

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19360420  
 研究課題名（和文） デジタル信号処理を用いた中性子分布計測による高速イオンと波動の非線形相互作用研究  
 研究課題名（英文） Study of non-linear interaction between energetic ion and wave by neutron profile measurement using digital signal processing  
 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・研究副主幹  
 研究者番号：50354600

## 研究成果の概要：

検出器の出力信号のデジタル信号処理により、弁別精度良く世界最高レベルの計数率で中性子の分布計測が可能となった。高計数率が得られたことで高速イオンと高速イオン起因不安定性の非線形相互作用の解明に貢献出来る高時間分解能計測が可能となった。しかし、期間中に高速イオン起因不安定性の実験を実施できなかった。そこで本計測器で新たに測定可能となった DT 核融合反応起因の中性子の分布測定を行い、発生源の高速トリトンの輸送研究に資するデータ取得に成功した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、核融合学

キーワード：プラズマ・核融合、計測工学、中性子計測、高速デジタルイザ

## 1. 研究開始当初の背景

高速イオンと高速イオンが励起源となるアルフベン固有モード周波数帯の MHD 不安定性(アルフベン固有モード不安定性)の非線形相互作用を理解することは、アルフベン固有モード不安定性の飽和決定機構の理解にとって非常に重要である。これを理解することによって、将来の炉でアルフベン固有モード不安定性が問題となるレベルまで成長するのかどうかを精度よく予測することが可能となり、このことは核融合炉の実現に大きく貢献する。

このような非線形相互作用機構の理解には、高速イオンの分布を高時間分解能で計測することが重要である。高速イオンと熱化プラズマの核融合反応によって発生した中性子の発生率の空間分布を計測することで、高速イオンの分布を求めることができる。したがって、中性子分布計測を高時間分解能で計測できるシステムを開発する必要がある。本研究では、中性子分布計測の高時間分解能化をデジタル信号処理法で実現することを提案した。

## 2. 研究の目的

高速イオンと高速イオン起因不安定性の非線形相互作用の物理機構を解明するため、高速イオンの空間分布を高時間分解能で計測することを目的としている。

高速イオンの空間分布の計測には中性子の分布計測システムを用いる。これまでのアナログ回路を用いたシステムでは計数率が  $1 \times 10^5 \text{cps}$  未満であり、サンプリング時間を短くすると測定精度が下がり、逆に測定精度を上げようとするとサンプリング時間を長くとりなくてはならないという制約により時間分解能が制限された。これをデジタル信号処理法を用いて克服する。我々はこのデジタル信号処理法を用いて観測一視線について、先行研究で原理実証を行った。本研究では、空間分布の理解を進めるためにこのデジタル処理化の多視線（多チャンネル）化を行う。デジタル信号処理法では大容量のデータを扱う必要があるため、20分間隔の実験放電でシステムが運用できるようにシステムを構築することも重要な目標である。

また、デジタル信号処理法においてはパルス波高からエネルギースペクトルを求めることも原理的に可能であり、その実証を行う。

## 3. 研究の方法

観測対象である高速イオン起因不安定性は、多量の高速イオンを発生させることが可能な負イオン源中性粒子ビームの高パワー出力で使用して励起する。

計測の要となる中性子分布計測システムについては、中性子の検出器からの信号パルス波形をそのまま高速のデジタル化に取り込み、アナログ回路で行っていた処理と同等以上の処理をソフトウェアで実施することで計数率を上げ、時間分解能を上げるという手法を用いる。

## 4. 研究成果

高速イオンと高速イオン起因不安定性の非線形相互作用の物理機構を解明するため、高速イオンの空間分布を高時間分解能で計測することを目的としている。当初は、データ取得時間の長さを重視し、デジタル化の4チャンネルを利用して視線の異なる検出器を日々取り替えるという運用で測定を行う予定であったが、取得時間が半分であっても空間分解能が常時確保できているべきであると判断した。デジタル化の計測時間は当初の予定の半分の2.5秒とした。この方針により7視線のチャンネルが確保できた。

