

JAERI-M

88-007

粒 子 ・ 固 体 相 互 作 用
— 固体内粒子分布における基礎過程 —

1988年2月

矢 野 淑 郎*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行　日本原子力研究所
印 刷　山田軽印刷所

粒子・固体相互作用
— 固体内粒子分布における基礎過程 —

日本原子力研究所東海研究所
原子分子データ研究委員会
矢野 淑郎 *

(1988年1月8日受理)

粒子と固体の相互作用としては、核融合開発におけるプラズマ・壁相互作用、主として半導体技術におけるインプランテーション、固体物理研究における窓用など多くの研究分野が発展している。本研究においては、プラズマ・壁相互作用の研究の一分野として、デポジションプローブによるプラズマ粒子のデポジションプロファイルをとり上げ、プラズマの特性と、固体内プラズマ粒子の分布の関連について、基礎的な機構の調査・研究を行う。その第一段階として、本報告においては、主に1978-84年に発表されている論文から、種々の磁場によるプラズマ閉じ込め装置について、どのような表面プローブがどのように用いられ、どのような実験結果と考察が与えられたかを述べる。最後にJFT-2Mで用いた表面プローブを適用することによって、スクレーピオフレーザーのプラズマの輸送が次第に明らかになって来ている。

本報告書は61年度における神戸商船大学への委託調査の成果をまとめたものである。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* 神戸商船大学

Investigation on Particle-Solid Interactions
— Basic Process Relating to the Plasma Particle
Deposition Profiles in Solids —

Syukuro YANO*

Research Committee on A&M Data
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 8, 1988)

Surface deposition probes have been conveniently used to diagnose plasma-wall interactions in recent magnetic plasma confinement devices. Deposition profiles of plasma particles in the surface probes reveal the basic mechanisms of particle-solids interactions as well as the plasma particle transport in the scrape-off-layers. In the first stage of this investigation, this report presents a review of surface probe experiments on various plasma confinement devices reported in 1978-1984.

Keywords : Particle-solid Interaction, Deposition Probe, Plasma-wall Interaction, Scrape-off-layer

Work supported by JAERI under contract with Kobe University of Mercantile Marine in the fiscal year 1986.

* Kobe University of Mercantile Marine

目 次

1.はじめに	1
2.総説論文	2
3. プラズマ閉じ込め装置に於ける表面プローブの適用による研究	3
3.1 調査した装置	3
3.2 U S Aに於ける研究	4
3.2.1 P D X	4
3.2.2 P L T	4
3.2.3 I S X, E B T - S	5
3.2.4 T M X	7
3.3 西ドイツの研究	33
3.3.1 P U L S A T O R - I	33
3.3.2 T E X T O R	33
3.3.3 A S D E X	33
3.3.4 W E N D E L S T E I N - V I A	35
3.4 U S S R	50
3.4.1 T - 10	50
3.5 F R A N C E	50
3.5.1 T F R	50
3.6 U K	59
3.6.1 D I T E	59
3.7 J I P P - T - IIほか	60
4. J F T - 2 M	68
5. あとがき	73
参考文献	74

Contents

1.	Introduction	1
2.	Review papers	2
3.	Applications of surface probes to studies on plasma confinement devices	3
3.1	Devices investigated	3
3.2	Research in USA	4
3.2.1	PDX	4
3.2.2	PLT	4
3.2.3	ISX, EBT-S	5
3.2.4	TMX	7
3.3	Research in West Germany	33
3.3.1	PULSATOR-I	33
3.3.2	TEXTOR	33
3.3.3	ASDEX	33
3.3.4	WENDELSTEIN-VIIA	35
3.4	Research in USSR	50
3.4.1	T-10	50
3.5	Research in France	50
3.5.1	TFR	50
3.6	Research in United Kingdom	59
3.6.1	DITE	59
3.7	JIPP-T-II	60
4.	JFT-2M	68
5.	Post script	73
	References	74

1. はじめに

粒子と固体の相互作用は放射線と物質との相互作用として、古くから広く研究されてきた。特に核分裂炉における固体の放射線損傷や保健物理学上の放射線の生体組織へ与える効果などが実用上重要な問題であり、また、基礎現象としては、固体の原子配列が受ける変化に関連した重要な研究テーマとなっていた。

最近、核融合炉実現のための研究開発に於いて、磁場閉じ込め装置に於けるプラズマ壁相互作用（PWI）の研究が超高温プラズマ生成上の重要問題としてクローズアップされ、また、近い将来の核融合炉の開発に対して、その成功の鍵を握る程の工学的重要問題であることが分かってきた。また、一方慣性核融合の研究に於いては、強力な出力密度のレーザー光や粒子ビーム（ 10^{12} ~ 10^{16} W/cm^2 ）が標的物質に入射し、超高密度の高温プラズマを生成するためのエネルギーードライバーとして開発されて来た。これらは従来の工学的装置には無かった新領域であり、その関与する基礎現象と実用上の問題は極めて広範囲に及ぶものとなっている。

一方、半導体の開発の為に、数 10 ~ 数 1000 keV の軽・重イオンビームが用いられ、イオンインプランテーション技術として、ここ数年間に広範な普及を遂げている。新素材の開発にはイオンビームによる材料のモディフィケーション、熱化学反応では製作できない新材料と合金などの製造開発研究が盛んで、加速器ビームによる超硬材料の開発などもこの分野の応用となっている。

粒子と固体の相互作用は上述のような広い実用を有し、また、その機構を更に解明しなければならない新分野として拡大しつつある。

本調査研究に於いては、主として磁場閉じ込め核融合に於ける粒子と固体の相互作用の中で、PWI の問題の一部として、プラズマから壁へ流入したプラズマ粒子の分布についての研究調査を行うものである。現在、中心温度数 1000 万度のプラズマを閉じ込められる実験装置が世界的主要国に於いて運転されている。これらの装置に於いては、プラズマを囲む真空容器の壁近くでは、プラズマは通常数 100 万度から数万度の温度の境界層をなし、真空壁との間に粒子のリサイクリングを行っている。即ち、壁表面へのプラズマの流入と、壁表面もしくはその内部の表面付近の部分から、種々のメカニズムによる軽原子の離脱と放出が生じ、これがプラズマへの粒子補給の一部をなし、プラズマ粒子及びエネルギーの釣り合いに重要な役割を果たしている。最近、プラズマの閉じ込めと加熱に対して、“放電の H モード”の発見や、プリンストンの T F T R の “スーパーショット”などに関連してプラズマの周辺部の振る舞いの解明が重要な意義を有するものと考えられるようになった。さらに、プラズマ閉じ込めが目標に達し、実際に核融合反応が中心部のプラズマ中で発生するような次期段階の核燃焼プラズマ装置が設計運転されるようになれば、三重水素、高速中性子、壁の放射化など多くの新しい要素が加わり、複合した困難な技術的課題のもとに、相互作用の研究は更に重要なものになると予想される。

プラズマと壁の相互作用は(1)プラズマが壁の存在により受ける問題と、(2)壁がプラズマの存在により受ける問題の両方の見方がある。前者は主に超高温プラズマを実現するために重要であり、例えば、トカマクプラズマのパラメータはライナー及びリミターの材料とそのプラズマの特性に

も依存し、不純物イオンの生成にとって重要な問題である。また、後者はプラズマ粒子の壁へのインプランテーションによる壁材料の受ける影響と損傷による工学的な真空容器の第1壁としての寿命などの問題を始めとし、壁物質に生じる変化がプラズマへ跳ね返ってくる効果の問題がある。

一方、時間的に見れば、極めて短時間 ($\sim ms$) に生じる効果と、多くの放電を重ねるか、または、定常的運転を継続した積分効果もそれぞれの研究意義と目的を有するものである。

本調査研究に於いては、PWIの研究の一環であるプラズマの固体壁への流入の問題を、真空壁の近くに設置した表面プローブによって測定する方法に重点を置き、従来の研究を調査し、その基本となっている問題を明らかにすることを目的とする。前記のプローブはプラズマのスクレーピオフレーヤー (SOL) の外周に設置され、それに捕捉されるプラズマ粒子を分析し、プラズマの診断に用いるものである。このプローブはプラズマ表面全体から見れば無視しうるほど極めて小さな面積に対して挿入されるため、プラズマの振る舞いに及ぼす影響は極めて小さく、そのデータ解析からは擾乱を与えることなくプラズマ情報を得ることが出来るものである。

このため、本調査研究では第1段階として、近年急速に広く行われるようになった“表面プローブ”的関連する研究報告をまず項目別に分類し、今後の研究に役立たせるように整理することから始めた。

この研究調査に関連する項目を大きく分けると、次のような報告と論文に分類できる。『1』総説、『2』プラズマの閉じ込め装置に表面プローブを用いた実験、『3』PWIの基本過程、『4』表面プローブの方法、『5』表面プローブの基本的物理-粒子反射、チャネリング、放射線損傷と結晶構造の効果、拡散と置換、トラッピングと再放出、コンピューター・シミュレーション、『6』核反応断面積、『7』エネルギー損失と阻止能、『8』多重散乱と広がり、『9』加速器分析の方法、技術、及び分析の例などの多くの項目にわたる。今年度の調査では、以上のうち第2項目までについて検討し報告することとした。

2. 総 説 論 文

PWIの総合的解説論文としては、1979年 Nuclear Fusion に McCracken らが 93 頁にわたりてトカマクに対する PWI の解説を行っている¹⁾。この論文の包括範囲は広く、特に深い関連を持つ事項が Chap. 5, 6 に述べられ、表面分析法についても 10 頁にわたって述べられており、引用文献も 351 の多くになっている。また同じく、Manos と McCracken は Post and Behrisch の Physics of plasma-wall interaction in controlled fusion; Plenum Press (1986) 135 ~ 209 頁に plasma edge diagnostics としてのプローブの解説を行っている²⁾。さらに、ORNL の Zuhur は Nuclear Science Application 誌に 1984 年 "Ion beam surface analysis in plasma edge studies" と題して具体的に研究の事例を示している³⁾。プラズマにさらしたプローブの分析方法についての解説では、1978 年 Böttiger の H 及び He の固体表面付近の分析法の特徴とそれとの比較があり、加速器分析の研究に有用である⁴⁾。

も依存し、不純物イオンの生成にとって重要な問題である。また、後者はプラズマ粒子の壁へのインプランテーションによる壁材料の受ける影響と損傷による工学的な真空容器の第1壁としての寿命などの問題を始めとし、壁物質に生じる変化がプラズマへ跳ね返ってくる効果の問題がある。

一方、時間的に見れば、極めて短時間(～ms)に生じる効果と、多くの放電を重ねるか、または、定常的運転を継続した積分効果もそれぞれの研究意義と目的を有するものである。

本調査研究に於いては、PWIの研究の一環であるプラズマの固体壁への流入の問題を、真空壁の近くに設置した表面プローブによって測定する方法に重点を置き、従来の研究を調査し、その基本となっている問題を明らかにすることを目的とする。前記のプローブはプラズマのスクレーパオフレーザー(SOL)の外周に設置され、それに捕捉されるプラズマ粒子を分析し、プラズマの診断に用いるものである。このプローブはプラズマ表面全体から見れば無視しうるほど極めて小さな面積に対して挿入されるため、プラズマの振る舞いに及ぼす影響は極めて小さく、そのデータ解析からは擾乱を与えることなくプラズマ情報を得ることが出来るものである。

このため、本調査研究では第1段階として、近年急速に広く行われるようになった“表面プローブ”的関連する研究報告をまず項目別に分類し、今後の研究に役立たせるように整理することから始めた。

この研究調査に関連する項目を大きく分けると、次のような報告と論文に分類できる。『1』総説、『2』プラズマの閉じ込め装置に表面プローブを用いた実験、『3』PWIの基本過程、『4』表面プローブの方法、『5』表面プローブの基本的物理-粒子反射、チャネリング、放射線損傷と結晶構造の効果、拡散と置換、トラッピングと再放出、コンピューター・シミュレーション、『6』核反応断面積、『7』エネルギー損失と阻止能、『8』多重散乱と広がり、『9』加速器分析の方法、技術、及び分析の例などの多くの項目にわたる。今年度の調査では、以上のうち第2項目までについて検討し報告することとした。

2. 総 説 論 文

PWIの総合的解説論文としては、1979年 Nuclear FusionにMcCrackenらが93頁にわたくってトカマクに対するPWIの解説を行っている¹⁾。この論文の包括範囲は広く、特に深い関連を持つ事項がChap. 5, 6に述べられ、表面分析法についても10頁にわたって述べられており、引用文献も351の多くになっている。また同じく、ManosとMcCrackenはPost and BehrischのPhysics of plasma-wall interaction in controlled fusion; Plenum Press(1986) 135～209頁にplasma edge diagnosticsとしてのプローブの解説を行っている²⁾。さらに、ORNLのZuhrはNuclear Science Application誌に1984年“Ion beam surface analysis in plasma edge studies”と題して具体的に研究の事例を示している³⁾。プラズマにさらしたプローブの分析方法についての解説では、1978年BöttigerのH及びHeの固体表面付近の分析法の特徴とそれぞれの比較があり、加速器分析の研究に有用である⁴⁾。

3. プラズマ閉じ込め装置に於ける表面プローブの適用による研究

3.1 調査した装置

調査した範囲は、次の装置に対して行われた研究で、また最近のものは未入手のため今後の調査によることとした。〔1〕USAのPrinceton Univ. Plasma Physics Laboratory のPLT, PDX, ORNLのISX-B, EBT-S, LivermoreのLRLのmirror-fusion, TMXなど。〔2〕西ドイツGarching IPPのPULSATOR, ASDEX, WENDELSTEIN-VIIA, KFA JülichのTEXTOR, 〔3〕UK-CULHAM LaboratoryのDITE Tokamak, 〔4〕フランス, Fontenay-aux-RosesのTFTR, 〔5〕USSRのT-10, 〔6〕日本の名古屋大学プラズマ研究所のJIPP-T-IIなどである。なお、筆者らは、日本原子力研究所の核融合研究部との協力研究を昭和61年度から開始し、JFT-2Mトカマクに対する表面プローブの測定を行っている。これについては、別に述べる。このほか、国外の研究で幾つかの報告があるが、省略する。

トカマクを始めとするプラズマ閉じ込め装置の、核融合に必要なプラズマパラメータの達成度を図示するとFig.1のようである。まだ、4大トカマクと言われるTFTR, JET, JT-60, T-15の表面プローブ測定は無いようである。

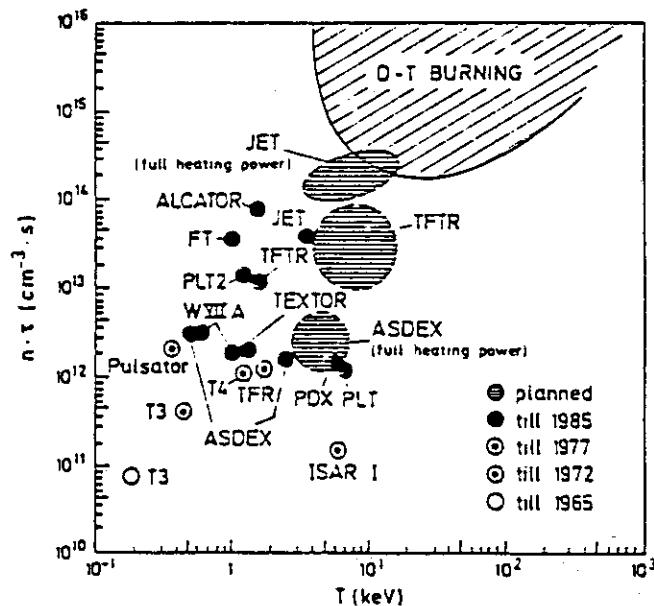


Fig. 1 Confinement parameter $n\tau$ and plasma temperature for a number of fusion plasma devices. The time history shows a gradual approach to the region required for D-T ignition and burning

3.2 USAに於ける研究

米国においては、PPPL, ORNL, LIVERMOREに於いて早くから境界プラズマ及び第1壁へのプラズマの効果の研究が盛んで、非常に進んでおり、SANDIA研究所(Albuquerque及びLivermore), RCAと協力して高い成果を挙げている。

3.2.1 PDX

PDXトカマクに対しては、Staib, Dylla, Wamplerらの研究がある。Staibはデポジションプローブ方式ではないが、SOL(Scrape off layer)^{*}に於ける粒子束、エネルギー、及び荷電状態を調べるため、E×Bアナライザーを製作、設置し、集電極ごとのドリフト粒子を電流増幅して実時間のデータを得ている。Fig.2にPDXアナライザーを示す⁵⁾。

PDXの条件は、 $I_p = 200 \text{ kA}$, $\bar{n}_e = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $Z_{\text{eff}} = 2.5$ である。結果としては、 H^+ 束 $22 \sim 200 \text{ eV}$ のもの $0.8 \sim 5 \times 10^{16} / \text{cm}^2 \text{s}$, 及び $5.5 \sim 22 \text{ eV}$ のもの $0.3 \sim 3 \times 10^{16} / \text{cm}^2 \text{s}$ を得て、また surface analysis stationでAES, XPS, SIMSなどの方法により時間分解の不純物分析を行い、O, Ti, C1などの時間変化が求められた。それらは、ほぼ $10^{14} / \text{cm}^2 \text{s}$ オーダーである⁶⁾。又、変わった方法では、H粒子の入射によるカーボンフィルムの電気抵抗の変化より粒子束を測定する“カーボン抵抗プローブ”をPLTに対しても適用し、プラズマエッジのイオン温度がPDXで100 eV以下、PLTで300 eV以上と言う結果を得ている⁷⁾。

3.2.2 PLT

PLTの実験では、in-situのAES(Auger Electron Spectroscopy), SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy), ESD(Electron Stimulated Desorption)などの方法により、305SSをサンプルとして、その放電による変化⁸⁾、またCohenらはそれらの方法にESCA(Photoelectron Spectroscopy)なども加え用い、真空壁の変化とFe, Cr, Ni, O, Wなどの長時間変化を調べ、SS, Siを表面プローブとして用い、長時間にわたる、重水素原子の濃度が数%となることを³Heの核反応で得ている。Fig.3, 4にTable 1とともに、その主要な結果を示す。なお、この研究はPPPLのCohen, Dylla, Sandia National Lab.のPicraux及びRCAのMageeらの共同による⁹⁾。

更に、SandiaのWamplerとPicrauxらは、UKAEAからのMcCrackenをも加え、Cohenと共にPLTに於いて小半径方向の距離に対し、Siフィルム、Cフィルム(Papyex)をプローブとして用い、H, Dのプロファイリングを得ている。計算との比較により、Maxwell分布では、電荷交換による500–600 eV及びプラズマエッジの50–350 eVのH, Dが、又、NBIのための5–40 keVの成分が観測された¹⁰⁾。主な結果をTable 2, Fig.5, 6, 7, 8, 9及びTable 3に与えた。

また、Cohenらはベルトコンベア方式のステンレスステップコレクターで、磁場に平行方向のO

* 第1壁近くの境界プラズマのうちプラズマエッジより壁側のプラズマ境界層をSOLと呼ぶ。プラズマエッジとはリミター先端に接するプラズマの壁からの距離にあるプラズマの境界を呼ぶ。

などの不純物の時間変化測定をAESにより行った¹¹⁾。

PLTの研究は更に積極的に進められている。Cohen, Dylla, Wampler, Magee は時間分解できる回転式カーボン（Papyex）プローブFig. 10により，Dの保持量を測定し，粒子束として 2×10^{15} ないし $3 \times 10^{17} / \text{cm}^2 \text{s}$ ，エネルギー $60 \sim 225 \text{ eV}$ ，また時間 vs D-保持量が得られた。この測定には，カーボンサンプルをプラズマにさらした後，RCAとSandia Lab.へ送り，前者ではCsイオンスパッタのSIMSにより，また後者ではDの保持量を ${}^3\text{He}$ のNRAにより求めたものである¹²⁾。これらの主な結果をFig. 11, 12, およびTable 4に示した。なお，PLTは $I_p = 350 \text{ kA}$, $V = 1.4 \text{ V}$, $n = 1.5 \times 10^{13}$, 放電時間は $t = 150 \sim 750 \text{ ms}$ ，また別のrunでは 450 kA , 1.0 V , $1.6 \sim 3.7 \times 10^{13} / \text{cm}^3$, $t = 900 \text{ ms}$ である。又，両方の場合とも $Bt = 25 \text{ kG}$ で小半径 40 cm ，リミッタはCとなっている。

Wamplerらは同じくカーボンプローブにより鉄を主とする不純物をRBSによって測定している。不純物の付着量の放電回数に対する依存性，位置による違いなどが論じられている¹³⁾。

文献12)のさらに継続として，Wamplerらは同じ回転式のカーボンプローブを用いてPLTのSOLプラズマに於けるDの粒子束とエネルギーを測定した¹⁴⁾。結果の代表的な図をFig. 13に示した。エネルギーの決定にはTRIM-Monte Carlo計算コードを用いているが，これには測定値として 0.44 D/C の飽和値を使っている。Fig. 14及びTable 5の $r = 45 \text{ cm}$ がプラズマエッジでリングリミッタの先端部， $r = 50 \text{ cm}$ が壁の位置を示す。また，Fig. 15に r に対するイオン温度，及びD粒子束の変化を示した。この実験は表面プローブの代表的成果を与えたものと考えられる。

以上の測定は主にオーミック加熱の場合であるが，PLT及びPDXに於いて，それぞれICRH及びNBIの第2段加熱時のDフラックスの測定がWamplerらにより行われた。その時間変化が90msの分解能で，プラズマからの距離の関数として求められた¹⁵⁾。まず，PDXの測定結果はFig. 16に示した。このときのプローブホルダーは文献12)のものと類似であるが，付与されたエネルギーを測るための熱電対を持つシールドがあり， $0.2 \mu\text{m}$ のカーボン，または，Moのフォイルを母材とし，その上に $1.0 \mu\text{m}$ のSiフィルムを着けたものを用いている。このSi中のDの深さプロファイルをFig. 17に記した。測定にはSIMSが使われ，NRAで較正された。NBIの時，約30%のsuperthermal-Dイオンが存在した。PLTではICRHの効果がカーボンプローブ中のDの保持量で求められ，約30%のフラックスの増加が認められた¹⁵⁾。

やや変わった実験ではPLTに於いて，500 eVのH, D, Tの主にTiの保持と再放出を見るため， β -Ti-alloy, α -Ti, α - β -Ti alloy, 316SSをホルダー上に熔接したもの，及びDの粒子束をモニターするためのプローブとしてカーボンを用い，ion-sideとelectron-sideに対して比較測定した。プラズマのdisruptionによりion-sideでは見て分かる程の損傷があり，又，上記合金の表面にカーボンが $50 \sim 200 \text{ \AA}$ 付着し，それにDが捕捉されていた。また，そのthermal desorptionも測定されている¹⁶⁾。

3.2.3 IXS, EBT-S

IXSのプローブ測定もよく行われており，Zuhr, Withrow, RobertoらのORNLのグループが同じくDのフラックス，不純物レベルについて，時間空間分解，エネルギー測定など一連

の研究を行っている。

まず、17)に於いては、Fig.18に示すようなスリット入り口付き回転式の時間分散型プローブにより、ISX-AプラズマのA1サンプル測定を行った。AESにより、Fe, Ti, Cr, Pbも時間分解された。AESとRBSの比較が出てるのでTable 6に示しておく。なお、プラズマが安定であれば不純物の付着は少なくなる。

また、Zuhr ら¹⁸⁾は、ISX-B放電で、Siサンプルを用い、RBSとチャネリング分析、³He-DのNRAを行い、Dの深さプロファイリングを測定した。不純物の放電数による変化も求めた。用いたSiは(100)単結晶を深さ1500ÅまでSiビームの照射によりアモルファスにした。プラズマはオーミック加熱及びNBI加熱のDプラズマで $I_p = 110\text{ kA}$, $B_T = 1.5\text{ T}$, $\bar{n}_e = 1.6 \times 10^{13}/\text{cm}^3$, $T_e = 1050\text{ eV}$ であり、またNBIの時は、100ms, 350kW, 40keVのHを入射し、 $I_p = 120\text{ kA}$, $B_T = 1.5\text{ T}$, $\bar{n}_e = 2.6 \times 10^{13}/\text{cm}^3$, $T_e = 1450\text{ eV}$ であった。1放電当たりの不純物はTable 7に示した。放電回数に対するSiプローブ中へのFeの保持量はFig.19に示した。オーミックとNBIの場合のFe, Oの比較がTable 8に与えてある。一方、Dの保持量も放電数と距離に対してFig.20のように求められている。深さプロファイルから半値幅を求めるとTable 9のようになり、12放電の幅は1放電の幅に較べ増加し、飽和効果が現れている。理論的計算はMARLOWEによっている。これとの比較により、Dのエネルギーは150~200eVと考えられる。保持量の飽和曲線から19), 20)の方法で入射エネルギーを算出出来る。この値は150eV位になり、s-Siの照射損傷より出したエネルギーとも、ほぼ一致する。また、1050eVの中心プラズマ温度はNBIにより1450eVとなるが、境界層でのDエネルギーにはその上昇があまり現れないことも分かった。

Roberto らはISX-Bプラズマでの侵食(erossion)率を見るため、3~4mmのAuフィルムを $0.6 \times 1.8\text{ cm}^2$ のs-Si上にスパッタ蒸着したものを用いて、RBSによりその厚さの変化を調べた²¹⁾。典型的なRBSスペクトルをFig.21に示した。またHとDプラズマに対して、 B_T -イオン側に向いたAuの侵食の半径方向変化をFig.22に示した。図には侵食サンプル上のD, OとFe, Cr, Niの蓄積量も与えてある。縦軸はerosionに対してはremoved, accumulationに対してはaddedで示されている。侵食率は $0.1\text{ nm}/\text{discharge}$ の値から半径と共に減少した。その結果Oによるスパッタリングが主であると考えられた。

Zuhr らはISX-Bプラズマに同様の測定を行い、NBIとガスバフの効果を調べている²²⁾。NBIは40keVのHビーム、 $6 \times 1.1\text{ MW}$ をDプラズマへ入射している。この値はオーミック加熱の入力の4倍になっている。Fig.23にその不純物の付着率を示した。Fig.24にはa-SiによるDの保持率とs-SiのDによるRBSで求めたダメージ率を較べてある。ダメージ率による入射フルエンスとエネルギーの求め方は23)に与えられている。また同じくガスバフの時のものをFig.25に示した。

これらの研究のその後のまとめがZuhr らの24)及び25)に与えられている。なお25)では、レーザ誘導蛍光測定法が併用されている。Table 10にまとめた数値が与えられている。プラズマエッジのイオン温度は20eV程度で、またISX-Bに於いては、電荷交換中性粒子、EBT-Sに於いてはその同種のイオンが壁をスパッタすることにより、主な重イオン不純物が発生する。EBT-SについてはLIFによる中性のアルミニウム原子の速度分布が与えられているの

で、これをFig. 26に示しておく。

同様の実験であるが、EBT-Sのa-Siに用いた開孔付きプローブをFig. 27に示しておく²⁸⁾。このプローブで得られたプロットから $kT = 20$ eVが導かれている。これをFig. 28に示す。

3.2.4 TMX

LivermoreのLLNL, Mirror Fusionの南隣にあるSandia National Laboratoryでは、Pontau, Wilson, Bastaszらが多くの表面分析装置を用いてPWIの研究を行っている。

Bastaszらは表面分析法の適用とTMX, TMX-Uに対する成果を述べている^{29,30)}。TMXの装置概要はFig. 29に示した。またプラズマパラメータはTable 11に示す。このプラズマはC及びSiをプローブとして中央セル及びエンドプラグ中に於いて測定された。得られた結果はFig. 30, 31に示すようであり、計算機によるTRIMシミュレーションのプロファイリングがFig. 32に示してある。またTMX特有のDの端損失もカーボンプローブを用いて調べられ、Table 12の結果が得られた。デポジションプローブはミラーに対しても有用なデータを出している。不純物については、Cプローブを用いて、RBSなどにより分析し、O, N, Ti, Cu, Feなど測定されている。これをTable 13に示す。

Table 1 Long-term integrated surface measurements in PLT 9)

	Sample group			
	A	B	C	D
Sample materials	SS, Si, Al ₂ O ₃	SS, Si, Al ₂ O ₃ , V	SS, Si, Al ₂ O ₃ , Be	SS, Si
Exposure time	July-Dec. 1976	Jan.-Mar. 1977	Apr.-May 1977	8 Dec. 1977
Discharge history a	H ₂ PDC ~10 ⁴ HPD(H ₂ , D ₂ , He)	H ₂ PDC H ₂ TDC ~(2-4)×10 ³ HPD(D ₂ , H ₂)	H ₂ TDC ~(2-4)×10 ³ HPD(H ₂ , D ₂) ~5×10 ² HPD He ~10 ² HPD, Ne, CH ₄	5.2 HPD in D ₂ with ~1MW NBI(D)
Film thickness b	~100 Å	~100 Å	~200 Å	<20 Å
Film composition c	Fe: 3.5×10 ¹⁶ /cm ² Cr: 9.0×10 ¹⁴ /cm ² W: 4.3×10 ¹⁵ /cm ²	Fe: 1.6×10 ¹⁷ /cm ² Cr: 1.6×10 ¹⁶ /cm ² W: 1.6×10 ¹⁶ /cm ²	Fe: 2.9×10 ¹⁵ /cm ² Cr: 5.0×10 ¹⁴ /cm ² W: 5.7×10 ¹⁴ /cm ² C: 6.2×10 ¹⁶ /cm ² O: 3.2×10 ¹⁶ /cm ²	Cu: 4.0×10 ¹⁴ /cm ² W: <5 ×10 ¹² /cm ² Fe: <1 ×10 ¹⁴ /cm ² Ti: 1 ×10 ¹⁴ /cm ² S: 8 ×10 ¹⁴ /cm ²
Total D retention d	11.4×10 ¹⁵ /cm ² (Si) 3.8×10 ¹⁵ /cm ² (SS)	1.9×10 ¹⁵ /cm ² (Al ₂ O ₃)	9.7×10 ¹⁵ /cm ² (Si) 3.1×10 ¹⁵ /cm ² (SS)	3.8×10 ¹⁵ /cm ² (Si) 1.5×10 ¹⁵ /cm ² (SS)

a PDC = high power discharge cleaning pulses, TDC = low power (Taylor-type) discharge cleaning pulses,
HPD = high power discharges, and NBI = neutral beam injection.

b Film thickness measurements are derived from Ta₂O₅ equivalent sputtering rates with 5 keV A⁺.

c 2.0 MeV ⁴He ion backscattering measurements on the Al₂O₃, Si, or Be samples.

d D(³He,α)H measurement on Si, Al₂O₃ or stainless steel (SS) samples.

