

富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 22: 65-76, 2002.

論文

PIN-diode による JET ダイバータタイトルのトリチウム分析

鳥養祐二¹⁾, 松山政夫¹⁾, 渡辺国昭¹⁾, 野田信明²⁾, N. Bekris³⁾, M. Glugla³⁾,
V. Philipps⁴⁾, P.Code⁵⁾

1) 富山大学 水素同位体科学研究センター 〒930-8555 富山市五福 3090

2) 核融合科学研究所 〒509-5292 岐阜県 土岐市 下石町 322-6

3) Tritium Laboratory, Forschungszentrum Karlsruhe, D-76021 Karlsruhe, Germany

4) EURATOM Association, Forschungszentrum Jülich, Institute for Plasma Physics, TEC, 52425,
Jülich, Germany

5) EURATOM/UKAEA Fusion Association, Culham Science Center, Abingdon, OX14 3DB, UK

Tritium measurement of Divertor Tiles in JET by PIN-diode

Y. Torikai¹⁾, M. Matsuyama¹⁾, K. Watanabe¹⁾, N. Noda²⁾, N. Bekris³⁾, M. Glugla³⁾, V.
Philipps⁴⁾, P.Code⁵⁾

1) Hydrogen Isotope Research Center, Toyama University, Gofuku, Toyama 930-8555, Japan

2) National Institute for Fusion Science, Orishi-sho, Toki-shi, Gifu 509-8292, Japan

3) Tritium Laboratory, Forschungszentrum Karlsruhe, D-76021 Karlsruhe, Germany

4) EURATOM Association, Forschungszentrum Jülich, Institute for Plasma Physics, TEC, 52425,
Jülich, Germany

5) EURATOM/UKAEA Fusion Association, Culham Science Center, Abingdon, OX14 3DB, UK

(Received December 18, 2003; Accepted January 23, 2004)

Abstract

In this study, a simple and easy method of PIN-diode was used to measure the tritium inventory of tritium contaminated sample. The measurement results of intensity of X-ray after being shielded by Al and plastic sheets by PIN-diode method corresponded very well with the results by conventional Ge-semiconductor detector method. The surface distribution of tritium of JET Mark IIA type divertor tiles were obtained by using PIN-diode method that demonstrated a high effectiveness determining the tritium inventory.

1. 緒言

D-Tプラズマ核融合では、実験の進展により核融合装置中にトリチウムが蓄積する。このトリチウムの存在量を評価することは、トリチウム燃料のサイクリングおよび炉内保守の安全性の点から重要である¹⁾。

実際にD-Tプラズマ実験を行っているJETでは、ダイバータタイル中に多量のトリチウムが存在し、一枚のタイル中に数 100GBqから数TBqのトリチウムが存在することが確認されている。JETダイバータタイル中のトリチウムの測定は、カールスルーエ研究所において、主にコア抜きした試料をスライスし、このスライス片を燃焼して脱離したトリチウムを回収することにより行われている（‘coring’/full combustion method）^{2,3,4,5,6)}。この方法によりダイバータタイル中のトリチウムの分布が詳細に測定され、トリチウムは表面堆積層中に多く、堆積層のない部分や損耗層にはトリチウムが少ないことが報告されている。コア抜きによる燃焼法では、その燃焼試料中に含まれるトリチウムの全量を正確に求めることができるが、試料のコア抜き時に多量のトリチウムを含むカーボンドストが発生し、周囲をひどく汚染することが問題となっている。また、燃焼法は破壊法であり、燃焼に時間がかかるため多点測定ができない。そのため、ダイバータタイルのトリチウム量の測定では、タイルの一部分のコア抜き試料の測定結果よりタイル全体のトリチウムの存在量を予測する方法がとられており、真にタイル中のトリチウム量を求めているか疑問である。タイル中に含まれるトリチウム量のより簡単な測定法としてPIN-diode法³⁾、加速器質量分析法^{7,8,9)}、BIXS法¹⁰⁾、イメージングプレート法¹¹⁾などが提案されている。この中でPIN-diode法は、光-電気変換素子であるPIN-diodeを用いてトリチウムから発生した α 線を計測する方法で、PIN-diodeの構造が簡単で検出部が非常に小さいため、簡便な測定に向いている。グラフィイト中における α 線の飛程が $1\mu\text{m}$ 程度であるため、試料表面から $1\mu\text{m}$ までの表層付近のトリチウム量を求めていると言われている。しかし、試料中のトリチウム量が多いと、 α 線によりPIN-diodeが飽和し、測定できなくなる欠点があり、再現性も良くない。近年、トリ

