

工学部 理工工学科

# 原子核工学コース

<https://www.ne.t.kyoto-u.ac.jp/ja>

## ■ 量子の科学と工学

原子レベルのミクロスケールは、粒子と波動の二重性を持つ量子の世界です。20世紀初めに量子が発見され、その二重性による不思議な現象は、量子力学で説明されています。そして今では、量子ビーム、レーザー、半導体、超伝導、エネルギーなど、さまざまな分野に利用されています。21世紀はこのような量子の科学や、それを応用した工学がどんどんと生まれ、物質、エネルギー、生命、環境などに役立てられることになるでしょう。

## ■ 原子核工学コースの構成

原子核工学コースは、学部では理工工学科・原子核工学コース、大学院では原子核工学専攻という名称で、4つのグループ、10の分野（研究室）から成り立っています。各グループ・分野が協力しあって、量子の科学と工学について研究と教育を行なっています。



原子核、原子、分子というミクロレベルの視点から最先端科学を切り開く量子テクノロジー

新しい物質の創成、新しい機能を備えた素子の開発、信頼できるエネルギー源の開発など、従来の工学分野にとられない学際的な研究

# (1-1) 核エネルギー変換工学

～ 限りあるエネルギーを限りなく安全に、かつ有効に利用するために ～

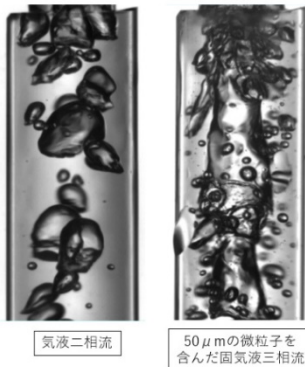
教授：横峯健彦 講師：河原全作、成田絵美

## ■ 混相流工学—理論・実験・シミュレーション・応用

混相流とは、気・液・固相(体)が複数共存する流れで、極めて複雑な構造と動きを見せます。とりわけ、異なる相が接する境界界面で生じる様々な現象が、流れを複雑にし、理論の成立を妨げます。また、私たちの研究室では、界面の物理と熱物質移動の理論的研究、マイクロメートルスケールから原子炉・核融合炉スケールの混相流を対象とした実験的研究、数値シミュレーション、そこで構築した理論・アイデアの社会実装に関する応用研究を行っています。

## ■ 核分裂炉・核融合炉のエネルギー変換と安全性に関わる伝熱流動

現在利用されている軽水炉の革新的な高度化や次世代の核分裂炉である高速炉、核融合炉など、エネルギーを社会に供給する原子炉には様々なタイプがあります。そこで発生したエネルギーを安全に効率よく利用するために、関連する伝熱流動現象に関する研究を行っています。



同じ流れ条件での二相流と三相流の違い (高速カメラによるスナップショット)

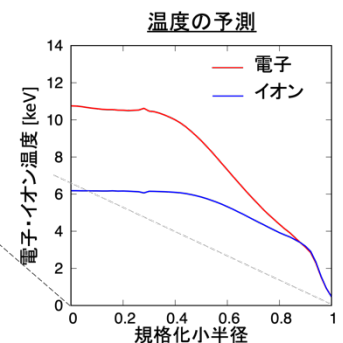
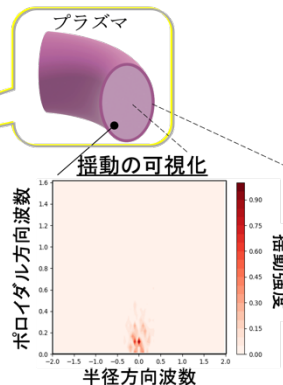
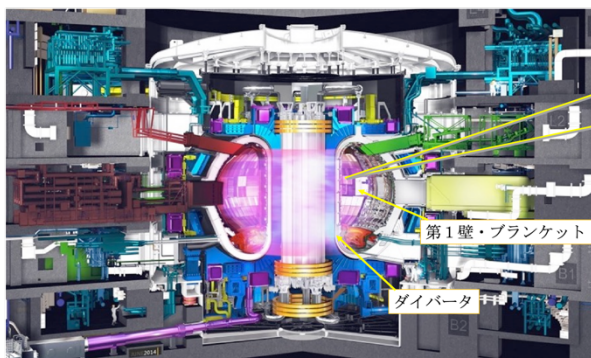


混相流伝熱実験ループ (上) と 混相流流動可視化実験ループ (右)



## ■ 機械学習を用いた核融合プラズマの理解・予測

核融合炉において燃料となるプラズマの理解や予測のために機械学習を利用した研究を進めています。プラズマ中の熱の流れは微視的な揺動によって支配されています。数値計算によって可視化された揺動の解析や熱の流れの高速な予測を行うニューラルネットワークモデルを開発しています。



(左) 核融合炉の構造と (中央) プラズマ中の揺動の波数空間上での可視化、(右) 機械学習モデルによる温度の予測

## (1-2) 量子制御工学

～ 核融合の実現をめざして超高温プラズマにおける物理現象の解明と制御手法の開発 ～

教授：村上定義 助教：森下侑哉

### ■ 核融合開発が新たな段階へ

核融合発電を目指す国際協力（日、欧、米、露、中、韓、印）が進められています。国際熱核融合実験炉（ITER）の建設がサン・ポール・レ・デュランス（フランス）で本格的に開始され、完成まであと数年となりました（図1）。核融合反応を維持することができる実験炉の完成により、核融合開発が新たな段階に進もうとしています。



