

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560825

研究課題名（和文）高速イオン輸送研究のための 2.45 及び 14 MeV 中性子の同時計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of system for simultaneous measurement of 2.45 and 14 MeV neutrons for research on fast ion transport

研究代表者

篠原 孝司（SHINOHARA KOUJI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹

研究者番号：50354600

研究成果の概要（和文）：

燃焼プラズマの物理の理解に必要な高速イオン輸送研究のために、2.45 及び 14MeV 中性子の同時計測可能なシステムの研究開発を行った。開発では、これまでの実績による課題を念頭に、ゲイン変動と呼ばれる波高変動の特性の把握、シンチレータ検出器の特性の把握、パルス波形最適化のための高速パルス波形処理用機器や解析ソフトの開発、処理用機器の試験を行い、改良に向けた指針を得た。指針にもとづき、多段式の検出システムを考案した。試験の結果、多段式検出システムが有望であることが確認できた。

研究成果の概要（英文）：

We have carried out the research and development of system for simultaneous measurement of 2.45 and 14 MeV neutrons for research on fast ion transport. We preceded the project with the issues observed in the previous experiments in mind by developing new hardwares and softwares, and evaluating the hardwares in experiments. Then, the following knowledgebase to improve the diagnostics system has been obtained: the characteristics of pulse height variation, so called "gain variation", the characteristics of scintillator detectors, the technologies on the fast pulse-shape processing. We have also proposed the multi-stage detection system based on the knowledgebase, and proved the capability through experiments using a neutron beam at the FNS facility.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：中性子計測・高計数率・ゲイン変動・中性子- γ 線弁別

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 (ITER) が建設段階に入り、燃焼プラズマの物理の理解の重要性が増している。燃焼プラズマでは、プラズマの

加熱の大部分を高速イオンである核融合生成物の α 粒子が担うため、高速イオンがプラズマに適切に閉じ込められている必要がある。様々なプラズマ条件下で高速イオンを

ラズマに適切に閉じ込めるためには、高速イオンの輸送機構の理解が必要であり、このことが当該分野の重要課題の一つとなっている。

重水素プラズマの実験では、重水素と重水素の衝突による 2.45MeV の DD 中性子と重水素と三重水素の衝突による 14MeV の DT 中性子が発生する。前者の発生量は主としてプラズマ加熱源に用いられる中性粒子ビームによって発生した高速重水素イオン (<500keV) に比例し、後者の発生量は、重水素と重水素の反応によって発生する 1MeV の高速三重水素に比例する。これら 2 種類の中性子の挙動を調べることで高速イオンの輸送機構のエネルギー依存性に関する情報をうるることができる。

研究代表者らは核融合プラズマ実験装置 JT-60U の中性子分布計測システムを用いて上記不安定性による高速イオン分布の変化の計測に成功した。しかしながら、オリジナルのシステムは、中性子計測で雑音と見なす γ 線による信号と DD 中性子による信号を専用のハードウェアによりアナログ的に弁別処理していたが、計数率が 1×10^5 cps 程度で飽和し、この計数率の範囲で時間分解能を上げようとする測定精度が下がり、に測定精度を上げようとする時間分解能を犠牲にしなくてはならなかった。また、このシステムでは DT 中性子の計測はできなかった。この状況を打開すべく、検出器からの信号 (光電子増倍管のアノード出力) をそのまま高速のデジタイザに取り込み、ソフトウェアで波形処理することで計数率を飛躍的に高める手法の開発を 2006-2008 年に行った。その結果、中性子・ γ 線の波形弁別を行いつつ計数率で 1 桁以上の増加を達成し、これまでは飽和のために、計測できなかった MHz 領域という世界最高レベルでのデータ取得が可能となった。加えて、DT 中性子の同時計測も可能とした。

本デジタル処理法では、検出器のパルス信号波形をそのまま取得するため、検出器の詳細な特性がわかるようになり、適切な弁別手法の開発が進んだ。同時に、一放電中に中性子発生量が大きく変化する実際のトカマク実験放電での運用を通して、核融合プラズマ実験装置でより高い計数率と弁別精度で使用する際の問題点/開発課題も具体的に明らかになった。

2. 研究の目的

高速イオンの輸送研究を進める上で高速イオンの空間分布や速度空間での分布の変化変化の計測が必要である。DD 中性子と DT 中性子という 2 つのエネルギーの異なった中性子の分布を同時計測することで、高速イオンの空間分布に加えて、限定的ではあるが、速度空間での分布を得ることができる。また、

