

Title	高速点火核融合実験用中性子スペクトロメーター及び評価試験用中性子源の開発
Author(s)	安部, 勇輝
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/61769">https://doi.org/10.18910/61769</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏名 ( 安部 勇輝 )

論文題名 高速点火核融合実験用中性子スペクトロメーター及び評価試験用中性子源の開発

## 論文内容の要旨

本論文は、著者が大阪大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻在学中に行った、高速点火核融合実験に於ける高エネルギー密度プラズマ診断のための中性子スペクトロメーターの開発、並びに計測器性能評価試験用の高輝度中性子源の開発に関する研究についてまとめたものである。

高速点火核融合は現在の高速点火核融合研究では、超高強度レーザーを用いた圧縮燃料の追加熱による有意な温度上昇を観測することが第一の目標であり、数千万度の燃料温度を評価するための中性子スペクトル計測は極めて重要である。しかしながら実際の中性子計測は簡単ではなく、追加熱レーザー照射時に発生する硬X線が計測器に深刻なバックグラウンドをもたらす為、これまでスペクトル計測はおろか、核融合中性子の信号を捉えることすら困難な状況であった。そこで著者は、高速点火実験での燃料温度計測を実施する為、高強度X線環境下でもバックグラウンドの少ない中性子計測器の開発に取り組んだ。またこうした計測器開発を行う上では、性能評価試験を行うための高輝度中性子源が必要であり、著者らは爆縮よりも安定して高イールドの核融合中性子を発生させる新しい手法の開発に取り組んだ。本研究の取り組みは、高速点火核融合だけでなく、超高強度レーザーを用いた中性子源開発における中性子計測技術としても期待されるものである。近年特にレーザー駆動中性子源の開発が盛んに行われており、光核反応や高エネルギーイオンと固体の核反応により発生する中性子のスペクトル計測が求められている。こうした研究においても硬X線の発生は深刻な問題であり、X線耐性の高い中性子計測器の開発は重要である。本論文は4章より構成されている。

第1章では、本研究の背景として、高速点火核融合及び中性子計測による核融合燃料の温度評価、密度評価の理論的基礎を述べた。

第2章では、高速点火実験における中性子計測の現状と課題について述べ、過酷X線環境に耐えうる中性子スペクトロメーターの開発として、低残光液体シンチレーターの開発、中性子コリメーターの設計、ゲート光電子増倍管の開発について述べた。

第3章では、計測器の性能評価試験のための高輝度中性子源開発として、レーザーの一方向照射で高イールドの核融合中性子を生成する「球殻燃料のレーザー内面照射法」について行った取り組みについて述べた。

第4章では、第3章の中性子生成効率を向上させる可能性をもつ手法の一つとして、レーザー内面照射によるキロテスラ級の自己生成磁場に関する理論背景と実験検証結果について述べた。

第5章は結論であり、得られた研究成果をまとめ、本論文の総括を行った。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 安 部 勇 輝 )			
	(職)	氏	名
論文審査担当者	主 査	(教 授)	乗 松 孝 好
	副 査	(教 授)	村 田 勲
	副 査	(教 授)	猿 倉 信 彦

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、高速点火核融合実験に於ける高エネルギー密度プラズマ診断のための中性子スペクトロメーターの開発、並びに計測性能評価試験用の高輝度中性子源の開発に関する研究についてまとめたものである。

現在の高速点火核融合研究の最重要課題は、核融合反応で生成する中性子のエネルギースペクトルから核融合燃料の温度を評価し、燃料温度が核融合点火閾値(5千万度)を超えることを実証することである。しかしながら実際の中性子計測は簡単ではなく、中性子とほぼ同時に発生する高強度X線が中性子検出器に深刻なバックグラウンドノイズをもたらす為、これまで中性子スペクトル計測はおろか核融合中性子の信号を捉えることすら困難な状況であった。著者は、既存の多チャンネル中性子スペクトロメーターに関して、高強度X線環境下におけるバックグラウンドノイズの対策に取り組んだ。

中性子検出器における具体的な問題は、①シンチレーターの遅発発光、②光電子増倍管の出力飽和と疑似信号(アフターパルス)の発生、③光核反応による中性子発生であり、これらがバックグラウンドノイズとなって核融合中性子の検出を困難にしている。このうち①について、著者は液体ベースのシンチレーターに強い電子受容体である酸素分子を飽和量溶存させることで、寿命の長い三重項励起由来の遅発発光を一桁以上抑制することに成功した。これによるシンチレーターの時間応答の劇的改善により、X線と中性子の時間弁別が可能になった。著者は酸素溶存によるシンチレーターの高速化に加え、発光核と溶媒の最適化による高速化を図り、これまでに報告された有機シンチレーターの中では最も遅発発光成分の少ない液体シンチレーターが完成した。著者がシンチレーターに用いた発光核4,4''-bis[(2-butyloctyl)oxy]-1,1':4',1'':4'',1'''-quaterphenyl(通称:BBQ)と溶媒1,2,4-trymethylbenzeneの組み合わせは著者独自のものである。

