



## 講座 核融合施設における放射線計測の基礎

### 3. 核融合施設における放射線計測

#### 3. Radiation Measurement in Fusion Facility

##### 3.3 中性子計測の基礎と実践

###### 3.3 Fundamentals and Applications of Neutron Measurement

瓜谷 章

URITANI Akira

名古屋大学大学院工学研究科

(原稿受付: 2013年9月2日)

重水素を用いたプラズマ核融合実験においては、中性子の測定は物理的興味の面からも、安全管理の面からも重要である。本講座では、核融合実験における中性子計測で必要とされる基礎知識、すなわち熱中性子と高速中性子の検出原理をその素過程に遡って解説するとともに、基本的な中性子検出器を紹介した。また、核融合実験装置での中性子測定例として、中性子束モニタ、中性子エネルギー測定、中性子プロファイル測定について解説した。

**Keywords:**

neutron, thermal neutron, fast neutron, elastic scattering, nuclear reaction, fission, activation

##### 3.3.1 はじめに

中性子は電荷をもたず、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線のような直接電離作用を有しないため、これを検出するためには、後述する核反応を介して、電離作用のある放射線に変換する必要がある。この点は $\gamma$ 線計測と共通するところであるが、 $\gamma$ 線に比べて検出器中で全エネルギーを失いにくく、またバックグラウンドとなる室内散乱中性子が多いなど、一般的には $\gamma$ 線より測定が難しいといえる。

中性子計測においては、エネルギー的に高速中性子と熱中性子、さらにはその両者間の熱外中性子の三つに大きく分類することができる。明確な基準はないが、高速中性子はおおむね 10 keV 程度以上のエネルギーを有するものとさす。高速中性子が周辺物質の原子核と弾性散乱などの相互作用を通してエネルギーを失い、最終的には周辺物質と熱平衡状態になっているものを熱中性子と称する。熱中性子のエネルギーはマクスウェル分布に従っており、室温における熱中性子束の最確値は 0.025 eV である。高速中性子と熱中性子の間の領域に存在する中性子を熱外中性子と呼ぶ。

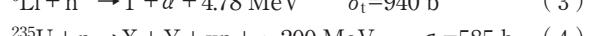
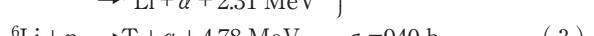
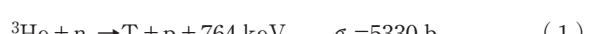
熱中性子と高速中性子とでは、計測方法が異なる。熱外中性子計測は熱中性子との類似点が多いので、熱中性子計測に包含されるものと考えておおむね差し支えない。核融合実験で扱う中性子エネルギーの下限は熱エネルギー、上限はおよそ 14 MeV である。本節では、この両者について基本的な検出方法を示したのちに、核融合実験で行われる中性子計測について、代表的な例を示す。

3.3.2 中性子検出原理

##### 3.3.2.1 热中性子検出法

###### (1) 検出に用いられる核反応と検出器の例

熱中性子の検出には、熱中性子との反応断面積が大きく、かつ正で大きい Q 値を有する核反応を利用する。以下に、熱中性子の検出に用いられる代表的な核反応を記す。付記されているエネルギーは核反応の Q 値を示す。



ここで  $\sigma_t$  は熱中性子に対する核反応断面積であり、X, Y は核分裂生成物を示す。

$^3\text{He}$  は最も一般的に用いられている熱中性子の検出媒体である。 $^3\text{He}$  は、それ自体がガス検出器の動作ガスとして優れた性質を有しているので、電離箱ならびに比例計数管において用いられる。1気圧の $^3\text{He}$  中では、 $^3\text{He}(\text{n}, \text{p})\text{T}$  反応で生成される p と T の飛程の和が 10 cm 程度となり、壁効果が顕著となるので、加圧したり、Xe や CF<sub>4</sub> などの阻止能の大きいガスが添加される [1]。Q 値が比較的低