チウムから発生した β 線が転換したX線を測定する β 線誘起X線検出法(BIXS)¹²⁾によりグラファイトタイル中のトリチウムを評価する方法が検討されている¹⁰⁾。グラファイト中ではトリチウムの β 線が転換したX線の飛程が 1mm程度であるため、試料表面から 1mmまでの深さのトリチウムを求めることができる。またBIXS法は、グラファイト表面のトリチウム量と同時にタイル内部のトリチウムの濃度分布を求めることができる非常に優れた方法である。しかし、BIXS測定には高価なGe半導体検出器を用いること、Ge半導体検出器を冷却するための装置が必要であり、装置が大きいという欠点がある。

そこで本研究では、より簡便なグラファイトタイル中のトリチウムの測定法として、トリチウムの β 線により誘起した X 線の検出器として PIN-diode を使い、グラファイトタイル中のトリチウムの分析を試みたので報告する。

2. 実験

2.1 試料

試料としてJETで高濃度トリチウムを用いたD-T実験においてダイバータ部に使用された二次元炭素タイル(2D CFC)を用いた。図 1 にその外観を示す。ダイバータはポロイダル方向に 10 枚のタイルから構成されているが、本研究ではこのうち 1IN1 および 1IN3 タイルを直径 60mmにコア抜きした試料であるIN1/6 およびIN3/17 の測定を行った。それぞれの試料の位置は図 2 に示す。また、それぞれ試料のコア抜き位置を図 1 に併せて示す。1IN1/6 試料は、試料表面に堆積や損耗がほとんど存在しない。燃焼法による 1IN1 試料の測定では、トリチウムの平均濃度は 38MBq/cm²であり、ほとんどばらつきは認められていない。これに対し、1IN3/17 試料では、試料表面に炭素の堆積とスパッタリングによる損耗が確認された。そのトリチウム濃度は、26MBq/cm² ~ 83MBq/cm²の間で大きく異なることが確認された試料である²⁾。