### ■ 核融合プラズマ中の輸送現象

約1億度の核融合プラズマを効率的に閉じ込めるためには、プラズマ閉じ込めを支配している物理機構の解明が必要です。単純な拡散現象では説明できない急峻な圧力勾配をもつ輸送障壁が実験的に観測され、トラスプラズマの閉じ込め性能向上に寄与しています。このような輸送障壁形成を説明する輸送モデルの構築や定量的な解析を行うための輸送シミュレーションを進めています。

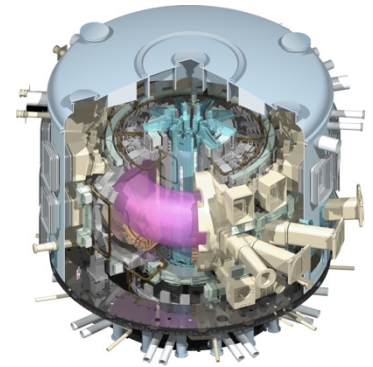


図1：サン・ポール・レ・デュランス（フランス）に建設中の国際熱核融合実験炉（ITER）

### ■ 波動によるプラズマの制御

高温プラズマを制御する有力な手段としての電磁波が利用されています。数10kHzから数100GHzまでのさまざまな電磁波が、プラズマの生成、加熱、電流駆動、計測等に広く用いられています。その物理機構を解明し、有効なプラズマ制御手法を開発するために、波動の励起、伝播、吸収とそれに伴うプラズマの時間発展の解析を進めています。

### ■ データ科学による核融合プラズマの解明

近年データ科学による物理現象の解明が進められて来ている。核融合開発においても、多くの実験データを用いたデータ科学による研究が行われている。ニューラルネットワークによる輸送モデルの構築やデータ同化手法を用いた統合輸送シミュレーションの開発など核融合研究への応用を進めています。

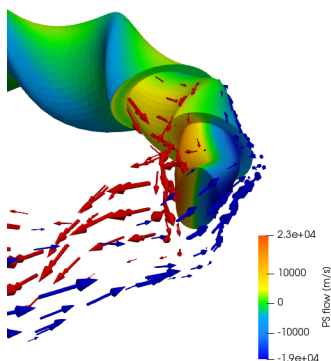


図2：電磁流体平衡における Pfirsch-Schlüter 流

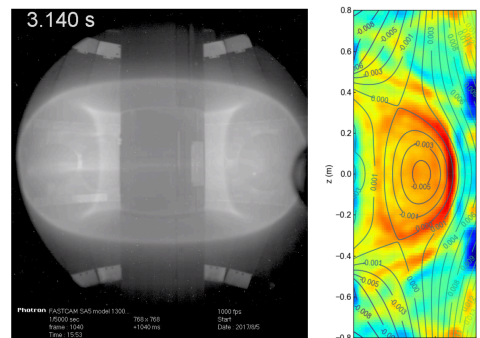


図3：可視光トモグラフィーによる電磁流体平衡の推定

## (2-1) 燃材料工学

～ 安全なエネルギーの確保と地球環境保護の両立を目指して～

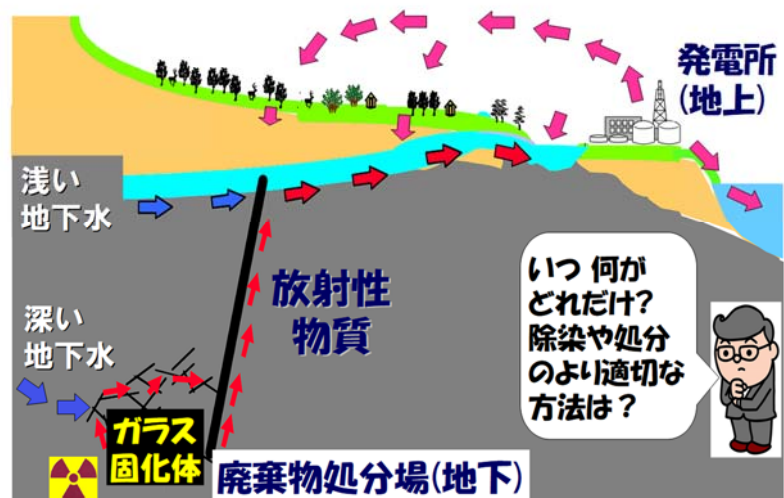
教授：高木郁二、佐々木隆之 准教授：小林大志

### ■ キーワードはエネルギー、安全、環境

私たちが毎日の生活を送る上で、環境に負担をかけない安定したエネルギーの確保は欠かせません。二酸化炭素の排出が少なく、資源も豊富に存在する核融合や原子力などの核エネルギーは、今の日本に適した選択肢です。エネルギー源である水素を製造する新しい技術としても核エネルギーは注目されています。私たちの研究グループでは、核エネルギーをより安全に、有効に利用するための物理化学的な研究や材料研究を行なっています。