Table 2 Summary of exposures in PLT ¹⁰⁾

Sample Group	E-1,2,3 7/13/78	E-5 10/16/78	F 12/19/78
<u>Plasma Parameters</u>			
Plasma	D	H	D
Neutral Beams	H	D	None
Limiter	304SS,C	304SS	C
Limiter Radius	40	40	40
No. of Discharges	45,39,25	24	1,1,1,2,3,6,12
I _P (kA)	370,300,320	430	250
B _T (kG)	32	32	17
n _e (10 ¹³ /cm ³)	2-5	2.5	1
T _{e(0)} (keV)	2.4,2.3,2.0	1.7	1.1
Sample Material:	Si:3-9	Si:6.5	C:10-180
D Retained (10 ¹⁵ cm ⁻²)	304SS:1-4 Be:4-5		Si:.04-2.5
Deposited Impurities (10 ¹⁵ cm ⁻²)	Ti:.5	Ti:110 0:70 Fe:2 Cu:.37 Ta:.6	Fe:2-18 Cu:3-28 Ta:2-13

Table 3 Calculated D temperature and fluences ¹⁰⁾

Sample	r(cm)	Measured		Calculated	
		D/cm ² (10 ¹⁵)	λ(nm)	T(eV)	φ(10 ¹⁷ cm ²)
C(F)	47	30±10	12.5±2.5	230±50	1.1 ^{+15.} _{-.3}
C(F)	48.5	10±3	6.0±1.2	100±20	.45 ^{+0.4} _{-.08}
Si(F)	47	2.5±.2	6.5±.6	155±20	.13±.02
Si(F)	52	.04±.03	3.5±.4	73±7	.022±.003
Si(E-2)	56	7±2	10.4±1.0	280±40	.3±.1
		2±.4	19.5±2.0	560±60	.07±.02

Table 4 D^+ fluxes and lower limits of D^+ energy (temperature) calculated from the experimental data of ref. 12) using the assumption of monoenergetic, normal incidence implants (Maxwellian, $\cos\theta$ implants) ¹²⁾

Sample	r	Monoenergetic normal incidence		Maxwellian $\cos\theta$ incidence	
		$\Gamma(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$	$E_{\min}(\text{eV})$	$\Gamma(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$	$T_{\min}(\text{eV})$
1	45	9.2×10^{16}	180	3.1×10^{17}	225
2	46.3	5.7×10^{15}	110	2.0×10^{16}	150
3	47.6	3.4×10^{15}	70	1.1×10^{16}	100
4	48.9	2.5×10^{15}	65	8.3×10^{15}	80
5	50.2	2.4×10^{15}	60	7.8×10^{15}	70

Table 5 Energy and flux of deuterium incident on carbon samples determined from the experimental data of ref. 13) assuming a Maxwellian velocity distribution and monoenergetic normal incidence implants ¹³⁾

r (cm)	Maxwellian		Monoenergetic	
	kT (eV)	ϕ (D/cm ² s)	E (eV)	ϕ (D/cm ² s)
44.0	270	3.3×10^{17}	600	3.1×10^{17}
45.3	140	2.8	400	1.5
46.6	140	3.6	450	1.4
47.8	120	1.3	300	0.8
49.1	110	1.0	280	0.7
50.4	90	0.65	200	0.5
51.7	-	~ 0.05	-	~ 0.03

Table 6 AES/RBS comparison ¹⁷⁾

	AES (atms/m ²)	RBS (atms/m ²)
Fe (Max.)	4.86×10^{18}	12.0×10^{18}
(Min.)	2.43×10^{18}	4.7×10^{18}
Ti (Max.)	5.88×10^{17}	5.0×10^{18}
(Min.)	0.78×10^{17}	1.7×10^{18}

Table 7 Retained concentrations per discharge of ohmically heated, D plasma. The samples were located 20 mm behind the limiter radius facing B_T (ion drift) ¹⁶⁾

C	$3.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$
N	$8.2 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$
O	$4.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$
S	$2.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$
Cr	$1.1 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$
Fe	$3.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$
Ni	$2.3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$
Pb	$2.1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$

Table 8 Estimated Fe and O fluxes and densities for D plasma at 20 mm behind the limiter radius ¹⁸⁾

		Ohmic	N.B.I.	
Flux	Fe	3.0×10^{18}	3.4×10^{18}	/m ² discharge
	O	4.3×10^{19}	2.4×10^{19}	/m ² discharge
Density	Fe	5.7×10^{15}	6.5×10^{15}	/m ³
	O	4.4×10^{16}	2.5×10^{16}	/m ³

Table 9 Comparison of experimental D depth profiles with MARLOWE code predictions ¹⁸⁾

Experiment		Theory	
D profile	FWHM	Energy	FWHM
1 Shot	92 Å	50 eV	26 Å
12 Shots	134 Å	150 eV	71 Å
		300 eV	135 Å

Table 10 Typical ISX-B edge parameters as inferred from surface probe and laser-induced fluorescence measurements.
The data are for nongettered, ohmic plasmas with $\bar{n}_e \approx 4 \times 10^{13}/\text{cm}^3$, $I_p \approx 150 \text{ kA}$ and $B_T \approx 1.3 \text{ T}$ ²⁵⁾

2 cm outside limiter radius		Ref.
Ion density	$2 \times 10^{12}/\text{cm}^3$	24)
Ion temperature	20 eV, Maxwellian	24)
Circulating ion flux	$2 \times 10^{18}/\text{cm}^2\text{s}$	24)
Circulating impurity fluxes:		
Oxygen	$2-5 \times 10^{16}/\text{cm}^2\text{s}$	18, 22)
Iron	$2-5 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$	18, 22)
Carbon	$2 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$	18)
Titanium (with TiC limiter)	$4 \times 10^{14}/\text{cm}^2\text{s}$	22)
Flux scrapeoff length:		
Hydrogen and iron	2 cm	18)
Iron impurity density:		
Neutral	$10^7-10^8/\text{cm}^3$	26, 27)
Total (for E = 25 eV)	$5 \times 10^9/\text{cm}^3$	18)
Surface erosion rate (Au)	$2 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$	21)
At outer wall position (away from limiter)		
Neutral hydrogen flux to wall	$2 \times 10^{16}/\text{cm}^2\text{s}$	24)
Mean neutral energy	30 eV (with high E tail)	24)
Iron impurity deposition	$< 10^{12}/\text{cm}^2\text{s}$	24)
Surface erosion rate (Au)	$< 10^{14}/\text{cm}^2\text{s}$	21)

Table 11 TMX plasma parameters³⁰⁾

Parameter	End plug	Center cell
Density (10^{13} cm^{-3})	1.5	0.27
Electron temperature (eV)	87	49
Ion energy (keV)	9	0.06
Plasma potential (V)	510	325

^a D.P. Grubb et al., Phys. Fluids 26, 1987 (1983).

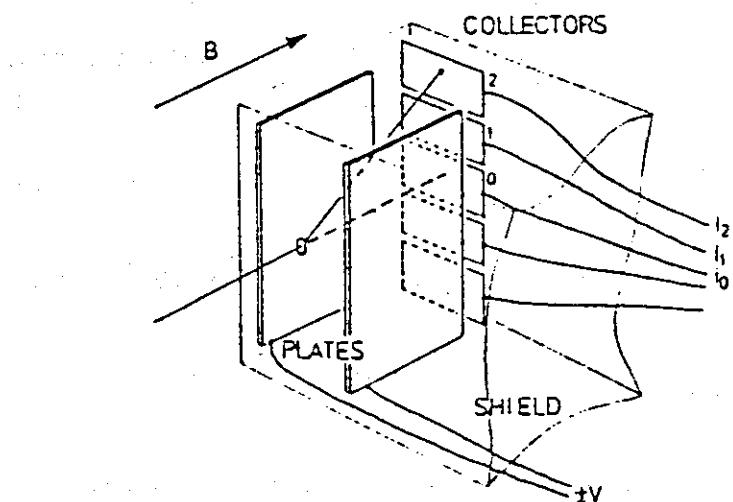
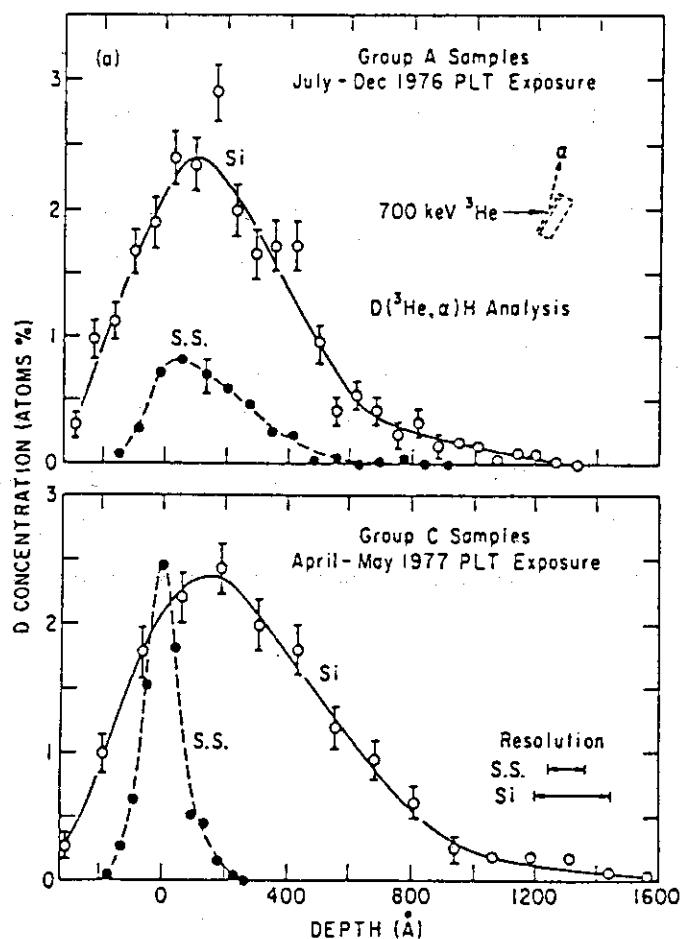
Table 12 End loss experiment ³⁰⁾

r (cm)	Fluence (D/cm ²) ^a		Flux (D/cm ² s) ^b	
	0	10	0	10
(1) D end plug and D center cell	6.0×10^{14}	6.8×10^{13}	6.0×10^{15}	5.8×10^{14}
(2) D end plug and H center cell	2.9×10^{14}	4.0×10^{13}	1.9×10^{15}	2.2×10^{14}
(3) Neutral beams and plasma guns	1.4×10^{14}	2.3×10^{13}

^a 5 discharges per sample, 17 ms exposure per discharge.^b Background subtracted.Table 13 Impurity analysis ³⁰⁾

No. discharges at r = 30 cm	Impurities ($\times 10^{15}/\text{cm}^2$)				
	O ^a	Ti	Fe	Cu	N
3	...	0.7
10	7.5	2.25	0.27	0.26	...
41	15.4	6.0	0.29	0.97	0
Estimated lower limit for detection	0.2	0.02	0.02	0.02	0.2

^a SIMS measurements indicate that O extends into the silicon.

Fig. 2 Schematic representation of the PDX analyzer.⁵⁾Fig. 3 Depth dependence of D concentration⁹⁾

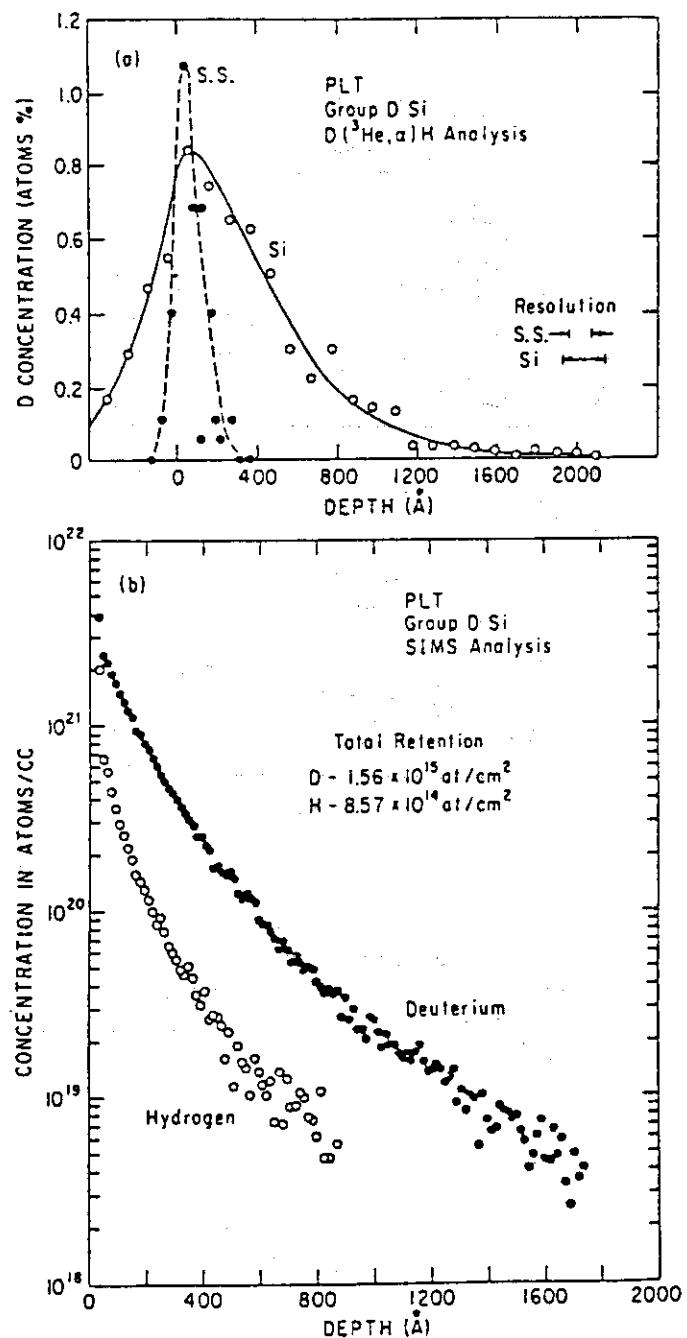


Fig. 4 (a) Deuterium profiles in Si and stainless steel samples exposed in group D as measured with the $D(^3He,\alpha)H$ reaction
 (b) Deuterium and hydrogen profiles in the same Si samples as in (a) but analyzed using secondary ion mass spectrometry (SIMS)⁹

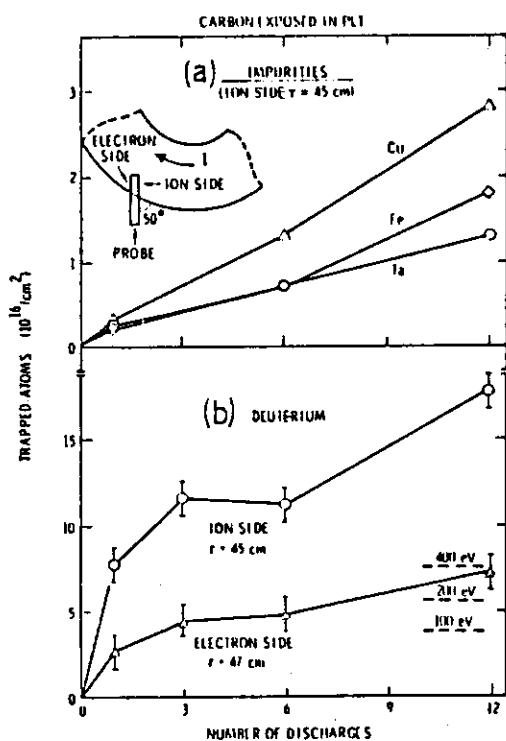


Fig. 5 (a) Impurity (ion side) and (b) deuterium (ion and electron side) content of the samples from set F closest to the plasma as a function of number of discharges. Saturation trapping levels measured for laboratory monoenergetic implants in C are shown by the dashed lines¹⁰⁾

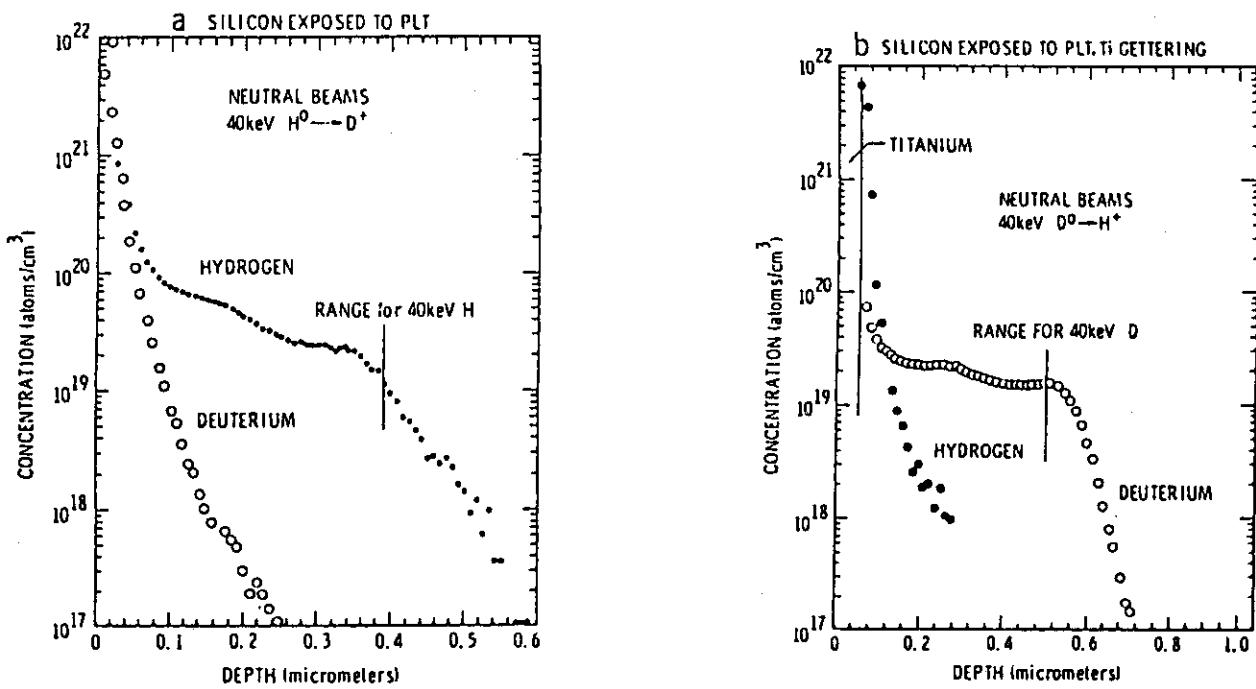


Fig. 6 Depth distribution, determined by SIMS, of H and D in samples from sets E-2 and E-5. The calculated range for normally incident 40 keV H(2a) and D(2b) are indicated. (The effect of the Ti layer (2b) was not included in the range calculation)¹⁰

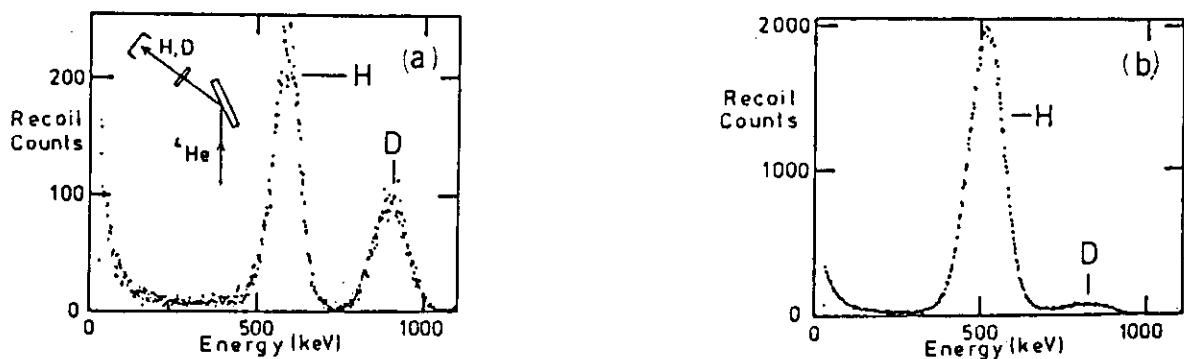


Fig. 7 Elastic recoil detection spectrum for Si samples exposed to the same PLT discharges as the samples used in the SIMS measurement of Fig. 6. Note the different vertical scales for (a) and (b). The H and D concentrations in units of $10^{15}/\text{cm}^2$ are: (a) 24 and 7.8 and (b) 190 and 6.5×10^3

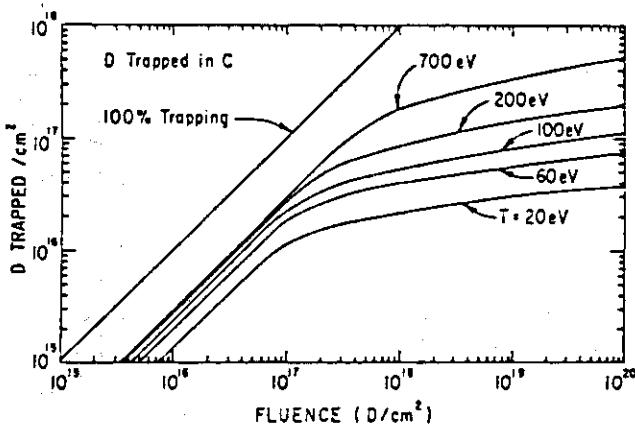


Fig. 8 Calculated D trapping in carbon as a function of D temperature and fluence. The impacting D was assumed to have a Maxwellian velocity distribution and a cosine distribution of impact angles 10)

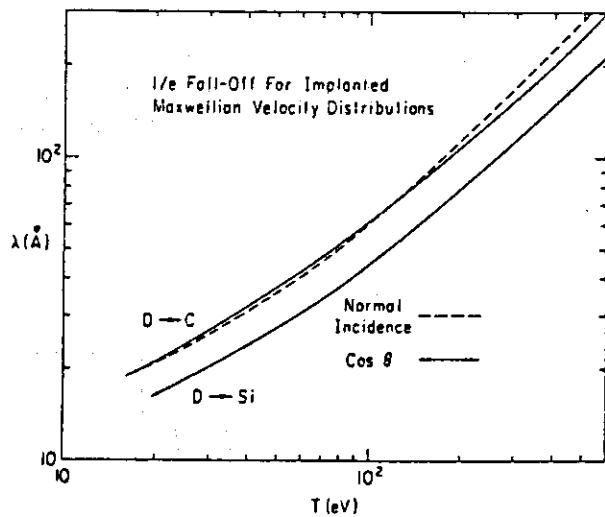
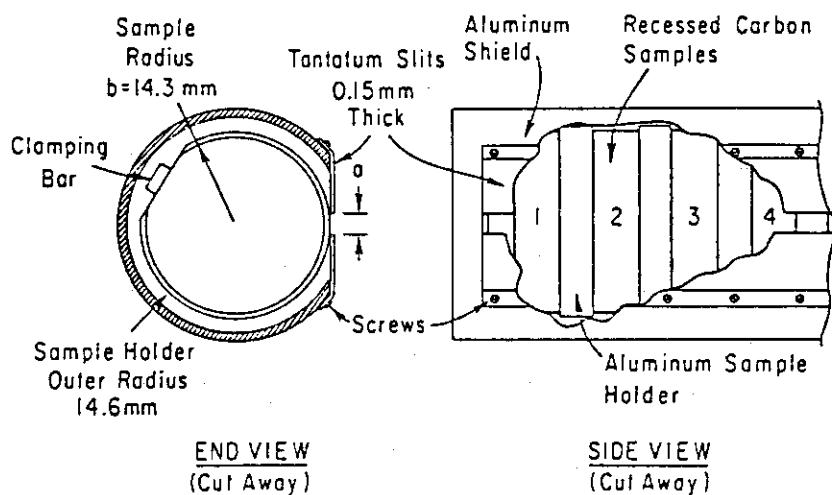
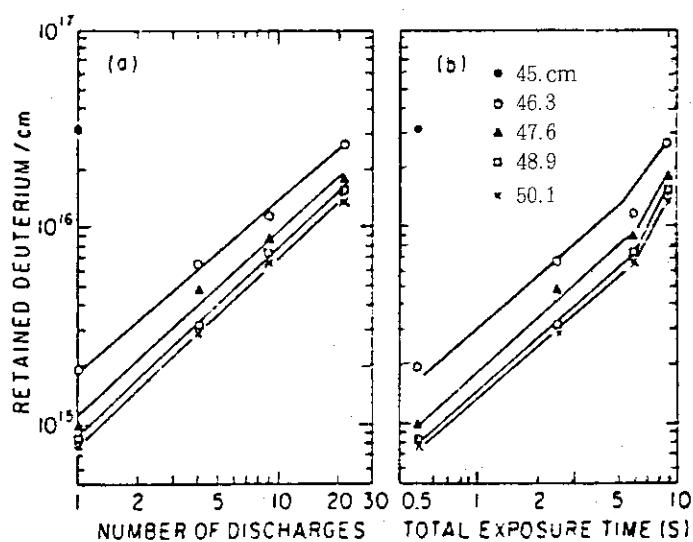


Fig. 9 Calculated 1/e fall-off, λ , in depth distribution of a Maxwellian velocity distribution D implant in carbon and silicon. Results for both normal incidence and cosine impact distribution are shown 10)

Fig. 10 Schematic of probe.¹²⁾Fig. 11 Build-up of retained deuterium: (a) vs. number of discharges and (b) vs. total integrated exposure time ¹²⁾

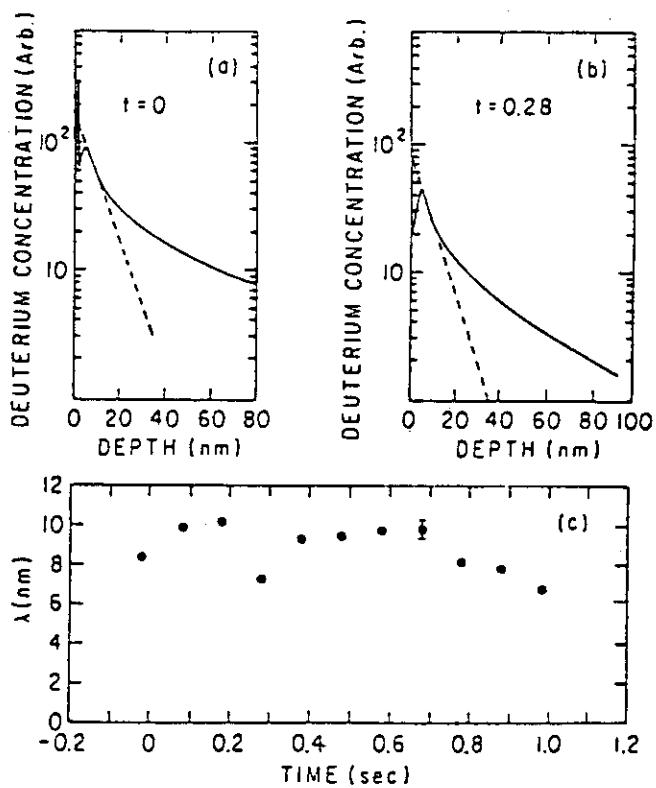


Fig. 12 (a), (b) Depth profiles of retained deuterium at $t = 0$ and 0.28 s. (c) Depth profile scale distance, λ , for the first component as a function of time for the same gas-puffed discharge shown in (b) 12)