いので、パイルアップが生じるような高 $\gamma$ 線場では、中性子と $\gamma$ 線の弁別が悪くなることがある。

$^{10}\text{B}$ は、 $\text{BF}_3$ が室温において気体として安定に存在するので、比例計数管に用いられる。しかし、 $\text{BF}_3$ は電気陰性度が比較的高く、比例計数管として安定に動作させるためには、気圧を低くし、かつ比較的高い電圧を印加する必要があり、 $^3\text{He}$ を用いた計数管に比べると使いづらい面がある。また、陰極表面に、蒸着などにより $^{10}\text{B}$ を薄膜状に装荷した比例計数管も存在するが[2]、パルス波高分布が本質的に連続分布となり、 $\gamma$ 線との弁別が容易でないため、用いられるることはあまり多くない。

$^6\text{Li}$ は、高いQ値を有しているので、熱中性子検出に広く用いられており、なかでもシンチレータに用いられることが多い。代表的なシンチレータはLiガラスシンチレータである。Liガラスシンチレータは熱中性子計測に広く用いられているが、 $\gamma$ 線により生成された2次電子に対する付与エネルギーあたりの発光量と、中性子との反応で生成された $\alpha$ 線とTに対するそれは前者の方が相当大きく、特に容積の大きいシンチレータでは $\gamma$ 線との波高弁別が問題となってくる。最近、日本において開発されたLiCaAlF<sub>6</sub>シンチレータ[3]が注目されている。先に述べた付与エネルギー当たりの発光量がガラスシンチレータほどは差がなく、また波形弁別により $\gamma$ 線弁別が可能[4]となるなど、優れた点が多い。比較的大きな結晶が作製可能である一方、小結晶を樹脂中に分散させて大面積でかつ $\gamma$ 線に対する感度を極めて低く抑えたものが開発中である。また、粉末状のLiFとZnS(Ag)シンチレータを混ぜ合わせた中性子検出器も広く用いられている。単なる検出器としても用いられるが、この混合体を平面に薄く塗布して2次元の画像検出器として使用する例も多い[5]。ただし、LiF中の荷電粒子のエネルギー損失や、ZnS(Ag)が不透明であることもあり、波高分布は多くの場合連続分布となる[6]。

$^{235}\text{U}$ は、金属ウランあるいは $\text{UO}_2$ を蒸着、電着等により電離箱の陰極内面に装荷して使用する。1核分裂あたり正反対に放出される2個の核分裂生成物のうち、1個は壁内で吸収されるので、実際に信号形成に寄与するのは1個の核分裂生成物である。それでもその付与エネルギーはおよそ100 MeVであるので、パルス計測が可能であり、 $\gamma$ 線との弁別も波高により行うことができる。 $\gamma$ 線の寄与が大きく、計数率が非常に高くなる状況では、電流出力の2乗平均を測定する、いわゆるキャンベル法[7]を用いることにより、 $\gamma$ 線の寄与を大幅に減じることができる。出力を2乗することにより、両者の波高差をさらに際立たせることによるものである。さらに高計数領域になると、電流モードで測定を行う。この場合、 $\gamma$ 線の影響が著しい場合には、中性子に不感で同じ構造をした補償型電離箱を用いて、 $\gamma$ 線の寄与を差し引く必要がある。核分裂電離箱は安定して動作するので、原子炉の運転制御に使われており、核融合分野では中性子束モニタに使用されることが多い。

## (2) 箔放射化測定法

熱中性子束の絶対測定には、箔放射化法が一般的に用いられている。熱中性子検出に主に用いられる元素は、金と

インジウムである。熱中性子の自己吸収が無視できる程度の厚さの箔に、 $\phi_t$  ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) の熱中性子束を $t$ 秒間照射した直後の放射能 $A$  (Bq) は次式で表される。

$$A = \phi_t \sigma_i n \{1 - \exp(-\lambda t)\} \quad (5)$$

ここで $n$ は箔中の当該原子の個数、 $\lambda$  ( $\text{s}^{-1}$ ) は生成された放射性物質の崩壊定数である。中性子照射後に、 $\beta$ - $\gamma$ 同時計測法や、検出効率が校正されたシンチレータやGe半導体検出器を用いた $\gamma$ 線測定から放射化箔の放射能を得ることにより、照射時の熱中性子束 $\phi_t$ を知ることができる。

