

工学部 理工学

原子核工学コース

<https://www.s-es.t.kyoto-u.ac.jp/nuc/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、学部では理工学・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わ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 ～

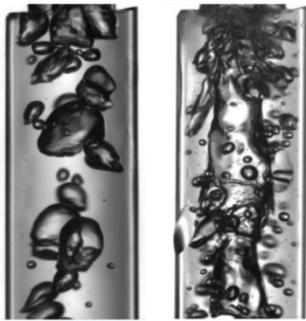
教授：横峯健彦 准教授：帆足英二 講師：成田絵美

■ 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。



気液二相流

50 μm の微粒子を含んだ固気液三相流

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)

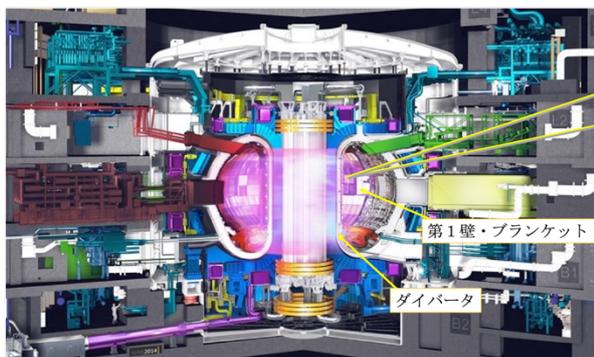


混相流伝熱実験ループ (上) と 混相流流動可視化実験ループ (右)



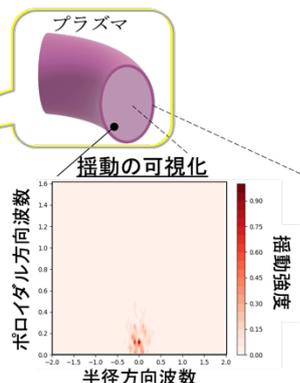
■ 機械学習を用いた核融合プラズマの理解・予測

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。



第1壁・ブランケット

ダイバータ



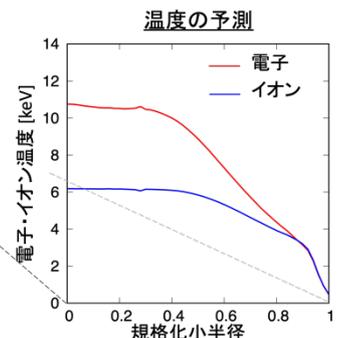
プラズマ

揺動の可視化

ポロイダル方向波数

半径方向波数

揺動強度



温度の予測

電子

イオン

電子・イオン温度 [keV]

規格化小半径

(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。

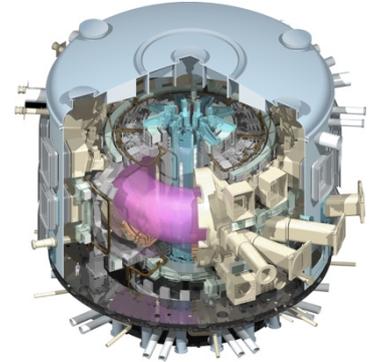


図1：サン・ポール・レ・デュランス（フランス）に建設中の国際熱核融合実験炉（ITER）

■ 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、トー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。

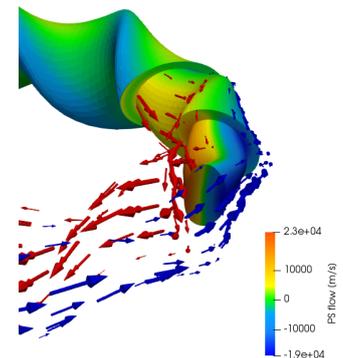


図2：電磁流体平衡における Pfirsch-Schlüter 流

■ 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 10 kHz 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。

■ データ駆動科学による核融合プラズマの解析・制御

近年、核融合の分野でもデータ駆動科学の活用が進められて来ています。本グループでも機械学習を用いた輸送モデルの構築やデータ同化手法を用いた解析・制御システムの開発など、核融合研究へのデータ駆動科学の応用を進めています。

