

KAKEN  
11558056

---

核融合中性子発生プロファイル計測のための  
高指向性中性子検出器の開発

---

(課題番号：11558056)

平成11年度～平成13年度科学研究費補助金  
(基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書

平成15年 3月

研究代表者 井口哲夫

(名古屋大学・工学研究科・教授)

# はしがき

本報告書は、研究課題「核融合中性子発生プロファイル計測のための高指向性中性子検出器の開発の開発」（課題番号11558056）として、平成11～13年度の3年にわたり、文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）を受けて実施した研究成果をまとめたものである。

本研究では、大型磁場閉じ込め核融合実験装置におけるDT（またはDD）核反応プラズマから発生する中性子の空間・時間相関プロファイル測定技術の高度化の観点から、小型の指向性中性子検出器アレイをベースにした空間的制約の少ないコンパクトな高速中性子発生プロファイル計測（カメラ）システムの構築を目指して、具体的に、He（またはH<sub>2</sub>）-Xe 希ガスシンチレータ中に荷電粒子コリメータを設置し、入射中性子によって生成される反跳He（または陽子）のうち、このコリメータを通過した成分のみを同時計数で選択的に検出する原理に基づく指向性検出器要素の設計・試作、性能実証を行うとともに、実用的な核融合中性子カメラシステムの設計提案を行った。

## 研究組織

研究代表者：井口 哲夫（名古屋大学工学研究科 教授）  
研究分担者：瓜谷 章（名古屋大学工学研究科 助教授）  
研究分担者：河原林 順（名古屋大学工学研究科 助手）  
研究分担者：笹尾 真実子（核融合科学研究所 助教授）  
研究分担者：北 好夫（東芝・府中工場 主査）

## 交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成11年度	7,500	0	7,500
平成12年度	4,400	0	4,400
平成13年度	1,900	0	1,900
総計	13,800	0	13,800

## 研究発表

### (1) 学会誌等

1. T.Iguchi, S.Iizuka, A.Uritani and J. Kawarabayashi, 'Conceptual Design of Compact Neutron Camera with Directional Neutron Detector for Nuclear Fusion Experiment', Proc. 14th Top.Meet.Technol. Fus. Energy, Fus. Technol., Vol.39, No.2, Part 2, FUSTE 8(3) 291-1166 March 2001. ISSN:0748-1896 (2001) 1147-1151.

(2) 口頭発表

1. 梅村憲弘、渡辺賢一、河原林順、井口哲夫、瓜谷章、西谷健夫：He-Xe ガスシンチレータ型指向性中性子検出器の開発、第 62 回応用物理学会学術講演会（2001）
2. 梅村憲弘、井口哲夫、渡辺賢一、河原林順、瓜谷章、西谷健夫：He(H<sub>2</sub>)-Xe ガスシンチレータ型指向性中性子検出器を用いた核融合中性子発生プロファイル計測システムの開発、プラズマ・核融合学会第 18 回年会（2001）
3. 尾方智洋、梅村憲弘、井口哲夫、笹尾真実子、河原林順、柴田泰成、瓜谷章：指向性中性子検出器と中性子コリメータの併用による核融合中性子発生プロファイルモニターのコンパクト化、第 4 回核融合エネルギー連合講演会（2002）

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

特になし

核融合中性子発生プロファイル計測のための  
高指向性中性子検出器の開発の開発  
研究成果報告書

目 次

	頁
1. 研究の概要	1
1.1 研究の目的	1
1.2 研究成果の要約	2
2. 指向性中性子検出器の概念	3
2.1 核融合中性子発生プロファイル計測	3
2.2 指向性中性子検出器	4
3. He-Xe ガスシンチレータの特性評価	9
3.1 ガスシンチレーション検出器	9
3.2 発光確認実験	11
3.3 最適ガス混合比の検討	17
3.4 中性子検出基礎実験	20
4. 指向性中性子検出器の設計検討	26
4.1 検出器応答のシミュレーション計算	26
4.2 計算結果と考察	34
5. 指向性中性子検出器の性能評価	37
5.1 試作検出器の構成	37
5.2 性能評価実験と成果	37
5.3 性能改善策	40
6. 指向性中性子検出器を用いた中性子発生プロファイル計測系の適用性評価	45
6.1 前提条件	45
6.2 マルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイル計測系の設計検討	45
6.3 指向性中性子検出器を用いた中性子発生プロファイル計測系の設計検討と 適用性評価	53
7. まとめと今後の展望	59
謝辞	60
参考文献	61
付録	62



# 1. 研究の概要

## 1.1 研究の目的

現在の磁場閉じ込め核融合の実験的研究は、DDやDT等の核反応プラズマ実験に確実に移行しており、またシステム設計的研究においても、DT 燃焼実験を前提とした国際熱核融合実験炉 ITER の工学設計がほぼ完了した段階にあって、将来の具体的な核融合炉概念も明確になりつつある。これらの研究において、炉心プラズマから大量に発生する核融合中性子の精密測定技術は、核的性能や安全性評価の観点から重要であるだけでなく、受動的なプラズマ診断・制御への応用の観点からも大きな期待が寄せられている。特に、中性子発生プロファイル計測は、米国 TFTR や E. C. JET などの大型核融合実験装置で実施された核反応プラズマ実験において極めて有効なプラズマ診断系として活躍し、その結果、核融合実験炉 ITER の計測設計では、最も開発優先度の高いランク、即ち、装置保護とプラズマ制御のための計測系として、燃焼制御や燃料供給制御の役割を担う位置づけが与えられた。しかしながら、現在の中性子発生プロファイル計測システムは、大型重量物である多チャンネル中性子遮蔽コリメータ内に中性子検出器を並べる方式が唯一採用されており、空間的制約の大きい核融合装置周辺へ設置する必要性から、大体積中性子源のプラズマを見込む視野や空間分解能の確保に大きな難点がある。

本研究代表者らは、この難点を解決する有力な手段として、数年前より、指向性を持つ中性子検出器を用いた（中性子遮蔽コリメータ不要の）中性子発生プロファイル計測システムの概念を提案し、その検出器要素として、中性子と水素弾性散乱の非等方性及びその反跳陽子エネルギーの角度依存性を利用した反跳陽子カウンターテレスコープ型検出器（反跳陽子放出ラジエータ（ポリエチレン薄膜）／荷電粒子マイクロコリメータ／高エネルギー分解能荷電粒子検出器の構成）の設計・試作、性能試験等を進めてきた。その結果、小型軽量ながら角度分解能 $\pm 10^\circ$ （検出器応答関数によるデータ補正で $\pm 1^\circ$ 程度まで改善可）を達成できることが分かったが、実用化にあたって、荷電粒子検出器（ex, Si 半導体検出器）と入射中性子の直接反応による S/N 比の改善や耐放射線性（検出器寿命）の確保、また検出器固有の角度分解能のさらなる向上が課題として残った。

そこで、本研究では、これらの問題を解決できる検出器要素として、基本原理を踏襲しながら、従来の反跳陽子放出ラジエータと荷電粒子検出器を、He（または $H_2$ ）-Xe 希ガスシンチレータに置換し、両者の同時計数をとる方式を提案したものである。即ち、入射中性子によって生成される反跳 He（または陽子）のうち、シンチレータガスセル間の荷電粒子マイクロコリメータを通過した成分のみを同時計数で選択して抽出する。この方式によって、S/N 比の改善、耐放射線性の確保、さらに He については、H よりも弾性散乱の非等方性が強いことから角度分解能（指向性）の向上が期待できる。また、検出器媒質が気体であるので、検出器サイズや検出感度（ガス圧）が広範に制御でき、さらに希ガスシンチレータの速い発光の高速同時計数を用いることで、時間分解能も保たれる。本研究では、上記アイデアに基づく検出器要素の設計・試作を行い、性能実証を行うとともに、従来のマルチチ

チャンネル中性子遮蔽コリメータ方式の代替システムとして、実機装置に適用可能なコンパクトな核融合中性子発生プロファイル計測システムの設計提案を行うことを目的としている。

## 1.2 研究成果の要約

本研究における主な成果は、次の通りである。

- (1) He-Xe 希ガスシンチレータ系について、ガスフローによる不純物除去および混合ガス比の最適化を図り、(反跳) He 検出に対する発光特性を実験的に明らかにした。
- (2) 検出器応答関数計算用プログラムを開発・整備し、検出効率および角度分解能をパラメータとする検出器設計を可能にした。また、DT(14MeV)中性子用の He-Xe 系と DD(2.5MeV)中性子用の H<sub>2</sub>-Xe 系につき、最適な検出器形状を見出し、性能予測とともに、適用限界を明らかにした。
- (3) 本指向性中性子検出器のプロトタイプシステムを設計・試作し、加速器 DT 中性子源等を用いて、基本性能を実験的に確認した。また、実用化に向けて、残された技術課題の洗い出しと要因分析を行い、その改良策を具体的に提示した。
- (4) 核融合科学研究所 LHD 装置への適用を想定して、本指向性中性子検出器をベースにした中性子カメラシステムの設計検討を行い、従来のマルチチャンネル中性子コリメータ方式に比べて、ほぼ同等な性能を保ちながら、そのシステム体積を 1/20 程度まで大幅に軽減できることを示した。

以上を総括すると、本研究は、従来の核融合中性子計測の技術体系へガスフロー式 He-Xe(および H<sub>2</sub>-Xe)ガスシンチレータ型指向性中性子検出器という新概念を導入し、極めてコンパクトな核融合中性子発生プロファイルモニターを実現する検出器要素として有効であることを実証したものであり、大型磁場閉じ込め核融合実験装置における DD/DT 核反応プラズマ実験での適用により、核反応プラズマ物理の解明に大きな役割を果たすことが期待できる。また、将来的に、核融合炉核計装系への発展、さらには、原子炉、大型加速器等における高強度かつ高エネルギーの中性子の動的画像計測とその応用への技術波及にも大きな寄与が見込まれる。

## 2. 指向性中性子検出器の概念

### 2.1 核融合中性子発生プロファイル計測

大型磁場閉じ込め核融合実験装置における中性子発生プロファイル計測は、核融合中性子カメラとも呼ばれ、核反応プラズマにおける大体積中性子源の空間的、時間的挙動をモニターすることでプラズマ制御等に利用される重要な計装項目である。

通常の測定方法としては、プラズマの存在する視野に対してコリメータによって絞られた視線に沿った中性子線積分値を測定し、その結果から中性子の時間的・空間的分布を導き出す方法が用いられる。それぞれの視線に沿った中性子束の時間分布を求めることが可能であるため、プラズマ中の中性子発生分布を仮定することでプラズマ全体としての中性子発生量時間分布及び中性子総発生量の概算を求めることができる。図 2-1 及び 2-2 に、代表的な中性子発生プロファイルモニタの構成図を示す。中性子発生プロファイルモニタはプラズマに対して水平及び垂直の二群から成り、それぞれ中性子マルチチャンネルコリメータとその内部に設置された中性子検出器群から構成される。中性子マルチチャンネルコリメータは主に中性子遮蔽材であるコンクリートやポリエチレンが用いられる。中性子検出器には中性子と $\gamma$ 線の混在場における  $n-\gamma$  弁別性、耐放射線性、広いダイナミックレンジが要求され、現在までに使用実績のある検出器としては NE213 有機シンチレータ (欧州 JET)、NE451 反跳陽子ラジエータ付 ZnS シンチレータ (米国 TFTR)、スチルベン有機結晶シンチレータ (原研 JT-60U) が挙げられる。

この方式の最大の問題点は、計測系ハードウェアを構成する上で必要不可欠な中性子マルチチャンネルコリメータにある。中性子マルチチャンネルコリメータは一般的に数~数  $10[\text{m}^3]$  の体積を占め、さらに今後の核融合実験炉クラスの中性子発生プロファイルモニタにおいては中性子発生量の増加から、さらに巨大な中性子マルチチャンネルコリメータが必要となる。将来的には、基幹プラズマ診断系の主流が中性子計測に移行することが予想されるが、現時点では他の通常プラズマ診断系が数多く存在し、核反応プラズマ物理の実験的解明には、通常プラズマ診断系と中性子計測系を組み合わせた総合的なプラズマ診断系の構築が重要かつ不可欠である。従って、実験装置近傍においては、中性子遮蔽とともに、他の通常プラズマ診断系との競合による空間的な制約が大きく、これまで巨大なマルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニタは水平・垂直のわずか二検出器群を設置するのが概ね限界となっている。その結果、プラズマを見込む視野数が限られるため、運転モードによっては中性子発生密度分布が十分な測定精度で得られない場合が生じている。

この問題を緩和する有力な方策の 1 つは、プラズマを見込む視野を制限するのに、中性子遮蔽コリメータを用いるのではなく、中性子検出器自体に指向性を持たせ、この小型の指向性中性子検出器を多数配置する方式が考えられる。

## 2.2 指向性中性子検出器

指向性中性子検出器とは検出器自身に中性子検出効率の入射角度依存性を持たせることでマルチチャンネルコリメータと同様に検出器の視界に制限を加えた中性子検出器である。先に述べたようなマルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニタの抱える問題は部分的な改良では解決することは難しい。従ってこの問題を解決する方策の一つとしてコンパクトかつ指向性を有する中性子検出器を多数配置する計装系が考えられ、これにより中性子コリメータを軽減もしくは省略が可能となることが期待される。

これまでに開発研究が行われた指向性中性子検出器としては、図 2-3、2-4 に示すような反跳陽子カウンターテレスコープ型のものが挙げられる。これらの指向性中性子検出器は水素含有のラジエータ中に入射した中性子による弾性散乱で生成する反跳陽子を荷電粒子検出器で測定するものである。この方式の動作原理や基本特性は実験的に確認されているが、実機適用上の問題点として耐放射線性が考えられる。次期大型核融合実験装置である国際熱核融合実験炉 ITER では、検出器設置箇所における最大中性子束が $\sim 10^{10} \sim 10^{12}$  [neutrons/cm<sup>2</sup>/sec]と、日本原子力研究所 JT-60U や核融合科学研究所 LHD 等の既設大型装置で見込まれる中性子束 $\sim 10^9$  [neutrons/cm<sup>2</sup>/sec]よりも 1～3 桁大きくなることが想定される。上述の反跳陽子カウンターテレスコープ型指向性中性子検出器は、荷電粒子検出器としてシリコン半導体検出器(Si-SSD)、プラスチックシンチレータ等を使用しているが、これらの検出器は Si-SSD で 14MeV 中性子フルエンスにして  $10^{12} \sim 10^{13}$  [neutrons/cm<sup>2</sup>]、プラスチックシンチレータでは  $10^{14} \sim 10^{15}$  [neutrons/cm<sup>2</sup>] の中性子フルエンスで特性劣化が始まるということが報告されている。従って、比較的短いサイクルでの検出器交換が必要となり実用的であるとは言い難く、核燃焼プラズマ実験などで実機に適用するには、さらなる耐放射線性の改善が必要と考えられる。

そこで、本研究ではマルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニタでの空間的制約の問題、またこれまで開発が行われた指向性中性子検出器での耐放射線性の問題を解決する方策として、ガスシンチレータベースの指向性中性子検出器による中性子発生プロファイル計測システムを考案した。本検出器の原理図を図 2-5 に示す。検出器の基本構造は、He-Xe または H<sub>2</sub>-Xe ガスを充填した検出器内を遮光薄膜で三分割したものである。高速中性子が入射する前方セル内の He 又は H が反跳され、中間セルを通過した反跳粒子のみを前方と後方セルで同時計数を取ることで選択的に検出する。中間セルの直径と長さの比を適切に設定して立体角を絞り、弾性散乱の非等方性とエネルギー弁別によって検出器に指向性を持たせることが可能となる。ターゲット物質はその対象となる中性子のエネルギーによって使い分ける。従来の固体検出器においてはターゲット物質として H が多く用いられてきたが、固体の検出器として用いることのできない He は弾性散乱以外の競合反応が存在せず、ノイズの低減が可能という利点を持っている。従って、D-T (14 MeV) 中性子測定に対しては、He-Xe 混合ガスシンチレータ、D-D (2.45MeV) 中性子測定には、H<sub>2</sub>-Xe 混合ガスシンチレータ型指向性中性子検出器を用いるのが適当であると考えられる。

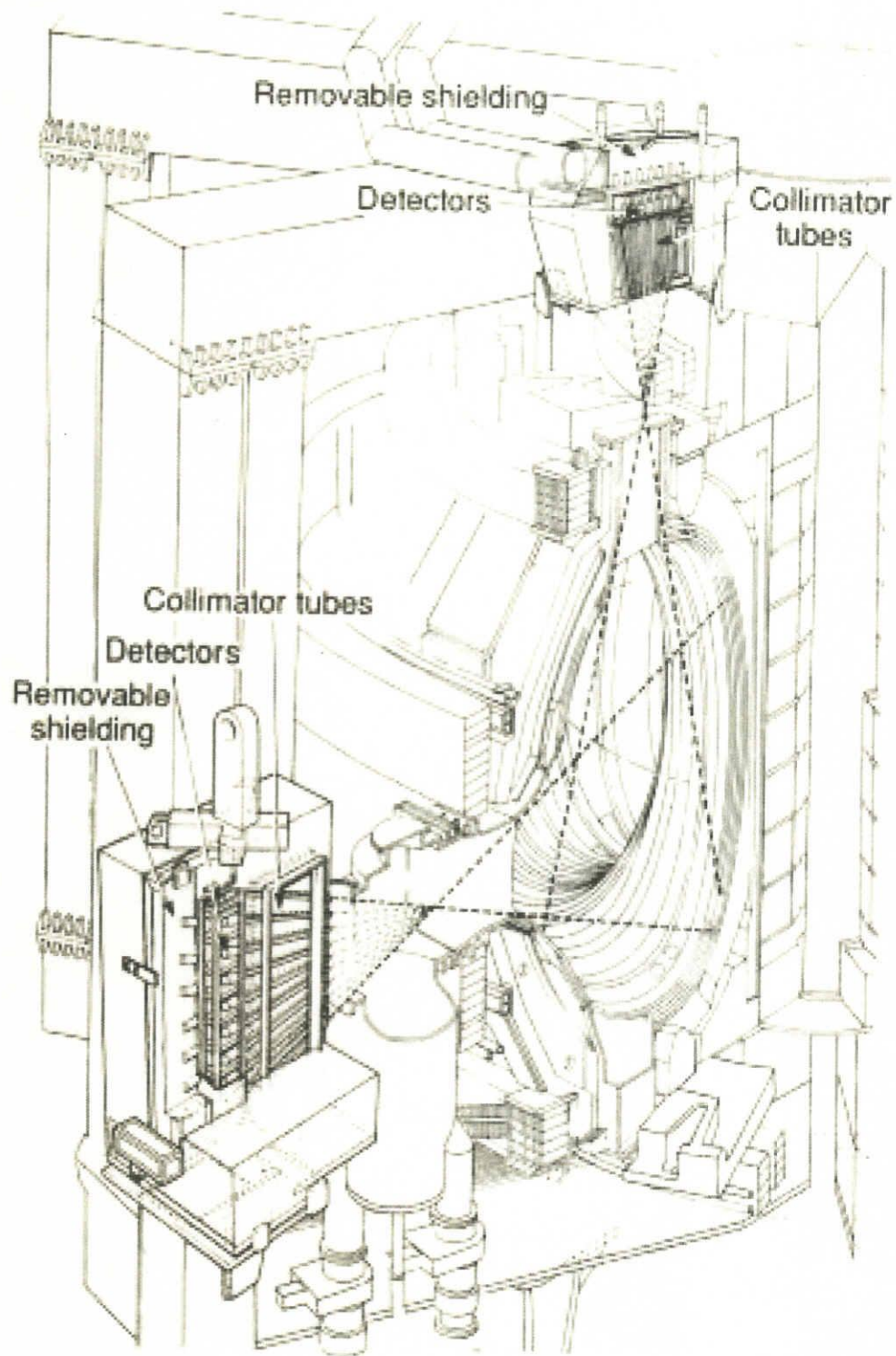


図2-1 JET に設置されたマルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニター



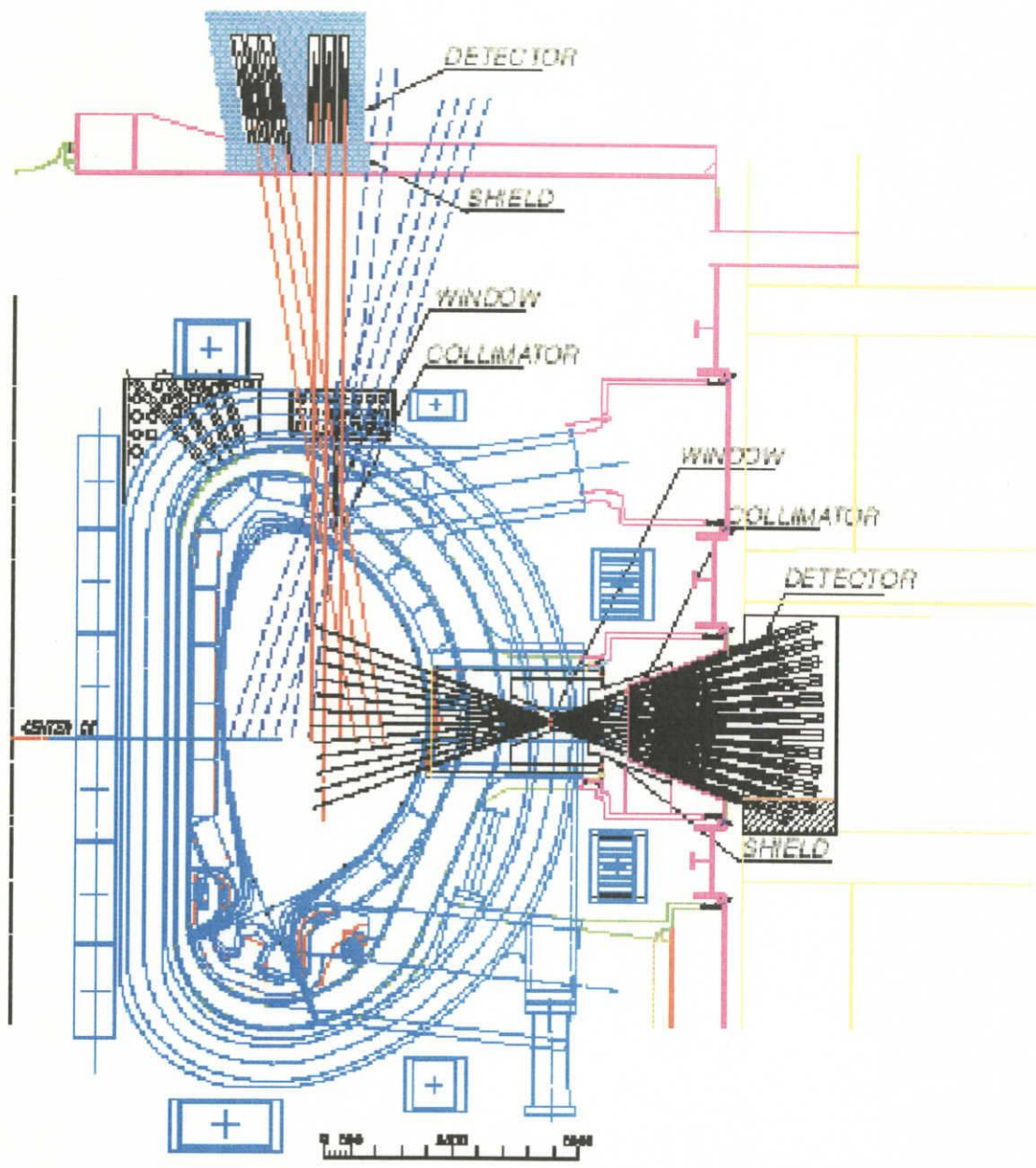


図2-2 国際熱核融合実験炉 ITER で想定される中性子発生プロファイルモニター概念

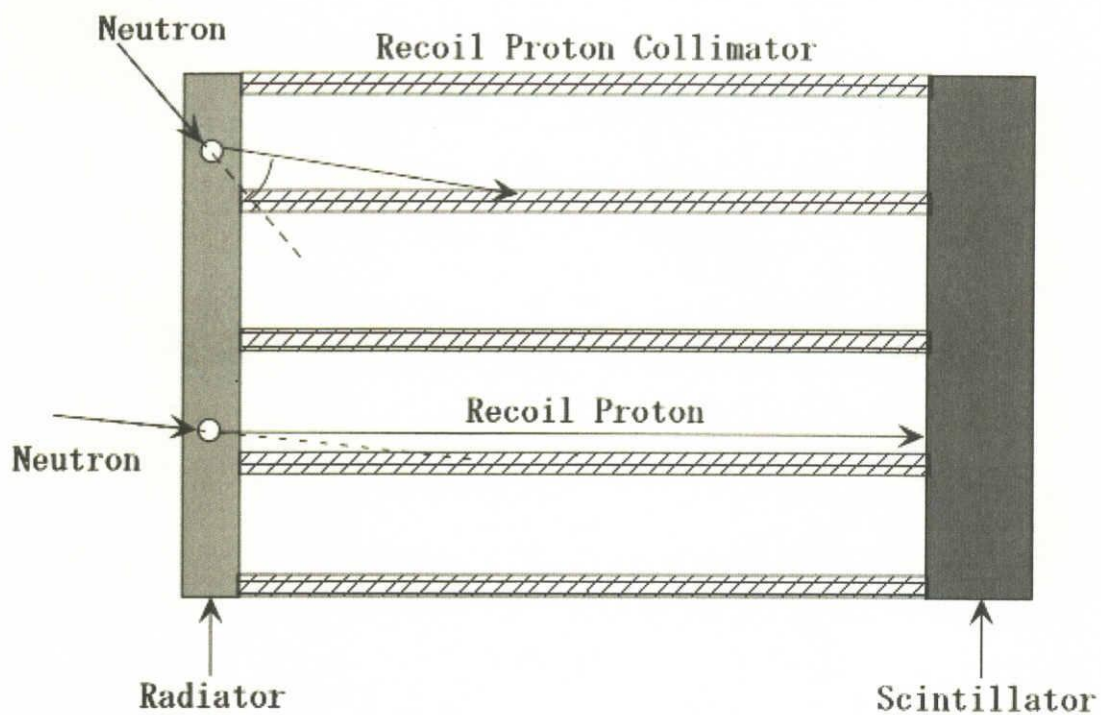


図2-3 反跳陽子カウンターテレスコープ型指向性中性子検出器の概念

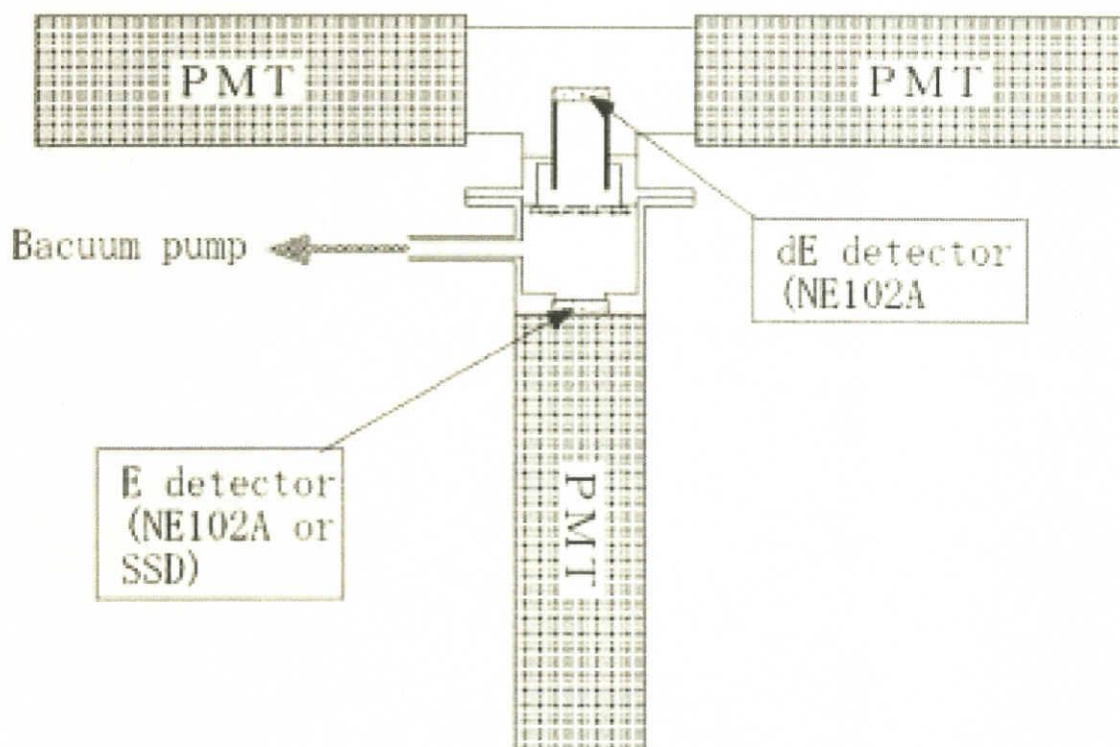


図2-4 反跳陽子カウンターテレスコープ型指向性中性子検出器の構成例 (COTETRA 利用)