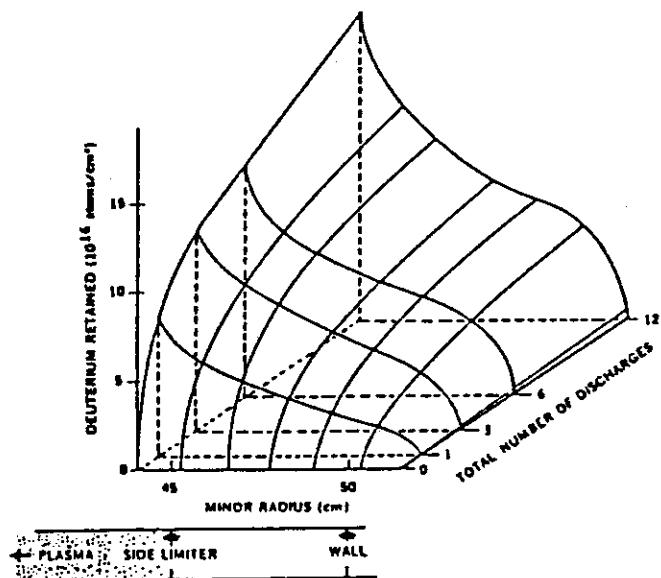


Fig. 13 Deuterium retention in carbon samples vs. number of discharges and position 13)

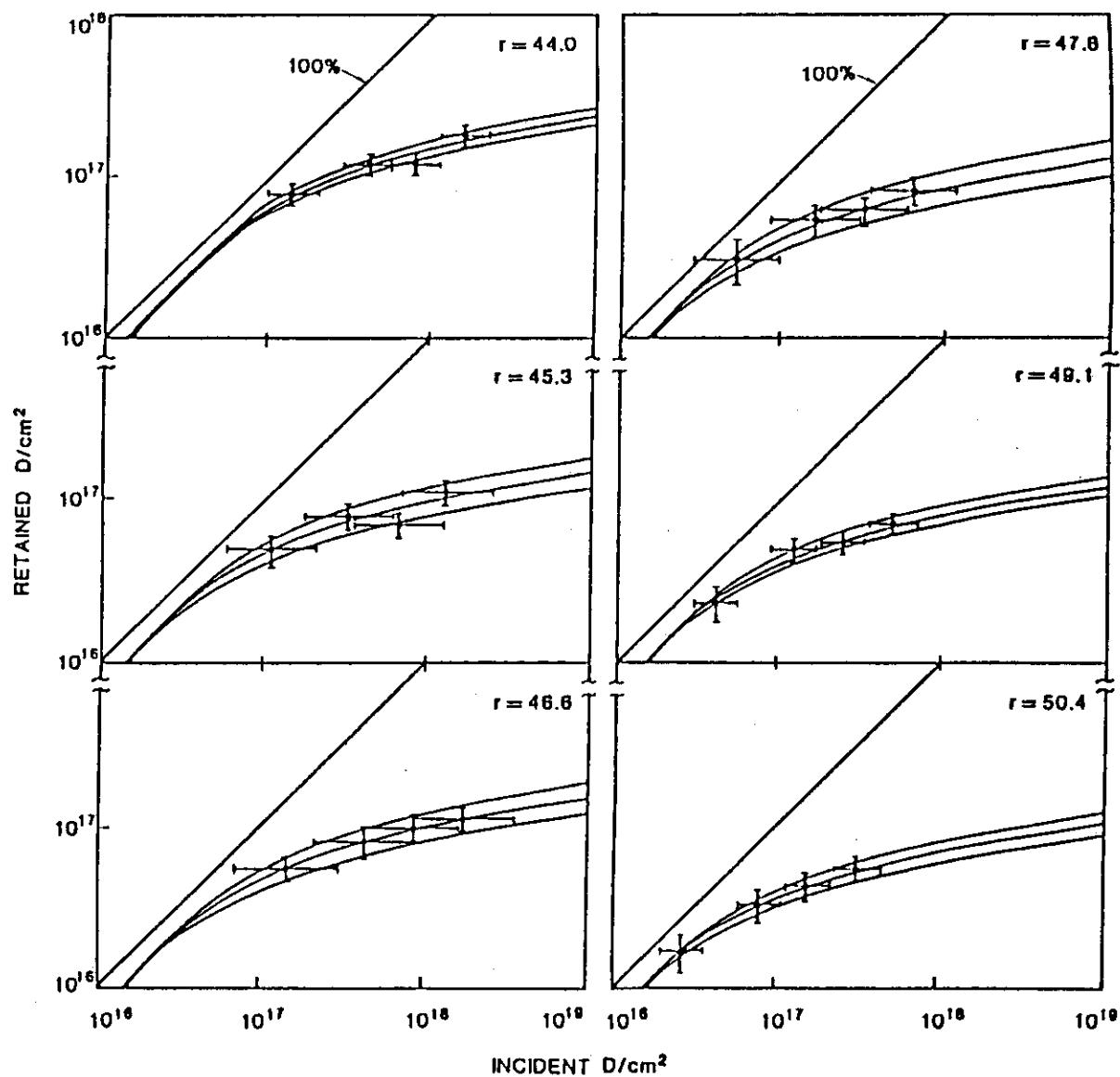


Fig. 14 The amount of deuterium retained on the samples exposed to 1, 3, 6 and 12 overlaid discharges at various radial positions. The center lines show the retention curves obtained from a least squares fit to the saturation model. The outer lines show the retention curves for $kT \pm \sigma_{kT}$ ¹³⁾

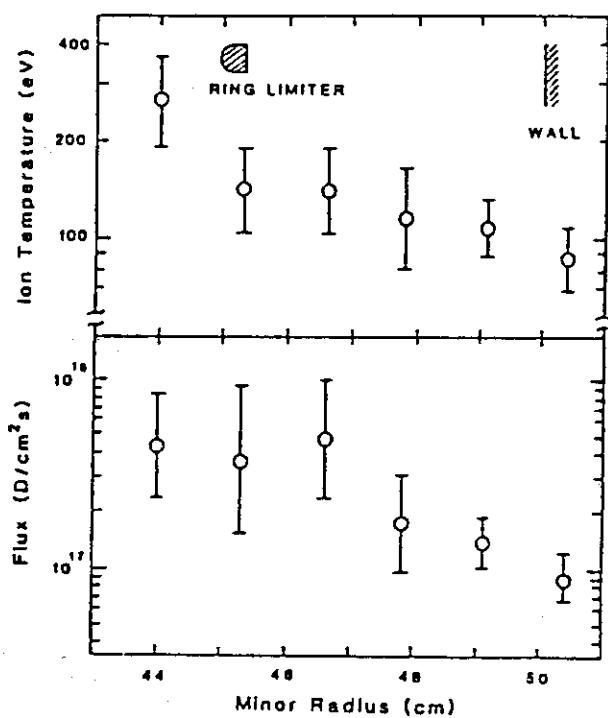


Fig. 15 Energy and B-parallel flux of deuterium incident on the carbon samples vs. distance from the PLT minor axis 13)

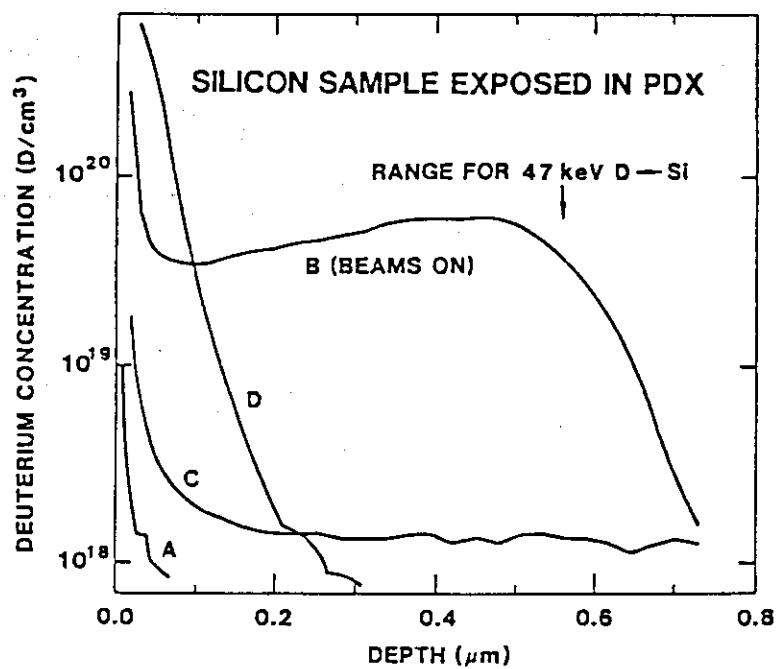


Fig. 17 Depth distribution of deuterium at positions corresponding to various times during the discharge for the sample exposed at $R = 193.6$ cm in PDX 15)

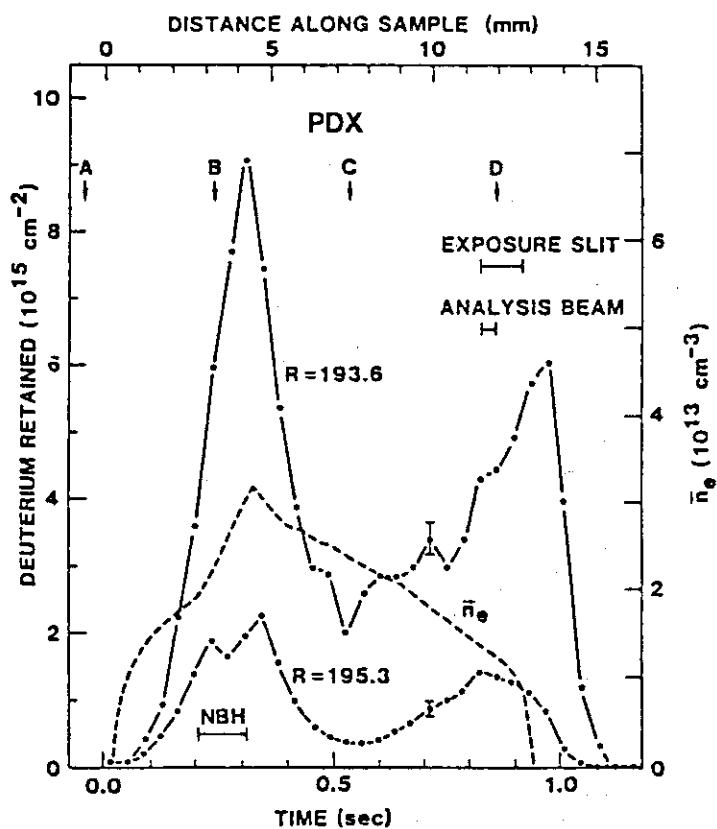


Fig. 16 The amount of deuterium retained on two silicon samples exposed at different distances from the plasma to neutral beam heated discharges in PDX (7 overlayed exposures) as a function of time during the discharge. The dashed line shows the line average electron density. At the positions labeled A, B, C and D, deuterium depth profiles were measured using SIMS on the sample exposed at $R = 193.6$ cm. The bar labeled NBH indicates the time when the neutral beams were on ¹⁵⁾

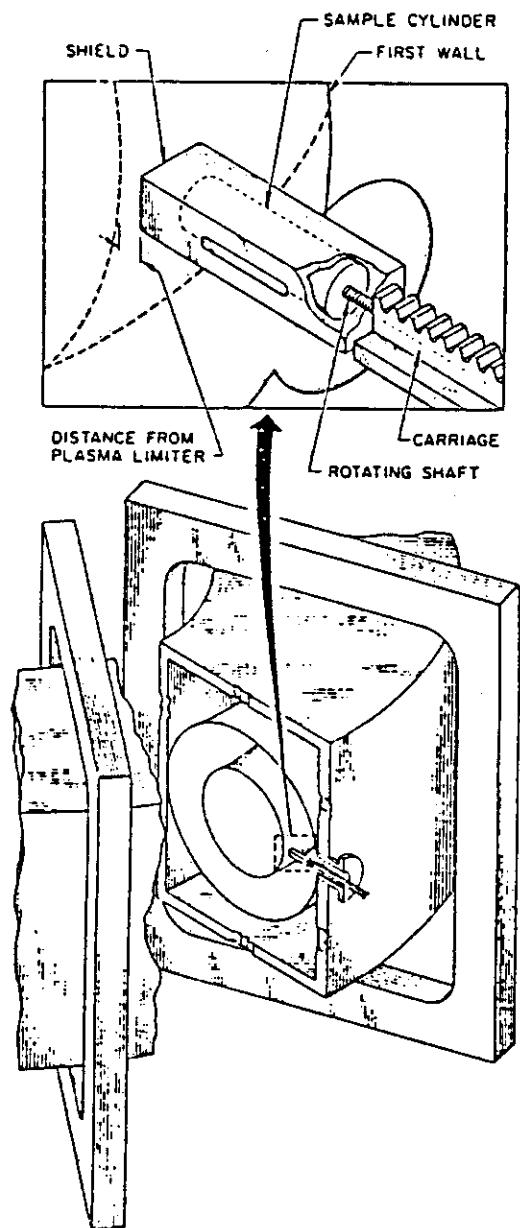


Fig. 18 Illustration of the time-resolved apparatus, showing the aluminum sample cylinder and its location relative to the plasma and first wall of ISX-A 17)

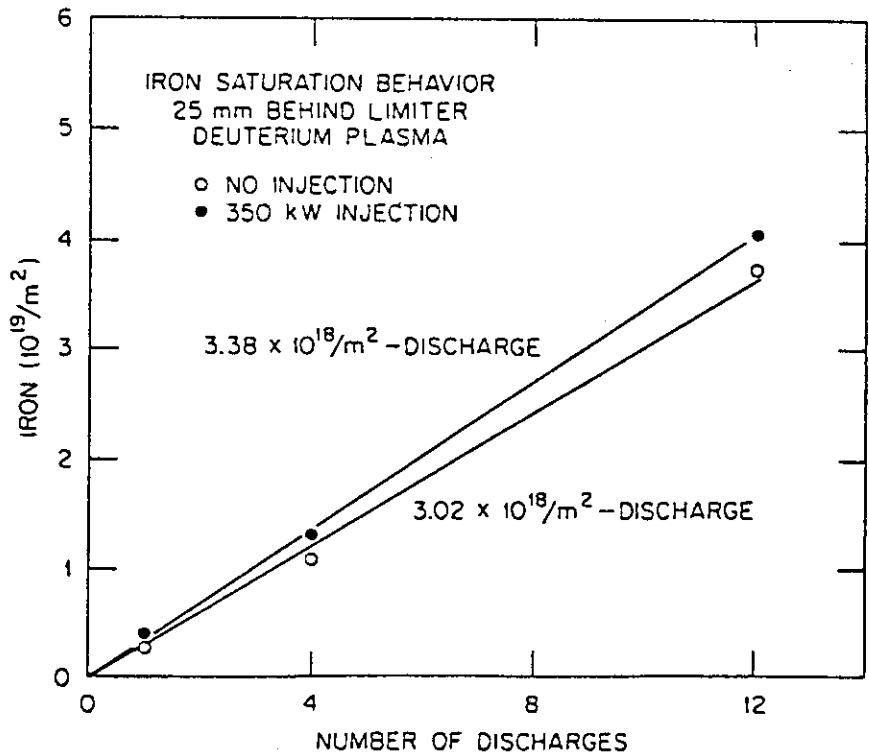


Fig. 19 Retained iron as a function of number of discharges for silicon probes exposed in ISX-B with and without neutral beam injection 18)

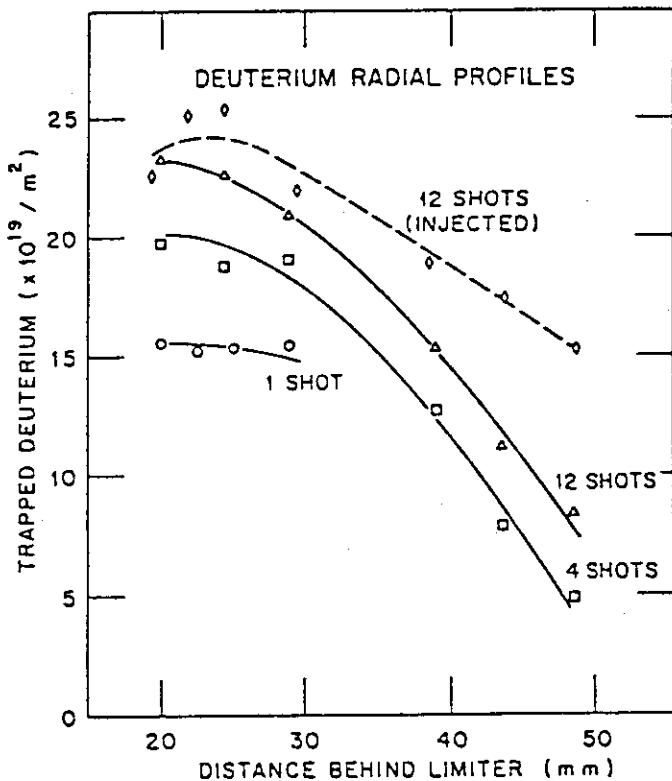


Fig. 20 Radial profiles of D trapped in a-Si for exposures to 1, 4 and 12 ohmically heated discharges. The profile for exposure to 12 discharges with neutral beam heating of the plasma is shown dotted 18)

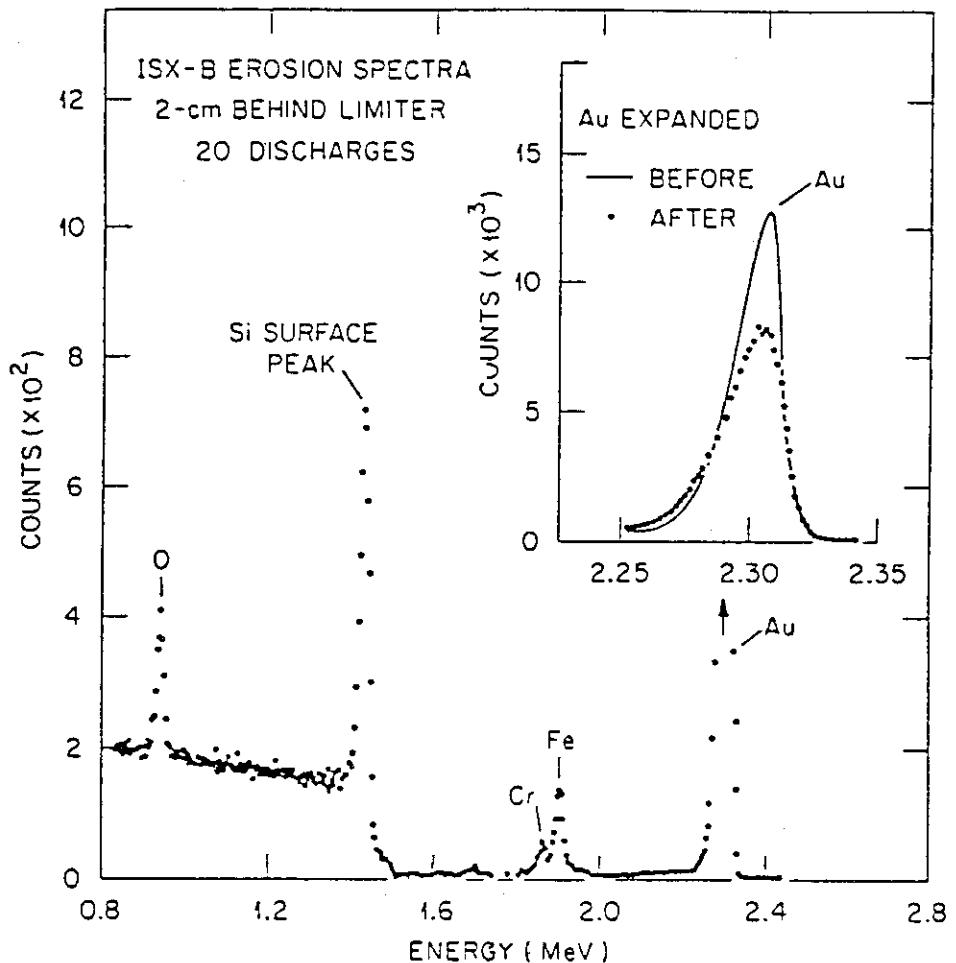


Fig. 21 Typical Rutherford backscattering spectra for an erosion sample before and after exposure to 20 D_2 discharges²¹⁾

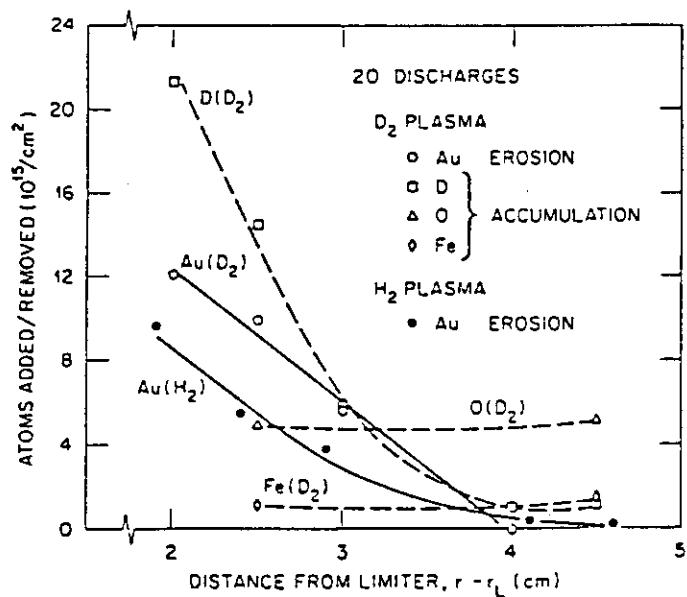


Fig. 22 Radial dependence of the erosion (H_2 and D_2 plasmas) and accumulation of D and impurities (D_2 plasma) for samples exposed to 20 discharges facing B_T (ion side)²¹⁾

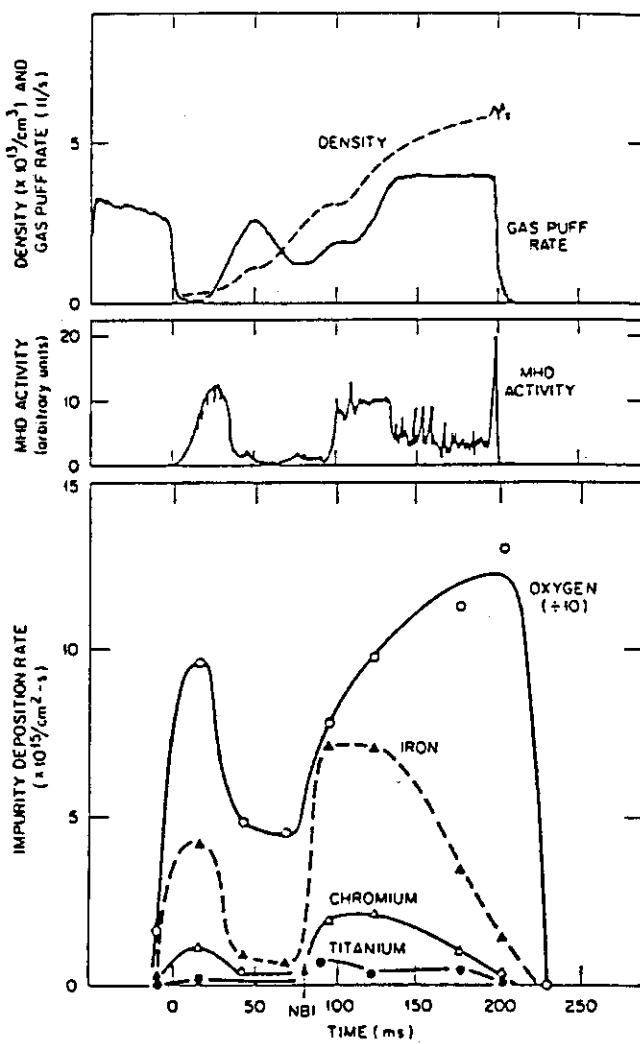


Fig. 23 Comparison of time-resolved impurity deposition rates with MHD activity, plasma density and gas puff rate for 1.1 MW neutral beam injected deuterium discharges in ISX-B. The arrow indicates the start of 100 ms NBI ²²⁾

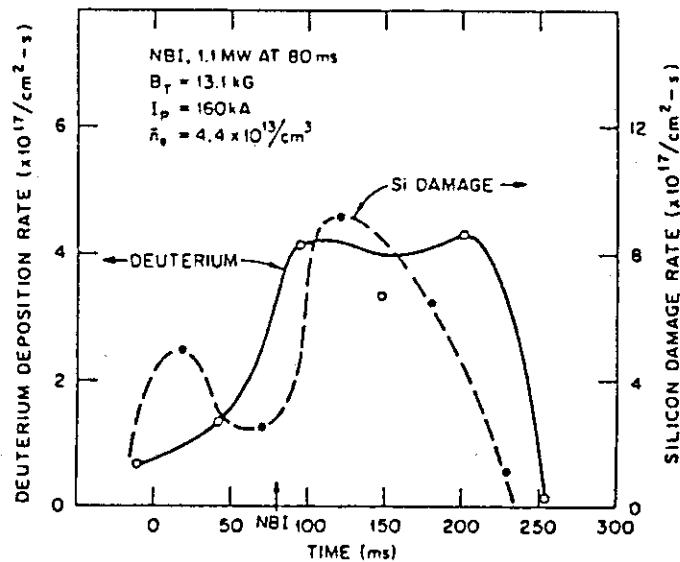


Fig. 24 Deuterium retention (a-Si) and single crystal silicon damage rates as functions of time for six 1.1 MW neutral beam injected deuterium discharges in ISX-B. The arrow indicates the start of 100 ms NBI 22)

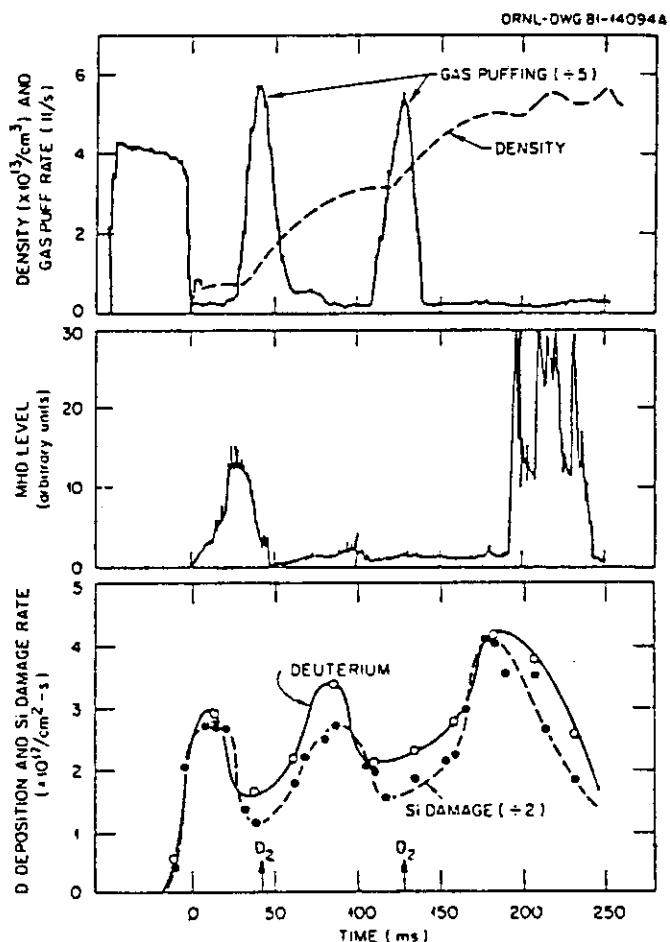


Fig. 25 Comparison of deuterium deposition and single crystal silicon (s-Si) damage rates with MHD activity, plasma density and gas puff rate for ohmic deuterium discharges in ISX-B with 0.3 tl gas puffing at 40 and 120 ms 22)