高い計数率をうる事が出来れば、高時間分解能で分布の変化を計測することができる。本研究では、高速イオン輸送研究のための 2.45 及び 14MeV 中性子の同時計測システムの開発を行う。

これまでの JT-60U での経験により明らかになった、シンチレータ型中性子計測器を核融合プラズマ実験装置で、高い計数率と弁別精度で使用する際の問題点/開発課題とは、次のようなものである。

- 1) 中性子、 γ 線等が多い (計数率が高い) ときには高エネルギー側で信号がなまるゲイン変動が発生する。これが一放電中に数百ミリ秒の時間スケールで発生する。これを軽減するため、実際の実験に即して、光電子増倍管に適切なデバイダ回路を製作する必要がある。
- 2) 一般に検出効率をあげるためにはシンチレータ検出器の大きさを大きくすればよいが、高エネルギーの X 線にも敏感になり、ゲイン変動を通して、DT 中性子の弁別を困難にすることがわかったため、最適な厚さの検出器を製作する必要がある。
- 3) データの処理時間を考慮すると 200MHz 程度のサンプリングが妥当である。このサンプリング間隔で、きれいなパルス波形を得るためには波形を 50-150ns 程度にする高速な波形整形回路の製作が必要である。
- 4) デジタイザのビット数は有限である。一方で、DT 中性子と DD 中性子のエネルギーは 6 倍程度異なるため、両方の波形を有効にデジタイズするために、高速の対数アンプの開発の必要がある。

本研究では、これまでの研究で明らかになった検出器システムの問題点の改善に主眼を置き、核融合プラズマ実験装置での高速イオン輸送研究に最適なシステムの開発を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

上記課題に取り組むため、

- ゲイン変動の特性の把握
- シンチレータの特性の把握
- 機器と解析ソフトの開発
- 機器の試験

を行った。機器の試験は原子力機構の核融合中性子源施設 (FNS) にて行った。

4. 研究成果

研究成果を以下に列挙する。

- (1) FNS にて、高い DT 中性子フラックスを用いた実験が実施でき、DT 中性子によるゲイン変動の特性の取得ができた。実験では、光電子増倍管のデバイダーについて既存のデバイダー回路に加え、市販のアクティブデバイダーを用いた実験も行うことができた。得

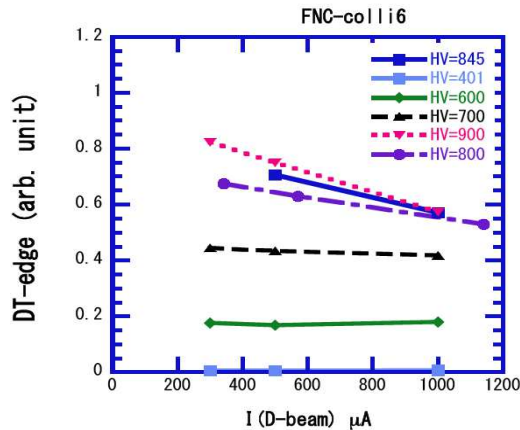


図1 DTエッジのDビーム電流依存性。波高スペクトルDTエッジは最大波高値とほぼ同様の意味合いを持つ。ビーム電流は、中性子フラックスあるいは計数率に比例する。複数の線は、光電子増倍管への印可電圧(HV)の違いを示す。光電子増倍管への印可電圧が低いときは、DTエッジは変化が小さい。

られた結果はどちらの方式でもほぼ同じでDT中性子フラックスの増加と線形の傾向をもって最大波高が減少した。すなわち、ゲイン変動が発生した。また、図1に示すようにDTエッジのDビーム電流依存性、すなわち、最大波高の中性子発生率依存性のデータを取得することができた。ここでさらに光電子増倍管の印可電圧(HV)を変化させて、印可電圧依存性のデータも取得した。印可電圧を下げると最大波高の減少は小さくなる。この波高の変動は波高の高いパルスに顕著にみられることから、全デバイダー電流による電圧降下よりも、光電子増倍管の後段の回路における電圧降下の可能性が高いと考えられる。