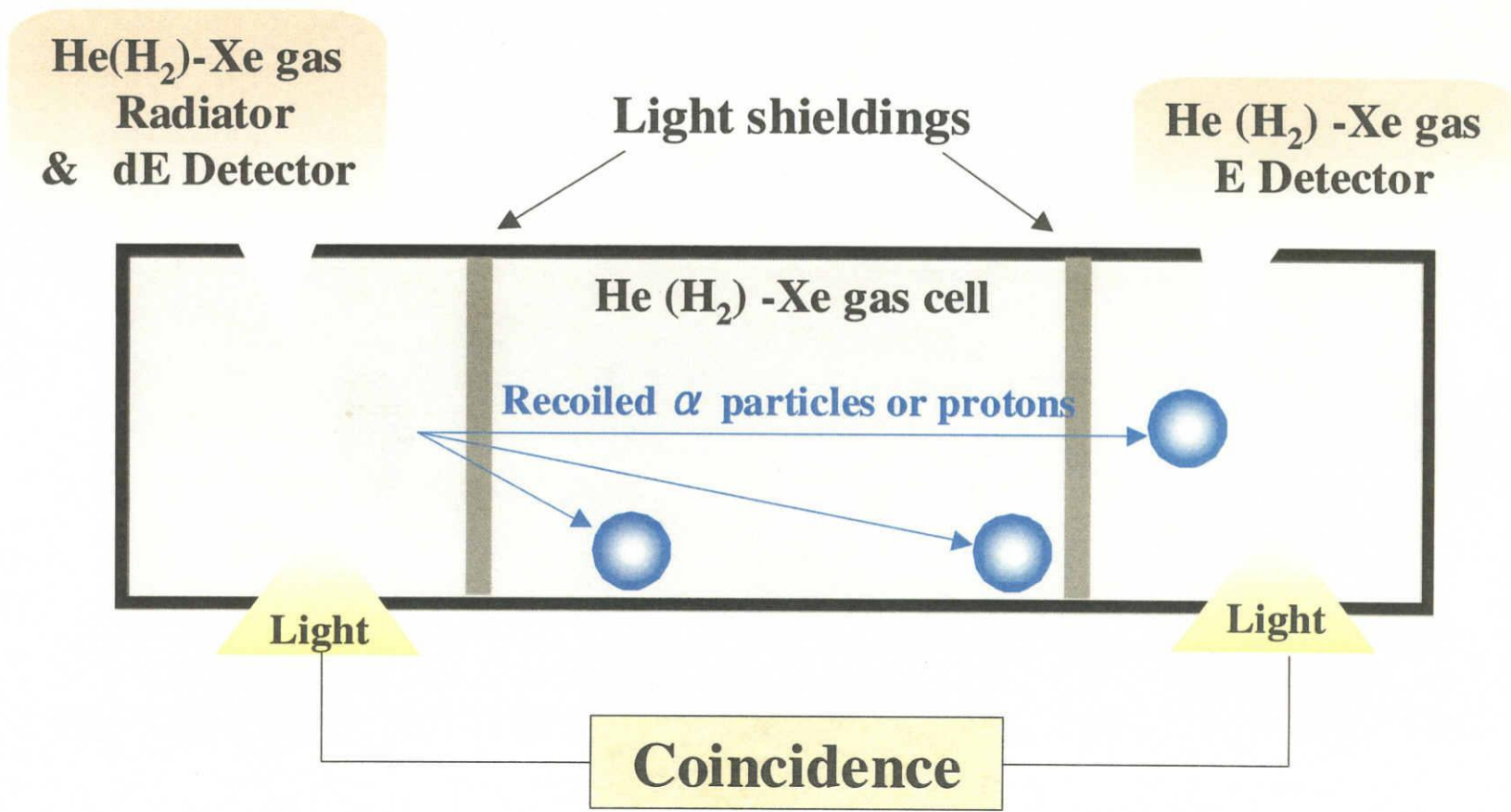


図2-5 He(H<sub>2</sub>)-Xe ガスシンチレータ型指向性中性子検出器の概念



### 3. He-Xe ガスシンチレータの特性評価

#### 3.1 ガスシンチレーション検出器

ある種の高純度ガスは、有用なシンチレーション材料となる可能性を持っており、特に、希ガスを用いたガスシンチレーション検出器についてはいくつかの報告例がある。シンチレーションの機構は比較的単純であり、入射放射線、すなわち荷電粒子がシンチレータ中を通過する際、気体分子を励起し、これらの励起分子が様々な過程で基底状態に戻る際に光子が放出されるものである。シンチレーション光放出の多くは可視領域よりも紫外線領域に多く、シンチレーション光を直接検出する場合には近紫外域領域に感度を持つ光電子増倍管やフォトダイオードを使用する必要がある。その代わりに波長シフトを行い、紫外線を一旦吸収し、より長波長の光子を再放出させ、可視領域感度の一般的な光電子増倍管により測定する方法もある。具体的には適当な波長シフト物質（一般的に、有機シンチレータ材）を検出器内面に塗布する方法や、ガス中に窒素を混合させる等の方法がある。ガスシンチレータの特徴としては

- ① 励起状態から基底状態への遷移が通常2~3nsまたはそれ以下という非常に短い時間内に起こる為、減衰時間が極めて短くすべての放射線検出器の中で最も早いものとなりうる
- ② ガス中に付与されたエネルギー当たりの発光量は検出粒子の電荷と質量に依存しない
- ③  $\gamma$ 線に対する検出効率が極めて小さい
- ④ ガスフロー方式を取り、シンチレーションガスを必要に応じて循環させることにより中性子による特性劣化を防ぐことができる
- ⑤ 寸法、形状および入射放射線に対する阻止能を状況に応じて簡単に変更することができる

といった点が挙げられる。これらの特徴、特に①、③、④の点でガスシンチレーション検出器は従来使用されてきた放射線検出器よりも、核融合実験装置周辺の計測に対して適切な検出器であることがわかる。しかしながら、遷移の際分子間衝突や内部消光のような多くの競合過程が存在するため、ガスシンチレータのシンチレーション効率は全体として非常に低い。いくつかの希ガスシンチレータのシンチレーション光率を表 3-1 に示す。最良の場合でも同じ荷電粒子のエネルギー損失に対して一般的なシンチレータである NaI 無機シンチレータの 1/10 程度である。

中性子の計測は弾性散乱によって生成する反跳粒子を測定することで検出器物質を直接励起しない中性子を間接的に測定する手法で行う。ターゲット物質として用いられるのは軽い核である H や He 等であり、もっとも一般的なものは水素である。今回使用するガスシンチレータにおいて水素ガスを混合しターゲット物質とすることも可能であるが、水素ガスは可燃性ガスであり爆発しやすい等の性質を持つため、取り扱いの簡便さ等から、検証実験では、He ガスをターゲットとして使用することとする。He もターゲット物質として非常に優れて

おり、中性子との相互作用は弾性散乱のみであり他の競合反応が存在せず余計なノイズ成分を完全に排除することができる。また陽子に比べその飛程が短いことから、同圧力でのガス充填においても検出器サイズのコンパクト化を実現することができる。He ガスのみでもガスシンチレータとしての動作の確認はなされているが、表3-1に示したようにHeは非常に発光の波長が短く、その発光量も小さい。そこで他のガスとの混合によって発光量等を補う必要があるが、ここではガスシンチレータの中でも発光量が大きく、発光波長も比較的長いXeが、混合するガスとしては最も適当であると考えられる。

気体	4.7MeVの $\alpha$ 粒子当たり入 $>200\text{nm}$ の光子の数 <sup>(8)</sup>	主な発光波長[nm] <sup>(9)</sup>
キセノン	3700	150~190
クリプトン	2100	-
アルゴン	1100	107~140
ヘリウム	1100	60~90
窒素	800	-
NaI(Tl)(比較用)	41000	410

表 3-1 種々のガスシンチレータの特性

### 3.2 発光確認実験

He と Xe の混合ガスの  $\alpha$  粒子に対する発光の確認実験及びその混合比に対する発光量の依存性の測定を行った。これらのガスでの  $\alpha$  粒子に対する発光確認の報告は多数みられるが、実験によって使用する波長シフタや光電子増倍管 (PMT) の組み合わせ方が様々であり、測定結果もその組み合わせに大きく依存する。本研究では、波長シフタを使用せず、紫外域に有感な PMT で直接的にシンチレーション光を測定する方法を採用する。これは波長シフタとして使用される物質は一般的に有機シンチレータ材の一種であり C と H から構成されているため、この物質を容器内壁に塗布した場合、中性子の照射によって反跳陽子が生成されることでノイズ原因となるといった懸念があることによる。また、本研究の大きな目標の一つである耐放射線性の向上に対しても波長シフト物質は不適當であり、PMT による直接測定が最も有効であると考えられる。

ガスシンチレータとして使用されるガスには高純度のものが求められる。ここでは He 純度 > 99.9999%、Xe 純度 > 99.995% を使用する。それぞれのガスの成分分析結果は、表 3-2 に示すものである。

$\alpha$  線源としては代表的な  $^{241}\text{Am}$  を使用した。この線源から放出される  $\alpha$  粒子は約 5.4 MeV でほぼ単色である。したがって、このエネルギーピーク的位置をその混合比での発光量とすることで、それぞれの混合比による発光量の比較を行った。

ガス 濃度	He	Xe
	> 99.9999%	> 99.995%
不純物	濃度	
O <sub>2</sub>	< 0.05 ppm	< 1 ppm
N <sub>2</sub>	< 0.1 ppm	< 5 ppm
CO	< 0.02 ppm	< 1 ppm
CO <sub>2</sub>	< 0.02 ppm	< 1 ppm
CH <sub>4</sub>	< 0.01 ppm	-
THC	-	< 0.5 ppm
Kr	-	< 40 ppm

表 3-2 高純度 He および Xe ガスの成分表

#### 3.2.1 実験系と測定システム

検出器の概略及び測定系を図 3-1 に示す。ガスチャンバーは SUS304 製で内部は軽いバフ加工が施されている。 $\alpha$  線源はアルミニウム板上に薄く電着されたものを使用する。測定の目的はガスの混合比による発光量の違いを測定することであり、集光条件などのガス混合比以

外の条件は同等にする必要がある。しかしながらガスの全圧を同じにした場合ではガス中の $\alpha$ 粒子の飛程が異なるため、同一な集光条件を得ることができない。そこで $\alpha$ 線源を合成石英窓から約130mmの位置に設置し、ガスの全圧を $\alpha$ 粒子の飛程が100[mm]程度になるように設定するという手法を採用した。この条件での各混合比でのHe、Xeガスそれぞれの分圧を表3-3に示す。また壁効果による影響を防ぎ、できる限り放出された $\alpha$ 粒子がすべてのエネルギーガス中に付与するように線源にセラミック製のコリメータ(1mm×1mm×5mm)を取り付け、線源からの $\alpha$ 粒子の射出方向をほぼPMT方向のみに制限した。

PMTの選定は今回のように直接的にガスシンチレータの発光測定を行う場合においては最も重要である。対象とする発光波長は非常に短く、特にHeの発光波長は主に60~90[nm]程度である。現在市販されているPMT(浜松ホトニクス)ではこの領域の光に対して有感なものはない。従って比較的高波長かつ高発光量のXeの発光を測定することが有望である。Xeのシンチレーション光に対して使用されているPMTとしてバイアルカリの光電面と合成石英ガラスの入射窓の組み合わせのものがある。このタイプのPMTの分光感度曲線を図3-2に示す。この図に示されるように感度領域は可視領域まで伸びており、非常に幅広い発光を示すガスシンチレータには適当であると考えられる。従って、今回の測定にはこのタイプのPMT R189(浜松ホトニクス)を使用した。

本研究では、ガスの不純物抑制と照射損傷軽減を図るため、ガスフロー方式でのガスシンチレータを採用している。しかしながら、本測定は、それほど長い時間を要しないため、ガスの劣化等がほとんど問題にならないことから、一度チャンバー内を $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$ [Torr]程度まで真空に引き、その後任意の比にガスを混合して充填するというバッチ方式で行った。

このような条件下で、混合ガス充填後に、合成石英の窓を通してシンチレーション光をPMTで測定し、その波高分布のガス混合比による違いを系統的に調べた。

He分圧比	Xe分圧比	全ガス圧[mmHg]	He分圧[mmHg]	Xe分圧[mmHg]
1	0	1512.5	1512.5	0.0
0.9	0.1	869.9	782.9	87.0
0.8	0.2	611.2	489.0	122.2
0.7	0.3	471.1	329.8	141.3
0.6	0.4	383.3	230.0	153.3
0.5	0.5	323.1	161.5	161.5
0.4	0.6	279.2	111.7	167.5
0.3	0.7	245.8	73.8	172.1
0.2	0.8	219.6	43.9	175.7
0.1	0.9	198.4	19.8	178.6
0	1	180.9	0.0	180.9

表3-2 各ガス混合比でのガス全圧およびHe/Xeガス分圧



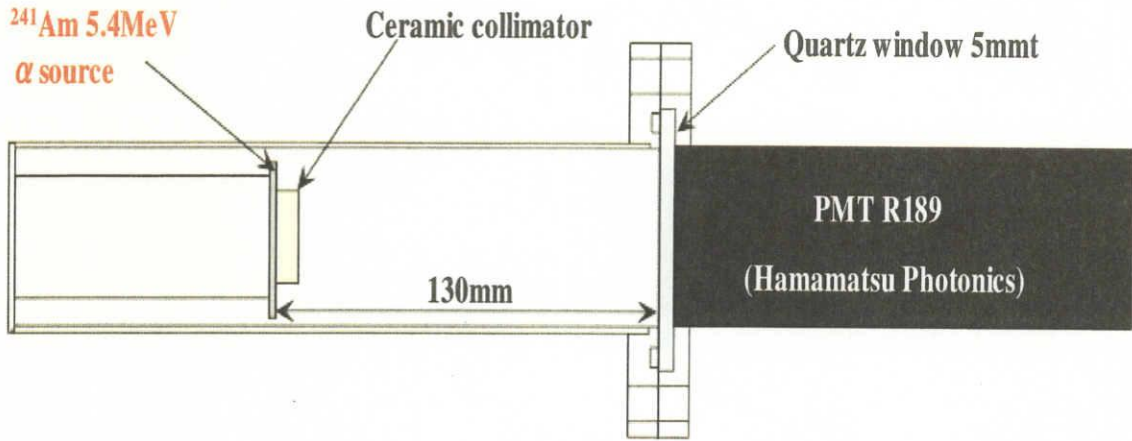


図3-1 He-Xe ガスシンチレータ発光実験系

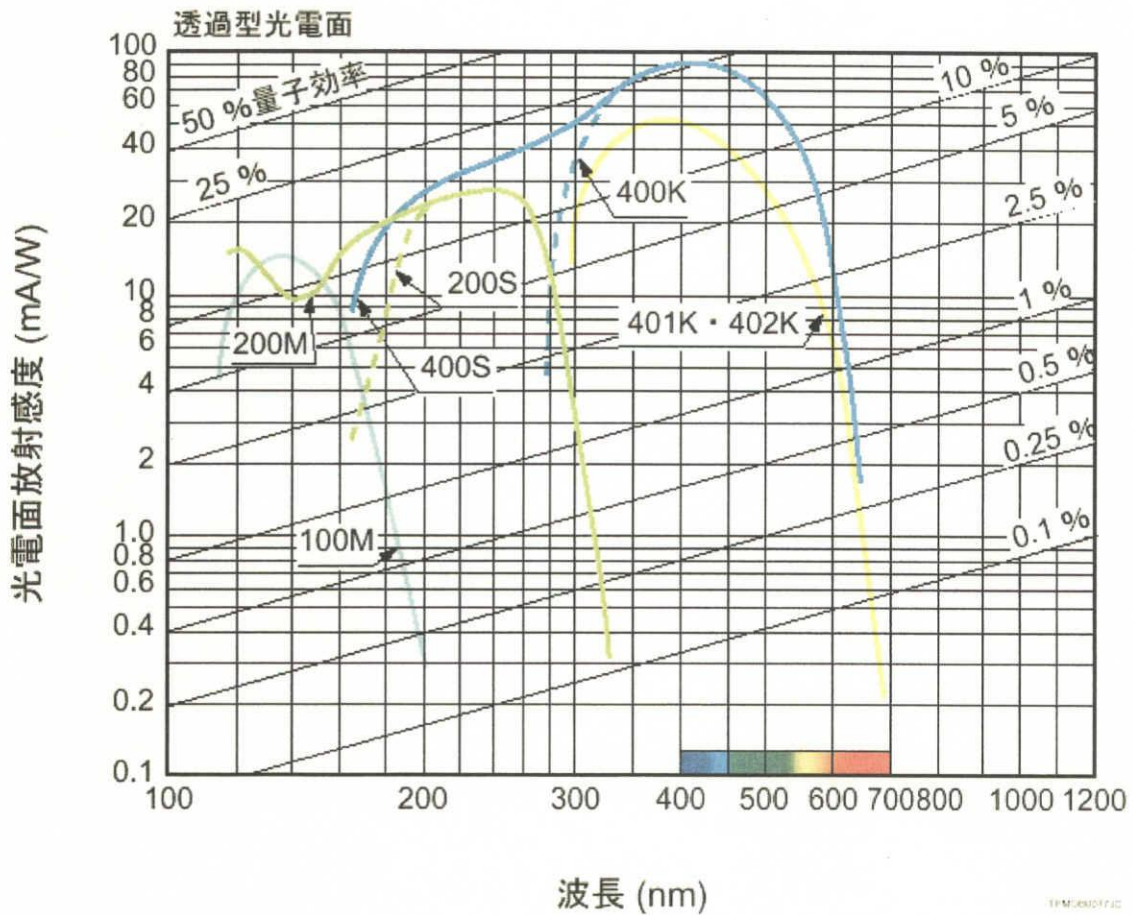


図3-2 光電子増倍管の光電面分光感度特性 (R189PMTは400Sの曲線)

### 3.2.2 結果と考察

測定された波高分布の一例を図 3-3 及び 3-4 に示す。図 3-3 は、He と Xe のガスの混合비가 9:1 及び 0:10 の場合の波高分布であるが、エネルギー分解能が悪いながら、明らかにピークとなっている部分がみられる。この観測ピークをもとに、He-Xe 混合ガスの  $\alpha$  粒子に対する発光特性の実験的評価を行った。なお、分解能が非常に悪い原因として、本検出器の内壁加工の不十分さと線源を固定する台部分等により光が複雑に反射し、PMT への集光効率が低く、光子の計数統計精度が悪いことによると考えられる。また、低波高部分の成因は主に PMT のノイズと壁効果を起こした成分であると考えられる。

一方、図 3-4 に示すのは  $\alpha$  線源を設置し、内部にはガスを充填せず 1atm の空気を入れたままの測定結果と He ガスのみを充填したときの結果である。内部を真空にした状態での測定でもこれらと同様のスペクトルが得られたことから、これらは PMT ノイズ成分であることが分かる。また先に予測したように、He ガスからの発光は PMT で測定することは困難であるため、He のみの充填時にはガス非充填時とほとんど変化のないスペクトルが現れた。従って中性子検出器用ガスシンチレータとしての動作のためには Xe の混合が必須であると考えられる。

これらの測定結果の  $^{241}\text{Am}$  からの  $\alpha$  粒子のピーク位置をその混合比における発光量として Xe 分圧に対してプロットしたものが図 3-5 である。ここでの発光量の誤差は、そのピークの半値幅をとっている。この結果から多少のばらつきはあるが、ほぼ Xe の混合比の増加に伴い発光量が増大していることが分かる。これは主に PMT で測定可能なシンチレーション光は Xe が発していることに起因しているためと考えられる。従って、発光量のみ観点から考えると、中性子検出用ガスシンチレータの混合比として最も適切であるのは Xe 混合比が高い場合であるが、ラジエータとしての He の役割等、本検出器の特性に影響を与える他の要因から総合的に判断して、最適な He と Xe の混合比を決定する必要がある。

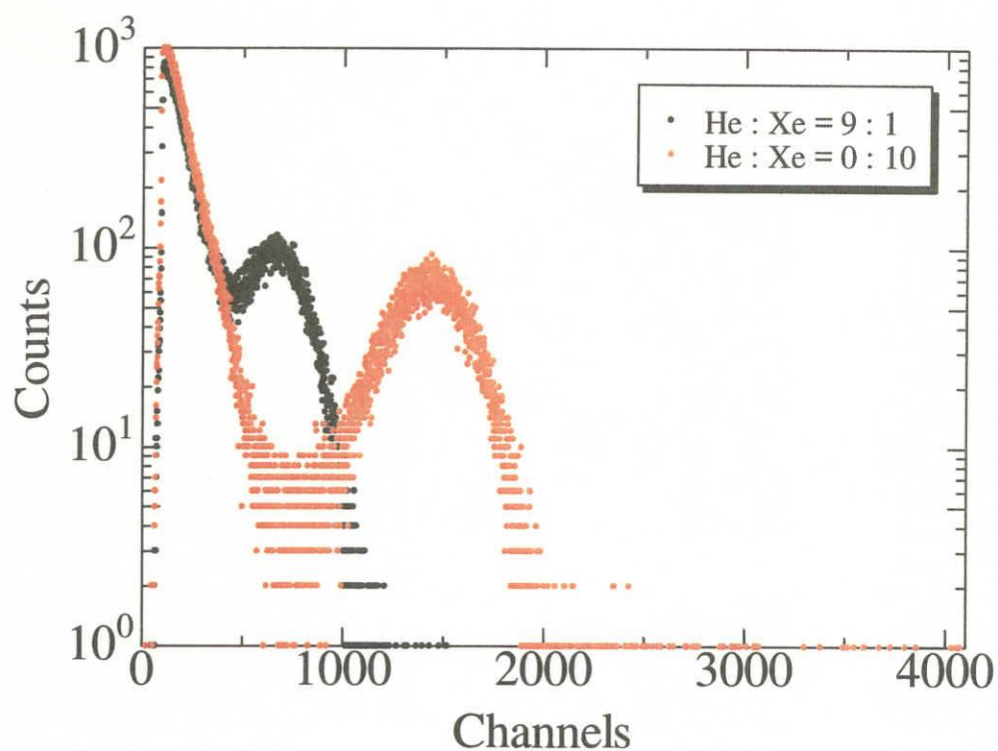


図3-3 He-Xe ガスシンチレータの Am-241  $\alpha$  線に対する発光出力波高分布の測定例

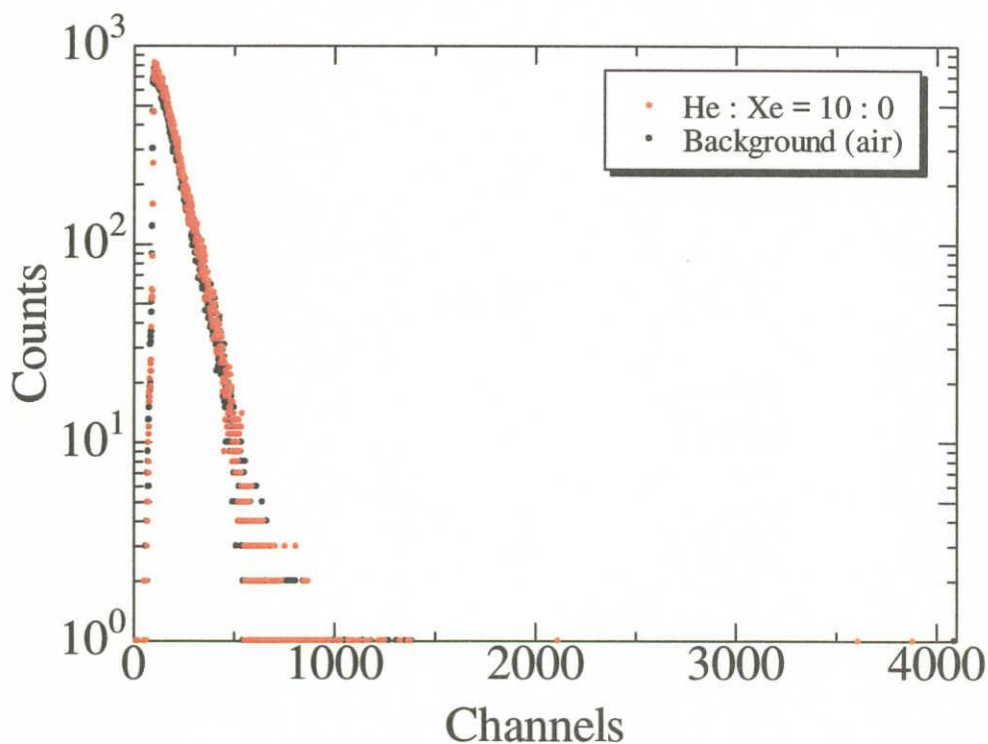


図3-4 Am-241  $\alpha$  線に対するバックグラウンド (He および空気) 発光出力の波高分布

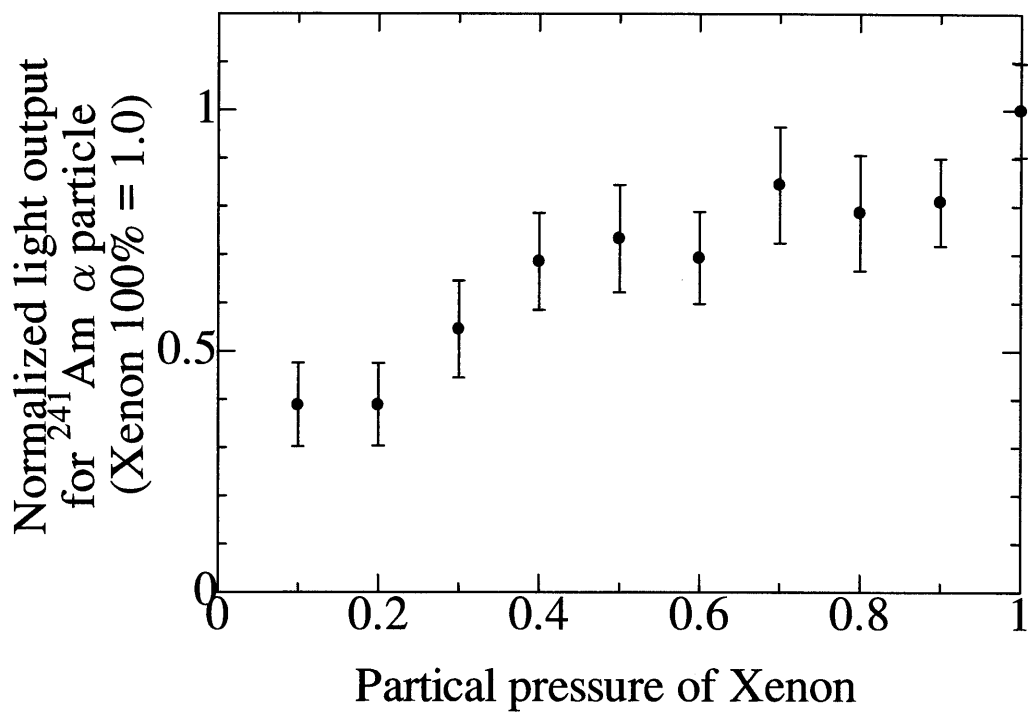


図3-5  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$ 線に対する発光量のHe-Xeガス混合比の依存性



### 3.3 最適ガス混合比の検討

He-Xe 混合ガスシンチレータの発光量は Xe ガスの混合比の増加に伴い増加することを実験的に確認したが、核融合中性子検出の観点から、その他にもいくつかの因子がガス混合比により影響を受ける。そこで、これらを総合的に判断し、ガスシンチレータ型指向性中性子検出器に最も適当なガス混合比の決定を試みた。ただし、検出器は、使用時の簡便化のためガスを全圧 1atm で用いるものとした。

まず、Xe ガスの混合比の増加に伴う得失について整理すると

#### メリット

- ・発光量の増加

#### デメリット

- ・He ターゲット原子数密度の減少に伴う中性子に対する検出効率の低下
- ・比較的重い原子である Xe の増加に伴う  $\gamma$  線感度の向上

(・高純度 Xe ガスは非常に高価である)

といった点が挙げられる。

次に、He の減少に伴う検出効率の低下について、これを中性子に対する巨視的断面積で評価する。巨視的断面積  $\Sigma$  の定義は

$$\Sigma[\text{cm}^{-1}] = N[\text{個}/\text{cm}^3] \times \sigma[\text{cm}^2] \quad (3-1)$$

である。従ってほぼガス内の He 原子数密度すなわち分圧に比例するものである。

$\gamma$  線感度に関しては各混合比における全線質量減弱係数で評価するものとする。値は文献値であり、各混合比による値を図 3-6 に示す。

ここで発光量(A)、中性子検出効率(B)、 $\gamma$  線感度(C)の 3 つの因子の重みを同等としこれらを総合的に評価する値として次のような値を定義する

$$F.O.M = A \times B \div C \quad (3-2)$$

この値及び発光量、中性子検出効率、 $\gamma$  線感度を Xe 分圧に対してプロットしたものが図 3-7 である。ただし、ここでの全線質量減弱係数は代表点として 1[MeV] の  $\gamma$  線に対するものである。

以上の結果から、本検出器のガス混合比としては He:Xe=9:1 が最も適切であると判断される。従って、本研究ではこのガス混合比を採用し、中性子検出実験に用いた。また、DD 中性子用の  $\text{H}_2$ -Xe ガスシンチレータにおいても、このガス比が適当であると仮定した。