### ■ 放射性廃棄物の処理と処分

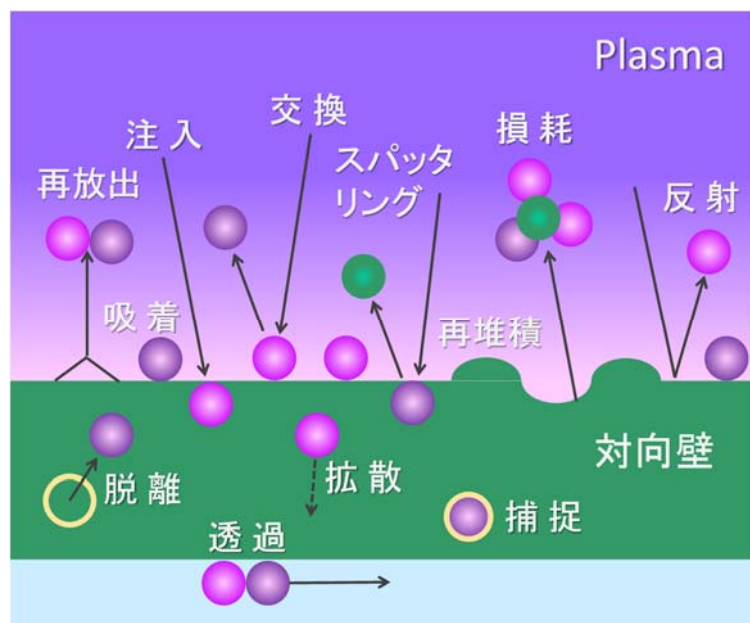
使用済燃料から発生した高レベル放射性廃棄物や廃炉工程で生じる廃棄物、福島第一原発事故により発生した多種多様な放射性物質等の安全かつ合理的な処理・処分は急務かつ長期の課題です。体系的な処分システムの構築を目指し、放射性物質の状態や環境移行挙動を数万年以上にわたり予測すべく、その物理化学的な性質を解明する実験的研究を行っています。



種々の放射性物質を取り巻く環境

### ■ エネルギー材料の研究

核融合炉でも原子炉でも、用いられる材料は高い温度や放射線などの過酷な環境にさらされるため、様々な反応が起こってしまいます。私たちはこれらの反応過程を解明し、材料を健全に使用するための研究を行うことによって、核融合炉の実現と原子炉の安全性向上を目指しています。研究テーマは核融合炉長時間運転のためのプラズマ対向壁相互作用の研究、原子炉用被覆管の水素発生・吸収機構です。



プラズマ対向壁相互作用のイメージ

## (2-2) 重元素物性化学

～ 重元素アクチノイドの興味深い性質を探り、活用し、安定化に寄与～

教授：山村朝雄 助教：外山真理

### ■ 未解明の性質を秘める発見 70 年余の元素群

原子炉でウラン燃料の核反応を起こし、一部は重い人工元素であるプルトニウム等の重元素を作ります。これらの元素は周期表では「アクチノイド系列」に属し(図 1)、15 個の系列元素の全てが放射性です。この系列の人工元素は人類により発見されて 70 年余しか経っておらず、未解明の興味深い物性化学的性質を秘めています。

### ■ 長寿命放射性廃棄物であるマイナーアクチノイドの安定化は人類にとってのチャレンジ

原子炉で生まれるネプツニウムやアメリシウムは、燃料として再利用できるウランやプルトニウムに比べると量が少ない「マイナーアクチノイド」と呼ばれます。このマイナーアクチノイドは数千年～数百万年もの半減期を持ち、アルファ線という強い毒性を持つ、長半減期放射性廃棄物とされています。マイナーアクチノイドを安全に管理できる方法を見出すことは人類にとって原子力を利用するために欠かせない課題です。

### ■ 伝播性ガン核医薬が放射性廃棄物から作られる

いきなり話が変わりますが、全身に転移した伝播性ガンに対して、アルファ線しか出さない RI (放射性同位元素) を利用した標的治療薬により治療した例が 2016 年に報告されました。ガン細胞の抗体に特異的に結合する抗原を、アルファ線を出す RI につけた錯体の配位子にリンクすることで、ガン細胞以外を傷つけずに効率的に治療を行うことができるのです(図 3③)。こうした核医薬に適した RI の特徴をもつアクチノイド元素は、放射性廃棄物から作られるものが多いです。

### ■ 相対論的量子化学による重元素の物性化学

人類に功罪半ばするアクチノイドを使いこなすため、電子的性質を放射光などを使って調べますが、私たちは相対論効果を十分に取り入れた計算を行ってきた実績があります。重元素物性化学は、核医薬用の錯体化合物の合成・探索や、放射性廃棄物の安定化のために注目されている研究分野です。