(2) 上記したように市販のアクティブデバイダの検出器では、JT-60Uの実験で使用していた検出器同様 1×10^5 cps 程度の計数率でゲイン変動が観測された。そこで、光電子増倍管の後段の回路の電圧降下が起きないように外部から電流を供給する方法(ブースタ方式)を試してみた。核融合プラズマ実験装置で使用する際は検出器を囲む中性子・ γ 線シールドの容積を減らすため、ブースタ方式に使用する電源(ブースタ電源)は検出器から数メートル以上話すことになる。ケーブル長が数メートルとなることで電源が時定数の小さいパルスに反応できない可能性がある。そこで、ブースタ方式を試験した実験では、ブースタ電源と光電子増倍管の間を10mのケーブルでつないで行った。結果、使用した検出器は 1×10^5 程度の計数率でもゲイン変動は観測されず、ゲイン変動に強いことがわかった。

(3) 200MHz 程度のサンプリング周波数で、弁別精度を向上させるパルス波形を得ることができるよう、波形を50-150ns程度にする高速な波形整形回路を準備し、この波形整形回路を通した信号が、弁別に必要な波形情報が維持されているかをFNSの実験にて調査した。この波形整形回路を通して、弁別精度を維持できることが確認できた。高い計数率時には長いパルスの信号はパイルアップ事象に弱いことを考え、50ns程度の時定数を用いることとした。

(4) 高速対数アンプの製作を行った。高速対数アンプはアナログ回路として製作する予定であったが、安定性と設定変更の正確さからDigital Signal processor(DSP)による実時間処理のシステムとして製作した。製作したシステムが弁別に必要な波形情報を維持されているかをFNSの実験にて試験した。本高速対数アンプで使用したアナログデジタル変換器の性能の制約から入力信号のパルスの時定数は50nsより長い必要があり、試験は、時定数50ns程度のパルスにて実施した。対数アンプであるので、解析ソフトの中で指数関数を通す逆処理を行なって、解析したが、弁別は正常に実施できた。したがって、時定数50ns程度の高速のパルスに対応できる高速対数アンプを製作できた。本高速対数アンプを用いればデジタイザのビットを有効に活用できる。

(5) デジタル処理法では、中性子- γ 線弁別処理をソフトウェアで実施しているが、ゲイン変動により、中性子- γ 線弁別処理の自動化には困難な部分があった。JT-60UやFNSの実験結果からゲイン変動の素性の理解がすすんだため、その特性を考慮した改良を行うことができた。これにより、これまで手動で行なっていた部分の多くの自動化が進んだ。

(6) NE213シンチレータについて、25mm厚と10mm厚についてDT中性子の感度、FNSの環境でのX線と γ 線の影響を調査した。10mm厚の検出器の検出効率は25mm厚の55%程度に低

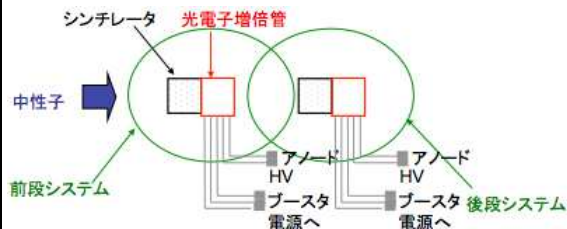


図2 タンデム式/多段式の検出器の模式図

下した。厚さの比は 40%であるので、厚さの低下ほどは検出効率は減っていない。一方、X線とγ線の影響であるが、10mm厚と25mm厚での計数の比は75%であり、高エネルギーX線/γ線の少ない環境であったためと推測されるが、中性子の検出効率の低下の方が大きい。また、厚さを減じることはDT中性子に検出効率を下げることになる。これらを考慮するとどちらの厚さを選択するかは設置した核融合プラズマ実験装置の環境で比較した上で決定することになる。

(7) JT-60Uの実験で使用していた1インチのステンチレータについて、絶対較正を行った。ガンマ線の混入が数%未満の設定ではDD中性子について0.1-0.15 count/neutronであった。これは、ステンチレータやNE213といった有機シンチレータの上限に近い。このため、一つの検出器で検出効率を現状から大幅に向上させることは難しいと考える。一方、光電子増倍管の高めの印加電圧はパルスの波高を増やすことでノイズレベルを越えた波高のDD中性子起因パルスの数を増やし、みかけの検出効率の向上に貢献したが、高めの印加電圧はゲイン変動を誘