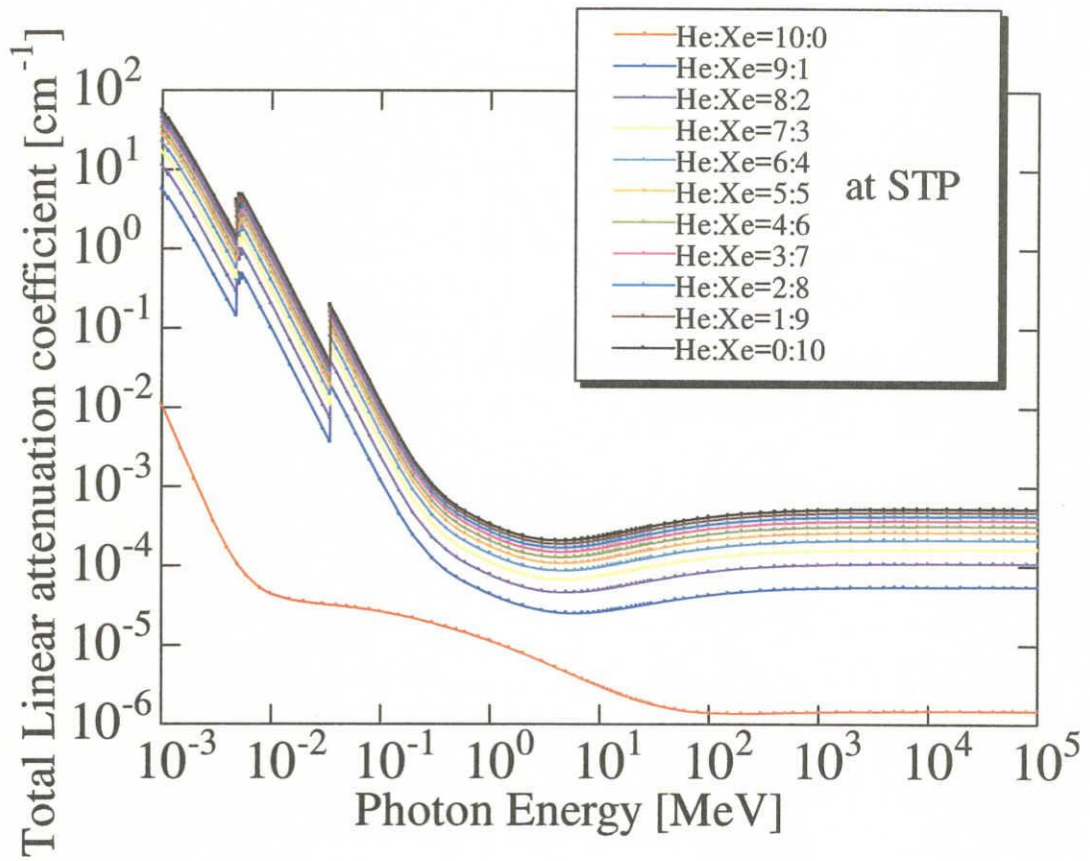


図3-6  $\gamma$ 線全線減弱係数のHe-Xeガス混合比依存性（1気圧）

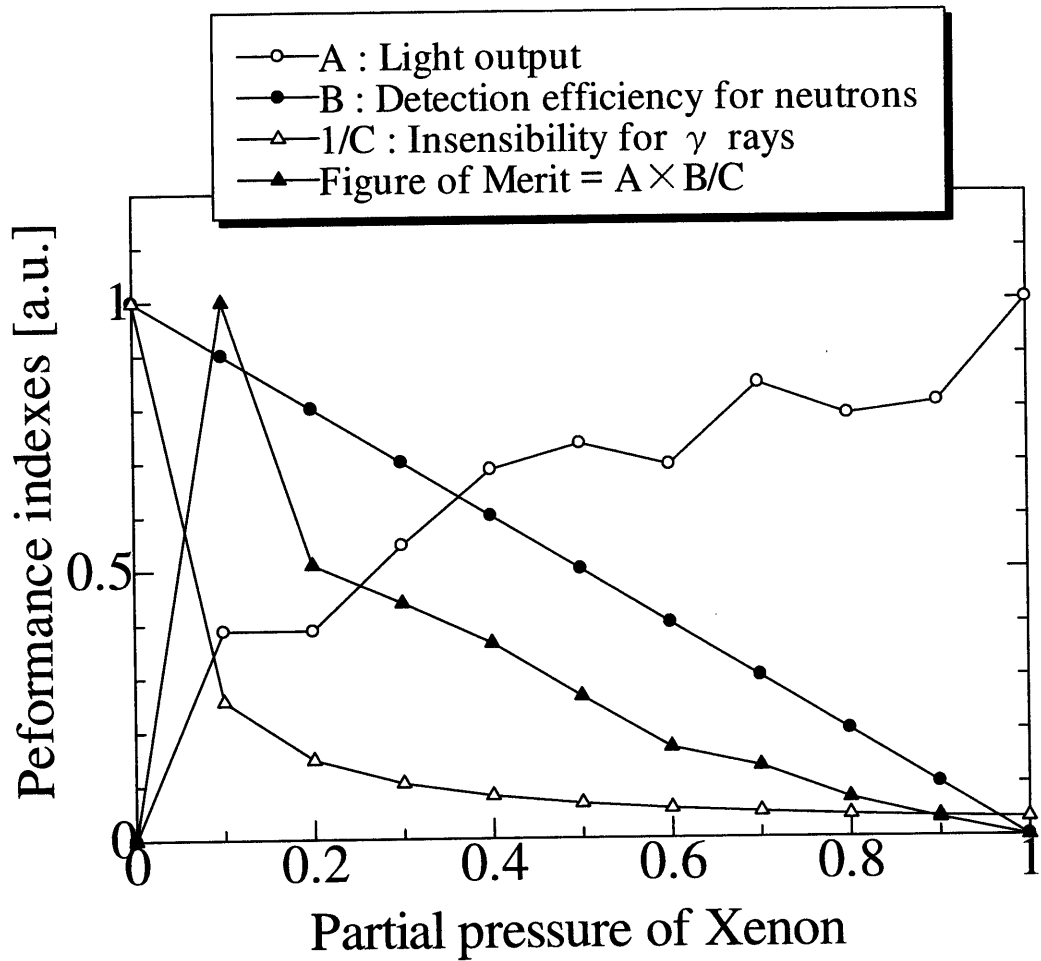


図 3-7 最適な He-Xe ガス混合比の選定評価

### 3.4 中性子検出基礎実験

He:Xe=9:1 の混合ガスシンチレータを用いて、高速中性子の検出基礎実験を行った。ガスフローとするため、あらかじめ He と Xe を 9:1 に混合したガスをボンベから直接検出器内へ流し、大気中へ放出することで内部のガス圧を約 1atm に保つという方法を採用した。

検出器の概略及び測定システムを図 3-8 に示す。片側の PMT から光を読み出す手法の場合直接 PMT の窓に入射する  $\gamma$  線や中性子により比較的高波長のノイズが多量に発生し、中性子による信号のみを特定することが妨害されたため、ガスチャンバー両端に PMT を取り付け、ガス中で発生したシンチレーション光の同時計数を取ることで  $\gamma$  線や中性子による PMT への直接入射によるノイズを除去することとした。この場合の波高分布は、両 PMT からの信号波高の和として得られるが、各信号は別経路をたどって収集されるため、それぞれの系列におけるゲイン等の較正を、パルサーにより一定波高の信号を各系列ごとに伝送させることで行った。この結果を元にデータ取得後、適当な重みを加えてデータ処理プログラムにより 2 つの測定結果を加算することになるが、前もって内部に  $^{241}\text{Am}$  を設置した実験で正常動作を確認した。また、パルス幅及び光の到達時間からコインシデンスタイムは  $5[\mu\text{s}]$  とした。

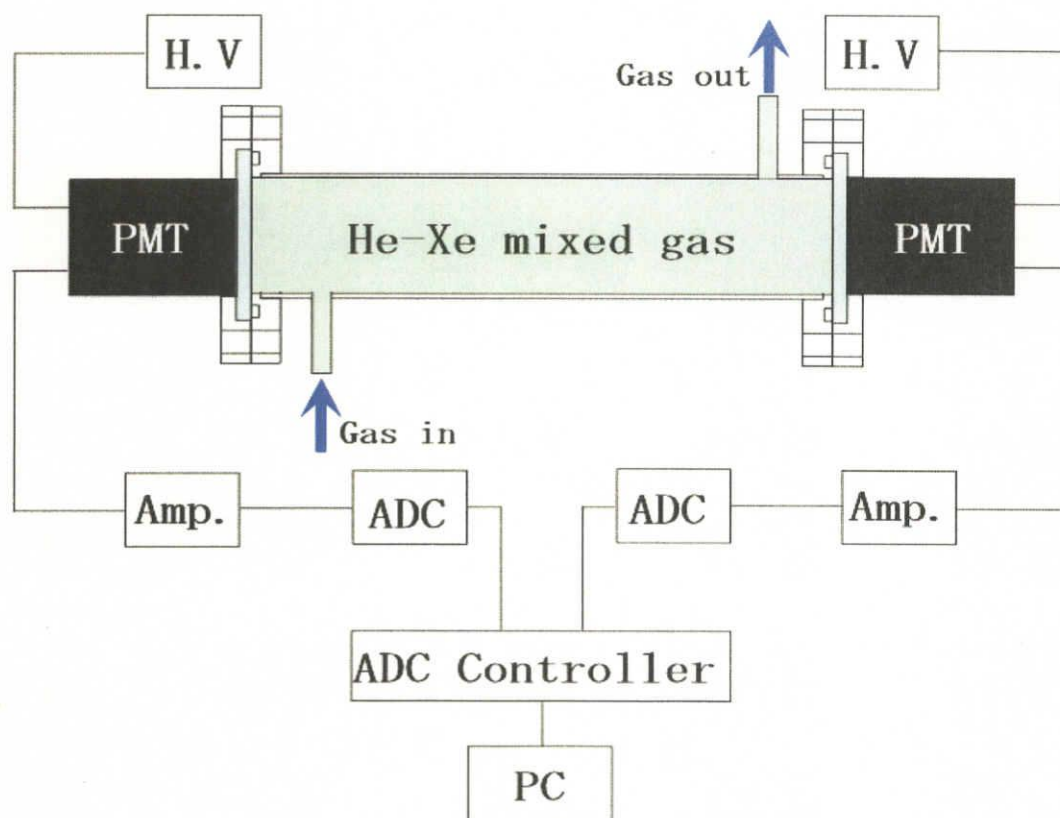


図 3-8 He-Xe ガスシンチレータの中性子検出基礎実験の測定系

### 3.4.1 Am-Be 中性子源に対する応答測定

名古屋大学工学研究科原子核工学専攻第一特別実験棟黒鉛室において、Am-Be 線源(186GBp)に対する He-Xe ガスシンチレータ型中性子検出器の応答測定を行った。この線源からの中性子のエネルギースペクトルは最高約 12MeV に及び、平均エネルギーは約 4MeV で、中性子の放出量は約  $1.26 \times 10^7$  [neutrons/sec] である。ここでは、ガス充填後すぐに測定可能であることからガスの劣化等の問題が無視できるため、ガスフローの形で行わず一度真空に引いたガスチャンバー内に He:Xe=9:1 の混合ガスを充填する形での実験を行った。実験体系は図 3-9 に示すもので、検出器内にできる限り多くの中性子が入射するようにガスチャンバーのほぼ中央部に線源を密着させた。

波高分布の測定結果を、図 3-10 に示す。この結果は、両側の PMT からの信号の同時計数を取ったもの同士の和で、図におけるバックグラウンドとは、線源を取り除いた状況での測定結果である。線源からの中性子と  $\gamma$  線がもろに PMT に入射しており、S/N 比的に悪条件の測定であるが、中性子入射時と非入射時に高エネルギー側で有意な差異がみられ、He-Xe ガスシンチレータによって Am-Be 中性子源からの中性子検出を確認できたと言える。

### 3.4.2 DT 核融合中性子に対する応答測定

日本原子力研究所核融合中性子工学用中性子源 FNS (Fusion Neutron Source) において DT (14MeV) 中性子に対する応答測定を行った。FNS では重水素を加速し、トリチウムターゲットに衝突させることで DT 核融合反応を起こし 14MeV 中性子を発生させている。

実験体系を図 3-11 に示す。0° ビームラインで発生した中性子を、ビームラインに対して 80° 方向にある実験ポートから 49cm の位置で測定を行った。中性子はトリチウムターゲット近傍の鉄 50cm のプリコリメータ、第一・第二ターゲット室間にある鉄 120cm、ポリエチレン 40cm のコリメータによって 20mm  $\phi$  のビーム状となる。検出器は両端の PMT からほぼ中央の位置に、中性子ビーム全体が検出器にあたるようにガスチャンバー円筒の軸とかビームの中心が重なるように設置した。ガスシンチレータは、本研究での経験によると、ガスを充填した後 50 時間以上経過したような場合には不純物ガスの混入やガスの透過により、発光特性の顕著な劣化が観測された。従って、本実験ではガスフローを採用した。ガスボンベから直接検出器内に混合ガスを流し、バブルゲージを通して大気中へ放出しながら循環させ、ガスの流量はバブルゲージの泡の個数によって管理した。ガスは測定開始約 18 時間前から循環させ、検出器内部を十分に置換することに留意した。特性測定として、波高分布の取得とともに、ビーム電流を変化させることで検出器の計数率の中性子束に対する比例性の確認も行った。

図 3-12 に、He-Xe 混合ガス 1atm 充填時と内部に空気 1atm 充填時及びガスを充填しビームを停止させた状態それぞれの波高分布を示す。この結果から He-Xe 混合ガス充填時にのみ特に高エネルギー側において顕著な差異を確認することができた。特に、空気のみを充填した

場合にはほとんど計数が得られなかったことから、信号は He-Xe 混合ガスシンチレータからの発光によるものであると考えられる。

図 3-13 は、中性子束に対する He-Xe 混合ガスシンチレータ型中性子検出器の計数率変化を示す。中性子束は FNS に線源モニターとして設置されている核分裂計数管の計数とその立体角からターゲットでの中性子総発生量  $Y_n$  求め、ターゲットと検出器までの距離  $d_{\text{det}}$  を用いて

$$\text{中性子束} = \frac{Y_n}{4\pi d_{\text{det}}^2} \quad (3-3)$$

から算出した。結果は、ほぼ中性子束に対して比例した計数が得られ、He-Xe ガスシンチレータによる DT 核融合中性子検出を確認できた。

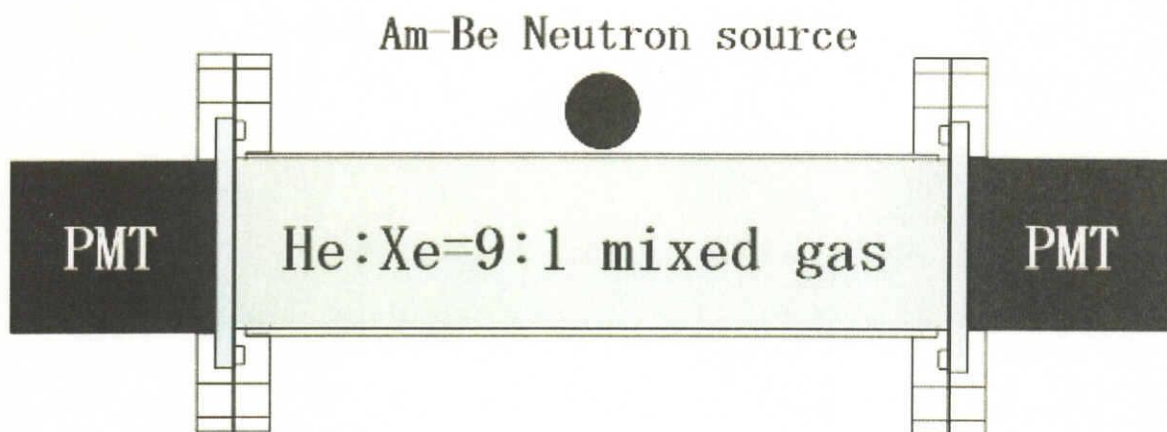


図3-9 Am-Be 中性子源を用いた実験配置

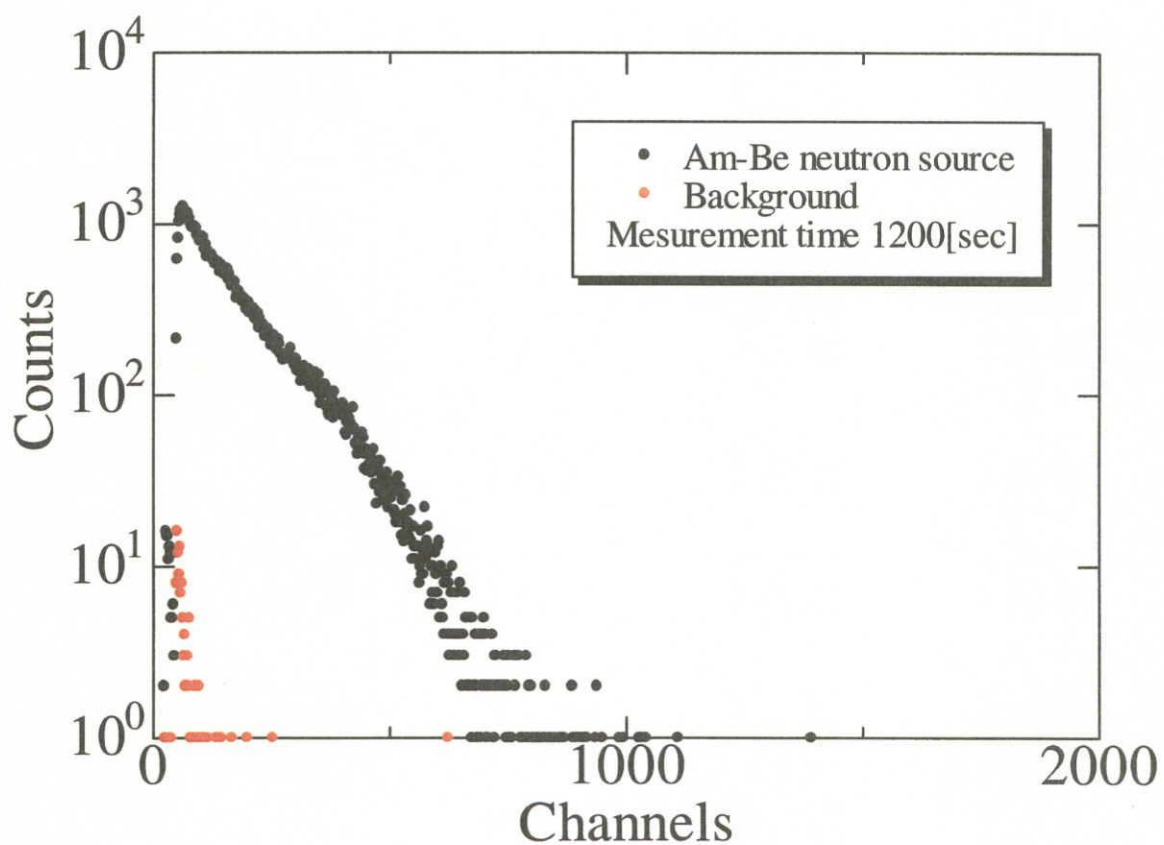


図3-10 He-Xe ガスシンチレータのAm-Be 中性子源に対する検出応答測定結果



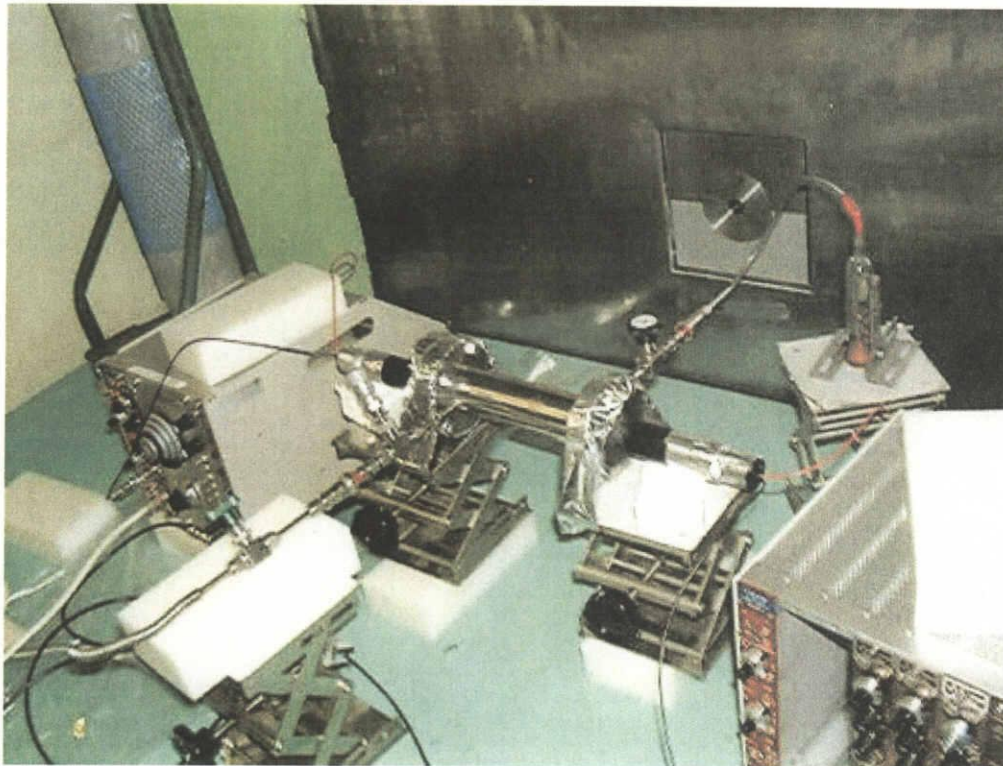
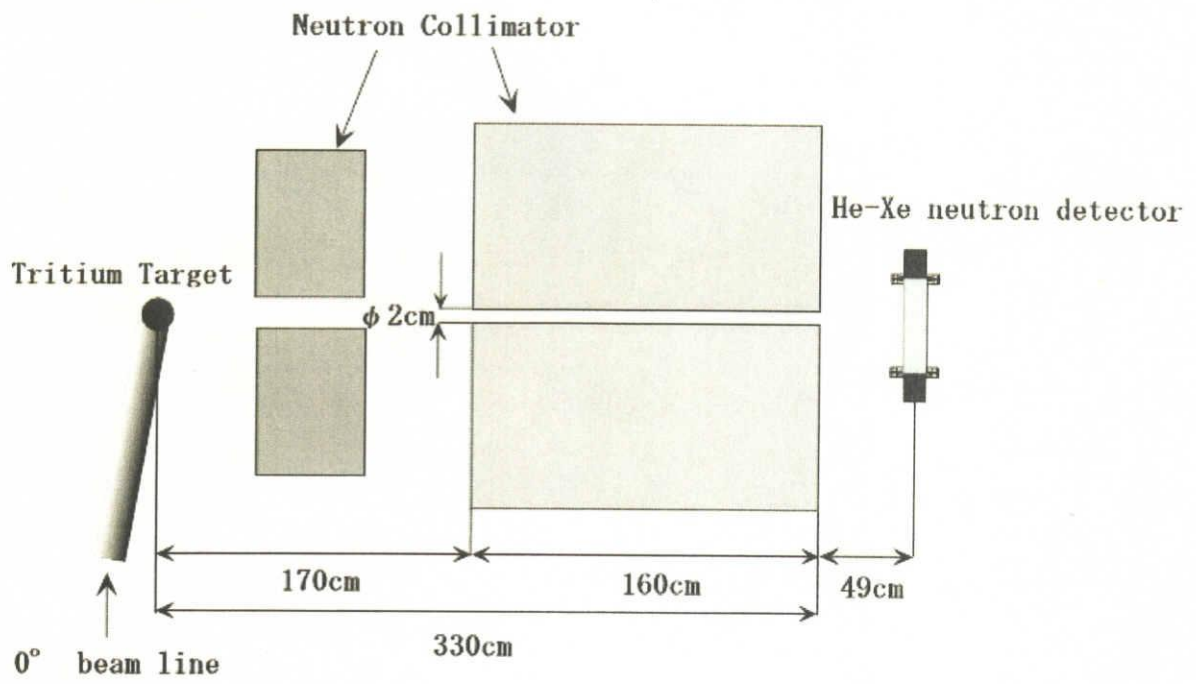


図 3-11 日本原子力研究所核融合中性子工学実験施設 (FNS) での実験体系



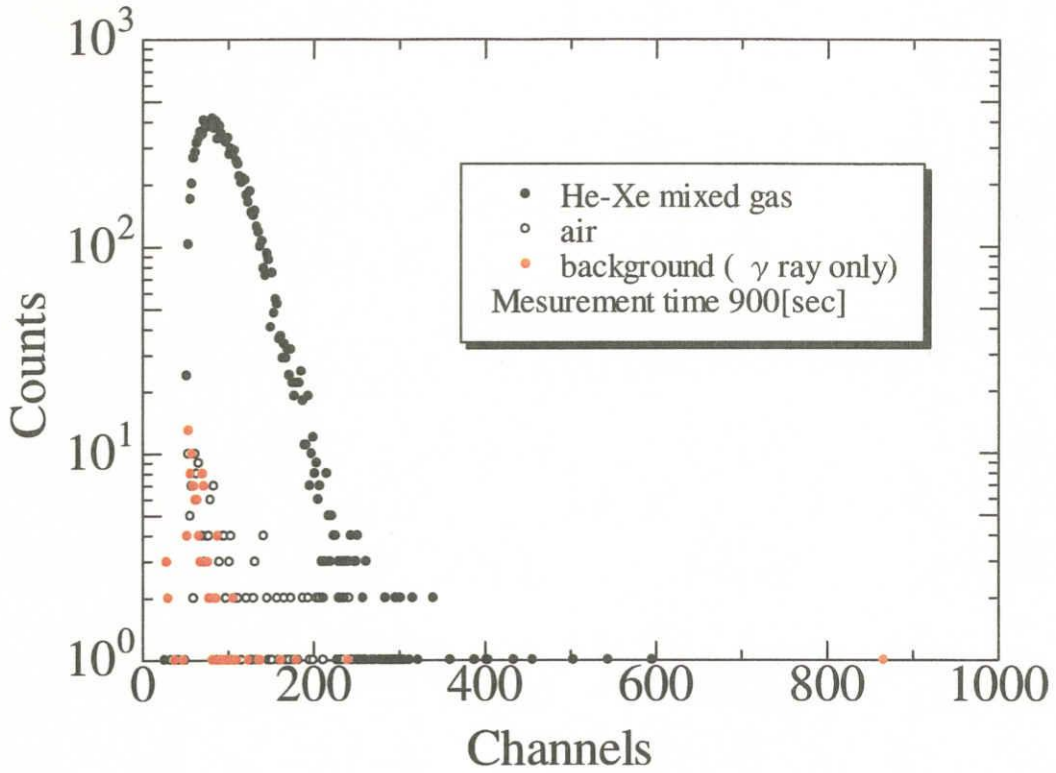


図3-12 He-Xe ガスシンチレータのDT 中性子に対する検出器応答測定結果

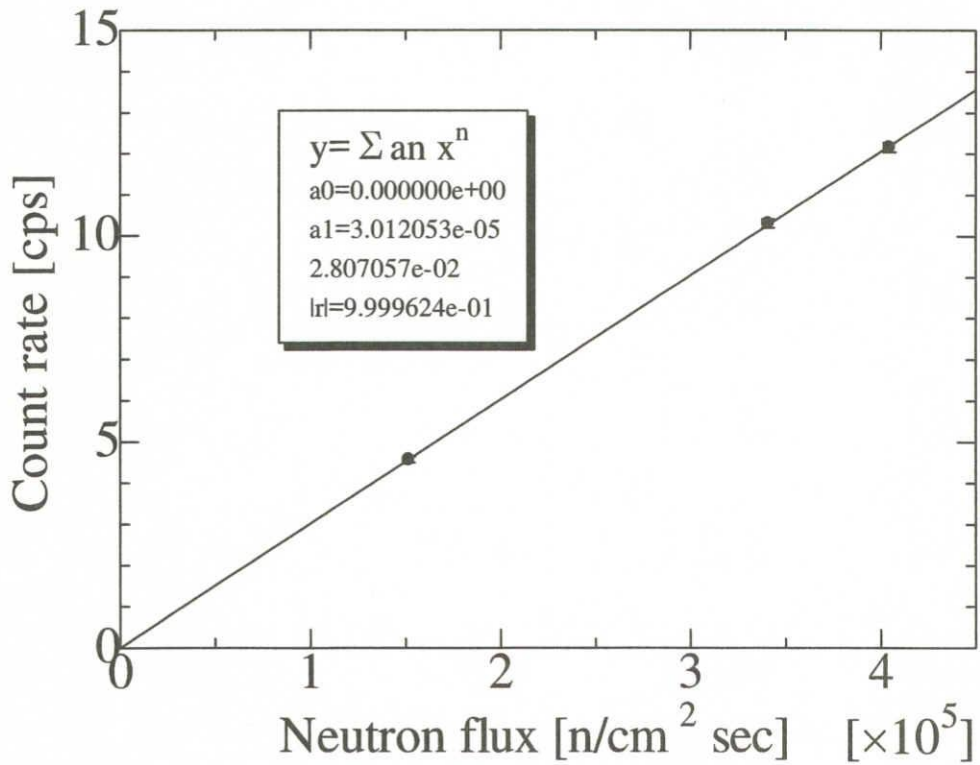


図3-13 He-Xe ガスシンチレータの発光量 (計数率) とDT 中性子束の比例性

## 4. 指向性中性子検出器の設計検討

### 4.1 検出器応答のシミュレーション計算

He-Xe ガスシンチレータ型指向性中性子検出器の仕様の最適化を検討するため、本検出器の測定原理に基づき、モンテカルロ法を用いて、中性子のエネルギー、入射角度等を想定することで検出器内部での中性子および反跳粒子の挙動をシミュレーションする計算プログラムを開発・整備した。

