

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360384

研究課題名(和文) 高エネルギー粒子誘起ガンマ線計測法の核燃焼場への応用

研究課題名(英文) Application of high energy particle induced gamma ray diagnostic to burning plasma experiments

研究代表者

西浦 正樹(Nishiura, Masaki)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：60360616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：本申請は核燃焼プラズマ中のDT反応で発生した3.5MeVアルファ粒子の閉じ込め物理に関する研究を目的としている。そのために、損失アルファ粒子誘起ガンマ線スペクトロスコピーを提案し、確立に向けた開発研究を行った。核融合炉壁へ損失する高エネルギーアルファ(損失アルファ)粒子と壁とのBe-反応により誘起された4.44MeV線の検出が基本原理である。4.44MeV線イメージを広範囲に観測するためにピクセル検出器の開発に取り組み、ガンマ線イメージの取得に成功した。同時にGe検出器で4.44MeV線の高分解エネルギースペクトル取得を行い、ドップラー広がりには角度依存性があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to study 3.5MeV alpha particle confinement and its physics created by DT reaction in burning plasmas. For the diagnostic of alpha particle loss to a first wall in a fusion reactor, we proposed and developed an alpha particle induced gamma ray spectroscopy. A pixel detector has been developed to acquire 4.44MeV gamma ray from the reaction of Be-alpha. We measured the gamma ray image successfully using it. Simultaneously a Ge detector detected the high resolution energy spectrum of 4.44 MeV gamma ray. We found that the spectrum has an angular dependence of the Doppler broadening strongly.

研究分野：プラズマ物理，核融合

キーワード：アルファ粒子 核融合 ガンマ線 耐放射線 中性子 イメージ プラズマ計測 多チャンネル検出器

### 1. 研究開始当初の背景

核燃焼プラズマにおいてプラズマ閉じ込め領域から損失するアルファ粒子(損失アルファ粒子)を制御することはプラズマ第一壁の保護やプラズマの性能劣化を防ぐために重要な研究である。損失アルファ粒子検出器は損失アルファ粒子を第一壁近傍で計測する検出器であり、その特徴は設置位置における損失アルファ粒子のエネルギーとピッチ角の同時計測が可能なことである。損失アルファ粒子検出器は国際熱核融合炉(ITER)の設置予定の計測器リストに含まれるが、高放射線環境下で使用可能性が危惧されており、検討が必要な先進計測器と考えられている。

### 2. 研究の目的

本申請は核燃焼プラズマ中の DT 反応で発生した 3.5MeV アルファ粒子の閉じ込め物理に関する研究を行うことを目的とし、今までに無い高エネルギー粒子検出手法(損失アルファ粒子誘起ガンマ線スペクトロスコピー)を確立する。核融合炉の第一壁へ損失してくる高エネルギーアルファ(損失アルファ)粒子とベリリウム第一壁との衝突反応  ${}^9\text{Be}(^4\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$  反応により誘起された 4.44MeV 線の検出がその基本原理である。観測された線から元の損失アルファ粒子の振る舞いを理解することが可能になる。線検出器は真空容器壁から離れた場所に設置することも可能となり、アルファ粒子を直接シンチレータで検出する従来の損失アルファ粒子検出器の課題であった、検出器の設置場所の確保、多チャンネル化、耐熱・耐放射線性を解決することが可能である。

### 3. 研究の方法

本研究計画は、これまでの先行研究を基に  ${}^9\text{Be}(^4\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$  反応を利用した損失アルファ粒子誘起ガンマ線スペクトロスコピーシステムを多チャンネル化し、大型プラズマ実験装置において線アレイ検出システムによる計測を確立することである。H24 年度は(a.1)線イメージング検出システムの設計と製作、及び性能試験を行う。 ${}^9\text{Be}(^4\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$  反応から放出される線スペクトルを高エネルギー分解能で計測するため、神戸大タンデム加速器施設に(a.2)HPGe 検出器を導入する。H25 年度は加速されたビームを用いて  ${}^9\text{Be}(^4\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$  反応を模擬し、(a.1)で開発したシステムの総合動作試験と線放出特性を調べる。その他に(b)耐熱・耐放射線コンポーネント開発として原子炉照射後試料の特性評価を金研大洗施設に於いて3年間継続的に行う。H26 年度は(c)大型核融合装置への適用と計測を検討する。