比較的短時間の照射で測定するためには、反応断面積が大きくて、かつ崩壊定数が比較的大きい(半減期が短い)核種の選択が望ましい。また放射能計測の観点からは、適度なエネルギーの $\gamma$ 線を適度な強度で放出する核種が使いやすい。このような観点から $^{197}\text{Au}$ が最もよく用いられている。 $^{197}\text{Au}$ は同位体存在比が100%であり、中性子を吸収して生成される $^{198}\text{Au}$ は、半減期2,696日でベータ崩壊をして、 $\gamma$ 線放出率98.6%で961 keVの $\gamma$ 線を放とする。ただし、熱外中性子領域に大きな共鳴吸収ピークを有するので、精密測定の場合にはその補正も必要となる。各種の補正などについては、文献[8, 9]を参照されたい。

### 3.3.2.2 高速中性子検出法

#### (1) 検出に用いられる核反応と検出器の例

高速中性子の測定は、中性子束の測定に加えて、エネルギー測定が重要となってくる。いずれの測定にも、以下で述べる核反応、特に水素原子核との弾性散乱が用いられる。

高速中性子を計測するための代表的な核反応は、水素原子核との弾性散乱である。水素を用いる理由は、水素原子核の質量が中性子にほぼ等しく、一回の衝突で中性子の全エネルギーを水素原子核に付与することが可能であること、ならびに適度な大きさの弾性散乱断面積を有することによる。また反跳された陽子の計測が比較的容易であることも、よく用いられるうことの一因である。

図1に、静止した水素原子核にエネルギー $E_n$ の中性子が衝突したときの弾性散乱を模式的に記す。ここで $\theta$ は陽子の反跳角、 $\psi$ は中性子の散乱角であり、 $\theta + \psi = \pi/2$ である。反跳陽子のエネルギー $E_p$ は次式で表される。

$$E_p = E_n \cos^2 \theta \quad (6)$$

一方、散乱後の中性子のエネルギー $E'_n$ は次式で表される。

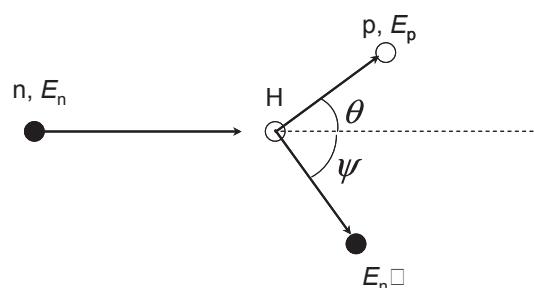


図1 中性子と水素原子核の弾性散乱の模式図。

$$E'_n = E_n \cos^2 \phi. \quad (7)$$

コリメータを用いて中性子の入射方向を限定すれば、検出器の幾何学的配置により  $\theta$ ,  $\phi$  は一意に決まるので、 $E_p$  または  $E'_n$  を測定することにより、入射中性子のエネルギー  $E_n$  を求めることができる。