計算モデルを図4-1に示す。充填ガスは、He:Xe 及び H<sub>2</sub>:Xe=9:1 で全圧 1atm の混合ガスとしている。遮光薄膜はこの部分での損失エネルギーをできるだけ小さくし、ガス中にエネルギーを付与させる必要がある。その上で十分な遮光能力を持ち、またガスフロー時に生じる可能性のある圧力差に耐えうる物質が望ましい。ここでは比較的入手が容易で、このような条件を満たす遮光薄膜材料としてアルミニウム 10 μm 薄膜を仮定した。また検出器の長さ d1、d、d2 の値は d1 を 3.5cm と固定し、d を前方セル最前部で発生した反跳粒子が後方セルまで到達できるように、d2 を前方セル最後部で発生した反跳粒子が後方セル内で止まるよう阻止能及び飛程からの計算で決定した。He-Xe、H<sub>2</sub>-Xe 混合ガスそれぞれの場合での d1、d、d2 の値および計算での使用データとなるガスのいくつかのパラメータを表4-1にまとめる。

本シミュレーション計算プログラムのフローチャートを図4-2に示す。計算は三次元空間内で中性子および反跳粒子の飛跡を追い、その過程でのエネルギー損失等を導出するものである。

以下、プログラム内での計算の具体的内容について解説するが、H と He それぞれのターゲット物質については同じプログラムを使用し、中性子エネルギー、散乱断面積、阻止能、飛程、反跳角度分布に関して、外部からの入力データを入れ替えて計算を行っている。

#### ・dE 検出器内での散乱判定

dE 検出器内での弾性散乱の判定を行う一つの方法として検出器内での中性子の飛行距離を微小区間に分割しその微小区間内で乱数を用いることで散乱の判定を行う手法がある。しかしながらこの手法においては繰り返し計算の回数が非常に多くなるため計算時間が長くなってしまふ。そこでここでは次に述べるような手法を用いて散乱判定を行った。

巨視的散乱断面積  $\Sigma_s$  の物質中で、反応点までの距離が  $x$  と  $x+dx$  の間にある確率  $p(x)dx$  は

$$p(x)dx = \Sigma_s \cdot \exp(-\Sigma_s \cdot x)dx \quad (4.1)$$

ここで

$$\int_0^{\infty} p(x)dx = 1 \quad (4.2)$$

であるから 0 から 1 までの一様な乱数を  $r$  とすると (4.1) (4.2) より

$$\int_0^x \Sigma_s \cdot \exp(-\Sigma_s \cdot x') dx' = r \quad (4.3)$$

よって

$$x = -\frac{1}{\Sigma_s} \ln(r) \quad (4.4)$$

この式から反応点までの距離を計算することができ、その距離が中性子の dE 検出器内での飛行距離以内であるかの比較を行うことで散乱判定がなされる。散乱がなされなかった場合にはもう一度中性子の入射位置の選定へ戻ることとなる。中性子の巨視的断面積  $\Sigma_s$  は (3-1) のように表され、ここで用いられる H および He の微視的断面積の値は図 3-3 に示す ENDF/B-IV のデータを使用した。

#### ・ 反跳粒子の反跳方向及びエネルギーの決定

ターゲットを H とした反跳陽子の反跳方向は重心系等方であり、乱数を使って比較的簡単に決定することができる。しかしながら He の場合での反跳  $\alpha$  粒子の反跳方向は非等方で簡単に決定することが難しい。そこでここでは中性子による He の弾性散乱の反跳角度分布を ENDF/B-IV に与えられる中性子の散乱角度分布から求めた。中性子の実験室系での散乱角度分布  $f(\nu, E)$  は 6 次の Legendre 多項式を用いて散乱角度の余弦  $\nu$  とエネルギー  $E$  の関数として次のように与えられる<sup>(13)</sup>

$$f(\nu, E) = \sum_{l=0}^6 \frac{2l+1}{2} a_l(E) P_l(\nu) \quad (4-5)$$

$l$ : Legendre 多項式の系列数

$a_l$ : 入射中性子エネルギーに対する Legendre 多項式の  $l$  番目の係数

また 14MeV の中性子に対する  $a_l$  及び  $P_l$  は次のように与えられる。

$$\begin{array}{ll} a_0 = 1.0 & p_0 = 1.0 \\ a_1 = 4.73597 \times 10^{-1} & P_1(\nu) = \nu \\ a_2 = 2.41891 \times 10^{-1} & P_2(\nu) = \frac{3\nu^2 - 1}{2} \\ a_3 = 1.73742 \times 10^{-3} & P_3(\nu) = \frac{5\nu^3 - 3\nu}{2} \\ a_4 = 8.45864 \times 10^{-4} & P_4(\nu) = \frac{35\nu^4 - 30\nu^2 + 3}{8} \\ a_5 = 1.97657 \times 10^{-4} & P_5(\nu) = \frac{63\nu^5 - 70\nu^3 + 15\nu}{8} \\ a_6 = 3.67558 \times 10^{-5} & P_6(\nu) = \frac{231\nu^6 - 315\nu^4 + 105\nu^2 - 5}{16} \end{array}$$

この計算から求められる実験室系での反跳 $\alpha$ 粒子の反跳角分布を反跳陽子の分布とともに図4-4に示す。本プログラム中ではこの分布確率の面積を1に規格化し乱数を用いてこの確率分布に従い反跳角度を決定するものとした。方位角については $360^\circ$ からのランダムでの選択となっている。

反跳粒子のエネルギーは反跳角度の決定後次の式から導出する。

$$E_{recoil} = \frac{4A}{(1+A)^2} E_n \cos^2 \theta \quad (4-6)$$

$A$ :核sの質量数

$E_n$ :入射中性子のエネルギー

従って、水素の場合には $\frac{4A}{(1+A)^2} = 1$ 、ヘリウムの場合には $\frac{4A}{(1+A)^2} = 0.64$ となることから、

反跳陽子は最大で入射中性子と同じエネルギーを持ち、反跳 $\alpha$ 粒子は最大で入射中性子のエネルギーの64%を持つこととなる。図4-5に、DD2.45MeV中性子に対して反跳陽子を、DT14MeV中性子に対して反跳 $\alpha$ 粒子を用いた場合、反跳角度に対するそれぞれのエネルギーを示す。

#### ・ 検出器内部でのエネルギー損失評価

検出器内でのエネルギー損失の評価はその物質中での飛程、阻止能を用いて行う。手順としてはその物質内での反跳粒子の飛行距離を幾何学的な条件から計算し、飛行距離とその物質内での飛程の比較を行う。飛行距離よりも飛程が短い場合にはその粒子は物質内にすべてのエネルギーを付与するものとするが、飛行距離よりも飛程が長い場合には粒子はその物質内にエネルギーの一部を付与しさらに飛行を続ける。この際に付与されるエネルギーの計算は阻止能から行う。まず粒子の物質内での飛行距離を微小距離に分割する。次に粒子が微小距離飛行する間に損失するエネルギーを阻止能を用いて計算し、そのエネルギーを粒子のエネルギーから差し引いた後再び次の微小距離に関しての計算を行う。これを粒子の飛行距離に達するまで繰り返すことにより付与エネルギーの計算がなされる。

飛程および阻止能のデータは文献値を使用した。ただし、文献に与えられるデータは離散的であるため、計算上はその間を直線補完する事で随時任意のエネルギーに対する飛程および阻止能を求めている。また混合ガスのような混合物における飛程および阻止能は、混合物中でのそれぞれの単体の値から次の式を用いて求めた。

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{mixture} = \sum_i \omega_i \rho_i \left( \frac{dE}{dx} \right)_i \quad (4-7)$$

$\omega_i$ : $i$ 番目の元素重量比

$\rho$ :混合物の密度

$\rho_i$ : $i$ 番目の元素の密度

$\left( \frac{dE}{dx} \right)_i$ : $i$ 番目の元素の阻止能

$$R_{mixture} = \frac{1}{\rho} \left( \sum_i \frac{\omega_i}{R_i} \right)^{-1} \quad (4-8)$$

$R_i$  :  $i$ 番目の元素中での飛程  
 $\omega_i$  :  $i$ 番目の元素の重量比

検出器内での使用物質での陽子および $\alpha$ 粒子に対する飛程、阻止能のエネルギー依存性を図4-6に示す。

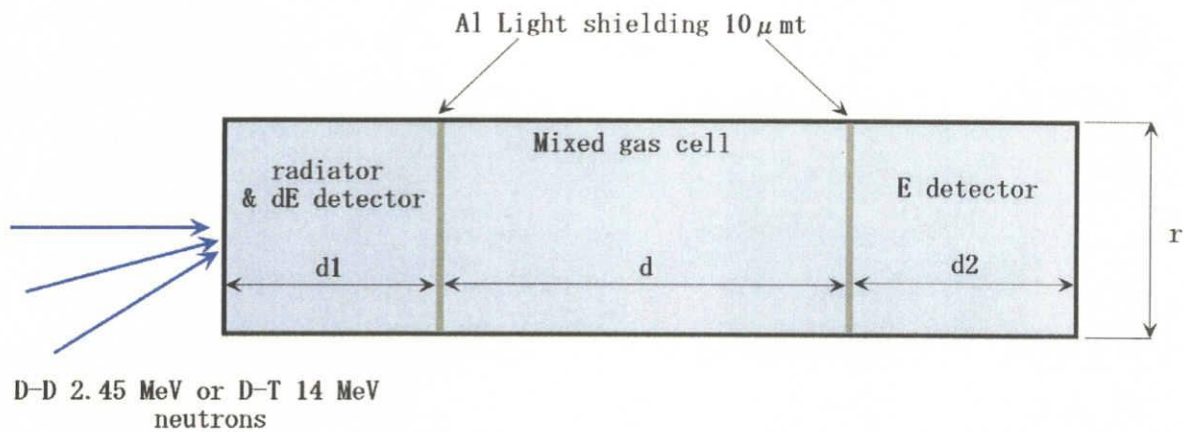


図4-1 検出器応答の計算モデル

表4-1 He(H<sub>2</sub>)-Xe 混合ガスの各種パラメータ

ガス	He-Xe	H <sub>2</sub> -Xe
混合比	9:1	9:1
標準状態での密度[g/cm <sup>3</sup> ]	7.47E-04	6.70E-04
ターゲット元素の個数密度[個/cm <sup>3</sup> ]	2.44E+19	4.84E+19
中性子に対する微視的断面積[cm <sup>-2</sup> ](中性子エネルギー[MeV])	1.06E-24(14)	2.59E-24(2.45)
d1[cm]	3.5	3.5
d[cm]	10.8	13.2
d2[cm]	5.3	3.0

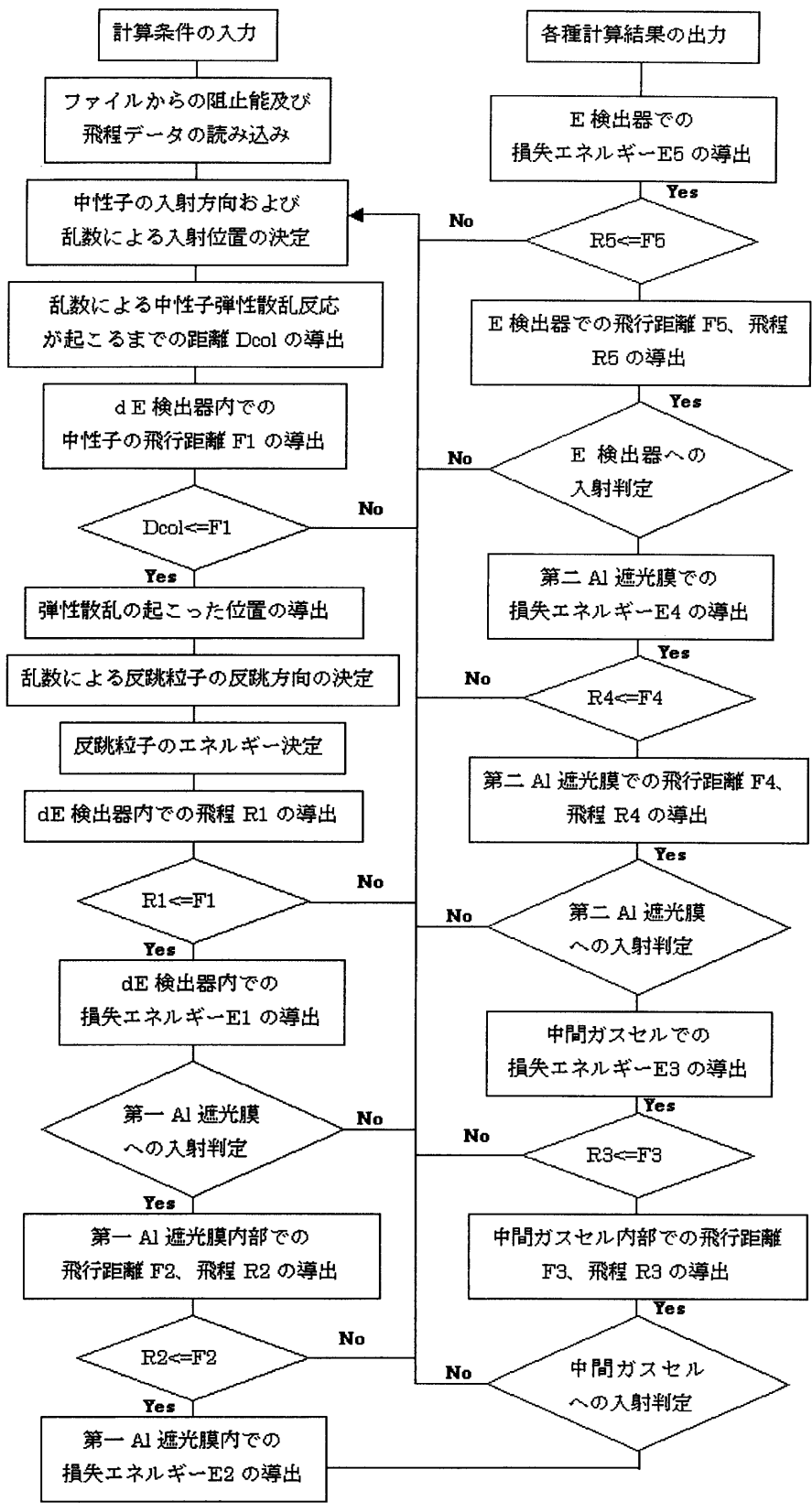


図 4-2 検出器応答計算プログラムのフローチャート

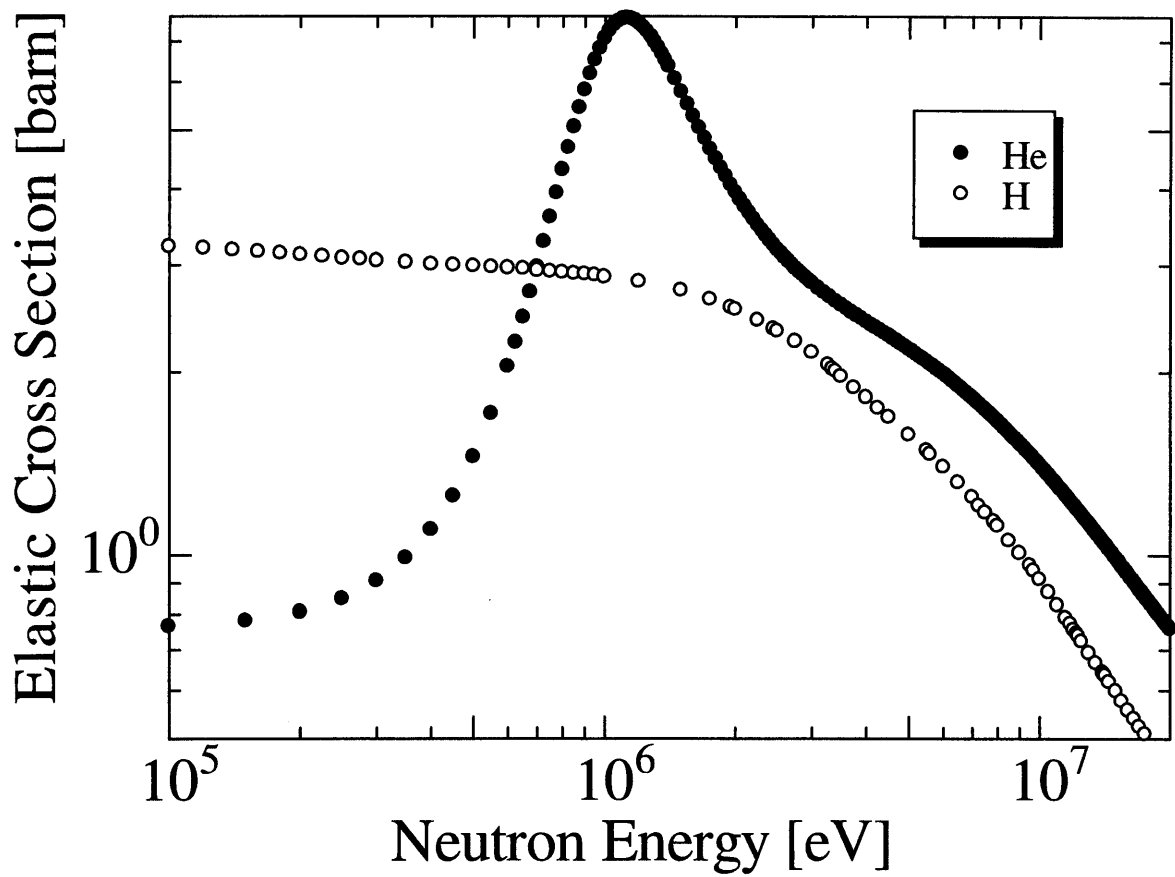


図4-3 HとHeの微視的中性子散乱断面積

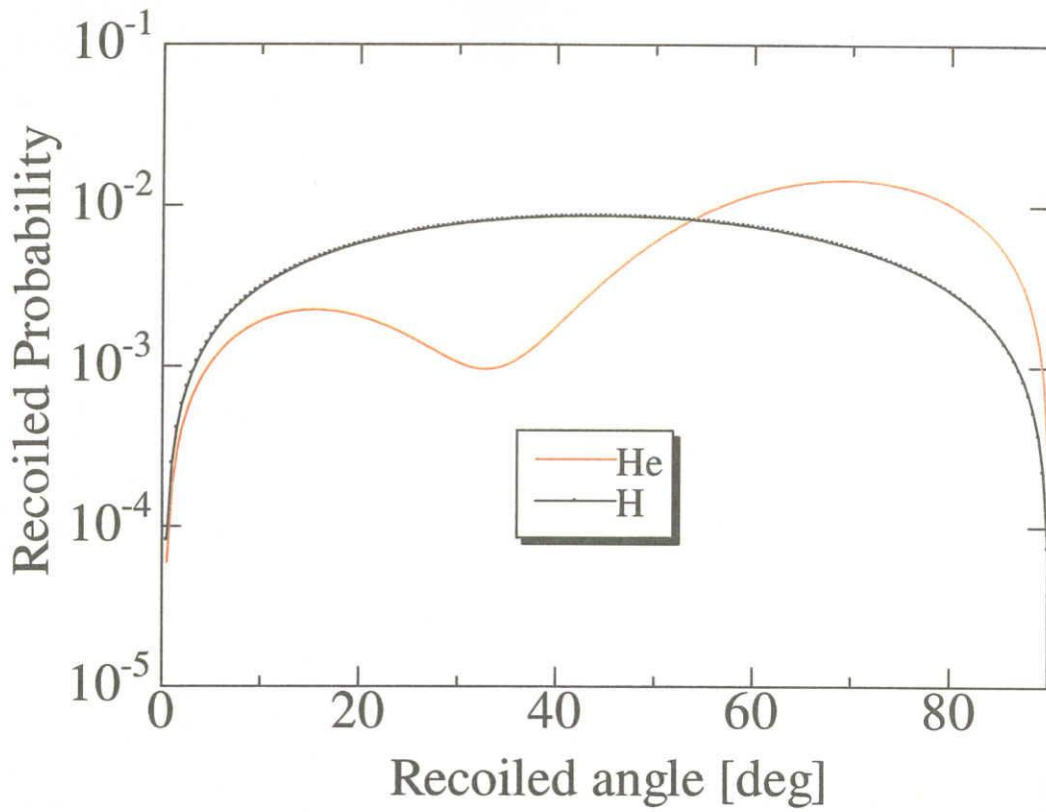


図4-4 HとHeの反跳角度分布

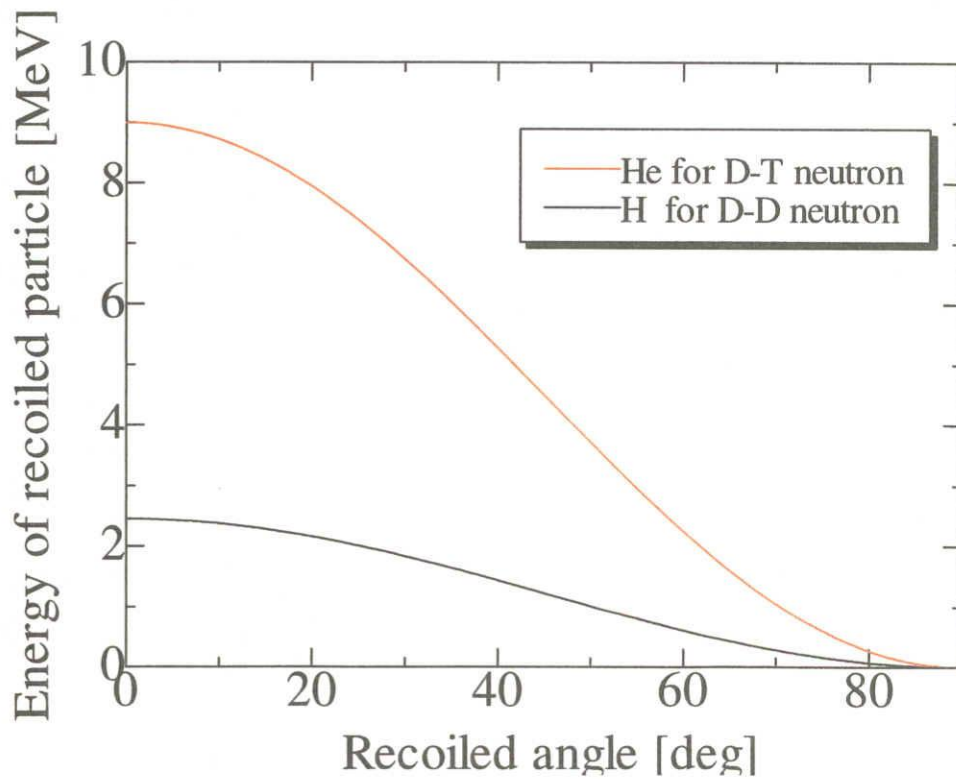


図4-5 HとHeの反跳角と反跳エネルギーの関係



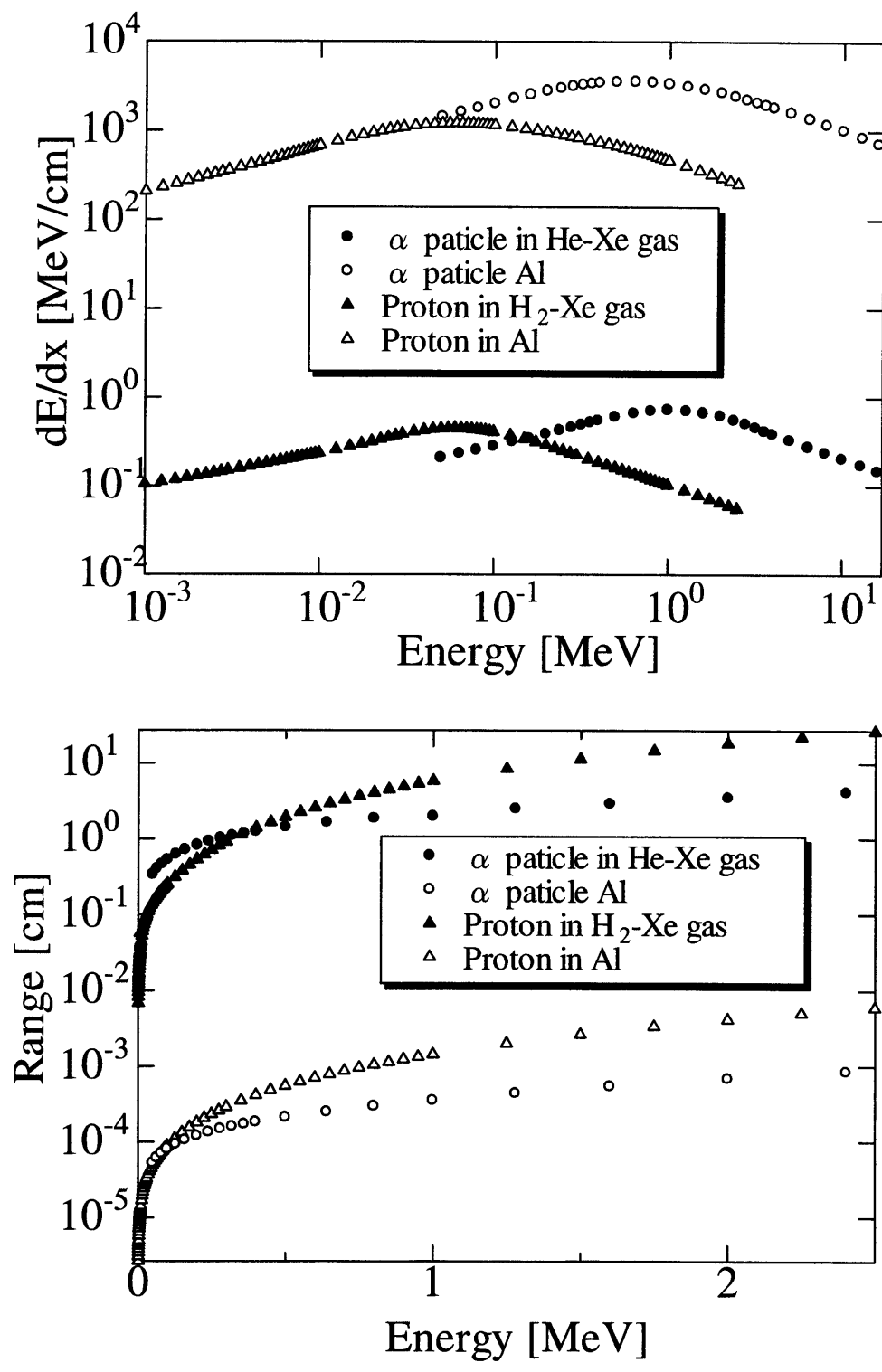


図4-6 検出器内使用物質における陽子および $\alpha$ 粒子に対する飛程、阻止能のエネルギー依存性

## 4.2 計算結果と考察

本指向性中性子検出器の性能パラメータとして重要なものは、検出効率と指向性であるが、指向性を定量的に評価するパラメータとして角度分解能という値を採用する。図4-7に中性子の入射角度による検出器の検出効率依存の一例を示すと、角度分解能  $R_a$  とはここでの正面 ( $0^\circ$ ) からの中性子入射時の検出効率に対して検出効率が  $1/2$  となる中性子の入射角度を  $R_a/2$  とするものである。この値が小さくなることで検出器の視界も狭くなり指向性に優れるということになる。

この検出効率と角度分解能のパラメータは、検出器の中間セルの長さ  $d$  と検出器の直径  $r$  の比 ( $d/r$  比) によって E 検出器の視野が変化することで大きく影響を受ける。従って、ここではこの  $d/r$  比による検出器の検出効率、角度分解能の両パラメータの依存性を調べることで最適な検出器構造を検討した。

いくつかの  $d/r$  比での入射角度に対する検出効率の依存性を He-Xe、 $H_2$ -Xe それぞれについて、図4-7、4-8に示す。結果は正面からの中性子入射時の検出効率を1とした場合の規格値である。中間セルの閾値及びコリメートによる効果で中性子の入射角度が大きくなるに従い、検出効率の減少する指向性が生じることが分かる。また  $d/r$  比に対する角度分解能と代表値として  $0^\circ$  方向からの中性子入射に対する検出効率の関係を、He-Xe、 $H_2$ -Xe それぞれについて図4-9、4-10に示す。ここから  $d/r$  比が大きくなるに伴い検出効率は低下していくのに対し、角度分解能は双方ともほぼ  $20^\circ$  程度で限界を迎えていることが分かる。従って、これ以上に  $d/r$  比を大きくすることは検出効率の大きな低下を招くのみでありあまり有益であるとは言えない。そこで、本検出器の最適な構造としては、このほぼ角度分解能が限界を向かえる領域で必要な検出効率を得られる値ということとなる。具体的には、He-Xe において  $d/r > 5$  程度の領域、 $H_2$ -Xe においては  $d/r > 7$  程度の領域となる。必要とされる検出効率は、適用対象とする核融合実験装置から発生する中性子束によって大きく異なるため、最適な検出器構造は装置依存となる。