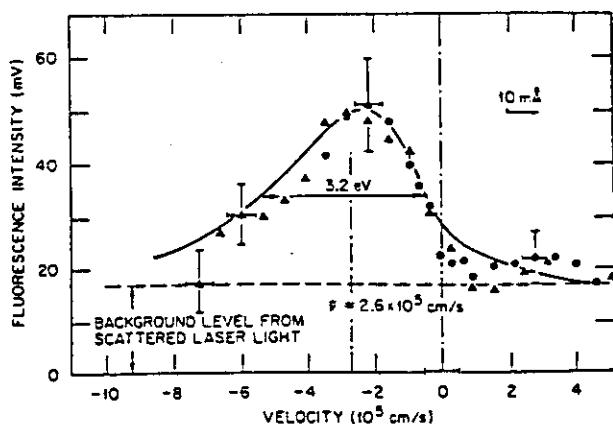


Fig. 26 Velocity distribution of neutral aluminum 5 cm from an outer cavity wall in EBT-S. Negative velocities correspond to transport away from the wall 25)

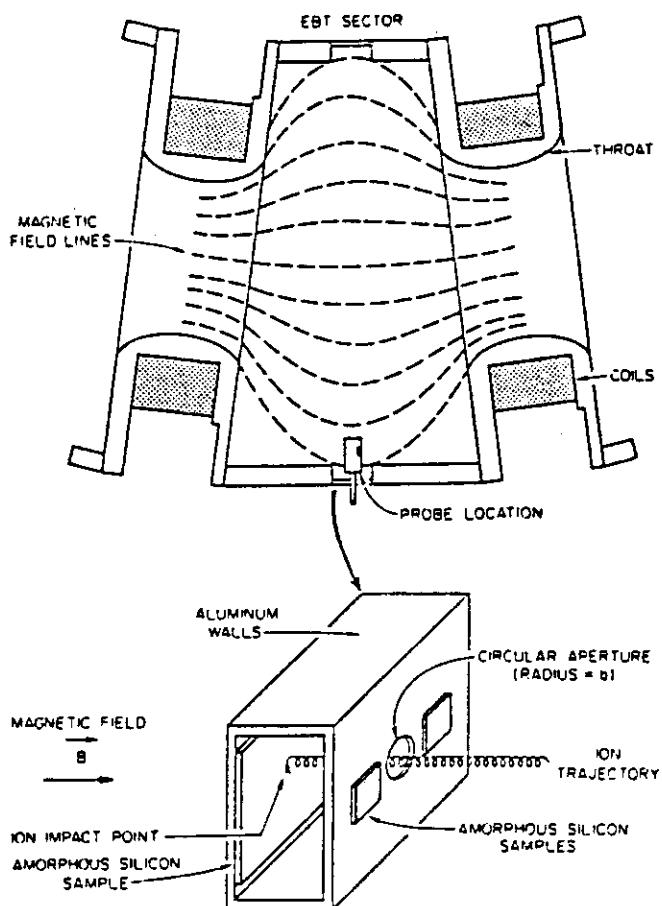


Fig. 27 Schematic diagram of the transmission probe and its location within a sector of EBT showing the aperture, amorphous silicon samples and a typical ion trajectory 28)

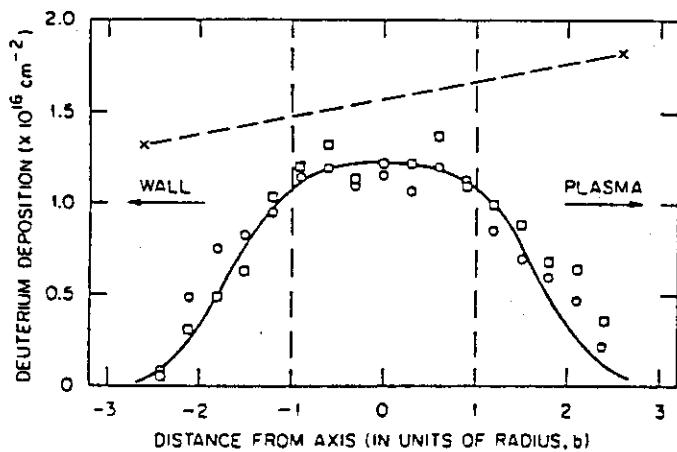


Fig. 28 Deuterium deposition on silicon samples located in front of (X) and behind a 6.74 mm dia. aperture and facing to the left (○) and right (□) in Fig. 27. The solid curve is the calculated transmission for $kT = 20$ eV with a $3kT$ sheath potential. The abscissa is in units of aperture radius, b 28)

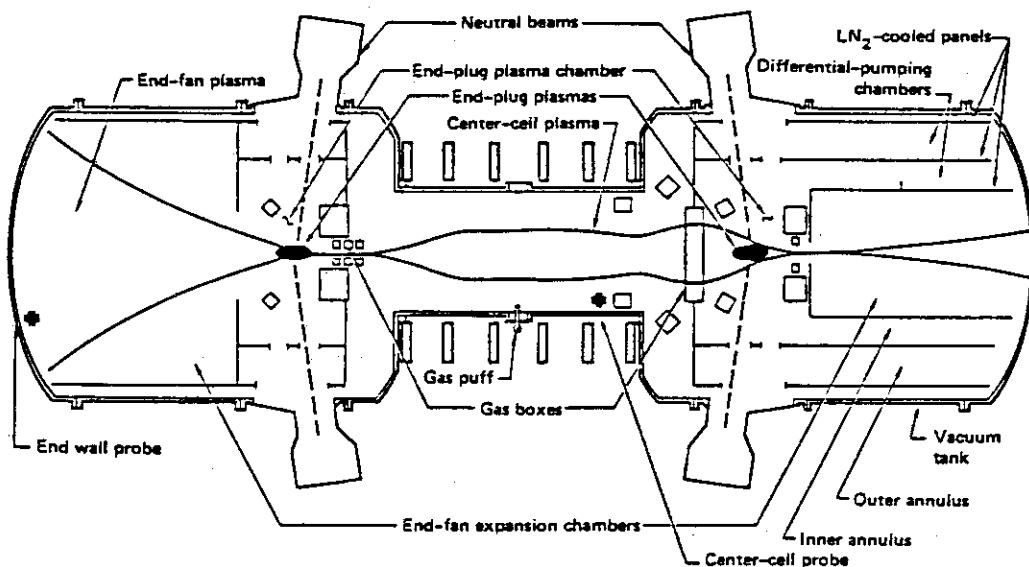


Fig. 29 Schematic of TMX showing major components and location (bold cross) of the solid-state probes in the center cell and end wall 30)

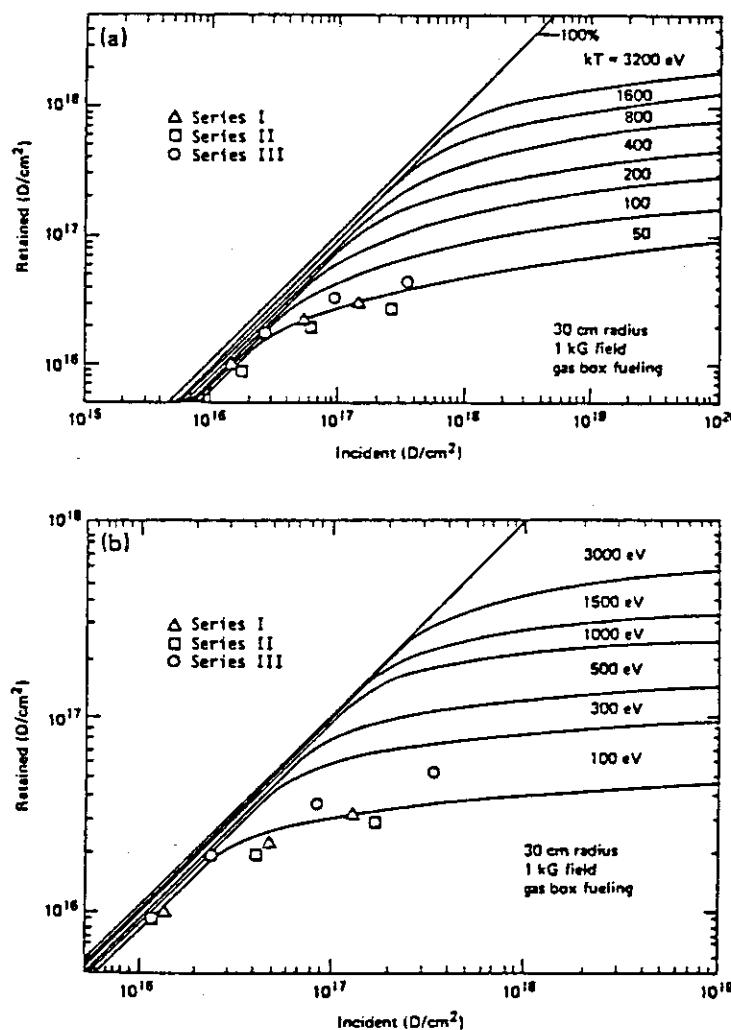


Fig. 30 (a) TMX data plotted on the saturation curves for D incident on C with a Maxwellian velocity distribution and cosine angular dependence. The data are consistent with a 40-60 eV incident energy.
 (b) TMX data plotted on the saturation curves for monoenergetic D normally incident on C. Note that the calculated curves tend to bend over more sharply than any of the three data sets 30)

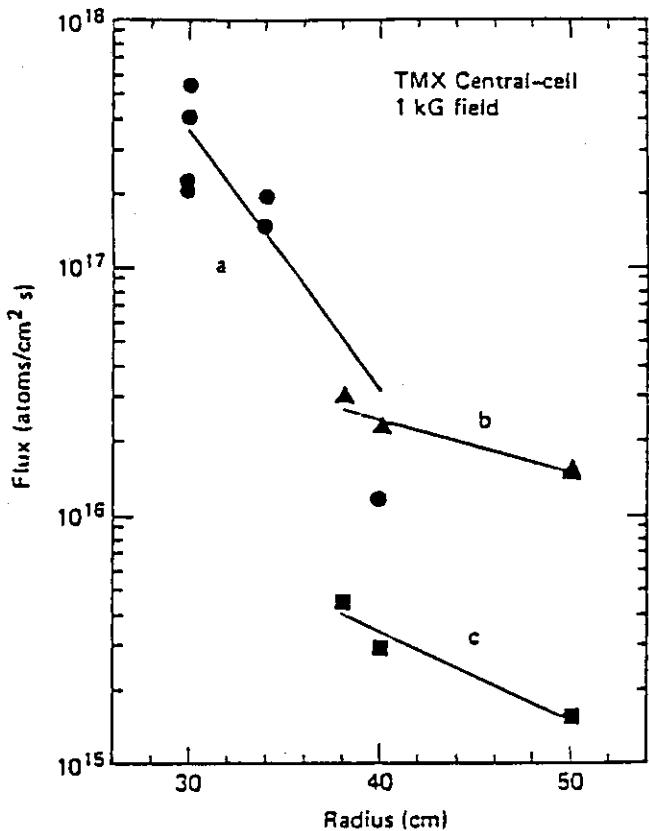


Fig. 31 Deuterium flux to carbon probes exposed to TMX facing radially inward. All data are analyzed assuming a 50 eV Maxwellian energy flux with a cosine angular incident distribution. (a) Gas box fueling, normal plasma density, various dates, (b) gas puffer fueling and (c) gas box fueling, low plasma density. The lines are linear regression fits to the three data sets 30)

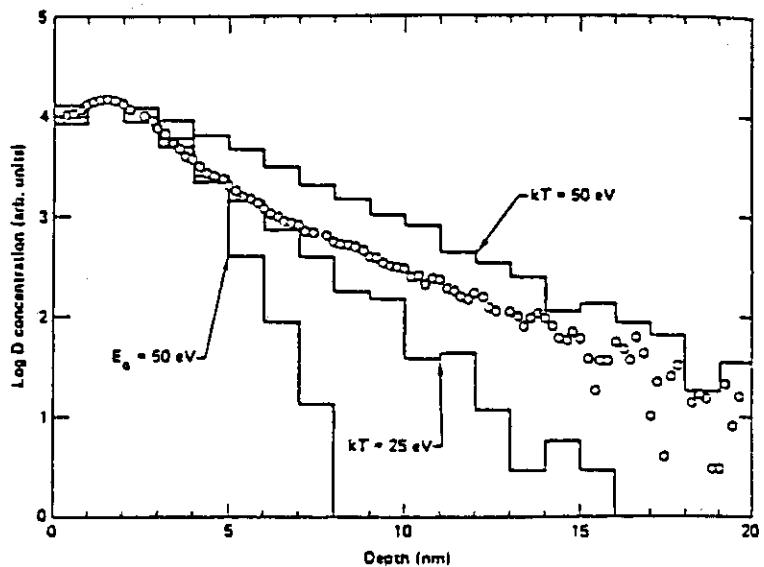


Fig. 32 Comparison of SIMS data with TRIM calculations. The SIMS data show the deuterium profile from a Si probe exposed to 26 discharges at 30 cm radius. TRIM calculations are shown for deuterium distributions in Si resulting from (a) monoenergetic 50 eV D at normal incidence (b) Maxwellian 25 eV D with cosine angular distribution and (c) Maxwellian 50 eV D with a cosine angular distribution. The data correlate well with a 25-50 eV Maxwellian D flux having a cosine angular distribution 30)

3.3 西ドイツの研究

3.3.1 PULSATOR - I

IPP の P. Staib と G. Staudenmaier は PULSATOR - I に設定した QWAASS (Quantitative Wall Analysis by Auger and Secondary Ion Mass Spectroscopy) に酸素を含まない材料として、プローブに 99.9995 Al またはパイロカーボン (Union Carbide の Pyrolytic Graphite) を用いた³¹⁾。その QWAASS 方式を Fig. 33 に、分析結果の 1 例を Fig. 34 に示す。また、磁場の方向との関係を調べるためのサンプルマウント方式を Fig. 35 に示した。時間分解を得るために、Fig. 36 のようなシャッターを用い、Fig. 37 の結果を得ている。又、ほかに多くの興味ある結果が得られている。

3.3.2 TEXTOR

TEXTOR は PWI の研究にウェイトを置いたトカマクで、以下その 3 編の報告について述べる。これは大半径 1.75 m で、第 1 壁に Inconel のライナーを用い、それを 600°C まで加熱でき、また、高周波グロー放電 (RG) クリーニングを用いている。通常、 $B_t = 2 T$, $I_p = 300 \text{ kA}$ ~ 500 kA, $n_e = 2 \sim 4 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ である。

ORNL の Zuhrl は C と単結晶シリコン (s-Si) をプローブとして D の保持量と Fe, Ni, Cr などの保持量を測定した³²⁾。その D 量の時間変化は Fig. 38 に示される。不純物では、Fe, Ni, Cr の 3 放電当たり $1 \sim 10 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ のフルエンスが有り、その値は壁近くで急速に上昇した。

また同じく Zuhrl は Fig. 39 に示すような時間分解型プローブにより、サンプルとしてはカーボン、及び (100) 面を持つ s-Si を用いて測定を行い³³⁾、D と H の保持量の時間変化、及び、放電回数に対する O, Mo, FeCrNi のフルエンスを測定した。また、プラズマエッジから壁方向への不純物原子は Fig. 40 に示すような O のみの異なった分布が得られた。また放電回数に対するそれらの保持量を Fig. 41 に示した。金属イオンが直線的に増加しているのに対し、O は飽和する。McCracken は 1) で不純物を O, N などの中重イオンと Mo などの重イオンに分けて論じており、この実験でも O と金属イオンの発生機構が異なることを示している。Fig. 42 には s-Si の表面付近が D のフルエンスの増加とともにアモルファス化が進むことを利用して、RBS (Rutherford Back Scattering) の表面ピークをプラズマにさらした時間の関数として求めると、D フルエンスとエネルギーが同時に求まる。図からエネルギーは 150 eV, ~ $5 \times 10^{15} / \text{cm}^2 / \text{discharge}$ となった。

ORNL の Clausing, Jülich の Waelbroeck ら、及び名大プラズマ研究所の Noda らは、壁のコンディショニングがプラズマのパラメータ、不純物、及び水素のリサイクリングに及ぼす影響を研究した。RG 放電による効果は脱ガス特性と Z_{eff} に対し長期的にみて良い結果を及ぼす³⁴⁾。

3.3.3 ASDEX

IPP - Garching の Roth, Scherzer, Vienna Tech. Univ. の Varga, 中国 Institute of Atomic Energy, Beijing の C. Cheng-Kai, Sandia の Wampler らは ASDEX チーム

と共に H と D の粒子束を 100 ms の時間分解で Papyex カーボン片を用いて測定した³⁵⁾。このための回転式プローブ及び A S D E X プラズマの形状をそれぞれ Fig. 43 及び 44 に示した。測定の際のプラズマパラメータなどは Table 14 に与えた。Fig. 43 の上図は真空中のまま熱脱離により水素量を 4 重極アナライザーで測るプローブで、下図は取り出して空気中を運んだ後 N R A, R B S による分析³⁶⁾を行うプローブである。Fig. 44 に於いてはプローブの標準的な位置が示してあるが、2 個のプローブはプラズマ・セパラトリックスが約 11 cm にあり、磁場に関しては、トロイダルリミタ、可動及び固定のポロイダルリミタの陰に置かれている。Fig. 45 には D 放電に N B I を併用したときの効果を示す。条件は Table 13 のものである。1 放電時間にわたる D 粒子束が示されている。約 $5 \times 10^{16} \text{ D/cm}^2 \text{s}$ の最高値が得られているが、最初のピークでは約 200 eV、中央部で 50 ~ 60 eV となることが Eckstein の計算³⁷⁾との比較により求められている。N B I により D の粒子束は約 10 倍に、またエネルギーは約 50 % 増加している。これらの実験結果を整理したものが Fig. 46 及び 47 である。平均の D フラックスはセパラトリックスからの距離と共に低下している。また、イオン温度も 100 から 10 eV に低下している。上記の D 粒子束の時間変化は D I T E, P L T, P D X でも同様に見られ、始めと終わりのピークは閉じ込めが良くない状態に対応する。また、N B I により粒子束が増加するのは、閉じ込めが悪くなったためと見られている。このように、詳細を知るには時間分解できるプローブが必要である。プローブの電位が 3 kTe のシース電位を持つので、その補正が必要である。さらにエネルギーが 50 eV 以下であるようなイオンについての捕捉と保持は 10^{14} D/cm^2 で飽和する可能性があり、中性粒子のバックグラウンド以下となり測定上の問題がある。

I P P の Taglauer らは 35) と同様に、主に不純物イオンについて研究した³⁸⁾。Fig. 48 に不純物のその時間変化、Fig. 49 には放電回数を重ねた時の Fe の半径方向の分布が示されている。減衰長 $\lambda = 1.1 \text{ cm}$ から Cohen の flux tube model (FTM)³⁴⁾によると、

$$\lambda^2 = D_{\perp} 4 L / v$$

に因り、イオン温度を 30 ~ 50 eV と仮定すると、磁場を横切る拡散係数 D_{\perp} の値は $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーであることが推定された。これは次の論文に於いてエネルギーが測定され、よりはっきりした拡散係数が求められた。

すなわち、Staudenmaier らは³⁹⁾ 同じく A S D E X での不純物の輸送を調べるため、Fig. 50 に示す $E \times B$ アナライザーを持つデポジションプローブを作製し、不純物イオンのエネルギーをも測定すると同時に、半径方向の減衰長を求めた。検出には前論文と同じく R B S と S I M S を用いている。減衰は指数関数であることから、不純物の流れは Free streaming である。この論文では

$$\lambda^2 = 2.9 \times 10^{-6} L (\text{cm}) D_{\perp} (\text{cm}^2/\text{s}) M_i^{1/2} T_i (\text{eV})^{-1/2}$$

により λ から FTM により L を与え D が求められる⁴⁰⁾。Fe イオンのエネルギーは約 10 ~ 20 eV であり、これより $D_{\perp} = 4 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ となった。Fig. 51, 52, 53 に得られたフルエンスを示した。Fig. 52 は disruption の放電を含んでいる。一方、Bohm の拡散は

$$D_B = 3.5 \times 10^2 T_e \text{ (eV)}$$

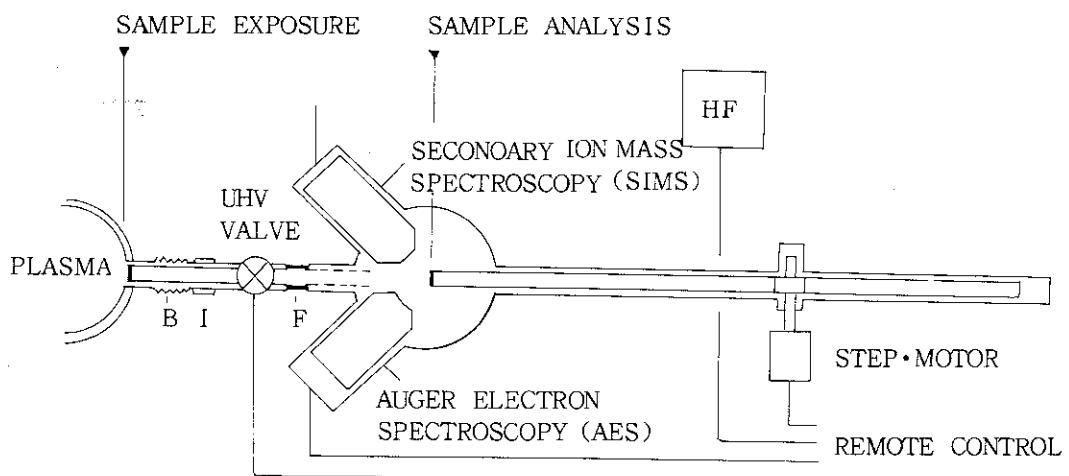
であり、いま $B_T = 1.8 \text{ T}$, $T_e = 10 \text{ eV}$ にはば一致している。結論として S O L の外側領域では D と Fe の磁場に沿う流れは free streaming であり、磁場を横切る拡散はボーム拡散のオーダーである。

3.3.4 WENDELSTEIN-VIIA

I P P の Schou, Scherzer, Renner は W-VII ステラレータで、不純物測定を行っている。この装置は $R = 2.0 \text{ m}$, $a = 0.1 \text{ m}$, $B = 3.5 \text{ T}$ である。オーミック放電は 20 kA で、中性粒子加熱が主で、 $T_e = 500 \text{ eV}$, $T_i = 650 \text{ eV}$, $\bar{n}_e = 6 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ であり、トカマクと同程度のプラズマを生成できる⁴¹⁾。プローブの配置図を Fig. 54 に示した。Papyex を 77 回のオーミック放電にさらした後、 1 MeV の ${}^4\text{He}$ で RBS 分析している。Fig. 55 にスペクトルの 1 例、Fig. 56 にチタンの分布を示した。プラズマエッジから 55 mm での 1 放電当たりの不純物量は Ti が 3×10^{12} , 壁からの Fe Cr Ni が 1×10^{11} , Mo は $6 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ であった。これらの値はトカマクに較べて小さいと述べられている。

Table 14 Plasma parameters for the series of discharges in ASDEX³⁵⁾

	1 series #1906-08, 2101 2229-32, 2916-23	2 series #3856-66	3 series #4667-75
Large radius R (cm)	1650	1650	1652
Small radius r	40	40	35
Discharge type	double null divertor in H ₂	single null divertor in D ₂	single null divertor in D ₂
Toroidal field B _T (kG)	22	22	22
Plasma current J _p (kA)	250	400	325
Electron density \bar{n}_e (cm ⁻³)	3×10^{13}	4×10^{13}	2×10^{13}
Neutral injection (MW)	-	1 beam line 0.95	2 beam lines 2.45
Central electron temperature T _e (eV)	600	800 1200 during NI	800 1300 during NI
Central ion temperature T _i (eV)	450	1050 during NI	2700 during NI
H ⁺ flux at fixed limiter (cm ⁻² /s)	1.5×10^{16}	2×10^{16}	4×10^{15}
H ⁺ energy at fixed limiter (eV)	40	20	20

Fig. 33 Schematic view of QWAASS³¹⁾

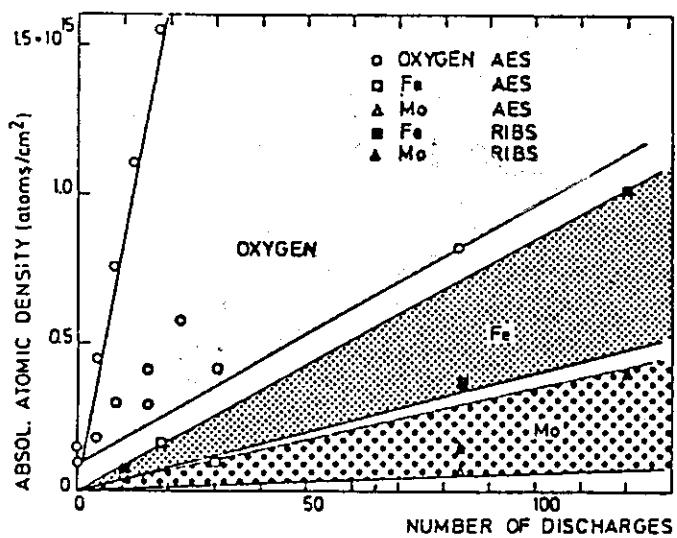


Fig. 34 Range of surface compositions for various discharges obtained by AES and RIBS after different number of discharges. Upper values for low density and lower values for high density 31)

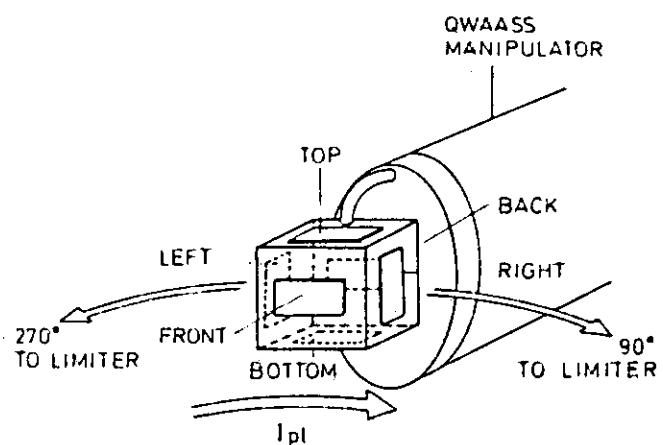


Fig. 35 Target arrangement on a cubic holder for measuring the dependence of the deposition on target orientation. View from the plasma toward the samples 31)

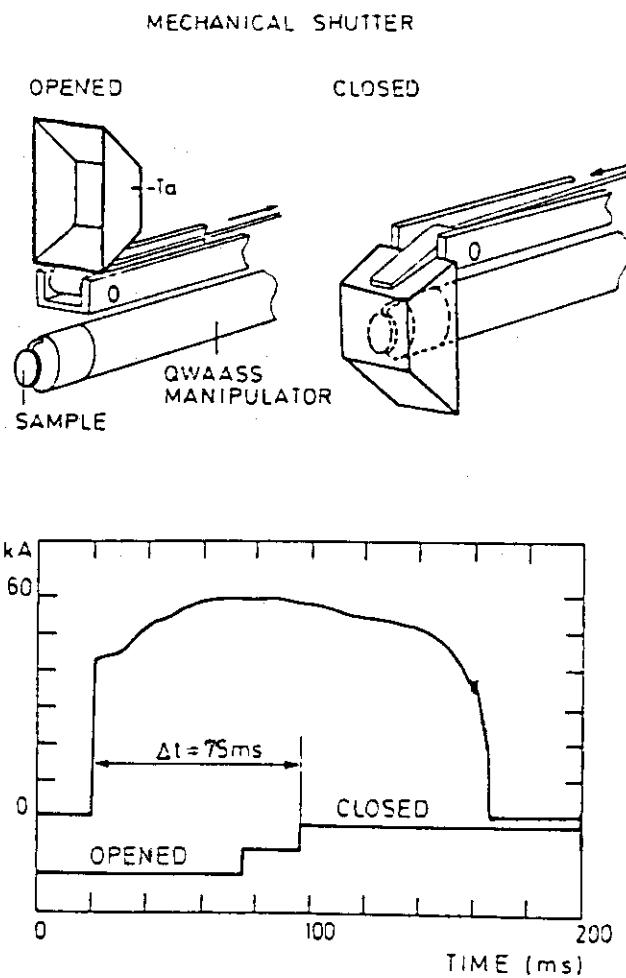


Fig. 36 Schematic view of the mechanical shutter 31)

