徴を明らかにしてきた。DNA損傷や突然変異誘発を指標とし、中性子線単独の効果やホウ素存在下で中性子線照射により生じるα線やリチウム線の生物効果に関する研究を進めている(中性子照射により生じた細胞のDNA二重鎖切断箇所が染色され蛍光を発している;図2)。

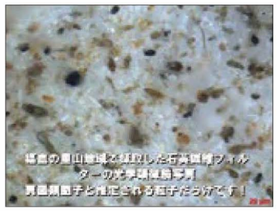


図1　福島第一原発事故で放出された放射性セシウムは森林の中で真菌類を介して循環することがわかってきました。大気へも胞子にふくまれて放出されます。自然の環境の理解も動態解明にかかせません。

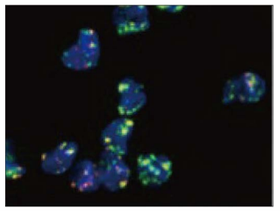
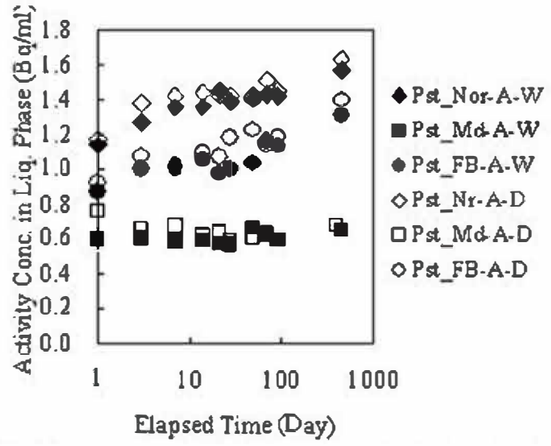


図2　研究用原子炉(KUR)からでる中性子線で照射された細胞。DNAの二重鎖が切断された個所が光って染色されている。

### 放射性廃棄物制御工学研究分野
### Radioactive Waste Management

原子力を安全に利用するためには、原子力施設から発生する放射性廃棄物管理に関する研究が必要である。本研究分野では原子力施設由来の放射能による環境影響の低減を目的とし、以下に代表される研究を行っている。

1)原子力施設由来の放射能汚染に対する分析・除染・浄化に関する研究
原子力発電所の事故によりセシウム-137をはじめとする放射性物質によって環境が大規模に汚染された際、環境修復すなわち除染および土壌系・水系の浄化に関して、吸着材の開発等共同研究や効率的な除染モデルの検討研究等を行っている。また、福島原発由来の核分裂生成物であるストロンチウム-90、燃料成分であるウラン、プルトニウム等を環境試料から検出し、その同位体比を精密に測定して環境中放射性元素の由来を解明する取り組みを開始した。過去に研究実績のほとんどない放射性テルルに関して植物移行に関する研究も行っており、加速器で放射性テルルを生成して実験に供する予定である。
2)原子力利用に伴う各種リスク評価に関する研究
原子力施設において放射能放出を伴う事故が発生した場合の環境影響を、さまざまな放射能放出モード、気象条件下でシミュレーションし、周辺地域での放射能汚染や被ばく線量の評価を行っている。また、原子力施設から環境中に放出される放射能について、低レベル放射能の測定法を開発するとともに、環境中における放射能濃度を短期的・長期的に観測し、原子力施設の平常運転がもたらしている環境影響を明らかにする研究を行っている。
3)有害汚染物質の環境中における動態とその評価に関する研究
放射性元素、重金属類など環境中に放出された有害微量元素の環境中での移行、形態変化などの挙動を解明するため、実験的、解析的研究を行っている。また、土壌中から植物へ、海水中から海草・海藻への有害汚染物質の移行機構を利用した環境浄化システムに関する研究も行っている。




各種セメントからの$^{134}$Csの水中への浸出

# 原子力基礎工学研究部門
Division of Nuclear Engineering Science

## 核変換システム工学研究分野
Nuclear System

この分野では、核エネルギーを利用したより安全で効率的な新しい核変換システムを開発するために、中性子輸送と核変換反応に基づくシステムの核特性に関する原子炉物理の基礎研究および新しい放射線計測システムの開発とその応用のための研究を行っている。研究は臨界集合体実験装置(KUCA)、中性子発生加速器施設などの施設を用いた実験とその解析が中心であり、主な研究テーマは以下の通りである。

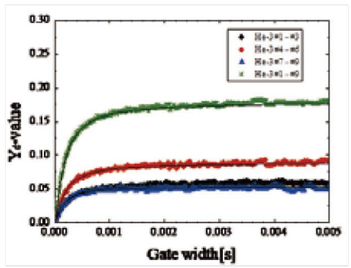
1)トリウム燃料を装荷した原子炉に関する研究
トリウムは高レベル放射性廃棄物が発生しにくいなどの特徴を持ったウランに代わる新しい核燃料として提案されており、このトリウムを用いた原子炉の核特性や燃料の増殖特性に関する基礎研究を行っている。

2)核燃料を用いる施設の臨界安全性及び原子炉の核的安定性・安全性の研究
核燃料サイクル施設の臨界安全性に関する研究として未臨界度(臨界状態からの安全裕度)の測定手法とそのための検出装置開発に関する研究を行っており、この手法を福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し作業でも用いる予定である。

3)新しい放射線検出器の開発と隠匿物質などの探査技術などへの応用
加速器中性子源と複数の検出器を組み合わせた新しい放射線測定システムの開発研究を行っており、これらの放射線測定システムを用いて、地中に埋められた地雷、コンテナなどの容器中の隠匿物質の探知技術の開発を進めている。



KUCAでの核物質探知実験




中性子雑音測定法による核物質探知実験の解析結果

## 放射能環境動態工学研究分野
Environmental Radionuclide Science & Engineering

**環境中の放射性・非放射性汚染物質の動態と環境修復技術**

本分野では、特に地水圏環境を中心に、放射性・非放射性の汚染物質の動態と環境修復の技術を研究してきた。(1)地質媒体・水・植物などの環境要素間での汚染物質の移行を解明する室内試験、(2)汚染物質の濃度や化学的存在形態の分析技術開発、(3)放射性セシウム、ウラン、プルトニウムの野外環境分布調査、(4)水や土壌の汚染の原位置除去技術開発、(5)汚染物質移行モデルや環境データの統計学的解析技術の開発、を国内外で展開している。

**廃棄物の安全な埋立処分と地下水汚染の防止・浄化技術の開発**

2011年の福島第一原発事故の結果、一般環境の放射性セシウム汚染という、新次元の環境問題が発生した。結果として、除染作業で除去された土壌と放射性セシウムを含む自治体ごみが大量に発生する事態となった。我々はこのような廃棄物の除染と減容の研究を行ってきた(図1)。このような廃棄物を埋め立て処分するには、実際に放射性物質を日本の地下環境に埋設しても安全が確保できることを実フィールドで示すことが必要と考えた。そこで2018年度からは、福島第一原発事故以来、低濃度ながら放射性セシウムを含有するようになったゴミ焼却灰を実際に受け入れている最終処分場の浸出水及び周辺地下水の本格的な調査に着手した(図2)。調査でえられた地下水位や地質ボーリングデータの情報を整理して地下水流動の数値シミュレーションを実施してきた(図3)。さらに、浸出水や地下水試料の放射能分析及び化学的な成分分析から得られたビッグデータを機械学習によるパターン認識技術を援用して整理してきた。

また自然地質由来の地下水ヒ素汚染の原位置浄技術として鉄バクテリア生物ろ過法に注目、日越での現場試験を行い、ベトナムにおける農村水道実施設を建設した(図4)。

現在は、北欧及びウクライナにおける地下水の放射性セシウム汚染の調査を推進している。



図1. 放射性セシウム除染の現場試験



図2. 観測井の水位観測と採水調査

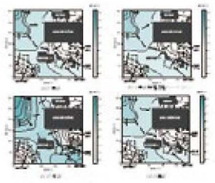


図3. 地下水流動シミュレーション



図4. ベトナムに設置した水処理施設

## アクチノイド物性化学研究分野
Condensed-matter Chemistry in Actinides

**発見から70年の「若い」元素の未知の性質の研究**

アクチノイド元素群は人類が見出して70年程度の元素が多く、未知の性質を明らかにしようとする努力が続けられています。元素周期表の中で希土類元素の下にあるのがアクチノイドの元素群です。希土類元素が持つ磁性、発光などの特性は産業に活用されています。アクチノイドの多彩な性質も負けていません。希土類と同様にf軌道が外殻である一方で、遷移金属元素とも類似する変幻自在な電子的性質が特徴です。

アクチノイドの元素群は、ウランやプルトニウムの原子炉燃料として利用されてきました。同時に、原子炉で生成する超長半減期のアクチノイド元素は放射性廃棄物とされ、アルファ放射体としての毒性を人類が管理する方法の工学的提示が求められています。また最近では、アルファ放射体としての性質や錯体形成の性質がガン治療核医薬に使われ注目を集めています。

**理工学、医学と連携するアクチノイドの実験的研究**

アクチノイド元素の化合物は、強いスピン軌道相互作用や5f電子軌道の空間的拡がりの特徴から、希土類元素や遷移金属元素とも異なる独特な結合性や磁性を示します。アクチノイド元素の錯体、酸化物、金属間化合物の物性の研究も活発ですが、投与により癌を治療する核医学の研究も行われます。結晶構造解析や、放射光や中性子などの量子ビームを利用した測定・分析により、結合軌道や電子の振る舞いに関する情報を得ることが行われます。

このような実験的研究には、本所ホットラボを起点とした独創性の高い手法が適用され、さまざまな大学や研究所に、長年にわたりコミュニティで設置された装置群・手法が活用されます。

**実験の解釈・先導を可能にする理論研究**

放射性で複雑な性質を持つアクチノイド元素では理論計算の重要性が増しています。実験のみでは困難な結果の解釈や、実験そのものの先導を行うことが求められます。

一般の理論計算では、多電子系の分子や化合物における計算量増大への対処法が研究されます。アクチノイド元素では、重元素系として核電荷が大きく電子の速度が光速に近づき「重く」なるため、相対論的量子力学を取り込む必要があります。このような物質では電子間の相関が著しく、この多体問題を正確に解くためプログラム開発やスパコンによる大規模計算も必要です。

実験と理論の協奏により、人類にとって実りあるようなアクチノイド元素の物性化学の進展を目指しています。

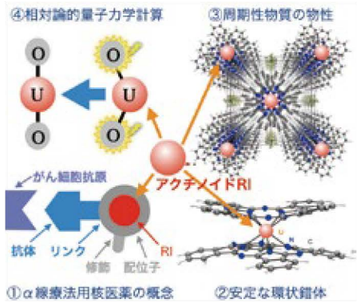



図1アクチノイドのアルファ放射体としての利用、安定化のための物性化学研究

## 量子ビームシステム研究分野(客員)
Quantum Beam System( Guest Research)

原子力安全に関連した分野の第一線で活躍し、優れた業績を上げている研究者を招聘し、最先端の研究情報を交換しながら関連分野の研究動向を的確に把握し総合的・計画的な研究の推進を図っている。



# Division of Quantum Beam Material Science

## 粒子線基礎物性研究部門

●中性子材料科学研究分野●
●中性子応用光学研究分野●
●核ビーム物性学研究分野●
●核放射物理学研究分野●
●粒子線物性学研究分野●
●照射材料工学研究分野●
●同位体利用化学研究分野●



# Division of Quantum Beam Material Science

## 粒子線基礎物性研究部門

### 中性子材料科学研究分野
### Neutron Material Science

黒鉛とダイヤモンドは物質としての性質（物性）が大きく異なる。この違いは炭素の原子スケール配列の差による。本研究室では、結晶、非晶質物質、非平衡物質の物性の起源を原子のスケールで理解すること、その理解を踏まえて有用な材料を得ることを目標として、各物質の合成と解析を行っている。中性子線、X線（自由電子レーザーを含む）、電子線などの量子ビームを使って、回折法・散乱法・吸収法による解析を行い、太陽系、惑星、地球の物質や、人間に役立つエネルギー材料、機能性材料を調べている。量子ビーム解析により、物質中の原子の配列（静的構造）に加えて、原子の揺らぎと拡散（動的構造）を捉えることができる。物質の静的・動的構造と、その特徴的な物性との関連性を予測した上で、高温や高圧などの最適な条件の下で試料の合成を行い、それを解析することで、物性の起源を明らかにしている。

中性子による解析は、水素やリチウムなどの軽元素に対して特に敏感である。本研究室ではこの中性子の特徴を利用して、軽元素を含む物質の解析を重点的に行っている。図1に静的構造の解析の例として、超高圧力の条件で合成した、微少量の水素を含む結晶についての結果を示す。図2に動的構造の解析の例として、水素を含む結晶が高温条件で脱水素反応を引き起こす前に、水素が結晶内部を移動する過程を原子スケールで捉えた結果を示す。

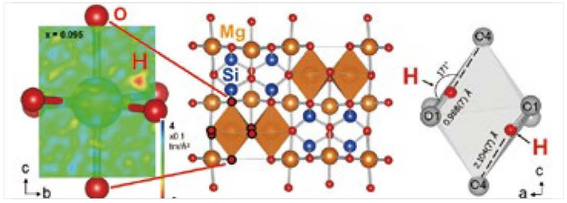



図1:17万気圧で合成した含水素鉱物・ワズレアイトの構造解析。左側の中性子散乱長分布の赤色（負値）が水素。散乱長から得た水素濃度は1500ppmであり、地球内部でこの結晶が海水の3倍の水素を吸収できることを示した。

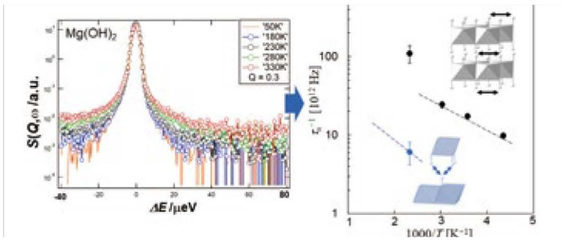



図2:水酸化マグネシウムの準弾性散乱解析。左側の中性子エネルギースペクトルの裾部分の幅が、結晶内部の水素跳躍運動の頻度を示す。右側は温度と水素の跳躍頻度の相関図。頻度が異なる二種類の跳躍の経路を発見した。

### 中性子応用光学研究分野
### Neutron Optics

本研究分野は、中性子の光学的性質を利用し、低速中性子の今までにない発見や利用方法の実現を目指している。中性子利用は様々な利点があるが、電気的に中性な特長のため中性子ビームを制御（曲げる）ことは大変難しい。そこで中性子が低速になるほど、物質「波」としての性質が顕著になることを利用して、世界最高レベルの多層膜中性子反射ミラーをはじめとする中性子光学素子を開発し、その応用研究を行っている。

中性子は軽元素や磁性体に敏感であり、物質内部のナノ構造解析に力を発揮する。また静的構造だけでなく、動的な構造の情報を直接引き出せる。



図1 J-PARC MLF BL06で利用が進む中性子共鳴スピンエコー分光器群 (VIN ROSE)

特に中性子スピンエコー法は、中性子のスピンを精密に制御することで、他の方法では見ることのできない時間・空間領域をカバーし、生体分子等のゆっくりとした動きも調べることができる。我々は中性子スピン干渉の原理と中性子スピンの精密制御技術を駆使して、世界的にユニークな中性子共鳴スピンエコー分光器(VIN ROSE)を京都大学と高エネルギー加速器研究機構の連携の元、J-PARC MLF BL06に建設し、共同利用研究を展開している。