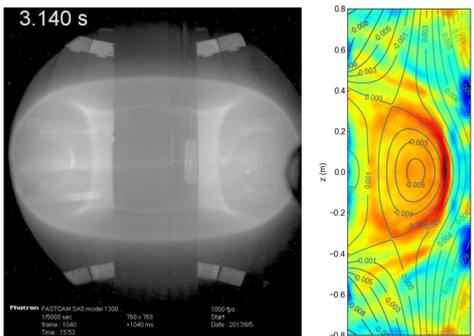


図3：可視光トモグラフィーによる電磁流体平衡の推定

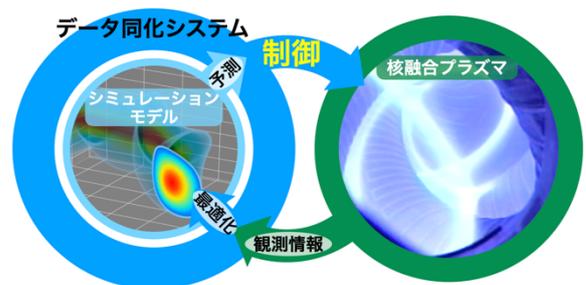


図4：データ同化を活用したデジタルツイン制御

(2-1) 燃材料工学

～ 放射性廃棄物の安全な処理処分の確立を目指して～

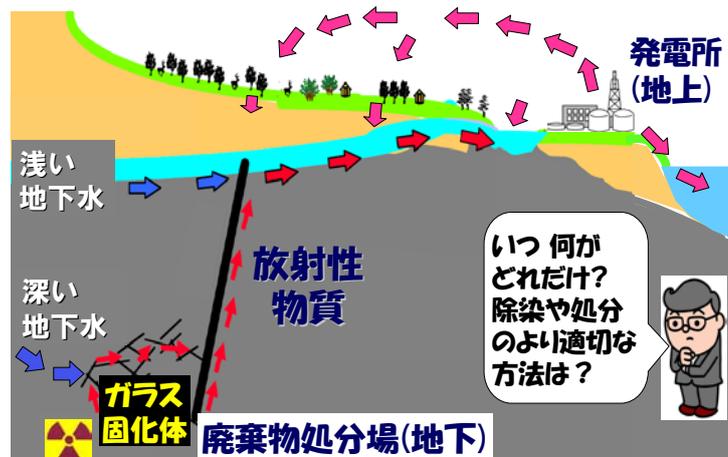
教授：高木郁二、佐々木隆之 准教授：小林大志

■ キーワードは放射性廃棄物、廃炉工学、物理化学

使用済み燃料から発生する高レベル放射性廃棄物や福島第一原発事故で生じた燃料デブリの安全かつ合理的な処理・処分には、廃棄物や燃料デブリの性状およびそれらに含まれる放射性物質の環境中での移行挙動の理解が欠かせません。私たちの研究室では、化学平衡や反応速度など物理化学的な視点から、様々な核種の振る舞いを明らかにする研究を行っています。

■ 福島廃炉への貢献

福島事故によって発生した燃料デブリの取り出し、処分に向けては、燃料デブリの物性や挙動を明らかにすることが不可欠です。そこで、ウランを含む模擬デブリを高温合成し、最先端の物性評価を行うとともに、地下水との反応を調べています。これにより、燃料デブリの処分を見据えた合理的な処理法の提案、数万年にわたるより安全で信頼性の高い処分方策を確立できると考えています。