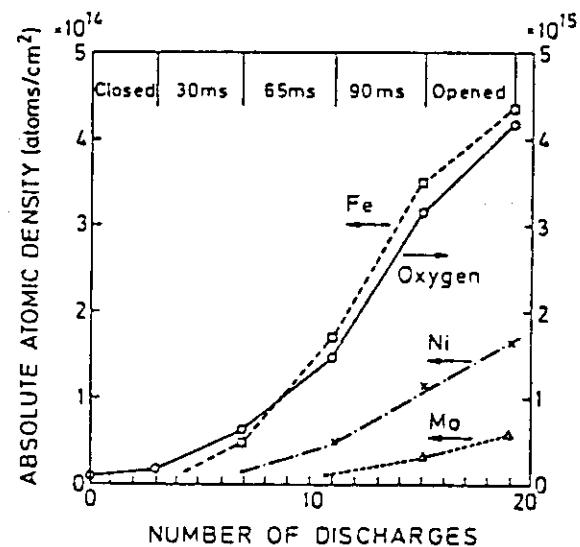


Fig. 37 Dependence of the surface composition on the number of discharges while varying the exposure time Δt . Total duration of the discharge 110 to 120 ms 31)

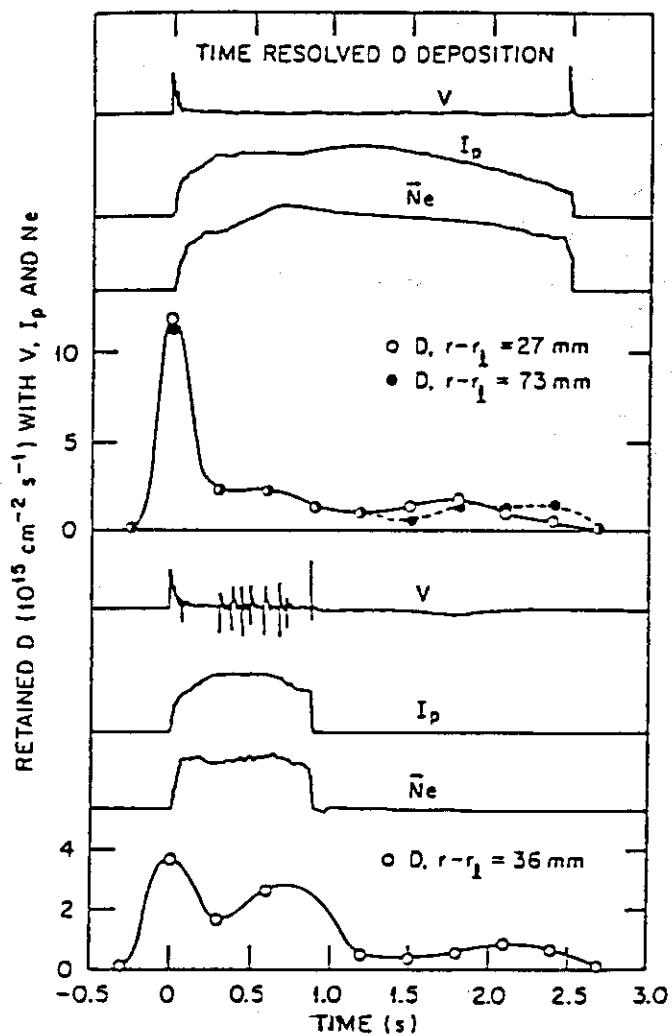


Fig. 38 Time resolved D retention rate is compared with loop voltage V plasma current I and average electron density \bar{n}_e for two different discharge types in TEXTOR ³⁸⁾

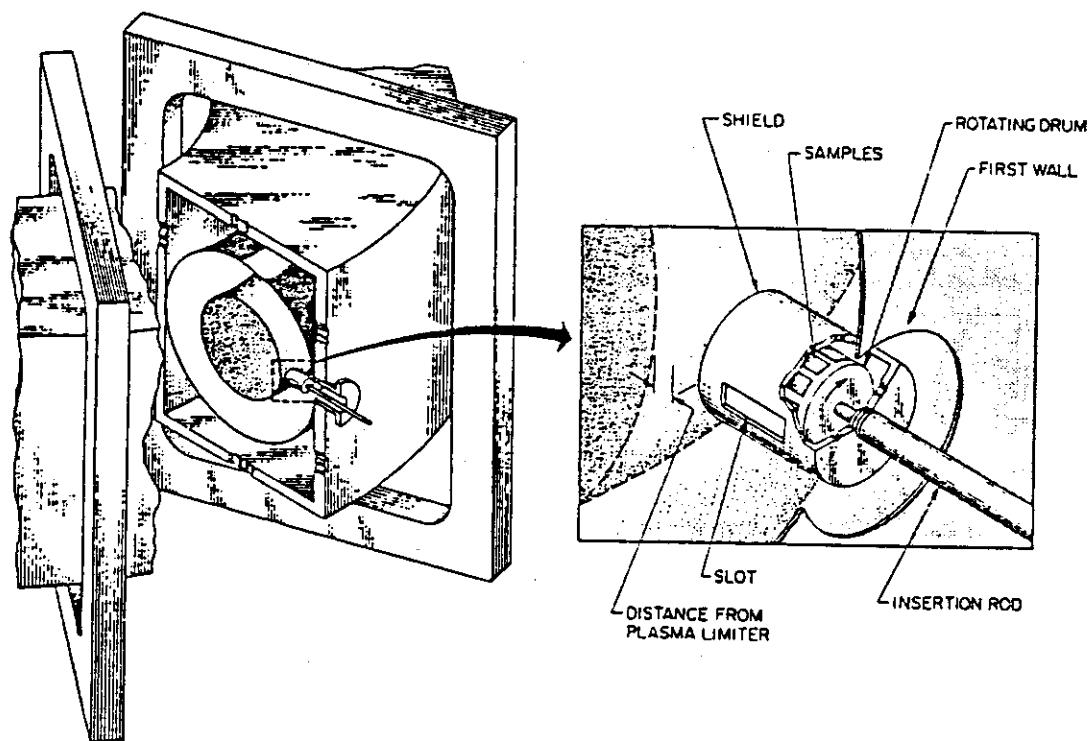


Fig. 39 Exposure geometry for the time-resolved deposition probe showing silicon collection samples mounted on the rotating drum 33)

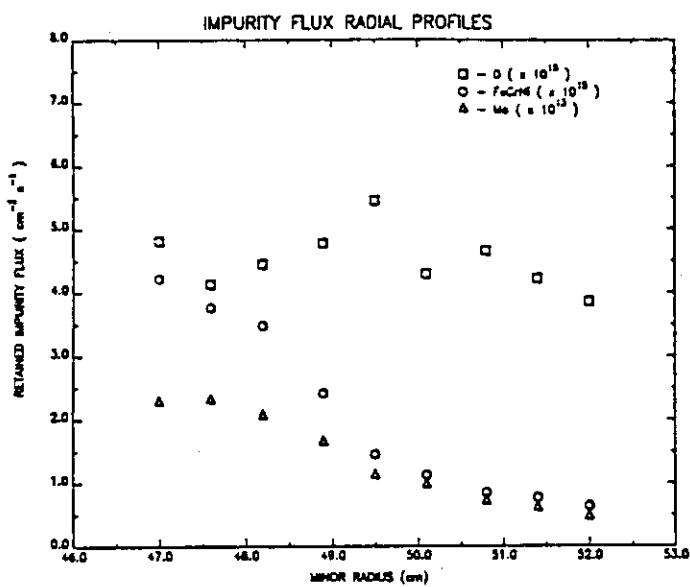


Fig. 40 Radial distribution of FeCrNi (○), O (□) and Mo (Δ) retained fluxes along the field lines in the electron drift direction during ohmic hydrogen discharges 33)

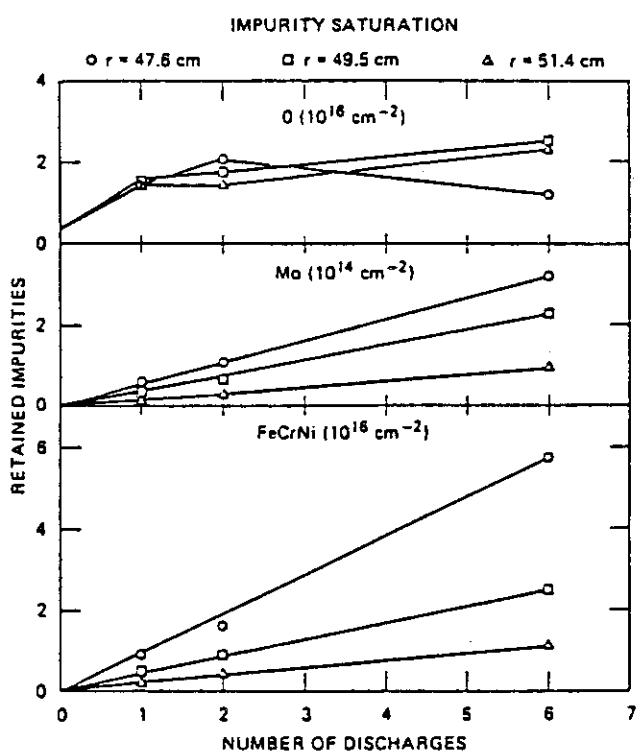


Fig. 41 Saturation effects observed in plots of retained impurities vs. number of hydrogen discharges at radii of 47.6 cm (○), 49.5 cm (□) and 51.4 cm (△) ³³⁾

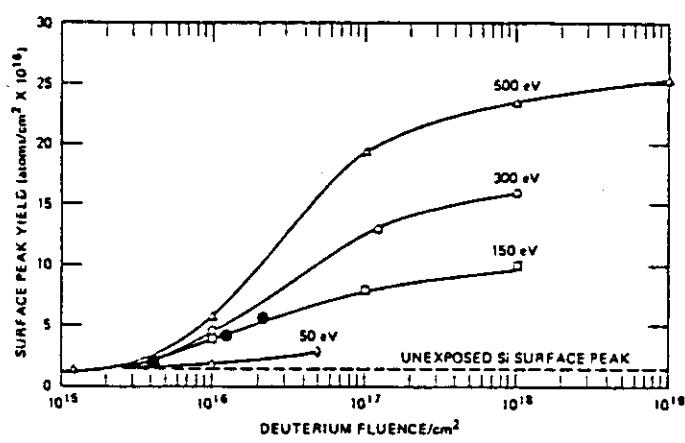


Fig. 42 Damage (surface peak yield) for single crystal silicon (100) as a function of dose and energy for monoenergetic incident deuterium. The . marks are measured damage for samples exposed 4 cm outside the limiter radius in TEXTOR ³³⁾

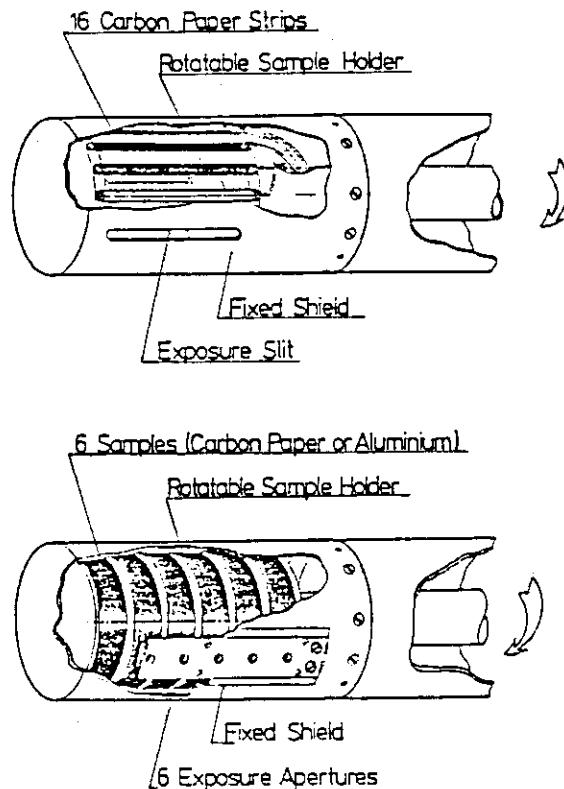


Fig. 43 Schematic diagram of the carbon probe assembly on ASDEX 35)

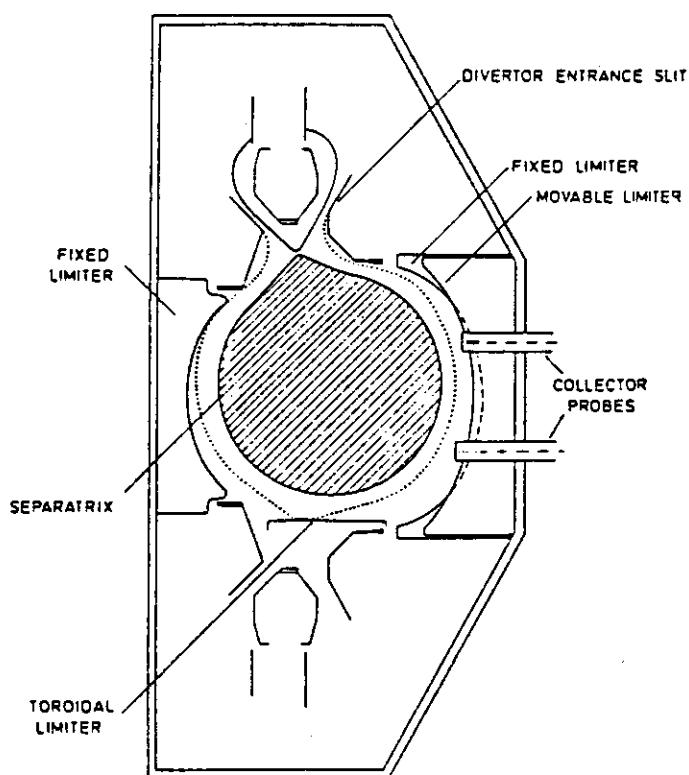


Fig. 44 Schematic cross section of the ASDEX torus for a single null divertor discharge with toroidal stainless steel limiter. The fixed poloidal limiters and the movable poloidal limiter are projected into the plane of carbon probes. The separatrix and the magnetic field line which is touching the divertor entrance slits, the toroidal limiter and inner poloidal limiter are shown 35)

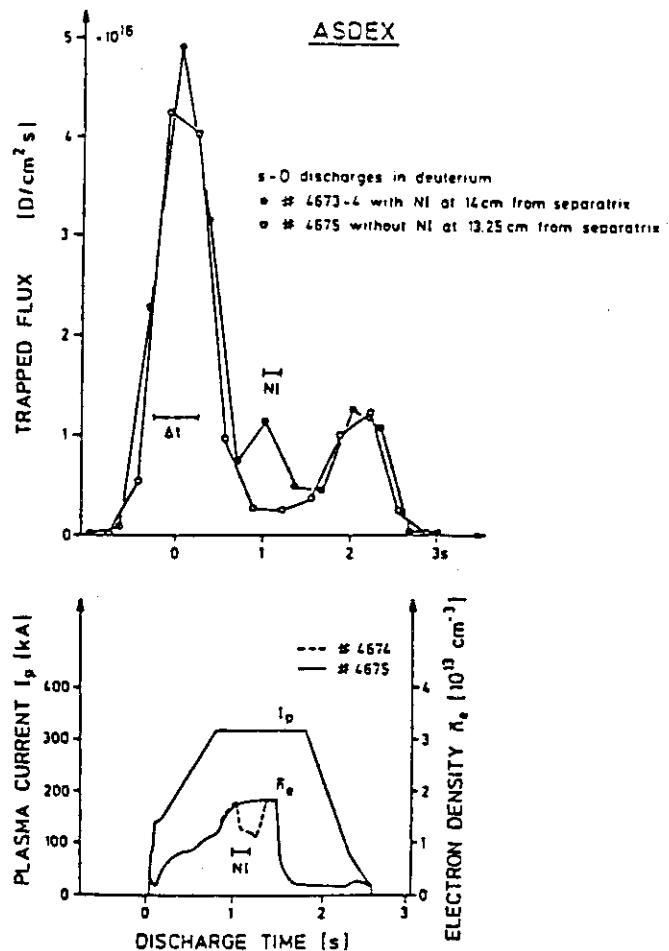


Fig. 45 Comparison of the trapped flux of deuterium for divertor discharges with and without neutral injection measured by nuclear analysis of the collectors of the lower probe. The time dependence of plasma current and electron density is shown for comparison. At a time of 1.4 s the density decreases as a result of closing the gas inlet valve 35)

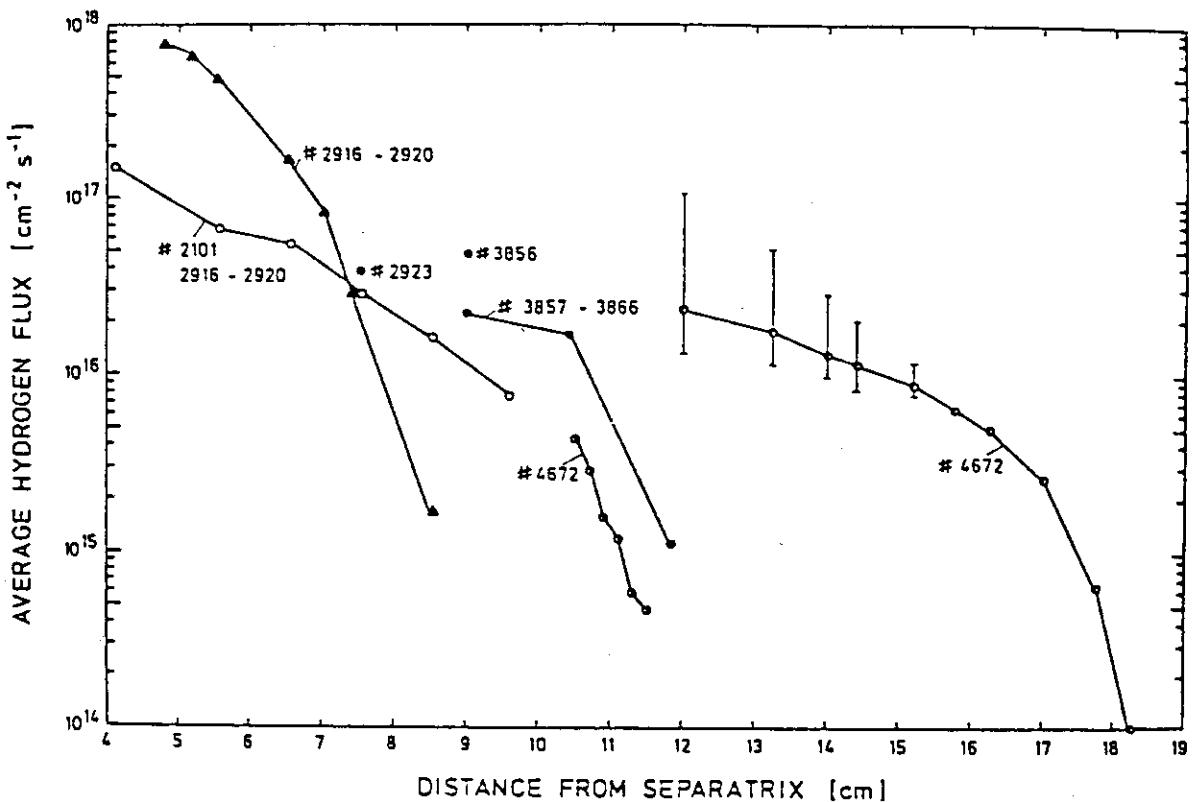


Fig. 46 A collection of the measured fluxes of plasma ions in the boundary layer of ASDEX as a function of the distance from the separatrix. For each measurement the fixed limiter may be at a different position towards the probe 35)

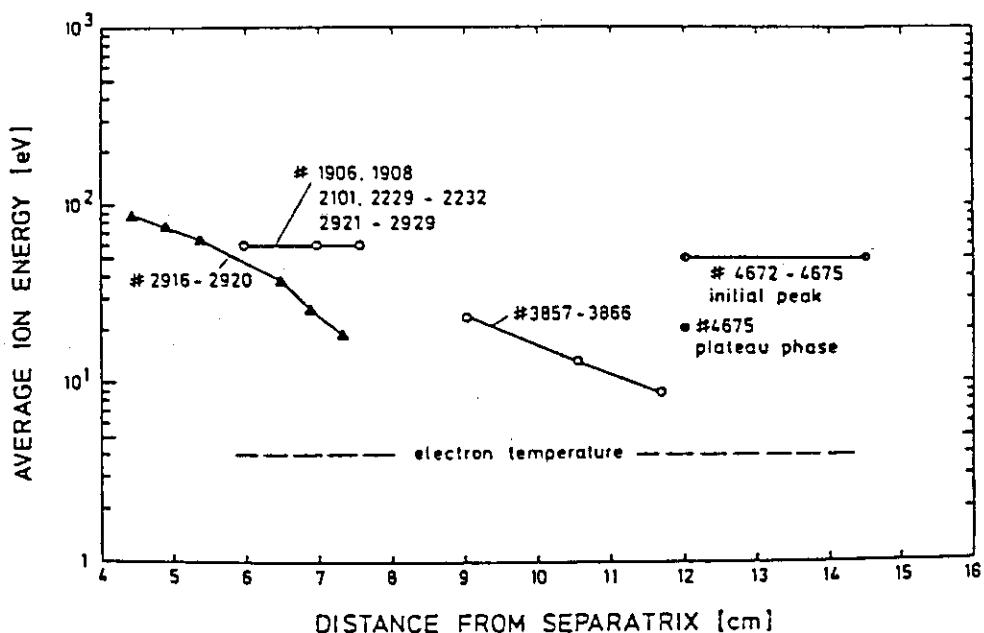


Fig. 47 A collection of the average ion energies of plasma ions in the boundary layer of ASDEX as a function of the distance from the separatrix 35)

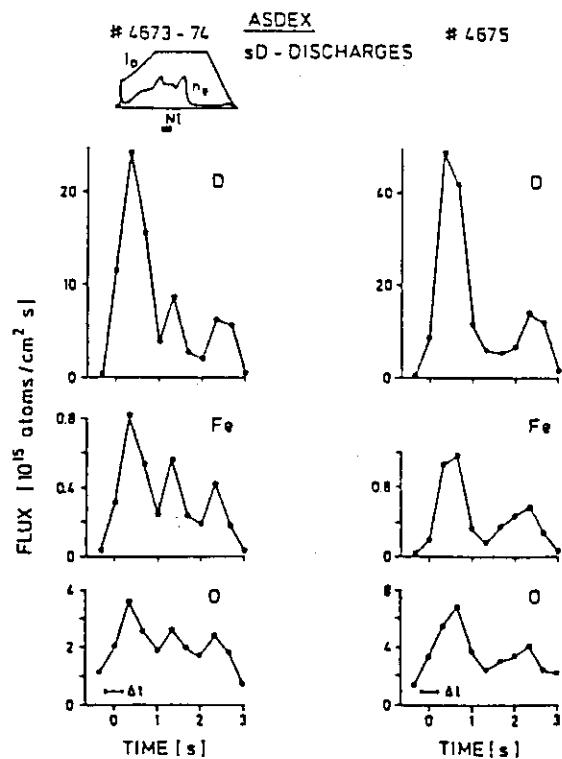


Fig. 48 Time-resolved deuterium and impurity fluxes for single null divertor operation with (left) and without (right) neutral hydrogen injection (3×0.6 MW, 200 ms) (36)

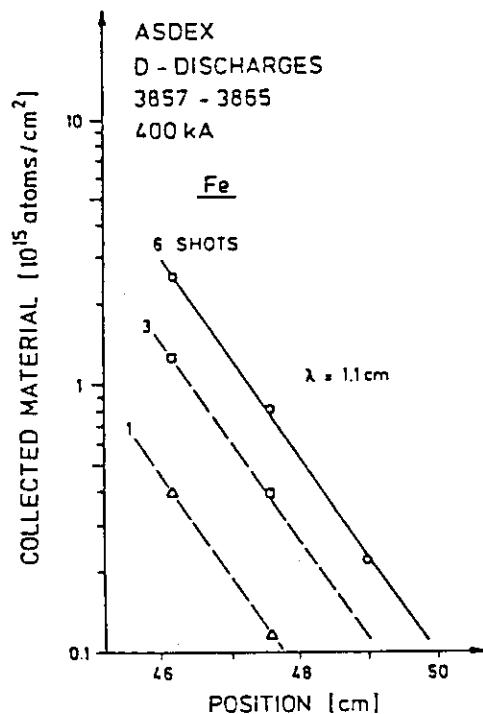
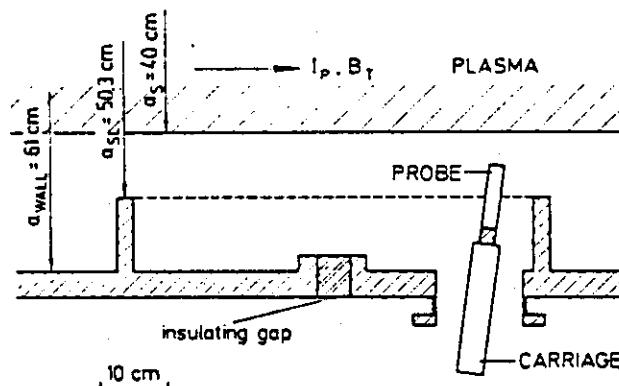


Fig. 49 Radial distribution of the deposited iron for various number of shots (36)



Probe exposure geometry in the ASDEX edge plasma.