### 4. 研究成果

(a.1) 線イメージング検出システムの設計と製作、及び性能試験

APD と MPPC の 2 種類の線アレイ検出器を選定し、線源・加速器ビームを用いた性能試験を行った。アレイ検出器に利用可能な多チャンネル信号読み出し回路の開発を行った。その予備試験の結果を元に、線 APD アレイ検出器を選定し、線源・加速器ビームを用いた性能試験を行った。アレイ検出器の信号読み出しの試験と改良を行った。ガンマ線輸送コード EGS を用いた鉛コリメータの設計を行った。図 1 がそのモデル体系であり、線状の 4.44MeV 線を放出した際の 12x12 ピクセル(1 ピクセル 2x2x50mm)の LuAG シンチレータ検出器に対して、検出幅は 3.4mm になることが分かった(図 2)。

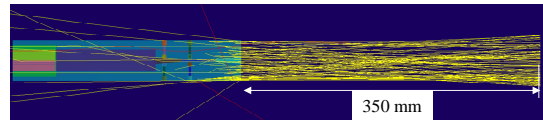


図 1 4.44MeV 線イメージ検出のための鉛コリメータのシミュレーション

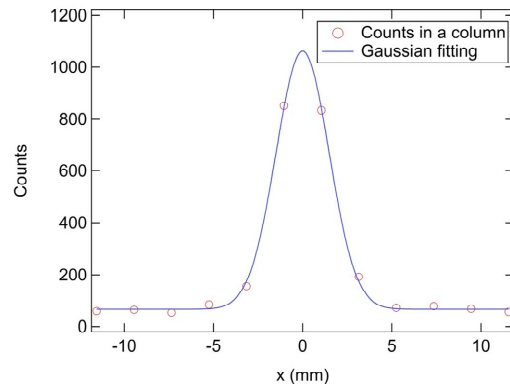


図 2 図 1 のコリメータを使った 12x12LuAG ピクセル検出器のガンマ線空間分解能

また、ダブルエスケープピークが全吸収ピークよりも支配的であるため、ピクセルを大きくする必要があることも分かった。神戸大のタンデム加速器を用いて、4.44MeV 線のイメージ検出実験を行った。図 3 は粒子の Be ターゲットへの照射実験の様子を示している。5x5mm<sup>2</sup>鉛コリメータを 12x12 ピクセル検出器の前面に設置している。図 4 が  ${}^9\text{Be}(^4\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$  反応由来の 4.44MeV ガンマ線イメージの測定結果である。本検出器は Na 線源を用いた試験では 511keV のエネルギー分解能を有していたが、4.44MeV の光電ピークを分離することが困難であり、シングルエスケープピークやダブルエスケープピークなども含んだイメージとなってしまっている。もし、プラズマ中で不純物によるピークが 4.44MeV 付近に存在した場合は、イメージ取得が困難になる可能性があり、今後の課題となった。