中性子は、強い透過力を持ち、X線ではコントラストのつきにくい物質内部の水の振る舞いや金属容器内の構造を3次元的に見ることが可能である。さらに中性子の位相に注目したイメージング手法では、サブミクロンの平均構造のゆらぎも同時に見ることが可能であり、中性子ならではの測定対象の拡大を目指している。そしてこれらの様々な装置開発の知見を活かし、福井県敦賀市「もんじゅ」サイトで建設計画が進行中の新たな試験研究炉の実現に向けて精力的に活動している。

また中性子検出器開発だけでなく、紫外線や放射線によって光るプラスチックを開発し、安価で高感度の放射線検出器開発を推進する等、広く開発研究を行っている

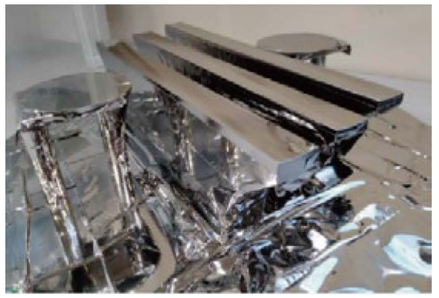


図2　開発した回転楕円体中性子集光スーパーミラー

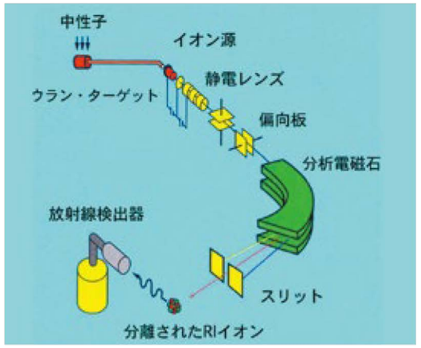
# 粒子線基礎物性研究部門
Division of Quantum Beam Material Science

## 核ビーム物性学研究分野
Nuclear Beam Material Science

不安定核は、有効に働く核力成分が異なることにより、安定な原子核とは異なる様相を示す。動的な性質を示す不安定核の多様な励起構造の研究は、表面を有する量子多体系の物理として、物理学における重要なテーマの一つである。不安定核の研究には、不安定核ビームが有用であり、オンライン同位体分離装置(ISOL)は単一のエネルギーをもった高い強度の不安定核ビームを提供できる。

核ビーム物性学研究分野では、研究炉に附置されたISOLを用いて、主に質量数150近傍における未知核種の探索、遷移領域核の核構造研究、$\beta$崩壊のQ値測定による原子核質量の決定、不安定核の磁気モーメント測定を行っている。また、それらに必要なユニークな各種計測装置、核分裂片用オンライン同位体分離装置の開発研究も行っている。これらの研究を通して、量子多体系の性質を明らかにしようと試みている。

さらに、ISOLなどで得られる短寿命核をプローブとし、遷移金属や酸化物などに導入して、$\gamma$線摂動角相関法(PAC)により観測される超微細相互作用をとおした物性研究を行っている。特に、短寿命核をイオンビームとして物質中に注入することにより、通常の実験室では生成できない化合物の合成や物性研究が可能である。




KUR-ISOLの概念図。
ウラン・ターゲット中で生成された放射性同位体をキャピラリーを通してイオン源に移送し、イオン化した後、質量分離を行う。

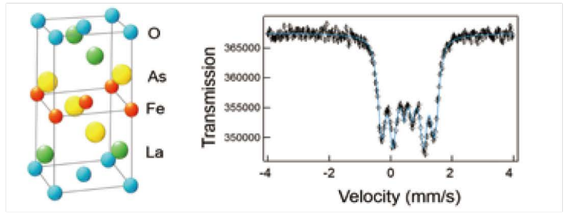


KUR-ISOLの2つのビームコースの写真。
左側にテープコレクタを設置した核物理コース、
右側に後段加速器を設置した物性コース。

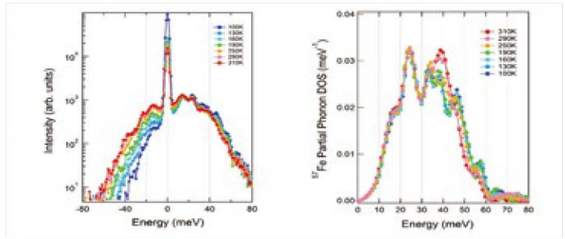
## 核放射物理学研究分野
Nuclear Radiation Physics

当研究室では、原子核の共鳴励起現象に関する基礎的研究ならびにこれを用いた凝縮系科学の研究を行っている。また、このような現象を用いた先進的分光法の研究も行っている。特に、核共鳴励起現象を用いた分光法としてMössbauer(メスバウアー)分光法を利用した研究を進めている。この分光法では、中性子照射などにより生成した放射性同位体(RI)線源からの$\gamma$線をドップラー効果によりエネルギー変調を起こさせ、共鳴核で無反跳核共鳴吸収させることによって原子核のエネルギー準位の変化を観測する。このとき、核のエネルギー準位は周囲の電子系の状態を、超微細相互作用を通して鋭敏に反映するため、局所的な電子構造・磁性の精密な測定が可能となる。また、neVオーダーの極めて小さな揺らぎの観測も可能となる。$\gamma$線源としては、長寿命RIの$^{57}$Co、$^{125m}$Te、$^{119m}$Snの他に短寿命RIの$^{129}$Te、$^{193}$Os、$^{197}$Pt等を用いて、$^{57}$Fe、$^{125}$Te、$^{119}$Sn、$^{129}$I、$^{193}$Ir、$^{197}$AuなどのMössbauer効果測定を行っている。これにより、高温超伝導物質の電子構造・磁性に関する研究、導電性高分子における電気伝導度に関する研究、低次元物質における電荷密度波に関する研究を実施している。さらに、放射光X線を光源とした核共鳴非弾性・準弾性散乱法による凝縮体のダイナミクスに関する研究も行っている。放射光核共鳴非弾性散乱法は当研究室が世界で初めて測定を行ったものであり、核的手法による物質科学研究分野で先端的な研究を推進している。

また、加速器を用いて相対論的荷電粒子と結晶との相互作用によるパラメトリックX線放射やコヒーレント制動放射などとその応用に関する研究も行っている。




Fe系高温超伝導体母物質LaFeAsOの$^{57}$Feメスバウアースペクトル。




電荷分離Fe酸化物$CaFeO_3$の温度変化核共鳴非弾性散乱スペクトル(左)とこれから求めたFeフォノン状態密度(右)。

## 粒子線物性学研究分野
Radiation Material Science

物質の構造とその動的性質は深く結びついている。構造は、構成要素間に働く相互作用により決定され、外的擾乱と構造を決定している相互作用との関係において動的性質は規定される。 特に、ナノスケールの構造体では、その動的性質は「機能」に直結している。したがって、ナノスケールの構造を持つ「機能性物質」の機能発現機構の研究は、静的構造解明とそれに基づく動的構造の理解が必要となる。本研究室では、 上記の考え方に基づきナノスケールの構造を持つ機能性物質(超臨界流体・高分子共重合体・高分子ゲル・タンパク質など)を対象として、その静的・動的構造研究を推進している。

ナノスケール構造研究は、主として量子ビーム(X線・中性子線)を用いた散乱法を用いて行っており、特に中性子の同位体識別能力を生かした構造解析に力を入れている。図1に、細胞中の不要タンパク質を分解する 20S Proteasomeの機能を制御するPA28というタンパク質のサブユニット配置と溶液中での解離平衡状態を中性子小角散乱法により解析した例を示す。選択的に特定サブユニットを重水素化することで、タンパク質の内部構造を解明するとともに 水溶液中での動態も明らかにした。

また、本研究室では、ナノ構造解析のための分光器・解析手法開発も積極的に進めており、J-PARCにおける小角散乱装置の開発に参加するとともに、RMCを用いたナノ構造解析Simulationソフトの開発も行っている。

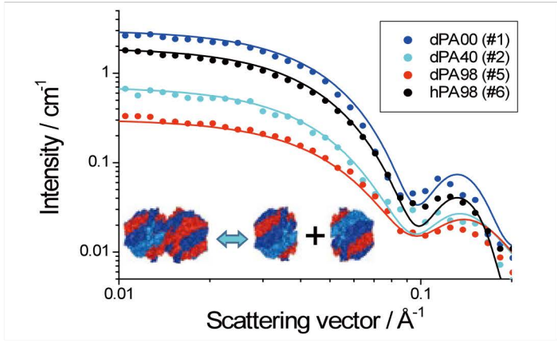



図1:PA28が図に示した内部構造(2種類のSubunitが交互に配置される)を持ち、更に2つが解離会合状態にあるというモデルを設定した。このモデルに対して散乱関数のSimulationを行うと測定データ(点)を非常によく説明でき、Fittingにより解離度も求めることに成功した。
この場合、PA28の2種類のSubunitの内、1種類のみの軽水素を全て重水素に置換している。(名古屋市立大学・分子研、加藤グループとの共同研究)

## 照射材料工学研究分野
Materials Radiation Effects

高エネルギー粒子を固体材料に照射すると、入射粒子が固体内原子と相互作用し、そのエネルギーを失う。この過程で原子の弾き出しや電子励起などの各種の照射効果が引き起こされる。本研究分野では、金属、半導体を中心とした様々な固体材料に対する照射効果の研究を実施する。その中で、(1) 中性子・イオン・電子を用いた各種の照射、(2) 陽電子消滅分光法・電子顕微鏡・昇温ガス脱離分析法などを用いた照射材料の評価、(3) 照射誘起欠陥の反応過程を解明する計算機シミュレーションに関する研究を行っている。

高エネルギー粒子の照射手法として、京都大学研究用原子炉(KUR)に設置された精密制御照射装置(SSS)による高温中性子照射、電子線型加速器(KURRI-LINAC)による低温・常温・高温電子線照射、小型加速器によるイオン照射等を行うための設備を開発・整備してきた。

照射材料の表面物性の評価手法として、KURを用いた原子炉ベース低速陽電子ビームシステムの開発を進めている。本システムは、世界的に見ても最先端の装置であり、陽電子消滅寿命測定、ドップラー広がり測定、あるいはこれら手法の同時計測などに使える高強度陽電子ビーム分析装置として開発を行っている。また、放射性同位体元素ベースの陽電子測定装置など既存の測定手法の各種材料への応用研究を進めている。

この分野の研究を発展させることにより、新しいタイプの原子力システムや、核融合炉のための材料開発が進むと期待される。また、原子力材料の照射損傷機構の解明とその寿命予測や、半導体素子の製造プロセスで導入される照射損傷の低減、あるいは照射を利用した新材料開発に役立つ知見が得られる。



KURのB-1実験孔に設置された原子炉ベース低速陽電子ビームシステム

## 粒子線基礎物性研究部門
Division of Quantum Beam Material Science

### 同位体利用化学研究分野
Isotope Production and Application

本研究分野では、研究用原子炉や加速器を用いて、化学･物理など自然科学のあらゆる研究分野に有効に利用できる同位体の製造やその利用に関する研究を行っている。その研究内容を以下に紹介する。

**1）放射性エアロゾルの生成メカニズムおよびその性質の解明**

原子力発電所の事故では、大量の放射性物質が放射性エアロゾルとして大気中に放出され、甚大な放射能汚染を引き起こした。しかし、この放射性エアロゾルがどのような過程を経て生成し、どのような性状をもっていたかは明確になっていない。そこで、この放射性エアロゾルを実験室内で模擬的に生成し、その化学的、物理的な性質を調べることで、放射性エアロゾルの生成機構を解明する試みを行っている。また、放射線防護の観点から、放射線施設内、特に加速器施設内の放射線場で生成する放射性エアロゾル（ナノ微粒子）の性状と生成機構を種々の放射化学的手法を用いて研究しています。また放射性エアロゾル粒子の簡便な粒径測定法の研究も行っている。

**2）中性子放射化法による宇宙･地球物質の微量元素分析**

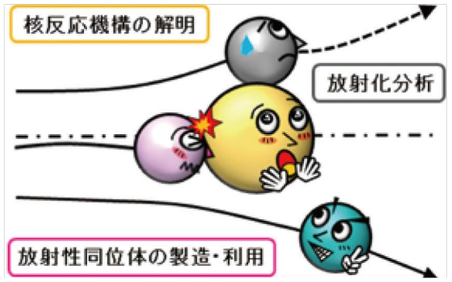
原子炉を用いた元素分析法である、中性子放射化分析法により、地球の変遷の理解に重要なマントル捕獲岩や、はやぶさ2探査機が持ち帰る試料などの宇宙物質、近年新たなエネルギー源として注目されているシェール岩石など、様々な物質の微量元素について、感度良く正確に定量している。また材料物質の物性向上のための不純物評価に関する研究も行っている。

**3）加速器や原子炉を用いた核反応機構の研究と同位体製造利用の研究**

イオンビーム加速器や原子炉による中重核～重核の核反応を他機関と共同で進め、新たなタイプの核分裂の発見とその機構解明、高エネルギー核反応による核破砕反応機構解明等の系統的研究を行っています。電子線加速器やイオンビーム加速器による同位体製造利用の研究では放射性ベリリウムなどの特徴ある放射性同位元素の寿命精密測定、放射性銅やその他の元素の医学利用のための基礎研究、様々な放射性同位元素の環境中でのトレーサー利用等、多岐にわたった研究を行っています。



Ge半導体検出器（自動試料交換機付き）




本研究分野の基本となる核反応の概念図





# Division of Radiation Life Science

## 放射線生命科学研究部門

●放射線生化学研究分野●
●粒子線生物学研究分野●
●生体分子構造研究分野●

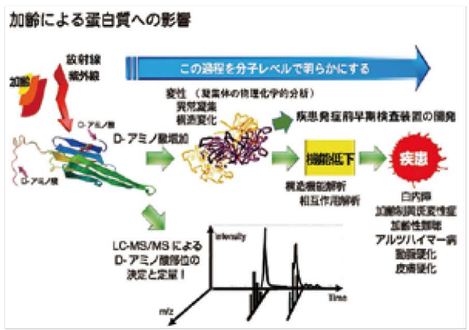
# Division of Radiation Life Science
## 放射線生命科学研究部門

### 放射線生化学研究分野
### Radiation Biochemistry

白内障、加齢黄斑変性症、アルツハイマー病、パーキンソン病、動脈硬化、皮膚硬化症などは蛋白質ミスフォールディング病と呼ばれる。これらの疾患は、各組織中の蛋白質内部アミノ酸の化学修飾に基づく蛋白質の構造変化（ミスフォールディング:misfolding）と蛋白質の異常凝集（アグリゲーション:aggregation）を共通基盤とする疾患である。

当研究室では、複合原子力科学研究所が有する照射施設を最大限利用し、放射線被曝、紫外線被曝など外部ストレスに応じたアミノ酸の化学修飾（酸化など）に関する研究と、自発的に発生する化学修飾（脱アミド化および異性化など）に関する研究を展開している。研究の進め方としては、まず蛋白質を構成するアミノ酸1残基毎の化学変化（酸化、脱アミド化、異性化など）を質量分析ベースの実験で定量的に捉える。次に、見出した各種修飾アミノ酸を導入した加齢モデル蛋白質を作製する。最後に、作製した加齢モデル蛋白質を生化学的に解析して修飾の影響を調査する。このプロセスを経ることによって、加齢性疾患の分子マーカーを定め、新たな年齢指標や創薬のターゲットとする（具体的な研究内容に関しては研究室HPを参照）。

