

# 中性子検出器 R & D

○塚田究、山西弘城、磯部光孝、三宅均

自然科学研究機構 核融合科学研究所

## はじめに

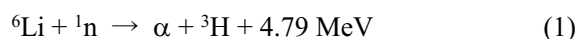
核融合科学研究所で行われている大型ヘリカル装置 (LHD) 実験の次期計画では、重水素実験が予定されている<sup>[1]</sup>。現在の閉じ込め実験では、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱が主流の加熱方法である。この NBI 加熱によるプラズマ中に生じた高エネルギー重水素イオン (このビームイオン速度は、イオン温度に比べて十分に高いため核反応面積が大きい。) および背景重水素プラズマとの反応から中性子が放出される。よって重水素実験では、このビーム-プラズマによる中性子放出反応が支配的となる。

中性子計測システムでは、高い時間応答性能を持つ中性子総発生率 ( $\sim 10^{16}$  個/秒) 測定および空間分布測定が必要とされ、広いダイナミックレンジ (重水素ビーム加熱プラズマでは、ビームイオンの減速時間 (100 ミリ秒程度) のスケールで、中性子総発生率が  $10^4 \sim 10^6$  程度変化する。) と速い時間応答性 (1 ミリ秒以下) が要求される。

また、中性子検出器の研究開発は、作業環境中での中性子線量評価のための測定器実現を目標としている。中性子検出部の基礎研究的位置付けとして、プロトタイプ of 測定系を原子炉に持込んで実験を行った。この実験は、近畿大学原子炉 (UTR-KINKI)<sup>[2]</sup> 等利用共同研究 “中性子線量測定器の応答特性試験” の内の 1 課題として実施した。

## 1 光電子増倍管を用いた中性子検出実験の原理および設定

中性子検出媒体 (コンバータ) にはフッ化リチウム (LiF) を用いた。LiF は中性子と次の反応を起こす。



この反応は、主に熱中性子から低エネルギー領域で起き、これにより生じた  $\alpha$  線を硫化亜鉛 (ZnS) シンチレータで発光に変換し、この発光を光電子増倍管 (PMT; 浜松ホトニクス社製 R329-02) で信号出力として捉える。

原子炉での実験に先立ち、検出器の動作確認試験として、放射線源  ${}^{252}\text{Cf}$  を用い、十分遮光された PMT に高電圧 (HV=-1500 V) を印加した時、そのダイノード出力において、図 1 に示す波形から  $\gamma$  線の信号出力 (A) および中性子線との反応で生じた  $\alpha$  線の信号出力 (B) を確認した。この信号出力波形の減衰の違いから、信号処理を施すことによって  $\gamma$  線から弁別して中性子を検出することができる。

検出器の信号読出し用電子回路はプロトタイプとして、そのフロントエンドに電荷有感型増幅器に CS-510、波形整形増幅器に MA-405 を使用した。これらの増幅器は嘗て KEK-TRISTAN 計画実験用に開発されたハイブリッド IC であり、高速 (整形時定数=10 ナノ秒)、低雑音、低消費電力および小型 (可搬が容易) である<sup>[3]</sup>ことから採用した。これにより得られたアナログ信号は、ガウス波形に整形された状態であるから、これを高速な AD 変換器あるいはマルチ・チャンネル・アナライザ (MCA) に取込みデジタル信号化し、PC で解析する。

次章 2.1 節で述べるパルス計数率測定では、CS-510 および MA-405 の出力信号を電圧弁別することで 1 bit の AD 変換とし、TTL 出力のコンパレータ MAX913 (MAXIM) を使用する。ここで、R329-02 の