このように中性子の入射方向を限定して、特定の角度に反跳される陽子、または散乱される中性子を利用して、入射中性子のエネルギーを測定する装置を総称してカウンターテレスコープ (counter telescope) と呼ぶ。反跳陽子を発生させる物質はラジエーター (radiator) とよばれ、水素原子を多く含むポリエチレンの薄膜や、ラジエーター内での反跳陽子のエネルギーも測定する目的で薄いプラスチックシンチレータ [10] が用いられる。検出効率を犠牲にしてでもエネルギー分解能を向上させるために、CH<sub>4</sub> がラジエーターとして用いられる場合もある [11, 12]。 $E_p$  の測定には、エネルギー分解能がよい表面障壁型 Si 検出器が用いられることが多い。検出器に到達する以前に陽子がエネルギーを損失することを防ぐために、陽子が飛行する経路を真空にすることが多い。陽子のエネルギーをきわめて正確に測るために、Si 検出器に替えて磁気スペクトロメータを用いる方法 [13] もあるが、装置がかなり大掛かりになるとともに、完全な磁気遮蔽が必要となる。散乱中性子のエネルギー  $E'_n$  は、飛行時間法を用いて測定することが多い。この場合、スタート信号を出すラジエーター部分と、ストップ信号を出す散乱中性子の検出器には速い応答特性を有する有機シンチレータが用いられることが多い [14]。また反跳陽子を用いた測定は、エネルギー測定だけではなく、高速中性子束の絶対測定にも使用される [15]。

入射中性子の入射方向を限定せず、比較的大きな有機シンチレータ内で起きた弾性散乱起因の反跳陽子のエネルギーを測定することにより、入射中性子のエネルギーを測定する方法もある。代表的な例はサンゴバン社製の有機液体シンチレータである BC-501A (旧型番 NE-213) である。有機シンチレータで得られる波高分布は、連続的に複雑な形状となる [16]。これは、反跳陽子のエネルギー分布が本質的に連続であること、有機シンチレータに付与されるエネルギーと発光量の間に非線形応答特性があること、炭素の反跳があること、中性子が多重散乱すること、などの理由による。このパルス波高分布から入射中性子のエネルギーを算出するには、当該検出器のエネルギーごとの応答閾値を得た上で、アンフォールディングという手法を施す必要がある。アンフォールディングについては参考文献 [17] を参照されたい。またこの種の有機シンチレータは  $\gamma$  線にも感度を有するが、 $\gamma$  線事象と中性子事象とでは、その発光の減衰時間が異なるので、そのことを利用した波形弁別 [18] により、 $\gamma$  線をかなり除去することが可能である。

水素原子核の弾性散乱以外には、以下の核反応が中性子エネルギーの測定に用いられる。



ここで  $\sigma_f$  は 14 MeV 中性子に対する核反応断面積である。<sup>238</sup>U の核分裂反応以外の核反応は吸熱反応であり、それぞれしきい値を有している。

Si 検出器に中性子を直接入射したときに起こる核反応 ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ) により生じた荷電粒子は飛程が短く、そのエネルギーをすべて検出器中に付与する事象が多いので、直接中性子のエネルギーを測定することが可能となる。簡便にエネルギー測定を行うことが可能であるが、Si 半導体検出器は中性子の照射損傷に弱く、14 MeV 中性子に対して  $10^{12} \text{ n/cm}^2$  程度 [19] の照射で使用が難しくなる。

Si 半導体検出器に替わり、中性子照射損傷に強い検出器としてダイアモンド検出器がある。ダイアモンド検出器は中性子に対して  $5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  程度の耐放射線性を有し、エネルギー分解能も天然のダイアモンド結晶を用いたものでは 1 % 台のものも得られている [20]。しかしながら欠陥が少なく、比較的大きな天然のダイアモンド結晶は非常に高価であるので、広く使用されるには至っていない。天然のダイアモンドに替わり、人工ダイアモンドを用いた検出器の開発が精力的になされている [21]。

<sup>238</sup>U は、明確なしきい値を有しているわけではなく、熱中性子に対しても小さなながら核分裂断面積を有する。しかしあおむね 1 MeVあたりで核分裂断面積が大きく上昇するので、高速中性子測定用の核分裂計数管の検出媒体として用いられることが多い。