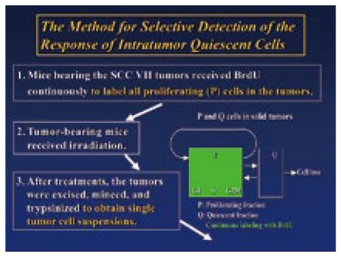
下記図において、当研究室が報告した世界初の蛋白質中アミノ酸分子のキラリティ変化（通常型のL-アミノ酸から異常型のD-アミノ酸への化学変化）を加齢分子マーカーとした研究例を提示する。このようなD-アミノ酸研究を発展させ、難治性の蛋白質ミスフォールデイング病の根絶に寄与することが我々の研究室の最終目標である。

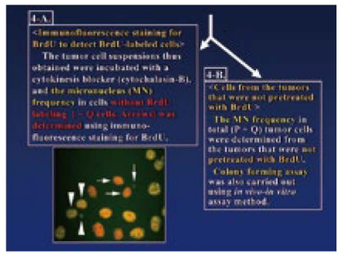


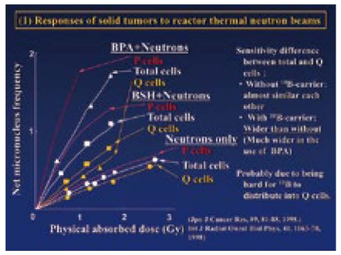

D−アミノ酸を分子指標とした老化の基礎研究とその応用

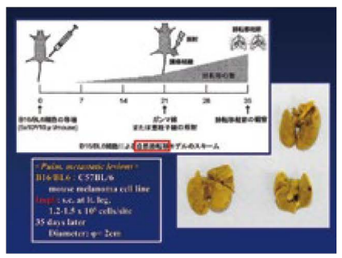
### 粒子線生物学研究分野
### Particle Radiation Biology

複合原子力科学研究所にて実施されている中性子捕捉療法を中心とし、がん治療の発展に寄与する生物学的データの取得と解析を生命科学・医学的見地から行っており、培養細胞を用いる実験から実験動物を用いる実験まで、段階的に研究を展開している。具体的には、DNA修復メカニズムに関連する研究、固形腫瘍内の微小環境と腫瘍細胞の感受性との関連を検出することによる各がん治療法の評価に関する研究、局所の腫瘍に対する 治療が及ぼす遠隔転移能に対する影響に関する研究、新規の中性子捕捉化合物のスクリーニング研究などである。今後は、理工系各分野の研究者を擁する当研究所の特性を生かし、生体構成物質の解析を行っている工学・化学系の研究者との共同研究プロジェクトも視野に入れている。




### 生体分子構造研究分野
### Biomolecular Structure

全ての生命現象は化学反応として説明でき、そのため反応が進行する蛋白質の反応部位の構造と、それに基づく生理機能の関係を探ることは基礎生命科学の理解と発展に非常に重要である。本研究室では、X線・放射光・中性子・電子線など量子ビームを利用した生体高分子・蛋白質の構造解析を通じて、立体構造と生理機能の相関を探る。

生体高分子（蛋白質）は、構造をとらなければただのアミノ酸の鎖であり何の機能ももたないが、それぞれの分子が複雑に折り畳まれ、立体構造をとることで初めて巧妙な反応場を形成しそれぞれの機能を発揮する。この蛋白質の反応場の維持や恒常性が破たんしたとき、がんをはじめ各種疾病が起きる。その予防、治療のためには反応場に精密に適合した薬剤の設計を行う必要があり、ホスト側の蛋白質の精密な構造は不可欠である。また、高効率・クリーンな酵素蛋白質の反応は、バイオ医薬品や規模を大きくしての工業的利用への期待が大きいが、そのためにはやはり酵素の反応部位の精密な構造を知る必要がある。さらに、単なる鎖の塊ではなく、規則的な部分構造を緻密に組み立てている構造学的な興味も非常に高い。

高輝度放射光結晶解析によって分子量に依存しない蛋白質・蛋白質複合体の三次元立体構造を決めることが可能になり、基質相互作用の時分割測定も可能となってきた。さらに水素・重水素を決定できる中性子を相補的に利用する事で上記の巧みな構造構築原理の解明と構造生物学を展開する。SPring-8（播磨）、Photon Factory（つくば）、SLS（スイス）放射光や、ANSTO（豪州）、ORNL（米国）中性子施設などの利用と共同研究を展開している。

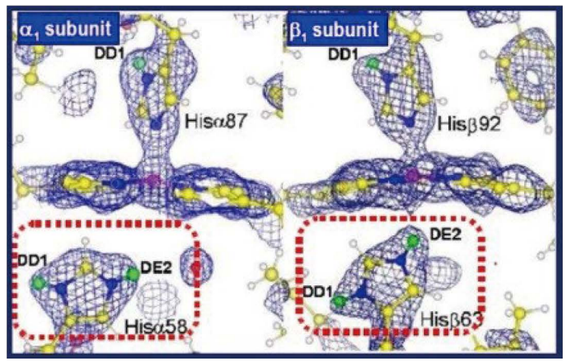



図1 ヒト血液ヘモグロビン分子内で見られた重水素原子（緑で表示）と核密度分布（フーリエ）図



# Particle Radiation Oncology Research Center

## 粒子線腫瘍学研究センター

●粒子線腫瘍学研究分野●

●粒子線医学物理学研究分野●



# Particle Radiation Oncology Research Center

## 粒子線腫瘍学研究センター

### 粒子線腫瘍学研究分野
### Particle Radiation Oncology

本研究分野は、ホウ素中性子捕捉療法（以下BNCT）の臨床研究の責任分野として、医療機関と連携し臨床研究を実施してきた。それらの臨床研究の成果が、2020年6月からの医療機関における頭頸部がんに対する加速器によるBNCTの診療開始へとつながり、BNCT臨床研究業務は医療機関にバトンタッチされた。本研究分野における主たる研究は、加速器BNCT臨床につながる非臨床橋渡し研究と、BNCTのユニークさの根幹をなすホウ素中性子捕捉照射（図1）を用いて、放射線腫瘍学、放射線生物学に新しい学術的知見を見出すことである。

本研究分野が実施する研究を以下に列記する

1）医療機関における加速器BNCT臨床につながる非臨床橋渡し研究
- 対応疾患拡大のための正常組織に対するBNCTの感受性、 耐容線量の検討
- ホウ素薬剤開発を行う研究室との、新規ホウ素薬剤開発の共同研究
- BNCTと免疫療法の併用療法に関する基礎研究

2）放射線腫瘍学、放射線生物学研究におけるホウ素中性子捕捉照射の応用研究。

3）伴侶動物に対するBNCTの基礎研究

4）ガドリニウム中性子捕捉療法の基礎研究

本研究分野が提供する大学院教育は、放射線腫瘍学、放射線生物学研究の基本的な知識、技術の習得、その上で、国内外において生物研究利用が可能な研究所が数か所に限定される中性子線を用いたユニークな放射線腫瘍学、放射線生物学研究を、立案から実施までの研究遂行能力の育成である。中性子を使用した研究成果は、医療機関における加速器BNCTが実施されたことから、難治がん治療へ貢献することが期待される。

図2に医療機関で今後実施される加速器BNCT照射システムの概略図を提示する。

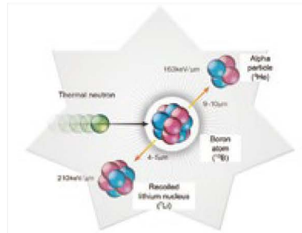



図1　ホウ素中性子捕獲反応（ホウ素中性子捕捉照射）
安定同位体である$^{10}$B原子核が熱中性子を吸収後、直ちにヘリウム原子核とリチウム原子核に分裂する。それぞれの飛程が細胞1個のサイズ以下の10μmであることから、$^{10}$Bを含む薬剤を標的とする細胞群に集積させると、その細胞群が選択的に照射される

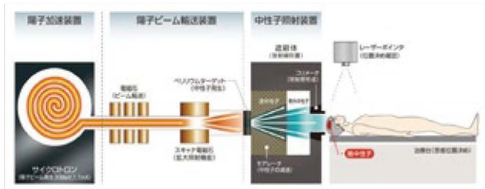



図2　加速器BNCT照射システムのシェーマ

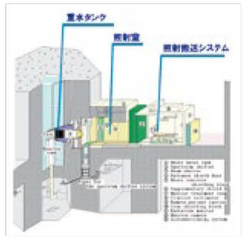
### 粒子線医学物理学研究分野
### Particle Radiation Medical Physics

医学物理学とは、医療、特に、放射線医療･粒子線医療を支える物理および工学の総称である。その内容は多岐にわたるが、重要な使命は「放射線治療法の高度化の促進」と「品質保証」である。本研究分野では、粒子線治療法の一つである「硼素中性子捕捉療法(BNCT)」に重点を置き、粒子線腫瘍学研究分野と協力して、この療法の最適化および高度化のために、以下の課題を中心に研究を行っている。

1) BNCT照射システムの高度化:
KUR重水中性子照射設備における臨床経験を通じて、BNCT照射システムの高度化について検討を行っている。また、研究用原子炉を用いた照射システムよりも運用面で優れている加速器を用いた照射場についても、シミュレーション計算および基礎実験を主体に設計検討を行っている。

2) 中性子およびγ線混在場における線量評価システムの開発:
BNCTに利用される中性子照射場では、中性子のエネルギーは数meV～数十MeVと広範囲にわたっており、γ線の混在が避けられない。本研究分野では、熱(<0.5 eV)、熱外(0.5 eV～10 keV)、高速中性子(>10 keV)ならびにγ線の4成分の分離評価手法の開発に取り組んでいる。最終目標は、二次元あるいは三次元のリアルタイム線量評価システムの構築である。

3) BNCTにおける品質保証の確立:
現在のBNCTでは、従来の脳腫瘍および悪性皮膚黒色腫に加え、難治性頭頸部腫瘍、多発性肝腫瘍等の体幹部腫瘍も臨床の対象となっている。適応拡大の結果、BNCTの認知度は上がり、一般的な放射線療法になる可能性が高まっている。このことを背景に、BNCTにおける品質保証の確立を目指して、照射場の標準測定、事前および事後の治療線量評価、患者の外部および内部被曝評価等に関して検討を行っている。



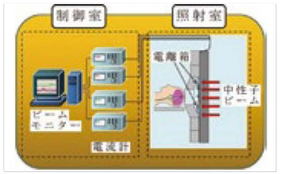

KUR重水中性子照射設備



加速器ベース照射システムの概念




線量評価統合システム




多重電離箱システム



# Research Center for Safe Nuclear system

## 安全原子力システム研究センター

●原子力防災システム研究分野●
●加速器応用工学研究分野●
●熱エネルギーシステム研究分野●



# Research Center for Safe Nuclear system

## 安全原子力システム研究センター

### 原子力防災システム研究分野
### Nuclear Disaster Prevention System

本分野は、材料科学と防災工学の二つの専門分野を対象としている。

材料科学の分野では、核燃料・原子炉材料の基礎物性を評価している。これにより、原子炉の安全性や経済性の向上を目指している。加えて、熱を電気に直接変換する熱電材料の高性能化や新材料開発をすすめている。自動車や工場からの排熱を有効活用する排熱回生発電や身近にあるわずかな温度差で発電する微小環境発電の実現を目指している。さらに、材料科学と情報科学が融合した「マテリアルズ・インフォマティクス」に、世界に先駆けて取り組んでいる。

防災工学の分野では、エネルギーの安定供給や生活継続に必要な防災戦略の研究と教育を行っている。世界で起こるマグニチュード6以上の大きな地震のうち約20%が、日本の国土とその周辺で発生している。このような厳しい自然環境の下で,安定的にエネルギーを供給するにはエネルギー関連施設や都市の耐震性向上及び被害後の回復力が重要となる。これら地震防災対策に必要な、地盤や施設の揺れの予測、建物の震動特性に関する研究を行っている。

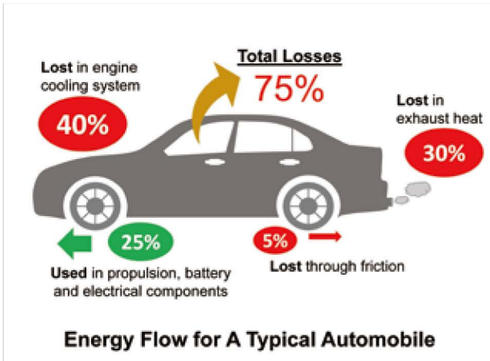



図1　自動車におけるエネルギーフロー、燃料であるガソリンの持つエネルギーの75%が熱として捨てられている。熱電変換によりこの熱を回収し電気に変換して再利用する。

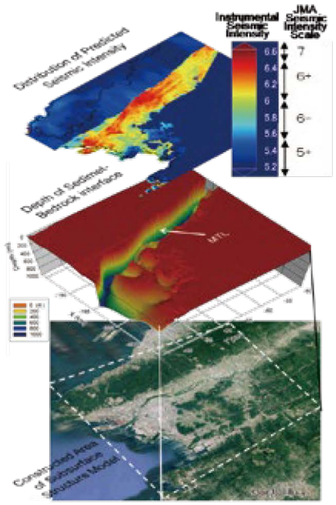



図2　文科省プロジェクトの一環として,構築した和歌山平野の地下構造モデル(中段)と中央構造線断層帯の震源モデルを用いて数値実験により推定した計測震度分布

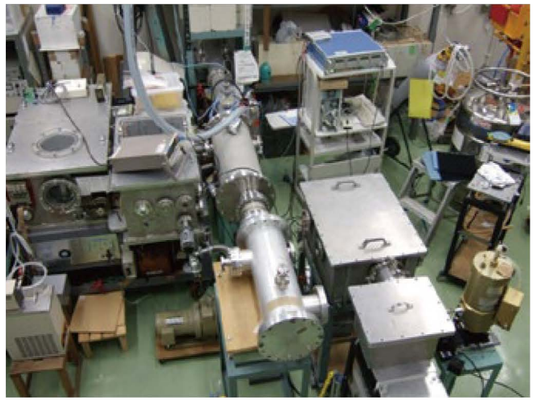
### 加速器応用工学研究分野
### Accelerator Physics, Engineering and Applications

この研究分野では、FFAG陽子加速器(Fixed-Field Alternating Gradient：固定磁場強収束)および電子線形加速器を用いた研究を行っている。FFAG陽子加速器は加速器駆動システム(以下ADS: Accelerator Driven System)の基礎研究に用いられている。ADSとは加速器からのビームで未臨界炉を駆動する、加速器と原子炉が結合したシステムで、原子炉運転後に生じる長寿命放射性物質を核変換により短寿命化することが可能な装置である。本研究所は核破砕中性子を用いたADS実験ができる世界で唯一の研究機関である。この実験は2009年より継続的に実施され、ADS実用化に必要な基礎データの収集を行っている。FFAG陽子加速器はADS実験の他、材料等の照射実験にも用いられている。

また、電子線型加速器などの高エネルギー電子ビームを用いて、ミリ波からテラヘルツ波の波長領域における新たな大強度光源の開発と分光法の開発を行うとともに、光物性、顕微イメージング分光などへの応用研究を行っている。



FFAG陽子加速器の全景



高輝度ミリ波テラヘルツ放射光分光装置

## 熱エネルギーシステム研究分野
Thermal Energy System

この分野は、将来の熱エネルギーシステムで発生する高密度の熱流を安全かつ効率的に利用することを目的に、加速器駆動システム（ADS）など次世代核システムや核融合炉、放射線・粒子線の高度利用システム等で遭遇する様々な極限条件下での熱流動現象や中性子挙動の特性とその制御に関する研究及び新しい流体機能の利用に関する研究を行う。また、様々な流体計測法の開発を行うとともに、中性子利用という当研究所の特徴を活かして、中性子イメージングを用いた革新的流体計測法の開発と応用研究が行われている。