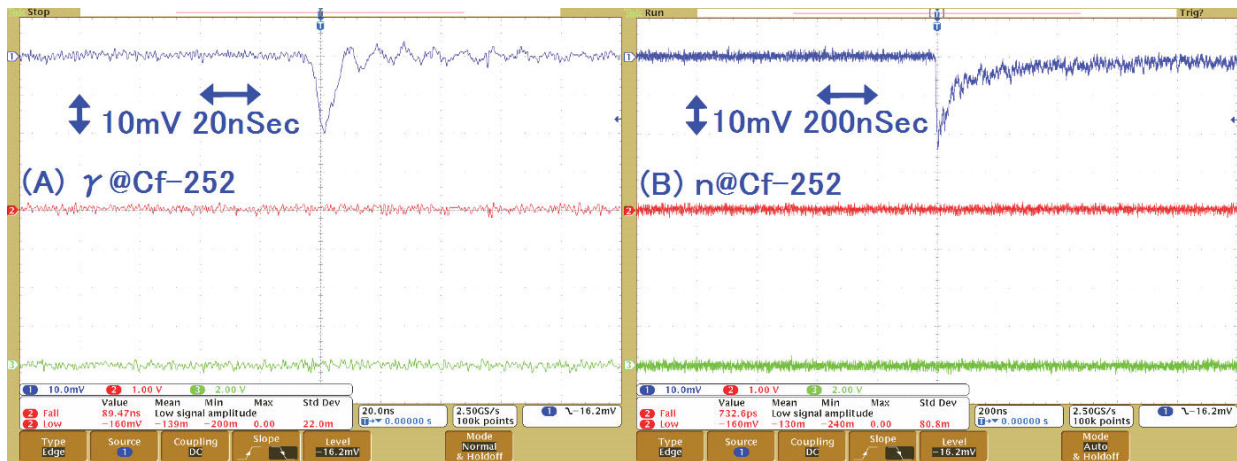


図 1. (A)  $^{252}\text{Cf}$  からの  $\gamma$  線信号出力波形：パルス減衰時間が約 10 ナノ秒の速い信号  
 (B)  $^{252}\text{Cf}$  からの中性子線信号出力波形：パルス減衰時間が約 300 ナノ秒の遅い信号

ゲイン  $G_{\text{PMT}}=10^6$  @ HV=-1500 V、CS-510 の入力容量  $C_{\text{input}}=1$  pF、ポール・ゼロ・キャンセル調整時の MA-405 のゲイン  $G_{\text{MA-405}}=2.5$  および電気素量  $e=1.6 \times 10^{-19}$  C であるから、

$$V_{\text{th}} = G_{\text{PMT}} \cdot G_{\text{MA-405}} \cdot e / C_{\text{input}} \quad (2)$$

より、MAX913 の閾値を  $V_{\text{th}} = 400$  mV とする。さらに TTL ワン・ショットにより 1 マイクロ秒幅パルスとし、汎用 NIM カウンタ・モジュールによりパルス計数を行う。また、次章 2.2 節で述べる MCA データ収集測定に使用する Amptek 社製 MCA8000A は、その AD 変換速度が MA-405 出力に追いつかないため、MCA の前段に Ortec 社製 NIM モジュール型アンプ Ortec572 を介し、その整形時定数を遅らせる必要がある。MCA8000A の ADC ゲインを 1024 Channel とした時、Ortec572 の各設定は、Fine Gain:5-0、Coarse Gain:100、Shaping Time:2 $\mu$ s、BLR:Auto、Unipolar Out とする。従って、プロトタイプ計測システムは、図 2 に示す接続構成となる。

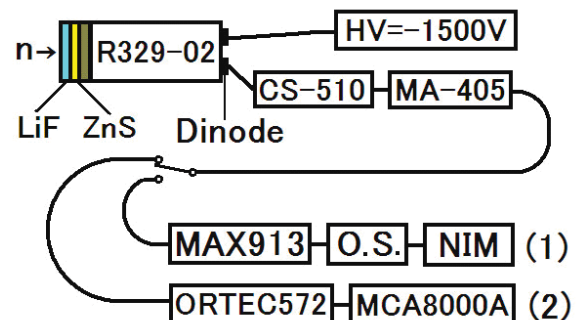


図 2. 中性子検出実験に使用するプロトタイプ計測システムの構成；(1) パルス計数率測定 (2) MCA データ収集測定

## 2 中性子検出実験

近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) で中性子検出実験を行った。原子炉出力を 1W に固定し、原子炉上蓋上面の中心に検出器を設置し、約 4 m の同軸ケーブルを介して原子炉近傍の机の上に信号処理等計測システムを配置した。この様子を図 3 に示す。オシロスコープで検出器からの出力信号が図 1 に示された波形と同様であることを確認した。また、各実験において、 $\gamma$  線の遮蔽材に厚さ 50 mm の鉛ブロックを使用した。



