

名古屋大学工学研究科 総合エネルギー工学専攻  
エネルギーシステム工学講座

## 原子核計測工学グループ

瓜谷章(教授)、渡辺賢一(准教授)、吉橋幸子(准教授)、山崎淳(助教)  
博士後期課程2名、博士前期課程10名、学部4名(2018年度の実績)

---

### 研究分野と研究方針

#### 【概要】

放射線計測、放射線利用を通して人々の健康と、安全、安心、豊かな暮らしに貢献すべく、研究を進めている。

我が国の課題の一つは、死因が第一位となっているがん、特に難治性がんの治療法の確立である。ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)のための加速器中性子源の開発や、重粒子線治療における体内のリアルタイム線量モニターの開発を通して、この課題解決への貢献を目指している。

各種放射線検出器の開発や、X線後方散乱イメージング、パルス中性子の利用法の開発などを通して、放射線の工業利用や、橋梁などのインフラの検査手法の確立に貢献し、もって人々の安全、安心、豊かな暮らしに貢献すべく研究を進めている。

#### 【キーワード】

放射線、レーザー、中性子、放射線計測、中性子スペクトロメータ、核融合中性子計測、シンチレータ、比例計数管、TLD、OSL、光ファイバー、臭化タリウム半導体検出器、ブラッグエッジ解析、中性子イメージング、後方散乱X線イメージング、加速器、産業利用、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)、重粒子線治療

#### 【主な研究と内容】

##### (A) BNCT 加速器中性子源

ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy: BNCT)は中性子を用いた放射線治療であるが、従来、その中性子源として原子炉が用いられてきた。BNCTの発展には、原子炉に比べ管理が容易な加速器中性子源が求められており、既にいくつかの施設が稼働し始めている。当グループでは、(1)陽子ビームを計測するためのワイヤ型プロファイルモニターの開発、(2)中性子を得るためのリチウムターゲットの開発、(3)中性子計測、(4)細胞試験、を実施している。

##### (B) 新規中性子シンチレータ・中性子検出器

これまで中性子検出器として標準的に用いられてきた $^3\text{He}$ 検出器は、その原料となる $^3\text{He}$ ガスの供給量不足により価格が高騰し、入手も困難となってきている。そこで、これに代わる中性子用シンチレータベースの新しい中性子検出器の開発を進めている。特に、 $\text{Eu:LiCaAlF}_6$ (以下、 $\text{Eu:LiCAF}$ )という比較的新しい中性子用シンチレータを小片化し、透明樹脂に分散させた透明樹脂型(Transparent Rubber Sheet

Type:TRUST) Eu:LiCAF は柔軟性を持ち、種々の検出器形状に対応可能な新しい中性子検出器材料となっている。これを用い、新型ボナーボール中性子スペクトロメータ、小型大立体角中性子回折装置用検出器といった新しい中性子検出器の開発を進めている。

#### (C)エネルギー分解中性子イメージング法

J-PARC 等の大強度加速器中性子源施設では、パルス中性子源を用いた飛行時間分析法により中性子のエネルギー情報を用いた各種分析が可能となっている。飛行時間法に基づくエネルギー分解中性子イメージングでは、中性子ブラッグエッジ解析法と組み合わせることで、材料中のひずみ、配向といった結晶組織情報の二次元的な分布を、一度の測定で評価可能である。これらの解析法の更なる性能向上を目指している。

#### (D)臭化タリウム半導体検出器

臭化タリウム半導体検出器は、高純度 Ge 半導体検出器に代わる室温動作可能、高効率かつ高エネルギー分解能のガンマ線検出器として期待を集めている。これまで臭化タリウム半導体検出器の開発を積極的に進めてきた東北大の人見准教授らと共同で、臭化タリウム半導体検出器の大型化、実用化に向けた検討を進めている。

#### (E)放射線治療中の患者体内の線量計測に向けた小型線量計

放射線治療の照射法に関する技術の発展は近年目覚ましく、高精細な線量分布を形成することが可能となっている。このことは、ちょっとした照射位置のずれが大きな誤照射・医療事故に繋がりがかねないということを意味し、治療中の患者の体内での線量測定が望まれ始めている。線量計を体内に挿入することは、患者の負担増につながるため、光ファイバベースの超小型線量計の開発を進めている。

#### (F)後方散乱 X 線イメージング

橋梁、トンネルといった社会インフラの老朽化に伴い、これらの効率的な保守管理技術の発展が求められている。X 線を用いた非破壊検査は、これらの検査技術の候補の一つではあるが、通常の透過撮像法では、被写体を X 線源と検出器で挟み込む必要があり、大型構造物の検査には不向きである。そこで、片側からの検査が可能な、後方散乱 X 線イメージング技術の開発に取り組んでいる。

#### (G) 核融合中性子工学

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (Large Helical Device: LHD) では、2018 年に重水素プラズマ実験の 2nd キャンペーンが実施された。DD 反応によって発生する中性子は核融合反応の直接的な証拠となることから、中性子総発生量の計測は核融合出力を評価することに繋がる。また、核融合反応によって発生する 2.45MeV の中性子は、周辺の構造材料と核反応をおこし、LHD 本体のみならず、コンクリート壁や周辺機器を放射化させる。そのため、将来の核融合炉の廃止措置や核融合炉における作業環境の向上のため放射化量の評価は重要である。そこで当グループでは、放射化法を用いた中性子総発生量の評価、スペクトル計測を行い、構造材料の放射化量の評価を行っている。また、LHD をモデル化し中性子輸送モンテカルロシミュレーションコード MCNP による計算を行い、測定結果との比較、評価を行っている。