種々の放射性物質を取り巻く環境

■ 高レベル放射性廃棄物の処分

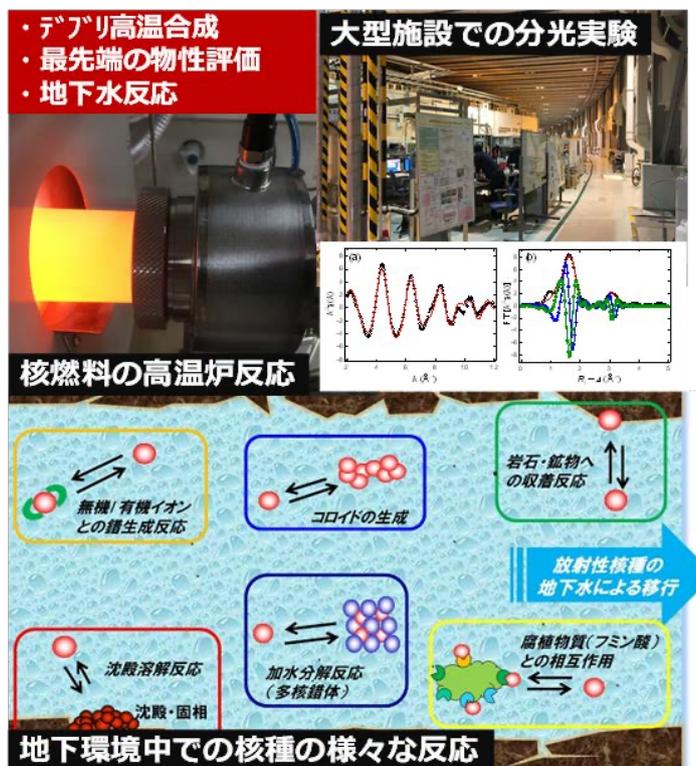
高レベル放射性廃棄物を酸素の無い地下深くに埋設する地層処分では、地下での放射性物質の非常に遅い状態変化を予測し、遠い将来の人間や環境の被ばく線量を見積もる必要があります。複雑な地下水場での核種挙動を熱力学的観点で記述するため、特殊な地下環境を模擬するラボや深地層の研究所で実験と解析を積み重ねています。

■ アクチノイド固体・液体の多様な分光研究

上記の知見をより確かなものにするには、模擬デブリや廃棄物を構成する固体・液体のミクロスコピックな化学構造やその状態変化を明らかにすることが重要です。SPring-8 や JRR-3 など学外大型施設で最先端の分光装置を活用した分析実験を推進し、核種の自然界での複雑な振る舞いのモデル化を目指しています。

■ 医療分野への挑戦

治療や診断に放射性物質を活用した最先端の医療分野では、核種を含む薬剤の安定性確保や、その生体標的への有効性の評価が必要です。本研究室では基礎的な観点から、モデル物質の開発やその生体内での安定性評価等に挑戦しています。



(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

■ 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癒した例が 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、電子の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。

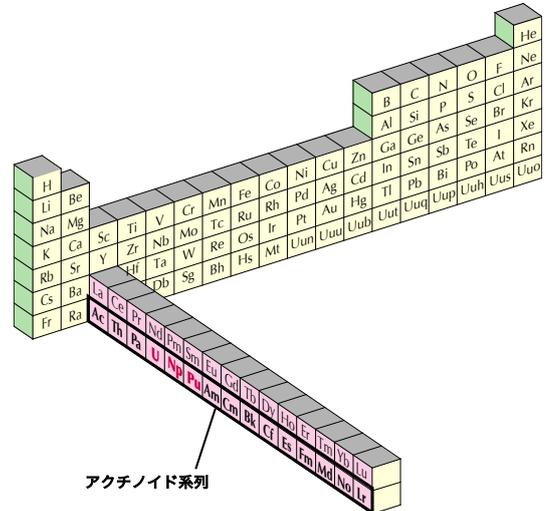


図 1 アクチノイド系列のウランより重い人工元素は発見されて 70 余年の謎の多い元素群



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+}

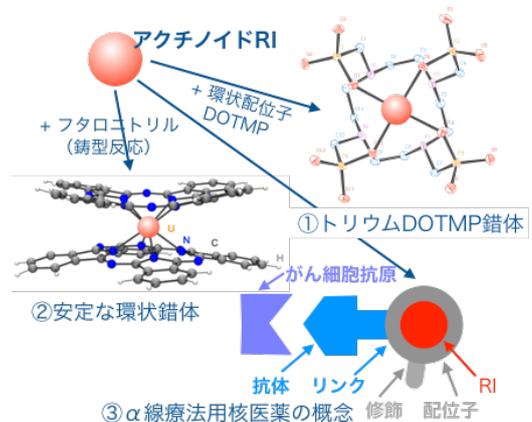


図 3 アルファ放射体としてのアクチノイド錯体の核医薬への利用や、安定化の検討

(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，間嶋拓也 准教授：土田秀次 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」と呼ばれます。これらを物質（固体・液体・気体・プラズマ）に照射すると、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、さまざまな量子現象が生じ、電子の状態は全く異なるものへと変化します。さらに、量子ビームによって形成される特異な衝突反応場では、通常では考えられない、あるいは生成できない構造をもつ新奇な粒子や物質が生まれることもあります。このように、量子ビームは原子や分子に直接作用し、物質のナノスケールレベルでの状態を変えるため、我々が知覚するマクロスケールの性質に変化をもたらしたり、想像を超えた新たな性質・機能を引き出したりすることが可能となります。