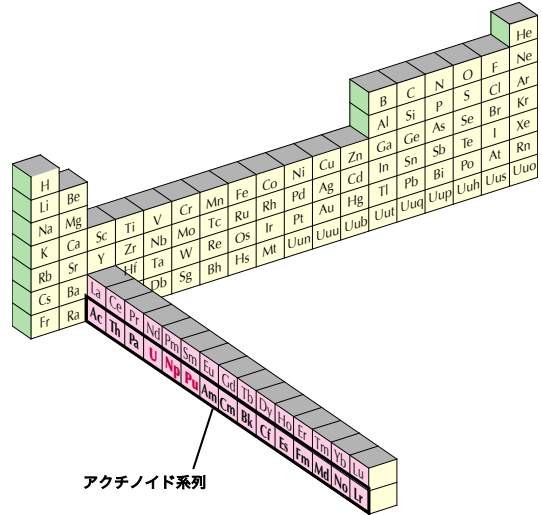


図 1 アクチノイド系列のウランより重い人工元素は発見されて 70 余年の謎の多い元素群



図 2 核医薬用  $Ac^{3+}$  のモデルとしての  $U^{3+}$  (左と中央) と  $U^{4+}$

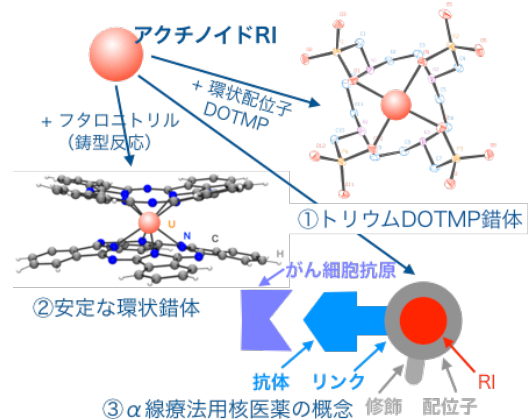


図 3 アルファ放射体としてのアクチノイド錯体の核医薬への利用や、安定化の検討

## (3-1) 量子ビーム科学

～ 量子ビーム科学を学び先進科学・技術に活かす

教授：齊藤学 准教授：土田秀次、松尾二郎、間嶋拓也 講師：瀬木利夫 助教：今井誠

### ■ 加速器からの量子ビームにより「原子衝突反応ダイナミクス～生体物質の照射影響」を探る

荷電粒子ビーム（イオンや電子）あるいはレーザーなどは総称して量子ビームと言います。これらを物質（固体・液体・気体・プラズマ）にあてると物質を構成する原子や分子に大きなエネルギーが与えられます。その結果、様々な量子現象が起こり電子の状態は全く別のものになってしまう。さらには量子ビームによる特異な衝突反応場によって通常では考えることも作ることもできない構造をもつ新奇な粒子・物質が形成されたりします。このように、量子ビームは個々の原子や電子に直接作用して物質のナノスケールレベルでの状態を変えるため、これにより我々が知覚しているマクロスケールの性質に変化をもたらしたり、我々の想像を超えた新しい性質・形質を発現させたりすることが出来ます。

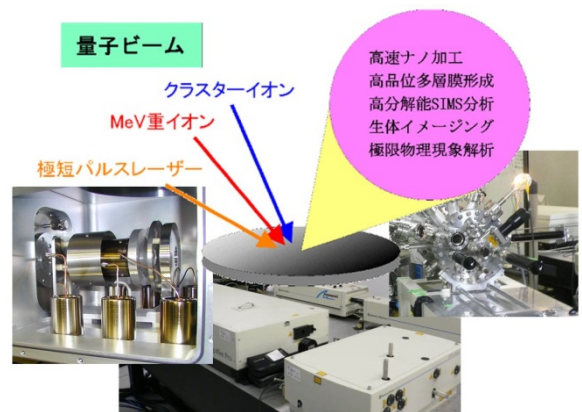
当研究室では、精密に制御した量子ビームをあらゆる物質に衝突させ、原子レベルで起こる反応の基礎的解明から生命科学や宇宙科学への応用までを考えたテーマで研究を行っています。中でも、加速器からの重イオンビームを使って、液体中の原子分子衝突反応を詳細に調べる研究を世界に先駆けて行っています。この研究では、液体中の生体分子に対してイオンビームからのエネルギー付与によって起こる特異な分子損傷ダイナミクスを調べることが可能になり、放射線によるがん治療や植物の品種改良などを行う際の物理学的基礎データを提供しています。また、極低温まで冷却した分子イオンに加速器からのイオンビームを照射する技術の開発研究も行っています。この技術によって、低温な宇宙空間での分子生成や進化に対する放射線影響を、宇宙に行くまでもなく、研究室で調べることができるようになります。



MeV イオン加速器のビームライン

### ■ 量子ビームによる革新的ナノプロセス・評価技術の開拓

革新的な量子ビームを用い、ナノテクノロジーや生命科学分野で使われる新しいプロセス技術、評価、シミュレーション技術の研究開発を行っています。例えば、多数の原子集団であるクラスターのイオン、1000万電子ボルトという非常に大きなエネルギーを持った重粒子、パルスの幅が  $10^{-12}$  秒以下の極短パルスのレーザーなどの様々な量子ビームを使った研究を行っています。量子ビームの持つ特異な性質を利用することで、これまでではできなかった新しいナノプロセスや評価を実現することができます。例えば、次世代の微細デバイスに用いられるナノレベルの加工技術、生体材料の分子イメージング、さらには物質中の電子応答や格子振動などの超高速で起こる物理現象の観測もできます。