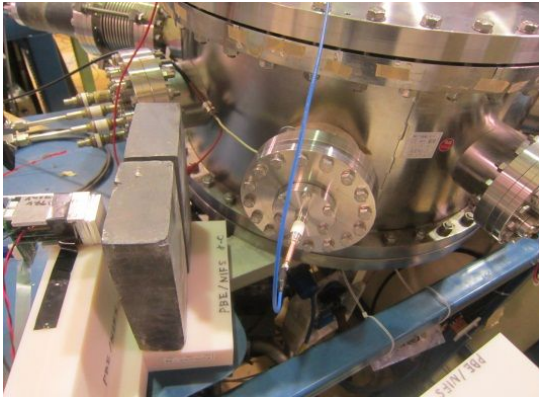


図3 4.44MeV 線検出実験

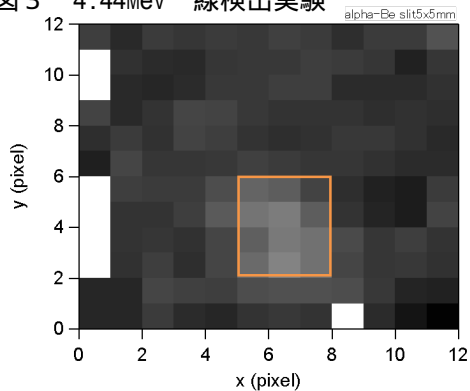


図4 12x12 ピクセル検出器により検出した3.5MeV アルファ粒子由来のガンマ線イメージ。で囲まれた内部は5x5mm<sup>2</sup>で厚さ50mmの鉛コリメータを通過したガンマ線によりカウント数が高い。

#### (a.2)HPGe 検出器の導入

線検出実験は従来の Am-Be 線源を用いたものから、粒子のエネルギーと粒子束を制御した実験を行うため、神戸大タンデム加速器施設にて加速器ビームを利用した実験を行った。<sup>9</sup>Be(<sup>4</sup>α, nγ)<sup>12</sup>C 反応の詳細な線スペクトルを知るためにゲルマニウム検出器(HPGe)を導入し、上述の線ピクセル検出器と同時計測を行った。定量評価に向けた基礎データを取得した。

HPGe を用いることで高エネルギー分解能の線のエネルギースペクトルを測定できることから、<sup>9</sup>Be(<sup>4</sup>α, nγ)<sup>12</sup>C 反応の角度依存性を取得した。HPGe 検出器前面にはコリメータを配置し、空間分解能も十分得られる状況で線のドップラー広がりや角度依存性を観測することに成功した。そのメカニズム解明と定量評価に向けた基礎データを取得した。

#### (b)耐放射線光学材に関する研究

東北大金研大洗施設において分光光度計により耐放射線光学材に関する透過率を測定した。分光光度計は測定値の再現性を得るために継続的に改造を施した。一般的な光学レンズや石英系無機シンチレータ等の光学特性評価から、不純物ドーパ量と耐放射線性に関する知見を得た。

東北大金研大洗施設においてこれまでより中性子フラックスの高い BR-2 を用いた原子炉照射のための試料を用意し、照射を実施した。

(c) 大型核融合装置への適用と計測を検討核融合装置に適用するために、東大 RT-1 装置の X 線エネルギースペクトル計測を Si 検出器により行った。そのスペクトル測定結果を図5に示す。この場合、フィッティングから電子の高エネルギー成分は 12.8keV、低エネルギー成分は 1.3keV であった。電子密度をパラメータとしてパラメータスキャンを行ったところ、高エネルギー電子は高いところで 50keV になることが分かった。今後 RT-1 においてプラズマ実験を行い、4.44MeV 線を模擬し、ピクセル検出器により X 線のエネルギースペクトルを計測することで計測器開発と解析手法の開発研究を行う。

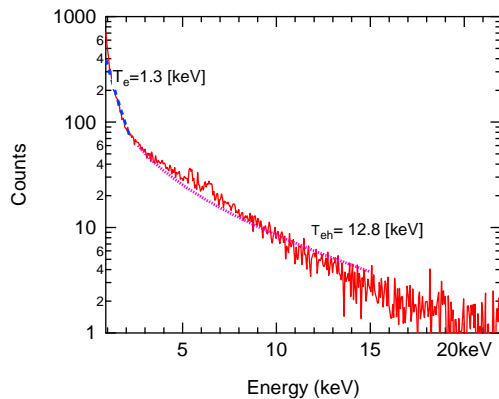


図5 プラズマ中の X 線エネルギースペクトル例。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

M. Nishiura, Z. Yoshida, H. Saitoh, Y. Yano, Y. Kawazura, T. Nogami, M. Yamasaki, T. Mushiake and A. Kashyap, Improved beta (local beta >1) and density in electron cyclotron resonance heating on the RT-1 magnetosphere plasma, Nuclear Fusion, 査読有, 55, 2015, 053019(5pp).