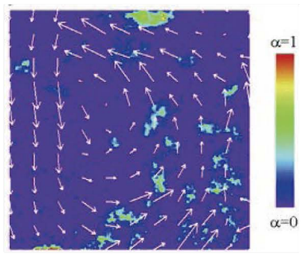
現在進行中の研究課題は以下のとおり:

1. ADS開発を目的とした鉛ビスマス熱流動研究
2. 気泡微細化沸騰を用いた高密度冷却法の開発とモデンリグ
3. 中性子イメージングを用いた定量的流体計測法の開発
4. プローブ法およびワイヤーメッシュセンサー(WMS)を用いた先進的流体計測法の開発
5. 放射線誘起表面活性による沸騰改善
6. サブクール沸騰限界熱流束の発生機構とモデリング
7. シビアアクシデント時の熱流動研究
8. 混相流現象の高精度数値解析研究
9. 渦流れを伴う気液二相流現象のモデリング

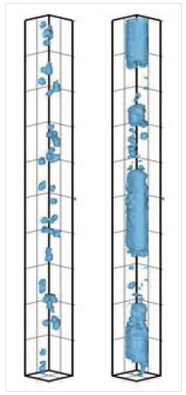
これらの研究で、実験には主に熱特性実験装置及びその附属設備を利用し、放射線誘起表面活性の実験ではコバルト-60ガンマ線源を、また中性子イメージングの流体計測への応用研究には、複合原子力科学研究所のKURを始め、J-PARC、JRR-3、韓国原子力研究所HANAROなどを利用している。



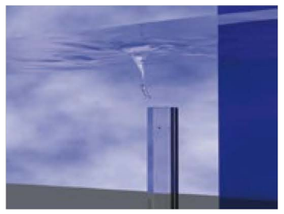
気泡微細化沸騰の様子




中性子イメージングによって得られた
溶融金属二相流内のボイド率と速度分布



WMSを用いて計測した管内二相流
左:気泡流　右:スラグ流





気液二相流の高精度数値解析例
（気液界面の複雑変形挙動）





## 複合原子力科学研究所の研究ユニット
### ～分野融合と新しい研究領域の創生のために～

これまでも、本研究所は放射線（粒子線）や放射性同位元素（RI）などを
利用した多様な研究を進めてきましたが、これらの研究領域を融合した
「複合原子力科学」をより効果的に発展させるために新たに研究ユニットを設置しました。
研究活動の基礎となる各研究分野の独自性を維持しながら、
選択と集中による分野融合および新しい研究領域創生を行い、
先端的な学術の発展に貢献しようというものです。

●量子ビーム生体システム解析・応用ユニット●
●中性子イメージング研究ユニット●

## 量子ビーム生体分子統合研究センター
### 新研究炉開発・利用センター・
### 新試験研究炉産学共同研究部門

日本原子力研究開発機構や福井大学とともに魅力ある新試験研究炉の実現に向けて
本格的な取り組みを進めます。

## 複合原子力科学研究所の研究ユニット

### 量子ビーム生体システム解析・応用ユニット

京都大学複合原子力科学研究所（以下、本研究所）では、中性子線、陽子線、電子線、X線、RIからのアルファ線、ベータ線、γ線　など様々な量子ビームが利用可能です。
本研究ユニットの目的は、所外、所内からの複数の研究分野からの研究者が参画する以下の2つの研究を実施するための創造的な研究プラットホームとして機能することです。

・量子ビームを使用して、主として中性子捕捉反応をベース にした生体（ヒト、動物、植物を含む）システムの解析研究
・量子ビームの主として医療応用研究

研究課題として、以下の課題を考えています。
中性子捕捉療法（照射）研究
・BNCT基礎研究（新規薬剤研究、放射線生物学研究、医学物理研究）
・Gadolinium-中性子捕捉療法（Gd-NCT）の基礎研究
・伴侶動物へのBNCT展開にむけた基礎研究*
・ホウ素中性子捕捉反応による育種に向けた基礎研究
同位体（RI）医療応用研究*
*本研究所で将来、新規研究課題として成立するか否かを明らかにしていくところからのスタートとなります。

### 中性子イメージング研究ユニット

本研究ユニットでは、中性子を用いたイメージングの応用･基礎研究を所内外の研究者と連携して推進しています。中性子は、X線にはない透過性をもち、金属内部の水素化合物などの検出プローブとして有用です。しかしながら、中性子源には定常中性子源（KUR、JRR3など）やパルス中性子源（J-PARC）などがあり、各々の特徴を活かした技術開発が必要となっています。本研究ユニットでは、国内の中性子源施設とも連携し、中性子イメージングの革新的開発･応用を目指しています。

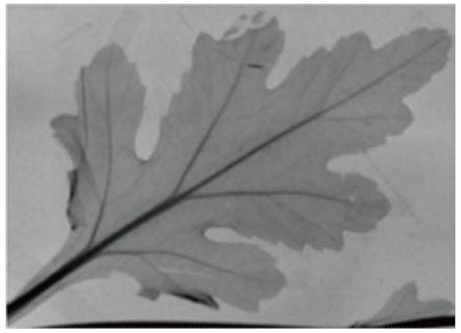


図1　中性子で視た葉の水分布

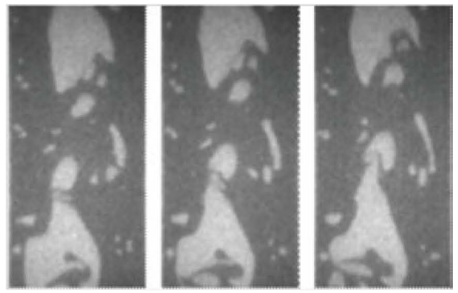
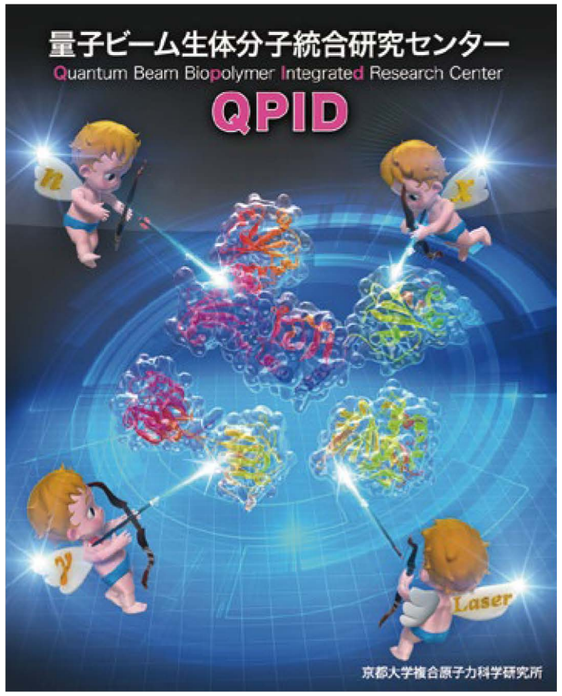


図2　気液二相流の高速度撮像例

### 量子ビーム生体分子統合研究センター

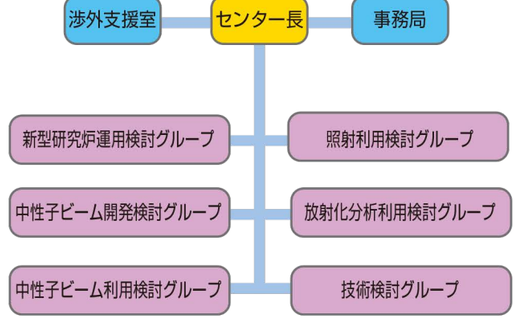
量子ビーム生体分子統合研究センター（Quantum Beam Biopolymer Integrated Research Center：QPID）は、「生命分子動態解析ユニット」(2019-2021 年）の成果を踏まえ、このユニットを発展させて設置した研究センターです。QPID には革新的な生化学技術を用いて特徴的な生体分子試料や新たな機能を持った分子の開発を目指す「生体分子機能・設計グループ」と独創的な量子ビーム測定技術や計算機解析手法を用いて、未知の現象の解明を目指す「量子ビーム計測・解析グループ」が設置されています。両者は互いに協働し、更に所外研究者及び所外施設とも連携し量子ビームを用いた生体高分子研究の推進を行っております。




### 新研究炉開発･利用センター･新試験研究炉産学共同研究部門

もんじゅサイトに新たに設置される試験研究炉プロジェクトにおいて、京都大学複合原子力科学研究所は JAEA/ 福井大学とともに中核機関として参画し、幅広い利用について検討することを主務としております。そこで、関連する学術団体のニーズの集約・整理とそれに基づいたニーズの研究炉本体への設計へ反映と逆に設計からの研究炉の性能・性質の学術団体へのフィードバック・意見調整を行うために新型研究炉開発・利用センターが設置されました。本センターは、図に示すようなグループを基軸として、所内外の研究者と連携してプロジェクトを推進しております。また、令和５年度からは新試験研究炉産学共同研究部門も設置し、センターの活動の事務・統括を行い、より効果的にプロジェクトを進めていきます。

京都大学複合原子力科学研究所　新型研究炉開発・利用センター



# Joint Study & Education, International Academic Exchange
## 共同利用研究と教育・国際交流

### 共同利用研究

京都大学研究用原子炉を用いた実験及びこれに関連する幅広い分野の科学研究を推進するため、公募により採択された課題について、全国の大学、国公立研究機関等の研究者による共同利用研究を実施している。また、外国の研究機関等に所属する研究者も研究協力者として参画可能としている。

採択された課題においては、研究計画に基づいたタイムスケジュールに従って研究者が来所し、研究に従事している。共同利用研究においては採択方法による区分として、「通常採択」、「プロジェクト研究」、「即時採択」が設けられており、共同利用者のさまざまな要求に対して柔軟な対応を行っている。

「プロジェクト研究」採択共同利用研究は、研究所において機動的に推進すべきプロジェクトに対し、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、3年を限度として、最大限の効果を上げるべく共同利用研究を行うものである。

この他に、研究者が討議、情報交換を行うための「ワークショップ」、「専門研究会」が開催されている。

なお、KURの標準運転パターンは約47時間の1MW運転と約6時間の5MW運転となっている。

**■共同利用研究採択件数** (2019年度~2023年度)

| | 2019年度 | 2020年度 | 2021年度 | 2022年度 | 2023年度 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.KUR共同利用 | 276 | 269 | 252 | 271 | 257 |
| (内訳) ①通常採択 | 168 | 173 | 173 | 192 | 179 |
| ②プロジェクト採択 | 106 | 193 | 74 | 76 | 78 |
| ③即時採択 | 2 | 3 | 5 | 3 | 0 |
| 2.KUCA共同利用 | 20 | 15 | 5 | 1 | 1 |
| (内訳) ①通常採択 | 15 | 15 | 5 | 1 | 1 |
| ②プロジェクト採択 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ③即時採択 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.ワークショップ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4.専門研究会 | 8 | 10 | 9 | 8 | 9 |
| 合　計 | 305 | 295 | 267 | 280 | 267 |

※2023年4月現在

### 教育・国際交流

複合原子力科学研究所の教員は、研究分野として理学研究科、医学研究科、工学研究科、農学研究科、エネルギー科学研究科の協力講座として大学院の講義や研究指羽を行っている。さらに、全学共通科目も担当し、京都大学の学部学生の教育にも貢献している。
この他、KUCAを用いて全国の原子力工学系大学院生(京大学部学生を含む)を対象に1週間の実験コースを毎年8週間程度実施している。この実験コースを受講する学生数は近年増加の傾向にあり、令和4年度までに単位を取得した学生数は約4,200名となっている。なお、平成15年度以降は韓国、スウェーデン、中国からの学生を受け入れるなど本実験コースの国際化を進めており、これまでに約320名の学生が海外から参加している。

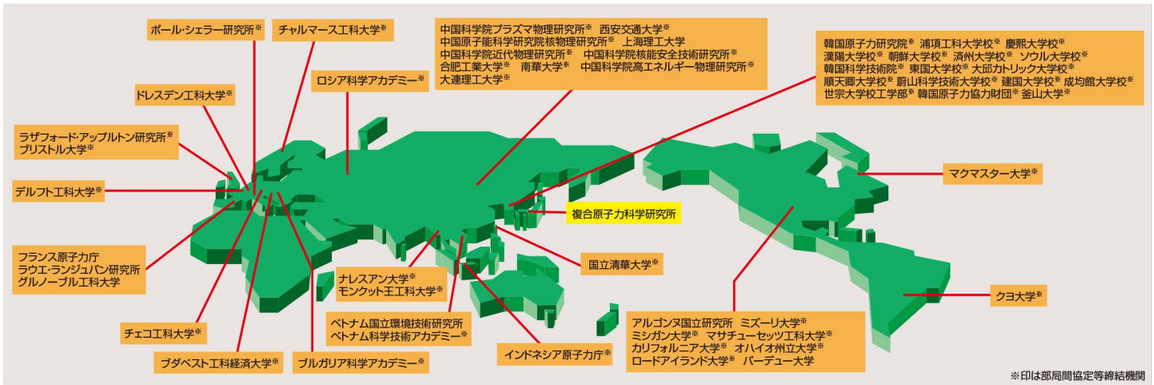
**■複合原子力科学研究所が協力講座として受け入れている研究科専攻大学院生数(実数)** (2020年度)

| 研究科 | 専　攻 | 学年 修　士 | 学年 博　士 | 合計 |
|---|---|---|---|---|
| 理　学 | 物理学・宇宙物理学(物理第一) | 2 | 0 | 2 |
| | 物理学・宇宙物理学(物理第二) | 1 | 3 | 4 |
| | 化学 | 3 | 0 | 3 |
| | 生物科学 | 0 | 0 | 0 |
| 工　学 | 機械理工学 | 7 | 0 | 7 |
| | 原子核工学 | 3 | 6 | 9 |
| | 物質エネルギー化学 | 1 | 0 | 1 |
| | 都市環境工学 | 0 | 0 | 0 |
| エネルギー科学 | エネルギー基礎科学 | 6 | 2 | 8 |
| | エネルギー社会・環境科学 | 5 | 1 | 6 |
| 農　学 | 地域環境科学 | 0 | 0 | 0 |
| 医　学 | 放射線腫瘍学 | 0 | 1 | 1 |
| 合　計 | | 28 | 13 | 41 |

全国共同利用研究所である本研究所は、研究用原子炉等の施設を共同利用・共同研究に供することにより、核エネルギー利用と放射線利用の両面から、複合原子力科学の先導的な応用分野の開拓につながる基礎的・萌芽的な実験的研究を行っている。そして、非常勤研究員の受入や外国人研究員の受入ばかりでなく、国際シンポジウムも開催されて国際化に向けて積極的に活動している。

国際交流としては、外国の50研究機関との間で、国際部局間協定あるいは学術交流に関する覚書を交換し、研究用原子炉の技術開発利用研究、並びに原子力工学およびこれに関連した教育について、両者の間において学術上の協力と研究者および学生の交流を促進している。