様々な量子ビームを用いた研究・評価装置

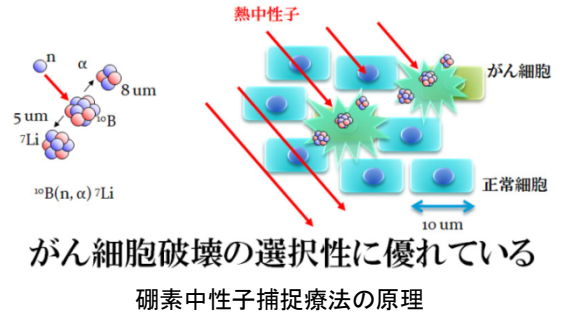
# (3-2) 粒子線医学物理学

～硼素中性子捕捉療法の高度化のために～

教授：田中浩基 准教授：櫻井良憲 助教：高田卓志

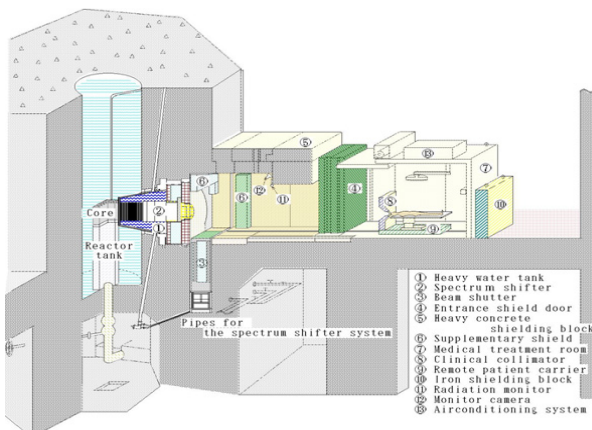
## ■ 医学物理学と BNCT

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・工学の総称です。重要な使命は「放射線治療法の高度化の促進」と「品質保証」です。がん細胞を選択的に破壊できる特徴を持つ硼素中性子捕捉療法(BNCT)に重点を置き、医学物理学に関する研究に取り組んでいます。

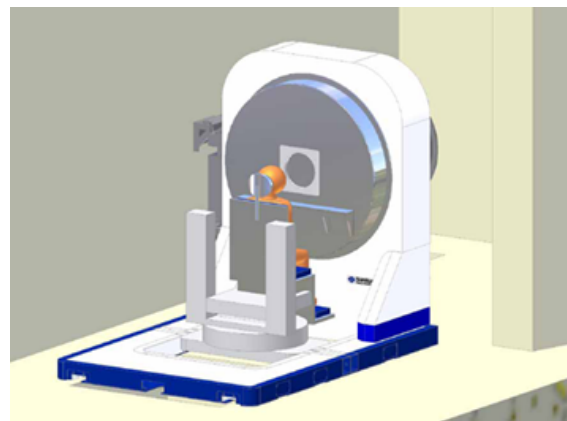


## ■ 照射システムに関する研究

原子炉および粒子線加速器を利用した照射システムについて研究しています。成果として「京都大学研究炉(KUR)重水設備」の改造および「サイクロトロンベース熱外中性子源(C-BENS)」の開発(住友重機械工業・ステラファーマと共同開発。2020年3月に医療機器として承認)があります。



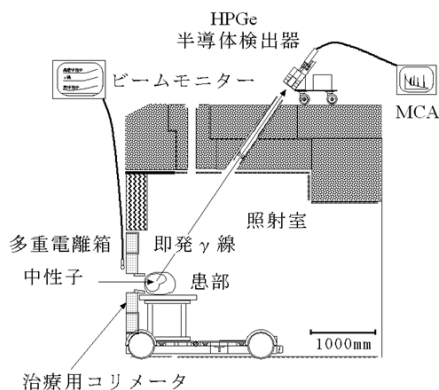
原子炉を利用した照射システム(KUR 重水設備)



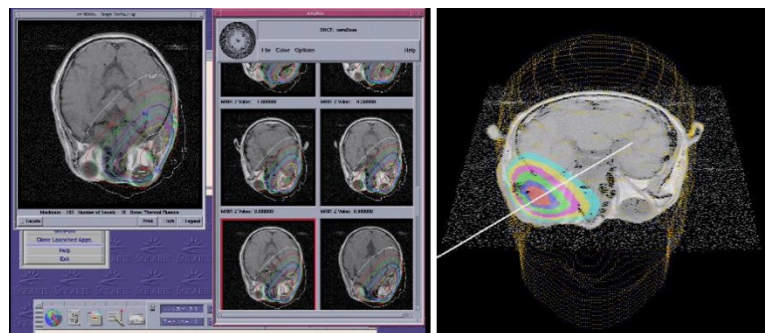
粒子線加速器を利用した照射システム(C-BENS)

## ■ 線量評価に関する研究

他の放射線治療と同様に、BNCTでも、照射システムの特長評価時、品質保証/品質管理(QA/QC)時、患者への治療照射時、などの各フェーズにおいて適正な線量評価が必須です。特に治療時における簡便・低労力で3Dかつリアルタイムの線量評価を究極の目標として、様々な評価手法を研究しています。