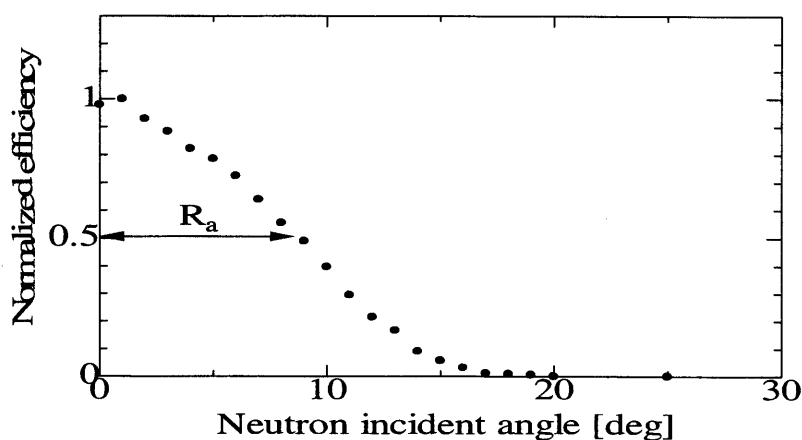


図4-7 検出効率の中性子入射角度依存性と指向性（角度分解能）の定義

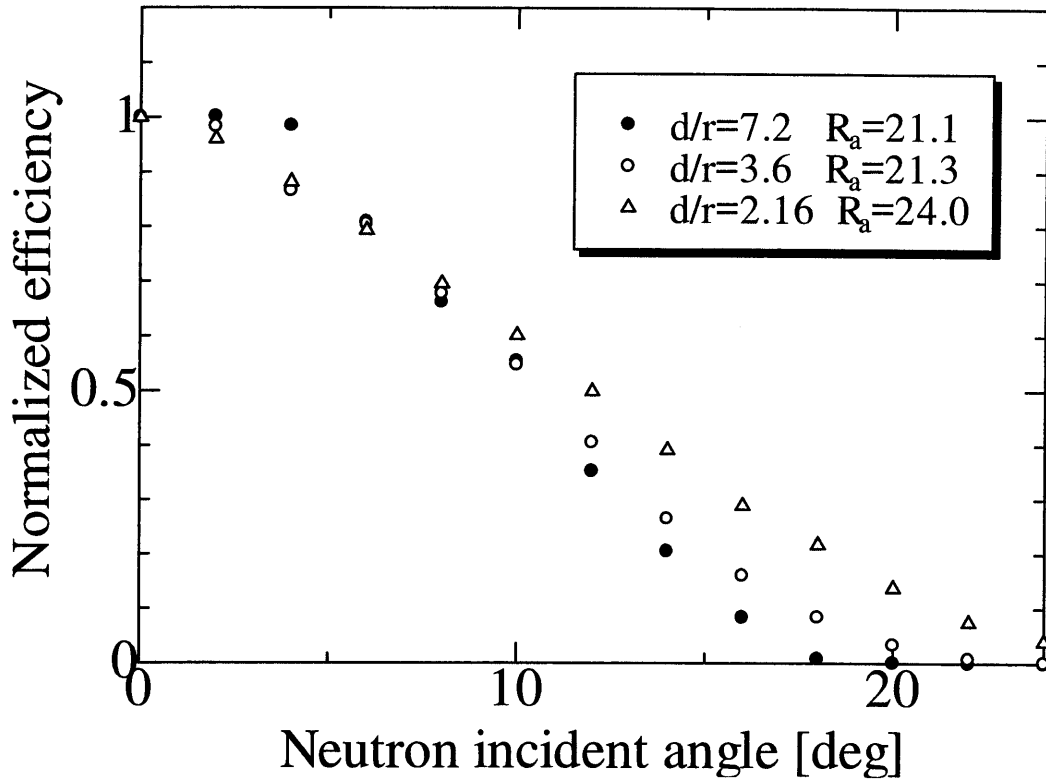


図4-8 He-Xe 指向性中性子検出器のDT 中性子入射角度に対する検出効率依存性

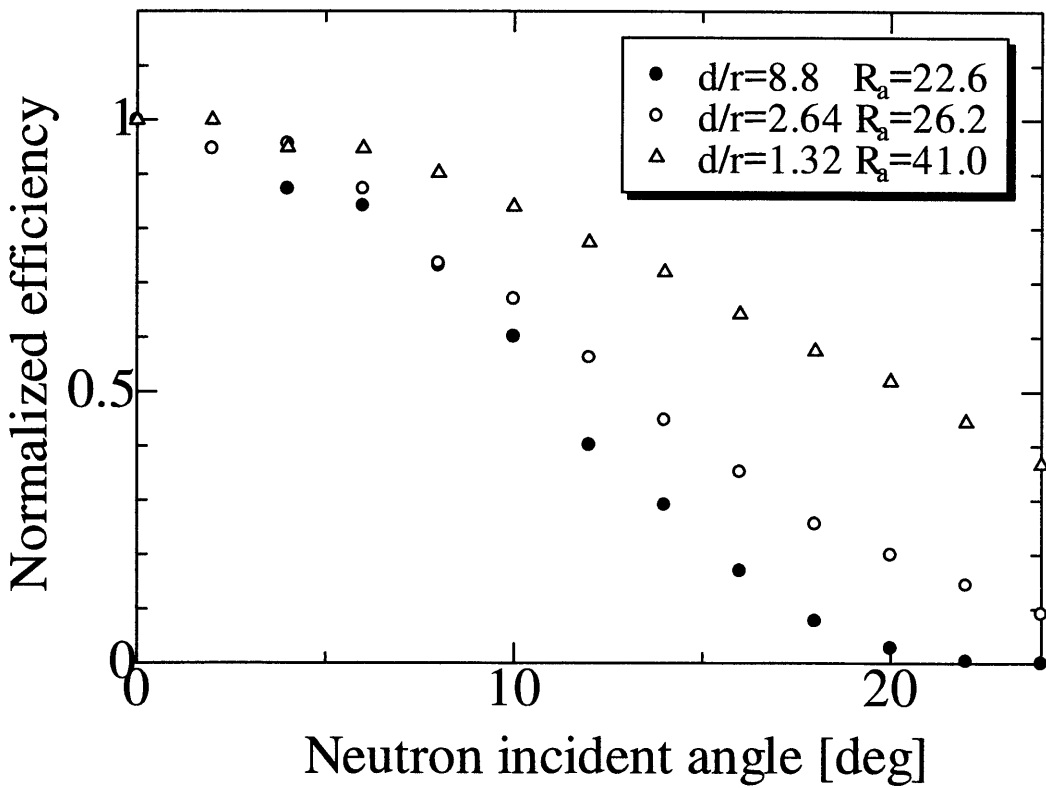


図4-9 H<sub>2</sub>-Xe 指向性中性子検出器のDD 中性子入射角度に対する検出効率依存性

1

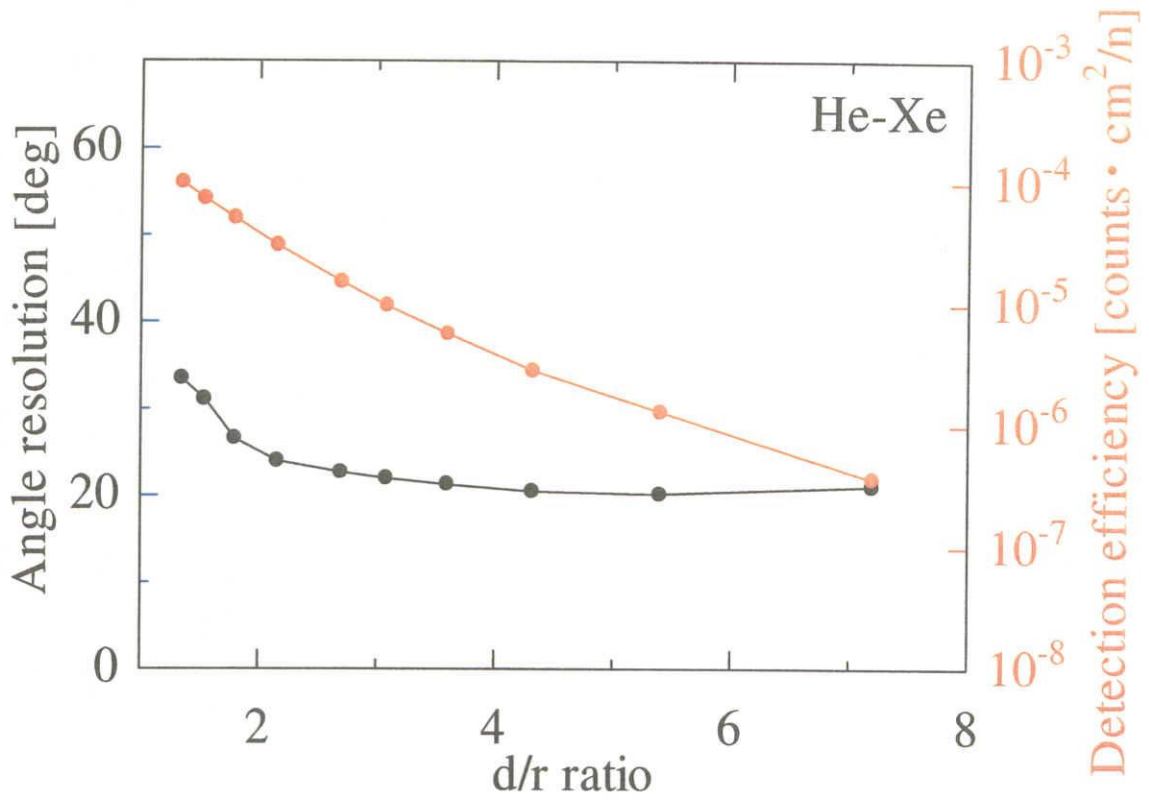


図4-10 He-Xe 指向性中性子検出器の角度分解能および検出効率の d/r 比依存性

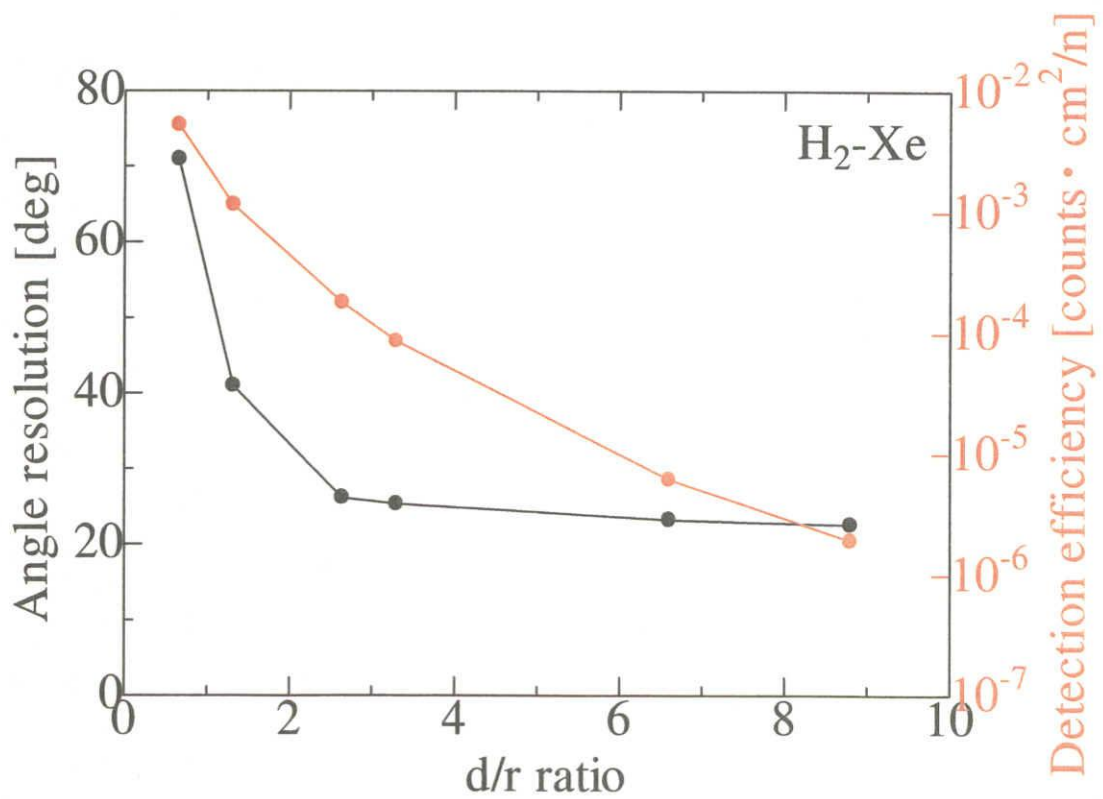


図4-11 H<sub>2</sub>-Xe 指向性中性子検出器の角度分解能および検出効率の d/r 比依存性

## 5. 指向性中性子検出器の性能評価

### 5.1 試作検出器の構成

He-Xe ガスシンチレータ型指向性中性子検出器の基本性能を実験的に検証するため、図 5-1 に示されるようなプロトタイプシステムを設計・試作した。一本の筒状の検出器内を 3 つのセルに分割した構造となっており、反跳粒子コリメータは両端に遮光用のアルミ箔を貼り付けた状態で内部に挿入するため、長さ等を自由に変更することができる。dE、E 各検出器には 3mmt の合成石英ガラス窓を取り付け、この部分からそれぞれ 2 本の PMT を用いて発光を測定する。従って、反跳粒子が前方セルで生成し、中間セルを通過した後、後方セルに到達した場合には、4 本の PMT にほぼ同時に光子が到達するため、ここでは SEIKOEG&G 社製マルチパラメータシステムを使用して、4 本の PMT の同時計数を取るものとした。4 本の PMT を設置したのは、できる限り PMT への放射線の直接入射等による偶然同時計数を削減するためである。また、充填ガスは、He-Xe:9:1 混合ガスを用いたが、不純物を除去するため、ボンベから直接検出器内の各セルへガスを流し、バブルゲージを通して大気中へ放出するという方法で行った。従って、内部のガス圧は約 1atm に保たれる。また、PMT は、これまでの基礎実験で使用したバイアルカリの光電面と合成石英の入射窓をもつ R7459 (浜松ホトニクス) を用いた。

### 5.2 性能評価実験 と結果

日本原子力研究所 FNS において、試作された He-Xe ガスシンチレータ型指向性中性子検出器の DT 中性子ビームに対する検出応答測定実験を行った。実験体系を図 5-2 に示す。試作検出器は、コリメータから距離 49cm 位置で、遠隔操作可能な回転架台の上に設置し、外部からの制御により中性子ビームに対する検出器の入射角度を任意に変更できるようにした中性子ビームの直径は 20mm で、加速器の運転はビーム電流約 12mA で行った。内部のコリメータは内径 2.5cm で長さは、設計計算により設定した 10.8cm である。コリメータの両端には遮光薄膜として Al の 10  $\mu$  mt 膜を取り付けた。

まず、検出器の正面(0°)から中性子を入射させ、マルチパラメータ分析システムのコインシデンスタイムを変化させ、その時の計数変化を測定した。結果を図 5-3 に示す。本検出器に適切な同時計数の分解時間は長くても数  $\mu$  sec 程度であると考えられるが、この結果から数  $\mu$  sec の領域においてはほとんど計数が得られなかった。そこで、十分に計数が得られ、コインシデンスタイムの減少に対する計数減少が多少なだらかになっている 100  $\mu$  sec の分解時間で中性子の入射角度を変え、測定を行った。結果を図 5-4 に示す。ここでの検出効率は FNS の核分裂電離箱モニターの計数より得られた中性子の総発生量から検出器への入射中性子数を求め、単位入射中性子あたりについて計算したものである。また、値は正面入射からの値を 1 として規格化を行っている。中性子の入射角度が大きくなるに伴って検出効率

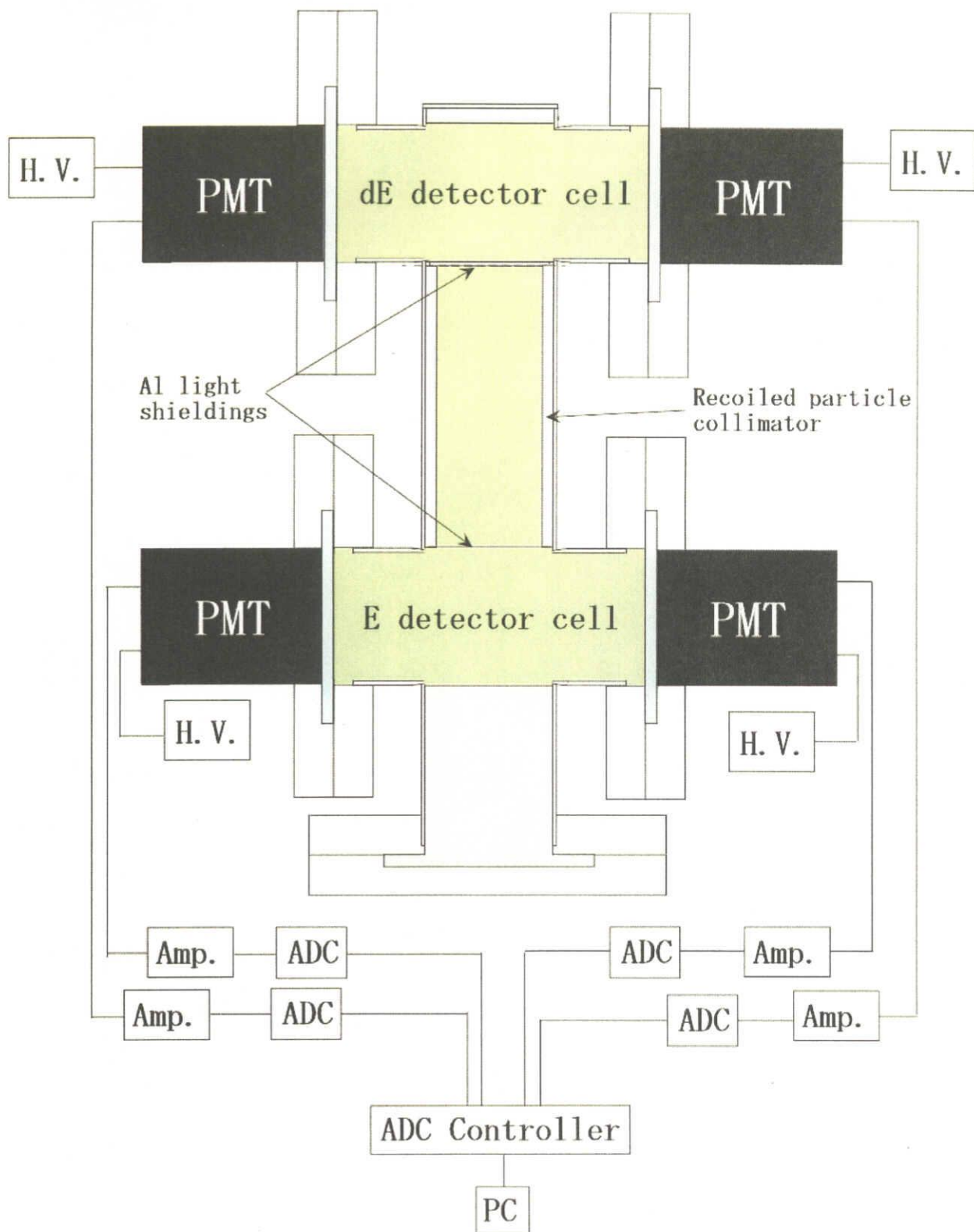


図5-1 試作されたガスシンチレータ型指向性中性子検出器と測定系

が減少する指向性を確認することができた。しかしながら、同時計数の分解時間設定に問題のあることが考えられるため、前方検出器と後方検出器それぞれの計数率と分解時間から、次式を用いて偶然同時計数率 $r_a$ の見積もりを行った。

$$r_a = r_1 r_2 \tau$$

$r_1$ : 検出器1の計数率  
 $r_2$ : 検出器2の計数率  
 $\tau$ : 同時計数の分解時間

(5-1)

結果を表 5-1 に示すが、見積もった偶然同時計数率が測定結果を上回っており、本測定結果は信頼性に欠けることが確認された。やはり数 $\mu$  sec の分解時間で測定することが必要であると判断し、より検出効率を高めて測定を行うために内部のコリメータの長さを 6.8cm に短くして再測定を行ったが、同様に十分な計数を得ることができなかった。

そこで、本試作検出器によって、十分な同時計数が行えない理由を明らかにするため、以下の可能性のある原因について検討を行い、問題の絞り込みを試みた。

①  $\alpha$ 粒子が後方セルまで到達しない

文献値による検出器中での飛行距離は確認済みである。また十分に短くしたコリメータを使用した場合においても改善が見られなかったことからこの要因ではないと考えられる。

② 同時計数の分解時間の設定が適当でない

二検出器間の $\alpha$ 粒子の飛行時間から考えて、数 $\mu$  sec の分解時間で十分である。

③ 4系統の同時計数が取れていない

パルサーによりマルチパラメータシステムの動作を確認済みである。

④ 検出効率が低すぎる

シミュレーション計算から導いた検出効率は測定に十分足るものであった。しかしながら次に示す⑤と関連して検出効率が著しく低下することが考えられる。

⑤ 発光量が小さすぎる

ガスシンチレータは本質的に発光量の非常に少ない検出器である。従って、本検出器で起こる事象の中で今回のシステムでは測定できない事象が存在することが考えられる。計算による検出器内ガスに付与されるエネルギーの分布を図 5-5 に示す。前方セル内で発生する反跳 $\alpha$ 粒子のうち、検出器前部で生成するものは前方検出器に比較的十分なエネルギーを付与するが、後方検出器にはほとんどエネルギーを付与しない。また前方検出器後部で生成した反跳 $\alpha$ 粒子は後方検出器には比較的十分なエネルギーを付与するが、前方検出器に対するエネルギー付与は非常に小さい。従って、このような事象については信号としても非常に小さく PMT のノイズに埋もれてしまうことが考えられる。今回の実験においても十分小さな信号まで測定することも試みたが、単位時間当りの信号処理量がマルチパラメータ分析システ



ムの許容量を超えてしまうため、PMT ノイズレベルの信号に関しては除去を行った。これにより想定したよりも検出効率が非常に小さくなってしまったことが考えられる。また、本検出器の原理上 2 枚の遮光薄膜を反跳粒子に透過させる必要があるが、反跳粒子のエネルギーの多くはこの遮光薄膜に与えられてしまい、ガス中に付与されるエネルギーの割合が小さくなってしまふ。

以上の④、⑤の原因と考察の妥当性を確認するため、名古屋大学工学研究科原子核工学専攻第一特別実験棟黒鉛室において、Am-Be 中性子源を用いた追試実験を行った。実験体系を図 5-6 に示す。線源は  $^{137}\text{Cs}$  線源を 3 つ用いて、黒鉛パイル内の約  $\Phi 2.5\text{cm}$  の穴内に挿入し、中性子をビーム状にコリメートした。検出器内部に挿入する反跳粒子コリメータは、先に指摘した④、⑤の問題をできる限り解決できるように Al 箔を  $1.5\ \mu\text{m}$  のものに変更し、また長さ  $1\text{cm}$ 、内径  $2.5\text{cm}$  のものを使用した。このような条件において、中性子を検出器正面( $0^\circ$  方向)から入射させ、コインシデンスタイム  $5\ \mu\text{sec}$  で中性子の測定を行った。Am-Be 中性子源は平均エネルギーが  $4\text{MeV}$  程度、最大で  $12\text{MeV}$  程度の中性子を発生するが、高エネルギー成分の発生割合は非常に小さい。従って、本追試実験では測定時間を十分に取り、19 時間の測定を行った。その結果、合計で 81 カウントの計数を得ることができた。これは計数率にして、約  $1.18 \times 10^{-3} \pm 1.1 \times 10^{-4} [\text{cps}]$  である。前方検出器、後方検出器それぞれの計数率から偶然同時計数率を見積もると、その値は  $1.81 \times 10^{-4} [\text{cps}]$  となり、この値を十分に上回る計数を得ることができた。従って、測定原理の実証とともに、性能改善のための要因を特定できたと考えられる。

### 5.3 性能改善策

Am-Be 中性子源による実験では、中間セル部分でのエネルギー損失を十分に小さくし、検出器セルへのエネルギー付与を増すことで中性子の測定が可能となった。しかしながら、指向性中性子検出器としては、中性子エネルギーに対して入射中性子のエネルギーに近い部分で閾値を設けることが重要である。本検出器の基本構成では、中間セルを減圧することで余計なエネルギー損失を緩和することも考えられるが、本質的に前部および後部ガスセルでのエネルギー付与は小さいものになってしまう。この少ないエネルギー付与に対して十分な大きさの信号を得るための方法、あるいは、相対的にノイズレベルよりも信号を十分に大きくする方法としては、次のような対策が考えられる。

- 集光効率を改善する
- より紫外域光に対して透過率の高い窓材を使用する
- より紫外域光に対して有感な PMT を使用する

集光効率に関しては、現在の検出器内はステンレス管内に軽いバフ加工を行っただけであるが、シンチレーション光の反射材としては、このような鏡面加工のものよりも酸化マグネ

シウムや酸化アルミニウムのような乱反射面のほうがよい結果を得ている。また、窓材として現在使用している合成石英ガラスは最善の材料ではない。図 5-7 に各種ガラスの光の透過率を示す。今回使用した合成石英ガラスは 160nm 程度の光までは透過するため、発光波長が 160nm~190nm 程度の Xe のシンチレーション光を透過することは可能であり、非常に安価であるという利点もある。しかしながら、 $MgF_2$  ガラスは、合成石英ガラスの 10 倍以上のコストという難点はあるものの、Xe の発光波長における光の透過率がほぼ 90% 程度の値を示し、性能改善に有効なガラスであるといえる。同様に PMT の窓材にも  $MgF_2$  ガラスを使用することが有効であると考えられる。

この他、相対的に信号を大きくする方法として PMT からのノイズの低減が挙げられる。PMT のノイズ成因の大部分は光電面からの熱電子放出によるものであるので、PMT を冷却することで大幅な改善が期待できる。

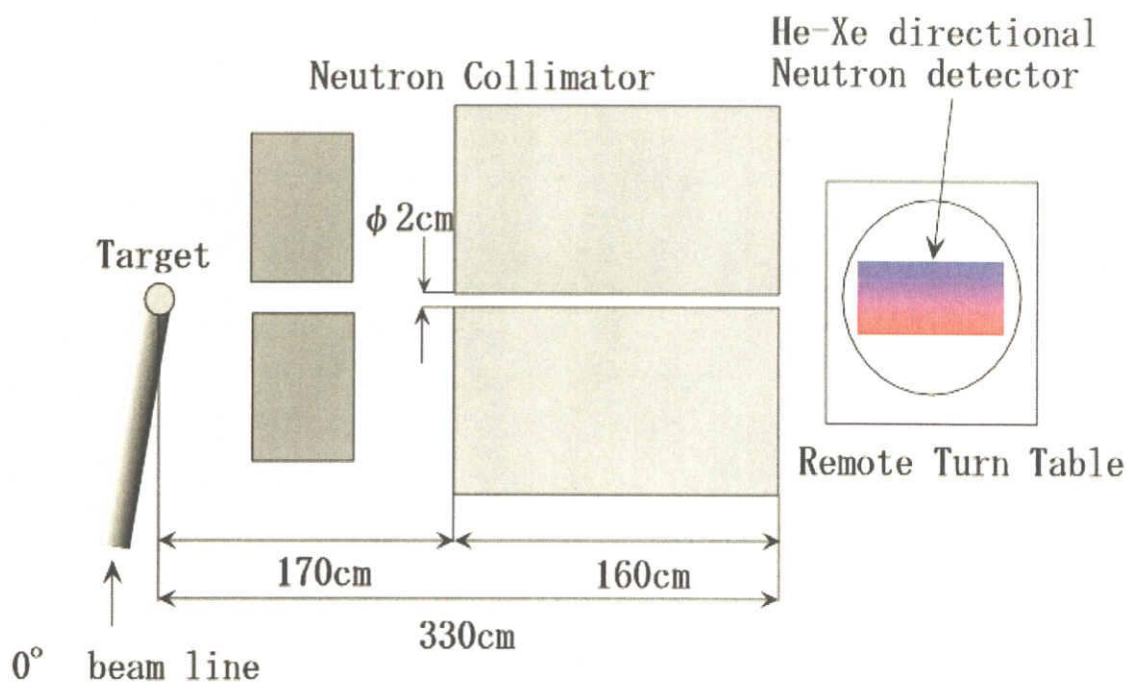


図 5-2 日本原子力研究所 FNS における He-Xe 指向性中性子検出器の特性測定実験体系

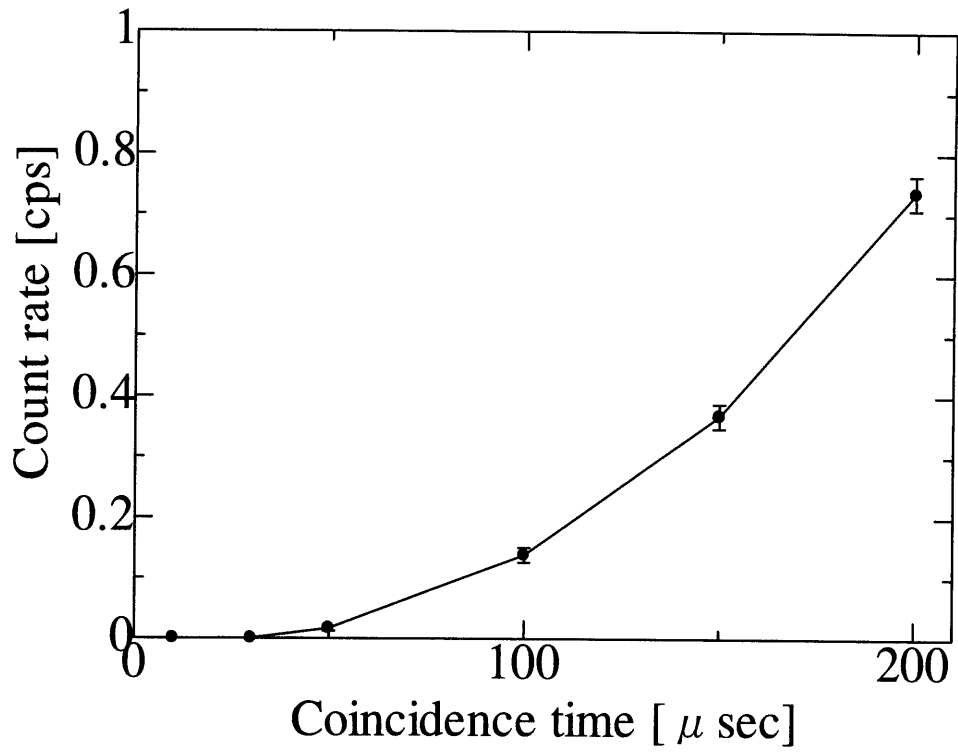


図5-3 試作検出器における計数率の同時計数分解時間依存性

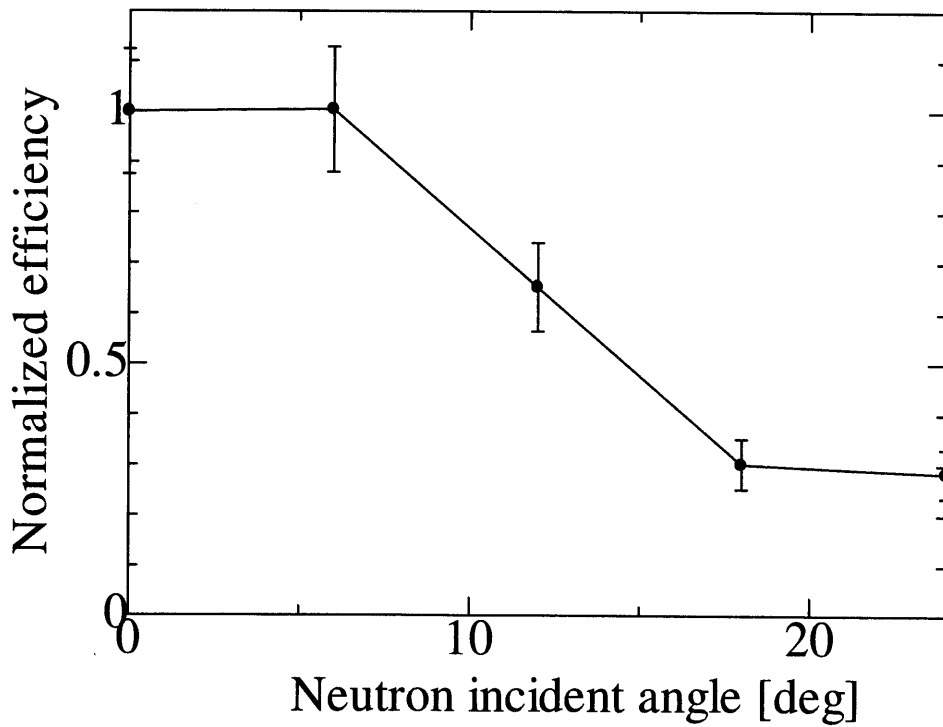


図5-4 試作検出器の検出効率の中性子入射角度依存性

表 5-1 試作検出器で測定された計数率と偶然同時計数率の比較

中性子入射角度[deg]	計数率[cps]	偶然同時計数率[cps]
0	$0.2056 \pm 0.0151$	0.6595
6	$0.2089 \pm 0.0152$	0.6907
12	$0.1378 \pm 0.0124$	0.2448
18	$0.0633 \pm 0.0084$	0.0728
24	$0.0589 \pm 0.0081$	0.1430