Hiroaki Kurishita, Masahiro Hatakeyama, Minoru Narui, Satoru Matsuo, Tatsuo Shikama, Kohei Tada, Noriyasu Ohno, Takao Takeuchi, Yuji Hatano, Masaki Nishiura, Yousuke Nakashima, Hideo Watanabe, Kazutoshi Tokunaga, Tomoaki Hino, Yoshio Ueda, Takeo Muroga, Akio Sagara, Osamu Kaneko, Curret Activities in the Interactive Joint Research at Tohoku

University - Advanced Evaluation of Radiation Effects on Fusion Materials, Plasma and Fusion Research, 査読有, 9, 2014, 3405136:1-4.

M. Nishiura, K. Doi, A. Taniike, T. Matsuki, K. Shimazoe, T. Mushiake, M. Yoshino, T. Nagasaka, Y. Fujimoto, K. Fujioka, T. Tanaka, M. Kisaki, H. Yamaoka, Y. Matsumoto, M. Wada, Ion induced gamma ray detection for fast ions escaping from fusion plasmas, Review of Scientific Instruments, 査読有, 85, 2014, 11E804:1-3.

〔学会発表〕(計19件)

西浦正樹, 土居謙太, 谷池晃, 松木拓也, 島添健次, 虫明敏生, 吉野将生, 長坂琢也, 藤本靖, 藤岡加奈, 田中照也, 木崎雅志, 山岡人志, 松本新功, 和田元, 核融合高エネルギーイオン誘起ガンマ線検出器の開発, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年09月18日, 北海道大学(北海道札幌市)

松木拓也, 谷池晃, 古山雄一, 西浦正樹, 島添健次, 堀木一成, 木崎雅志, 松本新功, 土居謙太, 山岡人志, タンデム加速器を用いて生成した高エネルギー線の測定及び中性子の影響, 原子力学会, 2014年03月27日, 東京都市大(東京都)

西浦正樹, 谷池晃, 松木拓也, 土居謙太, 鎌田圭, 島添健次, 長坂琢也, 藤本靖, 藤岡加奈, 田中照也, 木崎雅志, 山岡人志, 核融合計測のための高エネルギーイオン誘起ガンマ線の空間分布測定, 第74回応用物理学会, 2013年3月29日, 神奈川工科大学(神奈川県厚木市)

土居謙太, 西浦正樹, 粕谷俊郎, 和田元, ガンマ線カメラを用いた損失アルファ粒子計測法の開発, プラズマ核融合学会, 2012年11月30日, 春日市クローバープラザ(愛知県春日井市)

西浦正樹, 谷池晃, 長坂琢也, 藤本靖, 藤岡加奈, 田中照也, 木崎雅志, 山岡人志, 松本新功, 高エネルギーイオン誘起ガンマ線検出器の開発, 第73回応用物理学会, 2012年9月12日, 松山大学(愛媛県松山市)

〔その他〕

<http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西浦 正樹 (NISHIURA, Masaki)  
東京大学大学院・新領域創成科学研究科・

准教授

研究者番号: 60360616

(2) 研究分担者

長坂 琢也 (NAGASAKA, Takuya)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 40311202

藤本 靖 (FUJIMOTO, Yasushi)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・講師  
研究者番号: 70343241

谷池 晃 (TANIIKE, Akira)  
神戸大学・海事科学研究科・准教授  
研究者番号: 50283916

山岡 人志 (YAMAOKA, Hitoshi)  
理化学研究所・放射光科学総合研究センター・専任研究員  
研究者番号: 30239850

松本 新功 (MATSUMOTO, Yoshikatsu)  
徳島文理大学・人間生活学部・講師  
研究者番号: 50441598

田中 照也 (TANAKA, Teruya)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 30353444

木崎 雅志 (KISAKI, Masashi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号: 70598945

島添 健次 (SHIMAZOE, Kenji)  
東京大学大学院・工学研究科・助教  
研究者番号: 70589340