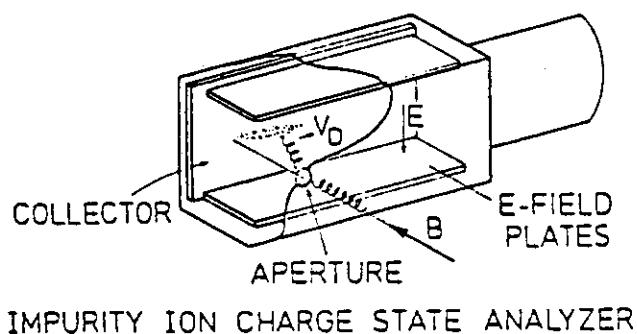


Fig. 50 Schematic of $E \times B$ analyser for impurity ions 39)

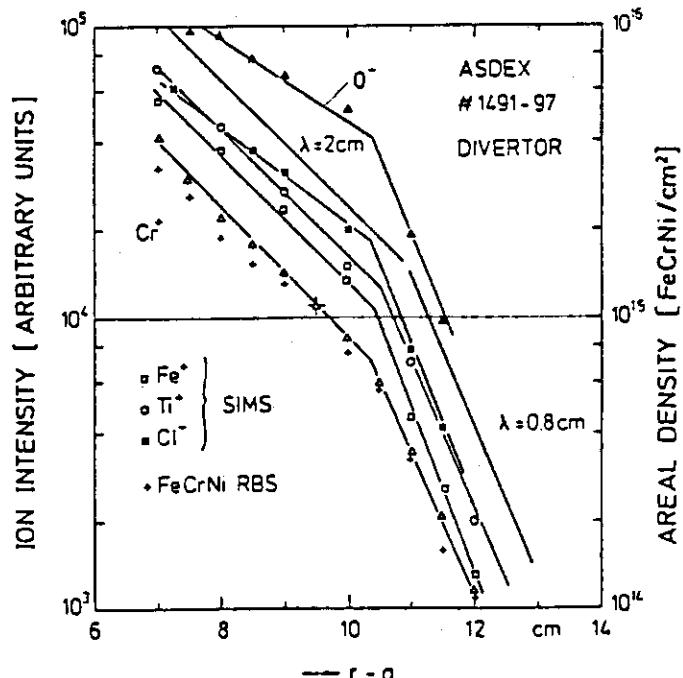


Fig. 51 Radial profiles of impurity fluxes measured by SIMS and RBS. The total exposure time was 11.9 s 39)

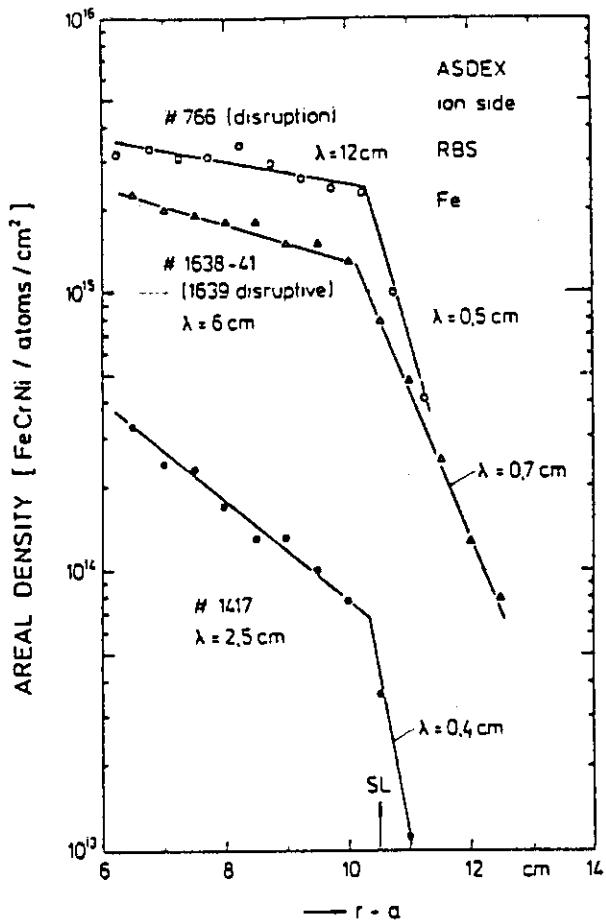


Fig. 52 Radial profiles of impurity fluxes after a disruption (#766): after a total exposure time of 5.7 s including one disruption (#1638-4) and for a single shot of 1.5 s duration (Divertor discharges) 39)

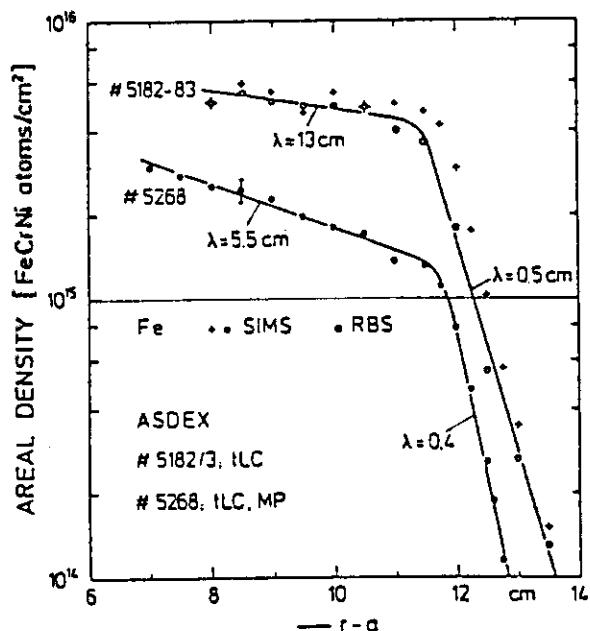


Fig. 53 Radial profiles of the impurity flux for two discharges (#5182-3) with a toroidal graphite limiter (3.8 s) and for one discharge with a multipole field added (1.7 s) 39)

COLLECTOR GEOMETRY AT W VII A

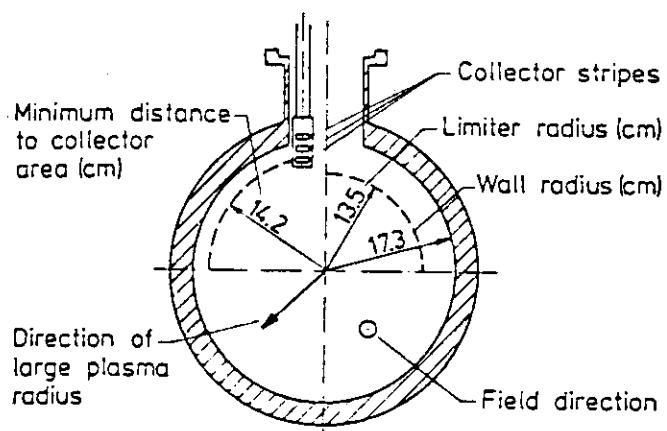


Fig. 54 Schematic of collector geometry 41)

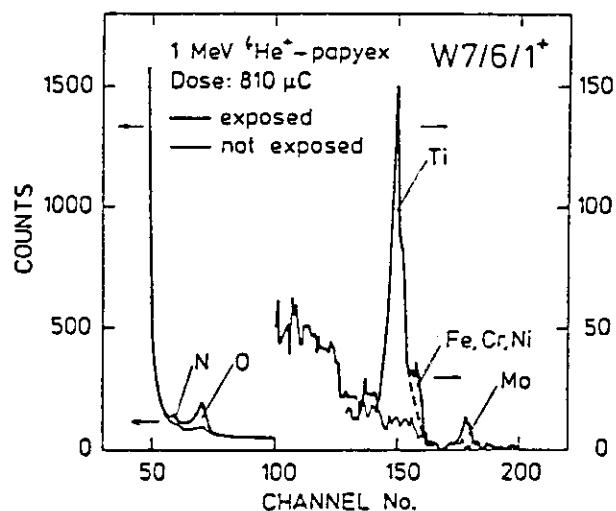


Fig. 55 Spectrum from a papyex stripe with an area exposed for 77 discharges in W VII A and an unexposed area 41)

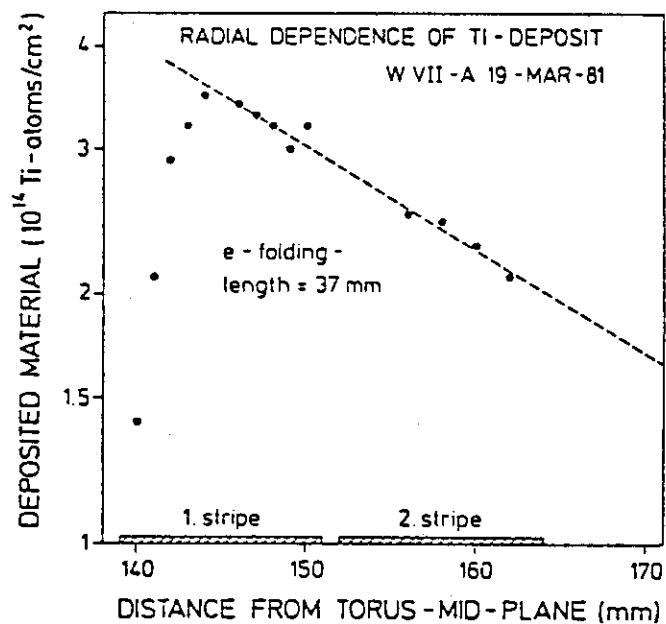


Fig. 56 The radial dependence of Ti-deposit for the 77 discharges. ⁴¹⁾

3.4 U S S R

3.4.1 T - 10

T - 10 につけられたWASA (Wall Analysis by SIMS and AES) の場所で Al プローブによって Chicherov らが時間分解の不純物分析を行った⁴²⁾。約 800 ms までに O, Fe, Cr, Ni を検出し, 10 ~ 100 eV を仮定して, $n_O = 0.7 \sim 2.2 \times 10^9$, $n_{Fe} = 0.4 \sim 1.3 \times 10^9$, $n_{Ni} = 1.1 \sim 3.5 \times 10^9$, $n_{Cr} = 0.08 \sim 0.25 \times 10^9 / \text{cm}^3$ の値となった。

また東ドイツ Hildebrandt らは T - 10 に LiH と KCl のペレットを入射した時, その入射と反対側にある WASA で分析を行い, 不純物イオンの閉じ込め時間を調べている⁴³⁾。得られた閉じ込め時間 τ_p は X 線測定からの値と類似であった。例示すると $I_p = 237 \text{ kA}$, $\bar{n}_e = 3 \times 10^{13} / \text{cm}^3$, $B_T = 2.5 \text{ T}$, $r_p = 37 \text{ cm}$, $q = 4.2$, LiH に対して $\tau_p = 150 \text{ ms}$, また, 366 kA, $4.8 \times 10^{13} / \text{cm}^3$, 2.5 T, 34 cm, $q = 1.8$, KCl に対して 130 ms であった。

3.5 F R A N C E

3.5.1 T F R

初期に於いては, TFR グループは分光, X 線などの方法で 400 kA, 60 kG の放電での不純物の生成の測定を始めている。その後, TFR - 400 と 600 については Garching の IPP の研究者の協力のもとに, 表面プローブにより不純物測定が開始されている。

Behrisch らは, SANDIA の Blewer と協力して TFR - 400 の 2 年間の運転停止後の SS ライナーから 50 個のサンプルを取り, 2.5 MeV の陽子で RBS 分析を行い, リミターに用いられたことのある元素を検出している⁴⁴⁾。この RBS のスペクトルの 1 例を Fig. 57 に, また周壁に沿う不純物原子の分布を Fig. 58 に示した。これは数少ない興味ある例と思われる。リミターのイオン側に於いて, 2 個のトロイダルコイルの中間位置の試料からより多くの不純物が検出された。しかし, 分布のトロイダル方向の対称性は見いだされていない。

更に, Staudenmaier らは, TFR - 400 と 600 に於いて, QWAASS により in-situ の不純物測定を行った³⁸⁾。リミターから壁へのカーボンプローブの位置の変化に伴い, Mo の量は指数関数的に減少していくが, このことの説明としては, deposition と erosion の 2 つのプロセスが働いており, erosion が deposition に較べて壁方向に早く減衰していくと考えられる。減衰長としては Mo で 0.5 cm となる。これは, リミタとプラズマが磁場に平行な熱の流れと直角方向へのボーム拡散にもとづくとするモデルで説明できる。エッジの温度を 10 eV と仮定して, この値はよく説明できる。Cr, Ni の測定値を Fig. 59 に示す。

また, Staudenmaier らは⁴⁵⁾ TFR - 600 の QWAASS の挿入機構を使って, E × B アナライザーを用いて, Si により粒子のエネルギー測定を行い, 理論解析と比較した。使用された 2 組のプローブを Fig. 60 に示す。磁場に沿って流れ込んでくる粒子はラーマー運動のため, 磁場に直交して開けた特定の直径の穴に対してはエネルギーにより定まる透過率を持つ。この透過率は理論的に導かれ, Fig. 61, 62 に円孔の直径を 0.3 cm, $B = 4 \text{ T}$ とした時のその計算の透過率が, それぞれ, 円孔に中心線の距離 r と温度 kT を横軸として与えられている。Fig. 63 に TFR で

0.3 mmのアパーチャーより測定されたサンプル上の水平方向の不純物イオンの分布と計算値の比較を示した。よい一致が得られている。この方法で同じ T F R の同種の放電で測定された D イオン温度はイオン側で 200 eV, 保持量からした 50 ~ 90 eV と異なった。重イオン不純物については、その荷電状態がわからないため、はっきりしないが、Ni のコロナ平衡に対する荷電分布率からみると、57% Ni⁵⁺, 35% Ni⁶⁺, 8% Ni⁴⁺ であり、重水素と不純物イオンが同じ温度となると、Ni については $Z = 4 \sim 5$ として $T_e = 300 \text{ eV}$ となり C については $Z = 2 \sim 3$ となる。

Staudenmaier らは T F R - 600 の重水素の温度とフラックスの測定を発表している⁴⁶⁾。ここでは、Q W A A S S により、リミタの陰の測定を行っている。R = 98 cm, r = 26 cm で a = 26 cm, リミターはインコネル 625 である。Taylor 型放電洗浄により $Z_{\text{eff}} = 1 \sim 2$ となる。トカマク放電は $I_p = 180 \sim 220 \text{ kA}$, $B = 4 \text{ T}$, 100 ~ 120 ms の間つき $\bar{n}_e = 4 \times 10^{13} / \text{cm}^3$, $T_e = 1200 \text{ eV}$, $T_i = 400 \text{ eV}$ である。Q W A A S S の位置は Fig. 64 に示した。プローブは良く磨いた Si の上に、120 mm のカーボンを着けたもの (C / Si) である。D プラズマにさらした後、He の N R A と R B S で測定した。保持された D の量を Fig. 65, 66 に示した。プラズマに近い所では、イオン側より電子側での D のトラップは少ない。この結果は P L T¹⁰⁾ のものと一致している。しかし、壁近くでは反転している。磁場に直角に置いたプローブに入るイオンフラックス Γ は

$$\Gamma_i(t) = n_i(t) \left(\frac{kT_i + kZT_e}{2\pi m_i} \right)^{1/2}$$

で与えられる。通常水素プラズマでは $Z = 1$ で S O L では $T_e < T_i$ である。従って、入射フルエンスは

$$\Phi_{I,i} = \int_0^{t_D} \Gamma_i(t) dt = \bar{\Gamma}_i t_D$$

しかし保持量 $\Phi_{T,i}$ は入射角 θ , エネルギー E と $\Phi_{I,i}$ 自体に依存する。300°C 以下のこの例では温度への依存は無い。

$$\therefore \Phi_{T,i} = g(\Phi_{I,i}, E, \theta)$$

である。関数 g は後の報告に述べるが、理論と実験の比較がなされており、その決定には 19), 10), 47), 20) が有用である。ここでは計算と実験の比較を Fig. 67, 68 に示した。マックスウェル分布に対する Fig. 68 の計算と実験の比較より

$$d\Gamma(E) = \Gamma_0 \frac{1}{kT} \exp \left\{ -\frac{E}{kT} \right\} dE, \quad \Gamma_0 = n \left(\frac{kT_i}{2\pi m} \right)^{1/2}$$

文献 47) の Table - 1 では Case B は cosine 分布に対し

$$d\Gamma(E, \theta) = \Gamma_0 \frac{2E}{(kT)^2} \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \sin \theta \cos \theta d\theta dE$$

となる。求められたプラズマのパラメータは Table 15 にある。

Table 15 Plasma edge parameter of TFR 600 for several radial positions evaluated with different model. As to the models A, B, C, see the caption of Fig. 67 46)

r (cm)	20.1	22.1	23.6	
$\frac{\Gamma_i}{\Gamma_i}$ ($10^{17} \text{ D} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.2	0.7	0.42	A
	0.75	0.5	0.3	B
	1.7	1.5	-	C
Mean energy $k\bar{T}_i(\text{eV})$	50 ± 10	30 ± 10	20 ± 5	A
	90 ± 10	50 ± 10	30 ± 10	B
	60 ± 10	30 ± 10	-	C
Ion density n_i ($10^{10} \text{ D} \cdot \text{cm}^{-3}$)	6.0	4.6	3.4	A
	2.8	2.5	2.0	B
	8	10	-	C

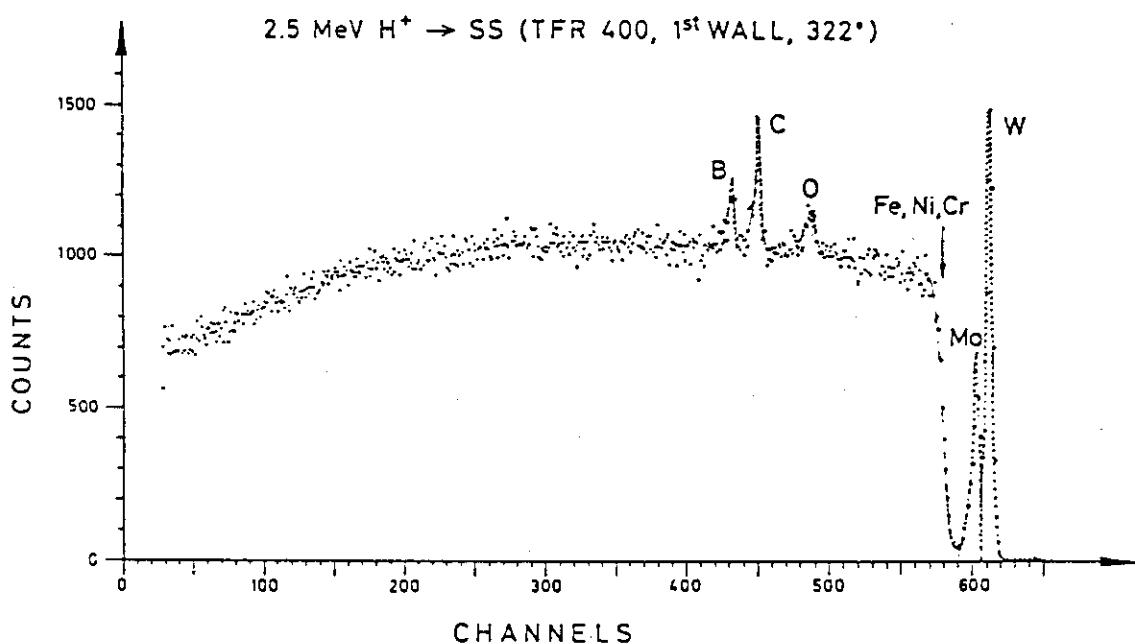


Fig. 57 Proton elastic backscattering (PES) spectrum from a wall sample of TFR (at 320 deg) as obtained on a multichannel analyser. Increasing channel numbers correspond to increasing energy. For Fe, Ni, Cr, Mo and W the Rutherford cross section applies, while for B, C and O the cross section is enhanced by a (p, p)-reaction 44)

POSITION OF IMPURITIES ON THE 1st WALL
OF 'TFR 400' (OUTER PERIPHERY)

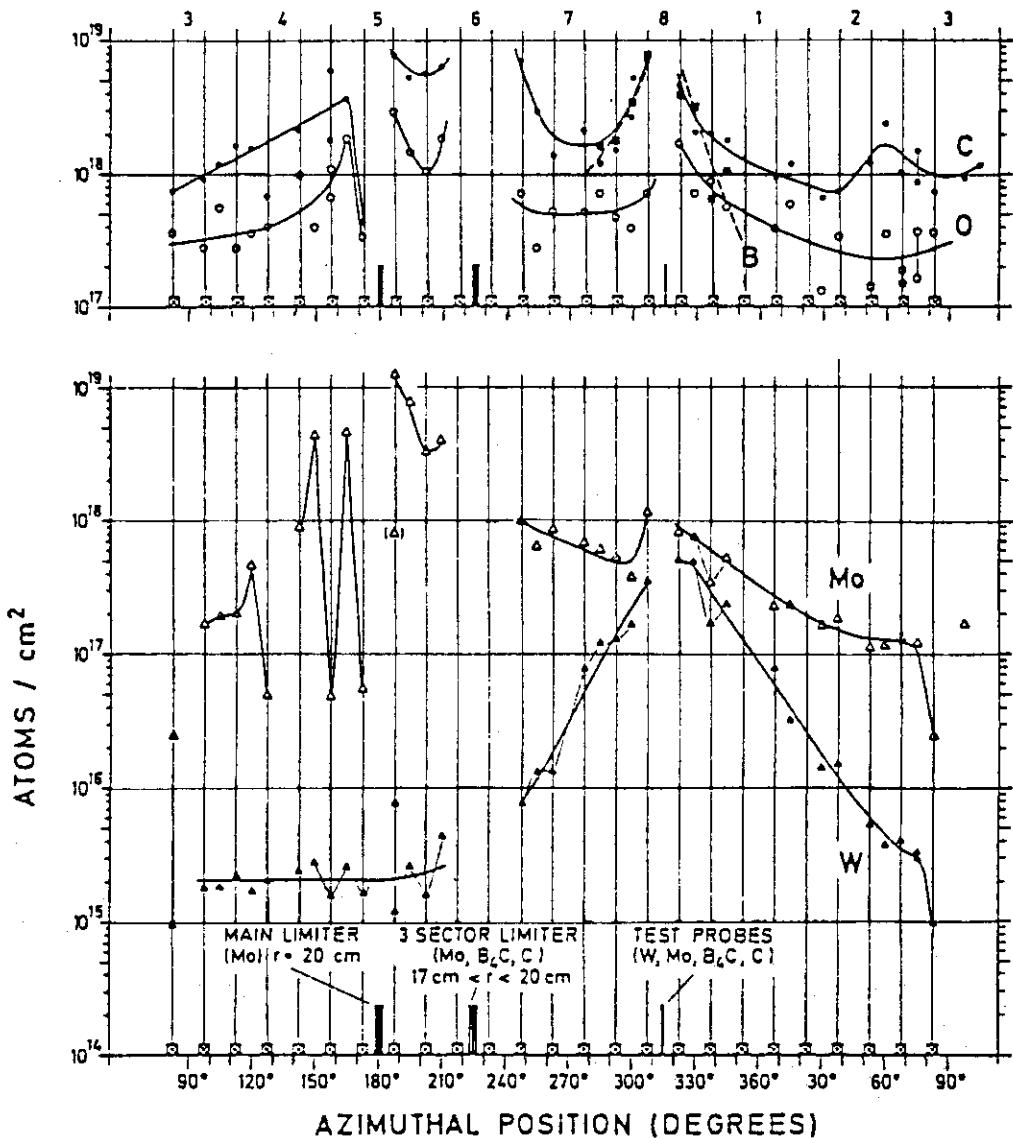


Fig. 58 Spatial distribution of different deposits on the outer circumference of TFR 400. The sector numbers of TFR are indicated on the top of the figure, while on the bottom the azimuthal position in degrees is shown. The position of the toroidal field coils and limiters and probes is also indicated 44)

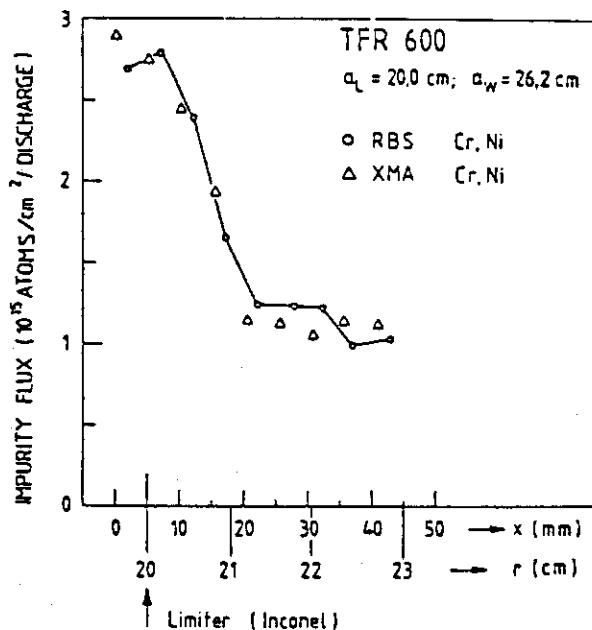


Fig. 59 Radial distribution on a 50 mm long sample after 15 discharges in TFR 600 analysed with Rutherford back-scattering (RBS) and X-ray microanalysis (XMA). The distance along the sample, x , and the corresponding radial distance are shown 38)

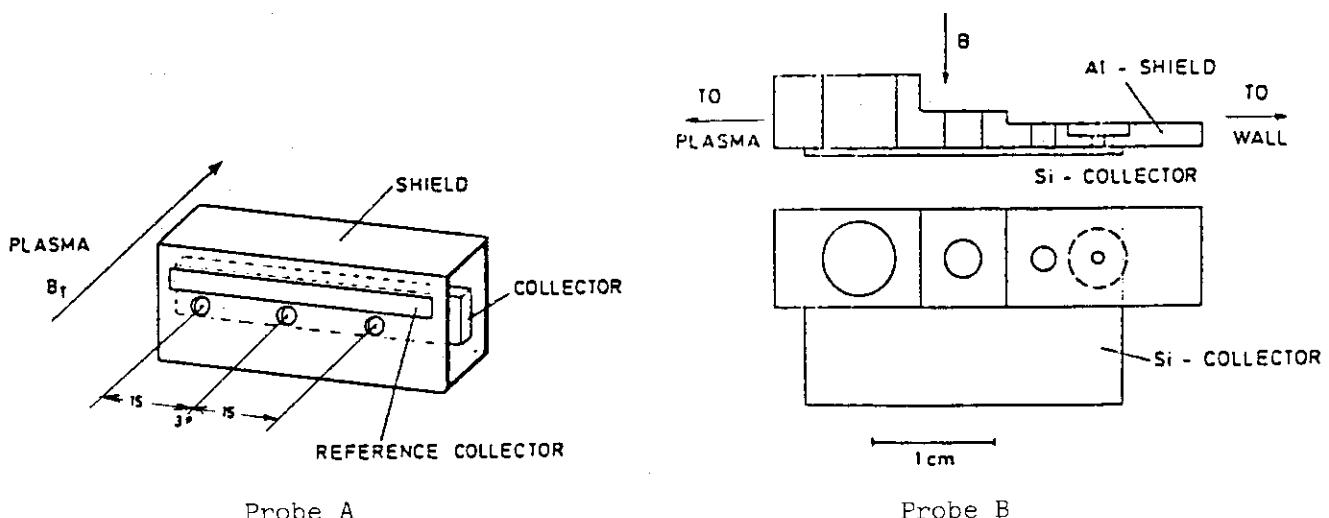


Fig. 60 Shield and collector geometry of probe A (above) and probe B (below) 45)

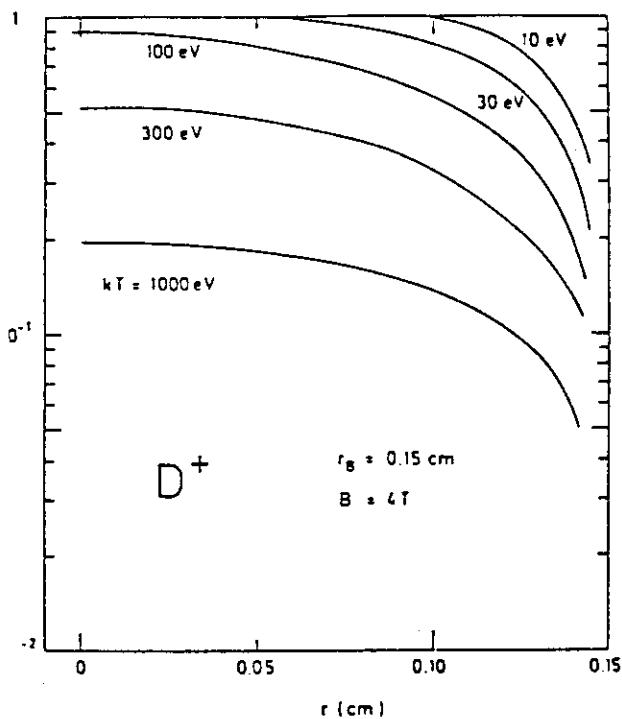


Fig. 61 Calculated ion flux transmission, $T(r, kT) = \Gamma(r, kT)/\Gamma_0$ of an aperture of 0.3 cm diameter in a magnetic field of 4 T for D^+ ions of five different temperatures 45)

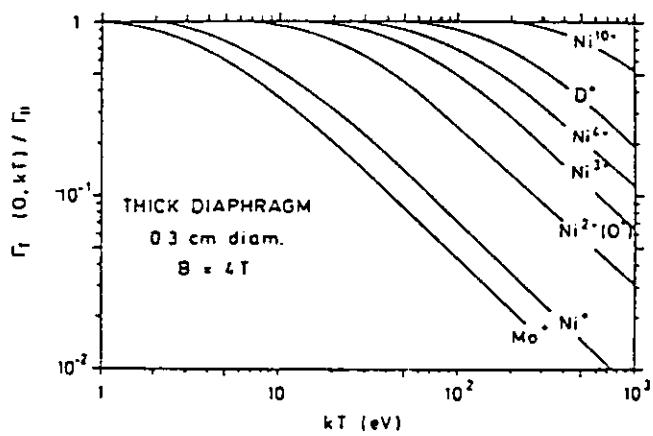


Fig. 62 Calculated ion flux transmission $T(0, kT)$ as a function of ion temperature for different ion species. Diameter of aperture: 0.3 cm, $B = 4$ T 45)

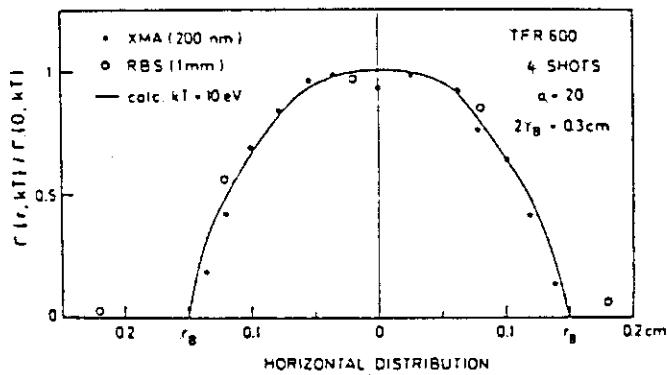


Fig. 63 Distribution of the ion flux transmission, $\Gamma(r, kT)$, of an aperture (0.3 cm diam.) in a magnetic field of $B(R_0 + a_L) = 3.5$ T. Comparison of experimental data for metals (Inconel) and calculation. Horizontal distribution indicates that it was measured on a line which is parallel to the horizontal plane of TFR. A line scan perpendicular to the one shown is broadened due to the varying poloidal field 45°