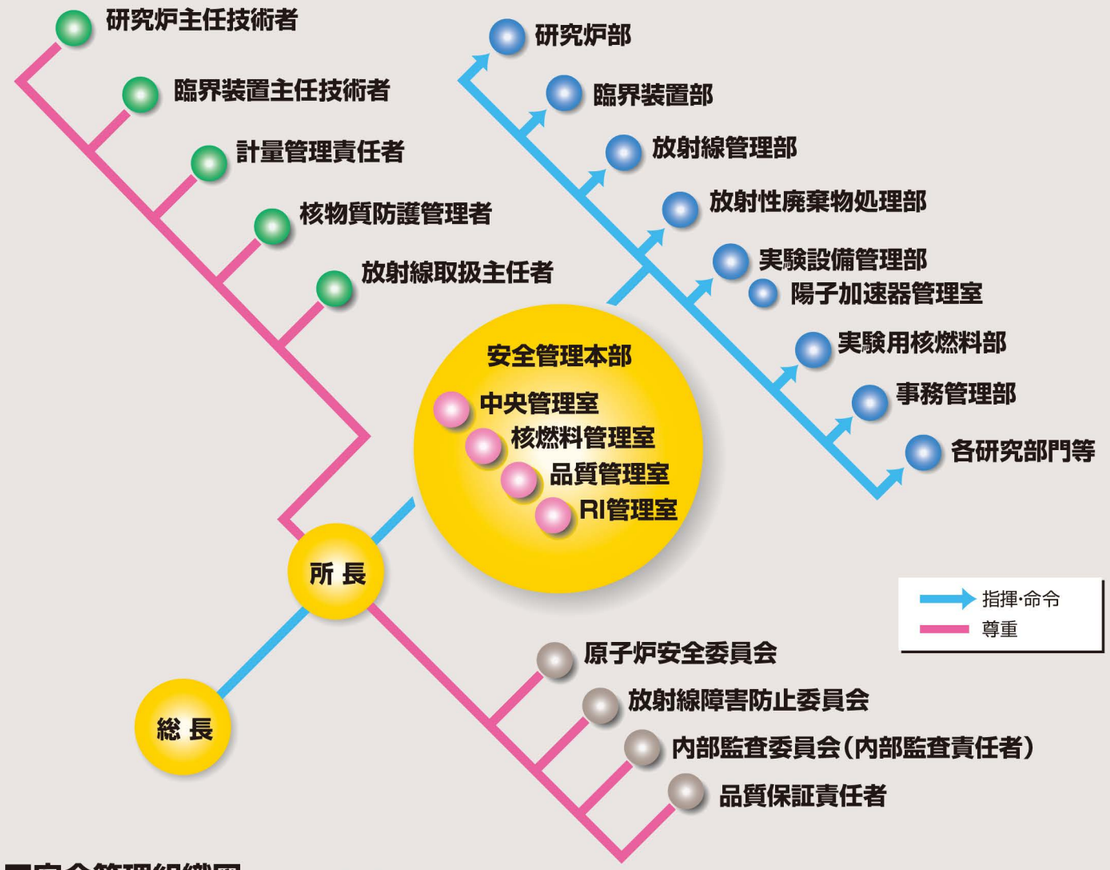
**■複合原子力科学研究所との研究交流の相手先**






# Safety Organization
## 安全管理組織

原子炉施設及び放射線施設並びに、放射性同位元素及び核燃料物質を安全に管理するために、法律に基づいて定められた原子炉施設保安規定、放射線障害予防規定、計量管理規定、核物質防護規定等により、研究所は以下の安全管理組織を設けている。




**■安全管理組織図** (2023年4月1日現在)

### 委員会

■原子炉安全委員会　■放射線障害防止委員会　■内部監査委員会

### 管理室

**■中央管理室**

原子炉施設および放射線施設の保全および保安のための教育・訓練、KUR、KUCAの運転管理のための監視、指示、各安全管理部間の連絡調整、異常時における指示などを行い、24時間勤務体制がとられている。また、KUR、KUCA利用の窓口業務、保安活動に必要な諸記録の保管なども行っている。室長、副室長、室員が置かれている。

**■RI管理室**

放射線同位元素(核燃料物質、核原料物質を除く)の安全管理に関する業務、特定放射性同位元素の防護措置に関する業務を行う。室長、副室長、室員が置かれている。

**■核燃料管理室**

KUR、KUCA用燃料や実験研究に使用する核燃料物質の管理状況の監視、指示、教育・訓練、保障措置、核物質防護等、研究所のすべての核燃料物質の一元的管理について、核燃料計量管理責任者及び核物質防護管理者との連絡調整を行う。室長、副室長、室員が置かれている。

**■品質管理室**

原子炉施設における保安活動の品質管理に係る業務を行う。室長、副室長、室員が置かれている。

## 部

### ■研究炉部

KURの保全および運転ならびにKUR用燃料などの取扱いに関する業務を担当する。業務を分掌するため、管理班、計画班および運転班が設けられている。

管理班は、KURの運転および燃料の取扱いならびに実験の安全性などの監督と指導、KURの検査･保守･修理および変更の監督と指導などを行う。

計画班は、KURの運転および検査に関する計画、燃料の取扱い計画、KURの修理、改造および変更の計画などを行う。

運転班は、KURの運転および燃料の取扱い、KURの検査･保守･修理･改造および変更などの作業を行う。KURの運転は、研究炉部長が指令し、当直運転主任が他の運転班員を指揮して行っている。

### ■臨界装置部

KUCAの保全および運転ならびにKUCA用燃料などの取扱いに関する業務を担当する。業務として、KUCAの運転･保守･修理･改造および変更などの計画と実施、検査の計画および実施、燃料の取扱いの計画と実施、KUCAを使用する実験の安全上の監督･指導、KUCAに関する放射線管理および放射性廃棄物の管理業務がある。

### ■放射性廃棄物処理部

放射性廃棄物の処理および放射性廃棄物処理施設の保全に関する業務を担当する。業務を分掌するため、管理班と処理班が設けられている。

管理班は放射性廃棄物の保管廃棄や廃棄業者への引渡しおよび廃棄物処理施設の保全などにかかる業務を行う。

処理班は放射性廃棄物処理の計画、放射性廃棄物の収集、詰替え、廃棄物の化学分析および放射能レベルの測定、処理設備の運転などにかかる業務を行う。

### ■放射線管理部

原子炉施設、核燃料物質および放射性同位元素などの放射線管理ならびに放射線管理施設の保全に関する業務を担当する。放射線管理部の業務を分掌するため、個人管理班.屋内管理班および野外管理班が設けられている。

個人管理班は、人体の被ばく線量評価.被ばく線量測定器の維持･管理および記録などを行う。

屋内管理班は、屋内管理区域にかかわる巡視･点検、外部線量(率)測定、表面密度測定、室内空気および排気中放射性物質濃度の測定、排気浄化設備の保守･点検およびフィルタの交換、屋内放射線モニタの保守･修理･校正および記録などを行う。

野外管理班は、施設と施設周辺の野外における外部線量(率)測定、空気中放射性物質濃度の測定、放射線モニタおよび気象測器の保守･点検･校正、環境試料の放射能測定ならびに記録などを行う。

### ■実験設備管理部

実験設備管理部は、原子炉施設以外の研究施設や実験設備･装置の運営と保守管理を所掌しており、原子炉に付属するホットラボラトリ、種々の化学および物理実験を行うためのトレーサ棟、中性子発生装置(電子線型加速器)、γ線照射施設、研究炉周辺に設置された中性子実験装置、研究炉の照射装置の一部および機械工作工場の運用と保守管理を行っている。これらの施設や設備は、放射性同位体、核燃料物質、放射線を利用する様々な研究を行うためのものであり、研究炉の利用を側面から支援するとともに、放射性物質や放射線を利用した広範な研究を支えている。

### ■実験用核燃料部

実験研究に使用する核燃料物質の安全管理および使用上の保安に関する監督、指導の業務を担当する。

実験棟毎に核燃料担当者を、また、貯蔵庫毎に管理者を配置し、業務を分掌している。

### ■事務管理部

事務管理部は、原子炉施設における保全、設計および工事に関する業務のうち調達に係る契約等の業務を担当する。

## 地元自治体等との連携

研究所では、大阪府、熊取町、泉佐野市、貝塚市の地元自治体などと密接な関係を保ちつつ、安全管理のための運営に当たっている。研究所の設置にともない、大阪府、地元自治体では条例などにより大阪府原子炉問題審議会、熊取町原子力問題調査特別委員会、同原子力問題対策協議会、泉佐野市原子力問題対策協議会が設置されている。研究所は、これらの諸機関に、KURおよびKUCAの運転状況や周辺環境の放射能測定結果の定期的な報告などを行っている。

## 原子力災害対策

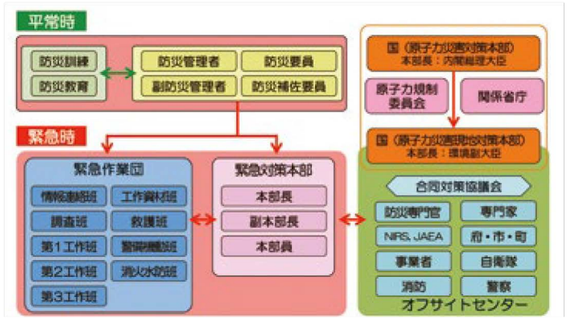
原子力災害に対する抜本的な強化を図るため平成12年6月から原子力災害対策特別措置法が施行されている。研究所でも原子力災害予防対策、緊急事態対応対策および原子力災害事後対策などの原子力災害対策を円滑かつ適切に行うため、原子力事業者防災業務計画を作成し、原子力災害対策に必要な業務を定めている。なお、防災業務計画は地元自治体(大阪府、熊取町、泉佐野市、貝塚市)との協議の上で作成されている。

原子力災害対策活動を行う防災組織として、防災管理者、副防災管理者、防災要員および防災補佐要員があらかじめ指名されており、緊急事態発生時には緊急対策本部の設置や緊急作業団の招集および諸活動が迅速に行われる。同時に、緊急事態応急対策拠点施設(オフサイトセンター)、国、地元自治体および防災機関などとの有機的な連携が図られる(下図参照)。

緊急対策本部は、情報の収集、関係機関との連絡などに当たるとともに、緊急作業団に対して災害応急対策および災害事後対策の実施などに必要な指示を行う。また、緊急作業団は9つの班から構成され、緊急時活動として情報連絡、応急措置、被害拡大の防止、放射線量または放射性物質濃度の測定、環境影響評価、警備、避難の指示または警告、汚染の除去と拡大防止、救護などを行う。

原子力災害に至らない火災、地震、原子炉施設の故障、異常などに対しても、原子炉施設保安規定、核燃料物質使用施設保安規定、放射線障害予防規定、核物質防護規定などに基づき、関係機関との情報連絡や諸対応が迅速かつ適切に行われる。

原子力事業者防災業務計画の要旨はホームページ(https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/safety/anti_disaster)に公開されている。








# Laboratories and Facilities

## 研究施設および設備等

●京都大学研究用原子炉(KUR)●
●ホットラボラトリ●
●京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)●
●熱特性実験装置●
●電子線型加速器●
●トレーサラボラトリ●
●コバルト60ガンマ線照射装置●
●放射性廃棄物処理設備●
●放射線管理設備●
●高機能中性子鏡製造装置●
●イノベーションリサーチラボラトリ●

## 京都大学研究用原子炉（KUR）
Kyoto University Research Reactor

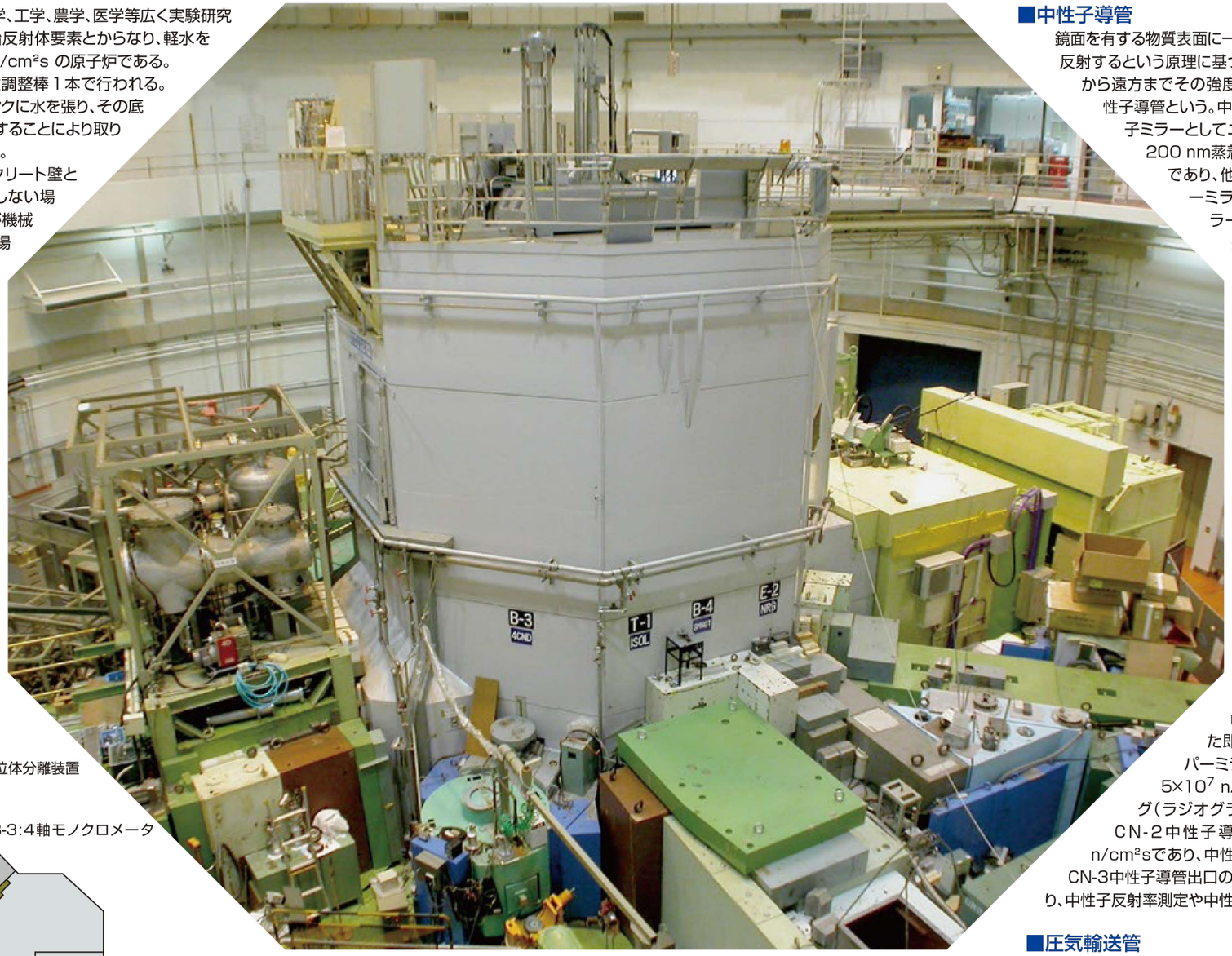
KURは、スイミングプールタンク型の原子炉で、物理学、化学、生物学、工学、農学、医学等広く実験研究に使用されている。炉心は、約20%濃縮ウランの板状燃料要素と黒鉛反射体要素とからなり、軽水を減速・冷却材とした熱出力5,000 kW、平均熱中性子束約$3\times10^{13}$ n/cm²s の原子炉である。

