

研究課題：JT-60SA における中性子計測機器の較正方法の検討

研究代表者：小川国大（核融合研）

量研機構担当者：隅田脩平

研究協力者：磯部光孝（核融合研）、篠原孝司（東京大学）、石川正男（量研機構）、高田英治（富山高専）

研究期間：令和 4 年度-6 年度

1. 「研究目的・意義」

重水素プラズマにおいて、中性子計測が計測する D-D や二次 D-T 核融合反応によって発生する中性子は核融合出力や高エネルギー粒子閉じ込め等に係る情報をもたらす。本研究では、JT-60SA において安定した中性子発生量の測定及び高エネルギー粒子閉じ込め物理解明に必要である高精度な中性子計測の実現に向けて、中性子線源を用いた中性子計測機器の高精度なその場較正試験の誤差の評価とノイズレベルの評価・低減を行う。これまでに核融合研と富山高専が共同開発してきた LHD 中性子計測機器の知見を活用し、JT-60SA における中性子計測機器の高精度な計測の実現に資することを目的とする。

2. 「研究成果」

1) その場較正試験の誤差の評価

JT-60SA における中性子計測器のその場較正試験では、真空容器内に中性子発生量が既知のカリホルニウム-252(Cf-252)中性子線源 1 個を様々なトロイダル角位置に設置し、その時の中性子計測器の測定値からリング状中性子源に対する感度を評価し、較正係数を得る。統計誤差としては 1%以下となるように試験を行うが、実際の試験では Cf-252 を設置するための較正用治具や、その治具を置くための容器内ステージが中性子を減衰及び散乱し、較正係数の全体精度を決める主要因の一つとなり得る。この影響の評価のために、較正試験時の JT-60SA 環境を模したモデル(図 1)を用いた 3 次元中性子輸送計算(MCNP)コードによる計算を実施した。較正係数の評価に最も影響を与える、P-6、P-10、P-18 の各中性子モニタの正面に Cf-252 をそれぞれ置いた計算を実施した。その結果、較正用治具と容器内ステージが無い理想的な環境に比べ、約 4~5%計測値が減少した。これにより、最大約 4~5%の較正係数の誤差を生じ得るということが分かった。

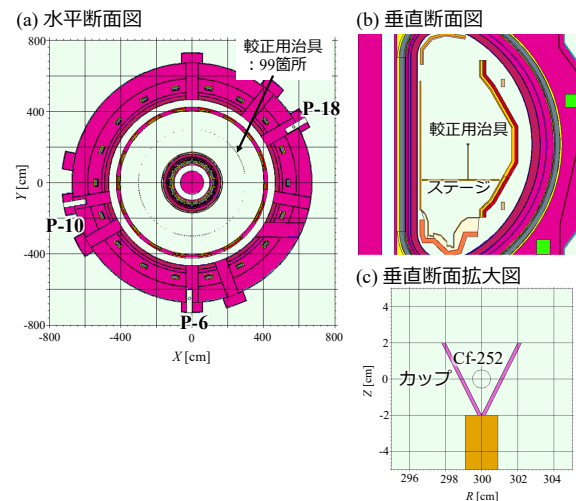


図 1. その場較正試験時の JT-60SA 環境を模した MCNP モデルの(a)水平断面の全体図、(b)垂直断面図と(c)その拡大図。真空容器内にステージがあり、その上にカップが付いた較正用治具がトロイダル角 99 箇所に設置される。その中に Cf-252 が 1 個置かれる。

2) 中性子モニタのノイズレベル測定

中性子モニタは検出器で得られた微弱な信号を使用するため、外部からのノイズの影響を受けやすい。較正試験での誤差に加えて、このノイズレベルを考慮した計測値の誤差を評価する必要がある。そこで JT-60SA の統合コミッショニングにおけるノイズレベルを評価した。

統合コミッショニングでは P-10 と P-18 の中性子モニタが準備できている。まずプラズマ及び中性子が無い条件での中性子モニタの動作確認およびノイズレベルを評価した。ここでは、ノイズと中性子信号を区別するための電圧の閾値であるディスクリ電圧に対する計数率の依存性を取得した。図 2 に P-10 の中性子モニタの試験結果を示す。中性子モニタの検出器である核分裂計数管の動作には 200 V の直流電圧の印加が必要である。印加電圧 0 V と 200 V での信号の差異は計数管内ウランの自己崩壊 α 粒子に起因するものである。 α の信号を明確に検

出できるということは、ノイズレベルが低く、核分裂計数管が正常に動作し、中性子モニタとして稼働できることを意味する。この健全性確認手法は ITER 用中性子計測の健全性を遠隔で評価することを目的に考案され、LHD でその妥当性が検証された後に、今回 JT-60SA で実用化された。本手法は高く評価され、プラズマ・核融合学会 第 29 回技術進歩賞を受賞した。 α 信号は中性子計測としては不要な信号である。この α 信号を含めても、JT-60U で設定していた -140 mV のディスクリ電圧で十分に除去できる低レベルであることを確認した。また P-18 の中性子モニタでも同様の結果であった。これらの低ノイズレベルの実現には、計数管の模擬検出器と携帯ラジオを使用してノイズ源を特定し、中性子モニタのケーブルの敷設位置を変える等の対処法が役立った。