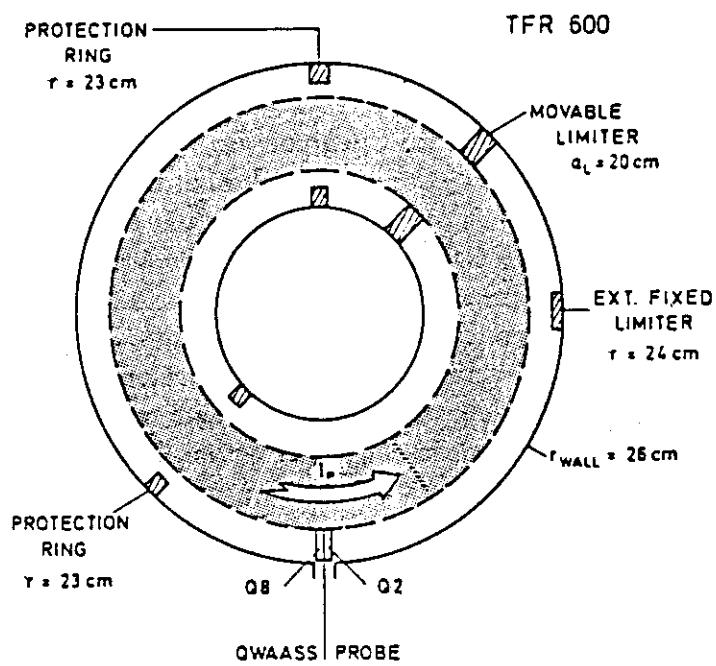


Fig. 64 Schematic view of horizontal cross-section of TFR 600 showing the location of the probe with respect to the limiters and other structures 46)

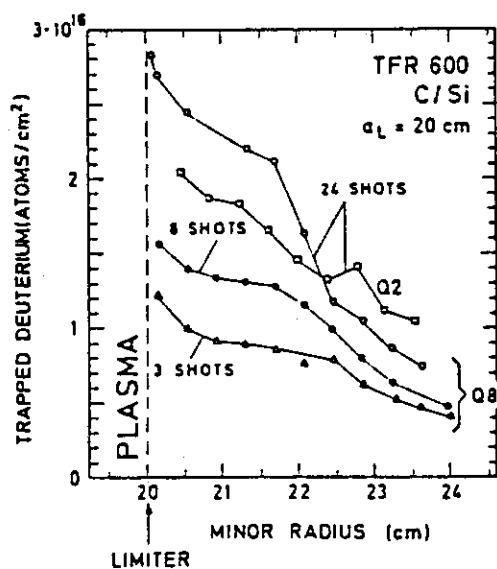


Fig. 65 Radial profile of deuterium trapped in a carbon sample exposed in the limiter shadow region (electron side Q2, ion side Q8) ⁴⁶⁾

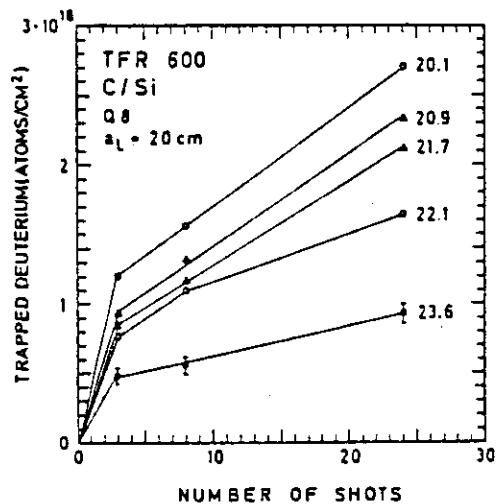


Fig. 66 Deuterium trapped in carbon as a function of the number of discharges (ion side). The data are taken from five different minor radii indicating the distance from the plasma edge, $a = 20$ cm ⁴⁶⁾

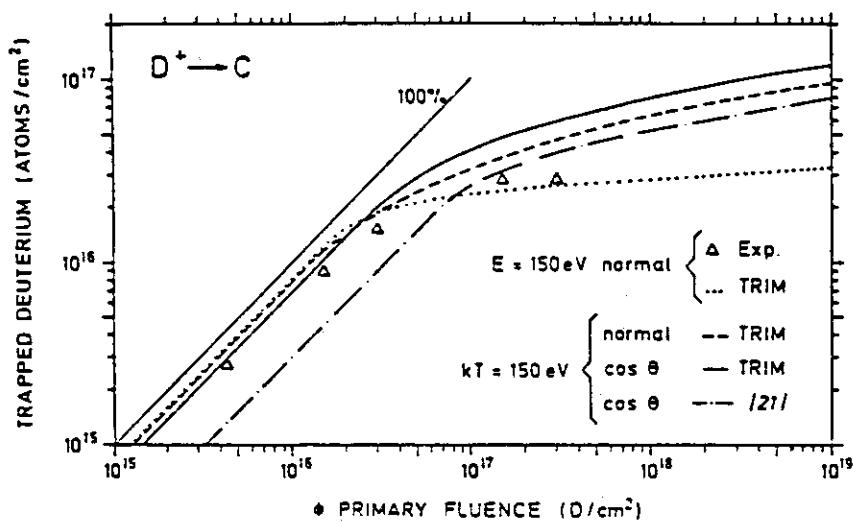


Fig. 67 Calculated trapping curves for 150 eV deuterium implanted into carbon: single energy at normal incidence (TRIM), --- Maxwellian energy distribution at normal incidence (case A; TRIM), — Maxwellian energy distribution and cosine distribution of the incident flux (case A; TRIM), - - same for a transport equation (case C). For the first case also experimental values are introduced ⁴⁶⁾

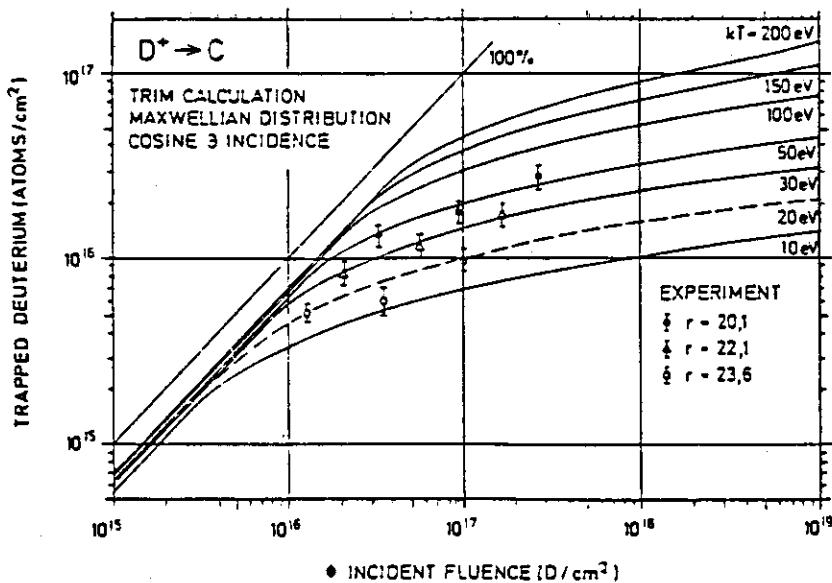


Fig. 68 Calculated trapping curves for deuterium in carbon for a Maxwellian energy distribution and a cosine distribution of the incident flux (case A; TRIM) at six different temperatures. The experimental values are introduced with a best fit to the shape of the curves ⁴⁶⁾

3.6 UK

3.6.1 DITE

多くの研究は前と同様に H, D 及び不純物に関する粒子束とその時間分解についてのものである。プローブとしては主にカーボンを使用し、分析法は D-³He, H-⁷Li, H-¹⁵N, RBS などを用いている。

McCracken らは⁴⁸⁾回転式カーボン円板を用い、時間分解された金属不純物の沈着量を RBS により分析した。DITE トカマクの構成は⁴⁹⁾ダイバータ方式で $B = 2.8 \text{ T}$, $R = 1.17 \text{ m}$, $r = 0.3 \text{ m}$, SS の真空容器で、 850°C までペークし、ベース圧力は $2 \times 10^{-8} \text{ Torr}$ である。Mo のリミターを有している。Fig. 69 にプローブの挿入方法を示した。分析には RBS 法を用い、Si に Bi⁺ をインプランツした標準試料で較正した後、3.5 MeV の ¹⁵N により行った。3 種の異なった放電(a)金属不純物から放射損失の大きい放電 $\tau_E = 3 \text{ ms}$, (b)低 Z 不純物の多い場合、2% の Ne を水素ガス中に加えて放電させる。 $\tau_E = 6 \text{ ms}$, (c)金属不純物は少ない高密度放電、真空壁は Ti コーティング、この時 $\tau_E = 20 \text{ ms}$ となった。この場合の結果のみを Fig. 70 に示す。放電の初期に不純物はピークとして放出される。Mo, SS のみでなく Ti が多い。またプラズマエッヂからの距離についての情報も得られており、(c)の場合の分布を Fig. 71 に示した。

McCracken らは回転式円板及びシリンドラーのカーボンコレクターを用い、AES, RBS, NRA, PIXE で DITE のダイバータの有無、及び 1 MWまでの NBI の有無に応じた測定を行った⁵⁰⁾。このとき DITE では 2 個の固定のチタンのポロイダルリミター ($r = 0.26 \text{ m}$) 及び、2 個の ATJ グラファイトの可動リミターが備えられている。約 100 放電までにさらした後、リミターそのものを分析した結果、C 上では Ti が $1.5 \pm 0.5 \times 10^{17} / \text{cm}^2$ 、相対値は Ti : Fe : Cu : Mo : Pb = 100 : 20 ~ 30 : 5 : 0.6 : 0.02 であった。PIXE で調べた結果では S, Cl, K, Ca, Cr, Ni などが 1% 程度存在した。重要な点は、リミター上に Fe が多いことである。これは壁にアークやディスラップションがあったためと思われる。D については 50 ~ 80 eV、また Fe や Ti は 4 価イオンであることが、エネルギー選別用の有孔板を用いたコレクターの分析で調べられている。この研究の主眼は不純物フラックスの時間分解にあるが、ガスパフと NBI の効果が Ti のフラックスにどう影響するかが調べられた。またプラズマディスラップションの効果は強いフラックスの増加として現れた。再現性は悪く効果がいつもこのように得られるとは限らないが、プラズマ密度の時間変化が不純物フラックスに大きい影響を与えることが明らかである。

H 及び D の壁中の濃度については、Sofield はトーラスの小円周方向に 90 度ずつ回転した場所で、H の濃度を ¹⁵N - H の RNRRA で測定した⁵¹⁾。このサンプルは SS で真空壁のライナーのステンレス（ベローシールドと書かれているが）を採取し、6 ~ 8 か月間保存した後に RNR 分析したものである。Fig. 72, 73 にその結果を示す。Fig. 72 ではプロファイルのための ¹⁵N の入射エネルギーに対するガンマ線の収量がサンプルの採取場所に対して示されている。平均 H 濃度はトーラス軸 90 度での信号が最大であったが、ここにはアークの跡が有った。また測定のため 6 ~ 8 か月経た間の拡散効果が存在することも考察されている。トーラス内壁の総面積を $2 \times 10^5 \text{ cm}^2$ として積分すると、D の材料中の総量は 30 mg となり、大型装置での三重水素のインベントリイを見積もる上で有用である。

この研究と関連して, Goodall らは, DITE トカマクでの単極アークの状況を調べた⁵²⁾。詳細は記さないが, アークテストのためのプローブリミタ上のアークによるトラックを Fig. 74, 75 の写真により, またそのトーラス内での位置を示す Fig. 76 をあげておく。

その後 Erents らは, 前にも述べた回転式カーボン板プローブを用いて NBI の時の D イオン, D 原子の保持について実験した⁵³⁾。分析は ^3He の NRA の外に, レーザー光でプローブ表面をアブレートし, それを 4 重極質量分析する方法を用いた。レーザーには Nd-YAG レーザを用い, 3 ns のパルスで $3 \text{ MW}/\text{mm}^2$ の出力密度で 3 mm スポットにフォーカスし, 1 回当たり 1000 \AA 以上の深さをアブレートした。放出されたガスは主に HD 分子の形であった。Fig. 77 にはダイバータ放電時の H, D のカーボンプローブへの捕捉粒子を, 2 種類 (H + D, 及び Hのみ) の放電に対し, 半径方向の変化を調べたものである。ダイバータにより定まるセパラトリックスは, 横軸のスケールでは 18 cm の場所であり, Ti の固定リミタは 26 cm の場所である。指数関数減衰でその $1/e$ の距離 λ が導かれた。しかし, いつもこの結果が得られるとは限らない。多くの放電を重ねたプローブの測定では Fig. 78 の結果が得られた。この飽和から 47), 49) の文献の手法によって, 入射フルエンスと平均エネルギーが求められた。なお Fig. 79 に時間分解されたレーザ法と, NRA 法の結果を示しておく。Fig. 77 に於けるように $\lambda \sim 1 \text{ cm}$ が種々のプラズマ状態で求められている。2 段の傾斜はプラトーティー部分はセパラトリックスからリミタまでのプラズマで, プラズマ密度が高いほど傾斜は緩くなる。また, Fig. 80 の不連続なステップは整数の q 値に対する磁気島 (Magnetic island) の形成によると考えられそうであるが, $q = 5, 6$ の磁気面の位置と較べて, この直接の検証にはならなかった。この原因はまだよくわかっていない。また, Fig. 78 でマックスウェル分布をとることには問題がある。その理由はシースにより加速の歪みが生じるためである。D フラックスは $1 \sim 5 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ で, その平均エネルギーは約 50 eV 程度で, これがリミタで不純物をスパッタし, $4 \times 10^9 \text{ a/cm}^3$ の不純物濃度をプラズマ中に発生している。

3.7 JIPP-T-IIほか

プラズマ研究所の JIPP-T-II への粒子フラックス測定及び不純物分析が行われ, プローブ材料にベリリウムも使用された^{54, 55)}。また, USA の MACROTOR⁵⁶⁾ に対しても表面プローブによる研究がある。

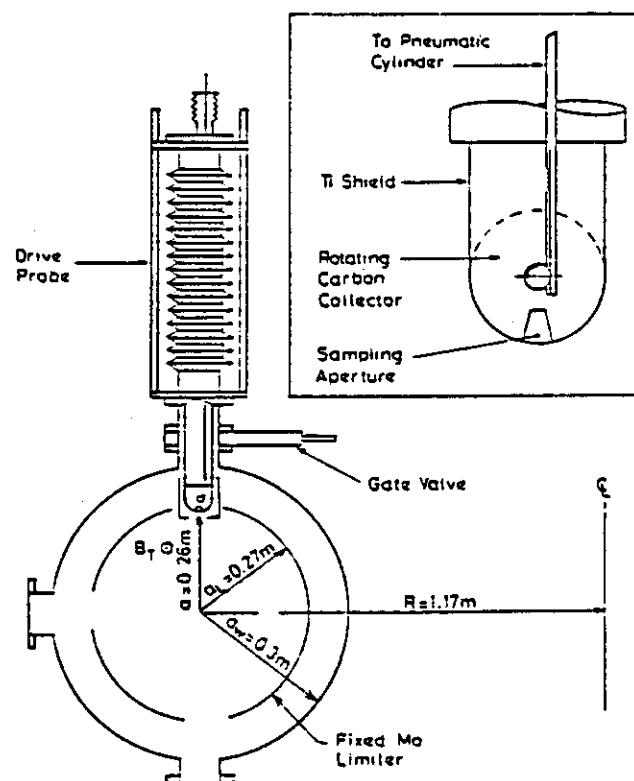


Fig. 69 Schematic of rotating carbon collector showing position in the DITE torus ⁴⁹⁾

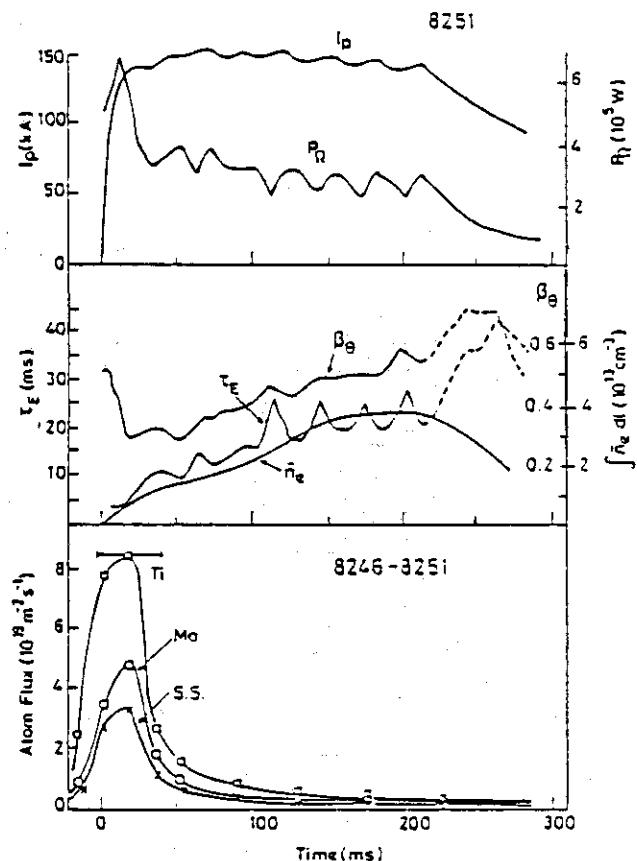


Fig. 70 Metallic flux to the collector disc as a function of time in a gettered discharge. The density is increased with time by continuous gas puffing during the discharge ⁴⁹⁾

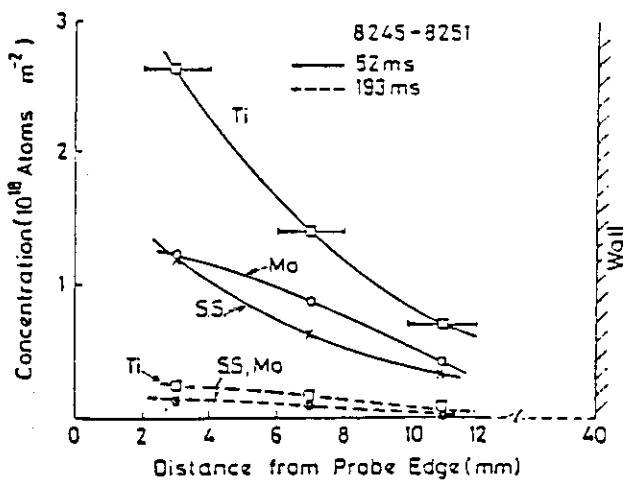


Fig. 71 Surface concentration of metal deposit on carbon collector as a function of radius in the gettered high density discharge at two points in time ⁴⁹⁾

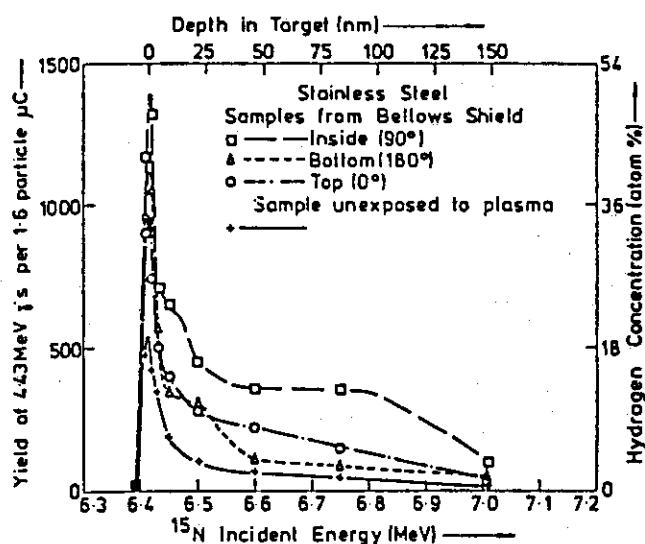


Fig. 72 Yield of 4.43 MeV γ 's from the $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ reaction vs. incident ^{15}N energy for various samples as shown. The depth scale was calculated from dE/dx values estimated from the energy loss tables of Northcliffe and Schilling. The concentration scale was calculated from the measured γ yield from a Kapton target of known H concentration and dE/dx ⁵¹)

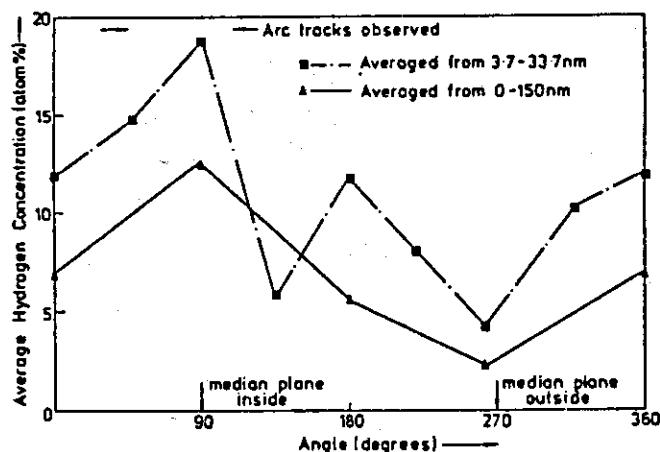


Fig. 73 Average hydrogen concentration from 3.7 to 33.7 mm and for 0-150 mm for samples taken at various angles around the bellows shield. The results for the data averaged over 0-150 mm were not altered relatively if the average excluded the surface peak, i. e. averaged from 3.7 to 150 mm⁵¹)

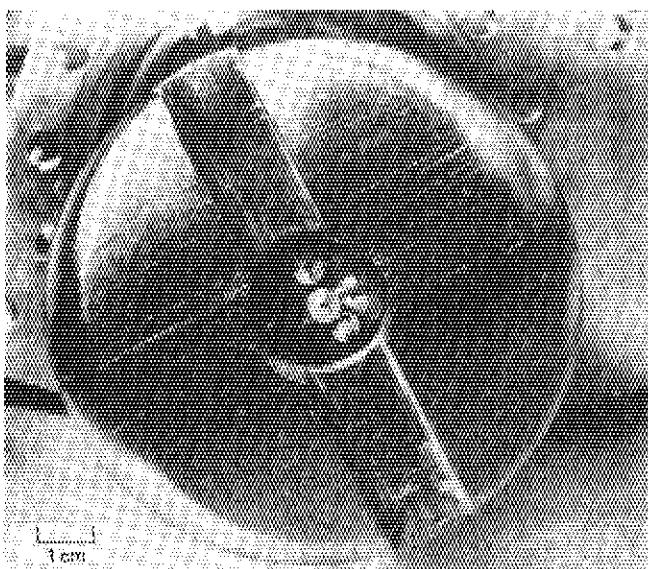


Fig. 74 Linear arc tracks on a
Molybdenum probe limiter 52)

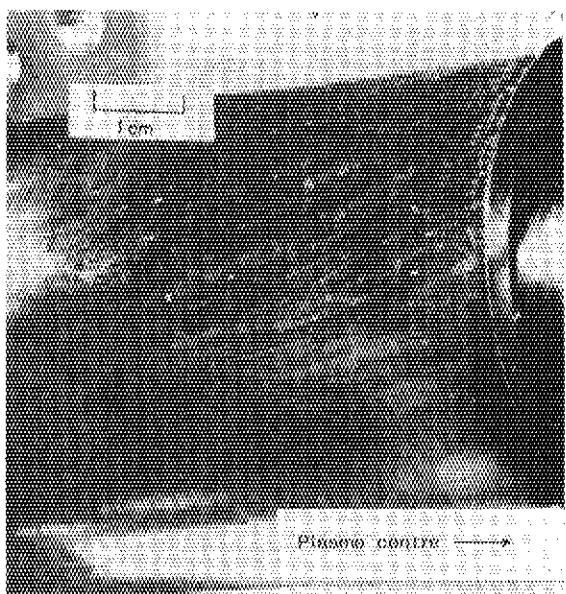


Fig. 75 Arc damage on the probe
limiter support tube 52)

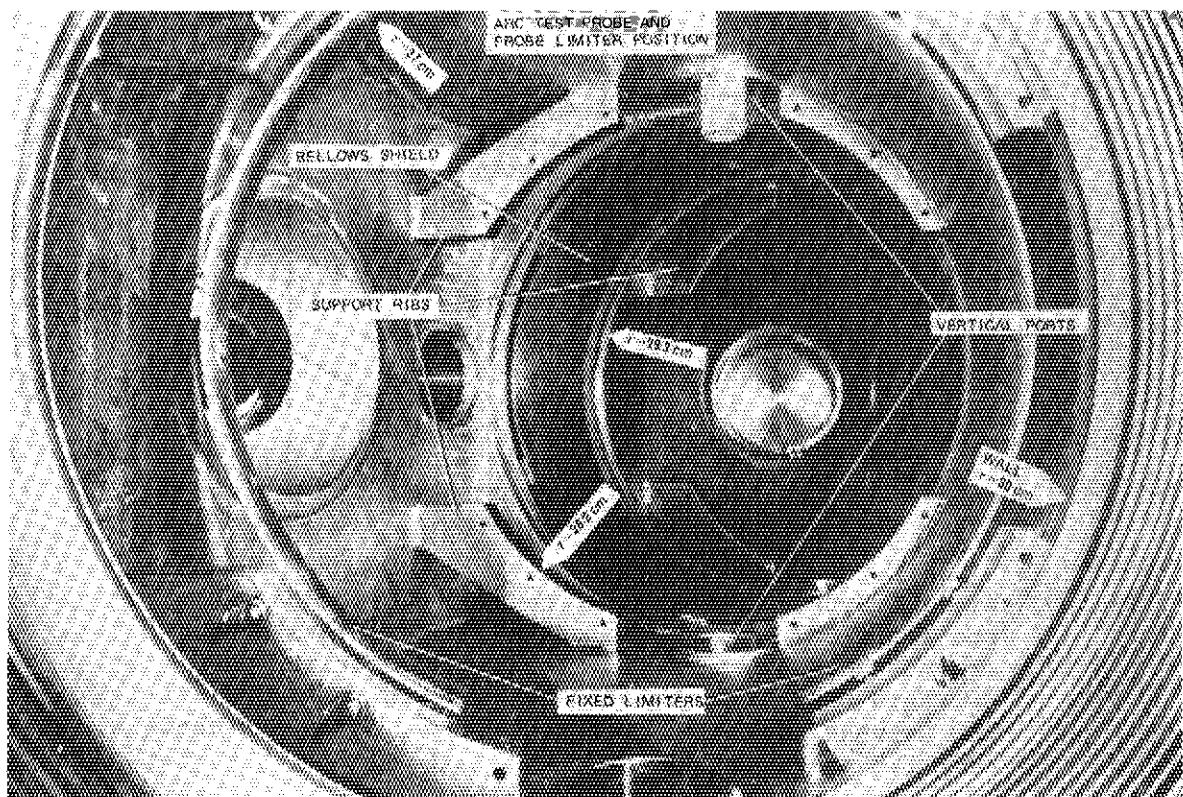


Fig. 76 A cross section of the DITE tokamak 52)

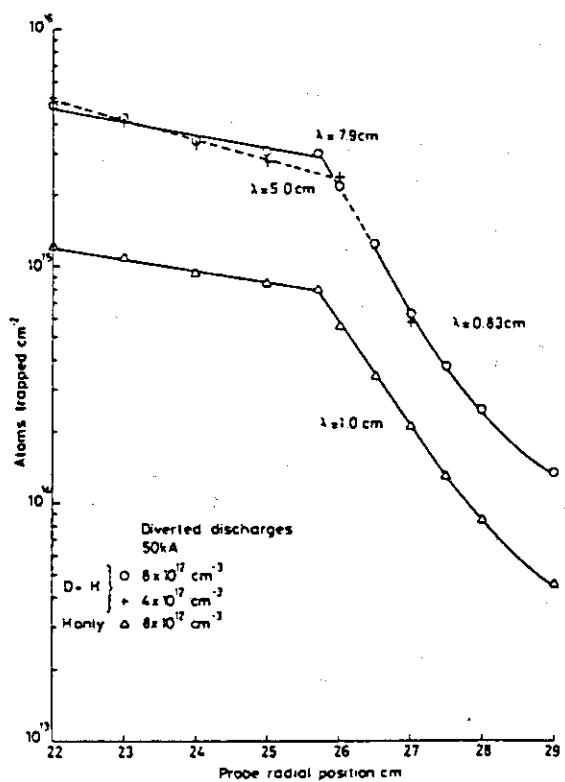


Fig. 77 Radial profiles of the trapped hydrogen and deuterium in a 50 kA diverted discharge 53)