線量評価統合システム



BNCT 時の線量分布評価

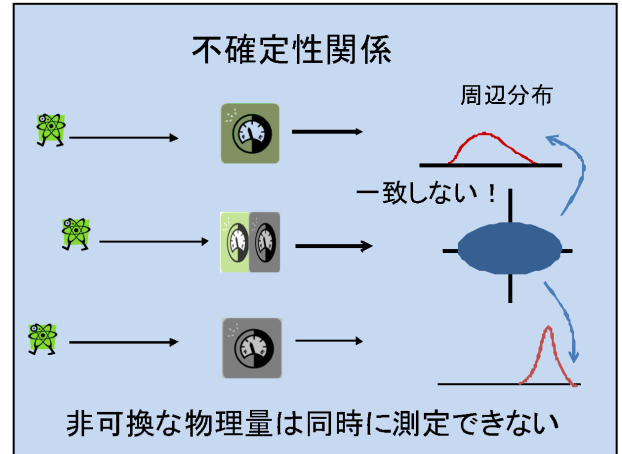
# (4-1) 量子物理学

～ 量子の普遍的な性質を探求し、「量子性」を操作して利用する ～

教授：宮寺隆之 助教：小暮兼三

## ■ 量子論の普遍的性質を探る

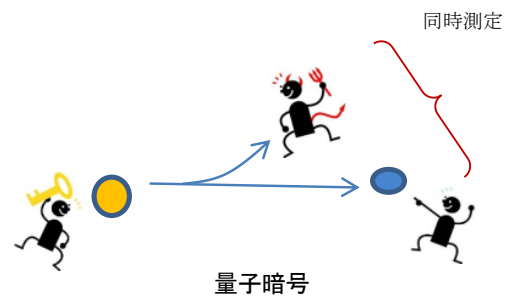
量子論では、位置と運動量は同時に正確に測定することはできません。これは不確定性関係と呼ばれており、位置と運動量に限らず一般に非可換な物理量について成り立ちます。その厳密な定式化や、この普遍的性質の背後に潜む構造、定量化などについて現在も活発に研究が行われています。このように量子論の基本原理解について数理的な手法を用いて研究を行っています。また、物理学を記述する広い枠組みの中で量子論の特徴付けを探ることで、その基礎付けを考えています。



物理量の非可換性をもたらす不確定性関係

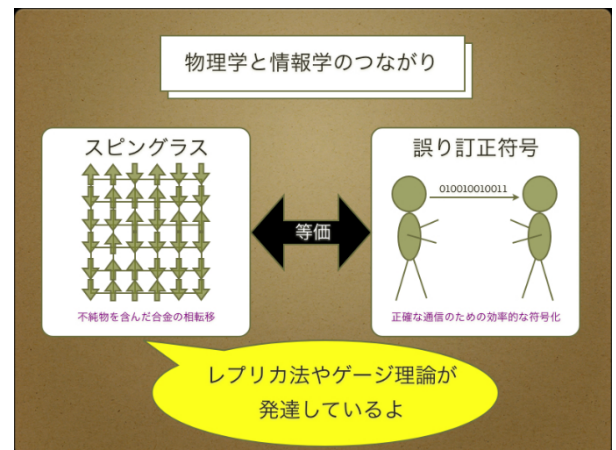
## ■ 量子情報理論

量子論の普遍的性質（「量子性」）を用いた情報処理過程を研究する分野を量子情報と呼んでいます。例えば送信者が量子状態に情報を載せられたとすると、受信者は不確定性関係のおかげで盗聴を検知することができます（量子暗号）。また、重ね合わせ状態を操作し、仮想的な並列計算を行うことにより、古典コンピュータでは時間がかかりすぎて解けない問題が、量子論に従うコンピュータではあっという間にとけてしまうことがわかっています（量子コンピュータ）。



## ■ スピングラスと情報理論

ある種の不純物を含む合金の磁性体には、スピングラス相と呼ばれる相が存在します。この相転移を調べるため物理学では、レプリカ法やゲージ理論が開発されてきました。近年、情報通信における効率的な誤り訂正符号化の問題とスピングラスモデルの基底状態を求める問題が等価であることが示され、物理学の手法が情報学に応用され始めています。この問題について、理論的な立場から研究しています。



理論物理学の手法が情報学に応用されようとしています



# (4-2) 中性子工学

～中性子をとおして新しい世界を拓く～

准教授：田崎誠司 助教：安部豊

## 物質科学や生命科学を拓く大強度中性子源

中性子は、約 90 年前に発見されてから原子力発電や物質構造解析などに大いに利用されてきました。中性子は電荷をもたないため、主に原子核によって散乱されます。中性子ビームを物質にあて、散乱された中性子の方向や速さを測定すれば、物質のミクロな(原子・分子の空間的配置や動き)を解明できます。今世紀になり、生命科学や新しい物質科学を研究するために、大強度で先端的な中性子ビームを創製するプロジェクト(大強度陽子加速器と先進中性子源の研究開発)が、日米欧で活発に進められています。