## (2) 箔放射化測定法

箔放射化法を用いた高速中性子束の測定原理は、1.1.2 で述べたものとまったく同じであるが、高速中性子の測定には反応断面積にしきい値を有するものが使用されることが多い。このしきい反応を利用することにより、DD 中性子と DT 中性子を弁別して測定したり、熱エネルギーなどの散乱成分の影響を排除することが可能となる。また、しきい値が異なる複数の箔を用いて測定を行い、アンフォールディング手法を用いることにより、高速中性子のスペクトルを評価することも可能となる。表 1 に、生成核種の半減期、しきい値、反応断面積、崩壊時の放出放射線の観点から、核融合中性子計測に適している核反応の例を示す。

表 1 核融合中性子の放射化測定に適用可能な核反応の例。

核反応の種類	生成核種の半減期	しきい値 [22] (MeV)	14 MeV 中性子に対する核反応断面積 [22] (mb)
<sup>24</sup> Mg( $n, p$ ) <sup>24</sup> Na	15.0 h	4.9	197
<sup>27</sup> Al( $n, \alpha$ ) <sup>24</sup> Na	15.0 h	3.3	122
<sup>27</sup> Al( $n, p$ ) <sup>27</sup> Mg	9.46 m	1.9	78
<sup>28</sup> Si( $n, p$ ) <sup>27</sup> Al	4.13 s	4.0	262
<sup>56</sup> Fe( $n, p$ ) <sup>56</sup> Mn	2.26 h	3.0	114
<sup>58</sup> Ni( $n, 2n$ ) <sup>57</sup> Ni	35.9 h	12.4	30.7
<sup>63</sup> Cu( $n, 2n$ ) <sup>62</sup> Cu	9.8 m	11.0	490
<sup>65</sup> Cu( $n, 2n$ ) <sup>64</sup> Cu	12.7 h	10.0	873
<sup>115</sup> In( $n, n'$ ) <sup>115m</sup> In	4.50 h	0.3	432

### 3.3.3 核融合実験装置における中性子測定器の例

核融合実験装置における中性子測定例として、中性子束モニタと、中性子発生プロファイルモニタを例に挙げて、要点を解説する。

#### (1) 中性子束モニタ

熱出力を伴わない核融合実験においては、放出中性子数が核融合出力、核融合反応数の主たる指標となる。また中性子放出率の経時変化を観察することにより、プラズマ温度などのプラズマ状態の把握につながり、プラズマ物理研究にも資することができる。さらには、核融合実験の円滑かつ安全な実行のためにも、核融合反応で放出される中性子数をモニタすることはきわめて重要である。

中性子モニタに使用される計測法としては、箔放射化法と核分裂電離箱を用いる手法が主として挙げられる。箔放射化法では、放射化箔を気送管により中性子束強度の高い測定ポートに送り、照射後はやはり気送管で測定室に送り、放射能の測定を行う。放射化法では、箔の放射化、放射能測定にそれぞれ時間がかかるので、実時間での測定は難しく、中性子束の数秒から数分の時間積分値を測定するのに適している。

リアルタイムの中性子束モニタには、核分裂計数管が用いられる。図2に核分裂電離箱をポリエチレン減速体とカドミウム板で取り囲んだ中性子束モニタの模式図を示す[23]。図3には、本モニタに中性子が等方的に入射した場合の中性子エネルギーに対する応答特性の計算例を示す。ポリエチレン減速体で取り囲み、入射中性子を減速する理由は、一つには<sup>235</sup>Uは低エネルギー中性子に高い感度を有