また②について、著者は既存の光電子増倍管の出力を電氣的に高速スイッチングするゲート機構を付加することによって、出力飽和の回避と疑似信号の抑制を図った。特に、市販されている一般的なゲート光電子増倍管のゲート回路は、出力飽和は回避できても疑似信号の発生を抑制できない機構になっている為、著者は回路構成を工夫し疑似信号の出ないゲート回路の開発に成功した。開発対象である多チャンネル中性子スペクトロメーターは、960個の中性子検出器で構成されており、現実的な電流量及び装置数で全検出器をスイッチングできるゲート回路系全体の設計と動作試験が完了した。

③については、モンテカルロシミュレーションコードを用いて実験施設内の光核反応の発生分布を計算し、核融合燃料を封入する真空容器が主たる光核反応の発生源であることを明らかにした。この計算結果は中性子発生点の違いを利用して光核反応中性子のみを選択的に遮蔽することが可能であることを示しており、著者は中性子コリメーターの設計・導入に取り組んだ。その結果、検出器のバックグラウンドノイズは劇的に低減し、ついに高速点火実験において核融合中性子の有意な信号を捉えるに至った。観測された中性子信号から推定される中性子発生数は、当初予測されていたものよりもずっと少なく、燃料の加熱が十分に行われていないことが明らかとなった。これにより、高速点火プロジェクトでは電子やイオンのエネルギー輸送を詳細に調べる基礎的な実験に主眼が置かれるよ

うになり、今日では燃料の加熱を示唆するX線画像などが得られ始めている。次なる課題は、中性子スペクトルによる燃料温度の実測である。一連の中性子計測器開発によって高速点火実験における温度計測の実現の目途が立ったため、現在、著者が開発した液体シンチレーター及びゲートシステムの全検出器への導入が順次行われている。

また著者は一連の中性子計測器の開発に加え、中性子検出器の性能評価試験及び感度較正用の高輝度中性子源の開発に取り組んだ。著者らの中性子発生法は、重水素化球殻燃料の内面に一方向から高強度レーザーを照射することで、低密度ではあるが1億度を超える超高温プラズマをターゲット内部に生成するという画期的な手法であり、爆縮のような複雑なレーザー配位を用いなくても高輝度な核融合中性子発生を可能にするものである。著者らの実験では、最大9.6 keV(～9千万度)のコアプラズマがターゲット中心部に生成し、その結果 $10^7$ 個以上の重水素核融合中性子の生成が確認された。この中性子数は検出器評価試験には十分な数であり、本手法を用いることで較正実験を行うレーザー施設、ショット数が格段に向上した。また実験で得られたX線画像から、本手法により発生する中性子は直径 $100\mu\text{m}$ 以下のごく限られた領域で発生していることがわかり、中性子撮影法における点中性子源としても本手法の応用が期待される。線源のサイズは撮影画像の空間分解能に直結するため、線源のサイズを小さくすることは極めて重要である。現在知られている中性子源のほとんどは、その発生点のサイズがミリオーダーにとどまっているため、本手法は点中性子源としてのブレイクスルーになり得る。

著者は本手法における更なる中性子発生数の向上を目指して、レーザー強度や照射位置の詳細な検討を行った。その中で、 $10^{19}\text{ W/cm}^2$ のレーザー強度を本手法に適用することで、相対論的高速電子によるキロテスラ級の準静的強磁場がターゲット内部に生成することを発見した。この磁場はターゲット内壁のプラズマ膨張に伴って内側へ圧縮され、ターゲット中心部ではおよそ10 kTにもなることがParticle-In-Cellシミュレーションによって示された。この磁場を利用してターゲット内部のプラズマの閉じ込め時間を延ばすことができれば、核融合反応による中性子発生数を劇的に向上させることが可能である。本手法による強磁場生成に関して、著者らは既に基礎的な実験を行っており、円筒型ターゲットを用いて少なくとも数キロテスラの磁場生成を示唆するデータが得られている。また一連のシミュレーションを通して、本手法における磁場生成の理論的な背景も詳細に理解が進んでいる。中性子発生数が $10^{10}$ 個を超えると、中性子源としての本格的な産業応用が可能になると言われており、本手法による中性子数向上の実証が待たれる。

以上のように、本論文は中性子計測器の耐X線性能を格段に向上させ、高速点火核融合実験における燃料温度評価の実施への見通しを示すものである。これまで検出することすら不可能であった核融合中性子の信号を捉え、現状の中性子発生数とスペクトルを明らかにしたことによってイオン温度が測定可能になり、高速点火核融合プロジェクトの方針転換に大きく貢献した。また、レーザーの一方向照射で実現可能な高輝度中性子源の開発の成果は中性子計測器開発の活動範囲を広げるだけでなく、中性子撮影法用の点中性子源として、医療や非破壊検査機器等への応用の可能性を示すものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。