次にプラズマ及び中性子が存在する条件でのノイズレベルの評価を行った。図 3 に He プラズマでの中性子モニタで計測した計数率の時間発展を示す。中性子モニタの計数率の信号は一旦電圧値に変換され、同軸ケーブルにより伝送されて、データ収集機器で記録される。これにより、中性子が発生しない時間帯でも完全な 0 cps ではなく、 $\pm 5 \times 10^3$ cps 程度の変動があり、オフセットが -5×10^3 cps 程度存在することが分かる。このことから、ノイズレベルは 10^4 cps であることが明らかになった。重水素プラズマでの中性子モニタの感度は中性子輸送計算で約 10^{-8} count/neutron と予測されているため、中性子発生率が $\sim 10^{12}$ n/s の時にノイズレベルが S/N が ~ 1 になると評価される。通常、中性粒子ビーム入射加熱が印加されると中性子発生率は 10^{14} n/s 以上になるため、重水素プラズマでの加熱実験では、中性子モニタにとっては十分に低いノイズレベルであると考えられる。また、ディスラプションなどで発生する逃走電子に起因して中性子が生成することが知られている。図 3 のように中性子モニタを用いて逃走電子に起因する中性子の測定にも成功した。

3. 「まとめ」

JT-60SA での中性子計測機器のその場校正試験に向けて、その環境を模した MCNP モデルを整備し、校正係数の誤算の主要因となり得る校正用治具や容器内ステージが与える影響を評価した。また、JT-60SA 実機での中性子モニタのノイズレベルの評価やノイズへの対処を行い、ノイズレベルは将来の重水素プラズマでの加熱実験では十分に低いことを確認した。本研究を進めるに当たって、自己崩壊 α 粒子を用いた核分裂検出器の新たな健全性確認方法の実証にも貢献した。

4. 「今後の課題・予定」

整備した MCNP モデルを用いて、さらに中性子輸送計算を進め、その場校正試験で最終的に得られる中性子モニタの校正係数の誤差を評価する。また中性子分布計測の検出器を含めた MCNP モデルも整備し、計測感度及びクロストークを評価する。そして、中性子モニタについては JT-60SA 実機環境で計測されたノイズレベルを考慮した最終的な校正係数の誤差を評価する。

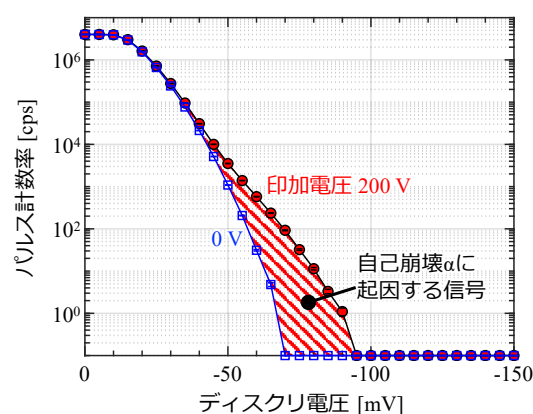


図 2. 核分裂計数管に 0 V(青)と 200V(赤)の印加時の P-10 中性子モニタのディスクリ電圧依存性。印加電圧 0 V と 200 V の差異が自己崩壊 α に起因する信号である。

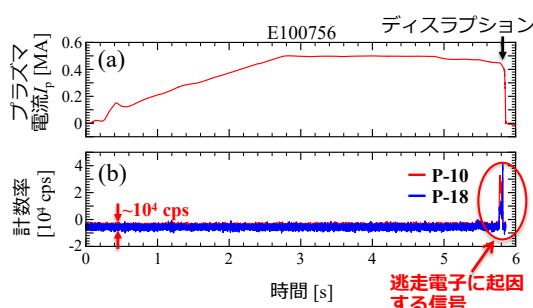


図 3. 軽水素プラズマでの(a)プラズマ電流と(b)P-10(赤)と P-18(青)の中性子モニタの計数率の時間発展。ディスラプション時に逃走電子に起因する中性子が発生し、有意な信号が計測される。

5. 「成果リスト」

- 1) 石川正男 他、自己崩壊 α 線によるフィッションチェンバー検出器の健全性評価、令和4年度第1回計測サブクラスター会合、2023年1月
- 2) 河野繁宏、石川正男 他、ITER マイクロフィッションチェンバー用核分裂検出器の自己崩壊 α パルスを利用した新たな検出器健全性確認方法の提案、第40回プラズマ・核融合学会年会、2023年11月
- 3) S. Kono, M. Ishikawa *et al.*, Estimation and measurement of alpha decay pulses in fission detectors and their practical application for verifying detector health, Plasma Fusion Res. **19**, 1405015 (2024).
- 4) 隅田脩平 他、JT-60SAにおける中性子モニタを用いた逃走電子の検出、第41回プラズマ・核融合学会年会、2024年11月
- 5) 河野繁宏、石川正男 他、自己崩壊 α パルスを利用した核分裂検出器の新たな健全性確認方法の開発、プラズマ・核融合学会 第29回技術進歩賞、2024年11月