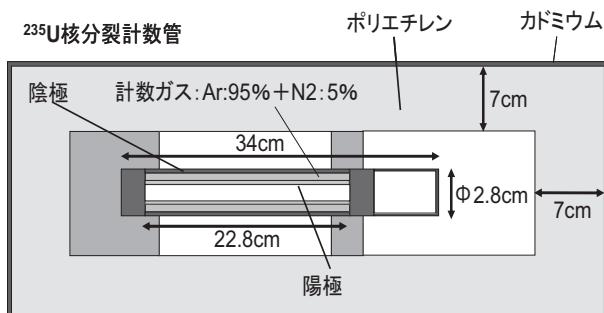


図2 JT-60において使用されたものと同等の中性子束モニタの模式図。

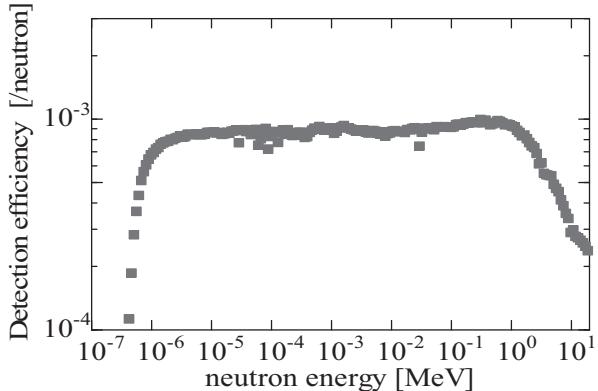


図3 図2に示した中性子束モニタのエネルギー応答特性の計算例。

するためである。また適当な形状の減速材で取り囲むことにより、モニタのエネルギー特性が、広いエネルギー範囲にわたって平坦になることも、その理由のひとつである。エネルギー応答が平坦であれば、周辺実験装置の移動などにより中性子の輸送状況が変化することにより、モニタに入射する中性子のエネルギーが多少変化したとしても、その検出効率が変わらないこととなるので、実験遂行上都合がよい。カドミウムは熱中性子に対する吸収断面積がきわめて大きく、モニタ全体を適当な厚さのカドミウム板で囲うことにより、実験室内の構造物等で減速されて生成されたバックグラウンドとなる熱中性子を排除することができる。

中性子束モニタを用いて中性子束の絶対値を得るためにには、モニタの検出効率の校正が必須となる。校正是<sup>252</sup>Cf自発核分裂線源を用いて行うことが多い。トーラス内に設置したレール上を、中性子放出率が値付けされた<sup>252</sup>Cf線源を搭載した模型の電車を走らせ、連続的、あるいは多点で校正を行う。この際注意すべき点は、校正を行う時と、実際のプラズマ実験を行う時とでは、様々な条件が異なるということである。異なる条件とは、<sup>252</sup>Cfの自発核分裂中性子（平均エネルギー：2.1 MeV）とDD、DT核融合反応で放出される中性子のエネルギースペクトルの違い、模型電車を走らせるためのレールや電車そのものによる中性子の散乱、超伝導実験装置であれば液体ヘリウムの有無、等々である。これらの影響は検出効率に対して数%の影響を及ぼすことがあるが、この影響を実験的に評価することは難しく、モンテカルロ計算により詳細な計算を行うことが必要となる[24, 25]。

#### (2) 中性子スペクトル測定

核融合反応で放出される中性子のエネルギースペクトルから、プラズマのイオン温度の情報を得ることができるので、これまでにTFTR、JET、JT-60などで、測定が試みられている。天然ダイアモンド検出器を用いる方法[26]、磁気スペクトロメータ[13]を用いたもの、飛行時間法を用いたもの[27, 28]などが試みられている。紙面の関係で、すべてを網羅的に解説することはできないが、特徴のあるものとしてJT-60での使用例がある飛行時間法のひとつであるダブルクリスタルスペクトロメータを採り上げ、その要点を解説する。図4に、きわめて簡略化した本スペクトロメータの模式図を示す。本スペクトロメータでは、コリメートされた中性子の入射軸上に中心をもつ直径Rの球の表面に、スタート検出器と、ストップ検出器を置く。スタート検出器で散乱された初期エネルギーE<sub>n</sub>の中性子がストップ検出器に到達するまでの時間tは、簡単な幾何学計算から、

$$t = \frac{R}{\sqrt{\frac{2E_n}{m}}} \quad (12)$$

となることが示される。すなわち散乱角度φによらず、中性子の飛行時間が等しくなることを利用するものである。通常の飛行時間法において、検出効率を向上させるために

ストップ検出器を大面積平板のものにすると、中性子の飛行時間に散乱角度依存性が生じ、それによりエネルギー分解能の低下を招くが、この方式であればこの低下を防ぐことができる。飛行時間法の欠点である検出効率の低さを改善できる可能性を秘めている。