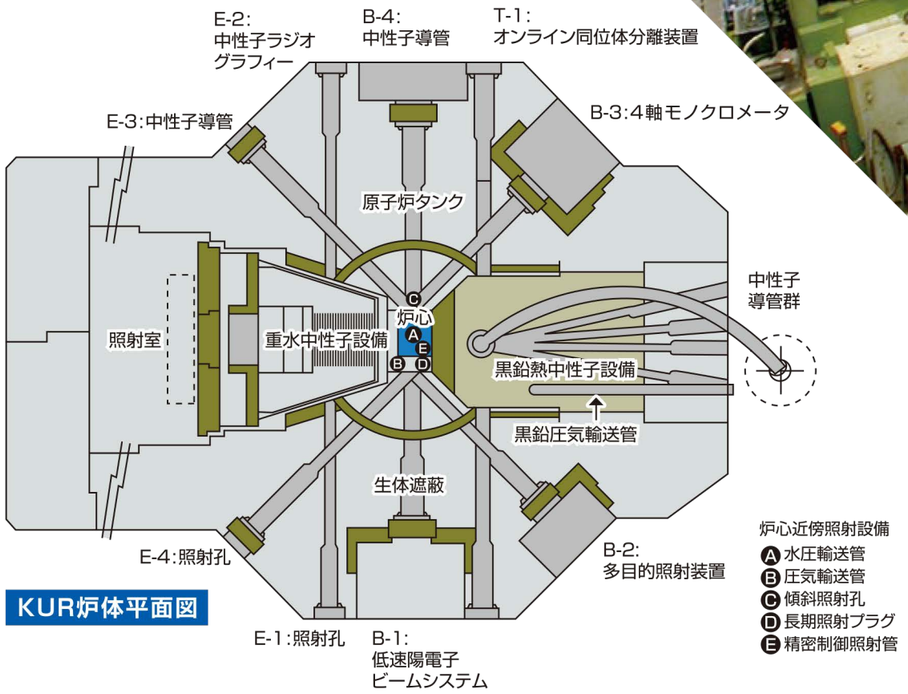
KUR運転の制御は、ホウ素入りステンレス鋼製の粗調整棒４本と微調整棒１本で行われる。KUR本体は、直径２ m、深さ８ m、厚さ 1.2 cmのアルミニウム製タンクに水を張り、その底部に炉心が設けられている。炉心で発生した熱は、タンク水を強制循環することにより取り出し、熱交換器から二次冷却水に移して冷却塔から大気中に放散される。

KUR建家は、直径28 m、地上22 m、地下7 mの円筒型で、コンクリート壁と溶接鉄板により気密が保たれ、送排風機で常時減圧されていて、予期しない場所からの空気の漏出がないようにしてある。事故時には給気・送気口が機械的に封鎖され、同時に水を用いて空気の出入りダクトを密閉する。この場合、建家内の空気は非常用の各種フィルタを通して清浄され、スタックから排出される。

KURに付属する実験設備には、実験孔（４本）、照射孔（４本）、熱中性子設備（重水、黒鉛）、圧気輸送管（３基）、水圧輸送管、傾斜照射孔、貫通孔および炉心内には照射中の試料温度を制御できる精密制御照射管、週単位で照射が行われる長期照射設備がある。

平成23年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故を踏まえて、原子力規制委員会は研究炉の新規制基準を策定し、国内の全ての研究炉は新規制基準の下で新たに許可を受けることが必要となった。KURについても、2014年５月より運転を休止し、原子力規制委員会による安全審査を受けるとともに、その後の改修工事・検査に取り掛かった。休止から３年を経た2017年８月に、KURは新たな運転許可を取得し、同月に共同利用のための運転を開始した。



KUR炉体平面図

### ■水圧輸送管
試料をアルミニウム製のキャプセルで炉心の近くまで運ぶことで、高い中性子束での照射が可能な照射設備である。照射は炉頂のサブプールから行い、照射後のキャプセルはサブプールを経由しホットケーブ室のキャナルに送られる。化学、物理学、地球宇宙科学、環境科学、材料工学など様々な分野において、極微量元素を対象とした中性子放射化分析や中･長寿命の同位体製造などに用いられている。

### ■長期照射用プラグ／炉心照射
アルミニウム製のキャプセルに封入した試料を、炉心内で最長１年間の照射をすることができる設備である。主に長寿命の同位体製造や材料照射などに用いられている。

### ■中性子導管
鏡面を有する物質表面に一定角以内に入射した低速中性子は全反射するという原理に基づいて低速中性子を中性子源（炉心）から遠方までその強度を減少させることなく導く設備を中性子導管という。中性子導管には2種類あり、一つは中性子ミラーとしてニッケルがフロートグラスの表面に約200 nm蒸着されたニッケルミラーを用いたものであり、他はニッケルとチタンの多層膜スーパーミラーを用いたものである。スーパーミラーは層厚を少しずつ変化させ広い波長範囲の中性子が全反射するように工夫したもので、ニッケルミラーに比べ短波長領域の中性子も全反射されるので強度は強くなる。

中性子導管に曲率を持たせれば、中性子源から発生する速中性子やγ線は途中で除かれるので測定のバックグラウンドを減らすことができ、測定精度の高い実験ができる。また、中性子導管を用いると遠方まで導くので広い実験スペースが利用できる等の特徴を有する。

KURでは、日本で最初の中性子導管であるE-3導管と、世界初の本格的スーパーミラー中性子導管であるB-4導管等が設置されている。それらの中性子束及び主たる利用目的は以下の通りである。

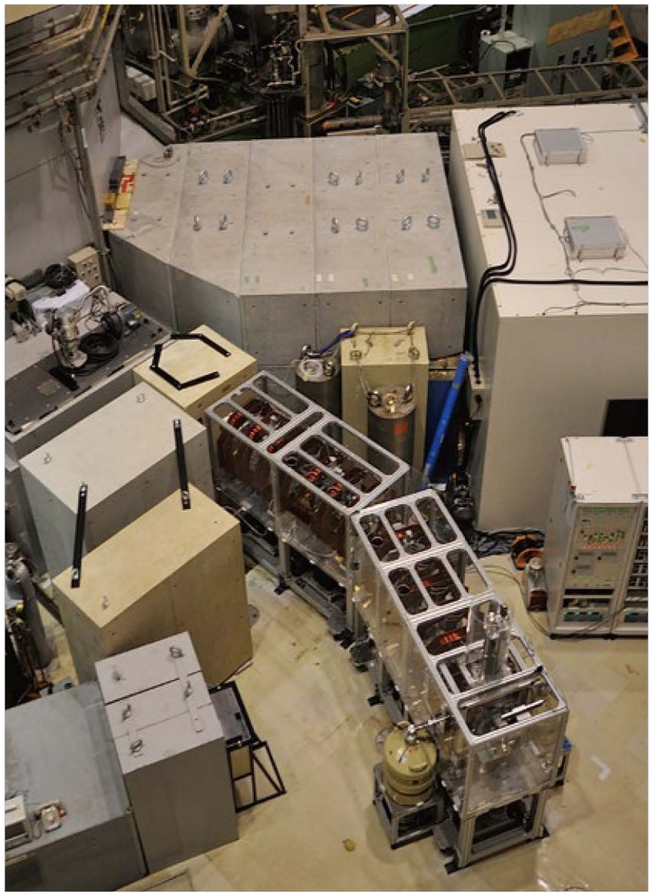
E-3ニッケルミラー中性子導管出口の全中性子束は$2\times10^{6}$ n/cm²sであり、BNCT研究に特化した即発γ線分析を行っている。B-4スーパーミラー中性子導管出口の全中性子束は$5\times10^{7}$ n/cm²sであり、主に中性子イメージング（ラジオグラフィ）実験が行われている。また、CN-2中性子導管出口の全中性子束は$5\times10^{7}$ n/cm²sであり、中性子小角散乱装置が設置されている。CN-3中性子導管出口の全中性子束は$2\times10^{7}$ n/cm²sであり、中性子反射率測定や中性子光学素子開発が行われている。

### ■圧気輸送管
試料をポリエチレン製のキャプセルで炉心の近くまで運んで中性子を照射する設備で、Pn-1、Pn-2、Pn-3 の3種類がある。それぞれ照射できる中性子強度が異なり、実験条件に応じて選択できる。ホットラボのホットケーブ室、ジュニアケーブ室、第１実験室にキャプセルの出し入れをするステーションが設置されている。化学、物理学、地球宇宙科学、環境科学、医学、生物学、材料工学など様々な分野において、中性子放射化分析、同位体製造などに用いられている。

### ■傾斜照射孔
比較的大きな試料に対して中性子照射を行うことができる照射孔である。照射孔内は水で満たされており、試料を容器に入れて炉頂から照射孔内に容器を吊り下げた状態で照射を行う。照射試料に信号線などを接続し、照射中にリアルタイムでモニターすることも可能である。

## ■低速陽電子ビームシステム（B-1 実験孔）

この実験設備は原子炉炉心のガンマ線による対生成反応で生じる陽電子をビームとして引き出し、陽電子消滅分光法による材料分析に使用することを目的として設置されたものである。線源部で生成した陽電子を熱エネルギーまで減速した後、10 eVオーダーのエネルギーでビームラインに引き出し、試料に照射する際に最大30 keVまで加速する。陽電子は電子と再結合して0.511 MeVの２本のガンマ線を放出して消滅するが、ガンマ線の放出時間やエネルギー分散から陽電子消滅寿命やドップラー広がりが測定できる。空孔やボイドなどの材料中の原子レベルの空隙に陽電子が捕捉されると陽電子の寿命が長くなるとともにドップラー広がりに変化が生じることが知られており、これらの原理を用いて材料中の空隙に関する情報を得ることが可能である。



低速陽電子ビームシステム（B-1実験孔）

## ■精密制御照射装置（SSS）

高温度領域（90～500 ℃）における制御した材料照射を行うために設置された照射設備である。原子炉に試料温度を原子炉出力と独立に電気ヒータおよびヘリウムのガス圧を変えることにより設定できる高度な温度制御装置が付属している。中性子スペクトルを反射体・炉心プラグ等の炉心要素の組み合わせ等により変化させた照射を行うことが可能である。照射時間は照射中に試料を引き上げることで任意の照射量を選択することができる。現在、炉心「E-7」に挿入されており、全中性子束は $3.9\times10^{13}$ n/cm²s、高速中性子束（E ＞ 0.1 MeV）は $9.4\times10^{12}$ n/cm²sである。



精密制御照射装置（SSS）



オンライン同位体分離装置（KUR-ISOL）

## ■オンライン同位体分離装置（T-1貫通孔）

短寿命中性子過剰原子核の構造に関する核分光学の分野と、原子核をプローブとする物質科学（核物性）の2つの研究分野で利用されている装置である。濃縮ウランを熱中性子で照射し、核分裂で生じた不安定原子核をHe-jet法によりイオン源へ導き、イオン化する。イオン化された元素を加速、収束した後、電磁質量分離により目的とする原子核だけを精度よく取りだす。本装置は高温熱イオン源を用い、アルカリ、アルカリ土類、希土類元素を効率よく分離できる。2つの研究分野に応じて2つのビームコースが設けられている。核分光コースでの質量分解能は約900、加速エネルギーは30 keVであり、テープコレクターが附設されている。核物性コースでの質量分解能は約600、加速エネルギーは後段加速器により30-200 keVの範囲で可変である。



## ■重水中性子照射設備（$D_2O$ 設備）

本設備は、従来、γ線の混在が少ない典型的なマックスウェル分布を持つ熱中性子照射場として、物理工学および医学生物学関係の研究分野において利用されていた。特に、医学利用として、脳腫瘍および悪性黒色腫に対する硼素中性子捕捉療法（BNCT）が行われ、1995年までに合計61例の臨床が行われた。そして、1995年11月から1996年3月にかけて、BNCTの高度化を主目的に、(1) 設備の安全性の向上、(2) 熱中性子から熱外中性子までの利用を可能とする性能向上、(3) 5 MW連続運転中の医療照射を可能とする等の使い勝手の向上、の３点に関して改修が行われた。

本設備は、KUR炉心に接して約２ $m^3$ の重水タンクを有している。重水タンク内の炉心側に、熱外中性子成分を増加させるための、体積比80 %/20 %のアルミニウムおよび重水で構成されている厚さ65 cmの熱外中性子減速材が組み込まれている。その外側には、中性子エネルギースペクトルをコントロールするための、中性子エネルギースペクトルシフターおよび重水シャッターが組み込まれている。スペクトルシフターは厚さ10、20、30 cmの３層、重水シャッターは厚さ30 cmの１層で構成され、各層の重水は独立して出し入れできる。重水シャッターの外側には、熱中性子成分をカットするための厚さ１ mmのカドミウムフィルターが２枚組み込まれている。



重水中性子照射設備

本設備では、中性子エネルギースペクトルシフターの重水厚さの調整、および、２枚のカドミウムフィルターの開閉により、ほとんど純粋な熱中性子から熱外中性子まで様々なエネルギースペクトルを持つ中性子照射が可能である。スペクトルシフターおよび重水シャッター各層の重水の有無、ならびに、２枚のカドミウムフィルターの開閉の組み合わせのみでも、64通りの照射モードが設定できる。本設備で得られる熱中性子束は最大で $5\times10^{9}$ $cm^{-2}s^{-1}$ 程度、熱外中性子束は最大で $1\times10^{9}$ $cm^{-2}s^{-1}$ 程度である。

本設備は、改修後も引き続き、物理工学および医学生物学関係の研究分野に利用されているが、様々なエネルギースペクトルを持つ中性子照射が可能となったことから、その利用の幅が広がっている。BNCT医療照射については、熱中性子単独照射、熱ー熱外中性子混合照射、熱外中性子単独照射の３つの照射モードが患部に応じて使い分けられている。2001年12月には世界初の口腔癌に対するBNCTが熱外中性子照射により行われ、2002年６月には脳腫瘍に対する非開頭の熱外中性子照射が開始された。本設備では、2018年７月現在で、脳腫瘍254件、頭頸部腫瘍193、悪性皮膚黒色腫27件、肺腫瘍44件、肝腫瘍10件、その他19件のBNCT医療照射が行われている。

## ■中性子イメージング設備（E-2 & B-4実験孔）

熱中性子を用いた中性子イメージングは、沸騰二相流、燃料電池内やコンクリート、さらには植物内部の水分挙動の把握に極めて有効な可視化技術であり、最近では超臨界水の混合や宇宙用機器の開発にも応用されている。KUR炉室内に設置されたE-2ポートと炉室外に設置されたB-4導管実験室の二つの中性子イメージング設備が利用可能である。



沸騰二相流ループ（B-4導管実験室）

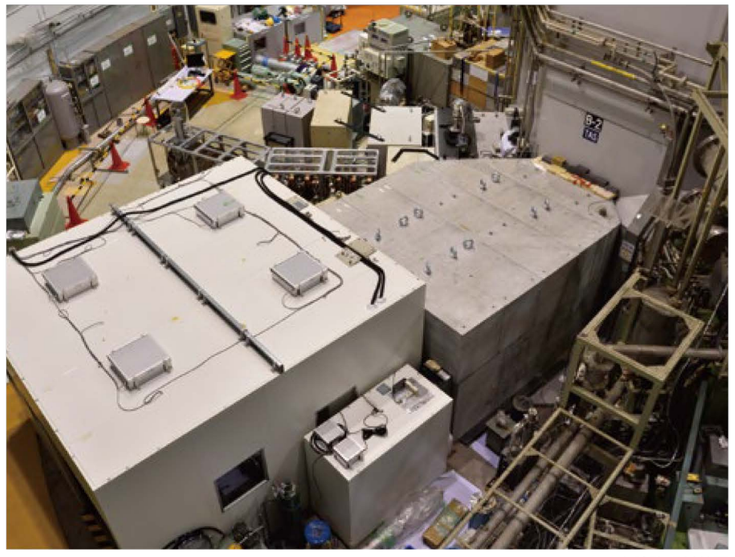
E-2ポートでは、比較的大きな視野（φ150 ㎜）を有した中性子ラジオグラフィ撮影が可能であるが、熱中性子束は低く（3.2×$10^5$ n/$cm^2$s程度）、主に静止画の取得に利用されている。また、CT画像取得システムを整備しており、3次元的な把握に対しても利用されている。