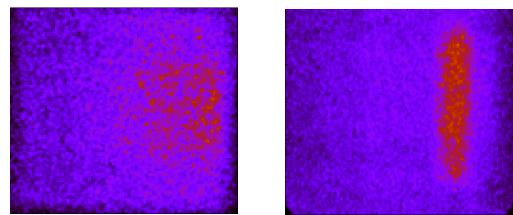


J-PARC センター Web サイトより引用  
大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の概略図

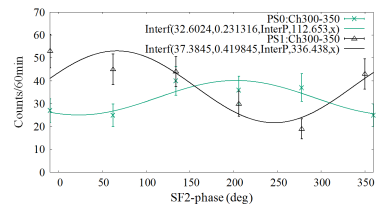
## 小型中性子源の新展開

さらに近年、大強度中性子発生施設に加え、陽子加速器を利用したコンパクトな中性子源の利用により、中性子利用のすそ野を広げ、より広範囲の応用分野に適用しようとする研究が進んでいます。

本研究室では、理学部の小型中性子源を利用し、設置する装置にあわせた減速材形状・材質の効率化の研究を行っています。例えば、幅が細くとも強いビームがほしい場合、減速材に細い孔をあけることでそのようなビームが得られます。さらにそのビームを用いて、透過実験、スピン干渉実験、回折実験等への応用についても研究しています。



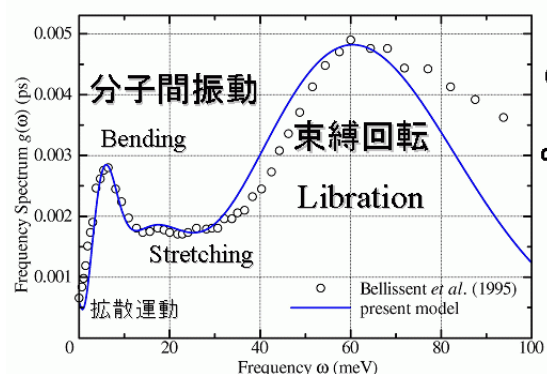
減速材表面の中性子分布。左が平板ポリエチレン、右が細長い孔のあいたポリエチレン。孔からは中性子が多く放出される。



中性子スピン干渉の例。経路途中の磁場の有無で干渉縞の位相が変わる。

## 低エネルギー中性子の高輝度生成と減速材の中性子散乱断面積解析

新しい中性子散乱研究を拓くには、核反応で発生した高エネルギー中性子を効率的に減速させ、大強度の低エネルギー中性子ビームを得る必要があります。そのための減速材として、液体水素や水などの中性子散乱断面積を解析したり、中性子ビーム強度やパルス形状を最適にする冷中性子源の形状を中性子輸送シミュレーションで調べたりしています。



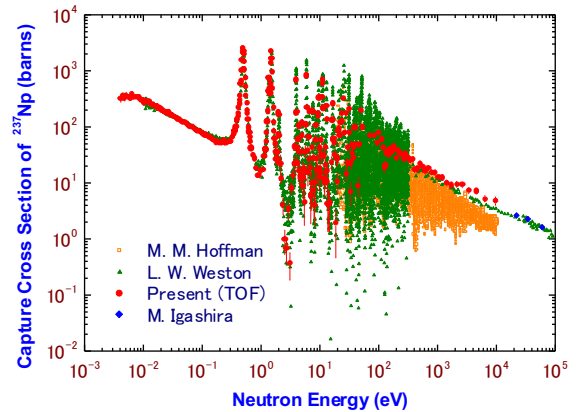
## (4-3) 中性子源工学

～ ミクロからマクロまで、基礎から応用まで、加速器から原子炉まで ～

教授：堀順一 准教授：石禎浩、高橋俊晴、山本俊弘、  
助教：上杉智教、栗山靖敏、沈秀中、寺田和司

### ■ 中性子の核反応断面積の測定・評価

原子炉等における中性子の振る舞いを評価するために必要な物質と中性子の相互作用に関するデータ（核反応断面積）の測定を原子炉実験所の電子線型加速器や原子力機構の J-PARC などの実験装置を用いて行っています。この研究では、反応する中性子のエネルギーを精度良く決めるために、その速度を測定してエネルギーに換算する飛行時間分析法と呼ぶ方法を用います。マイナーアクチニドや長寿命半減期を持つ核分裂生成物など、革新型原子炉の開発や放射性廃棄物等の処理処分技術の開発に必要な核種の反応断面積の測定を行なうとともに、精度向上のための手法開発を行っています。



