

原子核計測工学グループ

瓜谷章(教授)、吉橋幸子(教授)、山崎淳(助教)
博士後期課程3名、博士前期課程9名、学部5名(2022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、静電加速器を用いた中性子源の開発とBNCTの基礎研究として、(1)中性子を得るためのリチウムターゲットの開発、(2)中性子計測、(3)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 ^3He 検出器は、その原料となる ^3He 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、Eu:LiCaAlF₆(以下、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含め、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。

2022 年度の研究・教育の概要

【BNCT 用加速器型中性子源に関する研究】

当研究室では、ホウ素中性子捕捉療法 Boron Neutron Capture Therapy: BNCT のための加速器型中性子源の開発を行っている。ダイナミロン加速器からターゲットへ適切に陽子ビームを照射し、十分な中性子量を得るためには、ビーム情報をモニタリングすることが重要である。そこで、直径 2 mm の W ワイヤを鉛直下方向から上方向へ速度 204 rpm で 180° 回転させることで、陽子ビーム電流を取得する小型の「回転式ワイヤスキャナモニター (WSM)」を開発している。

ビーム計測システムの課題として、① 時間信号からビームプロファイルへの変換処理、及び② W ワイヤのビームによる耐熱性の評価が挙げられる。本研究ではこれらの課題を検討し、陽子ビーム計測システムの開発を行った。

また、陽子ビーム計測システムの開発と並行して、Li を Ti 箔と Cu 基板で封入した Li 封入型ターゲットの開発を進めている。本ターゲットは陽子線照射による熱負荷を、Cu 基板に設けた水路により除熱することが可能であるが、その際、各材料間の密着度が除熱性能に大きく関係する。

先行研究で金属間密着度には①Ti-Li 境界面にボイドを発生させないこと、②加熱することで生じる Li-Cu 合金が重要であると予想され、ボイド減少のためのガス出し等、いくつかの検討がなされた。しかしながら、Li 中の Cu の分布が明らかとなっておらず、Li 中の Cu によって除熱性能がどのように向上するかは分かっていない。

そこで、複数の元素分析法を用いて、Li 中の Cu 分布について多角的な考察をおこなった。さらに除熱性能評価やターゲットの品質評価のための手法として、アクティブサーモグラフィ法を検討した。

【加速器型中性子源における BNCT 用中性子ビーム整形装置の設計とビーム特性の評価】

核融合原型炉設計・建設のため、核融合炉材料の核融合中性子照射データを取得することを目的として先端核融合中性子源 (Advanced-fusion-neutron-source, A-FNS) の設計が量子科学技術研究開発機構六ヶ所研究所で行われている。A-FNS で得られる高強度の中性子は、核融合材料照射実験のみならず、産業・医療への利用も期待されている。医療応用の一つとしてホウ素中性子補足療法 (Boron neutron capture therapy: BNCT) への利用が検討されている。BNCT は、がんの放射線治療の一つであり、熱外中性子を患部に照射し、ホウ素の $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応を誘発することで治療を行う。A-FNS では D-Li 反応により中性子を生成するが、この核反応で生成する中性子は治療に必要な熱外中性子よりもエネルギーが高いため、中性子の減速が重要になってくる。そのため治療に適した中性子ビームを形成する中性子減速体系 (Beam Shaping Assembly: BSA) を構築する必要がある。BNCT に用いる中性子ビーム特性としては熱外中性子の強度に加え、治療時の余計な被ばくを低減するという観点から高速中性子、熱中性子、 γ 線の混入を減らすこと、ビームの直進性 (C/F) を高めることが求められ、IAEA による基準値が設定されている。本研究では粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を用いたモンテカルロシミュレーションにより A-FNS において BNCT の IAEA 基準を満足する BSA の設計を行うことで、A-FNS における BNCT の実現可能性について検討を行った。

【臭化タリウム検出器の電極構造に関する検討】

現在、室温動作可能で高いエネルギー分解能を有する化合物半導体検出器の開発が進められている。臭化タリウム半導体 (TlBr) 検出器はガンマ線スペクトロメータとして実用化が期待される化合物半導体検出器の一つである。TlBr 検出器は高い原子番号と密度を持つため、高エネルギーのガンマ線に対し

でも比較的高い感度を持つという利点がある。しかし、他の化合物半導体検出器と同様に TlBr 検出器は正孔の電荷輸送特性が十分でないため、高いエネルギー分解能を得るためには電極構造を工夫し、単極性電荷有感型検出器にする必要がある。

TlBr 半導体ではピクセル型の電極構造を持つ検出器や側面にシールド電極持つ Reversible Capacitive Frisch Grid 型検出器がよく製作されており、高いエネルギー分解能が得られている。しかし、それらの検出器は有感領域が小さく、電荷収集率があまりよくないだけでなく、TlBr 結晶の無駄になってしまう。

そこで本研究では、電極構造や結晶形状を工夫することにより、信号が電子にのみ敏感であり、有感領域が大きい検出器構造の検討を進めた。

【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	2	1	0	7
学生	5	0	0	6

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】

- ・ダイヤモンド検出器を用いた荷電粒子計測のための波形弁別法の研究
- ・LHD 重水素実験における誘導放射能の評価
- ・BeO-OSL を用いた BNCT 場のガンマ線線量測定に関する研究
- ・伴侶動物を治療対象とした BNCT 中性子場の最適化に関する研究
- ・BNCT の適応拡大に向けた動物メラノーマ治療への基礎研究

【修士論文】

- ・BNCT 用中性子源 Li 封入型ターゲットの除熱性能向上に向けた研究
- ・BNCT 用加速器型中性子源における陽子ビーム計測システムの開発に関する研究
- ・加速器型中性子源における BNCT 用中性子ビーム整形装置の設計とビーム特性の評価
- ・臭化タリウム検出器の電極構造に関する検討
- ・X線後方散乱に基づく非破壊検査法の開発
- ・食塩の OSL 特性に関する基礎研究

【博士論文】

- ・エネルギー分析型中性子イメージングの自動車用モータ材料への応用
- ・ホウ素中性子捕捉療法用高強度中性子場における線量評価に向けたリアルタイム中性子計測手法と簡易線量計算コードの開発

・ホウ素中性子捕捉療法用加速器駆動型中性子源 Li 封入ターゲットの基礎開発除熱性能評価に関する研究

その他・特記事項