図 3. 近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) の右下机には各種計測機器が配置される

## 2.1 コンバータおよび蛍光材の影響

鉛ブロックで $\gamma$ 線を遮蔽した状態において、コンバータおよび蛍光材がその計数率（回/分）に及ぼす影響について実験した結果を表1に示す。これは1分間の計数率測定を3回行った平均値である。

表1の計数差について、状態(1)−状態(2)=5553 カウントは、(1)式で示したコンバータ LiF からの $\alpha$ 線による寄与分で、主に熱中性子によるものと考えられる。

一方、状態(2)−状態(3)=4462 カウントは、コンバータ LiF との反応によらない速中性子および $\gamma$ 線の寄与分であると考えられる。

## 2.2 距離および遮蔽の影響

距離および遮蔽が中性子線と $\gamma$ 線との弁別に与える影響を調査するため、(1) H=300mm、遮蔽なし、(2) H=300mm、前方遮蔽（図4写真左）、(3) H=0mm、前方遮蔽（図4写真中）および(4) H=0mm、前方+側面遮蔽（図4写真右）において、そのMCAデータ収集時間を1分間として各実験を行った。

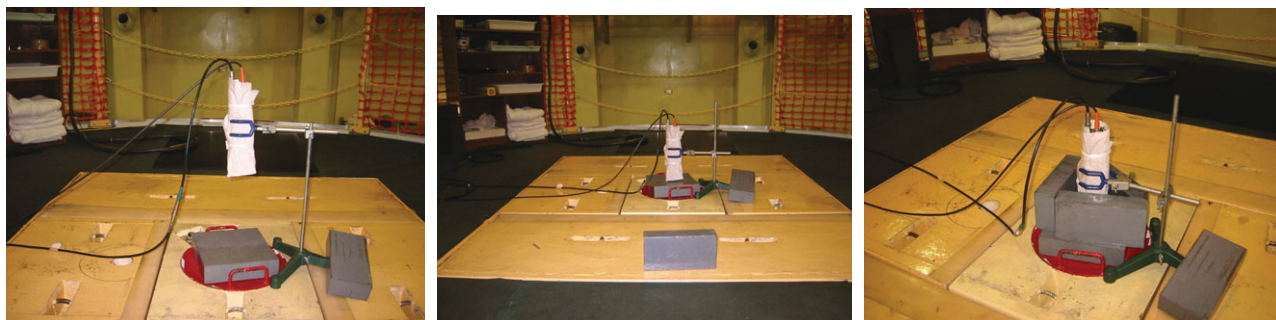


図4. 写真左から順に本文の実験項目(2)~(4)にそれぞれ対応し、十分にシートで遮光された光電子増倍管（浜松ホトニクス：R329-02）がUTR-KINKIの炉上中心（赤色の部分）に配置される。

ここでHは、原子炉上蓋上面における検出面の設置高さである。

実験結果を図5に示す。横軸のChannel番号は、エネルギー（波高）強度を表す。

## 2.3 考察

実験結果図5に示されるグラフ全体に見られる傾向として、横軸430 Channel近傍のピークは、速中性子および熱中性子による寄与であると考えられる。これは、2.1節の状態実験で得られた状態(1)−状態(3)=10015 カウント、即ち熱中性子、（コンバータ LiF との反応によらない）速中性子および $\gamma$ 線寄与分の合計が、これと同条件である2.2節の実験項目(3)によるグラフ横軸300 Channel近傍の谷を閾値とする、ピーク側の合計=9419 カウントに近い値を得ていることによる。