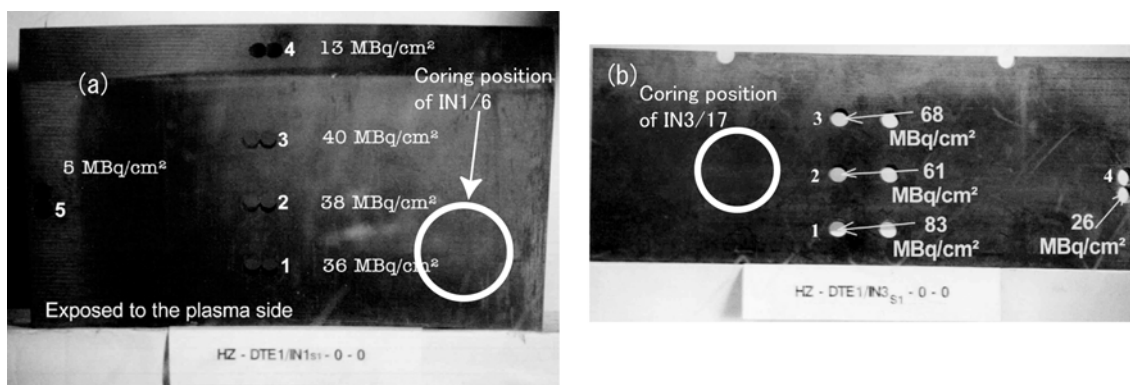


Fig.1 2D CFC type JET divertor tile
(a): 1IN1 tile, (b): 1IN3 tile

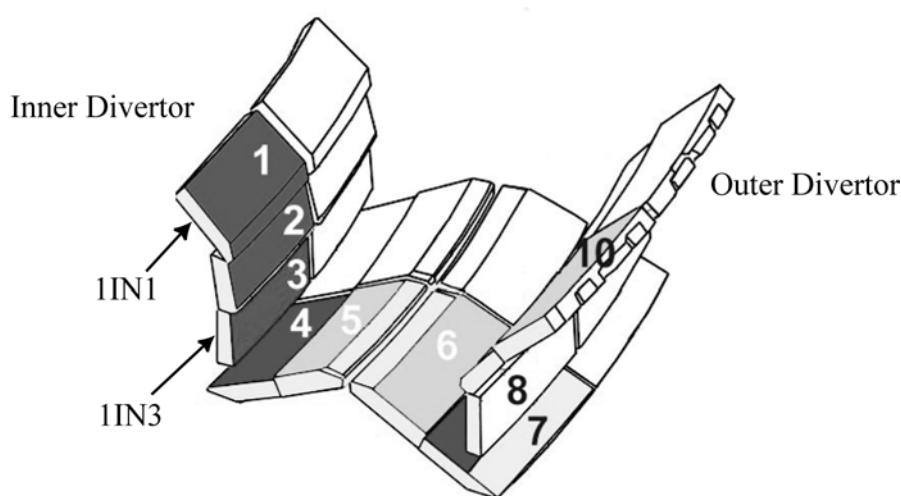


Fig.2 Schematic view of JET Mk IIA type divertor

2.2 測定

PIN-diode を用いた JET ダイバータタイルのトリチウムの測定は、ドイツ・カールスルーエ研究所内のトリチウム研究施設で行った。PIN-diode は windowless 仕様の PIN-photodiode detector を用いた 13)。本測定は検出器のサイズは $5 \times 5 \text{mm}^2$ である。トリチウムからの β 線を遮蔽し制動 X 線のみを検出するため、ポリエチレンシートまたは Al シートを PIN-diode 検出器と試料の間に挿入した。ポリエチレンシートは、カールスルーエ研究所において JET ダイバータタイルの保管に使われている厚さ 0.075mm のものを使用した。Al シートは厚さ 0.01mm のシートを使用した。図 3 にポリエチレンシートを用いた測定状況を示す。図に示すようにポリエチレンシート及び Al シートには一定間隔ごとに印を付け、常に一定の場所を測定した。試料と PIN-diode の間隔は 1mm とした。測定中は外

部の光による影響を防ぐため、暗室中で行った。なお PIN-diode 測定後に燃焼法による測定部位に含まれるトリチウム量の確認は行っておらず、PIN-diode のカウント数からのトリチウム量への換算係数はわかっていない。

また、CANBERRA 社製 Ge 半導体検出器と 165MBq のトリチウムを含む Amersham 社製ポリマー線源を使用し、遮蔽材を透過する線誘起 X 線のスペクトルの確認を行った。



Fig.3 Photograph of PIN-diode and coring specimen

3. 結果

3.1 X 線測定に与える遮蔽材の影響

線誘起 X 線測定に与える遮蔽材の影響を、試料と PIN-diode 検出器の間に入れたポリエチレンシートと Al シートの枚数を変えることにより検討した。図 4 は、11N1/6 試料の中心部について Al シートとポリエチレンシートを用いてシートの枚数を変えたときの透過 X 線を測定した結果である。測定ではそれぞれ 5min ずつ 5 回繰り返し行いその平均値とした。図 4 に示すように、どちらの測定においても遮蔽材の枚数の増加とともにカウント数は減少し、その減少挙動は遮蔽材の枚数の増加に対して指数的に減少した。Al シートとポリエチレンシートを比較した場合、低原子番号である水素及び炭素で構成され密度の低いポリエチレンシートよりも、高原子番号である Al の方が吸収係数が大きいため、透過 X 線強度が小さくなった。