B-4導管実験室は、世界初の本格的なスーパーミラー導管を備えた実験室であり、比較的高い熱中性子束（5×$10^7$ n/$cm^2$s@5 MW運転時）を得ることができる。そのため、静止画撮影のみでなく、高速度ビデオカメラを組み込んだ撮影システムを利用した動画像撮影を行うことができる。また、原子炉の安全研究にも重要となる沸騰現象の把握のために、加熱用直流電源（最大20 V×1,200 A）および冷却設備を備えた沸騰二相流用加熱ループを整備している。さらに、中性子ラジオグラフィとの相補的なデータ取得を鑑みて、X線発生器および撮像システムからなるX線ラジオグラフィ装置を新たに整備し、平成26年よりX線ラジオグラフィ実験装置の共同利用を開始している。

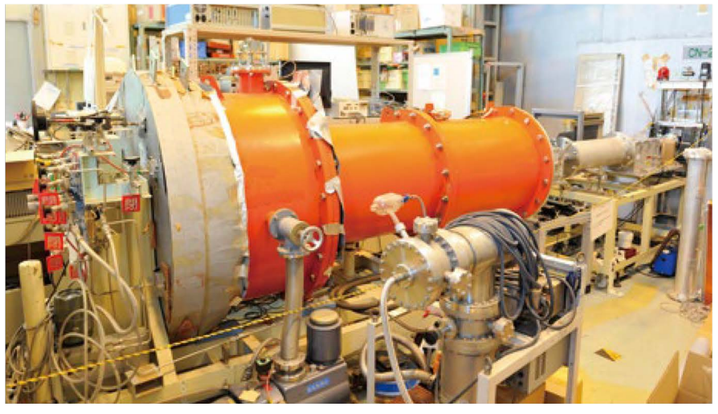
これらのイメージング設備では、神戸大、関西大、東京理科大、東北大、岩手大、茨城大、名古屋大、鹿児島大、日本原子力研究開発機構などの多くの研究者との共同利用が行われている。

## ■B-2実験孔照射装置（B-2実験孔）

B-2実験孔に設置された照射装置で、圧気輸送管では照射することができない溶液試料や大きな試料に対して中性子照射をすることができる。また、照射位置と測定室との間を信号線でつないで試料の状態をオンラインで観察することもできる。化学、物理学、医学、生物学、環境科学などの分野において、中性子放射化分析、飛跡イメージング、物理特性のリアルタイム測定などに用いられている。



B-2実験孔照射装置



中性子小角散乱装置（CN-2実験孔）

## ■中性子小角散乱装置（CN-2実験孔）

中性子小角散乱法（SANS）は、試料のナノ構造を解析するための手法であり、ポリマー、ミセル、タンパク質、金属、磁性体などの様々な試料の研究に利用されている。CN-2には多層膜モノクロメータと$^3$He二次元検出器、透過率検出器を備えたSANS装置が設置されている。多層膜モノクロメータは、一般的なSANS装置で用いられる中性子速度選別機と比較して小さく、メンテナンスが容易であるという特徴を持つ。使用できる波長は0.3 nmと0.46 nmである。試料に0.5 Tの磁場を印加することができる。データ収集システムはイベントレコーディング方式であり、フレキシブルなデータ処理が可能である。



# ホットラボラトリ
# Hot Laboratory

ホットラボラトリは原子炉室に近接して設置されている実験室で、原子炉で照射した試料の各種試験、化学処理 、放射能測定などを安全に取り扱うための施設である。

## ■ホットケーブ室

強放射性試料などを安全に取り扱うためのホットセルが設置されている。ホットセルは遮へい能力の高い重コンクリート壁で囲まれており、壁面に設置された厚さ1mの鉛ガラス窓から内部を見ながら、遠隔操作により強放射性試料を安全に取り扱うことができる。Aセルでは水圧輸送管による照射や炉心照射を行った試料の開封や仕分けを行う。Bセルにはメスバウアー分光装置が設置されており、照射により生成した短寿命の線源を用いた、様々な核種のメスバウアー分光が可能である。また、強磁場下測定用マグネット、低温測定用クライオスタット、高温測定用ヒータチャンバなどを使用することで、種々の条件下でのメスバウアー分光も可能であり、国内外でも稀有な設備として多くの研究に使用されている。Cセルには自発核分裂性核種であるCf-252を用いて検体へのイオン照射試験を行うための放射線試験装置が設置されており、人工衛星などに搭載される集積回路の耐放射線性の調査や、放射線によって引き起こされる回路の誤動作の検出試験などが行われている。室内にはホットセル以外に、圧気輸送管（Pn-1）で照射する試料キャプセルの出し入れを行うステーションや、黒鉛設備圧気輸送管（TC-Pn）のステーション、ヘリウム再凝縮装置、材料試験を行うための各種試験装置などが設置されている。



ホットセル



メスバウアー分光装置

## ■ジュニアケーブ室

核燃料物質や超ウラン核種、α線放出核種などを用いた化学実験や試料調製を安全に行うためのグローブボックスやフード、α線スペクトル測定器が設置されている。また、圧気輸送管（Pn-2）のステーションも設置されている。



ジュニアケーブの圧気輸送管ステーション

## ■セミホット実験室

第1～3実験室には、KURを用いた中性子照射実験で生成する放射性物質等の化学処理などを行うためのスクラバー付フード、グローブボックス、ケミカルフードなどが設置されている。第1実験室には圧気輸送管（Pn-3）のステーションも設置されている。第3実験室のクリーンルームにはICP-MSが設置されている。

## ■機器分析室（第1、第2）

試料の微量･微小分析装置、すなわち高周波プラズマ発光分析装置、原子吸光分析装置、X線回折装置、走査型電子顕微鏡等が設置されている。

## ■測定室

3室の測定室があり、γ線スペクトロメトリを行うためのゲルマニウム半導体検出器が約10台設置されている。



ゲルマニウム半導体検出器

## 京都大学臨界集合体実験装置（KUCA）
Kyoto University Critical Assembly

KUCAは臨界集合体という実験用の原子炉である。最大出力は100 WとKURのような研究用原子炉と比べて低出力であるため炉心の組み替えが容易で、原子炉物理や放射線物理等に関する基礎研究のために利用している。

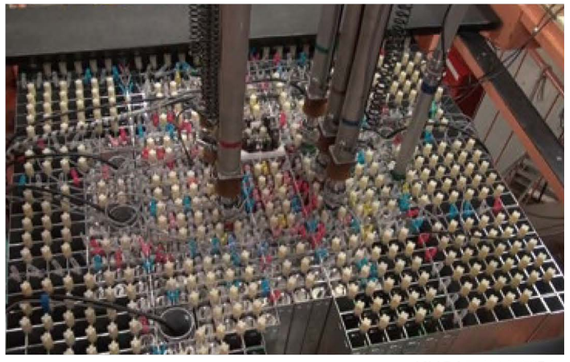
建家の内部は遮蔽壁により4つの部分に区画され、固体減速架台2基（A、B架台）と軽水減速架台1基（C架台）の3つの集合体と1つの加速器を設置するという世界的にも例を見ない複合架台方式を採用した実験装置である。複合架台方式であるが、計測制御系統は1組しかなく、同時に2つ以上の集合体を運転することはできない。KUCAは全国大学の共同利用施設として多くの研究者に研究に利用されている。

また、教育利用の面では、昭和50年以来、京都大学のみならず他大学の院生が参加する大学院生実験（2単位が与えられる）を行っており、原子炉の基礎実験だけでなく、燃料の取り扱い、原子炉運転操作など、原子炉に直接接する貴重な体験を提供してきている。現在、12大学の学部学生、大学院生が参加し、平成27年度までの受講者は約3,600名となっている。またこのKUCAを利用した教育は韓国、中国およびスウェーデンの学生に対しても行っており、これまでに海外から230名以上の学生が受講している。



### ■固体減速架台

A、B両架台は、ほぼ同じ構造の固体減速架台である。炉心は、架台支持構造第1段に設置された格子板上に燃料体を立てて構成される。燃料体は、断面約5 cm × 5 cmのアルミニウム製角筒中にウラン･アルミニウム合金の燃料角板と種々の厚さの黒鉛、ポリエチレンなどの減速材角板を重ねて詰めたもので、その有効長は約1.5 mである。その際、実験用として炉心の一部に天然ウラン、トリウムなどの核燃料や鉄･アルミニウムなどの様々な材料も使用することができる。格子板の中心部分は可動となっており、制御棒とは独立した系統の原子炉停止機構として働き、安全性を向上させた構造となっている。

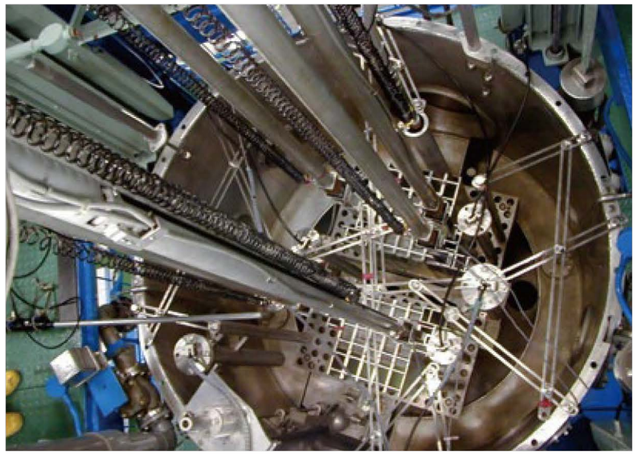


KUCA固体減速架台



### ■軽水減速架台

C架台は軽水減速架台で、直径と深さが約2 mのアルミニウム製炉心タンクの中に格子板を設け、燃料体や反射体容器をはめ込んで炉心を構成する。燃料体を構成する燃料板はウラン・アルミニウム合金をアルミニウムで被覆したもので、燃料板を１枚ずつ抜き差しすることができ、その間隔と枚数を変えることができる。格子板は2分割炉心の実験に便利なように水平に2分割できるようになっている。臨界調整は制御棒によって行われる。停止の場合には、水位下降用の弁を開いて炉心タンク中の水を下部のタンクへと排水する構造となっており、これは制御棒と独立して原子炉を安全に停止するための役割を果たす。

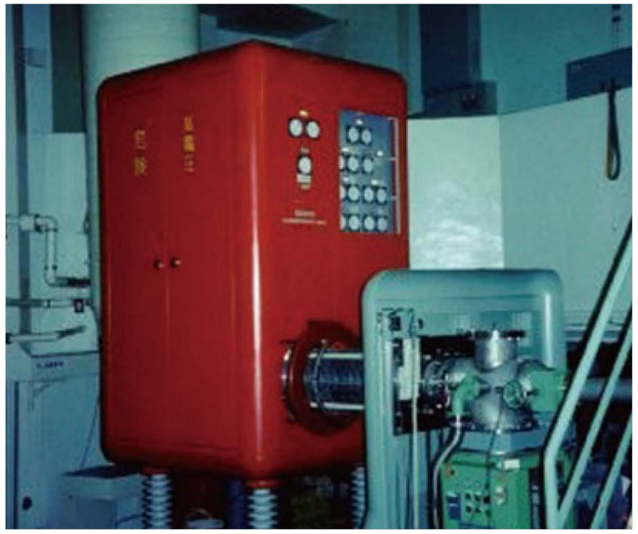


KUCA軽水減速架台

### ■パルス状中性子発生装置および中性子発生設備

臨界集合体と組み合わせた反応度測定などを目的とした中性子発生装置である。これは、加速電圧300 kVの絶縁変圧器型加速器で加速した重陽子をトリチウムターゲットに当てて14 MeVの高エネルギー中性子を発生させるもので、臨界集合体と組み合わせて設置されているものとしては、世界で最も強力なものの1つである。近年研究が盛んに行われている加速器駆動システムに関する基礎実験はこの装置とA架台とを組み合わせて行っている。また、中性子発生反応がD-T核融合反応と同じであるため、核融合関連の基礎的な実験などにも使用することができる。

この加速器とは別に、隣の建屋に設置されたFFAG加速器からの陽子ビーム（最大エネルギー100 MeV）をA架台横まで輸送し、重金属ターゲットに衝突させてパルス状の高エネルギー中性子を発生させる中性子発生設備が設置されており、2009年3月から世界で初めて陽子ビームを用いた加速器駆動システムに関する基礎実験を開始した。



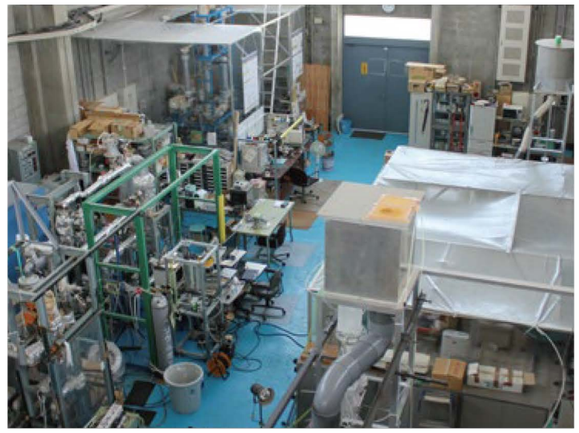
パルス状中性子発生装置

## 熱特性実験装置
Thermal-Hydraulic Test Loop

熱特性実験装置は、昭和62～63年度に設置され、４つの実験用ループと附帯設備から構成されている。2つの沸騰実験用加熱ループ、断熱二相流ループ、液体金属加熱ループが使用可能で、様々な熱流動実験に対応可能である。沸騰実験用加熱ループには、電子制御式の大電流実験に対応した大型直流安定化電源（最大20 V×5,000 A）が附設されており、定常伝熱実験のみでなく、急速な過渡伝熱実験などにも利用できる。断熱二相流ループでは、常温大気圧下の空気-水系二相流実験が可能であり、二相流計測技術の高度化や新たな計測手法の開発などに用いている。液体金属加熱ループは、次世代原子炉の安全解析に必要となる鉛ビスマス流動実験に利用している。

計測装置としては、高速度ビデオカメラなどの流体可視化装置やワイヤーメッシュセンサ、レーザー変位計などを備え、幅広い実験の要求に対応できるよう整備している。

これらの装置は、所員自身の研究のみでなく、平成元年度より共同利用にも供され、神戸大学、関西大学、東京海洋大学などの研究者との共同研究が行われている。平成１５年度には実験室を移転し、現在は工場横の熱特性実験室内で共同利用を含む実験を行っている。



熱特性実験装置と実験室風景

## 電子線型加速器
## Electron Linear Accelerator

電子線型加速器(ライナック)は2本の進行波型加速管を持ち、小型ライナックとしては世界的にも珍しいLバンド周波数(1.3 GHz)の大電力マイクロ波で電子を加速する装置である。発生できる電子ビームのエネルギーは6～46 MeV、パルス幅2 ns～4 μs、パルスの繰返し1～360 Hzと広い可変範囲を持つことが特長で、シングルバンチの発生も可能である。最高ビームパワーは10 kW(ビーム条件30 MeV、500 mA、4 μs幅、180 Hz)であり、小型ライナックとしては国内最高レベルの大電流が得られる。当初は間欠的なパルス状中性子源として昭和40年に設置されたが、現在では多種多様な量子ビーム源、すなわち汎用量子ビーム生成装置として、電子線、X線、中性子線による材料照射、中性子飛行時間分析法や鉛減速スペクトロメータを用いた核データの取得、(γ,n)および(γ,p)反応によるRIの製造やその応用、テラヘルツ帯コヒーレント放射光による物理実験、加速管内マイクロ波電界放出による超微弱ビームを用いた検出器校正試験などに広く利用されている。全国共同利用研究課題を年間40週以上実施するほか、京大大学院生実験も行われている。