### (3) 中性子発生プロファイル測定

プラズマのポロイダル断面内のどの位置からどれだけ中性子が放出されたのかを知ることは、プラズマ物理的に興味深いことである。図5はJETにおいて用いられた中性子放出プロファイルモニタである[28]。多数の独立した中性子検出器と、中性子コリメータからなっている。中性子検出器としてはBC-501Aなどの有機シンチレータが用いられる。これらのシンチレータを用いる利点は、応答時間がきわめて早いので高計数率に対応できること、波形解析から $\gamma$ 線事象を弁別できること、の2点にある。中性子コリメータを用いて視野をきわめて細く限定することにより、その視野内において発生する中性子のみを計測することが可能となる。空間分解能としては、プラズマ中心部分にお

いて8~14 cm程度が得られている。決して十分な情報量とはいえないが、種々の数学的な手法を用いて2次元プロファイルが得られている[28]。

### 3.3.4 おわりに

核融合エネルギーの平和利用に向けて、重水素、三重水素を用いた核融合プラズマ実験が今後ますます重要性を増すことであろう。この核融合プラズマ実験においては、他のプラズマ計測と並んで、中性子計測が重要な診断ツールの一つになるものと考えられる。また、物理的興味の側面だけではなく、実験の安全管理、実験の円滑的な遂行のためにも中性子計測はますます重要となってこよう。本節では、核融合実験における中性子計測で必要となる基礎知識、すなわち熱中性子と高速中性子の検出原理をその素過程に遡って解説するとともに、基本的な中性子検出器や測定例を紹介した。本講座により、中性子計測に多少なりとも親しんでいただき、興味をもっていただければ幸いである。