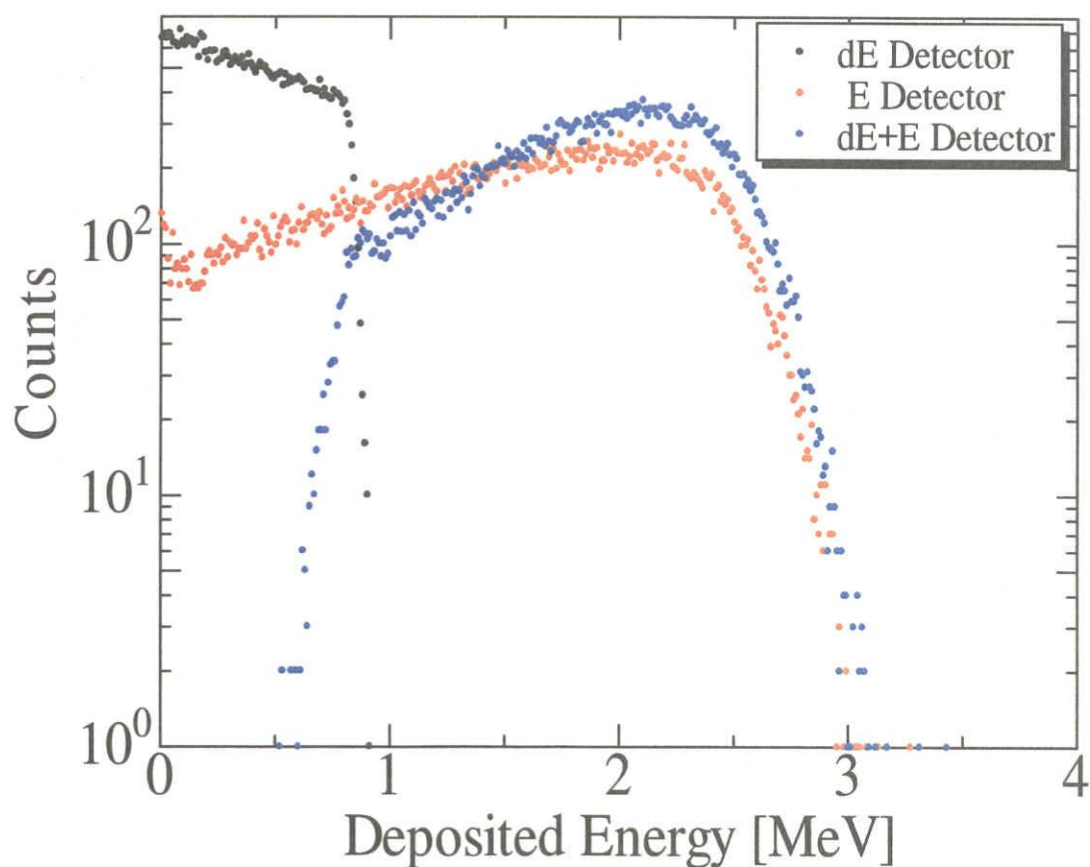


図 5-5 試作検出器における前部及び後部ガスセルへの付与エネルギー分布 (計算結果)

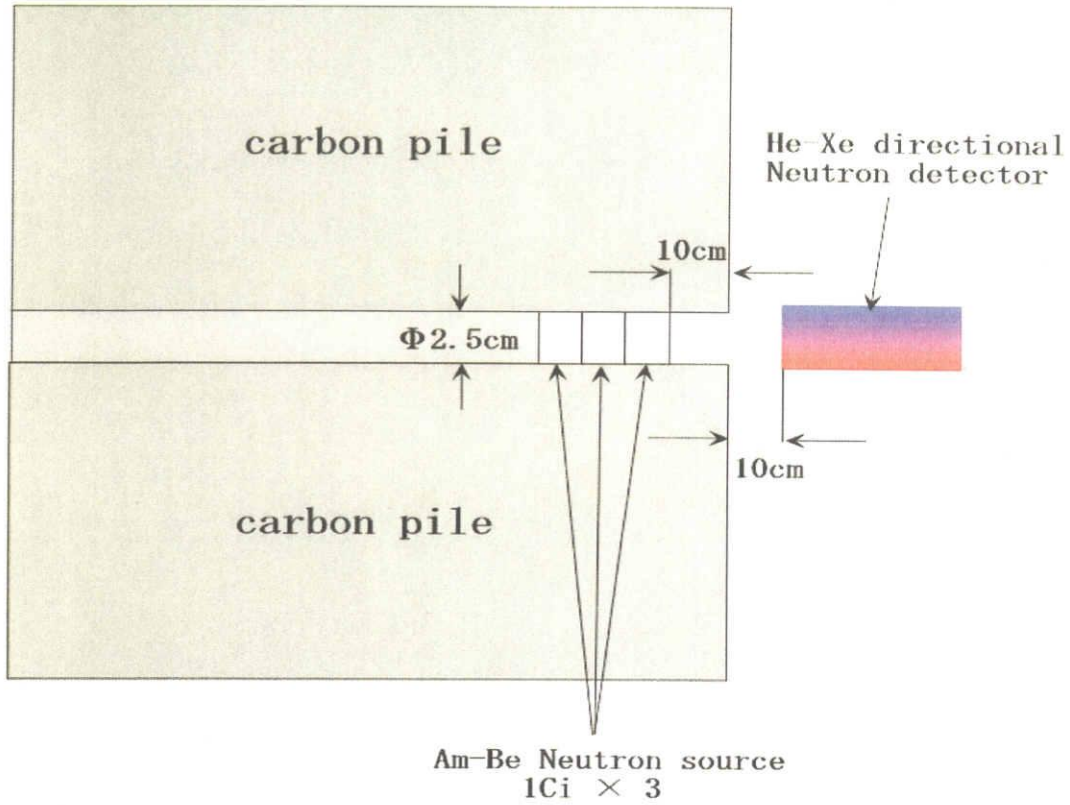


図5-6 Am-Be 中性子源を用いた試作検出器の性能改善実験体系

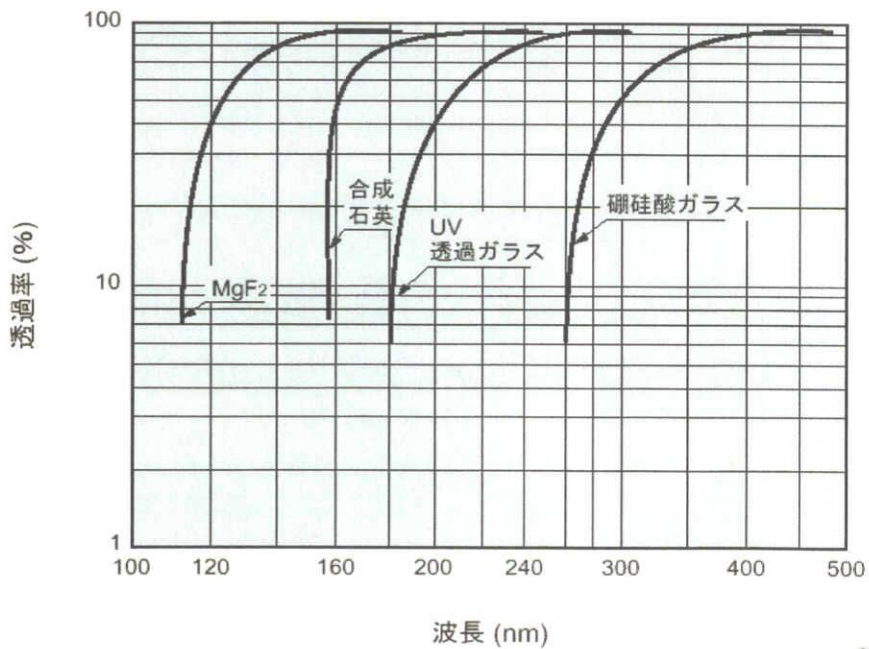


図5-7 ガラスの光透過率の波長依存性

## 6. 指向性中性子検出器を用いた中性子発生プロファイル計測系の適用性評価

### 6.1 前提条件

本研究におけるガスシンチレータ型指向性中性子検出器を用いた核融合中性子発生プロファイル計測系の有効性を議論するには、適用対象の核融合実験装置を選定し、従来方式のマルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニタとの性能比較を行うことが効果的と考えられる。そこで、本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル核融合実験装置 LHD で計画されている DD プラズマ実験での中性子発生プロファイル計測を念頭に、マルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニタの基本設計を行い、その性能をレファランスタとして、本指向性中性子検出器アレイによる核融合カメラシステムの効用の定量的評価を試みた。

LHD の中性子発生プロファイル測定系は、後述されるように、装置下部 4.5L ポートが割り当てられる予定であり、指向性中性子検出器アレイもそのポートに設置することを前提とする。また、設計性能目標として、プラズマ中心部の空間分解能 $\sim 10\text{cm}$ 、時間分解能 100ms を目安とする。

### 6.2 マルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイル計測系の設計検討

マルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニタ用の中性子検出器として、これまで大型磁場閉じ込め核融合実験装置で使用実績があるものは、欧州 JET での NE213 有機液体シンチレータ、米国 TFTR での NE451 反跳陽子ラジエータ付 ZnS(Ag) シンチレータ、また、現在日本原子力研究所 JT-60U においてスチルベン有機結晶シンチレータが使用されている。それぞれの特徴は、以下の通りである。

#### (1) NE213 有機液体シンチレータ

中性子と  $\gamma$  線の混在場において PSD(Pulse Shape Discrimination)により、中性子と  $\gamma$  線を弁別測定することが可能。シンチレーションの減衰定数も比較的短く 3.7[ns]である。組成は  $\text{CH}_{1.21}$  で反跳炭素に対する発光量も小さく、高速中性子計測に有用な検出器として広く研究が行われている。

#### (2) NE451 反跳陽子ラジエータ付 ZnS(Ag) シンチレータ

ZnS(Ag) は最も古い無機シンチレータの一つであり、NaI(Tl) とほぼ同じくらいの非常に高いシンチレーション光率を有するが多結晶の粉末としてしか入手できない。そのため発光に対する多結晶層による不透明さがあり薄膜状でしか使用することができない。中性子検出器用に用いられるものは円筒状の多層のポリエチレンラジエータの間に本シンチレータを挿入した構造となっている。薄膜状でしか使用できないがそのために  $\gamma$  線感度が極め

て小さく、 $n-\gamma$  弁別を必要としない。応答は比較的遅く減衰定数は 200[ns]程度である。

### (3) スチルベン有機結晶シンチレータ

スチルベン結晶は機械的熱的ショックに弱く、また中性子に対して非等方性応答を示す。すなわち結晶格子に対する入射方向の異なった中性子は異なった光出力を発生する。また炭素反跳による発光量が比較的大きい。組成は  $\text{CH}_{0.858}$  で減衰定数は 4.5[ns]で、NE213 同様 PSD による  $n-\gamma$  弁別が可能である。

LHD における DD プラズマ実験でもこれらの中性子検出器の利用が妥当であり、検出器自体には鋭い指向性がないので、プラズマを見込む空間分解能は、中性子遮蔽コリメータの幾何学的形状のみで決定される。

そこで、中性子・ガンマ線輸送計算コード MCNP を用いて、LHD 用中性子発生プロファイルモニターのためのマルチチャンネル中性子遮蔽コリメータの設計検討を行った。図 6-1、6-2 に計算体系（トロイダル断面およびポロイダル断面）を示す。ここで、中性子発生プロファイルモニタの設置位置は 4-5L ポート下の床空間である。この空間にマルチチャンネル中性子コリメータ及び中性子検出器を設置する。床空間に設置できる架台強度の問題から中性子コリメータの物質としてはポリエチレンが使用される。計算体系は LHD の本体構造の模擬したものであるが、計算時間の短縮、MCNP の領域設定の制限等により、以下の簡略化を行っている。

- ・プラズマ形状について、ヘリカル構造を模擬することが容易でないため、実際の LHD プラズマの平均小半径から半径 600mm の球形とした。中性子発生プロファイルモニタの測定対象となるポロイダル断面では視界が十分狭いため問題がないと考える。また、中性子エネルギーは DD 核融合反応による 2.45MeV 単色とし、中性子発生率分布  $N$  を、プラズマ小半径方向の距離  $r$  の関数として近似的に次のように与えた。

$$N(r) = \frac{1}{4} n_D(r)^2 \sigma_{DD} [\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\sigma_{DD} = 2.33 \times 10^{-14} \cdot T_i^{-2/3} \exp(-18.8 T_i^{-1/3}), \quad n_D(r) = n_D(0) \left\{ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right\}^2$$

ここで、 $\left[ \begin{array}{l} n_D : \text{重水素の個数密度} \\ \sigma_{DD} : \text{全反応率} \\ T_i : \text{イオン温度} \end{array} \right]$  である。

- ・LHD 本体の主要構造材であるヘリカルコイルは、プラズマの左右のみに存在するものとした。4.5L ポート位置ではヘリカルコイルはプラズマの左右に位置するため、この位置でのポロイダル断面の測定を行う際にはプラズマからの中性子に対してほとんど影響がない。



- ・LHD 本体構造をすべて計算体系に取り込むと、計算時間が膨大となる。従って、中性子発生プロファイル測定ポートを含まない領域を除いた約 1 / 2 モデルの計算体系とした (図 6-1)。
- ・装置および周辺構造物の組成は、表 6-1 のように設定した。

本設計検討では、性能目標としてプラズマ中心位置での位置分解能 100[mm]に設定しているので、プラズマの存在範囲は 1200[mm]であることから 12 チャンネルのコリメータを設けることになる。また、この位置分解能を得るためには、コリメータの長さ  $l$  及び直径  $r$  のアスペクト比  $l/r \cong 125$  が必要となる。従って、ここではコリメータ形状のアスペクト ( $l/r$ ) 比を 125 に一定に保ち、コリメータの長さを変化させることで適切なコリメータサイズの検討を行った。ただし、実際の LHD に既設の空間ポートでは、深さ 1500[mm]位置に架台が設けられ、この上にコリメータを設置するというので、中性子コリメータの最大長は 1500mm とした。

図 6-3 に、計算された体系内での中性子の二次元飛跡の追跡例を示すが、中性子の散乱が特に比較的水素の含有量の多いポリエチレンまたは床のコンクリートで多いことが分かる。しかしながら、コイルや真空容器、シェルサポートといった金属物質中での散乱も多くみられ、プラズマ中からあらゆる方向へ放出された中性子がマルチチャンネルコリメータ位置に到達してくる可能性がある。これらの散乱成分は中性子検出器でエネルギー弁別をかけることで除去することも可能であるが、プラズマに関する真の情報を持った直接飛来する中性子に対して幅広いダイナミックレンジを持たせるためには不適當な方法である。そこで、散乱等によって偶発的に検出器位置に飛来する中性子はできる限り中性子コリメータで除去することが望ましい。

図 6-4 にコリメータ長を変化させた場合の中心 (6) ch 検出器位置における中性子スペクトル計算結果の一例を示すが、コリメータ長さの短い場合には 2.45[MeV]以外の散乱成分が数多く到達してくることが分かる。この成分を定量的に評価するために、中心 (6) ch 検出器位置へ到達する中性子のうち、プラズマから直接飛来する中性子束と散乱等の相互作用の上で到達する中性子束を、コリメータ長に対してプロットした結果を図 6-5 に示す。コリメータ長が長くなることで 2.45[MeV]の中性子束は徐々に減少し、長さ 500[mm]程度からほぼ一定になっていることが分かる。これは、本計算において、コリメータ形状のアスペクト比 ( $l/r$ ) を一定にしているため、コリメータ長が 500[mm]を超えたあたりから、コリメータ材のポリエチレンを透過して直接検出器位置へ到達する中性子がほぼなくなるためであると考えられる。一方、散乱中性子束はコリメータの長さを増すことで減少していく。そこで、全チャンネルについて、検出器位置での全中性子束に対する 2.45[MeV]中性子束の割合を評価した結果、どのチャンネルでもほぼ 1400~1500[mm]程度のコリメータ長で 2.45[MeV]成分の割合が頭打ちになることが確認された。従って、LHD 用マルチチャンネル中性子コリメータの基本形状として、図 6-2 に示されるように、概略 1500mm×1200mm×1500mm のポリエチレン材に 24mm $\Phi$ ×1500mm 長の直円筒コリメータを 76mm ピッチで 12ch 設けることとした。因

みに、この中性子遮蔽コリメータの体積は約  $2.7\text{m}^3$ 、重量は約  $2.2\text{t}$  となる。LHD 実験での中性子発生率は $\sim 10^{14}[\text{n/s}]$ 程度と見積もられるが、この時の各 ch の検出器位置における中性子束の計算結果を図6-5に示す。この結果より、中性子検出器の検出効率を10%とした場合、中央 ch での計数率は $\sim 10^4[\text{cps}]$ 、両端 ch の計数率は $\sim 10^2[\text{cps}]$ となって、約2桁の計数率差が生じることになる。時間分解能  $100[\text{ms}]$  ( $100[\text{ms}]$ 毎データ取得) で、全 ch における中性子検出器の計数統計誤差を10%以内に抑える ( $10^2$ カウント以上の計数を得る) には、両端 ch の中性子検出器の効率を相対的に ( $\sim 50\%$ 程度まで) 高める必要がある。また、マルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニタのプラズマ中心位置での空間分解能は先に示したように  $100[\text{mm}]$ 、マルチチャンネル中性子コリメータの角度分解能は約 $\pm 0.4^\circ$ となる。

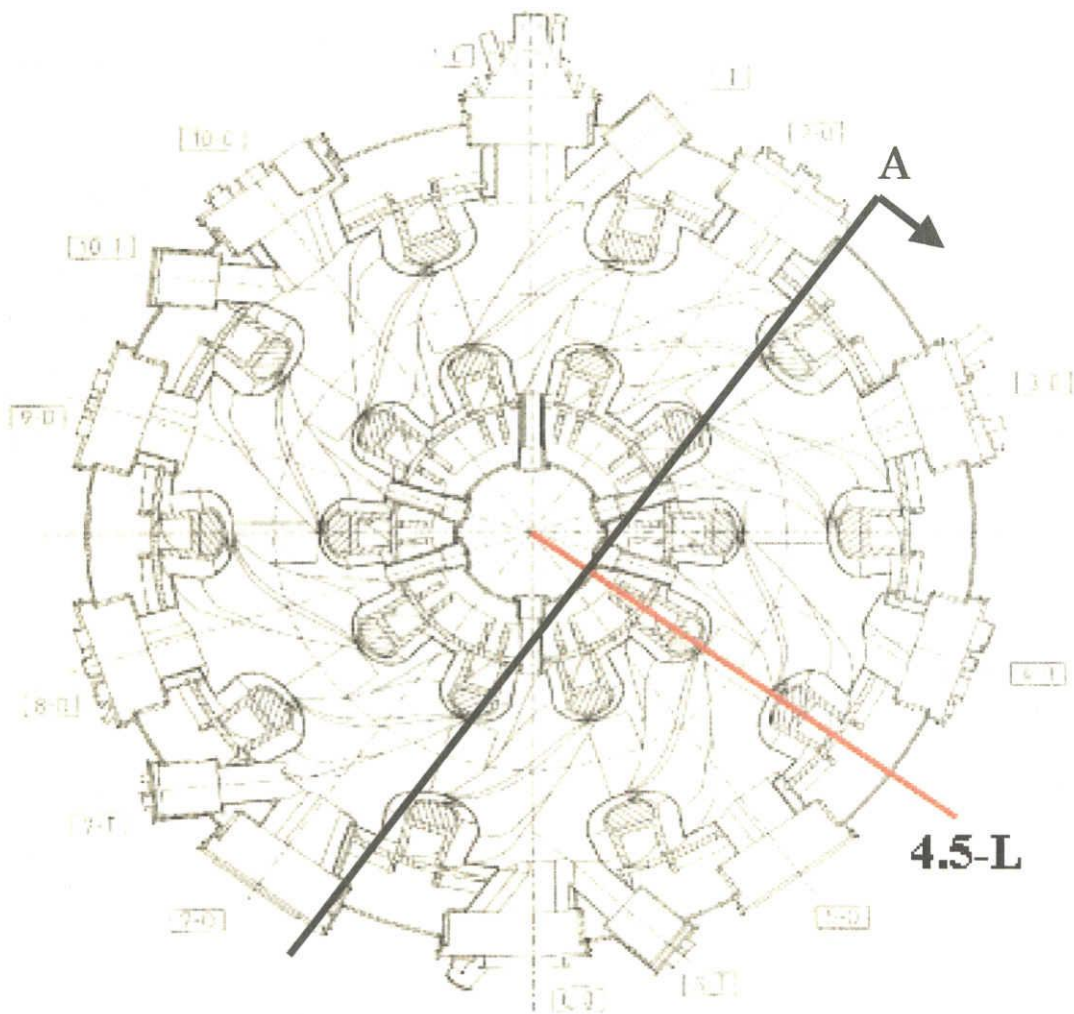


図6-1 核融合科学研究所 LHD 装置の中性子輸送計算モデル (トロイダル断面)

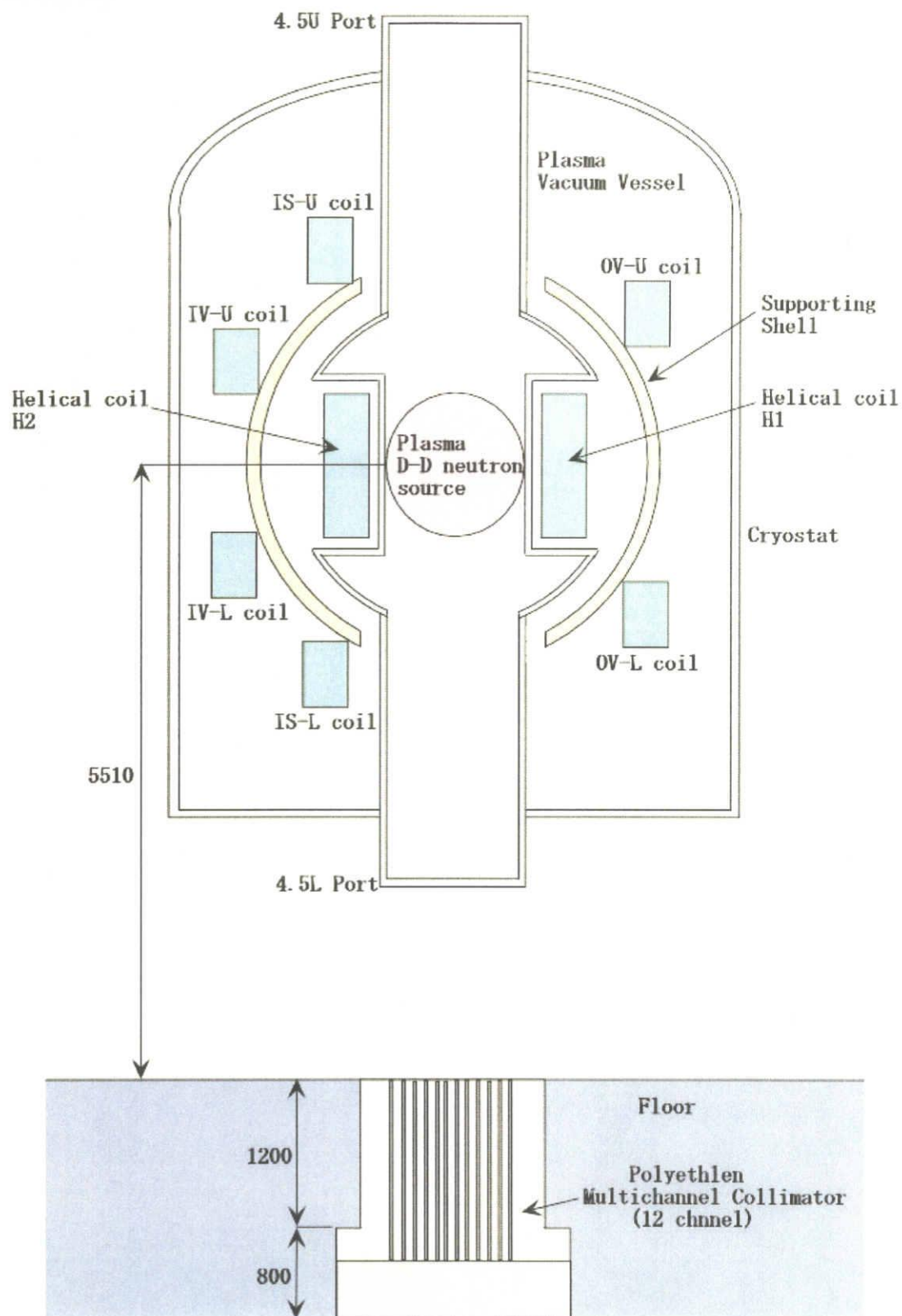


図6-2 核融合科学研究所 LHD 装置の中性子輸送計算モデル (ポロイダル断面)

表 6-1 LHD 構造物の組成

構造物	元素	原子数密度
真空容器 (SUS316 7.98[g/cm <sup>3</sup> ])	Fe	5.722E-2
	Cr	1.571E-2
	Ni	9.824E-3
	Mo	1.252E-3
	Mn	1.750E-3
クライオスタット (SUS316 7.93[g/cm <sup>3</sup> ])	Fe	5.964E-2
	Cr	1.745E-2
	Ni	7.525E-3
	Mn	1.739E-3
床 (コンクリート 2.15[g/cm <sup>3</sup> ])	H	5.524E-3
	Cr	1.078E-4
	O	4.046E-2
	Na	8.786E-4
	Si	1.546E-2
	K	4.206E-4
	Ca	2.484E-3
	Si	3.635E-5
	Fe	3.501E-4
	Mg	1.705E-4
シェルサポート (SUS316 7.98[g/cm <sup>3</sup> ])	Fe	5.636E-2
	Cr	1.1617E-2
	Ni	1.023E-2
	Mo	1.252E-3
	Mn	1.750E-3
ポロイダルコイル	Nb	6.078E-4
	Ti	1.356E-3
	Cu	2.797E-3
	Al	1.425E-2
	Pb	1.823E-4
	Sn	4.772E-4
	Fe	6.939E-3
	Cr	1.905E-3
	Ni	1.192E-3
	Mo	1.518E-4
	Mn	2.121E-4
	<sup>3</sup> He	3.003E-9
	<sup>4</sup> He	2.176E-3
Cu	3.949E-3	
Ni	4.750E-4	
ヘリカルコイル	Nb	6.617E-4
	Ti	1.477E-3
	Cu	2.410E-2
	Pb	4.609E-4
	Sn	1.207E-3
	Al	2.815E-2
	Ni	5.930E-5
	Si	3.059E-3
	O	8.866E-3
	C	9.852E-3
	H	6.548E-3
	<sup>3</sup> He	4.821E-7
	<sup>4</sup> He	3.495E-3