入射器側から見た電子線型加速器

## トレーサラボラトリ
## Tracer Laboratory

比較的弱い放射性同位体(RI)を使用して研究を行うための諸設備が設置されているトレーサ棟は、鉄筋コンクリート平屋建(一部2階および地下)の主棟と、廊下でつながった生物別棟からなっている。主棟は中央部の実験室と、そのまわりにある物理実験室、化学実験室、生物実験室用の小室およびRI貯蔵室などから構成されている。中央部の実験室にはX線回折装置、物理実験室には電子顕微鏡、メスバウアー分光装置や摂動角相関装置などが設置され、物性科学、材料工学や核物理学の研究に利用されている。化学実験室にはステンレス鋼製ケミカルフードが据え付けられている。その内の1つには、研究炉で照射された試料を、原子炉棟ホットケーブ室からトレーサ棟まで数秒で移送するための圧気輸送管の取り出し口がある。生物実験室にはRIを含んだ生体試料を取り扱うための装置が設けられている。平成14年および平成26、27年に大規模な改修が行なわれ、新たな研究の展開に対応できる環境が整備された。



トレーサラボラトリ

## コバルト60ガンマ線照射装置
## $^{60}$Co γ-ray Irradiation Facility

本装置は、地下の線源格納容器内に格納されたコバルト60γ線源を遠隔操作で床上まで押し上げることによってγ線照射を行う押上式のγ線照射装置であり、2018年4月1日現在、最高線量率9.5 kGy/hでの照射が可能である。照射室は15 m$^2$程度の面積を有しており、広範な線量率で、多様な種類、大きさ、形状の対象物に対してγ線の照射を行うことができる。また、種々の寒剤を利用した低温での照射や、実験の目的に応じた装置を搬入した上での特殊な照射を行うことも可能である。

照射室に隣接して電子スピン共鳴測定装置が設置された測定室が設けられており、測定直後の試料に対する測定が可能となっている。また、照射室と測定室の間には湾曲した貫通孔があり、各種のケーブルを通すことで、実験データの収集や照射中の実験装置のコントロールが可能である。線源の遠隔操作を行う操作室と照射室の間には鉛ガラス製の窓が設けられており、照射の様子を目視で確認することができる。

本装置を利用して、物理学、化学、生物学、地学、工学、医学など幅広い分野における研究が行われており、純粋なγ線の照射を行う実験設備として他の実験設備を補完する役割を担っている。



コバルト60ガンマ線照射装置



## 放射性廃棄物処理設備
## Radioactive Waste Management Facility

所内で発生する放射性廃棄物(固体および液体)を安全に処理するための施設で、主に廃棄物処理工場、タンクヤードおよび固形廃棄物倉庫からなる。また、このほかに放射性廃棄物に関する各種試験および実験研究を行うための測定室や実験室がある。

固体廃棄物は性状(可燃性、不燃性など)に応じて分別収集され、所定の容器に収納処理される。これらは以下に述べる高レベル廃液、蒸発濃縮液、脱水汚泥などとともに固形廃棄物倉庫に保管され、一部のものは法律で定められた廃棄業者に引き渡される。

高レベル廃液(放射能濃度3.7×10$^4$ Bq/cm$^3$以上)は使用施設ごとで一時貯留後保管される。そのほかの放射性廃液に関しては以下のような処理が行われる。



廃棄物処理設備タンクヤード

### ■蒸発濃縮処理設備

中レベル(放射能濃度0.37～3.7×10$^4$ Bq/cm$^3$)および高塩分の放射性廃液を蒸気加熱により、原廃液を蒸発蒸気と濃縮廃液とに分離する設備で、0.5 m$^3$/hの処理能力を持つ。前者は同伴飛沫中の放射性物質をさらに除去するため、飛沫分離装置を経て、復水された後監視貯留槽に送られる。一方、後者は容器に移される。

### ■凝集沈殿ろ過処理設備、凍結再融解処理設備

弱レベル(放射能濃度0.37 Bq/cm$^3$以下)廃液中の放射性物質を化学反応による沈殿物として回収する装置で処理能力5 m$^3$/hのものが2系列備えられている。沈殿した汚泥は凍結再融解処理設備(設備能力、0.2 m$^3$/d、2基)で更に脱水され、容器に移される。一方上澄み液は、ろ過装置を経て監視貯留槽へ送られる。

### ■イオン交換処理設備

蒸発濃縮または凝集沈殿ろ過処理後に、必要に応じて、陽イオン、陰イオンあるいは無機イオン交換処理装置を使い分けて用いる。処理能力5 m$^3$/hのものが2系列備えられている。特殊な多孔性合成樹脂の持つイオン交換能により、放射性物質がイオン交換体に捕集される。

以上の処理後に監視貯留槽に送られた廃水は、その濃度が法律に定められた濃度限度以下であることを確認した後に排出される。



## 放射線管理設備
Radiation Monitoring System

### ■屋内放射線モニタリング設備

1)ガンマ線エリアモニタ
　主に管理区域内に設置され、ガンマ線による空間線量率の監視を行っている。
2)中性子エリアモニタ
　原子炉棟、臨界装置棟の炉室などに設置され、中性子線による空間線量率の監視を行っている。


研究炉放射線監視盤

3)放射性ダストモニタ
　原子炉棟、臨界装置棟の炉室や排気口などに設置され、空気中放射性ダスト濃度の監視を行っている。
4)放射性ガスモニタ
　原子炉棟、臨界装置棟の炉室や排気口などに設置され、放射性ガス濃度の監視を行っている。
5)放射性水モニタ
　原子炉冷却水などの放射能濃度の監視を行っている。
6)ハンド・フット・クロスモニタ
　原子炉棟、臨界装置棟、トレーサ棟、放射性廃棄物処理棟などの出口に設置し、管理区域から退出する人の汚染検査を行っている。
　1)～ 5)のモニタの主要な信号は中央管理室にも送られ、二重の安全監視が行われている。

### ■野外放射線モニタリング設備

1)周辺監視区域モニタ
　複合原子力科学研究所敷地境界付近５ヶ所に設置され、空間線量率の監視を行っている。測定値は中央観測所へ送られている。
2)野外観測所
　複合原子力科学研究所外の1～5 kmの範囲の４ヶ所(和田、下瓦屋、市場、日根野)に設置され、空間線量率の監視を行っている。測定値は中央観測所へ送られている。


周辺監視区域モニタ

3)中央観測所
　風向、風速、日射量などの各種気象要素の測定データを蓄積している。これらを用いて、大気中に放出された放射性物質による被ばく線量の評価を行っている。
4)移動式環境監視装置
　任意の地点での空間線量率などを監視する装置である。
5)環境放射能核種別測定設備
　複合原子力科学研究所周辺を中心にした環境試料(水、土壌、農作物など)中の放射能を精密に測定する設備である。

### ■ホールボディカウンタ

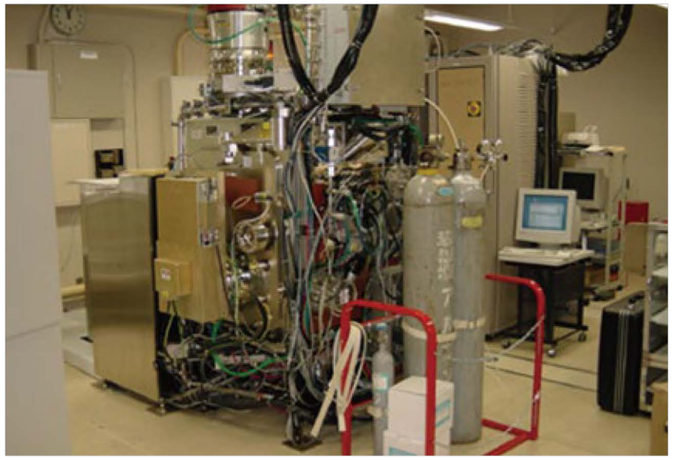
　人体中の放射能を測定し、内部被ばく線量を評価するための設備である。

## 高機能中性子鏡製造装置（イオンビームスパッタ装置および大面積蒸着装置）
Neutron Mirror Fabrication System

　高機能中性子鏡製造装置はイオンビームスパッタ装置(KUR-IBS)および大面積蒸着装置(LVE)の２台で構成される。IBSは高品質・極博多層薄膜を製造することができ、世界最高反射角のワイドバンド中性子多層膜モノクロメータや曲面のスーパーミラー等も製作可能であり、当研究所のみならず、J-PARC MLFやJRR-3等、大型中性子施設へキーデバイスとして中性子ミラーを供給、共同利用研究を推進している。LVEは電子ビームによる蒸着装置であり、世界最初の本格的なスーパーミラー導管(KUR B-4)建設に利用された。現在は中性子ミラーよりも希少試料をはじめとする汎用大面積製膜に利用されている。

### ■イオンビームスパッタ装置

　本装置は、誘導コイルによって励起したプラズマをグリッドに印加した電圧を用いてイオンビームとして引き出し、それを成膜材料に照射することによって、試料基板上に高精度な薄膜を成膜する装置である。ターゲットは最大６種類まで取り付けることができ、それらの材質を交互に積層することができる。試料基板の取り付け可能サイズは直径480 mm程度であり、広い範囲で均一な厚みを成膜することで、中性子ガイド管用の中性子ミラー製作も可能である。さらに回転楕円面などの曲面への多層膜成膜も可能である。また、基板に
磁気バイアスを印加することができ、磁性膜に磁気配向を持たせることも可能である。


イオンビームスパッタ装置

### ■大面積蒸着装置

　電子ビームによる蒸着装置であり、大面積中性子鏡の製作や特殊試料保持器具を利用する場合に利用されている。直径約 1000 mm、高さ600 mmという大型真空容器を有しており、その中で 110×350 $mm^2$ の中性子鏡が一度に８枚製作可能である。



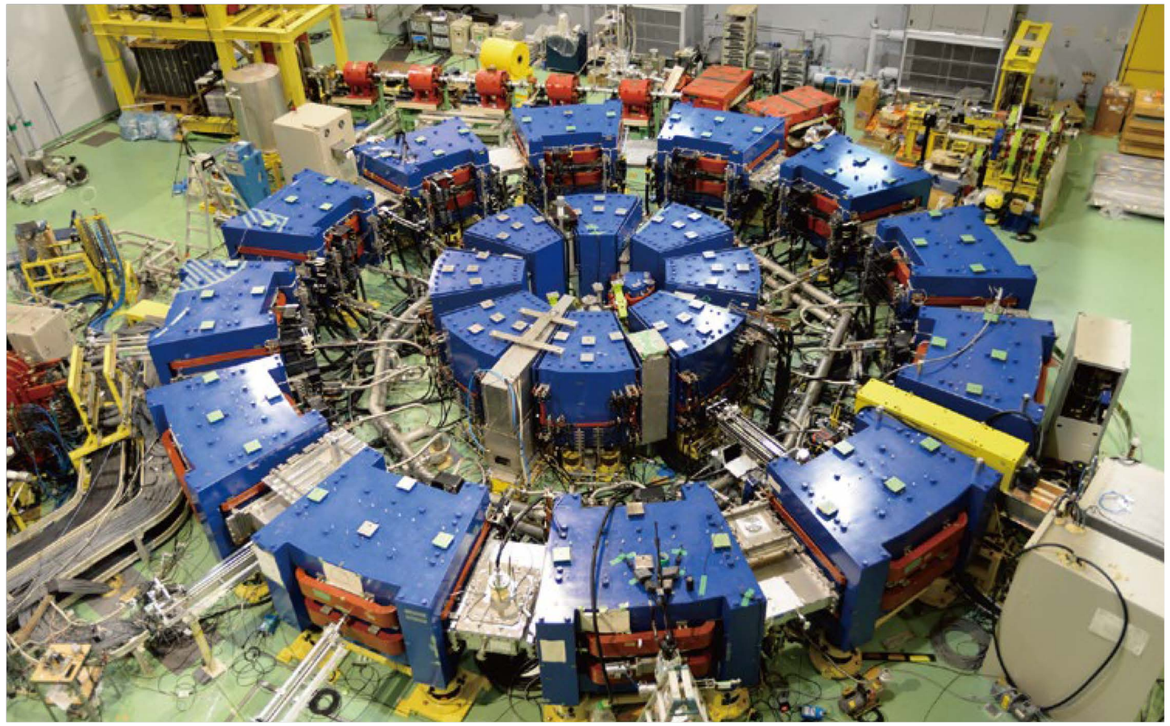
## イノベーションリサーチラボラトリ
Innovation Research Laboratory



　平成１５年度末にKUCA棟の隣に竣工した３階建ての建物で、150 MeV FFAG加速器・11 MeV 負水素イオンビーム線型加速器等を収容する「実験棟」および、30 MeVサイクロトロン・治療施設等を収容する「医療棟」から構成される。

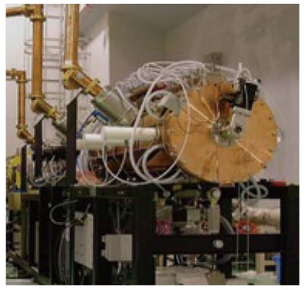
### ■150 MeV FFAG 加速器

　FFAG(Fixed Field Alternating Gradient：固定磁場強収束)加速器は、文部科学省「革新的原子炉システム技術開発」提案公募事業として加速器駆動システム(ADS)に関する基礎研究を行うために設置された。ADS 実験は、FFAG 加速器で加速された陽子ビームと、隣接するKUCA 建屋内 A 架台に設置された未臨界核燃料体系を組み合わせて行う。平成 21 年 3 月に世界初の ADS 実験を実施し、その後も、燃料体系やビーム条件を変えて実験を継続中である。
　平成 27 年現在のビーム性能は、エネルギー 150 MeV、電流 1 nA、繰り返し 30 Hz、パルス幅 100 ns 以下。ADS 実験以外にも、材料照射実験、エアロゾル照射実験、生体ラットへの照射実験等も実施されている。今後はパルス中性子源への展開も視野に入れ、1 μA を目指した電流増強を実施中である。


150 MeV FFAG 加速器

### ■11 MeV 負水素イオンビーム線型加速器

　この装置は負水素イオン源・3 MeV RFQ・7 MeV DTL・11 MeV DTLから構成され、150 MeV FFAG加速器の入射器として用いられている。負水素イオンは１個の陽子と２個の電子からなる複合粒子で、FFAGリング内に設置された炭素薄膜を通過する際、電子が剥離し、陽子となる。この入射方式で約100ターンにわたる長時間入射が可能となる。ビーム性能は、エネルギー 11 MeV、ピーク電流値１ mA、パルス幅100 μs、繰り返し200 Hzである。入射器としての用途のほかに、11 MeVおよび7 MeVでの照射実験等も可能である。


11 MeV 負水素イオンビーム線型加速器

### ■30 MeV サイクロトロン

　30 MeVサイクロトロン加速器はホウ素中性子捕捉療法で必要となる熱外中性子を発生させるための陽子線加速器である。供給可能な陽子エネルギー、電流は30 MeV、1 mAである。中性子発生ターゲットと減速体系を組み合わせることにより、$1.2\times10^9$ $n/cm^2s$ の強度を有する熱外中性子を生成することが可能である。
　平成20年12月にイノベーションリサーチラボラトリ医療棟に設置され、平成21年3月より中性子発生試験を開始した。物理実験、動物・細胞の照射試験を経て、平成24年10月に世界で初めて加速器中性子源によるホウ素捕捉療法の治験を開始した。


30 MeVサイクロトロンとビーム輸送系