反応断面積の測定例。マイナーアクチニド核種といわれる Np-237 について、その中性子捕獲断面積の新しい測定結果を示している(Present(TOF))。

### ■ FFAG 加速器を中心とした加速器開発およびその応用に関する基礎研究

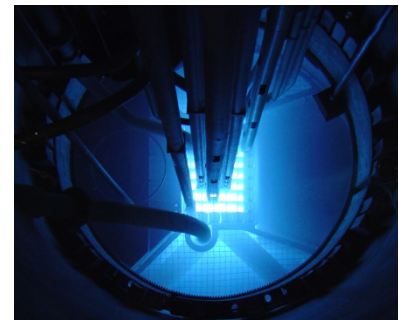
加速器駆動未臨界システム(ADS)、強力中性子源等に用いられる FFAG 加速器の開発とその応用について研究を行っています。なかでも FFAG 加速器における非線形ビーム力学、イオン化ビーム冷却法などの加速器物理学に関する研究開発を進めています。ADS とは、加速器からの高エネルギー陽子を使ってパルス状の中性子を発生させ、それを未臨界状態の原子炉に入射して、大量のエネルギーや中性子を利用できるようにするものです。現在、私達は、FFAG 加速器からのビームを用いた基礎実験を行い ADS の実現のために、FFAG の開発を進めています。



京大 FFAG 陽子加速器複合系：負水素イオン線形加速器と FFAG シンクロトロンを用いて陽子ビームを 150MeV まで加速し、隣接する臨界集合体にビームを導入する。

### ■ 原子力施設の安全性研究

原子力施設・設備を安全に運転・管理するための研究として、原子炉の核・熱特性に関する研究、核燃料の臨界安全性に関する研究を進めています。原子炉の核・熱特性研究は、核特性解析手法の高度化・精度向上を目的として、研究用原子炉 KUR の臨界性、反応度特性、燃焼特性等の測定・評価を行っている他、コールド試験装置による熱水力挙動に関する研究や次世代炉燃料の健全性評価等に取り組んでいます。また、核燃料の臨界安全性の研究では、モンテカルロコードによる未臨界体系のシミュレーション技術の開発や臨界事故解析手法の開発を行っています。



運転中の KUR 炉心。チェレンコフ光と呼ばれる原子核反応特有の青い光を見ることができます。

## (4-4) 中性子応用光学

～中性子光学デバイスを駆使した低速中性子の高度利用～

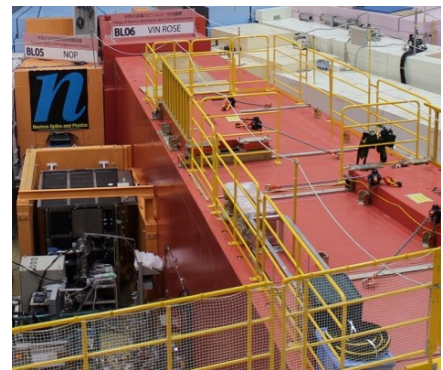
教授：日野正裕 助教：中村秀仁

### ■ 中性子？

物質を構成する原子は原子核と電子で構成されています。水素より大きな原子の原子核は陽子と中性子で出来ており、中性子は皆さんの体をはじめ、一般的な物質の重さの半分近くは中性子です。ただ、原子核の中に束縛されていない自由な中性子は約 15 分の寿命で崩壊し、様々な面白い性質を見せてくれます。中性子寿命は私達の宇宙の成り立ちに関する重要なパラメータですし、電氣的に中性で質量を持つ中性子は重力研究でも重要な研究対象です。そして物質の内部構造（原子やその集団の並び方）を調べる大変優れたプローブでもあります。

### ■ 中性子ミラー？

電氣的に中性な中性子ビームを制御（曲げる）ことは大変難しいです。しかし中性子の速度が遅くなれば「波」としての性質が顕著になります。これは量子力学という学問体系で記述できますが、この波の性質を活かすと、ニッケルとチタン等の薄膜を交互に精密に積層することで、中性子を反射できるミラー（鏡）が出来ます。私達は世界最高レベルの中性子ミラー開発技術を持ち、量子力学の基礎から分光器開発まで中性子光学を活かした研究を展開しています。



利用が開始された J-PARC MLF 中性子共鳴スピネコー分光器群 (VIN ROSE)

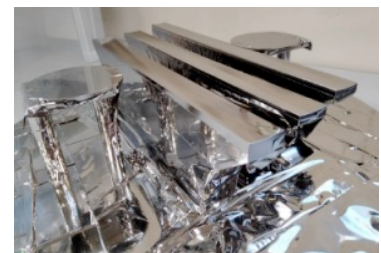
### ■ ロゼワイン？～世界最高の中性子共鳴スピネコー分光器実現を目指して～

中性子ミラーを用いてスピードの遅い中性子ビームを取り出し、スピンという物理量を精密に制御することで、今までどの装置でも見えなかった物質の時間—空間領域が見える装置：中性子共鳴スピネコー分光器 (VIN ROSE) を世界最強のパルス中性子源を持つ茨城県東海村にある J-PARC の物質生命科学施設(MLF)で高エネルギー加速器研究機構(KEK)のスタッフと協力して開発しています。

VIN ROSE：フランス語でロゼワインの意味です。時間が経過して熟成することにより価値を上げ、研究者たちが楽しんで研究が行えるようにと願って、当研究室がこの装置の命名をしました。

### ■ 中性子イメージング？量子ビーム検出？新たな研究用原子炉？

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、中性子の位相に注目したイメージング手法は、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となります。中性子利用のさらなる発展、よりよい未来を目指して、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発展に向けて精力的に活動しています。また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ます。



開発した回転楕円体中性子集光スーパーミラー