表1. 実験結果：コンバータおよび蛍光材の影響

状態	計数 (回/分)
(1) LiF + ZnS	28544
(2) ZnS	22991
(3) PMT 単体	18529

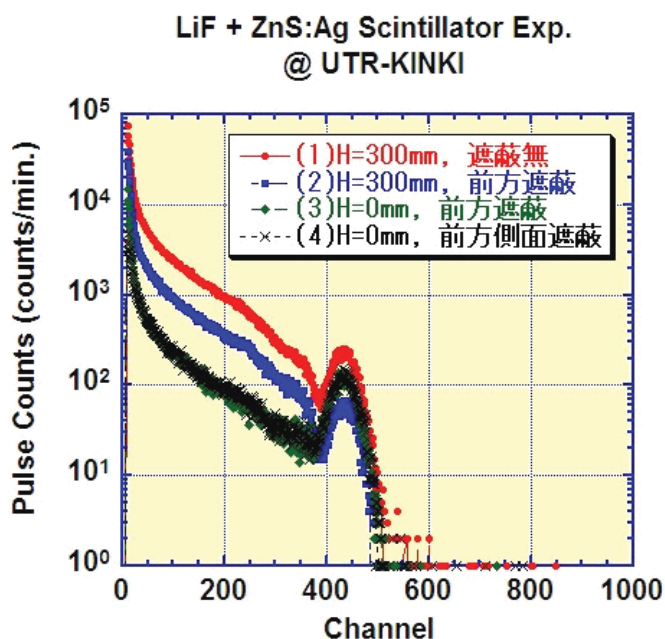


図5. 実験結果：距離および遮蔽の影響  
横軸はエネルギー（波高）強度を表す

実験項目 (1) および実験項目 (2) の結果について、図5のグラフから比較すると、その計数率が $\gamma$ 線とともに中性子線でも減少しており、遮蔽効果の有意性は見られない。これは、実験項目 (2) において、PMT 直下から入射して来る $\gamma$ 線は鉛ブロックで遮蔽されるものの、その設置高さ  $H=300$  mm 故に $\gamma$ 線が検出部に廻り込んでいると考えられる。しかし、実験項目 (3) においては、設置高さ  $H=0$  mm であることから、検出部が遮蔽材に密着していることで $\gamma$ 線の廻り込みを抑え、その遮蔽効果をより高めたものとする。

実験項目 (4) は、実験項目 (3) と同様の結果を示しており、側面遮蔽効果の有意性は認められない。これは、検出部が遮蔽材に密着していれば側面からの廻り込みのないことを意味する。しかしながら、実験項目 (1) および実験項目 (2) に比して、明らかにその遮蔽効果を認めることができる。

### 3 まとめと今後の課題

LHD の次期計画において重水素を使用する実験が予定されており、中性子計測システムは、この重水素プラズマで発生する中性子数の把握や放射線安全管理に重要な役割を果たすことになる。今、中性子検出器はまた、核融合科学のみならず、加速器科学や医療関係など様々な分野で注目されており、高効率、高時間分解能および高位置分解能な検出手法において、その開発の余地を余しながら日進月歩でその研究開発が急速な進展を遂げつつある。このことはつまり、中性子検出器の高い必要性を示すことに他ならない。

中性子検出器研究開発においては、検出部の基本特性を調べることに着手し、PMT 出力の信号処理系を構築した。近畿大学原子炉では、このプロトタイプ PMT 中性子検出システムを用いて、中性子線と $\gamma$ 線の弁別を試みたが、出力波形による弁別が課題として残った。

今後さらに、半導体検出器や電離・ガス増幅検出器等においても特性試験を行い、適用の検討を進め、また他大学、研究機関等との情報交換をより一層深めると共に、共同研究をも視野に入れた研究開発を展開して行きたいと考えている。

### 謝辞

近畿大学原子炉における中性子検出器の実験に際して、近畿大学原子力研究所の杉浦紳之准教授を始め、お世話を頂いた同研究所職員の皆様に感謝致します。

### 参考文献

- [1] 大型ヘリカル装置における重水素実験計画 ([http://www.nifs.ac.jp/j\\_plan/pdf\\_1/index.html](http://www.nifs.ac.jp/j_plan/pdf_1/index.html))
- [2] 近畿大学原子力研究所 (<http://kuaeri.ned.kindai.ac.jp/index.html>)
- [3] K. Tsukada et al., “Readout electronics for the vertex chamber of the TOPAZ detector at TRISTAN, KEK” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A300 (1991) pp.575-580.
- [\*] 実験物理学講座 26 『放射線』 山崎文男 (編) 共立出版 (株)
- [\*] 実験物理学講座 29 『原子炉』 伏見康治 (編) 共立出版 (株)