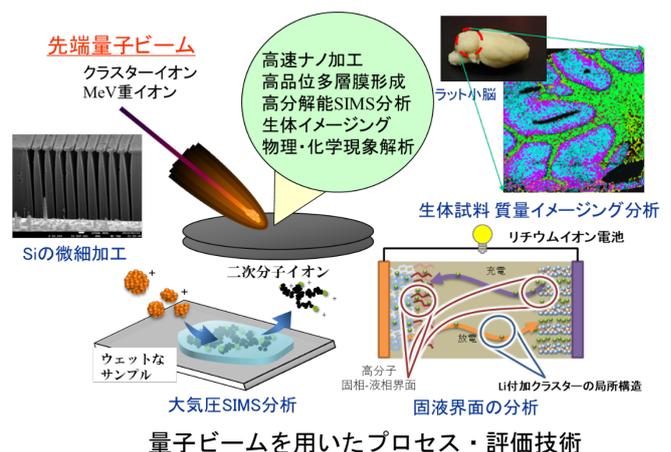
当研究室では、精密に制御した量子ビームをあらゆる物質に衝突させ、原子・分子レベルでの反応の基礎的な解明から、生命科学・宇宙科学・量子技術などへの応用までを見据えた研究を行っています。なかでも、加速器からの重イオンビームを用いて、液体中における原子・分子の衝突反応を詳細に調べる研究を世界に先駆けて進めています。この研究では、液体中の生体分子に対して、イオンビームからのエネルギー付与によって引き起こされる特異な分子損傷ダイナミクスを明らかにすることができ、放射線によるがん治療などにおける物理学的な基礎データを提供しています。また、極低温まで冷却した分子イオンに量子ビームを照射する新たな実験手法の開発にも取り組んでおり、これにより宇宙空間における分子の生成や進化の過程を、地上で再現・解明することが可能となっています。