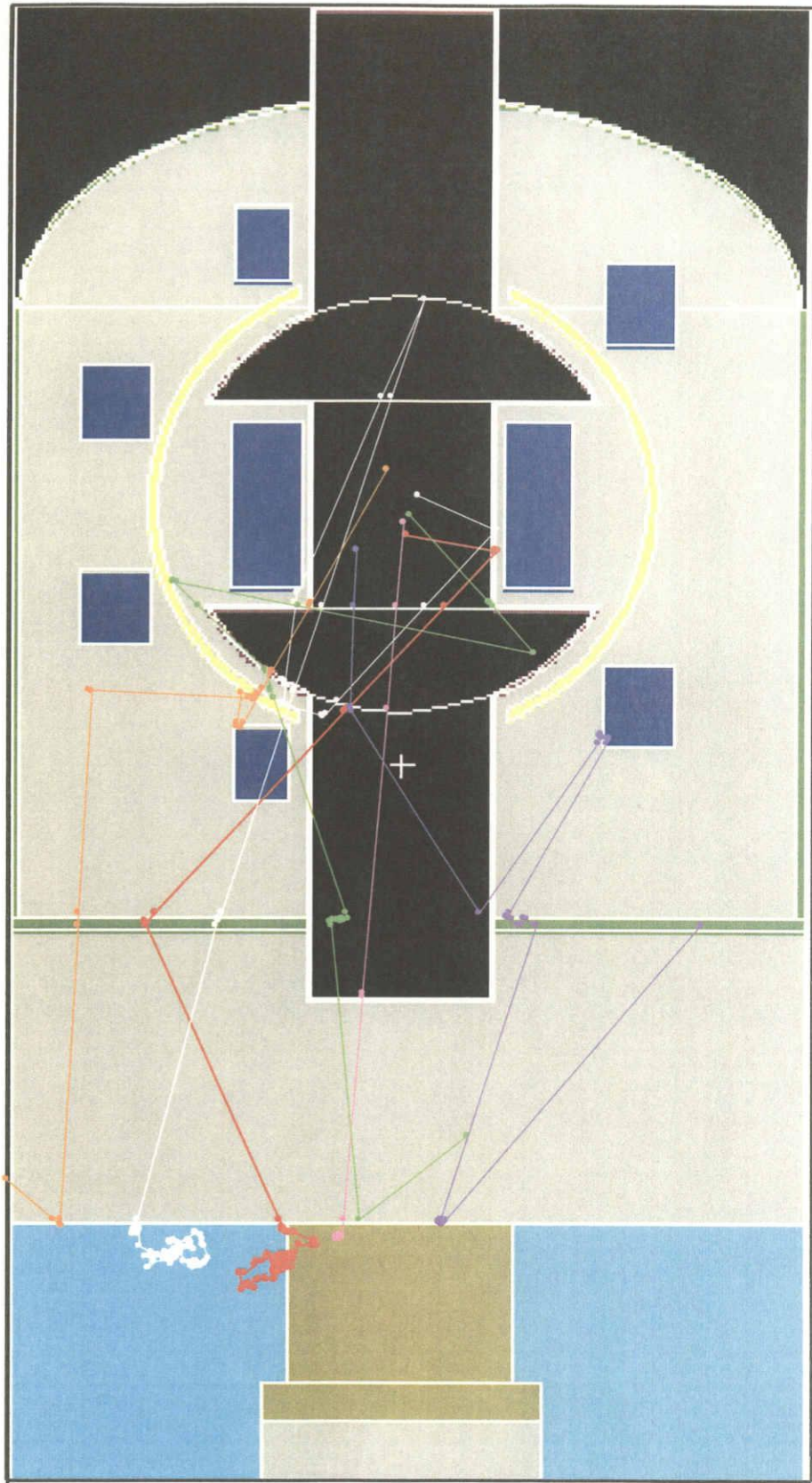


図6-3 LHD 体系内における DD プラズマ中性子の飛跡例

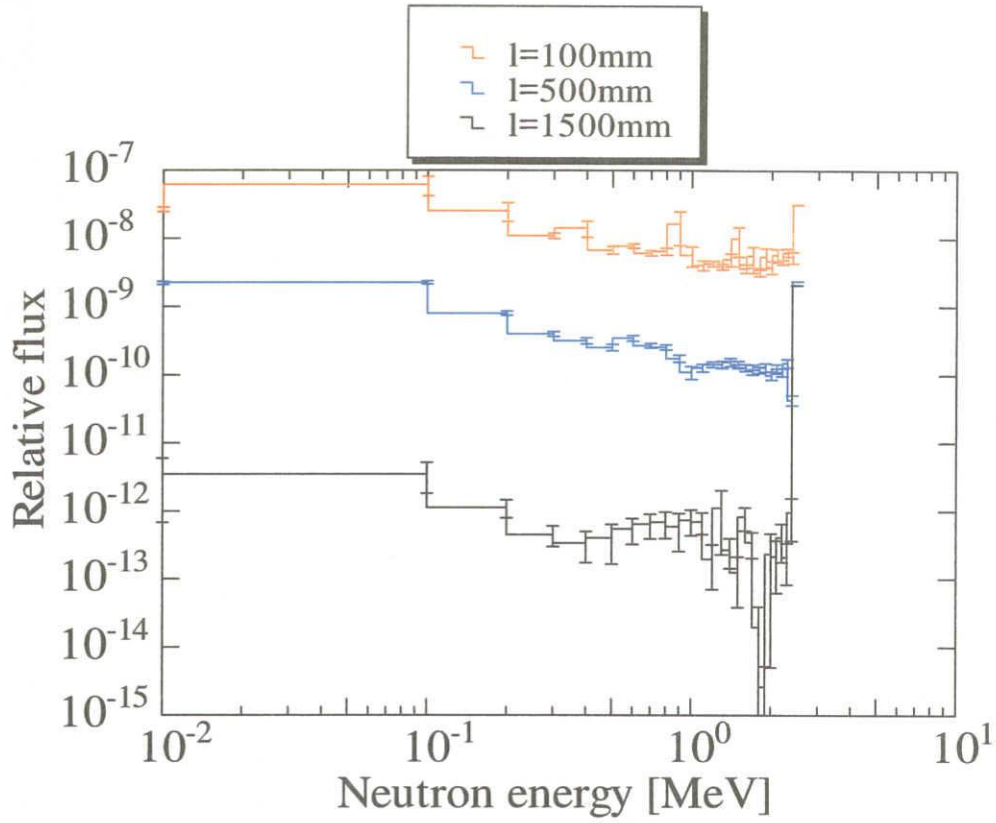


図6-4 中心チャンネル検出器位置における中性子スペクトルのコリメータ長依存性

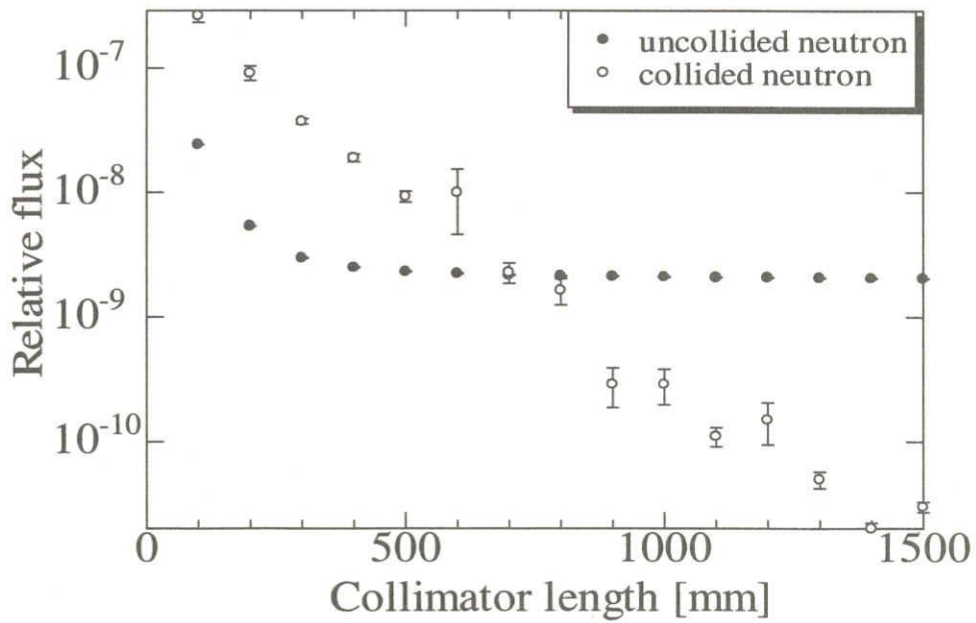


図6-5 中心チャンネルにおけるDD中性子束と散乱中性子束のコリメータ長依存性

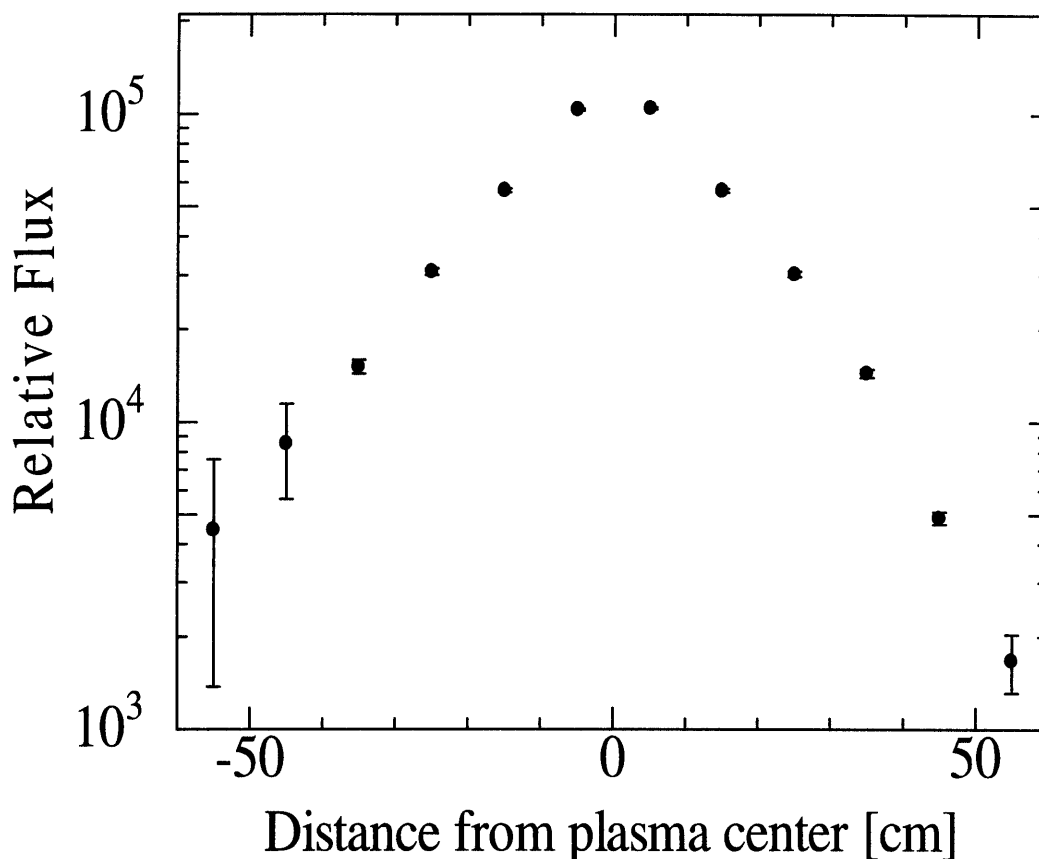


図6-6 各チャンネルの検出器位置における中性子束分布

### 6.3 指向性中性子検出器を用いた中性子発生プロファイル計測系の設計検討と適用性評価

指向性中性子検出器の角度分解能は約 $\pm 10^\circ$ であり、マルチチャンネル中性子コリメータ方式を大きく下回るため、同じ距離からの測定で所定の空間分解能を得ることは不可能である。従って、指向性中性子検出器の利点を生かすには、複数の検出器で異なる視野をオーバーラップして測定し、検出器の応答関数をもとに、中性子入射方向プロファイルを逆推定(アンフォールディング)する手法が考えられる。マルチチャンネル中性子コリメータ方式に比べ、性能的には劣るものの、空間的な制約が緩和されるため、プラズマのより近傍に検出器を設置することが可能となり、散乱中性子が少なくフラックスが高い有利な条件での測定を行うことができる。LHD実験に適用する場合、4.5Lポート下(プラズマ中心から3710[mm])程度の位置で中性子束は $\sim 10^9$ [n/cm<sup>2</sup>/s]程度が見込まれ、時間分解能 $\sim 100$ [msec]で測定誤差1%以下の測定を行うには $\sim 10^5$ [cps]の計数率、即ち $10^{-4}$ [counts · cm<sup>2</sup>/n]の検出効率が必要となるが、DD中性子測定用のH<sub>2</sub>-Xeガスシンチレータ型検出器では、 $\phi 50$ [mm] × L200[mm]のサイズで達成可能である。



そこで、図 6-7 に示されるように、この検出器を 4.5L ポート下(プラズマ中心から 3710[mm])及びベルジャー内の真空容器の下(プラズマ中心から 1650[mm])に 12 台設置した場合について、プラズマ中心部における中性子発生率分布の半値幅が 26cm、70cm、無限大(平坦)に変化させたときの検出器応答を計算した。その結果を図 6-8(a), (b)に示すが、3710[mm]位置では、各中性子発生率分布に対して指向性検出器群の応答にほとんど変化が現れなかったものn、1650[mm]位置では、有意な変化が見られた。従って、真空容器近傍に指向性中性子検出器アレイが設置できるならば、中性子コリメータなし(検出器アレイサイズ:約  $1 \times 10^2$ [m<sup>3</sup>]相当)で中性子発生プロファイルの推定が可能であると考えられる。また、図 6-9 に示されるような多孔型の小型中性子コリメータを併用することで、実質的な指向性を向上させることが可能である(図 6-10)。実際、図 6-11(a), (b)に、指向性中性子検出器アレイのみと中性子コリメータを併用した場合につき、プラズマ中心位置で点中性子源が平行移動したときの検出器応答(Point spread function、ただし、測定誤差として 10%を仮定)を示すが、前者の方式で~23cm 程度、後者の方式では 8cm 程度の空間分解能が得られることが分かる。表 6-2 に、性能比較した結果をまとめるが、小型の中性子遮蔽コリメータと指向性中性子検出器の併用方式では、マルチチャンネル中性子コリメータ型方式と同等な性能を保ちながら、その体積を 1/20 程度まで大幅に削減できる可能性が見出された。

表 6-2 各方式のシステム性能比較

	マルチチャンネル中性子コリメータ方式	ガスシンチレータ型指向性中性子検出器方式	中性子コリメータ併用ガスシンチレータ型指向性中性子検出器方式
プラズマ中心での空間分解能	10cm	23cm	8cm
時間分解能	~100ms	100ms	100ms
システムサイズ	2.7m <sup>3</sup>	0.01m <sup>3</sup>	0.14m <sup>3</sup>

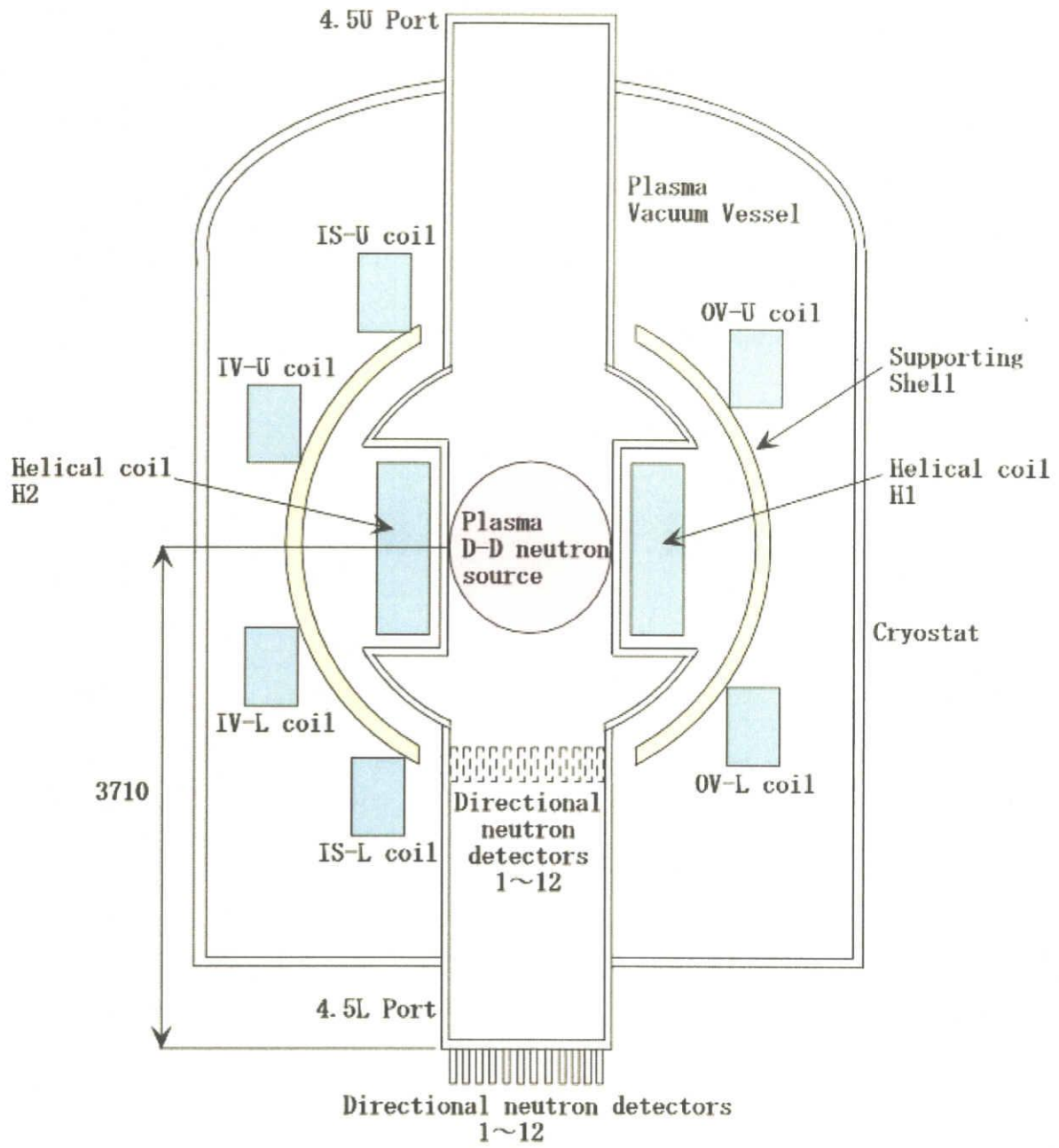
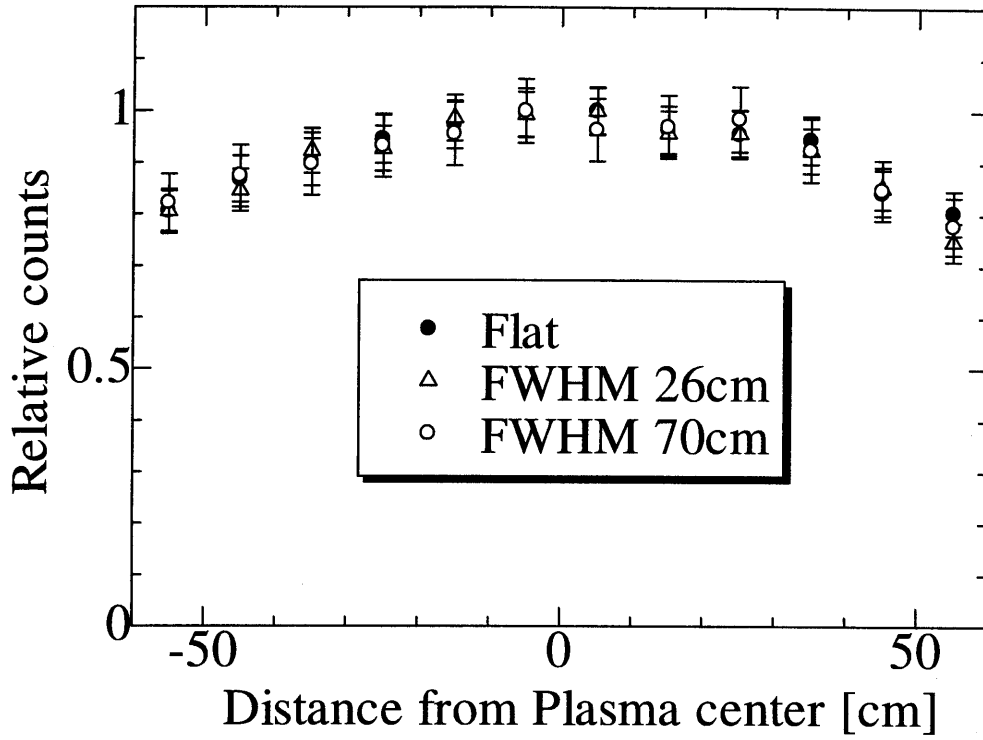
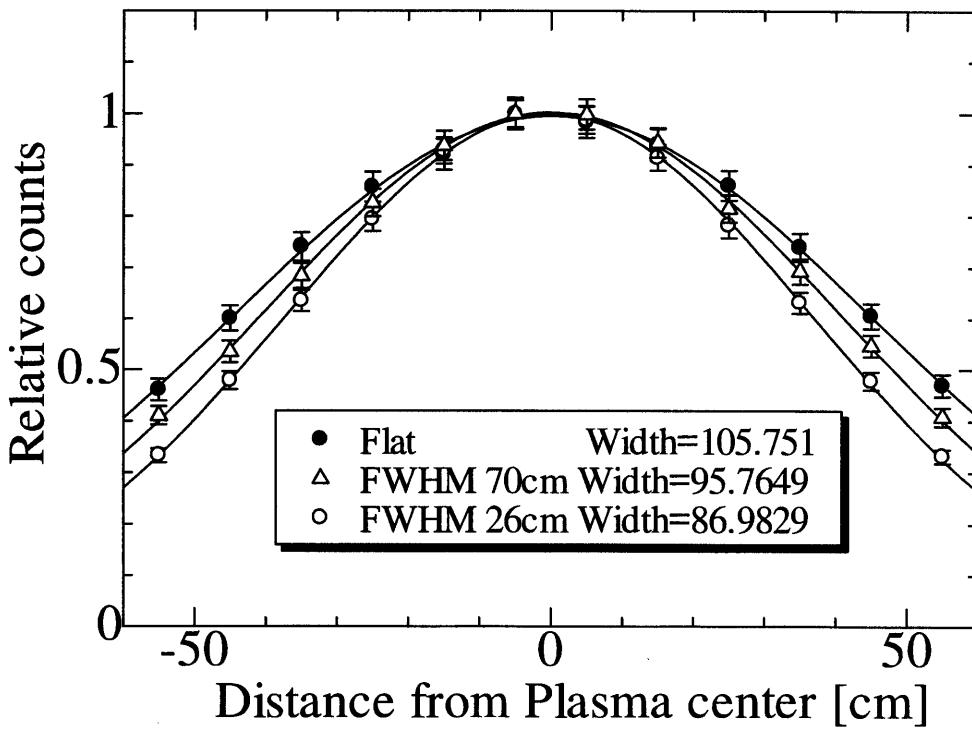


図6-7 指向性中性子検出器アレイの配置検討例



(a) プラズマ中心より 3710 mm の位置



(b) プラズマ中心より 1650mm の位置

図6-8 異なるプラズマ内中性子発生率分布に対する指向性中性子検出器アレイの応答

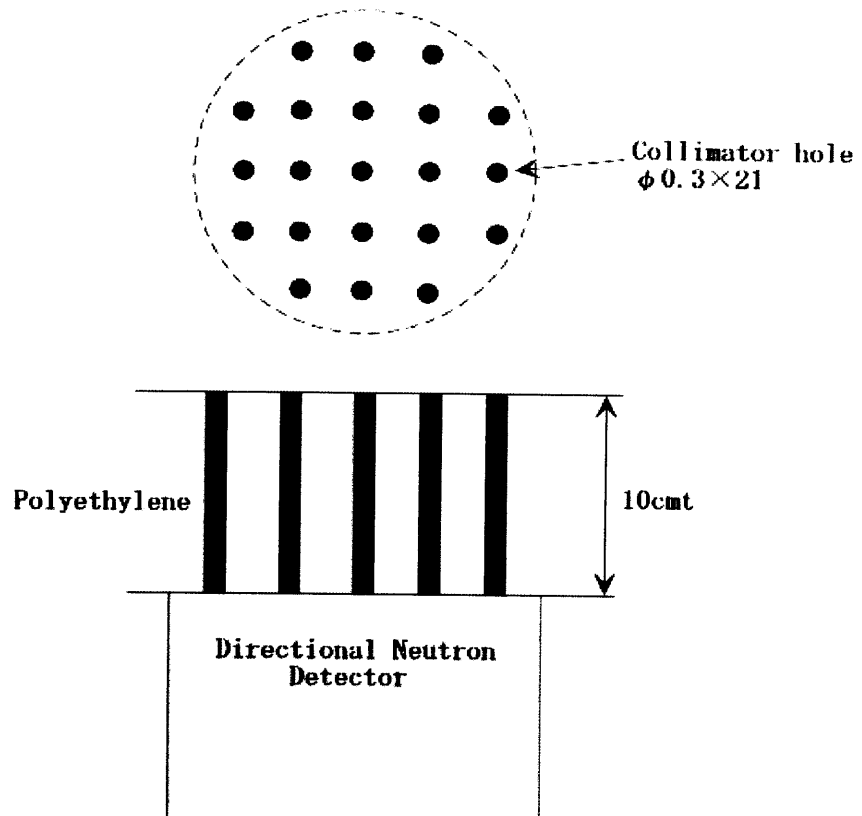


図6-9 小型中性子コリメータ併用指向性中性子検出器の概念

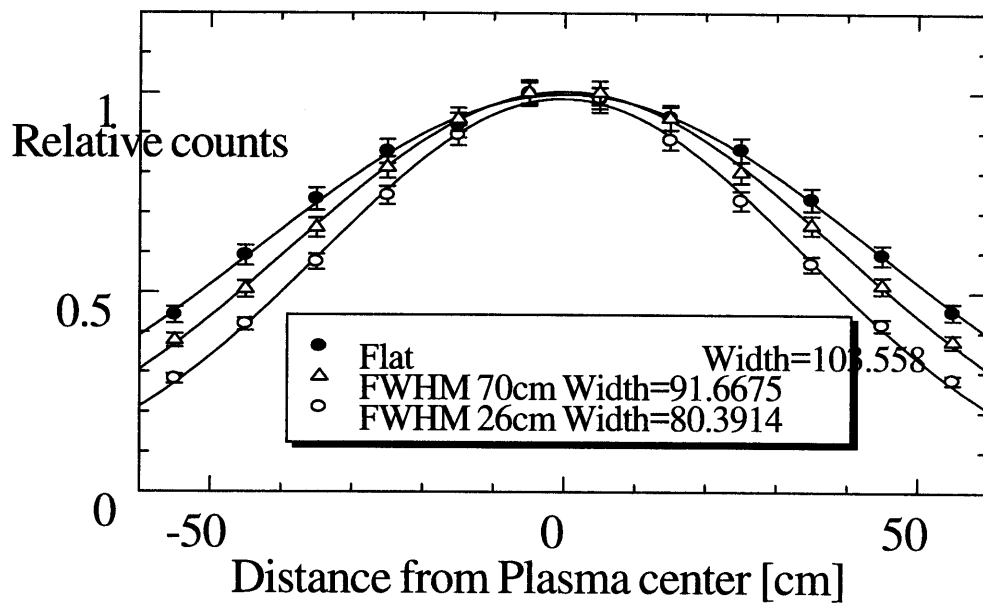
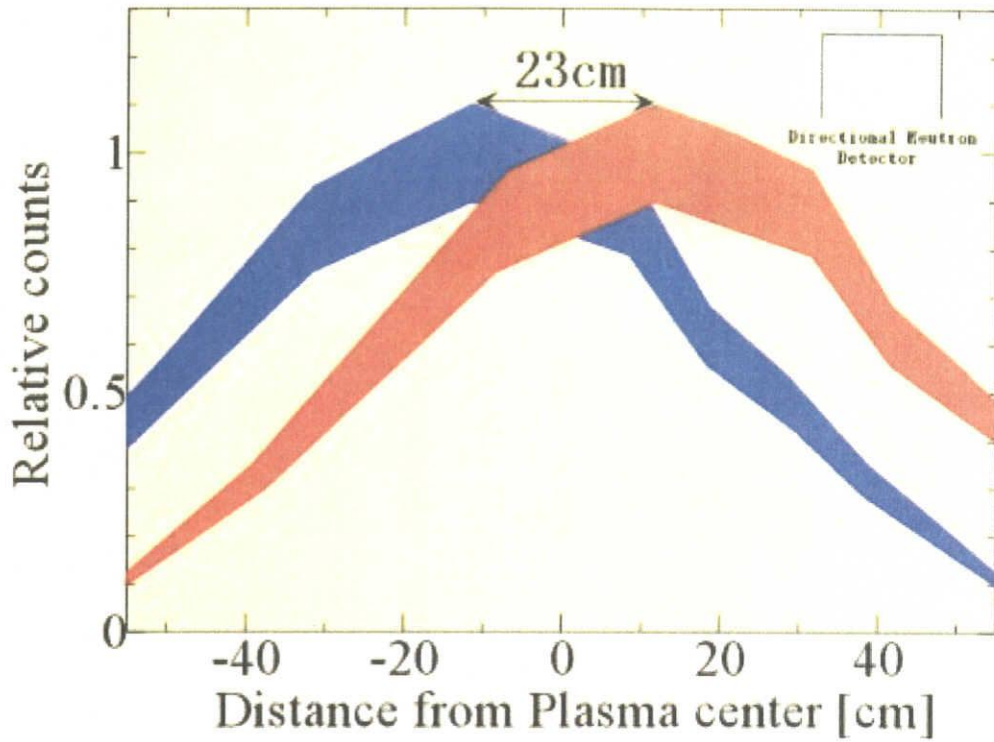
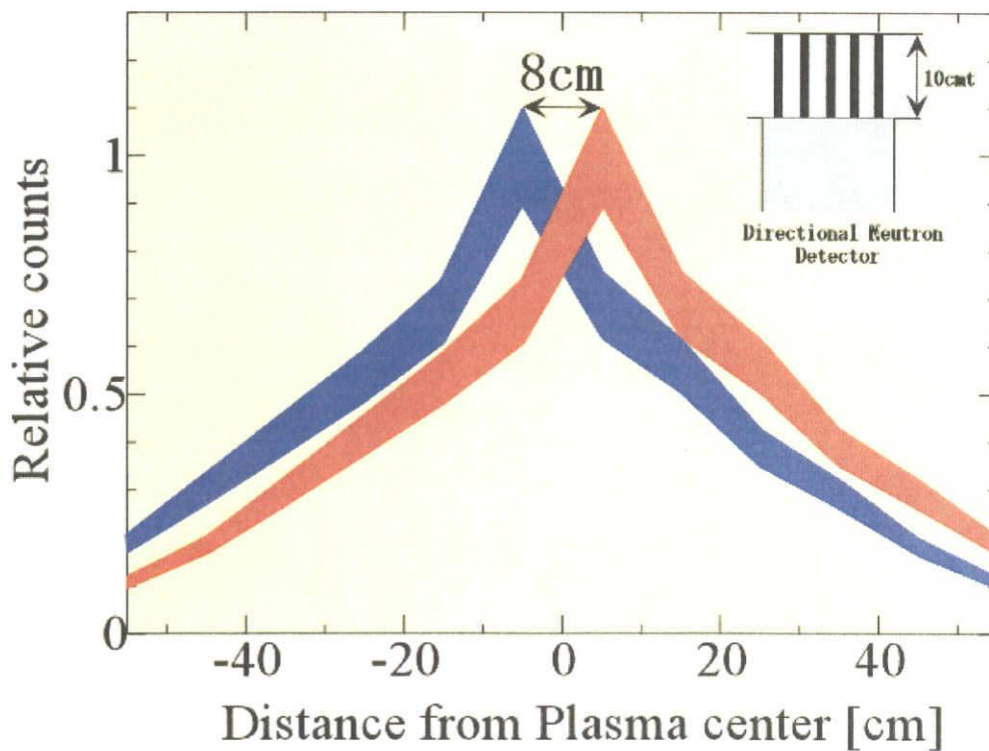