先行研究に基づき、デジタル信号処理化のための検出回路の改造、期待される計数率向上に対応するためのコリメータの改造、実験放電のシーケンスに沿って自動で実験デー

タが取得出来るようにするためのデータ収集ソフトウェアの改造、検出器の較正、20分間隔で行われる実験放電の放電と放電の間にデータ処理が出来るようにするためのデータ解析ソフトウェアの改造を行った。特に、1放電当り、7GBのデータを取得、解析する必要があるが、一方で、デジタル化の設置される管理区域への入室が制限される。このため、安定、かつ、運転のしやすいデータ収集が可能となるように、改良を行いながらデータ収集システムを構築した。加えて、大容量のデータを短時間で解析出来るようにデータ解析ソフトの処理法やロジックの改良を行った。データの前処理解析ソフトの改良により、データの前処理解析時間が数十倍（1GB当り約1時間から約1分に短縮）以上改善した。

使用した検出器は、出力パルスが数十ナノ秒で、時間分解能に優れたスチルベン検出器である。スチルベン検出器では中性子とガンマ線の両方に感度があるため、中性子とガンマ線の弁別処理が必要である。先行研究の手法をそのまま用いた初期の結果においては、中性子とガンマ線の弁別が不十分であり、弁別ロジックの考案や光電子増倍管の設定電圧の調整等の最適化が必要であることがわかった。そこで、新たな弁別のロジックを使用した解析ソフトウェアの作成やハードウェアの改造・調整を行った。

弁別ロジックについては、いくつかの手法を検討した結果、ノイズへの耐性が強いことと処理時間が高速であることから荷電積分法を採用した。荷電積分法では、検出した信号パルス信号を領域  $\Delta t_F$ 、 $\Delta t_S$  という二つの領域で積分した二つの積分量  $Q_F$ 、 $Q_S$  を用いて時定数の違いを判別する。デジタル処理化の長所である詳細な信号パルス波形の解析を行ったところ、対数スケールで見るとスチルベン検出器の信号パルス波形は二通りの時定数から成り立っていることが新たにわかった。このことは、この境である変曲点に  $\Delta t_F$ 、 $\Delta t_S$  という二つの積分区間の境を設定することが、弁別精度の向上に有利であることを意味する。そこで、実際にその変曲点を積分区間  $\Delta t_F$ 、 $\Delta t_S$  の境に設定したところ、弁別精度が大幅に改善した。この変曲点の時刻は個々の検出器で異なっており、個々の検出器に対し最適な積分区間を決定した。

オリジナルの電荷積分法の弁別パラメータは積分量  $Q_F$ 、 $Q_S$  であるが、精度のよい弁別を目指し、弁別パラメータを調査し、 $Q_S/(Q_F+Q_S)$  という弁別パラメータが最適であると判断した。

この弁別パラメータ  $Q_S/(Q_F+Q_S)$  に波

高依存性があることがわかった。アナログ回路であると、このような波高依存性に対応できないが、ソフトウェア処理であるため、 $Q_S/(Q_F+Q_S)$ という弁別パラメータと波高の2次元空間で適切な多角形の弁別領域を設定し、中性子とガンマ線の精度の良い弁別に成功した。

これらにより高い弁別精度で世界最高レベルの計数率 ( $>3 \times 10^5 \text{cps}$ ) を達成した。

また、弁別精度と計数率の向上により、もう一つの開発課題であった「エネルギースペクトル測定」へとつながるパルス波高スペクトルの測定が精度良く可能となった。これにより波高領域を分けることでDT核融合反応起因の中性子(DT中性子)の測定も可能となった。すなわち、主たる中性子であるDD核融合反応起因の中性子(DD中性子)とDT中性子の同時分布測定が初めて可能となった。アナログ処理と異なり、弁別したガンマ線信号も中性子計測に影響を与えることなく処理出来るため、同時にガンマ線の計測もできる。このようにして、同一視線にてガンマ線、DD中性子、DT中性子を同時測定できる分布計測システムを世界で初めて開発した。