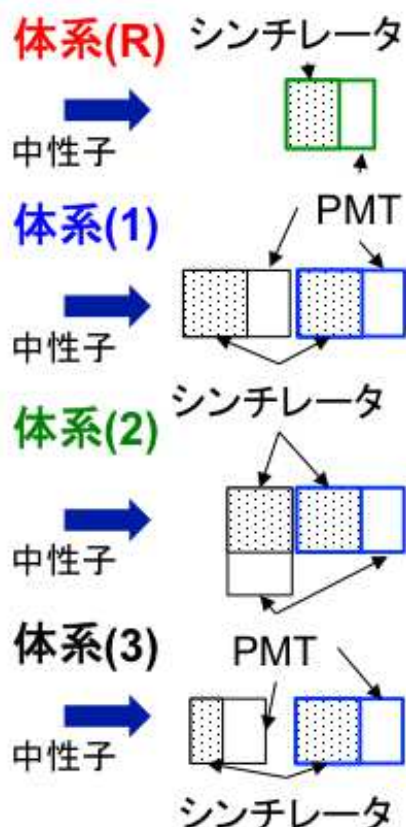


図3 実験を行った多段式中性子検出システムの体系。(3)の前段のみ10mm厚のシンチレータ。その他は25mm厚のシンチレータを使用。

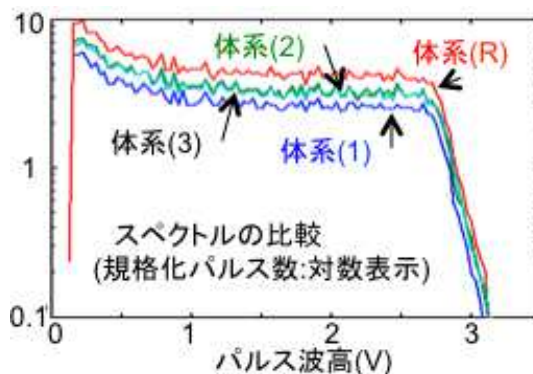


図4 体系(1)(2)(3)の後段の検出器の波高スペクトルと体系(R)の波高スペクトルの比較。

引しやすいことがわかった。このことを考慮すると核融合プラズマ実験装置の実験でゲイン変動を押さえつつ、中性子の検出効率をあげるには、図2のような二つの検出器を直列に並べた多段式の検出器を開発するのがよいと考え、設計検討を行い、検出器を制作した。

FNSにて、図3に示した4つの体系についてDT中性子に対する特性を調べた。特に後段の検出システムについて前段があることで波高スペクトルの歪みが発生しないかということ、計数率の劣化がどの程度かということ、図4は、体系(1)(2)(3)の後段の検出器の波高スペクトルを体系(R)の波高スペクトルと比較したものであるが、(1)(2)(3)の体系でも参照ケース(R)と変わらないことがわかった。また、前段と後段を合わせた検出効率は、参照ケース(R)に比べて、(1)の場合は1.6倍、(2)の場合は1.8倍、(3)の場合は1.25倍になった。このことから、体系(2)のシステムが有望であることが確認できた。これによって、多段式中性子検出システムにて検出効率をあげることが実証できた。今後、DD中性子についても同様に特性を調査する予定である。

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2件)

- ① K. Ishii, K. Shinohara, M. Ishikawa, T. Okuji, M. Baba, M. Isobe, S. Kitajima, and M. Sasao, Multi-Channel Neutron Emission and Triton Burn-up Measurement on JT-60U Using Digital Signal Processors, Plasma and Fusion Research, 査読有, vol. 5, 2010, S1043-1-5
- ② K. Ishii, K. Shinohara, M. Ishikawa,

M. Baba, M. Isobe, A. Okamoto, S. Kitajima, and M. Sasao, Fast neutron-gamma discrimination on neutron emission profile measurement on JT-60U, Rev. Sci. Instrum., 査読有, vol.81, 2010, 10D334-1 --3

〔学会発表〕(計1件)

- ① 石井啓一, 篠原孝司, 石川正男, 馬場護, 磯部光孝, 岡本敦, 北島純男, 笹尾眞實子, Fast Neutron-Gamma Discrimination on Neutron emission profile Measurement on JT-60U, The 18th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, 2010年5月20日, Wildwoods Convention Center (ワイルドウッド ニュージャージー州 米国)

〔その他〕

石井 啓一, JT-60U における高速イオン挙動解明を目指した 中性子分布計測の高性能化に関する研究, 修士学位論文, 平成 22 年 1 月 29 日提出, 東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠原孝司 (SHINOHARA KOUJI)
研究者番号: 50354600
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹

(2) 研究分担者

馬場 護 (BABA MAMORU)
研究者番号: 20005466
東北大学・サイクロトロンラジオアイソトープセンタ・名誉教授

(3) 連携研究者

石川 正男 (ISHIKAWA MASAO)
研究者番号: 70370351
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究員