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、さらにはデバイス内部の材料界面の分析もできます。



量子ビームを用いたプロセス・評価技術

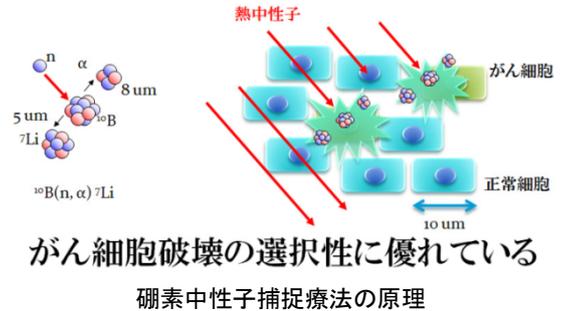
(3-2) 粒子線医学物理学

～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、松林錦

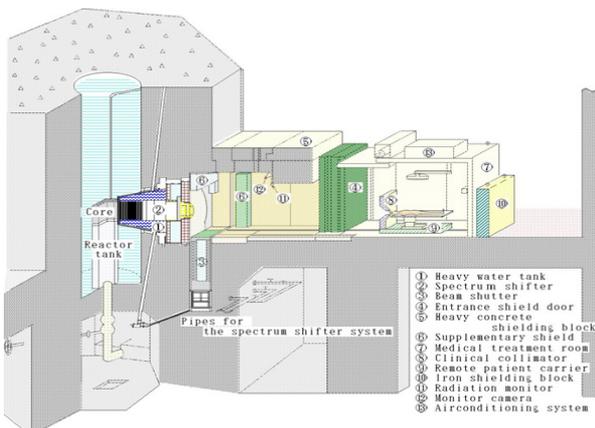
■ 医学物理学と BNCT

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。

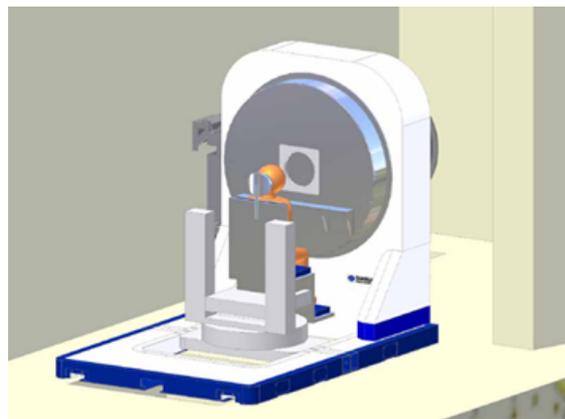


■ 照射システムに関する研究

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。



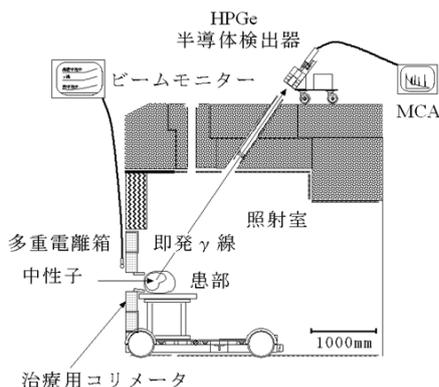
原子炉を利用した照射システム(KUR 重水設備)



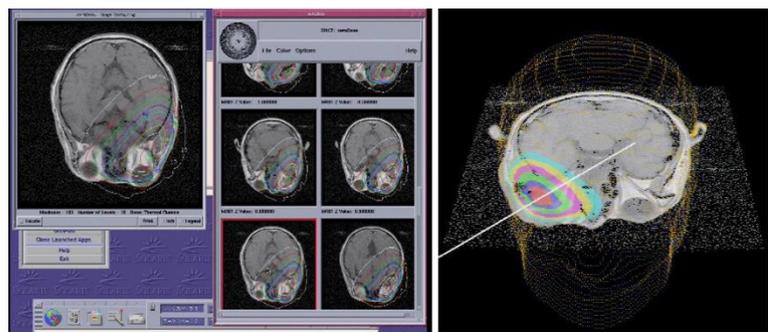
粒子線加速器を利用した照射システム(C-BENS)

■ 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用です。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

～ ニューラルネットワークによる自然科学の理解 ～

助教：小暮兼三

■ ニューラルネットワークとは

ニューラルネットワーク(NN)は、脳をモデルとした人工知能です。脳細胞が電気刺激を次の脳細胞へ伝える機構を、計算機上で再現しています。その中で、脳細胞は活性化関数という簡単な関数で近似し、活性化関数を連続して何段にもつなげた合成関数を作ることで、脳全体のモデルとしています。

近年、NNは画像認識・生成、音声認識・生成、文書認識・生成など多くの分野で実用化されています。特に、生成能力が急速に進化してきています。

また、NNは物理学における関数の近似法である「変分法」のパラメータが非常に大きいものだと見る事が出来ます。

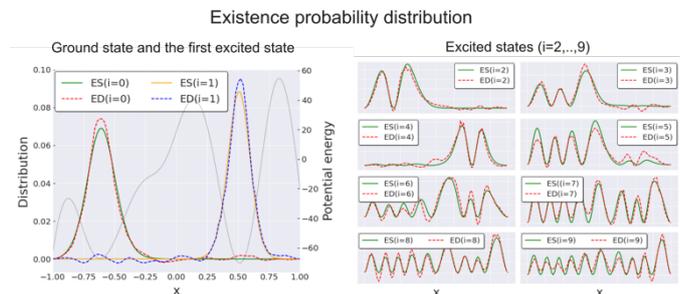


DALL-E が生成した「自然科学を理解するニューラルネットワークのイメージ図」

■ NNによる自然科学の理解

NNは、実用的には成功をおさめつつありますが、NNの物事の理解は非常に多くのパラメータに埋め込まれているため、NNがどのように物事を理解しているのかを知るのには、簡単ではありません。

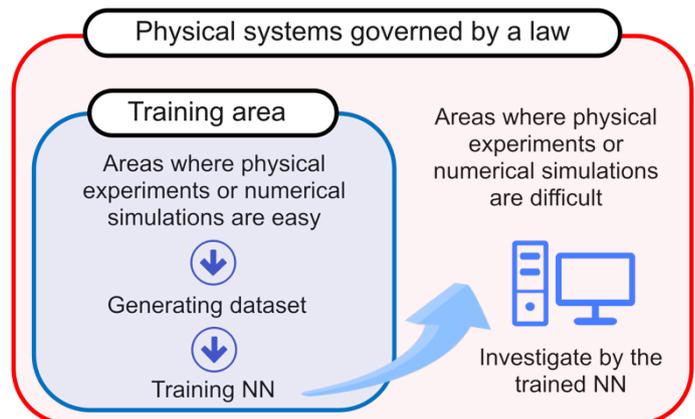
当研究室では、1次元量子力学のポテンシャルを入力とし、エネルギースペクトルを出力としてNNを学習しました。この学習済みのNNに対して、入力による微分を計算することにより、学習中に与えられていない波動関数の大きさをすでに知っていたことを示しました。