Ge 半導体検出器を用いて遮蔽材を使用したときの透過 X 線スペクトルの確認を行った。図 5(a) および図 5(b) にポリエチレンシートおよび Al シートを遮蔽材として使用したときの Ge 半導体検出器で得られた透過 X 線スペクトルを示す。どちらのピークにおいても遮蔽材の枚数の増加に伴い透過強度が低下した。特に低エネルギー成分の透過強度が大きく低下した。また、低下の割合は Al

の方が大きかった。Al を遮蔽材として使用した場合は、1.5keV 付近に Al(Kα)に起因するピーク 13) が確認されたが、そのピークは非常に小さかった。PIN-diode および Ge 半導体検出器で測定したそれぞれのピークを積分し、シート 1 枚を遮蔽材として使用したときの値を用いて規格化したときの結果を図 6 に示す。図中黒抜きのプロットは PIN-diode を用いたタイルの測定結果、白抜きのプロットは Ge 半導体検出器を用いたポリマー線源の測定結果である。図に示すようにポリエチレンシー

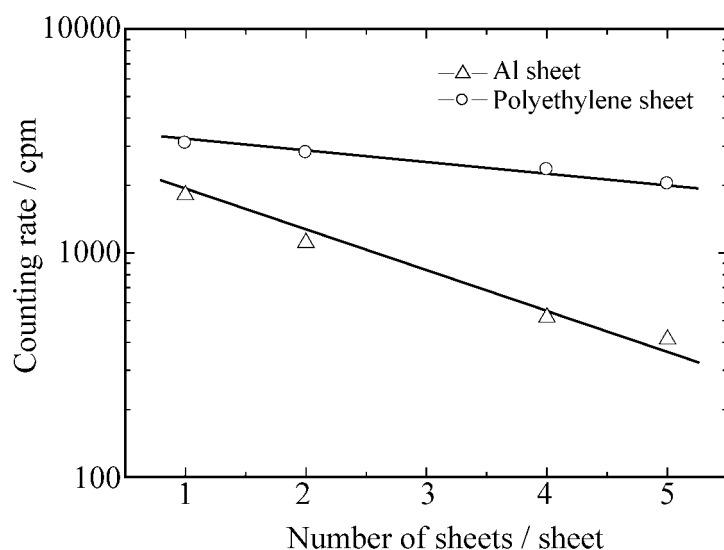


Fig.4 Relationship between the number of the shield sheets and counting rate of X-ray

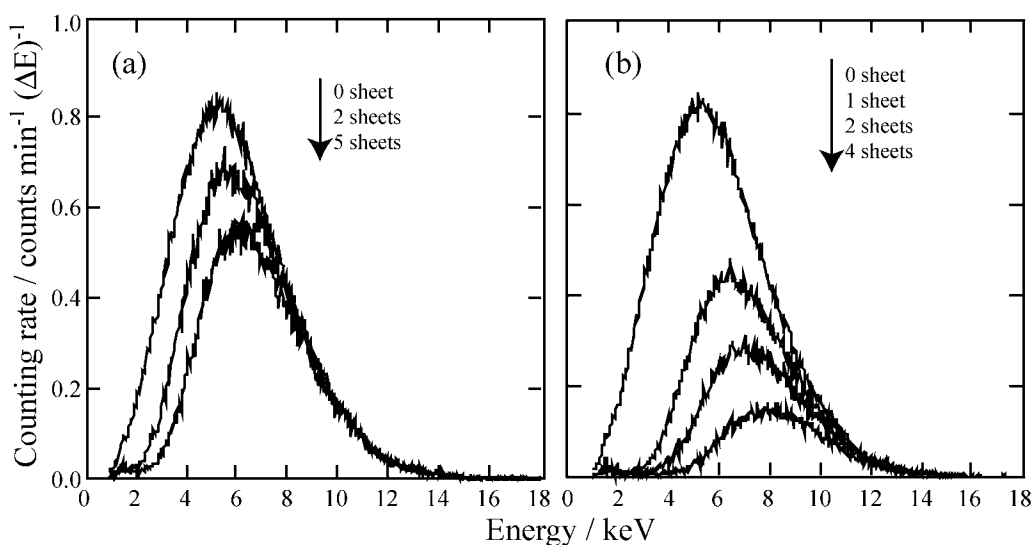


Fig.5 X-ray spectra obtained by Ge-semiconductor detector after being shielded by (a):polyethylene sheet and (b):Al sheet.