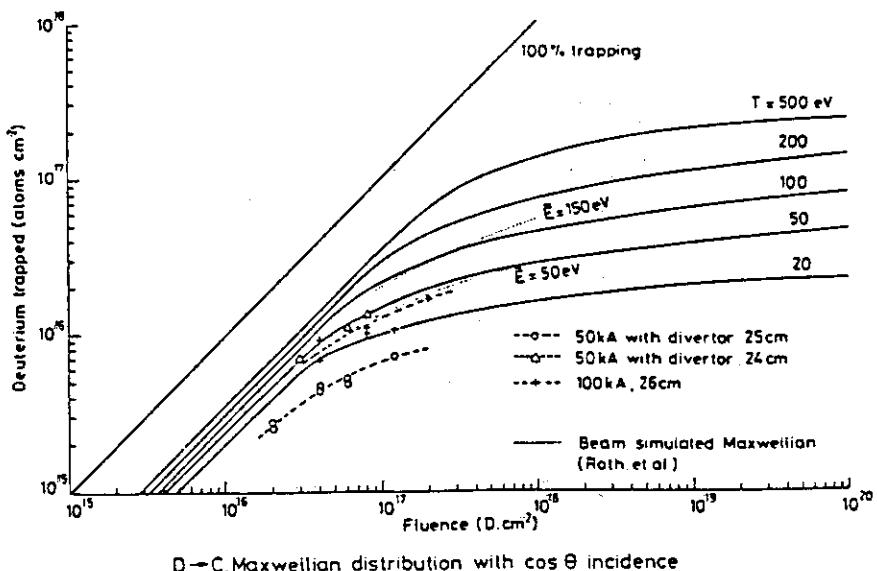


Fig. 78 Comparison of experimental data for saturation of desorption probe as a function of fluence with a theoretical model 53)

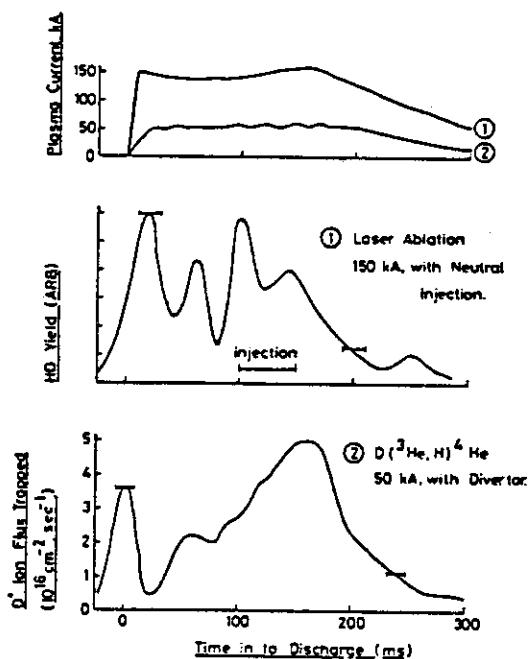


Fig. 79 Time resolved measurements of deuterons trapped in a rotating carbon collector measured by laser ablation and by nuclear reaction analysis 53)

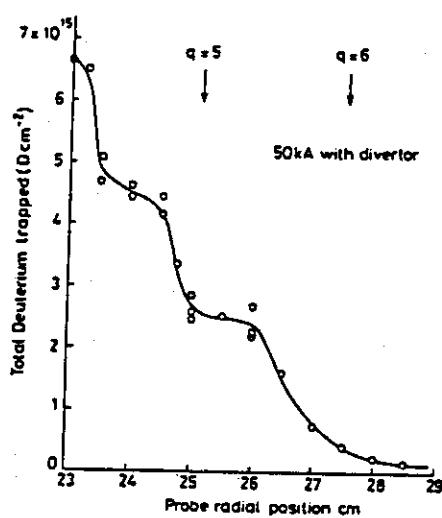


Fig. 80 Radial profile of deuterium trapped in a 50 kA diverted discharge 53)

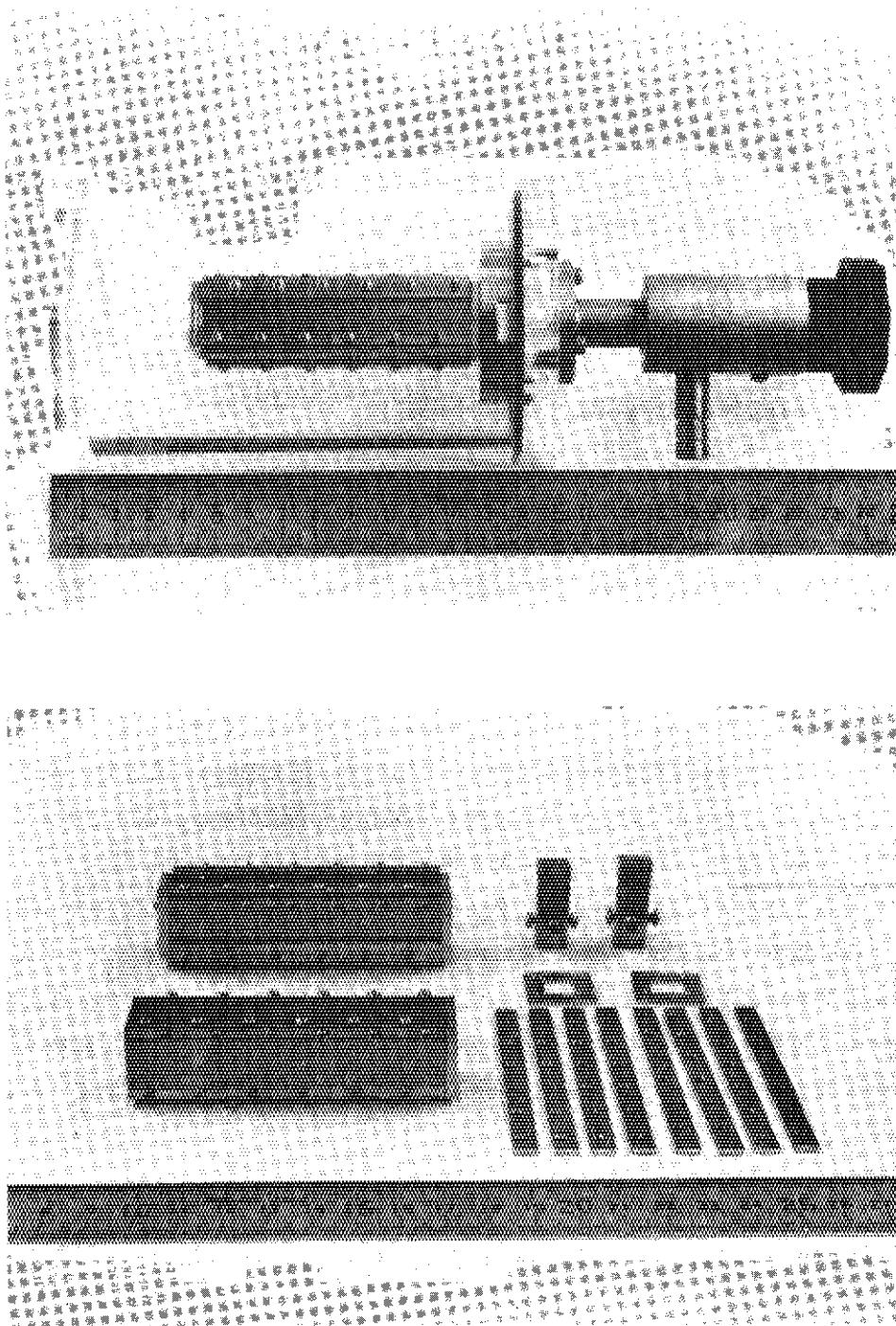


Fig. 81 Photograph of probe holders and vacuum vessel

4. JFT - 2 M

昭和 61 年度から、日本原子力研究所、核融合研究部と著者の研究室との間に協力研究が始まり、JFT - 2 M のプラズマよりの壁への水素の流れを、デポジションプローブにより捕捉し、そのプローブを著者の研究室の小型のタンデム型加速器を用いて分析することにより、水素のリサイクリングに就いての情報を求めることがとなった。

61 年度は、その第 1 回として s-Si プローブを用い、リミターの先端位置から壁方向の距離の関数として H 及び D の保持量を測定した。第 2 回目には、カーボンのプローブも試行し、次年度に行う予定の不純物測定のための予備実験を兼ねた。

s-Si プローブの形状を Fig. 81 に示す。これを JFT - 2 M 装置に、その Surface station の機構を用いてリミターの陰の S O L 領域に挿入し、最大 10 放電まで Table 16 のプラズマにさらした。多くの結果が得られており、すでに整理されているが *、ここではその重要な 1 結果として求められた D / H (原子保持量の比) に就いて簡単に述べる。水素保持量の測定には ^{19}F の弾性反跳検出法 (E R D) を用い、3 ~ 8 MeV の F イオンをサンプル表面に低角度で入射し、反跳した H 及び D 原子のエネルギーを半導体検出器により求めた。このフッ素ビームを用いる E R D の方法は著者の研究室で実績を積み上げてきたもので、従来の He の E R D に較べて感度、分解能とも高く、H と D を 1 つのスペクトル内で分離出来る利点がある。従ってプラズマ照射のようにサンプル量と測定点の多い分析のために極めて有用な手段であった。

求められた D と H のプロファイルより、D / H を求めるとプラズマエッジから半径方向に、壁に近づくに従い減少した。このことは、壁の内部に保持されている H がリサイクルしていることを示し、そのフラックスが推定できた。この結果を Fig. 82, 83 に示した。また、カーボンのプローブについては N 及び F ビームによる R B S を行い、Ti, Fe, Ni, Cr の不純物を検出している。この 1 例を Fig. 84 に示した。以上の研究に就いては他に詳細を述べる予定である。

* 秋山武司：神戸商船大学 昭和 61 年度修士論文、昭和 62 年 1 月。

Table 16-1 JFT-2M operating parameters

probe	S.P.C.-1	S.P.C.-2	S.P.C.-3
material	C	C	C
date	10/15	10/16	10/29
discharge cleaning	T.D.C.	T.D.C.	T.D.C.
working gass	H ₂	D ₂	H ₂
time [min]	6	7	7
P _t [10 ⁻⁸ Torr]	4.9	5.1	3.6
P _{TDC} [10 ⁻⁵ Torr]	8.0	8.0	~
shot No.	—	—	33299~33305
plasma shape	—	—	single-null
null point	—	—	L
working gass	—	—	D ₂
gass puff P _H /(P _H +P _D)	—	—	0.3
I _P [kA]	—	—	230
B _T [T]	—	—	1.17

Table 16-2 JFT-2M operating parameters (continue)

probe	L.P.S.-1	L.P.S.-2	S.P.S.-1	S.P.S.-2
material	Si	Si	Si	Si
date	5/21	10/14	10/15	10/16
shot No.	28594~ 28604	32434~ 32438	32529~ 32533	32658~ 32662
plasma shape	D-shape	single-null	single-null	single-null
working gass	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂
filling pressure ratio $P_D/(P_H+P_D)$	0.8	0.8	0.8	0.8
I _p [kA]	342	300	275	273
B _T [T]	1.07	1.20	1.26	1.27
N.B.I.				
Co-injection [msec]	700~900	—	—	—
counter inj. [msec]	800~900	—	—	—
incident beam	H ⁰	—	—	—
incident energy [keV]	34	—	—	—

Table 16-3 Neutral beam injection operating parameters

shot No.	Co-injection		Counter injection	
	I _n [A]	P _n [kW]	I _n [A]	P _n [kW]
28594	62.4	771	47.0	463
28595	62.1	776	47.1	470
28596	62.2	768	47.1	474
28597	62.6	774	47.5	482
28598	62.3	769	47.9	475
28599	61.9	763	46.9	463
28600	62.4	771	46.9	463
28601	62.9	778	46.9	464
28602	62.4	772	46.9	470
28603	62.6	774	46.9	464

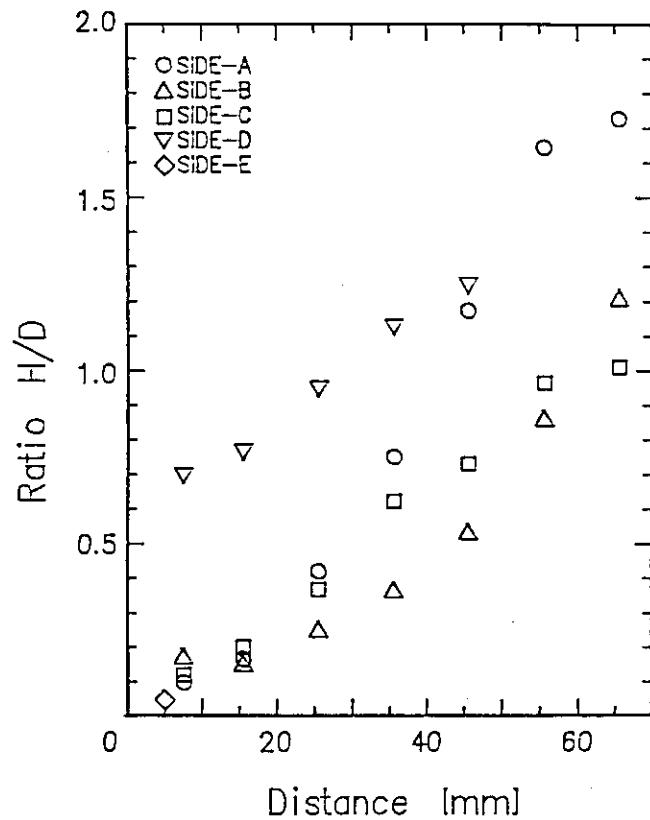


Fig. 82 Dependence of hydrogen-deuteron ratio vs. distance behind the limiter (Measured by L.P.S.-2)

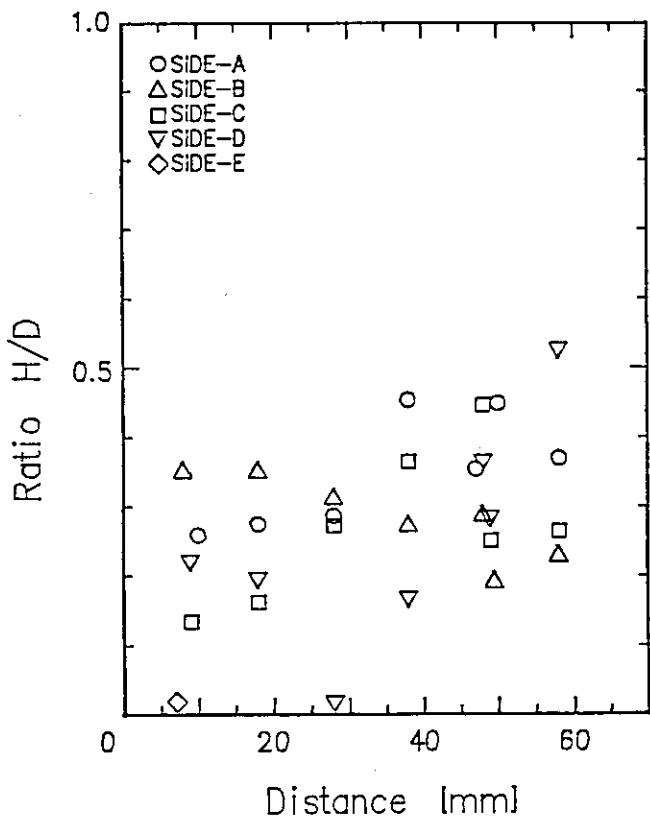


Fig. 83 Dependence of hydrogen-deuteron ratio vs. distance behind the limiter (Measured by L.P.S.-1)

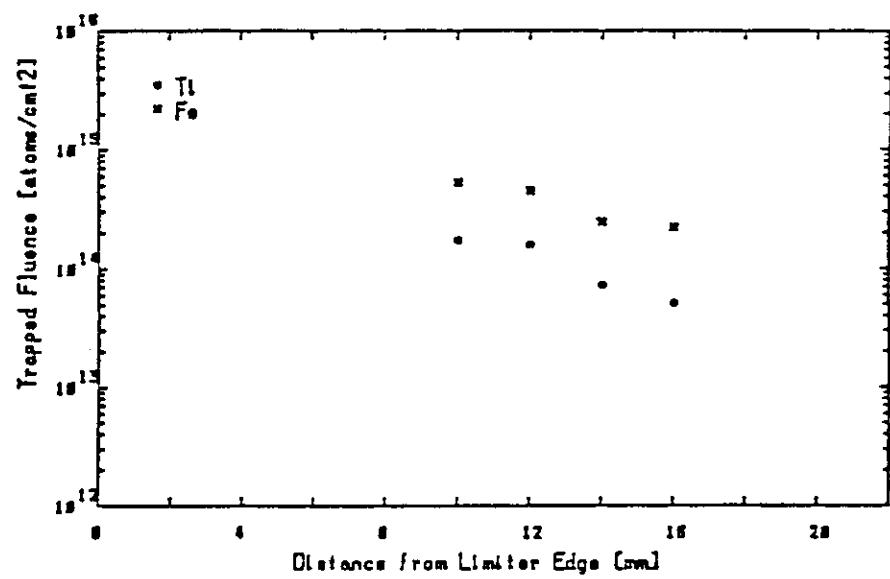


Fig. 84 Trapped fluence of Ti and Fe against the distance from limiter edge

5. あとがき

はじめに述べた本研究の包括する範囲に対して、今年度の調査研究はその前半に留まつたが、その概要を把握することが出来た。多くの方式の表面プローブによる研究が行われ、PWIの機構に関する情報が得られている。この研究の基礎となる問題に就いて今後なお掘り下げる検討を行う予定である。

終わりに調査に協力された神戸商船大学の中島雅博士に感謝する。また、第4章の実験研究に対し尽力された神戸商船大学の北村晃博士、大学院修士学生の秋山武司氏、及び研究室の学部4年生に感謝する。

参 考 文 献

- 1) G. M. McCracken and P.E. Stott:
Plasma-Surface Interaction in Tokamaks,
Nucl. Fusion, 19, pp. 889-981 (1979). (Review paper)
- 2) D. M. Manos and G. M. McCracken:
Probes for Plasma Edge Diagnostics in Magnetic Confinement
Fusion Devices,
"Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion",
ed. by D. E. Post and R. Behrisch, Plenum Press New York
and London, pp. 135-209 (1986).
- 3) R. A. Zehr et al.:
Ion Beam Surface Analysis in Plasma Edge Studies,
Nucl. Sci. Appl., 1, 617-674 (1984).
- 4) J. Böttiger:
A Review on Depth Profiling of Hydrogen and Helium Isotopes
within the Near-Surface Region of Solids by Use of Ion Beams,
J. Nucl. Mater., 78, 161-181 (1978).
- 5) P. Staib:
An EXB Analyser to Study the Particle Fluxes, Energy, and
Charge State in the Scrape-off Layer of Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 93&94, 351-356 (1980).
- 6) P. Staib et al.:
In-situ Impurity Measurements in PDX Edge Plasma,
J. Nucl. Mater., 93&94, 166-170 (1980).
- 7) W. R. Wampler and D. M. Manos:
Plasma Edge Studies Using Carbon Resistance Probes,
J. Vac. Sci. Technol., A1(2), 827-830 (1983).
- 8) H. F. Dylla and S. A. Cohen:
Changes in Surface Conditions with First Plasma in the
Princeton Large Torus (PLT),
J. Nucl. Mater., 63, 487-494 (1976).
- 9) S. A. Cohen et al.:
Long-Term Changes in the Surface Conditions of PLT,
J. Nucl. Mater., 76&77, 459-471 (1978).
- 10) W. R. Wampler et al.:
Hydrogen Isotope Trapping in Materials Exposed in PLT,
J. Nucl. Mater., 85&86, 983-987 (1979).

- 11) S. A. Cohen and H. F. Dylla:
Lower Limits for Parallel Impurity Fluxes in the PLT Plasma,
J. Nucl. Mater., 76&77, 425-430 (1978).
- 12) S. A. Cohen et al.:
Deuterium Ion Fluxes to Probes in the PLT Edge Plasma,
J. Nucl. Mater., 93&94, 109-114 (1980).
- 13) W. R. Wampler et al.:
Probe Measurements of Impurities in the Plasma Boundary of PLT,
J. Nucl. Mater. 93&94, 139-145 (1980).
- 14) W. R. Wampler et al.:
Flux and Energy of Deuterium Incident on a Limiter-Like Probes
in PLT,
J. Nucl. Mater., 102, 298-303 (1981).
- 15) W. R. Wampler et al.:
Deuterium Flux Measurements in the Edge Plasmas of PLT and
PDX during Auxiliary Heating Experiments,
J. Vac. Sci. Technol., 20, 1234-1237 (1982).
- 16) J. Chang et al.:
Deuterium Implantation in First Wall Candidate Materials by
Exposure in the Princeton Large Torus,
J. Nucl. Mater., 111&112, 168-172 (1982).
- 17) R. A. Zuhr et al.:
Time-Resolved Measurements of Impurity Deposition in ISX,
J. Nucl. Mater., 85&86, 979-982 (1979).
- 18) R. A. Zuhr et al.:
Deuterium and Impurity Deposition Probes in the Plasma Edge
of ISX-B,
J. Nucl. Mater., 93&94, 127-132 (1980).
- 19) G. Staudenmaier et al.:
Trapping of Deuterium Implanted in Carbon and Silicon: A
Calibration of Particle-Energy Measurements in the Plasma
Boundary of Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 84, 149-156 (1979).
- 20) S. A. Cohen and G. M. McCracken:
A Model for Hydrogen Isotope Backscattering, Trapping and
Depth Profiles in Carbon and Amorphous Silicon,
J. Nucl. Mater., 84, 157-166 (1979).
- 21) J. B. Roberto et al.:
Surface Erosion in the Plasma-Edge of ISX-B,
J. Nucl. Mater., 93&94, 146-149 (1980).
- 22) R. A. Zuhr et al.:
Effects of Neutral Beam Injection and Gas Puffing on Deuterium
and Impurity Levels in the Scrape-off Layer of ISX-B,
J. Nucl. Mater., 103&104, 315-320 (1981).

- 23) S. P. Withrow et al.:
Use of Damage Probes in Silicon as a Measure of Plasma Particles in Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 98, 231-234 (1981).
- 24) R. A. Zuhrl et al.:
Summary Abstract: Deposition Probe Measurements of Impurity and Plasma Fluxes near the Wall in ISX-B,
J. Vac. Sci. Technol., 20, 1244-1245 (1982).
- 25) J. B. Roberto et al.:
Plasma Edge Studies in ISX-B and EBT-S Using Surface Probes and Laser-Induced Fluorescence,
J. Vac. Sci. Technol., A1(2), 929-932 (1983).
- 26) B. Schweer et al.:
Measurement of the Density and Velocity Distribution of Neutral Fe in ISX-B by Laser Fluorescence Spectroscopy,
J. Nucl. Mater., 93&94, 357-362 (1980).
- 27) C. H. Muller and K. H. Burrell:
Time-Dependent Measurements of Metal Impurity Densities in a Tokamak Discharge by Use of Laser-Induced Fluorescence,
Phys. Rev. Lett., 47, 330-333 (1981).
- 28) R. A. Zuhrl et al.:
Deposition Probes Measurements in EBT-S,
J. Nucl. Mater., 111&112, 159-161 (1982).
- 29) R. Bastasz et al.:
Accelerator-Based Dagnostics in Tandem-Mirror Fusion Experiments
Nucl. Instrum. Methods, B10/11, 487-491 (1985).
- 30) A. E. Pontau et al.:
TMX Plasma Edge Parameters: Passive Solid-State Probe Measurements,
J. Vac. Sci. Technol., A2, 1378-1383 (1984).
- 31) B. Staib and G. Staudenmaier:
Wall Analysis in Pulsator 1,
J. Nucl. Mater., 63, 37-46 (1976).
- 32) R. A. Zuhrl:
Characterization of the TEXTOR Plasma Edge Using Deposition Probe Techniques,
J. Vac. Sci. Technol., A2, 686-688 (1984).
- 33) R. A. Zuhrl:
Accelerator-Based Plasma-Wall Interaction Studies on the TEXTOR Tokamak,
Nucl. Instrum. Methods, B10, 467-472 (1985).
- 34) R. E. Clausing et al.:
Effect of Wall Conditioning on Plasma Parameters, Impurities and Hydrogen Recycling in TEXTOR,
J. Nucl. Mater., 121, 249-253 (1984).

- 35) J. Roth et al.:
 Time-Resolved Measurements of Hydrogen and Deuterium Fluxes
 in the ASDEX Plasma Boundary,
 J. Nucl. Mater., 111&112, 123-129 (1982).
- 36) E. Tagulauer et al.:
 Measurements of Impurity Fluxes in the ASDEX Plasma Boundary,
 J. Nucl. Mater., 111&112, 142-146 (1982).
- 37) W. Eckstein:
 Calculated Trapping Curves of D in C and Si,
 IPP 9/33, October (1980).
- 38) G. Staudenmaier et al.:
 Impurity Fluxes in the Scrape off Layer of TFR 400 and TFR 600,
 J. Nucl. Mater., 76&77, 445-451 (1978).
- 39) G. Staudenmaier et al.:
 Impurity Transport in the ASDEX Edge Plasma Studied by a
 Combination of Passive and Active Probes with SIMS Analysis,
 J. Nucl. Mater., 111&112, 109-122 (1982).
- 40) S. A. Cohen:
 Tokamak Plasma Diagnosis by Surface Physics Techniques,
 J. Nucl. Mater., 76&77, 68-77 (1978).
- 41) J. Shou et al.:
 Probe Measurements of the Impurity Flux at the Plasma Edge of
 the Stellarator Wendelstein VII A,
 J. Nucl. Mater., 111&112, 162-164 (1982).
- 42) V. M. Chicherov et al.:
 Surface Changes of Probes Inserted into the Limiter Shadow of
 the T-10 Tokamak,
 J. Nucl. Mater., 93&94, 133-138 (1980).
- 43) D. Hildebrandt et al.:
 Deposition Probe Measurements of Impurities Injected into
 a Tokamak Plasma,
 Nucl. Fusion, 25, 1745-1749 (1985).
- 44) R. Behrisch et al.:
 Spatial Distribution of Limiter Material and Impurities of the
 First Wall of TFR 400,
 J. Nucl. Mater. 76&77, 437-444 (1978).
- 45) G. Staudenmaier et al.:
 Determination of Ion Temperatures in the Edge Plasma from Ion
 Flux Transmission of Apertures,
 J. Nucl. Mater., 93&94, 121-126 (1980).
- 46) G. Staudenmaier et al.:
 Deuterium Ion Fluxes, Temperatures and Densities in the
 Scrape-off Layer of TFR 600,
 Nucl. Fusion, 20, 96-101 (1980).

- 47) R. A. Langley et al.:
Behavior of Implanted D and He in Pyrolytic Graphite,
J. Nucl. Mater., 76&77, 313-321 (1978).
- 48) G. M. McCracken et al.:
Time Resolved Metal Impurity Concentrations in the DITE Tokamak Using RBS Analysis,
J. Nucl. Mater., 76&77, 431-436 (1978).
- 49) J. W. M. Paul et al.:
Divertor and Injection Experiments in DITE Tokamak,
IAEA-CN35/A 17, "Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion",
Proceedings of 6th International Conference, Vol. 2, pp.269-287
(1976).
- 50) G. M. McCracken et al.:
Impurity Investigations in the Boundary Layer of the DITE Tokamak,
J. Nucl. Mater., 111&112, 159-161 (1982).
- 51) C. J. Sofield et al.:
Measurement of the Hydrogen Concentration in the Walls and Limiters of the DITE Tokamak,
J. Nucl. Mater., 76&77, 348-350 (1978).
- 52) D. H. J. Goodall et al.:
Investigations of Arcing in the DITE Tokamak,
J. Nucl. Mater., 76&77, 492-498 (1978).
- 53) S. K. Erents et al.:
Time Resolved and Time Integrated Measurement of Deuterium Ion Fluxes and Energies in the DITE Tokamak, Using Carbon Probes,
J. Nucl. Mater., 93&94, 115-120 (1980).
- 54) Y. Hori et al.:
Study of Plasma Impurities in JIPP T-II,
J. Nucl. Mater., 111&112, 137-141 (1982).
- 55) M. Mohri et al.:
Probe Measurements for Impurity Transport in the Scrape-off Layer of JIPP T-II,
J. Nucl. Mater., 111&112, 147-152 (1982).
- 56) F. Schwirzke et al.:
Behavior of Hot Titanium Getters at the Plasma Edge in Tokamak,
J. Nucl. Mater., 111&112, 844-847 (1982).