入力データとしても出力データとしても与えていない物理量をNNは学習の過程で学んでいた

■ NNと自然科学のこれから

NNの自然科学への応用もすでに始まり、加速していますが、実用分野に比べるとまだまだこれからという所です。自然科学の分野においては、理解に重点が置かれるため、NNからどのように理解を引き出すのかが一つの課題だと考え、研究を進めています。



データ取得可能領域で学習して、仮想実験を行える

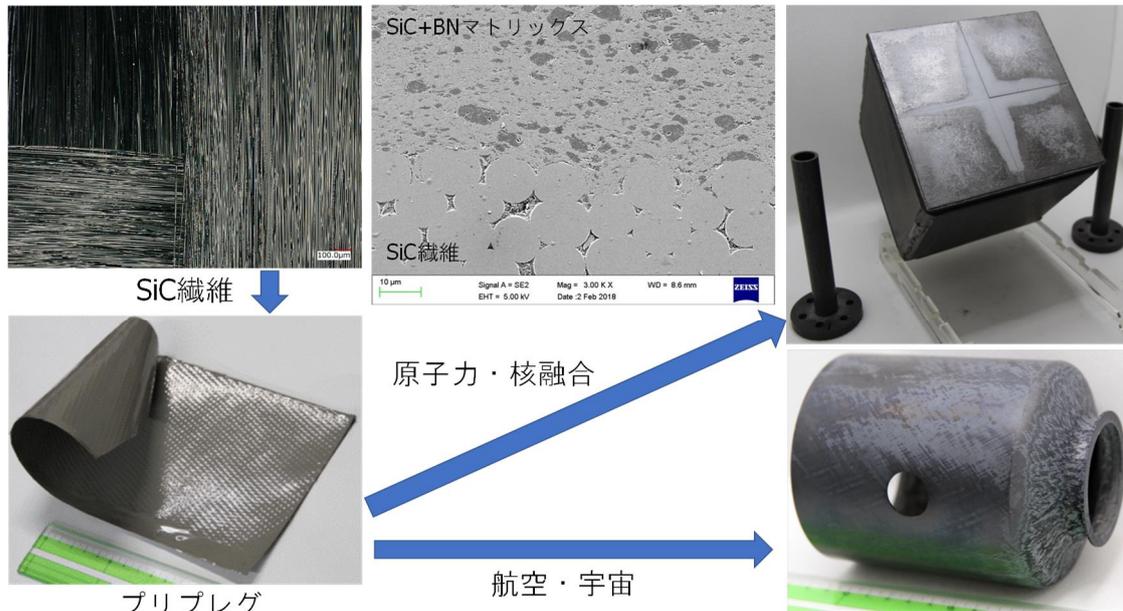
(4-2) 中性子工学

～中性子と物質の相互作用の理解に基づく材料・要素技術開発と応用～

教授：檜木達也 准教授：田崎誠司

中性子に耐える材料・要素技術の開発

中性子は、原子との衝突により欠陥生成などを引き起こし、材料特性に大きな影響を与えます。米国の研究炉（HFIR 炉）などにより、中性子と物質の相互作用の理解に基づき、中性子照射下においても強度の劣化しない、10 μm 径程の炭化珪素繊維で強化した新たな材料、要素技術開発を行っています。原子力・核融合への応用をはじめ、優れた耐環境特性から航空・宇宙への展開も期待されています。