ト、Alシートとも遮蔽材の枚数の増加に対する透過X線量の挙動は非常によく一致した。したがって、PIN-diode で得られたカウントは、トリチウムの線により誘起したX線を測定していると思われる。したがってPIN-diodeを用いた線誘起X線検出では、試料表面から1mm程度の範囲に存在するトリチウムの線により誘起したX線を測定していると思われる。

以上の結果より、PIN-diode は、ポリエチレンシート及びAlシートを線の遮蔽材として使用することによりトリチウムの

線誘起 X線の測定が可能であることがわかった。以下の測定では、得られるカウント数が多く、厚みの変化による影響を受けにくいポリエチレンシートを1枚使用した。

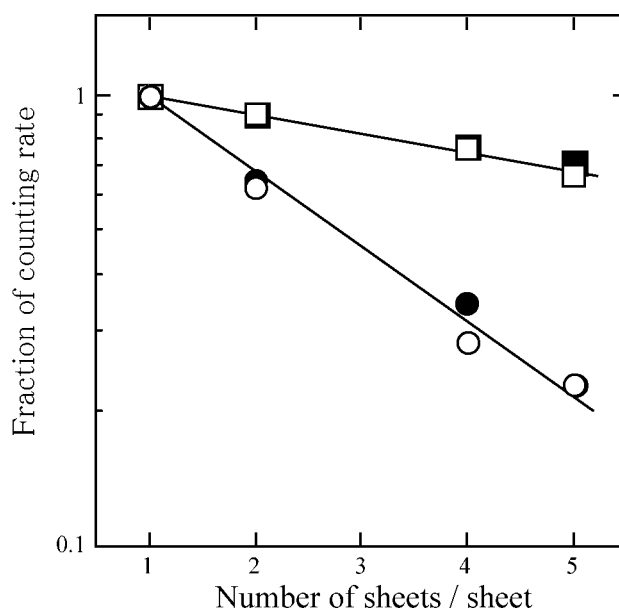


Fig.6 Comparison of the X-ray intensity obtained by PIN-diode and Ge-semiconductor detector. ○ & ●:Al sheet, □ & ■ :polyethylene sheet, □ & ○: measured by PIN-diode, ■ & ●: measured by Ge-semiconductor detector.

3.2 11N1/6 試料中のトリチウムの測定

PIN-diode を用いて 11N1/6 試料をそれぞれトロイダル方向、ポロイダル方向の測定を行ったときの測定結果を図 7(a)に、そのときの測定位置を図 7(b)に併せて示す。図示するように PIN-diode による表面のトリチウムの測定では、トロイダル方向、ポロイダル方向とも 3000cpm 前後でありばらつきは非常に小さい。従って、11N1/6 試料は既報の通りトリチウム量のばらつきは非常に小さいと思われる。