図6-10 異なるプラズマ内中性子発生率分布に対する小型中性子コリメータ併用指向性中性子検出器の応答



(a) 指向性中性子検出器アレイのみ



(b) 小型中性子コリメータ併用型指向性中性子検出器

図6-11 プラズマ中心位置の点中性子源に対する指向性中性子検出器アレイ応答

## 7. まとめと今後の展望

本研究では、大型磁場閉じ込め核融合実験装置における DT (または DD) 核反応プラズマから発生する中性子の空間・時間相関プロファイル測定技術の高度化の観点から、小型の指向性中性子検出器アレイをベースにした空間的制約の少ないコンパクトな高速中性子発生プロファイル計測 (カメラ) システムの構築を目指して、具体的に、He (または  $H_2$ )-Xe 希ガスシンチレータ中に荷電粒子コリメータを設置し、入射中性子によって生成される反跳 He (または陽子) のうち、このコリメータを通過した成分のみを同時計数で選択的に検出する原理に基づく指向性検出器要素の設計・試作、性能実証を行うとともに、実用的な核融合中性子カメラシステムの設計提案を行った。

本研究で得られた主な成果は、次の通りである。

- (1) e-Xe 希ガスシンチレータ系について、ガスフローによる不純物除去および混合ガス比の最適化を図り、(反跳) He 検出に対する発光特性を実験的に明らかにした。
- (2) 検出器応答関数計算用プログラムを開発・整備し、検出効率および角度分解能をパラメータとする検出器設計を可能にした。また、DT (14MeV) 中性子用の He-Xe 系と DD (2.5MeV) 中性子用の  $H_2$ -Xe 系につき、最適な検出器形状を見出し、性能予測とともに、適用限界を明らかにした。
- (3) 本指向性中性子検出器のプロトタイプシステムを設計・試作し、加速器 DT 中性子源等を用いて、基本性能を実験的に確認した。また、実用化に向けて、残された技術課題の洗い出しと要因分析を行い、その改良策を具体的に提示した。
- (4) 核融合科学研究所 LHD 装置への適用を想定して、本指向性中性子検出器をベースにした中性子カメラシステムの設計検討を行い、従来のマルチチャンネル中性子コリメータ方式に比べて、ほぼ同等な性能を保ちながら、そのシステム体積を 1/20 程度まで大幅に軽減できることを示した。

以上を総括すると、本研究は、従来の核融合中性子計測の技術体系へガスフロー式 He-Xe (および  $H_2$ -Xe) ガスシンチレータ型指向性中性子検出器という新概念を導入し、極めてコンパクトな核融合中性子発生プロファイルモニターを実現する検出器要素として有効であることを実証したものであり、大型磁場閉じ込め核融合実験装置における DD/DT 核反応プラズマ実験での適用により、核反応プラズマ物理の解明に大きな役割を果たすことが期待できる。また、将来的に、核融合炉核計装系への発展、さらには、原子炉、大型加速器等における高強度かつ高エネルギーの中性子の動的画像計測とその応用への技術波及にも大きな寄与が見込まれる。

今後、本研究で明らかにした集光効率改善や PMT ノイズ低減の対策を施し、ガスシンチレータ型指向性中性子検出器の性能向上を実現するとともに、データ処理を含めたコンパクト核融合中性子カメラフルシステムの本格的実用化研究への移行が望まれる。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、下記の名古屋大学工学研究科原子核工学専攻の学生諸氏には、多大なご協力、並びに有益な議論をいただきました。

梅村憲弘（現 東芝）、柴田泰成（現 松下情報システム）、

尾方智洋（現 博士前期課程 2 年）

ここに記して、心から感謝申し上げます。

また、試作検出器の性能実証試験において、西谷健夫 室長、山内通則 研究員 他、日本原子力研究所那珂研、核融合中性子工学研究室（FNS）のスタッフの方々に多くの便宜を図っていただきましたことに深く感謝いたします。

最後になりましたが、本研究成果のとりまとめに当って、従来方式のマルチチャンネルコリメータ型中性子発生プロファイルモニターの設計と性能比較の検討に予想以上に時間を要し、本成果の公開が大幅に遅れましたことを深くお詫び申し上げます。

平成 15 年 3 月末日



## 参考文献

- [1] J. M. Adams et al.、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A329 (1993) 277-290、The JET neutron emission profile monitor
- [2] ITER - Final Design Report 2001 Plant Description Document
- [3] エネルギー特別研究総合総括班、核反応プラズマ実験における放射線 ー現状と問題点 一、文部省科学科学研究費補助研究成果報告書(1983)
- [4] グレン F. ノル、放射線計測ハンドブック (第2版) 、日刊工業新聞社(1991)p262
- [6] J. B. Birks、Theory and Practice of Scintillation Counting、Pergamon Press(1964)
- [7] 浜松ホトニクス、カタログ 光電子増倍管と関連製品
- [8] M. Sasao et al.、Fusion Engineering and Design 34-35 (1997) 595-598、Preparation for fusion product measurement on LHD

## 付 録 (公表論文)

Proc. 14th Top.Meet.Technol. Fus. Energy, Fus. Technol.,Vol.39,No.2, Part 2,  
FUSTE 8(3) 291-1166 March 2001.ISSN:0748-1896 (2001) 1147-1151.

# CONCEPTUAL DESIGN OF COMPACT NEUTRON CAMERA WITH DIRECTIONAL NEUTRON DETECTOR FOR NUCLEAR FUSION EXPERIMENT

T. Iguchi, S. Iizuka, A. Uritani and J. Kawarabayashi  
Department of Nuclear Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, JAPAN  
+81-52-789-4680

## ABSTRACT

A new concept of compact neutron camera with directional neutron detector arrays is proposed for nuclear fusion experiment. The basic performance of the directional neutron detector is made clear through experiment for a prototype detector with 14MeV neutrons and design consideration of the detector specification to optimize its directionality. The results show that the angle resolution defined as a full width of neutron incident angles at a half maximum of detector counts would reach up to around 4 degrees at minimum around 45 degrees neutron incidence to the detector axis. The concept for a compact neutron camera is also given by making good use of an array of the optimized directional neutron detectors.

## I. INTRODUCTION

Neutron emission profile measurement is one of the most important key diagnostics in nuclear fusion plasma experiments for magnetic confinement fusion. At present, neutron camera systems with multi-channel collimators have been conventionally used. However, it has a large difficulty in setting up a sufficient number of line-of-sights with good spatial resolution because massive and heavy neutron shields are necessary to be placed near complicated fusion devices. To mitigate this difficulty, we propose a new concept of compact neutron camera with directional neutron detector arrays.

In the present study, we have verified the basic performance on the directional neutron detector through experiment for a prototype detector with 14MeV neutrons and then made design consideration of the detector specification to optimize its directionality. The concept for a compact fast neutron camera system has been also considered to make good use of an array of the optimized directional neutron detectors.

## II. DETECTION PRINCIPLE

The principle of the directional neutron detector is based on a recoil proton counter telescope holding

multi-channel proton collimators between a recoil proton emitter made of hydrogenous material (called as a radiator) and a charged particle detector to measure the recoil proton, as shown in Fig.1. By making good use of the anisotropy of fast neutron scattering with hydrogen atoms and the energy selection of recoil protons scattered in the forward direction, the detector efficiency can be sensitive to the direction of neutron incidence.<sup>1</sup> In our case, plastic scintillators (NE-102A) are used for both the radiator and the charged particle detector. The first scintillator, on which fast neutrons are incident, serves as a trigger signal supplier as well as a recoil proton emitter, to make coincidence with the second scintillator, which is quite effective to improve the signal to noise ratio in the charged particle detector. By adjusting the solid angle of higher energy recoil protons to enter the second scintillator through the recoil proton collimators, we have surveyed the detector configuration to obtain good directionality of the detector efficiency.

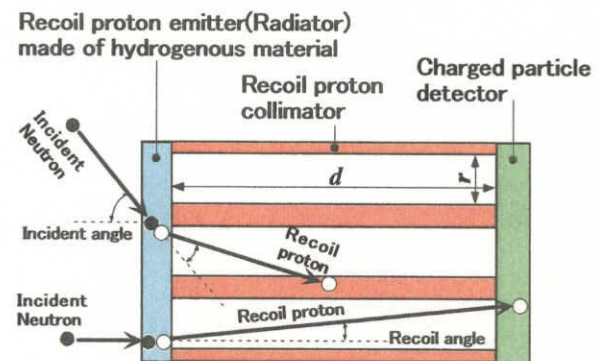


Fig.1 Concept of Directional Neutron Detector Based on Recoil Proton Counter Telescope

## III. EXPERIMENT

To verify the directionality based on the above detection principle, we prepared a prototype detector by modifying the energy compensated ( $\Delta E-E$ ) counter telescope system with a thick radiator (named as COTETRA), which has been previously applied to fusion neutron diagnostics as a fast neutron spectrometer.<sup>2</sup> Fig.2 shows the configuration of the COTETRA based directional



neutron detector with recoil proton collimators.

The performance test for this detector was made at Fusion Neutron Source Facility of Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI-FNS). Fig.3 illustrates the experimental arrangement, where the dependence of the detection efficiency and/or recoil proton spectrum was measured on the neutron incident angle to the detector axis by using 14MeV neutron beams extracted from the intense DT neutron source through the penetration hole of the room shielding wall.

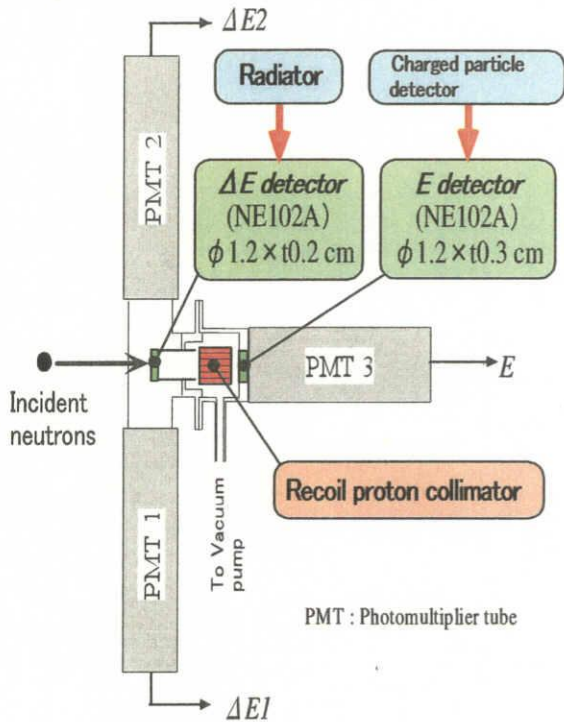


Fig. 2 A Prototype Detector Based on COTETRA

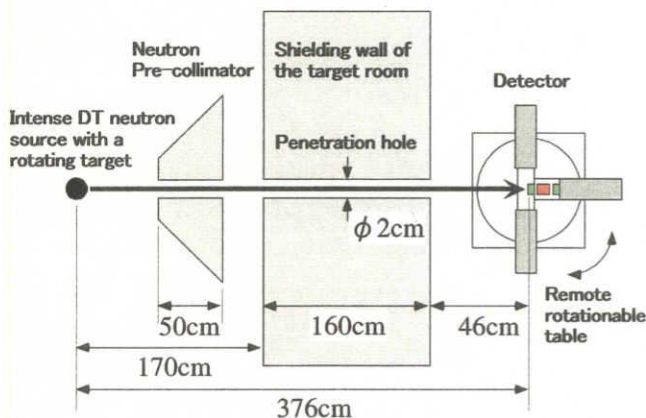


Fig. 3 Experimental Arrangement at JAERI-FNS

#### IV. RESULTS AND DISCUSSION

Fig.4 shows typical experimental results of the neutron incident angle dependence of the detection efficiency for two kinds of aperture ratios  $d/r$  of recoil proton collimation, compared with the results by Monte Carlo calculation. Reasonable agreement is found between experiment and calculation, where the experimental results give a little bit wider profile than the calculated ones because the energy resolution of both plastic scintillators was not considered in the calculation. It would be, therefore, concluded that the detection principle was proved and also the validity of the present Monte Carlo calculation was confirmed.

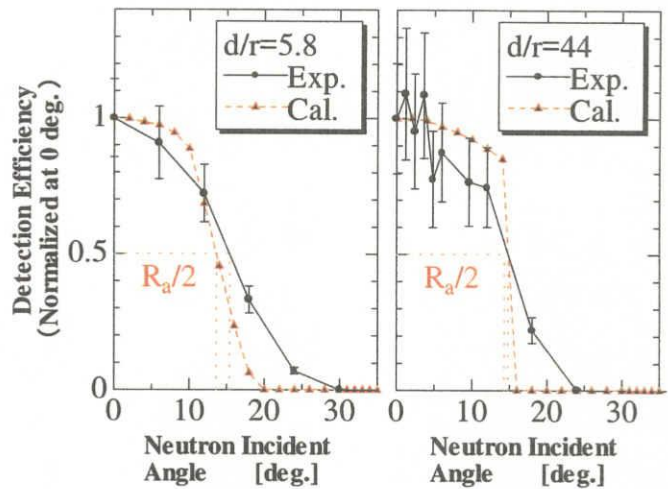


Fig. 4 Dependence of Detection Efficiency on Neutron Incident Angle

Using this calculation, we made a parametric survey on the aperture ratio  $d/r$  to obtain the best directionality. Fig.5 shows the results of the directionality dependence on the aperture ratio, where we defined an angle resolution  $R_a$ , that is, an index of directionality, as a full width of neutron incident angle at a half maximum of the detection efficiency. From Fig.5, it is found that the  $R_a$  is limited to around 25 degree at best for the 0 degree neutron incidence to the detector axis.

To improve this poor directionality, we have considered the case of oblique neutron incidence to the detector axis. Because the relation among the incident neutron energy  $E_n$ , the recoil proton energy  $E_p$  and the angle  $\theta$  of recoil proton to the neutron incident direction is given by  $E_p = E_n \cos^2 \theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ), the sensitivity of  $E_p$  to  $\theta$ , namely  $dE_p/d\theta$ , reaches the maximum around  $\theta$  of 45 degree. This means that the oblique neutron incidence would be more advantageous than the 0 degree neutron incidence in obtaining good directionality. Fig.6 gives an experimental verification of this fact, where the angle resolution  $R_a$  in oblique(35 deg.) neutron incidence is a few

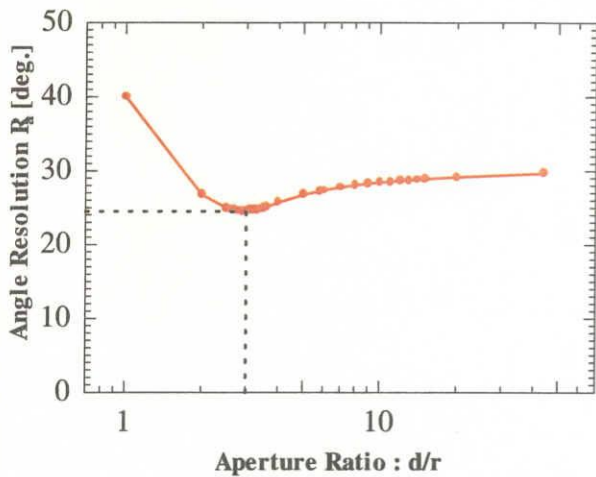


Fig. 5 Dependence of Angle Resolution:  $R_a$  on Aperture Ratio:  $d/r$  for the 0 deg. neutron incidence

times better than that in the 0 deg. neutron incidence. Through the parametric survey of the  $d/r$  ratio to minimize  $R_a$  for the 45 degree neutron incidence, we have found that the  $R_a$  could be improved up to around 4 degrees at  $d/r$  of 15.0, as shown in Fig.7.

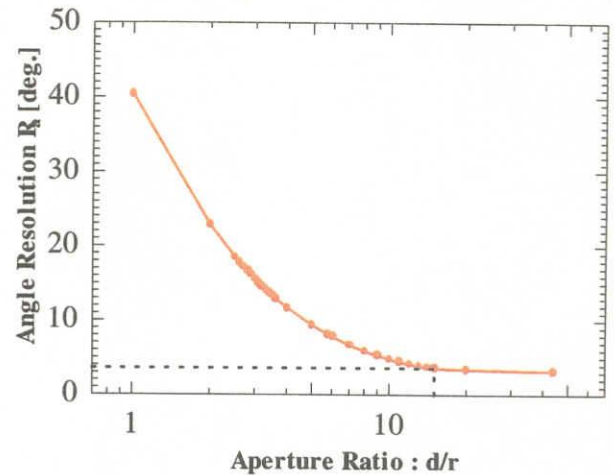


Fig. 7 Dependence of Angle Resolution:  $R_a$  on Aperture Ratio:  $d/r$  for the 45 deg. neutron incidence

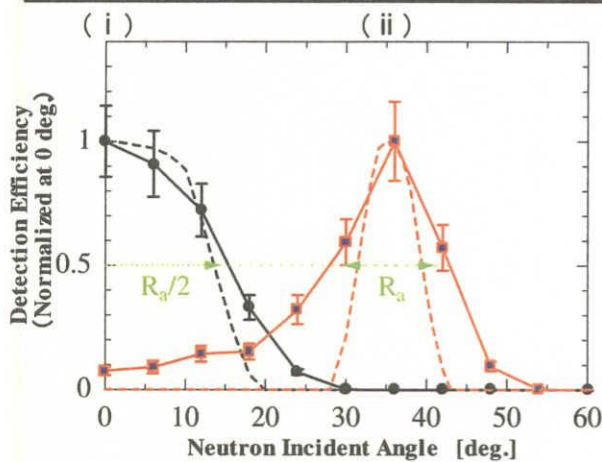
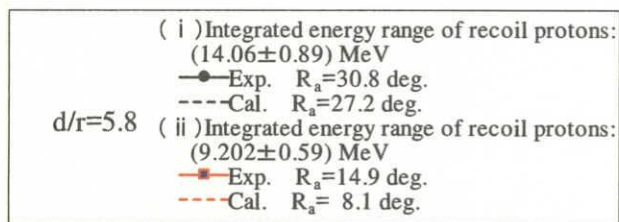


Fig. 6 Dependence of Detection Efficiency on Neutron Incident Angle in Oblique Neutron Incidence.

## V. DESIGN CONSIDERATION ON NEUTRON CAMERA CONFIGURATION

We have made preliminary design consideration on two kinds of neutron camera concept with an array of directional neutron detectors; one is to make good use of the directional neutron detector in oblique neutron incidence and the other to utilize recoil helium( $\alpha$ ) detection with a  $^4\text{He-Xe}$  gas scintillator for high flux neutron fields such as an ITER-like fusion experimental reactor.

### A. Neutron Camera with Directional Neutron Detector in Oblique Neutron Incidence

The directional neutron detector in oblique neutron incidence shows good directionality but would have such demerits that the detection efficiency is lower and the detection efficiency profile on the neutron incident angle is asymmetry. To mitigate these demerits, we propose to combine a few number of detectors and synthesize their measurement. Fig.8 shows an example of the detector arrangement, where the axis of the detector 1 array is at right angles to the axis of the detector 2 array. For neutrons coming into the front surface of the detectors 1 and 2, their synthesized detector response would be a desirable one which meets good and symmetrical directionality with moderate detection efficiency as demonstrated in Fig.9.

### B. Neutron Camera with Directional Neutron Detector Based on $^4\text{He-Xe}$ Gas Scintillator

As another concept of compact neutron camera for a high flux neutron field around  $10^{12}$  [ $\text{n}/\text{cm}^2/\text{sec.}$ ], that is, in an ITER-like environment, we propose to use recoil He( $\alpha$ )



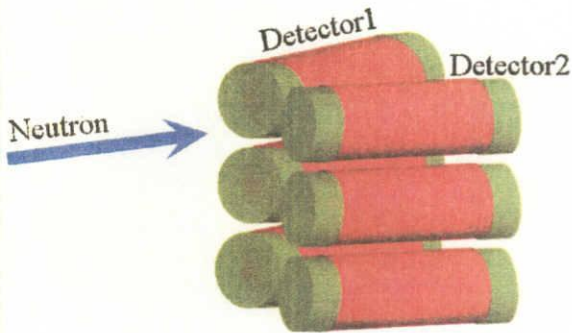


Fig.8 Concept of Neutron Camera with Directional Neutron Detector Arrays in Oblique Neutron Incidence

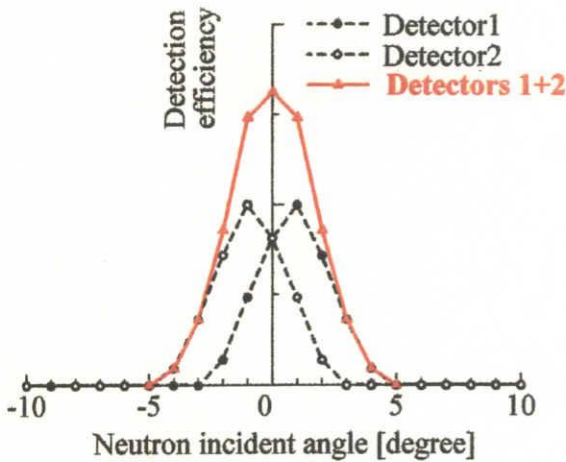


Fig.9 Synthesized Detector Response on the Horizontal Plane

detection with He gas mixture counters as an alternative of recoil proton detection with plastic scintillators. In particular, a  $^4\text{He-Xe}$  gas scintillator would be the most promising detector because it has many good features suitable for high flux neutron measurement, such as radiation-resistance, good time resolution due to fast response of gas scintillation, better directionality due to stronger anisotropy of fast neutron forward scattering with  $^4\text{He}$  than with  $^1\text{H}$  and insensitivity to gamma-ray. Fig. 10 shows a schematic view of the directional neutron detector based on the  $^4\text{He-Xe}$  gas scintillator. As the result of parametric survey of the aperture ratio  $d/r$  for recoil  $\alpha$  collimation to minimize the directionality index  $R_a$  for the 0 degree neutron incidence, the  $R_a$  is estimated around 18 degree as the best for  $^4\text{He-10\%Xe}$  gas mixture which can produce the largest scintillation output.

When applying this detector to ITER-FEAT, a 50

channel array can be set up in the mid-plane(remote handling) port. Most of plasma region would be viewed with only 7 channel detectors because of their poor spatial resolution. However the neutron emission profile could be reasonably derived by using all the measured data from 50 channel detectors through some unfolding procedure combined with their directional detector responses. In DT experiments, the count rate of each detector is estimated from  $10^2$  up to  $10^6$  [counts/sec.], which is suitable for pulse counting mode operation.

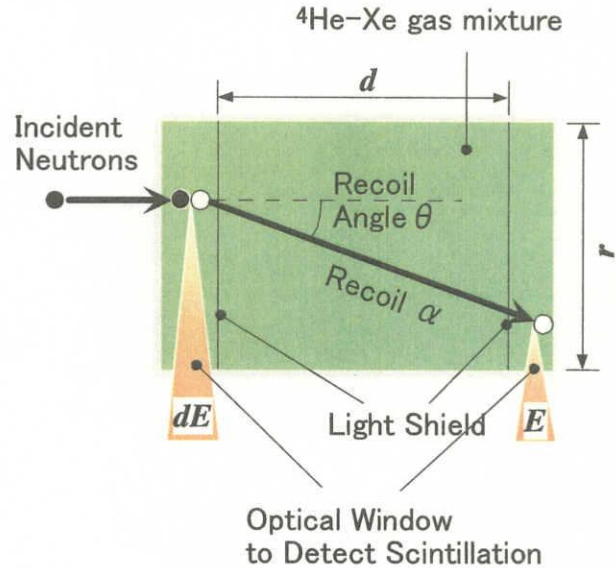


Fig.10 Concept of Directional Neutron Detector Based on  $^4\text{He-Xe}$  gas scintillator

Finally, the design results and expected performance on each directional neutron detector proposed here is summarized in Table 1..

## VI. CONCLUSION

We have proposed a new concept of compact neutron camera with directional neutron detector arrays for nuclear fusion experiment and made clear the basic performance on directional neutron detectors through both experiment and calculation. In particular, we have verified that the directionality is greatly improved by oblique neutron incidence to the recoil proton counter telescope type detector. Based on these results, we have also presented preliminary design consideration on two kinds of neutron camera concepts and the design results on each directional neutron detector.

Although the directionality and/or the spatial resolution expected from the present neutron camera element does not reach up to those of the conventional multi-channel neutron collimator system, which can give  $\sim 2.0$  degrees in angle resolution, it would be useful as a

complementary device which can obtain additional information on the neutron emission profile without a large increase of occupied space.

It is necessary to make much more detailed design consideration and experimental study to check the validity of the design results to embody the compact neutron camera system for practical application.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to express their thanks to Drs M. Sasao and M. Osakabe of National Institute of Fusion Science for their great help in the use of the 'COTETRA' system, and also the authors would like to acknowledge the JAERI-FNS staffs, in particular Drs. J. Kaneko and Y.

Ikeda for their operational support and for useful discussions.

#### REFERENCES

1. J. Kaneko et al., "A directional neutron detector based on a recoil proton telescope for neutron emission profile monitor", *Nucl. Instrum. Meth.*, **A385**, 157 (1997)
2. M.Osakabe et al., "A Compact Neutron Counter Telescope with Thick Radiator(COTETRA) for Fusion Experiment", *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 1636 (1994).

Table 1. Summary of Design Results and Expected Performance for Each Directional Neutron Detector

Recoil nucleus to be detected	Recoil protons		Recoil He( $\alpha$ )s
Max. energy of recoil nucleus to DT neutrons[MeV]	14.1		9.00
Neutron incident angle to the detector axis [deg.]	0	45	0
Integrated energy range of recoil nucleus [MeV]	14.1 $\pm$ 0.90	7.03 $\pm$ 0.45	9.00 $\pm$ 0.57
Aperture ratio:d/r	3.0	15	4.5
Detector length [cm]	3.4	75.4	25.9
Detector diameter [cm]	1.0	5.0	4.7
Angle resolution: $R_a$ [deg.]	24.5	3.6	18.0
Detection efficiency [counts/(neutrons/cm <sup>2</sup> )]	1.1 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	1.9 $\times$ 10 <sup>-5</sup>	7.4 $\times$ 10 <sup>-7</sup>