## 2018年度の研究・教育の概要

### 【BNCT 加速器中性子源】

(1) ワイヤ型のビームプロファイルモニタは大電流(1mA以上)の陽子ビーム照射によってワイヤが切断(溶融)されることが問題となっていた。ワイヤ回転式の小型ビームモニタを開発および製作し、加速器からの陽子ビーム(2.8MeV、2mA)のプロファイルの計測に成功した。また、複数のワイヤを用いることで、ビームの位置評価も可能にした。さらに熱電子および二次電子の影響を評価し、ビーム電流の測定も可能にした。(2) 小型リチウムターゲットを製作し、2.8MeV、1mAの陽子ビーム照射により中性子を発生させることに成功した。陽子ビーム照射による熱除去性能について実験と熱計算から評価した。(3) **Beam Shaping Assembly** をシミュレーション計算に基づき製作した。金箔による放射化法および光ファイバー型中性子検出器を用いた中性子計測を行い、おおよそシミュレーション通りの結果が得られた。さらに岡山大学との共同による細胞を用いた **BNCT** 評価実験に成功した。

### 【新規中性子シンチレータ・中性子検出器】

新規中性子シンチレータとして、小型大立体角中性子回折装置用検出器、**TRUST Eu:LiCAF** を用いた二次元検出器、光ファイバー型中性子検出器の開発を進めた。小型大立体角中性子回折装置用検出器については、小型加速器中性子源施設である京都大学 **KUANS** において粉末中性子回折実験を実施し、回折ピークを確認した。**TRUST Eu:LiCAF** を用いた二次元検出器では、京都大学原子炉において中性子イメージの取得を行い、光ファイバー型中性子検出器に関しては、信号処理法としてデジタル信号処理法を採用し、ダイナミックレンジの拡大に成功した。

### 【中性子ブラッグエッジ解析コードの改良】

エネルギー分解中性子イメージング法の一つである中性子ブラッグエッジ解析用のソフトウェアは、非常に複雑な非線形最小二乗フィッティングを行っており、その収束の不安定さが問題となっていた。そこで、ランダムサンプリング法を採用し、収束の安定性を改善することで、統計の悪いデータに対するフィッティングエラー率を減少することができた。

### 【小型線量計の前立腺がん炭素線治療中の線量測定への適用性評価】

炭素線治療では、前立腺がん治療時に前立腺内にある尿道を避けて照射することが検討されている。その際の尿道中の線量測定を開発中の光ファイバー型小型線量計で実施するための検討を進めた。治療中に逐次信号読み出しする方式と、治療の最後一度のみの読み出しで線量を評価する方式の二つが考えられるが、後者についての検討を進めた結果、一度の読み出しでは **S/N** を確保することが困難で、逐次読み出しが望ましいことがわかった。

### 【核融合中性子工学】

**DD** 反応によって発生する中性子スペクトルを計測するため、複数の種類の異なる放射化箔を用いた放射化法と中性子輸送モンテカルトシミュレーションコード **MCNP6** を用いた中性子発生量とエネルギースペクトルの算出を行った。放射化法による中性子計測の結果をとシンチレーションファイバ検出器に反映させることで、**DD** 反応に付随して起こる **DT** 中性子発生量の評価が可能になった。複数の種類の放射化箔とアンフォールディングコードを用いて重水素実験で発生する中性子スペクトルを評価した。シミュレ

ーション結果との間に多少の差異はあるが、概ねスペクトルを再現できた。LHD 構造材料の一つである SUS316U を重水素実験の期間中放射化させ、生成核種とその放射能の計測に成功した。また、放射化法を用いて LHD 本体室全体の中性子場の評価を行った。熱および熱外中性子の空間分布より、LHD 周辺に配置されたポリエチレンブロックが効果的に高速中性子を減速させていることを確認した。

#### 【本年度の研究成果発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	7	6	4	7
学生	26	10	2	0

## 本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

#### 【卒業論文】

- ・BNCT 場におけるガンマ線線量測定手法に関する検討
- ・波長分解型一次元光ファイバー放射線センサー基礎検討
- ・後方散乱 X 線検出器の高感度化に向けた検討
- ・大型ヘリカル装置本体室内における放射化物の形成量の実験的評価

#### 【修士論文】

- ・大電流陽子加速器における回転式ビームプロファイルモニタの製作と性能評価
- ・中性子ブラッグエッジ解析コード RITS におけるシングルエッジフィッティングの安定性の向上及び日本刀の結晶構造組織解析
- ・TRUST Eu:LiCAF を用いた位置敏感型中性子検出器の性能改善に向けた検討
- ・ヘリカル型核融合実験装置における放射化箔を用いた中性子場の評価
- ・BNCT 中性子場における中性子エネルギースペクトル評価に関する研究

## その他・特記事項

- ・第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 放射線分科会学生ポスター賞(応用物理学会放射線分科会)、D2 平田悠歩、受賞対象「光ファイバー型小型線量計の放射線治療時の線量測定に向けた検討」、平成 30 年 9 月 20 日
- ・The 14th International Workshop on Ionizing Radiation Monitoring SSD19 Award、M1 石川諒尚、受賞対象「Development of Optical Fiber-based Neutron Detector Using  $^6\text{Li}$  Scintillator」、2018 年 12 月 9 日
- ・9th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas、M2 田中智代、受賞対象「Measurement of neutron Spectrum using Activation Method in Deuterium Plasma Experiment at LHD」、2018 年 8 月 7 日

- 日本原子力学会フェロー賞 M2 田中智代、2019年3月21日
- 第66回応用物理学会春季学術講演会 放射線分科会学生ポスター賞(応用物理学会放射線分科会)、D2 平田悠歩、受賞対象「放射線治療中の患部周辺線量を評価するための放射線誘起蛍光体と光ファイバーを用いた小型線量計の開発」、平成31年3月11日