3.3 11N3/17 試料中のトリチウムの測定

次に、試料表面に堆積やスパッタリングがみられた 11N3/17 試料に関してトロイダル方向、ポロイ

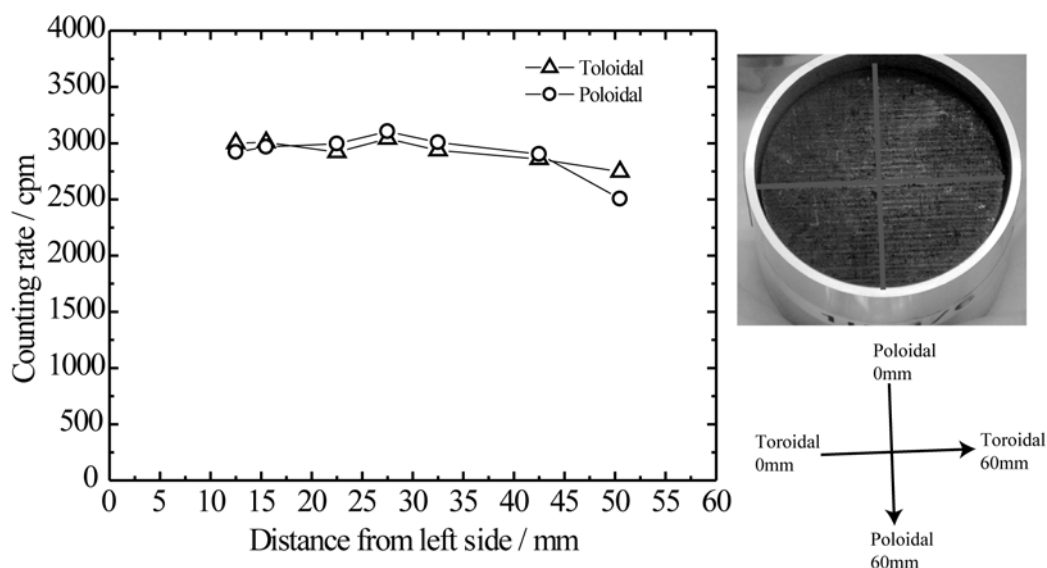


Fig.7 Tritium distribution of 11N1/6 specimen measured by PIN-diode.

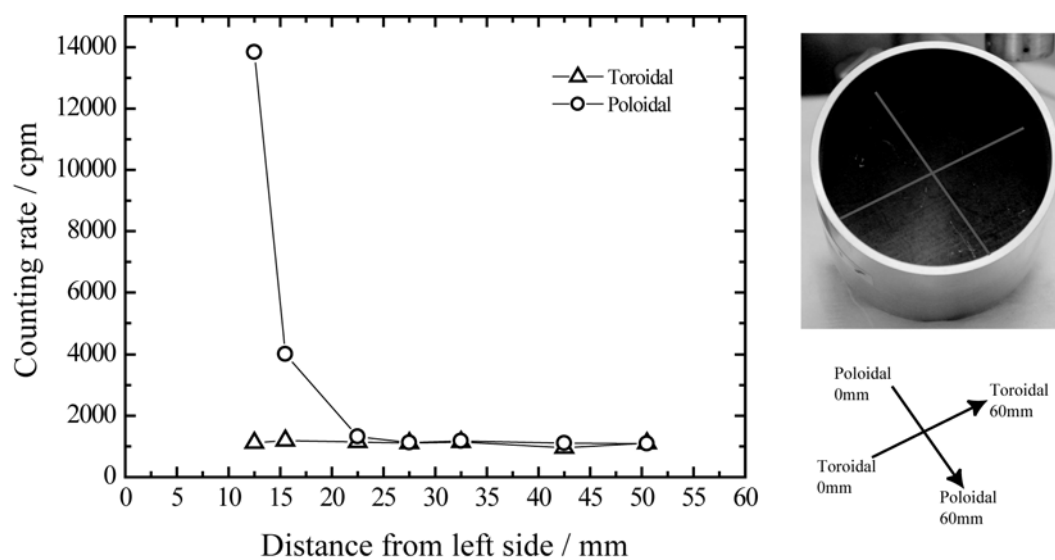


Fig.8 Tritium distribution of 11N3/17 specimen measured by PIN-diode.

ダル方向の測定を行った。そのときの測定結果を図 8(a)に、そのときの測定位置を図 8(b)に併せて示す。11N3/17 試料は、図 8(b)の上方向に炭素の堆積層があり、下方向に向けて、グラデーションを描くように堆積層が減少した試料である。この試料に対しトロイダル方向に 7 点測定した結果、図 8(a)に示すように 1100 カウント前後で一定していた。特にトロイダル方向基準点(図中左斜め下)から 42.5mm、50.25mm 地点は完全に炭素が堆積した層であり、表面の炭素繊維の縞が全く見えな