本システムを用いて、高速イオンと高速イオンが励起源となるアルフベン固有モード不安定性の非線形相互作用の研究を行う予定であった。計測可能な高速イオンの輸送を引き起こすアルフベン固有モード不安定性の非線形現象を引き起こすには、励起源である高速イオンをプラズマ中に多量に発生させる必要がある。このような高速イオンは負イオン源中性粒子ビームにて作り出している。しかしながら、本研究期間中、負イオン源中性粒子ビームが、機器の調整の都合で、アルフベン固有モード不安定性の非線形現象の励起に必要な入射パワーが得られず、必要な量の高速イオンを発生できず、研究に求められるアルフベン固有モード不安定性の非線形現象を励起できなかった。

そこで、新たに同時計測可能となったDT中性子の分布測定利用した実験を実施した。重水素放電では、 $D+D \rightarrow T+p$ 反応により1MeVの三重水素イオン(トリトン)が発生する。このトリトンは $D+T \rightarrow \alpha + n$ 反応によりDT中性子を発生させる。DT中性子を $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$ 反応によるDD中性子とあわせて計測すれば、高速トリトンの閉じ込め特性の研究が出来る。1MeVの高速トリトンのラーマー半径は、DT核融合反応の生成物で、DT核融合炉の燃焼を担う3.5MeVの $\alpha$ 粒子に近い。そのため、1MeVの高速トリトン

の輸送の研究は、重水素放電でも、3.5 MeVの $\alpha$ 粒子の輸送の研究に貢献出来る。初期的な成果はReview of Scientific Instruments誌に論文として掲載され、また、5件の学会発表を行った。

今後、システムの較正を原子力機構の核融合中性子源(FNS)装置にて実施し、中性子分布の定量的な評価を行うとともに高速トリトンの輸送を定量的に解析する。

## 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1件)

[1] K. Shinohara, T. Okuji, M. Ishikawa, M. Baba, T. Itoga, High repetition rate neutron flux array using digital-signal processing and scintillators for study of high performance plasma at JT-60U, Review of Scientific Instruments, 79 10E509-1--4 (2008), 査読有

[学会発表] (計6件)

[1] 石井啓一、篠原孝司、石川正男、奥地俊夫、馬場護、磯部光孝、北島純男、笹尾眞實子、「JT-60Uにおける デジタル信号処理を用いた中性子多視線計測」、日本物理学会、2009. 3. 30、立教大学

[2] K. Shinohara, K. Ishii, M. Ishikawa, M. Baba, M. Sasao, M. Isobe, T. Okuji, "Neutron flux array using digital-signal processing at JT-60U", JIFT meeting on Energetic Particle Physics in Toroidal Plasmas, Dec. 15, 2008, 核融合科学研究所

[3] K. Ishii, K. Shinohara, M. Ishikawa, T. Okuji, M. Baba, M. Isobe, S. Kitajima, M. Sasao, "Multi-channel neutron emission and triton burn-up measurement on JT-60U using Digital-Signal-Processors", 第18回土岐国際会議, 2008. 12. 9, セラトピア土岐

[4] K. Shinohara, T. Okuji, M. Ishikawa, M. Baba, T. Itoga, "High repetition rate neutron collimator using digital-signal processing and scintillators at JT-60U", International Tokamak Physics Activity "1<sup>st</sup> Energetic particle Topical Group Meeting", Oct. 22, 2008, Lausanne, Switzerland,

[5] K. Shinohara, T. Okuji, M. Ishikawa, M. Baba, T. Itoga, "Collimated neutron flux

array system using a digital signal processing method for neutron-gamma signal discrimination in JT-60U”, 17th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, May. 12, 2008, Albuquerque, USA

[6]奥地俊夫、糸賀俊朗、大石卓司、馬場 護、篠原孝司、石川正男、「JT60U での中性子計測におけるデジタル信号処理手法の応用と高速化」、日本原子力学会平成 20 年春の年会、2008 年 3 月 28 日、大阪大学吹田キャンパス

## 6. 研究組織

### (1) 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・研究副主幹  
研究者番号：50354600

### (2) 研究分担者

石川 正男 (ISHIKAWA MASAO)  
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・任期付研究員  
研究者番号：70370351

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

### (3) 連携研究者