## 参考文献

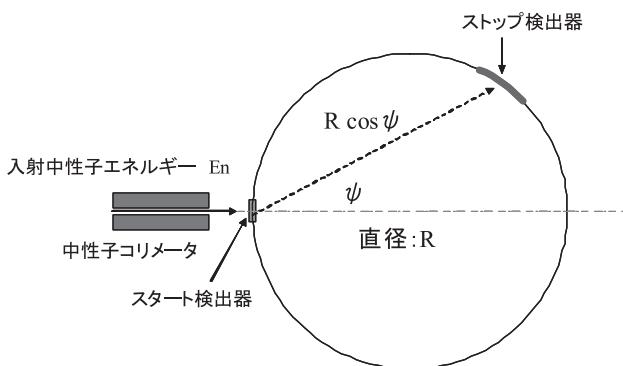


図4 ダブルクリスタルスペクトロメータの模式図。

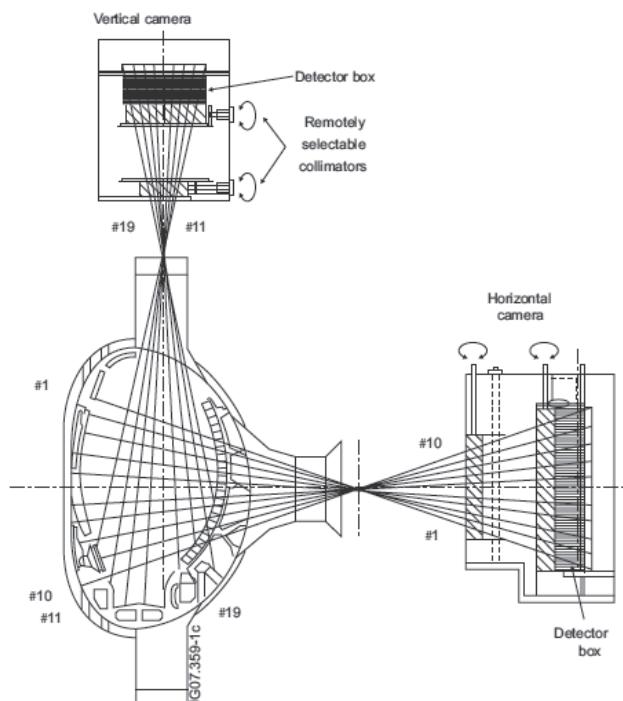


図5 JETにおける2次元中性子放出プロファイルモニタ。

- [1] M.K. Kopp *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. **201**, 395 (1982).
- [2] T. Tomoda *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **22**, 233 (1985).
- [3] T. Yanagida *et al.*, Appl. Phys. Exp. **4**, 106401 (2011).
- [4] A. Yamazaki *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A652**, 435 (2011).
- [5] M. Katagiri *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A573**, 149 (2007).
- [6] Y. Ito *et al.*, Radiat. Prot. Dosimetry **110**, 619 (2004).
- [7] R.A. DuBridge, IEEE Nucl. Sci. NS-14, 241 (1967).
- [8] 三澤 肇 他：原子炉物理実験（京都大学学術出版会、京都, 2010）p.113.
- [9] J. Nishiyama *et al.*, Rad. Protec. Dosimetry **148**, 237 (2011).
- [10] M. Osakabe *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **65**, 1636 (1994).
- [11] C. Mori *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A422**, 75 (1999).
- [12] T. Matsumoto *et al.*, Radiat. Prot. Dosimetry **110**, 223 (2004).
- [13] J. Kallne, A311, 595 (1992).
- [14] Y. Shibata *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 828 (2001).
- [15] H. Harano *et al.*, Prog. Nucl. Sci. Technol. **1**, 138 (2011).
- [16] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement 4th ed.* (John Wiley & Sons, Inc. 2010) p.576.
- [17] N. Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation* (Hemisphere Publishing, New York, 1983) p. 337.
- [18] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement 4th ed.* (John Wiley & Sons, Inc. 2010) p.581.
- [19] T. Iguchi *et al.*, Fusion Eng. Des. **28**, 689 (1995).
- [20] A.V. Krailnikov *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A476**, 500 (2002).
- [21] J.H. Kaneko *et al.*, Diamond Related Mat. **26**, 45 (2012).
- [22] K. Shibata *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **48**, 1 (2011).
- [23] T. Nishitani *et al.*, JAERI-M 91-176 (1991).
- [24] N. Nishio *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 2405115 (2011).
- [25] N. Nishio *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10D-306 (2010).
- [26] M. Isobe *et al.*, Fusion Engineer. Des. **34-35**, 573 (1997).
- [27] Y. Shibata *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 828 (2001).
- [28] T. Craciunescu *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A595**, 623 (2008).

## 講座執筆者紹介



たなかまさひろ  
田中将裕

核融合科学研究所 装置工学・応用物理研究系 准教授。主な研究分野：水素同位体の回収に関する研究、環境トリチウム研究、など。嫁の実家で無農薬野菜を作っています。手間をかけて作った野菜は一段と美味しく感じます。



たなかてるや  
田中照也

核融合科学研究所、准教授。主な研究分野：中性子工学設計、機能材料研究（実験も一生懸命やってます！）。



まつやままさお  
松山政夫

富山大学水素同位体科学研究所センター長・教授。主な研究分野：核融合炉燃料となるトリチウムの安全閉じ込め及び安全取扱い技術の確立に関する核融合炉燃料理工学研究。本研究に33年余り携わってきました。日々の新しい実験結果や理解不能な現象に遭遇し、眠っている脳内細胞に活を入れています。



うりたにあきら  
瓜谷章

名古屋大学大学院工学研究科教授。主な研究分野は、放射線計測、特に中性子の計測と、放射線の医療、工業などの利用。大学院生時代は名古屋大学プラズマ研で、プラズマ壁相互作用や真空に関連する研究に従事していました。その後放射線計測に興味を持ち、これを専門とするようになりましたが、最近は中性子計測つながりで核融合に関する研究にも二十数年ぶりに携わっています。趣味はバードウォッチング、バックギャモン。