いが、特にトリチウム量が多い結果になっていない。またその逆にトロイダル方向基準点 12.5mm ~ 22.5mm 付近は非常にはっきりと表面の炭素繊維の縞が見え、スパッタリングを受けていると思われるが、特にトリチウム量が少なくなっているとは認められなかった。これに対し、ポロイダル方向の測定では、グラファイトの堆積が見られなかったポロイダル方向基準点(図中左斜め上)から 50.25mm 付近の値が 1,090 カウントであったのに対し、堆積層が存在する基準点から 15mm 地点で 4,012 カウント、13mm 地点で 13,839 カウントとなり、13 倍の違いが見られ、ポロイダル方向に対して表面トリチウム量に分布が認められた。

4. 考察

既往の研究では、各タイルから数点または十数点コア抜きし、燃焼法によりトリチウム量の測定を行っている。その結果、トリチウムは表面堆積層中に多く堆積層のない部分や損耗層にはトリチウムが少ないことが報告されている。しかし、今回、1IN1/6 および 1IN3/17 タイル表面を PIN-diode を用いて詳細に測定した結果、必ずしも堆積層中のトリチウム存在量が高いわけではなく、堆積層のない部分や損耗層でも堆積層中よりも多くのトリチウム存在することがわかった。これらのトリチウムの分布は、D-T プラズマ実験時のトリチウムへの暴露の履歴および、核融合装置から取り出し後の履歴に起因すると思われる。

PIN-diode は検出部分の構造が非常に簡単であり、検出部を平面に並べることにより面積の大きな試料でも多点同時測定が可能となる。また、検出範囲の分解能は PIN-diode 素子の大きさに依存するため、素子サイズを調整することにより任意の分解能を得ることができる。このため、たとえば、核融合装置内のメンテナンスに利用されるマニピュレーターへ取付け、核融合装置内部に蓄積したトリチウム量を、装置を外部に取り出すことなく測定するなどの利用が考えられる。

また、JET 核融合実験装置より取り外されたダイバータタイルは、試料からのトリチウムとトリチウムを含んだグラファイトタイル粉末の飛散を防ぐため、ポリエチレンシート中に封じられ保管されてい

る。本法を用いれば、グラファイトタイルにさわることなく、ポリエチレンシート上からタイル表面に存在するトリチウムを直接測定することが可能となる。

以上のことから、PIN-diodeを用いた線誘起X線測定は、グラファイトタイル表面に含まれるトリチウムの安全かつ簡便な測定方法であるといえる。

5. 結論

多量のトリチウムを含むJETダイバータタイル中のトリチウム分布の測定をPIN-diodeを用いて行った。この時、グラファイト試料とPIN-diodeの間に、線の遮蔽材としてポリエチレンシートを使用し、線から転換したX線をPIN-diodeを用いて測定した。その結果、

- (1) PIN-diodeによりトリチウムの表面分布測定が可能であること、
 - (2) 堆積層以外にも多量のトリチウムが存在すること、
- がわかった。

参考文献

- 1) G. Federici et al., J. Nucl. Mater. 290&293 (2001)260.
- 2) R.-D. Penzhorn et al., Fus. Eng. Design 56&57(2001) 105.
- 3) R.-D. Penzhorn et al., J. Nucl. Mater., 288 (2001) 170.
- 4) F. Scaffidi-Argentina et al., J. Nucl. Mater., 307 (2002) 1411.
- 5) N. Bekris et al., J. Nucl. Mater., 313 (2003) 501-506.
- 6) J. P. Coad et al., J. Nucl. Mater., 290 (2001) 224-230.
- 7) R.-D. Penzhorn et al., J. Nucl. Mater., 279 (2000) 1390.
- 8) R.-D. Penzhorn et al., Fus. Eng. Design 49&50(2000) 753.
- 9) M. Friedrich et al., Nucl. Instrum. And Meth. 161-163 (2000) 216.
- 10) M. Matsuyama et al., J. Nucl. Mater 313-316 (2003) 491.
- 11) T. Tanabe et al., J. Nucl. Mater., 313&316 (2003) 478.
- 12) M. Matsuyama et al., Fusion Eng. Design, 39&40 (1998) 929.
- 13) W. R. Wampler et al., Nucl. Instrum. Meth. In Phys. A 349, (1994) 473-480.
- 14) E. W. WHITE et al., ASTM data Series DS 37A, ASTM(1987)