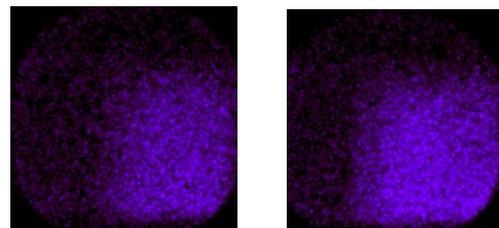
炭化珪素繊維及び本分野で開発した炭化珪素繊維強化複合材料

小型中性子源の新展開

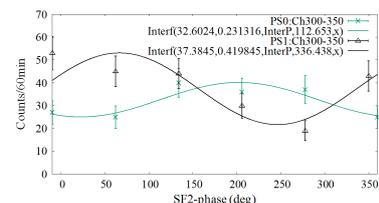
近年、大強度中性子発生施設に加え、陽子加速器を利用したコンパクトな中性子源の利用により、中性子利用のすそ野を広げ、より広範囲の応用分野に適用しようとする研究が進んでいます。

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、数 meV と

いう低いエネルギーの中性子強度は、冷やした減速材の前に前置減速材を置いた方が強くなります。さらにその中性子を用いた透過実験、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。また、これらの研究結果を基礎として、日本原子力研究開発機構の JRR-3 などのより大型の中性子源への研究展開も行っています。



減速材表面の冷中性子分布。左がポリエチレン前置減速材のない場合、右がある場合。前置減速材がある方が冷中性子強度が強い。



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。

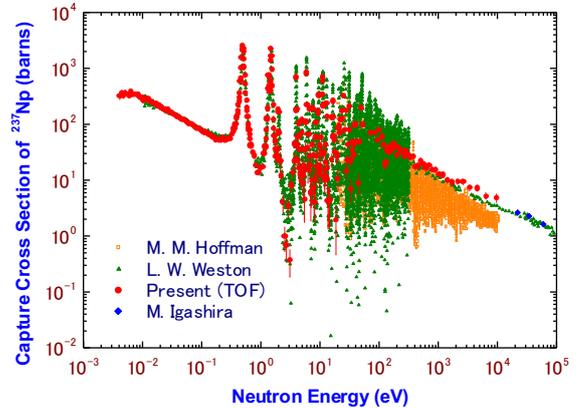
(4-3) 中性子源工学

～ 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

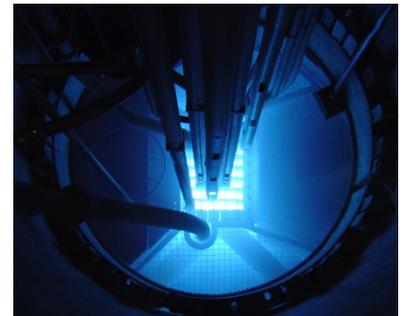
加速器駆動未臨界システム(ADS)、強力中性子源等に用いられる FFAG 加速器の開発とその応用について研究を行っています。なかでも FFAG 加速器における非線形ビーム力学、イオン化ビーム冷却法などの加速器物理学に関する研究開発を進めています。ADS とは、加速器からの高エネルギー陽子を使ってパルス状の中性子を発生させ、それを未臨界状態の原子炉に入射して、大量のエネルギーや中性子を利用できるようにするものです。現在、私達は、FFAG 加速器からのビームを用いた基礎実験を行い ADS の実現のために、FFAG の開発を進めています。



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～

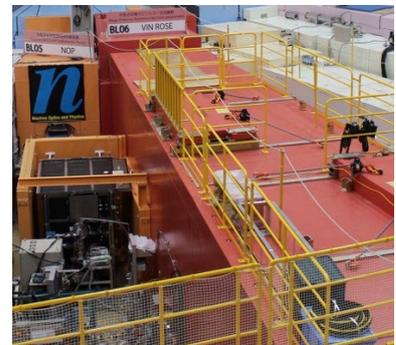
教授：日野正裕 助教：中村秀仁、樋口嵩

■ 中性子？超冷中性子？

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、物質の重さの半分近くは中性子と言うこともできます。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 分の寿命で崩壊します。この自由な中性子の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、質量を持つ中性子は重力研究でも重要な研究対象です。電氣的に中性な中性子ですが、もしプラスとマイナス電荷がほんの少しだけずれて存在(電気双極子)していれば、新粒子の発見に繋がります。これはカナダ TRIUMF で非常に速度の遅い超冷中性子をつくることで実験を行っています。また我々は中性子自身を研究すると共に、新たな中性子利用による発見を目指しています。

■ 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、物質内部の水の振る舞いや金属容器内の構造を 3 次的に見ることが可能です。さらに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